

地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた  
開発実証に係る工場分野におけるローカル5G等の技術的  
条件等に関する調査検討の請負  
(MR技術を活用した遠隔作業支援の実現)

成果報告書

令和3年3月31日

トヨタ自動車株式会社

(ローカル5G×MR実証実験コンソーシアム)

# 目次

<b>1. 全体概要</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景・目的 .....	1
1.1.1 ローカル5Gの概要.....	1
1.1.2 ローカル5Gへの期待と導入推進施策の必要性 .....	1
1.1.3 地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証について .....	2
1.1.4 本調査検討について.....	4
1.1.5 MRシステムの概要 .....	4
1.1.6 MRシステム活用の問題.....	5
1.2 実施事項及び実証目標 .....	6
1.2.1 本調査検討の実施概要 .....	6
1.2.2 本調査検討における想定ユースケース.....	6
1.2.3 課題解決システム .....	7
1.2.4 各実証の概要及び目標 .....	8
1.3 実施体制.....	9
1.3.1 コンソーシアム .....	9
1.3.2 分科会 .....	11
1.3.3 総務省及び調整事業者 .....	13
1.3.4 工場分野事業者 .....	14
1.4 実証のスケジュール.....	14
1.4.1 主要タスク .....	15
1.4.2 当初スケジュールから変更となった主なタスク .....	16
1.5 免許申請の概要.....	17
1.5.1 実験試験局免許 .....	17
1.5.2 無線従事者資格 .....	30
1.5.3 その他資格 .....	31
1.6 会議体 .....	32
1.6.1 コンソーシアム推進会議（全体定例会議） .....	32
1.6.2 分科会会議.....	33
1.6.3 総務省向け月次報告会 .....	34
1.6.4 工場分野4事業者合同会議.....	35
1.6.5 その他 .....	36
1.7 プロジェクト管理 .....	38
1.7.1 進捗管理.....	38
1.7.2 課題管理.....	38
1.7.3 リスク管理.....	38
1.7.4 変更管理.....	39
1.8 総務省及び調整事業者からの助言と対応依頼等.....	39
<b>2. 実証地域</b> .....	<b>42</b>

2.1 実証地域の概要.....	42
2.1.1 所在地.....	42
2.1.2 工場内レイアウト.....	44
2.2 当社における MR システムの活用.....	48
2.2.1 MR システム導入の背景.....	48
2.2.2 MR システム利用における問題.....	55
2.3 地域課題等.....	56
2.3.1 当社が認識している地域課題.....	56
2.3.2 本調査検討の目的及び検討すべき課題.....	57
2.3.3 課題解決による期待効果.....	58
<b>3. 実証環境.....</b>	<b>59</b>
3.1 ネットワーク構成.....	59
3.1.1 使用機器（ネットワーク）.....	60
3.1.2 機器設置場所.....	62
3.1.3 基地局のエリアカバレッジ.....	68
3.1.4 構築スケジュール.....	70
3.1.5 ネットワーク構成の詳細.....	70
3.2 システム機能・性能・要件.....	83
3.2.1 使用機器（アプリケーション）.....	83
3.2.2 MR システムの概要.....	83
3.2.3 MR システムの仕組み.....	85
3.2.4 MR システムの構成.....	89
3.2.5 ハードウェア性能及び推奨スペック.....	90
3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴.....	91
3.2.7 本調査検討におけるシステム構成.....	93
3.2.8 通信性能要件.....	98
3.3 実証環境の運用.....	100
3.3.1 実証参加者への対応.....	100
3.3.2 実証期間中の対応.....	100
3.4 関連事業.....	101
<b>4. 課題解決システムの実証.....</b>	<b>102</b>
4.1 前提条件.....	102
4.1.1 背景.....	102
4.1.2 実証方法の概要.....	102
4.1.3 実務ユースケースの選定.....	103
4.1.4 実証内容の詳細化.....	106
4.1.5 スケジュール.....	109
4.2 実証目標.....	110
4.3 課題解決システムに関する検証及び評価・分析.....	110
4.3.1 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認.....	110

4.3.2	生産設備製作時の配線作業遠隔支援 .....	115
4.4	課題解決システムに関する効果検証 .....	120
4.4.1	検証項目 .....	120
4.4.2	検証方法 .....	120
4.4.3	検証結果 .....	121
4.4.4	考察 .....	132
4.5	課題解決システムに関する運用検証 .....	133
4.5.1	検証項目 .....	133
4.5.2	検証方法 .....	134
4.5.3	検証結果 .....	135
4.5.4	考察 .....	148
4.6	課題解決システムに関する機能検証 .....	152
4.6.1	検証項目 .....	152
4.6.2	検証方法 .....	155
4.6.3	検証結果 .....	167
4.6.4	考察 .....	296
4.7	まとめ .....	303
<b>5.</b>	<b>ローカル 5G の性能評価等の技術実証 .....</b>	<b>304</b>
5.1	前提条件 .....	304
5.1.1	概要 .....	304
5.1.2	対象とするユースケース .....	304
5.1.3	基本的な諸元 .....	310
5.1.4	実証スケジュール .....	318
5.2	実証目標 .....	318
5.2.1	技術的課題 .....	318
5.2.2	技術実証としての実証目標 .....	321
5.2.3	実施事項 .....	322
5.3	ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等 .....	324
5.3.1	ユースケースに基づく性能要件 .....	324
5.3.2	評価・検証項目 .....	326
5.3.3	評価・検証方法 .....	327
5.3.4	評価結果 .....	332
5.3.5	ユースケースに基づくローカル 5G による性能評価の結果 .....	381
5.3.6	技術的課題の解決方策 .....	385
5.4	ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等 .....	388
5.4.1	評価・検証項目 .....	388
5.4.2	評価・検証方法 .....	388
5.4.3	検証結果 .....	390
5.4.4	技術的課題の解決方策 .....	420
5.5	その他ローカル 5G に関する技術実証 .....	423
5.5.1	課題選定の根拠 .....	423

5.5.2	アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響	423
5.5.3	柔軟なシステムの構築検討	436
5.6	まとめ	453
5.6.1	技術基準等の見直しに資する新たな知見	453
5.6.2	ローカル5Gの性能評価等の技術実証のまとめ	456
<b>6.</b>	<b>実装及び横展開に関する検討</b>	<b>459</b>
6.1	前提となる事項	459
6.1.1	実証終了後の継続利用	459
6.1.2	事業モデルの構築と実装計画の策定	460
6.1.3	前提条件	460
6.2	持続可能な事業モデル等の構築・計画策定	461
6.2.1	検討方法	461
6.2.2	意見聴取の結果	462
6.2.3	コスト試算	466
6.2.4	事業モデルの検討結果	469
6.2.5	考察	471
6.2.6	事業モデル	477
6.2.7	実装計画	479
6.3	横展開に資する普及モデルに関する検討	482
6.3.1	標準的な普及モデルの検討	482
6.3.2	<b>想定する事業化、販路開拓、マネタイズ手法等の展開方策</b>	<b>489</b>
6.3.3	当該計画の具体化への取り組み	489
6.3.4	推進対策の検討（普及のための提言）	490
6.4	共同利用型プラットフォームに関する検討	492
6.4.1	工場におけるシステムの在り方	492
6.4.2	共同利用型プラットフォームの在り方	494
6.4.3	共同利用型プラットフォームに係る仕様案	498
6.5	まとめ	501
<b>7.</b>	<b>会合等の開催</b>	<b>502</b>
7.1	総務省オンライン視察会	502
7.2	東海総合通信局向け視察会	502
7.3	ローカル5G開発実証成果報告会	503
<b>8.</b>	<b>まとめ</b>	<b>505</b>
<b>9.</b>	<b>参考資料</b>	<b>508</b>
9.1	問い合わせ先	508
9.2	報道発表	508
9.3	参考文献・レポート	509

## 1. 全体概要

### 1.1 背景・目的

地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証に係る工場分野におけるローカル5G等の技術的条件及び利活用に関する調査検討(MR技術を活用した遠隔作業支援の実現)(以下「本調査検討」という。)の背景及び目的を以下に示す。

#### 1.1.1 ローカル5Gの概要

ローカル5Gは、地域や産業の個別のニーズに応じて地域の企業や自治体等の様々な主体が、自らの建物内や敷地内でスポット的に柔軟に構築できる5Gシステムである。

政府においては、Society5.0時代を迎え、5GをはじめとするICTインフラ整備支援策と5G利活用促進策を一体的かつ効果的に活用し、ICTインフラをできる限り早期に日本全国に展開するため、「ICTインフラ地域展開マスタープラン」を策定(令和元年6月25日公表、令和2年7月16日改定、令和2年12月25日改定)している。本マスタープランを実行することにより、特に地方のICTインフラの整備を加速し、都市と地方の情報格差のない「Society5.0時代の地方」を実現することを目的としている。

#### 1.1.2 ローカル5Gへの期待と導入推進施策の必要性

- ① 第5世代移動通信システム(5G)及びローカル5Gへの期待：
  - ・ 5Gは超高速・超低遅延・多数同時接続といった特徴を有しており、我が国の経済成長に不可欠なSociety5.0を支える基幹インフラとして、様々な産業分野での活用が期待されている。
  - ・ 総務省では、令和元年6月18日に情報通信審議会からローカル5Gの技術的条件について答申を受け、令和元年12月24日に一部制度化が実施された。本取り組みにより、ローカル5Gにより地域の様々な主体が自らの建物や敷地内でスポット的に柔軟にネットワークを構築できるようになる。
  - ・ 上記に加え、総務省は、令和2年12月18日に、ローカル5G使用周波数帯を拡張するための、関係省令及び公示を交付、施行し、免許申請の受付を開始した。従来は、ミリ波帯の28.2GHz～28.3GHzの帯域幅のみであったが、今回の拡張ではSub6と呼ばれる4.6GHz～4.9GHzとミリ波帯の28.3GHz～29.1GHzも追加され、ローカル5Gとして利用できる帯域幅が大幅に拡大した。
- ② ローカル5Gの導入促進に向けた施策の必要性：
  - ・ 多様化するニーズに対応すべく、ローカル5Gに関する更なる技術的条件等の検討を行うため、実際のユースケースの利用環境における性能評価試験や既存無線局との共用可能性に関する試験等を行う必要がある。また、多種多様なローカル5G基地局の設置・利用環境下でローカル5Gの電波伝搬特性の解明が不可欠である。

- ・ 上記に加え、ローカル 5 G 等を活用した課題解決モデルの構築に取り組み、様々な分野でのローカル 5 G 等の活用策とその導入効果等を明らかにし、ローカル 5 G のユースケースモデルの構築及び導入の促進を図ることが求められている。

### 1.1.3 地域課題解決型ローカル 5 G 等の実現に向けた開発実証について

総務省では、地域のニーズや多様な産業分野の個別ニーズに応じて、様々な主体が柔軟に構築し利用可能な第 5 世代移動通信システム（ローカル 5 G）等の導入に向けた取り組みを推進している。

今般、ローカル 5 G 等を活用した地域課題解決を実現するため、多種多様なローカル 5 G 基地局の設置場所・利用環境下を想定したユースケースにおけるローカル 5 G の電波伝搬等に関する技術的検討を実施するとともに、ローカル 5 G 等を活用した地域課題解決モデルを構築するための、令和 2 年度「地域課題解決型ローカル 5 G 等の実現に向けた開発実証」を実施することとなった。<sup>i</sup>

実施に当たっては、取り組むべき地域課題や検討すべき技術的課題等について、令和 2 年 2 月から 3 月にかけての公募を経て、参考とする課題提案が選定された。選定された各課題提案を踏まえて調達手続を進めた結果、「表 1-1 実証内容及び請負者一覧」に示す 19 課題について、実施内容及び請負者が決定した。<sup>ii</sup>

今後総務省は、決定した請負者と協力し、有意義な成果が得られるよう各実証課題の円滑な実施に努めることで、実証実施期間後の実運用や課題解決モデルの普及を目指す。

---

<sup>i</sup> [https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban14\\_02000423.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban14_02000423.html)

総務省 Web サイト（令和 2 年 9 月 4 日（金）取得）

<sup>ii</sup> [https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01ryutsu06\\_02000280.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu06_02000280.html)

総務省 Web サイト（令和 3 年 3 月 25 日（木）取得）

表 1-1 実証内容及び請負者一覧

	件名	請負者	実証地域
1	自動トラクター等の農機の遠隔監視制御による自動運転の実現	東日本電信電話株式会社	北海道岩見沢市
2	農業ロボットによる農作業の自動化の実現	関西ブロードバンド株式会社	鹿児島県志布志市
3	スマートグラスを活用した熟練農業者技術の「見える化」の実現	日本電気株式会社	山梨県山梨市
4	海中の状況を可視化する仕組み等の実現	株式会社レイヤーズ・コンサルティング	広島県江田島市
5	地域の中小工場等への横展開の仕組みの構築	沖電気工業株式会社	群馬県及び隣接地域
6	MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現	トヨタ自動車株式会社	愛知県豊田市
7	目視検査の自動化や遠隔からの品質確認の実現	住友商事株式会社	大阪府大阪市
8	工場内の無線化の実現	日本電気株式会社	滋賀県栗東市
9	自動運転車両の安全確保支援の仕組みの実現	一般社団法人 ICT まちづくり 共通プラットフォーム推進機構	群馬県前橋市
10	遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現	中央復建コンサルタンツ株式会社	神奈川県横須賀市
11	観光客の滞在時間と場所の分散化の促進等に資する仕組みの実現	株式会社十六総合研究所	岐阜県大野郡白川村
12	e スポーツ等を通じた施設の有効活用による地域活性化の実現	東日本電信電話株式会社	北海道旭川市 東京都千代田区
13	MR 技術を活用した新たな観光体験の実現	日本電気株式会社	奈良県奈良市
14	防災業務の高度化及び迅速な住民避難行動の実現	株式会社地域ワイヤレスジャパン	栃木県栃木市
15	遠隔巡回・遠隔監視等による警備力向上に資する新たなモデルの構築	総合警備保障株式会社	東京都大田区
16	遠隔会議や遠隔協調作業などの新しい働き方に必要なリアルコミュニケーションの実現	東日本電信電話株式会社	新潟県新潟市 東京都渋谷区
17	へき地診療所における中核病院による遠隔診療・リハビリ指導等の実現	株式会社エヌ・ティ・ティ・データ経営研究所	愛知県新城市
18	専門医の遠隔サポートによる離島等の基幹病院の医師の専門外来等の実現	株式会社 NTT フィールドテクノ	長崎県長崎市 長崎県五島市
19	中核病院における 5G と先端技術を融合した遠隔診療等の実現	特定非営利活動法人滋賀県医療情報連携ネットワーク協議会	滋賀県高島市

#### 1.1.4 本調査検討について

本調査検討は、令和 2 年度「地域課題解決型ローカル 5 G 等の実現に向けた開発実証」の一環として、工場分野において、特に製造現場の人材不足や熟練技術の承継及び労働環境の改善等の解決に向けて多品種少量生産を行う製造現場の生産工程におけるローカル 5 G の導入を促進するため、金属製設備・部材等の環境下にある工場におけるローカル 5 G の電波伝搬特性の解明及び課題解決システムによる具体的なアプリケーション(MR 技術を活用した生産設備導入事前検証、遠隔作業支援)を想定した MR 等の端末における映像伝送等に基づくローカル 5 G の性能評価を実施することを目的とする。

具体的には、工場分野の課題解決に資するローカル 5 G 等の無線通信システムの具体的なユースケースとして、MR 技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証及び遠隔作業支援に関する実証を行い、その有効性を検証するとともに、ローカル 5 G 等の電波伝搬特性や性能評価といった技術的検討を実施し、技術面・制度面・運用面から課題の抽出及び解決方策、当該実証モデルの今後の普及展開に向けた検討を行うものである。

また、トヨタ自動車株式会社(以下、当社という)は、工場分野にて採択された 4 つの事業者(詳細は「1.3.4 工場分野事業者」に示す)の中で、「大規模企業型」に位置付けられている。そのため当該実証モデルの普及展開を検討するにあたり、トヨタ自動車本社のほかに、国内生産工場、国外拠点及び国外工場、グループ企業等の大規模工場を対象としている。

#### 1.1.5 MR システムの概要

MR (Mixed Reality) とは、日本語では「複合現実感」と呼び、現実世界と仮想世界を融合させる技術である。また、MR に関連し、VR (Virtual Reality/仮想現実) 及び AR (Augmented Reality/拡張現実) 等の用語が存在する。現実世界において実際には存在しないものを体験できるこれらの技術を総称して「xR」と呼ぶ。

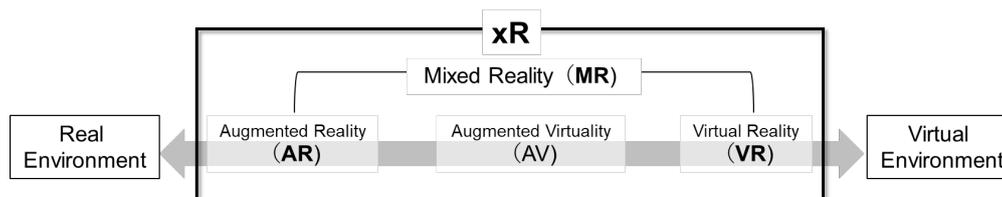


図 1-1 xR の概念図

MR システムは、HMD (Head Mounted Display)・プラットフォーム (基盤ソフトウェア)・3D データを表示するアプリケーションソフトウェア・PC・各種センサー等を組み合わせて、用途に応じた一連の機能を実現する複合的システムである。HMD に搭載されたカメラで撮影する現実世界と、仮想世界の 3D-CG 映像を、HMD の位置と姿勢に応じてリアルタイムで合成し、この MR 映像を HMD の表示パネルに投影する。現実世界の映像に対し、実物大の 3D データを自由な視点で可視化しているため、実際の物を作る前の早い時点でリアルな作業性操作性の検証・確認が可能となり、主にものづくりの現場での活用が広がっている。

当社では、MR システムとして、キヤノン社製 MR システム「MREAL」を採用している。

「MREAL」は、現実空間映像に仮想映像を単純に重ねる AR と異なり、現実空間内に仮想形状を配置した時の遮蔽（見え隠れ）の整合を取ることができるという特徴を有する。特に現実の自分の手が仮想物の手前か奥かを正しく知覚できることによって(図 1-2 仮想形状と手の位置関係)、仮想物の大きさや距離を把握することが容易となる。



図 1-2 仮想形状と手の位置関係

また、「図 1-3 VR, AM, MR の比較」では、xR それぞれの特性を比較している。



図 1-3 VR, AM, MR の比較

MR のみが仮想形状と作業者の位置関係を正しく表現できていることから、工場作業者にとって仮想形状を理解するには、見慣れた現実の人や自分の手を基準として仮想形状の距離や大きさを比較対比できることが MR の優位性と言える。

### 1.1.6 MR システム活用の問題

現状、MR システムにおいて、HMD と PC 間は有線接続となっている。そのため、工場内での光ファイバーケーブルの取り回しや 3D データの伝送の観点から、専用ルームでの活用が主体となり、製造現場では安全確保や準備作業工数、ネットワーク環境等の問題があり、広く活用するには至っていない。

そのため、MR システムのローカル 5G 化（無線化）と、ローカル 5G による 3D データの高速転送が実現できれば、有線の制約から解放され、より広く工場での活用も広がるのではないかと考えている。

当社が認識している問題については、「2.2 当社における MR システムの活用」に詳細を記載する

## 1.2 実施事項及び実証目標

### 1.2.1 本調査検討の実施概要

本調査検討においては、課題解決を図るため「図 1-4 実証環境概要」に示す実証環境を当社貞宝第1工場（詳細は「2.1 実証地域の概要」に示す。）に構築し、実証を行うとともに、本モデルの具体的な実装手法を検討し、自社内および外部への普及拡大につなげるための検討を行った。

また、本調査検討を通じて、実際にローカル5Gの導入プロセスを実施し、ローカル5G化したMRシステムの展開に対して障害となりうる課題を抽出した。

また実証は、「1.2.2 本調査検討における想定ユースケース」記載するユースケースをもとに行った。



図 1-4 実証環境概要

### 1.2.2 本調査検討における想定ユースケース

本調査検討では、MRシステムの具体的なユースケースを設定した上で実証を行った。設定したユースケースを、以下に示す。

#### (1) MR 技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証の効率化

生産設備の開発工程において、製造現場の作業者が着用したHMD（及びPCなど付随する機器）と遠隔の情報処理サーバの間で、ローカル5Gを活用して作業側側の情報（位置・姿勢等）と生産設備に関する設計データ（CAD）等のMRデータを伝送し、作業者の視線に仮想的に生成した立体映像を合成してHMDにリアルタイムに投影することで、事前検証に係るシミュレーションを行うユースケース。

## (2) MR 技術を活用した遠隔作業支援

製造現場の生産工程において、製造現場の作業者が着用した HMD（及び PC など付随する機器）と遠隔の情報処理サーバ間で、ローカル 5G を活用して作業側の情報（位置・姿勢等）と生産設備に関する設計データ（CAD）等 MR データに加え、遠隔地にいる熟練技術者等の支援者からの指示情報等を伝送し、作業者の視線に仮想的に生成した立体映像を合成して HMD にリアルタイムに投影することで、現場と遠隔地（1対1）間での指導や作業支援を行うユースケース。

また、本調査検討においては、実証ごとにユースケースの取り扱いが異なっている。各実証におけるユースケースの取り扱いを以下に示す。

- ・ 「4. 課題解決システムの実証」における取り扱い  
実際に工場現場で実施している MR システムの活用事例に基づき、「MR 技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「MR 技術を活用した遠隔作業支援」の 2 つのユースケースを実施する際に必要な人員や対象となる具体的な生産設備、システム活用の流れ等を詳細化した。こちらを踏まえ、本実証では効果検証等に当たった。詳細は「4.1.3 ユースケースの選定」に記載する。
- ・ 「5. ローカル 5G の性能評価等の技術実証」における取り扱い：  
「MR 技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「MR 技術を活用した遠隔作業支援」の 2 つのユースケースにおいて、ローカル 5G 環境を利用することを前提とし、工場内で求められるローカル 5G の性能等を評価した。
- ・ 「6. 実装及び横展開に関する検討」における取り扱い：  
ローカル 5G 及び MR システムの実装及び横展開を検討するために、「MR 技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「MR 技術を活用した遠隔作業支援」の 2 つのユースケースを、意見聴取やコスト試算、課題の抽出のための前提条件として活用した。

### 1.2.3 課題解決システム

本調査検討においては、「ローカル 5G による MR システム」を課題解決システムとして設定する。また、本来目指す姿（HMD の完全無線化）にて本実証を行うには、現時点では MR システム開発期間や技術的制約等の観点で困難であるため、以下の「図 1-5 ローカル 5G による MR システム（課題解決システム）」に示すとおり、バックパック方式及び疑似 HMD 方式の 2 つのパターンを設定し、実証を行った。

それぞれの方式の詳細については、「3.2.7 本調査検討におけるシステム構成」に記載する。



図 1-5 ローカル5GによるMRシステム（課題解決システム）

#### 1.2.4 各実証の概要及び目標

本調査検討では、課題解決システムの実証（以下、課題実証）とユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等の技術実証（以下、技術実証）、実装及び横展開に関する検討を行った。各実証の概要及び実証目標を以下に示す。

##### （1）課題解決システムの実証（課題実証）

製造現場の作業の効率化、安全性の向上を目的として、MR技術及びローカル5Gを活用した「生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「遠隔作業支援」を実現し、工場環境におけるMR技術の活用方策を確立することを目標とする。

現在は光ファイバーケーブルで映像情報をやり取りしているため、利用現場において、移動距離の制限や安全を確保するため光ファイバーケーブルを捌く人員確保が必要となるといった問題がある。本実証は、課題解決システムとしての「ローカル5GによるMRシステム」を実現することで、これらの問題を解決しようとするものである。

また、「ローカル5GによるMRシステム」について、目指す姿（完全無線化）を前提としたシステムを構築するためには、技術的な不確定要素が存在するため、「1.2.3 課題解決システム」に示したとおり、本実証においては、①バックパック方式、②疑似HMD方式の2つの方式を構築し、実証にあたった。具体的には、作業性向上や安全性向上等の期待検証及び現状と比較して業務負荷低減等の効果・運用検証についてはバックパック方式にて検証し、MRシステムで扱う映像データに係る機能検証については、疑似HMD方式

で検証した。

詳細は「4. 課題解決システムの実証」に記載する。

## (2) ローカル5Gの性能評価等の技術実証（技術実証）

工場環境下において「課題解決システム」を稼働させるために、通信インフラに求められる伝送スループットや伝送遅延といったローカル5Gの性能を評価するため、4.7GHz帯及び28GHz帯のローカル5G設備をそれぞれ構築し、測定データを取りまとめた。

また、測定データから工場環境の電波伝搬損失特性を明らかにし、ローカル5GによるMRシステムの実現におけるローカル5Gの技術基準等の整備に資する知見を得ることを目標としている。

また、独自のローカル5Gの技術的課題として、アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響及び、柔軟なシステムの構築検討をテーマに実証を行った。

詳細は「5. ローカル5Gの性能評価等の技術実証」に記載する。

## (3) 実装及び横展開に関する検討

ローカル5GによるMRシステムの無線化の枠内において、コンソーシアムメンバー内における利用者と提供者の定義を明確にすることにより、実装及び実証モデルの横展開に資する具体的な方策を明らかにすることを目標とする。

具体的には、実証地域において、本実証用に構築したローカル5G等を活用した課題解決システムについて、実証終了後も継続的に利用するとともに、課題解決等を図っていくための事業モデルの構築と実装計画の策定(持続可能な事業モデル等の構築・計画策定)、ローカル5G等を活用した課題解決システムについて、同様の課題を抱える他地域・他分野における実装や検討に資するような標準的な普及モデルについての検討(横展開に資する普及モデルに関する検討)、ローカル5G等無線通信システムと連携した共同利用型プラットフォームの在り方の案について検討(共同利用型プラットフォームに関する検討)を行った。

詳細は「6. 実装及び横展開に関する検討」に記載する。

## 1.3 実施体制

### 1.3.1 コンソーシアム

本調査検討を実施する上で、以下の要件を満たすコンソーシアム体制を構築した。

- ・ 当該地域課題を有する者及びその関係者が参加すること。
- ・ 実装及び他地域への横展開等を進めるのに必要な関係者が参加すること。
- ・ 実証で構築したローカル5G等の通信環境について、実証後も実証地域において継続的に利用することを検討する体制であること。

本コンソーシアムの構成員及び実施体制、情報管理体制を以下に示す。



図 1-6 コンソーシアム構成員及び実施体制、情報管理体制

本コンソーシアムにおいては、トヨタ自動車株式会社を代表者とし、代表者以外の組織を共同事業者とする体制をとった。また、コンソーシアムを形成するにあたり、「別紙:MIC-L5G-PJ-08-コンソーシアム協定書」に定める協定を締結している。本調査検討における各構成員の役割を以下に示す。

表 1-2 構成員の役割

構成員	分担される役割
株式会社エイビット	通信インフラ（4.7GHz帯）、通信デバイスの提供、並びにMRデバイス開発の支援、電波伝搬の技術検証及び電波測定支援
キヤノン株式会社	ローカル5G対応版のMRシステムの開発・提供、並びにローカル5GとMRシステムによる課題実証
シャープ株式会社	通信デバイス（5G端末）の提供、MRデバイス開発の支援、電波伝搬の技術検証及び電波測定支援
株式会社トヨタシステムズ	本実証事業におけるネットワーク全般の取りまとめ、電波伝搬の技術検証及び電波測定支援
トヨタ自動車株式会社	本実証事業における実証場所の提供、ローカル5GとMR技術を活用したシステムによる課題実証
ネットワンシステムズ株式会社	プロジェクト推進、電波伝搬の技術実証及び電波測定
ノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社	通信インフラ（28GHz帯）の提供、電波伝搬の技術検証及び電波測定支援
株式会社日立国際電気	通信インフラ（28GHz帯）の構築、電波伝搬の技術検証及び電波測定支援

※構成員は五十音順で記載

### 1.3.2 分科会

本調査検討においては、対応事項ごとに分科会を形成し、実証実験及び成果物作成を行った。分科会構成について、以下に示す。



図 1-7 分科会

また、分科会ごとの構成員、対応事項等を以下に示す。

#### (1) 全体取りまとめ分科会

表 1-3 全体取りまとめ分科会

分科会リーダー (PL)	トヨタ自動車株式会社、ネットワークシステムズ株式会社
メンバー	トヨタ自動車株式会社、株式会社トヨタシステムズ、キヤノン株式会社、ネットワークシステムズ株式会社
対応事項	<ul style="list-style-type: none"> <li>プロジェクト管理</li> <li>成果報告書取りまとめ</li> <li>コンソーシアム推進会議 (全体定例会議) 運営</li> <li>総務省月次報告対応</li> <li>各調整事業者との連携 (※発生都度)</li> <li>コンソーシアム責任者会議運営 (※発生都度)</li> </ul>

なお、分科会運営に関する詳細は「別紙：MIC-L5G-CO-PJ-01-全体取りまとめ分科会運営資料」に示す。

## (2) 工事・免許・運用分科会

表 1-4 工事・免許・運用分科会

分科会リーダー (PL)	トヨタ自動車株式会社
メンバー	トヨタ自動車株式会社、株式会社トヨタシステムズ、ネットワンシステムズ株式会社
対応事項	<ul style="list-style-type: none"><li>・ ローカル 5G 設備設置に向けた工場内工事計画の策定</li><li>・ 基地局取り付け用アンテナ支柱の製作</li><li>・ 工場内工事対応</li><li>・ 無線実験試験局免許申請（登録点検対応含む）</li><li>・ 設備及び免許の運用に係る検討</li><li>・ 各種課題の抽出</li><li>・ 分科会成果物取りまとめ</li></ul>

なお、分科会運営に関する詳細は「別紙：MIC-L5G-KM-PJ-01-工事・免許・運用分科会運営資料」に示す。

## (3) 課題実証分科会

表 1-5 課題実証分科会

分科会リーダー (PL)	トヨタ自動車株式会社
メンバー	トヨタ自動車株式会社、キヤノン株式会社、ネットワンシステムズ株式会社
対応事項	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 課題実証に係る検討の実施（ユースケースの選定・詳細化、検証項目の策定、課題実証計画書の作成）</li><li>・ 課題実証の実施</li><li>・ 総務省視察に関する調整</li><li>・ 課題実証成果物取りまとめ</li></ul>

なお、分科会運営に関する詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-KJ-01-課題実証分科会運営資料」に示す。

## (4) 技術実証分科会

表 1-6 技術実証分科会

分科会リーダー (PL)	株式会社トヨタシステムズ、ネットワンシステムズ株式会社
メンバー	株式会社トヨタシステムズ、ネットワンシステムズ株式会社、株式会社エイビット、シャープ株式会社、株式会社日立国際電気、ノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社
対応事項	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 技術実証に係る事前検証（PoC）の実施</li></ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 作業計画書の作成</li> <li>・ 技術実証の実施</li> <li>・ 技術実証成果物取りまとめ</li> </ul>
--	---

なお、分科会運営に関する詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-PJ-01-技術実証分科会運営資料」に示す。

### (5) 実装及び横展開分科会

**表 1-7 実装及び横展開分科会**

分科会リーダー（PL）	トヨタ自動車株式会社
メンバー	トヨタ自動車株式会社、株式会社トヨタシステムズ、キヤノン株式会社、ネットワンシステムズ株式会社
対応事項	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 持続可能な事業モデル等の構築・計画策定</li> <li>・ 横展開に資する普及モデルに関する検討</li> <li>・ 共同利用型プラットフォームに関する検討</li> <li>・ 各調整事業者との調整</li> <li>・ 分科会成果物取りまとめ</li> </ul>

なお、分科会運営に関する詳細は「別紙：MIC-L5G-JY-PJ-01-実装及び横展開分科会運営資料」に示す。

### 1.3.3 総務省及び調整事業者

本調査検討を実施するにあたり、総務省ならびに課題実証全体調整事業者、技術実証全体調整事業者及び分野別課題実証調整事業者（総務省が別途調達している「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」における工場分野の調査分析等を行う請負者をいう。以下同じ。）との連携を行った。調整事業者の詳細について、以下に示す。

**表 1-8 調整事業者一覧**

名称	事業者名
課題実証全体調整事業者	株式会社三菱総合研究所（以下、MRI）
技術実証全体調整事業者	一般社団法人電波産業会（以下、ARIB）
分野別課題実証全体調整事業者	PwC コンサルティング合同会社（以下、PwC）

また、総務省及び各調整事業者の体制について、以下に示す。

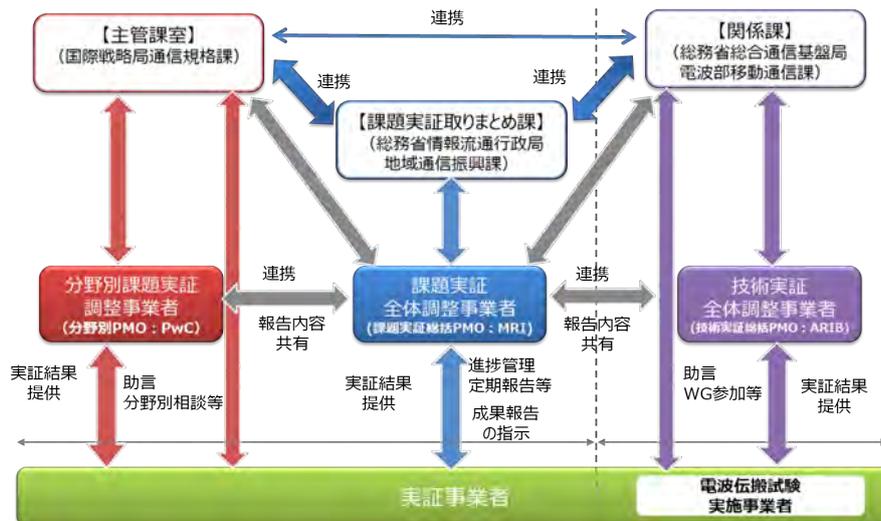


図 1-8 総務省および各調整事業者体制

出所) MRI 提供資料「管理方法・情報共有の進め方\_20201019.pptx」より引用

### 1.3.4 工場分野事業者

令和 2 年度「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」においては、19 の事業者がローカル 5G 等を活用した地域課題解決を実現するための実証に取り組む運びとなった。そのうち、工場分野においては、当社を含む 4 つの事業者が採択されている。採択された事業者について、以下に示す。

表 1-9 工場分野事業者一覧

分野	番号	件名	事業者名	実証地域
工場	5	地域の中小工場等への横展開の仕組みの構築	沖電気工業株式会社	群馬県及び隣接地域
	6	MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現	トヨタ自動車株式会社	愛知県豊田市
	7	目視検査の自動化や遠隔からの品質確認の実現	住友商事株式会社	大阪府大阪市
	8	工場内の無線化の実現	日本電気株式会社	滋賀県栗東市

### 1.4 実証のスケジュール

調査検討の実施期間は、本調査検討の特性、必要なシステム開発期間、検証項目等を踏まえ、コンソーシアム内で協議を行い、スケジュールを作成し実施した。

全体の実施スケジュールについて、以下に示す。

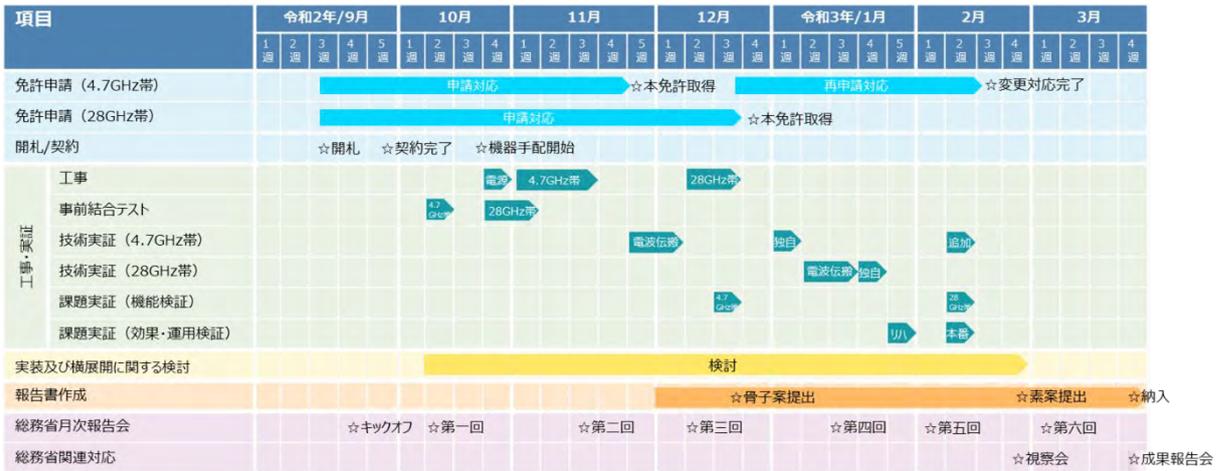


図 1-9 実施スケジュール

スケジュールは、分科会（「工事・免許・運用」「課題実証」「技術実証」「実装及び横展開」「全体取りまとめ」）毎に積み上げたタスクを、全体取りまとめ分科会で集約・連動性確認して全体のスケジュールとして組成した。

なお、スケジュールの詳細は、「別紙：MIC-L5G-PJ-10-WBS」に記載する。

### 1.4.1 主要タスク

本調査検討における主要タスクのスケジュールを以下に示す。

表 1-10 主要タスク一覧

大項目	タスク	実施期間
免許関連	実験計画書作成	6月29日(月)～10月20日(火)
	干渉調整	8月12日(水)～10月26日(月)
	登録点検	10月26日(月)～12月20日(日)
	4.7GHz帯免許申請	9月30日(水)～2月23日(火)
	2.5GHz帯免許申請	9月30日(水)～12月25日(金)
	28GHz帯免許申請	9月30日(水)～12月25日(金)
工事	構内作業安全教育	10月27日(火)～11月11日(水)
	工事設計	10月1日(木)～10月30日(金)
	工事手配	10月1日(木)～10月23日(金)
	アンテナ支柱製作	10月9日(金)～10月30日(金)
	工事施工	10月15日(木)～12月7日(月)
	ネットワークシステム工事	11月21日(土)～12月20日(日)
	動作確認	11月22日(日)～12月20日(日)
	工事検収	12月20日(日)～12月20日(日)
課題実証	ユースケースの検討	10月12日(月)～12月16日(水)
	課題実証計画書の作成	11月23日(月)～1月15日(金)

	機能検証の実施	12月12日(土)~2月22日(月)
	効果検証・運用検証の実施	1月26日(火)~2月12日(金)
	実証結果のとりまとめ	2月15日(月)~3月16日(火)
技術実証	ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等 (4.7GHz 帯)	11月28日(土)~12月6日(日)
	ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等 (28GHz 帯)	1月16日(土)~1月24日(日)
	ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等 (追加試験)	2月13日(土)~2月14日(日)
	ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等	12月3日(木)~2月14日(日)
	その他ローカル 5G に関する技術実証	1月9日(土)~1月31日(日)
	実証結果のとりまとめ	2月15日(月)~3月16日(火)
実装及び横展開に関する検討	分野別課題実証調整事業者との意見交換	12月23日(水)~3月5日(金)
	持続可能な事業モデル等の構築・計画策定	10月12日(月)~3月16日(火)
	横展開に資する普及モデルに関する検討	12月1日(火)~3月16日(火)
	共同利用型プラットフォームに関する検討	1月11日(月)~3月16日(火)
	成果報告書記載内容作成	12月1日(火)~3月16日(火)
成果報告書作成	分科会アウトプットの方向性確認	11月16日(月)~3月5日(金)
	骨子作成	12月1日(火)~2月5日(金)
	素案作成	2月8日(月)~3月15日(月)
	修正版作成	3月1日(月)~3月23日(火)
	最終版作成	3月17日(水)~3月24日(水)
	納入	3月25日(木)

#### 1.4.2 当初スケジュールから変更となった主なタスク

当初スケジュールから変更となった主なタスクを以下に示す。

- ・ 免許関連「4.7GHz 帯免許申請」：  
令和2年11月27日(金)に本免許発行となったが、その後アンテナ2本化の変更申請を行ったため、変更届受理された令和3年2月23日(火)までのスケジュールとなった。
- ・ 課題実証「機能検証のスケジュール変更」：  
当初のスケジュールでは休日作業を予定していたが、休日を実施するには、検証に参

加するメンバー全員が休日工事（作業）の安全教育を受けている必要があることが判明した。しかしながら、全員が受講完了するにはスケジュールが間に合わなかったため、検証日程を平日に変更した。

- ・ 技術実証「ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等（追加試験）」：  
当初実証試験において、試験不足項目があったため、予備日を活用した試験を追加した。

## 1.5 免許申請の概要

本調査検討を進めるにあたり、取得した免許の詳細について以下に示す。

### 1.5.1 実験試験局免許

#### 1.5.1.1 実験試験局免許概要

実験試験局免許とは、総務省令電波法施行規則第 4 条第 1 項第 12 号にて「科学若しくは技術の発達のための実験、電波の利用の効率性に関する試験又は電波の利用の需要に関する調査を行うために開設する無線局であつて、実用に供しないもの」と定義されており<sup>iii</sup>、こうした目的のために開設し、実験や試験、調査を行うことができる免許である。

また、本調査検討において、実験試験局免許を取得した事由を以下に示す。

- ・ ローカル 5G への期待値：

まず、当社においては、工場内のネットワークをローカル 5G によって無線化するにあたり、4.7GHz 帯の特性と 28GHz 帯の特性の違いがあることを前提に、最適な無線環境の導入に向けて、それぞれの周波数帯による工場内の電波伝搬の特性を解明することが必要であると考えた。具体的には、工場内における 4.7GHz 帯による広域エリアカバーに関する実証、28GHz 帯による大容量通信に関する実証を実施することを想定していた。

- ・ 制度面の制約：

ローカル 5G では、令和 3 年 3 月現在、4.7GHz 帯周波数と 28GHz 帯周波数が割り当てられている。一方、本調査検討の開始時点（令和 2 年 9 月）においては、28GHz 帯の一部が制度化されていたのみであった。前述のローカル 5G への期待値を踏まえ、今回の実証においては、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯双方の実証実験を実施することを想定していたものの、4.7GHz 帯は制度化前であり、また 28GHz 帯においては 100MHz 帯域幅のみが制度化されていた状況であった。

上記を踏まえ、本調査検討においては、工場内のローカル 5G による MR システムの実

---

<sup>iii</sup> <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/exp/index.htm>

総務省電波利用ホームページ（令和 3 年 3 月 25 日（木）取得）

現及び MR 技術を活用した遠隔作業支援実現に向けた電波伝搬特性等の検証のため、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯、また 28GHz 帯のアンカーバンドとして 2.5GHz 帯の実験試験局免許を取得した。

### 1.5.1.2 免許取得スケジュール

免許取得に係るスケジュールを以下に示す。

表 1-11 免許取得スケジュール

日時	内容
令和 2 年 8 月 17 日 (月)	干渉調整開始
令和 2 年 9 月 30 日 (水)	実験試験局予備免許申請
令和 2 年 10 月 26 日 (月)	干渉調整完了(NTT ドコモ/KDDI/ソフトバンク/CNCI/WCP/UQ)
令和 2 年 11 月 2 日 (月)	4.7GHz/2.5GHz/28GHz 帯予備免許発行
令和 2 年 11 月 11 日 (水)	4.7GHz 帯登録点検実施
令和 2 年 11 月 24 日 (火)	4.7GHz 帯本免許申請
令和 2 年 11 月 27 日 (金)	4.7GHz 帯本免許発行
令和 2 年 12 月 20 日 (日)	2.5GHz/28GHz 帯登録点検実施
令和 2 年 12 月 21 日 (月)	2.5GHz/28GHz 帯本免許申請
令和 2 年 12 月 25 日 (金)	2.5GHz/28GHz 帯本免許発行
令和 3 年 2 月 19 日 (金)	4.7GHz 帯設備変更工事完了届出
令和 3 年 2 月 23 日 (火)	4.7GHz 帯設備変更工事完了届出受理通知

### 1.5.1.3 実験試験局免許申請概要

4.7GHz 帯免許（基地局・端末）、28GHz 帯免許（基地局・端末）申請概要及び 2.5GHz 帯申請概要を以下に示す。また申請内容の詳細は「別紙：MIC-L5G-KM-OP-01-01～21-予備免許申請書類一式」及び「別紙：MIC-L5G-KM-OP-02-01～12-本免許申請書類一式」に記載する。また、実験試験局免許の申請にあたり、実験計画書を作成した。詳細は、「別紙：MIC-L5G-KM-OP-04-実験計画書」に示す。

なお、実験試験局免許に関しては、当社が申請主体となることでローカル 5G の導入に係る各種コストを最適化する観点、また当社におけるローカル 5G 導入ノウハウを蓄積するという観点から、申請者を当社とした。

表 1-12 4.7GHz 帯免許（基地局・端末）申請概要

申請者の氏名又は名称及び 代表者氏名	トヨタ自動車株式会社 〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地
-----------------------	--

	代理人 トヨタ自動車株式会社 プラント・環境生技部 工場計画室
無線局の種別及び局数	実験試験局 (EX) 6
識別信号	とよたろーかる 5G よんてんななじっけん 1~6
免許の番号	海実第 4042 号~4047 号
予備免許の年月日	令和 2 年 11 月 2 日
工事落成の年月日	令和 2 年 11 月 22 日
本免許の年月日	令和 2 年 11 月 27 日
希望する免許の有効期限	令和 3 年 5 月 31 日
電波の型式、周波数の範囲 及び空中線電力	100M X7W 4800MHz 60mW

表 1-13 28GHz 帯免許 (基地局) 申請概要

申請者の氏名又は名称及び 代表者氏名	トヨタ自動車株式会社 〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地  代理人 トヨタ自動車株式会社 プラント・環境生技部 工場計画室
無線局の種別及び局数	EXP (実験試験局) 2 局
識別信号	とよたろーかる 5G28GHz きちきょく 1~2
免許の番号	海実第 4049 号~4050 号
予備免許の年月日	令和 2 年 11 月 2 日
工事落成の年月日	令和 2 年 12 月 20 日
本免許の年月日	令和 2 年 12 月 25 日
希望する免許の有効期限	令和 3 年 5 月 31 日
電波の型式、周波数の範囲 及び空中線電力	99M8 X7W 28.74672/28.84608/28.94544/29.0448GHz 158.5mW

表 1-14 28GHz 帯免許 (端末) 申請概要

申請者の氏名又は名 称及び代表者氏名	トヨタ自動車株式会社 〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地  代理人 トヨタ自動車株式会社 プラント・環境生技部 工場計画室
無線局の種別及び局	EXP (実験試験局) 4 局

数	
識別信号	とよたろーかる 5G28GHz いどうき 1~4
免許の番号	海実第 4051 号~4054 号
予備免許の年月日	令和 2 年 11 月 2 日
工事落成の年月日	令和 2 年 12 月 20 日
本免許の年月日	令和 2 年 12 月 25 日
希望する免許の有効期限	令和 3 年 5 月 31 日
電波の型式、周波数の範囲及び空中線電力	99M9 D1A/D1B/D1C/D1F/D1X/D7W/G1A/G1B/G1C/G1D/G1F/G1X/G7W 28.74672/28.84608/28.94544/29.04480GHz 200mW 20M0 X1A/X1B/X1C/X1D/X1F/X1X/X7W 2585MHz 400mW

表 1-15 2.5GHz 帯 (基地局・端末) 申請概要

申請者の氏名又は名称及び代表者氏名	トヨタ自動車株式会社 〒471-8571 愛知県豊田市トヨタ町 1 番地  代理人 トヨタ自動車株式会社 プラント・環境生技部 工場計画室
無線局の種別及び局数	EXP (実験試験局) 2 局
識別信号	とよたろーかる 5G28GHz きちきよく 1~2
免許の番号	海実第 4049 号~4050 号
予備免許の年月日	令和 2 年 11 月 2 日
工事落成の年月日	令和 2 年 12 月 20 日
本免許の年月日	令和 2 年 12 月 25 日
希望する免許の有効期限	令和 3 年 5 月 31 日
電波の型式、周波数の範囲及び空中線電力	99M8 X7W 28.74672/28.84608/28.94544/29.04480GHz 158.5mW

#### 1.5.1.4 機器諸元・送信電力算出式・システム系統図

各ローカル 5G システムの諸元、送信電力算出式及びシステム系統図を以下に示す。

(1) 4.7GHz 帯（基地局・端末）機器諸元

4.7GHz 帯ではエイビット社製のシステムを利用した。諸元を以下に示す。

表 1-16 4.7GHz 帯（基地局・端末）機器諸元

項目	諸元
局数	6
周波数	中心周波数 4800MHz、4,750~4,850MHz
帯域幅	100MHz
電波の型式	X7W
変調方式	OFDMA, 64QAM
空中線電力（最大送信出力）	60mW
識別信号	とよたろーかる 5 G よんてんななじっけん 1～6
免許の期間	令和 3 年 5 月 31 日
常置場所	愛知県豊田市貞宝町 7 番地 トヨタ自動車貞宝工場 建物内
移動範囲	当該事業所の事業区域内

また、アンテナに関しては以下の 3 つのアンテナを使い分けて実証を行った。

空中線系番号 1

アンテナの利得	2dBi
アンテナの指向性	無指向
アンテナの本数	1（単一型）

空中線系番号 2

アンテナの利得	3.47dBi
アンテナの指向性	指向性
アンテナの本数	1（平面パッチアンテナ）

空中線系番号 3

アンテナの利得	8.99dBi
アンテナの指向性	指向性
アンテナの本数	1（平面パッチアンテナ）

4.7GHz 帯（基地局・端末）免許申請における空中線電力の根拠を以下に示す。

屋内実験の最大の伝送距離  $d$  を 15m と想定し、屋内伝搬損失は距離の 3.5 乗に反比例して電力が減衰するものとして計算した。

$$L = (4\pi f / c)^2 d^{3.5}$$

$$L[\text{dB}] = 20\log(4\pi/c) + 20\log(f) + 35\log(d)$$

ここで、 $c[\text{m/s}]$ は光速、 $f$ は周波数で  $f = 4.8 \times 10^9 [\text{Hz}]$ 。

上記式より  $d = 15\text{m}$  の屋内伝搬損失  $L$  は 87dB。

本装置の受信感度  $Pr=-65\text{dBm}$ 、受信アンテナ利得  $Gr=2\text{dBi}$ 、送信アンテナ利得  $Gt=2\text{dBi}$  とすると、所要空中線電力  $Pt$  [dBm] は以下のとおり。

$$Pt = Pr + L - Gr - Gt = 18\text{dBm} \text{ (約 } 60\text{mW)}$$

このため、今回の実験において最大空中線電力は  $60\text{mW}$  を希望した。

また、システム系統図を以下に示す。

屋内実験の最大の伝送距離  $d$  を  $180\text{m}$  と想定し、屋内伝搬損失は ITU-R P.1238-10 屋内伝搬モデルで計算した。

$$L [\text{dB}] = 20 \log f + N \log d + Lf(n) - 28 + \Delta L \text{ (W}\Phi)$$

$f$  [MHz] 使用する周波数 : 2585 [MHz]

$N$  (距離損失係数) : 33 (2.625GHz/Factory -> 33 を選択)

$Lf(n)$  (床侵入損失。床の数を  $n$  とする) : 13 (5GHz/Residencial/apartment [concrete wall] -> 13 を選択)

$\Delta L$  (W $\Phi$ ) (指向性アンテナ差分) : 0 [dB] ※無指向性アンテナのため

上記式より  $d=180\text{m}$  の屋内伝搬損失  $L$  は  $124.67 \text{ dB}$ 。

端末側での受信電力  $Pr=-85\text{dBm}$ 、受信アンテナ利得  $Gr=2.24 \text{ dBi}$ 、送信アンテナ利得  $Gt=2\text{dBi}$ 、基地局の給電線損失  $Lf=2\text{dB}$  とすると、所要空中線電力  $Pt$  [dBm] は以下のとおり。

$$Pt = Pr + L - Gr - Gt = 37.924\text{dBm} \text{ (} 6.2\text{W)}$$

このため、今回の実験において最大空中線電力は、 $37.924\text{dBm}$  ( $6.2\text{W}$ ) を希望した。

また、端末の空中線電力については、基地局からの指示に合わせて出力を決定した。

システム系統図は以下の通り。

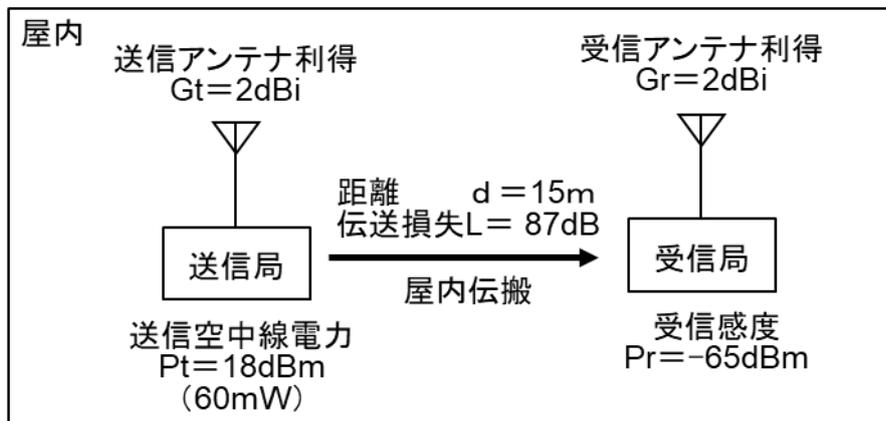


図 1-10 4.7GHz 帯 (基地局・端末) システム系統図

## (2) 28GHz 帯（基地局）機器諸元

28GHz 帯ではノキアソリューションズ&ネットワークス社製のシステムを利用した。諸元を以下に示す。

表 1-17 28GHz 帯（基地局）機器諸元

項目	諸元
局数	2
周波数	中心周波数 28.74672GHz, 28.84608GHz, 28.94544GHz, 29.04480GHz 4波
帯域幅	400MHz (上り：1x100MHz, 下り：4x100MHz)
電波の型式	99M8 X7W
変調方式	OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM)
空中線電力（最大送信出力）	158.5mW (22dBm)
識別信号	とよたろーかる 5 G 2 8 G H z きちきよく 1 ~ 2
免許の期間	令和 3 年 5 月 31 日
常置場所	愛知県豊田市貞宝町 7 番地 トヨタ自動車貞宝工場 建物内
移動範囲	当該事業所の事業区域内 (Q)
アンテナの利得	23dBi ※ビームフォーミング合成利得
アンテナの指向性	指向性アンテナ
アンテナの本数	2Tx/2Rx (1x192 AE) アンテナ内蔵型

28GHz 帯（基地局）免許申請における空中線電力の根拠を以下に示す。

屋内実験の最大の伝送距離  $d$  を 65m と想定し、屋内伝搬損失は ITU-R P.1238-10 屋内伝搬モデルで計算した。

$$L \text{ [dB]} = 20 \log f + N \log d + Lf(n) - 28 + \Delta L \text{ (W}\Phi\text{)}$$

f [MHz] 使用する周波数	28895.76 [MHz]
N : 距離損失係数	29.9 (28GHz/Office/NLOS -> 29.9 を選択)
Lf(n) : 床侵入損失 (床の数を n とする)	13 ( 5GHz/Residencial/apartment [concrete wall] -> 13 を選択)
$\Delta L$ (W $\Phi$ ) : 指向性アンテナ差分	5.23 [dB]

上記式より  $d=65m$  の屋内伝搬損失  $L$  は 133.65 dB。

端末側での受信電力  $P_r=-80dBm$ 、受信アンテナ利得  $G_r=8.81 dBi$ 、送信アンテナ利得  $G_t=23 dBi$  とすると、所要空中線電力  $P_t$  [dBm] は以下のとおり。

$$P_t = P_r + L - G_r - G_t = 21.84dBm$$

このため、今回の実験において最大空中線電力は、22dBm (158.5mW) を希望した。

また、システム系統図は以下の通り。

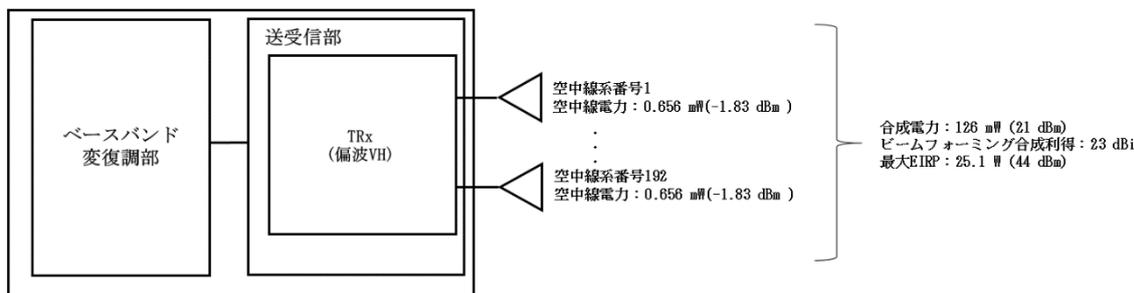


図 1-11 28GHz 帯 (基地局) システム系統図

### (3) 28GHz 帯 (端末)

28GHz 帯ではシャープ社製のシステムを利用した。諸元を以下に示す。

表 1-18 28GHz 帯 (端末) 機器諸元

項目	諸元
局数	4
周波数	中心周波数 28.74672GHz, 28.84608GHz, 28.94544GHz, 29.04480GHz 4波
帯域幅	400MHz (上り: 1x100MHz, 下り: 4x100MHz)
電波の型式	99M9 D1A,D1B,D1C,D1D,D1F,D1X, D7W,G1A,G1B,G1C,G1D, G1F, G1X,G7W
変調方式	64QAM
空中線電力 (最大送信出力)	200mW
識別番号	とよたろーかる 5 G 2 8 G H z い どう き 1 ~ 4
免許の期間	令和 3 年 5 月 31 日
常置場所	愛知県豊田市貞宝町 7 番地 トヨタ自動車貞宝工場 建物内
移動範囲	当該事業所の事業区域内 (Q)
アンテナの利得	8.81dBi
アンテナの指向性	指向性アンテナ
アンテナの本数	3 本 (同時には 1 アンテナからしか発射しない)

28GHz 帯 (基地局) 免許申請における空中線電力の根拠を以下に示す。

- ① 受信機の最低受信感度[dBm] -108
- ② 伝搬損失[dB] 140  
(実験計画書 8-2 記載 屋内伝搬損失 133.65dBm にマージン+6dBm)

- ③ 基地局アンテナ利得[dBi] 0  
(基地局受信時の最も条件が悪い環境を想定)
- ④ 移動局アンテナ利得[dBi] 8.81

∴ 所要空中線電力 = ①+②-③-④ = 23.19dBm ≒ 0.2W

また、端末の空中線電力については、基地局からの指示に合わせて出力を決定した。  
システム系統図を以下に示す。

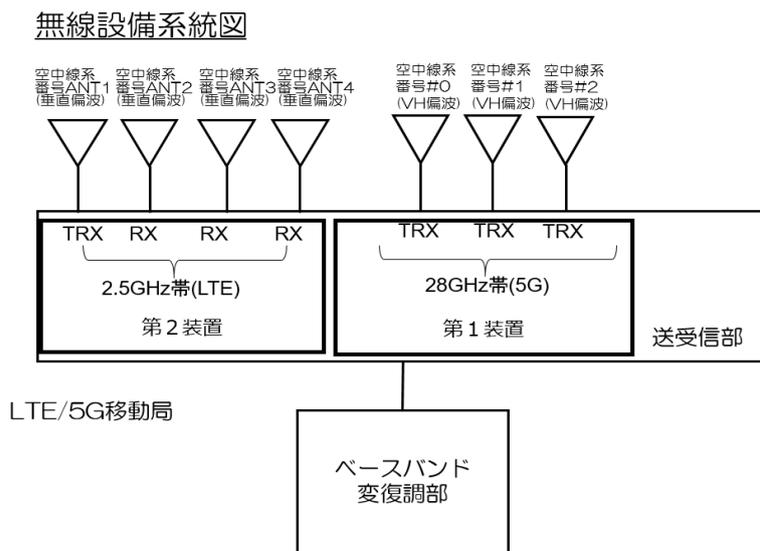


図 1-12 28GHz 帯 (端末) システム系統図

(4) 2.5GHz 帯 (基地局)

2.5GHz 帯ではノキアソリューションズ&ネットワークス社製のシステムを利用した。諸元を以下に示す。

表 1-19 2.5 GHz 帯 (基地局) 機器諸元

項目	諸元
局数	1
周波数	2585 MHz
帯域幅	20MHz
電波の型式	X7W
変調方式	QPSK 16QAM 64QAM
空中線電力 (最大送信出力)	6.2W (37.924dBm)
識別信号	MRけんしょうようLTE
免許の期間	令和3年5月31日
常置場所	愛知県豊田市貞宝町7番地 トヨタ自動車貞宝工場 建物内
移動範囲	当該事業所の事業区域内 (Q)

アンテナの利得	2.0 dBi
アンテナの指向性	無指向
アンテナの本数	2 本

2.5GHz 帯（基地局）免許申請における空中線電力の根拠を以下に示す。

屋内実験の最大の伝送距離  $d$  を 180m と想定し、屋内伝搬損失は ITU-R P.1238-10 屋内伝搬モデルで計算した。

$$L \text{ [dB]} = 20 \log f + N \log d + Lf(n) - 28 + \Delta L \text{ (W}\Phi\text{)}$$

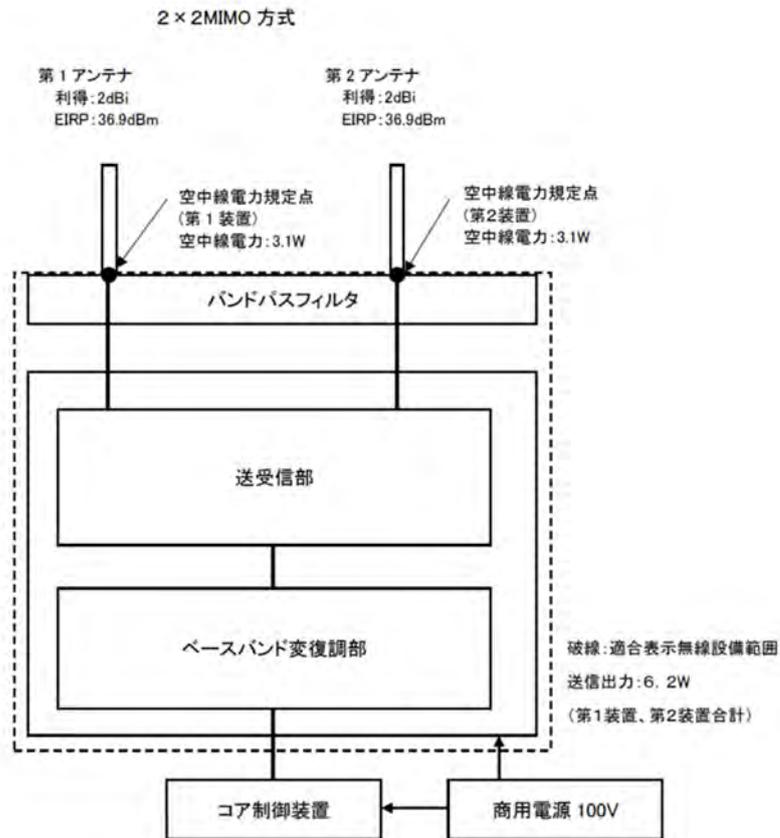
f [MHz] 使用する周波数	2585 [MHz]
N : 距離損失係数	33 (2.625GHz/Factory -> 33 を選択)
Lf(n) : 床侵入損失 (床の数を n とする)	13 ( 5GHz/Residencial/apartment [concrete wall] -> 13 を選択)
$\Delta L$ (W $\Phi$ ) : 指向性アンテナ差分	0 [dB] ※無指向性アンテナのため

上記式より  $d=180\text{m}$  の屋内伝搬損失  $L$  は 124.67 dB。

端末側での受信電力  $Pr=-85\text{dBm}$ 、受信アンテナ利得  $Gr=2.24 \text{ dBi}$ 、送信アンテナ利得  $Gt=2\text{dBi}$ 、基地局の給電線損失  $Lf=2\text{dB}$  とすると、所要空中線電力  $Pt \text{ [dBm]}$  は以下のとおり。

$$Pt = Pr + L \cdot Gr - Gt = 37.924\text{dBm (6.2W)}$$

このため、今回の実験において最大空中線電力は、37.924dBm (6.2W) を希望した。  
また、システム系統図は以下の通り。



(5) 2.5GHz 帯 (端末)

2.5GHz 帯ではシャープ社製のシステムを利用した。諸元を以下に示す。

表 1-20 2.5GHz 帯 (端末) 機器諸元

項目	諸元
局数	4
周波数	2585 MHz
帯域幅	20MHz
電波の型式	X1A,X1B,X1C,X1D,X1F,X1X,X7W
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM
空中線電力 (最大送信出力)	400mW
識別信号	とよたろーかる 5 G 2 8 G H z い どう き 1 ~ 4
免許の期間	令和 3 年 5 月 31 日
常置場所	愛知県豊田市貞宝町 7 番地 トヨタ自動車貞宝工場 建物内
移動範囲	当該事業所の事業区域内 (Q)
アンテナの利得	0.55dBi
アンテナの指向性	指向性アンテナ

アンテナの本数	4本（同時には1アンテナからしか発射しない）
---------	------------------------

なお、空中線電力については、基地局からの指示に合わせ出力を決定した。  
また、システム系統図は以下のとおり。

### 無線設備系統図

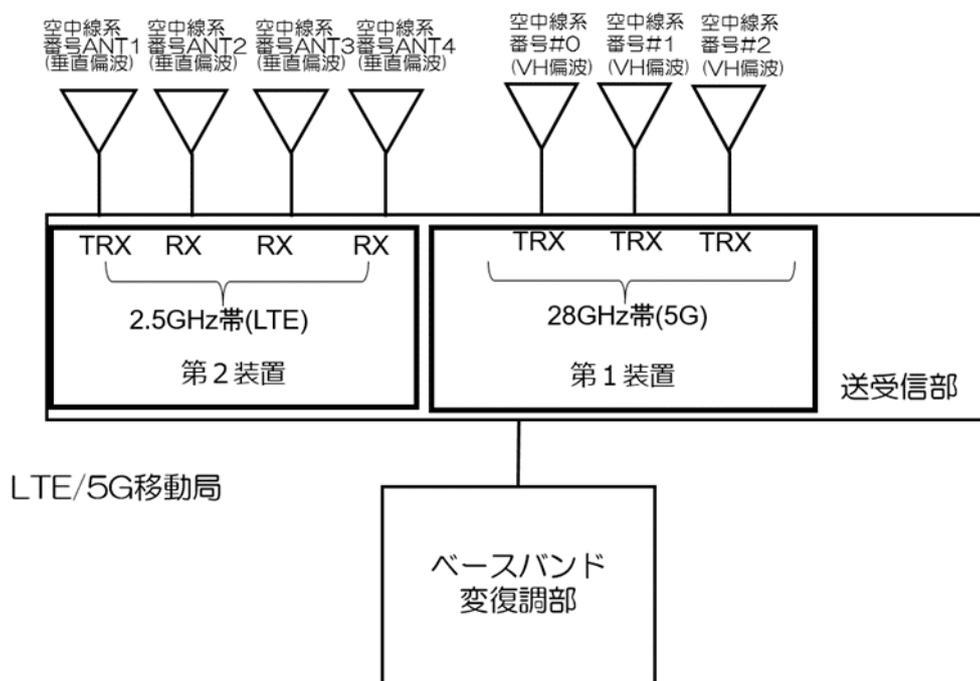


図 1-14 2.5GHz 帯（端末）システム系統図

#### 1.5.1.5 干渉調整

東海総合通信局の指示に基づき、以下事業者に対し干渉調整を実施した。

表 1-21 干渉調整先

周波数帯	事業者名	干渉調整合意日付	備考
4.7GHz 帯	株式会社 NTT ドコモ	令和2年8月19日(水)	メールでの合意
28GHz 帯	KDDI 株式会社	令和2年8月21日(金)	メールでの合意
	ソフトバンク株式会社	令和2年9月24日(木)	メールでの合意
2.5GHz 帯	株式会社コミュニティネットワークセンター (CNCI)	令和2年9月9日(水)	事業者間調整合意書取り交わしによる合意
	Wireless City Planning 株式会社	令和2年10月6日(火)	メールでの合意
	UQ コミュニケーション	令和2年10月26日	事業者間調整合意書取り

	ズ株式会社	(月)	交わしによる合意
--	-------	-----	----------

また、干渉調整にあたり、個別に対応を実施した事業者もある。事業者に提出した書類及び合意形成に係る資料を「別紙：MIC-L5G-KM-OP-05-01～13-干渉調整関連資料一式」に示す。また、各通信事業者より情報提供依頼があった主な項目を以下に示す。

- ・ 無線局諸元（工事設計）
  - ・ 無線機メーカー名、機種、型式、製造番号
  - ・ 局数（基地局、移動局）
  - ・ 周波数（中心周波数、周波数帯域幅）
  - ・ 電波の型式
  - ・ 変調方式
  - ・ 送信機出力、空中線電力
  - ・ アンテナ構成（本数、利得、指向性、指向方向、取付高さ、チルト、アンテナパターン）
  - ・ スプリアス実力値
  - ・ 無線機構成図
- ・ 運用方法（同期、準同期、非同期の別）及び同期対応可否、同期条件
- ・ 使用場所（住所及び無線局常置場所の緯度、経度）及び移動範囲
- ・ 通信のカバーエリア及び干渉調整対象区域
- ・ 無線通信の実施時期（実験試験局運用）
- ・ 干渉が発生した場合の対応方法

#### 1.5.1.6 登録点検

実験試験局免許を取得するにあたり、各無線設備の登録点検を実施した。詳細を以下に示す。

**表 1-22 4.7GHz 帯設備登録点検概要**

機器名	エイビット社製 ・とよたろーかる 5G よんてんななじっけん 1～6 製造番号 ・ P20362001016/P20362002031/P20362002032/P20362001017/ P20362002033/P20362002034
期間	令和 2 年 11 月 11 日（水）
実施場所	株式会社 スリーダブリュー 登録検査等事業者番号：関点第 0053 号

**表 1-23 28GHz 帯設備登録点検概要**

機器名	ノキア社製 ・ AWEUA(製造番号：AWEUA-HK0004)
-----	-------------------------------------

	・AWEUA(製造番号：AWEUA-HK0005)
期間	令和2年12月20日(日)
実施場所	中部電子システム株式会社 登録検査等事業者番号：海一第0051号 (一部を株式会社DSPリサーチへ委託、一部を一般社団法人 日本品質保証機構(JQA) 彩都電磁環境試験所へ委託) ※電波暗室、測定機材、無線機及びアンテナポジションナ等都合による

表 1-24 2.5GHz 帯設備登録点検概要

機器名	ノキア社製 ・MRけんしょうLTE ・FWHT(製造番号：FWHT-HK0002)
期間	令和2年12月7日(月)～12月8日(火) ※予備日含む
実施場所	トヨタ自動車(株)技術開発エリア 電波暗室 (GPS アンテナ使用) 中部電子システム株式会社(無線機操作を機器メーカーサポートによる) 登録検査等事業者番号：海一第0051号

#### 1.5.1.7 本調査検討終了後の免許取り扱いについて

本調査検討の終了後、免許期限までは継続して実証環境を活用し、研究開発にあたる。また、終了後の免許取り扱いについては、設備の仕様等を考慮し、今後検討を進める。

### 1.5.2 無線従事者資格

#### 1.5.2.1 無線従事者資格概要

無線設備を操作するためには、原則として電波に関する一定の知識・技能を身につけ、総務大臣の免許を受けた無線従事者を擁する必要がある。無線従事者の資格種別を以下に示す。

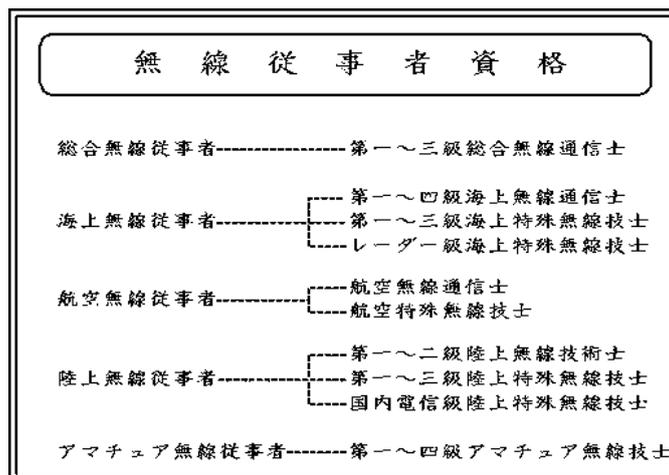


図 1-15 無線従事者資格

出所) 総務省電波利用ホームページ <https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/operator/operat/index.htm> 令和3年3月25日(木)取得

本調査検討においては、複数の人員が調査検討に携わり、製造工場内部における無線設備の操作・運用を行うことから、コンソーシアムメンバー内の無線従事者資格保持者複数名を無線従事者として選任した。無線従事者選任に係る詳細を「別紙：MIC-L5G-KM-OP-03-01～04-無線従事者選任届出一式」に示す。

### 1.5.2.2 無線従事者

無線局の運用にあたり、届出をした無線従事者を以下に示す。なお、届出をした無線従事者については、4.7GHz帯実験試験局免許、28GHz帯実験試験局免許、2.5GHz帯実験試験局免許全てにおいて共通となる。

表 1-25 無線従事者一覧

企業名	資格名/所持者数
トヨタ自動車株式会社	第二級陸上特殊無線技士 1名 第三級陸上特殊無線技士 2名
株式会社トヨタシステムズ	第三級陸上特殊無線技士 1名
ネットワンシステムズ株式会社	第三級陸上特殊無線技士 3名
株式会社エイビット	第三級陸上特殊無線技士 3名
株式会社日立国際電気	第一級陸上特殊無線技士 1名
シャープ株式会社	第三級陸上特殊無線技士 2名

### 1.5.3 その他資格

工場内工事及び各実証の実施に当たり、工場内におけるアンテナ取り付け等の高所作業、

また電子機器を使用した測定作業が発生することから、当社および株式会社トヨタシステムズの定める講習である「全豊田高所作業教育」及び豊田感電防止教育」を、コンソーシアムメンバーが受講した。受講の詳細について以下に示す。

**表 1-26 全豊田高所作業教育/全豊田感電防止教育受講詳細**

実施日時	企業名
令和2年10月27日(火) 9:00-17:30	キャノン株式会社 ネットワンシステムズ株式会社 株式会社エイビット シャープ株式会社
令和2年11月11日(水) 9:00-17:30	キャノン株式会社 ネットワンシステムズ株式会社 株式会社日立国際電気 ノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社

## 1.6 会議体

本調査検討を進めるにあたり、設置した会議体について以下に示す。

### 1.6.1 コンソーシアム推進会議（全体定例会議）

「1.3.1 コンソーシアム」に記載のとおり、本調査検討はコンソーシアムを形成し実施した。コンソーシアム推進会議（全体定例会議）では、コンソーシアム各社の代表者が参加し、作業進捗の報告・確認等を実施した。また、分野別課題実証調整事業者である PwC も参加し、進捗報告及び各種相談、情報共有等を行った。会議体の詳細を以下に示す。

**表 1-27 コンソーシアム推進会議（全体定例会議）**

目的	作業進捗状況の管理、課題管理、リスク管理、月次報告書のレビュー、PwC への進捗報告等
開催日程	隔週木曜日 15:30～17:00 に開催（全 12 回）
開催手段	Skype for Business または Microsoft Teams にて開催
参加者 （◎は主催者）	コンソーシアム各社主担当 コンソーシアム各社責任者 コンソーシアム各社メンバー ◎プロジェクトマネージャ/プロジェクトマネージャ補佐 コンソーシアム事務局 分野別課題実証調整事業者（PwC）

また、コンソーシアム推進会議（全体定例会議）において使用した資料及び議事録については、「別紙：MIC-L5G-MM-02～13-コンソーシアム推進会議資料」、「別紙：MIC-L5G-MI-01～13-コンソーシアム全体推進会議議事録」に示す。

## 1.6.2 分科会会議

「1.3.2 分科会」に示すとおり、本調査検討では、分科会を形成し実施した。分科会ごとに開催した会議体を以下に示す。

### (1) 全体取りまとめ分科会定例会議

表 1-28 全体取りまとめ分科会定例会議

目的	作業進捗状況の管理、課題管理、リスク管理、月次報告書のレビュー、成果報告書のレビュー等
開催日程	毎週木曜日 14:00～15:00 に開催（全 22 回）
開催手段	Skype for Business または Microsoft Teams にて開催
参加者 （◎は主催者）	◎プロジェクトマネージャ／プロジェクトマネージャ補佐 全体取りまとめ分科会メンバー 各分科会リーダー（PL） コンソーシアム事務局

### (2) 工事・免許・運用分科会定例会議

表 1-29 工事・免許・運用分科会定例会議

目的	ローカル 5 G 設備設置に向けた工場内工事計画の策定、工事対応、無線実験試験局免許申請（登録点検対応含む）、設備及び免許運用に係る検討の実施、メンバー間の情報共有及び認識合わせ等
開催日程	毎週木曜日 11:00～11:45 に開催（全 8 回）
開催手段	Skype for Business または Microsoft Teams にて開催
参加者 （◎は主催者）	◎分科会リーダー（PL） 分科会メンバー コンソーシアム事務局

### (3) 課題実証分科会定例会議

表 1-30 課題実証分科会定例会議

目的	課題実証に係る検討の実施（ユースケースの選定・詳細化、課題実証計画書作成）、課題実証の実施、課題実証成果物取りまとめ作業の実施、メンバー間の情報共有及び認識合わせ等
開催日程	毎週月曜日 14:00～15:00 に開催（全 26 回）
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 （◎は主催者）	◎分科会リーダー（PL） 分科会メンバー コンソーシアム事務局

#### (4) 技術実証分科会定例会議

表 1-31 技術実証分科会定例会議

目的	技術実証に係る事前検証 (PoC) の実施、作業計画書の作成、技術実証の実施、技術実証成果物取りまとめ作業の実施、メンバー間の情報共有及び認識合わせ等
開催日程	毎週月曜日 16:00～17:00 に開催 (全 18 回)
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 (◎は主催者)	◎分科会リーダー (PL) 分科会メンバー コンソーシアム事務局

#### (5) 実装及び横展開分科会定例会議

表 1-32 実装及び横展開分科会定例会議

目的	関係者からの意見聴取の実施、持続可能な事業モデル等の構築・計画の策定、横展開に資する普及モデルの検討の実施、共同利用型プラットフォームに関する検討の実施等
開催日程	毎週木曜日 17:00～18:00 に開催 (全 23 回)
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 (◎は主催者)	◎分科会リーダー (PL) 分科会メンバー コンソーシアム事務局

また、不測の事態が発生することを鑑み、以下に示すとおりコンソーシアム責任者会議を設置し、重要事項に対する意思決定を行う体制を構築した。なお、本調査検討においては、コンソーシアム責任者会議は開催されなかった。

表 1-33 コンソーシアム責任者会議

目的	プロジェクト全体に係る重要事項に対する意思決定の実施
開催日程	発生都度
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 (◎は主催者)	コンソーシアム各社主担当 コンソーシアム各社責任者 分科会リーダー (PL) ◎プロジェクトマネージャ/プロジェクトマネージャ補佐 コンソーシアム事務局

### 1.6.3 総務省向け月次報告会

本調査検討の進捗状況について、総務省及び各調整事業者に共有すべく、課題実証全体調整事業者の指示に基づき、工場分野 4 事業者合同の月 1 回の定期進捗報告会を実施した。実施実績を以下に示す。

表 1-34 総務省向け月次報告会

開催日程	令和2年10月16日(金) 15:00~17:00、11月16日(月) 15:00~17:00、12月15日(火) 13:00~15:00、令和3年1月18日(月) 13:00~15:00、2月10日(水) 15:00~17:00、3月8日(月) 15:00~17:00
開催手段	Webexにて開催
参加者 (◎は主催者)	総務省及び地域総合通信局 有識者委員 課題実証全体調整事業者 (MRI) 技術実証全体調整事業者 (ARIB) ◎分野別課題実証調整事業者 (PwC) 沖電気工業株式会社及びコンソーシアム各社 トヨタ自動車株式会社及びコンソーシアム各社 住友商事株式会社及びコンソーシアム各社 日本電気株式会社及びコンソーシアム各社

#### 1.6.4 工場分野4事業者合同会議

本調査検討実施にあたり、工場分野事業者間にて意見交換及び実証結果報告会を実施した。詳細を以下に示す。

##### ① 技術実証に関する意見交換会

表 1-35 技術実証に関する意見交換会

目的	技術実証の実施内容(反射板等)に関する意見交換
開催日程	令和2年12月3日(木) 16:00~17:00
開催手段	Webexにて開催
参加者 (◎は主催者)	住友商事株式会社及びコンソーシアム各社 日本電気株式会社及びコンソーシアム各社 トヨタ自動車株式会社及びコンソーシアム各社 ◎分野別課題実証調整事業者 (PwC)
議題	・ 実験環境の共有 ・ 反射板等を使用した実験について ・ マルチパス環境と反射板等の効果について
決定事項	なし

##### ② 技術実証結果共有会

表 1-36 工場分野4事業者合同技術実証共有会

目的	技術実証の結果に関する情報共有
開催日程	令和3年2月24日(木) 15:00~17:00
開催手段	Webexにて開催
参加者 (◎は主催者)	総務省 有識者委員 技術実証全体調整事業者 (ARIB) ◎分野別課題実証調整事業者 (PwC)

	沖電気工業株式会社及びコンソーシアム各社 住友商事株式会社及びコンソーシアム各社 日本電気株式会社及びコンソーシアム各社 トヨタ自動車株式会社及びコンソーシアム各社
議題	・ 技術実証共有会について ・ 各コンソーシアムによる技術実証結果報告
決定事項	なし

### 1.6.5 その他

総務省及び各調整事業者との個別協議に関して記載する。

**表 1-37 登録点検に関する協議**

目的	免許申請に係る登録点検に関する協議
開催日程	実証期間中随時（全 9 回）
開催手段	オンサイト及び Microsoft Teams にて開催
参加者 （◎は主催者）	総務省 東海総合通信局 ◎トヨタ自動車株式会社 ネットワンシステムズ株式会社
議題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各種スケジュール確認（総務省公示、免許申請のリードタイム等）</li> <li>・ 4.6GHz 帯の運用期限に関する確認</li> <li>・ 免許申請の設置局数の考え方に関する確認</li> <li>・ 電波利用料、申請手数料に関する確認</li> <li>・ 自営 BWA 屋内カバーエリアに関する確認</li> <li>・ 登録点検実施内容に関する確認</li> <li>・ 実験計画書の様式等の確認</li> <li>・ 電力測定の精度、測定の許容値に関する確認</li> <li>・ 基地局制御ができない場合のシミュレータに関する確認</li> <li>・ 測定方法に関する確認（空中線電量、周波数偏差、2.5GHz 屋内測定手法等）</li> <li>・ 電波暗室の対応周波数（スプリアス測定の場合中心周波数の 2 倍に対応必要）</li> <li>・ 申請内容変更手続き方法の確認</li> <li>・ 干渉調整の決まりごとに関する確認（地域 BWA、衛星通信など）</li> <li>・ 登録点検、落成検査における免許人と無線従事者の位置付けに関する確認</li> <li>・ 測定環境の記載等に関する確認</li> <li>・ 周波数範囲での測定若しくは指定周波数ごとの測定の要否に関する確認</li> <li>・ 申請書類の日付整合性に関する確認</li> </ul>
決定事項	なし

**表 1-38 有識者委員による実証環境視察**

目的	実証環境の視察
開催日程	令和 2 年 11 月 9 日（月）13:00～16:00

開催手段	オンライン
参加者 (◎は主催者)	有識者委員 分野別課題実証調整事業者 (PwC) ◎トヨタ自動車株式会社 ネットワンシステムズ株式会社
議題	なし
決定事項	なし

**表 1-39 技術実証全体調整事業者 (ARIB) によるヒアリング**

目的	技術実証ヒアリング
開催日程	令和 2 年 11 月 10 日 (火) 13:00~14:00
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 (◎は主催者)	技術実証全体調整事業者 (ARIB) ◎課題実証全体調整事業者 (MRI) トヨタ自動車株式会社 ネットワンシステムズ株式会社
議題	・ ヒアリングシートに基づいた実証方針の説明 ・ 質疑応答
決定事項	なし

**表 1-40 課題実証全体調整事業者 (MRI) によるヒアリング**

目的	共同利用型プラットフォームに関する協議
開催日程	令和 2 年 12 月 23 日 (水) 17:00~18:00、令和 3 年 3 月 5 日 (金) 11:00~12:00、3 月 10 日 (水) 18:00~19:00
開催手段	Microsoft Teams にて開催
参加者 (◎は主催者)	◎総務省 課題実証全体調整事業者 (MRI) トヨタ自動車株式会社 ネットワンシステムズ株式会社
議題	・ 共同利用型プラットフォームに関する考え方の共有 ・ コア共用に関する確認 等
決定事項	なし

**表 1-41 分野別課題実証調整事業者 (PwC) によるヒアリング**

目的	調査検討の詳細に関するヒアリング
開催日程	令和 3 年 3 月 4 日 (木) 15:00~17:00
開催手段	Webex にて開催
参加者 (◎は主催者)	◎分野別課題実証調整事業者 (PwC) トヨタ自動車株式会社 ネットワンシステムズ株式会社
議題	・ ヒアリングシートに基づいた実証成果の説明 ・ 質疑応答
決定事項	なし

## 1.7 プロジェクト管理

本調査検討遂行のため、プロジェクト管理の細則と、本調査検討のスコープ・スケジュール・コスト等を定めた実施計画書を作成した。詳細は「別紙：MIC-L5G-PJ-01-実施計画書 1.0 版 20201013」に記載する。

また、各進捗管理の概要を以下に示す。

### 1.7.1 進捗管理

- ・ WBS&スケジュール

本調査検討の作業項目とそのスケジュールを明確化するために、あらかじめ WBS を策定し、これをもって進捗状況を確認しながら本調査検討を実行した。また、定例会議の席上において、WBS&スケジュールを基に進捗状況確認を実施し、問題・課題がある場合には、早期把握及び解決を行い、調査検討の円滑な推進を図った。詳細は、「別紙：MIC-L5G-PJ-10-WBS」に記載する。

- ・ 分科会進捗報告書

各分科会の進捗状況の確認及び全体への進捗状況共有のため、プロジェクト個別に進捗報告書を定め、各分科会 PL に対し、毎週火曜日に提出するよう依頼した。様式は、「別紙：MIC-L5G-PJ-03-進捗報告書フォーマット」のとおりとなる。

- ・ 総務省向け月次報告書

総務省及び調整事業者の定めるフォーマットに従い、毎月末に免許取得状況及び環境構築状況、各実証の進捗状況の報告を行った。内容の詳細は、「別紙：MIC-L5G-MM-X1-01～05-総務省向け月次報告書」に記載する。また、月次報告書は、「1.6.3 総務省向け月次報告会」においても発表資料として活用した。

### 1.7.2 課題管理

コンソーシアム推進会議（全体定例）等で確認された課題については、課題詳細を別に定める課題管理表に記載し、管理・解決を図った。詳細は、「別紙：MIC-L5G-PJ-04-課題管理表」に記載する。

また、課題管理表は課題実証全体調整事業者である MRI の指示に従い作成し、「1.7.1 ③ 総務省向け月次報告書」に記載の報告書とあわせて、総務省及び各調整事業者に対し、月次にて展開した。

### 1.7.3 リスク管理

本調査検討実施にあたり、コンソーシアムメンバーから潜在的なリスクを提示し、別に定めるリスク登録簿に記載し、対応策の検討及び管理を行った。詳細は、「別紙：MIC-L5G-PJ-05-リスク登録簿」に記載する。

また、新型コロナウイルス感染症の感染拡大に伴い、令和3年1月7日（木）に1都3県（東京、千葉、埼玉、神奈川）<sup>iv</sup>、1月13日（水）に7府県（栃木、岐阜、愛知、京都、大阪、兵庫、福岡）<sup>v</sup>に対し、政府より非常事態宣言が発令された。これに伴い、当コンソーシアムは「別紙：MIC-L5G-PJ-11-緊急事態宣言下における実施方針」を定め、県間移動制限時や感染者発生時の対応策等をあらかじめ講じるとともに、感染拡大防止に努めながら実証を行った。

#### 1.7.4 変更管理

実施計画書に記載した内容に基づき変更管理を実施した。なお、本調査検討において発生した課題のうち、プロジェクト全体の見直しを伴う項目は発生しなかった。

#### 1.8 総務省及び調整事業者からの助言と対応依頼等

本調査検討の実施にあたり、課題実証全体調整事業者、技術実証全体調整事業者及び分野別課題実証調整事業者から助言等を受けた場合は、その助言等に従うよう努めるとともに、それぞれの求めに応じ必要なデータ等を報告する等の対応を実施した。本調査検討において受領した助言ならびに対応依頼を以下に示す。

表 1-42 助言

依頼者	内容
総務省	<ul style="list-style-type: none"> <li>実施計画書内容に関するコメント 令和2年10月5日（月）</li> </ul>
課題実証全体調整事業者 (MRI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>「実装及び横展開の検討」に関する補足 令和2年12月2日（水）</li> <li>成果報告書作成に関する補足 令和3年1月26日（火）</li> <li>共同利用型プラットフォームに関するヒアリング 令和3年3月5日（金）</li> </ul>
技術実証調整事業者 (ARIB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>技術実証に関する助言・支援 令和2年12月25日（月）</li> <li>技術実証の目標例の展開 令和3年2月1日（月）</li> <li>成果報告書素案技術実証部分に対するフィードバック 令和3年3月9日（火）</li> </ul>
分野別課題実証調整事業者	<ul style="list-style-type: none"> <li>成果報告書骨子に対するフィードバック</li> </ul>

<sup>iv</sup> [https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2021/0107kaiken.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2021/0107kaiken.html)

令和3年1月7日 新型コロナウイルス感染症に関する菅内閣総理大臣記者会見（令和3年3月25日（木）取得）

<sup>v</sup> [https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2021/0113kaiken.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2021/0113kaiken.html)

令和3年1月13日 新型コロナウイルス感染症に関する菅内閣総理大臣記者会見（令和3年3月25日（木）取得）

(PwC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>令和3年1月25日(月)</li> <li>・ 実証成果に関するヒアリング</li> <li>令和3年3月4日(木)</li> <li>・ 成果報告書素案に対するフィードバック</li> <li>令和3年3月10日(水)</li> <li>・ 成果報告書概要版素案に対するフィードバック</li> <li>令和3年3月12日(金)</li> <li>・ 成果報告書修正版・概要版修正版に対するフィードバック</li> <li>令和3年3月19日(金)</li> </ul>
-------	---

表 1-43 対応依頼

依頼者	内容
総務省	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証事業映像制作に係る依頼</li> <li>令和3年1月6日(水)</li> <li>・ 成果報告書素案アップロード依頼</li> <li>令和3年2月26日(金)</li> </ul>
課題実証全体調整事業者 (MRI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 情報発信(対外発表)に関わる留意事項</li> <li>令和2年11月9日(月)</li> <li>・ Microsoft Teams 登録確認依頼</li> <li>令和2年11月20日(金)</li> <li>・ 成果報告書作成に向けた依頼</li> <li>令和2年12月2日(水)</li> <li>・ 成果報告会開催について</li> <li>令和3年2月24日(水)</li> <li>・ 成果物紐づけ情報に関する依頼</li> <li>令和3年3月8日(月)</li> <li>・ 成果報告1枚物作成について</li> <li>令和3年3月9日(火)</li> </ul>
技術実証調整事業者 (ARIB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 測定データ提供依頼</li> <li>令和2年11月20日(金)</li> <li>・ データの迅速提供及びコミュニケーションに関するお願い</li> <li>令和3年2月10日(水)</li> </ul>
分野別課題実証調整事業者 (PwC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証事業の進め方に関する依頼</li> <li>令和2年10月20日(火)</li> <li>・ 月次報告書様式記入方法補足</li> <li>令和2年10月23日(金)</li> <li>・ 実証事業の映像資料作成に係る依頼</li> <li>令和2年11月17日(火)</li> <li>・ 技術実証共有会準備依頼</li> <li>令和3年2月9日(火)</li> <li>・ 成果報告書概要版作成依頼</li> <li>令和3年2月24日(水)</li> <li>・ 成果報告書作成関連対応依頼</li> <li>令和3年2月26日(金)</li> </ul>

また本調査検討においては、課題実証全体調整事業者である株式会社三菱総合研究所（MRI）が契約する Microsoft Teams<sup>vi</sup>というコミュニケーションツールを用い、課題実証全体調整事業者、技術実証全体調整事業者及び分野別課題実証調整事業者との円滑な情報連携や各種相談等を実施した。

---

<sup>vi</sup> Microsoft Teams はマイクロソフト社が推奨するコミュニケーションツールのひとつ。チャット・通話機能の他、ビデオ会議機能、ファイル共有機能、Office アプリとの連携機能等を有する。

## 2. 実証地域

### 2.1 実証地域の概要

本調査検討では、実証地域として、トヨタ自動車株式会社 貞宝第1工場を選定した。

貞宝工場は、車両工場とは異なり、モーター製作用設備や、鋳造型設備等の生産設備を製造している工場である。貞宝工場の特徴を以下に示す。

- ・ 世の中の技術の変遷に合わせ、大型～小型の様々な生産設備を製造している工場である。
- ・ 作業空間は、どんな大きさの生産設備を製造できるよう、建屋面積、高さ、柱の間隔などが広く設計されている。
- ・ 工場内の設備は汎用機が中心であり、バリエーションも豊富である。
- ・ 工場内は大きく 2 つのエリアに分かれており、新しい生産設備の組み立てを行う生産設備組立工場と、自動車生産で使うパーツを生産する金型工場が存在する。

また、他の国内製造工場と貞宝工場を比較すると、以下の違いがあると考えている。

- ・ 他の国内製造工場は、製造する物の大きさや量に応じて工場の大きさが設計されている。
- ・ 工場内の設備は製造する物にあわせて専用機であることが多く、またバリエーションも限定されている。

また、当社が所有する工場のうち、貞宝工場を選定した理由を以下に示す。

- ・ 建屋の大きさや、工場内に設置されている設備等が、一般的な製造工場と類似性が高い。
- ・ 貞宝第1工場では、既に製造現場にてMRシステムが活用されている。(詳細は「2.2 当社におけるMRシステムの活用」に記載)

#### 2.1.1 所在地

貞宝第1工場の所在地を以下に示す。

〒471-8574 愛知県豊田市貞宝町7番地



図 2-1 貞宝第 1 工場所在地

出所) Open Street Map Japan <https://openstreetmap.jp/> より取得 (令和 3 年 2 月 26 日 (金) 取得)



①

②



③

④

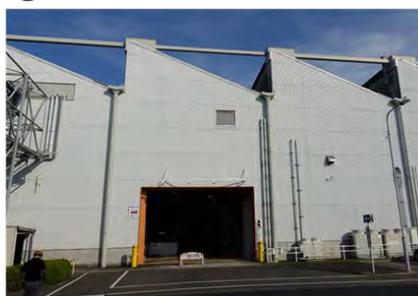


図 2-2 貞宝第 1 工場外観

また、貞宝工場の立地に関する特徴を以下に示す。

- ・ 豊田市の南西部、市の中心部に近い場所に位置する。
- ・ 自然に囲まれた高台に位置し、日当たりが良く、風の抜けが良い。
- ・ 地下は亜炭鉱であり、空洞が多い。
- ・ 各通信事業者が提供する 4G LTE 接続サービスのエリア範囲となっている。なお、豊田市中心部については、一部のキャリアによる 5G 接続サービスの提供が検討されている。(貞宝工場所在地は対象外となる。) vii

## 2.1.2 工場内レイアウト

貞宝第1工場の大きさは、縦 240m、横 140m であり、天井の高さは約 9.5m である。工場内レイアウトを以下に示す。

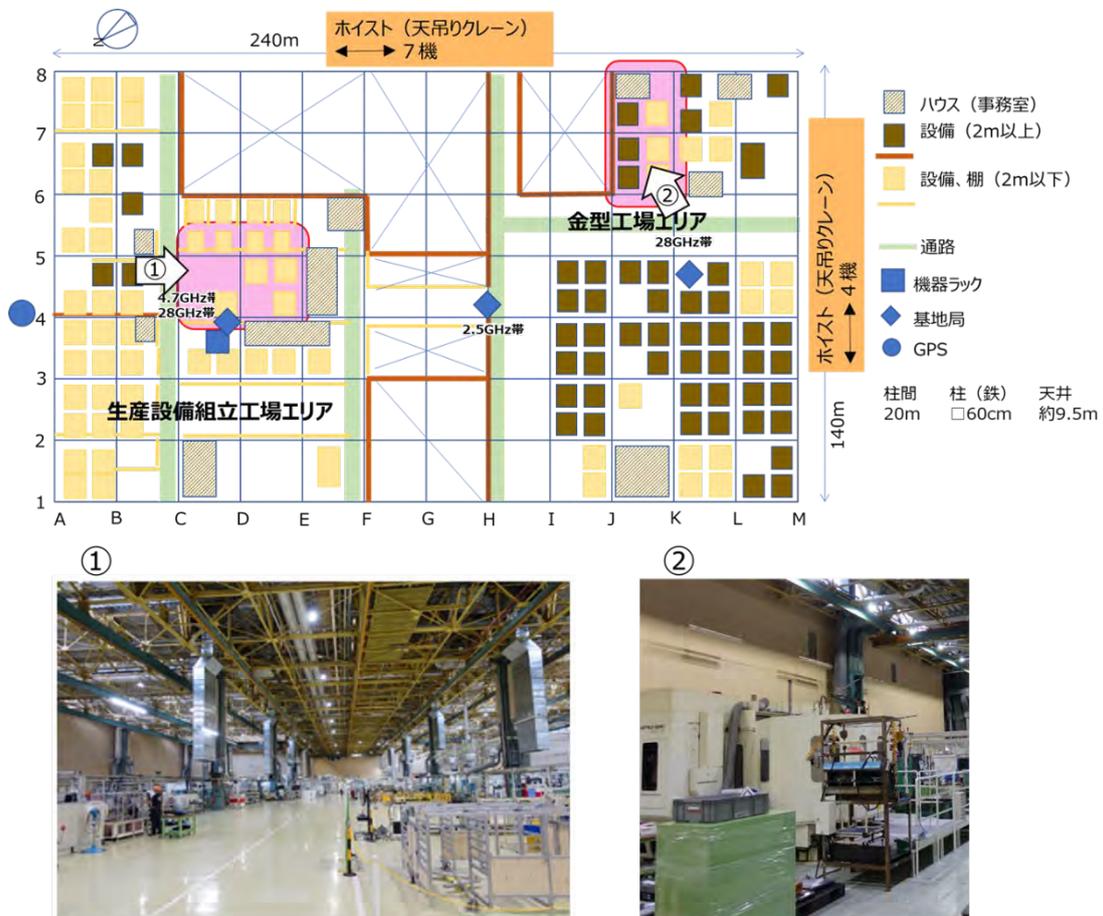


図 2-3 工場内レイアウト

「図 2-3 工場内レイアウト」の C4-F5 の区画 (60m×20m) 及び図中①が生産設備組立工場内の実証環境となり、J6-K8 の区画 (20m×40m) が及び図中②が金型工場内の実証

vii 令和3年3月25日(木)時点

環境となる。各エリアの概要を以下に示す。

- ・ 生産設備組立工場エリア：様々な新しい生産設備の組み立てを行うエリア。空間として開けており、比較的電波が伝搬しやすい。
- ・ 金型工場エリア：金型を加工する為の設備があるエリア。大小様々な設備が配置されており、比較的電波が伝搬しにくい。

また、工場の天井には、荷役や機械組立等に利用できるホイスト式天吊りクレーンが横方向に 7 機、縦方向に 4 機設置されており、可動範囲が広い。そのため、移動範囲内の天井にローカル 5G に関連する基地局等を設置しようとする、衝突の危険性があるため、設置場所が限定される。

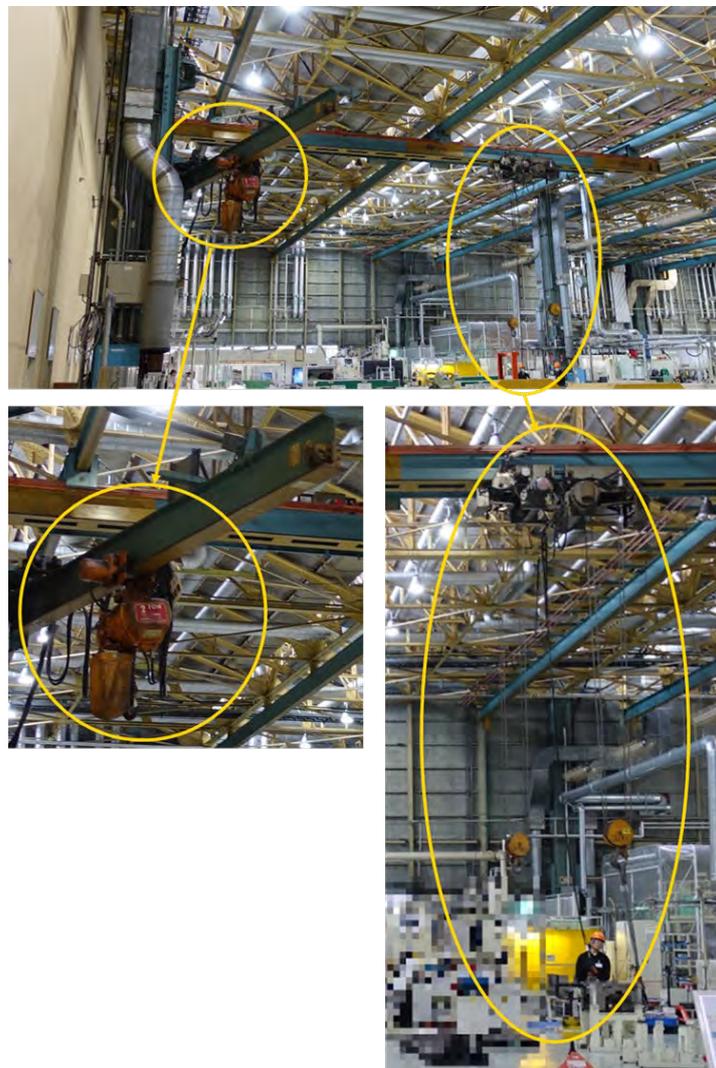


図 2-4 ホイスト式天吊りクレーン

また、天井付近には「図 2-5 ダクト」のように大小様々なダクト等が存在する。

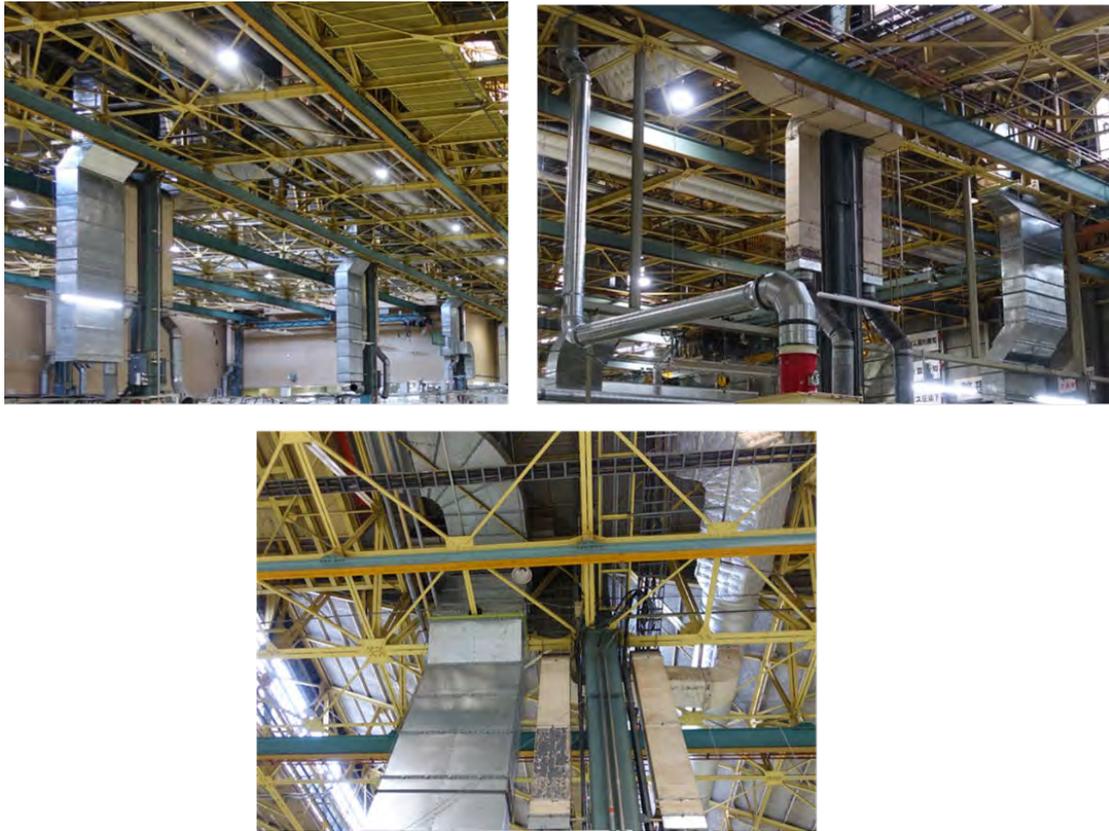
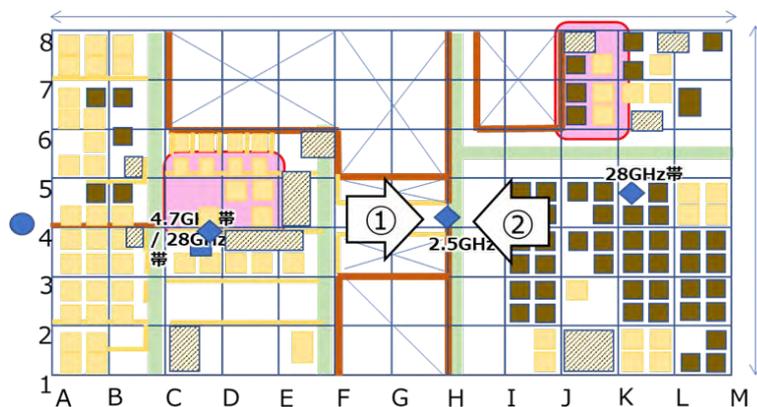


図 2-5 ダクト

また、生産工場エリアと金型工場エリアは、「図 2-6 エリア境界の壁（石膏ボード）」に示すとおり、石膏ボードで作られた壁によって区切られている。なお、壁（石膏ボード）の上側の一部は吹き抜けとなっている。



①



②



図 2-6 エリア境界の壁 (石膏ボード)

## 2.2 当社における MR システムの活用

今回実証地域として選定した貞宝第 1 工場では、製造現場において積極的に MR システムを活用している。これらの活動を踏まえ、当社における MR 活用の現状と問題を以下に示す。また、当社における MR システムの活用の詳細については、「別紙：MIC-L5G-CO-PJ-02 -MREAL の特徴と業務活用及び立体視の特性について」にも記載している。

### 2.2.1 MR システム導入の背景

#### 2.2.1.1 労働者の安全・健康の確保

労働安全衛生法 3 条では、「快適な職場環境の実現と労働条件の改善を通じて職場における労働者の安全と健康を確保するようにしなければならない」と定められており、会社として従業員の労働環境を良い状態に保つ・改善していく必要がある。

また、「機械、器具その他の設備を設計し、製造し、若しくは輸入する者、原材料を製造し、若しくは輸入する者又は建設物を建設し、若しくは設計する者は、これらの物の設計、製造、輸入又は建設に際して、これらの物が使用されることによる労働災害の発生の防止に資するように努めなければならないとされることによる労働災害の発生の防止に資するように努めなければならない。」と定められ、労働災害や疾病の発生の防止を考慮した設備や治具等を設計しなければならない。

労働安全衛生法 4 条では、「労働者は、労働災害を防止するため必要な事項を守るほか、事業者その他の関係者が実施する労働災害の防止に関する措置に協力するように努めなければならない」とあり事業者側は作業ルールを作り、労働者への教育訓練を実施し、労働者は事業者と協力し、災害防止に努める必要がある。

各業種において、業務上の疾病件数は各社の努力によって減少してきているが、統計上に表れない疾病数が少なからず存在するものとする。以下に業種別の業務上疾病発生状況を示す。

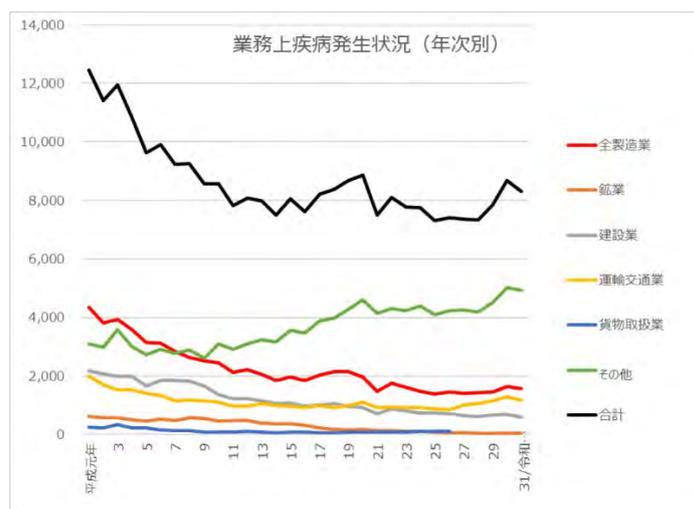


図 2-7 業務上疾病発生状況 (年次別)

出所) 厚生労働省のデータを基に、当社にて作成

なお、製造業の組立作業やサービス業においては、腰痛や上腕骨外（内）上顆炎（テニス肘など）・手関節炎（腱鞘炎やリウマチなど）・肘部管症候群（手指のしびれ、握力低下など）などを感じる者が多いと言われている。

### 2.2.1.2 弊社の安全・健康への取り組み

当社では、基本理念の第一に「安全な作業」を掲げ、労働安全衛生マネジメントシステム（OSHMS/Occupational Safety and Health Management System）を社内規の中でも最上位に定め、会社内で行われる安全衛生管理や活動等の全ての事項に適用するよう規定している。

また当社においては、OSHMS を以下に示す内容と定め、都度 OSHMS を再把握しリスクダウンを行い、従業員の安全と健康を確保することと定め、実際の生産に入る前段階から実施している。

- ・ 作業工程の洗い出し
  - ・ 各作業の危険・有害リスクの数値評価（安全、環境、作業負荷、頻度等）※
  - ・ リスク軽減のための改善の実施
  - ・ 作業手順書の整備
  - ・ 作業手順書に基づいた教育や訓練の実施
- ※作業負荷＝作業姿勢＋重量＋荷重＋頻度等

また、生産開始後にも更にリスクダウン検討を継続し、身体への負担を軽減するサポータやコルセットの提供や、重量軽減の吊り具や工程の見直し、治具の改良、設備や部品箱のレイアウト変更等を実施している。



図 2-8 リスク評価・採点

### 2.2.1.3 デジタル化以前のリスク評価

デジタル検討以前での工場においては、ラインを敷設する前に、設備単体での作業性等を実際の設備を用いて検討していた。実際にラインに敷設後、数十、数百回の作業を繰り返すことで初めて作業リスクが発覚し、作業風景をビデオで撮影し、コマ送りしながら、作業負荷を把握し、対策を実施していた。しかし、評価者による結果のバラツキ等や評価する時間がかかることなどが問題となっていた。

### 2.2.1.4 デジタル化後のリスク評価

3D-CAD の普及とともに、設備設計もデジタル上で検討が行えるとともに、デジタルマネキンを使った作業負荷を行えるようになった。

しかしながらデジタルマネキンで姿勢を設定したとしても、あるいは、連続作業のうちの一瞬の姿勢を切り取ったとしても、実際の現場作業には身長、性別、年齢など多くの差分があり、すべてのパターンにおいて、目線や手や腕と部品との隙を確認することは難しい状態であった。

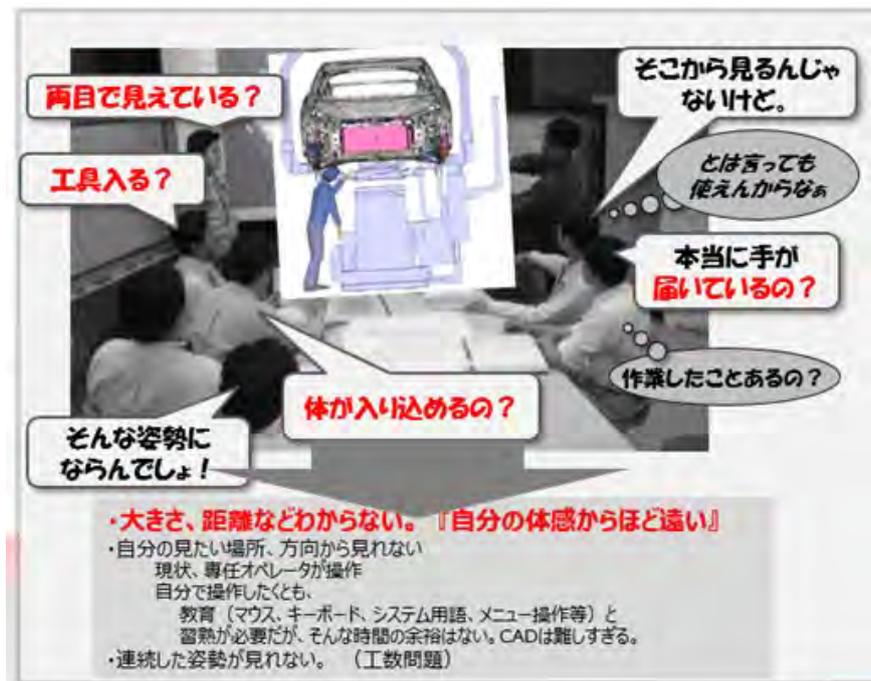


図 2-9 作業姿勢のレビュー

また、OSHMS では 1 工程内の連続作業に対してリスク評価することを定めている。現状、デジタルマネキンを連続して動かすアニメーション機能を使い、リスクを評価することも可能ではあるものの、リスクを採点するための 1 姿勢を CAD 上で設定するだけでも約 15 分以上かかる。更に 1 工程を全てアニメーション化するには多大な工数が必要となるため、1 ライン全行程に適用するのは現実的ではないと考えている。

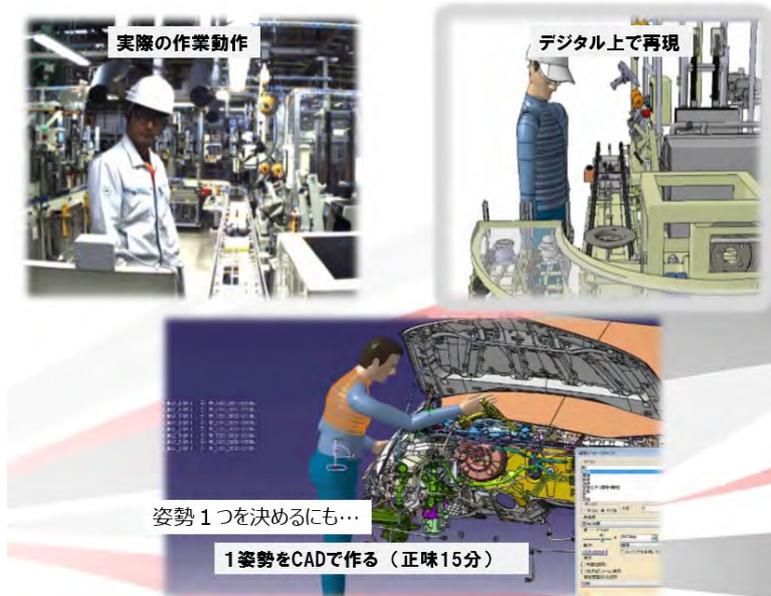


図 2-10 連続動作のアニメーション化

また、本来は、生産プロセスの全ての作業工程に関する作業性の検討をデジタルの世界で行うことが理想であるが、安全の観点から全工程の連続作業のリスク評価を行うべきとは理解していても、時間的に許されないのが実状である。

### 2.2.1.5 MR システムの適用

こうした問題を解決するために当社では MR システムを導入し、作業性の検討に MR の利用を開始した。

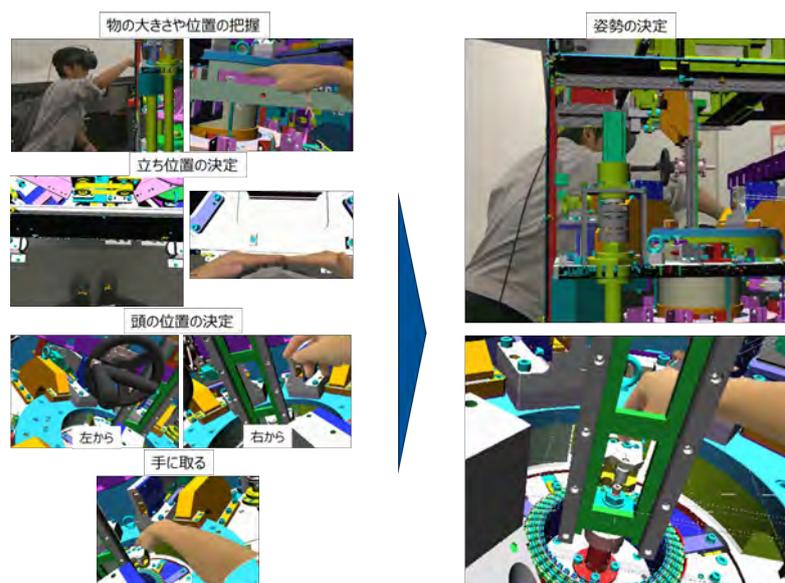


図 2-11 姿勢決定までの流れ

MR システムを活用することで、安全な作業の確立以外に、従来の設備等の現実物を製作した後にしか評価確認できなかった操作性、保全性等の検証を実際の作業者自らが早く実施できるようになり、設計や製作のやり直しの抑止とともに、期間・工数・コスト等の削減を図ることができた。

さらに、当社では、作業者がモーションセンサーを同時に装着することで、自動的に作業負荷を数値化し、集計することも行っている。

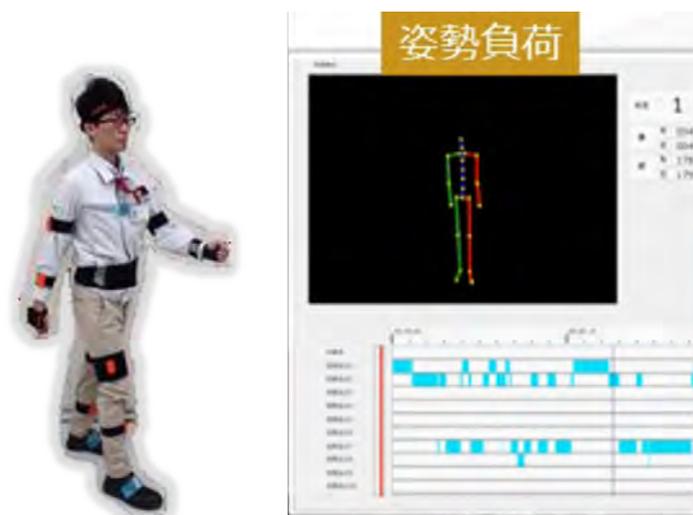


図 2-12 モーションキャプチャーと作業負荷計測

また、MR システムの特徴として、HMD を装着することで、仮想の設備を現実の設備と理解して実際と同じような作業検証ができることが挙げられる。さらに、HMD に投影している映像を別の大型モニターに表示することで、他者に対して HMD 装着者の視界を共有できる。

しかしながら、HMD が 1 台だけの場合、HMD 装着者の視界をモニター経由で把握できても、外部の人間は仮想形状の映像を直接確認することはできないため、仮想形状と HMD 装着者の位置関係を理解することは困難である (図 2-13 客観視 左図)。

そのため、もう 1 台の HMD から HMD 装着者を見ることによって<sup>viii</sup>、人と仮想形状の位置関係とどのような作業を行っているかを確認している (図 2-13 客観視 右図)。

<sup>viii</sup> HMD 装着者の映像を主観視映像、HMD 装着者のそばで、仮想形状と HMD 装着者の姿を同時に確認する者の映像を「客観視映像」と呼ぶ。



図 2-13 客観視

### 2.2.1.6 対象業務

当社における、MR システムの活用対象業務を「図 2-14 対象業務」に示す。

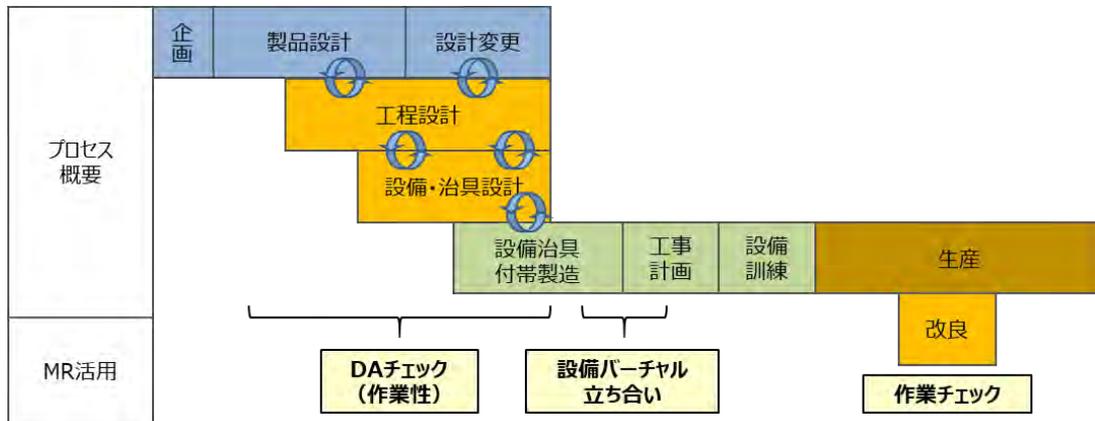


図 2-14 対象業務

#### (1) DA チェック

製品自体の成立性や部品間の隙・干渉等を CAD 上で確認した後に、実際の作業者が MR システムを活用して手が挿入できるか、無理な姿勢にならないかの一連の作業確認を行う。作業確認結果を製品形状や組付け治具の要件に反映する。

#### (2) 設備バーチャル立ち会い

現実の設備立ち合いの 3D データ版であり、設備製作に入る前段階における確認に相当する。設備の操作性や保守保全性、設備の組立性等を検討する。

#### (3) 生産中の改良

組付け工程の設備や治具の改良等、生産移行後の現場工場主体の改善活動となる。

### 2.2.1.7 検証環境

MRシステムを活用するため、「図 2-15 MR ルームの様子」に示す専用の部屋を愛知県内に用意し、関係者（設計者、製作者、作業員）が一堂に会して「DA チェック」「設備バーチャル立ち合い」を実施している。



図 2-15 MR ルームの様子

しかしながら、遠隔地の工場の場合、関係者全員が参加して合意判断を行うことは困難であった。そこで、離れた場所の MR システム同士を接続し、遠隔地間でもこれまで同様に同一場所で集まって検証を行うことのできる遠隔地間接続機能の実用化を開始した（図 2-16 遠隔地接続機能の概要）。

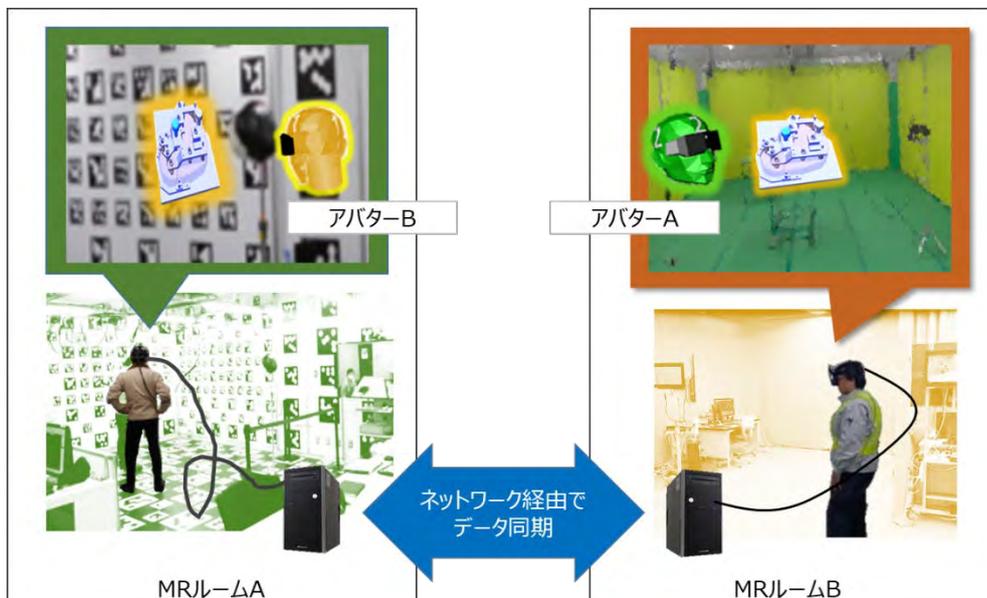


図 2-16 遠隔地接続機能の概要

### 2.2.1.8 工場における有効性検証

MR ルームで現実の設備を再現しながら検証を行うためには、既存設備の 3D データを作成するか、現地でレーザスキャナを使って点群データとして表す等の期間工数等が必要となる（図 2-17 有効性検証 左：治具のみで検討 右：既存設備の 3D データ又は測定点群）。

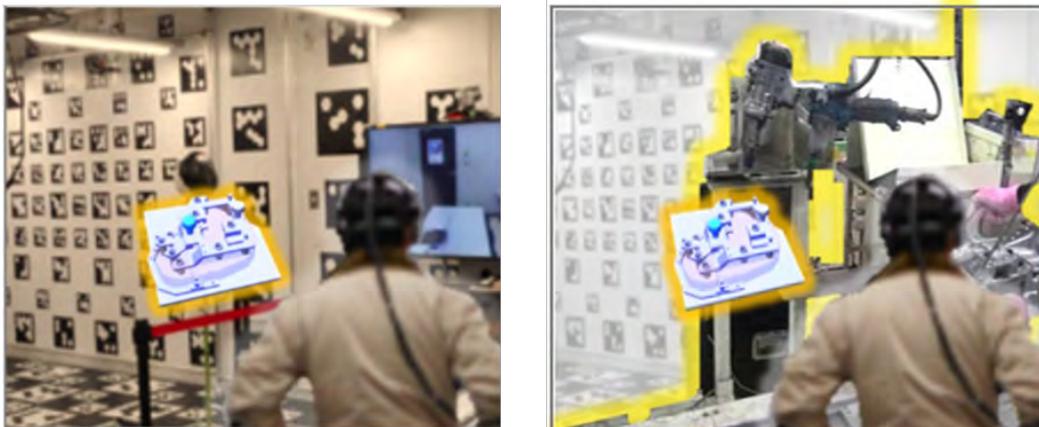


図 2-17 有効性検証

そこで、当社では、MR システムを工場現場に持ち込み、既存設備と仮想治具を組み合わせた MR システム有効性検証（PoC/Proof of Concept）を実施した（図 2-18 工場での活用検証）。



図 2-18 工場での活用検証

この PoC では、既存の工程設備に新たな作業治具を追加する際に、治具をどの部分に配置すると最も作業しやすいかの評価を行った。

結果、設計者の提案と異なる位置や向きについて、作業者自らの意見を反映しながら設計の変更を実施できるようになり、実際の作業者と現物設備及び仮想物を組み合わせた MR システムの有効性を実証できた。

### 2.2.2 MR システム利用における問題

PoC の実施により工場現場へ MR を持ち込み活用することの有効性を証明できたが、こ

のプロセスを定常業務化する上で以下の問題が顕在化している。

表 2-1 工場活用時の問題及び問題解決のための検討項目

	問題	問題解決のための検討項目
1	HMD 装着者の安全確保のために、HMD とサーバを接続する光ファイバーケーブルを複数人で取り回す必要がある。	MR システムの無線化（HMD 装着者単独作業の実現）。
2	HMD 光ファイバーケーブル長に限界があり、移動可能範囲や検証可能範囲が制限されている。	MR システムの無線化（HMD 装着者移動範囲及び検証可能範囲の拡大）。
3	MR システムを都度移設して利用しなければならず、準備・撤収に時間がかかる（MR システムは高価であり、当社では保有台数が少ない等の理由による）。	MR システム導入及び活用に係る運用プロセスの見直し。
4	工場現場には高精細・大容量の映像データをやり取りするための十分な無線ネットワーク環境（範囲とスピード）が整備されていない（高速無線ネットワーク導入ための費用がかかる、電波干渉の調整が必要となる等の理由による）。	高精細・大容量の映像データ及び MR 合成映像データをネットワーク上でやり取りするネットワークの検討。

これらの問題を総合的に解決するため、当社では、MR システムと超高速・超低遅延・多数同時接続という特徴を持つローカル 5 G を組み合わせた検証が必要となると考えている。

また、上記の内容を踏まえ、当社が抱える問題及び工場分野全体の地域課題を解決に導くにあたり、本調査検討において検討すべき課題を「2.3.1 当社が認識している地域課題」に記載した。

## 2.3 地域課題等

### 2.3.1 当社が認識している地域課題

地域製造業においては、人手不足解消（生産効率化・省人化）及び多様なニーズ（多品種少量生産）へ対応することの競争力強化が求められている。地域製造業の課題を以下に示す。

- ① ものづくりの現場においては、熟練技工人等のスキルを活用する等、属人的な力に頼っていた現状がある。現在、技工人の高齢化や後進育成がなかなか進まない状況により、後継者不在問題や人手不足が深刻化している。
- ② 一般に、平日日中帯等の工場稼働中には、現場の改善活動を行うことはできない。そのため、稼働していない休日に出勤して対応する等、生産現場における制約により、

工場における働き方改革が進んでいない。

- ③ 消費者ニーズの多様化により、異分野を複合した商品開発や、多品種少量生産に対応していく必要があり、ICT を活用し生産準備工程や開発工程を効率化する必要に迫られている。
- ④ 新型コロナウイルスの流行に伴い、製造工場等への出張に制限が発生し、関係者が集合した形式で各種検討・実作業を進めることが困難となった。そのため、検討・実作業の品質が低下し、業務のやり直しが増加している。

### 2.3.2 本調査検討の目的及び検討すべき課題

本調査検討は、「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」の工場分野において、特に製造現場の人材不足や、熟練技術の承継及び労働環境の改善等の課題解決に向けて、多品種少量生産を行う製造現場の生産工程にローカル5Gの導入を促進することが目的である。

具体的には、金属製設備・部材等の環境下にある工場におけるローカル5Gの電波伝搬特性の解明及び課題解決システムによる具体的なアプリケーション（MR 技術を活用した生産設備導入事前検証、遠隔作業支援）を想定したMR等の端末における映像伝送等に基づくローカル5Gの性能評価を実施することが目的となる。

また、「2.2 当社におけるMRシステムの活用」に基づき、MRシステムを活用するに当たり、当社が認識している課題と工場内にローカル5G環境を展開した際に検討すべき特有の課題等を踏まえ、MRシステムのローカル5G化を実現するために検討すべき課題を以下に示す。

#### (1) 工場現場へのMRシステム及びローカル5G導入を実現するための技術課題

- ・ ローカル5Gを用いてMRシステムとHMD間における高精細・大容量の映像データ及びMR合成映像データをネットワーク上でやり取りする仕組みの構築。
- ・ 上記を遅延なくやり取りするための映像圧縮・伸長技術等の実現。
- ・ HMD装着者の移動範囲並びに検証可能範囲を拡大するための、HMD装着者が単独で作業可能なハードウェア構成等の実現。
- ・ 屋内・工場現場においてMRシステムを活用するに当たり求められる、ローカル5Gの電波伝搬特性や性能の実現。

#### (2) MRシステム及びローカル5Gを展開するための制度面・運用面の課題

- ・ MRシステム及びローカル5Gの工場現場導入のために必要となる、制度や運用プロセスに関する課題の解決。
- ・ 今後のMRシステム及びローカル5G普及展開。

本調査検討は、当社が認識している課題を解決に導くための各種評価、検証、具体的な解

決方策の検討等を行うものである。

### 2.3.3 課題解決による期待効果

MR システムのローカル5G化により、従来できなかった、生産設備開発工程における生産設備導入前の作業姿勢検証、工場現場での既存の設備や工具などの現物確認とバーチャルの治具の組み合わせ検証が可能となる。これを踏まえ、当社は以下のとおり地域課題の解決が期待できると考えている。

- ・ **MR** システムを工場現場で活用することにより、既存の作業の効率化が実現できる。さらに、熟練技術者による遠隔からの現場への作業支援が可能となり、後進育成、高齢者の就労促進、人手不足の解消へとつながることが期待できる。
- ・ **MR** システムの無線化により安全性・利便性が向上することで、現場への設備導入等を短時間で実施可能となる。休日出勤を伴わずに効率よく現場改善活動を実施し、工場の働き方改革に貢献することができる。

超高速・超低遅延・多数同時接続という特徴を持つ5Gと**MR**技術を組み合わせることにより、「生産設備の導入等における事前検証の効率化」及び「遠隔作業支援」の実現を目指す。

### 3. 実証環境

MR システムのローカル 5 G 化（現状の有線接続から 5 G による無線化）による、生産設備開発工程における生産設備導入前の作業姿勢検証の効率化及び遠隔からの熟練技術者の支援による生産性向上の実現を検証するためのネットワークシステムについて、4.6GHz～4.9GHz（以下「4.7GHz 帯」という。）及び 28.2GHz～29.1GHz（以下「28GHz 帯」という。）に対応したローカル 5 G 基地局と端末を設置し、ローカル 5 G のネットワーク環境及び本実証のための MR システムの環境を構築した。

#### 3.1 ネットワーク構成

ローカル 5 G では、4.7GHz 帯と 28GHz 帯を利用できるよう制度化が予定されている（一部 28GHz 帯は先行して制度化済み）。4.7GHz 帯は、4G LTE と同様に 6GHz 帯以下の周波数帯であり、28GHz 帯と比べ遮蔽物を回り込む性質が強く、広いエリアをカバーすることができると思定される。また、28GHz 帯は、直進性が高く遮蔽物を回り込む性質が弱いいため、広いエリアをカバーすることは難しいと思定されるが、広い帯域幅を確保できることから大容量通信に適していると考えられる。

工場環境下でのローカル 5 G によるネットワークの導入においては、4.7GHz 帯、28GHz 帯のそれぞれの特徴を正しく把握し、ローカル 5 G ネットワークで利用するアプリケーション特性やコスト面等とのバランスを考慮していく必要がある。また同様に、MR システムのローカル 5 G 化においても、4.7GHz 帯、28GHz 帯のそれぞれの特徴を踏まえることが重要であるため、本調査検討においては、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯それぞれに対応したローカル 5 G のネットワーク環境を構築した。

また、各周波数帯の具体的な選定理由については以下の通り。

##### ① 4.7GHz 帯：

4.7GHz 帯を工場内で検証するにあたり、工場内では MR システムや IoT といった様々なアプリケーションに使用されることが想定されることから、その要求仕様に合わせて適切な UL/DL 比を設定できることが望ましい。また、今後は工場内の複数箇所でも MR システム等のアプリケーションを利用する可能性もあるため、本実証実験では、UL/DL 比が柔軟に設定でき、かつ広く工場内をカバー可能となる 4.7GHz 帯ローカル 5G システムを採用した。

##### ② 28GHz 帯：

28GHz 帯では、400MHz の広帯域が利用でき、特にダウンリンクは 1Gbps を超えた大容量通信が可能であることから、MR システムの映像伝送特性評価に適している。また、28GHz 帯の電波は直進性が高いことから遮蔽物の影響を受けやすいとされているが、実際の工場環境下で活用できるかどうか電波伝搬特性の観点からも知見の獲得が必要となるため、本実証実験では、28GHz 帯ローカル 5 G を採用した。

### 3.1.1 使用機器（ネットワーク）

本実証のネットワークシステムにおいては、4.7GHz 帯に対応するエイビット社製 Stand Alone 方式（以下「SA 方式」という。）のローカル 5 G 基地局を 1 局（独自の技術実証時は 2 局設置する）、28GHz 帯に対応するノキア社製 Non Stand Alone 方式（以下「NSA 方式」という。）のローカル 5 G 基地局を 2 局設置する。また、28GHz 帯の基地局は NSA 方式のため、アンカーバンドとして 2.5GHz 帯のノキア社製自営 BWA 基地局を 1 局設置する。

また、本実証のネットワークシステムにおける端末は、4.7GHz 帯に対応するエイビット社製端末を 1 台用意し（独自の技術実証時は 2 台用意する）、28GHz 帯及び 2.5GHz 帯に対応するシャープ社製端末を 4 台用意する。

使用する機器の一覧を以下に示す。

表 3-1 使用機器一覧

項目	4.7GHz 帯	28GHz 帯
概要	エイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムを利用する。SA 方式の 5 G システムとなる。	ノキア社製 Nokia Digital Automation Cloud サービス（以下「NDAC」という。）にて 28GHz 帯ローカル 5 G システムを利用する。NSA 方式となり、アンカーとして自営 BWA 基地局を設置する。
ローカル 5 G 基地局等無線通信システム	<p><b>【機能と役割】</b> エイビット社製 AU-500gNB を使用。ローカル 5 G の 4.7GHz 帯の無線通信が可能。帯域幅が 100MHz のため、高速通信が可能。</p> <p><b>【数量】</b> 1 局 （独自の技術実証時は 2 局設置）</p> <p><b>【設置形態（固定・可搬等）】</b> 固定</p>	<p><b>【機能と役割】</b> ノキア社製 AWEUA を使用。ローカル 5 G の 28GHz の無線通信が可能。帯域幅が 400MHz と広いため、超高速通信が可能。</p> <p><b>【数量】</b> 2 局</p> <p><b>【設置形態（固定・可搬等）】</b> 固定</p>
端末	<p><b>【機能と役割】</b> エイビット社製 AU-500gNB を使用。ローカル 5 G の 4.7GHz 帯の無線通信が可能。Ethernet ポートを有し課題解決検証に向けたアプリケーションとの接続が容易。</p> <p><b>【数量】</b> 4 台</p> <p><b>【設置形態（固定・可搬等）】</b></p>	<p><b>【機能と役割】</b> シャープ社製ローカル 5 G 対応無線ルータを使用。ローカル 5 G の 28GHz 帯及び自営 BWA の 2.5GHz 帯の無線通信が可能。Wi-Fi 接続、USB 接続機能並びに Ethernet ポートを有し課題解決検証に向けたアプリケーションとの接続が容易。</p> <p><b>【数量】</b> 4 台</p>

	可搬	【設置形態（固定・可搬等）】 可搬
コアネットワーク	<b>【機能と役割】</b> エイビット社製 AU-500 5GC を使用。SA 方式の 5GC 機能を提供。  <b>【数量】</b> 1 台  <b>【設置形態（固定・可搬等）】</b> 固定	<b>【機能と役割】</b> ノキア社製 NDAC を使用。NSA 方式に対応した EPC 機能を提供。クラウドとの通信断に備えエッジサーバにて機能代用可能な構成を取る。  <b>【数量】</b> 1 サービス（NDAC） 1 台（エッジサーバ）  <b>【設置形態（固定・可搬等）】</b> 固定

また、機器の調達先を以下に示す。

表 3-2 調達先一覧

使用する無線機器の種類	機器メーカー名
ローカル 5 G 4.7GHz 帯 基地局 (gNB)	株式会社エイビット
ローカル 5 G 4.7GHz 帯 端末 (UE)	株式会社エイビット
ローカル 5 G 28GHz 帯 基地局 (gNB)	ノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社
自営 BWA 2.5GHz 帯 基地局 (eNB)	ノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社
ローカル 5 G 28GHz 帯/ 自営 BWA2.5GHz 帯 端末 (UE)	シャープ株式会社

ローカル 5 G の性能評価のために利用するアプリケーションの概要を以下に示す。

表 3-3 ローカル 5 G 性能評価用アプリケーション

項目	詳細
ローカル 5 G 性能評価用アプリケーション	<b>【概要】</b> オープンソースソフトウェアとして開発されている、ネットワークパフォーマンス測定ツールである iPerf を使用する。  <b>【機能と役割】</b> ネットワークの伝送速度及び遅延を測定するツール。クライアントサーバ型の構成を取る。  <b>【数量】</b> サーバ (1 台)、クライアント (1 台)

	<p>【設置形態（固定・可搬等）】</p> <p>サーバ（固定）、クライアント（可搬）</p>
--	---

### 3.1.2 機器設置場所

ローカル 5G 機器の設置場所を以下に示す。

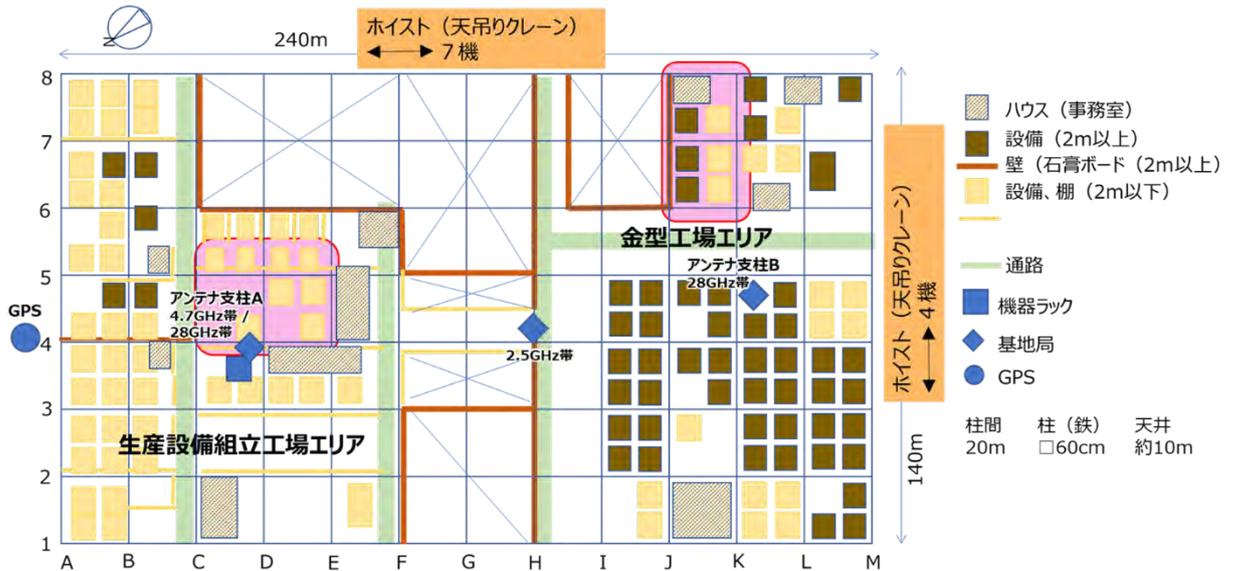


図 3-1 機器設置場所

① ラック設置位置：

貞宝 第 1 工場 C4 柱-D4 柱間

② 基地局設置位置：

貞宝 第 1 工場 C4 柱-D4 柱間 アンテナ支柱 A

貞宝 第 1 工場 K6 柱-K7 柱間 アンテナ支柱 B

貞宝 第 1 工場 H4 柱天井付近 NSA アンカーの自営 BWA の eNB とアンテナ

アンテナ支柱は、C4-D4 間（アンテナ支柱 A）と K6-K7 間（アンテナ支柱 B）に設置した。アンテナ支柱 A には、4.7GHz 帯の gNB とアンテナ、28GHz 帯の RRH を、アンテナ支柱 B には、28GHz 帯の RRH を設置した。

アンテナ支柱の寸法を含む詳細を以下に示す。





図 3-8 アンテナ支柱 A



図 3-4 アンテナ支柱 B

また、NSA アンカーである自営 BWA の eNB とアンテナは、工場内全体をカバーできる場所（H4）に設置した。

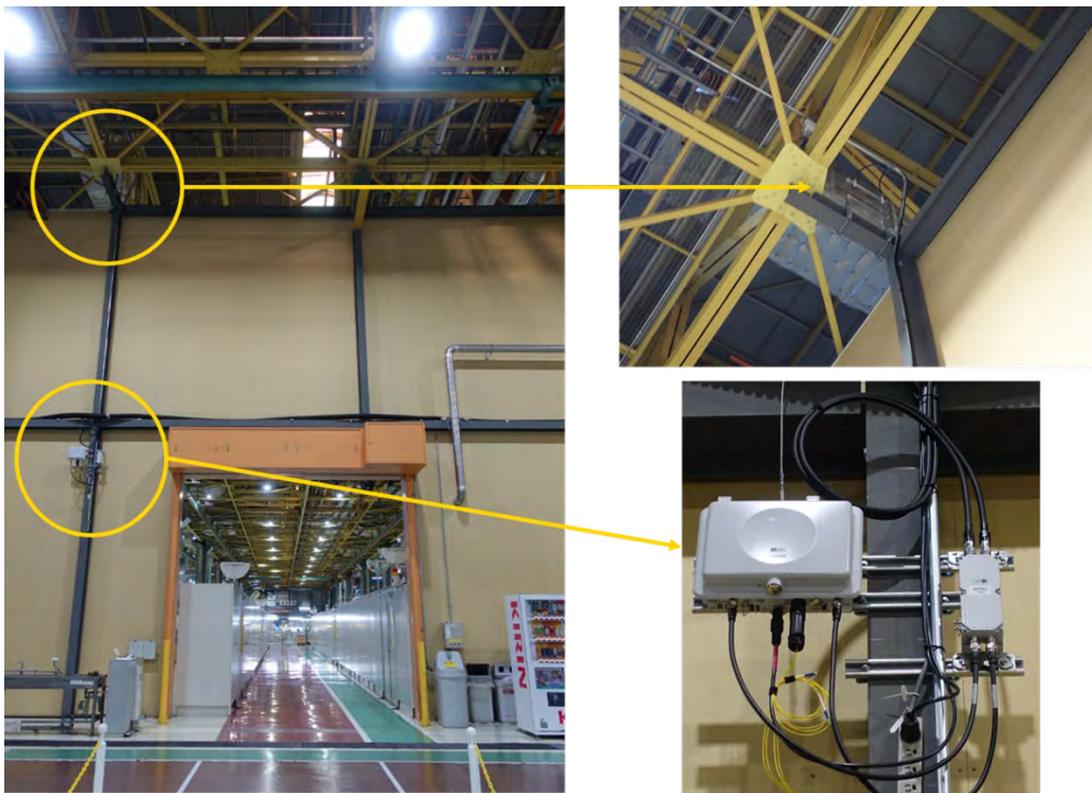


図 3-5 NSA アンカー

C4-D4 間には、実験用の機器を収容するラックを設置した。ラック内には、ネットワーク機器、4.7GHz 帯の 5GC サーバ、28GHz 帯の BBU、NSA アンカーの LTE EPC サーバ、クラウドサービス接続のインターネット回線機器を収容し、実証期間中稼働させた。

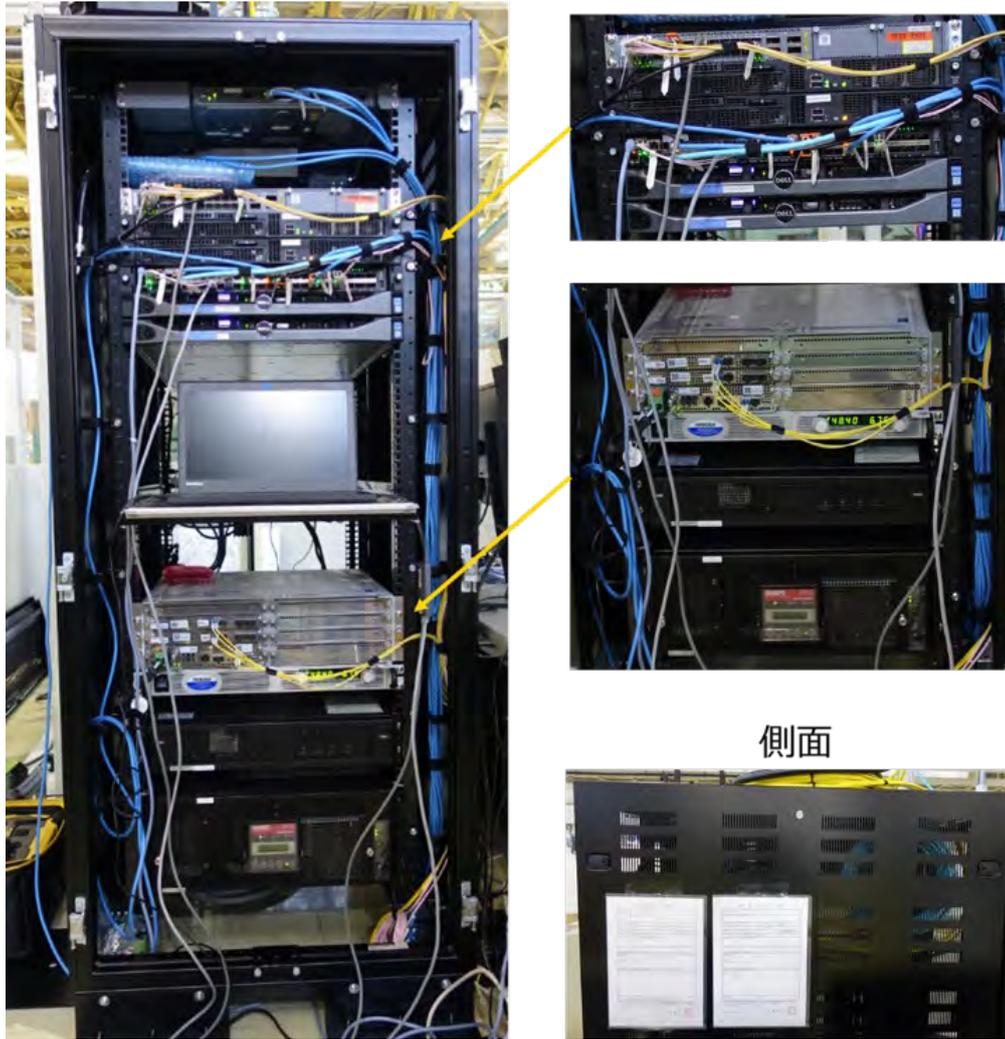


図 3-6 機器収容ラック

また、工場屋外には、28GHz 帯設備（NSA 構成）における時刻同期のための GPS アンテナを設置した。



図 3-7 GPS アンテナ

### 3.1.3 基地局のエリアカバレッジ

基地局のエリアカバレッジについては、実験試験局取得時に提出をした実験計画書への記載内容を踏まえて記載している。なお、総務省審査基準式に基づいた算出結果に関しては、「5. ローカル 5G の性能評価等の技術実証」に記載する。

#### 3.1.3.1 4.7GHz 帯のカバーエリア

4.7GHz 帯カバーエリアを、以下の算出式に基づき算出した。なお、屋内伝搬損失は、距離の 3.5 乗に反比例し、電力が減衰するものとして計算した。

$$L = (4\pi f / c)^2 d^{3.5}$$

$$L[\text{dB}] = 20\log(4\pi/c) + 20\log(f) + 35\log(d)$$

※ここで、 $c[\text{m/s}]$ は光速、 $f$ は周波数で  $f = 4.8 \times 10^9 [\text{Hz}]$

あわせて、使用する機器の受信感度として、 $-65\text{dBm}$  及び基地局の送信空中線電力  $18\text{dBm}$  ( $60\text{mW}$ ) を用いた。算出結果より、4.7GHz 帯のカバーエリアを以下に示す。

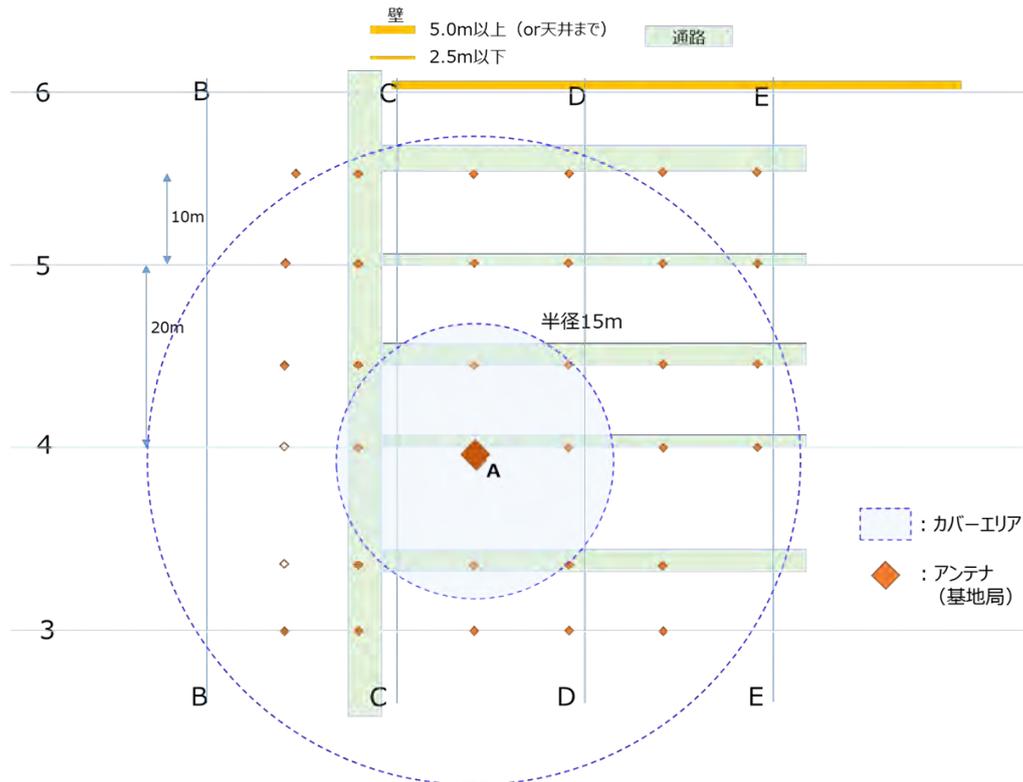


図 3-8 4.7GHz 帯のカバーエリア

### 3.1.3.2 28GHz 帯のカバーエリア

28GHz 帯の屋内伝搬損失を、ITU-R P.1238-10 屋内伝搬モデル<sup>ix</sup>をベースに計算した。また、基地局の送信空中線電力及び端末での受信電力が -80dBm となる範囲を計算しカバーエリアとした。

$$L [dB] = 20 \log f + N \log d + L_b - 28 + \Delta L(W\Phi)$$

表 3-4 計算に使用した値

変数	値
f [MHz] 使用する周波数	28,895.76 [MHz]
N : 距離損失係数	29.9 (28GHz/Office/NLOS)
L <sub>b</sub> : 石膏ボード透過損失	13 (5GHz/Residencial/apartment [concrete wall])
ΔL(WΦ) : 指向性アンテナ差分	5.23

算出結果より、28GHz 帯のカバーエリアを以下に示す。

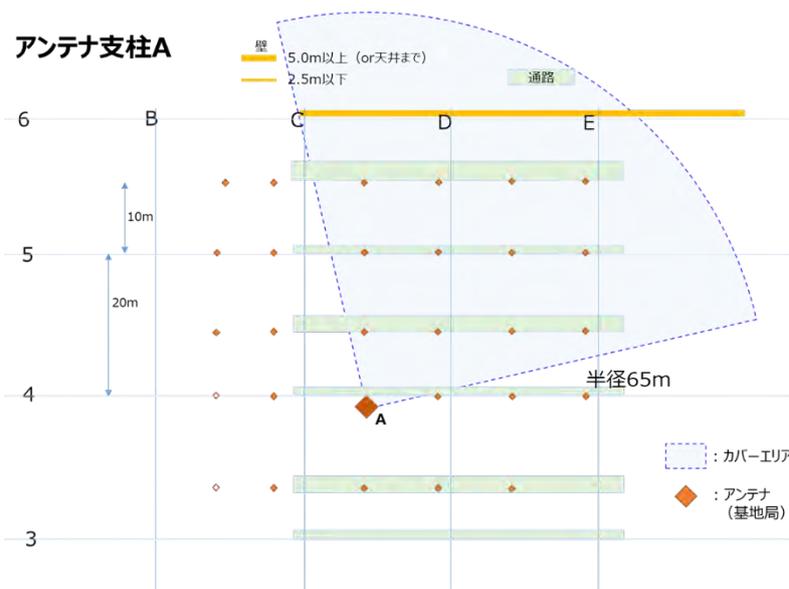


図 3-9 28GHz 帯のカバーエリア (アンテナ支柱 A)

<sup>ix</sup> <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-10-201908-I/en>

ITU 公式サイト (令和 3 年 3 月 25 日 (木) 取得)

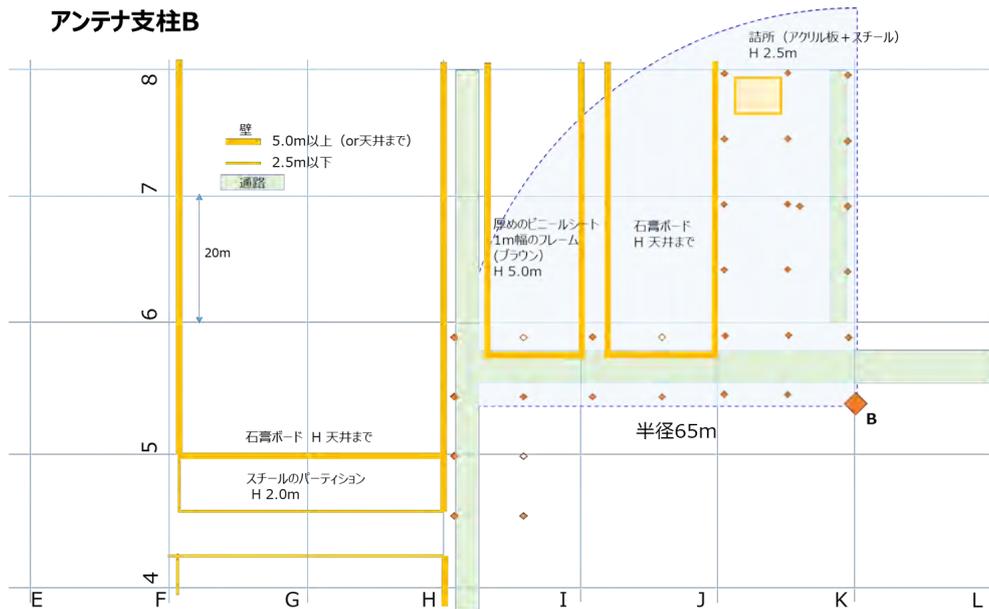


図 3-10 28GHz 帯のカバーエリア (アンテナ支柱 B)

### 3.1.4 構築スケジュール

実証環境の構築スケジュールを以下に示す。

表 3-5 実証環境の構築スケジュール

日時	内容
令和 2 年 10 月 25 日 (日)	電源取り出し工事
令和 2 年 11 月 7 日 (土)	アンテナ架台設置工事
令和 2 年 11 月 21 日 (金) ~ 22 日 (日)	UPS 設置、ラック設置、NW 機器設置、4.7GHz 帯基地局設置工事
令和 2 年 11 月 28 日 (土)	GPS アンテナ設置工事 (同軸ケーブル)
令和 2 年 12 月 19 日 (土) ~ 20 日 (日)	28GHz 帯/2.5GHz 帯基地局設置工事、GPS 装置設置工事
令和 2 年 12 月 26 日 (土)	アンテナ支柱 B 防護柵設置作業、養生作業
令和 3 年 1 月 23 日 (土) ~ 24 日 (日)	4.7GHz 帯基地局交換作業

なお、実験試験局免許取得に関連する事項は、「1.5.1.3 免許取得スケジュール」に記載している。

### 3.1.5 ネットワーク構成の詳細

ローカル 5G ネットワーク全体の論理構成図及び物理構成図を以下に示す。なお、また、各機器のインターフェースについても図中に併せて記載している。

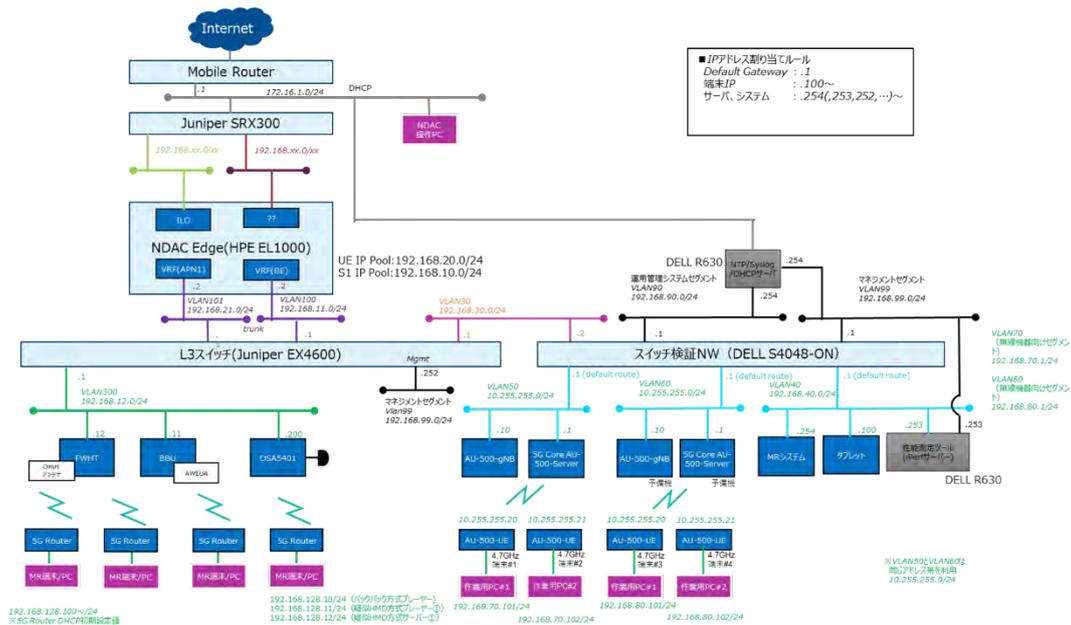


図 3-11 論理構成図

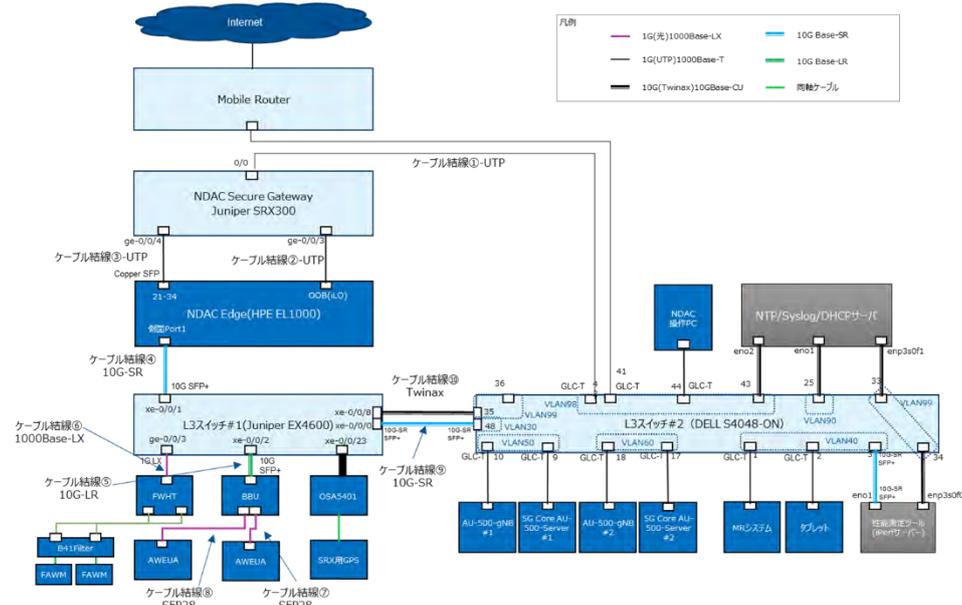


図 3-12 物理構成図

### 3.1.5.1 ネットワーク構成詳細 (4.7GHz 帯)

ローカル 5 G 4.7GHz 帯の構築にあたり、SA 方式のエイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムを採用した。4.7GHz 帯システムは、5GC 機能を提供する AU-500-Server と、gNB 機能を提供する AU-500 gNB、UE 機能を提供する AU-500UE から構成される。本実証にて使用するローカル 5 G 4.7GHz 帯システムの特徴を以下に示す。

また、各製品の詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-01-01- [製品カタログ] エイビット\_AU-

500System 機器仕様 (4.7GHz 帯基地局・端末) .pptx」にも記載する。

(1) 4.7GHz 帯システムの物理構成

エイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムのシステム構成を以下の図に示す。

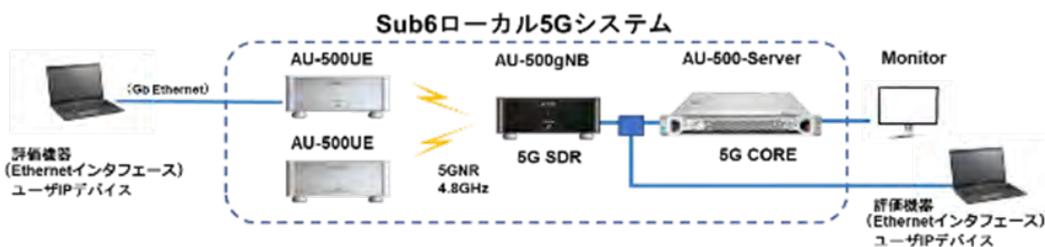
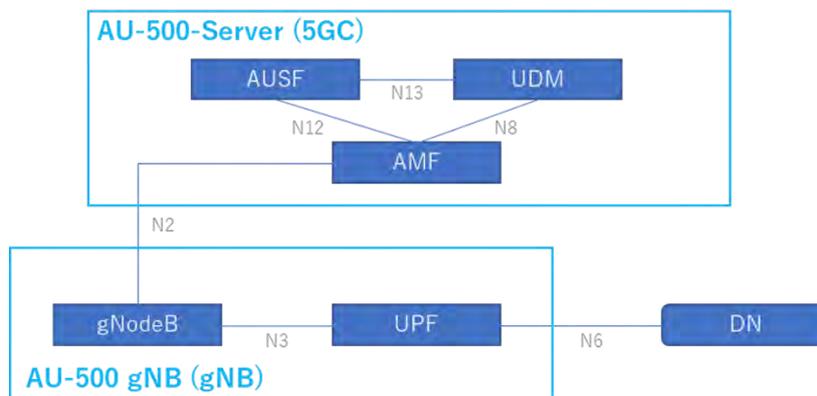


図 3-13 4.7GHz 帯システムの物理構成

(2) 4.7GHz 帯システムの論理構成

エイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムの論理構成を以下に示す。



※プレスケジュール機能を採用することにより、セッション管理 (SMF) を簡略化している。

図 3-14 4.7GHz 帯システムの論理構成

論理構成における各機能を以下に示す。

表 3-6 4.7GHz 帯システム機能説明

No.	装置	機能	説明
1	コア装置 (AU-500-Server)	AMF (Access and Mobility Management Function)	端末管理 (登録、接続)、モビリティ管理機能
2		AUSF (Authentication Server Function)	端末認証機能

3		UDM (Unified Data Management)	加入者情報管理機能
4	5 G 基地局 (4.7GHz 帯)	gNodeB (next generation NodeB)	5 G NR 基地局
		UPF (User Plane Function)	ユーザー・パケットの転送、DN への接続点機能
5	外部機器	DN (Data Network)	接続するデータネットワーク

また、コアネットワーク性能を以下に示す。

- ・ 端末同時接続数：100 台（※AU-500UE のみ接続可。また、AU-500UE のスループットを落としたときの接続数となる）
- ・ 最大スループット：70Mbps

### (3) 4.7GHz 帯システムの特徴

エイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムの特徴を以下に示す。

#### 1) SA 方式

「図 3-15 SA 方式イメージ」に示すとおり、ネットワークシステムを構成するコンポーネントは全て 5 G 専用のコンポーネントとなる。5 G 単独での通信が可能であり、5 G 回線で制御プレーンとユーザプレーンを扱う。また今後、5GC により、ネットワークスライシング等の 5 G 機能が利用できるようになる。

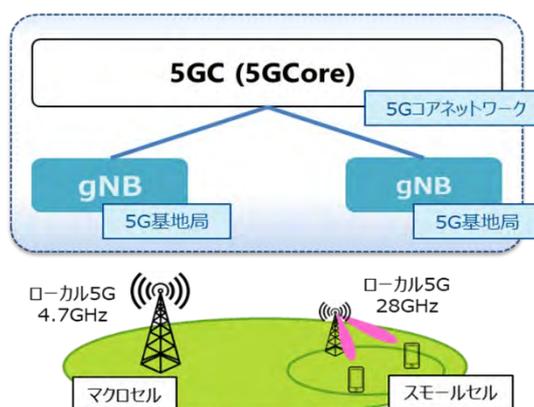


図 3-15 SA 方式イメージ

#### 2) PoC システム

本実証で使用する機器は PoC システムとして構成されており、5GC、gNB、UE とローカル 5 G 通信を実現するための必要なコンポーネントがエイビット社より提供され、ローカル 5 G 通信が担保されている。このため利用者は UE と gNB や 5GC との相互接続性の

問題を回避しローカル 5 G 通信を利用することができる。

### 3) 外部接続インターフェース

UE は、RJ45 コネクタを有しており、MR システムと Ethernet で接続することが可能となる。これにより、MR システムにおける通信モジュール開発を行う必要がない。また、gNB も RJ45 コネクタを有し、外部装置と Ethernet で接続することが可能である。あわせて、UPF 機能を搭載しており 5GC を通さずに直接外部機器に接続し、低遅延を実現している。

### 4) ソフトウェア及び SDR (Software Defined Radio) による実装

5GC は、汎用の IA サーバ上にソフトウェアで実装されており、今後の 3GPP のリリースにおいて、ソフトウェアにより機能を追加実装することが可能となっている。

既に gNB 及び UE の機能は、SDR 技術により無線部分においてもソフトウェアで実装されており、無線パラメータの変更を柔軟に行うことができる。これにより、PoC システムとして必要に応じて装置の特性を変えることができるよう実装されている。

#### (4) 4.7GHz 帯システム機器外観

エイビット社製 4.7GHz 帯ローカル 5 G PoC システムの各装置の外観を以下に示す。



図 3-16 4.7GHz 帯システム機器外観

### 3.1.5.2 ネットワーク構成詳細（28GHz 帯及び 2.5GHz 帯）

ローカル 5 G 28GHz 帯の構築にあたり、NSA 方式のノキア社製 NDAC サービスを採用した。また、NSA 方式のアンカーとして自営 BWA 基地局を設置した。なお、端末は、ローカル 5 G の 28GHz 帯及び自営 BWA の 2.5GHz 帯の無線通信が可能であるシャープ社製ローカル 5 G 対応無線ルータを使用した。本実証にて使用したローカル 5 G 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システムの特徴を以下に示す。

また、各製品の詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-01-02- [製品カタログ] ノキア\_28GHz 帯システム機器仕様（28GHz 帯基地局）」にも記載する。

#### (1) NDAC システムについて

ノキア社製 NDAC サービスは、複雑で難易度が高いモバイルコア装置、基地局の運用及び監視をクラウドサービスとして機能提供を受けることができるクラウドサービスである。このサービスを利用することで、ローカル 5 G 利用者は、運用性の問題を回避しローカル 5 G 通信を利用することができる。

NDAC サービスは、遠隔監視・運用機能を提供する NDAC クラウド、EPC 機能を提供するコア装置、ローカル 5 G 28GHz 帯 gNB 機能を提供する基地局と、自営 BWA 2.5GHz 帯 eNB 機能を提供する基地局から構成される。

NDAC サービスのシステム構成を以下に示す。

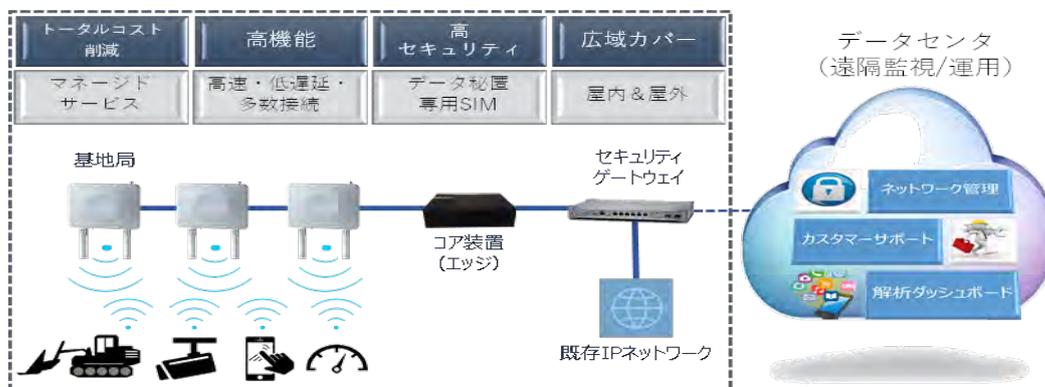


図 3-17 NDAC サービスシステム構成

また、NDAC は、セキュリティゲートウェイを利用した VPN ネットワークの構築、SIM カードを活用した認証によるユーザーの制限、NDAC クラウドデータセンタからのシステム遠隔監視・運用制限などにより、不正利用およびデータ流出などのサイバーセキュリティ対策を考慮したシステムとなっている。

#### (2) 28GHz 帯システムの物理構成

ノキア社製ローカル 5 G 28GHz 帯システム及び 2.5GHz 帯システムの物理構成を以下に示す。

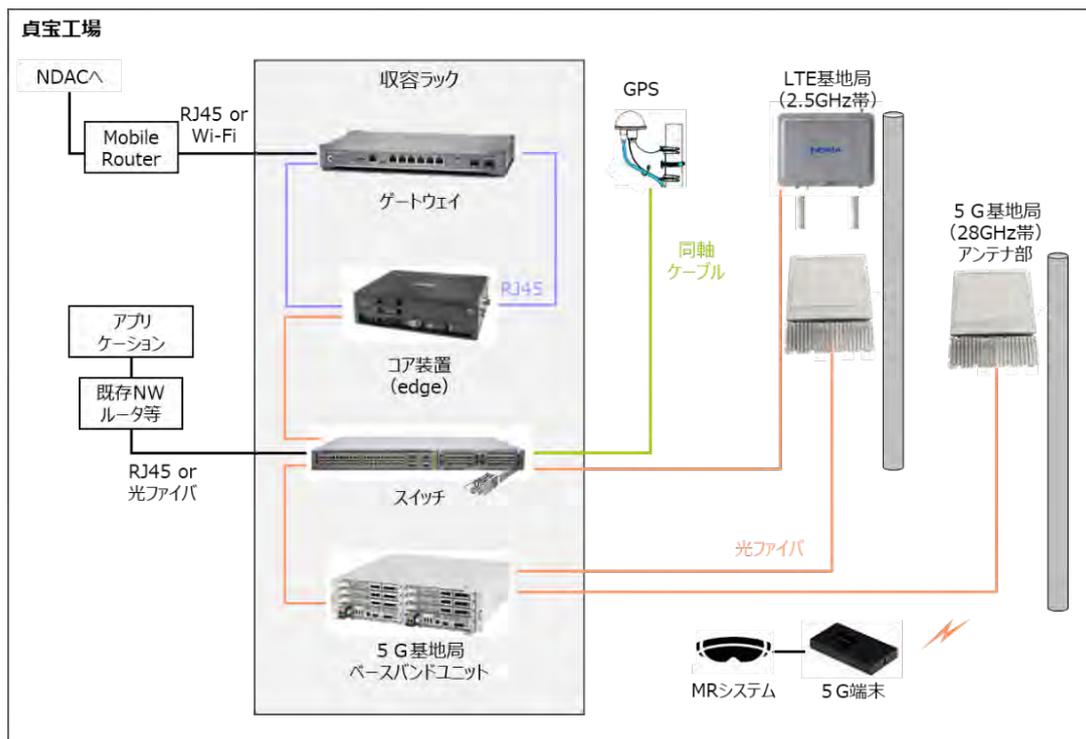


図 3-18 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システムの物理構成

貞宝第 1 工場内で EPC 機能を提供するコア装置 (Edge)、NDAC クラウドと安全に接続する VPN ゲートウェイ装置 (インターネット VPN を使用)、ローカル 5 G 28GHz 帯 gNB 機能を提供する基地局 (ベースバンドユニット (BBU) とアンテナ部 (RRH) に分かれる構成を取る。)、自営 BWA 2.5GHz 帯 eNB 機能を提供する基地局、これらネットワーク機器を接続するスイッチで構成される。端末は、ローカル 5 G の 28GHz 帯及び自営 BWA の 2.5GHz 帯に対応するシャープ社製ローカル 5 G 対応無線ルータを使用する。

ローカル 5 G 28GHz 帯システムの物理構成の各装置の機能説明を以下に示す。

表 3-7 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システムの機能説明 (物理構成)

No.	装置	機能	特徴
1	NDAC	システムの運用状態や障害状況を遠隔のデータセンターから監視する。また、遠隔によるシステム修復作業も可能である。 データセンターを経由してソフトウェアをアップデートする。	複数の工場に展開する際に、各工場メンテナンスをする必要がなく、運用管理コストを低減する。 また、常に最新のソフトウェアにアップグレードすることが可能である。
2	コア装置	端末の位置情報を管理し、ハンドオーバー等の移動制御、ページングによる呼び出し等を行う。また、正規の端末であるか認証を行う。	ローカル 5 G の高速通信に対応できるよう 10Gbps のインターフェースを持つコア装置を選定している。将来、MR の端末台数が増えることを見越して収容数

			に余裕のあるものを選定した。
3	基地局装置 (2.5GHz 帯)	自営等 BWA の無線通信が可能である。また、NSA 構成のローカル 5 G システム (28GHz 帯) に対しては、制御信号を扱うアンカーの役割を担う。	28GHz 帯の無線通信において、遮蔽等の影響に対しても、LTE (自営 BWA) との Dual Connectivity によって、無線通信の維持が可能である。28GHz 帯のエリア外であっても、自営等 BWA としての無線通信は可能である。
4	基地局装置 (28GHz 帯)	ローカル 5 G の 28GHz 帯の無線通信が可能である。帯域幅が 400MHz と広いため、超高速通信が可能となる。	MR システムに必要となる下りスループットを満たしている。
5	5 G 端末 (28GHz 帯、2.5GHz 帯)	28GHz 帯及び 2.5GHz 帯の無線通信を受信することが可能となる。本調査検討ではシャープ製の端末を採用した。	本実証環境の無線要件に合致しており、課題実証に向けたアプリケーションとの接続が容易である。また端末から受信電力等のログを取得することが可能。
6	GPS アンテナ	工場屋外に設置され、時刻データを取得している。	様々な屋外環境にも対応可能な機器となる。

また、コアネットワーク性能を以下に示す。

- ・ 端末同時接続数：50 台以上/基地局
- ・ 最大スループット (理論値)：
  - 上り：140Mbps (1CC)
  - 下り：2132Mbps (4CC 合計)

### (3) 28GHz 帯システムの論理構成

ノキア社製ローカル 5 G 28GHz 帯システム及び 2.5GHz 帯システムの論理構成を以下に示す。

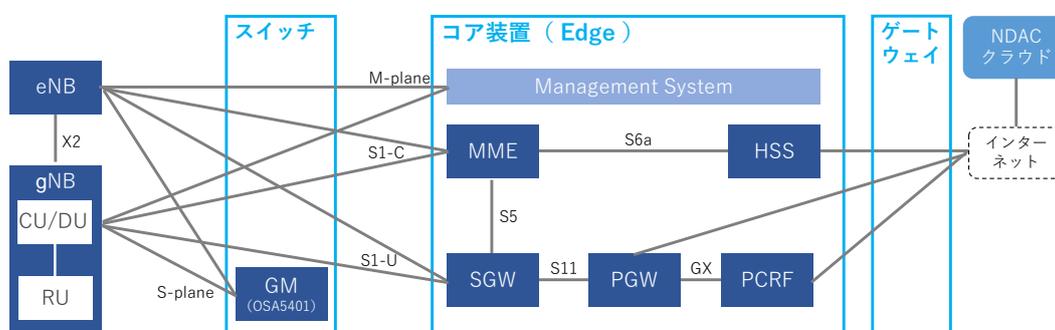


図 3-19 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システムの論理構成

NSA 方式となるため、システムは EPC を中心とした論理構成となる。論理構成における機能説明を以下に示す。

表 3-8 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システムの機能説明 (論理構成)

No.	装置	機能	特徴
1	コア装置 (Edge)	MME (Mobility Management Entity)	ネットワーク制御を扱う Control-Plane のアクセスゲートウェイとして機能する。
2		S-GW (Serving Gateway)	ユーザーデータの User-Plane を扱うゲートウェイとして機能する。
3		P-GW (Packet data network Gateway)	外部のインターネットや企業イントラネットなどに接続するためのゲートウェイとして機能する。
4		HSS (Home Subscriber Server)	ネットワークにおける加入者情報データベースであり、認証情報及び在圏情報の管理を行う。
5		PCRF (Policy and Charging Rules Function)	ユーザーデータ転送の QoS 及び課金のための制御を行う論理ノード
6	スイッチ	GM (Grand Master)	GPS 信号を各ノードに供給するグランドマスタークロックとして機能する。
7	LTE 基地局 (2.5GHz 帯)	eNodeB (evolved NodeB)	自営等 BWA (2.5GHz 帯) として端末と無線通信を行う。また、ローカル 5 G のアンカーとして端末と無線通信を行う。
8	5 G 基地局 (28GHz 帯)	gNodeB (next generation NodeB)	ローカル 5 G の基地局として 28GHz 帯の周波数で端末と無線通信を行う。

#### (4) 28GHz 帯システムの特徴

ノキア社製 28GHz 帯ローカル 5 G システムの特徴を以下に示す。

##### 1) NSA 方式

「図 3-20 NSA 方式イメージ」に示すとおり、ネットワークシステムを構成するコンポーネントは LTE コアネットワークである EPC を中心に構成される。LTE 回線で制御プレーンを扱い、5 G 回線でユーザープレーンを扱う。5 G NR に対応する gNB は EPC に接続され制御されるため、5GC が必要となるネットワークスライシング等の 5 G の独自機能は利用できない。

NSA 方式により自営 BWA 2.5GHz 帯基地局を用い工場内広域をカバーすることが可能となり、必要となる場所にローカル 5 G 28GHz 帯を組み合わせることで、超高速無線通信が可能となる。

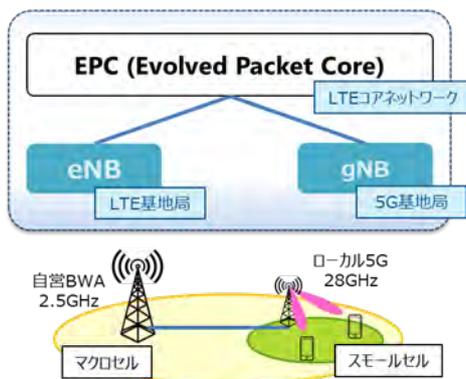


図 3-20 NSA 方式イメージ

## 2) 遠隔保守・運用

NDAC にて運用状況や障害発生状況を監視することにより保守運用が容易となり、以下のメリットを受けることができる。

- ・ 端末 SIM のアクティベーションや障害復旧操作など遠隔操作で対応可能となる。
- ・ 複数の工場に展開しても、遠隔のデータセンターを経由して、集中管理する拠点から専用ポータルサイトで保守・運用を行うことが可能となり、各工場に保守員を配備する必要がなくなる。
- ・ 遠隔からのソフトウェアアップデートにより、常に最新のソフトウェアを利用することが可能となる。

## 3) 高速通信

5 G NR 28GHz 帯に対応した RRH では、5 G NR の特徴でもあるビームフォーミング技術に対応しており超高速通信が可能となる。また、この技術は国内外の携帯電話事業者に採用されている。

## 4) 高セキュリティ

汎用的な携帯電話で活用されている高セキュリティ技術 (SIM によるユーザー認証や暗号化等) を実装している。この技術により、工場内でデータトラフィックが完結し、外部への漏えいを防ぐことができる。

## (5) 28GHz 帯基地局の装置外観

ノキア社製 28GHz 帯ローカル 5 G システムの各装置の外観を以下に示す。



コア装置(edge)



セキュリティゲートウェイ



スイッチ



LTE基地局(2.5GHz)



5G基地局(28GHz)アンテナ部



5G基地局(ベースバンドユニット)

図 3-21 28GHz 帯及び 2.5GHz 帯システム機器外観

#### (6) 28GHz 帯 端末の特徴

ローカル 5 G 28GHz 帯基地局は NSA 方式となるため、端末として、ローカル 5 G の 28GHz 帯及び自営 BWA の 2.5GHz 帯の無線通信が可能であるシャープ社製ローカル 5 G 対応無線ルータを採用した。本実証にて使用した 28GHz 帯端末の特徴を以下に示す。

また、製品の詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-01-03- [製品カタログ] シャープ\_ローカル 5G 対応ルーター端末仕様 (28GHz 帯端末)」にも記載する。

##### 1) 容易なアプリケーション接続

本実証環境の無線要件 (LTE アンカー：B41、5GNR ; n257 の NSA 対応) に合致しており、課題実証に向けたアプリケーションとの接続が容易である (RJ45 コネクタを有しており Ethernet 接続 (2.5G BASE-T) が可能)。

## 2) ログ取得

シャープ社製ローカル5G端末装置では、以下に示す図のように、開発用途としてログ取得PCをUSB接続することで、受信電力等のログを取得することができる。この機能を活用し、本実証において、実際に通信を行っている端末のデータを取得し評価検証を行うことができる。

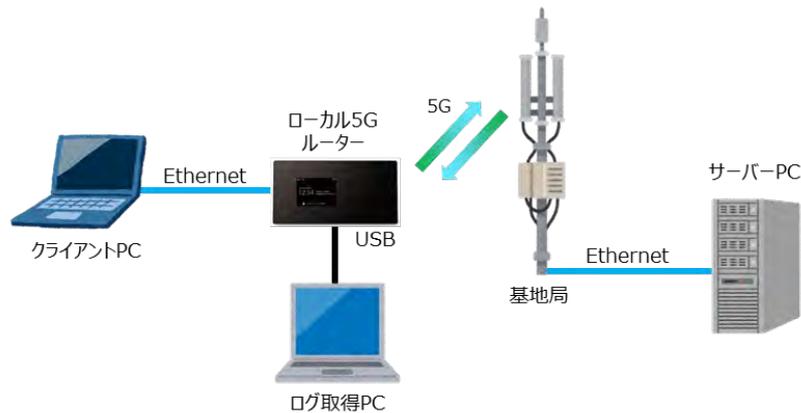


図 3-22 ログ取得イメージ

## 3) 採用実績

シャープ社製ローカル5G端末装置は、現時点で既に全国の通信事業者向けに販売を開始しているモバイル5Gルーター機器をベースとした端末となっており、安定した動作が期待できる。

また、端末を開発するシャープ社は5G端末装置の開発経験・実績並びに、過去映像伝送に関する実証試験の実績を有しており、本実証の実用化に向けて積極的な協力が可能である。

### (7) 28GHz 端末の仕様

シャープ社製 28GHz 帯ローカル5G端末の仕様を以下に示す。

表 3-9 ローカル5G 端末機器仕様

サイズ/質量	約 157×84×16mm/約 270g
ディスプレイ	約 2.4 インチ QVGA(320×240 ドット)
Wi-Fi	IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax
電池容量	4,000mAh
ローカル5G 対応周波数	n79(4.6~4.9GHz), n257(28.2~29.1GHz 帯) NSA 方式
ローカル5G 周波数組み合わせ	B39+n79, B41+n79, B41+n257

ローカル 5G 対応帯域幅	n79 : UL/DL 100MHz 幅 n257 : DL 100MHz×4 波まで UL 100MHz
ローカル 5G MIMO 対応	n79 : DL 4×4/UL 1×1 n257 : DL 2×2/UL 2×2
防水/防塵	×
有線 LAN	2.5GBASE-T×1
USB	USB3.0(Type-C)

### (8) 28GHz 帯端末の装置外観

シャープ社製 28GHz 帯ローカル 5 G 端末の外観を以下に示す。



図 3-23 28GHz 帯端末外観

## 3.2 システム機能・性能・要件

### 3.2.1 使用機器（アプリケーション）

「2.2 当社における MR システムの活用」に記載したとおり、当社では、MR システムとしてキャノン社製 MR システム「MREAL」を採用している。本実証における課題実証及び技術実証で使用するアプリケーション（MR システム）の概要を以下に示す。

また、製品の詳細は「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-01-04- [製品カタログ] キャノン\_MREAL 機器仕様（MR システム）」にも記載する。

表 3-10 課題実証用アプリケーション

項目	詳細
課題実証用アプリケーション（MR システム）	<p><b>【概要】</b> キャノン社製 MR システム、MREAL を使用。</p> <p><b>【機能と役割】</b> ビデオシースルータイプの HMD により現実空間と仮想空間を融合する MR 映像を体験することが可能。 MR システムにより仮想の設備を現実の設備と理解して実際と同じような作業検証ができる。</p> <p><b>【数量】</b> 1 セット</p> <p><b>【設置形態（固定・可搬等）】</b> 可搬</p>

### 3.2.2 MR システムの概要

MR システムは、HMD に搭載されたカメラで撮影する現実世界と、仮想世界の 3D CG 映像を、HMD の位置と姿勢に応じてリアルタイムで合成し、この MR 映像を HMD の表示パネルに投影することで、現実空間に仮想形状を表示することができる仕組みである。

MR システムの基本構成は、HMD と MREAL 基本ソフト（MREAL Platform）、PC から構成されるベースシステムと、HMD の位置や方向を把握するための仕組みであるヘッドトラッキング、MR 映像を表示する表示アプリケーションから構成される。MR システムの基本構成を以下に示す。

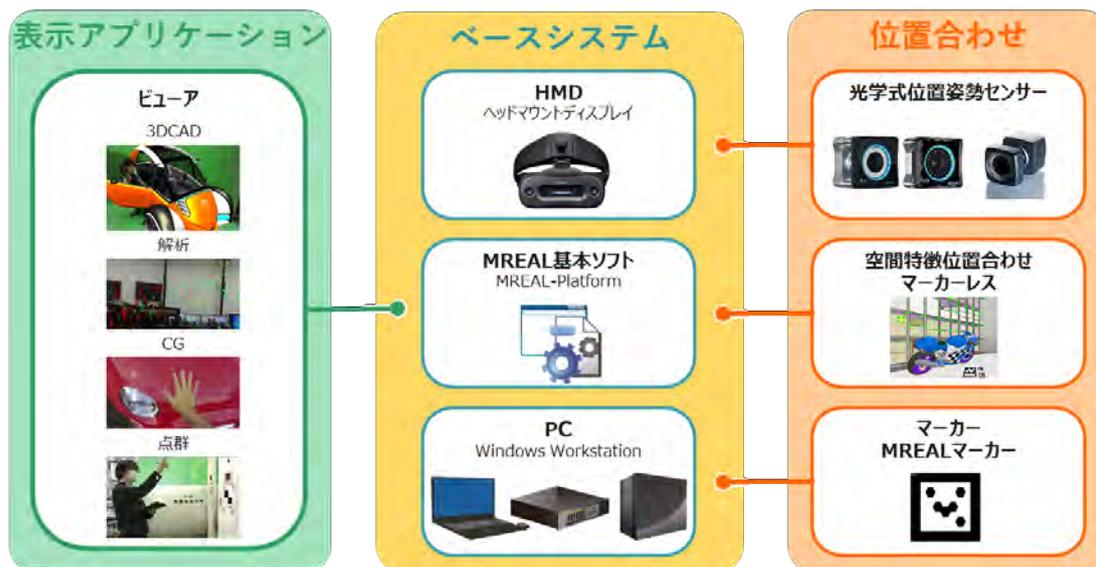


図 3-24 MR システムの基本構成

また、MR システムの構成要素を以下に説明する。

(1) ベースシステム - MREAL 基本ソフト (MREAL-Platform)

MREAL Platform はカメラで撮影した映像やヘッドトラッキングで得られた頭部の位置や方向の特定、位置情報から HMD に映し出す映像の合成を担う。

(2) 表示アプリケーション

キャノン社純正の Visualizer やサードパーティの表示アプリケーション、ゲームエンジン等が使用でき、利用する業務によって選択する。

HMD に搭載されたカメラで撮影する現実世界 (「図 3-25 表示アプリケーションの動き」中の①の映像。以下「撮像映像」という。) と、仮想世界の 3D CG 映像を、HMD の位置と姿勢に応じてリアルタイムで合成し (「図 3-25 表示アプリケーションの動き」中の②)、この MR 映像を HMD の表示パネルに投影する (「図 3-25 表示アプリケーションの動き」中の③)。

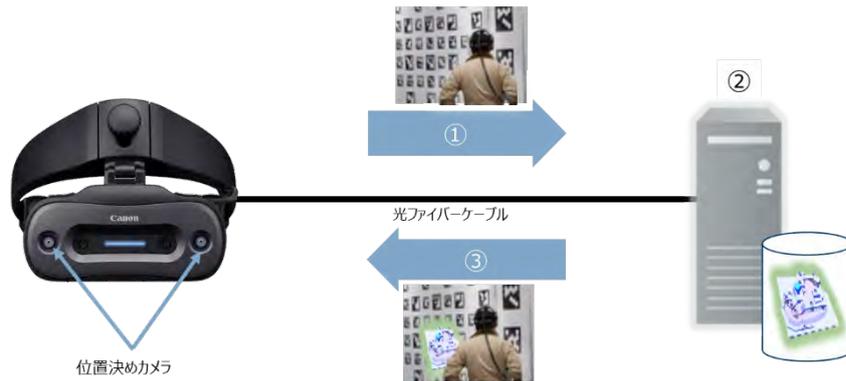


図 3-25 表示アプリケーションの動き

### (3) ヘッドトラッキング

ヘッドトラッキング（HMD の位置や方向の把握方法）としては大きく 3 方式があり、外部の光学式位置姿勢センサー方式、HMD のカメラから得られる現実のマーカ映像からのトラッキング方式、HMD のカメラから得られる現実空間の形状（机や設備等）の特徴を使った空間特徴位置合わせマーカレストラッキング方式である。

今回の実証においては、事前準備作業が少ない空間特徴位置合わせマーカレストラッキング方式を用いた。

### 3.2.3 MR システムの仕組み

MR システムの基本動作は、HMD に搭載されたカメラで撮影する現実世界と、仮想世界の 3D CG 映像を、HMD の位置と姿勢に応じて PC 上のソフトウェアがリアルタイムで合成し、この MR 映像を HMD の表示パネルに投影するものである。以下、この基本動作を実現する映像合成の仕組みを示す。

#### (1) ベースシステムのハードウェア構成

ベースシステムは HMD と PC により構成される。PC には HMD と PC 間でやり取りされる映像データその他 HMD の制御を行う各種信号の同期・多重化・フロー制御を行うハードウェアの専用拡張ボードが装着され、HMD は光ファイバケーブルで拡張ボードに接続される。HMD に搭載されるカメラで撮影された映像を PC に送信し、PC からは HMD で表示する映像を送信するが、専用拡張ボードにより大容量映像データ送受信のリアルタイム性を確保している。ハードウェア構成の詳細を以下に示す。

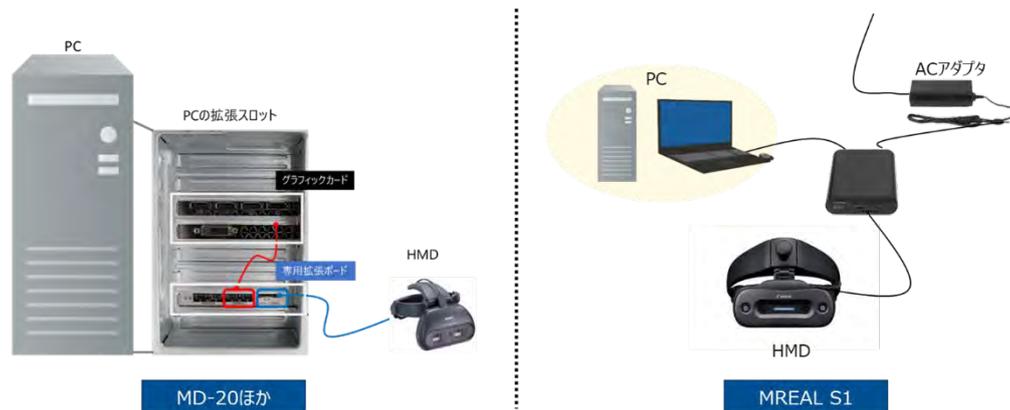


図 3-26 ベースシステムのハードウェア構成

なお、PC については、HMD 機種によって対応している PC 種別が異なる。具体的には、MD-20 等の機種はタワー型 PC にのみ対応し、最新機種（MREAL S1）はタワー型 PC 及びノート PC 双方に対応している。

また、本調査検討においてはベースシステムとして MREAL S1 及びノート PC を採用している。詳細は「3.2.7 本調査検討におけるシステム構成」に記載する。

## (2) 表示アプリケーション

今回の実証では表示アプリケーションとして当社で使用しているキヤノン社製ソフトウェア「MREAL Visualizer」を使用する。MREAL Visualizer は、MREAL Visualizer シーンサーバー（以下「シーンサーバー」という。）と MREAL Visualizer プレーヤー（以下「プレーヤー」という。）の 2 つのソフトウェアで構成される。

プレーヤーは HMD が接続された PC で稼働する。シーンサーバーは、同一の PC もしくはネットワークでつながった他の PC で稼働させることも可能である。MREAL Platform と MREAL Visualizer が組み合わせることにより、MR のシステムにおける映像合成を実現する。

## (3) 映像合成の仕組み

MREAL Platform は、MREAL Display（HMD）の位置・姿勢（視線方向に対しての頭の傾き）情報をヘッドトラッキングから MREAL Platform を介して計測する。空間特徴位置合わせを使用する場合は HMD で撮影した映像の特徴点より計測を行う。

MREAL Visualizer のシーンサーバーは、CAD や CG ソフトからデータを読み込み、3D-CG モデルを構築し、表示制御やモデル 1 つ 1 つの位置制御などを管理する。また、MR 映像体験時、HMD に表示する MR 映像が自然になるように光源の調整や 3D-CG モデルへ注釈を付与する等の処理を行い、MREAL 映像（全プレーヤーで共通のシーン情報）を生成

× 階層構造を持つ 3D-CG モデルに対して、光源情報や色情報、階層毎の位置情報や表示制御情報などをまとめたものをシーンと呼ぶ。MREAL Visualizer では、複数のシーンを保持し、切り替えることができる。

する。

MREAL Visualizer のプレイヤーは、MREAL Platform から得られる HMD の位置姿勢情報に基づき HMD で撮影された映像にシーンサーバーが管理するシーン情報に基づいて 3D-CG 情報をリアルタイムにレンダリング・合成し、HMD に出力する。ただし、データ量が多いため 3D-CG モデルのデータについては、あらかじめプレイヤー起動時にシーンサーバーよりダウンロードをしておき、スムーズな MR 映像体験実現している。

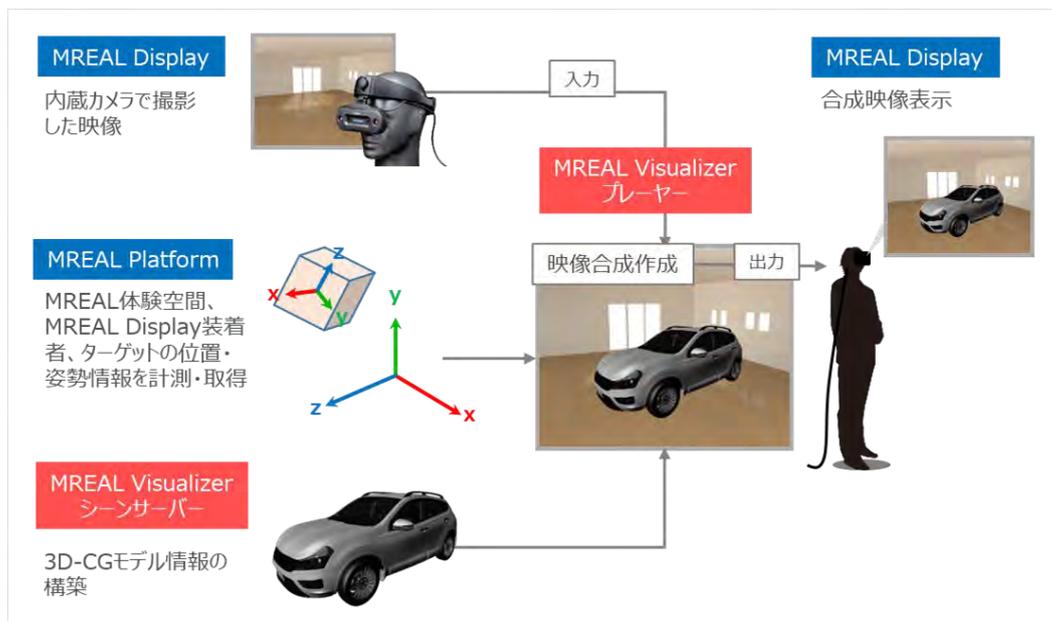


図 3-27 MREAL Visualizer 概要

#### (4) 空間特徴位置合わせ

空間特徴位置合わせとは、HMD で撮影した映像から空間内にある特徴点を指標として空間の地図情報をリアルタイムに生成し、その地図に基づいて HMD の位置と姿勢を算出する仕組みである。

「図 3-28 空間特徴点」は、HMD を通して見ている映像であり、特徴を捉えた緑点を「特徴点」と呼ぶ。



図 3-28 空間特徴点

### (5) カラーマスク

カラーマスクは、特定の色領域に対して 3D-CG モデルの表示/非表示を制御する。例えば、肌色の上には CG を描画しない設定にしておくことで、手と CG の位置（前後）関係を正しく表現し、現実味を向上させる。



図 3-29 カラーマスク（肌色）

出所) キヤノン社作成

また、ピンクの工具上には CG 描画しない設定にしておくことで、工具と 3D-CG モデルの前後位置関係を正しく表現する。

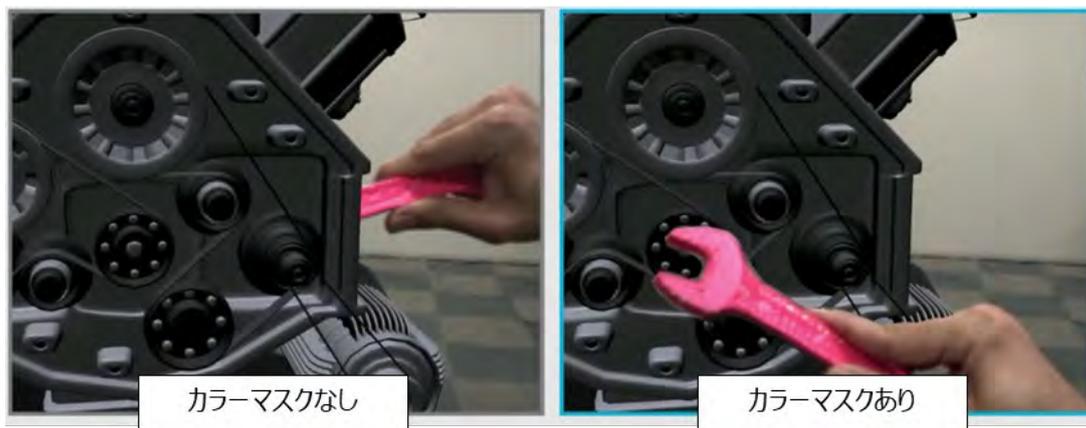


図 3-30 カラーマスク（ピンク）

### 3.2.4 MR システムの構成

MR システムのシステム構成を以下に示す。

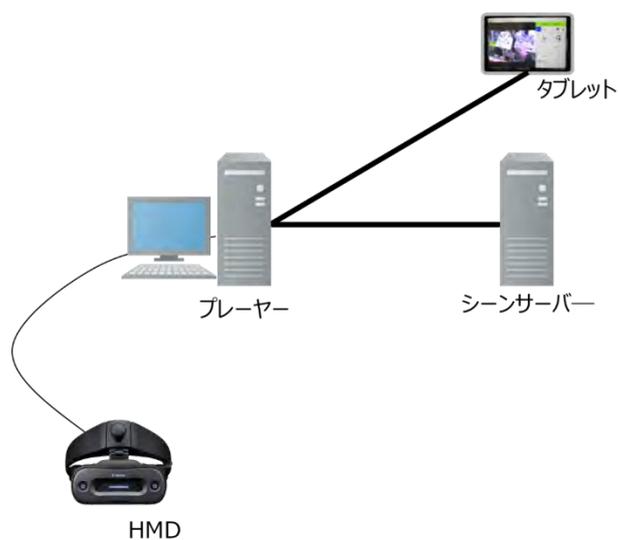


図 3-31 MR システムの構成

表 3-11 MR システムの機能

機器名	機能
HMD	前方を撮影した表示用ステレオ映像及び空間特徴位置合わせ用映像の PC への送信、PC から受信したステレオ映像の表示を行う。
プレイヤー	HMD から受信したステレオ映像に、HMD の位置姿勢情報に基づいて 3D-CG モデルのデータを映像合成して HMD に送信する。 3D-CG モデルのデータは、プレイヤー起動時にシーンサーバーからダウンロードを行う。
シーンサーバー	3D-CG モデルの管理・構築、及び複数のプレイヤーとの間で 3D-CG モデル情報の共有を行う。

タブレットプレーヤー	HMD を装着していないユーザーが MR 映像を見ることができるよう、プレーヤーからタブレット型 PC に MR 映像を送信する。 タブレット上でポインタや部品選択機能を使用してプレーヤーに指示を出す。
------------	--

また、MREAL の特徴として、シーンサーバーを介して複数の MR システムが同時に 1 つのシーンを共有することができる。例えば、現実空間 (MR ルーム等) で仮想の生産設備の 3D CG を MR 映像として映像合成すると、生産設備の正面にいる人の HMD には生産設備の正面が投影され、生産設備の背面にいる人の HMD には生産設備の背面が投影される。

### 3.2.5 ハードウェア性能及び推奨スペック

MR システムのハードウェア性能及び推奨スペックについて以下に示す。

#### (1) HMD 性能

表 3-12 HMD スペック

項目	スペック
製品名	MREAL S1
表示解像度	約 3200 × 1200 (左右のディスプレイそれぞれに 1600×1200 映像を表示)
リフレッシュレート	約 120Hz 表示パネルの駆動周波数。撮像カメラと CG のフレームレートは 60fps
撮像解像度	約 4800 × 1984
重量	約 338g (MREAL Display 本体、およびヘッドマウントユニット)
動作範囲	約 10m (インターフェースケーブルの長さ)

#### (2) プレーヤー及びシーンサーバーの推奨環境

プレーヤー及びシーンサーバーの推奨環境を以下に示す。ただし、推奨環境は、使用する条件 (3D-CG モデルのデータ量等) によって変動する。

表 3-13 推奨環境

項目	スペック
CPU	ベースクロック 3.9GHz 以上、8 コア以上
グラフィックカード	NVIDIA Quadro RTX5000 相当
メモリ	32Gbyte 以上

### (3) タブレットプレイヤーの推奨環境

表 3-14 推奨環境

項目	製品
タブレット PC	Microsoft Surface Pro 4

#### 3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴

MR システムの各機器間で取り扱うデータの特徴について説明する。

以下に示すように、「A:HMD—プレイヤー間」、「B:プレイヤー—シーンサーバー間」及び「C:プレイヤー—タブレット間」の 3 種類のデータの取り扱いがある。

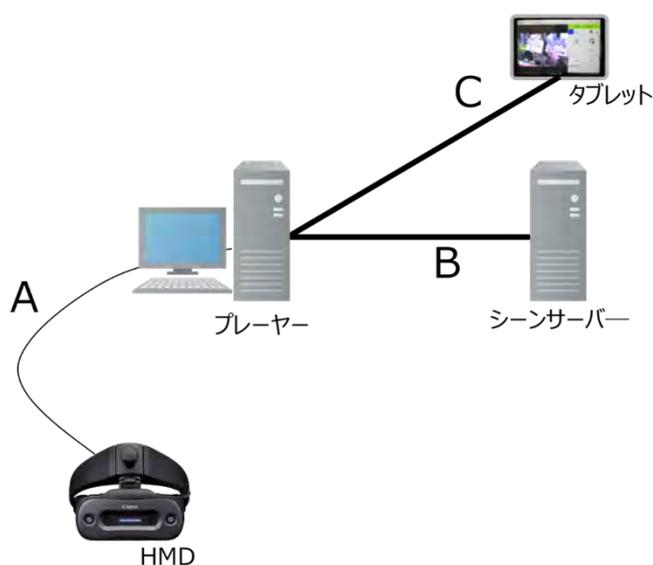


図 3-32 データ取り扱い種別

3 種類のデータ取り扱いの特徴を以下に示す。

表 3-15 データ取り扱いごとの特徴

データ 取り扱い	通信の方向	データ種別	特徴	データ量
A	HMD → プレー ヤー	撮像映像・位置検 出映像	4800 × 1984 (撮像映像) 1280 × 800 (位置検出映像)	約 16.7Gbps (無圧縮)
	プレーヤー → HMD	表示映像	3200 × 1200 (表示映像)	約 5.5Gbps (無圧縮)
B	プレーヤー → シ ーンサーバー	シーン情報	使用機能等により変 動する	数十 Mbps 程度
	シーンサーバー → プレーヤー	3D-CG モデル・シ ーン共有情報	使用機能等により変 動する	数十 Mbps 程度

C	プレーヤー→タブレット	表示映像	間引き・圧縮映像（片目のみ）	数十 Mbps 程度
	タブレット→プレーヤー	制御情報	タブレット操作者の指示情報等	数 Mbps 程度

### (1) データ取り扱い A (HMD-プレーヤー間)

MREAL のヘッドトラッキングの仕組みとしては、HMD 前面の左右撮像カメラと位置検出用カメラより現実映像を取り込み、プレーヤー上で動作する MREAL Platform の空間特徴ヘッドトラッキング機能によって、頭の位置と向きを検出するとともに、取り込んだ映像内の特定の色から 3D 形状データとして抽出している。

このカメラ 3 台分の映像が HMD とプレーヤー間を接続する光ファイバーケーブルを通して、PC 側に送り込まれている。

この際の上り (HMD→プレーヤー) 転送容量は、以下のとおり。

$$(4800 \times 1984 \times 24\text{bits/pixel} + 1280 \times 800 \times 24\text{bits/pixel} \times 2) \times 60\text{frames/sec} \approx 16.7\text{Gbps}$$

また、PC で作成した合成映像を HMD の左右ディスプレイに表示を行う下り (プレーヤー→HMD) 転送容量は、以下のとおり。

$$3200 \times 1200 \times 24\text{bits/pixel} \times 60\text{frames/sec} \approx 5.5\text{Gbps}$$

キャノン社製 MREAL は、スマートフォンや他 xR (ビデオシースルータイプ以外の VR 没入型 HMD や AR 光学シースルー型 HMD ) と比べ、下りよりも上りの転送容量を必要とする仕組みである。この仕組みによって、超高精度の MR 体験を実現している。

### (2) データ取り扱い B (プレーヤー-シーンサーバー間)

- ・ シーンサーバー→プレーヤーのデータ

プレーヤー起動時にシーンサーバーから 3D-CG データをダウンロードする。このデータ量は扱う 3D-CG モデルによって大きく変動するが、リアルタイム性は不要である。

- ・ プレーヤー→シーンサーバーのデータ

HMD での MR 体験時は、ダウンロードしたデータをプレーヤーがリアルタイムにレンダリングする。この際、プレーヤーとシーンサーバー間は、複数のプレーヤー間でシーンを共有するための情報、例えば各 HMD の位置姿勢情報や、操作の情報 (CG で表示されている部品のうち 1 つをハイライトする等) であり、通信量は変動するが最大で数十 Mbps 程度である。

### (3) データ取り扱いC (プレーヤー-タブレット間)

プレーヤーからは HMD に表示している映像のコピーをタブレットに送信する。現在の構成では、PCのソフトウェアで圧縮・送信をしており、数十Mbps程度のスピードとなっている。その他、タブレット操作者のオペレーション情報がやり取りされるが、伝送量は少ない。



図 3-33 注視点位置のポインタでの伝達

## 3.2.7 本調査検討におけるシステム構成

### 3.2.7.1 目指す姿のシステム構成

当社では、「2.2 当社におけるMRシステムの活用」に示す通り、これら安全面のリスクを軽減するための安全性向上の観点や、光ファイバーケーブルをなくすことによるユースケース拡大の観点から、MRシステムを無線で使用することを望んでいる。MRシステム無線化の検討において、目指す姿を以下に示す。

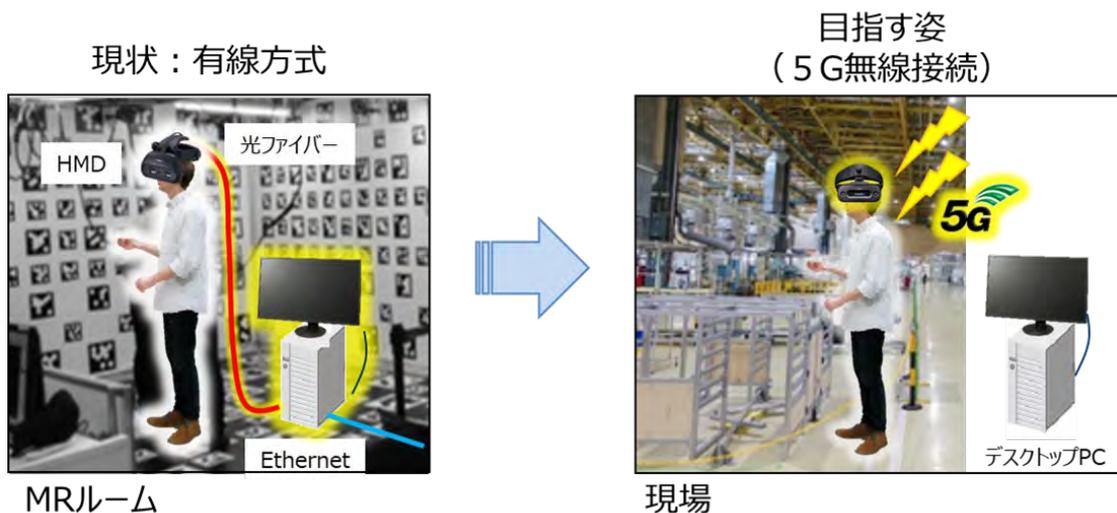


図 3-34 目指す姿の利用イメージ

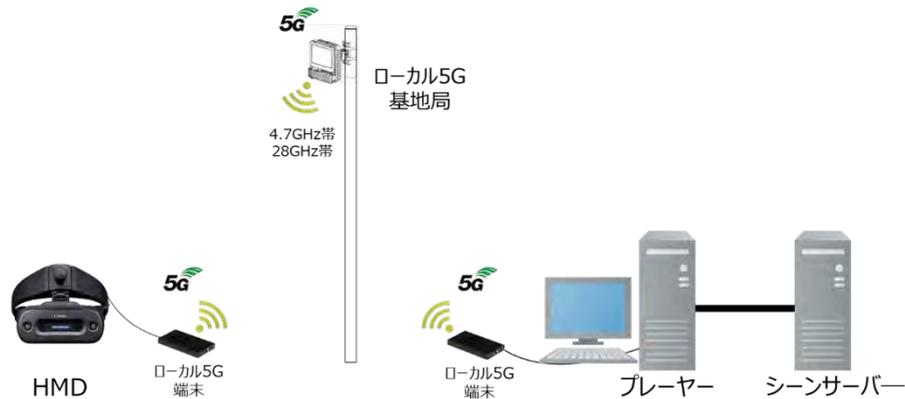


図 3-35 目指す姿のシステム構成

この目指す姿の利用イメージを実現するには、以下のように HMD がローカル 5 G 接続機能を有し、かつ「表 3-15 データ取り扱いごとの特徴」に示す大容量データを処理する性能が必要となる。本調査検討では、目指す姿を実現するための技術課題を、以下に示すとおり整理した。

- ・ ローカル 5 G を用いて MR システムと HMD 間における高精細・大容量の映像データ及び MR 合成映像データをネットワーク上でやり取りする仕組みの構築。
- ・ 上記を遅延なくやり取りするための映像圧縮・伸長技術等の実現。
- ・ 屋内・工場現場において MR システムを活用するに当たり求められる、ローカル 5 G の電波伝搬特性や性能の実現。

また、安全面の確保及びユースケース拡大の観点から、以下の課題についても検討が必要となる。

- ・ MR システムの無線化による、HMD 装着者の単独作業の実現。
- ・ MR システムの無線化による、HMD 装着者の移動範囲及び利用可能範囲の拡大。

これらの課題を解決に導くため、本調査検討では、ローカル 5 G 電波性能及び MR システム性能、MR システムの利用方法の変化等に関するデータを取得し、目指す姿を実現するために求められる通信速度要件、映像圧縮・伸長技術要件、非機能要件等を明らかにするべく、各種実証を行う。

また、特に MR システムの無線化検討に際して、技術的な不確定要素があり、短期的にシステム開発することが難しいため、MR システムが無線化した状態（目指す姿）での実証が極めて困難であることから、本調査検討では、バックパック方式、疑似 HMD 方式の 2 つの環境を構築し、実証にあたることとする。

### 3.2.7.2 バックパック方式

バックパック方式とは、MR システムが無線化した状態を模擬するため、バックパックに MR システムを稼働させるためのサーバー（PC）及びバッテリー等を搭載し、有線を排除

した MR システム利用環境を実現する仕組みである。なお、本調査検討においては、課題解決システムの実証（課題実証）のうち、効果検証及び運用検証において、バックパック方式にて実証を行う。

当社としては、HMD が直接ローカル 5G 等の無線ネットワークに接続し、光ファイバケーブルなしで MR システムを活用した工場内作業が実施できることを期待しているが、現状の MR システムの仕様においては、HMD を直接無線ネットワークに接続させる実装には至っていない。そこで、本実証において、MR システムのローカル 5G による無線化の効果を測定するために、疑似的な無線対応環境（バックパック方式）を構築した。

バックパック方式のシステム構成及び構成要素を以下に示す。



図 3-36 バックパック方式システム構成

表 3-16 バックパック方式構成要素

品目	説明
HMD	MREAL S1 MREAL Display 本体、およびヘッドマウントユニット：約 338g コントローラ BOX：約 599g 消費電力：約 35.5W
プレーヤーPC	Dell Precision 7730 CPU：Core i7-8850H CPU 2.6GHz 6 コア メモリ：64Gbyte グラフィックカード：Quadro P5200 重量：約 3.2kg 消費電力：約 240 W - 12.31 A（連続）
バッテリー	EENOUR ポータブル電源 P302 電池：リチウムイオンバッテリー 容量：80000mAh/296Wh（3.7V）（14.8V 換算値で容量 20000mAh） AC 出力(4 ポート)：100V 定格 300W（600W MAX） 定格周波数：正弦波 60Hz USB 出力(2 ポート)：5V/4A USB QC3.0 出力（1 ポート）:5V/2A,9V/2A,12V/1.5A Type-C 出力(1 ポート)：20V/5A MAX PD100W

	<p>DC 出力(4 ポート) : 12V/10A 120W MAX  シガーソケット出力(1 ポート) : 12V/10A 120W MAX  製品サイズ : 21.5 x 15 x 20.5 cm;  重量 : 3 kg</p>
ノートパソコン用クーラー	<p>CoolerMaster NOTEPAL X-SLIM II - Slim Laptop Cooling Pad (R9-NBC-XS2KJ-GP)  対応ノート PC : 最大 15.6 インチ  搭載ファン : 200mm ファン×1  ファン回転数 : 900rpm ±15%  風量 : 75CFM  ノイズレベル : 21dBA  インターフェース : USB 2.0×1  材質 : アルミニウム、プラスチック、ゴム  本体サイズ : 約 350×249×44mm  重量 : 530g</p>
5G 端末 (UE)	<p>4.7GHz 帯 : エイビット AU-500gNB  対象アプリケーション : eMBB  無線システム/中心周波数/帯域幅 : 5 GNR/4.8GHz/100MHz  最大スループット (基地局) : 140Mbps  同時最大接続端末数 : 100  端末認証 : SIM による認証  送信電力 : +18dBm(60mW)  3GPP バージョン : Release15  電源 : AC アダプタ  寸法 (WxHxD) : 174x70x180(mm)  重量 : 1.5kg 以下  動作保証温度 : 0~40℃</p> <p>28GHz 帯 : シャープ SH-52A  サイズ/質量 : 約 157 × 84 × 16 mm / 未定  通信速度 5G : 受信時最大 4.1Gbps/送信時最大 480Mbps  LTE : 受信時最大 1682Mbps/送信時最大 131.3Mbps※3  ディスプレイ : 約 2.4 インチ QVGA (320×240 ドット)  TFT 液晶ディスプレイ  Wi-Fi® : IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax (Wi-Fi6)  同時接続可能台数 : 16 台  有線 LAN : 2.5GBASE-T × 1 (内蔵)  USB : USB3.0 (Type-C)  バッテリー容量 : 約 4,000mAh</p>
バックパック	<p>mont-bell ロガーキャリア  素材 : フレーム:アルミニウム合金  本体 : 330 デニール・バリスティック®ウルトラナイロン・リップストップ  [ウレタン・コーティング]/330 デニール・ナイロンリップストップ[ウ</p>

	レタン・コーティング] 背面：E.V.A.フォーム 重量：2.35kg カラー：オレンジレッド(OGRD) サイズ：高さ 78×幅 36×奥行 33cm 耐荷重：40kg
シーンサーバー PC	HP Z820 CPU：Xeon E5-2630 v2 2.6GHz(6 コア)×2 メモリ：64Gbyte グラフィックカード：Quadro K5000 重量：約 21kg
タブレットプレ ーヤー	IBM Lenovo (ノート PC) CPU：Core i5-4200U 1.6GHz(4 コア) メモリ：8Gbyte 重量：約 1.34kg

なお、今回の実証では、バックパックに MR システムを稼働させるためのノート PC を搭載する必要があるため、ノート PC で可能な限り推奨環境に近い構成を選定した。当初は、リュックサックにプレーヤーPC を収納する方式を検討していたが、プレーヤーPC が熱暴走することやプレーヤーPC が電源供給なしの状態では GPU が本来必要な性能を発揮しないことが発覚した。この問題に対策するため、熱を冷ますためのノートパソコン用クーラー及びプレーヤーPC の電源供給が可能なバッテリーを搭載する必要があり、背負子型のバックパックを製作した。



図 3-37 背負子型バックパック

### 3.2.7.3 疑似 HMD 方式

疑似 HMD 方式とは、目指す姿を実現するために求められる通信速度要件、映像圧縮・伸長技術要件を検討するために、3D CG を含む大容量データ伝送に関する測定を行うための仕組みである。こちらの方式では、データ送受信のスループットや遅延等の測定データを効

率よく収集するために、「図 3-38 疑似 HMD 方式システム構成」に示す通り、本来大容量データを受信する端末となる HMD を、PC に置き換える構成を取っている。なお、本調査検討においては、課題解決システムの実証（課題実証）のうち、機能検証において、疑似 HMD 方式にて実証を行った。

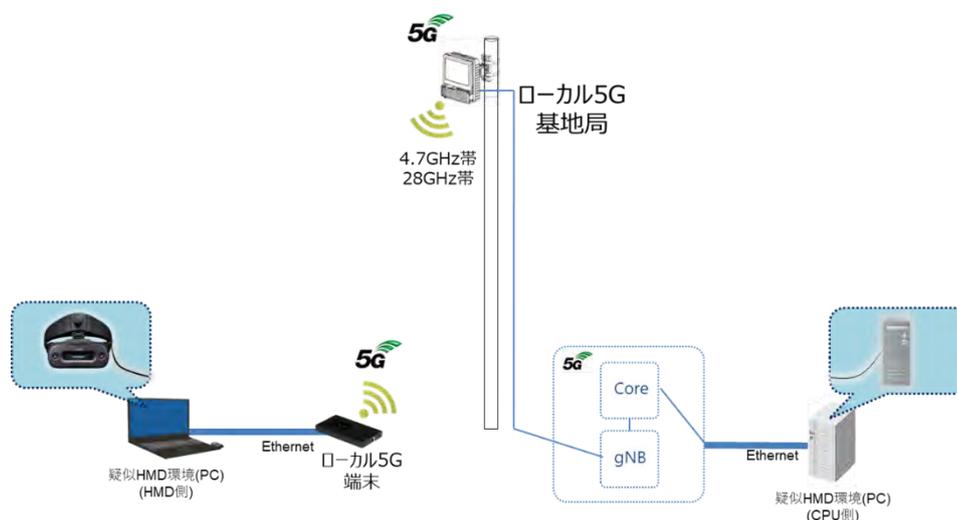


図 3-38 疑似 HMD 方式システム構成

表 3-17 疑似 HMD 方式構成要素

品目	説明
疑似 HMD 環境 (PC HMD 側)	CPU : Xeon 3.0GHz 相当×2 プロセッサ メモリ : 64Gbyte 約 21kg
疑似 HMD 環境 (PC CPU 側)	CPU : Xeon 3.0GHz 相当×2 プロセッサ メモリ : 64Gbyte 約 21kg
ローカル 5G 関連機器	「表 3-1 使用機器一覧」に記載。

なお、疑似 HMD 方式では、最大約 550Mbps で圧縮 (H.265) した映像を Ethernet 経由で送受信する必要があるため、今回の実証では 550Mbps の圧縮した映像を Ethernet で送受信可能な処理能力がある PC を選定した。

### 3.2.8 通信性能要件

課題実証システムにおいて求められる通信性能要件について以下に示す。

#### 3.2.8.1 バックパック方式の通信性能要件

必要な通信量は 3D-CG モデルのサイズに左右されるが一般的なアプリケーションにおい

て数十 Mbps 程度であり、ローカル 5 G の通信容量で十分であることが想定される。一方、複数のプレーヤーでシーンを共有する場合には遅延の増大が使い勝手に影響を与えるため、遅延は小さいことが求められる。

表 3-18 バックバック方式通信要件

項目	通信要件
伝送帯域	数十 Mbps 程度
伝送遅延	数十 msec 程度

今回構築するネットワークシステムでは、4.7GHz 帯において、無線区間のスループット（理論値）上り・下り 70Mbps を提供し、28GHz 帯においては、上り 150Mbps、下り 2242Mbps を提供するため、バックバック方式による MR システムの通信要件を満たすことができる見込みである。

### 3.2.8.2 疑似 HMD 方式の通信性能要件

無圧縮映像データを伝送すると上り・下りとも 10Gbps を超える容量が必要となり、ローカル 5 G 使用時も圧縮が必要になる。しかし、圧縮による画質劣化や遅延の増大は MR システムの使い勝手に大きな影響を与えるほか、上り（HMD→PC）及び下り（PC→HMD）の映像の画質劣化は HMD への表示画質の劣化を引き起こすのみならず、HMD から PC に送られる映像は特徴点位置合わせ用映像として使用されるため、画質の劣化が位置合わせ精度の劣化をも引き起こす。

今回、キヤノン社での H.265 圧縮方式を用いた検討において、1/30 程度の圧縮率で画質の劣化を想定より低く抑えられる見通しを得たため、仮の目標値として以下のスループットを設定した。課題実証においてローカル 5 G 通信環境における MR システム必要要件（画像圧縮率、圧縮回路の許容遅延等）を明らかにする。

MR システムの要求スループットの仮の目標値を HMD1 台当たり以下と想定する。

- ・ 上り：約 550Mbps（16.7Gbps/30）
- ・ 下り：約 183Mbps（5.5Gbps/30）

今回構築するネットワークシステムでは、28GHz 帯においては上り 150Mbps、下り 2242Mbps を提供することができ、本検証において、下りのスループットを満たすことができる見込みである。なお、上りスループットについては、将来、アップリンク比率を拡大する等の対応により満たすことが見込まれる。

### 3.3 実証環境の運用

#### 3.3.1 実証参加者への対応

課題解決システムの実証（課題実証）の参加者に対して、本実証に係る説明会を実施した。説明会の詳細は以下のとおり。

表 3-19 現場向け説明会概要

日時	令和3年1月12日（火）
場所	トヨタ自動車貞宝第1工場内
主催	課題実証分科会
参加者	トヨタ自動車株式会社 モノづくりエンジニアリング部 組長、チームリーダーほか
実施内容	<ul style="list-style-type: none"><li>ローカル5G 開発実証の概要説明</li><li>開発実証において使用する生産設備に関する相談</li></ul>



図 3-39 説明会の様子

なお、説明会実施時に使用した資料は、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-04-現場向け説明資料0112」に添付する。

#### 3.3.2 実証期間中の対応

本実証に際し、構築したシステムに関する問い合わせが発生した場合のエスカレーションフローを以下の通り設定した。また、設置期間は実証終了時の令和3年3月31日までとした。



図 3-40 エスカレーションフロー

また、本実証において発生したインシデントを以下に示す。

表 3-20 インシデント対応表

発生日時	内容	原因	対応事項
令和2年12月27日(日)	28GHz帯システム停止	貞宝第1工場の法定停電(年末年始対応)	工場復電後1月8日(金)、EPC再起動及びNDAC接続復旧を確認。 1月13日(水)、eNB、gNBともに通信を確認。 ※インシデント発生に伴う実証スケジュールへの影響はなし。
令和3年1月23日(土)	28GHz帯システム停止	モバイルルータ回線断	1月27日(水)、NDAC接続復旧を確認。 1月30日(土)、eNB、gNBともに通信を確認。 ※インシデント発生に伴う実証スケジュールへの影響はなし。

### 3.4 関連事業

本調査検討と関連する他省庁、自治体の事業施策等はない。

## 4. 課題解決システムの実証

### 4.1 前提条件

#### 4.1.1 背景

現状のMRシステムは、光ファイバーケーブル（以下、光ケーブルという。）で映像情報をやり取りしているため、工場現場において、安全性の確保や移動距離の制限のため光ケーブルを捌く人員確保が必要となるといった問題がある。その他、工場現場においてMRシステムを定常業務化する上での問題については、前述の「2.2.2 MRシステム利用における問題」を参照のこと。

課題解決システムとしての「ローカル5GによるMRシステム」（以下、課題解決システムという。）の実現が、この問題解決に資するものであるかを調査するため、現在MR技術を利用している生産設備の組み立て工場の関係者へのヒアリングを実施した。その結果により、作業員の安全性の向上や製造現場の人材不足及び熟練技術の承継等の課題解決に資するものと考えられる。また、この課題解決システムは、当社の特定業務に限らず、他の製造現場への汎用性・拡張性にも対応できるものと考えられる。

本実証は、課題解決システムの実現による製造現場の抱える課題への有用性を検証するとともに、目指すべき姿（ローカル5Gを用いた完全無線化）に向けた新たな課題を抽出するものである。

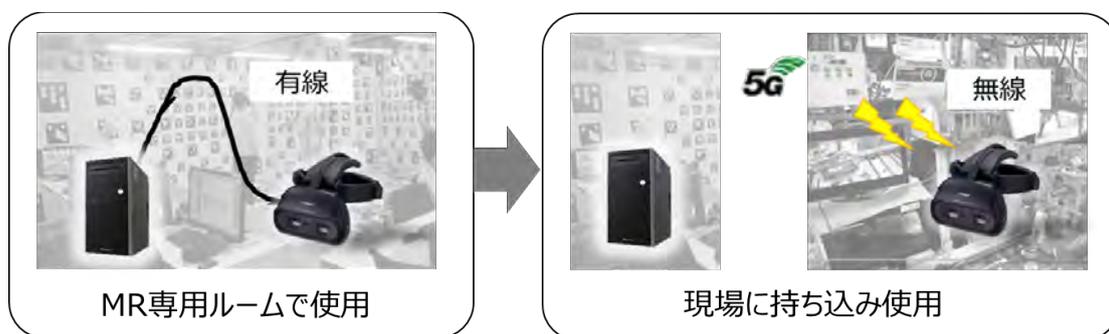


図 4-1 光ケーブルから無線化

#### 4.1.2 実証方法の概要

作業員の安全性の向上や製造現場の人材不足及び熟練技術の承継等に向けて、ローカル5Gを活用した製造現場における「MR技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「遠隔作業支援」に関する実証を行った。また、課題解決システムの効果、機能面、機能面等の観点から検証を行い、その技術的課題や実装を想定した場合の運用に係る課題について取りまとめを行った。

各実証方法に対する検証種別を以下に示す。

表 4-1 各課題に対する検証種別

実証方法	検証種別		
	効果検証	運用検証	機能検証
実務ユースケースについての検証 (完全無線化が実現した場合を想定)	バックパック方式	バックパック方式	—
目指す姿(ローカル5Gを用いた完全無線化)の実現に向けた事前技術検証	—	—	疑似HMD方式

課題解決システムの最終目標は、HMD とプレーヤーPC 間の完全無線化にある。しかしながら、以下の技術的な不確定要素があることにより、短期的にシステム開発することが難しい。

- ・ 工場環境下のローカル5Gにおけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性
- ・ 通信の性能特性から必要とされる映像圧縮伸長技術等の要件
- ・ HMD の高性能化・小型化、駆動時間の確保(次年度以降に検証)

そのため、効果検証及び運用検証の検証方法には、現時点で実現可能なバックパック方式を採用した。なお、機能検証は、これら技術的な不確定要素の具体的な要件等を明らかにするため、疑似HMD方式を採用した。

なお、バックパック方式、疑似HMD方式の詳細は、前述の「3.2.7.2 バックパック方式」、「3.2.7.3 疑似HMD方式」を参照のこと。

また、実証に当たっては各検証における観点を整理し、効果検証及び運用検証の登場人物を洗い出した。効果検証及び運用検証の対象者を以下に示す。なお、機能検証は課題解決システムの機能面の観点から課題実証メンバーにて実証を行った。

表 4-2 効果・運用検証の対象者

検証種別	検証観点	登場人物
効果検証	課題解決システムの利用者視点	検討責任者、作業実施者、作業評価者(又は技術支援者)
運用検証	課題解決システムの運用者視点	MR技術担当者、MR補助者

#### 4.1.3 実務ユースケースの選定

##### 4.1.3.1 実務ユースケースの洗い出し

実務ユースケース(以下、ユースケースという。)候補の選出に当たっては、課題解決システムの実現による作業者の安全性向上や製造現場の作業効率化の効果をより期待できるユースケースを検討するため、現在MRシステムを運用している担当者にワークショップに参加してもらった。

ワークショップでは、業務内容や作業場所、登場人物等の認識を合わせるため、絵コンテ

を用いて各ユースケースの作業工程を可視化すると共に、工場現場での MR システム利用状況やシステム構成等を確認した。その結果を受けて、課題解決システムによって現状の問題が解決できると想定されるユースケースを洗い出した。ワークショップにて検討した5つのユースケースの詳細を以下に示す。

### (1) 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認

設備治具付帯製造の設備製作工程において、生産設備（初号機）製作途中の不具合原因を確認するユースケースを検討した。設備製作工程では、設計内容と実際に製作された現物との差異を確認し、設計時又は製作時の問題や見逃し、設計データが最新化（機能追加等）されたことによる現物との差異の発生等、その原因を追究する必要がある。また、設備の配置換えや高さ検討において、実際の大きさや作業姿勢を、体感をもって確認する必要がある。そのため、現在は有線接続による MR システムを生産設備の製作を行っている工場現場に持ち込み、対象設備の横に仮想の設備を再現して、現場作業者が HMD を装着し、仮想の設備と実際の製作物との差異の確認を行っている。

このような現状に対して、ローカル 5G で無線化された MR システムを用いることで、従来よりも現場作業者の移動範囲や動作自由度が広がり、不具合確認作業の安全性の向上や作業効率化が期待できる。

### (2) 生産設備製作時の組付け作業の効率化

設備治具付帯製造での設備組付け工程において、製作中設備に MR システムで設計データを重ねて表示し、差異を確認・修正するユースケースを検討した。

設備組付け工程では、従来、設計図や CAD データ（PC モニターで表示）と製作中設備を見比べながら組付け確認を行っていた。これに対し、MR システムを用いて組付け後の姿を映像で重ねて確認できるようにすることで、組付け作業の効率化が期待できる。また、HMD により作業者の両手が使える状態となり、安全性及び作業効率の向上が期待できる。しかし、現在の MR システムでは、現場作業者に光ケーブルが繋がっているため、安全性の問題から MR システムを用いた組付け作業は実施できていない。

このような現状に対して、ローカル 5G で無線化された MR システムを用いることで、組付け作業の安全性向上や効率化が期待できる。

### (3) 金型加工時の段取り作業の効率化

設備治具付帯製造での金型加工（段取り確認）の工程において、MR システムで事前検討の状態を表示し、ワーク（加工を行う材料）位置を現実と比較しながら段取り確認するユースケースを検討した。

金型加工（段取り確認）工程では、金型加工機の設備ストローク等を考慮して、加工に最適な位置にワークの配置を定め段取りを確認する必要がある。従来は事前に設備ストローク長を確認し、加工物の大きさと照らして机上で位置を検討すると共に、実機で位置調整

を実施していた。これに対し、MR システムを金型加工機の近くに持ち込み、既存の設備に重ねて仮想の加工物を投影することで、事前机上検討した位置に早く正確に合わせることができ、作業ミス防止や作業時間短縮が期待できる。しかし、現在の MR システムでは、作業者に光ケーブルがつながっているため、安全性の問題から MR システムを用いた組付け作業は実施できていない。

このような現状に対して、ローカル 5 G で無線化された MR システムを用いることで、段取り確認作業の効率化が期待できる。

#### (4) 生産設備製作時の配線作業遠隔支援

設備治具付帯製造での設備組立工程（配線作業）において、製作中設備に MR システムで設計データを重ねて表示し、作業姿勢・組立方法等を遠隔から指導するユースケースを検討した。

現在は、配線作業の経験の浅い者が熟練技術者から事前の教育（マニュアル確認や事前のレクチャ）を受けるだけでなく、熟練技術者が現地に行き実際の設備を確認しながら具体的な指示のもと配線作業を行っている。これに対し、MR システムを用いて組付け時の姿を映像で重ねて表示すると共に熟練技術者が現場作業員と同じ映像を遠隔の PC モニター（タブレットプレーヤー機能を搭載した PC）で確認し、音声で現場作業員に作業姿勢・組立方法等を指導することが可能となれば、熟練技術者が作業現場に足を運ぶ手間や時間、移動費用の削減が期待できる。しかし、現在の MR システムでは、現場作業員に光ケーブルがつながっているため、安全性の問題から MR システムを用いた組付け作業は実施できていない。

このような現状に対して、ローカル 5 G で無線化された MR システムを用いることで遠隔作業支援が可能となる。

#### (5) 金型加工時の段取り作業の遠隔支援

設備治具付帯製造での金型加工（段取り確認）工程において、MR システムを用いて段取り作業のカン・コツを離れた場所から指導するユースケースを検討した。

現在は、設計図や CAD を用いて机上で事前指導を行った上で、実機作業を実施しているが、MR システムにより、実設備に重ねて仮想の加工物を投影し、遠隔の熟練技術者と現場作業員が同じ映像を共有しながら音声で現場作業員に段取り作業のカン・コツ等の指導を行うことで、学習効果を高め習得時間の短縮を行うことが期待できる。また、熟練技術者が現地足に足を運ぶ手間や時間、移動費用の削減が期待できる。

#### 4.1.3.2 実務ユースケースの選定結果

ユースケースの選定に当たっては、本実証の実現可能性や地域製造業の課題解決に資する効果を期待できるかを考慮した。本実証の実現可能性とは、工場現場で実施可能な設備があること及び課題実証の期間中に利用できる設備を確保できることを指す。

ユースケースの選定結果を以下に示す。

表 4-3 実務ユースケースの選定結果

区分	実務ユースケース	選定結果
MR 技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証（既存設備）の効率化	(1) 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認	○
	(2) 生産設備製作時の組付け作業の効率化	
	(3) 金型加工時の段取り作業効率化支援	
MR 技術を用いた遠隔作業支援	(4) 生産設備製作時の配線作業遠隔支援	○
	(5) 金型加工時の段取り作業の遠隔支援	

#### 4.1.4 実証内容の詳細化

ユースケースの選定後、作業工程毎に検証項目や想定効果の事前検討を行うため、AsIs/CanBe/ToBe 環境別に絵コンテを細分化した。AsIs/CanBe/ToBe 環境の構成イメージを以下に示す。

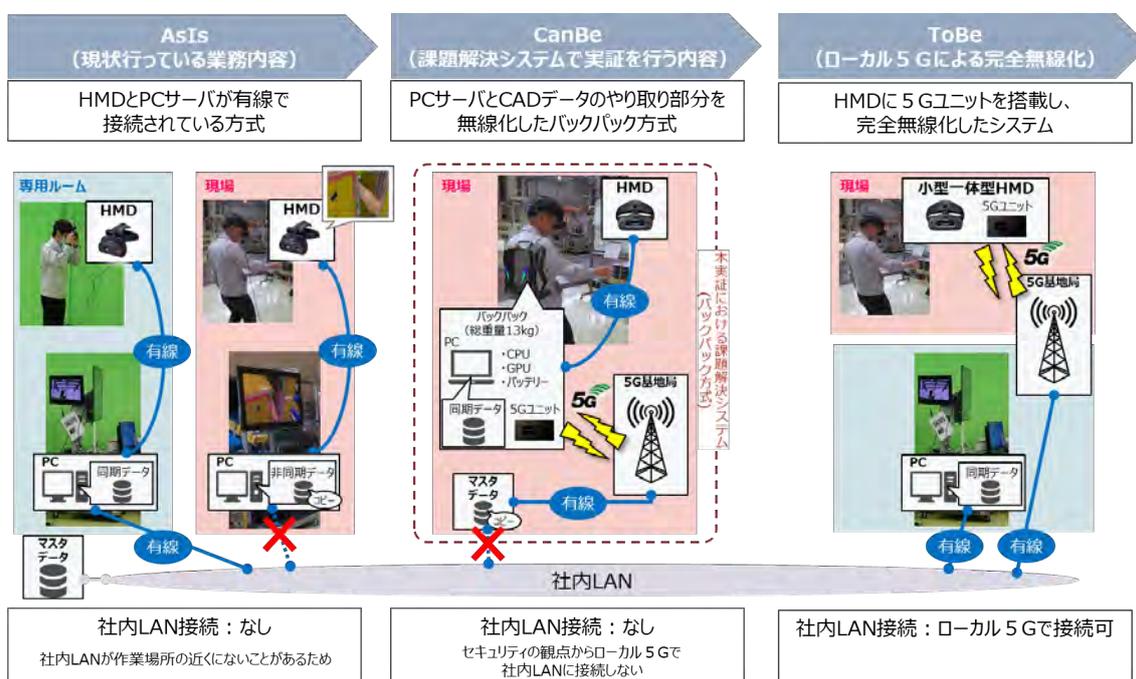


図 4-2 AsIs/CanBe/ToBe 環境の構成イメージ

AsIs/CanBe/ToBe 環境別に実証内容を詳細化した理由は、前述の「4.1.2 実証方法の概要」のとおり、効果検証及び運用検証は、技術的な課題によって目指す姿（ローカル 5Gを用いた完全無線化）の実現に向けた実証を行うことができず、完全無線化が実現した場合を想定したものとなった。しかしながら、目指す姿の実現に向けた課題抽出も本実証の目的と

していることから、AsIs と CanBe の比較に留まらず、ToBe も見据えて事前検討を行った。なお、AsIs/CanBe/ToBe 環境別に実証内容を絵コンテにて詳細化した結果については、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-02-課題実証計画書」を参照のこと。

また、効率的な実証実施に向けて、作業工程毎の業務内容を明らかにし、「工場現場での実証が必要なもの」と「机上検討で対応できるもの」とに区分した。ローカル 5G による効果が見込めると想定される作業工程については、工場現場での実証を行い、それ以外の作業工程については机上検討又は、一部実証を行うものとした。

加えて、課題実証計画に抜け漏れのないことや現場作業員へのインタビュー内容・対象者を検討するため、事前リハーサルを実施した。なお、事前リハーサルは、工場現場で実施することができなかった。これは、工場現場の設備配置が流動的であり、検証対象の設備の利用可能な期間が限られていたことによるものである。なお、現場作業員へのインタビューに係る詳細は、後述の「4.4.4.3 現場作業員へのインタビュー結果」を参照のこと。

ワークショップでの実証内容詳細化と課題実証リハーサルの実施を経て、課題実証計画を合意した。本実証（CanBe）における作業工程毎の実証風景を以下に示す。



◆ **業務概要**

- ①MRシステムの利用における検証シナリオを検討する
- ③生産設備の3DデータをUSBにコピーする
- ⑦カーペットマーカをHMDで映して仮想データの配置場所を調整する

図 4-3 作業工程毎の実証風景

#### 4.1.5 スケジュール

本実証のスケジュールを以下に示す。

表 4-4 スケジュール

イベント	検討期間	会議回数/ 作業日数	主な作業内容
キックオフ	令和2年10月7日(水)	会議1回	・課題実証分科会運営方法の合意
ワークショップの進め方検討	令和2年10月13日(火)	会議1回	・ワークショップの進め方の合意
ワークショップ開催	令和2年10月19日(月)～令和2年12月21日(月)	会議15回	・実務ユースケースの洗い出しと選定 ・MRシステムデモンストレーションの開催 ・実務ユースケースのプロセス整理のための絵コンテ作成 ・効果検証、機能検証、運用検証項目の作成
課題実証(機能検証/4.7GHz)の実施	令和2年12月16日(水)～令和2年12月18日(金)	作業3日間	・4.7GHzにおける疑似HMDの機能検証の実施
課題実証計画書の作成	令和3年1月8日(金)～1月15日(金)	会議2回	・課題実証計画書のレビュー ・ユースケースのリハーサル計画の作成
現場作業向け説明会の実施	令和3年1月12日(火)	会議1回	・貞宝工場で実施するローカル5G開発実証の進め方説明
課題実証リハーサルの実施	令和3年1月26日(火)～1月27日(火)	作業2日間	・課題実証リハーサルの実施 ・課題実証当日のタイムスケジュール作成 ・現場作業へのインタビュー内容作成
課題実証(効果検証/運用検証)の実施	令和3年2月8日(月)～令和3年2月12日(金)	作業5日間	・実務ユースケース1、2の効果検証、運用検証の実施 ・現場作業へのインタビュー
課題実証(機能検証/28GHz)の実施	令和3年2月8日(月)～令和3年2月9日(火)	作業2日間	・28GHzにおける疑似HMDの機能検証の実施
成果報告書の作成	令和3年2月17日(水)～令和3年3月24日(水)	会議8回	・成果報告書のレビュー

## 4.2 実証目標

効果検証及び運用検証は、製造現場の安全、品質の向上を目的として、MR 技術及びローカル5 Gを活用した「生産設備の導入に係る事前検証の効率化」及び「遠隔作業支援」を実現し、工場環境におけるMR 技術の活用方策を確立することを目標とした。

機能検証は、製造現場において求められる高い要件（精度、品質、リアルタイム性、実装の柔軟性等）を踏まえた、ローカル5 G の特性を活かした将来的な拡張を目的として、システム構成の要素毎の機能を評価・検証することを目標とした。

## 4.3 課題解決システムに関する検証及び評価・分析

### 4.3.1 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認

新たな製品を生産する際は、新規工場・新規ラインを用意する場合や既存のラインを改造する場合がある。また、生産効率や品質向上のための既存設備や工程の見直し・改造等、様々なシチュエーションにおいて設備検討が必要である。そのため、ユースケース「生産設備（初号機）製作途中の不具合確認」を対象に実証を行った。

本ユースケースの作業工程毎の業務シーンや登場人物を可視化するため、AsIs/CanBe/ToBe 別に絵コンテを作成した。本ユースケースにおける作業工程毎の絵コンテ及び登場人物と役割を以下に示す。なお、登場人物以外のアイコンの説明については、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-02-課題実証計画書」を参照のこと。

カテゴリ	アイコン	担当	役割
利用者		検討責任者 (設計者)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・設計室において、作業実施者の安全を確認する</li> <li>・全体の取りまとめを行う（計画立案）</li> <li>・設計者が検討責任者を担う</li> </ul>
		作業実施者	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工場（現場）において、HMDを装着して生産設備の不具合確認を行う</li> </ul>
		作業評価者	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業実施者の動作を確認する</li> </ul>
運用者		MR技術担当者	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シーンサーバの操作を行う</li> <li>・MRの運搬、作業現場での準備・撤収</li> </ul>
		MR補助者	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業現場において、ケーブルの配線、移動を行う</li> <li>・MRの運搬、作業現場での準備・撤収</li> </ul>

図 4-4 絵コンテの登場人物・役割

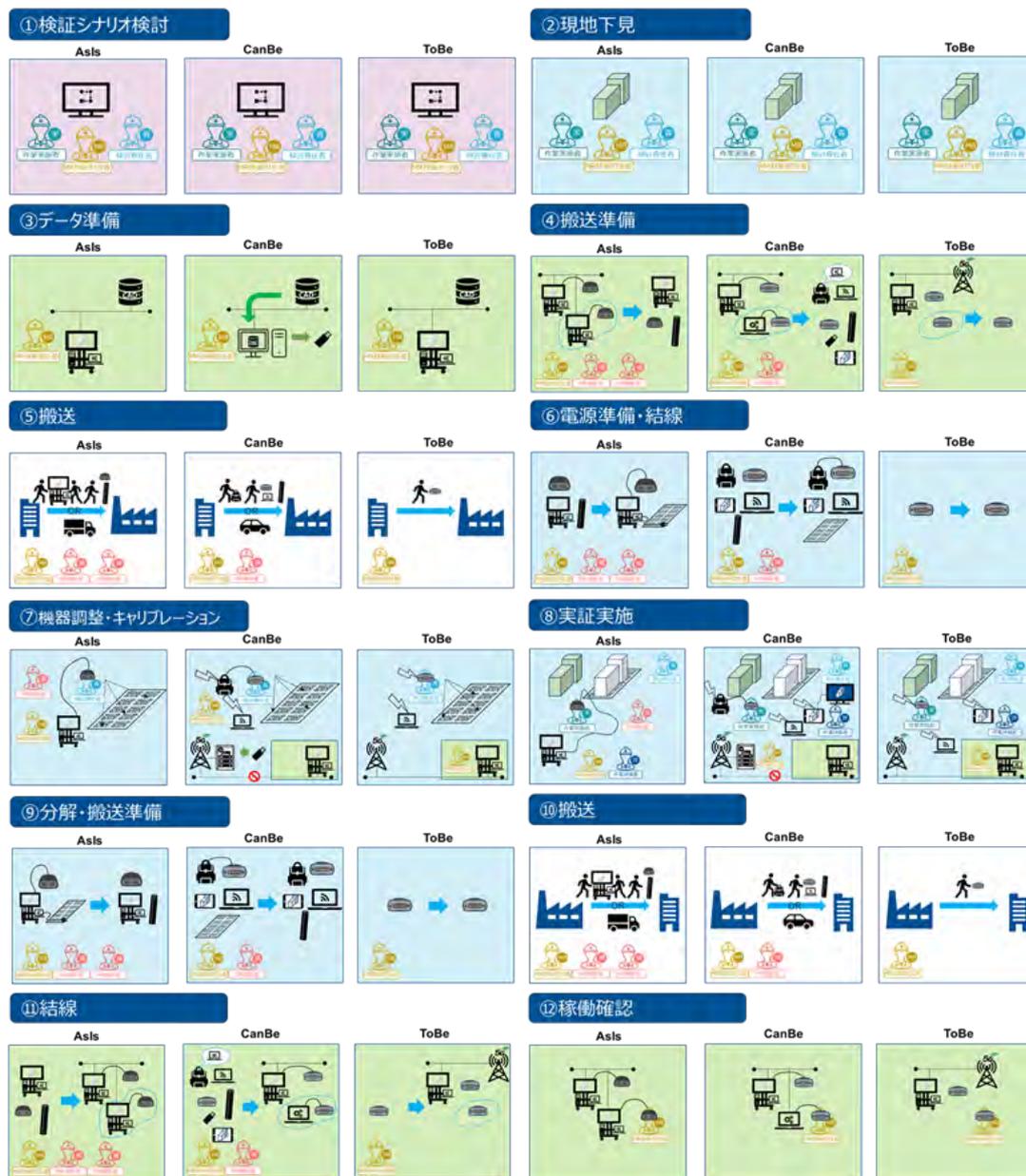


図 4-5 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の作業工程

#### 4.3.1.1 実証内容

設備事前検証工程では、設計内容と実際に製作された現物との差異を確認し、設計時又は製作時の問題や見逃し、設計データが最新化（機能追加等）されたことによる現物との差異の発生等、その原因を追究する必要がある。また、設備の配置換えや高さ検討において、実際の大きさや作業姿勢を、体感をもって確認する必要がある。そのため、現在は有線接続による MR システムを生産設備の製作を行っている工場現場に持ち込み、対象設備の横に仮想の設備を再現して、現場作業者が HMD を装着し、仮想の設備と実際の製作物との差異の確認を行っている。

このような現状に対して、ローカル 5G で無線化された MR システムを用いることで、従来よりも現場作業者の移動範囲や動作自由度が広がり、不具合確認作業の安全性の向上や効率化が期待できる。

#### 4.3.1.2 実証方法

ユースケース「生産設備（初号機）製作途中の不具合確認」では、有線接続の場合とローカル 5G による無線接続（バックパック方式）の場合を比較できるよう環境を構築し、検証を実施した。なお、バックパック方式のシステム構成及び諸元については、前述の「3.2.7.2 バックパック方式」を参照のこと。

本ユースケースは、製作設備横に MR システムで設備を再現し、現場作業者自らが現物と比較しながら確認を行うという業務シーンを想定した実証である。

AsIs 及び CanBe の構成イメージ及び実証場所を以下に示す。

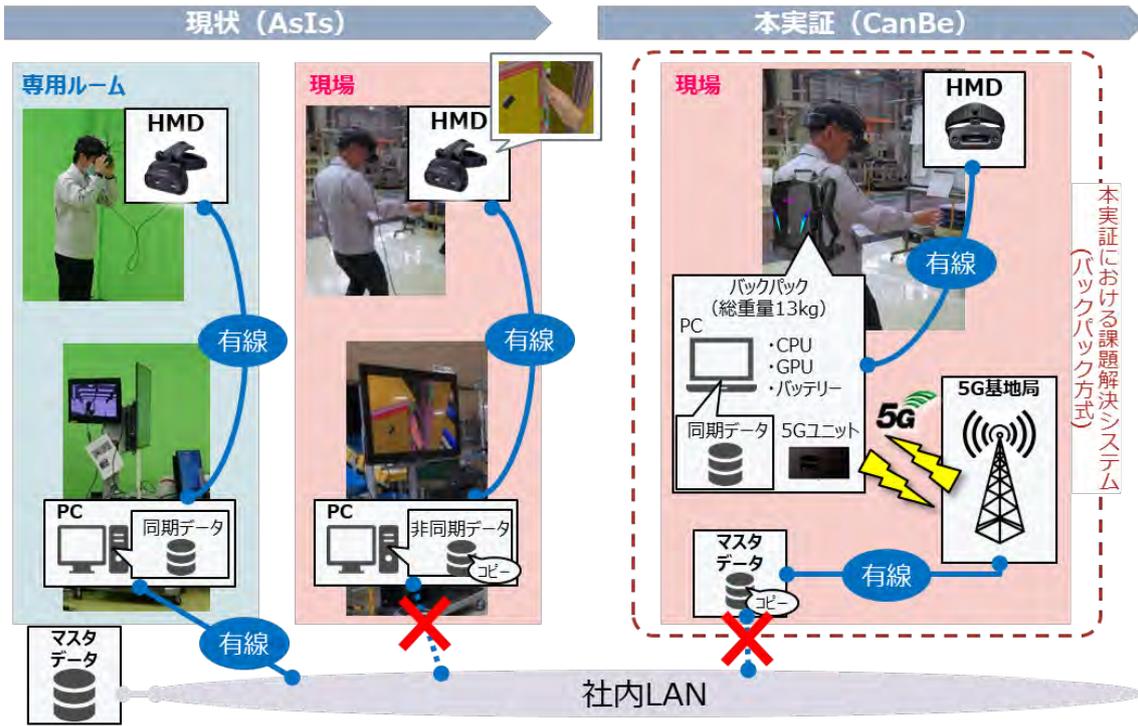
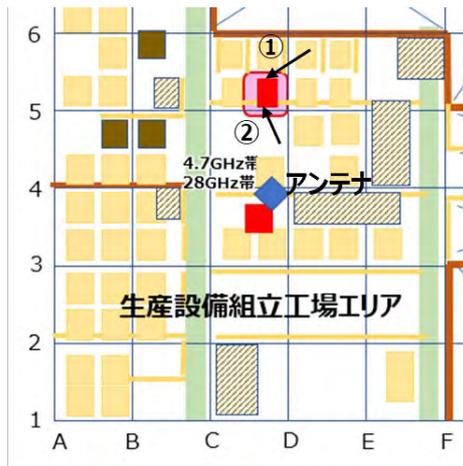


図 4-6 AsIs 及び CanBe の構成イメージ



①設備（正面）



②設備（左側）



図 4-7 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の実証場所

#### 4.3.1.3 評価項目

MR 技術を活用した生産設備の導入に係る評価項目を以下に示す。

- ・ 工場現場で現状（MR ルームで実施）と同様の作業が実施可能であるか。
- ・ 現場作業者の安全性が確保できるか。
- ・ 現状との比較において、業務効率化及び副次的効果が認められるか。
- ・ 無線化による効果、活用範囲の拡張性が認められるか。
- ・ その他、課題解決に資する導入効果（人員の最適配置、人材育成等）が認められるか。

#### 4.3.1.4 評価方法

本実証（CanBe）のユースケースに基づき、課題解決システムに関する効果検証、運用検証、機能検証を実施し、その測定結果や検討結果について現状（有線接続）の場合とローカル 5 G（無線接続）の場合を比較し評価を行った。また、現場作業者へのインタビューにより定性的な評価を取得し、分析を行った。

なお、評価の観点と各検証種別の関係を以下に示す。

表 4-5 評価の観点と各検証種別の関係

評価観点	検証種別		
	効果検証	運用検証	機能検証
生産設備の導入に係る事前検証の効率化	○	○	—
生産設備の導入に係る作業者の安全性及び健康への配慮	○	○	○

#### 4.3.2 生産設備製作時の配線作業遠隔支援

遠隔作業支援としては、これまでの当社の経験・知見から、ローカル5Gの能力が期待されるユースケースとして、単純な教育（マニュアルの投影、手順のガイド）ではなく、海外拠点を含む遠隔地の工場での設備組立作業支援を行うことが考えられる。

具体的には、遠隔拠点の工場で新しい車種の生産（クルマの組み立て）を開始しようとする際、新しい生産ラインで新しい設備や治具による作業を行う必要が出てくる。従来は、新しい設備を導入する際は、豊田市から現地へライン設計者や熟練技術者が赴き、現地に新しい治具が配備された後で、現地の現場作業者に対する指導や訓練を行っていた。

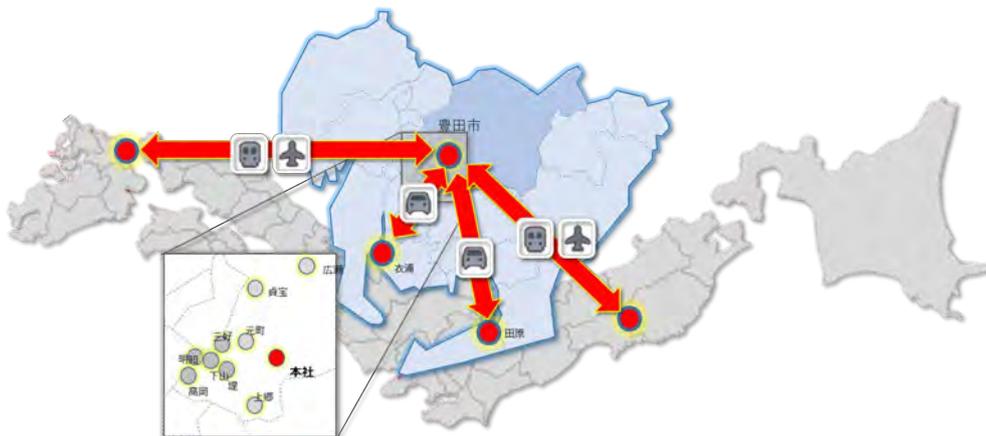


図 4-8 国内工場への移動

このような中、課題解決システムを活用することで、現地に新しい設備が配備される前に、豊田市から遠隔拠点の工場へ遠隔で指導や訓練を行うことができるようになると想定している。この遠隔拠点に新規生産ライン立上げに伴う指導や訓練にかかる段取りを前もって実施することで、現地での新規生産ライン立上げの効率化が可能となることが考えられる。そのため、ユースケース「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」を対象に実証を行った。

本ユースケースの作業工程毎の業務シーンや登場人物を可視化するため、AsIs/CanBe/ToBe 別に絵コンテを作成した。本ユースケースにおける作業工程毎の絵コンテ及び登場人物と役割を以下に示す。なお、登場人物以外のアイコンの説明については、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-02-課題実証計画書」を参照のこと。

カテゴリ	アイコン	担当名	役割
利用者		検討責任者 (現場職制)	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場（現場）において、作業実施者の安全を確認する</li> <li>現場の作業を熟知し、全体の作業の取りまとめを行う（計画立案）</li> </ul>
		作業実施者	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場（現場）において、HMDを装着して生産設備の配線作業を行う</li> </ul>
		技術支援者 (出張or遠隔)	<ul style="list-style-type: none"> <li>出張または遠隔で、技術支援を行う</li> </ul>
運用者		MR技術担当者	<ul style="list-style-type: none"> <li>シーンサーバの操作を行う</li> <li>MRの運搬、工場（現場）での準備・撤収</li> </ul>
		MR補助者	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場（現場）において、ケーブルの配線、移動を行う</li> <li>MRの運搬、工場（現場）での準備・撤収</li> </ul>

図 4-9 絵コンテの登場人物・役割

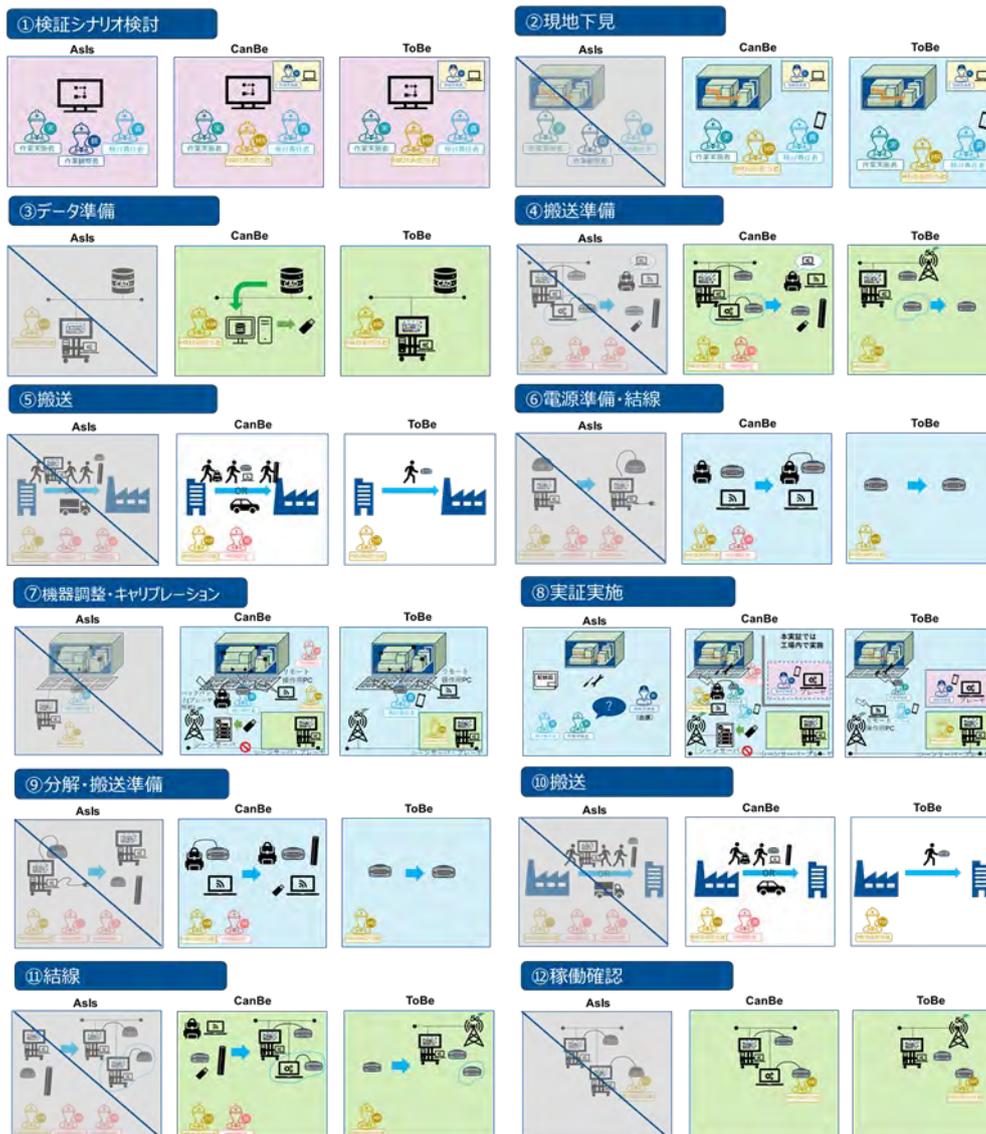


図 4-10 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の作業工程

#### 4.3.2.1 実証内容

設備治具付帯製造での設備組立工程（配線作業）では、現在、配線作業の経験の浅い者が熟練技術者から事前の教育（マニュアル確認や事前のレクチャ）を受けるだけでなく、熟練技術者が現地に行き実際の設備を確認しながら具体的な指示のもと配線作業を行っている。これに対し、MR システムを用いて組付け後の姿を映像で重ねて表示すると共に熟練技術者が作業実施者と同じ映像を遠隔の PC モニター（タブレットプレーヤー機能を搭載した PC）で確認し、音声で作業実施者に作業姿勢・組立方法等を指導することが可能となれば、熟練技術者が作業現場に足を運ぶ手間や時間、移動費用の削減が期待できる。

#### 4.3.2.2 実証方法

ユースケース「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」では、設備組立工場エリアを遠隔拠

点の工場から支援を受ける側と見立て、貞室内の工場内詰所を支援する側と見立てて、MR 技術で連携できる環境を構築し、検証を実施した。

本ユースケースは、製作設備の組立作業時に MR システムで組付部品を再現し、熟練作業者が現場作業者に対して遠隔から作業姿勢・配線方法等を指導するという業務シーンを想定した実証である。具体的には、遠隔拠点の工場で支援を受ける側（現場作業者）はバックパック方式で MR システムを利用し、支援する側（熟練技術者）はタブレットで遠隔拠点の映像を共有するとともに、大型モニターに映し出す方法にて検証を実施した。

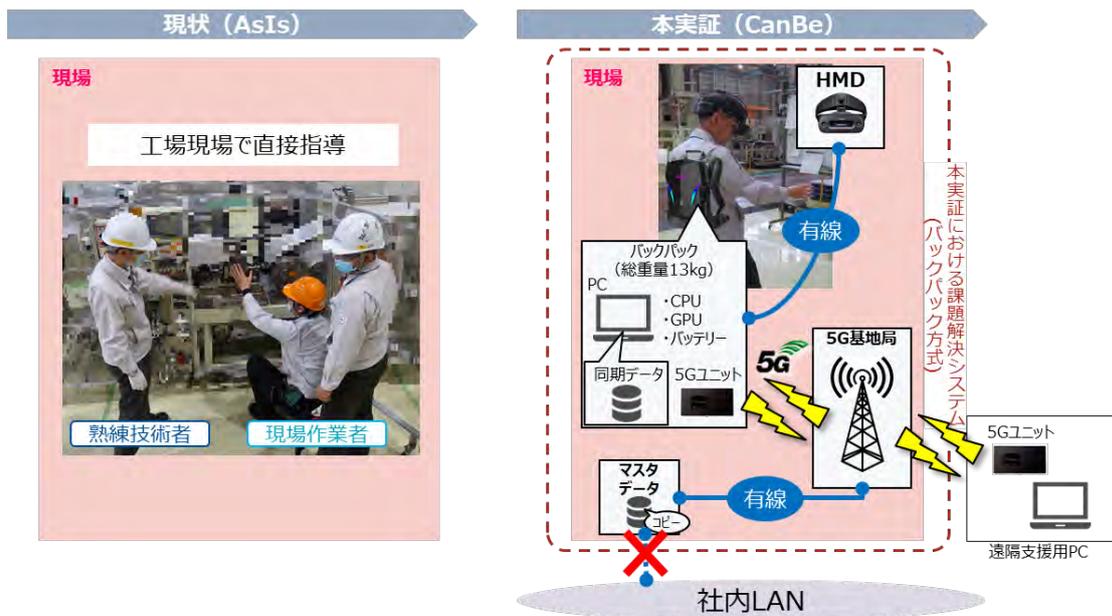
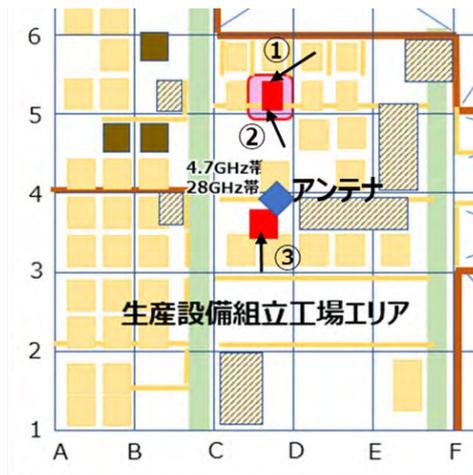


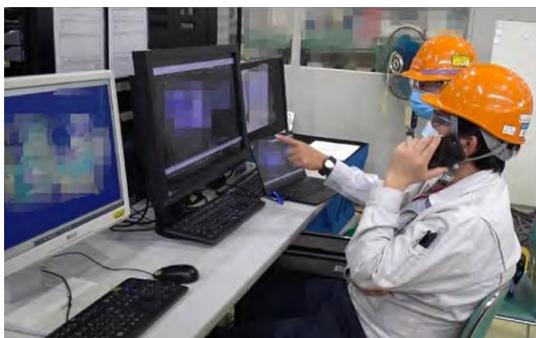
図 4-11 AsIs 及び CanBe の構成イメージ



①設備（正面）



③遠隔支援



②設備（左側）



図 4-12 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の実証場所

#### 4.3.2.3 評価項目

MR 技術を活用した遠隔作業支援における評価項目を以下に示す。

- ・ 工場現場で現状（MR ルームで実施）と同様の作業が実施可能であるか。
- ・ 現場作業者の安全性が確保できるか。
- ・ 現状との比較において、業務効率化及び副次的効果が認められるか。
- ・ 無線化による効果、活用範囲の拡張性が認められるか。
- ・ 現場作業者が HMD で見ている映像を遠隔にいる指導者が見て支援できるか。
- ・ その他、課題解決に資する導入効果（人員の最適配置、人材育成等）が認められるか。

#### 4.3.2.4 評価方法

前述する本実証のユースケースに基づき、課題解決システムに関する効果検証、機能検証、運用検証を実施し、その測定結果や検討結果について現状（有線接続）の場合とローカル 5 G（無線接続）の場合を比較し評価を行う。また、現場作業者へのインタビューにより定性的な評価を取得し、分析を行った。

なお、評価の観点と各検証種別の関係を以下に示す。

表 4-6 評価の観点と各検証種別の関係

評価観点	検証種別		
	効果検証	運用検証	機能検証
生産設備の製作に係る作業効率化	○	○	—
生産設備の製作に係る作業者の安全性及び健康への配慮	○	○	○

#### 4.4 課題解決システムに関する効果検証

##### 4.4.1 検証項目

各ユースケースにおける課題解決システムの効果検証項目を以下に示す。なお、効果検証は、課題解決システムの利用者視点から実証を行った。

作業工程毎の効果検証項目については、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-03-課題実証結果取りまとめ資料」を参照のこと。

表 4-7 効果検証項目（評価観点と検証項目を記載）

ユースケース	評価観点	効果検証項目
生産設備の導入に係る事前検証 ・ 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認	生産設備の導入に係る事前検証の効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検討品質</li> <li>・ 人数</li> <li>・ 参加時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業時間（一人当たり）</li> <li>・ 連続使用可能時間（一人当たり）</li> <li>・ 検討時間（一人当たり）</li> </ul>
	生産設備の導入に係る作業者の安全性及び健康への配慮	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安全性</li> <li>・ 移動可能範囲</li> </ul>
遠隔作業支援 ・ 生産設備製作時の配線作業 遠隔支援	生産設備の製作に係る作業効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検討品質</li> <li>・ 映像品質</li> <li>・ 遠隔操作実施可否</li> <li>・ 人数</li> <li>・ 参加時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業時間（一人当たり）</li> <li>・ 検討時間（一人当たり）</li> </ul>
	生産設備の製作に係る作業者の安全性及び健康への配慮	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 連続使用可能時間（一人当たり）</li> </ul>

##### 4.4.2 検証方法

MR 技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証及び遠隔作業支援の各ユースケースに基づく実証を通じて、現状の MR システム及び課題解決システムについて定量的かつ定性的な面から測定し効果検証を行った。定量面では、現状の工場現場での MR システム活用における作業工程毎に人数、時間、重量、大きさ等を測定した。定性面では、現場作業

者のインタビューを通じて安全、品質、移動可能範囲等を確認した。なお、検証に当たっては、定量化に必要な計測を行うとともに、課題解決システムの利用における現場作業員及び運用者による評価を実施することで、課題や改善点に係る検討を行った。

#### 4.4.3 検証結果

##### 4.4.3.1 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の効果検証結果

ユースケース「生産設備（初号機）製作途中の不具合確認」において、従来（現状）の MR システムと課題解決システムを活用した場合の比較では、当初想定していた通り、安全、品質、コストの面で向上が確認できた。一方で、新たな課題も確認できた。

安全においては、光ケーブル躓きの危険が解消され、足元の床を気にせずに確認作業が実施できるようになった。

一方で、バックパックが重い（約 13kg）ため屈伸が必要な下部の確認でバランスを崩す等のリスクを感じた。また、MR システムを固定できず、安全性は確保されていない。

品質においては、無線化によって現場で簡単に生産設備の 3D データ入れ替えが可能になり、様々な検討が実施でき漏れがなくなった。また、光ケーブル取り回しの制約によって現状は移動可能範囲が 10m だったのに対し、本実証（CanBe）では光ケーブル取り回しの制約を受けずに移動可能範囲の制限がなくなった。これにより、足元の床を気にせずに作業を実施できるようになった。

一方で、MR システムのプレーヤー用ノート PC が給電可能な状況でないと実証実施に耐える性能が確保できず、ノート PC を稼働させるのに必要な電力を確保できる容量・高出力なバッテリーを搭載する必要があった。搭載したバッテリーの諸元については、前述の「3.2.6.2 バックパック方式」を参照のこと。これにより、想定より重く大きなバックパックを背負う必要があり、背中が固定される・作業姿勢が制限されることがあった。

コストにおいては、MR システムを利用する現場作業員の人数に変化はなかったが、バックパックが重い（約 13kg）ため連続作業が困難になり、1 回当たりの作業時間に 20 分の上限を設けた。

本実証（CanBe）を通じて、製造現場で課題解決システムを更に活用するためには、バックパックの小型化、軽量化及び、ノート PC と無線の性能改善が必要となることが確認できた。これらの課題が解決された場合、安全、品質、コストの面において一層の向上が期待できる。なお、作業工程毎の結果詳細を以下に示す。AsIs と CanBe を比較して、特出すべき事項を確認できたものに関しては、その理由について記載する。

表 4-8 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の効果検証結果

【凡例】 ○：実現可能 △：一部課題がある ×：実現不可能

実証実験 検証項目				実証実験 結果				今後の期待	
作業工程	検証項目 (大項目)	検証項目 (中項目)	ToBe (最終目標 値)	AsIs (現状)	CanBe (本実証)	結果 (AsIsCanBe 比較)	補記	最終目標値 への実現可能性	
①検証シ ナリオ検 討	コスト	人数	2名	2名	2名	変化なし	-	○	-
		参加時間	60分	60分	60分	変化なし	-	○	検証機会の増加により標準化 が進み、さらに短縮/検証項目 追加も可能となる
②現地下 見	コスト	人数	2名	2名	2名	変化なし	-	○	同上
		参加時間	60分	60分	60分	変化なし	-	○	同上
③データ 準備	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
④搬送準 備	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑤搬送	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑥電源準 備・結線	なし	-	-	-	-	-	-	-	-

⑦機器調整・キャリブレーション	コスト	人数	1名	1名	1名	変化なし	-	○	-
		作業時間	5分	5分	5分	変化なし	-	○	-
⑧実証実施	安全	安全性	向上	従来通り	向上/低下	向上/低下	光ケーブル躓きの危険が解消され、床を気にせず確認作業が実施できるようになった。一方、バックパックの重さでバランスを崩す等のリスクもあった。<1>詳細記載	○	バックパックの小型・軽量化は近い将来実現可能と判断
		移動可能範囲	向上	従来通り	向上/低下	向上(10m ⇒制限なし)/低下	光ケーブル取り回しの制約がなくなり、床を気にせず確認作業が実施できるようになった、一方、バックパックによって背中が固定され、作業姿勢が制限されることがあった。<2>詳細記載	○	同上
	品質	検討品質	向上	従来通り	向上	向上	無線化によって現場で簡単に生産設備の3Dデータ入れ替えが可能になり、様々な検討を短時間で実施できるようになった。	○	社内LANとローカル5G設備の接続によりUSBメモリへのコピー不要-
	コスト	人数	3名	3名	3名	変化なし	-	○	-
		連続使用可能時間	30分	30分	20分	減少	バックパックが重いので連続作業が困難になり、一回当たりの作業時間に20分の上限を設けた。	○	バックパックの小型・軽量化は近い将来実現可能と判断
		検討時間	120分	120分	120分	変化なし	-	○	-
⑨分解・搬送準備	なし	-	-	-	-	-	-	-	

⑩搬送	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑪結線	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑫稼働確認	なし	-	-	-	-	-	-	-	-

### < 1 > 実証実施における安全性

光ケーブル躓きの危険が解消され、足元を気にせずに確認作業が実施できるようになった。

一方、バックパックが重い（約 13kg）ため屈伸が必要な下部の確認でバランスを崩す等のリスクを感じた。

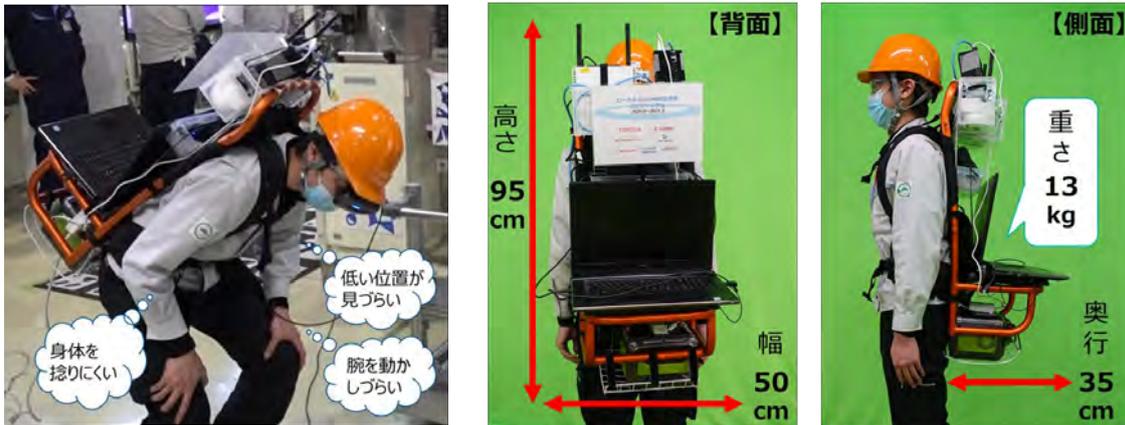


図 4-13 現場作業者の作業負荷

- ・ 当社では、女性の重量物取り扱い作業の基準値は 12kg との定めがある。バックパックの総重量は 13kg であったため、現場作業者の安全性の向上には繋がらなかった。
- ・ バックパックの重さや大きさによって、現場作業者の作業負荷が掛かった。（重さ：13kg、大きさ：高さ 95cm×幅 50cm×奥行 35cm）
- ・ バックパックによって背中が固定され、現場作業者の作業姿勢が限定された。（屈伸が必要な下部の確認でバランスを崩す等のリスクを感じる等）



図 4-14 現場作業者の安全性に関する説明

- ・ 現場ではヘルメットと保護メガネを着用しなければならないが、MR システム（MREAL MD-20）の場合はヘルメットと保護メガネを着用できない。MR システム（MREAL S1）の場合は、ヘルメットを被ることはできたが HMD がずり落ちてしまうことがあったため、HMD を固定する方法を検討する必要がある

る。また、保護メガネの着用についても同様に検討する必要がある。

#### <2>実証実施における移動可能範囲

光ケーブル取り回しの制約がなくなり、足元を気にせずに作業を実施できるようになった。

一方、大きなバックパックで背中が固定、作業姿勢が制限されることがあった。現場作業員からも“背中を折り曲げづらい”“腕を動かしづらい”“低い位置が見づらい”といった意見があり、移動可能範囲が低下する一面も確認された。バックパックの重さや大きさについての説明は、「<1>実証実施における安全性」を参照のこと。

#### 4.4.3.2 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の効果検証結果

ユースケース「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」において、現状は熟練技術者が現地に赴いて指示・助言を行っていた場合と課題解決システムを活用した場合の比較では、当初想定していた通り人数の変化はなかったが作業時間は減少し、コスト削減効果が確認できた。また、無線化により現場でのデータの差し替えが可能になり、様々な検討を実施できるようになったことで検討品質は向上した。今後、バックパックの小型化や軽量化が実現すれば、更なる品質の向上も期待できる。

一方で、4.7GHz帯においてはローカル5G通信による影響を受けて遅延・コマ落ち等があり、映像品質は低下した。ただし、28GHz帯においては熟練技術者が遠隔から指示・助言を行うことは問題なく実施できたことから、熟練技術者が現地に赴く時間や出張費用の削減につながるため、人手不足の課題に対する効果があることを確認できた。

なお、本実証では、ローカル5Gによる完全無線化(ToBe)として、バックパックを小型化(バッテリーのみ)又は廃止し、HMDのみを工場に持ち込む方式を想定している。このような方式が実現できた場合には、今回一部効果が得られなかった品質向上においても効果が見込まれる。なお、作業工程毎の結果詳細を以下に示す。AsIsとCanBeを比較して、特出すべき事項を確認できたものに関しては、その理由について記載する。

表 4-9 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の効果検証結果

【凡例】 ○：実現可能 △：一部課題がある ×：実現不可能

実証実験 検証項目				実証実験 結果				今後の期待	
作業工程	検証項目 (大項目)	検証項目 (中項目)	ToBe (最終目標 値)	AsIs (現状)	CanBe (本実証)	結果 (AsIsCanBe 比較)	補記	最終目標値 への実現可能性	
①検証シ ナリオ検 討	コスト	人数	3名	3名	3名	変化なし	-	○	-
		参加時間	60分	60分	60分	変化なし	-	○	検証機会の増加により標準化 が進み、さらに短縮/検証項目 追加も可能となる
②現地下 見	コスト	人数	3名	-	3名	増加	現状遠隔支援を実施していた ため新たな作業工程が追加とな った。	○	同上
		参加時間	60分	-	60分	増加	同上	○	同上
③データ 準備	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
④搬送準 備	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑤搬送	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
⑥電源準 備・結線	なし	-	-	-	-	-	-	-	-

⑦機器調整・キャリブレーション	コスト	人数	1名	-	1名	増加	現状遠隔支援を実施していたため新たな作業工程が追加となった。	○	-
		作業時間	5分	-	5分	増加	同上	○	-
⑧実証実施	安全	連続使用可能時間	30分	30分	20分	減少		○	バックパックの小型・軽量化は近い将来実現可能と判断
	品質	検討品質	向上	従来通り	向上	向上	熟練技術者による的確な遠隔支援により、検討漏れがなくなり品質が向上した。 遠隔支援者が客観視の映像を見ることができれば、更なる品質の向上に期待できる。	○	-
		映像品質	向上	従来通り	向上	低下	一か所無線で映像通信するため、映像品質が落ちることがあった。<1>詳細記載	○	-
		遠隔操作	実施可能	-	実施可能	実施可能	課題解決システムの活用によって遠隔から支援できる目途が立った。	○	-
	コスト	人数	3名(2名+遠隔1名)	3名	3名(2名+遠隔1名)	遠隔支援可能	同上	○	-
		検討時間	120分	120分	120分	変化なし	図面から3Dデータでの確認作業に置き換わり、現物が無くてもMRで重ねて/並べて確認できると作業イメージが湧く等、作業効率が向上した。	○	-
⑨分解・搬送準備	なし	-	-	-	-	-	-	-	
⑩搬送	なし	-	-	-	-	-	-	-	
⑪結線	なし	-	-	-	-	-	-	-	

⑫稼働確認	なし	-	-	-	-	-	-	-	-
-------	----	---	---	---	---	---	---	---	---

< 1 > 実証実施における映像品質（遠隔）

無線通信の不安定さにより遅延・コマ落ち等、映像品質が落ちることがあった。これは、ローカル 5G 通信による影響を受けたと考えられる。

【4.7GHz 帯】

- ・ タブレットプレーヤーとプレーヤーとの通信が不安定であったことから遠隔支援者の確認用ノート PC に上手く表示されず、遠隔支援者が現場作業者に対して作業指示を行うことが困難であった。

通信が不安定となってしまった要因としては、課題実証の対象とした生産設備の組み立て場所が設計当初想定していた利用場所（C4-D5 柱間）ではなく、その外側（C5-D6 柱間）のエリアとなり、特に 4.7GHz 帯 Abit 社製基地局のカバーエリア外での実証となったためである。

【28GHz 帯】

- ・ 影響なし（タブレットプレーヤーとプレーヤーとの通信は安定）

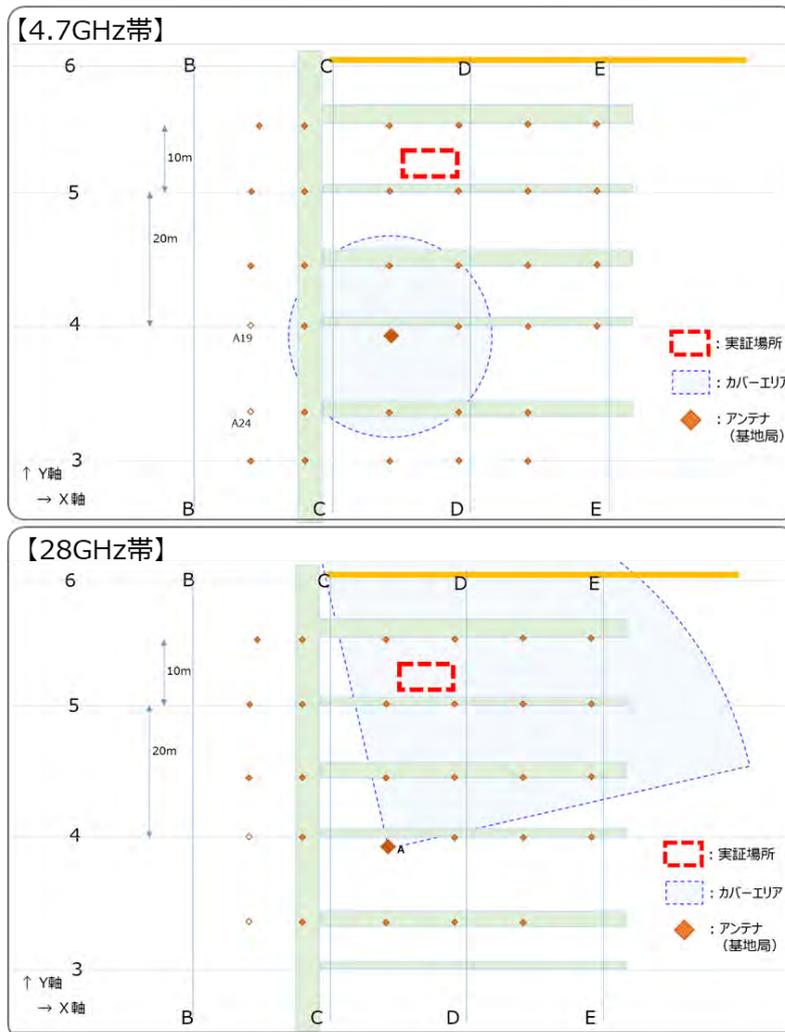


図 4-15 実証場所とローカル 5G カバーエリア

#### 4.4.3.3 現場作業員へのインタビュー結果

工場現場における課題解決システムの有効性の把握やローカル 5G による完全無線化 (ToBe) を見据えた課題抽出を目的に、現場作業員に対するインタビューを実施した。本インタビューは、MR システムの利用者である「検討責任者 (設計者)」「作業実施者」「作業評価者 (遠隔支援の場合は、技術支援者)」を対象とした。なお、MR システムの運用者である「MR 技術担当者」「MR 補助者」は、課題実証メンバーに含まれるため、本インタビューの対象外とした。

課題実証時のインタビュー結果を以下に示す。なお、現場作業員の生の意見として、発言をそのまま記載している。

##### ■MR システムに関する意見

###### <工場現場での MR システム利用>

###### ➤ 良い点

- ・ 現物と図面が違っていると作業が止まってしまう、内容によっては当日作業ができないこともある。そのため、既存設備を改造する場合、現物と図面が違いうことに早めに気づくことが出来る。
- ・ 現物のない一部の設備を MR システムで (3D 形状で重ねて) 見れるとイメージが湧きやすい。

###### <遠隔での MR システム利用>

###### ➤ 良い点

- ・ 移動時間が短縮され、熟練作業員が他の仕事に充てる時間が増えると製造現場の人手不足の解決につながると思う。

###### ➤ 改善点

- ・ 言葉では伝わりにくいので指導者が映像を操作できるとよい (現場作業員が見ている映像上に、指導者が注視点をポインターで指示する機能は既に実装済であるが、今回の実証においては活用していなかった)。
- ・ 遠隔機能を活用していくと、工場現場で直接話すことで得られる機会は失われる (現地現物の考えに合わない)。
- ・ 遠隔支援をするためには、ある程度同等の知識レベルが必要になるため、工場現場での直接指導が完全になくなることはないと思う (ベテランならば、現地に行かなくても経験や知識で指導できるが、経験の乏しい若手が現場に行かなくなることや現場でのベテランの指導が減ることによる現場の若手育成が疎かになることを懸念)。

###### <バックパック方式 (CanBe) 又は、完全無線化 (ToBe) での MR システム利用>

###### ➤ 良い点

- ・ 足元の床を気にせずに作業がしやすかった。
- ・ 将来 HMD のみで作業ができるようになれば、改造工事を指示することもできるようになると思う (事前シミュレーション以外にも活用できる)。

###### ➤ 改善点

- ・ 組付け作業は潜り込む姿勢が多いので、背負子をなくして HMD のみになると良い

- (今回のバックパックは大きく、重く感じた)。
- ・ 作業しにくい(背中を折り曲げづらい、腕を動かしづらい等)。
  - ・ MR システムを装着しても負荷が掛からないようになってほしい(例えば1時間保証等)。

#### <MR システム>

##### ➤ 改善点

- ・ 身体(手)を動かすと HMD に映されている画像の遅延が気になった(MR 酔いに繋がる)。
- ・ 20分使用後、平衡感覚が狂った(リアルな映像になったからだと思う)。
- ・ 3D データ映像と現物(手元)の距離感が掴みにくかった。
- ・ HMD は保護メガネと同等のサイズになると便利。

#### ■ローカル 5G に関する意見

##### ➤ 改善点

- ・ 4.7GHz 帯と 28GHz 帯と比較しても、映像に違いを感じなかった。
- ・ 現場作業者が見ている映像を遠隔地にいる指導者も遅延なく見れることが重要
- ・ 通信が安定していない(フレーム落ちや遅延等)状況では遠隔支援は難しい。
- ・ 遠隔支援側から電波強度が確認できると良い(ネットワークに問題があるのか MR システムに問題があるのかといった切り分けができる)。

#### ■MR システム及びローカル 5G 共通の意見

##### ➤ 改善点

- ・ 映像や音声にトラブルが発生した際の対処方法は明確になっていたほうがよい。

#### 4.4.4 考察

本実証では、光ケーブルによる制約がなくなったことで、足元を気にせず作業を行えるようになり、安全性、検討品質が向上した。将来的にローカル 5G が各工場に敷設されると、場所を選ばずに MR システムを使用することが可能となる。

加えて、将来ローカル 5G を用いた完全無線化(ToBe)を実現できれば、安全性、作業性がさらに向上することが期待できる。

また、指導者(熟練技術者)が、工場現場からローカル 5G を通して遠隔指導や支援を行うことが確認できた。これによる効果としては、熟練技術者による指導の機会が増え支援による検討品質の向上、熟練技術の継承にも寄与する。貞宝工場から九州地区の工場にいる現場作業者に対して遠隔支援を行った場合の費用削減効果を以下に示す。

表 4-10 費用削減効果

項目	AsIs	ToBe
対応人数	3名（貞宝から現場作業員2名+運用者1名が現地に出張して支援）	1名（現地にて運用者1名が支援）
移動時間	10時間 × 3名	—
移動費用	35,000円 × 3名	—
宿泊費用	2万円（2泊3日） × 3名	—
MRシステム運搬費用	30,000円	—
作業内容	1日目午前 貞宝→九州の工場へ移動 1日目午後 検証シナリオ検討、現地下見 2日目終日 MRシステムを使用した配線作業指導（30分×複数回） 3日目終日 九州の工場→貞宝へ移動	1日目午前 — 1日目午後 — 2日目終日 MRシステムを使用した配線作業指導（30分×複数回） 3日目終日 —

上述のような効果は確認できたものの、本実証（CanBe）を実現するために準備したバックパックやローカル 5G の性能に対して、以下の課題を確認できた。

具体的には、バックパックの重さ（13kg）が安全基準を満たしていないこと、またバックパック方式によって作業姿勢が限定されたこと、それによる体への負荷が掛かったこと等から、安全性が低下した。

さらに、無線通信の不安定さにより遅延やコマ落ち等が発生したため映像品質が低下し、遠隔から適切に指示できない場面があった。そのため、完全無線化（ToBe）を実現するには軽量化、小型化、通信の安定化の解決が必要と考える。

#### 4.5 課題解決システムに関する運用検証

##### 4.5.1 検証項目

各ユースケースにおける課題解決システムの運用検証項目を以下に示す。なお、運用検証は、課題解決システムの運用者の視点から実証を行った。

作業工程毎の運用検証項目については、「別紙：MIC-L5G-KJ-OP-02-課題実証計画書」を参照のこと。

表 4-11 運用検証項目（評価観点と検証項目を記載）

ユースケース	評価観点	運用検証項目
生産設備の導入に係る事前検証 ・ 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認	生産設備の開発工程の一連の運用プロセスにおける効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人数</li> <li>・ 参加時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業手順</li> <li>・ 重量（作業負荷）</li> </ul>
	運用者の安全性の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安全性（搬送物の転倒、光ケーブルによる躓き）</li> <li>・ 重量</li> </ul>
遠隔作業支援 ・ 生産設備製作時の配線作業 遠隔支援	製造現場の運用作業の効率化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 人数</li> <li>・ 参加時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業時間（一人当たり）</li> <li>・ 検討時間（一人当たり）</li> <li>・ 作業手順</li> <li>・ 出張・MR システム運搬費用</li> <li>・ MR 補助者の業務</li> </ul>
	運用者の安全性の向上	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 安全性（光ケーブルによる躓き）</li> </ul>

#### 4.5.2 検証方法

MR 技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証及び遠隔作業支援の各ユースケースに基づく実証を通じて、現状の MR システム及び課題解決システムについて定量的かつ定性的な面から測定するとともに以下の方法で検証を行った。

##### （1）現状運用業務の洗い出し

現状の MR システムの運用業務について、運用担当者へのヒアリングや資料閲覧、実地調査等により作業工程毎に業務内容の洗い出しを行った。

##### （2）課題解決システムの運用作業の定義

ワークショップにて本実証（CanBe）における MR システムの運用業務の洗い出しを行った。また、ローカル 5 G による完全無線化（ToBe）におけるあるべき運用業務の作業工程の定義を行った。

##### （3）運用状態の測定調査

現状及び本実証（CanBe）における MR システムの運用について、各ユースケースに基づく実証を行う中で、作業工程毎の運用に係る所要時間をストップウォッチ等で測定した。

#### (4) 現状運用とローカル5GによるMRシステム運用の比較、課題抽出

作業工程毎に運用業務内容の差異の確認及び運用状態の測定結果から、本実証 (CanBe) における MR システムの運用業務での効果を確認した。また、今後の課題を抽出するとともに解決策の検討を行った。

### 4.5.3 検証結果

#### 4.5.3.1 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の運用検証結果

ユースケース「生産設備（初号機）製作途中の不具合確認」における現状と本実証 (CanBe) での作業工程の有無に関しては差異が無いことを確認できた。ただし、③データ準備、④搬送準備、⑤搬送、⑥電源準備・結線、⑦機器調整・キャリブレーション、⑨分解・搬送準備、⑩搬送、⑪結線、⑫稼働確認の作業工程において準備・片付けに係る時間の削減に効果があることを確認できた。

作業工程：③データ準備

USB へのデータコピー、持ち出し手続きにより、想定どおり作業時間及び作業手順が増加することが分かった。ただし、将来的に社内 LAN にローカル5G が接続された環境が整備できた場合には、現状運用の通りとなり、作業時間や作業手順が増加することはないと想定される。

作業工程：④搬送準備

MR システムの搬送のために現在行われている光ケーブルの取り外しや台車を転倒防止ネットで覆う等の作業がなくなることで、人数、作業時間及び作業手順が減少することが分かった。また、搬送物の重さや大きさが縮小することで安全性が向上することを確認できた。

作業工程：⑤搬送

搬送物の重さや大きさが縮小したことにより、人数及び作業時間が減少することが分かった。また、バックパック方式にしたことにより手軽に搬送することが可能となり、安全性が向上することも分かった。

作業工程：⑥電源準備・結線

バックパック方式により光ケーブル跨ぎがなくなることで想定どおり安全性が向上することを確認できた。また、工場現場での電源準備に掛かる作業が削減されたことで人数は想定よりも減少することが分かった。一方、作業時間については、バックパックの電源投入、起動、接続確認が必要となるため、変化はなかった。

作業工程：⑦機器調整・キャリブレーション

MR システムが無線化され光ケーブルを捌く必要がなくなったため、人数は減少し、作業時間には変化がないことが分かった。また、安全性についても光ケーブル跨ぎがなく

なることで想定どおり向上することが確認できた。

#### 作業工程：⑧実証実施

MR システムが無線化され光ケーブルを捌く業務がなくなることから人数と運用者の業務削減につながる想定だったが、バックパックの重さや大きさによる影響で現場作業者の安全性を補助する者が必要となった。そのため、人数と運用者の業務は削減されなかった。

#### 作業工程：⑨分解・搬送準備

MR システムの搬送のために現在行われている光ケーブルの取り外しや台車を転倒防止ネットで覆う等の作業がなくなること、想定どおり人数、作業時間及び作業手順が減少することが分かった。また、搬送物の重さや大きさが縮小することで安全性が向上することを確認できた。なお、将来的に社内 LAN にローカル 5G が接続された環境が整備できた場合には、本作業工程自体がなくなり、運用業務の効率化に繋がる効果が期待できる。

#### 作業工程：⑩搬送

搬送物の重さや大きさが縮小したことにより、人数及び作業時間が減少することが分かった。また、バックパック方式にしたことにより手軽に搬送することが可能となり、安全性が向上することも分かった。なお、将来的に社内 LAN にローカル 5G が接続された環境が整備できた場合には、本作業工程自体がなくなり、運用業務の効率化に繋がる効果が期待できる。

#### 作業工程：⑪結線

バックパック方式により MR ルームでの結線に掛かる作業が削減され人数は想定よりも減少することが分かった。また、作業時間についてはバックパックの電源投入、起動、接続確認が必要となるため、想定どおり変化はなく、安全性についても光ケーブル跨ぎがなくなること、想定どおり向上することが確認できた。将来的に社内 LAN にローカル 5G が接続された環境が整備できた場合には、本作業工程自体がなくなり、運用業務の効率化に繋がる効果が期待できる。

なお、作業工程毎の結果詳細を以下に示す。AsIs と CanBe を比較して、特出すべき事項を確認できたものに関しては、その理由について記載する。

表 4-12 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認の運用検証結果

【凡例】 ○：実現可能 △：一部課題がある ×：実現不可能

実証実験 検証項目			実証実験 結果					今後の期待	
作業工程	検証項目 (大項目)	検証項目 (中項目)	ToBe (最終目標 値)	AsIs (現状)	CanBe (本実証)	結果 (AsIsCanBe 比較)	補記	最終目標値 への実現可能性	
①検証シ ナリオ検 討	コスト	人数	1名	1名	1名	変化なし	-	○	-
		参加時間	60分	60分	60分	変化なし	-	○	検証機会の増加により標準化 が進み、さらに短縮/検証項目 追加も可能となる
②現地下 見	コスト	人数	1名	1名	1名	変化なし	-	○	同上
		参加時間	60分	60分	60分	変化なし	-	○	同上
③データ 準備	コスト	作業時間 (USB コピ ー時間)	0分	0分	10分	増加	社内 LAN に接続できないため 本実証環境特有の運用が発生 した	○	社内 LAN とローカル 5G 設備 の接続により USB メモリへのコ ピー不要
		作業時間 (検証用 データ準 備)	最大半日	最大半日	最大半日	変化なし	-	○	-
		USB メモリ の持ち出 し手順	0分	0分	5分	増加	社内 LAN に接続できないため 本実証環境特有の運用が発生 した	○	社内 LAN と L5G 設備の接続 により USB メモリへのコピー不 要

④搬送準備	安全	安全性 (端末の転倒防止)	HMDのみ	高さ180cm ×幅110cm ×奥行 75cm	高さ95cm ×幅50cm ×奥行 35cm	向上	搬送物のサイズ縮小により安全性が向上した	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
		重量	350g	70kg+カー ペットマー カー	13kg+カー ペットマー カー	減少	バックパック方式により搬送物の重量が軽減した	△	同上
	コスト	人数	1名	3名	2名	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで人数は減少した	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	30秒	5分	30秒	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで作業時間が減少した	○	同上
		搬送準備に係る手順	1工程	6工程	3工程	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで搬送準備に係る手順は減少した	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
⑤搬送	安全	安全性 (端末の転倒防止)	HMDのみ	高さ180cm ×幅110cm ×奥行 75cm	高さ95cm ×幅50cm ×奥行 35cm	向上	搬送物のサイズ縮小により安全性が向上した	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
		重量	350g	70kg+カー ペットマー カー	13kg+カー ペットマー カー	減少	バックパック方式により搬送物の重量が軽減した	△	同上
	コスト	人数	1名	3名	2名	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで人数は減少した	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	3分	15分	4分	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで作業時間が減少した	○	同上

⑥電源準備・結線	安全	安全性 (躓きなどないか)	向上	従来通り	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険性が解消した	○	同上
⑦機器調整・キャリアレーション	安全	安全性 (躓きなどないか)	向上	従来通り	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険性が解消した。	○	-
	コスト	人数	1名	2名	1名	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで人数は減少した	○	-
		作業時間	5分	5分	5分	変化なし	-	○	-
⑧実証実施	コスト	人数	1名	2名	2名	変化なし	作業者を補助する者が必要となり、人数削減に繋がらなかった	○	バックパックの小型・軽量化は近い将来実現可能と判断
		検討時間	120分	120分	120分	変化なし	無線化したことで運用業務が効率化され作業時間が減少した訳ではなく、現場作業者の検証作業時間が減少されたことに合わせて運用者の作業時間も減少した	○	同上
		MR 補助者の業務	不要	従来通り	変化なし	変化なし	作業者を補助する業務が発生し、MR 補助者の業務削減に繋がらなかった	○	同上

⑨分解・搬送準備	安全	安全性 (端末の転倒防止)	HMDのみ	高さ180cm ×幅110cm ×奥行 75cm	高さ95cm ×幅50cm ×奥行 35cm	向上	搬送物のサイズ縮小により安全性が向上した。	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
		重量	350g	70kg+カー ペットマー カー	13kg+カー ペットマー カー	減少	バックパック方式により搬送物の重量が軽減した。	△	同上
	コスト	人数	1名	3名	2名	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで人数は減少した	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	30秒	5分	3分	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで作業時間が短縮された	○	同上
		搬送準備に係る手順	1工程	6工程	2工程	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで搬送準備に係る手順は減少した	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
⑩搬送	安全	安全性 (端末の転倒防止)	HMDのみ	高さ180cm ×幅110cm ×奥行 75cm	高さ95cm ×幅50cm ×奥行 35cm	向上	安全性 (端末の転倒防止)	△	同上
		重量	350g	70kg+カー ペットマー カー	13kg+カー ペットマー カー	減少	バックパック方式により搬送物の重量が軽減した。	△	同上
	コスト	人数	1名	3名	2名	減少	持ち運びが容易なバックパック方式としたことで人数は減少した	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	3分	15分	4分	減少	バックパック方式による搬送時間が短縮した。	○	同上

⑪結線	安全	安全性 (躓きなど ないか)	向上	従来通り	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険 性が解消した。	○	-
	コスト	人数	1名	3名	2名	減少	持ち運びが容易なバックパック 方式としたことで人数は減少し た	○	1人運搬が可能なサイズは、近 い将来実現可能と判断
		作業時間	30秒	5分	5分	変化なし	-	○	同上
⑫稼働確 認	コスト	人数	1名	1名	1名	変化なし	-	○	-
		作業時間	10分	10分	10分	変化なし	-	○	-

#### 4.5.3.2 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の運用検証結果

ユースケース「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」では、現状 MR システムを活用していないため、全ての作業工程で課題解決システム（バックパック方式）の運用業務が発生した。

作業工程：①検証シナリオ検討

MR システムを活用した検証作業を行うため、MR 技術担当者が検証シナリオ検討会に参加する必要があり、人数と参加時間が増加することが分かった。

作業工程：②現地下見

MR システムを活用するため、工場現場の広さや明るさ、社内 LAN の有無、作業時間（バッテリー持ち時間）を確認する現地下見が必要となり、人数、参加時間が増加することが分かった。

作業工程：③データ準備

MR システムを活用するため、USB へのデータコピー、持ち出し手続きにより、作業時間及び作業手順が増加することが分かった。ただし、将来的に社内 LAN にローカル 5G が接続された環境が整備できた場合には、USB を使用せず MR システムを利用できるようになるため、これらの業務は発生しない。

作業工程：④搬送準備

MR システムを活用するため、バックパックやカーペットマーカなどの搬送準備が必要となり、人数や作業時間、作業手順が増加することが分かった。

作業工程：⑤搬送

MR システムを活用するため、バックパックやカーペットマーカなどの搬送が必要となり、人数や作業時間、作業手順が増加することが分かった。

作業工程：⑥電源準備・結線

MR システムを活用するため、バックパックと HMD の結線が必要となり、人数や作業時間が増加することが分かった。

作業工程：⑦機器調整・キャリブレーション

MR システムを活用するため、カーペットマーカの敷設や各機器のローカル 5G への接続、キャリブレーションが必要となり、人数や作業時間が増加することが分かった。

作業工程：⑧実証実施

MR システムを活用するため、MR 技術担当者が工場現場に出張し MR システムを操作する必要があり、人数や作業時間が増加することが分かった。

作業工程：⑨分解・搬送準備

MR システムを活用するため、バックパックやカーペットマーカなどの搬送準備が必要となり、人数や作業時間、作業手順が増加することが分かった。

作業工程：⑩搬送

MR システムを活用するため、バックパックやカーペットマーカなどの搬送が必要となり、人数や作業時間、作業手順が増加することが分かった。

作業工程：⑪結線

MR システムを活用するため、MR システムの稼働確認が必要となり、人数や作業時間が増加することが分かった。

作業工程：⑫稼働確認

MR システムを活用するため、MR システムの稼働確認が必要となり、人数や作業時間が増加することが分かった。

なお、作業工程毎の結果詳細を以下に示す。想定効果と実証結果を比較して、想定していた結果と異なる結果となったものについては、その理由について記載する。

表 4-13 生産設備製作時の配線作業遠隔支援の運用検証結果

【凡例】 ○：実現可能 △：一部課題がある ×：実現不可能

実証実験 検証項目				実証実験 結果				今後の期待	
作業工程	検証項目 (大項目)	検証項目 (中項目)	ToBe (最終目標 値)	AsIs (現状)	CanBe (本実証)	結果 (AsIsCanBe 比較)	補記	最終目標値 への実現可能性	
検証シナ リオ検討	コスト	人数	1名	0名	1名	増加	現状遠隔支援を実施してい ないため MR 技術担当者担当は 検証シナリオには参加してい ない。	○	-
		参加時間	60分	0分	60分	増加	同上	○	検証機会の増加により標 準化が進み、さらに短縮/ 検証項目追加も可能とな る
②現地 下見	コスト	人数	1名	-	1名	増加	現状遠隔支援に MR 技術担当 者が参加していないため新た な作業工程が追加となった。	○	同上
		参加時間	60分	-	60分	増加	同上	○	同上
③デー タ 準備	コスト	作業時間 (USB コピ ー時間)	0分	-	10分	増加	同上	○	社内 LAN とローカル 5G 設備の接続により USB メ モリへのコピー不要-
		作業時間 (検証用 データ準 備)	最大半日	-	最大半日	増加	同上	○	-
		USB メモリ の持ち出 し手順	0分	-	5分	増加	同上	○	社内 LAN とローカル 5G 設備の接続により USB メ モリへのコピー不要

④搬送準備	コスト	人数	1名	-	2名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	30秒	-	30秒	増加	同上	○	同上
		搬送準備に係る手順	1工程	-	2工程	増加	同上	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
⑤搬送	コスト	人数	1名	-	2名	増加	同上	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
		作業時間	3分	-	4分	増加	同上	○	同上
		出張費用・MRシステム運搬費用	出張費用:0円 MRシステム運搬費用:0円	-	出張費用:0円 MRシステム運搬費用:30,000円	増加	同上	○	検証機会の増加により標準化が進み、運搬不要となる
⑥電源準備・結線	安全	安全性(躓きなどないか)	向上	-	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険性が解消した。	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断
	コスト	人数	1名	-	2名	増加	同上	○	同上
		作業時間	3分	-	5分	増加	同上	○	同上

⑦機器調整・キャリアブレーション	安全	安全性 (躓きなどないか)	向上	-	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険性が解消した。	○	バックパックの小型・軽量化は近い将来実現可能と判断
	コスト	人数	1名	-	2名	増加	現状遠隔支援を実施していたため新たな作業工程が追加となった。	○	同上
		作業時間	5分	-	5分	増加	同上	○	-
⑧実証実施	コスト	人数	1名	0名	1名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	-
		検討時間	120分	120分	120分	変化なし	-	○	-
⑨分解・搬送準備	コスト	人数	1名	-	2名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断-
		作業時間	30秒	-	30秒	増加	同上	○	同上
		搬送準備に係る手順	1工程	-	3工程	増加	同上	△	CPU・GPU能力、バッテリー容量等の実現課題
⑩搬送	コスト	人数	1名	-	2名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断-
		作業時間	3分	-	4分	増加	同上	○	同上

		出張費用・MRシステム運搬費用	出張費用:0円 MRシステム運搬費用:0円	-	出張費用:0円 MRシステム運搬費用:30,000円	増加	同上	○	検証機会の増加により標準化が進み、運搬不要となる
⑪結線	安全	安全性 (躓きなどないか)	向上	-	向上	向上	光ケーブルによる躓きの危険性が解消した。	○	-
	コスト	人数	1名	-	2名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	1人運搬が可能なサイズは、近い将来実現可能と判断-
		作業時間	30秒	-	5分	増加	同上	○	同上
⑫稼働確認	コスト	人数	1名	-	1名	増加	現状遠隔支援にMR技術担当者が参加していないため新たな作業工程が追加となった。	○	-
		作業時間	10分	-	10分	増加	同上	○	-

#### 4.5.4 考察

本実証では、現場作業者の動作に合わせて光ケーブルを捌く業務が不要となり、現場作業員だけでなく運用者も光ケーブルで躓くことがなくなり安全性が向上できた。また業務削減に繋がることが確認できた。

具体的には、現状は光ケーブル捌きの業務を行うに当たって年間6人日（月2回実証×120分（1実証）×12か月=2,880分=48時間）の工数が掛かっている。

将来的に完全無線化が実現された場合（ToBe）は、各16工場<sup>xi</sup>（\*1）でMRシステムが配備され、手軽に利用できることで利用回数が増えることが想定される。仮に月4回利用とした場合、768回程度の利用回数が見込まれる。このことから、光ケーブルを捌く業務だけでも192人日分の工数が掛かることが想定される。有線から無線化により、将来的に発生する192人日分の工数削減が期待できる。

しかしながら、本実証（CanBe）の場合は、バックパックの重さや大きさの面から現場作業員の安全性に懸念があり、運用者の補助が必要となり、新たな業務が発生した。将来的にローカル5Gによる完全無線化（ToBe）が実現された場合はHMDのみで作業を行うことが可能になるため、運用者の補助が不要となり、現場作業員の作業効率化に寄与するものと考えられる。

ユースケース「生産設備（初号機）製作途中の不具合確認」の運用検証結果から、一連の作業工程に係る運用者の作業時間を以下に示す。

表 4-14 運用者の作業時間（実証1回当たり）

作業工程	ToBe	AsIs	CanBe
①検証シナリオ検討	60（60×1名）	60（60×1名）	60（60×1名）
②現地下見	60（60×1名）	60（60×1名）	60（60×1名）
③データ準備	240（検証用データ準備）	240（検証用データ準備）	255（検証用データ準備+USBコピー・持ち出し）
④搬送準備	0.5（0.5×1名）	15（5×3名）	1（0.5×2名）
⑤搬送	3（3×1名）	45（15×3名）	8（4×2名）
⑥電源準備・結線	3（3×1名）	15（5×3名）	10（5×2名）
⑦機器調整・キャリブレーション	5（5×1名）	10（5×2名）	5（5×1名）
⑧実証実施	120（1名）	240（120×2名）	240（120×2名）
⑨分解・搬送準備	0.5（0.5×1名）	15（5×3名）	1（0.5×2名）
⑩搬送	3（3×1名）	45（15×3名）	8（4×2名）
⑪結線	0.5（0.5×1名）	15（5×3名）	10（5×2名）
⑫稼働確認	10（10×1名）	10（10×1名）	10（10×1名）
合計（分）	505.5（8時間25分）	770（12時間50分）	668（11時間8分）

<sup>xi</sup> : <https://global.toyota.jp/company/profile/facilities/manufacturing-worldwide/japan.html>

トヨタ自動車株式会社ホームページ（令和3年3月25日（木）取得）

	30 秒)		
--	-------	--	--

運用者の業務としては、ローカル 5 G を活用することで MR システムの搬送に係る作業が効率化され、現状と本実証 (CanBe) を比較して実証 1 回当たり 102 分 (1 時間 42 分) の作業時間削減効果が得られることが分かった。また、現状とローカル 5 G による完全無線化 (ToBe) を比較して 264.5 分 (4 時間 24 分 30 秒) の作業時間削減に繋がることが分かった。

なお、将来的に完全無線化が実現された場合 (ToBe) は、各 16 工場で MR システムが配備され、月 4 回利用した場合、768 回程度の利用回数が見込まれるため、現状と比較して年間 423.2 人日 (264.5 分×768 回=203,136 分=3,385.6 時間) の大幅な工数削減が期待できる。

ユースケース「生産設備製作時の配線作業遠隔支援」の運用検証結果から、一連の作業工程に係る運用者の作業時間を以下に示す。

表 4-15 運用者の作業時間 (実証 1 回当たり)

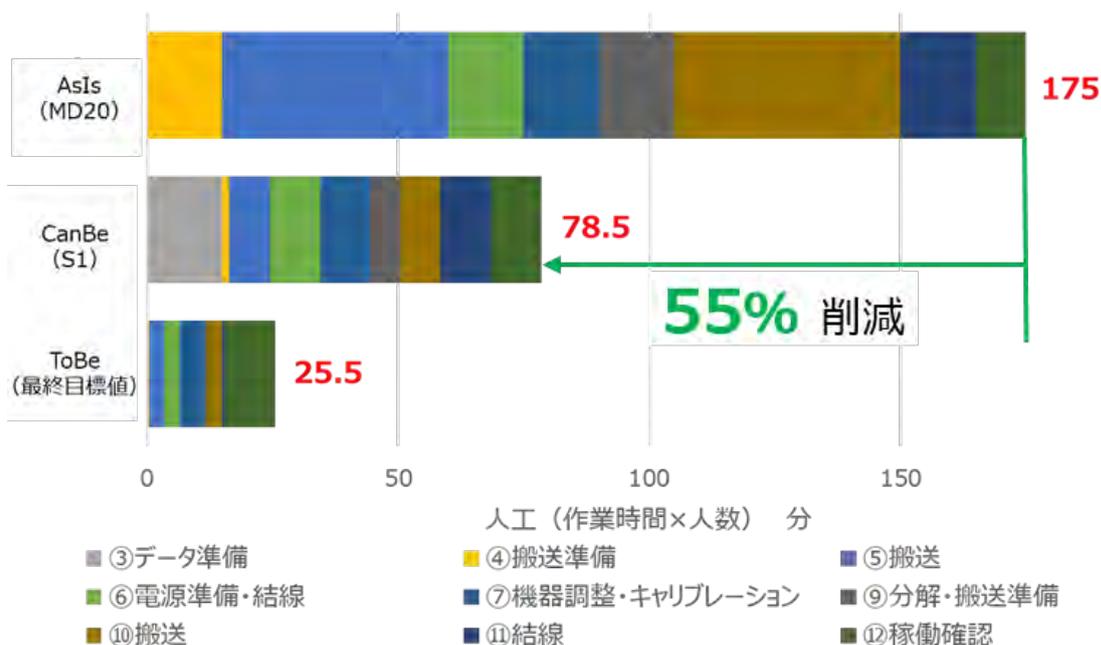
作業工程	ToBe	AsIs	CanBe
① 検証シナリオ検討	60 (60×1 名)	なし	60 (60×1 名)
② 現地下見	60 (60×1 名)	なし	60 (60×1 名)
③ データ準備	240 (検証用データ準備)	なし	255 (検証用データ準備+USB コピー・持ち出し)
④ 搬送準備	0.5 (0.5×1 名)	なし	1 (0.5×2 名)
⑤ 搬送	3 (3×1 名)	なし	8 (4×2 名)
⑥ 電源準備・結線	3 (3×1 名)	なし	10 (5×2 名)
⑦ 機器調整・キャリブレーション	5 (5×1 名)	なし	5 (5×1 名)
⑧ 実証実施	120 (1 名)	なし	240 (120×2 名)
⑨ 分解・搬送準備	0.5 (0.5×1 名)	なし	1 分 (0.5×2 名)
⑩ 搬送	3 (3×1 名)	なし	8 分 (4×2 名)
⑪ 結線	0.5 (0.5×1 名)	なし	10 分 (5×2 名)
⑫ 稼働確認	10 (10×1 名)	なし	10 分 (10×1 名)
合計 (分)	505.5 (8 時間 25 分 30 秒)	0 分	668 (11 時間 8 分)

現状は有線 LAN 利用のため MR システムを活用できるユースケースが限定されていることから、遠隔支援での利用には至っていない。そのため、一連の作業工程で運用業務が発生し、本実証 (CanBe) においては 668 分 (11 時間 8 分)、ローカル 5 G による完全無線化 (ToBe) においては 505.5 分 (8 時間 25 分 30 秒) の運用者の工数増加につながることが分かった。しかしながら、ローカル 5 G を活用した MR システムによる遠隔支援が可能となった場合には、効果検証での結果のとおり指導者 (熟練技術者) の移動に係る費用削減や熟練技術の継承等の効果が見込まれるため総合的には効果が期待できると考えられる。

その効果を発揮するために、ローカル5Gによる完全無線化（ToBe）における運用業務をいかに効率化させるかが今後の課題と考えられる。

これらの結果より、ローカル5GをMRシステムに活用した場合には、運用業務においても一定の効果が期待できる。加えて、安全性が懸念される搬送に係る作業工程自体がなくなることで、運用者の安全性向上にも寄与するものと考えられる。

運用業務作業工程の中で特に業務効率化に大きな効果があった準備・片付け人工について以下に示す。



注釈 1) AsIs/CanBe/ToBe 共通の業務（3Dデータの準備時間 240分）を除く

注釈 2) ①検証シナリオ検討②現地下見⑧実証実施の作業工程を除く

図 4-16 準備・片付け人工（作業時間×人数）

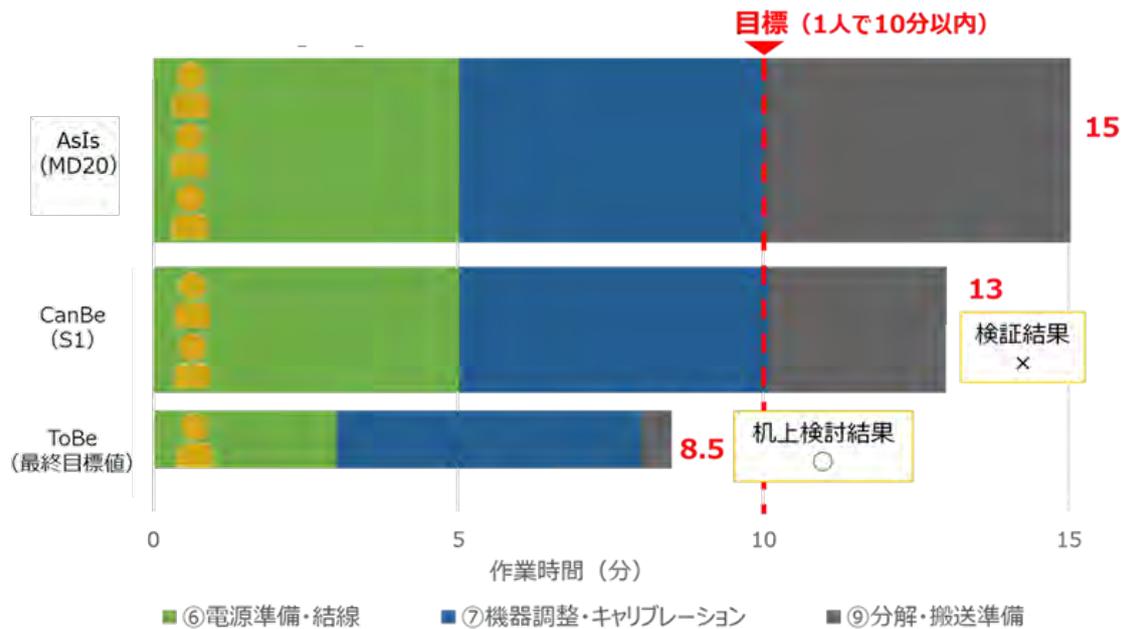


図 4-17 現地準備の片付け時間と人数

現状と本実証 (CanBe) を比較して、準備・片付け時間が 55% 減少することが分かった。ただし、現地準備・片付け時間が 1 人当たり 13 分掛かったため、目標値の 10 分以内を超えていた。しかしながら、将来ローカル 5G による完全無線化 (ToBe) が実現すれば、現地準備・片付け時間は 8.5 分となり、目標値の 10 分以内を達成できる。また、準備・片付け時間においても 85% 減少につながるため、課題解決システムは運用面でも効果があると考えられる。

さらに、副次的効果として、MR システムが普及すれば、現場作業者が MR システムの操作技術を習得することにより、運用者が工場現場に赴く機会が減少することが想定される。そのためには、ローカル 5G が各工場・工場内に普及し、社内 LAN への接続できる環境を構築することが必要となる。将来的に MR 技術担当者がシーンサーバの操作を遠隔 (MR ルーム等) から実施できるようになれば、工場現場への移動にかかる時間や手間が削減されることが想定され現状 (CanBe) よりもより効率化されることが期待できる。

## 4.6 課題解決システムに関する機能検証

MR 技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証及び遠隔作業支援の各ユースケースに基づく実証を通じて、課題解決システムについて評価・分析し、実装に必要な機能について検証を行う。

検討に当たっては、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検討を行い、同結果を踏まえた整理を行う。その他、MR 技術の利用に係る固有の課題（いわゆる「MR 酔い」等）の要因を踏まえた整理も行う。

また、製造現場において求められる高い要件（精度、品質、リアルタイム性、実装の柔軟性等）及びローカル 5 G の特性を活かした将来的な拡張性も踏まえ、システムを構成する要素毎に必要な機能を評価・検証を行う。

### 4.6.1 検証項目

現在の MR システムの構成図、完全無線化を行った時の MR システムの構成図を以下に示す。現在の MR システムでは光ケーブルで PC と接続しているが、完全無線化 MR システムでは、光ケーブルをローカル 5 G に置き換えることを考えている。



図 4-18 現在の MR システムおよび完全無線化 MR システム

ユーザが快適に MR システムを使うため、MR システムでは次の項目を特に重要項目としている。

- ・ 表示映像の鮮鋭さ
- ・ 表示映像のフレームレート
- ・ システムの遅延時間

ローカル 5G を用いて完全無線化した時、上記重要項目に課題はないか重点的に検証する。上記重要項目を効率的に検証するために、HMD の動作をシミュレートする PC（疑似 HMD）を用いた環境を構築した。この構成図を以下に示す。

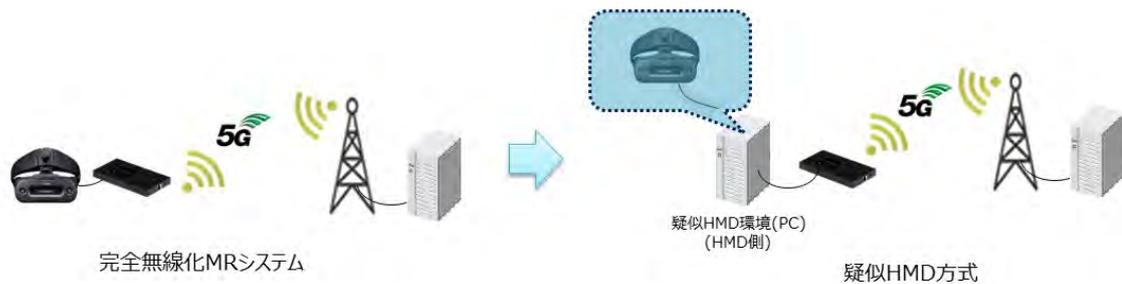


図 4-19 完全無線化 MR システムと疑似 HMD 方式

光ファイバーでは、上り下りで合計約 22.2Gbps の通信を行っており、光ケーブルをローカル 5G に置き換えた場合、上記記載した重要項目（表示映像の鮮鋭さ、表示映像のフレームレート、システムの遅延時間）に関するローカル 5G のスペックとして以下の項目が懸念点となる。

- ・ ローカル 5G の実効速度（上り／下り）、およびばらつき
- ・ ローカル 5G の遅延時間、およびばらつき

ローカル 5G を用いて約 22.2Gbps の通信を行うのは困難なため圧縮・伸長が必要になる。キヤノン社での H.265 圧縮方式を用いた検討において、1/30 程度の圧縮率で画質の劣化を想定より低く抑えられる見通しを得たため、目標値として以下の実効速度になる。

- ・ 上り：約 550Mbps（16.7Gbps/30）
- ・ 下り：約 183Mbps（5.5Gbps/30）

提案書では高画質 HMD MD-20 を想定し、映像を 1/30 程度圧縮した時に対して目標値を以下のように記載した。

- ・ 上り：約 550Mbps（17Gbps/30）
- ・ 下り：約 350Mbps（11Gbps/30）

本実証では、より速い実効速度が必要になる高画質 HMD MD-20 の映像転送の実効速度を目標値として定め、MREAL S1 および MD-20 の完全無線化の実現性を検証する。

MREAL S1、および MD-20 の撮像カメラ、および CG のフレームレートは 60fps である。1 フレームあたり約 16.6msec となっており、1 フレーム以上遅延があると、60fps の動作を守れなくなる可能性があるため遅延時間の目標を 17msec と設定した。

HMD を装着した使用者は動きながら MR システムを使うため、場合によっては基地局とローカル 5G 端末の間に設備等の機材や人があることが想定される。特に 28GHz 帯は金属や人体により電波が遮断されやすいため、これらの条件下での実効速度や遅延時間の変化を調べる必要がある。また、実使用を想定し、同時に 2 セットシステムを使った場合や、基地局をまたいで使用するような条件下での測定も行う。

#### 4.6.1.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証

MR で扱う映像データを、4.7GHz 帯/28GHz 帯の両方を用いて通信した時の実効速度や遅延などの測定をそれぞれ行う。測定結果と今後のローカル 5 G の技術動向を考慮し、どちらの周波数帯が MR システムの無線化に適しているか検証する。MR システムの実使用を想定して、以下の条件下での測定を行う。

- ① 基本的な条件（固定、障害物無し、1 セット使用）
- ② 通信距離の変更（水平）
- ③ 通信距離の変更（垂直）
- ④ アンテナ傾斜
- ⑤ ローカル 5 G 端末を移動
- ⑥ ローカル 5 G と基地局間に金属障害物がある時
- ⑦ ローカル 5 G と基地局間に人体障害物がある時（指向性アンテナ）
- ⑧ ローカル 5 G と基地局間に人体障害物がある時（無指向性アンテナ）
- ⑨ 2 セットを同時に使用
- ⑩ ハンドオーバー

各条件、および測定項目を以下に記載する。通信方向については上りのみ、下りのみ、双方向から適宜選択、通信速度については伝送能力を検証する場合は伝送能力以上の最大速度、安定性を検証する場合は伝送能力と同等の実効速度やパケット落ちが発生しない安定速度から適宜選択した。検証項目の詳細および検証結果は「4.6.3.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」に記載する。

表 4-16 検証項目一覧

	(A) 4.7GHz		(B) 28GHz	
	検証項目	検証結果	検証項目	検証結果
①基本条件	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (1) 1)	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (2) 1)
②通信距離を変更 水平	双方向 最大速度	4.6.3.1 (1) 2)	条件⑤で実施	—
③通信距離を変更 垂直	双方向 最大速度	4.6.3.1 (1) 3)	条件⑤で実施	—
④アンテナ傾斜	双方向 最大速度	4.6.3.1 (1) 4)	条件⑤で実施	—
⑤L5G端末移動 (移動条件：手で移動)	双方向 最大速度	4.6.3.1 (1) 5)	双方向 最大速度	4.6.3.1 (2) 2)
⑥金属障害物	双方向 安定速度	4.6.3.1 (1) 6)	双方向 安定速度	4.6.3.1 (2) 3)
⑦人体障害物 指向性アンテナ	双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (1) 7)	指向性アンテナ無し	—
⑧人体障害物 無指向性アンテナ	双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (1) 8)	双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (2) 4)
⑨2セット使用時	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (1) 9)	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.1 (2) 5)
⑩ハンドオーバー	基地局が1つなので未実施	—	双方向 最大速度/安定速度	4.6.3.1 (2) 6)

#### 4.6.1.2 PC/基地局間のインターフェース検証

PC とローカル 5 G 基地局間の適切なインターフェース（有線/無線）を検証する。

PC とローカル 5 G 基地局もローカル 5 G で無線空間にした時の実効速度、遅延時間、欠損率を計測する。検証項目を以下に記載する。検証項目の詳細および検証結果は「4.6.3.2 PC/基地局間のインターフェース検証」に記載する。

表 4-17 PC/基地局間インターフェース検証項目

	(A) 4.7GHz		(B) 28GHz	
	検証項目	検証結果	検証項目	検証結果
①基本条件	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.2 (1)	上り/下り/双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.2 (2) 1)
②2セット使用时	機材が用意できず未実施	—	双方向 最大速度/実効速度/安定速度	4.6.3.2 (2) 2)

#### 4.6.1.3 MR 技術の利用に係る固有の課題

ローカル 5 G で無線化を行うことにより、現状(有線接続)と比べてシステム全体の遅延の増加や映像品質の低下を引き起こすことが考えられる。上記、「4.6.1.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」及び「4.6.1.2 PC/基地局間のインターフェース検証」で決定したシステムにおいて、計測した遅延時間・データ欠損割合を元に、MR 利用時への影響項目、影響範囲について調査・分析を行う。

#### 4.6.1.4 システムを構成する要素毎に必要な機能

「4.6.1.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」及び「4.6.1.2 PC/基地局間のインターフェース検証」で決定した無線 MR システム構成において、現システムで求められている高い要件（精度、品質等）を無線システムにおいても満たすために、送受信するデータの圧縮が必要となる。そのため、データを圧縮する機能を検証する。

### 4.6.2 検証方法

#### 4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証

以下に示すように MR システム (HMD) を模した PC 環境 (疑似 HMD 方式) を構築し、MR 映像を疑似した映像データを一般的な圧縮方式 (H. 265 等) で圧縮したデータをあらかじめ用意し、PC 間で転送する。ローカル 5 G 通信区間に、4.7GHz 帯と 28GHz 帯の両方を用いて検証を行う。

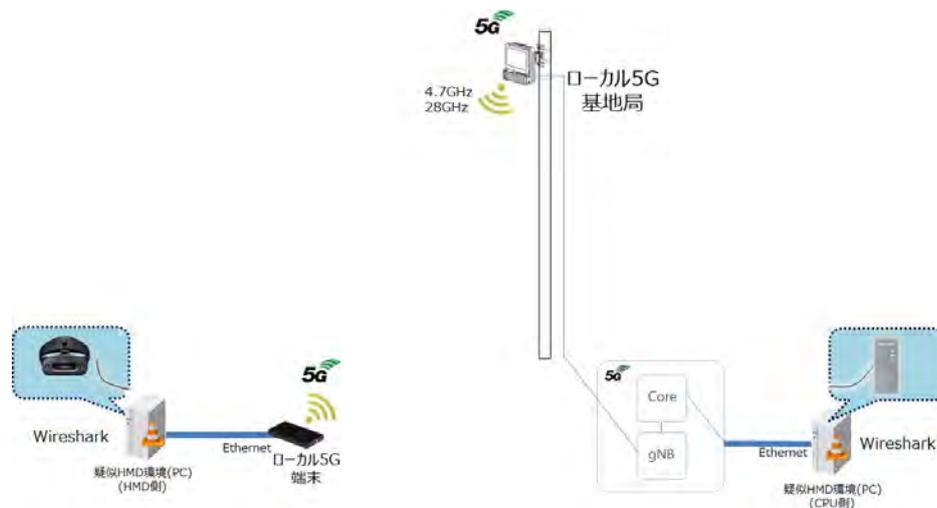


図 4-20 疑似 HMD 方式の検証構成（実効速度、欠損率）

具体的には、双方の PC で映像送信ソフトウェアと映像受信ソフトウェア（VLC media player **xii**）を稼働させ、圧縮映像データを送受信させながら PC で別途稼働させる通信解析ソフトウェア（Wireshark **xiii**）を用いて測定を行う。また、疑似 HMD 方式での動作についてアンケート等により以下に基づいて感応評価を行う。

表 4-18 感応評価基準

疑似 HMD 方式での動作の感応評価	アンケート等により感応評価を行う A：動作上問題なし B：違和感あり（画像が乱れる、遅延が大きい等） C：違和感あり（その他）
--------------------	--

遅延時間は以下に示す環境を構築し、4.7GHz 帯と 28GHz 帯の両方を用いて検証を行う。

**xii** <https://www.videolan.org/index.ja.html>

VideoLAN Client（令和 3 年 3 月 25 日（木）取得）

**xiii** <https://www.wireshark.org/>

Wireshark（令和 3 年 3 月 25 日（木）取得）

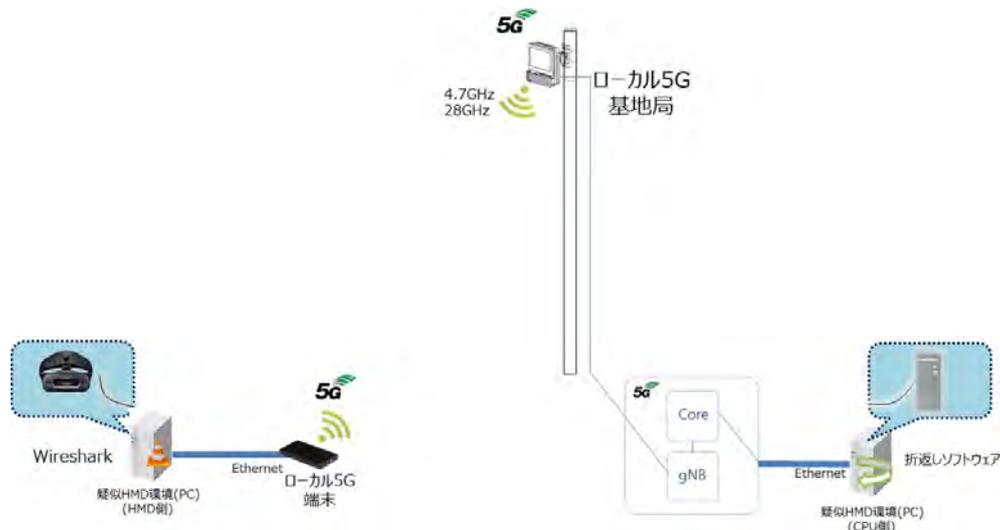


図 4-21 疑似 HMD 方式の検証構成（遅延時間）

具体的には片方の PC で映像送信ソフトウェア（VLC media player を使用）を稼働させ、もう片方の PC には受け取った映像データを送信元の PC に折り返すソフトウェア稼働させる。映像送信ソフトウェアを稼働させる PC に通信解析ソフトウェア（Wireshark）を用いて測定を行い、映像データの packets 毎に以下の計算式で遅延時間を計測する。

$$\text{遅延時間} = \text{受信した時刻} - \text{送信した時刻}$$

上記構成で測定した遅延時間は往復の遅延時間である。またローカル 5 G のみの遅延時間だけではなく、Ethernet や折り返しソフトウェアの時間も含まれる。そこで PC 間を直接 Ethernet で接続した時の構成において遅延時間を計測したところ、平均 0.7msec 程度であった。このため、Ethernet と折り返しソフトウェアの処理時間の影響はほとんどないとし、疑似 HMD で測定する遅延時間は図 4-21 で測定した遅延時間とする。

実証実験を効率的に実施するため、疑似 HMD 構成とローカル 5G(4.7GHz 帯/28GHz 帯)の結合確認を事前に行い、4.7GHz 帯、28GHz 帯それぞれの実効速度の計測を行った。事前に行った結合確認で得られた実効速度（最大）を以下に示す。

表 4-19 事前確認における計測結果

	上り (端末→基地局)	下り (基地局→端末)
4.7GHz 帯	約 70Mbps	約 62Mbps
28GHz 帯	約 140Mbps	約 400Mbps

事前に計測した実効速度から、疑似 HMD で転送する映像データサイズと測定項目を以下に示す方針で決定した。

表 4-20 映像データサイズ

測定条件	方針	測定項目	4.7GHz 帯 映像転送	28GHz 帯 映像転送
実効速度 最大測定 時	事前確認で 確認した最 大実効速度 以上のサイ ズ	最大実効速度 平均実効速度	上り：100Mbps 下り：100Mbps	上り：200Mbps 下り：550Mbps
実効速度 に近い転 送時	実効速度に 近いサイ ズ	平均実効速度	上り：60Mbps 下り：50Mbps	上り：100Mbps 下り：550Mbps
遅延／欠 損率測定 時	確実に送信 可能なサイ ズ	平均実効速度 欠損率または遅 延時間	上り：30Mbps 下り：30Mbps	上り：30Mbps or 20Mbps 下り：30Mbps or 20Mbps

検証に当たっては、4.7GHz 帯及び28GHz 帯の電波伝搬測定を実施したデータを基にして、MR システム動作の要件を満たす場所、満たさない場所を検討する。また、いくつか条件（例：無線通信区間の距離、無線通信区間の障害物、上記検討環境の複数セット同時使用等）を変更し測定を行い、その測定結果（遅延、実効速度、欠損等）及び今後のローカル 5 G の技術動向をもとに、どちらの周波数帯が適しているか比較検討を行う。

#### (1) 4.7GHz 帯

4.7GHz 帯の環境では、「図 4-22 4.7GHz 帯 基本配置（無指向性アンテナ）」を基本配置として測定を行う。一部の測定では「図 4-23 4.7GHz 帯 指向性アンテナ使用」に示すように指向性アンテナを使用した測定を行う。「表 4-17 検証項目一覧」に記載した項目によって条件を変更して測定を行う。

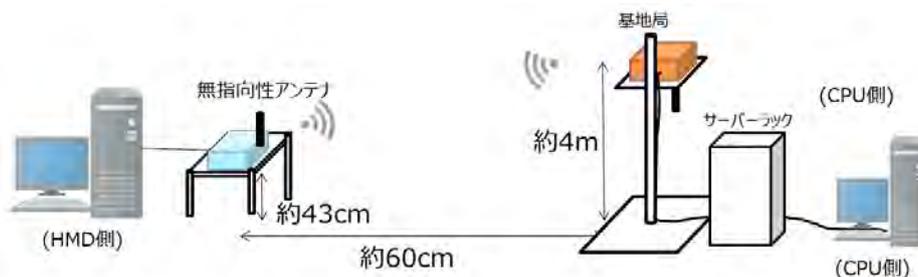


図 4-22 4.7GHz 帯 基本配置（無指向性アンテナ）



図 4-23 4.7GHz 帯 指向性アンテナ使用

1) 4.7GHz 帯 基本条件 (基地局一端末間の距離 60cm)

「図 4-20 疑似 HMD 方式の検証構成 (実効速度、欠損率)」に示す配置で測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-22 4.7GHz 帯 基本条件 測定結果 一覧」に示す。

2) 4.7GHz 帯—通信距離を変更 (水平)

以下に示す配置で測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-26 4.7GHz 帯 通信距離変更 水平 測定結果一覧」に示す。



図 4-24 4.7GHz—通信距離を変更 (水平)

3) 4.7GHz 帯—通信距離を変更 (垂直)

以下に示す配置で測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-28 4.7GHz 帯 通信距離変更 垂直 測定結果」に示す。



図 4-25 通信距離を変更 (垂直)

#### 4) 4.7GHz 帯－アンテナ傾斜

以下に示す配置で測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-29 4.7GHz 帯 アンテナ傾斜 測定結果一覧」に示す。

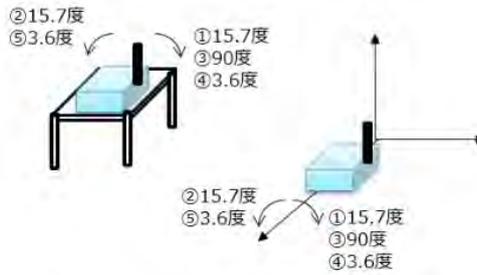


図 4-26 アンテナ傾斜

#### 5) 4.7GHz 帯－ローカル 5 G 端末移動

以下に示す配置で、端末を連続して移動させた場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-30 4.7GHz 帯 端末移動 測定結果一覧」に示す。

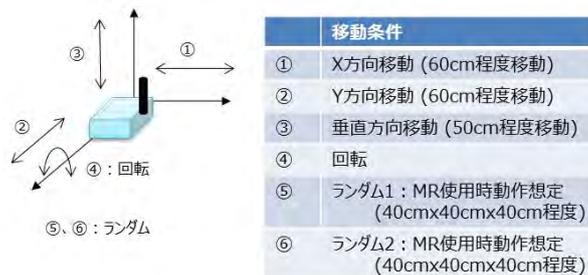


図 4-27 端末移動

#### 6) 4.7GHz 帯－金属障害物

以下に示す配置で、端末と基地局間に金属障害物を配置した場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-31 4.7GHz 帯 金属障害物 測定結果」に示す。

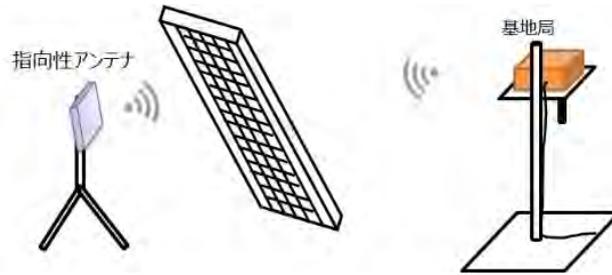


図 4-28 金属障害物

### 7) 4.7GHz 帯—人体障害物（指向性アンテナ）

以下に示す配置で、端末と基地局間に人体障害物を配置した場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-33 4.7GHz 帯 人体障害物（指向性アンテナ）測定結果一覧」に示す。なおこの測定は、次項の無指向性アンテナによる測定においてアンテナが動かさないという制約があったため、測定条件を増やす為を実施した。



図 4-29 人体障害物（指向性アンテナ）

### 8) 4.7GHz 帯—人体障害物（無指向性アンテナ）

以下に示す配置で、無指向性アンテナを使用した端末と基地局間に人体障害物を配置した場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-35 4.7GHz 帯 人体障害物（無指向性アンテナ）測定結果一覧」に示す。



図 4-30 人体障害物（無指向性アンテナ）

### 9) 4.7GHz 帯-2 セット使用時

以下に示す配置で、2 セット使用した場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-38 4.7GHz 帯 2 セット使用 測定結果一覧」に示す。

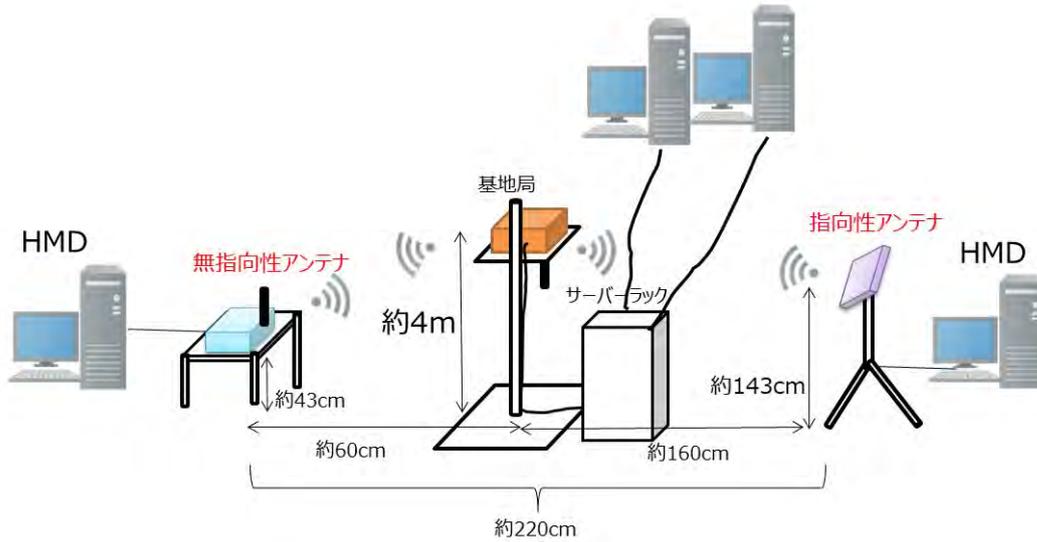


図 4-31 2 セット使用

### (2) 28GHz 帯

28GHz 帯の環境については、以下を基本配置とし、「表 4-17 検証項目一覧」で記載した項目によって条件を変更して測定する。

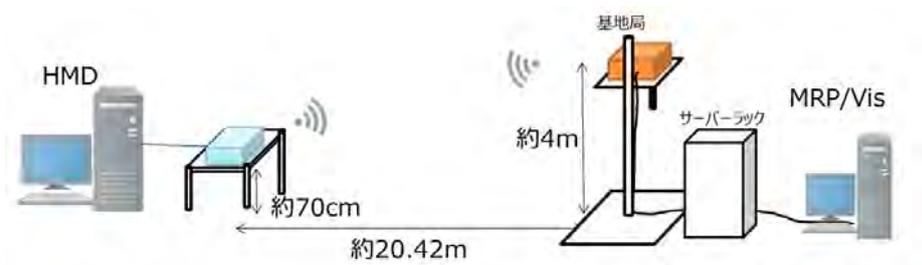


図 4-32 28GHz 帯 基本配置

#### 1) 28GHz 帯-基本条件 (基地局-端末間の距離 20.42m)

図 4-32 に示す配置で測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-42 28GHz 帯 基本条件 測定結果 一覧」に示す。

#### 2) 28GHz 帯-ローカル 5G 端末移動

以下に示す配置で端末を連続的に移動 (水平および垂直方向) させて場合の測定を行う。

確認項目については、検証結果「表 4-46 28GHz 帯 端末移動測定結果 一覧」に示す。

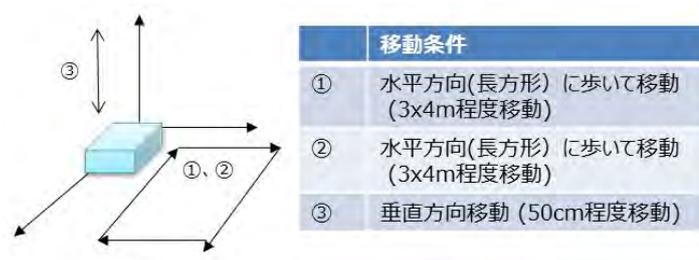


図 4-33 28GHz 帯 端末移動

### 3) 28GHz 帯—金属障害物

以下に示す配置で金属障害物を置いた場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-47 28GHz 帯 金属障害物測定結果 一覧」に示す。

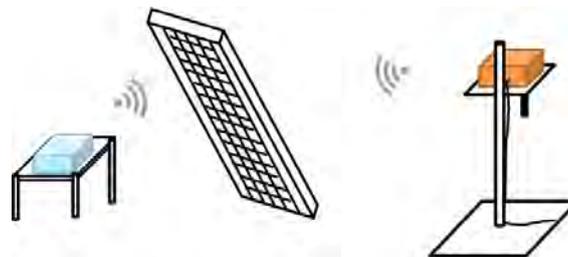


図 4-34 28GHz 帯 金属障害物

### 4) 28GHz 帯—人体障害物

以下に示す配置で人体障害物を置いた場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-48 28GHz 帯 人体障害物測定結果 一覧」に示す。



図 4-35 28GHz 帯 人体障害物

### 5) 28GHz 帯—2 セット使用時

以下に示す配置で 2 セット使用した場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-50 28GHz 帯 2 セット同時使用測定結果 一覧」に示す。

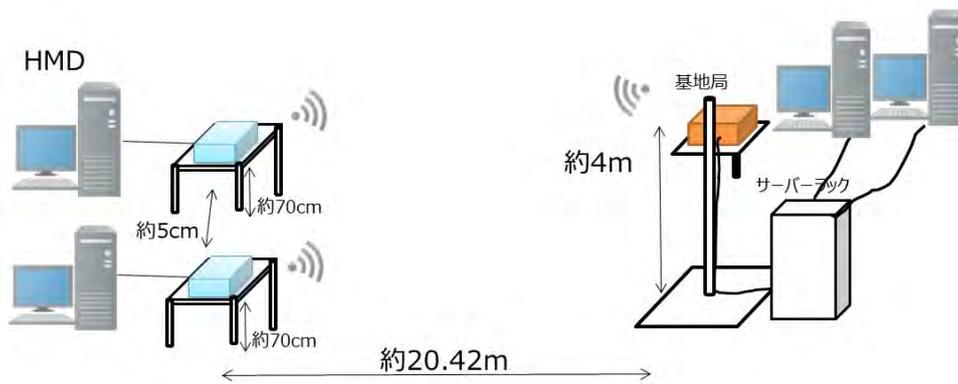


図 4-36 28GHz 帯 2 セット使用

#### 6) 28GHz 帯—ハンドオーバー

以下に示す配置で端末を連続的に移動させてハンドオーバーを発生させた場合の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-57 28GHz 帯 ハンドオーバー測定結果 一覧」に示す。



図 4-37 28GHz 帯 ハンドオーバー

#### 4.6.2.2 PC/基地局間のインターフェース検証

MR システムを無線化する際、PC と基地局のインターフェースは以下の 2 通りが考えられる。

(1) PC/基地局間は無線（ローカル5G）

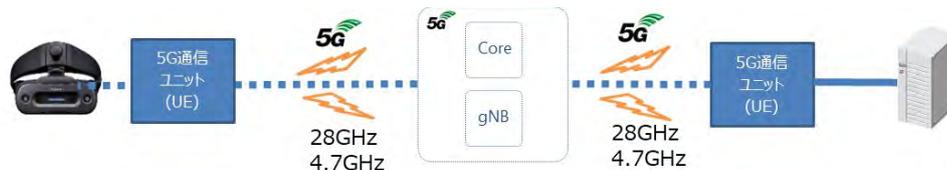


図 4-38 PC/基地局間 無線

(2) PC/基地局間是有線

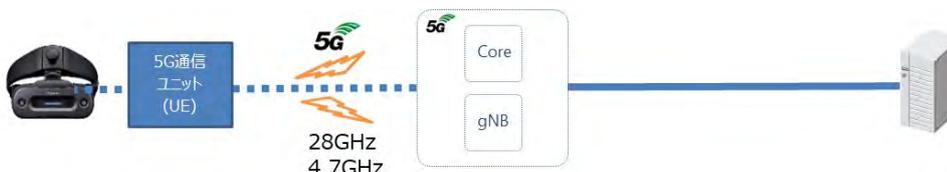
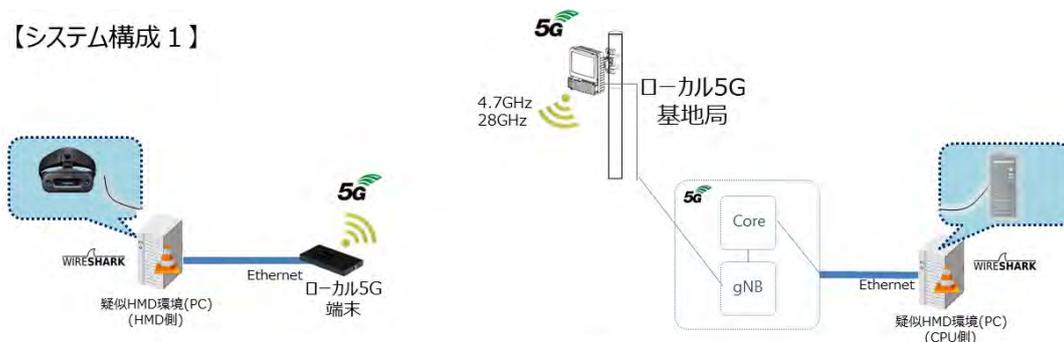


図 4-39 PC/基地局間 有線

MR システム (HMD) を模した PC 環境を以下に示す 2 つのシステム構成を構築し、「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5G システムの検証」と同様の測定を行う。以下において、システム構成 1 が PC/基地局間有線を模しており、システム構成 2 が PC/基地局間無線を模している。

【システム構成 1】



【システム構成 2】

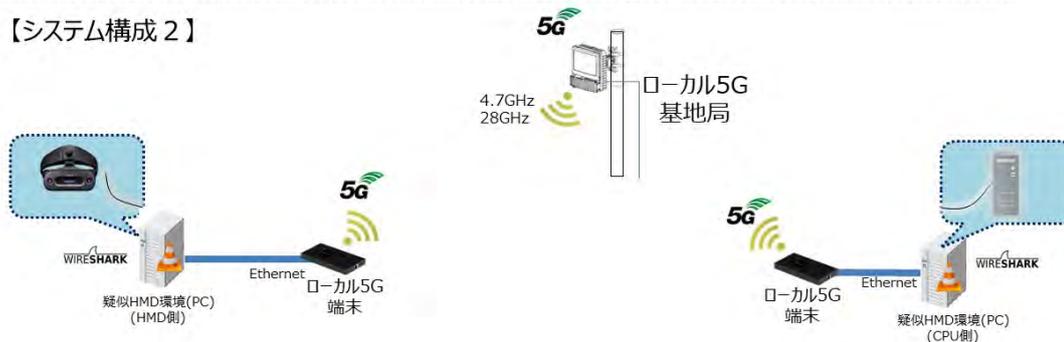


図 4-40 PC/基地局インターフェース検証

検証に当たっては、2 つのシステム構成を工場環境で動作させて「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5G システムの検証」と同じ方法で測定し、4.7GHz 帯及び

28GHz 帯の測定結果（遅延、実効速度、欠損等）及び運用やユースケース等のメリット/デメリットを鑑み、どちらの構成が適しているかを検討する。

以下に測定内容を記載する。

#### 1) 4.7GHz 帯

「図 4-40 PC/基地局インターフェース検証」システム構成 1 およびシステム構成 2 に示す配置で 4.7GHz 帯の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-58 4.7GHz 帯基本条件測定結果 一覧」に示す。

#### 2) 28GHz 帯

「図 4-40 PC/基地局インターフェース検証」のシステム構成 1 およびシステム構成 2 に示す配置で 28GHz 帯の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-62 28GHz 帯基本条件測定結果 一覧」に示す。

#### 3) 28GHz 帯、2 セット同時使用

「図 4-40 PC/基地局インターフェース検証」のシステム構成 1 を 2 セット、およびシステム構成 2 を 2 セット使用して 28GHz 帯の測定を行う。確認項目については、検証結果「表 4-66 28GHz 帯 2 セット同時使用計測結果 一覧」に示す。

### 4.6.2.3 MR 技術の利用に係る固有の課題

「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」及び「4.6.2.2 PC/基地局間のインターフェース検証」の検証結果に基づき、ローカル 5 G 通信による遅延時間や通信プロトコル起因のデータ欠損度合い等から、無線化により増加する遅延時間やフレーム落ち等の映像劣化の見積もりを行う。それらに基づいて MR 利用時に影響する項目及び影響度合いを分析する。特にシミュレータ酔いや VR 酔い等と一般的に呼称される現象については、まだその原因は解明されていないものの、論文等の文献を調査した上で検証結果との関係性を整理する。

### 4.6.2.4 システムを構成する要素毎に必要な機能

「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」及び「4.6.2.2 PC/基地局間のインターフェース検証」、「4.6.2.3 MR 技術の利用に係る固有の課題」で検証された結果に基づき、圧縮伸長に必要な要件を明らかにする。「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」及び「4.6.2.2 PC/基地局間のインターフェース検証」で測定された実効速度、通信安定性、遅延時間等より、圧縮伸長に求められる圧縮率、遅延時間を明らかにするとともに、映像の各パラメータ（解像度やフレームレート等）の違いによる影響及び今後のローカル 5 G 技術動向を考慮の上、圧縮伸長の必要

要件を整理する。圧縮方式は一般的に使用されている H.265 を用いて検証を行うが、必要要件によりソフトウェアで実装可能か、あるいはハードウェアでの実装が必須か、等の結論を導く。

#### 4.6.3 検証結果

##### 4.6.3.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証

「4.6.2.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システムの検証」で記載した項目の測定結果、およびログを記載する。

##### (1) 4.7GHz 帯

##### 1) 4.7GHz 帯－①基本条件（基地局－端末間の距離 60cm）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件での測定結果を示す。

表 4-21 4.7GHz 帯 基本条件 測定結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	VLCを用いて上りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：最大70Mbps 平均69Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
2		VLCを用いて上りのみ映像転送(60Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：平均63Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
3		VLCを用いて上りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：平均37Mbps 通信：安定 欠損率：0.288% 映像官能評価：A
4		VLCを用いて下りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：最大61Mbps 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
5		VLCを用いて下りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6		VLCを用いて下りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：平均37Mbps 通信：安定 欠損率：0.178% 映像官能評価：B
7	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 最大70Mbps 平均70Mbps 下り 最大61Mbps 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
8		VLCを用いて双方向映像転送(上り60Mbps、下り50Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均64Mbps 下り 平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
9		VLCを用いて双方向映像転送(上り30Mbps、下り30Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均37Mbps 下り 平均37Mbps 通信：安定 欠損率：上り0.281% 下り0.003% 映像官能評価：B
10	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(50Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：安定 遅延時間(往復)： 平均100.5msec 最小4.72msec 最大346.29msec 映像官能評価：B
11		VLC+ループバックツールを用いて映像転送(30Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：安定 遅延時間(往復)： 平均7.51msec 最小4.63msec 最大13.92msec 映像官能評価：B

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯—①基本条件—1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

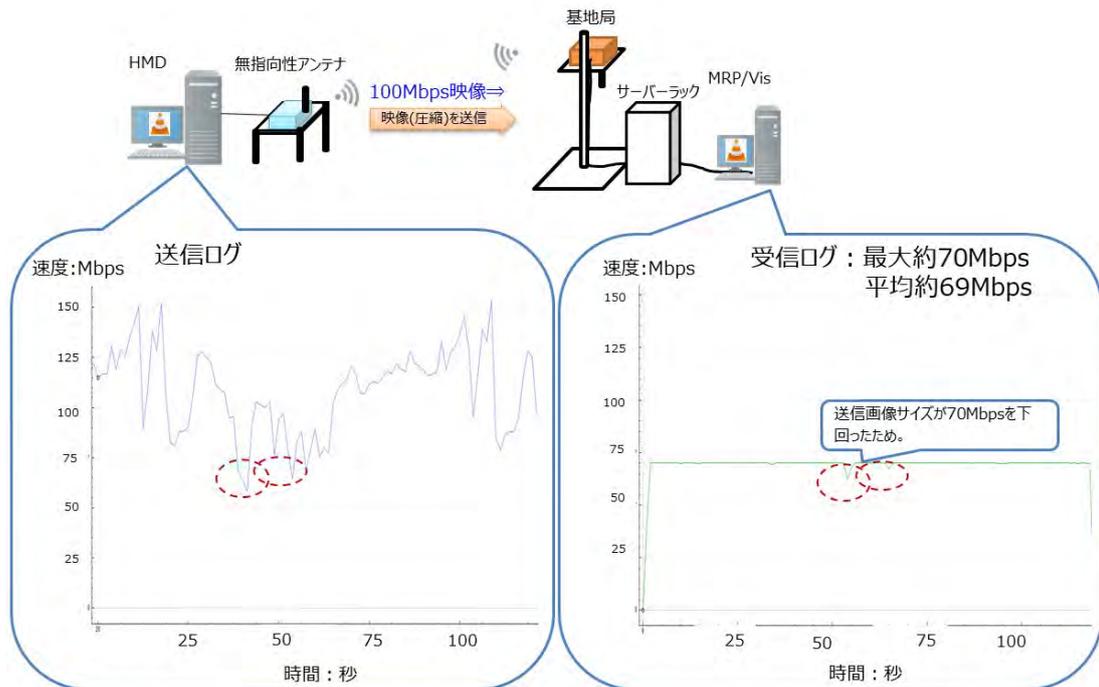


図 4-41 4.7GHz 帯 上り 100Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯—①基本条件—2（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 60Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

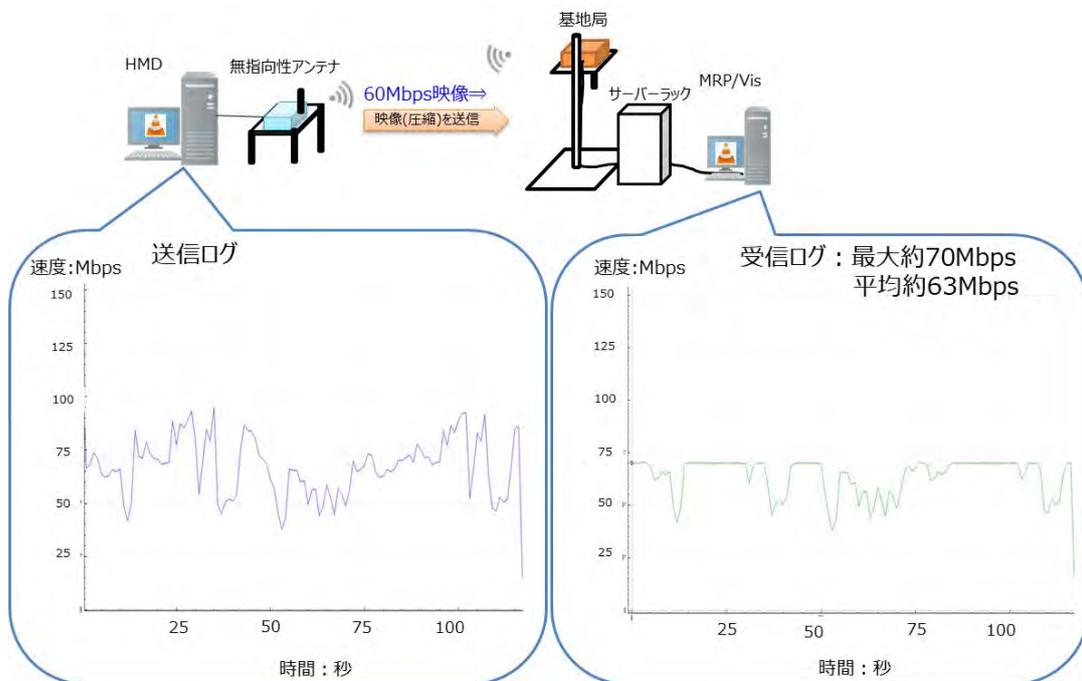


図 4-42 4.7GHz 帯 上り 60Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－3（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

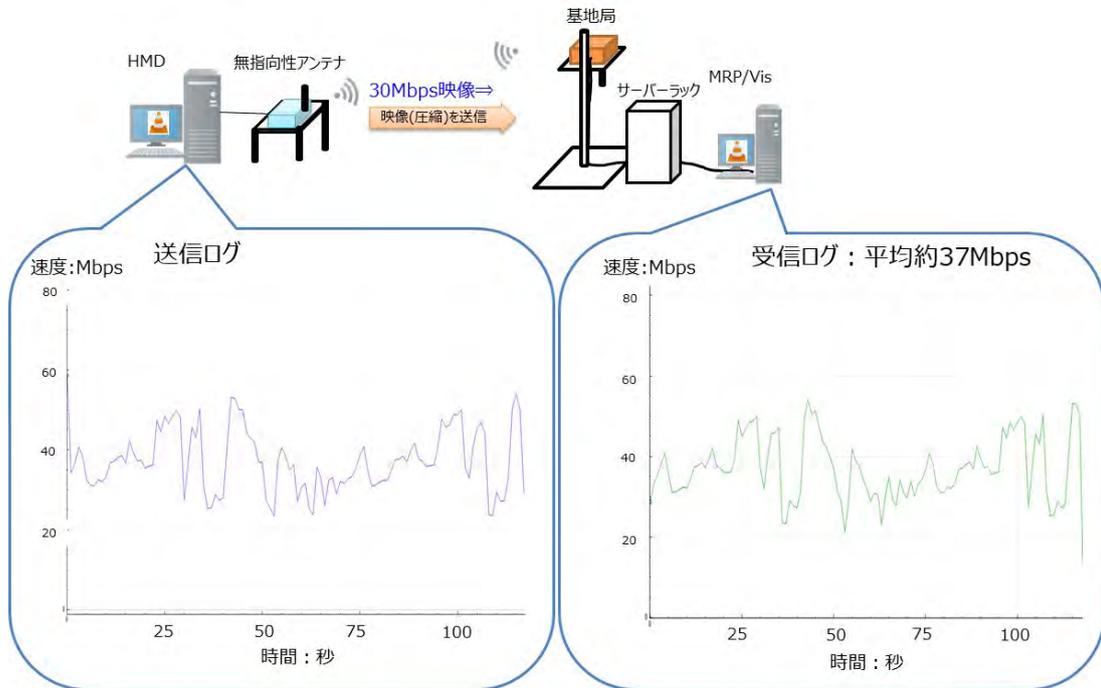


図 4-43 4.7GHz 帯 上り 30Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－3（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 30Mbps の映像転送をした時のパケットの欠損率の結果を示す。

表 4-22 4.7GHz 帯 上り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	401,996	—
未到達パケット数(UDP)	1,156	—
欠損率%	0.288%	—

e) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－①基本条件－4（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

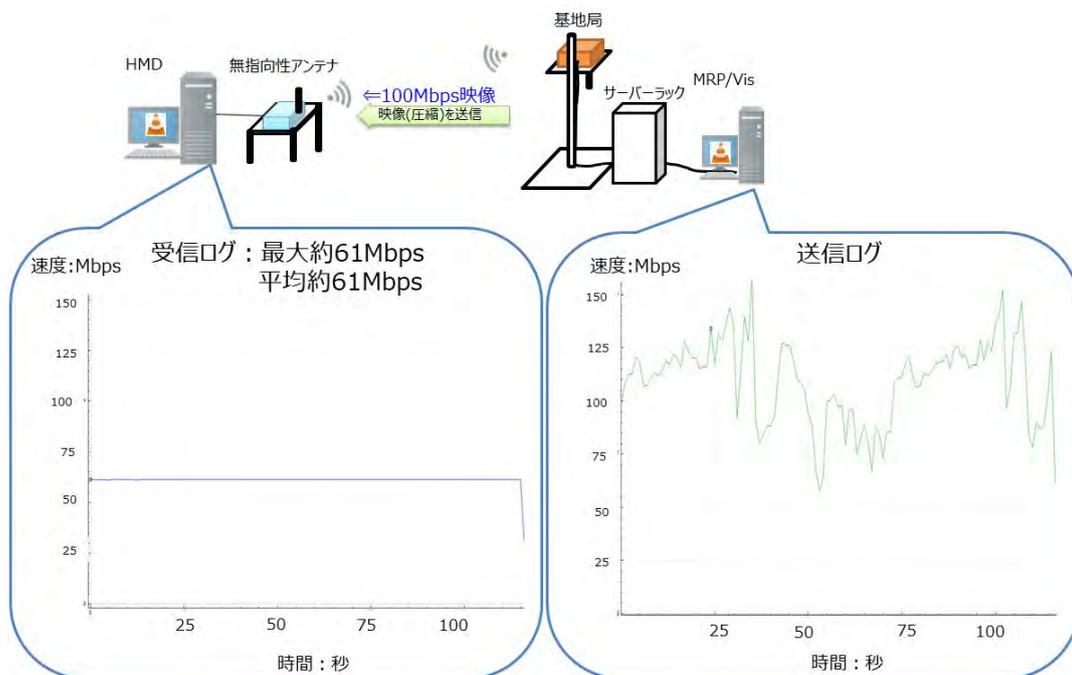


図 4-44 4.7GHz 帯 下り 100Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ: 4.7GHz 帯-①基本条件-5 (実効速度データ)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

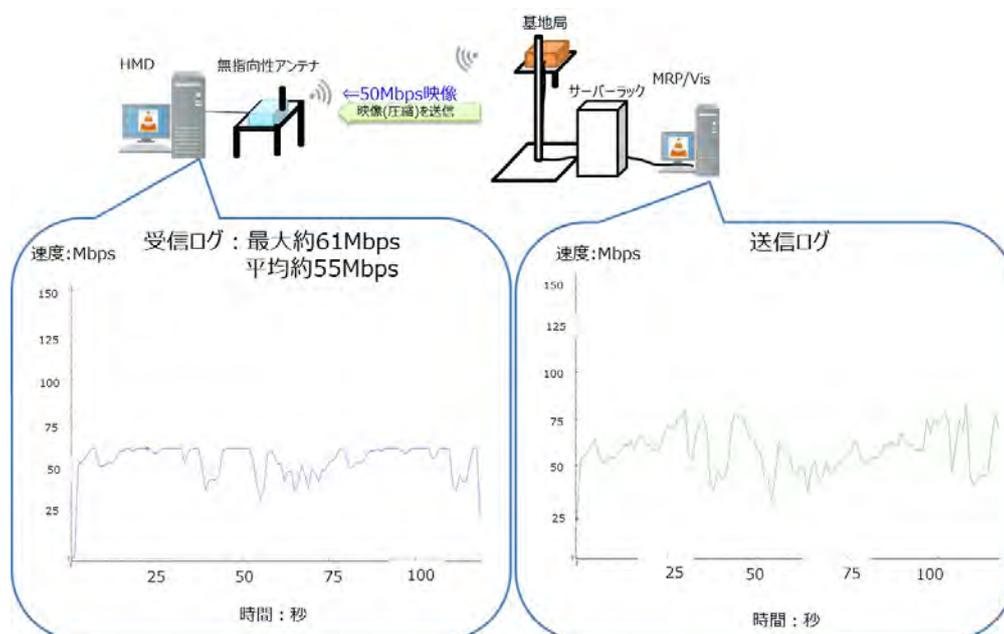


図 4-45 4.7GHz 帯 下り 50Mbps 速度ログ

g) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－6（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

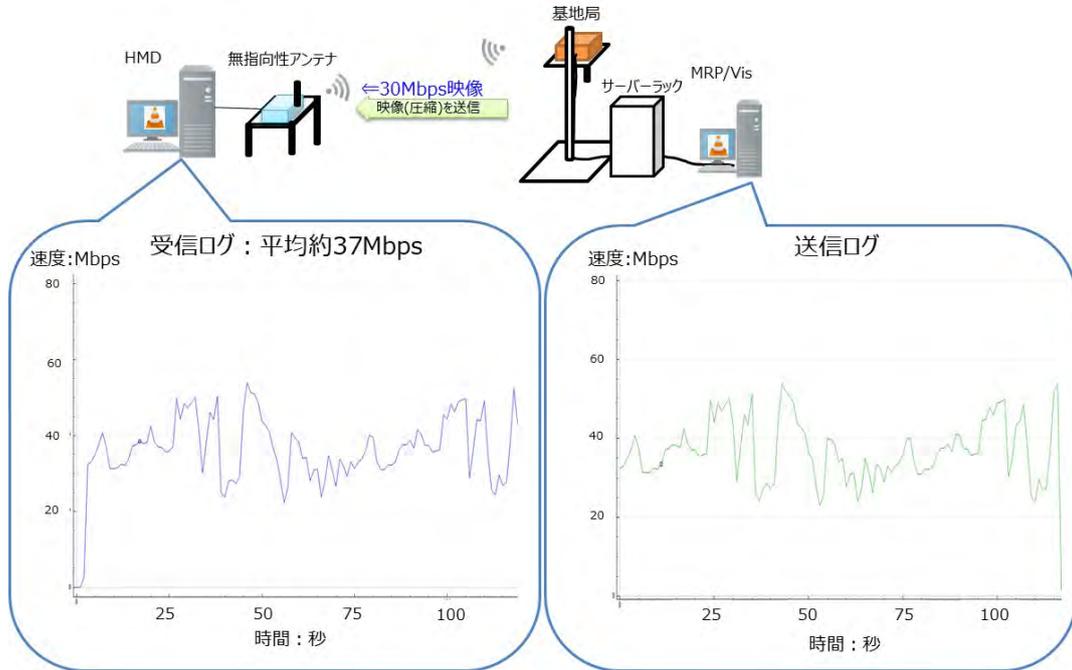


図 4-46 4.7GHz 下り 30Mbps 速度ログ

h) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－6（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-23 4.7GHz 帯 下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	395,936
未到達パケット数(UDP)	—	703
欠損率%	—	0.178%

i) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－7（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

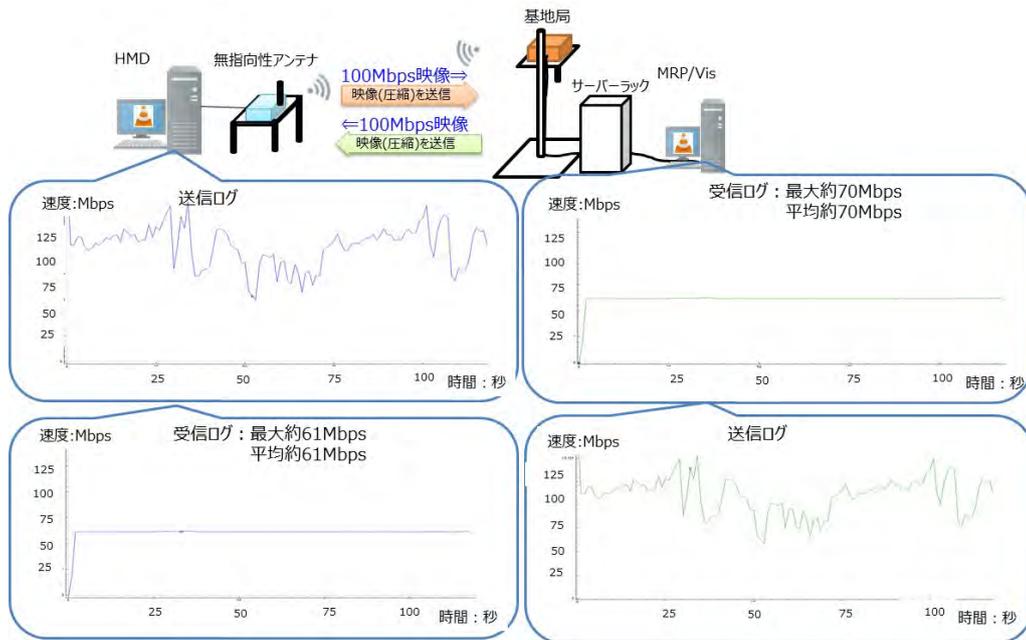


図 4-47 4.7GHz 帯 上り/下り 100Mbps 速度ログ

j) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－8（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 60Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

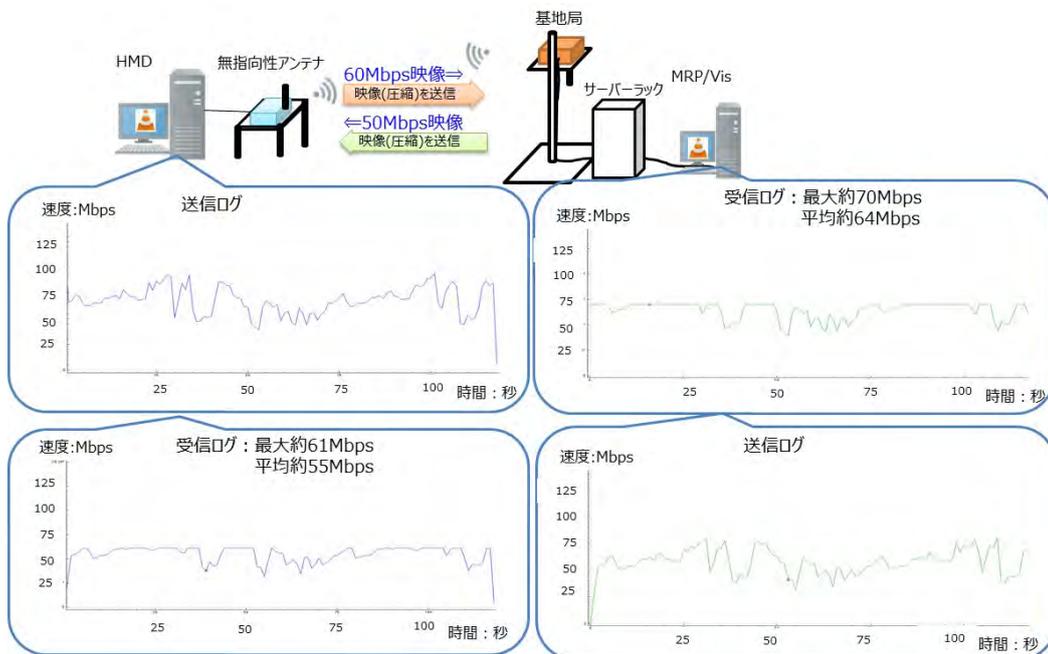


図 4-48 4.7GHz 帯 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ

k) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－9（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

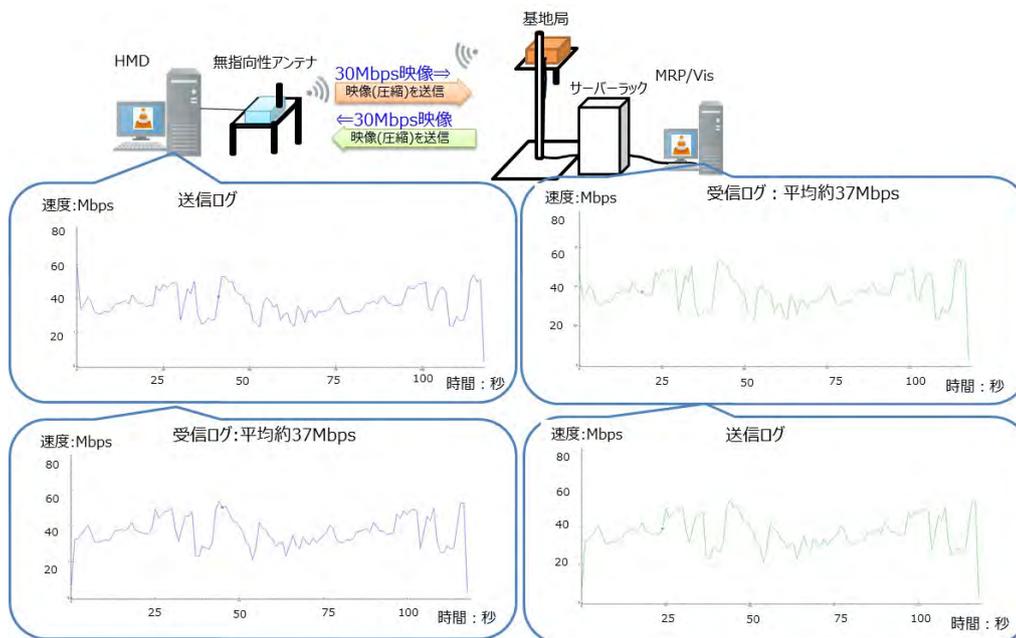


図 4-49 4.7GHz 上り/下り 30Mbps 速度ログ

l) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－9（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件で上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-24 4.7GHz 帯 上り/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	404,382	397,107
未到達パケット数(UDP)	1,137	13
欠損率%	0.281%	0.003%

m) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－10（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件でループバック 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

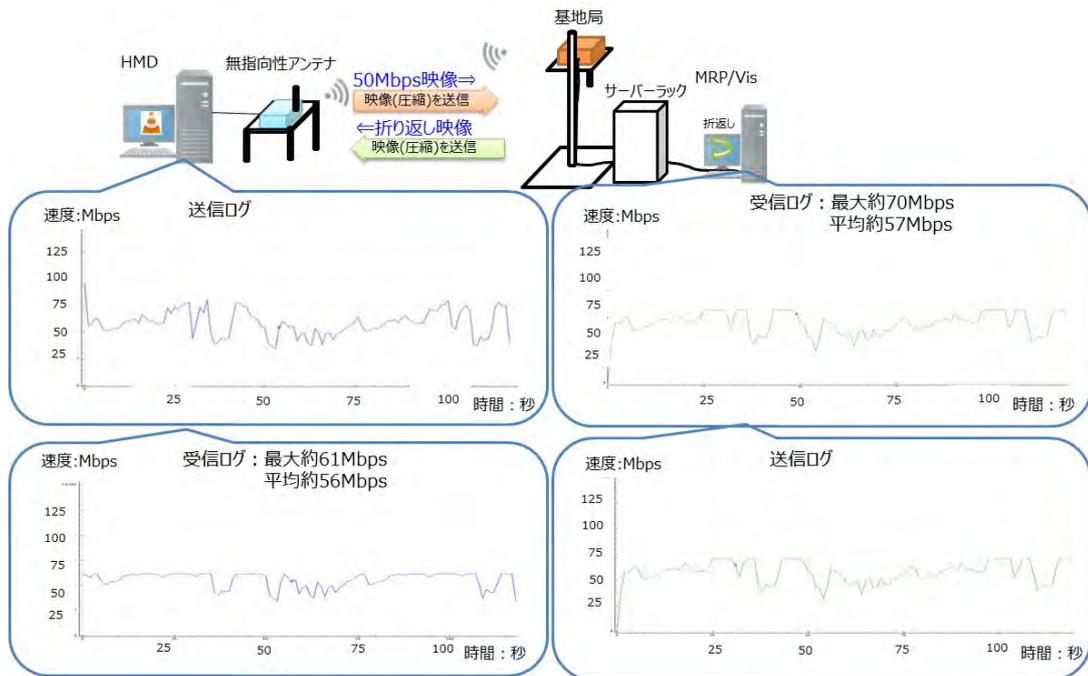
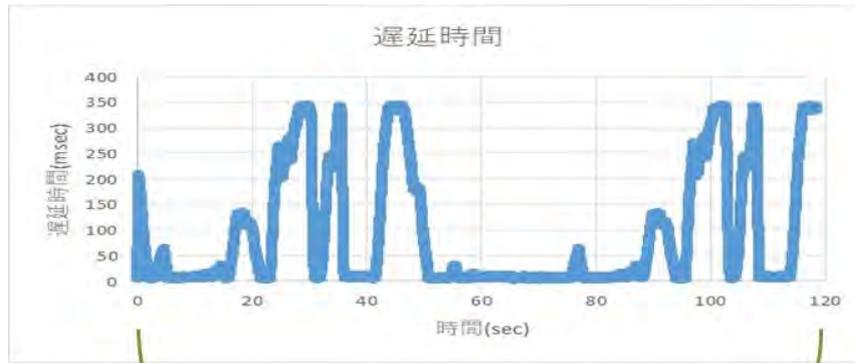


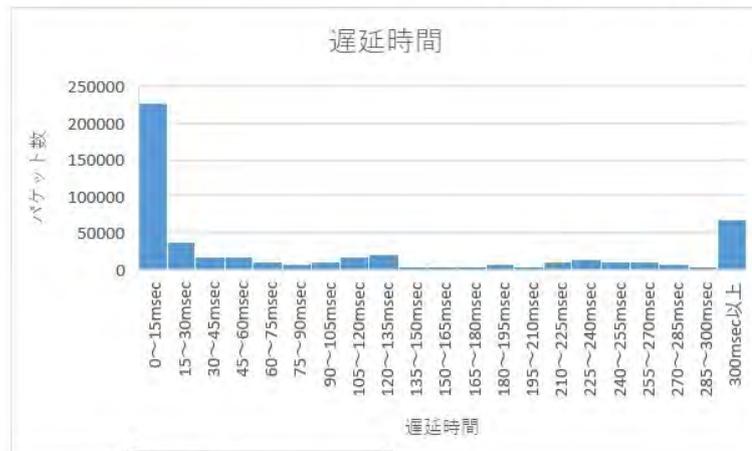
図 4-50 4.7GHz 50Mbps ループバック 速度ログ

n) 測定結果ログ：4.7GHz 帯—①基本条件—10 (遅延時間)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件でループバック 50Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。



1秒～120秒のヒストグラム



往復遅延  
 ・平均：100.50msec  
 ・最小値：4.72msec  
 ・最大値：346.29msec

図 4-51 4.7GHz 帯 50Mbps ループバック 遅延ログ

o) 測定結果ログ：4.7GHz 帯—①基本条件—1 1（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件でループバック 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

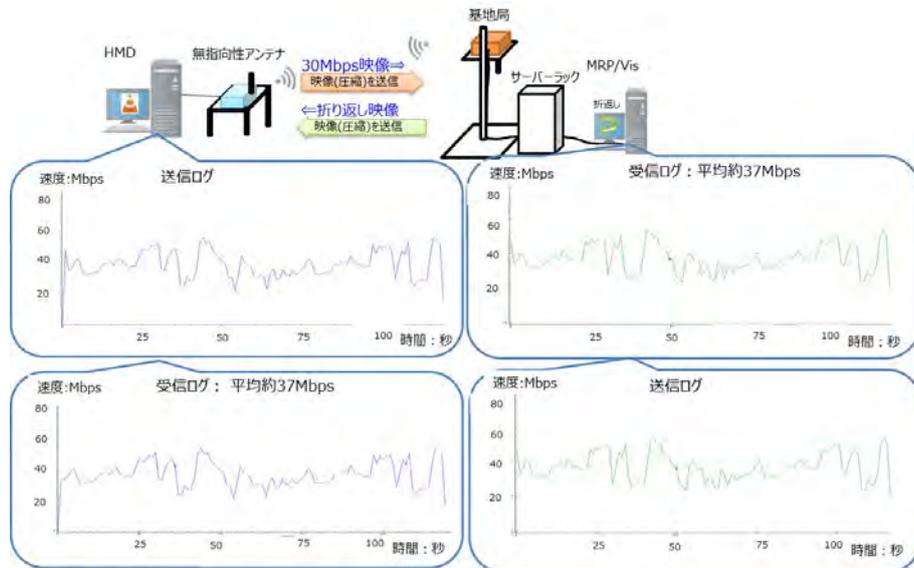


図 4-52 4.7GHz 帯 30Mbps ループバック 速度ログ

p) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-①基本条件-1 1 (遅延時間)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件でループバック 50Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

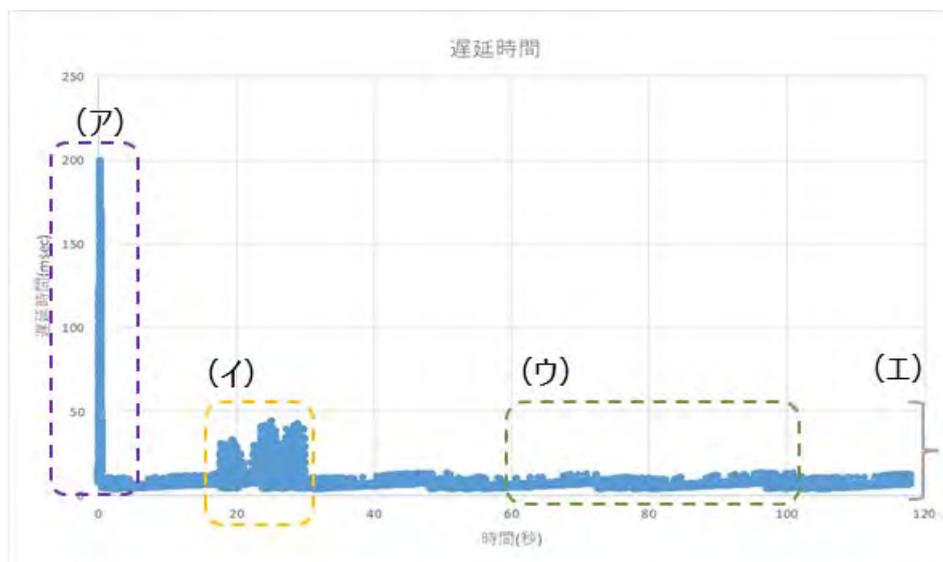


図 4-53 4.7GHz 帯 30Mbps ループバック 遅延ログ

(ア) の拡大図

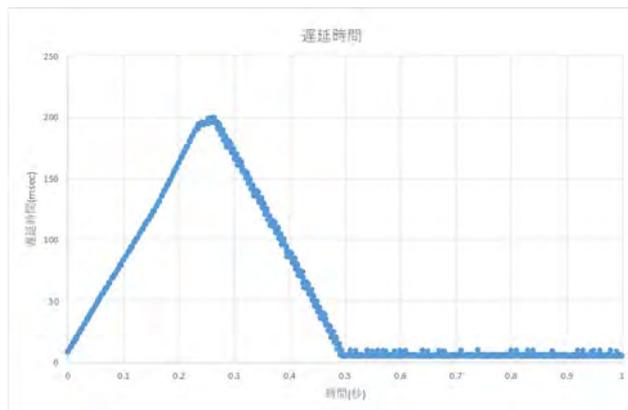


図 4-54 4.7GHz 30Mbps ループバック 遅延ログ

(イ) の拡大図

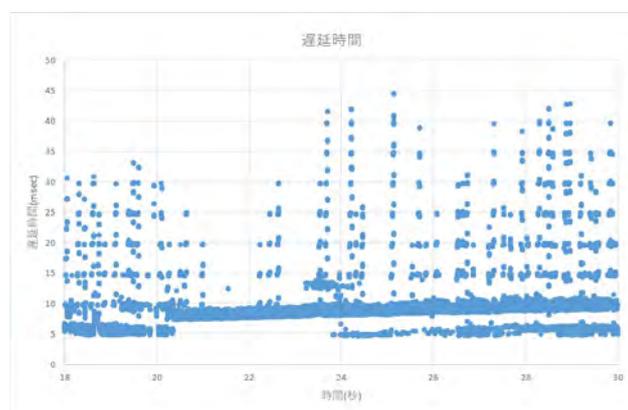


図 4-55 4.7GHz 30Mbps ループバック 遅延ログ

(ウ) の拡大図

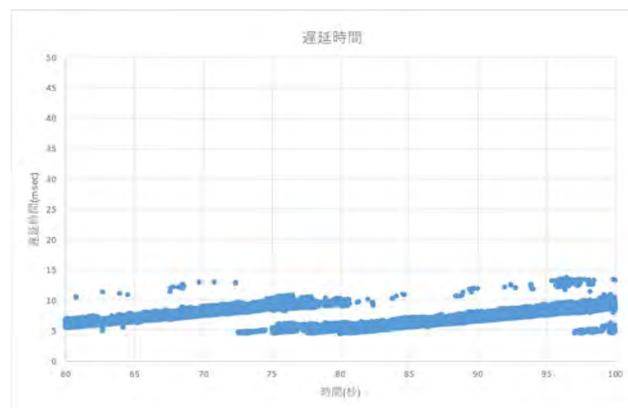


図 4-56 4.7GHz 30Mbps ループバック 遅延ログ

(エ) の拡大図

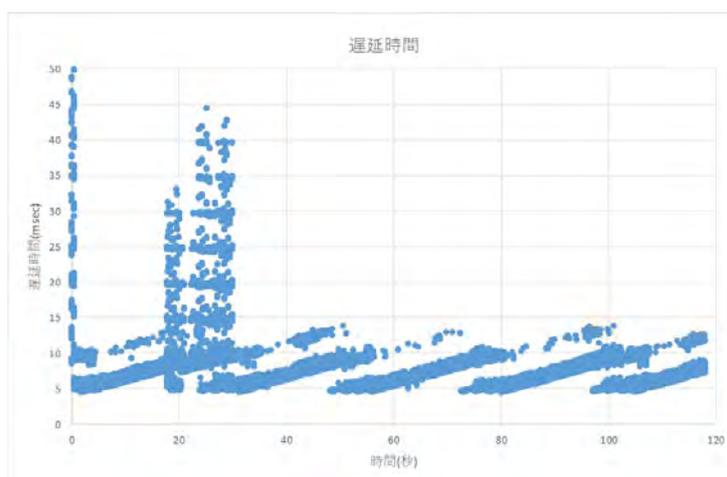


図 4-57 4.7GHz 30Mbps ループバック 遅延ログ

安定している 30 秒以降の遅延時間のヒストグラム

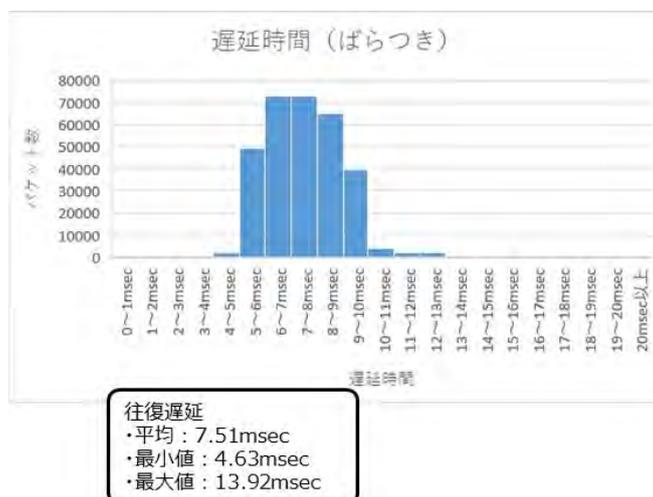


図 4-58 4.7GHz 30Mbps ループバック 遅延ヒストグラム・遅延値

■4.7GHz 帯①基本条件のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：  
上り約 70Mbps、下り約 60Mbps であり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、適用するのは困難である。
- ・ 遅延時間：  
往復の時間で平均 7.51msec であるが、実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなるため、通信不安定時でもローカル 5G 側で遅延時間を一定にする対策が必要である。

## 2) 4.7GHz 帯—②通信距離を変更 水平

以下に 4.7GHz 帯における水平の距離を変更した際の測定結果を示す。

表 4-25 4.7GHz 帯 通信距離変更 水平 測定結果一覧

項番	大項目	端末、基地局間の水平距離	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	110cm	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度 上り 平均 70Mbps 下り 平均61Mbps 通信 : 安定 映像官能評価 : B
2	双方向通信	60cm	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度 : 上り 平均69Mbps 下り 平均61Mbps 通信 : 安定 映像官能評価 : B
3	双方向通信	0cm	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度 : 上り 平均2.7Mbps 下り 平均4.4Mbps 通信 : 不安定 映像官能評価 : C
4	双方向通信	0cm	VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度 : 上り 平均2.7Mbps 下り 平均1.3Mbps 通信 : 不安定 欠損率 : 上り 92.455% 下り 96.802% 映像官能評価 : C

### a) 測定結果ログ : 4.7GHz 帯—②通信距離変更 水平—1 (実効速度データ)

以下に 4.7GHz 帯における通信距離 (水平) を 110cm にした際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

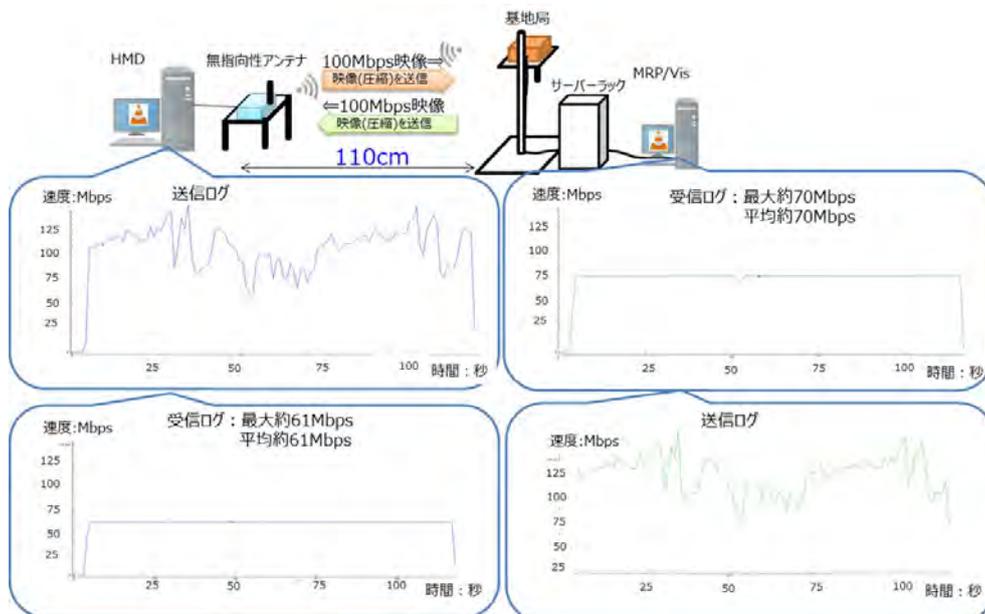


図 4-59 4.7GHz 帯 通信距離 (水平) 110cm 速度ログ

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－②通信距離変更 水平－2（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における通信距離（水平）を 60cm にした際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

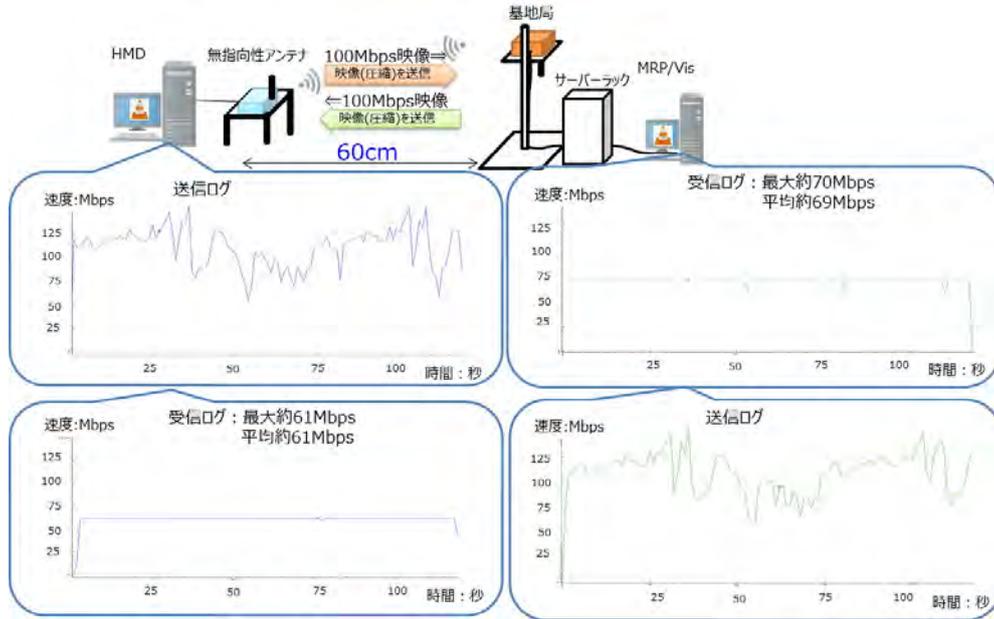


図 4-60 通信距離 60cm 上り/下り 100Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－②通信距離変更 水平－3（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における通信距離（水平）を 0cm にした際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

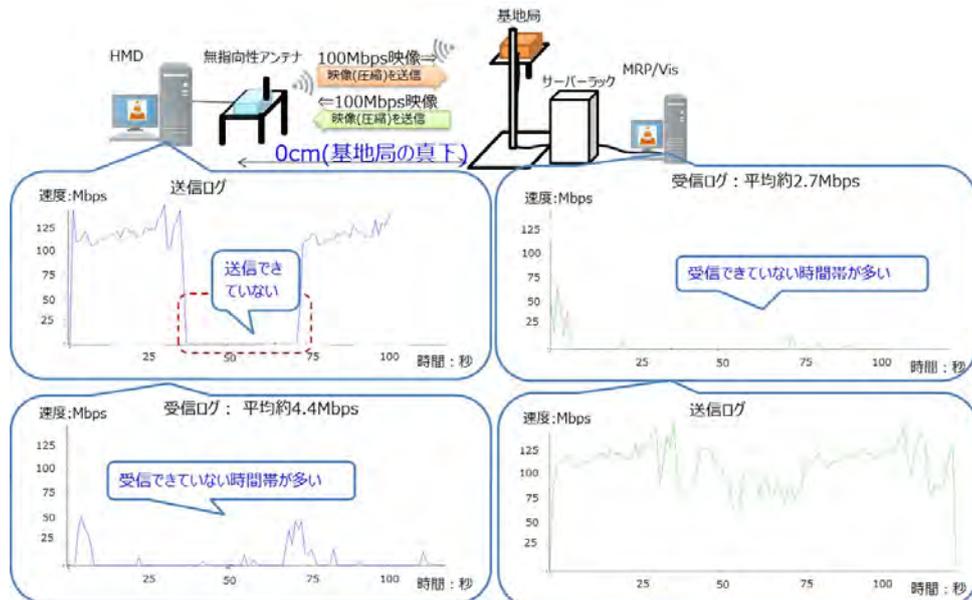


図 4-61 通信距離（水平）0cm 上り/下り 100Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：4.7GHz 帯②水平距離変更 水平-4（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における水平距離を 0cm にした際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

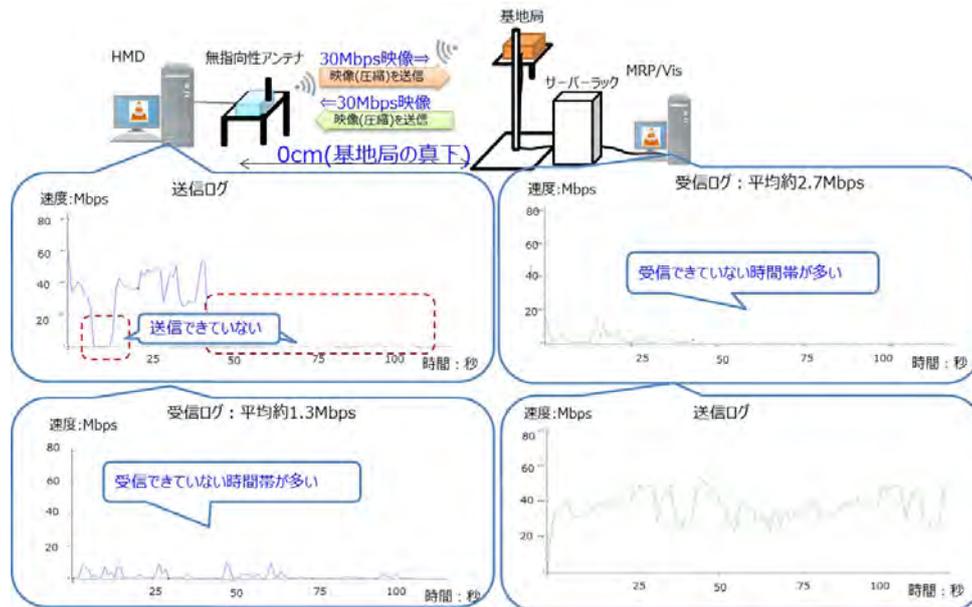


図 4-62 水平距離 0cm 上り/下り 30Mbps 速度ログ

e) 測定結果ログ：4.7GHz 帯②通信距離変更 水平-4（欠損率）

以下に 4.7GHz における通信距離（水平）を 110cm にした際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-26 通信距離（水平）0cm 上り/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	133,923	394,107
未到達パケット数(UDP)	123,819	381,573
欠損率%	92.455%	96.802%

■ 4.7GHz 帯②通信距離変更時（水平）のアプリケーション観点からの分析

・ 実効速度：

上り約 70Mbps、下り約 60Mbps であり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、適用するのは困難である。また、端末と基地局間の見通しが良くても、基地局の真下に端末を配置した場合、かなり通信が不安定になるため、通信が安定になるようなローカル 5G 側の対策が必要である。

### 3) 4.7GHz 帯-③距離変更 垂直

以下に 4.7GHz における垂直の距離を変更した際の測定結果を示す。

表 4-27 4.7GHz 帯 通信距離変更 垂直 測定結果

項番	大項目	端末と床からの垂直距離	確認手順	確認項目	実施チェック
1	双方向通信	57cm	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均63Mbps 下り 平均57Mbps 通信：一時不安定 映像官能評価：B

#### a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-③通信距離変更 垂直 1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における通信距離（垂直）を 57cm にした際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

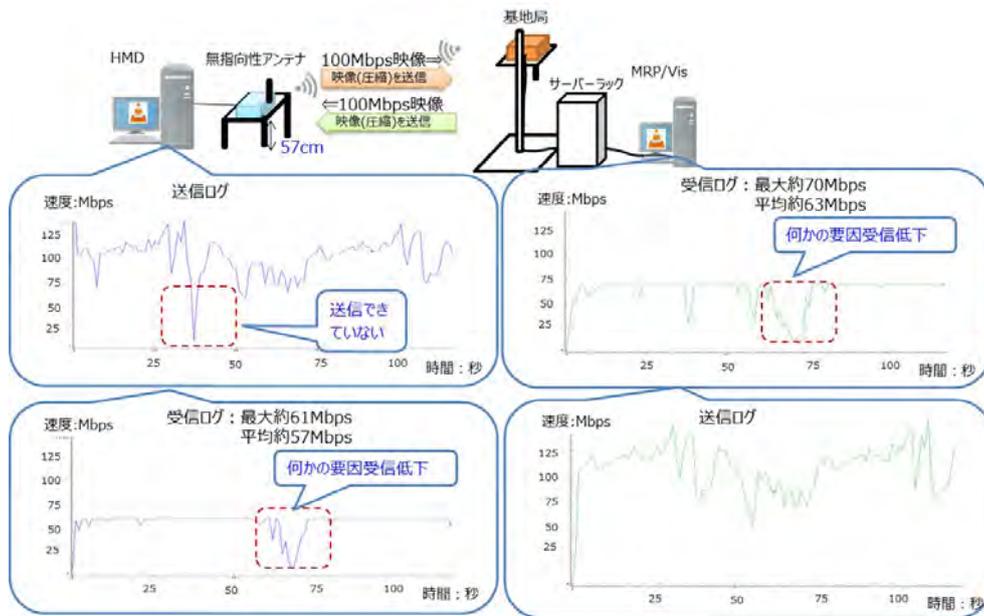


図 4-63 4.7GHz 帯 通信距離変更 垂直 57cm 上り/下り 100Mbps 速度ログ

#### ■ 4.7GHz 帯③通信距離変更時（垂直）のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
  - 上り約 70Mbps、下り約 60Mbps であり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、適用するのは困難である。また、端末と基地局間の見通しが良くても、通信が不安定になる時間帯があるため、通信が安定になるようなローカル 5G 側の対策が必要である。

#### 4) 4.7GHz 帯－④アンテナ傾斜

以下に 4.7GHz 帯における端末のアンテナを傾斜した際の測定結果を示す。

表 4-28 4.7GHz 帯 アンテナ傾斜 測定結果一覧

項番	大項目	アンテナ角度	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	① 15.7度	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均0Mbps 下り 平均0Mbps 通信：通信できない 映像官能評価：C
2		② -15.7度	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均30Mbps 下り 平均27Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
3		③ 90度	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均0Mbps 下り 平均0Mbps 通信：通信できない 映像官能評価：C
4		④ 3.6度	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均65Mbps 下り 平均49Mbps 通信：一時不安定 映像官能評価：B
5		⑤ -3.6度	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均64Mbps 下り 平均59Mbps 通信：一時不安定 映像官能評価：B

#### a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－④アンテナ傾斜－1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯におけるアンテナを 15.7 度傾けた際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

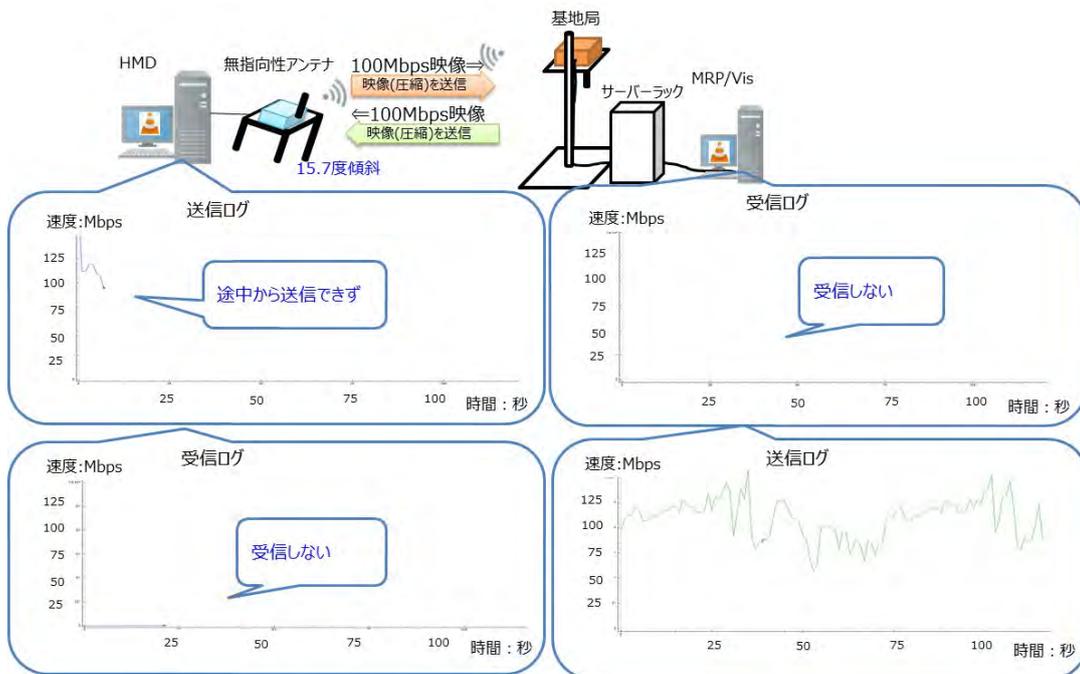


図 4-64 4.7GHz 帯 15.7 度傾斜 上り/下り 100Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－④アンテナ傾斜－2（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯におけるアンテナを逆向きに 15.7 度傾けた際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

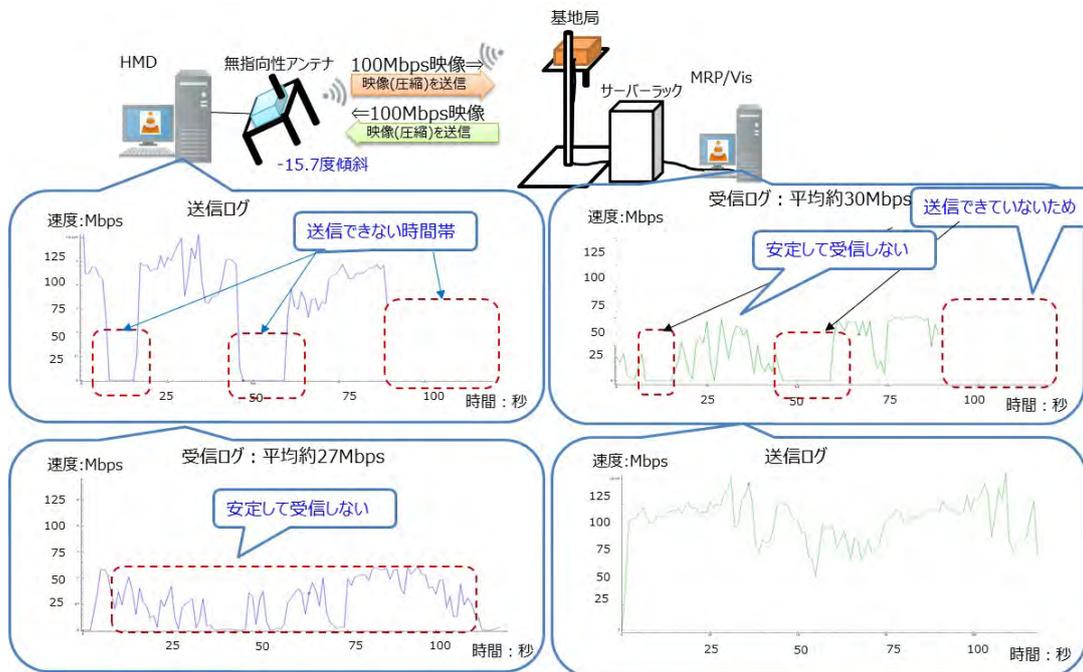


図 4-65 4.7GHz 帯 -15.7 度傾斜 上り/下り 100Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－④アンテナ傾斜－3（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯におけるアンテナを 90 度傾けた際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

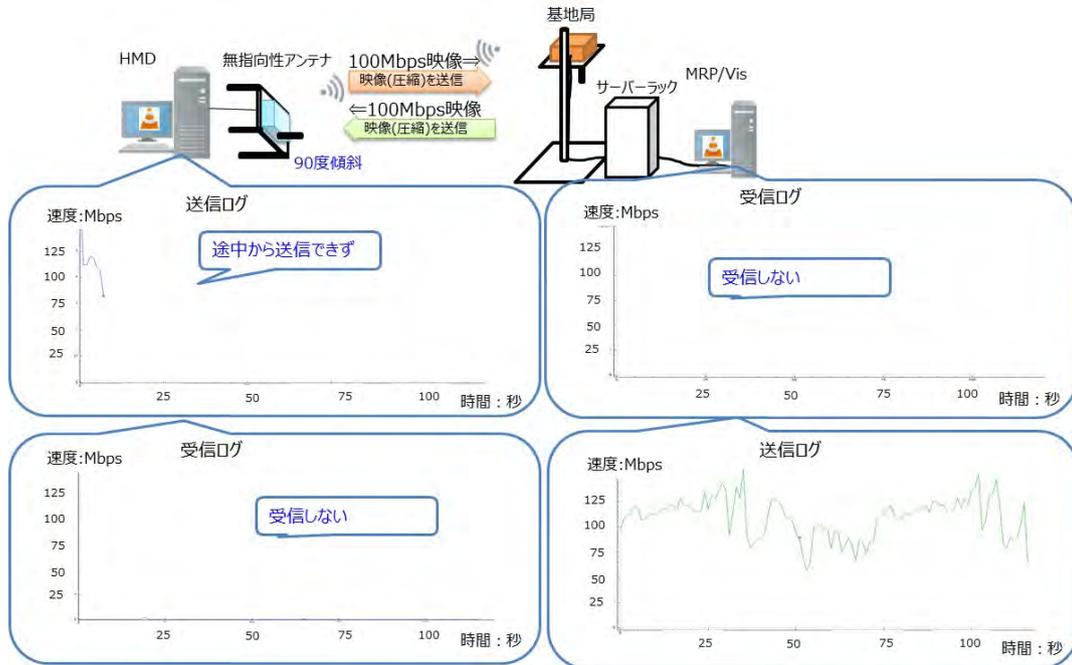


図 4-66 4.7GHz 帯 90 度傾斜 上り/下り 100Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－④アンテナ傾斜－4（実効速度データ）

以下に4.7GHz帯におけるアンテナを3.6度傾けた際、上り100Mbps、下り100Mbpsの映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

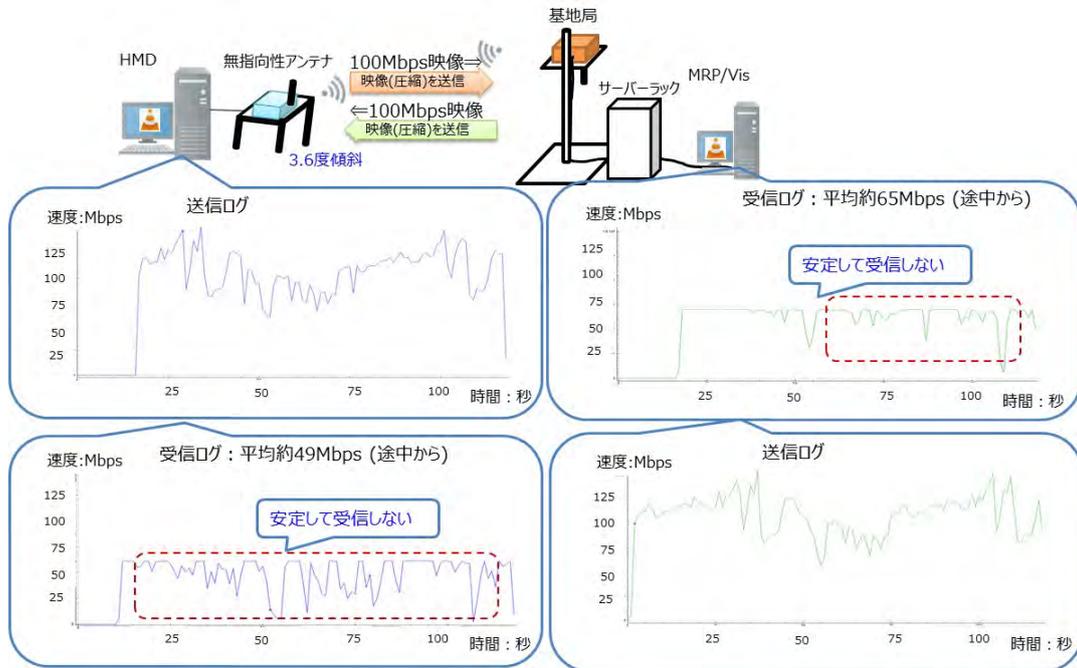


図 4-67 4.7GHz 帯 3.6 度傾斜 上り/下り 100Mbps 速度ログ

e) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-④アンテナ傾斜-5 (実効速度データ)

以下に 4.7GHz 帯におけるアンテナを逆向きに 3.6 度傾けた際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

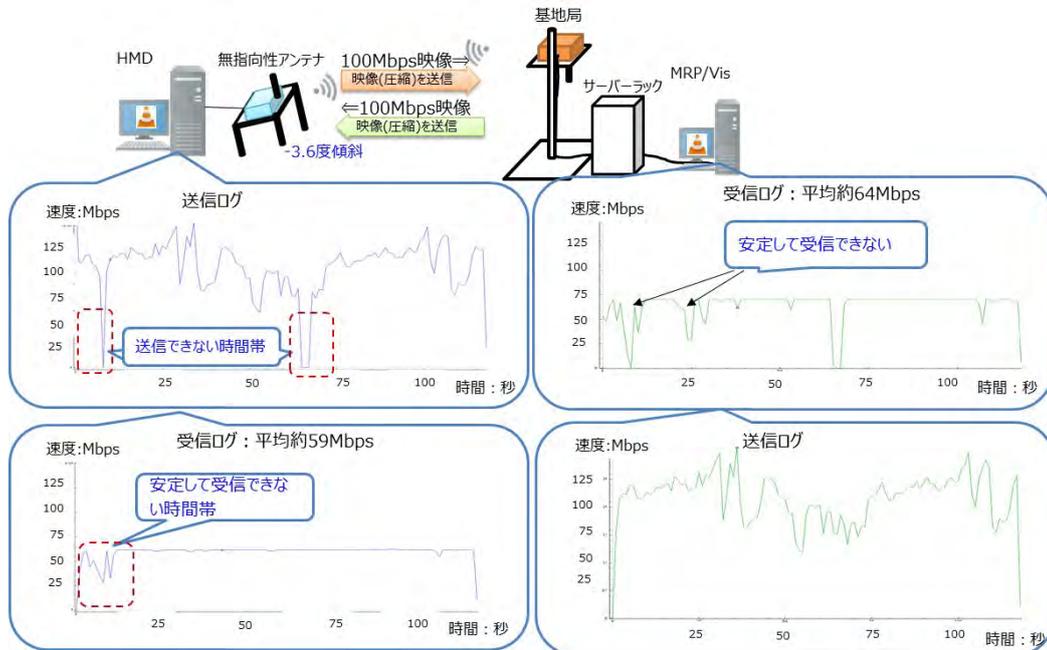


図 4-68 4.7GHz -3.6度傾斜 上り/下り 100Mbps 速度ログ

■ 4.7GHz 帯④アンテナ傾斜時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度 :  
 端末側のアンテナを傾ける程、通信が不安定になる。MR ではいろいろな作業姿勢を行うため、アンテナの傾斜によらず、通信が安定になるようなローカル 5G 側の対策が必要である。

## 5) 4.7GHz 帯－⑤端末移動

以下に 4.7GHz 帯における端末を移動した際の測定結果を示す。

表 4-29 4.7GHz 帯 端末移動 測定結果一覧

項番	大項目	移動条件	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	①	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均26Mbps 下り 平均30Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		②	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均43Mbps 下り 平均38Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
3		③	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均44Mbps 下り 平均33Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
4		④	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均— 下り 平均36Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
5		⑤	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均49Mbps 下り 平均39Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
6		⑥	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均28Mbps 下り 平均35Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑤端末移動－1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における端末を 60cm 程度移動させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

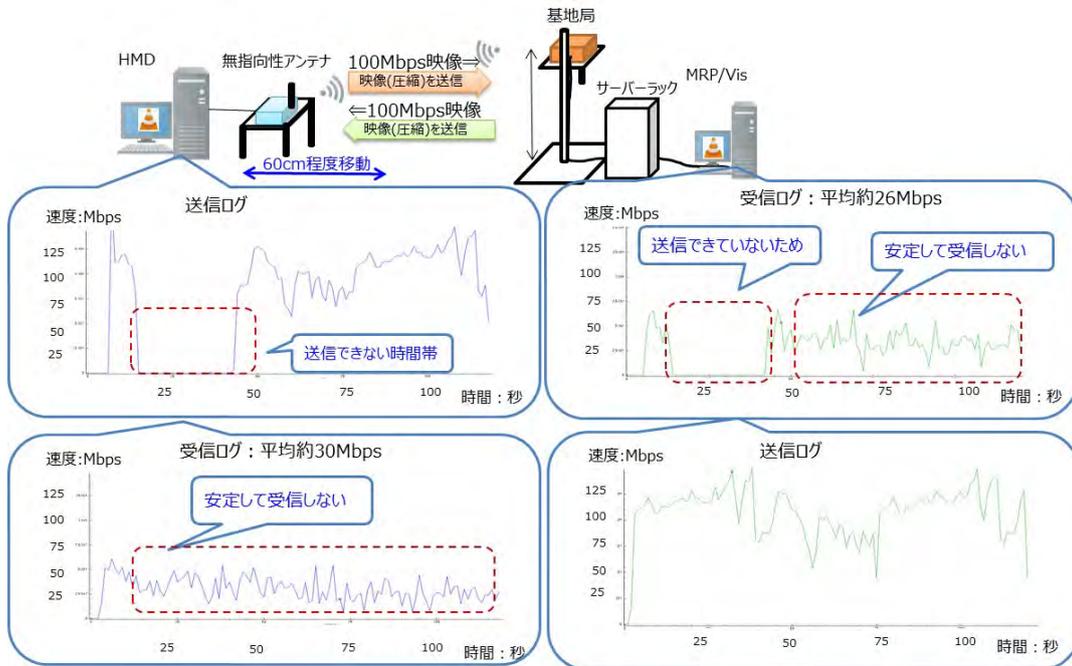


図 4-69 4.7GHz 帯 60cm 水平連続移動 上り/下り 100Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-⑤端末移動-2 (実効速度データ)

以下に 4.7GHz 帯における端末を 60cm 程度移動させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

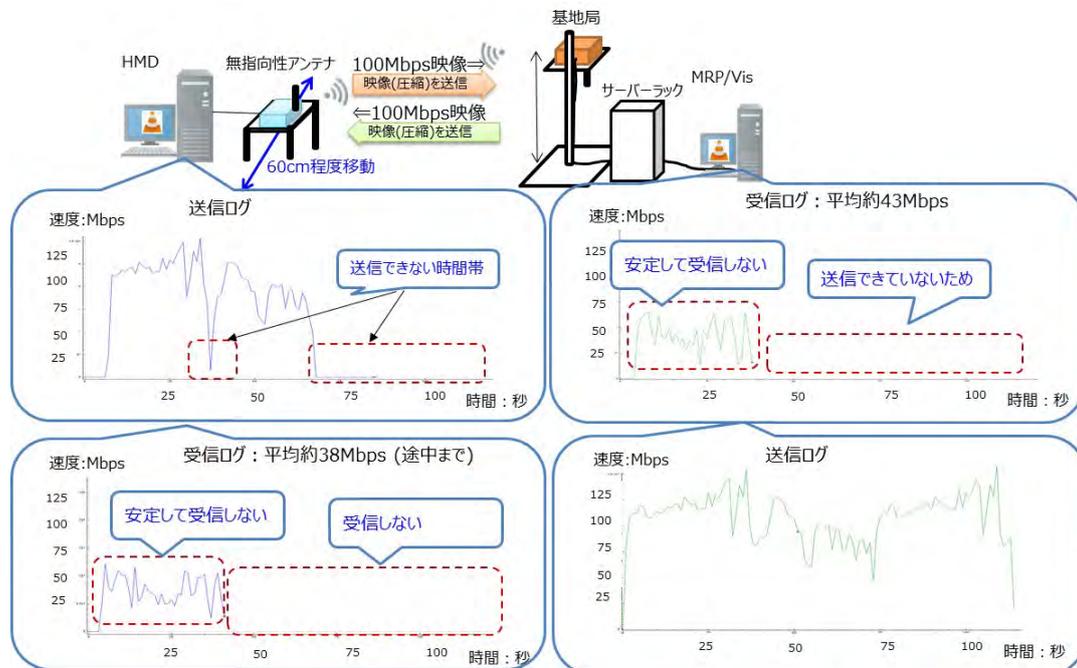


図 4-70 4.7GHz 帯 60cm 水平連続移動 上り/下り 100Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑤端末移動－3（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における端末を垂直方向に 50cm 程度移動させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

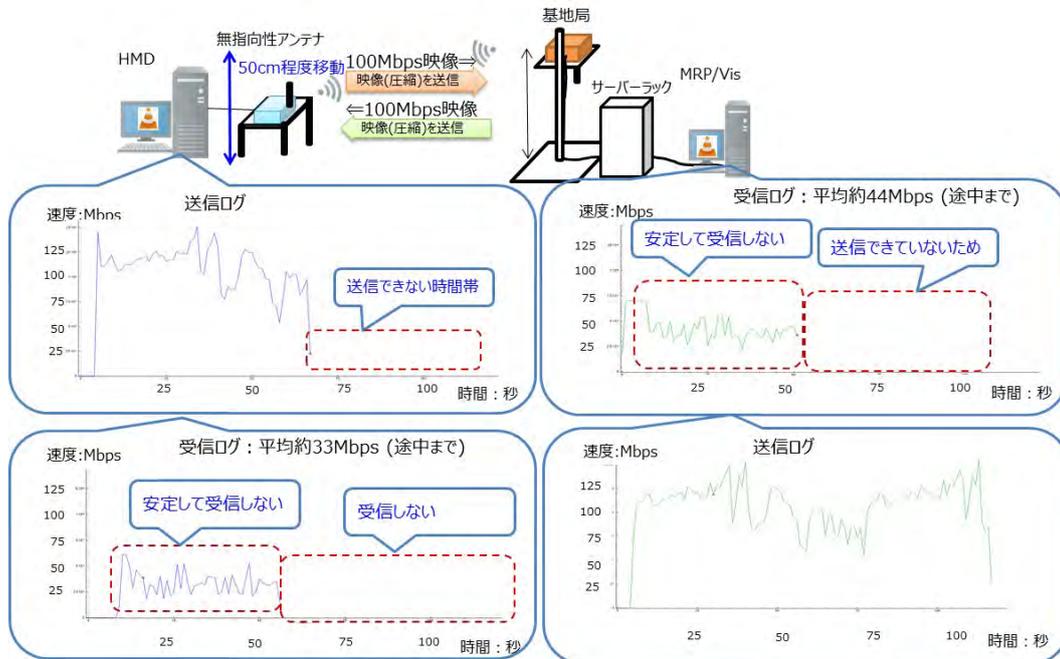


図 4-71 4.7GHz 帯 50cm 垂直方向連続移動 上り/下り 100Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑤端末移動－4（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における端末を連続回転させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

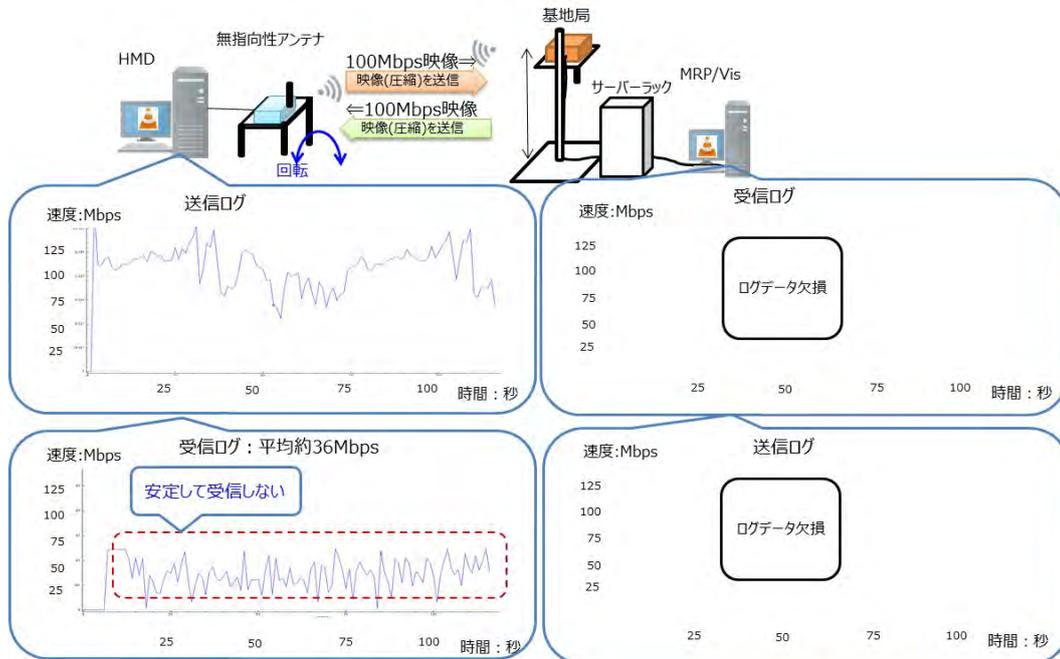


図 4-72 4.7GHz 帯 連続回転 上り/下り 100Mbps 速度ログ

e) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑤端末移動－5（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における端末をランダムに移動させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

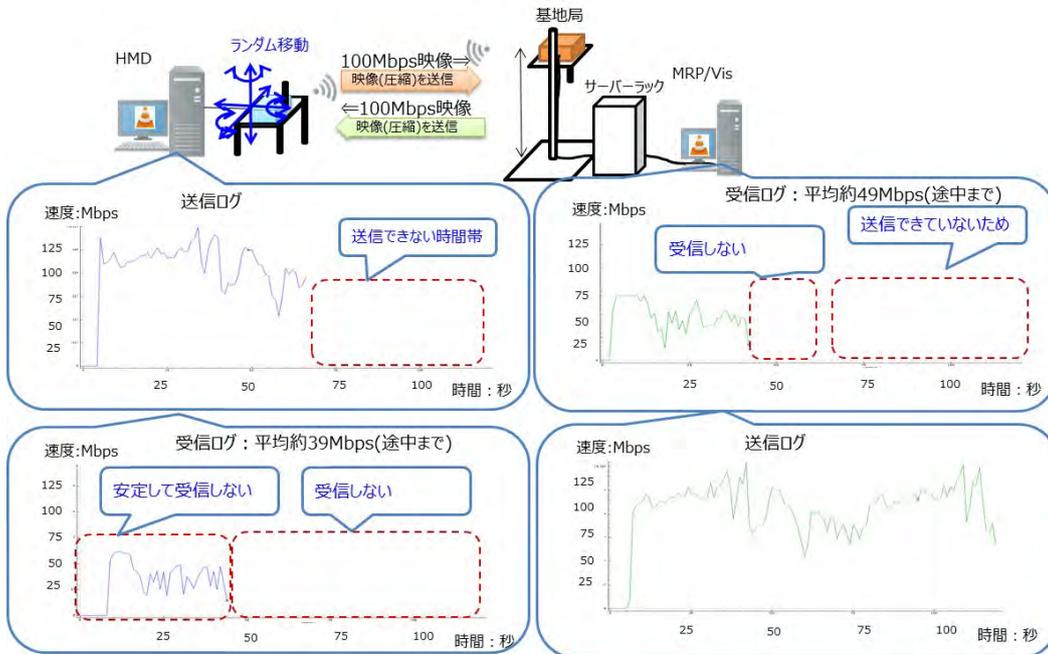


図 4-73 4.7GHz 帯 ランダム連続移動 1 上り/下り 100Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑤端末移動－6（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における端末をランダムに移動させている際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

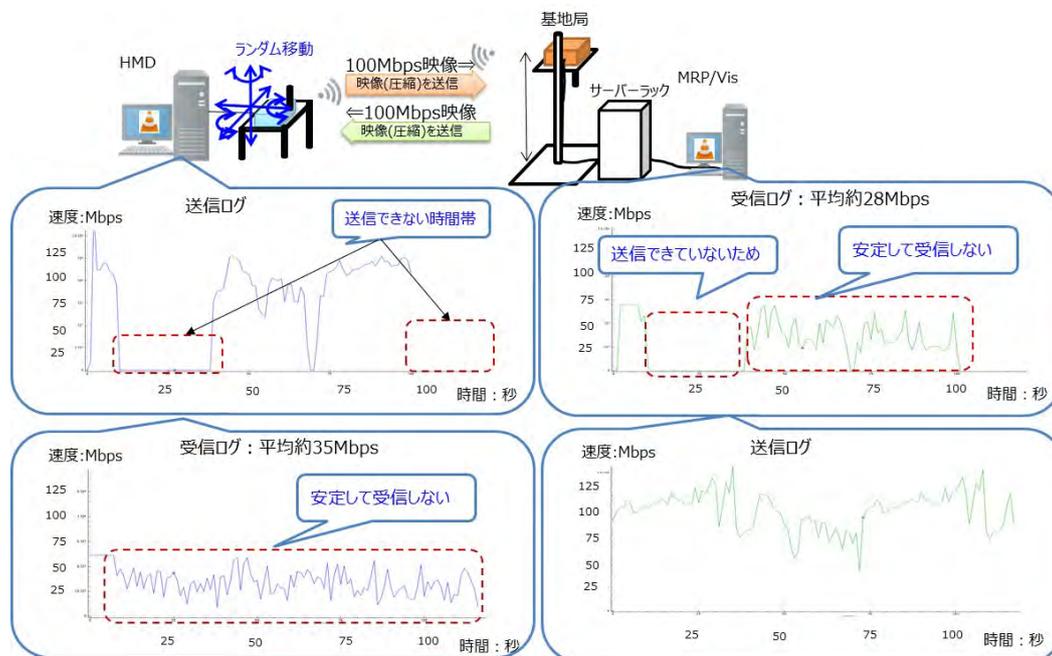


図 4-74 4.7GHz 帯 ランダム連続移動 2 上り/下り 100Mbps 速度ログ

■ 4.7GHz⑤端末移動時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：  
端末側を移動すると通信が不安定になる。MR では動きながら使うため、移動/停止によらず、通信が安定になるようなローカル 5G 側の対策が必要である。

6) 4.7GHz 帯－⑥金属障害物

以下に 4.7GHz 帯における金属障害物があった際の測定結果を示す。

表 4-30 4.7GHz 帯 金属障害物 測定結果

項番	大項目	金属物障害	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	条件1	VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り平均11Mbps 下り平均13Mbps 通信：不安定 欠損率：上り69.961% 下り63.682% 映像官能評価：C

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯—⑥金属障害物—1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯における金属障害物があった際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

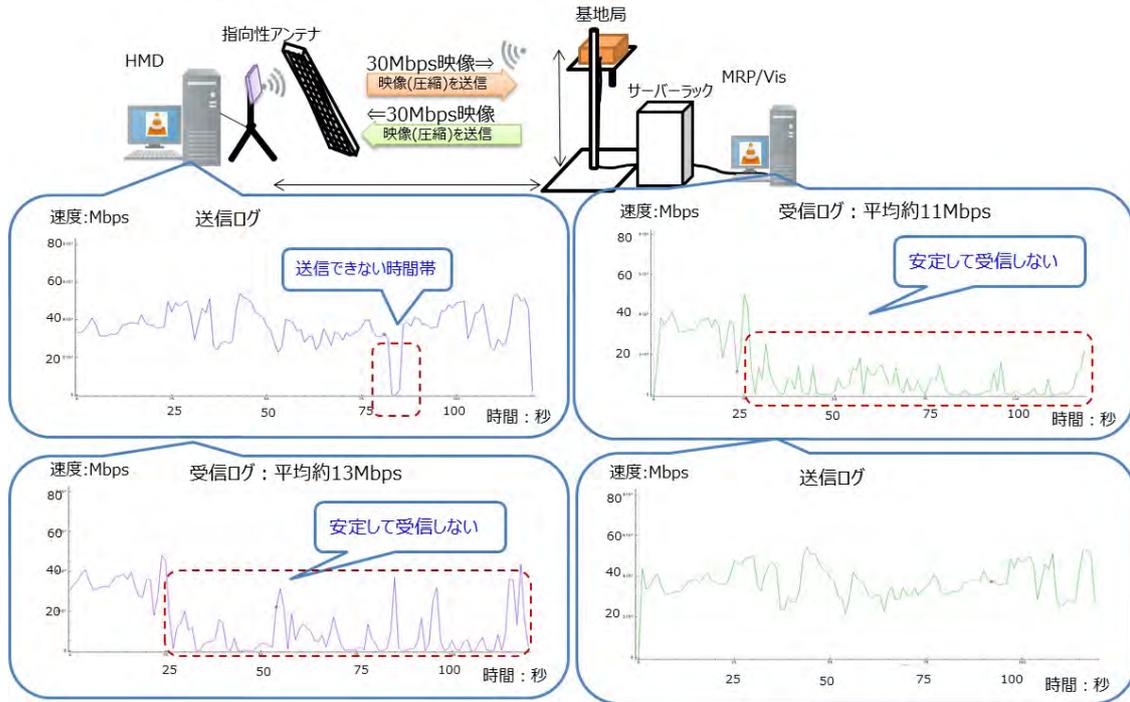


図 4-75 4.7GHz 帯 金属障害物 上り/下り 30Mbps 速度ログ

以下に 4.7GHz 帯における金属障害物試験時の写真を示す。



図 4-76 4.7GHz 帯 金属障害物 上り/下り 30Mbps 試験風景

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑥金属障害物－1（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における金属障害物があった際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-31 4.7GHz 帯 金属障害物 上り/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	399,685	404,410
未到達パケット数(UDP)	279,625	257,537
欠損率%	69.961%	63.682%

■4.7GHz⑥金属障害物時のアプリケーション観点からの分析

・ 実効速度：

端末と基地局の間に金属障害物があった場合、通信が不安定になる。MR のユースケースによっては端末と基地局の間に装置などが設置されているケースがあるため、端末と基地局間は見通しを確保する、もしくはローカル 5G 側でマルチパスや反射波で通信が可能ないようにローカル 5G 側の対策が必要である。

## 7) 4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）における人体障害物があった際の測定結果を示す。

表 4-32 4.7GHz 帯 人体障害物（指向性アンテナ）測定結果一覧

項番	大項目	端末と人の関係	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	前	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均13Mbps 下り 平均40Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		前	VLCを用いて双方向映像転送(上り60、下り50Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均39Mbps 下り 平均37Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
3		前	VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均25Mbps 下り 平均25Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 30.555% 下り 31.828% 映像官能評価：C
4	ループバック	前	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(30Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測	通信：不安定 遅延時間(往復)： 平均7.91msec 最小4.72msec 最大13.58msec 映像官能評価：C
5	双方向通信	後	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均69Mbps 下り 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6	双方向通信	横	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均69Mbps 下り 平均60Mbps 通信：安定 映像官能評価：B

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－1（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

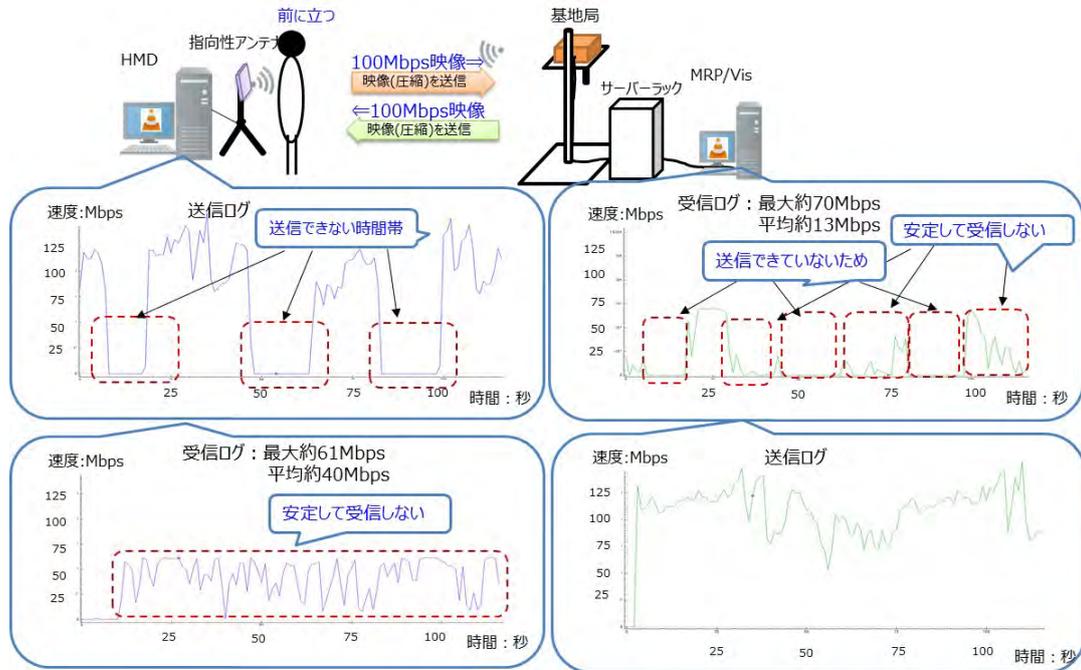


図 4-77 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 100Mbps 速度ログ

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物試験時の写真を示す。



図 4-78 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 100Mbps 計測風景

b) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－2（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、上り 60Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

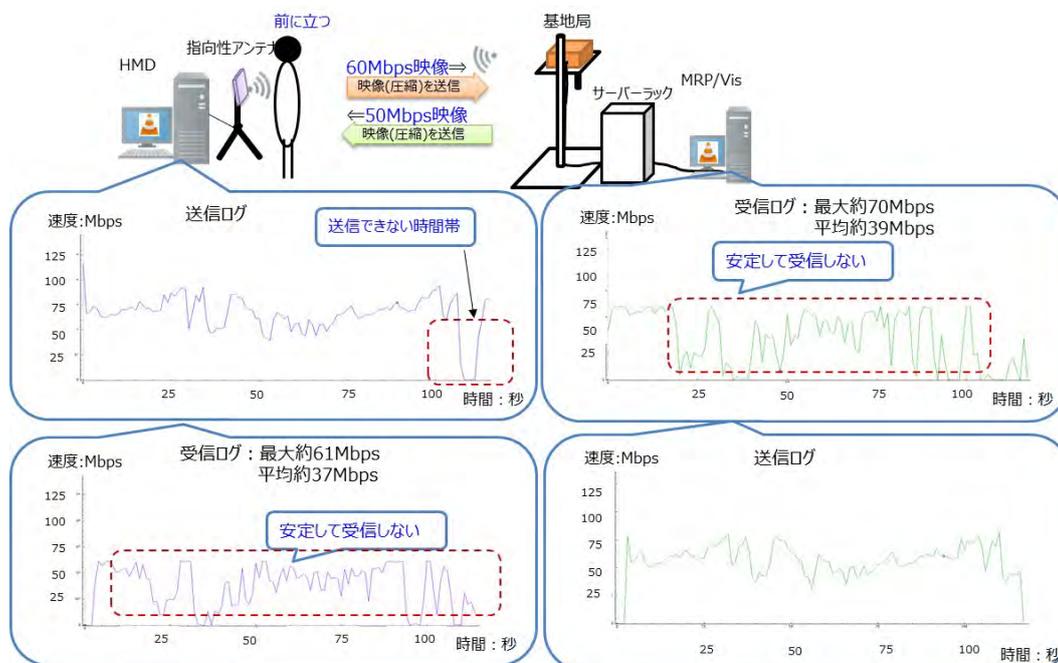


図 4-79 4.7GHz 帯 人体障害物 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－3（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

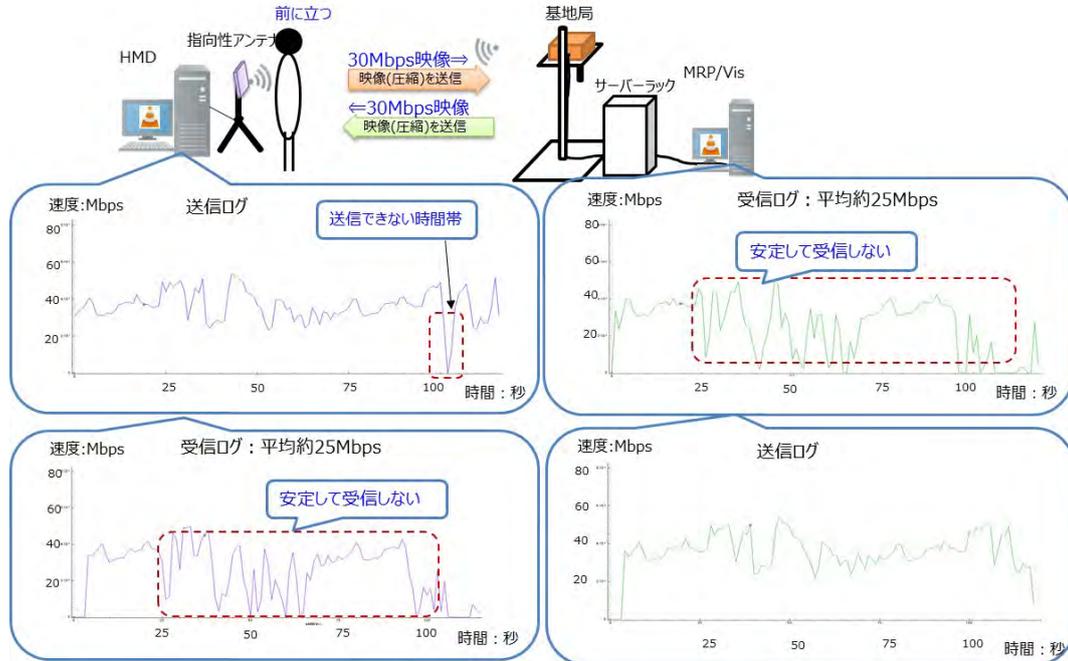


図 4-80 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 30Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－3（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-33 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	385,031	383,914
未到達パケット数(UDP)	117,648	122,308
欠損率%	30.555%	31.828%

e) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－4（実効速度データ）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

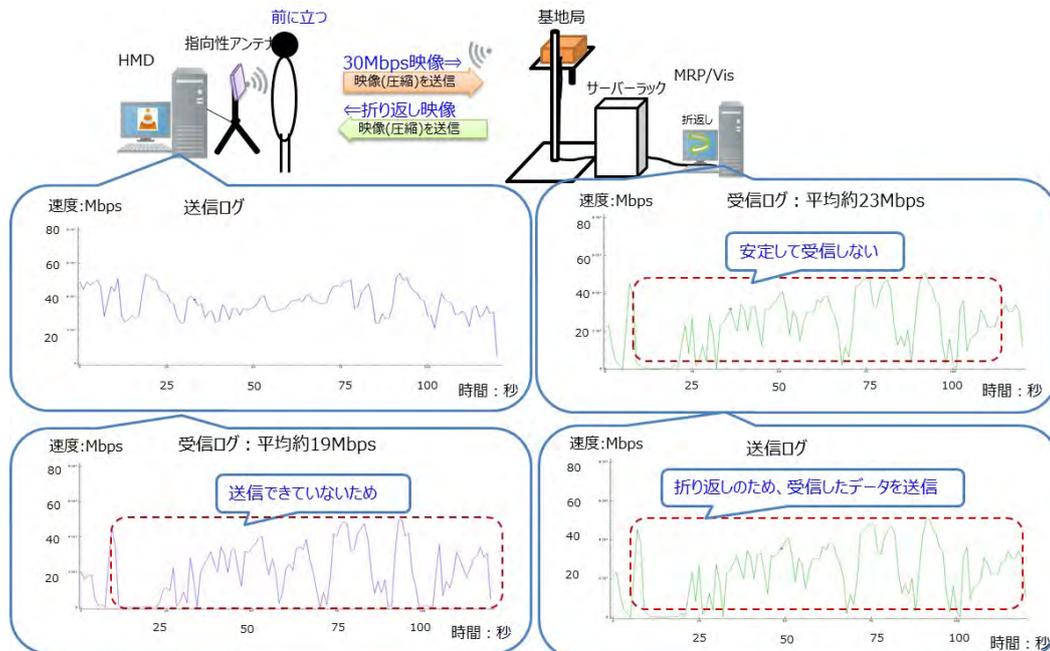


図 4-81 4.7GHz 帯 人体障害物 30Mbps ループバック 速度ログ

f) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－4（遅延時間）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

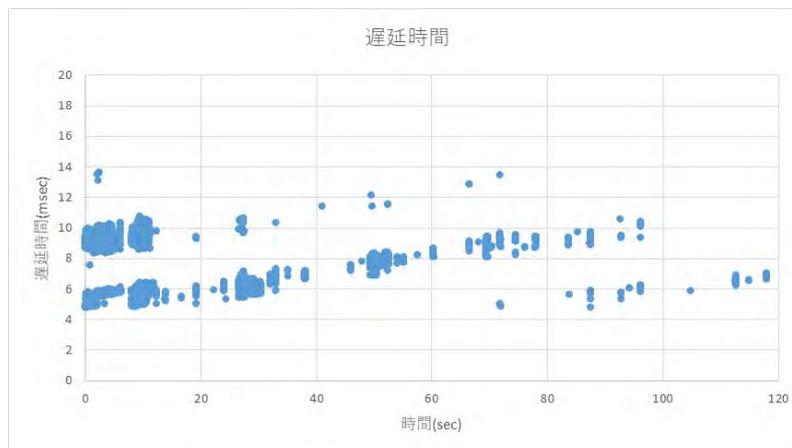


図 4-82 4.7GHz 帯 人体障害物 30Mbps ループバック 遅延ログ



図 4-83 4.7GHz 帯 人体障害物 30Mbps ループバック 遅延ログ

g) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－5（遅延時間）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの横に人体障害物があった際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

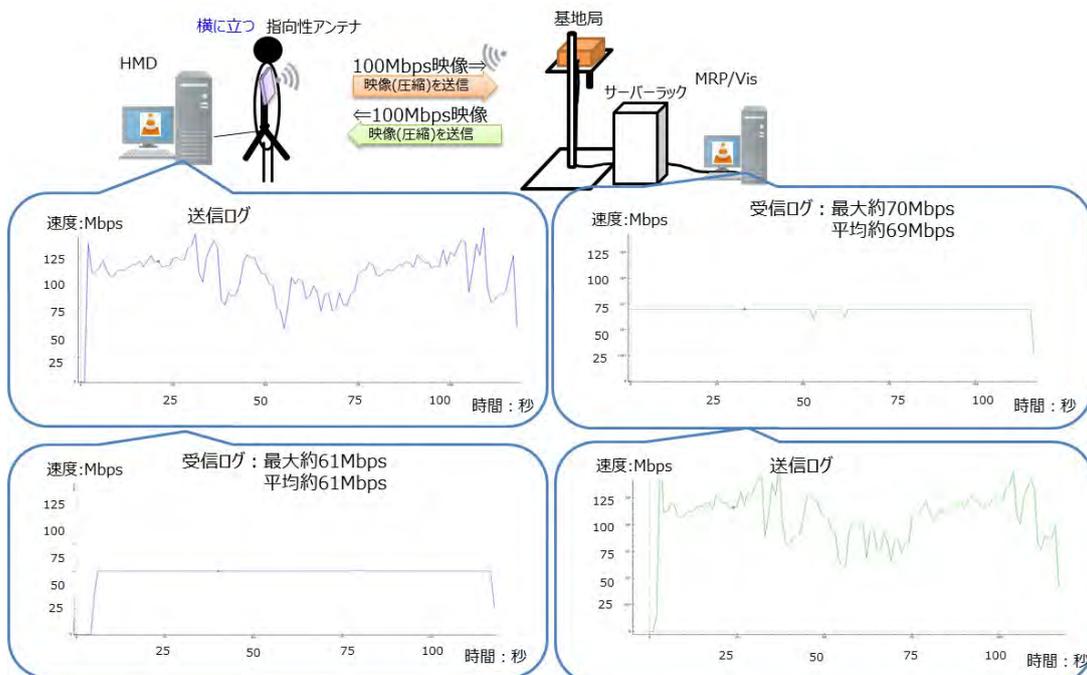


図 4-84 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 100Mbps 速度ログ

h) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑦人体障害物（指向性アンテナ）－6（遅延時間）

以下に 4.7GHz 帯（指向性アンテナ）におけるアンテナの後ろに人体障害物があった際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

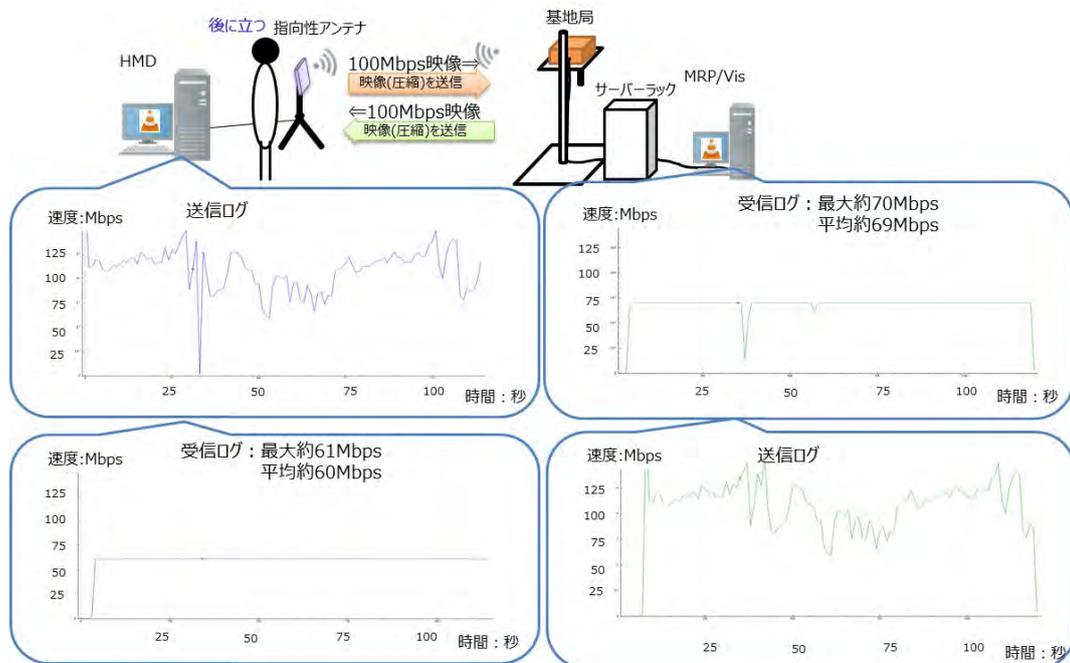


図 4-85 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 100Mbps 速度ログ

■4.7GHz⑦人体障害物時（指向性アンテナ）のアプリケーション観点からの分析

・ 実効速度：

端末と基地局の間に人体障害物があった場合、通信が不安定になる。MR のユースケースによっては端末と基地局の間に人がいるケースがあるため、端末側のアンテナは基地局との見通しを確保できるような場所が望ましい。また、ローカル 5G 側でマルチパスや反射波で通信が可能ないようにローカル 5G 側の対策が必要である。

## 8) 4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）における人体障害物があった際の測定結果を示す。

表 4-34 4.7GHz 人体障害物（無指向性アンテナ）測定結果一覧

項番	大項目	端末と人の関係	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	前	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均0Mbps 下り 平均18Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		前	VLCを用いて双方向映像転送(上り60、下り50Mbps 約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均10Mbps 下り 平均11Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
3		前	VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均22Mbps 下り 平均23Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 41.533% 下り 41.725% 映像官能評価：C
4		前	VLCを用いて双方向映像転送(10Mbps 約2分間)する。 Wiresharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均9Mbps 下り 平均8.8Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 55.507% 下り 87.709% 映像官能評価：C

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－1（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

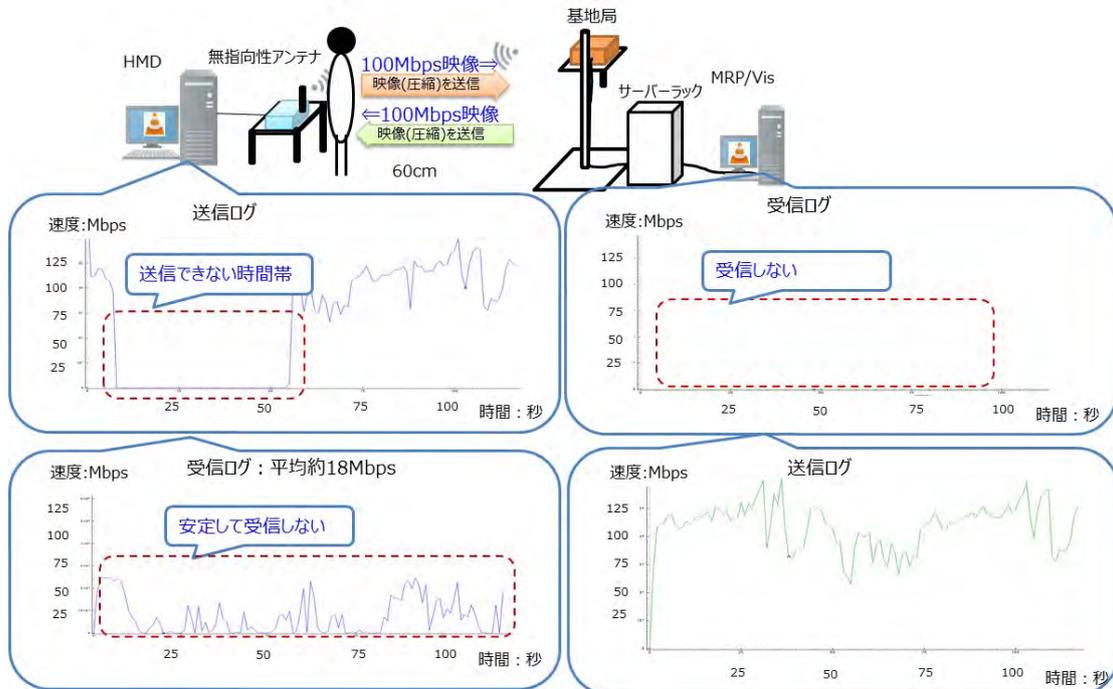


図 4-86 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 100Mbps 速度ログ

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物試験時の写真を示す。



図 4-87 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 10Mbps 計測風景

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－2（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の上り 60Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

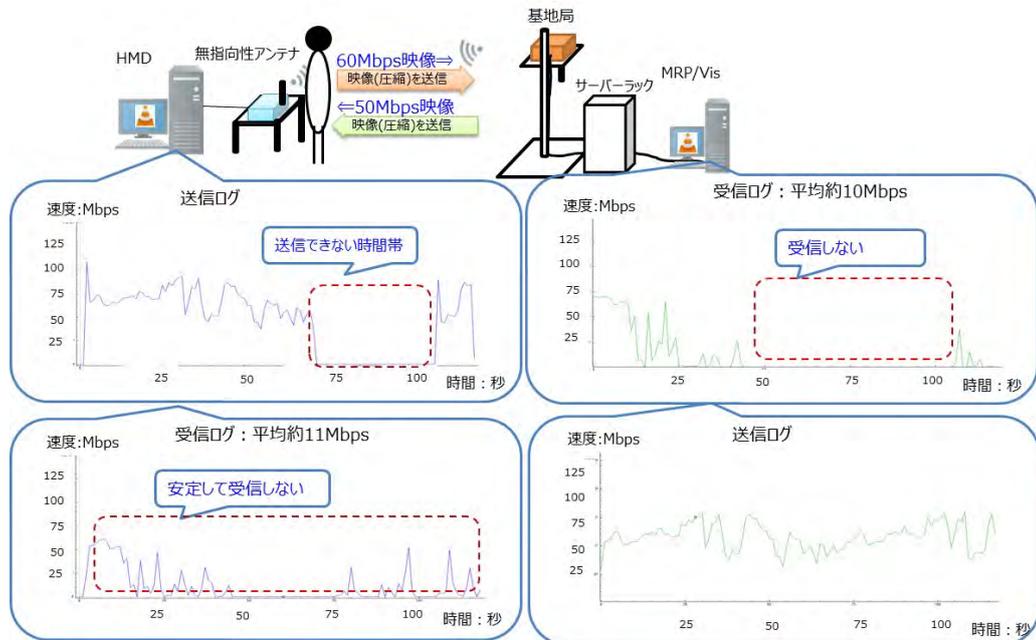


図 4-88 4.7GHz 帯 人体障害物 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－3（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

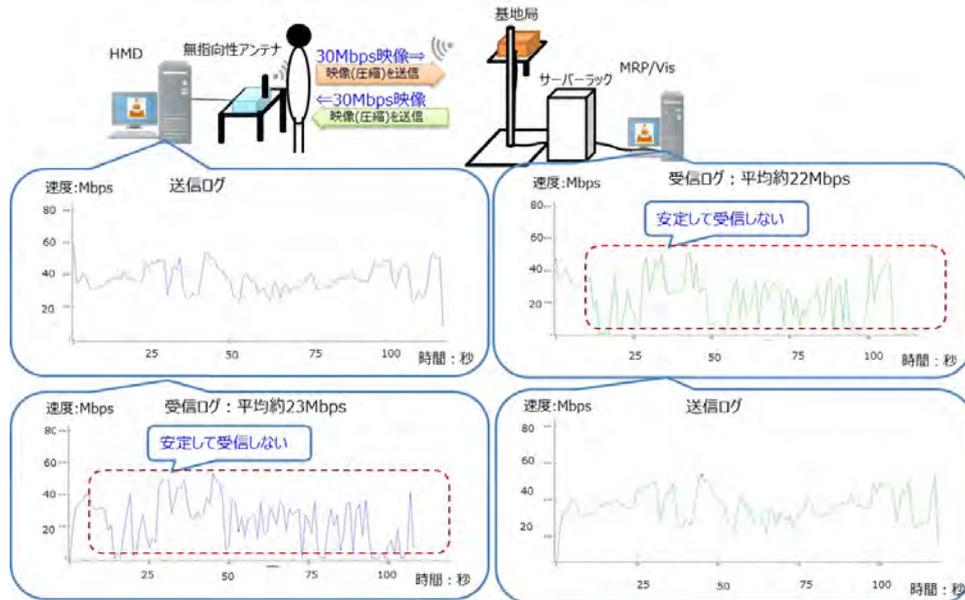


図 4-89 4.7GHz 帯 人体障害物 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－3（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の 上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-35 4.7GHz 帯 人体障害物 上り 60Mbps/下り 50Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	404,884	394,016
未到達パケット数(UDP)	168,161	164,405
欠損率%	41.533%	41.725%

e) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－4（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の上り 10Mbps、下り 10Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

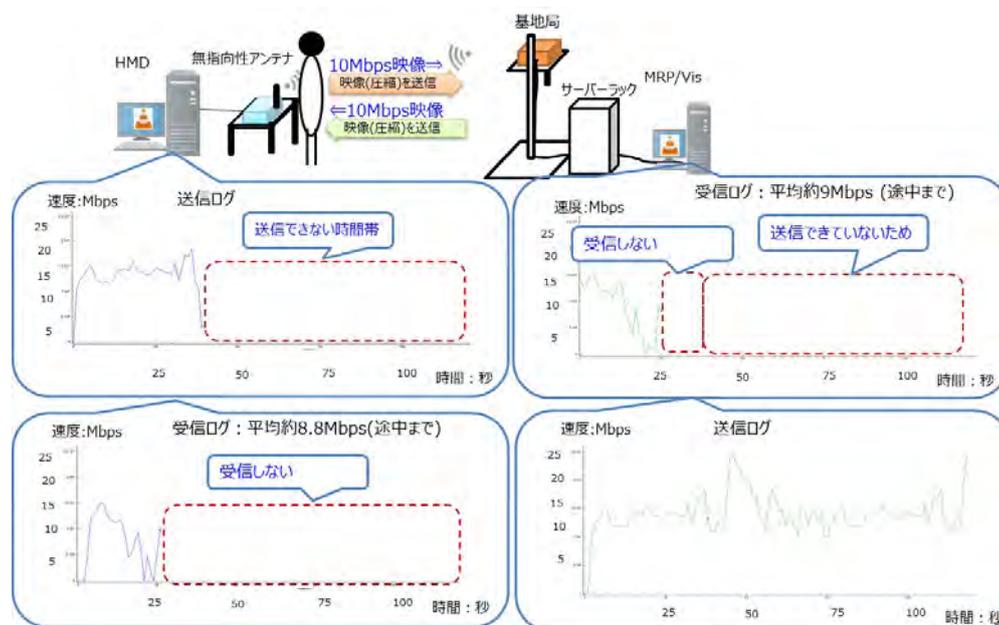


図 4-90 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 10Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑧人体障害物（無指向性アンテナ）－4（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯（無指向性アンテナ）におけるアンテナの前に人体障害物があった際の 上り 10Mbps、下り 10Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-36 4.7GHz 帯 人体障害物 上り/下り 10Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	48,124	153,038
未到達パケット数(UDP)	26,712	134,228
欠損率%	55.507%	87.709%

■ 4.7GHz 帯⑧人体障害物時（無指向性アンテナ）のアプリケーション観点からの分析

・ 実効速度：

端末と基地局の間に人体障害物があった場合、通信が不安定になる。MR のユースケースによっては端末と基地局の間に人がいるケースがあるため、端末側のアンテナは基地局との見通しを確保できるような場所が望ましい。また、ローカル 5G 側でマルチパスや反射波で通信が可能ないようにローカル 5G 側の対策が必要である。

9) 4.7GHz 帯—⑨ 2セット同時使用

以下に 4.7GHz 帯における 2セットを同時に使用した際の測定結果を示す。

表 4-37 4.7GHz 帯 2セット使用 測定結果一覧

項番	大項目	端末間の距離	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 最大70Mbps 平均70Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
2		220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(60Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均64Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
3		220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均37Mbps 通信：安定 欠損率：上り(無指向性)0.276% 上り(指向性)0.081% 映像官能評価：A
4		220 cm	VLCを用いて2セット同時に下りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 最大61Mbps 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
5		220 cm	VLCを用いて2セット同時にのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6		220 cm	VLCを用いて2セット同時にのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：下り 平均36Mbps 通信：安定 欠損率：下り(無指向性)0.094% 下り(指向性)0.288% 映像官能評価：A
7	双方向通信	220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 最大70Mbps 平均70Mbps 下り 最大61Mbps 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
8		220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(上り60、下り50Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均64Mbps 下り 平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
9		220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均36Mbps 下り 平均36Mbps 通信：安定 欠損率：上り(無指向性)0.267% 上り(指向性)0.029% 下り(無指向性)0.00% 下り(指向性)0.00% 映像官能評価：A
10	ループバック	220 cm	VLC+ループバックツールを用いて2セット同時に映像転送(30Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：安定 遅延時間(往復)：平均(無指向性)9.1msec 最小(無指向性)4.71msec 平均(指向性)8.99msec 最小(指向性)4.75msec 映像官能評価：A

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-1（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

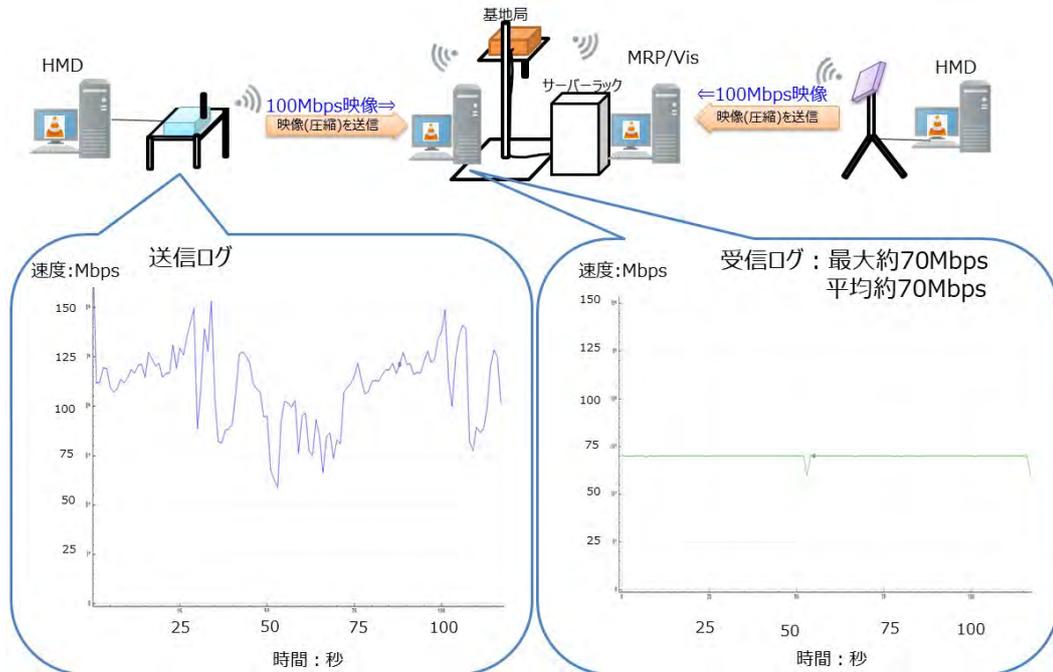


図 4-91 4.7GHz 帯 2セット 上り 100Mbps 速度ログ 1

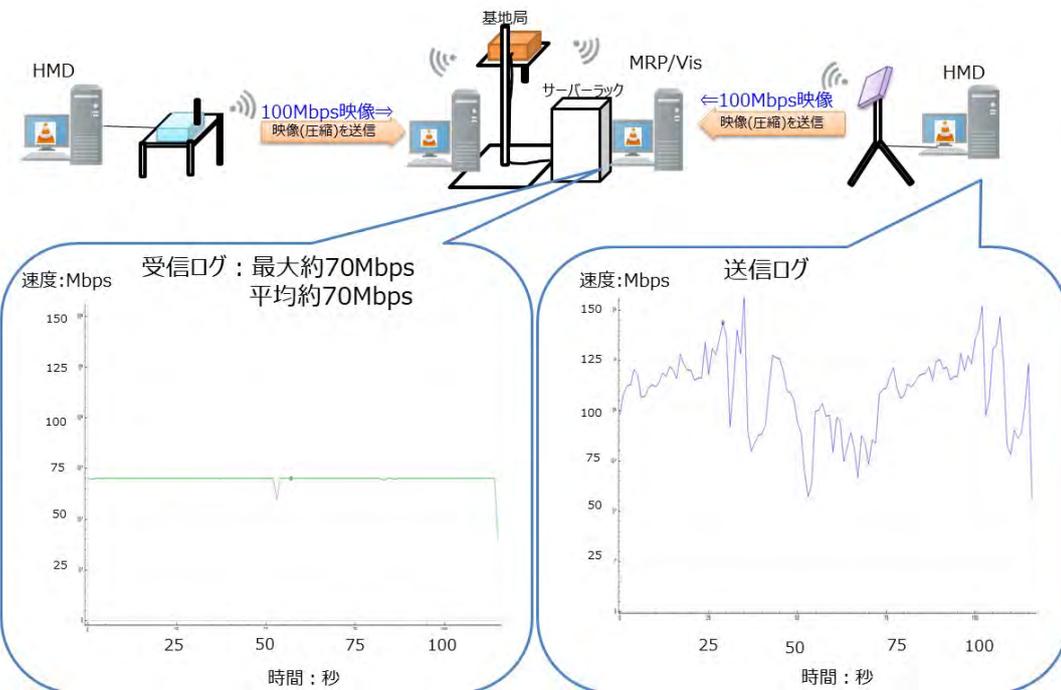


図 4-92 4.7GHz 帯 2セット 上り 100Mbps 速度ログ 2

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-2（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 60Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

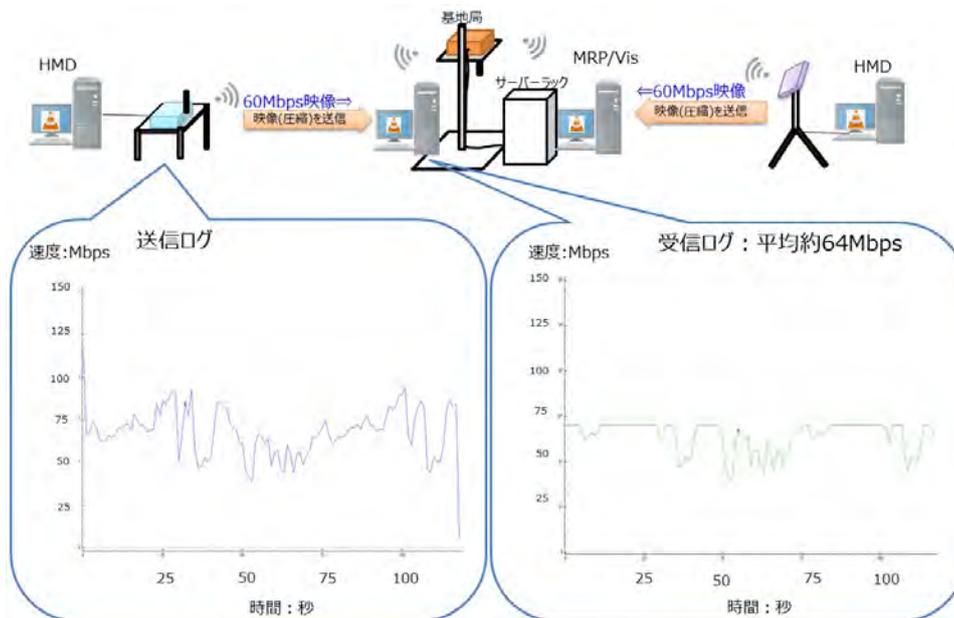


図 4-93 4.7GHz 帯 2 セット 上り 60Mbps 速度ログ 1

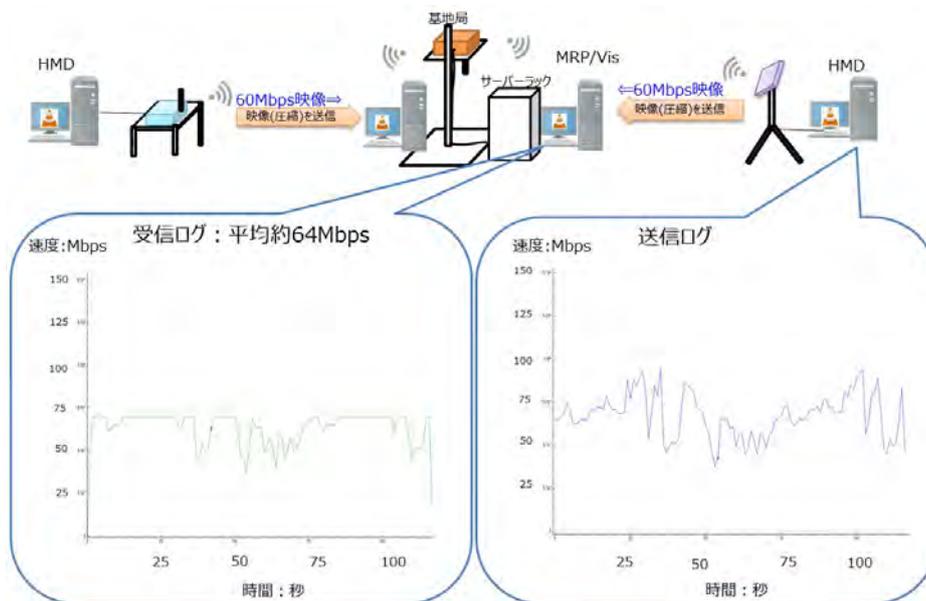


図 4-94 4.7GHz 帯 2 セット 上り 60Mbps 速度ログ 2

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑨2 セット同時使用－3（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

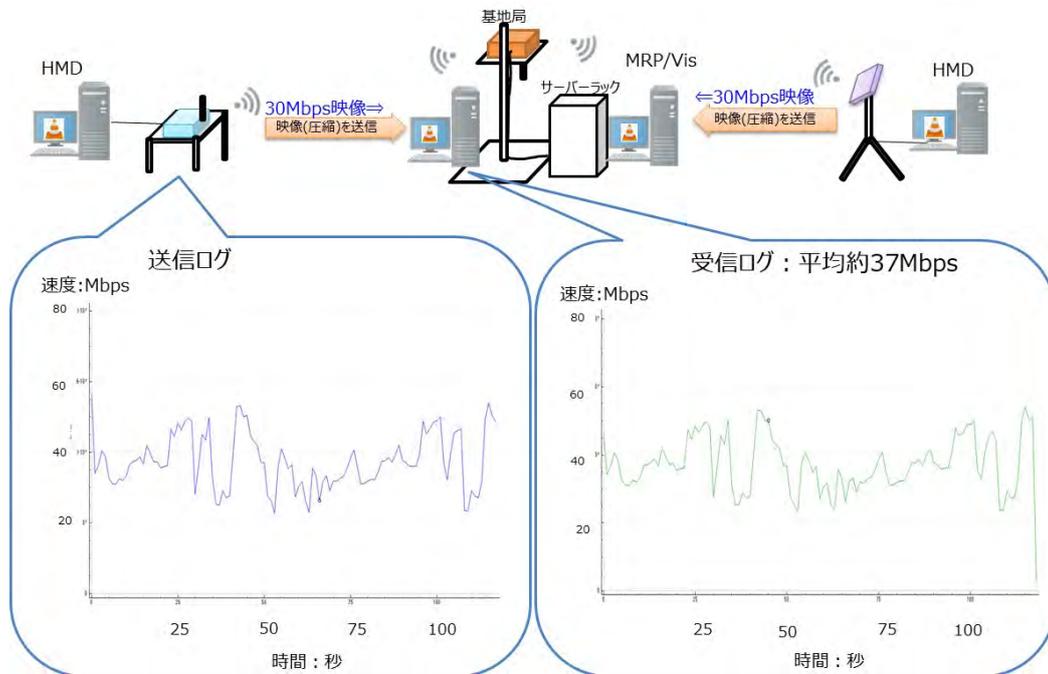


図 4-95 4.7GHz 帯 2 セット 上り 30Mbps 速度ログ 1

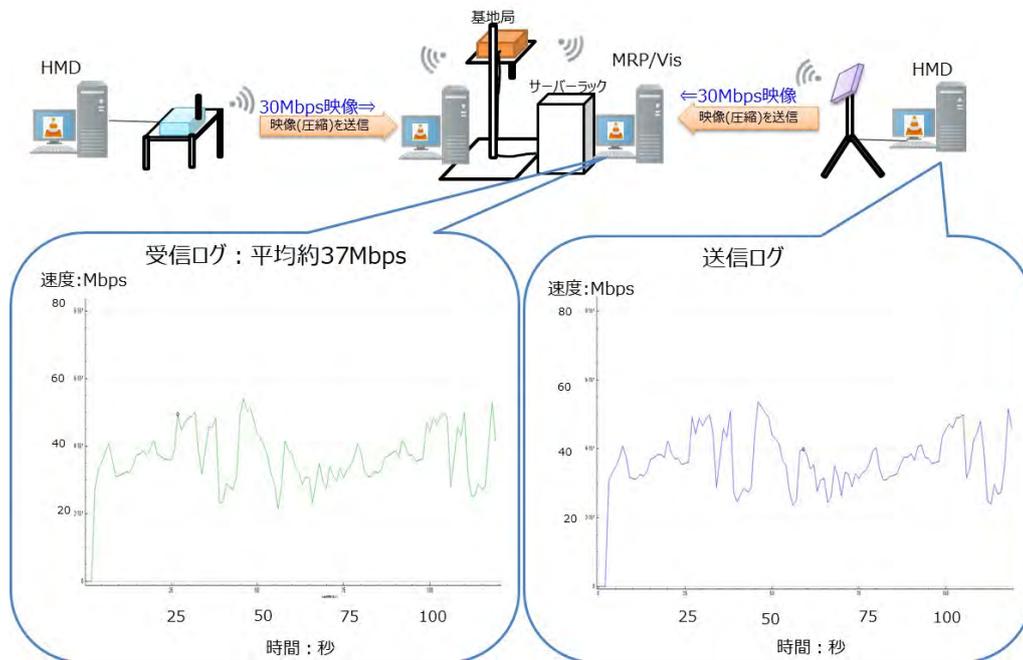


図 4-96 4.7GHz 帯 2 セット 上り 30Mbps 速度ログ 2

d) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-3 (欠損率)

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-38 4.7GHz 帯 2 セット 上り 30Mbps 欠損率

	無指向性アンテナ		指向性アンテナ	
	上り	下り	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	403,468	—	394,815	—
未到達パケット数(UDP)	1,112	—	320	—
欠損率%	0.2756%	—	0.081	—

e) 測定結果ログ : 4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-4 (実効速度)

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

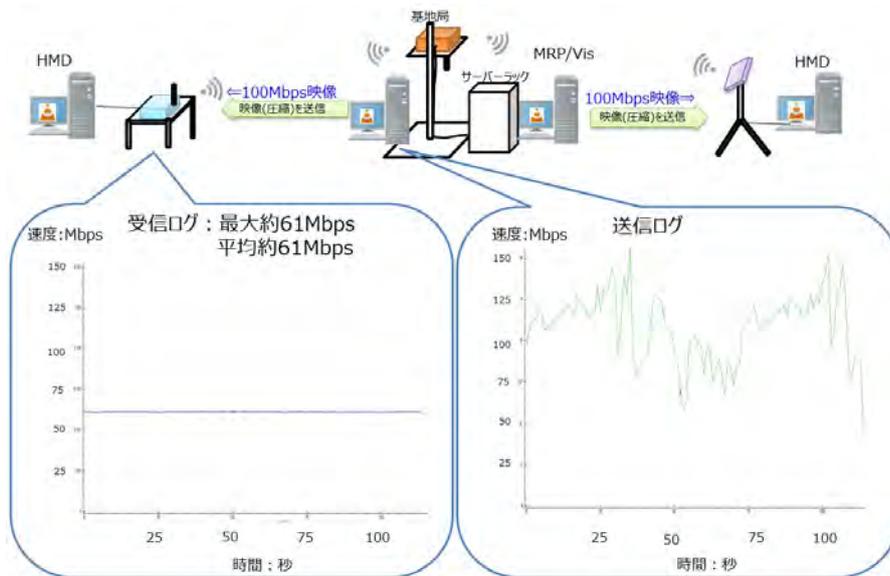


図 4-97 4.7GHz 帯 2 セット 下り 100Mbps 速度ログ 1

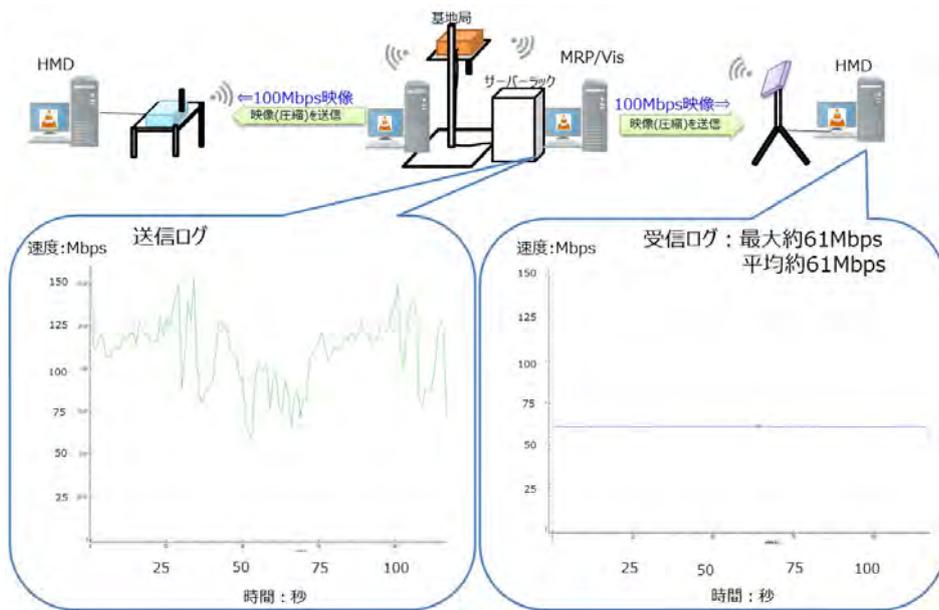


図 4-98 4.7GHz 帯 2セット 下り 100Mbps 速度ログ 2

f) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-5 (実効速度)

以下に 4.7GHz 帯における 2セットを同時に使用した際の下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

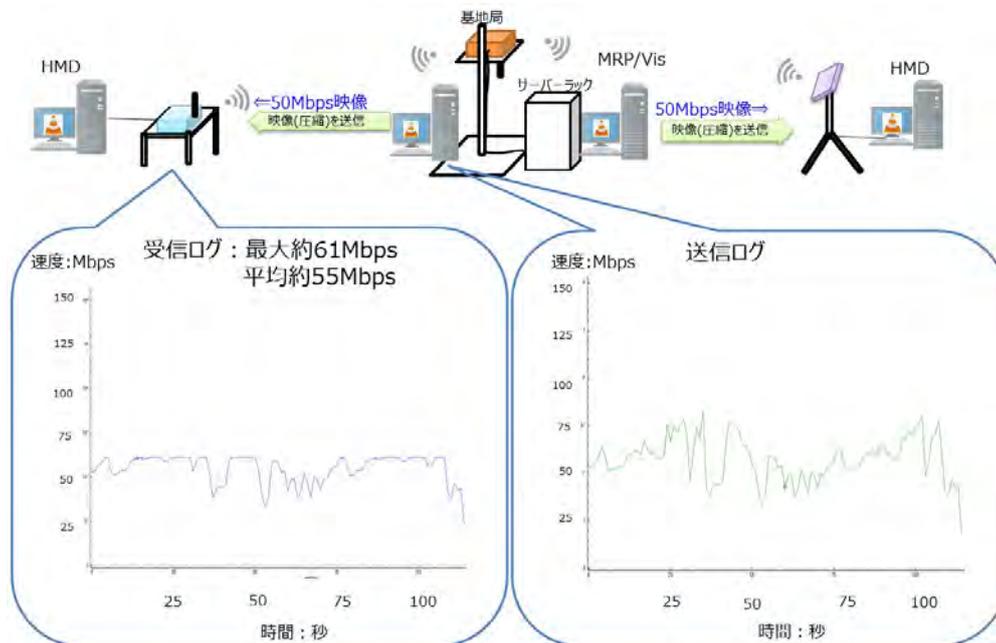


図 4-99 4.7GHz 帯 2セット 下り 50Mbps 速度ログ 1

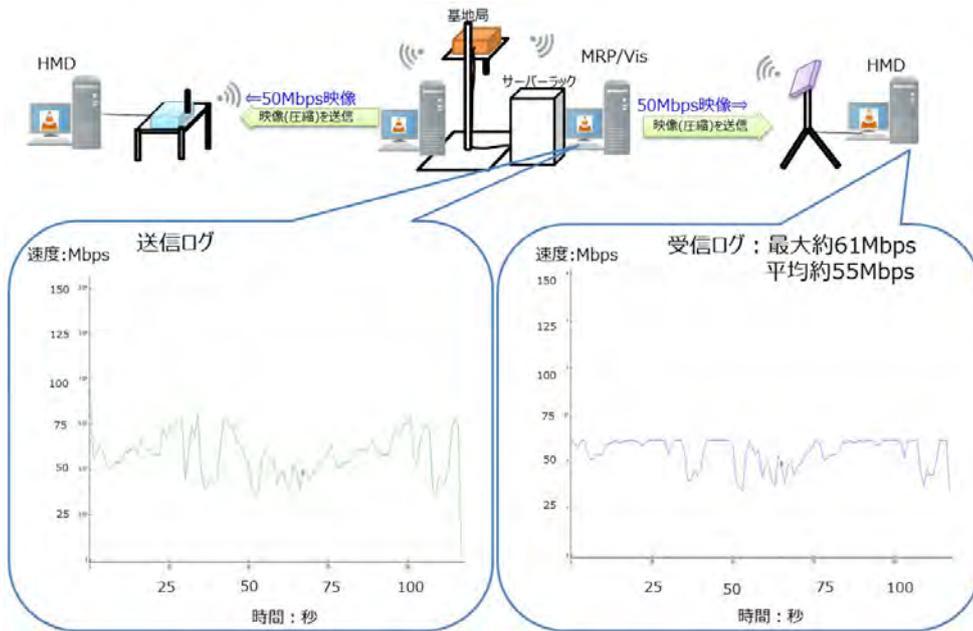


図 4-100 4.7GHz 帯 2セット 下り 50Mbps 速度ログ 2

g) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2セット同時使用-6（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2セットを同時に使用した際の下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

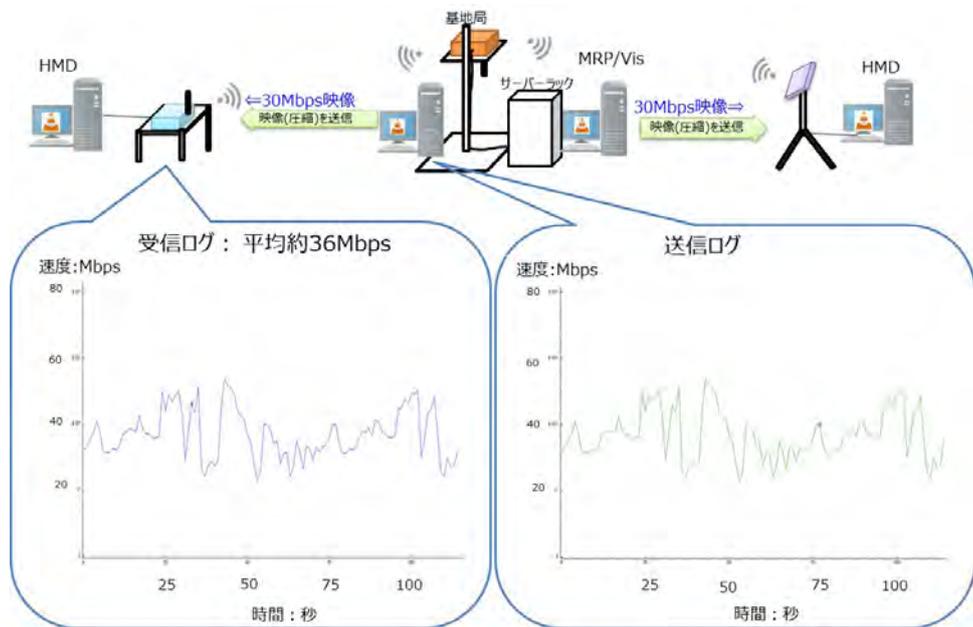


図 4-101 4.7GHz 帯 2セット 下り 30Mbps 速度ログ 1

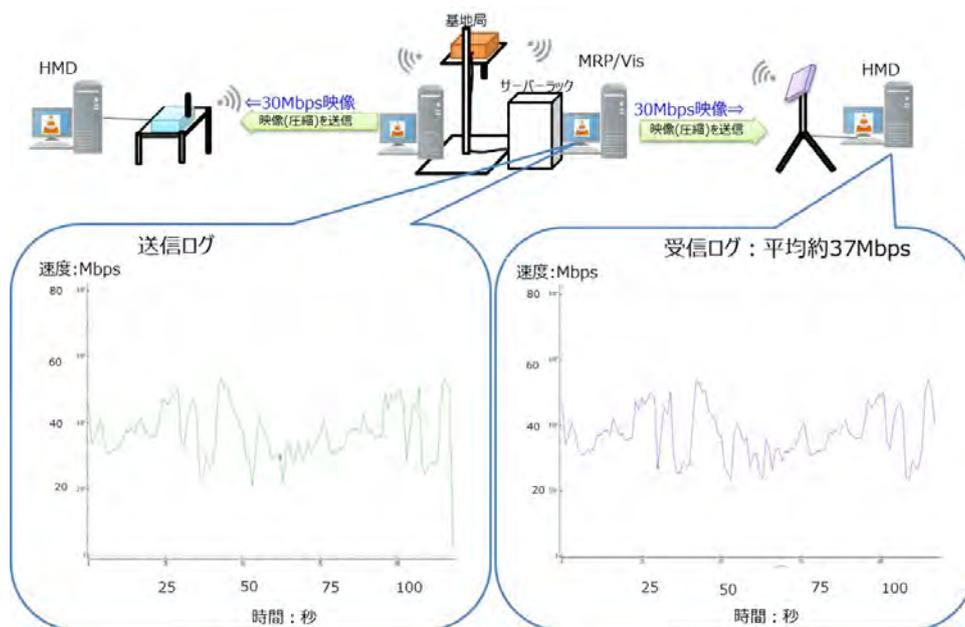


図 4-102 4.7GHz 帯 2 セット 下り 30Mbps 速度ログ 2

h) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-6 (欠損率)

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-39 4.7GHz 帯 2 セット 下り 30Mbps 欠損率

	無指向性アンテナ		指向性アンテナ	
	上り	下り	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	386,036	—	402,431
未到達パケット数(UDP)	—	362	—	1,157
欠損率%	—	0.094%	—	0.288%

i) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-7（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

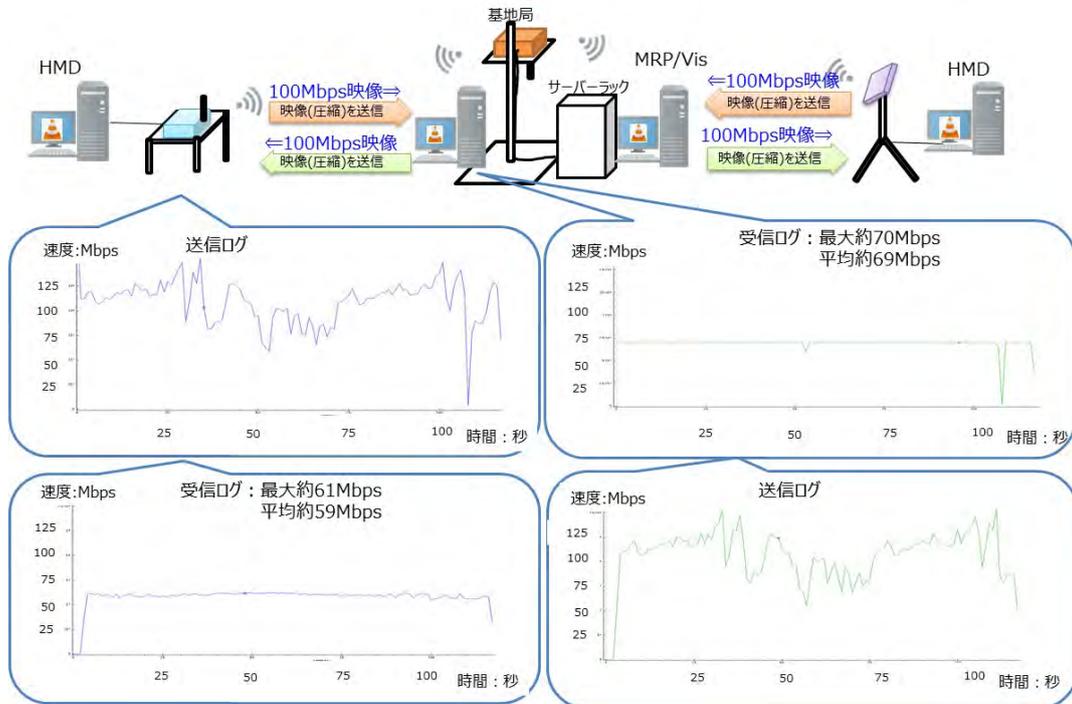


図 4-103 4.7GHz 帯 2セット 上り/下り 100Mbps 速度ログ 1

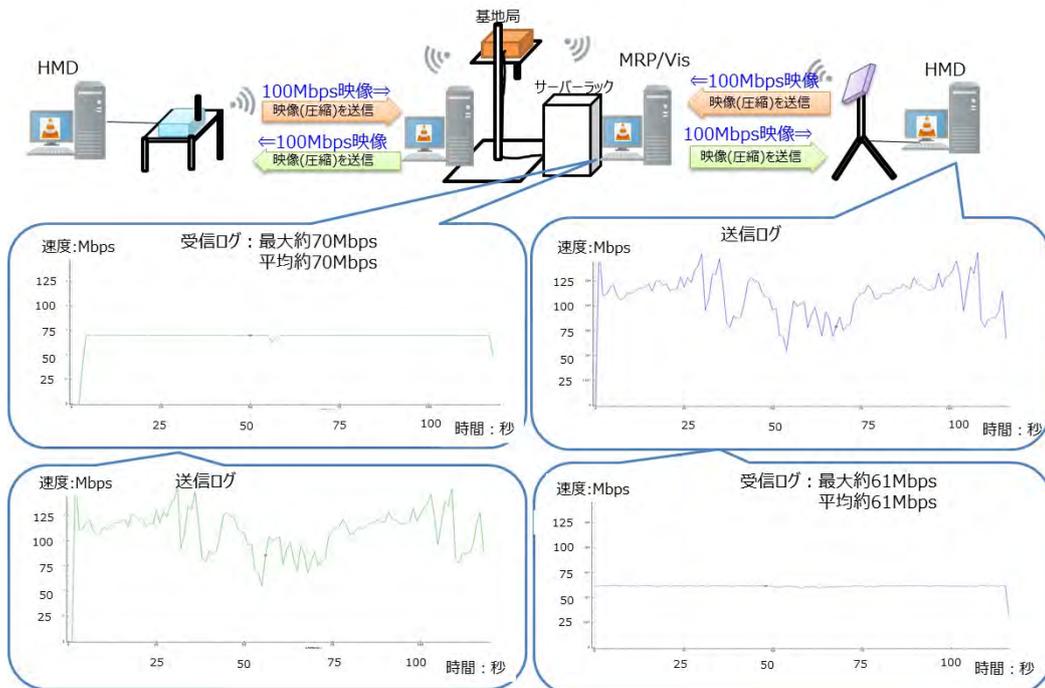


図 4-104 4.7GHz 帯 2セット 上り/下り 100Mbps 速度ログ 2

j) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-8（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 60Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

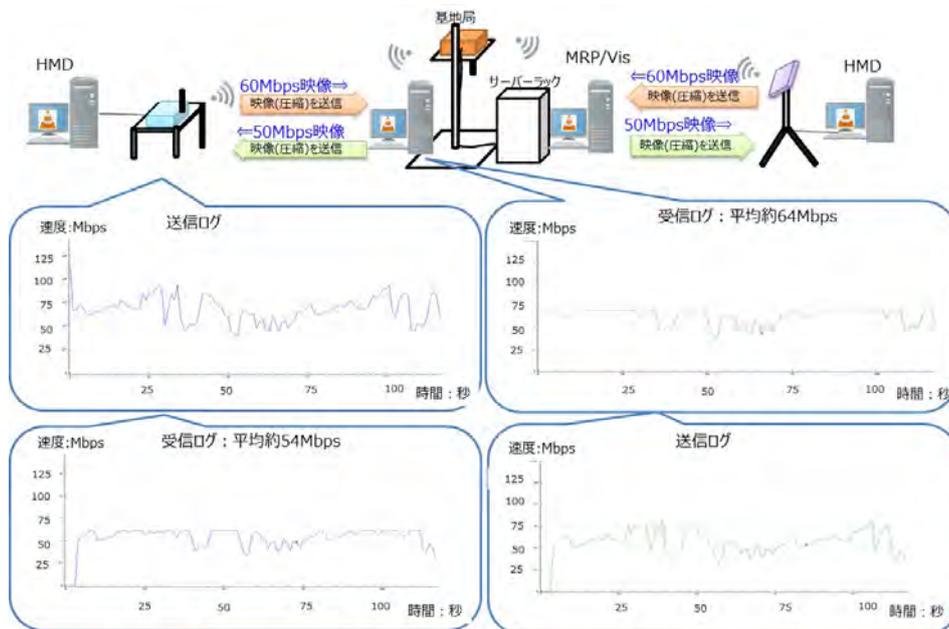


図 4-105 4.7GHz 帯 2セット 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ 1

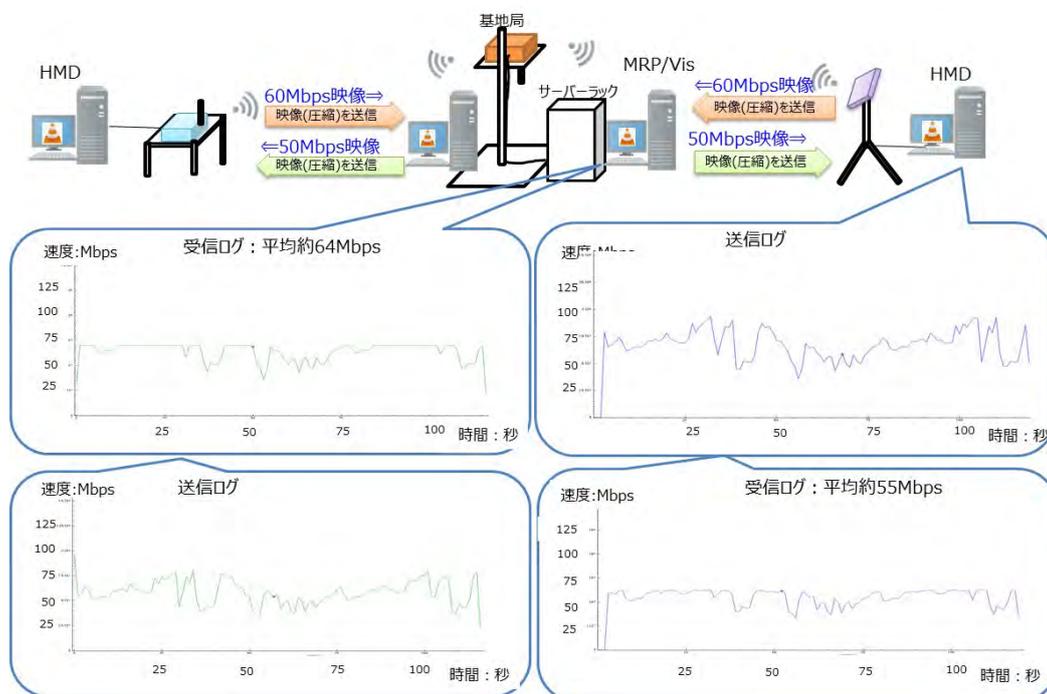


図 4-106 4.7GHz 帯 2セット 上り 60Mbps/下り 50Mbps 速度ログ 2

k) 測定結果ログ：4.7GHz 帯-⑨2 セット同時使用-9（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

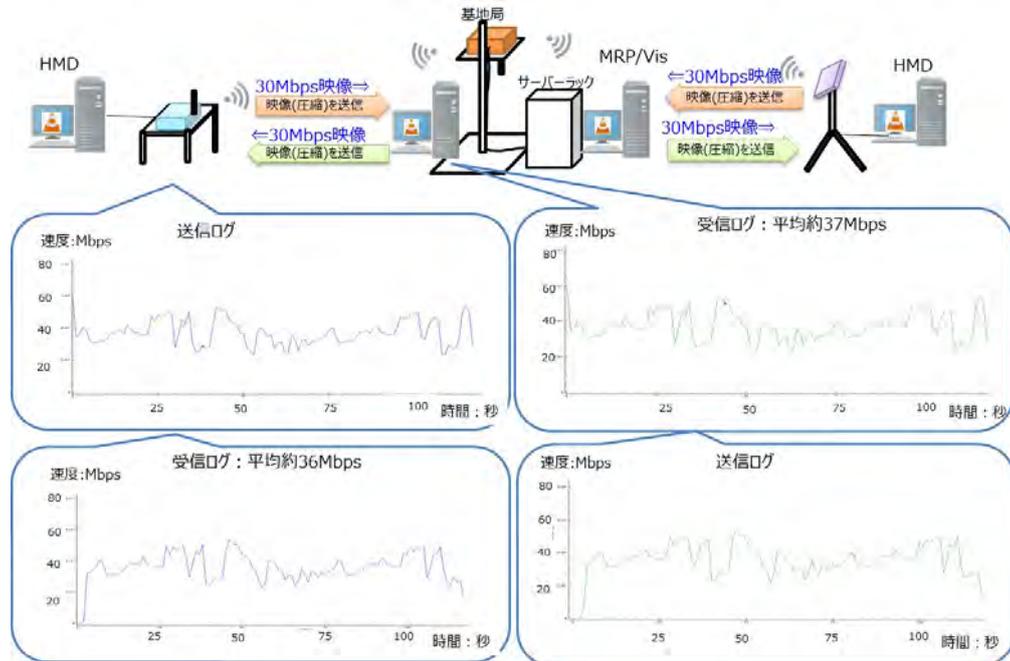


図 4-107 4.7GHz 帯 2 セット 上り/下り 30Mbps 速度ログ 1

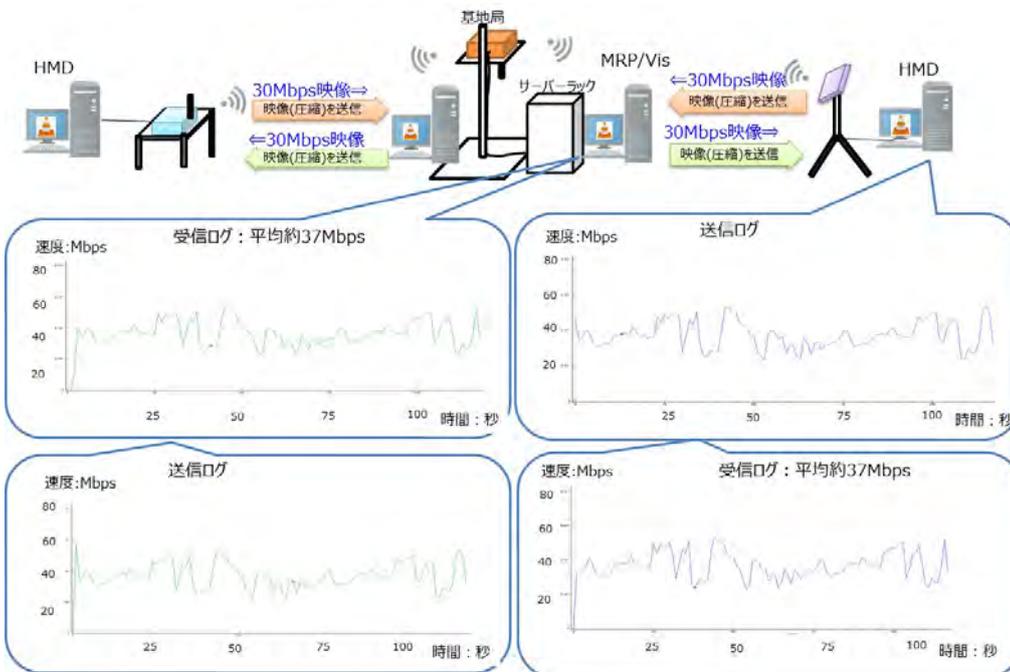


図 4-108 4.7GHz 帯 2 セット 上り/下り 30Mbps 速度ログ 2

l) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－⑨2 セット同時使用－9（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-40 4.7GHz 帯 2 セット 上り/下り 30Mbps 欠損率

	無指向性アンテナ		指向性アンテナ	
	上り	下り	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	402,009	384,723	393,967	401,066
未到達パケット数(UDP)	1,074	113	0	0
欠損率%	0.267%	0.029%	0.00%	0.00%

m) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－⑨2 セット同時使用－10（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における 2 セットを同時に使用した際のループバック 30 Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

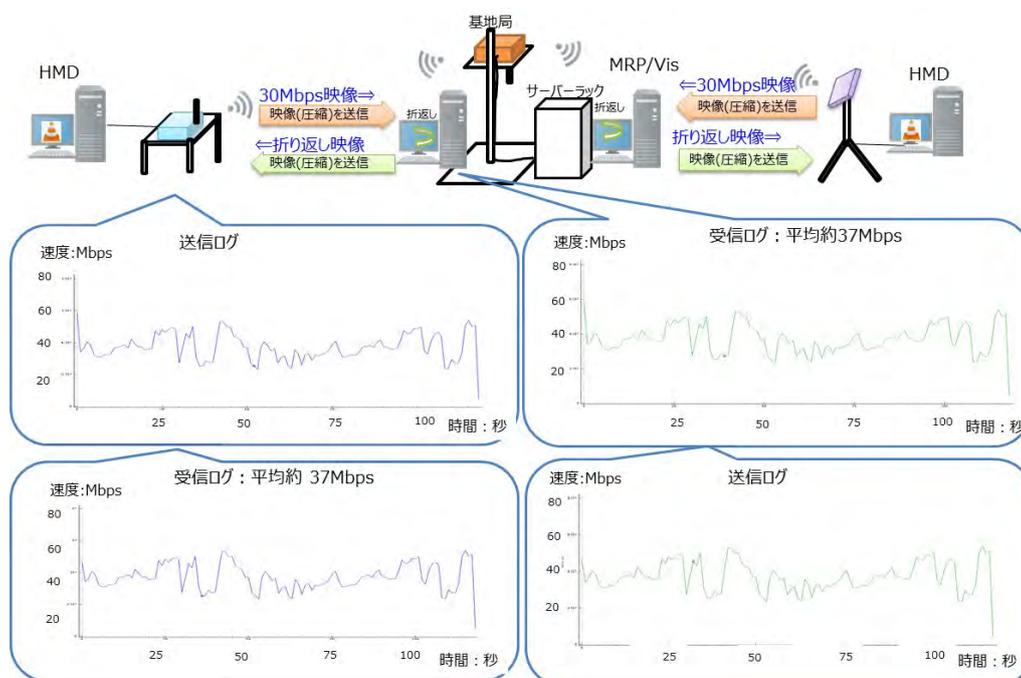


図 4-109 4.7GHz 帯 2 セット 30Mbps ループバック速度ログ 1

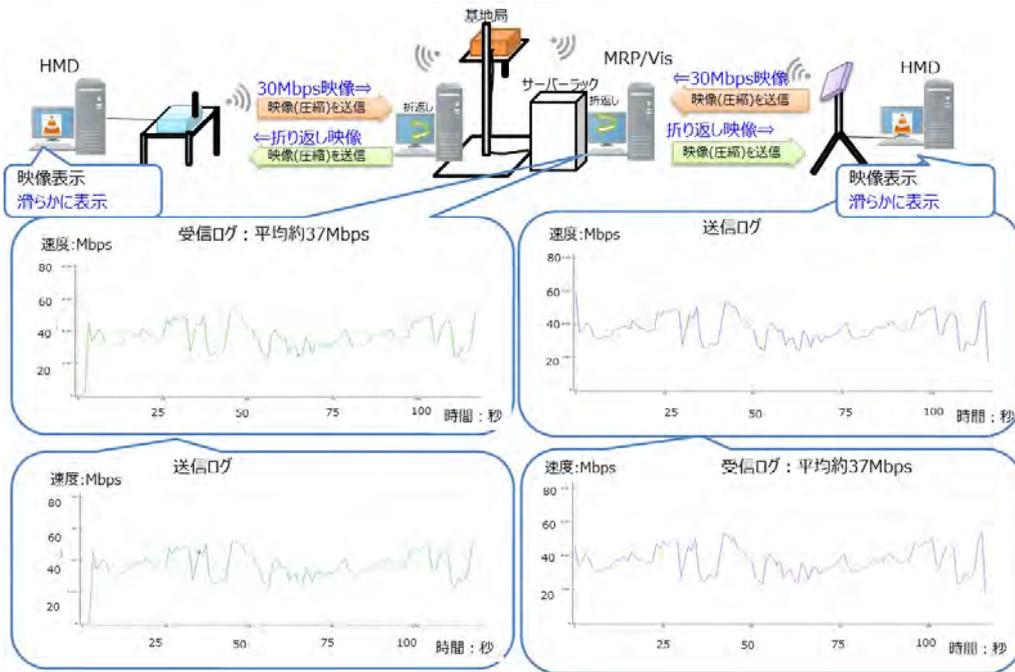


図 4-110 4.7GHz 帯 2セット 30Mbps ループバック速度ログ 2

n) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-②2セット同時使用-10 (遅延時間)

以下に 4.7GHz 帯における 2セットを同時に使用した際のループバック 30 Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

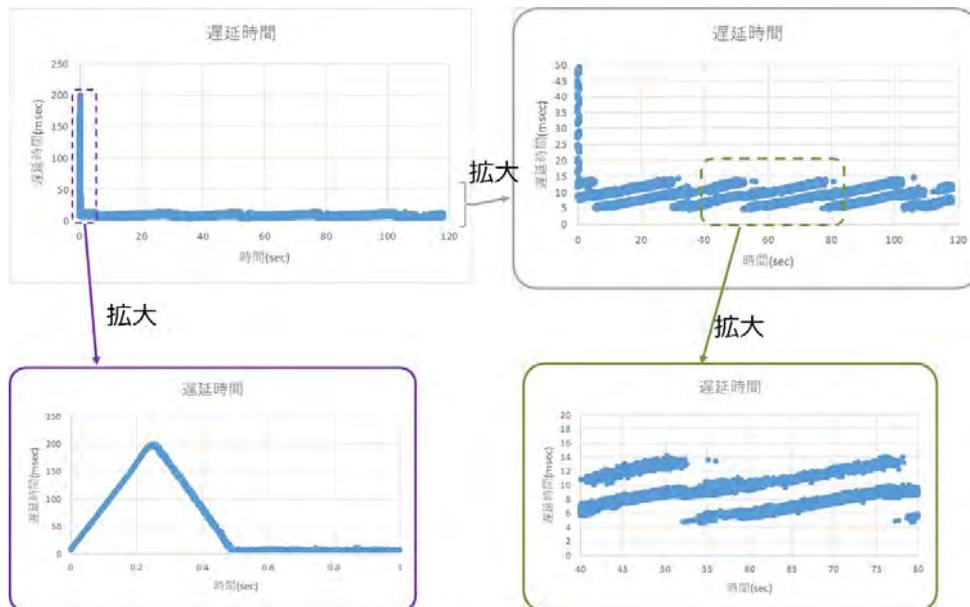


図 4-111 4.7GHz 帯 2セット 30Mbps ループバック遅延ログ



図 4-112 4.7GHz 帯 2セット 30Mbps ループバック遅延ログ

■4.7GHz 帯②セット同時使用時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
 

2セットを同時に使用時も実効速度は低下しないが、上り約 70Mbps、下り約 60Mbps であり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、適用するのは困難である。
- ・ 遅延時間：
 

往復の時間で平均 9.1msec と 1セットのみの使用から 1.5msec 程度遅延は増加し、通信が安定している時であれば目標(17msec)を満たしている。

(2) 28GHz 帯

1) 28GHz 帯—基本条件（基地局—端末間の距離 20.42m）

以下に 28GHz 帯における基本条件での測定結果を示す。

表 4-41 28GHz 帯 基本条件 測定結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	VLCを用いて上りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：最大100Mbps 平均97Mbps 通信：安定 映像官能評価：C
2		VLCを用いて上りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：平均43Mbps 通信：安定 映像官能評価：C
3		VLCを用いて上りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：平均26Mbps 通信：安定 欠損率：1.04% 映像官能評価：A
4		VLCを用いて下りのみ映像転送(550Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：最大600Mbps 平均509Mbps 通信：安定 映像官能評価：C
5		VLCを用いて下りのみ映像転送(100Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：平均109Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6		VLCを用いて下りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：平均36Mbps 通信：安定 欠損率：0.0058% 映像官能評価：A
7	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り平均101Mbps 下り平均501Mbps 通信：安定 映像官能評価：C
8		VLCを用いて双方向映像転送(上り50Mbps、下り100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り平均58Mbps 下り平均109Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
9		VLCを用いて双方向映像転送(上り20Mbps、下り30Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り平均26Mbps 下り平均36Mbps 通信：安定 欠損率：上り0% 下り1.96% 映像官能評価：A
10	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(200Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測	通信：安定 遅延時間(往復)： 平均 954.69msec 最小 44.54msec 最大 1683.18msec 映像官能評価：B
11		VLC+ループバックツールを用いて映像転送(20Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測	通信：安定 遅延時間(往復)： 平均18.63msec 最小 4.62msec 最大 373msec 映像官能評価：A

a) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

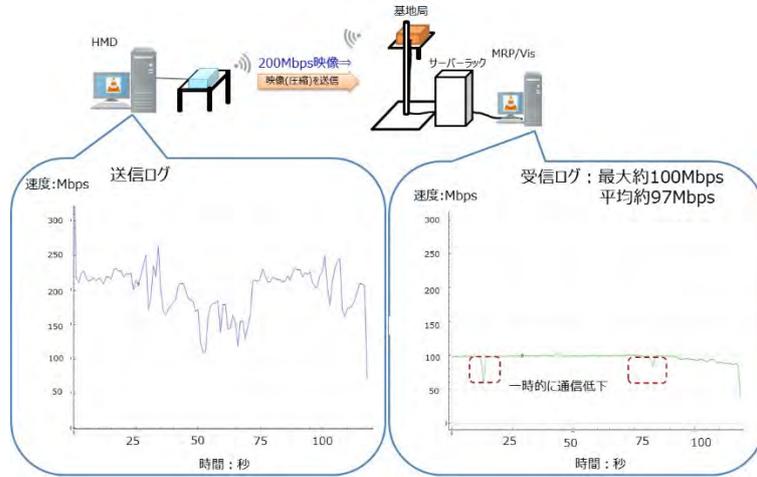


図 4-113 28GHz 帯 基本条件 上り 200Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

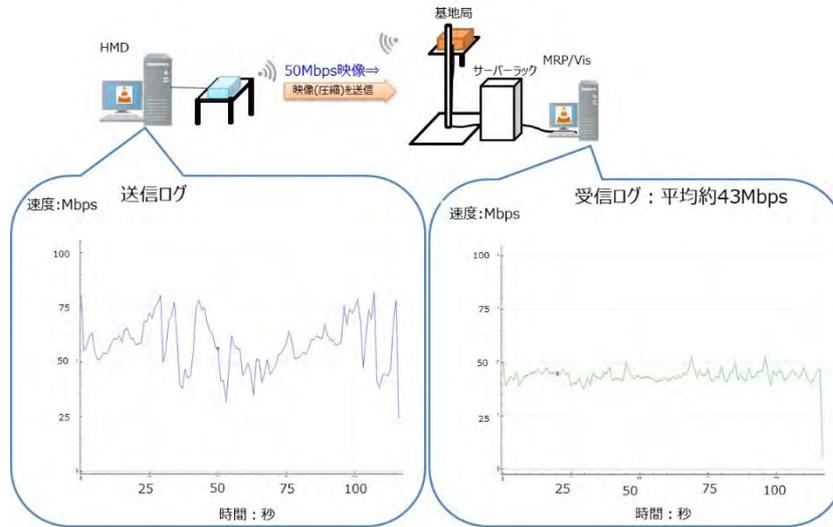


図 4-114 28GHz 帯 基本条件 上り 50Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－3（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

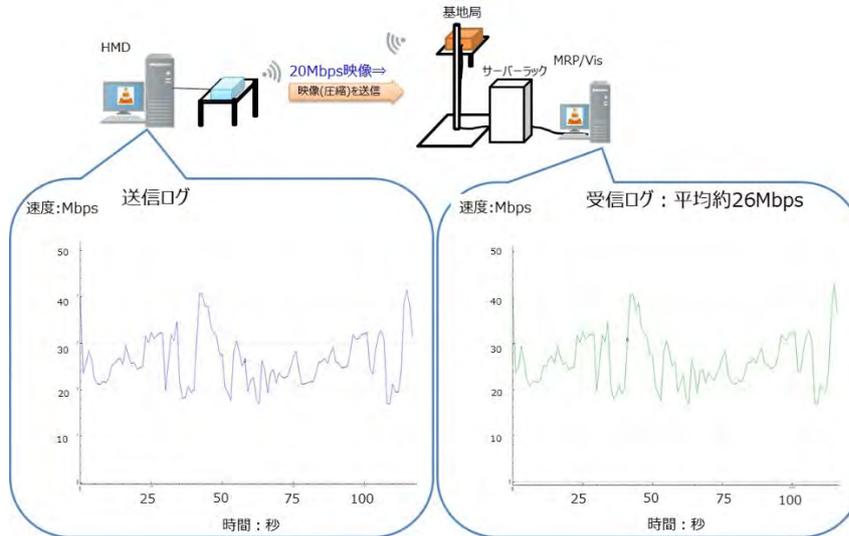


図 4-115 28GHz 帯 基本条件 上り 20Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－3（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 20Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-42 28GHz 帯 基本条件 上り 20Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	284,575	—
未到達パケット数(UDP)	2,970	—
欠損率%	1.04%	—

e) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－4（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

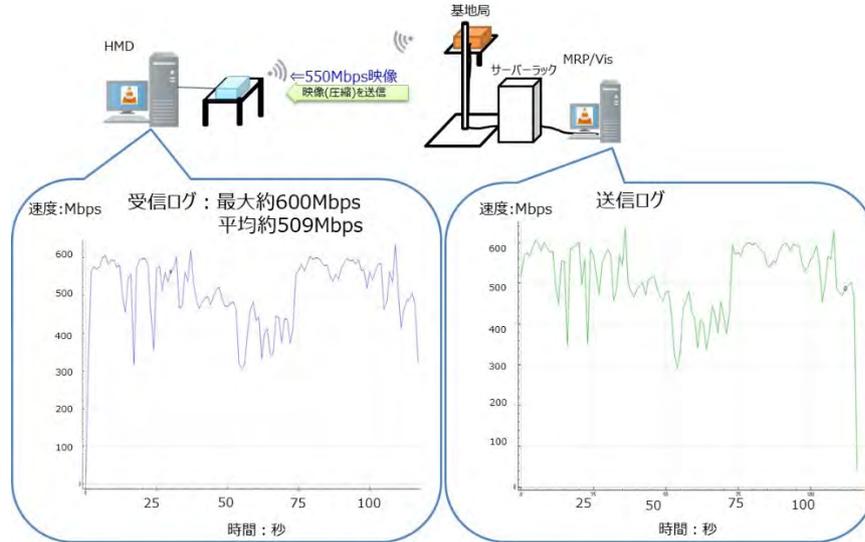


図 4-116 基本条件 下り 550Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－5（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

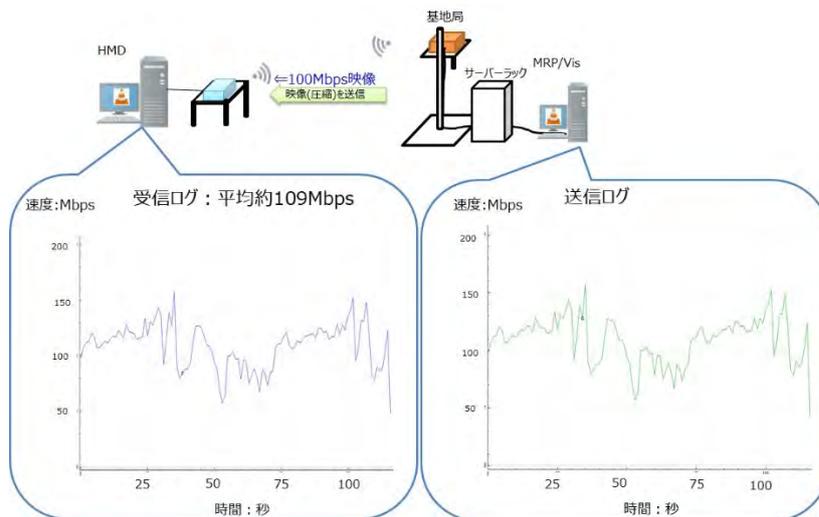


図 4-117 28GHz 帯 基本条件 下り 100Mbps 速度ログ

g) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－6（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

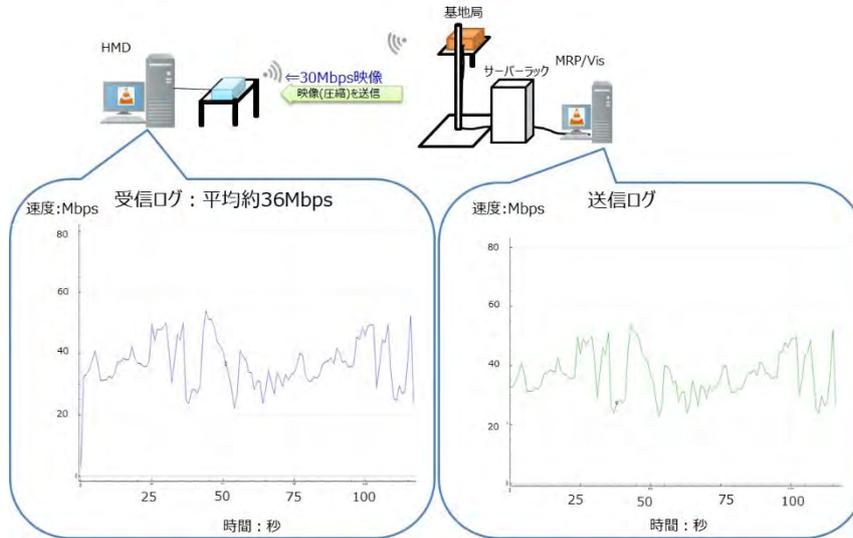


図 4-118 28GHz 帯 基本条件 下り 30Mbps 速度ログ

h) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－6（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-43 28GHz 帯 基本条件 下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	393,386
未到達パケット数(UDP)	—	23
欠損率%	—	0.0058%

i) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－7（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

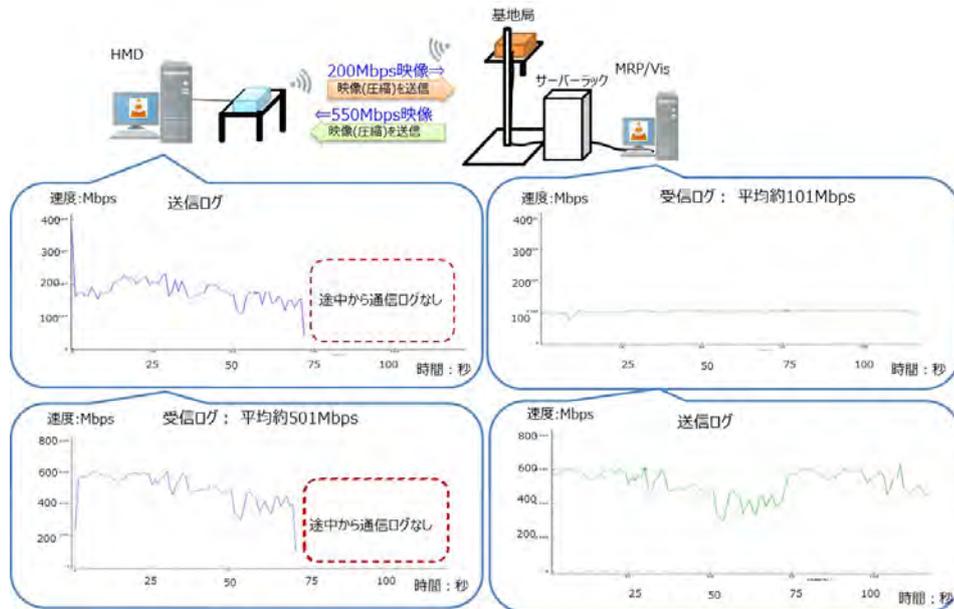


図 4-119 28GHz 帯 基本条件 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ

j) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－8（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 50Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

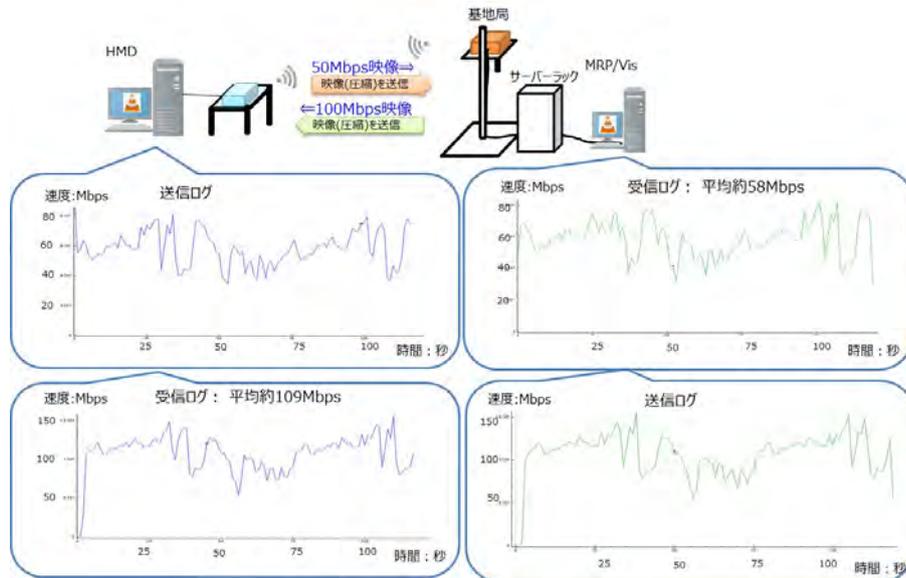


図 4-120 28GHz 帯 基本条件 上り 50Mbps/下り 100Mbps 速度ログ

k) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－9（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 20Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

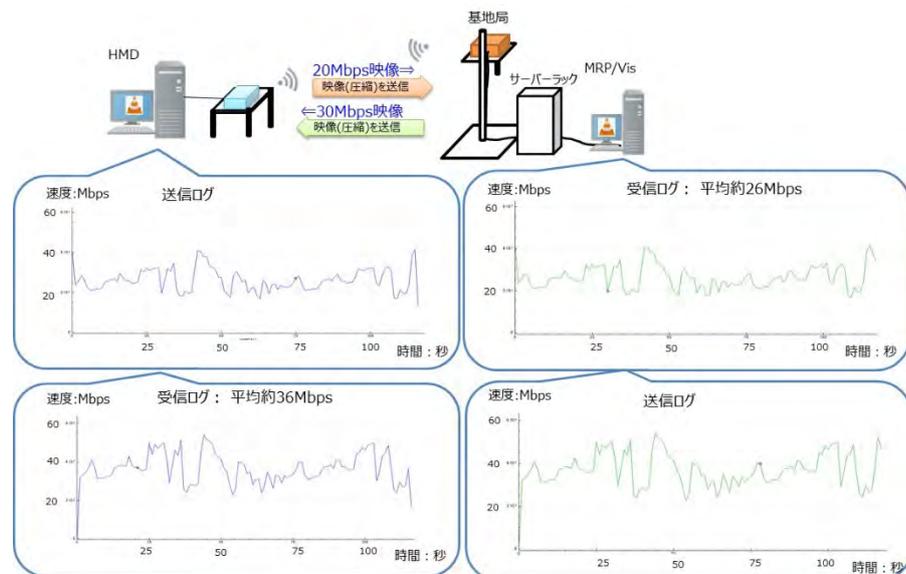


図 4-121 28GHz 帯 基本条件 上り 20Mbps/下り 30Mbps 速度ログ

l) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－9（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際の上り 20Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-44 28GHz 帯 基本条件 上り 20Mbps/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	279,394	395,439
未到達パケット数(UDP)	0	7,767
欠損率%	0%	1.96%

m) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－10（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際のループバック 200Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

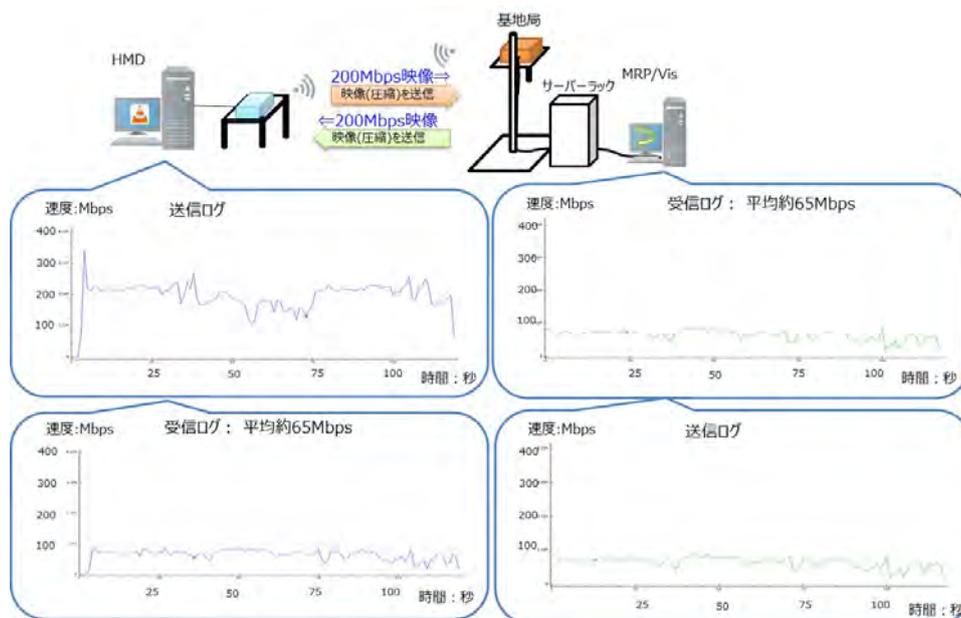


図 4-122 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 速度ログ

n) 測定結果ログ：28GHz 帯-①基本条件-10（遅延時間）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際のループバック 200Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

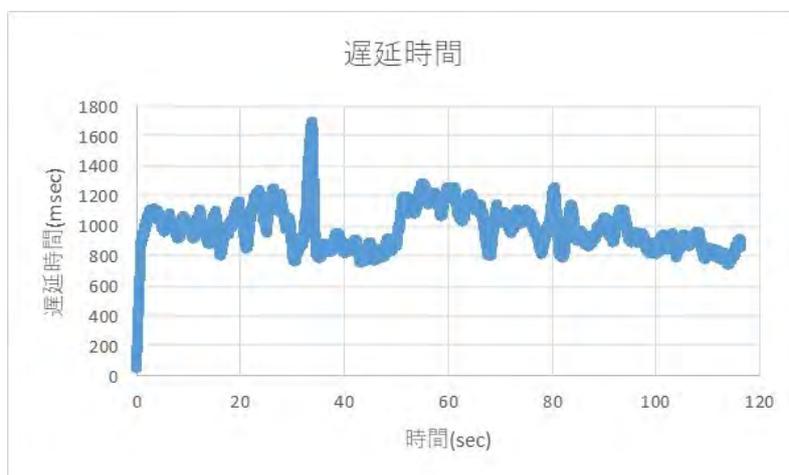


図 4-123 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 遅延時間 1

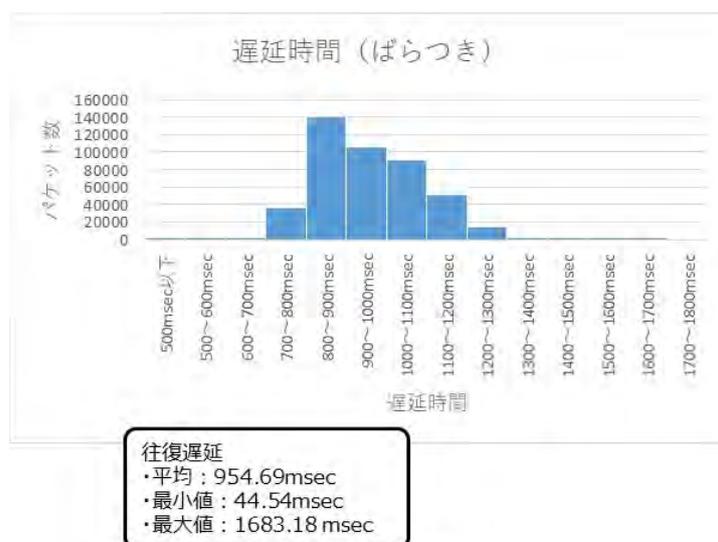


図 4-124 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 遅延時間 2

o) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－1 1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際のループバック 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

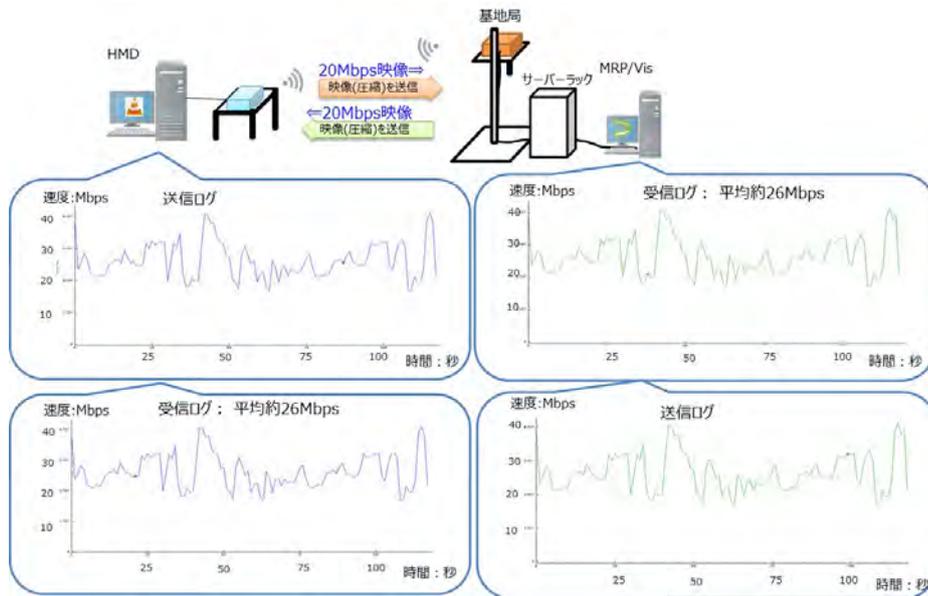


図 4-125 28GHz 帯 基本条件 ループバック 20Mbps 速度ログ

p) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－1 1（遅延時間）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際のループバック 20Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

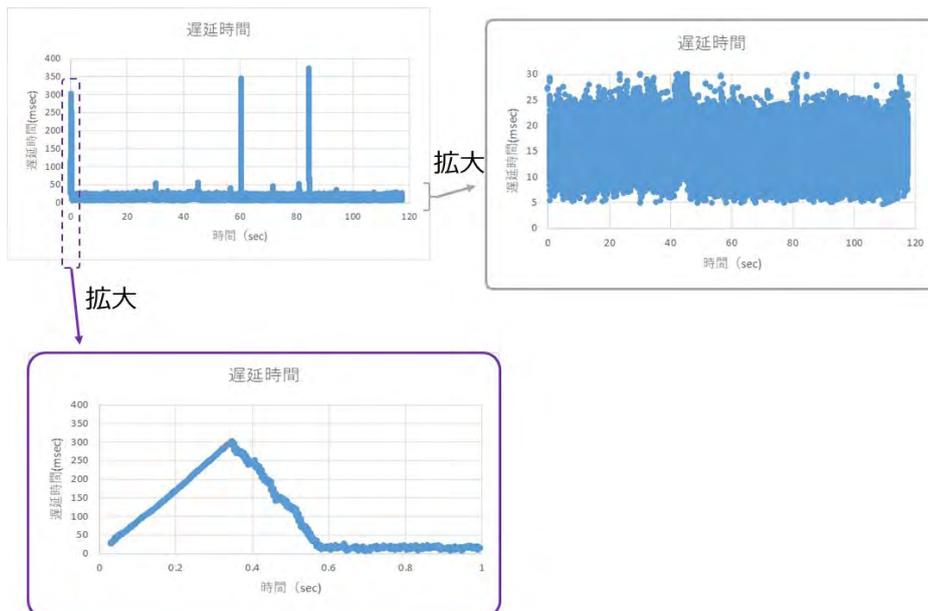


図 4-126 28GHz 帯 基本条件 ループバック 20Mbps 遅延時間 1

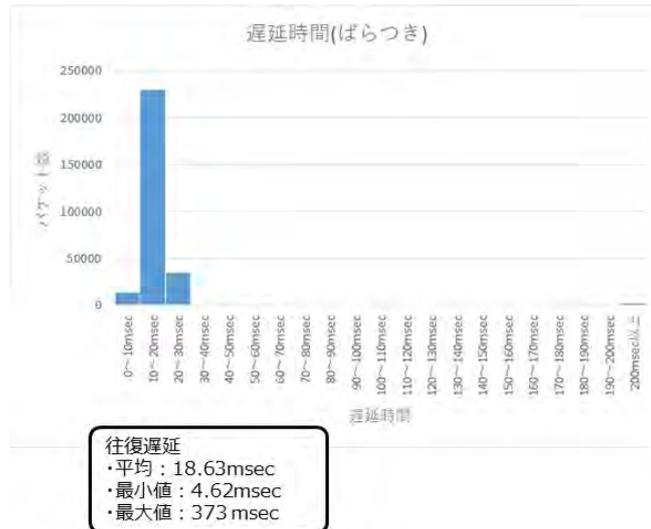


図 4-127 28GHz 帯 基本条件 ループバック 20Mbps 遅延時間 2

■28GHz 帯①基本条件時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
 

上り約 97Mbps、下り約 509Mbps であり、上りは目標値を満たせていない（目標値：上り 550Mbps、下り 350Mbps）。今後、ローカル 5G 側で上りの実効速度を増やす対策が必要である。
- ・ 遅延時間：
 

往復の時間で平均 18.6msec であるが、実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなるため、通信不安定時でもローカル 5G 側で遅延時間を一定にする対策が必要である。

2) 28GHz 帯-⑤端末移動

以下に 28GHz 帯における端末を移動した際の測定結果を示す。

表 4-45 28GHz 帯 端末移動測定結果 一覧

項番	大項目	移動条件	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	①	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。端末を手持ちで移動	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度： 上り 平均20Mbps 下り 平均472Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		②	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。端末を手持ちで移動	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度： 上り 平均42Mbps 下り 平均567Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
3		③	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。端末を手持ちで移動なく上下のみ	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度： 上り 平均25Mbps 下り 平均493Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C

a) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑤移動条件 1－1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末を移動した際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

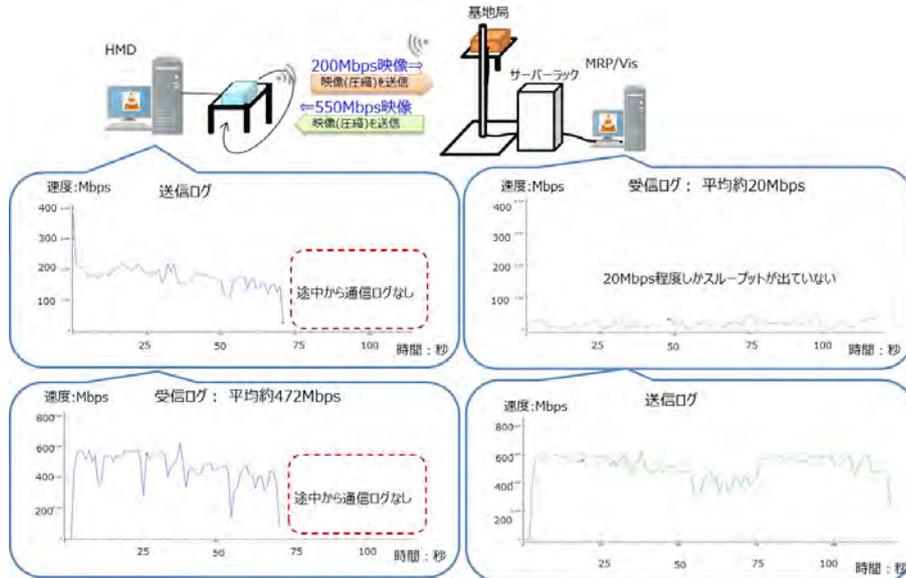


図 4-128 28GHz 帯 端末移動 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑤移動条件 2－2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末を移動した際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

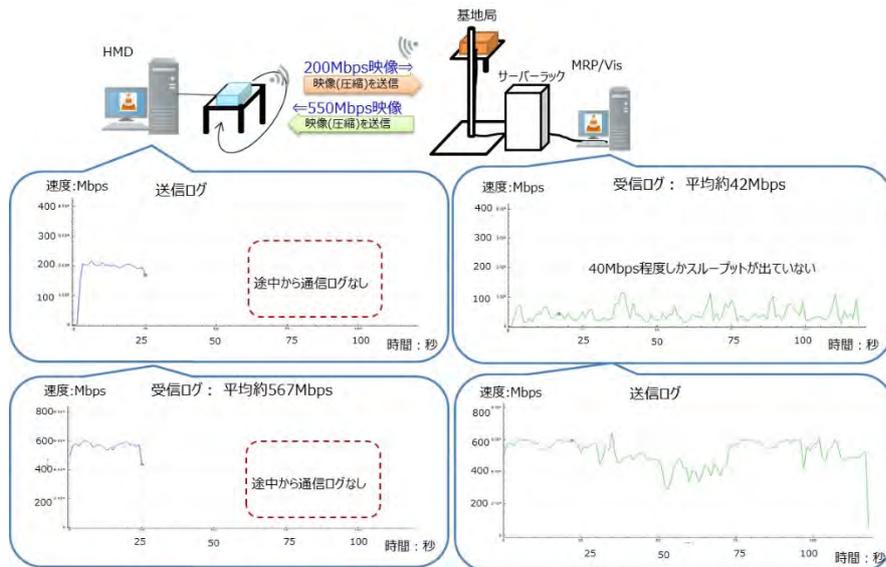


図 4-129 28GHz 帯 端末移動 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑤移動条件 3－3（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末を垂直方向に移動した際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

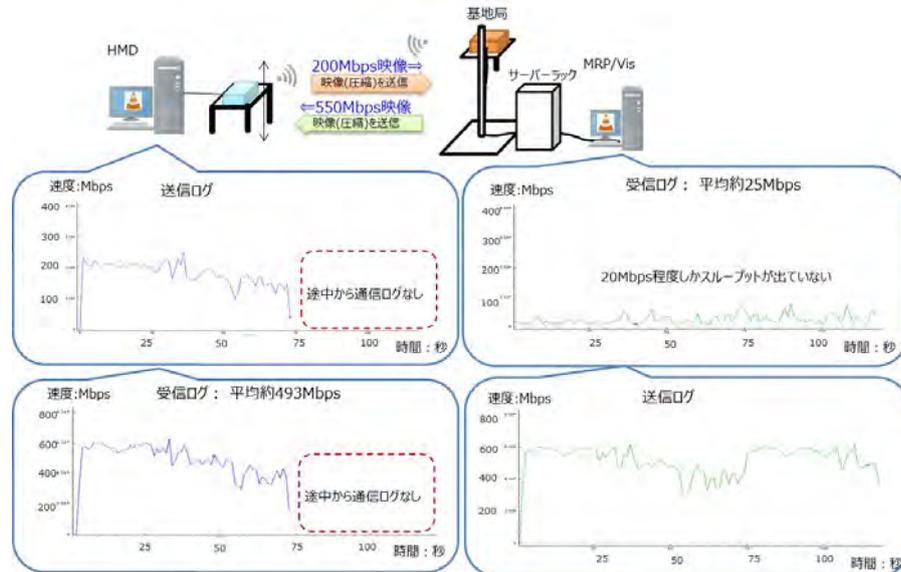


図 4-130 28GHz 帯 端末移動 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ

■28GHz 帯⑤移動条件時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：  
端末側を移動すると特に上りの通信が不安定になる。MR では動きながら使うため、移動/停止によらず、通信が安定になるようなローカル 5G 側の対策が必要である。

3) 28GHz 帯－⑥金属障害物

以下に 28GHz 帯における金属障害物での測定結果を示す。

表 4-46 28GHz 帯 金属障害物測定結果 一覧

項番	大項目	金属物障害	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	条件1	VLCを用いて双方向映像転送(上り100下り100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り平均53Mbps 下り平均111Mbps 通信：不安定 映像官能評価：B

a) 測定結果ログ：28GHz 帯⑥金属障害物 1-1 (実効速度データ)

以下に 28GHz 帯における金属障害物があった際の上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

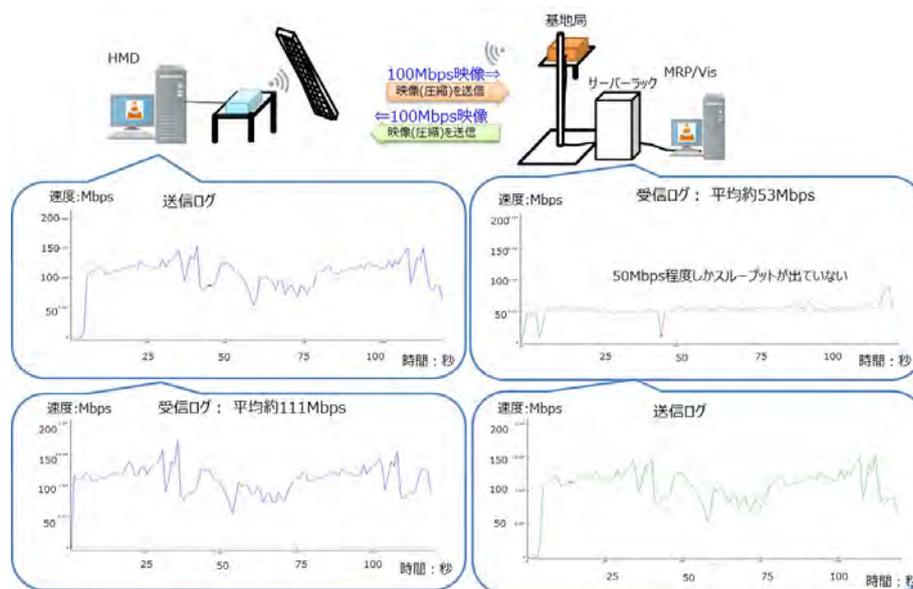


図 4-131 28GHz 帯 金属障害物 上り 100Mbps/下り 100Mbps 速度ログ

■28GHz 帯⑦金属障害物時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：

端末と基地局の間に金属障害物があった場合、特に上りの通信が不安定になる。MR のユースケースによっては端末と基地局の間に装置などが設置されているケースがあるため、端末と基地局間は見通しを確保する、もしくはローカル 5G 側でマルチパスや反射波で通信が可能ないようにローカル 5G 側の対策が必要である。

#### 4) 28GHz 帯－⑧人体障害物

以下に 28GHz 帯における人体障害物での測定結果を示す。

表 4-47 28GHz 帯 人体障害物測定結果 一覧

項番	大項目	端末と人の関係	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	前	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り500Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均40Mbps 下り 平均518Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		前	VLCを用いて双方向映像転送(上り100、下り100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均48Mbps 下り 平均106Mbps 通信：不安定 映像官能評価：B
3		前	VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均25Mbps 下り 平均34Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 30.07% 下り 7.58% 映像官能評価：B
4	ループバック	前	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(20Mbps 約2分間)する。 端末側：VLC サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測	通信：不安定 遅延時間(往復、通信安定時)： 平均15.48msec 最小4.91msec 最大83.3msec 映像官能評価：B
5	双方向通信	前/後	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均17Mbps 下り 平均475Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C

##### a) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑧人体障害物条件 1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

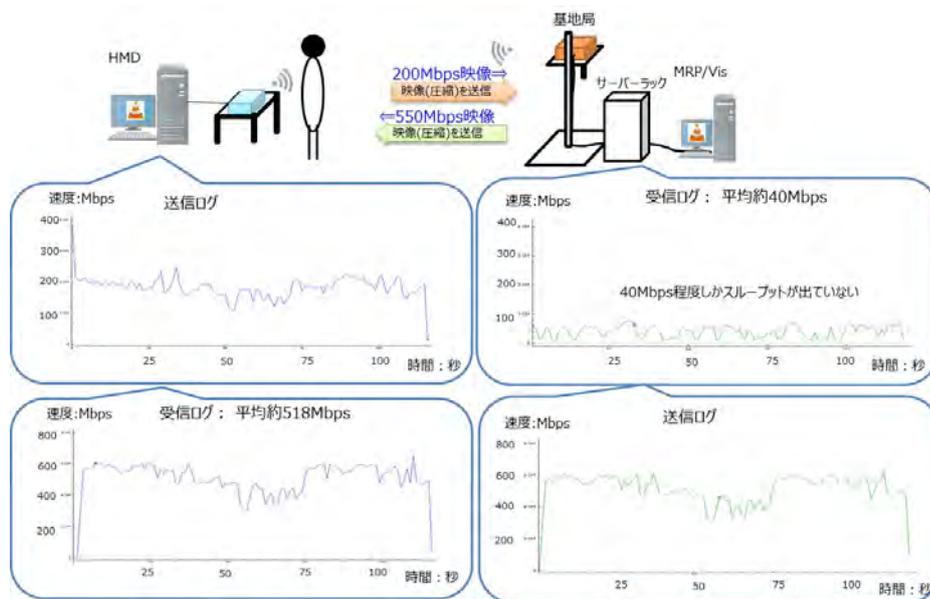


図 4-132 28GHz 帯 人体障害物上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑧人体障害物条件 2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

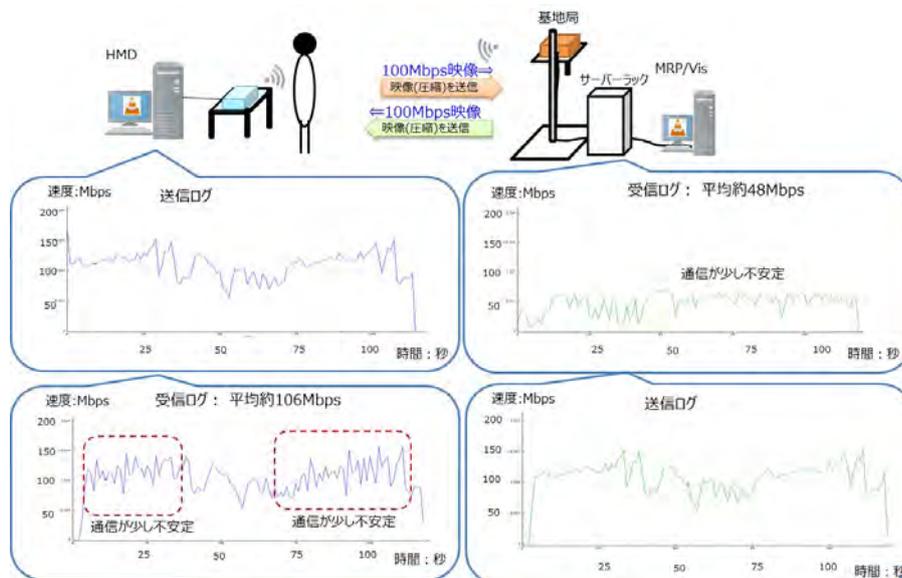


図 4-133 28GHz 帯 人体障害物上り 100Mbps/下り 100Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑧人体障害物条件 3（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

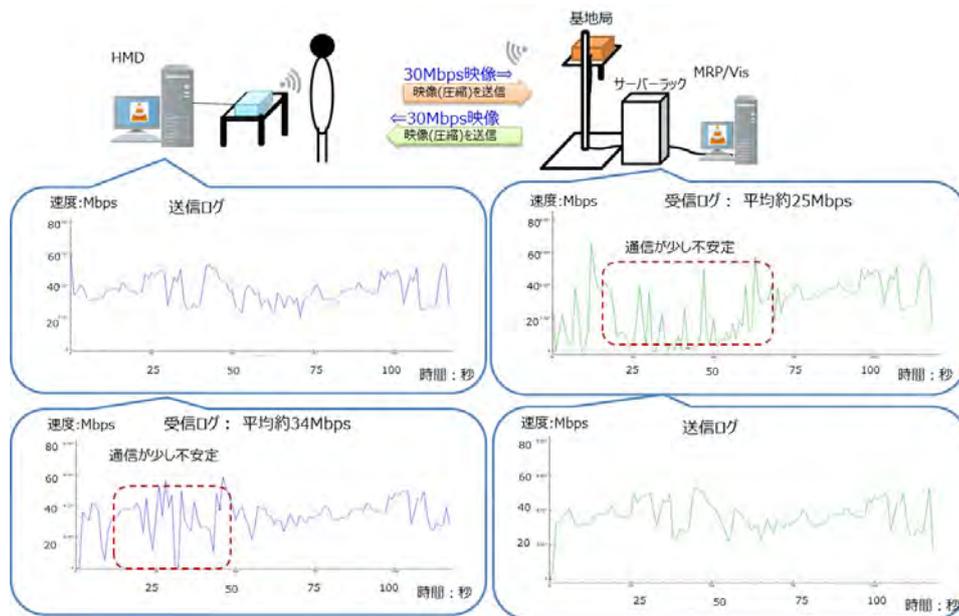


図 4-134 28GHz 帯 人体障害物上り 30Mbps/下り 30Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑧人体障害物条件 3（欠損率）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-48 28GHz 帯 人体障害物上り 30Mbps/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	400,153	393,314
未到達パケット数(UDP)	120,319	29,815
欠損率%	30.07%	7.58%

e) 測定結果ログ：28GHz 帯－①人体障害物条件 4（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 20Mbps、下り 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

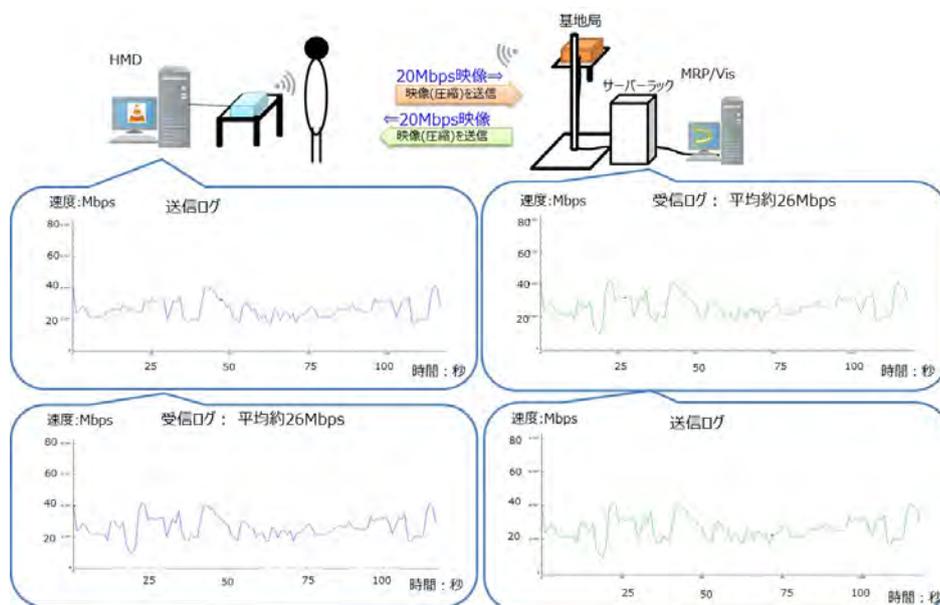


図 4-135 28GHz 帯 人体障害物上り 20Mbps/下り 20Mbps 速度データ

f) 測定結果ログ：28GHz 帯－①人体障害物条件5（遅延時間）

以下に 28GHz 帯における端末の前に人体障害物があった際の上り 20Mbps、下り 20Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

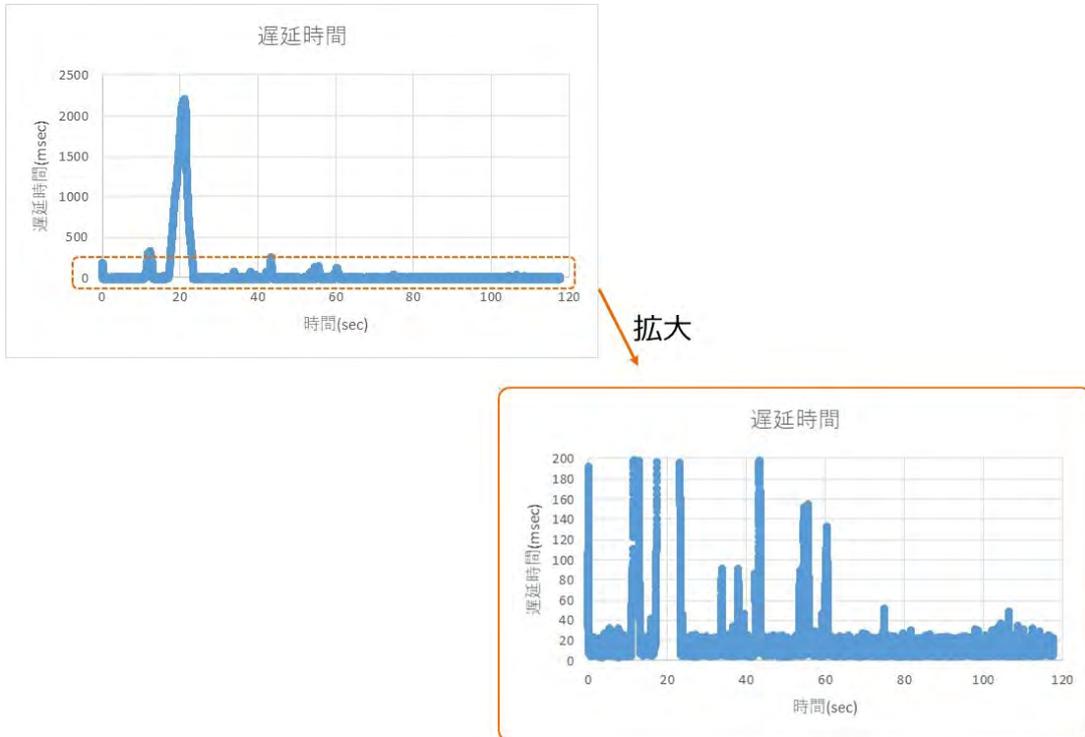


図 4-136 28GHz 帯 人体障害物上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間 1

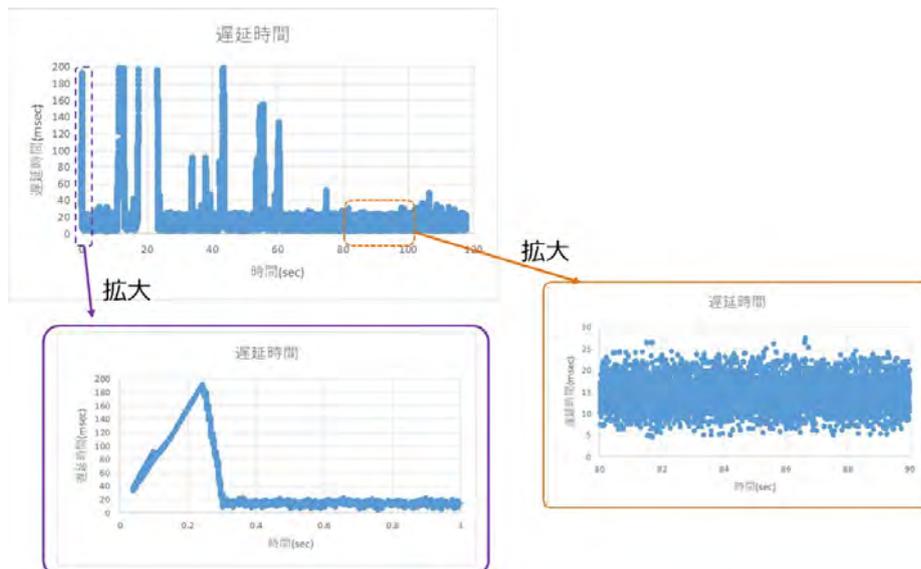


図 4-137 28GHz 帯 人体障害物上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間 2

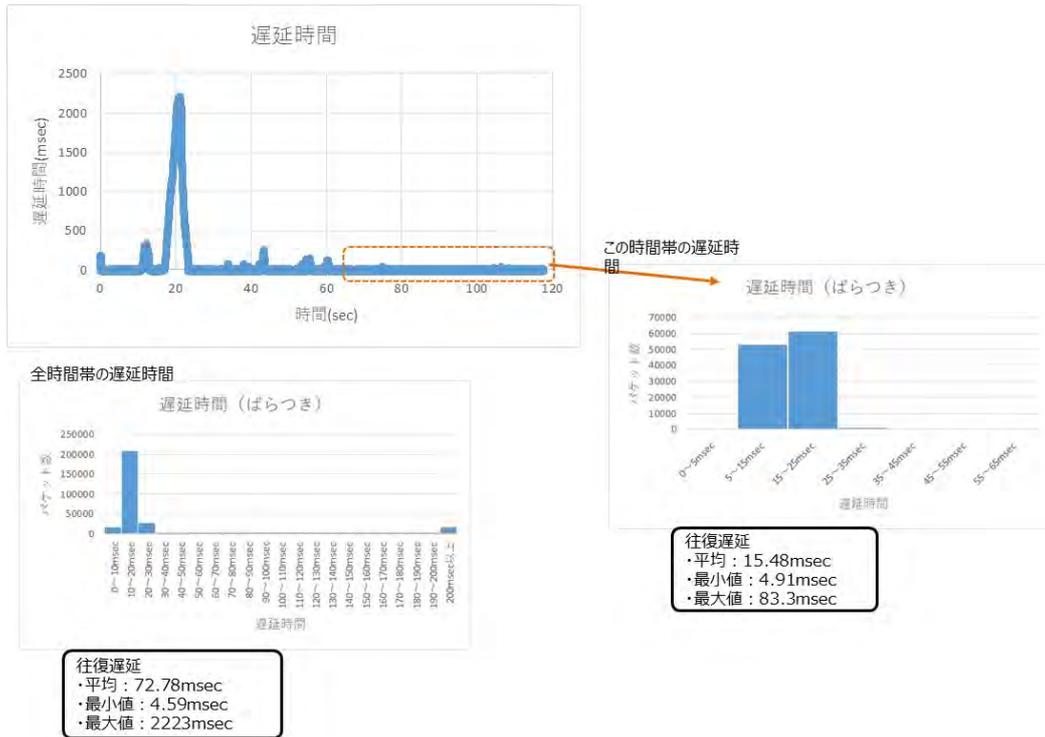


図 4-138 28GHz 帯 人体障害物上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間 3

g) 測定結果ログ：28GHz 帯-①人体障害物条件 6（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における端末の前後に人体障害物があった際の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

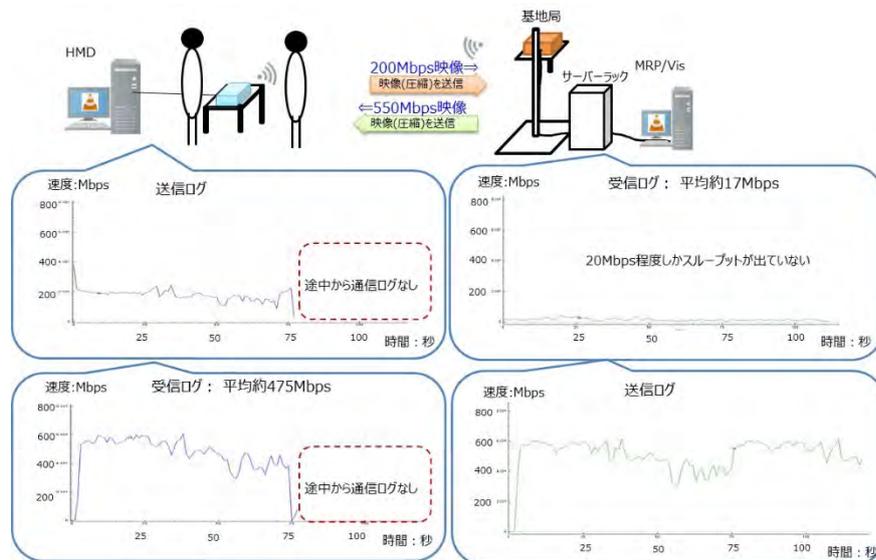


図 4-139 28GHz 帯 人体障害物上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度データ

■28GHz 帯⑧人体障害物時のアプリケーション観点からの分析

・ 実効速度：

端末と基地局の間に人体障害物があった場合、特に上りの通信が不安定になる。  
MR のユースケースによっては端末と基地局の間に人がいるケースがあるため、  
端末側のアンテナは基地局との見通しを確保できるような場所が望ましい。また、  
ローカル 5G 側でマルチパスや反射波で通信が可能なようにローカル 5G 側の  
対策が必要である。

5) 28GHz 帯-⑨2 セット同時使用

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時での測定結果を示す。

表 4-49 28GHz 帯 2 セット同時使用測定結果 一覧

項番	大項目	端末間の距離	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均42Mbps 平均45Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均52Mbps 平均44Mbps 通信：不安定 映像官能評価：B
3		220 cm	VLCを用いて2セット同時に上りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均26Mbps 平均26Mbps 通信：安定 欠損率：0%、0% 映像官能評価：A
4		220 cm	VLCを用いて2セット同時に下りのみ映像転送(550Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均483Mbps 平均281Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
5		220 cm	VLCを用いて2セット同時にのみ映像転送(100Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均109Mbps 平均110Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6		220 cm	VLCを用いて2セット同時にのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：下り 平均37Mbps 平均37Mbps 通信：安定 欠損率：1.36%、2.25% 映像官能評価：A
7	双方向通信	220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(上り200Mbps、下り550Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均16Mbps 下り 平均465Mbps 上り 平均47Mbps 下り 平均255Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
8		220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(上り50Mbps、下り100Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度： 上り 平均46Mbps 下り 平均109Mbps 上り 平均52Mbps 下り 平均110Mbps 通信：不安定 映像官能評価：B
9		220 cm	VLCを用いて2セット同時に双方向映像転送(20Mbps 約2分間)する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均37Mbps 下り 平均14Mbps 上り 平均37Mbps 下り 平均37Mbps 通信：安定 欠損率：上り 0% 下り 0.89% 上り 0% 下り 1.21% 映像官能評価：A
10	ループバック	220 cm	VLC+ループバックツールを用いて2セット同時に映像転送(20Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測	通信：安定 遅延時間(往復) 平均18.65msec 最小 5msec 最大 42.38msec 平均20.36msec 最小 5msec 最大 287.5msec 映像官能評価：A

a) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

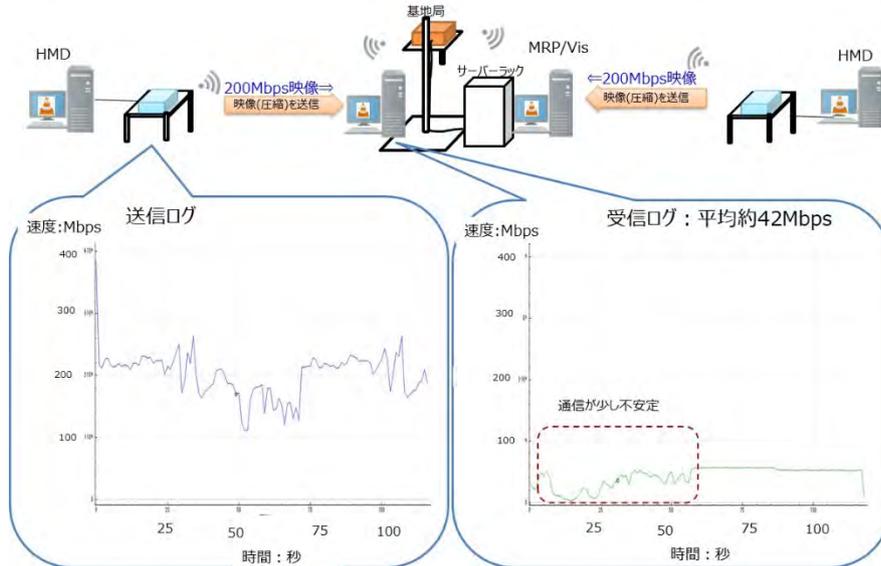


図 4-140 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps 速度データ 1

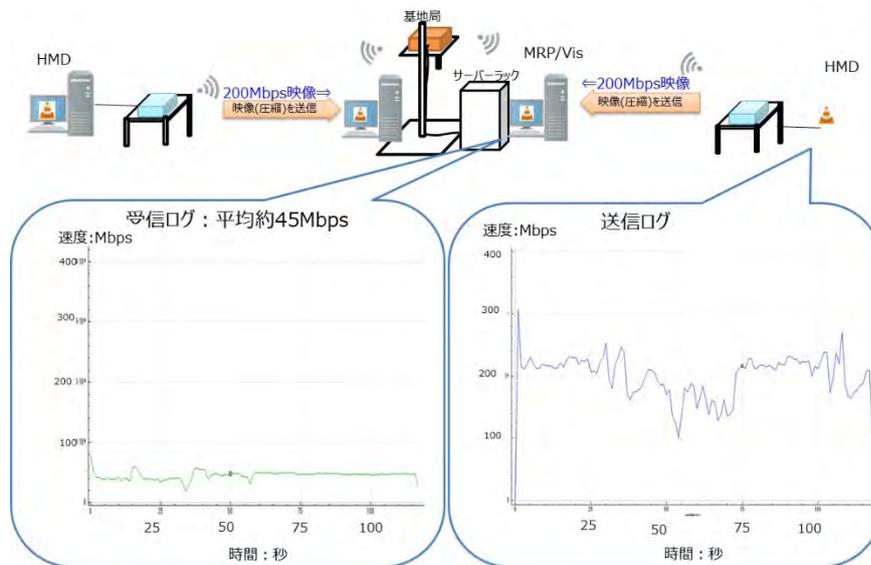


図 4-141 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps 速度データ 2

b) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

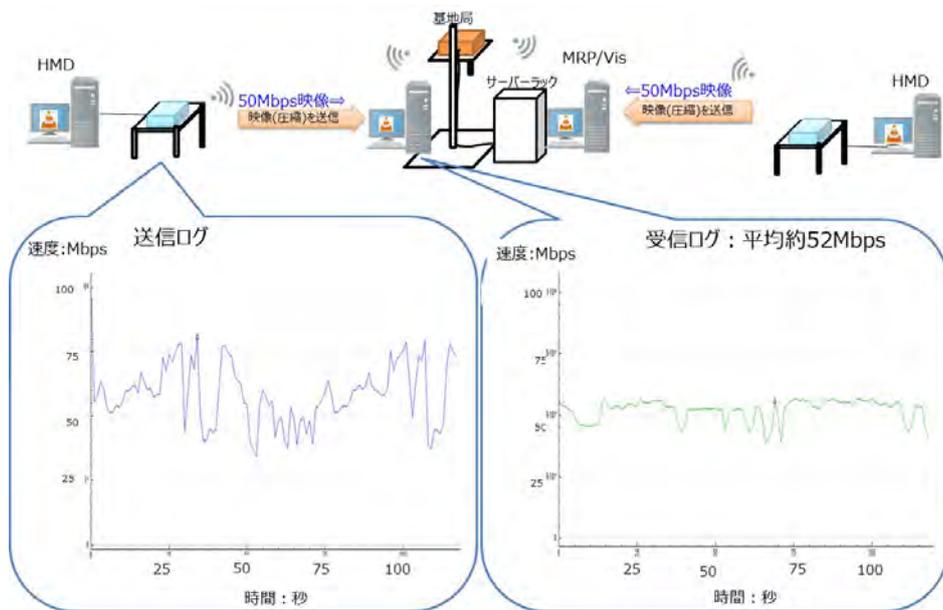


図 4-142 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps 速度データ 1

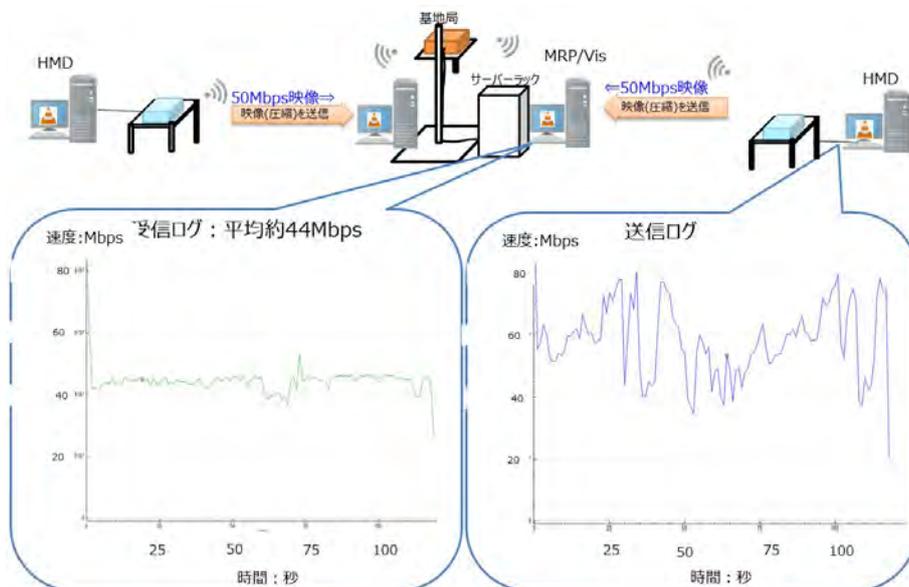


図 4-143 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps 速度データ 2

c) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑨2 セット同時使用－3（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

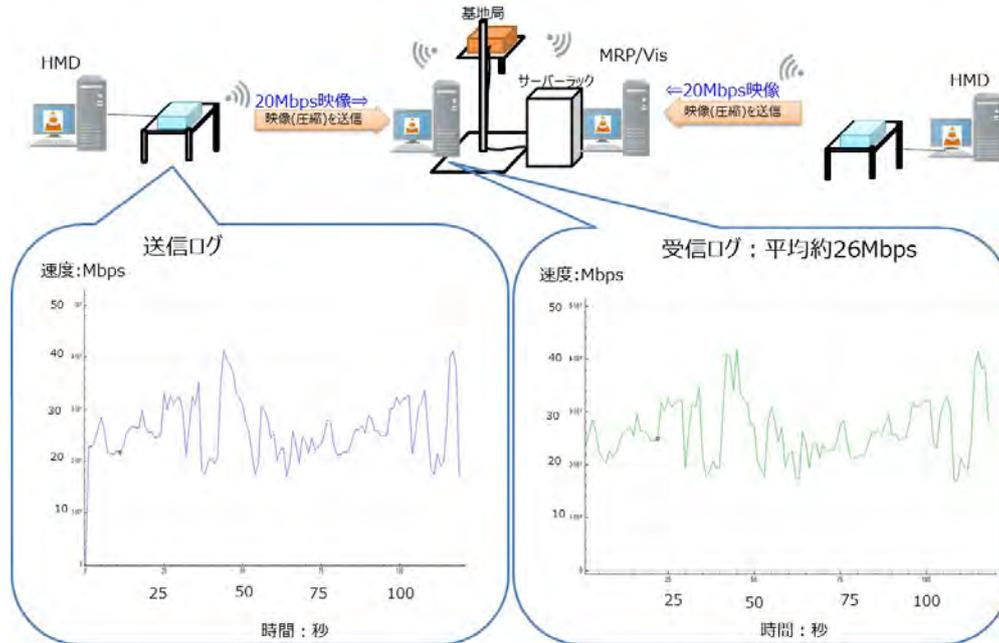


図 4-144 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 20Mbps 速度データ 1

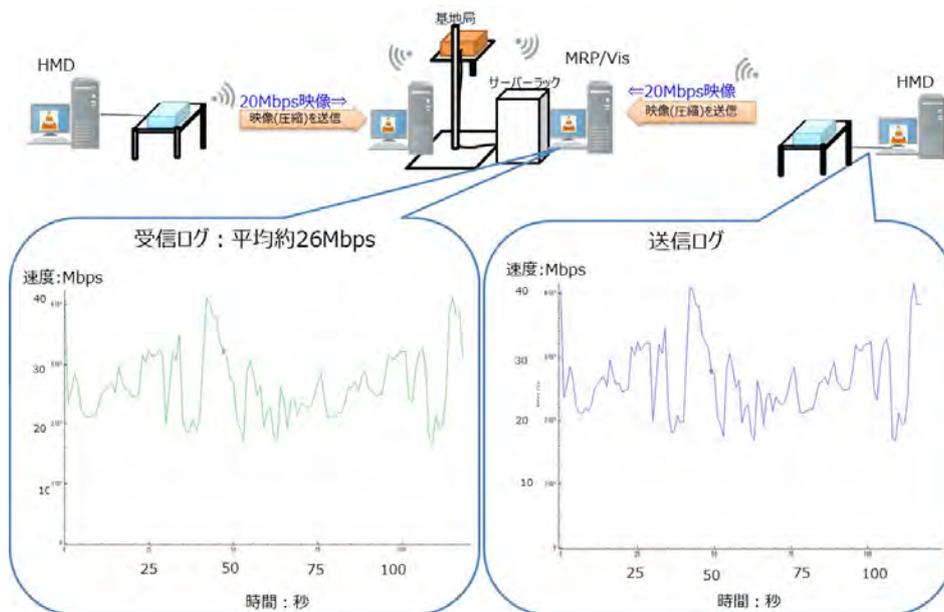


図 4-145 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 20Mbps 速度データ 2

d) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-3（欠損率）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 20Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-50 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 20Mbps 欠損率 1 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	284,029	—
未到達パケット数(UDP)	0	—
欠損率%	0%	—

表 4-51 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 20Mbps 欠損率 2 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	285,180	—
未到達パケット数(UDP)	0	—
欠損率%	0%	—

e) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-4（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

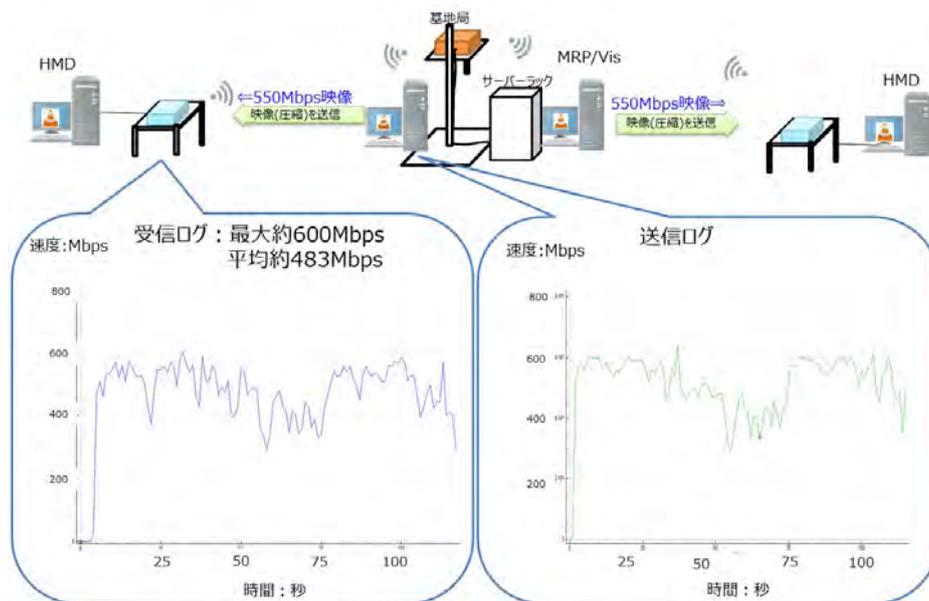


図 4-146 28GHz 帯 2 セット同時使用 下り 550Mbps 速度ログ 1

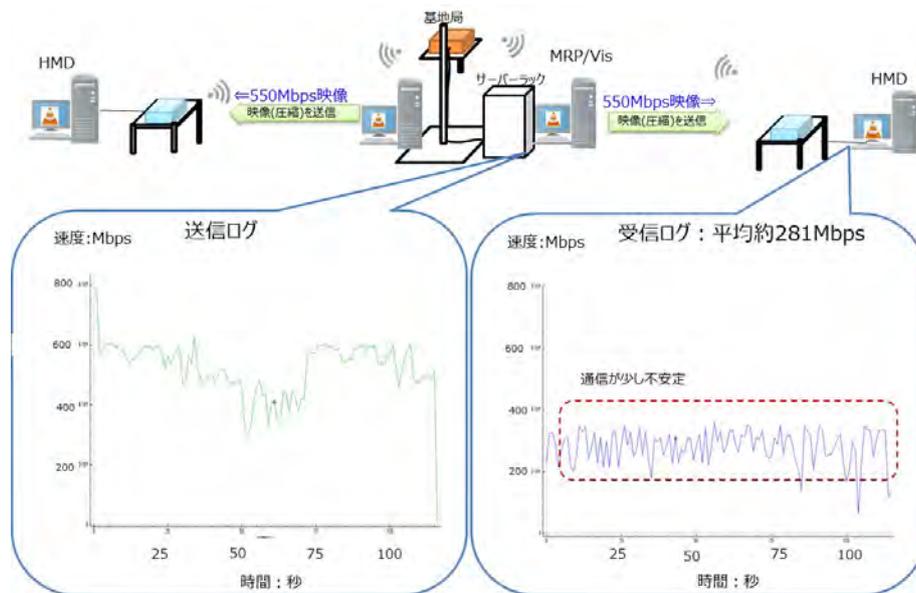


図 4-147 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 550Mbps 速度ログ 2

f) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2セット同時使用-5（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2セット同時使用時の下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

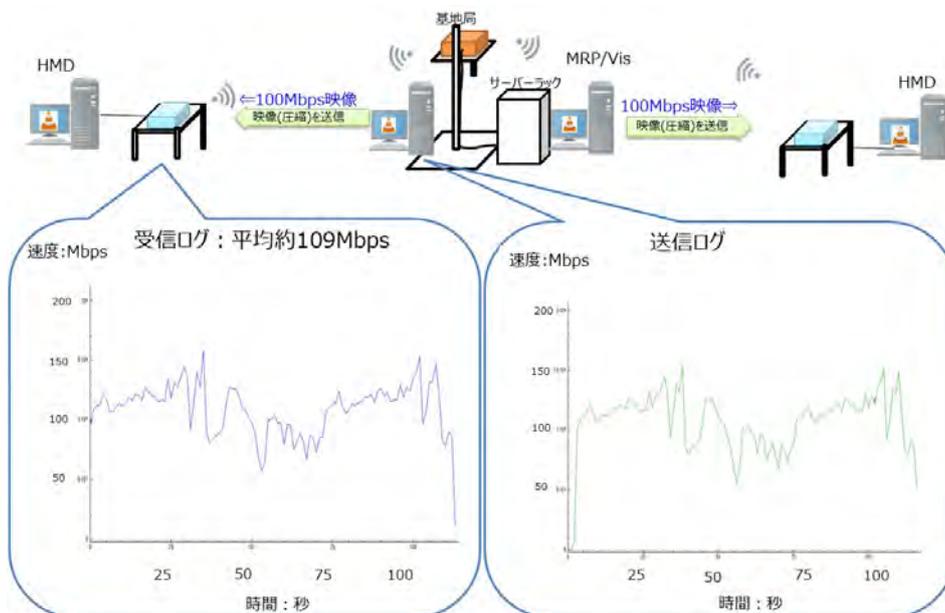


図 4-148 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 100Mbps 速度ログ 1

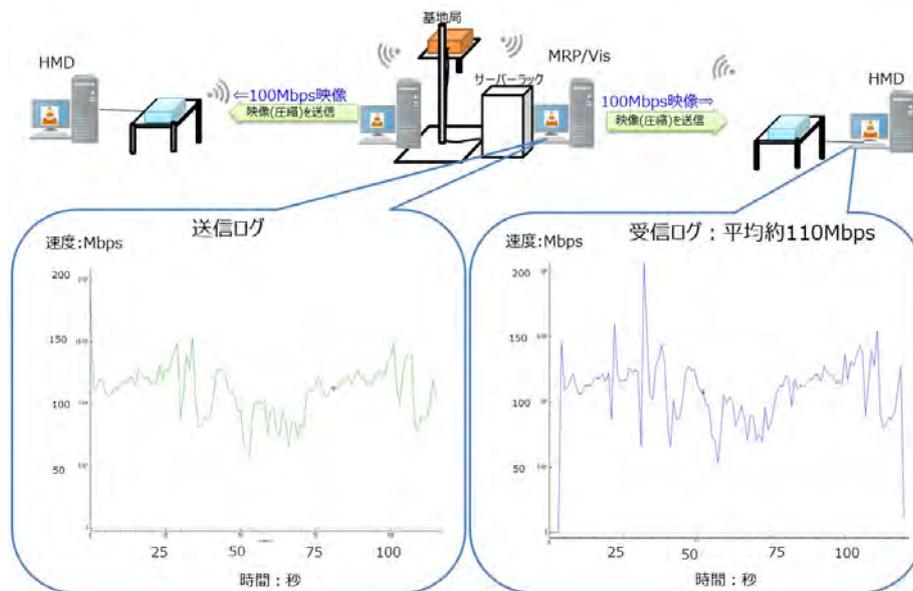


図 4-149 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 100Mbps 速度ログ 2

g) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2セット同時使用-6（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2セット同時使用時の下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

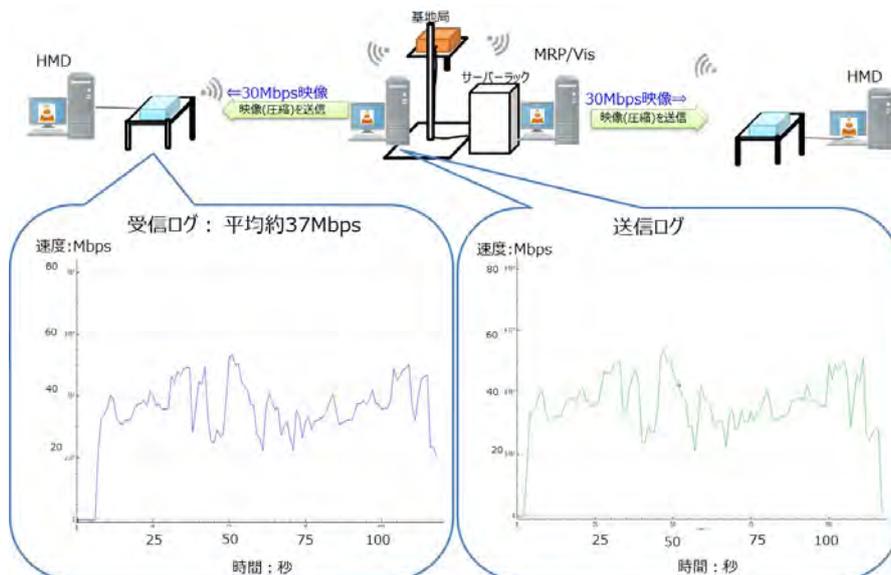


図 4-150 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 30Mbps 速度ログ 1

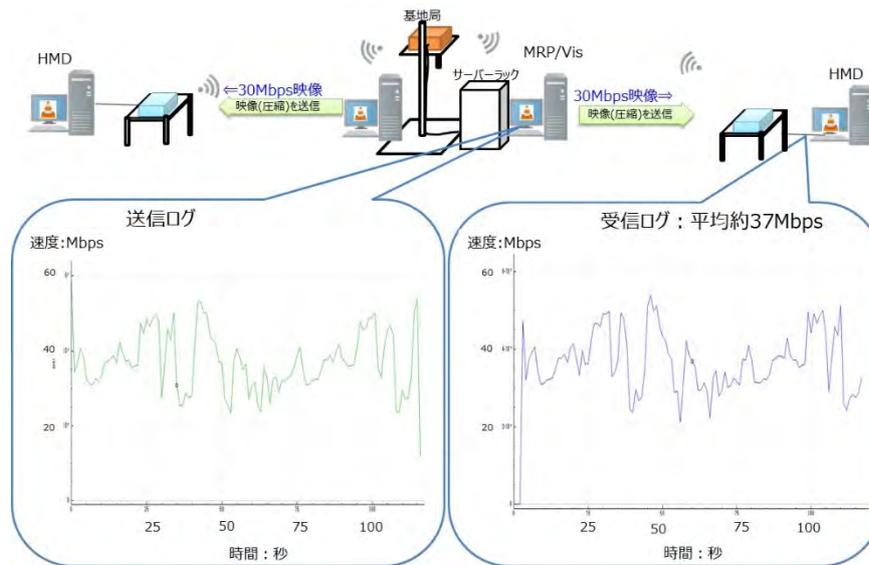


図 4-151 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 30Mbps 速度ログ 2

h) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2セット同時使用-6（欠損率）

以下に 28GHz 帯における 2セット同時使用時の下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-52 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 30Mbps 欠損率 1セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	381,440
未到達パケット数(UDP)	—	5,189
欠損率%	—	1.36%

表 4-53 28GHz 帯 2セット同時使用 下り 30Mbps 欠損率 2セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	395,883
未到達パケット数(UDP)	—	8,908
欠損率%	—	2.25%

i) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑨2 セット同時使用－7（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

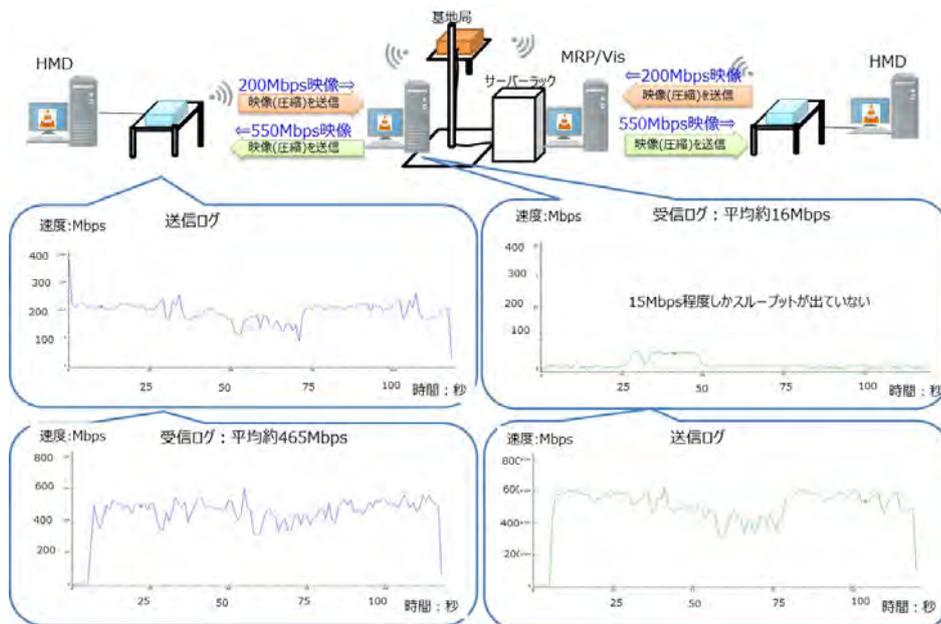


図 4-152 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 1

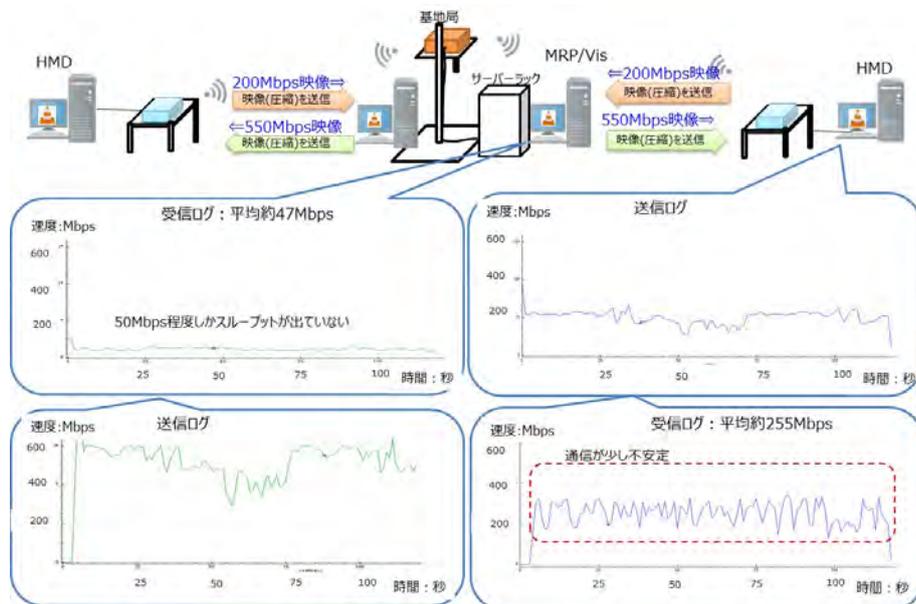


図 4-153 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 2

j) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑨2 セット同時使用－8（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 50Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

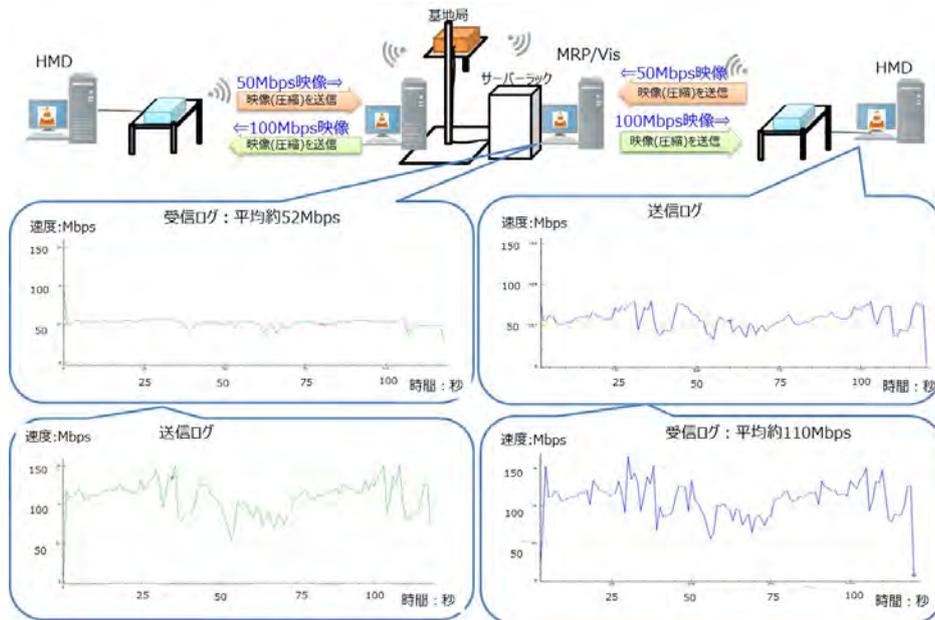


図 4-154 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps/下り 100Mbps 速度ログ 1

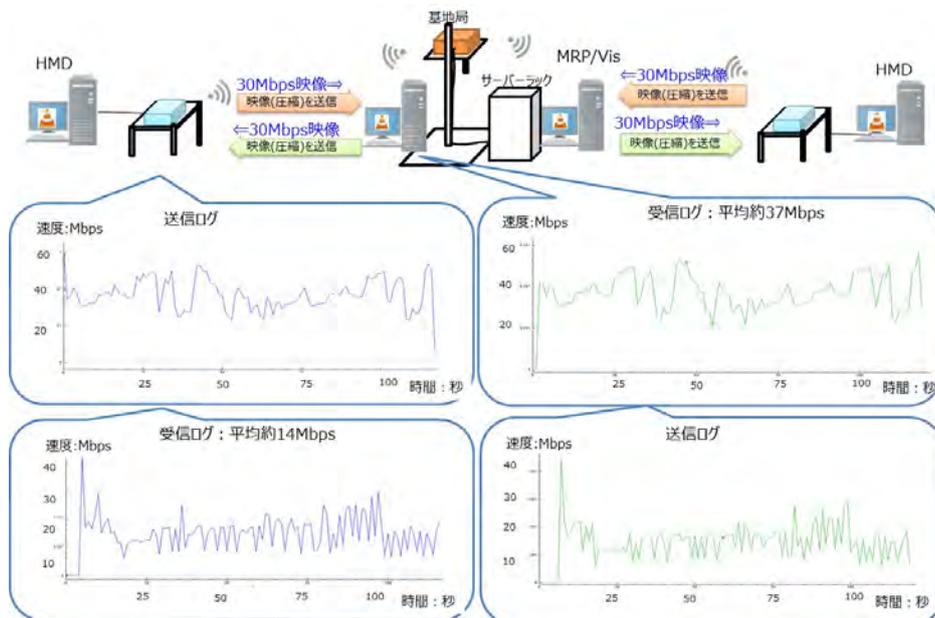


図 4-155 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps/下り 100Mbps 速度ログ 2

k) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-9（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

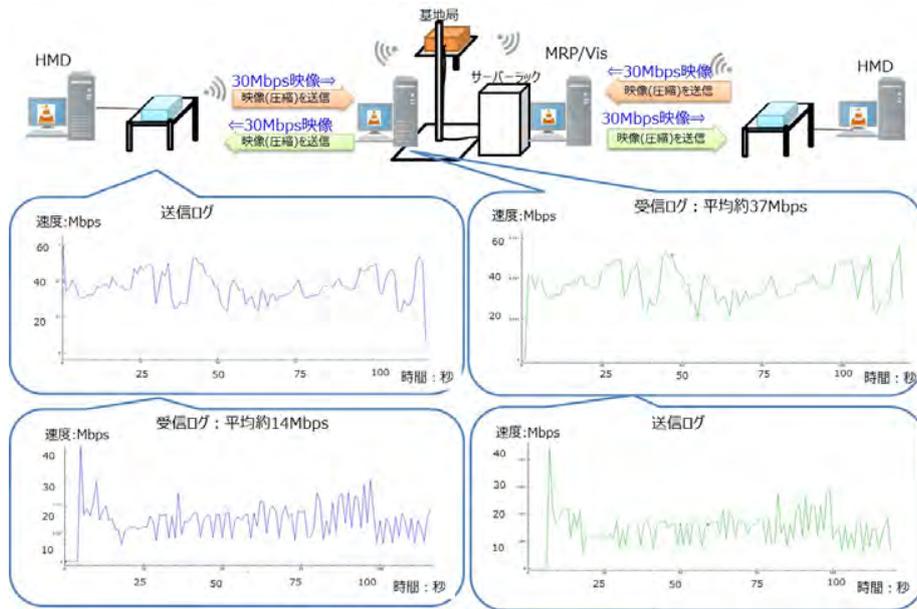


図 4-156 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 30Mbps/下り 30Mbps 速度ログ 1

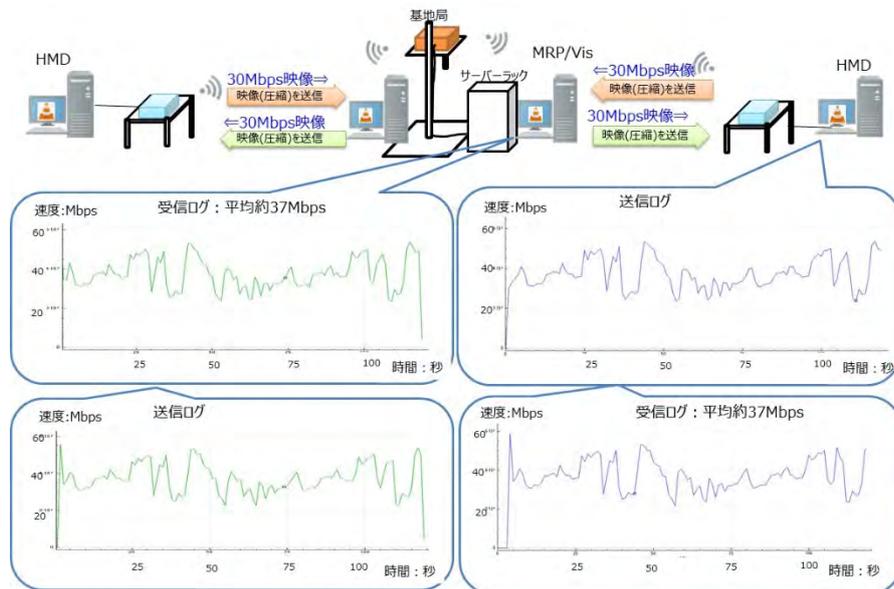


図 4-157 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 30Mbps/下り 30Mbps 速度ログ 2

l) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑨2 セット同時使用－9（欠損率）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時の上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-54 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 30Mbps/下り 30Mbps 欠損率 1 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	399,931	157,960
未到達パケット数(UDP)	0	1,409
欠損率%	0.0%	0.89%

表 4-55 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 30Mbps/下り 30Mbps 欠損率 2 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	404,590	399,439
未到達パケット数(UDP)	0	4,852
欠損率%	0%	1.21%

m) 測定結果ログ：28GHz 帯－⑨2 セット同時使用－10（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時のループバック 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

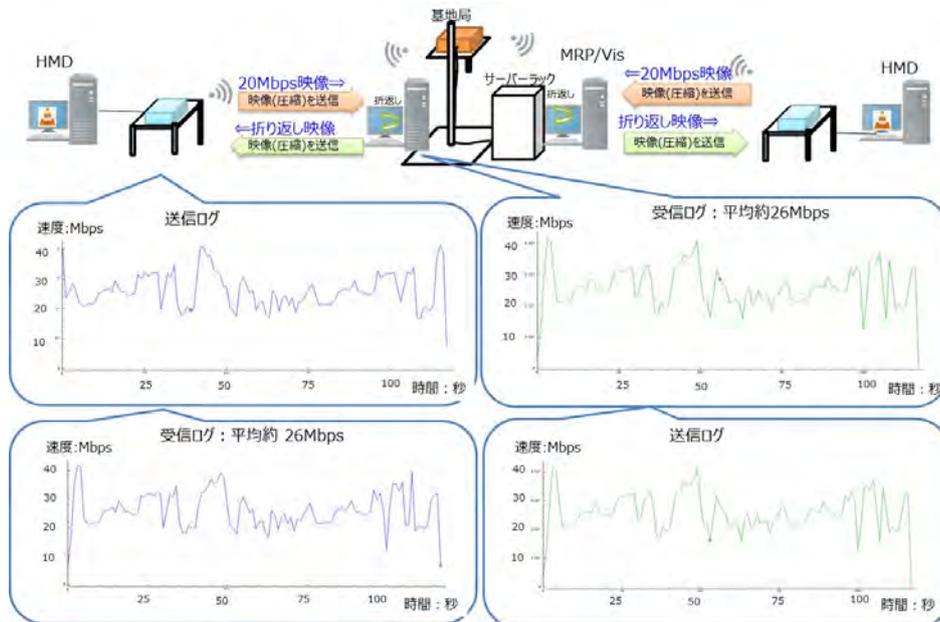


図 4-158 28GHz 帯 2 セット同時使用 ループバック 20Mbps 速度ログ 1

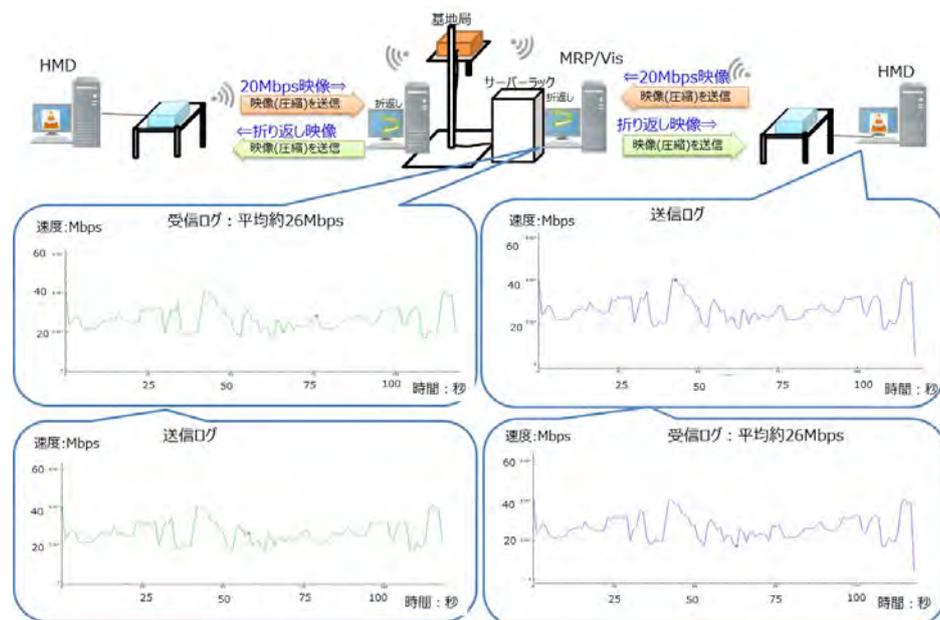
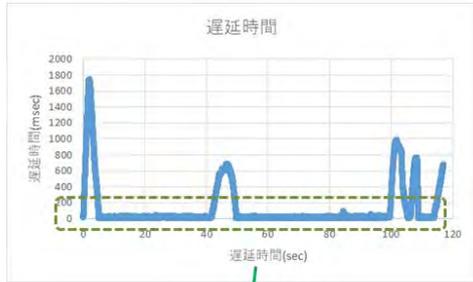


図 4-159 28GHz 帯 2 セット同時使用 ループバック 20Mbps 速度ログ 2

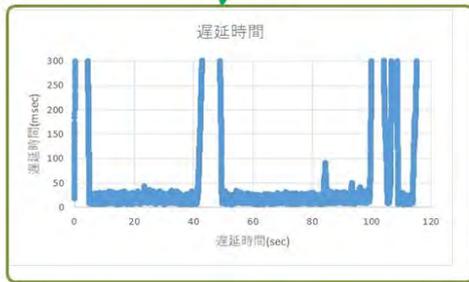
n) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑨2 セット同時使用-10 (遅延時間)

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時のループバック 20Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

1 セット目



拡大



2 セット目



拡大

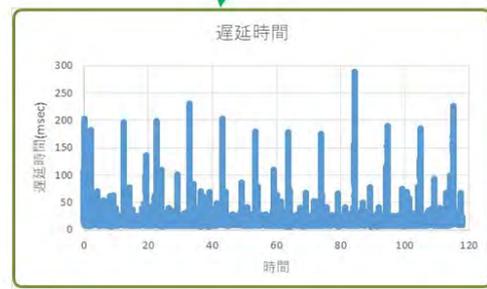
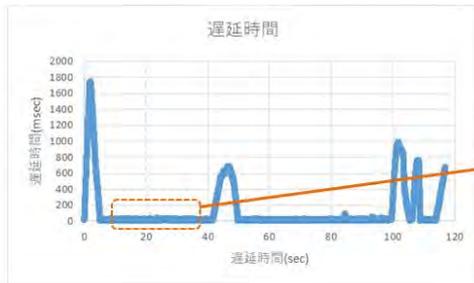
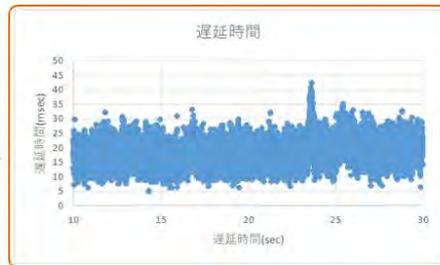


図 4-160 28GHz 帯 2 セット同時使用 ループバック 20Mbps 遅延時間

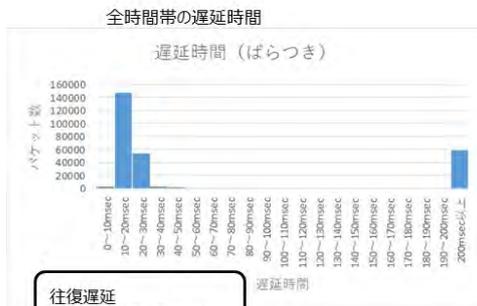
1 セット目詳細



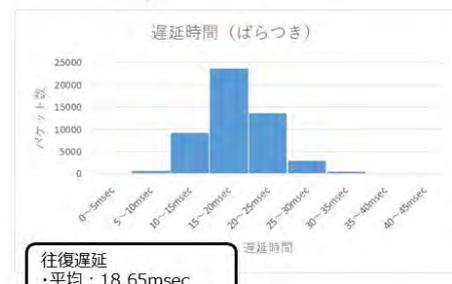
拡大



この時間帯の遅延時間



往復遅延  
 ・平均：155.38msec  
 ・最小値：5msec  
 ・最大値：1744msec



往復遅延  
 ・平均：18.65msec  
 ・最小値：5msec  
 ・最大値：42.38msec

図 4-161 28GHz 帯 2 セット同時使用 ループバック 20Mbps 1 セット目遅延時間

## 2セット目詳細

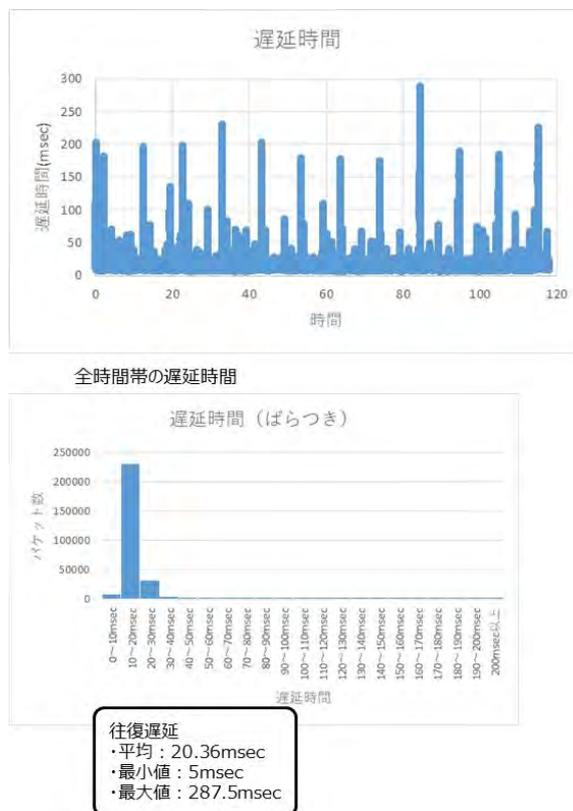


図 4-162 28GHz 帯 2セット同時使用 ループバック 20Mbps 2セット目遅延時間

### ■28GHz 帯⑨2セット同時使用時のアプリケーション観点からの分析

#### ・ 実効速度：

2セットを同時に使用時、特に上りの実効速度が低下する。1セット使用時でも上りの実効速度は目標値を達しておらず、2セット使用時になるとさらに厳しくなる。今後、ローカル 5G 側で上りの実効速度を増やと共に、複数セットを使用時でも実効速度が低下しないような対策が必要である。

6) 28GHz 帯-⑩ハンドオーバー

以下に 28GHz 帯におけるハンドオーバーでの測定結果を示す。

表 4-56 28GHz 帯 ハンドオーバー測定結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(上り200 下り550Mbps 約3分間)を、往路/復路それぞれ実施する。WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均5.3Mbps 下り 平均122Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(20Mbps 約3分間)を、往路/復路それぞれ実施する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。端末側のログから遅延時間を計測	通信：不安定 遅延時間(往復)： 往路 平均1106msec 最小4.9msec 最大15909msec 復路 平均1790msec 最小4.77msec 最大7511msec 映像官能評価：C

a) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑩ハンドオーバー-1 (実効速度データ)

「図 4-163 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 1」に 28GHz 帯におけるハンドオーバー (往路) の際、「図 4-164 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 2」にはハンドオーバー (復路) の際、上り 200Mbps、下り 550Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

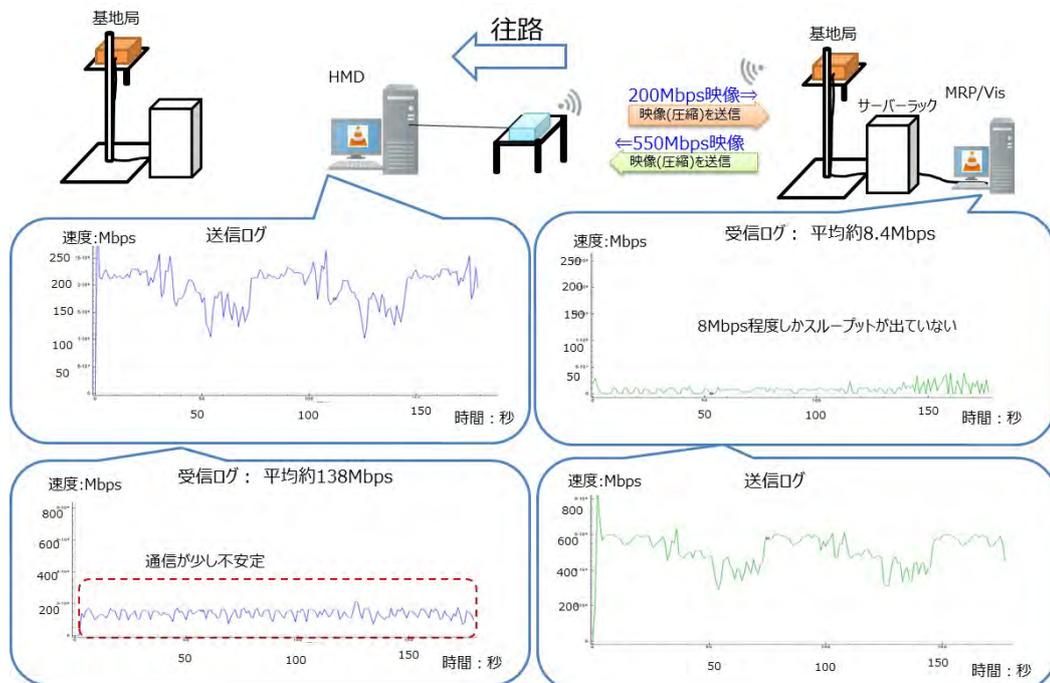


図 4-163 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 1

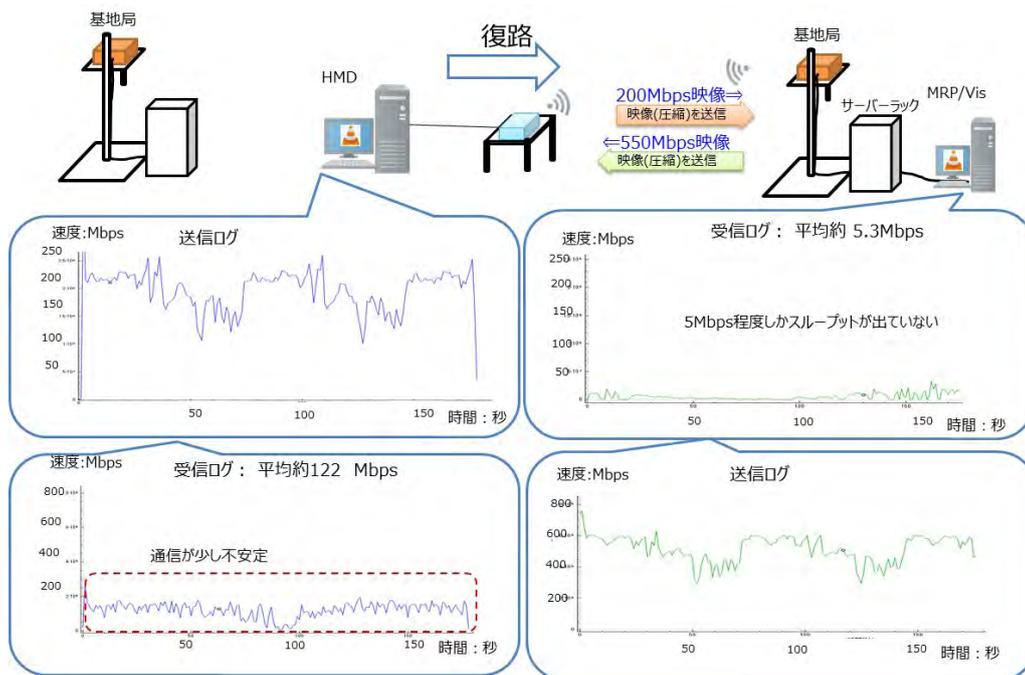


図 4-164 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 200Mbps/下り 550Mbps 速度ログ 2

b) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑩ハンドオーバー-2（実効速度データ）

「図 4-165 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 速度ログ 1」に 28GHz 帯におけるハンドオーバー（往路）の際、「図 4-166 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 速度ログ 2」にはハンドオーバー（復路）の際、上り 20Mbps、下り 20Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

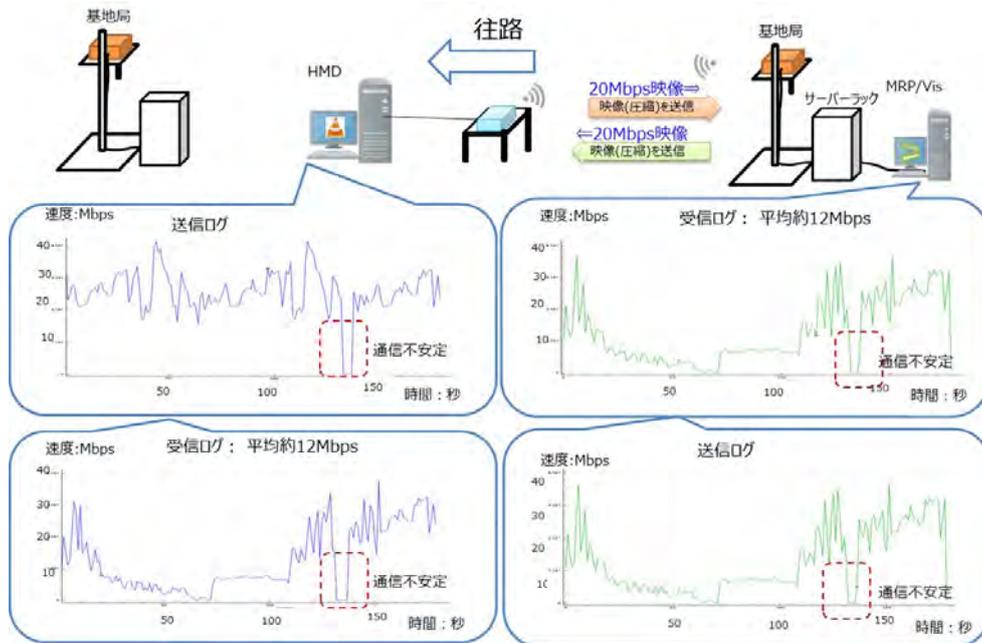


図 4-165 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 速度ログ 1

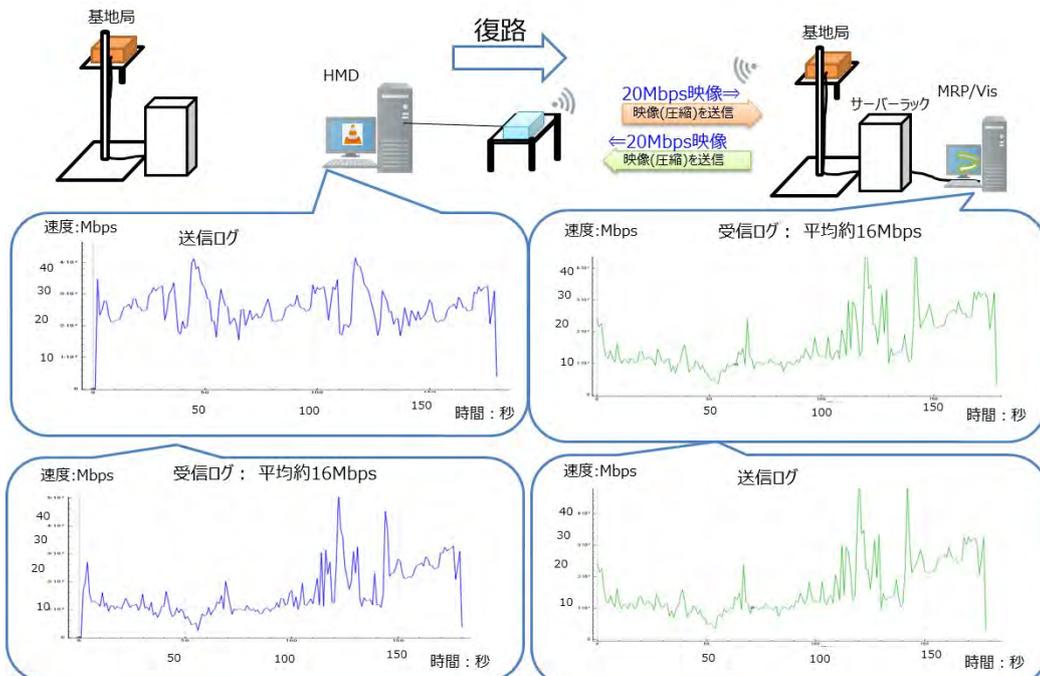


図 4-166 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 速度ログ 2

c) 測定結果ログ：28GHz 帯-⑩ハンドオーバー-2（遅延時間）

「図 4-167 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間」に 28GHz 帯におけるハンドオーバー（往路）の際、「図 4-168 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間」にはハンドオーバー（復路）の際、上り 20Mbps、下り 20Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

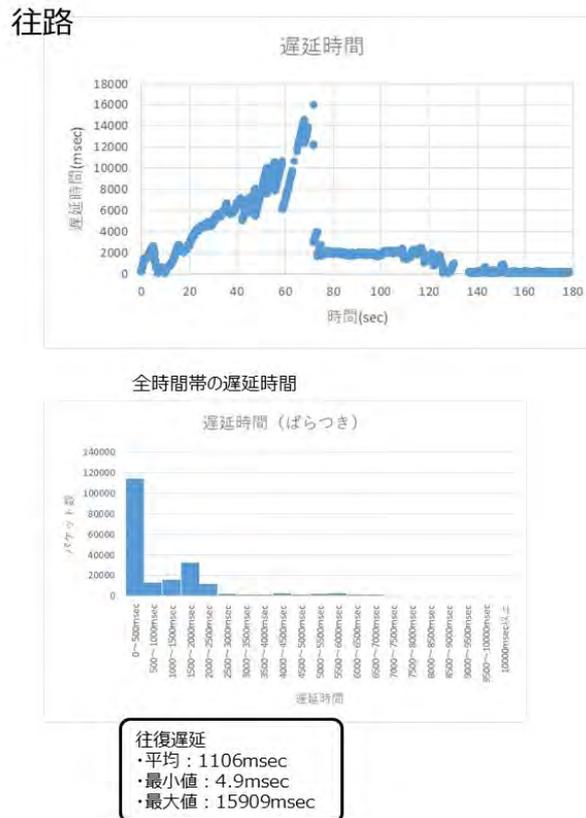
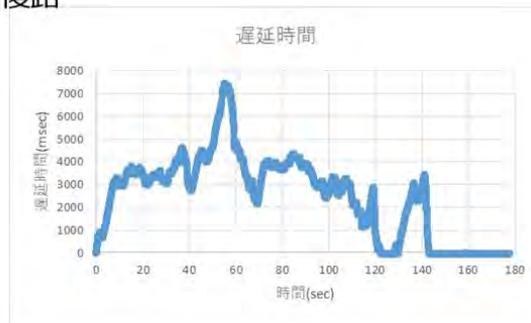
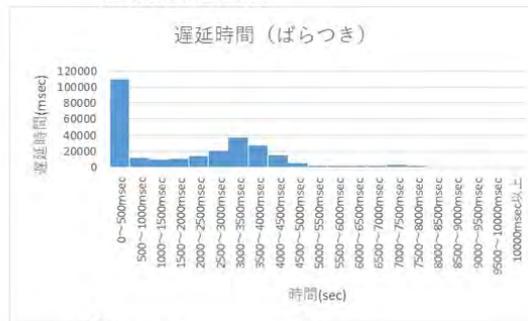


図 4-167 28GHz 帯 ハンドオーバー(往路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間

## 復路



### 全時間帯の遅延時間



往復遅延  
・平均：1790msec  
・最小値：4.77msec  
・最大値：7511msec

図 4-168 28GHz 帯 ハンドオーバー(復路) 上り 20Mbps/下り 20Mbps 遅延時間

### ■28GHz 帯⑩ハンドオーバー時のアプリケーション観点からの分析

#### ・ 実効速度：

特に上りの実効速度が低下し通信が安定しないため、ローカル 5G 側で通信を安定にする対応が必要である。また基地局が切り替わる時は一旦、通信が切れる場合もあるため、切り替わり時のアプリケーション側の対策が必要となる。

#### ・ 遅延時間：

実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなるため、通信不安定時でもローカル 5G 側で遅延時間を一定にする対策が必要である。

#### 4.6.3.2 PC/基地局間のインターフェース検証

「4.6.2.2 PC/基地局間のインターフェース検証」で記載した項目の測定結果、およびログを記載する。

##### (1) 4.7GHz 帯

##### 1) 4.7GHz 帯－①基本条件

以下に 4.7GHz 帯における基本条件での測定結果を示す。

表 4-57 4.7GHz 帯 基本条件測定結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	VLCを用いて上りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 最大61Mbps 平均61Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
2		VLCを用いて上りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均56Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
3		VLCを用いて上りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均37Mbps 通信：安定 欠損率：上り 0.269% 映像官能評価：A
4		VLCを用いて下りのみ映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 最大61Mbps 平均60Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
5		VLCを用いて下りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
6		VLCを用いて下りのみ映像転送(30Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：下り 平均36Mbps 通信：安定 欠損率：下り 0.092% 映像官能評価：A
7	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(100Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 最大61Mbps 平均61Mbps 下り 最大61Mbps 平均60Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
8		VLCを用いて双方向映像転送(上り50M、下り50Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均55Mbps 下り 平均55Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
9		VLCを用いて双方向映像転送(30Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均37Mbps 下り 平均36Mbps 通信：安定 欠損率：上り 0.288% 下り 0.389% 映像官能評価：A
10	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(30Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：安定 遅延時間(往復)： 平均12.9msec 最小 9.68msec 最大 19.27msec 映像官能評価：A

a) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－1（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

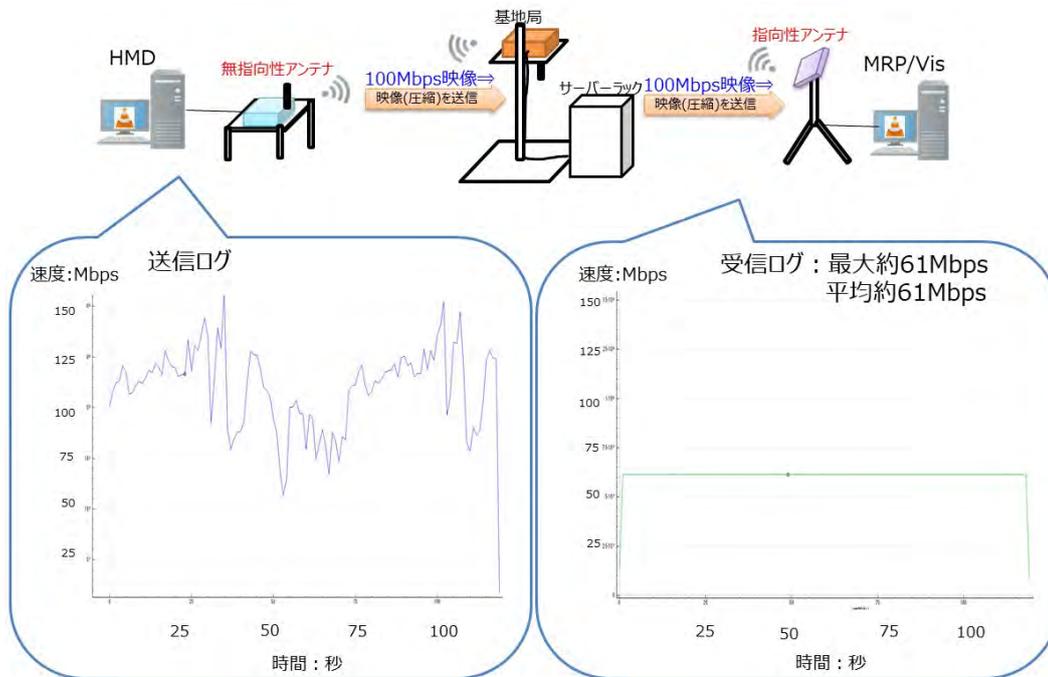


図 4-169 4.7GHz 帯 上り 100Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－2（実効速度）

4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを以下に示す。

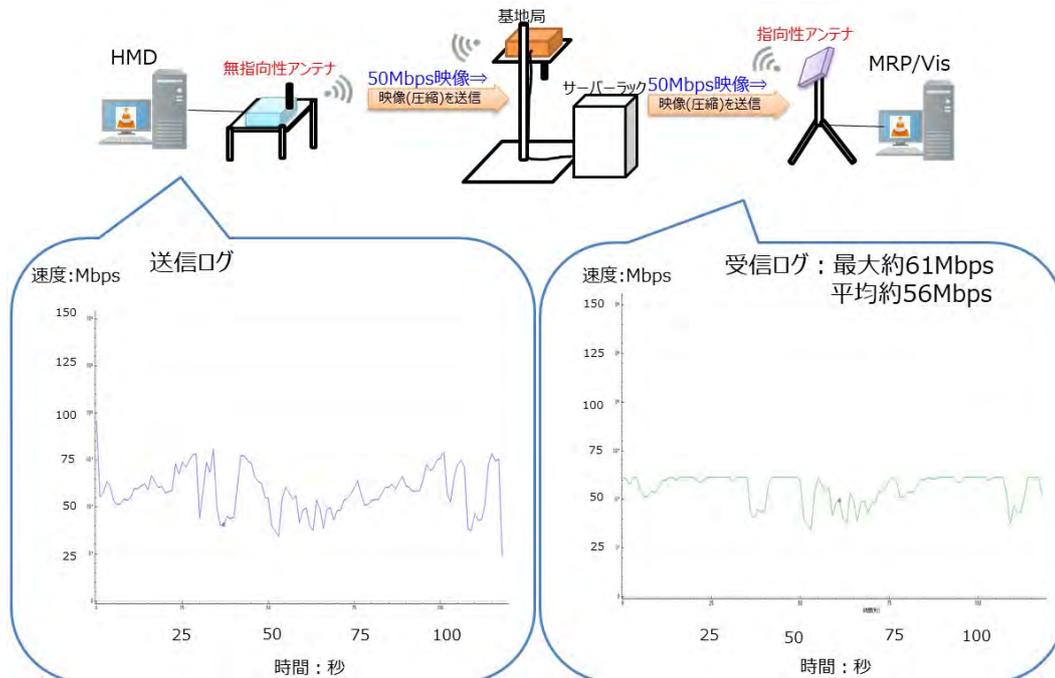


図 4-170 4.7GHz 帯 上り 50Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－3（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

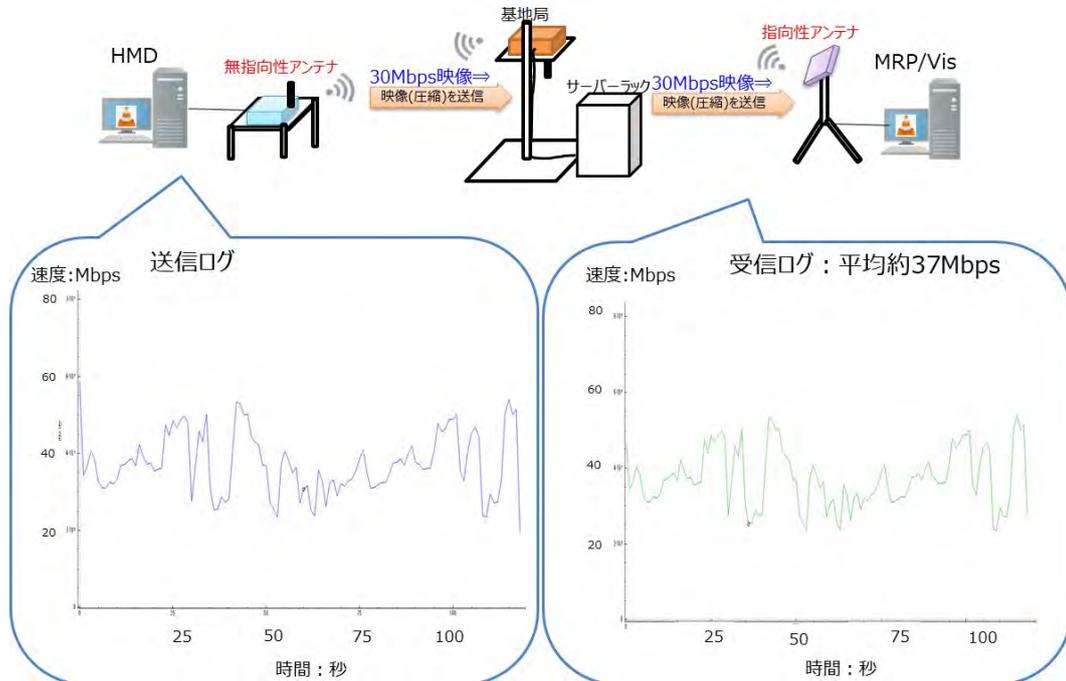


図 4-171 4.7GHz 帯 上り 30Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－①基本条件－3（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

表 4-58 4.7GHz 帯 上り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	405,803	—
未到達パケット数(UDP)	1,093	—
欠損率%	0.269%	—

e) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－4（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

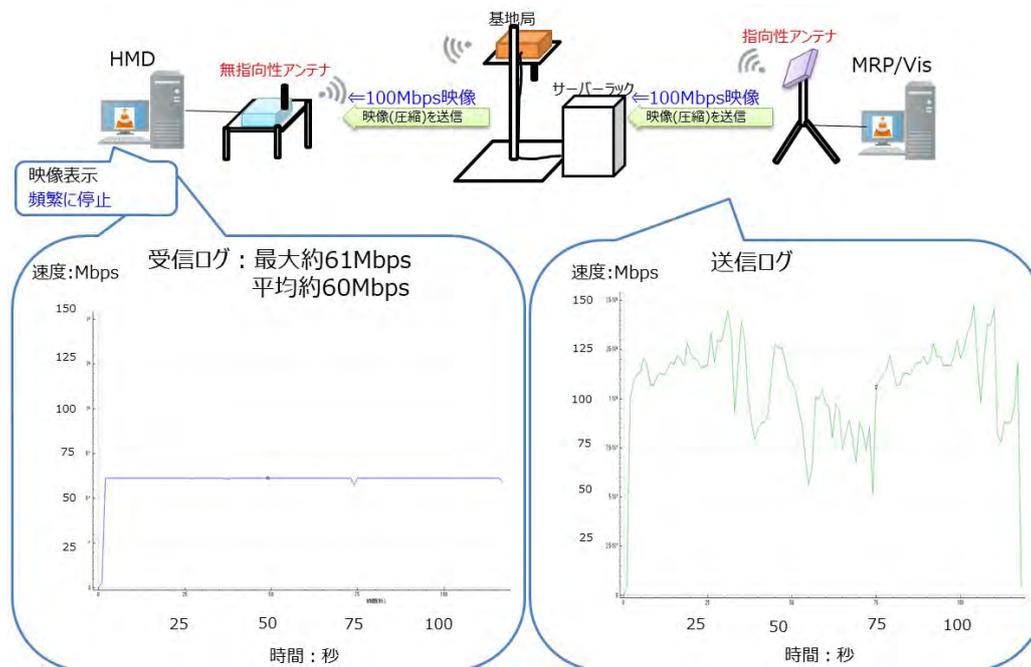


図 4-172 4.7GHz 帯 下り 100Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－5（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

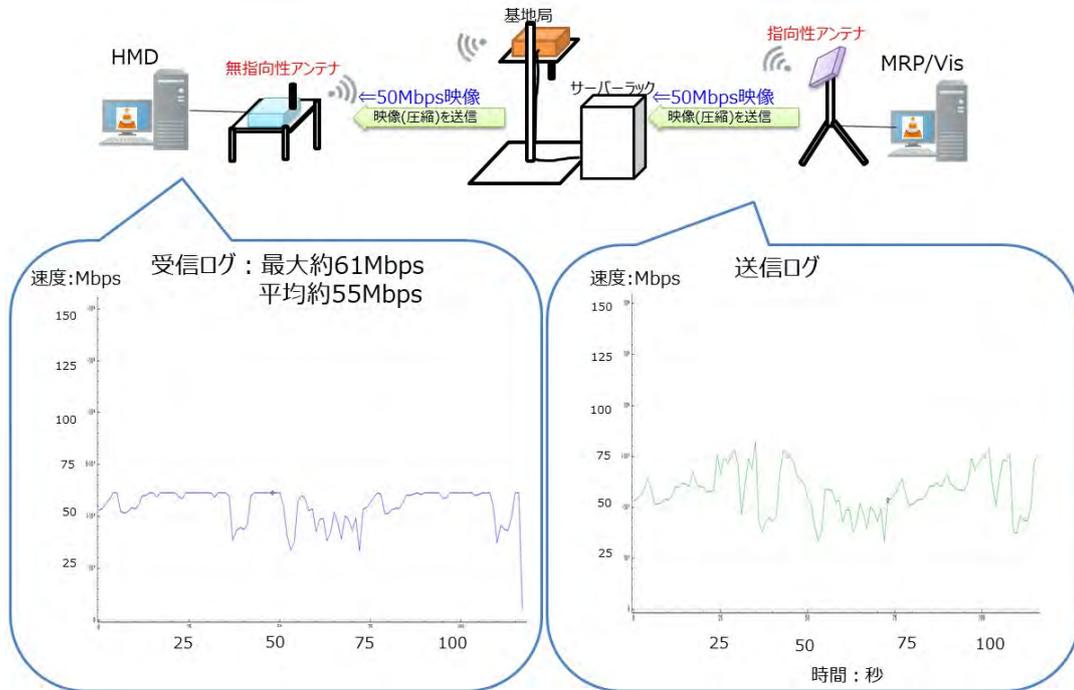


図 4-173 4.7GHz 帯 下り 50Mbps 速度ログ

g) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－6（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

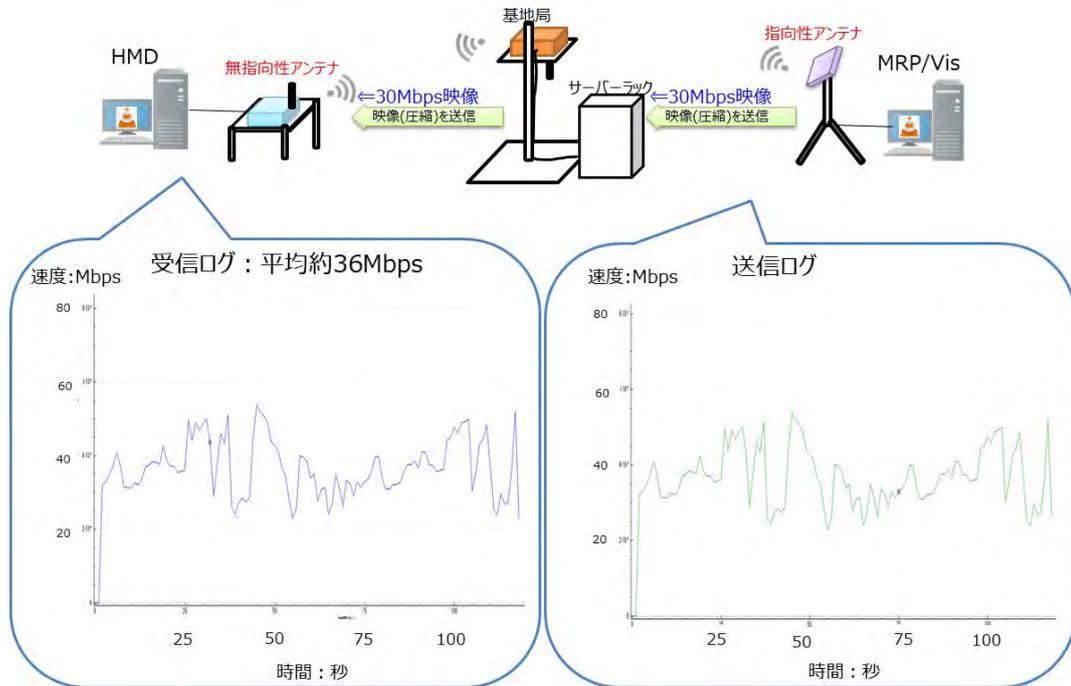


図 4-174 4.7GHz 帯 下り 30Mbps 速度ログ

h) 測定結果ログ：(A)4.7GHz 帯－①基本条件－6（欠損率）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-59 4.7GHz 帯 下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	393,293
未到達パケット数(UDP)	—	363
欠損率%	—	0.092%

i) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－7（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 100Mbps、下り 100Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

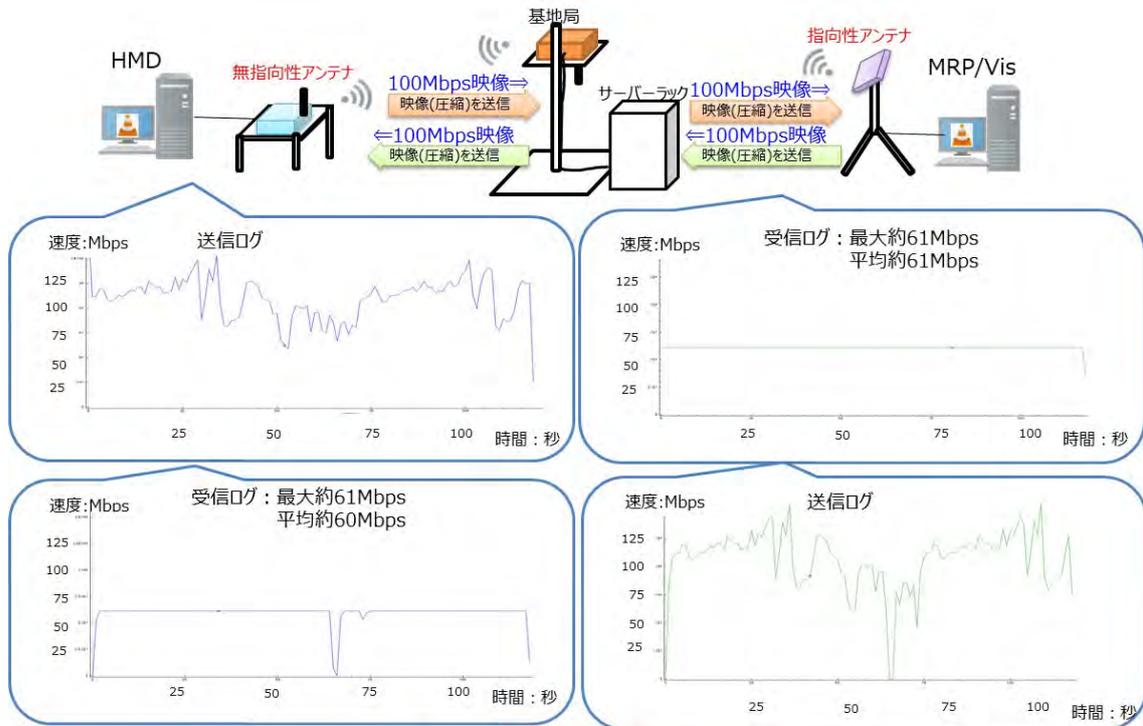


図 4-175 4.7GHz 帯 上り/下り 100Mbps 速度ログ

j) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－8（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 50Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

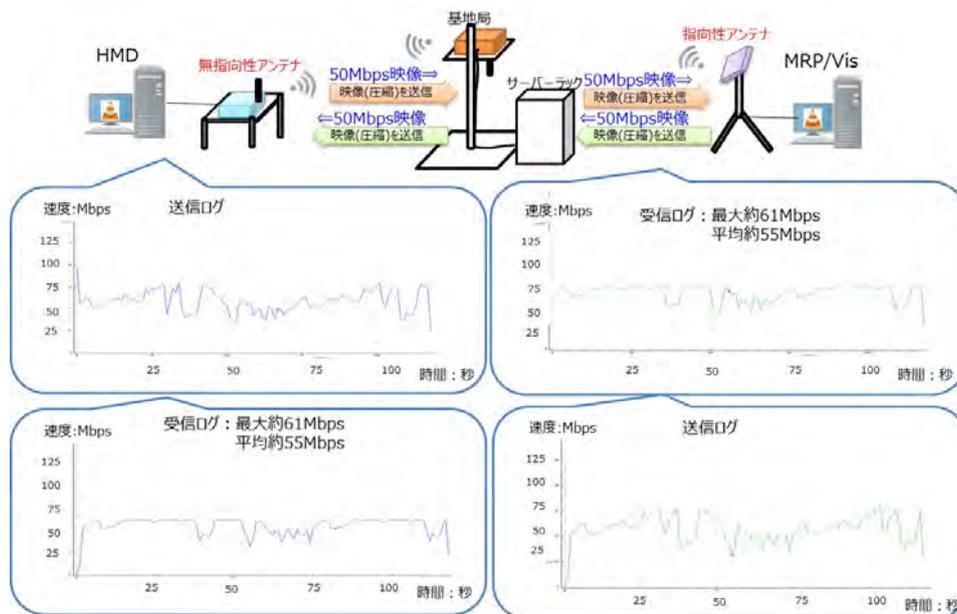


図 4-176 4.7GHz 帯 上り/下り 50Mbps 速度ログ

k) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-①基本条件-9 (実効速度)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

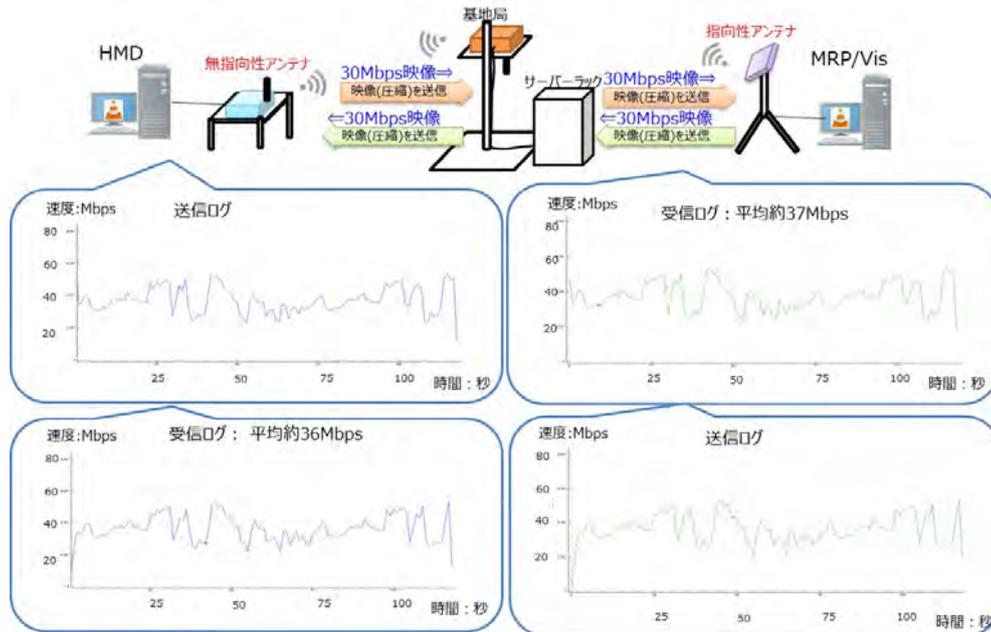


図 4-177 4.7GHz 帯 上り/下り 30Mbps 速度ログ

l) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-①基本条件-9 (欠損率)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-60 4.7GHz 帯 上り/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	405,139	394,282
未到達パケット数(UDP)	1,165	1,532
欠損率%	0.288%	0.389%

m) 測定結果ログ：4.7GHz 帯－①基本条件－10（実効速度）

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

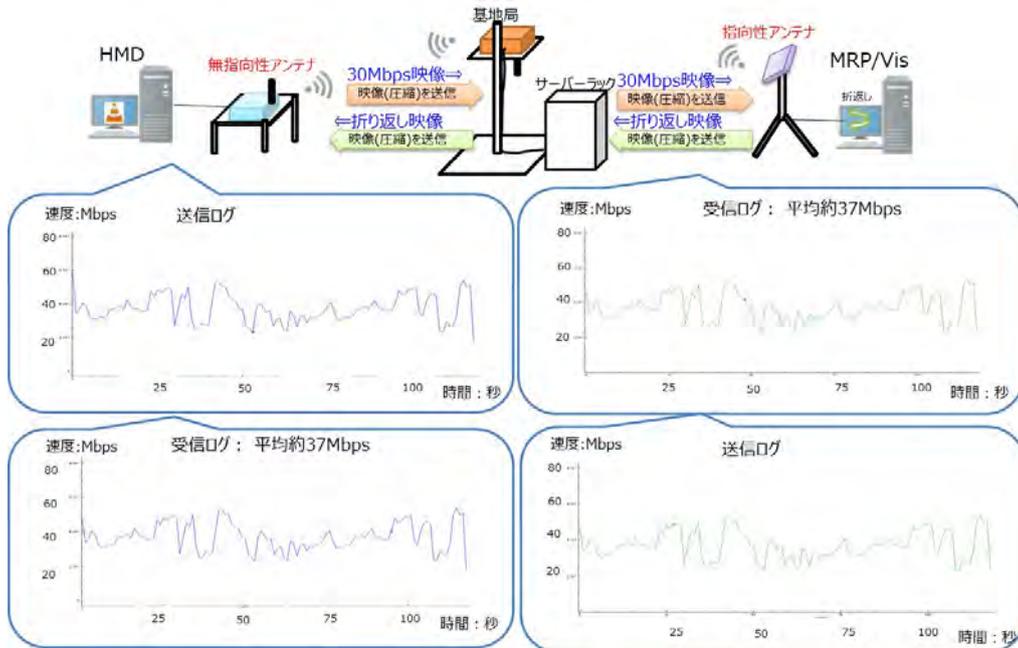


図 4-178 4.7GHz 帯 30Mbps ループバック 速度ログ

n) 測定結果ログ : (A)4.7GHz 帯-①基本条件-10 (遅延時間)

以下に 4.7GHz 帯における基本条件の際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

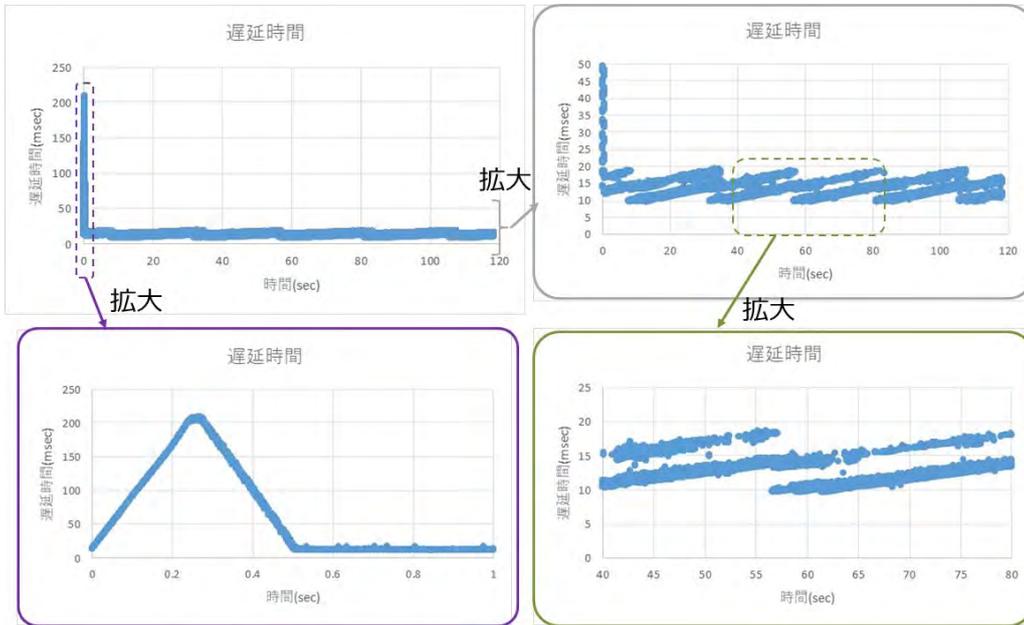


図 4-179 4.7GHz 帯 30Mbps ループバック 遅延ログ

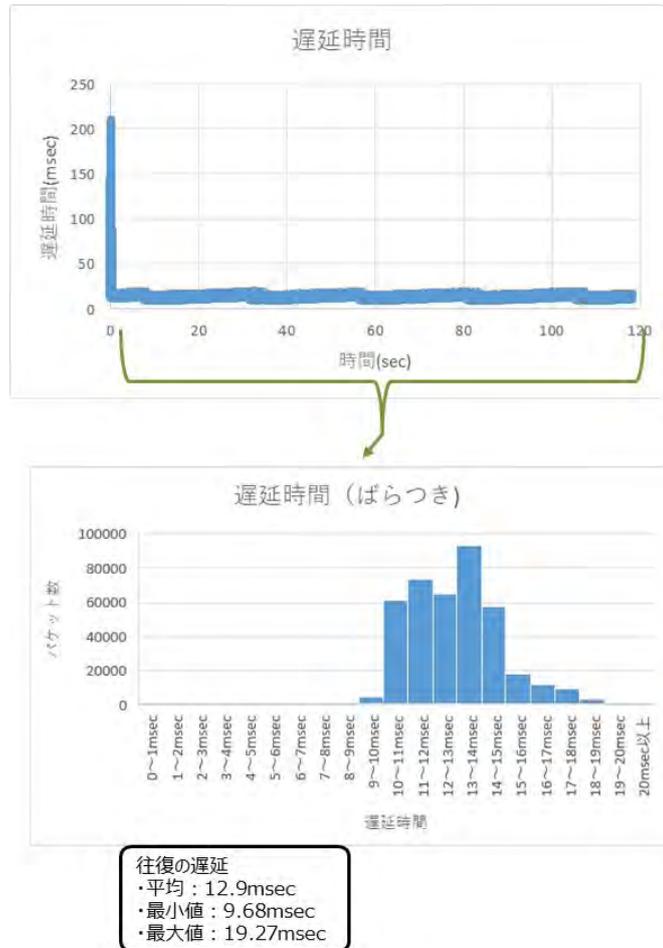


図 4-180 4.7GHz 帯 30Mbps ループバック 遅延ログ

■4.7GHz 帯（基地局－サーバ間無線）①基本条件時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
 

基地局－サーバ間が無線の時、上り／下りともに約 60Mbps となり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、適用するのは困難である。
- ・ 遅延時間：
 

平均で 12.9msec で、基地局－サーバ間が有線の時 7.51msec であり、基地局－サーバ間が有線の時の方が適している。

(2) 28GHz 帯

1) 28GHz 帯—基本条件（基地局—端末間の距離 20.42m）

以下に 28GHz 帯における基本条件での測定結果を示す。

表 4-61 28GHz 帯 基本条件測定結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	VLCを用いて上りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均56Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		VLCを用いて上りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均58Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
3		VLCを用いて上りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均26Mbps 通信：安定 欠損率：上り 0.68% 映像官能評価：A
4		VLCを用いて下りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均29Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
5		VLCを用いて下りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均27Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
6		VLCを用いて下りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：下り 平均21Mbps 通信：安定 欠損率：下り 19.47% 映像官能評価：B
7	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(上り200Mbps、下り200 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均42Mbps 下り 平均31Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
8		VLCを用いて双方向映像転送(上り50M、下り50Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均24Mbps 下り 平均17Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
9		VLCを用いて双方向映像転送(20Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度： 上り 平均16Mbps 下り 平均26Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 37.95% 下り 1.76% 映像官能評価：B
10	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(20Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：不安定 遅延時間(往復)： 平均2983msec 最小65.46msec 最大5512msec 映像官能評価：B

a) 測定結果ログ：28GHz 帯-①基本条件-1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

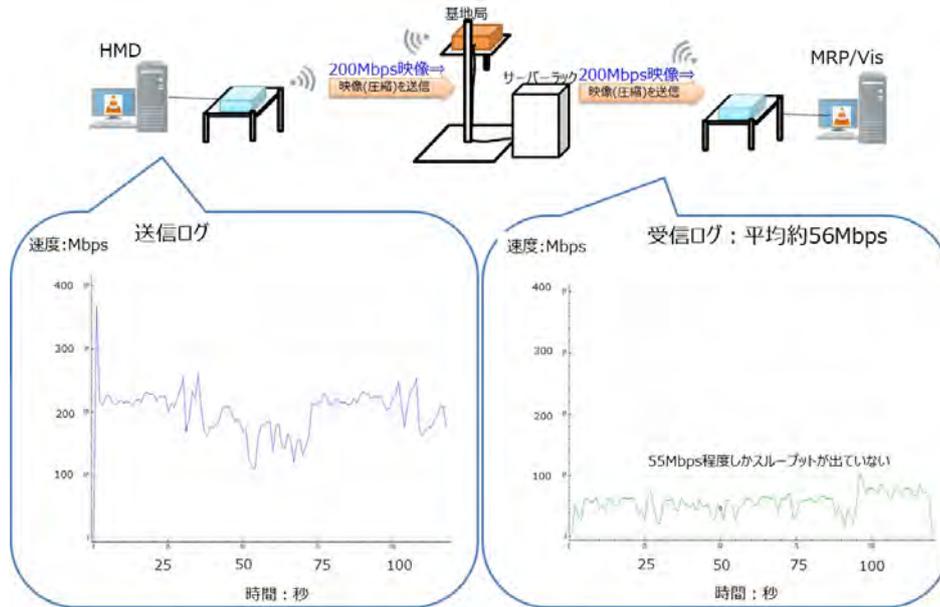


図 4-181 28GHz 帯 基本条件 上り 200Mbps 速度ログ

b) 測定結果ログ：28GHz 帯-①基本条件-2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

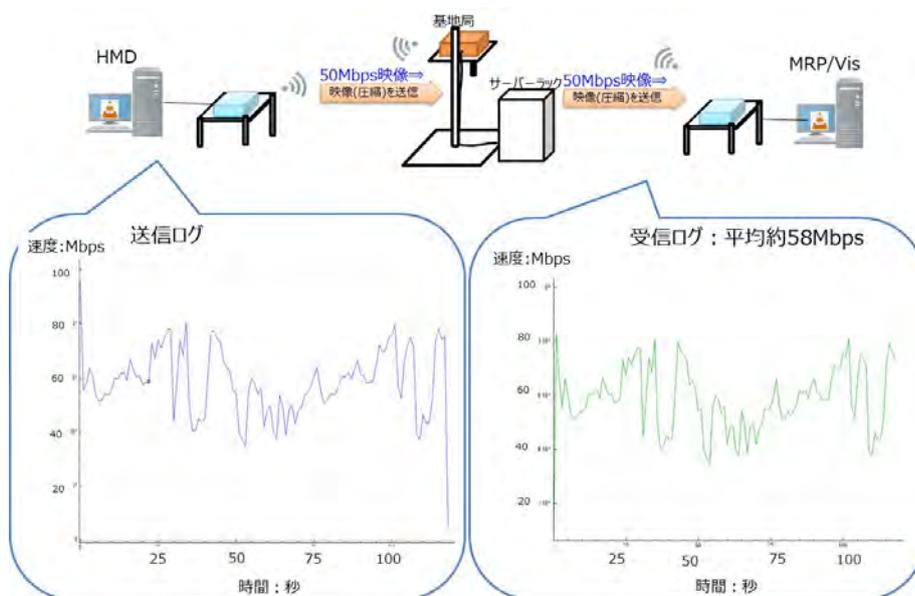


図 4-182 28GHz 帯 基本条件 上り 50Mbps 速度ログ

c) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－3（実効速度データ）

以下に 28GHz における基本条件の際、上り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

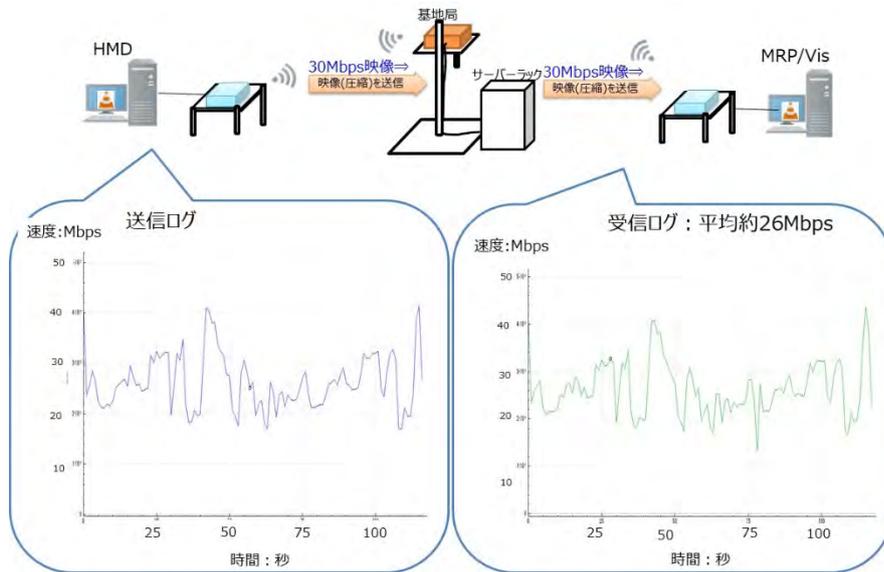


図 4-183 28GHz 帯 基本条件 上り 30Mbps 速度ログ

d) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－3（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-62 28GHz 帯 基本条件 上り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	285,520	—
未到達パケット数(UDP)	1,954	—
欠損率%	0.68%	—

e) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－4（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、下り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

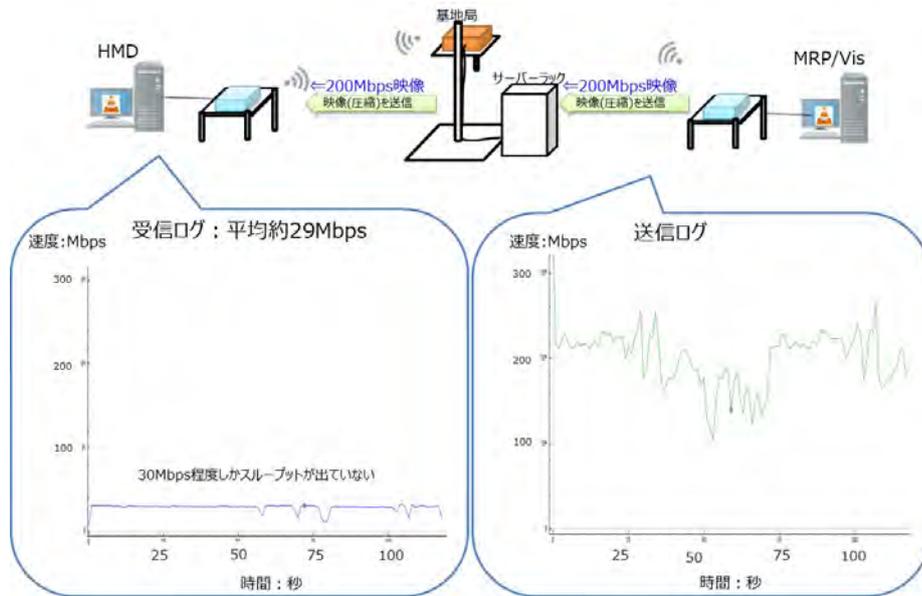


図 4-184 28GHz 帯 基本条件 下り 200Mbps 速度ログ

f) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－5（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

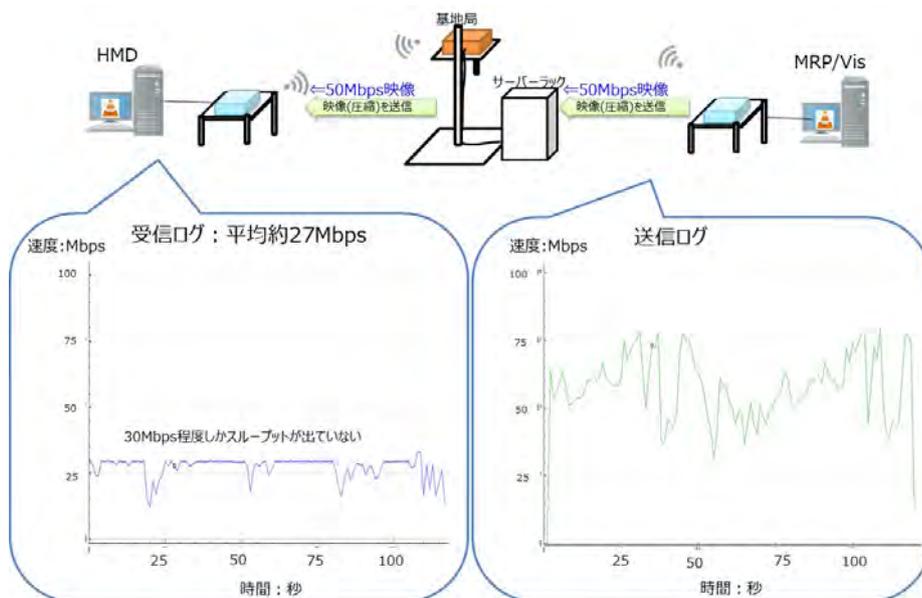


図 4-185 28GHz 帯 基本条件 下り 50Mbps 速度ログ

g) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－6（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

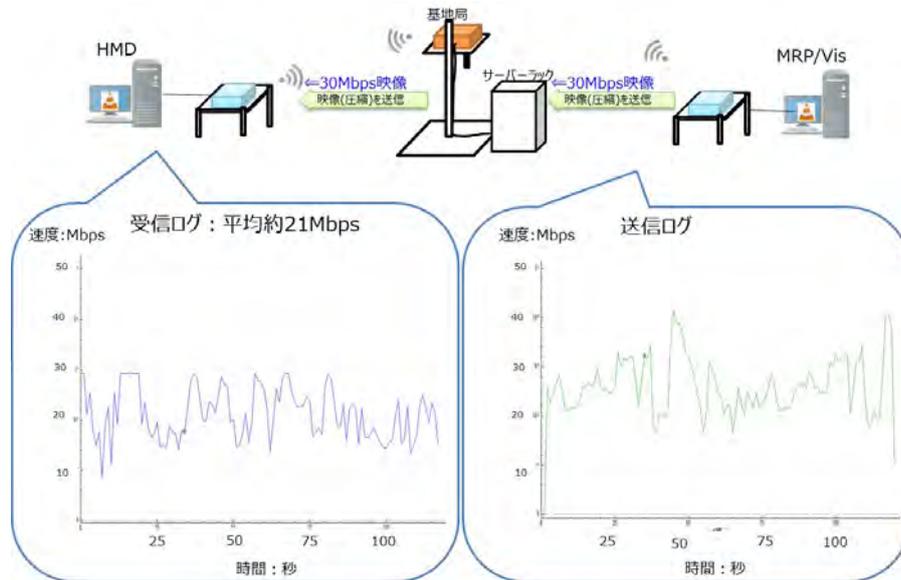


図 4-186 28GHz 帯 基本条件 下り 30Mbps 速度ログ

h) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－6（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-63 28GHz 帯 基本条件 下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	—	283,873
未到達パケット数(UDP)	—	55,268
欠損率%	—	19.47%

i) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－7（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 200Mbps、下り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

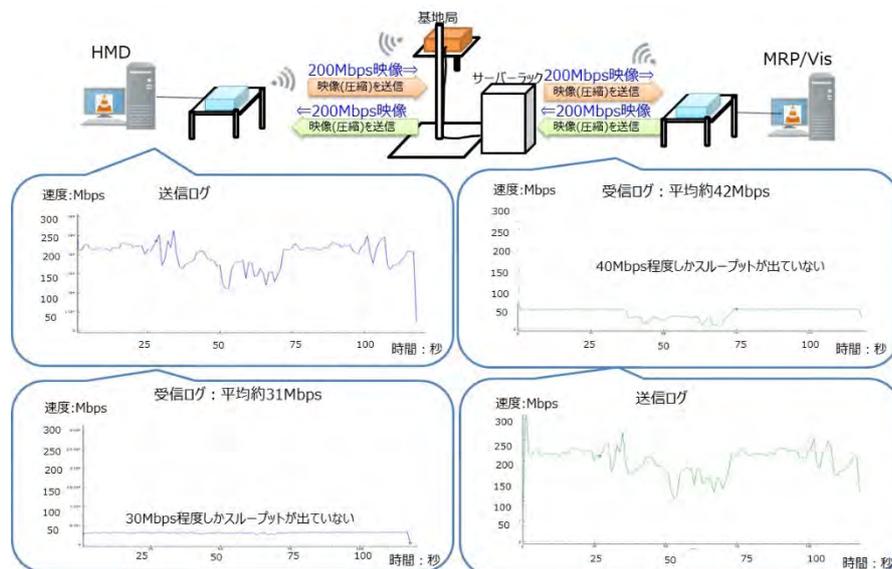


図 4-187 28GHz 帯 基本条件 上り 200Mbps/下り 200Mbps 速度ログ

j) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－8（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 50Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

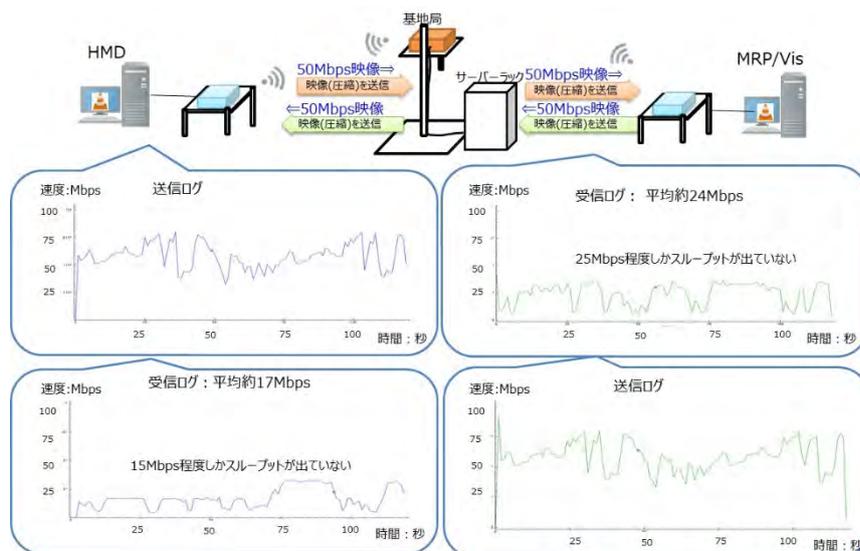


図 4-188 28GHz 帯 基本条件 上り 50Mbps/下り 50Mbps 速度ログ

k) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－9（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

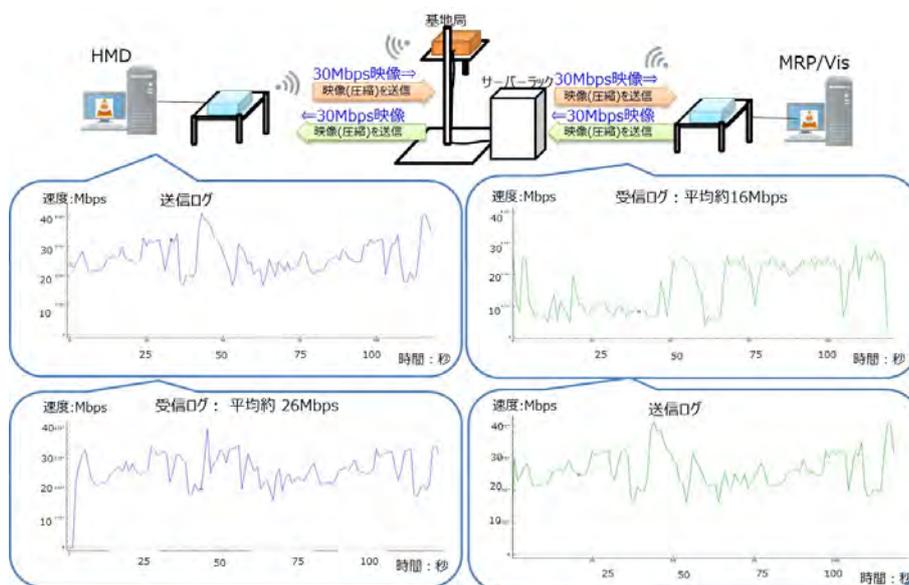


図 4-189 28GHz 帯 基本条件 上り 30Mbps/下り 30Mbps 速度ログ

l) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－9（欠損率）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、上り 30Mbps、下り 30Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-64 28GHz 帯 基本条件 上り 30Mbps/下り 30Mbps 欠損率

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	285,961	284,331
未到達パケット数(UDP)	108,535	5,009
欠損率%	37.95%	1.76%

m) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－10（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

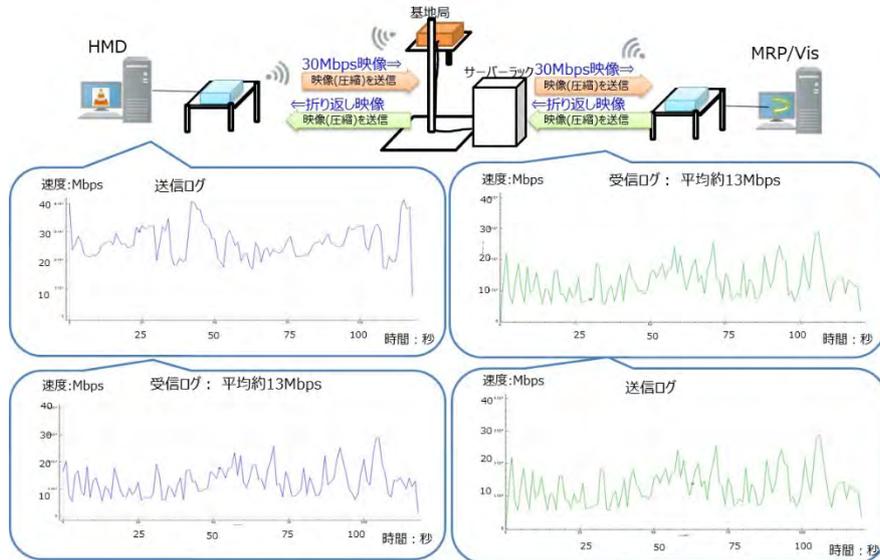


図 4-190 28GHz 帯 基本条件 ループバック 30Mbps 速度ログ

n) 測定結果ログ：28GHz 帯－①基本条件－10（遅延時間）

以下に 28GHz 帯における基本条件の際、ループバック 30Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

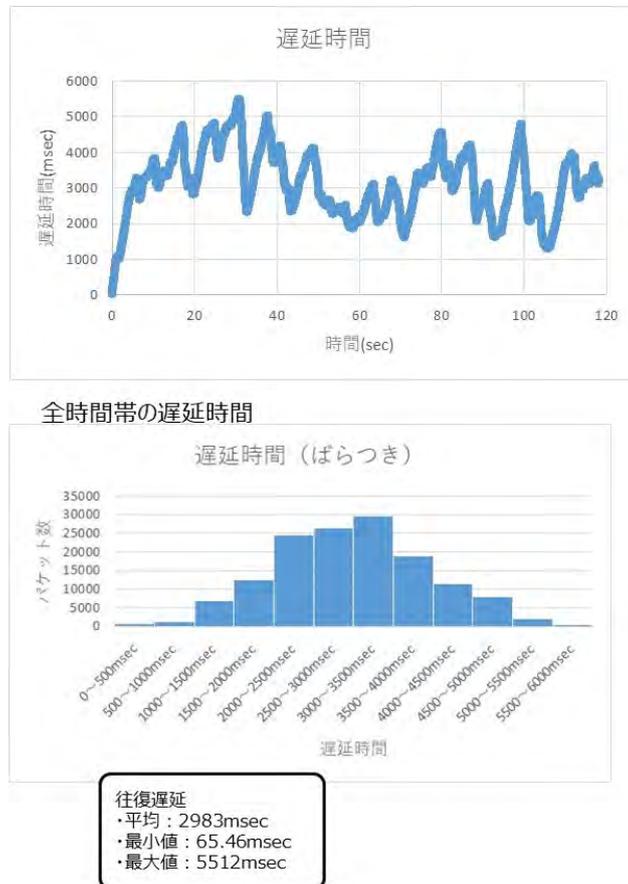


図 4-191 基本条件 ループバック 30Mbps 遅延時間

■28GHz（基地局－サーバ間無線）①基本条件時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
 

基地局－サーバ間が無線の時、上り／下りともに約 56Mbps となり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、ローカル 5G 側で上りの実効速度を増加させる対策が必要である。2 セット同時使用時と同様、複数ローカル 5G 無線端末を使用すると、通信の実効速度が低下するため、通信を安定させるようなローカル 5G 側での対策が必要である。
- ・ 遅延時間：
 

実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなるため、通信不安定時でもローカル 5G 側で遅延時間を一定にする対策が必要である

## 2) 28GHz 帯-2 セット同時使用

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用時での測定結果を示す。

表 4-65 28GHz 帯 2 セット同時使用計測結果 一覧

項番	大項目	確認手順	確認項目	測定結果
1	片方向通信	VLCを用いて上りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均56Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
2		VLCを用いて上りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均58Mbps 通信：安定 映像官能評価：B
3		VLCを用いて上りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：上り 平均26Mbps 通信：安定 欠損率：上り 0.68% 映像官能評価：A
4		VLCを用いて下りのみ映像転送(200Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均29Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
5		VLCを用いて下りのみ映像転送(50Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：下り 平均27Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
6		VLCを用いて下りのみ映像転送(20Mbps、約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度：下り 平均21Mbps 通信：安定 欠損率：下り 19.47% 映像官能評価：B
7	双方向通信	VLCを用いて双方向映像転送(上り200Mbps、下り200 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像(カクカク表示)を確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均42Mbps 下り 平均31Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
8		VLCを用いて双方向映像転送(上り50M、下り50Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度を計測する。	実効速度：上り 平均24Mbps 下り 平均17Mbps 通信：不安定 映像官能評価：C
9		VLCを用いて双方向映像転送(20Mbps 約2分間)する。 WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 受信ログから実効速度、欠損率を計測する。	実効速度： 上り 平均16Mbps 下り 平均26Mbps 通信：不安定 欠損率：上り 37.95% 下り 1.76% 映像官能評価：B
10	ループバック	VLC+ループバックツールを用いて映像転送(20Mbps 約2分間)する。端末側：VLC、サーバー側：ループバックツール WireSharkを用いて端末側ログとサーバー側ログを取得する。	VLCの表示映像を確認し、映像表示の滑らかさを確認する。 端末側のログから遅延時間を計測する。	通信：不安定 遅延時間(往復)： 平均2983msec 最小65.46msec 最大5512msec 映像官能評価：B

a) 測定結果ログ：28GHz 帯-②2 セット同時使用-1（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用の際、上り 200Mbps、下り 200Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

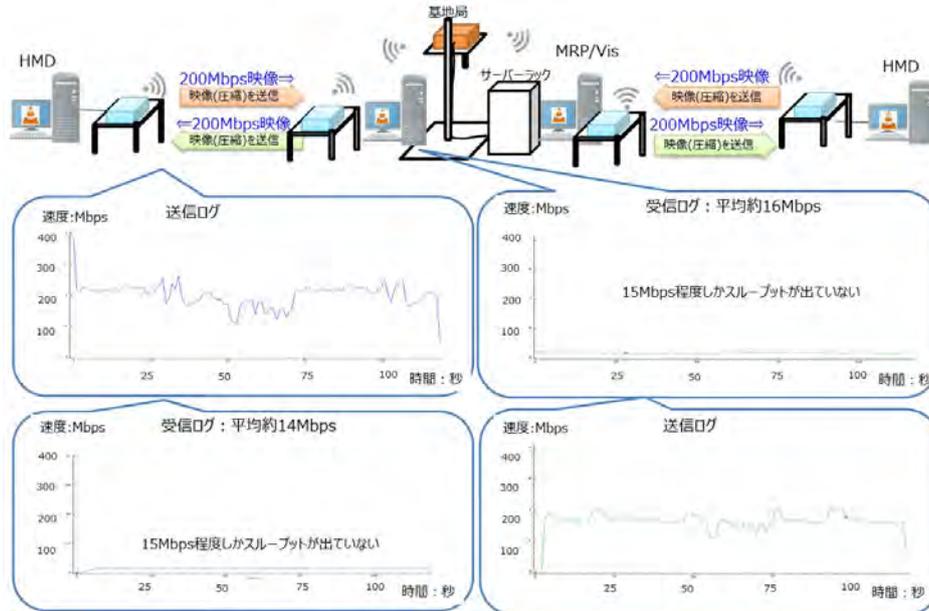


図 4-192 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps/下り 200Mbps 速度ログ 1

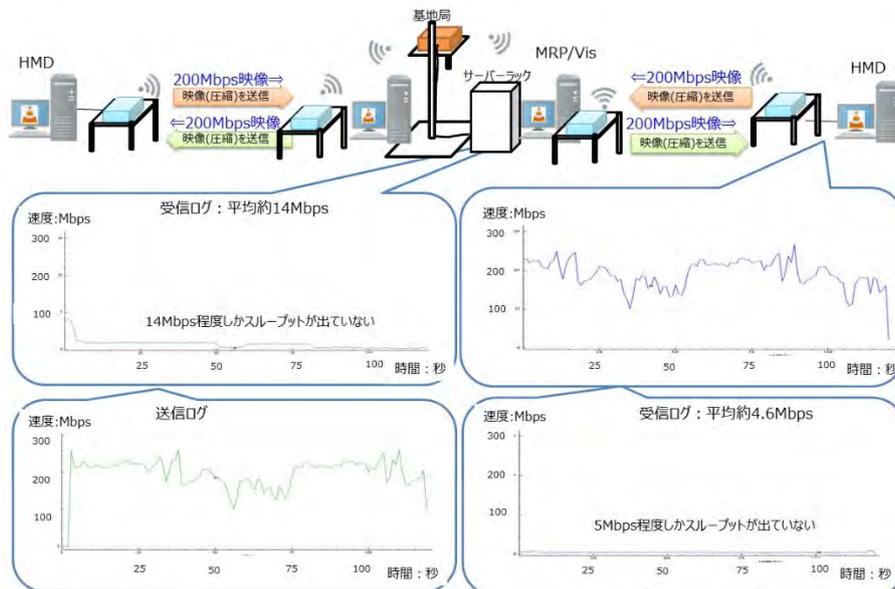


図 4-193 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 200Mbps/下り 200Mbps 速度ログ 2

b) 測定結果ログ：28GHz 帯-②2 セット同時使用-2（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用の際、上り 50Mbps、下り 50Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

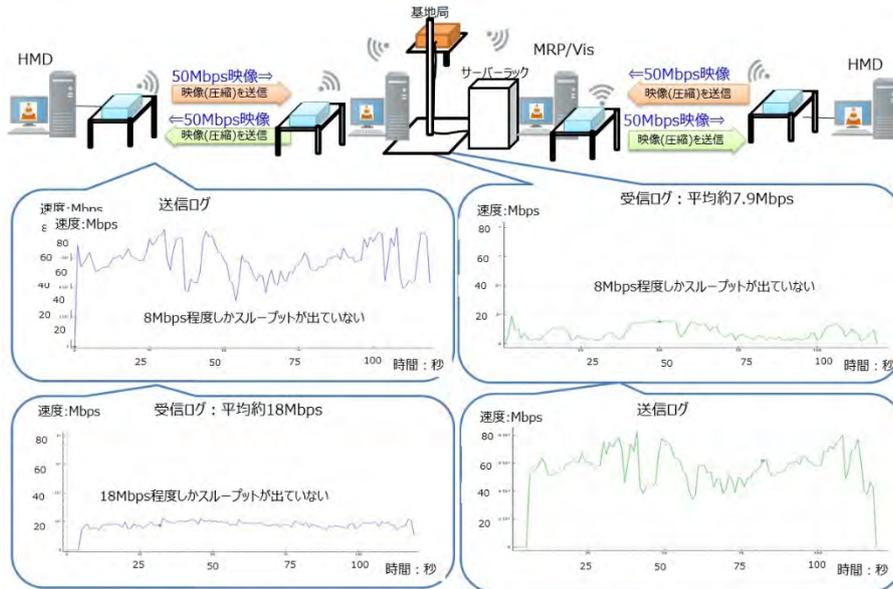


図 4-194 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps/下り 50Mbps 速度ログ 1

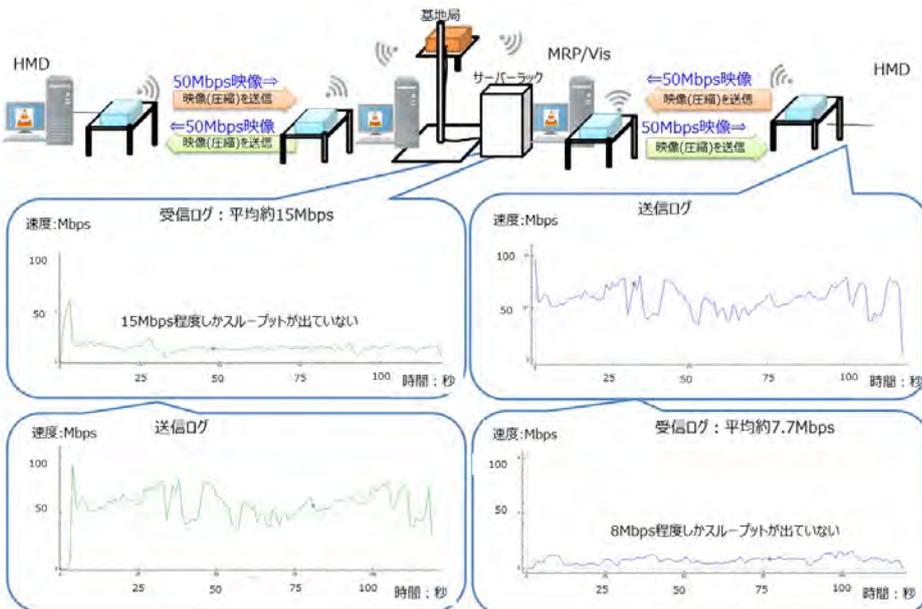


図 4-195 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 50Mbps/下り 50Mbps 速度ログ 2

c) 測定結果ログ：28GHz 帯-②2 セット同時使用-3（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用の際、上り 10Mbps、下り 10Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

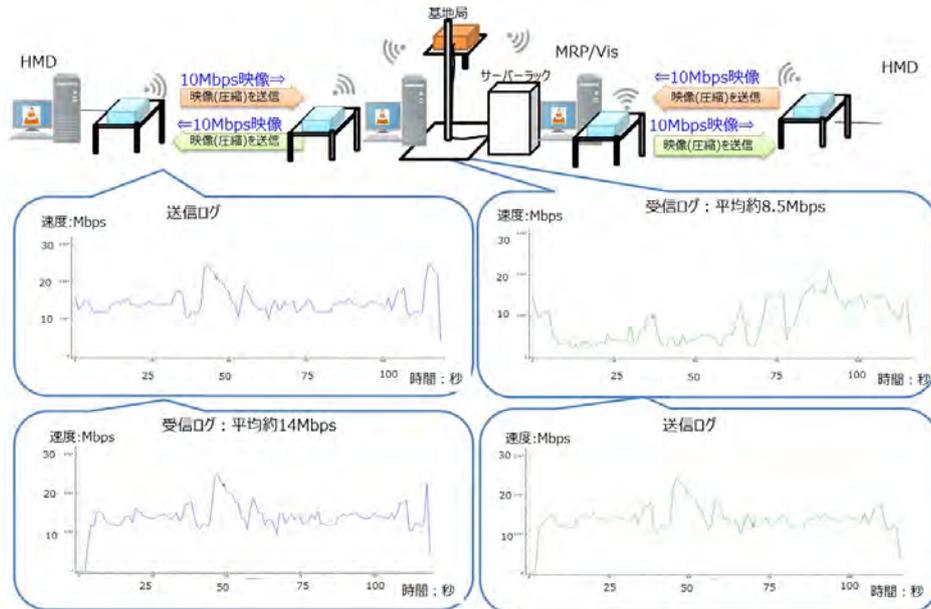


図 4-196 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 10Mbps/下り 10Mbps 速度ログ 1

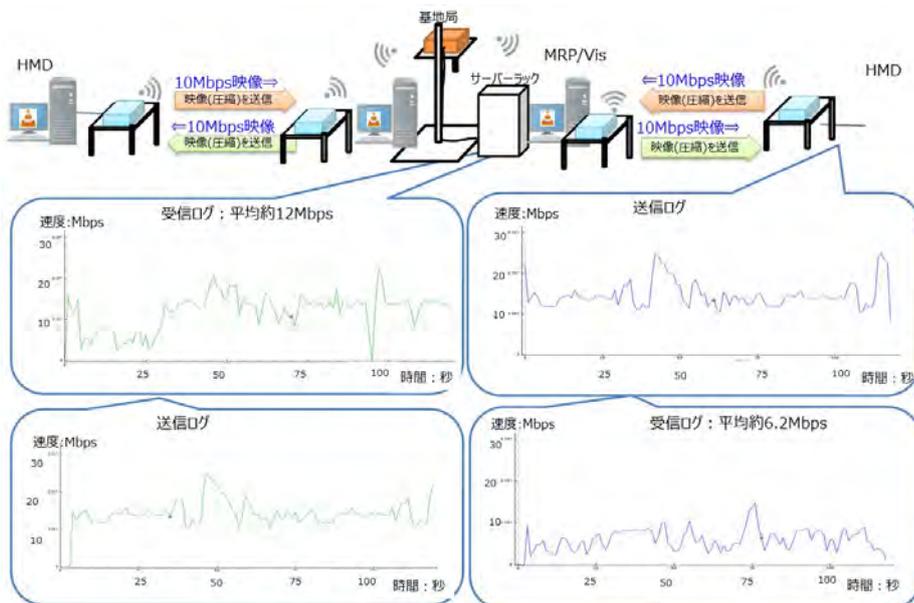


図 4-197 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 10Mbps/下り 10Mbps 速度ログ 2

d) 測定結果ログ：28GHz 帯－②2 セット同時使用－3（欠損率）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用の際、上り 10Mbps、下り 10Mbps の映像転送をした時のパケット欠損率の結果を示す。

表 4-66 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 10Mbps/下り 10Mbps 欠損率 1 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	159,861	148,094
未到達パケット数(UDP)	69,292	23
欠損率%	43.35%	0.016%

表 4-67 28GHz 帯 2 セット同時使用 上り 10Mbps/下り 10Mbps 欠損率 2 セット目

	上り	下り
送信全パケット数(UDP)	159,151	152,693
未到達パケット数(UDP)	29,199	87,827
欠損率%	18.35%	57.52%

e) 測定結果ログ：28GHz 帯－②2 セット同時使用－4（実効速度データ）

以下に 28GHz 帯における 2 セット同時使用の際、ループバック 10Mbps の映像転送をした時の送信側と受信側の速度ログを示す。

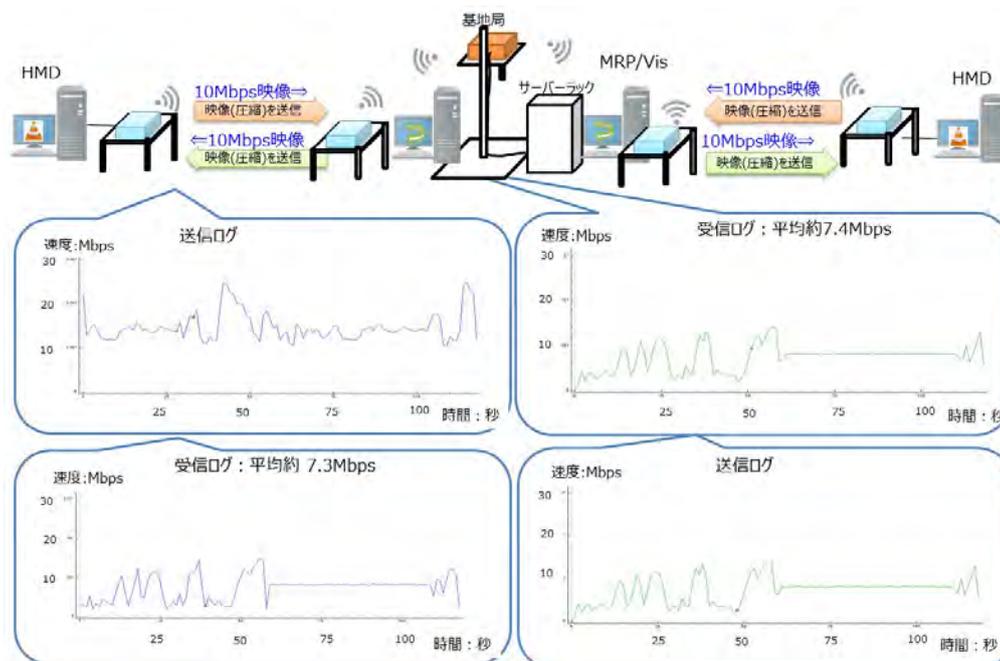


図 4-198 28GHz 帯 2 セット同時使用 ループバック 10Mbps 速度ログ-1

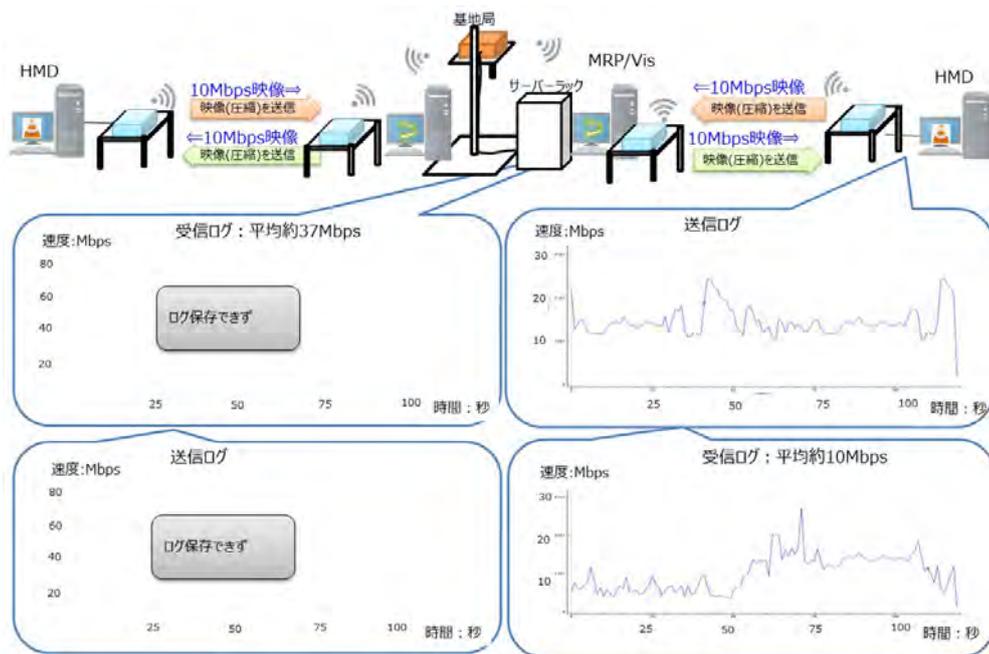


図 4-199 28GHz 帯 2セット同時使用 ループバック 10Mbps 速度ログ-2

f) 測定結果ログ : 28GHz 帯-②2セット同時使用-4 (遅延時間)

以下に 28GHz 帯における 2セット同時使用の際、ループバック 10Mbps の映像転送をした時の遅延時間の結果を示す。

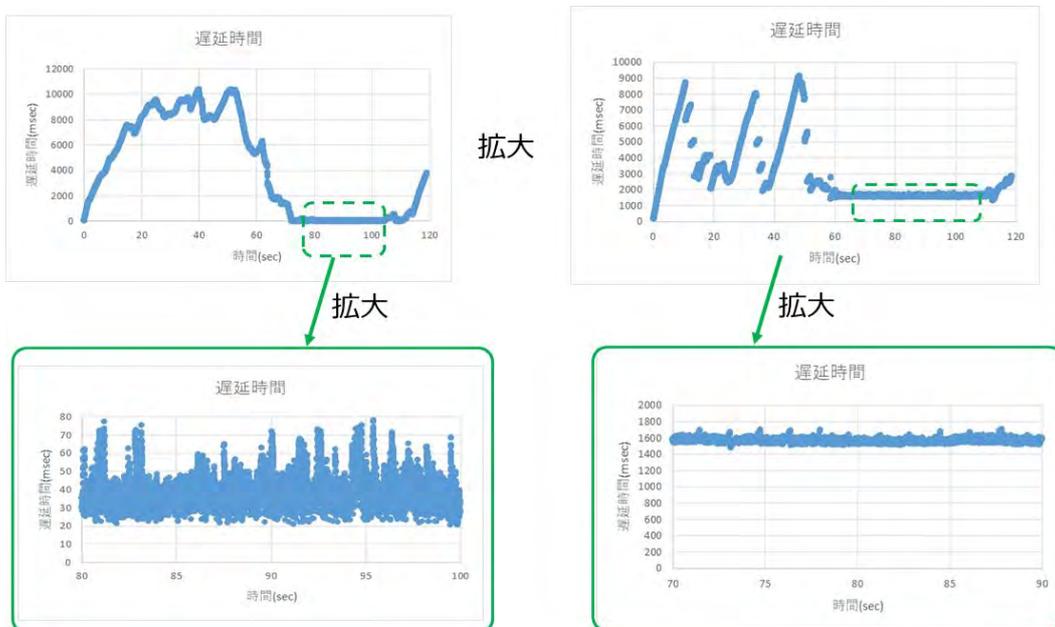


図 4-200 28GHz 帯 2セット同時使用 ループバック 10Mbps 遅延時間

1セット目

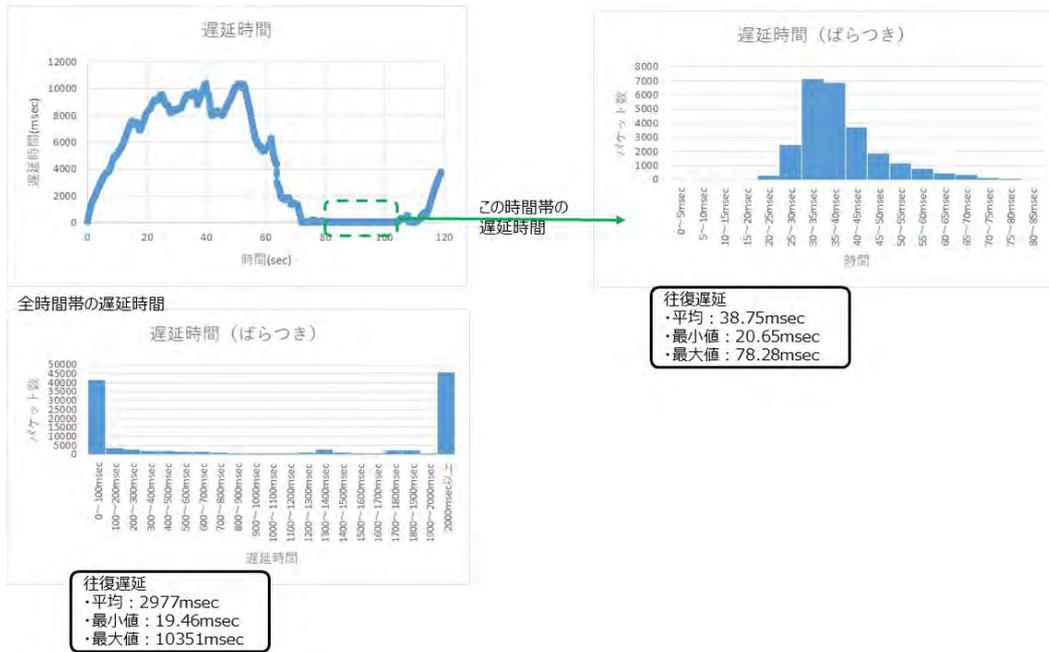


図 4-201 28GHz 帯 2セット同時使用 ループバック 10Mbps 1セット目遅延時間

2セット目

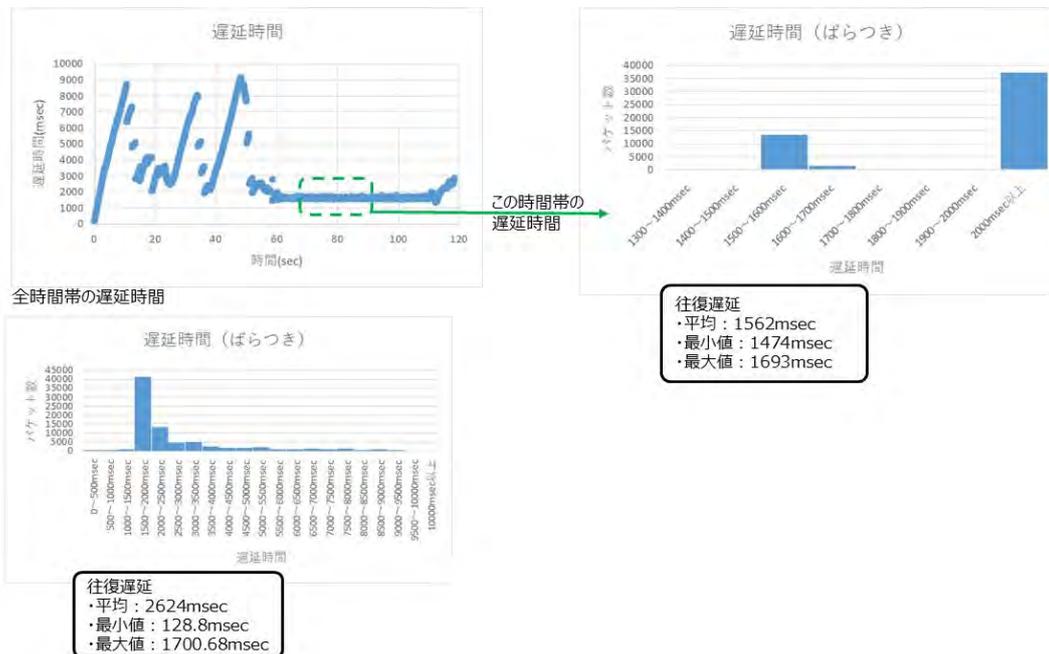


図 4-202 28GHz 帯 2セット同時使用 ループバック 10Mbps 2セット目遅延時間

■28GHz（基地局－サーバ間無線）②2セット同時使用時のアプリケーション観点からの分析

- ・ 実効速度：
 

基地局－サーバ間が無線の時、上り／下りともに約 14Mbps となり、目標値（上り 550Mbps、下り 350Mbps）を満たせていないため、ローカル 5G 側で上りの実効速度を増加させる対策が必要である。2セット同時使用時と同様、複数ローカル 5G 無線端末を使用すると、通信の実効速度が著しく低下するため、通信を安定させるようなローカル 5G 側での対策が必要である。
- ・ 遅延時間：
 

実効速度の上限に達する等通信が不安定になると遅延が大きくなるため、通信不安定時でもローカル 5G 側で遅延時間を一定にする対策が必要である

(3) 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯検証結果まとめ

1) 実効速度

前述で記載した内容とおり、MR システムの要求実効速度の目標値を HMD 1 台あたり以下とした。

- ・ 上り：約 550Mbps
- ・ 下り：約 350Mbps

工場環境下のローカル 5 Gにおけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性の実効速度測定結果を以下に示す。

■通常条件下（端末固定／障害物無し）

表 4-68 通常条件下の実効速度測定結果

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯	本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯
上り（平均）	70Mbps	97Mbps
下り（平均）	61Mbps	509Mbps

■端末移動時

表 4-69 端末移動時のスループット測定結果

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯	本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯
上り（平均）	28Mbps	20Mbps
下り（平均）	35Mbps	472Mbps

■人体障害物

表 4-70 人体障害物がある時のスループット測定結果

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯	本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯
上り (平均)	25 Mbps	17Mbps
下り (平均)	25 Mbps	475Mbps

■金属障害物

表 4-71 金属障害物がある時のスループット測定結果

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯	本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯
上り (平均)	11Mbps	53Mbps(100Mbps 映像転送)
下り (平均)	13Mbps	109Mbps(100Mbps 映像転送)

■2 セット同時使用時

表 4-72 2 セット同時使用時のスループット測定結果

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯	本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯
上り (平均)	70Mbps(1 セット目)	16Mbps(1 セット目)
	70Mbps(2 セット目)	47Mbps(2 セット目)
下り (平均)	61Mbps(1 セット目)	465Mbps(1 セット目)
	61Mbps(2 セット目)	255Mbps(2 セット目)

2) 遅延時間

工場環境下のローカル 5 Gにおけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性の遅延時間測定結果を以下に示す。以下の時間はローカル 5 Gそのものの時間ではなく、ルータ等の Ethernet および折り返す PC の処理も含めた時間である。

表 4-73 4.7GHz 帯、28GHz 帯の遅延時間

	本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯		本実証で使用した基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯	
	基地局-サーバ有線	基地局-サーバ無線	基地局-サーバ有線	基地局-サーバ無線
遅延時間 (往復) 平均	7.51msec	12.9msec	18.63msec	38.75msec (2 セット時)

ただし、送信データ>通信スループットの時、遅延時間は大幅に増加する。

### 3) 圧縮伸長

H.265 を低遅延で圧縮、伸長可能なハードウェアを調査し、圧縮・伸長に必要な時間を調査した結果を以下に示す。

表 4-74 圧縮伸長にかかる時間

	圧縮・伸長時間
ハードウェア処理	14msec

#### 4.6.4 考察

##### 4.6.4.1 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯を用いたローカル 5 G システム

(ア) 目標実効速度 (HMD MREAL S1 使用時)

HMD MREAL S1 を使用した時、圧縮前のデータ量、圧縮後のデータ量、および計測結果から適用の可能について以下に示す。

表 4-75 MREAL S1 使用時

通信の方向	データ種別	特徴	データ量 (無圧縮)	圧縮後	28GHz 帯	4.7GHz 帯
HMD→プレイヤー	撮像映像/位置検出映像	4800 × 1984 (撮像映像) 1280 × 800 (位置検出映像)	約 16.7Gbps	550Mbps	×	×
プレイヤー→HMD	表示映像	3200 × 1200 (表示映像)	約 5.5Gbps	183Mbps	○	×

実効速度の目標として、上り約 550Mbps、下り約 350Mbps としている。一方、4.6.3 検証結果に記載した計測結果から、現在のローカル 5 G の技術をそのまま MR システムへの適用を考えると、本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯の適用は困難である。本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯については、下りは目標を達成しているが、上りは目標を達成していない。上りの実効速度については、上りと下りの実効速度の割合を変更し、上りの割り当てを増やすことで、目標実効速度を達成できることが見込まれる。移動時や障害物があった場合、上りの実効速度が低下する。これは利用環境の電波状況を改善 (例：基地局と端末間の見通しを確保) することで将来は解決する可能性がある。

現在の実効速度で MR システムの無線を成り立たせる方法の一つとして、MR システム (HMD) の解像度を下げる、もしくはフレームレートを下げることが考えられる。しかし、解像度やフレームレートの低下は MR システムのスペックを低下させ、使用者の満足度の低下や、ユースケースの削減につながるため、安易に下げることが困難である。

MREAL S1 より高解像度の HMD MD-20 を使用した時、圧縮前のデータ量、圧縮後のデータ量、および計測結果から適用の可能について以下に示す。

表 4-76 MREAL S1 使用時

通信の方向	データ種別	特徴	データ量 (無圧縮)	圧縮後	28GHz 帯	4.7GHz 帯
HMD→ プレーヤー	撮像映像/ 位置検出 映像	5120 × 2048 (撮像映像) 1024 × 1280 (位置検出映像)	約 17Gbps	550Mbps	×	×
プレーヤー → HMD	表示映像	5120 × 1600 (表示映像)	約 11Gbps	350Mbps	○	×

高解像度 HMD(MD-20)を使用時の実効速度の目標は上記スペックとなり、上り約 550Mbps、下り約 350Mbps となる。一方、4.6.3 検証結果に記載した計測結果から、現在のローカル 5 G の技術をそのまま MR システムへの適用を考えると、HMD S1 使用時同様、本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯の適用は困難である。28GHz 帯については、下りは目標を達成しているが、上りは目標を達成していない。

(イ) 測定結果の実効速度を元に、必要となる映像圧縮伸長実現性

工場環境下のローカル 5 G におけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性で得られた結果から、この通信特性を MR システムに適用した時に必要となる圧縮率を以下に示す。前提にした実効速度は端末固定かつ障害物等がない環境下での平均実効速度と、MR 使用時を想定し、移動時/もしくは人体障害物の条件下で最も低い平均値の両方をベースに計算した。

表 4-77 4.7GHz 帯 (MREAL S1 使用時)

条件	上り/下り	実効速度	データ量	必要な圧縮率	実現性
理想的な環境	上り	70Mbps	約 16.7Gbps	1/240	×
	下り	61Mbps	約 5.5Gbps	1/90	△
MR 使用時想定時	上り	25Mbps	約 16.7Gbps	1/670	×
	下り	25Mbps	約 5.5Gbps	1/220	×

表 4-78 28GHz 帯 (MREAL S1 使用時)

条件	上り/下り	実効速度	データ量	必要な圧縮率	実現性
理想的な環境	上り	97Mbps	約 16.7Gbps	1/172	×
	下り	509Mbps	約 5.5Gbps	1/11	○
MR 使用時 想定時	上り	17Mbps	約 16.7Gbps	1/980	×
	下り	472Mbps	約 5.5Gbps	1/12	○

■MR 使用時を想定した場合

本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯を用いる場合は、上りは 1/670 まで映像を圧縮する必要がある。この映像サイズまで圧縮すると MR システムに多大な影響があり適用は困難である。もしくは、この実効速度で成り立つように抜本的に MR システムを見直す必要がある。ただし抜本的に MR システムを見直すと、ユーザが使える MR システムとして成り立たない可能性がある。(例：HMD 側が重く大きくなる、遅延が増える等)

本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯を用いる場合、上りは 1/980 まで映像を圧縮する必要がある。本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯、同様 MR システムに多大な影響があり適用は困難である。

工場環境下のローカル 5 G におけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性で得られた結果から、MREAL S1 より高解像度の MD-20 を使用した時に必要となる圧縮率を以下に示す。前提にした実効速度は端末固定かつ障害物等がない環境下での平均実効速度と、MR 使用時を想定し、移動時/もしくは人体障害物の条件下で最も低い平均値の両方をベースに計算した。

表 4-79 4.7GHz 帯 (高解像度 HMD MD-20 使用時)

条件	上り/下り	実効速度	データ量	必要な圧縮率	実現性
理想的な環境	上り	70Mbps	約 17Gbps	1/243	×
	下り	61Mbps	約 11Gbps	1/180	×
MR 使用時 想定時	上り	25Mbps	約 17Gbps	1/680	×
	下り	25Mbps	約 11Gbps	1/440	×

表 4-80 28GHz 帯 (高解像度 HMD MD-20 使用時)

条件	上り/下り	実効速度	データ量	必要な圧縮率	実現性
理想的な環境	上り	97Mbps	約 17Gbps	1/175	×
	下り	509Mbps	約 11Gbps	1/21	○
MR 使用時 想定時	上り	17Mbps	約 17Gbps	1/1000	×
	下り	472Mbps	約 11Gbps	1/24	○

#### ■高解像度 HMD MD-20 を想定した場合

MREAL S1 を想定した時同様、本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯を用いる場合は MR システムに多大な影響があるところまで映像を圧縮する必要があり困難である。

実効速度の観点から、本実証で使用したエイビット社製の 4.7GHz 帯の使用はかなり困難であり、本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯の方が上りに実効速度を割り当てられる可能性があるため、将来的に MR システムへの適用可能性が高い。そのため、機能検証の考察について、以降は 28GHz 帯を前提に記載する。

#### (ウ) 遅延時間

工場環境下のローカル 5 Gにおけるエンドツーエンドのアプリケーション通信特性で得られた遅延時間結果から目標を満たしているか以下に示す。

表 4-81 遅延時間

ローカル 5 G回線	目標	遅延時間	実現性
28GHz 帯	17msec 以下	安定時 18.63msec	△
		不安定時 954.7msec	×
4.7GHz 帯	17msec 以下	安定時 7.51msec	○
		不安定時 100.5msec	×

基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯、エイビット社製の 4.7GHz 帯どちらも伝送が安定している時は概ね遅延時間の目標を目標達成しているが、実効速度以上の速度で伝送する等伝送が不安定な状態になると目標値に届かないことがある。ローカル 5 G側では、さらなる伝送遅延の縮小、および、通信不安定時でも遅延時間の安定化が必要になる。

#### 4.6.4.2 PC/基地局間のインターフェース

「4.6.3 検証結果」に記載した通り、基地局とサーバ間は有線モデルの方が遅延に有利である。つまり基地局とサーバ間は有線にした方が、MR システムにローカル 5G を適用した場合に増加する遅延時間は短くなる。また基地局とサーバ間は有線モデルの方が効率的に電波を使用できる。ただし、基地局とサーバ間はイーサネット接続しており、基地局とサーバ間が複雑なネットワーク環境になると、遅延が増加する可能性が考えられるため、ネットワーク構築時に遅延を増加させないネットワーク構築が必要である。以下に各項目の星取表を記載する。

表 4-82 基地局－サーバ有線／無線の星取表

	基地局－サーバ有線	基地局－サーバ間無線
遅延（絶対値）	○	×
コスト	○	△
配置の柔軟性	△	○
電波使用率	○	△
同時使用数	○	△or×

上記星取表をもとにローカル5GをMRシステムに適用した時のシステム構成を以下に示す。

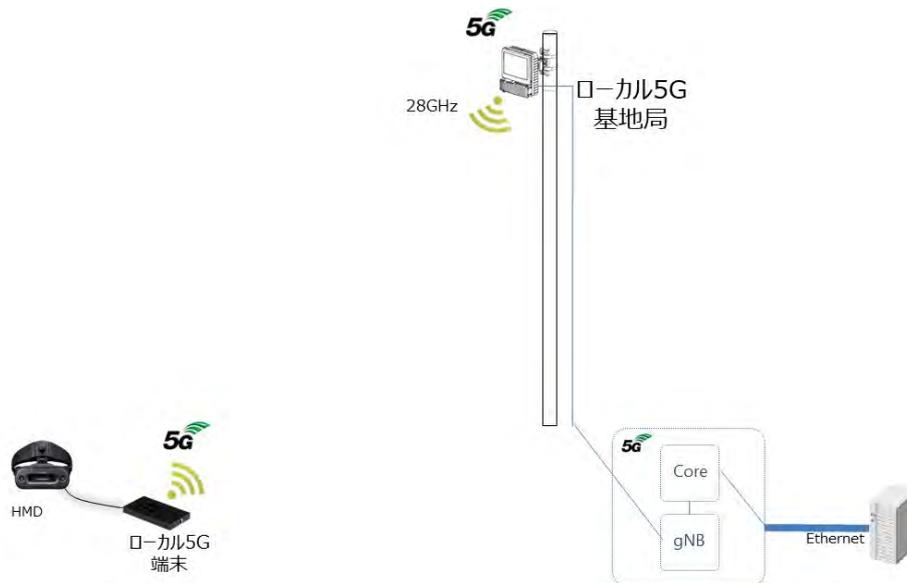


図 4-203 PC/基地局間のインターフェース

#### 4.6.4.3 MR 技術の利用に係る固有の課題

##### (1) 増加する遅延時間の影響項目、範囲（論文調査）

本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯を使用時、現在の MR システムと比べて、46.63msec 遅延が増加する（内訳：無線区間 18.63msec、圧縮伸長 28msec）。遅延が増加すると、操作性／快適性（酔い）に影響があると考えられる。遅延と操作性／快適性（酔い）の関係について文献を調査したところ、以下のような内容が過去の研究で明らかになっている。

##### 1) 遅延と快適性（酔い）の関係

- 文献(1)によると、遅延が 48msec の時と、300msec の時でも遅延の長さが固定されている場合は、同程度の酔いが発生する。
- 文献(2)によると、遅延の絶対時間と酔いの関係は少なく、遅延時間の揺れ（短い時間／長い時間）の方が影響は大きい。

- 文献(3)によると、遅延の絶対時間と酔いの関係は少ない。

## 2) 遅延と操作性

- 文献(4)によると、遅延は短い方がよく、24.3msec 以下の遅延であれば影響しない。

### 参考文献

- (1) Draper, M.H. Viire, E.S. Furness, T.A. Gawron : 「Effects of image scale and system time delay on simulator sickness with head-coupled virtual environments」, Human Factors, 43(1),129-146,2001
- (2) Matthew E. St Pierre,他: 「The effects of 0.2 Hz varying latency with 20–100 ms varying amplitude on simulator sickness in a helmet mounted display.」, Elsevier,2014
- (3) Jason D. Moss, 他 : 「The effects of display delay on simulator sickness.」 Elsevier,2011
- (4) 門脇 拓也、他 : 「身体感覚と視覚情報にずれが生じる没入環境における低遅延な映像のユーザへの影響」、TVRSJ Vol24 No.1 pp.23-30、2019

## (2) 今後の施策

上記文献の情報から、操作性に関してはローカル 5G を適用して無線にしたことによってシステム全体の遅延の増加を可能な限り抑えることで、有線モデルと無線モデルで操作の違いを感じさせるのを小さくすることが可能となる。既に遅延のあるシステムから、さらに遅延が増えた場合の許容値について参考になる文献はなかったため、今後の検討が必要と考える。

快適性(酔い)については、遅延時間より遅延のゆらぎの影響が大きい。そのためフレーム毎の遅延時間を常に一定に制御することが重要であると考え。本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯で通信が安定している時の遅延は 18.63msec であり、圧縮/伸長にかかる時間は 14msec であった。したがって、圧縮/伸長、および無線通信の遅延(往復)を 46.63msec (18.63msec +28msec) で一定にすることが必要である。

### ・遅延時間の増加、変動

「送信データ > 通信の実効速度」の時や、ハンドオーバー時、2セット同時使用時、障害物がある時などの条件下では本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯では遅延時間は大幅に増加したり、変動したりすることが分かった。ローカル 5G 側で上記条件の時も遅延時間が増えなく、遅延時間の変動も一定以内に抑える仕組みが必要である。

#### 4.6.4.4 システムを構成する要素毎に必要な機能

##### (1) 圧縮・伸長に係る時間と実現方法

映像の圧縮・伸長時にはその方式によって遅延の大きさが異なる。H264 や H265 等の圧縮方式においては通常フレーム間圧縮を行うので、フレーム間のデータを比較する為にバッファに蓄積するので、その分遅延が生じる。映像のフレームレートを 60fps とすると 1 フレームの蓄積により 16msec の遅延が生じる。無線 MR システムにおいては、上り映像、下り映像それぞれ圧縮・伸長を行う必要がある、すべての段階で 1 フレーム分遅延すると  $16\text{msec} \times 4 = 64\text{msec}$  の遅延が生じ、許容できない。よって圧縮方式としては、フレームバッファを使用しない方式、例えば Motion Jpeg や H264/H265 の I フレームのみによる圧縮等が必要となる。フレーム間圧縮を行わない場合、行う場合に比べて同等の圧縮率の場合に画質が劣るので、圧縮率を上げる事が難しいという課題がある。

遅延を短くする必要があるため、ローカル 5G 通信は、Ethernet の UDP のような通信が望ましい。信頼性は少し低下するためローカル 5G の無線通信区間でパケットロスが発生する。ローカル 5G の無線通信区間でパケットが欠損した場合、フレーム内で映像を圧縮するため該当のフレームが正常に表示できない。この時、ユーザにはフレームレートが低下したように感じる。

##### (2) HMD 側のアンテナ配置

本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯の障害物条件の測定結果から、HMD（端末）側のアンテナと、基地局との間には障害物のない方が通信は安定している。HMD（端末）側と基地局の間に設備等の金属障害物があった場合は、実効速度が低下する。そのため、頭部等にアンテナを配置するような構成がよいと考える。もしくは多少の障害物があっても実効速度が低下しないような反射波／マルチパスでの通信が可能なようにローカル 5G 側の対応が必要である。

##### (3) 基地局設定場所

本実証で使用した、基地局ノキア社製、端末シャープ社製の 28GHz 帯の障害物条件の測定結果から、HMD（端末）側のアンテナと、基地局との間には障害物のない方が通信は安定している。HMD（端末）側と基地局の間に設備等の金属障害物があった場合は、実効速度が低下する。そのため、なるべく高く見通しのよい場所に基地局を配置し、基地局と端末の間には障害物な無いような構成がよいと考える。もしくは少しの障害物があっても実効速度が低下しないような反射波／マルチパスでの通信が可能なようにローカル 5G 側の対応が必要である。

## 4.7 まとめ

課題実証を通じて、製造現場における課題解決システムの有効性を確認できた。将来的に技術課題の解決によって更なる MR システムの利活用促進が期待できる。

MR システムの利用者・運用者については、本実証のバックパック方式により工場現場での MR 活用の安全、検討品質が向上することが明らかになったが、システム構成等の影響を受けた。利用者視点では、バックパックの小型化を狙ったものの、バックパック（周辺機器、バッテリー）のサイズが大きく重く（13kg）なり、当社安全基準値を超えた。運用者視点では、バックパック方式では、一人作業ができず補助者が必要となった。遠隔作業支援においては、熟練技術者が遠隔から確認作業の支援が行えるようになり、検討品質が向上した。一方で、遅延・コマ落ち等、映像品質が落ちることがあり、無線通信の不安定さについては改善を要する。

MR システムについては、完全無線化に向けた機能要件を明確化できた。一方で、技術課題も明らかとなった。バックパック方式の技術課題としては、高性能 PC の小型化、低消費電力化が求められる。また、完全無線化の技術課題としては、無線通信で必要となる処理の確立（パケットロス、遅延変動の対応）、高圧縮の圧縮伸長技術と高速処理技術の確立、HMD と 5G ユニットの一体化、HMD の低消費電力化が求められる。

ローカル 5G については、工場現場での MR システムの利活用促進に向けて、更なる性能向上が求められることが明らかになった。機能検証の測定結果から今後 MR システムを活用するためには、上り速度の向上が必要となる。また、遠隔支援者がストレスなく業務を指導するためには、更なるローカル 5G 低遅延化及び通信の安定化も必要となる。さらに、工場現場で MR システムの利活用を促進するためには、ローカル 5G 端末の小型化及び低消費電力化も必要である。

## 5. ローカル 5G の性能評価等の技術実証

### 5.1 前提条件

#### 5.1.1 概要

本調査検討の技術実証では、貞宝第 1 工場に構築するローカル 5 G の実証環境を用いて、工場環境での 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯の電波伝搬特性の解明と MR システムにおける映像伝送を想定したローカル 5 G の性能評価を行った。

また、ローカル 5 G による MR システムの実装及び他の地域で利用する場合に有益な知見を得ることを念頭に、ITU 及び 3GPP における 5 G の標準化に関する検討状況並びに情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会におけるローカル 5 G に関する検討状況を踏まえて技術実証を実施した。

具体的には、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会のローカル 5 G 検討作業班にてローカル 5 G の非同期運用の実現に向けた検討<sup>xiv</sup>が進んでおり、この検討状況を踏まえ、アプリケーション要件を踏まえた準同期運用の拡張について検討を進めた。

なお、技術実証の実施においては、既存の無線システムに影響を与えないよう、事前の調査及び干渉調整を実施、並びに必要な測定機器や環境を準備して検証に臨んだ。

事前の調査については、貞宝工場にて利用している構内無線等の使用状況を確認し、本開発実証にて構築を予定しているローカル 5 G の電波周波数帯近隣の周波数利用がないことを確認した。干渉調整につきましては、免許申請にあたり東海総合通信局と相談し全国キャリア、全国 BWA 事業者、CATV 事業者と干渉調整を実施した。(干渉調整の詳細については、「1.5 免許申請の概要」を参照)

必要な測定機器や環境については、コンソーシアム内のインテグレータであるネットワークシステムズ株式会社にて、測定器のエリアテスタ、伝送スループット、伝送遅延測定サーバ・クライアントを準備して、検証に臨んだ。

#### 5.1.2 対象とするユースケース

##### 5.1.2.1 技術実証の対象とするユースケース

課題解決システムの技術実証にあたり、以下、2 つの方式で実施する。

- ① バックパック方式を用いた実務ユースケースに基づく実証（完全無線化が実現した場合を想定）

---

<sup>xiv</sup> [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000688562.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000688562.pdf)

情報通信審議会 情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会ローカル 5 G 検討作業班  
(第 15 回) 資料 15-3 委員会報告書概要 (案) (令和 3 年 3 月 25 日 (木) 取得)

- ② 目指す姿（ローカル 5G を用いた完全無線化）の実現に向けた疑似 HMD 方式による事前技術検証



図 5-1 対象とするユースケース

課題実証システム（ローカル 5G による MR システム）の最終目標は、工場内で MR システムを利用しながら移動して生産設備検証を行う等のため、HMD と映像合成処理 PC 間の光ファイバーケーブルの完全無線化にあるが、短期的に開発が難しいため、現時点で実現可能なバックパック方式により、完全無線化が実現した場合を想定し業務ユースケースに基づく実証を行うこととしている。

工場内のローカル 5G の電波伝搬検証など技術実証においては、①バックパック方式、②目指す姿を対象ユースケースとして技術実証を行う。

### 5.1.2.2 ユースケースに基づく性能要件の基本的な考え方

①バックパック方式、②目指す姿の実現に向けた疑似 HMD 方式、それぞれの通信性能要件があるが、性能要件の基本的な考え方としては、以下があげられる。

#### ① バックパック方式

バックパック方式におけるアプリケーション通信は、3DCG データをシーンサーバからプレーヤーへダウンロードする通信（ダウンリンク）と、HMD 表示映像をプレーヤーからタブレットプレーヤーに送信する通信（アップリンク）がある。

性能要件の基本的な考え方としては、3DCG データのダウンロードについては、送信される 3DCG データが一定時間内に欠損なく受信できることとなる。HMD 表示映像の送信については、HMD 表示映像が一定の品質で遅延なくタブレットプレーヤーで受信できることである。

#### ② 目指す姿の実現に向けた疑似 HMD 方式

目指す姿の実現に向けた疑似 HMD 方式におけるアプリケーション通信は、HMD の外側にあるカメラで撮影する HMD 撮像映像を PC へ送信する通信（アップリンク）と、PC で 3DCG と映像合成された MR 映像を HMD へ送信する通信（ダウンリンク）がある。

性能要件の基本的な考え方としては、HMD 撮像映像のアップロードについては、HMD 撮像映像が一定の品質で遅延なく PC で受信できることとなる。また、3DCG 合成後の MR

映像のダウンロードについても、一定の品質で遅延なく HMD で受信できることである。

#### 実証環境

本技術実証の実証環境の、以下 3 点について示す。

- ・ ネットワーク・システム構成
- ・ 設置環境（アンテナ高、装置の設置場所等）
- ・ 計測などの評価・試験環境構成

#### 5.1.2.3 ネットワーク・システム構成

貞宝工場内での MR システム利用の開発実証であり、他のシステムとのネットワーク接続の要件はないため、クローズドなネットワーク・システム構成とした。

具体的なネットワーク・システム構成については、「1.3. 実証環境」に詳細を記載している。

#### 5.1.2.4 設置環境（アンテナ高、装置の設置場所等）

技術実証を実施するに当たり、ローカル 5G の環境を構築し、無線局の免許取得を行った。クローズドなネットワーク環境とし、必要な機器は全て貞宝第 1 工場内に設置した。機器設置に当たっては、工場現場の設備設置状況や工場内のレイアウト変更予定、ローカル 5G の開発実証の実施内容などを考慮し、現地調査、現地調整を経て、決定した。

基地局や通信機器の設置環境の詳細については、「3.1.2 機器設置場所」を参照。

基地局設置のアンテナ高は、以下の通り。

表 5-1 基地局設置のアンテナ高

設置位置	基地局	アンテナ高
アンテナ支柱 A	4.7GHz 帯基地局 エイビット AU-500-gNB	3.43m
アンテナ支柱 A	28GHz 帯基地局 ノキア AWEUA	3.905m
アンテナ支柱 B	28GHz 帯基地局 ノキア AWEUA	3.87m

#### 5.1.2.5 計測などの評価・試験環境構成

- ・ 計測などの評価・試験環境構成について

各測定地点において、測定器で受信電力を測定、UE でのログ取得により UE 上での測定を実施し、PC 間の iPerf を用いてアップリンクとダウンリンクの伝送スループットについて評価を行った。また、Ping を用いて往復遅延時間を測定する。

受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定システム構成及び測定方法について以下に示す。

【測定システム構成】

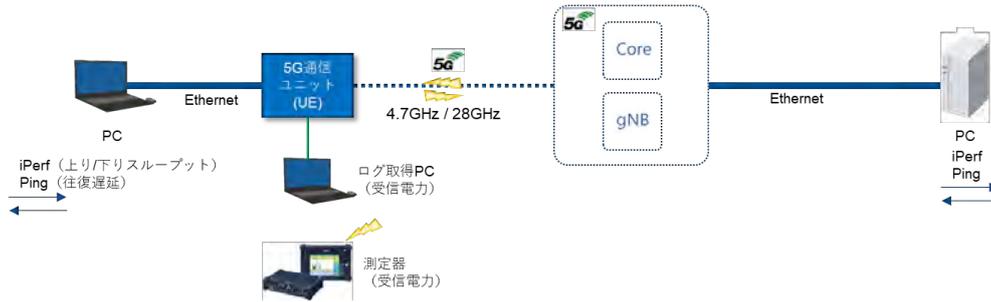


図 5-2 受信電力/伝送スループット/伝送遅延時間の測定システム構成

測定システムとして使用した機器については、以下の通り。

表 5-2 測定システム及び使用機器一覧

測定対象	使用機器
受信電力	アンリツ製 エリアテスタ ML8780A  ※sub6、mmWave モジュール・アンテナ搭載
伝送スループット	iPerf サーバ : Dell PowerEdge R630 E5-2620v4(2.1GHz 8core) * 2 128GB(16G×8)メモリ オンボード NIC:10G-SR(X520) * 2 + 1G(I350) * 2 PCIe NIC:10G-SR(X520) * 2 Linux CentOS 8  iPerf クライアント : Lenovo X240s Intel Core i5-4200U 1.6GHz 2 コア 8GB メモリ パッファロー製 2.5Gbps USB-NIC (LUA-U3-A2G) 使用 Linux CentOS 8 
伝送遅延時間	伝送スループット測定の使用機器を用いて、Ping にて復遅延時間(msec)を測定する。
UE ログ取得 PC	ノート PC Dell Latitude 5501 GeForce CPU : Core i7 -9850H メモリ : 16GB OS : Windows 10 pro 64 bit

出所) 表中の写真はメーカーサイトより引用

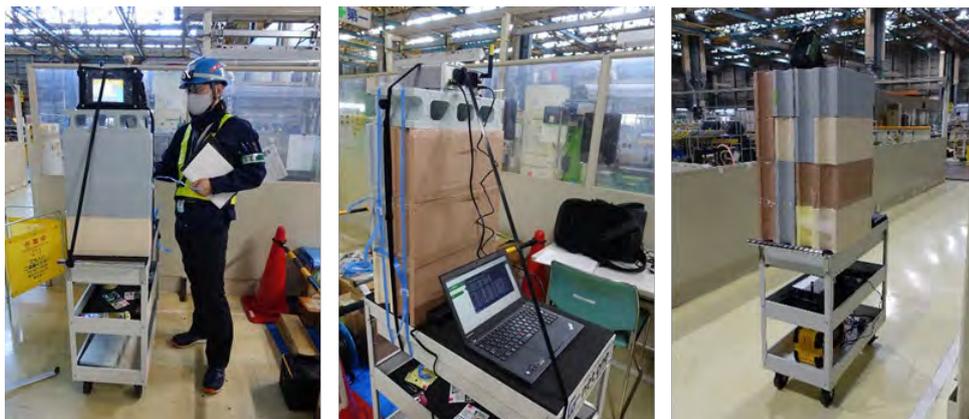


図 5-3 測定時の様子

ユースケースである MR システム利用を想定し、端末のアンテナ高を、人の肩～頭部の高さになるように、発泡ブロックを用いて高さ調整を行った。  
また、工場内の測定ポイントを効率的に回るため、ワゴンに測定器、端末を固定させ、測定環境を構成した。

- ワゴンの仕様：

ツールワゴン 引出付き 段数 天地 3 段 ホワイト、M3012X、1 台

外形寸法(幅 W×奥行 D×高さ H)(mm)：736×382×805(ハンドル含まず)

質量(kg)：19

材質(本体)：スチール



図 5-4 ワゴン

出所) メーカーサイトより引用

- 発泡ブロックの仕様：

外形寸法(幅 W×奥行 D×高さ H)(mm)：390×190×100(ハンドル含まず)

発泡スチロール製

- 端末のアンテナ高：

エリアテスタ アンテナ高：1.7m

4.7GHz 帯 エイビット AU-500-UE アンテナ高：1.58m

28GHz 帯 シャープ 5G ルータ アンテナ高：1.66m

### 5.1.2.6 測定ポイント

本技術実証は、貞宝第1工場内の評価エリア内で測定ポイントを定めた。

測定ポイントを選定した基準・手順は、以下とした。

<基準>

- ・ 技術実証による測定作業が、業務への影響を最小限となるようにする

<選定手順>

- ・ 基地局アンテナを中心に10m間隔で図面上に測定ポイントを仮設定
- ・ 仮設定したポイントが、工場内の歩行帯(通路)及び、立ち入り許可エリアであれば、そのポイントを測定ポイントとして確定
- ・ 仮設定したポイントが、立ち入り不可のエリアの場合は、近い工場内の歩行帯(通路)及び、立ち入り許可エリア内に測定ポイントを確定させた。
- ・ 測定ポイントについては、工場内床にマーキングを行った。

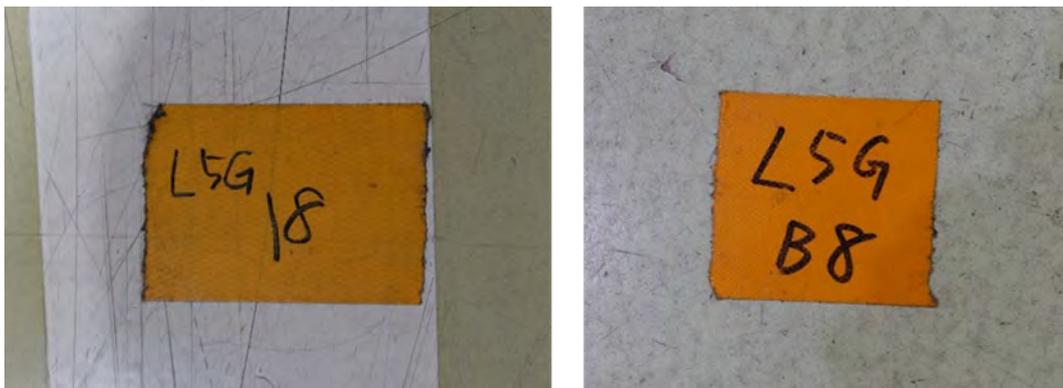


図 5-5 工場内床マーキング

#### (1) 工場内評価エリア A

想定利用エリアを中心にカバーエリアを設計、性能評価の測定ポイントを、アンテナ支柱を中心に10m間隔のマトリクスに置き、測定を実施した。

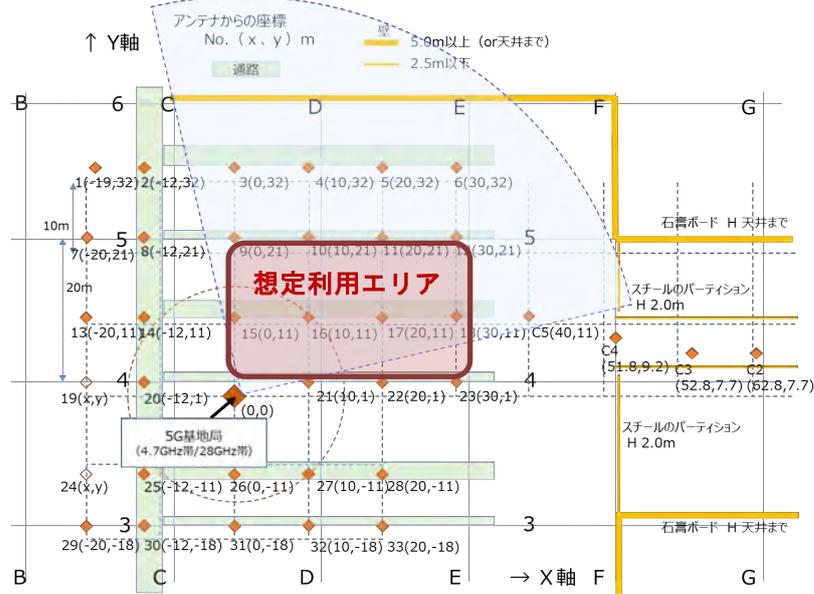


図 5-6 工場内評価エリア A

(2) 工場内評価エリア B

想定利用エリアを中心にカバーエリアを設計、性能評価の測定ポイントを、アンテナ支柱を中心に 10m 間隔のマトリクスに置き、測定を実施した。

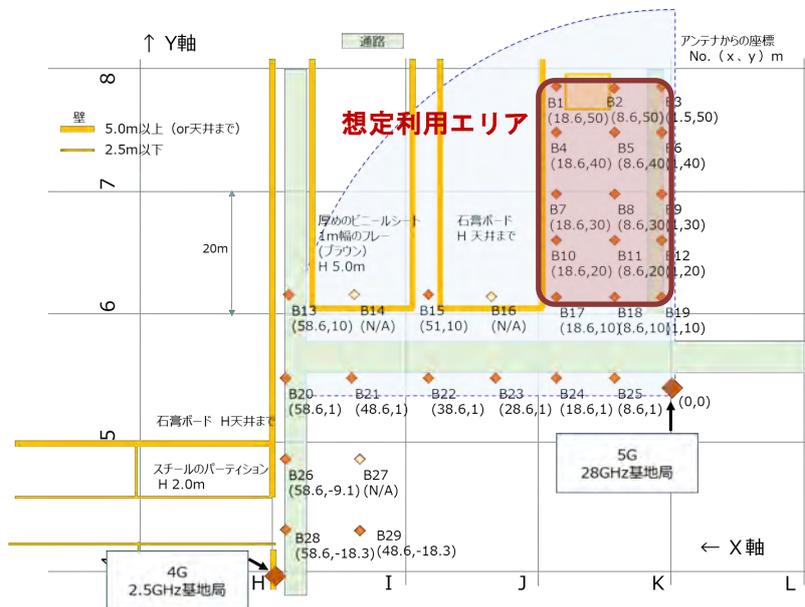


図 5-7 工場内評価エリア B

5.1.3 基本的な諸元

本技術実証に使用する環境や機器の基本的な諸元について、以下に示す。なお詳細は、「3. 実証環境」を参照。

### 5.1.3.1 使用周波数帯

本技術実証において、ローカル5Gで拡張周波数帯として制度化予定の4.7GHz帯および28GHz帯を使用する。また、28GHz帯のアンカーバンドとして、自営BWAの2.5GHz帯も使用する。

表 5-3 使用周波数帯

使用周波数帯	中心周波数
4.7GHz帯	4800MHz 1波
28GHz帯	28.74672GHz、28.84608GHz、28.94544GHz、29.04480GHz 4波
2.5GHz帯	2585MHz 1波

### 5.1.3.2 屋内外環境

本技術実証における、屋内外の環境について、「2. 実証地域」にて詳細を説明している。

なお、今回実施した貞宝第1工場は、生産設備組立工場エリアと金型工場エリアがあり、国内製造業の他の工場と類似性があると考えており、本技術実証の結果や得られた知見は、他の工場においても参考となると考える。

### 5.1.3.3 遮蔽物・反射物の概要

貞宝工場内には、鉄製の柱・ダクトが多数あり、天井にはホイストクレーンが設置されており、遮蔽物・反射物となっている。

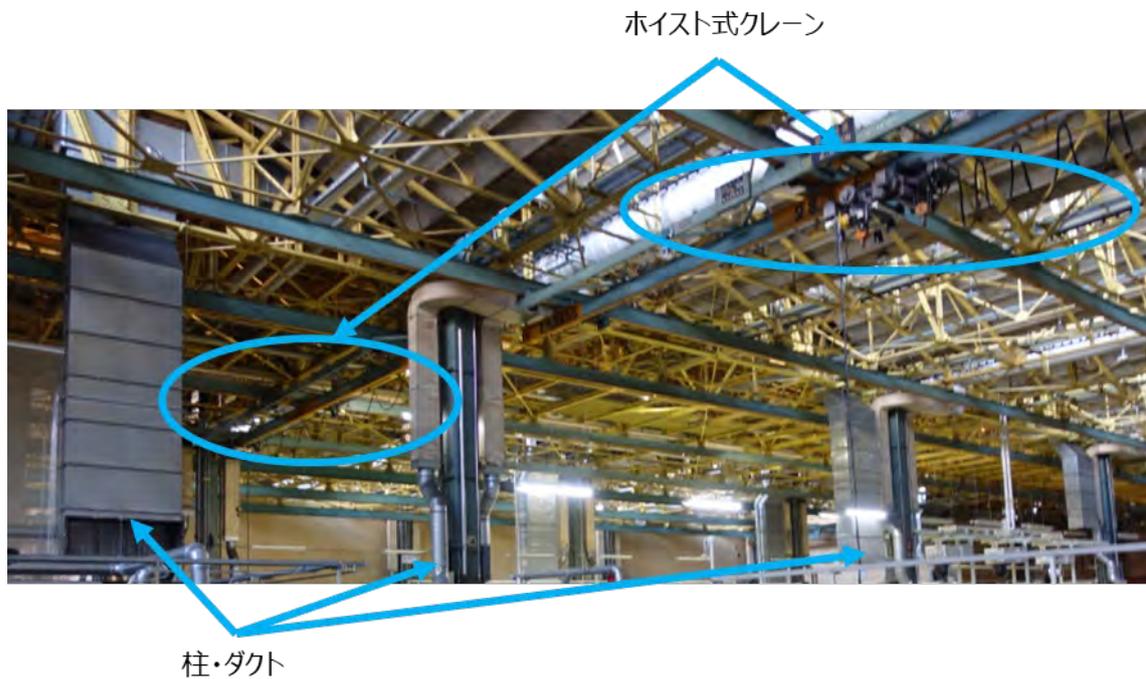


図 5-8 工場内遮蔽物・反射物の例（写真）

表 5-4 工場内遮蔽物・反射物の例（詳細）

	形状	大きさ	材質	静止・移動
工場内柱	四角柱	0.4 メートル×0.4 メートル	鉄	静止
ダクト	四角柱	幅約 2 メートル× 厚さ約 1 メートル	亜鉛メッキ 鋼板	静止
ホイス式クレーン	天井設置	移動幅約 20 メートル	鉄	移動 ※天井設置の レールに従い 前後に移動
ホイス本体	天井設置	0.5 メートル角～ 0.8 メートル角	鉄	

#### 5.1.3.4 端末の台数、静止・移動環境

本技術実証における、端末の台数、静止・移動環境について、以下に示す。

##### (1) 端末の台数

表 5-5 端末の機種・台数一覧

使用機器	機種	台数
------	----	----

ローカル 5G UE	エイビット AU-500-UE (4.7GHz 帯)	2 台 ※予備機 2 台を含め計 4 台
ローカル 5G UE	シャープ 5G ルータ (28GHz 帯)	4 台
エリアテスタ	アンリツ ML8780A	1 台
エリアテスタ	PCTEL	1 台
iPerf / Ping クライアント	ノート PC Lenovo x240s	1 台 ※予備機 1 台を含め計 2 台
シャープ端末ログ取得 PC	ノート PC Dell Latitude 5501 GeForce	1 台

## (2) 静止・移動環境

エイビット AU-500-UE を除き、全ての機器がバッテリーを搭載した移動を前提とした機器となっている。一方、本技術実証を行うことができるのは、基本的に工場が稼働していない土日となり、限られた時間で効率的な実証を行う必要がある。特に測定ポイントを移動して、測定を行うため、バッテリーを搭載していないエイビット AU-500-UE を含めて、可搬型の測定用環境を作成し、実証にあたった。

具体的には、AC100V の出力が可能なモバイルバッテリー (cheero 製 CHE-110 450Wh 容量) を用いて、ワゴンに必要な機材を搭載、固定した上で、工場屋内の各種測定を実施した。

なお、各地点での測定については、原則、ワゴンを停止し機材が落下しない様にキャスターのストッパーを止めて、静止状態で実施した。

### 5.1.3.5 基地局の台数

本技術実証では、4.7GHz 帯基地局 (エイビット製 AU-500-gNB) 1 台、28GHz 帯基地局 (ノキア製 AWEUA) 2 台を使用した。詳細は、「3. 実証環境」を参照。

### 5.1.3.6 同期・非同期運用及び SA/NSA 構成

本技術実証では、以下の通り、同期・非同期運用とした。

表 5-6 周波数帯ごとの同期・非同期詳細

使用周波数帯	同期・非同期 運用	SA / NSA 構成
4.7GHz 帯	非同期運用	SA (Stand Alone) 構成
28GHz 帯	同期運用	NSA (Non-Stand Alone)構成

なお、28GHz 帯の NSA 構成のためのアンカーバンドは、自営 BWA 2.5GHz 帯基地局（ノキア製 FWHT）1 台を構築した。詳細は、「2. 実証地域」及び「3. 実証環境」を参照。

### 5.1.3.7 DU 比

本技術実証では、使用周波数帯別に、以下の DU 比とした。

表 5-7 DU 比詳細

使用周波数帯	DU 比
4.7GHz 帯	D:U = 7:8 Subcarrier Space : 30kHz dl-UL Transmission Periodicity : ms5 (5ms) nrofDownlinkSlots : 4 nrofUplinkSlots : 4 nrofDownlinkSymbols : 0 nrofUplinkSymbols : 0 ※機器としては、この他、11:4、3:12 に変更が可能
28GHz 帯	D:U=3:1 ※スペシャルスロットを除く 5GMF ローカル 5G 免許支援申請マニュアル記載の同期フレーム構成 Subcarrier Space : 120kHz dl-UL Transmission Periodicity : ms0p625 (0.625ms) nrofDownlinkSlots : 3 nrofUplinkSlots : 1 nrofDownlinkSymbols : 10 nrofUplinkSymbols : 2

### 5.1.3.8 無線区間のデータレートの理論値

本開発実証で構築するローカル 5G 環境の伝送スループットの理論値を以下に示す。

伝送スループットの理論値は、3GPP TS 38.306 User Equipment (UE) radio access capabilities<sup>xv</sup> 4.1 Supported max data rate データレート概算の算出式より、以下の通り算出した。

$$\text{data rate (in Mbps)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left( v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{\text{BW}(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right)$$

<sup>xv</sup> <https://www.3gpp.org/DynaReport/38306.htm>

3GPP TS 38.306 User Equipment (UE) radio access capabilities（令和 3 年 3 月 25 日（木）取得）

(1) 4.7GHz 帯 エイビット AU-500-gNB / エイビット AU-500-UE の場合

3GPP TS 38.306 の 4.1 Supported max data rate データレート概算の算出式より、以下のパラメータにて算出した。

無線区間 UL データレート	79.2328 Mbps (1CC)
無線区間 DL データレート	68.775 Mbps (1CC)

この数値は、無線区間のデータレートの理論値であり、上位レイヤー（例えば IP 通信）での伝送スループットとは違う点に注意である。

実際には、各プロトコルのオーバーヘッドがあるため、IP ペイロードの伝送スループットとしては、低い値となる。

表 5-8 アップリンクの値 (4.7GHz 帯)

算出式パラメータ	値	備考
J 搬送波の数	1	1CC のため
$v_{Layers}^{(j)}$ MIMO のレイヤ数	1	MIMO レイヤ数は 1
$Q_m^{(j)}$ シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
$f^{(j)}$ スケーリングファクター	1	上位レイヤから指定する係数
$R_{max}$ 最大コードレート	822/1024	3GPP TS 38.214 の表 5.1.3.1-1 <sup>xvi</sup> より MCS25 固定より算出
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ リソースブロックの最大数	133	FR1 でサブキャリアスペーシングが 30kHz のため
12	12	RB あたりのサブキャリア数 (固定)
$T_s^\mu$ OFDM シンボル持続時間	$1e-3/(14*2^\mu)$	サブキャリアスペーシングが 30kHz なので、 $\mu$ (ヌメロロジーインデックス) は 1
$OH^{(j)}$ オーバーヘッド	0.08	FR1 の UL のため

1CC 辺りの UL :

$$10^{(-6)} * (1 * 6 * 1 * 0.803 * (133 * 12 / (1e-3/(14*2^1))) * (1-0.08)) = 198.082 \text{ Mbps}$$

DU 比のシンボル数の比率を 5 スロット分で UL 分を計算すると、

10slot(5ms)の中で、上に 4slot の割り当てとなるため、

<sup>xvi</sup> <https://www.3gpp.org/DynaReport/38214.htm>

3GPP TS 38.214 Physical layer procedures for data の 5.1.3.1 Modulation order and target code rate determination (令和 3 年 3 月 25 日 (木) 取得)

$$198.082 * 4/10 = 79.2328 \text{ Mbps}$$

表 5-9 ダウンリンクの値 (4.7GHz 帯)

算出式パラメータ	値	備考
J 搬送波の数	1	1CC のため
$v_{Layers}^{(j)}$ MIMO のレイヤ数	1	MIMO レイヤ数は 1
$Q_m^{(j)}$ シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
$f^{(j)}$ スケーリングファクター	1	上位レイヤから指定する係数
$R_{max}$ 最大コードレート	822/1024	3GPP TS 38.214 の表 5.1.3.1-1 より MCS25 固定より算出
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ リソースブロックの最大数	133	FR1 でサブキャリアスペーシングが 30kHz のため
12	12	RB あたりのサブキャリア数 (固定)
$T_s^\mu$ OFDM シンボル持続時間	$1e-3/(14*2^{\mu})$	サブキャリアスペーシングが 30kHz なので、 $\mu$ (ヌメロロジーインデックス) は 1
$OH^{(j)}$ オーバーヘッド	0.14	FR1 の DL のため

1CC 辺りの UL :

$$10^{(-6)} * (1 * 6 * 1 * 0.803 * (133 * 12 / (1e-3/(14*2^1))) * (1-0.14)) = 185.1638 \text{ Mbps}$$

DU 比のシンボル数の比率を 10 スロット分で DL 分を計算すると、

10slot(5ms)の中で、下りに 3slot と 10 シンボルが割り当てられる (4 シンボルが SSB として割り当てられる為) ため、

$$185.1638 * (3+(10/14)/10) = 68.775 \text{ Mbps}$$

## (2) 28GHz 帯 ノキア WEUA / シャープ 5G ルータの場合

3GPP TS 38.306 の 4.1 Supported max data rate データレート概算の算出式より、以下のパラメータにて算出した。

無線区間 UL データレート	202.7 Mbps (1CC)
無線区間 DL データレート	2401.1 Mbps (4CC)

この数値は、無線区間のデータレートの理論値であり、上位レイヤー (例えば IP 通信) での伝送スループットとは違う点に注意である。

実際には、各プロトコルのオーバーヘッドがあるため、IP ペイロードの伝送スループットとしては、低い値となる。

表 5-10 アップリンクの値 (28GHz 帯)

算出式パラメータ	値	備考
J 搬送波の数	1	1CC のため
$v_{Layers}^{(j)}$ MIMO のレイヤ数	2	2x2 MIMO のため
$Q_m^{(j)}$ シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
$f^{(j)}$ スケーリングファクター	1	上位レイヤから指定する係数
$R_{max}$ 最大コードレート	948/1024	3GPP TS 38.214 の表 5.1.3.1-1 より適応変調方式で最もよい 64QAM のときのコードレート
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ リソースブロックの最大数	66	n257 でサブキャリアスペーシングが 120kHz のため
12	12	RB あたりのサブキャリア数 (固定)
$T_s^\mu$ OFDM シンボル持続時間	$1e-3/(14*2^3)$	サブキャリアスペーシングが 120kHz なので、 $\mu$ (ヌメロロジーインデックス) は 3
$OH^{(j)}$ オーバーヘッド	0.10	FR2 の UL のため

1CC 辺りの UL :

$$10^{(-6)} * (2 * 6 * 1 * 948/1024 * (66 * 12 / (1e-3/(14*2^3))) * (1-0.10)) = 886.9014 \text{ Mbps}$$

DU 比のシンボル数の比率を 5 スロット分で UL 分を計算すると、  
 5slot(0.625ms)の中で、上りに(1slot + 2symbol)の割り当てとなるため、  
 $886.9014 * (1 + 2/14)/5 = 202.72032 \text{ Mbps}$

表 5-11 ダウンリンクの値 (28GHz 帯)

算出式パラメータ	値	備考
J 搬送波の数	4	4CC のため
$v_{Layers}^{(j)}$ MIMO のレイヤ数	2	2x2 MIMO のため
$Q_m^{(j)}$ シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
$f^{(j)}$ スケーリングファクター	1	上位レイヤから指定する係数
$R_{max}$ 最大コードレート	948/1024	3GPP TS 38.214 の表 5.1.3.1-1 より適応変調方式で最もよい 64QAM のときのコードレート
$N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ リソースブロックの最大数	66	n257 でサブキャリアスペーシングが 120kHz のため
12	12	RB あたりのサブキャリア数 (固定)
$T_s^\mu$ OFDM シンボル持続時間	$1e-3/(14*2^3)$	サブキャリアスペーシングが

		120kHzなので、 $\mu$ （ヌメノロジーインデックス）は3
$OH^{(i)}$ オーバーヘッド	0.18	FR2 の DL のため

1CC 辺りの DL :

$$10^{(-6)} * (2 * 6 * 1 * 948/1024 * (66 * 12 / (1e-3/(14*2^3))) * (1-0.18)) = 808.066 \text{ Mbps}$$

DU 比のシンボル数の比率を 5 スロット分で計算すると、5slot(0.625ms)の中で、下り(3slot + 10symbol)となるため、 $808.066 * (3 + 10/14)/5 = 600.2776 \text{ Mbps}$

$$4CC \text{ なので、} 600.2776 \text{ Mbps} \times 4 = 2401.1104 \text{ Mbps}$$

#### 5.1.4 実証スケジュール

ローカル 5G の性能評価等の技術実証の実証スケジュールについて、以下に示す。

工場内での技術実証において、平日作業の実施が難しいため、土日での技術実証のスケジュールを実施した。

その他、技術実証に係わるコンソーシアムメンバーが複数社に渡るため、毎週 1 回の定例会開催を軸に、個別協議の会議も含め情報共有・連携を進めた。

実証スケジュールの詳細については、「1.4 実証のスケジュール」参照のこと。

## 5.2 実証目標

### 5.2.1 技術的課題

#### 5.2.1.1 技術実証の背景となる技術的な課題

MR システムのローカル 5G 化（現状の有線接続からローカル 5G による無線化）を実現するためには、以下の検討・課題が必要である。

検討①：ローカル 5G を用いて MR システムと HMD 間における高精細・大容量の映像データ及び MR 合成映像データをネットワーク上でやり取りする仕組みの構築

課題①：この仕組みを構築するに当たり、工場環境下において、現状のローカル 5G が提供する伝送スループット、伝送遅延等の性能が、ローカル 5G による MR システムの無線化を実現するための性能に達しているか、制約や前提条件があるかどうか明確ではないことが課題である。

検討②：工場屋内の現場において MR システムを活用するにあたり求められる、ローカル 5G の性能の実現

課題②：工場現場におけるローカル5Gの電波伝搬特性や性能が明確ではないことが課題である。具体的には、工場屋内の現場での反射波の影響の有無や、基地局間をスムーズに移動してハンドオーバー時のアプリケーションへの影響有無等があげられる。工場内で場所の制約なくMRシステムを活用していくというニーズを想定すると、明確にしていくべき課題である。一方、電波の有効活用・干渉の観点から工場屋外への電波漏えいは問題でありどの程度の電波漏えいなのか明確ではないことが課題である。

検討③：MRシステムのための通信インフラとしてローカル5Gを捉えているが、工場内のインフラ高度化の手段として今後ローカル5Gを捉える場合、MRシステム以外の様々なアプリケーション通信を混在し運用できることが期待され、これらを実現する仕組みの検討が必要である。

課題③：様々なアプリケーション通信を混在して運用できることが期待されるが、アプリケーションにより、ローカル5Gへの要求性能や機能が異なってくるため、これらをどのように同時に実現するか今後課題となってくる。

本技術実証においては、これらの技術的課題を解決するため、かつローカル5Gの技術基準等の整備に資する知見を得るために、工場内外におけるローカル5G電波の測定等技術実証を実施する。

#### 5.2.1.2 課題に対するアプローチ、検証仮説等

「5.2.1.1 技術実証の背景となる技術的な課題」に記載した、技術的課題に対するアプローチ、検証仮説を以下に示す。

課題①：この仕組みを構築するに当たり、工場環境下において、現状のローカル5Gが提供する伝送スループット、伝送遅延等の性能が、ローカル5GによるMRシステムの無線化を実現するための性能に達しているか、制約や前提条件があるかどうか明確ではないことが課題である。

(課題①のアプローチ) ローカル5Gの性能やMRシステムのアプリケーション通信特性が明確ではないという課題に対しては、実際の環境を構築しローカル5Gの性能を実測するというアプローチで明らかにしていく。

(課題①の検証仮説) 本技術実証を実施するローカル5G環境において、ユースケースの方式と使用する周波数帯・機器によって、以下の仮説を立てた。

表 5-12 課題①の検証仮説

ユースケース方式	4.7GHz 帯 (エイビット製基)	28GHz 帯 (ノキア製基地局・)	備考
----------	-----------------------	-----------------------	----

	地局・端末)	シャープ製端末)	
①バックパック方式	○	○	必要なスループットの 実現が可能
②目指す姿の実現に向けた 疑似 HMD 方式	×	DL：○ UL：×	28GHz 帯については、 DLは4CCにより実現が 可能。ULは現状は未達。 将来、アップリンク比率 を拡大する等で実現が 可能

バックパック方式については、今回使用する、4.7GHz 帯・エイビット基地局/端末にて、必要な伝送スループットが実現できるものと試算した。同様に、28GHz 帯・ノキア基地局/シャープ端末にて、必要な伝送スループットが実現できるものとして試算した。

目指す姿の実現に向けた疑似 HMD 方式については、4.7GHz 帯・エイビット基地局/端末での実現は難しく、28GHz 帯・ノキア基地局/シャープ端末では、DLは4CCにより伝送スループットが実現できるものと試算した。ULは、現状では実現が難しいと仮説を立てた。

※目標とするローカル5Gの性能については、「5.3 ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等」を参照。

課題②：工場現場におけるローカル5Gの電波伝搬特性や性能が明確ではないことが課題である。具体的には、工場屋内の現場での反射波の影響の有無や、基地局間をスムーズに移動してハンドオーバー時のアプリケーションへの影響有無等があげられる。工場内で場所の制約なくMRシステムを活用していくというニーズを想定すると、明確にしていくべき課題である。一方、電波の有効活用・干渉の観点から工場屋外への電波漏えいは問題でありどの程度の電波漏えいなのか明確ではないことが課題である。

(課題②のアプローチ) 課題①のアプローチ同様、実際の環境を構築しローカル5Gの性能を工場屋内外で実測するというアプローチで明らかにしていく。

(課題②の検証仮説) 工場内には、多くの金属製のものが存在しており、反射波の影響、マルチパスの影響でマルチパスフェージングが発生しやすいと想定されるが、28GHz帯は直進性が高い周波数帯であるため、反射波を活用することで、見通しが確保できない環境においても通信が確保できると仮説を立てた。また、ハンドオーバーの動作については、基地局と端末メーカーが違うため、相互接続性の問題からうまく動作しないことも想定されるが、問題なく動作する場合には、アプリケーションへの影響として、アプリケーションが利用出来なくなる程、大きなものではなく、影響は小さいと想定した。理由としては、4G/LTE等の既存の公衆サービスにおいて通話が切れる等の影響はほぼなく、4G/LTEの拡張された仕様である5Gにおいても同様と考えた。工場屋外への電波漏えいについては、工場の外壁などの素材、基地局の出力電力、使用する周波数帯等で違いがあるが、今回使用する基地局においては、出力電力が小さいことから工場屋外への電波漏えいはほとんどないと仮説を

立てた。

課題③：様々なアプリケーション通信を混在して運用できることが期待されるが、アプリケーションにより、ローカル5Gへの要求性能や機能が異なってくるため、これらをどのように同時に実現するか今後課題となってくる。

(課題③のアプローチ) 課題①のアプローチ同様、実際の環境を構築しローカル5Gの性能を実測するというアプローチで明らかにしていくが、本課題に対して専用の機材等は用意できないため、予備機等を活用して環境を構築することとする。また、現時点ではネットワークスライシング等のより高度な機能実装ができていないため、異なるアプリケーションに適したパラメータで運用されるセルを隣接した際の動作を確認し、システムの実現可能性について検討するアプローチをとる。

(課題③の検証仮説) 異なるアプリケーションの混在利用を想定し、各アプリケーションに適したパラメータで運用するセルを隣接させ、各々のセルが性能を発揮するか、逆に互いに干渉しあわないかについて仮説をたて、その仮説に基づいて、技術実証を行う。なお干渉影響について、隣接するセル相互で干渉を受けることにより通信可能なエリアが小さくなること、また、変調方式によっても、干渉影響に差があると仮説を立てた。

## 5.2.2 技術実証としての実証目標

本技術実証では、ローカル5GによるMRシステムの無線化を実現するためのローカル5G性能を明らかにすること、及び技術基準等の見直しに資する新たな知見を得ることを目標とし、前述の技術的な課題①、②、③を解決するために実証目標を以下の通り立てた。

### 5.2.2.1 ローカル5Gの性能評価

実証目標① (課題①、②に対応)

ローカル5GによるMRシステムを稼働させるために必要とされる通信インフラに求める伝送スループットや伝送遅延といったユースケースに基づく工場環境下におけるローカル5Gの性能を評価する。

測定データ(受信電力、伝送スループット、伝送遅延)を取りまとめ、測定データから工場環境の電波伝搬損失特性を明らかにし、ローカル5GによるMRシステムの実現におけるローカル5Gの技術基準等の見直しに資する知見を得ることを目標とする。

### 5.2.2.2 技術基準等の見直しに資する新たな知見

技術基準等の見直しに資する新たな知見として、具体的には、以下の項目を立てた。

### (1) 電波法関係審査基準 カバーエリア及び調整対象区域の算出法

実証目標②（課題①に対応）

工場環境における電波伝搬測定結果（SS-RSRP 受信電力）、カバーエリア及び調整対象区域の調査より、算出式との差異を明らかにする。どの程度の差異があるのか、前提としている条件面も含めて、検証し新たな知見を得る。

### (2) アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

実証目標③（課題②に対応）

ハンドオーバー動作は、隣り合うセルの受信強度によって、振舞いが変わると想定している。本技術実証で使用する機器・実証環境での実際のハンドオーバー動作の結果より、MR システムのアプリケーションに対する技術要件を考察し、その他多様な条件で役立つ知見を得ることを目指す。詳細については、「5.5 その他ローカル5Gに関する技術実証」にて記載する。

### (3) 柔軟なシステムの構築検討

実証目標④（課題③に対応）

同一工場内で使用用途に応じて無線パラメータをそれぞれ設定しシステムを実現することが可能であるか。また、使用するアプリにより無線システムに要求されるスループット、遅延等が異なるため、5G の幅広いパラメータを柔軟に活用して最適なシステムを構築する際の知見を得ることを想定している。詳細については、「5.5 その他ローカル5Gに関する技術実証」にて記載する。

## 5.2.3 実施事項

本開発実証のローカル 5G の性能評価等の技術実証においては、実証目標を達成するため、以下の技術実証を実施した。

### 5.2.3.1 ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等

（課題① ②、実証目標①に対応）

本技術実証において、測定データ（受信電力、伝送スループット、伝送遅延）を取りまとめ、測定データから工場環境の電波伝搬損失特性を明らかにする。

具体的には、以下の項目を実施する。

- ・ 評価エリア A（4.7GHz 帯 基地局、28GHz 帯 基地局）と評価エリア B（28GHz 帯 基地局）において、20 カ所以上の測定ポイントを設け、受信電力（SS-RSRP）、伝送スループット、伝送遅延を測定する。

- ・ 工場環境でのローカル 5G の反射等の影響を調査する。
- ・ 工場屋外への電波漏えいを調査する。
- ・ バックパック方式、目指す姿の疑似 HMD 方式それぞれの性能目標に対するローカル 5G の性能評価を行う。

### 5.2.3.2 ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等

(課題①、実証目標②に対応)

ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証として、以下の項目を実施する。

- ・ 「5.2.3.1 ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価における測定結果」及び「4. 課題実証」の機能検証の結果を踏まえて、工場内のエリア構築、システム構成を検証する。
- ・ 基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域について総務省算出式と実測データとの比較を行い、差異を明らかにする。どの程度の差異があるのか、前提としている条件面も含め検証を行う。

### 5.2.3.3 その他ローカル 5G に関する技術実証

#### (1) アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

(課題②、実証目標③に対応)

本技術実証においては、評価エリア A に構築する 28GHz 帯 基地局と、評価エリア B に構築する 28GHz 帯 基地局との間でのハンドオーバー動作の検証を行う。

具体的には、評価エリア A と評価エリア B の間を、歩行速度で移動する状態で、受信電力、伝送スループット、伝送遅延を測定する。また、試行回数に対するハンドオーバーの成功率を測定する。

MR システムのアプリケーションとして疑似 HMD 方式の映像伝送を、歩行速度で移動する状態で実施し、ハンドオーバーによる映像伝送への影響を検証する。

#### (2) 柔軟なシステムの構築検討

(課題③、実証目標④に対応)

本技術実証においては、評価エリア A 内に構築する 4.7GHz 帯 基地局と、同じく評価エリア A 内に仮設置する別の 4.7GHz 帯 基地局(予備機を利用)とで、それぞれ異なるパラメータを設定しセル A とセル B の評価環境を構築する。その上で、セル B 側の機器を移動させセル A とセル B の距離を変動させお互いの干渉影響を検証する。

### 5.2.3.4 各実施事項に必要な各種データ

なお、各実施事項の技術実証を実施するに当たり、必要となる各種データについては、以下の通り定義した。

表 5-13 必要となるデータ一覧

測定・計測項目	単位	測定・計測方法
測定ポイントの基地局からの距離	m	レーザー距離計にて平面距離を計測 アンテナ高と合わせて算出
基地局のアンテナ高	m	レーザー距離計にて計測
端末のアンテナ高	m	レーザー距離計にて計測
測定時刻	yyyy/mm/dd hh:mm:ss	測定時時刻
見通しの有無	—	目視確認
測定ポイント状況	—	測定ポイントの状況の記録 可能であれば基地局方向の写真
受信電力 (SS-RSRP)	dBm	エリアテストにて測定
伝送スループット	M (G) bps	iPerf クライアント/サーバにて測定
伝送遅延	msec	Ping クライアントにて測定
(端末) BLER	%	ローカル 5G 端末にて測定
(端末) RSRP/RSSI	dBm	ローカル 5G 端末にて測定
(端末) スループット	Mbps	ローカル 5G 端末にて測定
(端末) MCS	—	ローカル 5G 端末にて測定 ※28GHz 帯 シャープ端末のみ

## 5.3 ユースケースに基づくローカル 5 G の性能評価等

### 5.3.1 ユースケースに基づく性能要件

対象とするユースケース (5.1.2 にて記載) の主要な計測指標毎の性能要件及び論拠の詳細を以下に示す。

#### 5.3.1.1 バックパック方式に対するローカル 5 G の性能要件

バックパック方式におけるアプリケーション通信は、以下の 4 つの通信がある。(詳細は、「3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴」を参照)

- UL①：プレーヤー→シーンサーバのデータ (シーン情報)  
HMD の位置姿勢情報や操作情報をシーンサーバへ送信する通信。
- DL①：シーンサーバ→プレーヤーのデータ (3D-CG データ)  
プレーヤー起動時にシーンサーバから 3D-CG データをダウンロードする通信
- UL②：プレーヤー→タブレットのデータ (表示映像)

- プレーヤーの HMD に表示している映像を圧縮してタブレットに送信する通信
- DL②：タブレット→プレーヤーのデータ（制御情報）  
タブレット操作者の指示情報などをプレーヤーに送信する通信

これらのアプリケーション通信を実現するための計測指標、性能要件、論拠は以下の通り。

表 5-14 計測指標・性能要件・論拠（バックパック方式）

計測指標	性能要件	論拠
伝送スループット	UL：数十 Mbps 程度 DL：数十 Mbps 程度	アプリケーション仕様による ※「3. 実証環境」参照
伝送遅延	数十 msec 程度	遅延の増大が MR の使い勝手に影響を与えるため、遅延は小さいことが求められる。

なお、受信電力、通信品質についても、今回の実証を通じて検証予定である。

### 5.3.1.2 疑似 HMD 方式に対するローカル 5G の性能要件

疑似 HMD 方式におけるアプリケーション通信は、以下の 2 つの通信がある。（詳細は、「3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴」を参照）

- UL①：HMD→プレーヤーのデータ（撮像映像・位置検出映像）  
HMD のカメラが撮像した映像、及び位置検出するための映像をプレーヤーへ送信する通信。
- DL①：プレーヤー→HMD（表示映像）  
プレーヤーで 3DCG と撮像映像を合成した MR 映像を HMD で表示するためにプレーヤーから HMD に送信される通信。

これらのアプリケーション通信を実現するための計測指標、性能要件、論拠は以下の通り。

表 5-15 計測指標・性能要件・論拠（疑似 HMD 方式）

計測指標	性能要件	論拠
伝送スループット	UL：約 550Mbps DL：約 350Mbps	UL①：16.7Gbps / 30 送信する映像帯域 / H.265 圧縮方式の圧縮率 DL①：11Gbps / 30 送信する映像帯域 / H.265 圧縮方式の圧縮率
伝送遅延	十数 msec 程度	遅延の増大が MR の使い勝手に影響を与えるため、遅延は小さいことが求められる。 60fps の場合伝送遅延 17msec となる。

なお、受信電力、通信品質についても、今回の実証を通じて検証予定である。

### 5.3.2 評価・検証項目

ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価の評価・検証項目を記載する。

なお、評価・検証項目における、計測指標及びその妥当性については、以下の通り。

表 5-16 計測指標及び妥当性

計測指標	評価・検証項目	妥当性
受信電力	(1) 5.3.2.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定 (2) 5.3.2.2 工場内でのローカル5Gの電波の反射等による影響評価 (3) 5.3.2.3 工場の屋外への電波漏えいの評価	(1) 5.2 実証目標で設定した課題①に対応する計測指標である  (2) 5.2 実証目標で設定した課題②に対応する計測指標である  (3) 5.2 実証目標で設定した課題②に対応する計測指標である
伝送スループット	(1) 5.3.2.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定 (2) 5.3.2.2 工場内でのローカル5Gの電波の反射等による影響評価	(1) 5.2 実証目標で設定した課題①に対応する計測指標である  (2) 5.2 実証目標で設定した課題②に対応する計測指標である
伝送遅延	(1) 5.3.2.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定 (2) 5.3.2.2 工場内でのローカル5Gの電波の反射等による影響評価	(1) 5.2 実証目標で設定した課題①に対応する計測指標である  (2) 5.2 実証目標で設定した課題②に対応する計測指標である
通信品質	(1) 5.3.2.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定 (2) 5.3.2.2 工場内でのローカル5Gの電波の反射等による影響評価	(1) 5.2 実証目標で設定した課題①に対応する計測指標である  (2) 5.2 実証目標で設定した課題②に対応する計測指標である

#### 5.3.2.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定

以下状況における受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間を測定する。

- ① 4.7GHz 帯ローカル5Gの受信電力、伝送スループット、伝送遅延時間
  - ・ 見通し通信 (Line Of Sight)
  - ・ 見通し外通信 (Non Line Of Sight)
- ② 28GHz 帯ローカル5Gの受信電力、伝送スループット、伝送遅延時間
  - ・ 見通し通信 (Line Of Sight)
  - ・ 見通し外通信 (Non Line Of Sight)

#### 5.3.2.2 工場内でのローカル5Gの電波の反射等による影響評価

アンテナと端末との位置関係を意図的に可変させ測定するポイントを用意し電波の反射等の影響を確認する。

#### 5.3.2.3 工場の屋外への電波漏えいの評価

工場屋外にて、基地局及びアンテナの設置後の電波状況を測定し、電波の漏えいについて評価を行う。

#### 5.3.2.4 ローカル5Gの性能評価

ローカル5GによるMRシステムを実現するための性能が得られるかどうか評価を行い、実現する際のシステム構成を検討する。

#### 5.3.2.5 技術的課題の整理と課題の解決方策などの考察

工場環境下におけるローカル5GによるMRシステムを実現するための4.7GHz帯及び28GHz帯の電波伝搬の技術的な課題を洗い出し、解決方策を検討・考察する。考察に当たっては、過去の類似調査結果を検証し、今回の技術実証の結果と併せ考察する。

### 5.3.3 評価・検証方法

#### 5.3.3.1 ローカル5Gの受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間の測定

計測の仕様（計測ポイント、計測頻度、単位等）について、以下に示す。

- ・ 工場内で利用場所を中心に10m間隔で測定ポイントを設け、以下を測定する。（詳細は、「5.1.3.4 測定ポイント」参照）

- 測定項目の測定方法、計測頻度、単位について、以下の表に示す。

表 5-17 計測の仕様

計測項目	計測方法	計測頻度・単位
受信電力	基地局から送信されている SS-RSRP の受信電力(dBm)を測定器(エリアテスタ)を用いて測定する。	1秒周期・100回計測 単位 (dBm)
伝送スループット	iPerfを用いて上りと下りのUDP伝送スループット(Mbit/s)を測定する。	1分間を3回 単位 (Mbps)
伝送遅延時間	Pingを用いて往復遅延時間(msec)を測定する。	1分間を3回 単位 (msec)

なお、計測環境の機器構成については、「5.1.3.3 計測などの評価・試験環境構成」を参照。

また、評価・検証方法の詳細について以下に示す。

- 測定データを、MRシステムを稼働させるために必要な伝送スループット、伝送遅延が得られるかの観点で評価する。
- 具体的には、測定ポイントごとにMRシステムの稼働に必要な性能が得られるかを比較する。また、通信の安定さ(一定のスループットなのか、ゆらぎがあるのか、など)について評価を行う。

測定場所と測定条件について以下に示す。

表 5-18 測定場所・測定条件

測定場所	4.7GHz帯		28GHz帯	
	見通し通信 (Line Of Sight)	見通し外通信 (Non Line Of Sight)	見通し通信 (Line Of Sight)	見通し外通信 (Non Line Of Sight)
工場内 評価 エリア内での 電波伝搬	見通し有	遮蔽物(建物の柱、 加工機等の設備、 作業者等)	見通し有	遮蔽物(建物の柱、 加工機等の設備、 作業者等)
工場内 評価 エリア外での 電波伝搬	見通し有	遮蔽物(建物の柱、 加工機等の設備、 作業者等)	見通し有	遮蔽物(建物の柱、 加工機等の設備、 作業者等)
工場周辺(屋 外)での電波 漏えい電力	条件なし		条件なし	

測定条件における見通し通信、見通し外通信のそれぞれの測定地点について、以下の環境を考慮して測定を行う。

① 見通し通信 (Line Of Sight)

- 周辺に電波が反射しやすい構造物が近くにある反射の影響が大きい環境。

- ・ 周辺に構造物がないオープンスペースでの環境。

② 見通し外通信 (Non Line Of Sight)

- ・ 障害物近傍で回折も発生しにくく反射した信号の受信のみの環境。
- ・ 障害物から遠方で直接波が回折した信号及び反射した信号を受信できる環境。

詳細の前提条件 (送信電力、計測位置等) について、4.7GHz 帯、28GHz 帯基地局の送信電力及びアンテナ高の詳細を以下の表に示す。

表 5-19 送信電力・計測位置等

設置位置	基地局	送信電力	アンテナ高
アンテナ支柱 A	4.7GHz 帯基地局 エイビット AU-500- gNB	60mW	3.43m
	28GHz 帯基地局 ノキア AWEUA	158.5mW	3.905m
アンテナ支柱 B	28GHz 帯基地局 ノキア AWEUA	158.5mW	3.87m

5.3.3.2 工場内でのローカル 5 G の電波の回折や反射等による影響評価

28GHz の電波は直進性が高く、ほとんど回折しないため、本評価では反射の影響のみを評価するものとする。工場の遮蔽物による影響や反射による改善を評価するための測定方法を以下に示す。

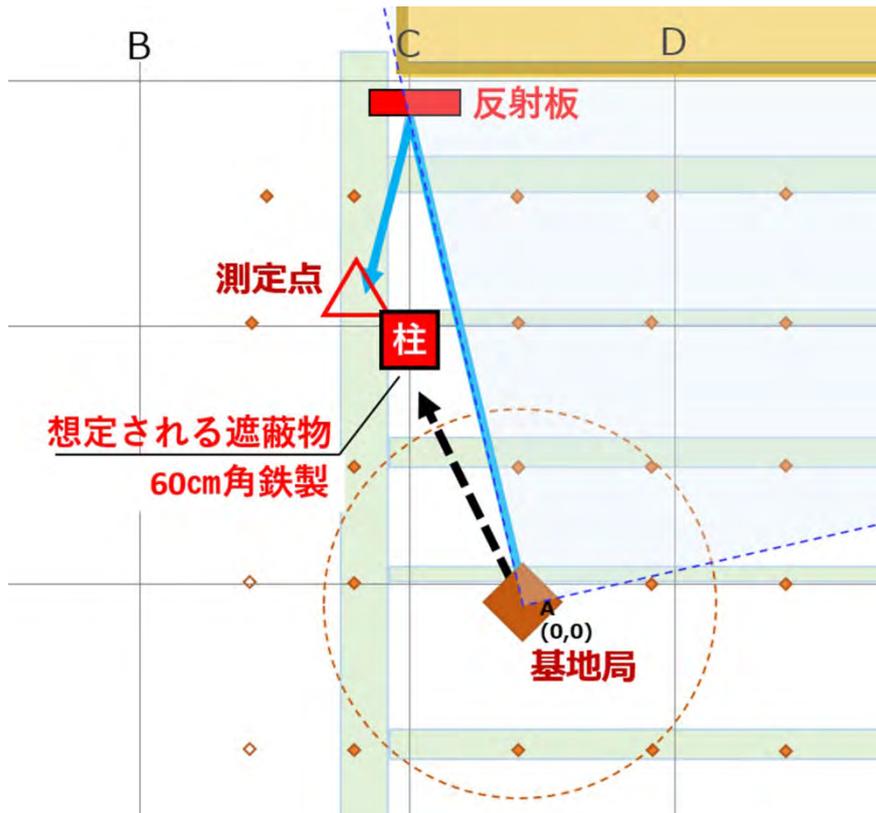


図 5-9 工場の遮蔽物による影響を評価するための測定方法

基地局から遮蔽物の影となって見通しのない地点において、受信電力を測定する。また、工場のレイアウト変更などを想定して、意図的に遮蔽物を設置して影となる環境を作り出して受信電力が劣化する様子を確認する。

遮蔽物の影に対して、反射板等を設置することによって、受信電力が改善するかどうか確認を行う。通信が可能である場合には、反射板を設置した場合としない場合で差があるかどうか、受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間等について測定を行う。

評価方法について、以下に示す。

- ・ 見通しなしで通信が可能な場合、反射波により通信できていると想定し、遮蔽物を用いて反射波の影響によるものかを確認する。
- ・ 見通しなしで通信が不可・不安定な場合、散乱板を用いて反射波を捉え改善するかどうかを確認する。
- ・ 「回折」について仕様書上記載があり、回折現象の評価について検討を実施したが、ローカル 5G で使用する 4.7GHz 帯、28GHz 帯については、回折現象より反射現象が多く観測されるため、反射による影響評価を実施することとする。

### 5.3.3.3 工場の屋外への電波漏えいの評価

工場の屋外への電波漏えいを評価するための測定図を以下に示す。

貞宝第 1 工場の中心から、一定の距離かつ工場敷地内で立ち入りが可能な 10 地点を、測

定地点として選定した。

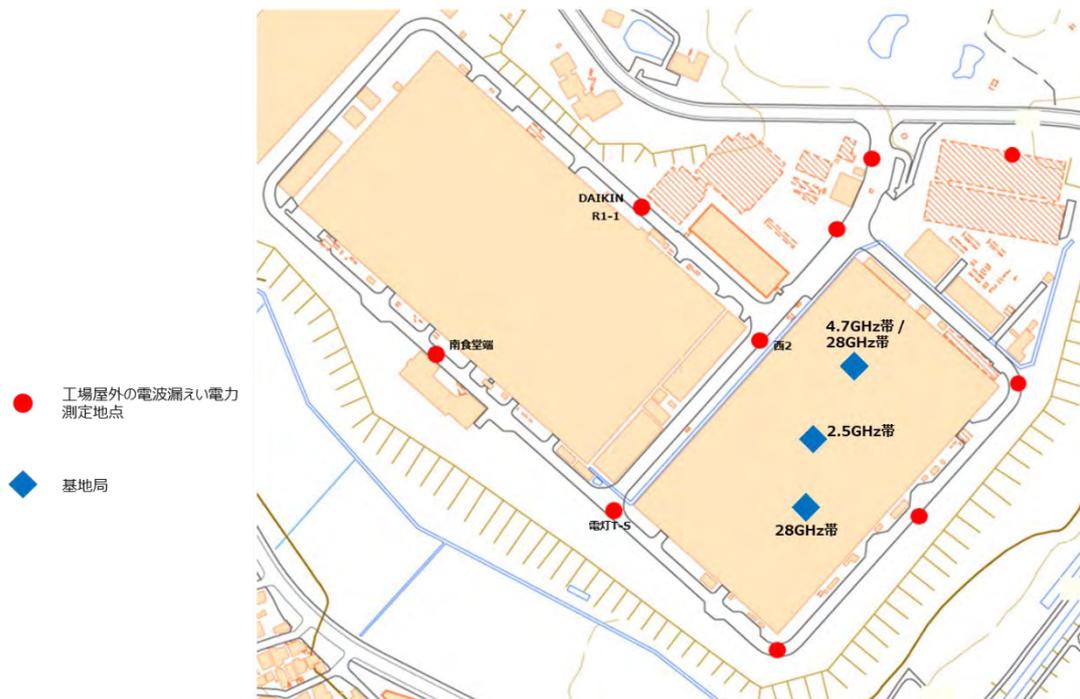


図 5-10 屋外測定箇所

天候の良い時に、エリアテスタを用いて、SS-RSRP の受信電力を計測する。計測の様子は、「5.3.3.1 ローカル 5G の受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間の測定」の計測の様子に記載の通りとする。

#### 5.3.3.4 ローカル 5G の性能評価

ローカル 5G による MR システムを実現するための性能が得られるかどうか「4.5 エラー! 参照元が見つかりません。」結果を踏まえて検討する。

また、評価にあたり、事前 PoC における好条件環境下での測定データと理論値を用いる。

#### 5.3.3.5 技術的課題の整理と課題の解決方策等の考察

工場環境下におけるローカル 5G による MR システムを実現するための 4.7GHz 帯及び 28GHz 帯の電波伝搬の技術的な課題を洗い出し、解決方策を検討・考察する。考察に当たっては、過去の類似調査結果を検証し、今回の技術実証の結果と併せ考察する。

具体的には、屋内環境で 4.7GHz 帯、28GHz 帯の実証試験の結果から、電波伝搬特性が環境によりどのような違いがあるのか調査する。この調査により貞宝工場特有のものなのか、屋内環境として同一と言えるのか等評価する。

### 5.3.4 評価結果

工場におけるローカル5Gの電波伝搬試験において測定した測定データの取りまとめ方針としては、検証作業及び課題検討・考察の際、必要時に即座に実際の測定データが確認できるように整理を行った。また、測定データを組み合わせ、ローカル5GによるMRシステムを実現するためのデータ分析を行い、ローカル5Gの性能評価作業を効率的に行った。なお、測定データの取りまとめにおいて、技術実証全体調整事業者と調整の上、効果的・効率的に行った。

#### 5.3.4.1 サービスエリア範囲

測定器（エリアテスタ）にて測定した同期信号の受信電力値より、ヒートマップ形式に取りまとめた。

なお、各測定ポイントでの受信電力値は、1秒間隔100回測定の中央値を採用し、測定ポイント間の値は、線形補完により算出した。

#### (1) 4.7GHz帯の結果

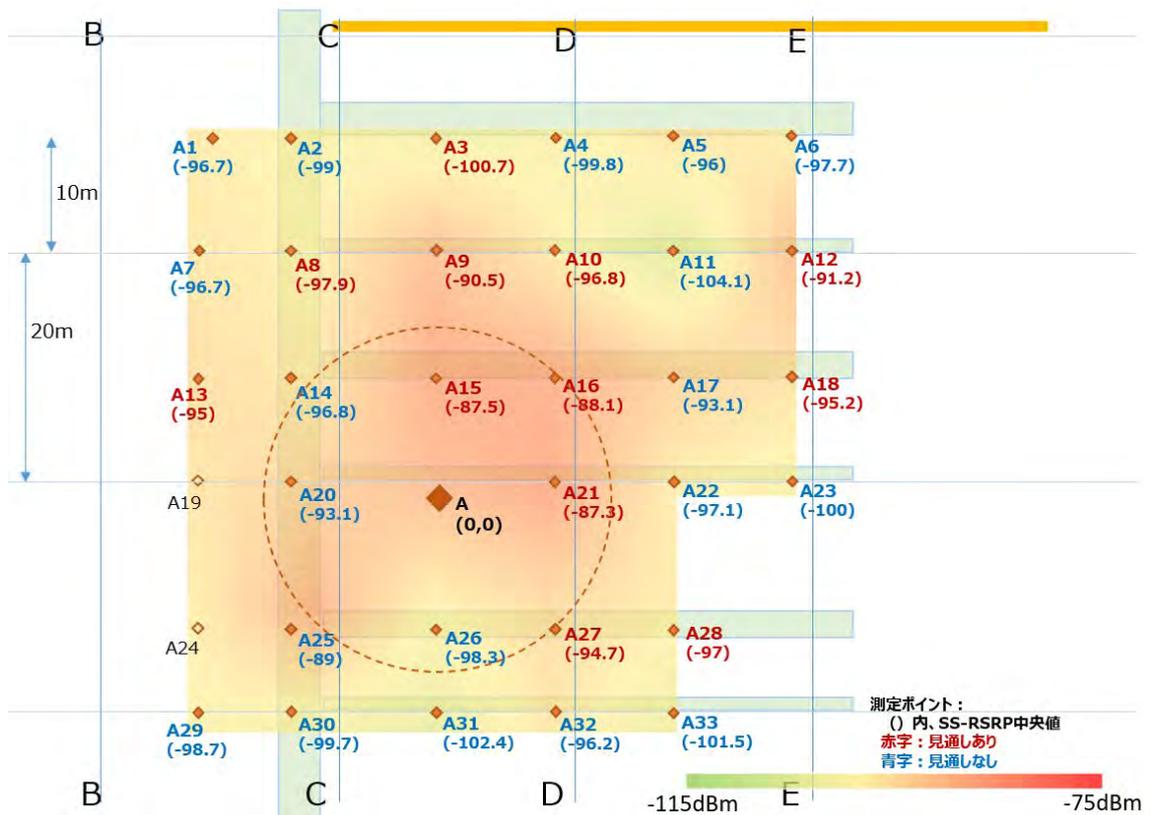


図 5-11 4.7GHz帯受信電力ヒートマップ

工場内の柱やダクトなどの構造物、生産設備の設置等により、見通しが確保できないポイントでは、受信電力は弱く、見通しが確保できる測定ポイントでは、受信電力は強いことが分かった。

また、カバーエリアよりも遠いポイント（No.12 等）でも受信電力が強いことを観測した。逆に基地局に近い箇所においても受信電力が低い部分がある。これらは主にダクトなどの構造物による反射の影響によるものと考えられる。

4.7GHz 帯 エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいて、マルチパスフェージングの影響を回避するため、受信アンテナを増設し 2 本アンテナ化の工事を実証期間中に実施した。その結果、1 本アンテナと比較して 2 本アンテナにおいて、通信可能エリアが増えて安定した通信を行うことができる箇所が増えた。

しかしながら、見通しのない測定ポイントでは安定した通信を確保することが難しい。受信場所をある程度固定すると通信できるものの、少しでも移動してしまうと BLER が上がり通信ができなくなる事象が確認された。特に作業員が MR システムで作業しながらの通信としては、評価することは難しい。今後、移動することや、周囲の環境変動への対応を強化して、安定した通信を実現する工夫が必要と思われる。

なお、4 章にて報告した課題実証において、実施場所が設計当初想定していた利用場所（評価エリア A）ではなく、その外側（C5-D6 柱間）のエリアでの実証となった。このため、特に 4.7GHz 帯 エイビット製基地局のカバーエリア外での実証となったため、ネットワーク品質への影響が顕著に出てしまった。

## (2) 28GHz 帯の結果

エリアテストの測定器を用いて同期信号の受信電力を測定した。ワゴンの上に発泡ブロックを置き、その上にエリアテストを設置・固定し、アンテナ高としては、地上から 170cm となるように設置した。評価エリア A および評価エリア B の測定結果ヒートマップを「図 5-12 28GHz 受信電力ヒートマップ（評価エリア A）」及び「図 5-13 28GHz 受信電力ヒートマップ（評価エリア B）」に示す。

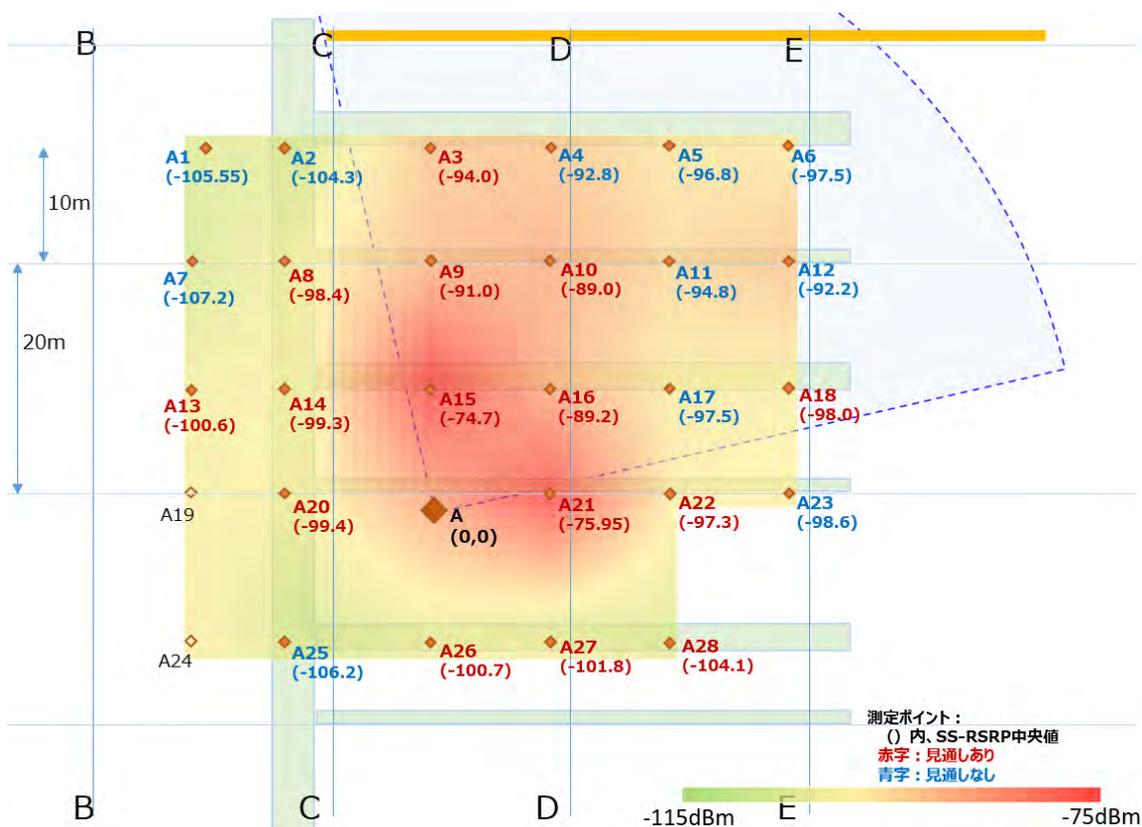


図 5-12 28GHz 受信電力ヒートマップ (評価エリア A)

工場内の柱やダクトなどの構造物、生産設備の設置等により、見通しが確保できないポイントでは、受信電力は弱く、見通しが確保できる測定ポイントでは、受信電力は強い。

アンテナ指向パターンの範囲内で見通しがある地点では、概ね受信電力が高い傾向にあるが、アンテナ指向パターンの範囲外（側面など）でも、基地局に近い箇所については反射の影響により受信電力が確保されると考えられる。

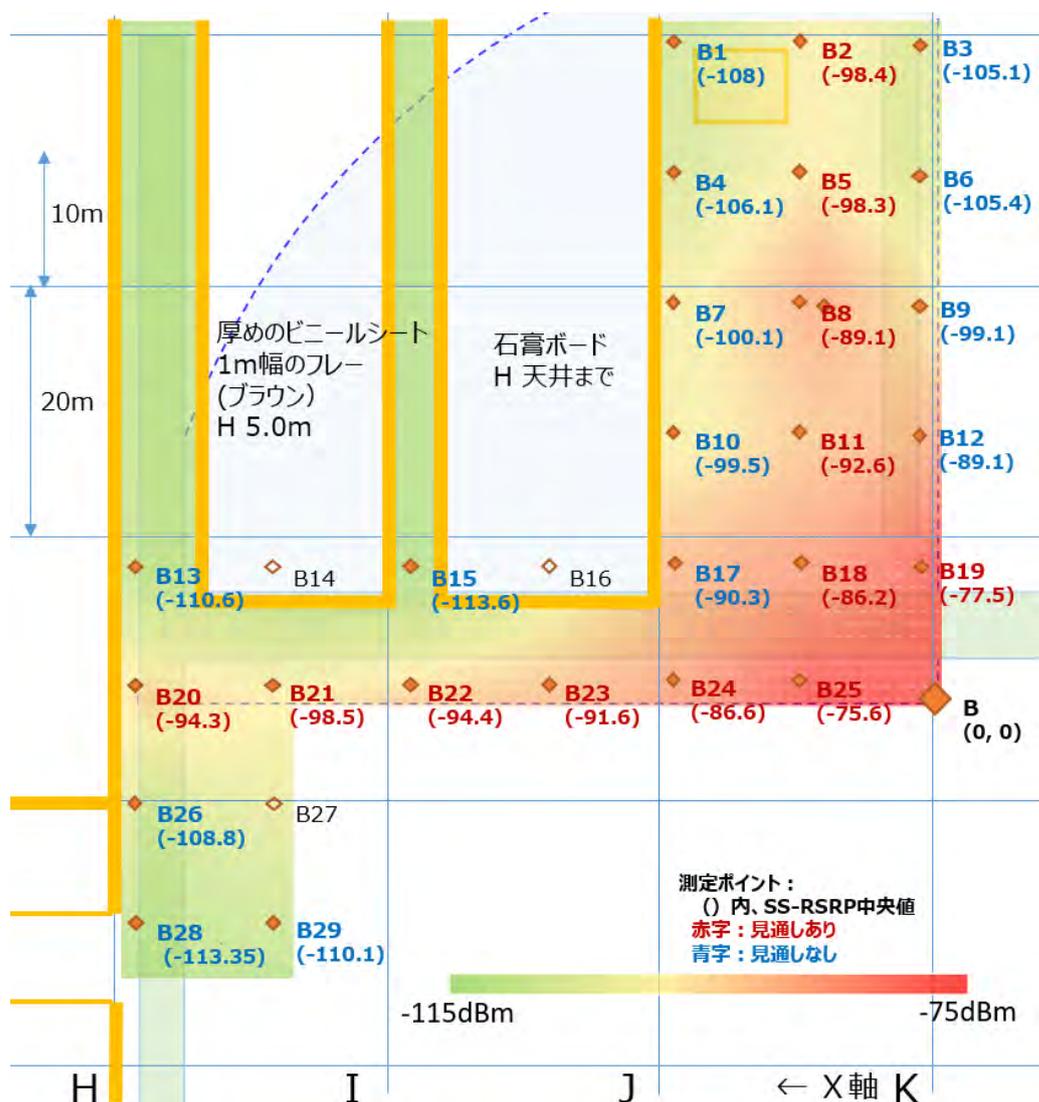


図 5-13 28GHz 受信電力ヒートマップ (評価エリア B)

見通しのあるところは受信電力が高く、見通しのないところの受信電力が低い結果となっており、概ね、想定通りの結果が得られている。

測定ポイント B4, B7, B10, B26, B28, B29 は、工作機械の裏となり、見通しが確保できない測定ポイントである。

また、測定ポイント B1 は、工場内ハウスの裏となり、見通しが確保できない測定ポイントであり、測定ポイント B3, B6, B9, B12 は、それぞれ近くの柱で基地局との見通しが確保できない測定ポイントである。

### 5.3.4.2 エリアテストで受信した SS-RSRP から算出した伝搬損失について

#### (1) エイビット基地局からの送信電波（4.7GHz 帯）に関して

##### 1) 測定環境

- ・ 測定日時：令和 2 年 12 月 5 日（土）10 時頃から 12 時頃
- ・ 測定地点数：31 地点

##### 2) 伝搬損失算出手法

1 つの測定地点で測定した 100 個の SS-RSRP データから中央値を算出して、その測定地点での SS-RSRP（中央値）の測定値とした。

なお、測定地点番号 15（見通しあり）では、2 度の測定を実施したので、31 地点で合計 32 個の測定値がある。

式 1 によって、SS-RSRP の測定値  $Pr0$ [dBm] と、エイビット基地局の諸元から伝搬損失  $L$ [dB] を算出した。

$$L = Pte + Gt - Pr0 \quad (\text{式 1})$$

$Gt$  = エイビット基地局アンテナ利得[dBi] = 2dBi

$Pr0$  = SS-RSRP（中央値）の測定値[dBm]

ここで、 $Pte$  = 30kHz 幅に相当するエイビット基地局送信電力[dBm] = 約-17.4dBm  
送信周波数 4800MHz の 100MHz 幅伝送で送信電力 60mW なので、30kHz 幅の送信電力[mW] を求めて、単位を[dBm]へ変換。サブキャリア波の間隔=30kHz なので、SS-RSRP の受信帯域幅も 30kHz となる。



図 5-14  $Pr0 = Pte + Gt - L$  (式 2)

エリアテストの受信アンテナの利得とディバイ 1 ダの損失はエリアテスト内で補正済みが測定値  $Pr0$  になっている。ゆえに上記 (式 2) で  $L$  を左辺に移項して (式 1) から  $L$  が算出可能。

伝搬損失  $L$ [dB] は、自由空間伝搬損失  $L0$ [dB] と比較した。  $L0$  は、式(3)から理論的に計算した。

$$L0 = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{式 3})$$

$d$  = エイビット基地局のアンテナとエリアテストのアンテナを結ぶ直線距離[m]

$\lambda = \text{エイビット基地局の送信周波数 (4800MHz) の波長[m]} = 300/4800 = 0.0625\text{m}$

### 3) 測定結果

以下図中に、伝搬損失の測定結果を×印で示した。各図の横軸は、エイビット基地局のアンテナとエリアテストのアンテナを結ぶ直線距離である。また、自由空間伝搬損失も破線で示した。

「図 5-15 伝搬損失の測定結果」は、31 の測定地点の 32 個の伝搬損失 (LOS と NLOS の両方を含むすべて) の測定結果である。「図 5-16 伝搬損失の測定結果」は、「図 5-15 伝搬損失の測定結果」から LOS だけの測定結果 (12 の測定地点の 13 個の伝搬損失) を示した。「図 5-17 伝搬損失の測定結果」は、「図 5-15 伝搬損失の測定結果」から NLOS だけの測定結果 (19 の測定地点の 19 個の伝搬損失) の測定結果を示した。

なお、エイビット基地局のアンテナもエリアテストのアンテナも、両方とも、垂直偏波で測定し、エリアテストのアンテナ利得= 3dBi、水平面内無指向性、垂直面内の半値幅 (-3dB 幅) = -17 度から +40 度である。

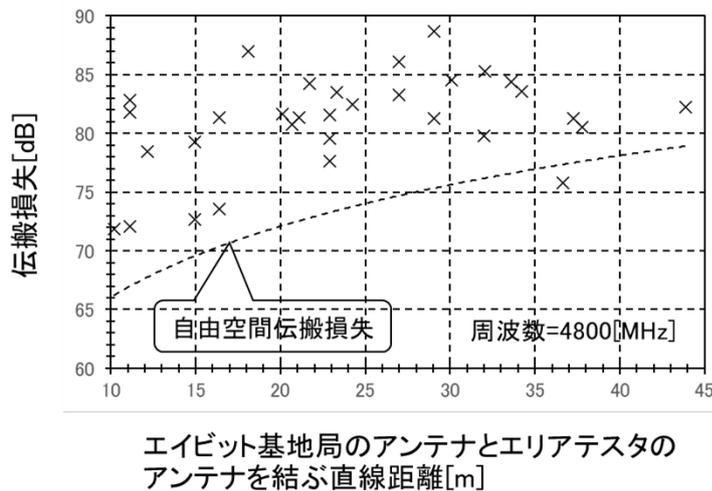


図 5-15 伝搬損失の測定結果 (4.7GHz 帯)

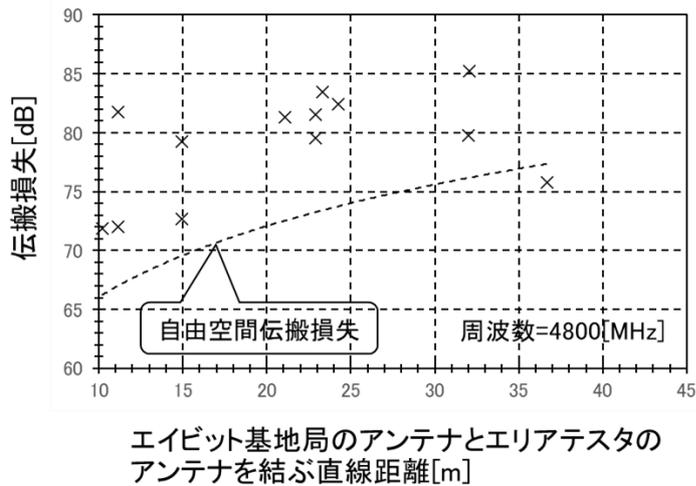


図 5-16 伝搬損失の測定結果 (4.7GHz 帯/LOS のみ)

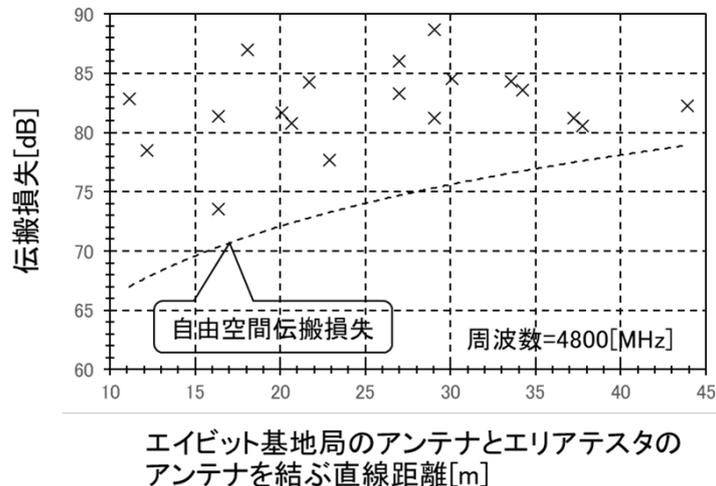


図 5-17 伝搬損失の測定結果 (4.7 GHz 帯/NLOS のみ)

#### 4) 考察

- I. LOS だけの測定結果である「図 5-16 伝搬損失の測定結果 (4.7GHz 帯/LOS のみ)」に着目すると、伝搬損失は、自由空間伝搬損失に比べて最大 10dB 程度大きい傾向がある。本実験環境では LOS といっても、各種の物体等が、基地局アンテナとエリアテストのアンテナ間の電波伝搬路の周辺には多数存在し、また、壁面、床面、及び天井面も存在する空間であり、理想的な自由空間とは異なる環境での測定結果である。従って、伝搬に伴う電波の吸収や反射等の効果が総合的に表れて上記の傾向になっていると推測する。

なお、距離が約 36.7m における測定地点 (地点番号 12) の伝搬損失が、自由空間伝搬損失より約 1.6dB 小さくなっていた。その理由は不明であるが、同地点の真上にはダクトがあるとのことなので、そのダクトの存在が何かの影響を与えているかもしれない。

II. NLOS だけの測定結果である「図 5-17 伝搬損失の測定結果 (4.7 GHz 帯/NLOS のみ)」に着目すると、伝搬損失は、自由空間伝搬損失に比べて最大 15dB 程度大きい傾向がある。送信アンテナと受信アンテナ間の見通し確保の目安を定量的に表現できる有用な考え方として第 1 フレネルゾーンがある[1],[2],[3]。理論的には、第 1 フレネルゾーンの半分が遮蔽されると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は 6dB 低下し、また、第 1 フレネルゾーンがすべて遮蔽されると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は約 16dB 低下する[3]。本実験環境では天井がかなり高いので、NLOS として基地局アンテナとエリアテストのアンテナ間の電波伝搬路の見通しを物体等がしゃへいしても、その上方周辺には、広い空間が存在している。従って、伝搬に伴う電波の回折や反射等の効果が総合的に表れて上記の傾向になっていると推測する。

## (2) ノキア基地局(28GHz 帯 : PCI44)からの送信電波に関して

### 1) 測定環境

- ・ 測定日 : 令和 3 年 1 月 16 日 (土)
- ・ 測定地点数 : 12 地点 (送信アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側、支柱 A のサービスエリア)

### 2) 測定手法

ノキア基地局は送信ビームフォーミングで動作して 32 個のビームで送信する (但し、各ビームの指向性状況 (水平面、垂直面) 等、具体的な状況は不明)。ある測定地点で、受信した SS-RSRP の中央値が最大になっている場合、そのビーム番号の指向性が概ね、その測定地点に向いている (水平面でも垂直面でも) と解釈できる。つまりノキア基地局の 192 個のアンテナ素子に 158.5mW の空中線電力が給電されて振幅と位相が調整された結果、その送信ビーム (合成利得は 23dBi と理解) が「送信アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側」に形成されていると理解できる。従って、ある測定地点で受信した SS-RSRP の中央値[dBm]が最大になっているビーム番号を 1 つ見つけて、その最大の SS-RSRP の中央値[dBm]を用いて、伝搬損失[dB]を算出する。

なお、ある測定地点で受信ビーム総数が 32 個より少ない状況の場合は、その状況があまりのままの電波伝搬状況を反映していると理解した。また、ビーム番号別の SS-RSRP の測定データ記録数が 100 個より少ない状況が発生することもあったが、測定系としては正常動作していると判断できたので、記録できている測定データ数で解析を進めた。

測定地点番号 3 (見通しあり) では、2 度の測定を実施したので、12 地点で合計 13 個の測定値がある。

### 3) 伝搬損失算出手法

式 1 によって、SS-RSRP の測定値  $Pr_0$ [dBm]と、ノキア基地局の諸元から伝搬損失  $L$ [dB]を算出した。ここで、 $P_{te}=240$ kHz 幅に相当するノキア基地局送信電力[dBm]=約 4.2dBm $\Rightarrow$ 送信周波数 29.04480GHz の 100MHz 幅伝送で送信電力 158.5mW なので、

240kHz 幅の送信電力[mW]を求めて、単位を[dBm]へ変換。サブキャリア波の間隔=240kHzなので、SS-RSRPの受信帯域幅も240kHzとなる。

$$L = P_{te} + G_t - Pr_0 \quad (\text{式 1})$$

$G_t$ = ノキア基地局アンテナ利得 [dBi]=23dBi

(192個のアンテナ素子による合成利得)

$Pr_0$ = SS-RSRP (中央値) の測定値[dBm]



図 5-18  $P_{te} + G_t - L$  (式 2)

エリアテスタの受信アンテナの利得とディバイダの損失はエリアテスタ内で補正済みが測定値  $Pr_0$  になっている。ゆえに上記 (式 2) で  $L$  を左辺に移項して (式 1) から  $L$  が算出可能。

送信側であるノキア基地局のアンテナは、垂直偏波と水平偏波に対応。但し、空中線電力が各偏波にどのように分配給電されているかは不明。また、送信アンテナ面の法線は水平から下向きに 20 度傾斜。受信側であるエリアテスタのアンテナは、垂直偏波で測定。エリアテスタのアンテナ利得= 3dBi、水平面内無指向性、垂直面内の半値幅 (-3dB 幅) = -22.5 度から +22.5 度。伝搬損失  $L$ [dB]は、自由空間伝搬損失  $L_0$ [dB]と比較した。  $L_0$  は、式(3)から理論的に計算した。

$$L_0 = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{式 3})$$

$d$ = ノキア基地局のアンテナとエリアテスタのアンテナを結ぶ直線距離[m]

$\lambda$ = ノキア基地局の送信周波数 (29.04480GHz) の波長[m]

$$= 300/29044.8 = 0.0103\text{m}$$

#### 4) 測定結果

以下図中に 伝搬損失の測定結果を×印で示した。各図の横軸は、ノキア基地局のアンテナとエリアテスタのアンテナを結ぶ直線距離である。また、自由空間伝搬損失も破線で示した。「図 5-19 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44)」は、12 の測定地点の 13 個の伝搬損失 (LOS と NLOS の両方を含むすべて、かつ、ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側) の測定結果である。

「図 5-20 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/LOS のみ)」は、「図 5-19 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44)」から LOS だけの測定結果 (6 の測定地点の 7

個の伝搬損失)を示した。

「図 5-21 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/NLOS のみ)」は、「図 5-19 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44)」から NLOS だけの測定結果 (6 の測定地点の 6 個の伝搬損失)を示した。

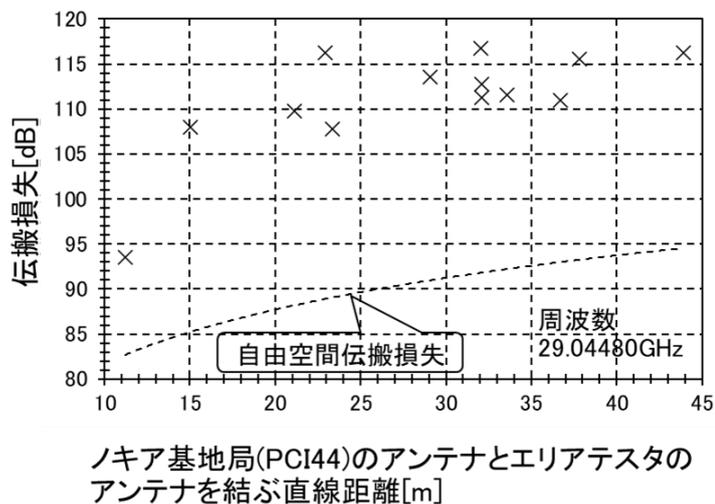


図 5-19 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44)

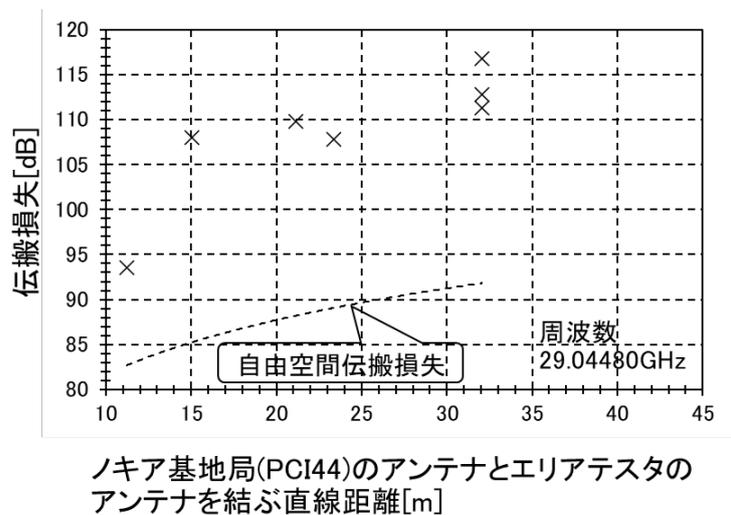


図 5-20 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/LOS のみ)

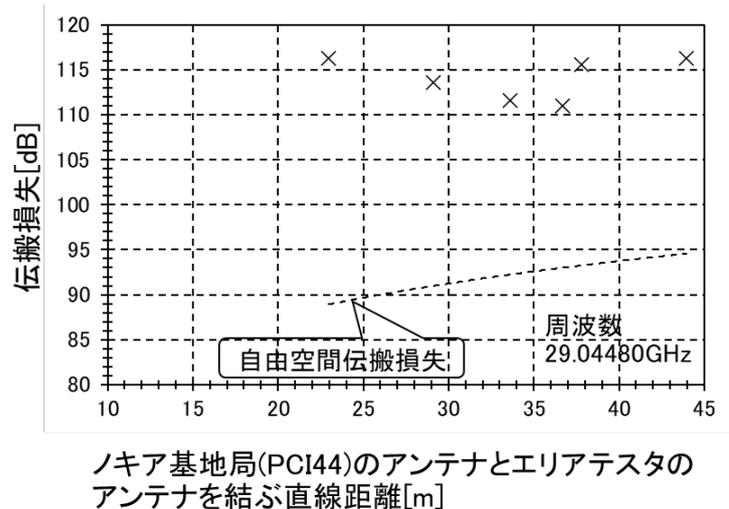


図 5-21 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/NLOS のみ)

## 5) 考察

- I. ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅は 90 度なので[1]、その内側がサービスエリアである。測定地点がサービスエリアに存在し、かつ、LOS だけの測定結果である「図 5-20 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/LOS のみ)」に着目すると、伝搬損失は、自由空間伝搬損失に比べて最大 25dB 程度大きい傾向がある。

本実験環境では LOS といっても、各種の物体等が、基地局アンテナとエリアテストのアンテナ間の電波伝搬路の周辺には多数存在し、また、壁面、床面、及び天井面も存在する空間であり、理想的な自由空間とは異なる環境での測定結果である。従って、伝搬に伴う電波の吸収や反射等の効果が総合的に表れて上記の傾向になっていると推測する。また、ノキア基地局アンテナがマルチビームであること等が上記の傾向の一因になっている可能性もあると推測でき、この件を次の項目(2)で考察する

- II. ノキア基地局アンテナは、192 個のアンテナ素子による 32 個のマルチビームを垂直偏波と水平偏波で送信していると理解しているが[1]、詳細は不明である。もしも空中線電力が垂直偏波と水平偏波で等しく分配されているならば、式 1 における  $P_{te}$  は 3dB 低下し、受信アンテナが垂直偏波なので、伝搬損失  $L$  は 3dB 減少する（「図 5-20 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/LOS のみ)」においては各 ×印が 3dB だけ縦軸方向で自由空間伝搬損失に近づく）可能性がある。

さらに、同アンテナの 32 個のマルチビームによる水平面の主輻射の角度幅は 90 度であるが[1]、垂直面内のマルチビームの角度変化の幅や合成利得の変化の詳細は不明である。もしも、ある測定地点では、各ビームの水平面及び垂直面の最大の利得の指向方向からズレていた場合には、式 1 における  $G_t$  は低下するので、伝搬損失  $L$  は減少する（「図 5-20 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI44/LOS のみ)」においては各 ×印が縦軸方向で自由空間伝搬損失に近づく）ことになる。

ローカル 5G 無線局運用者がより適切に運用可能とするためには、基地局製造業者であるノキア社から、より詳細な各種の情報が提供や公開されることが望まれ

る。

- III. 測定地点がサービスエリア（ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側）に存在し、かつ、NLOS だけの測定結果である「図 5-21 伝搬損失の測定結果（28GHz 帯：PCI44/NLOS のみ）」に着目すると、伝搬損失は、自由空間伝搬損失に比べて最大 28dB 程度大きい傾向がある。

送信アンテナと受信アンテナ間の見通し確保の目安を定量的に表現できる有用な考え方として第 1 フレネルゾーンがある[2],[3],[4]。理論的には、第 1 フレネルゾーンの半分が遮蔽されると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は 6dB 低下し、また、第 1 フレネルゾーンがすべて遮蔽されると、見通しが確保されている状況に比べて受信電力は約 16dB 低下する[4]。本実験環境では天井がかなり高いので、NLOS として基地局アンテナとエリアテストのアンテナ間の電波伝搬路の見通しを物体等が遮蔽しても、その上方周辺には、広い空間が存在している。従って、伝搬に伴う電波の回折や反射等の効果が総合的に表れて上記の傾向になっていると推測する。

また、上記項目(2)で考察した件は、「図 5-21 伝搬損失の測定結果（28GHz 帯：PCI44/NLOS のみ）」においても同様である。ローカル 5G 無線局運用者がより適切に運用可能とするためには、基地局製造業者であるノキア社から、より詳細な各種の情報が提供や公開されることが望まれる。意見募集でも意見が出ていたが[5]、ローカル 5G の無線設備（基地局や端末等）を日本国内向けに提供する製造業者等に対して、ローカル 5G の無線局申請に必要な情報はもちろんのこと、ローカル 5G 無線局運用を適切に運用可能とするための情報を WEB サイト等で積極的に公開するように、総務省から指導や勧告が実施されることを、多くのローカル 5G 無線局運用者は望むと思われる。

### (3) ノキア基地局（28GHz 帯：PCI48）からの送信電波に関して

#### 1) 測定環境

- ・ 測定日：測定日：令和 3 年 2 月 14 日（日）
- ・ 測定地点数：23 地点（送信アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側、支柱 B のサービスエリア）

#### 2) 測定手法

ノキア基地局は送信ビームフォーミングで動作して 32 個のビームで送信する（但し、各ビームの指向性状況（水平面、垂直面）等、具体的な状況は不明）。ある測定地点で、受信した SS-RSRP の中央値が最大になっている場合、そのビーム番号の指向性が概ね、その測定地点に向いている（水平面でも垂直面でも）と解釈できる。つまりノキア基地局の 192 個のアンテナ素子に 158.5mW の空中線電力が給電されて振幅と位相が調整された結果、その送信ビーム（合成利得は 23dBi と理解）が「送信アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側」に形成されていると理解できる。従って、ある測定地点で受信

した SS-RSRP の中央値[dBm]が最大になっているビーム番号を 1 つ見つけて、その最大の SS-RSRP の中央値[dBm]を用いて、伝搬損失[dB]を算出する。

なお、ある測定地点で受信ビーム総数が 32 個より少ない状況の場合は、その状況がありのままの電波伝搬状況を反映していると理解した。また、ビーム番号別の SS-RSRP の測定データ記録数が 100 個より少ない状況が発生することもあったが、測定系としては正常動作していると判断できたので、記録できている測定データ数で解析を進めた。

測定地点番号 B13（見通しなし）では、2 度の測定を実施したので、23 地点で合計 24 個の測定値がある。

### 3) 伝搬損失算出手法

式 1 によって、SS-RSRP の測定値  $Pr0$ [dBm]と、ノキア基地局の諸元から伝搬損失  $L$ [dB]を算出した。ここで、 $P_{te}=240$ kHz 幅に相当するノキア基地局送信電力[dBm]=約-4.2dBm⇒送信周波数 29.04480GHz の 100MHz 幅伝送で送信電力 158.5mW なので、240kHz 幅の送信電力[mW]を求めて、単位を [dBm]へ変換。サブキャリア波の間隔=240kHz なので、SS-RSRP の受信帯域幅も 240kHz となる。

$$L = P_{te} + G_t - Pr_0 \quad (\text{式 1})$$

$G_t$  = ノキア基地局アンテナ利得 [dBi]=23dBi

(192 個のアンテナ素子による合成利得)

$Pr_0$  = SS-RSRP (中央値) の測定値[dBm]



図 5-22  $Pr_0 = P_{te} + G_t - L$  (式 2)

送信側であるノキア基地局のアンテナは、垂直偏波と水平偏波に対応。但し、空中線電力が各偏波にどのように分配給電されているかは不明。また、送信アンテナ面の法線は水平から下向きに 20 度傾斜。受信側であるエリアテスタのアンテナは、垂直偏波で測定。エリアテスタのアンテナ利得= 3dBi、水平面内無指向性、垂直面内の半値幅 (-3dB 幅) = -22.5 度から +22.5 度。

伝搬損失  $L$ [dB]は、自由空間伝搬損失  $L_0$ [dB]と比較した。  $L_0$  は、式(3)から理論的に計算した。

$$L_0 = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (\text{式 3})$$

$d$  = ノキア基地局のアンテナとエリアテスタのアンテナを結ぶ直線距離[m]

$$\lambda = \text{ノキア基地局の送信周波数 (29.04480GHz) の波長[m]} \\ = 300/29044.8=0.0103\text{m}$$

#### 4) 測定結果

以下図中に 伝搬損失の測定結果を×印で示した。各図の横軸は、ノキア基地局のアンテナとエリアテストのアンテナを結ぶ直線距離である。また、自由空間伝搬損失も破線で示した。「図 5-23 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48)」は、23 の測定地点の 24 個の伝搬損失 (LOS と NLOS の両方を含むすべて、かつ、ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側) の測定結果である。

「図 5-24 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48/LOS のみ)」は、「図 5-23 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48)」から LOS だけの測定結果 (13 の測定地点の 13 個の伝搬損失) を示した。

「図 5-25 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48/NLOS のみ)」は、「図 5-23 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48)」から NLOS だけの測定結果 (10 の測定地点の 11 個の伝搬損失) を示した。

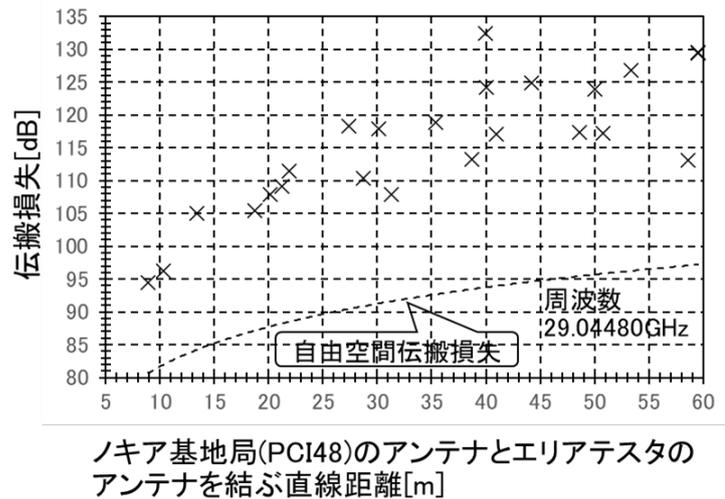


図 5-23 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48)

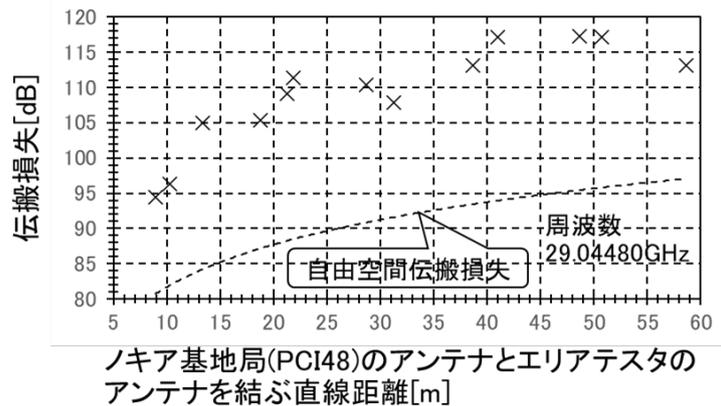


図 5-24 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48/LOS のみ)

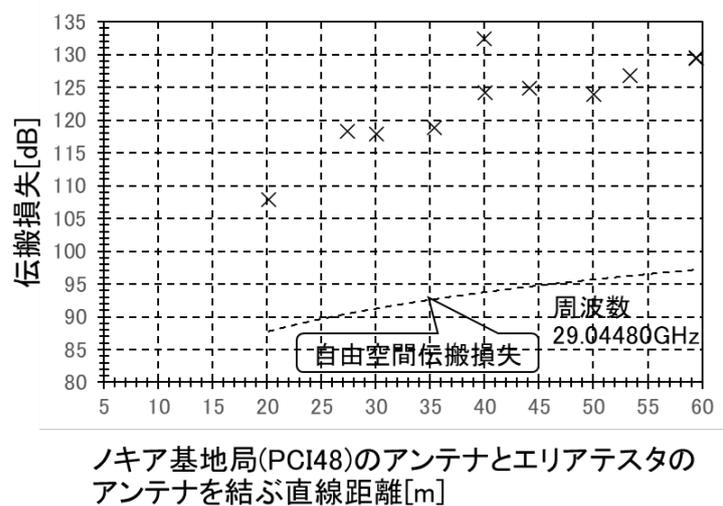


図 5-25 伝搬損失の測定結果 (28GHz 帯 : PCI48/NLOS のみ)

### 5) 考察

- I. ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅は 90 度なので[1]、その内側がサービスエリアである。測定地点がサービスエリアに存在し、かつ、LOS だけの測定結果である図 X.2 に着目すると、伝搬損失は、自由空間伝搬損失に比べて最大 23dB 程度大きい傾向がある。

本実験環境では LOS といっても、各種の物体等が、基地局アンテナとエリアテストのアンテナ間の電波伝搬路の周辺には多数存在し、また、壁面、床面、及び天井面も存在する空間であり、理想的な自由空間とは異なる環境での測定結果である。従って、伝搬に伴う電波の吸収や反射等の効果が総合的に表れて上記の傾向になっていると推測する。また、ノキア基地局アンテナがマルチビームであること等が上記の傾向の一因になっている可能性もあると推測でき、この件を次の項目(2)で考察する。

- II. ノキア基地局アンテナは、192 個のアンテナ素子による 32 個のマルチビームを垂

直偏波と水平偏波で送信していると理解しているが[1]、詳細は不明である。もしも空中線電力が垂直偏波と水平偏波で等しく分配されているならば、式1における  $P_{te}$  は 3dB 低下し、受信アンテナが垂直偏波なので、伝搬損失  $L$  は 3dB 減少する（「図 5-24 伝搬損失の測定結果（28GHz 帯：PCI48/LOS のみ）」においては各×印が 3dB だけ縦軸方向で自由空間伝搬損失に近づく）可能性がある。

さらに、同アンテナの 32 個のマルチビームによる水平面の主輻射の角度幅は 90 度であるが[1]、垂直面内のマルチビームの角度変化の幅や合成利得の変化の詳細は不明である。もしも、ある測定地点では、各ビームの水平面及び垂直面の最大の利得の指向方向からズレていた場合には、式1における  $G_t$  は低下するので、伝搬損失  $L$  は減少する（「図 5-24 伝搬損失の測定結果（28GHz 帯：PCI48/LOS のみ）」においては各×印が縦軸方向で自由空間伝搬損失に近づく）ことになる。

ローカル 5G 無線局運用者がより適切に運用可能とするためには、基地局製造業者であるノキア社から、より詳細な各種の情報が提供や公開されることが望まれる。

- III. 測定地点がサービスエリア（ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側）に存在し、かつ、NLOS だけの測定結果である図 X.3 に着目すると、伝搬損失は、概ねの測定地点では、自由空間伝搬損失に比べて最大 32dB 程度大きい傾向がある。

なお、距離が約 40m における一部の測定地点（地点番号 B15）の伝搬損失が約 132dB であり、同距離付近のその他の測定地点よりも伝搬損失が約 8dB 大きくなっていった。地点番号 B15 における見通しなしの状況は、床面から天井まで石膏ボードで遮られた壁面が存在し、そこから、地点番号 B15 は、さらに少し奥の通路へ入った状況だったので、電波（透過波、回折波及び反射波）は、かなり到来しにくい状況だったと考えられる。

また、上記項目(2)で考察した件は、「図 5-25 伝搬損失の測定結果（28GHz 帯：PCI48/NLOS のみ）」においても同様である。ローカル 5G 無線局運用者がより適切に運用可能とするためには、基地局製造業者であるノキア社から、より詳細な各種の情報が提供や公開されることが望まれる。意見募集でも意見が出ていたが[2]、ローカル 5G の無線設備（基地局や端末等）を日本国内向けに提供する製造業者等に対して、ローカル 5G の無線局申請に必要な情報はもちろんのこと、ローカル 5G 無線局運用を適切に運用可能とするための情報を WEB サイト等で積極的に公開するように、総務省から指導や勧告が実施されることを、多くのローカル 5G 無線局運用者は望むと思われる。

- IV. 「図 5-26 伝搬損失の測定結果」（本資料では次ページに記載）には、LOS だけ、かつ、ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側に測定地点が存在する場合に、支柱 A に設置したノキア基地局(PCI44)と、同 B に設置したノキア基地局(PCI48)の各伝搬損失を比較して示した。これら両者の伝搬損失は概ね同じ傾向であることがわかった。
- V. 一方、「図 5-27 伝搬損失の測定結果」（本資料では次々ページに記載）には、NLOS だけ、かつ、ノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側に測定地点が存在する場合に、支柱 A に設置したノキア基地局(PCI44)と、同 B に設置したノキア基地局(PCI48)の各伝搬損失を比較して示した。両者の伝搬損失を

同じ距離付近で比較すると、支柱 B に設置したノキア基地局(PCI48)における伝搬損失は、同 A に設置したノキア基地局(PCI44)の伝搬損失より、少し大きい傾向（最大で 9dB 程度）が見られた。

NLOS の状況、即ち、測定地点における見通しなしの状況は、各測定地点の個別の状況に依存すると理解できるので、支柱 B のサービスエリアにおける見通しなしの状況は、同 A のサービスエリアにおける見通しなしの状況より厳しかった可能性もありえる。

また、上記項目(2)でも述べたように、垂直面内のマルチビームの角度変化の幅や合成利得の変化の詳細は不明であるが、支柱 B に設置されたノキア基地局(PCI48)の送信アンテナ面の法線は、水平から下向きに 20 度傾斜されていることが、上記の傾向に関係している可能性もあるかもしれない。

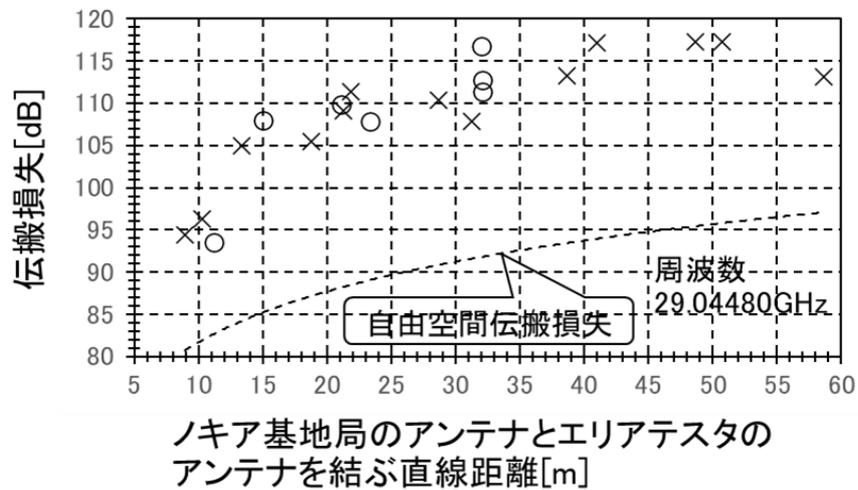
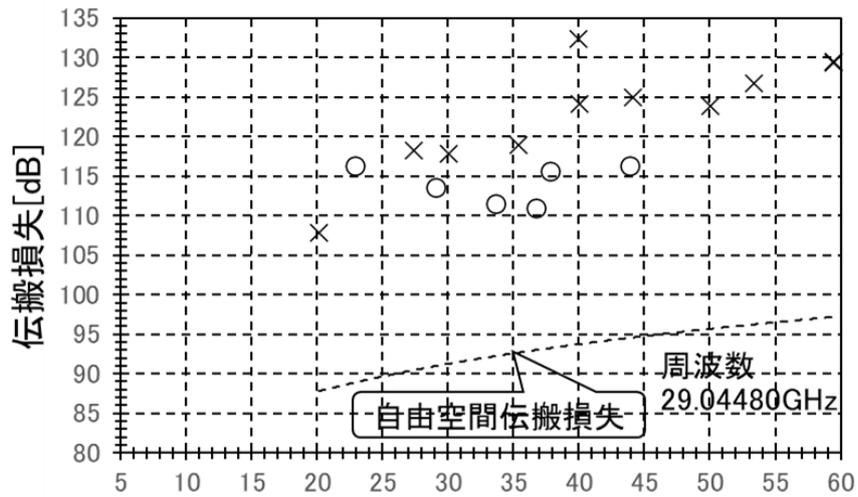


図 5-26 伝搬損失の測定結果 (LOS のみ、かつノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側)

- ×印： ノキア基地局（支柱 B、PCI48）による 13 の測定地点の 13 個の伝搬損失
- 印： ノキア基地局（支柱 A、PCI44）による 6 の測定地点の 7 個の伝搬損失



ノキア基地局(PCI48)のアンテナとエリアテスト  
のアンテナを結ぶ直線距離[m]

図 5-27 伝搬損失の測定結果 (NLOS のみ、かつノキア基地局アンテナの水平面の主輻射の角度幅 90 度の内側)

- ×印： ノキア基地局（支柱 B、PCI48）による 10 の測定地点の 11 個の伝搬損失
- 印： ノキア基地局（支柱 A、PCI44）による 6 の測定地点の 6 個の伝搬損失

### 5.3.4.3 伝送スループット特性

#### (1) 4.7GHz 帯

4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせによる伝送スループットの特性について、以下に示す。

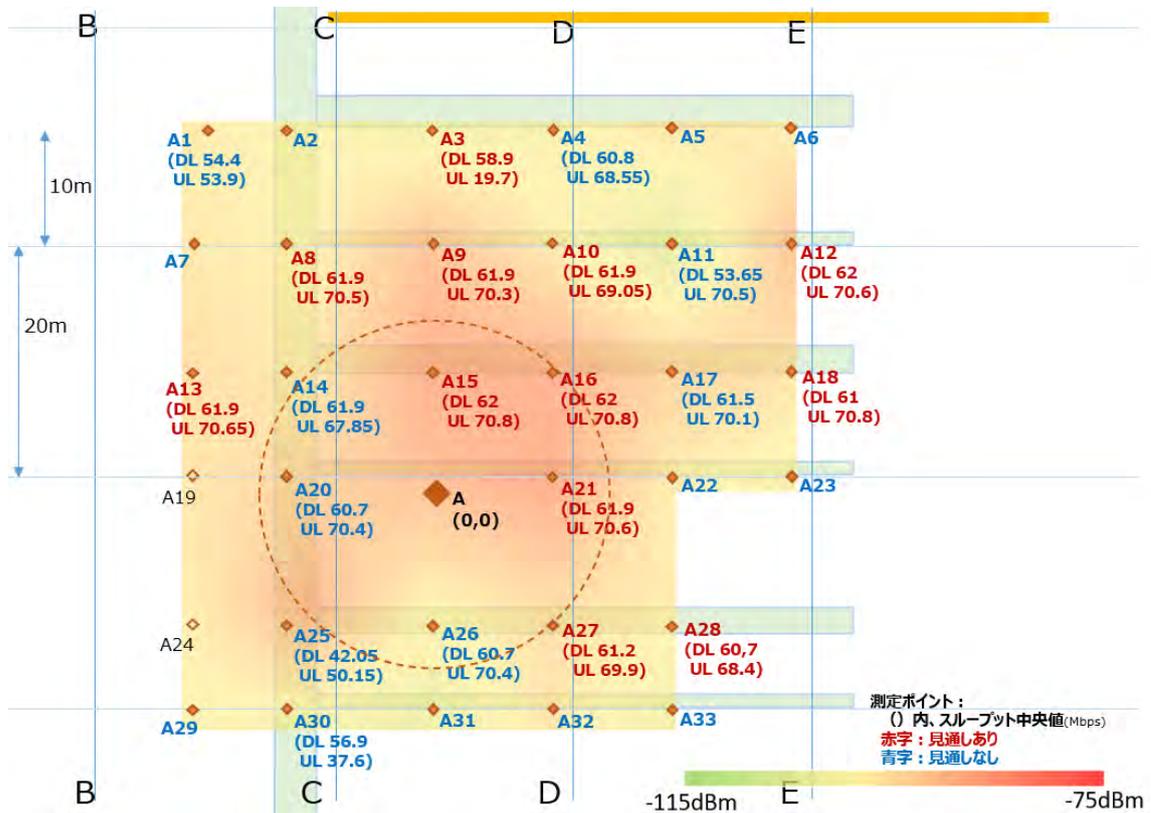


図 5-28 4.7GHz 帯 伝送スループット

見通しありの測定ポイントにおいて、DL 伝送スループットは概ね 61.3Mbps 程度（中央値）となった。UL 伝送スループットは、概ね 70.4Mbps 程度（中央値）となっている。

見通しなしの測定ポイントでは、DL 伝送スループットは、概ね 61Mbps（中央値）となり、概ね 70.35Mbps（中央値）である。

見通しあり、なし共に、スループットが出ている測定ポイントにおいては、端末のログからは、BLER が 0% に近く安定した電波環境となっている。一方通信ができなかった測定ポイントにおいては BLER が 100% になり電波環境が不安定であることが確認できた。

詳細は、「別紙： MIC-L5G-GJ-OP-03-03-試験結果取りまとめ資料（4.7GHz 帯アンテナ支柱 A）」参照。

#### (2) 28GHz 帯

28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせによる伝送スループットの特性について、以下に示す。

■評価エリア A

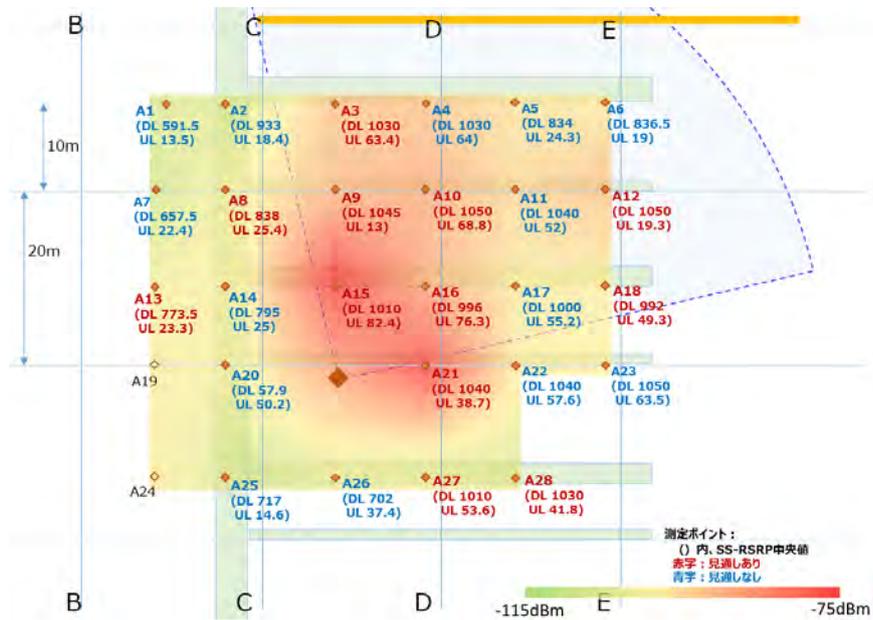


図 5-29 28GHz 帯 評価エリア A 伝送スループット

■評価エリア B

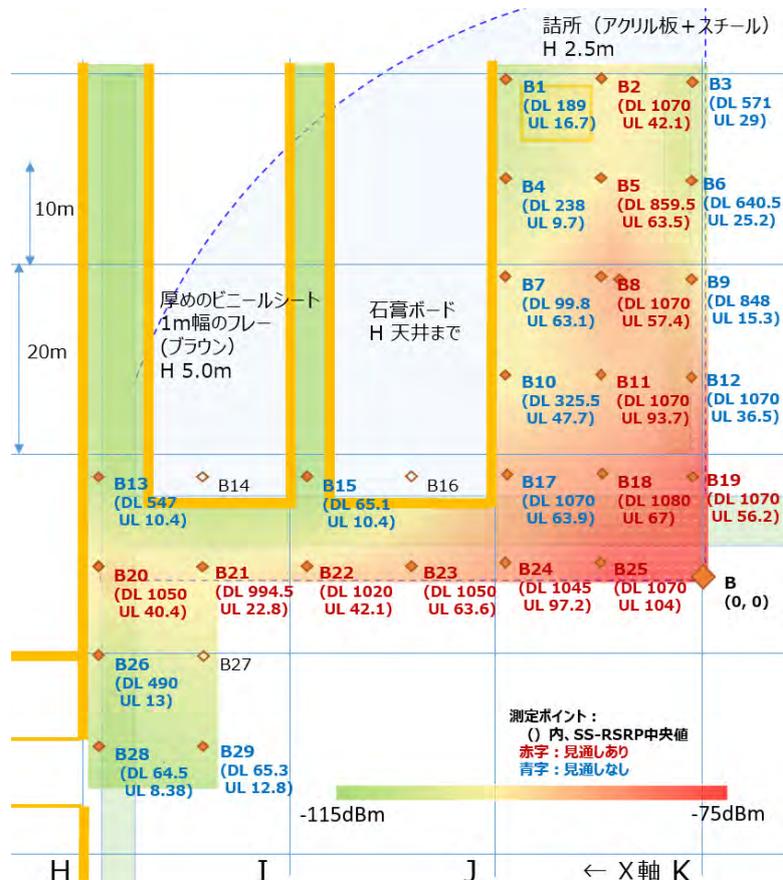


図 5-30 28GHz 帯 評価エリア B 伝送スループット

見通しありの測定ポイントにおいて、LTE を除き 5G のみで DL 伝送スループットは概ね 1.00Gbps 程度（中央値）となった。UL 伝送スループットは、概ね 40.2Mbps 程度（中央値）となっている。

見通しなしの測定ポイントでは、DL 伝送スループットは、概ね 1.00Mbps（中央値）となり、概ね 25.4Mbps（中央値）である。

見通しあり、なし共に、スループットが出ている測定ポイントにおいては、端末のログからは、BLER が低く安定した電波環境となっている。一方スループットが出ていない測定ポイントにおいては BLER が不安定であり MCS も変動している状況ということが分かった。

詳細は、「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-03-01-試験結果取りまとめ資料（28GHz 帯アンテナ支柱 A）」及び「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-03-02-試験結果取りまとめ資料（28GHz 帯アンテナ支柱 B）」参照。

28GHz 帯 ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいては、「3.1.3.2 28GHz 帯のカバーエリア」にて算出したカバーエリア（半径 65m）よりも広い範囲で通信が可能であることを確認した。

適応変調のため、柱の裏、工作機械の裏や工場内ハウスの裏といった見通しのない A1、B1 といった測定ポイントでは、MCS が変動しスループットが出ないこと、場合によっては 5G が切れて LTE に落ちてしまう事象も確認された。

#### 5.3.4.4 伝送遅延特性

##### (1) 4.7GHz 帯

4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせによる伝送遅延の特性について、以下に示す。

4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせの Ping による伝送遅延の測定結果を以下のグラフにて示す。Ping による測定において、31 の測定ポイントの内、23 測定ポイントが安定した通信環境下となり、測定を実施した。

表 5-20 安定した通信環境下での Ping による伝送遅延測定の結果（4.7GHz 帯）

最小値	最大値	平均値	中央値
4.1 msec	14 msec	6.1 msec	5.9 msec

この 23 測定ポイントを受信電力のヒートマップ上に示すと、以下の通りとなる。

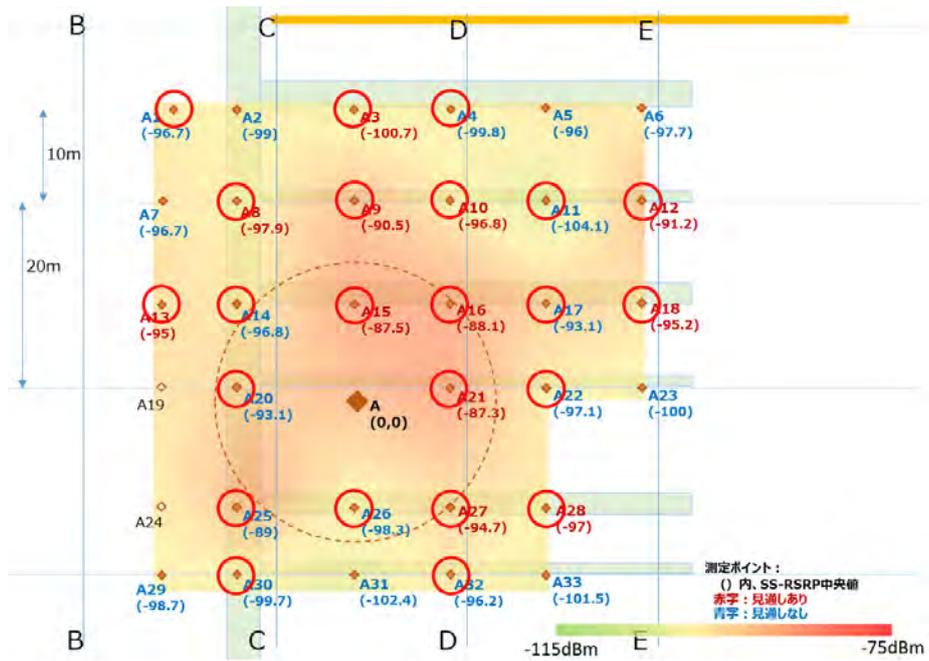


図 5-31 Ping 測定ポイント

また、23 測定ポイントの Ping 測定の結果と基地局との距離の関係を以下のグラフに示す。

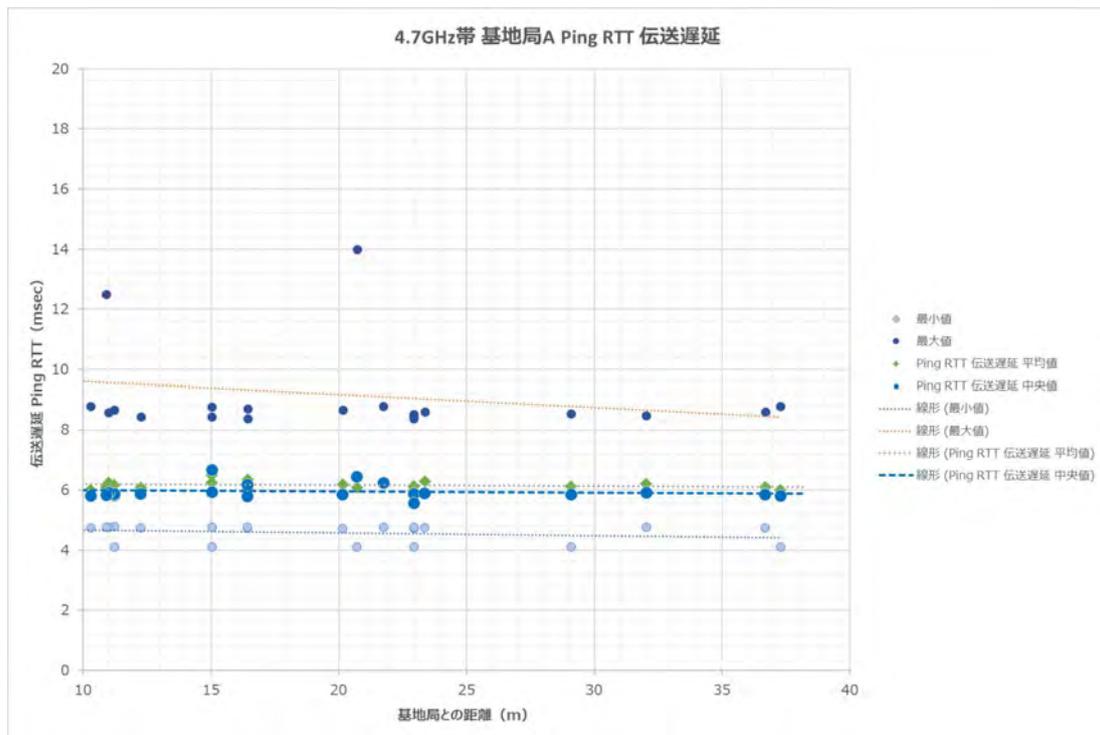


図 5-32 4.7GHz 帯 伝送遅延 Ping グラフ (基地局との距離)

伝送遅延としては、基地局との距離に応じて、影響があると想定されたが、40m までの範囲においては大きな違いは見られなかった。最大値の近似線 (線形) が右肩下がりとなって

おり、距離が遠くなるにつれ遅延が短くなるようにグラフ上見えてしまうが、これは10msec以上かかっている2ポイントの影響があると考えられ、最大値についても距離による大きな違いは見られない。

一方、通信ができなかった7測定ポイントは、見通しがなくカバーエリアから外れた地点であったため、Destination Host Unreachableとなり伝送遅延の結果が測定できなかった。

見通しなしの測定ポイント及びカバーエリアの外側の測定ポイントにおいては、端末のログからもRSSIの値が低くなり、BLERも不安定となることが確認されている。

Pingが可能であった、23測定ポイントの中でも、周辺環境の変動（機器が移動する等）によってはマルチパスフェージングが発生し、極端にPing応答に時間がかかる場合や、パケットロスとなるケースも確認することができた。

測定ポイント A20 での伝送遅延 Ping の結果は、以下の通り。

- ・ 10msec 以下（平均 6.09msec）

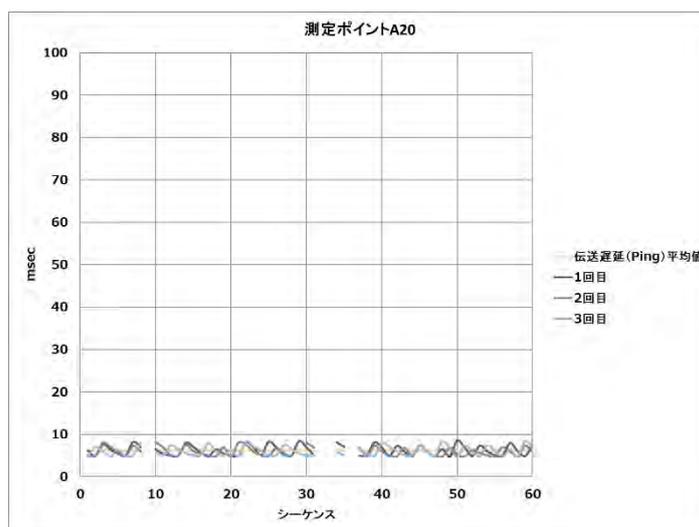


図 5-33 測定ポイント A20 での伝送遅延 Ping グラフ

その他、測定ポイントについては、別紙「MIC-L5G-GJ-OP-03-03-試験結果取りまとめ資料（4.7GHz帯アンテナ支柱A）」を参照。

## (2) 28GHz帯

28GHz帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせによる伝送遅延の特性について、以下に示す。

### 1) 基地局 A

28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせの Ping による伝送遅延の測定結果を以下のグラフにて示す。Ping による測定において、31 の測定ポイントの内、31 の測定ポイント全てで Ping 通信が可能であり、測定を実施した。

表 5-21 Ping による伝送遅延測定の結果 (28GHz 帯/基地局 A)

最小値	最大値	平均値	中央値
8.74 msec	320 msec	32.4 msec	31.8 msec

なお、測定ポイント A1、A2、A16、A17、A18 にて、Ping の応答時間が極端に時間がかかる事象が確認された。要因の特定は難しいが、測定時の環境変化（工場内設備の移動や、人の移動など）により瞬間的にマルチパスフェージングが発生し、悪影響を及ぼしてしまったと考えることができる。

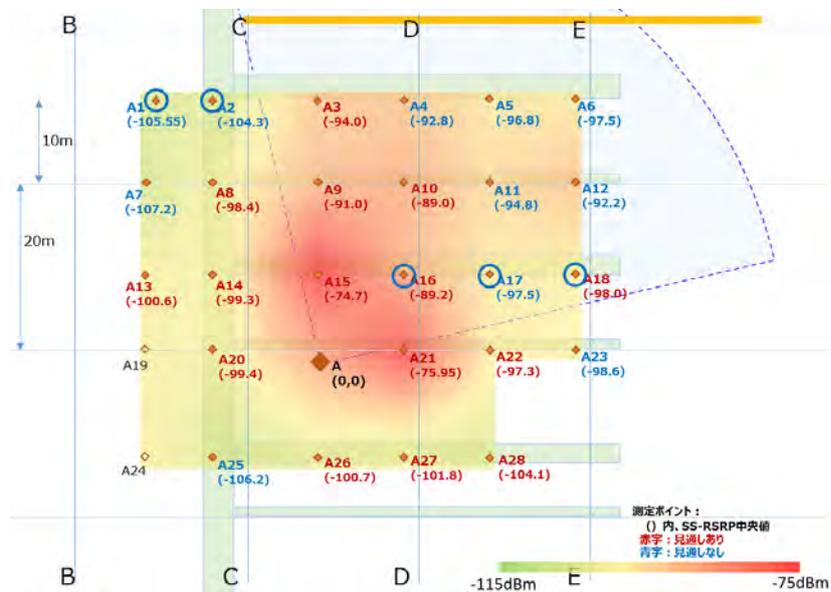


図 5-34 Ping 応答時間がかかった測定ポイント (基地局 A)

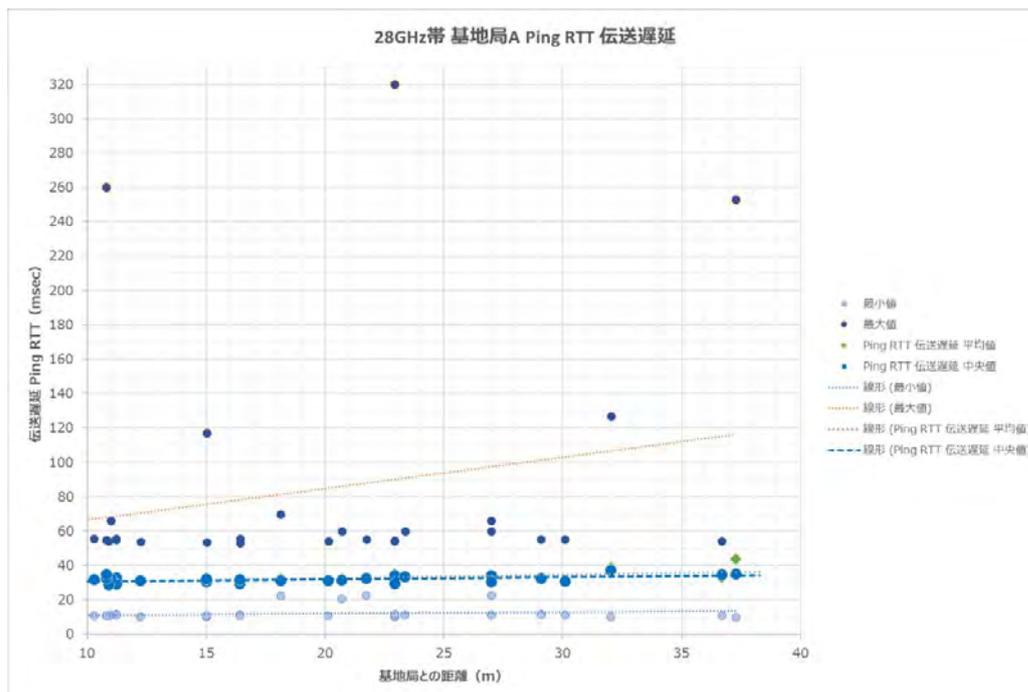


図 5-35 28GHz 帯 基地局 A 伝送遅延 Ping グラフ (基地局との距離)

伝送遅延としては、基地局との距離に応じて、影響があると想定されたが、40m までの範囲においては大きな違いは見られなかった。

測定ポイント A21 での伝送遅延 Ping の結果は、以下の通り。

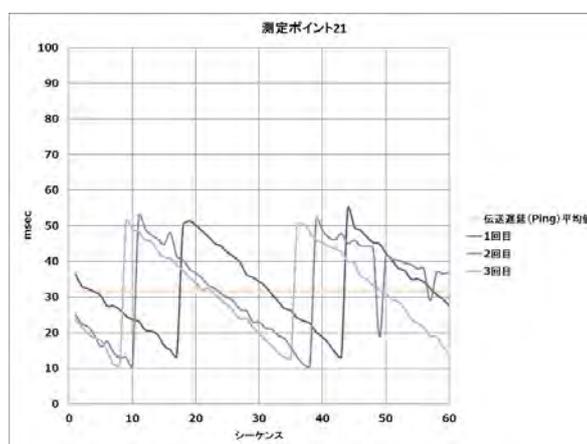


図 5-36 測定ポイント A21 での伝送遅延 Ping グラフ

伝送遅延 Ping の結果は、10msec~50msec の RTT となり、平均は 31.59msec であった。Ping による RTT の測定のため UL/DL それぞれの伝送遅延は、概ね 1/2 と想定されるため、片方向の伝送遅延は、約 15.8msec となる。

なお、Ping の応答にバラツキがみられるのは、Ping の通信が間欠的であるために、常に DRX 状態となり、その後の通信開始時に無線区間で待ちが入る可能性があるためと考えられる。

※DRX (Discontinuous reception) 低消費電力技術

## 2) 基地局 B

28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせの基地局 B での Ping による伝送遅延の測定結果を以下のグラフにて示す。Ping による測定において、31 の測定ポイントの内、31 の測定ポイント全てで Ping 通信が可能であり、測定を実施した。

表 5-22 Ping による伝送遅延測定の結果 (28GHz 帯/基地局 B)

最小値	最大値	平均値	中央値
9.23 msec	493 msec	34.3 msec	32.0 msec

なお、測定ポイント B1、B3、B5、B7、B15、B20、B26 にて、Ping の応答時間が 101msec ~493msec と極端に時間がかかる事象が確認された。要因の特定は難しいが、測定時の環境変化 (工場内設備の移動や、人の移動など) により瞬間的にマルチパスフェージングが発生し、悪影響を及ぼしてしまったと考えることができる。また、カバーエリア端に近く、受信電力も低い測定ポイントで発生していることも分かる。

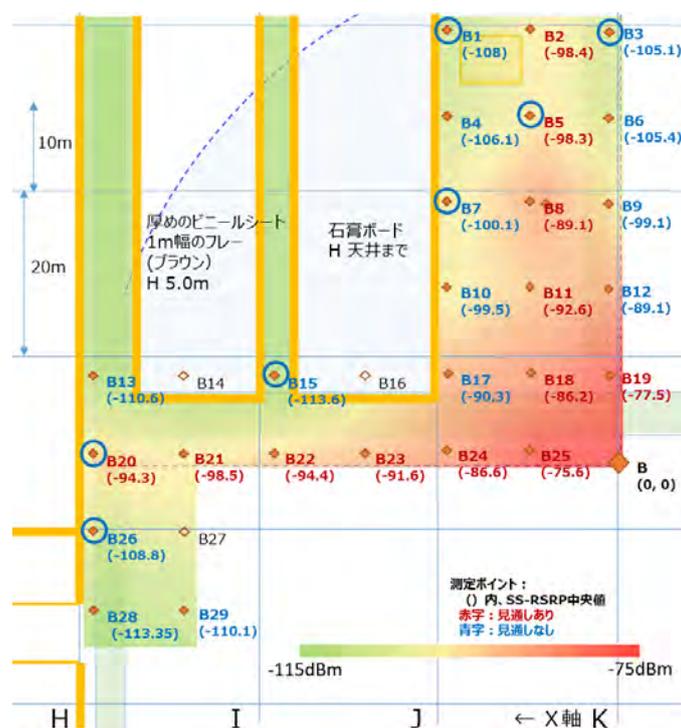


図 5-37 Ping 応答時間がかかった測定ポイント (基地局 B)

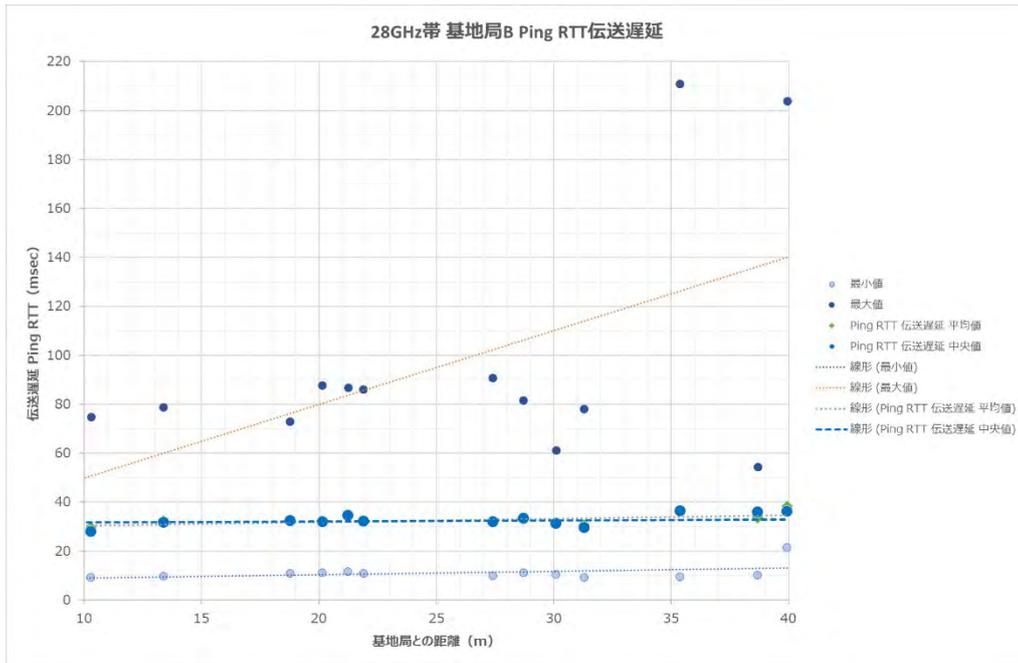


図 5-38 28GHz 帯 基地局 B 伝送遅延 Ping グラフ (基地局との距離)

伝送遅延は、基地局との距離に応じて、影響があると想定している。距離が離れれば離れるほど受信電力が弱くなり、電波環境に応じて伝送遅延が大きくなると想定している。

評価エリア B の基地局 B の結果からは、100msec を超える Ping 応答時間となっているポイントが 35m よりも遠い測定ポイントで 2 つ現れていることから、距離に応じて伝送遅延に影響があるということが確認された。

#### 5.3.4.5 工場内でのローカル 5 G の電波の反射による影響評価

貞宝第一工場の評価エリア A に設置された基地局を用いて、「図 5-39 評価エリア A における反射に関する測定地点」に示す 3 つの地点 (A6, A9', KJ) と、評価エリア B に設置された基地局を用いて、「図 5-40 評価エリア B における反射に関する測定地点」に示す 4 つの地点 (B1', B7, B9, B15) で、28GHz 帯の反射による影響を検討するための測定を実施した。

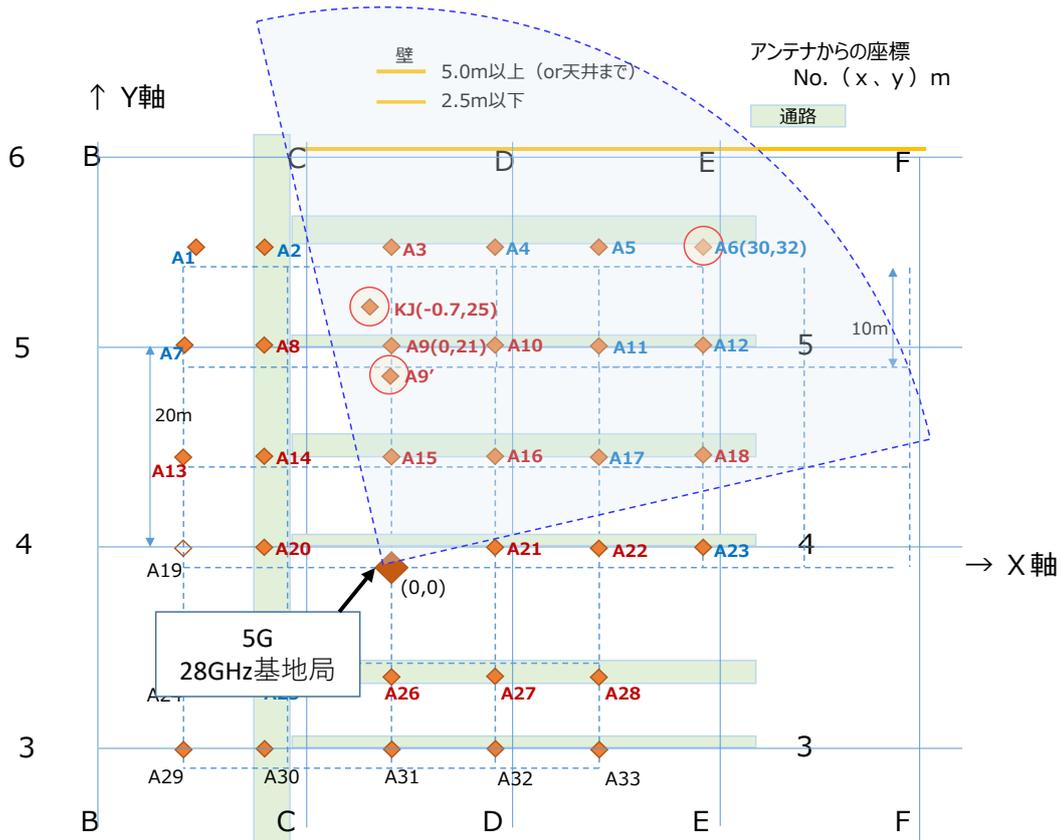


図 5-39 評価エリア A における反射に関する測定地点

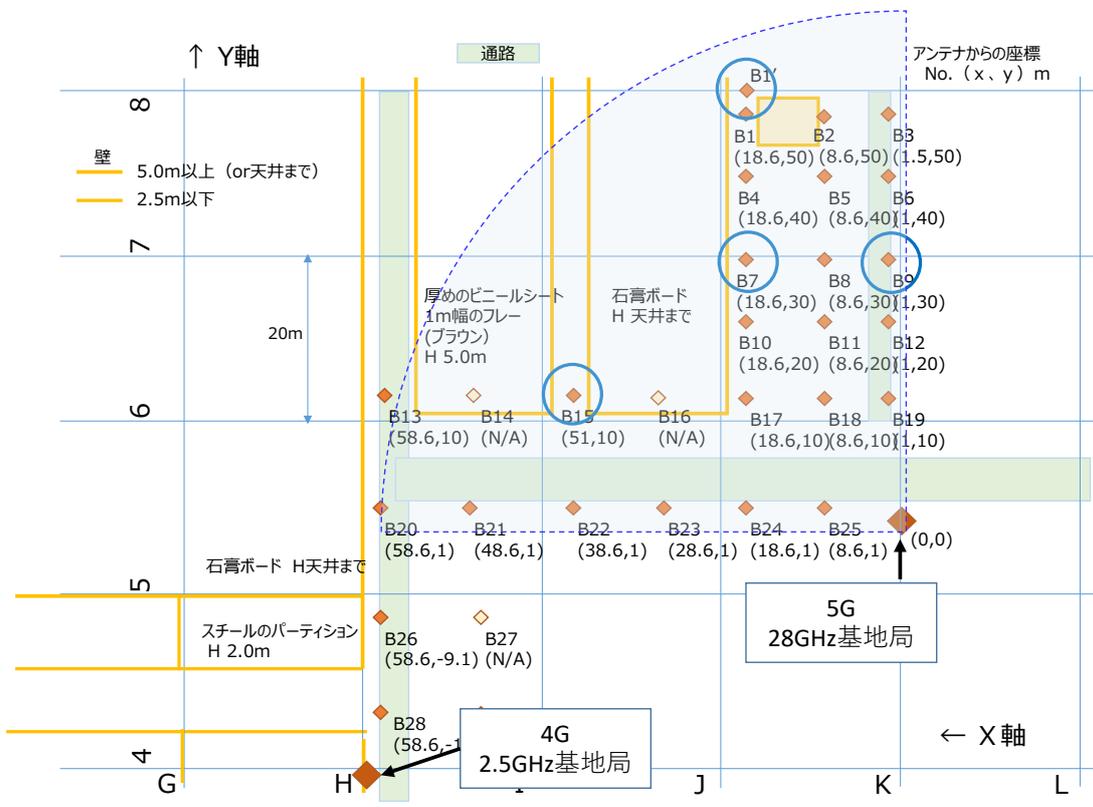


図 5-40 評価エリア B における反射に関する測定地点

### (1) 測定項目及び測定方法

各測定地点において、「表 5-23 反射に関する測定項目と測定方法」に記載の測定を実施した。

表 5-23 反射に関する測定項目と測定方法

#	測定項目	測定方法
1	基地局方向の受信電力測定	基地局の方向と特定し、その方向にホーンアンテナを向けて受信電力を測定（100 点以上）
2	遮蔽物を設置した際の受信電力測定（基地局が見通しの場合）	ホーンアンテナの前 40cm のところに、遮蔽物を置いて見通し外としたときの受信電力の変化を測定
3	受信電力が最強となる到来方向の特定	ホーンアンテナを回転させて向きを変更し、受信電力が最強となる方角を特定する
4	反射板を設置した場合の受信電力測定	反射板を設置した場合に受信電力が改善するかどうか調べる（ステンレス板による鏡面反射板／アルミ фольによる散乱板）

なお、ホーンアンテナの高さは、地上から 145cm に設置した。また、ホーンアンテナ 1 つの信号を同軸ケーブルで接続し、エリアテスタ (PCTEL) にて各セル(PCI)毎の同期信号 S S の受信電力の測定を行った。ホーンアンテナの利得と、ケーブル損失について下記に示す。

- ・ ホーンアンテナの利得： 19dB
- ・ ケーブル損失： 6dB

なお、反射板については、アルミ фольによる散乱板とステンレス板による鏡面反射の 2 種類を活用した。ただし、鏡面反射の場合は、手で持って測定を行うと、測定中に基地局の電波が異なる方向に飛んでデータがバラつくことが分かり、以降では、鏡面反射の結果は、固定設置できた場合のみ結果を示すものとする。

また、反射板の設置場所については、基地局から見通しがとれる場所に反射板を設置するものとし、受信する場所までの距離が極力短くなるように設置場所を定めることとした。

また、遮蔽物としては、アルミ фольによる散乱板の裏面をホーンアンテナに向けて信号を遮ることとした。



図 5-41 反射板・散乱版の設置



散乱板 (裏面を遮蔽板として活用)  
アルミフォイルをプラダンに張り付けて作成

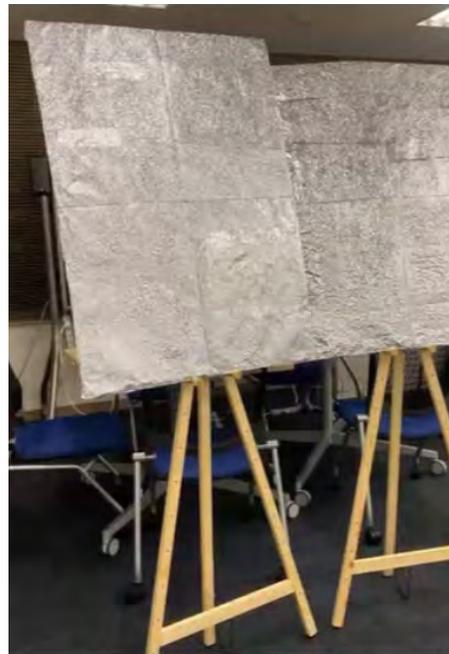
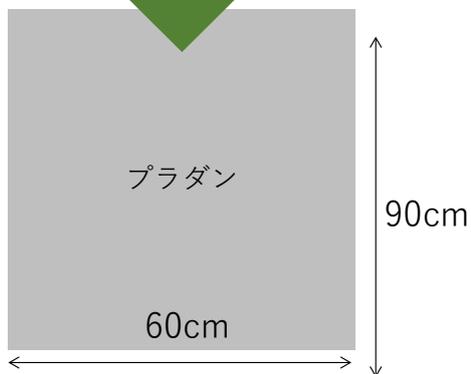


図 5-42 プラダンにアルミフォイルを張り付けた散乱板 (裏面活用時：遮蔽板)

## (2) 反射影響の検討結果

各地点において、反射波の測定によって検討した結果を以下の「表 5-24 反射影響の検討結果」に纏める。

表 5-24 反射影響の検討結果

#	地点	反射影響の検討
1	A6	基地局から見通し外で、基地局方向の受信電力は-100dBm であるが、到来方向として北から 109° 方向の反射波で-87dBm で受信している。通路に沿って設置された金属パーティションの反射であると推測。(反射波が強いため、反射板設置による改善は少ない)
2	A9'	基地局からの直接波が-72dBm 程度であるが、受信するホーンアンテナの前を遮蔽すると-91dBm まで信号が劣化。周囲の構造物の反射波で-88dBm の信号が届いている。端末の近くに散乱板を設置することで、-83dBm まで受信電力を強めることができた。
3	KJ	基地局からの直接波が-90dBm 程度であるが、受信するホーンアンテナの前を遮蔽すると-100dBm まで信号が劣化。周囲の構造物の反射波で-98dBm の信号が届いている。端末の近くに鏡面反射板を設置することで、-83dBm まで受信電力を強めることができた。
4	B115	基地局から見通しがなく、基地局方向の受信電力が-119dBm で 5G 通信ができず、4G となる場所。鏡面反射板の設置により、受信電力を-94dBm まで改善して、5G 通信が可能となる。4G で DL: 65Mbps のところ、5G 通信によって DL: 906Mbps まで改善
5	B1'	基地局から見通しがなく、基地局方向の受信電力が-111dBm で 5G 通信ができず、4G となる場所。鏡面反射板の設置により、受信電力を-99dBm まで改善して、5G 通信が可能となる。4G で DL: 58Mbps のところ、5G 通信によって DL: 693Mbps まで改善
6	B7	基地局から見通しがなく、反射波によって 5G 通信が可能な場所。反射板がない状況で受信電力が-102.3dBm であったのに対して、鏡面反射の反射板を設置した場合に-89.7dBm まで改善することができた。散乱反射の場合は、反射板と測定器の距離が遠く改善効果は見られなかった。
7	B9	基地局から見通しがなく、反射波によって 5G 通信が可能な場所。反射板がない状況で受信電力が-106.5dBm であったのに対して、散乱反射の反射板を設置した場合に-98.4dBm まで改善することができた。鏡面反射も改善が見られたが、反射板を手にもった測定のため誤差が大きかった。

以下に、各測定地点における結果を示す。

### (3) 評価エリア A

#### 1) A6 地点 (基地局は見通し外: NLOS)

A6 地点における測定結果を「表 5-25 A6 地点の測定結果」に示す。(SS の受信電力は、PCI=41 の読み取り値)

表 5-25 A6 地点の測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力測定	-100 dBm	333° (北西)
2	受信電力が最強となる到来方向	-87 dBm	109° (南東)
3	反射板を設置した場合の受信電力	-84 dBm (散乱板)	109° (南東)

A6 地点において、受信電力が最強となる到来方向について、「図 5-43 A6 地点における到来波の受信電力測定結果」に測定結果を示す。

この「図 5-43 A6 地点における到来波の受信電力測定結果」の表現方法について説明する。「図 5-39 評価エリア A における反射に関する測定地点」に示すエリア A における反射に関する測定地点の X 軸と Y 軸と軸の方向は一致している。原点(x=0,y=0)における受信電力を-120dBm と仮定し、原点から点までの距離が受信電力を表している。1つのメモリを 10dB とし、受信電力-100dBm となる円を参考までに図に記載した。この線上であれば受信電力-100dBm であることを示している。各測定点から原点への方向が、電波到来方向を示しており、電波の到来方向にホーンアンテナを向けたときの受信電力の値をプロットしている。

北から 109° の南東方向にホーンアンテナを向けたとき、-87dBm で最も強い受信電力となった。

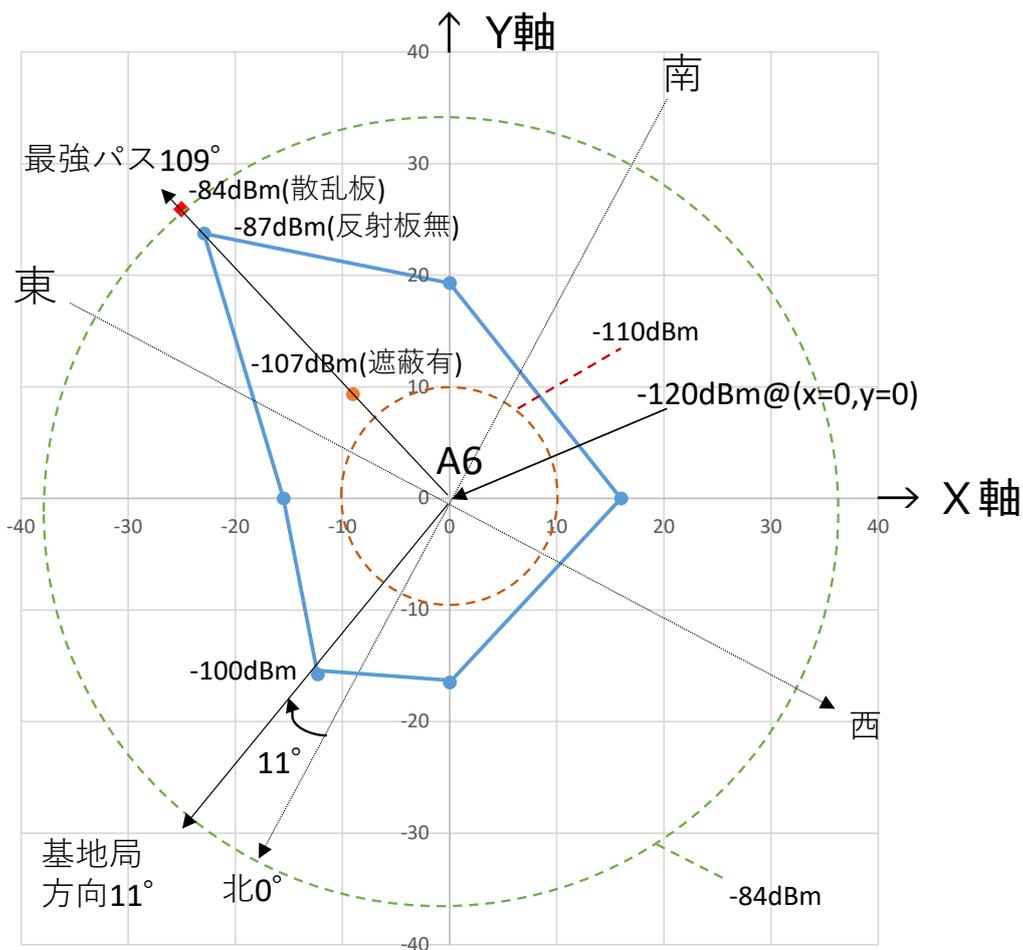


図 5-43 A6 地点における到来波の受信電力測定結果

この到来方向（北から  $109^\circ$  の角度）にホーンアンテナを向けて、ホーンアンテナより 40 cm 手前に遮蔽物を設置したところ、 $-107\text{dBm}$  に劣化した。この結果から、この到来方向の電波によって通信を行っていると考えられる。

A6 地点における反射の影響に関する検討について、「図 5-44 A6 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討」を用いて説明する。図の通路に沿って、金属のパーティションが設置されており、このパーティションによって反射していると考察される。そのパーティションに沿って、散乱板を設置したときに、 $-84\text{dBm}$  程度の強い受信電力を測定した。なお、鏡面反射するステンレス板に、基地局が映るようにして角度調整を行うことで、 $-88.4\text{dBm}$  程度の受信電力を測定することもできたが、反射板を人手で持って測定をしていたため、測定中に反射板の角度がずれてしまい、安定した測定結果を得ることができなかった。

なお、A6・A9'・B9 の地点において、鏡面反射板を人の手に持った状態で測定したため、測定誤差が大きい。また、A9'・B9 の地点においては散乱反射板も人の手に持った状態で測定しているため、測定誤差が大きい。

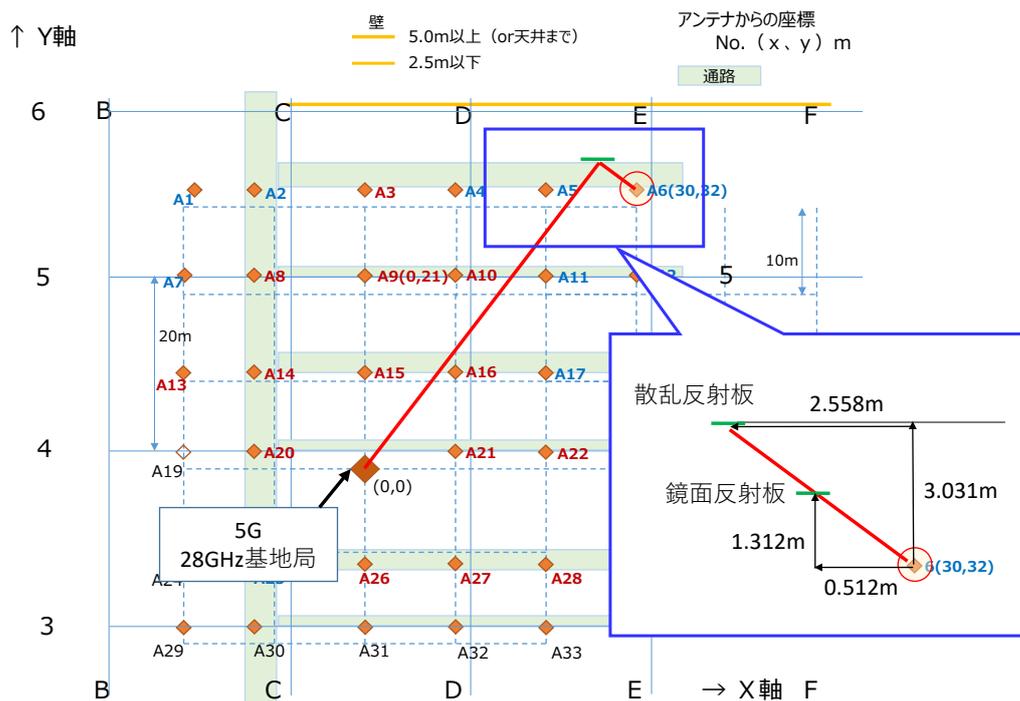


図 5-44 A6 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討

## 2) A9' 地点（基地局は見通し内: LOS）

A9 地点に、金属製の低いパーティションが設置されており、測定器を設置することが困難であったため、基地局より近づいた A9' 地点にて測定を行った。

A9' 地点における測定結果を「表 5-26 A9' 地点の測定結果」に示す。（SS の受信電力は、PCI=41 の読み取り値）

表 5-26 A9' 地点の測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力測定	-72dBm	333° (北西)
2	LOS の場合、遮蔽物を設置した際の受信電力の変化	-91.4 dBm	333° (北西)
3	受信電力が最強となる到来方向 (遮蔽した状態で測定)	-87.5 dBm	269° (西)
4	反射板を設置して受信電力測定	-83.3 dBm (散乱板)	192° (南西)

A9' 地点は、基地局から見通しの場所であり、基地局方向にホーンアンテナを向けると、同期信号を -72dBm の強い信号で受信していた。

工場のレイアウト変更により大型工作機械等が設置された場合、従来、見通しであった場所が、見通し外になることを想定して、ホーンアンテナから 40cm のところに遮蔽物を設置して同期信号を測定すると、-91.4dBm に劣化した。

この遮蔽された状況で、周囲から反射して届く電波を測定するために、ホーンアンテナの角度を変えて、受信電力が最強となる到来方向について測定した結果を、「図 5-45 A9' 地点における到来波の受信電力測定結果(遮蔽時)」に示す。

北から 269° の西方向にホーンアンテナを向けたとき、約-87.5dBm で最も強い受信電力となった。この到来方向には、工作機械や金属性のダクト等があるが、距離が遠いため、どの構造物で反射しているか特定するのは困難であった。また、基地局方向とは反対側になる真後ろの方向には、金属製の低いパーティションが設置されており、この金属製のパーティションによる反射で-88dBm 程度の受信信号を受信していることが分かった。

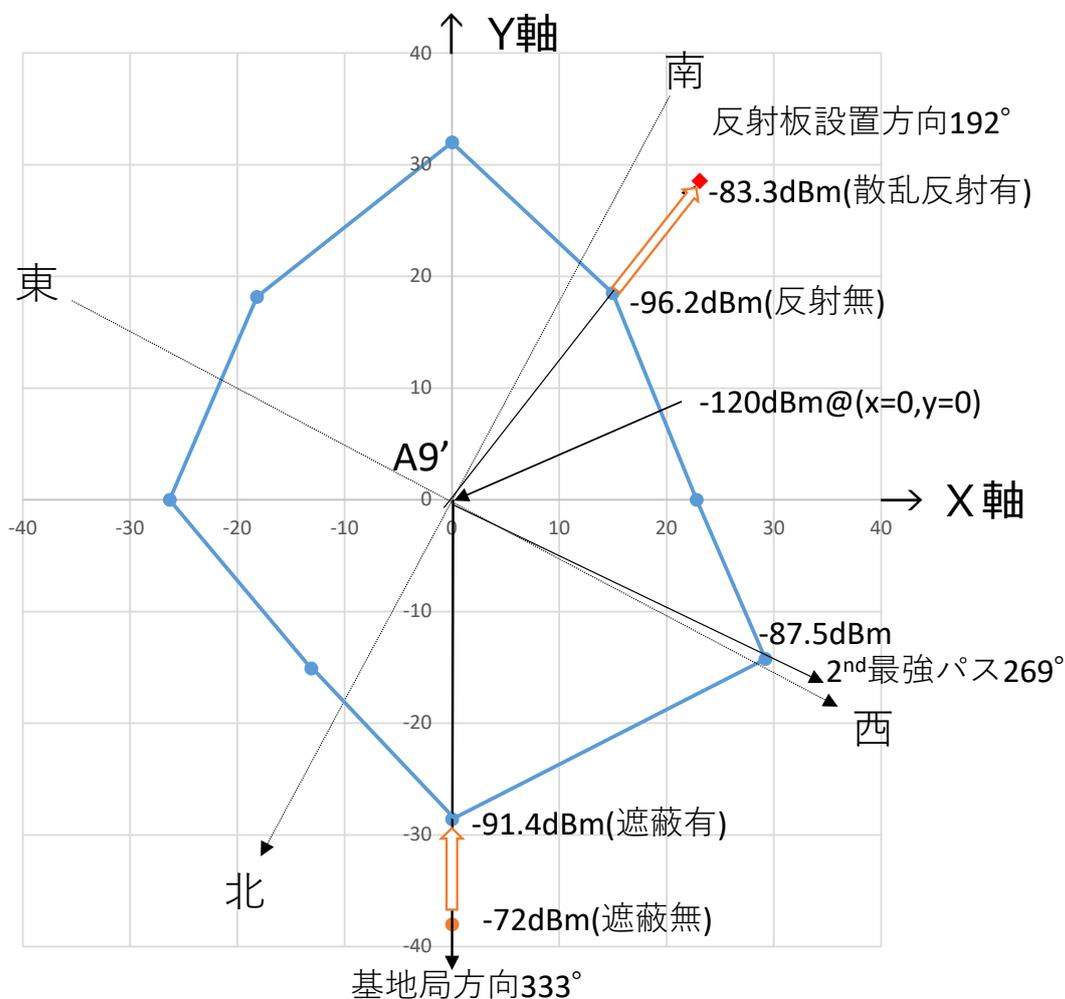


図 5-45 A9'地点における到来波の受信電力測定結果(遮蔽時)

2番目に強いパスの到来方向(北から 269° の西方向)に反射板を設置しようとした場合、基地局との反射角度が厳しく設置が困難なため、基地局方向とは反対方向となる後方の A9 よりの地点で、少し横に離れた場所を選んで反射板を設置することにした。

A9'地点における反射板設置について、「図 5-46 A9'地点における反射板(散乱反射)の影響検討」に示す。散乱板を設置することによって、受信電力を-87.5dBm から-83.3dBm まで改善することができた。これにより、工場のレイアウト変更によって、見通し外となった場合でも、散乱板の設置によって受信電力を改善する見通しが得られた。

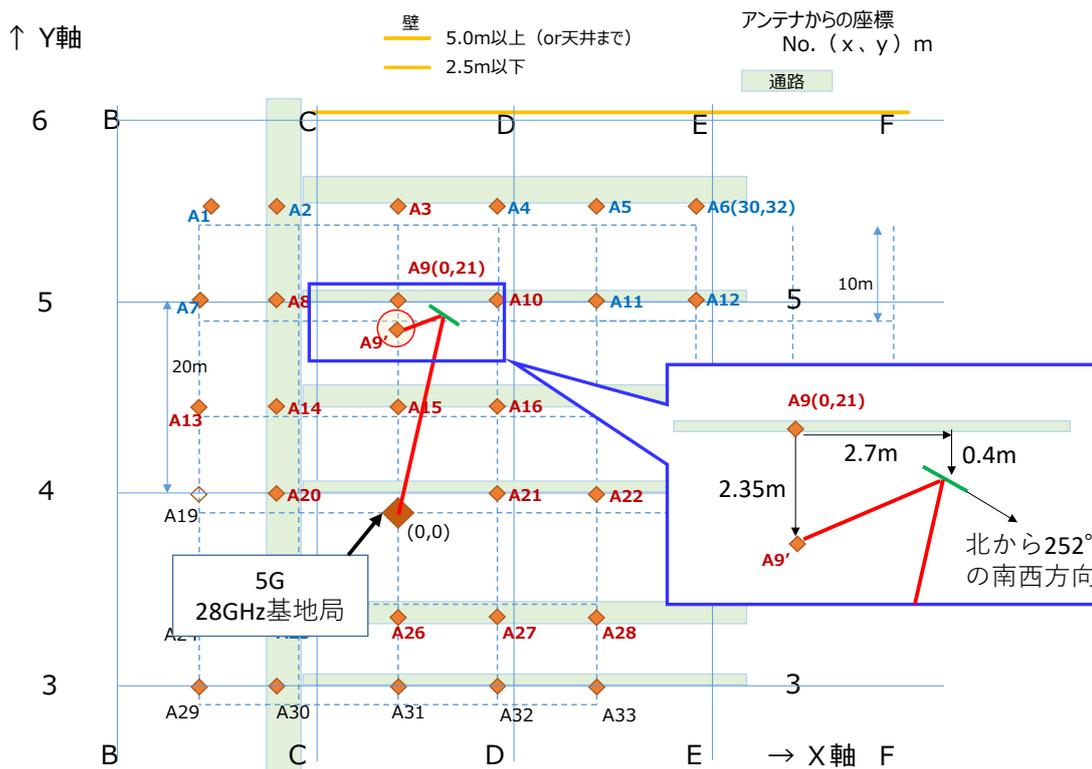


図 5-46 A9'地点における反射板（散乱反射）の影響検討

### 3) KJ 地点（基地局見通し無し：NLOS）

KJ 地点は、課題実証の MR システムにおいて動作検証を行う場所である。

KJ 地点における同期信号 SS の受信電力測定結果を「表 5-27 KJ 地点の測定結果」に示す。（SS の受信電力は、PCI=41 の読み取り値）

表 5-27 KJ 地点の測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力測定	-90.7dBm	333° (北西)
2	LOS の場合、遮蔽物を設置した際の受信電力	-100dBm	333° (北西)
3	受信電力が最強となる到来方向 (遮蔽した状態で測定)	-97.7 dBm	269° (西)
4	反射板を設置した場合の受信電力	-83 dBm (鏡面反射板) -84.5dBm(散乱板)	172° (南東)

KJ 地点では高さが高いと基地局を見通すことができるが、手前に金属製の低いパーティションが設置されており、ホーンアンテナが丁度、パーティションの影に隠れる状況であった。

基地局方向にホーンアンテナを向けると、同期信号を-90.7dBm で受信していた。

A9'地点と同様に、工場のレイアウト変更により大型工作機械等が設置された場合、従来、見通しであった場所が、見通し外になることを想定し、ホーンアンテナから 40cm のところに遮蔽物を設置して同期信号を測定すると、-100dBm になった。

直接波が遮蔽された状況で、周囲から反射して届く電波を測定するために、ホーンアンテナの角度を変えて、受信電力が最強となる到来方向について測定した結果を、「図 5-47 KJ 地点における到来波の受信電力測定結果(遮蔽時)」に示す。この KJ 地点では、前の A6,A9' の地点に比べて低い受信電力が観測されたため、「図 5-47 KJ 地点における到来波の受信電力測定結果(遮蔽時)」では、原点(x=0,y=0)における受信電力の値を-120dBmとしている。

北から 269° の西方向にホーンアンテナを向けたとき、約-97.7dBm で最も強い受信電力となった。この到来方向には、A9'地点のときと同様に、工作機械や金属性のダクト等があるが、距離が遠いため、どの構造物で反射しているか特定するのは困難であった。

また、基地局方向とは反対側になる真後ろの方向には、金属製の構造物があり、この反射経路では、-103dBm 程度の受信電力であった。

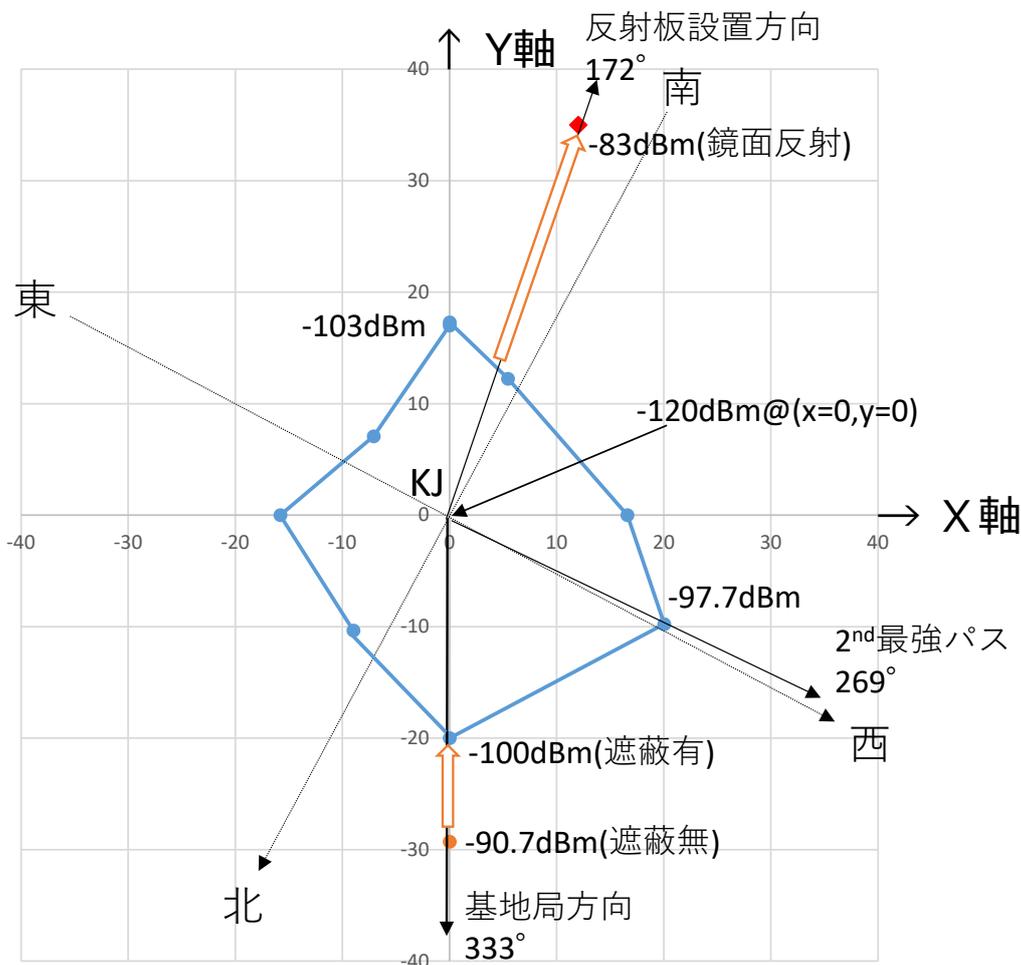


図 5-47 KJ 地点における到来波の受信電力測定結果(遮蔽時)

A9' 地点と同様に、2 番目に強いパスの到来方向（北から 269° の西方向）に反射板を設置しようとする、基地局との反射角度が厳しく設置が困難なため、基地局方向と反対方向となる後方の地点を選んで反射板を設置することにした。方角としては、北から 172° の方向に反射板を設置した。

KJ 地点における反射板設置について、「図 5-48 KJ 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射／ホワイトボード）の影響検討」に示す。反射板がない状況では、基地局方向の受信電力が-90.7dBm であったのに対し、鏡面反射の反射板を設置した場合に-83dBm、散乱

板を設置した場合に-84.5dBm まで改善することができた。なお、ホワイトボードを反射板として活用した結果、-87.9dBm まで受信電力を改善することができた。

KJ 地点においても、反射板の設置によって受信電力を改善する見通しが得られた。

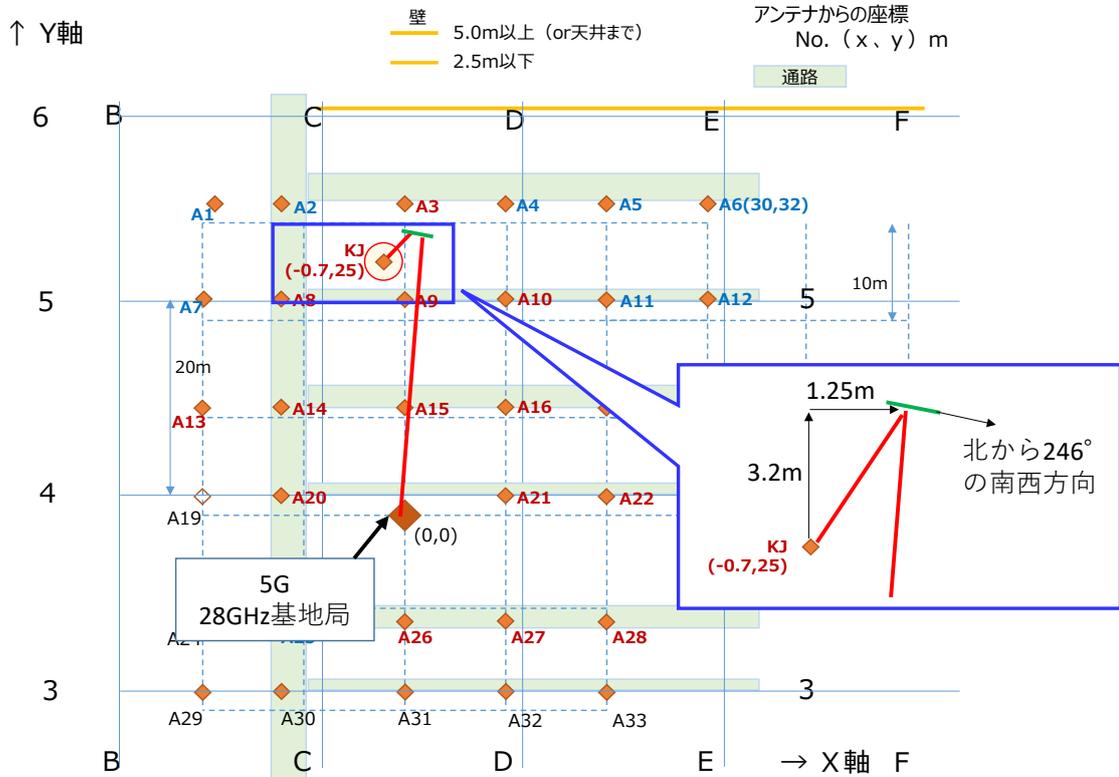


図 5-48 KJ 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射／ホワイトボード）の影響検討

#### (4) 評価エリア B

##### 1) B15 地点（5G 基地局からの見通し無し：NLOS）

B15 地点は、5G の基地局からの見通しがない環境である。両側を高い壁で囲まれており、5G の電波が届きにくい場所である。そのままの状態では、端末は 4G に接続できるが、5G には接続できない通信環境である。

B15 地点における同期信号 SS の受信電力測定結果を「表 5-28 B15 地点の受信電力測定結果」に示す。（SS の受信電力は、PCI=45 の読み取り値）

表 5-28 B15 地点の受信電力測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力	-119.3dBm	263° (南西)
2	基地局方向の受信電力 (遮蔽有)	-123.5dBm	263° (南西)
3	受信電力が最強となる到来方向	-110.8dBm	333° (北西)
4	反射板を設置して受信電力測定	-94.4 dBm (鏡面反射)、 -104.6dBm(散乱板)	333° (北西)

5Gの基地局方向（北から263°）にホーンアンテナを向けたときの同期信号の受信電力は、-119.3dBmであり、5Gの基地局方向からは電波が到来していなかった。

なお、基地局方向にホーンアンテナを向けたまま、ホーンアンテナから40cmのところの遮蔽物を設置して同期信号を測定した場合は、-123.5dBmであった。

ホーンアンテナの角度を変えて、受信電力が最強となる到来方向について測定した結果を、「図 5-49 B15 地点における到来波の受信電力測定結果」に示す。このB15 地点では、低い受信電力が観測されたため、「図 5-49 B15 地点における到来波の受信電力測定結果」では、原点(x=0,y=0)における受信電力の値を-130dBmとした。

北から333°の北西方向にホーンアンテナを向けたとき、約-110.8dBmで最も強い受信電力となった。この到来方向は、通路として開けている方向であり、通路の先にある金属の構造物からの反射波と推測できる。

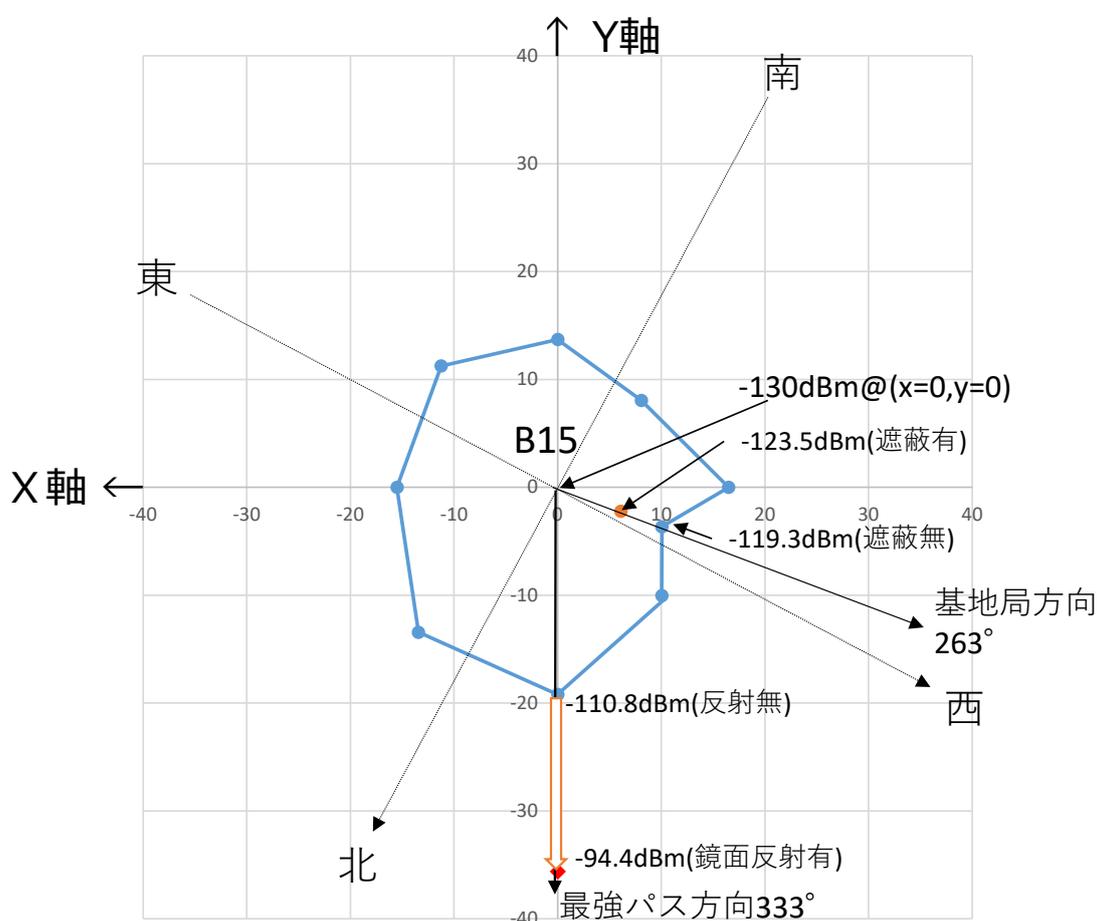


図 5-49 B15 地点における到来波の受信電力測定結果

この最強パスの方向に反射板を設置することにした。

B15 地点における反射板設置について、「図 5-50 B15 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討」に示す。反射板がない状況での最強の受信電力が-110.8dBmであったのに対して、鏡面反射の反射板を設置した場合に-94.4dBm、散乱板を設置した場合に-104.6dBmまで改善することができた。

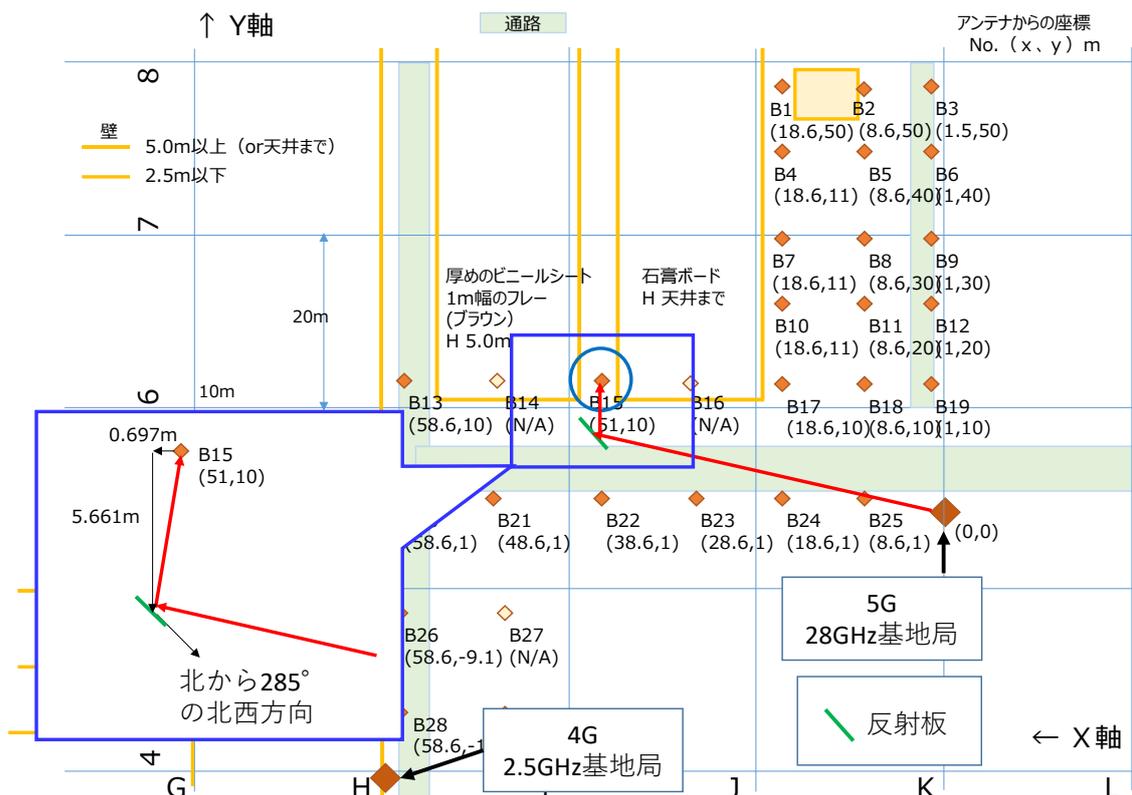


図 5-50 B15 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討

B15 地点では、鏡面による反射板がない状態では、4G で通信を行っていたが、鏡面反射板を設置することによって、5G 通信が可能となった。反射板によるスループット改善の様子を下記の「表 5-29 B15 地点における反射板によるスループット改善結果」に纏める。

表 5-29 B15 地点における反射板によるスループット改善結果

	反射板無	鏡面反射板有
SS-RSRP 受信電力	-110.8dBm	-94.4dBm
DL	64.3Mbps (4G で通信)	906Mbps(5G で通信)
UL	7.1Mbps(4G で通信)	26.7Mbps(5G で通信)

## 2) B1' 地点 (5G 基地局からの見通し無し : NLOS)

B15 地点以外にも、地点 B1 では 4G 通信となってしまうことが事前の調査で分かっていた。B1 地点で、反射板を活用することで 5G 通信にすることが可能かどうか調査を行った。測定日当日は、B1 地点の上に工具類の箱が並べられており、測定器を設置することができ

なかったため、基地局から遠い地点を B1'地点として測定を実施した。

B1'地点は、5G の基地局からの見通しがない環境である。基地局方向には部屋の壁で遮られており、多くの工作機械もあって 5G の電波が届きにくい場所である。そのままの状態では、端末は 4G に接続できるが、5G には接続できない通信環境である。

B1'地点における同期信号 SS の受信電力測定結果を「表 5-30 B1'地点の受信電力測定結果」に示す。(SS の受信電力は、PCI=45 の読み取り値)

表 5-30 B1'地点の受信電力測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	受信電力 (反射無)	-111.3dBm	243° (南西)
2	受信電力 (反射有)	-99.6dBm (鏡面反射)	243° (南西)

B1'地点においては、反射板によって 4G 通信を 5G 通信にすることが可能かどうかを調べたため、到来方向に関するデータは取得していない。

B1'地点における反射板設置について、「図 5-51 B1'地点における反射板 (鏡面反射) の影響検討」に示す。ホーンアンテナは、反射板を設置する方向 (北から 243° の南西方向) に固定することにした。反射板がない状況での受信電力が-111.3dBm であったのに対し、鏡面反射の反射板を設置した場合に-99.6dBm まで改善することができた。

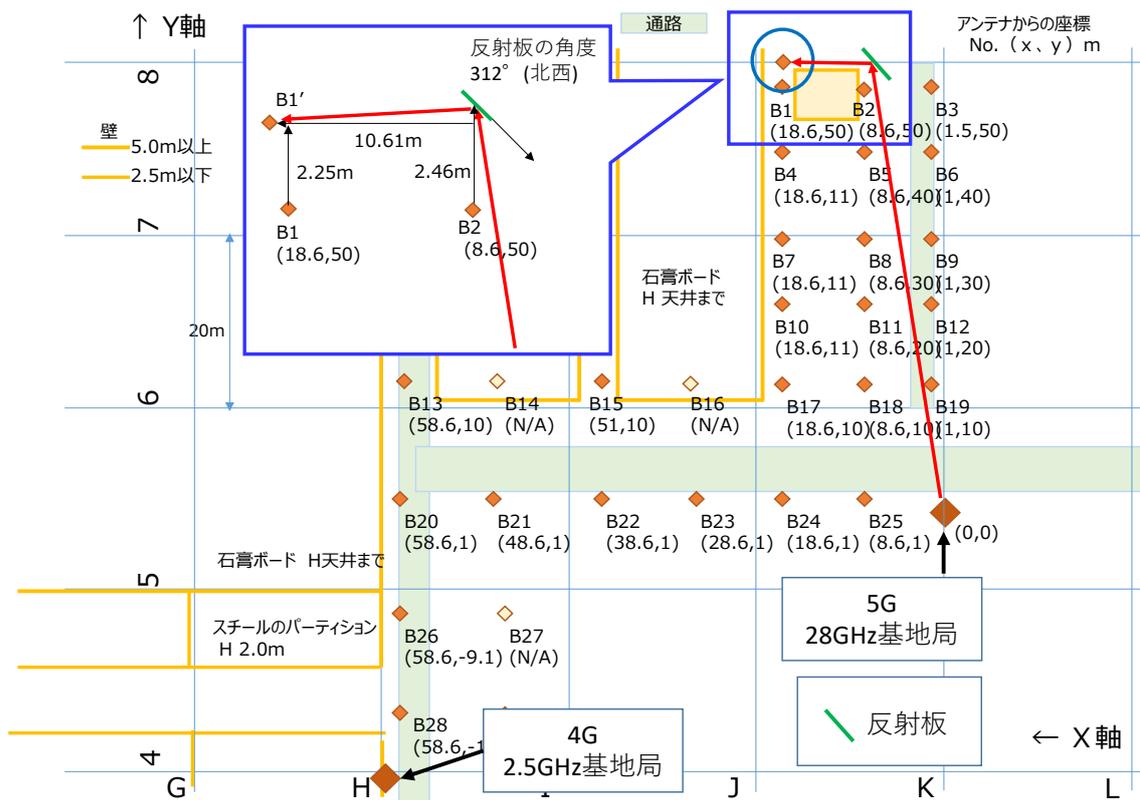


図 5-51 B1'地点における反射板 (鏡面反射) の影響検討

また、B1'地点でのスループット測定結果として、「表 5-31 B1'地点における反射板によるスループット改善結果」に纏める。

鏡面反射板がない状態では、4G で通信を行っていたが、鏡面反射板を設置することによって、5G 通信が可能となり、スループットが劇的に改善している様子が分かる。

表 5-31 B1'地点における反射板によるスループット改善結果

	反射板無	鏡面反射板有
SS-RSRP 受信電力	-111.3dBm	-99.6dBm
DL	58.1Mbps(4G で通信)	693Mbps(5G で通信)
UL	5.5Mbps(4G で通信)	13.5Mbps(5G で通信)

### 3) B7 点 (5G 基地局からの見通し無し : NLOS)

B7 地点は、5G の基地局からの見通しが無い環境である。基地局方向に大型の工作機械が設置されており、多数の反射経路がある地点である。5G で通信できる環境である。

B7 地点における同期信号 SS の受信電力測定結果を「表 5-32 B7 地点の受信電力測定結果」に示す。(SS の受信電力は、PCI=45 の読み取り値)

表 5-32 B7 地点の受信電力測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力	-103.6dBm	296° (北西)
2	基地局方向の受信電力 (遮蔽有)	-107.8dBm	296° (北西)
3	受信電力が最強となる到来方向	-99.9dBm	286° (北西)
4	反射板を設置して受信電力	-89.7 dBm (鏡面反射) -104.3dBm(散乱反射)	333° (北西)
5	反射板がない状態の受信電力	-102.3dBm	333° (北西)

5G の基地局方向(北西 296°)にホーンアンテナを向けたときの同期信号の受信電力は、-103.6dBm だった。なお、基地局方向にホーンアンテナを向けたまま、ホーンアンテナから 40cm のところに遮蔽物を設置して同期信号を測定した場合は、-107.8dBm であった。

ホーンアンテナの角度を変えて、受信電力が最強となる到来方向について測定した結果を、「図 5-52 B7 地点における到来波の受信電力測定結果」に示す。「図 5-52 B7 地点における到来波の受信電力測定結果」では、原点(x=0,y=0)における受信電力の値を-120dBm としている。

北西 286° の北西方向にホーンアンテナを向けたとき、-99.9dBm で最も強い受信電力となった。この到来方向には、大型工作機械があり、この工作機械で反射波していると推測できる。

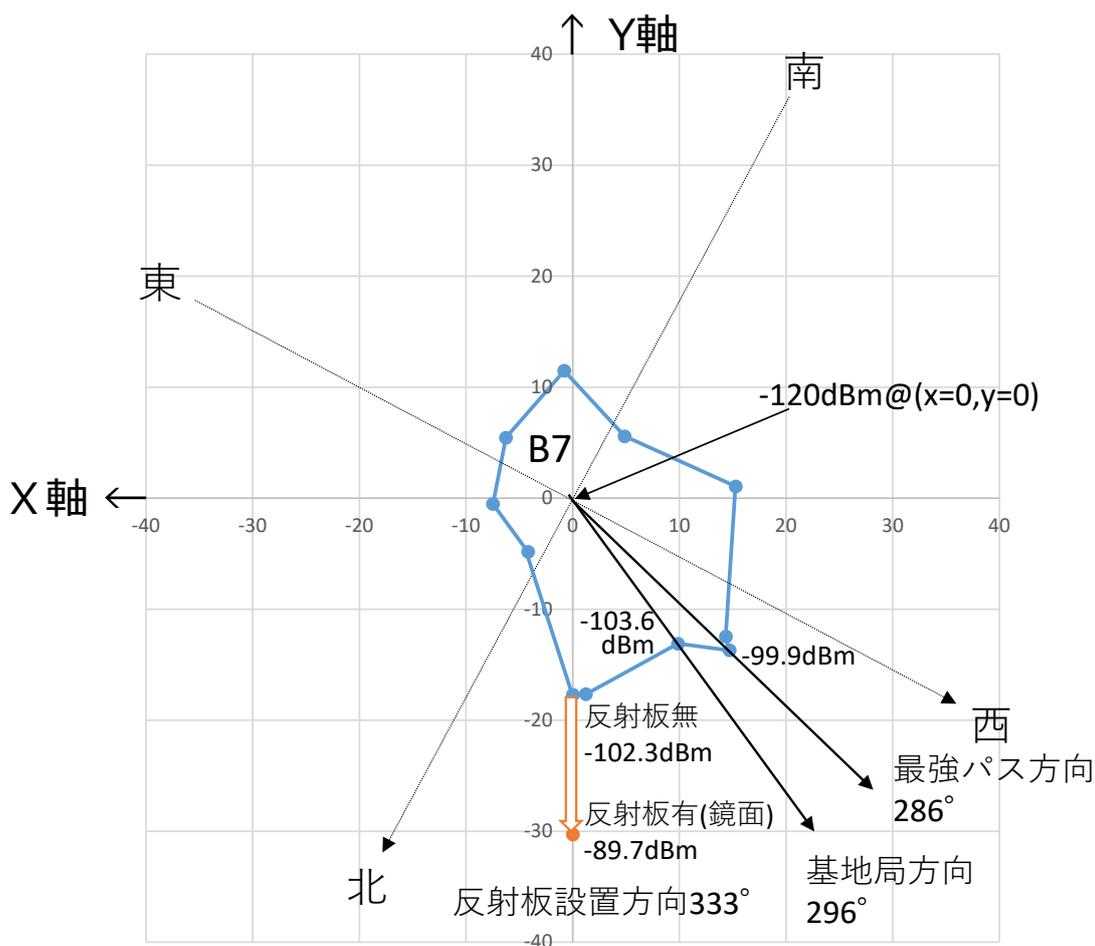


図 5-52 B7 地点における到来波の受信電力測定結果

B7 地点における反射板の設置場所について、「図 5-53 B7 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討」に示す。基地局と B7 地点で鏡面反射できる場所が限られていたため、図に示す場所に反射板を設置することとした。

ホーンアンテナの向きは 333° 北西に設置した。反射板がない状況での受信電力が -102.3dBm であったのに対して、鏡面反射の反射板を設置した場合に -89.7dBm まで改善することができた。散乱板を設置した場合、-104.3dBm で改善効果が得られなかった。反射板と測定器の距離が 20m 以上と遠いため、散乱板では直接、反射波を届けることができているかどうか定かではないことが要因として考えられる。

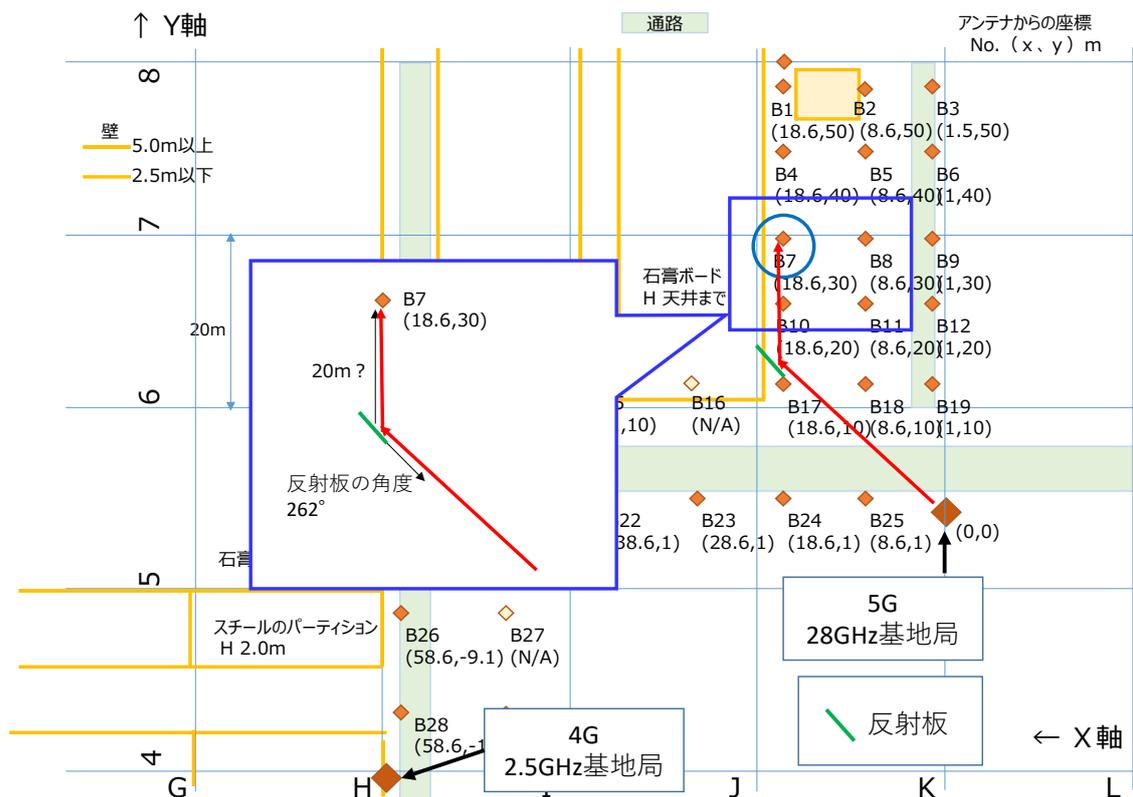


図 5-53 B7 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討

4) B9 地点（5G 基地局からの見通し無し：NLOS）

B9 地点は、5G の基地局からの見通しが無い環境である。基地局方向には、金属のダクトがあり、見通すことができない。また、側面にも金属のロッカーが設置されている。ただし、5G で通信できる環境である。

B9 地点における同期信号 SS の受信電力測定結果を「表 5-33 B9 地点の受信電力測定結果」に示す。（SS の受信電力は、PCI=45 の読み取り値）

表 5-33 B9 地点の受信電力測定結果

#	測定項目	SS の受信電力 (dBm)	アンテナ向き
1	基地局方向の受信電力	-101.8dBm	333° (北西)
2	基地局方向の受信電力 (遮蔽有)	-110.4dBm	333° (北西)
3	受信電力が最強となる到来方向 (遮蔽有)	-106.5dBm	96° (南東)
4	反射板を設置して受信電力	-101.8 dBm (鏡面反射) -98.4dBm(散乱反射)	96° (南東)

5G の基地局方向(北西 333°)にホーンアンテナを向けたときの同期信号の受信電力は、-101.8dBm だった。なお、基地局方向にホーンアンテナを向けたまま、ホーンアンテナから 40cm のところに遮蔽物を設置して同期信号を測定した場合は、-110.4dBm であった。遮蔽したまま、ホーンアンテナの角度を変えて、受信電力が最強となる到来方向について

測定した結果を、「図 5-54 B9 地点における到来波の受信電力測定結果」に示す。「図 5-54 B9 地点における到来波の受信電力測定結果」では、原点(x=0,y=0)における受信電力の値を -120dBm としている。

南東 96° の方向にホーンアンテナを向けたとき、-106.5dBm で最も強い受信電力となった。到来方向 5m 程度の場所に構造物が置いてあり、そこで反射していると推測できた。

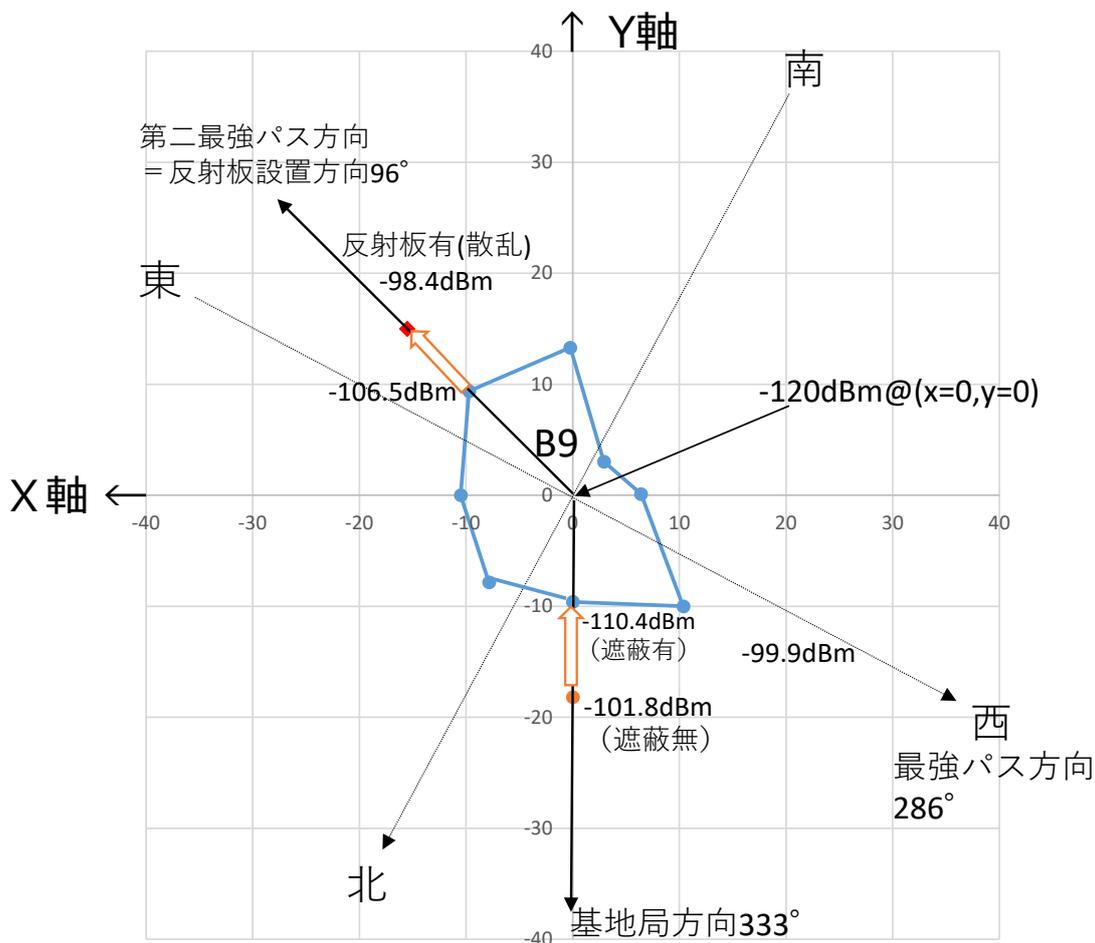


図 5-54 B9 地点における到来波の受信電力測定結果

B9 地点における反射板の設置場所について、「図 5-55 B9 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討」に示す。基地局方向を遮蔽した場合の最強パスの方向に合わせて、反射板を設置した。

ホーンアンテナの向きは 96° 南東に向けて設置した。反射板がない状況での受信電力が -106.5dBm であったのに対して、散乱反射の反射板を設置した場合に -98.4dBm まで改善することができた。鏡面反射の反射板については手にもって測定したため、正確な測定ができていなかったが、それでも -97dB から -101.8dBm 程度の値を示して改善できることが分かった。

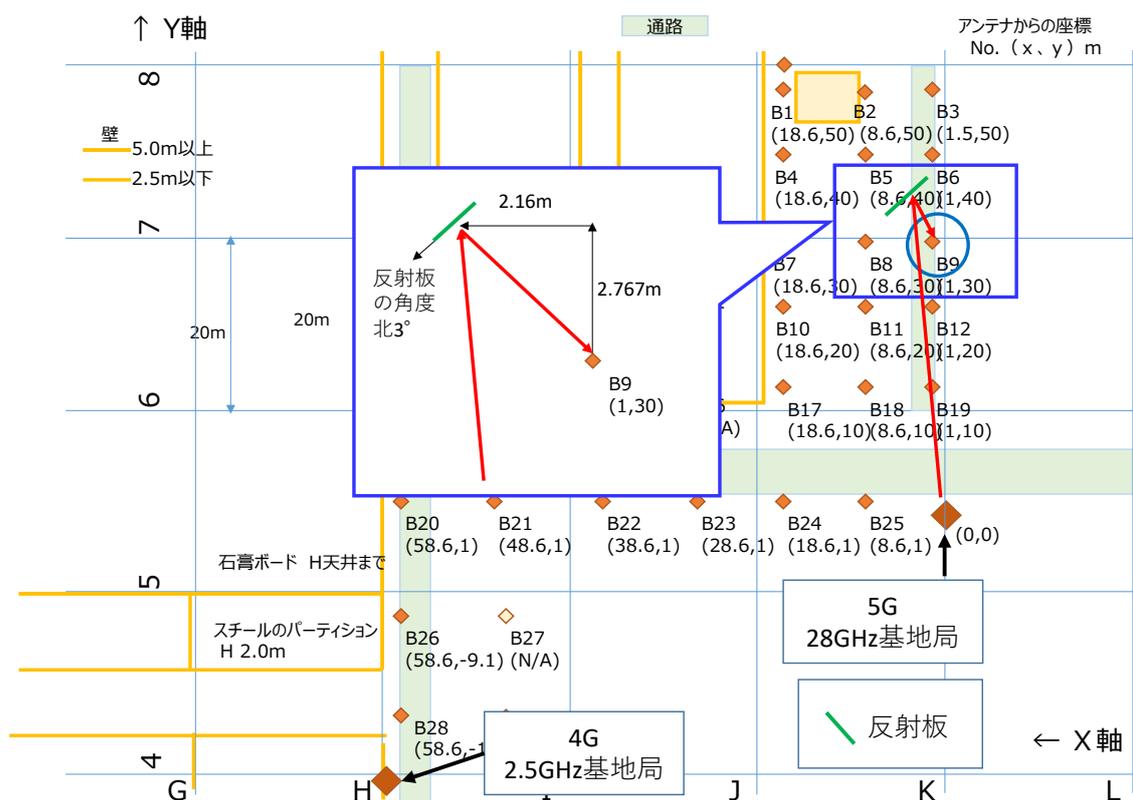


図 5-55 B9 地点における反射板（鏡面反射／散乱反射）の影響検討

### 5.3.4.6 工場の屋外への電波漏えいの評価

工場の屋外への電波漏えいの評価にあたり、当初は、貞宝第 1 工場の中心部より同心円上に測定ポイントを取り、測定をする計画を立てた。

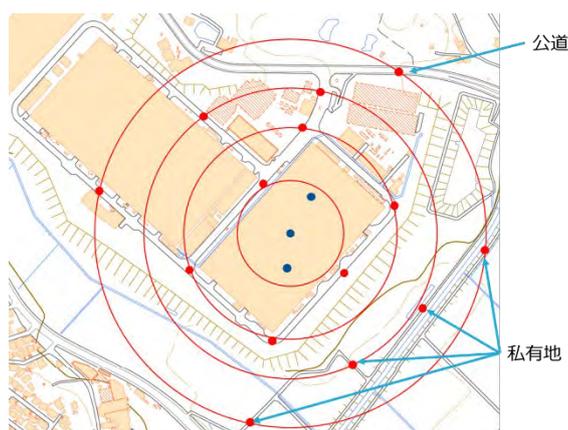


図 5-56 当初の計画（屋外の測定）

事前の簡易測定において、工場屋外へはほとんど電波が出ていない事が判明したことから、以下の図の通り、貞宝工場の敷地内での測定ポイントを 10 ポイント選定しエリアテストにて測定を実施した。



西2扉



第1工場北東側



安全の門



立体駐車場

図 5-57 工場屋外での測定の様子

以下に、4.7GHz 帯、28GHz 帯それぞれの工場の屋外への電波漏えいの評価結果を示す。

(1) 4.7GHz 帯

- ・ 測定日：令和2年12月6日（日）
- ・ 測定条件：下記図に示す各測定ポイントでエリアテストにて測定

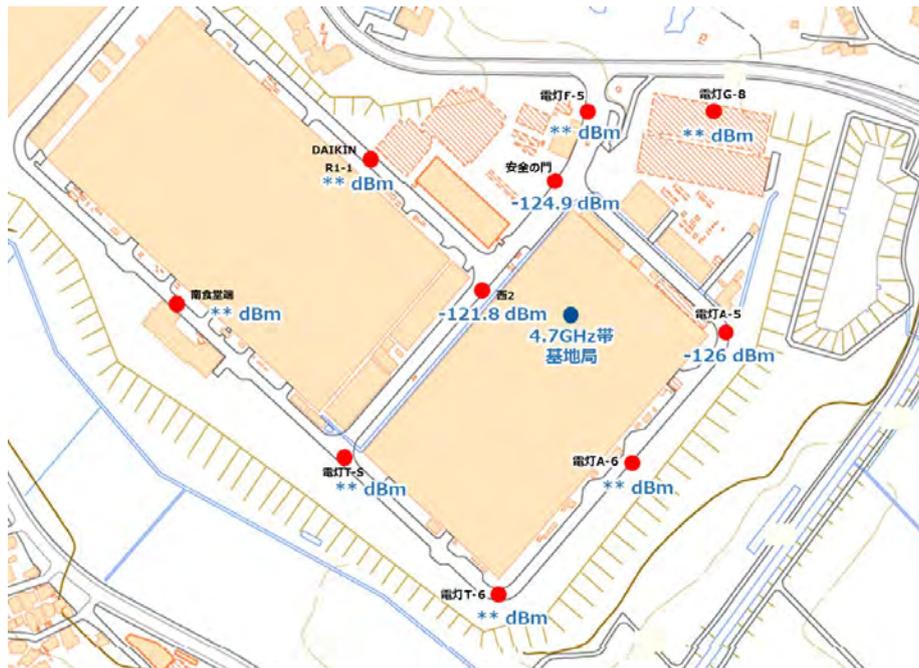


図 5-58 工場の屋外への電波漏えいの測定結果 (4.7GHz 帯)

測定ポイント 10 カ所中、3 カ所で 4.7GHz 帯の電波を計測することができた。その他の 7 カ所では、エリアテストの表示が「\*」となり計測することができなかった。

表 5-34 工場の屋外への電波漏えいの測定結果 (4.7GHz 帯)

No	測定ポイント	受信電力 (SS-RSRP)	受信電力 (RSSI 換算)	基地局との 距離	備考
No.1	南食堂端	*	—	296m	南食堂建物の端
No.2	電灯 T-S	*	—	190m	第 1 工場南西角
No.3	DAIKIN R1-1	*	—	228m	第 2 工場横
No.4	西 2 扉	-121.8 dBm	-86.57dBm	76m	車両扉の前
No.5	電灯 T-6	*	—	200m	第 1 工場南東角
No.6	安全の門	-124.9 dBm	-89.67dBm	101m	貞宝工場入口
No.7	電灯 F-5	*	—	145m	貞宝工場守衛横
No.8	電灯 A-6	*	—	102m	第 1 工場東側
No.9	電灯 A-5	-126 dBm	-90.77dBm	100m	第 1 工場北東側
No.10	電灯 G-8	*	—	179m	立体駐車場

※受信電力 (RSSI 換算) の値は、エリアテストの受信電力 (SS-RSRP) の計測値から換算した値

計測の結果、基地局との距離が 100m 付近までの測定ポイントでは測定することができたが、それ以上の測定ポイントでは、エリアテストにて電波を掴むことができず測定できなかった。

## (2) 28GHz 帯

- ・ 測定日：令和3年1月31日（日）
- ・ 測定条件：下記図に示す各測定ポイントでエリアテスタにて測定

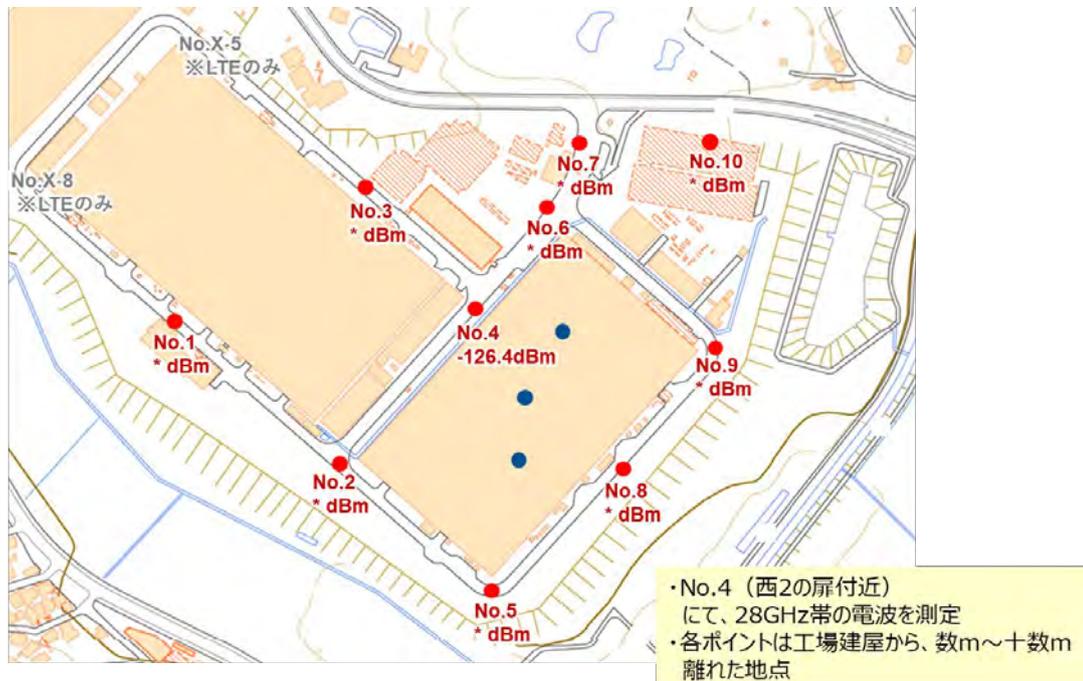


図 5-59 工場の屋外への電波漏えいの測定結果（28GHz 帯）

測定ポイント 10 カ所中、1 カ所で 28GHz 帯の電波を計測することができた。その他の 9 カ所では、エリアテスタの表示が「\*」となり計測することができなかった。

表 5-35 工場の屋外への電波漏えいの測定結果（28GHz 帯）

No	測定ポイント	受信電力 (SS-RSRP)	受信電力 (RSSI 換算)	基地局 A との距離	基地局 B との距離	備考
No.1	南食堂端	*	—	296m	259m	南食堂建物の端
No.2	電灯 T-S	*	—	190m	97m	第 1 工場南西角
No.3	DAIKIN R1-1	*	—	228m	274m	第 2 工場横
No.4	西 2 扉	-126.4 dBm	-80.2dBm	76m	132m	車両扉の前
No.5	電灯 T-6	*	—	200m	65m	第 1 工場南東角
No.6	安全の門	*	—	101m	230m	貞宝工場入口
No.7	電灯 F-5	*	—	145m	275m	貞宝工場守衛横
No.8	電灯 A-6	*	—	102m	93m	第 1 工場東側
No.9	電灯 A-5	*	—	100m	203m	第 1 工場北東側
No.10	電灯 G-8	*	—	179m	316m	立体駐車場

※受信電力 (RSSI 換算) の値は、エリアテスタの受信電力 (SS-RSRP) の計測値から換算した値

計測の結果、No.4 西 2 扉にて測定することができた。基地局との距離を考慮すると、基地局 A の電波をとらえた結果と考えられる。

一方、No.5 電灯 T-6 は、基地局 B との距離が 65m と他と比べても近いが、電波を測定することができていない。工場内での工作機械等の設置されている条件が違い、伝搬損失も違っている為と思われる。

なお、第 2 工場奥の測定ポイント No.X-5、No.X-8 においては、自営 BWA の LTE の電波を掴み端末がアタッチすることができている。

### 5.3.5 ユースケースに基づくローカル 5G による性能評価の結果

本技術実証のユースケースに基づくローカル 5G による性能評価としては、以下を実施した。

- ・ ローカル 5G の受信電力、伝送スループット並びに伝送遅延時間の測定
- ・ 工場内でのローカル 5G の電波の反射等による影響評価
- ・ 工場の屋外への電波漏えいの評価

それぞれの結果については、前項までに記載した通りである。それらの結果から、以下、ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価を行った。

#### 5.3.5.1 バックパック方式を用いた実務ユースケースに基づいた実証

バックパック方式は、目指す姿であるローカル 5G を用いた完全無線化が実現する場合の課題解決システムとしての効果検証及び運用検証を行う方式である。

貞宝第 1 工場に構築したローカル 5G 環境を用いて行った技術実証の結果、明らかになったローカル 5G の性能をバックパック方式の性能要件で評価を行った。

バックパック方式の性能要件に対する評価結果を以下に示す。

表 5-36 バックパック方式の性能要件に対する評価結果

計測指標	性能要件	技術実証結果	性能評価
1)伝送スループット	UL : 数十 Mbps 程度	■28GHz 帯 ノキア製基地局・シャープ製端末 (UL 100MHz 幅、DL 100MHz 幅 x 4、適応変調) UL 約 20~90Mbps DL 約 300Mbps~1Gbps	○
	DL : 数十 Mbps 程度	■4.7GHz 帯 エイビット製基地局・端末 (UL/DL 50MHz 幅、MCS25 固定) UL 約 40~70Mbps	○

		DL 約 50~62Mbps	
2)伝送 遅延	数十 msec 程度	■28GHz 帯 ノキア製基地局・シャープ製端末 (UL 100MHz 幅、DL 100MHz 幅 x 4、適応変調) 10msec~50msec の RTT (平均 31.59msec) ※測定ポイント A21	○
		■4.7GHz 帯 エイビット製基地局・端末 (UL/DL 50MHz 幅、MCS25 固定) 10msec 程度の RTT (平均 6.1msec)	○

なお、性能要件の論拠については、「5.3.1 ユースケースに基づく性能要件」に記載している。

### (1) 伝送スループット

本技術実証の結果より、4.7GHz 帯、28GHz 帯にて、UL / DL 共に、バックパック方式において必要な性能要件を満たしていると考ええる。

### (2) 伝送遅延

本技術実証の結果より、4.7GHz 帯、28GHz 帯にて、UL / DL 共に、バックパック方式において必要な性能要件を満たしていると考ええる。

### (3) ローカル 5G の通信品質

28GHz 帯 ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいては、基本的にカバーエリア内において見通しあり、見通しなしに係わらず、パケットロスを確認されなかった。ただし、基地局からの距離が 50m を超え見通しがない測定ポイント (A1、B1、B3) などでは 5G を掴めず LTE になる場合もあったが、反射波を活用することで改善することも確認することができた。

4.7GHz 帯 エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいて、カバーエリア内において見通しが確保されている測定ポイントでは、BLER も安定した通信となりパケットロスは確認されなかった。なお、カバーエリア外の測定ポイント (A3、A12) においても見通しが確保されていること及び反射の影響により安定した通信となった箇所もあった。しかしながら、見通しなしの測定ポイント及びカバーエリアの外側の測定ポイントにおいては、端末のログからも RSSI の値が低くなり、BLER も不安定となることが確認されたが、パケットロスが発生し通信が不安定となる場合が多かった。

バックパック方式において、詳細は、「3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴」に記載しているが、パケットロスによる再送処理などが発生することで、シーンサーバから 3D-CG データをダウンロードする時間がかかってしまう影響や、タブレットでの映像表示にお

いて、映像にブロックノイズが発生してしまうことや、映像が固まり映像が飛んでしまうことなどの影響が出てくる。

このことから、業務区域をカバーエリアとし見通しを確保するような置局設計が重要となりアプリケーション影響が最小限に抑えられるパケットロス率となるようにすることが必要である。

### 5.3.5.2 目指す姿（ローカル5Gを用いた完全無線化）の実現に向けた疑似HMD方式による事前技術検証

疑似HMD方式は、目指す姿であるローカル5Gを用いた完全無線化を実現するための事前技術検証として実施している。技術実証としてローカル5Gの性能評価として検証を行い、アプリケーション側の機能検証として、課題実証として実施した。

（4章 機能検証参照）

貞宝第1工場に構築したローカル5G環境を用いて行った技術実証の結果、明らかになったローカル5Gの性能を疑似HMD方式の性能要件で評価を行った。

疑似HMD方式の性能要件に対する評価結果を以下に示す。

表 5-37 疑似HMD方式の性能要件に対する評価結果

計測指標	性能要件	技術実証結果	性能評価
1)伝送スループット	UL : 約 550Mbps DL : 約 350Mbps	■28GHz帯 ノキア製基地局・シャープ製端末 (UL 100MHz幅、DL 100MHz幅 x 4、適応変調) UL 約 20~90Mbps DL 約 300Mbps~1Gbps	UL × DL ○
		■4.7GHz帯 エイビット製基地局・端末 (UL/DL 50MHz幅、MCS25固定) UL 約 40~70Mbps DL 約 50~62Mbps	UL × DL ×
2)伝送遅延	十数 msec程度 ※60fpsの場合 17msec以下	■28GHz帯 ノキア製基地局・シャープ製端末 (UL 100MHz幅、DL 100MHz幅 x 4、適応変調) 10msec~50msecのRTT (平均 31.59msec) ※測定ポイント A21	△
		■4.7GHz帯 エイビット製基地局・端末 (UL/DL 50MHz幅、MCS25固定) 10msec程度のRTT (平均 6.1msec)	○

なお、性能要件の論拠については、「5.3.1 ユースケースに基づく性能要件」に記載している。

### (1) 伝送スループット

28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいては、UL は、性能要件を満たすことができていない。DL は、900Mbps や 1Gbps を超える伝送スループットを測定することができており、性能要件を満たすことができていると考える。

一方、4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいては、複数周波数を束ねるキャリアコンポーネント技術や MIMO 実装が取られていないため、UL、DL とともに性能要件を満たすことはできていない。

### (2) 伝送遅延

本技術実証では、Ping による往復遅延時間の測定を実施した。実証開始前の検討において、伝送遅延の性能要件としては、「十数 msec 程度」と想定した。

しかしながら、課題実証においてバックバック方式による効果検証時、MR 映像のフレームレートによっては、MR を利用する作業者が感じる違和感が出てきてしまうことが確認された。具体的には、およそ 60fps 程度で映像表示が必要と明らかになった。

60fps を想定すると 1 フレーム辺り、約 17msec 以下で映像表示が必要となる。つまり 60fps を実現するためのエンドーエンドのアプリケーションレベルを含む処理遅延が、17msec となる。

この性能目標から、現状のローカル 5G の性能を評価すると、28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいては、最小値としては、達成している状況もあるが、平均遅延とすると満たすことができていない。

ただし、本結果は Ping による測定のため、ノキア基地局の DRX の実装パラメータによる待ち時間が含まれていると想定される。そのため、今後 DRX のパラメータ調整などにより更なる低遅延の実現を進めていく必要があると考える。

4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいては、Ping による往復遅延時間の平均において、性能要件を下回っており要件を満たしていると考える。

### (3) ローカル 5G の通信品質

疑似 HMD 方式において、詳細は、「3.2.6 MR システムで取り扱うデータの特徴」に記載しているが、パケットロスが発生することで、撮像映像の送信、MR 表示映像の受信に影響が発生してしまう。UL のパケットロスは撮像映像に影響が出るため、正確な位置情報を伝達することができず、合成する 3D-CG の位置が MR 映像内で正しく表示されなくなる可能性がある。また、合成する撮像映像自体がかけると MR 映像もくずれてしまうことが想定される。DL においては、HMD で表示する際の体感品質に影響を与えてしまう。

このことから、業務区域をカバーエリアとし見通しを確保するような置局設計が重要となりアプリケーション影響が最小限に抑えられるパケットロス率となるようにすることが必要である。(ローカル 5G の通信品質の性能要件については、今回の開発実証を通じて検証予定)

### 5.3.5.3 評価結果のまとめ

バックパック方式は、目指す姿であるローカル 5G を用いた完全無線化が実現する場合の課題解決システムとしての効果検証及び運用検証を行う方式である。本技術実証を通じて、4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせ、28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいて、伝送スループット UL/DL、伝送遅延共に、バックパック方式において必要な性能要件を満たしていると考ええる。

目指す姿（ローカル 5G を用いた完全無線化）の実現に向けては、4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいて、UL、DL ともに伝送スループットの性能要件を満たせず、28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいて、伝送スループットの DL は性能要件を満たしているが、UL は満たせておらず、速度向上が必要である。伝送遅延については、Ping による往復遅延時間の測定結果から、4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末の組み合わせにおいて、性能要件を満たしており、28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末の組み合わせにおいては、性能要件を満たしておらずパラメータ設定等により遅延の短縮と安定化が必要である。

### 5.3.6 技術的課題の解決策

#### 5.3.6.1 技術的課題の整理と課題の解決策

本技術実証の結果から、以下、技術的課題と解決策について整理した。

表 5-38 技術的課題と解決策

指標	技術的課題	解決策
伝送スループット	UL の速度向上 ※4.7GHz 帯、28GHz 帯共に	ローカル 5G 機器の性能向上及び制度面の変更
伝送スループット	DL の速度向上 ※4.7GHz 帯	ローカル 5G 機器の性能向上
伝送遅延	均一で安定した低遅延の実現	DRX のパラメータ調整などにより更なる低遅延の実現 3GPP release16 低遅延の実装
通信品質	不感地帯の解消	基本的に見通し確保の設計を行うが、難しい場合、反射波の簡易利用などの工夫
通信品質	パケットロスによる影響	上位層での FEC 処理の実装やトランスポート層での実装等

#### 5.3.6.2 更なる技術的課題等

更なる技術的課題として、UL の伝送スループット向上について検討した。

UL の伝送スループットを向上するためには、「5.1.4.8 無線区間のデータレートの理論

値」において記載したが、3GPP TS 38.306 User Equipment (UE) radio access capabilities 4.1 Supported max data rate データレート概算の算出式のパラメータより、以下のパラメータ実装を検討することができる。

- ・ 搬送波の数 (キャリアコンポーネント数)
- ・ MIMO のレイヤ数
- ・ シンボルあたりのビット数

また、令和 2 年 12 月に制度化された準同期運用のための同期・準同期条件 (TDD の無線フレーム構成) があり、上記パラメータと DL/UL のシンボル数の割り当てによって、検討することができる。

なお、これらの算出結果は、あくまで無線区間の伝送データレートの理論値であるため、IP レイヤでの実効速度で検討することが重要である。IP レイヤでの実効速度については、本技術実証での UDP の実測値から理論値の約 40%程度であると算出した。

以下に現状、準同期運用、アプリケーション要件に合致するパラメータの 3 種類の算出結果を記載する。

- ・ 28GHz 帯 UL (現状)

表 5-39 28GHz 帯 UL (現状)

算出パラメータ	値	
搬送波の数 (キャリアコンポーネント数)	1	1CC のため
MIMO のレイヤ数	2	2x2 MIMO のため
シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
シンボル数の割り当て	UL 16 シンボル (5 スロット中)	UL 14 シンボル x 1 スロット + 2 シンボル = 16 シンボル

28GHz 帯 UL 無線区間理論値 : 202.7Mbps

※詳細は、5.1.4.8 無線区間のデータレートの理論値 (2) 28GHz 帯 ノキア WEUA/ シャープ 5G ルータの場合を参照

28GHz 帯 UL 実効値 : 81.08Mbps (202.7Mbps x 40%)

- ・ 28GHz 帯 UL 準同期運用

表 5-40 28GHz 帯 UL 準同期運用

算出パラメータ	値	
搬送波の数 (キャリアコンポーネント数)	1	1CC のため
MIMO のレイヤ数	2	2x2 MIMO のため
シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため

シンボル数の割り当て	UL 28 シンボル (5 スロット中)	UL 14 シンボル x 2 スロット = 28 シンボル
------------	----------------------	-------------------------------

28GHz 帯 UL 無線区間理論値 : 354.7Mbps

28GHz 帯 UL 実効値 : 141.88Mbps (354.7Mbps x 40%)

- ・ 28GHz 帯 UL アプリケーション要件

表 5-41 28GHz 帯 UL アプリケーション要件

算出パラメータ	値	
搬送波の数 (キャリアコンポーネント数)	2	1CC のため
MIMO のレイヤ数	2	2x2 MIMO のため
シンボルあたりのビット数	6	64QAM のため
シンボル数の割り当て	UL 52 シンボル (5 スロット中)	UL 14 シンボル x 3 スロット + 10 シンボル = 52 シンボル

28GHz 帯 UL 無線区間理論値 : 1317.68Mbps

※UL 2CC、シンボル数の割り当てを UL/DL 比 3:1 (スペシャルスロットを含むと 76.5:23.5) とし UL 側に多くを割り当て

28GHz 帯 UL 実効値 : 527.072Mbps (1317.68Mbps x 40%)

※DL については、下り (1slot + 2symbol) となり 4CC のため、

28GHz 帯 DL 無線区間理論値 : 184.7 Mbps × 4 = 738.8 Mbps

28GHz 帯 DL 実効値 : 295.52Mbps (738.8 Mbps x 40%)

キヤノン社の MREAL S1 においては、「3.2.8 通信性能要件」に記載した通り、

上り : 約 550Mbps (16.7Gbps/30)

下り : 約 183Mbps (5.5Gbps/30)

であるので、圧縮技術の更なる向上と合わせて、実現可能性が見えてくる。

上記、算出結果より、現状の準同期による UL の性能向上では、MR システムの完全無線化を実現するためには足りておらず、ローカル 5G 機器の性能向上と合わせて、より柔軟に TDD の無線フレーム構成を運用できるように制度面の工夫が必要と考える。

なお、上記アプリケーション要件に合わせた TDD 無線フレームの構成については、基地局からの送信開始タイミングは、同期運用、準同期運用と同様に GPS 基準信号により合わせて運用するものとする。

このように、令和 2 年 12 月に制度化された準同期運用を、ローカル 5G の適用範囲を広げるために、「準同期の拡張」という考え方を取り入れていくことも重要と考える。ただし、電波の有効利用、周波数共用の考え方から屋内に限る等の条件設定も必要と考える。

## 5.4 ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等

工場内における最適なローカル5Gのエリア構築やシステム構成について検証し、技術的課題を整理するとともに、それら課題の解決方策等について考察を行う。

### 5.4.1 評価・検証項目

ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の評価・検証項目を記載する。

#### 5.4.1.1 建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性

建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性の評価・検証項目として、計測指標を、受信電力、伝送スループット、伝送遅延を計測することで、評価・考察を行い明らかにする。

なお、評価する測定データは、「5.3 ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価」で測定するデータを用いる。

#### 5.4.1.2 高精細映像伝送を伴うMR等のリアルタイム通信

高精細映像伝送を伴うMR等のリアルタイム通信の評価・検証項目として、計測指標を、アプリケーションレイヤでの遅延を計測することで、評価・考察を行う。

#### 5.4.1.3 基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の評価・検証項目として、計測指標を、基地局からの距離、受信電力を計測することで、総務省エリア算出法との比較を行い、評価・考察を行う。

### 5.4.2 評価・検証方法

「5.3 ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等」で取りまとめた受信電力等の各種データ及び「4.6 課題解決システムに関する機能検証」に関する機能検証の結果を用いて、以下の検証を行い、工場内における最適なローカル5Gのエリア構築やシステム構成について考察を行った。

#### 5.4.2.1 建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性

計測指標である、受信電力、伝送スループット、伝送遅延、通信品質について、「5.3 ユ

ケースに基づくローカル 5G の性能評価」で測定するデータを用いて、以下の観点で評価を行う。

工場内の通信特性を明らかにする上で、柱やダクト、ケーブルラック、ホイストクレーン等の遮蔽物や構造物によって、反射影響を受けるものと想定をした。反射波が良い影響を及ぼす場合は、通信が難しいと想定されるポイントにおいて、受信電力が強くなり通信を行うことができると想定される。一方、反射波が悪い影響を及ぼす場合は、マルチパスフェージングが発生し通信に影響が出てしまうと想定される。

評価エリア A 並びに評価エリア B において、4.7GHz 帯と 28GHz 帯で特徴のある測定ポイントを選定し、工場内の通信特性を評価・考察を行う。

※計測指標の測定方法については、「5.3.3.1 ローカル 5G の受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間の測定」「5.3.3.2 工場内でのローカル 5G の電波の回析や反射等による影響評価」を参照

#### 5.4.2.2 高精細映像伝送を伴う MR 等のリアルタイム通信

計測指標である、アプリケーションレイヤでの遅延について、「4.6 課題解決システムに関する機能検証」で取得するパケットキャプチャーデータを用いて、4.7GHz 帯と 28GHz 帯でのローカル 5G による影響を明らかにして評価を行う。

#### 5.4.2.3 基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の評価・検証項目として、計測指標を、基地局からの距離、受信電力を計測することで、総務省エリア算出法との比較を行い、評価・考察を行う。

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の評価・検証方法について、以下に示す。

- ① 総務省が別途提供するエリア算出法に基づき、設置する 2 局の基地局について、基地局毎にカバーエリア及び調整対象区域の図を作成する。
- ② それぞれのエリア端における実際の受信レベルを測定する。
- ③ エリア算出式におけるカバーエリア及び調整対象区域の閾値と受信電力が異なっている場合は、それぞれの閾値の受信電力が実測される場所を特定し、基地局からの距離を確認する。

調整対象区域とカバーエリアの図及びエリア端での受信レベル測定の説明図を以下に示す。

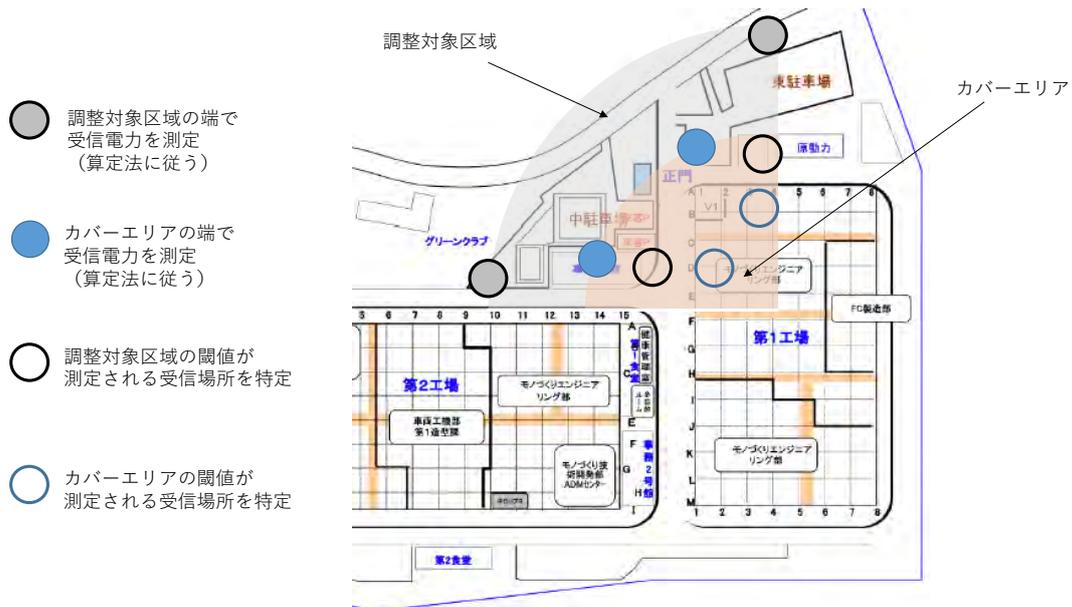


図 5-60 調整対象区域とカバーエリアの図及びエリア端での受信レベル測定の説明図

### 5.4.3 検証結果

#### 5.4.3.1 建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性

評価エリア A 並びに評価エリア B において、4.7GHz 帯と 28GHz 帯で特徴のある測定ポイントを選定し、工場内の通信特性を評価・考察を行った。結果を以下に示す。

※計測指標の測定方法については、「5.3.3.1 ローカル 5 G の受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間の測定」「5.3.3.2 工場内でのローカル 5 G の電波の回折や反射等による影響評価」を参照

##### (1) 評価エリア A 4.7GHz 帯

「5.3 ユースケースに基づくローカル 5 G の性能評価等」で取りまとめた、評価エリア A の 4.7GHz 帯のヒートマップを以下に示す。

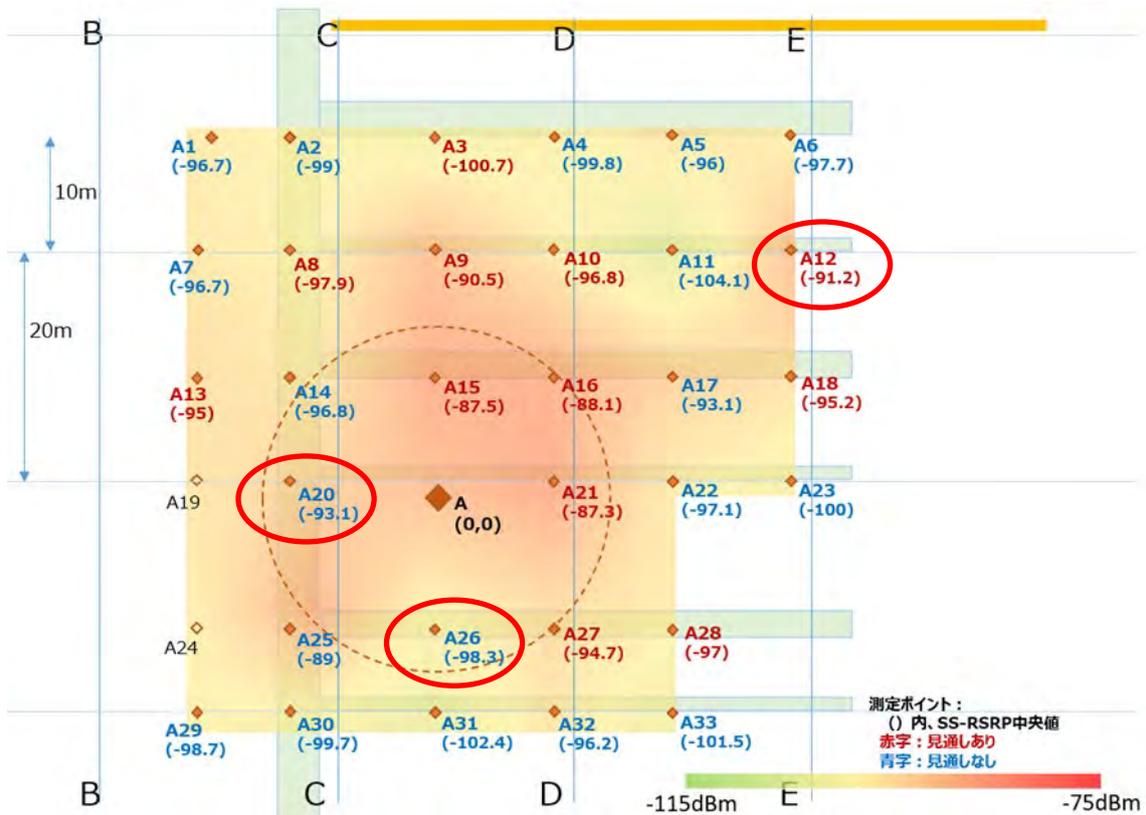


図 5-61 4.7GHz 帯受信電力ヒートマップ (評価エリア A)

### 1) 測定ポイント A12

このヒートマップから、カバーエリアを超えて基地局からの距離離れている測定ポイント A12 に着目した。測定ポイント A12 は、基地局とエリアテストのアンテナ間の距離が、36.66m の位置である。A12 の SS-RSRP 中央値は、-91.2dBm であり、他の同程度の距離で見通しありの測定ポイント A3 (距離 32m) と比べても 9.5dBm 電波が強い。

測定ポイント A12 の状況を以下に示す。



図 5-62 測定ポイント A12 の様子

撮影日：令和 2 年 11 月 28 日（土）

赤枠で示したように、ダクトの下に位置しており、また、基地局側に別のダクトや配管があり、これらの構造物による反射波の影響により電波が強くなっていると考えられる。

これらの構造物の反射による影響かどうか、プラスチック製の段ボールにアルミ фольを貼り付けた簡易的な散乱板を遮蔽物として、測定ポイント上部にあるダクトとエリアテストのアンテナの間に置き、反射波の到来を減らすようにして受信電力を測定した。その結果、SS-RSRP 中央値は  $-92.9\text{dBm}$  となった。遮蔽した場合と、しなかった場合では、 $1.7\text{dBm}$  の差が確認された。

測定ポイント A12 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-42 測定ポイント A12 における測定結果

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送 スループット	iPerf DL	62.0Mbps	62.0Mbps	62.0Mbps	62.0Mbps
	iPerf UL	69.6Mbps	69.6Mbps	70.7Mbps	69.9Mbps
伝送遅延	Ping	6.21msec	6.34msec	6.16msec	6.24msec

(令和 2 年 12 月 5 日（土）の測定データに基づく)

このことから、測定ポイント A12 においては、上部にあるダクトによる反射の影響により受信電力が強まっていることが分かった。

## 2) 測定ポイント A20

また、カバーエリア内にある測定ポイント A20 にも着目した。A20 は、柱によって見通しが確保できない測定ポイントである。受信電力の測定結果としては、SS-RSRP の中央値が、-93.9dBm であった。



図 5-63 測定ポイント A20 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（金）

測定ポイント A20 では、12 月 5 日時点の測定においては、通信が不安定で Ping による疎通確認の時点で IP Destination Host Unreachable となり通信を確保することができなかった。

この時の端末は、送受信 1 本アンテナの AU-500-UE で、工場内の柱により見通しが確保されていない環境のため通信できなかった。

その後、不安定さ解消のための改善策として、受信アンテナを 1 本増設する改造を、東海総合通信局への無線局変更申請を行い実施した。

アンテナを 2 本化した後は、以下のように見通しが確保できない環境においても通信が可能となることを確認した。

表 5-43 測定ポイント A20 における測定結果

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送スループット	iPerf DL	59.4Mbps	59.4Mbps	51.4Mbps	56.7Mbps
	iPerf UL	68.0Mbps	69.0Mbps	68.6Mbps	68.56Mbps
伝送遅延	Ping	6.18msec	5.97msec	6.12msec	6.09msec

(令和 3 年 2 月 13 日（土）の測定データに基づく)

### 3) 測定ポイント A26

カバーエリア内にある測定ポイント A26 にも着目した。



図 5-64 測定ポイント A26 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（金）

A26 は、アンテナ支柱 A に設置した基地局がアンテナ支柱でぎりぎり見通しが確保できていない。その結果、12 月 5 日時点の測定においては、1 本アンテナでは通信が不安定で Ping による疎通確認の時点で IP Destination Host Unreachable となり通信を確保することができなかった。

アンテナ支柱の材質が鉄であること、基地局のアンテナ位置がアンテナ支柱と基地局の取り付け棚に近く、電波伝搬への悪影響が出ていると思われる。また、基地局と端末の間が空間として開けており、アンテナ支柱の台座への反射がマルチパスフェージングを発生させ悪影響が出ていると考えられる。このようにカバーエリア内であるが、見通しがなく、空間が開けているような場合、マルチパスの影響を受けやすくなると考えることができる。

アンテナ支柱の材質については、工場内に支柱を仮設するに当たり、倒れて事故につながらないように安全対策のため、しっかりとした作りの支柱とした。

なお、アンテナを 2 本化した後は、以下のように見通しが確保できない、マルチパス環境において改善し通信が可能となることを確認した。

表 5-44 測定ポイント A26 における測定データ

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送スループット	iPerf DL	61.1Mbps	54.3Mbps	58.8Mbps	58.08Mbps
	iPerf UL	58.4Mbps	70.2Mbps	69.2Mbps	65.9Mbps
伝送遅延	Ping	6.10msec	5.94msec	113msec	41.7msec

(令和 3 年 2 月 13 日 (土) の測定データに基づく)

ただし、Ping の測定時、3 回とも通信が不安定で Ping の応答が返ってこずパケットロスが発生していることを確認している。マルチパスが強く影響している環境であったと考えられる。

## (2) 評価エリア A 28GHz 帯

「5.3 ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等」で取りまとめた、評価エリア A の 28GHz 帯のヒートマップを以下に示す。

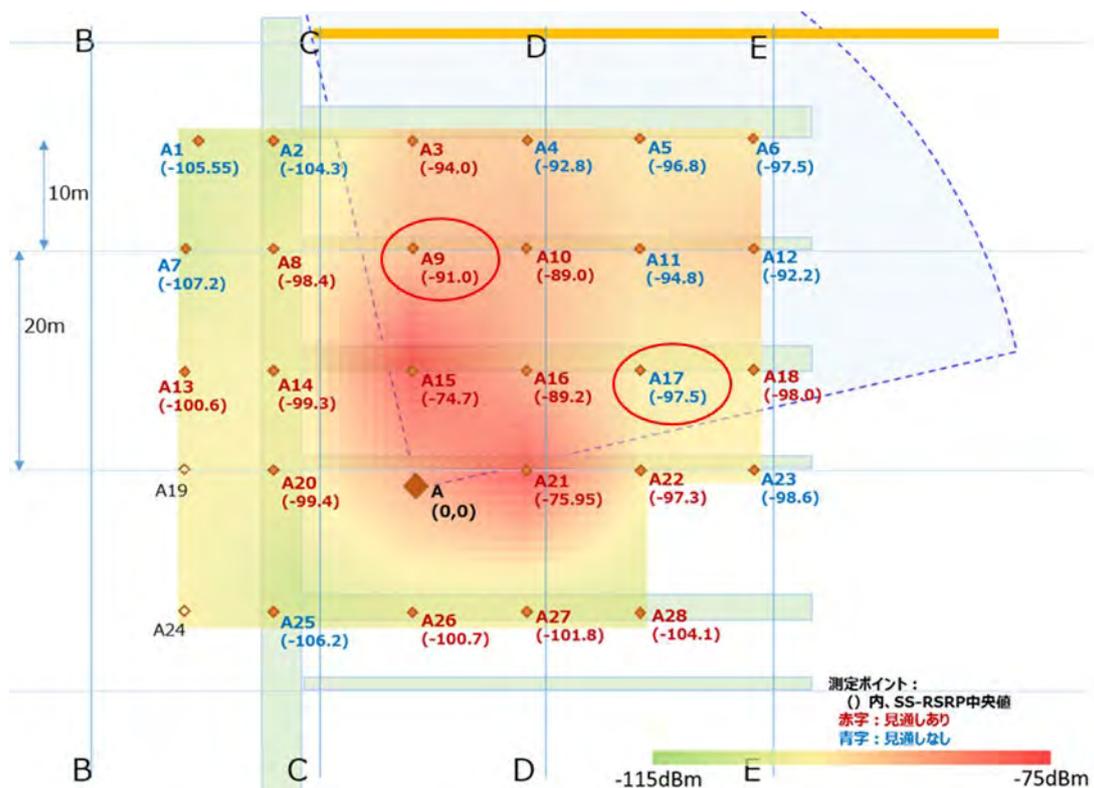


図 5-65 28GHz 帯受信電力ヒートマップ (評価エリア A)

### 1) 測定ポイント A9

このヒートマップから、カバーエリア範囲内で見通しのある測定ポイント A9 に着目し

た。測定ポイント A9 は基地局との距離が 21m であり、SS-RSRP の中央値も-91.0dBm と比較的受信電力が良好な場所である。

測定ポイント A9 の状況を以下に示す。

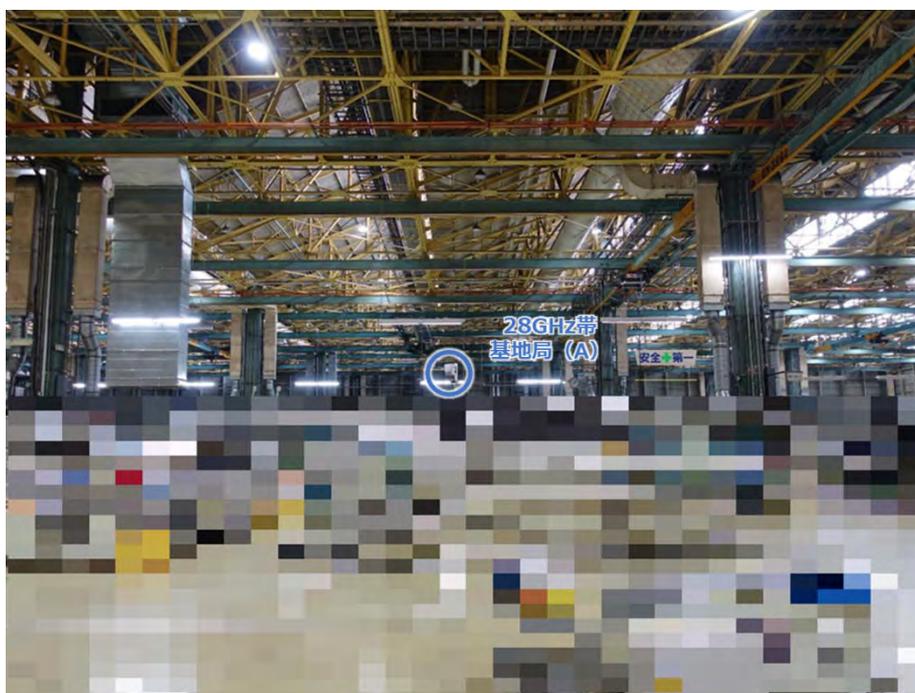


図 5-66 測定ポイント A26 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（土）

測定ポイント A9 は、図に示すように、アンテナ支柱 A に設置した基地局に対して見通しのある環境である。そのため SS-RSRP の中央値は、-91.0dBm となり通信できる水準で受信できている。また、周りに工作機械等が無く広い空間が広がっていることから、測定ポイント A9 では直接波を受けていることがうかがえる。このようにカバーエリア内であれば見通しがあり空間が広がっているような環境であれば基地局周辺のダクト等のマルチパスの影響を受けずに通信ができること考えられる。

測定ポイント A9 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-45 測定ポイント A9 における測定データ

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送スループット	iPerf DL	1.04Gbps	1.03Gbps	1.02Gbps	1.03Gbps
	iPerf UL	70.0Mbps	69.6Mbps	68.6Mbps	69.4Mbps
伝送遅延	Ping	28.56msec	32.30msec	33.06msec	31.30msec

## 2) 測定ポイント A17

また、アンテナとの位置関係が測定ポイント A9 と近しく見通しのない測定ポイント A17 について着目した。SS-RSRP の中央値は-97.5dBm と測定ポイント A9 に比べ約 6.5dBm 低い結果となった。

測定ポイント A17 の状況を以下に示す。

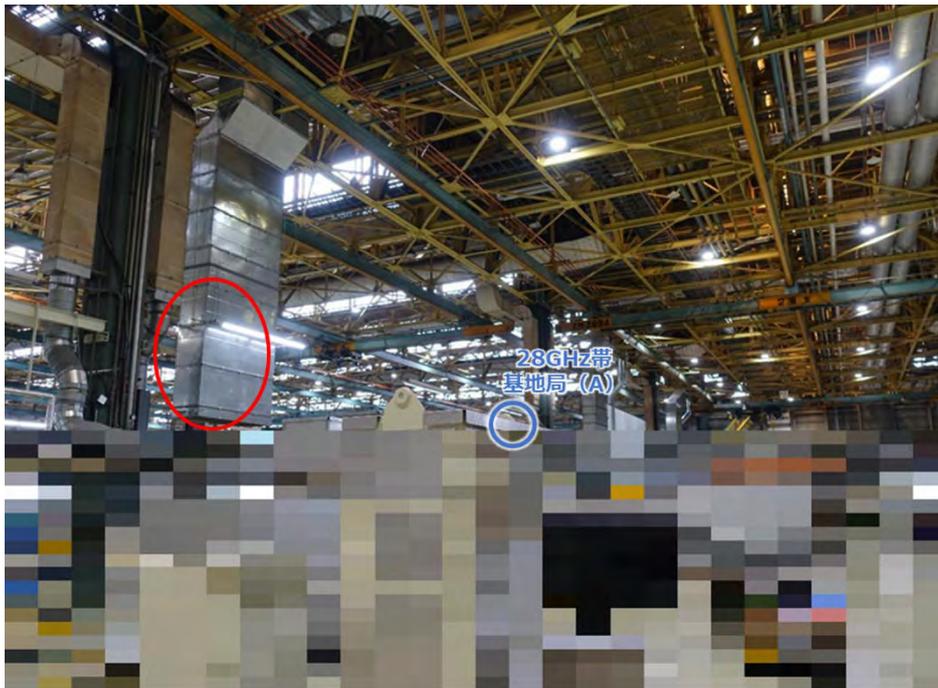


図 5-67 測定ポイント A17 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（土）

図中で示す 28GHz 帯基地局 (A) については基地局の方向を示しており、実際には全く基地局が見えない環境である。そのため A9 に比べて SS-RSRP 値が低くなっていると考えられる。しかしながら、図中赤枠線で囲まれた位置にダクトがあり、これが反射板となって電波を受けていると思われる。波長が短い 28GHz 帯を工場構内で利用していく場合、このようにマルチパスを考慮する必要があることがわかる。

測定ポイント A17 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-46 測定ポイント A17 における測定データ

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送 スループット	iPerf DL	989.9Mbps	1.00Gbps	965.3Mbps	986.5Mbps
	iPerf UL	53.0Mbps	47.9Mbps	50.8Mbps	50.5Mbps
伝送遅延	Ping	30.19msec	43.01msec	32.54msec	35.25msec

### (3) 評価エリア B 28GHz 帯

「5.3 ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等」で取りまとめた、評価エリア B の 28GHz 帯のヒートマップを以下に示す。

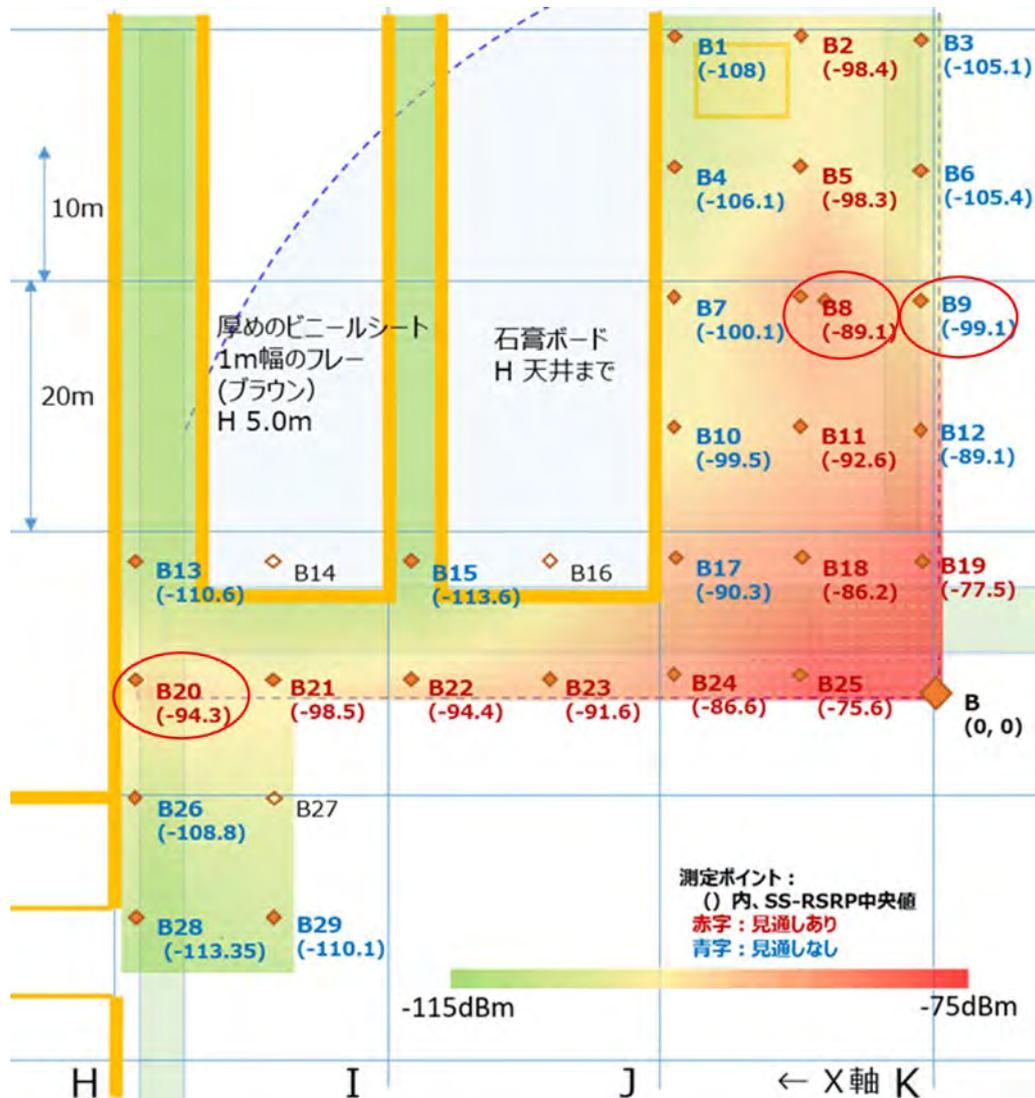


図 5-68 28GHz 帯受信電力ヒートマップ (評価エリア B)

#### 1) 測定ポイント B8

このヒートマップから、カバーエリア範囲内の測定ポイント B8 に着目した。測定ポイント B8 は、基地局とエリアテストのアンテナ間の距離が、31.2083 m の位置である。B8 の SS-RSRP 中央値は、-89.1dBm であり、同じくカバーエリア内で基地局との距離がより近い測定ポイント B11 (21.7706) と比べても 3.5dBm 電波が強い。

測定ポイント B8 の状況を以下に示す。

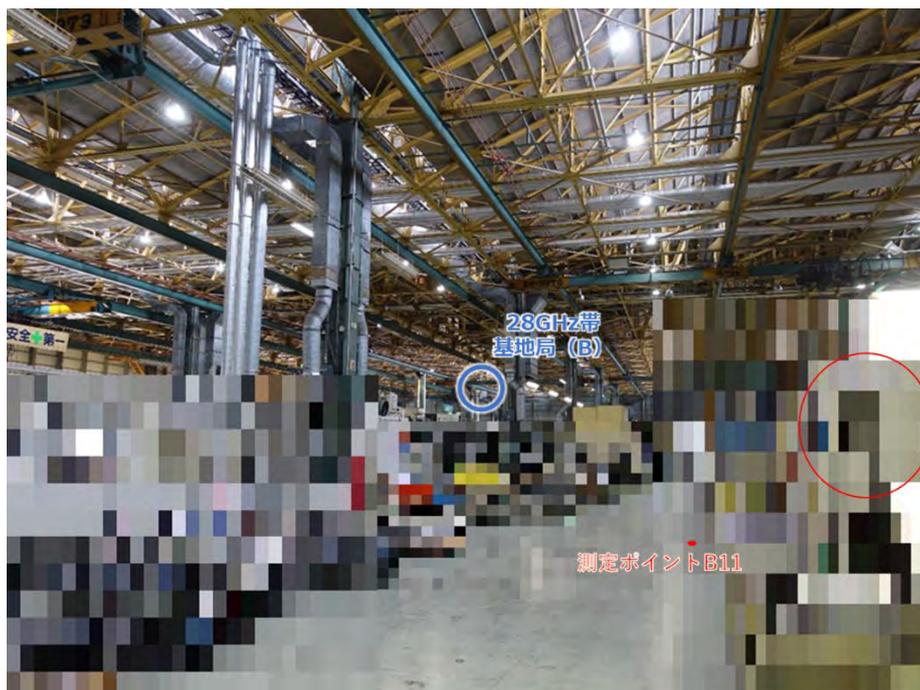


図 5-69 測定ポイント B8 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（土）

B8 は、アンテナ支柱 B に設置した基地局に対して見通しのある環境である。そのた SS-RSRP の中央値より、通信できる水準で受信できている。そこでヒートマップ中に示す、同様に見通しがあり、より基地局との距離が近い測定ポイント B11 に比べ SS-RSRP が高いことに工場内の通信特性が見られる。図中赤枠線で囲んだ工作機械が反射体としての役割を果たしており、基地局→工作機械→測定点のパスにおいて、入射角=反射角の関係により近い測定点 B8 の方が工場内のようなマルチパス環境では受信電力が大きくなると考えられる。

測定ポイント B8 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-47 測定ポイント B8 における測定結果

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送スループット	iPerf DL	1.07Gbps	1.02Gbps	1.07Gbps	1.05Gbps
	iPerf UL	57.0Mbps	57.3Mbps	57.3Mbps	57.2Mbps
伝送遅延	Ping	30.98msec	31.13msec	29.87msec	30.66msec

## 2) 測定ポイント B9

また、カバーエリア内にある測定ポイント B9 にも着目した。B9 は、柱によって見通しのない測定ポイントである。受信電力の測定結果としては、SS-RSRP の中央値が、-99.1dBm であり、ほぼ等距離にて見通しのある測定ポイント B23 (約 30m) に比べ 7.5dbm 程度低い。

測定ポイント B9 の状況を以下に示す。

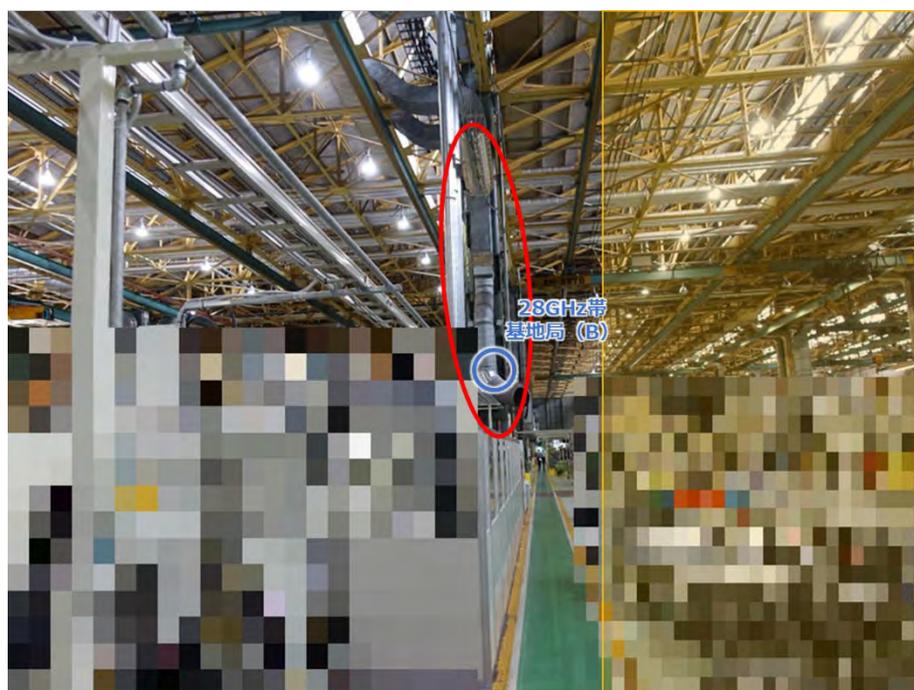


図 5-70 測定ポイント B9 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（土）

B9 は、アンテナ支柱 B に設置した基地局に対して、赤枠線で示したダクト及び柱によって全く見通しのない環境である。そのことから、受信している SS-RSRP の中央値（99.1dBm）については反射波を受信していることがうかがえる。図中右側の黄色部には反射するような工作機械等は無く、さらに奥（測定点 B10 辺り）から反射波を受け取っていると考えられる。これも工場内のようなマルチパス環境特有の通信特徴の一つであると言え、工場内ではマルチパスによる影響を大きく置けるということがわかる。

測定ポイント B9 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-48 測定ポイント B9 における測定結果

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送 スループット	iPerf DL	847.0Mbps	843.0Mbps	849.2Mbps	846.4Mbps
	iPerf UL	16.3Mbps	15.5Mbps	14.8Mbps	15.5Mbps
伝送遅延	Ping	32.15msec	31.28msec	30.47msec	31.30msec

### 3) 測定ポイント B20

さらに、カバーエリア境界付近にある測定ポイント B20 にも着目した。B20 は、基地局から見通しのあるポイントであり、壁を背面にするような環境である。受信電力の測定結果としては SS-RSRP の中央値が -94.3 dBm であり、より距離の近い測定ポイント B21 に比べ 4.2dBm 程度高い。

測定ポイント B20 の状況を以下に示す。



図 5-71 測定ポイント B20 の様子

撮影日：令和 3 年 2 月 12 日（土）

これより、反射する物体（当測定ポイントでの壁）が近くに存在する環境の方がただ見通しのある環境に比べて受信電力が強いことがわかる。また、図中左側に見える黒色の建物はプラスチックのような素材で出来ており、こちらでは電波が反射していないと考えられる。そのため、より基地局に距離の近い測定ポイント B21 では B20 に比べ SS-RSRP の中央値が低いのではないかと考えられる。工場内の環境は工作機械だけでなく、反射しない素材での構造物も考えられるため、この点は考慮する工場内の特性の一つと考える。

測定ポイント B20 においては、伝送スループット、伝送遅延の測定結果は以下であった。

表 5-49 測定ポイント B20 における測定結果

		1 回目平均	2 回目平均	3 回目平均	平均
伝送 スループット	iPerf DL	1.03Gbps	1.00Gbps	1.05Gbps	1.03Gbps
	iPerf	39.8Mbps	37.5Mbps	39.8Mbps	39.0Mbps

	UL				
伝送遅延	Ping	79.19msec	49.10msec	64.40msec	64.23msec

### 5.4.3.2 高精細映像伝送を伴う MR 等のリアルタイム通信

計測指標である、アプリケーションレイヤでの遅延について、「4.6 課題解決システムに関する機能検証」で取得するパケットキャプチャーデータを用いて、評価を行った。

#### (1) 28GHz 帯 ①基本条件－10（遅延時間）

28GHz 帯における基本条件の際のループバック 200Mbps の映像転送をした時の遅延時間遅延時間について評価を行った。

以下に示す通り、端末（HMD 装着を疑似）から UL へ 200Mbps の映像を送信し、サーバ側で受信したトラフィックをループバックして端末へ送り返す動作となる。

「5.3.4.3 伝送スループット特性」に示した通り、現状 UL 伝送スループットは、200Mbps を送信することはできない。そのため、ローカル 5G の無線区間でパケットドロップが発生していることが確認できる。

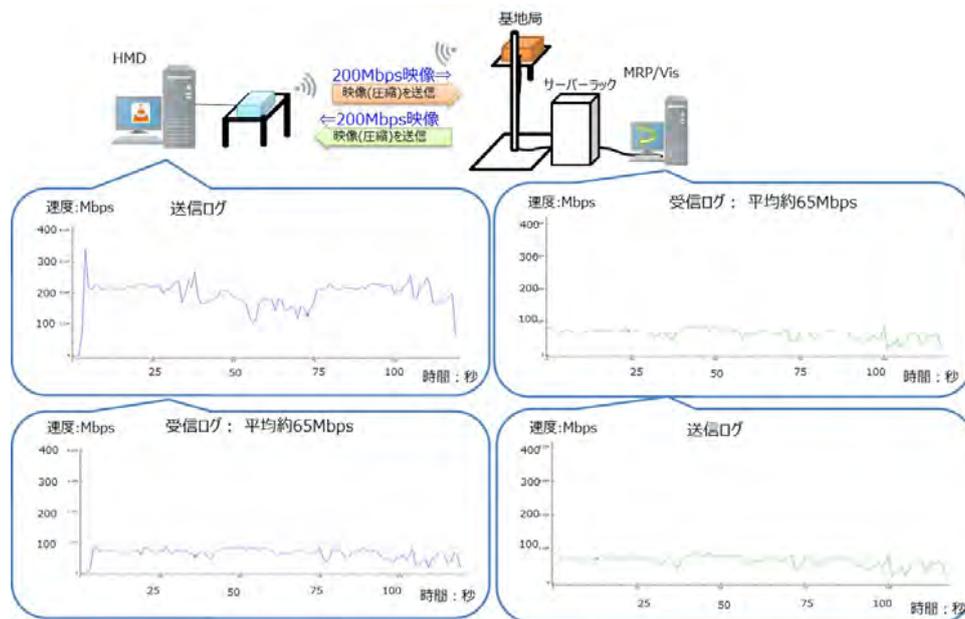


図 5-72 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 速度ログ

このような、アプリケーションにとって不安定となるネットワーク環境での遅延時間は、以下の通りであった。

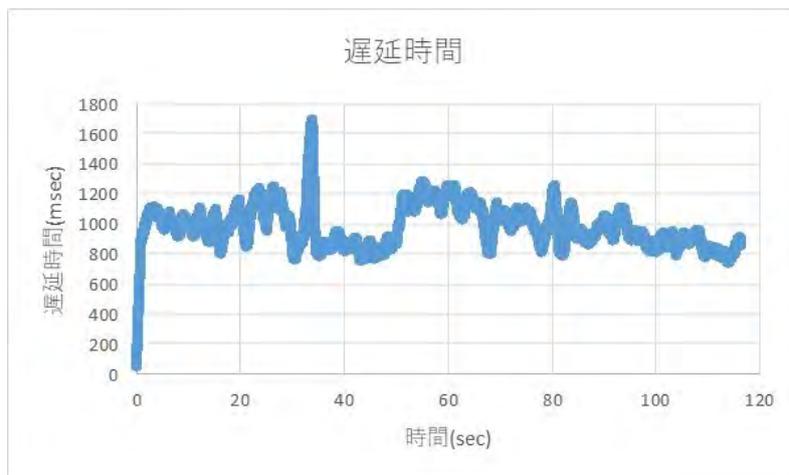


図 5-73 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 遅延時間 1

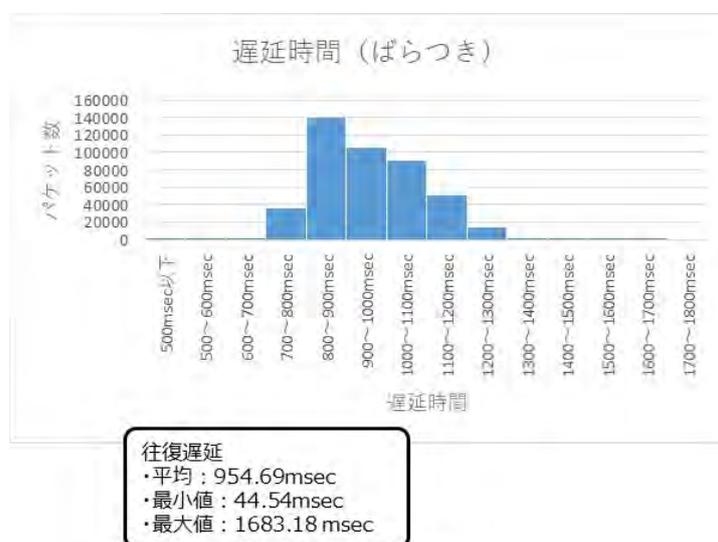


図 5-74 28GHz 帯 基本条件 ループバック 200Mbps 遅延時間 2

往復遅延時間が平均 945.69msec と、約 1 秒となっている要因としては、パケットドロップによる影響が考えられる。無線区間では上位レイヤーヘデータを渡すためエラー訂正を行うがこの処理に時間を要していると考えられる。また、ネットワークインターフェースにおいても CRC エラーの処理等で時間を要していると考えられる。

UL の伝送スループットがアプリケーションの期待通りの性能を出すことが可能となった場合は、大量のパケットドロップの処理時間の増大による遅延時間はここまで大きくはならないと想定される。

## (2) 28GHz 帯 ①基本条件－1 1 (遅延時間)

28GHz 帯におけるループバック 20Mbps の映像転送における遅延時間について評価を行った。

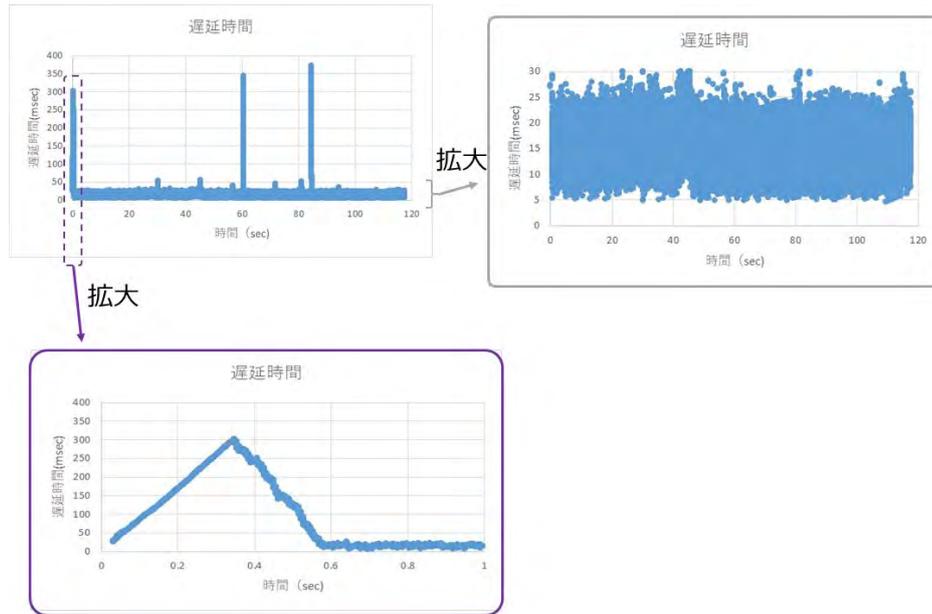


図 5-75 28GHz 帯 基本条件 ループバック 20Mbps 遅延時間 1

Wireshark のログから、遅延時間のグラフを作成したところ、以下のことが確認された。

- (1) 試験開始直後 0.35 秒間で 300msec まで遅延時間が線形に上がっていき、その後 0.6 秒までの間で、30msec 以内に下降していく
- (2) その後の遅延時間は、5msec～30msec の範囲内で経過していく
- (3) 60 秒頃、82 秒頃に 350msec を超える遅延が発生している

これらの事象について、以下確認を進めた。

(1) 山形の遅延グラフとなっていることから、端末側、コア側のキューイング処理等が関係するかメーカーへ確認をしたが、このような事象の要因となる実装などはないとの回答を得た。

(2) 「5.3.4.4 伝送遅延特性」でも記載したが、遅延時間の変動については DRX の実装とも関係があると思われる。

(3) 調査を進めたが、要因の特定には至っていない。工場内の機器の移動などの環境変動から、電波環境に影響が出たと考えることもできるが、今後、様々なパターンで事象の確認と要因解析をしていく必要があると考える。

なお、Wireshark の RTP ストリームの解析でジッター値も同様のグラフとなることが分かった。(ジッター値の最大は 23.07msec)

遅延が大きくなることで、パケット間のゆらぎにも影響が出ていると言える。

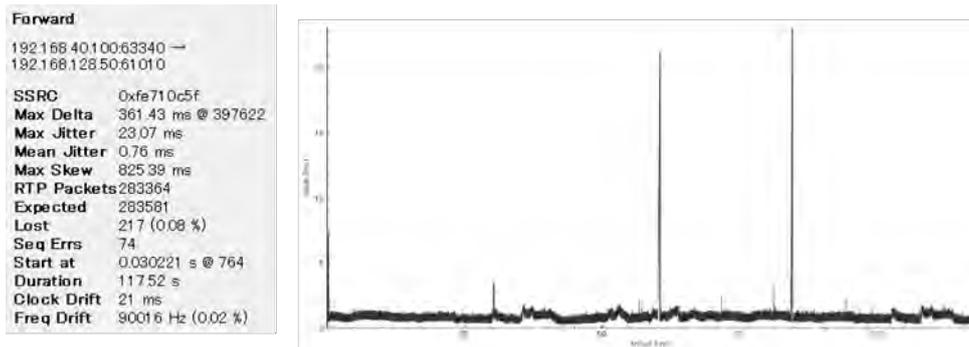


図 5-76 RTP ストリーム解析結果

高精細映像伝送を伴う MR 等のリアルタイム通信を行う無線ネットワークとしては、上記のような遅延の動きや揺らぎについて均一で安定した通信が期待される。

また、アプリケーション側も無線ネットワークでの通信特性を踏まえて安定した利用ができるようにシステム全体として工夫ができると良いと考える。

#### 5.4.3.3 基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の評価・検証項目において、計測指標を受信電力、基地局からの距離をとして、実際に計測することで、総務省エリア算出法との比較を行い、評価・考察を実施した。

##### (1) 4.7GHz 帯

「総務省訓令 電波法関係審査基準 別紙(16)-1 カバーエリアおよび調整対象区域の算出法」(以下、総務省エリア算出法)を以下に示す。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 8$$

- Pr [dBm] : 受信レベル (受信電力)
- Pt [dB] : 送信電力 (基地局の空中線電力)
- Gt [dBi] : 送信アンテナ利得
- Lf [dB] : 基地局の給電線損失
- Gr [dBi] : 受信アンテナ利得
- L [dB] : 伝搬損失 (注)

(注) 伝搬損失 L は自由空間伝搬損失式及び拡張秦式を基礎として算出することとし、送受信間距離  $d_{xy}$  によって以下の式で算出する。なお、以下の②又は③で得られる伝搬損失 L が①より小さな値の場合、L は①の値に変更する。

##### ① $d_{xy} \leq 0.04 \text{ km (40m)}$ の場合

$$L = L_0$$

$$= 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 10 \log_{10} \{ (d_{xy}^2) + (H_b - H_m)^2 / 10^6 \} + R$$

f (MHz) : 使用する周波数

H<sub>b</sub> (m) : 基地局の空中線地上高

d<sub>xy</sub> (m) : 基地局と伝搬損失を算出する地点との距離

H<sub>m</sub> (m) : 移動局の空中線地上高。第 2 項の定めるところによる。(1.5m)

R (dB) : 建物侵入損 ※基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損 (16.2)

② 0.04km < d<sub>xy</sub> < 0.1 km (40~100m)の場合

L = L<sub>0</sub>

+ {2.51 × log<sub>10</sub>(d<sub>xy</sub>) + 3.51} × {L<sub>H</sub> - L<sub>0</sub>}

③ d<sub>xy</sub> ≥ 0.1 km の場合

L = L<sub>H</sub>

= 46.3

+ 33.9 log<sub>10</sub>(2000)

+ 10 log<sub>10</sub>(f/2000) - 13.82 log<sub>10</sub> (max (30, H<sub>b</sub>))

+ {44.9 - 6.55 log<sub>10</sub> (max (30, H<sub>b</sub>))} (log<sub>10</sub>(d<sub>xy</sub>))<sup>α</sup>

- a(H<sub>m</sub>) - b(H<sub>b</sub>) + R - K - S

f (MHz) : 使用する周波数

H<sub>b</sub> (m) : 基地局の空中線地上高

d<sub>xy</sub> (km) : 基地局と伝搬損失を算出する地点との距離

H<sub>m</sub> (m) : 移動局の空中線地上高。第 2 項の定めるところによる。(1.5m)

R (dB) : 建物侵入損 ※基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損 (16.2)

α : 遠距離に対して考慮する係数 (本技術実証では、20km 以内なので「1」)

距離 d<sub>xy</sub> が 20km 以内 : 1

距離 d<sub>xy</sub> が 20km~100km : 計算式あり <sup>xvii</sup>

a(H<sub>m</sub>) : 陸上移動局高の補正項 (本技術実証では、中小都市となり、「0.057」)

中小都市の場合 : 0.057

大都市の場合 : -0.00092

b(H<sub>b</sub>) : 基地局高の補正項 (本技術実証では、30m より低いため「20log<sub>10</sub>(H<sub>b</sub>/30)」)

30m 以上 : 0

30m より低い : 20log<sub>10</sub>(H<sub>b</sub>/30)

K : 地形の影響補正值 (本技術実証では、「0」)

通常は、0

S (dB) : 市街地、郊外地及び開放地の補正值

(本技術実証では、工場屋内であり市街地相当と判断「0」)

市街地 ; S = 0.0

---

xvii <https://5gmf.jp/wp/wp-content/uploads/2020/12/local-5g-manual2.pdf>

5GMF ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.0 版 p.101 参照 (令和 3 年 3 月 25 日 (木) 取得)

郊外地 ; S = 12.3  
 開放地 ; S = S32.5

1) 4.7GHz 帯カバーエリア及び調整対象区域

4.7GHz 帯カバーエリア及び調整対象区域を以下に示す。

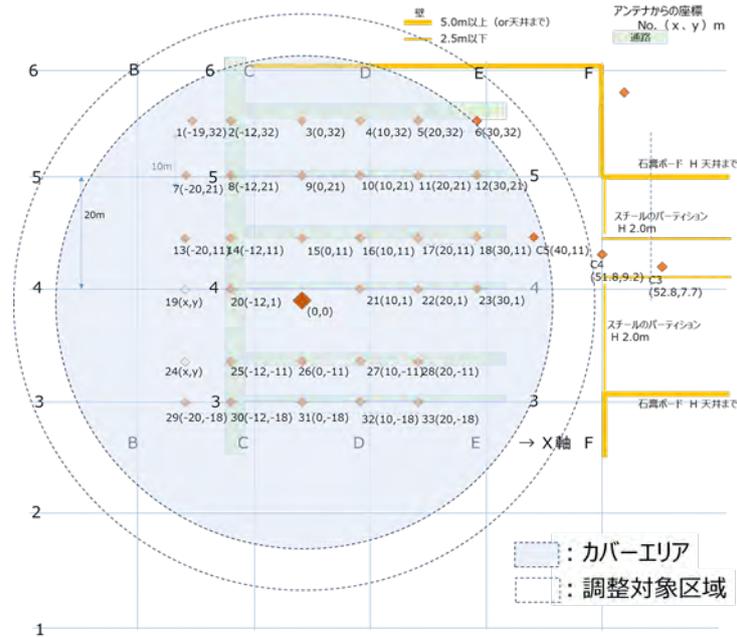


図 5-77 4.7GHz 帯カバーエリア及び調整対象区域

2) エリア端における実際の受信レベル

計算式より求めた、基地局からの距離の地点 (エリア端) は以下の通り。

表 5-50 基地局からの距離と受信レベルの測定結果 (4.7GHz 帯)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	算出法より求めたエリア端	エリア端での実際の受信レベル
カバーエリア	-84.6dBm	41.87m	-59.472dBm <sup>1</sup>
調整対象区域	-91dBm	48.07m	-63.672dBm <sup>2</sup>

1 … エリアテストによる SS-RSRP の測定値は、-94.7dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

2 … エリアテストによる SS-RSRP の測定値は、-98.9dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

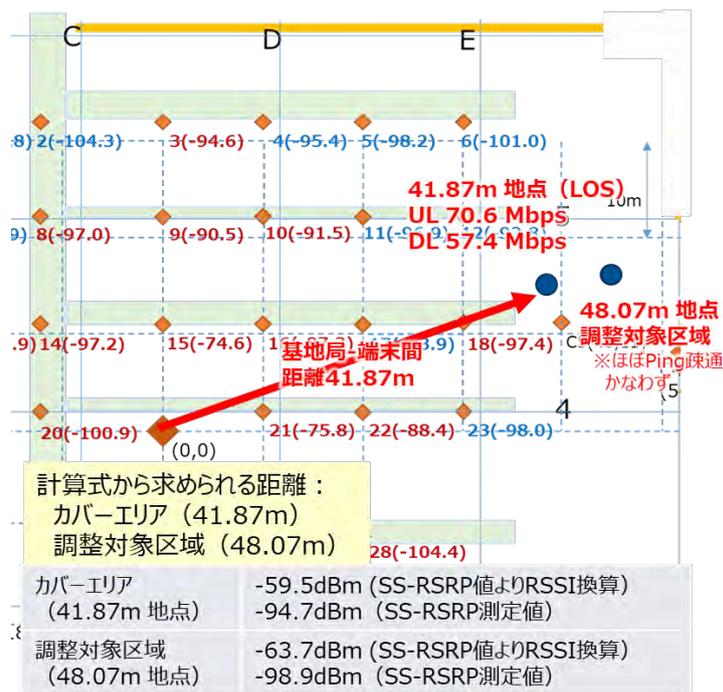


図 5-78 基地局からの距離と受信レベルの測定結果 (4.7GHz 帯)

なお、参考まで、41.87m 地点 (カバ－エリア端) にて、伝送スループットは、UL 70.6Mbps、DL 57.4Mbps であった。また、48.07m 地点 (調整対象区域端) では、Ping 疎通できず通信することができなかった。

### 3) カバ－エリア及び調整対象区域の閾値が実測される地点の基地局からの距離

上記 2) の結果で、差異が確認されたため、実測される地点を貞宝第 1 工場内で探し、基地局からの距離を求めた。

表 5-51 カバ－エリア及び調整対象区域の閾値が実測される地点の基地局からの距離

	算出法によって定められている受信電力の閾値	SS-RSRP に換算した値	実測される基地局からの距離
カバ－エリア	-84.6dBm	-119.8dBm	42.2m (東 1 屋外)
調整対象区域	-91dBm	-126.2dBm	60m (東 1 通路側屋外)

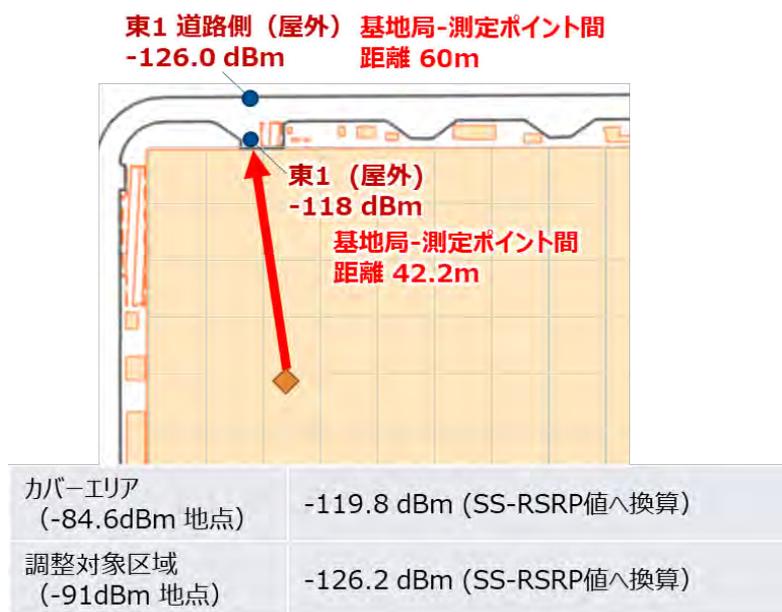


図 5-79 カバーエリア及び調整対象区域の閾値が実測される地点の基地局からの距離

#### 4) 評価・考察

総務省エリア算出法と実測値に差異が確認された。

本実証の環境は、工場屋内に基地局が設置され、端末も同様に工場屋内での利用する環境である。

そのため、伝搬損失を算出する際に、屋外から建物内に電波が侵入してくるわけではないこと、また、屋外で端末を使用するユースケースではないことから、建物侵入損としてどの程度の減衰値とするかは、考慮が必要と思われる。

そこで、仮に、総務省エリア算出法の建物侵入損を 0dB として算出した場合と、7dB として算出した場合について、カバーエリア端の閾値を実測した測定地点（42.2m 地点）で受信電力が-84.6dBm となるには、どのくらいの伝搬損失の差があるのかを算出した。

表 5-52 電波伝搬損失の差

算出式内、建物侵入損	カバーエリア受信電力閾値	基地局との距離（水平）※算出式で-84.6dBmとなる距離	実測の受信電力の距離	距離が 42.2m となるための伝搬損失の差
建物侵入損 (16.2dB)	-84.6dBm	41.87m	42.2m	—
建物侵入損 (0dB)	-84.6dBm	58.76m (この時の伝搬損失 L 96.38 dB)	—	15.85 dB
建物侵入損	-84.6dBm	50.97m	—	8.85 dB

(7dB)		(この時の伝搬損失L 96.4 dB)		
-------	--	---------------------	--	--

この結果、上記の表の通り、設定する建物侵入損によってカバーエリア端の受信電力閾値が実測された地点での伝搬損失の差があることを確認できた。

この考え方で、建物侵入損を 0dB として算出した場合と、7dB として算出した場合と「5.3.5.2 エリアテストで受信した SS-RSRP から算出した伝搬損失について」にて算出した実際の伝搬損失(L)との比較を行った。

表 5-53 実際の電波伝搬損失との比較

測定地点番号	見通し(1:LOS 0:NLOS)	SS-RSRP 中央値 [dBm]	実際の伝搬損失 L[dB]	水平の距離[m]	算出式建物侵入損 0dB の時の伝搬損失	算出式との差 (伝搬損失)	算出式建物侵入損 7dB の時の伝搬損失	算出式との差 (伝搬損失)	算出式建物侵入損 16.2dB の時の伝搬損失	算出式との差 (伝搬損失)
21	1	-87.3	71.9	10.0	66.2	5.63	73.2	-1.37	82.4	-10.6
26	0	-98.3	82.9	11	67.0	15.9	74.0	8.87	83.2	-0.33
31	0	-102.4	86.9	18	72.0	14.9	79.1	7.86	88.3	-1.34
9	1	-96.8	81.3	21	72.5	8.8	79.5	1.85	88.7	-7.35
7	0	-96.7	81.3	29	75.3	6.0	82.3	-1.04	91.5	-10.2
12	1	-91.2	75.8	36.6	77.3	-1.6	84.3	-8.56	93.5	-17.8
1	0	-96.7	81.3	37.2	77.5	3.8	84.5	-3.20	93.7	-12.4

各測定ポイントで伝搬損失の差が違って来るが、見通しの有無、距離に応じて傾向が違っているが、実際の伝搬損失と、算出結果を比べ差が小さい値に赤枠を付けた。

今回の 7 つの測定ポイントでの試算からは、建物侵入損が 7dB の時が実際の値と近くなる傾向があることが分かる。

この伝搬損失の差について、サンプル数を多く取り、場合分け、条件分けによって傾向が明らかになってくると、その傾向をエリア算出法として加えることができると考えられる。

総務省エリア算出法としては、技術審査基準としてできるだけ多くの場合に対応していく必要があるが、場合分けや条件分けを行い、利用者が利用する場合に合わせた算出ができるようになることが良いと考える。

## (2) 28GHz 帯

「総務省訓令 電波法関係審査基準 別紙(16)-1 カバーエリアおよび調整対象区域」(以下、総務省エリア算出法)を以下に示す。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 4 \quad (\text{式 1})$$

Pr [dBm] : 受信レベル (受信電力)  
 Pt [dBm] : 送信電力 (基地局の空中線電力)  
 Gt [dBm] : 送信アンテナ利得  
 Lf [dB] : 基地局の給電線損失  
 Gr [dBi] : 受信アンテナ利得  
 L [dB] : 伝搬損失

(注) 伝搬損失 L は、勧告 ITU-R P.1411 を基礎として算出する事

伝搬損失 L

③屋内の場合

$$L = 20 \log_{10} (4 \pi d / \lambda) + R$$

d (m) : 基地局から陸上移動局までの距離

$\lambda$  (m) : 指定周波数の波長

R (dB) : 建物侵入損 (20.1)

#### 1) 28GHz 帯カバーエリア及び調整対象区域の図

本技術実証で使用する、ノキア製 28GHz 帯基地局 AWEUA の諸元 (xxx に記載) より、受信電力が、カバーエリア (-81.2dBm)、調整対象区域 (-90.0dBm) となる基地局から陸上移動局までの距離を求めた。

表 5-54 基地局からの距離と受信レベルの測定結果 (28GHz 帯)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	算出法より求めたエリア端
カバーエリア	-81.2dBm (100MHz システム)	1,057.6m
調整対象区域	-90.0dBm (100MHz システム)	2,912.9m

※基地局の送信電力 : 22dBm、送信アンテナ利得 : 23dBi、基地局の給電線損失 : 0dB、周波数 : 28746.72

算出法より求めたエリア端であるが、想定以上の距離がカバーエリア、調整対象区域ということになる結果であった。この結果については、無指向性アンテナにより全方向に送信している前提での計算となっているためと考えられる。

ノキア製 28GHz 帯基地局 AWEUA は、フェーズドアレイアンテナ一体型の基地局となっており、指向性のあるアンテナである。このため、アンテナパターンを考慮して、算出する必要があると考える。

今回の基地局設置にあたり、干渉調整の結果、チルト角を 20 度かけることとなっているため、アンテナパターンより、送信アンテナ利得を 6dBi として改めて、算出を行う必要がある。

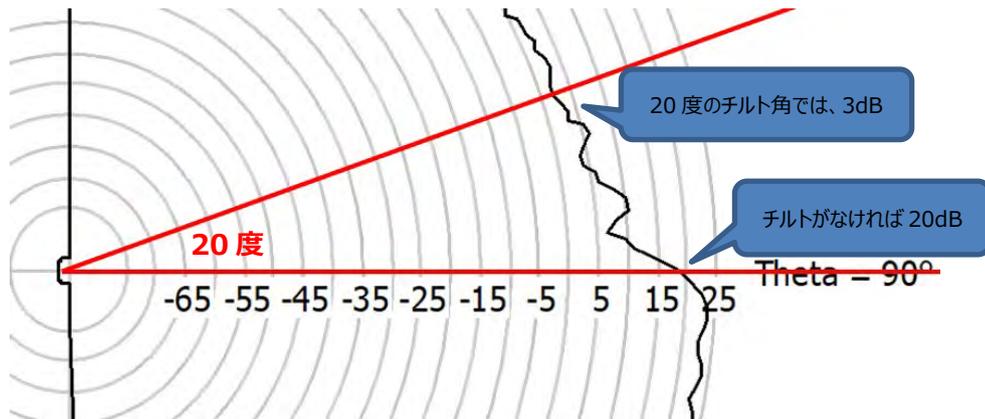


図 5-80 チルト角

※諸元の送信アンテナ利得 23dBi から 20 度のチルトによる差 17dB を差し引き、6dBi とした。また基地局の給電線損失を 1dB とした。アンテナ一体型ではあるが、多数のアンテナ素子を構成する回路による損失を想定した。

そこで、アンテナの放射パターンとエリアの地形図、建物の侵入損を 20.1dB として、建物外のカバーエリアと干渉調整エリアをシミュレーションソフトにて計算した。

シミュレーションの結果を以下、評価エリア A を「図 5-81 評価エリア A の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の計算結果」に、評価エリア B を「図 5-82 評価エリア B の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の計算結果」に示す。

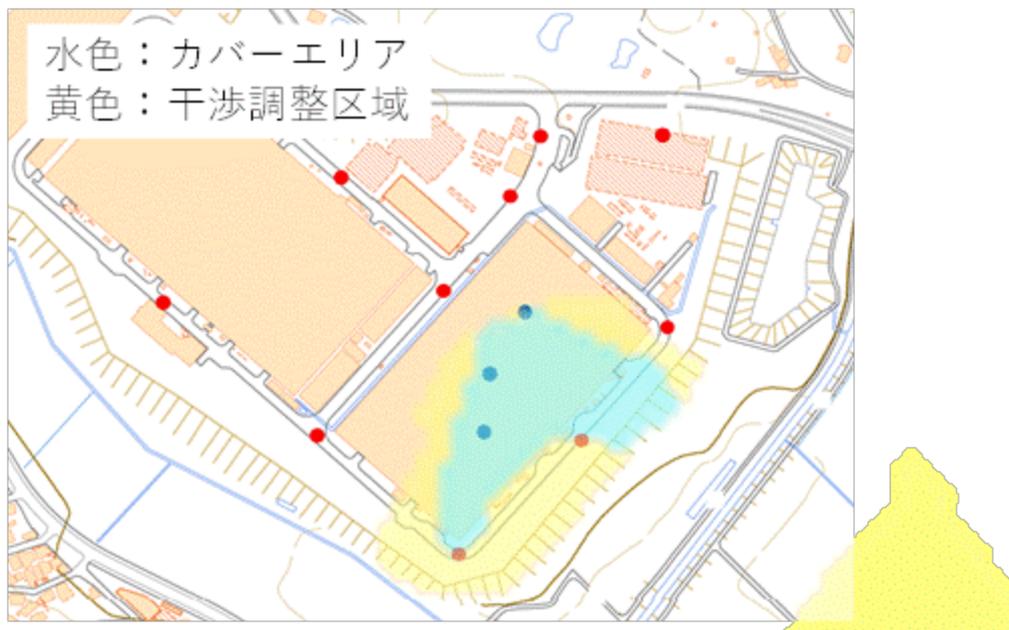


図 5-81 評価エリア A の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の計算結果

表 5-55 評価エリア A の基地局からのエリア端

	シミュレーションに入力した受信電力の閾値 (算出法の値)	シミュレーションより求めたエリア端
--	------------------------------	-------------------

カバーエリア	-81.2dBm (100MHz システム)	85.83m (B8 柱)
調整対象区域	-90.0dBm (100MHz システム)	94.34m (A8 柱)

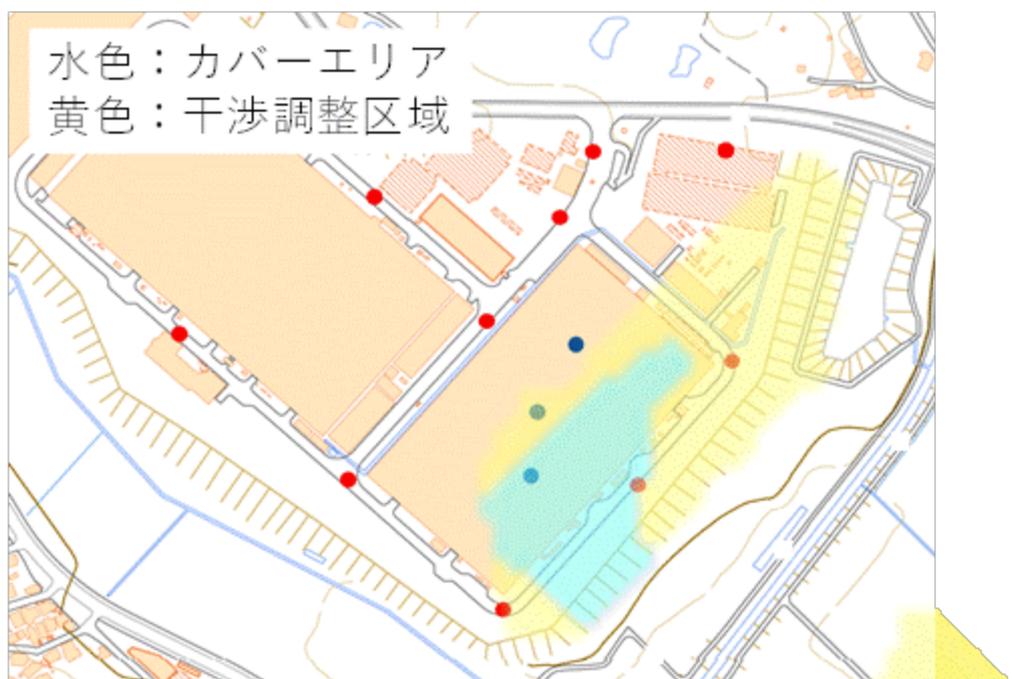


図 5-82 評価エリア B の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の計算結果

表 5-56 評価エリア B の基地局からのエリア端

	シミュレーションに入力した受信電力の閾値 (算出法の値)	シミュレーションより求めたエリア端
カバーエリア	-81.2dBm (100MHz システム)	50.01m (L8 柱)
調整対象区域	-90.0dBm (100MHz システム)	60.84m (M8 柱)

## 2) エリア端における実際の受信レベル

当初の算出法による結果の距離の地点が工場の敷地外となったため測定は行っていない。そこで、アンテナの放射パターンとエリアの地形図を考慮に入れ、建物の侵入損(20.1dB)より計算したカバーエリアと干渉調整エリアのエリア端を測定した。

表 5-57 算出法より求めたエリア端

	算出法によって定められている受信電力の閾値	算出法より求めたエリア端
カバーエリア	-81.2dBm (100MHz システム)	1,057.6m
調整対象区域	-90.0dBm (100MHz システム)	2,912.9m

a) 評価エリア A

エリア端での実際の受信レベルの確認として、アンテナの放射パターンとエリアの地形図、建物の侵入損(20.1dB)より計算し、評価エリア A の基地局に対して、以下の測定ポイントを選定した。

- ・ カバーエリア : B8 柱
- ・ 調整対象区域 : A8 柱

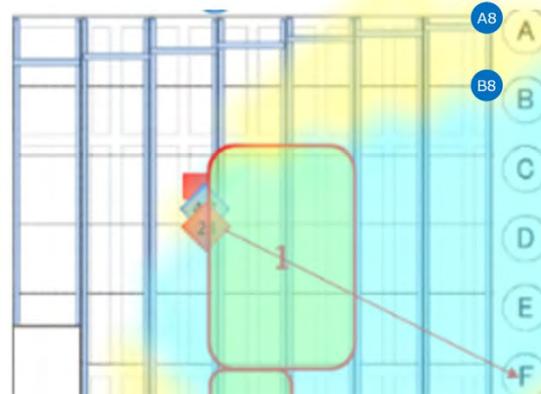


図 5-83 カバーエリアと調整対象区域 (評価エリア A)

B8 柱 (カバーエリア)、A8 柱 (調整対象区域) での、実際の受信電力について、以下に示す。

表 5-58 カバーエリアと調整対象区域における受信電力 (評価エリア A)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	基地局との距離 (シミュレーション上)	エリア端での実際の受信レベル
カバーエリア	-81.2dBm	85.83m (B8 柱)	-74.25dBm <sup>1</sup>
調整対象区域	-90.0dBm	94.34m (A8 柱)	-77.07dBm <sup>2</sup>

1 … エリアテスタによる SS-RSRP の測定値は、-120.25dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

2 … エリアテスタによる SS-RSRP の測定値は、-123.07dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

SS-RSRP 値の求め方としては、エリアテスタのケーブルロスとアンテナ利得を含めてアンテナ端での SS-RSRP の受信電力を求め、同期信号から 100MHz(95.4MHz)帯域の RSSI に換算。また、受信端末でのアンテナ利得 20dBi を想定して免許基準の閾値に相当する SS-RSRP の値を計算した。

この結果からは、シミュレーションの結果の地点での実際の受信電力について、カバーエリア、調整対象区域ともに差異が確認された。

これは、シミュレーションではアンテナの指向性によってカバーエリアと調整対象区域の端となることを予想したが、実際には工場内の構造物の反射などによって、予想よりも高い受信電力であったと考えることができる。

## b) 評価エリア B

エリア端での実際の受信レベルの確認として、アンテナの放射パターンとエリアの地形図、建物の侵入損(20.1dB)より計算し、評価エリア B の基地局に対して、以下の測定ポイントを選定した。

- ・ カバーエリア : L8 柱
- ・ 調整対象区域 : M8 柱

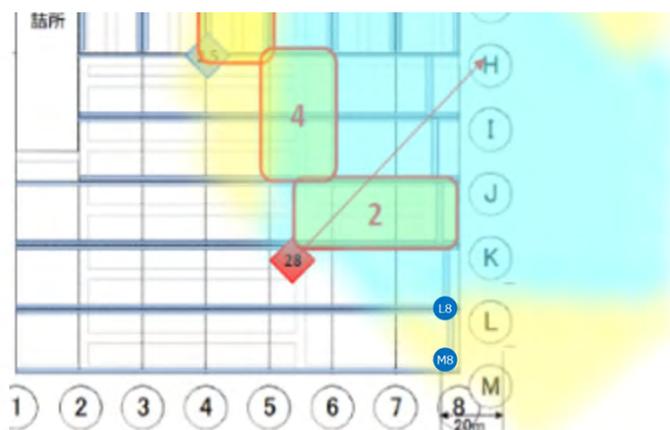


図 5-84 カバーエリアと調整対象区域 (評価エリア B)

L8 柱 (カバーエリア)、M8 柱 (調整対象区域) での、実際の受信電力について、以下に示す。

表 5-59 カバーエリアと調整対象区域における受信電力 (評価エリア B)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	基地局との距離 (シミュレーション上)	エリア端での実際の受信レベル
カバーエリア	-81.2dBm	50.01m (L8 柱)	-71.15dBm <sup>1</sup>
調整対象区域	-90.0dBm	60.84m (M8 柱)	-74.20dBm <sup>2</sup>

1 … エリアテスタによる SS-RSRP の測定値は、-117.15dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

2 … エリアテスタによる SS-RSRP の測定値は、-120.20dBm。SS-RSRP 値より RSSI 換算した値

SS-RSRP 値の求め方としては、ケーブルロスとアンテナ利得を含めてアンテナ端での SS-RSRP の受信電力を求め、同期信号から 100MHz (95.4MHz) 帯域の RSSI に換算。また、受信端末でのアンテナ利得 20dBi を想定して免許基準の閾値に相当する SS-RSRP の値を計算した。

この結果からは、シミュレーションの結果の地点での実際の受信電力について、カバーエリア、調整対象区域ともに差異が確認された。

これは、シミュレーションではアンテナの指向性によってカバーエリアと調整対象区域の端となることを予想したが、実際には工場内の構造物の反射などによって、予想よりも高い受信電力であったと考えることができる。

### 3) カバーエリア及び調整対象区域の閾値が実測される地点の基地局からの距離

上記 2)の結果で、シミュレーション上の地点での実測値との差異が確認されたため、総務省エリア算出法で規定されている受信電力が実測される地点を貞宝第1工場内で探し、基地局からの距離を求めた。

#### a) 評価エリア A

カバーエリアと干渉調整区域の境界におけるエリアテストの SS-RSRP 値をあらかじめ計算しておき、閾値に相当する SS-RSRP の値を示す地点を探した。

SS-RSRP 値の求め方としては、エリアテストのケーブルロスとアンテナ利得を含めてアンテナ端での SS-RSRP 値に無線局免許審査基準で指定される陸上移動局の空中線利得 20dBi を想定し、100MHz (95.4MHz) 帯域の RSSI に換算した値が、閾値となるように求めた。計算した SS-RSRP 値に近い測定結果を示した地点情報を「表 5-60 測定器の SS-RSRP 値と閾値の関係」に示す。

表 5-60 測定器の SS-RSRP 値と閾値の関係 (評価エリア A)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	SS-RSRP 値	閾値が実測される地点の基地局からの距離
カバーエリア	-81.2dBm	-127.4dBm	地点：西 1 扉外 基地局からの距離：61.10m SS-RSRP：-127.2dBm
調整対象区域	-90.0dBm	-136.2dBm	地点：F1 柱 屋外 基地局からの距離：79.23m SS-RSRP：-135.9dBm

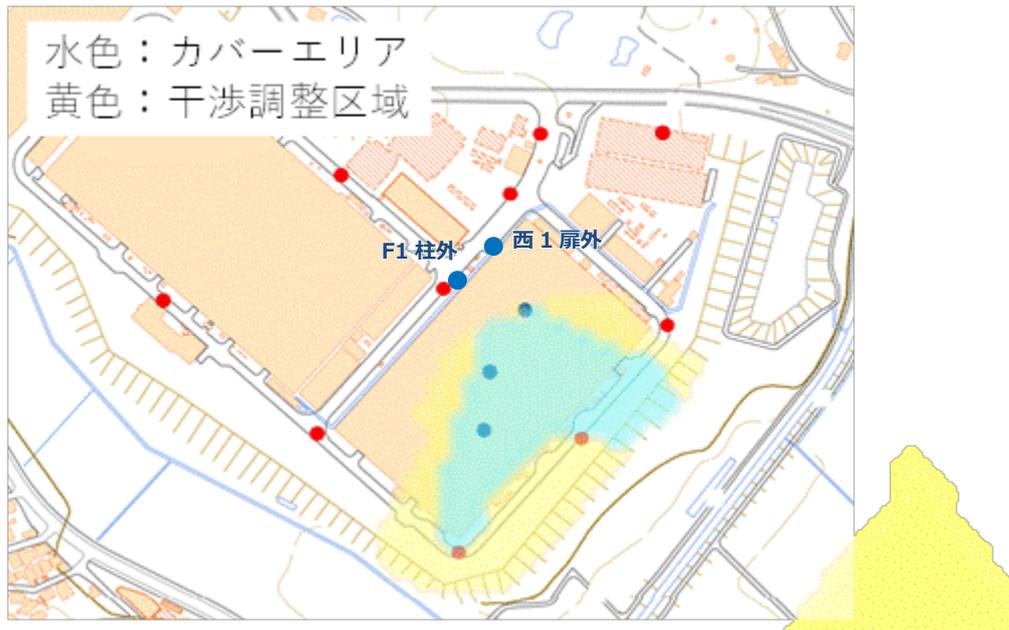


図 5-85 西 1 扉外及び F1 柱の場所

この結果より、カバーエリアとして測定した西 1 扉については、基地局の指向性から外れる方角の測定地点であるが、工場内の反射などの影響で電波が到達していると考えられる。また、調整対象区域についても、同様に基地局の指向性から外れる方角の測定地点となる。

b) 評価エリア B

カバーエリアと干渉調整区域の境界におけるエリアテストの SS-RSRP 値をあらかじめ計算しておき、閾値に相当する SS-RSRP の値を示す地点を探した。

SS-RSRP 値の求め方としては、エリアテストのケーブルロスとアンテナ利得を含めてアンテナ端での SS-RSRP 値に無線局免許審査基準で指定される陸上移動局の空中線利得 20dBi を想定し、100MHz (95.4MHz) 帯域の RSSI に換算した値が、閾値となるように求めた。計算した SS-RSRP 値に近い測定結果を示した地点情報を「表 5-61 測定器の SS-RSRP 値と閾値の関係 (評価エリア B)」に示す。

表 5-61 測定器の SS-RSRP 値と閾値の関係 (評価エリア B)

	算出法によって定められている受信電力の閾値	SS-RSRP 値	閾値が実測される地点の基地局からの距離
カバーエリア	-81.2dBm	-127.4dBm	地点：東 4 扉 基地局からの距離：47.65m SS-RSRP：-129dBm
調整対象区域	-90.0dBm	-136.2dBm	地点：東 4 扉より 18m 歩道 基地局からの距離：65.42m SS-RSRP：-137.1dBm

「図 5-86 評価エリア B の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の測定結果」にカバーエリアと干渉調整区域の測定地点を示す。



図 5-86 評価エリア B の基地局のカバーエリアと干渉調整区域の測定結果

この結果から、シミュレーションの結果と実際の閾値が測定される地点とが、合致していることが分かった。

工場内の測定において、立ち入り不可のエリアも多く、今回実測できた地点は限られていたが、東 4 扉付近、及び、東 4 扉より 18m の歩道の地点については、実測することができた。

#### 4) 工場の屋内、屋外における受信電力測定の結果 (28GHz 帯にて測定)

建物の内外において受信電力を測定した結果を「図 5-87 建物の外と建物の中での受信電力の違いの測定結果」に示す。

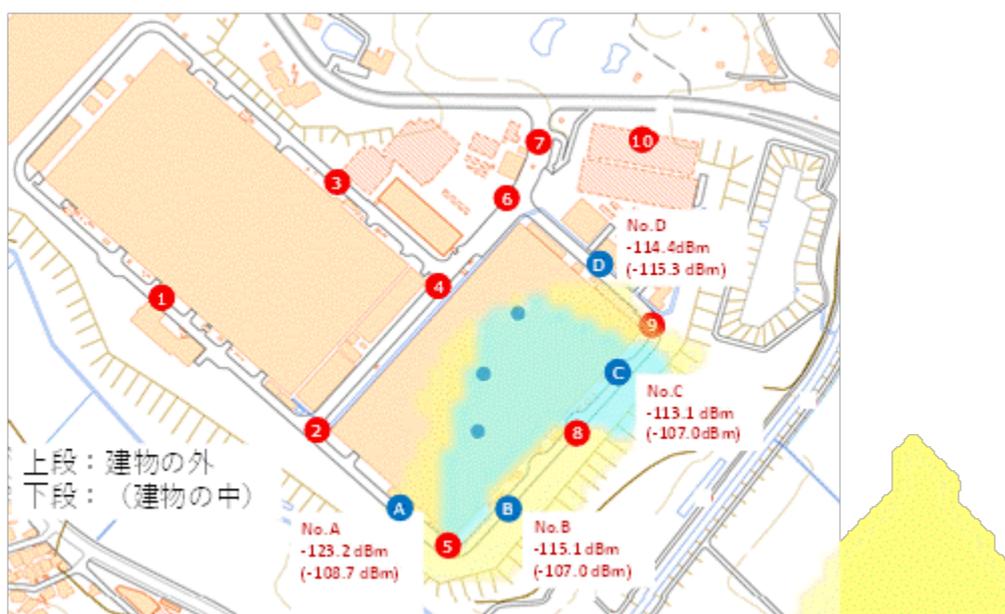


図 5-87 建物の外と建物の中での受信電力の違いの測定結果

表 5-62 測定地点と環境

測定地点	建物壁材質	屋内外での 受信電力の差
No.A	ガラス窓（ワイヤー有）＋ビニールシート	7.4dBm
No.B	車両専用トビラ	3.4dBm
No.C	ガラス窓（ワイヤー無）＋ビニールシート	3.8dBm
No.D	ガラス窓（ワイヤー有）＋ビニールシート ※屋内に大型設備あり	4.5dBm

No.D においては、建物の中に大型工作機械があったため、建物内の受信電力が低い値を示していた。No.A では 15 dB 程度の差があるが、No.B で 8dB、No.C で 6dB 程度、建物の外の方が受信電力が低くなる結果が得られた。建物侵入損としての 20dB より低い値であることが分かった。

### 5) 評価・考察

算出法より求めたエリア端については、想定以上の距離となる算出結果となったため、アンテナの放射パターンとエリアの地形図、建物の侵入損を 20.1dB として、建物外のカバーエリアと干渉調整エリアをシミュレーションソフトにて計算した。

このシミュレーションソフトの結果と総務省エリア算出法の閾値から、実際の受信電力、閾値が実測される地点を測定した。本検証を通じて、アンテナ放射パターンや地形データを含めたシミュレーション結果との比較において、シミュレーションの結果と実際の閾値が測定される地点とが、合致している

ことが確認できた。

本実証の環境は、工場屋内に基地局が設置され、端末も同様に工場屋内での利用する環境である。

そのため、先に述べた、4.7GHz 帯と同様に伝搬損失を算出する際に、屋外から建物内に電波が侵入してくるわけではないこと、また、屋外で端末を使用するユースケースではないことから、建物侵入損としてどの程度の減衰値とするかは、考慮が必要と思われる。

また、本検証を通じて、使用する基地局の指向性やチルトによっても算出結果が大きく変わることが分かった。

現状の電波法関係審査基準のエリア算出法の 28GHz 帯については、あまり細かな条件設定がない。一方 28GHz 帯はビームフォーミングを活用する実装となっており、指向性などについて、算出式への条件設定もなされると、実体と合う形で運用できると考える。

#### 5.4.4 技術的課題の解決方策

ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証として、以下の検証を実施した。

- ・ 建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性
- ・ 高精細映像伝送を伴う MR 等のリアルタイム通信
- ・ 基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域

これら検証結果を踏まえ、技術的課題とその解決方策について示す。

##### 5.4.4.1 検証結果を踏まえた考察

建物構造・遮蔽物の存在を前提とした工場内の通信特性の検証結果より、工場内の電波伝搬特性として、柱やダクトといった構造物による反射の影響があり、当初設計段階のカバーエリアよりも広い範囲で電波が到達していることや、カバーエリアの外においても通信できること、逆にマルチパスフェージングが発生して電波状況が弱くなるということが明らかになった。

ローカル 5G のエリア構築の観点からは、基地局と端末間の見通しを確保できるように設計しエリア構築をすることが重要であると言えるが、工作機械の裏など、どうしても見通しが確保できないエリアが出てきてしまう。

本技術実証では、反射影響の実証も行い、特に直進性の強い 28GHz 帯では反射波を積極的に活用することも検討していけることが明らかになった。

高精細映像伝送を伴う MR 等のリアルタイム通信の検証では、ローカル 5G 環境におけるアプリケーションレベルでのエンドーエンドの遅延特性が明らかになった。

疑似 HMD 方式での実証において、安定した通信となる場合は、一定の遅延時間内で通信

が可能であるが、実効帯域を超える通信となる場合等では、通信が不安定となり大幅に遅延が大きくなることが明らかになった。

HMD 装着快適性を向上させる為には遅延を少なくする事、遅延の値を一定にする事が必要となる。

また、本実証の結果より、ローカル 5G による MR システムの完全無線化のシステム構成を検討においては、遅延が大きくならないようなシステム構成が望ましいと言える。

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の検証では、4.7GHz 帯については、総務省エリア算出式の結果と実際の測定結果との比較を行い、28GHz 帯については、総務省エリア算出式を元にしたシミュレーションの結果と実際の測定結果との比較を行った。その結果、差異があることが明らかになった。

差異がある点については、伝搬損失を求める際に建物侵入損をどの程度の減衰値とするか考慮が必要と思われる。本実証の環境は、工場屋内に基地局が設置され、端末も同様に工場屋内での利用する環境であることは考慮のポイントと考えられる。

#### 5.4.4.2 技術的課題の解決方策

<ローカル 5G のエリア構築について>

工場内で工作機械の裏など、見通しが確保できないエリアに対して、新たに見通しが確保できる基地局を都度構築するわけにはいかない。

工場でのローカル 5G の積極的な活用のためには、無線環境が固定ではなく、利用する場所に合わせて、移動してローカル 5G を使えるようにすることも解決方策として考えられる。反射波を活用することも検討できるが、一番確実なのは、使いたい場所に無線があることと考えられる。

このような仕組みを実現するため、技術的に手法の確立や実験が必要と考える。

<システム構成について>

ローカル 5G による MR システムの完全無線化のシステム構成を検討においては、遅延が大きくならないようなシステム構成が必要となる。

「5.3.5.4 遅延特性」でも記載した通り、DRX などのパラメータにより遅延も変動することが分かっており、現状の解決方策としては、これらのパラメータの設定を最適なものにしていくことが考えられる。

ローカル 5G は、従来の携帯電話サービスをベースとしたテクノロジーの延長で利用するだけでなく、IoT 向けとしてローカル 5G に合う設定をしていくなど、アプリケーションを理解した上でのローカル 5G の低遅延化、安定化が必要となる。

MR システムの完全無線化のほかにも工場環境においては、IoT としてローカル 5G に期待するアプリケーションは多く、今後の実験等により明らかにしていく必要があると考える。

<基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域>

基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域の検証では、4.7GHz帯については、総務省エリア算出式の結果と実際の測定結果との比較を行い、28GHz帯については、総務省エリア算出式を元にしたシミュレーションの結果と実際の測定結果との比較を行った。

総務省エリア算出式は、干渉調整などよりどころとなるため、実測との差異が出てしまうことが技術的課題と言える。

解決方策としては、本開発実証等の知見を集め算出式を修正していくこと、国内だけでなく海外事例も参考にしていければと考える。

#### 5.4.4.3 更なる技術的課題等

##### <ローカル5Gのエリア構築について>

本技術実証を通じて得られた、貞宝第1工場での電波伝搬特性は、今後のエリア設計等を行う際に有益な参考情報として活用することが期待できる。一方、違う環境でのエリア構築の場合で、今回の結果が参考にならないような場合も今後多数出てくる。

その際に、一事業者が実証実験から行っていたのでは、国内でのローカル5Gの活用や展開に時間がかかってしまう。このように、地域課題を解決するためにローカル5Gを活用しようとしても、時間がかかってしまう事や、技術的な知見が分散してしまうことが想定される。

解決方策としては、多くの事例や実験の結果などを共有して、議論を通じて知見を集約していく活動が期待される。

##### <システム構成について>

システム全体の構成においては、特に高精細映像をリアルタイム処理することにおいては、大容量かつ低遅延が求められる。このように利用者に近い場所に処理系を配置する、MEC<sup>xviii</sup>のような技術も期待される。その際の技術的な課題としては、MECとして近い場所にコンピュータがあったとしても、利用端末の移動や位置を把握した上で、アプリケーションが適切にMEC上で稼働することが必要となる。例えば、MEC間でアプリケーション処理のステート情報をどのようにやり取りするか、MECのプラットフォームの相互接続性等の仕組みづくりが課題となってくると考えられる。

##### <基地局毎のカバーエリア及び調整対象区域>

今後ローカル5Gが普及、展開していく上で、周波数共用のシステムということが、大きな技術的課題となってくると考えられる。

都市部のビルなどで、多数の事業者がそれぞれ、ローカル5Gを構築運用する、といった場合、多数のローカル5Gの基地局がそれぞれ干渉源とならないように、運用していくことが求められるが、数が多くなってくると、人手で対応していける量を超えてしまう可能性も想定される。

国際的にもプライベートLTE、プライベート5Gと国内のローカル5Gの制度と似ている制度を導入していく国も増えてくると想定される。それらの国や地域とも連携して、周波

---

<sup>xviii</sup> MEC ( Mobile Edge Computing )

数共有をより効率的に運用していくための仕組みや枠組みを整備していく必要があると考える。

## 5.5 その他ローカル5 Gに関する技術実証

### 5.5.1 課題選定の根拠

独自のローカル5 Gの技術的課題として、アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響及び柔軟なシステムの構築検討をテーマに新たな知見を得ることを目標とする。この技術課題を独自に選定した根拠を以下に示す。

#### ① アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

工場内でローカル5 Gによる MR システムを利用するに当たり、場所の制約等がないことが望ましい。自由に移動しながら MR システムを利用するため、異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能し、MR システムの利用に影響が出ないことを確認する。

#### ② 柔軟なシステムの構築検討

同一工場内において MR システム等の大容量通信が必要なアプリケーションのほか、低レート通信のセンサーデバイスを多数接続するといった使用用途に応じて、ローカル5 Gへの要求性能や機能が異なってくる。ローカル5 Gにおいて所有者が自由にパラメータを設定し自身が必要とするシステムが実現可能かどうかを検討する。

この技術的課題は工場環境内に構築するローカル5 G実証環境の MR システムを用いて検証を実施し技術的課題の解決方策等について考察を行った。その際の環境条件や無線パラメータ等の前提について報告書へ記載する。

### 5.5.2 アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

工場内でローカル5 Gによる MR システムを利用するに当たり、場所の制約等がないことが望ましい。自由に移動しながら MR システムを利用するため、異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能し、MR システムの利用にどのような影響があるのかを確認する。

#### 5.5.2.1 検証項目

アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響を検証するため、2つの28GHz帯の基地局間でのハンドオーバーの検証を行う。

- ・ハンドオーバー機能の動作確認
- ・伝送スループット、伝送遅延への影響

- ・疑似 HMD 方式によるハンドオーバーの映像伝送への影響

### 5.5.2.2 検証方法

評価方法を以下に示す。

#### ① 検証構成

図 1-1 記載の評価エリア A と図 1-2 記載の評価エリア B に、それぞれ 28GHz 帯の基地局を設置し、その間でハンドオーバーの試験を行う。ハンドオーバー試験を行った場所の情報を下記の「図 5-88 ハンドオーバーの測定の説明図」に示す。

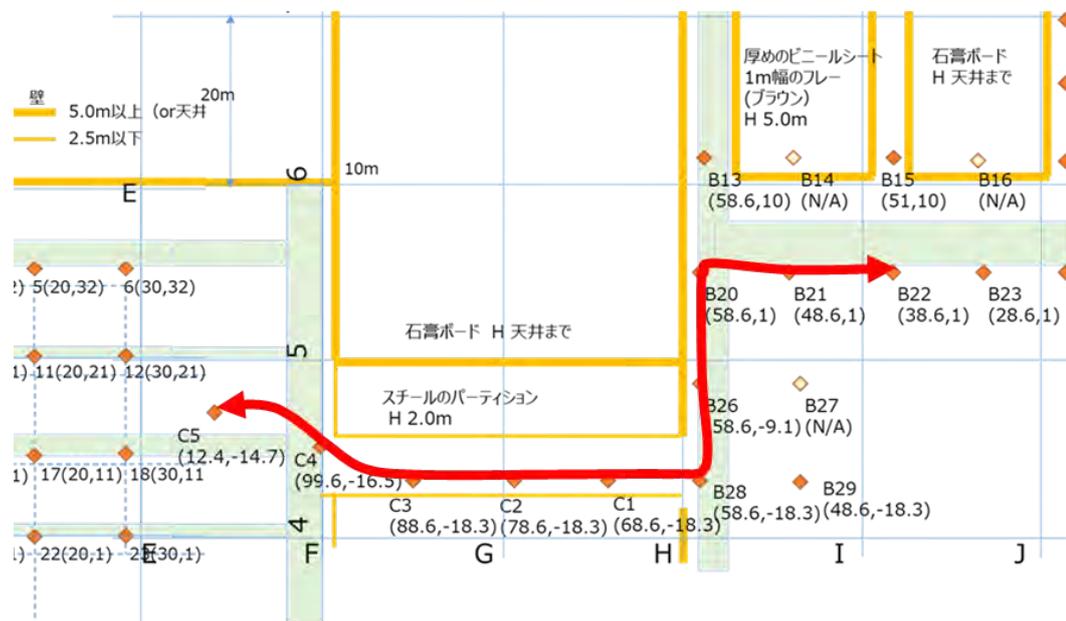


図 5-88 ハンドオーバーの測定の説明図

#### ② 評価方法

評価エリア A と評価エリア B の間を、測定器を持ったまま歩行速度で移動を行う。各地点において、受信電力、伝送スループット及び伝送遅延時間について測定する。ハンドオーバーの評価項目として、試行回数に対する成功率を測定する。

### 5.5.2.3 検証結果

#### (1) ハンドオーバー動作の検証結果

本時術実証において、ハンドオーバー動作の検証は、以下、3回実施した。

- ・ 1回目：令和3年1月30日(土) ハンドオーバー動作検証
- ・ 2回目：令和3年1月31日(日) 基地局 B の向きを変更しハンドオーバー動作検証
- ・ 3回目：令和3年2月9日(火) 疑似 HMD 方式によるハンドオーバー動作検証

## 1) 測定ポイントの受信電力

まず、ハンドオーバーで移動する経路上の測定ポイントで静止した状態で、同期信号の受信電力を測定した結果を、「図 5-89 ハンドオーバーを行うエリアの受信電力測定結果」に示す。A はエリア A からの受信電力を示し、B はエリア B からの受信電力を示している。なお、受信電力の値は、測定器での読み取り値である。

B28 ではエリア A からの受信電力が強いが、B26 に移動するとエリア B からの受信電力が強くなり、この間でハンドオーバーが行われる場所と推測できる。

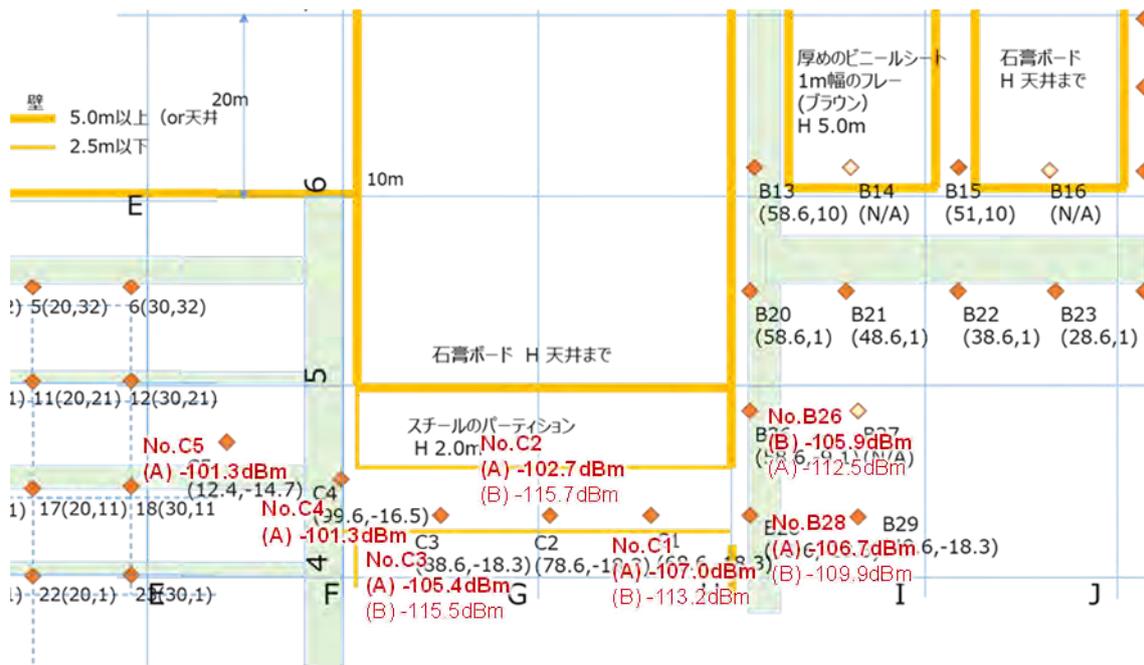


図 5-89 ハンドオーバーを行うエリアの受信電力測定結果

## 2) ハンドオーバー地点

実際に、歩行速度で移動しながらハンドオーバーを行った結果、「図 5-90 ハンドオーバーが発生した地点」に示す地点にてハンドオーバーが行われた。

- エリア A からエリア B への移動：B28 地点から B26 地点の間でハンドオーバー
- エリア B からエリア A への移動：B28 地点から C1 地点の間でハンドオーバー

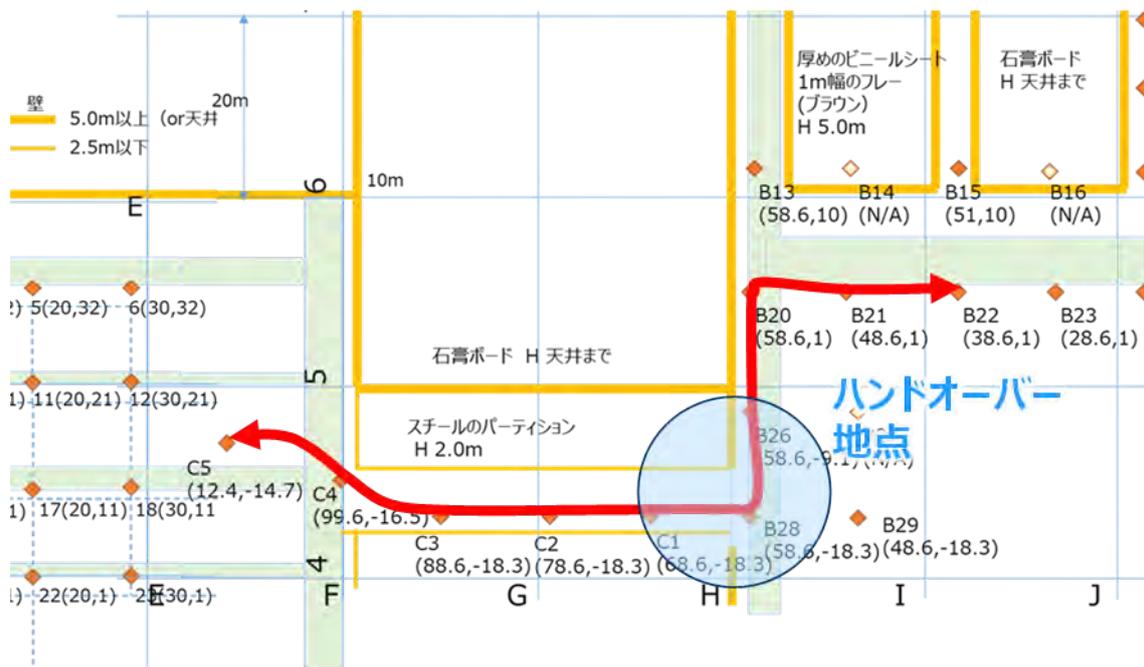


図 5-90 ハンドオーバーが発生した地点

ハンドオーバーが起こった地点では、基地局 A と基地局 B からの受信電力の強さが入れ替わるポイントであることが分かる。  
 エリア A からエリア B へ移動した場合は、基地局 A の電波を掴んだままエリア B へ入り、B28～B26 の間でハンドオーバーした。  
 一方エリア B からエリア A へ移動した場合は、基地局 B の電波を掴んだままエリア A へ入り、B28～C1 の間でハンドオーバーした。

### 3) 伝送スループットへの影響

以下に、測定ポイント C5 から B22 へ移動しつつハンドオーバーした際の DL と UL の伝送スループットについてグラフを示す。

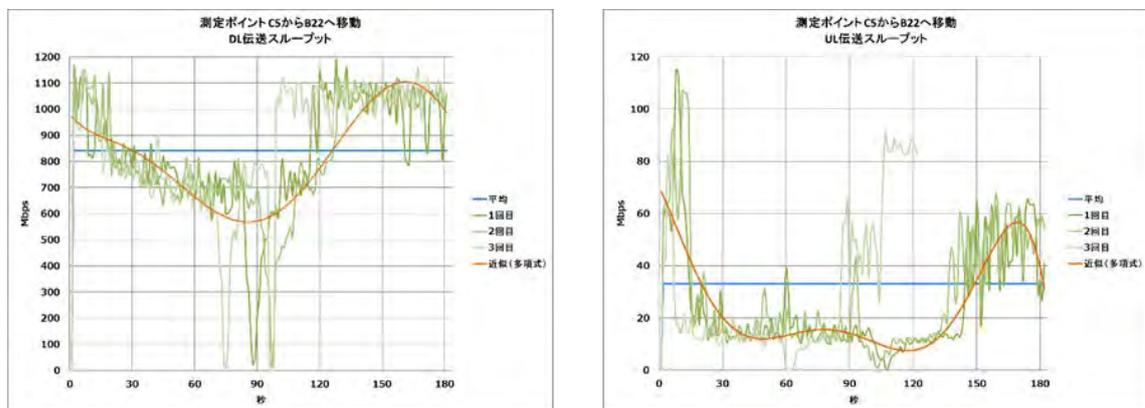


図 5-91 ハンドオーバー時の伝送スループット (C5→B22)

DL については、ハンドオーバーの地点に向かうにつれて伝送スループットが落ち込み、ハンドオーバー後に回復する動きとなっていることが分かる。同様に UL についても、ハンドオーバーの地点に向かうにつれて伝送スループットが落ち込み、ハンドオーバー後に回復する動きとなっている。

落ち込む時間が、各回でワゴンの移動速度にバラつきがあるため、均一ではないが、概ね傾向は把握する事が出来ていると考える。

なお、DL、UL ともに 3 回目は、速度による影響があるか確認をするため、移動速度を 1 回目、2 回目よりも早い速度 (180 秒から 120 秒へ変更、33%程度早歩きした) で移動した。結果としては、傾向に差は見られなかった。

次に、測定ポイント B22 から C5 へ移動しつつハンドオーバーした際の DL と UL の伝送スループットについてグラフを示す。

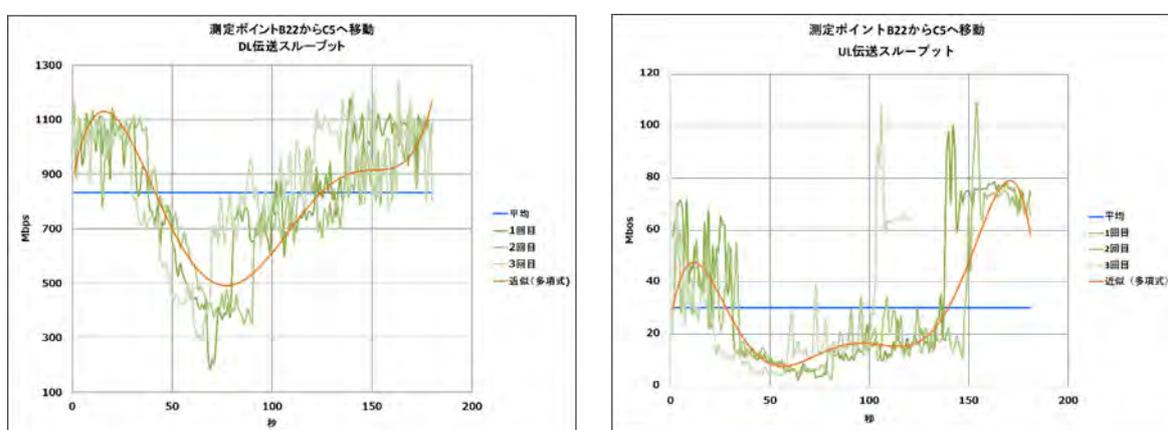


図 5-92 ハンドオーバー時の伝送スループット (B22→C5)

C5 から B22 へ移動した時と同様に、ハンドオーバーの地点で、スループットの落ち込みが確認でき、ハンドオーバー後にスループットが回復することが確認できる。

B22 から C5 への移動の際も 3 回目は、速度による影響があるか確認をするため、移動速度を 1 回目、2 回目よりも早い速度 (180 秒から 120 秒へ 33%程度早歩き) で移動し測定した。こちらも同様に傾向に差は見られなかった。

#### 4) 伝送遅延への影響

以下に、ハンドオーバー動作時の Ping による伝送遅延を示す。

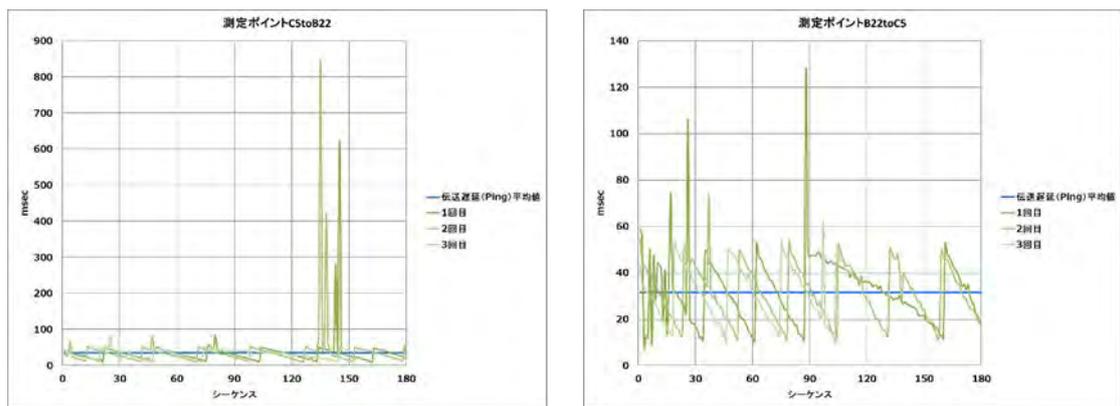


図 5-93 ハンドオーバー時の伝送遅延

C5 から B22 へ移動する場合、B22 から C5 へ移動する場合どちらの場合も、ハンドオーバーにより切り替わるタイミングで、遅延時間が増加していることが分かる。特に、C5 から B22 へ移動する場合は、遅延時間が約 850msec であり 1 秒弱の遅延が発生していることが確認できる。

ハンドオーバーの切り替わり後は、スムーズに元の遅延時間に戻っているため、ハンドオーバー動作としては正しく機能している。

遅延時間が増加した原因としては、セルチェンジが発生する前の基地局からの受信電力が弱くなり電波環境が悪くなっていることが要因と考えられる。また、セルチェンジにより実際の通信が切り替わる瞬間も遅延が発生すると考えられる。

## (2) 基地局・コアの統計情報

基地局やコアのシステムから得られる統計情報から、ハンドオーバーに関する測定結果を、以下に示す。

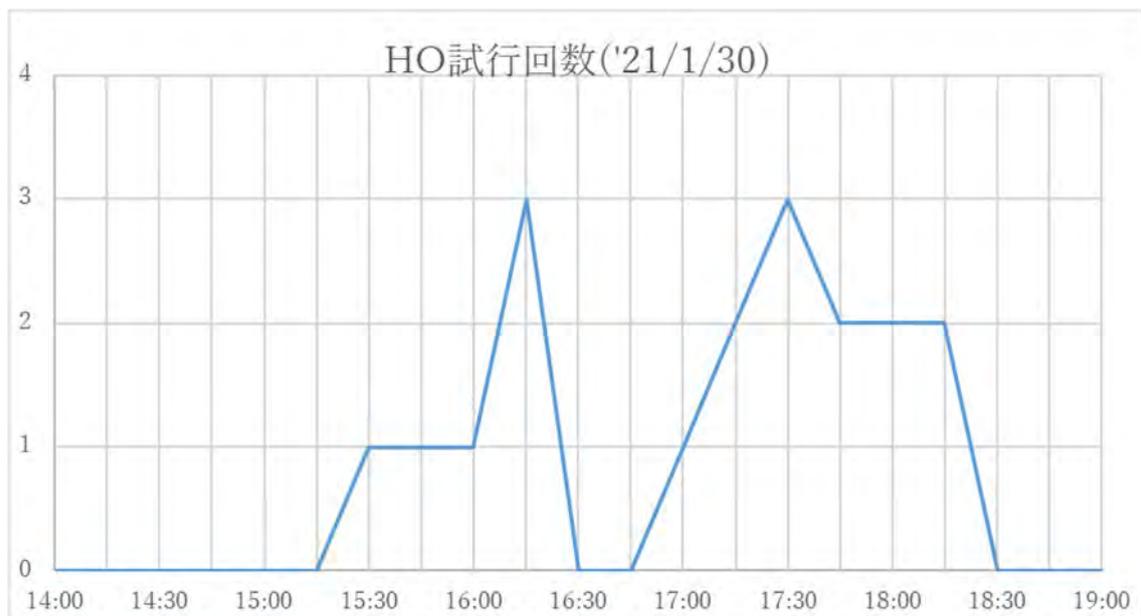


図 5-94 ハンドオーバー（5G→5G）の試行回数（令和3年1月30日（土）測定）

(令和3年1月30日(土)の測定データに基づく)

「図 5-94 ハンドオーバー (5G→5G) の試行回数 (令和3年1月30日(土)測定)」に、15分間隔で取得している統計情報から、5Gから5Gにハンドオーバーした試行回数の時間経過について示す。

「表 5-63 ハンドオーバー試験実施時の時刻と地点情報 (令和3年1月30日(土)測定)」に、ハンドオーバー試験時の時刻と地点情報を示す。Pingによる往復遅延時間測定と、UL通信、DL通信のそれぞれ動作させながら、六回ずつエリアAとエリアBの間を往復してハンドオーバーの試験を実施した。いずれの試験においても、エリアAとエリアBの5G基地局間同士でハンドオーバーが実行されることを確認した。

表 5-63 ハンドオーバー試験実施時の時刻と地点情報 (令和3年1月30日(土)測定)

時刻	HO回数	時刻：地点	備考
15:30	1	①15:36 : C5→15:40 : B24	Ping
15:45	1	②15:52 : B24→15:56 : C5	Ping
16:00	1	③16:06 : C5→16:09 : B22	Ping
16:15	3	④16:13 : B22→16:17 : C5 ⑤16:21 : C5→16:23 : B22 ⑥16:28 : B22→16:30 : C5	Ping
16:30	0		
16:45	0		
17:00	1	<b>17:02 : C5→17:05 : B22</b>	UL
17:15	2	②17:14 : B22 →17:17 : C5 ③17:23 : C5 →17:26 : B22	UL
17:30	3	④17:30 : B22 →17:32 : C5 ⑤17:36 : C5 →17:37 : B22 ⑥17:41 : B22 →17:43 : C5	UL
17:45	2	①17:48 : C5→17:51 : B22 ②17:56 : B22 →17:58 : C5	DL
18:00	2	③18:03 : C5→18:06 : B22 ④18:09 : B22 →18:11 : C5	DL
18:15	2	⑤18:14 : C5→18:16 : B22 ⑥18:20 : B22 →18:22 : C5	DL

(令和3年1月30日(土)の測定データに基づく)

このとき、5Gから5Gへのハンドオーバー成功率を「図 5-95 ハンドオーバー (5G→5G) の成功率 (令和3年1月30日(土)測定)」に示す。すべてのハンドオーバーについて100%成功していることが分かる。

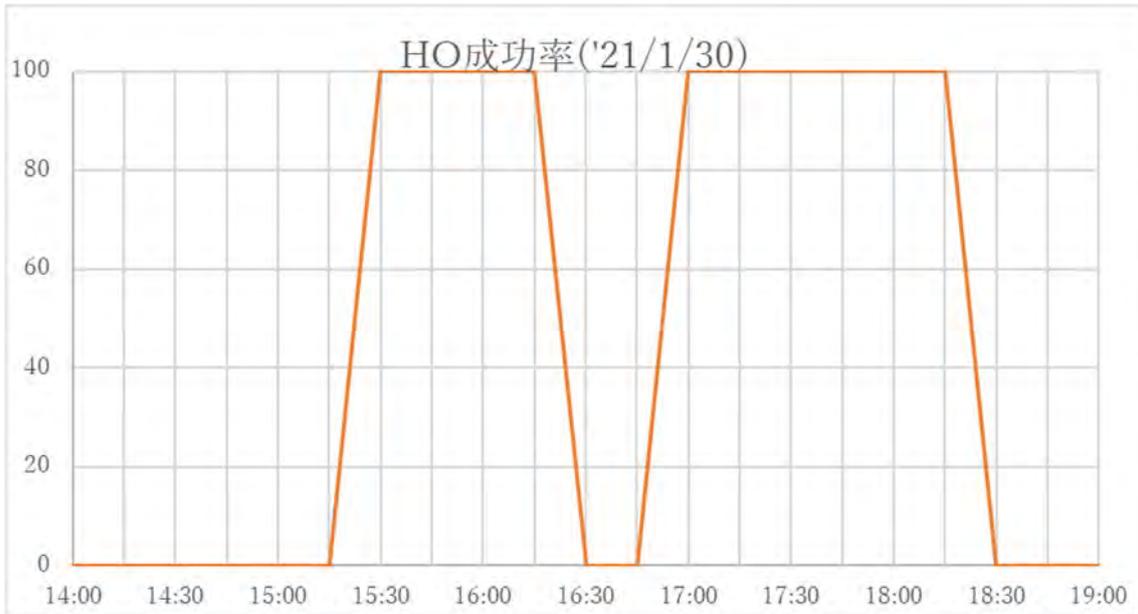


図 5-95 ハンドオーバー（5G→5G）の成功率（令和3年1月30日（土）測定）  
（令和3年1月30日（土）の測定データに基づく）

次に、令和3年1月31日（日）に、エリアBの基地局の角度を変更して測定した結果を示す。

「図 5-96 ハンドオーバー（5G→5G）の試行回数（令和3年1月31日（日）測定）」に、15分間隔で取得している統計情報から、5Gから5Gにハンドオーバーした試行回数の時間経過について示す。

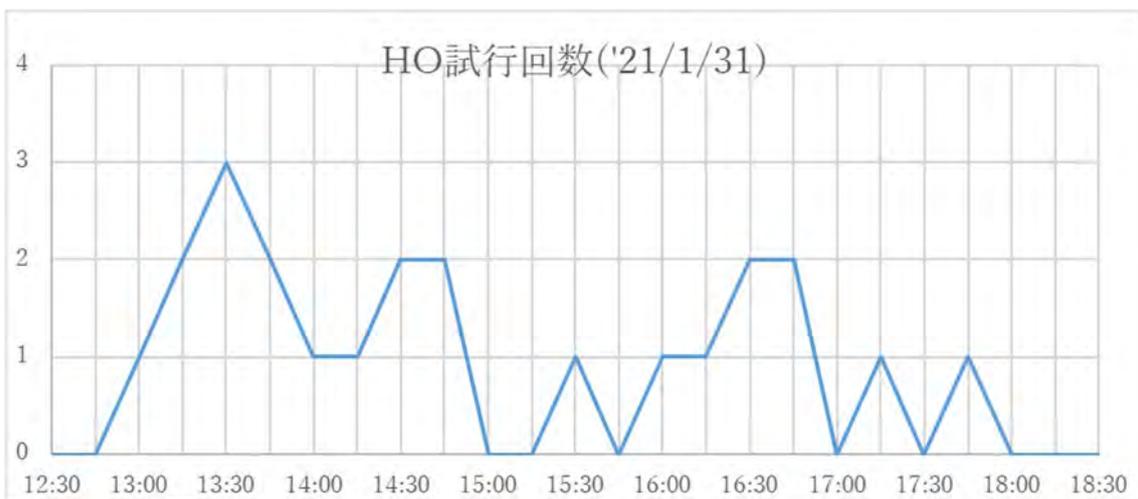


図 5-96 ハンドオーバー（5G→5G）の試行回数（令和3年1月31日（日）測定）  
（令和3年1月31日（日）の測定データに基づく）

「表 5-64 ハンドオーバー試験実施時の時刻と地点情報（令和3年1月31日（日）測定）」に、ハンドオーバー試験時の時刻と地点情報を示す。

15時15分の時間帯の①、15時45分の時間帯の③、16時15分の時間帯の⑤については、5Gから5Gにハンドオーバーせず、5Gから一度、4GのLTEアンカーに落ちて、LTEから、次の5G基地局に接続していたと思われる。

また、16時30分の⑦、16時45分の⑨については、5Gから4GのLTEに遷移しているが、再度、元の5Gの基地局に接続してから、隣の5G基地局へと5Gから5Gにハンドオーバーが実行されたと推測される。詳細を解析するには、端末のログと突き合わせる必要があるが、基地局の統計情報からは、そのような動作をしていると考えられる。

表 5-64 ハンドオーバー試験実施時の時刻と地点情報（令和3年1月31日（日）測定）

時刻	H0回数	時刻：地点	備考
13:00	1	①13:10：C5→13:12：B22	Ping
13:15	2	②13:15：B22→13:17：C5 ③13:23：C5→13:25：B22	Ping
13:30	3	④13:28：B22→13:31：C5 ⑤時刻未記録：C5→22 ⑥時刻未記録：B22→C5	Ping
13:45	2	①13:50：C5→13:53：B22 ②13:57：B22→14:00：C5	UL
14:00	1	<b>14:08：C5→14:11：B22</b>	UL
14:15	1	<b>14:19：B22→14:21：C5</b>	UL
14:30	2	⑤14:32：C5→14:34：B22 ⑥14:28：B22→14:40：C5	UL
14:45	2	⑦14:45：C5→14:47：B22 ⑧14:52：B22→14:54：C5	UL
15:00	0		
15:15	0	①15:20：C5→15:23：B22	DL：①5G→LTE→5G
15:30	1	②15:34：B22→15:36：C5	DL
15:45	0	③15:46：C5→15:48：B22	DL：③5G→LTE→5G
16:00	1	④16:01：B22→16:03：C5	DL
16:15	1	⑤16:17：C5→16:18：B22 ⑥16:28：B22→16:30：C5	DL：⑤5G→LTE→5G ⑥5G→5G
16:30	2	⑦16:33：C5→16:36：B22 ⑧16:41：B22→16:44：C5	DL：⑦5G→LTE→5G→5G ⑧5G→5G
16:45	2	⑨16:52：C5→16:55：B22 ⑩16:58：B22→17:01：C5	DL：⑨5G→LTE→5G→5G ⑩5G→5G
17:00	0		
17:15	1	⑪17:26：C5→17:29：B22	DL
17:30	0		
17:45	1	⑫17:44：B22→17:47：C5	DL

（令和3年1月31日（日）の測定データに基づく）

5Gから5Gへのハンドオーバー成功率を「図 5-97 ハンドオーバー（5G→5G）の成功率（令和3年1月31日（日）測定）」に示す。5Gから5Gへのハンドオーバーのトリガーがかかったケースにおいては、すべてのハンドオーバーで100%成功していることが分かる。

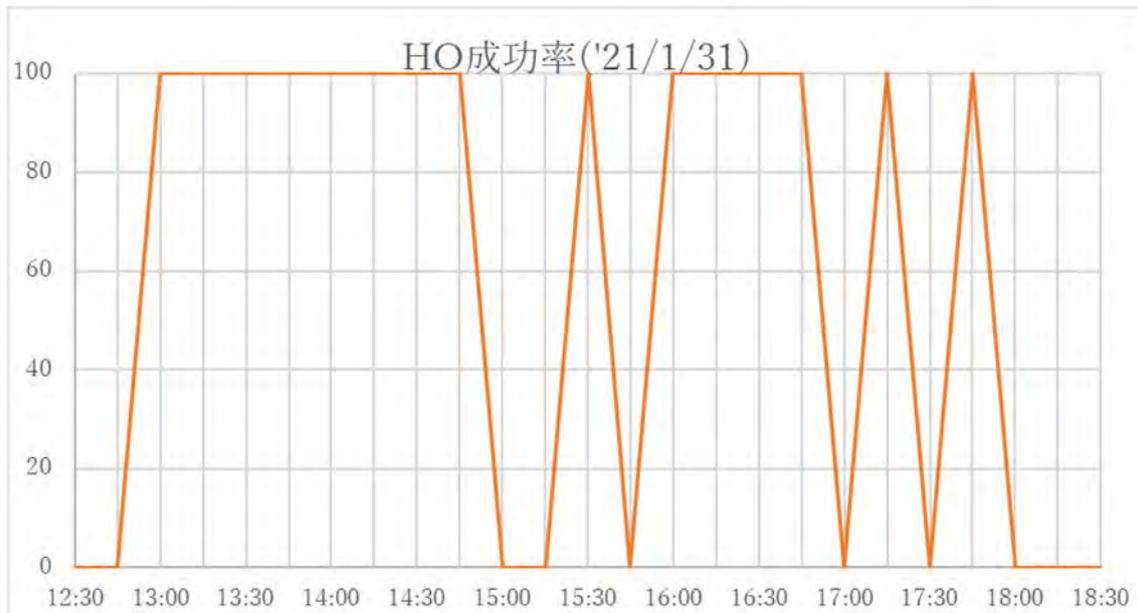


図 5-97 ハンドオーバー（5G→5G）の成功率（令和3年1月31日（日）測定）  
（令和3年1月31日（日）の測定データに基づく）

### （3）疑似HMD方式によるハンドオーバー試験

#### 1) 疑似HMD方式によるハンドオーバーの映像伝送への影響

令和3年2月9日（火）に貞宝第1工場にて、疑似HMD方式によるハンドオーバーの映像伝送への影響を調査した。

ワゴンに疑似HMDのPCとシャープ製ローカル5Gルータを設置し、映像伝送を行いながら、以下、往路・復路とワゴンを歩行速度で移動する際のハンドオーバーの影響を調査した。

- ・ 往路：測定ポイント C5 → 測定ポイント B22
- ・ 復路：測定ポイント B22 → 測定ポイント C5



図 5-98 ハンドオーバー試験の様子

#### ・ 測定結果

ハンドオーバーによるセルの切り替えが発生する際、通信が不安定になり映像伝送がスムーズに行われず途切れてしまうことが確認された。切り替えが完了し通信が安定し

てくると映像伝送も回復することが確認された。

先にハンドオーバーの伝送スループットへの影響、および伝送遅延への影響でもグラフで示した通り、アプリケーションが利用できる帯域が少なくなり、かつ遅延が大きくなってしまふことが、そのまま疑似 HMD 方式での映像伝送にも影響を与えていることが確認された。なお、ハンドオーバーの測定結果の詳細は、「4 章 4.6.3.1 (2) 6) 28GHz 帯-⑩ハンドオーバー」を参照。

## 2) 28GHz 帯ローカル 5G 端末の試験ログ

シャープ製ローカル 5G 端末にてハンドオーバー時の動作ログを取得し、端末側のハンドオーバーの動作を確認した。

端末の動作ログから、ハンドオーバーの動作が正しく行われていたか確認することができた。

- ・ 1 回目：基地局 A から B へ切り替わり (PCI 41→PCI45) を確認
- ・ 2 回目：基地局 B から A へ切り替わり (PCI45→PCI41) を確認
- ・ 3 回目：基地局 A から B へ切り替わり (PCI 41→LTE→PCI45) を確認  
※ 途中 5G が切れ LTE になった
- ・ 4 回目：基地局 B から A へ切り替わり (PCI45→PCI41) を確認

### a) 測定ポイント C5 → 測定ポイント B22 1 回目

試験内容：C5 から B22 へ移動、UL:200mbps/DL:550mbps

表 5-65 測定ポイント C5 → 測定ポイント B22 (1 回目) のログ

UTC	LOG	Serving Cell PCI	備考
		41	
2021 Feb 9 09:05:17.854	UL_DCCH / MeasurementReport		端末で測定していた結果をReport
2021 Feb 9 09:05:17.855	UL_DCCH / Extension_c2_ulInformationTransferMRDC_r15		Dual Connectivityを変更する
2021 Feb 9 09:05:17.915	DL_DCCH / RRCConnectionReconfiguration		PCI45に切り替え
2021 Feb 9 09:05:17.918	RRC_RECONFIG		
2021 Feb 9 09:05:17.918	RADIO_BEARER_CONFIG		
2021 Feb 9 09:05:17.942	RRC_RECONFIG_COMPLETE		
2021 Feb 9 09:05:17.942	UL_DCCH / RRCConnectionReconfigurationComplete		
2021 Feb 9 09:05:17.959	BCCH_BCH / Mib		PCI45の報知情報取得
		45	

### b) 測定ポイント B22 → 測定ポイント C5 1 回目

試験内容：B22 から C5 へ移動、loopback, 20Mbps

表 5-66 測定ポイント B22 → 測定ポイント C5 (1回目) のログ

UTC	LOG	Serving Cell PCI	備考
		45	
2021 Feb 9 09:11:13.933	UL_DCCH / MeasurementReport		端末で測定していた結果をReport
2021 Feb 9 09:11:13.933	UL_DCCH / Extension_c2_ulInformationTransferMRDC_r15		Dual Connectivityを変更する
2021 Feb 9 09:11:13.992	DL_DCCH / RRCConnectionReconfiguration		PCI41に切り替え
2021 Feb 9 09:11:13.997	RRC_RECONFIG		
2021 Feb 9 09:11:13.997	RADIO_BEARER_CONFIG		
2021 Feb 9 09:11:14.033	RRC_RECONFIG_COMPLETE		
2021 Feb 9 09:11:14.033	UL_DCCH / RRCConnectionReconfigurationComplete		
2021 Feb 9 09:11:14.051	BCCH_BCH / Mib		PCI41の報知情報取得
		41	

c) 測定ポイント C5 → 測定ポイント B22 2回目

試験内容 : C5 から B22 へ移動、loopback, 20Mbps

表 5-67 測定ポイント C5 → 測定ポイント B22 (2回目) のログ

UTC	LOG	Serving Cell PCI	備考
		41	
2021 Feb 9 09:17:46.046	DL_DCCH / RRCConnectionReconfiguration		C41(NR)のCellを切断
2021 Feb 9 09:17:46.047	RADIO_BEARER_CONFIG		
2021 Feb 9 09:17:46.141	UL_DCCH / RRCConnectionReconfigurationComplete		
		LTE	
2021 Feb 9 09:18:22.715	UL_DCCH / MeasurementReport		PCI45に切り替え
2021 Feb 9 09:18:22.756	DL_DCCH / RRCConnectionReconfiguration		
2021 Feb 9 09:18:22.761	RRC_RECONFIG		
2021 Feb 9 09:18:22.761	RADIO_BEARER_CONFIG		
2021 Feb 9 09:18:22.796	RRC_RECONFIG_COMPLETE		
2021 Feb 9 09:18:22.799	UL_DCCH / RRCConnectionReconfigurationComplete		
2021 Feb 9 09:18:22.932	BCCH_BCH / Mib		PCI45の報知情報取得
		45	

d) 測定ポイント B22 → 測定ポイント C5 2回目

試験内容 : B22 から C5 へ移動、loopback, 20Mbps

表 5-68 測定ポイント B22 → 測定ポイント C5 (2回目) のログ

UTC	LOG	Serving Cell PCI	備考
		45	
2021 Feb 9 09:36:16.376	UL_DCCH / MeasurementReport		端末で測定していた結果をReport
2021 Feb 9 09:36:16.376	UL_DCCH / Extension_c2_ulInformationTransferMRDC_r15		Dual Connectivityを変更する
2021 Feb 9 09:36:16.436	DL_DCCH / RRCConnectionReconfiguration		PCI41に切り替え
2021 Feb 9 09:36:16.440	RRC_RECONFIG		
2021 Feb 9 09:36:16.440	RADIO_BEARER_CONFIG		
2021 Feb 9 09:36:16.468	RRC_RECONFIG_COMPLETE		
2021 Feb 9 09:36:16.468	UL_DCCH / RRCConnectionReconfigurationComplete		
2021 Feb 9 09:36:16.484	BCCH_BCH / Mib		PCI41の報知情報取得
		41	

#### 5.5.2.4 考察

本試験結果により以下のことが確認できた。

- ・ 異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能することを確認した。
- ・ 5G から 5G へのハンドオーバー、5G から一度、LTE にフォールバックしてから 5G に接続するハンドオーバー等、アプリケーションのセッションを切断しないことを確認した。
- ・ ハンドオーバーの前後でスループットが劣化する。特に、5G から LTE にフォールダウンする場合もスループットの劣化がある。このため、アプリケーションの利用者観点では画像が乱れる点が課題となる。

セル境界のスループット劣化の課題に対しては、3GPP 標準で規定されている CoMP(Coordinated MultiPoint)の適用が効果を発揮すると考えられる。ただし、CoMP 技術を適用する場合は、二つのセルをもっと近づけた方がよく、エリア設計や利用場所も含めて更なる詳細検討が必要となる。

#### 5.5.2.5 技術的課題の解決方策

##### (1) 検証結果を踏まえた考察

工場内でローカル 5G による MR システムを利用するに当たり、場所の制約等がないことが望ましいため、アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響の検討を行った。自由に移動しながら MR システムを利用するための技術的な前提として、

1. 異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能すること
2. MR システムの利用に影響がでないこと

の二つの観点で検証を行った。

結果として、

1. 異なるセル間の移動時にハンドオーバーが正しく機能することを確認した。また、端末位置や周辺の環境に応じて無線伝搬環境が変動することから、5G から LTE にフォールバックするケースも見られた。

令和 3 年 1 月 30 日 (土) の実験では、18 回の試行で 100% : 5G から 5G にハンドオーバーが成功していた。令和 3 年 1 月 31 日 (日) の実験では、基地局の向きを変更したが、26 回の試行のうち、5 回ほど、5G から LTE に遷移する事象が見られた。そのうちの 3 回は、LTE のまま次のセルに移動し、移動先の 5G に接続しなおしている。2 回は、LTE にフォールバックした後、元の 5G 基地局に接続してから、移動先の 5G にハンドオーバーしていることが確認できた。

今回のシステムは、NSA 構成で実験を行ったため、アンカーである LTE 基地局の電波

が 28GHz の電波よりも広い範囲で安定したコネクティビティを提供している。

このため、基地局から基地局の間をハンドオーバーをした場合であっても、コネクションを切断せずに次のセルに移動することを確認できた。

アプリケーションにとっては、ハンドオーバー時に呼 <sup>xix</sup>の切断が起こると、アプリケーションのレイヤで再接続するため、再接続にかかる時間が長いと利用者の視点では使用に耐えられない。今回導入したシステムでは、28GHz という直進性が高い電波を扱ったとしても、ハンドオーバー時に 2.5GHz の LTE の電波でカバーすることによって、呼の接続が維持されることを確認することができた。

ハンドオーバー動作は、基地局間の受信電力の差が明確であると、適切に切り替わる仕組みである。本実証では、基地局から基地局の間に石膏ボードの壁（遮蔽物）があり、その遮蔽物の前後で、受信電力の差が生じていた。このような環境において、ハンドオーバー動作が想定通り機能するという知見が得られた。

2. ハンドオーバー時に、受信電力が弱くなるため、スループットとしての劣化は避けることができなかった。また、5G から LTE にフォールバックした場合も、スループットが急激に低下することになる。呼が切断されて再接続する必要はなかったものの、利用者の視点では、ハンドオーバーの前後で画像が乱れることが残課題として明らかになった。

## (2) 技術的課題の解決方策

ハンドオーバーが機能することは確認できたが、ハンドオーバーの前後でスループットが劣化することで、画像が乱れることが残課題となる。

この解決策としては、二つの基地局間で協調送信を行う 3GPP 標準で規定されている CoMP(Coordinated Multipoint)を導入することでセル境界のスループットを向上することができる。ただし、CoMP では、二つのセルの同じ周波数の電波を強い電力でオーバーラップさせた方が効果的であるため、セル配置と端末収容とのバランスに応じて適切にエリア設計を行う必要がある。

## (3) 更なる技術的課題等

更なる技術的課題として、以下の点を挙げる。

工場でのアプリケーションは多岐に渡るため、ハンドオーバーに対するアプリケーション要件も多岐に渡ると考える。

一つの技術実証チームの検証だけでは知見を十分に高めることができない。そのため、多くの実証実験の結果を互いに共有し、議論できる場が必要と考える。

### 5.5.3 柔軟なシステムの構築検討

- ・ 背景

---

<sup>xix</sup> 通信のセッションのこと

工場におけるローカル 5G の活用においては、「表 5-65 工場内における通信アプリケーションと通信トラフィック例」に示すように同一工場内において MR システム等大容量通信が必要なアプリケーションの他、低レート通信のセンサーデバイスを多数接続するといったことが考えられる。

一方、アプリケーションや使用用途に応じて、ローカル 5G への要求性能や機能が異なってくるため、これらをどのように同時に実現するか今後課題となってくると考えられる。

表 5-69 工場内における通信アプリケーションと通信トラフィック例

アプリケーション	通信方向	基地局当の端末数 (想定)	データ内容	端末当の通信速度	端末当の通信頻度
リモート支援	上り	1	動画 (4K 画像)	50Mbps	常時
	下り		制御データ	1Mbps	常時
品質確認カメラ	上り	1	準動画 (FullHD)	5Mbps	常時
	下り		制御データ	1Mbps	イベント発生時
監視カメラ	上り	1	動画 (4K 画像)	50Mbps	常時
	下り		制御データ	10kbps	イベント発生時
AGV	上り	5	動画 (FullHD)	10Mbps	常時
	下り		制御データ	10kbps	イベント発生時
ステータスボード	上り	1	ステータス	10kbps	イベント発生時
	下り		進捗情報	1Mbps	10 秒毎
自動搬送	上り	1,000	状態通知	10kbps	0.1 秒毎
	下り		指示情報	10kbps	数十秒毎
NC 加工	上り	1	作業状況	10kbps	1 分毎
	下り		加工データ	1Mbps	30 分毎
物品管理	上り	100	状態通知	10kbps	1 分毎
	下り		位置情報	10kbps	1 分毎

・ 技術検証の目的

工場内における異なるアプリケーション利用を想定し、それぞれに適したパラメータで運用されているセル同士の干渉影響を調査し、このようなシステムの実現可能性を検討する。

本検証より、工場環境における複数基地局、UE の配置を検討する指針を示す。

5.5.3.1 過去の類似調査結果

平成 29 年度 G6「屋内において 2 万台程度の多数同時接続通信を可能とする 第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討」では同時多数接続を想定した周波数利用効率について調査検討をしている。

当該報告書では LTE については商用網での実測からの値と 5G については当該実証で使用したシステムパラメータを基に周波数利用効率を計算しているがいずれも 1 セル当たりの周波数利用効率に限定されたものとなっている。

しかし今後実用化されるローカル 5G のシステム、特に工場を想定した場合には、基地局 1 台だけで業務区域全体をカバーすることは難しくシステム内に複数の基地局を設置する必要がある。

そのため、本実証実験では複数セルを考慮した周波数利用効率について検証を行った。さらに工場のような様々なアプリケーションが同時に使用される環境においてはそれぞれに適した異なる無線パラメータを使った基地局を使用し、より効率的な運用が望まれる。このような観点から独自の実証実験として柔軟なシステムの構築検討を行い、その中で複数セルの周波数利用効率について検討する。

### 5.5.3.2 検証項目

「図 5-82 柔軟なシステムの構築検討の実施情報」に示す工場内評価エリアで非同期運用とする 4.7GHz 帯の基地局を 2 局設置し、使用用途に合わせて異なるパラメータを設定する。

具体的にはセル#A ではカメラ画像による品質評価を行い、セル#B では MR を活用した遠隔技術支援を行うようなケースを想定する。



図 5-99 柔軟なシステムの構築検討の実施情報

- ・ 技術検証の環境
  - 4.7GHz 帯の異なるパラメータを実装した基地局を 2 つ設置（セル A を仮設）
  - セル A：変調（QPSK）、RB 数（32）、UL/DL 比（1:3、2D1S6U1S ※DL の 1 シンボル目は SSB）
  - セル B：変調（64QAM）、RB 数（132）、UL/DL 比（1:1、4D1S4U1S ※DL の 1 シンボル目は SSB）

### 5.5.3.3 検証方法

同一周波数で隣接エリアにて異なるパラメータで運用している基地局が互いに及ぼす電波干渉の影響を測定する。

それぞれのアプリケーションに適応した物理パラメータを次の通りに選択する。

表 5-70 セル#A に適した無線物理パラメータ

項目	値	備考
中心周波数	4,800MHz	
帯域幅	100MHz	
SCS	30kHz	
PUSCHシンボル長	14	
TDD周期	5msec	
UD configuration	2D1S6U1S	DLの1シンボル目はSSB
Modulation	QPSK	
MCS	9	
RB数	32	
RB start	0	
データレート	DL1.84Mbps/UL7.37Mbps	
Cell ID	0	
n_RNTI	1	

表 5-71 セル#B に適した無線物理パラメータ

項目	値	備考
中心周波数	4,800MHz	
帯域幅	100MHz	
SCS	30kHz	
PUSCHシンボル長	14	
TDD周期	5msec	
UD configuration	4D1S4U1S	DLの1シンボル目はSSB
Modulation	64QAM	
MCS	25	
RB数	132	
RB start	0	
データレート	DL64.54Mbps/UL73.76Mbps	
Cell ID	0	
n_RNTI	1	

・ ガードエリアの定義

セル間干渉を避けるためには隣接するセルの干渉調整区域が重ならないようにする必要はある。しかし、このようなセルの配置にすると干渉調整区域かつ通信エリア外の領域が不感地帯となる。この不感地帯を”ガードエリア”と定義する。

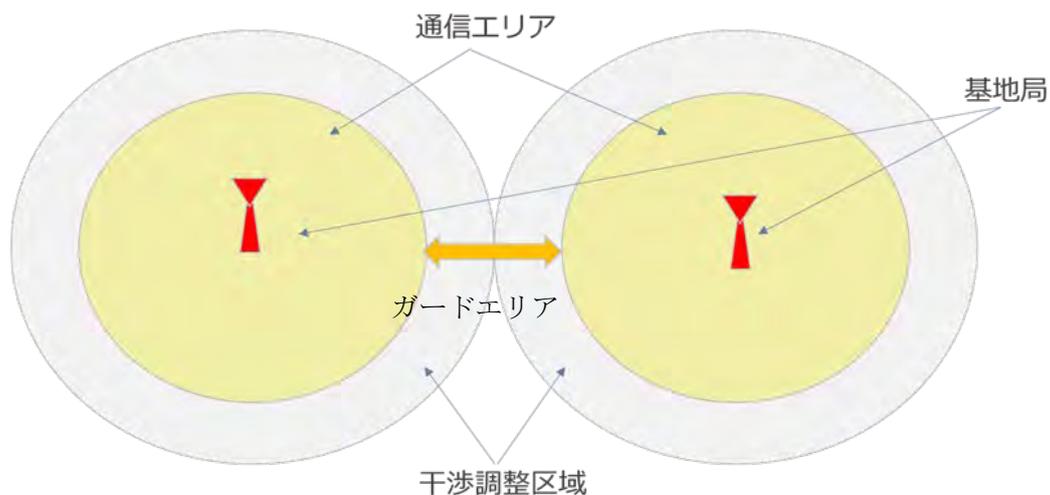


図 5-100 ガードエリア

・ ガードエリアおよび周波数利用効率の算出

隣接チャネルの基地局が非同期運用だと、ガードエリアを十分にとる必要がある。ローカル5G免許申請支援マニュアル記載の数式にて通信エリア、干渉調整区域を計算。そこからガードエリアを算出すると1セル当たり7.6mとなり、2セルで15.2mとなる。この領域は通信ができないため、敷地内での周波数利用効率を下げってしまう。

エリアを円で描いた場合、エリア全体（干渉調整区域全体）で通信が可能な場合に対してガードエリアを設けると周波数利用効率は $(\pi \times 66.1 \times 66.1 - \pi \times 58.5 \times 58.5) \div (\pi \times 66.1 \times 66.1) = 78\%$ 。よって22%落ち込む。

表 5-72 ガードエリア算出に使用したパラメータ

説明	変数名	値	単位
システム帯域幅	Bw	100	MHz
送信電力（基地局の空中線電力）	Pt	18	dBm
送信アンテナ利得	Gt	2	dBi
基地局の給電線損失	Lf	0	dB
使用する周波数	f	4800	MHz
基地局の空中線地上高	Hb	3	m
基地局を屋内に設置する場合の建物損入損ガラスを想定	R	0	dB
都市選択		中小都市	
使用環境		市街地	

表 5-73 通信エリア算出結果

タイプ	電力		距離	
カバーエリア	-84.6	dBm	58.5	m
干渉調整区域	-91	dBm	66.1	m
ガードエリア			7.6	m

以上の算出結果を図にすると「図 5-84 ガードエリアの算出結果」のようになる。

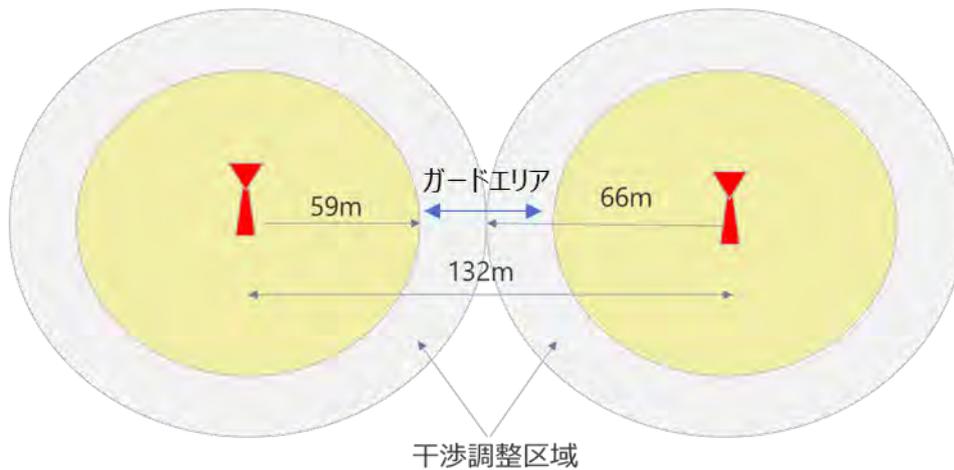


図 5-101 ガードエリアの算出結果

- 基地局間距離の最適化

ガードエリアを小さくすることによりシステム全体の周波数利用効率を向上させる。実際に干渉に依る受信性能への影響を測定し、最適な基地局間距離を導き出す。

基地局間の距離を短くするとセル間干渉の影響が大きくなり全体的なスループットが下がるが、一方でガードエリアが縮小するために周波数利用効率が上がる。そのため適切な基地局間の距離が求められると考えられる。本実証では以上の観点から基地局間の最適な距離を導き出す。

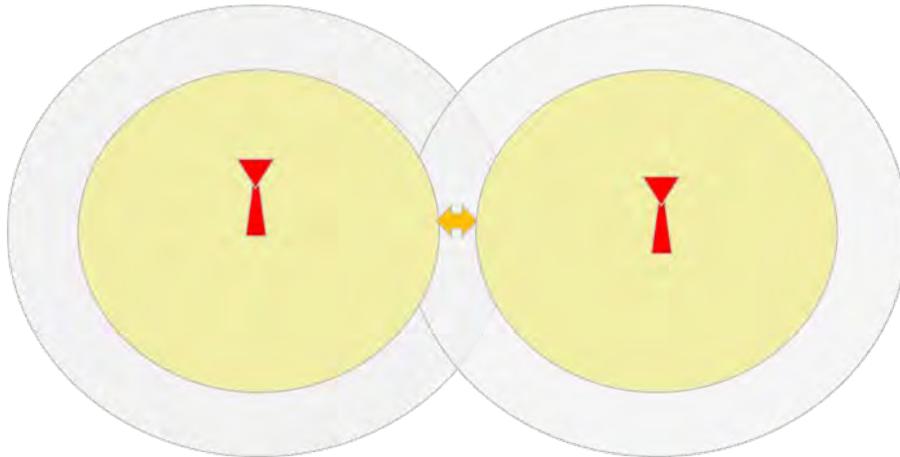


図 5-102 基地局間の最適な距離の検討

・ 干渉の種類についての検討

セル間の干渉について被干渉、与干渉毎に干渉の影響をまとめたものを「表 5-62 干渉の影響」に示す。

この中で最も干渉の影響が大きいものは4番の UE#A 受信に対する UE#B 送信の干渉となる。本実証実験では、干渉の影響が最も大きいこの UE 間の干渉について評価の対象とする。

表 5-74 干渉の影響

	被干渉	与干渉	干渉の影響
1	gNodeB#A受信	gNodeB#B送信	gNodeB#AからgNodeB#Bの距離が遠いため影響が小さい
2	gNodeB#A受信	UE#B送信	gNodeB#AからUE#A,UE#Bの距離が等しいか近い時、影響がややある
3	UE#A受信	gNodeB#B送信	UE#AからgNodeB#Bの距離が遠いため影響が小さい
4	UE#A受信	UE#B送信	UE#AからgNodeB#Aの距離よりUE#AからUE#Bの距離に近い状況があり影響が大きい

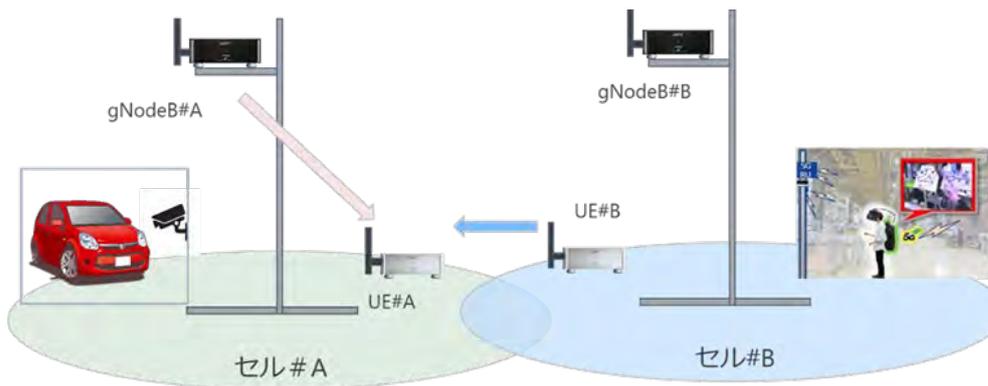


図 5-103 セル間干渉イメージ図

・ フレームタイミングによる影響

非同期システムの場合、フレームタイミングにより図 XX に示すように干渉の影響の大きさが異なる。本実証実験では最悪条件となる UE の全受信タイミングで干渉を受けたものと想定して実験を行う。



図 5-104 フレームタイミングと干渉の影響

以上の検討から本実証実験では、セル#Aにおける gNodeB#A から UE#A へ送信される信号に対する隣接セル#B の UE#B から送信される信号の干渉を調査する。

最悪条件を想定し非同期システムで、UE#A の受信タイミング全てで干渉の影響を受けていることを想定し試験を実施する。

試験手順を以下に示す。

#### Step1 セル#B の通信エリア確認

- ① セル#Bにて gNodeB#B を起動させ、UE#B と通信を開始
- ② 通信を維持しながら UE#B を gNodeB#B から離していく
- ③ gNodeB#B と UE#B の通信が維持できない(BLER>1e-3)位置を確認
- ④ ③の UE#B の位置をエリア境界部として設定

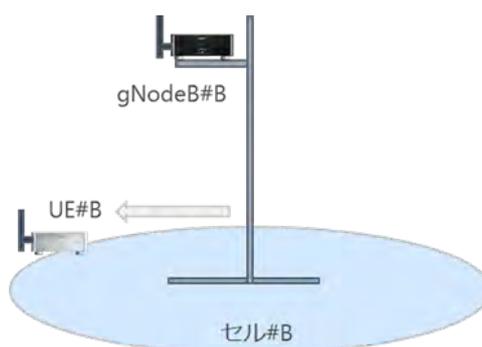


図 5-105 セル B の通信エリア

#### Step2 セル#A の設置

- ① Step1③の UE#B の位置に UE#A を設置
- ② gNodeB#A と UE#A を起動させ、通信を開始
- ③ 通信を維持しながら gNodeB#A を UE#A から離していく
- ④ gNodeB#A と UE#A の通信が維持できない(BLER>1e-3)位置を確認

- ⑤ gNodeB#A の位置を、基地局設置位置として設定

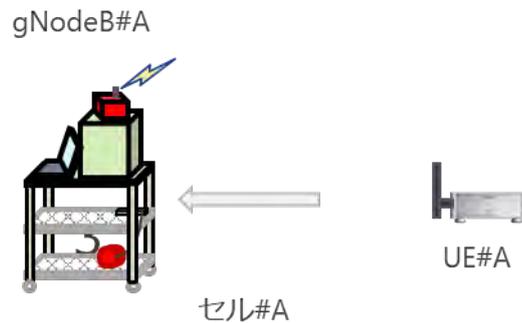


図 5-106 セル#A の配置

### Step3 干渉源 UE#B の設置

セル#A 内での干渉の影響変化がわかるような干渉源設置位置を選択

- ① Step2 で設置した gNodeB#A を起動、UE#A をセル中心から通信エリアの 1/3 離れたところに設置し通信開始
- ② UE#B から干渉信号を出力した状態でセル#B 内で UE#A から離していく
- ③ gNodeB#A と UE#A の通信が維持できない( $BLER > 1e-3$ )位置を確認
- ④ ③の位置を干渉源 UE#B の設置位置として設定

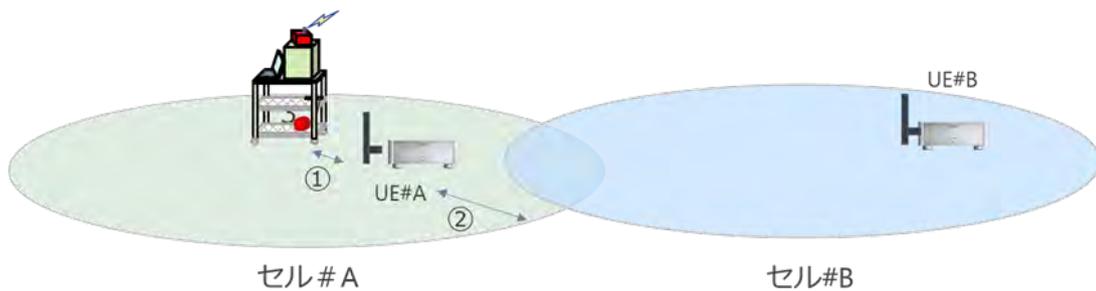
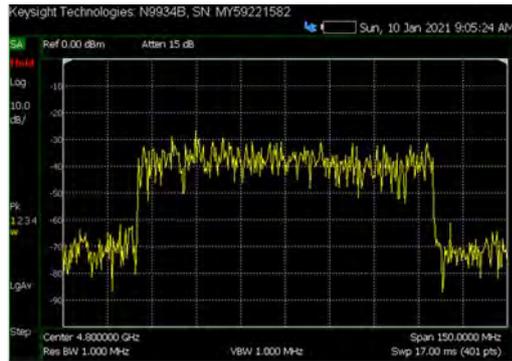


図 5-107 干渉源 UE#B の配置

干渉の条件としては最悪条件を想定し以下の通りとした。

1. 当該帯域 100MHz 幅で送信
2. バースト受信タイミング全体に干渉を与えることができるよう連続で送信

干渉源は、AU-500-UE を用いて動作モードをソフトウェアで切り替えて信号を発生させ、UE#B からの干渉を疑似した。



測定器で取得した送信スペクトラム波形

図 5-108 干渉源リソース

Step4 干渉測定

- ① UE#A を gNodeB#A 近傍に設置し、DL/UL スループット、SS-RSRP 等の受信電力を測定
- ② UE#A をセル境界方向に移動させ、①を実施
- ③ g NodeB#A/UE#A 間の通信が維持できない位置まで測定

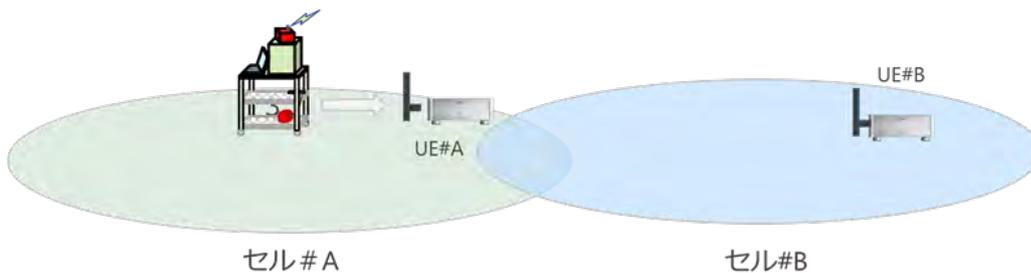


図 5-109 干渉測定イメージ図

測定項目を下記表に記す。

表 5-75 測定項目

測定項目	測定内容	測定時間	結果
受信電力	アンリツ製エリアスタML8270にてSS-RSRPを測定	1分	画面出力値
スループット#1	gNodeB,UE各々にPCを接続し、iperfにてDL,ULのスループットを測定	1分	平均値を代表値とする
スループット#2	AU-500装置内部にてL1スループットを測定	1分	平均値を代表値とする
遅延時間	gNodeB,UE各々にPCを接続し、pingにてDL,ULの遅延時間を測定	1分	平均値を代表値とする

測定ポイントを「図 5-92 測定ポイント」に示す。

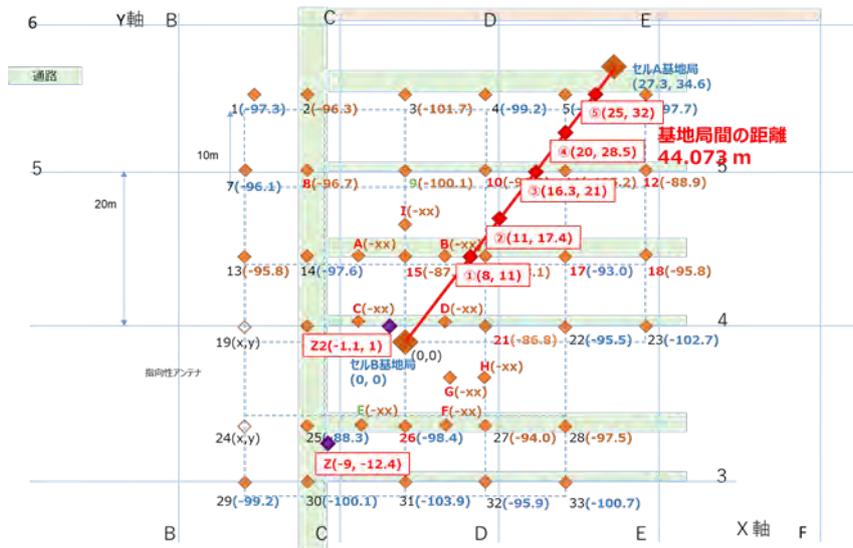


図 5-110 測定ポイント

### 5.5.3.4 検証結果

#### (1) gNodeB#A 受信に対する隣接セル干渉の影響

gNodeB#A から 60m の距離に干渉源を設置し、セル A 内で UE#A を動かし UL スループットの変化を iperf で観測した。移動範囲内ではスループットの低下は見られなかった。

なお、gNodeB#A からの距離が 20m 以上離れると UE#A への下り信号の通信が不安定となり iperf を実行できず測定不可となった。

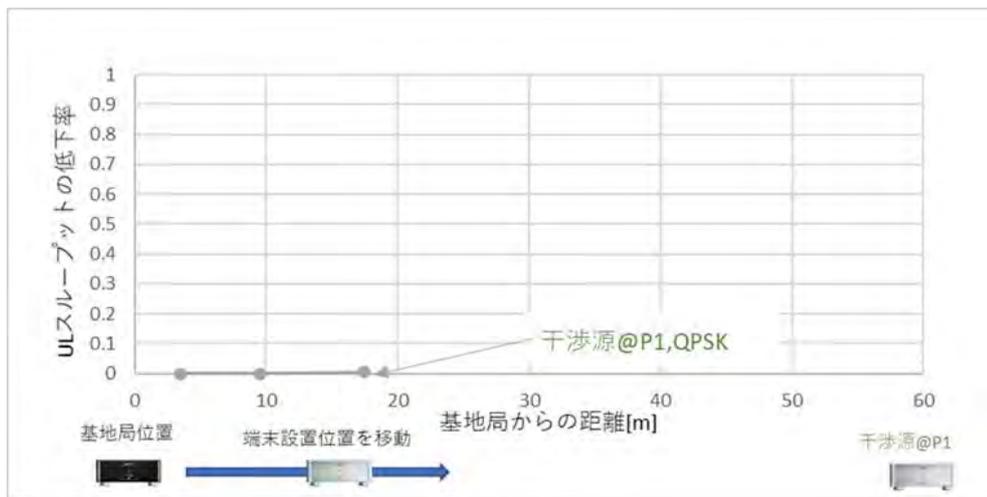


図 5-111 干渉源が遠方のときの UL への干渉の影響

次に gNodeB#A から 45m の距離に干渉源を設置し、セル A 内で UE#A を動かし UL スループットの変化を iperf で観測した。gNodeB#A からの距離が 15m を過ぎたところからスループットの低下が見られた。これは干渉源から gNodeB#A の距離が近づいたことにより、干渉電力が大きくなったためと考えられる。

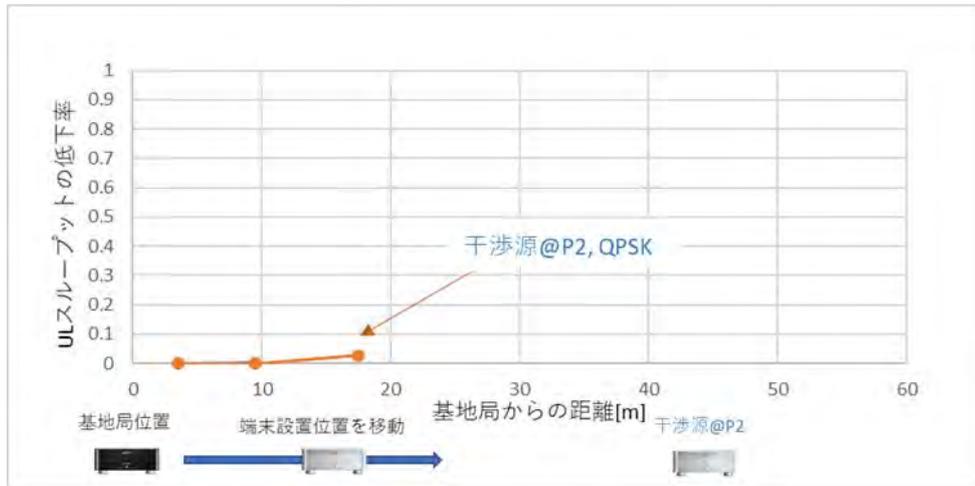


図 5-112 干渉源が近傍のときの UL への干渉の影響

以上の結果から、試験前の予測の通り、他セルの UE による UL 方向の干渉の影響は軽微であることが確認できた。

## (2) 干渉環境下における DL スループットの低下率

干渉を受けることにより通信エリアの縮小を確認した

干渉源の位置を P1 から P2 に移動すると測定箇所全てにおいて DL スループットの計測ができなくなった。

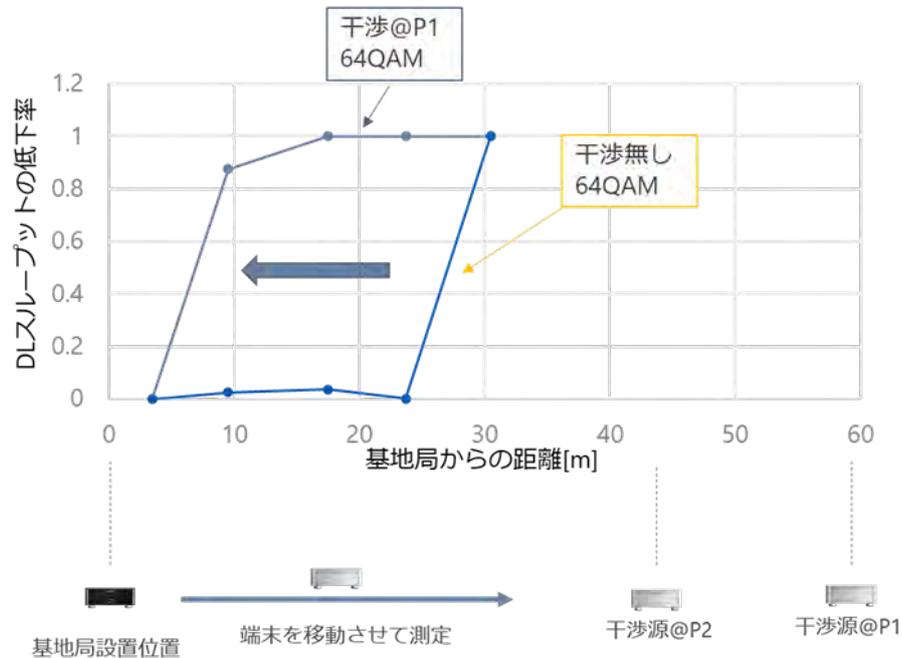


図 5-113 DL への干渉の影響(64QAM)

この結果から MCS=25 のフォーマットでは、通信エリア境界付近に干渉源があるとエリアのほぼ全域で通信ができなくなることがわかった。

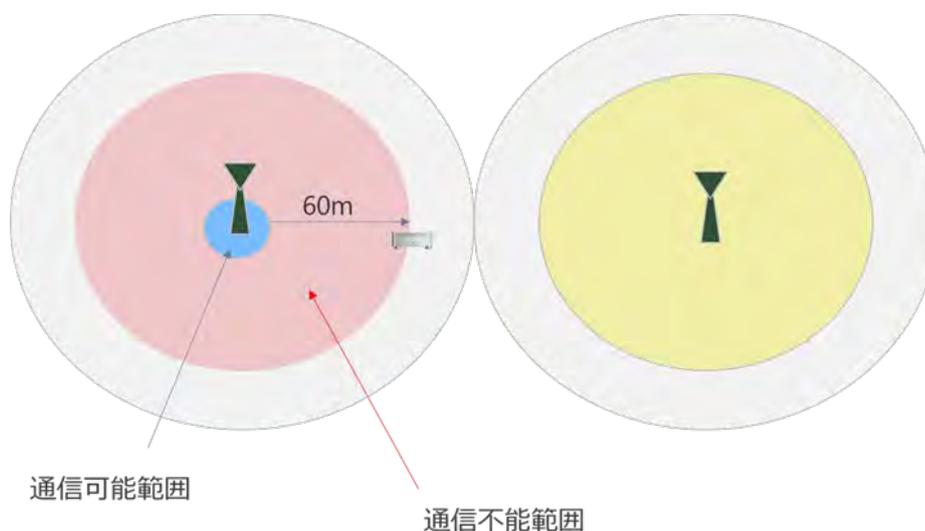


図 5-114 通信エリアの縮小(64QAM)

この結果から以下、周波数利用効率を検討する。

- ・ 干渉無しでの通信可能範囲は半径 30m
- ・ 干渉有りでの通信可能範囲は半径 10m

という結果となった。

元の通信エリアに対して干渉下でのエリアは  $10 \times 10 \times \pi / 30 \times 30 \times \pi = 0.1 = 10\%$  に狭くなっていることが確認できた。したがって周波数利用効率は干渉が無い条件に対して、干渉があると 90%減少し、10%まで落ち込むことになる。

今回使用した無線フォーマットでは、周波数利用効率は 1.36bps/Hz のため、干渉により劣化した後の周波数利用効率は 0.14bps/Hz となる。非同期システムによりセル間干渉が起きた場合、最悪条件として、1bps/Hz を切る値となることがわかった。2017 年度の「屋内において 2 万台程度の多数同時接続通信を可能とする 第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討」では 1.584bps/Hz となっている。これに対しても著しい劣化となっていることから、アプリケーションに適した無線パラメータを選択するだけではシステム全体の周波数利用効率を向上させることができなく、セル間干渉も考慮した無線パラメータの選択が必要であることがわかった。

今回の実験では確認ができなかったが当該セルと同サイズのガードエリアを設置した場合、周波数利用効率は  $1/1.5$  となり、 $1.36\text{bps/Hz} \times 1/1.5 = 0.91\text{bps/Hz}$  となり、隣接セルからの干渉を受けるセル配置より周波数利用効率が高くなる。

次に変調方式を変更した際の影響を確認した。

干渉を受けることにより通信エリアの縮小を確認したが、その影響は64QAMに対して著しく小さいことを確認した。

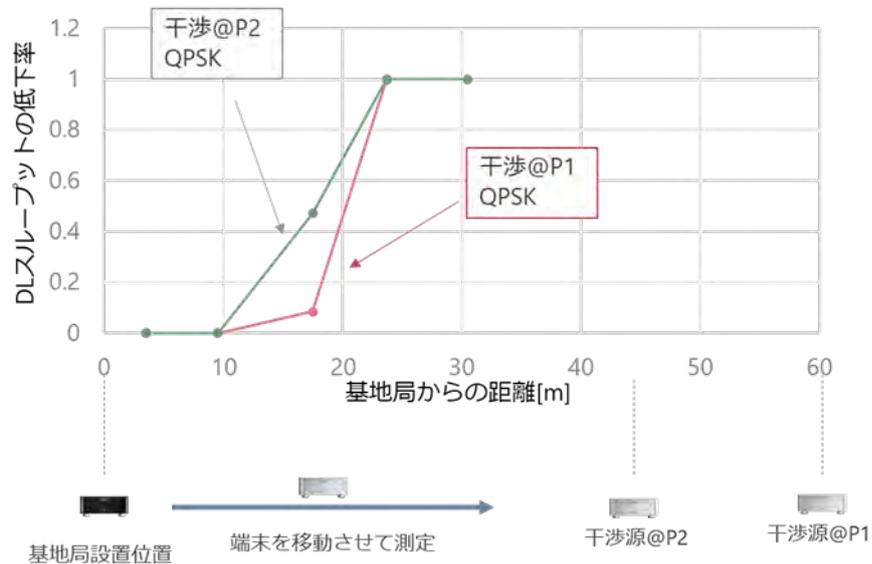


図 5-115 DL への干渉の影響(QPSK)

MCS=9 のフォーマットでは、通信エリア境界付近に干渉源があっても通信エリアの半径が半分のエリアまで通信可能であることを確認した。

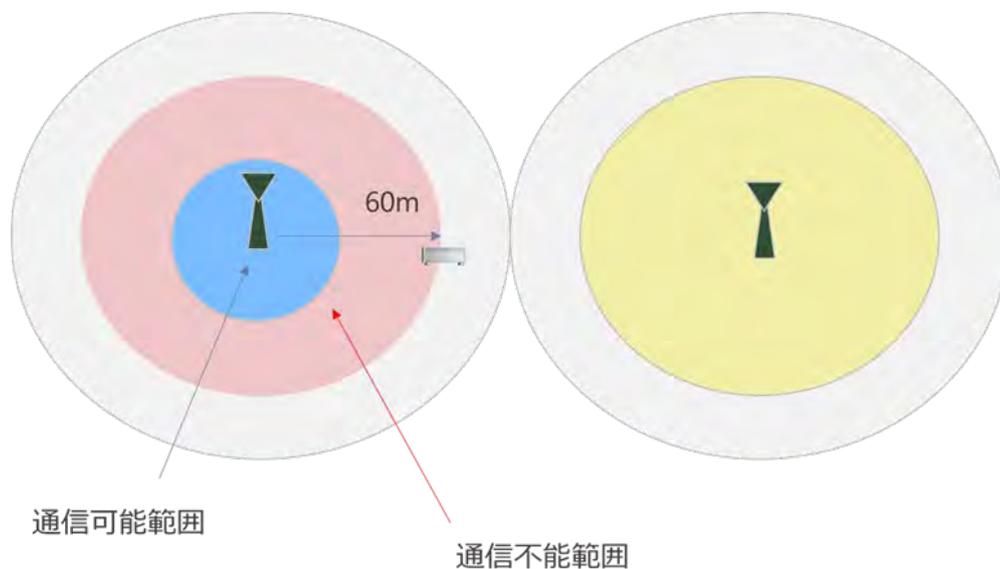


図 5-116 通信エリアの縮小(QPSK)

以下、QPSK での干渉の影響による周波数利用効率の変化を検討する。

- ・ 干渉無しでの通信可能範囲は半径 40m

- ・ 干渉有りでの通信可能範囲は半径 20m

という結果となった。

元の通信エリアに対して干渉下でのエリアは  $20 \times 20 \times \pi / 40 \times 40 \times \pi = 0.25$   
 $= 25\%$ に狭くなっていることが確認できた。

したがって周波数利用効率は干渉が無い条件に対して、干渉があると 75%減少し、25%  
 まで落ち込むことになる。

この実験で使用した無線パラメータから算出される周波数利用効率は 0.16bps/MHz のた  
 め、セル間干渉を受けた際には 0.04bps/MHz まで落ち込むことになる。しかし 64QAM の  
 試験結果に対して干渉による周波数利用効率の劣化は低いことがわかった。

今回の実験では確認ができなかったが当該セルと同サイズのガードエリアを設置した場  
 合、周波数利用効率は 1/1.5 となり、 $0.16\text{bps/Hz} \times 1/1.5 = 0.11\text{bps/Hz}$  となり、隣接セルか  
 らの干渉を受けるセル配置より周波数利用効率が高くなる。

### (3) 受信電力への影響

干渉の有無で対象となる装置の受信電力 RSSI、SS-RSRP への影響を測定した。

通常は基地局から UE の距離が遠くなると受信電力は下がっていくが、干渉源の影響  
 で基地局から UE が離れた場所でも RSSI が低下しないことを確認した。

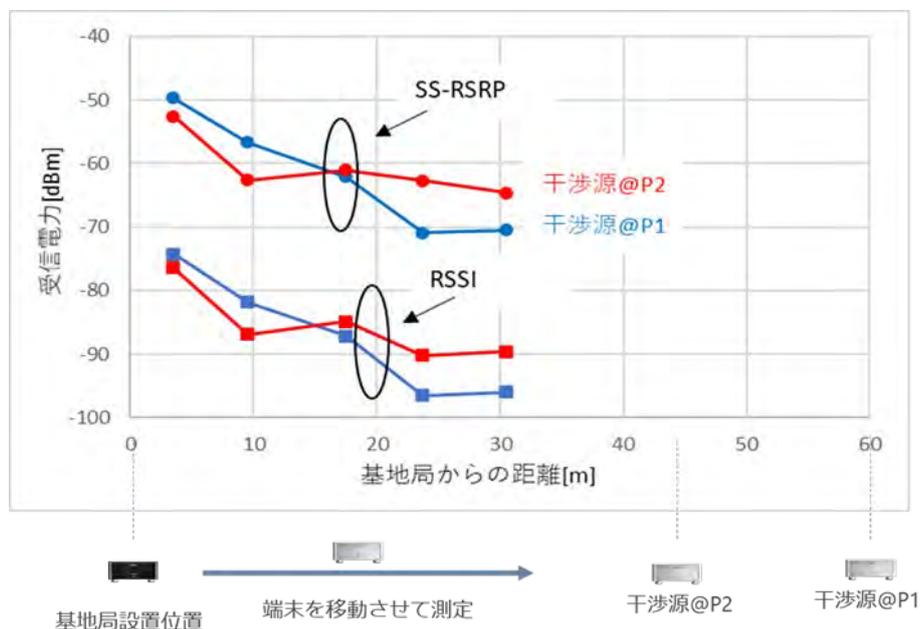


図 5-117 受信電力への干渉の影響

### (4) 受信信号品質への影響

基地局からの距離が離れた場所では信号品質が劣化することを確認した。干渉源に近い

とその影響の大きさが大きいことを確認した。

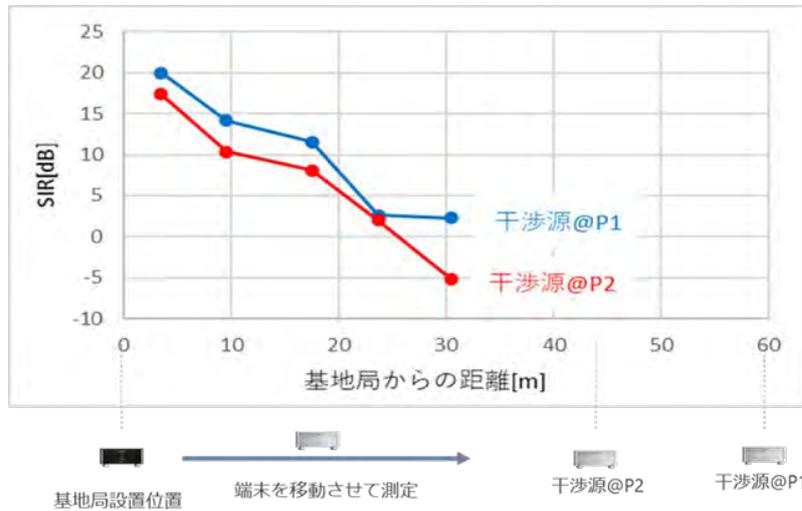


図 5-118 受信信号品質への干渉の影響

### 5.5.3.5 考察

本試験結果により以下のことが確認できた。

- ・ 他セルの UE からの干渉について UL 通信に対する影響は軽微
- ・ 他セルの UE からの干渉について DL 通信には大きく影響しセル間の距離は干渉区域が互いに重ならない程度まで必要である。

UL 通信への干渉の影響は軽微であった。セル間干渉を考慮し、基地局設置を検討する際には UE 間の干渉を観測することが有効であることを確認した。そして、セル間の距離としては干渉区域が重ならないような距離を空けることが望ましい。

上記の特徴を考慮すると以下のようなシステム構築が可能と考えることができる。

- ・ セル#A : 監視カメラ (UL-UDP)
- ・ セル#B : IoT (センサー)

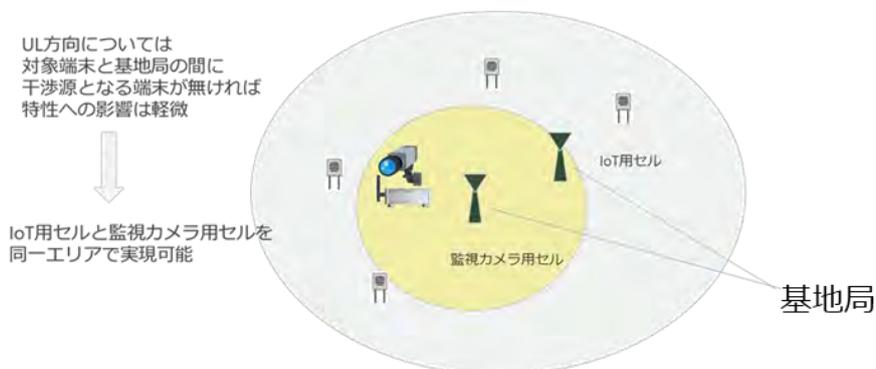


図 5-119 柔軟なシステム構築の例

セル#Bの中にセル#Aを構築、監視カメラとセル#Aの基地局の間にセル#BのIoTセンサーを設置しないようにすれば、監視カメラの画像転送に対するIoTデバイスの送信信号からの干渉は低減でき、IoTデバイスは通信レートを落とし、コーディングレートを高めるなどして耐干渉性を高めればセル#Aの端末が近傍にあっても通信が可能と考えることができる。

### 5.5.3.6 技術的課題の解決方策

#### (1) 検証結果を踏まえた考察（自身で設定したテーマ・視点への対応等）

柔軟なシステムの構築検討として、周波数利用効率の観点から各アプリケーションに適した無線パラメータを選択して実証実験を実施した。本実証実験では特にシステム全体の周波数利用効率を調査、検討するために、セル間干渉に着目して、各セルにアプリケーションに適した無線パラメータを設定して、実験を行い、その影響を確認した。

- MRシステムを活用した遠隔技術支援を模したセルでは隣接セルのUEからの干渉により周波数利用効率が1.36bps/Hzから0.14bps/Hzに下がる。
- カメラ画像による品質評価を模したセルでは隣接セルのUEからの干渉により周波数利用効率が0.16bps/Hzから0.04bps/Hzに下がる。

本実証実験では干渉条件として、最悪条件となる受信帯域、受信時間全てに隣接セルからの干渉を受けるものとして実験を行った。その結果周波数利用効率の低下を確認したが、その影響が大きかったMRシステムを活用した遠隔技術支援を模したセルであっても、基地局周辺では安定した通信を確認することができた。MRシステムを活用する際には、今回のユースケースにおいては移動範囲はさほど広くなく基地局周辺での作業とすることも可能である。干渉調整区域を重ねないようにセルを配置した場合、セル間干渉が最悪の条件であったとしても、MRシステムを活用できるような通信エリアを確保できる可能性を示すことができた。またその通信エリアは、無線パラメータを選択することにより拡大できる可能性も確認することができた。

以上のように本実証実験により同一工場内において非同期システムで異なる無線パラメータを使用した複数セルを配置した場合、セル間干渉の影響はあるものの実運用上、活用できる可能性があることがわかった。現行の同期・準同期で規定されている無線フォーマットではULの比率が最大50%で、ULの通信トラフィックが主体のアプリケーションであったとしても必要性の低いDLに対して無線リソースを少なくとも50%はアサインしなければならない。ULのスループットを高めるためには、帯域の拡大、多値変調、MIMOの活用が必要となり、通信エリアも狭くなることによりエリア当たりに必要な基地局台数が増え、さらにシステムとしては複雑になるため高コストになってしまう。導入コストを抑えるためにも工場のように様々なアプリケーションが使用される場所では、より柔軟な無線システムが要求されるため、今後準同期のフレームフォーマットの拡張や、非同期システムが活用できるよう法整備を進めていただきたい。

今回は干渉条件として最悪の条件での評価であったが、今後より実システムに近い干渉の与え方をしたり、他アプリケーションにあった無線パラメータの選択をしたりして実証実験を進めていき、知見をさらに高める必要がある。

## (2) 技術的課題の解決方策

今回の実証実験では一つのユースケースについて想定し、実証実験、評価を行った。その結果として干渉調整区域が重ならないセル配置において非同期システム並びに異なる無線パラメータでの活用の可能性を確認できた。今後はより実システムに近く、多くのユースケースを想定した実験が必要と考えられる。その結果から、知見をさらに高めてより汎用的なシステム構築手順等を示すことが期待される。

- 周波数の選択

屋内使用を想定した場合には 4.6～4.9GHz と 300MHz の帯域が使用できるため、100MHz のシステムであっても 3 チャネル分の周波数を選択することが可能である。同一周波数だけでなく隣接チャネルでからの干渉の影響を測定する必要がある。

- 無線パラメータの選択

UL/DL の比率の変更の他、システム帯域幅、物理フォーマット等変更した場合の影響について更なる実験を行う必要がある。

- 指向性アンテナの活用

MR システム等、狭い範囲で使用されるアプリケーションに対しては指向性アンテナも有用で、異なる種類のアンテナを用いた評価が必要である。

## (3) 更なる技術的課題等

工場内でのアプリケーションは多岐に渡るため、一つの技術実証チームでの実証検証だけでは知見が十分に高めることができない。そのため、多くの実証実験の結果をお互いに共有し、議論できる場が必要と考えられる。

情報通信研究機構では「フレキシブル・ファクトリー・プロジェクト」として、製造現場における安全で安定した無線利用により IoT 化を推進するため、独自で実施した現場検証やヒアリング、解析結果等をもとに各種資料をまとめ、公開している。このような組織または場をあらためてローカル 5G の活用検討の場として設け、情報が共有できることを期待する。

## 5.6 まとめ

### 5.6.1 技術基準等の見直しに資する新たな知見

本技術実証を通じて、技術基準等の見直しに資する新たな知見について以下の通り得る

ことができた。提言と合わせて、以下に示す。

#### 5.6.1.1 電波法関係審査基準 カバーエリア及び調整対象区域の算出法

実証目標②（課題①に対応）

工場環境における電波伝搬測定結果（SS-RSRP 受信電力）、カバーエリア及び調整対象区域の調査より、算出式との差異を明らかにする。どの程度の差異があるのか、前提としている条件面も含めて、検証し新たな知見を得る。

4.7GHz 帯について、エイビット製の無指向性アンテナの基地局からの電波を測定した結果をもとに検証を行った。

工場の屋内環境において、基地局と端末間の見通しが確保されている場合は、建物侵入損は不要と考えることができる。一方、基地局と端末間の見通しが確保できない場合においては、伝搬損失が違うことから、検討が必要である。

本技術実証では、実測値と算出式の結果を比較した。限られた測定ポイントでの計算ではあるが、建物侵入損を 7dB 程度にすることで、伝搬損失の差が小さくなることが分かった。

この伝搬損失の差について、サンプル数を多く取り、場合分け、条件分けによって傾向が明らかになってくると、その傾向をエリア算出法として加えることができると考えられる。

総務省エリア算出法としては、技術審査基準としてできるだけ多くの場合に対応していく必要があるが、場合分けや条件分けを行い、利用者が利用する場合に合わせた算出ができるようになると良いと考える。

28GHz 帯について、ノキア製の指向性一体型フェーズドアレイアンテナの基地局からの電波を測定した結果をもとに検証を行った。

本検証を通じて、使用する基地局の指向性やチルトによっても算出結果が大きく変わることが分かった。

現状の電波法関係審査基準のエリア算出法の 28GHz 帯については、あまり細かな条件設定がない。一方 28GHz 帯はビームフォーミングを活用する実装となっており、指向性などについて、算出式への条件設定もなされると、実体と合う形で運用できると思われる。また、工場内では障害物が多いため、伝搬損失が大きくなることが分かったため、今後、審査基準の見直しがある場合には、他の工場も含めてサンプルを多くとった上で、検討するのがよいと考える。

#### 5.6.1.2 アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響

実証目標③（課題②に対応）

ハンドオーバー動作は、隣り合うセルの受信強度によって、振舞いが変わると想定している。本技術実証で使用する機器・実証環境での実際のハンドオーバー動作の結果より、MR システムのアプリケーションに対する技術要件を考察し、その他多様な条件で役立つ知見を得ることを目指す。詳細については、「5.5 その他ローカル 5 G に関する技術実証」にて記載する。

MR システムのアプリケーションとしては、疑似 HMD 方式での実証を行った。結果としては、伝送スループットがハンドオーバー地点に近づくにつれて低くなり、遠ざかり次の基地局のカバーエリアに入るに従い伝送スループットが高くなった。

基地局と端末との関係において、ハンドオーバーの動作自体は成功しているものの、伝送スループットの性能要件としては、一定の伝送スループットが確保できず変動してしまった。

以上の結果から、以下の知見を得た。

今回の実証実験では、ハンドオーバー発生時に切り替えがうまく動作するように、端末が報告する受信電力に対して、ハンドオーバーが実行されるようにセル配置を行い、ハンドオーバーがセル境界で頻繁に発生しないように、ハンドオーバー元とハンドオーバー先の基地局の受信電力の差分を適切に設定することによって、ほぼ確実にハンドオーバーを動作させることができた。

これによって、ハンドオーバー時にも呼の切断を発生させず、アプリケーションのセッションを継続することが可能であることを確認した。

- ・ ノキア製基地局 AWEUA とシャープ製端末ローカル 5G ルータとの間で、ハンドオーバー（セルチェンジ）動作が可能であること。
- ・ 次の基地局に切り替わる際の受信電力強度の閾値。
- ・ 次の基地局の受信電力が強くなりハンドオーバー動作の前後で伝送スループットに変動があるという関係性。
- ・ ハンドオーバーを期待するアプリケーションの通信要件に合致する、電波強度を確保するように基地局間の距離調整が必要であるということ。

技術基準等に対する提言については、現在検討中であり、以下は素案である。

同一事業者が設計し運用する隣接するセルでハンドオーバー動作をする場合は、セル間の干渉については自信で設計しているため問題とはならない。

しかしながら今後ローカル 5G の普及に伴い、他者と隣接するローカル 5G のエリア境界においては、ハンドオーバー等の機能を活用することも想定して、業務区域を確保できるかどうか、事前の設計段階で検討することが重要になると考えられる。

そのため、置局設計段階で検討できるように利用を想定しているローカル 5G の基地局の技術情報などの情報共有の枠組みが必要になるとと思われる。

### 5.6.1.3 柔軟なシステムの構築検討

実証目標④（課題③に対応）

同一工場内で使用用途に応じて無線パラメータをそれぞれ設定しシステムを実現することが可能であるか。また、使用するアプリにより無線システムに要求されるスループット、遅延等が異なるため、5G の幅広いパラメータを柔軟に活用して最適なシステムを構築する際の知見を得ることを目的に検証を実施した。

その結果、以下のことが分かった。

- ・ 他セルの UE からの干渉について UL 通信に対する影響は軽微
- ・ 他セルの UE からの干渉について DL 通信には大きく影響しセル間の距離は干渉区域が互いに重ならない程度まで必要である

5G の幅広いパラメータを柔軟に活用して最適なシステムを構築・基地局設置を検討する際には、本検証の結果から UL 通信への干渉の影響は軽微であったことから、セル間干渉を考慮し、UE 間の干渉を観測することが有効である。また、セル間の距離としては干渉区域が重ならないような距離を空けることが望ましいという知見を得ることができた。

## 5.6.2 ローカル 5G の性能評価等の技術実証のまとめ

第 5 章では、ローカル 5G の性能評価等の技術実証について報告した。

本技術実証においては、ローカル 5G による MR システムを実現するための通信インフラに求められるローカル 5G の性能評価を明らかにするため、技術実証 PMO の ARIB 様による適切なアドバイスを受け、前提条件の整理、実証目標の整理、ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価の計画と実施、ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証を実施した。

また、その他ローカル 5G に関する技術実証として、アプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響、柔軟なシステムの構築検討を実施した。

### 5.6.2.1 ローカル 5G の性能評価等の技術実証のまとめ

本技術実証を通じて、トヨタ自動車株式会社 貞宝第 1 工場における、ローカル 5G の以下の電波伝搬特性を明らかにすることができた。

以下の機器を用い

- ・ 4.7GHz 帯エイビット製基地局・端末による電波伝搬（「5.3.5 評価結果」参照）
- ・ 28GHz 帯ノキア製基地局・シャープ製端末による電波伝搬（「5.3.5 評価結果」参照）

貞宝工場内で伝送試験を実施し、本工場内の構造物として、鉄製の柱や大型のダクトなど反射影響があり、また天井高が高く空間が開けているということから、当初設計段階のカバーエリアよりも広い範囲で電波が到達していることや、カバーエリア外であっても見通しが確保できる箇所においては通信が可能であるということ等を明らかにすることができた。

また、ローカル 5G の工場屋外への電波漏えいについては、ほとんどの測定ポイントで電波漏えいは確認できず、確認できた測定ポイントにおいても工場外壁や扉により減衰し通信することができない程度の微弱な電波であることが明らかになった。

これらの結果から、今後のエリア設計等を行う際に有益な参考情報として活用することが期待できる。本技術実証の結果や得られた知見は、他の国内工場においても参考となると考える。

### 5.6.2.2 本実証を通じて判明した技術的な課題及び技術的な課題の解決策（案）

本技術事象を通じて判明した課題について、今後の展開を見据えた際の観点で以下に示す。

- ・ 本技術実証を通じて判明した新たな課題 a) 相互接続性

28GHz 帯においては、基地局と端末メーカーが違い、相互接続性確保が懸念であったが、本実証においては事前の PoC 等を通じて動作確認を行うことで問題を回避した。

- ・ 解決策（案）

今後の 5G の 3GPP release に合わせ、機器メーカーによる機能実装、品質向上、相互接続性の確保等が期待される。

利用者がローカル 5G の導入時に毎回相互接続性の検証をローカル 5G の導入者が実施することは大きな課題であり、そのためにもメーカー間の情報交換や相互接続性確認の試験などの工夫がなされることを期待したい。

- ・ 本技術実証を通じて判明した新たな課題 b) 通信性能の更なる向上

ローカル 5G による MR システムの完全無線化を実現するための通信インフラとしては、UL 伝送スループットの増速、安定した通信品質の提供が必要となる。

- ・ 解決策（案）

”準同期の拡張” / 非同期運用において無線フレームの UL スロットアサインを確保し帯域を確保し、キャリアアグリゲーションによる統合、MIMO による多重化技術などの実装により帯域を確保する方策が考えられる。

※特に非同期運用については、干渉調整等が重要となるため、屋内利用限定で運用可能とする等条件を整理してガイドライン化できると良いと考える。

※詳細は「5.3.6 技術的課題の解決策」にて記載した通り。

- ・ 本技術実証を通じて判明した新たな課題 c) 通信品質への対応

MR システムの完全無線化を実現するためには、均一で安定した通信品質が必要となる。MR システムにとって通信品質によるパケットロス等は位置情報のズレ、MR 映像の表示、体感品質に影響を与えてしまう。

- ・ 解決策（案）

業務区域をカバーエリアとし見通しを確保するような置局設計が重要。また、無線を前提とした上位層での FEC 処理の実装やトランスポート層での実装等も今後の解決策と考えられる。

- ・ 本技術実証を通じて判明した新たな課題 d) 同期運用を行う際の課題

本技術実証を行う前段階の環境構築における課題でもあったが、今後のローカル 5G の普及においても同様な課題になってくると思われるため、記載する。

28GHz 帯においては、同期運用のため GPS の設置が必要となった。今後各工場への横展開などを検討する際、GPS 設置に付随する超低損失同軸ケーブルの配線など機器追加につながることを課題として挙げられる。

- ・ 解決策（案）

同期 / 準同期運用において、基地局からの送信開始タイミングを、GPS 設置・敷設以外の方法で、GPS 信号取得装置等から GPS 基準信号を取得する方法（例えば、公衆 LTE の電波、放送波から GPS 信号を生成する装置（IDSS：InDoor Synchronization System）の利用など）を代替案として運用技術を確立する等の方策が考えられる。

以上、4 点、今後の展開を見据えた際の観点の課題と解決方策について記載した。

技術実証として、ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価を実施してきたが、今回の実証を通してローカル 5G による MR システムの完全無線化を実現するための通信インフラとしては、5G の実力が出しきれていないことが判明した。

考えられる原因としては、

- ・ 従来のコンテンツ配信を中心とした利用モデルにより、TDD の無線フレームにおけるスロット割り当てが、DL 優先となっている。
- ・ 産業ニーズとしては、UL をメインに使うアプリケーションが多いが、そのためのローカル 5G 向けの機能実装がなされていない。

今後、ローカル 5G によって地域課題解決を実現し、ローカル 5G の利用拡大を推進していくためには、産業ニーズを取り込んだ機能実装を進め、より多くのアプリケーション事例を実証する必要がある。

また、今後の普及展開を考慮するとローカル 5G の共用システムや小規模構成が増えることが考えられ、今後は運用技術の進化発展が重要と考える。

その実現に向けては、

- ・ 干渉調整の煩雑さや誤った運用による影響の排除などの工夫や技術進化が期待される。
- ・ 5G の 3GPP release に合わせ、ローカル 5G に必要となる機能の機器メーカーによる機能実装及び品質向上、相互接続性の確保等も期待される。
- ・ 地域課題解決のためのローカル 5G 利活用に向け、利用側の環境変化（設備の入替など）に柔軟に対応できる機器や制度面の工夫なども期待される。

このようにローカル 5G の製造業への展開については、課題が多数あることが判明してきたが、一つ一つ解決することで地域課題の解決・国内製造業の発展に貢献していけると考える。

## 6. 実装及び横展開に関する検討

### 6.1 前提となる事項

#### 6.1.1 実証終了後の継続利用

課題解決システムの実証およびローカル5Gの性能技術の技術実証の結果より、製造現場の生産工程にバックパック方式の課題解決システムを導入することにより、ケーブル排除による安全性向上、これに伴う要員削減効果等、課題解決を促進するための効果が確認できた。課題解決の概要は、下記の通り。

① 本事業が取り組む地域課題：

- ・ 製造現場の人材不足
- ・ 熟練技術の承継
- ・ 労働環境の改善等

② 当該課題の解決度・アウトカム：

多品種少量生産を行う製造現場の生産工程にローカル5Gを導入することにより、バックパック方式によるMRシステムの無線化に道筋がついた。当該課題の解決度・アウトカムとしては、以下が挙げられる。

- ・ 課題解決システムの導入に伴う削減工数
- ・ MRシステム利用時における取り回しケーブル数の減少

③ 地域課題の内容及び直接・間接的な効果のロジック：

MR技術を活用した遠隔作業支援の実現による効果のロジックは以下の通り。

- ・ MRシステム利用時における取り回しケーブル数が減少することにより、ケーブルが装置や作業員と接触する機会が減少するため、取り回しケーブルに起因する事故発生の可能性が低くなり、作業時における安全性が向上する。このため、労働環境の改善の効果が期待できる。
- ・ 工場操業の遠隔作業支援により、製造現場の人材不足解消の効果が期待できる。例えば、高度な知識を有する技術者を地域に点在する複数の工場に常時配置する必要がなくなるため、このような高度人材を有効活用することが可能になる。このことはまた、熟練技術の継承への効果にも繋がるものである。すなわち、課題解決システムの活用により、熟練技術の継承が遠隔地でも容易になる。
- ・ 取り回しケーブル数が減少することにより、準備作業および撤収作業の時間短縮を図ることが可能になり、作業担当者がMRシステムを積極的に利用しようとする機運が高まる。MR技術の活用は、地域に立地する工場において多くの利点をもたらすものであるが、ローカル5Gとの組み合わせによって、より容易にシステム

を利用することが可能となるため、MR 技術の利用機会が増えることが期待できる。このことは、地域課題の解決に間接的な効果をもたらす。

このため、本事業で開発した課題解決システムは、実証終了後においても継続的に利用する。継続利用する場合の運営体制・内容は実証と同様である。

### 6.1.2 事業モデルの構築と実装計画の策定

課題解決システムの実証及びローカル 5 G の性能評価の技術実証の成果を踏まえ、課題解決を図っていくための事業モデルの構築と実装計画の策定を行った。

本報告書の作成時点においては、本モデルが「持続可能である」ということについて結論は出していない。この理由の 1 つは、事業モデルとして必要となる機能要件が実現途中であるためであるが、もう 1 つの大きな理由は、工場への導入を想定した場合における費用対効果の創出に目途が立っていないためであり、MR システムのみならずその他の IoT システムにもローカル 5 G への対応が必要であるという観点に立っているためである。このため、課題解決等を図っていくための事業モデルの構築と実装計画の策定には、本モデルが「持続可能である」ことを検証するための計画も含まれている。

持続可能な事業モデルの適用範囲は、本実証と同等の効果を有する企業各社を想定している。現時点では、自社が、工場における費用対効果の創出の観点で、モデル構築を目指している。現時点では、以下のような期待・役割の担い手を想定している。

- ・ 免許： 運営事業者（基地局を設置する各社）
- ・ エリア構築： 構築事業者（インテグレーター）
- ・ 運用保守： 運用事業者、または構築事業者が兼務する
- ・ サービス利用： サービス利用者

しかしながら、前述したように、持続可能であるかの判断が現時点では難しいため、上記の役割分担は、今後の検討次第にて見直しが入ると考えている。

### 6.1.3 前提条件

実装・横展開に係る基本的な考え方は、大規模企業型として、製造現場における労働力不足の解消に向けた省力化や効率化、等の地域課題の解決に向け、MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現に資する、ローカル 5 G 等の技術的条件等に関する調査検討を行うことである。

前提としている条件は、下記の通り。

#### ① コンソーシアム・関係各社の考え・意向：

自社工場における事業モデルを構築するとともに、自社のグループ企業に対して横展

開を図ることにより、企業グループとして地域課題の解決に取り組む。

② 制約条件等：

企業として、自立的に運用維持が可能となる費用対効果を実現できること。

## 6.2 持続可能な事業モデル等の構築・計画策定

### 6.2.1 検討方法

課題解決システムの実証において用いたユースケースと意見聴取の結果に基づき、検討を実施した。以下に検討方法を示す。

#### 6.2.1.1 ユースケースに基づく検討

第4章で示しているユースケースに基づき、事業モデルを検討した。ユースケースは、同一工場内において事前検証作業の効率化を行うものと遠隔地の工場内作業を支援するものの2つに大別して検討を行った。各ユースケースの詳細については、「4.1.3 実務ユースケースの選定」を参照のこと。

##### (1) ユースケース1（事前検証効率化）

- ・ 生産設備（初号機）製作途中の不具合確認

##### (2) ユースケース2（遠隔地支援）

- ・ 生産設備製作時の配線作業遠隔支援

#### 6.2.1.2 ニーズや体制面での意見聴取

ローカル5GとMRシステムを活用した課題解決システムについて、ニーズや体制面について意見聴取を行った。

意見聴取の対象者は、以下の通り。

- ・ 現場責任者、作業員
- ・ 設備・治具の設計・開発者
- ・ 工場管理者、本社管理部門、調達部門
- ・ ネットワーク維持管理者
- ・ 免許取得・申請担当者

意見聴取のテーマは、以下の通り。

- ・ ローカル5Gの工場内無線インフラ活用について（以下、「前提」という）
- ・ ユースケース1の効果、課題等について
- ・ ユースケース2の効果、課題等について
- ・ 免許取得・申請における課題等について

### 6.2.1.3 事業モデルの検討

ビジネスモデルキャンバスの手法を用いて事業モデルを検討した。ビジネスモデルキャンバスの書式を以下に示す。

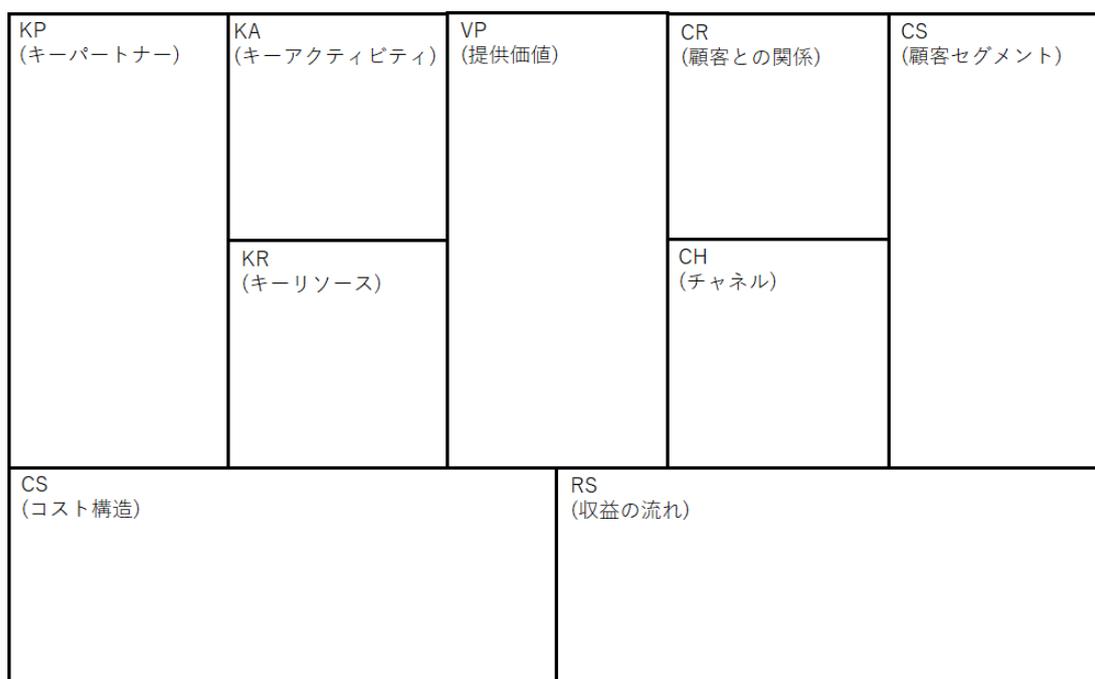


図 6-1 ビジネスモデルキャンバス

この手法は、特に、コスト構造と収益の流れを比較することによって費用対効果を算出するために用いた。具体的には、課題解決システムが創出する提供価値をもとに、顧客セグメントにもたらす価値を収益（効果）として定量化するとともに、キーアクティビティとキーリソースからコスト（費用）を算出することにより、両者を比較した。

## 6.2.2 意見聴取の結果

課題実証時に担当者にヒアリングを実施した結果を以下に示す。結果は、生の意見として、各担当者の発言をそのまま記載している。

### 6.2.2.1 現場責任者、作業員

<ユースケース1について>

- ・ ケーブルを捌く必要がないため、不具合確認・組付け確認の時間が短縮できる。
- ・ ケーブルを捌く人員（作業補助者）が必要なくなる。
- ・ ケーブルがないため作業実施者の動作自由度が上がる。
- ・ ケーブルがないため作業実施者が配線につまつく等のリスクが低減する。
- ・ 有線では安全性の問題で MR システムが利用できない場合があり、無線化で MR システムが利用でき作業性が向上する。
- ・ MR システムの現場移動がないため、システムの準備時間が短縮となる。
- ・ MR システムの搬送、準備、撤収の作業工数が削減される。
- ・ MR 技術担当者の省人化を図ることができる。
- ・ 現場設置がないため、現場での MR システムの設置場所の確保が不要となる。
- ・ 安全性・利便性が向上することで、現場への設備導入等を短時間で実施可能となる
- ・ 休日出勤を伴わずに効率よく現場改善活動を実施し、工場の働き方改革に貢献することができる。
- ・ ケーブルの制約がなくなることで使用範囲が広がる。

#### <ユースケース 2 について>

- ・ 熟練技術者による遠隔からの現場への作業支援が手軽となり後進育成が活発化することで、高齢者の就労促進、人手不足の解消への貢献できる。
- ・ 安全性・利便性が向上することで、現場への設備導入等を短時間で実施可能となる。
- ・ ローカル 5 G の基地局サービスがあると小規模拠点等において導入しやすい。（利用規模に応じて導入形態に選択肢があるとよい）
- ・ 大規模ー小規模拠点間の通信等、全体のスループットを考慮したバランスのよい設計が求められる。

### 6.2.2.2 設備・治具の設計・開発者

#### <ユースケース 1 について>

- ・ 生産設備の不具合早期発見による設備設計開発のスピード向上が期待できる。
- ・ 生産設備の組付け確認が効率化することで設備製作スピード向上が期待できる。
- ・ 金型加工時の段取作業が効率化することで金型製作スピード向上が期待できる。
- ・ 省人化や安全性の向上により、製造業の課題である人手不足対策に貢献できる。

### 6.2.2.3 工場管理者、本社管理部門、調達部門

#### <前提について>

- ・ 携帯電話向けの通信規格であるため、ハンドオーバーの仕組みが整っているなど広範囲をカバーするのに適している。
- ・ 高速大容量、超低遅延、多数同時接続といった特徴に期待している。
- ・ キャリア事業者には左右されない独立したネットワークであり、ネットワークが外部環境に影響を受けないという利点がある。この点はセキュリティ確保の利点でもあ

る。

- ・ 工場管理者、本社管理部門、調達部門の管理負荷の低減の効果が見込まれる。
- ・ 現在のユーザーニーズに対して通信デバイスコストと保守費が高すぎるため、費用対効果が乏しい。
- ・ 工場内無線インフラとして、ローカル 5 G を MR システムに特化して利用（MR システムのみで利用）することを想定すると、費用対効果が乏しい。
- ・ 接続デバイスが多岐に渡るため、コスト試算が難しくなる。
- ・ 接続デバイスが多岐に渡るため、設計が難しくなる。
- ・ ローカル 5 G の場合には、基地局等の運用・管理に別の組織が加わることになるため、Wi-Fi 利用と比較して、運用・管理等に係る仕組み、機器の所有権や関係者間の契約の在り方、費用分担も含めた関係者間の役割分担等の体制、等が複雑になる。

#### 6.2.2.4 ネットワーク維持管理者

<前提について>

- ・ 干渉等の連絡があった場合に対応する必要がある。
- ・ 他のローカル 5 G の利用者との調整（干渉調整、自己土地利用）が発生する。
- ・ 無線従事者監査に応じる必要があり工数増を招く。
- ・ 装置交換時に同じものが手に入るのかメーカーに確認が必要であり、不安がある。
- ・ 交換装置を保持しておく等、円滑な運用体制を構築する上での課題になる。
- ・ 電波利用料の費用負担部門、費用負担先はどこにすべきか検討する必要がある。
- ・ 大規模利用者の場合には機器の所有権や契約について検討する必要がある。
- ・ 小規模利用者の場合には所有ではなくサービスとして利用する方が有利になる。
- ・ 利用形態（所有 or サービス）に係らず基地局用の電源工事、通信ケーブル工事が必要であり、追加費用が発生する。
- ・ 光ケーブルの取扱いに注意を要する。
- ・ ローカル 5 G 利用に際して干渉調整等のガイドライン等の整備が望まれる。

#### 6.2.2.5 免許申請・取得担当者

- ・ 登録点検事業者が限られている。特に DSP のような登録点検事業者（既得権益のある）は全国的に数が少ない。
- ・ 登録点検およびローカル 5 G について相談できる機関が少ない。
- ・ 登録点検の要になる基準や許容値など実務レベルのルールが存在しない。
- ・ 無変調発振、CW 発振ができるのか、等の機能確認が事前に必要であり、専門知識が必要である。
- ・ GPS など必須のインフラ、機能について事前確認が必要。（56GHz まで許容している電波暗室、GPS 引き込み、等の施設がない、等）
- ・ 登録点検ノウハウのある技術者が少なく、特定の人に業務が集中している。
- ・ 5 G は携帯キャリア事業者を対象としているためか、FA 利用等では制度化されてい

- る 5G バンドでは狭小で、帯域を広めての申請では実験試験局とならざるを得ない。
- ・ 特に 28GHz 帯の高周波の測定では、測定機器が特殊となり追加オプションが必要になる、あるいは測定機器も高価で高額な費用が必要になる。
  - ・ 登録点検について、今回は制度化前に免許申請を行う必要がスケジュール的にあり、時間・費用ともに、多大な労力がかかってしまった。毎回このような対応が必要とならない様に制度面も工夫が必要となる。また、技術適合の拡充にも期待する。
  - ・ 一方、免許取得後の運用において一定の期間で点検が必要と理解しているが、その方法なども、利用者（ローカル 5G においては運用主体でもある）目線、技術的観点（OTA 等）から整理していくことが望ましい。
  - ・ 今回は制度化前であったため実験試験局での免許申請・交付となるが、5 月末までの期限となっている。制度的にスムーズに運用局へ移行できるような手立てがあるとよい。（技適がないと、改めて登録点検が必要となってしまうことなどを懸念している）

### 6.2.3 コスト試算

費用対効果の検討に用いるコストを算出するための方法を以下に示す。

#### 6.2.3.1 無線利用のコスト

本実証実験で導入したローカル 5G 関連コスト試算を簡略化するために、前提としてローカル 5G を 28GHz 帯または 4.7GHz 帯のどちらか一方のみを利用するものとして、無線利用のコストを試算した。

28GHz 設備を例にすると以下の表の通りとなる。

表 6-1 無線利用のコスト

費用区分	内容		基地局・移動局数との関係
一時費用	①	28GHz 基地局	28GHz 基地局数に比例
一時費用	②	28GHz 基地局設置・光ケーブル敷設作業	28GHz 基地局数に比例
一時費用	③	ケーブル類	28GHz 基地局数に比例
一時費用	④	コア装置、GPS、セキュリティ GW、 ベースバンドユニット、 スイッチングハブ、 LTE 基地局・設置・光ケーブル敷設作業	なし（1 式のみ）
一時費用	⑤	設計、接続試験、基地局申請支援等	なし（1 式のみ）
一時費用	⑥	28GHz 陸上移動局電波利用料（デバイス）	デバイス・移動局数に比例
維持費用	⑦	28GHz 基地局サブスクリプション	28GHz 基地局数に比例
維持費用	⑧	28GHz 基地局電波利用料	28GHz 基地局数に比例
維持費用	⑨	28GHz 陸上移動局電波利用料（デバイス）	デバイス・移動局数に比例
維持費用	⑩	自営等 BWA 陸上移動局電波利用料（デバイス）	デバイス・移動局数に比例
維持費用	⑪	自営等 BWA 等基地局電波利用料	なし（1 式のみ）
維持費用	⑫	コア装置サブスクリプション、LTE 基地局サブスクリプション	なし（1 式のみ）

ローカル 5G の無線利用のコストは、一時費用と維持費用に大別され、それぞれについて、設置する基地局数に比例する項目、デバイス数（移動局数）に比例する項目、それらのどちらにも依存しない項目が存在する。ここで、一時費用とは、システム構築や環境整備のために一時的に支出される費用のことであり、維持費用とは、システムの保守・運用等のために継続的に支出される費用のことである。

これらの項目をローカル 5G 導入時に求めれば以下の計算式で概算コストが算出できる。

一時費用 : (①+②+③) × 28GHz 基地局数 + ④+⑤+⑥  
 維持費用 : (⑦+⑧) × 28GHz 基地局数 + (⑨+⑩) × 移動局数 + ⑪+⑫

### 6.2.3.2 ローカル 5G の基地局数について

#### (1) MR システムで利用するローカル 5G のエリアの考え方

MR システムの利用が必要な場所においては、満遍なくローカル 5G エリア化するための設備投資が必要である。このため、必要な基地局数を算出するために、以下の考え方をを用いた。

- ・ 本来は工場内設備等の障害物や壁等の反射を考慮して基地局を設置するが、ここでは便宜上、障害物や反射を考慮せずに、工場内にて基地局を等間隔で設置するものとする。
- ・ 電波射出点を中心として電波が到達するエリア (カバーエリア) を原単位として定義する。MR システム利用場所の面積と原単位の面積から必要な基地局数を算出する。
- ・ 基地局から各方向に電波を射出する場合、電波射出点を中心とした円がカバーエリアとなるが、コスト算出を簡易化するため、カバーエリアの形状をカバーエリアに内接する正方形と定義し、その正方形を並べることで、MR システムの利用場所を満遍なくローカル 5G エリア化する。

※一部エリアでは複数の基地局から電波を受信する

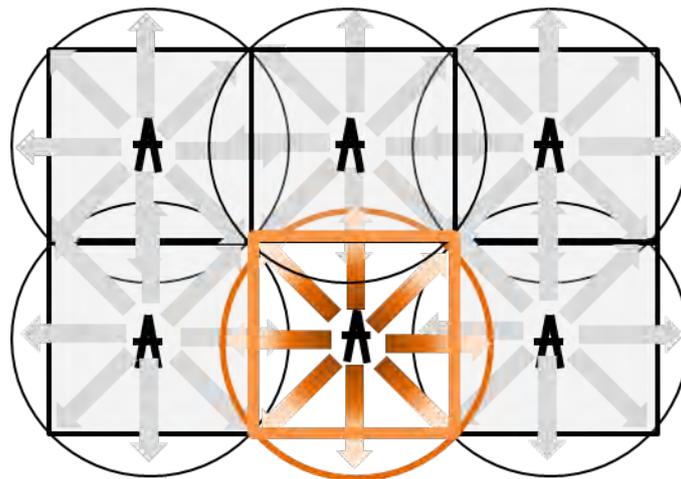
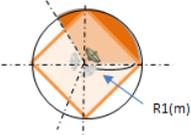
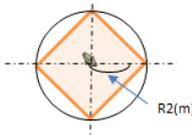


図 6-2 基地局設置イメージ

#### (2) 原単位と原単位あたりの基地局数

基地局からの電波到達距離 (想定電波到達距離) から原単位の面積と原単位あたりの基地局数を算出すると以下の表のようになる。

表 6-2 原単位の面積と原単位あたりの基地局数

	ローカル 5 G (28GHz帯)	ローカル 5 G (4.7GHz帯)
<b>[A]</b> 想定電波到達距離	R1 m	R2 m
<b>[B]</b> 原単位の面積  ※  の部分  ローカル 5 G 機器の指向性は 想定	3基で全方向をカバー (1基120°)    R1(m)	1基で全方向をカバー    R2(m)
	$R1 \times R1 / 2 \times 4$ (㎡)	$R2 \times R2 / 2 \times 4$ (㎡)
<b>[C]</b> 原単位あたり の基地局数 (予備機込)	6 (3×2)	2 (1×2)

MR システム利用場所の面積[S](㎡)を原単位の面積[B]で除し、さらに原単位あたりの基地局数[C]を乗じた  $([S] / [B]) \times [C]$  で必要な基地局数が算出できるので、貞宝第 1 工場 (11,200 ㎡) の場合、必要基地局数は以下となる。尚、必要基地局数には予備機が含まれていることに留意が必要である。

ローカル 5 G (28GHz 帯) :  $11200 / ((R1)^2 \times 2) \times 6$  (基)

ローカル 5 G (4.7GHz 帯) :  $11200 / (R2)^2 \times 2) \times 2$  (基)

※今回の実証で利用する MR システムは数台で運用し、基地局 1 基あたりの接続上限数に達しないものとする。

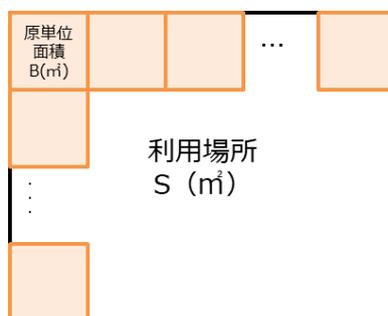


図 6-3 利用場所と原単位面積の関係

### 6.2.3.3 遠隔地利用に係るコスト

遠隔地利用、同一敷地内等、利用場所に関わらず前々項の計算方法でコスト試算が可能である。

## 6.2.4 事業モデルの検討結果

### 6.2.4.1 ユースケース 1

ユースケース 1 の分析結果を以下に示す。

KP (キーパートナー)  ・ 伝送システム提供事業者	KA (キーアクティビティ) ・ インフラ整備 ・ 運用、保守 ・ 免許取得・維持	VP (提供価値) ・ 作業精度の向上 ・ 準備時間の短縮 ・ 工数の低下 ・ 手戻り削減 ・ ネットワーク工事における安全性の確認(高所作業等) ・ 健康の確認(連続作業の負荷確認) ・ 対象範囲の拡大	CR	CS (顧客セグメント) トヨタ自動車 ・ 現場責任者 ・ 作業員 ・ 設備・治具の設計・開発者 ・ 工場管理者 ・ 本社管理部門 ・ 調達部門 ・ ネットワーク維持管理者
	KR (キーリソース) ・ 通信インフラ ・ 通信デバイス ・ LAN		CH	
CS (コスト構造) ・ 導入コスト(インフラ構築費用、デバイス導入費用) ・ ランニングコスト(保守費、電波利用料、免許取得・維持費、等)		RS (収益の流れ) ・ 工数削減 ・ 逸失利益の獲得(稼働率向上) ・ 安全管理に係るコストの低減 ・ 既設インフラコストの削減		

図 6-4 ユースケース 1 の分析結果

分析は、有線で利用していた MR システムを改変することなくローカル 5G で無線接続して、バックパック方式により利用することを前提とした。このため、KP (キーパートナー)、KA (キーアクティビティ)、KR (キーリソース) においては、MR システムに係る要素は加味していない。事業モデルを正確に分析するためには、MR システムを改変するための機能開発費あるいは新機種の購入費等に係る要素の記載が必要であるが、現時点ではそのコスト算出の見通しが立たないことから、このような前提のもとで分析を実施した。また、上記の分析結果において CR (顧客との関係) と CH (チャネル) が空欄となっているのは、自社内での利用であることからこれらを考慮する必要がないことに因る。

ユースケース 1 の費用対効果の試算結果を以下に示す。

表 6-3 ユースケース 1 の費用対効果試算

コスト	収益
・ 導入コスト 50 百万円/年 ・ ランニングコスト 10 百万円/年	・ 工数削減 800 時間/年 ・ 逸失利益の獲得 ・ 安全管理、既設インフラのコスト削減
60 百万円/年 (初年度)	800 時間/年

ユースケース 1 は、現状利用している MR システムをそのまま活用するため、追加コストは発生していない。収益については、工数削減効果のみ算出した。時間単価を乗じて比較すると、コストが収益の 15 倍程度であるという試算結果が得られた。

### 6.2.4.2 ユースケース 2

ユースケース 2 の分析結果を以下に示す。

KP (キーパートナー)  ・ 伝送システム提供事業者 ・ WAN回線事業者	KA (キーアクティビティ)  ・ インフラ整備 ・ 運用、保守 ・ 免許取得・維持	VP (提供価値)  ・ 作業精度の向上 ・ 準備時間の短縮 ・ 工数の低下 ・ 手戻り削減 ・ 安全性の確認 (高所作業等) ・ ネットワーク工事における安全性の確認 (高所作業等) ・ 健康の確認 (連続作業の負荷確認) ・ 対象範囲の拡大	CR	CS (顧客セグメント)  トヨタ自動車 ・ 現場責任者 ・ 作業員 ・ 設備・治具の設計・開発者 ・ 工場管理者 ・ 本社管理部門 ・ 調達部門 ・ ネットワーク維持管理者
	KR (キーリソース)  ・ 通信インフラ ・ 通信デバイス ・ WAN回線 ・ LAN		CH	
CS (コスト構造)  ・ 導入コスト (インフラ構築費用、デバイス導入費用) ・ ランニングコスト (保守費、電波利用料、免許取得・維持費、等)		RS (収益の流れ)  ・ 工数削減 ・ 逸失利益の獲得 ・ 安全管理に係るコストの低減 ・ 出張費削減 ・ 機会損失の削減		

図 6-5 ユースケース 2 の分析結果

分析は、ユースケース 1 の場合と同様に、有線で利用していた MR システムを改変することなくローカル 5G で無線接続して、バックパック方式により利用することを前提とした。ユースケース 2 の費用対効果の試算結果を以下に示す。

表 6-4 ユースケース 2 の費用対効果試算

コスト	収益
・ 導入コスト 50 百万円/年 ・ ランニングコスト 10 百万円/年 ・ MR の軽量化、長時間稼働の改良費	・ 工数削減 800 時間/年 ・ 逸失利益の獲得 ・ 安全管理、既設インフラのコスト削減 ・ 出張費削減 ・ 移動時間などによる機会損失の削減
60 百万円/年 (初年度) + $\alpha$	800 時間/年 + 削減された出張費

ユースケース 2 には、MR システムの軽量化、長時間稼働の改良費がコストとして追加されており、出張費や移動時間による機会損失の削減額等が収益として追加されている。MR システムを遠隔から利用する場合、現地での利用頻度が低い場合には、所有している拠点から搬送して利用することが想定される。このために、機器の軽量化、頑健化、長時間稼働のための改良などが必要となるが、出張費 (移動、宿泊) の削減が可能となるため、コストと収益の比率は、ユースケース 1 と同じく 15 倍程度という試算が得られた。

## 6.2.5 考察

### 6.2.5.1 ユーザーニーズやコスト等を踏まえた経済性

ユースケース 1、2 とも、コストが収益の 15 倍程度となっている。このため、費用対効果の分析結果からは経済性の利点がなく、ローカル 5G の導入は困難である。将来的にはローカル 5G の機器コストや運用コストの低減が見込まれるものの、15 倍程度の差を劇的に向上させることは難しいと考えられる。この一因として、ローカル 5G の基地局 1 基あたりの収容サービス数が挙げられる。

前述の検討結果では、ローカル 5G の基地局 1 つに対して MR システムによる工程改善箇所が 1 箇所であるためコストが収益の 15 倍程度となっているが、同程度の費用削減が見込まれるサービスを 15 程度収容することにより、収益がコストを上回ることになる。また、ローカル 5G コストは、大別して基地局に係るコストと共通設備に係るコストに大別されるが、共通設備に係るコストが按分されていないことも経済性に利点が見出せない一因となっている。このため、複数基地局を設置することにより基地局当たりの共通設備コストの低減が期待できる。

経済性向上に寄与する要因は、下記の通り。

- ・ ローカル 5G のコスト低減
- ・ 基地局当たりの共通コストの低減（複数基地局の設置による共通設備・作業コストの按分）
- ・ 基地局当たりの収容サービスの増加

このうち、基地局当たりの共通コストの低減に着目し、工場内の複数箇所に基地局を設置して、ローカル 5G (28GHz 帯) でカバーすることを想定した試算を行った。「6.2.3.2 ローカル 5G の基地局数について」において示したように、28GHz 帯における貞宝第 1 工場の必要基地局数は、以下の式で算出できる。

$$\text{ローカル 5G (28GHz 帯)} \quad : \quad 11200 / ((R1)^2 \times 2) \times 6 \quad (\text{基})$$

技術実証の試験において、28GHz 帯では 50m～80m の電波到達を確認（基地局と測定装置の距離の実測値）している。このため、28GHz 帯における想定電波到達距離 (R1) の値を 52m とした。この値は、実験試験局の免許申請の値である屋内実験の最大伝送距離 65m を基準とし、この 8 割として算出した。この値を上記の式に代入すると、貞宝第 1 工場の全域をカバーするために必要となる基地局数は 12 基となる。この数には予備機が含まれているため、稼働基地局数はこの半分の 6 基である。

この結果をもとに、「6.2.3.1 無線利用のコスト」において示したコスト算出式に基づき、基地局設置コストの試算を行った。試算結果を以下に示す。

表 6-5 基地局設置コストの試算結果

(金額:百万円)

カバー範囲		原単位	工場エリアの50%	工場エリア全域
		1基	6基 (予備機を含む)	12基 (予備機を含む)
28GHz帯設備 基地局数				
		1基	6基 (予備機を含む)	12基 (予備機を含む)
一時費用		50	90	156
	1基当たり	50	15	13
維持費用		10	36	60
	1基当たり	10	6	5

試算結果より、基地局数の増加に伴いコア設備等の共通コストが案分され、1基当たりのコストが一時費用、維持費用とも原単位と比較して低減していることがわかる。

表 6-6 工場エリアの50%をカバーする場合の費用対効果試算 (基地局数6)

コスト	収益
・導入コスト ・ランニングコスト	・工数削減 ・逸失利益の獲得 ・安全管理、既設インフラのコスト削減
126百万円/年	2,400時間/年

※貞宝一部 (MR システムを3か所で収容することを想定)  
 ※基地局数: 28GHz 帯×6  
 ※ユースケース1で試算

コストと収益の比較においては、コストが収益の10.5倍であるという試算結果が得られた。これは、基地局当たりの共通コストの低減が寄与していると考えられる。また、複数箇所をローカル5Gでカバーしているため、MRシステム以外のサービスによる収益の向上も見込みやすい。

表 6-7 工場エリアの全域をカバーする場合の費用対効果試算 (基地局数12)

コスト	収益
・導入コスト ・ランニングコスト	・工数削減 ・逸失利益の獲得 ・安全管理、既設インフラのコスト削減
216百万円/年	4,800時間/年

※貞宝全部 (MR システムを6か所で収容することを想定)  
 ※基地局数: 28GHz×12  
 ※ユースケース1で試算

コストと収益の比較においては、コストが収益の9倍という試算結果が得られた。これは、工場エリアの50%をカバーする場合と大きな差は見られなかった。これにより、ロー

カル5 Gで工場全域をカバーするよりも、工場の一部をカバーする方が、コストメリットが高いことがわかった。

以上までの結果より、大規模企業型の工場での経済性を確保するためには、複数のMRシステムを工場内で稼働させつつ、同時に、その他のIoTシステムをローカル5 Gで接続して効果を創出することにより、費用対効果を向上させる必要があることがわかった。貞宝第1工場の場合では、工場内に6か所程度の基地局を設置（工場建屋内面積の概ね半分をカバー）し、MRシステムと同程度の効果を創出することが可能なシステムを稼働させることが必要である。この場合、コストと収益には10倍程度の差があるため、MRシステムとその他のIoTシステムの稼働率を高め、ローカル5 Gシステムをフル活用する利用方法の確立が必要になる。

#### 6.2.5.2 運用・管理等に係る仕組みの課題

運用・管理等に係る仕組みについて、課題は以下の通り。

- ・ 免許保持者に限定される作業等があり、仕組みを構築する際に考慮する必要がある。
- ・ 法令順守の観点を考慮する必要がある。
- ・ 利用者間の電波干渉が発生する可能性があり、干渉調整を実施する必要がある。
- ・ 基地局監査に対応する必要がある。

現状において、工場の無線インフラ（Wi-Fi 等）の運用・管理は、ネットワーク維持管理者が行っている。このため、課題解決のためには、ネットワーク維持管理者がローカル 5G の運用・管理のためのスキルを習得する必要がある。また、免許保持者の計画的な育成、干渉調整や基地局監査への対応、等を実施するために、組織的な体制を整備する必要がある。

#### 6.2.5.3 機器の所有権や関係者間の契約の在り方の課題

機器の所有権や関係者間の契約の在り方について、課題は以下の通り。

- ・ 従来の工場内無線インフラと比較すると、機器の所有権や関係者間の契約の在り方が異なることが想定される。事前に予備機を保持しておくことや、保守契約の在り方、等についてメーカー等と調整する必要がある。

ローカル 5G を導入する場合における機器の所有権や関係者間の契約の在り方は、従来の工場内無線インフラと大きく変わるものではない。しかしながら、現状のローカル 5G は、キャリア事業者のように法規制に係る知識や技術的な専門知識を有するユーザ層を対象としているのに対して、従来の工場内無線インフラは、法規制に係る知識や技術的な専門知識を有していないユーザ層を対象とすることになる。このため、機器の所有権や関係者間の契約の在り方について、キャリア事業者が有している知識や知見等をユーザとしてこれから蓄積していくことになる。このため、このようなメーカー等との調整を円滑にかつ速やかに実施するための仕組みの構築、あるいはこれらを代行する組織の整備が必要である。

#### 6.2.5.4 費用分担も含めた関係者間の役割分担等の体制の課題

関係者間の役割分担等の体制について、課題は以下の通り。

- ・ 利用者は電波利用料と機器保守料を支払う必要があるが、費用負担先はどこにすべきか検討する必要がある。
- ・ ローカル 5G は利用形態が所有またはサービス提供に関わらず電源工事が発生するため、利用者の追加費用負担が必ず発生する。加えて、設計も含めて利用者が関与すべき作業が発生する。
- ・ 遠隔支援においては、支援を受ける側（小規模拠点）の投資が難しいことが課題とな

る場合がある。

大規模企業型の場合には、これまでキャリア事業者が果たしていた課金と費用徴収の役割をユーザ側で受け持つことになる。このため、課金と費用徴収のための仕組みの構築、あるいはこれらを代行する組織の整備が必要である。今後、工場内において IoT システムのデバイス数が激増することを想定すると、課金と費用徴収のための仕組みは高度にシステム化される必要があると考えられる。さらに、このようなシステム化に際しては、現行制度の改変も必要になると考えられる。

#### 6.2.5.5 通信インフラの機能性や拡張性についての課題

MR システムの要求スペックを満足するための通信インフラの機能性や拡張性について、課題は以下の通り。

- ・ アップリンク、ダウンリンクの比率変更
- ・ 複数周波数帯の利用
- ・ 圧縮技術の検証

課題実証及び技術実証の結果及び考察より、課題解決システムの実装に鑑み、今後実現する必要のある事業モデルの機能要件は、概ね以下が挙げられる。

- ・ 作業に支障が出ない程度の遅延時間内で映像表示すること。
- ・ 作業に支障が出ない程度の解像度で映像表示すること。
- ・ 無給電で必要時間使用可能なこと。

これらのうち、1つ目と2つ目の要件を実現するためには、ローカル5Gが具備すべき特徴である大容量・低遅延を最大限に活用する必要がある。このため、通信インフラの機能性や拡張性についての課題として上記を挙げている。すなわち、ダウンリンク重視の現行仕様を改め、工場利用を前提としてアップリンクも重視するよう仕様変更するとともに、複数周波数帯の利用と圧縮技術を活用することにより、大容量・低遅延のための機能性や拡張性を向上する必要がある。

### 6.2.5.6 規模や製造物等の異なる製造事業者での活用可能性について

実証環境は生産設備の工場であるため、製品の製造工場における活用可能性について検討した。

<b>KP</b> (キーパートナー)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 伝送システム提供事業者</li> <li>• WAN回線事業者</li> </ul>	<b>KA</b> (キーアクティビティ)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• インフラ整備</li> <li>• 運用、保守</li> <li>• 免許取得・維持</li> </ul>	<b>VP</b> (提供価値)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 作業精度の向上</li> <li>• 準備時間の短縮</li> <li>• 工数の低下</li> <li>• 手戻り削減</li> <li>• 安全性の確認(高所作業等)</li> <li>• ネットワーク工事における安全性の確認(高所作業等)</li> <li>• 健康の確認(連続作業の負荷確認)</li> <li>• 対象範囲の拡大</li> </ul>	<b>CR</b>	<b>CS</b> (顧客セグメント)  トヨタ自動車 (製品製造工場) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 現場責任者</li> <li>• 作業員</li> <li>• 設計・開発者</li> <li>• 工場管理者</li> <li>• 本社管理部門</li> <li>• 調達部門</li> <li>• ネットワーク維持管理者</li> </ul>
	<b>KR</b> (キーリソース)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 通信インフラ</li> <li>• 通信デバイス</li> <li>• WAN回線</li> <li>• LAN</li> </ul>		<b>CH</b>	
<b>CS</b> (コスト構造)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 導入コスト(インフラ構築費用、デバイス導入費用)</li> <li>• ランニングコスト(保守費、電波利用料、免許取得・維持費、等)</li> </ul>		<b>RS</b> (収益の流れ)  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 工数削減</li> <li>• 逸失利益の獲得</li> <li>• 安全管理に係るコストの低減</li> <li>• 出張費削減</li> <li>• 機会損失の削減</li> </ul>		

図 6-6 異なる製造事業者での分析結果

分析は、前述した事業モデルの検討結果の場合と同様に、有線で利用していたMRシステムを改変することなくローカル5Gで無線接続して、バックパック方式により利用することを前提とした。

検討の結果、製品製造工場での現地確認が必要であるものの、当該システムの導入がもたらす提供価値は、製品製造工場におけるものと生産設備製造工場におけるものとに顕著な差異は見られないと考えられる。このため、課題解決システムの製品製造工場への活用は可能であると判断した。一方で、製品製造工場は、生産設備製造工場(貞宝工場)と比較すると、天井が低い、設備が密集している、閉鎖空間や遮蔽物が多い、等の違いがある。このため、製品製造工場において生産設備製造工場と同程度の提供価値を実現するためには、課題解決システムを稼働させるための環境調整(見通し確保のための基地局設置位置の調整、等)がより難しくなると考えられる。

## 6.2.6 事業モデル

本実証における事業モデルは、完全無線化によるMRシステムの稼働を目指しているが、現時点では技術的な目途が立っていないため、バックパック方式を前提としている。事業モデルの概要は以下の通り。

① 事業内容（対象エリア、活動内容、運用・管理等に係る仕組みや方法等）：

対象エリア： 愛知県豊田市  
活動内容： 自社工場への導入  
運用・管理等： 今後検討

運用・管理等については、現時点においては、キヤノン（MRシステムを担当）とネットワークシステムズ（ローカル5Gシステムを担当）の支援の下、トヨタシステムズがその役割を担うことを想定している。従来から、工場内のネットワーク機器や設備の運用・管理等はトヨタシステムズが担っており、その仕組みや方法等についてはこれまでと同様である。

② 対象となるユーザ（組織・機関、属性等）：

組織・機関： 自社工場における就労要員（子会社、関連会社等の要員を含む）  
属性等： 設備・治具・製品の設計・開発者、現場責任者、作業員

③ 対象ソリューションやサービス、提供価値（類似事業等との差別化）：

バックパック方式を前提としたMR技術を活用した遠隔作業支援ソリューションを対象とする。主な提供価値は、以下の通り。

- ・ 工数削減
- ・ 逸失利益の獲得（熟練技術者の活用範囲の拡大による効果を含む）
- ・ 安全管理に係るコストの低減（労働環境の改善による効果を含む）
- ・ 作業品質の向上

④ 運営体制と役割分担（免許人、機器管理、契約関係、費用分担等）：

免許人： トヨタ自動車株式会社  
機器管理： 今後検討  
契約関係： 自社が各関係会社と契約を締結する  
費用分担： 自社が一括して負担する

⑤ マネタイズの方法：

自社の基準に照らした費用対効果の創出（工場単位収支の黒字化）を原則とする。

⑥ 経済性、運用・管理等に係る仕組みや方法（他領域への活用等）：

MR技術を活用した遠隔作業支援ソリューションの導入は、従来から実施している工場の生産性向上施策の一環である。このため、経済性、運用・管理等に係る仕組みや方法

は、これまでに工場が導入してきたソリューションやサービスと同様である。

⑦ 実証地域やユーザ等の固有な要因：

自社工場を対象とした事業モデルであること（自社の導入条件が適用されること）が主な固有の要因である。本実証は、ローカル5Gを活用したサービスを利用者と提供者の立場で検証するものであり、サービス提供者と利用者（ユーザ）が同一の組織（企業）であることを特徴としている。

⑧ 実証環境との関係：

異なる製造物（生産設備→製品）の工場への活用可能性を検討する。実証環境である貞宝工場は生産設備を生産する工場であったが、今後の展開においては、製品（自動車の部品あるいは自動車そのもの）を生産する工場を対象とすることを検討する。

## 6.2.7 実装計画

### 6.2.7.1 費用計画

今回の課題解決システム単独では「課題の解決」は満たせるが、「費用対効果」が見込めないため、費用対効果が見込める状態になった時点で改めて計画を検討する。

### 6.2.7.2 展開計画

課題解決システムを持続可能なものとして展開するための道筋は、大別すると以下の2つの段階に分けられる。

段階1：価値をもたらす機能を課題解決システムが実現する段階

段階2：費用対効果を含む持続可能な要件を課題解決システムが達成する段階

段階1は、事業モデルの構築段階である。現時点では、価値をもたらす機能の実現可能性を確認することはできたが、完全無線化による機能の実現には至っていない。

段階2は、事業モデルを自社内外に展開する段階である。段階2は、費用対効果を向上するための施策に着目すると、さらに以下の段階に分けられる。

段階2-1：基地局1基当たりの費用対効果を向上する段階

段階2-2：単一工場において費用対効果を向上する段階

段階2-3：複数工場において費用対効果を向上する段階

段階2-4：地域展開において費用対効果を向上する段階

段階2-1は、基地局の稼働率を上げることにより、基地局1基当たりの費用対効果を向上する段階である。前述の考察の通り、課題解決システムを持続可能なものとするためには、MRシステム以外のIoTシステムをローカル5G接続して効果を創出することにより、費用対効果の向上が期待できる。段階2-1について、基地局単位の費用対効果向上施策の概念図を以下に示す。



図 6-7 基地局単位の費用対効果向上施策

費用対効果の向上に向けては、複数の IoT システムデバイス（設備ロボット、工具、AGV、監視カメラ）等の無線接続検証と、その結果を踏まえたローカル 5 G の性能評価が必要となる。このため、段階 2-1 においては、以下の検討を同時並行で行う必要がある。

- ・ 今後リリースされる多接続、超低遅延などの製品機能を総合的に評価し、複数の MR システムを工場内で安定稼働させるための製品構成を検討する。
- ・ 工場内において価値を創出し得る、MR システム以外のローカル 5 G 接続製品を検討する。

これらの検討は、すなわち、大規模企業型の工場として導入するための最適な機器構成の検討が必要であることを意味している。このため、ローカル 5 G を工場の無線接続インフラとしてとらえる必要が出てくる。

段階 2-2、段階 2-3、段階 2-4 は、工場を単位として費用対効果を向上する段階である。展開段階の概念図と実施項目を以下に示す。

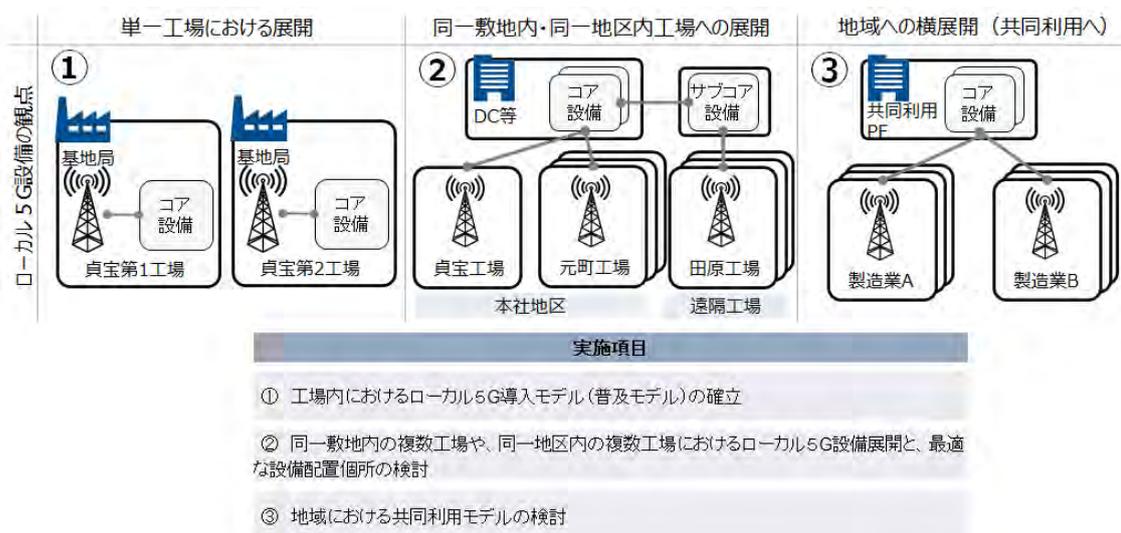


図 6-8 工場単位の費用対効果向上施策

図に示す通り、単一工場における展開から複数工場、地域へ横展開により、共通設備を集約することによる費用対効果の向上が期待できる。ここで、段階 2-2 は、後述する普及モデルの確立段階である。また、段階 2-4 は、大規模企業型においては、企業グループレベルの共同利用段階として位置付けることができる。

次に、課題解決システムの導入・展開スケジュールを以下に示す。

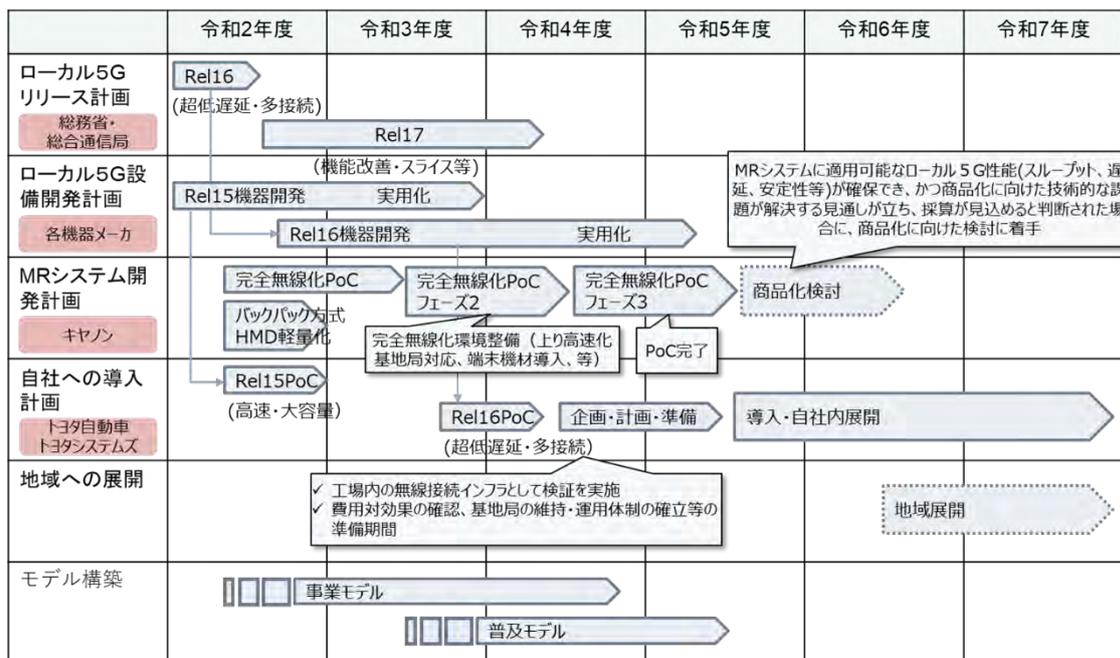


図 6-9 導入・展開スケジュール

スケジュールには、自社の導入計画に加えて、ローカル 5G 設備開発計画のスケジュールと MR システム開発計画のスケジュールを併記している。また、最下段に示したモデル構築のスケジュールは、前述した事業モデルの構築期間と普及モデルの構築期間をそれぞれ示している。事業モデルの構築完了は令和 4 年度後半を目指しており、普及モデルの構築完了は令和 5 年度半ばを目指している。

### 6.3 横展開に資する普及モデルに関する検討

ローカル5G等を活用した課題解決システムについて、同様の課題を抱える他地域・他分野における実装や検討に資するような標準的な普及モデルについて検討を行った。検討は、課題実証全体調整事業者の指示等を踏まえて行った。

#### 6.3.1 標準的な普及モデルの検討

##### 6.3.1.1 概要

本実証における普及モデルは、完全無線化によるMRシステムの稼働による事業モデルをベースとして、同様の課題を抱える企業各社への展開に資するモデルである。

標準的な普及モデルの概要を以下に示す。

- ① 想定される具体的な主体及びターゲット（地域・市場・ユーザ等）：  
地域： 各社の工場が立地する地域  
市場： 各社  
ユーザ等： 工場の作業員等
- ② 対象となるシステム：  
普及に資するソリューションは、「MR技術を活用した遠隔作業支援ソリューション」を対象としている。課題解決システムの実証およびローカル5Gの性能評価の技術実証の結果からは、バックパック方式による事業モデル確立のための基礎的要件の確認のみに止まり、普及モデルとなる対象システムの確立には至っていないが、ここでは、完全無線化が実現した場合を想定した「MR技術を活用した遠隔作業支援ソリューション」を対象としている。
- ③ 詳細の前提条件（実証地域やユーザ等の固有な要因や実証環境との関係等）：  
大規模企業型の工場であることを前提とする。
- ④ ターゲット企業等の抱えるニーズや課題：  
自社と同様のニーズや課題を持つ企業等をターゲットとしている。すなわち、人手不足や技術向上の環境変化への対応を迫られる中で、工場単位の収支向上を課題としている各社を対象としている。

広く一般的な横展開が今後想定される中で、ローカル5Gの横展開の一例として、自社グループにおける検討を行った。大規模企業型の検討としては、他の大企業への横展開とグループ企業への横展開の2種類が想定されるが、大企業の典型的なモデルケースはグループ内展開であると考えられるため、本実証においては横展開先としてトヨタグループ各社を選定している。しかしながら、本実証において得られた知見は、他の大企業への横展開の検討、あるいは大企業以外の地域の中小工場への展開に際しても、有用であると考えられる。すなわち、本実証において検討する普及モデルは、以下の地域課題の解決に対応し得るもの

と考えられる。

- ・ 製造現場の人材不足
- ・ 熟練技術の承継
- ・ 労働環境の改善等

#### 6.3.1.2 普及モデルの詳細

##### ① 機能要件・非機能要件：

課題解決システムの機能要件は以下の通り。

- ・ MR システムが有する以下の機能を実無線接続により遠隔で実現する。
  - HMD に製品および生産設備の CAD データを表示する。
  - HMD に現実映像と CAD データを重ねて表示する。
  - 現実映像と CAD データで奥行を識別して表示する。
  - HMD に表示される画像を遠隔地と共有する。
- ・ 作業に支障が出ない程度の遅延時間内で映像表示する。
- ・ 作業に支障が出ない程度の解像度で映像表示する。
- ・ 無給電で必要時間使用可能なこと。

課題解決システムの非機能要件は以下の通り。

- ・ 障害時において速やかに対応する。
- ・ 電波利用に関する種々の支援を提供する。
- ・ 免許やライセンス等、更新が伴う手続きに関する支援を提供する。
- ・ バックアップ等、障害対策や事業継続対策を講じる。
- ・ 機密情報の漏えい防止等、各種のセキュリティ対策を講じる。
- ・ 工場における使用に耐え得る施策を講じる。

##### ② ネットワークシステム構成：

課題解決システムを稼働させるためのネットワークシステム構成については、当初想定と前提が異なることが判明したため、今後検討が必要である。

##### ③ 業務・処理フロー：

横展開（普及モデルを拡販する）ために対象となる業務・処理フローは以下の通り。

- ・ 設計業務  
基地局設置箇所の特定制や各種のシステム・パラメータの検討等、工場の導入箇所においてシステムを稼働させるために必要となる設計を行う業務。
- ・ 構築業務

設計に基づき、基地局および各種機器類の設置、各種パラメータの投入、稼働試験の実施、等を行う業務。

- ・ 運用業務  
ユーザであるグループ各社の作業担当者が当該システムを使用する際に、これを支援する業務。(ライセンス管理等を含む)
- ・ 保守業務  
当該システムにおいて不具合が発生した際に、復旧を支援する業務。

④ 横展開におけるノウハウ：

横展開において必要となるノウハウは以下の通り。

- ・ 免許取得、従事者に関するもの  
免許申請、無線従事者の育成に必要な知見及び知識等。
- ・ 設計に関するもの  
基地局設置個所の特定、各種システム・パラメータの設計等、工場現場におけるユーザの要求に応じて、当該システムを稼働させるために必要となる技術的ノウハウ。工場内柱への基地局設置工法。
- ・ 運用に関するもの  
当該システムを安定稼働させるために必要となるノウハウ等。工場において定期・不定期の停電が発生することに伴う、停電対策の知見等。
- ・ 障害対応に関するもの  
当該システムに発生する各種障害を復旧させるために必要となる知見及び知識等。

⑤ 実装方法・手順

実装方法・手順は以下の通り。

- ・ 設計・構築  
当該システムを設計し、各種の物品やサービス、ライセンス等の調達を行い、当該システムを構築する。
- ・ 教育・訓練  
当該システムを利用する作業担当者に対して必要となる教育・訓練を行う。
- ・ 導入試験  
当該システムの利用開始に際して、機能試験および運用試験を行う。

### 6.3.1.3 体制・事業スキームの検討

ビジネスモデルキャンパスの手法を用いて、体制・事業スキームを検討した。検討結果は、下記の通り。

<b>KP</b> (キーパートナー) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 伝送システム提供事業者</li> <li>・ WAN事業者</li> <li>・ MRシステム提供事業者</li> </ul>	<b>KA</b> (キーアクティビティ) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ インフラ整備</li> <li>・ デバイス開発</li> <li>・ 運用、保守</li> </ul>	<b>VP</b> (提供価値) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 作業精度の向上</li> <li>・ 準備時間の短縮</li> <li>・ 費用削減</li> <li>・ 操業データの定量化</li> <li>・ 工数の低下</li> <li>・ 手戻り削減</li> <li>・ 安全性の確認 (高所作業等)</li> <li>・ 健康の確認 (エルゴ、連続作業の負荷確認)</li> </ul>	<b>CR</b> (顧客との関係) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ グループ傘下</li> </ul>	<b>CS</b> (顧客セグメント) グループ企業の工場 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 現場責任者</li> <li>・ 作業員</li> <li>・ 設計・開発者</li> <li>・ 工場管理者</li> <li>・ 本社管理部門</li> <li>・ 調達部門</li> <li>・ ネットワーク維持管理者</li> </ul>
	<b>KR</b> (キーリソース) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 通信インフラ</li> <li>・ 通信デバイス</li> <li>・ MRデバイス</li> <li>・ 3Dデータ</li> </ul>		<b>CH</b> (チャンネル) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ グループ内コミュニケーション</li> <li>・ グループ内提案</li> </ul>	
<b>CS</b> (コスト構造) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 導入コスト (インフラ構築費用、デバイス導入費用)</li> <li>・ ランニングコスト (保守費、電波利用料、免許取得・維持費、等)</li> </ul>		<b>RS</b> (収益の流れ) <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工数削減</li> <li>・ 逸失利益の獲得</li> <li>・ 安全管理に係るコストの低減</li> </ul>		

図 6-10 横展開についての検討結果

自社グループにおける検討を前提としているため、CS (顧客セグメント) はグループ企業の工場担当者を対象としている。また、CR (顧客との関係) はグループ傘下にあること、CH (チャンネル) はグループ傘下にある会社同士の経路を示している。これ以外の要素については、事業モデルで検討した内容と同様である。

体制・事業スキームは、CS (顧客セグメント) 側と KP (キーパートナー) 側に大別されるが、CS (顧客セグメント) 側については、特に課題解決システムの展開に特化することではなく、これまでのものを踏襲可能であると想定した。このことは、従来におけるシステム拡販の手法が適用できることを意味している。一方で、KP (キーパートナー) 側については、課題解決システムの展開において大きな変更が必要になると想定される。すなわち、課題解決システムが MR システムとローカル 5G システムを組み合わせたシステムであり、インフラ整備とデバイス開発、これらに伴う運用および保守、さらにはローカル 5G システムを維持するための免許取得等の業務にも対応する必要が出てくるため、体制・事業スキームはこれらに合わせて変更する必要が出てくる。

### 6.3.1.4 導入効果

主たる導入効果は以下の通り。

- ・ 当該システムに導入による工数削減効果

- ・ 設備変更時における工場ライン停止に伴い発生する、逸失利益の低減
- ・ 安全管理に係るコストの低減
- ・ 作業品質の向上

### 6.3.1.5 課題と対応策

普及モデルを展開するにあたっての課題と対応策を以下に示す。

#### ① 免許申請

総合通信局の助言・協力なしには実施は困難と思われる。ローカル 5G 免許申請支援マニュアルを参考に対応したが、キャリア事業者のような専門知識を有していない利用者が対応するには難易度が高いと思われる。使用するローカル 5G の基地局・端末に関する無線局事項書、工事設計書に記載する機器諸元の入手は、メーカーと個別調整を実施したが、こちらも同様に難易度が高い。また、運用局への移行が必要であることも課題である。

また、利用者からブラックボックスに見えてしまっている現状がある。このため、無線局事項書、工事設計書に係るメーカー機器諸元などのシステム化集約による簡便な方法を実現（利用者とメーカーの役割分担）するとともに、申請状況の見える化を推進すべきである。また、ローカル 5G のカテゴリ分け（使用エリア、屋内/屋外、出力等）して利用しやすくする、免許人の役割を含めて運用ガイドを整備する等も有効であると考えられる。

#### ② 登録点検

経験のある登録点検事業者が数少ない、登録点検およびローカル 5G について相談できる機関が少ない、等の課題がある。また、登録点検ノウハウのある技術者が少なく、特定の人に業務が集中している。さらに、無変調発振、CW 発振ができるのか、等のポイントとなる機能確認や、GPS など必須のインフラ、機能について事前確認が必要となるが、試験施設がない（56GHz まで許容している電波暗室、GPS 引き込み）ため個別に対応せざるを得ない状況にある。測定機器が特殊となり追加オプションが必要になる、あるいは測定機器も高価で高額な費用が必要になるという課題もある。

対策としては、技術者育成のために、登録点検事業者のローカル 5G 対応のための講習会開催などを実施することが挙げられる。また、登録点検が実施できる施設情報を共有するとともに、点検項目を計測するための手法の整理を行うことが考えられる。技適取得にかかるコストの補助制度が望まれる。

#### ③ リードタイム

免許申請、周波数調整など導入におけるリードタイムが長い。新規導入時だけでなく、導入後の工場レイアウト変更時に基地局増設・移設、向き、高さ、出力等の調整に時間がかかる。（利用したいときにすぐに利用できない）

対策としては、免許申請、周波数調整業務を簡略化、及び敷地内の移設や一定の範囲でのチューニングを許可するようルールを見直すことでリードタイムを短縮。

#### ④ 保守スキーム

保守メニューの未整備、機器交換時の再検査などのため、機器故障時に業務影響を与えるような長時間停止のリスクがある。

対策としては、機器提供事業者による安価な保守メニューの拡充、及び機器交換時における検査の省略。(事前に許可済の型式であれば検査を不要にする等)

#### ⑤ 干渉調整

利用者が各事業者と直接調整を実施する必要があるが、事業者によって内容に差異がある。メールのやり取りで完了した事業者もいれば、打ち合わせを実施して懸念事項を確認して対応する事業者の場合もあった。このような事業者とのやり取りは、利用者にとっての負担になると思われる。

対策としては、干渉調整の対応事例を含む、干渉調整ガイドラインなどを整備することが挙げられる。今後、ローカル 5G 事業者間の干渉調整も必要と想定され、調整の業務量増大が懸念されるため、地域事業者マップの掲載等、システム化など対策も必要と考えられる。

#### ⑥ 免許取得のコスト

免許申請に係る収入印紙代、電波利用料、免許申請支援費用・代行費用が予備免許、本免許でそれぞれ必要となるが、支援費用や代行費用が業者によってまちまちであり、コストの内訳も現状では不明瞭であるという課題がある。

対策としては、適正な見積項目の整備、明細による積算根拠の明示、等が望まれる。センサーデバイスなどの接続を今後想定すると、端末の電波利用料については、台数ではない基準(例えば、空間や周波数利用を対象とした課金体系)があっても良いと思われる。

#### ⑦ コスト

本実証の課題解決システムにおいては各社でも費用対効果が見込めないことが想定される。対策としては、複数のシステムをローカル 5G に接続する。複数基地局を設置することにより基地局当たりの共通設備コストの低減を図る。

加えて、コア設備のクラウドメニュー提供とマルチテナント化によりコア設備提供価格の低減がある。また、免許申請、周波数調整などを簡略化するよう法整備し、導入の一時コストを下げる。また、電波出力向上で基地局 1 基のカバー範囲を拡大することで、基地局数を削減し、コストを削減することが考えられる。

### 6.3.1.6 課題解決システムに係る仕様・設計書等

課題解決システムについて、バックパック方式の仕様・設計書等は以下の通り。詳細については「3. 実証環境」を参照のこと。

- ・ バックパック方式の構成要素(詳細は、「3.2.7.2 バックパック方式」の「表 3-16 バ

ックパック方式構成要素」を参照)

- ・ ローカル 5G システムの構成要素 (詳細は、「3.1.1 使用機器」の「表 3-1 使用機器一覧」および「別紙：MIC-L5G-GJ-OP-01-01～04-製品カタログ・諸元」を参照)

なお、現時点においては事業モデル確立の途上であるため、今後、課題解決システムの仕様・設計書等に変更になることに留意いただきたい。

### 6.3.2 想定する事業化、販路開拓、マネタイズ手法等の展開方策

現時点では事業モデルおよび普及モデルの確立に至っていないため、横展開について具体的な内容を記述することは困難である。「課題の解決」と、「横展開の対象主体にとっての費用対効果」の2点が明確に見込める場合に具体的な横展開方策を検討する。現時点での想定は以下の通り。

- ① 横展開の主体（単独・複数）  
横展開の対象主体：各社（自社利用）
- ② サービスや事業展開等を通じた普及展開にむけた取組の考え方・ゴール  
取組の考え方：事業モデルの場合と同様（工場単位収支の黒字化）  
ゴール：横展開の主体となる会社における事業化計画立案の実現
- ③ 体制（主体・パートナー等）、事業スキーム：  
実施主体：各種課題に対する対応の結果により適切な実施主体を検討する  
パートナー：各種課題に対する対応の結果により適切なパートナーを選定する  
事業スキーム：通常システム提案と同様
- ④ 事業展開のステップ・取り組み：  
事業展開のステップは、以下の通り。
  1. 候補会社の選定
  2. 事業化提案の打診
  3. 事業化計画の提案
  4. 事業化計画の詳細化
  5. 事業展開
  6. 振返り
  7. 改善の提案
  8. 改善活動
- ⑤ 展開にあたっての課題及び対応策：  
展開にあたっては、工場における費用対効果について十分な根拠を提示する必要がある。このため、各社における費用対効果の検証結果に基づき提案内容を検討する。

### 6.3.3 当該計画の具体化への取り組み

現時点のように大きな課題がある状態では、横展開について具体的な内容を記述することは困難である。「課題の解決」と、「横展開の対象主体にとっての費用対効果」の2点が明確に見込める場合に具体的な横展開方策を検討する。

### 6.3.4 推進対策の検討（普及のための提言）

考察において述べたように、大規模企業型の工場での経済性を確保するためには、複数の MR システムを工場内で稼働させつつ、同時に、その他の IoT デバイスをローカル 5 G に接続して効果を創出し、費用対効果を向上させる必要がある。これは、基地局が固定であることによるものであり、基地局の移動が可能であれば、ローカル 5 G と MR システムを一体のシステムとして最適化することにより、費用対効果の創出が容易になると考えられる。具体的には、見通しの確保、電波反射、各種のノイズの影響等を加味したうえで、MR システム利用に最適な設置場所に基地局を都度配置することが可能になれば、課題解決システムの稼働率も高まり、費用対効果委の向上が実現できると考えられる。また、電波特性に応じて、固定基地局と移動基地局を併用することにより、より効率的に課題解決システムを運用することも考えられる。このため、各種の規制等を緩和し、基地局の移設の自由度を上げていただきたい。

#### 提言 1：

各種の規制等を緩和し、工場内における基地局の移設の自由度を上げることが望まれる。

法令順守等のための追加コスト（干渉調整への対応、電波利用料の徴収）が発生するため、負荷軽減の措置が求められる。大企業における工場の場合を対象とした場合には、拠点数も多く、工場内外の環境も多岐に渡る。このため、工場の立地環境も含め、工場の状況に精通した事業者による干渉調整等の実施が必要となる。このような作業を効率よく実施するためには、大企業の工場に特化した干渉調整等のガイドラインを作成することが望まれる。

#### 提言 2：

国主導で干渉調整等のガイドラインを作成することが望まれる。ガイドラインには、調整に必要な項目が整理されており、必要な情報がメーカーからスムーズに提供されること（義務として）が望まれる。

工場内に設置する端末数が多数になることが想定され、このことに伴う事務手続きの業務量が増える可能性がある。支払いをユーザが自ら申告して支払っていかねばならない現状のままでは、この事務手続きを行うための工数負担が無視できなくなる、等の課題がある。

#### 提言 3：

電波利用料の支払いスキームを整備することが望まれる。

干渉調整、免許申請、登録点検、コスト等について、知見、知識、情報、ノウハウが分散しており、活用しにくいという課題がある。前述したように、工場の立地環境も含め、工場の状況に精通した事業者による干渉調整等の実施組織が必要となる。このような組織は、必ずしも無線インフラの整備に特化した組織ではないため、これに対応する機関の設置が望まれる。

提言 4 :

ローカル 5G の利用・運用者が、必要な時に相談できる機関を設置することが望まれる。

干渉調整、免許申請準備、登録点検等について、手続きが煩雑で分かりにくく、時間と工数がかかるという課題がある。例えば、工場内におけるレイアウト変更は、概ねその起案から実施まで 2 週間程度で完了させる必要がある。このため、各種の手続きに時間を要すると、工場の機動的な運用に支障を来す恐れがあり、課題解決システムの稼働を阻害する要因になる。また、工場においては定期・不定期の停電が発生するため、端末の電源 ON/OFF 操作を通常の維持管理業務の一環として実施できるような制度が望まれる。

提言 5 :

手続きをより簡便にすることが望まれる。

- ・ 製品利用の場合あらかじめ製品仕様を登録しておく等、システム化により簡便にする。
- ・ 工場利用を想定して登録局の扱いとする。
- ・ 端末側の手続きをより簡素化する。
- ・ 端末の電源 ON/OFF 操作は無線従事者不要とする。

干渉調整、免許申請、登録点検等について、コストおよびその算出根拠が不明瞭であるという課題がある。

提言 6 :

情報を可視化して手続きを明確にすることが望まれる。

- ・ 調整に必要な項目が整理されている。
- ・ 必要な情報がメーカーから遅滞なく提供されること。（義務として）
- ・ メーカー含め、登録点検の項目および計測手法を共通化すること。
- ・ 必要なコストおよびその内訳が可視化されていること。

以上までの提言は、ローカル 5G の維持管理に係る工数を削減することによって、より利用しやすい環境の実現を目指すためのものである。今後ローカル 5G が普及、展開していく上で、周波数共用のシステムということが、大きな技術的課題となってくると考えられる。都市部のビルなどで、多数の事業者がそれぞれ、ローカル 5G を構築運用する、といった場合、多数のローカル 5G の基地局がそれぞれ干渉源とならないように、運用していくことが求められるが、数が多くなってくると、人手で対応していける量を超えてしまう可能性も想定される。このため、周波数共用をより効率的に運用していくための仕組みや枠組みを整備していく必要があると考える。

## 6.4 共同利用型プラットフォームに関する検討

### 6.4.1 工場におけるシステムの在り方

本実証の対象ソリューションは、MR 技術を活用した遠隔作業支援ソリューションであり、ローカル5GシステムとMRシステムを組み合わせたソリューションである。技術実証および課題実証の結果から、工場内において、ローカル5G基地局の電波到達範囲内においてMRシステムを有効に機能させるためには、ローカル5Gの基地局とMRシステムとを1対1に対応付けざるを得ない状況である。

一方で、前述したように、ローカル5Gの基地局とMRシステムとを1対1に対応付けたシステム構成では、工場において採算性が確保できない。このため、ローカル5Gの基地局には複数のサービスが收容される必要があり、共同利用型プラットフォームは、ローカル5Gシステム、MRシステム及びその他の收容サービスを構成するシステムを包含する工場内サービスシステムとして位置付けられる。

工場内における課題解決システムの在り方について、以下に示す。

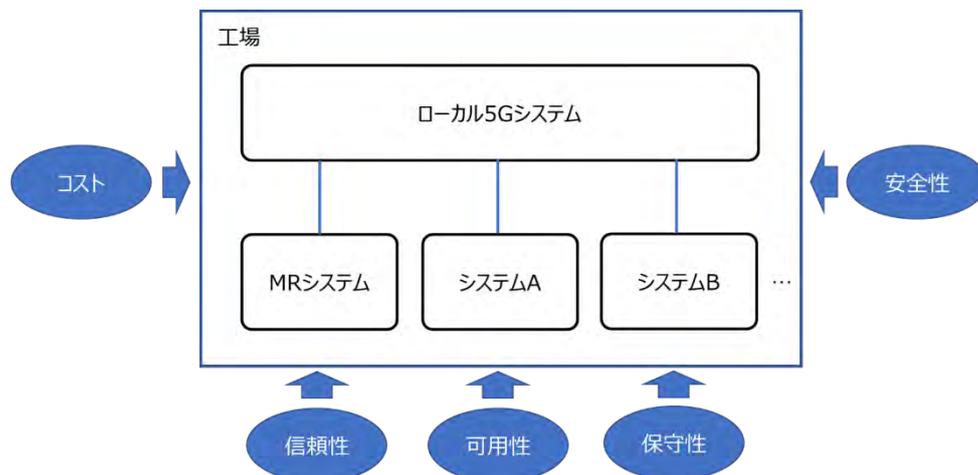


図 6-11 工場内におけるシステムの在り方

課題解決システムは、ローカル5GシステムとMRシステムから構成されるが、前述の理由からローカル5GシステムとMRシステムを一体のシステムとして位置付けることができない。このため、ローカル5Gシステムは工場内の無線インフラ設備に位置付けられ、コスト、信頼性、可用性、保守性、安全性といった、インフラとしての検討要素を考慮した設計および維持管理が必須となる。

このような状況下、MR技術を活用した事前検証効率化及び遠隔地支援ソリューションが工場内において費用対効果を確立するためには、MRシステム以外のサービス（以下、「その他收容システム」という）の收容が必要になる。すなわち、MR技術を活用した事前検証効率化及び遠隔地支援ソリューションの実現には、以下のサブシステムが必要となる。

1. ローカル5Gシステム
2. MRシステム

3. その他収容システム（設備ロボット、工具、AGV、監視カメラ、等）

このような構成下において、各サブシステムは以下の特徴を有することになる。

1. 各サブシステムは、個別に運用される。
2. 各サブシステムは別々に調達され、実装される。一方で、運用中の構成システムはそのまま運用されるため、個々の構成システムの調達が全体に及ぼす影響を最小化する必要がある。
3. 各サブシステムは、個々に進化的な開発が進む。

本実証システムが持つこのような特徴は、System of Systems と類似したものである。  
(参考文献：Architecting principles for systems - of - systems, Mark W. Maier)

このような特徴を有することから、ローカル5GシステムとMRシステムを密に連携させた場合には、種々の不具合が生じる可能性が高い。すなわち、ローカル5GシステムはMRシステムとその他収容システムが稼働することを前提とし、各々が独立して信頼性、可用性、保守性、安全性を確保する必要がある。

これらの状況下、共同利用型プラットフォームの全体概要は、下記となる。

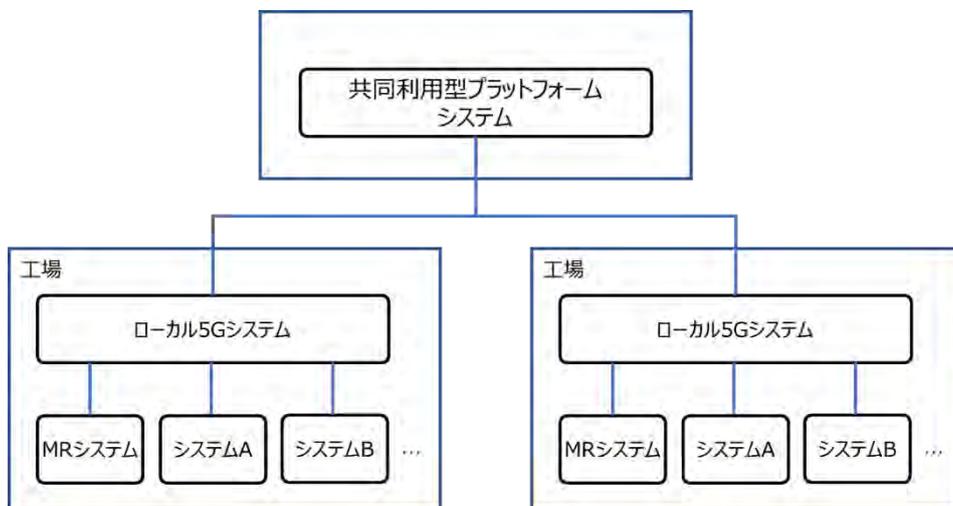


図 6-12 共同利用型プラットフォームの全体概要

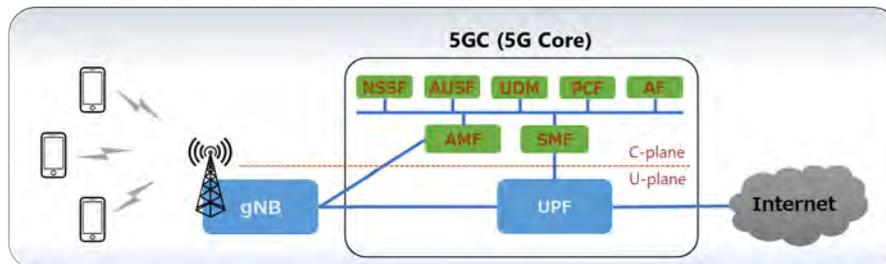
図に示すように、共同利用型プラットフォームシステムは、各工場インフラを束ねることにより、コスト、信頼性、可用性、保守性、安全性といった、インフラ要素を向上させるよう設計する必要がある。

## 6.4.2 共同利用型プラットフォームの在り方

### 6.4.2.1 ローカル5Gシステムの構成

ローカル5Gシステムの構成を下記に示す。

#### 5Gシステムの5G Core



#### 【主な特徴】

- オールIPベースのコアネットワーク
- **ノード間をAPIでつなぐ**  
**サービスベースアーキテクチャ**
- **C-plane / U-planeの明確な分離**
- ネットワークスライシングのサポート
- **NF間通信を高速なHTTP/2へ**
- U-planeノードとしてUPFのみとし低遅延を実現
- アクセス網に依存しないアーキテクチャ

EPCの主な構成要素		
gNB	next Generation NodeB	5G NR基地局
AMF	Access and Mobility management Function	端末のモビリティ管理
SMF	Session Management Function	端末のセッション管理（ネットワークスライス毎に配置）
UDM	Unified Data Management	加入者情報・端末情報の保持
UPF	User Plane Function	ユーザーパケットデータ伝送

図 6-13 ローカル5Gシステムの構成

ローカル5Gシステムの構成要素の内、5Gコアの構成要素は以下に大別される。xx

1. **C-plane**：制御プレーン。通信の確立などをするためにやり取りされる、一連の制御処理を指す。
2. **U-plane**：ユーザプレーン。ユーザデータの送受信処理を指す。gNBとUPFが主な構成要素である。

工場間連携を前提として機能集約を行う場合には、上記の内のC-planeを集約し、U-planeとgNBおよび基地局設備を工場に分散配置することが、費用対効果に寄与すると考えられる。このため、5GコアシステムのC-planeとU-planeを分離して、C-planeを集約することを検討した。これ以降、C-planeを構成するシステムを「5GCコア設備」、U-planeを構成するシステムを「5GCエッジ設備」と呼ぶ。5Gコアシステムの分離について、以下に示す。

xx <https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/technology/rd/tech/5g/5g06/02/index.html>

NTTドコモ 5Gコアネットワーク技術概要（令和3年3月25日（木）取得）

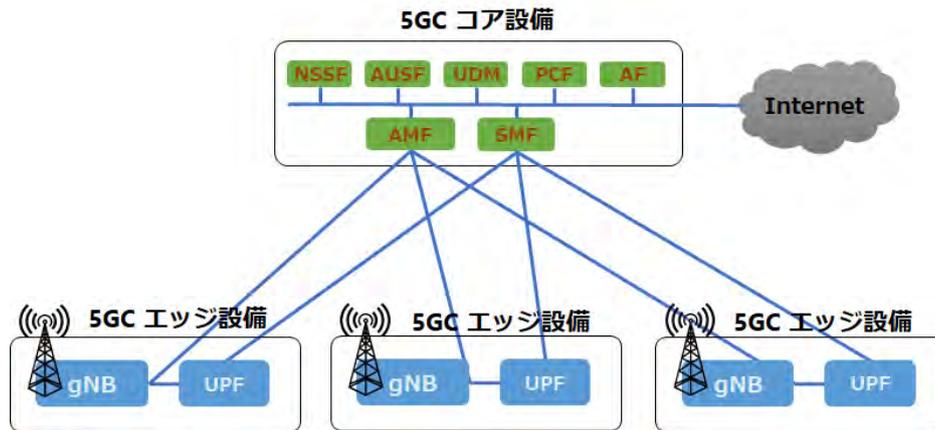


図 6-14 5G コアシステムの分離

5GC コア設備の主な機能は、以下の通りである。

- ・ 端末のモビリティを管理する機能
- ・ 端末のセッションを管理する機能
- ・ 加入者情報・端末情報を保持する機能

5GC エッジ設備の主な機能は、以下の通りである。

- ・ ユーザーパケットデータを伝送する機能
- ・ 5G NR 基地局機能
- ・ 電波を送受信する機能

上記を加味した場合、共同利用型プラットフォームの概要は、下記の通りとなる。

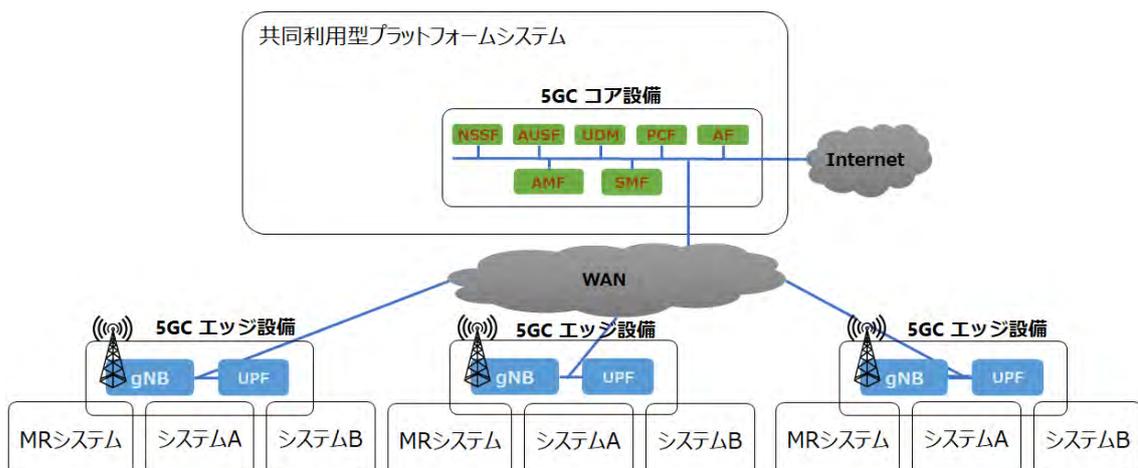


図 6-15 共同利用型プラットフォームシステムの概要

集約された 5GC コア設備の機能が、共同利用型プラットフォームにおいて実装され、各工場に設置される 5GC エッジ設備の機能と連携する。MR システムを含む IoT システム

は、5G 無線通信を介して 5GC エッジ設備の機能と連携し、各種のサービスを提供する。

#### 6.4.2.2 MR システムの構成

MR システムの構成を下記に示す。

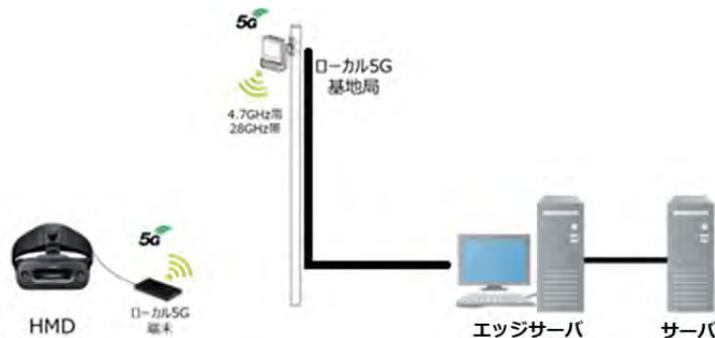


図 6-16 目指す姿のシステム構成

MR システムの構成要素は、HMD、エッジサーバ、サーバに大別される。これらの構成要素が具備すべき機能を以下に示す。

表 6-8 MR システムの構成要素が具備すべき機能

構成要素	機能
HMD	<ul style="list-style-type: none"> <li>カメラで撮影した映像やヘッドトラッキングで得られた頭部の位置や方向の特定、位置情報から HMD に映し出す映像の合成を担う機能。</li> <li>HMD に搭載されたカメラで撮影する撮像映像と、仮想世界の 3D CG 映像を、HMD の位置と姿勢に応じてリアルタイムで合成し、この MR 映像を HMD の表示パネルに投影する機能。</li> <li>HMD の位置や方向を把握する機能。</li> </ul>
エッジサーバ	<ul style="list-style-type: none"> <li>HMD の位置・姿勢（視線方向に対しての頭の傾き）情報をヘッドトラッキングから MREAL Platform を介して計測する機能。</li> <li>空間特徴点をもとに位置合わせを行う機能。</li> <li>HMD の位置・姿勢情報に基づき、HMD で撮影された映像とサーバが管理するシーン情報に基づいて、3D-CG 情報をリアルタイムにレンダリング・合成する機能。</li> <li>合成画像を HMD に出力する機能。</li> <li>スムーズな MR 映像表示を実現するために、3D-CG モデルデータをサーバよりダウンロードして保持する機能。</li> </ul>
サーバ	<ul style="list-style-type: none"> <li>CAD や CG ソフトからデータを読み込み、3D-CG モデルを構築する機能。</li> <li>表示制御やモデル 1 つ 1 つの位置制御などを管理する機能。</li> <li>シーン情報を管理する機能。</li> </ul>

これらの構成要素の内、サーバが具備すべき機能については、前述の共同利用型プラット

フォーム側において実装することが可能と考えられる。共同利用型プラットフォームを前提とした、課題解決システムの構成要素の配置について、以下に示す。尚、本図は実現イメージの1つであり、今後の開発過程において変更となる可能性があることに留意いただきたい。

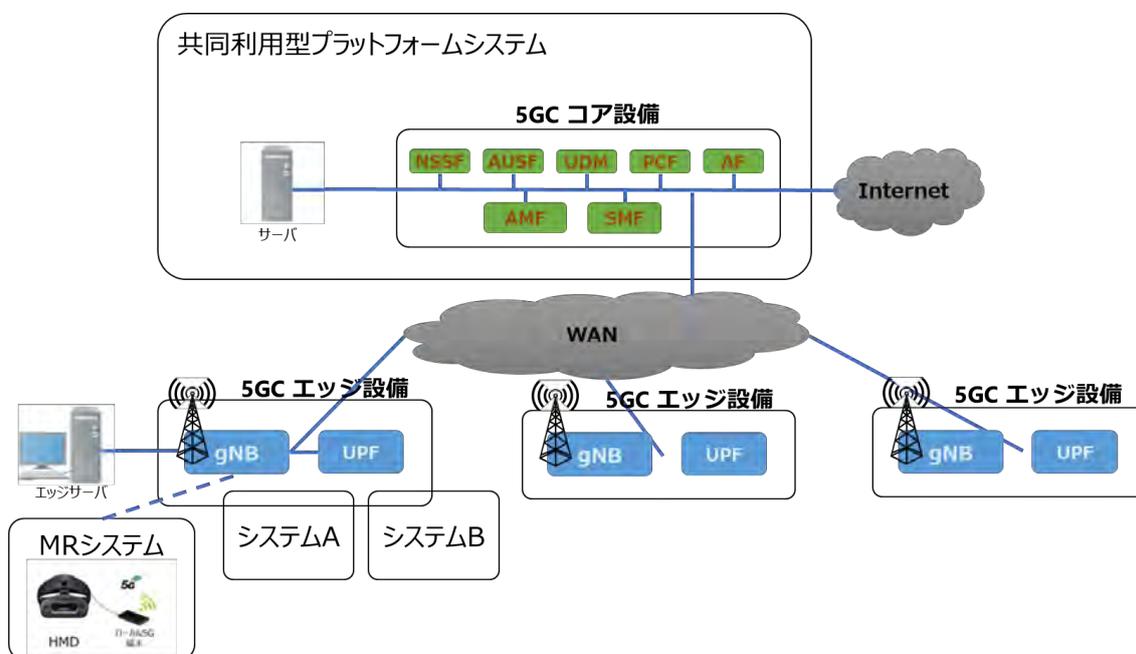


図 6-17 課題解決システムの構成要素の配置

課題解決システムの構成要素の内、サーバは共同利用型プラットフォーム内に配置され、5GC コア設備に接続される。このような配置は、異なる工場間において遠隔利用を行う場合の連絡情報の制御等において有利である。

エッジサーバは、工場内に配置され、5GC エッジ設備に接続される。エッジサーバで取り扱う情報は大容量かつ低遅延が強く要求されるため、共同利用型プラットフォーム内に配置される機能から分離して、工場内に設置されることが望ましい。

### 6.4.3 共同利用型プラットフォームに係る仕様案

本実証が「大規模企業型」であることから、共同利用型プラットフォームは、各地に点在する自社の工場群、あるいは自社を中核とするグループ会社等の工場群による共同利用が前提となる。この場合、取り扱う情報の機密性・完全性・可用性等の観点から、「大規模企業型」としての自社のポリシーに合致しない利用者による利用を制限する方向になることが想定される。

このため、本章における検討は、自社が構築・運営する共同利用型プラットフォームの在り方を検討したうえで、その他の組織体（例えば総務省が主導する組織等）が構築・運営する共同利用型プラットフォーム（あるいは共同利用センター）への要望等を取りまとめる。

共同利用型プラットフォームを含むローカル5Gシステムの概要を以下に示す。

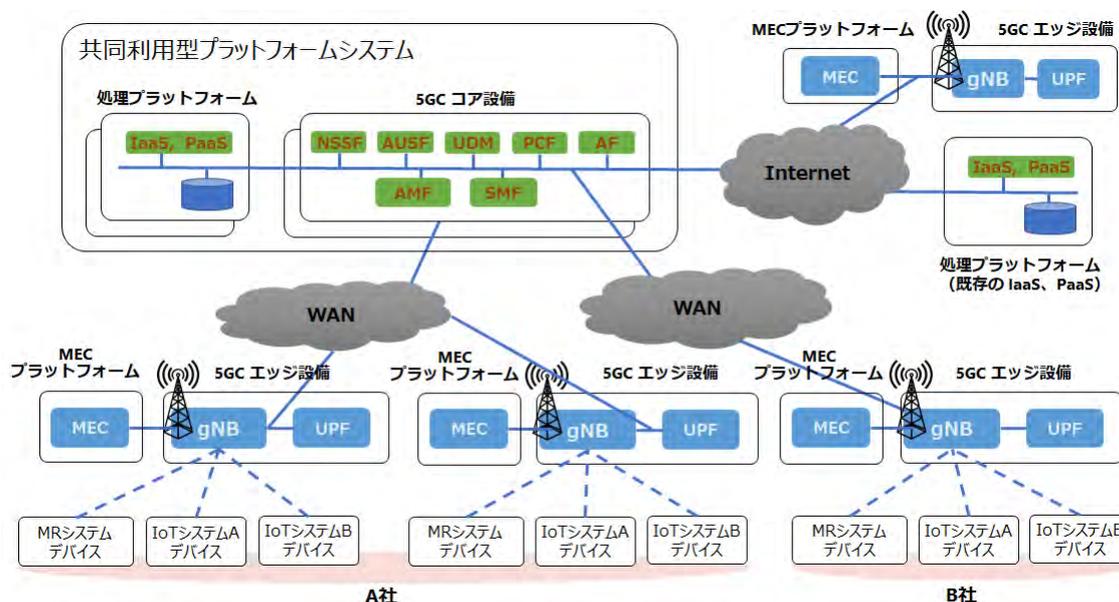


図 6-18 共同利用型プラットフォームを含むローカル5Gシステムの概要

前述したように、サーバは共同利用型プラットフォーム内に配置され、5GC コア設備に接続されることが望ましい。このため、MR システムにおけるサーバのような、IoT システムにおける主たるアプリケーションプログラムやデータ処理システム等を実装するための処理プラットフォームを共同利用型プラットフォーム内に配置する。サーバを構成するシステムは、処理プラットフォーム上に実装される。

エッジサーバは工場に配置し、5GC エッジシステムに接続する。IoT システムにおいて、エッジデバイスに近い設置個所において処理を実施する仕組みを MEC (Mobile Edge Computing) と呼ぶことから、以降、エッジサーバ等の MEC を実装する環境を MEC プラットフォームと呼ぶ。エッジサーバを構成するシステムは、MEC プラットフォーム上に構築される。サーバとエッジサーバ間の通信は、5GC コア設備と 5GC エッジ設備を介して行われ、エッジサーバと IoT デバイス間の通信は、5GC エッジ設備を介して行われる。

共同利用型プラットフォーム内の 5GC コア設備は、必要に応じて複数実装する場合がある。例えば、グループ会社の工場における利用を想定した場合には、機密性、完全性、可用性の観点から 5GC コア設備を会社ごとに分離する必要がある。また、共同利用型プラッ

トフォーム内の処理プラットフォームについても、同様の理由により、必要に応じて複数実装する場合がある。

共同利用型プラットフォームは、LAN/WAN/Internet を介して外部システムと接続する。このため、各ノード間を接続する機能に加えて、サイバーセキュリティに対応するための各種機能を実装する必要がある。

システムの構成要素について、以下に示す。

表 6-9 システムの構成要素

名称	主な構成要素	機能についての説明
処理プラットフォーム	アプリケーションプログラム (MR システムの場合はサーバ)	サービスを提供するためのアプリケーションプログラム及びデータ処理システムの実装環境
IP ネットワーク	工場内 LAN WAN インターネット (VPN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>工場内外の接続</li> <li>各ノード間を接続する機能</li> <li>セキュリティを確保するための機能</li> </ul>
5G コア設備	AMF SMF UDM など	<ul style="list-style-type: none"> <li>端末のモビリティを管理する機能</li> <li>端末のセッションを管理する機能</li> <li>スライスネットワーク (IP ネットワーク) と連携する機能</li> <li>ローカル 5G エッジ設備制御 (電波制御、5G 連携等)</li> <li>加入者情報および端末情報を保持する機能 (SIM の管理等)</li> </ul>
MEC プラットフォーム	低遅延処理が必須となるアプリケーションプログラム (MR システムの場合はエッジサーバ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MEC (Mobile Edge Computing) の実装環境</li> <li>処理プラットフォームと連携してサービスを提供する機能</li> </ul>
5G エッジ設備	gNB UPF 基地局	<ul style="list-style-type: none"> <li>無線を提供する基地局機能</li> <li>ユーザーパケットデータを伝送する機能</li> <li>ローカル 5G における電波の送受信機能</li> </ul>
デバイス	IoT デバイス (MR システムの場合は HMD)	IoT デバイスとこれに属する制御

出所) 当社にて作成

共同型プラットフォームを利用する場合における、課題解決システムの実装例を以下に示す。

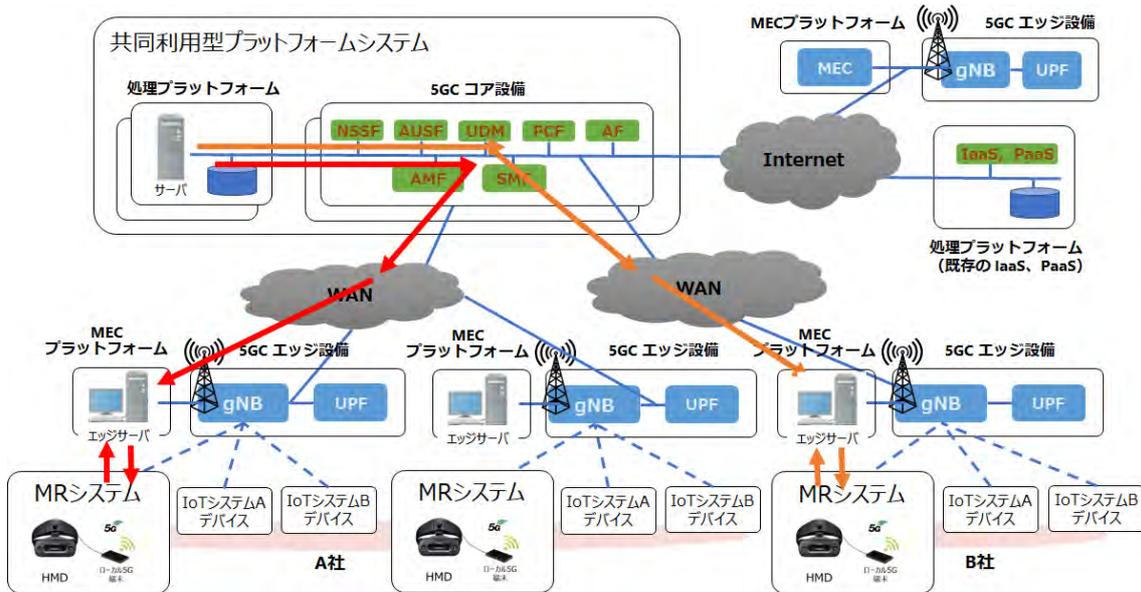


図 6-19 課題解決システムの実装例

これまでの検討結果より、共同利用型プラットフォームに係る構成要素と主な機能をまとめる。共同型プラットフォームの位置付けを以下に示す。

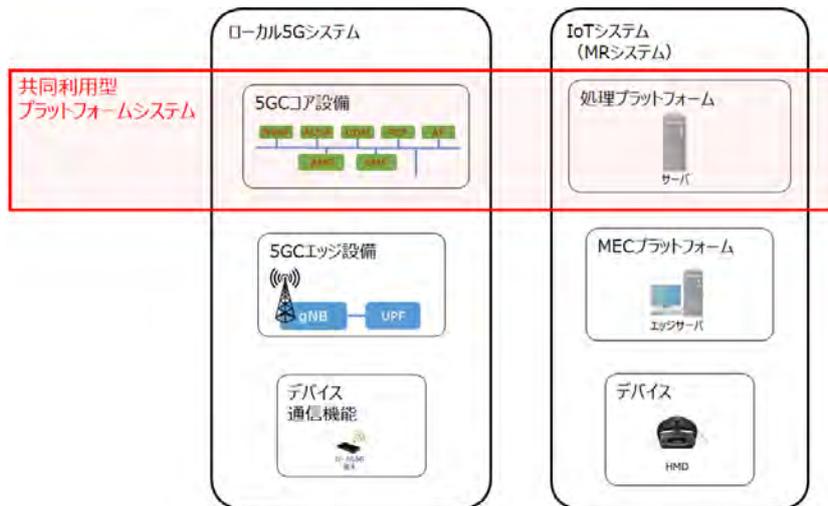


図 6-20 共同利用型プラットフォームの位置付け

本実証における課題解決システムは、ローカル 5G システムと MR システムに大別されるが、これらの構成要素の内、5GC コア設備と処理プラットフォームが共同利用型プラットフォームシステムに含まれる。

## 6.5 まとめ

技術実証および課題実証の結果において、課題解決システムが実装に足る機能を有することが確認できた。このため、本章では、課題解決システムの継続利用を前提として、課題解決システムの実証及びローカル5Gの性能評価等の技術実証の成果を踏まえ、実証地域における実装及び実証モデルの横展開に資する具体的な方策や計画等について検討した。

持続可能な事業モデル等の構築・計画策定において、課題解決システムの実装を実現するための各種課題について検討した。検討の結果、実装実現における技術的な課題があり、工場に導入をするかの判断ができない状況である。加えてコスト面も課題であるとの結論を得た。本実証は大企業の工場を対象としたものであり、課題解決システムの実装を実現するためには、工場を単位とした費用対効果を確保する必要がある。一方で、工場内の利用においては、様々な遮蔽物が存在することによる電波伝搬の劣化要素あるいは工場内のレイアウト制約により見通しの確保が難しいこと等により、基地局1基当たりのMRシステムの収容は1か所が限度である。さらに、課題解決システムが工場内の稼働箇所における常時利用を前提としていないことから、基地局稼働率の観点においても費用対効果を確保しにくい。このようなコスト面での課題を解決するため、工場内利用においては、課題解決システムをローカル5GシステムとMRシステムに分離し、ローカル5Gシステムを工場内無線インフラとして位置付け、MRシステムを含む複数のサービスをその収容下で利用することにより費用対効果を確保するとの結論に至っている。

横展開に資する普及モデルに関する検討において、課題解決システムの横展開を実現するために必要な事項の整理を行うとともに、その課題について整理した。横展開の対象は工場であり、横展開に資する普及モデルについても、前述したコストが最大の課題である。さらに、横展開においては、事業継続性やセキュリティの確保等、非機能要件に起因する課題も多い。前述したように、課題解決システムの実装は大企業の工場における設備投資と直結するものであり、普及モデルの構築には更なる検討が必要である。

共同利用型プラットフォームに関する検討において、共同利用型プラットフォームの在り方を検討するとともに、その実現形態について検討した。共同利用型プラットフォームを構築することは、課題解決システムの費用対効果を向上させるための有効な手段である。すなわち、大企業の工場群による利用を前提とした場合には、ローカル5Gシステムのコア部分を共用化することにより、大幅なコスト削減を見込むことが期待できる。このため、共同利用型プラットフォームとして、ローカル5Gコアシステムを集約するとともに、MRシステムをはじめとする各エッジシステムが利用する処理プラットフォームを集約する形態を提示した。

## 7. 会合等の開催

### 7.1 総務省オンライン視察会

令和3年2月26日（金）に、総務省及び関係各社向け実証環境視察会を行った。詳細を以下に示す。なお、新型コロナウイルスの感染拡大状況を踏まえ、視察はオンラインで行われた。

表 7-1 総務省オンライン視察会概要

テーマ	MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現
開催日程	令和3年2月26日（金）15:00～15:45
開催手段	Microsoft Teamsにて開催
開催場所	トヨタ自動車貞宝第1工場内
参加企業・組織	総務省、総合通信局ほか、87の企業・組織
参加人数	約100名

オンライン視察会の当日資料は「別紙：MIC-L5G-CO-OP-01-総務省オンライン視察会\_説明資料」の通りとなる。

また、視察当日の様子を以下に示す。

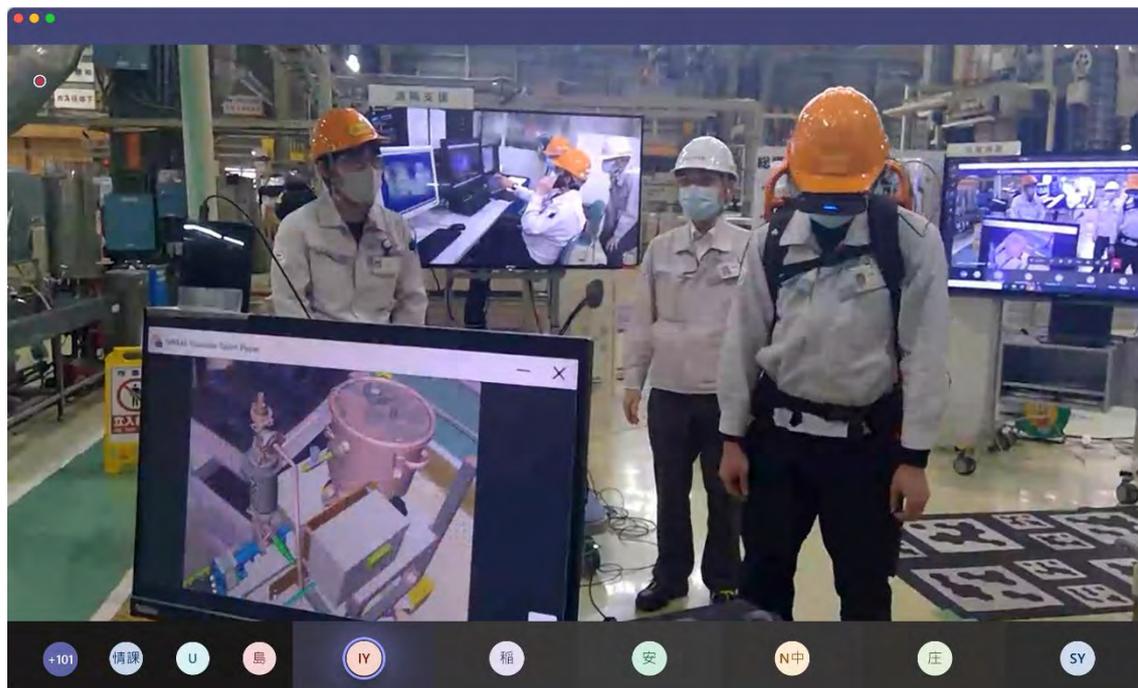


図 7-1 総務省視察会の様子（中継画面）

### 7.2 東海総合通信局向け視察会

令和3年3月12日（金）に、総務省東海総合通信局向けの実証環境視察会を行った。詳細を以下に示す。

表 7-2 東海総合通信局視察会概要

テーマ	MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現及び MR システム体験
開催日程	令和 3 年 3 月 12 日（金）14:00～15:00
開催場所	トヨタ自動車貞宝第 1 工場内
参加企業・組織	総務省 東海総合通信局 無線通信部 情報通信部
参加人数	5 名

なお、当日使用した資料は「7.1 総務省オンライン視察会」で使用したものと同様である。視察当日の様子を以下に示す。



図 7-2 東海総合通信局向け見学会の様子

### 7.3 ローカル 5G 開発実証成果報告会

令和 3 年 3 月 29 日（月）に、令和 2 年度「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」に採択された 19 事業者が一同に会し、実証成果の報告会を実施した。詳細を以下に示す。

表 7-3 ローカル 5G 開発実証成果報告会概要

目的	令和 2 年度ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証（19 プロジェクト）における事業成果のご報告
開催日程	令和 3 年 3 月 29 日（月）17:00～19:00
開催手段	Microsoft Teams にて開催
次第	①開始の挨拶・進め方の説明 ②19 プロジェクトの動画の放映【総務省】 ③19 プロジェクトからの成果報告【各プロジェクト】

	④分野毎に質疑応答 ⑤有識者等による総評【有識者】
参加企業・組織 (◎は主催者)	総務省 有識者委員 ◎各調整事業者（クニエ、MRI、PwC、NTT 東日本、ARIB、MRI） 19 コンソーシアム

また当日の資料として、「MIC-L5G-CO-OP-03-成果報告1枚もの No6 MR 遠隔支援（トヨタ自動車）」を使用した。

## 8. まとめ

本成果報告書は、「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証に係る工場分野におけるローカル5G等の技術的条件等に関する調査検討の請負」と題し、工場分野の地域課題解決に向けて、ローカル5Gの具体的なユースケースとして、MR技術を活用した生産設備の導入に係る事前検証及び遠隔作業支援に関する実証を行い、その有効性を評価するとともに、工場内におけるローカル5Gの電波伝搬特性や性能等の技術的な評価を行い、その結果を踏まえた技術面、運用面、制度面の課題の抽出及び解決方策の検討の結果、そして、当該ユースケースの普及拡大に向けた検討の結果をまとめたものである。

第1章では、本調査検討を進める上での目標や体制、スケジュール、会議体、プロジェクト管理等の実績のほか、実験試験局免許取得に関する詳細を記載し、本調査検討を進めるための各種実施事項を取りまとめた。また、本章では、本調査検討におけるMRシステムの具体的な活用ユースケースとして、「MR技術を活用した生産設備の導入等に係る事前検証の効率化」と「MR技術を活用した遠隔作業支援」を挙げている。

第2章では、本調査検討を実施する地域であるトヨタ自動車貞宝第1工場に関する詳細を記載したほか、当社が抱える工場内におけるMRシステム活用の問題や、当社及び製造業全体が抱える地域課題を踏まえ、本調査検討の目的及び検討すべき課題について整理した。本調査検討においては、当社の抱える問題と、製造現場の人材不足や、熟練技術の承継及び労働環境の改善等といった地域製造業の課題に対し、MRシステム及びローカル5Gを組み合わせた課題解決システムの活用を推進することで、解決策の検討に資することを目指している。

第3章では、本調査検討における課題解決システムの構成要素であるローカル5G環境（4.7GHz帯、28GHz帯）及びMRシステムの具体的な構成や各機器の詳細に関する説明を記載した。

なお、当社としてはMRシステム活用における課題解決のため、MRシステムを構成する要素のうちヘッドマウントディスプレイ（HMD）に5G接続機能を搭載した、完全無線化システムの実現（目指す姿）を期待しているが、技術的な不確定要素があり、短期的にシステム開発することが難しく、目指す姿を用いた実証は極めて困難な状況にあった。そのため、本調査検討においては、目指す姿を実現するための実現効果の検証や各種データを取得するにあたり、「バックパック方式を用いたユースケースに基づく実証（バックパック方式）」及び「目指す姿の実現に向けた疑似HMD方式による事前技術検証（疑似HMD方式）」の2つの実証環境を用意し、実証にあたった。

第4章では、課題解決システムの効果・有効性を評価するための効果検証・運用検証・機能検証の結果を記載した。効果検証・運用検証では、それぞれのユースケースにおいて、現状（AsIs）の作業工程と、課題解決システムを導入した場合（CanBe）の作業工程、将来的に目指す姿（ToBe）の作業工程ごとの差分や変化を比較し、課題解決システムの導入効果を評価した。また、機能検証では、将来的に目指す姿（ToBe）に向けて、MR技術の開発・

発展に向けた要求事項を明らかにするための評価を行った。

結果としては、製造現場において MR システムを無線化すると、生産設備の製作における安全・品質の向上及びコスト削減に寄与できる、といったことを確認した。一方で、MR システムの完全無線化を実現するためには、ローカル 5G のアップリンクの向上と低遅延化、通信の安定化が必要となる、といった技術的課題も確認した。

第 5 章では、工場内におけるローカル 5G の電波伝搬特性や性能等の技術的な評価を行うため、工場内及びに工場周辺におけるローカル 5G 電波の測定、工場内におけるローカル 5G システム構築に関する検証、そして、独自実証としてアプリケーション特性へのハンドオーバー動作の影響の検証及び柔軟なローカル 5G システム構築に係る検討を行った。

技術実証を通じて、トヨタ自動車株式会社貞宝第 1 工場において、MR システムを活用するにあたり求められるローカル 5G の電波伝搬特性や性能を確認することができたほか、独自実証の結果を踏まえ、工場内でローカル 5G 利用を促進するための知見を得ることができた。

一方で、課題解決システムの実証で確認した内容と同様に、MR システム活用のユースケースを実現するにはローカル 5G のアップリンクの向上や均一で安定した回線品質の実現が必要となることが判明した。また、異なるメーカーが提供するローカル 5G 機器同士の相互接続性や、同期運用時の対応事項等、今後のローカル 5G の普及展開に向けて阻害要因となり得るような課題も確認できた。

第 6 章では、大規模企業型という観点から、課題解決システムの実装と横展開に向けた検討を行った。具体的には、まず MR システムの完全無線化による稼働を目指して事業モデルの検討を行い、実現できた機能と実現できていない機能を整理した。次に、課題解決システムの費用対効果を分析し、普及モデルが達成する必要がある要件を整理した。さらに、普及モデル検討で明らかになった課題対応の一方策として、共同利用型プラットフォームの在り方に関する検討も行った。

今後、事業モデルとして、MR システムの完全無線化を実現するためには、MR システムにおける軽量・小型化等の技術開発と、ローカル 5G の機能検証（UL/DL の割合調整、増量等）を行う必要がある。また、普及モデルについては、工場として費用対効果が許容できることを前提条件として挙げているが、課題解決システムを独立したシステムとして捉えると費用対効果を許容することが難しいと判断した。このため、本事業モデルを持続可能な普及モデルとするためには、MR システム以外の IoT システムの利活用によるコストの按分が必要になり、ローカル 5G を工場内の無線インフラとして導入するための技術的課題（UL/DL 割合調整、多接続、超低遅延等）の対応と、運用的課題（免許取得、干渉調整、機器の保守、共同利用等）が必要との結論に至った。

本調査検討を総括する。調査検討の結果、課題解決システム（ローカル 5G による MR システムの無線化）を導入することで、地域製造業における課題である製造現場の人材不足や、熟練技術の承継、及び労働環境の改善等に対して、作業者が現場で早く手軽にシステムを利用できるようになる、あるいは、必要に応じて遠隔からの支援も受けられるようになるといった、地域課題の解決に資する効果を確認することができた。また、課題解決システムが、

生産設備の製作における安全・品質の向上及びコスト削減にも寄与していることも確認した。

しかしながら、MR システムの利用という観点では、ローカル 5 G のアップリンク速度向上、低遅延化、通信の安定化が必要だということも判明した。また、今後の MR システム開発の観点からは、完全無線化のためには、MR システムが取り扱う通信情報の圧縮伸長の検討や機器の小型化も必要となることもわかった。さらに、工場において課題解決システムを利用する際の安全性の確保についても、今後の課題となっている。

また、ローカル 5 G 導入・運用の観点からは、実装及び横展開に向けては、技術面・運用面の課題があり、対応が必須であることを認識した。特に今後工場内での利用の為には、MR システム以外の様々な機器（設備・カメラ等）から大容量の情報を収集する為にも、アップリンクの帯域確保が重要となる。またあわせて、収集したデータを複数ユーザにストレスなく伝達する為には、ダウンリンクの帯域確保も必要となることから、UL/DL の通信割合の調整・増量や、多数同時接続等の機能追加といった、今後リリースされるローカル 5 G 機能である多接続、超低遅延、高信頼等の早期の製品化にも期待を寄せている。また、ローカル 5 G の展開を図るには、各種コスト低減の検討も必要であると考えている。

本調査検討の結果を踏まえ、引き続き工場内の無線通信インフラとして、ローカル 5 G 等に係る検討を継続していく。

## 9. 参考資料

### 9.1 問い合わせ先

本調査検討において使用した機器等に関する問い合わせ先を以下に示す。

表 9-1 問い合わせ先一覧

MR システム (MREAL)	キヤノン IT ソリューションズ株式会社 第二営業部 03-6701-3328 (直通) MR ホームページ： <a href="https://www.canon-its.co.jp/solution/mr/">https://www.canon-its.co.jp/solution/mr/</a>
ローカル 5 G システム (4.7GHz 帯)	株式会社エイビット 5G ビジネスユニット 営業担当 042-627-1900 (代表) HP からの問い合わせ： <a href="https://www.abit.co.jp/contact-5G/">https://www.abit.co.jp/contact-5G/</a> メールでの問い合わせ： sales-5g@abit.co.jp
ローカル 5 G システム (28GHz 帯)	株式会社日立国際電気 営業本部 パートナー事業推進センタ 050-3383-3501 HP からのお問い合わせ： <a href="https://www.hitachi-kokusai.co.jp/contact/index.html">https://www.hitachi-kokusai.co.jp/contact/index.html</a>
ローカル 5 G 対応ルーター (4.7GHz 帯/28GHz 帯)	シャープ株式会社 通信事業本部 メールでの問い合わせ： Local_5G_Market@list.sharp.co.jp
ローカル 5 G システム導入・構築	ネットワンシステムズ株式会社 HP からのお問い合わせ： <a href="https://www.netone.co.jp/contact/">https://www.netone.co.jp/contact/</a>

### 9.2 報道発表

コンソーシアム企業による本調査検討に関連する各報道発表を以下に示す。

表 9-2 報道発表一覧

発表者	発表日時	件名	掲載箇所 (URL)
ネットワンシステムズ株式会社	令和 3 年 1 月 19 日 (火)	総務省「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」における、「MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現」の実証へ参加	<a href="https://www.netone.co.jp/news/release/20210119_01.html">https://www.netone.co.jp/news/release/20210119_01.html</a>
株式会社エイビット	令和 3 年 1 月 19 日 (火)	総務省「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開	<a href="https://www.abit.co.jp/2021/01/19-01/">https://www.abit.co.jp/2021/01/19-01/</a>

		発実証」における、「MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現」の実証へ参加	
株式会社日立国際電気	令和3年 1月27日(水)	総務省「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」における、「MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現」の実証へ参加	<a href="https://www.hitachi-kokusai.co.jp/news/2021/news210127.html">https://www.hitachi-kokusai.co.jp/news/2021/news210127.html</a>

### 9.3 参考文献・レポート

- (1) 株式会社 NTT ドコモ：「人口密集地において 10Gbps を超える超高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討の請負 報告書」、2018 年
- (2) 国立研究開発法人情報通信研究機構ほか：「5G 総合実証 GVI 屋内において 2 万台程度の多数同時接続通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討報告書」、2018 年
- (3) 株式会社 NTT ドコモ：「屋外において平均 4-8Gbps の超高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討の請負 調査検討報告書」、2019 年
- (4) Wireless City Planning 株式会社：「高密度に展開された端末の多数同時接続通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討 報告書」、2019 年
- (5) 株式会社 NTT ドコモ：「屋外において複数基地局、複数端末の環境下で平均 4-8Gbps の超高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討の請負 調査検討報告書」、2020 年
- (6) Wireless City Planning 株式会社：「多数の端末からの同時接続要求を処理可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件等に関する調査検討の請負 報告書」、2020 年
- (7) Mark W. Maier：「Architecting principles for systems - of - systems」, 1999 年
- (8) 内藤辰彦, 渡辺紀：「産業用イーサネット入門」、CQ 出版、2009 年
- (9) 富士通株式会社 木村大、関宏之：「セル間干渉制御 (ICIC) 技術」、2011 年
- (10) 東北大学 関宏之：「広帯域移動通信におけるセル間干渉制御技術に関する研究」、2015 年
- (11) NTT アクセスサービスシステム研究所 丸田一輝、太田厚、飯塚正孝、杉山隆利：「基地局連携セル間干渉低減技術とフラクショナル周波数繰り返し技術」、2012 年
- (12) 岡嶋裕史：「5G 大容量・低遅延・多接続のしくみ」、講談社ブルーバックス、2020 年
- (13) Ali Zaidi, Fredrik Athley, Jonas Medbo, Ulf Gustavsson：「5G Physical Layer」、Academic Press、2018 年
- (14) Sassan Ahmadi：「5G NR」、Academic Press、2019 年
- (15) NTT ドコモ 佐野洋介、奥山卓、飯笹直人、高田卓馬、安藤桂、藤村直紀：「5G における性能/無線リソース制御仕様」、NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル V1026

No3、2018年

- (16) 藤野 学、竹内 久雄：「ローカル 5G の概要と実証実験スターターキット」、CQ 出版 RF ワールド、2019 年
- (17) Draper、M.H. Viire、E.S. Furness、T.A. Gawron：「Effects of image scale and system time delay on simulator sickness with head-coupled virtual environments」,Human Factors、43(1),129-146,2001 年
- (18) Matthew E. St Pierre,他：「The effects of 0.2 Hz varying latency with 20?100 ms varying amplitude on simulator sickness in a helmet mounted display.」, Elsevier,2014 年
- (19) Jason D. Moss,他：「The effects of display delay on simulator sickness.」 Elsevier,2011 年
- (20) 門脇 拓也、他：「身体感覚と視覚情報にずれが生じる没入環境における低遅延な映像のユーザへの影響」、TVRSJ Vol24 No.1 pp.23-30、2019 年
- (21) 岩井 誠人、前川 泰之、市坪 信一：「電波工学基礎シリーズ 2 電波伝搬」、朝倉書店、2018 年
- (22) 岩井 誠人：「移動通信における電波伝搬」、コロナ社、2012 年
- (23) 服部 武、藤岡 雅宣：「5G 教科書－LTE/IoT から 5G まで－」、インプレス、2018 年
- (24) Chris Johnson：「5G New Radio in Bullets 1st Edition (Colour)」, Independently published、2019 年
- (25) Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Skold：「5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology」、Academic Press、2018 年
- (26) 守倉 正博、久保田 周治：「改訂三版 802.11 高速無線 LAN 教科書」、インプレス、2008 年
- (27) 安永 遼真、中山 悠、丸田 一輝：「TCP 技術入門」、技術評論社、2019 年
- (28) 井上 直也、村山 公保、竹下 隆史、荒井 透、荻田 幸雄：「マスタリング TCP/IP－入門編－ (第 6 版)」, オーム社、2019 年
- (29) 日本経済新聞出版：「まるわかり！5G ビジネス 2021」、日経 BP、2020 年