令和3年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証

ローカル 5G を活用した高速道路トンネル内メンテナンス

作業の効率・安全性向上に関する開発実証

成果報告書

令和4年3月25日

エクシオグループ株式会社

目次

1. 実証概要	1
1.1 背景・目的	1
1.1.1 道路構造物の老朽化及び生産年齢人口の減少	1
1.1.2 最先端の技術の導入による高速道路マネジメント	
1.2 実証の概要	
2. 実証環境の構築	6
2.1 実施環境	
2.1.1 実証地域の概要	
2.1.2 所在地	7
2.2 ネットワーク・システム構成	
2.2.1 設置場所	
2.2.2 ネットワーク構成	
2.2.3 ローカル5Gシステムの外観と特長	
2.2.4 ローカル5G 28GHz 帯端末の特徴	
2.2.5 アプリケーションの概要	
2.3 システム機能・性能・要件	26
2.3.1 アプリケーションの要求スループットについて	
2.4 免許及び各種許認可	29
2.4.1 免許申請	
2.4.2 道路占用許可	
2.4.3 道路使用許可	
2.5 その他要件	34
2.5.1 開発供給計画認定/サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリテ	ィ対策
について	
2.5.2 サイバーセキュリティ対策について	
2.5.3 実証に用いる機材の実証則の品質担保、単則の動作検証	
2.6 実証環境の運用	35
3. ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討(技術実証)	36
3.1 実証概要	36
3.2 実証環境	39
3.3 実証内容	41
3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定	
3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化	
3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化	
3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発	155
3.3.5 その他のテーマ	155

3.3.6 技術実証における追加提案	155
4. ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討(課題実証)	156
4.1 実証概要	156
4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標	157
4.2.1 課題事項	
4.2.2 課題解決策と実証との関係性	
4.2.3 実装シナリオ	
4.2.4 実証目標	
4.3 実証環境	166
4.3.1 4K カメラを活用した現場作業員の安全確保	
4.3.2 スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援	
4.3.3 実証環境	
4.4 実証内容	170
4.4.1 ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証	
4.4.2 ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証	
4.4.3 ローカル5Gの美装に向けた課題の抽出及び解決束の検討 4.4.4 継続利田の目通し、実装計画	
5. 晋及啓発活動の実施	226
5.1 映像制作への協力	226
5.2 実証視察会の実施	226
5.3 その他普及啓発活動	
6. 実施体制	228
6.1 コンソーシアム	228
6.2 高速道路ローカル5G 実証部会	229
6.3 総務省及び調整事業者	
6.3.1 総務省及び調整事業者	
6.3.2 その他の調整事業者等	
6.4 情報保全体制	230
7. スケジュール	

1. 実証概要

1.1 背景·目的

「令和3年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」に係るローカル5G を活用した高速道路トンネル内メンテナンス作業の効率・安全性向上に関する開発実証(以 下「本開発実証」という。)の背景及び目的を以下に示す。

1.1.1 道路構造物の老朽化及び生産年齢人口の減少

中日本高速道路株式会社(以下、中日本高速道路) 管内の道路構造物は約6割が供用後 30年以上を経過しており、インフラ長寿命化計画(行動計画)を策定し、高速道路リニュ ーアルプロジェクトに取り組んでいる。(図1-1 中日本高速道路管内の総延長と経年数) しかしながら、将来は、今以上に構造物の劣化が進行し、道路構造物管理をより合理的、 効果的に革新した生産性の向上が求められてくる。

また、道路構造物の老朽化だけではなく、耐震補強などの激甚化する自然災害への対策 強化、4 車線化・6 車線化の推進、「高速道路における安全・安心基本計画」に基づく今後 の事業展開など、事業の量は増大し続けている。



1

さらに、生産年齢人口、すなわち働き手が減少すればそれだけメンテナンスを担う技術 者の確保は困難となっていく。国内の建設需要の増加や技術者不足により、高速道路の事 業運営への影響も看過できない状況にある。(図 1-2 わが国の生産年齢人口の推移)



図 1-2 わが国の生産年齢人口の推移

一方で「働き方改革」の進展、ICT 技術の目覚ましい進歩など、社会環境の劇的な変化に 対応するため、技術の進歩が著しいビッグデータ、AI、IoT などの ICT 技術を積極的に取 り入れた作業の迅速化・省力化や、機械化による高度化・効率化を実現するなど、生産性 を飛躍的に向上させ、高速道路の事業運営のあり方を変革していく必要がある。(図 1-3 中日本高速道路 保全マネジメント改革プロジェクト イメージ図)



-MOVEMENTの実現をめざしたイメージ回であり、実際に整備するものとは異なります。

図 1-3 中日本高速道路 保全マネジメント改革プロジェクト イメージ図

1.1.2 最先端の技術の導入による高速道路マネジメント

中日本高速道路では、高速道路オペレーションの迅速化・省力化、機械化による現場点 検作業や日常的な維持作業の高度化・合理化などを実現するとともに、既存の業務プロセ スやマニュアルを見直すなど、10年先を見据えた次世代技術を活用した高速道路の保全マ ネジメントの革新的な改革プロジェクトに取り組んでいる。(図 1-4 次世代の新たなリア ルタイム業務 イメージ図)

デジタルテクノロジーを始めとする最先端の技術の導入により、人口減少や少子高齢化 に伴う労働力不足、脱酸素社会への転換といった社会環境の変化、お客さまニーズの多様 化に伴う業務量増大などの、高速道路マネジメントに取り組んでいる。

高速道路の現場で行われている点検から補修のサイクル、交通巡回、料金収受、敷地管 理といった日常業務、大規模更新・大規模修繕事業に代表されるプロジェクト型の業務、 そして業務や災害等の有事対応といった様々なオペレーションを、デジタル化、遠隔化、 自動化、機械化して、安全かつ効率的、効果的に行いたいと考えている。例えば、日常業 務は道路管制センターからの指示・運営を基本として、高速道路運営のオペレーションに 関わる全ての人々の仕事の質と量、働き方を変えたいと考えている。

併せて、道路構造物の健全性を確保し、自動運転や隊列走行といった新たな道路交通を 支え、交通事故や渋滞を減らし、CO2 排出量を削減するとともに、お客様や沿線地域への 対応を充実させ、より安全で快適、適時性の高い、環境負荷の少ない次世代の高速道路空 間・サービスを提供したいと考えている。



図 1-4 次世代の新たなリアルタイム業務 イメージ図

1.2 実証の概要

本調査研究では、高速道路事業者特有の環境である「トンネル」に焦点をあてることとす る。トンネルは山間部に多く、キャリア5Gの活用が見込めないため、ローカル5G活用 モデルとしての期待があり、スマートグラス、監視カメラ、AIを組み合わせることで高速 道路の保守保全業務を高度化するポテンシャルがある。

高速道路の「トンネル」でローカル5Gを活用することを想定し、その環境下でのローカル5G特性調査、及び課題解決手段の有効性を調査する。

上記の調査を行うとともに、「トンネル内」でローカル5Gを活用する具体的な社会実装 内容を検討し、普及拡大につなげる。

上述に記載したように、労働人口減少で作業員確保が困難な課題に対して、以下の二点 について課題実証を行う。(図 1-5 高速道路トンネル内メンテナンス作業 イメージ図)

- 作業員の安全確保
 - 規制中車線に突入しそうな車を監視カメラの映像をローカル5Gで伝送し、AI画 像解析サーバでリアルタイム AI 画像解析することで危険を検知し、作業員にア ラート通知して危険を回避するシステムを検証する。
 - また、監視カメラで作業員を監視し、危険な作業エリアへの侵入があった場合も 作業員に危険アラート通知を行う。
- 作業員の遠隔作業支援
 - スマートグラスやスマートフォンを活用して、4Kの解像度の映像伝送と音声を 組み合わせて、遠隔にある事務所の熟練者による遠隔作業支援を実施する。複数

の現場を一人の熟練者が対応することで、作業効率の向上が期待できる。



図 1-5 高速道路トンネル内メンテナンス作業 イメージ図

また、技術実証として、トンネル内の電波伝搬に関して受信電力・伝送スループット・伝 送遅延時間の静特性を取得し、上記の課題実証のアプリケーション要件を満たすことがで きるエリアを明らかにする。

また、免許の審査基準式となるエリア算出法において、「トンネル」に対する伝搬モデルの定義がなされていない状況を鑑み、「電波伝搬モデルの精緻化」でトンネルにおける伝搬 損のモデルを構築して、エリア算出方法に寄与する。

また、「電波反射板によるエリア構築の柔軟化」においては、入射角度に対する反射角度 を制御可能な反射板を用いることによって、従来はエリアカバーが困難であった「トンネル 内の避難連絡坑」までエリア拡張することが可能であることを検証する。

実証環境の構築

ローカル5Gでは、4.7GHz帯と28GHz帯を利用できる。4.7GHz帯は、4GLTEと同 じ6GHz帯以下の周波数帯であり、28GHz帯と比べて遮蔽物の影響を受けにくく広いエリ アをカバーすることができると言われている。28GHz帯は、直進性が高く遮蔽物を回り込 むことができないが、4.7GHzは100MHzの帯域であるのに対して、28GHzでは400MHz の帯域を活用することができるため、大容量通信に向いている。

本開発実証に活用することができる装置の候補として、4.7GHz SA(Stand Alone)の装置 では、上りのスループットの理論上限が 80Mbps であるのに対して、28GHz NSA(Non Stand Alone)方式の装置では、スループットの理論限界値が 140Mbps である。100MHz の周波数を 2 つアグリゲーションすることで 280Mbps までスループットを拡張すること が可能である。

本開発実証では、監視カメラやスマートフォンで4K映像を扱うため、アップリンクの スループットを重視して、実証期間において高いスループットを提供することができる 28GHz NSA 方式の装置を採用することとする。

2.1 実施環境

本開発実証環境は、高速道路のトンネルを選定している。山間部にあるトンネルには、 キャリア5Gが敷設される見込みが薄いため、ローカル5Gを活用することを考えている。

トンネルでは反射が多く、導波管のように電波が遠くまで届くことを期待でき、どの程 度までエリアを構築することができるのか検証する。また、ローカル5Gにおけるトンネ ル内での 28GHz の電波伝搬特性のデータが少ないことから、エリア算出法に向けた電波 伝搬モデルの構築にも貢献することができる。

なお、トンネル内に基地局を設置するため、電波伝搬の特性としては屋内で、平地としての地形に分類できる。

2.1.1 実証地域の概要

本開発実証では、実証地域として、中日本高速道路管内の古城山トンネル(下り)を選定した。

古城山トンネルは東海北陸自動車道にあるトンネルである。東海北陸自動車道は、愛知 県一宮市から岐阜県を経由して富山県砺波市へ至る、東海地方と北陸地方を結ぶ高速道路 (高速自動車国道)である。古城山トンネルは、起点からすると美濃 IC と古城山 PA(上 り方面のみ)との間にあり、古城山という山にある。古城山トンネル(下り)のデータを以

下に示す。

- ・ トンネル名:古城山トンネル(下り)
- よみがな:こじょうざん
- · 会社名:中日本高速道路株式会社
- · 道路名:東海北陸自動車道
- 供用年:1994年
- ・ 延長:1.508m
- 車線数:2車線

- 車線幅: 3.5m×2車線
- 照明間の幅:約8m
- 照明設置高さ:4.8m

2.1.2 所在地

古城山トンネル(下り)の所在地を以下に示す。

· 岐阜県美濃市口野々

実験場所を図 2-1 及び図 2-2 に示す。



図 2-1 実験場所 古城山トンネル(岐阜県美濃市口野々)



2.2 ネットワーク・システム構成

2.2.1 設置場所

各種機器設置場所を下記に示す。ローカル5G基地局(28GHz帯)の具体的な設置場所については古城山トンネル内に設置する。(表 2-1 事業実施場所と5G利用設備)

	4			
事業実施場所		5 G利	用設備	
項	設置場所	住所	基地局	移動局
	古城山トンネル	岐阜県美濃市口野々	ローカル5G基	モバイルルータ
1	(下り線)		地局(28GHz 帯)	スマートフォン
	監視員通路			
0	古城山トンネル	岐阜県美濃市口野々	コア装置、	
	電気室		サーバ関連	

表 2-1 事業実施場所と5 G利用設備



古城山トンネル 坑口

トンネル内 イメージ

	図	2-3	設置場所	古城山トンネル((岐阜県美濃市口野々)) 外観図
--	---	-----	------	----------	-------------	-------

機器設置について、図 2-4 を用いて説明する。電気室に、5Gコア、基地局 CU/DU、 AI 画像解析サーバ等の設備を設置する。電気室から、トンネル入り口付近に設置する基地 局までの間を光ファイバーで接続する。GPS アンテナを電気室に引き込み、基地局 CU/DU に接続する。基地局設置場所から、ほぼ直線となる間で 20 箇所以上の受信電力を 測定する。なお、反射板を活用することで、避難連絡坑のエリア化をすることができるか 実証を行う。



図 2-4 機器配置図(東海北陸自動車道:古城山トンネル)

図 2-5 に、電気室内における5Gコア、5G基地局 CU/DU 等、ラックに搭載する設備 の設置場所を示す。



図 2-5 電気室におけるラック設備設置場所(5Gコア、5G基地局 CU/DU 等)

図 2-6 に、トンネル内への基地局設置イメージを示す。ローカル5G基地局(28GHz) と、Private LTE の 4G 基地局(2.5GHz)を、トンネル内に設置する。基地局の指向性を 考慮して、車が進行する方向に合わせて電波が届くように設置角度を調整する。



図 2-6 トンネル内への基地局設置イメージ

2.2.1.1 エリア算出法によるカバーエリア、調整対象区域

電波法関係審査基準(平成 13 年 1 月 6 日総務省訓令第 67 号)に定められているエリア算 出法では、トンネルを想定したモデルが定められていない。

トンネル内に基地局を設置するため屋内モデルが近いと考えられる。ただし、建物がないため、建物侵入損 R を 0dB と仮定した。

Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 4 (式 1)

- 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)
- ③ 屋内の場合(基地局を屋内に設置する場合)
- L=20log10($4 \pi d / \lambda$)+R
- d(m): 基地局から陸上移動局までの距離
- λ(m):指定周波数の波長
- R(dB): 建物侵入損(20.1)

トンネル内での伝搬モデル精緻化については、後述するが、建物侵入損の代わりとなる トンネル固有の補正パラメータを、本技術実証にて検証する。 表 2-2 に、エリア算出のために用いたパラメータを示す。

また、このパラメータによって、5G基地局 RU のアンテナ放射パターンとチルト角度 を考慮してカバーエリアと調整対象区域を算出した結果を、図 2-7 に示す。

カバーエリア端は、5G基地局 RU から 0.78km の地点、調整対象区域は、2.1km の地 点と求めることができる。

項目		設定値
	アンテナ利得	23[dBi]
	送信電力	22[dBm] (158[mW])
基地局	給電線損失	0[dB]
	周波数	28.2499[GHz]
	高度	地上高 5[m]
	チルト角	20°
	アンテナ利得	20[dBi]
移動局	高度	地上高 1.5m
	人体吸収損失	4[dB]
之而他	伝搬モデル	ITU-R P.1411
	建物侵入損失	0[dB]

表 2-2 エリア算出のためのパラメータ



図 2-7 エリア算出式をベースとしたカバーエリア、調整対象区域

ローカル5Gのカバーエリア、調整区域に関して図 2-8 に示す。メッシュの荒さから、 トンネル区間でトンネルの外に電波が出ているように表示されているが、トンネル区間で は隣接する部分には電波が放射されない。トンネルの出口方向と入口方向に電波が放射される。



また、Private LTE(2.5GHz)のカバーエリア、調整区域に関して図 2-9に示す。



2.2.2 ネットワーク構成

本開発実証のネットワークシステムは、28GHz 帯に対応するノキア社製 NSA 方式のロ ーカル5Gシステムを設置する。

令和 2 年度の総務省ローカル5G開発実証において、同システムを活用した実績があり、 100MHzの帯域幅を下りで4つ(4×100MHz)と、上りで2つ(2×100MHz)アグリゲ ーションすることができることから、4K画像でアップリンク伝送の性能を出すためにはノ キア社製のものが性能要件を満たすと判断したため選定した。同社が提供する4.7GHz SA (Stand Alone)構成のシステムでは、アップリンクの伝送スループットの理論上限値が 80Mbpsのため、理論上限値が140Mbps (2CC: Component Carrier: 280Mbps)である 28GHz NSA 構成を選定した。また、Nokia Digital Automation Cloud (NDAC)サービス で、クラウドを経由してローカル5Gシステムの遠隔保守・運用が可能であり、トンネル ごとに保守員を配置しないで済むメリットがあるため、ノキア社製 NDAC を採用すること とした。(図 2-11 NDAC システム 概略図)

また、本開発実証のネットワークシステムにおけるローカル5Gモバイルルーターは、 28GHz帯に対応するシャープ社製端末を5台用意し、スマートグラス×2台、4K 監視カ メラ×2台、警告灯×1台と接続する。(図 2-10 ローカル5G実験システム 構成図)



CU: Central Unit, DU: Distributed Unit, RU: Remote Unit, BWA: Broadband Wireless Access

図 2-10 ローカル5G実験システム 構成図

2.2.2.1 ネットワークシステム使用機器

本開発実証におけるローカル5Gのネットワークシステムとして使用する機器の概要を 以下に示す。

項目	内容
概要	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5Gシステムを活用す
	る。NSA 方式となり、アンカーとして自営等 BWA 基地局を設置す
	る。
コア装置	【機能と役割】
	ノキア社製 NDAC サービスを使用。NSA 方式に対応したコア装置
	(EPC 機能)を提供。NDAC サービスでは、遠隔地のデータセンタ
	からコア装置や基地局を遠隔監視・制御することが可能。
	【数量】
	1 サービス (NDAC)
	1台 (エッジサーバ)
	【設置形態(固定・可搬等)】
	固定
ローカル5G	【機能と役割】
基地局システム	ノキア社製基地局 CU/DU と RU (AWEUA)を使用。ローカル5G
	の 28GHz の無線通信が可能。100MHz の帯域幅をダウンリンクでは
	4 つ (4×100MHz)、アップリンクでは 2 つ(2×100MHz)までアグリ
	ゲーション可能なため、超高速通信が可能。
	【数量】
	1局
	【設置形態(固定・可搬等)】
	固定
自営等 BWA 基地	【機能と役割】
局	ノキア社製自営等 BWA 基地局(2.5GHz)を使用。ローカル5Gのアン
	カーバンドとして活用。また、ローカル5Gとのデュアルコネクティ
	ビティ通信も行う。ローカル5Gの電波が届かない場所では、端末と
	自営等 BWA にて通信を継続することが可能。
	【数量】
	1局
	【設置形態(固定・可搬等)】
	固定
端末	【機能と役割】
	シャープ社製および京セラ社製ローカル5G対応無線ルーターなら
	びに FCNT 社製ローカル5G対応スマートフォンを使用。ローカル
	5 Gの 28GHz 帯及び自営等 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

表 2-3 ネットワークシステム使用機器

証に向けたアプリケーションとの接続が容易。
【数量】 8 台
【設置形態(固定・可搬等)】 可搬

2.2.2.2 同環境が効率的である説明

(1) スマートグラス+スマートフォン双方向通信について

課題実証項目「①トンネル内スマートグラス〜事務所間双方向通信」の実現にあたり、ス マートグラス+スマートフォン×2式を用いる。このとき、4K映像伝送を行うため、トン ネル内でLTE回線では十分な通信速度が確保できず、ローカル5Gのエリア化が必要とな る。4.7GHz SA 方式のシステムに比べて、現状では28GHz NSA 方式の方がアップリンク 速度の理論値上限が大きいため、28GHz NSA システムの実験環境が効率的であると考え る。

(2) トンネル内 4K 監視カメラを用いた作業員の安全確保について

課題実証項目「②トンネル内 4K 監視カメラを用いた作業員の安全確保」の実現にあたり、 4K 監視カメラ×2 式を用いる。このとき、トンネル内には仮設カメラ映像伝送用専用ケー ブルを敷設することは一般的ではない。また、トンネル内で 4K 監視カメラ映像を LTE 回 線でアップリンク伝送するには十分な通信速度が確保できないためローカル5 Gのエリア 化が必要となる。上述のように、4.7GHz SA 方式に比べて、28GHz NSA の方がアップリ ンク速度の理論値上限が大きいため、28GHz NSA システムの実験環境が効率的であると 考える。



図 2-11 NDAC システム 概略図

2.2.2.3 ネットワークシステム構成図 物理構成(詳細)

ネットワークシステム構成図 物理構成(詳細)を以下に示す。



2.2.2.4 ネットワーク構成図 (論理構成)



図 2-13 ネットワーク構成図(論理構成)

2.2.2.5 ローカル 5G システム (基地局)の概要

ローカル 5G システム(基地局)の概要を以下に示す。

A = - 7.75		
	基地局 A(DAAWEUA-1.6-N20)	
製造ベンダ	ノキア社	
台数	1台	
設置場所(屋内/屋外)	屋内	
同期/準同期	同期	
UL : DL 比率	1:4	
周波数带	28GHz 帯	
SA/NSA	NSA	
UL 周波数	99.9- 99 COL	
DL 周波数	28.2 ⁷ ~ 28.0GHZ	
UL 帯域幅	100MH->1手下之儿	
DL 帯域幅	100MHZへ4 ノヤホル	
UL 中心周波数	F1=28.24992 GHz	
	F2=28.34928 GHz	
DL 中心周波数	F3=28.44864 GHz	
	F4=28.54800 GHz	
	※UL は上記から 2 つ	
UL 変調方式	640AM	
DL 変調方式	04QAM	
MIMO	2×2 MIMO	

表 2-4 ローカル 5G システム(基地局)の概要

2.2.3 ローカル5Gシステムの外観と特長

ローカル5G(28GHz NSA 構成)のシステムの装置外観を以下に示す。





以下に各装置の外観と仕様を示す。

2.2.3.1 コア装置(edge)

コア装置の外観と仕様を以下に示す。



図 2-15 ノキア製ローカル5G コア装置 外観

••• • • • • •	
項目	説明
型名	HP EL 1000 m510 10GE
同時端末接続数	10,000 台
最大スループット(理論値)	$10 \mathrm{Gbps}$
外形	W232×D352×H87.5 mm
最大重量	8.36kg
最大消費電力	225W

表 2-5 ノキア製ローカル5G コア装置 主な仕様

2.2.3.2 ローカル5G (28GHz NSA)基地局 CU/DU の装置外観と仕様

ローカル5G(28GHz帯)基地局CU/DUの外観と仕様を以下に示す。



図 2-16 ノキア製ローカル5G 基地局 CU/DU 外観

武 40 / 1	
項目	説明
型名	NDAC Airscale 5G Indoor Base Band Kit
外形	W447×D400×H129 mm
最大重量	11kg(今回構成)
最大消費電力	420W(今回構成)

表 2-6 ノキア製ローカル5G基地局 CU/DU 主な仕様

2.2.3.3 ローカル5G (28GHz NSA)基地局 RU の装置外観と仕様

ローカル5G (28GHz帯)基地局RUの外観と仕様を以下に示す。



図 2-17 ノキア製ローカル5G 基地局 RU 外観

$\overline{\mathbf{z}}$ $$	计様
--	----

項目	説明
型名	AWEUA

外形	W270×D115×H325
最大重量	10kg
最大消費電力	250W
送信出力	22[dBm] (158[mW])
アンテナ利得	23[dBi]
指向性	水平方向: 正面から±45°
	垂直方向: 水平面から下方 20°

2.2.3.4 自営等 BWA 基地局 (2.5GHz)基地局の装置外観と仕様

自営等 BWA 基地局 (2.5GHz)の外観と仕様を以下に示す。



図 2-18 ノキア製自営等 BWA 基地局 外観

項目	説明
型名	FWHT
外形	W327×D120×H247
最大重量	7.8kg
最大消費電力	135W

表 2-8 ノキア製自営等 BWA 基地局 主な仕様

ローカル5Gシステムの各装置の特徴を表 2-9 に示す。

	$\overline{\mathbf{X}}$ 2-9 ローカル 5 Gシステム	の谷袋直の将倒
項目機能説明		各装置の特徴
NDAC	システムの運用状態や障害状況	各現場でメンテナンスをする必要
	を遠隔のデータセンターから監視	がなく、運用管理コストを低減す
	する。また、遠隔によるシステム	る。
	修復作業も可能である。	また、常に最新のソフトウェアに
	データセンターを経由してソフト	アップグレードすることが可能で
	ウェアをアップデートする。	ある。
コア装置	端末の位置情報を管理し、ハンド	ローカル5Gの高速通信に対応で
	オーバー等の移動体制御、ページ	きるよう 10Gbps のインタフェー
	ングによる呼び出し等を行う。ま	スを持つコア装置を選定している。
	た、正規の端末であるか認証を行	
	う。	
自営等 BWA	自営等 BWA の無線通信が可能で	28GHz 帯の無線通信において、遮

長 2-9 ローカル5Gシステムの各装置の特徴

基地局	ある。また、NSA 構成のローカル	蔽等の影響に対しても、LTE
$(2.5 \mathrm{GHz})$	5Gシステム(28GHz)に対して	(自営等 BWA)との Dual
	は、制御信号を扱うアンカーの役	Connectivity によって、無線通信の
	割を担う。	維持が可能である。28GHz 帯のエ
		リア外であっても、自営等 BWA で
		無線通信は可能。
ローカル5G	ローカル5Gの 28GHz 帯の無線	本課題実証において、4K 映像伝送
基地局	通信が可能である。100MHz 帯域	のアップリンクのスループットを
(28 GHz)	幅を下りは4つ、上りは2つまで	満足することが可能である。
	アグリゲーションすることができ	
	るため、超高速通信が可能となる。	

2.2.4 ローカル5G 28GHz帯端末の特徴

ローカル5G 28GHz帯端末の特徴を以下に示す。

項目	内容	外観
モバイルルータ	【機能と役割】	
<u> </u>	ローカル5Gの 28GHz 帯及び自営等 BWA	
	の 2.5GHz 帯の無線通信が可能。	
	スマートグラス、4K 監視カメラのローカル	
	5 G接続が可能	
	【数量】6台(3台ずつ)	A.
	【設置形態(固定・可搬等)】可搬	
	【メーカー】シャープ株式会社	and the second se
	【型名】 HMSA-0003	42-50
	【メーカー】京セラ株式会社	
	【型名】PC9056	
スマートグラス	【機能と役割】	
,	接続先と映像、音声の双方向通信が可能。	
	请隔作業支援用 。	1
		A man
	【数量】2 台	1 1 1 mile
	【設置形能 (固定・可搬等)】可搬	
		No.
	【メーカー】株式会社ニコン・トリンブル	
	【列名】Trimble XR10	
スマートフォン	【 上 山 】 11111101C XIIIO 【 操 能 と 役 乳 】	
	1000000000000000000000000000000000000	
	「	
		and the second
	【粉景】9~	To Taxa menerative and the second
	【效里】4 口 【氾栗形能(田字,可姚笙)】 可拠	
	【	
		1.0
	【ハーガー】FUNI 体以去社 【刑友】 FMD191L01	
	【空石】 FIMIF 101LU1 【機能し処理】	
4 K 監視ルメノ	「機能と牧剤」	
	同時像段監視ルメフ。	
	現場1F美有の旭映ユリブ 侵人を撮影する。	
	【粉具】 0. ム	-
	【	, manufacture and a second
1	【空石】 SAW C01011	1

表 2-10 ローカル5G 28GHz 帯端末の特徴

なお、FCNT 社製のスマートフォン(型式: FMP181L01)では、以下の情報を確認する ことができる。

- ・ NR (Sub6/mmW)の無線情報のリアルタイム表示
- ・ 無線情報の時系列ログ保存(位置情報含む)
- ・ スループット測定(測定ログ保存機能含む)
- ・ シグナリングのリアルタイム表示およびログ出力機能

•••	
項目	NR
接続周波数[Hz]	3.7G/4.5G/28G
CA 状態	PCC+SCC すべて
带域幅[Hz]	40M/50M/60M/80M/100M/200M/400M
Serving セル	PCI
Neighbor セル	PCI
受信レベル	RSRP
受信品質	RSRQ
MIMO	LAYER 数 4/2/1
信号対ノイズ比	SNR
制御状態(RRC)	Idle/connected
制御状態(NAS)	Attach/Detach/TRU/ServiceReq
送信電力	Txpower (PUSCH/PUCCH)
受信電力	RxAGCPower
NSA/SA 状態	NSA/SA/-
Modulation Type	BPSK~256QAM

表 2-11 スマートフォン (FMP181L01) で測定可能な無線情報

2.2.5 アプリケーションの概要

アプリケーションの概要を以下に示す。

項目	内容
①トンネル内	【概要】
スマートグラス~事務	Microsoft 社製 スマートグラス
所間双方向通信	FCNT 社製 スマートフォン
	【機能と役割】 スマートグラスやスマートフォンを活用して、遠隔の事務所間 では映像や音声の双方向通信を行う。
	よに、事物所からは因面/ / テキを共有することを心足してい ス
	【数量】
	2式
	【設置形態(固定・可搬等)】
	可搬
②4K 監視カメラを用い	【概要】
た作業員の安全確保	FCNT 社製 4K 監視カメラ
	日立国際電気社製 AI 画像解析ソフトウェア
	仮設する4K 監視カメフとリノルダイムAI 画像解析を活用し、 現現作業長の在除エルマ月1 検知の拡圧東西検知し、現現作業
	現場作業員の厄陝エリノ侵入検知や按辺単画検知し、現場作業
	貝にノノート通知を打り。
	【数量】
	2式
	【設置形態(固定・可搬等)】
	固定

表 2-12 アプリケーションの概要

2.3 システム機能・性能・要件

2.3.1 アプリケーションの要求スループットについて

課題実証においては、遠隔作業支援における作業員のスマートグラスやスマートフォン での 4K 映像伝送が必要であり、また規制中車線で作業する作業員の安全確保では監視カ メラで 4K 映像をリアルタイム伝送する必要がある。フルカラーの 4K 映像を 30fps のフレ ームレートで伝送する場合非圧縮だと約 6Gbps が必要となる。

本開発実証において使用を想定している FCNT 製4Kカメラを使用した場合、フレーム レート 30fps の4K映像を伝送するのに必要帯域を約 25Mbps 程度に抑えることが可能と なる。(圧縮規格:H.264/H.265)

システム機能、性能要件を以下に纏める。

#	項目	要件
1	機能要件	4K 映像伝送が可能であること
2	性能要件	25Mbps 以上のアップリンク伝送が可能であること

表 2-13 システム機能、性能要件

TDD システムでは、DL と UL の Path Loss が同じであることを利用し、実測(28GHz) の UE 受信電力(RSSI)から算出した Path Loss を用いて、UL スループットとの対比関係 を纏めると、表 2-14 の通りとなる。マージンを考慮して、目標スループットを 30~40[Mbps]とした場合、下表のシミュレータにおける Path Loss 閾値は-91.66[dB]と分かる。 ここで、シミュレータの Path Loss が示している値は、伝搬損失と基地局のアンテナ利得 を含むものとする。

スループット	UE受信電力	シミュレータ
UL[Mbps]	RSSI[dBm]	Path Loss閾値[dB] ^{※1}
0~10	-77.11	-109.11
10~20	-69.97	-101.97
20~30	-65.78	-97.78
30~40	-59.66	-91.66
40~50	-55.11	-87.11
50~60	-50.17	-82.17
60~70	-43.20	-75.2
70~80	-41.28	-73.28
80~90	-39.49	-71.49
90~100	-37.88	-69.88
100~110	-35.67	-67.67

表 2-14 実測(28GHz)の受信電力を基に算出した Path Loss とスループットの関係

トンネル内に設置するノキア製ローカル5G基地局(28GHz帯)の仕様を元に移動局を搭載する4Kカメラ、スマートグラス、スマートフォンの高さを1.5mとして、要求スループットでの上り通信が可能な弊社基準にて算出し実施した Path Loss のシミュレーションを 実施した。シミュレーション条件を以下に示す。

シミュレーション結果より4Kカメラ、スマートグラス、スマートフォンの高さが1.5m の場合において 50m までは4Kカメラ映像を圧縮した状態で伝送できるだけのスループッ トをアップリンクにおいて出す無線通信が可能と分かる。

なお、基地局のチルト角を0°とすることにより、249mまでの距離をカバーできる見通しとなる。

また、50m を超えたエリアについては、フレームレートを落としたり、HD の解像度と することで、画像解析及び事務所への映像通信を継続することは可能である。

本開発実証においては、4K解像度の映像情報をトンネル内において実証することを目的 としているため、ノキア製ローカル5G基地局(28GHz帯)は要件を満たしていると考える。

項目		設定値
	アンテナ利得	23[dBi] (AWEUA)
基地局	送信電力	22[dBm] (158[mW])
	給電線損失	0[dB]

表 2-15 シミュレーション条件

	周波数	28.2499[GHz]
	高度	地上高 5[m]:トンネル内の照明を想定
	チルト角	20°
	アンテナ利得	20[dBi]
移動局	高度	地上高 1.5m
	人体吸収損失	4[dB]
その仙	伝搬モデル	ITU-R P.1411
- C マノT吧	建物侵入損失	0[dB]



図 2-19 4K, 30fps を満たすカバーエリアのシミュレーション結果

2.4 免許及び各種許認可

本開発実証を進めるにあたり取得した、実験試験局免許、道路占用許可及び道路使用許可について以下に示す。

2.4.1 免許申請

本開発実証を進めるにあたり、取得した免許について以下に示す。

2.4.1.1 実験試験局免許

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って、実用に供しないもの」と定義されておりiii、 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、本開発実証において、実験試験局免許を取得した事由を以下に示す。

・トンネル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、最適な無線環 境の導入に向けて、トンネル内の電波伝搬の特性を解明することが必要であった。28GHz のミリ波は直進性が高く、トンネルでは遠くまで電波が届くことも予想された。本実証では 実験的な側面が多いため、総合通信局にもご指導を仰ぎながら、実験試験局免許にて行うの がふさわしいと判断した。

上記を踏まえ、本開発実証においては、ローカル5Gを活用した高速道路トンネル内メン テナンス作業の効率・安全性向上の実現に向けた電波伝搬特性等の検証のため、28GHz帯 の実験試験局免許を取得した。

2.4.1.2 取得免許概要

28GHz 帯免許取得概要を以下に示す。なお、ネットワーク等の構築に当たっては、設置 及び設置場所等について、中日本高速道路:古城山トンネルの管理者と協議して協力のも と実施した。また、以下の点に留意し、東海総合通信局及び貴省と適宜相談を行い実証実 験開始までに無線局免許を取得した。

(1) 免許関係諸経費

無線局開設に係る免許関係諸経費は免許申請者負担とした。

(2) 免許申請者

免許申請者は、無線局免許の取得に当たっては、無線局の設置予定の場所周辺の携帯電

話事業者が開局している(又は開局予定の)キャリア5G及びローカル5G等の無線局との 共用調整の上、携帯電話事業者及びローカル5Gの免許人等の承諾をあらかじめ得る必要 があることから、請負契約後、速やかに携帯電話事業者等との周波数調整を開始し、合意 を取れた上で、総務省総合通信局に無線局免許申請を行い、実証実験開始までに無線局免 許を取得した。

(3) 免許に関する情報

本開発実証において取得した 28GHz 帯の免許に関する情報を以下に示す。取得した免 許状を「別紙_無線局免許状(基地局)、(移動局 1)、(移動局 2)及び(移動局 3)」に記載 する。

免許人の	エクシオグループ株式会社
氏名又は名称	
免許人の住所	東京都渋谷区渋谷3-29-20
無線局の種別	実験試験局
免許の番号	海実第 4163 号
免許の年月日	令 3.12.24
免許の有効期限	令 4.3.31 まで
無線局の目的	実験試験用
運用許容時間	常時
通信事項	実験、試験又は調査に関する事項(アルゴスシステムデータ伝送に関
	する事項、教育に関する事項を除く。)
通信の相手方	免許人所属の実験試験局
識別番号	えくしおこじょうざんとんねるろーかる5Gじっけん
無線設備の設置場所	常置場所
又は移動範囲	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道上り線 古城山トンネル 電気室
	移動範囲
	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道下り線 古城山トンネル内、
	36.7kpから36.9kpの間
電波の型式、周波数の	99M8X7W 28.24992 GHz 158 mW
範囲及び空中線電力	100MX7W 28.34928, 28.44864,28.548 GHz 158 mW
	20M0X7W 2585 MHz 6.2 W

表 2-16 28GHz 带免許状情報(基地局)

汞 2-17 28GHz 骨宄計状情報(移動	」局)
--------------------------	-----

免許人の	エクシオグループ株式会社
氏名又は名称	
免許人の住所	東京都渋谷区渋谷3-29-20
無線局の種別	実験試験局
免許の番号	海実第 4164 号 ~ 海実第 4166 号
免許の年月日	令 3.12.24

免許の有効期限	令 4.3.31 まで
無線局の目的	実験試験用
運用許容時間	常時
通信事項	実験、試験又は調査に関する事項(アルゴスシステムデータ伝送に関
	する事項、教育に関する事項を除く。)
通信の相手方	免許人所属の実験試験局
識別番号	えくしおこじょうざんとんねるろーかる5Gじっけんいどう 1~3
無線設備の設置場所	常置場所
又は移動範囲	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道上り線 古城山トンネル 電気室
	移動範囲
	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道下り線 古城山トンネル内
電波の型式、周波数の	99M8D1A, B, C, D, F, X/99M8D7W/99M8G1A, B, C, D, F, X/99M8G7W
範囲及び空中線電力	28.24992 GHz 200 mW
	100MD1A, B, C, D, F, X/100MD7W/100MG1A, B, C, D, F, X/100MG7W
	28.34928 GHz 200 mW
	20M0X1A, B, C, D, F, X/20M0X7W
	2585 MHz 400 mW

表 2-18 28GHz 带免許状情報(移動局)

免許人の	エクシオグループ株式会社
氏名又は名称	
免許人の住所	東京都渋谷区渋谷3-29-20
無線局の種別	実験試験局
免許の番号	海実第 4167 号 ~ 海実第 4169 号
免許の年月日	令 3.12.24
免許の有効期限	令 4.3.31 まで
無線局の目的	実験試験用
運用許容時間	常時
通信事項	実験、試験又は調査に関する事項(アルゴスシステムデータ伝送に関
	する事項、教育に関する事項を除く。)
通信の相手方	免許人所属の実験試験局
識別番号	えくしおこじょうざんとんねるろーかる5Gじっけんいどう 4~6
無線設備の設置場所	常置場所
又は移動範囲	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道上り線 古城山トンネル 電気室
	移動範囲
	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道下り線 古城山トンネル内
電波の型式、周波数の	99M8D1A, B, C, D, F, X/99M8D7W/99M8G1A, B, C, D, F, X/99M8G7W
範囲及び空中線電力	28.24992 GHz 200 mW
	100MD1A, B, C, D, F, X/100MD7W/100MG1A, B, C, D, F, X/100MG7W
	28.34928 GHz 200 mW
	20M0X1A, B, C, D, F, X/20M0X7W
	2585 MHz 200 mW

表 2-19 28GHz 带免許状情報(移動局)

免許人の	エクシオグループ株式会社

氏名又は名称	
免許人の住所	東京都渋谷区渋谷3-29-20
無線局の種別	実験試験局
免許の番号	海実第 4170 号 ~ 海実第 4171 号
免許の年月日	令 3.12.24
免許の有効期限	令 4.3.31 まで
無線局の目的	実験試験用
運用許容時間	常時
通信事項	実験、試験又は調査に関する事項(アルゴスシステムデータ伝送に関
	する事項、教育に関する事項を除く。)
通信の相手方	免許人所属の実験試験局
識別番号	えくしおこじょうざんとんねるろーかる5Gじっけんいどう 7~8
無線設備の設置場所	常置場所
又は移動範囲	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道上り線 古城山トンネル 電気室
	移動範囲
	岐阜県美濃市 東海北陸自動車道下り線 古城山トンネル内
電波の型式、周波数の	99M8D1A, B, C, D, F, X/99M8D7W/99M8G1A, B, C, D, F, X/99M8G7W
範囲及び空中線電力	28.24992 GHz 200 mW
	100MD1A, B, C, D, F, X/100MD7W/100MG1A, B, C, D, F, X/100MG7W
	28.34928 GHz 200 mW
	20M0X1A, B, C, D, F, X/20M0X7
	2585 MHz 200 mW

(4) 電波干渉協議

免許申請に先立って電波干渉協議を行った。本開発実証を進めるにあたり、総務省東海総合通信局に電波干渉協議について確認した結果、5Gの近隣設置はなく干渉協議の必要はないとの回答をもらった。よって今回は BWA(2.5G 帯)の干渉協議のみとなった。

本開発実証を行う古城山トンネル付近に、UQコミュニケーションズ株式会社とWireless City Planning株式会社の無線機があったため、両会社と電波干渉協議を行った結果合意を 得るに至った。合意書を「別紙_地域広帯域移動無線アクセスシステムの無線局の申請に伴 う干渉の回避・低減に関する合意書」に記載する。
2.4.2 道路占用許可

本開発実証を進めるにあたり、道路占用許可を取得した。取得した道路占用許可に関する情報を以下に示す。取得した道路占用許可書を「別紙_道路占用許可書」に記載する。

項目	説明	
発行者	独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構	
	理事長 渡邊 大樹	
申請者	エクシオグループ株式会社 東海支店長	
許可日	令和3年12月28日	
占有の目的	総務省社会実験用の実験用器材設置のため	
占有の場所	路線名:	
	東海北陸自動車道	
	場所:	
	東海北陸自動車道 上下線 36.20KP~36.90KP	
	岐阜県美濃市鉈尾 4018-1 地先	
	古城山トンネル電気室~古城山トンネル内	
占有物件	名称・規模・数量:別紙のとおり	
占有の期間	許可日から令和4年3月31日まで	
工事の期間	許可日から令和4年3月31日まで	
道路の復旧方法	原状回復	

表 2-20 取得道路占用許可情報

2.4.3 道路使用許可

本開発実証を進めるにあたり、道路使用許可を取得した。取得した道路使用許可に関する 情報を以下に示す。取得した道路使用許可書を「別紙」道路使用許可書」に記載する。

項目	説明	
発行者	岐阜県高速道路交通警察隊長	
申請者	エクシオグループ(株)東海支店長	
道路使用の目的	総務省社会実験用の実験用器材設置のため	
場所又は区間	東海北陸自動車道 古城山 TN(上り線・下り線)	
期間	令和4年1月17日7時から令和4年3月4日17時まで	
方法又は形態	車線規制(走行車線、追越車線)・路肩規制	
現場責任者	愛知県名古屋市中区錦 3·10·33 錦 SIS ビル 4F	
	矢野 満義	

表 2-21 道路使用許可情報

2.5 その他要件

2.5.1 開発供給計画認定/サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策に ついて

基地局、コア設備等については、特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律(令和2年法律第37号)に基づく開発供給計画認定を受けた実績を有する事業者が開発供給した機器であることから、本開発実証において使用する基地局やコア設備については開発供給計画認定番号「2020開1総経第0003号-1」にて開発供給計画認定を受けているノキアが製造している機器を使用するものとする。

また、日立国際電気においてもノキアとの共同申請の形式で開発供給計画の認定に向け て申請中であり、日立国際電気が実施している特定高度通信技術活用システムの安全性・ 信頼性、供給安定性及びオープン性の確保措置に関しての総務省殿・経済産業省殿からの 指摘事項もやり取りを重ねており、収束に向かっている。

2.5.2 サイバーセキュリティ対策について

サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策についても「IT 調達に係 る国の物品等又は役務の調達方針及び調達手続に関する申合せ」(2018 年 12 月 10 日関係 省庁申合せ)等を始めとする開発供給計画で定められた各種ガイドラインに留意している。

本開発実証を実施するために導入するシステムについて、サイバーセキュリティ対策に 留意し、実証を行う古城山トンネルでのシステム構築とし不必要にデータが外部に漏れな い閉域のシステムとした。

28GHz 帯システムにおいては、ノキア社 NDAC サービスを利用するが、コア装置や基 地局の運用監視機能に限定しており、個人情報に関するデータは扱わない。また、NDAC サービスのデータセンタとは VPN を設定し、サイバーセキュリティ対策を講じている。 また、NDAC サービスでは、ダッシュボードアクセスの HTTPS 暗号化、SIM 情報 管理 DB 自体の暗号化といったサイバーセキュリティ対策を執り行っている。

また、本開発実証においては情報保全を履行する体制を確立して情報管理を行うものと する。

本開発実証において取得するデータの管理方法についても、本コンソーシアム内でのみ 扱うものとし、情報保全を履行する体制にて情報管理を行うものとする。

2.5.3 実証に用いる機材の実証前の品質担保、事前の動作検証

日立国際電気では、5G/AI 協創ラボを開設しており、本開発実証で扱う 28GHz の NSA システムを導入済である。以下の検証を行う。

- ① 端末との相互接続試験:端末のアタッチと iperf の通信が可能であることを確認
- ② 課題実証におけるアプリケーションの事前動作確認(車両検知によるアラート通知のシステム動作すること。及び、遠隔支援作業システムが動作すること。)
- ③ 技術実証での測定項目(基地局同期信号の受信電力測定、無線区間の PDCP スルー プット確認、iperf によるスループット確認、ping による遅延時間測定)が取得でき ること。また、車線規制の時間内に完了するために、一地点において 20 分以内に作 業を終えることができることを検証。上記の項目の測定方法は、3.3.1.2 に記載して いる。

③では、基地局同期信号の受信電力の値と、iperf によるスループット、無線区間の PDCP スループットの関係が分かるようにデータを取得することによって、現地でのリフ ァレンスとなるデータを取得した。

2.6 実証環境の運用

本開発実証では、片側の車線を工事規制を行って実証試験を行う。実証試験開始前に入 念な準備を行うことによって、実証手順内容を定め、効率よく実験データを取得する。

本開発実証で活用する 28GHz の NSA 構成は、遠隔のデータセンタから保守監視を行う ことができる。もし、開発実証中にインシデント等が発生した場合は、遠隔保守のサービ スセンタと連携をとることによって早急に対処を行うものとする。

3. ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討(技術実証)

3.1 実証概要

近年の豪雨の影響から土砂災害が多発している状況である。トンネルを構成しているコ ンクリートの裏側で何が起きているか不明な状況であり、トンネルの保守保全業務の重要 性が高まっている。一方、労働人口が減り、トンネルの保守保全業務を行う技術者の確保が 課題となっている。ローカル5Gを活用することで、保守保全業務を行う作業者に対して遠 隔の熟練者がアドバイスを行う遠隔作業支援を行うことが期待されている。

また、高速道路で保守保全業務を行うために、車線を規制することがあるが、規制中の車 線に車が突入する事故などが発生しており、作業員の安全確保も重要な課題である。このた め、監視カメラの映像をAI分析することで、危険を早く検知して作業員にアラート通知す る仕組みによって、作業員の安全確保を行う。

遠隔作業支援や監視カメラの4K映像をローカル5Gで伝送することによって、上記の ユーザニーズを満たすシステムを構築することができる。なお、キャリア5Gは、都市部な ど人口密度の多いところから優先的に設置されるため、山間部およびトンネル等は、ローカ ル5Gを活用するというように5Gのインフラを使い分けていくことが重要である。

また今回のユースケースはトンネル以外でも求められており、特に高速道路の安全確保 に関しては、高速で走行する自動車の速度に応じたリアルタイム性が求められる。

上述のようなユースケースに対する要件を踏まえて、ローカル5Gの通信インフラに求 める伝送スループットや伝送遅延など、実際の電波伝搬データを取得することによって検 証を行う。

本開発実証の技術実証では、古城山トンネルの下り線に構築するローカル5Gの実証環境を用いて、トンネルにおける 28GHz帯(28.2-28.45GHz)の電波伝搬特性等に関する技術的検討(技術実証)を行う。表 3-1に技術実証の項目を示す。

項目	概要説明
a. ローカル5Gの電波伝	トンネル内の 20 点以上の測定点で受信電力/伝送スループ
搬特性等の測定	ット/伝送遅延を測定。また、カバーエリア端、調整対象区
	域端の調査を行う。
b. テーマ別実証	エリア算出基準にトンネルのモデルがないため、トンネル
I.電波伝搬モデルの精緻化	内の受信電力の測定 データを用いて、電波伝搬モデルを
	構築して検証する。
b. テーマ別実証	28GHz のミリ波で不感地帯になると想定される避難連絡
II.電波反射板によるエリア	坑で、電波反射板を活用して、4Gから5G通信可能である
構築の柔軟化	ことを検証する。

表 3-1 技術実証の項目

図 3-1 に、技術実証の試験系統図を示す。28GHzのRU(Remote Unit)をトンネル内 に設置し、各測定地点において受信電力/伝送スループット/伝送遅延時間を測定することで、 トンネル内の無線電波伝搬環境を明らかにする。 また、トンネル内の保守保全業務に必要となるアプリケーション要求の通信品質を満た すエリア(基地局と端末間の距離)を明らかにする。



図 3-1 技術実証の試験系統図

表 3-2 に、各装置のアンテナ高について纏める。

表	3-2	技術実証におけるアンテナ福	靳
			-

#	装置	アンテナ高
1	ローカル5G基地局RU	高速道路面から 3.75 m(監査路から 2.75m)
2	モバイルルータ	高速道路面から 2.3m (監査路から 1.3m)
3	エリアテスタ	高速道路面から 2.3m (監査路から 1.3m)

図 3-2 に、技術実証で測定する環境の様子を示す。人が一人程度通行可能な監査路を利 用して、基地局からの距離に応じて電波伝搬の特性を測定する。この監査路は、高速道路 の路面から高さ 1m に設置されている。



図 3-2 技術実証の環境説明図

表 3-3 に、技術実証の実施環境やテーマ別実証の対応状況について纏める。

項目			該当(〇、×)
技術実証の	周波数带	4.7GHz 帯	×
実施環境		28GHz 帯	0
		キャリア5Gの周波数帯	×
	屋内外	屋内	0
		屋外	×
		半屋内	×
	周辺環境	都市部	×
		郊外	0
		開放地	×
		その他	〇トンネル
テーマ別	I.電波伝搬モデルの	Kの精緻化	×
実証	精緻化	Sの精緻化	×
		Rの精緻化	×
		その他の精緻化	○トンネル
	II.電波反射板による	実施の有無	0
	エリア構築の柔軟化		
	III.準同期 TDD の追	TDD2 の検討	×
	加パターンの開発	TDD3 の検討	×
		TDD2、3以外のパターンの検討	×
		追加パターンを具備した実機での検証	×

表 3-3 技術実証の実施環境、テーマ別実証の対応状況

IV.その他のテーマ	実施の有無	×

3.2 実証環境

技術実証を行う場所は、2.1 章に記載の通り、東海北陸自動車道の古城山トンネルの下り 線とする。

高速道路における保守保全作業を行う実利用場面を想定して設定された実証環境であり、 以下の理由により、ローカル5Gの技術実証の場として、最適な環境であると考える。

・実証環境は、山間部のトンネルであり、キャリア5Gのサービスエリアとして見込めない場所であり、ローカル5Gの活用が期待される。

・ローカル5Gのエリア算出法において、トンネルの電波伝搬に関するモデルがない。今後、多くの高速道路のトンネルへの展開を鑑みて、トンネル設置におけるエリア算出法として電波伝搬モデルを構築することが重要であると考える。





図 3-3 と図 3-4 を用いて、技術実証の実証環境、及び技術実証の場所に関して説明する。

古城山トンネルの下り線、及び下り線と上り線を結ぶ避難連絡坑を用いて技術実証を行う。 具体的には、以下の項目について測定を行う。

- ① トンネル内電波伝搬測定(20箇所)
- ② 避難連絡坑電波伝搬測定
- ③ トンネル出口漏洩電力測定
- カバーエリア端調査
- ⑤ 調整対象区域端調査

図 3-5 に、トンネル内の基地局設置に関する様子を示す。28GHz の RU をトンネル壁面 近くまで高く設置した。RU の中心まで、監査路から 2.75m であり、道路の路面から 3.75m の高さに設置した。自営等 BWA の LTE のアンテナは、28GHz の RU の下側に二本設置し ている。



図 3-5 基地局設置の様子

3.3 実証内容

3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定

3.3.1.1 実証目標

トンネル内における保守保全作業として、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ローカル5Gの性能を評価するため、 測定データを取りまとめる。測定データからトンネル内の電波伝搬損失特性を明らかにし、 ローカル5Gによるトンネル内保守保全作業に向けたローカル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する。

トンネル内保守保全作業の例として、後述の課題実証に記載している。この課題実証で は、遠隔作業支援で活用するスマートフォンや、作業員の安全監視のために活用する監視 カメラとして 4K カメラを活用することを想定している。4K カメラの解像度で 30fps を実 現するためには、H.264/H.265 圧縮で平均 25Mbps 程度のスループットが必要となる。

トンネル内において、基地局から何 m の範囲で 25Mbps 以上のスループットが得られる か明らかにする。なお、4Kの解像度が得られない場合は、HDの解像度に落とし、2Mbps で映像が途切れないようにすることをトンネル内の保守保全作業を行うエリアで可能であ ることを検証する。

4K解像度が得られる範囲を明らかにすることによって、トンネル内でのローカル5Gの 基地局設置基準を明らかにする。

また、4K 解像度が得られなかった場合であっても、HD 画像の解像度が担保されること を確認することによって、遠隔作業支援や作業員への危険アラート通知のユースケースに おいて、画質劣化による作業の容易性に影響があったとしても、機能を実現することが担 保できることを確認する。

測定の結果、ローカル5Gを用いたソリューションの所要性能を実現できない場合は、 実測データに基づき必要なローカル5Gを構築する方策(必要な帯域幅、送信電力、準同 期への対応等)を検討する。

3.3.1.2 評価·検証項目

ローカル5Gのトンネル内における技術実証における評価・検証内容を表 3-4に示す。

#	評価内容	検証内容
1	トンネル内の監視員通路	基地局設置場所から一定の距離(例:10m)離れた場所か
	20 箇所以上の電波伝搬特	ら一定間隔(20m)ごとに 20 箇所以上の地点で表 3-5 に示
	性測定	す測定項目全てを測定し、以下を検証する。
		1. 受信電力と基地局からの距離の特性検証
		(伝搬モデルの検証に活用)
		2. アプリの要件を満たす伝送スループットを達成する
		基地局からの距離

表 3-4 技術実証の評価・検証内容

		3. 伝送遅延時間と基地局からの距離の特性検証
2	トンネル出口の漏洩電力	トンネル出口において電波の漏洩電力を測定。表 3-5 に
	測定	示す測定項目の受信電力を測定し、以下を検証する。
		1. トンネル外への漏洩電力の有無
3	カバーエリア端の調査	エリア算出法において、屋内の自由空間伝搬モデルを仮
		定し、建物侵入損なしの条件でカバーエリア端を推定し、
		実測と比較。表 3-5 に示す測定項目の受信電力を推定力
		バーエリア端位置で測定し、異なる場合は、カバーエリ
		ア端の閾値の受信電力となる場所を探す。以下を検証す
		る。
		1. 推定カバーエリア端と実測カバーエリア端の基地局
		からの距離の差分
4	調整対象区域端の調査	調整対象区域端についても、想定と実測の比較を行う。
		表 3-5 に示す測定項目の受信電力を推定調整対象区域エ
		リア端で測定し、異なる場合は、調整対象区域端の閾値
		の受信電力となる場所を探す、以下を検証する。
		1. 推定調整対象区域端と実測調整対象区域端の基地局
		からの距離の差分
		なお、高速道路上で工事規制の関係で人が立ち入るのが
		難しく実測困難な場合は測定しない。一般道で調査する。

各測定地点での測定項目・測定方法を表 3-5 に示す。

#	測定項目	測定方法
1	受信電力	各測定地点においてエリアテスタを活用して、基地局が
		送信する同期信号の受信電力(dBm)を測定
2	伝送スループット	上りと下りの伝送スループット(Mbit/s)を iPerf を用い
		て測定、無線区間のスループットについては、端末にて
		PDCP のスループットを測定
3	伝送遅延時間	Pingを用いて往復遅延時間(msec)を測定
4	SINR	端末における SINR を測定

表 3-5 各測定地点での測定項目・測定方法

図 3-6 に測定システム構成を示す。エリアテスタによって基地局が送信する同期信号の 受信電力を測定する。PC間で、iPerfを用いて上りと下りの伝送スループット(UDP/TCP) について評価を行う。また、無線区間については、PDCP レイヤでのスループットを測定 する。

また、Pingを用いて往復の伝送遅延時間を測定する。

また、端末における SINR を測定する。

エリアテスタと5Gモバイルルータを組み合わせて測定する。



図 3-6 測定システムの構成

各測定地点での測定項目(受信電力、伝送スループット、伝送遅延時間、PDCP スループッ ト、SINR)に対する測定手順を以下に示す。

(1) 受信電力(基地局同期信号の受信電力)の測定手順

- ① 測定器設定(起動時のみ)
 - 1. エリアテスタの電源オン
 - 2. PC で測定ソフトを起動
 - 3. 測定ソフトでワークスペース、使用するハードウェアを選択
- ② 受信電力(28GHz 基地局同期信号の受信電力)測定(測定地点)
 - 1. 28GHz帯のデバイスを設定に変更
 - ホーンアンテナを活用する場合、ホーンアンテナの向きを設定
 (基本的には基地局が設置されている方向、もしくは反射板が設置されている 方向を向けるものとする。)
 - 3. 測定ソフトの Start ボタンを押下し、測定開始
 - 4. 測定ソフトの Stop ボタンを押下し、測定終了
 - 測定したログを保存
 ※測定毎に CSV 形式で保存する。測定地点、日時、ホーンアンテナの向き等の 情報でログファイル名を区別する。
 - 6. 3の状態で画面に表示されている情報や測定位置を記録
 ※測定地点、日時、ログファイル名、ホーンアンテナの向き、測定時の読み取り 情報(RSRP値)の記入
 - 7. ホーンアンテナを活用し、かつホーンアンテナの向きを変更する場合、上記 2~
 6を繰り返し実施
 ※測定地点に構造物等、電波に大きく影響を与えると想定されるものがある場合、その箇所での一番強い反射波等を測定して、ホーンアンテナの向きを記録
 - 8. 次の測定地点へ移動し、上記 2~7 を繰り返し実施
 ※予定している測定箇所の測定が完了したら、エリアテスタ・PC 電源オフ
 ※各測定地点での測定時間:1測定ポイント辺り移動を含め、20分を想定

- (2) 伝送スループット・伝送遅延時間・PDCP スループット・SINR の測定手順
 - ① iperf サーバ上で、iperf コマンドをサーバーモードで実行する。
 - ② 測定地点へ移動し、端末が基地局と接続されていることを確認
 - ③ 測定地点での測定条件の記録
 - ④ 測定用 PC から、iperf サーバに対する ping で、通信できることを確認する。
 - ⑤ Pingによる伝送遅延時間を測定し、ログファイルに格納する。
 2 分間を1回測定
 - ⑥ 測定用 PC から、iperf で伝送スループットを測定し、ログファイルに格納する。
 上り:2分間を UDP と TCP で 2 回測定
 下り:2分間を UDP と TCP で 2 回測定
 - ⑦ Iperfを実行しているときに、5Gモバイルルータの Diagnostic Port 経由で得られる無線区間の情報を格納する。PDCP スループット、SINR のデータが取得されていることを確認。
 - ⑧ Ping, iperfの各ログと端末で測定した無線区間情報(PDCP スループット、SINR のデータ)、が格納されていることを確認。
 - ⑨ 次の測定地点に移動し、②~⑧を繰り返す。
 ※予定している測定地点の測定が完了したら、PC・モバイルルータ電源オフ
 ※各測定地点での測定時間:1測定ポイント辺り移動を含め、30分を想定

各測定地点での測定項目(受信電力、伝送スループット、伝送遅延時間)で得られたデー タは、検証内容に合わせてデータ集計分析を行う。

3.3.1.3 評価·検証方法

技術実証の評価・検証方法について、以下に図を用いて説明する。

(1) トンネル内の監視員通路の電波伝搬特性測定

図 3-7 に、トンネル内での電波伝搬特性測定で、基地局が送信する同期信号の受信電力 の測定と、伝送スループット・伝送遅延時間の測定に関する説明図を示す。基地局から一定 の距離(例:10m)をスタート地点として 20m間隔で 20 箇所以上の測定地点を決める。 エリアテスタを活用して、基地局同期信号の受信電力を 5 分間測定することにより、1地 点あたり 1000 サンプル以上のデータを測定する。

また、各地点で 5G モバイルルータとノートパソコンを接続して、サーバとの間のスルー プット(UDP DL/UDP UL/TCP DL/TCP UL)と往復遅延時間(Ping)を 2 分間(120 サ ンプル)データを取得する。このとき、モバイルルータの Diagnostic Port 経由で PDCP レ イヤのスループットと、SINR のデータを同時に取得する。



図 3-7 基地局同期信号の受信電力/伝送スループット・伝送遅延の測定方法

受信電力/伝送スループット・伝送遅延の測定時の様子を図 3-8 に示す。



ホーンアンテナで受信電力を確認後、 5Gモバイルルータをホーンアンテナの前に設置

図 3-8 受信電力/伝送スループット・伝送遅延の測定の様子

受信電力/伝送スループット/伝送遅延特性と車両の通過影響に関して

上記の各測定において、通過する車が測定結果に与える影響を検討するために、図 3-9 に 示すチェックシートに車の通過状況を記録することとした。



図 3-9 車両通過に関する記録シート

- ① 測定 ID…各測定に対する ID (通し番号)
- ② 距離情報 X,Y…監査路では、基地局から車道方向での距離を X として記録。避難連絡 坑で反射板を用いた測定では、避難連絡坑の鉄の扉からの避難連絡坑方向での距離を X とし、横方向のずれを Y として記録
- ③ 測定種別…SS-RSRP、ping、UDP_DL、UDP_UL、TCP_DL、TCP_ULの6種類の 測定のどれを実施したかについて記録

上記の記録シートを用いて各測定を区別し、それぞれの測定における車の通過のタイミン グを上記④のように測定開始からの経過時間のどの時点で車が通過したか縦線を引くこと によって記録した。

(2) トンネル出口の漏洩電力測定

トンネル出口での受信電力を測定し、トンネル外に漏洩している電力の有無を確認する。 もし、トンネル出口での受信電力が、カバーエリアの閾値よりも小さければ、トンネル 内にカバーエリア端があることになる。



受信電力(SS-RSRP)測定:測定可否判断→取得可能な場合、120サンプル以上/地点

図 3-10 トンネル外への漏洩電力の測定方法

また、トンネル出口での受信電力が、調整対象区域の閾値よりも小さい場合は、調整対 象区域もトンネル内となることが確認できる。

漏洩電力が、カバーエリアの閾値よりも大きい、または調整対象区域の閾値よりも大き い場合は、カバーエリア端や調整対象区域の閾値となる受信電力を高速道路上で測定する のが困難な可能性が高い。カバーエリア端や調整対象区域の調査をトンネル外で測定する 場合には、高速道路上では工事規制で測定が可能な範囲内に制限するものとし、一般道も含 めて調査を行う。

(3) カバーエリア端の調査

2.2.1.1 に記載のエリア算出法に従って計算したカバーエリア端の近辺で基地局同期信 号の受信電力を測定する。エリア算出式のカバーエリアの受信電力の閾値と異なっている 場合は、その閾値が実測される基地局からの距離を確認する。

図 3-11 にカバーエリア端の測定について説明する。カバーエリア端となりそうな場所 を推測しながら受信電力を測定する。受信電力の平均値が、-81.2dBm となる地点を探し て、基地局からの距離を測定することによって、実際のカバーエリア端と、推定カバーエ リア端の距離の差を調べる。



受信電力(SS-RSRP)測定:測定可否判断→取得可能な場合、120点以上/地点

図 3-11 カバーエリア端の測定方法

(4) 調整対象区域端の調査

2.2.1.1 に記載のエリア算出法に従って計算した調整対象区域端の近辺で基地局同期信号 の受信電力を測定する。エリア算出式の調整対象区域端の受信電力の閾値と異なっている 場合は、その閾値が実測される基地局からの距離を確認する。

図 3-12 に調整対象区域端の測定について説明する。推定した調整対象区域端の地点の 近辺で受信電力を測定する。受信電力の平均値が、-90.0dBm となる地点を探して、基地 局からの距離を測定することによって、実際の調整対象区域端と、推定対象区域端の距離 の差を調べる。



図 3-12 調整対象区域端の測定方法

3.3.1.4 実証結果及び考察

(1) トンネル内の監視員通路の電波伝搬特性測定

1) 受信電力(RSSI)

基地局から 10m 離れた地点において基地局の同期信号の受信電力 (SS-RSRP) の時系列 データを図 3-13 に示す。ここで、CC(Component Carrier)1~CC4 は、表 2-4 に示す F1 ~F4 に対応している。CC3 が最も強い受信電力となっている。

100MHzの帯域幅のシステムとして電波伝搬を解析するため、一つの CC に着目してデ ータを纏めることする。以降では、10m 地点で最も強い受信電力を示した CC3 のデータを 基本として、トンネル内における受信電力を纏めることとする。



図 3-13 基地局同期信号の受信電力(SS-RSRP)の測定結果(時系列)

ここで、SS-RSRPの受信電力測定結果から RSSI に換算する方法について、下記に示す。

- ・SSBの SCS(サブキャリア間隔)は240kHz
- ・1 リソースブロック=12 サブキャリア=12*240kHz=2.88MHz
- ・RSRPの測定単位は 2.88MHz
- ・RSSIの帯域幅: 120kHz(データ信号の SCS)× 12(12 サブキャリア=1 リソースブロック)× 66(100MHz システムのリソースブロック数)=95.04MHz
- ・RSRP (2.88MHz) とRSSI (95.04MHz) の電力差=10*log10(2.88/95.04)=26.0 dB

下記の式により、RSSIを求めることとする。 RSSI = SS-RSRP+26 dB

基地局からの距離に応じて、基地局同期信号の受信電力 SS-RSRP を測定し、上記の計算によって RSSI を求めた結果を図 3-14 に示す。



図 3-14 基地局からの距離(10m~390m) vs. RSSI 特性

図 3-14 は、エリアテスタとして PCTEL を活用して測定した結果である。受信電力やス ループットの測定と並行して、カバーエリア端や干渉区域端の調査をアンリツの測定器 (ML8780A)を活用して行っていたが、カバーエリア端や干渉区域端の調査が終わった後 に、基地局からの距離 300m から 900m までの区間については、アンリツの測定器で追加 測定した。追加測定の結果を図 3-15 に示す。





RSSI の理論値については、28GHz の審査基準の式をベースとして、下記の式によって 求めた。

 Pr = Pt + Gt · Lf + Gr - Lr - L - 4
 (※式中の4は、人体吸収損)
 (式2)

 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): 22dBm

 Gt [dBm] : 送信アンテナ利得: 23dB

 Lf [dB] : 基地局の給電線損失: 0 dB

 Gr [dBi] : 受信アンテナ利得: 0 dB

Lr [dB]: 測定器の受信ケーブル損失: 4dB

L[dB]: 伝搬損失

Lとしては、下記の自由空間伝搬損の式を用いた。

L = 20 log10 (4 π d / λ) : $\lambda = 3 \times 10^{8}$ / F3 (Hz) : (F3 = 28448.64 MHz)

理論値と比べて、実測の RSSI は高い受信電力を示している。これは、トンネル構造で導 波管として電波を遠くまで届くためと推測できる。

以下に、基地局から 50m 離れた地点や 70m 離れた地点における受信電力の劣化について考察する。

まず、基地局(28GHz RU/LTE)の設置に関して、図 3-16の施工図を用いて説明する。 基地局は、トンネル内の直線上に電波を届けるため、監査路の上で壁面に近い場所に設置し ている。基地局から 1.3m 離れた場所に、トンネルの監視カメラ CCTV が設置されている。 CCTV よりも前に基地局を設置してしまうと、トンネルを監視することに障害が出るため、 CCTV の後ろに設置を行った。ただし、端末との間に見通しを確保するために、28GHz の RU としては、CCTV よりも高い位置に設置している。



図 3-16 基地局 (28GHz RU/LTE) の施工図

図 3-17 に示すように、基地局から 30m 離れた地点で端末側から見た場合に基地局 (28GHz RU) が監視カメラ CCTV より上に設置されており、見通しが確保されている様



図 3-17 基地局からの距離 30mの地点における基地局見通し状況:LOS

次に、基地局から 50m 離れた地点の様子について、図 3-18 に示す。非常駐車帯には車 を止めるスペースがあるため、監査路が曲がって、図 3-18 の右側の写真に写っているよう になる。基地局から 50m 離れた監査路上では、直接基地局を見通すことができない NLOS の状況になる。この地点では NLOS となるため、図 3-14 の水色に示すように低い受信電 力となる。

なお、図 3-14の灰色の点で示した測定結果は、図 3-18の左側の写真に写っているよう に非常駐車帯の白線近くに測定器を設置して測定した受信電力を示している。非常駐車帯 の中では、基地局を見通すことができる LOS であるため、高い受信電力が得られる。なお、 非常駐車帯における測定器のアンテナ高は、道路の路面から 1.3m とした。

監査路上での測定では、監査路の高さ 1m と監査路の路面からの高さ 1.3m の合計として アンテナ高は 2.3m となるが、非常駐車帯の上では、道路の路面から 1.3m となっているこ とに留意されたい。実際に作業員が非常駐車帯上で、スマートフォン等の端末を手に持つこ とを想定した高さとして測定することを優先したためである。

なお、図 3-18の左側の写真は、反射板を設置した際に撮影したものであり、写真では反射板の高さ 1.6m に調整してしているが、図 3-14の受信電力測定時には高さ 1.3m として



図 3-18 基地局から 50m 離れた地点の様子

次に、図 3-14 の結果において、基地局から 70m~80m 離れた地点で受信電力が低くなっている理由について考察する。基地局からの距離 70m の地点における基地局の見通し状況について、図 3-19 に示す。



図 3-19 基地局からの距離 70m の地点における基地局見通し状況: NLOS

非常駐車帯に設置されている非常電話の看板が、28GHz RU の見通しを遮っており、 NLOS となっている。この遮蔽によって、基地局からの距離 70m~80m の地点では、受信 電力が低くなっていると考えられる。なお、この 70m~80m の地点については、念のため 再測定を実施したが、受信電力が低くなる結果に変化はなかった。 続いて、図 3-14の結果において、基地局から 230m 離れた地点あたりで受信電力が高くなっている理由について考察する。

図 3-20 に示すように、トンネルがカーブしており、28GHz の RU 設置場所の見通し がよい状況になってくる。このため、受信電力が高くなっていると考えられる。また、導波 管効果により、遠くまで電波が届く効果もあると推測できる。



図 3-20 基地局から 230m 地点の様子:LOS

次に、受信電力測定において、車の通過の影響に関して考察する。まず、各測定種別ごと に、車両の平均通過台数を纏めたものを表 3-6 に示す。

場所	測定種別	測定時間	車の平均通過台数	
監査路	受信電力	5分	26 台	
	スループット/遅延	2分	11 台	
避難連絡坑	受信電力	5分	22 台	
	スループット/遅延	2分	13 台	

表 3-6 測定時における車両の通過台数(平均値)

受信電力の測定では、1000 サンプル以上のデータを取得するために、5 分間の測定を行っている。この5 分間の車の平均通過台数は 26 台であった。

図 3-21 に、基地局からの距離 10m の地点における受信電力の測定の様子を示す。この グラフには、複数のビームの時間変化をプロットしている。複数のビームの中で、PCI=53 (周波数 F3 の CC3) で Beam Index 39 のビームが最も強い電波として受信している様子 が分かる。



図 3-21 基地局からの距離 10m における SS-RSRP 測定の様子

この受信電力測定の5分間に、小型車が13台、大型車が1台通過している。しかし、車 の通過があっても、SS-RSRPの一番強い値は、車の通過台数との間に相関関係を見ること はできない。受信電力のレベル変動が4dB以内に納まっていることから、車両通過による 受信電力の測定結果に大きな影響はなかったと考えることができる。基地局からの距離が 10m と近いため、基地局から測定器に直接電波が届くので受信レベル変動としての影響が なかったと考えられる。

次に、図 3-22 に基地局からの距離 390m の地点における SS-RSRP 測定の様子を示す。 全体として受信電力の変動幅は 4dB 以内に抑えられている。

この5分間の測定の間に、小型車が16台、大型車が6台通過している。ただし、車両の 通過タイミングで大きなレベル変動はなく、車両通過の影響を受けていない。

車両 Beam Index20 (PCI=51/F2, PCI=50/F1)や Beam Index15 (PCI=50/F1) あたりで 受信電力として強い値を示しており、比較的強い受信電力の測定であり、車の通過時間も短 く、長期間に渡る遮蔽が生じないため、車両の通過による影響は少ないと考えられる。



後述の反射板を用いたエリア構築の章にて詳細を記載するが、避難連絡坑で反射板を用 いない場合は、受信電力が非常に低い状況である。この状況において、避難連絡坑の前を車 両が通過するとき、車自身が反射板となって反射波を測定器に届けるため、瞬間的に高い受 信電力が得られるという現象が観測された。

避難連絡坑で反射板を用いない場合の受信電力測定以外の試験については、車両の通過 によって大きく性能が劣化するといった事象は観測されなかった。

2) UDP DL スループット

まず、基地局から 10m 離れた地点において iperf3 による UDP DL(ダウンリンク)スルー プット測定結果の時系列データを図 3·23 に示す。サーバから 2Gbps の負荷をかけ、120 秒 間かけて測定した結果である。Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モ バイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオ レンジ色で示す。測定結果を表 3-7 に纏める。





表 3-7 基地局からの距離 10m 地点におり	ける UDP DL	スループット測定結果
--------------------------	-----------	------------

|--|

Iperf3	1.48Gbps	1.57Gbps	233.5Mbps	1.86Gbps	1.45Gbps
PDCP	2.04Gbps	2.38Gbps	24.6Mbps	2.045Gbps	2.035 Gbps

また、UDP DL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-24 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-25 に示す。PDCP レイヤのスループットは、 2.05Gbps に集中しており、分散が少ないのに対して、iperf3 では、約 1.5Gbps を中心とす る山と、約 1.9Gbps を中心とする山の二つに分類できる。ノートパソコンの処理状況等に よって、1.9Gbps 程度までデータ処理が間に合うケースと、1.5Gbps 程度までしか処理でき ないケースがあると推測できる。

5G モバイルルータとしては、PDCP レイヤで約 2Gbps の通信を維持できているが、5G モバイルルータと接続しているノートパソコンにてデータの取りこぼしが発生していると 推測される。ノートパソコンの処理性能が足りていなかった可能性が高いが、5G モバイル ルータとノートパソコン間のインタフェースにて取りこぼしが生じた可能性もある。本技 術実証では、5G モバイルルータを USB3.0 から 2.5Gbps のイーサネットに変換するアダ プタでイーサネットに変換し、再度、イーサネットから USB3.0 に変換するアダプタを経 由してノートパソコンの USB3.0 のポートに接続して実験を行っている。この変換アダプ タでロスが発生していた可能性も否めない。







UDP DL(PDCP)ヒストグラム

図 3-25 基地局からの距離 10m における UDP DL(PDCP)のヒストグラム

本技術実証では、UDP DL に対して、5G 通信速度が期待できる場所では 2Gbps の負荷 をかけて測定を行ったが、2Gbps の通信速度が得られない地点(後述する避難連絡坑内等) においては、サーバやコア装置等におけるシステム側でパケットが詰まってバッファ溢れ を起こす可能性も考えられるので、2Gbps の負荷をかけて試行を行った際に得られたスル ープットの最大値を調べ、最大値あたりまで負荷を下げる調整も行ってデータを取得した。

また、本開発実証では実施しなかったが、iperf3のオプションとして、パラレル数を増や して一つのプロセスで扱う通信速度を引き下げることも効果がある可能性はある。パラレ ルに分けたスループットを合計することによって全体のスループットを求めることによっ て、PDCP レイヤに近いスループットの実験結果が得られる可能性はある。

なお、PDCP レイヤのスループットと iperf3 のログで求めたスループットで差があるの は、UDP DL の測定で基地局に近い場所に限られている。ノートパソコンで処理が間に合 う程度にスループットが低くなれば、iperf3 でのスループット測定と PDCP レイヤでのス ループット測定結果は、ほぼ一致することが確認できている。後述の UDP UL、TCP DL、 TCP UL 等では PDCP レイヤのスループットと iperf3 でのログによるスループットは、ほ ぼ一致している。

上述の基地局から 10m 地点での測定と同様の方法にてデータを収集して、基地局からの 距離で 20 地点以上の場所において UDP DL スループット(iperf3/PDCP)の測定を行った。 図 3-26 に、測定結果を示す。



図 3-26 基地局からの距離 vs. UDP DL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-26の結果より、下記のことが分かる。

- ① PDCP レイヤと iperf3 のスループットの差が出るのは、基地局からの距離 90m 近く までである。この場合、PDCP レイヤのスループットは 2Gbps に近い。
- ② 基地局(28GHz RU)の指向性は下り車線の進行方向に向けているが、基地局の指 向性と反対となる裏側においても 5G の通信が可能
- ③ 非常駐車帯上 50m 地点でのスループットは 1.8Gbps 程度であるが、基地局に対して NLOS となる監査路上の 50m 地点におけるスループットは約 1Gbps までスループ

ットが劣化する。

 ④ 基地局から 310m 離れた地点まで、5G 接続が可能であり、スループットとして 1.5Gbps から 2Gbps 程度のスループットとなる。330m 以降では、LTE 接続となり、 iperf3 のスループット平均値は約 20Mbps になる。

上記に関する考察について、以下に記載する。

① PDCP レイヤと iperf3 のスループットの違いについて

上述の通り、2Gbps 近い速度では、ノートパソコンの処理能力の問題でデータの取りこ ぼし等が発生していると考えられる。

② 基地局の裏側で 5G 通信が可能であることについて

図 3-27 に、基地局の裏側 10m の地点で測定している様子を示す。図 3-16 に示したように、基地局(28GHz RU)から 1.3m 離れた場所に監視カメラの CCTV が設置されている。この監視カメラの CCTV、もしくはトンネル内の主要構造物(非常電話の看板等)にあたって反射した 5G の電波によって、基地局の裏側であっても 5G 接続が可能である。



図 3-27 基地局の裏側 10m 地点における 5G 通信の様子

③ 非常駐車帯の監査路 50m 地点でのスループット劣化について

図 3-18 で説明したように、非常駐車帯では車を止めるスペースがあるため、監査路が 曲がっており、50m 地点の監査路上では基地局への見通しがない NLOS となっている。 このため、スループットが劣化したと考えられる。 ④ 基地局から 310m 離れた地点までの 5G 接続可能について

本実証実験で用いたローカル 5G システムでは、アンカーバンドの LTE を用いてアタ ッチを行ってから、5G のセルが追加するシステムとなっている。具体的には、iperf3 の セッションを張る前に、5G モバイルルータで測定した受信電力をシステムに報告し、そ の値が閾値以上であれば 5G のセルを追加して 5G 通信を行い、受信電力が低ければ 4G の LTE 通信となる。なお、本技術実証での実験で測定した地点において、LTE でアタッ チできなかった場所はなかった。

また、工事規制の関係から、技術実証期間の時間制約があったため、閾値を変更して 5G に繋がりやすくすることまでは確認を行っていない。

次に、5G モバイルルータの端末から得られた受信電力(RSRP)の測定結果を図 3-28 に示す。330m 以降では、受信電力が弱くなるため、5G 通信のセッションを張ることが 難しくなったと考えられる。



図 3-28 UDP DL 時、5G モバイルルータで測定した受信電力(RSRP)

上記では、基地局から 330m 以上離れた地点で 5G 接続するのが難しくなる結果が得られたが、逆に、5G に一度接続してしまった後に基地局から離れる方向に移動したとしても 5G 通信が維持される可能性が高いと考えた。

そこで、基地局から近い場所で 5G 接続した後で、どこまで離れても 5G 通信が維持され るのか検証を行った。その結果を図 3-29 に示す。基地局から 110m 離れた地点で 5G 接続 して、そのままトンネル出口まで歩行しながら UDP DL スループット (PDCP レイヤ)を 測定した。

トンネルの全区間で5G通信が可能であることを確認した。

基地局から 110m 離れた地点かトンネル出口近くにある非常駐車帯 (基地局から約 800m 離れている場所)までは、約 1.5Gbps 程度のスループットを確認できる。移動に伴うフェ ージング等で多少のバラつきは出ているが、1.5Gbps を中心として、あまり速度劣化は起き ていない。この 1.5Gbps は iperf3 で UDP DL にかけた負荷の数値と同じ値である。負荷を 1.5Gbps とした理由として、上述のように 2Gbps の負荷をかけると PDCP レイヤと iperf3 のスループットに差が生じており、5G モバイルルータに接続されているノートパソコンで の処理が間に合わなくなり、システム側でバッファ溢れ等の問題が引き起こされる可能性 があると考え、そういった問題を回避するために負荷を 1.5Gbps 程度に設定している。 なお、トンネル出口近くの非常駐車帯での監査路では、NLOS となり、基地局からの信号 が直接届きにくくなって受信電力が下がり、スループットが劣化している様子が伺える。

その後、非常駐車帯からトンネル出口まで移動したが、トンネル出口の地点においても、約1Gbpsのスループットが出ていることを確認した。

基地局設置場所からトンネル出口まで 930m あるので、基地局から約 930m 離れた距離 にて、UDP DL で約 1Gbps のスループットが出ることを確認することができた。

上記の結果より、5G 接続の閾値を調整する等して、システムに 5G 接続しやすくして 5G の通信セッションを確立すれば、トンネル出口までの区間において 5G 通信が可能であることを実証することができた。



図 3-29 5G 接続後にトンネル内を移動したときの UDP DL スループット(PDCP)

続いて、端末における SINR の結果を、図 3-30 に示す。

今回の技術実証では、基地局1台と端末1台の通信でスループットを測定している。このため、隣接セル等からの干渉成分はない。1つの基地局で複数台の端末をスケジューリングした場合であっても外部からの干渉成分はないため、実質的には SNR を測定していることに相当する。

全ての区間において SINR の平均値が 20dB 以上を示しており、64QAM での変調方式に よる高速通信が可能である。



図 3-30 UDP DL 通信時の端末における SINR 特性

図 3-31 に、基地局からの距離 310m における SINR の時系列データを示す。多少の変動 はあるものの高い SINR で通信できている様子が分かる。



図 3-31 基地局からの距離 310m における UDP DL 通信時の SINR 特性(時系列)

図 3-32 に、基地局からの距離 310m において、UDP DL 通信時の変調方式の頻度を示 す。64QAM:978 サンプル、16QAM:2 サンプル、QPSK:3 サンプルで、ほとんど 64QAM で高速通信を行っていることが分かる。



図 3-32 基地局からの距離 310m における UDP DL 通信時の変調方式

3) UDP UL スループット

まず、基地局から 30m 離れた地点において iperf3 による UDP UL(アップリンク)スルー プット測定結果の時系列データを図 3-33 に示す。端末から 300Mbps の負荷をかけ、120 秒間かけて測定した結果である。

Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。測定結果を表 に纏める。PDCP レイヤと iperf3 のスループットは、ほぼ同じ値を示している。5G モバイ ルルータの処理能力やノートパソコンの処理能力として余裕があるためと考えられる。

この測定中に、大型車3台、普通車4台が車両として通過したが、車両通過による性能劣 化は見られなかった。基地局との距離も近いため、車両通過の影響は少ないと考えられる。



図 3-33 基地局からの距離 30m 地点における UDP UL スループット(時系列データ)

表 3-8 基地局からの距離 30m 地点における UDP UL スループット測定結果

~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~ ~					
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%

Iperf3	245Mbps	244.8Mbps	1.48Mbps	247Mbps	243Mbps
PDCP	$251.6 \mathrm{Mbps}$	$250.3 \mathrm{Mbps}$	12.7Mbps	$258.4 \mathrm{Mbps}$	$243.7 \mathrm{Mbps}$

また、UDP UL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-34 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-35 に示す。iperf3 では 246Mbps が中心とな っており、PDCP レイヤのスループットは 254Mbps を中心に広がっている。PDCP レイヤ の方がスループットの平均値が高いが、プロトコルオーバヘッドの違いと考えられる。





図 3-34 基地局からの距離 30m における UDP UL(iperf3)のヒストグラム

図 3-35 基地局からの距離 30m における UDP UL(PDCP)のヒストグラム

上述の基地局から 30m 地点での測定と同様の方法にてデータを収集して、基地局からの 距離で 20 地点以上の場所において UDP UL スループット(iperf3/PDCP)の測定を行った。 図 3-36 に、測定結果を示す。



図 3-36 基地局からの距離 vs. UDP UL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-36の結果より、下記のことが分かる。

- ① PDCP レイヤと iperf3 のスループットの差がほとんどない。
- ② 基地局(28GHz RU)の指向性は下り車線の進行方向に向けているが、基地局の指 向性と反対となる裏側においても 5Gの通信が可能
- ③ 非常駐車帯上 50m 地点でのスループットは 120Mbps 程度であるが、基地局に対し て NLOS となる監査路上の 50m 地点におけるスループットは約 20Mbps までスルー プットが劣化する。
- ④ 測定した全区間で 5G 通信が可能。10~30m 地点で UDP UL 約 240Mbps で、50m 以降で約 80~120Mbps のスループットを確認。(LTE の上限は 10Mbps)
- については、ノートパソコンやインタフェースの処理性能等の問題がなくなるためと 考えられる。
- ② については、基地局の裏側 10m 離れた地点での通信では、端末から基地局に届くまで、基地局より先の構造物に反射してから届くため基地局での受信電力が弱くなっていると推測され、基地局の表側での通信に比べて、スループットが低くなっていると考えられる。
- ③ 非常駐車帯での監査路上では、上述のように NLOS のためスループットは劣化する。
- ④ については、5G 通信を行う判断として、端末から基地局に届いた受信電力として十 分であったと考えられる。

なお、UDP UL(アップリンク)の測定では、端末における SINR の測定データはな い。本技術実証に用いた基地局では、統計情報は収集しているが、個別のアップリンク通 信に対して、上りの SINR の測定データを収集することはできない。

4) TCP DL スループット

まず、基地局から 10m 離れた地点において iperf3 による TCP DL (ダウンリンク)スル ープット測定結果の時系列データを図 3-37 に示す。

TCP の測定ではサーバからの負荷を指定する必要はなく、120 秒間かけて測定した結果

である。Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。測 定結果を表 3-9 に纏める。PDCP レイヤと iperf3 のスループットは、ほぼ同じ値を示して いる。UDP DL の 2Gbps 近く必要となる処理能力に比べると、5G モバイルルータの処理 能力やノートパソコンの処理能力に余裕ができていると考えられる。

この測定中に、大型車4台、普通車11台が車両として通過したが、車両通過による性能 劣化は見られなかった。基地局との距離も近いため、車両通過の影響は少ないと考えられる。



図 3·37 基地局からの距離 10m 地点における TCP DL スループット(時系列データ)

種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Iperf3	1.08Gbps	1.08Gbps	36Mbps	1.12Gbps	1.03Gbps
PDCP	1.11Gbps	1.11Gbps	102.7Mbps	1.22Gbps	1.08Gbps

表 3-9 基地局からの距離 10m 地点における TCP DL スループット測定結果

また、TCP DL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-38 に、PDCP レ イヤのスループットのヒストグラムを図 3-39 に示す。iperf3 では 1.08Gbps が中心となっ ており、PDCP レイヤのスループットは、1.12Gbps を中心に広がっている。PDCP レイヤ の方がスループットの平均値が高いが、プロトコルオーバヘッドの違いと考えられる。



図 3-38 基地局からの距離 10m における TCP DL(iperf3)のヒストグラム



図 3-39 基地局からの距離 10m における TCP DL(PDCP)のヒストグラム

上述の基地局から 10m 地点での測定と同様の方法にてデータを収集して、基地局からの 距離で 20 地点以上の場所において TCP DL スループット(iperf3/PDCP)の測定を行った。 図 3-40 に、測定結果を示す。



図 3-40 基地局からの距離 vs. TCP DL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-40 の結果より、下記が分かる。

- ① PDCP レイヤと iperf3 のスループットの差がほとんどない。
- ② 基地局(28GHz RU)の指向性は下り車線の進行方向に向けているが、基地局の指 向性と反対となる裏側においても 5G の通信が可能で速度劣化も少ない。
- ③ 非常駐車帯上 50m 地点でのスループットは 1.2Gbps 程度であるが、基地局に対して NLOS となる監査路上の 50m 地点におけるスループットは約 1Gbps までスループ ットが劣化する。
- ④ 310m 離れた地点まで 5G 通信が可能。10m から 310m の地点まで TCP DL 約 1~
 1.2Gbps のスループットを確認。320m から 390m の地点まで LTE 接続となり、約 20Mbps のスループットとなることを確認。
- については、上述のようにノートパソコンやインタフェースの処理性能等の問題がなくなると考えられる。
- ② については、基地局から先の構造物で反射する反射波が十分な受信電力となり、基地局の表側 10mの地点の通信と比べて、ほぼ同じ程度のスループットを出すことができたと考えられる。
- ③ 非常駐車帯での監査路上では、上述のように NLOS のためスループットは劣化する。
- ④ については、UDP DLの考察と同様に、セッションを接続する際に端末で測定した基 地局同期信号の受信電力が弱いため、5G 接続できなかったと考えられる。

続いて、TCP DL 通信時の端末における SINR の測定結果を図 3-41 に示す。

UDP DL 通信の SINR 特性でも記載したように、今回の技術実証では、基地局1台と端 末1 台の通信でスループットを測定しており、隣接セル等からの干渉成分はなく、実質的 には SNR を測定していることに相当する。

全ての区間において SINR の平均値が 20dB 以上を示しており、64QAM での変調方式に よる高速通信が可能である。


図 3-41 TCP DL 通信時の端末における SINR 特性

図 3-42 に、基地局からの距離 310m における SINR の時系列データを示す。多少の変動 はあるものの高い SINR で通信できている様子が分かる。



図 3-42 基地局からの距離 310m における TCP DL 通信時の SINR 特性(時系列)

図 3-43 に、基地局からの距離 310m において、TCP DL 通信時の変調方式の頻度を示 す。64QAM:974 サンプル、16QAM:6 サンプル、QPSK:4 サンプルで、ほとんど 64QAM で高速通信を行っていることが分かる。



図 3-43 基地局からの距離 310m における TCP DL 通信時の変調方式

5) TCP UL スループット

まず、基地局から 30m 離れた地点において iperf3 による TCP UL(アップリンク)スルー プット測定結果の時系列データを図 3-44 に示す。

TCP の測定では端末からの負荷を指定する必要はなく、120 秒間かけて測定した結果で ある。Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。

測定結果を表 3-10 に纏める。PDCP レイヤと iperf3 のスループットは、ほぼ同じ値を 示している。5G モバイルルータの処理能力やノートパソコンの処理能力として余裕がある ためと考えられる。



図 3-44 基地局からの距離 30m 地点における TCP UL スループット(時系列データ)

•••					
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Iperf3	114 Mbps	114.9Mbps	22.8Mbps	141Mbps	83Mbps

表 3-10 基地局からの距離 30m 地点における TCP UL スループット測定結果

PDCP 119.	0.5Mbps	119.6 Mbps	$26.7 \mathrm{Mbps}$	149 Mbps	86.1Mbps
-----------	---------	------------	----------------------	----------	----------

この測定中に、大型車3台、普通車5台が通過している。特に、測定開始後、約40秒後 に大型車1台と普通車3台が連続して通過しており、13:12:55 近辺で速度が劣化している ことと関連している可能性はある。しかし、TCPの場合、受信電力が大きい場合であって もTCPセッションでの再送制御等に起因してスループットが変動する幅が大きいため、車 両通過との関連性を突き詰めるには、一パケット単位のレベルでパケット解析をしない限 り判断が難しい。今回の実証ではWireShark等でのパケットログは取得していないため、 そこまでの分析はできない。基地局との距離は近く、十分な受信電力を得ていることから車 両通過の影響は少ないと考えてもよいと考える。

また、TCP UL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3·45 に、PDCP レ イヤのスループットのヒストグラムを図 3·46 に示す。iperf3 では 120Mbps を中心として 分布に広がりがあり、PDCP レイヤのスループットは 130Mbps を山として広い範囲に広が って分布している様子が分かる。



図 3-45 基地局からの距離 30m における TCP UL(iperf3)のヒストグラム



図 3-46 基地局からの距離 30m における TCP UL(PDCP)のヒストグラム

上述の基地局から 30m 地点での測定と同様の方法にてデータを収集して、基地局からの 距離で 20 地点以上の場所において TCP UL スループット(iperf3/PDCP)の測定を行った。 図 3-47 に、測定結果を示す。



図 3-47 基地局からの距離 vs. TCP UL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-47の結果より、下記のことが分かる。

- ① PDCP レイヤと iperf3 のスループットの差がほとんどない。
- ② 基地局(28GHz RU)の指向性は下り車線の進行方向に向けているが、基地局の指 向性と反対となる裏側においても 5G の通信が可能
- 非常駐車帯上で LOS である 50m 地点でのスループットは 20Mbps 程度であるのに 対し、基地局に対して NLOS となる監査路上の 50m 地点におけるスループットは約 30Mbps で高い値を示した。
- ④ 測定した全区間で 5G 通信が可能。10m と 70m 地点で約 TCP UL 約 80Mbps、30m の地点で TCP UL 約 120Mbps、それ以外の区間では約 16~18Mbps のスループットを確認。LTE の理論上限は 10Mbps のため、5G 通信をしている。

- については、ノートパソコンやインタフェースの処理性能等の問題がなくなるためと 考えられる。
- ② については、UDP UL と同様の理由で、基地局の裏側 10m 離れた地点での通信では、 端末から基地局に届くまで、基地局より先の構造物に反射してから届くため基地局で の受信電力が弱くなっていると推測され、基地局の表側での通信に比べて、スループ ットが低くなっていると考えられる。
- ③ 非常駐車帯での監査路上が NLOS であるのに対して、LOS である非常駐車帯上の方の スループットの結果が低く逆転現象が見られた。ただし、限られた時間内でのデータ 取得であったため、再現性が高いかどうかまでは確認できなかった。無線区間のパケ ットロス等の要因によって、TCP がネットワーク輻輳と誤判定してしまい、TCP の受 信側のウィンドウサイズが大きくならない制御がかかったと推測される。 なお、TCP のウィンドウサイズに関しては、Linux の PC と Windows の PC でも挙動 が異なる。無線区間でパケットロスが起こったとしても TCP の速度をあげるためには、 Wireless TCP 等を採用するか、TCP の受信ウィンドウサイズをあらかじめ大きめに 設定しておて輻輳判定させずに多く送り付ける等によって性能を改善することができ ることが知られている。
- ④ については、UDP UL と同様に、5G 通信を行う判断基準として、端末から基地局に届 いた受信電力として十分であったと考えられる。

なお、UDPULと同様に、TCPUL(アップリンク)の測定では、端末における SINR の測定データはない。本技術実証に用いた基地局では、統計情報は収集しているが、個別 のアップリンク通信に対して、上りの SINR の測定データを収集することはできない。

6) 往復遅延時間特性



まず、基地局から 10m 離れた地点において ping による往復遅延時間の測定結果の時系 列データを図 3-48 に示す。120 秒間かけて測定した結果である。統計値を表 3-11 示す。

図 3-48 基地局からの距離 10m 地点における往復遅延時間特性(時系列データ)

表 3-11 基地局からの距離 10m 地点における往復遅延時間測定結果

種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Ping	37.5 msec	35.1 msec	11.4 msec	49.1 msec	18.4 msec

片方向の遅延は、往復遅延時間の半分であることから、平均値 35.1msec の半分として約 17.6msec である。本技術実証で用いたローカル 5G システムは、URLLC に対応していな い。

なお、Ping の応答時間が、15msec から 53msec まで 40msec 程度のバラつきで変動して いる。これは、参考文献[2]の P356 に記載している通り、Ping の通信が間欠的であるため、 DRX の機能によって、パケットの発生時間によっては、最大 40msec 分パケットをためて から送出するためであると考えられる。

この測定中に、大型車1台、普通車13台が通過している。特に車両通過による特性への 影響はないと考える。



Ping で測定した往復遅延時間のヒストグラムを図 3-49 に示す。上記の DRX の影響もあって、16msec から 56msec の広い範囲に分布している様子が分かる。

図 3-49 基地局からの距離 10m における往復遅延時間(ping)のヒストグラム

上述の基地局から 10m 地点での測定と同様の方法にてデータを収集して、基地局からの 距離で 20 地点以上の場所において往復遅延時間 (ping)の測定を行った。

図 3-50 に、測定結果を示す。



図 3-50 基地局からの距離 vs. 往復遅延時間 (ping)特性

図 3-50 の結果より、下記のことが分かる。

- 基地局からの距離-10mから 390msecの区間では、20msecから 35msec 程度の往復 遅延となっている。
- ② 非常駐車帯上のLOSである 50m 地点では遅延時間の平均値が 32msec だが、非常駐車帯の監査路上 50mの NLOS である 50m 地点では遅延時間の平均値が 20msec と小さい値を示している。
- ① については、基地局からの受信電力が十分な状況では、往復遅延時間(ping)の特性は あまり変わらないと考えられる。Pingのパケットサイズは小さく、頻度も1秒に1 回のため、性能の差分は少ないと考えられる。
- ② の考察のために、往復遅延時間の時系列データとして、非常駐車帯の監査路上 50m 地 点(NLOS)のデータを図 3-51 に、非常駐車帯上 50m 地点(LOS)のデータを図 3-52 に 示す。図 3-51 の方が図 3-52 に比べて遅延のバラつきが小さい。一回だけ 120msec 近くの遅延が発生したが、これはパケットロス等の影響が一時的に出たと考えられる。
 図 3-52 のデータは、図 3-48 に比べてバラつきの周期が安定していないが、DRX に よって最大で 50msec 程度の値を示している。LOS 環境では DRX が働きやすいが、 NLOS では DRX が働きにくいと推察される。



図 3-51 非常駐車帯の監査路上(50m 地点)における往復遅延時間特性(時系列データ)



図 3-52 非常駐車帯上 (50m 地点)における往復遅延時間特性 (時系列データ)

(2) トンネル出口の漏洩電力測定

トンネル出口の漏洩電力と、カバーエリア端、調整対象区域端の調査を纏めて行ったため、 調整対象区域端の調査に纏めて記載することとする。

(3) カバーエリア端の調査

トンネル出口の漏洩電力と、カバーエリア端、調整対象区域端の調査を纏めて行ったため、 調整対象区域端の調査に纏めて記載することとする。

(4) 調整対象区域端の調査

トンネル出口の漏洩電力・カバーエリア端・調整対象区域端の調査では、アンリツの測定 器(ML8780A)を用いて受信電力の測定を行った。トンネル出口では、オムニアンテナ(受 信利得 3dBi,ケーブル損失 0dB)で測定を行い、カバーエリア端と調整対象区域端の調査 ではホーンアンテナ(受信利得 20dBi,ケーブル損失 3dB)を測定器に接続して測定を行っ た。測定において、F1(28.24992 GHz)の周波数を測定器で目視により確認し、カバーエ リア端や調整対象区域については審査基準に近い値となっている場所を見つけて 1000 サ ンプル以上のデータを取得し、受信電力の平均値を求めた。なお、審査基準では受信アンテ ナ利得 20dBi、ケーブル損失 0dB であるため、ケーブル損失の値を補正した値を測定結果 として示している。

まず、トンネル出ロ側の一般道におけるカバーエリア端・調整対象区域端を調査した結果 を図 3-53 に示す。太い赤線の部分では、5G の電波を検出することができなかった。図 2-8 で示したシミュレーション結果によると調整対象区域端が川の近辺となっていたが、測定 したところ川の近辺では 5G の電波を検出することができなかった。これは、高速道路が一 般道路に比べて高いところを走っているためであると考えられる。図 3-54 に地点 E から トンネル方向を撮影した写真を示す。一般道に比べて、かなり高いところを高速道路が走っ ていることが分かる。



出典:国土地理院ウェブサイトの地図を加工して作成

図 3-53 トンネル出口側のエリア調査(一般道)



図 3-54 高速道路と一般道の高低差の様子(地点 E よりトンネル方向を撮影)

図 3-53 より、一般道では、トンネル出口から約 380m 離れた地点 A が調整対象区域端 であることが分かった。基地局からの距離としては、1210m の地点となる。シミュレーシ ョンで求めた 2.1km の距離よりは短い。シミュレーションよりも 890m 短い結果となった。 ただし、高速道路の直線から外れた場所であるため、1210m の距離までしか飛ばないとい うことではない。後述のように高速道路上では工事規制内の関係もあり、カバーエリア端し か測定できなかったため、調整対象区域端を特定することはできなかった。また、一般道で も調整対象区域端は見つからなかった。このため、調整対象区域端のシミュレーション結果 と実測の距離の差を正確に調べることはできなかった。

この地点 A の様子を図 3-55 に示す。高速道路と一般道が並走している区間で、高速道路

の高さと一般道の高さがほぼ同じ高さになったところで調整対象区域端となっている。また、一般道からトンネルの出口が見通すことができない場所であるため、たまたま調整対象 区域になっていたと考えられる。

上記より、一般道よりも高いところを走っている高速道路の高さで道路に沿って 5G のエ リアとなっていると考えられる。このため、ミリ波の直進性の高さから、高速道路を外れた 場合には、すぐ調整対象区域端となっていると考えることができる。



図 3-55 地点 A の様子



続いて、図 3-53 より、一般道では、トンネル出口から約 260m 離れた地点 D がカバー エリア端であることが分かった。地点 D からトンネル方向を見た写真を図 3-56 に示す。

図 3-56 地点Dの様子

地点 D でも、一般道と高速道路の高さが、ほぼ同じ高さになっている。つまり、高速道路と同じ高さでなければ、5G の電波を検出することは難しい。逆に言えば、高速道路と高さが揃っている場所は少ないため、高いところを走っている高速道路であればミリ波は高速道路の外の低い一般道には見通しがない限り届きにくいと考えられる。また、本技術実証を行ったような高速道路の環境では、周辺に山や樹木が多くあるため、周辺にローカル5G

で干渉を与える土地が少ないと考えられる。

なお、地点 D の写真に写っている高速道路は下り線ではなく、上り線である。上り線の 古城山トンネルの入口が先の方に写っている。また、下り線のトンネル出口から地点 D は 見通しがよい状況とは言えない。地点 D は、基地局からの距離として 1190m 離れている。 シミュレーション結果で求めたカバーエリア端は基地局から 780m の距離であったが、ト ンネル内の導波管効果もあり、遠くまで届いている。



続いて、トンネル出口側で高速道路上で調査した結果を図 3-57 に示す。

図 3-57 トンネル出口側のエリア調査(高速道路)

トンネル出口(地点 H)の漏洩電力については、RSSIの平均値で-71.0 dBm であった。 トンネルの導波管効果によって電波がよく届いていることが分かる。なお、図 3-15 で示し たように、トンネル内での受信電力測定結果より、トンネル内にはカバーエリア端はなかっ た。地点 H でトンネル出口で受信電力を測定している様子を図 3-58 に示す。



図 3-58 トンネル出口(地点 H)で受信電力測定している様子 図 3-57 より、高速道路上では、トンネル出口から 400m 離れた地点 F でカバーエリア端 であることを確認することができた。地点 F の様子を図 3-59 に示す。



図 3-59 高速道路上のカバーエリア端(地点F)の様子

地点 F は、基地局から 1330m 離れた地点である。シミュレーションで求めたカバーエリ ア端 780m よりも遠くまで届いていることが分かる。シミュレーション結果よりも 550m 長かった。

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

電波法関係審査基準(平成 13 年 1 月 6 日総務省訓令第 67 号)に定められているエリア算 出法では、トンネルを想定したモデルが定められていない。

トンネルの保守保全業務へのローカル5G活用のユースケースを、今後、多くのトンネル に展開するためにも、トンネルを想定したエリア算出方法を定める必要がある。

トンネル内部に基地局を設置した場合、カバーエリアがトンネル内となるように基地局 の出力やチルト等を調整するが、トンネルの外にも漏洩する電波がある。トンネルの外側で、 ローカル5Gを活用する別の施設(工場、病院、港湾等)がある場合には、干渉調整が必要 となる。この干渉調整を行うためには、エリア算出法の精緻化が必要となる。

本技術実証を通じて、トンネル内の伝搬モデル構築に向けたデータ収集とモデルを検証することを目的とする。

(2) 実証目標

本開発実証実験では、トンネル内の保守保全業務で大容量通信を可能とする 28GHz のロ ーカル5Gを活用という実施環境要件を想定し、古城山トンネルという高速道路で保守保 全業務を行う実証環境で測定データを取得してトンネル向けの電波伝搬モデルのパラメー タを構築することを目標とする。

エリア算出方法におけるモデルの精緻化の対象とするパラメータを表 3-12 に示す。

利用する 周波数帯	精織化の対象 パラメータ	精織化の方向性	実施環境の要件
4.7GHz	К9	斜面や植生、水面の	 ● 基地局設置場所が屋外である
帯		影響の定量化	 基地局と測定点の距離が 100m 以上確保できる
			 斜面や植生、水面等の地形情報データにより算入
			し難い地形の影響が存在する
	S ¹⁰	選択基準の詳細化	 基地局設置場所が屋外である
			 基地局と測定点の距離が 100m 以上確保できる
	R11	壁面の材質・厚さ別	 基地局設置場所が屋内である
		の定量化	
28GHz 帯	hr ¹²	選択基準の明確化	 基地局設置場所が屋外である
			 基地局が見通せない測定点を確保できる
	R13	壁面の材質・厚さ別	 基地局設置場所が屋内である
		の定量化	

表 3-12 エリア算出法の精緻化対象パラメータ

トンネル内に 28GHz 帯のローカル5G基地局を設置するため、基地局設置場所が屋内

であるモデルが最も近い。基地局を屋内に設置する場合の伝搬損 L(dB) は、以下の式であらわされる。

L=20log10($4 \pi d \lambda$)+R

λ(m):指定周波数の波長

R(dB): 建物侵入損(20.1)

トンネル内には、建物がないため、R=0 dB となるが、トンネルの電波伝搬が自由空間 伝搬損に従うとは限らない。

トンネル内では、反射が多い環境であり、導波管効果のように電波を遠くまで届ける効果があると推測する。このため、伝搬損L(dB)が小さくなると予測される。

伝搬損 L(dB) をモデルの精緻化パラメータとして検討し、トンネル内に向けたモデルを 構築することを目標とする。

3.3.2.2 実証仮説

上述のように、トンネル内では、反射が多い環境で導波管効果のように電波を届ける効果 があると推測し、伝搬損が小さくなると予測される。

参考文献〔1〕では、2.5GHz 帯の周波数ではあるものの、自由空間伝搬損よりも実測の 伝搬損が小さくなる結果が示されている。また、自由空間損失と実測を直線フィッティング することによって、距離に対する減衰乗数 K (dB/m)を求めている。この文献では、カー ブや起伏のあるトンネルとして、K=0.03 としている。直線状のトンネルであれば、 K=0.0016 である。

文献〔1〕に示されている結果をもとに、伝搬損 L(dB)を以下のモデルとして仮説を立てる。

 $L=20\log_{10}(4\pi d/\lambda) \quad (d < d1) \qquad (\exists 3)$ $L=20\log_{10}(4\pi d1/\lambda) + K \times d (d >= d1) \qquad (\exists 4)$

ここで、d1,Kの二つのパラメータを新しく定義する。 d1: 実測データとのフィッティングによって基地局からの距離 0m での切片から導出。 d1 までの距離は、自由空間伝搬損モデルの伝搬損に近い。

K(dB/m):距離当たりの減衰係数

上記の伝搬損Lのモデルを構築するために、トンネル内で測定した実測データから d1,K を求める。また、トンネル内にカバーエリア端や調整対象区域がある場合には、求めたパラ メータによって精緻化した伝搬損Lを活用して、カバーエリア端と、調整対象区域端の距 離を検証する。実測したカバーエリア端とモデルによって求めたカバーエリア端、実測した 調整対象区域端とモデルによって求めた調整対象区域端を比較することで、モデルの精度 について検証する。

3.3.2.3 評価·検証項目

基地局同期信号の受信電力の測定データを分析し、上述の仮説で示した伝搬損 L(dB)を、 実測データからのフィッティングによって式(1)、式(2)のパラメータを求める。電波 伝搬モデルの評価・検証項目を表 3-13 に示す。

#	評価項目	説明
1	d1	実測データとのフィッティングで基地局からの距離 0m
		の切片情報から求める。d1 までの距離は、自由空間伝搬
		損モデルの伝搬損に近い。
2	К	伝搬モデルで距離が大きくなるにつれて減衰する係数

表 3-13 電波伝搬モデルの評価・項目

3.3.2.4 評価·検証方法

「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」で測定した結果を利用して、評価・検証 を行った。基地局の同期信号の受信電力 SS-RSRP を測定し、1つの測定点で1000 サンプル 以上のデータを取得する。エリアテスタを用いて基地局の同期信号の受信電力を20 点以上 の地点で測定する。測定で得られたデータの平均値を求め、図 3-60 に示すように、回帰 分析によって切片と傾きを求める。

切片情報から、上述の(式3)によって自由空間伝搬損と近似できる距離d1を求める。 また、傾きの情報から、上述の(式4)にフィッティングするKを求める。



図 3-60 基地局からの距離と受信電力特性に対する伝搬損モデルのフィッティング

もし、トンネル内でカバーエリア端が観測された場合には、カバーエリア端と基地局間の 距離について、精緻化した伝搬モデルの方が自由空間伝搬損のモデルよりも精度がよくな っていることを検証する。

また、トンネル内で調整対象区域端を実測することができた場合には、調整対象区域端と

基地局間の距離について、精緻化した伝搬モデルの方が自由空間伝搬損のモデルよりも精 度がよくなっていることを検証する。

3.3.2.5 実証結果及び考察

① 実証フィールドや測定点の選定に関して/地図上の測定点の図

上述のように、トンネル内では導波管効果によって自由空間伝搬損よりも遠くまで届く と想定している。現在のエリア算出基準にトンネルの想定がないため、実証フィールドとし て古城山トンネルを選定した。測定点に関する情報については、図 3-4 と図 3-7 に記載の 通りである。

② 精緻化対象パラメータに関する情報

本技術実証では、トンネル内の電波伝搬モデルを新たに構築して検証するため、指定の精 緻化パラメータはない。

③ 測定データの詳細について

測定結果については、図 3-15 に纏めている。

なお、エリア算出法については、自由空間伝搬損を前提として、本報告書に記載している (式2)を用いて計算した。

・複数の測定点において、エリア算出法で計算された受信電力と、実際に測定された受 信電力の中央値、平均値、標準偏差、上位 10%値、下位 10%値

・測定点の基地局からの距離とそれぞれのアンテナ高、LOS/NLOSの情報

④ 基地局や端末の設置状況、測定の様子、周辺の様子(遮蔽物・反射物)がわかる写真等 本報告書で写真を用いて説明している。

⑤ パラメータの推定結果と導出過程

電波伝搬モデルのパラメータ推定に関して、図 3-61を用いて説明する。

図 3-15 の測定結果では、基地局からの距離 60~80m 地点では非常駐車帯の非常電話の看板によって NLOS で特徴点のため取り除き、追加測定分については 400m~900m のデータを活用した。なお、800m の地点では、非常駐車帯による NLOS で受信電力が低かったため、ここも取り除いた。10m~900m までの測定データに対して、距離と受信電力(実測値)について回帰分析を行った結果、下記の(式5)のようになる。

 $RSSI(d) = -52.0 - 0.028 \times d \quad (\vec{1}5)$

文献[2]に記載の係数 K=0.03 に近い値が得られている。



図 3-61 古城山トンネルにおける電波伝搬モデル

続いて、上記の(式3)における d1 を求めるため、図 3-61 の RSSI(自由空間)と、(式5)の交点を求めると、距離 30m の地点近くでクロスしていることが分かる。しかし、距離 30m 地点における受信電力は既に自由空間に比べて高い受信電力となっており、30m 地 点まで自由伝搬に従うとは言いにくい。図 3-61 の測定結果を見ると、基地局からの距離 10m から 170m までの区間では、受信電力が距離に比例して減衰していることから、この 区間の回帰分析を行ったところ、下記の(式6)が得られた。

 $RSSI(d) = -45.23 - 0.103 \times d$ (式 6)

(式6) と図 3-61の RSSI(自由空間) との交点として、d1=10m と設定した。

(式5)と(式6)の交点となる距離 d2=90m とし、基地局からの距離 d1 から d2 までを
 (式5)、d2 よりも大きければ(式6)を用いることとした。

伝搬損Lを求めるため、(式2)を変形すると下記のようになる。

L = Pt + Gt - Lf + Gr - Lr - 4 - Pr

今回のパラメータを当てはめると、伝搬損Lは下記の(式7)として求めることができる。 L(d) = 37 – RSSI(d) (式7)

これらを纏めると、伝搬損については、以下のモデル1を導出した。

$L1(d) = 20\log 10(4 \pi d / \lambda)$	(d < 10m)	(式7)
$L1(d) = 82.23 + 0.103 \times d$	$(10m \le d < 90m)$	(式8)
$L1(d) = 89.0 + 0.028 \times d$	(90m \leq d \leq 930m)	(式9)

ここで、図 3-61 で距離 200m から 900m の実測値のカーブについては、自由空間伝搬損 のカーブに近いとも考えられる。そこで、下記の(式10)で示すように、トンネル内では 伝搬損が小さくなるというオフセット値を与えるモデル2を追加で検討した。 $L_2(d) = 20\log_{10}(4 \pi d \lambda) - L_{offset}$ (式10)

図 3-61の RSSI (自由空間)の値と RSSI の実測値の差を求め、平均値を求めると 10.9dB であった。L_offset = 10.9dB としてモデル化することができる。

上記のモデル1とモデル2、実測値の関係について図 3-62に示す。



図 3-62 古城山トンネル内の電波伝搬モデルと実測値の関係

90m までの区間はモデル1の(式7)(式8)が実測値に近く、90m 以降については、モ デル1の(式9)の代わりに(式10)であってもよい近似を示していると考えられる。 下記の電波伝搬モデルをモデル3と定義する。

$L3(d) = 20\log 10(4 \pi d / \lambda)$	(d < 10m)	(式7)
$L3(d) = 82.23 + 0.103 \times d$	$(10m \le d < 90m)$	(式8)
L3(d)=20log10(4 π d/ λ)-10.9	(90m \leq d \leq 930m)	(式11)

以下に、カバーエリア端に関する考察を記載する。図 3-63 に、実験計画段階での伝搬モ デル精緻化後のカバーエリア端の検証について記載する。



図 3-63 伝搬モデル精緻化後のカバーエリア端の検証

事前シミュレーションでは、カバーエリア端は 780m でトンネル内にあると想定された が、上記の実測結果ではトンネル内にはカバーエリア端はなかった。高速道路上におけるカ バーエリア端は、トンネル出口から 400m、基地局から 1330m 離れた地点となっていた。 事前のシミュレーションと実測された地点の距離の差分は、550m (=1330m-780m) となっ ている。

上記の電波伝搬モデルは、トンネル内部のモデルであるため、トンネルの外部まで適用す るのは難しいと考える。そこで、トンネル外のモデルについては、自由空間伝搬損のカーブ に従うという仮説を立てる。ここで、トンネル出口からの距離で伝搬損が生じるのではなく、 基地局からの距離で伝搬損のカーブが決まると仮定する。

以下に、基地局からカバーエリア端の距離 d2 を求める方法について、上記の伝搬損モデル1を活用して求める方法を下記に記載する。

トンネル出口までの伝搬損L1をモデル1の(式9)を用いて下記のように求める。

 $L1 = L1(930) = 89.0 + 0.028 \times 930 = 115.0 dB$

基地局からカバーエリア端の距離を d3 とすると、カバーエリア端とトンネル出口の受信電力の差分が下記の自由空間伝搬損の式の差分に従うと仮定する。

 $L_{diff}(d3) = 20\log_{10}(4\pi \times d3 / \lambda) - 20\log_{10}(4\pi \times 930 / \lambda)$

基地局からカバーエリア端までのトータルの伝搬損を、L1+L_diff(d3)とする。

カバーエリア端の審査基準の-81.2 dBm となる距離 d3 を求めた。

d3 = 1700m

実測されたカバーエリア端は 1330m であり、差分は 370m である。

精緻化前の 550m より、差分は若干小さくなっている。

なお、電波伝搬モデル3を活用してトンネル出口までの伝搬損を(式11)を活用した場合 に、カバーエリア端までの距離d3を求めると、

d3 = 2700 m

となる。差分は、1470mとなり電波伝搬モデル3では届き過ぎてしまう結果となる。

次に調整対象区域の考察について記載する。図 3-64 に、実験計画段階での伝搬モデル精 緻化後の調整対象区域端の検証について記載する。



図 3-64 伝搬モデル精緻化後の調整対象区域端の検証

事前のシミュレーション結果では2100m離れた地点に調整対象区域があると想定された が、その周辺である川の近辺では5Gの電波が検出されなかった。一般道では、高速道路に 並走する上り車線の横で調整対象区域端の受信電力が観測されたが、下り車線のトンネル 出口から 380m の地点で基地局から 1310m の距離であった。ただし、この地点は下り車線 のトンネル出口から見通しがきかない場所のため、伝搬モデルの検証には向かない。

高速道路上のカバーエリア端が基地局からの距離 1330m であるため、高速道路上に調整 対象区域端があるとすれば、もっと先になる。ただし、工事規制の関係で 1330m よりも奥 の地点に行くことができず、測定は不可能であった。

上記の電波伝搬モデルは、トンネル内部のモデルであるため、トンネルの外部まで適用する のは難しいと考える。そこで、トンネル外のモデルについては、自由空間伝搬損のカーブに 従うという仮説を立てる。ここで、トンネル出口からの距離で伝搬損が生じるのではなく、 基地局からの距離で伝搬損のカーブが決まると仮定する。

以下に、基地局から調整対象区域端の距離 d4 を求める方法について、上記の伝搬損モデル1を活用して求める方法を下記に記載する。ここでも、トンネル外部のモデルは自由空間 伝搬損のカーブとして計算した。

まず、トンネル出口までの伝搬損をモデル1の(式9)を用いて計算するのは、カバーエリ アの計算の時と同様である。

基地局から調整対象区域端の距離を d4 とすると、カバーエリア端とトンネル出口の受信電力の差分が下記の自由空間伝搬損の式の差分に従うと仮定する。

 $L_{diff}(d4) = 20\log_{10}(4\pi \times d4/\lambda) - 20\log_{10}(4\pi \times 930/\lambda)$

基地局からカバーエリア端までのトータルの伝搬損を、L1+L_diff(d4)とする。

調整対象区域端の審査基準の-90 dBm となる距離 d4 を求めた。

d4 = 4700 m

なお、実際には 2.1km 先の川周辺では調整対象区域を観測することができなかったことと、 高速道路が 4.7km 直線ではないことから、高速道路上でカーブするところまでが現実的と 考えられる。安全サイドに値が出ることになる。

なお、電波伝搬モデル3を活用してトンネル出口までの伝搬損を(式11)を活用した場合 に、調整対象区域端までの距離 d4 を求めると、

d4= 7450m

となる。電波伝搬モデル3では届き過ぎてしまう結果となる。

上記の結果より、電波伝搬モデル3よりも電波伝搬モデル1を適用した方がよいと考える。 以下に伝搬損モデルについて纏める。

・トンネル内の伝搬損モデル: モデル1 (式7、式8、式9)

・トンネル外の伝搬損モデル: 下記の(式12) $L(d) = L1(930) + 20\log_{10}(4\pi \times d/\lambda)$ - 20log10(4 $\pi \times 930/\lambda$) (d ≥ 930)(式12)

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化

3.3.3.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

トンネル内の保守保全業務の高度化をめざして、遠隔作業支援や、監視カメラのAI画像 解析による作業員への危険アラート通知等のユースケースを活用することができるエリア を効率よく提供する必要がある。

3.3.1.1 章に記載の通り、後述の課題実証ユースケースでは、遠隔作業支援で活用するス マートフォンや、作業員の安全監視のために活用する監視カメラとして 4K カメラを活用す ることを想定している。4K カメラの解像度で 30fps を実現するためには、H.264/H.265 圧 縮で平均 25Mbps 程度のスループットが必要となる。高速道路において、25Mbps 以上の スループットが得られることを検証する。

高速道路のトンネルは直線が多く、また、トンネル内の反射によって導波管のように電波 が伝わる性質もあるため、28GHzのローカル5Gと2.5GHzのPrivate LTE を組み合わせ たNSA(Non Stand Alone)のシステム構成が向いている。

ローカル 5G(28GHz)の NSA 構成において、アンカーとなる Private LTE(2.5GHz) との比較を表 3-14 に示す。受信電力の閾値として、2.5GHz では-85dBm, 28GHz では-80dBm を閾値とした場合の免許審査基準式から距離の目安を算出している。

	Private LTE (2.5GHz)	ローカル 5G (28GHz)
距離	約 900m	約 100m
スループット	上り(64QAM) 10Mbps	上り(64QAM): 140Mbps
(理論値)	下り(256QAM) 110Mbps	下り(64QAM): 533Mbps
遅延時間	50msec程度(端末・サーバ間)	50msec程度(端末・サーバ間)
	10msec(無線区間)*1	10msec(無線区間)*1

表 3-14 ローカル 5G(28GHz)と Private LTE (2.5GHz) の特徴

*1:無線区間のフレーム単位は 10msec となる。

総務省のローカル 5G 導入ガイドラインの P10「図 2:28.2~29.1GHz の周波数帯におけ る送信装置のフレーム構成」に記載してある同期方式の 10msec 単位での無線フレーム構成 となっている。

https://www.soumu.go.jp/main_content/000722596.pdf

なお、提供する基地局は、eMBB をサポートしており、現時点では、URLLC をサポート していない。

eMBB では、大容量高速通信を実現するために、10msec の無線フレームにおけるダウン リンクとアップリンクのシンボルを全て活用する。表 3-14 に示したスループット(理論値) は、3GPP 標準の TS38.306 でスループットの近似計算式を用いて計算した結果である。

なお、URLLCでは、データ量が少ない場合等に、例えば、1 スロット内のシンボル数を 14 シンボルではなく、4 シンボル等にシンボル数を短くする方法が規定されている。ただ し、この方法は、ローカル 5G 導入ガイドラインのフレーム構成と異なる。

なお、無線基地局・端末では、無線区間の時間を測定する機能を提供していないため、端

末・サーバ間の遅延時間を測定する。具体的には、図 3-6 に示す構成にて、端末・サーバの 区間における遅延時間を測定することができる。

この表 3・14 からも分かる通り、Private LTE(2.5GHz)の方がカバーエリアが広く、ロー カル 5G(28GHz)のみでエリアを構築するよりも不感地帯を少なくすることができる。ただ し、Private LTE(2.5GHz)では、上りのスループットが 10Mbps 程度までのため、4Kの映 像伝送で 25Mbps を通すことができない。このため、ローカル 5G によって 4K 映像伝送が 必要な箇所を構築し、4K 以下の HD の解像度に落としても映像伝送が可能となるようにア ンカーの Private LTE(2.5GHz)で映像伝送を行う NSA 構成の方がエリア構築には向いてい る。

また、28GHzの電波は直進性が高いため、直進する道路に対しては有効だが、カーブが あったり、高速道路で災害時に避難する避難連絡坑等については、電波が届きにくい不感地 帯となりやすい課題がある。

これらの不感地帯をカバーするように、28GHzの基地局の台数を増やして設置すること は可能であるが、基地局の台数に応じてシステム全体のコストが高くなってしまう。

この課題を解決するために、基地局に比べて安価な電波反射板を活用してカバーエリア を柔軟に構築することができれば、システム全体を少ないコストで構築することが可能に なる。

本技術実証では、トンネル内で電波が届きにくい不感地帯となりやすい避難連絡坑に対 して、反射板を用いてエリア化することができるかどうか検証を行う。

本技術実証で活用する反射板(AGC 社提供)は、入射角度に対して反射角度を変更する ことができ、1°ステップで反射角度を制御可能という特長を有する。設置の容易性を考慮 すると、設置後に角度調整をすることによって避難連絡坑にある端末に対して受信電力が 大きくなるように調整することが可能である。この反射角度の調整機構が、反射板を活用し たエリア構築に役立つことを検証する。

図 3-65 に、技術実証で活用した反射板の特性評価を行っている様子を示す。



図 3-65 技術実証で活用する反射板(AGC 社提供)

反射位相をスイッチング素子によって制御することができる。 表 3-15 に反射板の諸元を示す。

#	諸元	説明
1	大きさ	330 x 270 x 40 mm
2	重量	2kg
3	材質	レドーム : Nylon12 (PA12):内部 : PCB 基板+素子群
4	動作周波数	27.0GHz~29.5GHz
5	偏波	H 偏波および V 偏波
6	入射角度/反射角度範囲	水平/垂直方向 ±60°
7	ビーム幅 (HPBW)	ボアサイト方向の 3dB ビーム幅(28.25GHz)測定値
		V 偏波(アジマス) : 3°
		V 偏波(エレベーション) : 3°
		H 偏波(アジマス): 3°
		H 偏波(エレベーション): 2°
8	反射板利得	67dB(入射角 45°、出射角 45°の理論値)

表 3-15 活用する反射板の諸元

反射板を設置することによって、その背面は従来の電波が遮られることになる。しかし、 今回活用する反射板の大きさは、トンネルの断面積に対して十分小さいことや、反射板の設 置場所は図 3-67 に示すように路肩が広がった場所に設置したため、トンネルの道路の直線 方向に対して、ほぼ影響を与えないように設置した。これらの理由から、反射板を設置する ことによって、トンネル直線方向のカバーエリアは、図 2-7 にて示したカバーエリアに対 する影響は少ないと考える。

避難連絡坑が5Gのエリアになっていなかったのが、反射板を設置することで、5Gの通信エリアとなることを検証する。

なお、反射板の特性評価や反射板を活用することで避難連絡坑のカバーエリアがどのようになるのかについては、実測データも踏まえて検証を行うものとする。

ローカル 5Gのトンネル直線方向のカバーエリア端は、図 2-7 に記載の通りである。

2.2.1.1 節に、Private LTE(2.5GHz)のカバーエリア、調整対象区域と、ローカル5Gのカバーエリア、調整対象区域に関する図を示している。

なお、電波反射板を活用して拡張するエリアは、トンネル直線方向に対して直角方向であ る避難連絡坑の内部に閉じている。このため、反射板を活用する前と活用した後で、トンネ ルの出入り口方向の電波には影響がないため、Private LTE とローカル5G のカバーエリ アと調整対象区域には差がないと考える。

なお、避難連絡坑は、トンネル内部に閉じているため、他者との干渉調整が不要な領域で あるため、反射板を活用して新たに構築する避難連絡坑におけるカバーエリア端の調査は 不要と考える。

上記を纏めると、カバーエリア、調整対象区域、不感地帯に関して、表 3-16のように纏めることができる。

システム	エリア	反射板なし	反射板あり
Private LTE (2.5GHz)	カバーエリア	図 2-9	図 2-9
	調整対象区域	図 2-9	図 2-9
	不感地带	特になし	特になし
ローカル5G(28GHz)	カバーエリア	図 2-8	図 2-8
			図 3-67(避難連絡坑)
	調整対象区域	図 2-8	図 2-8
	不感地带	図 3-66(避難連絡坑)	なし

表 3-16 ローカル 5G(28GHz)と Private LTE (2.5GHz) のエリア図面

本開発実証実験の範囲外となるが、将来、反射板を活用することで、トンネルの外部に影響を与える場合は、チルト角度に相当する反射板の垂直方向のビームを調整することでカ バーエリアを調整することが可能であると考える。

本開発実証では、1つの90度曲った避難連絡坑の電波環境改善を目的としている。トン ネル内には、複数の避難連絡坑があるが、複数通路に対しても同様に反射板を設置すること によってエリアを拡張することが可能であると考える。

・1つの避難連絡坑で実測の検証をベースとして、基地局と避難連絡坑の距離の関係から、複数の避難連絡坑に対して机上検討を行う。

・トンネル内に類似する事例として、屋内閉空間において複数の通路が電波の進行方向に 対して左右にある場合、通路までの距離が異なる場合の対応を検討する。

・上記について、電波反射板を設置する際のエリア設計手法のモデル化に取り組む。

(2) 実証目標

本技術実証では、トンネル内で電波が届きにくい不感地帯となりやすい避難連絡坑に対して、反射板を用いて 5G のエリアとすることができることを検証する。

実証目標1:不感地帯となる避難連絡坑を5Gで通信可能なエリアとすること。

なお、実証において、実測した結果、既に 5G で通信可能なエリアとなっていた場合は、 その地点において安定した通信品質を確保するためにも、反射板の活用により受信電力を 改善することを狙う。参考文献[8]のR2年度のローカル5G開発実証「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」においては、反射板を活用した改善効果として、 28GHzのNSA構成で基地局の受信電力が5dB以上改善することを検証している。ただし、 反射板と端末の距離が近い場合に効果が出ることが分かっている。

本開発実証では、避難連絡坑の反対側に反射板を設置するため、反射板と端末の距離が 10m以上の遠い距離であっても受信電力を改善することを検証する。上記の5dB以上の改 善を実証目標として設定することにする。

実証目標 2:基地局同期信号の受信電力が、反射板の活用により 5dB 以上の改善が得ら

れる(端末との間の距離10m以上)

反射板を活用して避難連絡坑をエリア化した場合に、受信電力の改善量を確認し、スルー プットと遅延時間の測定を実施する。

後述の課題実証のユースケースでは、遠隔作業支援で活用するスマートフォンや、作業員 の安全監視のために活用する監視カメラとして 4K カメラを活用することを想定している。 4K カメラの解像度で 30fps を実現するためには、H.264/H.265 圧縮で平均 25Mbps 程度の スループットが必要となる。このスループットが得られることを実証目標とする。また、課 題実証のユースケースでは AI 画像解析等も含めた遅延時間で規定しているが、AI 画像解 析での解析時間が支配的となっている。このため、端末からサーバ間の往復遅延時間(ping) として 100msec 以内を目標とする。

実証目標 3: 反射板を活用することで、アップリンク、ダウンリンクとも 25Mbps 以上 のスループットが得られる

実証目標 4: 反射板を活用することで、端末とサーバ間の往復遅延時間を 100msec 以内とする。

活用する反射板は、反射波の角度を制御することができる特長がある。端末の位置に応じ て反射波の角度を調整し、受信電力を大きくするよう調整することができる。

この角度制御によって、端末における受信電力を反射板がない場合に比べて 5dB 以上改善することができることを確認する。

この反射波の角度を制御する機能があれば、反射板の設置場所や取り付け角度等に制約 があった場合でも、不感地帯である避難連絡坑の入り口に向けて反射波の角度を調整する ことが可能になるため、不感地帯のエリアカバーを柔軟にすることができる。

なお、人体損失等マージンを含めて 4K 映像伝送を可能とする受信電力の目標としては、 表 2-14 に記載の通りである。

3.3.3.2 実証仮説

エリア構築における課題として、28GHzの電波は直進性が高いため、トンネル内で災害時に避難する避難連絡坑は道路に対して直角に曲がっているため、不感地帯となる可能性が高い。この様子を図 3-66 に示す。高速道路に反射板を設置することによって、避難連絡坑を 5G エリアとすることができるという仮説を、本技術実証にて検証する。



図 3-66 不感地帯(避難連絡坑)の説明図(反射板活用前)



図 3-67 反射板を活用した不感地帯(避難連絡坑)のエリア化

高速道路において、避難連絡坑に入るには工事規制をかける必要があり、事前の現地調査 では中に入ることができなかった。このため、レイトレーシングによるシミュレーションに よって不感地帯となることを仮説検証した。シミュレーション結果を図 3-68 に示す。ここ で、基地局からの距離は、50m までは道路の進行方向であるが、その先、直角方向に曲が り避難連絡坑に入っていく。60m~80m の範囲が避難連絡坑内となる。60m 以降では、受 信電力が-100dBm 以下となり、カバーエリア閾値の-81.2dBm よりも低く不感地帯である と予測できる。



図 3-68 避難連絡坑に対するシミュレーション結果(不感地帯の予測)

次に、反射板を活用した場合の改善についてシミュレーションによる検証を行った。シミ ュレーション結果を図 3-69 に示す。反射板を活用しない場合に比べて、反射板を活用する ことによって受信電力を改善する見込みを得た。カバーエリアの-81.2dBm 以上となる見込 みを得た。



図 3-69 避難連絡坑に対するシミュレーション結果(反射板活用時の改善効果)

ここで理論値は、基地局から反射板を設置するまでの距離によるパスロスと、反射板で得られる利得、反射板から端末までのパスロスを考慮することで、基地局から端末までのパスロスを求めたものである。反射板の入射角度と出射角度の関係から反射板の利得に関して 理論値を導出して求めている。理論値の式を(式11)に示す。

$$Pr = Pt + Gt - Lf - L1 + Gref L2 + Gr - Lr - 4 \qquad (\exists 1 \ 1)$$

- Pr [dBm] :端末での受信レベル(受信電力)
- Pt [dB]: 基地局送信電力(基地局の空中線電力): 22 dBm
- Gt [dBi] : 基地局送信アンテナ利得: 23 dBi
- Lf [dB]: 基地局の給電線損失: 0 dB
- L1 [dB]: 基地局から反射板までの伝搬損失
 - L1=20log10($4 \pi d1 / \lambda$) : 95.5 dB
 - d1(m): 基地局から反射板までの距離: 50m
 - λ(m):波長: 0.01055m
- Gref [dBi] : 反射板利得
 - Gref = $20 \times \log 10(4 \pi \eta \text{ Ae}/\lambda 2)$
 - $Ae = 4ab\sqrt{\cos\theta in \times \cos\theta out}$
 - θ in: 入射角との反射板のなす角度: 45°
 - θ out: 入射角との反射板のなす角度: 45°
 - a: 反射板の横方向の半分の長さ:0.1m
 - b: 反射板の縦方向の半分の長さ:0.1m
 - η:反射板効率: 0.707(=1/ $\sqrt{2}$) 正反射
- L2 [dB] : 反射板から端末までの伝搬損失
 - $L2=20\log 10(4 \pi d2 / \lambda)$
 - d2(m):反射板から端末までの距離:これをパラメータとして測定
 - λ(m):波長
- Gr [dBi] : 端末(測定器)の受信アンテナ利得: 20dBi
- Lr[dB]: 端末(測定器)のケーブル損失: 3dB
- 4dB: 人体吸収損

このシミュレーション結果を踏まえて、実際に避難連絡坑を 5G エリア化することができ るかどうか実証実験にて検証を行う。

なお、日立国際電気の東京事業所にある 5G/AI 協創ラボの環境を活用して、反射板の設置 位置と端末の受信電力改善効果に関して事前検証を行う。

3.3.3.3 評価·検証項目

反射板がなかった場合に比べて、反射板を活用して避難連絡坑をエリア化した場合に、受 信電力、伝送スループット、伝送遅延時間が、どの程度改善するのか評価する。

反射板を活用したエリア化の評価・検証項目を、表 3-17 に示す。

#	評価項目	説明
1	受信電力改善量	反射板がある場合とない場合で、基地局が送信する同期
		信号の受信電力が、どの程度改善するか確認する
2	伝送スループット改善量	反射板がある場合とない場合で、上りと下りの伝送スル
		ープット(Mbit/s)の改善量を比較する

表 3-17 反射板を活用したエリア化の評価・検証項目

3	伝送遅延時間	反射板がある場合とない場合で、Ping に差があるかどう かを検証する
4	SINR の改善量	反射板がある場合とない場合で、端末における 5G の SINR が、どの程度改善するか確認する。

3.3.3.4 評価·検証方法

<指標>

評価・検証に必要となる以下の情報について記載する。

- 電波反射板種別:アクティブリフレクタ:方向制御反射板、スイッチング素子で反射 位相を制御する。
- 電波反射板の大きさ、重量、利得(Gain)、ビーム幅: 表 3-15 参照
- 電波反射板設置位置: 避難連絡坑の反対側となる非常駐車帯に設置
- 電波反射板設置自由度: 特に制約なし
- リンクバジェット: 反射板利得の理論値を用いてリンクバジェットを設計。図 3-69 参照。
- 電波反射板によるエリア改善の推定: 反射板を活用することにより、避難連絡坑で 4Gではなく5G通信が可能になると推定。
- - ▶ サービスエリア等における受信電力(RSRP 値)
 - ▶ 通信品質(SINR)
 - ▶ 伝送性能(UL/DL 別のスループット、伝送遅延)

<計測方法>

- 測定に用いる測定機器のエリアテスタは、キーサイト社の Nemo ネットワーク RF 測 定ツールを活用する。
- 電波反射板未設置及び設置にて差分を計測する。
- 電波反射板の効果(有効性)として、避難連絡坑内の複数の地点(5箇所)にて計測
- 電波反射板への到来波の入射角、反射角について計測
- 「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」で測定した結果(20箇所)を利用して、カバーエリア内におけるトンネル内のスループット参考値として活用する。
 特に、UDP/TCP DL スループットの測定結果では、基地局からの距離が遠い場合にLTE接続のみとなり、5G セルが追加されない結果が得られており、5G セル追加となる RSRP値を参考データとして活用し、反射角度の調整によって 5G 接続可能な RSRP 値まで受信電力を改善できない場合には、LTE 接続でのデータ取得を行うこととした。

まず、反射板の設置やビーム制御を行うときに使う主要パラメータについて、下記に説明 する。図 3-70 に、水平面における主要パラメータを示す。

- R_{BS}: 反射板と基地局との距離
- α in:反射板の法線方向に対する基地局からの電波の入射角度

α out:反射板の法線方向に対して端末への電波の出射角度



図 3-70 反射板に関する主要パラメータ(水平面)

本実証実験では、反射板の利得が最も高くなるように、 α in と α out が 45° となる正反射 を基本パラメータとして設定した。ただし、避難連絡坑内の端末位置によって α out を可変 パラメータとしてビーム制御を行う実験を行った。

図 3-71 に、垂直面における主要パラメータを示す。 ε in:反射板の法線方向に対して基地局の見上げ角度 ε out:反射板の法線方向に対して端末への見下ろし角度



図 3-71 反射板に関する主要パラメータ(垂直面)

上記のパラメータを用いて、端末の位置にビームが届くように制御することによって受 信電力を大きくすることが可能となる。

ここで、上記のパラメータを求めるために、反射板を設置するときに、基地局、反射板、 端末の位置に応じて、下記に示すような手順によってパラメータを計測することが必要と なる。反射板の設置手順(パラメータ計測含む)について、下記に記載する。

三脚の設置位置の決定

基地局と端末が見通せる場所に三脚の設置場所を決定する。避難連絡坑の不感地帯をエ リア化するため、非常駐車帯に反射板設置することとした。



図 3-72 反射板の設置場所について

図 3-73 に、28GHz の RU の場所から非常駐車帯の見通し状況の写真を示す。目の前に CCTV があるが、非常駐車帯近くに人と車が映っており、見通しが確保されていることが 分かる。



図 3-73 28GHz RU から見た見通し状況

② 三脚への補強パイプと重りの取り付

反射板の転倒防止のために補強パイプを三脚の各脚に取り付け、三脚を更に安定させる ために三脚の脚および補強パイプに重りを付けた。この様子を図 3-74 に示す。



転倒防止の重り

図 3-74 反射板の転倒防止対策

③ 三脚の水平出し

三脚付属の水平器を使って、三脚の脚の長さを調整し水平となるように設置した。



図 3-75 水平器による三脚の水平出し

④ 反射板の三脚への取り付

三脚上部にある雲台に反射板固定治具を用いて、反射板を三脚に取り付ける。



図 3-76 反射板の三脚への取り付け

⑤ 反射板の高さ調整

三脚のセンターポールの高さを調節し、反射板の中心部の高さを 1.6m とした。

⑥ ロール調整

水準器を使いロール方向を水平にする。

⑦ 基地局の位置計測

反射板に垂直にレーザー距離計を当てた状態のまま、アジマス調整用ハンドルとエレベ ーション調整用ハンドルを回して反射板を基地局の方向に向ける。レーザー光を基地局に 当てた時の基地局までの距離*R_{BS}と、三脚が示すアジマス角度α_{BS}、三脚が示すエレベーシ ョン角度<i>ε_{BS}を*記録する。図 3-77 にレーザ測距計による測定の様子を示す。図 3-78 と図 3-79 に、それぞれのパラメータの説明図を示す。



図 3-77 レーザー距離計による測距と角度調整



図 3-78 基地局までの距離 Rbsと、アジマス角度 α bs の説明図



図 3-79 エレベーション角度 ε BS の説明

実証試験を行う日毎に、パラメータを計測して確認する。各実験日における基地局関連パ ラメータの計測結果を表 3-18 に示す。

表 3-18 各美	「証試験日におけ	る基地局関連パ	ラメー	タの計測結果
-----------	----------	---------	-----	--------

日付	R_{BS} [m]	α_{BS} [deg]	ε_{BS} [deg]
1月31日	49.224	17	3.7
2月1日	49.263	14	3.8

⑧ 端末の設置予定位置の測定

最初に端末を置く予定の位置に向けてレーザー光を向け、基地局と同様に調整を行う。 その時の三脚が示すアジマス角度 aue、三脚が示すエレベーション角度 Eue を記録する。 図 3-80 と図 3-81 に、それぞれのパラメータの説明図を示す。



図 3-80 端末の設置予定位置の方向に対するアジマス角度 aug



図 3-81 端末の設置予定位置の方向に対するエレベーション角度 ε υΕ

各実験日における基地局関連パラメータの計測結果を表 3-19 に示す。

表 3-19 谷美証試験日における端木関連ハフメーダ(の計測結果
-------------------------------	-------

日付	α_{UE} [deg]	ε_{UE} [deg]
1月31日	107	-2.3
2月1日	106	-1.2

⑨ 反射板の設置方向調整

三脚のアジマス調整用ハンドルを回してアジマス角度を $\alpha_{ref} = \frac{\alpha_{BS} + \alpha_{UE}}{2}$ に向け、三脚の エレベーション調整用ハンドルを回してエレベーション角度を $\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_{BS} + \varepsilon_{UE}}{2}$ に向ける。

これにより、入射角度 α_{in} と出射角度 α_{out} が 45° となる正反射の状態で基地局からの電波を端末に向けることができる。




図 3-83 三脚に設定するエレベーション角度 & ref

表 3-20 各実証試験日に設定したアジマス角度 α ref とエレベーション角度 ε ref

日付	α_{ref} [deg]	ε_{ref} [deg]
1月31日	62	0.7
2月1日	60	1.3

⑩ 方向制御反射板の角度設定

 $R_{BS}, \alpha_{BS}, \alpha_{UE}, \varepsilon_{ref}, \varepsilon_{BS}, \varepsilon_{UE}$ を方向制御反射板に入力し、基地局からの電波を端末に向けて反射させた。

以下に、反射板を活用した場合と、反射板を活用しなかった場合に測定する項目の測定方 法について記載する。

図 3-84 に、反射板を活用した避難連絡坑エリア化における基地局から送信する同期信 号の受信電力測定の説明図を示す。避難連絡坑の 5 か所程度の地点において、反射板があ ったときと、反射板がなかったときの受信電力を測定して比較する。



図 3-84 反射板を活用した避難連絡坑エリア化の受信電力測定

同様に、伝送スループット・伝送遅延時間についても、同じ地点で測定を行う。図 3-85 に示した測定構成で、伝送スループットと伝送遅延時間を測定する。



図 3-85 反射板を活用した避難連絡坑エリア化の伝送スループット/伝送遅延時間測定

受信電力、伝送スループット/伝送遅延時間の各項目を測定する手順については、3.3.1.2 に記載の通りである。

図 3-86 に、避難連絡坑における受信電力、伝送スループット、伝送遅延時間の測定の様子を示す。受信電力測定では、ホーンアンテナを用いた。アンテナ利得は 20dBi で、ケーブル損失は 3dB である。ホーンアンテナを用いた理由として、反射板有と反射板無の場合を比較する際、反射板を設置している方向からの到来波が、反射板を用いたときに改善幅が大きいことから、反射板の効果が分かりやすいためである。ホーンアンテナを用いずにオム

ニアンテナとすると構造物による反射波も含めることになり、反射板による反射波である のかどうかを区別することが難しくなるためである。



スループット測定時 (5Gモバイルルータをホーンアンテナの前に設置)

受信電力測定時



なお、5G エリア化するためのリンクバジェットとしては RSSI=-81.2dBm 以上となる前 提としているが、通信品質として 4K 映像伝送が可能となる 25Mbps 以上となるかどうか についても確認を行う。25Mbps 以上とならない場合は、受信電力が足りていないことが想 定されるため、端末から得られる受信電力(RSRP)の測定も行う。

端末から得られる受信電力(RSRP)とスループットの関係については、日立国際電気の 5G/AI協創ラボで運用しているシステムの評価結果を参照データとして活用し、避難連絡 坑での受信電力(RSRP)が足りていたかどうかについて検証を行う。

また、本番の環境で反射板を用いた実験を行う前に設定手順や反射板の効果を確認する ため、5G/AI協創ラボで運用しているシステムで反射板を活用することによって、受信電力 増大とスループット向上の効果があることを検証してから、本番環境での実験を行った。

3.3.3.5 実証結果及び考察

表 3-21 に電波反射板によるエリア構築の柔軟化の実証目標と結果概要の纏めを示す。 反射板と測定器間の距離が 12.9m~32.9m と長かったこともあり、反射板を活用するこ とで基地局に 5G 接続することができた区間は、反射板から 17.9m の距離であった。ただ し、5G 接続すれば避難連絡坑全体で 5G 通信が可能であり、接続するための閾値を調整す れば避難連絡坑全体を 5G としてエリア化できる見込みが得られた。

表 3-21 電波反射板によるエリア構築の柔軟化の実証目標と結果概要纏め

#	実証目標	実証結果
1	不感地帯となる避難連絡坑を 5G で通信可	\triangle
	能なエリアとすること。	不感地帯である避難連絡坑を入口から 5m
		(反射板からの距離 17.9m)地点まで 5G
		通信可能とした。5G 接続したまま移動す
		ると、避難連絡坑全体で 5G 通信可能であ
		ることを確認。
2	基地局同期信号の受信電力が、反射板の活	0
	用により 5dB 以上の改善が得られる(端	反射板からの距離 17.9m の地点にて反射
	末との間の距離 10m以上)	板無しに比べ反射板の活用で 14dB 改善
3	反射板を活用することで、アップリンク、	\triangle
	ダウンリンクとも 25Mbps 以上のスルー	ダウンリンクは UDP で約 1~1.2Gbps、
	プットが得られる	TCP で 900Mbps~1.1Gbps で達成。
		アップリンクは、UDP、TCP とも約
		20Mbps で未達成。
4	反射板を活用することで、端末とサーバ間	0
	の往復遅延時間を 100msec 以内とする。	往復遅延時間は約 30msec で達成。

以下に避難連絡坑における受信電力(RSSI)、スループット、SINR、往復遅延時間の特 性を評価した結果を示す。

反射板を活用したエリア構築の実験では、工事規制時間内に作業を終わらせる必要があったため、作業効率を考えて、まず反射板を設置して受信電力やスループットの特性データを取得し、その後で反射板を取り除いて反射板無しのデータを取得することとした。以降に示す測定データについては、反射板有の測定データを先に示し、反射板無しのデータを後に示し、反射板の有無による差分について検討を行うという順序で記載する。

1) 受信電力(RSSI)

反射板から 12.9m 離れた地点が避難連絡坑の入り口の扉になるが、この位置において、 基地局の同期信号の受信電力(SS-RSRP)の時系列データとして、反射板有の結果を図 3-87 に、反射板無しのデータを図 3-88 に示す。





図 3-87 避難連絡坑入口(反射板から 12.9m)での SS-RSRP 測定結果(時系列): 反射板有



ここで、CC(Component Carrier)1~CC4 は、表 2-4 に示す F1~F4 に対応している。

図 3-87 では、2回ほど、受信電力が小さくなるときが発生している。この事象は、車が 通過する時間に比べて非常に長い時間であり、車の影響とは考えにくい。基地局で電力が落 ちたのか、基地局から反射板へのビームがずれてしまった可能性も考えられる。なお、基地 局側で特にシステム動作上、アラーム等は発生していなかった。

図 3-87 では、CC3 が最も強い受信電力となっている。これは、上述の監査路における受 信電力測定において、基地局からの距離 10m 地点で測定したときのデータと同様である。

100MHzの帯域幅のシステムとして電波伝搬を解析するため、一つの CC に着目してデ ータを纏めることする。以降では、反射板活用時に最も強い受信電力を示した CC3 のデー タを基本として、避難連絡坑における受信電力を纏めることとする。

図 3-88 の結果では、CC4 が比較的、大きな受信電力を示しているが、本技術実証では反 射板を活用した場合について着目するため、CC3 にてデータを纏めている。

図 3-88 の結果で、時折、受信電力が 10dB 近く飛びあがる現象が観測されている。これ は、避難連絡坑の前を通過する車両が反射板の代わりに電波を避難連絡坑内の測定器に反 射波を届けるためである。この様子について、測定器のモニター画面を図 3-89 に示す。



図 3-89 避難連絡坑における車両通過時に車両による反射に受信電力増大(反射板無)

上述のように、SS-RSRP の受信電力測定結果から下記の式により、RSSI を求めることとする。

RSSI = SS-RSRP + 26 dB

反射板からの距離に応じて、基地局同期信号の受信電力 SS-RSRP を測定し、上記の計算 によって RSSI を求めた結果を図 3-90 に示す。



図 3-90 反射板からの距離(12.9m~32.9m) vs. RSSI 特性:ホーンアンテナ

この結果より、反射板を活用しなかった場合に比べ、反射板を活用することにより、大幅 に受信電力を改善していることが分かる。改善幅の少ない反射板からの距離 17.9m の地点 においても、受信電力を 14dB 改善している。理論値は上述の(式11)によって求めた。

理論値と実測値では、約 2~5dB の差分があるが、反射板によるビームが入射波の角度 45°、反射波の角度 45°の正反射に正しくなっている訳ではなく、反射板効率 η の値が低 くなっていることが推測できる。また、測定器とホーンアンテナを接続するケーブル損失や コネクタによる損失等もあり、理論値よりも数 dB 低い値となっていることなどが考えられ る。

上記の結果より、反射板からの距離 32m の避難連絡坑の端でも、反射無しでカバーエリア の基準値-81.2 d Bm より強い電波を受信できるため、避難連絡坑内はカバーエリアとなって いる。なお、避難連絡坑の外は測定が不可能な場所のため、カバーエリア端と調整対象区域 端を避難連絡坑内で見つけることはできなかった。

避難連絡坑まで考慮したカバーエリア、調整対象区域については、表 3-16 に示した通り であった。なお、避難連絡坑内は、他者土地との干渉調整等が不要な場所である。

また、「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」で測定した測定データ(20箇所) は、カバーエリア内におけるトンネル内データとしての参考値として活用できる。同じ程度 の RSRP であれば、同じ程度のスループットを出すことができると考えられる。避難連絡坑 における RSRP の値によって 5G 通信可能かどうかを判断し、5G 通信ができない RSRP である と判断した場合には LTE 通信としての測定データを収集した。

2) UDP DL スループット

まず、反射板を設置して、反射板より 12.9m 離れた地点(避難連絡坑の鉄の扉入り口) において iperf3 による UDP DL(ダウンリンク)スループット測定結果の時系列データを図 3-91 に示す。サーバから 2Gbps の負荷をかけ、120 秒間かけて測定した結果である。Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port に て出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。測定結果を表 3-22 に纏める。



図 3-91 反射板からの距離 12.9m における UDP DL スループット(反射板有)

衣 5 22 区利板からの距離 12.9m の地点における UDI DL ハルーノット(区利板有)						
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%	
Iperf3	1.2Gbps	1.04Gbps	370.2Mbps	1.22Gbps	340Mbps	
PDCP	1.22Gbps	1.02Gbps	406Mbps	1.24Gbps	$55.7 \mathrm{Mbps}$	

表 3-22 反射板からの距離 12.9m の地点における UDP DL スループット(反射板有)

この測定時、車の通過は大型車1台、普通車10台で、測定開始してから15秒以内に4 台、測定開始してから1分近辺に大型車1台、普通車5台が集中して通過している。車両 通過が集中した14時1分56秒や14時2分50秒あたりではスループットは劣化していな い。14時2分15秒あたりでスループットが劣化しているが、このとき車両は通過してい ないため、システムの要因によって劣化していると考えられる。

また、UDP DL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-92 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-93 に示す。Iperf3 も PDCP レイヤのスルー プットも、1.24Gbpsに集中している。ノートパソコンの処理能力として問題ないレベルで、 5G モバイルルータにおける PDCP レイヤでの処理速度にて受信処理ができていると考え られる。



図 3-92 反射板からの距離 12.9m における UDP DL(iperf3)のヒストグラム: 反射板有



図 3-93 反射板からの距離 12.9m における UDP DL(PDCP)のヒストグラム:反射板有

避難連絡坑の中では受信電力が弱いため、反射板によって 5G 通信できる場所とできない 場所があった。5G 通信速度が期待できる場所では、UDP DL で 1.5Gbps の負荷をかけて 測定を行ったが、5G 通信できない場所で 1.5Gbps の負荷をかけると端末側のクライアント がログを取得できなかったり、サーバ側のプログラムが終了してしまうことが発生した。

このため、5G 通信できない場所では、LTE としての DL 上限 100Mbps の約 2 倍の 200Mbps を負荷としてかけて測定を行った。

続いて、反射板がなかった場合について、反射板設置場所から距離 12.9m における UDP DL スループットを図 3-94 に示す。また、統計値を表 3-23 に示す。

この場所では、データ測定前までは 4G 接続しかできていなかったため、負荷を 200Mbps に設定して測定を開始したが、9時46分13秒あたりで、5G 接続となり負荷上限の 200Mbps を達成していることが、事後の測定データ解析で明らかになった。測定時は 4G 接続してい るものとしてデータを取得した。車線規制の関係もあり、この場所ではデータ再取得を行う ことができなかった。



図 3-94 反射板からの距離 12.9m における UDP DL スループット(反射板無)

表 3-23 反射	「板からの距離」	l 2.9m の地点に	おける UDP DI	Lスループット	(反射板無)
活则	由市信	亚均值	 一 淮 佢 主	ト伝 10%	下位 10%

種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Iperf3	200 Mbps	$160.0 \mathrm{~Mbps}$	68.6Mbps	222 Mbps	$58.6 \mathrm{~Mbps}$
PDCP	203.6 Mbps	166.8 Mbps	118Mbps	$315.3 \mathrm{~Mbps}$	49.7 Mbps

また、UDP DL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-95 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-96 に示す。Iperf3 では 200Mbps に山があり、 PDCP レイヤでは 250Mbps に山がある。なお、PDCP レイヤでは、時折、600Mbps を超 えるスループットを示している。



図 3-95 反射板からの距離 12.9m における UDP DL(iperf3)のヒストグラム: 反射板無



図 3-96 反射板からの距離 12.9m における UDP DL(PDCP)のヒストグラム: 反射板有

反射板からの距離を 12.9m から 5m 間隔で 32.9m まで変化させたときに、UDP DL スルー プットの平均値について反射板有と反射板無で比較した結果を図 3-97 に示す。



図 3-97 反射板からの距離 vs. UDP DL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-97の結果より、下記のことが分かる。

- ① 避難連絡坑では、反射板を活用しないと LTE 接続となるケースが多かった。避難連絡 坑の入り口(鉄扉の場所)において、5G 接続がたまにできることがある。
- ② 反射板を活用することにより、反射板設定場所から 17.9m 離れた地点(避難連絡坑の 鉄の扉から 5m)まで 5G で接続が可能となり、1Gbps 以上のスループットを達成。
- ③ 反射板設置場所から 22.9m 離れた地点では、反射板を用いても LTE 接続となること が多かったが、測定データ取得時には iperf3 で負荷をかけた 100Mbps の上限に近い 値を示しており、5G で接続できていた。
- ④ 反射板設置場所から 22.9m 以上離れると、反射板を活用しても LTE 接続となる。
- ⑤ PCDP レイヤと iperf3 のスループットで差が出てくるのは、1.2Gbps の高い負荷の場合のみで、後はほぼ同じスループットを示している。

上記に関して、以下に考察する。

まず、⑤については、ノートパソコンの処理能力の問題で、高い負荷では PDCP レイヤの スループットよりも iperf3 でのスループットが低くなると考えられる。

①から④については、本技術実証で用いたシステムにおいて、端末が通信セッションを張る際、端末からシステム側に報告された SS-RSRP の値を元に 5G のセルを追加するかどうかの判断を行う。今回、デフォルト値の-100dBm が設定されていた。これは、RSSI にして-74 dBm 相当の値になる。図 3-90 では、ホーンアンテナを用いて測定した結果であるが、アンテナ利得 20dBi、ケーブル損 3dB での測定結果である。5G モバイルルータでは、アンテナ利得 3dBi,ケーブル損 0dB とすると、ホーンアンテナ活用時に比べて、14dB(=20-3-3)低い値を示すことになる。図 3-90 の結果より、避難連絡坑の入り口(反射板設置場所から 12.9m の地点)において、RSSI=-60dBm のため、この近辺(反射板設置場所から 17.9m 程度の場所まで)では-74dBm に近い値となり 5G 接続が可能となるかならないかの受信電力であったと考えられる。

なお、アンカーバンドの LTE を用いて避難連絡坑内では、すべてアタッチすることはでき ていた。アンカーバンドの LTE でアタッチした後に 5G のセルが追加することができてい ない。この 5G セル追加の閾値を 5~10dB 程度、低く設定することによって、避難連絡坑 全体で 5G 接続を可能とすることができると考えられる。なお、工事規制の関係で、技術実 証期間の時間制約があったため、閾値を変更して 5G に繋がりやすくすることまでは確認を 行っていない。

5Gモバイルルータの端末から得られた受信電力の測定結果を図 3-98 に示す。

受信電力が弱いため、5G通信のセッションを張ることが難しい状況であることが分かる。 5G接続した場合は、受信電力を測定可能であったが、LTE接続となってしまう場合は、受 信電力の測定結果を得ることができなかった。反射板がない場合は、反射板からの距離 12.9mの位置でのみ5G接続となったため、受信電力のデータが得られているが、それ以外 の場所では受信電力のデータは得られなかった。

反射板がない場合に比べて、反射板がある場合は、約3dB受信電力が改善した。



図 3-98 UDP DL 時、5G モバイルルータで測定した受信電力(RSRP)(避難連絡坑)

別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-1 に、日立国際電気の東京事業所で本技術実証 と同様の 28GHz の NSA 構成のシステムで測定した UDP DL(PDCP)と RSRP の関係を 示す。

図 3-98では、避難連絡坑で5G接続した際のRSRPは -90dBm 近辺の値を示しており、 別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-1 によれば UDP DL として 1.2Gbps から 1.8Gbps 程度のスループットのポテンシャルがあることを示している。図 3-97 より、避難連絡坑で 5G 通信可能なところでは、約 1Gbps~1.3Gbps のスループットが得られており妥当な結果 と考えられる。

図 3-97 では、反射板から 17.9m 離れた地点より先で 5G に接続するのが難しくなる結果が得られたが、逆に、5G に一度接続してしまえば、反射板から離れる方向に移動しても 5G 通信が維持される可能性が高いとの仮説を立てた。

そこで、反射板から 12.9m 離れた場所で 5G 接続した後、避難連絡坑を移動しながら、 どこまで 5G 通信が維持されるのか仮説検証を行った。この検証結果として、UDP DL ス ループット (PDCP レイヤ)の測定結果を図 3-99 に示す。なお、負荷は 1.5Gbps とした。

この検証の結果、避難連絡坑の全区間で 5G 通信が可能であることを確認した。反射板から 32.9m 離れた避難連絡坑の出口近くまで、約 1Gbps 程度のスループットを確認した。なお、5m 移動する毎に 30 秒間静止状態を保った。移動に伴うフェージング影響により、スループットのバラつきが出ている現象が観測されている。

この結果より、システムに 5G 接続を許容する閾値を調整して、システムに 5G 接続しや すくし、5G の通信セッションを確立さえすれば、避難連絡坑内において 5G 通信を可能と することができると考えられる。



図 3-99 5G 接続後に避難連絡坑内を移動したときの UDP DL スループット(PDCP)

続いて、避難連絡坑において反射板を活用した場合と活用しなかった場合で、端末における SINR の測定結果を図 3-100 に示す。

今回の技術実証では、基地局1台と端末1台の通信でスループットを測定している。こ

のため、隣接セル等からの干渉成分はない。1つの基地局で複数台の端末をスケジューリングした場合であっても外部からの干渉成分はないため、実質的には SNR を測定していることに相当する。

なお、5G 接続しているときのみ SINR の測定データが得られており、LTE 接続の場合は SINR のデータが得られていない。このため、反射板無しの場合は、反射板から 12.9m の 避難連絡坑の入り口のみデータが得られている。この地点では、反射板無の場合に比べて反 射板を活用することによって SINR を約 7dB 改善することができる。



図 3-100 UDP DL 通信時の端末における SINR 特性(避難連絡坑)

図 3-101 に、反射板からの距離 12.9m における SINR の時系列データを示す。約 15dB の高い SINR で通信できている様子が分かる。



図 3-101 反射板からの距離 12.9m における UDP DL 通信時の SINR 特性(反射板有)

図 3-102 に、反射板からの距離 12.9m において、UDP DL 通信時の変調方式の頻度を示 す。64QAM:854 サンプル、16QAM:21 サンプル、QPSK:34 サンプルで、ほとんど 64QAM で高速通信を行っていることが分かる。



図 3-102 反射板からの距離 12.9m における UDP DL 通信時の変調方式(反射板有)

別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-2 に、日立国際電気の東京事業所で本技術実証 と同様の 28GHz の NSA 構成のシステムで測定した UDP DL(PDCP)と SINR の関係を 示す。図 3-100 では、避難連絡坑で 5G 接続した際の SINR は 15~20dB 近辺の値を示し ており、別紙(非公開)「事前取得データの図 1-2 によれば UDP DL として 1.2Gbps から 1.8Gbps 程度のスループットのポテンシャルがあることを示している。避難連絡坑では約 1Gbps~1.3Gbps の結果が得られており妥当な結果と考えられる。

3) UDP UL スループット

まず、反射板を設置して、反射板より 12.9m 離れた地点(避難連絡坑の鉄の扉入り口) において iperf3 による UDP UL(アップリンク)スループット測定結果の時系列データを図 3-103 に示す。端末から 300Mbps の負荷をかけ、120 秒間かけて測定した結果である。 Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。測定結果を表 3-24 に纏める。測定開始後、10 秒程度は LTE 接続(5G PDCP レイヤスループットのデー タ無しの区間)であったが、その後、5G 接続している様子が分かる。また、時折、PDCP レ イヤで高いスループットを示すことがあるが、5G モバイルルータの特性と考えられる。そ れ以外の区間については、PDCP レイヤと iperf3 のスループットは、ほぼ同じ値を示して いる。これは、5G モバイルルータの処理能力やノートパソコンの処理能力として余裕があ るためと考えられる。

この測定中に、大型車2台、普通車6台が車両として通過したが、車両通過した時間と 通信の性能劣化の相関は見られなかった。



図 3-103 反射板からの距離 12.9m における UDP UL スループット(反射板有)

表 3-24 反射板からの距離 12.9m における UDP UL スループット(反射板有)							
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%		
Iperf3	20.8Mbps	19.3Mbps	4.3Mbps	21.6Mbps	8.15Mbps		
PDCP	22.3Mbps	12.0Mbps	12.7Mbps	22.6Mbps	19.2Mbps		

また、UDP UL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-104 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-105 に示す。iperf3 では 21Mbps を中心とし た分布となっている。PDCP レイヤのスループットは 25Mbps を中心としているが、 70Mbps や 80Mbps も観測されている。



図 3-104 反射板からの距離 12.9m における UDP UL(iperf3)のヒストグラム(反射板有)



図 3-105 反射板からの距離 12.9m における UDP UL(PDCP)のヒストグラム(反射板有)

続いて、反射板がなかった場合について、反射板設置場所から距離 12.9m における UDP UL スループットを図 3-106 に示す。また、統計値を表 3-25 に示す。測定開始から 1 分 15 秒までは LTE 接続であり、その後、5G 接続されて 5G の PDCP レイヤの測定データが得 られている様子が分かる。

この測定中に、大型車1台、普通車6台が車両として通過した。車両通過した時間と通信の性能劣化の相関は見られなかった。大型車の通過タイミングが、測定開始後、1分15秒あたりに重なるため、この大型車が通過したタイミングで大型車に反射した5Gの電波が測定されて5G接続となった可能性が推測される。なお、車の通過タイミングと通信性能劣化の間には相関関係は見られない。



図 3-106 反射板からの距離 12.9m における UDP UL スループット(反射板無)

表 3-25 反射	板からの距離1	L 2.9m の地点に	おける UDP U	Lスループット	(反射板無)
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%

Iperf3	6.87 Mbps	8.74 Mbps	3.06Mbps	13.6 Mbps	6.47 Mbps
PDCP(5G)	$13.7 \mathrm{~Mbps}$	14.3 Mbps	9.36Mbps	$15.4 \mathrm{~Mbps}$	8.4 Mbps

また、UDP UL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-107 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-108 に示す。

Iperf3 では、LTE 接続では 7Mbps に山があり、5G 接続で 14Mbps に山が分かれている。 PDCP レイヤでは 15Mbps に山がある。なお、PDCP レイヤでは、65Mbps や 80Mbps 等の高いスループットが頻度は少ないが発生している。



図 3-107 反射板からの距離 12.9m における UDP UL(iperf3)のヒストグラム: 反射板無



図 3-108 反射板からの距離 12.9m における UDP UL(PDCP)のヒストグラム: 反射板有

反射板からの距離を 12.9m から 5m 間隔で 32.9m まで変化させたときに、UDP UL スル ープットの平均値について反射板有と反射板無で比較した結果を図 3-109 に示す。



図 3-109 反射板からの距離 vs. UDP UL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-109の結果より、下記のことが分かる。

- ① 避難連絡坑では、反射板からの距離 17.9m までは反射板を活用することによって LTE の 4G 接続から 5G 接続とすることでスループットを改善
- ② 反射板からの距離 12.9mの避難連絡坑の入り口(鉄扉の場所)では、反射板を設置しない場合、最初はLTE 接続であったが、途中から 5G 接続となった。反射板無しで 5G 接続できたのは、この地点のみで、17.9m~32.9m の区間では 5G 接続ができなかった。
- ③ 4K 映像伝送に必要となる 25Mbps 以上を達成することはできなかった。

上記に関して、以下に考察する。

- ① については、今回の測定では、LTE 接続と 5G 接続の境界であった。5G 接続が可能となるようにシステムパラメータを変更する等の調整を行うことで、避難連絡坑全体を5G 接続とすることは可能と考えられる。
- ② 図 3-106 で説明したように、最初は LTE 接続で途中から 5G 接続となった。PDCP レイヤのスループットは 5G 接続になってからの平均値を示している。Iperf3 のスループットは LTE 接続と 5G 接続の両方でスループットの平均値を示している。このため、iperf3 のスループット平均値に比べて、PDCP レイヤの平均値は高い値を示している。また、距離 17.9m~32.9m では 5G 接続ができていないため、PDCP レイヤの測定データを得られず、平均値が 0 となっている。
- ③ 25Mbps 以上を達成するためには、基地局と端末間のパスロスを小さくすることが必要となる。まず、本技術実証と同様な28GHzのNSAシステムを日立国際電気の東京事業所で5G協創ラボで運用しているデータを別紙(非公開)「事前取得データ」の図1-3に示す。RSRPとスループットの対応関係にはバラつきがあるが、25Mbps以上の

スループットを得るには、RSRP として-85 dBm (RSSI=-59dBm) 以上が望ましい。 続いて、図 3-110 に、避難連絡坑において 5G モバイルルータで測定した受信電力 (RSRP)の測定結果を示す。反射板からの距離 12.9m の地点では、反射板無しの場 合に比べて反射板有の場合は、約 4.4dB 改善しているが、RSRP は-90dBm 程度で低 い値を示している。反射板からの距離 12.9m と 17.9m でのみ RSRP 測定結果が得ら れているが、22.9m、27.9m、32.9m の地点では RSRP の測定データを得ることがで きなかった。反射板からの距離 17.9m で RSRP=-87.4dBm であり、-85dBm 以上と するには足りていない。これらのことから、避難連絡坑で 25Mbps 以上を達成するた めには、以下のような対応策が必要になると考える。

- 1. 基地局を反射板の近くに近づけて設置することで、端末の受信電力をあげる。
- 2. 反射板と端末間の距離が近くなるように、反射板の設置場所を避難連絡坑の入り 口近くに設置する。



図 3-110 UDP UL 時、5G モバイルルータで測定した受信電力(RSRP)(避難連絡坑)

なお、UDPUL(アップリンク)の測定では、端末における SINR の測定データを得る ことはできない。本技術実証に用いた基地局においては、統計情報を収集しているが、個 別のアップリンク通信に対して、上りの SINR の測定データを収集することはできない。

4) TCP DL スループット

反射板を設置して、反射板より 12.9m 離れた地点(避難連絡坑の鉄の扉入り口)において iperf3 による TCP DL(ダウンリンク)スループット測定結果の時系列データを図 3-111 に示す。120 秒間かけて測定した結果である。Iperf3 のログで測定したスループットを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのスループットの結果をオレンジ色で示す。測定結果を表 3-26 に纏める。



図 3-111 反射板からの距離 12.9m における TCP DL スループット(反射板有)

表 3-26 反射板からの距離 12.9m の地点における TCP DL スループット(反射板有)							
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%		
Iperf3	932Mbps	889.8Mbps	199.8Mbps	1.08Gbps	593Mbps		
PDCP	965.8Mbps	899.7Mbps	270.2Mbps	1.148Gbps	534 Mbps		

この測定時、車の通過は大型車4台、普通車4台で、測定開始直後の10秒、30秒、1分、 1分30秒に大型車が通過している。大型車の通過タイミングとスループットの劣化には関 係がある可能性があるかもしれないが、パケットキャプチャしての分析をしないと相関が あると断定はできない。TCPのスループット劣化は車の通過台数以上に変動が大きいため、 システム要因によってスループットが劣化していると考えられる。

また、TCP DLの iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-112 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-113 に示す。

Iperf3 では 1Gbps、PDCP レイヤでは 1.1Gbps を山とした分布になっている。Iperf3 と PDCP レイヤの差分は大きくなく、ノートパソコンの処理能力として問題ないレベルで、 5G モバイルルータにおける PDCP レイヤでの処理速度にてノートパソコンで受信できて いると考えられる。



図 3-112 反射板からの距離 12.9m における TCP DL(iperf3)のヒストグラム: 反射板有



図 3-113 反射板からの距離 12.9m における TCP DL(PDCP)のヒストグラム: 反射板有

続いて、反射板がなかった場合について、反射板設置場所から距離 12.9m における TCP DL スループットを図 3-114 に示す。また、統計値を表 3-27 に示す。

この場所は、反射板無しの場合に 5G 接続するかしないかの境界であった。測定時には気が付かなかったが、事後にデータ解析したところ測定開始時は 4G 接続で通信していたが、 10 時 00 分 10 秒あたりで 5G 接続となってスループットが増大していることが分かった。

この測定中に、大型車2台、普通車25台が車両として通過した。特に、測定開始後、1 分15秒あたりから普通車が連続して通過しており、1分30秒に大型車が通過したタイミ ングが、測定開始後、1分15秒あたりから5G接続となった可能性がある。この大型車に 反射した5Gの電波が測定され、5G接続に切り替えられた可能性が推測される。



図 3-114 反射板からの距離 12.9m における TCP DL スループット(反射板無)

表 3-27 反射板からの距離 12.9m の地点における TCP DL スループット(反射板無)

種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Iperf3	62.1 Mbps	142.1 Mbps	185.7Mbps	396 Mbps	$50.6 \mathrm{~Mbps}$
PDCP	64.7 Mbps	149.7 Mbps	231.2Mbps	380.2 Mbps	44.2 Mbps

また、TCP DL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-115 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-116 に示す。LTE 接続のときは、Iperf3 と PDCP レイヤでは 60Mbps 程度の速度で通信をしていたが、5G 接続となり 120Mbps から 900Mbps まで速度を上げたため分布が広がっている様子が分かる。



図 3-115 反射板からの距離 12.9m における TCP DL(iperf3)のヒストグラム:反射板無



図 3-116 反射板からの距離 12.9m における TCP DL(PDCP)のヒストグラム: 反射板有

反射板からの距離を 12.9m から 5m 間隔で 32.9m まで変化させたときに、TCP DL スルー



プットの平均値について反射板有と反射板無で比較した結果を図 3-117 に示す。

図 3-117 反射板からの距離 vs. TCP DL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-117の結果より、下記のことが分かる。

- ・避難連絡坑では、反射板を活用しないと LTE 接続となるケースが多かった。ただし、
 図 3-114 で説明したように避難連絡坑の入り口(鉄扉の場所)では 4G 接続から途中
 で5G 接続に切り替わって通信できることがある。
- ② 反射板を活用することにより、反射板設定場所から 17.9m 離れた地点(避難連絡坑の 鉄の扉から 5m)まで 5G で接続が可能となった。800Mbps~1.1Gbps 程度のスループ ットを達成。
- ③ 反射板設置場所から 22.9m 以上離れると、反射板を活用しても LTE 接続となる。

上記に関して、以下に考察する。

まず、①については、UDP DL で考察したことと同様の理由で、避難連絡坑の入り口では、 5G 通信可能なケースがある。②と③については、上述のように、端末が通信セッションを 張る際、端末からシステム側に報告された RSRP の値を元に 5G のセルを追加するかどう かの判断を行うため、5G 接続が可能となるかならないかの受信電力であったと考えられる。 この 5G セル追加の閾値を 5~10dB 程度、低く設定することによって、避難連絡坑全体で 5G 接続を可能とすることができると考えられる。なお、工事規制の関係で、技術実証期間 の時間制約があったため、閾値を変更して 5G に繋がりやすくすることまでは確認を行って いない。

5G モバイルルータの端末から得られた RSRP の測定結果を図 3-98 に示す。

なお、5G 接続できた場合にのみ RSRP の測定結果が得られており、LTE 接続のときには データを得られていない。

反射板から 12.9m 離れた避難連絡坑の入り口において、反射板がない場合に比べて、反射板がある場合は、約 3.8dB 受信電力が改善した。



図 3-118 TCP DL 時、5G モバイルルータで測定した受信電力(RSRP)(避難連絡坑)

別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-4 に、日立国際電気の東京事業所で本技術実証 と同様の 28GHz の NSA 構成のシステムで測定した TCP DL (PDCP) と RSRP の関係を 示す。図 3-118 では、避難連絡坑で 5G 接続した際の RSRP は -90dBm 近辺の値を示して おり、別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-4 によれば TCP DL として 1Gbps から 1.4Gbps 程度のスループットのポテンシャルがあることが分かる。避難連絡坑では 900Mbps~1.1Gbps の結果が得られており妥当な結果と考えられる。

工事規制の時間の都合により、UDP DL で実施したように避難連絡坑の入り口で 5G接続してから移動して避難連絡坑で 5G接続が可能かは検証しなかったが、UDP DL と同様 に TCP DL でも 5G接続したまま通信可能であると推測できる。

続いて、避難連絡坑において反射板を活用した場合と活用しなかった場合で、端末における SINR の測定結果を図 3-119 に示す。

上述のように、今回の技術実証では、基地局1台と端末1台の通信でスループットを測定しており、隣接セル等からの干渉成分はない。1つの基地局で複数台の端末をスケジューリングした場合であっても外部からの干渉成分はないため、実質的にはSNRを測定していることに相当する。

なお、5G 接続しているときのみ SINR の測定データが得られており、LTE 接続の場合は SINR のデータが得られていない。このため、反射板無しの場合は、反射板から 12.9m の 避難連絡坑の入り口のみデータが得られている。この地点において、反射板を使った場合と 使わなかった場合の差は 5.5dB で、反射板を活用することによって改善されている。



図 3-119 TCP DL 通信時の端末における SINR 特性(避難連絡坑)

図 3-120 に、反射板からの距離 12.9m における TCP DL 通信時(反射板有)の SINR 時 系列データを示す。時折 10dB となることがあるが、15dB~20dB の高い SINR で通信で きている様子が分かる。



図 3-120 反射板からの距離 12.9m における TCP DL 通信時の SINR 特性(反射板有)

図 3-121 に、反射板からの距離 12.9m において、UDP DL 通信時の変調方式の頻度を示 す。64QAM:851 サンプル、16QAM:57 サンプル、QPSK:64 サンプルで、ほとんど 64QAM で高速通信を行っていることが分かる。



図 3-121 反射板からの距離 12.9m における TCP DL 通信時の変調方式(反射板有)

別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-5 に、日立国際電気の東京事業所で本技術実証 と同様の 28GHz の NSA 構成のシステムで測定した TCP DL (PDCP) と SINR の関係を 示す。図 3-119 では、避難連絡坑で 5G 接続した際の SINR は 15~20dB 近辺の値を示し ており、別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-5 によれば TCP DL として 1Gbps から 1.4Gbps 程度のスループットのポテンシャルがあることを示している。避難連絡坑では 900Mbps~1.1Gbps の結果が得られており妥当な結果と考えられる。

5) TCP UL スループット

まず、反射板を設置して、反射板より 12.9m 離れた地点(避難連絡坑の鉄の扉入り口) において iperf3 による TCP UL(アップリンク)スループット測定結果の時系列データを図 3-122 に示す。120 秒間かけて測定した結果である。Iperf3 のログで測定したスループッ トを水色で示し、5G モバイルルータから Diagnostic Port にて出力した PDCP レイヤのス ループットの結果をオレンジ色で示す。測定結果を表 3-28 に纏める。測定開始後、15 秒 程度は LTE 接続(5G PDCP レイヤスループットのデータ無しの区間)であったが、その後、 5G 接続している様子が分かる。PDCP レイヤと iperf3 のスループットは、ほぼ同じ値を示 しているが、測定区間や求め方の違いによって違う値を示すこともある。



図 3-122 反射板からの距離 12.9m における TCP UL スループット(反射板有)

表 3-28 反射板からの距離 12.9m における TCP UL スループット(反射板有)						
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%	
Iperf3	21.3Mbps	20.2Mbps	11.8Mbps	31.8Mbps	7.2Mbps	
PDCP	23.4Mbps	23.3Mbps	8.5Mbps	28.9Mbps	13.9Mbps	

この測定中に、大型車1台、普通車6台が車両として通過したが、車両通過した時間と 通信の性能劣化の相関は見られなかった。

また、TCP UL の iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-123 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-124 に示す。iperf3 と PDCP レイヤのスルー プットは 25Mbps に山があり、70Mbps や 75Mbps 等も観測されている。



図 3-123 反射板からの距離 12.9m における TCP UL(iperf3)のヒストグラム(反射板有)



図 3-124 反射板からの距離 12.9m における TCP UL(PDCP)のヒストグラム(反射板有)

続いて、反射板がなかった場合について、反射板設置場所から距離 12.9m における TCP UL スループットを図 3-125 に示す。また、統計値を表 3-29 に示す。測定開始から 5G 接 続されて 5G の PDCP レイヤの測定データを得ていることが分かる。

この測定中に、大型車2台、普通車10台が車両として通過した。車両通過した時間と通信の性能劣化の相関は見られなかった。測定開始後、1分後あたりで大型車2台と普通車2 台が密に通過しているが、スループットの変動との関連は見られない。



図 3-125 反射板からの距離 12.9m における TCP UL スループット(反射板無)

種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%
Iperf3	11.7 Mbps	12.2 Mbps	10.7Mbps	19.3 Mbps	0.90 Mbps
PDCP(5G)	13.2 Mbps	13.0 Mbps	5.87Mbps	19.5 Mbps	6.3 Mbps

また、TCP ULの iperf3 で測定したスループットのヒストグラムを図 3-126 に、PDCP レイヤのスループットのヒストグラムを図 3-127 に示す。

Iperf3 と PDCP レイヤで 15Mbps に山があって似たような広がりとなっている。



図 3-126 反射板からの距離 12.9m における TCP UL(iperf3)のヒストグラム: 反射板無



図 3-127 反射板からの距離 12.9m における TCP UL(PDCP)のヒストグラム: 反射板有

反射板からの距離を 12.9m から 5m 間隔で 32.9m まで変化させたときに、TCP UL スル ープットの平均値について反射板有と反射板無で比較した結果を図 3-128 に示す。



図 3-128 反射板からの距離 vs. TCP UL 時の iperf/PDCP スループット特性

図 3-128の結果より、下記のことが分かる。

- ① 避難連絡坑では、反射板からの距離 17.9m までは反射板を活用することによって LTE の 4G 接続から 5G 接続とすることでスループットを改善
- ② 反射板からの距離 12.9mの避難連絡坑の入り口(鉄扉の場所)では、反射板を設置しない場合でも 5G 接続となることがあるが、反射板を用いた方がスループット平均値が高い
- ③ 4K映像伝送に必要となる 25Mbps 以上を達成することができなかった

上記に関して、以下に考察する。

- ① については、UDP UL でも述べたように、今回の測定では、LTE 接続と 5G 接続の境 界であり、5G 接続が可能となるようにシステムパラメータを変更する等の調整を行う ことによって、避難連絡坑全体を 5G 接続とすることは可能と考えられる。
- ② については、反射板を用いることで端末の受信電力が改善されたため、スループット 平均値としては反射板を用いた方が高いと考えられる。図 3-129 に、避難連絡坑にお いて TCP UL 測定時に 5G モバイルルータで得られた RSRP の測定結果を示す。なお、 5G 接続できた場合にのみ RSRP の測定結果が得られており、LTE 接続のときには測 定データを得ることができていない。反射板からの距離 12.9m の地点では、反射板無 しの場合に比べて反射板有の場合は、約 4.6dB 改善していることが分かる。



図 3-129 TCP UL 時、5G モバイルルータで測定した受信電力(RSRP)(避難連絡坑)

- ③ については、UDP UL でも述べたように、25Mbps 以上を達成するためには、基地局 と端末間のパスロスを小さくすることが必要となる。本技術実証と同様な 28GHz の NSA システムを日立国際電気の東京事業所で 5G 協創ラボで運用しているシステムの TCP UL と RSRP の特性データを別紙(非公開)「事前取得データ」の図 1-6 に示す。 RSRP とスループットの対応関係にはバラつきがあるが、25Mbps 以上のスループッ トを得るには、RSRP として-85 dBm (RSSI=-59dBm) 以上が望ましい。反射板から の距離 17.9m で RSRP=-88.1dBm であり、-85dBm 以上とするには足りていない。 避難連絡坑で 25Mbps 以上を達成するためには、以下のような対応策が必要になると 考える。
 - 1. 基地局を反射板の近くに近づけて設置することで、端末の受信電力をあげる。
 - 2. 反射板と端末間の距離が近くなるように、反射板の設置場所を避難連絡坑の入り 口近くに設置する。

なお、TCP UL (アップリンク)の測定では、基地局における SINR の測定データを得 ることはできない。本技術実証に用いた基地局においては、統計情報を収集しているが、 個別のアップリンク通信に対して、上りの SINR の測定データを収集することはできな い。

6) 往復遅延時間特性

反射板を活用したときに、反射板から 12.9m 離れた地点において ping による往復遅延時間の測定結果の時系列データを図 3-130 に示す。120 秒間かけて測定した結果である。統計値を表 3-30 に示す。



図 3-130 反射板から距離 12.9m における往復遅延時間特性(時系列データ): 反射板有

表 3-30 反射板から距離 12.9m における往復遅延時間:反射板有								
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%			
Ping	32.7 msec	$34.5 \mathrm{msec}$	18.0 msec	48.8 msec	16.3 msec			

片方向の遅延は、往復遅延時間の半分であることから、平均値 34.5msec の半分として約 17.3msec である。本技術実証で用いたローカル 5G システムは、URLLC に対応していな い。

なお、Pingの応答時間が、120msecの大きな値が見られたが、無線区間のパケットロス に起因するものなのかコアネットワークやサーバ側のシステム要因であるのか切り分けは 難しい。また、12msecから51msecまで40msec程度のバラつきで変動している。これは、 参考文献[2]のP356に記載している通り、Pingの通信が間欠的であるため、DRXの機能に よって、パケットの発生時間によっては、最大40msec分パケットをためてから送出するた めであると考えられる。

この測定中に、大型車2台、普通車6台が通過している。特に車両通過による特性への 影響はないと考える。

Ping で測定した往復遅延時間のヒストグラムを図 3-131 に示す。上記の DRX の影響も あって、18msec から 58msec の広い範囲に分布している様子が分かる。



図 3-131 反射板からの距離 10m における往復遅延時間(ping)のヒストグラム:反射板有

次に、反射板無しの場合の測定結果を示す。反射板から 12.9m 離れた地点において ping による往復遅延時間(反射板無)の測定結果の時系列データを図 3-132 に示す。120 秒間 かけて測定した結果である。統計値を表 3-31 に示す。



図 3-132 反射板から距離 12.9m における往復遅延時間特性(時系列データ): 反射板無

及 0 01 次初次》 9 距離 12.0m (Clot) 3 正夜赶延时间: 次初次 //							
種別	中央値	平均值	標準偏差	上位 10%	下位 10%		
Ping	32.8 msec	66.8 msec	143.2 msec	59.5 msec	21.9 msec		

表 3-31 反射板から距離 12.9m における往復遅延時間: 反射板無

1 秒近くの遅延が発生していることから平均値が大きくなっている。反射板有のときは、 120msec 程度の遅延が発生していたが、反射板無しでは 1 秒近くとなっており、無線区間 でのパケットロスの影響が大きくなっている可能性がある。

中央値については、反射板有の場合と反射板無の場合で差が少ない。片方向の遅延は、往 復遅延時間の半分であることから、平均値 66.8msec の半分として約 33.4msec となる。

この測定中に、大型車5台、普通車13台が通過している。測定開始後、30秒~1分30秒の間に多くの車両が通過している。大きな遅延を発生させた要因に車両通過との関係が

ある可能性は否めない。

反射板無しの場合の Ping で測定した往復遅延時間のヒストグラムを図 3-133 に示す。1 秒近くの大きな遅延については排除して、それ以外のデータの分布を調べてみたところ、反 射板有のヒストグラムと比べて、分布が少し広がっているが、似たような分布であると言え る。



図 3-133 反射板からの距離 10m における往復遅延時間(ping)のヒストグラム:反射板無

上記に記載した反射板から 12.9m 地点における測定と同様の方法にてデータを収集して、 反射板からの距離 12.9m から 5m 間隔で 5 地点において、反射板有の場合と反射板無の場 合において往復遅延時間 (ping)の測定を行った。図 3-134 と図 3-135 に、測定結果を示す。



図 3-134 反射板からの距離 vs. 往復遅延時間 (中央値)特性 (避難連絡坑)



図 3-135 反射板からの距離 vs. 往復遅延時間(平均値)特性(避難連絡坑)

図 3-134の結果より、下記のことが分かる。

- ① 反射板の有無に関わらず、往復遅延の中央値は 30msec 程度で一定。
- ② 反射板無の場合、反射板からの距離 12.9m の地点でのみ平均値が高くなっている。
- ③ 上位 10% 値や下位 10% 値等、往復遅延時間に 40 msec 程度のバラつきがある。
- については、往復遅延時間(ping)の特性は、Pingのパケットサイズが小さく、頻度も 1秒に1回のため、それほど変化しないと考えられる。
- ② については、図 3-132 に示した通り、1 秒近くの大きな遅延が発生したため、平均値が大きくなっている。この地点以外では、それほど大きな遅延となっていない。
- ③ については、DRX の影響と考えられる。

7) ビーム制御機能の確認

本開発実証で用いた反射板は 1°ステップでビームを垂直方向と水平方向に制御する機能を持っている。この機能の有効性を確認するため、以下の検証を行った。

ビーム制御前の設定情報について、図 3-136 に示す。なお、パラメータに関する説明は 3.3.3.4 に記載している通りである。

反射板からの距離 17.9m で避難連絡坑の中心線の位置から横に1m移動した地点を測定 点とした。横に1mずれると中心線から 3.2°ずれた位置となる。反射板の半値幅の角度が 3°であるため、半値幅から外れて受信電力が弱くなることが予想された。

まず、横 1m ずれた場所に移動し、ビーム制御前の測定データとして、出射波の角度を 45°のままとし中央線上に電波を出射した状態で受信電力の測定を行った。

その後、図 3-137 に示すような方向で、ビームを 1° ずつ水平方向に変化させて受信電力が高くなるかどうかを見ながら出射波の角度を変更して、受信電力が最大となる設定を 探した。図 3-137 に示すように、 α out が 50° となるビームで最大の受信電力となった。






図 3-137 ビーム調整後の設定情報

図 3-138 にビーム制御前と、ビーム制御後の測定器における受信電力の測定画面を示す。 この画面を見ながら、ビームを1°ずつ変更していったときに、受信電力があがったのか下 がったのかを見ながら、反射板のビーム制御パラメータを変更した。ビーム制御後の方が受 信電力が高くなっている様子が分かる。



図 3-138 ビーム制御前とビーム制御後の受信電力測定画面

図 3-139 に、ビーム制御による受信電力改善効果について示す。

ビーム制御前は、避難連絡坑の中心線方向にビームが向いており、横1mずれた地点では 受信電力の平均値が-102.7dBm であったが、横1mずれた場所にビームを制御することに よって-95.2dBm まで約7dB受信電力を改善することを確認した。



ビーム制御による受信電力改善

図 3-139 ビーム制御による受信電力改善効果

上述のように反射板の半値幅が3°であるため、図3-136に示すように避難連絡抗の中 心線に出射するようにパラメータを設定した場合、横1mずれた地点は3.2°ずれている ので受信電力が減少した。測定器の受信電力が最大となるには、避難連絡抗の中心線の45° 方向から50°までビームを5°変更している。この設定では、避難連絡抗の中心線から 3.5°から6.5°までの範囲内が半値幅となる。横1mずれた場所の3.2°の角度よりも、 若干大きめの値を設定することとなった。今回のビーム制御では水平方向の調整であった が、垂直方向で調整にずれがある場合には、水平方向で設定する値にも影響を受ける可能性 がある。

なお、工事規制時間の関係で、受信電力の改善を確認するところまでで撤収となった。

なお、事前の日立国際電気での事前検証でビーム制御による受信電力改善場所において スループットを改善できることを確認している。

今回の技術実証にて用いた反射板は、パラメータ制御によって受信電力を改善すること ができる。電気的に反射方向を制御することが出来る反射板であるからこそ実現できたこ とであり、金属板や反射角度が決まっているパッシブな反射板では実現が難しい。

8) 日立国際電気(東京事業所)における反射板を活用した事前検証

本技術実証では、本番環境の避難連絡坑に入るためには高速道路の追越車線に規制をかけて入るため、限られた時間内に実験を行う必要があった。事前に、日立国際電気の東京事業所にある 5G/AI 協創ラボで商用局の免許で運用している 28GHz NSA 構成のシステムで反射板を活用した実験の手順確認 (パラメータ調整含む)を 2021 年の 11 月末と 12 月末に2 日間ずつ、合計 2 回、事前検証を実施した。



図 3-140 日立国際電気における反射板を活用した事前実証試験環境

図 3-140 に、事前検証を行った日立国際電気の 5G/AI 協創ラボの設置状況について示す。 5G/AI 協創ラボ内に、28GHz の RU が設置されている。この RU から 11m 離れた見通し のある場所に反射板を設置した。反射波は、5G/AI 協創ラボ内と廊下を挟んだ会議室の扉を 開放して会議室の奥まで反射板からの距離 20m 離れた地点まで測定器を使って事前検証を 行った。図 3-141、図 3-142 に反射板の設置状況や測定器で測定している様子を示す。



図 3-141 事前検証@日立国際電気における反射板設置状況



図 3-142 事前検証@日立国際電気における測定器と反射板の様子



図 3-143 に、反射板無の状況から反射板有となった場合の受信電力改善の様子を示す。

145

反射板によって約 14dB 以上、受信電力が改善している。なお、28GHz の RU からは多数 のビームが出ており、反射板無しの場合には多数のビームが混ざり合った状況として観測 されている。反射板を活用すると、28GHz の RU から出ているビームの内、直接、反射板 に届いているビーム 3 本程度が反射板利得を得て電力が増幅されて届いている様子が分か る。このようにビームが少数、分離されて到来する様子を観測することによって、反射板を 経由して到達したビームなのかどうかを判断することができる。この現象は、オムニアンテ ナでは判別が難しく、ホーンアンテナの方が反射板の到来方向の電波が増幅される様子が 分かるため反射板によるビームが届いているのかどうかを判別しやすい。



図 3-144 に、反射板と測定器間の距離を横軸として RSSI を測定した結果を示す。

図 3-144 事前検証@日立国際電気における受信電力(RSSI)の測定結果

この測定では、反射板を設定している方向にホーンアンテナを向けてその到来方向の受 信電力を測定している。これは上述のように、ホーンアンテナの方が、反射板によるビーム が届いているのか否かを判別しやすかったため、ホーンアンテナを用いて測定を行ってい る。

反射板無に比べて、反射板によって受信電力を改善している様子が分かる。なお、日立国際電気の環境では、会議室まで建物の構造による反射波も届いていたため、反射板・測定器間の距離 16m の位置等は反射板ではない経路で電波が到達していたため、反射板の有無による差が少なかった。なお、反射板から距離 1 mの地点では、反射板の高さが 1.6m に対して、測定器のアンテナの高さ 1.3m で測定したため、反射波のビームがうまく届かない状況であったため RSSI が低い値を示している。

図 3-145 に、UDP DL のスループット測定結果を示す。反射板からの距離 8m までは、 日立国際電気の 5G/AI 協創ラボの中であり、反射板無しであっても壁などによる反射波が 強い環境であり、反射板の有無によるスループットの差は出ない。一方、反射板からの距離 13m、20mの地点は会議室の中で、構造物による反射波が届きにくい場所になるため、反射 板を活用することによって受信電力が改善されスループットも改善されていることが分か る。



図 3-145 事前検証@日立国際電気における UDP DL スループットの測定結果

この他、ビーム制御によって端末の位置が移動した場合でも受信電力が改善できることも確認した。

日立国際電気における事前検証では、本番環境に入る前の手順確認が主な目的なため、 反射板のパラメータ調整やビーム制御機能の確認、測定器の測定手順確認等を中心に行っ た。このため、本番環境で取得予定のデータを全部取得した訳ではなく、上記に記載したデ ータのみを取得している。

9) その他の分析・考察

以下の 9.1~9.4 に関して、分析・考察を記載する。

- 9.1 電波反射板を利用したエリア設計手法の手順
- 9.2 実証目的に照らした電波反射板の有効性評価結果
- 9.3 電波反射板活用に適したユースケースの提案 1つの基地局から複数、直角に曲がった場所に対する反射板活用の検討
- 9.4 他のエリア改善策(無線中継器、簡易基地局等)との経済性比較
- 9.1 電波反射板を利用したエリア設計手法の手順

電波反射板を設置する際のエリア設計手法について、下記に纏める。 なお、前提条件として基地局設置場所はあらかじめ決まった場所となっており、反射板を活 用することでカバレッジを拡張するエリア設計とする。

今回の実証実験では、反射板の効果を調査することを主眼としたため、基地局からの見通 しを確保できる非常駐車帯に反射板を設置したが、実際には、非常駐車帯は車を止めるスペ ースを空ける必要があり、常時、反射板を設置することは難しい。常時設置可能な場所とし ては、トンネル内の壁面か避難連絡坑の壁面に制限されることになる。ここでは、本実証実験の環境を例として避難連絡坑内に反射板を設置することを検討した場合について、図 3-146に例として図面を記載する。



図 3-146 エリア設計手順に関する例

以下にエリア設計手順を記載する。

Step1: 反射板を活用したカバーエリアの決定(図 3-146 で緑色のエリア) Step2: 反射板の設置場所、設置個数を仮決定。

本実証実験では暫定的に非常駐車帯に置いたが、本番設置では壁に近いところに固定す る必要がある。また、基地局から見通しが取れる場所に反射板を設置することが望ましい。 このため、図 3-146 では、避難連絡坑の入り口に近い場所を設置候補とした。

反射板の設置個数を考える場合、1つの反射板の半値幅、もしくはビーム制御による角度 の上限を考え、図 3-146 の例では、右下のカバーエリア端となる端末位置に電波を届ける ことが可能であれば反射板は一つで十分である。もし、カバーできない場合は、追加で反射 板を設置することを検討する。図 3-146 の例では避難連絡坑の真ん中に反射板を1個追加 することで、カバーエリアの右下の端末をカバーする方法も考えられる。

反射板の個数と設置場所については、計算機によって最適解を求めてもよいが、パスロス や反射板の調整にかかる工数も考慮して、反射板の個数を数多く設置しないように設計指 針として反射板の個数の上限を定めてもよい。

Step3: カバーエリアの中で、反射板を活用した反射波の受信電力が最も弱くなる場所を計算によって求める。

カバーエリア内の端末で反射板から最も遠くなる場所、もしくは出射角度の条件から受信 電力が弱くなる場所等が考えられる。図 3-146 の場合は、避難連絡坑内のカバーエリアの 四隅の中から、反射板と端末の距離が最も遠くなる場所を候補とすればよい。

候補となった端末の場所で、反射板を経由した反射波の受信電力を下記の式によって求める。下記は、図 3-90 の理論値を計算した(式4)と同じである。

端末受信電力(dBm)=基地局RUの送信電力(dBm)+基地局アンテナ利得(dBi) -基地局RU・反射板間距離による自由空間伝搬損(dB)+反射板利得(dBi)

・反射板・端末間距離による自由空間伝搬(dB)

+端末アンテナ利得(dBi)・端末ケーブル損失

なお、反射板の段数が増えた場合には、下記のような考え方でモデルを構築する。 端末受信電力(dBm)=基地局RUの送信電力(dBm)+基地局アンテナ利得(dBi) -基地局RU・反射板間距離による自由空間伝搬損(dB)+反射板1の利得(dBi) -反射板1・反射板2の間の距離による自由空間伝搬(dB)++反射板2の利得(dBi) +端末アンテナ利得(dBi)-端末ケーブル損失

(式4)において、反射板の入射角度と出射角度が必要となる。この値を決定するには、反 射板の設置角度等を決める必要がある。反射板の入射角度、反射角度が45°の正反射条件 が最も出射波の電力が高くなる。設置状態から45°の出射角度に調整する方法としては、 3.3.3.4 で①から⑩で記載した手順によって設定することができる。

なお、反射板の設置高さについては、設置場所の制約によって決まってくる。(例えば、避 難連絡坑の高さ以内等。)先に反射板の設置高さを決めてから、3.3.3.4 で①から⑩で記載し た手順によって反射板から基地局の見上げ角度、反射板から端末の見下ろし角度を測定し て垂直方向の出射波を強くする。

Step4: 最も受信電力が小さくなる端末の場所において所要品質を満たすかどうかチェックする。所要品質を満たしていれば、Step5 へ。満たしていない場合は、Step6 へ。

Step5:端末から基地局に報告する端末での受信電力の値が、システムとして 5G 接続を許 容可能なパラメータになっているかどうかを検証する。

もし、5G 接続を許容していれば Step7 へ。そうでない場合、パラメータの変更が可能であ れば、5G 接続を許容できるようにパラメータを変更して Step7 へ。もし、パラメータの変 更が不可能である場合には、端末での受信電力の値が許容できる値となるように受信電力 を高めるために Step6 へ。

Step6:端末での受信電力が高くなるために下記の検討を行う。

- 1. 反射板と端末の位置が極力近くなるように反射板の配置場所を再度検討し、Step2 に 戻る。
- 2. 上記の1で反射板設置場所を変えても所要品質を満たす解が導出できない場合には、 反射板の位置での基地局からの電波が弱い可能性が高い。その場合は、基地局を動か すことが可能であれば、所要品質を満たすまでに必要な受信電力が反射板の位置で

得られるように基地局設置場所を反射板の近くに設置する。

Step7: エリア設計終了

本技術実証のエリア設計では、上記の Step4 において、不感地帯を 5G のエリアとするこ とに主眼を置いていたため、避難連絡坑で反射板から最も遠い位置の端末でカバーエリア の基準となる RSSI=-81.2 dBm 以上の所要品質を満たすことをシミュレーションで確認し ていた。一方で、25Mbps 以上の通信速度に必要となる RSSI=-59dBm という基準でリンク バジェット設計していなかったこともあり、アップリンクでは 25Mbps を達成できていな かった。しかし、図 3-47 で、基地局から 50m 離れた地点で TCP UL のスループットが 25Mbps 以上を達成できなかったことを踏まえると、反射板の位置が基地局から 50m 離れ ていたため反射板を活用してアップリンクで 25Mbps 以上を満たすことは厳しい条件であ ることが分かる。

本来、反射板の活用目的としては、通信圏外となりそうな弱電界で受信電力改善によりエ リア化することにある。一方、高いスループットを実現する強電界を本実証実験で用いたサ イズの反射板を用いて設計しようとすると、反射板以外の構造物の反射波の影響も考慮す る必要が出てくるため、モデル化が難しくなり設計困難になると考えられる。

9.2 実証目的に照らした電波反射板の有効性評価結果

本技術実証の実証目標に対する評価結果は、表 3-21 に纏めた通りである。 図 3-147 を用いて、有効性評価について概略を説明する。



図 3-147 反射板を活用した柔軟なエリア構築の有効性検討

まず第一に、トンネルから直角に曲がった避難連絡坑では、ミリ波が届きにくいという仮 説があたっており、避難連絡坑入口付近以外では 5G 通信ができない不感地帯だった。それ に対して、反射板を活用することによって、5G通信を可能にすることが実証できた意義は 大きい。

ただし、以下の課題が抽出された。

課題1: 反射板からの距離 17.9m まで 5G 接続できるが、それ以上離れると 5G 接続が できなかった。

課題 2: 反射板による反射波の半値幅が 3°と狭い為、避難連絡坑の出口近くの 32.9m の地点でも 1.72m 程度の幅となる。

課題1に対しては、リンクバジェットが足りていないことが主要因だった。基地局と反射 板の間の距離を近くする、反射板から端末の間の距離を小さくする、反射板のサイズを大き くする等、リンクバジェットに余裕を持ったエリア設計が必要だった。

ただし、避難連絡坑の入り口近くで 5G 接続したまま、避難連絡坑の出口まで移動することで 5G 通信が維持されることを確認した。これは、避難連絡坑の内部で 5G 通信ができる ポテンシャルがあることを示している。リンクバジェットが低くても、システム側で 5G 接 続を許容する閾値等を調整することによって、5G のエリア化とすることは可能であると考 えられる。

課題2に対しては、反射板の方向を制御する機能を持っているため、ビーム制御によって 受信電力を増大することができることを実証した。これは、パッシブな金属反射板や散乱板 では実現することができず、本技術実証で用いたアクティブ素子を活用してビーム制御が 可能な反射板だからこそ実現できたことである。

ただし、現時点では、端末の位置に応じて、反射板のビーム制御を個別にマニュアル設定 する必要がある。今後、実用化を踏まえると、以下の二つのアプローチが必要になると考え る。

1. 反射板の半値幅増大によるカバレッジ範囲の拡大

2. 半固定の端末に対して、反射板のビーム制御が自動追従するための機能追加

9.3 電波反射板活用に適したユースケースの提案

本技術実証では、基地局と電波反射板を組み合わせて、ミリ波の直進性を活かしながら、 直角に曲がった通路にエリアを構築することを検討した。この考え方を応用すると、図 3-148 に示すように、一つの基地局から電波が届く通路に反射板を設置することによって、 直角に曲がった通路をエリア化することが可能であると考える。



図 3-148 反射板を活用したエリア構築のユースケース例

このようなユースケースとして、以下のような場所があげられる。

- ・ショッピングモール/デパート等
- 大規模な物流倉庫
- ・港湾のコンテナ置き場
- 鉄道のプラットフォーム
- ・空港等

図 3-149 に、1 つの基地局から複数の通路に対して、反射板を活用してエリア構築した 場合の受信電力を示す。基地局から見通しがとれる反射板を設置する通路は、緑色の自由空 間伝搬損に従った受信電力になることを想定している。基地局から 20m 離れた地点に反射 板を設置し、直角に曲がった通路をエリア化した場合、図 3-148 に示した基地局からのト ータル距離 (D=X+Y) における受信電力を黄色い線で示す。水色の線は、基地局から 40m 離れた地点に反射板を設置した場合の受信電力を示している。理論値として(式11)によ って求めた値である。



図 3-149 複数の通路に対して反射板を活用してエリア構築したときの受信電力

基地局からの受信電力が十分であることと、反射板から端末までの距離が離れないように することで、複数の通路を反射板を活用することによって経済的にエリア化することがで きる。直角に曲がった通路をエリアとしてカバーするためには、反射板からの反射波の半値 幅を広くとるか、端末位置に位置に応じたビーム制御を適用する等が必要になってくる。

9.4 他のエリア改善策(無線中継器、簡易基地局等)との経済性比較

本技術実証で用いた反射板と他のエリア改善策との比較について、表 3-32 に纏める。本 技術実証で用いた方向制御反射板は、電源設備が必要となるが反射波の方向性を制御でき る点が特長であり、電波反射板や散乱板に比べると長い距離のカバレッジや角度広がりに 対応できるメリットがある。簡易基地局や中継局に比べて伝送路設備が不要なため設置コ ストを低く抑えることができる。

比較対象としては金属板などの電波反射板、散乱板、簡易基地局、中継器を挙げた。これら製品/技術の性能や導入コストは、構成やユースケースに依存して変化するものであるが、代表的な構成や一般的な構成を想定して、本実証実験で用いた方向制御反射板との比較を行った。

比較については大きく分けて2つの観点から行った。1つ目の観点は設置の容易性であ り、2つ目の観点は設置のコストである。方向制御反射板は電源が必要であるが伝送路は 必要ないため施工は比較的容易である。電波反射板(金属アルミ等)や散乱板は伝送路と電 源の必要としないため、それらに比べると施工は容易ではないが、伝送路や電源を必要と する簡易基地局よりは施工は容易であると言える。方向制御反射板は電気的に方向制御が 可能であることからカバレッジの距離及び角度を広くとることが出来るので設置場所の選 定および位置合わせも短期間で終わらせることが出来ると考えられる。電波反射板(金属 アルミ等)は、カバレッジの距離は長いがカバレッジの範囲が狭いため位置合わせに時間 が掛かり、設置容易性が高いとは言えない。散乱板はカバレッジの距離が短いため設置場 所の選定が難しく、設置の容易性が高いとは言えない。それに対して方向制御反射板は施 工が比較的容易でカバレッジの範囲も広いことから、設置の容易性は比較的高いと言える。

方向制御反射板の設置のコストという観点で考えると、電源や伝送路を必要としない電 波反射板や散乱板よりは設置のコストは高いが、簡易基地局や中継器のように信号増幅機 能を有しないことから変復調回路や増幅回路が不要であるため、比較的低コストでの導入 および保守が可能である。

評価項目	方向制御反射 板(本実証)	電波反射板 (金属アルミ)	散乱板	簡易基地局	中継器
設置面積	少	少	少	大	大
電源必要性	必要	不要	不要	必要	必要
消費電力	小	無	無	大	中
伝送路必要性	不要	不要	不要	必要	不要
施工容易性	容易	容易	容易	やや難	やや難
リードタイム	数週間~ 数か月	数週間~ 数か月	数週間~ 数か月	6カ月程度	数カ月~ 6 カ月
移設容易性	容易	容易	容易	困難	困難
カバレッジ 距離	広い	広い	短い	非常に広い	非常に広い
カバレッジ 角度	広い (ビーム制御)	狭い	広い	広い	広い
基地局との 位置関係	見通し内	見通し内	見通し内	制限無し	見通し内
数量拡張性	増設可能	増設可能	増設可能	増設困難	増設困難
位置合わせ	容易	困難	不要	不要	容易
コスト	中	/]\	/]\	特大	大
総合評価	優	न	न	可	良

表 3-32 他のエリア改善策との比較

以上を踏まえると方向制御反射板は設置の容易性、設置のコストの観点で金属反射板と 散乱板の長所を併せ持つと言える。また、方向制御反射板は変復調機能や信号増幅機能を 有しないことから、単純な性能で言うと簡易基地局や中継局ほど万能ではないが、コスト 面・メンテナンス面・消費電力など総合的観点で考えれば、ユースケースによって無線環 境改善のために導入する通信機器として適切な選択肢である言える。具体的には見通し内 伝搬が確保できて、カバレッジ距離が極端に広くないようなユースケースが挙げられ、基 地局と避難連絡抗が見通し外伝搬である環境で、基地局と避難連絡抗のそれぞれから見通 し内伝搬で距離もおよそ 50m の位置に機器の設置が可能な本実証実験のようなユースケー スにおいては、方向制御反射板は適切な選択肢であると言える。

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発

本実証では該当しない。

3.3.5 その他のテーマ

本テーマには取り組まない。

3.3.6 技術実証における追加提案

技術実証における追加提案には取り組まない。

4. ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討(課題実証)

4.1 実証概要

労働人口の減少により、メンテナンスを担う技術者の確保が困難となり、更に、熟練技術 者の高齢化及び退職により、現場を任せることのできる熟練技術者の確保も困難となって いる。そのため、技術者の教育が急務であるにもかかわらず、指導する熟練技術者が不足し ていると言う課題に直面している。

また、高速道路では、図 4-1 に示すように、NEXCO3 社(東日本、中日本、西日本)で規 制中車線に車が突入する事故が 6 年間で 326 件発生しており、ICT 技術の活用等による対 策が急務である。このため現場作業員の安全確保が重要な課題となっている。

① 規制への突入 (326件)	② 路肩停止中	② 路肩停止中の作業車両への接触(136件)		
 (テーパー部への突入) 62% (テーパー部への突入) 62% 規制のテー にまっすぐい 行しながら3 もの。 		路肩に停止中の後 尾警戒車、規制機 村運搬車などの各 種作業車両に接触 するもの。	é H	
<u> </u>	③ 低速作	乍業車両への接触(94件)		
(平行部への突入) 36% 規制の平行 → → → → → → → → → → → → → → → → → → →		 路面清掃A、雪氷 作業車両などの復 速作業車両に接触 するもの 	5 虫	
	④ 路上作	業関係者への接触(13件)		
			E E	

図 4-1 工事規制に関する他責事故例

技術者不足の課題に対しては、5Gとスマートグラスを活用して熟練者が遠隔作業支援 を行うことにより教育を通じて技術者のレベルアップを図る。

作業員の安全確保の課題については、監視カメラの映像をローカル5Gで伝送し、エッジ コンピュータで AI 画像解析することにより、規制中車線に進入してくる車を早期発見し、 作業員にアラート通知することで、未然に事故を防止することができる。また、作業員自身 が気付かずに、危険なエリアに侵入したことを AI 画像解析で検知してアラート通知するこ とも事故防止の観点で効果的であると考える。

上記を踏まえて、高速道路事業者特有の環境である「トンネル内」における現場作業員の 安全確保や業務効率向上を目的として、ローカル5G、スマートグラス、監視カメラ、AIに よる保守保全業務の高度化を狙い、以下の課題実証を推進する。

- 遠隔作業支援:労働人口減少による作業員確保の課題に対し、スマートグラスや4 Kカメラで遠隔の熟練者から作業を支援
- 2. 作業員の安全確保:監視カメラの AI 画像解析で、規制中車線に突入しそうな車や

作業員が危険なエリアに入ったとき、作業員に通知して危険を回避。

なお、今年度実証については、保全の ICT 化をテーマとしており、コンソメンバーも保 全に関連したメンバーにより構成されている。

「トンネル工事作業の ICT 化」については、本年度技術実証により明らかになるトンネル内電波伝搬モデルを踏まえて、来年度調査段階からの検討が必要になると認識している。

具体的には、

①必要なコンソーシアムの構成

②利用シーンの調査

③利用可能なソリューションの調査

④利用可能な L5G 機器等の調査

⑤対象となるトンネルの調査

等が考えられる。

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

中日本高速道路では、高速道路オペレーションの迅速化・省力化、機械化による現場点 検作業や日常的な維持作業の高度化・合理化などを実現するとともに、既存の業務プロセ スやマニュアルを見直すなど、10年先を見据えた次世代技術を活用した高速道路の保全マ ネジメントの革新的な改革プロジェクトに取り組んでいる。

また、中日本高速道路では、幅広い分野の企業や大学などと連携し、AI、IoT、ビッグ データ、ロボットなどの先端技術や知見を取り入れるため、コンソーシアム方式を導入し、 オープンイノベーション推進組織である「イノベーション交流会」を設置している。本開発 実証コンソーシアムでは、このイノベーション交流会のローカル5G 企画検討部会にあた り、5G の技術を活用することについて検討を推進している。表 4-1 に、高速道路の高度 化と、5G 活用との関係について検討した結果を示す。

なお、下表 5G 活用については、イノベーション交流会の企画部会にて、課題とニーズ に関して幅広く検討して整理した結果となっている。5Gの活用に記載している○、△、× については、ローカル 5G の特徴(超高速、低遅延、多数接続)との親和性を示している。

#	高速道路業務の高度化		5G の活用	
1	ドローン、車載カメラ(ドラレコ含む)等の立体画像	0	大容量・移動体通信	
2	ウエラブルカメラ画像(点検支援、工事管理(立ち合い)、近接立ち会い等用)	0	大容量・移動体通信	
3	構造物等 3D・点群計測データ(点検ロボット等による自動計測)	0	大容量・移動体通信	
4	定点 CCTV カメラ画像(明かり部・トンネル部用)	\bigtriangleup	地上ネットワークで整備済 み有	
5	道路管理用各種センサー計測データ(明かり部・トン ネル部・のり面変形位計等も含む)	0	多元接続・ネットワーク整 備コスト削減・労力削減・	

表 4-1 高速道路業務の高度化と5G活用について

			早期実現可能
6	情報提供設備向け監視・制御データ(将来、空中結像		地上ネットワークで整備済
	サイネージでの提供		み有
\bigcirc	点検用タブレット入力、過去データ/3D 図面等参照	0	大容量・移動体通信
8	料金所周辺のケーブルレス化(ETC・現金システム	~	大容量・高安定性・高セキ
	等)		ュリティー確保が必要
	社屋内ネットワーク(音声電話系やグループネットワ		他のシステムで字価に対応
9	ーク(保全サービスセンター棟、道路管制センター	\times	
	棟、SA・PA管理用		нÌ
10	CCTV カメラ臨時増設用(火災時、イベント発生時)	0	ネットワーク整備コスト削
			減・労力削減・早期実現可
			能
11	光ケーブル切断時のバックアップ(予備)	×	技術的に対応できない(基
			地局間通信が不可)
12	維持管理車両の自動運転(自動走行・遠隔走行の監視	\bigcirc	十次县,孜乱休泽信
	制御含む)	\cup	八台里・汐助 や理旧
(13)	工事・作業用ロボットの遠隔制御・監視	0	大容量・移動体通信

この検討項目を、図にマッピングしたものを、図 4-2に示す。

本開発実証コンソーシアムでは、5Gの活用に関して、ローカル5Gを活用するユースケ ースについて整理を行った。

まず、高速道路のトンネルのような特殊な場所は、山間部にあることが多く、キャリア5 Gを見込めない。このことから、トンネルの環境に焦点をあてることとした。

保守保全業務の中でも、熟練者不足の課題から、遠隔作業支援を取り上げることとし、表 4-1の②スマートグラスカメラ画像の活用の検証に取り組むこととした。

また、車線規制中に車が突入する事故などの作業員の安全確保の重要性から、表 4-1 の ⑩CCTV 監視カメラを臨時増設することによって、規制中のテーパ部から突入しそうな車を 検知するシステムの検証を行うこととした。

これらの検証では、4K 解像度の映像を活用するため、大容量の映像情報を活用すること になる。キャリア5Gでは、クラウド上に動画を取りためると、膨大なデータ量となるため、 現実的な値段でのシステム・サービス提供が難しいと推測される。

ローカル5Gとエッジコンピューティングを組み合わせれば、映像のデータ量を気にせず活用できるため、現場の映像情報をAIで画像解析するには、ローカル5Gシステムが望ましいと考える。



図 4-2 中日本高速道路における5G活用システムの俯瞰図

以降に、課題実証における実証目標を記載する。

(1) 4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

工事規制場所へ車が突入する事故の半数以上は作業場所から約200m~300m離れた テーパー部からの突入であり、車両が時速80kmで突入してきた場合は、作業場所ま で約10秒である。警告灯通知・確認・避難する時間を考慮し、本検証では、出力時間 を5秒以内でとすることができることを確認する、

(2) スマートデバイスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

スマートデバイス(スマートグラス、スマートフォン)を活用して、4K映像と音声 を用いて、トンネル~遠隔の事務所間の双方向通信により、遠隔作業支援を行う。 4K映像伝送では遅延時間が発生するが、遠隔にいる熟練者と作業員の間で違和感が 感じられない遅延時間について検証を行う。ここでは、許容できる映像の遅延時間の 目標を500msと設定する。

今回、高速道路事業者特有の環境である「トンネル内」での安全性向上及び、作業の効率化を目的として、4Kカメラ+AI技術の活用して、上記の課題実証テーマを推進することでフィージビリティ検証を行い、今後、各トンネルへの横展開を目論む。

4.2.1 課題事項

図 1-2 に示したように、生産人口は減少しており、2018 年度に対して 2030 年度には 1 割減と予測されている。



図 4-3 建設業就業者の年齢構成

図 4·3 に、建設業の年齢構成を示す。約3割が55歳以上であり、29歳以下は約1割 と年齢構成が二極化していることが分かる。今後、就業者確保の競争が激化し、また、 ワークライフバランスも踏まえると、単位時間あたりの従業者を確保することが重要な 課題となっている。熟練技術者の高齢化及び退職により、現場を任せることのできる熟 練技術者の確保も困難となっている。

若い技術者の確保と共に、高齢となっている熟練者の技術の伝承が急務である。

また、図 4-1 に示したように、高速道路では、規制中車線に車が突入する事故が発生す るなど、ICT 技術の活用による対策が急務であり、現場作業員の安全確保が重要な課題 となっている。

図 4·4 に工事規制のイメージ図を示す。車が突入する可能性を事前に発見して、現場の作業員に早く通知することにより、作業員の安全を確保できる可能性がある。



図 4-4 工事規制イメージ

作業員の安全管理に関して、図 4-5 工事中の事故要因と対策について示す。外部的要因と、従業者自身に起因する問題に分けることができる。

ローカル5Gを活用したシステムとして効果が検証しやすく、システムとしての実現 性が高く、実装に向けて展開しやすい検証内容として、作業員への注意喚起と、現場作業 支援の二つについて、本開発実証で検証することとした。

具体的には、外部的要因として規制中車線に突入してくる車の可能性を監視カメラの リアルタイム AI 映像解析で検知し、作業員への注意アラート通知を行うシステムが有効 であるという仮説を検証する。また、作業員に起因する問題として、作業員自身が気が付 かず危険な場所にいることを作業員や周囲の作業員に向けてアラート通知するシステム が有効であるという仮説を検証する。

現場作業支援としては、熟練者による遠隔作業支援によって業務効率を向上すること を狙う。

161



図 4-5 工事中の事故と対策

上記に述べた課題に対する仮説として、図 4-6 のイシューツリーを活用して説明する。



図 4-6 本開発実証の検証内容と課題の関係(イシューツリー)

労働人口の減少対する作業者確保と熟練作業者の高齢化に対する課題に対しては、IT 導入による作業現場の効率向上を狙い、ローカル5Gとスマートデバイス(スマートグラス、スマートフォン)を活用した遠隔作業支援が有効との仮説を立てた。

また、作業現場での事故抑止に向けた安全管理の課題に対しては、IT 導入による安全管理として、監視カメラのリアルタイム AI 画像解析によって、規制中車線に車が突入してくることを検知したり、作業員が危険エリアに侵入したことを検知して、作業員にアラート通

知するシステムが安全対策として有効という仮説を立てた。 上記に示したように、本課題実証では、以下の2つの課題について検証を行うものとする。

- (1) 課題事項① トンネル内での作業員の安全性向上(作業員へのアラート通知)
 - ・規制中工事車線に突入してくる車に対する事故抑止
 - ・作業員が、不注意により危険エリアに侵入することへの事故抑止
- (2) 課題事項② 現場管理者の作業効率化(遠隔作業支援)
 - ・熟練技術者が少なくなるため、現場に行かないでも技術伝承する方法

4.2.2 課題解決策と実証との関係性

(1) 課題事項① トンネル内での作業員の安全性向上

(解決策)

古城山トンネルにおける作業員不足の解決策として、トンネル内に4Kカメラ2台設置 し、AI画像解析による人物検知と車両検知を行うことで、作業員が危険エリア(道路)に侵 入した時や車両が工事規制場所へ突入した際に通知し、安全性向上を図る。

(どのようにして課題解決につながるか)

先述した課題の解決策として 4K カメラ+AI 画像解析を用いて、①~③を行う。

- ①作業員が作業範囲外の危険エリアに侵入した際に警告灯等でアラートを鳴らし、現場作業員へ通知し、事故防止を目指す。
- ②工事規制場所へ車が突入してきたとき、警告灯等でアラートを鳴らし、現場作業員へ通知し、事故防止を目指す。
- ③ ①、②で、現場作業員に通知すると同時に、現場管理者にも SNS 通知する。

4K カメラや AI を活用し、リアルタイムで人の目や判断を代替させることで、人員増 強なしに少ない人数の監視体制であっても安全性を向上することができる。

(ローカル 5G の必然性)

本開発実証環境における監視エリアは作業エリアからテーパー部までの約 200m~ 300m あり、少ない台数で作業エリア全体の監視を行うためにはこれらを俯瞰して撮影す る必要がある。そのため、視野の広い 4K 映像が取得可能なカメラが必要となる。また、 トンネル内でローカル5Gが必要である理由は 4K 映像をアップリンク回線で伝送して、 リアルタイム AI 画像解析を行うためには、大容量通信とエッジコンピューティングが本 ソリューションにおいて必要となるからである。



危険作業エリア侵入検知、接近車両検知 → アラート通知(作業員スマートフォン、警告灯等)



(2) 課題事項② 現場管理者の作業効率化

(解決策)

事務所にいる熟練技術者が、現場の作業者に対してスマートグラスを活用して、トンネ ル内~事務所間で通信し、遠隔から作業支援を行う。

(どのようにして課題解決につながるか)

先述した課題の解決策として現場作業員がスマートグラスを装着し、事務所にいる熟 練技術者が遠隔から作業指示を行うことで、熟練技術者が現場に行くことなく、現場の作 業品質を確保し 0JT 教育を実施できる。

また、熟練技術者が複数現場に対応することができるため、少ない熟練技術者でも 現場の作業品質を担保することができる。

(ローカル5Gの必然性)

トンネル内で複数の現場作業者の作業確認をするためには、双方向(アップリンク・ダウンリンク回線)の大容量通信が本ソリューションにおいて必要となるためである。



図 4-8 遠隔作業支援による現場管理者の作業効率化

4.2.3 実装シナリオ

(1) 4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

トンネル内で行う作業管理はすべて人手で行っている。

そのため、複数現場を担当している現場管理者の死角が発生し、監視体制の強化が 必要となっている。

本開発実証では、以下について検証する。

- ①危険エリアを撮影した映像を AI で解析し、危険エリアに現場作業員が侵入した際に検知できるのか確認する。侵入を検知した場合、危険エリア近くに設置した警告灯を点灯させ、撮影映像は管理者が使用するスマートフォンに SNS で通知する。
- ②工事規制場所を撮影した映像をAIで解析し、工事規制場所へ車が突入してきたときに 検知できるのか確認する。車の突入を検知した場合、危険エリア近くに設置した警告灯 を点灯させ、撮影映像は管理者が使用するスマートフォンに SNS で通知する。

将来構想として、監視対象区域に4Kカメラを設置することで、監視体制の省力化 を図る。また高速道路業務のメニューを高度化し、作業員の安全確保を実現する。 ソリューション検証以外の、内部・外部要因を踏まえた実装に向けたシナリオについては、 今後の中日本高速道路のイノベーション交流会における実証部会等で検討していく。



図 4-9 4K カメラ を活用した現場作業員の安全確保の実装シナリオ

(2) スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

生産労働人口が減少しているため、現場管理者の業務効率化は必要となっている。 そこで、現場作業員にスマートグラスを装着してもらい、トンネル〜事務所間の双方向 通信を行うことで、事務所内で現場管理者が作業指示をできるのか確認する。

将来構想として、その他トンネルにおいて、スマートグラスを活用した遠隔作業支援 を実施し、複数現場対応も事務所から実施できるようにして、作業効率を向上する。



4.2.4 実証目標

(1)4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

図 4-4 に工事規制の様子を示しているが、工事規制場所へ車が突入する事故の半数 以上は作業場所から約 200m~300m 離れたテーパー部からの突入であり、車両が時速 80km で突入してきた場合は、作業場所まで約 10 秒かかる。

撮影した映像を人物・車両検知 AI で処理する時間、および作業員が規定時間(例えば 5秒)危険エリアに滞在したときに、警告灯通知・確認・避難する時間を考慮し、本課題 実証では、出力時間 5秒以内であることを確認する。

なお、実用的とみなす基準や、実装に向けてのステップについては今後の実証部会等 で検討していく。

安全性に関しては、各種の法制度(労働安全衛生法、道路法等)、中日本高速道路社 内内規に従う。また、電波防護指針にも対応する。

(2) スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

スマートグラスを活用し、トンネル〜事務所間の双方向通信を行うことを確認する。 遠隔作業支援の目標遅延時間として、当社で検証したスマートグラスの遅延時間測定 結果を参考に設定する。当社で検証したスマートグラスの遅延時間は約 300~500ms である。一方、一般的な IP 電話の端末間の遅延は、理想的には 150ms 以下、条件付き で 400ms 以下と言われている。本開発実証は、スマートグラスによる遠隔での映像配 信であるため、コーデック時間や Teams サーバの経由時間を考慮し、遅延時間 500ms 以内を目標値とする。

なお、今年度の実証では、上記の目標数値でのフィージビリティ検証を行う。来年度 以降に、実装に向けた仕様としての数値、課題について実証部会を通じて検討していく。

4.3 実証環境

4.3.1 4K カメラを活用した現場作業員の安全確保

課題実証実施にあたり、日立国際電気にて検証済のAI 画像解析技術のバックグラウンド について、本項及び次項にて説明する。

課題実証を実現するために必要となるリアルタイム AI 画像解析に関して、以下に説明する。

図 4-11 に、日立国際電気における AI 人物検知評価画像を示す。

赤い枠線で囲った範囲内にいる人数が3人であることをカウントしている様子を示して いる。赤い枠線の範囲を危険エリアと設定したり、枠線の左側の線を人物が超えたときに アラート通知を出す等のシステム検証を行った経験がある。

日立国際電気では従来から侵入者監視システムを市場展開しており、近年ではAI人物検知機能も開発している。

なお、本開発実証では、危険エリアに人物が侵入したことを検知した場合に SNS 及び警告灯へアラート出力するシステムを構築する。



図 4-11 日立国際電気における AI 人物検知評価画像

図 4-12 に、日立国際電気における AI 車両検知評価画像を示す。

車両をAIで検知して、水色の線を越えている車の数をカウントしている。車の動きをト ラッキングしており、手前に向かってくる車を黄色で示し、奥にいく車を青色で示してい る。左上に、IN:5 台、OUT:4 台とラインクロスした車の台数をカウントアップするこ とができる。

日立国際電気では従来から道路監視システムを市場展開しており、近年ではAI車両検知機能も開発している。

なお、本開発実証では、テーパー部から突入してくる車両を検知したら、SNS 及び警告 灯へアラート出力するシステムを構築する。



図 4-12 日立国際電気における AI 車両検知評価画像

4.3.2 スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

図 4-13 に日立国際電気の5G協創ラボ (ローカル5G 28GHz NSA 構成) におけるス マートグラスの社内評価画像を示す。

図面の下にいる遠隔の熟練者が、遠隔にいる作業者(図面左上)と遠隔作業支援を行って いる様子を示している。図面右上の画面は、作業者が見ている視線の映像を表しており、 遠隔にいる熟練者の映像や作業指示内容を左下にある仮想画面で確認することができる。 また、作業者の視線の映像のみでは視線が動くと長時間見ていると疲れてしまうこともあ るため、スタビライザー付きの三脚などに固定したスマートフォンによる映像を組み合わ せて、遠隔の熟練者と情報共有することによって、作業現場で見たい情報を細かく把握す ることが可能になり、遠隔作業支援をスムーズに行うことができる。

日立国際電気では遠隔の工場への作業指示や顧客立会向けとして、スマートグラスの活 用をすでに進めおり、遠隔作業支援の有効性を確認している。

本開発実証においても、遠隔作業支援の有効性をトンネルの作業現場で確認する。





作業者の動き

スマートグラス上の画像、及び指示者PCの画像



図 4-13 日立国際電気の5G協創ラボにおけるスマートグラスの社内評価画像

4.3.3 実証環境

課題実証の実証環境は古城山トンネルで実施する。「2.実証環境の構築」に記載の通り である。

・4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

・スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援



図 4-14 実証実験イメージ

4.4 実証内容

4.4.1 ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証

4.4.1.1 効果検証

(1) 評価・検証項目

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保 利用者にアンケートを実施して以下を調査

評価観点	効果検証項目		
作業員・車両の侵入検知	・警告灯による安全管理支援の満足度		
	・危険エリア進入時の検知率		
現場管理者への SNS 通知	・遠隔通知の満足度		
4Kカメラの視認性、運用	・既存監視カメラ映像と比較した視認性		
	・仮設可能なカメラの運用満足度		

表 4-2 4K カメラ効果検証項目

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援 利用者にアンケートを実施して以下を検証する。

表 4-3 スマートグラス効果検証項目

評価観点	効果検証項目	
スマートグラスの操作性	・作業員のスマートグラス装着の満足度	
遠隔作業指示	・現場管理者の遠隔作業指示の満足度	
	・使用可能な機能の満足度	

また、ローカル5Gを活用した導入効果と費用対効果についても検討を行う。

(2) 評価・検証方法

実証部会にて現場担当者(NEXCO 岐阜保全センターなど)に評価依頼を行い、現場担当 者に現地評価又はビデオクリップを確認頂く。その後、現場担当者にアンケート及びご意 見ヒアリングを実施し、評価検証を行う。

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

・作業員・車両の侵入撮影→検知→警告灯通知、SNS 通知の一連の挙動を体験してもらい、各運用の満足度:4段階評価頂く。



図 4-15 4K カメラを活用した現場作業員の安全確保 評価・検証方法



図 4-16 現場担当者評価状況(画像解析 AI)



図 4-17 現場担当者評価状況(検知)



図 4-18 現場担当者評価状況(警告灯通知、SNS 通知)

・4Kカメラの視認性確認

4Kカメラの視認性、運用のアンケート評価では、監視カメラ評価用チャートを準備 し、4Kカメラ映像と、既存監視カメラ映像(FHD)と比較した際の満足度:4 段階評価 頂く。図 4-19~図 4-22 に 4K/FHD 比較用チャート動画の一例を示す。



図 4-19 4K カメラ 5m 地点の評価①



図 4-20 4K カメラ 5m 地点の評価②



図 4-21 4K カメラ 5m 地点の評価③



図 4-22 FHD カメラ 5m 地点の評価



図 4-23 現場担当者評価状況(チャート評価)

総務省開発実証(課題実証) 効果検証実施体験

HITACHI Inspire the Next

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保 アンケート Confidential

1:同意しない~4:同意する

#	内容	結果
1	設置が容易	1 • 2 • 3 • 4
2	設定が容易	1 • 2 • 3 • 4
3	十分に検知(精度)できている	1 • 2 • 3 • 4
4	十分に検知(速度)できている	1 • 2 • 3 • 4
5	通知を警告灯で行うのは良い	1 • 2 • 3 • 4
6	通知をSNSで行うのは良い	1 • 2 • 3 • 4
7	現状と比べて安心して作業ができる	1 • 2 • 3 • 4
8	安全確保として実運用に使える	1 • 2 • 3 • 4
9	4K画像は従来画像(FHD)より視認性が良い ※デモ動画より	1 • 2 • 3 • 4
10	4K画像は従来画像(FHD)より監視し易い ※デモ動画より	1 • 2 • 3 • 4
11	ご意見(良い点)	自由記載
12	ご意見(悪い点、改善点)	自由記載

日立国際電気

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential Copyright $\textcircled{\sc black}$ Hitachi Kokusai Electric Inc. 2022. All rights reserved. 3

図 4-24 アンケート内容

[・]各期待できる効果について、実証協力者にアンケート頂く。
②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

・スマートグラスの操作性、遠隔作業指示の一連の挙動をまとめたビデオクリップを視聴してもらい、各運用の満足度:4段階評価頂く。

スマートグラスで検証する作業項目については、トンネル点検作業者から別途ヒア リングを実施し、トンネル内の道路設備の点検などで有効なものを洗い出して実施す る。

実施作業項目 ①非常通話ボックス模擬設備点検 ②傷などの損傷確認



図 4-25 現場担当者評価状況 (遠隔作業支援 現場側)



図 4-26 現場担当者評価状況(遠隔作業支援 事務所想定側)



図 4-27 現場担当者評価状況(事務所側 PC 表示画面)

・各期待できる効果について、実証協力者にアンケート頂く。

総務省 開発実証(課題実証) 効果検証 実施体験

HITACHI Inspire the Next

Confidential

②スマートデバイスを活用したトンネル内の遠隔作業支援 アンケート

1:同意しない~4:同意する

#	内容	結果
1	取り扱いが容易(スマートグラス)	1 • 2 • 3 • 4
2	取り扱いが容易(PC)	1 • 2 • 3 • 4
3	十分に双方向通話ができている、ストレス無い(スマートグラス)	1 • 2 • 3 • 4
4	十分に双方向通話ができている、ストレス無い(PC)	1 • 2 • 3 • 4
5	監督者等の省力化、省人化に使える(スマートグラス)	1 • 2 • 3 • 4
6	監督者等の省力化、省人化に使える(PC)	1 • 2 • 3 • 4
7	遠隔作業支援として実運用に使える(スマートグラス)	1 • 2 • 3 • 4
8	遠隔作業支援として実運用に使える(PC)	1 • 2 • 3 • 4
9	ご意見(良い点)(スマートグラス)	自由記載
10	ご意見(悪い点、改善点)(スマートグラス)	自由記載
11	ご意見(良い点)(PC)	自由記載
12	ご意見(悪い点、改善点)(PC)	自由記載

日立国際電気

Hitachi Kokusai Electric Inc. Proprietary & Confidential Copyright © Hitachi Kokusai Electric Inc. 2022. All rights reserved.

図 4-28 アンケート内容

※ヒアリングを通じて評価作業項目決定後、評価指標を決定する(時間、コスト等)

(3) 実証結果及び考察

現場担当者に現地での評価頂き、アンケート及びご意見ヒアリングの結果を元に、最良点 を見出す。

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

現状の現場作業員の安全確保として、作業員とは別に走行車両を常時監視している保 安員を用意している。保安員は、走行車両の異常の兆候を発見したら現場作業員へ逃げ ろの合図を行い、また保安員自身も退避する。ただし、走行車両は時速約 80km (秒速約 22m) で走行しているため、早期避難合図をする必要がある。今回、4K カメラを活用し、 画像解析 AI (人物・車両) で早期異常の兆候を発見し、現場作業員への通達を体験して いただくことで、実運用として利用可能かアンケートを実施した。

以下にアンケート結果を示す。



1:同意しない、2:やや同意しない、3:やや同意する、4:同意する

図 4-29 アンケート結果①



図 4-30 アンケート結果②

総務省開発実証(課題実証) 効果検証実施体験

HITACHI Inspire the Next

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保 アンケート

Confidential

		1:同意しない~4:同意する
#	内容	結果
1	カメラの設置が容易	1 • 2 • ③ 4
2	カメラの設定が容易	1 • 2 • 3 ④
3	PCの設定が容易	1 · 2 · 3 · (
4	十分に検知(精度)できている	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
5	十分に検知(速度)できている	1 • 2 • ③ 4
6	通知を警告灯で行うのは良い	1 • 2 • 3 • ④
7	通知をSNSで行うのは良い	1 · 2 · 3 · ④
8	現状と比べて安心して作業ができる	1 • 2 • 3 • ④
9	安全確保として実運用に使える	1 • 2 ③• 4
10	4K画像は従来画像(FHD)より監視し易い	※デモ動画より 1・2・3・④
		自由記載
11	ご意見(良い点)	小米甲、本根に気を取られま、
		が来に来中にいるきかがいないでもの
		自由記載
12	ご意見(悪い点、改善点)	しょうかない、寺たとは心いサンパー 海知ならがおあため 狭い範囲の作業ズパラ
		では、使用は難しいのではないか、
		2.思います。



図 4-31 アンケート結果例①

総務省 開発実証(課題実証) 効果検証 実施体験

HITACHI Inspire the Next

Confidential

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保	
アンケート	

	:	1:同意しない~4:同意する
#	内容	結果
1	カメラの設置が容易	1 • 2 (3)• 4
2	カメラの設定が容易	1 • 2 • ③• 4
3	PCの設定が容易	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
4	十分に検知(精度)できている	1 • 2 • 3)• 4
5	十分に検知(速度)できている	1 • 2 • 3 4
6	通知を警告灯で行うのは良い	1 2 • 3 • 4
7	通知をSNSで行うのは良い	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
8	現状と比べて安心して作業ができる	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
9	安全確保として実運用に使える	1.2.3.4
10	4K画像は従来画像(FHD)より監視し易い ※デモ動画より	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
11	ご意見(良い点)	自由記載通行車両へのエイもうが変い
		自由記載
12	ご意見(悪い点、改善点)	作業員への運知方法か

作業員への通知の方法か そくかに対応できるいのでは ヘルメートンフッサーン振動 等でからきるいと迷け、



図 4-32 アンケート結果例2

石平	百 采		同意しない		同意する	
44		1	2	3	4	[1] 尼平
1	カメラの設置が容易	1票	5 票	6票	3 票	60%
2	カメラの設定が容易	1票	3 票	6票	5 票	73%
3	PCの設定が容易	1票	3 票	7 票	4票	73%
4	十分に検知(精度)できている	0票	1票	5 票	9票	93%
5	十分に検知(速度)できている	2 票	3票	8票	2 票	67%
6	通知を警告灯で行うのは良い	2 票	2 票	3 票	8票	73%
7	通知を SNS で行うのは良い	2 票	5 票	3票	5 票	53%
8	現状と比べて安心して作業できる	2 票	2 票	8票	3票	73%
9	安全確保として実運用に使える	2 票	6 票	4票	3 票	47%
10	4K 画像は従来画像(FHD)より監視しやす い	2 票	4票	5 票	4票	60%

表 4-4 アンケート結果まとめ

カメラの設定・設置、PCの設定項目について、約7割の同意をいただいたが、機器がカ メラ、5Gルータ、エリア設定用 PC と煩雑なため、簡素のほうが良いという意見もいただ いた。また作業内容によって、移動しながら点検することが多く、一箇所に長時間留まる ことがないとの意見もいただいた。そのため、機器を車載することによる簡素化や、走行 車線用/追い越し車線用の検知エリアの設定をプリセット化することで操作の簡素化が必要 であると考えられる。

検知精度については、9 割以上の同意をいただいた一方、検知速度は 6 割程度の同意で あった。また検知精度結果から、「現状と比べて安心して作業できる」に約 7 割の同意い ただいたが、「安全確保として実運用に使える」では検知速度結果から 5 割未満の同意と なった。また他ご意見として、「検知にはラグがあるため使用が難しい」「ヘルメットにブザ ーと振動等で知らせないと逃げられない」とのご意見を頂いた。閉域網を使用している警告 灯と比べ、公衆網を活用している SNS 通知は約 4 秒程度と通知時間が遅かった。今後実運 用に向けて、閉域網を活用した通知方法の検討をしていく。 ②スマートグラスを活用トンネル内の遠隔作業支援

現状の設備点検は目視にて、外観確認(汚損、損傷)、動作確認、レンズの清掃などがあ り、現場作業員 2 人以上で行っている。一方、生産労働人口が減少しているため、現場監 督者の業務効率化は必要となってきている。

今回、スマートグラスによる遠隔作業支援を体験していただくことで、遠隔作業支援が 実運用として利用可能かアンケートを実施した。

以下にアンケート集計結果を示す。

1:同意しない、2:やや同意しない、3:やや同意する、4:同意する



図 4-33 アンケート結果③



図 4-34 アンケート結果④

総務省 開発実証(課題実証) 効果検証 実施体験

HITACHI Inspire the Next

②スマ マンケ	ートデバイスを活用したトンネル内の遠隔作業支援	Confidential
J. J. J.	1	: 同意しない~4 : 同意する
#	内容	結果
1	スマートグラスの取り扱いが容易	1 • 2 • 3 • 4
2	PCの取り扱いが容易	1 · 2 · 3 · 4
3	スマートグラスで十分に双方向通話はストレス無くできている	1 (2.3.4
4	PCで十分に双方向通話はストレス無くできている	1 • 2 • 3 • 🖓
5	スマートグラスは監督者等の省力化、省人化に使える	1 · 2 ·3· 4
6	PCは監督者等の省力化、省人化に使える	1 • 2 • 3 • 4
7	スマートグラスは遠隔作業支援として実運用に使える	1 • 2 • 2)• 4
8	PCは遠隔作業支援として実運用に使える	1 • 2 • 3 • 4
9	スマートグラスに対するご意見(良い点)	自由記載 Pとの画面がうっしむさみているのが良かった。
10	スマートグラスに対するご意見(悪い点、改善点)	自由記載 アメはびは音声がきこえ尽い。 速く動くと明像くがおいっかない。
11	PCに対するご意見(良い点)	自由記載 画質も問題から 文字(穿が をかた。
12	PCに対するご意見(悪い点、改善点)	自由記載 物に な し



図 4-35 アンケート結果例①

総務省 開発実証(課題実証) 効果検証 実施体験

HITACHI Inspire the Next

②スマートデバイスを活用したトンネル内の遠隔作業支援	Confidential
アンケート	
1	: 同意しない~4 : 同意する

#	内容	結果
° 1	スマートグラスの取り扱いが容易	1 · 2 · 3 · 4
2	PCの取り扱いが容易	1 · 2 · 3 · 4
3	スマートグラスで十分に双方向通話はストレス無くできている	$1 \cdot 2 \cdot 3 4$
4	PCで十分に双方向通話はストレス無くできている	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
5	スマートグラスは監督者等の省力化、省人化に使える	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
6	PCは監督者等の省力化、省人化に使える	1.2.34
7	スマートグラスは遠隔作業支援として実運用に使える	$1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4$
8	PCは遠隔作業支援として実運用に使える	$1 \cdot 2 \cdot 3 4$
9	スマートグラスに対するご意見(良い点)	自由記載 現場の状況を伝える考は千方応と 感じまれた。
10	スマートグラスに対するご意見(悪い点、改善点)	自由記載 TN R たとローンハス、等で顕語が 出来ず、崎氏な遅ぶ、沙季がある。
11	PCに対するご意見(良い点)	自由記載 遠隔で現場の状況を t分把握できると思います。
12	PCに対するご意見(悪い点、改善点)	自由記載 スマートグラス、例をはなり新かしたり、 細秋新、と見を見いかと見いすした。



図 4-36 アンケート結果例②

百釆			同意しない		同意する	
供钳 供日		1	2	3	4	间息竿
1	スマートグラスの取り扱いが容易	1票	3票	5票	1票	60%
2	PC の取り扱いが容易	0票	2 票	7 票	1票	80%
2	スマートグラスで十分に双方向通話が	1 亜	₄≖	4 亜	1 ==	50%
3	ストレスなくできている	Ⅰ票	4 宗	4 宗	⊥景	
4	PC で十分に双方向通話がストレスなく	○亜	っ亜	ь щ	っ田	80%
4	できている	0 宗	4 宗	0 景	9 法	
5	スマートグラスは監督者等の省人化、	1 亜	っ亜	۸ س	っ亜	70%
5	省力化に使える	⊥示	4示	4 示	り示	
6	PC は監督者等の省人化、省力化に使え	1 西	の両	「用	⊿覀	90%
0	る	⊥示	0 示	0 示	4 示	
7	スマートグラスは遠隔作業支援として	1 西	っ西	₄覀	っ西	60%
'	実運用に使える	⊥示	っ子	4 示	4示	
0	PC は遠隔作業支援として実運用に使え	○亜	っ亜	ь щ	2 亜	80%
0	3	0 宗	4 宗	9 条	り宗	

表 4-5 アンケート結果まとめ

スマートグラスを活用した遠隔作業支援について事務所側 PC の運用については、8割以 上「取り扱い易い」、「双方向通信できている」、「実運用でも使える」という意見いただ いた一方、「スマートグラス側をはやく動かしたり、細かく動くと見づらい」という意見を いただいた。またスマートデバイス側では「映像はきれいに見えているが、音声が聞き取り づらい」、「スマートデバイスが従来のヘルメットと比べて重たい」、「早く動くと表示して いる映像が追い付かない」など意見があり、5割程度の同意であった。今回の実証現場はト ンネル内であり、走行車両音が反響している環境のため、骨伝導イヤホン・マイクを使用 した。そのため、事務所側 PC 側へは問題なく映像・音が伝送され、評価いただいたと考 えられる。しかし、トンネル側は安全面から耳をふさがずに実施したため、事務所側から の音声に加え、走行車両音も聞こえてしまうため、5割程度の同意であったと考えられる。

事務所側 PC 側での「はやく動かしたり、細かく動くと見づらい」というご意見について は事務所側 PC と接続するため、公衆網を利用しているので、時間帯によって回線が安定せ ず見づらくなったと考えられる。

スマートグラス側での「早く動くと表示している映像が追い付かない」というご意見については、スマートデバイスはユーザーの左右を数フィートずつ見ることのできるセンサが搭載されており、ユーザーが動くと、フレームも一緒に動く仕様となっている。製品の仕様上、センサが認識することでスマートデバイス上に表示された映像が動くため早く動くと表示している映像が追い付かない場合があるが、事務所側 PC からの視点には影響がないため点検作業には問題ないと考えられる。

スマートグラスは現場の状況を迅速に伝えることに活用できるが、双方向通話をする場合は、事務所側からの指示をテキストや資料で共有する、走行車両の音が反響しない明かり部で使用するなど検討が必要である。

4.4.1.2 機能検証

(1) 評価・検証項目

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

- ・現場作業員が危険エリアに侵入した際の検知から SNS 通知までの平均時間測定を人間 が PC のキーボードに手打ちをしてサーバに時刻の記録を残す方式で実施する。
- ・時速 80km で走行する車両の検知から SNS 通知までの平均時間測定を人間が PC の キーボードに手打ちをしてサーバに時刻の記録を残す方式で実施する。
- ・AIの検知率調査(危険エリア検知、車両検知) 撮影映像を1000枚の画像に分解してAIでの検知結果と後から目視で与えた 正解データを元に下記の指標を求め検知が難しい条件について考察する。

		正解		
		Positive	Negative	
予測	Positive	TP	FN	
	Negative	FP		

表 4-6 4 K カメラ評価方法

TP(検知率)…AI が人間、車両を検知して、実際に人間、車両であった割合 FP(誤検知率)…AI が人間、車両を検知して実際には人間、車両でなかった割合 FN(検知漏れ)…AI が人間、車両を検知出来なかったが実際には人間、車両であった割合

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

・スマートグラスで撮影した映像の平均遅延時間の測定を、PCのキーボードに手打ち をしてサーバに時刻の記録を残す方式で実施する。

なお、スマホ画面とサーバ上の時間をスマホ等のカメラで映像記録し、フレーム単位で 遅延を測定する。

(2) 評価・検証方法

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

評価で使用する4Kカメラの設置場所、画角、AI検知エリアのイメージは以下とする。



図 4-37 4Kカメラ設置場所①(車両検知)



図 4-38 4Kカメラ設置場所①(人物検知)



図 4-39 4Kカメラ画角および検知エリア(車両検知)



図 4-40 4Kカメラ画角および検知エリア(人物検知)



4Kカメラ正面



4Kカメラ背面 (画面は撮影イメージ図)

図 4-41 4Kカメラ使用イメージ図

本検証では、作業エリアから 200~300m 離れた地点と仮定した場所に 4K カメラを三脚 で仮設する。

図 4-40 のように人物検知では、非常駐車帯を危険エリアと仮定し、作業員が設定した ラインをクロスしたときに検知するように 4K カメラの位置を調整する。

4Kカメラの設置位置を決めるために、検出エリア設計を行う。

ただし、現地トンネル内環境は工事状況により、一定とできないため、本設計は目安と する。

【条件】

①4Kカメラの解像度:3840×2160pix

24Kカメラの画角:79度(垂直)

③人物検知、車両検知の最低画素: 225×225pix

④人物、車両の高さ:約1.7m

上記①~④から検出寸法を求めると以下になります。

4K カメラ×1 台の検出面の高さ…2160pix:225pix=Xm:1.7m X=約 16.3m 4K カメラ×1 台の検出面の幅…3840pix:2160pix=Ym:16.3m Y=約 29.0m 4K カメラ×1 台の検出面までの距離 …sin(79/2°):cos(79/2°)=Zm:16.3/2m Z=約 9.9m

よって、4K カメラの設置位置は、人物検知エリア寸法縦 16.3m×横 29.0m、カメラからの距離:検出エリアを 9.9m 以内とする。



図 4-42 カメラ画角設計結果

カメラ位置調整では、図 4-41 のようにカメラ背面に撮影している画像が表示されるため、 カメラ背面を確認しながら画角調整を行う。 図 4-39 のように車両検知では、追越車線にテーパー部を仮定し、通行車両が設定した ラインをクロスしたときに検知するように 4K カメラの位置を調整する。カメラの設置位 置は図 4-37 の通りである。

※本来、車両検知エリアは走行車線のテーパー部であるが、評価時にテーパー部に突入 する車両はないと考えられるため、実証開発では、追越車線にテーパー部を仮定して いる。

カメラ位置調整では、図 4-41 のようにカメラ背面に撮影している画像が表示されるため、カメラ背面を確認しながら画角調整を行う。

設定したエリアに人物/車両が入ったときの作業者への通知方法として、警告灯および SNS を使用する。警告灯を人物検知エリア付近や作業エリア付近に設置することで、作 業者が検知エリアに侵入したときや、車両が突入してきたときの通知を行うことができ る。また現場管理者は警告灯目視外で作業している可能性もあるため、SNS を活用し、 侵入検知情報を通知する。

平均時間測定をするため、各使用機器については予めNTPで時刻を合わせておき、各 機器のログ等や撮影する映像に電波時計等を入れることで所要時間を計測する。また、デ ータの信用性を担保するため計測は複数回実施して平均値を求める。

- (a) 作業員が危険エリアに侵入した際の検知から SNS 通知までの平均時間測定
- 作業員があるエリアに侵入したと判断したときに、現場に設置している PC1 で Enter を押す。このとき、UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取 り、AI 画像解析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻1)
- 2) 作業員が SNS 通知を受け取ったことに気が付いた時点で、PC2 で Enter を押す。
 このとき、UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取り、AI 画像
 解析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻 2)
- 3)時刻2から時刻1の差分を取ることで、遅延時間を求める。



図 4-43 人物検知測定風景①

- (b) 走行車両が工事規制場所に侵入した際の検知から SNS 通知までの平均時間測定
- 1) 走行車両があるラインをクロスしたと判断したときに、現場に設置している PC1 で Enter を押す。このとき、UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取 り、AI 画像解析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻1)
- 2) 作業員が SNS 通知を受け取ったことに気が付いた時点で、PC2 で Enter を押す。 このとき、UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取り、AI 画像解 析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻 2)
- 3)時刻2から時刻1の差分を取ることで、遅延時間を求める。



図 4-44 車両検知測定風景②

(c)AIの検知率調査(危険エリア検知、車両検知) 検知結果(検知正解、誤検知、検知見逃し)等、現場で記録簿に記録する。

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

(a)作業風景をスマートグラスで撮影した映像の平均遅延時間の調査

- 現場にいる作業員がスマートグラスでストップウォッチを撮影し、規定の時間(例えば10秒)になったタイミングで現場に設置している PC1の Enterを押す。このとき、 UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取り、AI 画像解析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻1)
- 事務所にいる現場管理者が撮影されたストップウォッチの時刻が規定の時間(例えば 10 秒)になったタイミングで、PC2 で Enter を押す。このとき、UDP クライアントプログラムは、PC の時刻情報を読み取り、AI 画像解析サーバの UDP サーバに通知する。(時刻 2)
- 3)時刻2から時刻1の差分を取ることで、遅延時間を求める。



(3) 実証結果及び考察

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

表 4-7、表 4-8 に設定したエリアに人物/車両が入ったときの作業者への通知時間結果 (100回測定時平均通知時間、最大通知時間、最小通知時間)、表 4-9 に 4K 映像が伝送し た時間を示す。

不时间间的时候。 ————————————————————————————————————				
	警告灯	SNS		
平均通知時間	約 2.234 秒	約 4.153 秒		
最大通知時間	約 2.830 秒	約 5.774 秒		
最小通知時間	約 1.933 秒	約 3.127 秒		

表 4-7 車両検知通知時間結果

表 4-8 人物検知通知時間結果

	警告灯	SNS
平均通知時間	約 2.528 秒	約 4.200 秒
最大通知時間	約 3.435 秒	約 5.925 秒
最小通知時間	約 1.846 秒	約 2.829 秒

表 4-9 4K 映像伝送時間

	測定時間
平均通知時間	約 0.421 秒
最大通知時間	約 0.568 秒
最小通知時間	約 0.348 秒

表 4-10、表 4-11 に設定したエリアに人物/車両が入ったときの AI の検知率調査結果を示す。

		AI 判定結果	
		Positive	Negative
実際に車両	Positive	検知率:97%	検知漏れ:3%
であった		(967 回)	(30 回)
	Negative	誤検知率:0.3%	
		(3 回)	

表 4-10 車両検知の検知率調査結果

表 4-11 人物検知の検知率調査結果

		AI 判定結果	
		Positive	Negative
実際に人物	Positive	検知率:100%	検知漏れ:0%
であった		(100 回)	(0 回)
	Negative	誤検知率:0%	
		(0 回)	



図 4-46 AI が車両と検知して、実際に車両であった結果



図 4-47 AI が車両と検知して実際には車両でなかった結果



図 4-48 AI が車両と検知出来なかったが実際には車両であった結果



図 4-49 人物検知前



図 4-50 人物検知後



図 4-51 人物がエリアに入っていないため、検知しない結果①



図 4-52 人物がエリアに入っていないため、検知しない結果②

表 4-7、表 4-8 のように人物/車両が指定したエリアに入ったとき、作業者への通知時 間は目標値である 5 秒以内に警告灯、SNS 通知を行うことができた。ただし、警告灯通 知では最大約 3 秒に対し、SNS 通知では最大 6 秒と目標値を超えているときもあった。 これは AI で人物/車両判定後、公衆網を使用し通知しているため、回線が安定せず、通知 時間が目標値より超えたと考えられる。

4.4.1.1 項での記載の通り、今後実運用に向けて、閉域網を活用した通知方法の検討をしていく。

車両検知では、検知エリアを 4K カメラから 10~20m 地点に設定し、1 車両あたり約 5 フレーム取得できるようにしている。図 4-48 のようにフレーム単位では、検知漏れを している車両も、前後フレームを確認すると車両と検知しているため、1 台あたりの検知 は漏れなくできているといえる。一方、表 4-10 のように誤検知は 0.3%(3/1000 回)であっ た。トンネル内はヘッドライトをつけて走行しているため、路面に車両が反射し、図 4-47 のように検知してしまったことが原因である。これは走行車線に検知エリアを構築した 時のみ発生したため、「走行車線の検知エリアの検討」、「車両検知 AI の再学習」で対策 可能である。

本検証結果より、検知エリアの設定により誤検知してしまう場合はあるが、1車両あた りの検知漏れは、0%のため現場作業員の安全確保には問題ないと考えられる。

人物検知では表 4-11 のように 100%の精度であったが、図 4-52 のようにエリアを手 で隠してしまった場合、カメラに対象者が映らないため検知することはできない。実運用 する際は、カメラを複数台設置することでより現場作業員の安全確保につながると考え られる。 ②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

・スマートグラスで撮影した映像の平均遅延時間の測定を、PCのキーボードに手打ち をしてサーバに時刻の記録を残す方式で実施する。

表 4-12 にスマートグラスで撮影した映像の平均遅延時間の測定結果(100回)の測定 時平均通知時間、最大通知時間、最小通知時間)を示す。

	遠隔作業支援
平均遅延時間	約 0.331 秒
最大遅延時間	約 0.927 秒
最小遅延時間	約 0.258 秒

表 4-12 遠隔作業支援遅延時間測定結果



図 4-53 遠隔作業支援遅延時間結果

表 4-12 のように遠隔作用支援の遅延時間は目標値である 0.5 秒以内であることが確認で きた。一方、最大遅延時間は約 0.9 秒と目標値を超えているときもあった。遠隔作業支援で は、事務所側 PC と接続するため、公衆網を利用しているので、映像・音声の遅延が目標値 を超えたと考えられる。今後実運用に向けて、専用回線など安定した回線を利用する検討を していく。 4.4.1.3 運用検証

(1) 評価・検証項目

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

・4K 監視カメラ及び AI 画像解析にて、現場作業員の安全確保に寄与できるか検証する。

・システムのランニングコストと削減できる人件費を比較して費用対効果を検証する。

・4Kカメラを活用するにあたり、現地作業フローの見直しを実施する。

なお、4K 監視カメラ、AI 画像解析を活用した危険検知は、本開発実証フィールドである トンネル以外での運用も可能である。そのため、トンネル以外のユースケースについて今後 の実証部会等で検討していく。

下図は中日本高速道路で整理する、現在の交通規制作業時のフローである。

交通規制作業は、概ね人力作業であり、多くの人的労働が注がれており、その為工事中事 故も発生している危険な作業である。



図 4-54 交通規制作業フロー

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

- ・スマートグラスにて、熟練技術者、現場管理者は複数の現場対応に寄与できるか検証する。
- ・システムのランニングコストと削減できる人件費を比較して費用対効果を検証する。
- ・スマートグラスを活用するにあたり、現地及び事務所の体制見直しを実施する。

なおスマートグラスやスマートフォンといったコミュニケーションデバイス以外のセンサ等の活用方法については、今後の実証部会等で検討していく。 例:ヘルメットにセンサを装着しバイタルチェックを行う等 下図は事務所のイメージ図である。

高速道路工事は複数、広域に渡り実施されている。今後、複数の現場を一人の熟練者が対応して、作業効率の向上が必要。スマートグラスやスマートフォンを活用して、事務所の熟練者による遠隔作業支援を実施することが理想とされている。



図 4-55 事務所イメージ図

(2) 評価・検証方法

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

- ・現状の現場作業の運用フローを整理する
- ・机上にてカメラ設置場所や効果を検討する
- ・トンネル内に 4K カメラを簡易設置し、危険エリアを想定した場所を網羅的に歩き、画像 AI での検知を確認する
- ・現場作業員にアンケートを実施し、改善点の洗い出しを行う
- ・整理作業フローをベースに、4Kカメラを活用する場合のフローを構築する。
- ・本システム費用及び本技術による従来人員から削減可能な人数を確認する

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

- ・現状の現場作業の運用フローを整理する
- ・机上にてスマートグラスを活用した点検項目や効果を検討する
- ・トンネル内で作業員がスマートグラスを活用し、熟練技術者や現場管理者が遠方からの 指示で十分対応可能か確認する。
- ・現場作業員にアンケートを実施し、改善点の洗い出しを行う
- ・現在の体制をベースに、スマートグラス活用する場合の体制表を構築する。
- ・本システム費用及び本技術による従来人員から削減可能な人数を確認する

(3) 実証結果及び考察

本検証ではトンネルの点検作業を実施している点検員、及び監督員に対して効率をあげ ることを目標とする。そのためにまず、保全センターにおける現場管理に役立つ運用を検証 する。最終的には、道路管制センターへの導入についても検討する予定である。

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

・現状の現場作業の運用フローを整理する

図 4-56 に従来の作業フローを示す。



・机上にてカメラ設置場所や効果を検討する

4.2.4 項で記載したようにカメラ設置場所や効果を検討した。

・トンネル内に 4K カメラを簡易設置し、危険エリアを想定した場所を網羅的に歩き、 画像 AI での検知を確認する

4.4.1.2 項に記載した通り、画像 AI で検知を確認した。

・現場作業員にアンケートを実施し、改善点の洗い出しを行う
 4.4.1.1 項に記載した通り、アンケートを実施し、改善点を洗い出した。

・整理作業フローをベースに、4Kカメラを活用する場合のフローを構築する。
 図 4-57 に 4Kカメラを使用した画像解析 AI のフローを示す。



図 4-57 4K カメラを使用した画像解析 AI のフロー

従来は保安員が走行車両を目視で監視しているが、画像解析 AI を使用することで保 安員が目視で確認する前に検知し、避難時間の確保ができると考えられる。

・本システム費用及び本技術による従来人員から削減可能な人数を確認する

今回の実証で現場導入に必須である要求性能を満たしていることは確認できた。 本実証では規制内監視として3名体制(テーパー部、作業部の近傍監視、交代要員)で 実施していた。本システムを活用することで、テーパー部または作業部の近傍監視を4K カメラに置き換えることで1名削減でき、交代要員含めた2名体制で実施可能であると 考えられる。また実証期間中、5箇所のトンネル工事を実施していた。全線ローカル5G システムが導入されたと仮定した場合、各現場1名削減可能なため、5名分の人員を削減 することが期待できる。

一方、普及に際してはローカル 5G 以外の技術で類似の効果が得られる製品・サービスが 市場に出回りつつあるので、ニーズ範囲と実施性能・コストなどを今後比較した上で、 費用対効果の検証を行いたい。 ②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援・現状の現場作業の運用フローを整理する



図 4-58 に従来の作業フロー(CCTV 設備点検)を示す。

図 4-58 従来のフロー

・机上にてスマートグラスを活用した点検項目や効果を検討する

表 4-13 に現状の CCTV 点検チェックリスト(点検周期 6ヵ月)を示す。

#	装置名	点検部位	点検項目	点検方法	作業要領
1	カメラ装置	カメラ部	1 外観確認(汚 損、損傷)	近接目視(また は遠望目視)に よる点検	汚損、腐食、損傷、発 錆、塗装剥離及び変形 はないか。
2	カメラ装置	カメラ部	2 動作確認	近接目視による 点検	旋回及びズーム等はス ムーズに動作するか。
3	カメラ装置	カメラ部	3 レンズ面の清 掃	人力による清掃	ウエス及びブラシ等を 使用し、塵埃等の除去 を行う。
4	カメラ装置	カメラ部	4 電源電圧の計 測(付属メータ による)	付属メータによ る計測	電圧値は規定値内であ るか。
5	カメラ装置	カメラ部	5 ビーム、フォ ーカス調整	近接目視及び操 作による点検	ビーム、フォーカスは 正常に動作している か。
6	制御装置 (換気所、 事務所等)	全般	3 動作確認	近接目視及び操 作による点検	遠方制御による雲台カ メラの機構は正常に動 作しているか。
7	制御装置 (換気所、 事務所等)	全般	4 電圧、電流の 計測(付属メー タによる	付属メータによ る計測	電圧及び電流値は規定 値内であるか。
8	制御装置 (換気所、 事務所等)	伝送装置	1 外観確認(汚 損、損傷)	近接目視による 点検	汚損、腐食、損傷、発 錆、塗装剥離及び変形 はないか。
9	制御装置 (換気所、 事務所等)	伝送装置	 2 電圧、電流の 計測(付属メータによる) 	付属メータによ る計測	電圧及び電流値は規定 値内であるか。
10	操作卓(VTR を含む)	全般	1 外観確認(汚 損、損傷)	近接目視による 点検	汚損、腐食、損傷、発 錆、塗装剥離及び変形 はないか。
11	操作卓(VTR を含む)	全般	2 機能試験	近接目視及び操 作による点検	各機能の動作状況はよ いか。
12	モニターテ レビ	全般	1 外観確認(汚 損、損傷)	近接目視による 点検	汚損、腐食、損傷、発 錆、塗装剥離及び変形 はないか。
13	モニターテ レビ	全般	2 画像状態	近接目視による 点検	画質は良好か。

表 4-13 CCTV 点検チェックリスト(点検周期 6ヵ月)

スマートグラスを活用することで、点検項目の削減はできないが、4.2.3 に記載した ように現場管理者の業務効率化につながると考えている。 ・トンネル内で作業員がスマートグラスを活用し、熟練技術者や現場管理者が遠方からの 指示で十分対応可能か確認する。

4.4.1.1 、4.4.1.2 項に記載した通り、熟練技術者や現場管理者が遠方からの指示で 十分対応可能か遅延時間確認やアンケートにて確認した。

・現場作業員にアンケートを実施し、改善点の洗い出しを行う

4.4.1.1 項に記載した通り、アンケートを実施し、改善点を洗い出した。

・現在の体制をベースに、スマートグラス活用する場合の体制表を構築する、本システム 費用及び本技術による従来人員から削減可能な人数を確認する

体制、費用対効果について、アンケート結果にてスマートデバイス側では映像は きれいに見えているが、音声が聞き取りづらい、スマートデバイスが従来のヘルメ ットと比べて重たいなど課題が出ており、まずはシステムの改善として機器構成や 周辺機器の見直し(例えば、ノイズキャンセリングヘッドホンの利用、音声認識機 能等の活用など)を行い、その後に体制、費用対効果の検証を行いたい。

なお、本システムを活用することで、熟練技術者は遠隔地で現地状況を確認でき るため、複数箇所の現場を確認することができる。実証期間中、5箇所のトンネル 工事を実施していた。このとき、全線ローカル5Gシステムが導入され、熟練技術 者が各1名現場にいると仮定した場合、熟練技術者は遠隔から指示できるため、現 場の5名分の人員を削減することが期待できる。

4.4.2 ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証

4.4.2.1 ローカル5G活用モデルの構築・検証

中日本高速道路では、「i-MOVEMENT (アイ・ムーブメント)」の実現に向け、幅広い 分野の企業や大学などと連携し、AI、IoT、ビッグデータ、ロボットなどの先端技術や知見 を取り入れるため、コンソーシアム方式を導入し、オープンイノベーション推進組織である 「イノベーション交流会」を設置している。



図 4-59 中日本高速道路のイノベーション交流会

イノベーション交流会では、図 4-60 に示すように、勉強会で検討を行い、運営委員会に て承認された実証メニューを部会にて推進することになる。部会にて実証を行った後、将来 への展開として、実用化に向けた業務への落とし込みを行って実用展開していく流れにな る。


図 4-60 中日本高速道路のイノベーション交流会における勉強会と部会の位置づけ

部会としては、図 4-61 に示すように調査部会、企画部会、実証部会の段階で活動内容 を区別している。本開発実証コンソーシアムは、採択時点ではローカル 5G 企画部会の位置 づけであったが、本ローカル 5G の開発実証を行うため、実証部会へと移行した。ローカル 5Gの実証実験を推進し、実用化に向けた課題を洗い出すために、計 12回の実証部会会合 を行った。

企画部会段階においては、高速道路業務の高度化と5G活用について幅広く検討を行い、 13の利用シーンを抽出したが(表 2-1 事業実施場所と5G利用設備)、本実証においては、 利用シーンとして

②ウエラブルカメラ画像(点検支援、工事管理、近接立ち会い等用)

- ⑩ CCTV カメラ臨時増設用(火災時、イベント発生時)
 - を取り上げた。





具体的なソリューションとしては、

- ・「スマートデバイスを活用した遠隔作業支援」
- ・「4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保」

を取り上げ、高速道路のトンネルにおけるローカル5G活用モデルの検証を行った。また、 今回検証した②⑩の利用シーン以外にも、中日本高速道路のニーズを踏まえてローカル5 Gを活用した利用シーンの数を増やしていくことを引き続き検討を行っていきたい。

これらの検討を行うにあたっては、

- ・運用検討 \Rightarrow 仕様化 \Rightarrow 試行導入 \Rightarrow 本格導入
- といった流れで検討を進めたい。

本実証において整理した主な項目は以下の通り。

- 1. 本実証の結果、想定されるターゲット
 - ・中日本高速道路の高速道路:2,170 km (営業延長)(2021 年 5 月時点)
 - うち、トンネル区間
 - TN 延長 489.6 km(2021 年 4 月時点)
 - TN チューブ数 456 〔チューブ〕 (2021 年4月時点)

また、明かり部 1,680 km (推計)

- 2. 対象となるシステム
- ・中日本高速道路の業務システム
 CCTV、ウェアラブルカメラ、その他
 (詳細は、表 21 事業実施場所と5G利用設備)
- 3. 実証地域の固有な要因など
 - ・実証地域である「古城山トンネル」は、チューブ長約1.5kmである。
 - ・中日本高速道路のトンネルの平均チューブ長は、約1.1kmと推計されるため、中日本 高速道路の過半のトンネルにおいて、本開発実証の結果を参考とすることが可能で ある。
- 4.標準モデル
 - ・本開発実証の結果により、一定の伝送品質が確認されたことから、中日本高速道路の
 業務システムのラストワンマイルの高度な無線化として活用が期待される。
- 5. 体制・事業スキームのモデル(免許人・ネットワーク・システム構築・運用等の役割 分担の在り方含む)

本開発実証を踏まえ、システム構築の役割分担としては、

- ・中日本高速道路(道路の管理者):仕様化、調達、整備、運用、免許人
- 日本高速道路保有・返済機構(道路保有者):道路占有許可
- ・メーカー等民間事業者:システム構築、(免許人も可能)
- が考えられる。
- 6. 課題と対応策

本実証において、「4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保」について検証を行い、 一定の成果を確認できたが、実装にあたり、工事規制現場への臨機応変な環境の構築に ついて検討を行ったが、以下の課題が確認された。対応策は4.4.3 にて詳述する。

- アプリケーション要件(4.4.3.1)
- ② アップリンク伝送スループット (4.4.3.2)
- ③ 「設置場所を変更可能とする基地局」に対するニーズについて(4.4.3.3)

- ④ コスト算出について(4.4.3.4)
- ⑤ 方式上の課題について(28 GL NSA システム)(4.4.3.5)

4.4.2.2 普及展開方策の検討

本開発実証で得られたトンネルの実証実験結果を踏まえて、中日本高速道路グループの 全国のトンネルへの普及展開方策を検討することが今後具体的に可能になる。

なお、検討にあたっては、免許申請や費用対効果、システム方式の検討課題があり、 4.4.3 で詳述する。

中日本高速道路グループのトンネルの TN 延長の分布は以下の通り。

TN 延長	対象チューブ数		
500m 未満		173	チューブ
500m 以上 100	0m未満	123	チューブ
1000m 以上15	00m未満	63	チューブ
1500m 以上 20	00m未満	33	チューブ
2000m 以上 50	00m未満	60	チューブ
5000m 以上		4	チューブ

中央値	661.5	m
平均值	1073.64	m



図 4-62 TN 延長別 チューブ数

(再揭)

1500m 未満: 359 チューブ (79%) 1500m 以上: 97 チューブ (21%) 参考:古城山トンネル(下り):1510m

中日本高速道路グループのトンネルの約8割は、本実証(28GHz NSA構成)で得られた

実験データを元に、トンネルに対するエリア構築方法や、システム構築方法のポイント等 を整理することが可能となる。今回得られたトンネルという電波伝搬の特有の環境で得ら れた通信品質(伝送速度・遅延時間等)の実測値を踏まえて、アプリケーション要件に対す る通信品質の推奨値や運用条件等、機器や端末の設置や接続の方法も含めて、実装時の推 奨環境として検討することが可能である。

本実証より長いトンネル(約2割)については、本実験データを基に、複数の基地局の設 置の必要性など更なる検討、検証が必要であることが確認できた。

また、従前ローカル5Gの制度としてトンネルを想定とした電波伝搬モデルがないため 検討が困難であったトンネル設備を持っている他分野のユーザ(例:鉄道事業者等)につい ても、本開発実証で得られた電波伝搬モデルを精緻化することによって、ローカル5Gが 広く活用される可能性が広がった。今後は、これらのユーザについてもニーズ開拓を検討 していきたい。

また、本実証により、工事など場所が変わるケースに対しても、可搬型基地局によって 運用することができないかというニーズが確認できた。一方で現状の法制度の範囲では対 応が難しいことが本実証の中でも確認できたが、引き続きニーズも踏まえた制度の在り方 等、関係省庁・業界団体と情報共有するとともに、社会実装に向けた議論を行っていきた い。

4.4.3 ローカル5Gの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討

ローカル5Gの実装に向けた課題として、以下の5点を整理した。

- アプリケーション要件(4.4.3.1)
- ② アップリンク伝送スループット(4.4.3.2)
- ③ 「設置場所を変更可能とする基地局」に対するニーズについて(4.4.3.3)
- ④ 費用対効果について(4.4.3.4)
- ⑤ 方式上の課題について(28 GL NSA システム)(4.4.3.5)

4.4.3.1 アプリケーション要件について

(1) 課題

アプリケーション要件となる AI 画像解析システムで検知してから作業員への通知時間や スマートグラスの遅延時間の実証目標と実証結果の比較を行った。

表4-14の通り、いずれも、実証目標を達成する結果を確認した。

	項目	実証目標	実証結果(平均値)
1	▲ 通知時間(鄭生灯)	5 秒以内	車両検知:約2.234秒
T		0 19 DAP 1	人物検知:約2.528秒
2	AI 通知時間(SNS)	5 秒以内	車両検知:約4.153秒
		0 19 241 1	人物検知:約4.200秒

表 4-14 アプリケーション要件 実証目標と実証結果

3 へて トクノハの建処時間 0.3 秒以内 約0.331 秒

(2) 解決策

実証目標を達成する結果を確認した。

(3) 検証項目の精査

実証目標を達成する結果を確認したため、検証項目はなし。

4.4.3.2 アップリンク伝送スループットについて

(1) 課題

2キャリアコンポーネントのアグリゲーションで速度向上を確認した。

1CC: 理論上限:140Mbps

2CC: 技術実証での実測値 240Mbps@UDP UL を確認

(2) 解決策

実証目標を達成する結果を確認できた。

(3) 検証項目の精査

実証目標を達成する結果を確認したため、検証項目はなし。

4.4.3.3 「設置場所を変更可能とする基地局」に対するニーズについて

(1) 課題

今回の開発実証内で、ユーザーやコンソーシアム内より安全や保全以外にも、災害時等に 対応できる可搬型としての活用方法について意見があった。また、インフラ管理(道路)は、 工場やオフィスと異なり自己所有敷地の延長が長いといった特徴があるので、可搬型のニ ーズが高かった。引き続き、常設型の社会実装に合わせて、可搬型の制度化にも注目してい く。

本実証により、以下の具体的な課題が確認できた。

① 免許人申請:

総距離が長い高速道路では、局所的かつ一定期間内に保全作業を行うため、移動可能な 基地局は、全線への設置に比べ、費用対効果が高いが、移動を前提とした基地局について、 該当する制度が存在しない。

具体的には、複数のトンネルについて、時期をずらしながら計画的にメンテナンス作業 を順次行う場合、作業の状況に応じ、無線機の位置を移動させエリア化を行うことが必要 であるが、無線機の移動については、免許変更の手続きが必要となり、 具体的には、干渉調整 ⇒ 免許変更申請 ⇒ 移設 の手続き毎回が発生し その手間および時間が都度必要である。

システム面:

本実証において構築した基地局は、ラック搭載を前提としているため、可搬には馴染まない。また、本ラックが移動可能な場合でも、移動先電気室の場所や電源確保、ケーブルルー ト確保が課題である。

(2) 解決策

免許人申請:

本実証におけるユースケースの場合、基地局位置は高速道路周辺に限られ、また、トンネ ル内では干渉調整も限定的である。屋外複数拠点の手続き簡素化などの仕組みがあれば、メ ンテナンス作業に合わせて柔軟に基地局を移動することができる。

将来的には、高速道路全域の一括免許化、特にジャンクションなどの面的な免許が可能で あることが、利用者目線からは望まれる。

システム面:

現状では、災害時に基地局ごと移動させながら柔軟迅速にエリア形成を行うようなニー ズには対応しにくい。ポータブル化の検討などにより、より利便性が高まる。

(3)検証項目の精査

屋外複数拠点の手続き簡素化については、免許制度の改正などが必要となるため、短期間 での解決は難しいと考えられる。但し、「申請」を「届出」に変更するなどは、比較的容易 に実現される可能性もある。

手続面での改善が困難な場合、エリア化の改善やスループットの改善などにより置局を 効率的にして予め面的に整備することで設備面からの改善が可能になる。この点について は、4.4.3.5 にて検討を行う。

4.4.3.4 費用対効果について

(1) 課題

今回の開発実証において、トンネル内ローカル5G システムの整備コストが具体的になった。この上の課題として、

① 個別要件に基づく個別算出が必要という点が挙げられる。

現状のローカル 5G の基地局については、商品としてインキュベーションフェーズにある

ため個別要件(必要性能の確認)を確認しながら、個別に算出を行うというプロセスが必要 である。

② 整備費におけるローカル5Gシステムの整備コストとアプリケーションの導入コストのバランスとしては、ローカル5Gシステムの整備コストのウェイトが高い。

(2) 解決策

個別要件に基づく個別算出が必要

将来的には、松竹梅のような性能グレードを踏まえて適正価格を算出することができる ようになることが望ましい。

そのためには、ローカル5Gシステムが市場に広く普及していくことが前提条件となる。

② コストのバランス

ローカル5Gシステムの整備コストの費用対効果を高めていくためには、

- (例1) コア設備に対して基地局の数を増やす。
- (例2) NEXCO 中日本光自営網の活用をする。

(例3) 多数のアプリケーションをローカル5Gシステム上で共有化する

などの方策を実現可能性も踏まえながら検討を進めることが必要である。

(3) 検証項目の精査

・コア設備に対して基地局の数を増やすことについては、28 GL NSA システムの課題となるため、4.4.3.5 にて検討する。

・コア設備一基地局間の配線について、NEXCO中日本光自営網との接続を行い、配線等の効率化を行うことは、制度面を確認しつつ、具体的なフィジビリティスタディにより考察 を行うことが望ましい。4.4.4.1 にて考察を進める。

・高速道路に整備したローカル5Gシステムを多数のアプリケーションで共有することは、 中期的な課題として、4.4.4.2 にて考察を進める。

4.4.3.5 方式上の課題について(28GHz NSA システム)

(1) 課題

今回の課題実証においては、4.7GHzに比較して大容量伝送が可能であり、LTEエリアカ バー範囲が広いなどの理由により 28GHz NSA システムを採用した。

実際に課題実証を行ったことにより、以下の成果と課題が明らかになった。

①エリア化:

(成果1)トンネル内電波伝搬特性が把握でき、4K映像伝送に必要となるエリアを把 握することができた。

トンネル内の伝搬モデルを構築し、今後、トンネル内でのエリア構築に向けての指針 を得ることができた。

(成果2) 概ね 300m 程度まで 5G 接続が可能であることが確認できた。

また、基地局の近くで5G接続した状態で、トンネルの出口(約930m)まで移動しても5Gの通信可能であった。

また、反射板の活用により、避難連絡抗が5Gエリア化されることを確認できた。 (反射板から約18m)

(課題) 300m 以上のエリアでは、LTE 接続した後に、5G セルを追加しなかったため、 5G エリアの範囲を拡大するための技術的な検討が必要である。

②スループット:

(成果) トンネル内でのスループット特性を把握することができた。

なお、100m 地点で 5G 接続した後、トンネル出口(930m)まで移動しても 5G 通信 が維持され、約 1Gbps スループットを確認できた。

(課題) スループットは、アップリンクとダウンリンクによる差異、プロトコル (TCP/UDP)による差異が大きく、スループットを改善する技術的検討が必要。

TCP に関しては、無線区間のパケットロスが TCP のウィンドウサイズを小さくし続けることによるスループット抑制が課題。

(例) TCP の UL スループットでは、4K 画像伝送が可能なエリアが 10~30mおよび70m地点と狭い

(2) 解決策

①エリア化:

・LTE 接続した後に 5G セルを追加するシステムパラメータの変更により、300m 以上 でも 5G 通信接続を可能とする。

・システムパラメータの調整で限界であれば、無線機(RU)を追加することでエリアを拡大する。

②スループット:

・アップリンクのスループット増大のために、準同期方式で対応。64QAM 対応から 256QAM まで対応。

・TCP のウィンドウ制御を回避するために、ウィンドウサイズを固定化するか、 Wireless TCP 等のソリューションを適用。

(3) 検証項目の精査

本実証結果では、5G 接続のカバレッジの範囲を広げることと、アップリンクの性能向上 の二つを課題として抽出した。

①エリア化:

・5G 接続可能なエリア拡大については、5G セルの追加閾値の調整も考えられる。 ただし、要件として何 m まで拡張すべきかを明確化する必要がある。

・300m以上のエリアにて、必要となるスループットの要件を再度整理し、本開発実証で 把握した電波伝搬特性結果を持って基地局の置局設計を行うことが妥当と考える。

②スループット:

・アップリンクのスループット増大については、準同期への対応と 256QAM への対応

が解決策であるが、現時点で提供するベンダーが実装していない機能のため、ベンダー のリリースを待ってから検証を行う。準同期対応では、アップリンクの速度が2倍、 256QAMでも2倍が見込まれる。

・TCP のウィンドウ制御に関しては、大きなウィンドウサイズに固定化することを検証すれば、スループット増大効果があることを検証できると考えられる。

ただし、Windows 等、ウィンドウサイズに手を出せない場合については、別途ソリ ューションを調査する必要がある。

4.4.4 継続利用の見通し・実装計画

4.4.3 にて敷衍した課題と解決策については、短期的な実装計画と中期的な実装計画の中 で検討を進める。以下、抽出された課題とその解決策について主なものを記す。

検討ポイント	抽出された課題	解決策	期間
アプリケーシ	・運用環境に合わせた	警告音や骨伝導技術など伝達手段の多様	短期
ョン	仕様変更	化	
L5G システム	・エリアやスループッ	パラメータ調整/無線機(RU)の追加/準同	短中期
(28GHz NSA)	トの改善	期方式	
	・効果的な置局	NEXCO 光自営網活用、「移動可能な基	
		地局」検討	
費用対効果	・費用対効果の改善	L5G を多数の利用シーンで活用	中期
	(L5G 整備費用)		

表 4-15 抽出された課題とその解決策

4.4.4.1 継続利用の見通し(短期実装計画)

来年度の継続利用については、引き続き NEXCO 中日本管内の高速道路のメンテナンス 作業の高度化において、短期的に検証可能な項目を精査して検討を進める。

以下は、現時点での素案であり、具体的には、イノベーション交流会のスキームを継続し ながらコンソーシアム全体の合意形成を図りながら進める。

(1) 対象期間

- ・企画段階(令和4年4月~6月)
- ・実証段階(令和4年7月~12月)

(2) 解決策の計画化

・対象メンテナンス業務としては、本開発実証と親和性が高い点検業務もしくは監視業務 の中から選定する。

・設置場所については、NEXCO中日本が各種新技術の検証路線として選定している 伊勢原保全・サービスセンター管内もしくは本実証の実施箇所である岐阜保全・サービ スセンター管内を主たる検証候補場所として調整を進めている。

(a)検討主体

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

4.4.1.1(3)①、4.4.1.2(3)①記載のように通知先デバイスの再検討、操作性の確認である。

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

4.4.1.1(3)②、4.4.1.2(3)②記載のように走行車両の音が反響しない明かり部で利用する、 専用回線など安定した回線を利用するなどである。

(b)想定されうる検証内容・項目

①4Kカメラを活用した現場作業員の安全確保

・通知先デバイスを活用した安全管理支援、遠隔通知の満足度調査

・危険エリア侵入時の通知時間測定

②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

- ・明かり部での現場管理者の遠隔作業指示の満足度調査
- ・専用回線など安定した回線を利用した際の遅延時間測定

・得られた知見・ノウハウについては、活動成果報告書としてコンソーシアム内で取り纏め活用を図る。特に要求性能は活動成果報告書として取り纏め活用。

・以上の項目は、実施の可否なども含め、4月以降具体的に検討を進めるものとする。

(3) 収支計画

・具体的な収支計画は、企画段階で検討を行うが、費用負担は、コンソ構成員の民間負担 を前提として検討を進める。

本実証試験で活用したソリューション費用に基づき、ネットワーク設備・アプリケーション設備等の設備費・ランニングコストの試算を行った。以下に試算結果を示す。

#	項目	コスト
1	ネットワーク設備	30百万円
2	アプリケーション設備 ①4K カメラを活用した現場作 業員の安全確保	20 百万円~30 百万円 ※設置台数、現場規模によって変動します。
3	アプリケーション設備 ②スマートグラスを活用したト ンネル内の遠隔作業支援	10 百万円~20 百万円 ※設置台数、現場規模によって変動します。
4	ランニングコスト	12 百万円
5	1人あたりの人員コスト	35 百万円/年

表 4-16 各設備コスト

※既存ネットワークの改修費用、設置工事費用については除く。

以下に各ソリューションのコストと想定される削減費用について示す。

	衣417 ①4K スパノを旧	用した死物ド未良の女王唯体
#	コスト	想定される削減費用
1	アプリケーション設備	・工数削減・安全管理人員削減
2	20百万円~30百万円(初年度)	35 百万円/年

表 4-17 ①4K カメラを活用した現場作業員の安全確保

表 4-18 ②スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援

#	コスト	想定される削減費用
1	アプリケーション設備	 ・工数削減 ・安全管理人員削減
	10 五五田 - 90 五五田(初左座)	
Z	10日万円~20日万円(初年度)	35日万円/年

現時点のソリューションを活用した場合、表 4-17、表 4-18 より、1 年以上運用することで、費用対効果が挙げられると考えられる。

4.4.4.2 利用シーンの拡大(中期実装計画)

中期的な検討課題として、費用対効果を高めるための利用シーンの拡大がある。(4.4.3.4) この検討を進めるにあたり、前提条件として、ローカル5Gシステムに求められる仕様の リリースとその実装のタイミングについて整理を行った。



表 4-19 ローカル5G リリースと実装計画の関連

上記を踏まえると、中期的な実装計画については以下の通りとなる。

以下については、現時点での素案であり、実施の可否等については、当該年度毎に具体的 に判断を行う。

(1) 対象期間

令和4年度~令和8年度

※当該年度毎に具体的な実施可否の判断を行う。

(2) 解決策の計画化

具体的な実装検討計画については、以下の通り。

							2021	2022	2023	2024	2025	2026
		5G 0.)活月	月					実装検	討計画		
#	高速道路業務の高度化	判定	大容量	超低遅延	多接続	備考	令和3年	令和4年	令和5年	令和6年	令和7年	令和8年
1	ドローン、車載カメラ(ドラレコ含む)等の立体画像	0	•							ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
2	ウエラブルカメラ画像(点検支援、工事管理(立ち合い)、近接立ち会い等用)	0	•	•		本実証により検証	本実証	再検証	実装検討			
3	構造物等3D・点群計測データ(点検ロボット等による自動 計測)	0	•	•						ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
4	定点CCTVカメラ画像(明かり部・トンネル部用)	0	•	•		ジャンクションで活用検討		企画・計画・検	証 実装検討			
5	道路管理用各種センサー計測データ(明かり部・トンネル 部・のり面変形位計等も含む)	0	•	•	•					ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
6	情報提供設備向け監視・制御データ(将来、空中結像サイ ネージでの提供	\bigtriangleup	•							ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
7	点検用タプレット入力、過去データ/3D図面等参照	0	•	•						ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
8	料金所周辺のケーブルレス化(ETC・現金システム等)	\bigtriangleup	•	•	•	大容量・高安定性・高セ キュリティー確保が必要				ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
9	社屋内ネットワーク(音声電話系やグループネットワーク (保全サービスセンター棟、道路管制センター棟、SA・PA 管理用	×				他のシステムで安価に 対応可						
10	CCTVカメラ臨時増設用 (火災時、イベント発生時)	0	•	•		本実証により検証	本実証	再検証 本実証の課題点を改良	実装検討			
11	光ケーブル切断時のバックアップ(予備)	×				技術的に対応できない(基 地局間通信が不可)						
12	維持管理車両の自動運転(自動走行・遠隔走行の監視制御 含む)	0	•	•						ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討
13	工事・作業用ロボットの遠隔制御・監視	0	•	•	•					ユースケース・	ニーズ等に応じて	検討

表 4-20 各利用シーンとその実装計画(現時点における素案)

注、②ウエラブルカメラ画像(点検支援、工事管理(立ち合い)、近接立ち会い等用) には、本実証での「スマートグラスを活用したトンネル内の遠隔作業支援」を含む。 ⑩CCTV カメラ臨時増設用(火災時、イベント発生時)には、本実証での「4K カメラ を活用した現場作業員の安全確保」を含む。

本実証においては、②ウェアラブルカメラ画像、⑩CCTV カメラ臨時増設用などの検証 を行ったが、次のステップとしては、明かり部における④定点 CCTV カメラ画像の検証な どを検討して行きたい。

さらに、令和6年以降には、例えば⑤道路管理用各種センサー計測データなどの検討も 行いたい。これにより、トンネル部・明かり部のみならず、のり面や橋梁などを含む高速 道路全体の異常モニタリングが可能となる。

(3) 収支計画

具体的な収支計画は、各年度の企画段階で検討を行うが、費用負担は、コンソ構成員の 民間負担を前提として検討を進める。

(素案)

- ・L5G 関連機器等:日立国際電気
- ・移設工事、免許人申請等:エクシオグループ
- ・ドキュメント作成等:AMEC コンサルタンツ

・道路規制等:NEXCO中日本

4.4.4.3 他の事業者への拡大

本開発実証にて活用されたシステムや得られた知見・ノウハウ等は、中日本高速道路に限 らず、以下のような事業者・管理者への拡大が可能と思われる。

①東日本高速道路や西日本高速道路などの他の高速道路事業者
 ②国道や県道などを管理する国・自治体
 ③JR、私鉄各社など鉄道事業者等

5. 普及啓発活動の実施

ローカル5Gの普及の観点から、下記の方針で、普及啓発活動を行った。

5.1 映像制作への協力

本開発実証コンソーシアムは、本開発実証の請負先である株式会社三菱総合研究所の指示に従い、実証映像の素材提供に協力した。

5.2 実証視察会の実施

本開発実証コンソーシアムは、ローカル5Gの導入に関心のある企業や、地方公共団体、 関係省庁等に対する普及啓発の一環として、フルオンラインでの実証視察会を行った。実 施概要は以下の通り。

- 1. 日程:2月24日(木)
- 2. 時間:14時~14時50分
- 3. $\mathcal{V} \mathcal{V}$: Microsoft Teams
- 4.参加者:総務省(情報流通行政局、総合通信基盤局)様
 国土交通省様
 東海総合通信局はじめ関係省庁様
 有識者(評価委員、専門会合委員)様
 関係企業様等
 計54名(2/18現在、コンソーシアムが受領した名簿による)

また、当日のアジェンダは以下の通り。

- 1 コンソーシアム代表者挨拶
- 2 プロジェクトの概要
- -1 本調査検討の概要
- -2 実証環境の構築
- -3 ローカル5Gシステム構成
- -4 実証内容(技術実証)
- -5 実証内容(課題実証)
- -6 実証デモ(録画)
- 3 まとめ
- 4 質疑応答・意見交換

5.3 その他普及啓発活動

本開発実証コンソーシアムは、実証成果について以下の普及啓発活動を行った。

(1) 2021 年 10 月 01 日 日立国際電気、AMEC コンサルタンツ、エクシオグループ、

各社 HP にてプレスリリース発出

(2)日立国際電気ソリューションフォーラム 2021 (オンラインによる事業発表) 会期:2022年2月7日(月)~2月10日(木)※アーカイブ配信2022年3月31日ま で。

顧客協創事例、ソリューション事例として、本開発実証について紹介。

なお、上記の情報発信は、総務省「課題解決型ローカル5G等の実現に向けたローカル 5Gの電波伝搬特性やローカル5G等の活用に関する技術的検討並びに調査検討の請負」 の一環としての取組・成果である旨を明示し、あらかじめ情報提供を行った。

また、中日本高速道路のイノベーション交流会と連動した普及啓発活動として、以下を 検討中。

(3) 実証完了後は、中日本高速道路の HP のイノベーション交流会(活動成果)のページに掲載する予定。

○活動成果ページ

https://innovative-expressway-consortium.jp/activityresult/index.html

(4) また、実証完了時に、実証結果および実用化した際に期待される効果について記 者発表を検討する予定。

○ニュースリリースページ (NEXCO HP)

https://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/news_release/5164.html

6. 実施体制

6.1 コンソーシアム

本開発実証を実施する上で、以下の要件を満たすコンソーシアム体制を構築した。

- ・ 当該課題を有するローカル5G利用者
- ・ 本開発実証環境の構築に必要な部材を提供する各種メーカー
- ・ 実装及び横展開に豊富な実績を有するインテグレータ

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 6-1 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、エクシオグループ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_令和3年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証にともなう作業分担等 覚書」(非公開)に定める覚書を締結した。本開発実証における各構成員の役割を以下に示す。

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
構成員	分担される役割
エクシオグループ株式会社	コンソ代表者、工事、課題実証支援、
	技術実証支援、免許人
株式会社日立国際電気	システム纏め(ローカル5G/AI 画像解析)
	技術実証推進、課題実証支援、免許支援
AMEC コンサルタンツ	監修/図面、課題実証推進、
株式会社	報告書支援
中日本高速道路	実証支援(試験場所提供等)

表 6-1 コンソーシアム内の役割

### 6.2 高速道路ローカル5G実証部会

本開発実証においては、コンソーシアムの構成員をメンバーとする「高速道路ローカル5 G実証部会」を形成し、実証実験及び成果物作成について、計12回の部会会合ならびにそれを補完する会合を開催し討議を行った。

# 6.3 総務省及び調整事業者

# 6.3.1 総務省及び調整事業者

本開発実証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との連携を行った。

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)

#### 6.3.2 その他の調整事業者等

上記以外に以下の事業者等と調整ならびに各種申請等を行った。

#### 6.3.2.1 道路占用許可(道路法 32 条関連)

・独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構 なお、道路占用許可申請にあたり、以下の事業者と調整を行った。 ・中日本高速道路株式会社(名古屋支社岐阜保全サービスセンター)

## 6.3.2.2 道路使用許可(道路交通法 77 条関連)

・岐阜県警察本部 (高速道路交通警察隊) なお、道路使用許可申請にあたり、以下の事業者と調整を行った。 ・中日本高速道路株式会社(名古屋支社岐阜保全サービスセンター)

## 6.3.2.3 道路規制

・中日本高速道路名古屋支社岐阜保全サービスセンター道路規制会議 (1月期、2月期)

### 6.4 情報保全体制

- ・実証コンソーシアムは、契約を履行する業務に従事する法人・個人(以下「業務従 事者」という。)として、本件業務を実施するにあたって必要な経験、資格、業績等 を有する者を確保した。
- ・業務従事者は、履行に必要若しくは有用な、又は背景となる経歴、知見、語学(母 語及び外国語能力)、文化的背景(国籍等)を有する者を確保した。
- ・実証コンソーシアムは、本契約の履行に際し知り得た保護すべき情報(契約を履行する一環として実証コンソーシアムが収集、整理、作成等した情報であって、当社が保護を要さないと確認したものを除く。)その他の非公知の情報(当社から提供した情報を含む。以下「保護すべき情報等」という。)について、適切に管理した。
- ・実証コンソーシアムは、保護すべき情報等の取扱いについては、次の履行体制を確 保し、これを変更した場合には、遅滞なく当社に通知するルールとした。
- ①当社が保護を要さないと確認するまでは保護すべき情報として取り扱う履行体制
- ②当社の同意を得て指定した取扱者以外の者に取扱わせない履行体制
- ③当社が許可した場合を除き、実証コンソーシアムを構成する団体や企業(以下「実証コンソーシアム構成員」という。)に係る親会社や実証コンソーシアム構成員に対して指導、監督、業務支援、助言、監査等を行う者を含む一切の実証コンソーシアム構成員以外の者に対して伝達又は漏えいさせない履行体制
- ・実証コンソーシアムは、契約の履行中、履行後を問わず情報の漏えい等の事故や疑い、将来的な懸念の指摘があったときは、直ちに必要な措置等を講ずるとともに、当社に報告することとした。また、当社から求められた場合は、情報の管理の履行状況等を報告するとともに、当社による調査が行われる場合は、これに協力することとした。

# 7. スケジュール

本開発実証の実施期間は、本開発実証の特性、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た。

全体の実施スケジュール(計画)について、以下に示す。



実績について、以下に示す。



図 7-2 スケジュール (実績)

なお、本実証は、供用中高速道路において車線規制を行いながら実証を行ったため、天候 の影響などに対し、スケジュール調整を柔軟に行った。

主な天候の影響等は、以下の通り

- ・実証環境の構築(工事):1月17日週より作業開始を予定していたが、天候の影響によ りこの週3日間道路規制が不可となり、作業開始が遅延した。翌週の技術実証(電波伝 搬測定)の工程においてリカバリーを行った。
- ・課題実証(顧客ヒアリング): 顧客参加による課題実証を行ったが、予定していた2月 17日は、天候の影響により道路規制が不可となり、予備日である2月25日に行った。 このため、顧客側参加者の調整等を行った。

参考文献

[1]:構造計画研究所、「カーブや起伏のあるトンネル内の Wi-Fi 伝搬特性」 https://network.kke.co.jp/consulting_samples/train/wi-fi.shtml

[2] ローカル 5G 開発実証成果報告書 「No.6 MR 技術を活用した遠隔作業支援の実現」 全体版 <u>https://go5g.go.jp/carrier/l5g/</u>

- [3] ローカル 5G 導入ガイドライン https://www.soumu.go.jp/main_content/000722596.pdf
- [4] 5G New Radio, Fundamentals, procedures, testing aspects, Meik Kottkamp, etc, ROHDESCHWARZ

[5] 3GPP TR 38.900 version 14.2.0 Release 14, ETSI TR 138 900 V14.2.0 (2017-06), Study on channel model for frequency spectrum above 6GHz

[6] 3GPP TS38.306

[7] 5G NR Throughput Calculator https://www.resurchify.com/5G-tutorial/5G-NR-Throughput-Calculator.php

[8] ローカル 5G 開発実証成果報告書「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」

全体版 <u>https://go5g.go.jp/carrier/l5g/</u>