

総務省 御中

令和4年度 0049-0062

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
及び調査検討の請負 報告書

【技術実証編】

MRI 三菱総合研究所

2023年3月31日

デジタル・イノベーション本部

目次

1.	調査検討の枠組み.....	1
1.1	全体概要	1
1.1.1	背景	1
1.1.2	目的及び本事業の位置づけ	1
1.1.3	事業の全体像	2
1.1.4	本報告書の位置づけ.....	4
1.2	実証内容の設計.....	5
1.2.1	課題及び解決の方向性	5
1.2.2	実証事業の内容	9
1.3	実証成果を踏まえた検討	10
1.3.1	開発実証・特殊環境実証.....	10
1.3.2	端末試作事業	12
1.3.3	検討・実施体制.....	12
1.3.4	実施事項(本報告書の内容).....	13
2.	ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討.....	15
2.1	電波伝搬モデルの精緻化	15
2.1.1	概要	15
2.1.2	パラメータの精緻化.....	15
2.1.3	エリア算出式の推定.....	41
2.1.4	その他	44
2.1.5	電波伝搬モデルの精緻化に関するまとめ.....	47
2.2	エリア構築の柔軟性向上.....	50
2.2.1	エリア設計概要	50
2.2.2	エリア構築の課題	59
2.2.3	エリア構築の柔軟化(課題の解決).....	62
2.2.4	エリア設計手法のモデル化.....	76
2.2.5	エリア構築の柔軟化事例.....	97
2.2.6	実証を通じて見出した課題と課題解決の方策	99
2.2.7	まとめ.....	99
2.3	準同期 TDD 追加パターンの開発.....	101
2.3.1	概要	101
2.3.2	干渉シナリオの整理.....	102
2.3.3	令和 3 年度/4 年度実証の結果とりまとめ	108
2.3.4	まとめ.....	113
2.4	ローカル 5G のさらなる高度化等に向けた技術テーマ	114

2.4.1	実証概要.....	114
2.4.2	実証結果.....	116
3.	特殊な環境におけるローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討.....	125
3.1	線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化.....	125
3.1.1	線状の空間におけるパラメータの精緻化.....	125
3.1.2	エリア算出式の推定.....	154
3.1.3	線状の空間における電波伝搬モデルの精緻に関するまとめ.....	163
3.2	線状の空間におけるエリア構築の柔軟性向上.....	164
3.2.1	線状の空間におけるエリア構築の課題.....	164
3.2.2	線状の空間における実証を通じて見出した課題と課題解決の方策.....	165
4.	ローカル5G活用モデルに即した端末システムを用いたローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討.....	177
4.1	検討内容.....	177
4.1.1	各端末システム試作者の性能目標.....	177
4.1.2	各端末システム試作者の検証環境.....	177
4.2	検討結果.....	185
4.2.1	端 01 の実証結果及び考察.....	185
4.2.2	端 02 の実証結果及び考察.....	190
4.2.3	端 03 の実証結果及び考察.....	198
4.3	無線通信の技術基準の観点から必要な課題.....	202
4.3.1	背景・前提条件の整理.....	202
4.3.2	実証を通じた示唆.....	203

1. 調査検討の枠組み

1.1 全体概要

1.1.1 背景

第5世代移動通信システム(5G)は、超高速・超低遅延・多数同時接続といった特長を有しており、我が国の経済成長に不可欠な Society 5.0 を支える基幹インフラとして、様々な産業分野での活用が期待されている。5Gのうち、令和元年12月24日に制度化、令和2年12月18日に周波数帯域が拡充されたローカル5Gは、地域や産業の個別のニーズに応じて地域の企業や自治体等の様々な主体が、自らの建物内や敷地内でスポット的に柔軟に構築できる5Gシステムであり、農業や製造業、建設現場など様々な分野における課題の解決や新たな価値の創造への活用、ポストコロナにおける「新たな日常」の構築、デジタルトランスフォーメーションの推進、引いては「デジタル田園都市国家構想」の実現にも寄与することが期待されている。ローカル5Gの利用においては、一般的な無線局と同様、同一又は隣接周波数を使用する他の無線局との混信を避け、適切に電波を使用するために、技術基準等の範囲内での運用が義務付けられている。

総務省では、ローカル5Gをより使いやすくするため、技術基準の緩和等を検討するものとし、令和2年度から、現実の様々な利用場面を想定した多種多様な利用環境下において、電波伝搬等に関する技術的検討を実施するとともに、ローカル5G等を活用したソリューションを創出する「課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」に取り組んできた。ローカル5Gは、全国5Gとは異なる利用形態も見られるところであり、これに伴い、利用する機器も、全国5Gとは異なる特性が求められるシーンが存在する一方で、ローカル5Gの端末システムは、全国5Gの端末システムを基としたものが大半であるため、活用シーンに応じた端末システムが必ずしも存在しない場合も存在し、ローカル5Gの普及の支障の一つともなっている。また、昨今、一定以上の広さのエリア等を複数のローカル5G基地局を用いてカバーしたいというニーズが顕在化しつつある。このような環境において活用シーンに応じた端末システムに係る電波伝搬等に関する技術的検討も求められている。

1.1.2 目的及び本事業の位置づけ

総務省令和2年度「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」及び令和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」(以下「総務省令和2年度及び令和3年度開発実証」という。)では、ローカル5Gに係る技術的検討等が重ねられてきたところ、ローカル5Gを活用したソリューションとしての可用性や有効性等の面から、更なる向上や改善の必要性が指摘された。また、ユーザ企業等が求める経済性や費用対効果の可視化、より持続的な活用モデルの構築など、ローカル5Gの実装・横展開に向けた更なる工夫が求められている。加えて、ローカル5G が自己土地利用を原則としたシステムである点を踏まえ、ソリューションとしての可用性、有効性と、他の無線システムへの干渉を抑制することによる安全性を両立させることが肝要である。

令和4年度開発実証は、本開発実証の最終年度の事業として、「デジタル田園都市国家構想」の実現にも寄与すべく、ローカル5Gのより柔軟な制度の実現及び低廉かつ安心安全なローカル5Gの利活用

の実現等に向けた検討を実施し、引き続きローカル5Gの技術基準等の改定の方向性などの技術的検討や、ローカル活用モデルの普及に向けた課題の解決策に着目し、ローカル5Gの実装性を一層高める取り組みを行うこととする。

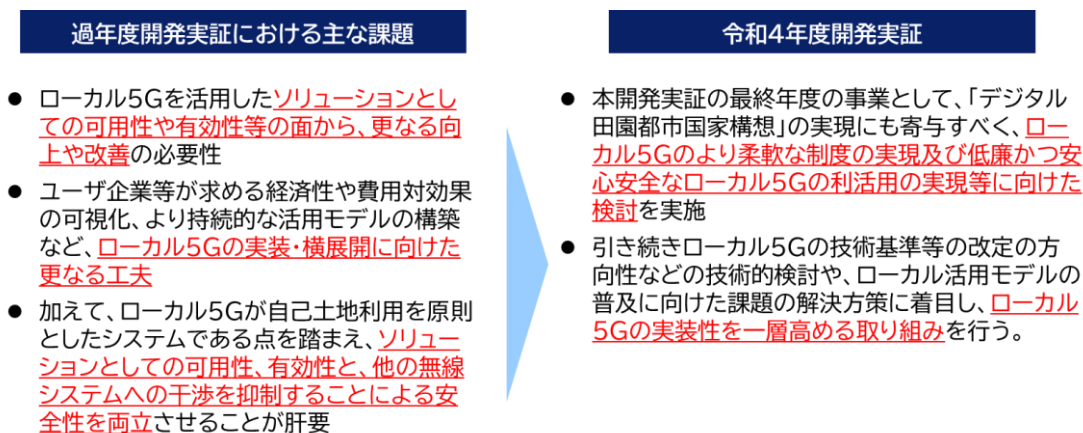


図 1-1 過年度開発実証における主な課題及び令和4年度開発実証の方向性

1.1.3 事業の全体像

令和4年度事業は、更なる検討が必要とされた電波伝搬等について詳細なデータを取得するとともに、引き続きローカル5G等を活用したソリューション創出に向け技術的検討等を行うものである。また、ローカル5Gの実活用シーンに応じた端末について、安定した電波伝搬を確保しつつ、ローカル5Gの普及展開を促進するため、ローカル5G固有の活用シーンに応じた端末システムの在り方を検討するとともに、一定以上の広さのエリア等を複数のローカル5G基地局(以下、「テストベッド環境」という。)を用いてカバーする環境等の特殊な環境下において当該端末システムを利用する際の電波伝搬等についての詳細なデータを取得するとともに技術的検討等を行うものである。

本事業は、全体としては3つの事業区分より構成されており、技術的な課題の検討ならびにローカル5G活用モデルの普及に向けた課題の解決策等について考察を行うため、本公募を通じて実証事業を募集・採択した。(表 1-1)。各事業は、基本的には独立して実施し、実装に向けて3事業間での情報連携等を適宜実施した。なお、「開発実証事業」のみ、農業分野の実証については、農林水産省『スマート農業産地モデル実証(ローカル5G)』と連携している。

表 1-1 事業区分

事業区分	開発実証事業 (令和4年度当初予算)	特殊な環境における 実証事業 (令和3年度補正予算)	端末システム試作事業 (令和3年度補正予算)
概要	様々な利用環境におけるローカル5Gの活用ニーズを満たせるよう、ローカル5Gの電波伝搬特性等についての検討を行うとともに、ローカル5G活用モデルの実証を行う。	線路や道路等の線状の空間等の特殊な環境下におけるローカル5Gの活用ニーズを満たせるよう、ローカル5Gの電波伝搬特性等についての検討を行うとともに、ローカル5G活用モデルの実証を行う。	様々な利用環境におけるローカル5Gの活用ニーズを満たせるよう、ローカル5Gでの実現性のある具体的な利用シーンを想定した上で、 端末システムの試作 を行うとともに、電波伝搬等に係る測定・試験・分析を行う。
1事業あたり 上限額	1.65億円(税込)	4.4億円(税込)	3.3億円(税込)
採択件数	20件	4件	3件
募集対象	実証コンソーシアム	実証コンソーシアム	端末システム試作者

三菱総合研究所が、調査研究請負事業者として事業全体の取りまとめ及び考察等を行った(図 1-2)。

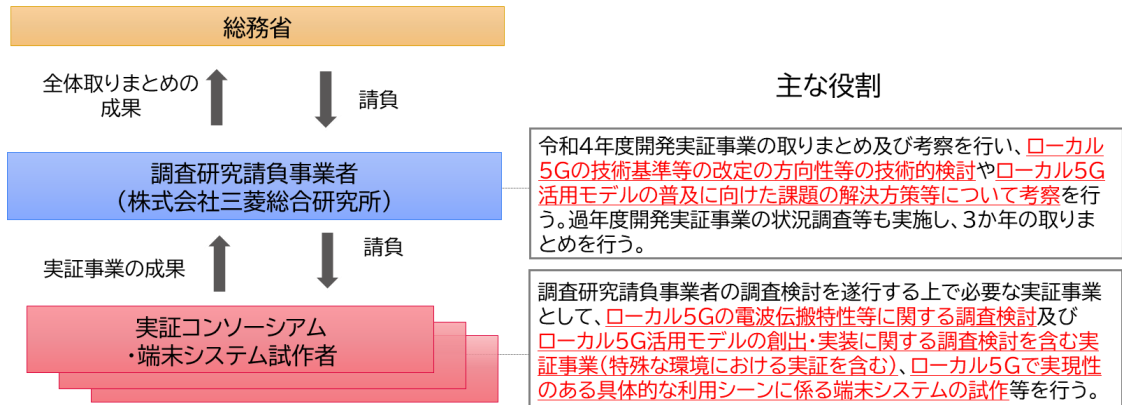


図 1-2 事業実施体制

採択した3事業の各実証概要を図 1-3 に示す。

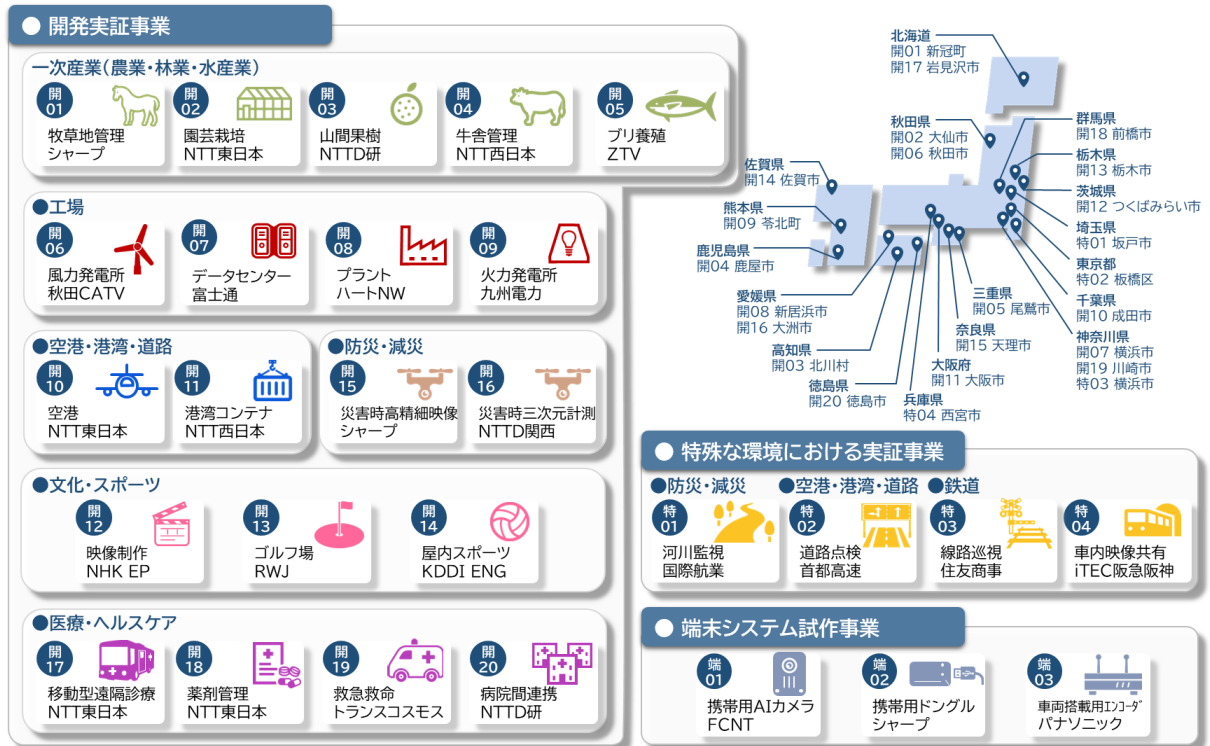


図 1-3 実証事業一覧

1.1.4 本報告書の位置づけ

本事業では、過年度ローカル5G等開発実証事業の成果と、実証を通じて明らかになった技術面・運用面など複数の課題等を踏まえ、ローカル5Gの一層の実装及び普及促進を図ることを目的としている。当該目的に資するように、各事業ともに、表 1-2 に示す「技術実証」と「課題実証」の2つの柱から構成しており、3事業ともそれぞれ「技術実証」及び「課題実証」に相当する実証を実施した。

表 1-2 実証の枠組み

実証内容	概要	目的・狙い
技術実証	ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討	ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する詳細の計測を実施する実証事業を実施し、ローカル5Gの技術基準等の改定の方向性等の技術的検討を行う。
課題実証	ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討	ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討を含む実証事業を実施し、ローカル5G活用モデルの普及に向けた課題の解決方策等について検討を行う。

本報告書【技術実証編】は、上記の技術実証に関してとりまとめたものである。具体的には、図 1-2 で示した、実証コンソーシアム・端末システム試作者の実施した実証成果等を踏まえ、調査研究請負事業者である三菱総合研究所が、ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する横断的などとりまとめ・分析を実施し、ローカル5Gの技術基準等の改定の方向性等について取りまとめたものである。

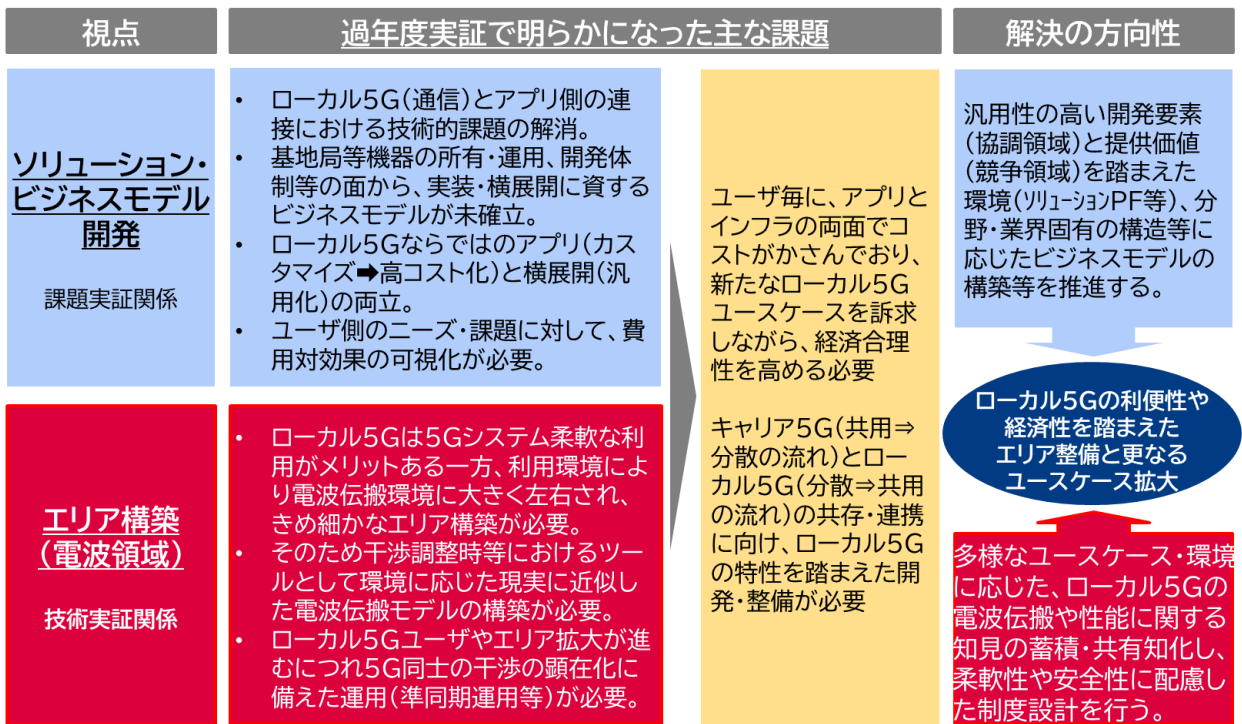
なお、課題実証のとりまとめについては、【課題実証編】を参照されたい。また、各実証コンソーシアム・端末システム試作者による実証成果については各実証事業の報告書を参照されたい。

1.2 実証内容の設計

課題及び解決の方向性を踏まえ、本実証内容の設計の枠組みと当初方針について説明する。

1.2.1 課題及び解決の方向性

図 1-4 は、5G を活用したソリューションの開発とエリア構築の側面から浮彫となった主な課題と、想定される解決の方向性に関する整理である。令和 2 年度以降の、5G 税制優遇措置やサブ 6GHz 帯ローカル5G の制度化を経て、また多くのプレイヤーの参入が進みつつある中、令和 3 年度開発実証事業における取り組みと成果は今後の普及促進のシナリオを決定づける重要な役割を担った。令和4年度開発実証事業では、過年度事業の成果を踏まえつつ、引き続きローカル 5G の電波伝搬特性やエリア構築の方法を明らかにしたうえで、柔軟なエリア構築や安全性に配慮した制度設計につないでいくことが肝要であると考えられる。本報告書(技術実証編)では、主に「エリア構築(電波領域)」の視点から、ローカル5G の課題と解決の方向性等に着目している。



出所)三菱総合研究所

図 1-4 開発実証における課題と解決の方向性概要

以降、具体的な課題として、①ローカル 5G の電波伝搬や性能に関する知見の共有知化、②柔軟性の向上、③安全性への配慮に係る課題について説明する。

(1) ローカル 5G の電波伝搬や性能に関する知見の共有知化

課題の内容	ローカル5G のユースケースや利用環境(屋内外)によっては電波伝搬環境とそれに伴うパフォーマンス等が変化しやすく、システム構築やエリア整備にあたっては電波伝搬に係る正確な理解が不可欠である(安定的な通信を求められるユースケースにおいては大きな課題)。他方、現行の審査基準ではカバーエリア及び調整対象区域の算出方法が一律であることから、 <u>干渉調整時におけるツールとして、環境に応じ現実に近似した電波伝搬モデル(算出式や付随データ)の構築が求められる。</u>	
解決 アプローチ	技術面	<u>多様な電波環境やユースケースを想定した電波伝搬モデルの精緻化</u> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 概要:ローカル5Gの周波数帯・ユースケース・電波伝搬環境等に応じて、実証フィールドを活用する等で、電波環境の特性評価(データ計測等)による電波伝搬に関する理解の深化、対応する既存の電波伝搬モデルを踏まえたパラメータ値の精緻化(または遮蔽損等を踏まえた新たな係数・項に関する検討)を行い、実務上有益な情報や知見を得る。また、今後のユースケースやニーズに応じて、自己土地・他者土地利用基準に係る実測(屋内外間や他者土地への漏れ等)なども想定される。 ➤ 方法:検証用パラメータに応じて、モデル(伝送距離等)や計測枠組み(計測単位・粒度等)を予め定め、実証側がユースケースとともに検証の環境を提案する。制度化において基準である電波伝搬モデルを踏まえ、地形・環境等に応じた補正係数による伝搬損失等の精緻化について考察する。
	運用・制度面	<u>エリア化算出手法の見直し</u> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 電波伝搬モデル(算出式)の見直しについて、実測を重ねるなどで統計的有意性を確保した上で、地形・環境に応じた場合分け等で現行制度(または制度に準じた各種ガイドラインや業界標準など)に反映することを目指す。 ➤ 上記見直しを通じ、調整負荷を軽減するとともに利便性の高い運用や柔軟なエリア整備に向けて、システム間の調整エリアの縮減効果を踏まえ、適宜干渉調整における手順等へ反映することを目指す。

(2) 柔軟性の向上

課題の内容	ローカル5G は 5G システムを柔軟に利用できるメリットがある一方、
-------	-------------------------------------

	<p>ユースケースや利用環境により電波伝搬環境に大きく左右されるとともに(屋内におけるレイアウト変更に伴う伝搬環境の変化含む)、きめ細やかにエリア構築・調整を行う必要がある。しかしながら、現場レベルでは、レイアウト変更のたびに、アンテナ位置等の設定調整や工事とともに免許の変更申請が必要となり、コスト増及び迅速性の欠如といった課題があり、<u>周波数帯や環境等に応じたエリア化の改善やより柔軟な利用に向けた検討</u>が求められている。</p>
<p>解決 アプローチ</p>	<p><u>技術面</u></p> <p><u>エリア化の改善・柔軟性向上に資する手法の検討</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 概要:反射板や中継局(移動局免許)の活用など、サイトエンジニアリング等によるエリア化の改善や設計手法を考案し、実証フィールドまたは模擬的な環境にて検証を行う(令和3年度実証では反射板によるエリア化改善について実証)。その他、今後のユースケースやニーズに応じて、可搬・可搬半固定運用や無線従事者に係らず現場での調整が可能な技術や実現方法等の提案も考えられる。 ➤ 方法:実測と電波伝搬シミュレーションを組み合わせること等で汎用化・共有知化を行う。ただし、実証フィールドでは、環境依存や計測の実施に係る制約があることから、特に屋内環境についてはイベント会場等を活用するなど模擬的な環境を構築し、伝搬に影響を与える壁、資材の材質・厚さや配置を変更しながら検証データを蓄積することが想定される。
	<p><u>運用・制度面</u></p> <p><u>免許申請条件の新設・緩和</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 反射板の活用など、エリア化改善に資する条件(ローカル5G 基地局のアンテナ位置変更、アンテナ指向性変更、送信電力値の変更等)に係る免許申請条件の緩和等に寄与する。 なお、反射板については、免許制度上の扱いについて整理の上、実証の対象範囲等について精査が必要(基地局の一部と見なされる場合、基地局免許申請時に合わせて申請が必要)となる。 ➤ 令和3年度実証では反射板の活用に限定したが、将来的には中継局の活用も考えられる。5G(ローカル5G 含む)4.6GHz 帯、28GHz 帯においては、5G NR 用の無線中継局の規定がない。現在、貴省「情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会 技術検討作業班」では、中継局の技術基準について検討が進められている。このような動きと連携して、中継局の技術基準・審査基準の検討に資する実測データを得ることは有用である。

(3) 安全性への配慮

課題の内容	<p>準同期方式の運用においては、ローカル5G を安心・安全に利用するために、他システムに干渉を与えない又は自システムが干渉を受けても運用上支障がないと判断するための、共通な知見が求められる。</p> <p>ローカル5G ユースケース(UL 重視など)への対応と電波有効利用の観点から準同期方式が制度化されているが、制度化済みパターン(同期 TDD 及び準同期 TDD1)における実機によるさらなる検証と、更なる多様なユースケースの要望に応じた準同期(以下、「追加準同期」という。)パターンにおける運用への検討が求められる。</p>	
解決 アプローチ	技術面	<p><u>準同期運用の検証及び拡張に関する検討</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 概要:制度化済みパターンについては、多様なユースケースの要件に応じた、シミュレーションによる干渉等の検討と実機による検証とを行う。追加準同期運用については、異なる UL/DL 比の提案及び異なる準同期パターン間等でのシミュレーションによる干渉検討を行うことにより、新たな知見を得る(令和2年度実証では、ユースケースにおける要求性能に対して UL スループットが不足するものが数多く見られた)。 ▶ 方法:共用検討で実施するモンテカルロシミュレーション等により干渉影響や上りスロットの信号速度の変化等の特性評価等を行う。実証コンソーシアム側では特性評価等の実測を行いシミュレーション結果の検証等を行うことが想定される。 <p><u>準同期運用における干渉軽減に資する手法の検討</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 概要:制度化済みパターンについて、 キャリア5G 基地局→ローカル5G 基地局干渉及び ローカル5G 移動局→キャリア5G 移動局干渉 等を軽減するための手法(改善に資する置局の場所、送信電力制御パラメータの調整等)の検討・考察を行う。 ▶ 方法:準同期運用(TDD2、TDD3 等)を前提とした実証環境・システムを構築し、各種実測データ等により検証・考察を行う。
	運用・制度面	<p><u>準同期運用ルールの検証と見直し</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ 制度化済みパターンについては、シミュレーションの実施及び実証を通じて運用ルール等の検証を行うとともに、新たな準同期パターンについては、技術的条件等の運用ルールへの反映による、複数のモードに対応した機器調達や相互接続検証に係るコスト負担の低減を図ることを目指す。 ▶ なお、令和3年度開発実証では5件の実証で追加準同期パターンの運用に対応した商用機等を活用した実証が行われた。一定程度実機による技術的な実証が可能になったと評価できるため、実機による実証を通じた干渉影響の把握、干渉軽減手法の検証

(干渉軽減手法実施前後での性能の変化の確認)を行う。

1.2.2 実証事業の内容

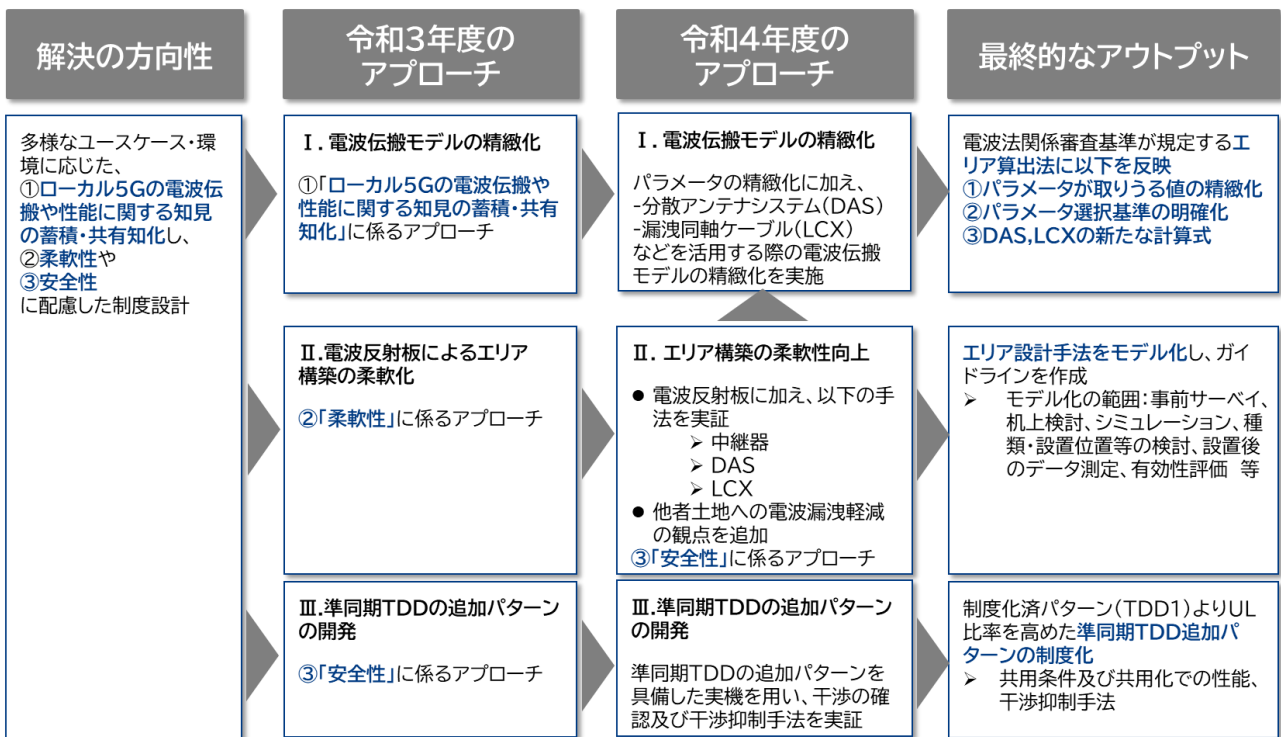
(1) 実証の枠組み(開発実証事業・特殊環境実証事業)

令和4年度開発実証の枠組みについて、令和3年度開発実証と比較できる形で整理したものを図1-5に示す。令和3年度開発実証では、1.2.1で示した課題及び解決の方向性に従い、

- I. 電波伝搬モデルの精緻化(1.2.1(1)への対応)
- II. 電波反射板によるエリア構築の柔軟化(1.2.1(2)への対応)
- III. 準同期TDD追加パターンの開発(1.2.1(3)への対応)

という3種類のテーマが設定され、実証コンソーシアムによる実証が行われた。

技術実証においてはより多くの電波伝搬データを取りまとめて科学的な知見を導出することが求められることから、令和3年度の枠組み(技術実証テーマ制)は維持しつつ、補充的、発展的な内容に取り組むこととした。



出所)三菱総合研究所作成

図 1-5 技術実証の枠組み

なお、令和4年度は、「ローカル5Gの更なる高度化等に向けた技術テーマ」として技術実証チームが電波の反射角を動的に制御可能な電波反射板 Reconfigurable Intelligent Surface(以降、RIS)の実証を行った。RIS は一般的な電波反射板より高度な機能を有するものの、類型としては反射板であるため、実証のとりまとめにあたってはテーマII:エリア構築の柔軟性向上の1手法として取りま

とめた。

(2) 実証内容(開発実証事業・特殊環境実証事業)

開発実証事業・特殊環境実証事業の実証コンソーシアムに対し、図 1-5 に示した枠組みに則り以下のテーマのいずれか 1 つ以上に取り組みさせた。

- テーマⅠ：電波伝搬モデルの精緻化
電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号)が規定するエリア算出法(以下、「エリア算出法」という。)に基づく基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域と実測値の比較検証、現実の利用環境に近い電波伝搬モデル(算出式、パラメータ)の検討。
- テーマⅡ：エリア構築の柔軟性向上
中継器(リピーター等)や分散アンテナシステム、電波反射板等の活用による基地局の設置数・設置形態の変更を不要とするエリア構築や、他者土地への電波漏洩軽減の評価
- テーマⅢ：準同期 TDD の追加パターンの開発(開発実証事業のみ)
多様なアプリケーションの要求条件に応じるため、ローカル5Gのアップリンク(以下 UL)及びダウンリンク(以下 DL)の運用比率を可変とする場合における、同期局や既存の準同期局との干渉評価による離隔距離の算出その他の共用検討のための実用的パラメータの策定を通じた、時分割複信(TDD)の準同期運用パターンの追加の検討。また、当該パターンを具備した実機を用いた、与干渉/被干渉を軽減するサイトエンジニアリング手法の評価。

(3) 実証内容(端末試作事業)

試作する端末システムについて、無線通信の技術基準の観点から必要な課題を明らかにすることを目的にテストベッド環境において電波伝搬等に係る測定・試験・分析を実施させた。なお、テストベッド環境においては環境要因により電波伝搬特性が変動するため、当該測定結果と比較可能なデータを得るべく、環境要因を極力排除したラボ環境にて事前に測定させることとした。以下①～④に、実証の手順を示す。

- ① 環境要因を極力排除したラボ環境にて、試作する端末システムの伝送性能(UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延 等)を確認する。
- ② テストベッド環境にて、試作する端末システムをローカル 5G 基地局に接続し、カバーエリア内 20 以上の測定点において、伝送性能を測定する。
- ③ と同一の測定点において受信電力を測定する。試作する端末システムに受信電力を測定する機能がいない場合は、別途測定器を用意し測定する。
- ④ ①～③の結果を整理し、無線通信の技術基準の観点から必要な課題を分析・考察する。

1.3 実証成果を踏まえた検討

1.3.1 開発実証・特殊環境実証

各テーマについて、調査研究請負事業者の実施事項は以下のとおりである。なお、開発実証及び特殊環境実証は令和3年度開発実証と同じ枠組み(テーマ制)で実施していることから、令和3年度開発実証の成果も活用した。

(1) 電波伝搬モデルの精緻化

それぞれの利活用モデルにおける環境条件下において、伝搬モデルの精緻化の検討を行う。特定の利用環境下における電界マップの精度向上を図るべく、エリア算出法(電波法関連審査基準)で使用する電波伝搬式の補正項(K、R、S及びhr等)に関する考察を行った。

a) K:利用場面の地形影響

基地局が屋外に設置される場合でかつ調整対象区域が100m以上の利用環境を対象に、各利用環境における実測データから近似したK値を元に、下記2項目について整理分析し、種々の利活用モデルにおける地形影響(K)を考察する。

- ・ 近似したK値を元に利活用モデルをカテゴリ化する。
それぞれのカテゴリ毎に、利用環境条件を分析し、K値に影響すると要因に関する考察を行う。
- ・ 利活用モデルを環境条件によってカテゴリ化する。
それぞれのカテゴリ毎のK値を比較し、K値に影響すると要因に関する考察を行う。

b) R:建物侵入損

基地局を屋内の設置される場合を対象に、屋外への漏洩電力の実測データから、建物侵入損(R)を考察する。様々な参考文献を参考に、壁面の材質や厚み、窓の影響等に関する考察を行う。

c) S:市街地、郊外地、開放地を考慮した補正

それぞれの利活用モデルの利用環境における電波伝搬特性データや実測値を整理・分析し、適用すべきS値の条件(市街地、郊外地、開放地の区分)の具体化に関する考察を行う。

横断的な分析の手法としては、まず各実証コンソーシアムの実証について実施環境(屋内外、遮蔽物、反射物等)及び精緻化を試みるパラメータを軸に類型化した。次に、同一種類の測定データを一つのグラフにプロットし、総務省のエリア算出式やITUの電波伝搬モデル等と比較した。

(2) エリア構築の柔軟性向上

それぞれの利活用モデルにおけるエリア化の改善・柔軟性に資する手法の効果に関する実証を元に、当該手法有用性とその活用手法を考察し、知見を纏めた。

横断的な分析の方法としては、まず各実証コンソーシアムの実証について実施環境(屋内外、遮蔽物等)及び当該手法の仕様等を軸に類型化する。類型ごとに、当該手法のエリア改善に寄与した要素を整理し、複数の環境・ユースケースにおいて共通的に有効性が示された要素と、特定の環境・ユースケースにおいてのみ有効性が示された要素を仕分けた。なお、ここでいう要素には、当該手法で用いられた技術自体の要素(ハード面)、技術の利用方法の要素(ソフト面)の両方を含む。

(3) 準同期 TDD の追加パターン開発

本調査検討は以下のシミュレーション及び実測データを元に取りまとめた。

- コンソーシアムの実証にて得られる「準同期 TDD パターン1, 2, 3に関するシミュレーション及び準同期 TDD パターン1の実証結果(実測データ)」
- コンソーシアムの実証にて得られる準同期パターン2, 3に関する実証結果(実測データ)

本調査検討では以下の項目に関して考察する。

- a) 隣接するキャリア5G(隣接チャンネル)/ローカル5G(同一チャンネル)への与干渉量
準同期TDD各パターンそれぞれにおいて、隣接局に干渉を与えないための条件(離隔距離や漏洩防止策等)
- b) 隣接するキャリア5G(隣接チャンネル)/ローカル5G(同一チャンネル)からの被干渉量
準同期TDD各パターンそれぞれにおいて、隣接局に干渉量、及び干渉抑止条件(離隔距離や漏洩防止策等)
- c) 隣接局からの被干渉下での性能
隣接局からの干渉量(その際の離隔距離・遮蔽量)を基準にし、準同期TDD各パターンそれぞれにおける性能(スループット等)を評価し、利活用モデルの所要性能条件を想定した追加の準同期パターンの有用性・有効性に関して考察する。

横断的な分析としては、まず各実証について干渉パターンを軸に類型化する。その後、同一類型の結果の比較等分析を行った。

1.3.2 端末試作事業

各端末システム試作者の実証について、特に実際の利用状況に近いと思われるテストベッドでの実証について、実証環境や測定結果、分析・考察の内容を取りまとめた。特に、端末システムにおける技術基準の検討に資する分析・考察について抽出した。

1.3.3 検討・実施体制

調査研究請負事業者と実証コンソーシアム・端末システム試作者、技術実証専門会合の役割・位置づけは図 1-6 のとおりである。

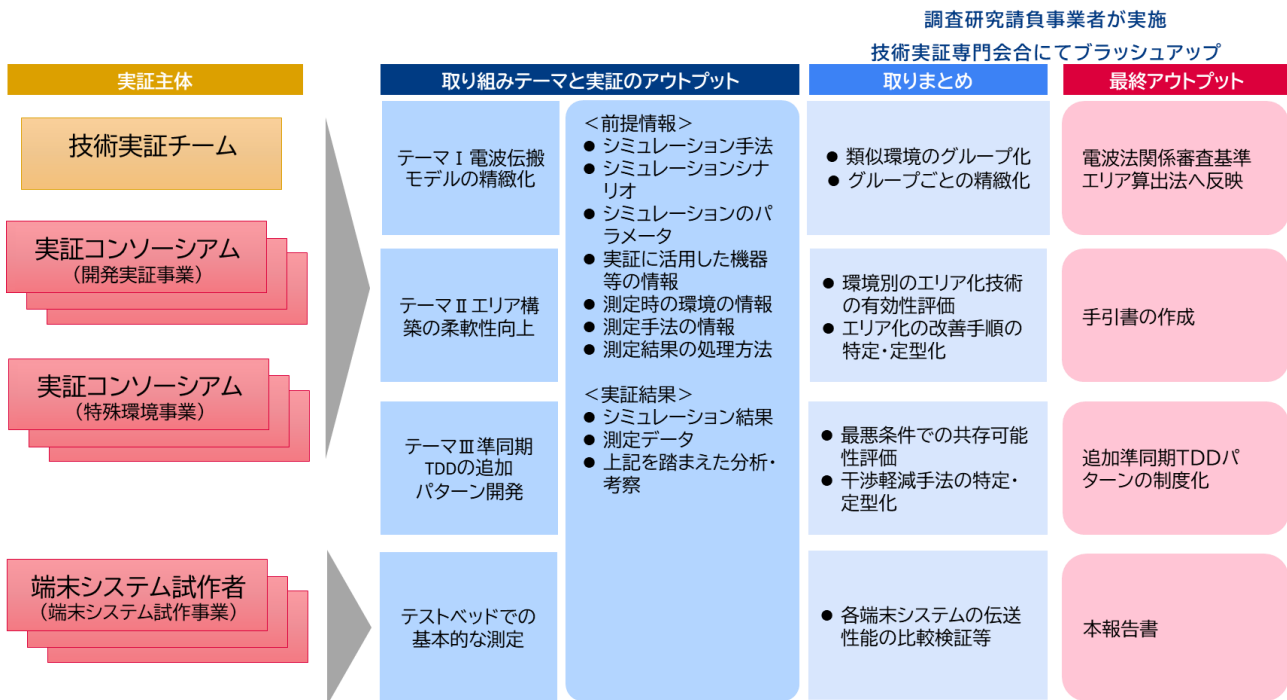


図 1-6 検討・実施体制

1.3.4 実施事項(本報告書の内容)

上述した調査検討の内容について、以降の章においてその結果を記載した。

2. ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討

様々な利用環境におけるローカル5Gの活用ニーズを満たせるよう、実証コンソーシアムの実証を通じて 4.7GHz 帯(4.6GHz～4.9GHz 帯)及び 28GHz 帯(28.2GHz～29.1GHz 帯)の周波数帯を使用するローカル5Gの電波伝搬特性等について、以下の①から③の事項について、技術基準改定の検討や低廉な機器の普及などを念頭におき検討を行った。

- ① 多様な電波環境やユースケースを想定した電波伝搬モデルの精緻化(前述のテーマⅠと対応)
- ② エリア化の改善・柔軟性向上に資する手法の検討(前述のテーマⅡと対応)
- ③ 準同期運用の検証及び干渉軽減に資する手法の検討(前述のテーマⅢと対応)

検討にあたっては今後考えられるローカル5Gの技術基準等の改定の方向性を含むローカル5Gの普及に向けた技術的課題の解決方策等について考察を行った。その際、ローカル5G等の電波伝搬特性等に関する技術実証内容と類似の調査結果についても整理した。また、総務省令和2年度及び令和3年度開発実証の成果も取りまとめ、考察に活用した。

3. 特殊な環境におけるローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討

線路や道路等の線状の空間におけるローカル5Gの活用ニーズを満たせるよう、実証コンソーシアムの実証を通じて、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯の周波数帯を使用するローカル5Gの電波伝搬特性等について、以下の①及び②の事項について、技術基準改定の検討等を念頭におき検討を行った。

- ① 線状の空間における電波環境やユースケースを想定した電波伝搬モデルの精緻化(前述のテーマⅠと対応)

マIと対応)

② 線状の空間におけるエリア化の改善・柔軟性向上に資する手法の検討(前述のテーマIIと対応)

検討にあたっては今後考えられるローカル5Gの技術基準等の改定の方向性を含むローカル5Gの普及に向けた技術的課題の解決方策等について考察を行った。その際、ローカル5G等の電波伝搬特性等に関する技術実証内容と類似の調査結果についても整理した。また、総務省令和2年度及び令和3年度開発実証の成果も取りまとめ、考察に活用した。

4. ローカル5G活用モデルに即した端末システムを用いたローカル5G電波伝搬特性等に関する技術的検討

端末システム事業者が試作した端末システムを一定以上の広さのエリア等を複数のローカル5G基地局を用いてカバーする等の特殊な環境下において通信させ、電波伝搬特性の測定・試験を実施し、無線通信の技術基準の観点から必要な課題を分析した。

2. ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討

2.1 電波伝搬モデルの精緻化

2.1.1 概要

電波伝搬モデルの精緻化においては、電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号)が規定するエリア算出法(以下、「エリア算出法」という。)に基づく基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域と実測値の比較検証、現実の利用環境に近い電波伝搬モデル(算出式、パラメータ)の検討を行った。なお、サンプル数確保の観点から 3.2 節で取り上げた特殊環境実証の測定データも分析に含んでいる部分がある。

2.1.2 パラメータの精緻化

(1) 精緻化対象

本検討では、カバーエリア、調整対象区域を算出する電波伝搬モデルを現実の利用環境に近いモデルとするために、現在の算出法の簡便さは維持することを前提に、地形や遮蔽物などの現実の利用環境に依存するパラメータを精査することとした。

4.7GHz 帯を使用する場合、地形情報データにより算入し難い地形の影響等の補正值である K 、市街地、郊外地及び開放地に対して考慮する補正值である S 、基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損の R が、このパラメータとなる。また、28GHz 帯を使用する場合、基地局と陸上移動局の間に存在する建物の平均建物高 hr 、基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損 R である。

(2) 精緻化の進め方

実証事業者に対して、表 2-1 に示す各パラメータの精緻化の方向性及び実施環境の要件を提示し、実証環境に適合するパラメータの精緻化のためのデータを取集した。

表 2-1 精緻化対象パラメーターの環境要件

利用する周波数帯	精緻化の対象パラメータ	精緻化の方向性	実施環境の要件
4.7GHz帯	K ⁶	斜面や植生、水面の影響の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 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 ● 斜面や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 ⁷	選択基準の詳細化	<ul style="list-style-type: none"> ● 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
	R ⁸	壁面の材質・厚さ別の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋内である
28GHz帯	hr ⁹	選択基準の明確化	<ul style="list-style-type: none"> ● 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
	R ¹⁰	壁面の材質・厚さ別の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋内である

取得データは、複数の測定点での受信電力結果であり、そのデータに基づいてパラメータの最適化を行う。

パラメータの精緻化により得られる効果として望ましいのは、エリア算出法で計算されるエリア境界と実際のエリア境界の距離の誤差を一定値以内にすることである。つまり、目標として距離誤差を数値化することが最も望ましい。しかしながら、以下の課題により精緻化対象パラメータを最適化しても、距離誤差をどこまで小さくできるのかの目標を設定することは難しい。

- 伝搬モデルは距離に比例するモデルではなく、基地局からの距離によって、受信電力誤差の与える距離誤差が異なる。
- エリア算出式をより多くのフィールドに適用するため、本検討で精緻化対象パラメータとした、K(地形)、S(環境 市街/郊外/開放)、R(侵入損)、hr(環境 建物高)の補正項は、このような単純な定数での補正が可能か、各パラメータが独立に決定できるか等は明確でない。

このため、本検討では、パラメータの最適化について評価することとした。

(3) 測定および精緻化の方法

実証事業者に対し、以下の方法で受信電力を測定することを依頼した。

- 受信電力として、SS-RSRP を測定する。
- 定在波の影響を避けるため、測定点ごとに、 10λ (λ は波長)の範囲で測定位置を動かしながら(あるいは 10λ の範囲で複数の位置を定めて)測定を実施し、すべてのサンプル(トータル 1000 サンプル)を統計処理する。
- 測定周期は任意。
- 1000 サンプルの中央値を代表値として採用。ただし、平均、標準偏差、上位 10% 値、下位 10% も算出する。
- 測定周期は任意。
- 測定機のアンテナが指向性を持つ場合、あるいは実際の利用において端末のアンテナが指向性をもつ場合は、それを考慮した測定(アンテナの水平・垂直方向の角度を変化させた測定)を行う。

また、測定点に関して、以下の依頼を行った。

- 精緻化を行うために実施する測定点の選択方法については、パラメータの種別や各実証環境に応じて異なると思われるが、エリア算出式は干渉調整等を行うためのエリア端を示すことが主たる目的であるため、エリア端周辺での十分な測定が必要になると考えられる。
- 各エリアは置局点に対し全方位で作図する必要があるため、精緻化後のエリア算出式の評価としては、ある一方向だけではなく、できるだけ全方位での実測の実施が望ましい。例えば、置局点を中心として30°方向ごとに方位を区切る場合、カバーエリア端、調整対象区域端でそれぞれ12点(方位)ずつの点について、精緻化後の算出式で求められるエリア端での受信電力誤差や、実際のエリア端受信電力の地点との距離の誤差を評価することになる。

1) 実証事業者の提供データ

測定点情報の提供を依頼したデータフォーマットを表 2-2 に示す。

表 2-2 提供データフォーマット(測定点情報)

測定点 ID	基地局との3D距離 [m]	基地局との水平距離 [m]	基地局アンテナ地点 標高 [m]	基地局アンテナ地上高 [m]	送信電力 Pt [dBm]	送信アンテナ利得 Gt [dBi]	基地局給電線損失 Lf [dB]	受信アンテナ利得 Gr [dBi]	受信給電線損失 [dB]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)	測定日 (yyyy/mm/dd)	備考
1	200.42	200.00	1.00	15.00	30.00	7.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
2	100.84	100.00	1.00	15.00	30.00	5.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
3	81.05	80.00	1.00	15.00	30.00	3.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
4	230.37	230.00	1.00	15.00	30.00	8.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
5	120.70	120.00	1.00	15.00	30.00	7.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
6	105.80	105.00	1.00	15.00	30.00	5.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
7	130.65	130.00	1.00	15.00	30.00	6.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
8	280.30	280.00	1.00	15.00	30.00	8.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
9	215.39	215.00	1.00	15.00	30.00	7.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m
10	190.44	190.00	1.00	15.00	30.00	7.00	2.00	0.00	1.00	1.50	1.50	0	2021/12/10	積音 1.0m

また、受信電力測定結果の提供を依頼したデータフォーマットを表 2-3 に示す。

表 2-3 提供データフォーマット(受信電力測定結果)

測定点ID	算出式による		実測値 [dBm]				中心周波数 [GHz]	4.85	入力例
	受信電力 [dBm]	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値			
1	-100.6	-92.0	-92.0	0.4	-92.0	-93.0	入力例	0.0	入力例
2	-96.5	-89.0	-89.0	0.6	-88.0	-90.0	入力例	12.3	入力例
3	-97.3	-92.0	-92.0	0.7	-91.0	-93.0	入力例	0.0	入力例
4	-100.6	-94.0	-94.0	0.5	-93.0	-94.0	入力例	0.0	入力例
5	-97.2	-92.0	-92.0	0.6	-91.0	-93.0	入力例		
6	-96.8	-86.0	-86.0	0.7	-85.0	-87.0	入力例		
7	-97.8	-90.0	-90.0	0.7	-89.0	-91.0	入力例		
8	-102.9	-95.0	-95.0	0.3	-95.0	-96.0	入力例		
9	-101.0	-89.0	-89.0	0.4	-88.0	-89.0	入力例		
10	-99.8	-90.0	-90.0	0.4	-90.0	-91.0	入力例		
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

※1B列において、算出式のパラメータで0以外の値を用いて受信電力を計算した場合その値を記載。

※2B列において、算出に使用した人体吸収損失の値(4.7GHz帯では0又は8)を記載

算出式による受信電力と実測値の帯域を合わせる。

- ・C-G列の実測値にSS-RSRPの測定値をそのまま使用する場合、B列の算出式はSS-RSRPの帯域に変換した受信電力値
- ・C-G列の実測値を使用するシステムの受信帯域値とする

補足情報として、以下のデータや写真等の情報の提供を依頼した。

- 実証の目的・概要
- 実証フィールドや測定点の選定に関する説明(根拠)
- 精緻化対象パラメータに関する情報(パラメータごとに指定)
- 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
- パラメータの推定結果
- パラメータの導出過程
- 地図上の測定点の図
- 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

- アンテナの指向性パターン
- 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(考察に必要な情報)受信電力として、SS-RSRP を測定する。

2) パラメータ推定(最適値算出)方法

推定するパラメータ(例 R[dB]: 建物侵入損)を定め、推定するパラメータによる補正を行わない場合(例 R=0)の測定点 i における受信電力 $P_{rpred.}(i)$ [dBm] を審査基準の算出式により求める。

複数の測定点 i で受信電力 $P_{rmes.}(i)$ [dBm] を測定する。測定は、特異値を除くため、適切な測定方法・測定サンプル数の測定を行い結果を適切に統計的に処理する。統計値は基本的には中央値を採用するが、必要に応じて、平均値、標準偏差、上位 10%、下位 10% 値も使用し、ばらつきに対するマージンについても検討する。

最小二乗法により、以下、E が最小となる R を推定値として算出する。

$$E = \sum_i \{P_{rpred.}(i) - R - P_{rmes.}(i)\}^2$$

本推定の有効性確認のため、E/N の標準偏差 σ_E の大きさについて評価する。

(4) R の精緻化

1) パラメータ R の精緻化の概要

審査基準では、基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損であるため、基地局を屋内に設置し、屋外で測定される電力と建物が無いものとして算出式により計算される電力の差を R として求める。このとき、通過する壁面の条件ごとに R を求める。

ただし、これ以外にも測定方法による影響や他の環境要因による影響が考えられるため、勧告 ITU-R P.2040-1 Annex 2 4.2 章にあるような情報についてもできる限り収集し考察に利用する。

勧告 ITU-R P.2040-1 Annex 2 4 章には、屋外基地局から屋内エリアへの侵入損が定義されており、建物の外壁を挟んで同じ高さの電界強度の差分として求めている(図 2-1)。

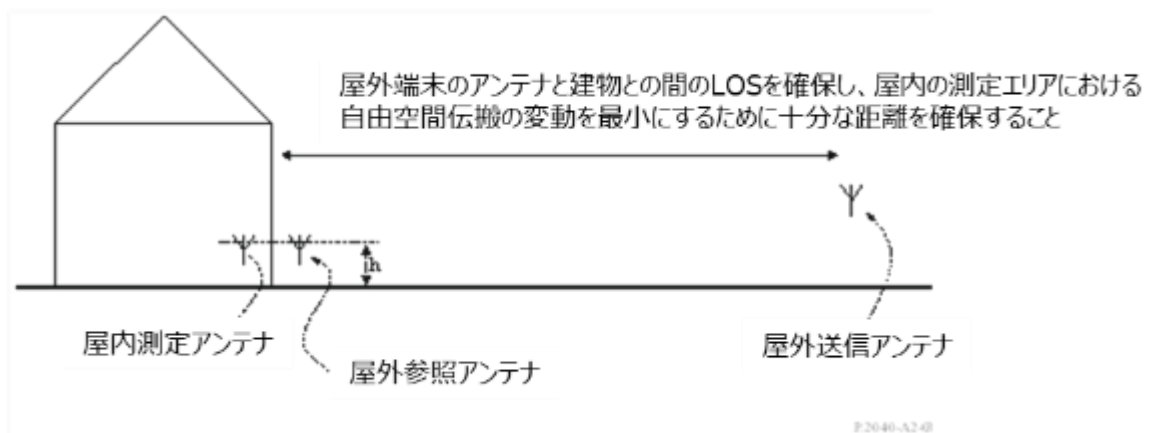


図 2-1 建物侵入損を測定するためのアンテナ位置

2) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証のみならず令和3年度の実証結果も活用して検討を行う。令和3年度の実証を表 2-4 に、令和4年度の実証を表 2-5 に示す。

表 2-4 令和3年度パラメータ R の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
No.02	牛舎	牛舎→周辺農地、4 方向で異なる壁面	01:3.5dB、 02:5.6dB、 03:3.6dB、 04:8.4dB	
No.07	工場	屋外→工場建屋内	01:18.5dB、 02:17.5dB	
No.09	火力発電所	工場建屋内→屋外、開口部が少ない	01:40.4dB	
No.18	国際会議場	ホール、会議室→屋外	01:5.5dB、 02:16.3dB、 03:11.4dB、 04:2.9dB	
No.20	ドーム球場	球場内→屋外、鉄筋コンクリートの複層構造	01:29.8dB	複層構造
No.21	コンサートホール	ホール内→屋外	01:67.2dB	複層構造
No.22	体育館	体育館内→屋外	01:22.4dB、 02:15.6dB、 03:8.2dB、 04:9.6dB	複層構造
No.25	市街地	屋外→集合住宅内	13dB	
No.26	救命救急センター	病院屋内→屋外	17.2dB	28GHz 帯

(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

表 2-5 令和4年度パラメータ R の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	着目点	備考
開 07	データセンター	開口部のない鉄筋コンクリート造り	仮説 R = 35dB	
開 14	体育館	屋外まで1つ以上の壁面が存在する競技エリア	類似する外壁構造パターンを持つ体育館への汎用性	複層構造
開 17	公共施設内の研修室	28GHz 帯の場合の一般的な壁面	仮説 R = 20.1dB(審査基準値)	28GHz 帯
開 18	病院	ドアや壁面が多数存在する環境	壁面は R = 16.2dB(審査基準値)	複層構造
開 19	病院	ドアや壁面が多数存在する環境	壁面は R = 16.2dB(審査基準値)	屋内で測定

実証 No	実証場所	伝搬路概況	着目点	備考
			査基準値)	
特 02	首都高速	基地局設置場所は屋外、遮音壁を壁面とみなす	遮音壁の材質や厚さ	
特 03	駅	周辺他者土地への伝搬	建物により遮蔽されやすい構造と開かれた環境の混在	28GHz 帯

(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

3) パラメータ R の測定結果まとめと考察

a. グループ化

各実証環境における仮説より想定されるパラメータ R の値に着目して、グループ化を行い、それぞれのグループに対して、各実証の測定結果をまとめて評価することにより、R の精緻化を行った。

表 2-6 にグループ化の結果を示す。

表 2-6 R 精緻化のためのグループ

グループ	周波数帯	概要	実証
R-1	4.7GHz	壁面が簡素 ($R < 16.2$)	No.02, No.18-1, No.18-4
R-2	4.7GHz	壁面が一般的 ($R = 16.2$)	No.07、No.18-2、No.18-3、No.22-2・3・4、No.25、開 19
R-3	4.7GHz	壁面が堅牢 ($R > 16.2$)	No.09、開 07
R-4	4.7GHz	複層構造	No.20, No.21, No.22-1, 開 14, 開 18
R-5	28GHz	壁面が簡素 ($R < 20.1$)	No.26
R-6	28GHz	壁面が一般的 ($R = 20.1$)	開 17, 特 03
R-7	28GHz	壁面が堅牢 ($R > 20.1$)	—

精緻化は、各実証より提供された審査基準の算出式による受信電力の計算値と対応する受信電力の測定値の中央値から、最小二乗法により R として最適な推定値を求めた。

b. グループ R-1

4.7GHz 帯を利用する壁面が簡素に分類される R-1 グループの実証結果をまとめたものを図 2-2 に示す。この類の図は、測定が行われたポイントにおける精緻化するパラメータが 0 と仮定した場合のある測定ポイントにおける審査基準の算出式による計算値を横軸に、その測定ポイントにおける測定値を縦軸としてプロットしたものである。各プロットは、No02-1 と記載されている場合は、No02 は実証を示す番号であり、ダッシュ番号は、その実証の中で同一の電波伝搬環境と推定される測定ポイントをグループ化した測定 No を示している。

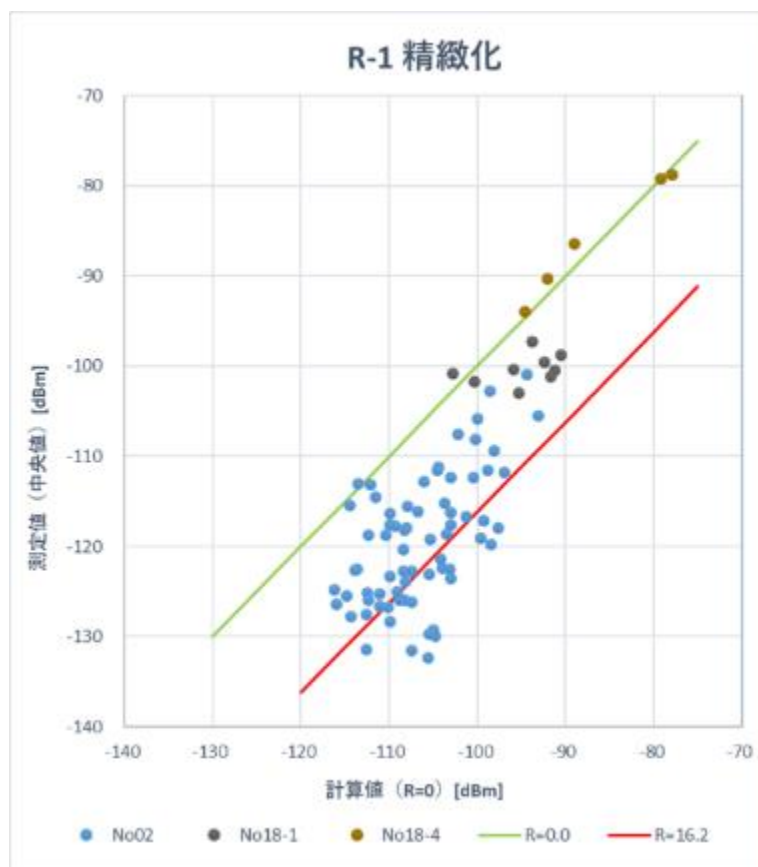


図 2-2 グループ R-1(壁面が簡素)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-1	精緻化
最適な推定値 [dB]	11.4
標準偏差	6.8

壁面が簡素という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 11.4dB となった。審査基準で設定されている基準値である 16.2dB に近い値となったのは、No.02 の測定結果が基準値に近いためである。No.02 はプラスチックのメッシュ構造及びビニールシートを主とした壁面であり、勧告 ITU-R P.2040 の壁面両端の測定では小さな値となっている。このグループの実証数が少ないため、更なる実証が必要ではあるが、簡素な壁面においては、勧告 ITU-R P.2109 の建物侵入損の期待値 5%の値である 4.2dB 程度の減衰が見込める可能性がある。

c. グループ R-2

4.7GHz 帯を利用する壁面が一般的に分類される R-2 グループの実証結果をまとめたものを図 2-3 に示す。

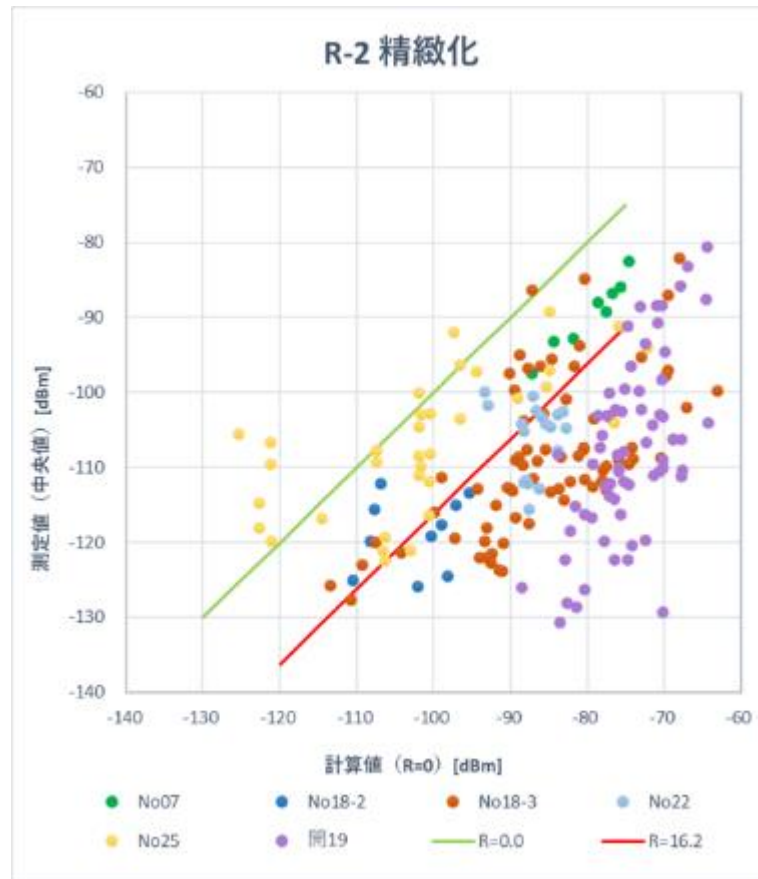


図 2-3 グループ R-2(壁面が一般的)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-2	精緻化
最適な推定値 [dB]	22.1
標準偏差	13.1

壁面が一般的という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 22.1dB と、審査基準で設定されている 16.2dB と比較して大きくなった。これは、開 19 が比較的大きな値に分布しているためと考えられる。R 値は建物外部へ漏洩する電波を測定することとしているが、開 19 では一般的な外壁との仮説にも係わらず建物外部においては電波が測定できなかった。このため、建物内部における内壁の透過の測定を行っており、内壁も一般的な壁面と想定された。しかしながら、壁面以外の機器による遮蔽の影響により、大きな値に分布していると考えられる。

若干仮説とは異なる分布となる実証があるものの、一般的な壁面においては、現在の審査基準値の 16.2dB 程度の減衰が見込める。

d. グループ R-3

4.7GHz 帯を利用する壁面が堅牢に分類される R-3 グループの実証結果をまとめたものを図 2-4 に示す。

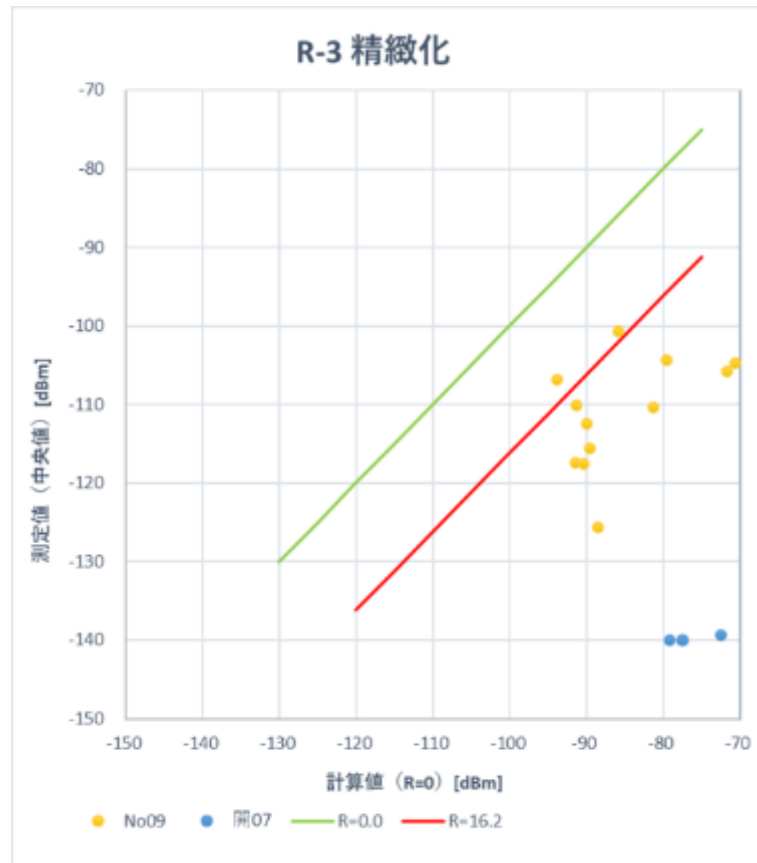


図 2-4 グループ R-3(壁面が堅牢)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-3	精緻化
最適な推定値 [dB]	37.4
標準偏差	14.7

壁面が堅牢という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 37.4dB となった。開 07 では、屋外では電波が弱く、測定点当たり 1000 サンプルの測定を行うことができなかったため、測定限界の-140dBm が測定されたものとして評価を行った。このグループの実証数が少ないため、更なる実証が必要ではあるが、堅牢な壁面においては、勧告 ITU-R P.2109 の Thermally-efficient の場合の建物侵入損の期待値 50%の値である 31.4dB 程度の減衰が見込める可能性がある。

e. グループ R-4

4.7GHz 帯を利用する複数の壁面に分類される R-4 グループの実証結果をまとめたものを図 2-5 に示す。



図 2-5 グループ R-4(複数壁面)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-4	精緻化
最適な推定値 [dB]	36.0
標準偏差	17.5

複数の壁面という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 36.0dB となった。No.20 はスタジアムであり、一部に開口部があるため小さな減衰となったものの、複数壁面においては、現在の審査基準値の 2 倍の 32.4dB 程度の減衰が見込める可能性がある。

f. グループ R-5

28GHz 帯を利用する壁面が簡素に分類される R-5 グループの実証結果をまとめたものを図 2-6 に示す。

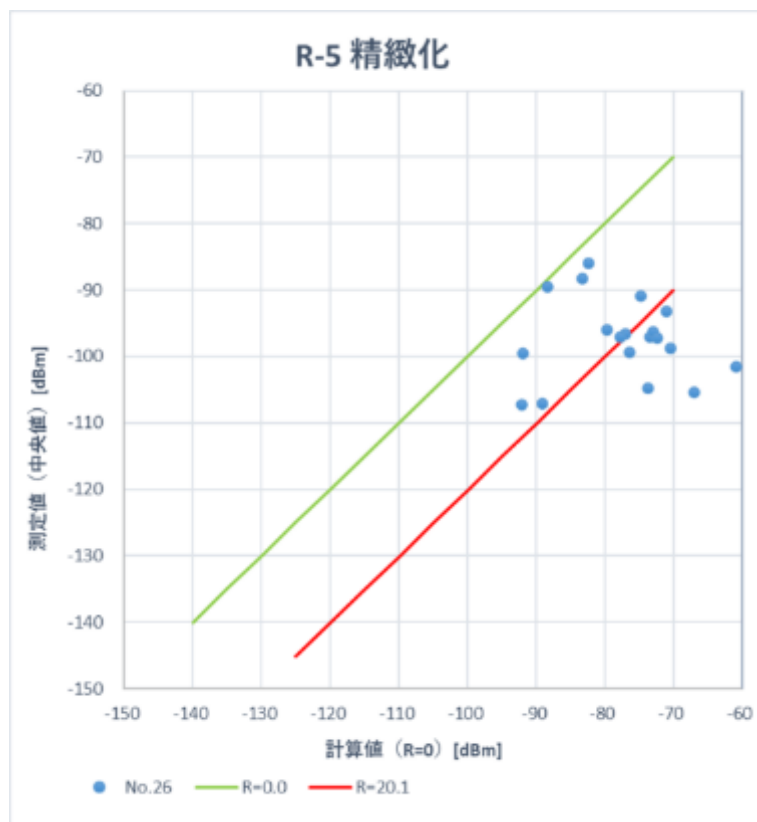


図 2-6 グループ R-5(壁面が簡素)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-5	精緻化
最適な推定値 [dB]	21.2
標準偏差	11.7

壁面が簡素という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 21.2dB と、審査基準で設定されている 20.1 と同等の値となった。これは、No.26 が窓などの開口部が多い環境と推定されたため、簡素な壁との仮説にも係わらず、主要な壁面は、コンクリート 70%、ガラス 30%という構成であり、結果として、このような壁面は一般的な壁面に分類されると考えられる。

g. グループ R-6

28GHz 帯を利用する壁面が一般的に分類される R-6 グループの実証結果をまとめたものを図 2-7 に示す。

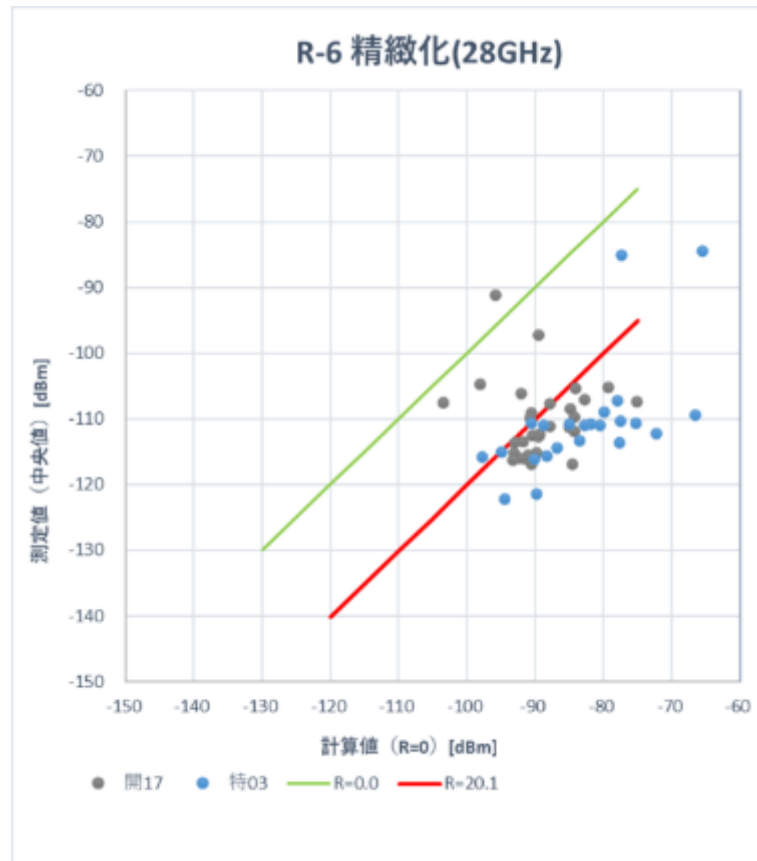


図 2-7 グループ R-6(壁面が一般的)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ R-6	精緻化
最適な推定値 [dB]	23.9
標準偏差	9.6

壁面が一般的という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 23.9dB と、審査基準で設定されている 20.1 と同等の値となった。開 17 は駅ホームの置局であり、半屋内とみなすのが適切と考えて、屋内設置の場合の算出によって評価した。

駅ホームを含めて、一般的な壁面においては、現在の審査基準値の 20.1dB 程度の減衰が見込める。

(5) Kの精緻化

1) パラメータKの精緻化の概要

審査基準では、地形情報データにより算入し難い地形の影響等の補正值であり、通常は0とし、地形水面の反射、小規模の見通し外伝搬の影響等を特に考慮する必要のある場合に使用することとなっている。算出式から、4.7GHz帯において基地局との距離が100m以上の場合にKによる補正が適用される。

電波伝搬ハンドブックによれば、丘陵地、山岳地(孤立山岳)、傾斜地形、陸海混合通路が特殊地形として補正することが記載されている(表 2-7)。

表 2-7 特殊地形

分類	条件に関する定量的な情報	説明図
丘陵地	地形起伏高 Δh Kh 丘陵地微細補正 Khf	
山岳地 (孤立山岳)	山岳の高さ h 基地局から山頂までの水平距離d1 山頂から端末までの水平距離d2	
傾斜地形	地形平均傾斜角 $\theta_m = (h_n - h_m) / d_n$ $\theta_m > 0$ 上り勾配 $\theta_m < 0$ 下り勾配	
陸海混合通路	水面の比率 $\beta = (ds1 + ds2) / d$	

2) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証のみならず令和3年度の実証結果も活用して検討を行う。令和3年度の実証を表 2-8 に、令和4年度の実証を表 2-9 に示す。

表 2-8 令和3年度パラメータ K の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
No.04	山林	斜面上に多数の樹木が生えている山林地域	上り傾斜 11.1 度:K=-1.2 下り傾斜 7.2 度:K=8.3	斜面
No.24	富士山 4,6 合目	山岳斜面で植生なし	上り傾斜 17.0 度:K=9.4、 上り傾斜 2.3 度:K=18.0 下り傾斜 8.0 度:K=12.3、 下り傾斜 9.0 度:K=10.2	斜面

表 2-9 令和4年度パラメータ K の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	着目点	備考
開 08	海に囲まれた離島	丘陵高台からの吹きおろし	斜面の影響	
特 01	河川の線状空間	伝搬経路中に河川(水面)を含む	水面の割合 水面と移動局の標高差	

3) パラメータ K の測定結果まとめと考察

a. グループ化

各実証環境における特徴的な地形に着目して、類似の地形環境によりグループ化を行い、それぞれのグループに対して、各実証の測定結果をまとめて評価することにより、K の精緻化を行った。

表 2-10 にグループ化の結果を示す。

表 2-10 K 精緻化のためのグループ

グループ	周波数帯	概要	実証
K-1	4.7GHz	斜面の影響	No.04、No.24 開 08
K-2	4.7GHz	水陸混合	特 01

精緻化は、各実証より提供された審査基準の算出式による計算値と対応する測定値の中央値から、最小二乗法により K として最適な推定値を求めた。

b. グループ K-1

4.7GHz 帯を利用する斜面の影響に分類される K-1 グループの実証結果をまとめたものを図 2-8 に示す。

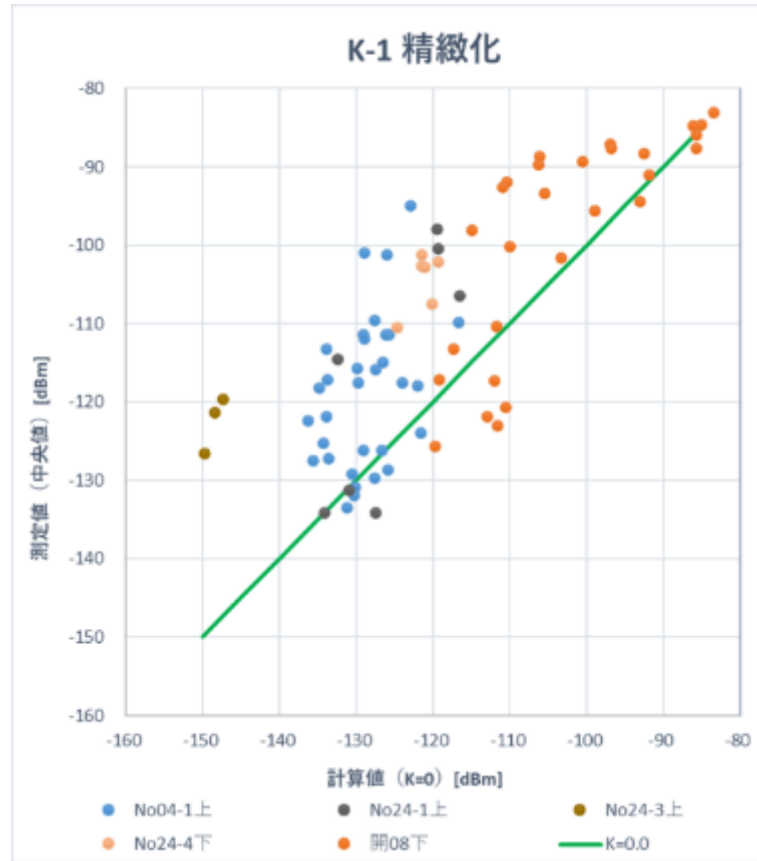


図 2-8 グループ K-1(斜面)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ K-1	精緻化
最適な推定値 [dB]	8.9
標準偏差	9.7

No.04-1、No.24-1、No.24-3 が上り、No.24-4、開 08 が下り斜面での測定結果である。図 2-8 に見られるように、下りと上りでは異なった補正值となることが予想されたが、異なった傾向は得られていない。

今回、上り勾配、下り勾配で補正の傾向に差がみられないことから、ローカル5Gにおいて斜面の影響をパラメータ K で補正する可能性については確証が得られなかった。

c. グループ K-2

4.7GHz 帯を利用する一部が水面の影響に分類される K-2 グループの実証結果をまとめたものを図 2-9 に示す。

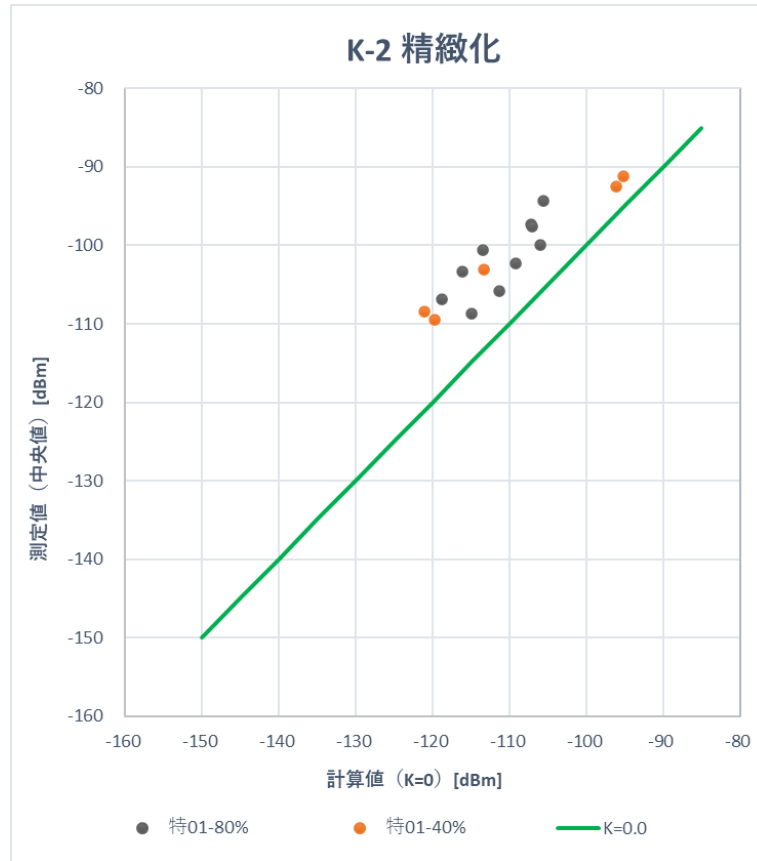


図 2-9 グループ K-2(一部が水面)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ K-2		精緻化
水陸混合 80%	最適な推定値 [dB]	9.3
	標準偏差	2.8
水陸混合 40%	最適な推定値 [dB]	8.1
	標準偏差	3.6

水陸混合の場合は、水面の比率で値を設定するのは難しいが、伝搬損失が少なくなる傾向があることが分かったため、水陸混合の場合には、正の値の K を設定できる可能性があることがわかった。しかしながら、その値については今後の課題である。

(6) S の精緻化

1) パラメータ S の精緻化の概要

審査基準では、パラメータ S は市街地、郊外地及び開放地に対する補正值であり、それぞれ適用する値が定められている。算出式から、4.7GHz 帯において基地局との距離が 100m 以上の場合に S による補正が適用される。

電波伝搬ハンドブックによれば、パラメータ S という地形、地物による分類が、市街地、郊外地及び開放地という非常に大雑把なものであり、分類の基準が明確ではないとされており、建物の密度(建物占有面積率)をパラメータとして、市街地から郊外地までを連続的にカバーし得る補正值が求められたとある。

表 2-11 にパラメータ S の現在の定義を示す。精緻化として、市街地と郊外地、郊外地と開放地、開放地以上の中間的な値についても検討する。

表 2-11 パラメータ S の定義

影響要因	条件	S [dB]
市街地	都市の中心部であって、2 階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など	0
郊外地	樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域	12.3
開放地	電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑地・田地・野原など	32.5

2) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証のみならず令和3年度の実証結果も活用して検討を行う。令和3年度の実証を表 2-12 に、令和4年度の実証を表 2-13 に示す。

表 2-12 令和3年度パラメータ S の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
No.01	ぶどう畑	圃場で樹木あり	01:39.1dB、02:28.6dB	
No.02	牛舎	牛舎周辺の農地	05:32.5dB、 06:32.5dB	
No.06	都市ガス工場	ガスタンク等による高反射環境	32.5dB	金属構造物の反射の影響
No.08	工場	住宅街	01:10.2dB、02:16.5dB	
No.10	空港エプロン	空港環境	LOS:自由空間、 NLOS:40dB、NLOS(建物):35dB	
No.17	交通	道路周辺の建造物/遮蔽物	12.3dB	
No.19	スマートシティ	キャンパス内の建造物/遮蔽物	12.3dB	
No.25	集合住宅	市街地の集合住宅	01:0dB、02:12.3dB	階ごとの建物占有面積率

表 2-13 令和4年度パラメータ S の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	着目点	備考
開 01	牧場	ほぼ平坦な屋外、開放地	仮説 S=32.5(開放地)	
開 02	フルーツパーク	ビニールハウスを有する圃場環境	樹木の存在する環境と開けた環境	
開 03	ゆず農園	中山間地域の急傾斜地と平坦地	急傾斜地(開放地)と平坦地(郊外地)	
開 08	海に囲まれた離島	プラント工場の建物や入り組んだ構造物、配管等の影響	仮説 S=0 (市街地)	
開 09	発電所の広大な敷地	見通しの良い環境	仮説 S=32.5(開放地)	
開 10	空港エプロン	空港特有の環境	空港環境に適切なS値	過去実証 S>32.5
開 11	コンテナヤード	コンテナ、クレーン等様々な電波伝搬の妨害物が存在する環境	コンテナの積載状況の変化による影響	0<S<12.3
開 15	ダム堤体	エリア端では山体反射や丘陵・樹木の影響の可能性	谷筋に沿った道路は「開放地」、それ以外は「郊外地」に近い値	12.3<S<32.5
開 16	河川域	河川に直交する方向へのエリア展開	住宅地で郊外地に近い	
開 17	公共施設の駐車場	畑地・田地・野原エリア、近隣に建物が存在	仮説 S=12.3(郊外地)	
特 01	河川の線状空間	河川方向(線状)、堤内地、堤外地で異なる電波伝搬環境	線状-非線状で異なる S 値、河川の環境(樹木が密集)の S 値	
特 02	首都高速	道路直線区間、道路及び河川敷、道路外	開放地、郊外地	直線部は自由空間
特 04	鉄道線路	線路内と線路外で市街地と開放地が入り混じる特殊な環境	直線、曲線の線路内外の S 値	方向により 0 または 32.5

3) パラメータ S の測定結果まとめと考察

a. グループ化

各実証環境におけるパラメータ S の仮説に着目して、グループ化を行い、それぞれのグループに対して、各実証の測定結果をまとめて評価することにより、S の精緻化を行った。

表 2-14 にグループ化の結果を示す。

表 2-14 S 精緻化のためのグループ

グループ	周波数帯	概要	実証
S-1	4.7GHz	S=0 (市街地)	No.25 開 08、特 04-1
S-2	4.7GHz	0<S<12.3	開 11
S-3	4.7GHz	S=12.3 (郊外地)	No.08、No.17、No.19、No.25 開 02-1、開 03-1、開 15-1、開 16、開 17、特 01-1、特 02-1
S-4	4.7GHz	12.3<S<32.5	開 15-2
S-5	4.7GHz	S=32.5 (開放地)	No.01、No.02、No.06 開 01、開 03-2、開 09、特 01-2、特 02-2、特 04-2
S-6	4.7GHz	S>32.5	No.10、No.12、No.16 開 02-2、開 10、特 02-3

精緻化は、各実証より提供された審査基準の算出式による計算値と対応する測定値の中央値から、最小二乗法により S として最適な推定値を求めた。

b. グループ S-1

4.7GHz 帯を利用する市街地に分類される S-1 グループの実証結果をまとめたものを図 2-10 に示す。

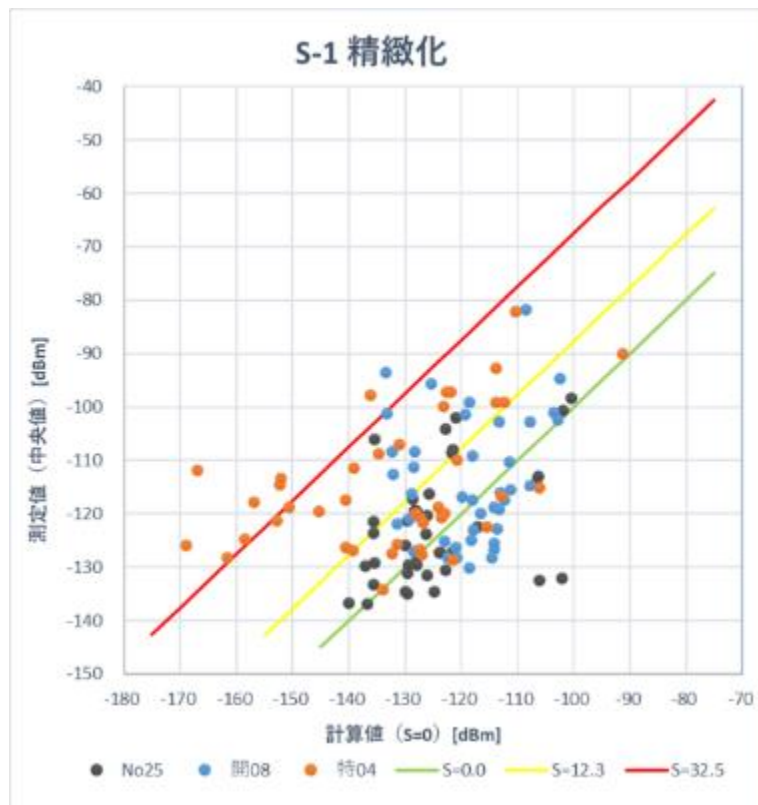


図 2-10 グループ S-1(市街地)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-1	精緻化
最適な推定値 [dB]	8.1
標準偏差	15.1

市街地という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 8.1dB となった。特 04 に開放地より減衰の小さな場合が多いことに起因すると考えられる。全体としては市街地を適用することが可能と思われる。

c. グループ S-2

4.7GHz 帯を利用する市街地と郊外地の中間に分類される S-2 グループの実証結果をまとめたものを図 2-11 に示す。

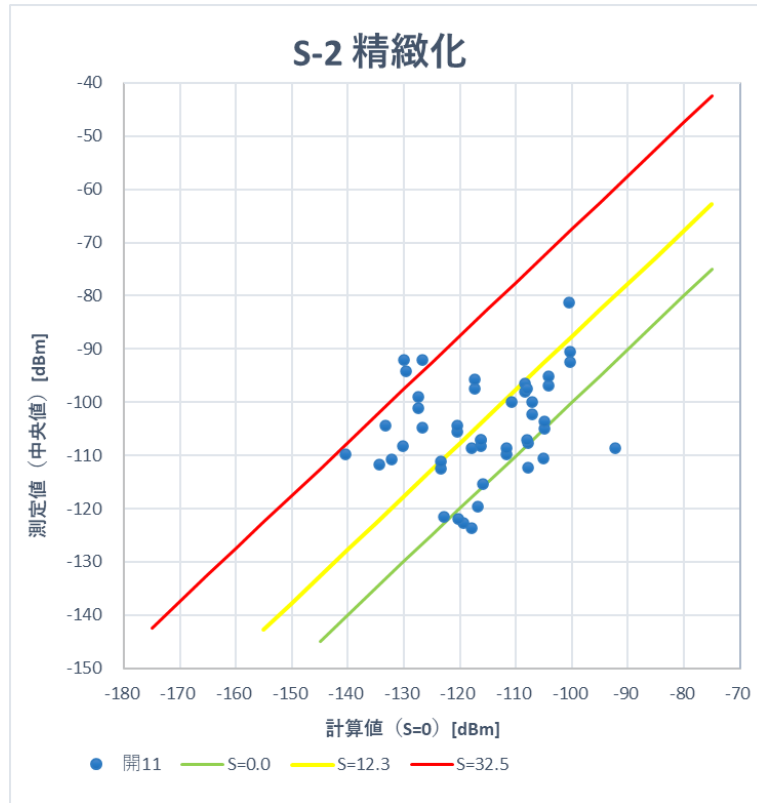


図 2-11 グループ S-2(市街地と郊外地の中間)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-2	精緻化
最適な推定値 [dB]	11.0
標準偏差	12.1

市街地と郊外地の中間という分類でとりまとめて評価した場合には、推定値は 11.0dB となった。中間の値が想定されたものの、郊外地を適用することが可能と思われる。

d. グループ S-3

4.7GHz 帯を利用する郊外地に分類される S-3 グループの実証結果をまとめたものを図 2-12 に示す。

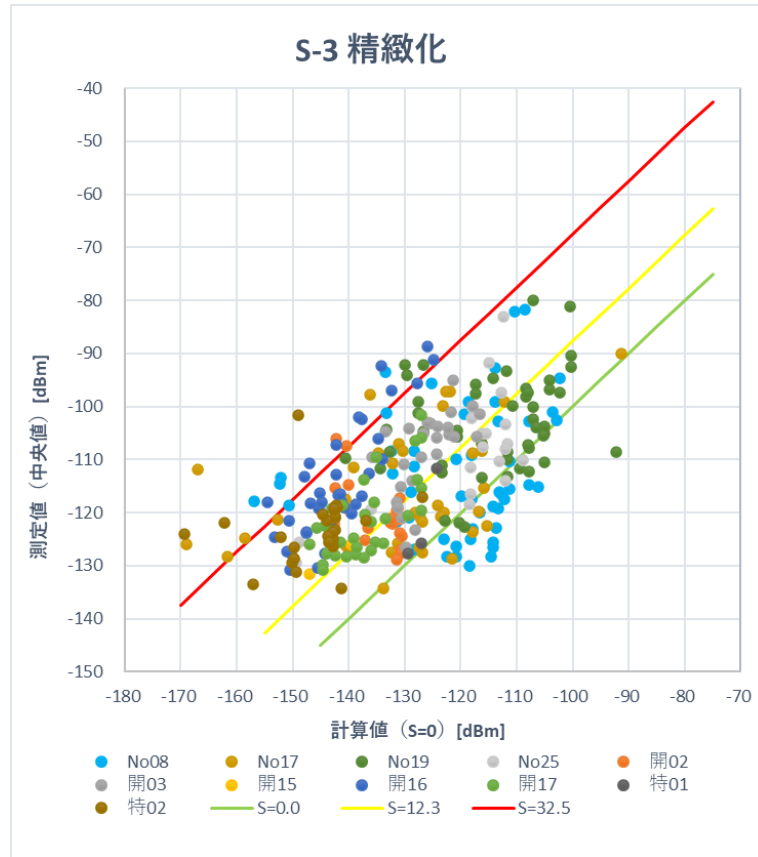


図 2-12 グループ S-3(郊外地)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-3	精緻化
最適な推定値 [dB]	16.2
標準偏差	10.1

郊外地という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 16.2dB となった。郊外地を適用することが可能と思われる。

e. グループ S-4

4.7GHz 帯を利用する郊外地と開放地の中間に分類される S-4 グループの実証結果をまとめたものを図 2-13 に示す。

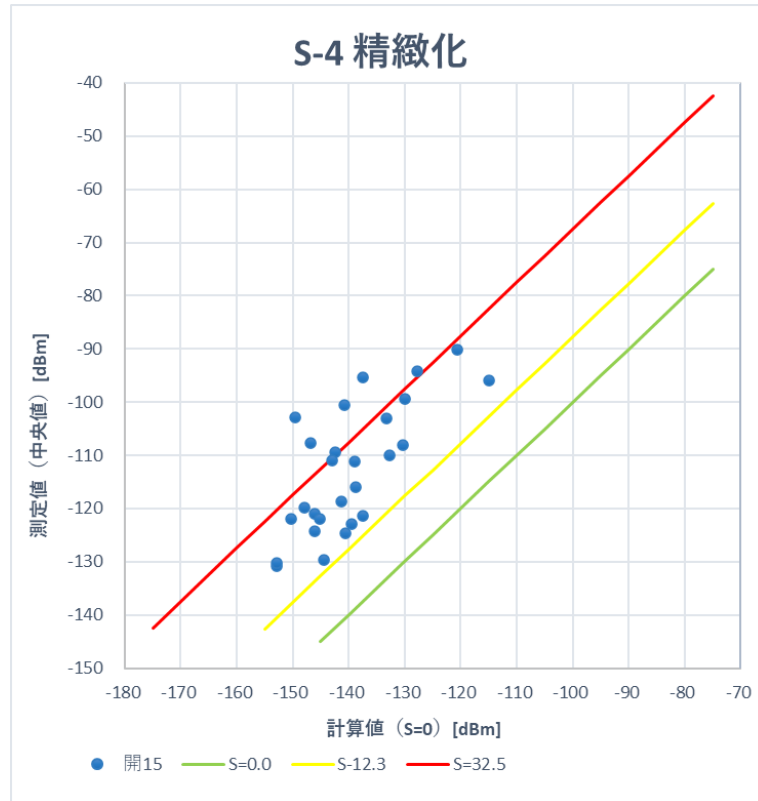


図 2-13 グループ S-4(郊外地と開放地の中間)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-4	精緻化
最適な推定値 [dB]	27.2
標準偏差	8.1

郊外地と開放地の中間という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 27.2dB となった。郊外地と開放地の中間的な値となったが、開放地に近い値も出現することから、開放地として推定することが可能と思われる。

f. グループ S-5

4.7GHz 帯を利用する開放地に分類される S-5 グループの実証結果をまとめたものを図 2-14 に示す。

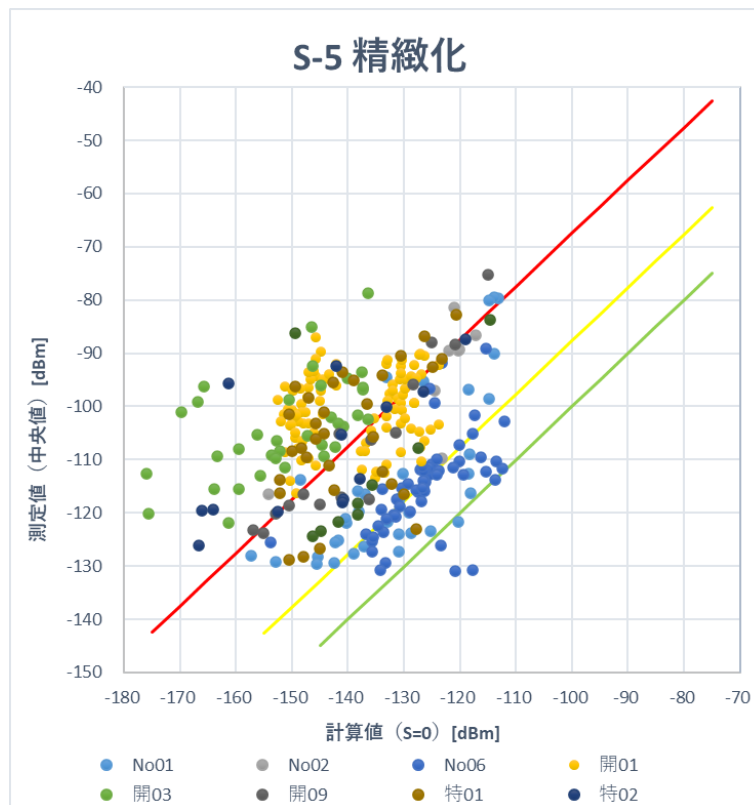


図 2-14 グループ S-5(開放地)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-5	精緻化
最適な推定値 [dB]	36.4
標準偏差	11.7

開放地という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 36.4dB となった。開放地を適用することが可能と思われる。

g. グループ S-6

4.7GHz 帯を利用する開放地より伝搬損失の少ない場合に分類される S-6 グループの実証結果をまとめたものを図 2-15 に示す。

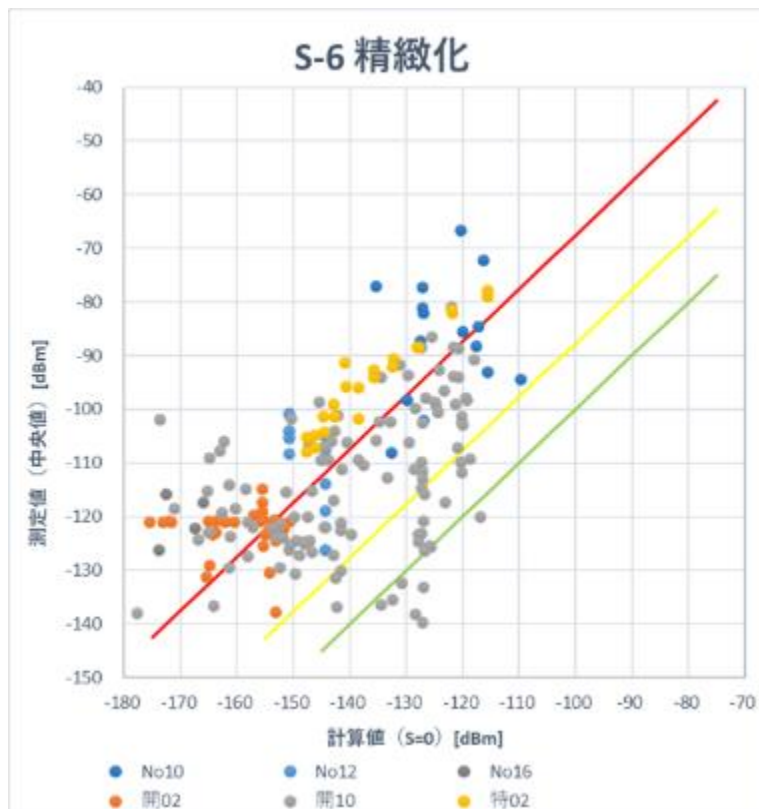


図 2-15 グループ S-6(開放地を超える)の測定結果

このデータより以下が得られた。

グループ S-6	精緻化
最適な推定値 [dB]	32.1
標準偏差	20.3

開放地より伝搬損失の少ない場合という分類でとりまとめて評価した場合においては、推定値は 32.1dB となった。開放地を中心として分布しているため、開放地として推定することが可能と思われる。

h. パラメータ精緻化のまとめ

電波法関係審査基準の算出式によって計算されるカバーエリア、調整対象区域について、現在の算出法の簡便さは維持しつつ、現実の利用環境に近いモデルとすることを目的として、算出式の精緻化を行った。

本報告では、4.7GHz 帯の算出式には、R、K、S という補正項が、28GHz 帯の算出式には、R という補正項含まれており、現実の利用環境を数種類の環境にグループ化し、グループ化された利用環境を代表する値を検討した。その結果、各パラメータについて以下のことが言える。

パラメータ R

- 概ね現在のパラメータ(4.7GHz 帯:16.2dB、28GHz 帯:20.1dB)の適用による算出でよい
- 開口部が少ないなど堅牢な建物の場合には、建物種別として Thermally efficient(期待値 50%、4.7GHz 帯:31.4dB、28GHz 帯:41.5dB)が適している可能性がある
- 複数の壁面を透過する場合、2 層を代表値として既存のパラメータ(4.7GHz 帯:16.2dB)の2 倍の値(32.4dB)が適している可能性がある

パラメータ K

- 一部水面では、水面割合をパラメータとした推定までは困難であったが、水面が一定の割合で存在する場合には、正の値のパラメータを設定できる可能性がある

パラメータ S

- 現在のパラメータの適用でエリア算出は可能であるが、基地局からの方向により環境が異なる場合は、方向毎に異なるパラメータを適用できる可能性がある

2.1.3 エリア算出式の推定

(1) 分散アンテナシステムの利用

遮蔽物による不感地帯の改善方法として、基地局をむやみに増設することなく対処可能な方法の一つである分散アンテナシステム(DAS)を利用することが考えられる。

ローカル 5G においては、DAS に関する審査基準のエリア算出方法が規定されていないため、検討を行った。

1) 仮説

図 2-16 に DAS 構成の場合に想定されるエリアのイメージを示す。DAS の各アンテナからは同一の信号が送信されるため、複数のアンテナのエリアが重なっている場合には、電力が合成されることが考えられる。

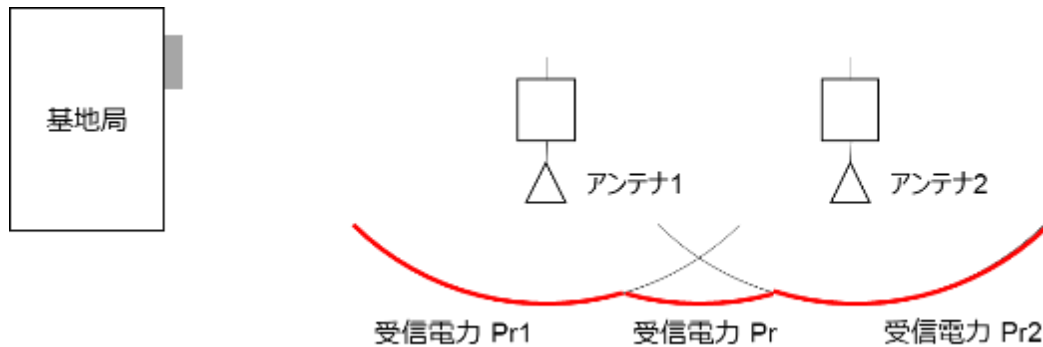


図 2-16 DAS のイメージ図

受信電力 Pr は、次式により求められると仮定した。

$$Pr = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{(Pr(i)/10)} \right)$$

$Pr(i)$ は、審査基準のエリア算出式により算出される値である。4.7GHz 帯の場合には、以下により算出する。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - Lb$$

Pr [dBm]: 受信レベル(受信電力)

Pt [dBm]: 送信電力(基地局の空中線電力)

Gt [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]: 自由空間伝搬損失式及び拡張秦式を基礎として算出

Lb [dB]: 審査基準では 8。実証においては、測定時に人体の影響がない場合は 0。

2) 測定および精緻化の方法

実証事業者に対し、以下の方法で受信電力を測定することを依頼した。

- 受信電力として、SS-RSRP を測定する。
- 定在波の影響を避けるため、測定点ごとに、 10λ (λ は波長)の範囲で測定位置を動かしながら (あるいは 10λ の範囲で複数の位置を定めて)測定を実施し、すべてのサンプル(トータル 1000 サンプル)を統計処理する。
- 測定周期は任意。
- 1000 サンプルの中央値を代表値として採用。ただし、平均、標準偏差、上位 10%値、下位 10%も算出する。
- 測定周期は任意。
- 測定機のアンテナが指向性を持つ場合、あるいは実際の利用において端末のアンテナが指向性をもつ場合は、それを考慮した測定(アンテナの水平・垂直方向の角度を変化させた測定)を行う。

a. 実証事業者の提供データ

測定点情報の提供を依頼したデータフォーマットを表 2-15 に示す。

表 2-15 提供データフォーマット(測定点情報)

測定点 ID	DAS ID	アンテナとの3D距離 [m]	アンテナとの水平距離 [m]	DASアンテナ地点標高 [m]	DASアンテナ地上高 [m]	DAS送信電力Pt [dBm]	DAS送信アンテナ利得 Gt [dBi]	DAS給電線損失 Lf [dB]	受信アンテナ利得 Gr [dBi]	受信給電線損失 Lr [dB]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)	DASアンテナ-端末 (0:LOS 1:NLOS)	測定日 (yyyy/mm/dd)	測定点環境	特殊環境	備考
1	1	200.4	200.0	1.0	15.0	30.0	7.0	2.0	0.0	1.0	1.5	1.5	0	0	2022/12/10	屋外 (市街地)		積雪 1.0m
	2	210.4	210.0	1.0	15.0	30.0	5.0	2.0	0.0	1.0	1.5	1.5	0	0	2022/12/10		積雪 1.0m	
2	1	100.8	100.0	1.0	15.0	30.0	5.0	2.0	0.0	1.0	1.5	1.5	0	0	2022/12/10	屋外 (市街地)		積雪 1.0m
	2	120.7	120.0	1.0	15.0	30.0	7.0	2.0	0.0	1.0	1.5	1.5	0	0	2022/12/10		積雪 1.0m	
3	1	0.0																
	2	0.0																

また、受信電力測定結果の提供を依頼したデータフォーマットを表 2-16 に示す。

表 2-16 提供データフォーマット(受信電力測定結果)

測定点 ID	DAS ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値 [dBm]					測定日(yyyy/mm/dd)	測定点環境	特殊環境	備考	中心周波数 [GHz]	4.85
			中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値						
1	1	-100.6	-92.0	-92.0	0.4	-92.0	-93.0	2022/12/10	屋外 (市街地)			精緻化対象パラメータ	K
	2	-96.5	-89.0	-89.0	0.6	-88.0	-90.0	2022/12/10		B列算出式で使用了K	0.0		
2	1	-97.3	-92.0	-92.0	0.7	-91.0	-93.0	2022/12/10	屋外 (市街地)			B列算出式で使用了S	12.3
	2	-100.6	-94.0	-94.0	0.5	-93.0	-94.0	2022/12/10		B列算出式で使用了R	0.0		
3	1								屋外 (市街地)			B列算出式で使用了人体吸収損失	0.0
	2												
...													

b. 評価方法

測定点情報から、DAS を構成する各アンテナの測定点 i における受信電力 $P_{\text{rpred.}}(i)$ [dBm] を審査基準の算出式により求める。複数の測定点 i で DAS を構成するすべてのアンテナを送信状態としたときの受信電力 $P_{\text{rmes.}}(i)$ [dBm] を測定する。測定は、特異値を除くため、適切な測定方法・測定サンプル数の測定を行い、結果を統計的に処理する。統計値は基本的には中央値を採用するが、必要に応じて、平均値、標準偏差、上位 10%、下位 10%値も使用し、ばらつきに対するマージンについても検討する。

標準偏差を求め、 $P_{\text{rpred.}}$ と $P_{\text{rmes.}}$ の相関により、仮説を評価する。

3) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証を活用して検討を行う。対象となる実証を表 2-17 に示す。

表 2-17 令和4年度 DAS の実証

実証 No	実証場所	設置概況	着目点	備考
開 01	牧場	4アンテナで放牧地をカバー	ほぼ見通し環境	
開 18	病院	3アンテナでフロア全体をカバー	測定点に至るまでの壁面などが複雑	屋内で測定
開 19	病院	2または3アンテナで各フロアをカバー	測定点に至るまでの壁面などが複雑	屋内で測定

(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

なお、開18、開19に関しては、屋内に基地局を設置した場合の屋内の受信電力を測定したものであり、屋外への漏洩ではないため、本調査では参考とすることとした。

4) 実証結果

開01の結果を図 2-17 に示す。この図は、測定が行われたポイントにおける審査基準の算出式による計算値を加算した電力を横軸に、その測定ポイントにおけるすべてのアンテナから送信された場合の測定値を縦軸としてプロットしたものである。

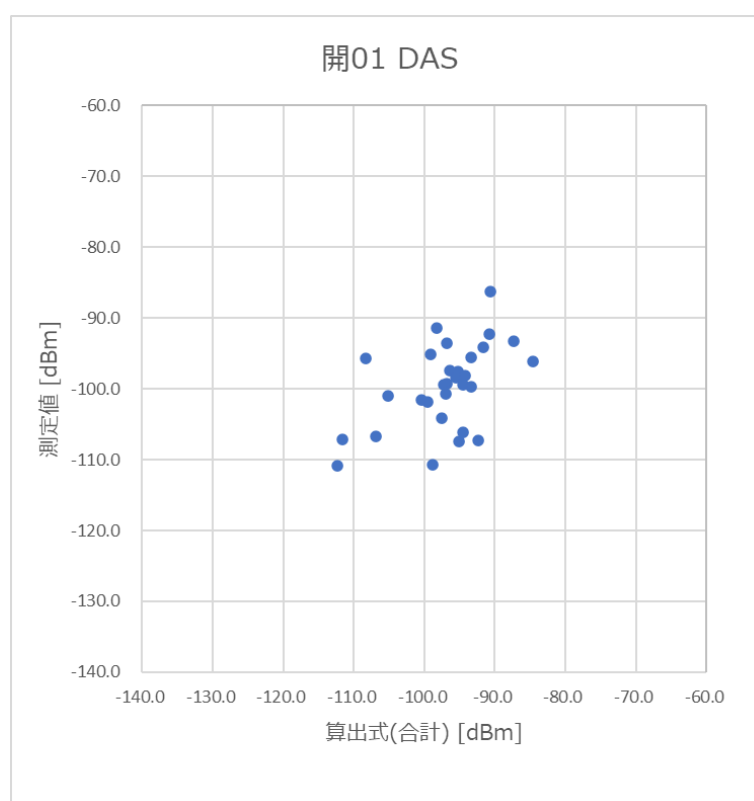


図 2-17 DAS の測定結果

このデータより以下が得られた。標準偏差は 6.6dB となった。計算値と測定の相関があるため、電力を合計したエリア算出は有効と考えられる。ただし、一つの実証からの結果であるため、他の実験などに

よる検証が必要である。

次に参考として屋内の場合について評価を行う。図 2-18 に DAS を屋内に設定した場合の結果を示す。標準偏差は、開18が 17.1、開 19 が 23.1 であり、ばらつきが大きい結果となった。

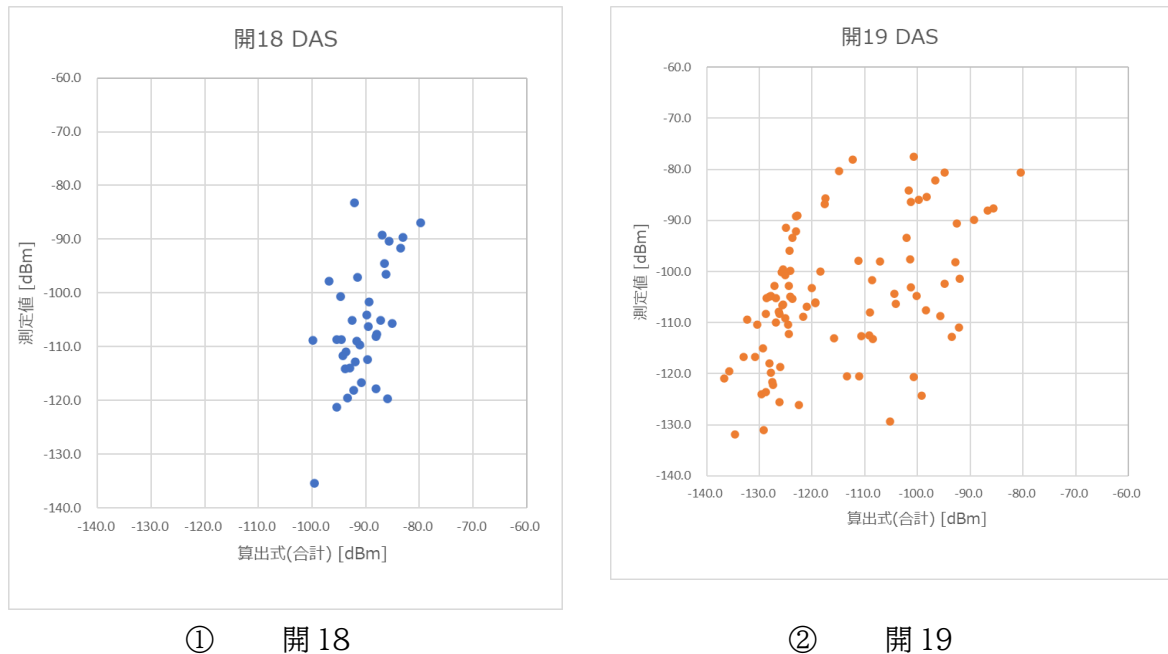


図 2-18 屋内 DAS の測定結果

2.1.4 その他

(1) 上下階の電波伝搬

1) 概要

現在は、同一建物内の異なるフロアで、異なる免許人がローカル5G を運用することは想定されていないが、実証によりデータが取得できたため、今後の参考として、データを評価した。

評価方法については、厳密に言えば、審査基準の算出式のパラメータRではないが、Rと同等の評価手法が適用できるものとした。以降このパラメータ R' と表記する。

2) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証のみならず令和3年度の実証結果も活用して検討を行う。令和3年度の実証を表 2-4 に、令和4年度の実証を表 2-5 に示す。

表 2-18 令和3年度パラメータ R' の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
No.14	地下駅ホーム	駅ホーム下→ホーム上→上層階	41.1dB	

(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

3) 実証結果

No.14 の実証結果を図 2-19 に示す。

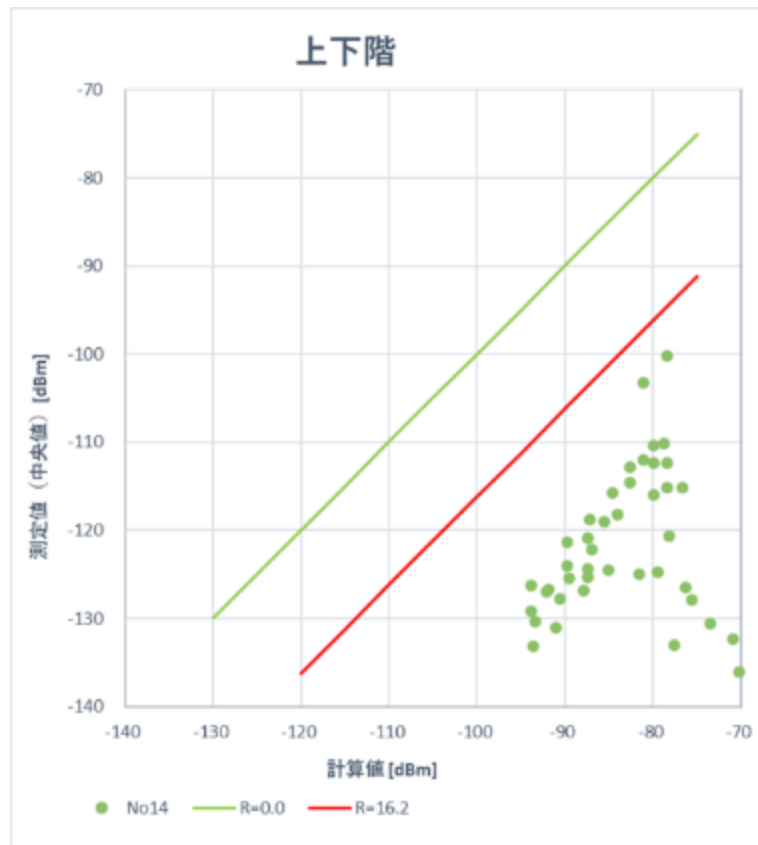


図 2-19 上下階の測定結果(4.7GHz 帯)

このデータより以下が得られた。

上下階(R')	精緻化
最適な推定値 [dB]	38.0
標準偏差	9.2

上下フロアの電波の透過損は大きく、上下に通ずる開口部の付近を除けば、上下階の透過はほぼ無視できる可能性がある。

(2) 水面の伝搬

1) 概要

現在は、ローカル5G の海上利用は認められていないが、実証によりデータが取得できたため、データを評価した。

評価方法は、受信電力の測定から求められた伝搬損失の距離特性を求め、自由空間伝搬損失と比較した。

伝搬損失 L は以下により算出した。

$$L = Pt + Gt - Lf - Pr + Gr - Lb$$

Pt[dBm]: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

Pr[dBm]:受信レベル(受信電力)

Gr[dBi]:受信アンテナ利得

Lb[dB]:審査基準では 8。実証においては、測定時に人体の影響がない場合は 0。

2) 対象となる実証案件

本報告においては、令和4年度の実証のみならず令和3年度の実証結果も活用して検討を行う。令和3年度の実証を表 2-4 に、令和4年度の実証を表 2-5 に示す。

表 2-19 令和3年度水面の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
No.11	港湾	ほぼ水面	K=秦式伝搬損失@Db - 自由空間伝搬損失@Db Db=4ht・hr/λ	Kによる補正を目標とした

(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

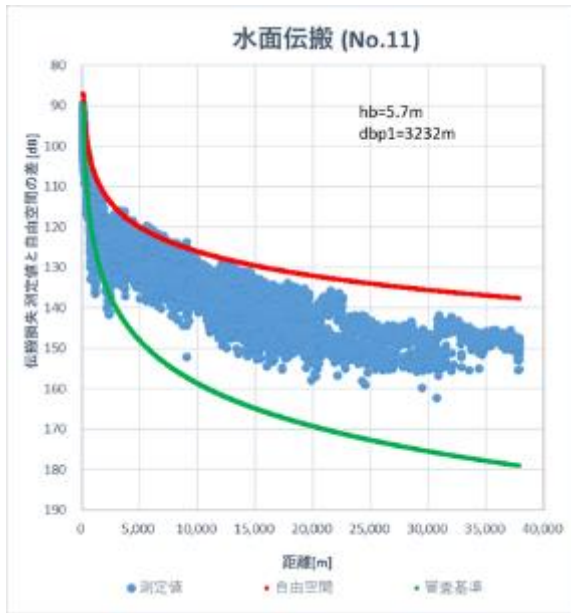
表 2-20 令和4年度パラメータ R' の実証

実証 No	実証場所	伝搬路概況	令和 3 年度結果	備考
開 05	湾内	ほぼ水面	自由空間電波伝搬で推定。遠距離は2波モデル	

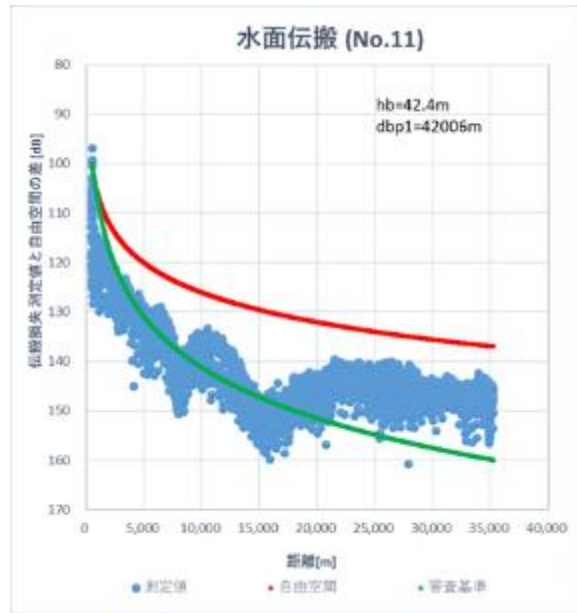
(注)特に記載が無い場合の実証周波数は 4.7GHz 帯である。

3) 実証結果

No.11 の実証結果を図 2-20 に、開 05 の結果を図 2-21 に示す。

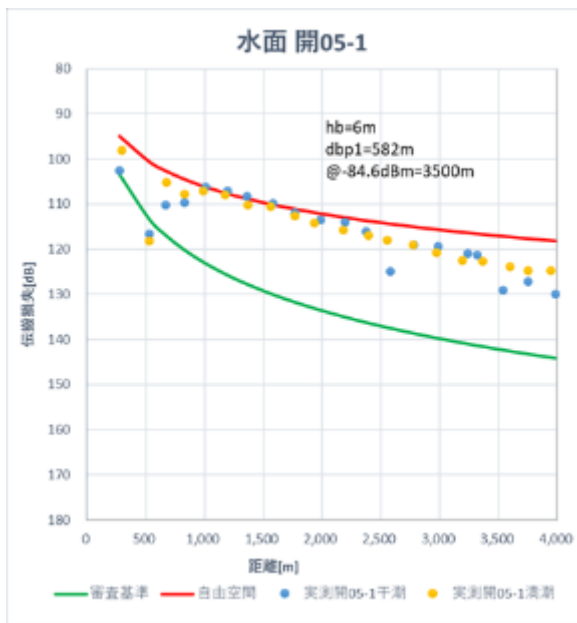


(a) 低アンテナ

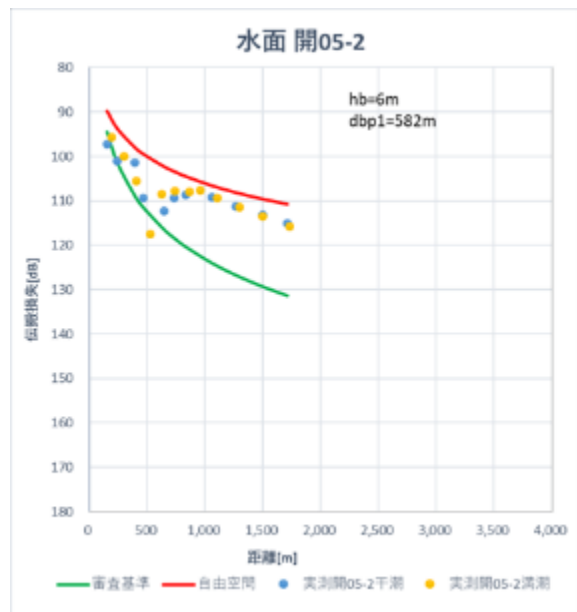


(b) 高アンテナ

図 2-20 No.11 の測定結果



(a) コース1



(b) コース2

図 2-21 開 05 の測定結果

2つの実証によって、水面の電波伝搬は2波モデルに近い算出式で算出可能と考えられる。

2.1.5 電波伝搬モデルの精緻化に関するまとめ

電波伝搬モデルの精緻化の実証及び取りまとめの結果から、エリア算出法の改定の方方向性を以下の通り提案する。

(1) 堅牢な建物に適用可能な R の設定【4.7GHz 帯】

発電所やデータセンターなど窓等の開口部が少なくかつ堅牢な壁面の建物内に基地局を設置する場合、現在のエリア算出式に定める 16.2dB より大きな建物侵入損となった 4.7GHz 帯の実証が複数報告された。具体的な値については、勧告 ITU-R P.2109 の Thermally-efficient の場合の建物侵入損の期待値 50%の値である 31.4dB 程度の減衰が見込める可能性が示唆されている。

現在のエリア算出法において 4.7GHz 帯の R は以下のように定義されており、実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用することが認められている。他方で、「実際の建物侵入損が明確な場合」が具体的にどのような場合かは明記されていない。

4. 7GHz帯の場合¹

R(dB); 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損(16.2)。実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。

以上を踏まえ、窓等の開口部が少なくかつ堅牢な壁面の建物内に基地局を設置する場合には、R として 31.4dB を適用してもよいことを明記するように改訂することを提案する。

(2) 複層構造の建物に適用可能な R の設定【4.7GHz 帯】

スタジアムや体育館、病院などの複層構造の建物内に基地局を設置する場合、現在のエリア算出式に定める 16.2dB より大きな建物侵入損となった 4.7GHz 帯の実証が複数報告された。具体的な値については、複層構造の代表として 2 層構造、すなわち現在の審査基準値 16.2dB の 2 倍の 32.4dB 程度の減衰が見込める可能性が示唆されている。

再掲にはなるが、現在のエリア算出法において 4.7GHz 帯の R は以下のように定義されており、実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用することが認められている。他方で、「実際の建物侵入損が明確な場合」が具体的にどのような場合かは明記されていない。

4. 7GHz帯の場合²

R(dB); 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損(16.2)。実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。

以上を踏まえ、基地局から屋外までに複数の壁面、空間を透過する屋内環境に基地局を設置する場合には、Rとして 32.4dB を適用してもよいことを明記するように改訂することを提案する。

¹ <https://go5g.go.jp/sitemanager/wp-content/uploads/2021/06/%E9%9B%BB%E6%B3%A2%E6%B3%95%E9%96%A2%E4%BF%82%E5%AF%A9%E6%9F%BB%E5%9F%BA%E6%BA%96%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%83%AB%EF%BC%95%E9%83%A8%E5%88%86%EF%BC%9C%E6%8A%9C%E7%B2%8B%EF%BC%9E.pdf>

² 同上

(3) 垂直方向の干渉調整に関する規定の追加

同一の建物であっても、上下階の電波の透過損は大きく、上下に通ずる開口部の付近を除けば、透過はほぼ無視できることが地下鉄駅ホームでの実証から示唆されている。現在のエリア算出法においては、水平方向でカバーエリア、調整対象区域を描画することになっており、同一の建物の上下階で異なる免許人がローカル 5G システムを運用する際には必ずカバーエリアが重複することとなる。しかし、実際には上下階の電波の透過は無視できるほど小さい可能性があることから、垂直方向の干渉調整について記載を追記するように改訂することを提案する。

(4) 海上等水面を主なエリアとする場合の 2 波モデルの適用【4.7GHz 帯】

海岸から海上に向けて電波を発射する場合など、伝搬路の大部分が水面になる場合には、2 波モデルにより精緻なエリア算出ができることが複数の 4.7GHz 帯の実証より示唆された。しかし、現在のエリア算出法は自由空間伝搬損失式及び拡張秦式を基礎としているため、2 波モデルによるカバーエリア、調整対象区域の算出は認められない。以上のことから、海上等伝搬路の大部分が水面になる場合には 2 波モデルによる算出も認めるように改訂することを提案する。

(5) 分散アンテナシステムにおける電力計算値の合成

DAS 構成の場合に想定されるエリアのイメージを再掲する。DAS の各アンテナからは同一の信号が送信されるため、複数のアンテナのエリアが重なっている場合には、電力が合成されることが考えられる。

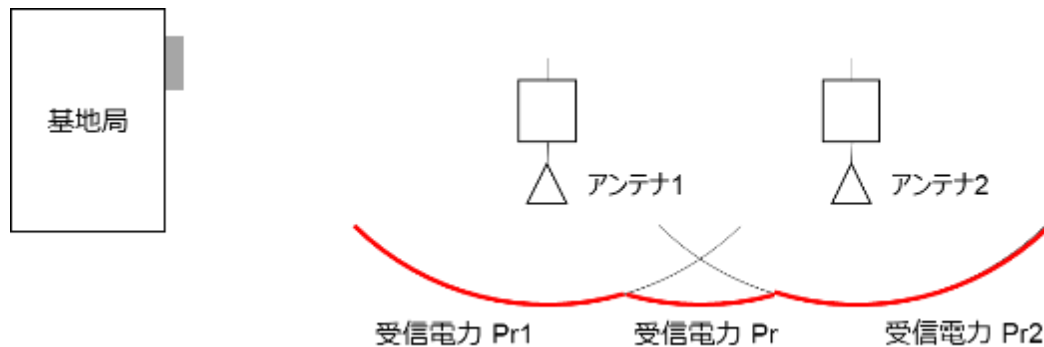


図 2-22 DAS のイメージ図(再掲)

受信電力 Pr は、次式により求められると仮定した。

$$Pr = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{(Pr(i)/10)} \right)$$

Pr(i)は、審査基準のエリア算出式により算出される値である。4.7GHz 帯の場合には、以下により算出する。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - Lb$$

Pr[dBm]: 受信レベル(受信電力)

Pt[dBm]: 送信電力(基地局の空中線電力)

Gt[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]:自由空間伝搬損失式及び拡張秦式を基礎として算出

Lb[dB]:審査基準では 8。実証においては、測定時に人体の影響がない場合は 0。

複数の実証の結果を確認した結果、複数のアンテナ同士の見通しが取れている環境においては上記の仮定通りのエリア形成となっていることが示唆された。現在のエリア算出式においては DAS 構成の場合の算出法が定義されていないことから、DAS のアンテナ同士が見通しの場合には、各アンテナの電力を合成してカバーエリア、調整対象区域を描画するように改訂することを提案する。

2.2 エリア構築の柔軟性向上

2.2.1 エリア設計概要

(1) エリア設計の重要性

ローカル5G システムを導入するにあたり、自システムの電波がどこまでエリアをカバーしているか、業務を行う区域内の通信品質を確保できるか、他者土地へ電波が伝搬し規定の電波漏洩の基準を超えていないか事前に把握することが重要である。また、免許申請上においてもエリア設計に関する資料を作成する必要がある。以下にエリア設計の目的と実施内容につき記載する。

表 2-21 エリア設計の目的及び実施内容

目的	実施内容
1)業務区域の確保と十分な電波の確保	・業務区域の広さをどこまでカバーできるか確認する。 ・業務区域における電波の受信電力値を確認しサービスレベルの確保を図る。
2)他者土地への電波漏洩の防止	・設置する無線設備からの電波が他者土地へ漏洩しないようにエリア端、調整対象区域端を確認する。 ・エリア設計にて電波が他者土地へ漏洩する場合、無線設備の送信電力を下げる、アンテナ高を下げる、アンテナチルト角を調整するなど方策を織り込み設計を見直す。
3)ローカル5Gの免許申請	次に掲げる事項が地図上に記された資料が必要 ・自己土地の範囲・基地局の設置場所・カバーエリア・調整対象区域・業務区域 これら自己土地の範囲等のイメージ図を次ページに示す。

(2) 電波伝搬計算式

電波伝搬(電波がどこまで到達するか)に関しては、一般的には電波の輻射電力が大きい場合遠くまで到達し、輻射電力が小さい場合到達距離は短くなる。

しかしながら基地局と移動局(端末)間の伝搬環境も大きく影響を及ぼす。

例えば基地局と移動局間が見通しの良い環境(LOS : Line of Sight)では電波伝搬の阻害要因が少ないため受信電力への影響も少ない。

基地局と移動局間に建物や樹木が存在する場合、見通しの悪い環境(NLOS : Non-Line of Sight)にてこれらの電波伝搬阻害要因にて受信電力が弱くなり通信品質の劣化をもたらす。また NLOS 環境においてはこれらの阻害要因により伝搬経路がたくさん分かれマルチパス伝搬になる。マル

チパス伝搬により受信電力が低下するだけでなくドップラーシフトのぼらつきによる周波数特性の変化が発生する。

エリア設計を行う場合、基地局から電波がどこまで到達するか把握する必要があるため、電波伝搬区間における損失(Loss)を算出する。

以下に代表的な算出式を紹介する。

1. 自由空間損失計算:パラメータとして基地局と移動局間の距離と周波数のみにて算出
2. 拡張秦式:パラメータとして環境(市街地、郊外地、開放地)、基地局及び移動局のアンテナ高、基地局と移動局間の距離にて算出
3. ITU-R P.1411:屋外で見通し外の場合、見通せる場合、屋内の場合にて算出

ローカル 5G のカバーエリア及び調整対象区域の算出式は、上記3つの算出式及び補正值により電波伝搬損失の計算を行う。4.6GHz から 4.9GHz までの周波数においては上記 1.自由空間損失式及び 2.拡張秦式を基礎として補正值を加えて算出する。28.2GHz から 29.1GHz までの周波数においては上記 3. ITU-R P.1411 を基礎として補正值を加えて算出する。

1) 自由空間損失計算

- ・距離と周波数の簡単な伝搬損失計算式である。
 - ・電波法審査基準の固定局別図第 13 号に詳細の記載あり。
- <概要>
- ・フリスの伝達公式が基本式になる。
 - ・自由空間の空中線から電力(P)放射されると、半径(D)の球面上には均等に分布される。

$$PD = P / (4\pi D^2)$$

1. PD:自由空間の電力密度
2. P:輻射電力
3. D: 距離
4. $4\pi D^2$:半径 D の球の表面積

- ・自由空間の損失(Lo)を書き換えると下記のようなになる。

$$Lo(\text{dB}) = 10\log(4\pi D/\lambda)^2$$

$$Lo(\text{dB}) = 20\log(4\pi D/\lambda)$$

$$Lo(\text{dB}) = 20\log(4\pi \times D/300/F)$$

1. F:周波数(MHz)
2. D:区間距離(m)

- ・上記式を開くと下記のようなになる。

$$Lo(\text{dB}) = 32.5 + 20\log(F) + 20\log(D)$$

1. F:周波数(MHz)
2. D:区間距離(Km)

2) 拡張秦式(伝搬損失推定式)

- ・ローカル 5G においては 4.7GHz 帯のベースになる伝搬損失計算方法である。
- ・パラメータとして環境(市街地、郊外地、開放地)、送受信間距離 d(km)、周波数 f(MHz)、基地局高 Hb(m)、移動局高 Hm(m)を用いて伝送損失 L を算出する。

・見通しの有無は計算式に含まれない。

<概要>

・ $d \leq 0.04 \text{ Km}$ の場合

$$L = L_0$$

$$L(\text{dB}) = 32.4 + 20 \log(f) + 10 \log(d^2 + (H_b - H_m)^2 / 10^6)$$

* 本式は自由空間における伝送損失式と等価である。

1. L: 伝送損失(dB)
2. f: 周波数(MHz)
3. H_b : 基地局空中線の実効高(m)
4. H_m : 移動局空中線高(m)
5. d: 通信区域の半径(通達距離)(Km)

・ $0.04 \text{ km} < d < 0.1 \text{ km}$ の場合

$$L(\text{dB}) = L_0 + \{2.51 \times \log(d) + 3.51\} \times \{L_H - L_0\}$$

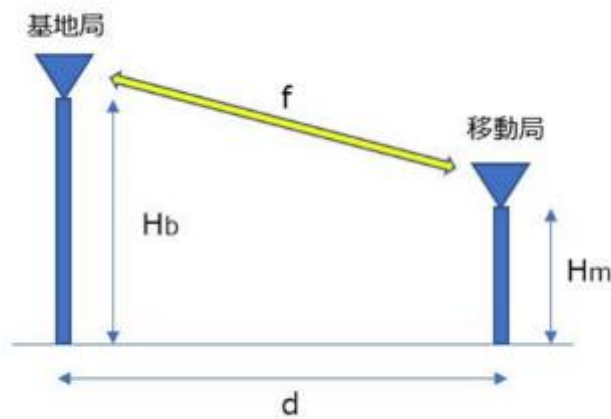


図 2-23 拡張式による伝搬損失式のパラメータ

・ $d \geq 0.1 \text{ Km}$ の場合

(市街地)

$$L(\text{dB}) = [44.9 - 6.55 \log(\max\{30, H_b\})] (\log d)^a - a(H_m) - b(H_b) - 13.82 \log(\max\{30, H_b\}) + 46.3 + 33.9 \log(2000) + 10 \log(f/2000)$$

: $2000 < f \leq 3000 \text{ MHz}$

1. L: 伝送損失(dB)
2. f: 周波数(MHz)
3. H_b : 基地局空中線の実効高(m)
4. H_m : 移動局空中線高(m)
5. d: 通信区域の半径(通達距離)(Km)

(郊外地)

$$L(\text{dB}) = L(\text{urban}) - 2 \{ \log [(\min\{\max\{150, f\}, 2000\}) / 28] \}^2 - 5.4$$

(開放地)

$$L(\text{dB})=L(\text{urban})-4.78\{\log[(\min\{\max\{150,f\},2000\})]\}^2+18.33\log[(\min\{\max\{150,f\},2000\})]-40.94$$

3) ITU-R P.1411(伝搬損失推定式)

・ローカル 5G においてはミリ波帯のベースになる伝搬損失計算方法である。

伝搬損失 L は勧告 ITU-R P.1411 を基礎として算出することとし、以下の式で算出する。

①屋外で見通し外の場合

陸上移動局から基地局が見通せない場合は、以下により伝搬損失を算出する。

$$L = 32.1 \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_{RD}} \right) + L_{d_{RD}}$$

$$d_{RD} = (0.25 \cdot d_3 + 0.25 \cdot d_4 - 0.16 \cdot d_1 - 0.35 \cdot d_2) \cdot \log_{10}(f) + 0.25 \cdot d_1 + 0.56 \cdot d_2 + 0.10 \cdot d_3 + 0.10 \cdot d_4$$

f (GHz): 指定周波数

d_{RD} の値は、以下の式に k に 0 から 4 までの値を入力し、その値を求めて、上記の式に値を入力し算出する。

$$d_k = \sqrt{\left(\frac{25(h_1 - 1.5) \times (2k + 1)}{2(h_r - 1.5)} - 25k \right)^2 + (h_1 - 1.5)^2}$$

$$L_{d_{RD}} = L_{d_k} + \frac{L_{d_{k+1}} - L_{d_k}}{d_{k+1} - d_k} \cdot (d_{RD} - d_k) \quad (d_k \leq d_{RD} \leq d_{k+1})$$

$L_{d_{RD}}$ の値は、以下の式に k に 0 から 4 までの値を入力し、全ての値を求めて、上記の条件の範囲内の値を入力し算出する。なお、 d_k は上記式により求めたものである。

$$L_{d_k} = 20 \cdot \log_{10} \left\{ 4\pi \sqrt{\left(\frac{25 \cdot (h_1 - 1.5) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - 1.5)} \right)^2 + (h_1 - 1.5)^2} / (0.4^k \cdot \lambda) \right\}$$

$$\phi_k = \tan^{-1} \left(\frac{25 \cdot (h_1 - 1.5) \cdot (2k + 1)}{2 \cdot (h_r - 1.5)} \cdot \tan \frac{\pi}{2} \right)$$

d (m): 基地局から陸上移動局までの距離

h_1 (m): 基地局の高さ(アンテナ高)

h_r (m): 以下の条件に応じて指定する平均建物高

条件	値(m)
概ね5階までの建物が密集する地域に基地局を開設する場合	15
概ね3階までの建物が密集する地域に基地局を開設する場合	10

概ね2階までの建物が密集する地域に基地局を開設する場合	6
概ね平屋が散在する地域や田園地域の場合	3

λ (m): 指定周波数の波長

これは勧告 ITU-R P.1411-10 における Models for propagation over roof-tops の Site-specific model の suburban area の伝搬モデルとして定義されたものである。P.1411 においては以下の制限がある。

h_r : any height m

Δh_1 : 1 to 100 m

Δh_2 : 4 to 10 (less than h_r) m

h_1 : $h_r + \Delta h_1$ m (高い局のアンテナ高)

h_2 : $h_r - \Delta h_2$ m (低い局のアンテナ高)

f : 0.8 to 38 GHz

w : 10 to 25 m

d : 10 to 5,000 m

②見通せる場合

陸上移動局から基地局が見通しの場合は、以下により伝搬損失を算出する。

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

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

③屋内の場合

基地局を屋内に設置する場合は、以下により伝搬損失を算出する。

$$L = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - R$$

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)

4) カバーエリア及び調整対象区域の算出式ならびに補正值

4.1) 4.6GHz から 4.9GHz までの周波数を使用する場合

■伝搬等に応じて受信電力を算出する際の計算式は、次のとおりとする。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 8$$

Pr (dBm): 受信レベル(受信電力)

Pt (dBm): 送信電力 (基地局の空中線電力)

Gt (dBi): 送信アンテナ利得

Lf (dB): 基地局の給電線損失

Gr (dBi): 受信アンテナ利得

L (dB): 伝搬損失 (注)

(注)伝搬損失 L は「自由空間伝搬損失式」及び「拡張秦式」を基礎として算出する。

■補正值

R (dB): 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損。実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。

・4.7GHz 帯では 16.2dB (勧告 ITU-R P.2109 建物種別=Traditional,期待値=50%)

K (dB): 地形情報データにより算入し難い地形の影響等の補正值であり、通常は 0 とし、地形水面の反射、小規模の見通し外伝搬の影響等を特に考慮する場合に参入する。

S (dB) : 市街地、郊外地及び開放地に対して考慮する補正值であり、下記による。

(1) 市街地(都市の中心部であって、2階建て以上の建物と繁茂した高い樹木の混合地域など):

$$S = 0.0$$

(2) 郊外地(樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域): $S = 12.3$

(3) 開放地(電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑地、田地、野原など): $S = 32.5$

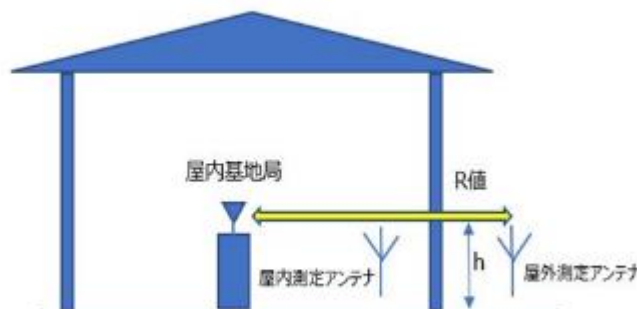


図 2-24 補正值 R の測定

4.2) 28.2GHz から 29.1GHz までの周波数を使用する場合

■伝搬等に応じて受信電力を算出する際の計算式は、次のとおりとする。

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

Pr (dBm): 受信レベル(受信電力)

Pt (dBm): 送信電力 (基地局の空中線電力)

Gt (dBi): 送信アンテナ利得

Lf (dB): 基地局の給電線損失

Gr (dBi): 受信アンテナ利得

L (dB): 伝搬損失 (注)

(注)伝搬損失 L は「勧告 ITU-R P.1411」を基礎として算出する。

■伝搬損失 L の算出式

①屋外で見通し外(陸上移動局から基地局が見通せない場合)

$$L=32.1*\log(d/d_{rd})+L_{drd}$$

②見通せる場合(陸上移動局から基地局が見通しの場合)

$$L=20\log(4\pi d/\lambda) \quad d(\text{m}): \text{基地局から陸上移動局までの距離}, \lambda(\text{m}): \text{指定周波数の波長}$$

③屋内の場合(基地局を屋内に設置する場合)

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

R (dB): 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損

・28 GHz 帯では 20.1dB (勧告 ITU-R P.2109 建物種別=Traditional,期待値=50%)

(3) 電波伝搬シミュレーションツールの紹介

電波伝搬シミュレーションは、電波伝搬推定(伝搬損失/伝搬遅延/LOS 等の推定)を目的とするものである。無線ネットワークシミュレーションでは、まず電波伝搬シミュレーションを行い、その結果に基づいて、対象とするエアインターフェースに関する無線ネットワークの諸特性(カバーエリア/受信確率/最大データレート 等)の評価を行うことができる。

1) エリア壁画ツール(KCAMP)

電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号)が規定するエリア算出法(式)から、エリア描画ツール KCAMP(エリア算出法)を用いてエリア設計を行うことができる。

パラメータとしては送信出力、アンテナパターン(利得、ビーム幅)、アンテナ指向方向、アンテナチルト角、基地局位置(緯度経度)、基地局設置高、給電線損失、その他損失、受信点メッシュ縮尺等を変更してエリア計算を行った例を下図に示す。

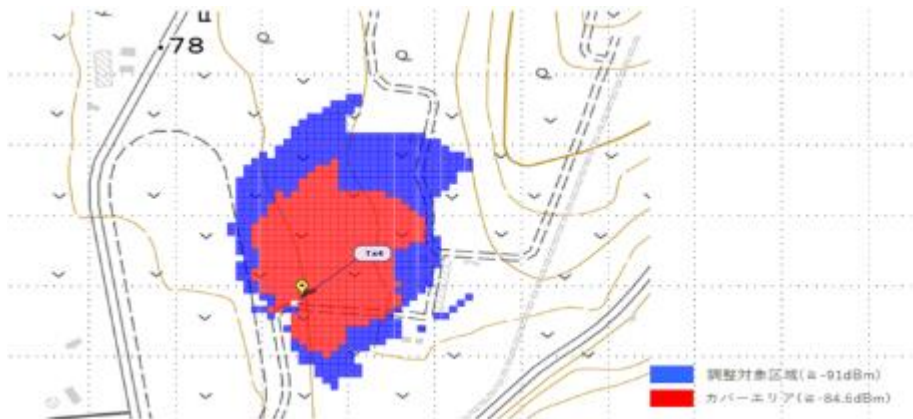


図 2-25 エリア作画ツールによる作図例

2) 電波伝搬シミュレーションツール(Wireless InSite)

3次元電波伝搬シミュレータ Wireless InSite を用いてレイトレース法による受信電力分布の計算結果を示す。

■計算概要

- ・計算条件:反射回数(3回)、透過回数(3回)
- ・建物材質:外壁(コンクリート)、室内壁(ドライウォール)、窓(ガラス)

■建物データ

- ・床~天井高:4m

■無線設備、アンテナ情報

- ・周波数:4850MHz
- ・帯域幅:100MHz
- ・アンテナパターン、利得情報
- ・アンテナ設置高:地上高(8.72m) + 天井高(2.5m)=11.22m

引用:令和4年度開発実証19報告書

技術実証にて使用された電波伝搬シミュレーションツールは上記以外に、「iBwave」「Ranplan Professional」「Atoll」「Planet」等がある。

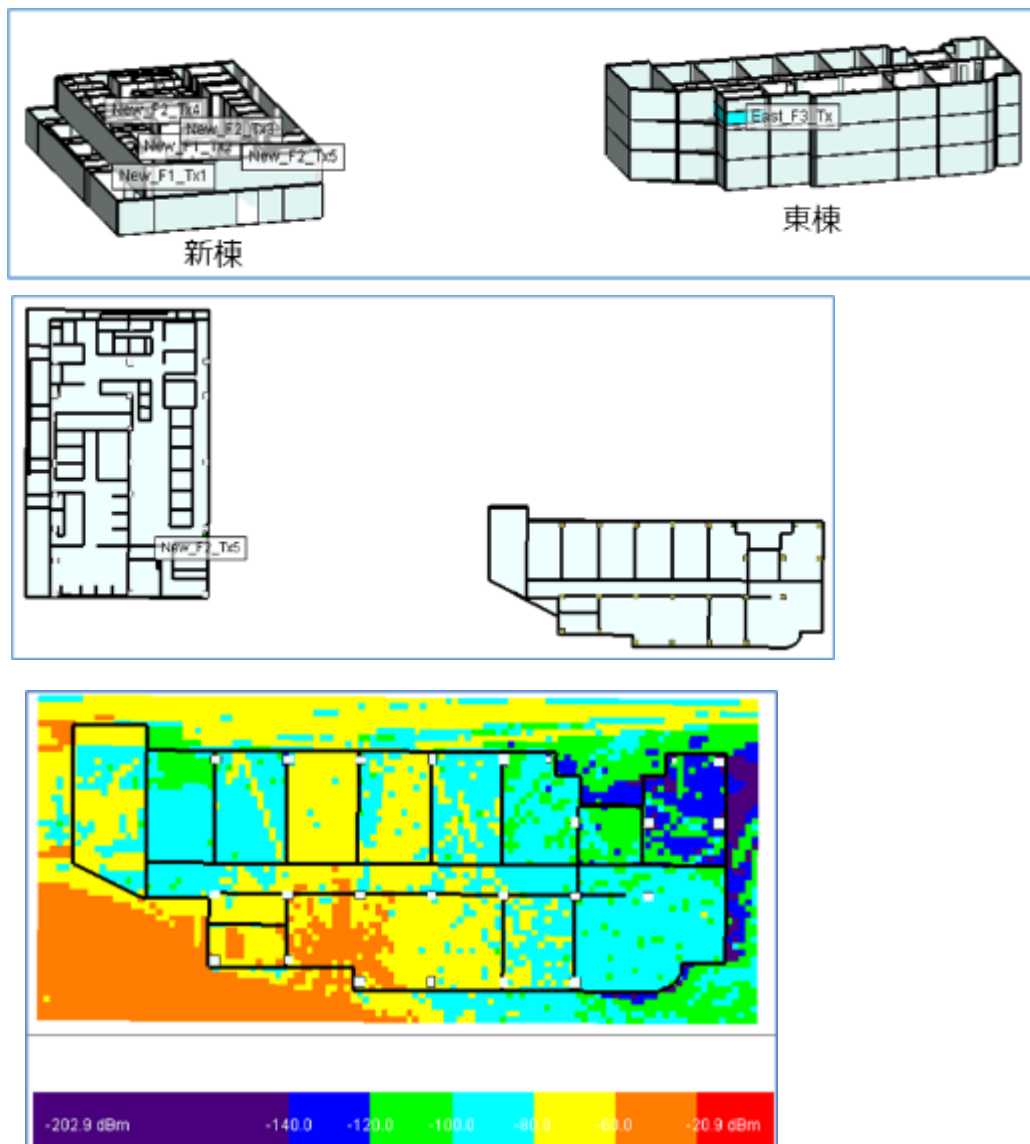


図 2-26 3次元伝搬シミュレーション実施例

(4) 電波伝搬環境の紹介

各区分の定義と代表的環境 市街地、郊外地、開放地、屋内、半屋内

1) 市街地



図 2-27 市街地イメージ

都市の中心部であって、2 階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など

(S 値=0.0^{*1})

*1 ローカル5Gのカバーエリア及び調整対象区域の補正值。2.3.1(2)4)参照。

2) 郊外地



図 2-28 郊外地イメージ

樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域 (S 値=12.3^{*1})

3) 開放地



図 2-29 開放地イメージ

電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300 ~400m 以内が開けていような畑地、田地、野原など (S 値=32.5^{*1})

4) 屋内

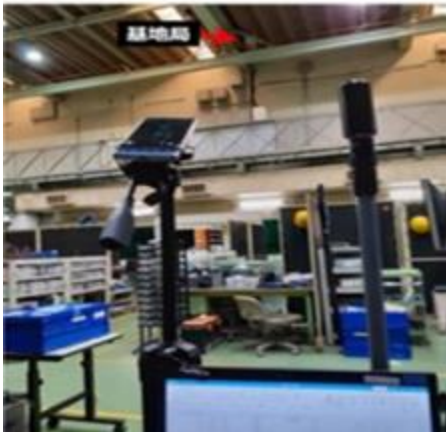


図 2-30 屋内イメージ

事務所、病院、体育館、アリーナ等：屋根、壁、床、窓等に閉ざされた空間

(R 値=16.2dB:4.7GHz 帯^{*1})

(R 値=20.1dB:28GHz 帯^{*1})

5) 半屋内



図 2-31 半屋内イメージ

ビニールハウス、牛舎等：壁に大きな開口部がある空間

(R 値=5.8dB:4.7GHz 帯^{*1*2})

*2 令和3年度技術実証 No.01 のデータより。参考値。

2.2.2 エリア構築の課題

エリア構築での課題として下記があげられる。

・業務区域内での不感地帯、弱電界エリアが発生し通信不可ないし伝送スループットの低下によりサービス品質劣化が起こる。

・他者土地との距離が短く、電波漏洩が起こる。

令和4年度の開発実証、技術実証及び特殊環境実証においてこれらの課題への解決方策として電波反射板、中継器、DAS、LCX 等の設備を活用しその有効性につき検証を行った。

(1) 課題の実例

2022 年度の開発実証とそれぞれの課題を表 2-22 に紹介する。

表 2-22 開発実証と課題一覧

採択 No.	場所	分野	電波伝搬環境	課題① 不感地 対策	課題② カバーエリア 拡張	課題③ 電波漏洩 軽減	RF Band		エリア柔軟化設備				
							4.7 GHz	28 GHz	反射 板	中継 器	DAS	LCX	その他
開01	北海道新冠町	畜産	屋外（開放地）	○		○	○				○		
開02	秋田県大仙市	農業	半屋内	○		○	○			○			
開03	高知県北川村	農業	屋外（開放地）	○		○	○				○		
開04	鹿児島県鹿屋市	畜産	半屋内	○		○	○					○	
開05	三重県尾鷲市	漁業	海面	対象外		○	○						○
開07	横浜市	データセンター	屋内	○	○	対象外	○				○		
開08	新居浜市・四阪島	工場	屋外（開放地）	○	○	対象外	○			○	(飛行空間のエリア化)		
開09	熊本県苓北町	火力発電所	屋外（開放地）	○		○	○			○			
開12	茨城県つくばみらい市	映像制作	屋外（市街地）	○		対象外	○				○		
開13	栃木県栃木市	ゴルフ場	屋外（開放地）	○		対象外	○			○			
開16	愛媛県大洲市	災害対策	屋外（開放地）	○	○	○	○			○	(飛行空間のエリア化)		
開17	北海道岩見沢市	地域医療	屋内	○		対象外		○	○				
開18	群馬県前橋市	大学病院	屋内	○		○	○				○		
開19	川崎市	中核病院	屋内	○	○	○	○				○		
				○	○	○				○			
開20	徳島県徳島市	中核病院	屋内	○		○	○				○		

(2) 課題を把握する方法及び課題解決の方策検討

課題を把握し課題解決の方策を検討した実例を以下に示す。

1) 不感地帯の課題把握及び解決方策(令和4度開 20)

屋内に基地局を設置する方法の場合には、外壁が外部への電波漏洩を抑制するため他者土地への電波漏洩のリスクは少なくなり、小さな送信電力で効率的に屋内をカバーできるという利点がある。

本実証においてはこれらの分散アンテナシステム的一种である Active DAS を活用することで基地局を増やさずに送信機とアンテナ部分のみの数を増加させることで干渉を抑制しつつカバーエリアを確保できる。

図 2-32 に DAS 子局 1 台の場合と 2 台の場合での不感地・弱電界エリアが予想されるフロアの受信電力(RSRP)をシミュレーションした結果を示す。

DAS 子局を 2 台にすることで、受信電力の改善効果(30~35dB)が予測された。

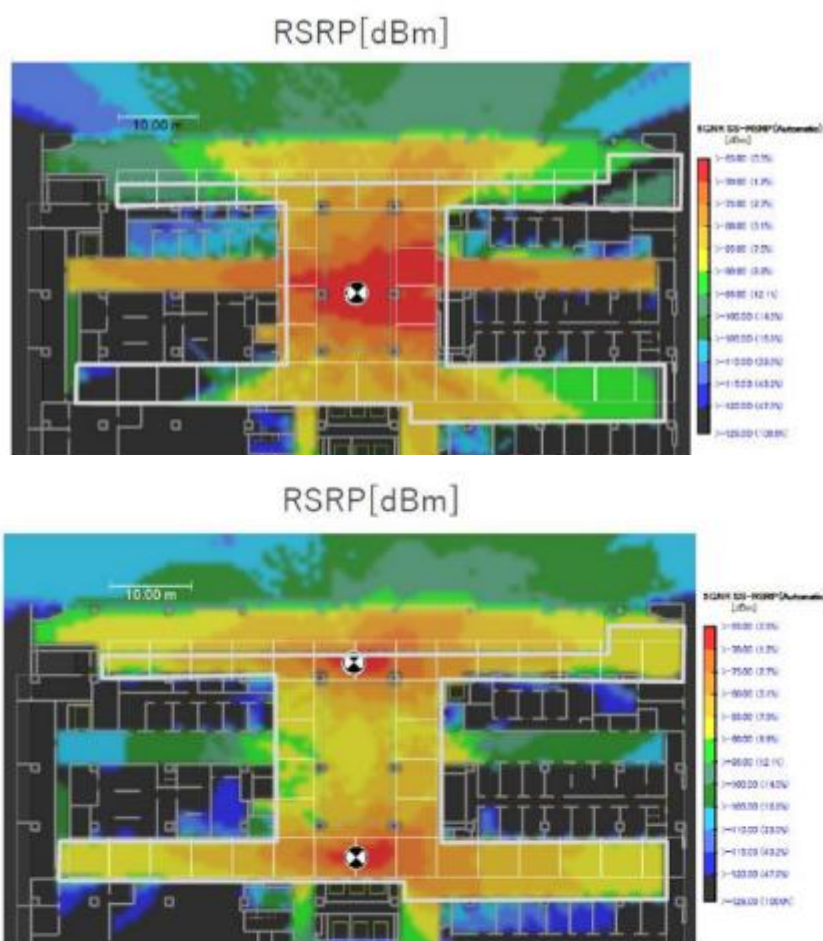


図 2-32 不感地帯の受信電力シミュレーションによる把握例

2) 電波漏洩の課題把握及び解決方策(令和4年度開 04)

牛舎内が半屋内という電波漏洩しやすい環境のため、指向性、無指向性に関わらず他者土地へ電波が漏洩しやすいことから、本実証においてケーブルの動線上に電波をスポット的に照射できる LCX(漏洩同軸ケーブル)を用いて実証した。LCX を牛舎内に配置することにより、牛舎内をカバーエリア、他者土地への電波漏洩を軽減させる。

屋外に設置している RU の位置を変えずに、同一エリアを指向性アンテナまたは LCX

それぞれのアンテナを用いた時の電波漏洩影響を検証した。

指向性アンテナを使用した場合と LCX を使用した場合のシミュレーション結果(図2.3.2-2)より他者土地への電波漏洩が以下のように予測される。

- ・指向性アンテナ:-56~-80dBm
- ・LCX:-76~-120dBm
- ・電波漏洩の軽減予想量は 20~40dB

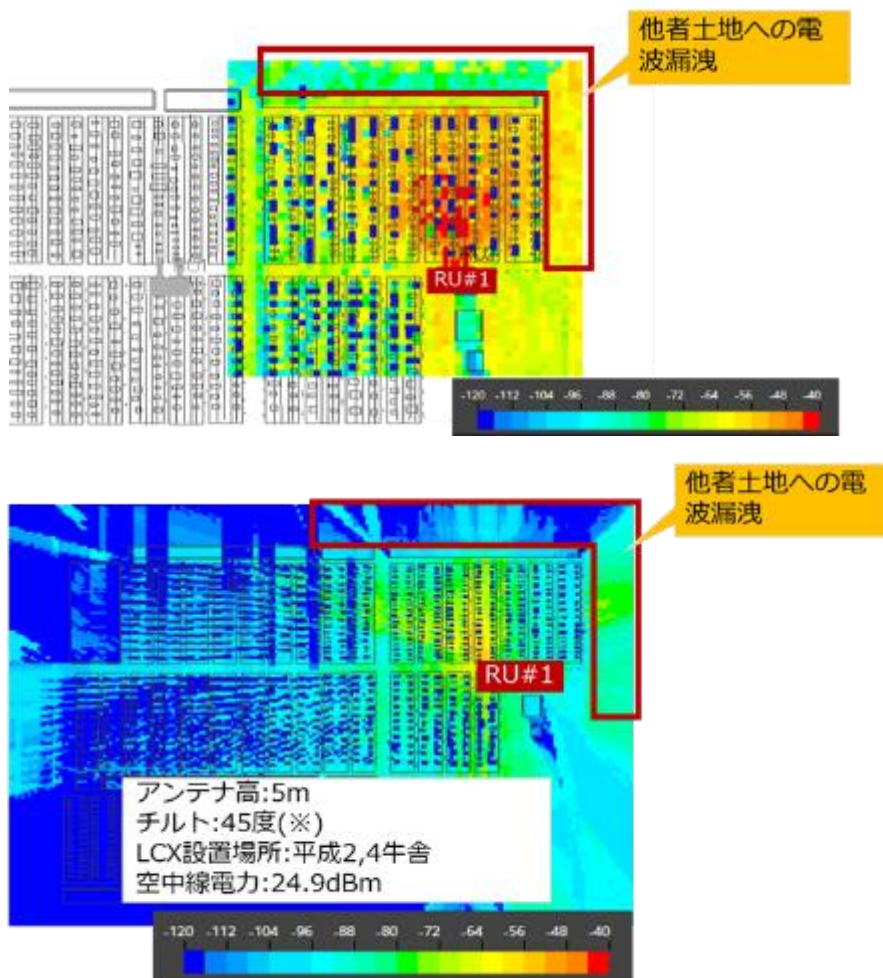


図 2-33 電波漏洩の軽減効果のシミュレーション実施例

2.2.3 エリア構築の柔軟化(課題の解決)

エリア構築の柔軟化において課題解決の方策として活用した下記設備につき紹介する。

- ・電波反射板
- ・中継器
- ・分散アンテナシステム(DAS)
- ・漏洩同軸ケーブル(LCX)

(1) 設備等を用いた課題解決の方策

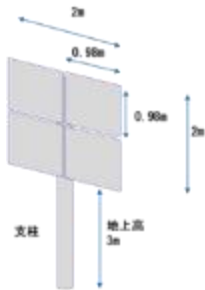
1) 電波反射板

電波反射板はアルミ等金属板により無線送信局からの入射電波を反射させ電波の中継を行う装置である。電源が不要なことから無給電中継装置とも呼ばれる。設備構造が簡易であり、電源も不要であ

ることから設置が容易で低コストでの導入が可能となる。

電波反射板(金属板)の利得算出に関しては、電波法関係審査基準(平成13年総務省訓令第67号別紙1、別図第29号、第30号、第30号の2)が参考となる。

近年メタマテリアル素材を使用した電波反射板も開発され、ミリ波帯での活用が進みつつある。



項目	諸元
大きさ	2m x 2m
重量	64Kg
利得	69dBi
ビーム幅	水平：12.7°、垂直：3.2°



項目	諸元
大きさ	0.4m x 0.4m
重量	NA
利得	63dBi
ビーム幅	水平：10°、垂直：12°

	金属反射板	メタマテリアル反射板	RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)
特徴	入射角-反射角	入射角と反射角は個別に設定	反射角を制御可能
周波数帯	Sub6帯、ミリ波帯	ミリ波帯	ミリ波帯
設計・設置自由度	設計：容易 設置自由度：入射角と反射角に制限あり、設置条件に制限あり	設計：中程度 設置自由度：入射角と反射角は個別となるため自由度はあるが設置後の変更には対応できない	設計：高度 設置自由度：設置後においても反射角の変更がサイトにおいて対応可能
電源	不要	不要	要
価格	安価	中程度	高価

図 2-34 電波反射板設備紹介(外観、諸元、特徴)

電波反射板にてその素材より金属反射板、メタマテリアル反射板及び近年注目を浴びている反射角を制御可能なRISの比較を図2-34示す。

2) 中継器(非再生中継方式)

非再生中継方式とは、受信した電波を復調及び変調せず増幅して送信する中継方式である。中継の際には送受信を同時に行うため、アンテナ間の離隔距離を十分に確保する必要がある。希望波とそれ以外の波のレベル差(アイソレーション値)に関しては、ドナー端子端でのPSRPのレベル差が30dB以上

(目標値)必要となることから設置位置を十分に検討する必要がある。(電気興業株式会社)

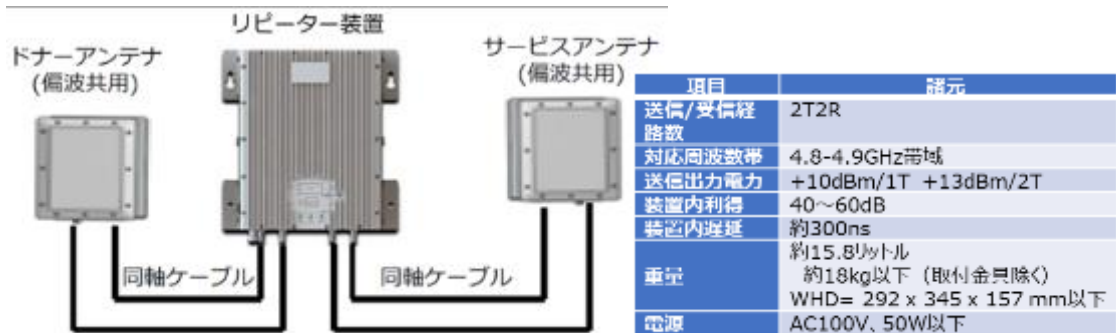


図 2-35 中継器設備紹介(外観、諸元)

中継器には再生中継方式と非再生中継方式があり、各々の特徴を以下に示す。(技術実証にて使用されたものは非再生中継方式のみである)

再生中継方式では、多段中継への対応にて優位であるが、伝送遅延時間が大きくなること及びコストが割高になることが考えられる。

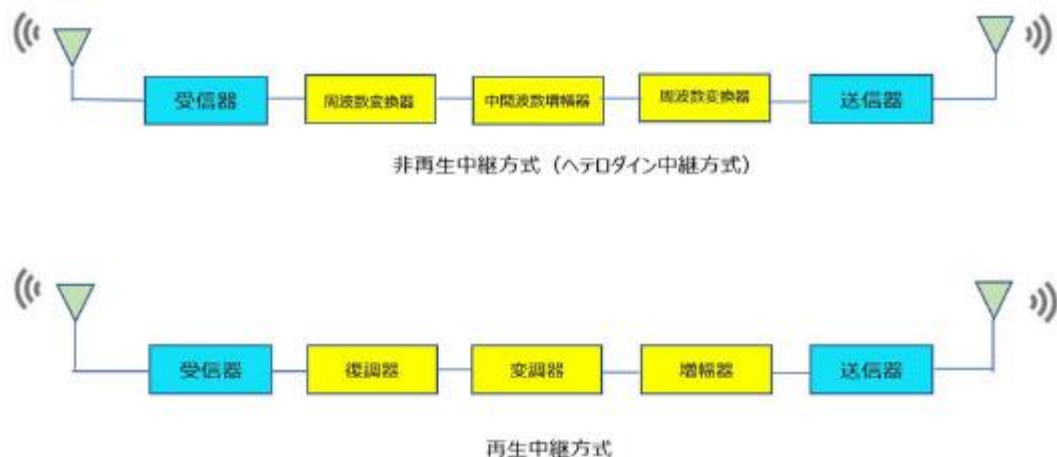


図 2-36 再生中継方式と非再生中継方式

3) 分散アンテナシステム (DAS)

分散アンテナシステムは、複数アンテナを分配器、結合器、同軸ケーブルなどパッシブコンポーネントにて接続する「Passive DAS」及び基地局から届く電波を光ケーブルにて親機(MU)、中継機(HU)、子機(RU)にて接続、分配する「Active DAS」があり、通信できるエリアを拡張するシステムである。

	親機 (MU)	中継機 (HU)	子機 (RU)
無線周波数	N79 4800MHz~4900MHz		
周波数幅	100MHz幅		
アンテナ	4Tx / 4Rx		
最大送信電力	30dBm/アンテナ		
動作温度範囲	0℃ to 40℃		
寸法	430x380x87.5mm (取付金具、突起部を除く)	430x300x87.5mm (取付金具、突起部を除く)	305 x 385 x 105mm (取付金具、突起部を除く)
設置条件	19インチラック 強制空冷	19インチラック 強制空冷	水平or壁掛け 自然空冷
質量	10kg以下	9kg以下	12kg以下
外観		今回実証においては未使用 	

図 2-37 分散アンテナシステム設備紹介(Active DAS)

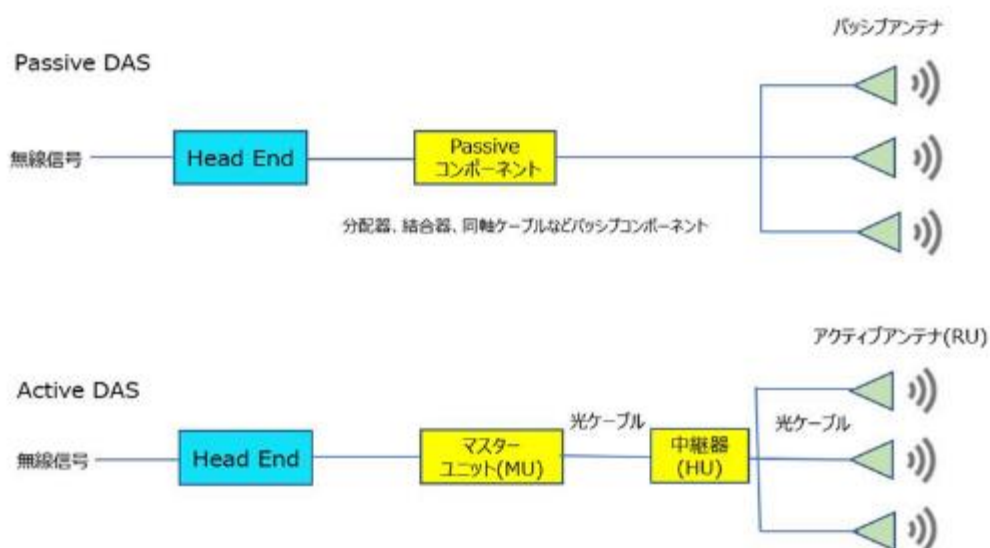


図 2-38 Passive DAS と Active DAS

Passive DAS と Active DAS の特徴を表 2-23 に示す。

表 2-23 Passive DAS と Active DAS の特徴

	Passive DAS (同軸DAS)	Active DAS (光DAS)
特徴	親基地局より複数アンテナによりカバーレッジを拡大、同一セルの親基地局増局より価格は安価。	親基地局からのRF信号を光信号に変換、光ケーブルにて伝送し受信エリアにて光/RF変換し無線信号送信。送信機配置や送信電力を柔軟に設計できる。
親基地局からの距離	概ね100m以下	最大数km
送信電力	距離により減衰	装置仕様で調整可
工事の容易性	同軸ケーブル配線及びRF部材(複数アンテナ、分配器、結合器等)の工事が必要	光ケーブル配線及び光DAS設備(MU,HU,RU)工事が必要
コスト	安価	Passive DASより高価

Active DAS によるエリア構築例を図 2-39 に示す。

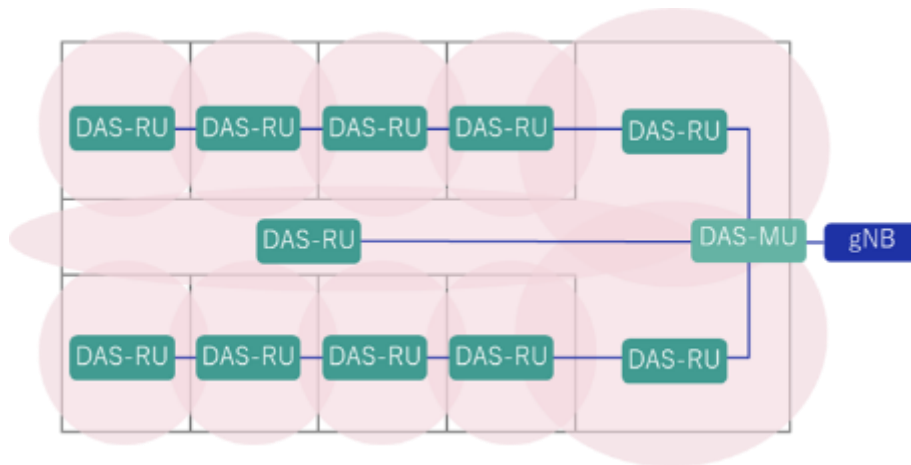


図 2-39 Active DAS によるエリア構築例

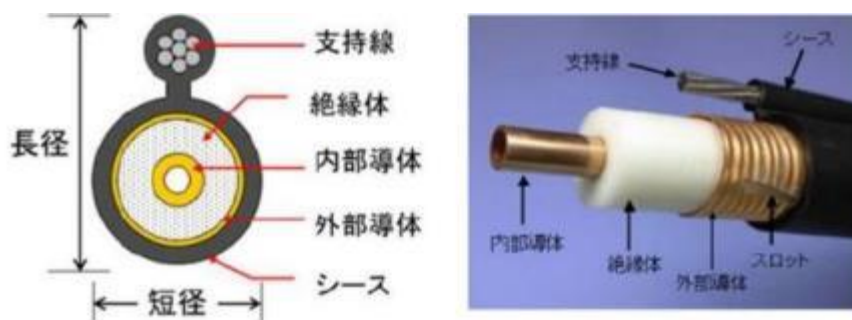
4) 漏洩同軸ケーブル (LCX)

漏洩同軸ケーブルの特徴であるケーブルの長手方向に沿って細長い領域の通信エリアが設計でき、鉄道や道路、地下街などの細長い領域や空間、工場などの敷地の形状に合わせてローカル5G 環境を構築することができる。

LCX の送受信特性は一般に結合損失 L_c で示される。

結合損失は LCX への入射電力 P_{in} と LCX から 1.5m 離れた位置にある半波長標準ダイポールアンテナからの出力 P_{out} によって計算する。

$$L_c = -10 \log(P_{out}/P_{in}) \text{ [dB]}$$



項目	諸元
ケーブルサイズ	20D
減衰量	0.3dB/m
結合損失	60dB
入力インピーダンス	50Ω
短径 × 長径	20mm × 39mm
概算重量	0.7kg/m

図 2-40 漏洩同軸ケーブル設備紹介(外観、構造、諸元)

鉄道における線路区間での漏洩同軸ケーブル(LCX) の代表的使用例を以下に示す。

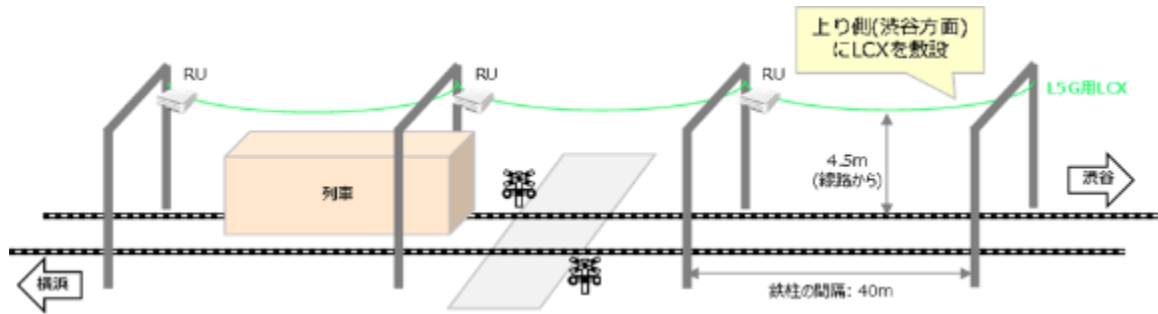


図 2-41 鉄道における LCX の代表的使用例無効な資料文献が指定されました。

(2) 課題解決の有効性

課題解決の有効性につき下記代表的実証実験の結果を記載する。

有効性の評価に当たっては、設備のあり・なしでの測定点での受信電力 (RSRP)、通信品質 (SIR/SINR)、伝送性能 (UL データスループット、DL データスループット) の測定値を基地局から各測定点までの3D 距離(m)にて比較し各々の平均改善量を求めた。また不感地帯改善に関しては改善できたエリア面積を求めた。

1) 令和4年度 開 17 (電波反射板)

改善施策はメタマテリアル反射板による屋内の不感地帯対策であり、使用した無線システムは、周波数が 28GHz 帯、帯域は 400MHz であった。

実証目標は SS-RSRP 値が -103.2dB 、UL データスループット値が 80Mbps であった。試験環境 (基地局、反射板、不感地帯の改善目標エリアの位置関係と電波反射板への電波の入射角度と反射角度) を以下の図に示す。

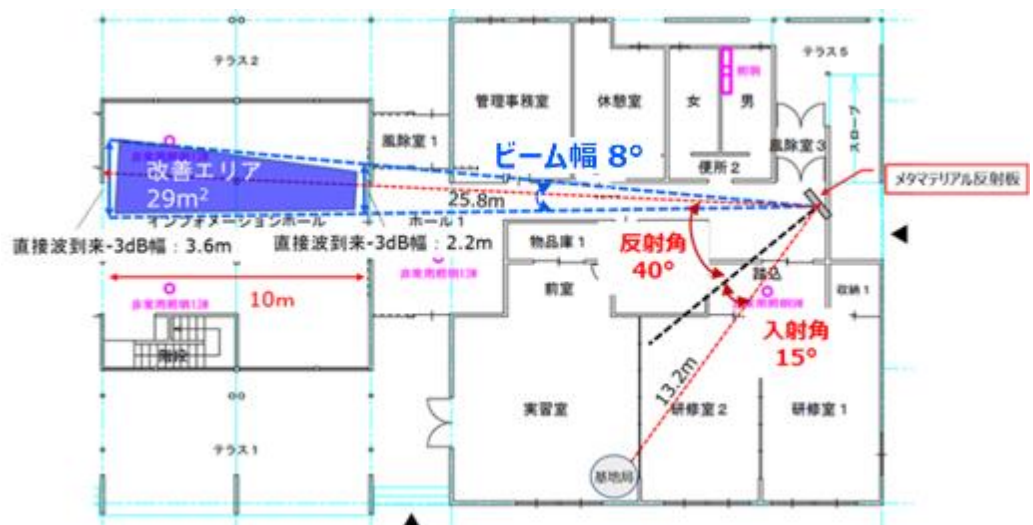
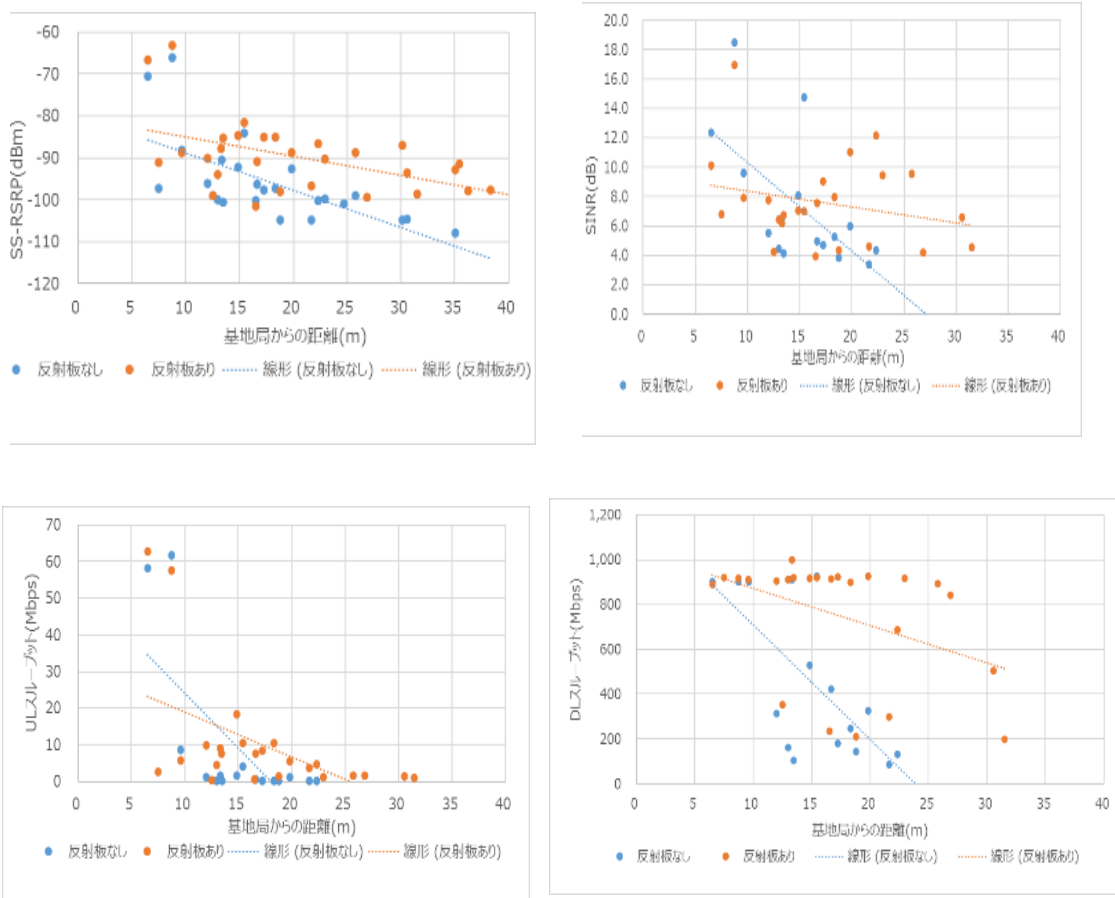


図 2-42 電波反射板による実証試験環境(屋内)



	平均改善量	<ul style="list-style-type: none"> ・改善エリア（ビーム幅の中心）の測定点は、SS-RSRPが7.5dB、12.2dB改善した。 ・業務区域の不感地帯の面積は、56.3%から16.7%に改善した。反射板の効果が確認できる。 ・実証目標（ULスループット80Mbps）が未達。
SS-RSRP【dBm】	6.9dB（24測定点）	
SINR【dB】	1.0dB（16測定点）	
ULスループット【Mbps】	5.2Mbps（14測定点）	
DLスループット【Mbps】	372.6Mbps（16測定点）	

改善エリア (不感地帯)	面積（概算）	基地局からの距離
	29m ² 〔屋内〕	約18m

図 2-43 電波反射板による不感地帯改善効果(屋内)

2) 令和4年度 開 01 (DAS)

改善施策は Active DAS(光 DAS)にて子局を4台使用した屋外での不感地帯対策であり、DAS子局1台における不感地帯を DAS 子局 4 台使用し改善を行った。使用した無線システムは、周波数が4.7GHz 帯、帯域は100MHzであった。

実証目標は UL データスループットが40Mbpsであった。試験環境(DAS子局4台、業務区域)を以下の図に示す。

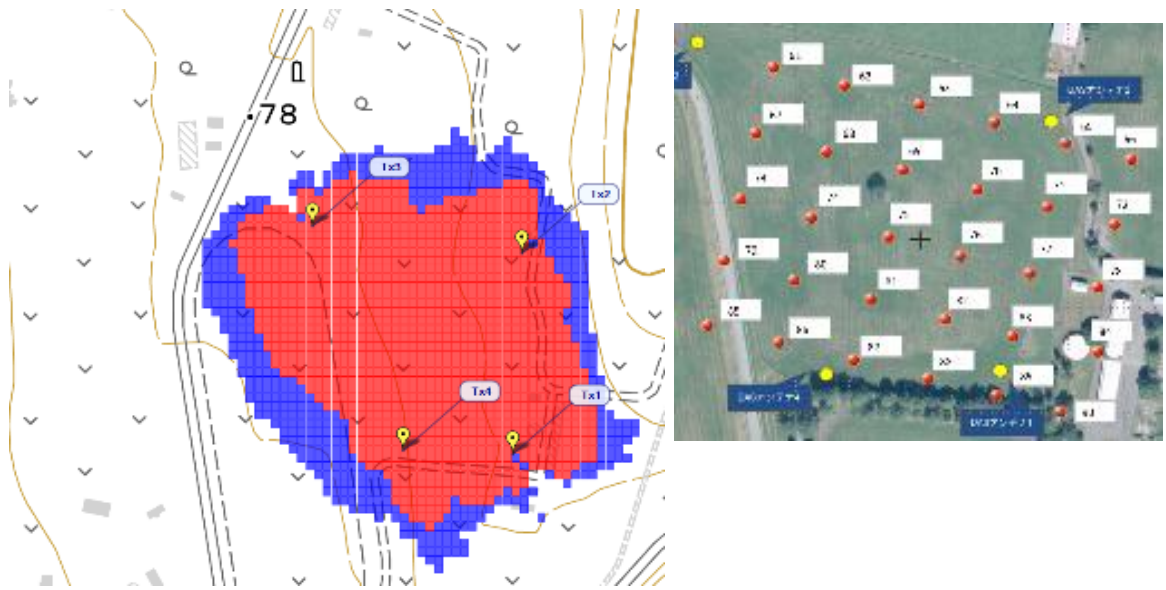
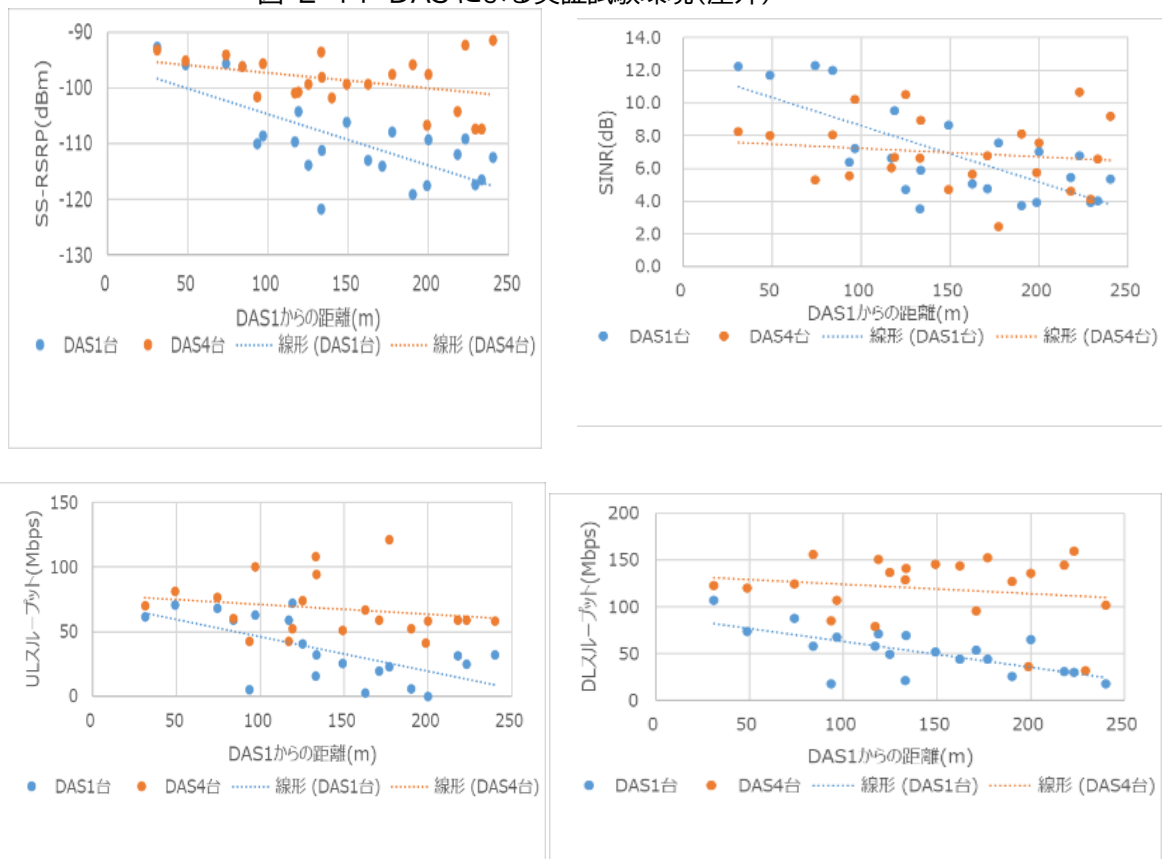


図 2-44 DASによる実証試験環境(屋外)



	平均改善量
SS-RSRP【dBm】	10.6dB (23測定点)
SINR【dB】	0.4dB (23測定点)
ULスループット【Mbps】	36Mbps (20測定点)
DLスループット【Mbps】	76Mbps (20測定点)

- ・実証目標 (ULスループット40Mbps) は、達成。DAS4台による効果を確認した。
- ・SINRは、DAS1台では距離 (DAS1から) が長くなると劣化する傾向。DAS4台では距離による劣化傾向が打ち消されている。

改善エリア (不感地帯 含む全体)	面積 (概算)	DAS1からの距離
	120,000m ² [屋外] (約400m×約300m)	約150m

図 2-45 DAS による不感地帯改善効果(屋外)

3) 令和4年度 開 19 (DAS)

改善施策は Active DAS(光 DAS)にて子局を 2 台使用した屋内での不感地帯対策及びカバーエリア拡張であり、DAS 子局 1 台における不感地帯を DAS 子局 2 台使用し改善を行った。使用した無線システムは、周波数が 4.7GHz 帯、帯域は 100MHz であった。

実証目標は DL データスループットが 50Mbps であった。試験環境(DAS 子局 2 台、不感地帯、カバーエリア拡張エリア)を図 2-46 に示す。

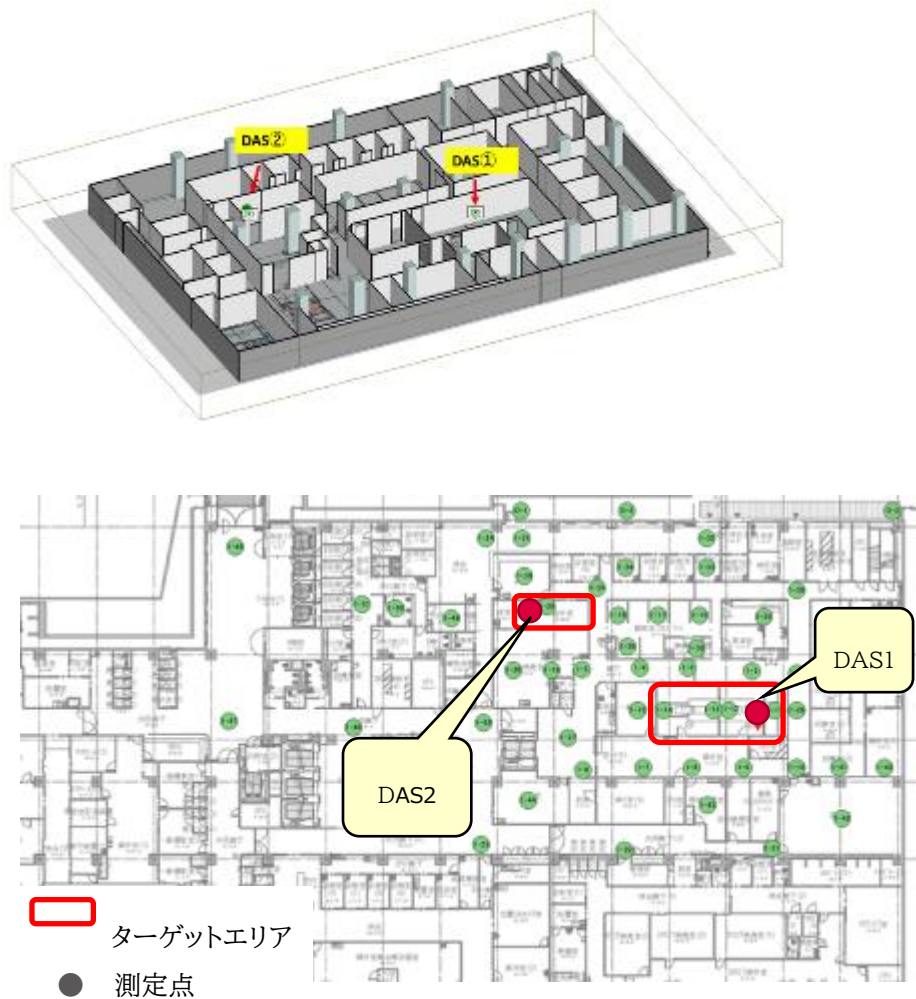
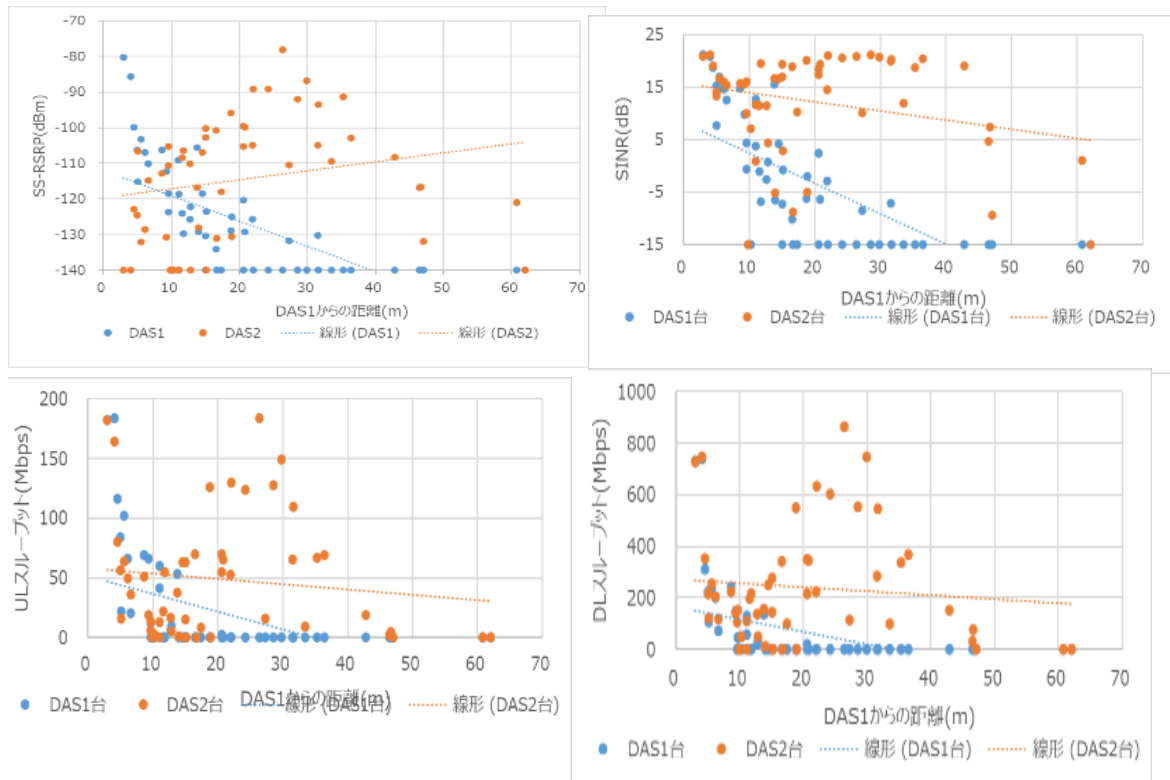


図 2-46 DAS による実証試験環境(屋内)



平均改善量		<ul style="list-style-type: none"> ・実証目標 (DLスループット50Mbps) は、達成。DAS2台による効果を確認した。 ・SINRは、DAS1台では距離が長くなると劣化する傾向 (SS-RSRPは、距離約10mでカバーエリア端)。DAS2台では距離による劣化傾向が打ち消され距離45m程度まで延長された。
SS-RSRP【dBm】	11.8dB (52測定点)	
SINR【dB】	24dB (52測定点)	
ULスループット【Mbps】	28Mbps (52測定点)	
DLスループット【Mbps】	174Mbps (52測定点)	

改善エリア (不感地帯、 エリア拡張)	面積 (概算)	DAS1からの距離
	24m ² 〔屋内〕 (約3m×約8m)	約45m

図 2-47 DAS による不感地帯改善効果(屋内)

4) 令和4年度 開 02 (中継器)

改善施策は中継器を使用した半屋内(ビニールハウス)での不感地帯対策であり、基地局 1 局における不感地帯を中継器 1 台使用し改善を行った。使用した無線システムは、周波数が 4.7GHz 帯、帯域は 100MHz であった。

実証目標は SS-RSRP 値が-114.75dBm、DL データスループットが 100Mbps であった。試験環境(基地局、中継器、不感地帯(ハウス 3)の位置関係及びハウス 3 内の測定点)を以下の図に示す。

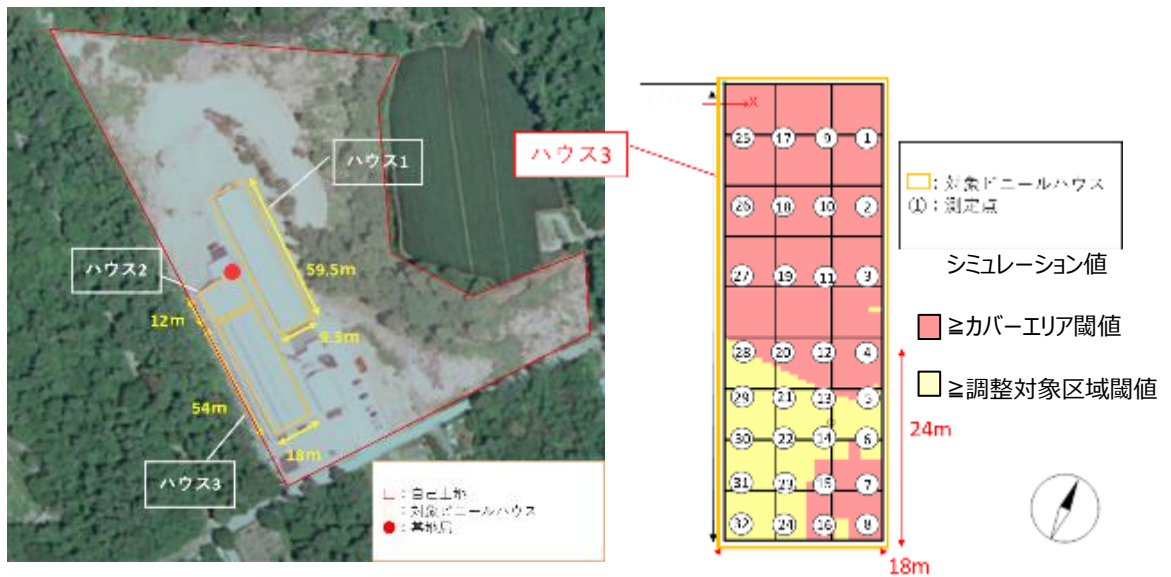
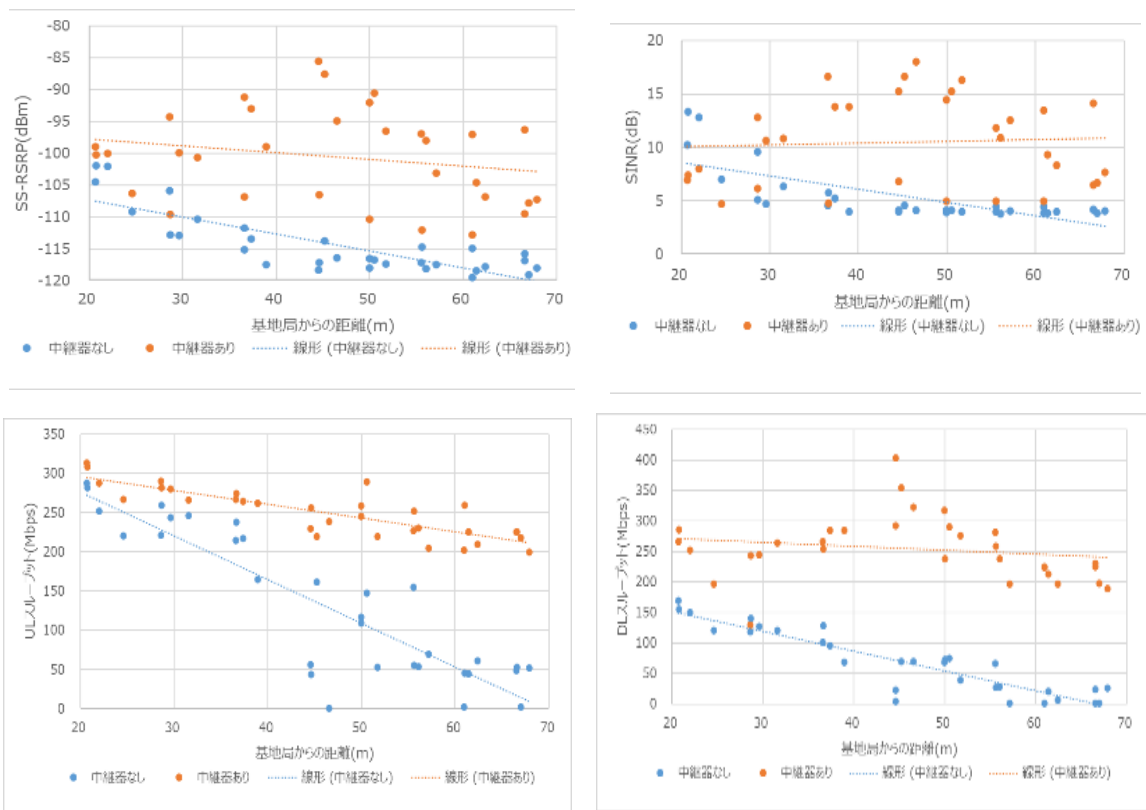


図 2-48 中継器による実証試験環境(半屋内)



	平均改善量	・実証目標 (SS-RSRP -114.75dBm , ULスループット 100Mbps) は、達成。 中継器追加により、SS-RSRP、SINR、スループットが概ね改善できた。
SS-RSRP【dBm】	13.9dB (32測定点)	
SINR【dB】	5.0dB (32測定点)	
ULスループット【Mbps】	119.5Mbps (32測定点)	
DLスループット【Mbps】	187.2Mbps (31測定点)	

改善エリア (不感地帯)	面積 (概算)	DAS1からの距離
	432m ² (半屋外) (24m×18m)	約50m

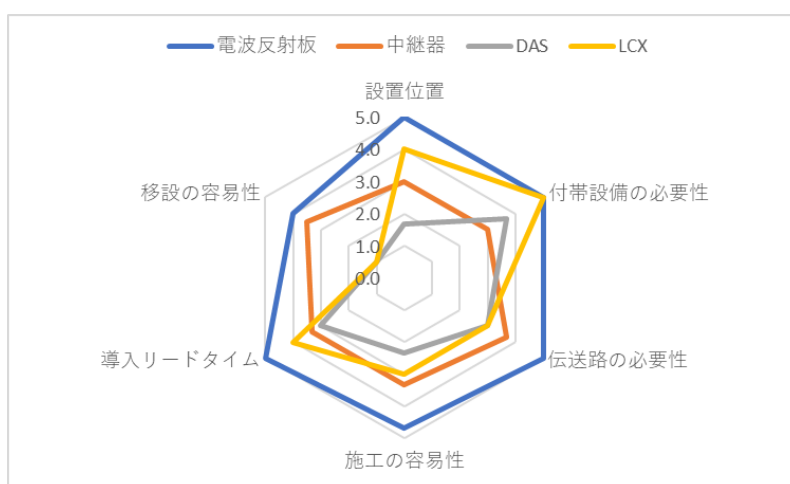
図 2-49 中継器による不感地帯改善効果(半屋内)

(3) 活用設備の諸元・特性及び相互比較

エリア構築柔軟化方法における設備(電波反射板、中継器、分散アンテナシステム(Active DAS)、漏洩同軸ケーブル(LCX))の相互比較を「設置容易性、コスト比較」の観点から行った。

1) 設置容易性

設置容易性の比較結果を図 2-50 に示す。電波反射板は設備自身が簡易にて電源等付帯設備が不要、伝送路も不要の為最も容易性が高かった。次に中継器は設備が小型にて電源は必要となるが伝送路は不要の為設置の容易性が次に高かった。DAS に関しては基地局と DAS の親機を同軸で接続し親機から子局の間は光ケーブル、同軸ケーブルにより延長し必要となる業務区域をカバーするために子局を見通しの取れる位置に設置する必要がある。電源と伝送設備(光、同軸)を必要とする。LCX は基地局と同軸ケーブルにて接続するが電源は必要とならない。



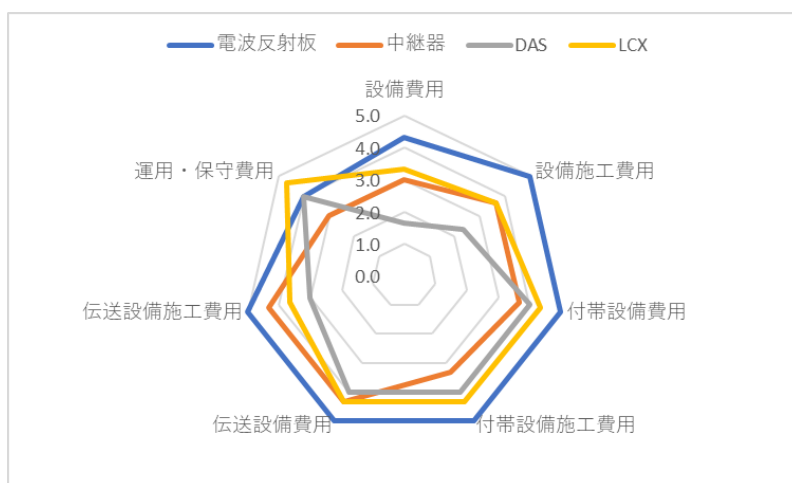
設置の容易性	5	4	3	2	1
設置位置	容易	比較的容易	難易度中	やや困難	困難
付帯設備の必要性	不要		必要(AC電源)		
伝送路の必要性	不要		必要(光・同軸)		
施工の容易性	容易	比較的容易	難易度中	やや困難	困難
導入リードタイム	3か月程度	6か月程度	10か月程度	1年未満	1年以上
移設の容易性	容易	比較的容易	難易度中	やや困難	困難

図 2-50 設置容易性比較

2) コスト比較

コスト比較結果を図 2-51 に示す。電波反射板はその素材(金属、メタマテリアル)により価格に幅があるが他の設備に対して簡易な構造にて安価である。また電源設備が不要にて付帯設備は反射板基礎、取り付け支柱程度にて安価である。LCX はその構造上運用・保守が簡易で経済的である。ただし無線設備と一緒に設置するため無線設備あたりの LCX のケーブル長が長くないと経済性が悪くなる要因がある。中継器自身のコストは量産化ベースでは安くなるものと思われ電源設備は必要となるが伝送設備が不要なため経済性の高い設備である。

DAS(Active DASを想定)については、無線基地局との接続の為親機が必要となり伝送路(光ケーブル)の布設も必要となるため子局が少ない構成ではコストが割高となる。対象となるカバー面積が大きくなるほど経済性は上がると思われる。



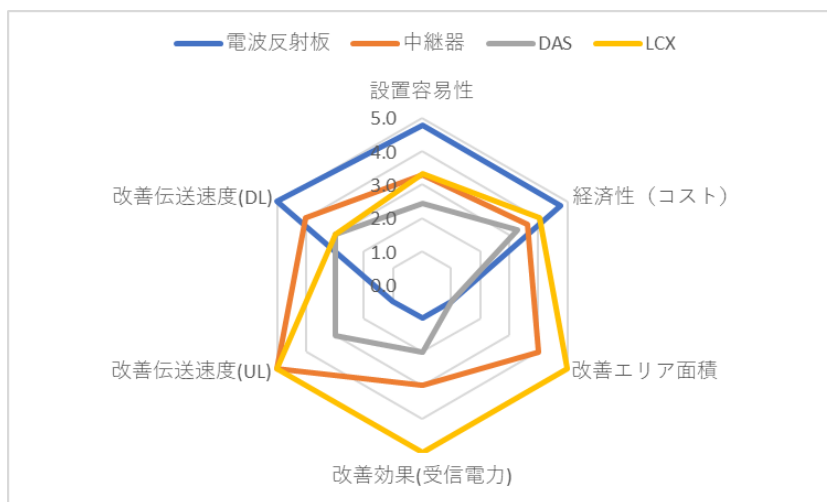
コスト比較	5	4	3	2	1
設備費用	50万円程度	100万円程度	数百万円程度	500万円程度	1000万円程度
設備施工費用	数十万円程度	100万円程度	数百万円程度	500万円程度	1000万円程度
付帯設備費用	不要	50万円程度	100万円程度	数百万円程度	500万円程度
付帯設備施工費用	不要	50万円程度	100万円程度	数百万円程度	500万円程度
伝送設備費用	不要	数十万程度	50万円程度	100万円程度	数百万円程度
伝送設備施工費用	不要	数十万程度	50万円程度	100万円程度	数百万円程度
運用・保守費用	数十万円程度	50万円程度	100万円程度	数百万円程度	500万円程度

図 2-51 コスト比較

3) 改善効果を含めた総合比較

上記1)にて設置容易性、2)にてコスト比較を行ったが、これらの設備における改善効果(不感地の改善面積、受信電力値、伝送スループット)も合わせ評価することが重要である。(2)問題解決の有効性から得られた改善効果を加味して総合比較を行った結果を図 2-52 に示す。電波反射板は設置容易性、コストにて最も優位であるが不感地帯の改善面積が少ない事、UL のスループットの改善量が低い。中継器は伝送設備が不要であることから設置も容易でありコストも経済的で改善面積も大きくバランスの取れた設備である。DAS は基地局から業務区域まで伝送設備(光ケーブル、同軸ケーブル)を使用することから伝搬路の自由度があるがコスト的には割高になる。DAS 子局 1 局あたりのカバーエリアはそれ

ほど大きくないが多数の子局を接続することによりカバーエリアの拡大、経済性を向上させることが可能である。LCXは線状エリアにおいて改善効果が高く長い距離をカバーすることが可能である。電源設備も不要であり経済性も高い。ただし無線設備とセットで使用されることからLCXのケーブル制限長が長くないとコストが高くなる要因となる。



改善効果	5	4	3	2	1
改善エリア面積(m ²)	1000	500	100	50	数十
改善効果 (受信電力)	25dB以上	20dB程度	15dB程度	10dB程度	5dB以下
改善伝送速度(UL)	100Mbps以上	50Mbps程度	数十Mbps	10Mbps程度	5Mbps以下
改善伝送速度(DL)	300Mbps以上	200Mbps程度	150Mbps程度	100Mbps程度	50Mbps以下

図 2-52 改善効果を含めた総合比較

4) 設置の有効性

エリア設計柔軟化設備(電波反射板、中継器、DAS、LCX)を設置する場合、性能の有効的設置方法につき表 2-24 にまとめた。

電波反射板、中継器ともに無線基地局からの入射電波を反射、中継することからいかに無線機から強く質の高い電波を受信できるかが鍵である。そのためには基地局と見通しが確保できることが重要である。また改善するエリアを正確に把握し、電波反射板からの反射波、中継器サービスアンテナからの電波のビームをそこに向けることが重要である。中継器においてはドナーアンテナとサービスアンテナ間のアイソレーションを十分にとることが重要である。エリア設計手法のモデル化(2.3.4 2)手順③)に記載があり参考としていただきたい。DASにおいては改善するエリアとDAS子局のアンテナ間が障害物により遮られないようにアンテナ位置を決めることが有効性につながる。LCXにおいては大地、コンクリート壁からの距離を考慮し伝送損失の影響を少なくなるよう布設位置を検討することが肝要である。

表 2-24 エリア柔軟化設備の有効的設置方法

エリア柔軟化設備	有効となる設置条件	適したユースケース
電波反射板	<ul style="list-style-type: none"> 電波反射板に強電界を入射できる。電波反射板からの反射波を効率良く伝搬できる。(基地局⇄反射板及び反射板⇄端末の見通し(LOS)が確保できる。) 電波反射板への入射角・反射角が大きくな鋭角である。(反射有効面積を確保) 電波反射板の水平・垂直ビーム幅を確認し不感地帯へ正確に電波の方向を設定し、調整する。 	<ul style="list-style-type: none"> 不感地帯の面積が限定的(スポット、幅の狭い短い線状エリア) 電波伝搬路に遮蔽物があり迂回が必要 LOSを得やすい天井方向からの電波伝搬路を活用 枝分かれする通路等で分岐点で電波を反射
中継器	<ul style="list-style-type: none"> a.基地局と中継器間の電波伝搬 LOS環境にて、フレネルゾーンが確保できること。 ドナーアンテナは、基地局以外の不要電波を避けるため高利得のものを使用すること。 中継器ドナー受信端子にて基地局の希望波とそれ以外のレベル差(約30dB)を十分確保すること。 b.ドナー及びサービスマンアンテナ間の電波のアイソレーションが一定以上(中継器利得+15~20dB程度)あること。 c.中継器で対策するエリアは不感地帯であること。(基地局からの電波との干渉を避ける) 	<ul style="list-style-type: none"> 電波伝搬路に遮蔽物があり迂回が必要 屋外の電波を屋内へ中継 異なるフロア間を業務区域とする場合(一方を基地局、他方を中継器でカバー) 不感地帯の面積がある程度広い
DAS	<ul style="list-style-type: none"> DAS子局アンテナとカバーする業務区域間はLOS環境であること。 他者土地への電波漏洩軽減を行う場合、DAS子局のアンテナタイプと設置位置、送信出力を調整すること。 	<ul style="list-style-type: none"> 点在するあるいは連続する複数の業務区域をカバーする。 他者土地との距離が近く電波漏洩の懸念がある。 工場、病院等の必要箇所電波を送受信し、全体をカバーする。
LCX	<ul style="list-style-type: none"> LCXの伝送損失・結合損失への影響が少ない位置へ敷設すること。(大地、コンクリート壁からの距離による伝送損失への影響) 他者土地への電波漏洩を抑える向きを考慮してLCXを敷設すること。(LCXのアンテナパターンを把握し設置の向きを決める) 	<ul style="list-style-type: none"> 他者土地との距離が近く電波漏洩の懸念がある。 線状の業務区域を連続的にカバー(高速道路、鉄道等。特にトンネル、地下鉄等)

2.2.4 エリア設計手法のモデル化

(1) エリア設計手法のモデル化(概要)

エリア柔軟化設備を使用してエリア設計を行う場合、各々の設備毎にどのような設計手順にてどのように設計を行ったら良いかモデル化を提案いただいた。代表的なモデル化の内容を以下に記載する。

(2) エリア設計手法(設計段階毎及び活用設備毎)

1) 電波反射板

電波反射板によるエリア設計手法の手順を表 2-25 に示す。

表 2-25 エリア設計手法の手順

手順	項目	内容
①	不感地帯の把握	<ul style="list-style-type: none"> レイトレースシミュレーションの実施 遮蔽物に応じた補正值(S,R)の適用
②	解決方策の検討	メタマテリアル反射板/中継器/DAS/LCX等から最適な解決方策を選定
③	設備・設置仕様の検討 ※手順③以降はメタマテリアル反射板を選定した場合について記載	<ul style="list-style-type: none"> メタマテリアル反射板に求められる仕様の確認 メタマテリアル反射板対策位置の要件整理
④	解決方策の適応	メタマテリアル反射板利用時の留意事項の確認
⑤	次回設計へのフィードバック	手順③,手順④の結果を比較し、次回設計へのフィードバックを検討

以下に上記手順①から⑤についてその詳細を示す。

◆ 手順①：不感地帯の把握

実施環境において机上検討で事前に不感地帯の把握・他者土地への電波漏洩レベルを予測する際には、本実証のようにレイトレースシミュレーションを実施する手法を推奨する。

レイトレースシミュレーションを用いた事前検討時には、屋内環境における壁、ドア、窓(ガラス)、什器といった反射物、遮蔽物を考慮した 3D モデリングの作成・パラメータ調整を行い、現地環境を模してシミュレーションを実施する。シミュレーション結果より、不感地帯の受信レベルを確認し発生する位置・大きさの確認を実施する。

なお、レイトレースシミュレーションは一事業者が調達するには費用負担が大きいことや、3D モデリング等の技術的知見が必要となるため、レイトレースを実施しない場合の事前検討手法としては、エリア算出式を用いて環境に応じた遮蔽物透過損を引用し机上検討を行う手法を推奨する。本実証環境と類似する一般的な木造建屋において、エリア算出式を用いて机上検討を行う場合に考慮すべきパラメータ(補正值 R)は、電波伝搬モデルの精緻化の実証結果を参照し、「R=35.4」を選択することが望ましいと考える。

◆ 手順②：解決方策の検討

手順①の机上検討の結果より、反射板/中継局/DAS/LCX 等の中から、不感地帯の解消に最適な解決方策を検討する。その際、不感地帯が発生する位置や大きさから選定する。

ミリ波帯の周波数を使用する場合には、金属反射板、メタマテリアル反射板、中継局が該当する。金属反射板については鏡面反射であり、反射波が狭ビームとなるため、エリア改善効果が限定的であることが、2021 年度課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証の No.3「新型コロナからの経済復興に向けたローカル 5G を活用したイチゴ栽培の知能化・自動化の実現」の結果からも明らかになっている。また中継局については、指向性選択の自由度があることや増幅装置により不感地帯面積の大幅な改善が期待できるが、電源、同軸ケーブルの伝送路の確保が必要であるため、設置容易性の観点からは反射板に劣る点がある。

メタマテリアル反射板は、電源が不要で取り付け金具・架台のみで設置可能であるため、設置環境において伝送路・付帯設備の構築の難易度が高いケースやコスト増加が想定されるケースでは優位性がある。令和 3 年度 No.3 の実証環境のように不感地帯想定面積が 100 m²前後であり、単一方向に対する設置の場合には、伝送路の確保等が不要かつ反射波のビーム幅も任意に設計することができるメタマテリアル反射板の利用が有効であると考えられる。

◆ 手順③：設備・設置仕様の検討

手順②解決方策の検討結果として、電波反射板が最適な解決方策である場合について、2022 年度開 17 (電波反射板)のメタマテリアル反射板を複数枚組み合わせることで 1 枚の反射板に見立てた場合の設計手法について記述する。

まず設置条件として、今回利用するメタマテリアル反射板は入射波を反射させることによって、疑似的に LOS 環境を構築する製品であることから、設置条件として下記が挙げられる。

- 反射板設置位置～基地局が LOS 環境であること
- 反射板～対象エリアが LOS 環境であること

- フレネルゾーンを確保できること(特に基地局-反射板間が重要)
- マルチパスは考慮しないこと(反射板においては、基地局からの直接波が支配的であること)
- 上記に加え、電界強度が高いエリアに設置すると効果的

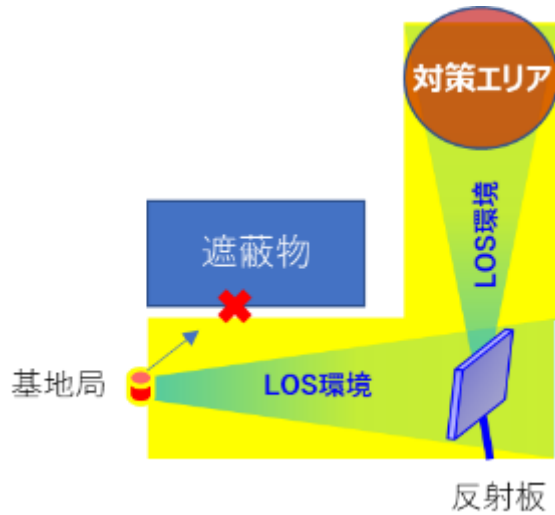


図 2-53 基地局、反射板、対策エリアの位置関係と電波伝搬路

エリア設計モデルにおけるパラメータは表 2-26 のとおりである。

表 2-26 エリア設計モデルにおけるパラメータ

基地局(RU)	陸上移動局(UE)	反射板	距離
使用周波数[MHz]	受信アンテナ利得[dBi]	横の寸法[m]	基地局から反射板まで[m]
送信電力[dBm]		縦の寸法[m]	反射板から反射板でカバーするエリアまで[m]
送信アンテナ利得[dBi]		設置Azimuth角[度]	
送信指向性にかかる減衰[dB]		設置Elevation角[度]	
給電線損失[dB]		反射効率[%]	
		入射波角度 [度]	
		反射波角度 [度]	
		反射板枚数	

次に基地局-反射板、反射板-対策エリアの中心を結ぶ 2 本の直線のなす角度を入射角度とし、入射角度を決定する。

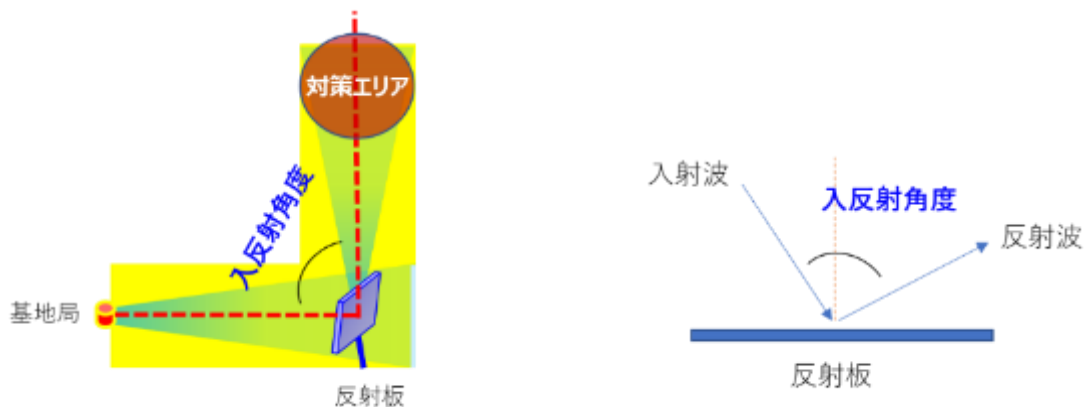
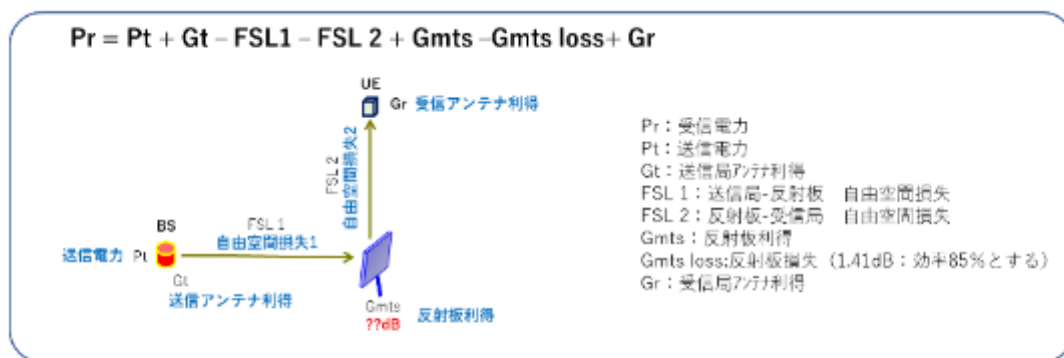


図 2-54 反射板との入射角度

上記が決定したら、反射板を用いたエリア設計として、反射板利得・ビーム幅(カバレッジエリア)を考慮する。この二つの要素によって反射板の枚数・サイズが決定され、設置場所にも影響するため、前述までの要素を考慮しながら利得とビーム幅を検討する。

反射板利得については図 2-55 にて計算することができる。

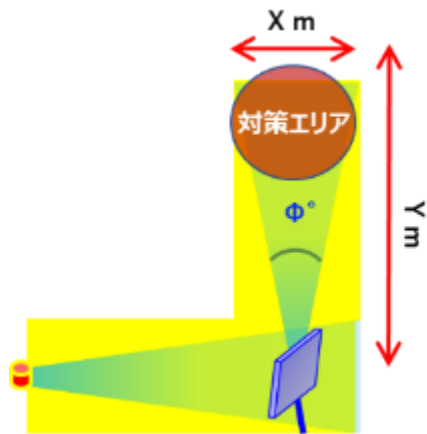


$$Gm_{ts} = Pr - Pt - Gt + FSL1 + FSL2 + Gm_{ts\ loss} - Gr$$

※反射板の必要利得 (Gm_{ts}) は、必要な最低受信感度をPrとして下記式より算出
自由空間損失2 (FSL2) は対策エリアのエリア端 (最も遠い場所) までの距離で算出すること

図 2-55 反射板利得算出

上記より、設定した入射角を基に反射板の必要利得を算出し、利得と入射角に応じた反射板を選定することで 1 枚あたりの反射板の面積とビーム幅が決定される。1 枚あたりの反射板面積とビーム幅が確定したら、対策エリアに対して必要なビーム幅を算出する。



対策エリアの幅：X m
 反射板-対策エリア端の距離：Y m

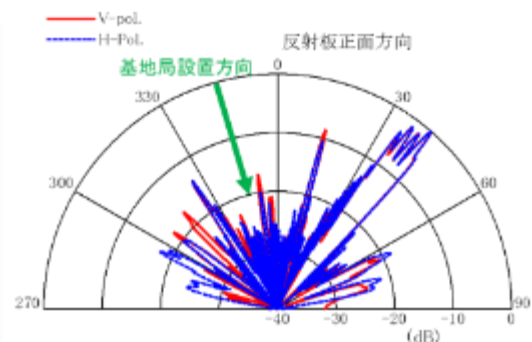
必要なビーム幅

$$\Phi = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{X/2}{Y} \right)$$

図 2-56 対策エリアに対するビーム幅算出

算出したビーム幅から、反射板が何枚必要かを計算し、複数枚並べることで必要ビーム幅に対応できる反射板を算出・設計する。本実証では上記の設計手法から、下記の反射板によるエリア設計を実施した。

項目	仕様	
周波数	28.2~29.1GHz	
利得	約70dB	
入射角	AZ: -15°	EL: 0°
反射角	AZ: 40°	EL: 0°
ビーム幅	AZ: 約8°	EL: 約3°
角度調整	AZ: ±15°	EL: ±15°
反射板寸法	約700×400mm	



岩見沢実証実験 反射パターン

図 2-57 反射板仕様と反射パターン

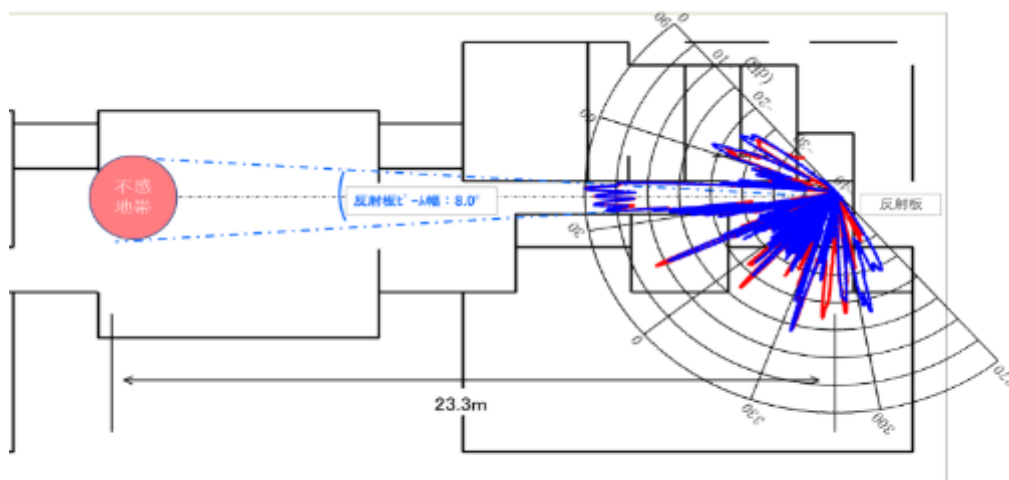


図 2-58 不感地帯へのビーム幅の確認

表 2-27 リンクバジェット算出

Pr = Pt + Gt - FSL1 - FSL 2 + Gmts -Gmts loss+ Gr	
Pt	17.0
Gt	15.0
FSL1	83.9 13.2mで計算
Gmts	70.0
Gmts loss	1.4 効率85%
FSL2	88.9 23.3mで計算
Gr	20.0 ※測定器でオフセット設定しているため
Pr	-52.2
RSRP換算	-78.2

Pr：受信電力
 Pt：送信電力
 Gt：送信局アンテナ利得
 FSL 1：送信局-反射板 自由空間損失
 FSL 2：反射板-受信局 自由空間損失
 Gmts：反射板利得
 Gmts loss:反射板損失（1.41dB：効率85%とする）
 Gr：受信局アンテナ利得

◆ 手順④：解決方策の適応

手順④について、電波反射板設置前後で電波測定・伝送性能測定を実施する。電波反射板によるエリア改善効果が明らかになると想定して選定した測定点を図 2-59 に示す。

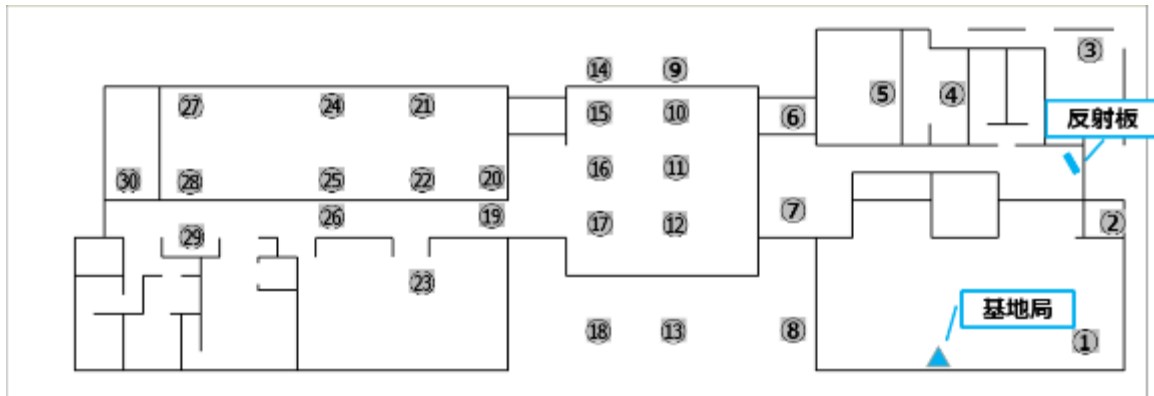


図 2-59 エリア改善効果確認測定点

測定結果から反射板設置することによる不感地帯および伝送性能の改善を確認する。不感地帯であり、ビーム幅の中心である測定点①、⑩に焦点を当て確認してみても、どの測定項目においても改善効果が確認できる。ただし、本実証で掲げている所要性能(UL スループット 80Mbps/伝送遅延 30ms)との差分については改善効果が達成しきれていない点が見受けられる。この点に関して考察する上で今回の反射板設計において、実測値は設計とおりになったかを確認する。

想定していた値に対し、不感地帯の一番良好な数値が算出されると想定している測定点⑩をビーム幅の中心として、そこから左右に 30 cmずつ離れながら測定することで実際のビーム幅を測定した結果を図 2-60 に示す。

• RSRP想定値及び実測値比較

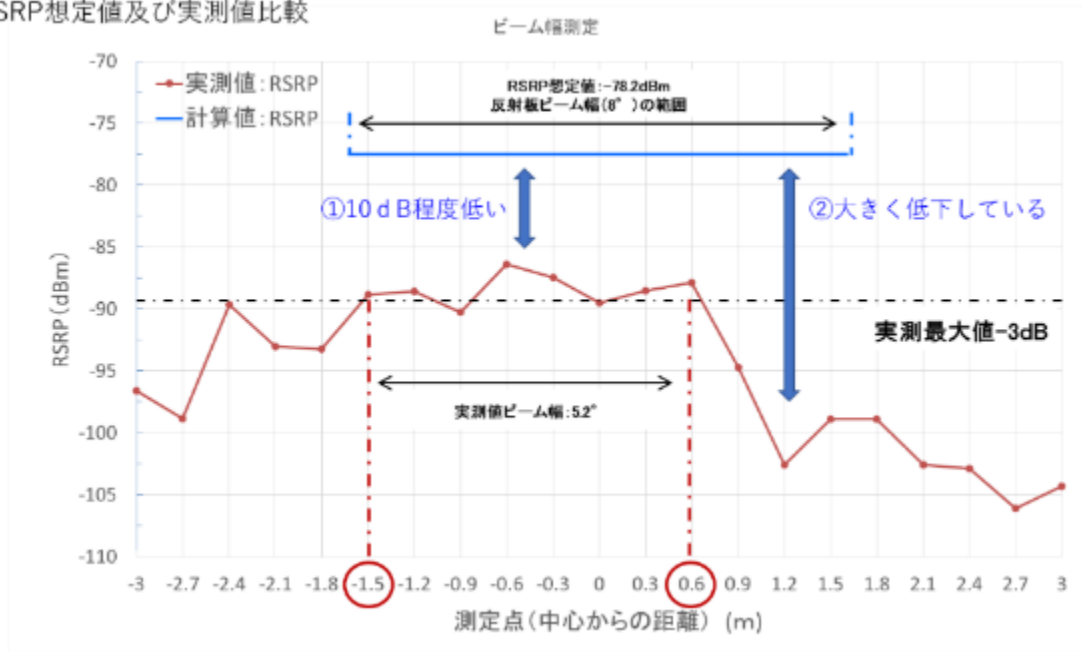


図 2-60 RSRP 想定値及び実測値比較

◆ 上記結果から、想定していた RSRP に対し①10dB 程度の差分があること、②測定箇所によっては大きく低下している箇所があり、結果として実測値のビーム幅は想定 8.0 度に対し 5.2 度という結果を得た。想定値との乖離理由について要因分析を行う。

◆ 手順⑤: 次回設計へのフィードバック

手順③、④で記述した設置条件を確保し、不感地帯を改善できるメタマテリアル反射板の有用な設置方法について検討した。今回の実証環境では設置場所の観点から、反射板設置は基地局に対して同じ設置高になるように架台に取り付けることにしたが、見通し環境を確保するという点では、天井面に設置することで確保するという方法が挙げられる。反射板は疑似的な見通し環境を構築する機器の為、「基地局-反射板」、「反射板-対象エリア」の区間が見通し環境となると効果的に動作する特長がある。人体や什器等の遮蔽が生じる可能性が高い小規模な建物よりも大規模工場や大型施設のような広い空間において、反射板を高所や天井に配置する方法が設置場所として効果的であると考えられる。

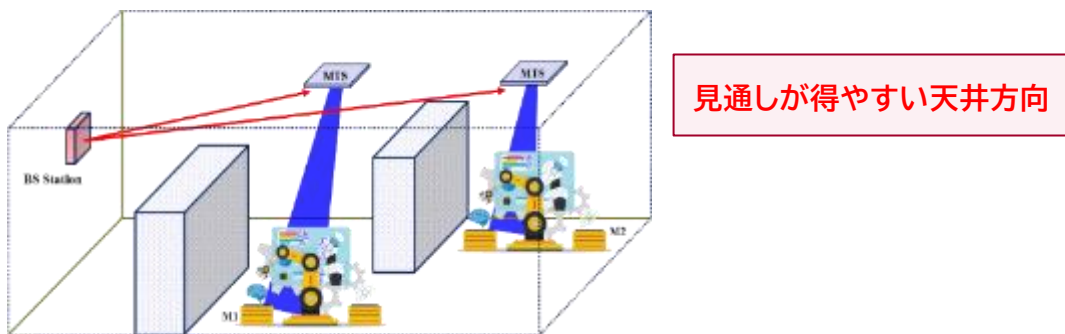


図 2-61 反射板を高所や天井に配置する方法

2) 中継器

中継器活用時の最適なエリア設計手法モデル化に向け設計手順を表 2-28 に記す。

表 2-28 エリア設計手法の手順

手順	項目	内容
①	不感地帯の把握 他者土地電波漏洩の予測	・レイトレースシミュレーションの実施 ・遮蔽物に応じた補正值(S,R)の適用
②	解決方策の検討	反射板/中継器/DAS/LCX から最適な解決方策を選定
③	設備・設置仕様の検討 ※手順③以降は中継器を選定した場合について記載	・中継器に求められる仕様 ・アンテナ設置位置の要件整理
④	解決方策適応前後のリンクバジェット・シミュレーション実施	・不感地帯改善予測(リンクバジェット・レイトレースシミュレーション) ・ドナーアンテナの設置位置決定 ・サービスアンテナの設置位置決定
⑤	解決方策の適応	・中継器設置時の留意事項
⑥	不感地帯・他者土地電波漏洩軽減確認	・電波強度、伝送性能等を測定し不感地帯や他者土地電波漏洩の確認
⑦	次回設計へのフィードバック	・手順④,手順⑤の結果を比較し、次回設計へのフィードバックを検討

以下に上記手順①から⑦についてその詳細を示す。

◆ 手順①: 不感地帯の把握・他者土地電波漏洩の予測

実施環境において机上検討で事前に不感地帯の把握・他者土地への電波漏洩レベルを予測する際には、本実証のようにレイトレースシミュレーションを実施する手法を推奨する。

レイトレースシミュレーションを用いた事前検討時には、農業器具を保管する倉庫やビニールハウス内の柱・什器類による遮蔽や周辺の樹木による遮蔽を考慮した 3D モデリングの作成・パラメータ調整を行い、現地環境を模してシミュレーションを実施します。シミュレーション結果より、不感地帯の受信レベルを確認し発生する位置・大きさの確認と他者土地への電波漏洩レベルの確認を実施する。

なお、レイトレースシミュレーションは一事業者が調達するには費用負担が大きいことや、3D モデリング等の技術的知見が必要となるため、レイトレースを実施しない場合の事前検討手法としては、エリア算出式を用いて環境ごと LOS・NLOS、遮蔽損を引用し机上検討を行う手法を推奨する。

他者土地漏洩に関しては、エリア端の把握のためリピーター設置前後のカバーエリア端・調整対象区域端を算出法エリア図で作図し確認を行う。その際に用いる補正值 S は実証結果を参照し、周辺が樹木に囲まれ NLOS となり、遮蔽物面積率 40%ほどの環境ではフルーツパーク DETO で導出した $S=12.97$ のように郊外地の S 値を選択することを推奨する。また、秋田食産コーヒーハウスのように遮蔽物面積率 3%と一桁台程で周辺が開けた環境では LOS 環境では導出した $S=31.37$ のように開放地の S を選択、NLOS 環境では $S=23.42$ を導出した結果より、開放地と郊外地の間となる S 値を選択することが望

ましいと考える。

◆ 手順②:解決方策の検討

手順①の机上検討の結果より、反射板/中継器/DAS/LCX の中から、不感地帯の解消に最適な解決方策を検討する。不感地帯が発生する位置や大きさから選定する。

◆ 手順③:設備・設置仕様の検討

手順②解決手法の検討結果、中継器が最適な解決方策である場合について以下に記述する。

まず中継器に求められる仕様を示し、ドナーアンテナ・サービスアンテナの設置位置の要件について整理する。中継器ドナー側・サービス側の最大送信出力及び装置内利得値を確認する。本実証で使用した中継器の諸元は以下の通りである。

- ・ 最大送信出力: 10dBm/ポート 13dBm/2ポート(ドナー側/サービス側とも)
- ・ 装置利得: 40 - 60dB

上記より、サービス側最大送信出力: 10dBm/ポートを得るために必要なドナー側のドナー側受信最大電力値は以下の通りである。

- ・ 利得設定 40dB 時: -30dBm/ポート (= 10dBm/ポート - 40dB)
- ・ 利得設定 60dB 時: -50dBm/ポート (= 10dBm/ポート - 60dB)

実運用後の利得調整等を考えて安定した品質を確保するためには、サービス側最大出力が得られるドナー側受信最大電力値を元に、利得設定値の決定を行うことが望ましい。この場合、ドナー側受信許容最大電力値は -30 ~ -50dBm/ポートとなる。SS-RSRP で表現すれば-65 ~ -85dBm であり、ドナーアンテナ側の受信レベル目標値となる。

中継器を使用したシステム全体の電波経路を図 2-62 に示す。

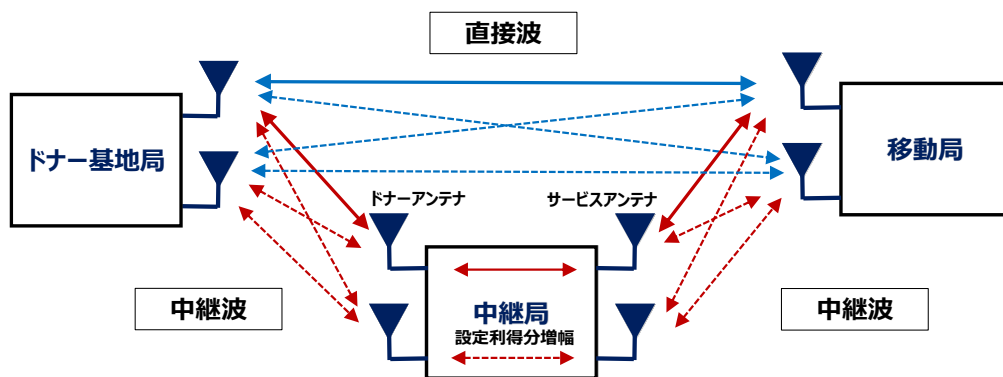


図 2-62 中継器使用時のシステム全体の電波経路

上図で青線は直接波(基地局⇄移動局)、中継波(基地局⇄中継器⇄移動局)の電波経路、実線は SSS 信号(リファレンス信号)の支配的な電波経路を示す。

上図で分かる様に、中継波の電波経路は、基地局⇄中継器、中継器⇄移動局の2つのパートから構成される。中継波は直接波に比べて電波経路が多い分変動の影響が大きくなり(変動が重畳され)、よりスループットの変動も大きくなる。従って、慎重な RF 回線設計が必要となる。中継器のドナーアンテナは一度設置位置を決めればポール等に取り付け固定となることが想定され、基地局⇄中継器の電波経路は「固定通信」として運用されるため、電波経路は一定でありスループットの変動も小さくなる。一方、中

継器⇔移動局の経路は移動局の移動に伴い、電波経路は変化し、スループットの変動もダイナミックに変化しやすい環境にある。

以上より、中継波による良好な品質の電波通信を得るためには、基地局⇔中継器間は、安定した品質の電波通信が確保できるようドナーアンテナの設置位置を決めることが必要不可欠となる。具体的には、下記があげられる。

- ✓ 基地局－中継器ドナーアンテナが見通し(LOS)であること。
(経路上に障害物が無いこと)
- ✓ 経路の近くに、反射波を生じさせる様な障害物が無いこと。
- ✓ フレネルゾーンを確保できること。
- ✓ 中継器ドナーアンテナとは自由空間伝搬となる伝搬状態が望ましい。
- ✓ ドナーアンテナ・サービスアンテナのアイソレーションを確保すること。

アイソレーションの確保については、3GPP で規定されている TR25.956 より、中継器利得+15dB が規格となる。本実証で仕様する中継器利得は最大 60dB であるため、60dB+15dB=75dB に 5dB のマージンを見込み 80dB を目標にアイソレーションが確保できれば問題ないと判断した。

<計算条件>

- 1) 机上では、最悪時の動作を考慮して中継器最大利得で計算を行う。
(本実証では 60dB)
- 2) Path Loss は、自由空間伝搬式により計算する。
- 3) 机上計算では、マージンを考慮して、15dB⇒20dB で計算・判定を行う。

$$Se_O = Do_I + G$$

$$Do_FB_I = Se_O - Lf_Se + aG_Se - PL + aG_Do - Lf_Do$$

$$Do_FB_I \leq Do_I - 15(20)$$

$$\Rightarrow G \leq PL - (aG_Do + aG_Se) + (Lf_Do + Lf_Se) - 15(20)$$

◆ 手順④:解決方策適応前後のリンクバジェット・シミュレーション実施

次に、手順③で確認した設置要件を考慮し基地局～中継器間と中継器～端末間の2つの区間のリンクバジェットを算出する。リンクバジェットで考慮すべきパラメータは下記となる。(計算値は本実証における値を適用。)

表 2-29 リンクバジェット算出(基地局～中継器間)

基地局→リピーター リンクバジェット			
※電波法関係審査基準エリア算出法に基づいた回線設計書			
パラメーター	計算値	単位	備考
f	4849.98	MHz	使用する周波数
H _b	4	m	基地局の空中線地上高
H _m	3	m	陸上移動局の空中線地上高
dxy	0.03	km	基地局と伝搬損失を算定する地点との距離
α	1	—	遠距離考慮係数
a(H _m)	-0.001	—	移動局考慮係数
b(H _b)	-17.501	—	基地局考慮係数
K	0	—	補正值
R	0	—	建物侵入損
S	32.5	—	補正值 (開放地)
P _t	16.052	dBm	送信電力-給電線損失
G _t	1	dBi	送信アンテナ利得
G _r	0	dBi	受信アンテナ利得
EIRP	20.052	dBm	等価等方輻射電力 Pt+G _t -L _f
L	75.662	dB	伝搬損失 32.4+20*LOG10(f)+10*LOG10((dxy)^2+(H _b -H _m)^2/1000000)+R
P _r	-58.61	dBm	受信電力 Pt+G _t +G _r -L-L _f

表 2-30 リンクバジェット算出(中継器～端末間)

リピーター→受信端末 リンクバジェット			
※電波法関係審査基準エリア算出法に基づいた回線設計書			
パラメータ	計算値	単位	備考
f	4849.98	MHz	使用する周波数
H _b	2	m	基地局の空中線地上高
H _m	1.5	m	陸上移動局の空中線地上高
dxy	0.035	km	基地局と伝搬損失を算定する地点との距離
α	1	—	遠距離考慮係数
a(H _m)	-0.001	—	移動局考慮係数
b(H _b)	-23.522	—	基地局考慮係数
K	0	—	補正值
R	0	—	建物侵入損
S	32.5	—	補正值 (開放地)
P _t	-1.48	dBm	送信電力(受信電力-58.61dBm+装置内利得57.13)
G _t	1	dBi	サービスアンテナ 送信アンテナ利得
G _r	1	dBi	UE 受信アンテナ利得
EIRP	-0.48	dBm	等価等方輻射電力 Pt+G _t -L _f
L	76.997	dB	伝搬損失 32.4+20*LOG10(f)+10*LOG10((dxy)^2+(H _b -H _m)^2/1000000)+R
P _r	-84.48	dBm	受信電力 Pt+G _t +G _r -L-L _f

なお、上記リンクバジェット例では、受信端末の受信電力を-84dBm 程とカバーエリアの閾値で算出しているが、実際のエリア設計ではシミュレーションと実測で誤差が生じることを考慮し、+5dB 程のマージンを持たせるよう考慮した設計が重要である。

リンクバジェット結果および手順③に示した設置要件をもとにドナーアンテナ・サービスアンテナの設

置位置を決定する。設置位置決定後、中継器設置後のレイトレースシミュレーションを実施し所要改善量を確認し設置後の受信電力の改善目標値(dB)を設定する。

◆ 手順⑤:解決方策の適応

中継器設置手順、設置時の留意事項

中継器設置時には、手順③の設置要件を満たすよう下記の点を満たしていること、および手順④のリンクバジェットに基づき基地局～ドナーアンテナ・サービスアンテナ～不感地帯の距離を確認しアンテナを設置する。

- ✓ 基地局－中継器ドナーアンテナが見通し(LOS)であること。
(経路上に障害物が無いこと)
- ✓ 経路の近くに、反射波を生じさせる様な障害物が無いこと。
- ✓ フレネルゾーンを確保できること。
- ✓ 中継器ドナーアンテナとは自由空間伝搬となる伝搬状態が望ましい。
- ✓ ドナーアンテナ・サービスアンテナのアイソレーションを確保すること。

ポール等で仮設置する場合、風の揺れであっても電波伝搬に影響を及ぼすため出来る限りアンテナは固定し風等の影響を受けないよう設置することが望ましい。

ドナーアンテナの受信レベルを確認するため、1000 サンプル以上のデータ取得を行い、受信レベルが目標値を満たしており安定していることを確認する。

◆ 手順⑥:不感地帯・他者土地電波漏洩軽減の確認

中継器設置後の不感地帯・他者土地電波漏洩軽減効果の確認手法を記す。不感地帯を中心に、等間隔でメッシュ状に測定点をプロットする。定義した測定点で中継器設置前後の受信電力・伝送性能を取得し改善効果を比較する。取得するパラメータは以下の通りである。

- ・ 受信電力(SS-RSRP)
- ・ 伝送性能(SINR,UL・DL スループット・UL・DL 伝送遅延)

他者土地漏洩軽減の確認には、壁面等が存在する場合には、壁面前後の測定点(屋内・屋外)の受信電力を比較し、差分から透過損失を確認する。

◆ 手順⑦:次回設計へのフィードバック

手順④のリンクバジェットと手順⑥で確認した不感地帯における受信レベルを比較する。目標値未達の場合においては、下記の方策によって性能向上する可能性について検討する。

- ✓ 基地局の送信出力や角度変更によって性能向上する可能性
- ✓ 中継器の設置位置や角度変更によって性能向上する可能性

前述のとおり、中継器の利得設定値を一定(60dB)とした場合、中継器サービスアンテナの送信出力はドナーアンテナの受信レベルに応じて決定される。事前の回線設計では、ドナーアンテナの受信電力が良好である位置に設置できるよう基地局の送信出力および設置角度、中継器の設置位置および設置角度を考慮したエリア設計を行う必要がある。

具体的には、下記があげられる。

- ・ SS-RSRP: -65 ~ -85dBm の範囲での受信レベルの確保 (本実証の場合)
- ・ 基地局アンテナー中継器ドナーアンテナが見通し(LOS)であること(経路上に障害物が無いこと)
- ・ 経路の近くに、反射波を生じさせる様な障害物が無いこと。
- ・ フレネルゾーンを確保できること。
- ・ 基地局アンテナー中継器ドナーアンテナは自由空間伝搬となる伝搬状態が望ましい。

3) DAS

DAS を用いたエリア設計には、事前のシミュレーションやリンクバジェット算出、アンテナ設置位置の検討といった留意事項が数多く存在するため、本実証で得られた知見より DAS を用いたエリア設計手法のモデル化を行った。屋内設置を想定した DAS 活用時におけるエリア設計手法モデル化に向けた設計手順を表 2-31 に示す。

表 2-31 エリア設計手法の手順

手順	項目	内容
①	不感地帯の把握 他者土地電波漏洩の予測	・レイトレースシミュレーションの実施 ・遮蔽物に応じた補正值(R,S)の適用
②	解決方策の検討	反射板/中継器/DAS/LCX から最適な解決方策を選定
③	設備・設置仕様の検討 ※手順③以降は DAS を選定した場合について記載	・DAS に求められる仕様の検討 ・アンテナ設置位置の要件整理
④	解決方策適応前後のリンクバジェット・シミュレーション実施	・不感地帯改善予測(リンクバジェット・レイトレースシミュレーション) ・サービスアンテナの設置位置決定
⑤	解決方策の適応	・DAS 設置時の留意事項
⑥	不感地帯・他者土地電波漏洩軽減確認	・電波強度、伝送性能等を測定し不感地帯や他者土地電波漏洩の確認
⑦	次回設計へのフィードバック	・手順④, 手順⑤の結果を比較し、次回設計へのフィードバックを検討

以下に上記手順①から⑦についてその詳細を示す。

◆ 手順①: 不感地帯の把握・他者土地電波漏洩の予測

実施環境において机上検討で事前に不感地帯の把握・他者土地への電波漏洩レベルを予測する際には、本実証のようにレイトレースシミュレーションを実施する手法を推奨する。

レイトレースシミュレーションを用いた事前検討時には、屋内に多数存在する屋内壁、窓、各病室のスライド式扉、天井や床面に設置されているデッキプレート等、多様な素材で構成される遮蔽物による透

過・反射を考慮した 3D モデリングの作成・パラメータ調整を行い、現地環境を模してシミュレーションを実施する。シミュレーション結果より、不感地帯の受信レベルを確認し発生する位置・大きさの確認と他者土地への電波漏洩レベルの確認を実施する。

なお、レイトレースシミュレーションは一事業者が調達するには費用負担が大きいことや、3D モデリング等の技術的知見が必要となるため、レイトレースを実施しない場合の事前検討手法として、本実証で得られた遮蔽物透過損を用いたエリア算出手法を推奨する。

「電波伝搬モデルの精緻化」の実証にて得られた屋内遮蔽物における遮蔽物透過損を表 2-32 に示す。この各遮蔽物の透過損値を平均すると、屋内遮蔽物に対する透過損失の平均値は 6.7dB となる。

表 2-32 屋内遮蔽物における遮蔽物透過損

遮蔽物	素材	透過損 (dB)
屋内壁(石膏)	石膏	5.78
屋内壁(鋼材)	鋼材	16.16
スライド式扉(各病室)	木材	8.12
窓(外壁)	ガラス	2.73
自動ドア(ナースステーション)	ガラス	3.63
開閉式扉(テレフォンルーム)	ガラス	2.82
円柱(ナースステーション)	木材	7.91

本実証環境に基づいた例を示すと、図 2-63 のように3か所にアンテナを設置すると仮定して、それぞれに①から③の番号を平面図にプロットする。次にアンテナの仕様に基づき、アンテナの電波到達範囲の円を描いて 12 等分する。12 等分した各区画に対して、業務区域内で遮蔽物がいくつ存在しているかを確認し、区画内を電波が透過する際の遮蔽物平均枚数・最大枚数を算出する。ただし、業務区域が含まれない区画については遮蔽物確認の対象外とする。図 2-63 に記した例では、12 等分した方向の遮蔽物平均枚数は 1.7 枚、最大枚数は4枚となる。

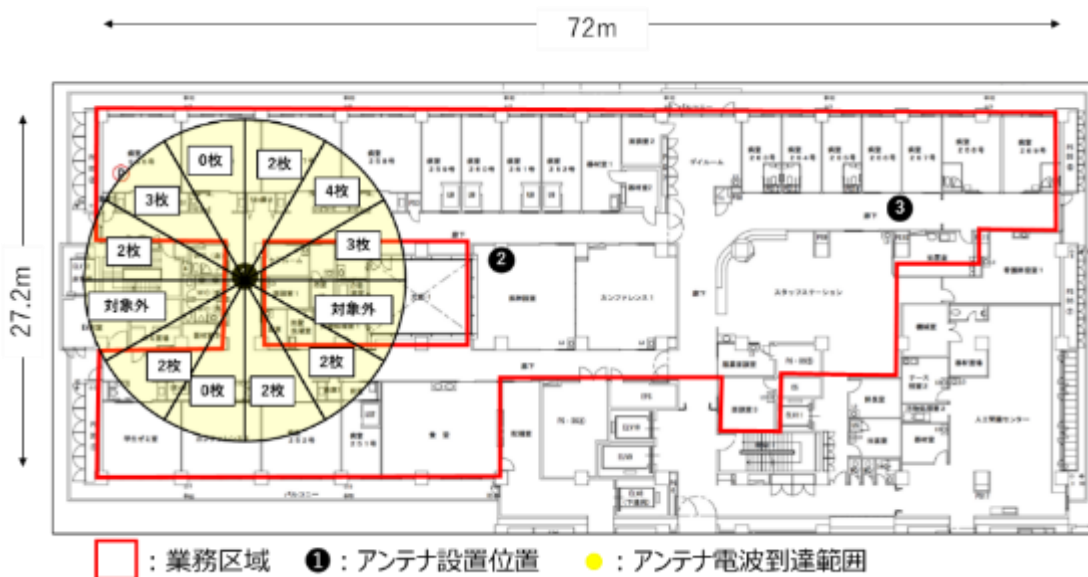


図 2-63 アンテナ到達範囲での遮蔽物確認

次に、アンテナ付近における遮蔽物透過損の予測値を算出する。対象とする区画を大まかにカバーしたい場合は遮蔽物平均枚数より、区画全域をカバーしたい場合は遮蔽物最大枚数を用いて、本実証結果から得られた1遮蔽物あたりの平均遮蔽透過損「約 6.7dB」より透過損予測値を算出する。本例では、遮蔽物平均枚数 1.7 枚を用いた場合は約 11.4dB が、遮蔽物最大枚数4枚を用いた場合は 26.8dB が遮蔽物透過損の予測値として算出される。手順④では、この遮蔽物透過損を用いてエリア設計を実施する。

◆ 手順②:解決方策の検討

手順①の机上検討の結果より、反射板/中継器/DAS/LCX の中から、不感地帯の解消に最適な解決方策を検討する。不感地帯が発生する位置や不感地帯の大きさ等から解決方策を選定する。

本実証環境である病棟環境のように、多数の遮蔽物による不感地帯が散在しており、不感地の大きさが各々50~100 m²程となるフィールドにおいては DAS の設置が適当であるといえる。

◆ 手順③:設備・設置仕様の検討

不感地帯の改善方策として DAS を採用する場合、Active DAS と Passive DAS のどちらを採用すべきかを検討する必要がある。Active DAS と Passive DAS の比較について、表 2-33 に示す。

表 2-33 Active DAS と Passive DAS の比較

比較項目	Active DAS	Passive DAS
無線機の位置	アンテナに搭載	基地局に搭載
給電線損失の有無	発生しない	発生する
コスト面の比較	Passive DAS より高価	Active DAS より安価
アンテナごとの電波出力設定	設定可	設定不可

表 2-33 に示す通り、Active DAS と Passive DAS の違いは、無線部がアンテナに内蔵されてい

るかどうかであり、Active DAS であれば給電線損失を考慮する必要が無く、アンテナごとの電波出力設定が可能となるというメリットがあるものの、Passive DAS よりもコストが高額になってしまうデメリットも存在する。これらの項目を比較することで、Active DAS と Passive DAS のどちらが導入環境に適するかを検討することが推奨される。

また、DAS 採用時にはアンテナ種別・位置の設計も併せて検討する必要がある。アンテナの指向性の有無については、解消したい不感地帯の範囲・形状に従って選定する。本実証環境のように、屋内をくまなくカバーしたいケースにおいては、無指向性アンテナの選定を推奨する。また、アンテナ選定時には、選定候補のアンテナが「分散アンテナシステムとしての構成」をもって技術基準適合証明を取得していることを確認する必要がある。これは、無線機として技術基準適合証明を取得しているローカル5Gシステムであっても、分散アンテナシステムとしては取得されていない場合が存在するためである。

アンテナの設置構成についても、周辺環境や用途を考慮して検討する必要がある。室内環境におけるクリアランスの確保を考慮する場合は、天井への敷設を検討することが望まれる。さらに、Passive DAS を採用する場合には、分配損失および給電線損失を考慮した設置位置の設計も行う必要がある。本実証で用いた Passive DAS では分配損失が 4.8dB、ケーブル損失は 100m あたり 32.518dB であった。各アンテナのケーブル長はアンテナ①が 50m、アンテナ②が 30m、アンテナ③が 25m であったため、給電線損失はそれぞれ、アンテナ①は 16.25dB、アンテナ②は 9.75dB、アンテナ③は 8.125dB となる。このように、給電線損失は同軸ケーブル長によって変わるため、アンテナ設置位置を検討する際は給電線損失による減衰量が許容できることを踏まえて設計する必要がある。減衰量が許容できない場合は、各アンテナに無線機が内蔵されており、アンテナごとに送信出力を設定できる Active DAS を検討することを推奨する。

◆ 手順④:解決方策適応前後のシミュレーション実施

手順③に示した設置要件をもとにアンテナの設置位置を決定した後、DAS における各アンテナのカバーできるエリアを推定することで、目標としている不感地帯の改善効果についてシミュレーションを実施する。カバーエリアの推定方法については、本実証のようにレイトレースシミュレーションを用いる手法を推奨する。しかし、手順①でも述べたようにレイトレースシミュレーションの利用については、費用面・技術面におけるハードルが大きいことから、電波法関係審査基準エリア算出法に基づいた各アンテナにおけるリンクバジェット算出方法を示す。

DAS 設置時の各アンテナのリンクバジェットの算出式を下記に示す。

$$Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 8$$
$$L = 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 10 \log_{10}\left\{(d_{xy})^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6}\right\} + R'$$

ただし、式中のパラメータは下記に示す通りである。

Pr:受信レベル(受信電力)[dBm]

Pt:送信電力(基地局の空中線電力)[dBm]

Gt:送信アンテナ利得[dBi]

Lf:基地局の給電線損失[dB]

Gr :受信アンテナ利得 [dBi]

L :伝搬損失 [dB]

f :使用する周波数 [MHz]

d_{xy} :基地局と伝搬損失を算定する地点との距離 [km]

H_b :基地局の空中線地上高 [m]

H_m :陸上移動局の空中線地上高 [m]

R' :屋内における遮蔽物透過損。手順①で算出した値を適用する。

また、一例として本実証で使用したパラメータ(表 2-34)を用いて、アンテナ①より 15m 離れた位置におけるリンクバジェット算出結果を示す。ただし、屋内における遮蔽物侵入損は、遮蔽物平均枚数より算出した 11.4dB を適用する。

表 2-34 リンクバジェット算出のパラメータ

パラメータ	計算値	単位	備考
P_t	46	dBm	送信電力(基地局の空中線電力)
G_t	1	dBi	送信アンテナ利得
L_f	16.25	dB	基地局の給電線損失
G_r	0	dBi	受信アンテナ利得
f	4849.98	MHz	使用する周波数
d_{xy}	0.015	km	基地局と伝搬損失を算定する地点との距離
H_b	9.8	m	基地局の空中線地上高
H_m	6.9	m	陸上移動局の空中線地上高
R'	11.4	dB	屋内における遮蔽物透過損

$$\begin{aligned} L &= 32.4 + 20 \log_{10}(f) + 10 \log_{10} \left\{ (d_{xy})^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6} \right\} + R' \\ &= 32.4 + 20 \log_{10}(4849.98) + 10 \log_{10} \left\{ 0.015^2 + \frac{(9.8 - 6.9)^2}{10^6} \right\} + 11.4 \\ &\cong 81.2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Pr &= P_t + G_t - L_f + G_r - L - 8 \\ &= 46 + 1 - 16.25 + 0 - 81.2 - 8 \\ &= -58.45 \text{ [dBm]} \end{aligned}$$

ただし、実際のエリア設計ではレイトレースシミュレーションや上記のリンクバジェット算出式による推定値と、実測値の間に誤差が生じることが想定されるため、+10dB程度のマージンを持たせたエリア設計を行うことを推奨する。

手順③・④で示した設置要件・推定カバーエリアなどを元にアンテナ設置位置・方式を決定した後、DAS 導入後における所要改善量を確認し、導入後の受信電力改善目標値(dB)を設定する。

◆ 手順⑤:解決方策の適応

DAS 導入時の留意事項として、下記の設置要件を満たしていることが必要である。

- ✓ 張り出しアンテナの AC 電源が確保できる環境であること
- ✓ 基地局から張り出しアンテナまでの同軸ケーブル配線が物理的に可能であること
- ✓ 張り出しアンテナの設置位置にて、敷設工事が可能であること(天井施工など)
- ✓ Passive DAS を採用する場合、給電線損失による減衰量が許容できる距離までにアンテナ設置位置が設計されていること
- ✓ 基地局から各アンテナへの分配を行うための、分配器の設置が可能なスペースが確保されていること

設置後は、各アンテナ下において 1000 サンプル以上のデータ取得を行い、受信レベルおよび安定性が目標値を満たしているかを確認することを推奨する。

◆ 手順⑥:不感地帯・他者土地電波漏洩軽減の確認

DAS 設置後における不感地帯・他者土地電波漏洩軽減効果を確認する手法を示す。まず、対象とする業務区域を等間隔でメッシュ上に区分けし、各メッシュ内にて測定点を設定する。設定した各測定点にて DAS 設置前後の下記パラメータを取得することで、受信電力・伝送性能から改善効果を比較する。

- ・ 受信電力(SS-RSRP)
- ・ 伝送性能(SINR,UL・DL スループット・UL・DL 伝送遅延)

他者土地漏洩軽減の確認には、屋外もしくはバルコニーなどの半屋外で取得した屋外受信電力と屋内の受信電力を DAS 設置前後で測定し、その差分から透過損失を確認することで行う。

◆ 手順⑦:次回設計へのフィードバック

手順④で推定したリンクバジェット(レイトレースシミュレーションを実施している場合はレイトレースシミュレーションに基づくシミュレーション値)と手順⑥で確認した不感地帯における受信レベルを比較することで、DAS 導入による不感地帯解消の効果について評価を行う。手順④で設定した受信電力改善目標値を下回るエリアについては、下記の方策によって導入効果が向上する可能性について検討する。

- ・ 基地局の送信出力を変更
- ・ アンテナの増設や、一部のアンテナを指向性アンテナに置換する

また、遮蔽物の多い屋内環境では、壁や窓、各個室の開閉扉などによって様々な遮蔽・回折などの影響が生じるため、エリア設計時には想定されていなかったマルチパス波や電波伝搬の大幅な減衰が発

生する可能性が考えられる。そのため、下記に示す測定を実施することで、類似環境におけるレイト
レースシミュレーション実施時に資するモデルの精緻化を実施することが可能となる。

- ・ マルチパスの発生箇所における周辺環境から、発生原因を特定する
- ・ 屋内の様々な遮蔽物に対して、遮蔽物前後の受信電力差分より遮蔽損を算出する

4) LCX

漏洩同軸ケーブル(LCX)のエリア設計手法を確立することで、カバーエリアや調整対象区域を精度
よくシミュレーションにて算出し、免許申請の手続き方法を確立することにつなげることを目的として、
LCX のエリア設計手法について検討した。

LCX のエリア設計手法として、LCX の理論式に基づくエリア算出式を検討した。今回、LCX のエリア
算出式は使用した LCX の諸元(伝送損失 0.3 dB/m、結合損失 60dB)及び公開情報から検討した。
公開情報から抜粋する LCX の結合損失と結合損失の距離特性の概念図を図 2-64 に示す。

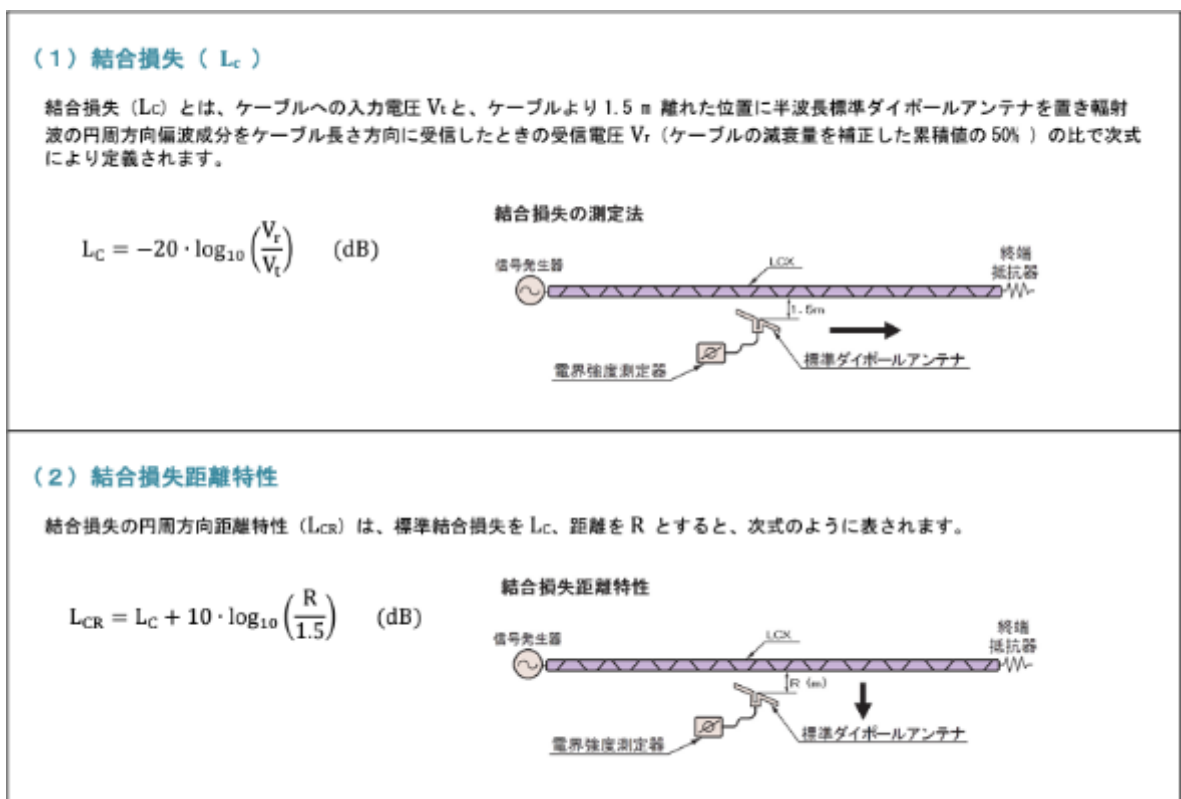


図 2-64 漏洩同軸ケーブルの結合損失と結合損失距離特性

図 2-64 を参考として、式(1)に LCX の結合損失の式を、式(2)に LCX の結合損失の距離特性の
式を示す。式(1)と式(2)を踏まえ、LCX の給電点からの距離と、LCX の法線距離に対する受信電力推
定値を式(3)に示す。 L_C は結合損失[dB]、 P_{dipole} は結合損失測定の際に用いた標準ダイポールアンテ
ナの受信電力、 P_t は送信電力、 L_{CR} は LCX の法線距離に応じた損失[dB]、 R は LCX からの法線距
離[m]、 S は LCX エリア算出式用の精緻化パラメータである。以上のパラメータを踏まえ、式(3)により
受信電力推定値を算出した。 G_r は受信アンテナ利得[dBi]、 G_{dipole} は半波長ダイポールアンテナの利得

[dBi]、 a はLCXの伝送損失[dB/m]、 l はLCXの給電点からの距離[m]を示す。LCXの給電点からの距離と法線距離の関係について、図2-65に示す。基本は図2-64に記載される式と同様の考え方であるが、式(3)にあるLCX接線方向における伝送損失を考慮した減衰及び式(2)の精緻化パラメータ S を追加している。なお、式(3)において G_{dipole} が減算される理由は、式(1)ではダイポールアンテナが受信した受信電力を用いて結合損失が計算されるており、その補正のためである。

$$L_C = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{dipole}}{P_t} \right) \quad (1)$$

$$L_{CR} = L_C + 10 \log_{10} \left(\frac{R}{1.5} \right) + S \quad (2)$$

$$P_r = P_t + G_r - G_{dipole} - L_{CR} - a \times l \quad (3)$$

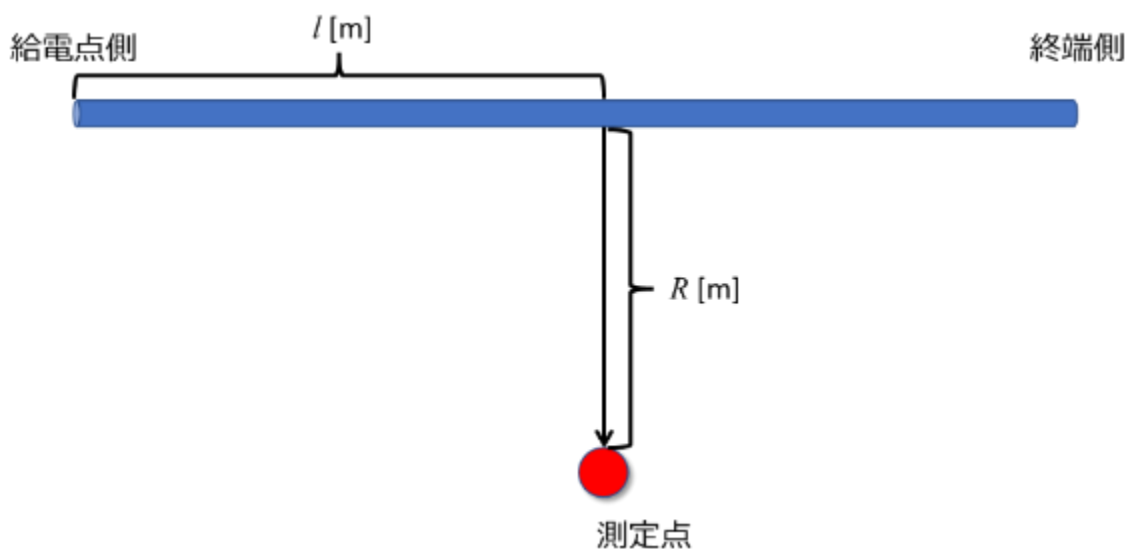


図 2-65 給電点からの距離(L)と法線距離(R)の関係

今回は、無線ユニット RU-2 に対して上記の式を適用し、エリア算出式の検討を行った。RU-2 を選定した理由としては、LCX が約 150 m と比較的長く、かつ直線に敷設されているため、基礎検討に有効であるためである。今回検討した精緻化は、RU-2 の測定点のうち、法線距離が算出可能な測定点 16 点により実施した。式(2)に示す精緻化パラメータ S を用いて精緻化したところ、 S 値は 11.51 となった。また LCX の給電点からの 2 次元距離に対する受信電力を LCX のエリア算出式(精緻化後)と実測値で比較した結果を図 2-66 に示す。

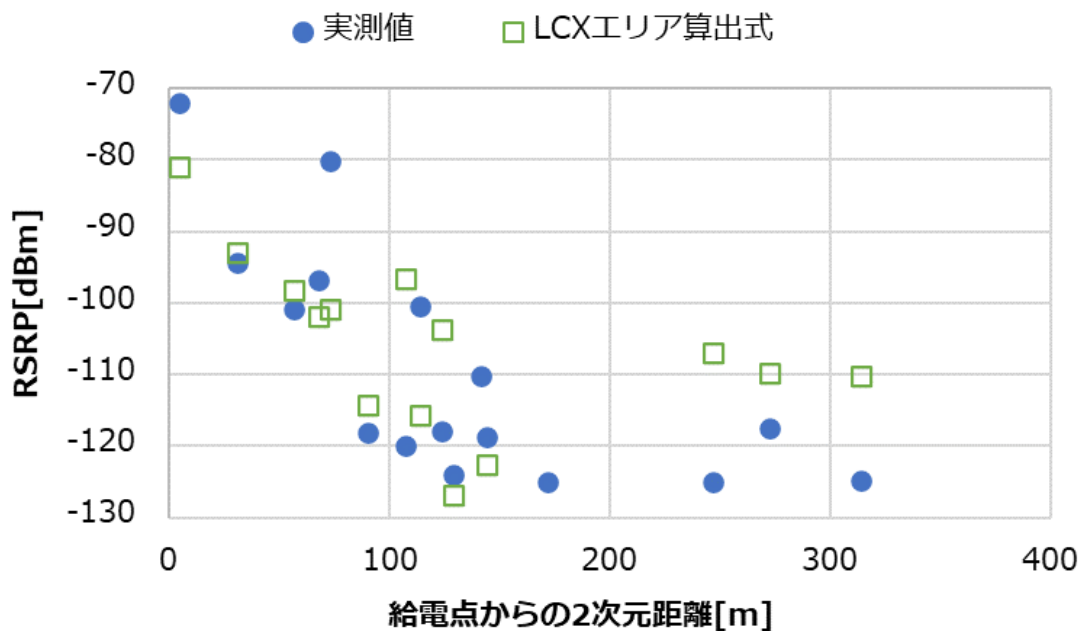


図 2-66 受信電力のエリア算出式と実測値比較

図 2-66 から、今回検討した LCX のエリア算出式では LCX の法線方向にしかエリア推定が出来ない点と、LCX の法線距離方向の距離減衰特性が実態の法線方向の電波強度減衰傾向と一致しない点から、今回検討した LCX のエリア算出式では精密なカバーエリア推定にて適用しづらいと考えている。この理由として、LCX は本来、電波不感地帯への対策として用いられるため、今回の検証において用いた図 2-64 の公開情報の LCX 法線方向の距離特性が、LCX から法線方向に十分遠方を考慮した式ではなく、LCX 近傍のみを考慮している可能性がある。

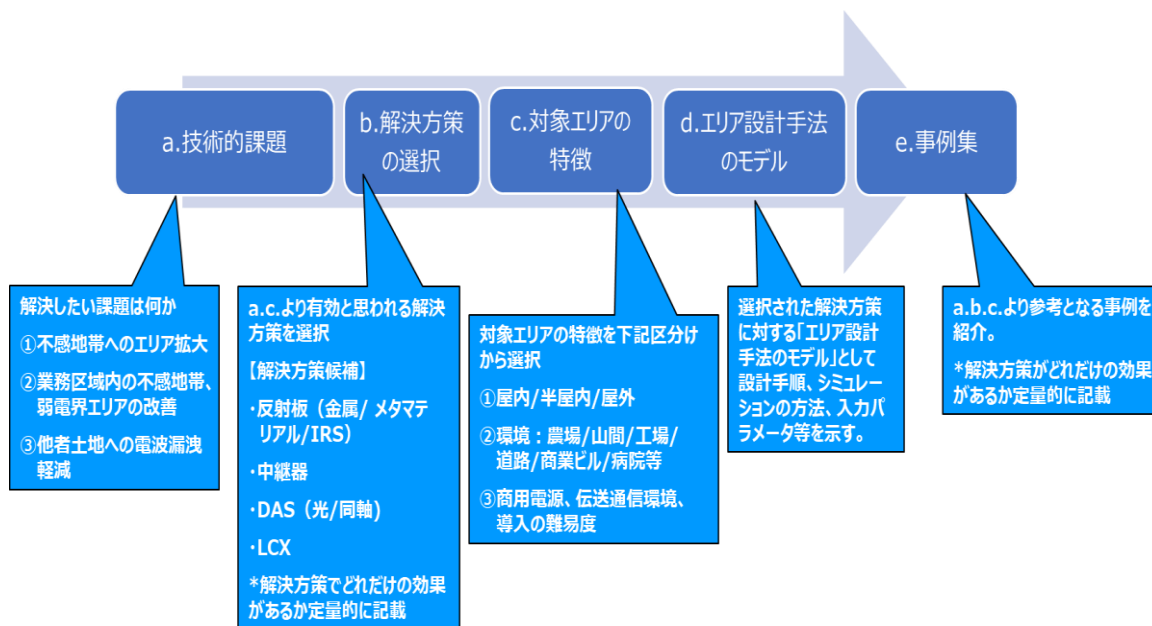
上記の課題から、精度の高い LCX のエリア算出式を検討するためには、式(2)にて示した伝搬損失の距離特性の項を、LCX 接線方向と法線方向についてそれぞれ多くのデータから統計的に算出する必要があると考えている。

また図 2-66 から、実測値と LCX エリア算出式(精緻化後)を比較したときの RMSE は 12.89 であった。RU-2 のレイトレースシミュレーションと実測値の RMSE は 8.83 であり、レイトレースシミュレーションの方がより精度が高いことを確認した。また、LCX シミュレーションであれば、LCX の法線方向だけでなく、接線方向にもシミュレーション可能であり、より精細なエリアマップ推定が可能だと考える。今回の実証のようなカバーエリア端、調整対象区域端を推定するような目的に対しては、今回検討した LCX エリア算出式はカバーエリア端、調整対象区域端の推定に対しては難しく、実測の結果からも、LCX 法線方向だけでなく接線方向も含めて受信電力を推定する手法が必要であると考え。また、サイトスペシフィックな受信電力推定が可能であるレイトレースシミュレーションが精密なエリア推定にはより有効であると考えている。

2.2.5 エリア構築の柔軟化事例

(1) エリア構築の柔軟化事例

令和4年度における技術実証の事例集を別冊として作成するが、検索を容易とするために技術的課題(a)、解決方策(b)と対象エリアの特徴(c)から参考となるエリア設計手法のモデル(d)と対象事例(e)が導けるようにした。



(2) エリア構築の課題に応じた参考事例の紹介

1) 不感地帯の改善

不感地帯の改善に対する技術課題に対して、電波反射板、中継器、DAS、LCX の解決方策による実証試験が行われた。対象エリアとして屋外、屋内、半屋内があり対象となる事例を図 2-67 に示す。対象事例は事例集として別冊にまとめた。

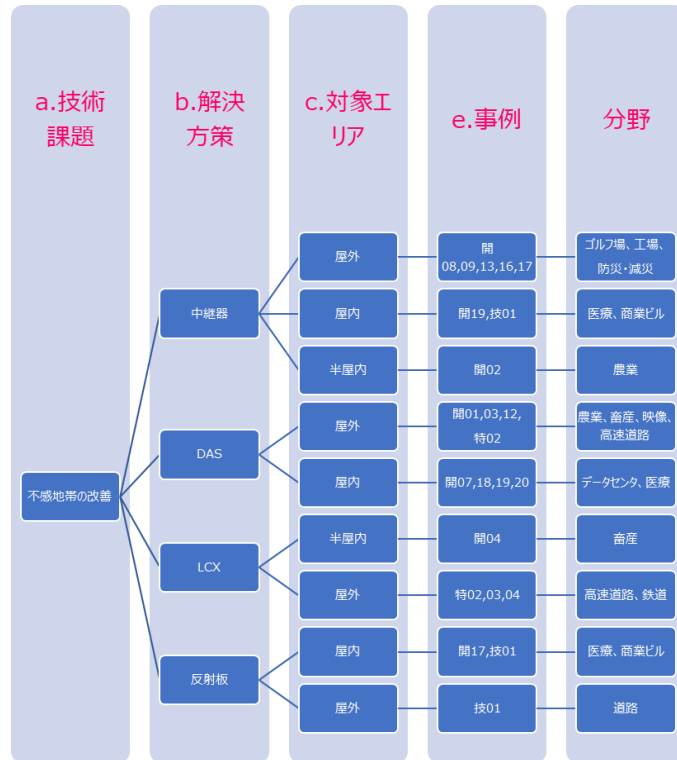


図 2-67 不感地帯の改善に関する事例一覧

2) 他者土地への電波漏洩軽減

他者土地への電波漏洩軽減に対する技術課題に対して、中継器、DAS、LCX、電波遮蔽フィルムの解決方策による実証試験が行われた。対象エリアとして屋外、屋内、半屋内があり対象となる事例を図 2-68 に示す。対象事例は事例集として別冊にまとめた。

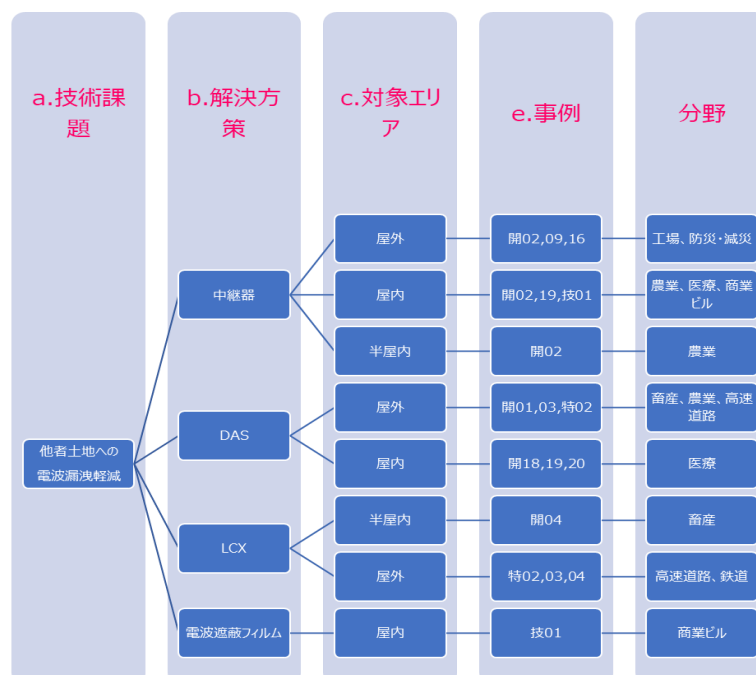


図 2-68 他者土地への電波漏洩軽減に関する事例一覧

2.2.6 実証を通じて見出した課題と課題解決の方策

(1) 28GHz 帯での更なる技術実証

過年度の技術実証を含め 4.7GHz 帯での技術実証試験は多数実施されたが 28GHz 帯での技術実証試験は限定的であった。基地局、端末、柔軟化設備の商用開発が 4.7GHz 帯に比較し遅いことが理由と思われる。より直進性の高い 28GHz 帯での電波伝搬試験は今後も継続して行う必要があると思われる。

(2) 簡易な電波伝搬シミュレーションツール

過年度の技術実証を含め、不感地帯の把握、改善策の効果確認のためにより精度の高いレイトレースシミュレーションを使用されてきたが、一事業者で使いこなすには経済的にも負担が大きくかつシミュレーションに3D 地形、屋内環境を読み込む時間が必要にてより簡易なシミュレーション方法が望まれる。また電波伝搬環境から補正值(S 値、R 値等)を求めることも専門的知識が必要となる。AI の活用によりハードルを下げて業務区域、設備の配置位置、基地局及び端末の仕様等少ないパラメータを入力し基地局を中心に方向毎のエリア算出式により簡易にシミュレーションが実施できるツールが望まれる。またサイト運用等により簡易に使用できる環境作りが必要と思われる。

(3) 持続可能なオープンラボの開設

ローカル5G 普及促進のために、基地局、端末設備及びエリア柔軟化設備を設備メーカー、ローカル5G 事業者が持ち込み自由に技術試験実施可能なオープンラボの開設が望まれる。この設備を使って異なる設備メーカー間のインターフェース試験が可能となり、かつ無線エンジニアの育成にも役立ち有意義と思われる。

2.2.7 まとめ

課題毎、柔軟化設備毎に分類、各実証試験から得られたデータ、成果報告書を横断的に分析し下記視点で取りまとめを行った。

(1) 課題解決の有効性

- ・不感地対策での有効性
- ・カバーエリア拡張
- ・他者土地への電波漏洩軽減

(2) 柔軟化設備(電波反射板、中継器、DAS、LCX)の相互比較

- ・設置容易性比較
- ・コスト比較
- ・改善効果を含む総合比較

(3) エリア設計手法のモデル化

- ・電波反射板のエリア設計手法
- ・中継器のエリア設計手法
- ・DAS のエリア設計手法
- ・LCX の設計手法

また各実証の概要として実施例を別冊としてまとめた。今後のローカル5Gの導入にあたり参考となる資料にまとめることができた。

2.3 準同期 TDD 追加パターンの開発

2.3.1 概要

ローカル5G に用いられる時分割複信(TDD)パターンについては、利用シーンに合わせた通信性能の実現のため、これまでに(令和2年 12 月)、キャリア5Gの TDD パターンとタイミングを一致させたまま上り/下りのスロットのみを一部変更したパターン(準同期 TDD)が上りスロットの比率が高い形で4.5GHz 帯及び 28GHz 帯に一つずつ追加された。しかしながら、多様なアプリケーションの要求条件に応じるため、更に多くの上りスロットを必要とするユースケースの需要への対応が必要となっており、既存のいずれの運用パターンとも準同期の関係となる準同期運用パターンの追加が考えられている。

そこで、令和3年度の技術実証テーマⅢでは、準同期 TDD パターンにてローカル5Gの UL 及び DL の運用比率を可変とする場合における、同期局や既存の準同期局との干渉評価による離隔距離の算出その他の共用検討のための実用的パラメータの策定を通じた、準同期 TDD パターンの追加の検討を取りまとめた。また、令和4年度においては、当該パターン を具備した実機を用いた、与干渉、被干渉を軽減するサイトエンジニアリング手法の評価を行った。

※1「同期」とは、送信バースト繰り返し周期、基地局及び陸上移動局の送信バースト長の最大値並びに送受信のタイミングを同一とし、平成 31 年総務省告示第 23 号別図第1号及び第2号に規定する同期方式の運用方法をいう。

※2「準同期運用」とは、送信バースト繰り返し周期、基地局及び陸上移動局の送信バースト長の最大値並びに送受信のタイミングを同一とし、平成 31 年総務省告示第 23 号別図第1号及び第2号に規定する準同期方式の運用方法をいう。

(具体的な同期・準同期パターンは後述)

(1) 実証目標

図 2-69 に本実証にて追加検討する準同期 TDD の運用パターンとして準同期2及び3を示す。既存(制度化済み)の準同期 TDD1 に対して、追加する準同期 TDD2、TDD3 では、フレーム全体に占める U:上りスロットの比率が増加されている。

スロット番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
同期TDD	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D
準同期TDD 1	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U
準同期TDD 2	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U
準同期TDD 3	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U

※D:下りスロット、U:上りスロット、S: DからUへの切替期間を含む特別スロット

図 2-69 追加する準同期 TDD の運用パターン

出処:課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証令和3年度実施方針(総務省;令和3年4月):

https://www.soumu.go.jp/main_content/000745726.pdf

2.3.2 干渉シナリオの整理

(1) 周波数隣接条件

現在、本国におけるローカル5Gの周波数割り当てのうち4.7GHz帯については、4.6～4.9GHz帯となっており、ローカル5Gの最大システム帯域100MHzがこの周波数範囲に配置され運用される。図2-70にローカル5Gおよびその近傍の周波数割り当て状況を示す。

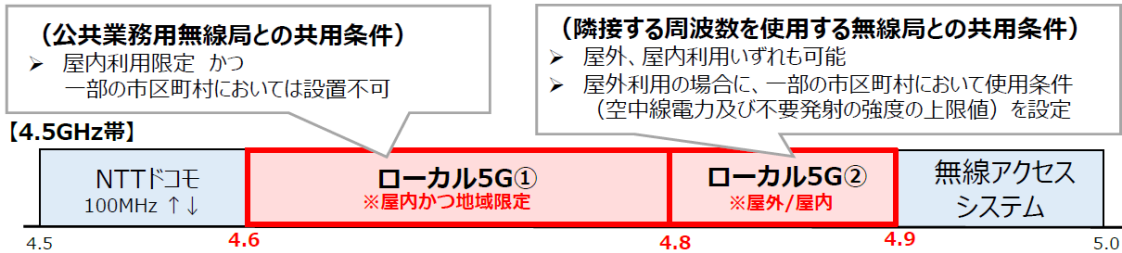


図 2-70 ローカル5Gの周波数配置(4.7GHz帯)

また、情報通信審議会 情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和2年7月新世代モバイル通信システム委員会)では、移動通信システム相互間における干渉検討に関連して、与干渉システムと被干渉システムとの周波数隣接条件が、隣接周波数の場合と同一周波数の場合について解説されている。図2-71に隣接周波数の干渉計算のイメージ、図2-72に同一周波数の干渉計算のイメージを示す。

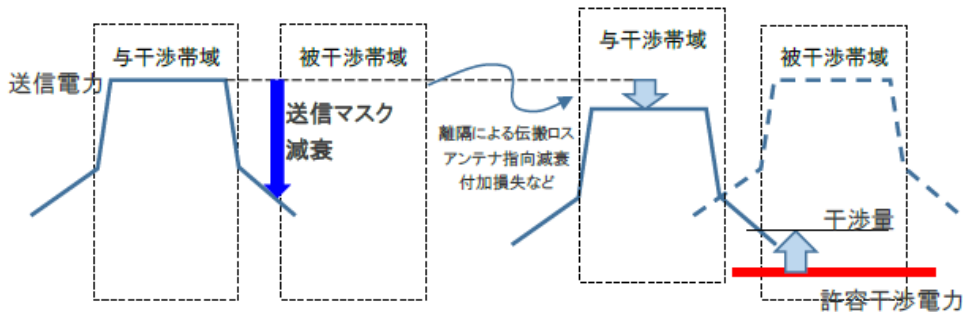


図 2-71 隣接周波数の干渉計算のイメージ

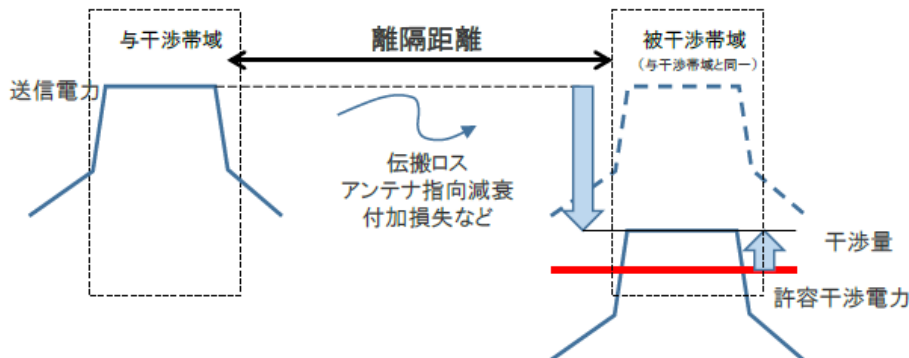


図 2-72 同一周波数の干渉計算のイメージ

一般に、隣接周波数では、被干渉帯域に直接干渉する成分は与干渉波の隣接チャンネル漏洩など不要

発射であり送信マスク減衰が期待できることと、与干渉はそのものに対しては被干渉側の許容感度抑圧を上回る値でなければ干渉影響は少ないが、同一周波数の場合は、被干渉帯域の周波数＝与干渉波の周波数であり、より多くの離隔距離が必要になるなど共用に向けての難易度は高い。

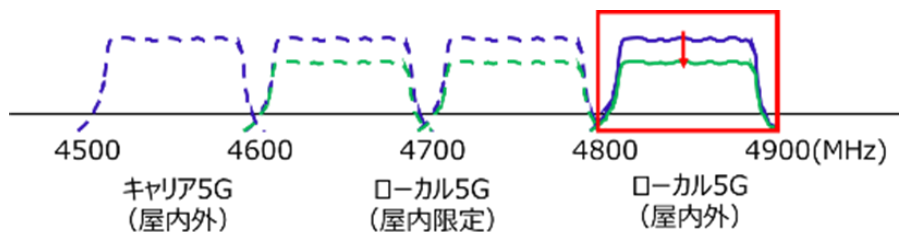


図 2.3.2-4 ローカル5G の周波数配置(sub6)

また、ローカル5G は、屋内環境については、4600～4700MHz、4700～4800MHz、4800～4900MHz帯の各100MHz帯域幅の選択が可能であり、置局しようとする隣接の他社土地で使用されている周波数と隣接関係にある周波数を選択可能であるが、屋外環境においては、4800～4900 MHzのみしか許可されてないため、隣接の免許人とは同一周波数で運用せざるを得ないため、十分な離隔や干渉調整が必要となっている。

(2) 基地局間干渉と移動局間干渉

情報通信審議会 情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和2年7月新世代モバイル通信システム委員会)にて、準同期 TDD 運用について、「基地局間干渉はパターン1(同期運用)を用いる事業者からパターン2(準同期運用)を用いる事業者に、そして移動局間干渉はパターン2(準同期運用)を用いる事業者からパターン1(同期運用)を用いる事業者にしか発生しない。」と記載されている。

したがって、今回の技術実証テーマⅢにおいても、(制度化済み準同期パターンに比べて非同期区間が増加した)追加準同期パターンの適用における準同期運用側上り回線への**基地局間干渉**影響および同期運用側下り回線への**移動局間干渉**影響について、共有条件の導出および所用性能の達成・対処を確認することについて、取りまとめを行う。

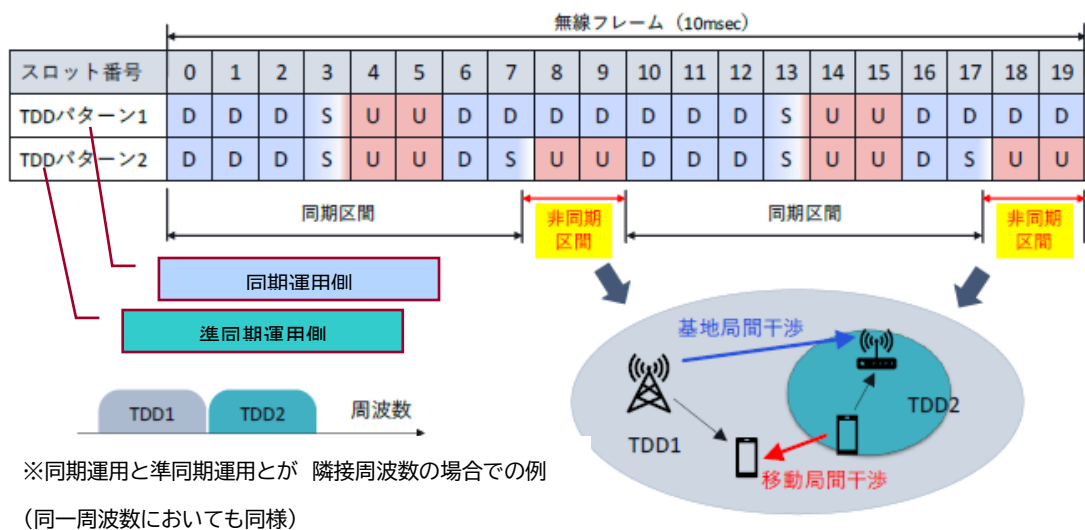


図 2-73 4.7GHz 帯の準同期 TDD

(情報通信審議会 情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和2年7月 より抜粋)

(3) 実証コンソーシアムの干渉シナリオ一覧

表 2-35 に令和 3 年度及び令和 4 年度の課題実証コンソーシアムのうち、技術実証テーマⅢについて作業実施したコンソーシアムの干渉シナリオ一覧を示す。干渉影響が大きい同一周波数が多く検討されており、また、非同期区間が課題となる基地局間干渉、移動局間干渉が検討されている

表 2-35 課題実証コンソーシアムの干渉シナリオ一覧

令和 3 年度

No	産業テーマ	実証環境	周波数帯	周波数隣接	追加準同期パターン	干渉相手 TDD	与干渉システム	被干渉システム	与被干渉基地局/移動局組合	屋内/屋外組合せ	実機検証
01	農業(ぶどう畑)	屋外	4.7GHz	隣接	TDD2	同期TDD	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局	屋外→屋外	○
02	農業(牛舎)	屋内/ 半屋内	4.7GHz	同一	TDD2	同期TDD 準TDD1	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局	屋外→屋外 屋外→屋内 屋内→屋外 屋内→屋内(壁有/無)	- (追加提案)
03	農業(苜蓿)	半屋内	4.7GHz	同一	TDD2	同期TDD	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局	屋外→屋外	○
04	林業	屋外	4.7GHz	同一	TDD2 TDD3	同期TDD	同期システム 同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→基地局 移動局→移動局	屋外→屋外	○
11	コンテナヤード	屋外	4.7GHz	同一	TDD2 TDD3	同期TDD	準同期システム	同期システム	移動局→移動局	屋外→屋外	○
15	高速道路地上	屋外	4.7GHz	同一 隣接	TDD2 TDD3	同期TDD 準TDD1	準同期システム 準同期システム	同期システム 準同期システム	移動局→移動局 基地局→移動局	屋外→屋内 屋外→屋外	-
17	国際会議場	屋内	4.7GHz	隣接	TDD3	同期TDD	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局	屋内→屋内	○
18	スマートシティ	屋外	4.7GHz	同一	TDD2 TDD3	同期TDD	準同期システム	同期システム	移動局→移動局	屋外→屋外	-
23	富上山五合目	屋外	4.7GHz	同一	TDD2 TDD3	同期TDD	同期システム 同期システム 準同期システム	準同期システム 準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→基地局 移動局→移動局	屋外→屋外	○

令和 4 年度

No	産業テーマ	実証環境	周波数帯	周波数隣接	追加準同期パターン	干渉相手 TDD	与干渉システム	被干渉システム	与被干渉基地局/移動局組合	屋内/屋外組合せ	実機検証
開 12	大型口施設	屋外	4.7GHz	同一	TDD3	同期TDD	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局 移動局→基地局	屋外→屋外	○
開 20	病院	屋内	4.7GHz	同一 隣接	TDD3	同期TDD	同期システム 準同期システム	準同期システム 同期システム	基地局→基地局 移動局→移動局 基地局→移動局	屋内→屋内	○

(4) 干渉シナリオの組み合わせ

干渉シナリオの組み合わせは、隣接周波数における基地局間干渉と移動局間干渉および同一周波数における基地局間干渉と移動局間干渉に大別することができ、それぞれの組み合わせにおいて、各実証コンソーシアムが検証する追加準同期 TDD パターンにどのパターンを用いたか整理することで技術実証テーマⅢ全体の実証の網羅性を確認した。

表 2-36 に隣接周波数における干渉シナリオ組合せ、表 2-37 に同一周波数における干渉シナリオ組合せを示す。周波数隣接条件と基地局間干渉/移動局間干渉の各組み合わせにおいて、追加準同期 TDD パターン(TDD2,TDD3)の実証がいずれかの実証コンソーシアムにて実施されており、技術実証テーマⅢ全体の実証の網羅性は確保されている。

表 2-36 隣接周波数における干渉シナリオ組合せ

隣接周波数 (数字はコンソーシアムNo.)

基地局⇒基地局 干渉		被干渉システム			
		同期(TDD)	制度化済準同期1(TDD1)	追加準同期2(TDD2)	追加準同期3(TDD3)
システム 与干渉	同期(TDD)	/	無し	01,	18,開20
	制度化済準同期1(TDD1)	/	/	無し	無し
	追加準同期2(TDD2)	/	/	/	無し
	追加準同期3(TDD3)	/	/	/	/

移動局⇒移動局 干渉		被干渉システム			
		同期(TDD)	制度化済準同期1(TDD1)	追加準同期2(TDD2)	追加準同期3(TDD3)
システム 与干渉	同期(TDD)	/	/	/	/
	制度化済準同期1(TDD1)	無し	/	/	/
	追加準同期2(TDD2)	01,	16,	/	/
	追加準同期3(TDD3)	17,開20	16,	16,	/

表 2-37 同一周波数における干渉シナリオ組合せ

同一周波数 (数字はコンソーシアムNo.)

基地局⇒基地局 干渉		被干渉システム			
		同期(TDD)	制度化済準同期1(TDD1)	追加準同期2(TDD2)	追加準同期3(TDD3)
システム 与干渉	同期(TDD)	/	23,	02, 03, 04, 24	04, 24, 開12,開20
	制度化済準同期1(TDD1)	/	/	02, 24,	24,
	追加準同期2(TDD2)	/	/	/	24,
	追加準同期3(TDD3)	/	/	/	/

移動局⇒移動局 干渉		被干渉システム			
		同期(TDD)	制度化済準同期1(TDD1)	追加準同期2(TDD2)	追加準同期3(TDD3)
システム 与干渉	同期(TDD)	/	/	/	/
	制度化済準同期1(TDD1)	23,	/	/	/
	追加準同期2(TDD2)	02, 03, 04, 11, 19, 23	02, 16, 24	/	/
	追加準同期3(TDD3)	04, 11, 19, 23,開12,開20	16, 24,	16, 24,	/

なお、令和3年度実証については次図に示すようにすでに取りまとめられているため、以降では令和4年度の実証について説明する。

隣接周波数

基地局⇒基地局 干渉

【No.01】 1対1(正対)実測後シミュレーションでは、指向性アンテナ局にて所用改善量が残ったため、実機にて、ローカル5G・キャリア5G同時運用と各単体運用時で伝送性能、受信電力、通信品質を測定。

【結果】

ローカル5G単体時とローカル5G・キャリア5G共用時の性能差について考察した結果、共用時ローカル5Gシステムの受信品質には影響しないことがわかった。

【No.17】 干渉観点評価では環境影響により有効なデータが取れなかったが、実機によるスループット観点評価結果から(干渉量-68[dBm/MHz]以下ではスループット劣化は発生しない)、併設での離隔距離1.7m、アンテナチルト90°のサイトエンジニアリングにて共用可能。

移動局⇒移動局 干渉

【No.01】 1対1正対SIMでは所用改善が残ったため、実機にて、同時接続端末数を1台と5台でTP性能、受信電力、品質(RSRQ, SINR)を測定。

【結果】 共用時と単体時の性能差から、共用時のキャリア5G下りには影響しなかった。

また、キャリア5G端末/ローカル5G端末の0m/1mの差も、伝送性能悪化は無し。

【No.15】 最悪値ケースで若干の所要改善が残ったが、モンテカルロシミュレーション(半径100m,3台)による確率計算にて、所用改善はマイナスとなり、共用可能である。

【No.17】 最悪値ケースで所要改善が残ったが、実機によるスループット観点評価結果から、移動局間距離によらず共用可能

同一周波数

基地局⇒基地局 干渉

【No.02】 準同期基地局が干渉影響を受けても、所望の通信性能を得るために必要となる現実的な同期基地局との離隔距離を共用条件として検討。(伝送スループットへの干渉影響を評価)

【結果】

基地局間離隔距離をパラメータに、準同期基地局と移動局間の距離に対するULスループット特性の関係を計算により導出した。所望通信性能に応じた置局条件の設定に有効。

【No.23】 併設であれば、共用シミュレーションで所要離隔距離1.5m、スループット観点のラボ評価でも1.1~3.5mとなり、アンテナ調整にて共用可能。

移動局⇒移動局 干渉

【No.02】 実測値の移動局送信電力分布を用いたモンテカルロシミュレーション

【結果】

移動局間距離を100m以内で運用した場合、移動局台数が1台であっても、同期移動局への干渉影響が発生する可能性がある。そのため、同期運用事業者保護の観点から準同期の移動局送信出力を抑える、もしくは、見通し外で運用することが必要である。

【No.23】 正対(無指向性アンテナ間)において、帯域内干渉の共用シミュレーションで所要離隔距離は580m、スループット観点のラボ評価でも40~75m程度となり、移動範囲の検討が必要

出所)令和3年度ローカル5G 開発実証 調査報告書 技術実証編 概要版³

図 2-74 令和3年度実証における結果のとりまとめ

2.3.3 令和3年度/4年度実証の結果とりまとめ

(1) 隣接周波数における干渉

4) 基地局間干渉

a. 令和3年度実証 No.01 農業(ぶどう園)

1対1(正対)実測後シミュレーションでは、指向性アンテナ局にて所用改善量が残ったため、実機にて、ローカル5G・キャリア5G同時運用と各単体運用時で伝送性能、受信電力、通信品質を測定し、ローカル5G単体時とローカル5G・キャリア5G共用時の性能差について考察した結果、共用時ローカル5Gシステムの受信品質には影響しないことがわかった。

b. 令和3年度実証 No.17 国際会議場

³ https://go5g.go.jp/sitemanager/wp-content/uploads/2022/05/%E4%BB%A4%E5%92%8C%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%83%AB%E5%96%8B%E7%99%BA%E5%AE%9F%E8%A8%BC_%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8_%E6%8A%80%E8%A1%93%E5%AE%9F%E8%A8%BC%E7%B7%A8_%E6%A6%82%E8%A6%81%E7%89%88.pdf

干渉観点評価では環境影響により有効なデータが取れなかったが、実機によるスループット観点評価結果から(干渉量-68[dBm/MHz]以下ではスループット劣化は発生しない)、併設での離隔距離1.7m、アンテナチルト90°のサイトエンジニアリングにて共用可能である。

以上から、追加準同期 TDD パターン 2 およびパターン 3 に関して、隣接周波数における基地局間干渉の条件下での同期 TDD パターンや制度化済み準同期 TDD パターン 1 との共用については、大きな問題なく可能と考える。

5) 移動局間干渉

a. 令和 3 年度実証 No.01 農業(ぶどう園)

1対1正対SIMでは所要改善が残ったため、実機にて、同時接続端末数を1台と5台でTP性能、受信電力、品質(RSRQ,SINR)を測定した結果、共用時と単体時の性能差から、共用時のキャリア5G下りには影響しなかった。また、キャリア5G端末/ローカル5G端末の0m/1mの差も、伝送性能の悪化は無かった。

b. 令和 3 年度実証 No.15 高速道路地上

最悪値ケースで若干の所要改善が残ったが、モンテカルロシミュレーション(半径100m,3台)による確率計算にて、所要改善はマイナスとなり、共用可能と考える。

c. 令和 3 年度実証 No.17 国際会議場

最悪値ケースで所要改善が残ったが、実機によるスループット観点評価結果から、移動局間距離によらず共用可能と考える。

以上から、追加準同期 TDD パターン 2 およびパターン 3 に関して、隣接周波数における移動局間干渉の条件下での同期 TDD パターンや制度化済み準同期 TDD パターン 1 との共用については、大きな問題なく共用可能と考える。

(2) 同一周波数における干渉

1) 基地局間干渉

a. 令和 3 年度実証 No.02 農業(牛舎)

実証実機パラメータ及び実測値を用いた検討では、屋外のローカル5G基地局同士が共存する場合と屋内のローカル5G基地局同士が共存する場合において、基地局間干渉の所要離隔距離は約140mとなった。ここで、約140m以下の基地局間距離で準同期基地局が干渉影響を受けても、所望の通信性能を得るために必要となる現実的な同期基地局との離隔距離を共用条件として検討し(伝送スルー

プットへの干渉影響を評価)基地局間離隔距離をパラメータに、準同期基地局と移動局間の距離に対する UL スループット特性の関係を計算により導出した。所望通信性能に応じた置局条件の設定に有効と考える。

他に、屋外のローカル 5G 基地局と屋内のローカル 5G 基地局が共存する場合および、屋内にて壁で隔てられているローカル 5G 基地局同士が共存する場合の基地局間干渉の所要離隔距離は約 20m となった。異なる建物内で運用する場合の基地局間干渉の所要離隔距離は約 4m となった。

b. 令和 3 年度実証 No.23 富士山五合目

併設であれば、共用シミュレーションで所要離隔距離 1.5m、スループット観点のラボ評価でも 1.1~3.5mとなり、アンテナ調整にて共用可能。

以上から、追加準同期 TDD パターン 2 およびパターン 3 に関して、同一周波数における基地局間干渉の条件下での同期 TDD パターンや制度化済み準同期 TDD パターン 1 との共用については、基地局送信電力、アンテナ指向性やチルト角などの調整によるサイトエンジニアリングによって可能となると考える。

c. 令和 4 年度実証 No.開 12

被干渉となる準同期移動局位置 8 ポイントにて測定を行った。与干渉基地局と被干渉基地局間の距離については、干渉波が許容干渉電力-110dBm/MHz(-90dBm/100MHz)となる 11.5m を基準に 3.5m~21.5m の地点で設定した。

干渉なしの状態と比較し、基地局間の距離 21.5m 地点において 25%~40%ほどのスループット劣化が確認された。

実使用上許容可能なスループットの劣化量に応じて離隔距離を確保することで、同期局との併用運用が可能と考えられる。

d. 令和 4 年度実証 No.開 20

同一周波数で、同期システムと準同期システムを併設した場合、非同期スロットの基地局間干渉により準同期システムの UL スループットが影響を受ける。測定の結果、基地局間の離隔が 40m の場合には、中間点である準同期基地局から 20m の場所では準同期移動機が基地局に接続できなかったが、基地局間の離隔を 50m 以上取ること、同期システム同士が 70m 離隔で併設される場合(同期スロットの同期移動機から準同期基地局への干渉)よりも良好な UL スループットを得るまで改善することができた。さらに基地局間の離隔を 70m まで確保すると、準同期基地局を単独で設置した場合の UL スループットの 60%程度まで改善した。基地局間の干渉は基地局のアンテナの設定や設置方法によっても改善が可能である。本実証では天井設置型のオムニアンテナを使用した。十分な基地局間離隔が確保できない場合には指向性を持つ平面アンテナ等を採用して準同期基地局における同期基地局からの受信電界を下げられるような無線設計をすることも可能である。

2) 移動局間干渉

a. 令和 3 年度実証 No.02 農業(牛舎)

ア) 干渉が発生しない場合の共用条件について

屋外のローカル 5G 同士が共存する場合、基地局間干渉の観点では、141m 以上の所要離隔距離を確保すれば共用可能と考えられる。また、移動局間干渉の観点では、1対1対抗モデルの検討結果から、320m 以上の所要離隔距離を確保すれば、共用可能と考えられる。すなわち、移動局間干渉における所要離隔距離の方が基地局間干渉よりも大きくなるため、同期運用事業者保護観点では、本実証で用いた無線局を用いる場合、準同期(TDD2)移動局の移動範囲を制限した運用が必要であると考えられる。ただし、見通し外で運用する場合や、準同期(TDD2)移動局の送信電力密度を下げる場合はこの限りではない。

なお、同じ1対1対応モデルの検討結果として、移動局間干渉の所要離隔距離は、屋外のローカル 5G 移動局と屋内のローカル 5G 移動局が共存する場合および壁面で隔たれている同一建物内で運用する場合は 50m以上、異なる建物内で運用する場合は 8m以上となることが分かった。

イ) 干渉が発生する場合の共用条件について

屋外のローカル 5G 同士(または屋内のローカル 5G 同士)が共存する場合、基地局間干渉の所要離隔距離は約 140mとなった。この離隔距離以内では干渉により準同期 UL スループットが劣化するが、これを許容して運用する場合について、実測値の移動局送信電力分布を用いたモンテカルロシミュレーションした結果、移動局間距離を 100m 以内で運用した場合、移動局台数が 1 台であっても、同期移動局への干渉影響が発生する可能性がある。そのため、同期運用事業者保護の観点から準同期の移動局送信出力を抑える、もしくは、見通し外で運用することが必要である。

なお、同じモンテカルロシミュレーションの結果として、干渉が生じ始める準同期移動局の台数は、屋外のローカル 5G 移動局と屋内のローカル 5G 移動局が共存する場合は2台以上、壁面で隔たれている同一建物内で運用する場合は5台以上、異なる建物内で運用する場合は 160 台以上となることが分かった

b. 令和 3 年度実証 No.23 富士山五合目

正対(無指向性アンテナ間)において、帯域内干渉の共用シミュレーションで所要離隔距離は 580m、スループット観点のラボ評価でも 40-75m 程度となり、移動範囲の検討が必要である

c. 令和 4 年度実証 No.開 12

基地局間距離 60m/与干渉基地局ポイント①② 移動局間距離 vs 被干渉移動局 UL スループットにおいては、被干渉基地局の正面に近い移動局間距離 25m ポイントでは、プラス(+)の SINR 値が確保でき通信可能であるが、正面から数 m ズれる位置においては、与干渉移動局からの干渉によりマイナス(-)の SINR となり、正常な通信を確保できない状況となり、シミュレーション結果と一致する。

今回の実証から、準同期移動局からのスロット間干渉よりも同一周波数による干渉の影響が支配的であることが分かる。本事象の回避のためには、UL パワーを抑える(合わせて基地局セルの縮小)が必

要となる。

d. 令和 4 年度実証 No.開 20

干渉低減手法参照。

(3) 干渉低減手法

1) 基地局間干渉

a. 令和 4 年度実証 No.開 12

2 システムの基地局指向性アンテナのメインビーム方向を並列に配置した状態を基準に一方の指向性アンテナの水平方向設置角を変化させ干渉低減効果を検証した。一概にアンテナ併設と言っても、指向性アンテナを用いる場合、アンテナパターンのヌル点も含め、指向性を考慮して基地局、移動局を配置する必要があることが分かった。

2) 移動局間干渉

a. 令和 4 年度実証 No.開 12

与干渉移動局(準同期局)のパワーを下げることにより、被干渉基地局への干渉影響度を確認した。

与干渉移動局の送信電力を下げ測定を行い、干渉が軽減されることが確認できた。与干渉移動局の最大送信電力 23dBm～14dBm と与干渉移動局の最大送信電力を下げることで、干渉影響が少なくなり被干渉移動局の DL スループットが 125Mbps～253Mbps と改善している。この手法は干渉軽減に有効に働くが、一方的に与干渉移動局のみ送信電力を下げた場合、被干渉側の影響を与干渉が受ける状態となるため、与干渉移動局を一方的に抑制するのではなく、同期システム側からの影響を考慮した調整を行う必要がある。

b. 令和 4 年度実証 No.開 20

与干渉となる準同期移動局の最大送信電力制限値を基地局からの報知パラメータ設定を編集することにより下げる干渉低減手法の評価を行った。準同期移動局の最大送信電力制限値を基準の+23dBmから下げていくと、被干渉側の同期DLスループットは改善する。一方、準同期移動局の最大送信電力制限値を下げたことにより準同期側のULスループットは低下する。ここに、同期DLスループットと準同期ULスループットはトレードオフの関係にあり、そのバランスを調整することにより、屋内など同一免許人が運用しそのユースケースが必要な性能が得られる場合は、同期と準同期の2システムが共用可能であることが分かった。一方で、基地局間離隔 70m で移動機送信電力を+8dBmまで抑制しても同期局から 5m の位置まで近づかなければ移動機間干渉の影響を解消できないため影響解消のためにはより大きな離隔が必要である。また、移動局間干渉自体はLOS環境で 691m の離隔が必要であるこ

とも改めて確認し、別の免許人の場合、同期保護の考えから十分な離隔や見通し外での運用が必要であることも確認した。

2.3.4 まとめ

以上から、追加準同期 TDD パターン 2 およびパターン 3 に関して、同一周波数における移動局間干渉の条件下での同期 TDD パターンや制度化済み準同期 TDD パターン 1 との共用については、カバーエリアや調整対象区域によるエリア設計によって共用先システムとの基地局間離隔を確保した上で、共存する基地局が屋外または屋内に設置されているかの組合せに応じて、準同期移動局の台数を制限することが必要である。若しくは、同期運用事業者保護の観点から準同期の移動局送信出力を抑える、もしくは、見通し外で運用することが必要である。但し、準同期側において、干渉による通信品質劣化を許容して運用する場合は、共用先システムとの離隔距離を短縮することも可能であるが、同期運用事業者保護の観点からの対策は同じく必要である。なお、共用する為に必要な制限事項やルールについて、今後もより多くの具体化事例を積み上げることにより、導入可能性の向上を図る必要があると考える。

令和4年度実証においては、特に移動局間干渉について、基地局併設の条件下で共用可能となる条件を実証したが、屋内環境においては、与干渉の準同期移動局の最大送信電力を下げる干渉低減手法の実証により、同期DLスループットと準同期ULスループットはトレードオフの関係にあり、そのバランスを調整することにより、屋内など同一免許人が運用しそのユースケースが必要な性能が得られる場合は、同期と準同期の2システムが共用可能であることが分かった。一方、屋外環境では同一周波数(4.8~4.9GHz)での運用しか認められておらず、先発のローカル 5G 免許人が同期システムで運用していた場合、後発の準同期免許人は、先発を保護する必要があるため、この共用条件の適用は現実には非常に難しいであろうと考えられる。または、NLOS 環境になるようなサイト構築(遮蔽等)が必要となる。

2.4 ローカル 5G のさらなる高度化等に向けた技術テーマ

2.4.1 実証概要

電波の反射角を動的に制御可能な反射板 Reconfigurable Intelligent Surface(以降、RIS)による、2つの離れた不感地帯の動的な解消を実証した。

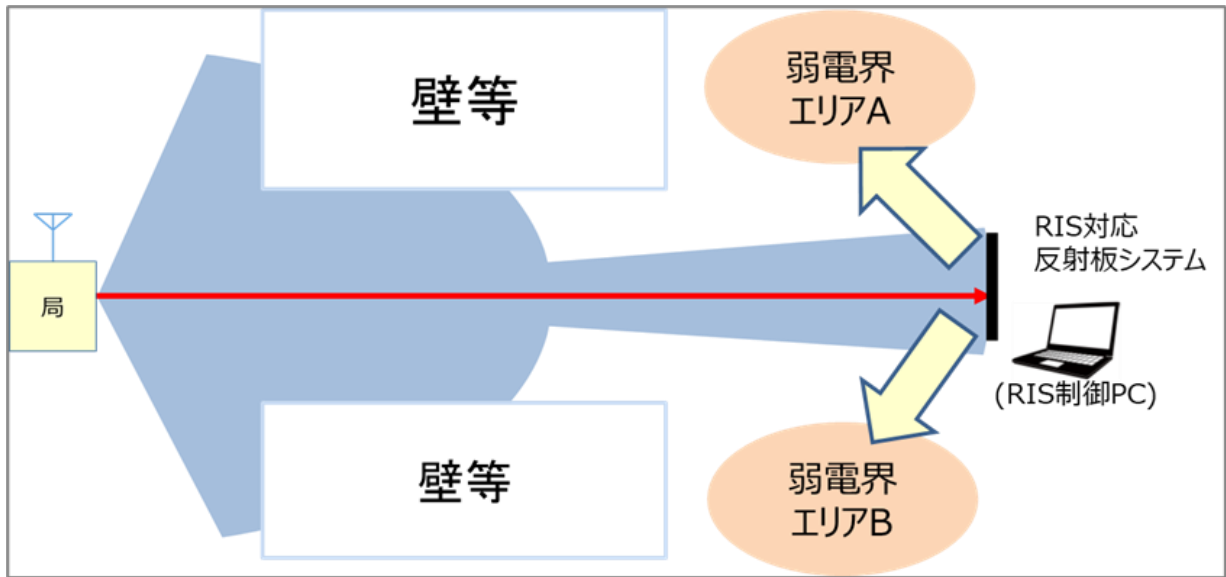
ローカル5Gにおける不感地帯対策として、導入コストや設置の容易性等を鑑み、反射板によるエリア改善が有効と考えられる。一方、現在のエリア改善に使用する反射板は、主に電波の入射角、反射角を一意に決めた角度においてのみ利用することが可能であり、エリア設計上、あらかじめ決定した不感地帯のみをエリア化するという場合に限られている。様々な分野における利用用途や利用環境を想定し、例えば時間によりエリア化をする場所を変更したいといったニーズが有る場合、反射板の位置や電波の入射角、反射角を手動で変更することも考えられるが、反射板によるエリア構築は厳密な反射板の設置位置、電波の入射角、反射角を考慮したエリア設計が必要なことから、容易に変更することが困難であった。

今回の実証で用いるRISは、表面に電氣的に位相を切り替える素子を配列し、反射方向を適応的に制御できることで、移動する受信機での受信電力を広範囲に改善するだけでなく、時間毎にターゲットエリアを反射板の設置位置を変更することなく、エリア化することが可能になる。つまり、一時的に使用する会議室などの限定したエリア化だけでなく、他の会議室やターゲットエリアに対しても電波の反射方向を制御することで、利用環境に応じたエリア構築の柔軟化が可能になると考えられる。想定されるユースケースとして、時間ごとに人流が変わる場所、具体的には駅や繁華街における混雑の状況により方向を制御する、また定点に設置した複数エリアのIoT機器やカメラに接続したローカル5G端末をターゲットエリアにした制御等が考えられる。

今回の実証環境では、「ミライト・ワン新木場ビル」の4階に置局された28GHz帯のローカル5G基地局からの電波を固定の位置に設置したRISを用い、2区画の「改善エリア」について確認を行う。

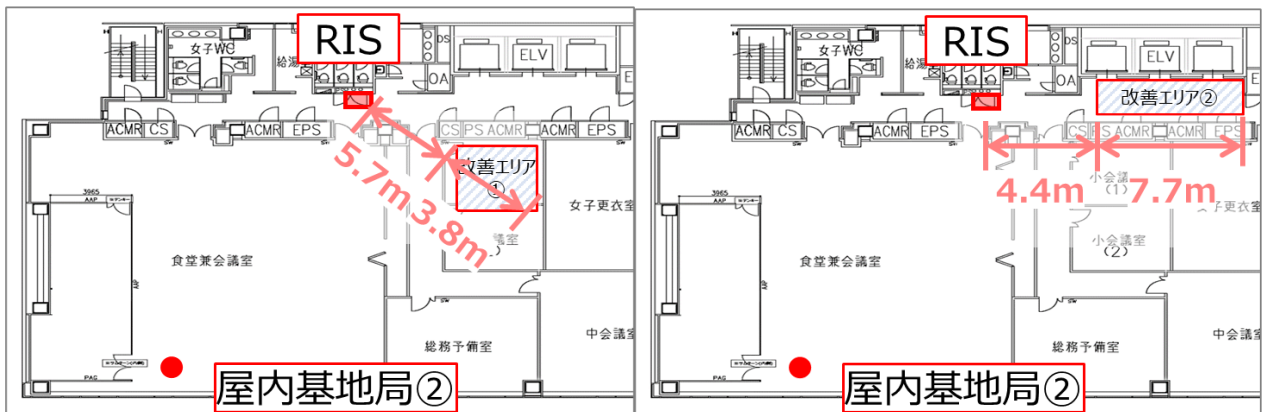
本実証を通して、屋内での同フロアの2区画を一つのRISを用い入射角、反射角の制御によるエリア化を行い、新たなユースケースとして、RISを用いた複数エリア構築の柔軟化について示すことを目標とし、RIS有無による差分について実測をもとに分析・考察を行うこととする。

基地局とRISとの距離は21.1m、図面上側が方位0°とするとRUからRISの方位角は20°、高低差は基地局の中心を基準すると約70cmとなる。以下にRISを用いたエリア構築の柔軟化イメージと実証環境を示す。



出所) 技 01 成果報告書

図 3.3.3-3 RIS を用いたエリア構築の柔軟化: イメージ



出所) 技 01 成果報告書

図 3.3.3-4 RIS 設置位置拡大(4階、上:全体図 左下:改善エリア①距離、右下:改善エリア②距離)

2.4.2 実証結果

(1) 実証環境内の見通し/見通し外環境における電波伝搬特性の分析

1) 改善エリア①

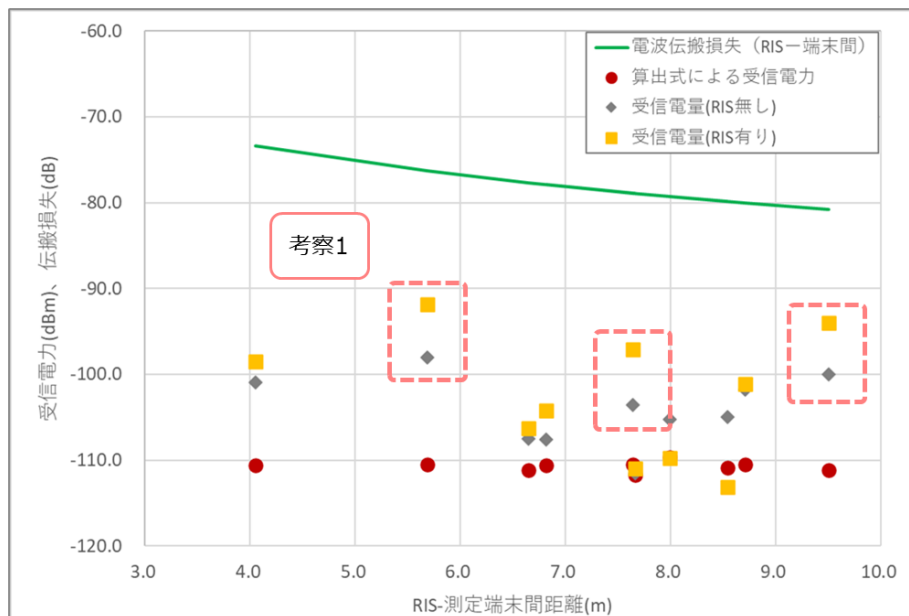
「改善エリア①」における伝搬ロス算出結果およびエリア算出法、電波反射板の設置有無の実測値に関する情報を下表に示す。

表 2-38 伝搬ロス算出結果およびエリア算出法、電波反射板の設置有無の実測値(改善エリア①)

測定点 ID	RIS からの 3D 距離(m)	電波伝搬損失 (RIS-端末間) (dB)	算出式による受信 電力(dBm)	受信電力 (RIS 無し) (dBm)	受信電力 (RIS 有り) (dBm)
14	4.0	-73.35	-110.6	-100.9	-98.5
17	5.7	-76.30	-110.5	-98.0	-91.8
18	6.6	-77.66	-111.2	-107.5	-106.3
19	7.7	-78.89	-111.8	-111.6	-110.9
20	6.8	-77.88	-110.6	-107.6	-104.2
21	7.6	-78.87	-110.5	-103.5	-97.1
22	8.5	-79.83	-110.9	-105.0	-113.1
23	8.0	-79.26	-109.7	-105.2	-109.8
24	8.7	-80.00	-110.5	-101.8	-101.1
25	9.5	-80.76	-111.2	-100.0	-94.0

出所) 技 01 成果報告書

下図は、RIS と端末間の電波伝搬損失(緑線)、エリア算出法による受信電力(赤点)、電波反射板設置時の受信電力(青点)、電波反射板未設置時の受信電力(橙点)とし、縦軸を受信電力と伝搬損失、横軸を RIS から測定端末間の距離を示したグラフである。



出所) 技 01 成果報告書

図 2-75 RIS 設置時の伝搬損失と算出式、実測値との関係 (改善エリア①)

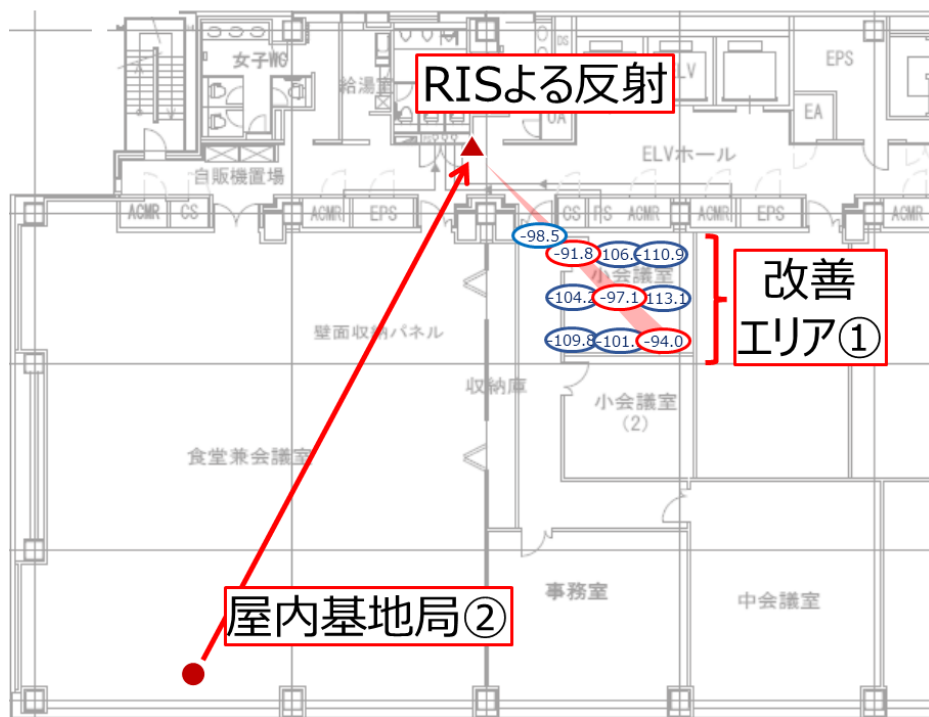
結果から、エリア算出法における受信電力と RIS 設置時の受信電力を比較すると RIS 設置後の受信電力が向上していることがわかる。また、RIS 設置時と RIS 未設置時との比較についても RIS 設置時の受信電力が向上していることから、RIS による効果が得られていると考えられる。RIS と測定端末間における伝搬損失と実測値受信電力との比較では、実測値受信電力が十数 dB 低いことから、RIS による反射で大きく減衰していることがわかる。

一方、RIS 設置時と RIS 未設置時の受信電力差が広い 3 地点に着目し考察 1 とした。この測定点は RIS からの見通しとなる測定点 17、21、25 であり RIS 設置前の受信電力から約 6dBm 受信電力が向上した。この測定点を強調(赤枠)した結果、RIS からの反射による電界強度の改善が線的であることがわかった。



出所)技 01 成果報告書

図 2-76 改善エリア①測定点



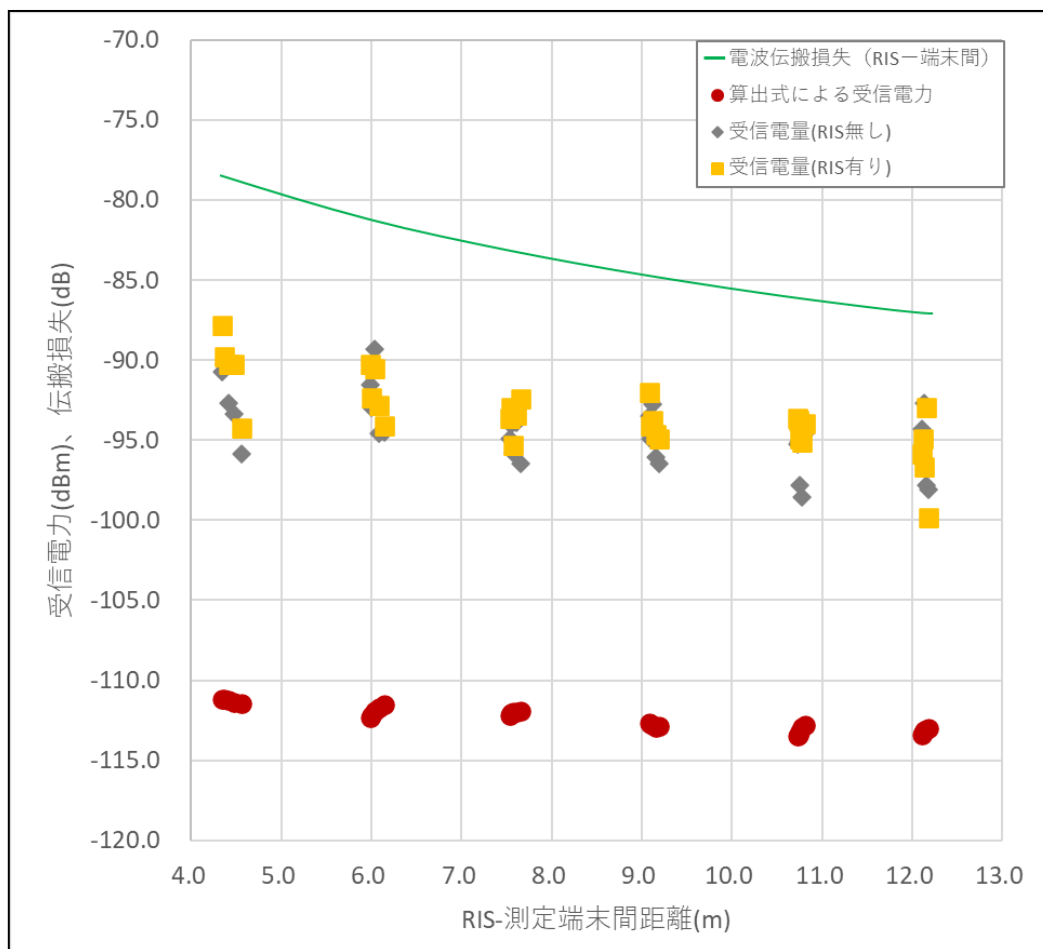
出所)技 01 成果報告書

図 2-77 改善エリア①測定結果(RSRP 受信電力値:単位 dBm)

2) 改善エリア②

下図に示すグラフは、RIS と端末間の電波伝搬損失(緑線)、エリア算出法による受信電力(赤点)、電

波反射板設置時の受信電力(青点)、電波反射板未設置時の受信電力(橙点)とし、縦軸を受信電力と伝搬損失、横軸を RIS から測定端末間の距離を示したものである。

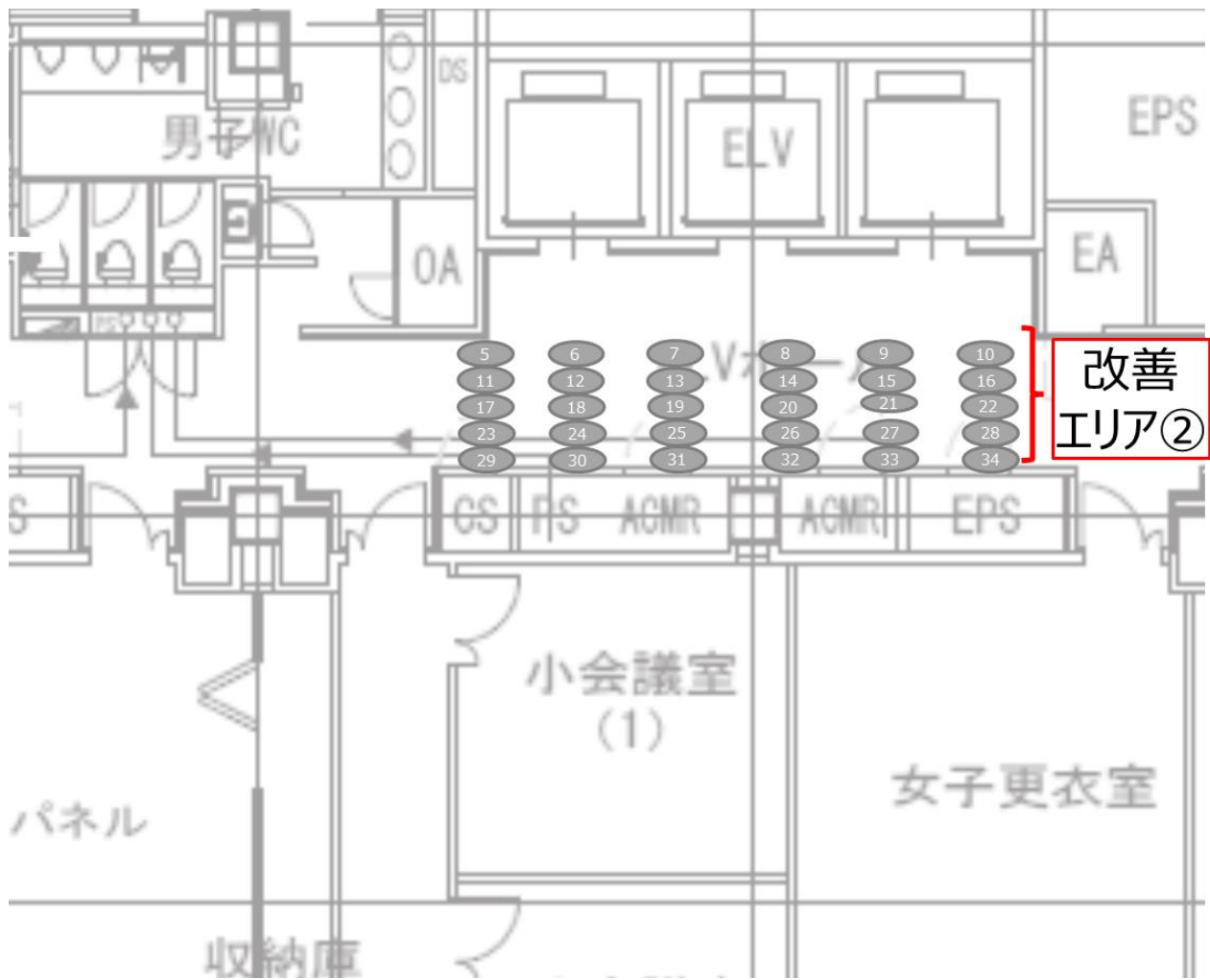


出所) 技 01 成果報告書

図 2-78 RIS 設置時の伝搬損失と算出式、実測値との関係(改善エリア②)

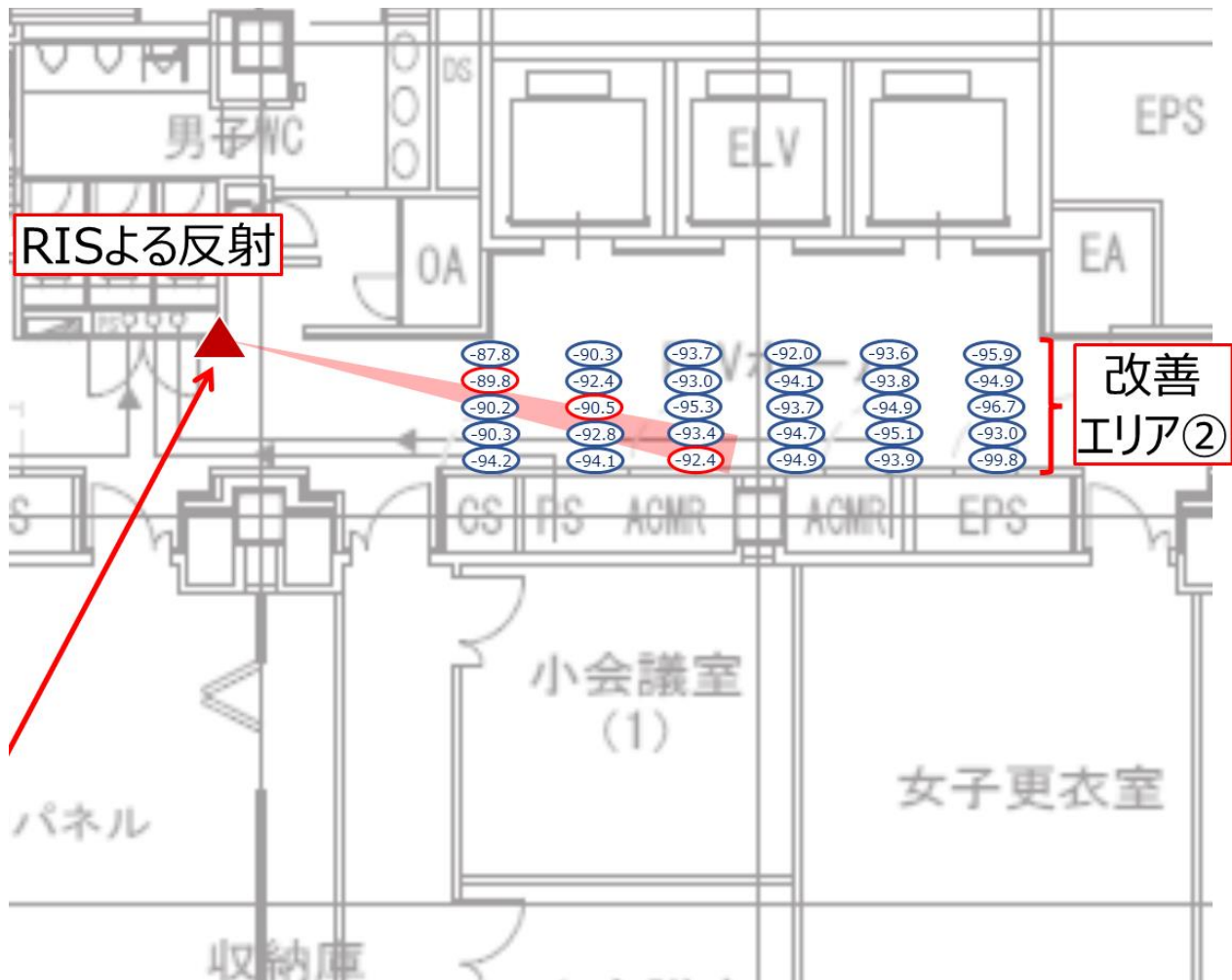
結果から、エリア算出法における受信電力と RIS 設置時の受信電力を比較すると RIS 設置後の受信電力が向上していることがわかる。RIS と測定端末間における伝搬損失と実測値受信電力との比較では、実測値受信電力が十数 dB 低いことから、RIS による反射で大きく減衰していることがわかる。

一方、RIS 設置時と RIS 未設置時との比較については、グラフからでは判断が難しいことから、それぞれの測定地点毎に実測値の受信電力を図面上にプロットし、測定点の位置関係から RIS の反射効果を見極める。まず、「改善エリア①」の結果、RIS からの反射波が「線形」とであると仮定し、線路上に受信電力が高い測定点を強調(赤枠)した。



出所) 技 01 成果報告書

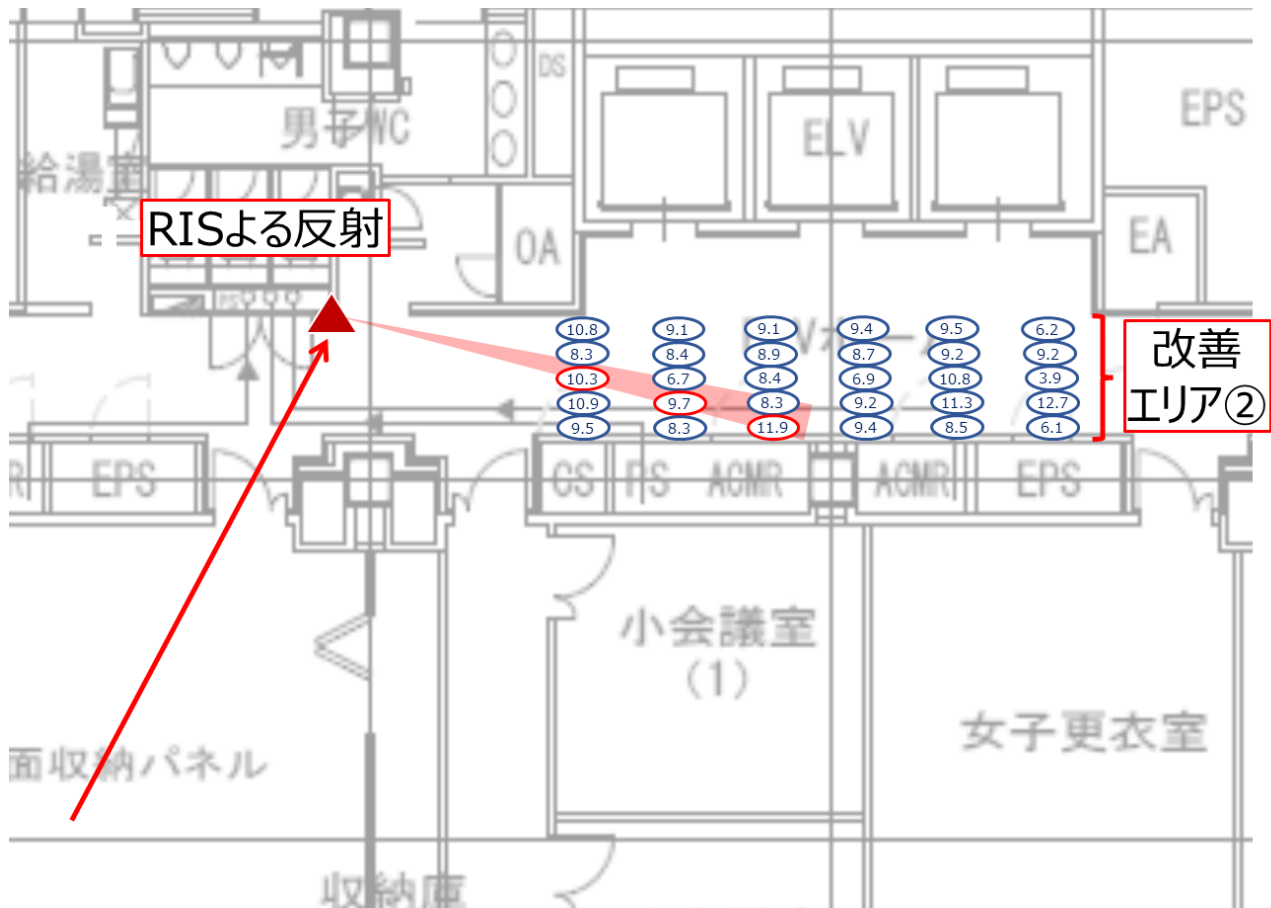
図 2-79 改善エリア②測定点



出所) 技 01 成果報告書

図 2-80 改善エリア②測定結果(SS-RSRP 受信電力値: 単位 dBm)

次に、RIS 設置前、RIS 設置後の実測値受信電力差分をプロットした。その結果、測定点 31 を終点とする RIS からの反射波による受信電力が大きかった。結果、RIS からの反射による電界強度の改善が線的であることがわかった。



出所) 技 01 成果報告書

図 2-81 改善エリア②測定結果(SS-RSRP 受信電力値差:単位 dB)

(2) 他のエリア改善策との経済性比較

電波反射板以外のエリア改善策について設置の容易性およびコストの観点から比較した結果を以下に示す。

表 2-39 設置の容易性におけるエリア改善策比較結果

評価項目	RIS	電波反射板 (反射板材質: 金属アルミ)	中継器	漏洩同軸ケーブル	散乱板
設置位置(アクセス容易、面積)	設置面積が少なく、伝送路も不要	設置面積が少なく、電源、伝送路も不要	設置面積は電源設備も必要 なため電波反射板より大きくなる	設置面積はカバーエリアに応じて大きく(長くなる)	設置面積が少なく、電源、伝送路も不要
付帯設備(電源・バッテリー等)の必要性	必要	不要	必要	不要	不要
消費電力	小	無	中	無	無
伝送路の必要性	不要	不要	不要	必要	不要
施工の容易性	容易	容易	中程度	高程度	容易
導入リードタイム	数週間～数か	数週間～数か	数か月～6か	6か月程度	数週間～数か

評価項目	RIS	電波反射板 (反射板材質: 金属アルミ)	中継器	漏洩同軸ケー ブル	散乱板
	月	月	月		月
移設の容易性	容易(伝送路が 無く簡易)	容易(電源、伝 送路が無く簡 易)	困難(電源、伝 送路含み移設 が必要)	高程度	容易(電源、伝 送路が無く簡 易)
カバレッジの距離	広い	広い	非常に広い		狭い
カバレッジの角度	広い	狭い	広い		広い
基地局との位置 関係	見通し内	見通し内	原則見通し内		見通し内
数量拡張性	増設可能	増設可能	増設可能		増設可能
位置合わせ	容易	困難	容易		不要
設置場所の選定	容易	容易	容易		困難
総合評価	優	可	良		可
電波反射板が有効となる条件や使い方	時間帯や周囲環境の変化に応じて電波環境を改善する位置や方向などを切り替えた いユースケースで有効である。また施工や移設が容易であることから、比較的短期間 で電波環境を改善したい場合に有効である。				

出所) 技 01 成果報告書

表 2-40 設置のコストにおけるエリア改善対策比較結果

評価項目	RIS	電波反射板 (反射板材質: 金属アルミ)	中継器	漏洩同軸ケー ブル	散乱板
設備費用(機器費除く)	低	低	中		低
作業費用	低	低	中		低
運用・保守費用	低	不要	中		不要
総合評価	優	優	良		優
電波反射板が有効となる条件や使い方	時間帯や周囲環境の変化に応じて電波環境を改善する位置や方向などを切り替 えたいユースケースで有効である。また施工や移設が容易であることから、比較的 短期間で電波環境を改善したい場合に有効である。				

出所) 技 01 成果報告書

(3) RIS を利用したエリア設計手法・運用手順

1) エリア設計手順

RIS は基地局から放射される電波を所望の方向に反射するデバイスであり、電波受信環境を改善したい領域が基地局の見通し外領域にあるケースにて活用される。

設置場所は、基地局の見通し内領域、かつ、改善したい領域の見通し内領域に設置する必要がある。また、製品の特性上、動作角度範囲を超えると改善したい領域の受信電力が減少するため、基地局および改善したい領域が RIS の動作角度範囲内にあることも考慮して設置する必要がある。

これらを踏まえた上でエリア設計していくが、具体的な手順は下記である。

1. 基地局が見通し内領域の地点を RIS の設置地点とする
2. RIS が基地局の見通し内領域であり、基地局が見通し外領域である地点を受信電力測定領域

として選択する

3. RIS の正面方向を 0 度とした場合、基地局および受信電力測定領域が RIS の動作角度範囲である ± 60 度の範囲内に入るように RIS の正面方向を決定する
4. RIS を原点とした場合の基地局の座標を計測する
5. RIS の制御プログラムに基地局の座標、中心周波数を設定する
6. 反射角度を制御プログラムで適宜変更して受信電力測定領域内の受信電力を測定し、受信電力が閾値を超えている領域を設計エリアとする

2) 運用する際の手順概要

周囲環境や受信端末の位置に応じて最適な RIS の反射角度は変化する。受信端末の受信電力を閾値以上に保つためには受信端末の受信電力を計測しながら反射角度を微調整する必要がある。

これらを踏まえた上で、RIS を使用する場合の手順は下記である。

1. エリア内に受信端末を設置する
2. RIS を原点とした場合の受信端末のアジマス角度とエレベーション角度を計測する
3. RIS の制御プログラムに基地局の座標、中心周波数、受信端末のアジマス角度とエレベーション角度を設定し、受信電力を計測する
4. 受信端末の受信電力を計測し、受信電力が最大となるアジマス角度およびエレベーション角度を決定する
5. 受信端末の移動や周囲環境の変化に応じて適宜、アジマス角度およびエレベーション角度の調整を行う

3. 特殊な環境におけるローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討

3.1 線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化

3.1.1 線状の空間におけるパラメータの精緻化

線状の空間においては、自己土地である線状の長手方向と他者土地と想定される短手方向では電波伝搬環境が大きく異なることが予想される。このような利用環境において、現実の基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域をより精度よく算出するためのパラメータの検討を行った。

(1) 高速道路の実証

1) Sの精緻化

本技術実証では、線状の都市高速道路の環境に即した電波伝搬モデルの精緻化を目的として、直線区間である区間①及び区間③を対象に、高速道路上の電波伝搬、高速道路上基地局から道路外への輻射の2つのパターンについて検討を実施した。

- i. 高速道路上の電波伝搬
 - ・ フェージング、干渉、反射の影響と、現在の算出法との差異の確認
 - ・ 高速道路上の電波伝搬における新たなパラメータの検討
- ii. 高速道路上基地局から道路外への輻射
 - ・ 道路面、河川敷、市街地における精緻化パラメータの検討

a. 実証仮説

区間①

区間①においては、表 3-1 に示すように、電波伝搬路の環境条件に従い、パラメータ S に異なる値を定義し、仮説値を設定した。

表 3-1 区間①パラメータ S による実証仮説

環境条件	仮説パラメータ	想定伝搬路モデル	パラメータ値
高速道路上／河川敷	S	開放地	32.5dB
周辺市街地	S	郊外地	12.3dB

区間③

< 高速道路外の伝搬 >

- ・ 現在の3種類のパラメータ S によって「市街地」「郊外地」「開放地」を適用できる

< 高速道路上の伝搬 >

- ・ 希望カバーエリアである高速道路上は、区間③のような直線区間の場合には移動におけるフェージング、遮音壁による反射等の考慮は必要だが、基地局と端末間に情報板やその他構造

物がほぼ無く、自由空間伝搬損失に近似するエリアを形成すると予想できる

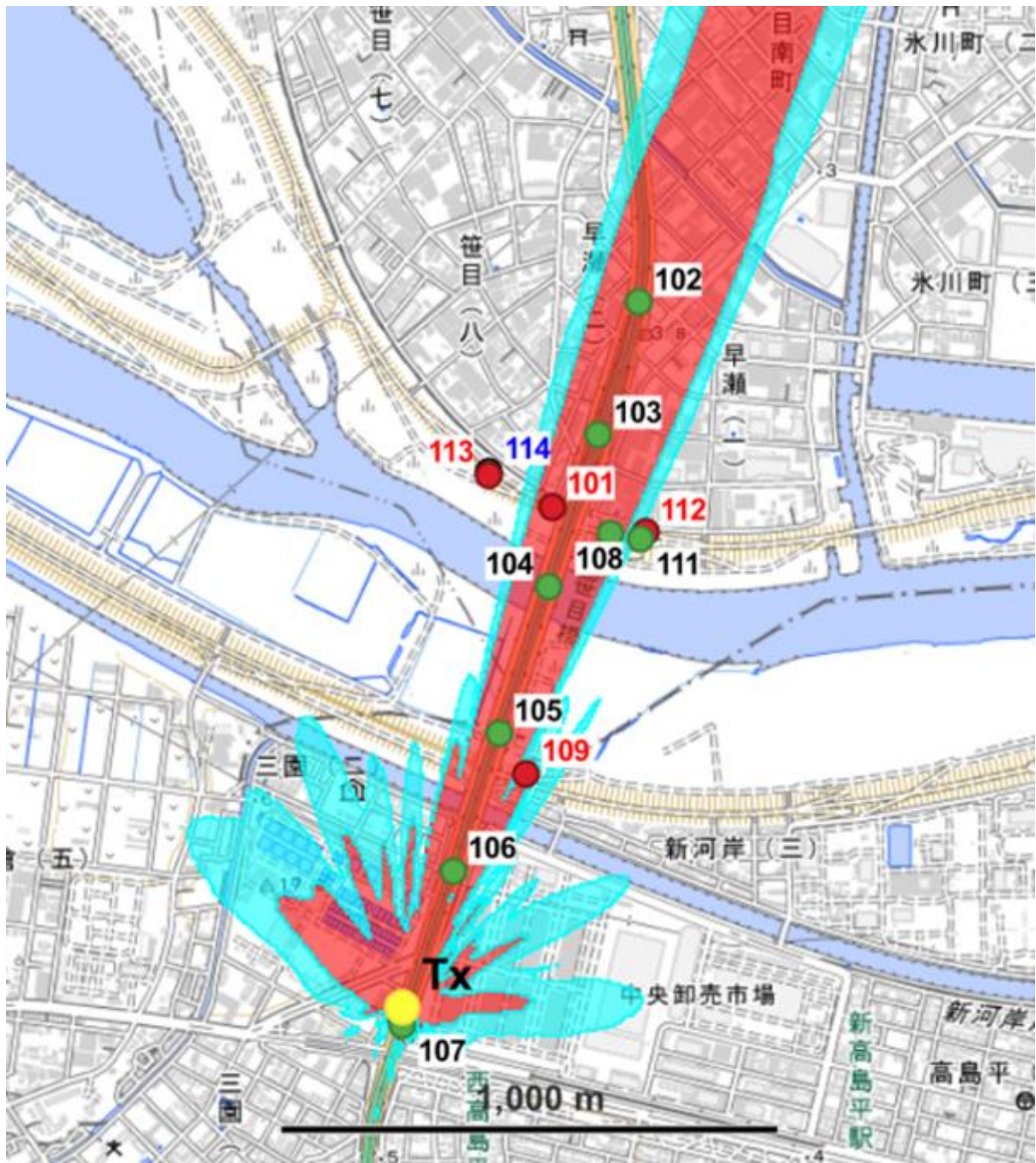
このことから、パラメータ S で一番損失が少ない「開放地」よりもさらに伝搬すると推察される。従って、高速道路上の直線区間を考慮した電波伝搬モデルの精緻化検討のために必要なパラメータ S を検証するにあたり、「開放地」の場合の S 値(32.5dB)よりも自由空間伝搬損失の値に近づくと予想し、総務省式の伝搬損失と自由空間伝搬損失、その差分が今回の S 値の補正值 S1 となるので、(0 dB<S1<20.22dB)と仮説を設定し検証を行った。

b. 実証結果

精緻化の結果、推定した S の値と、精緻化前後の伝搬損失実測値との RMSE を表 3-2 に示す。また、精緻化後の S 値を用いたカバーエリア及び調整対象区域のエリアと、実測により探索したカバーエリア端、調整対象区域端の結果を図 3-1 及び図 3-2 に示す。精緻化後の S 値を用いたエリア算出式と実測値の伝搬損失の比較を行った結果を図 3-3 及び図 3-4 に示す。

表 3-2 精緻化条件と精緻化前後の S 値、実測値との RMSE の結果

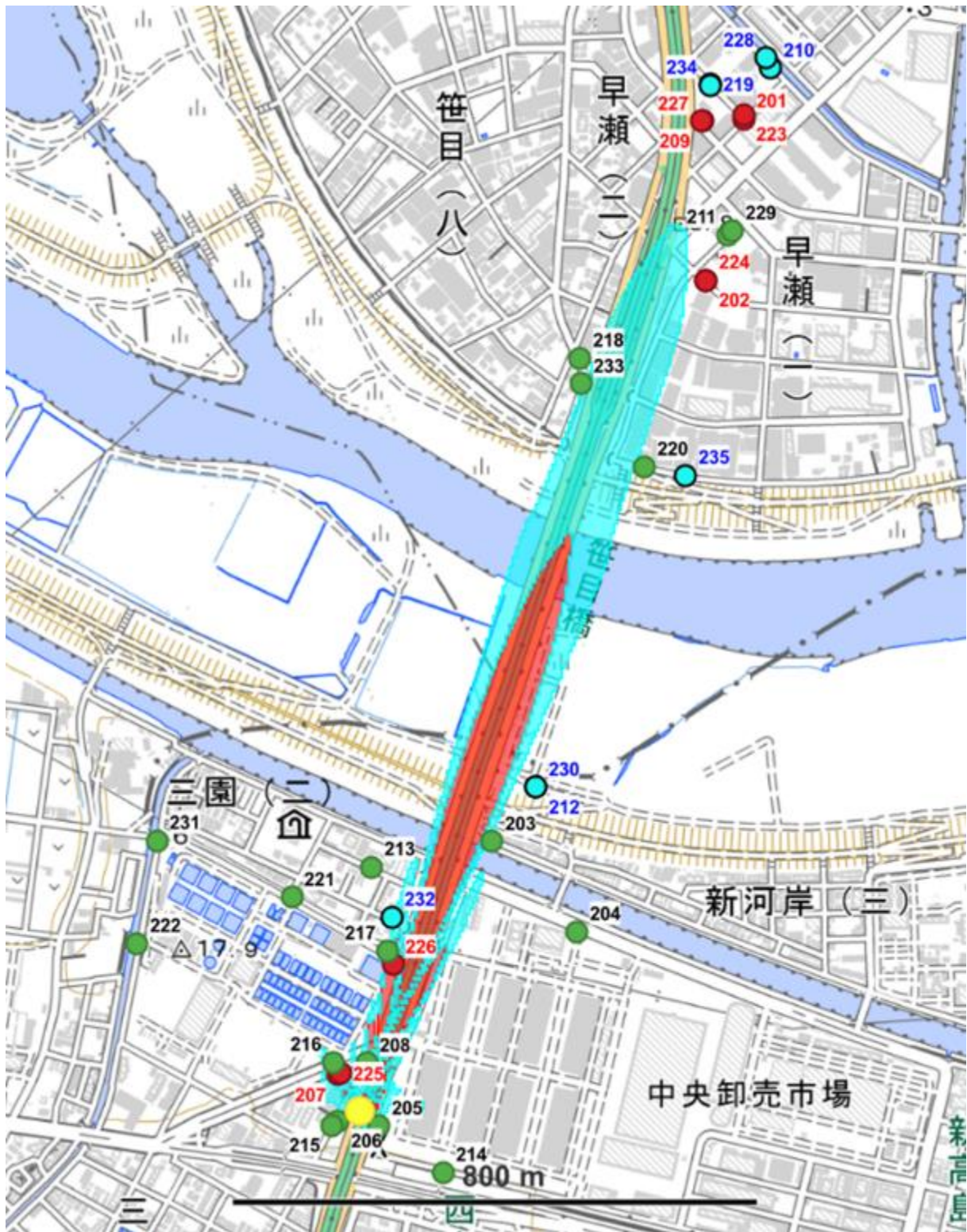
測定	箇所 影響要因	条件	精緻化後の S [dB]	精緻化前の 実測値との RMSE[dB]	精緻化後の 実測値との RMSE[dB]
1	区間① 高速道路上 及び河川敷 開放地	建物や障害物などが存在せず、開けたエリア	仮説値: 32.5	14.84	13.97
			精緻化後: 39.03		
2	区間① 道路外 郊外地	移動局近傍に建物、障害物はあるが密集はしていないエリア	仮説値: 12.3	12.46	8.69
			精緻化後: 22.07		



- カバーエリア（精緻化後）
- 調整対象区域（精緻化後）
- カバーエリア端（実測）
- 調整対象区域端（実測）

出典：国土地理院地図を日本無線株式会社にて加工

図 3-1 精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(区間①高速道路上及び河川敷)



- カバーエリア (精緻化後) ■ 調整対象区域 (精緻化後)
- カバーエリア端 (実測) ● 調整対象区域端 (実測)

出典: 国土地理院地図を日本無線株式会社にて加工

図 3-2 精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(区間①道路外)

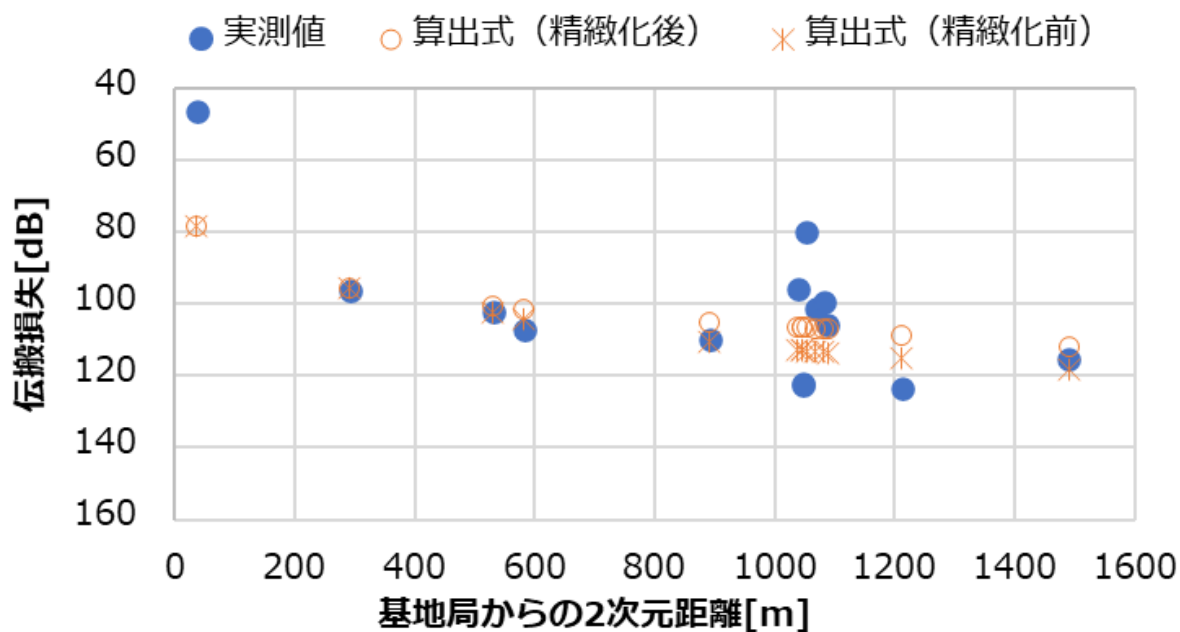


図 3-3 精緻化前後の伝送損失の比較(区間①高速道路上及び河川敷)

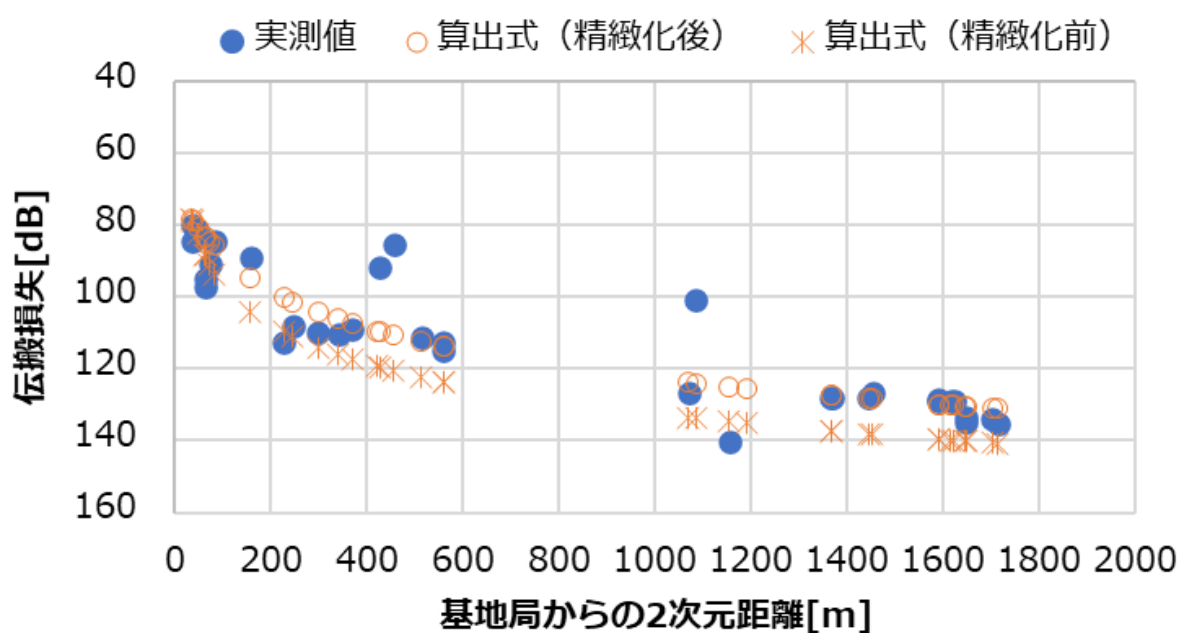


図 3-4 精緻化前後の伝送損失の比較(区間①道路外)

図 3-3 より、河川敷付近の測定点及びアンテナ後方の測定点(ID107)がグラフから外れ値となっていることを確認した。狭指向性アンテナ後方の測定点は、送信アンテナ利得が非常に低くなるため、S の精緻化を実施する際にアンテナ前方の測定点と傾向が大きく異なり、エリア算出式に対して外れ値となりやすいと考える。河川敷付近の測定点は基地局から 1,000 m 以上の距離があるため、アンテナ方位がわずかにずれるだけでアンテナのメインローブから外れる可能性がある。また、河川敷付近は起伏が

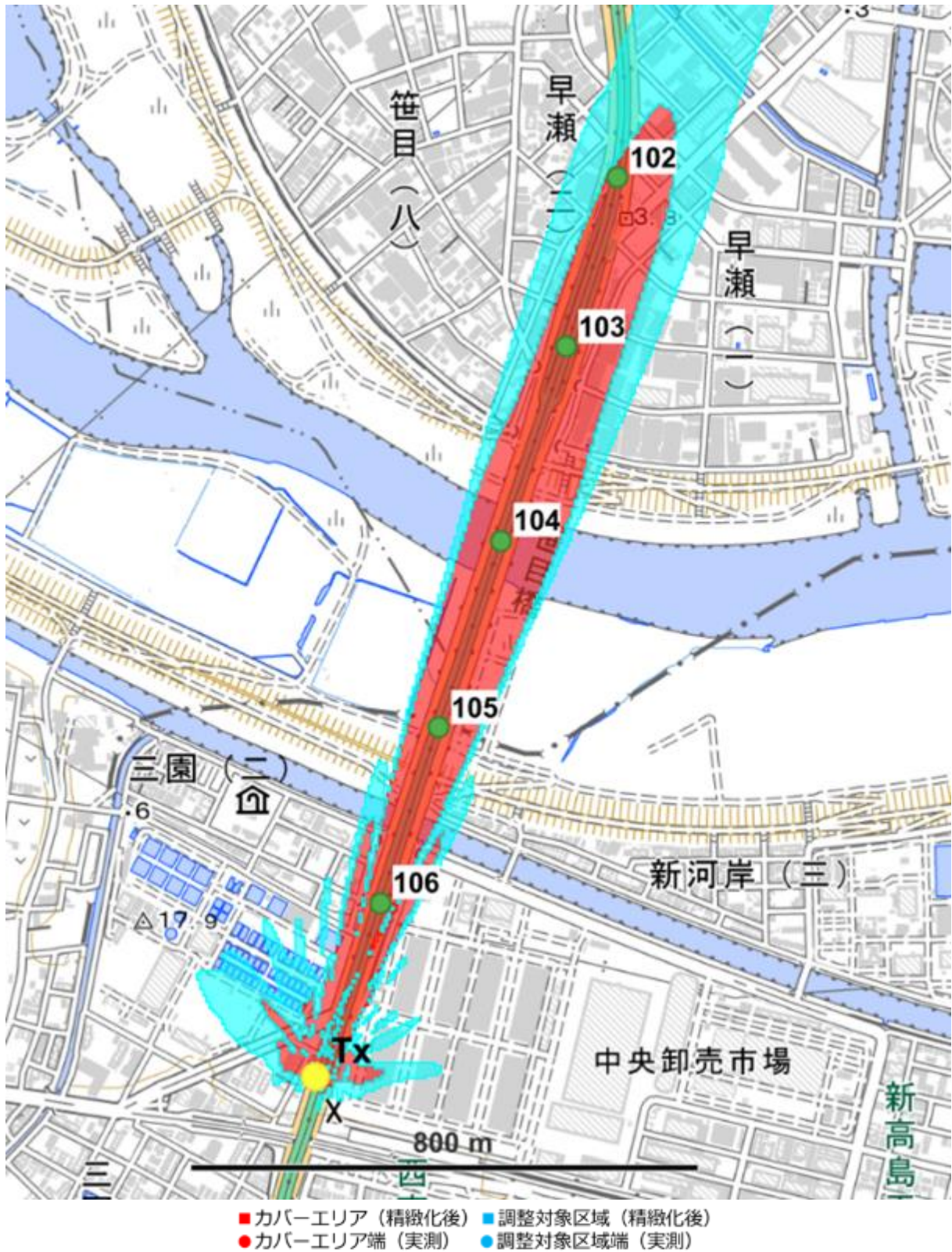
比較的激しく、測定点によって高さが異なる。エリア算出式の伝搬損失計算は、シミュレーション上の 3 次元的な位置関係から送信アンテナ利得を導出し、その値を考慮した計算をしているが、実態の送信アンテナ利得と乖離している可能性も考えられる。これにより、算出された伝搬損失の値にばらつきが生まれたと考えている。

また、図 3-4 より実測値の伝搬損失とエリア算出式の伝搬損失の傾向がよく一致していることを確認した。このときの RMSE 値は 8.69 となり、概ね精度よく精緻化できていることを確認した。

以上の考察を鑑み、高速道路上及び河川敷のエリアの測定点において、高速道路上のアンテナのメインローブ方向のみの 5 点(ID:102~106)を用いて精緻化を試み、環境毎に分けて精緻化することでより精度の高い受信電力推定を目指すこととした。

表 3-3 区間①(高速道路上及び河川敷)のアンテナメインローブ方向のみの測定点における精緻化後の S 値と精緻化前後の実測値との RMSE

測定	箇所 影響要因	条件	精緻化後の S [dB]	精緻化前の 実測値との RMSE[dB]	精緻化後の 実測値との RMSE[dB]
1'	区間① 高速道路上 及び河川敷 開放地	建物や障害物などが存在せず、開けたエリア (アンテナメインローブ方向の測定点のみで精緻化)	30.34	4.22	3.84



出典: 国土地理院地図を日本無線株式会社にて加工

図 3-5 精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(区間①高速道路上、アンテナ前方の測定点のみ)

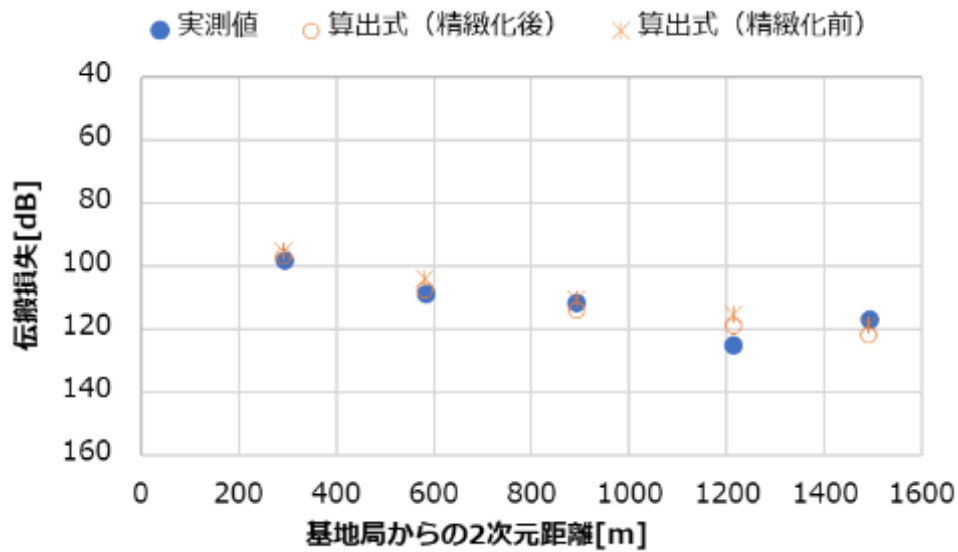


図 3-6 精緻化前後の伝搬損失の比較(区間①道路外)

区間③においては、パラメータ S の補正值としてパラメータ S1 の検討を行った。当該パラメータの仮説値 S1 は $0 \text{ dB} < S1 < 20.22 \text{ dB}$ であり、実測により得られた値は $-0.07 \sim 14.46$ の範囲で、平均すると 8.13 となった。これらの数値のうち、何を定量的なパラメータとして使用できるか、以下のとおり考察した。まず、総務省式 ($S=32.5$ (開放)) と自由空間伝搬損失及び実測で得られた伝搬損失の値を図 3-7 に示す。

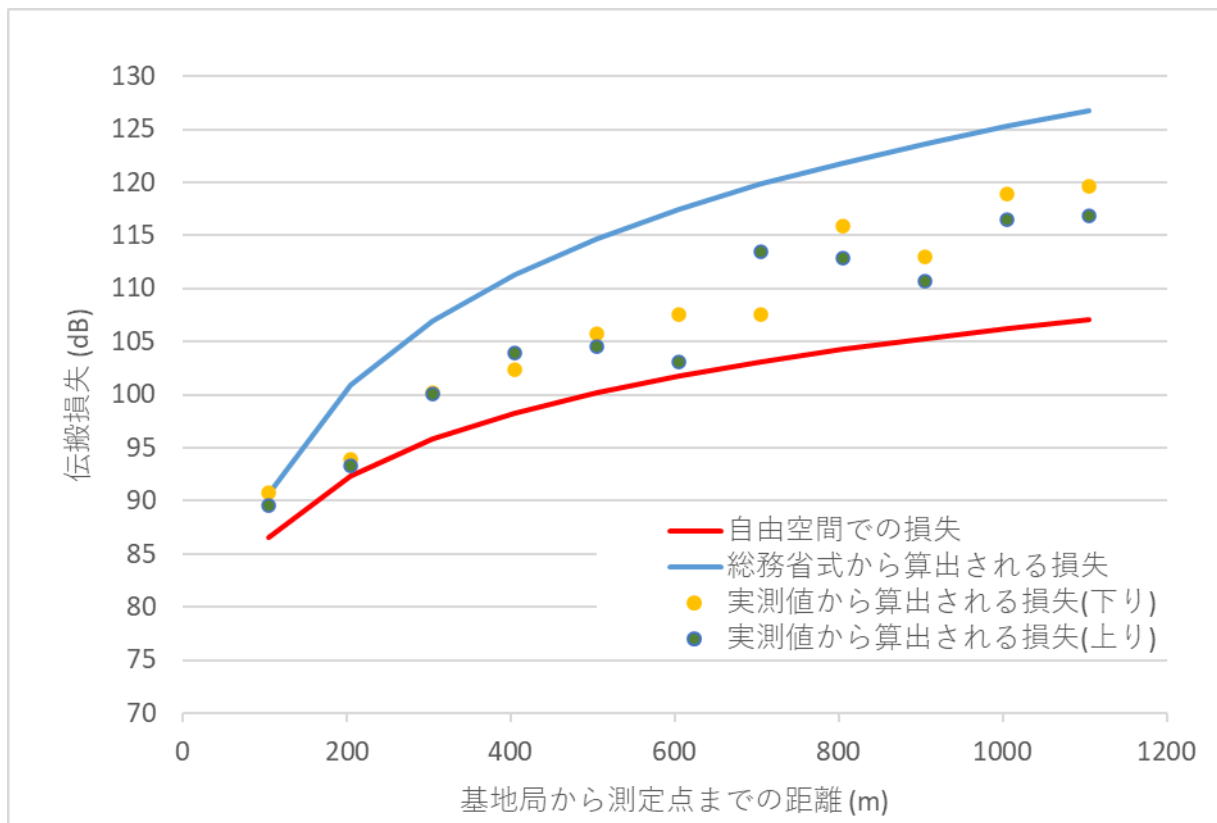


図 3-7 総務省式と自由空間伝搬損失及び実測で得られた伝搬損失の比較

上図より、仮説の通り既存の総務省式よりも自由空間伝搬損失に近い値であることが分かった。次に、総務省式(S=32.5(開放地))と自由空間伝搬損失及び取得した損失値と総務省式の差分を平均化した値を図 3-8 に示す。

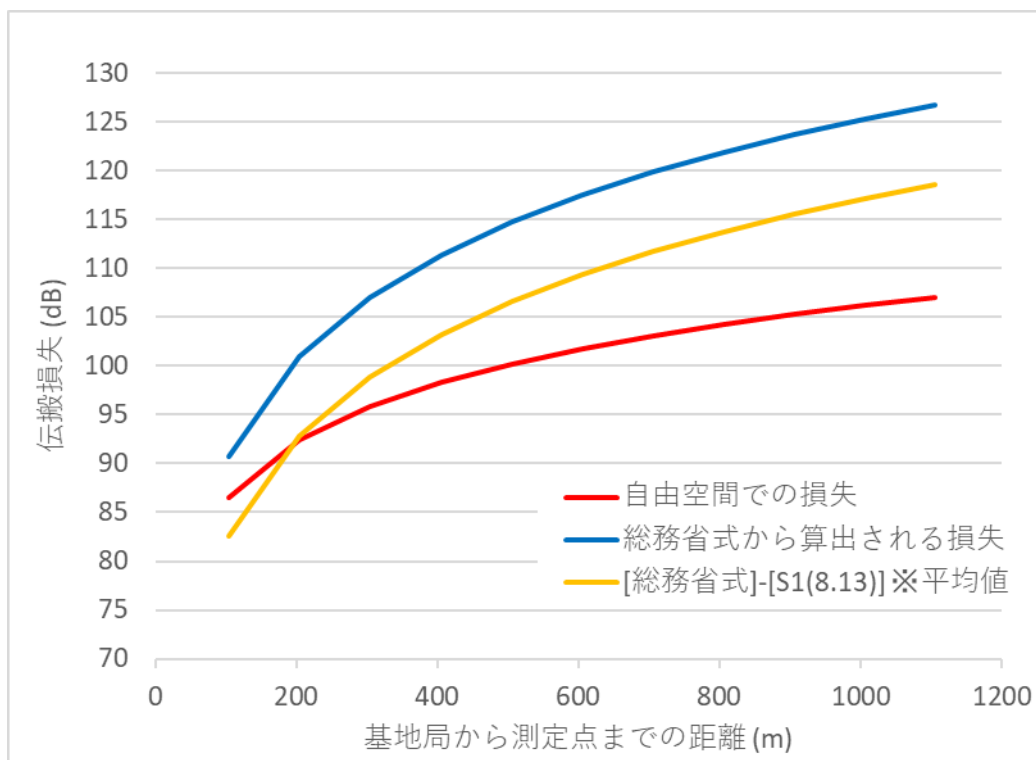


図 3-8 総務省式に補正パラメータ S1 を考慮

総務省式の差分を平均化した値をグラフ化すると、実測データに近似するような開放地のみ加味した総務省式と自由空間伝搬損失との差異にほぼすべての距離で整合する結果となった。この結果から開放地 S パラメータを補足するパラメータ S1 として、8.13dB が既存式よりも実態に近似する値であり妥当であると考えた。

本検証においては、自由空間伝搬損失による計算した値に近似し、それを阻害する要素としては、高速道路両側の遮音壁などの構造物による反射・マルチパス及び移動測定をした際のフェージングの影響と位置付けていた。従って、今回の差分においては、この阻害要素で十分説明できる範囲であり、仮説値を実測によって裏付ける結果となったと考える。

2) R の精緻化

a. 実証仮説

総務省式の 4.7GHz 帯のパラメータ R 及び 28GHz 帯の室内における建物侵入損 R は、どちらも具体的損失値が既知であれば、その値を代入する方式となっている。

別項で述べられている柔軟化使用や自己土地使用前提のローカル5G の法制度を鑑みると、今後は高速道路上のみをエリア化する方策が鋭意選択され、基地局の設置は屋外にはなるが、道路外に対して直接波が届かないように設計されていくことが想定される。このような伝搬環境に適応する計算式は、屋内に置かれた基地局の電波が建物の通過損失を受けた後に屋外に漏洩・伝搬するようなインドアモ

デルが近似すると考えられる。この場合、28GHz 帯における総務省式としては、現行の屋外・見通し外の計算式ではなく、屋内の R 損失を加えた式が実態に見合うものとなると想定される。従って、本実証においては、このような見地から R について検証することとした。

本実証に使用する高速道路上の基地局から道路外への伝搬における特性としては、高速道路の両側を覆うように施工されている遮音壁による減衰と、高速道路の路面による減衰が考えられ、総務省式においては透過損失のパラメータ R として計算されると考えられる。高速道路外の地上 1.5m の高さの受信点に対しては、道路面やそれを支持する鉄筋コンクリートなどの構造物は、空間損失や道路面に対して俯角をもって放射するため、当該構造物をローカル 5G の周波数が調整対象区域の受信レベル以上で透過するとは考えにくい。しかし、遮音壁においては、その材質や厚さによって、十分道路外に調整対象区域の受信レベル以上で透過すると考えられる。従って、当該検証環境においては、高速道路上の遮音壁を総務省式のパラメータ R の成分として取り扱い、検証することとした。

この R の成分を作り出す高速道路の遮音壁には、その目的によって多数のバリエーションがあり、また技術革新と共に高性能化しているため、すべてをある 1 つの損失係数として表現することは難しい。また、高速道路上の基地局という特殊環境下においては、遮音壁の透過損失が少なければ少ないほど道路外へ電波が漏洩するので、高速道路上での基地局設置において重要な観点となりうる。このため、区間③において遮音壁の材質の中では透過損失が一番少ないと想定されるポリカーボネートの材質の遮音壁が北側に設置されており、この透過損失を検証することによって遮音壁を電波が透過する場合の道路外への漏洩の最大値について検証することとした。

精緻化対象パラメータ R 値の仮説値を算出するにあたって、4.7GHz 帯はノキアソリューションズ & ネットワークス合同会社にて過去に測定したプラスチック系素材(12mm 厚特殊アクリル板)の透過損失データ(表 3-5)を参考にした。ミリ波周波数帯においては同素材の透過損失を示すデータを文献から適用できなかったため、ITU-R P.2109-1 のデータを使って、同じように透過率が高く、誘電率・誘電損失率が判明している特定のガラス素材の透過損失(図 3-9)から算出した。この結果から、4.7GHz 帯システムにおいては $0 < R < 2.0$ 、28GHz 帯システムにおいては $0 < R < 3.98$ と仮説を設定し検証を行った。(表 3-4 参照)

表 3-4 パラメータ R 推定の算出根拠

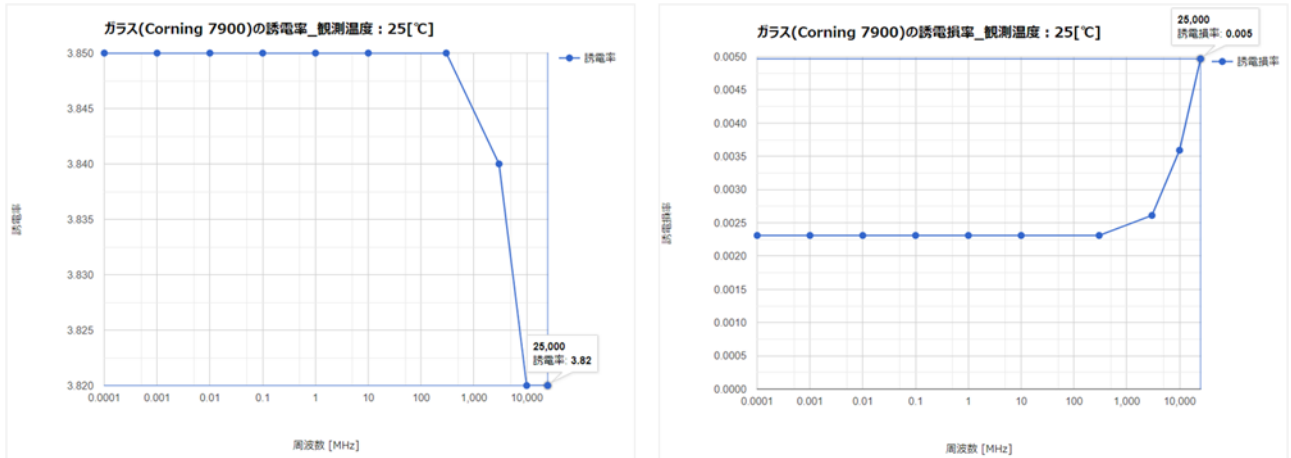
	誘電率	誘電損失率	仮説 R 値	説明
4.7GHz 帯	—	—	2.00	12mm 厚特殊アクリル板の実測データを使用
28GHz 帯	3.82	0.005	3.98	ITU-R.P.2109-1 のデータを使用(図 3-9 参照)

出所)特 02 成果報告書

表 3-5 パラメータ R 推定に用いた実測データ(Sub6)

入射角 θ	4.5GHz 帯透過損失率
0	0.33dB
15	0.71dB
30	0.88dB
45	1.09dB
60	2.00dB

出典:ノキア暗室での実測データ



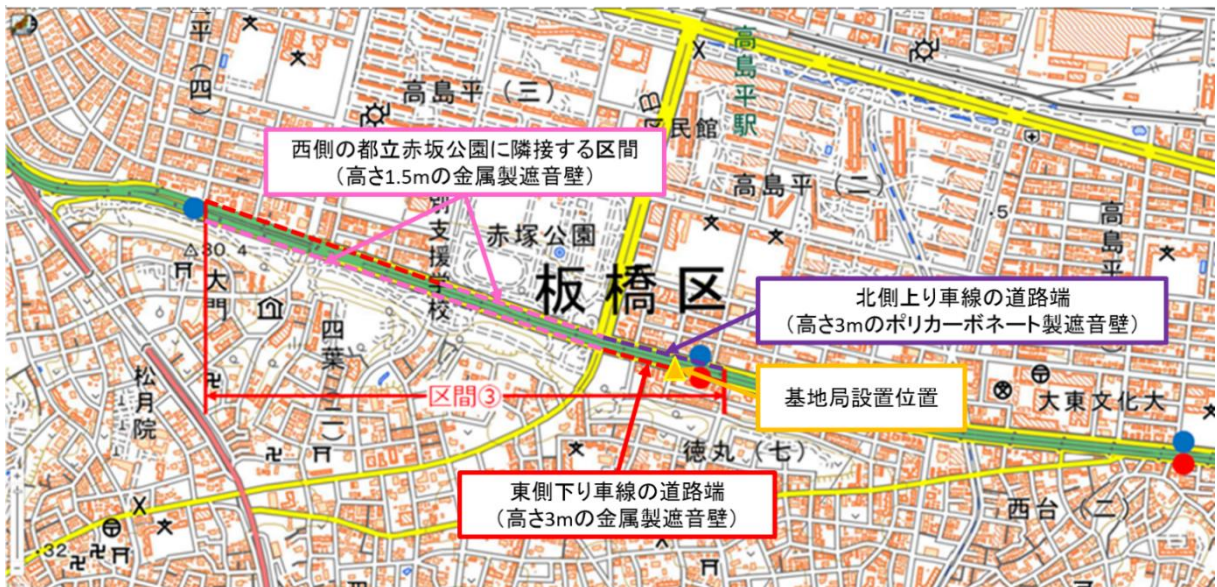
出典:誘電率・透磁率データベース(<https://permittivity.jp/index.html>)

図 3-9 パラメータ R 推定に用いた誘電率と誘電損失(ミリ波)

実証対象区間は 1km 以上の直線区間であり、遮音壁は下記の 3 種類が設置されている。

- ・ 高さ 3.0m の金属製遮音壁:区間内東側下り車線脇:(図 3-11 参照)
- ・ 高さ 1.5m の金属製遮音壁:区間内西側上り下り車線脇:(図 3-12 参照)
- ・ 高さ 3.0m のポリカーボネート製遮音壁:区間内東側上り車線脇:(図 3-13 参照)

これらの配置状況をまとめた図を図 3-10 に示す。



出典:国土地理院地図をノキアソリューションズ&ネットワークス合同会社にて加工

図 3-10 区間③実証環境詳細



出所)特 02 成果報告書

図 3-11 区間③東側区間下り車線の道路端(高さ 3m の金属製遮音壁)



出所)特 02 成果報告書

図 3-12 区間③西側区間の都立赤坂公園に隣接する区間(高さ 1.5m の金属製遮音壁)



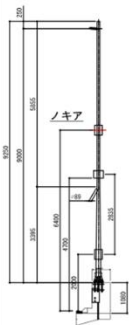
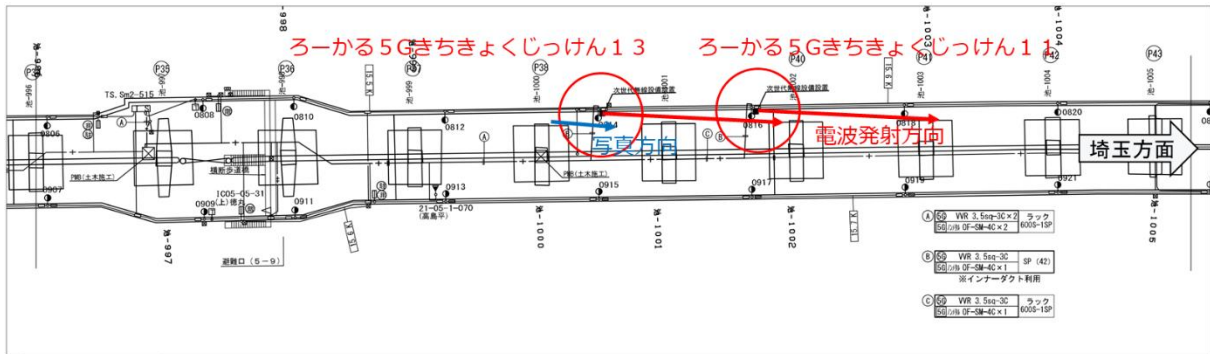
出所)特 02 成果報告書

図 3-13 区間③北側上り車線の道路端(高さ 3m のポリカーボネート製遮音壁)

また、4.7GHz 帯及び 28GHz 帯のアンテナは、図 3-14 で示すように、高速道路の南側の遮音壁のほぼ垂直延長線上の照明柱に道路面より 4.7mの高さに設置した。アンテナの設置場所は図 3-15 に示す。



図 3-14 区間③無線機設置環境(道路南側遮音壁のほぼ垂直延長線上に設置)



出所)特 02 成果報告書

図 3-15 アンテナの設置場所

b. 実証結果

測定結果をもとに、既出のパラメータ算出式で求めた計算値は以下のとおりである。

4.7GHz 帯パラメータ R の各測定ポイントの計算結果を表 3-6 に示す。計算結果を平均化し、測定結果から算出された結果は、 $R=1.96$ となる。

表 3-6 パラメータ R の算出結果(4.7GHz 帯)

測定ID	R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10
測定結果から算出された伝搬損失 [dB]	89.23	89.36	89.70	90.16	90.70	90.82	91.06	91.42	91.40	91.80
自由空間伝搬損失から算出された伝搬損失 [dB]	87.18	87.53	87.86	88.18	88.49	88.79	89.08	89.36	89.63	89.90
上記差分 (=R成分)	2.06	1.84	1.84	1.98	2.21	2.03	1.98	2.06	1.76	1.90

出所)特 02 成果報告書

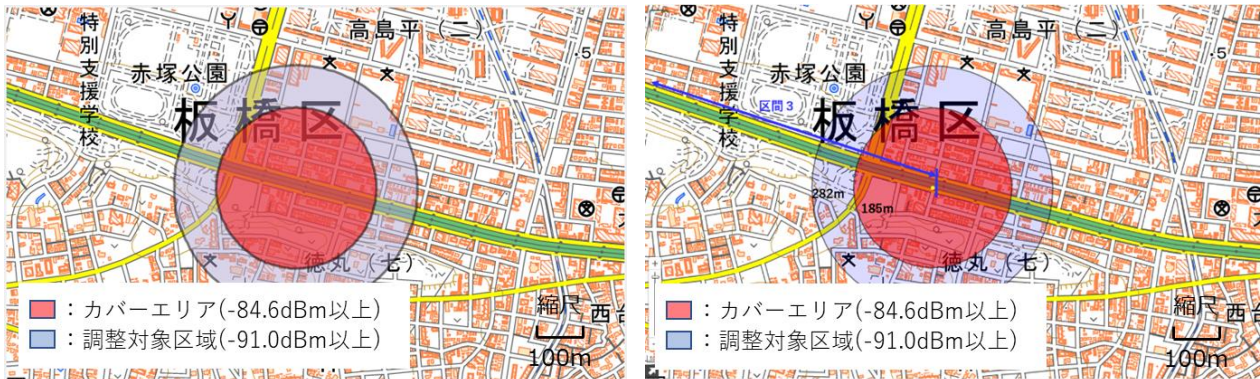
28GHz 帯パラメータ R の各測定ポイントの計算結果を表 3-7 に示す。測定機の受信空中線利得は 20dBi であるが、測定時にオフセットし測定結果(実測値)は受信空中線利得が相殺された値を取り扱っている。計算結果を平均化し、測定結果から算出された結果は、 $R=5.51$ となる。

表 3-7 パラメータ R の算出結果(ミリ波)

測定ID	R51	R52	R53	R54	R55	R56	R57	R58	R59	R60
測定結果から算出された伝搬損失 [dB]	109.94	110.21	109.66	109.77	111.50	110.39	111.18	110.67	111.06	111.42
自由空間伝搬損失から算出された伝搬損失[dB]	105.06	105.06	105.07	105.07	105.07	105.07	105.07	105.07	105.07	105.08
上記差分 (=R成分)	4.88	5.15	4.59	4.70	6.43	5.32	6.11	5.60	5.99	6.34

出所)特 02 成果報告書

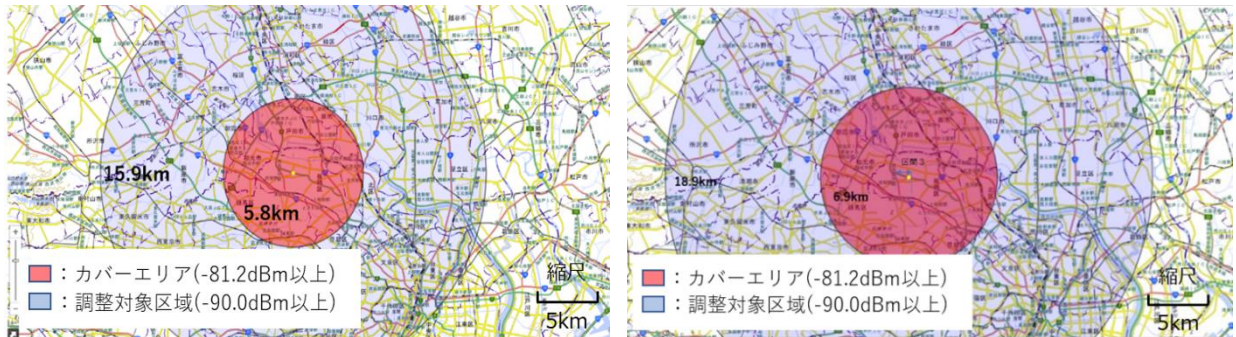
4.7GHz 帯の測定によって算出したパラメータ R を加味した精緻化エリア図を図 3-16 に示す。



出所)特 02 成果報告書

図 3-16 精緻化エリア図(R=1.96)(左)と仮説エリア図(R=2.0)(右)(4.7GHz 帯)

28GHz 帯の測定によって算出したパラメータ R を加味した精緻化エリア図を図 3-17 に示す。なお、受信空中線利得は、審査基準の指定どおり 20dBi としてカバーエリア及び調整対象区域を算出した。



出所)特 02 成果報告書

図 3-17 精緻化エリア図(R=5.51)(左)と仮説エリア図(R=3.98)(右)(28GHz 帯)
仮説エリア図と精緻化エリア図の差分について以下のとおり考察する。

ア) 4.7GHz 帯パラメータ R

当該パラメータの仮説値は $0 < R < 2.0$ 、実測により得られた値は 1.96 であった。

仮説値は、ポリカーボネート素材のデータが無く、ガラスや厚みの違う別素材の透過損失の値を流用しているため、仮説値設定のエビデンスとしては精度の良くないものとなっていた。実際の遮音壁は、当該素材が単一に設置されているのではなく、高速道路への設置という環境により、幾層の金属の枠組み合わせの中に当該素材が埋め込まれているため、純粋な素材のみの想定透過損失よりも R 成分が大きくなっていると思われる。

これらを踏まえた上で、ポリカーボネート単一素材の透過損失ではなく、本来の目的である、当該素

材を使用した遮音壁という「構造物全体」における透過損失として、このデータの有効性に対する考察を行った。本検証においては、ある物質の透過損失を測定するという命題と同義であったが、それを阻害する要素としては、別項で述べたとおり理想的環境である電波暗室とは異なる環境下での測定になるので、マルチパスの影響(①)や、対象 R 成分以外の遮蔽を受ける可能性(②)があると推察される。

前者①の要素については、指向性のあるアンテナを使用し、R 成分が存在する方向以外からのマルチパスの除去を試みた。後者②の要素については、3 段階の測定ステップを踏むことにより、できる限りの排除を行った。従って、これらの阻害要素の影響を限りなく小さくしたものであると考え、今回の対象素材である「ポリカーボネート製遮音壁」の R 成分について、測定より得られた当該値は信頼性のある結果だと考える。

イ) 28GHz 帯パラメータ R

当該パラメータの仮説値は 3.98、実測により得られた値は 5.51 であった。

仮説値は、当該 R 素材のデータが無く、ガラスや厚みの違う別素材の透過損失の値を流用しているため、実測結果との差分よりも以下の点について重きを置いて考察した。

本検証においては、ある素材の透過損失を測定するという命題と同義であったが、それを阻害する要素としては、別項で述べたとおり理想的環境である電波暗室とは異なる環境下での測定になるので、マルチパスの影響(①)や、対象 R 素材以外の遮蔽を受ける可能性(②)があると推察される。

前者①の要素については、指向性のあるアンテナを使用し、R 成分が存在する方向以外からのマルチパスの除去を試みた。後者②の要素については、3 段階の測定ステップを踏むことにより、できる限りの排除を行った。従って、この阻害要素の影響を限りなく小さくしたものであると考え、今回対象素材の R 成分について、測定より得られた当該値は高い信頼性のある結果だと考える。

現在の審査基準上は、R は基地局屋内設置の場合のみ考慮することになっているが、屋外設置であっても基地局周辺に遮蔽物がある場合は、R を考慮することを提案する。

(2) 鉄道の実証

1) S の精緻化

a. 実証仮説

本実施場所において、線路内は障害物が少なく見通しも確保できることから、S 値は開放地の値に近くなると想定した。また、線路外においては、ホテルや商業ビル、商店などが沿線上に多くあるため市街地の値に近くなると想定した。狭指向性アンテナの指向方向は、アンテナから近い位置を強電界でカバーするため、アンテナ付近の線路方向に合わせた。ただし、線路はほぼ直線だが、図 3-20 と図 3-21 のとおり、ともにアンテナから 400m から 1km 地点から図面下側にカーブしており、その地点以降は電波が自己土地からはみ出ることが予想される。

算出法エリア図としては、線路内外ともに S 値を市街地の値で計算し、図 3-18 と図 3-19 を作図できる。



図 3-18 RU-5 における算出法エリア図①(地理院地図を加工して作成)



図 3-19 RU-2 における算出法エリア図②(地理院地図を加工して作成)

仮説エリア図としては、電波の指向方向のうち線路長手方向のみ開放地($S=32.5$)、それ以外の角度については市街地($S=0$)として計算し、図 3-20 と図 3-21 を作図できる。線路長手方向をすべて開放値扱い、それ以外の方向を市街地としたため、非常にシャープなエリア図となった。なお、作図の仕組み上、線路の形に沿った S 値の設定ができずアンテナ近傍の線路の長手方向はすべて開放地という設定しかできないため、線路が曲線に差し掛かった地点以降は線路外に大きく電波漏洩した図となっている。



図 3-20 RU-5 における仮説エリア図①(地理院地図を加工して作成)



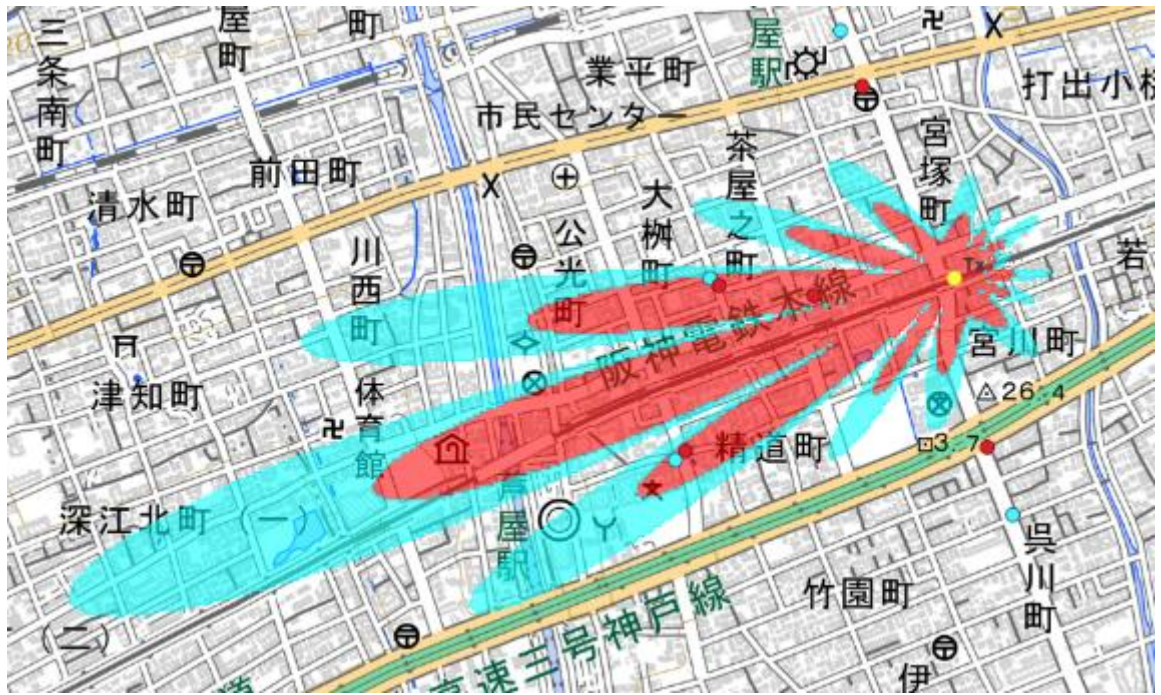
図 3-21 RU-2 における仮説エリア図②(地理院地図を加工して作成)

b. 実証結果

RU-2、RU-5 それぞれにおいて、精緻化パラメータ S を精緻化の対象としている。精緻化は、線路内(業務区域内)と線路外(業務区域外)に分けている。

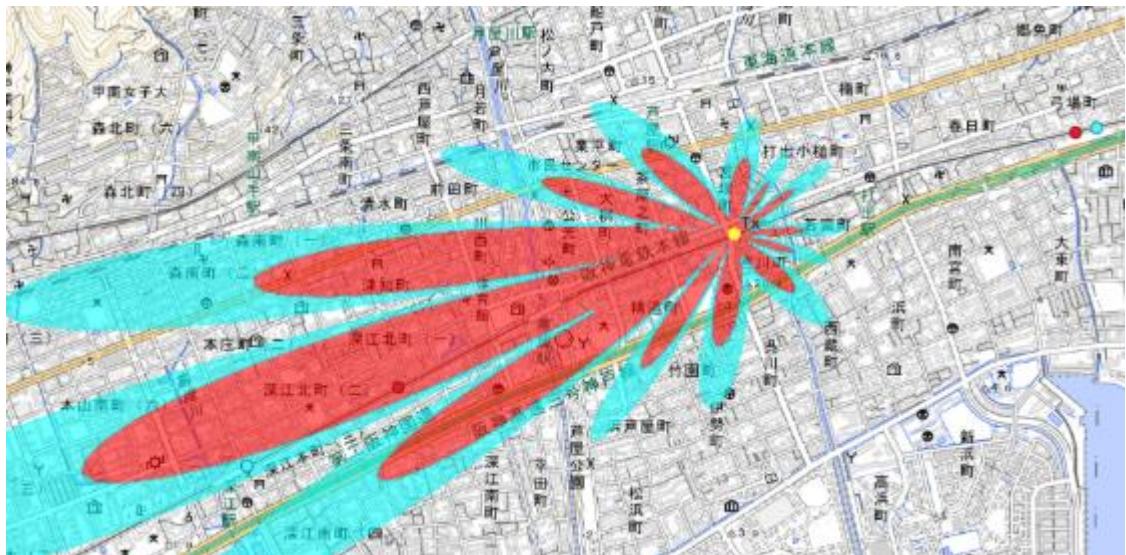
表 3-8 精緻化条件と精緻化前後の S 値、RMSE の結果

箇所	影響要因	条件	精緻化後の S [dB]	精緻化前の実測値との RMSE[dB]	精緻化後の実測値との RMSE[dB]
RU-2	RU-2 市街地・線路外	主に 2 階建て程度の家屋が密集するエリア	17.54	20.55	13.57
	RU-2 開放地・線路内	基地局から沿線に沿って建物が存在しないエリア	32.18	18.47	18.47
RU-5	RU-5 市街地・線路外	主に 2 階建て程度の家屋が密集するエリア	18.09	23.36	15.72
	RU-5 開放地・線路内	基地局から沿線に沿って建物が存在しないエリア	34.42	20.34	20.13



- カバーエリア端 (実測) ■ カバーエリア (算出式)
- 調整対象区域端 (実測) ■ 調整対象区域端 (算出式)

図 3-22 RU-2(線路外)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域
(地理院地図を加工して作成)



- カバーエリア端 (実測) ■ カバーエリア (算出式)
- 調整対象区域端 (実測) ■ 調整対象区域端 (算出式)

図 3-23 RU-2(線路内)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域
(地理院地図を加工して作成)

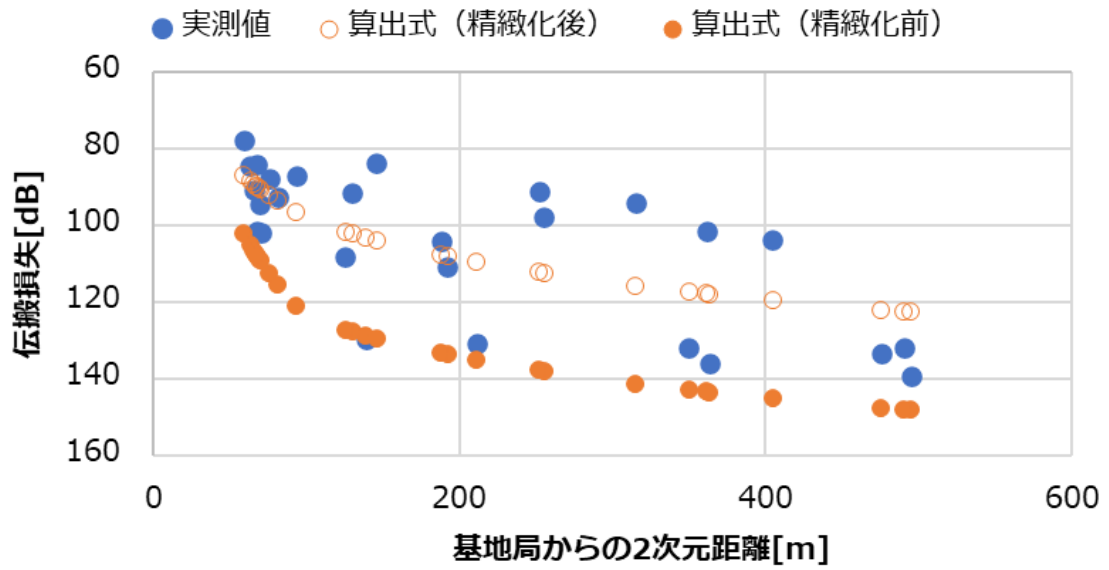


図 3-26 RU-2(線路外)精緻化前後の伝搬損失の比較

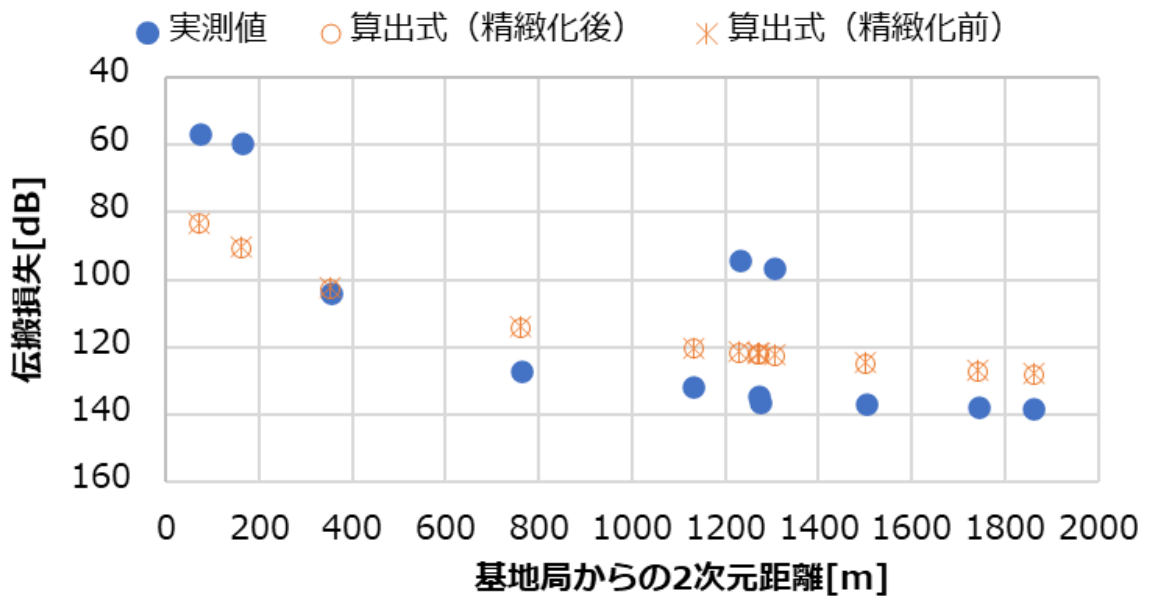


図 3-27 RU-2(線路内)精緻化前後の伝搬損失の比較

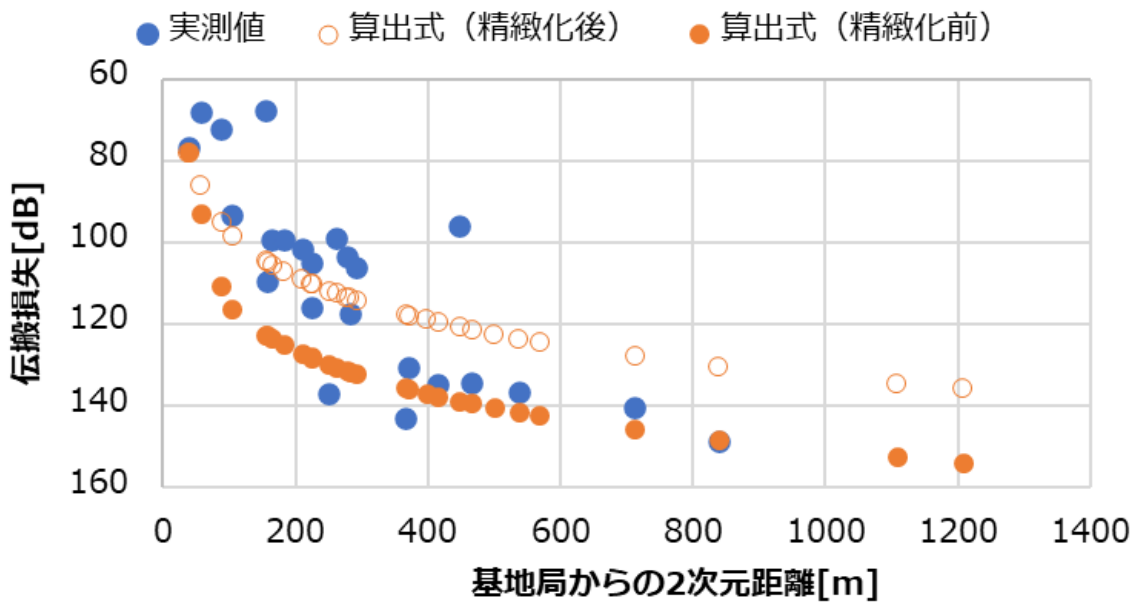


図 3-28 RU-5(線路外)精緻化前後の伝搬損失の比較

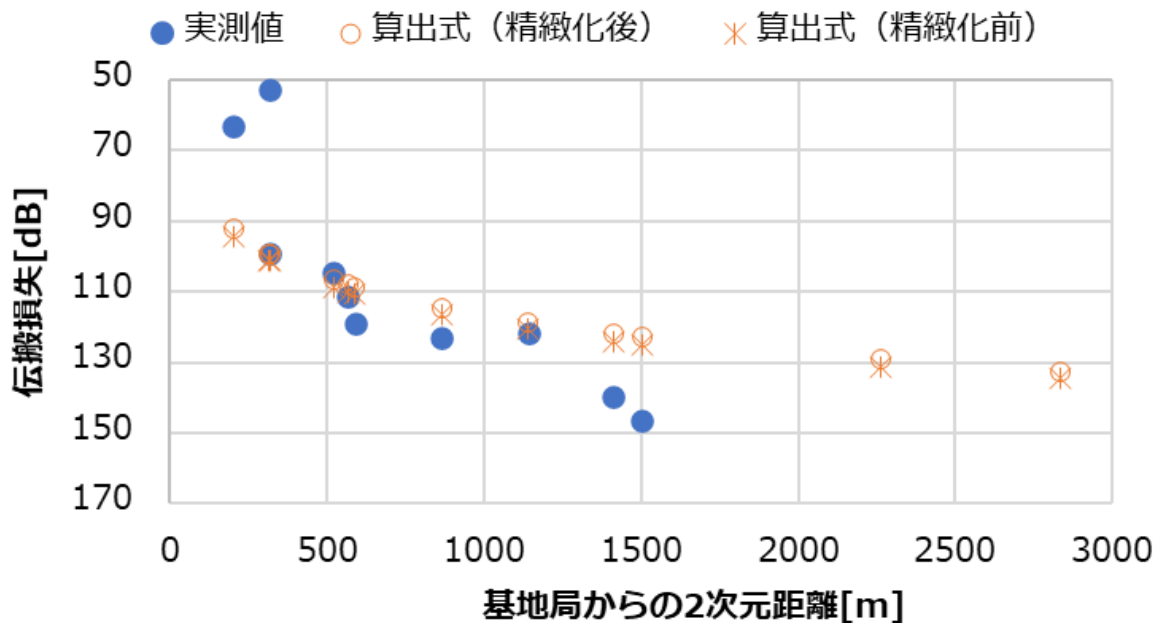


図 3-29 RU-5(線路内)精緻化前後の伝搬損失の比較

図 3-28(RU-5、線路外)から、基地局からの 2 次元距離に対する実測値のプロットと、エリア算出式のプロット傾向が概ね一致していることを確認した。一方、図 3-26 では、2 次元距離に対する実測値のプロットと、エリア算出式のプロット傾向が一致していないことを確認した。エリア算出式のプロットから大きな外れ値となっている実測値は、測定点 ID113 から 117、122 であり、RU-2 基地局から南北に沿った道沿いにある測定点であった。これらの測定点は、その他の線路外の測定点よりも見通し環境であるため、大きな外れ値となったと考える。

図 3-27(RU-2、線路内)、図 3-29(RU-5、線路内)においても一部の測定点でエリア算出式からのプロットが外れ値となっている測定点があった。これらは、アンテナのメインローブとは逆方向(後方)の測定点であった。

以上の結果を鑑み、に示す精緻化条件において、表 3-8 で示す精緻化条件から測定点を絞って精緻化を実施し、より詳細な精緻化を目指した。表 3-9 に精緻化条件、精緻化後の S 値、実測値との RMSE を示している。

RU-2 の線路外において、基地局から南北に伸びる通り沿いの見通しの良い測定点を除外して精緻化を実施することで、図 3-30 に示すように精緻化後のエリア算出式において伝搬損失の傾向を見積もることが出来ることを示した。S 値が 12.59 となり、概ね郊外地相当の S 値となった。その際の精緻化後の RMSE は 11.39 となった。実測値と精緻化後の算出式の伝搬損失を比較したグラフを図 3-33 に示す。

RU-2、RU-5 の線路内において、アンテナのメインローブ方向の測定点のみを用いて精緻化を行った。精緻化後のカバーエリア、調整対象区域を図 3-31、図 3-32 に示す。実測値と精緻化後の算出式の伝搬損失を比較したグラフを図 3-34、図 3-35 にそれぞれ示す。精緻化の結果、S 値が概ね 20 程度となり、精緻化後の実測値との RMSE がそれぞれ 3.72、8.04 となり実測値と非常に傾向が一致することを確認した。以上より、今回実証した線状の開放地の環境、かつ狭い指向性を持つアンテナにおいては、アンテナメインローブ方向に関しては非常に精度よく精緻化できることを示した。

表 3-9 精緻化条件変更後における精緻化後の S 値、実測値との RMSE

箇所	影響要因	条件	精緻化後の S [dB]	精緻化後の実測値との RMSE[dB]
RU-2	RU-2 市街地・線路外 測定点 ID: 113 から 117、 122 を除いて精緻化	主に 2 階建て程度の家屋が密集するエリア	12.59	11.39
	RU-2 開放地・線路内 測定点 ID: 201 から 208	基地局から沿線に沿って建物が存在しないエリア ※アンテナのメインローブ方向(前方)のみの測定点で精緻化	21.63	3.72
RU-5	RU-5 開放地・線路内 測定点 ID: 401 から 408	基地局から沿線に沿って建物が存在しないエリア アンテナビーム方向(前方)のみの測定点で精緻化	23.98	8.04

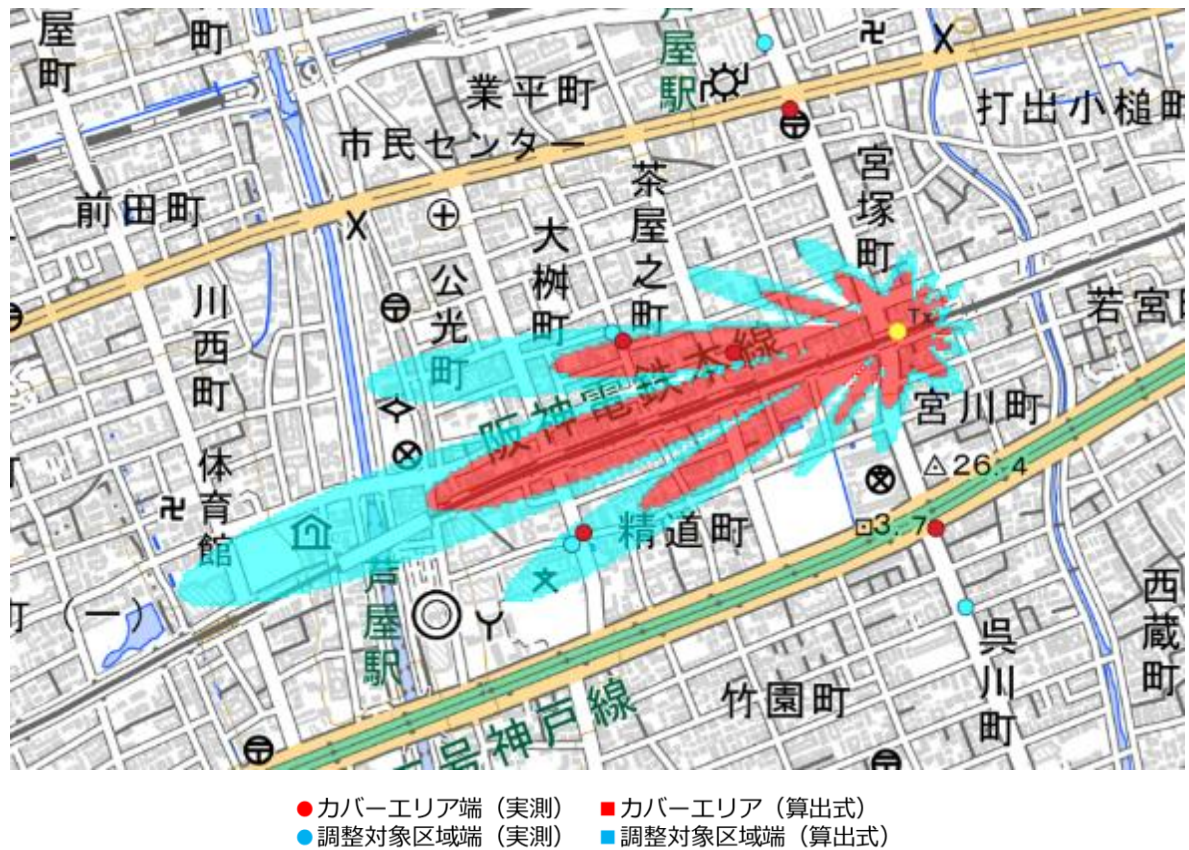
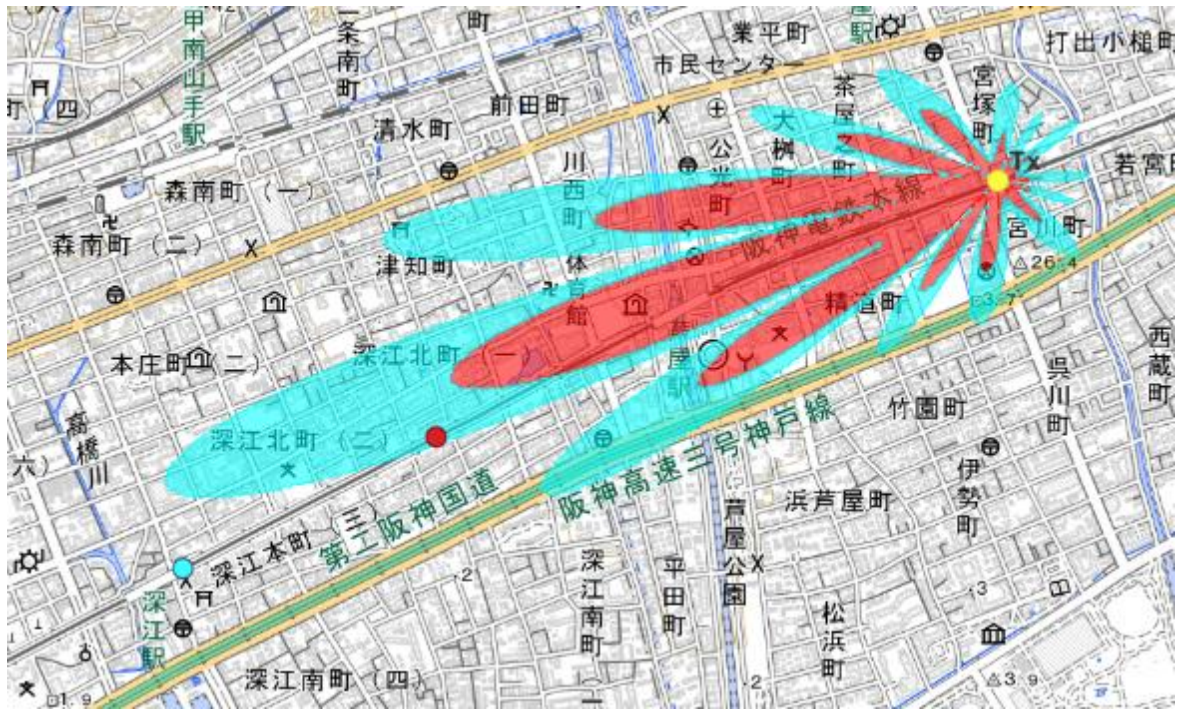
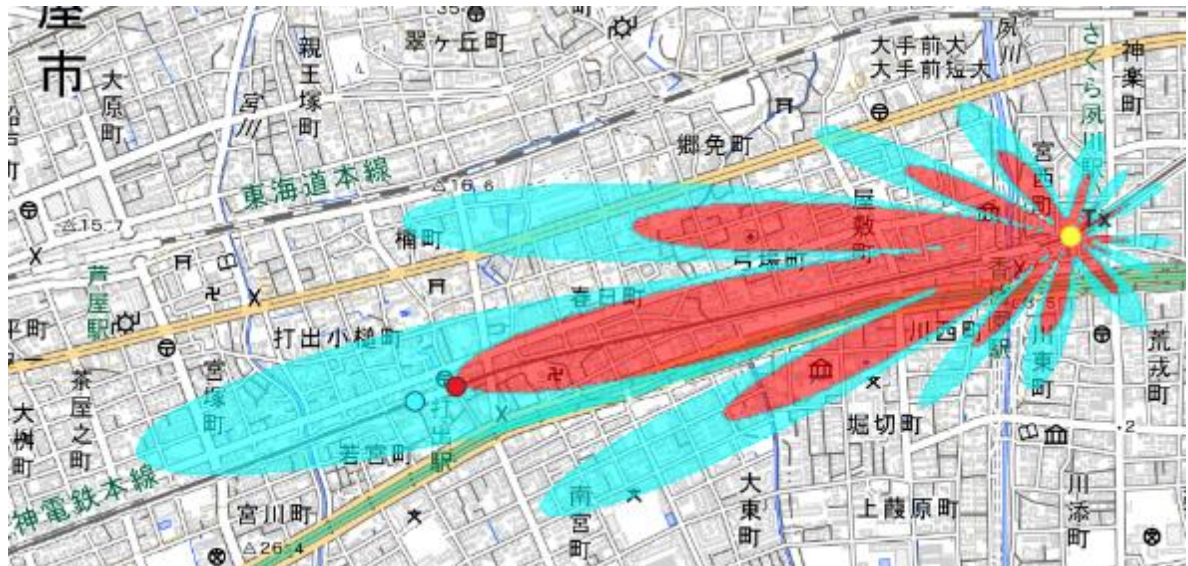


図 3-30 RU-2(線路外、基地局から南北の通りの測定点を除いて精緻化、S = 12.59)
 精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)



- カバーエリア端 (実測) ■ カバーエリア (算出式)
- 調整対象区域端 (実測) ■ 調整対象区域端 (算出式)

図 3-31 RU-2(アンテナ指向方向の測定点のみで精緻化、 $S = 21.63$)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)



- カバーエリア端 (実測) ■ カバーエリア (算出式)
- 調整対象区域端 (実測) ■ 調整対象区域端 (算出式)

図 3-32 RU-5(アンテナ前方の測定点のみで精緻化、 $S = 23.68$)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)

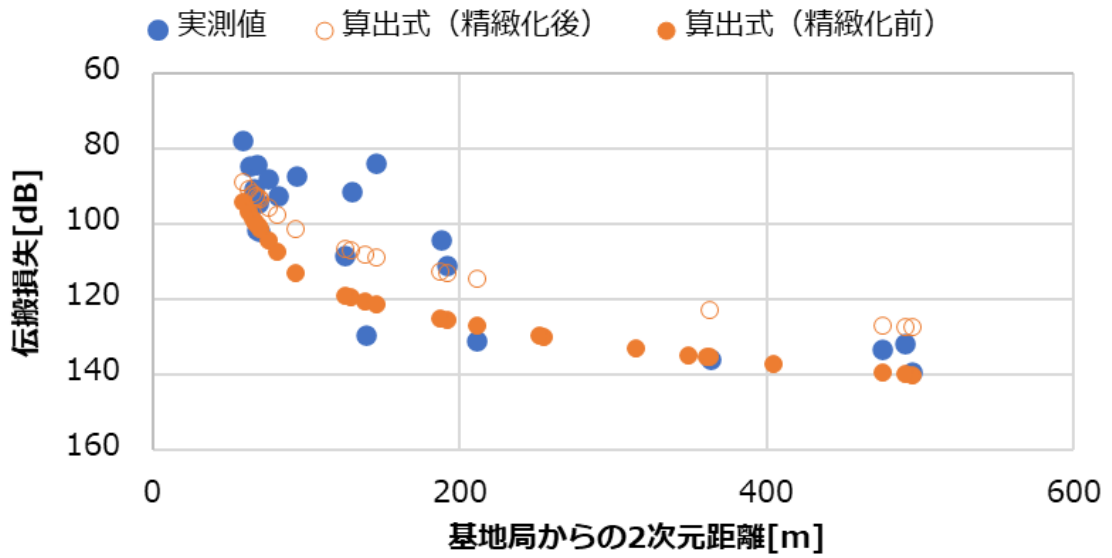


図 3-33 RU-2(線路外、基地局から南北の通りの測定点を除いて精緻化)精緻化前後の差

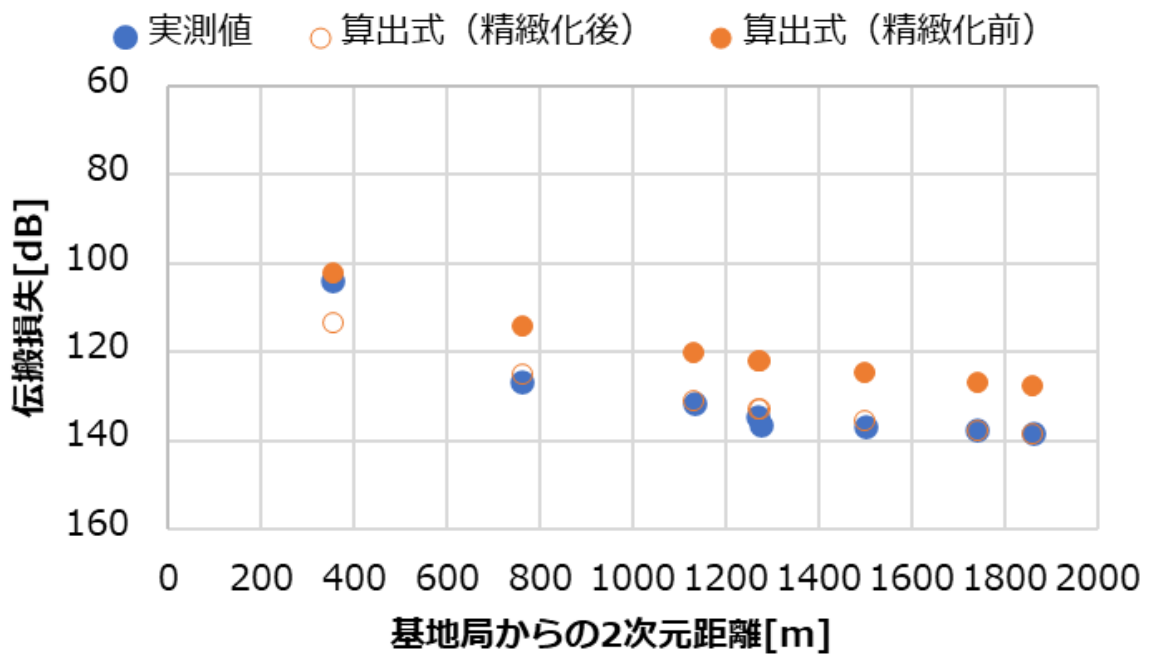


図 3-34 RU-2(アンテナ前方の測定点のみで精緻化)精緻化前後の差

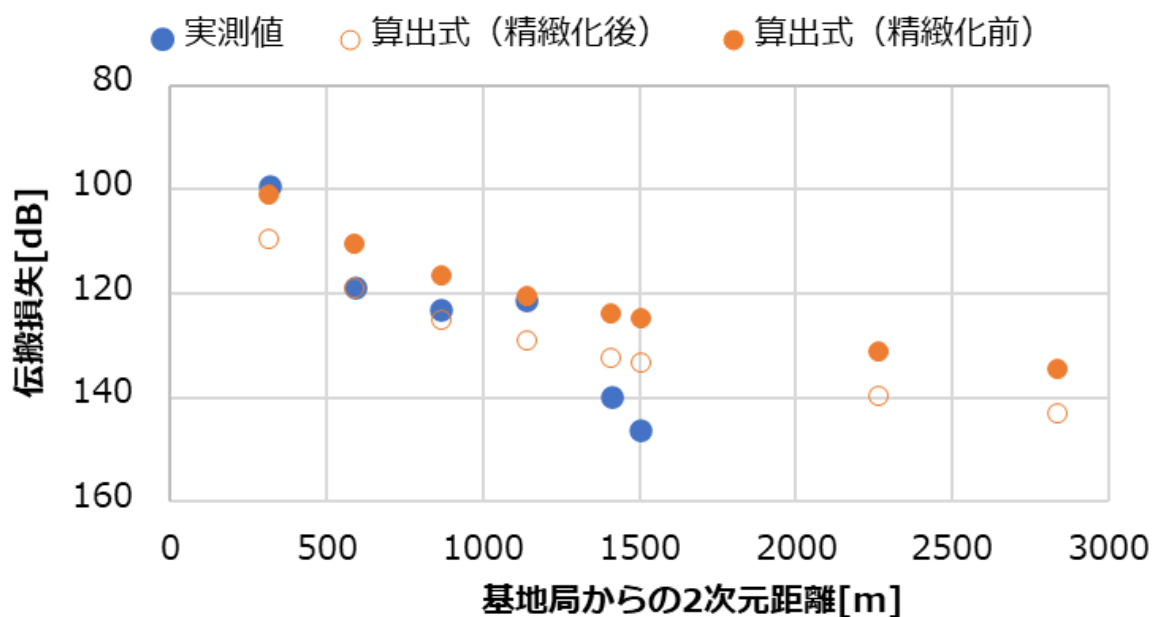


図 3-35 RU-5(アンテナ前方の測定点のみで精緻化)精緻化前後の差

2) Rの精緻化

a. 実証仮説

実証環境である菊名駅は横浜方面に駅舎や周辺建築物によって遮蔽された半屋外環境を有している一方、渋谷方面は横浜方面と比較して天井も簡素となり、ホームの側面も開放された環境を有している。今回 28GHz 帯の技術実証ではホーム上の遮蔽物及び周辺他者土地との遮蔽環境による R パラメータの精緻化を目的とするため、以下の 28GHz 帯における伝搬等に関する計算式を用いることにした。本実証では遮蔽環境を有する横浜側に基地局を設置していることから菊名駅を屋内環境同等とみなし、建物侵入損 $R=20.1\text{dB}$ として算出法エリア図を作成した。

一方で渋谷側は横浜側に比べて開けた構造となっており、完全な屋内環境よりも R の値は小さくなると推定した。

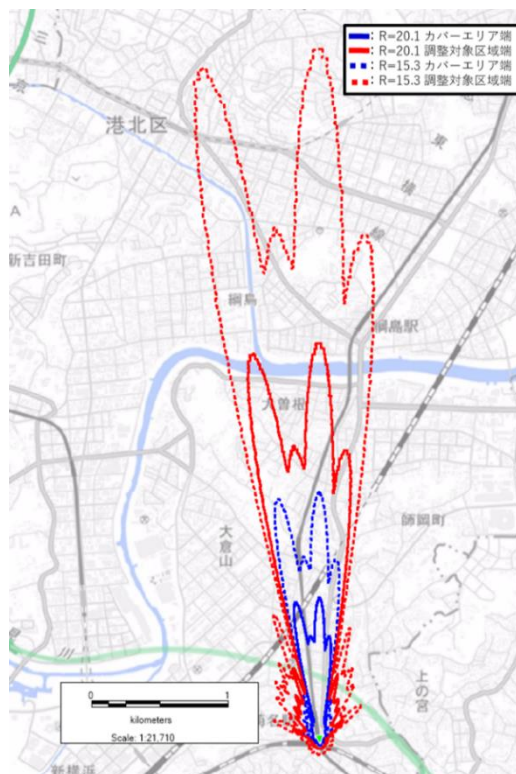
その仮説のR値は令和 3 年度 No13 において実施した 4.7GHz 帯の東横線自由が丘駅のホーム環境における R 値の値を元に算出することにした。遮蔽度が中に該当する環境(下表参照)が今回実施する菊名駅の渋谷側の環境に近いと考えており、その R-D 地点で測定した R 値は 11.4 であった。

表 3-10 令和 3 年度 No13 実証実験における近似エリアの R 値

エリア	写真	遮蔽観点の説明	遮蔽度	R 値
R-D		壁面通過後、受信エリアまでに見通し領域がある	中	11.4

出所)特 03 成果報告書

上記の R 値 11.4 に対して 4.7GHz 帯と 28GHz 帯の周波数特性による損失の差分 3.9 を加味した R=15.3 を仮説の R 値として仮説エリア図を作成して実際の測定データとの乖離を確認することにした。下図に算出法エリア図及び仮説エリア図を示す。今回基地局の出力は設定可能な最低限の設定 (19dBm) としているが、かなり遠方まで飛来するシミュレーション結果となっていることが確認された。



出所)特 03 成果報告書

図 3-36 算出法エリア図及び仮説エリア図

b. 実証結果

以下に示す 3 つのグループに分けて精緻化を実施した結果は下表のとおりとなった。

グループ①: 指向方向上の線路及び道路上の地点

グループ②:ホーム側面の開放箇所から飛来する地点

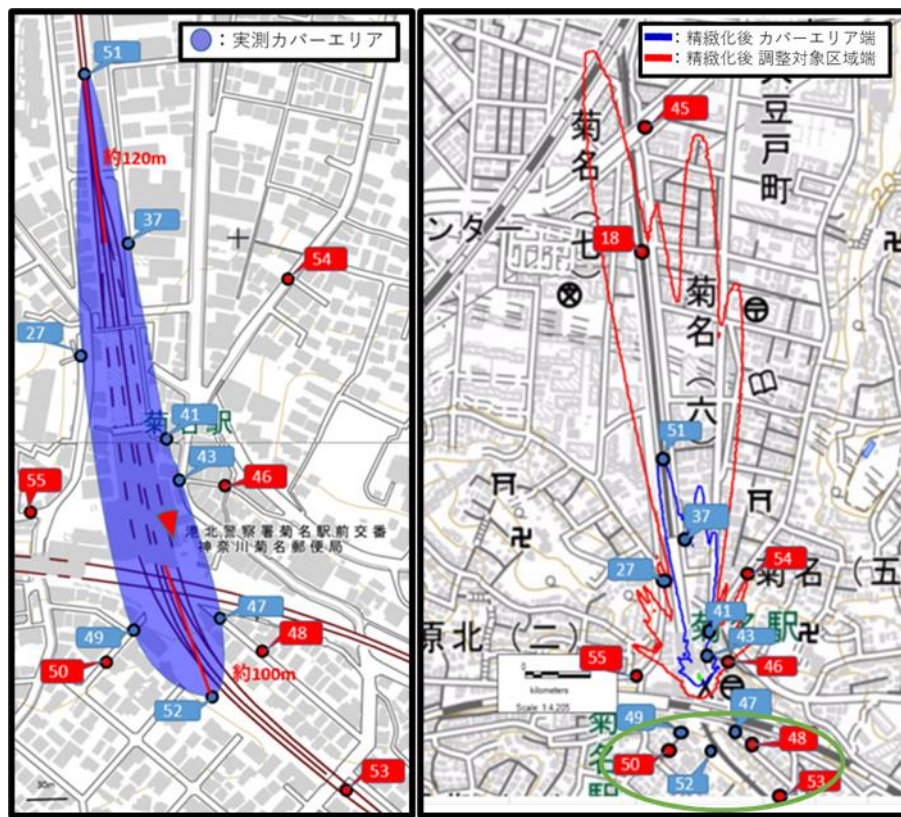
グループ③:隣接建物によって隔てられた地点

表 3-11 28GHz 帯の R の精緻化結果

	グループ①	グループ②	グループ③
R 値	29.4	30.8	25.6

出所)特 03 成果報告書

短手方向については周辺他者土地への飛来は狙い通り抑制されており、長手方向(線路方向)については概ね自己土地(線路)内に収まっており、線状のエリア構築を実現できた。R の精緻化により当初のエリア算出法よりも実測結果に近いエリア図を描くことができた。



出所)特 03 成果報告書

図 3-37 実測エリア図(左)、精緻化エリア図(右)

以上のことから、駅ホーム内に基地局を設置する際は屋内と同様に R 値を用いてホーム上の遮蔽物により発生する遮蔽影響を見込んでエリア図作成の必要があるが、駅ホームの構造や無線機の設置位置によって遮蔽影響が変わるため、他のケースについても精緻化していく必要があると結論付けられている。

(3) パラメータ精緻化のまとめ

線状の空間における 4.7GHz 帯のエリア算出式のパラメータ S について以下のことが分かった。

- ・線状の空間が直線のみの場合には、現在のエリア算出式より、自由空間伝搬での推定に近い

- ・線状の空間がカーブしている場合には、開放地で推定できる
- ・線状の空間の外では、その環境に従った S 値で推定できる

また、線状の空間における 4,7GHz 帯、28GHz 帯のエリア算出式のパラメータ R について、駅ホームや遮音壁のある道路においては、半屋外環境であっても R を見込んでエリア算出をする方が精緻にエリアが描けることが分かった。

3.1.2 エリア算出式の推定

(1) 線状の空間における漏洩同軸ケーブルの利用

線状の空間においては、短手方向への電波を抑制することが重要となる。このため、漏洩同軸ケーブル(LCX)の利用が解の一つであると考えられる。現在の審査基準には、LCX を利用する場合のエリア算出式が定義されていない。実証結果からエリア算出式の検討を行った。

1) 鉄道線路の実証

a. 実証仮説

距離減衰指数 n および人体吸収損失を考慮した式(1)を想定し、単一の LCX に関して、LCX の正面の区間①と LCX の前後の区間②に分けて、減衰指数 n(n 乗減衰)に関して以下のような仮説を設定する。

$$P_r = P_t - (\alpha z + L_c) - 10n \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) + G_r - 8 \quad \text{式(1)}$$

■LCX 正面(区間①)での伝搬

- ・自己土地(LOS 環境): n=1~1.5

見通し(LOS)環境と考えられる自己土地内は、一般的な LCX で想定される 1 乗減衰に近く、鉄道業務用の機器・鉄柱等による反射・回折の影響も考えて 1~1.5 乗と推測する。

- ・他者土地: n=1.5~2

線路脇に遮蔽物がないエリアは自己土地に近い 1.5 乗程度の減衰と考えられるが、隣接する民家や建物、もしくは高台等の地形影響によって見通し外(NLOS)環境となるエリアでは、更に減衰が大きくなることを予想して 1.5~2 乗程度の減衰と推測する。

■LCX の外側エリア(区間②-1,2)での伝搬

LCX の放射角 θ (法線方向から LCX 前方に向かって定義) はスロット(放射孔)間隔と絶縁体の比誘電率で決まるが、他者土地への電波漏洩抑制の観点から、LCX の長手方向(前方または後方)に向けて放射すると考えられる。ここでは、LCX 前方に放射角が設定された場合を想定して、LCX 前方と後方とで異なる伝搬の仮説を立てる。

- ・②-1: LCX 前方
 - ・自己土地(LOS 環境): $n=1.5\sim 2$
見通し環境だが、LCX の区間外となるため、LCX 正面(区間①)よりも距離減衰は大きくなると推測。
 - ・他者土地(NLOS 環境): $n=2\sim 2.5$
見通し外のため、LCX の区間外の自己土地よりも距離減衰は急峻になると推測。
- ・②-2: LCX 後方
 - ・自己土地(LOS 環境): $n=2\sim 2.5$
放射角と反対方向のため、LCX 前方よりも大きい減衰指数と推測。
 - ・他者土地(NLOS 環境): $n=2.5\sim 3$
放射角と反対方向で見通し外のため、距離減衰が全区分の中で最も大きいと推測。

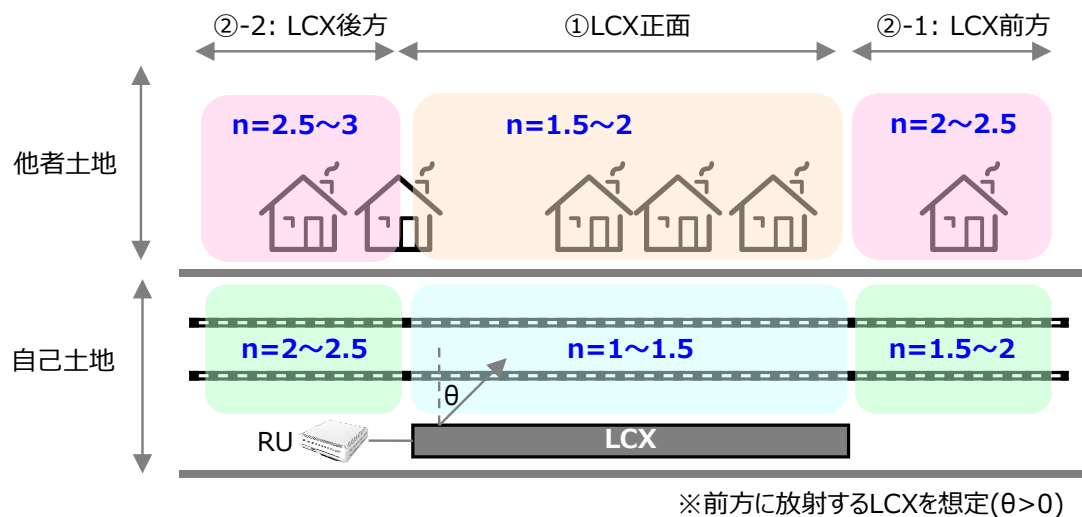


図 3-38 LCX における距離減衰指数の仮説

b. 実証結果

LCX 正面 自己土地エリアの分析

図 3-39 に 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

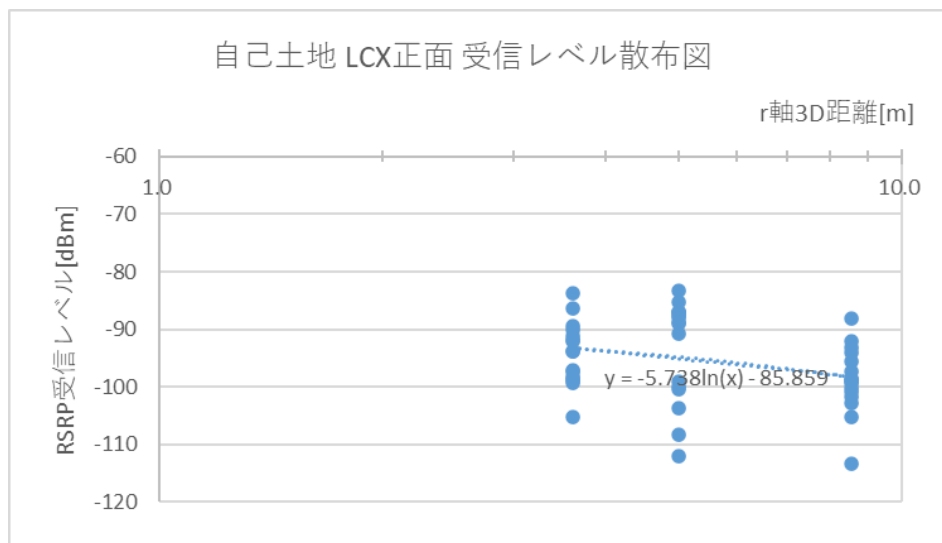


図 3-39 LCX 正面自己土地 受信レベル散布図

近似線を引くと、図中の式 ($y = -5.738 \log_e(x) - 85.859$) で示され、
仮説式の傾き $10 \log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.1$ になる。

ただし、このグラフをみると近似線に対して測定結果の分散が大きすぎるため、LCX 区間における各測定点の平均値をとってみた。

表 3-12 全 LCX 区間の測定結果の平均受信レベル

距離[m]	z=0	z=10	z=20	z=30	z=40
r=2	-91.7398	-91.25993	-91.0975	-96.5368	-96.5815
r=4	-92.293167	-92.59157	-94.7145667	-90.4302333	-91.5332
r=8	-95.3251	-93.78793	-98.1765667	-101.1776	-103.156

この結果を r 軸 3D 距離に対する受信レベルの散布図で表したものが図 3.3.1.5-(14)である。

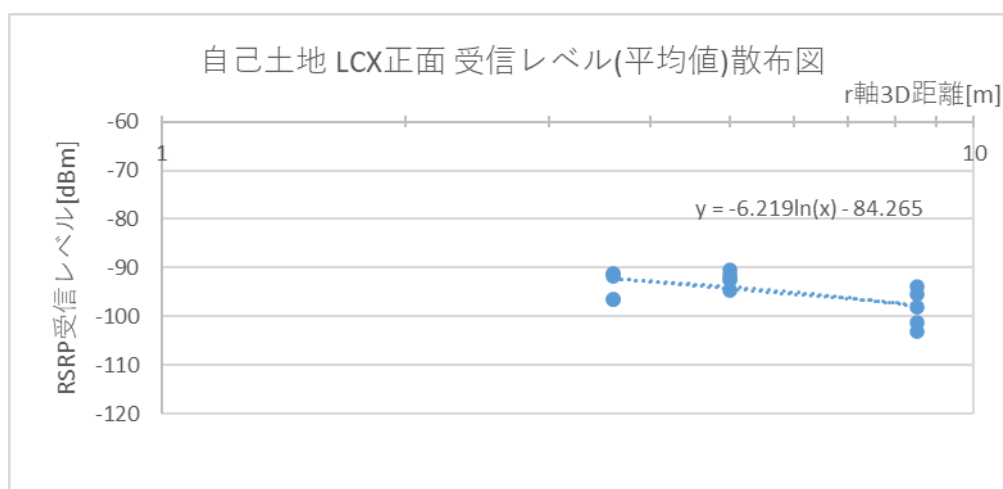


図 3-40 LCX 正面自己土地 受信レベル散布図

対数線を引き、仮説式の傾き $10 \log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.2$ になる。

LCX 正面 他者土地エリアの分析

図 3-41 に r 軸 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

なお、建造物による減衰抵抗の影響を極力減らすために、LOS 環境の測定結果のみ分析に用いた。

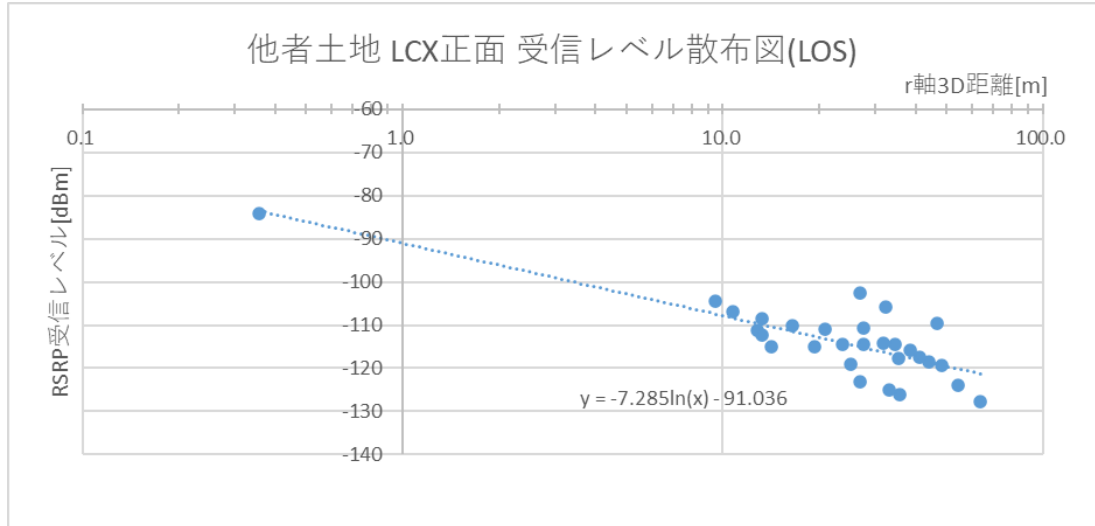


図 3-41 LCX 正面他者土地 受信レベル散布図

近似線から仮説式の傾き $10\log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.2$ になる。

LCX 前方 自己土地エリアの分析

図 3-42 に LCX 終点からの 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

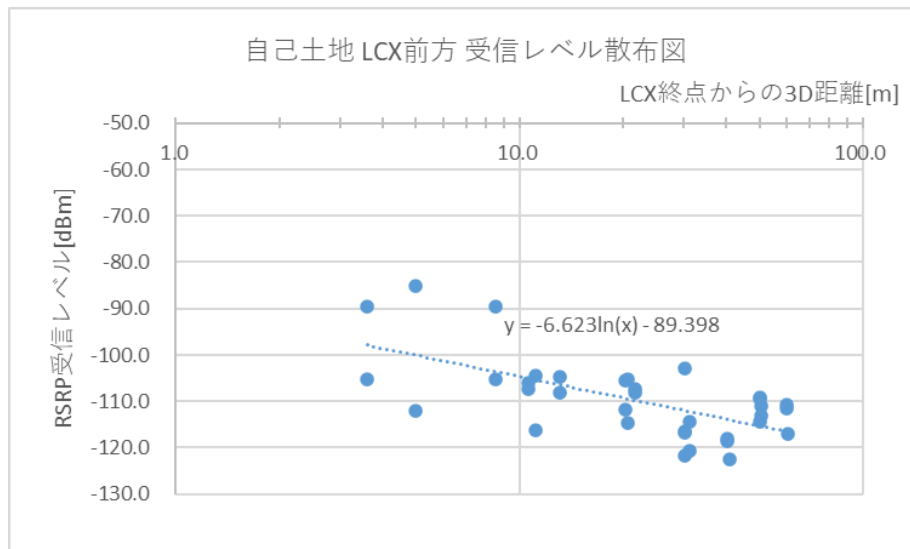


図 3-42 LCX 前方自己土地 受信レベル散布図

近似線から仮説式の傾き $10\log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.2$ になる。

LCX 前方 他者土地エリアの分析

図 3-43 に 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

なお、建造物による減衰抵抗の影響を極力減らすために、LOS 環境の測定結果のみを用いた。

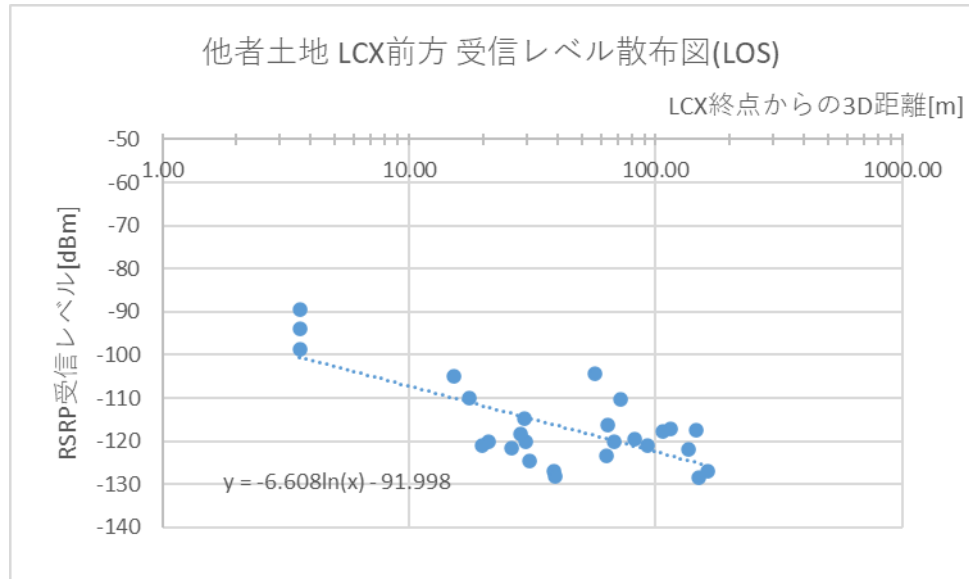


図 3-43 LCX 前方他者土地 受信レベル散布図

近似線から仮説式の傾き $10n\log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.2$ になる。

LCX 後方 自己土地エリアの分析

図 3-44 に LCX 始点からの 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

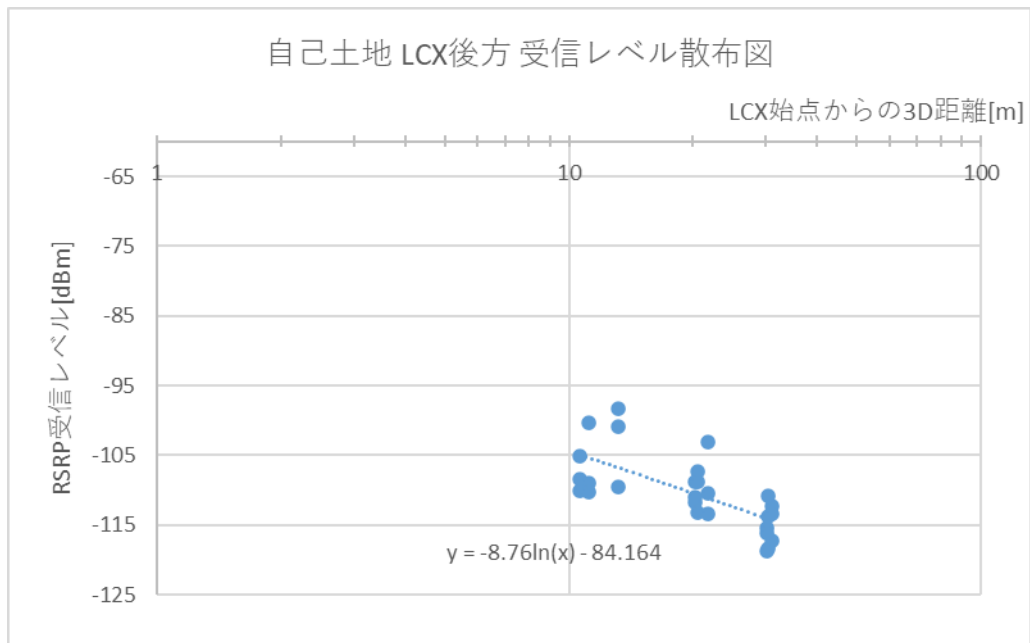


図 3-44 LCX 後方自己土地 受信レベル散布図

近似線から仮説式の傾き $10n\log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.3$ になる。

LCX 後方 他者土地エリアの分析

図 3-45 に LCX 始点からの 3D 距離と受信レベルの関係についての散布図を示す。

なお、建造物による減衰抵抗の影響を極力減らすために、LOS 環境の測定結果のみを用いた。

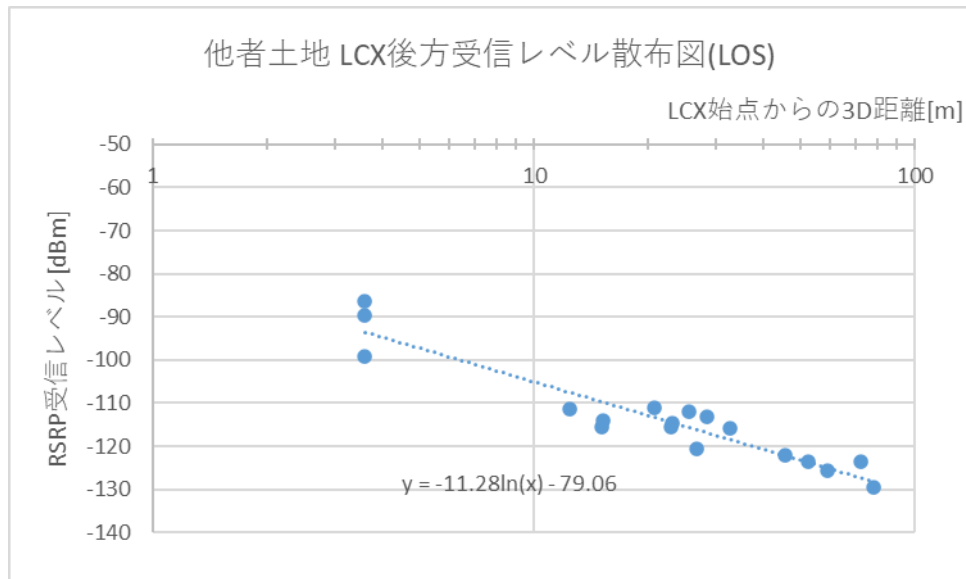


図 3-45 LCX 後方他者土地 受信レベル散布図

近似線から仮説式の傾き $10n\log_{10}(x)$ に変換すると $n = 1.3$ になる。

各エリアで算出した減衰指数 n について表 3-13 にまとめる。

表 3-13 減衰指数 n の仮説値と結果一覧

エリア	自己土地/他者土地	n の仮説値	測定結果
LCX 正面エリア	自己土地	1~1.5	1.2
	他者土地	1.5~2	1.2
LCX 前方エリア	自己土地	1.5~2	1.2
	他者土地	2~2.5	1.2
LCX 後方エリア	自己土地	2~2.5	1.3
	他者土地	2.5~3	1.3

仮説では近傍距離(40m)を境にして急激な減衰傾向を示すとしていたが、他者土地の受信レベル散布図を見ると、40m を超えても一定の減衰率となっていることがわかる。したがって、仮説の式は近傍距離にかかわらず適用可能と考える。その減衰率であるが、想定したとおり、減衰指数 $n < 1.5$ の緩やか

な減衰をしている。

後方は前方や正面に比べ減衰指数 n が大きくなる仮説どおりではあるが、想定していたほど大きな差にはならなかった。

仮説を立てた時点では自己土地と他者土地での減衰指数に差が発生すると考えていたが、表に示すとおり、同じ値となった。これは、他者土地の減衰率を分析する際に、LOS 環境の測定結果のみ扱ったため、自己土地と他者土地の境界がなくなり、自己土地が延長された形になったものと推測される。仮説時点では他者土地においては建物の影響を受けることを想定しての減衰指数の値であったが、NLOS 環境の測定結果を LOS 環境の測定結果と混在して分析すると、距離に対する受信レベルのバラつきが大きくなり、近似線が引けなくなってしまう。NLOS 環境の測定結果に一定の定数 R で受信レベルを補正することも考えたが、 R の値の取り方で減衰指数の値にも影響するため、恣意的な要素を除外するため、LOS 環境の結果のみを精緻化の対象として扱うこととした。

また、前方は正面に比べて、減衰指数が大きくなると予想していたが、測定結果をみると前方と正面ではほとんど違いがなかった。これは前方エリアが想定よりも減衰していないためであり、想定より減衰していない理由としては、LCX の電波放射方向が進行方向に対して 30° であり、前方に対して電波が放射されたこと、さらに LCX 放射先に建立している住宅やコンクリート壁によって、前方方向に対して電波が反射していることが考えられる。

実測で得られた n の値を仮説式に適用し、LCX のカバーエリアを図 3-46 に示す。

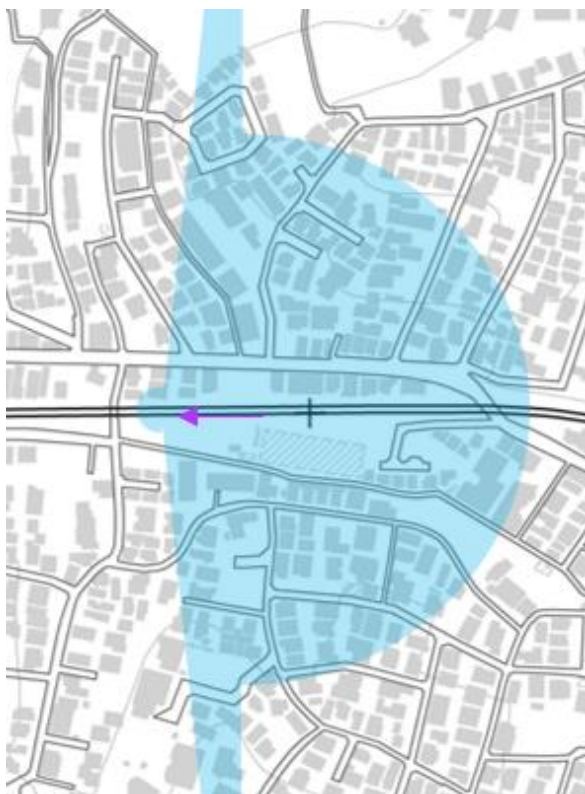


図 3-46 仮説式によるカバーエリア図

上記試算時の仮説式と n 以外の固定パラメータ値は以下である。

仮説の式 $P_r = P_t - (a_z + L_c) - 10n \log_{10}(r/r_0) + G_r - 8$

表 3-14 パラメータ一覧

パラメータ名	パラメータ値
Pt	9dBm
a	0.3 dB/m
Lc	61.0dB (Lf + Ly)
r0	1.5m
Gr	2.4dB

仮説式によるカバーエリア図を見ると、全体的に広範囲に広がり過ぎている。これは減衰指数 n として、ほぼ1に近い値を適用し距離による減衰が緩やかになったためである。

測定結果から求めた n を適用して試算したカバーエリアが測定結果から乖離していることから、空中線に発射されるまでの減衰が大きいと考えられるため、切片によるフィッティングを試みる。

当初 Lc は LCX 入力時点でのロスとして、 $Ly + Lf$ と考え、メーカー公表値より $60\text{dB} + 1\text{dB} = 61\text{dB}$ を適用していた。ところが、LCX の始点に最も近い測定点である自己土地内 C-0-2 ($z=0\text{m}$, $r=2\text{m}$) の値を見ると、 $Lc=61$ を代入した仮説式の試算値との間に差が生じている。C-0-2 の実測値の平均値と試算結果との差を計算すると約 5.7 となっていることから、この値を Lc の切片 $Lo=5.7$ として、 $Lc = Lf + Ly + Lo$ の式で補正した。

次に LCX 正面エリアに着目すると、 z 軸方向への減衰率(傾き)が測定結果よりも大きく見える。

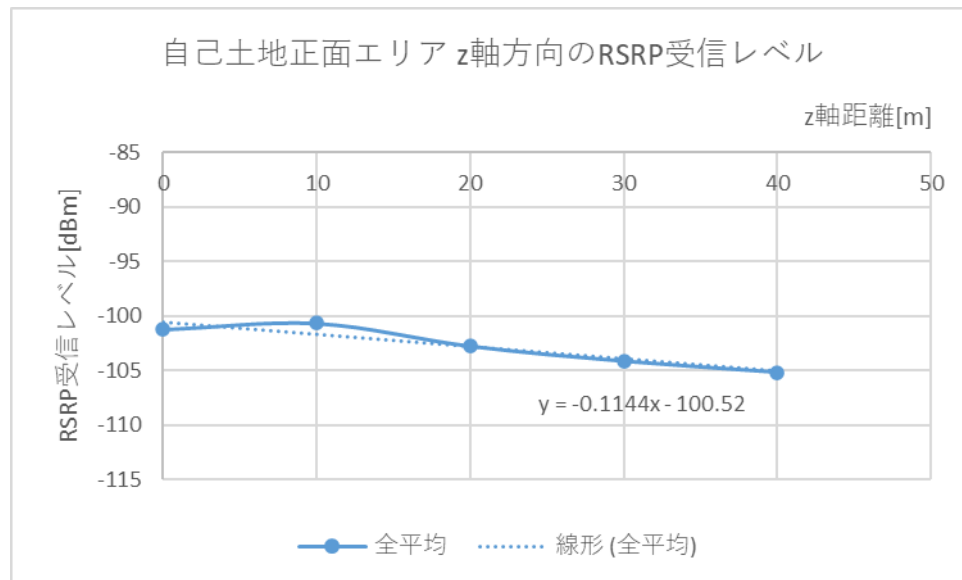


図 3-47 自己土地内 z 軸方向への減衰グラフ

図 3-47 は LCX3 区間の全データにおいて、 z 軸距離での平均値からグラフから近似線を引いたものである。 $y = -0.11x$ の近似直線に対して値のバラつきがほとんど発生しておらず、 z 軸距離に対して一次関数的な減衰を示している。このことにより、 $a = 0.11\text{dB/m}$ に値に置き換えて試算する。

以下の表にフィッティング前後のパラメータ値を整理する。

表 3-15 フィッティング前後のパラメーター一覧

パラメータ名	当初のパラメータ値	見直したパラメータ値
Pt	9dB	←
a	0.3 dB/m	0.11 dB/m
Lc	61.0 dB (Lf + Ly)	66.7 dB (Lf + Ly + Lo)
r0	1.5 m	←
Gr	2.4 dB	←

フィッティング後のパラメータ値を用いて、仮説式にてエリアカバー図を描いた結果を図 3-48 に示す。これらカバーエリア図に対して、測定結果からカバーエリア端の値に近い測定点を抽出して図中にマッピングした。

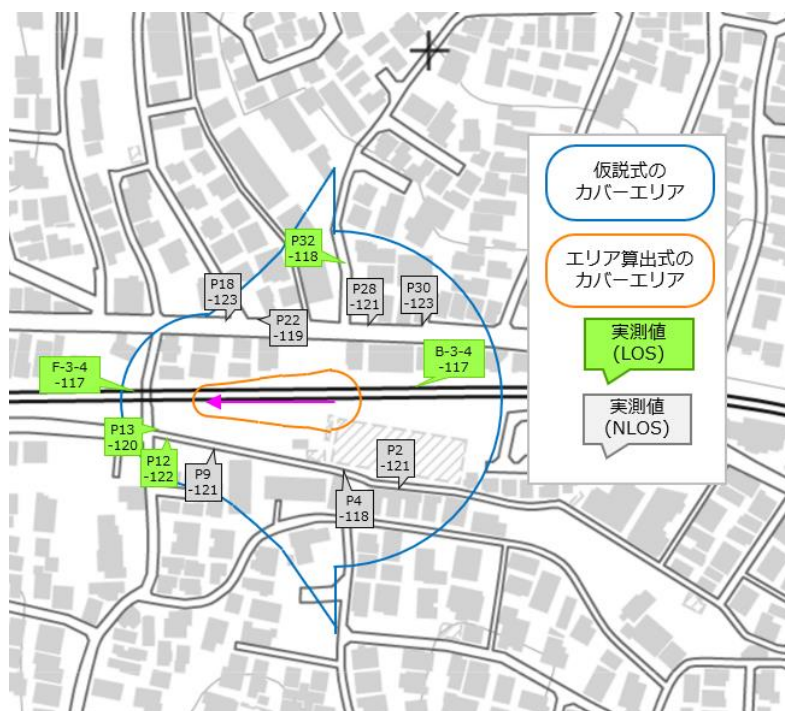


図 3-48 フィッティング後のエリアカバー図

NLOS 地点での測定結果は、建物の透過損により、試算よりも低い値が測定される。

このため、NLOS 地点での実測に伴うカバーエリア端は、透過損を考慮すると、現在の位置よりも外側に広がるため、精緻化した式のカバーエリアにさらに近づくと考えられる。

LOS 地点での測定結果は、精緻化した式によるエリア図に近い値を示している。

2) まとめ

LCX のエリア算出式の検討を行い、フィッティングによる精緻化を実施することにより、実測に近いエリアを試算可能なエリア算出式の可能性を示した。

メーカー公表値に基づいたパラメータにより、簡易に適用することのできる算出式は、今後の課題である。

3.1.3 線状の空間における電波伝搬モデルの精緻に関するまとめ

線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化の実証及び取りまとめの結果から、エリア算出法の改定の方角性を以下の通り提案する。

(1) 基地局からの方向(環境)に応じた異なるパラメータの適用

現在のエリア算出法では、1 基地局のカバーエリア及び調整対象区域の算出に適用する S、K、R の値は、基地局の設置環境に応じてそれぞれ 1 種類を選択する。他方で、線路や道路などの線状の空間においては長手方向は開放地、短手方向は郊外地または市街地のように、長手・短手で異なる伝搬環境となる。これは開発実証事業でも同様であるが、線状の空間においてはより顕著である。具体的には、特殊環境実証を通じて S の値については以下のことが明らかになっている。(再掲)

- ・線状の空間が直線のみの場合には、現在のエリア算出式より、自由空間伝搬での推定に近い
- ・線状の空間がカーブしている場合には、開放地で推定できる
- ・線状の空間の外では、その環境に従った S 値で推定できる

この内容をエリア算出法に反映するために、1のパラメータではなく複数のパラメータを基地局からの方向(環境)に応じて適応可能とするように改訂することを提案する。

(2) 半屋外環境における R の適用

線状の空間においては、短手方向に遮蔽物が設置されている場合がある。具体的には、線路や道路の遮音板などである。このような環境において、線状の空間内に基地局が設置される場合、遮蔽物と基地局のアンテナ高の関係によるが、基地局の上方部は開放され、水平方向には遮蔽された環境となる。この場合、エリア算出式において建物侵入損 R を適用することにより、精緻なエリア算出が可能であることが実証(特 02、特 03)より示唆された。他方で、現在のエリア算出法においては R について以下の通り定義されており、半屋外環境において R を算入すべきかは明記されていない。

4. 7GHz帯の場合⁴

R(dB); 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損(16.2)。実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。

28GHz帯の場合

① 屋内の場合(基地局を屋内に設置する場合)

$$L=20\log_{10}(4\pi d/\lambda)+R$$

以上から、基地局を半屋外、具体的には基地局の上方部が開放され、水平方向には遮蔽されており、基地局のアンテナ高が遮蔽物よりも十分に低い環境に設置する場合には、エリア算出の際に R を適用可能とするように改定することを提案する。

3.2 線状の空間におけるエリア構築の柔軟性向上

3.2.1 線状の空間におけるエリア構築の課題

鉄道、高速道路、河川などにおける電波伝搬空間は下記のような特徴がある。

- ・形状は直線、曲線からなる線状
 - ・トンネル、高架等による複雑な構造に加え、鉄道・高速道路内の布設設備での遮蔽。反射、周辺建物での反射等の影響が発生する。
 - ・自己土地は線路敷地、道路敷地内であり、周辺は他者土地である。
 - ・エリア構築の課題として他者土地への電波漏洩の発生があり、特に曲線部において顕著である。
- 線状空間の代表的な例(鉄道と高速道路)を図 3-49 線状空間の例(鉄道)と図 3-50 に示す。



図 3-49 線状空間の例(鉄道)

⁴ <https://go5g.go.jp/sitemanager/wp-content/uploads/2021/06/%E9%9B%BB%E6%B3%A2%E6%B3%95%E9%96%A2%E4%BF%82%E5%AF%A9%E6%9F%BB%E5%9F%BA%E6%BA%96%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%83%AB%EF%BC%95%E9%83%A8%E5%88%86%EF%BC%9C%E6%8A%9C%E7%B2%8B%EF%BC%9E.pdf>



図 3-50 線状空間の例(高速道路)

特殊環境実証と課題の一覧を下表に示す。

表 3-16 特殊環境実証と課題一覧

採択 No.	場所	分野	電波伝搬環境	課題① 不感地対策	課題② カバーエリア 拡張	課題③ 電波漏洩 軽減	RF Band		エリア柔軟化設備				
							4.7 GHz	28 GHz	反射板	中継器	DAS	LCX	その他
特01	埼玉県/高麗川,入間川	災害対策	屋外(開放地)	○	○	○	○			○			
特02	東京都/首都高池袋線	高速道路	屋外(開放地)	○		○	○				○		
特03	東急/菊名-妙蓮寺	鉄道	屋外(開放地)	○		○	○						○
特04	兵庫県/阪神本線	鉄道	屋外(開放地)	○		○	○						○

3.2.2 線状の空間における実証を通じて見出した課題と課題解決の方策

令和4年度の特特殊環境(線状の空間)での実証試験は下記の4つが実施された。

1) 特 01 (中継器及び複数基地局による不感地対策ならびにカバーエリア拡張)

ユースケースで想定される災害時は、可搬型の RU が必要である。しかし、可搬型は低出力であるため 1 台の基地局で広域な線状の空間をカバーすることが困難である。このため、レピータや複数基地局によるエリア拡大が必要となる。

また、レピータはローカル 5G において実用実績が少なく、今後の普及および技術規定の改定に向けた課題の洗い出しが必要である。具体的に想定する課題としては、レピータの中継処理遅延によるスループット特性の劣化である。レピータで中継処理を行う際に処理遅延が発生するため、レピータによりエリア拡大した地点の端末では、基地局が放射した弱い電波が先に到来し、その後レピーターが放射した強い電波が到来する。このため、レピータによるエリア構築と基地局のエリア構築では、必要な電波強

度が異なる懸念がある。そのため、電波強度とスループットの関係性をレピータによるエリア拡大地点および単一基地局で構築した地点の両方で検証を行った。

加えて、ユースケースである災害時は堤防決壊などが発生し、電波伝搬環境が刻一刻と変動するため、平時では他者土地への電波漏洩が生じていない場合でも、災害時では堤防決壊および水面範囲の拡大など電波伝搬環境の変動によって他者土地への電波漏洩が生じてしまう恐れがある。業務区域と不感地帯、基地局やレピータの位置関係(水平面)を図 3-51 に示す。基地局と端末の直線区間にて水門が存在するため、電波が遮蔽され、基地局と水門が直線状に重なるエリアは不感地帯となることが想定される。また、図 3-52 に基地局と不感地帯の位置関係(垂直面)を示す。水門を迂回するようにレピータまたは複数基地局を配置することで電波伝搬経路上に遮蔽物が存在しないようにした。



図 3-51 業務区域と不感地帯の位置関係(水平面)



図 3-52 不感地帯の位置(垂直面、基地局～レピータ～端末間)

不感地帯を改善するためにレピータを活用する場合の基地局(RU#1)との位置関係とレピータ使用時におけるカバーエリア及び調整対象区域を図 3-53 に示す。

またレピータに加え複数基地局(RU#2)による不感地帯改善の比較も行った。両方の改善方法による測定結果から各々の改善効果を図 3-54 にて比較した。

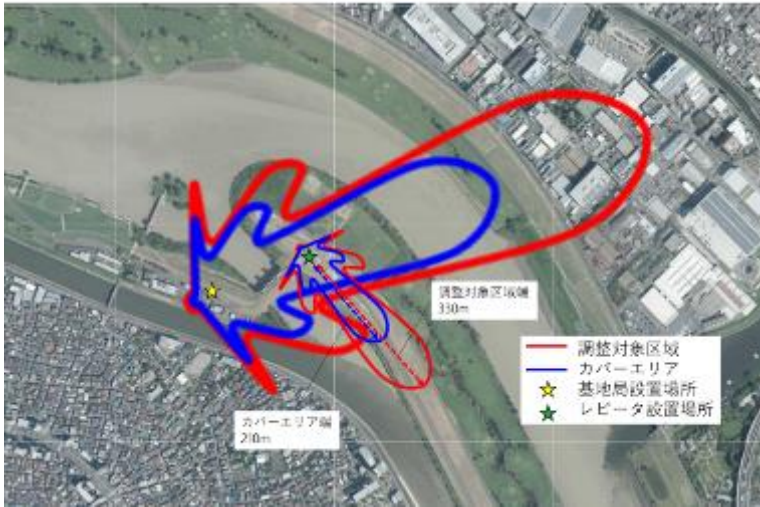
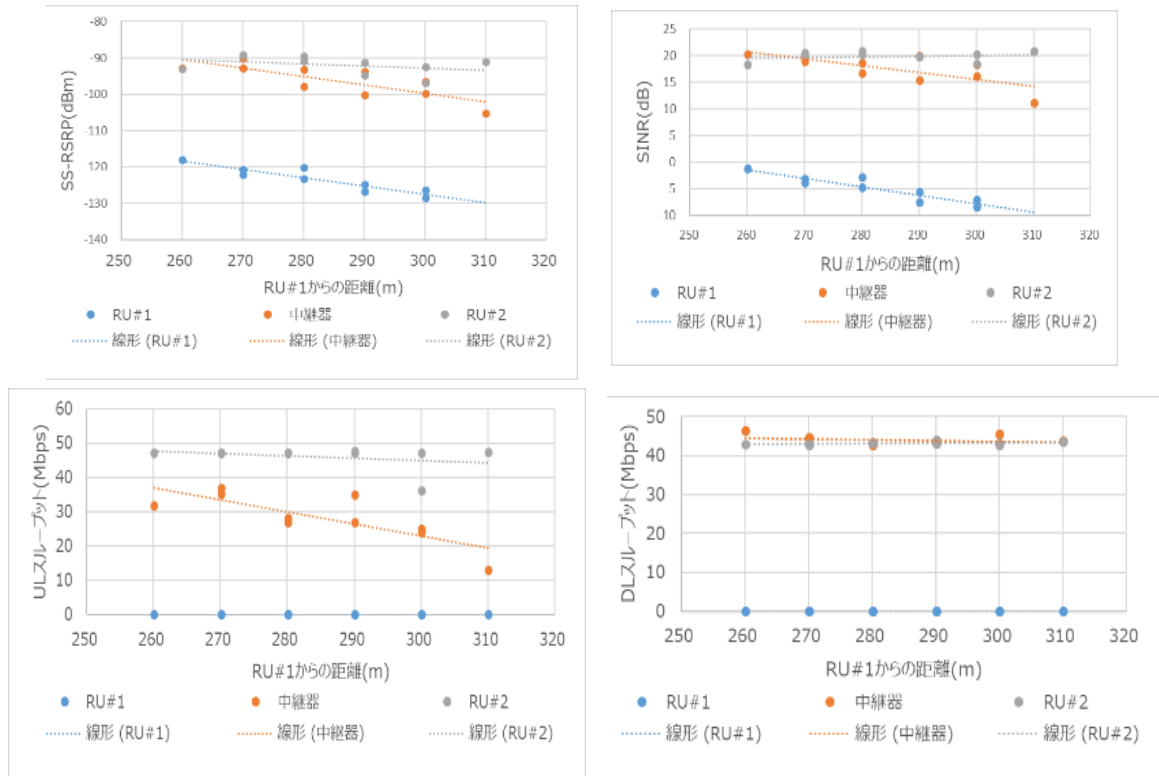


図 3-53 基地局およびレピータ使用時のカバーエリアおよび調整対象区域



	平均改善量 (中継器)	平均改善量 (RU#2)	・実証目標ULスループット 45Mbpsは、 基地局増局(RU#2)では達成、 中継器では未達。 DLスループット7Mbpsは、基地局増局 (RU#2)、中継器ともに達成した。
SS-RSRP[dBm]	28.2dB (9測定点)	31.5dB (9測定点)	
SINR[dB]	23.2dB (9測定点)	24.7dB (9測定点)	
ULスループット【Mbps】	28.2Mbps (10測定点)	46.0Mbps (10測定点)	
DLスループット【Mbps】	43.9Mbps (10測定点)	43.1Mbps (10測定点)	

改善エリア (不感地帯、エリア拡張)	面積 (概算)	RU#1からの距離
中継器	6,900m ² 〔屋外〕	約200m
RU#2	35,000m ² 〔屋外〕	約450m

図 3-54 レピータ(中継器)ならびに複数基地局(RU#2)による改善効果

レピータはレピータ本体/アンテナ(設置用ポール含む)のみの構成であるため、より大がかりな設備(CU/DU等を設置するため搬送には車両が必要な)複数基地局と比較し、設置/コストの観点としてもメリットが多い。このため、レピータで対応可能な範囲のエリア拡大であれば、レピータを使用することが望ましいと考える。

2) 特 02 (狭指向性アンテナと LCX による性能比較と他者土地への電波漏洩軽減)

首都高速の道路構造は、高架部、土工部、半地下部、トンネル部と多様であり、道路形状も直線区間、曲線区間、JCT やランプ部等の立体交差区間など、複雑な構成となっている。また、道路上には遮音壁、ガードレール、標識等の電波伝搬に与える影響が大きな道路附属物が多数設置されている。さらに、都市内に位置することから、隣接土地との十分な離隔が取れない。特に、曲線区間においては、狭指向性アンテナを用いると他者土地への電波漏洩が大きくなることが懸念される。

区間②では柔軟化手法適用前として狭指向性アンテナを適用する。柔軟化手法として、より柔軟なエリア構築が見込める漏洩同軸ケーブルを適用し、各アンテナ環境で取得した実測値を比較し、以下のポイントで検証を行う。

- ・ 業務区域の広さと回線品質
- ・ 道路外への電波漏洩の程度



図 3-55 区間②漏洩同軸ケーブル適用時の高速道路上の測定点

狭指向性アンテナ環境、及び漏洩同軸ケーブル環境下における高速道路上での受信電界値を図 3-56 に、SINR 測定結果を図 3-57 に示す。

図 3-56 に示した受信電力値の測定結果から、狭指向性アンテナの場合は、区間②全域に渡って、カバーエリアが構成されていることがわかる。

漏洩同軸ケーブルでは、用意したケーブル長が 150m だったため、区間全域をカバーすることはできていないが、ケーブル敷設区間で反対車線での測定点で $-85\text{dBm} \sim -100\text{dBm}$ (RSRP)程度の受信電界値を得ることができた。

図 3-57 に示した SINR の測定結果から、狭指向性アンテナ、漏洩同軸ケーブルのアンテナの種別に関わらずカバーエリアとして見込まれる区間においては、SINR:20dB 前後の値となっており、通信品質上の場合には生じないことが分かる。

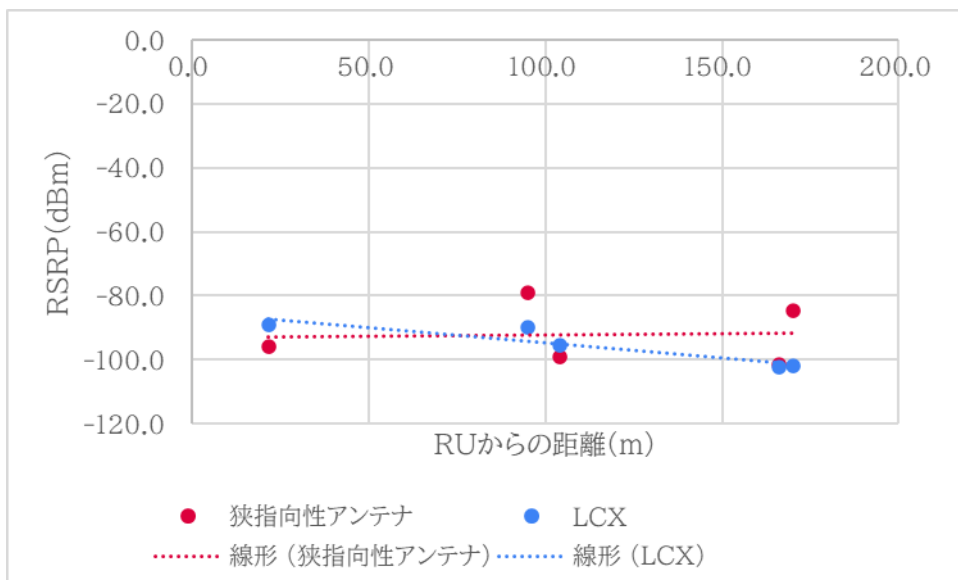


図 3-56 受信電力(RSRP)測定値

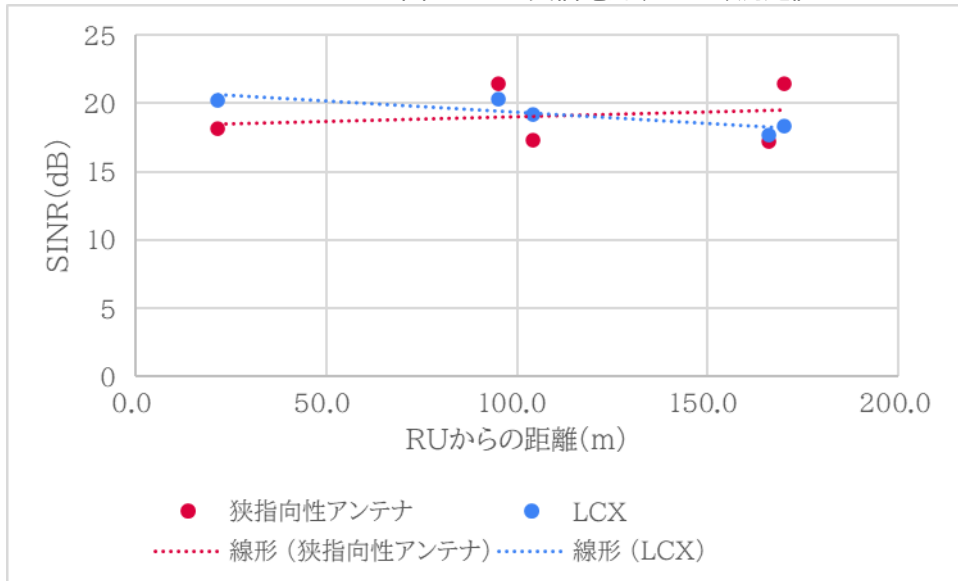


図 3-57 SINR 測定値

UL スループット測定値を図 3-58 に、DL のスループット測定値を図 3-59 に示す。狭指向性アンテナも LCX も数値はほぼ同じにて UL スループット値が約 10Mbps、DL スループット値が約 50Mbps であった。

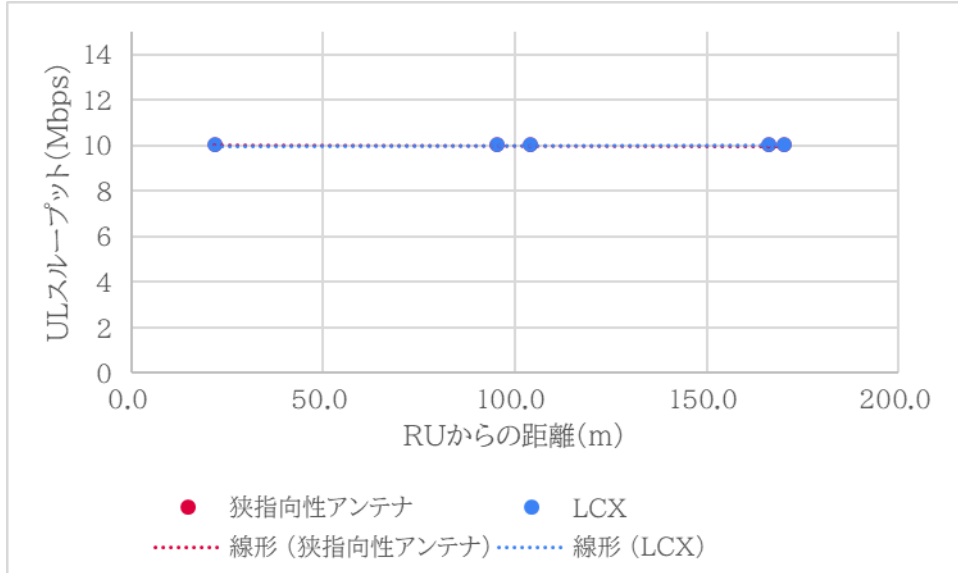


図 3-58 UL スループット測定値

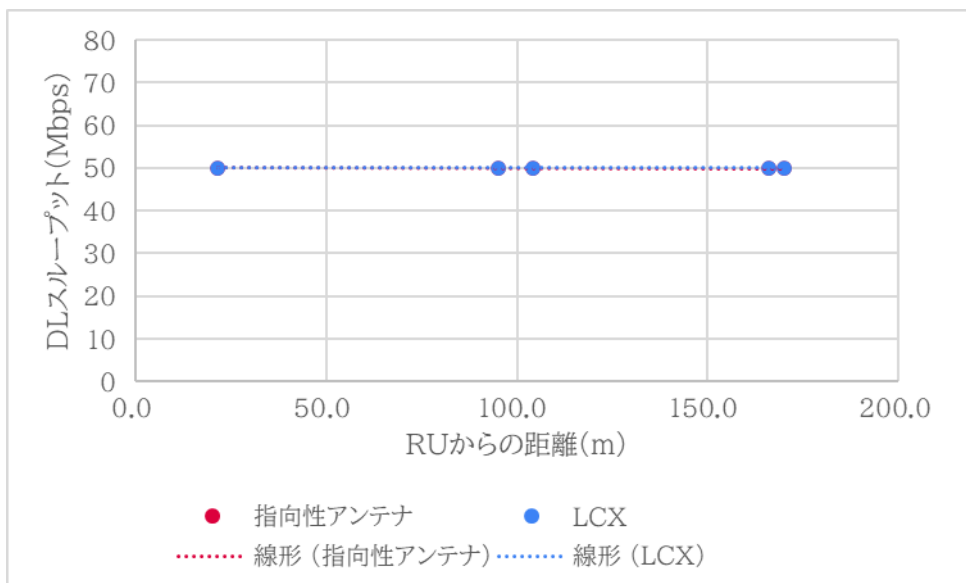


図 3-59 DL スループット測定値

他者土地への電波漏洩軽減については測定結果を表 3-17 に示す。

表 3-17 他者土地への電波漏洩低減

測定点ID	狭指向性アンテナ_実測値 [dB]	LCX_実測値 [dB]	LCXによる軽減_改善値 [dB]	測定点環境	特殊環境
	中央値	中央値	中央値		
207	-113.1	-121.2	8.1	屋外(郊外地)	線状(曲線)
223	-123.6	測定不可(-143dBm以下)	19.4	屋外(郊外地)	線状(曲線)

LCX による電波漏洩軽減効果は約 8~19dB であった。

3) 特 03 (RU+指向性アンテナ/低出力 RU+LCX)

実証環境である線路エリアは、自己土地の短手方向の幅が狭く、他者土地との境界部分の遮蔽性が低い屋外環境であり、約 1km の長区間に渡ってローカル 5G のエリア化を計画している。従って、課題実証で要求される無線性能の実現と、他者土地への電波漏洩の抑制を両立する線状エリアでのセル設計手法の検討が必要である。

以上のような背景に基づき、本テーマでは自己土地内での所要性能の確保と両立可能な、線状エリアに適した漏洩抑制手法の確立を目的とした実証を行うこととし、以下の 2 手法を比較することで、提案する線状エリア構築方法の優位性を示す。

従来手法:「RU+指向性アンテナによる水平方向へのビーム照射」

提案手法:「低出力 RU と短距離 LCX を組み合わせた DAS 構成による線状セルの構築」

自己土地、他者土地と業務区域の位置関係を図 3-60 に示す。

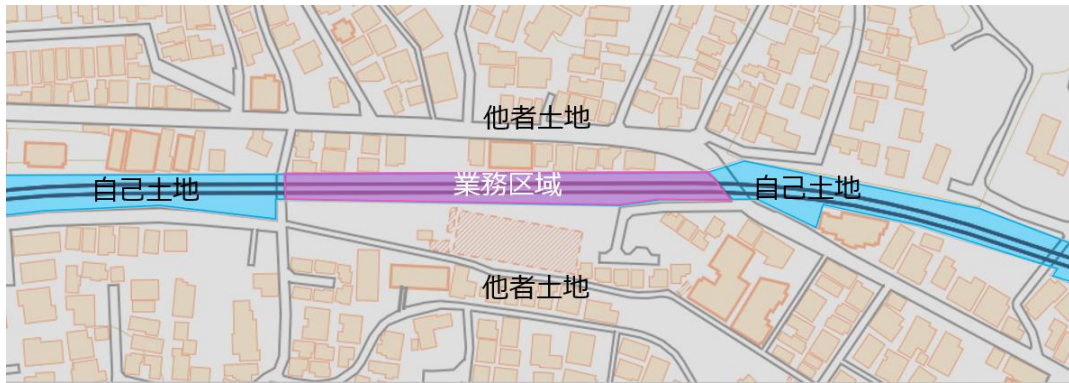


図 3-60 自己土地、業務区域、他者土地の位置関係

他者土地測定点における従来手法の受信電力測定結果を図 3-61 に提案手法の受信電力測定結果を図 3-62 に示す。

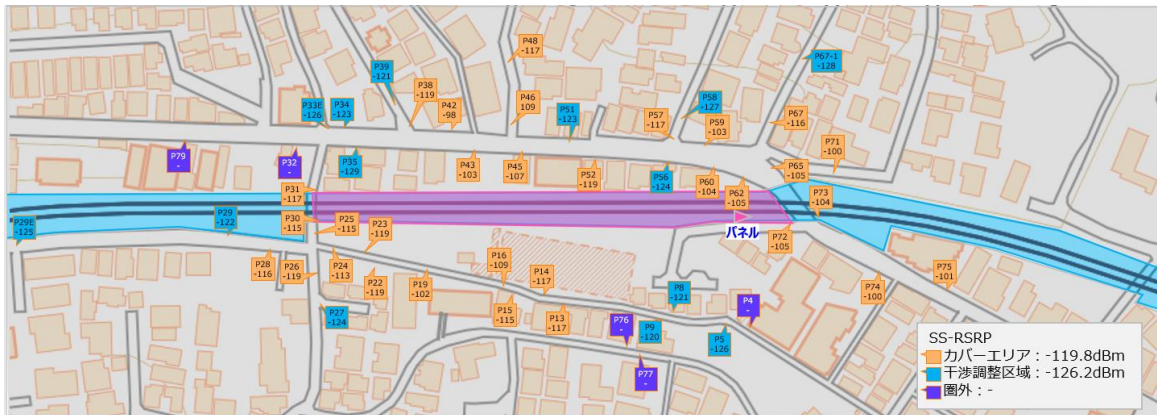


図 3-61 従来手法の他者土地測定点と受信電力測定結果

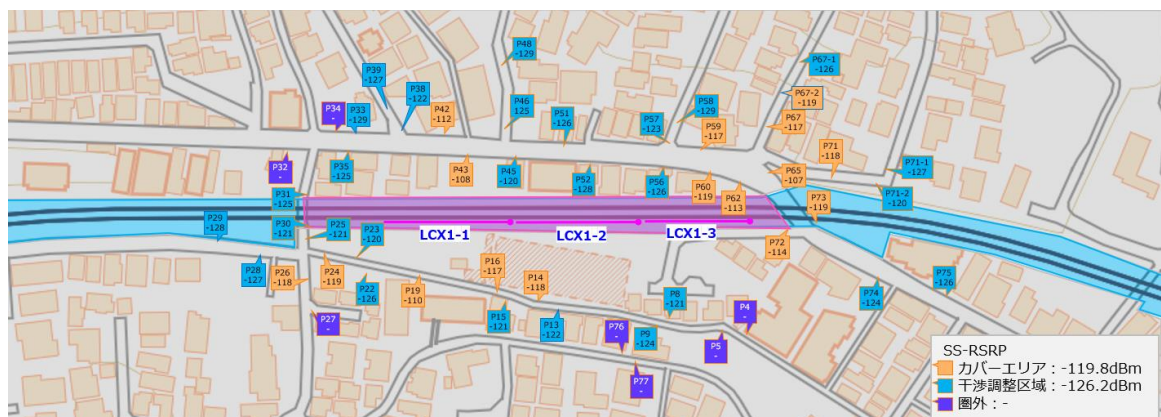


図 3-62 提案手法の他者土地測定点と受信電力測定結果

自己土地測定点における従来手法の受信電力測定結果を図 3-63 に提案手法の受信電力測定結果を図 3-64 に示す。



図 3-63 従来手法の自己土地測定点と受信電力測定結果

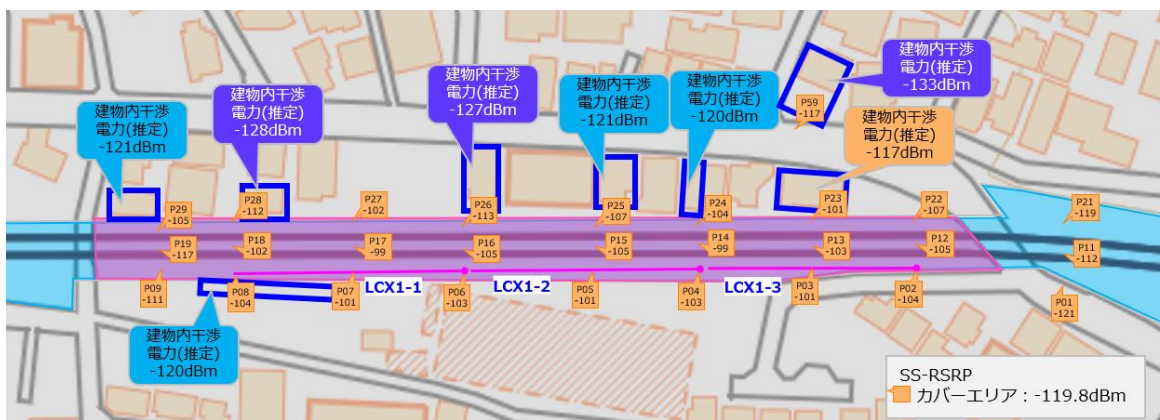


図 3-64 提案手法の自己土地測定点と受信電力測定結果

自己土地内の業務区域においては、従来手法、提案手法のいずれもカバーエリア内の閾値を満たしている。

他者土地への電波漏洩に関しては、従来手法(RU+指向性アンテナとの組み合わせ)と提案手法(低出力RU+短距離LCXの組合せ)にて測定値の比較を行った。その結果を図 3-65 に示す。

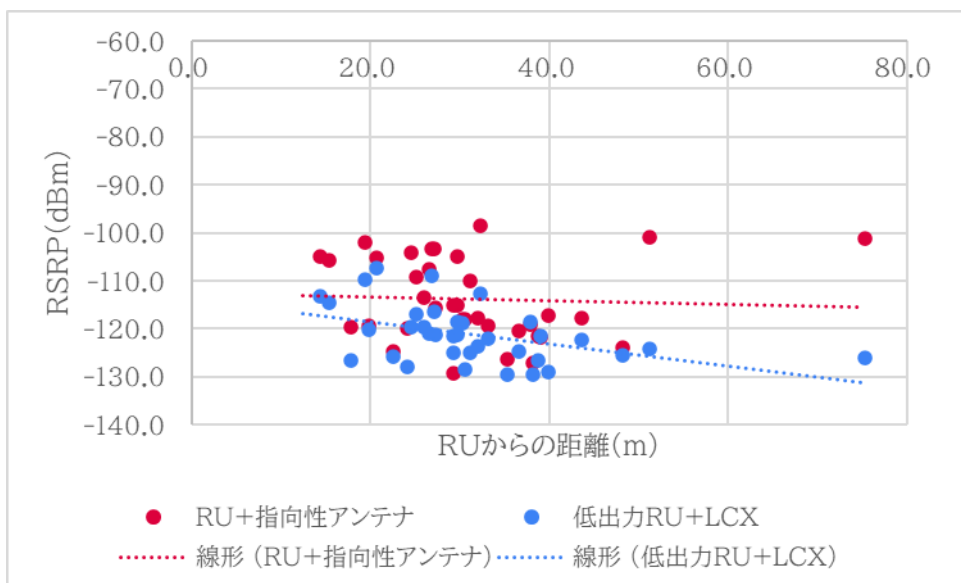
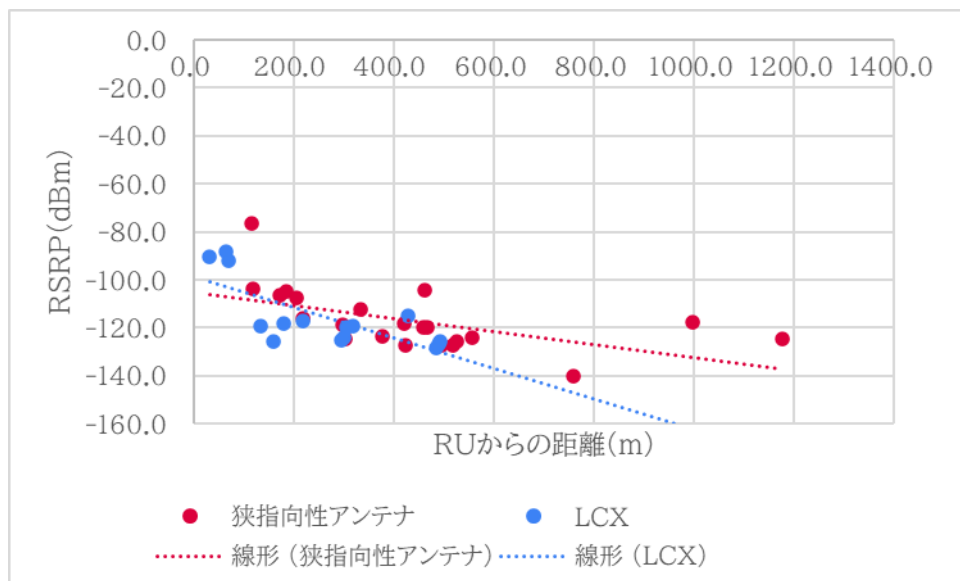


図 3-65 他者土地への電波漏洩(従来手法と提案手法の比較)

電波漏洩軽減の平均改善量(36 測定点)は 7.3dB であった。



4) 特 04

長い距離の鉄道線路上をローカル 5G で効率的にエリア構築する際、直線区間は狭指向性アンテナ、曲線区間は漏洩同軸ケーブルを用いる必要があると考えている。しかし、指向性アンテナを用いた際の他者土地への電波の漏れ度合いや連続配置する場合の課題、漏洩同軸ケーブルを用いた際のエリアカバー範囲やコストパフォーマンスが不透明であるといった課題があった。

図 3-66 に無線設備(RU1)を使用した実証試験における測定点を示す。

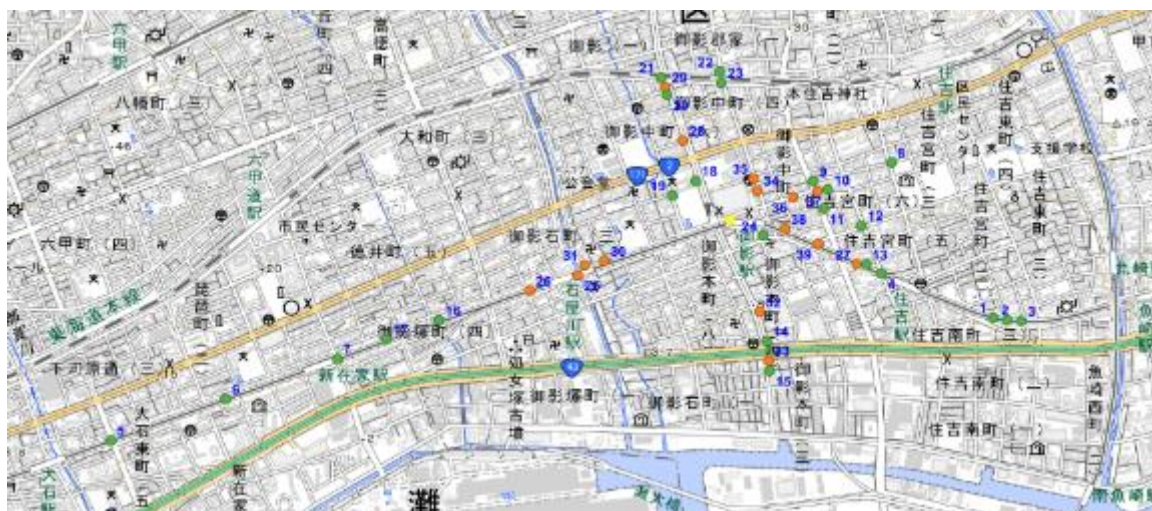


図 3-66 測定点(RU1)

狭指向性アンテナと LCX における受信電力(RSRP)の測定値を図 3-67 に示す。

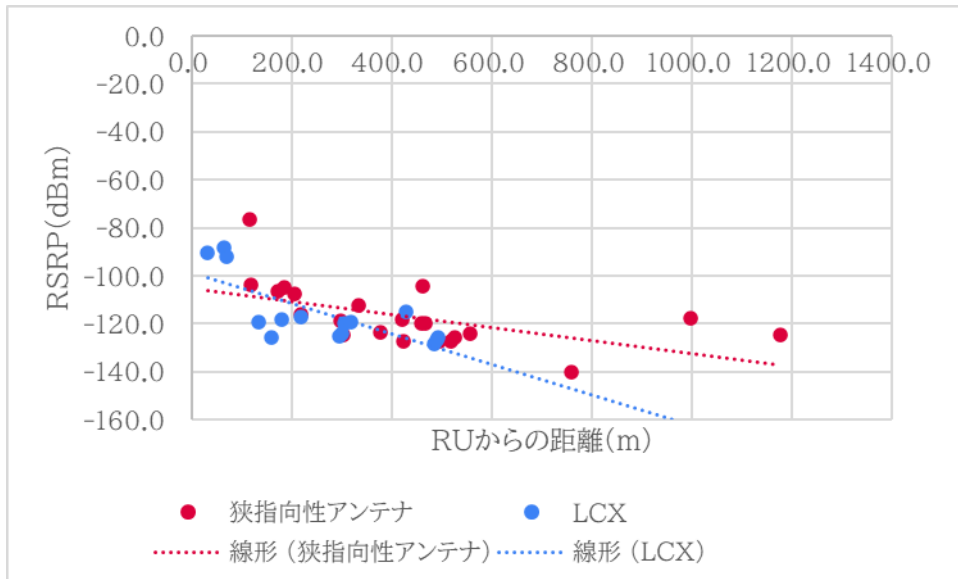
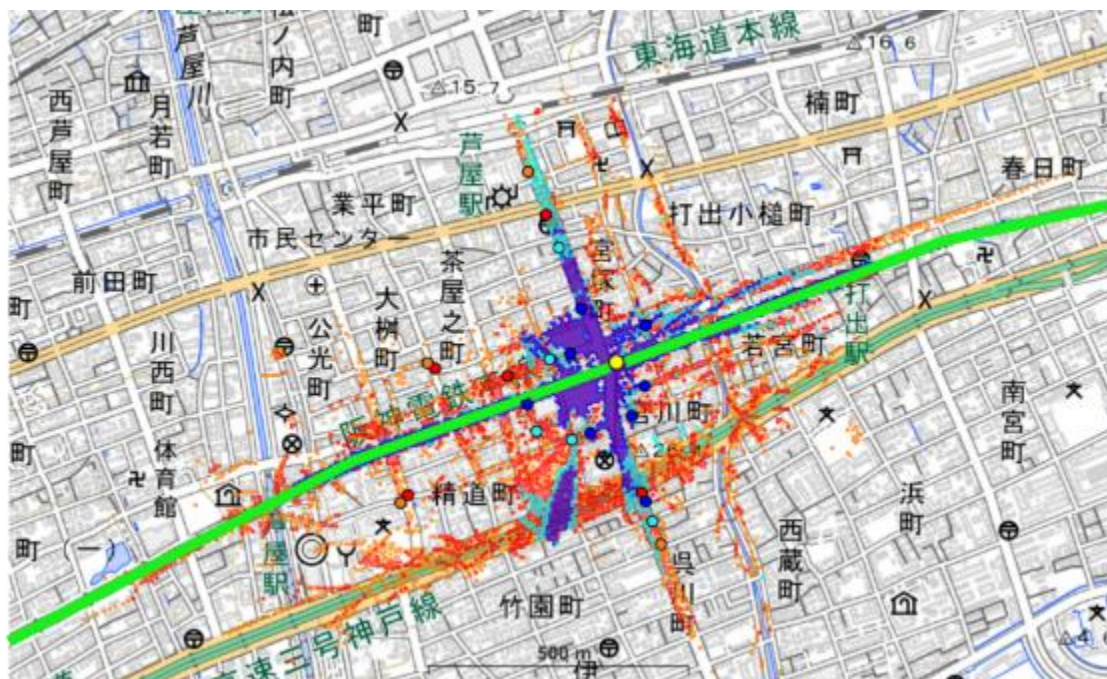


図 3-67 受信電力測定値(狭指向性アンテナ/LCX)

無線設備(RU2)を使用して線路外の同一測定点にて指向性アンテナとLCXにおいて受信電力比較を行い電波漏洩レベルの比較を行った。

無線設備(RU2)における試験環境としたシミュレーション及び実測結果を図 3-68 に示す。



- 基地局位置
- 自己土地 (業務区域)
- 【狭指向性アンテナ】
- カバーエリア (レイトレース)
- カバーエリア端 (実測)
- 調整対象区域 (レイトレース)
- 調整対象区域端 (実測)
- 【LCX】
- カバーエリア (レイトレース)
- カバーエリア端 (実測)
- 調整対象区域 (レイトレース)
- 調整対象区域端 (実測)

図 3-68 RU2 設備でのカバーエリア、調整対象区域比較(狭指向性アンテナ/LCX)

同一測定点において測定した受信電力値(RSRP)を表 3-18 に示す。

表 3-18 同一測定点における受信電力値比較(狭指向性アンテナ/LCX)

測定点ID	測定点ID	狭指向性アンテナ 実測値 [dBm]		LCX 実測値 [dBm]		改善値 [dB]	
		中央値	標準偏差	中央値	標準偏差	中央値	標準偏差
623	803	-87.7	3.1	-92.1	5.0	4.4	-1.9
624	811	-108.9	2.2	-125.8	3.9	16.9	-1.7
625	812	-96.1	3.0	-117.3	4.1	21.2	-1.1
626	813	-107.8	4.6	-124.0	3.7	16.2	0.9
627	814	-101.9	2.4	-118.2	4.1	16.3	-1.7
628	815	-111.2	3.6	-125.2	4.1	14.0	-0.5

表 3.3.1-3 のデータより狭指向性アンテナに比較し LCX の方が受信電力値(RSRP)が約 16dB 程度電波漏洩レベルが低くなることが分かった。

4. ローカル5G活用モデルに即した端末システムを用いたローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討

4.1 検討内容

公募を通じて採択した端末システム試作者に対し、複数のローカル5G基地局によりエリアカバーされた環境において電波伝搬等に係る測定・試験・分析を実施させた。具体的には、一定以上の広さのエリア等を複数のローカル5G基地局を用いてカバーする等の特殊な環境下において、試作した端末システムを用いて通信させ、電波伝搬特性の測定・試験を実施し、無線通信の技術基準の観点から必要な課題を分析させた。この際、端末システム事業者の試験環境として主管課が指定したテストベッド環境において測定・試験を実施させた。また、テストベッド環境での測定・試験の結果を正しく理解・解釈するための前提として、環境要因を極力排除したラボ環境にて、試作した端末システムの伝送性能(アップリンク(以下 UL)/ダウンリンク(以下 DL)別 d の伝送スループット、伝送遅延 等)を確認させた。

4.1.1 各端末システム試作者の性能目標

各端末システム試作者は、ローカル5Gでの実現性のある具体的な利用シーンを想定した上で、ローカル5Gの端末システムの試作を実施した。その前提として想定する利用シーンにおいて必要となる伝送性能(スループットや遅延)が設定された。各端末システム試作者が設定した目標を以下に示す。

表 4-1 各端末システム試作者の性能目標

No	想定する利用シーン	UL スループットの目標	伝送遅延の目標
端 01	遠隔監視・遠隔臨場での 4K、60fps 映像伝送	112Mbps 以上	50msec 以下 【データ送受信区間】
端 02	8K 映像伝送	80Mbps 以上	—
端 03	自動搬送車(AGV)や自動運転車両での Full HD 映像送信	30Mbps 以上	150msec 以下 【エンド to エンド】

表から分かるように、すべての端末試作者が映像伝送を想定し、目標を設定している。しかし、映像伝送という点では同じであっても、利用シーンに応じて必要な伝送性能は異なるため、UL スループットの目標は 30Mbps から 112Mbps と差がある。

4.1.2 各端末システム試作者の検証環境

各端末システム試作者は環境要因を極力排除したラボ環境での検証ののち、テストベッド環境での検証を実施した。また、端末システム試作者によってはテストベッド環境以外でのフィールドでも検証した。

表 4-2 各端末システム試作者の検証環境

No	ラボ環境	テストベッド環境	テストベッド環境以外の
----	------	----------	-------------

			フィールド
端 01	FCNT 株式会社本社実験室	国立研究開発法人情報通信研究機構【2021 年度補正予算】ヘテロジニアス B5G テストベッド	—
端 02	シャープ幕張事業所シールドルーム及び基地局シミュレータ		—
端 03	パナソニックグループ佐江戸事業場シールドルーム	B5G テストベッド	三郷町 FSS35 キャンパス

(1) テストベッド環境

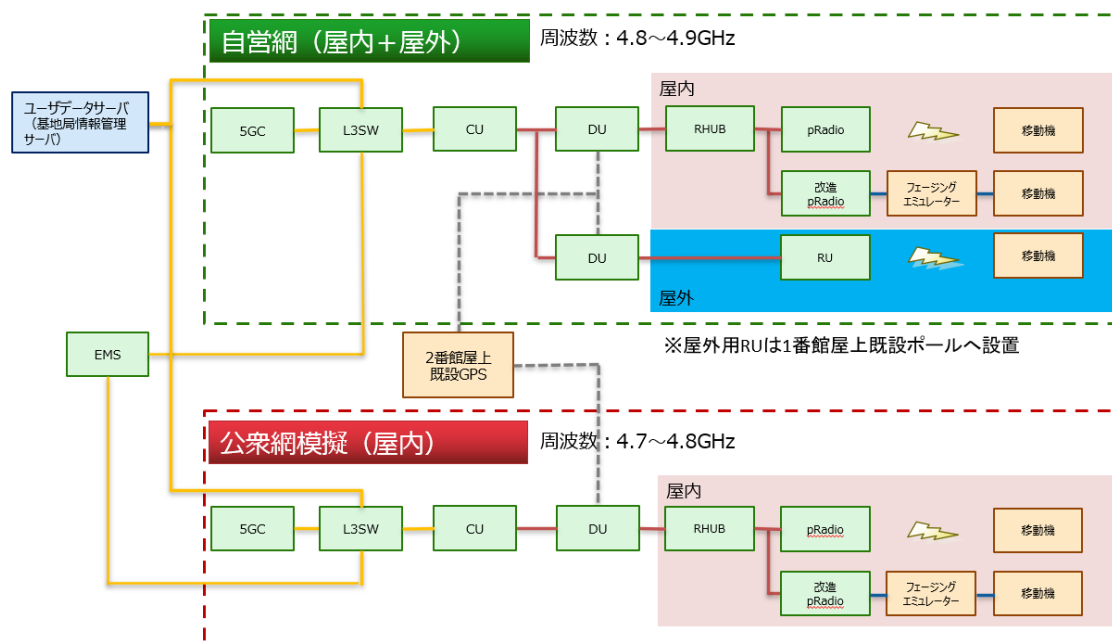
各端末試作試作事業者が活用したテストベッド環境は、主管課からの指示に従い、横須賀リサーチパーク(以下 YRP)内の、国立研究開発法人情報通信研究機構が設置している実験試験局のうち、YRP1番館屋上に設置されている 4.6GHz 帯基地局を用いて実証試験を行った。テストベッドの情報は以下のとおりである。

免許人：国立研究開発法人情報通信研究機構

免許番号：関実第 49277 号

無線局名：【NICTよこすかB5Gきちじっけんよこすか1】

テストベッドで使用したローカル 5G システム構成及び基地局のシステム構成と主要諸元を以下に示す。



※出典 【2021 年度補正予算】ヘテロジニアス B5G テストベッド 概要資料
 国立研究開発法人情報通信研究機構 2022 年 11 月 30 日 update 版

表 4-3 ローカル 5G 基地局システム諸元

製造ベンダ	富士通株式会社
周波数	4.8-4.9GHz
帯域幅	100MHz
多重化方式	TDD
送受信系統数	4T(送信)4R(受信)
Beamforming	サポート
DL:UL 比率	DL:UL = 8:2 (同期 TDD パターン)
セルスループット(規格値)	DL:1.7Gbps UL:0.2Gbps
MIMO	UL 2Layer, DL 4Layer
変調方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
同期方式	GPS
フロントホール・インターフェース	ORAN Option 7.2x

使用するテストベッドの近隣環境を図 3.2-2 に示す。

神奈川県横須賀市光の丘 3-4 YRP センター1番館



図 4-2 YRP センター一番館近隣環境 ※

※出典 【2021 年度補正予算】ヘテロジニアス B5G テストベッド 概要資料
 国立研究開発法人情報通信研究機構 2022 年 11 月 30 日 update 版

基地局が設定されている YRP1番館の環境を図 3.2-3、図 3.2-4 に示す。今回使用するローカル 5G の屋外基地局は、YRP1番館の屋上に設置されており、図中の赤枠が本実証で使用する基地局である。YRP1番館の屋上には、今回使用する基地局の他に、28GHz 帯ミリ波用の基地局、ミリ波用基地局の NSA⁵アンカー用の LTE システム基地局が合わせて設置されている。



図 4-3 テストベッド環境(1)



図 4-4 テストベッド環境(2)

5 Non-Stand Alone(ノンスタンドアローン)の略で、コアネットワークや基地局に4Gを残しつつ、一部の基地局から5Gを導入していくもの

基地局(アンテナ)が1番館屋上に設置されているため、基本的には見通しのよい環境(LOS⁶)ではあるが、敷地内にはカフェテリア等の建物もあり、陰に入ると見通し外環境(NLOS⁷)となりうる。YRP1番館屋上に設置された基地局(アンテナ)の設置環境を次図に示す。



図 4-5 屋外基地局(アンテナ)の設置環境

YRP2番館に設置されている制御装置の設置環境を図 4-6 制御装置の設置環境に示す。図の左側のラックにローカル 5G の基地局関連の機器が収容されており、右側のラックに公衆網関連のネットワーク機器が収納されている。

6 Line of Sight
7 Non-Line of Sight



図 4-6 制御装置の設置環境

(2) テストベッド以外のフィールド環境

端 03 は、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の「スマートシティにおける移動体搭載カメラ・AI 画像認識による見守りの高度化」で三郷町に構築されたローカル 5G ネットワーク環境下で行った。フィールド試験を行った三郷町の FSS35 キャンパスの基地局及びセンター装置設置場所を次図に示す。



※国土地理院の航空写真を使用

図 4-7 FSS35 キャンパスの基地局及びセンター装置設置場所

FSS35 キャンパスの基地局及びセンター装置を以下に示す。



図 4-8 FSS35 キャンパスの基地局

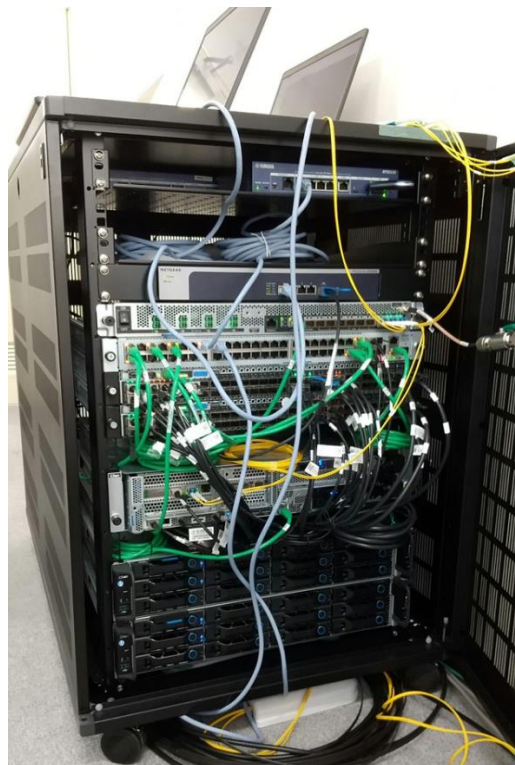


図 4-9 FSS35 キャンパスのセンター装置(コア装置等)

FSS35 キャンパスのローカル 5G ネットワーク構成を次図に示す。

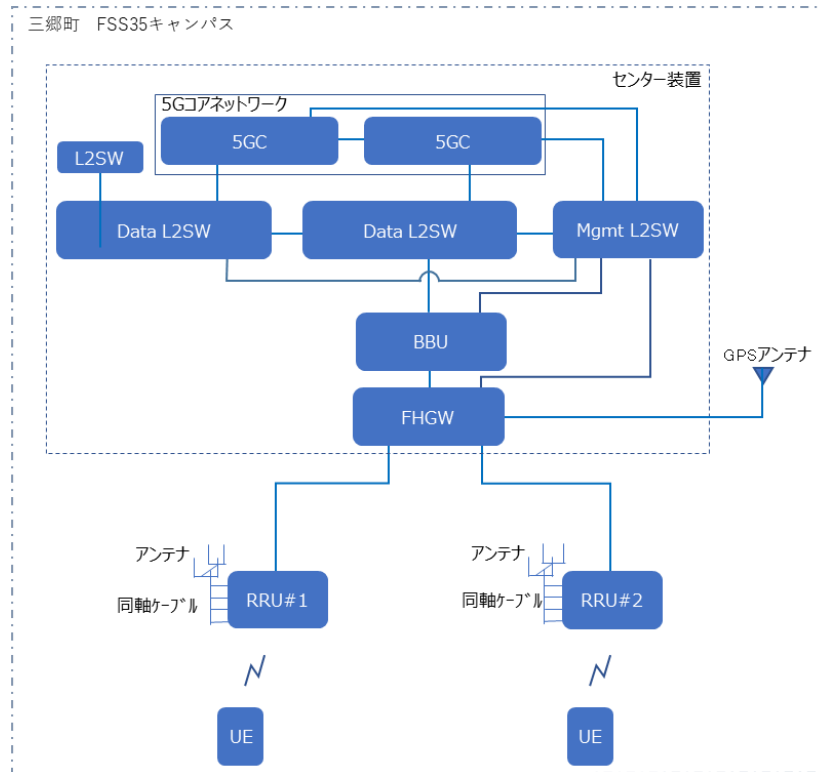


図 4-10 FSS35 キャンパスのローカル 5G ネットワーク構成

4.2 検討結果

各端末システム事業者のテストベッドでの実証について、実証結果及び考察を以下に述べる。

4.2.1 端 01 の実証結果及び考察

UL(Uplink) 2x2 MIMO に対応した本端末システムをローカル 5G 基地局に接続したときの受信電力、スループット、伝送遅延を明らかにした。

全測定ポイントでの伝送遅延の最悪値と全測定ポイントにおける平均値を表 4-4 に、同様に、全測定ポイントでのスループットの最高値と見通し内における平均値を表 4-5 にまとめる。

本技術実証を実施したエリア内には、基地局装置の無線機(“基地局”と以後表記)が目視できる屋外・屋内のポイント、基地局が目視できない屋外・屋内のポイントがあるが、伝送遅延はどのポイントにおいても目標値である 50msec を満足出来る結果となった。一方でスループットは、見通し内環境下では、遠隔監視、遠隔臨場でストリーミング配信可能な Uplink スループット(フル HD, 60fps: 28Mbps, 4K, 30fps: 56Mbps)を確保することが出来たが、技術実証目標に対しては、目標を満足出来るポイントはあるものの、平均値でも目標を満足することが出来ず、目標を満足出来るポイントと満足出来ないポイントがある結果となった。見通し外環境においては、どのポイントでも目標を満足することは出来ない結果となった。詳細は後述する。

表 4-4 テストベッド実証目標と結果(伝送遅延)

単位[msec]

項目	目標数値	実測値(最悪値)	実測値(全ポイント平均値)	備考
伝送遅延	50	39	29.6	データ送受信区間

表 4-5 テストベッド実証目標と結果(スループット)

単位[Mbps]

項目	目標数値	実測値(最良値)	実測値(見通し内平均値)	備考
スループット	112	130	86.4	UL(Uplink)時

(1) 基地局からの見通し影響

基地局から見通せる範囲内であれば、現在想定しているユースケースである遠隔監視・遠隔臨場において、本端末システムが現地映像をストリーミング配信するための以下の条件を、全ての測定ポイントで満足することを確認出来た。

フルHD(1,920x1,080) 60fps でのストリーミング:UL(Uplink)28Mbps

4K(3,840x2,160) 30fps でのストリーミング:UL(Uplink)56Mbps

伝送遅延:50msec 以下

一方で、本実証の目標値である 4K 60fps のために必要な UL(Uplink)112Mbps のスループットは基地局との距離、角度によっては満足できないことも分かった(図 4-11)。図中の 4K 60fps 表記部分が、112Mbps を達成しているポイントである。

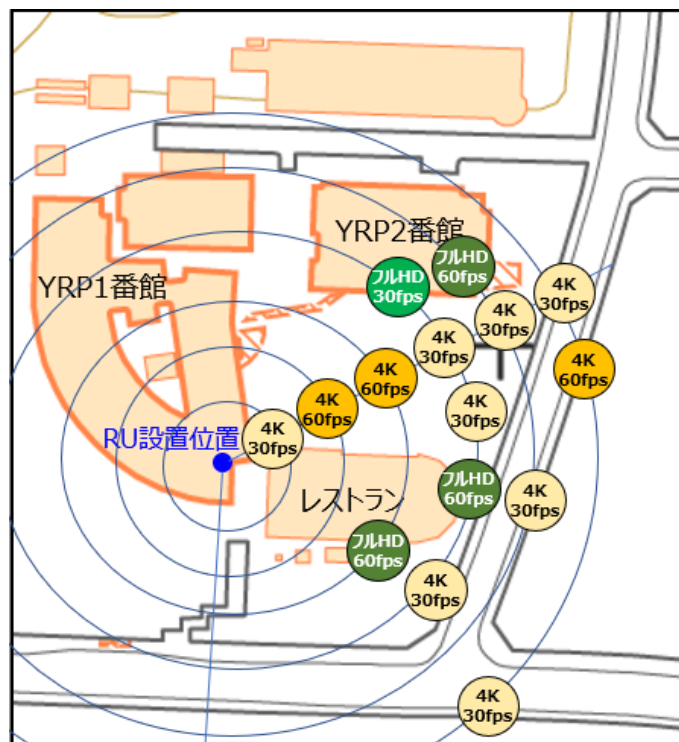


図 4-11 同期 TDD パターン時にフル HD, 4K 映像配信が可能なポイント

(2) TDD パターン等によるスループット改善

本技術実証では接続した基地局が同期 TDD パターンで動作している。準同期 TDD パターンを用いることで、UL スロットが約 1.8 倍になるため、理論上 UL スループットも約 1.8 倍となる。ラボ環境での測定結果においても同期スループットに比べ約 1.8 倍のスループットになることを確認出来ており、実環境でも同程度の効果が見込まれる。これにより本技術実証で確認した範囲内である限りは見通し内でどの場所でも 4K 60fps のストリーミング配信が可能となることが分かった。これは、ユースケースに合わせて必要な通信能力を可変できるローカル 5G の強みを示す例と言える。屋外の見通し外や屋内環境においてもこの強みが発揮され、場所によっては準同期 TDD パターンを使用することで 4K 60fps のストリーミング配信をすることが可能となることが分かった。(図 4-12)

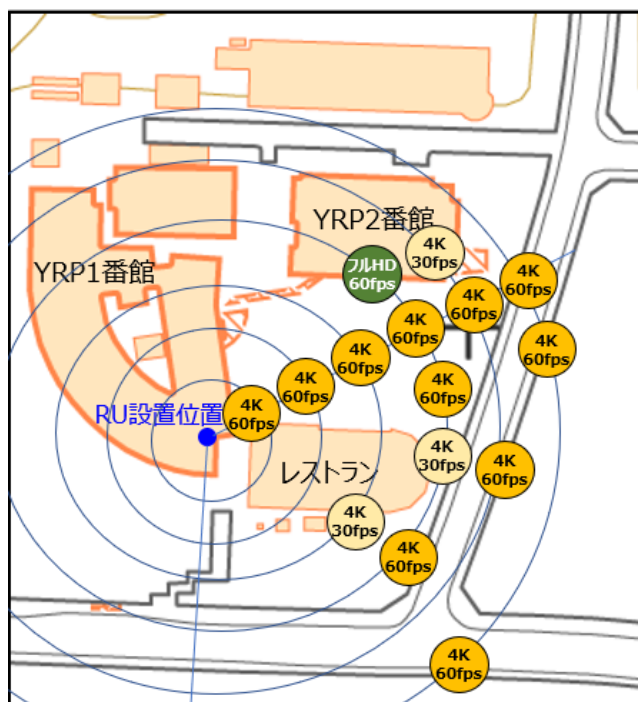


図 4-12 準同期 TDD パターン時にフル HD, 4K 映像配信が可能なポイント

準同期 TDD パターンよりも UL 比率を高める TDD パターンを今後利用することが出来れば、屋内においても 4K 30fps でストリーミング配信できる可能性があることも本実証の測定結果から分かった。

また、上記準同期 TDD パターンの使用に加え、端末システム視点での改善施策として、端末システムの送信電力を上げる HPUE⁸への対応が考えられる。一般的な端末システムの送信電力は、PC3⁹として最大 23dBm で規定されているが、PC2¹⁰として3dB 大きな電力で、PC1.5¹¹として、PC2よりき

⁸ High Power User Equipment

⁹ Power Class 3

¹⁰ Power Class 2

¹¹ Power Class1.5

らに 3dB 大きな電力で送信可能な制度の導入が検討されている。一方でこれら HPUE の運用に関しては法制化の準備中で、総務省「新世代モバイル通信システム委員会」にて技術基準の検討が行われている。HPUE の運用が可能になると、端末システムの送信電力を上げることが可能となり、屋内環境下においても 4K 60fps のストリーミング配信可能なエリアが広がる可能性がある。これは、テストベッドで得られた端末システム受信電力と上りスループットの測定結果から裏付けられる。本技術実証の屋外環境下の測定結果から受信電力が -84.0dBm 以上の場合は上りスループットは 65Mbps 以上であることが分かる。一方で、屋内において端末システム受信電力が -86.0dBm 、上りスループットが 17.2Mbps、端末システム受信電力が -84.2dBm 、上りスループットが 53.9Mbps の測定ポイントがあった。この結果から、受信電力が高い方が上りスループットが高くなる傾向があると言える。ローカル 5G は上りと下りで同じ周波数を利用しているため、上りと下りの電波伝搬路の相反性から、端末システムが HPUE に対応して基地局の受信電力が 3dB 上がる時の通信リンクの改善量は、基地局の送信電力が 3dB 上がって端末システムの受信電力が 3dB 改善した時の通信リンクの改善量と同等である。つまり、端末システムが HPUE に対応することによる上りスループットの改善効果は、受信電力が -86dBm から -83dBm に、 -84.2dBm から -81.2dBm に改善する効果と同等であり、これらのポイントでは端末システムが HPUE に対応することで受信電力が -84.0dBm 以上の場合の上りスループットが出るのが推定される。つまり、上りスループットが 65Mbps 以上に改善し、4K 30fps でストリーミング配信できるようになると推定される。

(3) 基地局から死角エリアでの改善

基地局が見通せなくなり、建物による反射も期待できない場所(例: YRP2 番館裏)においては TDD パターンの変更だけでは 4K 60fps を可能とするほどの UL スループット改善は見込めないことが確認できた。

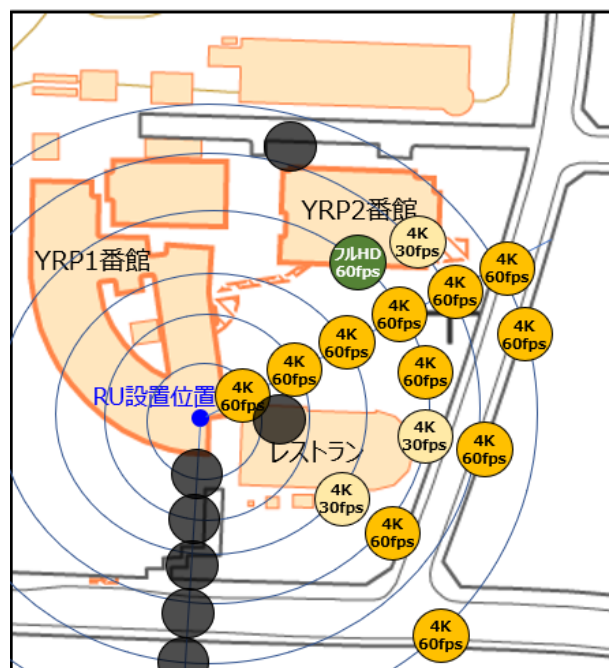


図 4-13 準同期 TDD パターン時でもフル HD 映像配信が出来ないポイント(黒塗り部分)

ローカル 5G では、現状では比較的高い周波数を利用することから、空間及び遮蔽物による減衰が大きい。今回の端末システムは主に遠隔監視・遠隔臨場で活用される想定であり、工事・建設現場等では次図に示すように建機、建設中の建物等によりローカル 5G の電波を阻害される死角がある環境での利用が想定される。これら死角があるエリアでも遠隔監視・遠隔臨場を実施できるローカル 5G システムを構築する必要がある。

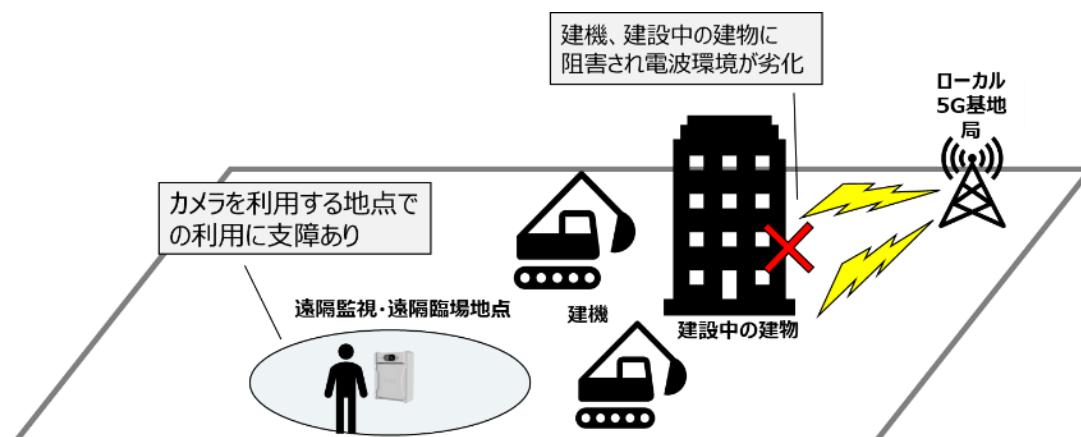


図 4-14 遠隔監視・遠隔臨場利用時に想定される電波劣化状況

改善の施策としては、コアシステム含めローカル 5G システム全体を遠隔監視・遠隔臨場をするエリア内での複数構築、エリア内に中継局(陸上移動中継局、小電力レピータ陸上移動局)の設置、コアシステム数は増やさずに分散型アンテナシステム(DAS)¹²を利用する等して、基地局が電波を送受信する場所を増やし、端末システムとローカル 5G 通信できるエリアを広げることが対処案として考えられる。

具体的な例として、DAS を用いた改善例を次図に示す。ローカル 5G の基地局から死角になっている現場近くに子機を設置する。ローカル 5G 基地局と子機との間は光ケーブル等により接続されており、間に中継器を入れることで複数の子機を接続することも可能である。このように接続された子機から基地局の電波を発射することで、元々基地局の死角であった場所においても、安定した接続が期待出来る。

12 Distributed Antenna System; 基地局から届く電波を光ケーブル等によって分配することで通信出来るエリアを拡張するシステム

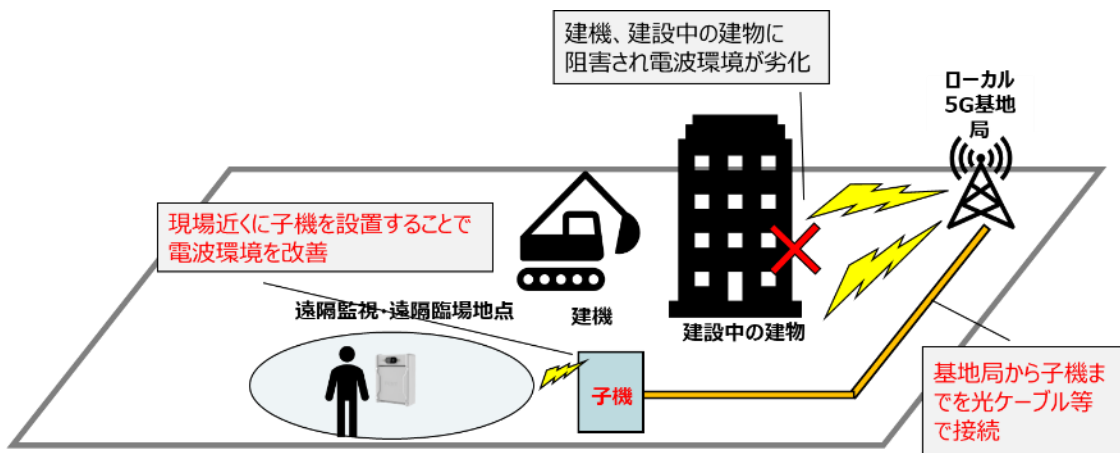


図 4-15 DAS を用いた電波環境の改善例

この場合は、電波が自己土地外に届くエリアも広くなることから干渉調整エリアも広くなり、他者土地所有者との調整作業が増えることや、調整期間が伸びることが懸念されるが、免許申請で示されているカバーエリア端(受信電力 -84.6dBm)地点での受信電力の実測値は申請値のそれよりも 15dB 以上低くなっていることが確認出来た。

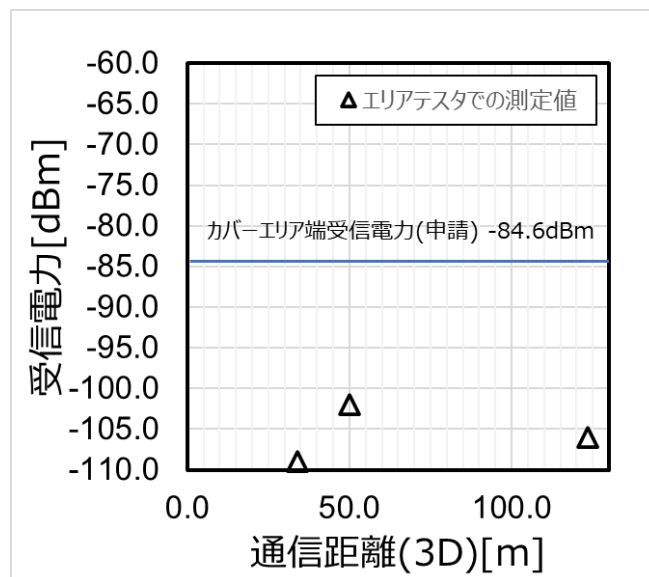


図 4-16 カバーエリア端での受信電力確認結果

この結果からは、電波法関係審査基準(平成 13 年総務省訓令第 67 号) 別紙 2(第 5 条関係)無線局の目的別審査基準で示されているカバーエリア及び調整対象区域を求める伝搬等に応じて受信電力を算出する際の計算式の更なる精緻化や、受信電力の実測値を元にした免許申請も可能とすることで、ローカル 5G の強みを発揮できるエリアを広げつつ、干渉調整が必要となるエリアが狭小化する可能性が示される。

4.2.2 端 02 の実証結果及び考察

テストベッドでの評価は次図に示した 20 ポイントの評価ポイントで取得した。いずれの評価項目も 1 分間の時間変動を観測した。また、これらの時間変動値を解析し一定時間の最小値、最大値、平均値、中央値をまとめた。

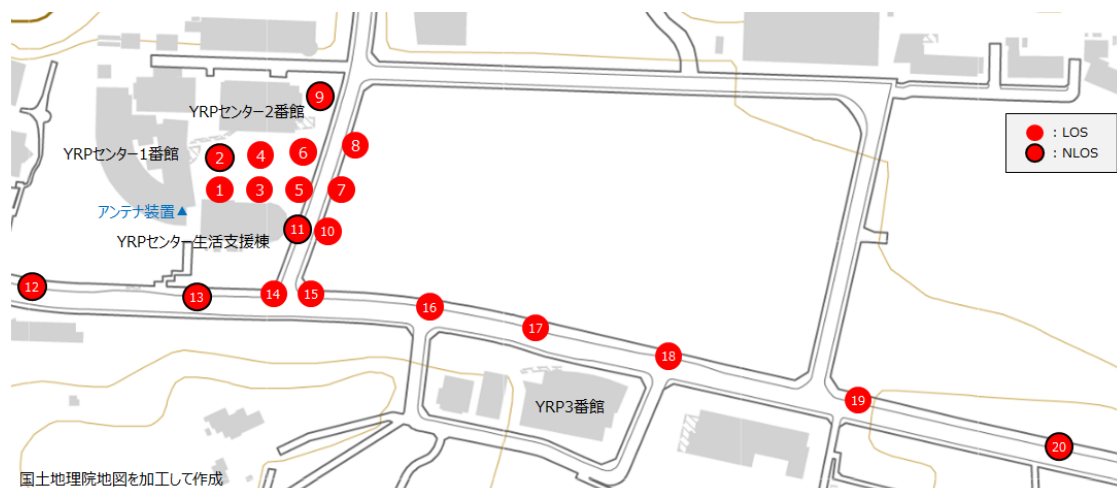


図 4-17 テストベッドの測定ポイント（赤丸が測定ポイント）

評価ポイントは、工事現場等の反射物の少ない開けた土地を想定して見通し(LOS)となるポイントを多く選択した。アンテナ設置位置に最も近く見通し環境であるポイント①から、見通し外環境ではあるが最も距離が遠くになり通信できる限界となると予想されるポイント⑳まで合計 20 ポイントを設定した。本環境ではアンテナ設置位置が高く、丘の上に建つ建物から見下ろすような方向に電波を放射しており通信距離が長くとれることが期待できる。②、⑨、⑪、⑫、⑬、⑳のポイント は YRP の建物や壁、地形の影響があり見通し外となるポイントを選択し測定を行った。他の建物や壁等の反射による電波も期待できるため比較検証のポイントとして測定を実施した。

以下に各ポイントで測定した伝送性能と受信電力の測定結果を考察する。

各ポイントのアップリンクスループット、ダウンリンクスループット、受信電力、伝送遅延の最小値、最大値、平均値、中央値をそれぞれ以降の表に示す。

表 4-6 各測定ポイントでのアップリンクスループット測定結果

ポイント	アップリンクスループット [Mbps]			
	最小値	最大値	平均値	中央値
1	52.2	68.0	62.1	61.7
2	2.1	5.1	3.2	3.2
3	58.0	108.7	79.8	78.6
4	46.1	108.4	72.5	71.3
5	61.5	117.6	82.3	80.6
6	63.9	98.9	76.0	73.8

7	61.7	93.1	74.1	74.3
8	56.0	88.6	71.3	70.7
9	1.4	3.9	2.6	2.6
10	70.8	97.1	80.6	80.3
11	45.6	62.1	57.2	57.2
12	0.4	1.4	0.9	0.9
13	8.8	49.2	15.8	14.1
14	60.4	85.0	69.4	68.8
15	50.4	131.9	87.8	85.5
16	57.6	88.9	69.5	68.1
17	11.9	68.5	53.3	59.2
18	4.0	29.5	10.7	9.7
19	5.3	22.6	11.0	9.9
20	1.3	4.3	2.4	2.3

表 4-7 各ポイントでのダウンリンクスループット測定結果

ポイント	ダウンリンクスループット [Mbps]			
	最小値	最大値	平均値	中央値
1	161.5	254.6	204.2	204.2
2	112.6	190.1	162.6	164.6
3	177.6	370.7	261.3	261.1
4	180.8	272.0	224.4	225.4
5	120.9	308.3	232.5	240.6
6	157.8	353.4	244.0	248.9
7	171.6	351.2	224.5	213.6
8	169.2	334.1	238.7	234.2
9	59.0	125.5	91.3	91.8
10	151.5	346.2	213.3	207.4
11	155.3	239.4	186.1	182.6
12	1.4	26.2	16.4	17.8
13	26.8	54.2	42.7	42.2
14	185.6	265.7	222.3	221.9
15	135.5	456.1	305.1	307.0
16	110.0	345.6	236.1	223.6
17	113.8	235.9	167.2	164.4
18	83.0	191.6	107.1	105.0
19	37.8	126.4	89.5	91.7
20	23.9	91.2	50.8	50.8

表 4-8 各ポイントでの受信電力

ポイント	受信電力(SS-RSRP) [dBm/100MHz]			
	最小値	最大値	平均値	中央値
1	-91.0	-85.9	-88.6	-88.7
2	-104.8	-100.1	-102.5	-102.5
3	-79.3	-73.8	-76.0	-75.9
4	-89.9	-82.2	-87.4	-87.3
5	-74.8	-69.9	-72.8	-73.0
6	-88.9	-81.6	-85.2	-85.3
7	-78.4	-73.4	-75.8	-75.8
8	-96.3	-83.5	-87.1	-86.7
9	-108.8	-100.9	-104.9	-105.0
10	-82.9	-76.7	-79.1	-78.8
11	-88.3	-83.8	-86.5	-86.5
12	-117.9	-113.3	-116.2	-116.2
13	-98.8	-90.3	-91.9	-91.6
14	-79.3	-75.8	-77.6	-77.6
15	-81.6	-75.8	-78.9	-78.8
16	-86.8	-78.8	-81.1	-80.6
17	-92.7	-82.8	-86.3	-85.7
18	-97.8	-86.7	-93.1	-93.1
19	-107.6	-93.8	-99.5	-99.5
20	-111.5	-101.4	-104.8	-104.5

表 4-9 各ポイントでの往復遅延時間

ポイント	往復遅延時間 [ms]			
	最小値	最大値	平均値	中央値
1	16.0	192.0	33.8	31.0
2	14.0	45.0	26.5	26.0
3	17.0	52.0	31.8	33.0
4	17.0	51.0	31.1	31.0
5	16.0	51.0	29.9	31.0
6	16.0	56.0	31.3	32.5
7	16.0	50.0	30.7	30.5
8	17.0	53.0	32.2	31.0
9	15.0	54.0	26.6	25.0
10	16.0	55.0	30.6	30.5
11	16.0	41.0	29.1	29.5
12	15.0	139.0	33.0	28.0
13	15.0	66.0	42.1	26.0
14	16.0	192.0	33.8	31.0
15	18.0	68.0	37.0	36.5
16	16.0	199.0	38.3	35.0
17	16.0	208.0	37.4	31.0
18	17.0	211.0	33.3	29.0
19	14.0	189.0	31.1	30.0
20	15.0	49.0	25.7	24.0

次図に YRP の試験エリアで実施した伝搬特性評価結果として、全ポイントの SS-RSRP とアップリンクスループットの相関関係を示した。SS-RSRP でおよそ-90dBm 以上のポイントでアップリンクスループットが 50Mbps 以上を達成していることがわかる。ただし、YRP に設置された基地局装置と有線接続して実施した事前評価結果からもわかる通り、アップリンクスループット性能が SS-RSRP の良い環境でも十分に出ないことがわかっており、屋外の試験環境においても同様に十分に受信電界強度が高いポイントにおいてもスループットが上がらなかった。この問題を解決するためには端末システム側の動作解析だけでなく、基地局装置側のパラメータ設定や動作解析が必要となる。

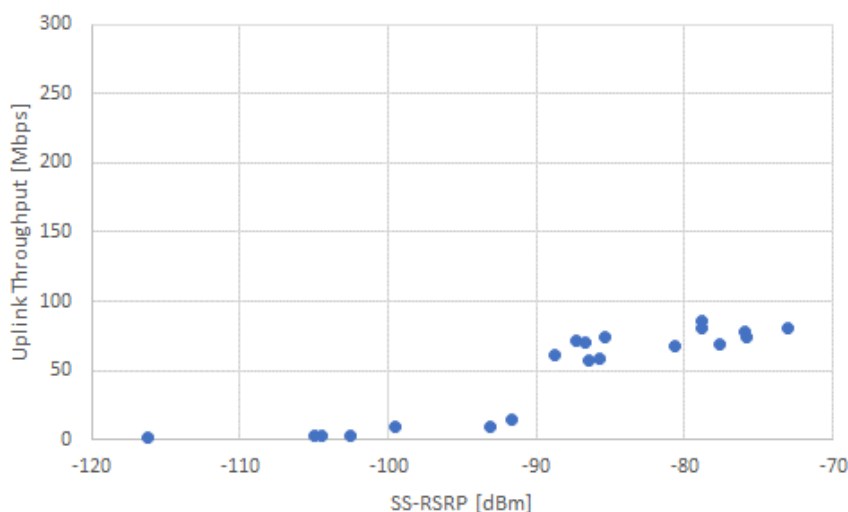


図 4-18 SS-RSRP とアップリンクスループットの相関関係

次図に YRP の試験エリアで実施した伝搬特性評価結果として、全ポイントの SS-RSRP とダウンリンクスループットの相関関係を示した。ダウンリンクスループットでは SS-RSRP でおよそ-90dBm 以上のポイントでダウンリンクスループットが 150Mbps 以上、-85dBm 以上のポイントで 200Mbps 以上を達成していることがわかる。

ポイント①から⑩の LOS 環境では 200Mbps 以上の速度ができることが確認できた。一方で LOS 環境でも距離の遠い⑨、⑩は 100Mbps を下回るダウンリンクスループットになっている。ポイント②は LOS 環境で近距離ではあるが、基地局アンテナの指向性の低いところになっているためダウンリンクスループットは低くなっている。

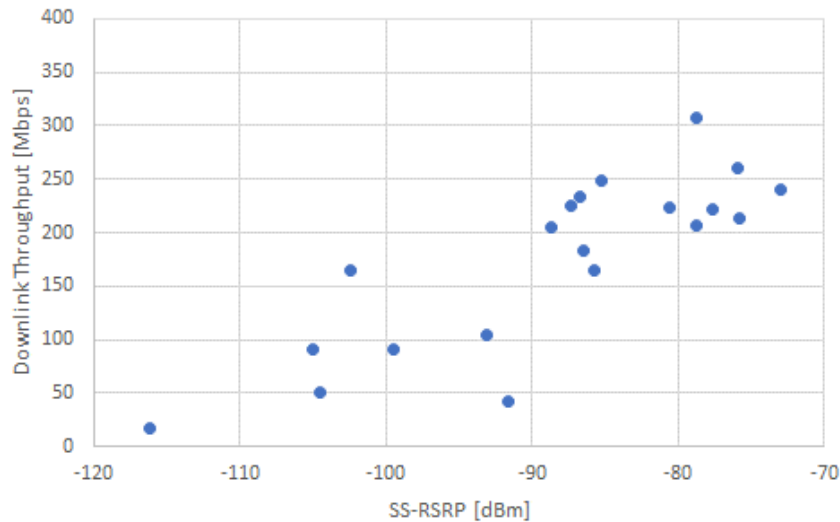


図 4-19 SS-RSRP とダウンリンクスループットの相関関係

受信電力値としては、基地局アンテナの正面となる③、⑤、⑦付近が最も高く、目標とした伝搬損 74dB(SS-RSRP で-90.1dBm)以上となっているポイントでアップリンク速度 80Mbps の達成に関しては、基地局からの制御で常にアップリンク 2×2 MIMO にならないためか達成できたのはポイント⑤、⑩、⑮のみであった。図 3-21 に各測定ポイントでの SS-RSRP の評価結果を示す。ポイントに示した丸の中の数値は SS-RSRP を 1 分間測定して抽出された中央値であり、丸の色は赤系が SS-RSRP の高いポイント、緑系が低いポイントでグラデーションになっている。

ポイント⑮から⑱の地点ではアンテナ装置からの距離が遠く、SS-RSRP が非常に低くなっているものの無線通信が途切れることなくデータ通信を行っていた。これはアンテナ装置が建物の屋上に設置され、さらに建物の建つ地形も丘の上になっていることが要因と考える。また、前述したように見通し環境になっていることから通常より広く通信エリアが確保できているものと想定される。一方で、②、⑨、⑬のポイントは距離が近いが、NLOS となる環境では反射波もあまりないためか、スループットが急激に低下してしまうことが判明した。

本実証におけるテストベッドに設置されたローカル 5G 基地局装置は同期運用であったが、例えば準同期 TDD1 で運用することを想定すると、変調方式を 64QAM まで使用した場合、理論上はアップリンクスループット(2×2 MIMO)で約 380Mbps 程度、ダウンリンクスループット(4×4 MIMO)で 900Mbps 程度の速度が想定され、アップリンクのスループットは倍近い速度が実現できる。実運用上はそれよりはやや低くなるが、ローカル 5G で高い要望となっているアップリンクの高速通信の実現に向けて、準同期 TDD1 運用を使い本実証で試作した端末システムを利用すれば、8K 映像伝送を想定した 80Mbps 以上の通信速度が多くのポイントで実現できると考えられる。

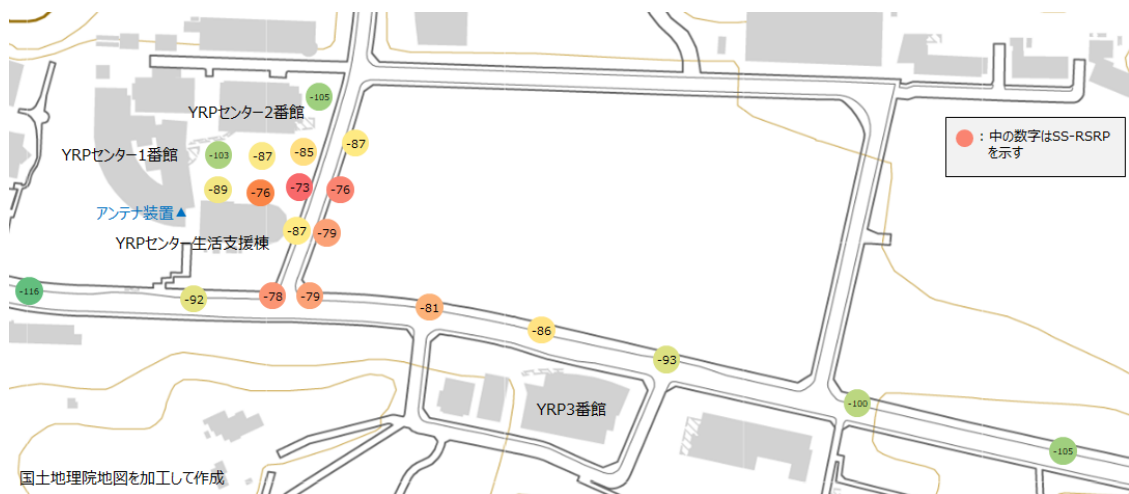


図 4-20 テストベッドの測定ポイントでの SS-RSRP

往復遅延は測定ポイントによらず中央値は安定しており、30m 秒前後となった。この結果は事前検証の結果とほぼ変わらなかった。

今回のテストベッドにおける電波伝搬特性の評価では、基地局アンテナの設置位置や地形によっては従来の算出式と比較して実際のカバーエリアが広がることがわかった。ローカル 5G においてはユーザが自己土地でシステムを運用することを前提としているが、近接したエリアで複数のシステムが運用される場合、境界付近では電波干渉により通信品質が劣化することが想定される。ローカル 5G 特有の準同期 TDD と従来の同期 TDD が混在して運用されている場合には特に注意する必要があり、今後導入が検討されている端末の送信電力を上げられる HPUE や、ローカル 5G の Sub6 帯としては唯一屋外で使用可能な 4.8~4.9GHz 帯の隣接帯域である 4.9GHz~5.0GHz 帯の移動体通信システムへの割り当てを行う際には、既に免許を取得し運用を開始しているシステムへの影響を含め、例えば準同期運用時は HPUE の送信電力を制限する等、ローカル 5G の運用方法を含め十分な検証が必要であるとする。

HPUE の導入は端末の送信電力を上げることによって、その分のアップリンクの到達距離、もしくは同地点での SINR(Signal-to-Noise Ratio)の改善が見込める。特に小型端末のように設計上の制限からアンテナ利得が十分高くない端末システムのアップリンクの性能を補うもので、広大な土地にローカル 5G の通信エリアを構築する上では有効な技術と言える。一方で、端末の送信電力を上げる場合には、消費電力の増加にともなう給電容量の課題や放熱設計の見直し、送信電力を上げるための回路設計やデバイスの再検討、電波防護基準の準拠等の課題も多い。

4.2.3 端 03 の実証結果及び考察

同期 TDD パターンにおけるラボでの有線測定のスループット測定値と、テストベッド及び FSS35 キャンパスのフィールドにて実測したスループット測定値の DL の比較を次図に示す。

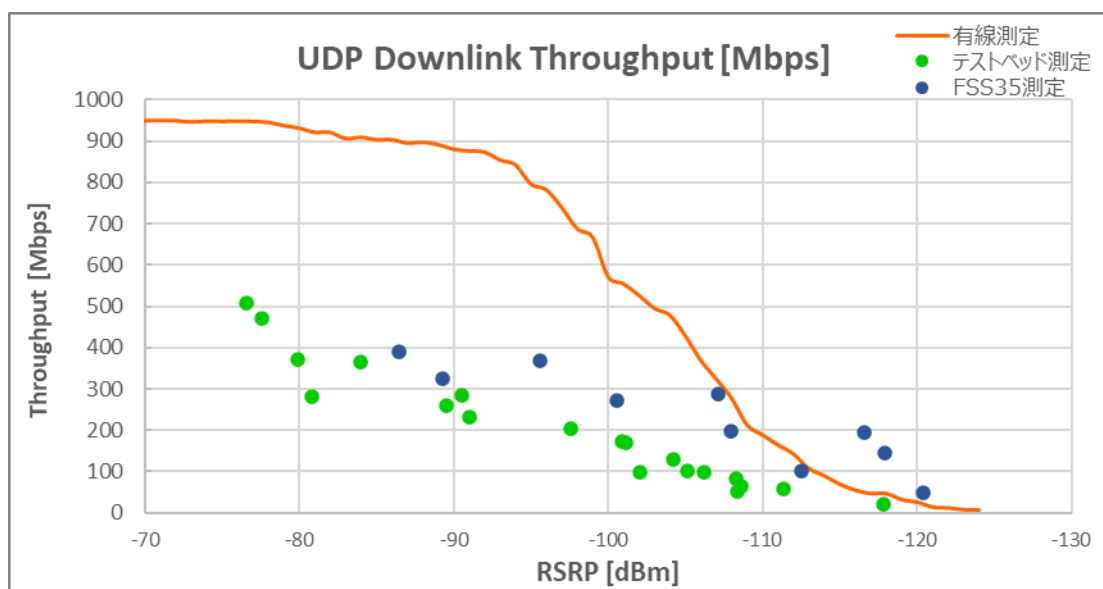


図 4-21 有線接続とフィールドでのスループットと RSRP(同期 TDD:DL)

DLの有線接続での結果とフィールドでの結果を比較すると、RSRP:-100dBm以上の強電界ではフィールドのほうがおおよそ半分程度のスループットとなった。これは、有線接続の強電界では、全て4レイヤで動作していたが、フィールドでは、2レイヤ動作が大半であったこと、又フィールドでは、電界強度が刻々と変わるため、MCSも有線接続の時のMCSより低めであったためと考えられる。

RSRP:-110dBm前後では、有線接続とFSS35のフィールドでのスループットは近似する結果となった。

またRSRP:-115dBm以下の弱電界ではラボの有線接続よりFSS35のフィールドでのスループットのほうが良い結果となった。ラボとFSS35の基地局は同一ベンダーであるが、ラボよりもFSS35の基地局の方が機種が新しく、パラメータ設定も含め弱電界での特性が改善されているためと考えられる。

テストベッドでの測定結果とFSS35での測定結果を比較すると、RSRP:-95dBm以下程度の電界ではテストベッドのフィールドよりFSS35のフィールドでのスループットのほうが良い結果となった。これはRSRP:-95dBm以下程度においては、FSS35の方がテストベッドより高いMCSが設定される傾向があったため、パラメータ設定も含め基地局側の性能差によるものと考えられる。

同期TDDパターンにおけるラボでの有線測定のスループット測定値と、テストベッド及びFSS35キャンパスのフィールドにて実測したスループット測定値のULの比較を次図に示す。

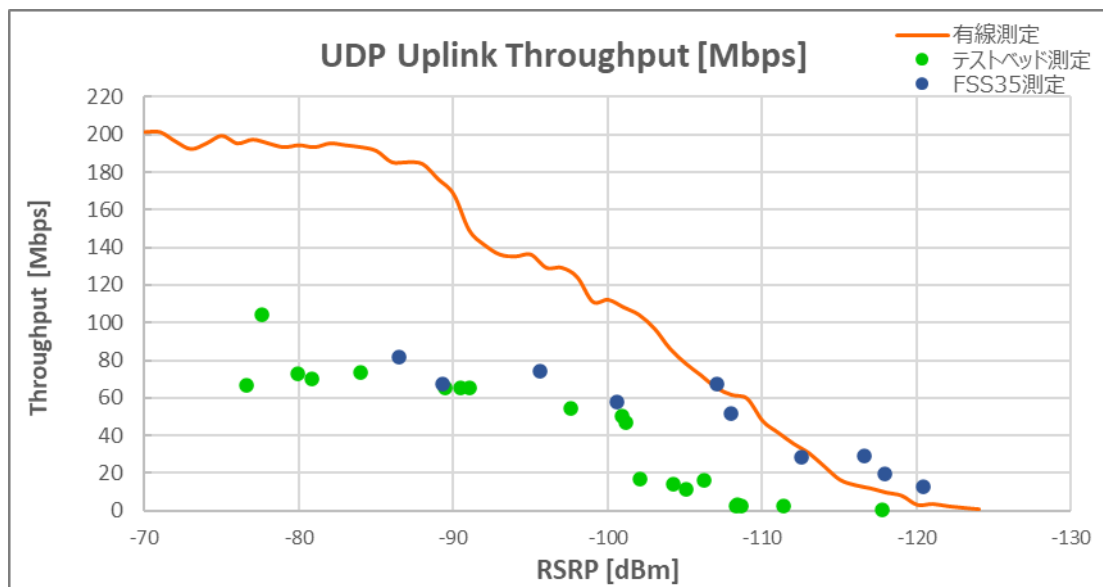


図 4-22 有線接続とフィールドでのスループットと RSRP(同期 TDD:UL)

UL の有線接続での結果とフィールドでの結果を比較すると、RSRP:-100dBm 以上の強電界ではフィールドのほうがおおよそ半分程度のスループットとなった。これは、有線接続の強電界では、全て2レイヤで動作していたが、フィールドでは、1レイヤ動作もあったこと、又フィールドでは、電界強度が刻々と変わるため、MCS も有線接続の時の MCS より低めであったためと考えられる。

RSRP:-110dBm 前後では、ラボの有線接続と FSS35 のフィールドでのスループットは近似する結果となった。

また RSRP:-115dBm 以下の弱電界ではラボの有線接続より FSS35 のフィールドでのスループットのほうが良い結果となった。ラボと FSS35 の基地局は同一ベンダーであるが、ラボよりも FSS35 の基地局の方が機種が新しく、パラメータ設定も含め弱電界での特性が改善されているためと考えられる。

テストベッドでの測定結果と FSS35 での測定結果を比較すると、RSRP:-100dBm 以下程度の電界ではテストベッドより FSS35 でのスループットのほうが良い結果となった。これは RSRP:-100dBm 以下程度において、FSS35 の方がテストベッドより高い MCS が設定される傾向があったためと基地局の受信感度が FSS35 の方が良かったためと想定され、パラメータ設定も含め基地局側の性能差によるものと考えられる。

受信電力(RSRP)-110dBm 以内のエリアで準同期 TDD パターン 1 にて UL のスループット 30Mbps 以上の目標値に対しては、ラボでの同期 TDD パターン 1 による測定で、RSRP:-110dBm にて 47.7Mbps、FSS35 で RSRP:-108.0dBm にて 51.7Mbps、RSRP:-110dBm 以下となる RSRP:-112.5dBm にて 28.8Mbps であった。準同期 TDD パターン 1 では、UL スロット数が同期 TDD パターンの2倍となり、スループットも約 2 倍となると考えられるため、今回の同期 TDD パターンでの測定結果値を 2 倍した場合は、ラボで RSRP:-110dBm にて 95.4Mbps、FSS35 で RSRP:-108.0dBm にて 103.4Mbps、RSRP:-110dBm 以下となる RSRP:-112.5dBm にて 57.6Mbps となり、性能としては目標値を十分上回る結果となった。

同期 TDD パターンにて測定したラボの有線測定での伝送遅延時間測定値(Ping)と、テストベッド及び FSS35 キャンパスのフィールドにて実測した伝送遅延時間測定値(Ping)の比較を次表に示す。

表 4-10 有線接続とフィールドでの Ping 伝送遅延時間(平均)

伝送遅延時間 (ms)		
ラボ	フィールド	
	テストベッド	FSS35
20.2	36.7	25.1

ラボの有線測定での伝送遅延時間測定値(Ping)と、テストベッドでの伝送遅延時間を比較した場合、テストベッドでの伝送遅延時間が 16ms 以上長い結果となった。

同期 TDD パターンにて測定したラボの有線測定での伝送遅延時間測定値(Ping)と、テストベッド及び FSS35 キャンパスのフィールドにて実測した伝送遅延時間測定値(Ping)のグラフを次図に示す。

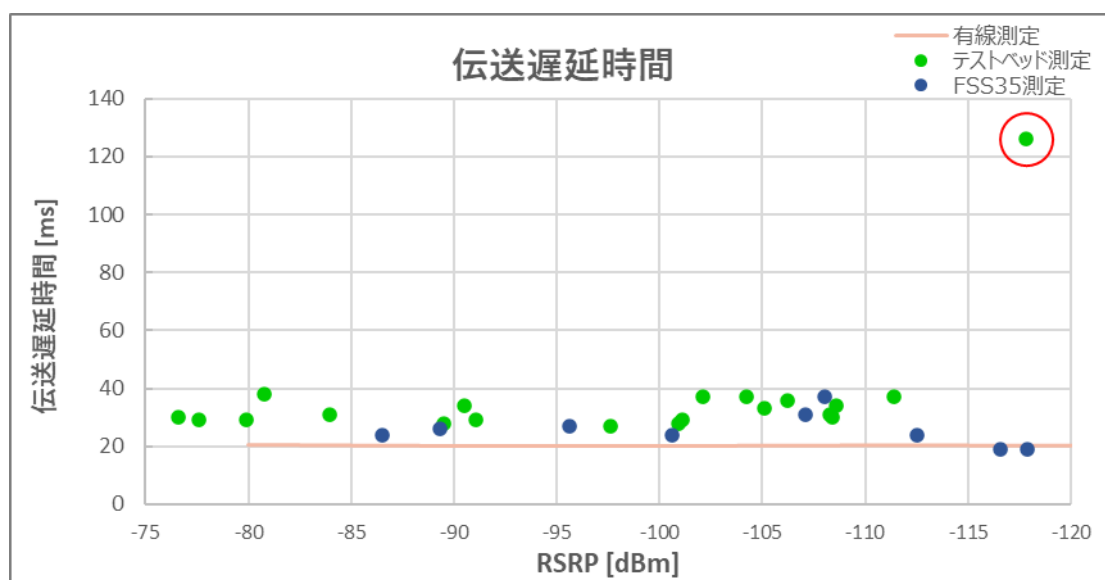


図 4-23 有線接続とフィールドでの Ping 伝送遅延時間(平均)

テストベッドでは図中に赤丸をつけている弱電界の RSRP:-117.8dBm 地点で伝送遅延時間が長くなっている。この RSRP 値がテストベッドの基地局の受信感度限度値あたりと想定され、再送等が発生しているため、テストベッドでの伝送遅延時間(平均)が伸びたと考えられる。なお、この RSRP:-117.8dBm 地点を除いた場合は、テストベッドでの伝送遅延時間(平均)は 31.9ms となり、FSS35 キャンパスとの差は 7ms 程度と小さくなる。

ラボの有線測定での伝送遅延時間測定値(Ping)と、フィールド測定(テストベッドの RSRP:-117.8dBm 地点を除く)での伝送遅延時間を比較した場合、フィールドでの測定の方が電界が不安定であることもあり、若干伝送遅延時間が長くなったが、ラボの有線測定、フィールドでの測定結果ともに

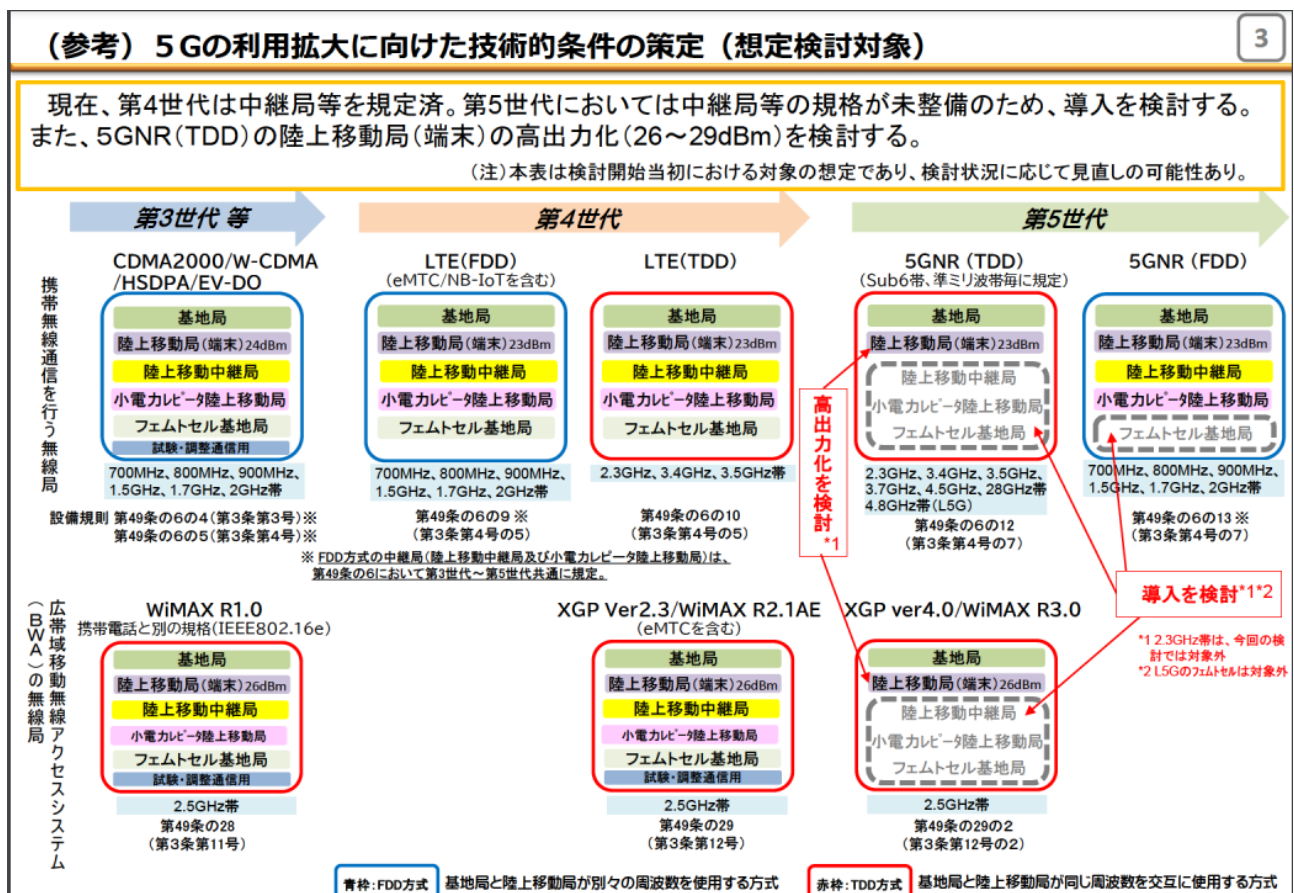
RSRP による大きな差はみられない結果となった。Ping は DL+UL の遅延時間のため、映像伝送の遅延時間を考えた UL の遅延時間はこの半分程度の遅延時間となるため、UL のローカル 5G ネットワーク部分の伝送遅延時間は 10~15ms 程度になると考えられる。利活用シーンを想定し、エンコーダ/デコーダ間の映像伝送遅延時間は 150ms 以下を目標としたが、FullHD×4 映像に相当する 4K 映像でのローカル 5G ネットワークを介さない有線接続での映像遅延時間は 70ms 程度のため、ローカル 5G ネットワーク部分の伝送遅延時間の 10~15ms 程度は十分許容範囲と考えられる。

4.3 無線通信の技術基準の観点から必要な課題

4.3.1 背景・前提条件の整理

ローカル 5G 端末システム(移動局)の技術基準は、無線設備規則¹³第 49 条の6の 12 に、4.7GHz 帯と 28GHz 帯のそれぞれが規定されている。なお、同一周波数帯であれば、無線設備規則上はキャリア 5G とローカル 5G の分類はない。

現在、貴省が開催・運営する「情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会」及びその下部組織である技術検討作業班においては、以下に示す通り当該技術基準の改定方針として高出力化が検討されている。



¹³ <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325M50080000018>

出所)総務省「情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会(第 22 回)」資料 22-1¹⁴
 図 4-24 情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会での検討状況

上記の検討を踏まえ、総務省「情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会 技術検討作業班(第 29 回)」では資料 29-5 の中で HPUE の技術的条件が素案として示されているところである。

技術的条件 (HPUE)

32

項目		NR (TDD)				
		2.3GHz帯	3.5GHz帯	3.7GHz帯	4.5GHz帯	28GHz帯
変調方式	基地局	規定しない				規定しない
	移動局	規定しない				規定しない
隣接チャネル漏えい電力	移動局	-50dBm/MHz以下 又は -30.2dBc以下のいずれかを満たすこと				-35dBm ^(※) 以下 又は以下のいずれかを満たすこと
						50MHz又は100MHzシステム
					200MHzシステム	-7.7dBc以下
					400MHzシステム	-4.7dBc以下
最大空中線電力	移動局	23dBm以下	29dBm以下		35dBm以下	
空中線絶対利得の許容値	移動局	3dBi以下。 ただし、等価等方輻射電力が、絶対利得 3dBiの空中線に定格空中線電力の最大値を加えたときの値以下となる場合は、その低下分を空中線の利得で補うことができる				20dBi以下。 ただし、等価等方輻射電力が、絶対利得 3dBiの空中線に定格空中線電力の最大値を加えたときの値以下となる場合は、その低下分を空中線の利得で補うことができる

※ 参照帯域幅は以下のとおり。

50MHzシステム：47.52MHz、100MHzシステム：95.04MHz、200MHzシステム：190.08MHz、400MHzシステム：380.16MHz

出所)総務省「情報通信審議会 情報通信技術分科会 新世代モバイル通信システム委員会 技術検討作業班(第 29 回)」資料 29-5¹⁵

4.3.2 実証を通じての示唆

本実証を通じて試作された端末システムは、具体的な利用シーンを踏まえて防塵、防水、防雪、耐振動性や、取り回しの良さ(小型、軽量 等)に特徴があり、送信出力等は現在の技術的条件に則って試作された。そのため HPUE 等の試作は行われていない。他方で、実証の結果と将来的な利用シーンを踏まえて HPUE の考察を行った実証を存在する。具体的には端 01、端 02 である。それぞれの分析、考察を以下に引用する。

¹⁴ https://www.soumu.go.jp/main_content/000786142.pdf

¹⁵ https://www.soumu.go.jp/main_content/000848395.pdf

表 4-11 HPUE に関する考察

No	内容
端 01	<p>上記準同期 TDD パターンの使用に加え、端末システム視点での改善施策として、端末システムの送信電力を上げる HPUE への対応が考えられる。一般的な端末システムの送信電力は、PC3 として最大 23dBm で規定されているが、PC2 として 3dB 大きな電力で、PC1.5 として、PC2 よりさらに 3dB 大きな電力で送信可能な制度の導入が検討されている。一方でこれら HPUE の運用に関しては法制化の準備中で、総務省「新世代モバイル通信システム委員会」にて技術基準の検討が行われている。HPUE の運用が可能になると、端末システムの送信電力を上げることが可能となり、屋内環境下においても 4K 60fps のストリーミング配信可能なエリアが広がる可能性がある。これは、テストベッドで得られた端末システム受信電力と上りスループットの測定結果から裏付けられる。本技術実証の屋外環境下の測定結果から受信電力が-84.0dBm 以上の場合は上りスループットは 65Mbps 以上であることが分かる。一方で、屋内において端末システム受信電力が-86.0dBm、上りスループットが 17.2Mbps、端末システム受信電力が-84.2dBm、上りスループットが 53.9Mbps の測定ポイントがあった。この結果から、受信電力が高い方が上りスループットが高くなる傾向があると言える。ローカル 5G は上りと下りで同じ周波数を利用しているため、上りと下りの電波伝搬路の相反性から、端末システムが HPUE に対応して基地局の受信電力が 3dB 上がる時の通信リンクの改善量は、基地局の送信電力が 3dB 上がって端末システムの受信電力が 3dB 改善した時の通信リンクの改善量と同等である。つまり、端末システムが HPUE に対応することによる上りスループットの改善効果は、受信電力が-86dBm から-83dBm に、-84.2dBm から-81.2dBm に改善する効果と同等であり、これらのポイントでは端末システムが HPUE に対応することで受信電力が-84.0dBm 以上の場合の上りスループットが出るのが推定される。つまり、上りスループットが 65Mbps 以上に改善し、4K 30fps でストリーミング配信できるようになると推定される。</p>
端 02	<p>HPUE の導入は端末の送信電力を上げることによって、その分のアップリンクの到達距離、もしくは同地点での SINR(Signal-to-Noise Ratio)の改善が見込める。特に小型端末のように設計上の制限からアンテナ利得が十分高くない端末システムのアップリンクの性能を補うもので、広大な土地にローカル 5G の通信エリアを構築する上では有効な技術と言える。一方で、端末の送信電力を上げる場合には、消費電力の増加にともなう給電容量の課題や放熱設計の見直し、送信電力を上げるための回路設計やデバイスの再検討、電波防護基準の準拠等の課題も多い。</p>

出所)端01、端 02 の成果報告書より引用し、三菱総合研究所にて作成

端 02 は長時間の連続稼働を目標の一つに掲げているため、HPUE 化に伴う消費電力増加や放熱設計の変更等の課題に焦点が当たった記載がなされている。他方で端 01 は、将来的な利用シーンにおいて 4K 60fps のストリーミング配信を想定していることから、HPUE 化に伴う伝送性能の改善に焦点が当たった記載がなされている。HPUE の技術的条件の検討にあたっては、4K 60fps のストリーミング配信等、高い伝送性能が求められる利用シーンを具体的に想定(どのような環境で、周囲にはどのような無線システムが存在するか 等)して進めることが望ましいと考える。

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及び調査検討の請負 報告書【技術実証編】

2023年3月

株式会社三菱総合研究所
デジタル・イノベーション本部
