

令和4年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証

【特殊環境実証事業】

ローカル5Gを活用した車地上間通信及び
AI画像認識等による鉄道事業の
より安心安全かつ効率的な運営の実現

成果報告書

令和5年3月

アイテック阪急阪神株式会社

目次

1.	実証概要	1
1.1	背景・目的.....	1
1.2	実証の概要	4
2.	実証環境の構築.....	5
2.1	対象周波数帯	5
2.2	実施環境	5
2.3	ネットワーク・システム構成	6
2.4	システム機能・性能・要件	16
2.5	その他.....	17
2.5.1	実証システムの拡張性等	17
2.5.2	実証システムの安全性確保のための対策.....	18
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(技術実証)	19
3.1	実証概要	19
3.2	実証環境	19
3.3	実証事項	22
3.3.1	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.....	22
3.3.2	線状の空間におけるエリア化の改善・柔軟性向上.....	59
4.	ローカル 5G 活用モデルに関する検討(課題実証)	129
4.1	実証概要	129
4.1.1	背景となる課題.....	129
4.1.2	本実証におけるローカル 5G 活用モデル.....	133
4.1.3	実証内容の新規性・妥当性.....	139
4.1.4	実証目標.....	140
4.2	実証環境	144
4.3	実施事項	148
4.3.1	ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する検証.....	148
4.3.2	ローカル 5G 活用モデルの実装性に関する検証.....	213
4.3.3	ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題の抽出及び解決策の検討	240

4.3.4	ローカル 5G 活用モデルの実装・普及展開.....	242
5.	普及啓発活動の実施	252
5.1	映像制作	252
5.2	実証視察会の実施	253
5.3	その他普及啓発活動	255
6.	実施体制	256
6.1	実施体制の全体像	256
6.2	実施体制内の役割	257
7.	スケジュール	258

1. 実証概要

1.1 背景・目的

現在、日本国内においては人口減少及び少子高齢化が進み、今後生産年齢人口比率の減少が加速すると予測されており、業務の効率化や生産性の向上が極めて重要な課題となっている(図 1.1-1)。鉄道事業においても同様であり、列車運行や各種設備の点検・保守には多くの人的リソースを費やしている。さらには新型コロナウイルス感染症の感染拡大により移動が抑制され、鉄道事業は大きな打撃を受け厳しい経営状況が続いているが、エッセンシャルワーカーとして日々の安全な列車運行を実現している。一方で、2021年8月に小田急電鉄株式会社の快速急行列車内で傷害事件が発生し、2021年10月にも京王電鉄株式会社の特急列車内での傷害事件が発生した(図 1.1-2)。これらの事件を受け、お客様の鉄道に対する安全・安心への関心は急激に高まっている。このような社会情勢の中、全てのお客様に安心して鉄道をご利用いただけるよう輸送の安全確保を大命題として運営を行っていく必要がある。

本実証事業の実証コンソーシアムの構成員である阪神電気鉄道株式会社、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、アイテック阪急阪神株式会社は、阪急阪神ホールディングスグループに属している。阪急阪神ホールディングスグループでは「長期ビジョンー2040年に向けてー」を策定しており、スローガンとして「深める沿線 広げるフィールド」を掲げ、それを実現するために4つの戦略を打ち出している。その中でも「戦略① 関西で圧倒的No.1の沿線の実現」では、都市交通事業において少子高齢化が進む中でも沿線各所でデジタル技術や最新技術の積極的な活用等を通じて、沿線の魅力を飛躍的に高めることを目指している。また「戦略④ 高付加価値サービスの提供による事業シェアの拡大」では、保有する技術やノウハウを活用して事業の価値提供領域を拡大するとともに、高品質で競争力のあるサービスの提供に努めることにより、事業の規模とシェアの拡大を目指している(図 1.1-3)。

本実証事業では、ローカル5G無線通信システムを活用し、AI画像認識等の最新技術を活用した各種ソリューションの導入により、列車運行の安全性を高めつつ、業務の効率化や生産性の向上による鉄道事業のコンパクト運営を実現することを目指す。

将来人口の予測

- 2050年に日本の人口は約1億人まで減少する見込み。
- 今後、生産年齢人口比率の減少が加速。

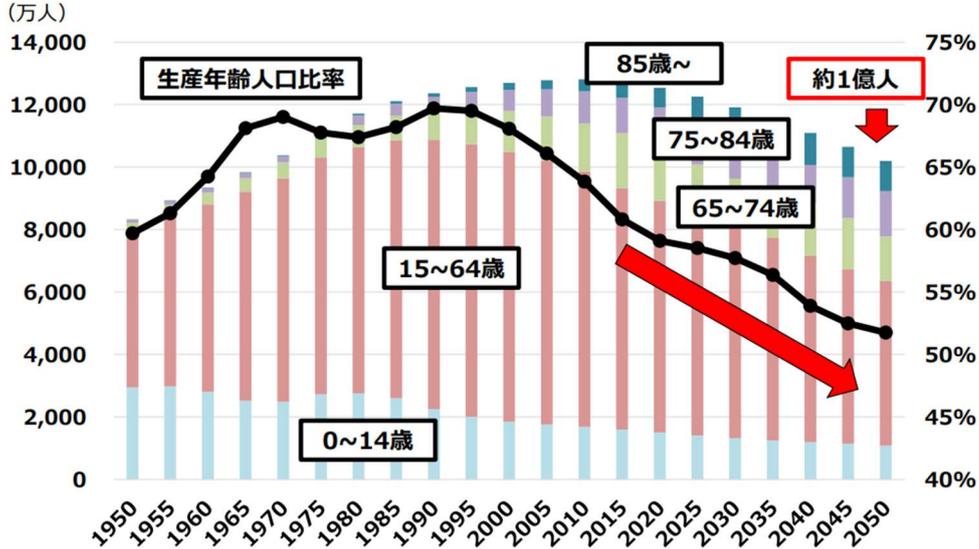


図 1.1-1 日本国内における将来人口及び生産年齢人口の予測

引用：経済産業省「2050年までの経済社会の構造の変化と政策課題について」

小田急線車内傷害事件の発生を受けた今後の対策について 国土交通省

2021年8月6日に発生した小田急線における車内傷害事件を受け、国土交通省では、JR・大手民鉄・公営地下鉄等の鉄道事業者と意見交換を行い、線区や車両等の状況を踏まえた取組として、以下の対策をとりまとめ、順次実施。

警備の強化（見せる警備・利用者への注意喚起）

- 駅係員や警備員による駅構内の巡回や車内の警戒添乗等の実施
- 業界共通のポスターや車内アナウンス等を活用した警戒警備の周知
- 車内や駅構内の防犯カメラの増備
- 警察との連携の強化



警備員による巡回 画像解析(置き去り検知)

被害回避・軽減対策

- 最新技術を活用した不審者や不審物の検知機能の高度化
 - ・防犯カメラ画像の解析などによる不審者・不審物の検知機能について、AIを含む最新技術を活用した機能の高度化や技術の共有化等を検討(最新技術の活用状況等について関係者間で共有)
- ピクトグラムも活用した非常通報装置等の車内設備の設置位置や使用方法のよりわかりやすい表示
- 指令を含む関係者間のリアルタイムの情報共有
 - ・スマホやタブレットの活用
 - ・非常時映像伝送システムの活用 等
- 防護装備品や医療器具類等の整備
- 車内事件発生時における現場対応力を向上させるための社員の教育・訓練の実施及びマニュアル等の見直し

※具体的な方策の検討・実施に向けては安全統括管理者会議等を活用
(安全統括管理者:鉄道事業法に基づき、各鉄道事業者が選任する安全の責任者(副社長、専務・常務取締役等))

<参考>車内への携行品に関する関係法令の整備

- ・適切に梱包されていない刃物の持ち込みについては、省令改正(平成31年4月施行)により禁止
- ・手荷物検査の実施については、省令改正(令和3年7月施行)によりその権限を明確化



注意喚起ポスター
(9月24日より順次掲載開始)



非常通報装置の設置例

図 1.1-2 小田急線車内傷害事件の発生を受けた対策

引用：国土交通省「小田急線車内傷害事件の発生を受けた対策を取りまとめました」

長期的にグループが目指す姿

長期ビジョン スローガン

深める沿線 広げるフィールド

世の中がこれまで以上に大きく変化していく中で、グループが一体となって変革を推し進めながら、沿線やコンテンツの魅力さをさらに高め、事業フィールドを広げるとともに、財務の安定性を追求し、資本コストを意識した経営の定着を図っていく。

こうしたことを通じて

- 安心・快適な都市生活や夢・感動をもたらす体験など多様な価値を創造・提供しつづけ、沿線のまちづくりを深化させるとともに、事業の展開エリアを拡大させることで、顧客満足度を高め、持続的な企業価値の向上を実現する。
- お客様や地域社会をはじめとするステークホルダーの期待に応え、持続可能な社会の実現に貢献する。
- これらにより、バランスに秀でた品格のある、地域（関西）とともに成長する企業グループとなる。

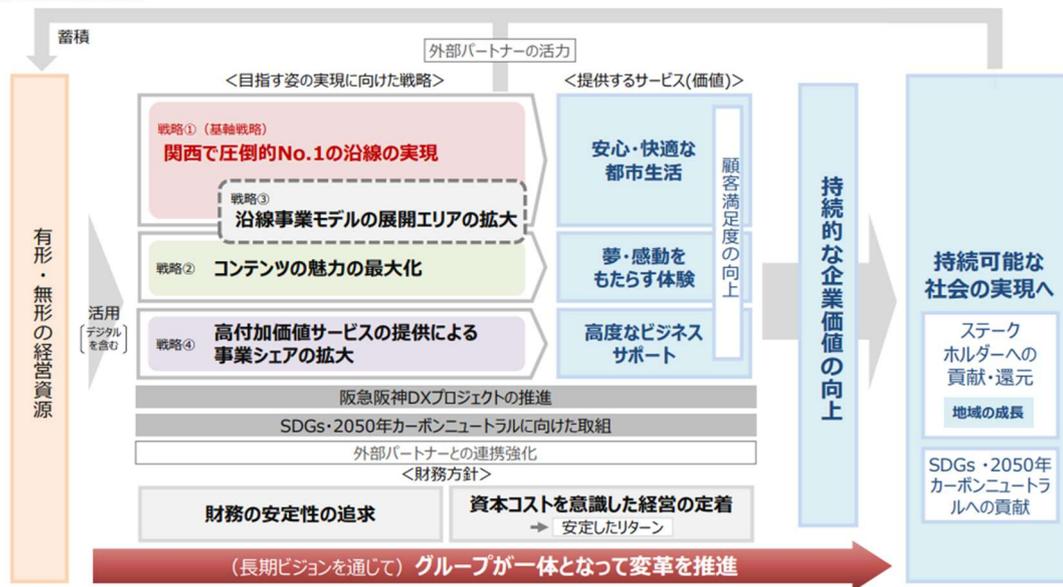
<ステークホルダーへの貢献・還元>

お客様	安心・快適な都市生活や魅力あるコンテンツにより夢・感動をもたらす体験等を提供し、顧客満足度を高める。
地域社会	地域とともに、関西で圧倒的No.1の沿線の実現を目指す。
従業員	ダイバーシティ&インクルージョン※を意識しながら、従業員満足度を高める。 ※性別・年齢・障がい・国籍などの外面の属性や、ライフスタイル・職歴・価値観などの内面の属性に関係なく、それぞれの個性を尊重し、認め合い、良いところを活かすこと。
お取引先・外部パートナー	高付加価値サービスの継続的な提供を通じて、信頼関係を構築し、ともに成長する。
債権者	財務健全性を維持する（格付の維持を図る）。
株主	ROEの維持・向上を図り、安定的かつ適正水準の株主還元を継続する。
未来世代	活気に溢れる「住みたい」「訪れたい」「働きたい」関西を実現し、未来世代にバトンを繋ぐ。

13

長期ビジョンの全体像

価値創造プロセス



2030年度における経営目標（財務指標・非財務指標）

<財務指標>

収益性	営業利益	1,300億円+α
財務健全性	有利子負債/EBITDA倍率	5倍台
資本効率	ROE	中長期的に7%水準

<非財務指標>

CO2排出量の削減率 (2013年度比) △46%	従業員満足度の継続的向上
鉄道事業における有事故ゼロ	女性管理職比率 10%程度
	女性新規採用者比率 30%以上を継続

14

図 1.1-3 阪急阪神ホールディングスグループの長期ビジョン全体像

1.2 実証の概要

本実証事業は 1.1 章に記載の内容を実現するために、阪神電気鉄道株式会社の芦屋駅から西宮駅区間及び御影駅を実施環境とし調査検討を実施した。

技術実証として、一般的な都市部の鉄道路線(地上区間、高架区間、曲線区間や直線区間)において、線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化及びエリア化の改善・柔軟性向上のための手法について検討した。電波伝搬モデルの精緻化については、実証区間となる鉄道沿線上では線路内と線路外で精緻化の対象パラメータ S 値が異なることが予想されたため、鉄道沿線上における精緻化の対象パラメータ S 値の適正值の設定を実証目標とし検討を行った。エリア化の改善・柔軟性向上については、シミュレーション結果から狭指向性アンテナのみでは他者土地への電波漏洩の抑制が不十分であり、また基地局の境界付近で高速運行する場合、正常にハンドオーバーできない可能性が考えられたことから、線路内のエリア構築方法、線路外への電波漏洩抑制方法、円滑なハンドオーバー実施方法について検討を行った。

課題実証として鉄道事業者の課題解決に寄与するローカル 5G を活用したソリューション(①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化、②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化、③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化)について実証し、その有効性を評価した。各ソリューションについて、機能検証ではスループットや安定性、AI 検知精度などを検証し、運用検証ではユーザである阪神電気鉄道株式会社にてソリューションの満足度や操作の容易性、セキュリティ面での検証などを実施した。効果検証では、異常発生時の状況確認等に係る時間短縮や、業務時間や費用の削減効果などを定量的に検証し、課題解決への寄与度を定性的に検証した。

2. 実証環境の構築

2.1 対象周波数帯

本実証事業においては、ローカル 5G を車地上間通信に活用するため、屋外利用であることと屋外に設置された基地局から列車内への電波の透過性を考慮し、4.8 から 4.9GHz 帯を使用した。

2.2 実施環境

線状の空間におけるローカル 5G の電波伝搬特性等についての検討やローカル 5G 活用モデルの実証を行うため、阪神電気鉄道株式会社の運営する鉄道路線である阪神本線の芦屋駅－西宮駅区間及び御影駅(以下、「実施場所」という)にて実証を行った(図 2.2-1、図 2.2-2)。

本実施場所は、地上区間、高架区間、曲線区間や直線区間等、一般的な都市部の鉄道路線の特徴を多数有しており、線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化及びエリア化の改善・柔軟性向上のための手法を検討するために適した環境であるとともに、課題実証のテーマとしている走行列車と踏切や駅等の地上施設間の通信による安心安全かつ効率的な鉄道運営の実現の検証に際し必要な踏切や駅が多く含まれる区間であるため選定した。なお、本実証事業において選択した実施場所の環境条件は、表 2.2-1 のとおり。

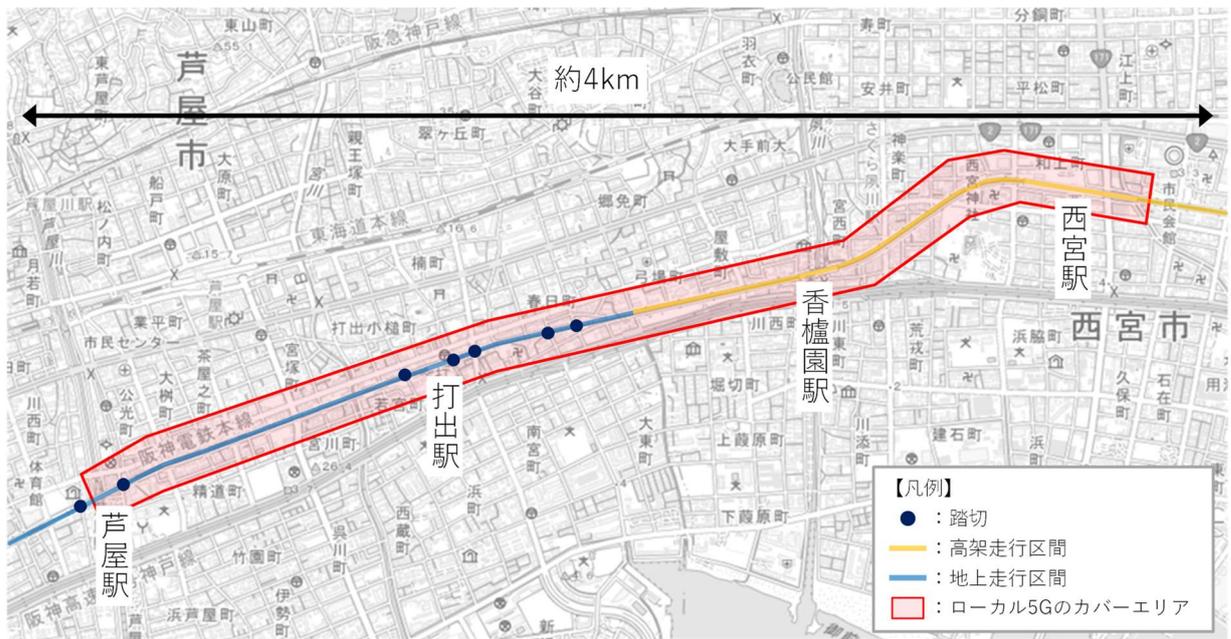


図 2.2-1 芦屋駅－西宮駅区間の周辺地図(地理院地図を加工して作成)

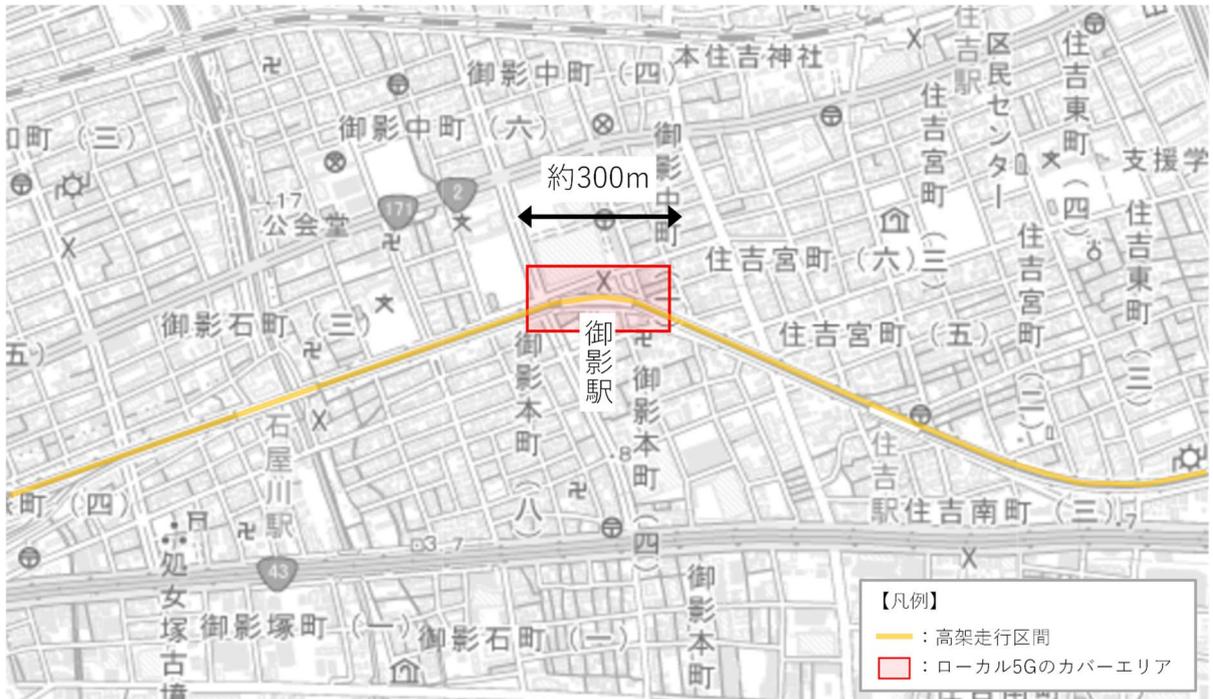


図 2.2-2 御影駅の周辺地図(地理院地図を加工して作成)

表 2.2-1 実施場所の環境条件

項目	選択した環境条件
空間	屋外、半屋外(西宮駅)
地形	平地

2.3 ネットワーク・システム構成

構築したネットワーク・システムの構成を図 2.3-1、各機器の設置場所及び基地局のエリアカバレッジを図 2.3-2、構築スケジュールを図 2.3-3 に示す。調達予定機器の一覧ほか、主要機器の諸元は表 2.3-1 から表 2.3-12 のとおり。効率的にローカル 5G のネットワークを構築するため、阪神電気鉄道株式会社の路線のうち、技術実証及び課題実証を実施するうえで必要な条件(線路形状や踏切、駅)が極力集約している区間を選定した。また、ローカル 5G のコアネットワークから基地局までの光回線については、既に敷設されている物を利用することで構築コストの低減を図った。

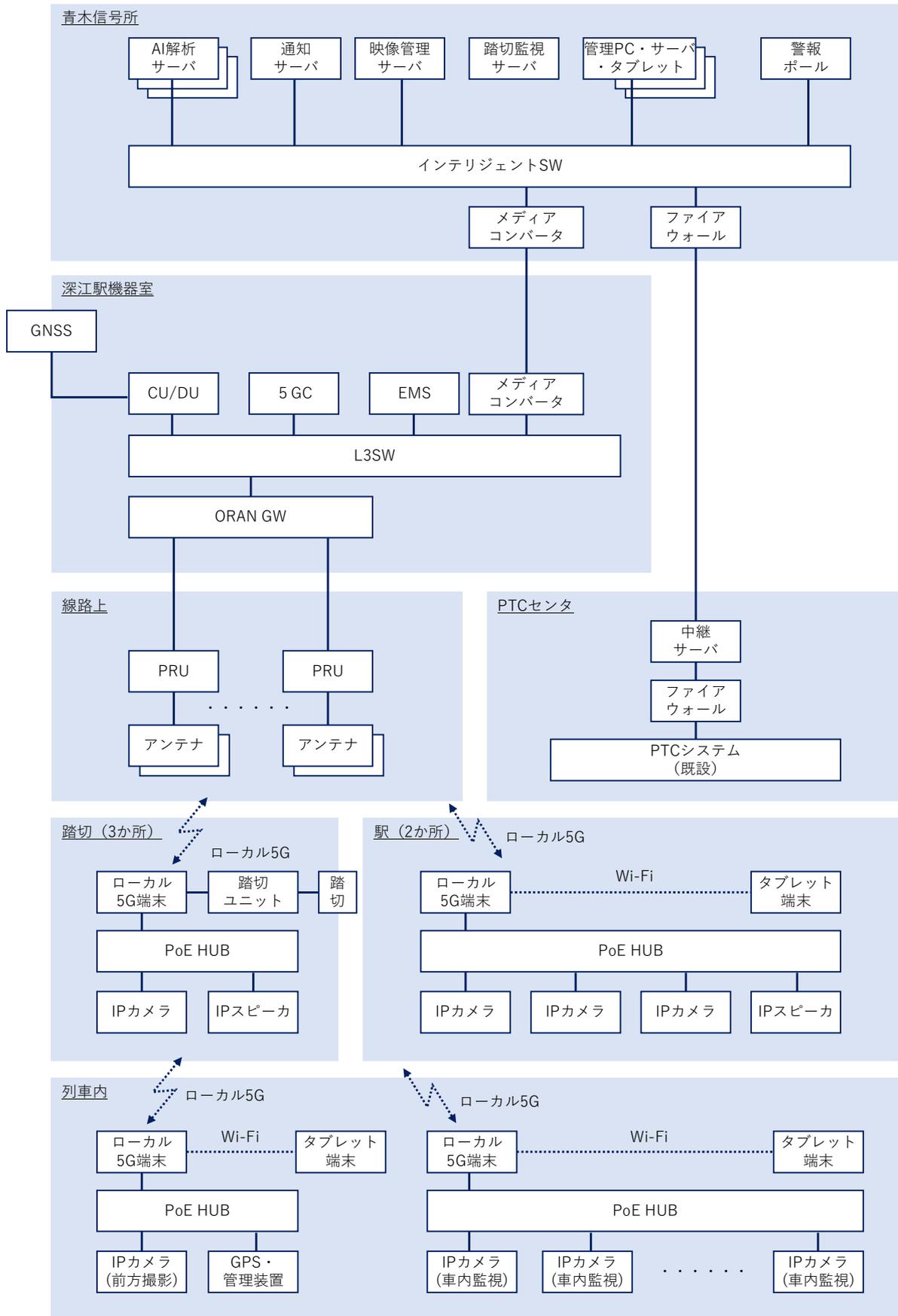


図 2.3-1 システム構成図

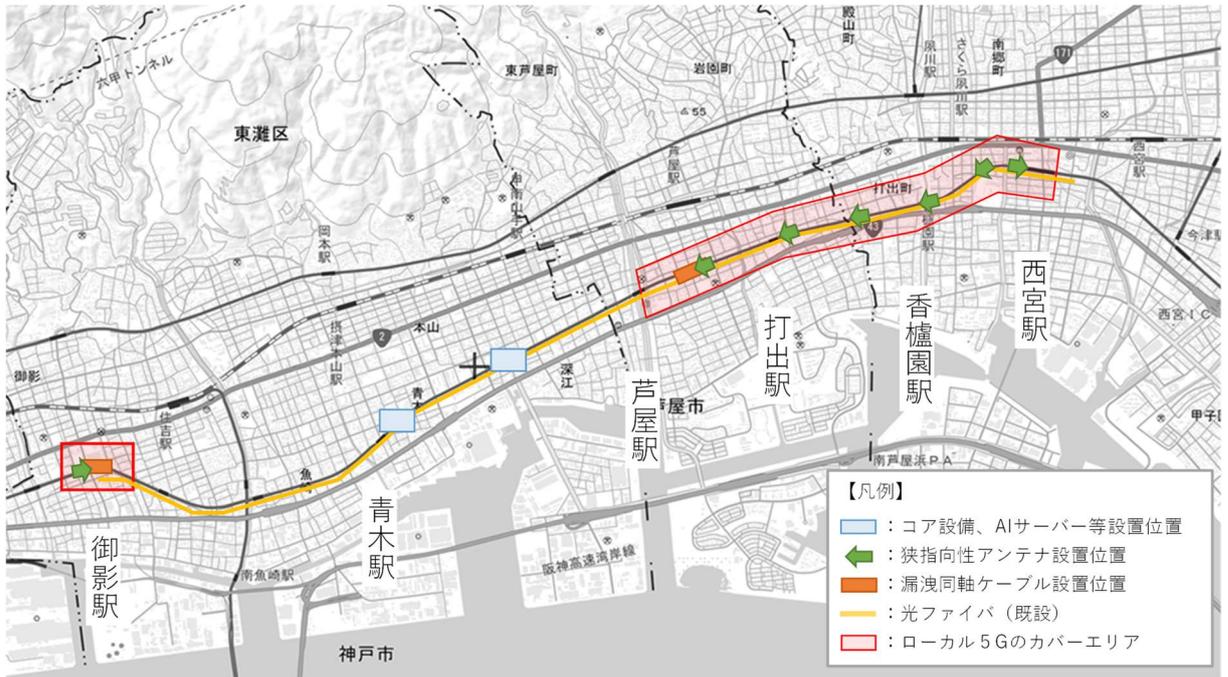


図 2.3-2 各機器の設置場所及びローカル 5G のエリアカバレッジ(地理院地図を加工して作成)

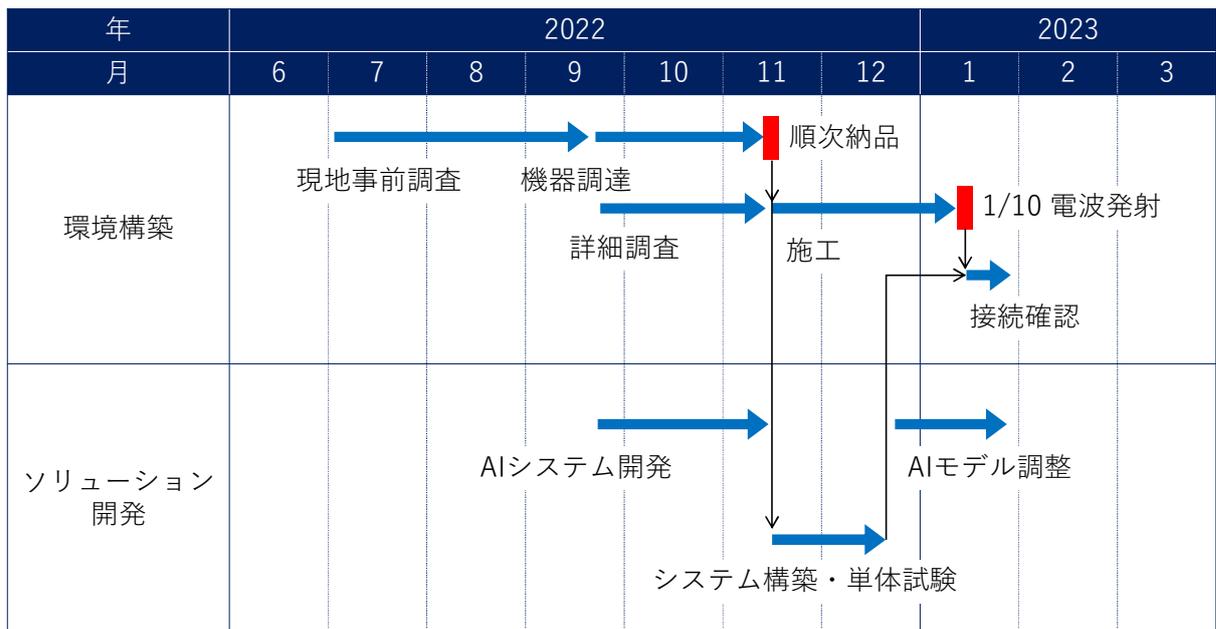


図 2.3-3 システムの構築スケジュール

表 2.3-1 調達予定機器一覧

機器等名	機能・役割	数量	設置形態	調達先
5GC	C-Plane のデータを制御・処理する。UPF 機能(U-Plane のデータを制御・処理する機能)も一体となっている	1	固定	NEC ネットエスアイ
EMS	5G システム全体の管理を行う	1	固定	NEC ネットエスアイ
CU/DU	ローカル 5G 基地局の制御等を行う	1	固定	NEC ネットエスアイ
ORAN GW	複数のローカル 5G 基地局を収容するための集約装置	1	固定	NEC ネットエスアイ
PRU	屋外設置用のローカル 5G 基地局	7	固定	NEC ネットエスアイ
アンテナ	ローカル 5G 基地局用の狭指向性アンテナ(2 台 1 組)	14	固定	日本電気
漏洩同軸ケーブル	ローカル 5G 基地局用の漏洩同軸ケーブル(約 300m)	—	固定	フジクラ・ダイヤケーブル
GNSS アンテナ	基地局間の時刻同期をとる	1	固定	日本電気
5G 端末	カメラ映像、AI 検知結果等の伝送や通信品質の測定を行う	15	固定/可搬	京セラ
L3SW	5G コアネットワークの収容装置	1	固定	日本電気
踏切、ホーム監視用 IP カメラ	踏切内、ホーム上の撮影を行う	9	固定	ダイワボウ情報システム
踏切、ホーム注意喚起用 IP スピーカ	踏切内、ホーム上の人物へ注意喚起のための自動放送を行う	5	固定	TOA
踏切ユニット	踏切の接点信号を IP 変換する	4	固定	アイテック阪急阪神
列車前方撮影用 IP カメラ	巡視点検省人化のための撮影を行う	1	固定	ダイワボウ情報システム
GPS	列車在線位置の追跡を行う	1	固定	ミカサ商事
GPS 管理装置	上記 GPS で取得する位置情報の管理を行う	1	固定	ダイワボウ情報システム
車内監視用 IP カメラ	列車内の撮影を行う	6	固定	アイテック阪急阪神
タブレット端末	乗務員等への危険検知、非常通報ボタンの模擬のために使用	8	可搬	ダイワボウ情報システム

PoE HUB	踏切、駅及び列車内の機器を収容する	7	固定	パナソニックコネク
AI 解析サーバ	IP カメラで撮影された映像をもとに AI 解析を行う	8	固定	サンワテクノス
映像管理サーバ	IP カメラ映像の管理を行う	1	固定	ダイワボウ情報システム
管理 PC	踏切設備等の監視状況の確認や各種作業を行う	2	固定/可搬	ダイワボウ情報システム
管理サーバ	車内防犯カメラの監視状況の確認や作業等を行う	1	固定	ダイワボウ情報システム
踏切監視サーバ	踏切設備の監視を行う	1	固定	ダイワボウ情報システム
NAS	IP カメラで撮影した映像を保存する	1	固定	ダイワボウ情報システム
通知サーバ	AI 解析の結果等をタブレット端末へ通知するための処理を行う	1	固定	日本電気
インテリジェント SW	機器室に設置するサーバ等を収容し 5G コアネットワークと接続する	2	固定	ダイワボウ情報システム
中継サーバ	既設の鉄道システムと本実証事業で構築するシステムの分離を行う	1	固定	日本電気
警報ポール	踏切、ホームで危険を検知した際に注意喚起のため運転指令で明滅させる	1	固定	ダイワボウ情報システム

※ケーブル、サーバラック等の雑材、電源関連機器、ディスプレイ等は記載省略

表 2.3-2 ローカル 5G システム(基地局)の概要

型番	PRU
製造ベンダ	HFR, Inc.
台数	7 台
設置場所	屋外
同期/準同期	同期(PTP による)
UL:DL 比率	1:4
周波数帯	4.7GHz 帯
SA/NSA	SA
UL 周波数	4.8 から 4.9GHz
DL 周波数	
UL 帯域幅	100MHz
DL 帯域幅	
UL 中心周波数	4.85GHz
DL 中心周波数	
UL 変調方式	QPSK/16QAM/64QAM
DL 変調方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
MIMO	4×4MIMO

表 2.3-3 コアネットワークの性能

機種	5GC	CU/DU	ORAN GW
同時接続ユーザ数	10,000	—	—
機器接続数	CU/DU:最大 10 台	ORAN GW:1 台	PRU:最大 24 台

表 2.3-4 端末の概要

外観	
端末数	15
機種	K5G-C-100A
製造ベンダ	京セラ
アンテナ利得	アンテナ 1(Tx/Rx):0.4dBi アンテナ 2(Rx):-0.1dBi アンテナ 3(Rx):+0.1dBi アンテナ 4(Rx):0.0dBi
送信電力	23dBm
対応周波数	n79
インターフェース	IEEE802.11 a/b/g/n/ac/ax USB タイプ C×2 ポート(1 ポートは Ethernet に変換して使用)
電源	AC アダプタ、バッテリー(6,000mAh)
重量	326g
寸法	78×165×27mm
動作温度	+5 から+35℃

表 2.3-5 5GC の機器諸元

外観	
機種	5G vCore
製造ベンダ	HFR, Inc.
インターフェース	1000BASE-T×4 ポート 25GBASE-SR/LR/ER×2 ポート
消費電力	最大 800W
電源	AC100 から 120V
重量	23kg
寸法	446×680×88mm
動作温度	+10 から+35℃

表 2.3-6 EMS の機器諸元

外観	
機種	EMS
製造ベンダ	HFR, Inc.
インターフェース	1000BASE-T×4 ポート
消費電力	最大 800W
電源	AC100 から 120V
重量	23kg
寸法	446×680×88mm
動作温度	+10 から+35℃

表 2.3-7 アンテナの機器諸元

外観	
機種	X25-3545FTD
製造ベンダ	電気興業株式会社
アンテナ利得	19.5dBi
水平面内指向性	約 8 度 ※本実証事業では 2 台 1 組で使用することで電波の合成によりビーム幅を約 8 度としている
垂直面内指向性	約 20 度
偏波面	±45 度偏波
重量	2kg
寸法	200×200×27mm

表 2.3-8 踏切、ホーム監視用 IP カメラの機器諸元

外観	
機種	WV-X1534LNJ
製造ベンダ	パナソニックコネクト株式会社
解像度	1,920×1,080
消費電力	約 11.5W
電源	PoE、DC12V
重量	約 1.7kg
寸法	130×130×337mm
動作温度	-40 から+60℃

表 2.3-9 踏切、ホーム注意喚起用 IP スピーカの機器諸元

外観	
機種	IP-A1SC15
製造ベンダ	TOA 株式会社
出力音圧レベル	112dBm(1W, 1m)
消費電力	最大 22W
電源	PoE 給電
重量	1.4kg
寸法	222×211×276mm
動作温度	-30 から+55℃

表 2.3-10 列車前方撮影用 IP カメラの機器諸元

外観	
機種	WV-S2572LNJ
製造ベンダ	パナソニックコネクスト株式会社
解像度	4,096×2,304
消費電力	最大 12.5W
電源	PoE 給電
重量	1.2kg
寸法	φ154×103mm
動作温度	-40 から+60℃

表 2.3-11 タブレット端末の機器諸元

外観	
機種	Surface Pro 8 LTE
製造ベンダ	Microsoft corporation
OS	Windows10 Pro
電源	AC アダプタ、バッテリー駆動
寸法	287×208×9.3mm

表 2.3-12 AI 解析サーバの機器諸元

外観	
機種	MX1-10FEP-D-C246-IEF-AC300
製造ベンダ	MITAC COMPUTING TECHNOLOGY CORP.
CPU/GPU	Core i7 8700/NVIDIA TeslaT4
消費電力	最大 300W
電源	AC100V
寸法	268×246×128mm

2.4 システム機能・性能・要件

ローカル 5G 基地局に関しては、表 2.3-2 にも示すとおり、下り方向においては最大 1.1Gbps の最大スループットを持つが、本実証事業において構築するシステムのインターフェースは、光回線を除き基本的に 1000BASE-T を採用するため、システム全体の最大スループットは 1Gbps として検討する。また、4.1.2 章で後述する 3 つのソリューション「①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化」、「②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化」、「③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化」について必要とされる通信性能については以下のとおり。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

踏切は各 1 台、ホーム上には各 3 台のカメラを設置するが、撮影条件を表 2.4-1 のとおりとするとカメラ 1 台あたりに必要な伝送帯域は約 6Mbps であるため、踏切においては約 6Mbps、ホームにおいては合計約 18Mbps の伝送帯域が必要な見込みである。また遅延については、検知すべき事象をカメラで撮影してから乗務員用端末で検知結果を表示するまで 1 秒(1,000 ミリ秒)で処理することを目標とするが、カメラでのエンコード処理に 100 ミリ秒、サーバでの AI 解析及び結果表示等の処理に 500 ミリ秒から 700 ミリ秒程度と想定すると、ローカル 5G の通信遅延は 200 ミリ秒以内とする必要がある。

表 2.4-1 地上カメラの撮影条件

解像度	1,920×1,080(フル HD)
フレームレート	30fps
圧縮方式	H.264

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

車両内に設置したカメラの映像及び非常通報装置からの音声を地上係員及び乗務員へ連携する。カメラの撮影条件は、①と同様としてカメラ 1 台あたりに必要な伝送帯域は約 6Mbps である。カメラは車内を死角なく撮影するために 1 車両あたり 3 台設置する。遠隔からの映像閲覧は、指定したカメラ 1 台分のライブ映像がタブレットに伝送される仕様であり、映像閲覧用タブレットごとに上り伝送帯域が 6Mbps 必要となる。また、地上係員だけでなく列車の乗務員からも映像を閲覧することを考えると下り伝送帯域も 6Mbps 必要となり、無線区間として上り下り合計で 12Mbps が最低限必要である。さらに、映像を閲覧する拠点が増えタブレットの台数が増加するとタブレットの台数に比例して、必要な伝送帯域が倍増するため、実装時には大容量の帯域が求められる。なお、音声通信に必要な伝送帯域は 1Mbps 以下である。

表 2.4-2 車内防犯カメラの撮影条件

解像度	1,920×1,080(フル HD)
フレームレート	30fps
圧縮方式	H.264

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

列車前方に設置したカメラの映像を AI 解析用サーバへアップロードする。カメラの撮影条件は、表 2.4-3 とするとカメラ 1 台あたりに必要な伝送帯域は約 40Mbps となる。

表 2.4-3 撮影条件

解像度	4,096×2,304(4K)
フレームレート	60fps
圧縮方式	H.264

2.5 その他

2.5.1 実証システムの拡張性等

ローカル 5G に係る設備については、3GPP に準拠した機器を使用し、システム全体においては、インターネットプロトコル等の一般的な規格に対応した機器を使用する。また、システム・アプリケーションは、ソフトウェアのアップデート等によって将来的な機能拡張にも対応可能である。また、カメラやサーバ類は、市場に流通している一般的な製品を使用することで、入手しやすく横展開しやすい構成とした。

2.5.2 実証システムの安全性確保のための対策

(1) 特定高度情報通信技術活用システム

本実証事業で使用した基地局、コア設備等の機器については、特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律に基づく開発供給計画認定を受けた機器ではないものの、機器ベンダ、メーカへの部品確保に向けた事前調整及び定期的な製造状況の確認により実証期間内で予定通り調達し、環境構築を実施した。また、「情報通信ネットワーク安全・信頼性基準」に則り、EMS によってネットワークの動作状況の監視を行い、故障等を速やかに検知できるよう対策を行い、情報セキュリティ対策として、クラウドサービスの利用やインターネットへの接続は行わず、ローカルネットワークで完結する構成とすることで、システム内外からの攻撃に備えた。なお、実証期間中にサイバーセキュリティを脅かすインシデントは発生していない。

(2) その他の実証システム

カメラ、サーバ等の一部機器については、半導体不足の影響を受け長納期化し調達できない状況となったが、あらかじめ検討していた代替機種を採用することで実証期間内に予定通り環境構築を実施した。また、サイバーセキュリティについては、2.5.2 章(1)と同様の対策を施し、実証期間中にサイバーセキュリティを脅かすインシデントは発生していない。

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(技術実証)

3.1 実証概要

本実施場所は、地上区間、高架区間、曲線区間や直線区間等、一般的な都市部の鉄道路線の特徴を多数有しており、線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化及びエリア化の改善・柔軟性向上のための手法を検討するために適した環境である。

電波伝搬モデルの精緻化に関しては、実証区間となる市街地を走る鉄道沿線上は、「市街地」と「開放地」が入り混じる特殊な環境であり、線路内と線路外では、従来の伝搬損失計算式におけるパラメータS値の適切な値が異なると予想した。本実証事業では、鉄道路線における電波伝搬を測定・評価し、他者土地への電波漏洩も考慮しつつ、電波伝搬モデルの精緻化を行った。

エリア化の改善・柔軟性向上に関しては、鉄道線路上を隙間なくエリア化する場合、複数の基地局を設置し、他者土地への電波漏洩を低減するように場所ごとに最適なアンテナを配置することで、連続的なエリア形成を行うことが考えられる。具体的には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た。本実証事業では、狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルを活用する際の電波伝搬を測定・評価することで、課題実証において検証する各ソリューションをローカル5Gで実現する際の最適なエリア構築方法を検討した。

3.2 実証環境

本実施場所は屋外であり、地上直線区間、高架直線区間、高架曲線区間の3種類の環境がある。各環境下における電波環境への影響としては表3.2-1のとおりであり、線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化及びエリア化の改善・柔軟性向上のための手法を検討するために適した環境である。

図2.5.2-1から図2.5.2-3に技術実証を実施する場所及び使用するシステムを示す。全区間に狭指向性アンテナを設置するとともに、地上直線区間及び高架曲線区間の一部には漏洩同軸ケーブルを設置した。3.3.1章の電波伝搬モデルの精緻化においては、図2.5.2-1で示す狭指向性アンテナのみを対象とし、3.3.2章のエリア化の改善・柔軟性向上においては、図2.5.2-1及び図2.5.2-2で示す狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルを対象とした。

表 3.2-1 実施場所の電波伝搬環境への影響

実施場所		電波伝搬環境への影響	
		線路長手方向	線路短手方向
歴	地上直線区間	電車以外に障害物がない。 エリア算出法で求めるカバーエリアよりも遠くまで電波伝搬する可能性あり。	他者土地の建物が近接している。 エリアの染み出し、当該建物による自己土地への反射の可能性あり。
	高架直線区間		
	高架曲線区間	線路内の延長線上に他者土地の建物が近接している。 エリアの染み出し、当該建物による自己土地への反射の可能性あり。	

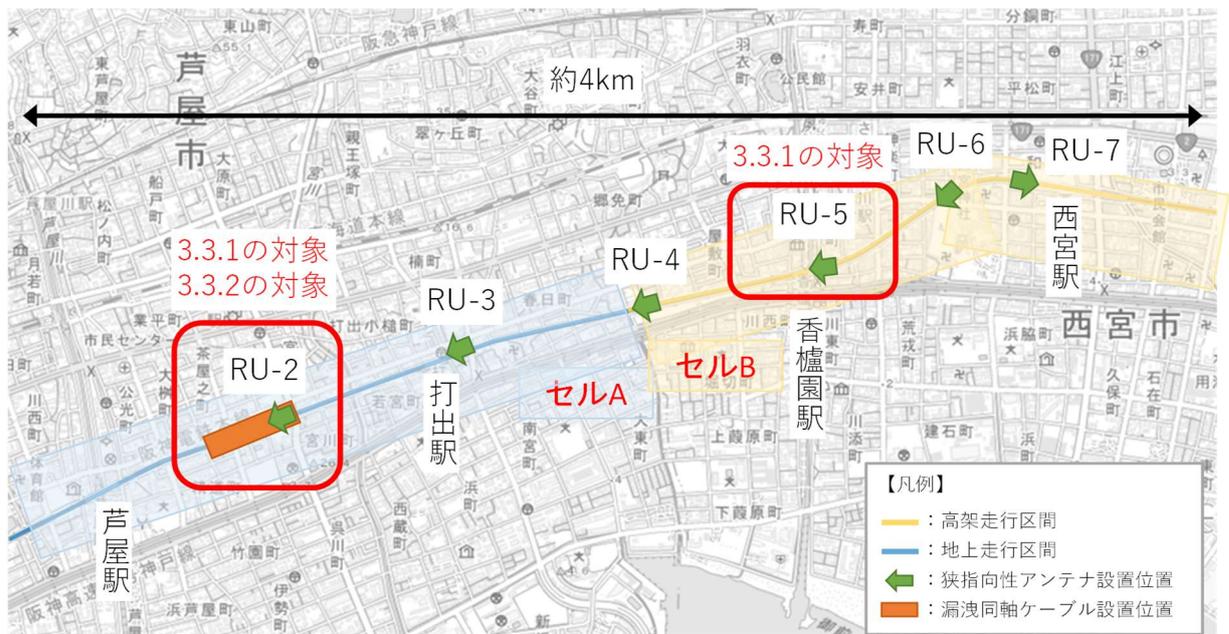




図 2.5.2-2 御影駅の周辺地図(地理院地図を加工して作成)

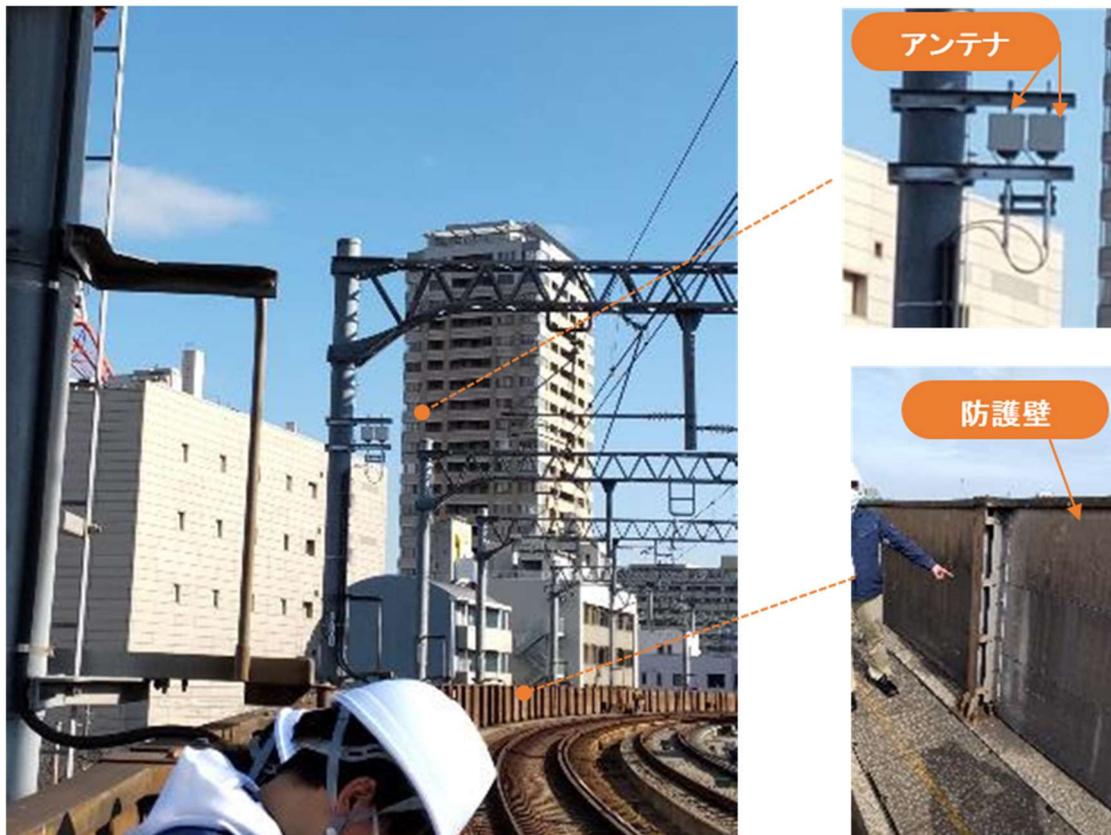


図 2.5.2-3 アンテナ設置例(RU-6)

3.3 実証事項

3.3.1 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

(1) 実証の目的・目標

1) 背景となる技術的課題と実証目的

鉄道線路上でのローカル 5G の利用においては、地上/高架区間、直線/曲線区間等の特徴を有した、線状の空間における電波伝搬モデルの精緻化が必要となる。また、従来の伝搬損失計算式におけるパラメータ S 値について、実証区間となる市街地を走る鉄道沿線上は、「市街地」と「開放地」が入り混じる特殊な環境であり、線路内と線路外では、適切な値が異なることが予想される。

本技術実証では、鉄道線路上における上記の各区間での電波伝搬を測定・評価し、ローカル 5G のエリア構築における他者土地への電波漏洩軽減を主眼に置き、電波伝搬モデルの精緻化を行った。

2) 実証目標

本実証環境において、「市街地」と「開放地」が入り混じる特殊な環境であることを考慮し、表 3.3.1-1 のとおり、精緻化対象パラメータは S 値とした。

表 3.3.1-1 精緻化対象パラメータと本実証環境との対応関係

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	本実証環境との対応関係
4.7GHz帯	K	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 	精緻化の対象としない。 理由:実施する線路区間において、急な斜面は存在せず、川は存在するものの水面からは約 10m 離れており、水面の影響はないものと推定されるため。
	S	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 	精緻化の対象とする。 理由:鉄道沿線上は、「市街地」と「開放地」が入り混じる特殊な環境であり、線路内と線路外では、適切な値が異なることが予想されるため。

	R	壁面の材質・厚さ別の定量化	・基地局設置場所が屋内である	精緻化対象としない。 理由:以下の2点 ・基地局を屋外に設置するため。 ・図 3.2-3 の通り、線路上に防護壁(線路から高さ約1.5m)はあるが、アンテナ設置位置(線路から高さ約5m)が高いため、防護壁による影響はないと推定しているため。
28GHz帯	hr	選択基準の明確化	・基地局設置場所が屋外である ・基地局が見通せない測定点を確保できる	4.7GHz帯を利用するため、精緻化の対象としない。
	R	壁面の材質・厚さ別の定量化	・基地局設置場所が屋内である	4.7GHz帯を利用するため、精緻化の対象としない。

3) 過年度技術実証からの発展性・新規性

本技術実証と類似性のある過年度技術実証として、以下の2件があげられる。

- ・「遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現」(令和2年度)
- ・「ローカル5Gを活用した鉄道駅における線路巡視業務・運転支援業務の高度化」(令和3年度)

過年度実証では鉄道駅においてローカル5Gのエリア構築を行っているが、他者土地への電波漏洩の観点から鉄道線路上でのエリア構築を今後の検討課題としてあげている。過年度実証との差異や新規性は以下のとおりである。

- ・ローカル5Gのエリア構築を駅構内に限定せず、鉄道線路上において、電波伝搬モデルの精緻化を行う点。
- ・他者土地への電波漏洩を低減するために、ローカル5Gのエリア構築に狭指向性アンテナを用いる点。

(2) 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 3.3.1-3 と図 3.3.1-4 の通り、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 3.3.1-1 と図 3.3.1-2 を作図できる。

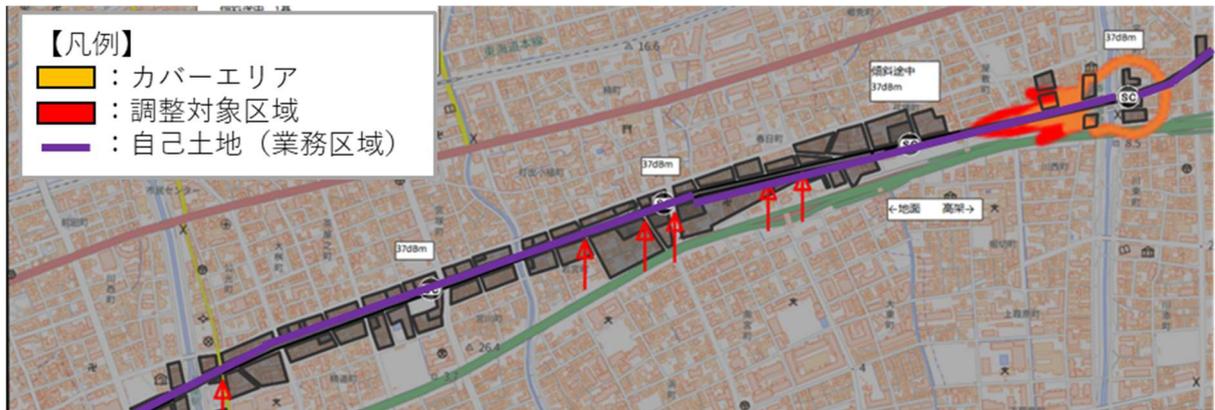


図 3.3.1-1 RU-5 における算出法エリア図①(地理院地図を加工して作成)



図 3.3.1-2 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 3.3.1-3 と図 3.3.1-4 を作図できる。線路長手方向を全て開放値扱い、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全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 3.3.1-3 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 3.3.1-4 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)

(3) 評価・検証項目

測定器(アンリツ社製エリアテスタ ML8780A/ML8781A)を使用して受信電力(SS-RSRP)を測定した。SS-RSRP は 1 リソースエレメントあたりの SSS(Secondary Synchronization Signal) の受信電力であり、基地局からの電波の受信レベルを評価する基本的なパラメータである。

(4) 評価・検証方法

受信電力(SS-RSRP)の測定地点に関しては、各アンテナの測定地点数が 30 以上となるよう、表 3.3.1-2 の地点で測定を行った。特に RU-2 においては、列車が在線する場合における線路外への電波漏洩の影響を評価すべく、列車を在線させた状態でも測定を行った。測定器(アンリツ社製エリアテスタ ML8780A/ML8781A)を使用し、以下の条件を満たす方法で測定し、データを処理した。

- ・定在波の影響を避けるため、1つの測定点において、 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)、そこで得られた全てのサンプルを統計処理した。
- ・測定点あたり、合計 1,000 サンプルの測定結果に対し、中央値、 σ 、上位 10% 値、下位 10% 値を算出した。

表 3.3.1-2 アンテナごとの測定地点

測定対象 (状態)	測定地点	
	線路・駅 (最低 10 地点)	線路外(最低 20 地点)
RU-2、RU-5 (列車が在線していない状態)	調整対象区域の閾値が実測される地点を特定し、その地点とアンテナ設置地点の間で10地点以上測定した。	エリア算出法による作図でサイドローブの影響が顕著な各方向において、エリア算出法に定めるカバーエリア及び調整対象区域の閾値がそれぞれ実測される地点を含む2か所以上の地点で測定する。また、電波漏洩が発生するおそれのある地点については、精緻な実測のカバーエリア図、干渉調整区域図が得られるように、測定点を柔軟に設定し、追加測定を行った。
RU-2 (列車が在線している状態)	—	列車を在線させることで電波漏洩への影響が発生すると推定した地点で測定を行った。

(5) 実証結果及び考察

1) 受信電力の測定によるカバーエリア・調整対象区域の検証

電波伝搬モデルの精緻化のために、RU-2、RU-5の2か所のエリアにおいて受信電力を測定した。基地局や、その周辺環境の写真を図 3.3.1-5、図 3.3.1-6 に示す。



図 3.3.1-5 RU-2 の周辺環境(測定点 ID208 より RU-2 方向を撮影)



図 3.3.1-6 RU-5 の周辺環境(測定点 ID408 より RU-5 方向を撮影)

RU-2、RU-5 のカバーエリア端、調整対象区域端を実際に測定した地点を図 3.3.1-7 から図 3.3.1-10 に示す。なお、図 3.3.1-7 から図 3.3.1-10 は、測定点をプロットした緑色点に加え、基地局座標(黄色点)、仮説値におけるカバーエリア(赤色タイル)、調整対象区域(水色タイル)を合わせて描画している。測定箇所を選定は、RU-2 と RU-5 の線路内・線路外それぞれにおける S の仮説値を用いてエリア算出式で算出した結果をもとに選定した。実測においては、仮説値のカバーエリア端、調整対象区域端の測定に加え、実際のカバーエリア端、調整対象区域端の特定も行った。表 3.3.1-3 から表 3.3.1-4 に RU-2 について、表 3.3.1-5 から表 3.3.1-6 に RU-5 において測定点の情報を示す。



図 3.3.1-7 RU-2 測定点(線路外)(地理院地図を加工して作成)

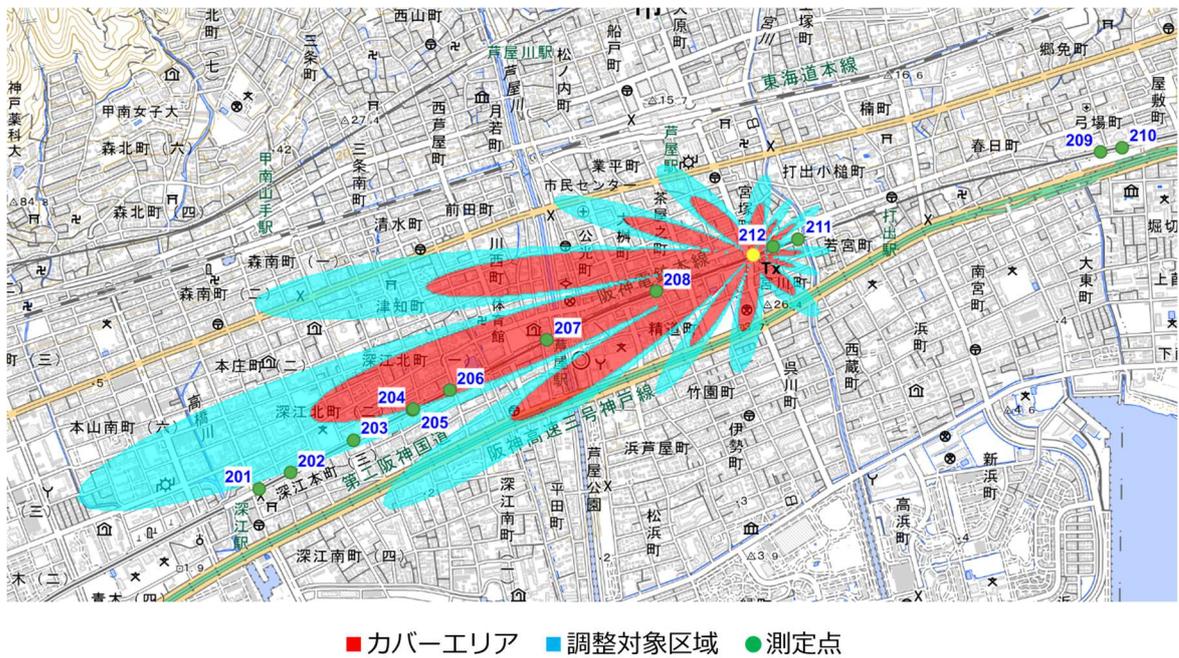


図 3.3.1-8 RU-2 測定点(線路内)(地理院地図を加工して作成)

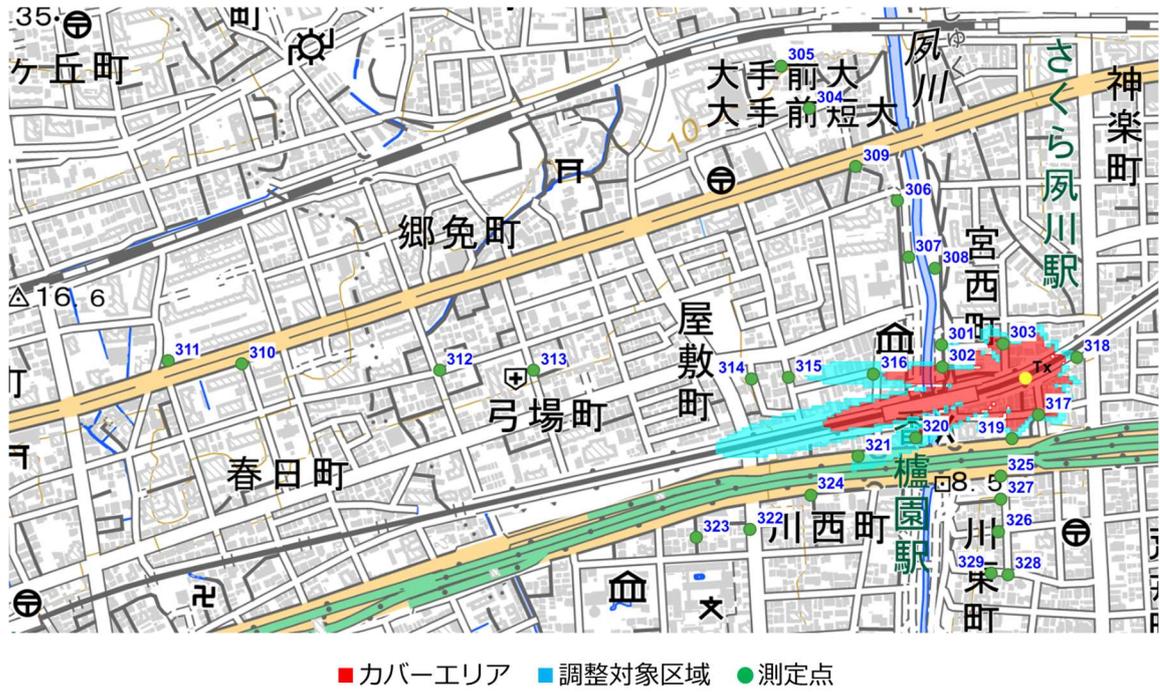


図 3.3.1-9 RU-5 測定点(線路内)(地理院地図を加工して作成)

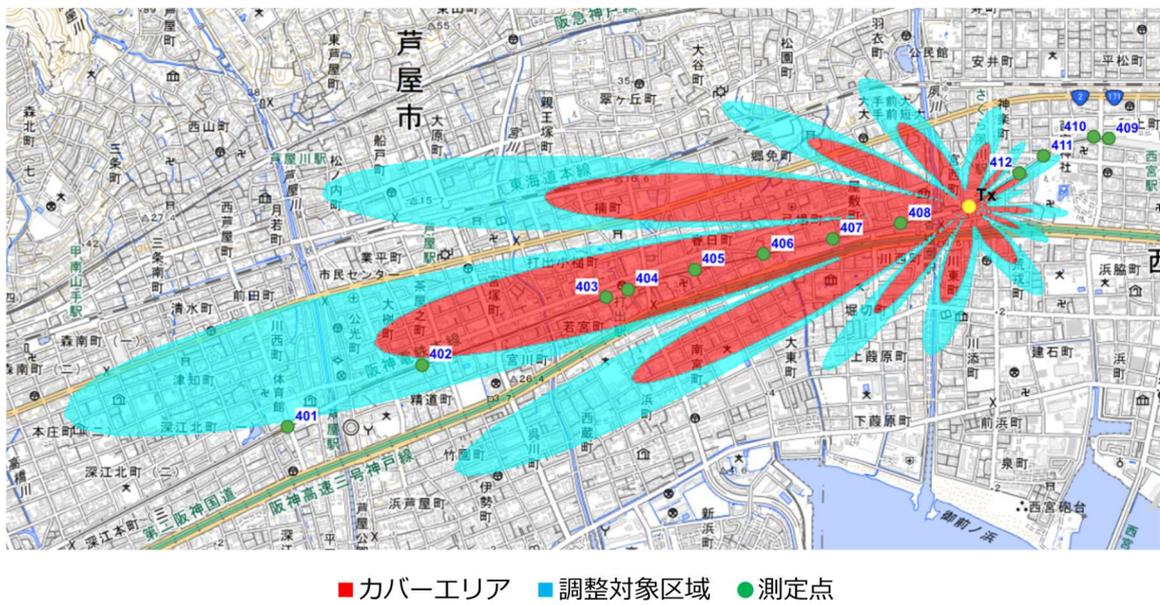


図 3.3.1-10 RU-5 測定点(線路内)(地理院地図を加工して作成)

表 3.3.1-3 RU-2 測定点(線路外)の測定点情報

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]	測定点 標高 [m]	端末 (測定器) アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
101	138.8	138.6	5.3	10.5	7.1	1.5	1
102	211.3	211.2	5.3	10.5	7.7	1.5	1
103	69.4	69.0	5.3	10.5	6.8	1.5	1
104	81.7	81.4	5.3	10.5	7.1	1.5	1
105	59.3	58.8	5.3	10.5	6.1	1.5	1
106	63.6	63.1	5.3	10.5	6.1	1.5	1
107	66.3	65.6	5.3	10.5	4.8	1.5	1
108	70.7	70.1	5.3	10.5	5.0	1.5	1
109	68.2	67.4	5.3	10.5	4.1	1.5	0
110	76.3	75.6	5.3	10.5	4.0	1.5	0
111	130.0	129.7	5.3	10.5	5.4	1.5	0
112	192.3	192.1	5.3	10.5	5.8	1.5	1
113	255.5	255.3	5.3	10.5	3.4	1.5	1
114	361.4	361.2	5.3	10.5	2.4	1.5	1
115	315.0	315.0	5.3	10.5	10.3	1.5	1
116	404.6	404.6	5.3	10.5	10.8	1.5	1
117	349.6	349.6	5.3	10.5	8.4	1.5	1
118	363.1	363.1	5.3	10.5	8.6	1.5	1
119	475.3	475.3	5.3	10.5	7.9	1.5	1
120	495.0	495.0	5.3	10.5	8.1	1.5	1
121	490.4	490.3	5.3	10.5	8.0	1.5	1
122	252.2	252.1	5.3	10.5	8.8	1.5	1
123	93.9	93.5	5.3	10.5	6.2	1.5	1
124	68.1	67.4	5.3	10.5	5.0	1.5	1
125	145.9	145.5	5.3	10.5	3.7	1.5	1
126	188.1	187.9	5.3	10.5	6.1	1.5	1
127	125.5	125.4	5.3	10.5	7.4	1.5	1

表 3.3.1-4 RU-2 測定点(線路内)の測定点情報

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
201	1861.1	1861.1	5.3	10.5	19.6	1.5	1
202	1741.9	1741.9	5.3	10.5	14.9	1.5	1
203	1500.7	1500.7	5.3	10.5	13.3	1.5	1
204	1274.3	1274.3	5.3	10.5	12.2	1.5	1
205	1270.0	1270.0	5.3	10.5	12.2	1.5	1
206	1131.2	1131.2	5.3	10.5	12.1	1.5	1
207	760.9	760.9	5.3	10.5	18.6	1.5	1
208	353.7	353.7	5.3	10.5	13.6	1.5	0
209	1230.8	1230.8	5.3	10.5	9.6	1.5	1
210	1305.6	1305.6	5.3	10.5	9.6	1.5	1
211	162.2	162.0	5.3	10.5	7.7	1.5	0
212	71.9	71.8	5.3	10.5	11.3	1.5	0

表 3.3.1-5 RU-5 測定点(線路外)の測定点情報

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
301	164.3	164.3	5.0	10.0	10.8	1.5	1
302	157.6	157.6	5.0	10.0	9.8	1.5	0
303	88.6	88.1	5.0	10.0	3.9	1.5	0
304	499.2	499.2	5.0	10.0	7.7	1.5	1
305	568.3	568.3	5.0	10.0	11.0	1.5	1
306	447.0	447.0	5.0	10.0	10.6	1.5	1
307	261.5	261.5	5.0	10.0	10.4	1.5	1
308	223.9	223.9	5.0	10.0	10.7	1.5	1
309	398.1	398.1	5.0	10.0	9.3	1.5	1
310	1106.9	1106.9	5.0	10.0	12.1	1.5	1
311	1207.3	1207.3	5.0	10.0	12.6	1.5	1
312	838.7	838.7	5.0	10.0	6.2	1.5	1
313	711.7	711.6	5.0	10.0	4.5	1.5	1
314	415.2	415.1	5.0	10.0	3.2	1.5	1
315	366.1	365.9	5.0	10.0	3.5	1.5	1
316	250.1	249.9	5.0	10.0	4.1	1.5	1
317	57.8	56.9	5.0	10.0	3.8	1.5	1
318	39.3	38.3	5.0	10.0	4.5	1.5	0
319	104.1	103.6	5.0	10.0	3.9	1.5	1
320	209.6	209.5	5.0	10.0	8.7	1.5	1
321	291.7	291.5	5.0	10.0	3.4	1.5	1
322	465.9	465.7	5.0	10.0	2.2	1.5	1
323	537.1	537.0	5.0	10.0	1.9	1.5	1
324	371.3	371.1	5.0	10.0	2.8	1.5	1
325	155.2	154.9	5.0	10.0	3.4	1.5	1
326	224.5	224.3	5.0	10.0	3.2	1.5	1
327	182.4	182.1	5.0	10.0	2.9	1.5	1
328	276.8	276.6	5.0	10.0	2.6	1.5	1
329	281.7	281.6	5.0	10.0	3.1	1.5	1

表 3.3.1-6 RU-5 測定点(線路内)の測定点情報

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
401	2835.9	2835.9	5.0	10.0	20.3	1.5	1
402	2264.4	2264.4	5.0	10.0	13.4	1.5	1
403	1503.7	1503.7	5.0	10.0	9.8	1.5	1
404	1410.9	1410.9	5.0	10.0	9.2	1.5	1
405	1140.1	1140.1	5.0	10.0	6.6	1.5	1
406	864.8	864.8	5.0	10.0	8.0	1.5	1
407	589.4	589.4	5.0	10.0	12.3	1.5	1
408	316.4	316.4	5.0	10.0	16.3	1.5	1
409	567.1	567.1	5.0	10.0	15.9	1.5	1
410	520.1	520.1	5.0	10.0	16.3	1.5	1
411	317.6	317.6	5.0	10.0	16.2	1.5	1
412	201.8	201.8	5.0	10.0	16.1	1.5	0

図 3.3.1-7 から図 3.3.1-10 に示すカバーエリア端と調整対象区域端の実際の受信電力を測定し、エリア算出式と比較した。その結果を表 3.3.1-7 から表 3.3.1-10 に示す。

表 3.3.1-7 エリア算出式と実測値の受信電力の比較(RU-2 線路外)

測定点ID	算出式による 受信電力 [dBm]	実測値 [dBm]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
101	-106.2	-115.1	-115.1	3.6	-110.3	-120.0
102	-112.8	-116.6	-116.6	3.2	-112.5	-121.0
103	-109.0	-102.8	-102.9	3.3	-98.6	-107.7
104	-118.0	-103.3	-103.4	2.3	-100.7	-106.4
105	-113.9	-97.5	-97.9	2.8	-94.2	-101.9
106	-115.0	-102.6	-102.6	2.7	-99.2	-106.1
107	-115.5	-107.5	-106.8	4.2	-100.1	-111.7
108	-113.6	-114.3	-114.4	2.3	-111.3	-118.1
109	-110.1	-94.6	-94.9	2.5	-92.5	-98.2
110	-113.8	-97.4	-97.7	4.4	-92.5	-103.8
111	-110.3	-82.1	-82.5	2.9	-79.2	-86.3
112	-113.9	-99.2	-101.1	4.6	-96.7	-109.0
113	-150.7	-118.7	-118.8	2.0	-116.5	-121.5
114	-158.5	-124.8	-125.1	3.7	-120.7	-130.0
115	-156.9	-117.8	-118.4	2.8	-115.6	-122.8
116	-161.6	-128.3	-129.1	3.9	-124.9	-134.4
117	-122.9	-119.9	-120.3	2.8	-116.7	-124.0
118	-126.9	-127.6	-128.5	4.2	-123.9	-134.5
119	-127.2	-121.0	-121.4	3.1	-117.8	-125.9
120	-127.4	-126.7	-126.5	2.6	-122.9	-129.4
121	-128.1	-119.9	-120.3	2.7	-117.1	-124.2
122	-152.1	-113.4	-113.6	2.0	-111.1	-116.1
123	-133.7	-107.9	-108.0	2.1	-105.4	-110.7
124	-112.3	-114.2	-114.1	2.5	-110.7	-117.1
125	-152.2	-114.6	-114.6	2.7	-110.9	-117.9
126	-113.8	-92.7	-93.3	4.3	-88.3	-99.3
127	-120.8	-110.0	-110.0	2.5	-106.9	-112.9

表 3.3.1-8 エリア算出式と実測値の受信電力の比較(RU-2 線路内)

測定点ID	算出式による 受信電力 [dBm]	実測値 [dBm]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
201	-113.8	-124.4	-124.3	1.8	-121.7	-126.3
202	-112.4	-123.4	-123.6	2.5	-120.7	-126.5
203	-109.3	-121.7	-121.9	2.0	-119.5	-124.4
204	-105.8	-120.3	-120.5	2.0	-118.1	-123.1
205	-105.7	-118.3	-118.5	1.9	-116.1	-121.1
206	-103.2	-114.8	-114.5	1.7	-111.8	-116.6
207	-95.0	-107.8	-107.8	3.1	-103.7	-111.5
208	-82.2	-83.7	-84.5	4.1	-79.8	-90.5
209	-148.8	-121.8	-122.0	2.0	-119.6	-124.5
210	-149.7	-123.9	-124.4	3.0	-121.5	-127.7
211	-116.9	-86.3	-86.1	2.3	-83.2	-89.0
212	-106.7	-80.2	-79.9	1.8	-77.2	-82.1

表 3.3.1-9 エリア算出式と実測値の受信電力の比較(RU-5 線路外)

測定点ID	算出式による 受信電力 [dBm]	実測値 [dBm]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
301	-131.1	-107.1	-107.3	2.8	-104.0	-111.1
302	-112.3	-99.1	-99.5	2.8	-96.6	-102.9
303	-136.2	-97.7	-97.9	2.5	-94.6	-100.7
304	-146.9	測定不可(-143dBm未満)				
305	-148.5	測定不可(-143dBm未満)				
306	-168.9	-126.0	-126.0	2.8	-122.1	-129.4
307	-152.7	-121.3	-122.0	3.8	-117.6	-127.8
308	-140.6	-117.5	-117.7	1.7	-115.7	-120.2
309	-143.9	測定不可(-143dBm未満)				
310	-138.0	測定不可(-143dBm未満)				
311	-139.4	測定不可(-143dBm未満)				
312	-133.9	-134.3	-134.7	3.0	-131.2	-139.0
313	-131.3	-125.8	-126.0	3.0	-122.3	-129.7
314	-123.6	-120.7	-121.2	3.4	-117.3	-125.5
315	-121.4	-128.7	-129.0	3.4	-124.7	-133.1
316	-115.4	-122.4	-122.6	3.2	-118.7	-127.2
317	-121.9	-97.2	-97.5	2.2	-95.1	-100.8
318	-91.3	-90.0	-90.4	2.8	-87.1	-94.2
319	-123.2	-99.9	-99.9	2.4	-96.6	-102.9
320	-122.6	-97.2	-97.8	4.0	-92.9	-103.8
321	-134.8	-108.8	-109.0	4.3	-103.4	-114.8
322	-126.8	-121.7	-122.0	2.5	-119.1	-125.5
323	-132.4	-127.5	-127.8	3.4	-123.9	-132.0
324	-124.1	-118.7	-118.6	2.0	-116.2	-121.3
325	-166.9	-111.9	-112.0	2.1	-109.6	-115.0
326	-139.2	-126.9	-127.4	3.3	-123.6	-132.2
327	-145.2	-119.5	-119.8	2.7	-116.7	-123.5
328	-139.2	-111.4	-111.6	3.6	-107.1	-116.4
329	-140.5	-126.3	-126.8	3.0	-123.7	-130.9

表 3.3.1-10 エリア算出式と実測値の受信電力の比較(RU-5 線路内)

測定点ID	算出式による 受信電力 [dBm]	実測値 [dBm]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
401	-118.9	測定不可(-143dBm未満)				
402	-112.5	測定不可(-143dBm未満)				
403	-104.8	-126.1	-126.3	3.2	-122.5	-130.1
404	-103.7	-119.6	-119.8	2.3	-116.8	-122.8
405	-100.5	-101.3	-101.9	3.7	-97.6	-106.8
406	-96.3	-102.9	-103.1	4.2	-97.4	-108.9
407	-90.5	-98.9	-99.2	3.2	-95.5	-103.8
408	-81.2	-79.4	-79.5	2.5	-76.3	-82.8
409	-123.4	-124.5	-124.6	2.2	-121.7	-127.4
410	-123.2	-119.0	-119.1	2.0	-116.7	-122.1
411	-148.0	-99.7	-99.4	2.1	-96.3	-102.0
412	-126.0	-95.0	-94.7	1.6	-92.3	-96.5

実測のカバーエリア端、調整対象区域端を地図上にプロットした図と、基地局からの距離を図 3.3.1-11 から図 3.3.1-14 に示す。また、各測定箇所における精緻化条件と精緻化前の S 値、RMSE の結果を表 3.3.1-11 示す。

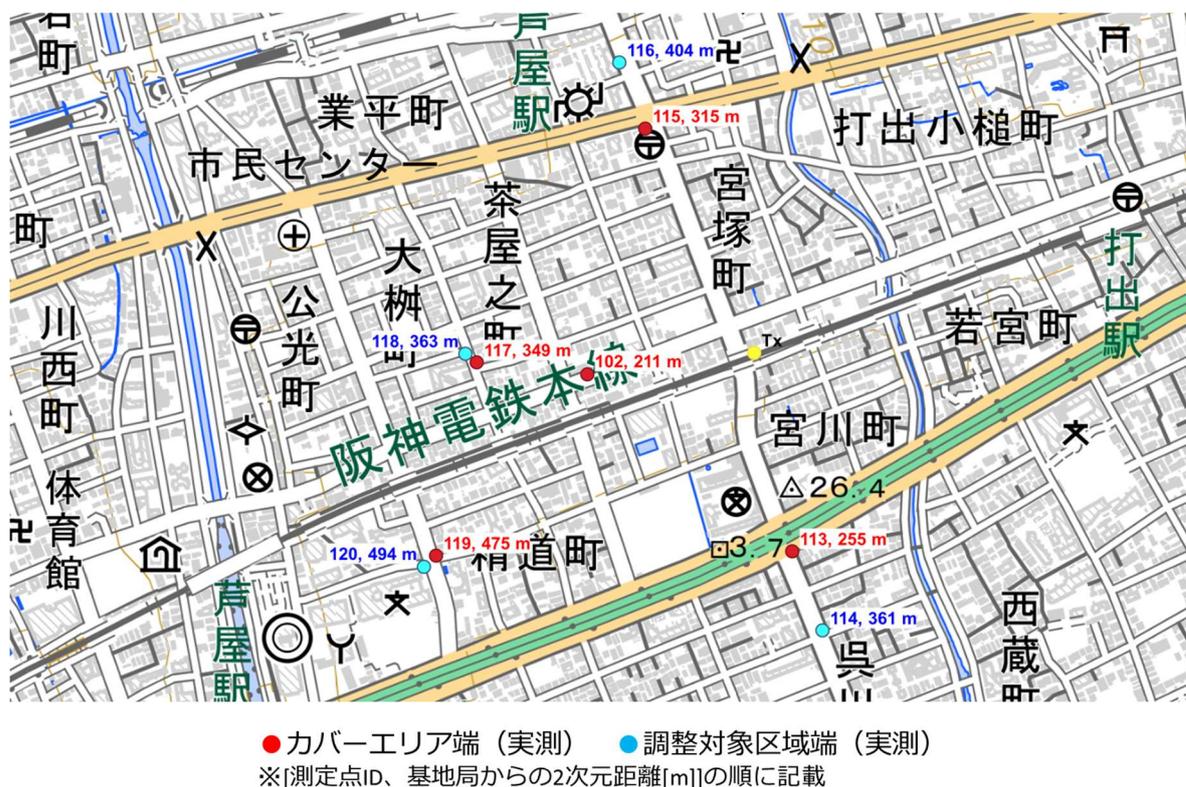


図 3.3.1-11 (RU-2 線路外)実測におけるカバーエリア端、調整対象区域端と基地局からの距離 (測定点 ID, 距離の順に記載)(地理院地図を加工して作成)



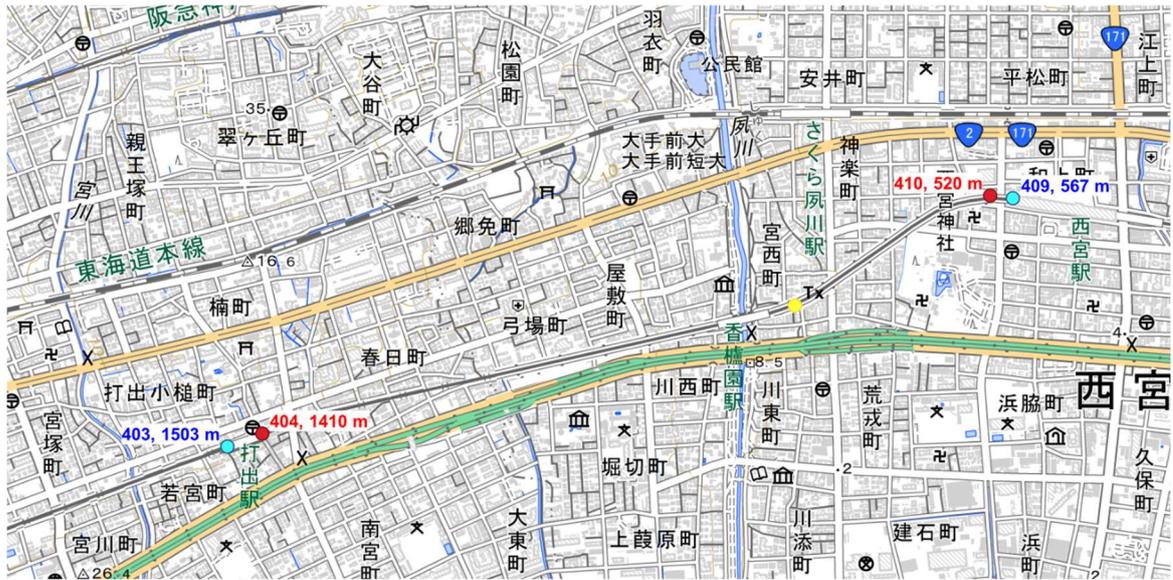
●カバーエリア端 (実測) ●調整対象区域端 (実測)
 ※[測定点ID、基地局からの二次元距離[m]]の順に記載

図 3.3.1-12 (RU-2 線路内)実測におけるカバーエリア端、調整対象区域端と基地局からの距離 (測定点 ID, 距離の順に記載)(地理院地図を加工して作成)



●カバーエリア端 (実測) ●調整対象区域端 (実測)
 ※[測定点ID、基地局からの二次元距離[m]]の順に記載

図 3.3.1-13 (RU-5 線路外)実測におけるカバーエリア端、調整対象区域端と基地局からの距離 (測定点 ID, 距離の順に記載)(地理院地図を加工して作成)



●カバーエリア端 (実測) ●調整対象区域端 (実測)
 ※[測定点ID, 基地局からの2次元距離[m]]の順に記載

図 3.3.1-14 (RU-5 線路内)実測におけるカバーエリア端、調整対象区域端と基地局からの距離 (測定点 ID, 距離の順に記載) (地理院地図を加工して作成)

表 3.3.1-11 精緻化条件と精緻化前の S 値、RMSE の結果

測定	箇所 影響要因	条件	S [dB]	精緻化前の実測値 との RMSE[dB]
1	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	0	20.55
2	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	32.5	18.47
3	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	0	23.36
4	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	32.5	20.34

RU-2、RU-5 の線路内(仮説値:開放地、S=32.5)においては、アンテナのメインローブの方向(前方)においてカバーエリア、調整対象区域の傾向が概ね一致していることを確認した。一方、アンテナのメインローブと逆方向(アンテナ後方)においては仮説値のエリアマップよりもさらに後方へ電波が伝搬していることを確認した。

RU-2、RU-5 の線路外(仮説値:市街地、S=0.0)においては、仮説値のエリアマップよりも広範囲に電波が伝搬していることを確認した。今回実証した環境は、2 階建て以上の家屋が密集しているエリアであるが、S 値を精緻化すると、市街地の値よりも遥かに大きい値となる。これより、市街地の仮説値である S=0.0 では、カバーエリアを過小評価しているため、特に今回実証したような線状の特殊環境においてはこの値を見直す余地があると考えられる。また、今回実証したような線状の環境においては線路内に開放値が存在するため、線路外の市街地の電波伝搬状況において S 値を別に設定する方が良い可能性も考えられる。電波伝搬状況については、3)におけるレイトレースシミュレーションの結果を含めて考察する。

2) 電波伝搬モデルの精緻化

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)に分けており、図 3.3.1-7 から図 3.3.1-10 の測定点において実施している。

精緻化に用いた式を式(3.3.1-1)、式(3.3.1-2)示す。S 値の精緻化にあたり、式(3.3.1-1)により、各測定点 i の実測の伝搬損失 $L_{mes.}(i)$ と、精緻化パラメータ S の値に依存する算出式の伝搬損失 $L_{pred.}(i, S)$ から計算できる E が最小となる S 値を Microsoft Excel のソルバー機能により求めている。なお、式(3.3.1-2)は実測値の伝搬損失の式であり、 P_r は受信電力、 P_t は給電線損失を考慮した送信電力、 G_t は送信アンテナ利得、 G_r は受信アンテナ利得である。

$$E = \sum_i \{L_{pred.}(i, S) - L_{mes.}\}^2 \quad (3.3.1-1)$$

$$L_{mes.} = -(P_r - G_t - G_r - P_t) \quad (3.3.1-2)$$

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 3.3.1-12 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 3.3.1-15 から図 3.3.1-18 に、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 3.3.1-19 から図 3.3.1-22 に示す。

表 3.3.1-12 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

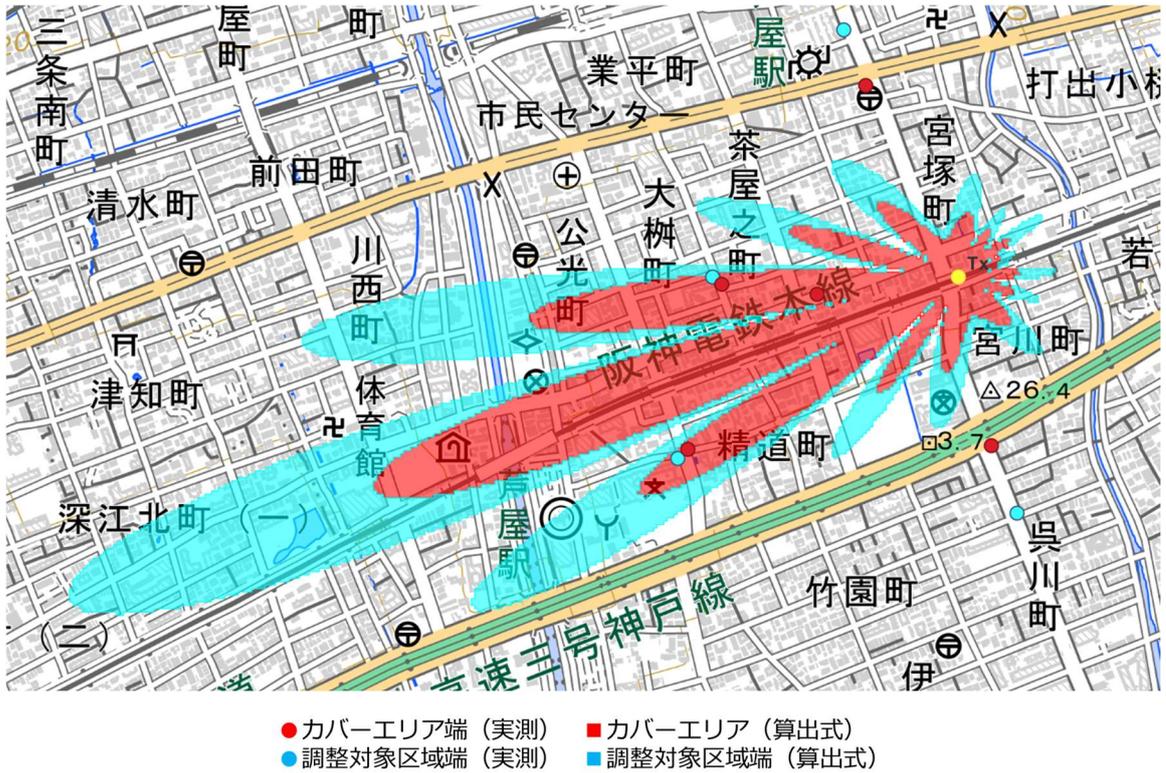


図 3.3.1-15 RU-2(線路外)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域
 (地理院地図を加工して作成)

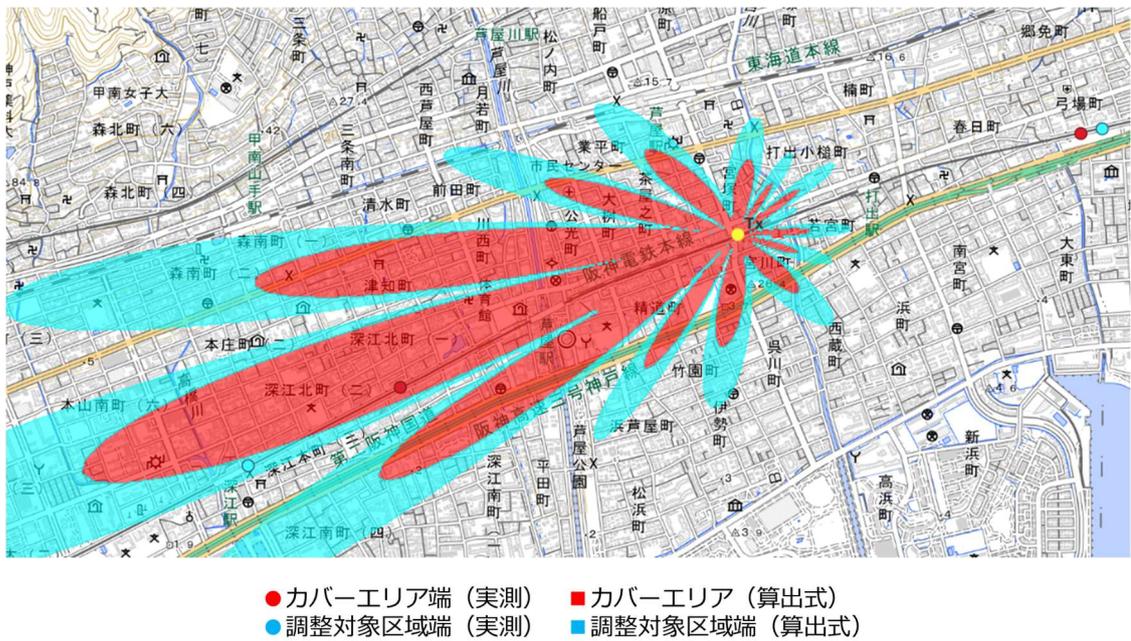


図 3.3.1-16 RU-2(線路内)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域
 (地理院地図を加工して作成)

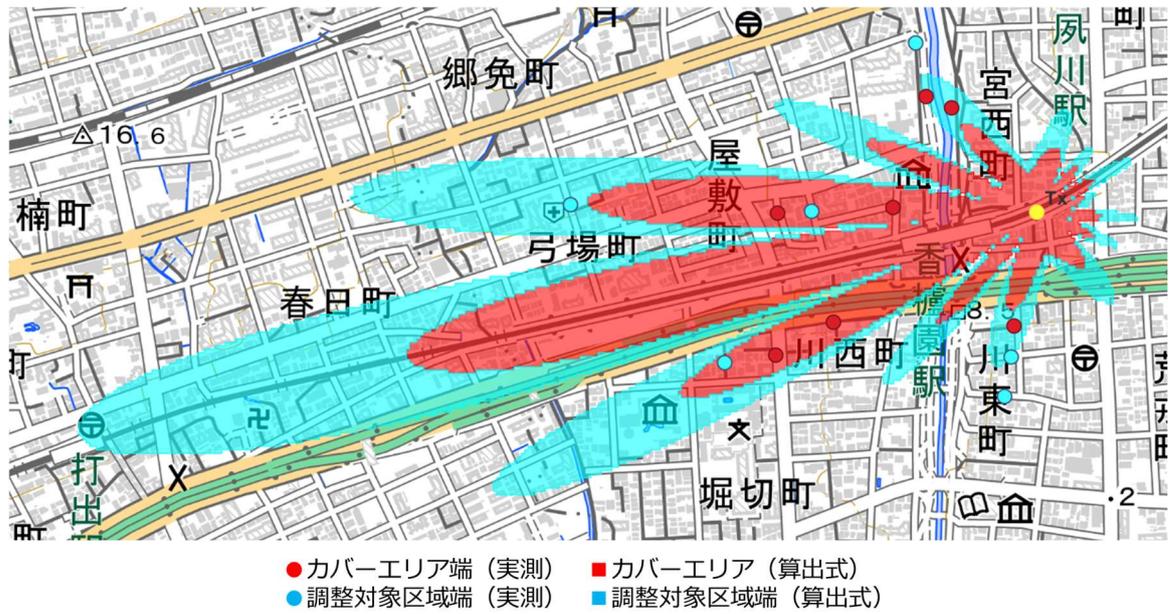


図 3.3.1-17 RU-5(線路外)精緻化後のカバリア、調整対象区域
(地理院地図を加工して作成)

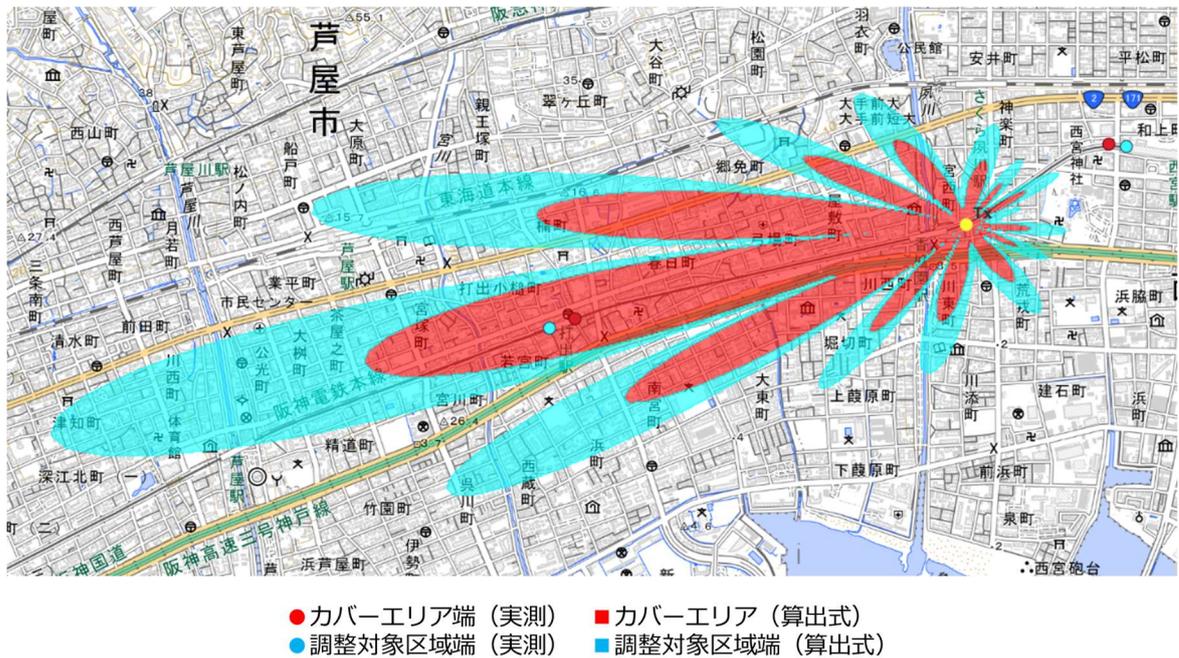


図 3.3.1-18 RU-5(線路内)精緻化後のカバリア、調整対象区域
(地理院地図を加工して作成)

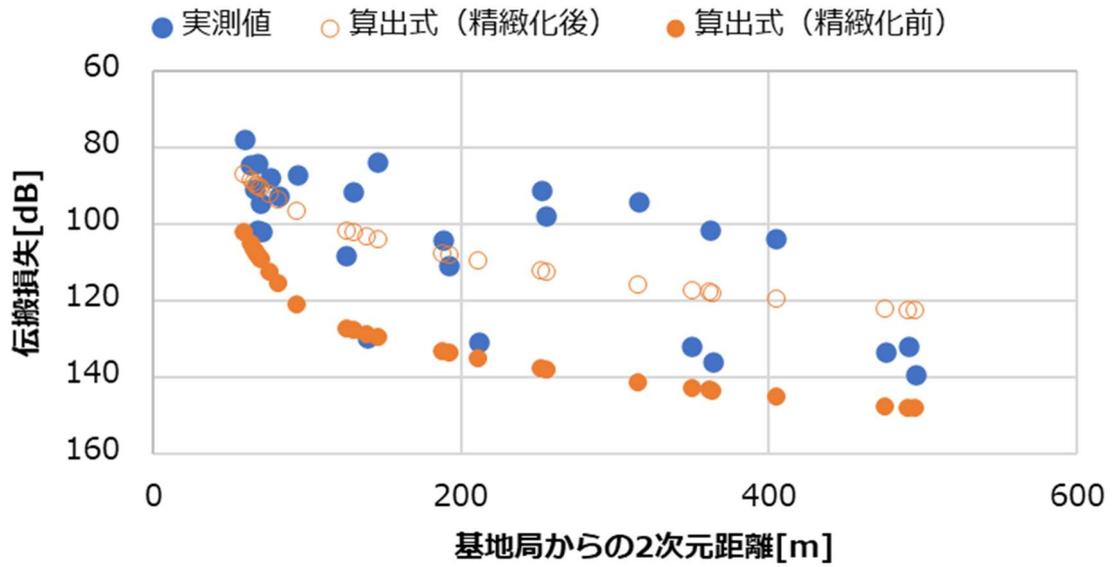


図 3.3.1-19 RU-2(線路外)精緻化前後の伝搬損失の比較

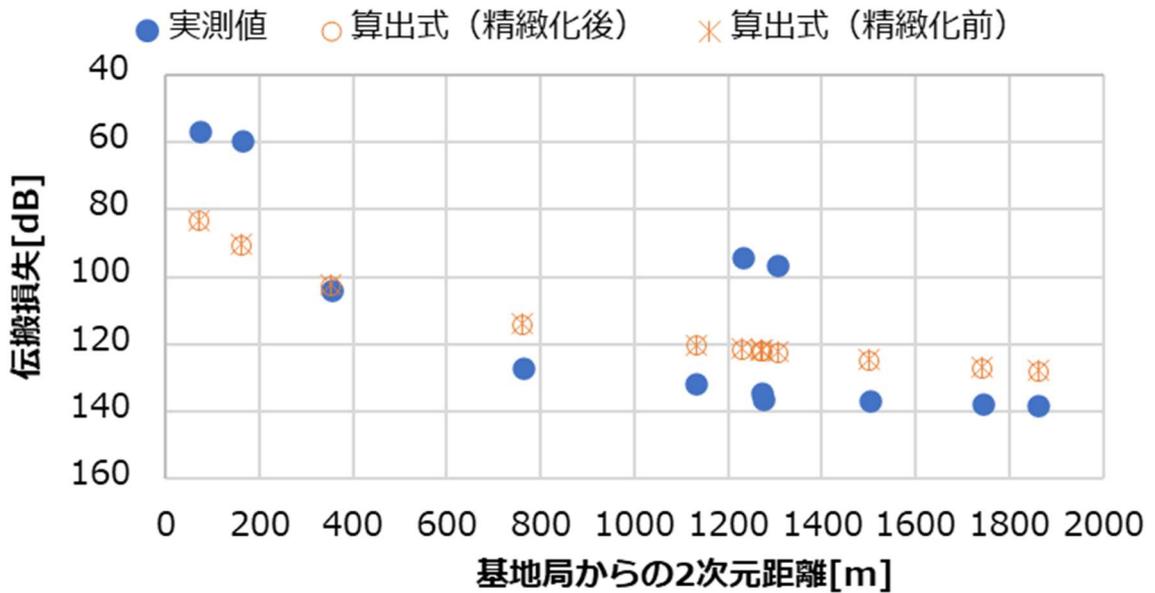


図 3.3.1-20 RU-2(線路内)精緻化前後の伝搬損失の比較

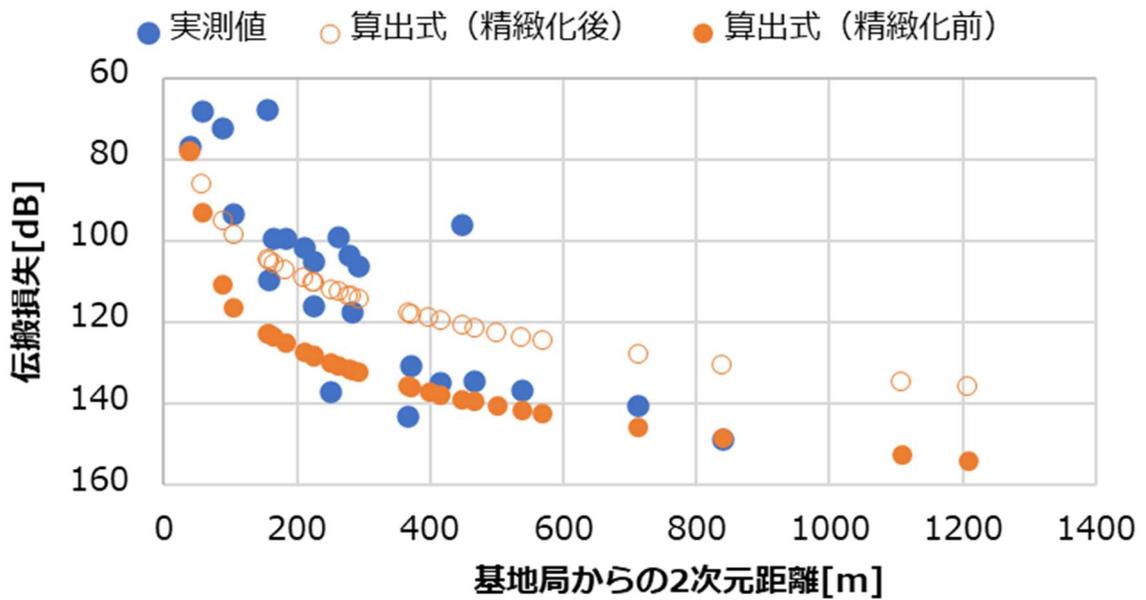


図 3.3.1-21 RU-5(線路外)精緻化前後の伝搬損失の比較

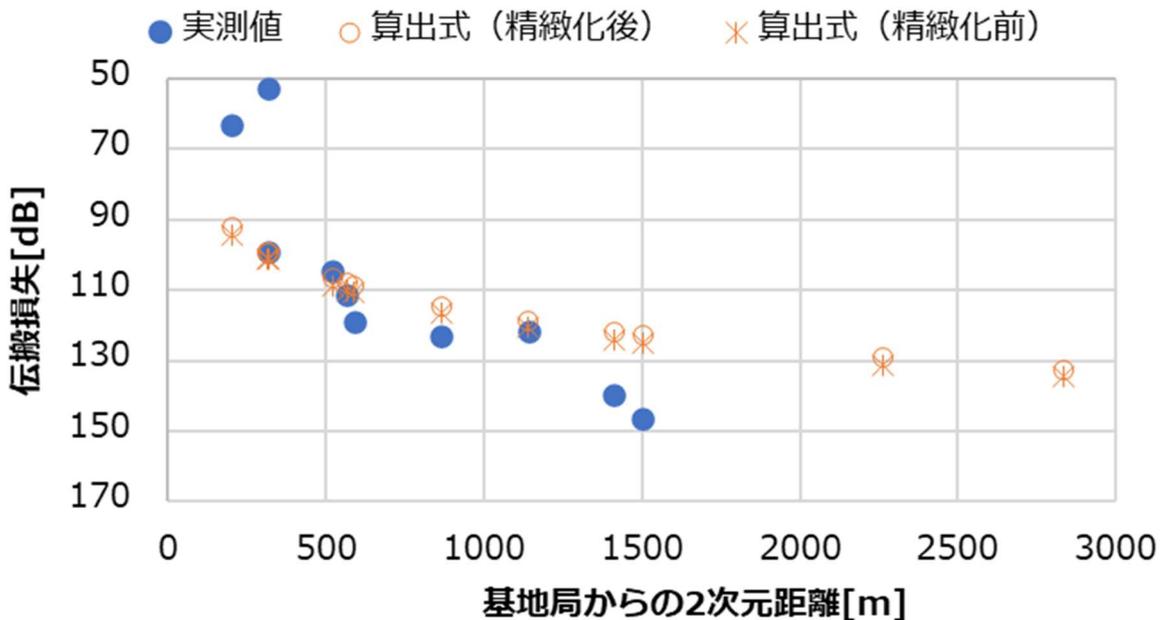


図 3.3.1-22 RU-5(線路内)精緻化前後の伝搬損失の比較

図 3.3.1-21(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 3.3.1-19 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、図 3.3.1-7 における測定点 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 3.3.1-20(RU-2、線路内)、図 3.3.1-22(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、表 3.3.1-12 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 3.3.1-13 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 3.3.1-23 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できることを示した。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 3.3.1-26 に示す。

RU-2、RU-5 の線路内において、アンテナ後方はバックローブに加え、メインローブから出た電波の反射波による影響が顕著であり、エリア算出法ではこの反射波を適切に表現できないと考えたため、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 3.3.1-24、図 3.3.1-25 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 3.3.1-27、図 3.3.1-28 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良く精緻化できることを示した。

以上から、線路内と線路外で精緻化後の S 値が異なるため、線路内と線路外では異なる S 値を採用する方が良いと考える。しかし、これらの結果は一環境の実測から算出した S 値であるため、より多くの環境の実測値から統計的に S 値を導く必要があると考える。

表 3.3.1-13 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

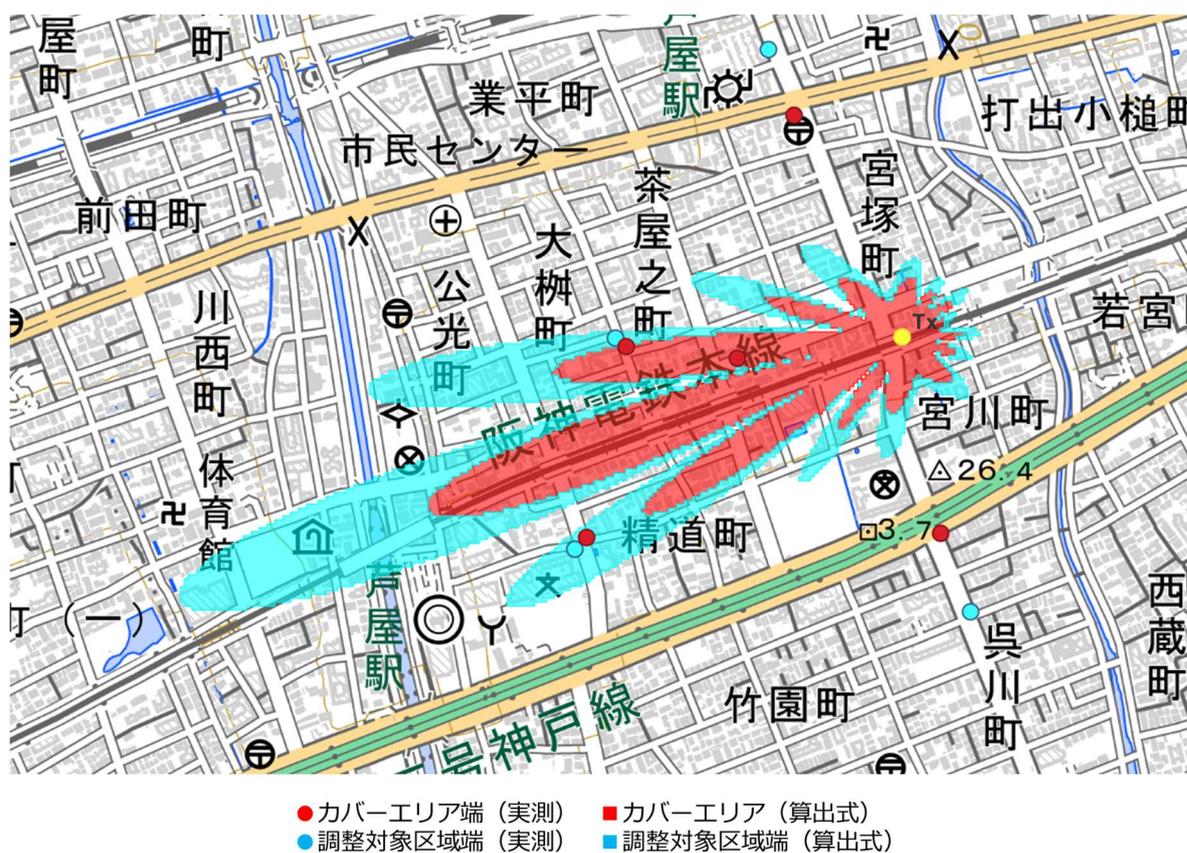


図 3.3.1-23 RU-2(線路外、基地局から南北の通りの測定点を除いて精緻化、 $S = 12.59$)
精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)

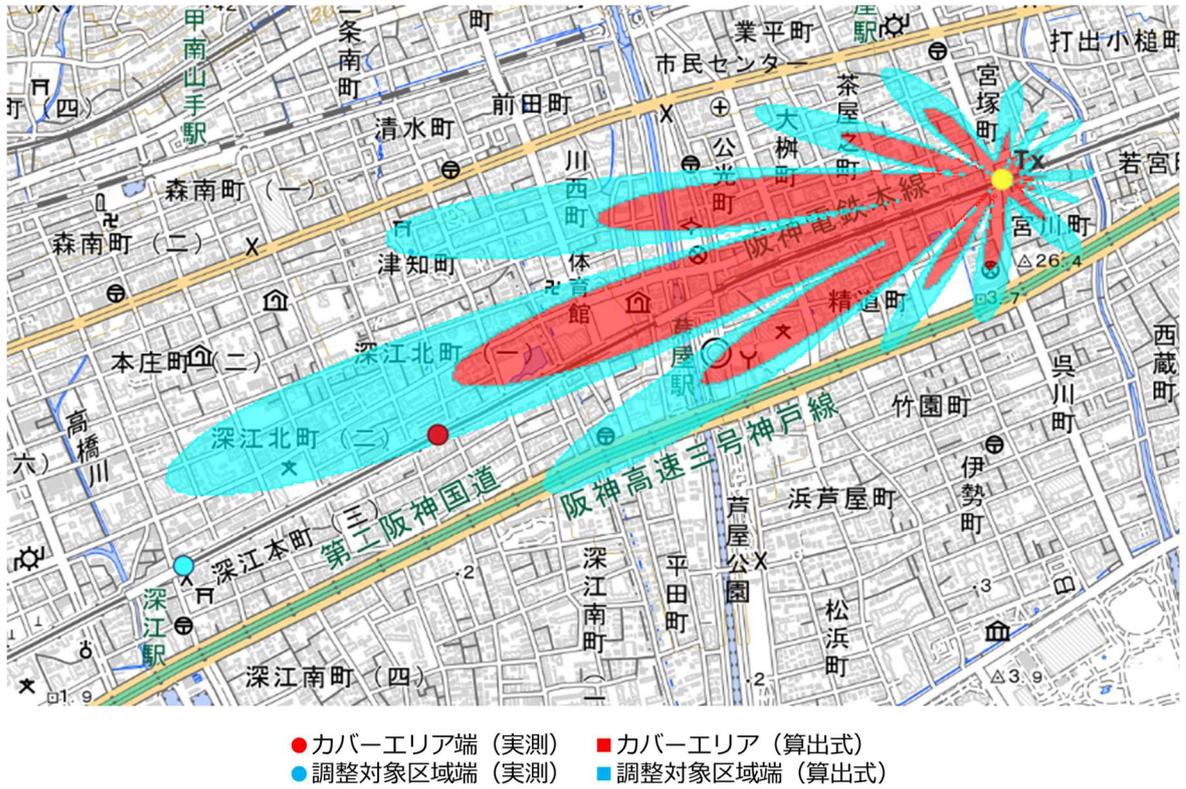


図 3.3.1-24 RU-2(アンテナ指向方向の測定点のみで精緻化、 $S = 21.63$)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)

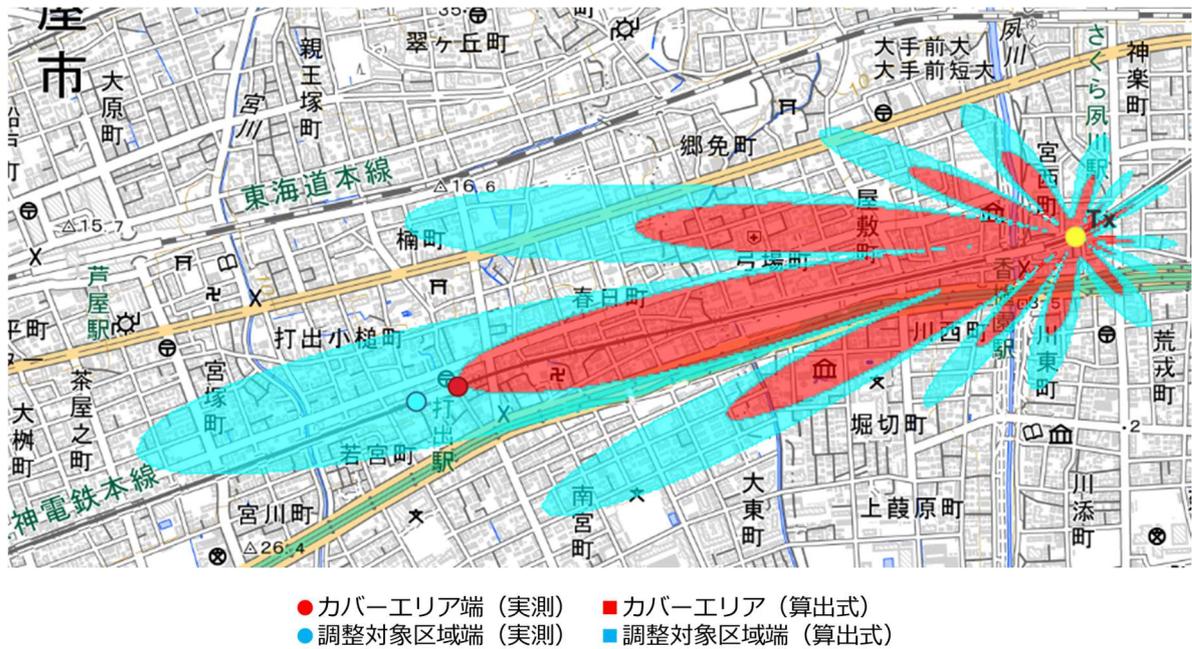


図 3.3.1-25 RU-5(アンテナ前方の測定点のみで精緻化、 $S = 23.68$)精緻化後のカバーエリア、調整対象区域(地理院地図を加工して作成)

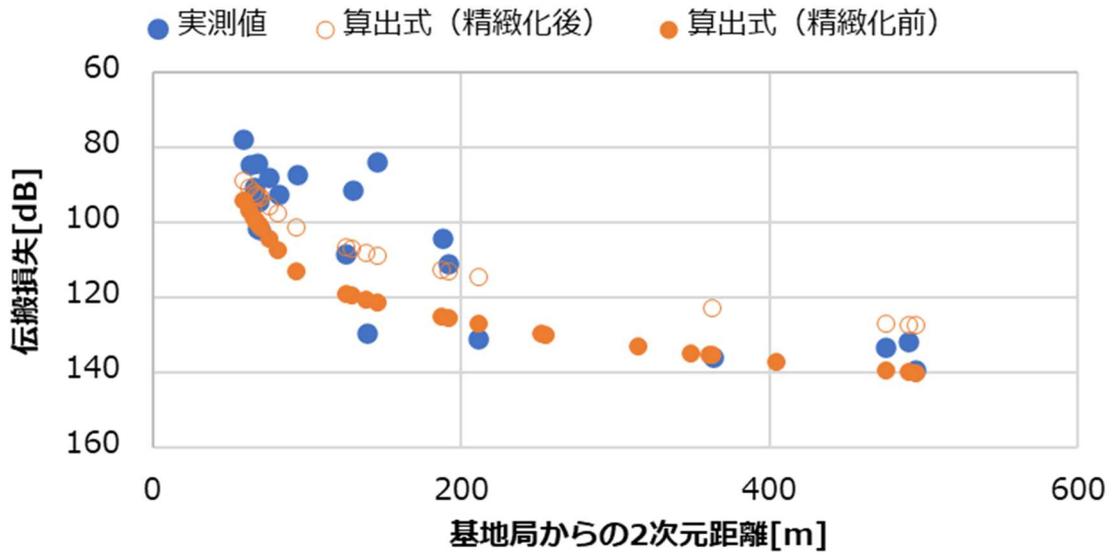


図 3.3.1-26 RU-2(線路外、基地局から南北の通りの測定点を除いて精緻化)精緻化前後の差

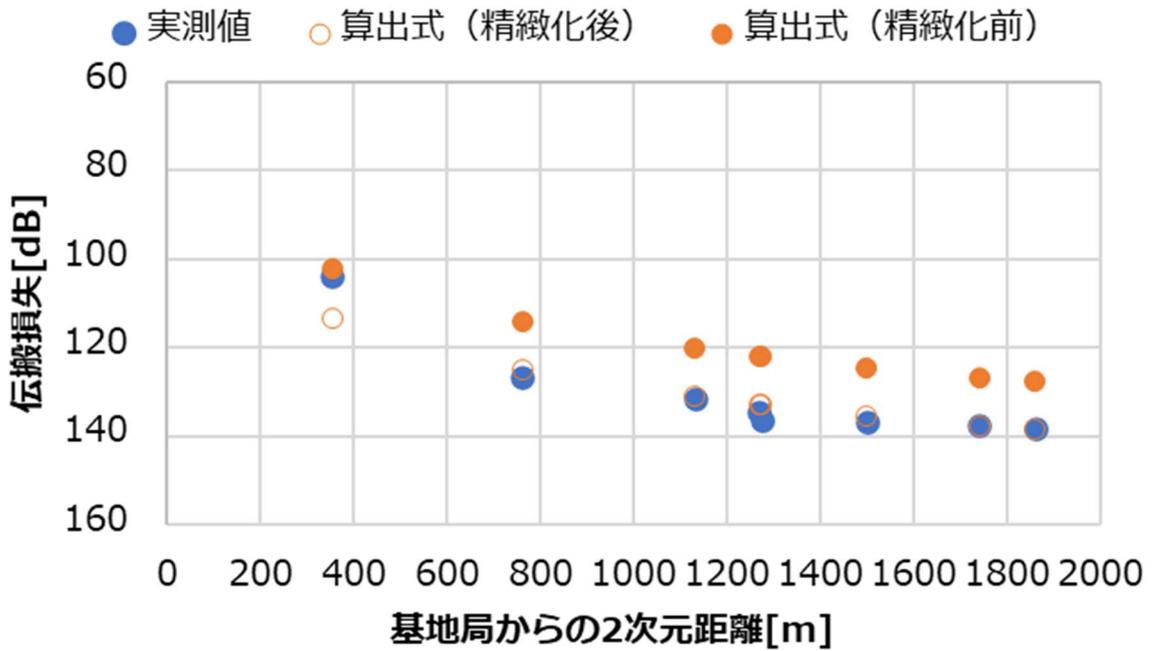


図 3.3.1-27 RU-2(アンテナ前方の測定点のみで精緻化)精緻化前後の差

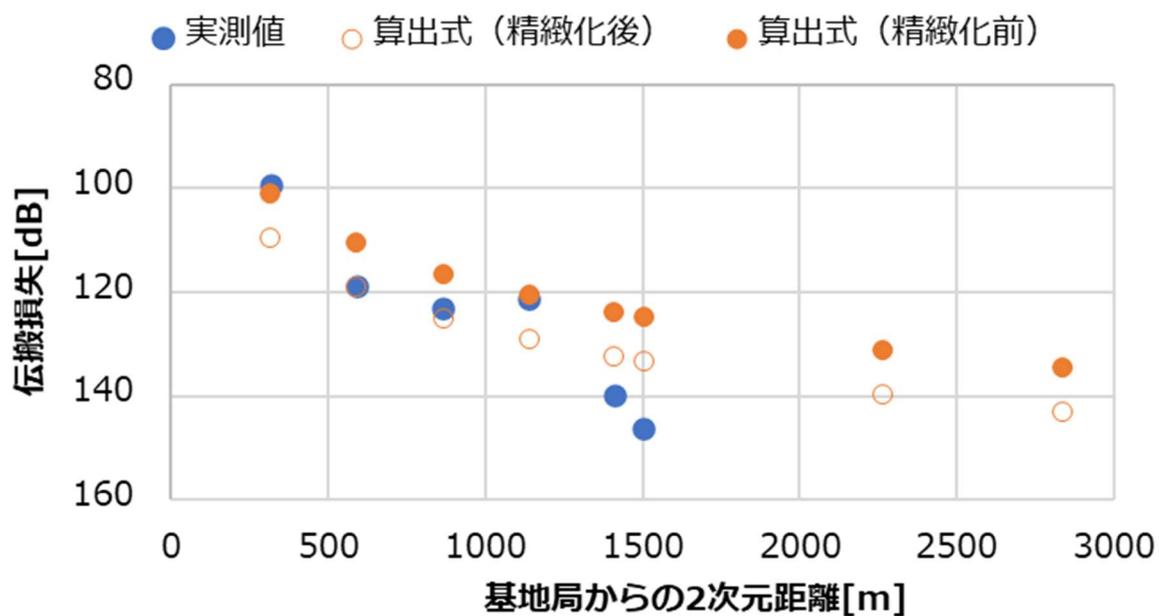


図 3.3.1-28 RU-5(アンテナ前方の測定点のみで精緻化)精緻化前後の差

3) レイトレースシミュレーションによるカバーエリア、調整対象区域の推定

カバーエリア、調整対象区域のより精緻な推定のため、RU-2 においてはレイトレースシミュレーションによる受信電力推定を実施した。RU-2、狭指向性アンテナにおけるレイトレースシミュレーションの諸元を表 3.3.1-14 に示す。

表 3.3.1-14 レイトレースシミュレーションの諸元(RU-2、狭指向性アンテナ)

項目	内容
周波数	4850 MHz
送信電力	40 dBm(給電線損失 4.148 dB)
送信アンテナ	狭指向性アンテナ (最大利得 19.5 dBi)
受信アンテナ	無指向性アンテナ (最大利得 0 dBi)
建物モデル、地形モデル	AW3D テレコムデータセット 建物データ:Shape 形式 地形データ:GeoTiff 形式
反射(R)、透過(T)、回折(D)の 最大回数	R3T0D1
受信点配置	5 m 間隔でグリッド状に配置
受信点高さ	線路内:軌道内の高さから、高さ 1.5 m 線路外;地上高さから、高さ 1.5 m

表 3.3.1-14 の諸元において設定したレイトレースシミュレーションのモデルを図 3.3.1-29、図 3.3.1-30 に示す。



図 3.3.1-29 RU-2 レイトレースシミュレーションモデル(天頂図)

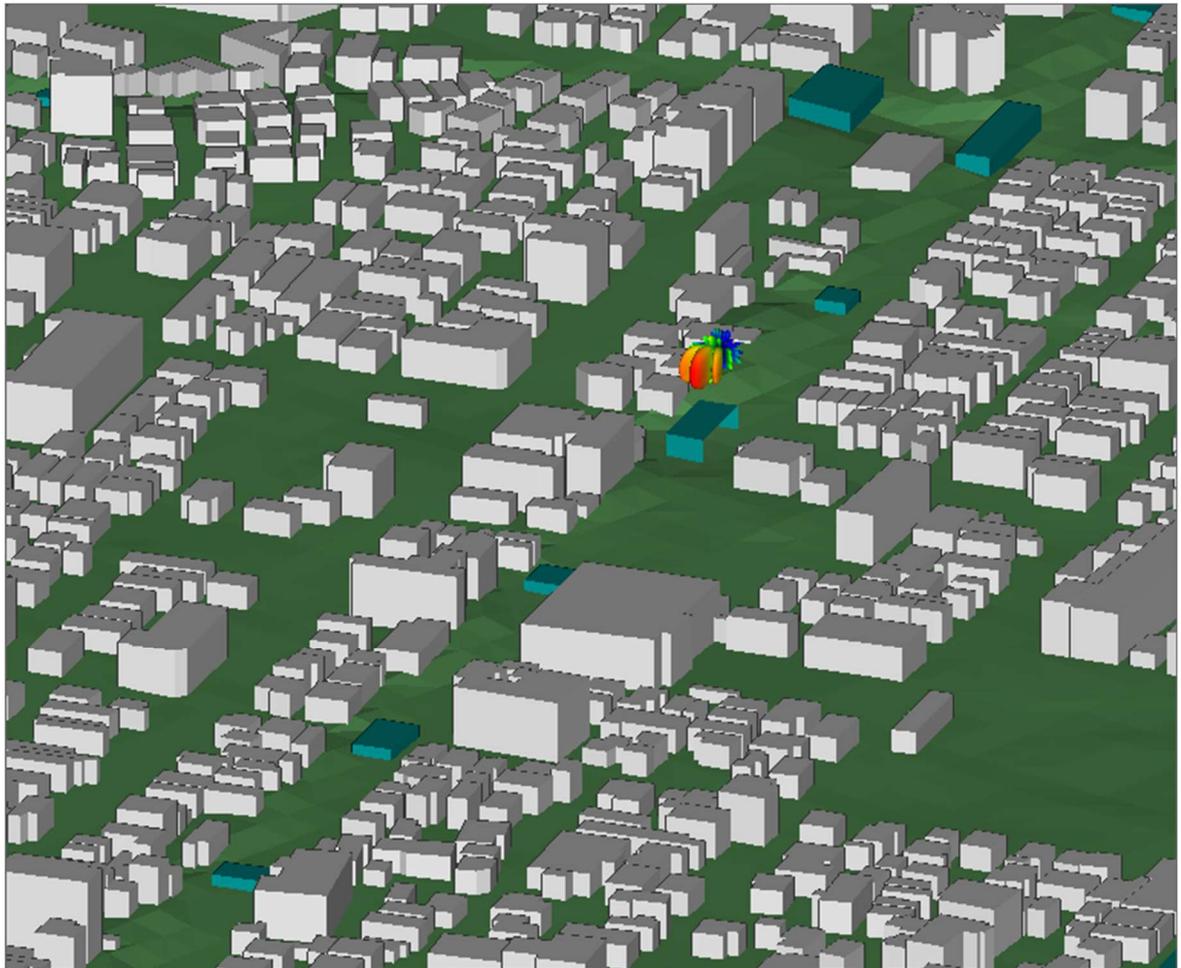


図 3.3.1-30 RU-2 レイトレースシミュレーションモデル(基地局部分拡大)

レイトレースシミュレーションによる受信電力の結果(カラーマップ)を図 3.3.1-31、図 3.3.1-32 に示す。図 3.3.1-31(RU-2、線路外)から、狭指向性アンテナから射出された電波が、開放地である線路内を伝搬した後、市街地の通り沿いを伝搬していることを確認した。レイトレースシミュレーションの結果として、鉄道沿線エリアを伝搬して、建物で反射または回折をした後、線路外の受信点へ到達する伝搬経路の例を図 3.3.1-33 に示す。図 3.3.1-32(RU-2、線路内)から、開放地である線路内においては、線路外の結果よりも遠くまで電波が伝搬することを確認した。また、アンテナ後方においても遠くまで電波が伝搬することを確認した。これは、メインローブや第一サイドローブから射出された電波が、線路沿いの建物を反射してアンテナ後方へ伝搬していることが理由である。レイトレースシミュレーションの結果として、建物を反射または回折してアンテナ後方へ伝搬する経路の例を図 3.3.1-34 に示す。

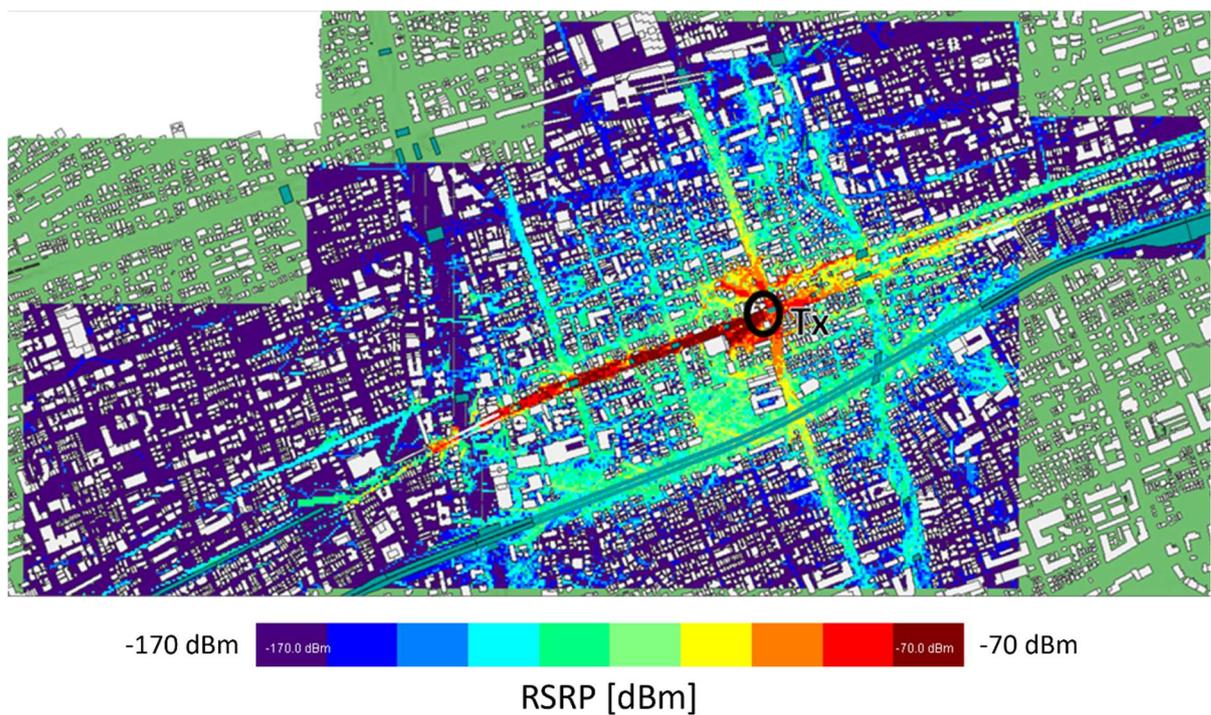


図 3.3.1-31 RU-2(線路外)レイトレース結果(RSRP カラーマップ)

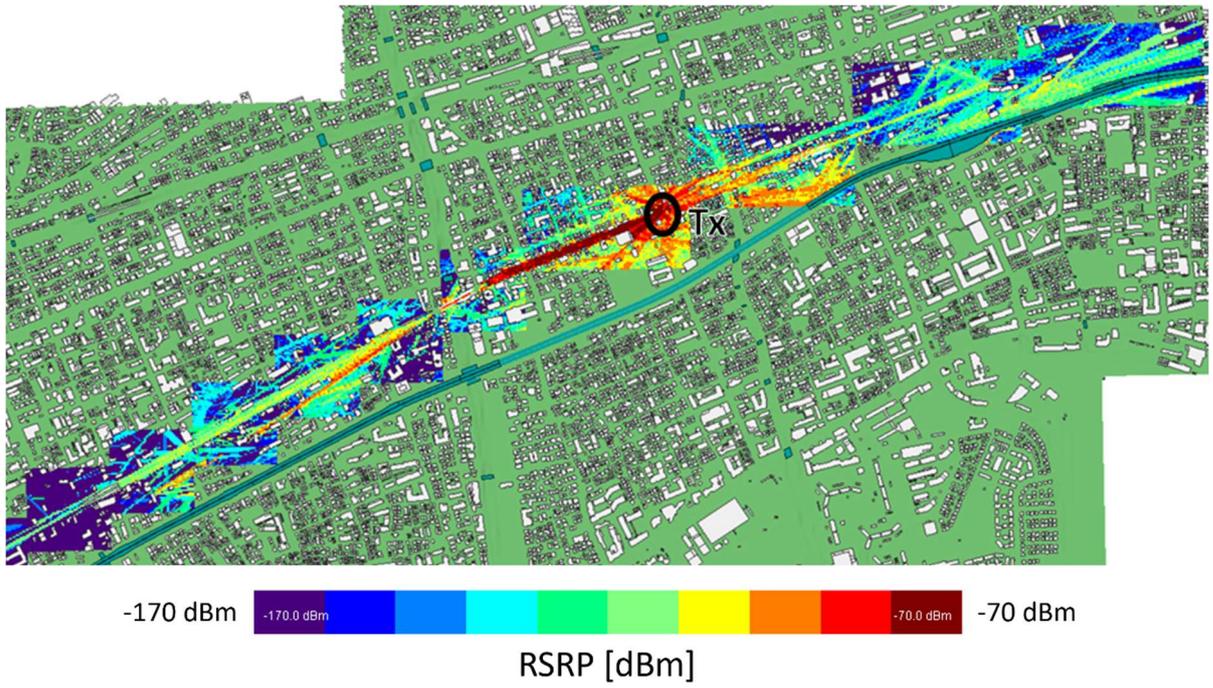


図 3.3.1-32 RU-2(線路内)レイトレース結果(RSRP カラーマップ)



図 3.3.1-33 鉄道沿線を経由して線路外へ到達する伝搬パス(RU-2 線路外)



図 3.3.1-34 建物反射/回折によりアンテナ後方へ到達する伝搬パス(RU-2 線路内)

表 3.3.1-15 に、算出式(精緻化後)とレイトレース結果における実測との RMSE を比較した結果を示す。また、基地局からの 2 次元距離に対する実測値、精緻化後の算出式、レイトレースの結果を比較したグラフを線路外、線路内それぞれにおいて図 3.3.1-35、図 3.3.1-36 に示す。表 3.3.1-15 から、RMSE はレイトレースの方がより小さい値になり、より詳細なカバーエリアの推定ができることを確認した。特に、アンテナ後方の測定点においては、アンテナメインローブから出た電波の跳ね返りをレイトレースがより正確に模擬できていることから、レイトレースの精度が高くなったと考えている。以上から、今回実証したような線状の特殊環境においては、アンテナ指向方向と反対側の受信電力の推定はエリア算出式では難しいが、レイトレースシミュレーションのようなサイトスペシフィックな電波伝搬推定では精度良く推定可能であることを示した。

なお、今回の実証におけるレイトレースシミュレーションは、現場調査を実施したうえ、調達した 3D モデルとの実態との乖離を検討し、レイトレースシミュレーションの結果に影響が表れると思われる駅舎や鉄道の高架、阪神高速道路の高架のオブジェクトを一部編集した。以上の編集は、基本的には Shape 形式の箱型モデルの一部の面を削除するのみの作業であった。

表 3.3.1-15 算出式(精緻化後)とレイトレースの実測値との RMSE 比較

箇所	影響要因	レイトレースの実測値との RMSE[dB]	精緻化後の実測値との RMSE[dB]
RU-2	RU-2 市街地・線路外	7.93	13.52
	RU-2 開放地・線路内	10.56	18.47

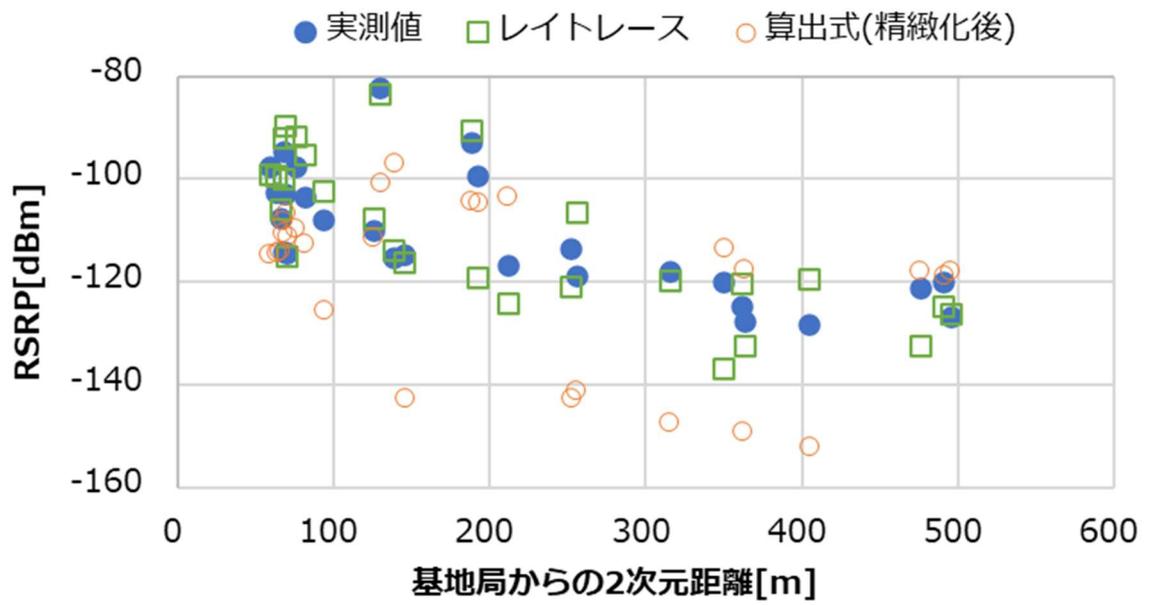


図 3.3.1-35 RU-2(線路外)実測値、算出式(精緻化後)、レイトレース結果の比較

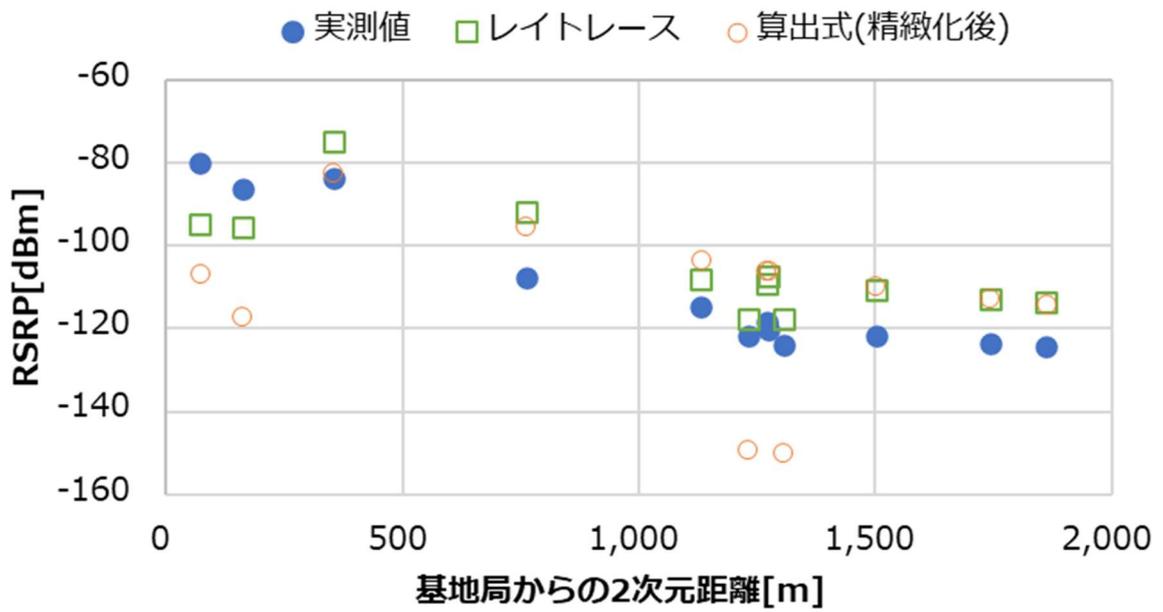


図 3.3.1-36 RU-2(線路外)実測値、算出式(精緻化後)、レイトレース結果の比較

4) その他の影響の検証・考察

今回実証した環境では、鉄道車両が線路上を頻繁に走行する。よって、鉄道車両が基地局付近に存在している際に、電波伝搬状況にどの程度影響を与えるかを調査した。調査は、鉄道車両をRU-2付近に在線させた状況において、表 3.3.1-3 に示す測定点と同一の測定点を主に用いて受信電力を測定した。鉄道車両の写真を図 3.3.1-37 に、実測において線路上に在線させたときの様子を示す。また、実測を行った測定点を図 3.3.1-38 に示す。



図 3.3.1-37 鉄道車両の写真



図 3.3.1-38 基地局位置に対する在線位置(Tx 付近から南西方向、上り線に約 200 m 在線)と測定点(地理院地図を加工して作成)

表 3.3.1-16 に、測定点ごとの鉄道車両の有無による実測値とその差分を示す。また、基地局からの 2 次元距離に対する実測値をプロットしたグラフを図 3.3.1-39 に示す。表 3.3.1-16、図 3.3.1-39 から、殆どの測定点において、在線ありのときの実測値が在線なしのときの実測値を下回っていることを確認した。例えば、測定点 ID501 や 509 では、在線ありのときにおいて、10 dBm 程度受信電力が減少する結果となったが、これは基地局と測定点の間に鉄道車両が介在し、大幅に受信電力が減少したと考えられる。また、測定点 ID504 のように、受信電力が増加した測定点に関しては、鉄道車両から反射した電波を受信した可能性があると考えられる。

在線なしの測定においてカバーエリア端、調整対象区域端であった測定点 ID510 から 513 においては、在線ありのときにおいて極端に受信電力が変わることはなかった。以上から、鉄道の在線の有無によりカバーエリア、調整対象区域を再検討する必要はないと考える。

表 3.3.1-16 鉄道車両の有無による実測値の変化

測定点ID	基地局からの水平距離[m]	RU2線路外測定点に対応する測定点ID	実測値 [dBm]		
			在線あり中央値	在線なし中央値	差分
501	71.8	112	-90.00	-80.15	-9.85
502	138.6	113	-116.55	-115.10	-1.45
503	211.2	114	-119.50	-116.60	-2.90
504	69.0	115	-97.80	-102.80	5.00
505	58.8	117	-96.60	-97.50	0.90
506	65.6	119	-107.80	-107.50	-0.30
507	67.4	121	-95.00	-94.60	-0.40
508	129.7	123	-87.00	-82.10	-4.90
509	192.1	124	-109.30	-99.15	-10.15
510	255.3	125	-120.80	-118.70	-2.10
511	361.2	126	-123.60	-124.80	1.20
512	315.0	127	-117.30	-117.80	0.50
513	475.3	131	-124.00	-121.00	-3.00

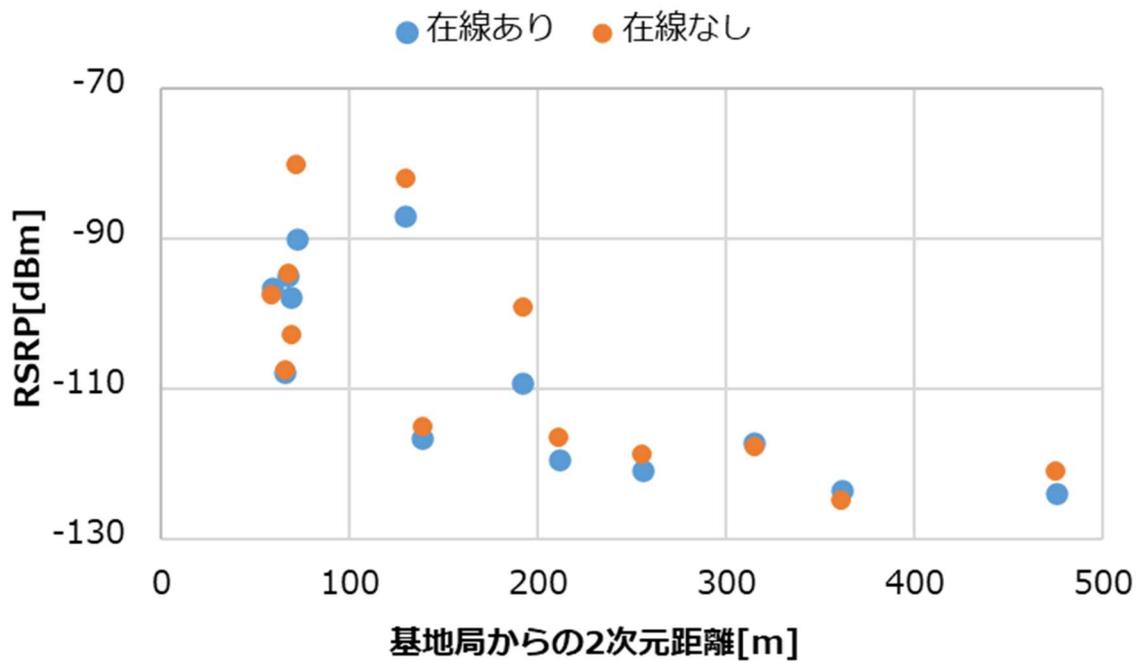


図 3.3.1-39 RU-2 鉄道車両の有無による実測値の変化

3.3.2 線状の空間におけるエリア化の改善・柔軟性向上

(1) 実証の目的・目標

1) 背景となる技術的課題と実証目的

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。当該区間の特徴を踏まえた実証環境の各課題について以下にて説明する。

(A) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 1

今回技術実証を行うエリアの見取り図を図 3.3.2-1 に示す。本実証エリア①のうち、打出駅東方を境に、東側(西宮駅側)は高架区間、西側(芦屋駅側)は地上区間となっている。本実証エリア②の御影駅は高架区間となっている。鉄道線路と他者土地の境界には、高架区間は腰高壁(線路から高さ 1.5m 程度)、地上区間ではフェンス(線路から高さ 2m 程度)が存在するが、線路外の開放性が高いため、横長で狭小な自己土地を単純にエリア化すると、隣接する他者土地への電波漏洩が課題となる。一般的に長い距離の鉄道線路上を隙間なくカバーしたい場合は複数のローカル 5G 基地局を設置して、連続的なエリア形成を行うことが考えられる。そこで本実証事業では他者土地への電波漏洩を抑制するため、狭指向性アンテナを連続的に配置することにより、線状の空間におけるエリア構築を行った。また、今回用いる狭指向性アンテナの仕様やアンテナパターン図を図 3.3.2-2 に示す。

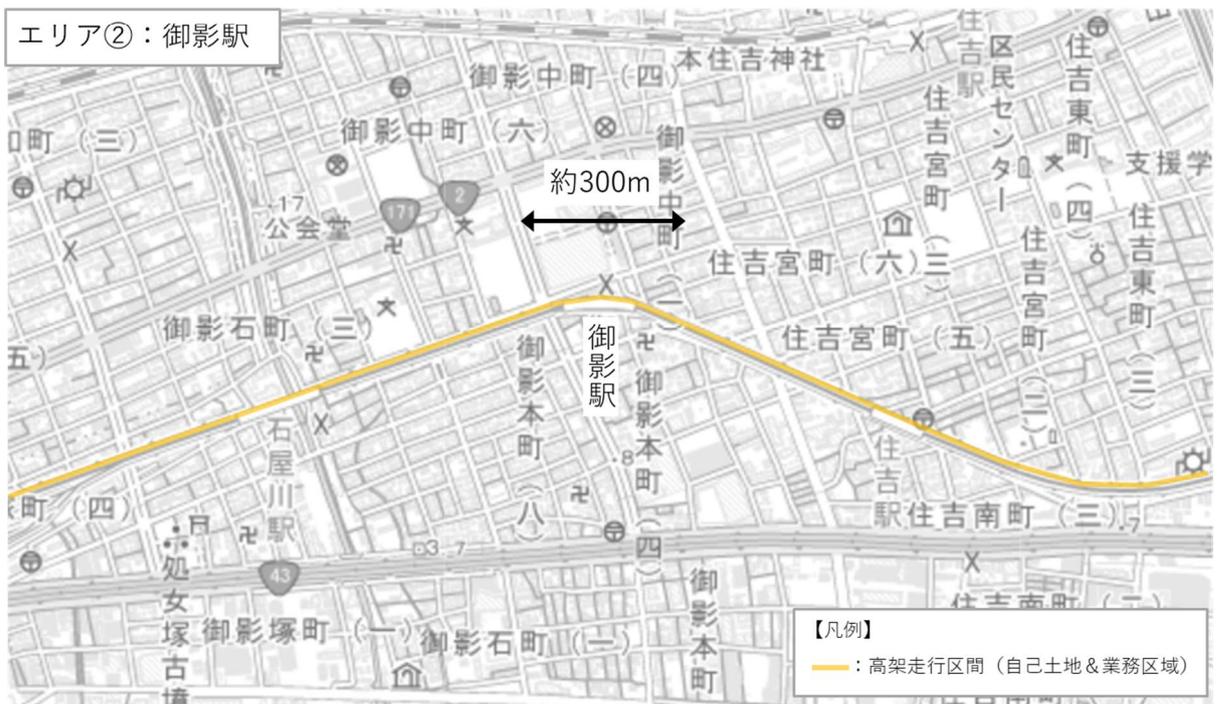
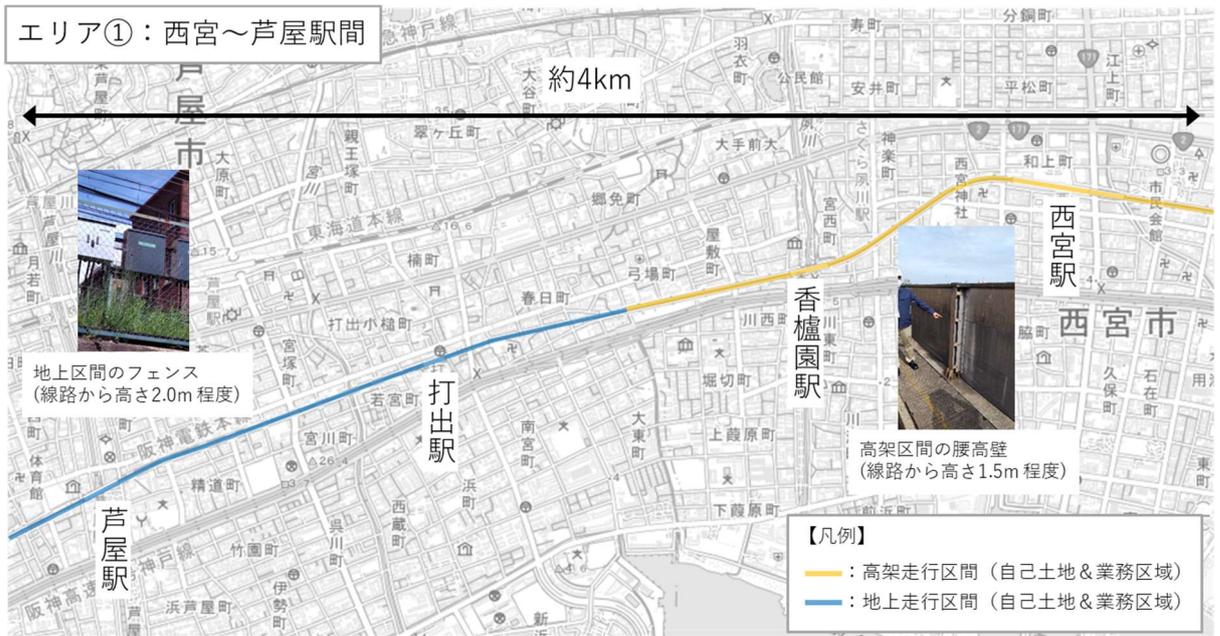


図 3.3.2-1 実証エリアの見取り図(エリア①：西宮から芦屋駅間、エリア②：御影駅)
(地理院地図を加工して作成)

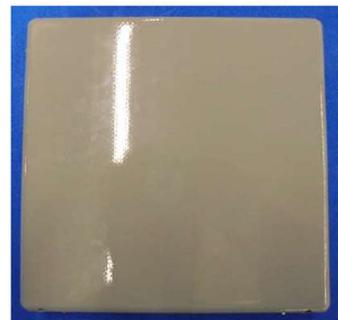
Band	3400 - 4200 / 4400 - 5000
Polarization	±45
Half-power Beam Width	360°

Model: X25-3545FTD

Rev. 01

Electrical Specifications

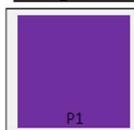
Operating Frequency Band [MHz]	3400 - 4200 / 4400 - 5000		
Frequency Range [MHz]	3400 - 3600	3600 - 4200	4400 - 5000
Polarization	±45		
Gain [dBi]	16	17	18
Horizontal Beam Width [degrees]	28	25	21
Vertical Beam Width [degrees]	28	25	21
Electrical Downtilt [degrees]	0 (fixed)		
VSWR	≤2.0		
Maximum Input Power / Per Port [W]	120		
Impedance [Ω]	50		



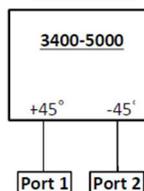
Mechanical Specifications

Radome Material	Fiberglass
Connector Type	N Female x2
Mounting Hardware	option
Mast Diameter Adjustable	φ42.7mm - φ60.5mm (φ1.68inch - φ2.38inch)
mechanical Downtilt Angle	-40° - +40°
Operating Temperature Range	-20 - +65°C , (-4 - 149°F)
Operating Humidity	0 - 95%RH
Enclosure Protection	IPX4
RF Connector Protection	IP67
Wind Load (Front / Lateral / Rear)	59.7N / 8.1N / 59.7N @93.2 MPH
Wind Velocity	167.7 MPH
Weight	2 kg (4.4 lb)
Dimension (Length x width x depth)	200 x 200 x 27mm (7.87 x 7.87 x 1.06 inch)

Antenna Array Configurations



Port Layout

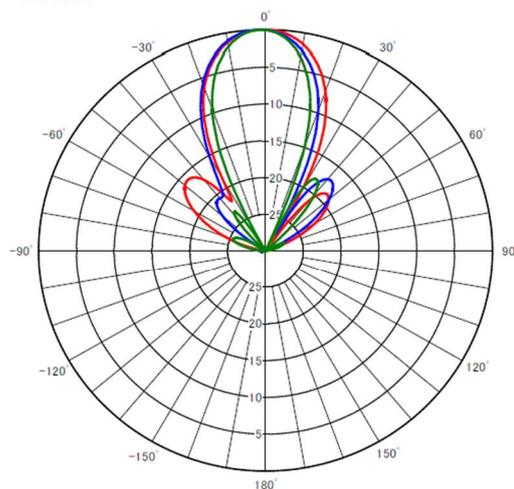


Antenna Back View



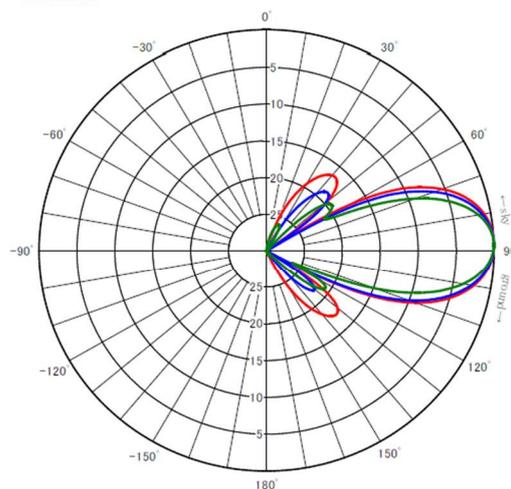
Horizontal Plane

- 3500MHz
- 3800MHz
- 4800MHz



Vertical Plane

- 3500MHz
- 3800MHz
- 4800MHz



GKE-96012

All specifications are subject to change without notice.

Copyright © 2021 DKK Co., Ltd. All rights reserved

図 3.3.2-2 狭指向性アンテナの仕様やアンテナパターン図

(B) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 2

狭指向性アンテナ設置時の垂直図を図 3.3.2-3 に示す。狭指向性アンテナの連続配置によるエリア構築の電波伝搬の机上計算結果を図 3.3.2-4 に示す。机上計算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、エリア算出式にて計算した結果を地図上にプロットし作図した。線路長手方向を全て開放値扱い、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全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。

机上計算①では直線部において、指向性アンテナを連続的に配置しているが、他者土地への電波漏洩が発生している。机上計算②の曲線部においては、電波漏洩がさらに顕著に発生している。線状の空間においてエリア構築する際、狭指向性アンテナのみでは、電波漏洩の抑制に十分な効果が得られず、さらなる対策を検討する必要がある。

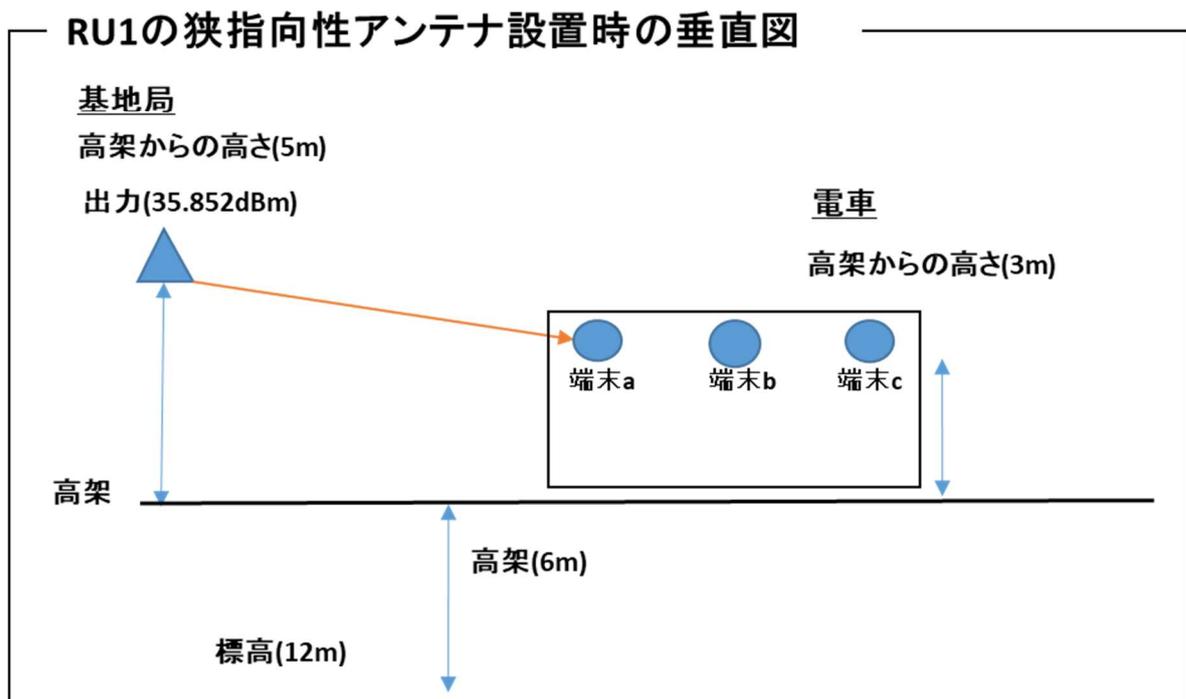
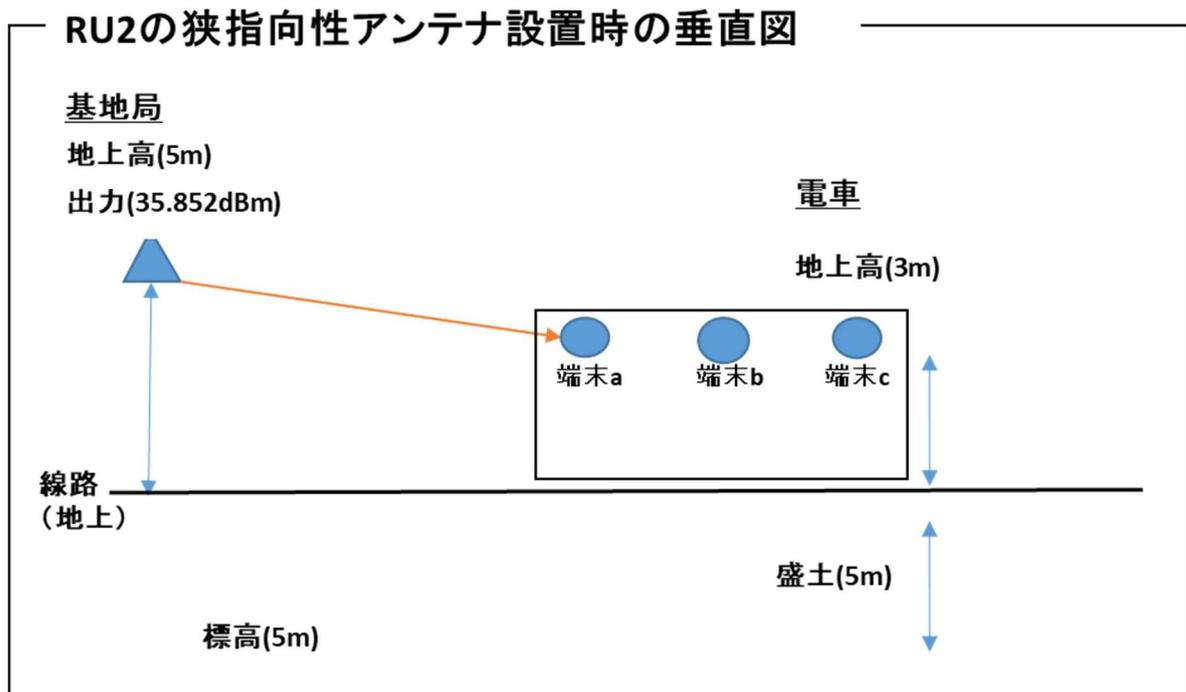


図 3.3.2-3 狭指向性アンテナ設置時の垂直図

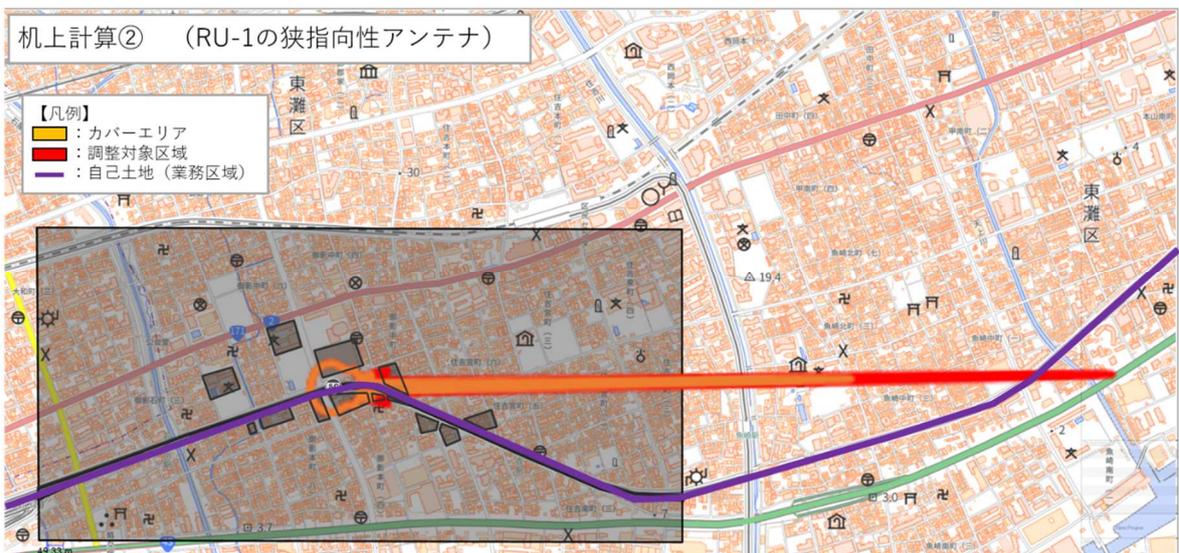
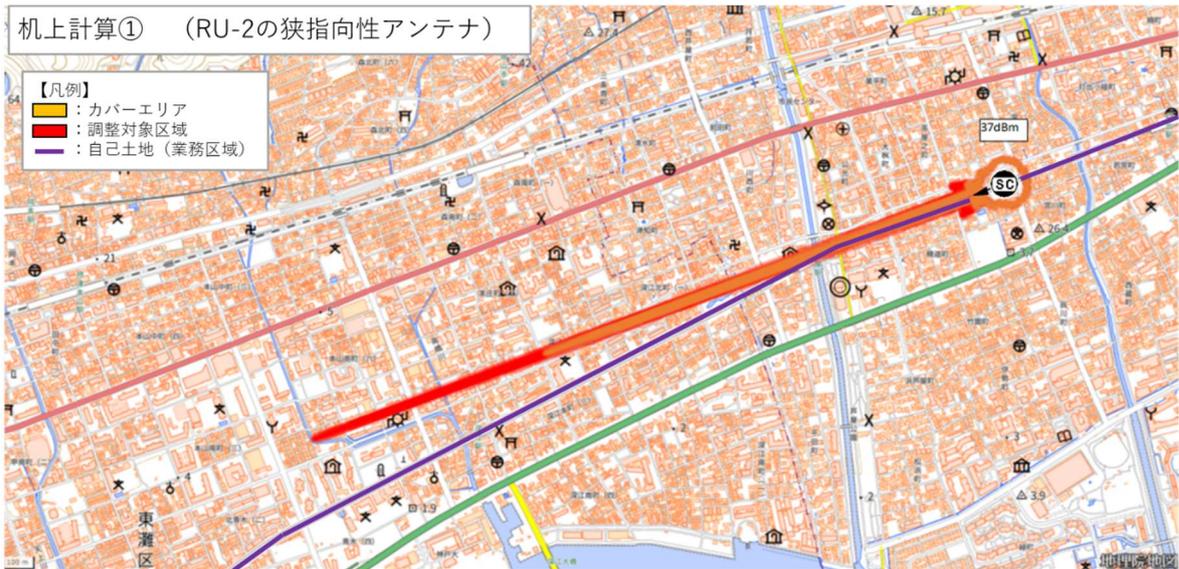


図 3.3.2-4 狭指向性アンテナによるエリア構築の電波伝搬の机上計算結果(RU-2, RU-1)
(地理院地図を加工して作成)

2) 実証目標

前述の 2 つの課題に対する実証目標をそれぞれ以下に示す。

(A) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 1

前述のとおり、狭指向性アンテナを連続的に配置することで、線路内においてはエリア算出式でのエリア端に相当する 4.7GHz 帯 100MHz システムの SS-RSRP の値である -119.7dBm 以上となること。なお、また、線路外への電波漏洩は最小限に抑えられるアンテナの向き、角度、出力を確認する。なお、エリア算出式でのエリア端は 4.7GHz 帯 100MHz システムにおいて -84.6dBm(RSSI)であることから、SS-RSRP の値は以下の算出式にて算出した。

$$\text{RSRP}[\text{dBm}] = \text{RSSI}[\text{dBm}] - 35.1[\text{dBm}]。$$

(B) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 2

狭指向性アンテナのみでなく、漏洩同軸ケーブルを設置することにより、線路外においては、エリア算出式での調整対象区域(許容干渉レベル)に相当する 4.7GHz 帯 100MHz システムの SS-RSRP の値である-126.1dBm 以下となること。なお、エリア算出式での調整対象区域(許容干渉レベル)は 4.7GHz 帯 100MHz システムにおいて-91.0dBm(RSSI)であることから、SS-RSRP の値は以下の算出式にて算出した。

$$\text{RSRP}[\text{dBm}] = \text{RSSI}[\text{dBm}] - 35.1[\text{dBm}]$$

3) 過年度技術実証からの発展性・新規性

本技術実証と類似性のある過年度技術実証として、3.3.1 章(1)3)と同様、以下の 2 件があげられる。

- ・「遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現」(令和 2 年度)
- ・「ローカル 5G を活用した鉄道駅における線路巡視業務・運転支援業務の高度化」(令和 3 年度)

過年度技術実証では、鉄道駅においてローカル 5G のエリア構築を行っているが、他者土地への電波漏洩の観点から鉄道線路上でのエリア構築を今後の検討課題としてあげている。本実証事業と過年度技術実証との差異や新規性は以下のとおり。

- ・ローカル 5G のエリア構築を駅構内に限定せず、鉄道線路上も含めた複数基地局による広域的なエリア構築を行う点。
- ・線状かつ曲線区間に対し、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルを組み合わせることでより電波漏洩の低減を図る点。

(2) 実証仮説

(A)(B)それぞれに対する実証仮説を以下で述べる。

(A) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 1

線路内において SS-RSRP の値が-119.7dBm 以上となるようにシミュレーション上での出力を調整すると、線路外への電波漏洩が多分に発生し、他者土地の建物からの反射等を受けにくい高架部分ではより電波漏洩が顕著に表れる。実測値も同様の値になると想定しており、(B)で述べる改善策が必要になると想定した。

(B) 線路内のエリア構築、線路外への電波漏洩 2

漏洩同軸ケーブルを用いてエリア構築することにより、線路外の SS-RSRP の値が-126.1dBm 以下となるように調整できると想定した。

<エリア設計>

狭指向性アンテナを用いる場合のシミュレーションは図 3.3.2-4 の通りである。漏洩同軸ケーブル設置時の垂直図を図 3.3.2-5 に示す。漏洩同軸ケーブルを用いる場合については、シミュレーションソフト等やエリア算出式が存在しないため、アンテナパターン図、伝送損失、今回の設置位置をもとにカバーエリア及び調整対象区域を想像で図示した(図 3.3.2-6)。

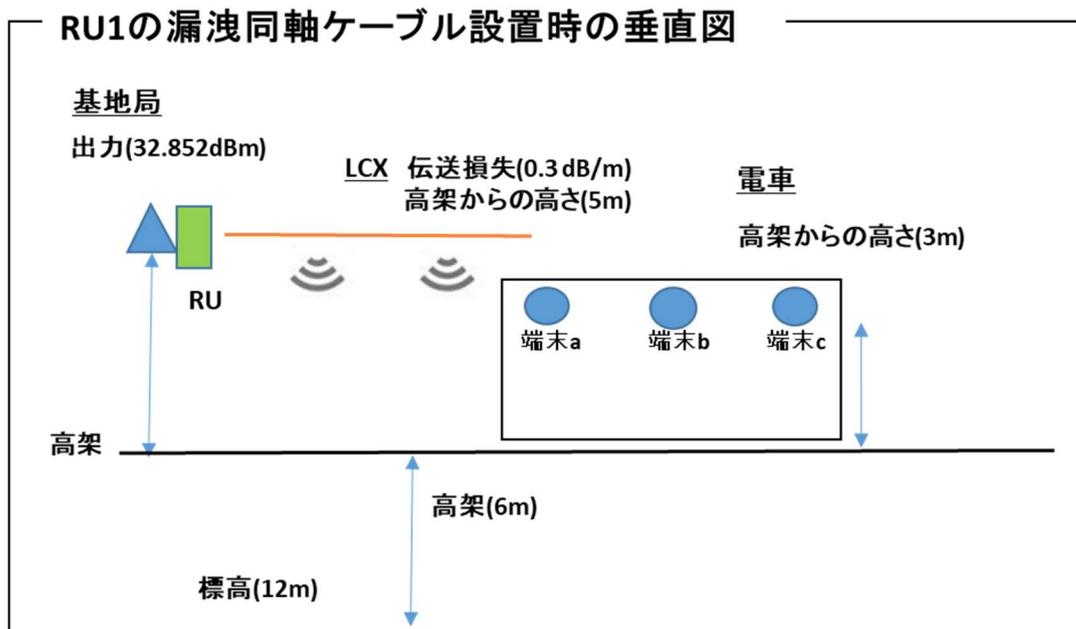
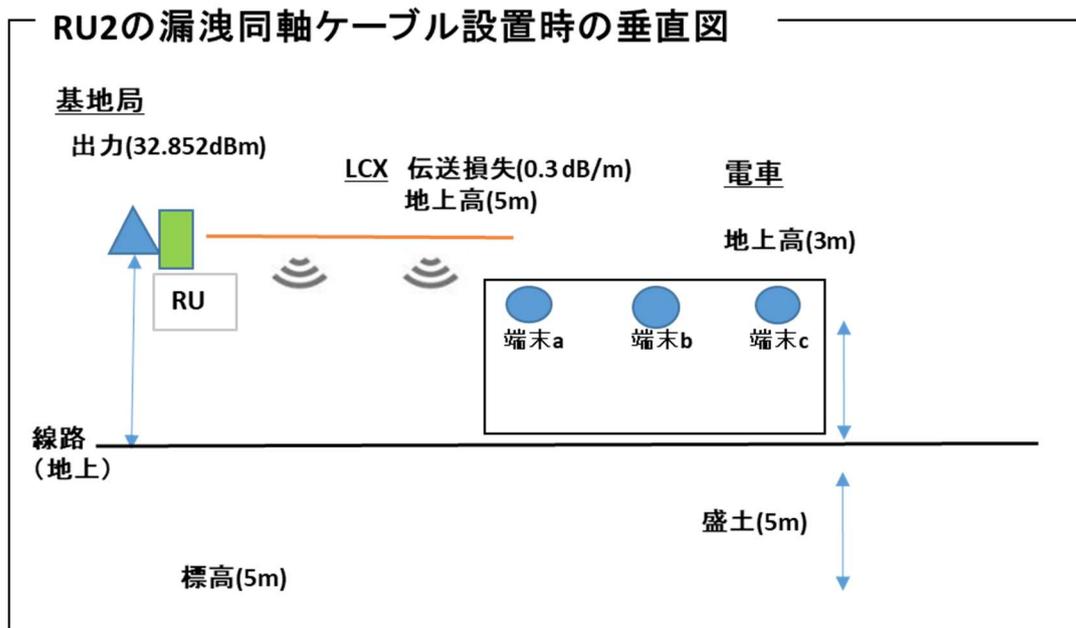


図 3.3.2-5 漏洩同軸ケーブル設置時の垂直図

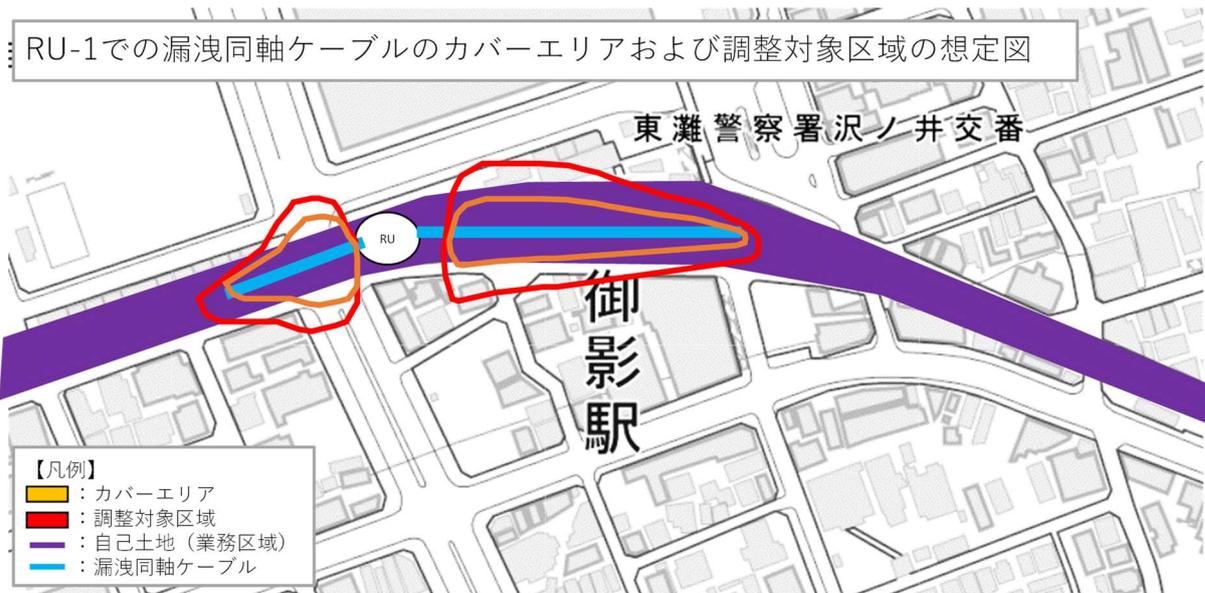
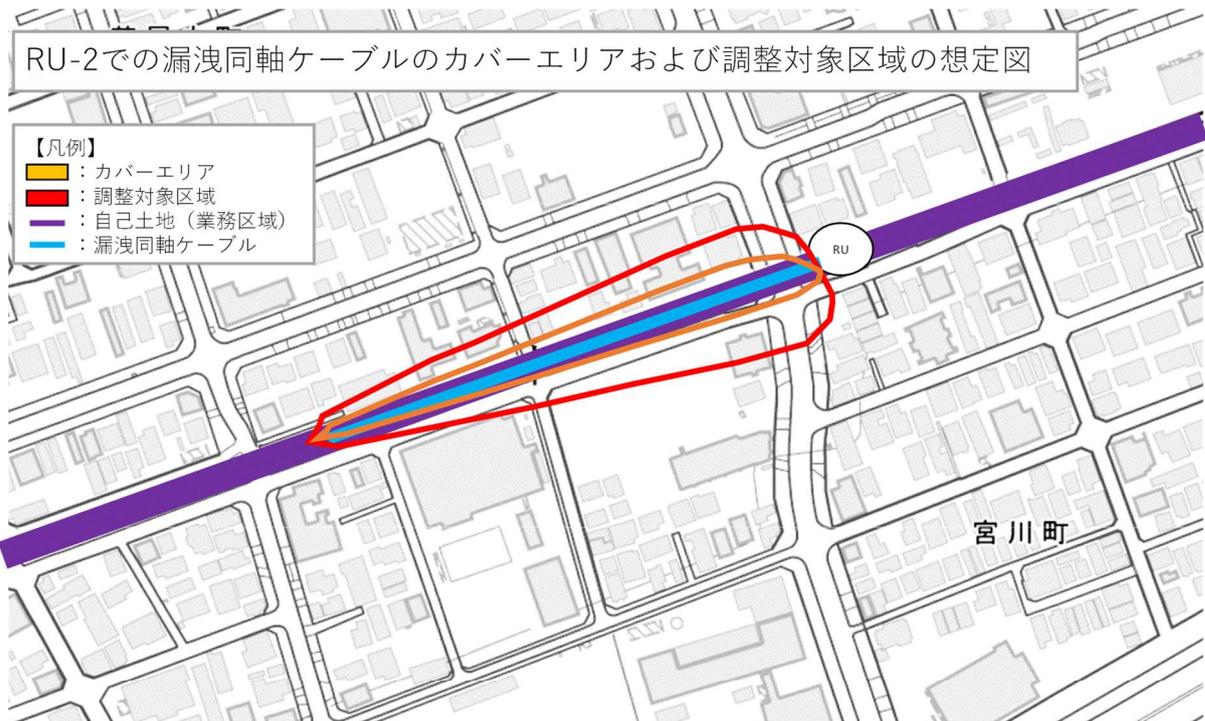


図 3.3.2-6 漏洩同軸ケーブルによるエリア構築の想定図(RU-2、RU-1)
(地理院地図を加工して作成)

(3) 評価・検証項目

指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルのシステムごとに業務区域内、カバーエリア端及び調整対象区域のシミュレーションを実施した。なお、シミュレーションには Wireless InSite(構造計画研究所)を使用し、指向性アンテナは電波法関係審査基準にある算出式、漏洩同軸ケーブルはメーカー提供の伝搬損失算出式を用いたレイトレースシミュレーションを行った。

また、3.2 章で示した実施場所において、狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルのシステムを個別

に動作させ、カバーエリア及び調整対象区域相当の受信電力が得られるエリアにおいて、受信電力 (SS-RSRP 値)、通信品質 (SIR)、及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延) を測定し、前述のシミュレーションとの比較・考察を行った。伝送性能に関しては、2.4 章で①から③のソリューションを個別動作させた際の要件 (UL 最大 36Mbps/DL 最大 40Mbps) を満たすことができるかどうかを検証した。

(4) 評価・検証方法

受信電力、通信品質、伝送性能の測定に関しては、エリア算出法に定めるカバーエリア及び調整対象区域の閾値がそれぞれ実測される範囲内で測定を行った。受信電力、通信品質の測定には測定器 (アンリツ社製エリアテスタ ML8780A/ML8781A) を利用し、伝送性能の測定には「Libre Speed」を利用した。また、Network-RTK 測位 (docomo IoT 高精度 GNSS 位置情報サービス) を用いて測定地点の緯度、経度、標高を計測した。提案手法による改善効果が明確になるよう、狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルを利用した場合において、それぞれ電波発射を行い、エリア構築手法ごとに測定を行い、測定結果を比較した。測定地点に関しては、それぞれの場合に対して測定地点数が 30 以上となるよう、表 3.3.2-1 示す地点で測定を行った。伝送性能に関しては、課題実証システムで要求される性能を実現できるかどうかを検証した。ハンドオーバーの検証に関しては、図 2.5.2-1 に示すセル A-B 間を移動する場合に通信が途切れないことを確認した。なお、受信電力の測定にあたっては、以下の条件を満たす方法で測定し、データを処理する。また、試験に使用する漏洩同軸ケーブルの仕様は図 3.3.2-7 のとおり。

- ・定在波の影響を避けるため、1 つの測定地点において、 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)、そこで得られた全てのサンプルを統計処理する。
- ・測定地点あたり、合計 1,000 サンプルの測定結果に対し、中央値、 σ 、上位 10% 値、下位 10% 値を算出する。

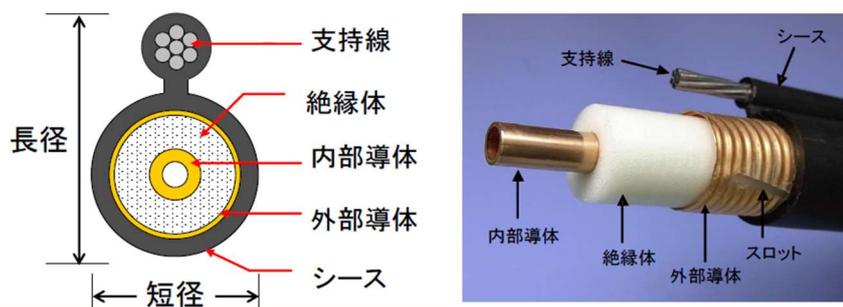
表 3.3.2-1 エリア構築手法ごとの測定地点

システム	測定地点	
	線路・駅 (最低 8 地点)	線路外 (最低 20 地点)
狭指向性 アンテナ ・ 漏洩同軸 ケーブル	自己土地 (業務区域) において、調整対象区域の閾値が実測される地点を特定し、その地点とアンテナ設置地点の間を 8 地点以上測定した。	レイトレースシミュレーションによる作図でサイドローブ等の影響が顕著な各方向において、エリア算出法に定めるカバーエリア及び調整対象区域の閾値がそれぞれ実測される地点を含む 2 か所以上の地点で測定する。また、電波漏洩が発生するおそれのある地点については、精緻な実測のカバーエリア図、干渉調整区域図が得られるように、測定点を柔軟に設定し、追加測定を行った。

1. Sub6帯対応LCXケーブルの構造案

BRH-22010

構成		単位	ケーブルサイズ
			20D
内部導体	材質	—	銅管
絶縁体	材質	—	高発泡ポリエチレン
外部導体	材質	—	銅テープ(ひだ付)スロット付き
支持線	材質	—	亜鉛めっき鋼より線
	本数/素線径	本/mm	7/1.6
シース	材質	—	ノンハロゲン難燃ポリエチレン
標準仕上外径 短径×長径		mm	29×39
概算質量		kg/m	0.7



-2-

Confidential



2. 短尺試作品評価結果

BRH-22010

前項の構造のサンプルを約50m試作し、当社屋外試験場にて下記の測定結果を得ました。

項目	結合損失(dB) (50%値,1.5m離隔,水平偏波)		減衰量(dB/m)		
	測定値	想定値	測定値	想定値	
周波数	1700MHz	62	70	0.06	0.07
	1900MHz	65	69	0.07	0.09
	2600MHz	62	65	0.08	0.11
	3400MHz	64	63	0.11	0.12
	3500MHz	59	63	0.12	0.12
	3700MHz	58	63	0.13	0.13
	4100MHz	58	61	0.16	0.16
	4600MHz	58	60	0.23	0.23
	4900MHz	57	60	0.30	0.30

注意)本結果は仕様値ではありません。

-3-

Confidential



図 3.3.2-7 漏洩同軸ケーブルの仕様

(5) 実証結果及び考察

1) 受信電力の測定によるカバーエリア・調整対象区域の検証

技術実証Ⅱにおいては、RU-1、RU-2 それぞれにおいて狭指向性アンテナ、漏洩同軸ケーブルの両方のシステムで電波の実測を行った。狭指向性アンテナにおいて実測した箇所を図 3.3.2-8 から図 3.3.2-11 に示す。また、測定点の測定点情報を表 3.3.2-2 から表 3.3.2-5 に示す。表 3.3.2-2 から表 3.3.2-5 に示す実測した地点における受信電力の結果を表 3.3.2-6 から表 3.3.2-9 に示す。



図 3.3.2-8 実測した地点(RU-1 狭指向性、線路外)(地理院地図を加工して作成)



図 3.3.2-9 実測した地点(RU-1 狭指向性、線路内)(地理院地図を加工して作成)



図 3.3.2-10 実測した地点(RU-2 狭指向性、線路外)(地理院地図を加工して作成)※再掲

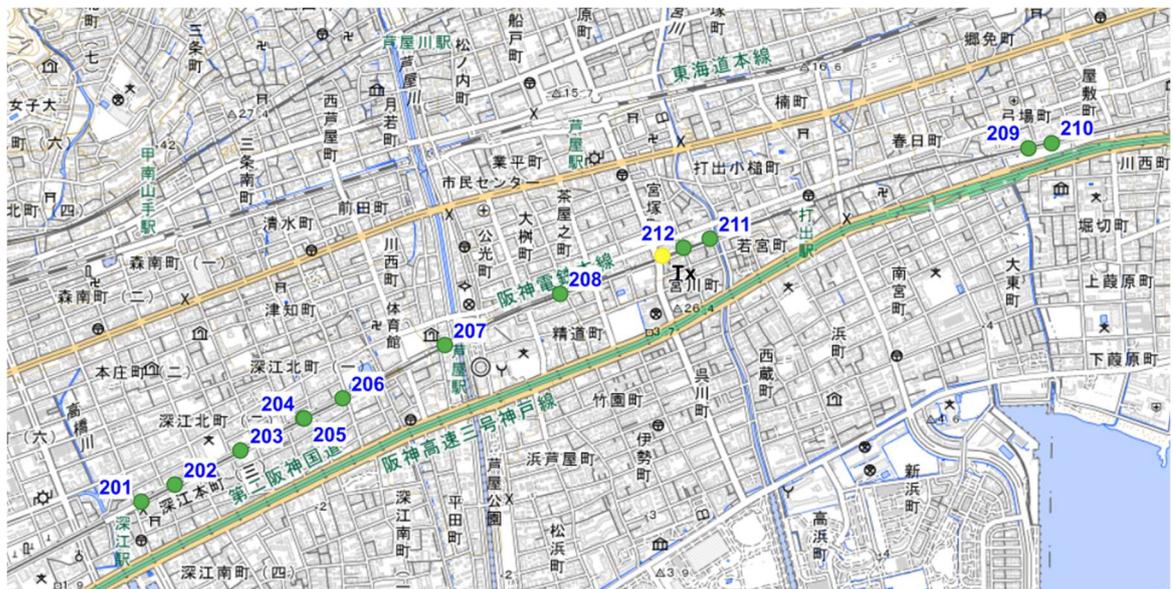


図 3.3.2-11 実測した地点(RU-2 狭指向性、線路内)(地理院地図を加工して作成)※再掲

表 3.3.2-2 測定点情報(RU-1 狭指向性、線路外)

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
601	758.4	758.4	12.075	11.0	9.6	11.1	1
602	555.3	555.2	12.075	11.0	15.9	17.4	1
603	297.3	297.2	12.075	11.0	14.8	16.3	1
604	331.8	331.8	12.075	11.0	14.3	15.8	1
605	303.0	303.0	12.075	11.0	11.6	13.1	1
606	423.6	423.6	12.075	11.0	10.9	12.4	1
607	462.1	462.1	12.075	11.0	7.9	9.4	1
608	419.5	419.2	12.075	11.0	3.9	5.4	1
609	517.5	517.2	12.075	11.0	3.3	4.8	1
610	995.6	995.5	12.075	11.0	6.2	7.7	1
611	1175.6	1175.5	12.075	11.0	7.4	8.9	1
612	171.4	171.2	12.075	11.0	14.4	15.9	1
613	204.9	204.9	12.075	11.0	13.3	14.8	1
614	465.6	465.1	12.075	11.0	21.1	22.6	1
615	525.6	525.1	12.075	11.0	22.8	24.3	1
616	495.0	494.3	12.075	11.0	24.2	25.7	1
617	459.3	458.6	12.075	11.0	23.4	24.9	1
618	376.4	375.9	12.075	11.0	21.0	22.5	1
619	217.1	216.8	12.075	11.0	17.0	18.5	1
620	115.9	115.8	12.075	11.0	13.2	14.7	0
621	117.8	117.8	12.075	11.0	10.4	11.9	1
622	184.4	184.4	12.075	11.0	10.9	12.4	1
623	67.6	67.6	12.075	11.0	11.8	13.3	0
624	161.7	161.6	12.075	11.0	14.2	15.7	1
625	211.7	211.6	12.075	11.0	13.6	15.1	1
626	294.1	294.0	12.075	11.0	13.9	15.4	1
627	178.1	178.1	12.075	11.0	11.2	12.7	1
628	293.7	293.7	12.075	11.0	9.3	10.8	1

表 3.3.2-3 測定点情報(RU-1 狭指向性、線路内)

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
701	908.3	908.3	12.075	11.0	4.8	11.2	1
702	952.6	952.5	12.075	11.0	4.8	11.0	1
703	998.0	998.0	12.075	11.0	4.9	11.3	1
704	519.8	519.8	12.075	11.0	6.7	11.7	1
705	2128.0	2128.0	12.075	11.0	11.8	13.0	1
706	1731.9	1731.9	12.075	11.0	10.7	11.2	1
707	1348.7	1348.7	12.075	11.0	8.7	11.3	0
708	431.4	431.4	12.075	11.0	8.5	10.6	0

表 3.3.2-4 測定点情報(RU-2 狭指向性、線路外)※再掲

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
101	138.8	138.6	5.3	10.5	7.1	1.5	1
102	211.3	211.2	5.3	10.5	7.7	1.5	1
103	69.4	69.0	5.3	10.5	6.8	1.5	1
104	81.7	81.4	5.3	10.5	7.1	1.5	1
105	59.3	58.8	5.3	10.5	6.1	1.5	1
106	63.6	63.1	5.3	10.5	6.1	1.5	1
107	66.3	65.6	5.3	10.5	4.8	1.5	1
108	70.7	70.1	5.3	10.5	5.0	1.5	1
109	68.2	67.4	5.3	10.5	4.1	1.5	0
110	76.3	75.6	5.3	10.5	4.0	1.5	0
111	130.0	129.7	5.3	10.5	5.4	1.5	0
112	192.3	192.1	5.3	10.5	5.8	1.5	1
113	255.5	255.3	5.3	10.5	3.4	1.5	1
114	361.4	361.2	5.3	10.5	2.4	1.5	1
115	315.0	315.0	5.3	10.5	10.3	1.5	1
116	404.6	404.6	5.3	10.5	10.8	1.5	1
117	349.6	349.6	5.3	10.5	8.4	1.5	1
118	363.1	363.1	5.3	10.5	8.6	1.5	1
119	475.3	475.3	5.3	10.5	7.9	1.5	1
120	495.0	495.0	5.3	10.5	8.1	1.5	1
121	490.4	490.3	5.3	10.5	8.0	1.5	1
122	252.2	252.1	5.3	10.5	8.8	1.5	1
123	93.9	93.5	5.3	10.5	6.2	1.5	1
124	68.1	67.4	5.3	10.5	5.0	1.5	1
125	145.9	145.5	5.3	10.5	3.7	1.5	1
126	188.1	187.9	5.3	10.5	6.1	1.5	1
127	125.5	125.4	5.3	10.5	7.4	1.5	1

表 3.3.2-5 測定点情報(RU-2 狭指向性、線路内)※再掲

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]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
201	1861.1	1861.1	5.3	10.5	19.6	1.5	1
202	1741.9	1741.9	5.3	10.5	14.9	1.5	1
203	1500.7	1500.7	5.3	10.5	13.3	1.5	1
204	1274.3	1274.3	5.3	10.5	12.2	1.5	1
205	1270.0	1270.0	5.3	10.5	12.2	1.5	1
206	1131.2	1131.2	5.3	10.5	12.1	1.5	1
207	760.9	760.9	5.3	10.5	18.6	1.5	1
208	353.7	353.7	5.3	10.5	13.6	1.5	0
209	1230.8	1230.8	5.3	10.5	9.6	1.5	1
210	1305.6	1305.6	5.3	10.5	9.6	1.5	1
211	162.2	162.0	5.3	10.5	7.7	1.5	0
212	71.9	71.8	5.3	10.5	11.3	1.5	0

表 3.3.2-6 実測値の受信電力(RU-1 狭指向性、線路外)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
601	測定不可(-143dBm未満)				
602	-124.2	-124.4	1.82	-122.5	-126.8
603	-118.9	-118.8	2.46	-115.6	-121.9
604	-112.5	-112.2	4.26	-104.5	-117.7
605	-124.6	-124.4	3.57	-119.7	-128.8
606	-127.5	-127.9	2.40	-125.5	-130.7
607	-104.2	-104.7	1.54	-103.2	-106.7
608	-118.4	-119.0	1.97	-117.3	-122.0
609	-127.3	-127.5	1.66	-125.6	-129.8
610	-117.7	-118.2	2.80	-115.1	-123.3
611	-124.7	-125.2	2.88	-122.3	-128.5
612	-106.3	-106.4	3.31	-102.2	-111.2
613	-107.7	-107.8	3.19	-103.8	-111.9
614	-119.7	-119.8	1.77	-117.8	-122.0
615	-125.7	-126.0	2.09	-123.7	-128.5
616	-127.2	-127.7	2.86	-124.5	-131.4
617	-119.6	-119.7	1.73	-117.6	-122.1
618	-123.7	-124.4	3.02	-121.1	-128.8
619	-116.2	-116.2	3.36	-111.6	-120.7
620	-76.3	-77.2	3.39	-73.6	-82.1
621	-103.9	-104.2	2.78	-100.8	-107.9
622	-104.9	-105.1	3.06	-101.1	-109.2
623	-87.7	-87.7	3.09	-83.5	-91.9
624	-108.9	-108.9	2.20	-106.2	-111.6
625	-96.1	-96.1	2.98	-91.9	-100.1
626	-107.8	-108.3	4.60	-102.7	-114.8
627	-101.9	-102.1	2.42	-99.3	-105.2
628	-111.2	-111.9	3.61	-108.0	-117.1

表 3.3.2-7 実測値の受信電力(RU-1 狭指向性、線路内)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
701	-118.6	-118.7	1.51	-117.0	-120.6
702	-124.2	-124.7	3.44	-120.7	-129.5
703	-125.7	-126.1	2.31	-123.7	-129.2
704	-99.2	-99.1	1.44	-97.1	-100.9
705	-124.5	-124.9	2.26	-122.5	-127.7
706	-119.9	-119.6	1.78	-116.6	-121.7
707	-110.0	-110.1	2.21	-107.4	-112.8
708	-91.8	-92.0	1.91	-89.9	-94.6

表 3.3.2-8 実測値の受信電力(RU-2 狭指向性、線路外、再掲)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
101	-115.1	-115.1	3.6	-110.3	-120.0
102	-116.6	-116.6	3.2	-112.5	-121.0
103	-102.8	-102.9	3.3	-98.6	-107.7
104	-103.3	-103.4	2.3	-100.7	-106.4
105	-97.5	-97.9	2.8	-94.2	-101.9
106	-102.6	-102.6	2.7	-99.2	-106.1
107	-107.5	-106.8	4.2	-100.1	-111.7
108	-114.3	-114.4	2.3	-111.3	-118.1
109	-94.6	-94.9	2.5	-92.5	-98.2
110	-97.4	-97.7	4.4	-92.5	-103.8
111	-82.1	-82.5	2.9	-79.2	-86.3
112	-99.2	-101.1	4.6	-96.7	-109.0
113	-118.7	-118.8	2.0	-116.5	-121.5
114	-124.8	-125.1	3.7	-120.7	-130.0
115	-117.8	-118.4	2.8	-115.6	-122.8
116	-128.3	-129.1	3.9	-124.9	-134.4
117	-119.9	-120.3	2.8	-116.7	-124.0
118	-127.6	-128.5	4.2	-123.9	-134.5
119	-121.0	-121.4	3.1	-117.8	-125.9
120	-126.7	-126.5	2.6	-122.9	-129.4
121	-119.9	-120.3	2.7	-117.1	-124.2
122	-113.4	-113.6	2.0	-111.1	-116.1
123	-107.9	-108.0	2.1	-105.4	-110.7
124	-114.2	-114.1	2.5	-110.7	-117.1
125	-114.6	-114.6	2.7	-110.9	-117.9
126	-92.7	-93.3	4.3	-88.3	-99.3
127	-110.0	-110.0	2.5	-106.9	-112.9

表 3.3.2-9 実測値の受信電力(RU-2 狭指向性、線路内、再掲)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
201	-124.4	-124.3	1.8	-121.7	-126.3
202	-123.4	-123.6	2.5	-120.7	-126.5
203	-121.7	-121.9	2.0	-119.5	-124.4
204	-120.3	-120.5	2.0	-118.1	-123.1
205	-118.3	-118.5	1.9	-116.1	-121.1
206	-114.8	-114.5	1.7	-111.8	-116.6
207	-107.8	-107.8	3.1	-103.7	-111.5
208	-83.7	-84.5	4.1	-79.8	-90.5
209	-121.8	-122.0	2.0	-119.6	-124.5
210	-123.9	-124.4	3.0	-121.5	-127.7
211	-86.3	-86.1	2.3	-83.2	-89.0
212	-80.2	-79.9	1.8	-77.2	-82.1

また、漏洩同軸ケーブルにおいて実測した箇所を図 3.3.2-12 から図 3.3.2-15 に示す。また、測定点の測定点情報を表 3.3.2-10 から表 3.3.2-13 に示す。表 3.3.2-10 から表 3.3.2-13 に示す実測した地点における受信電力の結果を表 3.3.2-14 から表 3.3.2-17 に示す。



図 3.3.2-12 実測した地点(RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路外)(地理院地図を加工して作成)

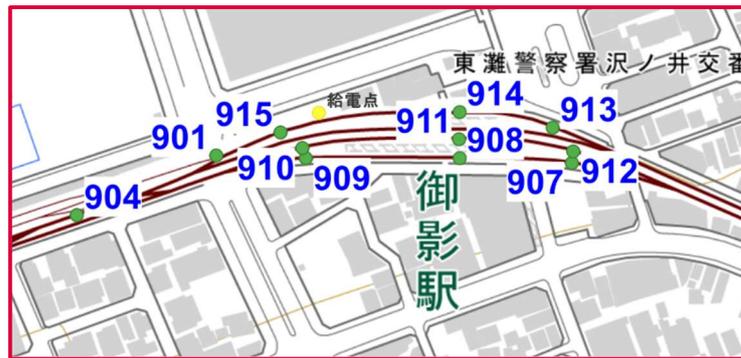


図 3.3.2-13 実測した地点 (RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路内、御影駅付近の拡大図含む)
(地理院地図を加工して作成)



図 3.3.2-14 実測した地点 (RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路外)(地理院地図を加工して作成)



図 3.3.2-15 実測した地点 (RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路内) (地理院地図を加工して作成)

表 3.3.2-10 測定点情報 (RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路外)

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]	測定点標高 [m]	法線距離 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
801	63.1	62.3	12.075	11.0	11.9	7.9	1.5	0
802	31.4	29.8	12.075	11.0	11.7	22.4	1.5	0
803	68.1	67.4	12.075	11.0	11.9	-	1.5	0
804	305.9	305.9	12.075	11.0	17.5	-	1.5	0
805	488.8	488.8	12.075	11.0	21.7	-	1.5	0
806	428.4	428.2	12.075	11.0	8.4	-	1.5	0
807	492.6	492.5	12.075	11.0	10.4	-	1.5	0
808	318.7	318.3	12.075	11.0	5.8	317.7	1.5	0
809	483.5	483.2	12.075	11.0	3.3	483.3	1.5	1
810	133.0	132.8	12.075	11.0	13.8	94.3	1.5	1
811	158.2	158.1	12.075	11.0	14.3	131.6	1.5	1
812	217.9	217.7	12.075	11.0	13.6	-	1.5	1
813	298.4	298.3	12.075	11.0	14.2	-	1.5	1
814	178.4	178.1	12.075	11.0	11.2	-	1.5	1
815	294.3	294.0	12.075	11.0	9.3	-	1.5	1

表 3.3.2-11 測定点情報(RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路内)

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]	測定点標高 [m]	法線距離 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
901	49.3	49.3	12.075	11.0	21.6	-	1.5	0
902	522.5	522.5	12.075	11.0	17.0	-	1.5	0
903	688.2	688.2	12.075	11.0	17.0	-	1.5	0
904	116.3	116.3	12.075	11.0	20.8	-	1.5	0
905	502.6	502.5	12.075	11.0	17.2	-	1.5	0
906	433.6	433.6	12.075	11.0	17.8	-	1.5	0
907	113.8	113.8	12.075	11.0	21.2	-	1.5	0
908	65.2	65.2	12.075	11.0	22.4	28.1	1.5	0
909	21.0	21.0	12.075	11.0	21.8	17.0	1.5	0
910	17.3	17.3	12.075	11.0	21.7	12.2	1.5	0
911	62.9	62.9	12.075	11.0	22.4	19.4	1.5	0
912	113.6	113.6	12.075	11.0	21.1	-	1.5	0
913	103.4	103.4	12.075	11.0	21.2	-	1.5	0
914	62.1	62.0	12.075	11.0	25.5	7.4	1.5	0
915	19.1	19.1	12.075	11.0	21.6	7.1	1.5	0

表 3.3.2-12 測定点情報(RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路外)

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]	測定点標高 [m]	法線距離 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
1001	123.9	123.7	5.3	10.5	7.9	120.3	1.5	0
1002	246.6	246.6	5.3	10.5	8.7	244.8	1.5	0
1003	56.9	56.4	5.3	10.5	6.5	41.7	1.5	0
1004	58.6	58.0	5.3	10.5	6.1	-	1.5	1
1005	90.5	90.1	5.3	10.5	5.9	-	1.5	1
1006	72.4	71.8	5.3	10.5	5.0	-	1.5	1
1007	73.7	73.0	5.3	10.5	4.0	67.5	1.5	0
1008	107.7	107.1	5.3	10.5	3.7	106.9	1.5	1
1009	144.8	144.4	5.3	10.5	3.6	110.5	1.5	1
1010	171.9	171.6	5.3	10.5	4.0	111.2	1.5	0
1011	141.6	141.2	5.3	10.5	4.8	56.0	1.5	0
1012	272.8	272.6	5.3	10.5	3.3	270.0	1.5	1
1013	314.0	313.8	5.3	10.5	2.8	311.5	1.5	1
1014	32.5	31.1	5.3	10.5	4.7	9.8	1.5	1
1015	189.6	189.4	5.3	10.5	6.1	-	1.5	1
1016	202.8	202.7	5.3	10.5	5.3	-	1.5	1
1017	90.7	90.4	5.3	10.5	6.7	44.9	1.5	1
1018	128.9	128.7	5.3	10.5	7.1	48.4	1.5	1

表 3.3.2-13 測定点情報(RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路内)

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]	測定点標高 [m]	法線距離 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)
1101	374.4	374.3	5.3	10.5	7.1	-	3.8	0
1102	540.8	540.7	5.3	10.5	6.0	-	4.9	0
1103	138.8	138.8	5.3	10.5	7.5	-	5.5	0
1104	65.8	65.7	5.3	10.5	8.4	-	4.7	0
1105	5.3	4.6	5.3	10.5	8.3	-	4.8	0
1106	68.0	68.0	5.3	10.5	8.3	5.3	4.7	0
1107	113.9	113.9	5.3	10.5	8.0	5.5	5.1	0
1108	171.5	171.5	5.3	10.5	8.3	-	4.9	0
1109	230.0	230.0	5.3	10.5	7.9	-	5.7	0
1110	288.4	288.4	5.3	10.5	8.2	-	6.2	0
1111	326.2	326.2	5.3	10.5	9.3	-	5.6	0
1112	565.0	565.0	5.3	10.5	14.2	-	5.1	0

表 3.3.2-14 実測値の受信電力(RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路外)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
801	-88.0	-88.1	2.4421396	-85.1	-91.2
802	-90.5	-90.3	3.3615633	-86.1	-94.4
803	-92.1	-92.3	4.3620837	-86.9	-98.3
804	-119.8	-119.9	2.6675389	-116.4	-123.6
805	-126.9	-127.6	4.0045888	-123.4	-133.2
806	-115.1	-115.6	3.1355385	-111.9	-120.2
807	-125.7	-126.5	4.1470820	-122.2	-132.2
808	-119.5	-119.9	2.6481986	-117.1	-124.1
809	-128.1	-128.7	3.3491945	-125.3	-133.4
810	-119.2	-119.5	2.2966800	-116.9	-122.5
811	-125.8	-125.8	2.1627285	-123.3	-128.6
812	-117.3	-117.5	2.6578264	-114.4	-120.8
813	-124.0	-124.1	1.8882430	-121.9	-126.9
814	-118.2	-118.3	2.7097574	-115.0	-122.1
815	-125.2	-125.6	2.4998835	-122.9	-129.2

表 3.3.2-15 実測値の受信電力(RU-1 漏洩同軸ケーブル、線路内)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
901	-76.7	-77.6	4.5033467	-73.0	-83.8
902	-115.7	-116.8	3.1216657	-113.3	-121.3
903	-127.4	-127.4	3.8041565	-122.4	-132.3
904	-92.1	-92.1	2.5431991	-89.0	-95.6
905	-123.2	-123.4	1.4976492	-121.9	-125.5
906	-120.5	-120.6	1.5122676	-118.9	-123.0
907	-105.1	-105.0	2.3734686	-101.9	-108.0
908	-96.6	-96.5	3.5717912	-91.9	-100.8
909	-86.2	-86.3	3.2538304	-82.1	-90.8
910	-79.6	-79.4	2.8649237	-75.8	-82.8
911	-83.8	-84.9	4.2550689	-80.8	-91.4
912	-96.8	-97.8	3.7372271	-93.9	-102.9
913	-98.9	-98.9	2.3646248	-95.8	-101.9
914	-82.7	-83.0	3.7102632	-78.4	-87.9
915	-66.5	-67.0	3.7269189	-62.7	-72.4

表 3.3.2-16 実測値の受信電力(RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路外)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
1001	-117.9	-117.6	3.1775135	-113.4	-121.7
1002	-125.0	-125.4	2.6074478	-122.4	-129.1
1003	-100.9	-100.1	5.5566814	-90.9	-106.8
1004	-101.4	-101.8	2.4662768	-98.9	-105.2
1005	-118.9	-118.8	3.6027657	-113.5	-123.3
1006	-117.8	-117.9	2.0367163	-115.5	-120.7
1007	-80.1	-80.8	3.4137686	-77.2	-85.6
1008	-119.9	-120.1	3.4148164	-116.3	-124.2
1009	-118.7	-119.3	4.0126184	-114.6	-124.9
1010	-125.1	-125.6	2.8724791	-122.6	-129.1
1011	-110.2	-111.5	4.2944495	-107.4	-118.2
1012	-117.6	-117.9	2.9713873	-114.3	-121.4
1013	-124.8	-125.4	3.7683816	-121.4	-130.4
1014	-94.4	-95.0	4.1187575	-90.3	-101.2
1015	-119.1	-118.5	5.4685816	-110.5	-125.0
1016	-129.3	-129.6	3.4973022	-125.6	-134.1
1017	-118.2	-118.5	3.0516541	-114.9	-122.8
1018	-124.1	-124.2	2.9309303	-120.5	-127.9

表 3.3.2-17 実測値の受信電力(RU-2 漏洩同軸ケーブル、線路内)

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
1101	-117.3	-117.7	2.5947550	-114.7	-121.5
1102	-124.6	-124.4	2.0959962	-121.6	-127.0
1103	-100.2	-100.4	1.2163650	-99.0	-102.3
1104	-95.4	-95.6	2.6425909	-92.9	-99.2
1105	-71.9	-72.8	3.7658343	-68.9	-78.8
1106	-96.8	-97.4	4.0746249	-92.9	-103.3
1107	-100.5	-100.3	3.7189384	-94.7	-105.4
1108	-110.3	-110.4	3.3034055	-106.2	-114.8
1109	-115.7	-115.7	2.8759431	-112.3	-119.5
1110	-117.0	-117.0	3.6576879	-111.7	-121.8
1111	-119.0	-118.8	2.5674814	-115.7	-122.0
1112	-123.9	-124.8	4.2069416	-120.1	-130.4

2) 狭指向性アンテナレイトレースシミュレーションの実施

狭指向性アンテナによるレイトレースシミュレーションの諸元を表 3.3.2-18 に示す。

表 3.3.2-18 レイトレースシミュレーションの諸元(RU-1、RU-2、狭指向性アンテナ)

項目	内容
周波数	4850 MHz
送信電力	40 dBm(給電線損失 4.148 dB)
送信アンテナ	狭指向性アンテナ (最大利得 19.5 dBi)
受信アンテナ	無指向性アンテナ (最大利得 0 dBi)
建物モデル、地形モデル	AW3D テレコムデータセット 建物データ:Shape 形式 地形データ:GeoTiff 形式
反射(R)、透過(T)、回折(D)の 最大回数	R3T0D1

受信点配置	5 m 間隔でグリッド状に配置
受信点高さ	線路内:軌道内の高さから、高さ 1.5 m 線路外;地上高さから、高さ 1.5 m

表 3.3.2-18 において設定した諸元における、RU-1、RU-2 の狭指向性アンテナのレイトレースシミュレーションモデルを図 3.3.2-16 から図 3.3.2-19 に示す。



図 3.3.2-16 RU-1 狭指向性アンテナレイトレースシミュレーションモデル(天頂図)

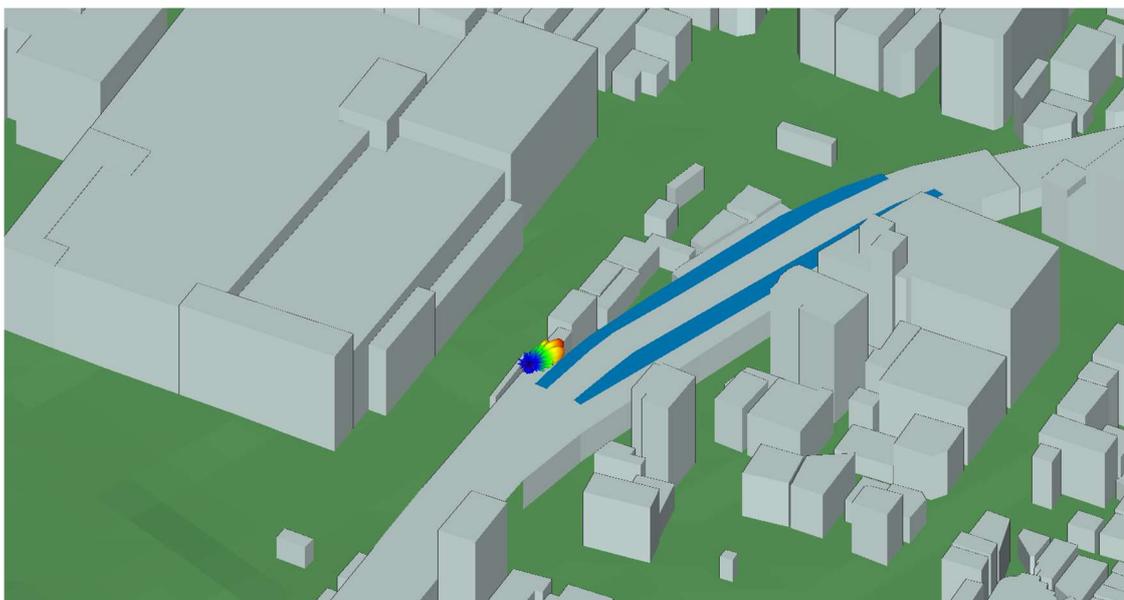


図 3.3.2-17 RU-1 狭指向性アンテナレイトレースシミュレーションモデル(基地局部分拡大)



図 3.3.2-18 RU-2 狭指向性アンテナレイトレースシミュレーションモデル(天頂図)※再掲



図 3.3.2-19 RU-2 狭指向性アンテナレイトレースシミュレーションモデル(基地局部分拡大)
※再掲

レイトレースシミュレーションによる受信電力の結果(受信電力カラーマップ)を、RU-1、RU-2の線路外、線路内においてそれぞれ図 3.3.2-20 から図 3.3.2-23 に示す。また、実測値とレイトレースシミュレーション結果を比較したグラフを図 3.3.2-24 から図 3.3.2-27 に、実測値とレイトレースシミュレーション結果の RMSE を比較した表を表 3.3.2-19 に示す。なお、今回の実証におけるレイトレースシミュレーションは、現場調査を実施したうえ、調達した 3D モデルとの実態との乖離を検討し、レイトレースシミュレーションの結果に影響が表れると思われる駅舎や高架、高速道路の高架のオブジェクトを一部編集した。

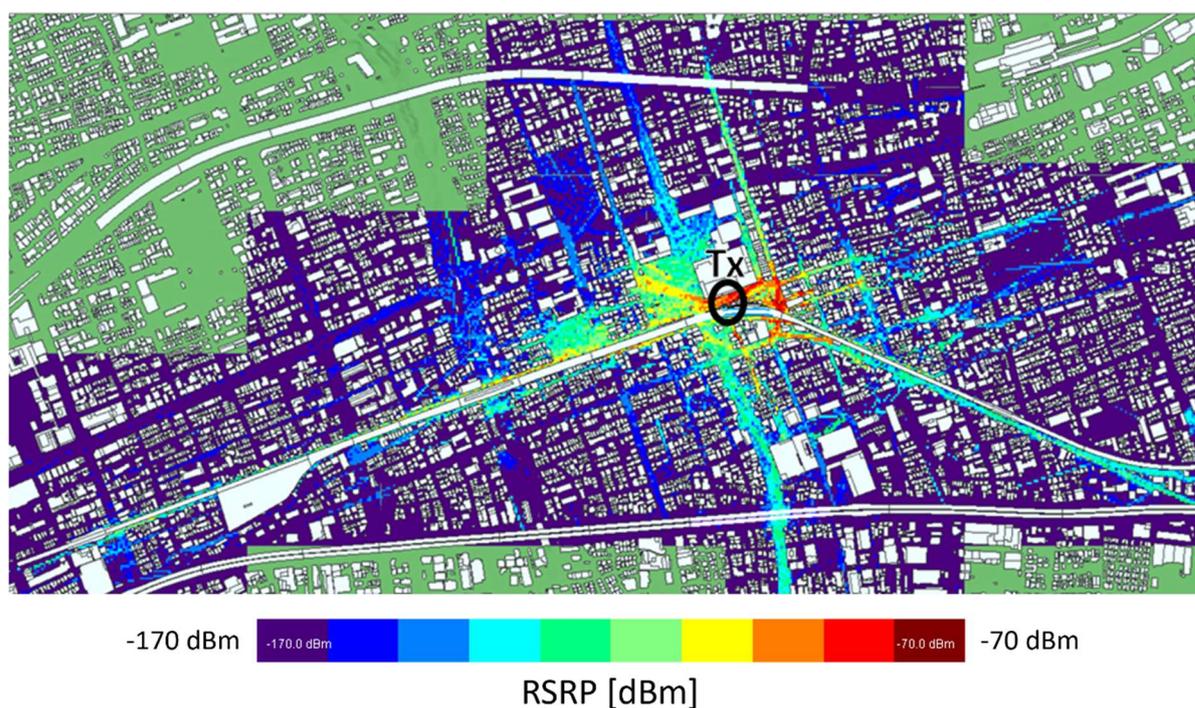


図 3.3.2-20 RU-1 線路外、狭指向性アンテナレイトレース結果(カラーマップ)

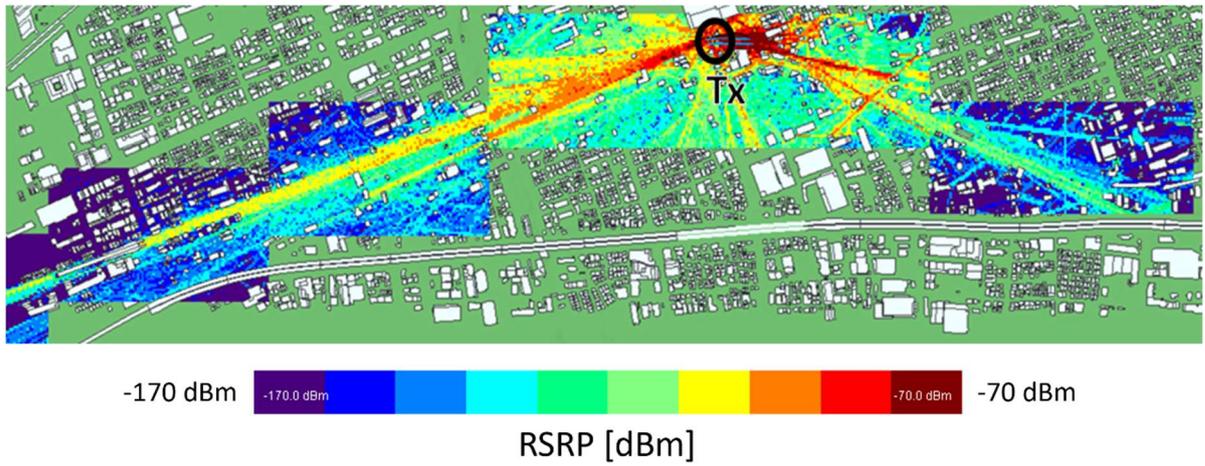


図 3.3.2-21 RU-1 線路内、狭指向性アンテナレイトレース結果(カラーマップ)

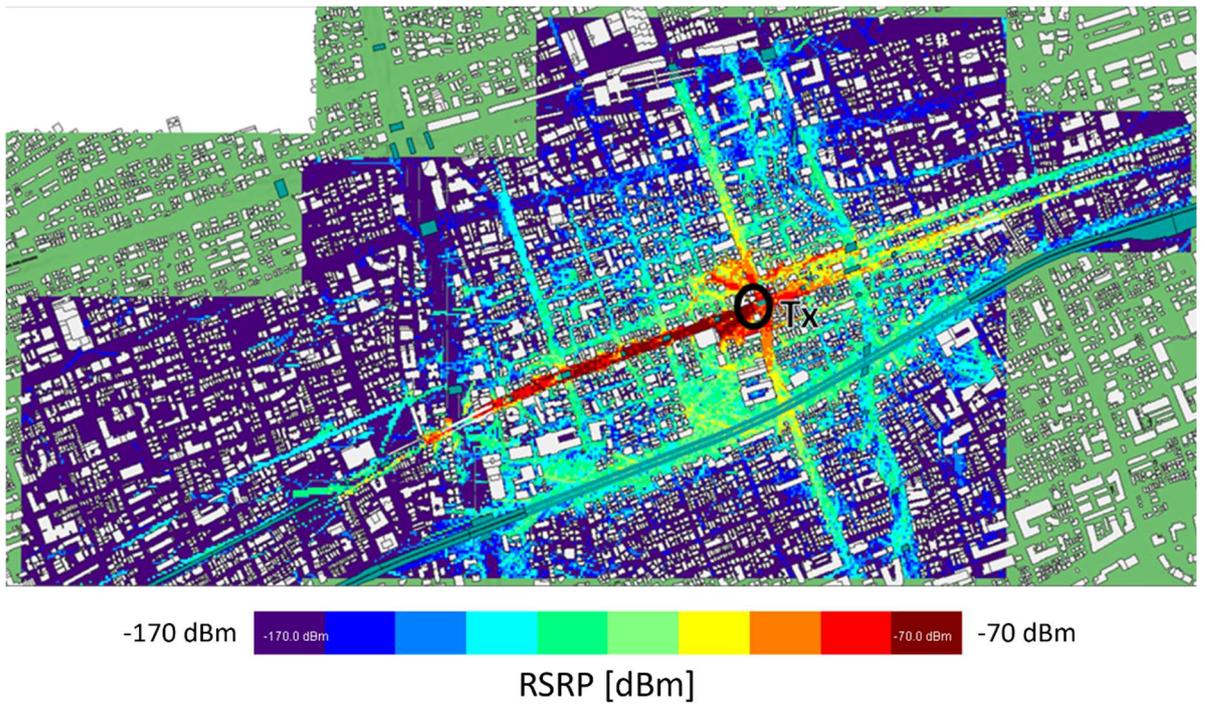


図 3.3.2-22 RU-2 線路外、狭指向性アンテナレイトレース結果(カラーマップ)※再掲

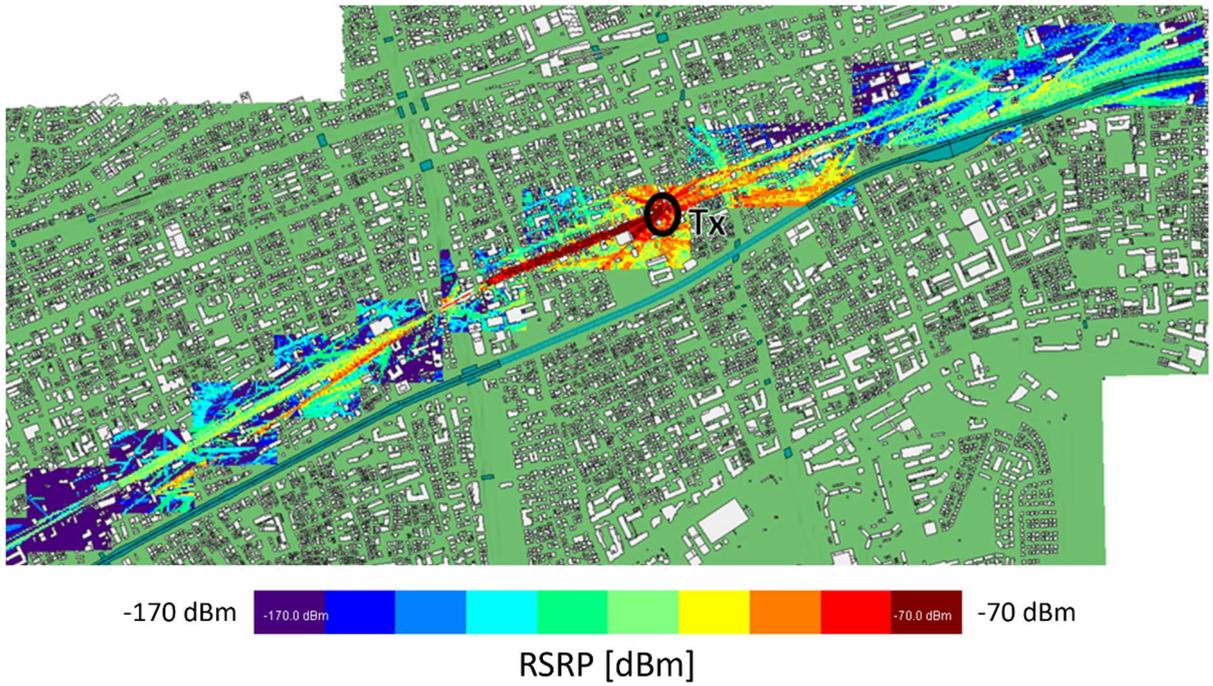


図 3.3.2-23 RU-2 線路内、狭指向性アンテナレイトレース結果(カラーマップ)※再掲

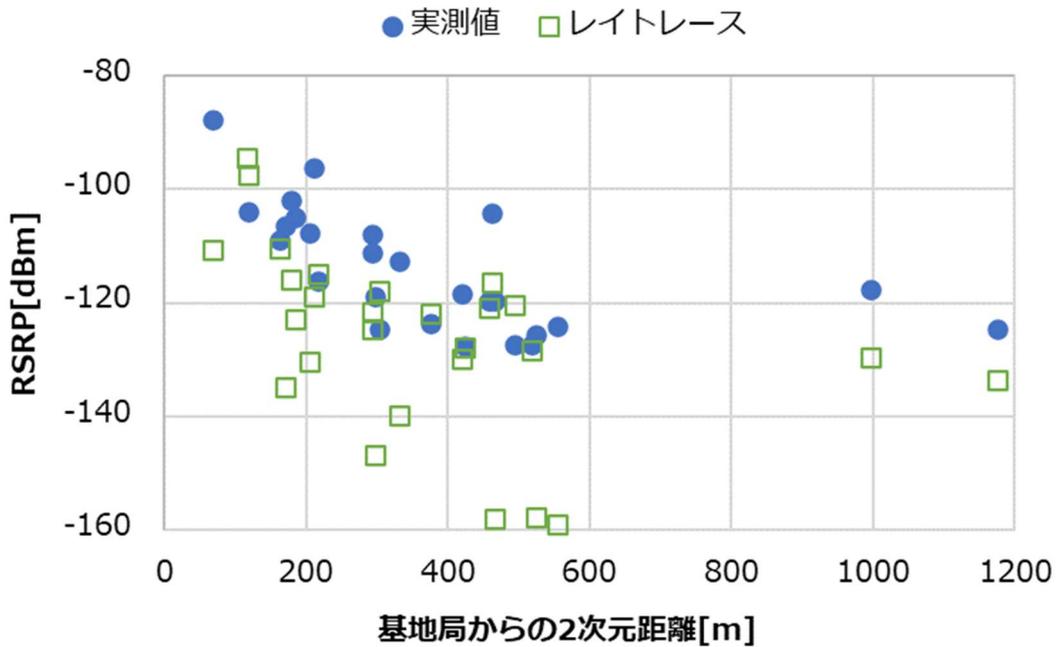


図 3.3.2-24 RU-1 線路外、狭指向性アンテナレイトレース結果(実測との比較グラフ)

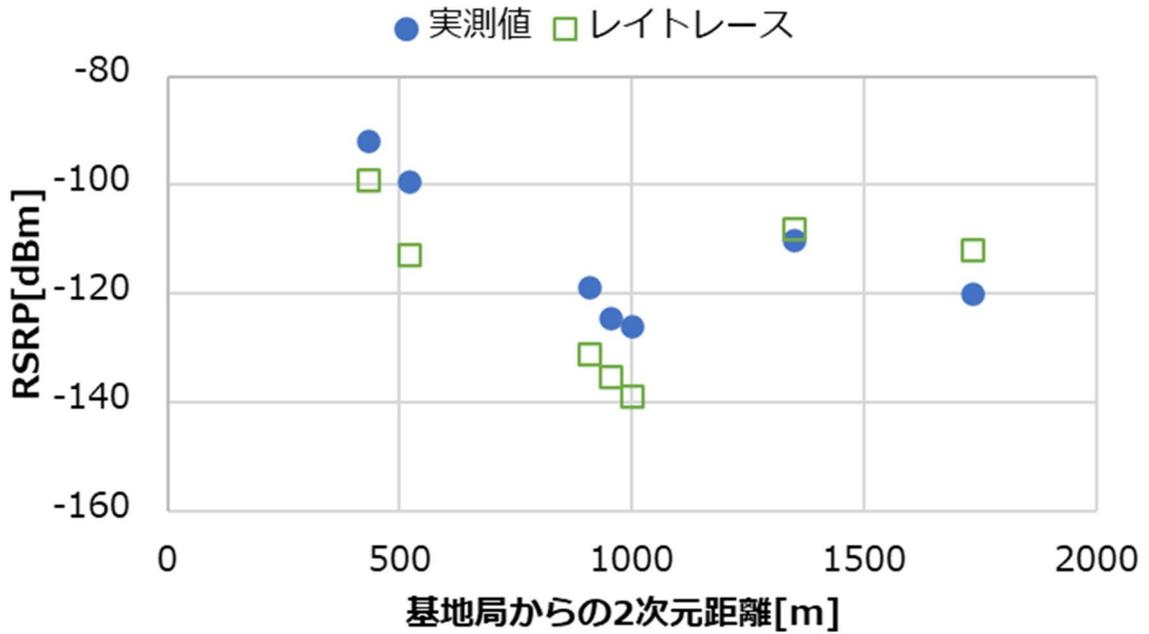


図 3.3.2-25 RU-1 線路内、狭指向性アンテナレイトレース結果(実測との比較グラフ)

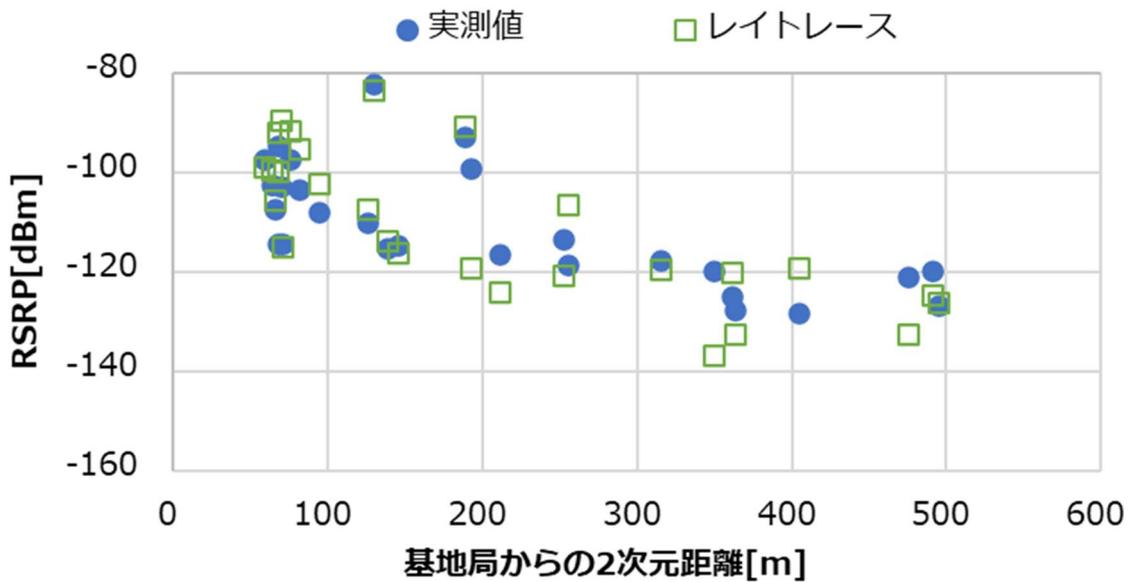


図 3.3.2-26 RU-2 線路外、狭指向性アンテナレイトレース結果(実測との比較)※再掲

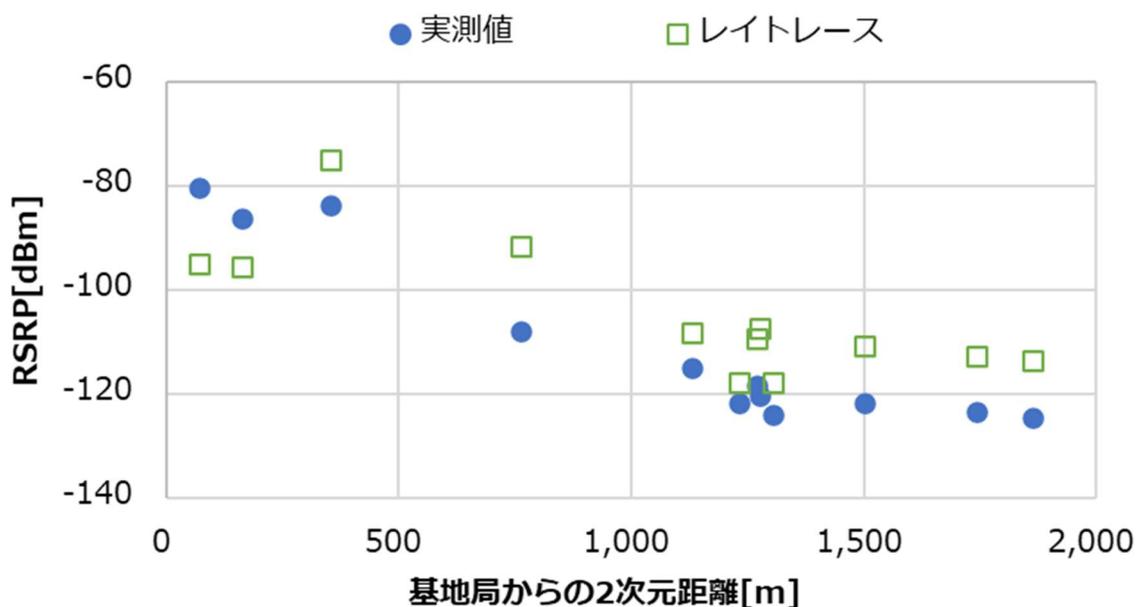


図 3.3.2-27 RU-2 線路内、狭指向性アンテナレイトレース結果(実測との比較)※再掲

表 3.3.2-19 レイトレース結果と実測結果の RMSE(狭指向性アンテナ)

No.	箇所	実測値との RMSE [dB]
1	RU-1・線路外	18.72
2	RU-1・線路内	10.31
3	RU-2・線路外	7.93
4	RU-2・線路内	10.56

表 3.3.2-19 から、実測値とシミュレーション結果の RMSE が概ね 10 程度以下となり、シミュレーションと実測値の傾向を掴めていることを確認した。RU-1 の線路外は RMSE が 18.72 であったが、図 3.3.2-24 の基地局からの 2 次元距離 400 m から 600 m において実測とシミュレーションが合っていない箇所がある。これは、RU-1 の線路外のシミュレーションにおいて電波伝搬状況を正確に模擬できなかった箇所であり、さらなるモデル修正及び反射・回折回数の調整が必要であることを示唆している。RMSE は外れ値に対し厳しく評価することも影響しており、上記の測定点を除くと RU-1 線路外の結果においても電波伝搬状況の傾向を掴めていると考える。

3) 漏洩同軸ケーブルのレイトレースシミュレーションの実施

漏洩同軸ケーブルを用いたローカル 5G システムのカバーエリア、調整対象区域を推定するために、漏洩同軸ケーブルにおいてもレイトレースシミュレーションを実施した。漏洩同軸ケーブルレイトレースシミュレーションの概念について図 3.3.2-28 に示す。また、レイトレースシミュレーションの諸元を表 3.3.2-20 に示す。今回の実証における漏洩同軸ケーブルのレイトレースシミュレーションは、漏洩同軸ケーブルに沿って送信点を 1 m おきに配置している。隣接している送信点は、漏洩同軸ケーブルの伝送損失である 0.3 dB/m の値を用いて送信電力を減衰させ、複数の送信点の合計値が漏洩同軸ケーブルへ給電する電力と等しくなるように各送信点の送信電力を設定している。また、最終的な結果は、各受信点において、各送信点からの結果を、位相を考慮せず合算することで導出している。なお、各送信点には、メーカーより受領した 1 m 単位の漏洩同軸ケーブルのアンテナパターン情報を入力してレイトレースシミュレーションを実施している。

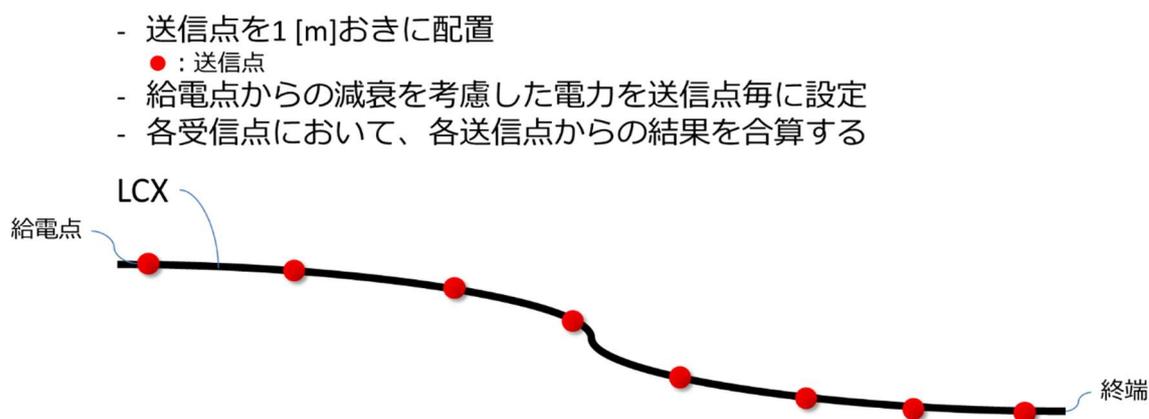


図 3.3.2-28 漏洩同軸ケーブルレイトレースシミュレーションの概念図

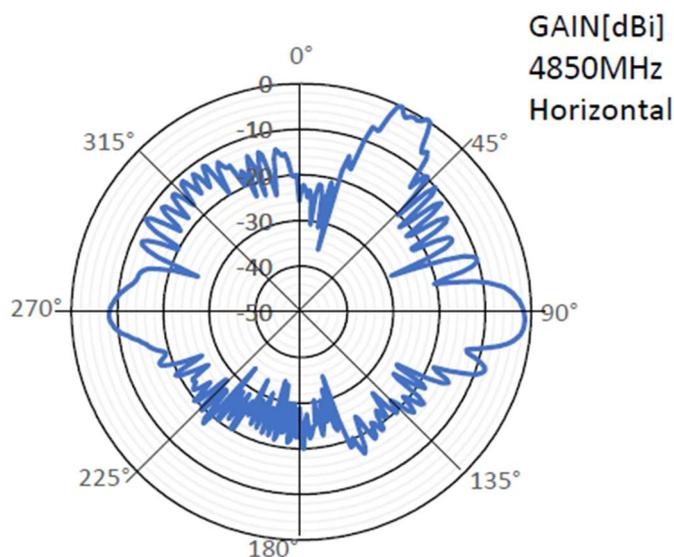


図 3.3.2-29 漏洩同軸ケーブルのアンテナパターン(水平面)

表 3.3.2-20 レイトレースシミュレーションの諸元(RU-1、RU-2、漏洩同軸ケーブル)

項目	内容
周波数	4850 MHz
送信電力	37 dBm(給電線損失 4.148 dB)
送信アンテナ	漏洩同軸ケーブル (最大利得 0.27 dBi)
受信アンテナ	無指向性アンテナ (最大利得 0 dBi)
建物モデル、地形モデル	AW3D テレコムデータセット 建物データ:Shape 形式 地形データ:GeoTiff 形式
反射(R)、透過(T)、回折(D)の 最大回数	R3T0D1
受信点配置	5 m 間隔でグリッド状に配置
受信点高さ	線路内:軌道内の高さから、高さ 1.5 m 線路外;地上高さから、高さ 1.5 m

漏洩同軸ケーブルレイトレースシミュレーションのシミュレーション上における漏洩同軸ケーブルの送信点を RU-1、RU-2 それぞれにおいて図 3.3.2-30、図 3.3.2-31 に示す。

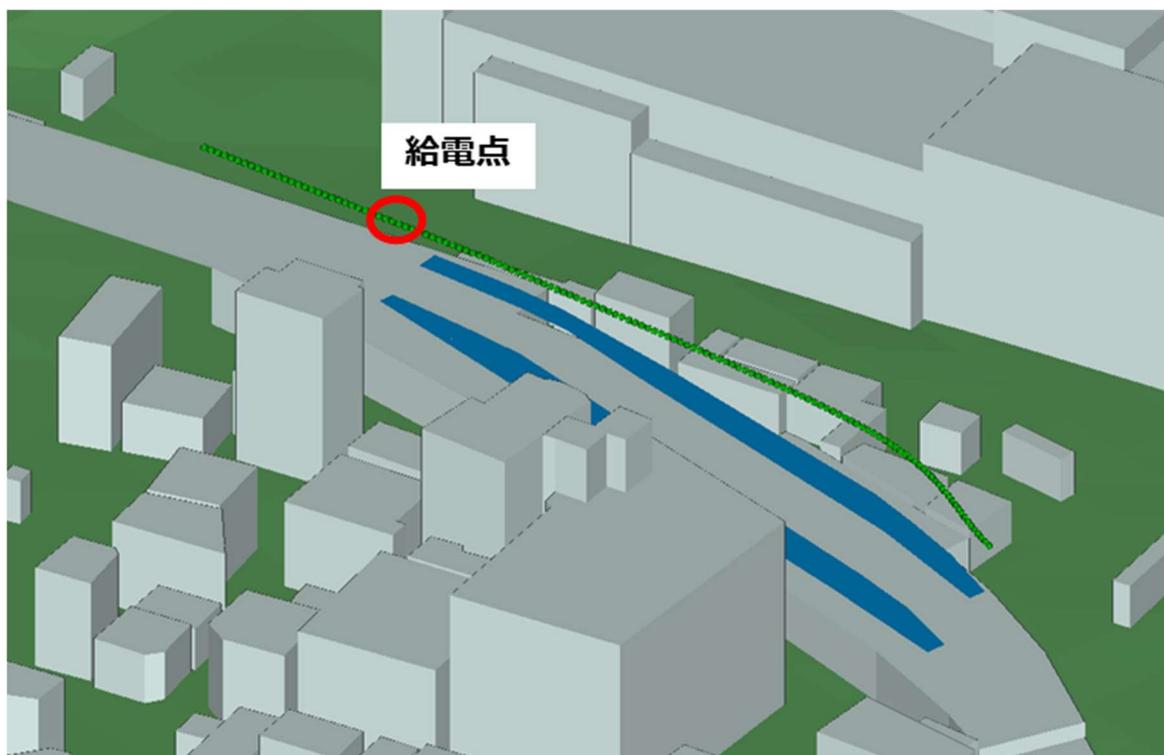


図 3.3.2-30 (RU-1)漏洩同軸ケーブルシミュレーションの送信点付近拡大図

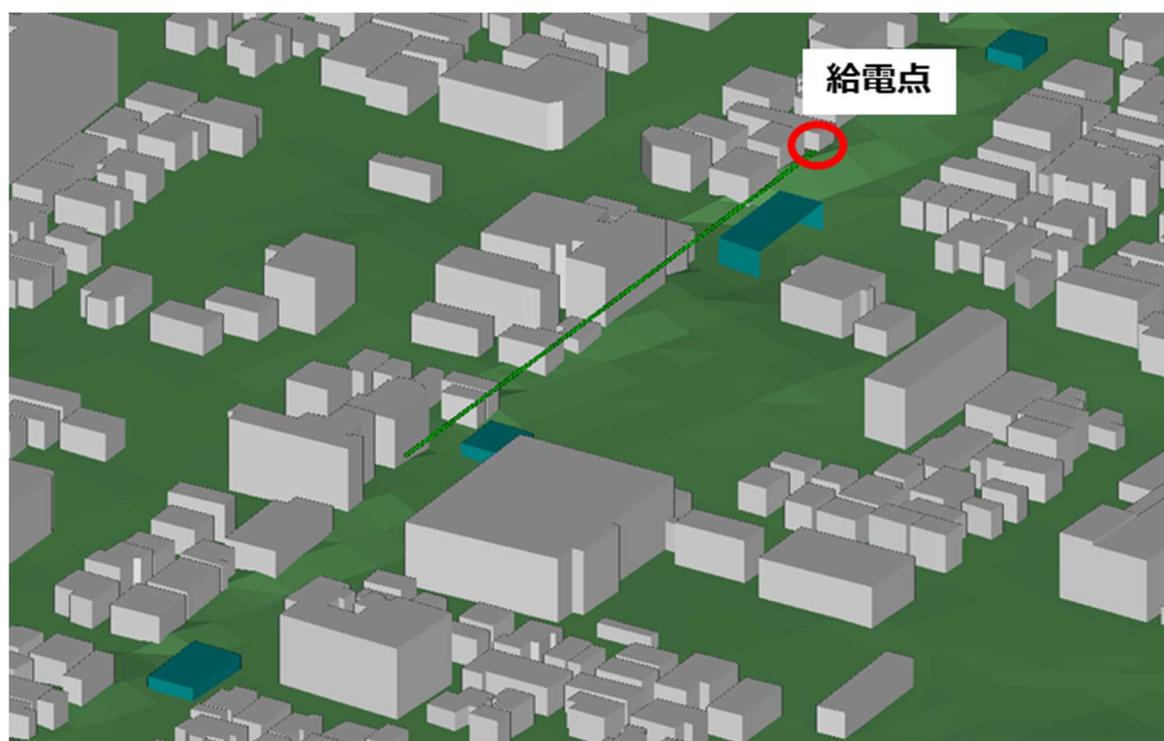


図 3.3.2-31 (RU-2)漏洩同軸ケーブルシミュレーションの送信点付近拡大図

RU-1、RU-2 それぞれにおけるレイトレースシミュレーションを実施した結果の、受信電力を表すカラーマップを図 3.3.2-32 から図 3.3.2-35 に示す。

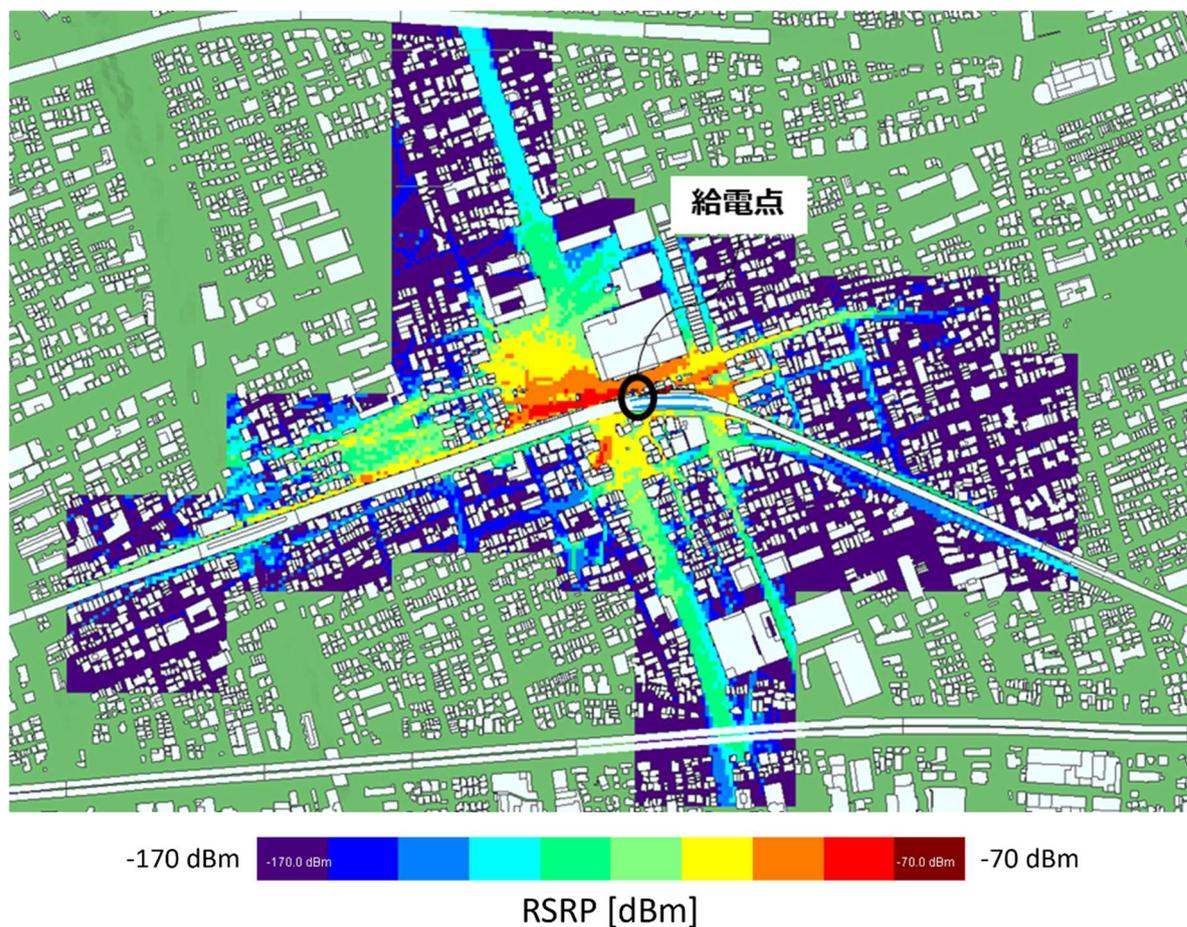


図 3.3.2-32 RU-1 線路外、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(カラーマップ)

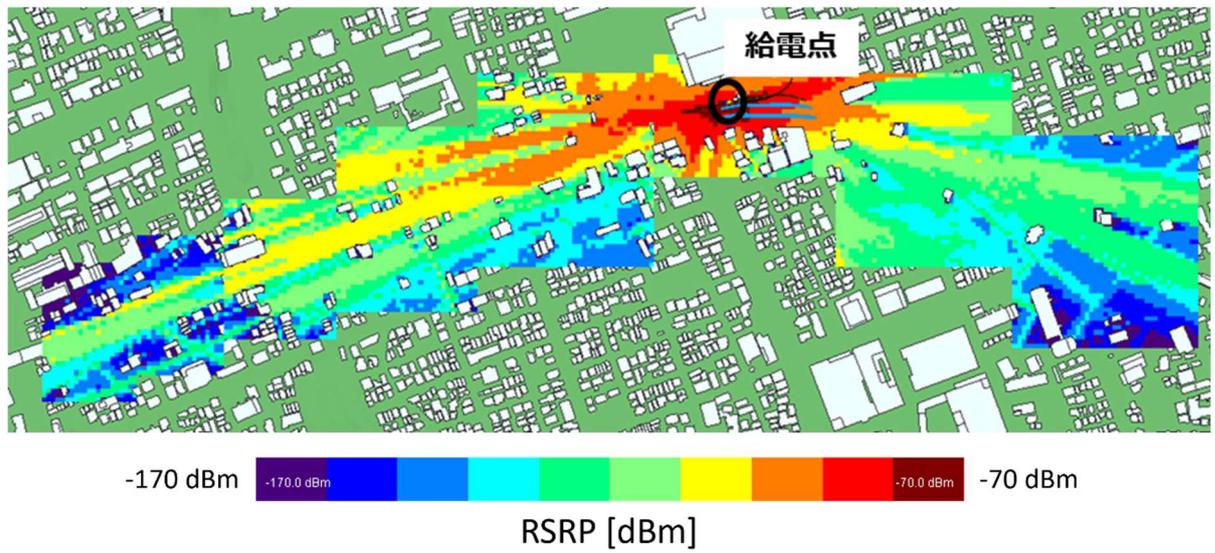


図 3.3.2-33 RU-1 線路内、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(カラーマップ)

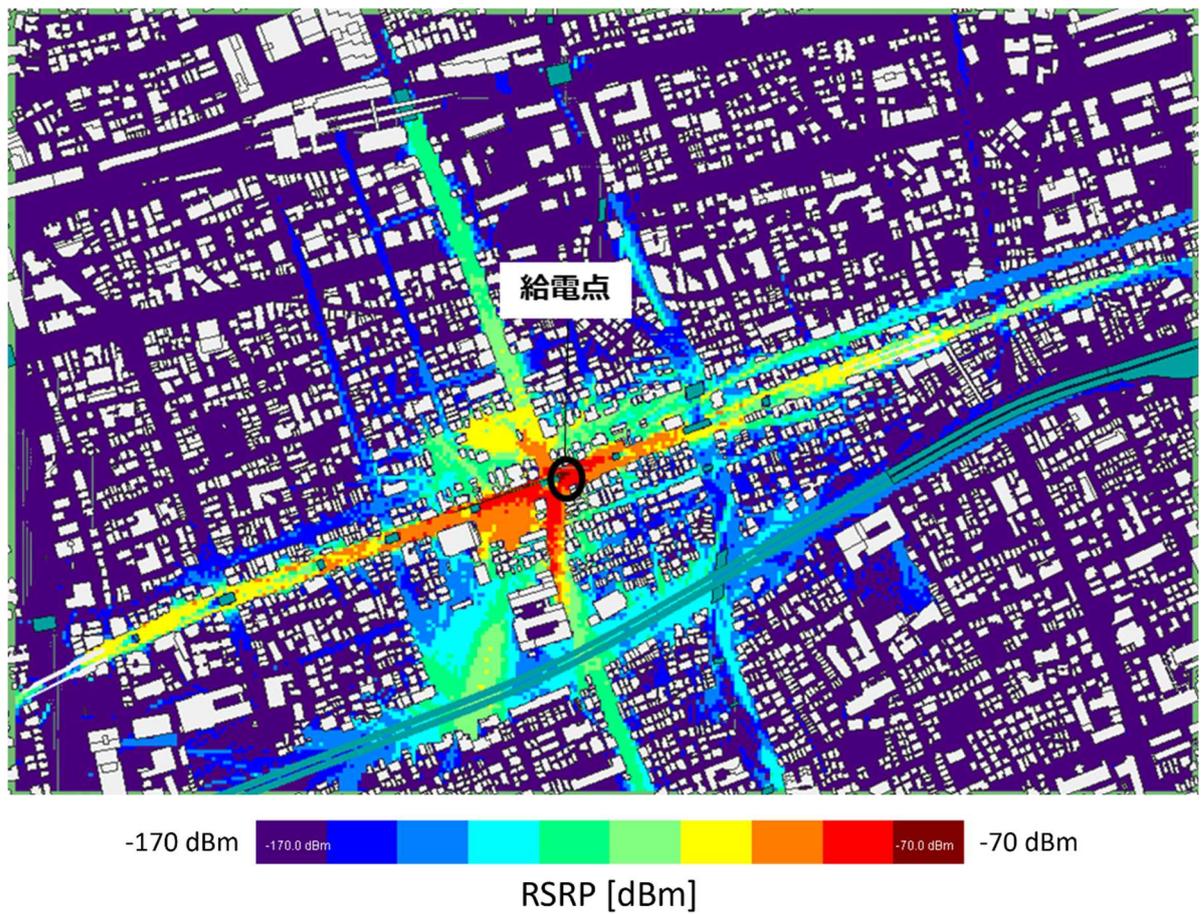


図 3.3.2-34 RU-2 線路外、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(カラーマップ)

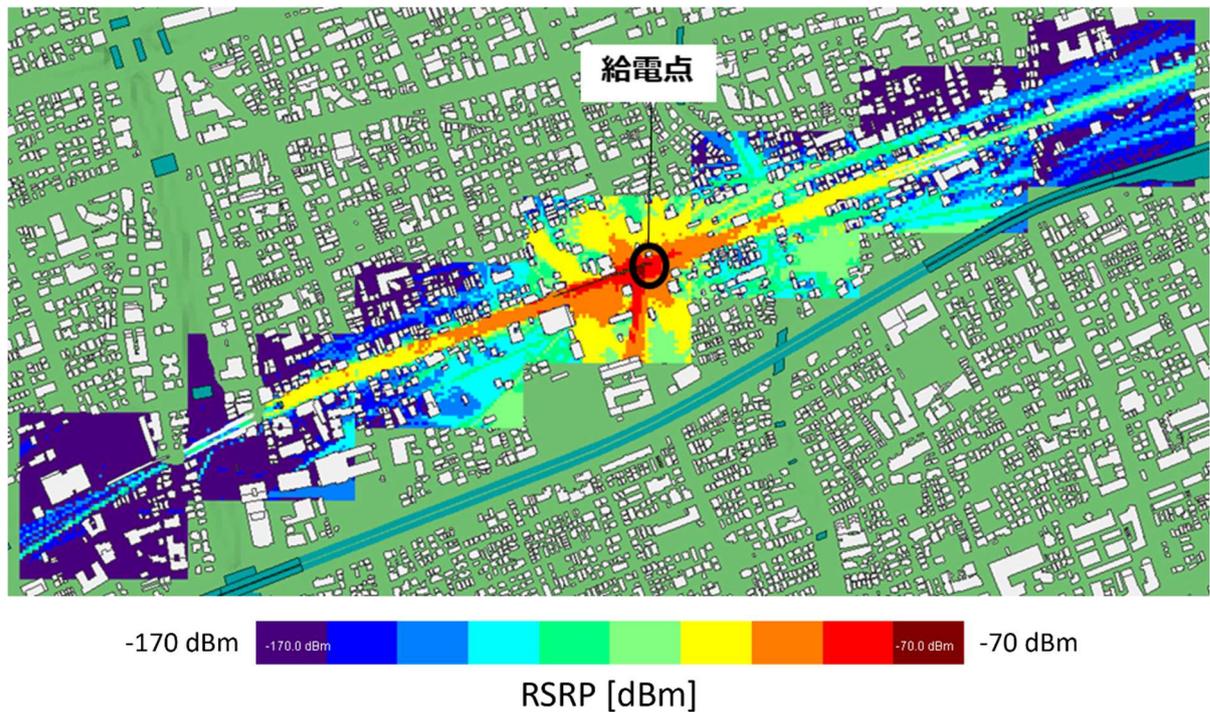


図 3.3.2-35 RU-2 線路内、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(カラーマップ)

RU-1、RU-2 それぞれにおいて実施したレイトレースシミュレーションの結果の、実測値との RMSE を表 3.3.2-21 に示す。また、漏洩同軸ケーブルの給電点座標からの 2 次元距離に対する RSRP を比較したグラフを図 3.3.2-36 から図 3.3.2-39 に示す。

表 3.3.2-21 レイトレース結果と実測値の RMSE(漏洩同軸ケーブル)

No.	箇所	実測値との RMSE[dB]
1	RU-1・線路外	9.06
2	RU-1・線路内	7.23
3	RU-2・線路外	8.83
4	RU-2・線路内	14.05

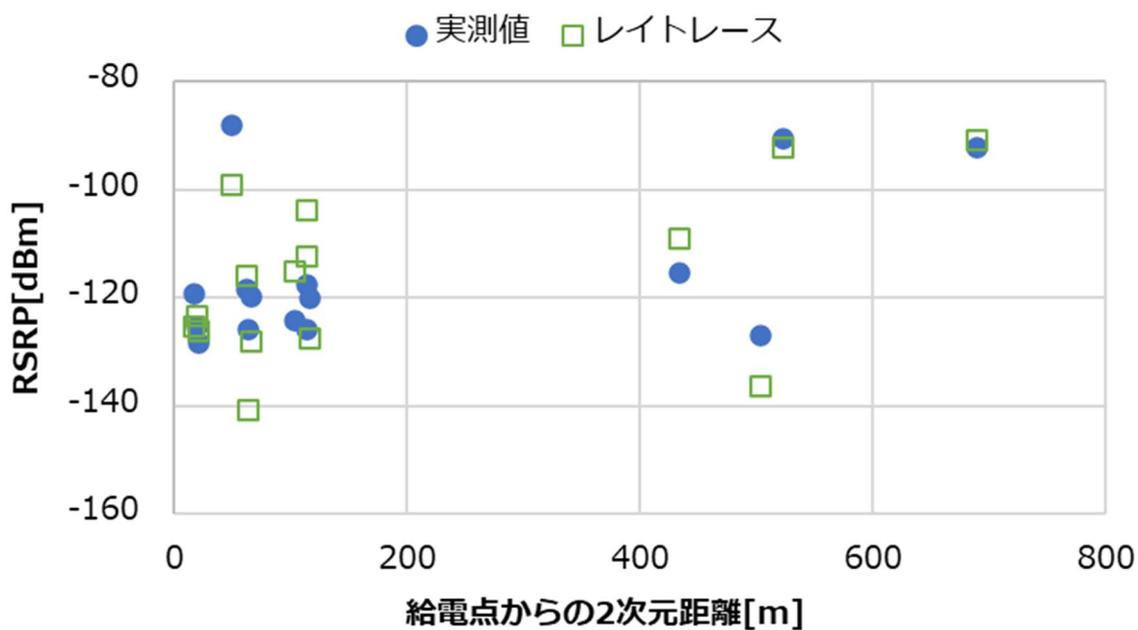


図 3.3.2-36 RU-1 線路外、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(実測との比較)

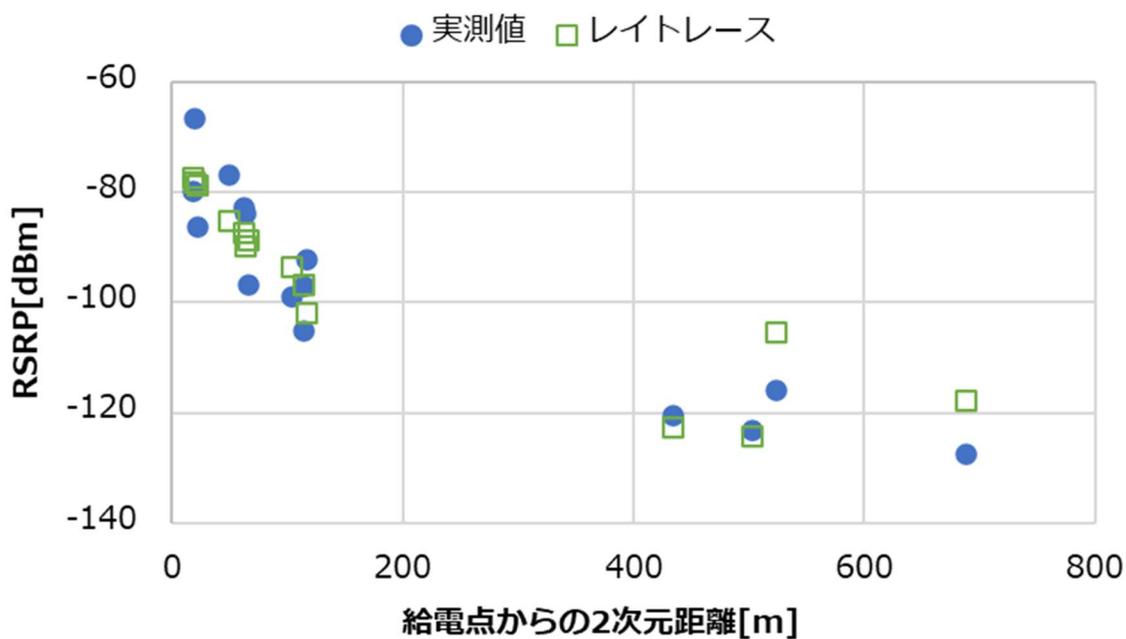


図 3.3.2-37 RU-1 線路内、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(実測との比較)

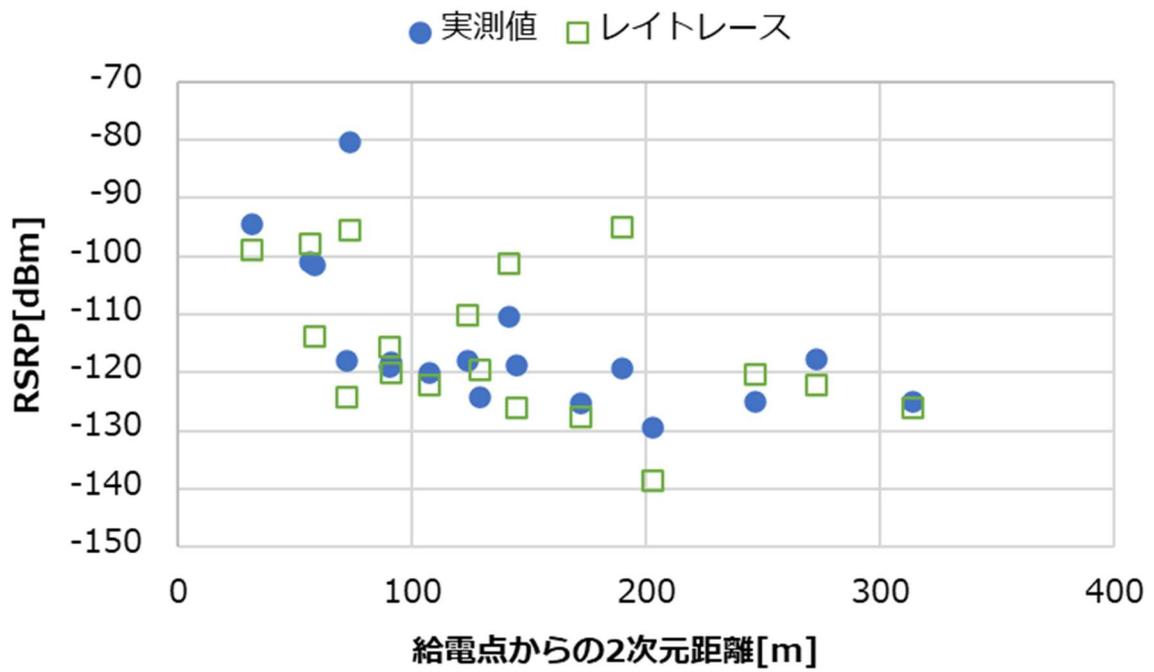


図 3.3.2-38 RU-2 線路外、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(実測との比較)

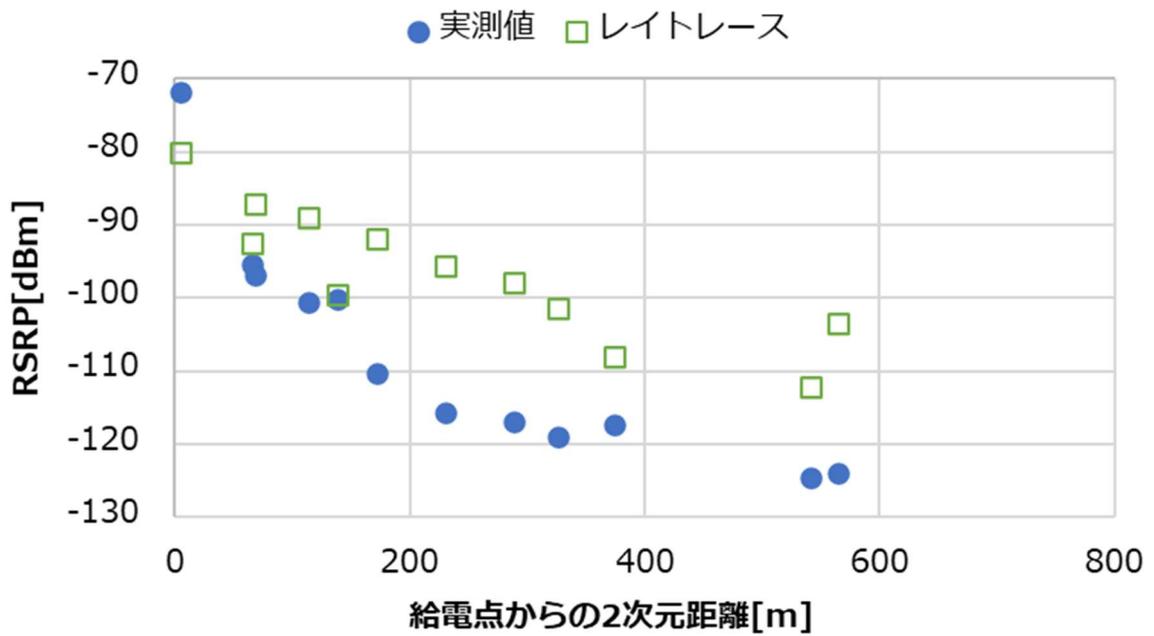


図 3.3.2-39 RU-2 線路内、漏洩同軸ケーブルレイトレース結果(実測との比較)

図 3.3.2-36 から図 3.3.2-39 より、シミュレーションと実測の傾向が良く一致しており、RMSE も概ね 10 以下となったことから、レイトレース法によるカバーエリア、調整対象区域の推定は有効であることを示した。図 3.3.2-39 では、シミュレーションの結果が実測よりも過大評価する結果となった。これは、各送信点からの結果を、位相を考慮せず合算しているため、線路内のような非常に見通しの取れるエリアでは過大評価になったのだと考えている。

なお、今回の実証におけるレイトレースシミュレーションは、現場調査を実施したうえ、調達した 3D モデルとの実態との乖離を検討し、レイトレースシミュレーションの結果に影響が表れると思われる駅舎や高架、高速道路の高架のオブジェクトを一部編集した。

4) 測定点における伝送性能の測定結果

RU-1、RU2 では、受信電力に加え、SIR、伝送スループット(UL/DL)、伝送遅延時間、マルチパス数を測定した。なお、本項目の図表において掲載する測定点 ID は、表 3.3.2-2 から表 3.3.2-5 及び表 3.3.2-10 から表 3.3.2-13 で掲載する測定点 ID に対応する。

RU-1 について、SIR の測定結果を表 3.3.2-22 に、SIR に対する UL のスループットの測定結果を表 3.3.2-23 に、SIR に対する DL のスループットの測定結果を表 3.3.2-24 に、伝送遅延の測定結果を表 3.3.2-25 に示す。また、RSRP に対する UL/DL スループットを図 3.3.2-40、図 3.3.2-41 に、SIR に対する UL/DL スループットを図 3.3.2-42、図 3.3.2-43 に示す。

表 3.3.2-22 SIR の測定結果(RU-1)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
701	4.4	4.4	1.7	6.7	2.3
702	-0.9	-1.3	3.5	2.9	-6.2
703	-2.7	-3.0	2.5	0.0	-6.3
704	19.7	19.7	1.2	21.3	18.1
705	-0.9	-1.2	2.5	1.7	-4.7
706	3.7	3.8	2.1	6.6	1.2
707	12.5	12.3	2.2	15.0	9.5
708	19.0	19.1	1.4	20.9	17.3
901	20.8	20.7	1.3	22.4	19.0
902	7.0	6.3	3.3	10.2	1.5
903	-3.7	-3.7	3.7	1.3	-8.6
904	19.6	19.5	1.5	21.3	17.6
905	0.2	0.1	1.9	2.3	-2.3
906	2.9	2.8	1.9	5.1	0.2
907	14.8	14.8	2.1	17.4	11.9
908	18.9	18.7	2.1	21.0	16.2
909	19.4	19.3	1.7	21.5	17.2
910	20.2	20.3	1.4	22.0	18.5
911	20.6	20.5	1.5	22.3	18.6
912	18.7	18.4	2.3	20.8	15.6
913	18.0	17.8	1.8	19.9	15.7
914	20.6	20.6	1.3	22.3	18.9
915	21.1	21.1	1.3	22.7	19.4

表 3.3.2-23 SIR に対する UL スループットの測定結果(RU-1)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]					UL伝送スループット 実測値 [Mbps]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
708	19.0	19.1	1.4	20.9	17.3	2.0	2.3	1.8	6.0	0.5
901	20.8	20.7	1.3	22.4	19.0	10.5	10.8	3.9	17.6	4.3
904	19.6	19.5	1.5	21.3	17.6	1.5	1.6	0.9	3.3	0.8
908	18.9	18.7	2.1	21.0	16.2	1.0	1.2	0.9	2.8	0.2
909	19.4	19.3	1.7	21.5	17.2	10.1	9.5	1.9	11.6	5.8
910	20.2	20.3	1.4	22.0	18.5	12.4	12.0	4.3	21.1	5.4
911	20.6	20.5	1.5	22.3	18.6	4.3	5.1	1.7	8.2	3.5
912	18.7	18.4	2.3	20.8	15.6	1.3	1.1	0.6	1.7	0.0
913	18.0	17.8	1.8	19.9	15.7	1.0	0.9	0.4	1.3	0.0
914	20.6	20.6	1.3	22.3	18.9	10.8	10.1	2.1	11.9	5.2
915	21.1	21.1	1.3	22.7	19.4	22.3	20.6	4.3	23.0	9.0

表 3.3.2-24 SIR に対する DL スループットの測定結果(RU-1)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]					DL伝送スループット 実測値 [Mbps]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
708	19.0	19.1	1.4	20.9	17.3	229.5	230.9	44.4	324.0	167.0
901	20.8	20.7	1.3	22.4	19.0	371.5	368.7	41.7	414.0	267.0
904	19.6	19.5	1.5	21.3	17.6	237.0	213.1	107.5	340.0	26.9
908	18.9	18.7	2.1	21.0	16.2	223.5	225.6	66.3	306.0	70.0
909	19.4	19.3	1.7	21.5	17.2	482.0	452.5	120.4	584.0	204.0
910	20.2	20.3	1.4	22.0	18.5	464.0	463.0	51.2	551.0	359.0
911	20.6	20.5	1.5	22.3	18.6	326.0	310.5	61.5	375.0	176.0
912	18.7	18.4	2.3	20.8	15.6	211.5	197.7	64.6	262.0	44.3
913	18.0	17.8	1.8	19.9	15.7	217.5	212.7	32.2	257.0	152.0
914	20.6	20.6	1.3	22.3	18.9	368.5	359.0	28.8	397.0	303.0
915	21.1	21.1	1.3	22.7	19.4	518.0	460.5	190.4	651.0	62.7

表 3.3.2-25 伝送遅延の測定結果(RU-1)

測定点ID	伝送遅延* 実測値 [msec]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
708	10.0	32.1	71.7	236.0	3.9
901	5.7	7.1	5.0	15.7	1.6
904	14.8	62.2	131.7	431.0	7.8
908	15.6	58.6	130.9	430.0	7.0
909	10.3	9.8	5.0	15.9	2.4
910	9.4	10.3	4.1	18.5	5.7
911	8.7	12.6	10.4	31.9	2.3
912	14.8	73.3	138.8	425.0	4.5
913	10.7	9.9	5.5	19.7	2.2
914	5.9	8.6	7.7	23.7	1.4
915	13.7	12.5	5.4	20.0	3.1

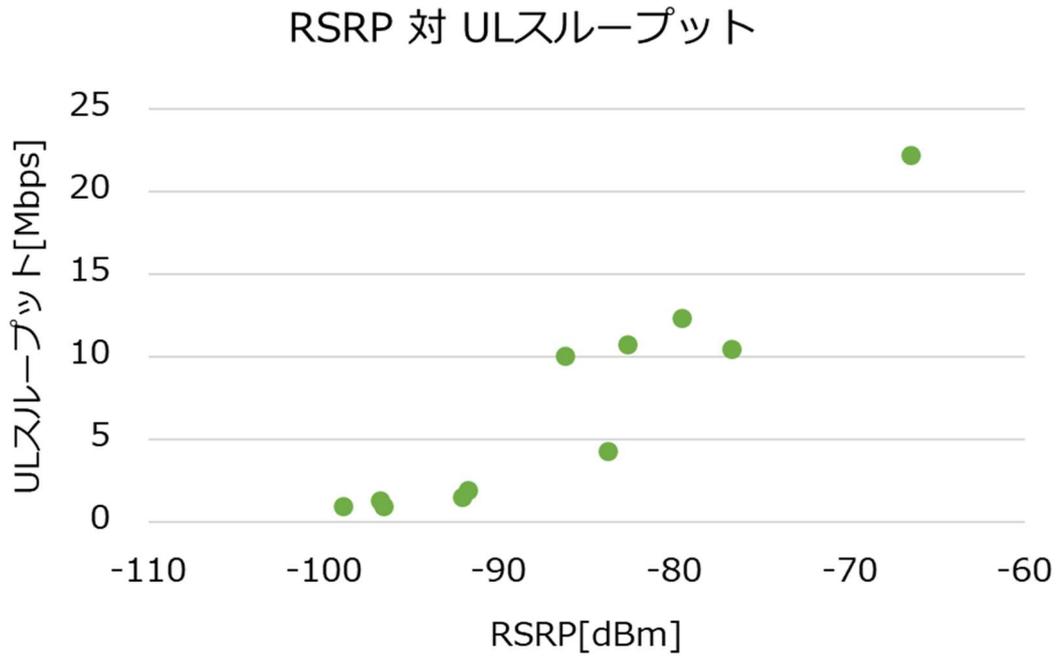


図 3.3.2-40 RSRP に対する UL スループット(RU-1)

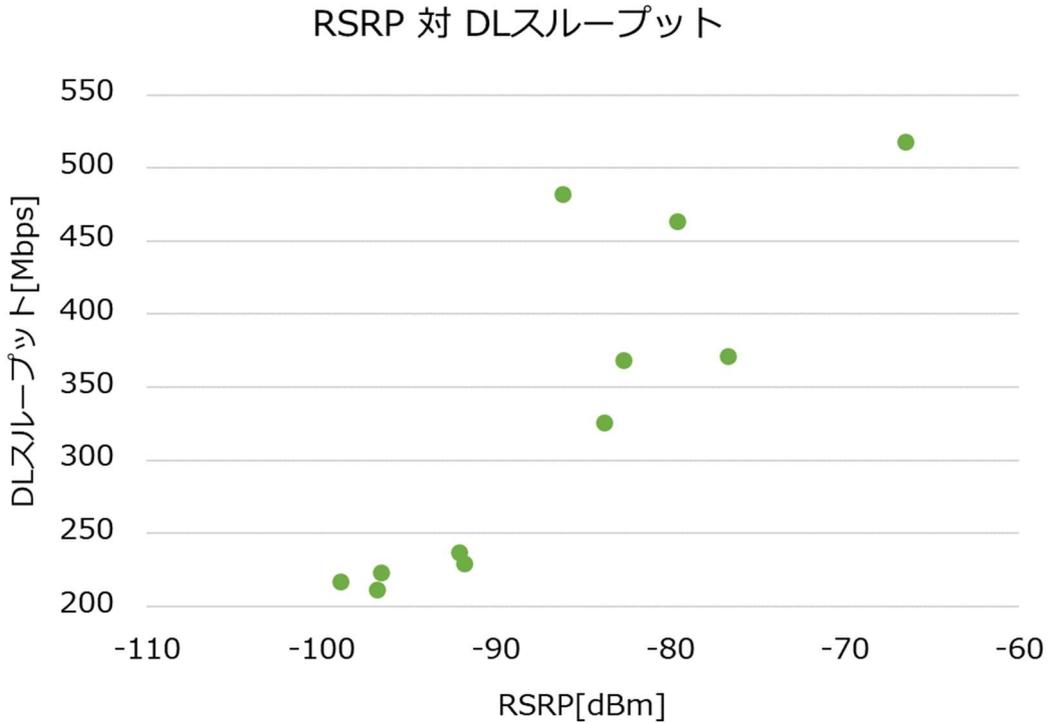


図 3.3.2-41 RSRP に対する DL スループット(RU-1)

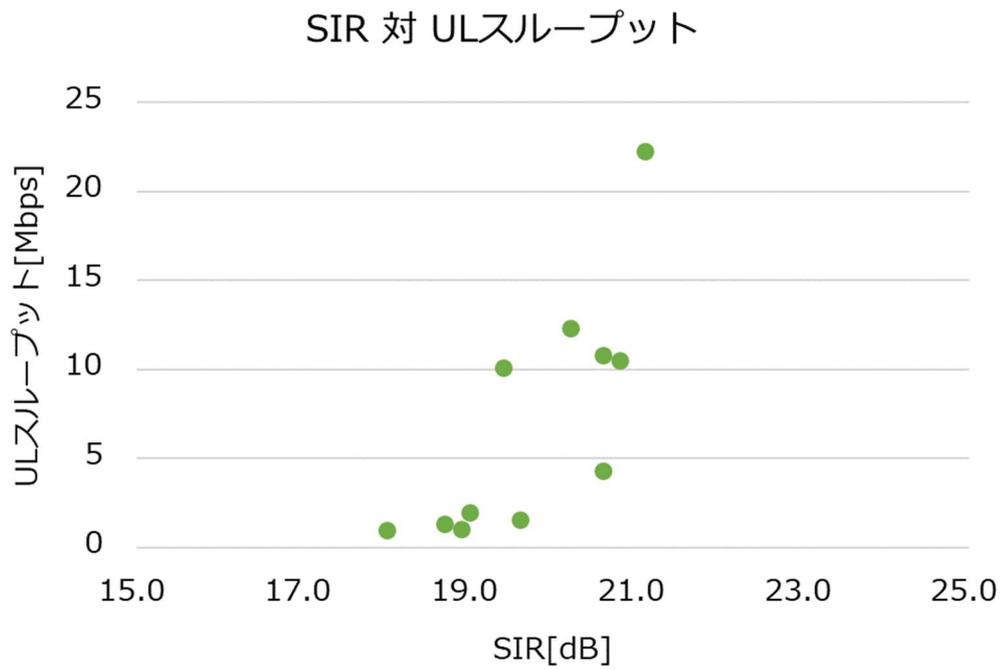


図 3.3.2-42 SIR に対する UL スループット(RU-1)

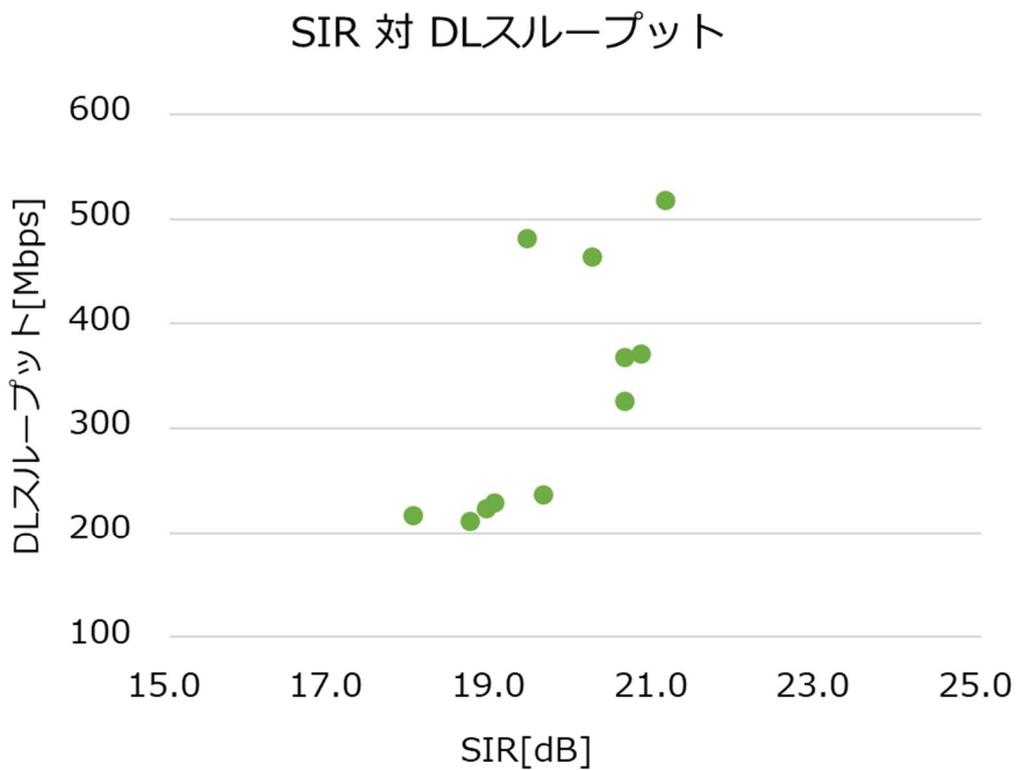


図 3.3.2-43 SIR に対する DL スループット(RU-1)

RU-2 について、SIR の測定結果を表 3.3.2-26 に、SIR に対する UL のスループットの測定結果を表 3.3.2-27 に、SIR に対する DL のスループットの測定結果を表 3.3.2-28 に、伝送遅延の測定結果を表 3.3.2-29 に示す。また、RSRP に対する UL/DL スループットを図 3.3.2-44、図 3.3.2-45 に、SIR に対する UL/DL スループットを図 3.3.2-46、図 3.3.2-47 に示す。

表 3.3.2-26 SIR の測定結果(RU-2)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
201	-0.6	-0.5	2.1	2.1	-3.2
202	0.4	0.3	2.7	3.4	-3.0
203	2.2	2.0	2.3	4.6	-0.9
204	3.4	3.2	2.3	6.1	0.3
205	5.1	5.1	2.3	7.8	2.1
206	9.0	9.0	2.0	11.7	6.5
207	14.4	14.2	2.7	17.6	10.6
208	20.0	19.7	1.8	21.8	17.3
209	1.6	1.4	2.2	4.2	-1.4
210	-0.2	-0.8	3.0	2.5	-4.5
211	12.1	12.4	2.2	15.5	9.6
212	16.2	16.2	2.1	18.9	13.2
1101	6.2	5.8	2.7	8.9	1.9
1102	-0.9	-0.9	2.3	2.1	-3.9
1103	18.4	18.4	1.2	19.8	16.8
1104	19.2	19.0	1.5	20.8	17.1
1105	20.8	20.7	1.3	22.3	19.0
1106	19.2	18.8	2.0	21.0	16.1
1107	18.4	18.2	2.0	20.6	15.5
1108	12.4	12.3	3.1	16.3	8.3
1109	7.8	7.7	2.9	11.0	4.1
1110	6.4	6.4	3.6	11.3	1.5
1111	4.6	4.6	2.7	8.0	1.2
1112	-0.3	-1.1	4.1	3.7	-7.0

表 3.3.2-27 SIR に対する UL スループットの測定結果(RU-2)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]					UL伝送スループット 実測値 [Mbps]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
208	20.0	19.7	1.8	21.8	17.3	4.7	4.5	0.8	5.7	2.9
211	12.1	12.4	2.2	15.5	9.6	3.2	3.3	1.2	5.0	0.6
212	16.2	16.2	2.1	18.9	13.2	13.2	11.5	4.6	15.2	0.0
1104	19.2	19.0	1.5	20.8	17.1	2.1	1.9	1.0	3.4	0.3
1105	20.8	20.7	1.3	22.3	19.0	20.7	21.0	6.0	30.4	10.6
1106	19.2	18.8	2.0	21.0	16.1	4.3	4.3	0.7	5.5	3.2

表 3.3.2-28 SIR に対する DL スループットの測定結果(RU-2)

測定点ID	SIR 実測値 [dB]					DL伝送スループット 実測値 [Mbps]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
208	20.0	19.7	1.8	21.8	17.3	366.5	357.5	66.5	436.0	201.0
211	12.1	12.4	2.2	15.5	9.6	303.5	306.4	21.8	335.0	278.0
212	16.2	16.2	2.1	18.9	13.2	454.5	401.4	112.8	472.0	110.0
1104	19.2	19.0	1.5	20.8	17.1	185.0	185.1	27.7	233.0	143.0
1105	20.8	20.7	1.3	22.3	19.0	274.5	280.6	28.9	333.0	241.0
1106	19.2	18.8	2.0	21.0	16.1	254.0	257.9	27.0	296.0	214.0

表 3.3.2-29 伝送遅延の測定結果(RU-2)

測定点ID	伝送遅延* 実測値 [msec]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位10%値	下位10%値
208	8.1	50.4	134.9	434.0	1.5
211	8.1	8.1	4.6	14.2	1.2
212	7.3	87.1	169.1	433.0	1.8
1104	7.9	10.7	8.6	32.2	2.6
1105	4.9	4.9	2.4	8.6	2.0
1106	6.0	80.2	223.7	716.0	2.3

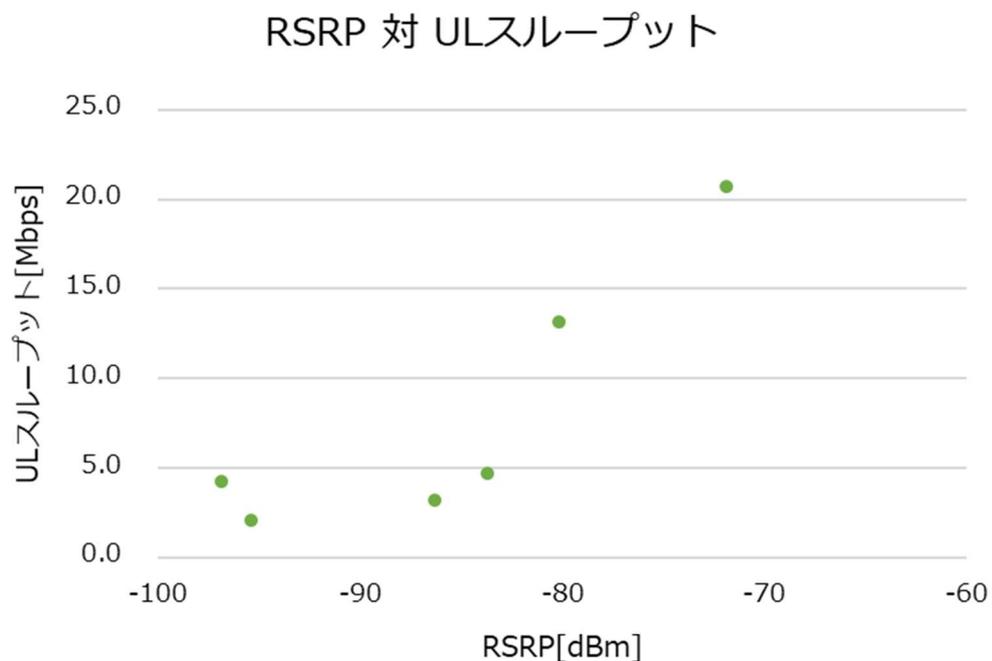


図 3.3.2-44 RSRP に対する UL スループット(RU-2)

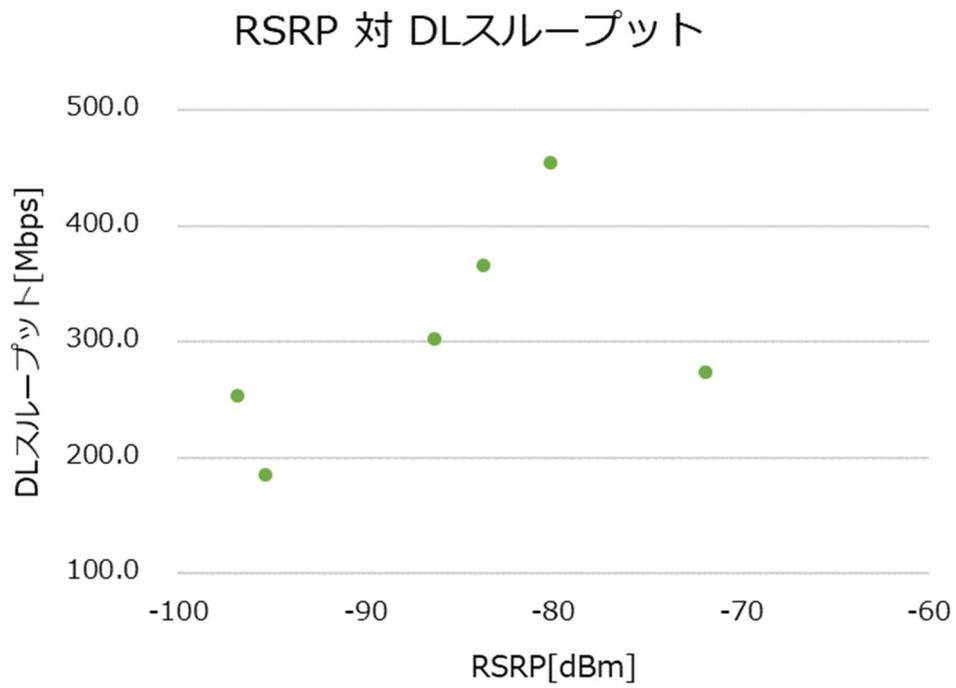


図 3.3.2-45 RSRP に対する DL スループット(RU-2)

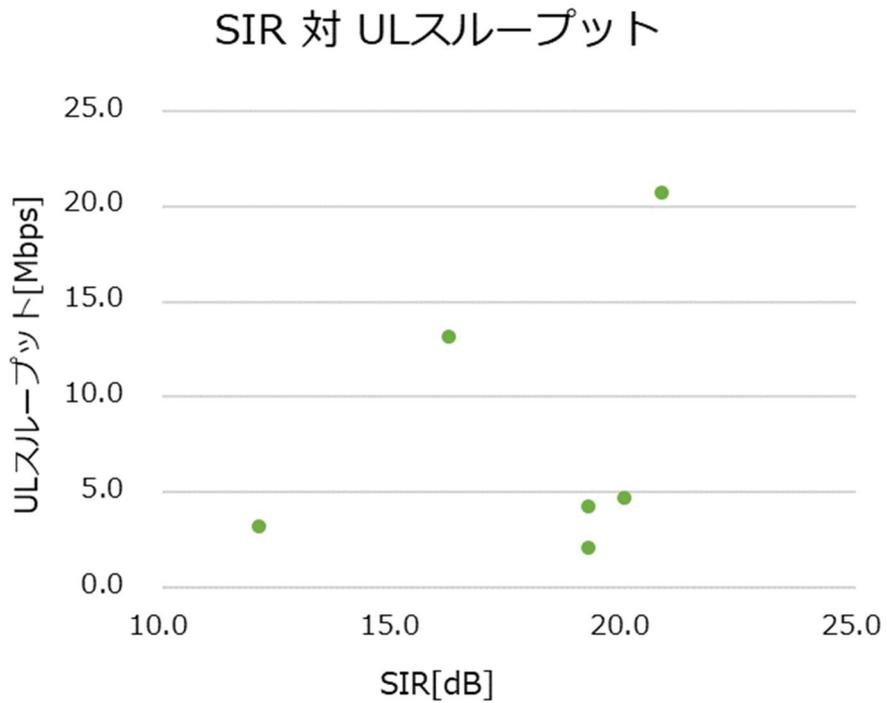


図 3.3.2-46 SIR に対する UL スループット(RU-2)

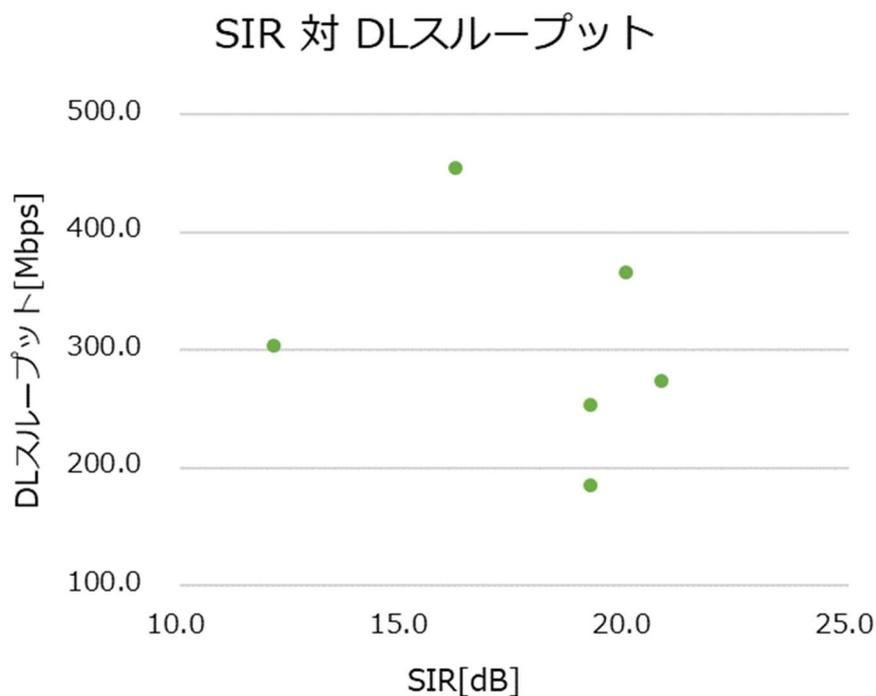
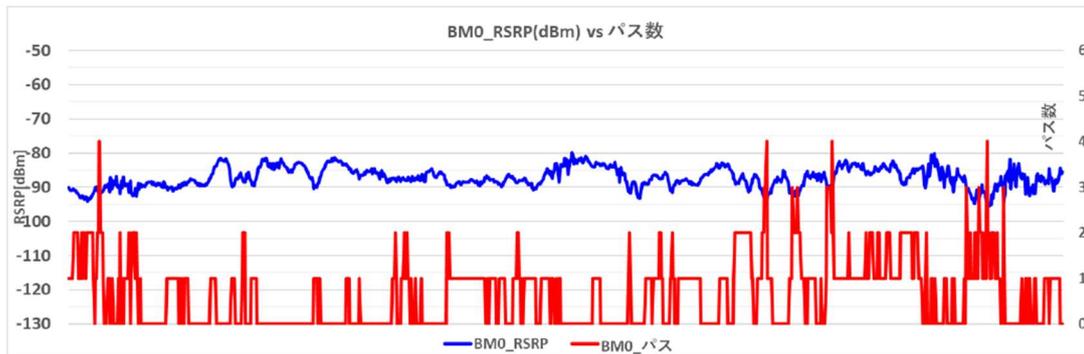


図 3.3.2-47 SIR に対する DL スループット(RU-2)

図 3.3.2-40 から図 3.3.2-47 から、RSRP の大きい測定点では UL/DL のスループットが大きくなる傾向を確認した。また、SIR が大きい測定点においても UL/DL のスループットが大きくなる傾向を確認した。

また、RU-1、RU-2 において、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルを同一測定点で測定した際の、RSRP とマルチパス数の変動の図を、測定点 ID623、803 について図 3.3.2-48 エラー! 参照元が見つかりません。に、測定点 ID122、1002 について図 3.3.2-49 エラー! 参照元が見つかりません。に示す。

狭指向性



LCX

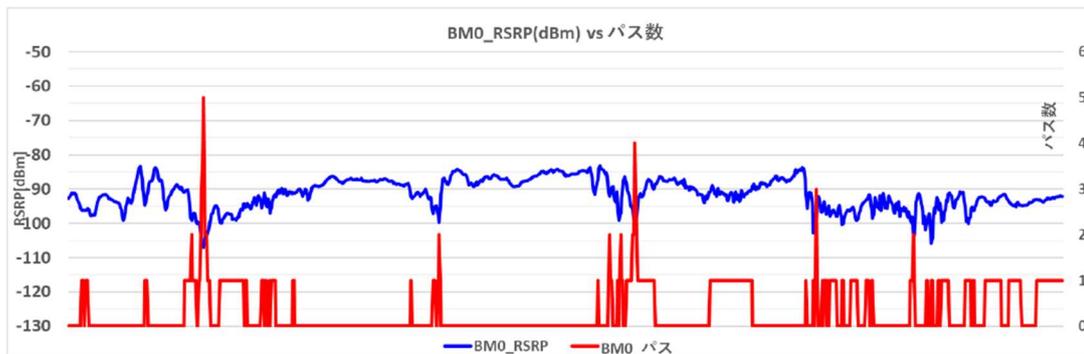
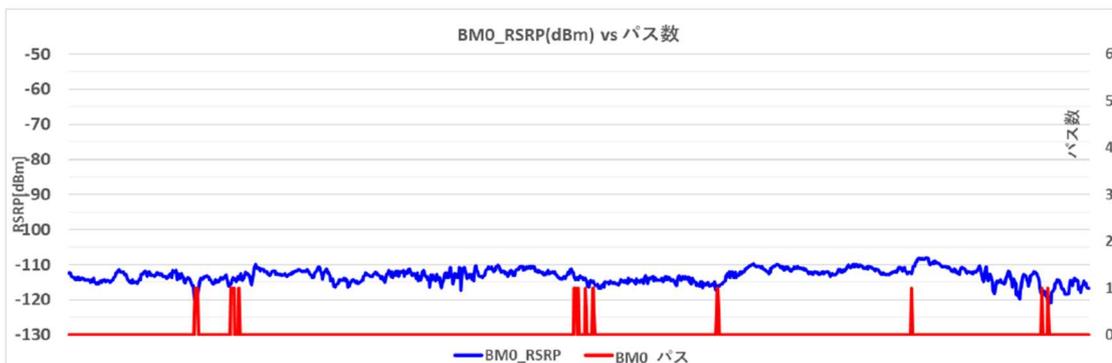


図 3.3.2-48 マルチパス数測定結果(測定点 ID:623、803)

狭指向性



LCX

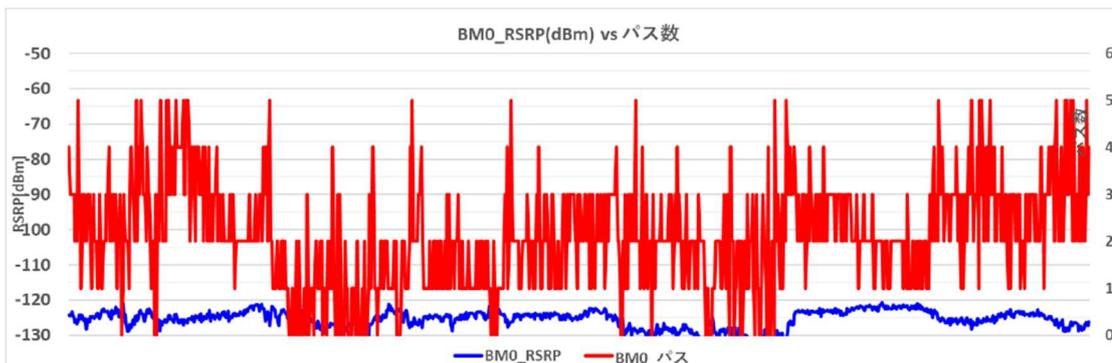


図 3.3.2-49 マルチパス数測定結果(測定点 ID:122、1002)

図 3.3.2-48 は、狭指向性アンテナ、漏洩同軸ケーブルの RSRP の大きな差は見られない基地局付近の測定点であるが、狭指向性アンテナのときの方がマルチパス数の変動がやや大きいことを確認した。これは、測定点 ID623 が狭指向性アンテナのアンテナ後方に位置するためだと考える。また、図 3.3.2-49 は、狭指向性アンテナ、漏洩同軸ケーブルの RSRP の差が大きく、基地局から離れた測定点である。この際は、アンテナの指向方向等によらず、RSRP が小さい測定点の方がマルチパス数の変動具合が大きくなることを確認した。

また、スループットの理論値に関して次に記す。本実証で利用したローカル 5G における物理層の最大スループットの理論値は以下となる。

- ・UL 82Mbps
- ・DL 842Mbps

上記スループットの理論値を算出する際の前提条件は以下とする。

- ・UL
 - 帯域幅 100MHz
 - SCS 30KHz
 - Layer 1
 - リソースブロック 273
 - MCS 28
 - TDD 7:2
 - 変調方式 64QAM
 - Scaling factor 1

- ・DL
 - 帯域幅 100MHz
 - SCS 30KHz
 - Layer 2
 - リソースブロック 273
 - MCS 27
 - TDD 7:2
 - 変調方式 256QAM
 - Scaling factor 1

なお、3GPP TS 38.306 に最大となるスループットの計算式が提示されており、これに基づいて計算した。 Page 9 4.1.2 Supported max data rate for DL/UL

$$\text{data rate (in Mbps)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{Layers}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{max} \cdot \frac{N_{PRB}^{BW^{(j)}, \mu} \cdot 12}{T_s^{\mu}} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right)$$

上記計算式の各項の意味合いと、今回のシステムでの値では以下の通りとなる。

J: バンドまたはバンドの組み合わせの中でアグリゲーションに使用されるコンポーネントキャリアの数 (キャリアアグリゲーションのコンポーネントキャリア数は最大 16)

理論値算出条件としては 1 とする。

Rmax: 最大コードレート(948/1024)またはそれ以下

理論値算出条件としては 772/1024 とする。

v: レイヤー数(最大レイヤー数は 8)

理論値算出条件としては UL:1 DL:2 とする。

Q: 変調シンボルあたりのビット数

理論値算出条件としては UL:64QAM DL:256QAM とする。

f: 上位レイヤーからシグナリングされるスケーリング係数

理論値算出条件としては 1 とする。

NRB: 帯域幅部分あたりのリソースブロックの最大数またはそれ以下

理論値算出条件としては 273 とする。

Ts: 平均シンボル持続時間

理論値算出条件としては 35.7 μ S とする。

OH: シグナリング情報によるオーバーヘッド

理論値算出条件としては UL:0.08 DL:0.14 とする。

メーカーでの実験環境における SINR 値と MCS 値、レイヤー3 の最大スループット値の実測値を以下に示す。

- ・UL
 - スループット 52.7Mbps
 - SINR 32dB
 - MCS 24
- ・DL
 - スループット 604.9Mbps
 - SINR 32dB
 - MCS 24

なお、SINR 値と MCS 値、TBS 値の関係については、メーカー非開示情報であり、本資料への記載は行わない。

5) シミュレーションに関する考察

まず、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルに関するエリア柔軟化に関する考察をする。図 3.3.2-20 から図 3.3.2-23 の狭指向性アンテナのシミュレーションの結果から、狭指向性アンテナは見通し環境である線路内にアンテナのメインビームを向けるのであれば、沿線に渡って広くカバーエリアを確保することができる。しかし、実測やシミュレーションから示したように、アンテナ後方においても建物等からの電波が跳ね返る影響により、カバーエリアが広く確保されることは、エリア設計時に注意が必要である。

狭指向性アンテナのレイトレース結果である図 3.3.2-20 から図 3.3.2-23 と、漏洩同軸ケーブルのレイトレース結果である図 3.3.2-32 から図 3.3.2-35 を比較すると、基本的に、漏洩同軸ケーブルを用いる場合は狭指向性アンテナよりもカバーエリアが全体的に狭くなることを確認した。また、RU-2 線路外の狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルそれぞれにおいて、レイトレースによるカバーエリア、調整対象区域及び実測によるカバーエリア端、調整対象区域端を図 3.3.2-50、図 3.3.2-51 に示す。これらの図を狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルに対して重ねて比較した図を図 3.3.2-52 エラー! 参照元が見つかりません。に示し、カバーエリア閾値が観測される点、調整対象区域閾値が観測される点の距離の変化を表 3.3.2-30 に示す。図 3.3.2-52 から、レイトレース、実測のどちらの場合においても、漏洩同軸ケーブルの方が、カバーエリアが狭くなることが確認でき、業務区域外への漏洩が少ないことが確認できる。

加えて、線路外のエリアにおいて狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルを同一測定点で測定し、狭指向性アンテナに比べて漏洩同軸ケーブルの電波漏洩の改善値を示した結果を表 3.3.2-31 に示す。に示

す全ての測定点において、漏洩同軸ケーブルの結果が狭指向性アンテナの結果を下回ることを定量的に確認した。このことから、業務区間外等への漏洩を抑えたい場合は狭指向性アンテナより漏洩同軸ケーブルが有効であり、業務区間外への漏れを少なくエリア設計することが可能であると考え。しかし、漏洩同軸ケーブルでは接線方向においても広く電波が伝搬することから、エリア設計時に留意が必要である。

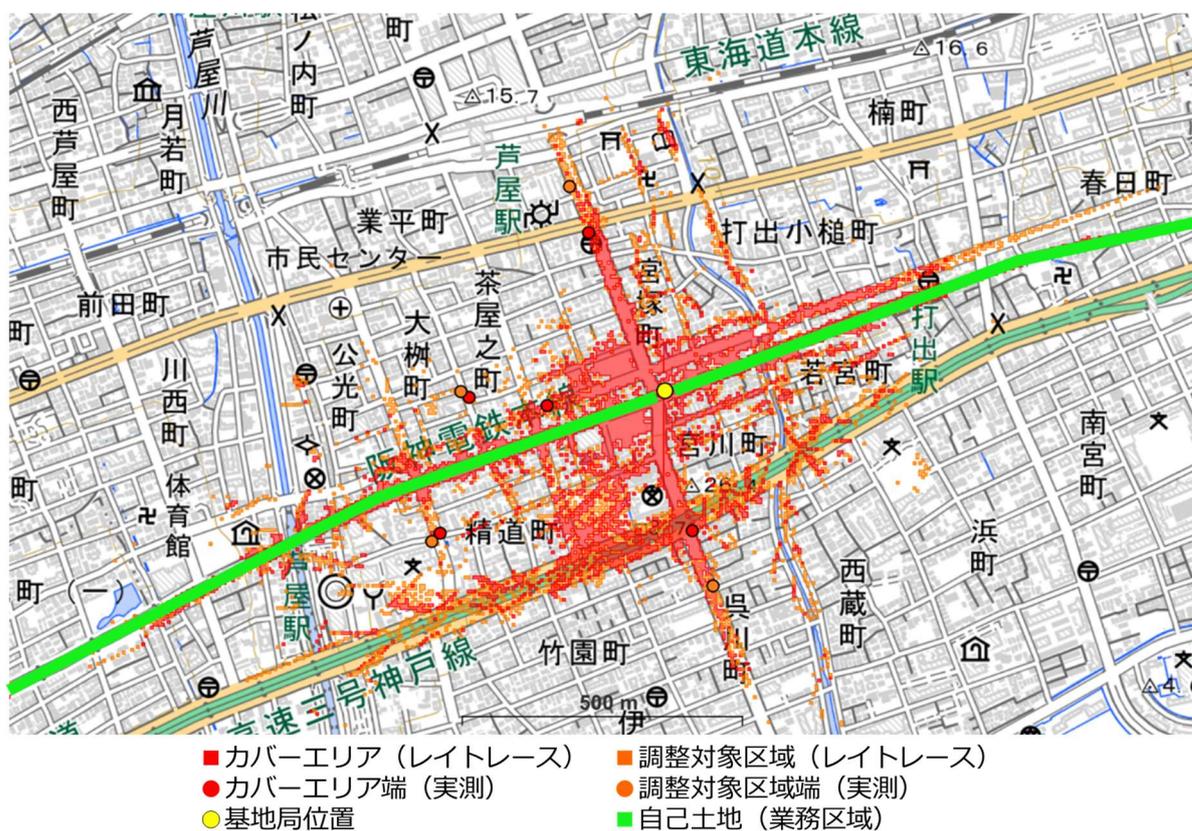


図 3.3.2-50 (RU-2 線路外、狭指向性アンテナ)レイトレースと実測のカバーエリア、調整対象区域

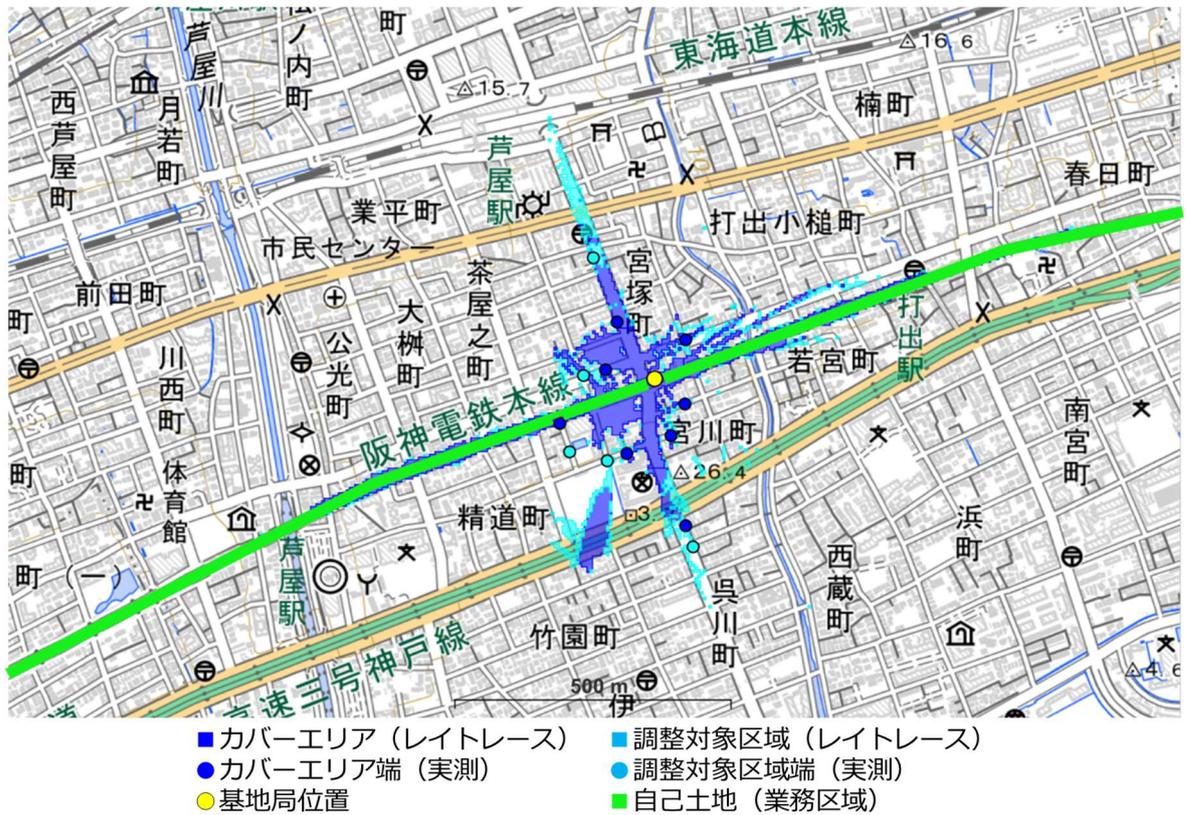


図 3.3.2-51 (RU-2 線路外、漏洩同軸ケーブル)レイトレースと実測のカバーエリア、調整対象区域

表 3.3.2-31 (RU-2)同一測定点における狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルの
受信電力比較

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

次に、狭指向アンテナのレイトレースと、漏洩同軸ケーブルのレイトレースのエリア推定精度について考察する。表 3.3.2-32 に、レイトレース結果の実測値との RMSE を示す。今回の実証では、RU-1、RU-2において線路内・線路外の結果をそれぞれ比較検討した。RU-1、線路外の狭指向性アンテナと、RU-2、線路内の漏洩同軸ケーブルの結果を除けば、RMSE が 10 を下回る結果となった。RMSE が 10 を超えた箇所については、実測値とシミュレーションの差分が局所的に大きい測定点が影響しており、RMSE が外れ値を厳しく評価する点が顕著に出ていると考える。基本的にレイトレースシミュレーションは、狭指向性アンテナ、漏洩同軸ケーブルの両方において高い精度を出すことができ、カバーエリア、調整対象区域の推定には有効であることを示した。今回の実証でシミュレーションと実測との差分が大きくなった測定点に関しては、モデルの修正や編集が必要であることや、調達した建物モデルで一部の建物が表現できていない等の課題があるため、調達したモデルに追加・編集が必要である点も留意する必要がある。

表 3.3.2-32 レイトレース結果と実測結果の RMSE ※再掲

No.	箇所	狭指向性アンテナ 実測値との RMSE [dB]	漏洩同軸ケーブル 実測値との RMSE [dB]
1	RU-1・線路外	18.72	9.06
2	RU-1・線路内	10.31	7.23
3	RU-2・線路外	7.93	8.83
4	RU-2・線路内	10.56	14.05

次に、漏洩同軸ケーブル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良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がることを目的として、漏洩同軸ケーブルのエリア設計手法について検討した。漏洩同軸ケーブルの今後の普及課題として、エリア算出法が存在しないことが原因で、カバーエリアや調整対象区域のシミュレーション方法がなく、免許申請手続きの方法が定まっていないことがあげられる。上記のエリア算出法が導出できれば、カバーエリアや調整対象区域を精度良くシミュレーションすることができ、免許申請手続きに関する課題の解決に

つながると考えている。

漏洩同軸ケーブルのエリア設計手法として、漏洩同軸ケーブルの理論式に基づくエリア算出式を検討した。今回、漏洩同軸ケーブルのエリア算出式は使用した漏洩同軸ケーブルの諸元(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漏洩同軸ケーブルの結合損失と結合損失の距離特性の概念図を図 3.3.2-53 に示す。

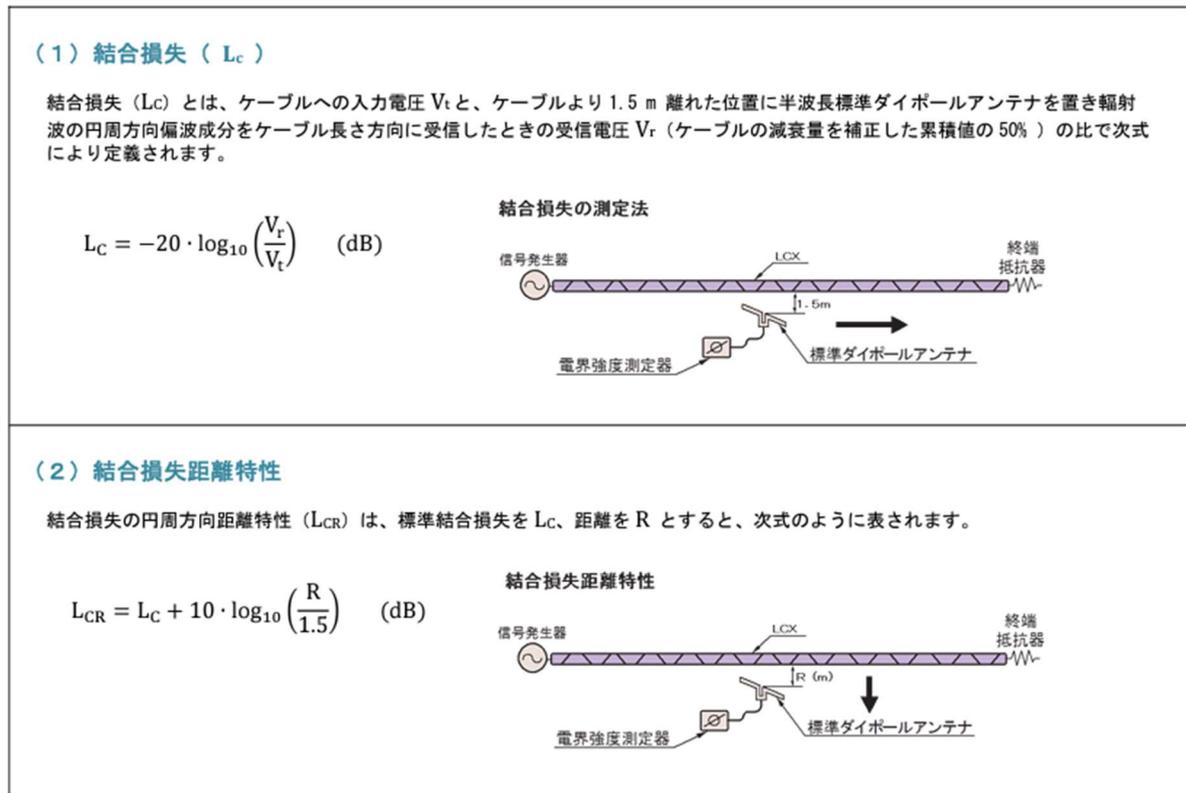


図 3.3.2-53 参照した公開情報の抜粋部分
(参照元:<https://www.fujikura-dia.co.jp/pdf/漏洩同軸ケーブル.pdf>)

図 3.3.2-53 を参考として、式(3.3.2-1)に漏洩同軸ケーブルの結合損失の式を、式(3.3.2-2)に漏洩同軸ケーブルの結合損失の距離特性の式を示す。式(3.3.2-1)と式(3.3.2-2)を踏まえ、漏洩同軸ケーブルの給電点からの距離と、漏洩同軸ケーブルの法線距離に対する受信電力推定値を式(3.3.2-3)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} は漏洩同軸ケーブルの法線距離に応じた損失[dB]、 R は漏洩同軸ケーブルからの法線距離[m]、 S は漏洩同軸ケーブル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(3.3.2-3)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 は漏洩同軸ケーブルの伝送損失[dB/m]、 l は漏洩同軸ケーブルの給電点からの距離[m]を示す。漏洩同軸ケーブルの給電点からの距離と法線距離の関係について、に示す。基本は図 3.3.2-53 に記載される式と同様の考え方であるが、式(3.3.2-3)にある漏洩同軸ケーブル接続方向における伝送損失を考慮した減衰及び式(3.3.2-2)の精緻化パラメー

タ S を追加している。なお、式(3.3.2-3)において G_{dipole} が減算される理由は、式(3.3.2-1)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。

$$L_C = -10 \log_{10} \left(\frac{P_{dipole}}{P_t} \right) \quad (3.3.2-1)$$

$$L_{CR} = L_C + 10 \log_{10} \left(\frac{R}{1.5} \right) + S \quad (3.3.2-2)$$

$$P_r = P_t + G_r - G_{dipole} - L_{CR} - a \times l \quad (3.3.2-3)$$

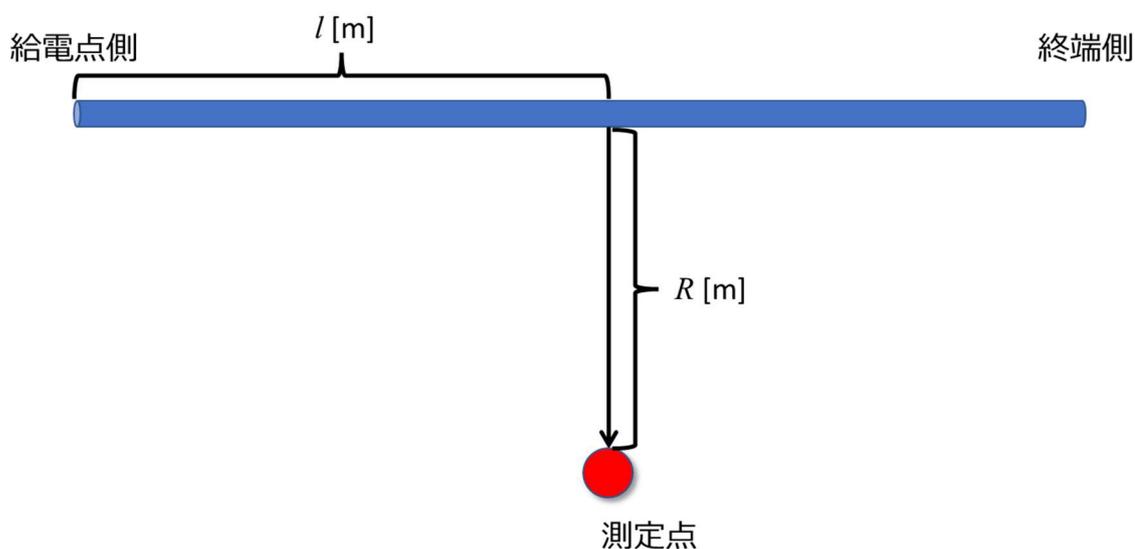
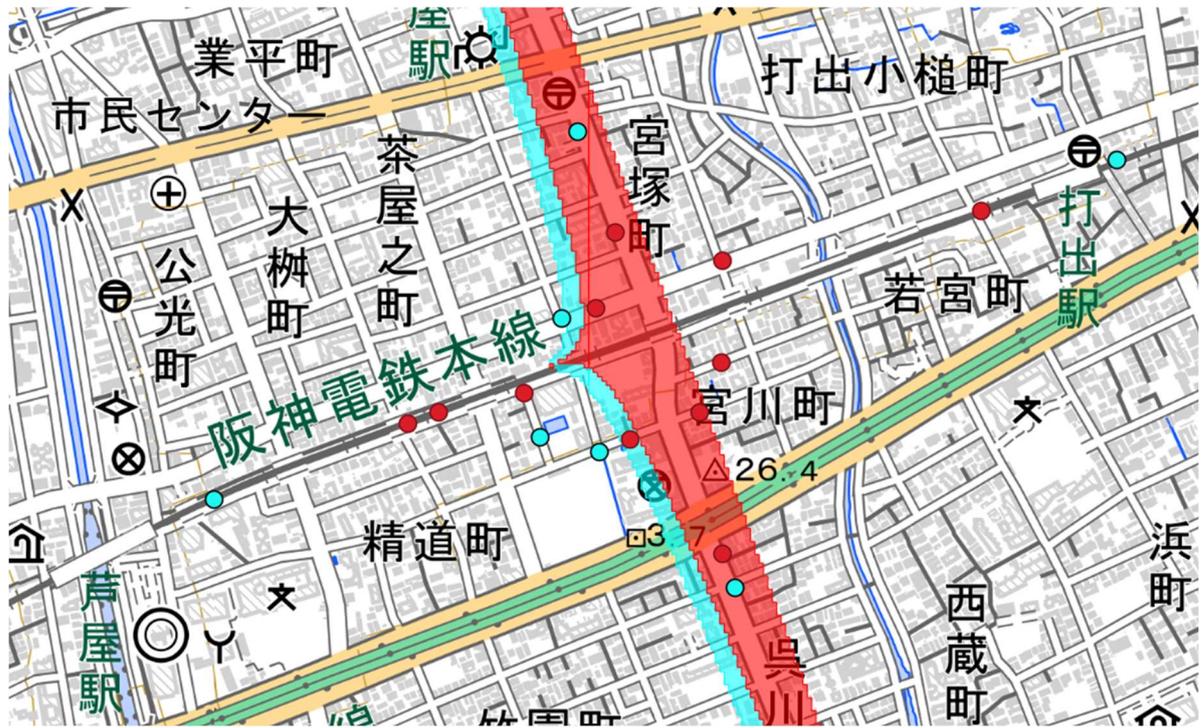


図 3.3.2-54 漏洩同軸ケーブルの給電点からの距離 l と法線距離 R の関係

今回は、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、漏洩同軸ケーブルが約 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(3.3.2-2)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。この S 値を用い、式(3.3.2-1)から式(3.3.2-3)から算出した RU-2 のエリアマップと、実測によるカバーエリア端、調整対象区域端を図 3.3.2-55 に示す。また、図 3.3.2-56 に、漏洩同軸ケーブルの給電点からの 2 次元距離に対する受信電力を漏洩同軸ケーブルのエリア算出式(精緻化後)と実測値で比較した結果を図 3.3.2-56 に示す。



- 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)

図 3.3.2-55 (RU-2)漏洩同軸ケーブルのエリア算出式案と実際のカバーエリア端、調整対象区域端の比較(地理院地図を加工して作成)

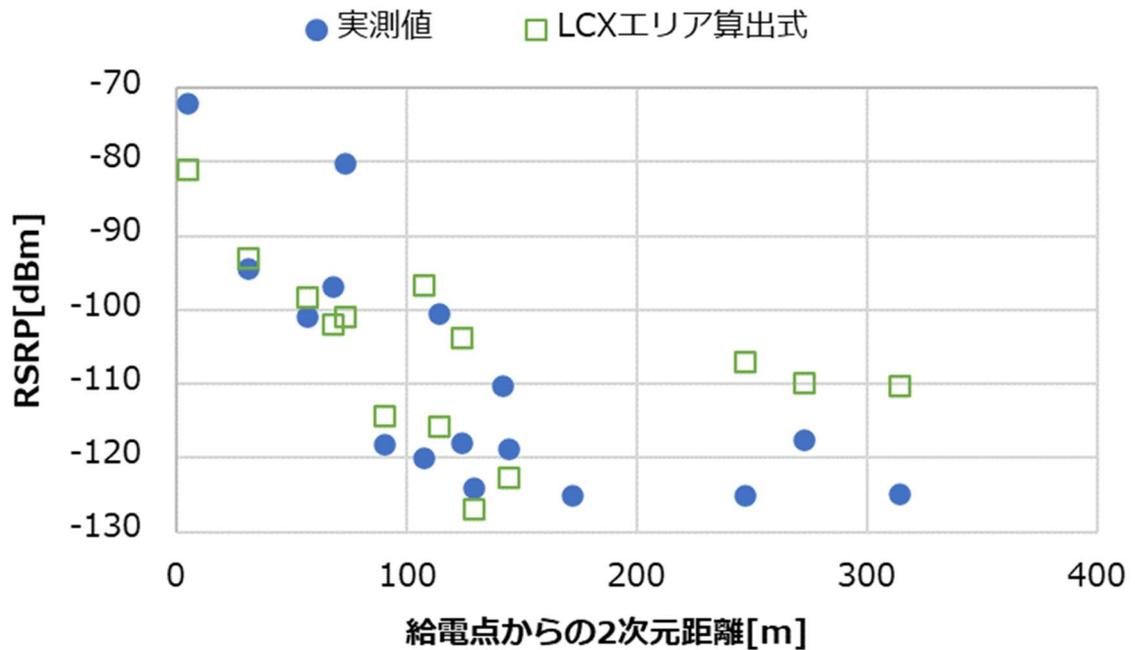


図 3.3.2-56 (RU-2)漏洩同軸ケーブルのエリア算出式案と実測値の比較

図 3.3.2-55 から、今回検討した漏洩同軸ケーブルのエリア算出式では漏洩同軸ケーブルの法線方向にしかエリア推定ができない点と、漏洩同軸ケーブル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、今回検討した漏洩同軸ケーブル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、漏洩同軸ケーブルは本来、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 3.3.2-53 の公開情報の漏洩同軸ケーブル法線方向の距離特性が、漏洩同軸ケーブルから法線方向に十分遠方を考慮した式ではなく、漏洩同軸ケーブル近傍のみを考慮している可能性がある。

上記の課題から、精度の高い漏洩同軸ケーブルのエリア算出式を検討するためには、式(3.3.2-2)にて示した伝搬損失の距離特性の項を、漏洩同軸ケーブル接続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 3.3.2-56 から、実測値と漏洩同軸ケーブルエリア算出式(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、漏洩同軸ケーブルシミュレーションであれば、漏洩同軸ケーブルの法線方向だけでなく、接続方向にもシミュレーション可能であり、より精密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、今回検討した漏洩同軸ケーブル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、漏洩同軸ケーブル法線方向だけでなく接続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ている。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。

6) 設置容易性やコスト・工期性の評価

鉄道施設における設置容易性比較にあたり、図 3.3.2-57 に駅間におけるアンテナ設置可否、図 3.3.2-58 に駅構内におけるアンテナ設置可否を示す。今回の漏洩同軸ケーブルは図 3.3.2-58 のように架空ケーブルの一部として設置しているが、図 3.3.2-57 のように駅間のトラフ内に設置できる可能性もある。ただし、トラフはコンクリート製や金属製となっているため、トラフ内に漏洩同軸ケーブルを設置した場合に線路上が強電界でカバーできるのかに関しては、今後検討や実測が必要である。

狭指向性アンテナや漏洩同軸ケーブルの設置容易性比較を

表 3.3.2-33 に、コスト比較を

表 3.3.2-34 に示す。両表とも、今回利用していない電波反射板や中継器、DAS に関しての項目は推定で記載している。

表 3.3.2-34 の最下部に記載の通り、場所ごとの環境に合わせて、狭指向性や漏洩同軸ケーブル、さらには DAS 等を使い分ける必要があると考える。



図 3.3.2-57 駅間におけるアンテナ設置可否



図 3.3.2-58 駅構内におけるアンテナ設置可否

表 3.3.2-33 設置容易性比較(狭指向性 vs. 漏洩同軸ケーブル)
 ※紙面都合により 90 度回転して掲載

評価項目	電波反射板 (反射板材質：) ※利用していないため、以下は推定	中継器 ※利用していないため、以下は推定	分散アンテナシステム(DAS) (Active DAS/Passive DAS) ※利用していないため、以下は推定	漏洩同軸ケーブル(LCX)	狭指向性アンテナ
設置位置 (アクセス容易、面積)	アクセス容易性は設置する高さ次第。(高所であればアクセスは難しい) 設置面積は型式次第。	アクセス容易性は設置する高さ次第。(高所であればアクセスは難しい) 設置面積は型式次第。	アクセス容易性は設置する高さ次第。(高所であればアクセスは難しい) 設置面積は型式次第。	高所への設置となりアクセスは難しい。 複数の柱にわたった設置や壁面に沿った設置となり設置面積は大きくなる。	線路内、高所への設置となりアクセスは難しい。 柱上等への設置となり設置面積は小さい。
付帯設備 (電源・バッテリー等) の必要性	不要	型式次第で必要	必要	基地局への電源供給が必要だが、 LCXへの電源供給は不要	基地局への電源供給が必要だが、 狭指向性アンテナへの電源供給は不要
消費電力	電力消費なし	型式次第で必要	必要	LCX自体は電力消費なし、 基地局は400W	狭指向性アンテナ自体は電力消費なし、 基地局は400W
伝送路の必要性	不要	型式次第で必要	必要	基地局への光供給が必要	基地局への光供給が必要
施工の容易性	設置する高さ次第。 (高所であれば施工は難しい)	設置する高さ次第。 (高所であれば施工は難しい)	設置する高さ次第。 (高所であれば施工は難しい)	線路内、高所への設置となるため施工は難しい	線路内、高所への設置となるため施工は難しい
導入リードタイム	不明	不明	不明	ケーブルの納品に時間がかかる(発注後数カ月) 設置は複数の柱や壁面に沿った施工が必要のため、複数日数かかる。	機器の納品に時間がかかる(発注後数カ月) 設置は1つの柱への施工が必要のため、1日で完了する。
鉄道施設で設置可能な場所	駅間全域、駅構内	駅間全域、駅構内	駅間全域、駅構内	駅間の一部(架空ケーブル設置可能な区間、トラフ内に設置可能な区間) 駅コンコース(天井内に設置可能な範囲)	駅間全域
鉄道施設で設置不可能な場所	特になし	特になし	特になし	駅間の一部(架空ケーブル設置不可の区間、トラフ内に設置不可の区間) 駅コンコース(天井内に設置不可の範囲) 駅ホーム	駅構内(設置できる場合でもエリアカバーは難しい)
総合評価	LCXが設置不可の場所で狭指向性アンテナではエリアカバーが難しい箇所で利用検討していきたい。	LCXが設置不可の場所で狭指向性アンテナではエリアカバーが難しい箇所で利用検討していききたい。	LCXが設置不可の場所で狭指向性アンテナではエリアカバーが難しい箇所で利用検討していききたい。	導入までのリードタイムが長く、設置できる場所は限られるが、設置できれば鉄道施設を柔軟にエリアカバーできる。	導入までのリードタイムが短く、駅間はどこでも設置可能であることから、長い線路を効率よくエリアカバーするのに最適である。
採用した解決策の設備が有効となる条件や使い方	駅間：狭指向性アンテナは全区間で設置可能だが、LCXは設置不可の区間もある。 駅構内：狭指向性やLCXで全域エリア化は難しいため、DASや中継器等の別のソリューションが必要				

表 3.3.2-34 コスト比較(狭指向性 vs. 漏洩同軸ケーブル) ※紙面都合により 90 度回転して掲載

※線路内の同一距離を電波カバーする前提での費用等を比較した

評価項目	電波反射板 (反射板材質：)	中継器	分散アンテナシステム(DAS) (Active DAS/Passive DAS)	漏洩同軸ケーブル(LCX)	狭指向性アンテナ
設備費用	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	800千円	600千円
設備施工費用	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	2,300千円	900千円
付帯設備費用(電源、バッテリー等)	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	100~2,200千円 (RUへの電源供給設備を試算、ケーブル長により変動)	100~2,200千円 (RUへの電源供給設備を試算、ケーブル長により変動)
付帯設備施工費用(電源、バッテリー等)	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	200~4,400千円 (RUへの電源供給設備を試算、ケーブル長により変動)	200~4,400千円 (RUへの電源供給設備を試算、ケーブル長により変動)
伝送設備費用(光、無線)	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	100~2,200千円 (RUへの光設備を試算、ケーブル長により変動)	100~2,200千円 (RUへの光設備を試算、ケーブル長により変動)
伝送設備施工費用(光、無線)	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	200~4,400千円 (RUへの光設備を試算、ケーブル長により変動)	200~4,400千円 (RUへの光設備を試算、ケーブル長により変動)
運用・保守費用	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	- (LCX自体に運用保守費用はかからない)	- (狭指向性アンテナ自体に運用保守費用はかからない)
総合評価	利用していないため不明	利用していないため不明	利用していないため不明	設備自体の費用と施工費用が高く、全区間をLCXで敷設するのは難しい	設備自体の費用と施工費用が比較的安く、全区間を効率的にエリアカバーするのに利用可能。
採用した解決方策の設備が有効となる条件や使い方	LCXよりも狭指向性の方が低コストである。上記の設置容易性の比較も加味すると、場所ごとの環境にあわせて、狭指向性やLCX、さらにはDAS等を使い分ける必要がある。 駅間：直線部は狭指向性アンテナで効率的にエリアカバーし、曲線部はLCXやDAS等を設置可否にあわせて柔軟に配置する必要がある。 駅構内：狭指向性アンテナやLCXでは駅構内全域のカバーが難しいため、DASや中継器等の今回実証していない別のソリューションが必要である。				

7) まとめ 1: 自己土地内・業務区域内での利用

自己土地内及び業務区域内での今回の実証で目指したことは、2.4 章の①から③のソリューションを個別動作させた際の要件(上り最大 36Mbps/下り最大 40Mbps)を満たすことができるよう、区間により狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルを用いて効率的かつ柔軟なエリア構築を実施することである。

結果としては、3.3.2(5)4)に記載の通り、両ソリューションとも今回の測定点では、下りスループットの要件は満たすことができたが、上りスループットの要件を満たすことができなかった。これはシステム上の課題と電界強度の課題との 2 つの要因に分けることができると考える。ここからは、この 2 つの要因分析を行うとともに、それぞれの今後の解決方法を考察した。

a. 上りスループットが満足に出ていない要因 1: システム上の課題

システム上の課題としては、基地局が低出力で多重度が低いこと、システムとして準同期に非対応であることの 2 点があると考えられる。それぞれ詳細を考察した。

ア) システム上の課題 1: 基地局側の出力や多重度

今回のローカル 5G システムは 3.3.2(5)4)に記載の通り、下りが 2×2MIMO で 256QAM、上りは 1×1MIMO で 64QAM であり、スループット理論値は下り 842Mbps、上り 82Mbps である。特に上りスループットは理論値が低い値だが、4×4MIMO や 256QAM に対応することができれば、理論値上の上りスループットは約 400Mbps となり、実測でもより良い結果が得られると考える。

また、今回のローカル 5G システムは各基地局での出力上限が 20W であるが、制度上の出力上限は 63W である。基地局での出力を制度上の上限近くまで上げることができれば、強電界でカバーできるエリアが拡大し、スループット向上につながると思われる。

ただし、今回のローカル 5G システムの多重度や出力を今後変更することは難しい見込みであるため、上記の対応は別のローカル 5G システムを利用する場合に検討していきたい。

イ) システム上の課題 2: 基地局側の準同期非対応

今回のシステムはローカル 5G の同期システムで動作しており、上り:下りの比率が 1:4 である。また、メーカーでの検証途中であることから今回の実装は見送ったものの、システムとしては準同期に対応しており、今後上りの比率を上げることができれば上りスループットも向上する。検証途中の参考情報

として、準同期の場合、上りスループットの理論値は約 240Mbps 程度となる見込みである。理論値ベースで上りスループットが約 3 倍になることから、現行の同期運用で約 12Mbps 以上出ている箇所は、準同期運用にすることで要件を満たすことができると考える。

ウ) システム上の課題 1 と 2 のまとめ

出力や多重度の改善により、上りスループットの理論値改善が期待できるが、今回のローカル 5G システムでは今後これ以上の出力や多重度への変更はできず、改善は望めない。一方、準同期対応は今後のソフトアップデートで実現可能であり、理論値ベースで上りスループットが約 3.5 倍になることから、現行の同期運用で約 10Mbps 以上出ている箇所は、準同期運用にすることで要件を満たすことができると考える。3.3.2(5)4)で記載の通り、SS-RSRP では-85dBm より強電界のエリアでは要件を満たすことができるようになる見込みである。

b. 上りスループットが満足に出ていない要因 2:電界強度の問題

上述の準同期への対応が実現できる場合、-85dBm より強電界のエリアでは要件を満たすことができる見込みである。そこで、鉄道施設内を-85dBm より強電界で包含する方法を考察する。

考察にあたり、線路形状ごとのエリアカバー可否、施設ごとの各ソリューションの設置可否、各ソリューションのコスト面や工期面での比較を以下に記載する。

ア) 線路形状ごとのエリアカバー可否

鉄道施設の駅間部分に関しては、主に直線区間とカーブ区間に大別できる。それぞれの区間において、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルのどちらが向いているか考察した。

狭指向性アンテナに関しては、実測結果を 3.3.2(5)1)に示した通り、RU-2 の周辺のような直線区間の場合、RU 前方約 350m から RU 後方約 150m の範囲は-85dBm より強電界で包含できている。しかし、実測結果を 3.3.2(5)1)に示した通り、RU-1 の周辺のようなカーブ区間の場合、線路がカーブしている先(RU-1 は基地局から約 100m 先)で急激に SS-RSRP の値が悪くなっている。

漏洩同軸ケーブルに関しては、実測結果を 3.3.2(5)1)に示した通り、RU から前後 50m 程度の範囲は-85dBm より強電界で包含できている。特に、RU-1 の周辺のようなカーブ区間の場合でも、カーブに沿って漏洩同軸ケーブルを敷設すればそのカーブ区間に沿ってエリア化できることから、カーブ区間やカーブの先でも同様に強電界でのエリア化が期待できる。

まとめると、狭指向性アンテナは直線部を広範囲にエリア化するのに適しており、漏洩同軸ケーブルはカーブ区間をピンポイントでエリア化するのに適し

ていると考える。

イ) 施設ごとの各ソリューションの設置可否

鉄道施設は駅間と駅構内に大別でき、それぞれの施設において、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルのどちらが向いているか考察した。

狭指向性アンテナに関しては、駅間においては図 3.3.2-57 に示した通り、全区間で鉄柱に設置可能である。駅構内においては図 3.3.2-58 に示した通り、景観上の理由や、設置できる場合でも構内全域をエリア化するのは難しいと考える。

漏洩同軸ケーブルに関しては、駅間においては図 3.3.2-57 と図 3.3.2-58 に示した通り区間により架空への設置可否が異なる。駅構内においては、図 3.3.2-58 に示した通り、ホーム上への設置は難しいが、駅コンコースは天井内に設置可能な場合もある。

また、今回の実証では利用していないが、DAS や中継器であれば、駅間は全区間で鉄柱に取付け可能と推測しており、駅構内も設置でき、配置次第で駅構内全域をエリアカバーできると推測している。

まとめると、駅間においては、狭指向に加え DAS や中継器であれば全区間で設置可能だが、漏洩同軸ケーブルは設置不可の区間もある。駅構内においては、狭指向性と漏洩同軸ケーブルは設置不可の場合もあるため、DAS や中継器等の別のソリューションも柔軟に組み合わせる必要がある。

ウ) 各ソリューションのコスト面や工期面

コストや工期に関しては、今回の実証に利用した狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルを比較すると、

表 3.3.2-34 に示した通り、狭指向性アンテナの方がコスト面でも工期面でも優れている。また、前述した DAS や中継器は今回の実証で利用していないことから、コスト面や工期面の情報がないため、今度検討していく必要がある。

エ) まとめ

上述のア)からウ)の結果をまとめると、鉄道施設においては、場所ごとの環境に合わせて、狭指向性アンテナや漏洩同軸ケーブル、さらには DAS や中継器等を使い分けて、エリア構築する必要があると考える。

駅間においては、直線部は狭指向性アンテナでコストパフォーマンス良く効率的にエリアカバーし、曲線部は漏洩同軸ケーブルや DAS 等を設置可否にあわせて柔軟に配置する必要がある。駅構内においては、DAS や中継器等の今回実証していない別のソリューションの活用も検討していく必要がある。

8) まとめ 2: 他者土地への電波漏洩

ここからは狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルの他者土地への電波漏洩の観点でまとめていく。シミュレーション及び実測において、狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルともに他者土地への電波漏洩が発生していた。そこで、以下の a. 章にてシミュレーションで電波漏洩を精度良く把握できるか、b 章にて電波漏洩を軽減することができるか考察し、c 章にてそれらをまとめた。

a. 他者土地への電波漏洩対応 1: 電波漏洩を軽減する

電波漏洩を軽減する方法に関しては、今回利用した狭指向性アンテナと漏洩同軸ケーブルに分けて検討した。ともに現行製品を利用する場合で軽減する方法があるか、あるいは今後の製品開発ではどのようなことが期待されるかを考察した。

なお、3.3.2(5)7)で記載した通り、現時点では満足なスループットが出ておらず、その要因のひとつとして、自己土地内(業務区域内)を強電界でカバーできていないことがあげられる。そこで、考察する上での前提として、自己土地内(業務区域内)の電界強度を下げる対応策は避け、他の方法で他者土地への電波漏洩に対応していく方法を考察した。

ア) 狭指向性アンテナでの他者土地への電波漏洩軽減

狭指向性アンテナの現行製品を利用する際、電波漏洩を軽減する方法は、出力を下げる方法以外に、設置位置の調整とアンテナ角度の調整の 2 つの方法が考えられる。設置位置に関しては、鉄道施設ではアンテナを設置できる高さや位置に制約があり、大幅な高さや位置変更は難しい。アンテナ角度の調整に関しては、水平方向は現在線路方向を向いており、左右に調整するとメインビームが他者土地方向となり、電波漏洩が増える見込みである。一方、チルトを調整することで電波漏洩が軽減される可能性もあるが、効果が出るほど調整すると、自己土地内の強電界エリアとトレードオフの関係になると推測するため、この方法は避けたい。

また、今後の製品開発への期待としては、ビームフォーミングの活用があげられる。ビームフォーミングに対応するアンテナを取付けることで、現在よりも基地局の出力を下げても自己土地内の端末を強電界でカバーすることができる可能性があり、その際には他者土地への電波漏洩が軽減される可能性がある。

イ) 漏洩同軸ケーブルでの他者土地への電波漏洩軽減

漏洩同軸ケーブルの現行製品を利用する際、電波漏洩を軽減する方法は、出力を下げる方法以外に、設置位置を調整する方法が考えられる。今回設置した架空での設置位置に関しては、鉄道施設ではアンテナを設置できる高さや位置に制約があり、大幅な高さや位置変更は難しい。一方、今回の実証では検証していないが、トラフ内に設置することができれば、他者土地への見通しがなくなり、他者土地への電波漏洩を軽減させる可能性があると考えられる。ただし、トラフはコンクリート製や金属製となっているため、自己土地(業務区域)の線路上が強電界でカバーできるのかに関しては、今後検討や実測が必要である。

また、今後の製品開発への期待として、電波漏洩方向を指定できる漏洩同軸ケーブルの開発があげられる。鉄道施設における漏洩同軸ケーブルの架空設置の場合の設置場所は、図 3.3.2-59 の上部のように駅間の線路と他者土地との境界部となる。現行の漏洩同軸ケーブルは仕様上、図 3.3.2-59 の上部のように他者土地方向にも電波伝搬してしまっている。そこで、図 3.3.2-59 の下部のように任意の方向のみに漏洩できるような漏洩同軸ケーブルが開発されれば、設置場所ごとに自己土地(業務区域)方向のみに漏洩させ、他者土地方向には漏洩させないようにした漏洩同軸ケーブルを設置できる可能性がある。これにより、他者土地への電波漏洩が軽減される可能性がある。

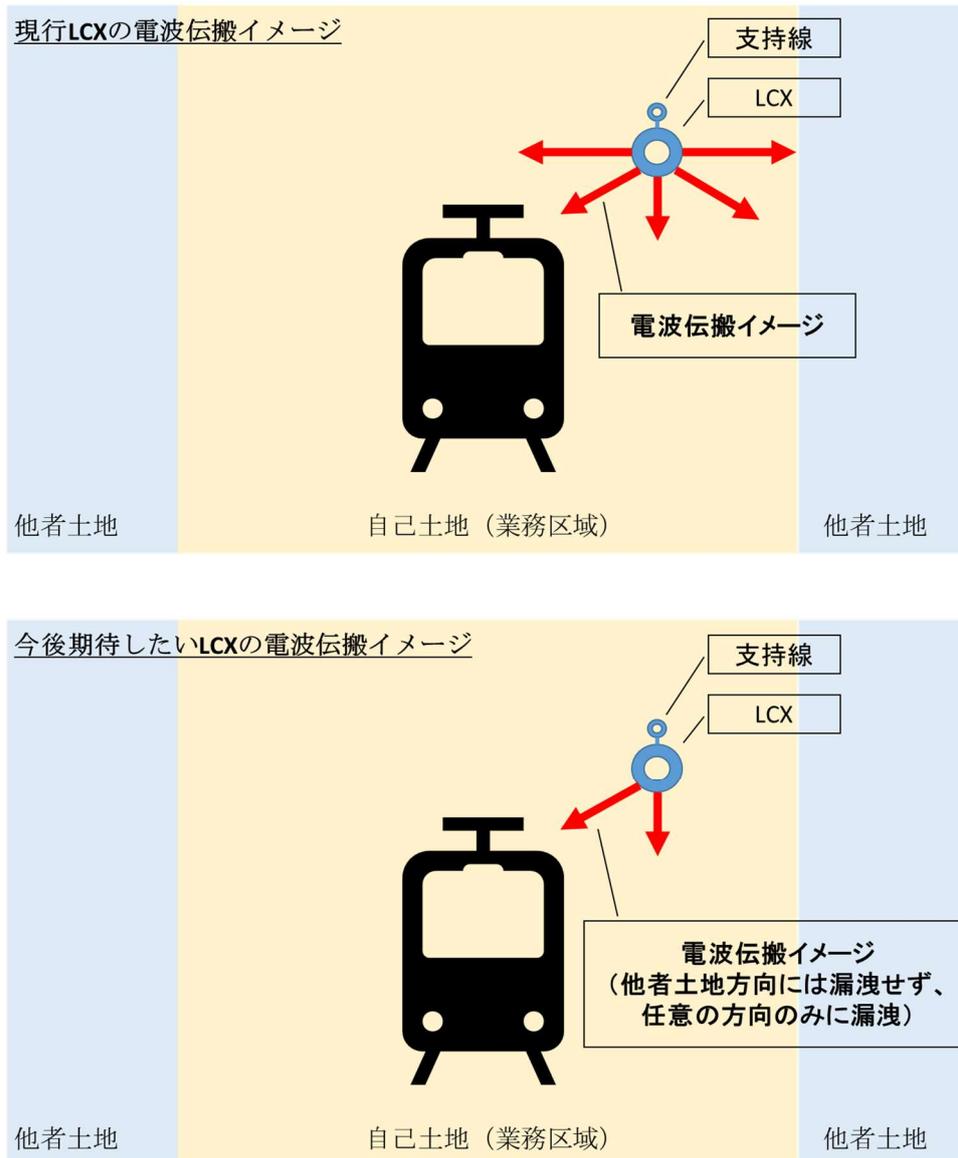


図 3.3.2-59 現行漏洩同軸ケーブルの電波伝搬イメージと今後期待したい漏洩同軸ケーブルの電波伝搬イメージ

ウ) 他者土地への電波漏洩軽減まとめ

狭指向性アンテナの現行製品では他者土地への電波漏洩を軽減することは難しい。漏洩同軸ケーブルはトラフ内に設置することで他者土地への電波漏洩を軽減される可能性があるが、自己土地(業務区域)の線路上が強電界でカバーできるのかに関しては、今後検討や実測が必要である。

一方、今後の製品開発で、狭指向性アンテナはビームフォーミングに対応する製品、漏洩同軸ケーブルは任意方向のみ電波漏洩させる漏洩同軸ケーブル、それぞれが開発されれば他者土地への電波漏洩を軽減することができると思う。

b. 他者土地への電波漏洩対応 2:漏洩を把握する

現行免許制度で原則自己土地利用とされているのは、隣接事業者のシステムとの干渉を避けるためである。一例として、同期システムと準同期システムのエリアが重なってしまうと、以下のように悪影響を与えてしまう。

- ・基地局間干渉:同期システム→準同期システムへ悪影響
- ・移動局間干渉:準同期システム→同期システムへ悪影響

エリアが隣接すると干渉が生じることから、エリアが被るか(他者土地への漏洩度合いがどの程度か)に関して、シミュレーションにて事前に把握する必要がある。他者土地への漏洩度合いを事前に把握する手法として、エリア算出法によるシミュレーション、レイトレースシミュレーションの 2 つがある。それらのシミュレーション結果と実測結果を、狭指向性アンテナの場合と漏洩同軸ケーブルの場合でそれぞれ比較し、シミュレーションの精度を考察した。また、エリア算出法とレイトレースシミュレーションを難易度や容易性の観点で比較し、どのような特徴があるか考察した。

ア) エリア算出法を利用したシミュレーションに関する考察

エリア算出法を利用した狭指向性アンテナのシミュレーション精度を考察する。シミュレーションは 3.3.2(1)1)に、実測結果は 3.3.2(5)1)で示した通りで、両 RU ともにシミュレーション結果と実測結果を比較すると、RU 近傍の南北(図の上下方向)の道路に沿って、シミュレーションよりも遠方まで電波伝搬していることがわかる。S 値を市街地とした場合でも開放地とした場合でも同様に、実測結果の方が遠方まで電波伝搬している。これは、実際の電波が南北道路の両サイドの建物に反射した結果だと推測している。シミュレーションに着目すると、建物による反射はエリア算出法では考慮できないため、電波伝搬する範囲を過小評価してしまっていると推測している。

エリア算出法を利用した漏洩同軸ケーブルのシミュレーション精度を考察する。結果は 3.3.2(5)5)にて示した通りで、今回は漏洩同軸ケーブルのエリア算出法自体を検討したが、今回の結果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。精度の高い漏洩同軸ケーブルのエリア算出式を検討するためには、伝搬損失の距離特性の項を、漏洩同軸ケーブル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。

イ) レイトレースシミュレーションに関する考察

レイトレースシミュレーションを利用した狭指向性アンテナの電波伝搬精度を考察する。結果は 3.3.2(5)2)にて示した通りで、実測結果に近いシミュレーション結果が得られた。

レイトレースシミュレーションを利用した漏洩同軸ケーブルの電波伝搬精度を考察する。結果は 3.3.2(5)3)にて示した通りで、実測結果に近いシミュレーション結果が得られた。

ウ) 両シミュレーションの容易性や難易度に関する考察

エリア算出法に関しては、狭指向性アンテナのような一般的なアンテナであれば、シミュレーションソフトにアンテナパターンデータや基地局の出力をインプットすることで、シミュレーション結果がアウトプット

される。シミュレーションソフトさえあれば、専門知識が乏しい人でも容易にシミュレーションを行うことができる。ただし、漏洩同軸ケーブルのような特殊なアンテナはエリア算出法自体が確立されていないため、シミュレーション不可である。

レイトレースシミュレーションに関しては、シミュレーションソフトにアンテナパターンデータや基地局の出力に加え、3D マップをインプットする必要がある。さらに 3.3.2(5)3)に示したように、シミュレーション精度を上げるためには基地局周辺の建物の材質や大きさを現地状況に合わせて修正する必要があり、専門知識が必要で工数もかかる。

エ) まとめ

上記のア)からウ)から、エリア算出法は、シミュレーション自体は簡単だが、電波伝搬する範囲を過小評価(実測の方がエリアが広い)する場合がある。レイトレースは、シミュレーション自体が難しく工数がかかるが、高い精度で電波伝搬の範囲をシミュレーションすることができる。なお、漏洩同軸ケーブルのような特殊なアンテナは、現時点ではエリア算出法が確立されていないため、レイトレースのみでシミュレーション可能である。

c. 他者土地への電波漏洩対応まとめ

ここまで a.)にて電波漏洩を軽減する方向性、b.)にて免許制度の改定により電波漏洩を許容する方向性を考察してきた。

電波漏洩を軽減する観点では、現行製品では電波漏洩を軽減するのが難しいが、今後の製品開発状況次第では、電波漏洩を軽減できる可能性はあると考える。

制度改定して漏れを許容する観点では、システムによっては干渉が生じるため、シミュレーションにてエリアが被るか事前に把握する必要があることがわかった。エリア算出法でのシミュレーションは簡単だが、電波伝搬の範囲を過小評価(実測の方がエリアが広い)する場合があり、エリアが被ることによる干渉のおそれがある。レイトレースでのシミュレーションはエリアが被り干渉する可能性は低く抑えられる。ただし、シミュレーションが難しく工数がかかる。また、漏洩同軸ケーブルはレイトレースのみでシミュレーション可能である。どちらの方向性も本実証事業の成果のみでは決定打にかけるため、今後の製品開発状況の注視や、他実証での結果(シミュレーションと実測との比較、システム間干渉への示唆)を考慮し、検討していく必要がある。

4. ローカル 5G 活用モデルに関する検討(課題実証)

4.1 実証概要

4.1.1 背景となる課題

我が国では、本格的な少子高齢化社会を迎え労働人口の減少が進んでおり、鉄道事業においても今後は乗務員や保守員の確保が困難になることが予想される。また、これに加えて近年は新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、阪神電気鉄道株式会社においても運輸収入及び輸送人員が落ち込むなど厳しい経営状況が続いている(図 4.1.1-1)。

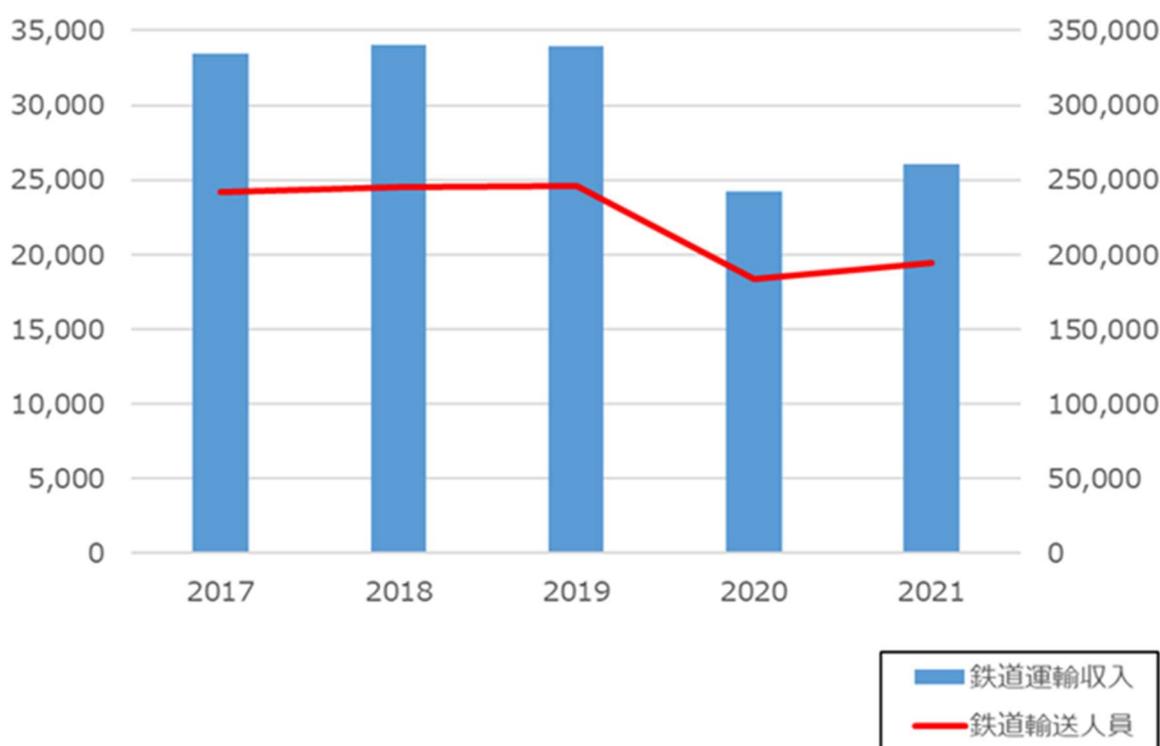


図 4.1.1-1 2017 から 2021 年度における阪神電気鉄道の運輸収入及び輸送人員の推移

一方で、昨今の社会情勢を踏まえ、国民の安全・安心への関心は急激に高まっている中、全てのお客様に安心して鉄道をご利用いただけるよう輸送の安全確保を大命題として運営を行っていく必要がある。

以上のような事情を勘案し、阪神電気鉄道株式会社としては、鉄道事業のコンパクト運営(少数精鋭でより一層の効率的な運営)を実現しつつも、鉄道事業の根幹である「安全」の水準をさらに高め、安定した輸送サービスを提供し続けていかなければならないと考えている。そこで、「①さらなる安全性の追求」、「②コンパクト運営実現に向けた点検・保守員の省人化」の 2 つのテーマを掲げ本実証事業に取り組む。

①さらなる安全性の追求

列車運行の安全確保において最も重要となるのが、「万一異常事態を検知すれば“一刻も早く”該当列車に状況を伝達し、場合によっては列車を止める」ということである。現行規則では、「列車の停止を必要とする障害が発生した場合は、列車の非常制動距離を考慮し、停止信号の現示その他の進行してくる列車を速やかに停止させるための措置を講じなければならない」（「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」第 106 条）とあり、この解釈基準によると、「新幹線以外の鉄道における非常制動による列車の制動距離は、600m 以下を標準とすること」と明記されている。要するに、勾配や悪天候のような状況があるにせよ、運転士が異常を検知して急いで非常ブレーキをかけたとしても完全停止するまでに基本的には最大 600m は進行してしまうことになる。

異常事態が発生した場所、それを検知した者、その対処内容に関する現状及び課題を図 4.1.1-2 に示す。これを見てもわかるように、列車運行に支障する異常事態が発生した場合は、一刻も早く乗務員（運転士）へ急ブレーキ操作を指示しなければならないが、現状の対応フローでは伝言ゲームのように状況を口頭で伝えていく必要があり、相当な時間ロスが生じる。この時間ロスにより、最悪の場合、異常発生場所までに列車が安全に停止できずに大事故につながる可能性が否めない。

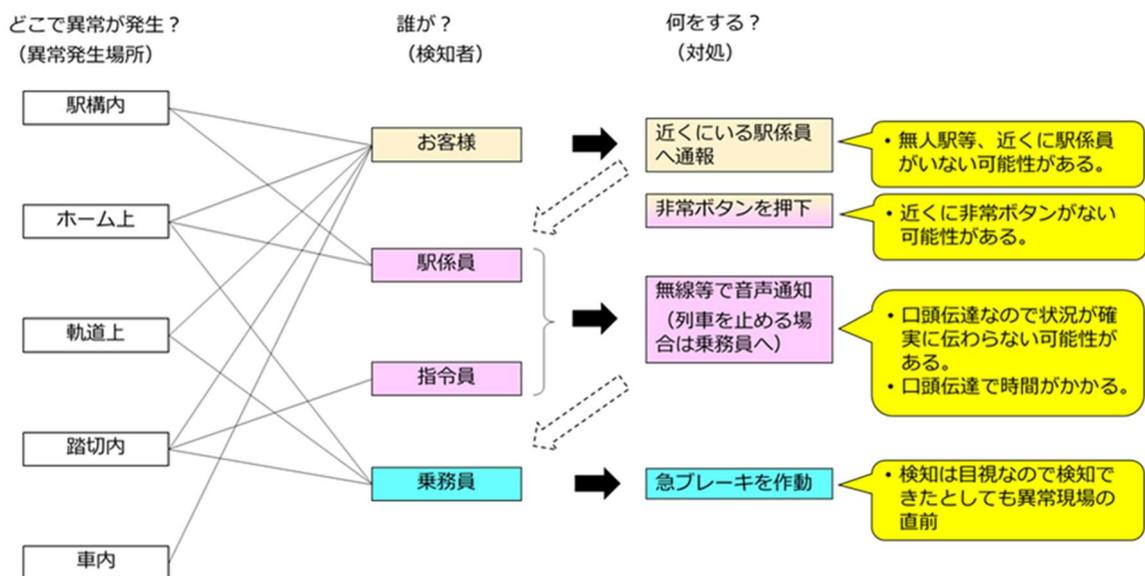


図 4.1.1-2 現状の異常事象発生時の対応と課題について

なお、本実証事業における課題整理にあたっては、列車運行のさらなる安全性の追求、すなわち「列車事故の未然防止」を目的とするため、ひとまず異常発生場所のうち列車事故とは関係のない「駅構内」は対象から除外することとした。また、阪神電気鉄道株式会社は、線路の立体化率が阪神本線で 95%、阪神なんば線で 90%と非常に高く、軌道上へ人等の侵入する可能性が極めて低いことから「軌道上」も除外し、「ホーム上」、「踏切内」、「車内」における安全性向上に向けた実証を行う。なお、鉄道施設における場所の概念を図 4.1.1-3 に示す。

以上の内容をもとに、一刻も早く異常事態を検知し乗務員へ通知するために必要な対策を図 4.1.1-4 のイシューツリーにより洗い出した。

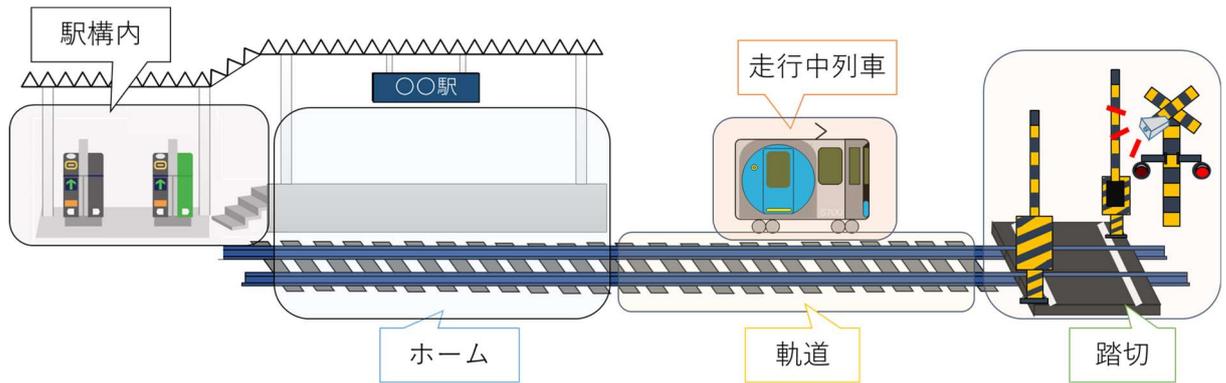


図 4.1.1-3 鉄道施設における場所の概念図

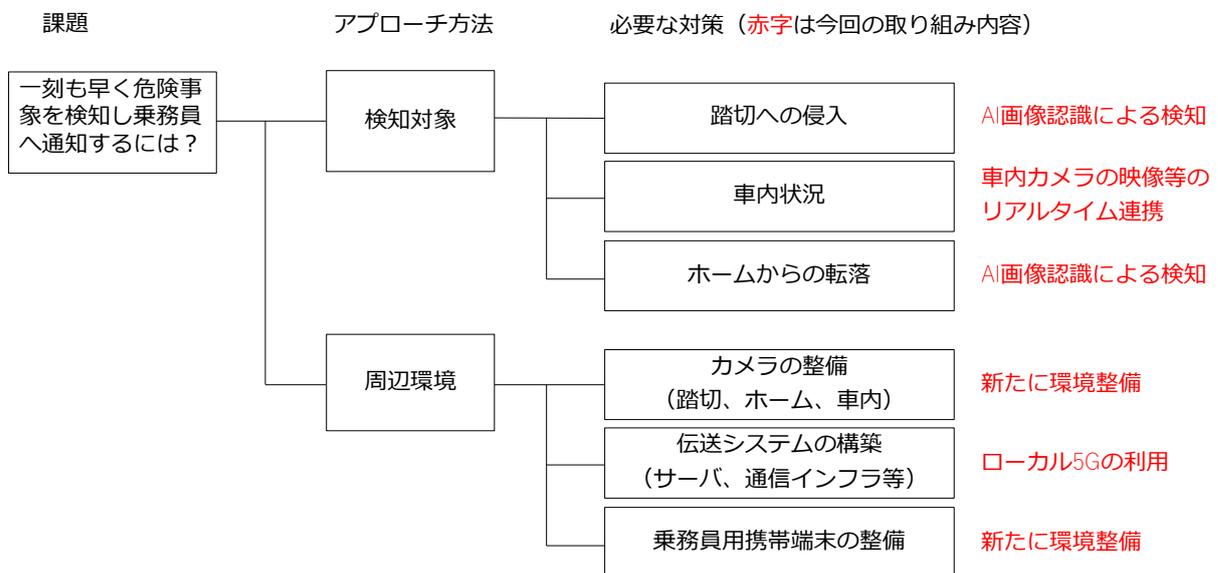


図 4.1.1-4 さらなる安全性の追求に関する 이슈ツリー

②コンパクト運営実現に向けた点検・保守員の省人化

鉄道事業のコンパクト運営の一環として、本実証事業では「点検・保守業務の効率化」に着目する。日々の安全な列車運行には各種設備の点検・保守が欠かせない。また、鉄道従事者のうち設備の点検・保守に携わる者の割合は非常に高い。ほんの一例に過ぎないが、阪神電気鉄道株式会社における沿線電気設備の点検業務に要する年間人工数(2020年度実績)を表 4.1.1-1 に示す。前述のとおり、今後労働人口の減少が進む中、鉄道保守員の確保も困難となることが予想され、その限られた人員の中で点検・保守業務を行っていくには限界がある。

以上の内容をもとに、図 4.1.1-5 に示すとおり 이슈ツリーによって点検・保守業務の効率化のために必要な対策を体系的に整理した。

表 4.1.1-1 電気設備の点検業務に要する年間人工数の一例(2020 年度実績)

線区	目視点検を行う作業	点検対象	定員	点検頻度	人員数 (2020年実績)
全線	配電線周り設備点検	配電線設備 電線、がいし及びがいし装置、避雷器、架空・地中ケーブル、架空地線	1作業/7~8名	2年に1回	年間10日 年間人員75名
	き電線周り設備点検	き電線設備 電線、がいし及びがいし装置、架空・地中ケーブル、避雷器 負き電線設備 電線、がいし及びがいし装置、架空・地中ケーブル、帰線引下線	1作業/5~6名	1年に1回	年間7.5日 年間人員39名
	電車線周り設備点検	電車線設備 吊架線、補助吊架線及びき電吊架線、トロリ線、がいし及びがいし装置・吊架装置、トロリ線接続箇所、ドロップ装置、ハンガ及びインガイヤー、曲線引装置、振止装置、エアークッション・ジョイントフィードブランチ装置、(引留装置)	1作業/5~6名	1年に1回	年間6.5日 年間人員35名
	支持物周り設備点検	支持物、支線設備 鉄柱、コンクリート柱、銅管柱、支線 (3年で全線を点検)	1作業/7~8名	3年に1回	年間14日 (3年合計) 年間人員106名 (3年合計)
	電車線設備一斉点検	設備全般	1作業/4名	半年に1回	年間13日 年間人員53名
	車上巡回	設備全般	1人	営業日毎 (例外有)	—
	低圧線設備点検 (電源箱点検含む)	低圧線設備 電線、がいし、架空・地中ケーブル電源箱※ (接地線、接地線がいし、接地端子箱)	1作業/4~5名	2年に1回	年間9日 年間人員41名

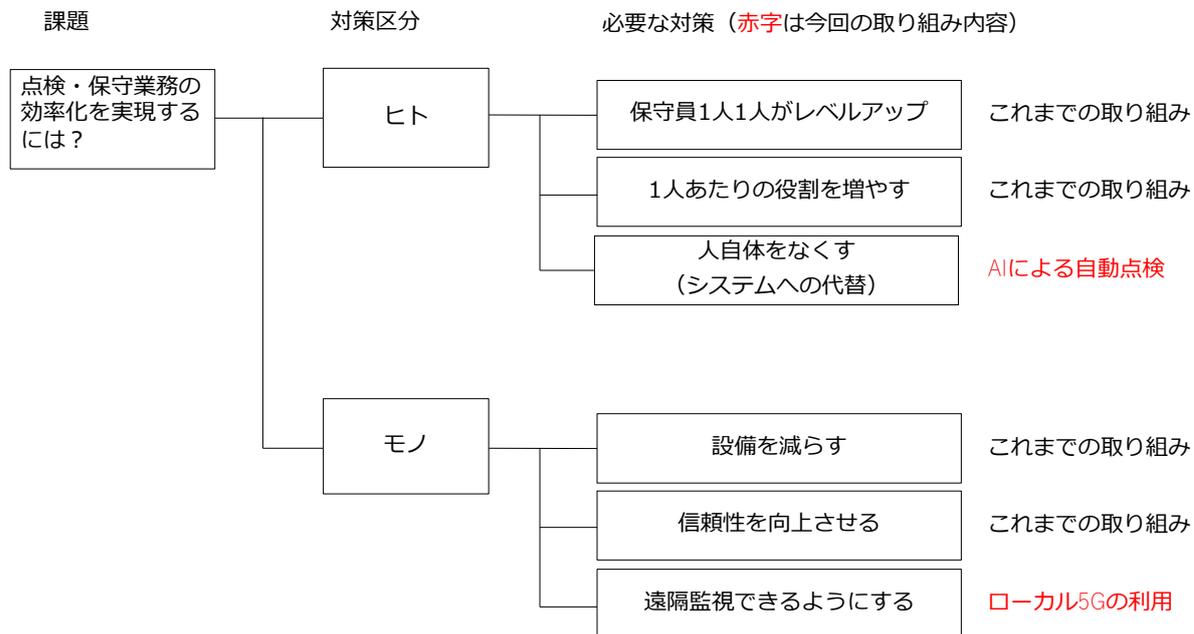


図 4.1.1-5 点検・保守員の省人化に関する 이슈ーツリー

4.1.2 本実証におけるローカル 5G 活用モデル

(1) ローカル 5G を用いたソリューション

4.1.1 章で述べた課題を解決すべく、以下 3 つのソリューションに関して検証を実施。いずれのソリューションもローカル 5G を用いた車地上間通信による、鉄道事業のコンパクト運営と、さらなる安全水準の向上の実現を目的としている。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

列車事故の未然の防止を目的として、踏切での立往生や駅ホームからの乗客の転落等、地上で発生した危険を AI 画像認識によって検知し、ローカル 5G で瞬時に走行中の列車乗務員等に通知するとともに立往生者等に対してスピーカによって注意喚起を行うソリューションである(図 4.1.2-1)。機能概要を表 4.1.2-1 に示す。踏切の障害物検知装置やホームの非常通報ボタン等、既に安全対策のための設備は設置されているが、障害物検知装置は自動車の立往生検知を前提として設計されており人が転倒等によって立往生している場合は検知できないおそれがあったり、ホームの非常通報ボタンは危険を察知した周囲の人がボタン押下する必要があるなどと課題も存在することから、既存設備を補完することでさらなる安全性の向上を実現する。なお、ホーム上や踏切において既設カメラの設置実績があるため、本検証で設置するカメラについても同様に撮影中の旨を明示、用途外利用しないようにする等プライバシーの観点からデータ管理を徹底する。また、設置にあたっては「カメラ画像活用ガイドブック」に則り、プレスリリース等による事前告知を行った。

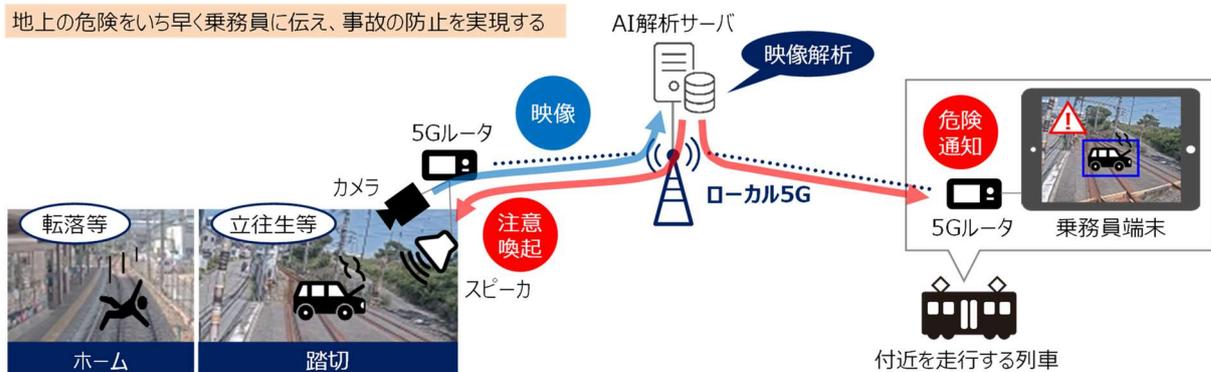


図 4.1.2-1 地上で発生した危険の通知イメージ

表 4.1.2-1 機能概要

場所		機能概要
踏切	概要	監視カメラの映像より踏切内の支障物を検知し、走行中列車の乗務員や運転指令 ^{※1} に通知する。また、特殊発光信号器が点灯した場合にも同様に通知を行う。
	検知対象	人物、白杖利用、自動車、二輪車、車いす
	検知シーン	・踏切閉鎖中の踏切内への侵入 ・踏切から線路への侵入(常時) ・白杖利用者の通行(常時)
	その他	白杖利用者を検知した場合は、踏切の動作状況に関わらず注意喚起のためスピーカにて自動放送を行う
ホーム	概要	お客様のホームからの転落、ホーム端への寄付きまたは駆込み乗車を検知し、乗務員、運転指令及び駅係員へ通知する。また、ホームの非常通報ボタン ^{※2} が押下された場合も同様に通知を行う。
	検知対象	人物
	検知シーン	・ホームからの転落(列車非在線時) ・ホーム端への寄付き(列車非在線時) ・駆込み乗車(列車在線停車時)
	その他	ホーム端への寄付きを検知した場合には、各所への通知に加えてホーム上のスピーカにて注意喚起のための自動放送を行う。
走行中列車	概要	タブレット端末にて通知(AI 画像認識による検知結果)を受信する。

※1,2 本実証事業においては、実際の運行業務に支障をきたさないよう運転指令室を模擬した場所において検証を実施。同様に非常通報ボタンも既設の物ではなく、タブレット端末とアプリによって模擬したボタンを使用し、通知機能の検証を実施。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

お客様の安全確保のための有事対応の迅速化を目指し、車内カメラの映像や非常通報装置の音声をローカル5Gでリアルタイムに列車内の乗務員、運転指令及び駅係員(以下、「地上係員」という)へ連携するソリューションである(図 4.1.2-2)。機能の概要を、表 4.1.2-2 に示す。現状、乗務員と地上係員間の情報連携は列車無線により口頭で行われるが、有事の際に冷静にわかりやすく状況を伝達することは難しく、また地上係員は乗務員からの情報を受けてからの対応となってしまう。車内の映像や音声をリアルタイムに同時に連携することで、地上係員もただちに車内の状況を把握でき迅速に対応を行えるようになる。なお、本実証事業においては、プライバシーの観点から一般のお客様が乗車する列車ではなく、回送列車等に試験関係者のみ乗車した状態で検証を実施した。営業列車への実装にあたっては、既設防犯カメラ同様に撮影中の旨を明示、用途外利用しないようする等、映像データの取扱いに注意し運用する。

地上係員との情報連携強化により有事対応の迅速化を図る

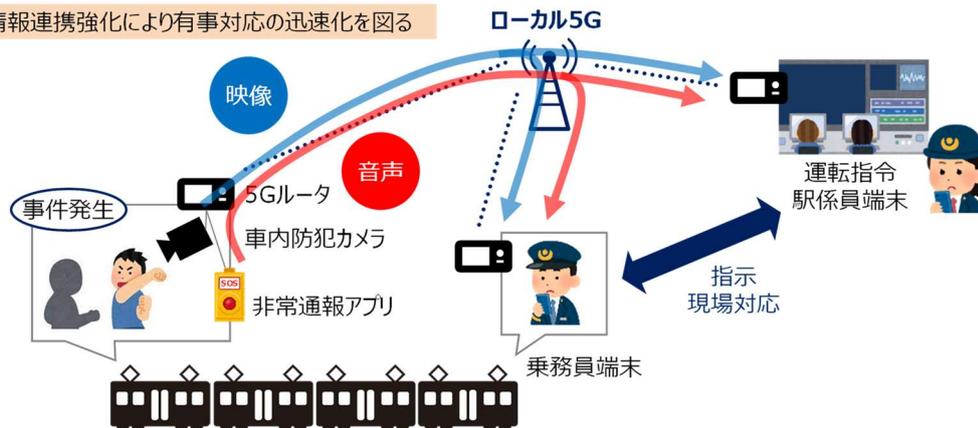


図 4.1.2-2 車内状況の連携イメージ

表 4.1.2-2 機能概要

設備	機能概要
車内カメラ	車内の状況を撮影し、有事の際には乗務員及び地上係員の持つタブレット端末に映像を表示する。
非常通報ボタン※1	ボタンが押下されると乗務員及び地上係員の持つタブレット端末に通知され、必要に応じて通話を行う。また、近くに設置される車内カメラと連動し、映像が乗務員及び地上係員の持つタブレット端末に表示される。

※1 ①同様、タブレット端末による模擬ボタンを使用。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

沿線設備の日常巡視点検業務の省人化を目指し、列車前方に搭載したカメラの映像を AI によって解析し、設備の異常等を検知し保守作業員へ通知するソリューションである(図 4.1.2-3)。表 4.1.1-4 に示すとおり、阪神電気鉄道株式会社では車上での巡視点検を毎日実施しており、相当な工数がかかっているため、自動化されることで大きな省人化効果を期待できる。なお、巡視点検で確認する観点は多岐に渡る(表 4.1.2-3)ため、本実証事業においては、第 1 ステップとして対象物の中で比較的発生頻度の高い、支持物類(曲線引金具)の脱落、飛来したビニール袋の電線類への付着を検知する AI モデルを開発した。また本実証事業の成果を踏まえ、次ステップとして AI モデルの追加学習や異常判定アルゴリズムの調整を行い、精度の向上や検知対象物の拡充を図る。最終的には、現行の日常巡視点検業務で確認している事象を実用レベルで網羅することを目指す。なお、AI モデルの開発にあたっては、段階ごとにシステムの想定ユーザとなる阪神電気鉄道株式会社において実験的に試用し、検知精度等に関してユーザ目線でのフィードバックを行う。

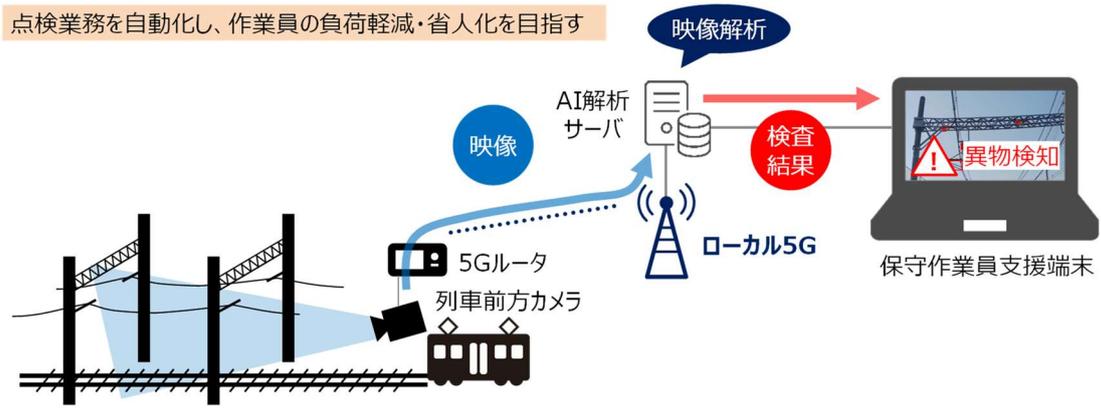


図 4.1.2-3 沿線設備の点検イメージ

表 4.1.2-3 巡視点検で確認している事象の一例

対象物		状態
電路設備	碍子	・脱落していないか ・破損していないか
	金具類	・脱落していないか ・破損していないか
	電線類	・断線が発生していないか ・アーク放電等、素線切れにつながる事象は発生していないか ・バランスの張力表示が適性範囲内か
	支持物類	・傾いていないか ・破損していないか
	その他	・設備全般に通常とは異なる事象が発生していないか
異物	鳥の巣	・支持物に鳥の巣がないか ・巣がある場合は、運行へ支障をきたす場所、大きさでないか
	樹木	・運行へ支障をきたす範囲まで枝葉が伸びてきていないか ・倒木はないか
	飛来物	・ビニールなどが落下もしくは電車線等に絡まっていないか ・台風の直後等、看板等の飛来物が落下していないか

(2) ローカル 5G 活用モデル(当初仮説)

現在のローカル 5G 免許制度において、自己土地利用の観点から鉄道軌道上での実運用が難しいことから、本実証事業終了後も実験試験局を活用して将来の実装に向けた実証実験を継続する。また、ローカル 5G や AI システム等の運用には専門的なノウハウや保守体制が必要となるが、鉄道事業者が一から体制を構築し、ノウハウを持つ人材を確保することは困難であると考えられることから、実装の際には、阪神電気鉄道株式会社をユーザとし、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社とアイテック阪急阪神株式会社が連携のうえ、ローカル 5G の通信環境及びソリューションをそれぞれ提供するスキーム

を想定する。想定されるビジネススキームを図 4.1.2-4 に示す。

横展開にあたっては、全国の鉄道事業者を導入ターゲットとするが、コンソーシアム内における実装時同様、鉄道事業者がローカル 5G を運用・保守するための体制を一から構築することは難しいと想定されることから、地域で通信事業を営むケーブルテレビ事業者との連携により、鉄道事業者の運用負担を軽減するモデルを模索する。また、特に地方において経営状況が厳しい事業者も多く存在することから、コスト面において導入しやすいビジネスモデルの検討が必要である。コスト低減対策として、各ソリューションで求められる通信遅延等の性能を満たす範囲内でシステムのクラウド化等を進め、サブスクリプションモデルでも提供することで各鉄道事業者の設備投資負担の軽減を図る。

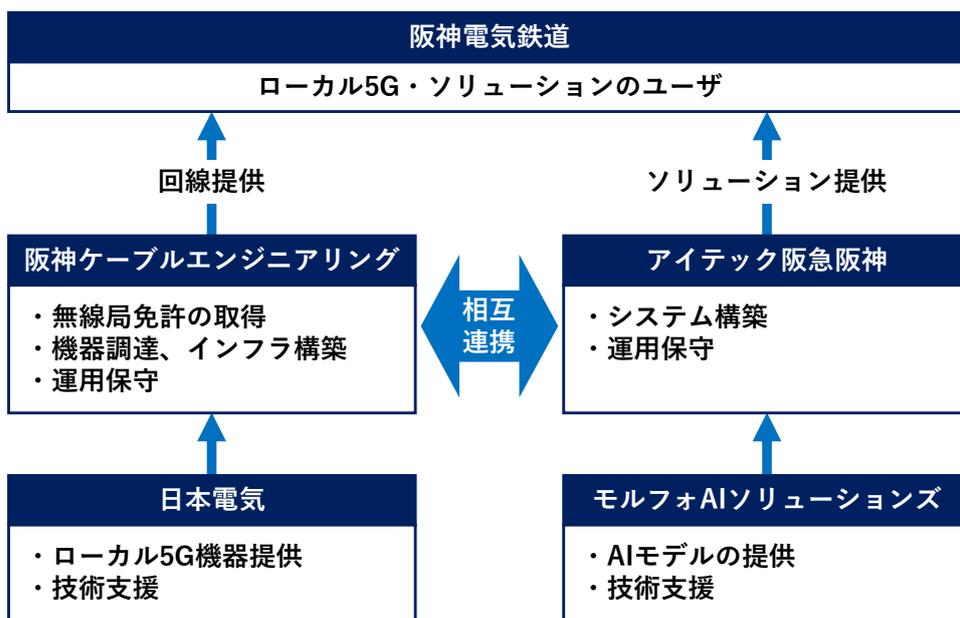


図 4.1.2-4 想定するビジネススキームのイメージ

(3) ローカル 5G の必然性・必要性

3つのソリューション「①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化」、「②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化」、「③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化」それぞれについて、特に重要視する指標を定め(表 4.1.2-4)、他の通信方式(キャリア 5G、4G・LTE、Wi-Fi、有線)との比較を行うことで、ローカル 5G が最も適した通信方式であると結論付けた。なお、ソリューション①の地上カメラについては、既設の有線インフラ(光回線)を利用することが考えられるが、有線の接続にかかる設置費用が高むことや鉄道線路上の既設光回線は多くの鉄道事業者において空きが限られており、カメラ台数が増加した際の拡張性に懸念が残ることからローカル 5G が優位であると考えられる。また、ソリューション③については、取得したデータを記録媒体に記録しておき、列車が車庫に入庫した後に AI 解析用サーバへデータ移行して解析する方法が考えられるが、データ移行が作業となるため省人化効果が低くなることや記録媒体の紛失等のセキュリティリスクがあることから、ローカル 5G が優位であると判断した。比較結果を表 4.1.2-5 から表 4.1.2-7 に示す。

表 4.1.2-4 各ソリューションで重要視する通信性能指標

ソリューション	重要視する指標
①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化	通信遅延、安定性、セキュリティ
②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化	スループット、安定性、セキュリティ
③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化	経済性、安定性、セキュリティ

表 4.1.2-5 ①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化における比較表

通信方式	通信遅延 (一刻も早く危険を通知するため)	安定性 (通知の欠落が発生してはならないため)	セキュリティ (一般のお客様の映像を扱うため)
ローカル5G	低遅延かつ自営設備のため、ローカルでデータ処理が可能 (MEC)	自営利用のため帯域占有可能	SIM認証やローカルでのクローズドNWの構築によりセキュリティを担保可能
キャリア5G	無線区間は低遅延であるがコア設備が遠隔地にあるため伝送に時間を要する	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
4G・LTE	コア設備が遠隔地にあるため伝送に時間を要する	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
Wi-Fi	条件により数ミリ秒～	免許不要のため電波干渉のおそれ	NWへの不正侵入等のおそれ
有線	車地上間通信においては、有線接続はできないため検討対象外		

表 4.1.2-6 ②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化における比較表

通信方式	スループット (カメラ映像や音声を送信するため)	安定性 (有事の際に途切れてはならないため)	セキュリティ (一般のお客様の映像を扱うため)
ローカル5G	・自営利用のため帯域占有可能 ・必要に応じて準同期により、上りの比率を変更可能	自営利用のため帯域占有可能	SIM認証やローカルでのクローズドNWの構築によりセキュリティを担保可能
キャリア5G	ローカル5Gと同等以上 (理論値ベース)	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
4G・LTE	カメラ映像を送信する際に上り帯域が逼迫するおそれ	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
Wi-Fi	理論値ベースでは数Gbps	・免許不要のため電波干渉のおそれ ・高速移動時のハンドオーバーが難しい	NWへの不正侵入等のおそれ
有線	車地上間通信においては、有線接続はできないため検討対象外		

表 4.1.2-7 ③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化における比較表

通信方式	経済性 (大容量データを伝送するため)	安定性 (欠損により検査漏れが生じないため)	セキュリティ (機微な情報を取り扱うため)
ローカル5G	自営利用のため、通信回線コストは、データの通信量によらない	自営利用のため帯域占有可能	SIM認証やローカルでのクローズドNWの構築によりセキュリティを担保可能
キャリア5G	大容量通信をすると通信回線コストが高額となる	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
4G・LTE	大容量通信をすると通信回線コストが高額となる	公衆回線のため、駅等の混雑する場所では輻輳のおそれ	SIM認証ではあるが、公衆回線のため、NW全体でのセキュリティ担保が困難
Wi-Fi	自営利用のため、通信回線コストは、データの通信量によらない	・免許不要のため電波干渉のおそれ ・高速移動時のハンドオーバーが難しい	NWへの不正侵入等のおそれ
記録媒体での運用	別途手作業が発生し省人化効果が低いことや記録媒体紛失のリスクがあることからローカル5Gが優位		

4.1.3 実証内容の新規性・妥当性

(1) 実証内容の新規性

AI 画像認識を活用した取り組みは鉄道業界においても盛んに行われているが、本章(3)でも後述するとおり、ローカル 5G を広域的に利用し、大容量、低遅延等の特徴を活かして車地上間において AI の検知結果等を伝送することで安全性の向上や省人化の実現を目指す取り組みは、他に例のない取り組みである。また、車内の防犯カメラについても鉄道各社での導入検討が進められているが、通信回線を用いる物は携帯電話事業者の 4G・LTE 回線の使用が基本となっており、カメラ映像の伝送に伴う上り通信帯域の逼迫や通信コスト等が課題としてあがっている。ローカル 5G を使用することができれば、これらの課題解決に資する新しい手段となる。過年度実証においては駅部での実証結果が得られているが、鉄道営業においては駅間走行時に密室となる車内トラブルや踏切部での立往生等が操業に大きく影響することから駅間を含めた全線を網羅的に包含して通信を行う必要がある。これを実現するため、高速走行中の通信や、複数基地局間のハンドオーバーなど、駅間ならではの性能条件について、実証を行う点も新規性があると考えられる。

(2) 過年度実証事業との関連性

本実証事業と類似性のある過年度実証事業としては、令和 3 年度開発実証の「ローカル 5G を活用した鉄道駅における線路巡視業務・運転支援業務の高度化」(以下、「過年度案件」という)があげられる。過年度案件では、少子高齢化による労働力不足に起因し鉄道事業者が抱える課題に着目し、ローカル 5G 及び AI 画像認識等により鉄道運行業務・保守業務の効率化を図っている点が本実証事業と共通している。一方で、本実証事業では過年度案件では取り組まれていない新しいテーマとして、走行中列車との通信による鉄道事業の課題解決に取り組んだ。本実証事業における具体的な検証の観点を以下に、本実証事業と過年度案件との比較を表 4.1.3-1 に示す。

- ・ 鉄道事業者の抱える課題として労働力不足対策のための業務効率化だけでなく、さらなる安心安全の実現に向けて駅間を含めたあらゆる環境下(踏切、ホーム等)における安全対策の強化に着目している点。
- ・ ローカル 5G 通信の利用場所を駅構内に限定せず、広域利用を見据えて走行中の列車と踏切、ホーム等の地上施設との車地上間通信を主体とした活用モデルの検証を行う点。
- ・ 「高速走行中の通信」、「複数基地局間のハンドオーバー」等を検証する等、全線展開を模擬したより実践的な実証を行う点。

表 4.1.3-1 本実証事業と過年度案件との比較

	過年度案件	本実証事業
解決を目指す課題	・ 労働力不足の解消、生産性の向上	・ 労働力不足の解消、生産性の向上 ・ 列車運行のさらなる安全性の向上
実証するソリューション	・ AI による軌道設備、踏切保安設備の巡視点検の高度化 ・ AI による車両扉の開閉判断の高度化	・ AI による電車線設備の巡視点検の省力化 ・ AI によるホーム・踏切の危険検知 ・ 車内防犯カメラ映像のリアルタイム連携
通信範囲	駅構内のみ	・ 駅構内 ・ 駅間を走行する列車内

4.1.4 実証目標

ローカル 5G に関して本実証事業における目標は「列車運行の安全性をさらに高める安定的かつ即時性が高い通信の実現」とする。本実証事業において、評価基準の達成が認められたまたは見込まれた場合、4.1.3 章(1)でも述べたとおり 2026 年度以降の試験運用に向けて、課題の抽出と解決を繰り返すことで実装に向けたブラッシュアップを図る。列車運行における安全性を担う設備への実装を想定していることから、実装設備に対しては高度な信頼性が求められる。また、免許制度の改定による広域利用化の実現にあたっては、需要の確保と需要に対する供給の実現性の評価が必要である。以上から実証においてローカル 5G 実証が満たすべき目標水準として以下①から⑤の項目を設定する。各実証目標に対する検証方法等を表 4.1.4-3 に示す。なお、本実証事業においては、現時点で最も効率が良いと考える製品を選定しているが、ローカル 5G 製品はこれからも継続して性能のアップデートがなされることが考えられることから、実装の段階では、評価基準を満たす最適な製品を改めて選定することも踏まえ取り組みを継続する。

①完全性

鉄道運行において安全管理等に使用する場合、通信の完全性が必須要件となる。データ欠落のない完全な通信を安定的に供給できることが要件となることから、限りなく完全に近い ping 応答率 99.9%

を実証目標とする。

また、実際にローカル 5G をソリューションに利用した際の具体例として、車内防犯カメラの映像及び音声の品質について評価を行う。実験関係者へのアンケート調査により、高評価が 80%以上得られることを目標とする。

②安定性

実運用においては乗務員の業務支援のほか、点検・保守業務の省人化や情報連携、お客様への情報提供等、様々な用途で通信を使用する。同時多接続環境下においても品質を担保し、安定的に運用できることが求められるため、2.4 章で述べたスループット要件(表 4.1.5-1)を十分に満たすことを目標とする。また、通信の安定性を示す指標として、ジッタやハンドオーバー性能について評価する。ジッタについては、一般に通信回線が安定しているとみなされる 10 ミリ秒以下となることを目標とする(参考:イツツ・コミュニケーションズ株式会社 WEB サイト(<https://www.itscom.co.jp/service/internet/column/internet/639/#Jitter%E5%80%A4%E3%81%A8%E3%81%AF>))。ハンドオーバーは、基地局の境界部において ping 応答試験を実施し、通信断が発生しないことを目標とする。

このほか、システムの安定性として AI 検知精度について評価する。各ソリューションの AI 検知精度について表 4.1.4-2 を満たすことを目標とする。

表 4.1.4-1 スループット要件(2.4 章の再掲)

ソリューション	要件
①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化	・上り伝送帯域:18Mbps ・通信遅延:200 ミリ秒
②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化	・上り伝送帯域:6Mbps ・下り伝送帯域:6Mbps ※タブレット 1 台で映像確認する場合
③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化	・上り伝送帯域:40Mbps

表 4.1.4-2 AI 検知精度の目標値

ソリューション	目標値
①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化	・検知率: 100%(特に踏切における立往生やホームからの転落等、事故に直結する事象について) ・誤検知率:1%未満
②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化	AI を利用しないため該当なし
③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化	検知率:95%前後で安定すること

③即時性

乗務員への通知は、ホーム上や踏切内の危険を検知し、乗務員の操作により安全性を確保するために使用されることから、鉄道の安全運行上即時性が極めて重要である。危険検知から通知までの間において、遅延が大きいと事故等に直結することから、ローカル 5G による低遅延通信が期待される。昨年度阪神電気鉄道武庫川線において実施した社内試験において、地域 BWA(4G 回線)と 5G 回線の速度比較を実施したところ、一定の違いが見られた。本実証事業では、事象発生から 1 秒以内に係員に通知が届くことを要件とし、通信遅延については 200 ミリ秒、システムの処理に係る時間として 700 ミリ秒を目標値とする。ここでは、100 ミリ秒要するカメラ内部のエンコード処理を含むと仮定する。

④拡張性

本実証事業の結果をもとに阪神電気鉄道株式会社の全線に展開し、さらに他の鉄道事業者にも横展開していくことを想定した場合、インフラ構築に関するノウハウは不可欠となる。様々な条件下において、効率的にインフラを構築するに足る実証結果が必要となることから、異なる条件下におけるローカル 5G のカバーエリアの可視化を実証目標とする。

⑤強靱性

安全性を確保するためには、外部からの侵入を許さない堅牢なシステムであることが求められる。セキュリティレベルの低下は、公共交通機関たる鉄道の運行に支障を及ぼすおそれがあるため、十分なセキュリティ対策を講じたシステムの構築が必要とされる。本検証においても外部からの侵入を許さないシステムの実装を目標とし、システムログの照合により不要なアクセス等がないか検証することで評価する。

表 4.1.4-3 実証目標の検証方法

実証目標	検証項目	検証方法	目標
①完全性	パケットロス率	各駅、踏切において ping 試験を行い、応答失敗の割合を算出	1%以下
	車内防犯カメラの映像及び音声の品質	アンケート調査により映像のカクツキや音声の途切れがなかった等の評価	高評価/同意が80%以上
②安定性	スループット	測定ソフトウェアにより、各駅、踏切における上り/下りのスループットを計測	表 4.1.4-1 の達成
	ジッタ	各駅、踏切における ping 応答時間の標準偏差を算出	10 ミリ秒以下
	ハンドオーバー性能	基地局の境界部において、ping 応答試験を実施し、通信の途切れの有無を確認	通信が途切れずハンドオーバー可能であること
	AI 検知精度	AI で判定された結果とカメラの録画映像をもとに目視で判定した結果から算出	表 4.1.4-2 の達成
③即時性	通信遅延	各駅、踏切において ping の応答時間を計測	200 ミリ秒以下
	システムに係る処理時間	ログからシステムの各コンポーネントに係る処理時間を算出	700 ミリ秒以下 ※ローカル 5G の通信遅延は除く
④拡張性	ローカル 5G 電波強度	列車に乗車した状態でローカル 5G の電波強度を測定し、線路上におけるローカル 5G のカバーエリアを可視化	線路形状や基地局設置位置等による電波強度の差異を考察
⑤強靭性	セキュリティ	システムログ等により確認	不正アクセスがないこと

4.2 実証環境

ソリューションごとの実証環境の概要は以下のとおり。また、課題実証の実施環境の全体像を図 4.2-1 に示す。



図 4.2-1 実証環境の全体像(地理院地図を加工して作成)

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全確認業務の高度化

駅(ホーム上)及び踏切を対象に課題実証を実施する。駅は、芦屋駅と西宮駅を選定した。(図 4.2-2、図 4.2-3)選定理由としては、芦屋駅ホームは完全屋外、西宮駅ホームは半屋外となっており、駅舎の構造の違いがあげられる。両駅で実証を行うことで構造の違いによるローカル 5G の通信性能の差異を検証可能である。また、両駅はいずれも急行や特急等の優等列車の停車駅であることから、利用者が比較的多くホーム上での AI 検知精度等の検証効果が高いと予想する。なお、御影駅については、技術実証のためにローカル 5G の環境構築を行ったため、課題実証においては利用しない。踏切については、区間内で特色のある 3 か所(打出東口踏切、打出南宮町踏切及び打出駅踏切)を選定した(図 4.2-4、図 4.2-5、図 4.2-6)。選定理由として、打出東口踏切は、歩行者専用踏切のため、障害物検知装置を設置しておらず、非常通報押ボタンのみの整備に留まっていることから本ソリューションによって踏切内の立往生等を事前に検知することによる、安全性の向上が見込まれる。打出南宮町踏切は踏切幅員が 17.8m と広く、また南北に幹線道路が走っているため自動車の交通量が他踏切と比較して多いほか、2次元レーザレーダ式踏切障害物検知装置を設置しており、本ソリューションとの動作比較検証も実施することができる。最後に打出駅踏切は、駅に隣接した踏切ということもあり歩行者が多いことから多くのサンプル数をうることができる。



図 4.2-2 芦屋駅

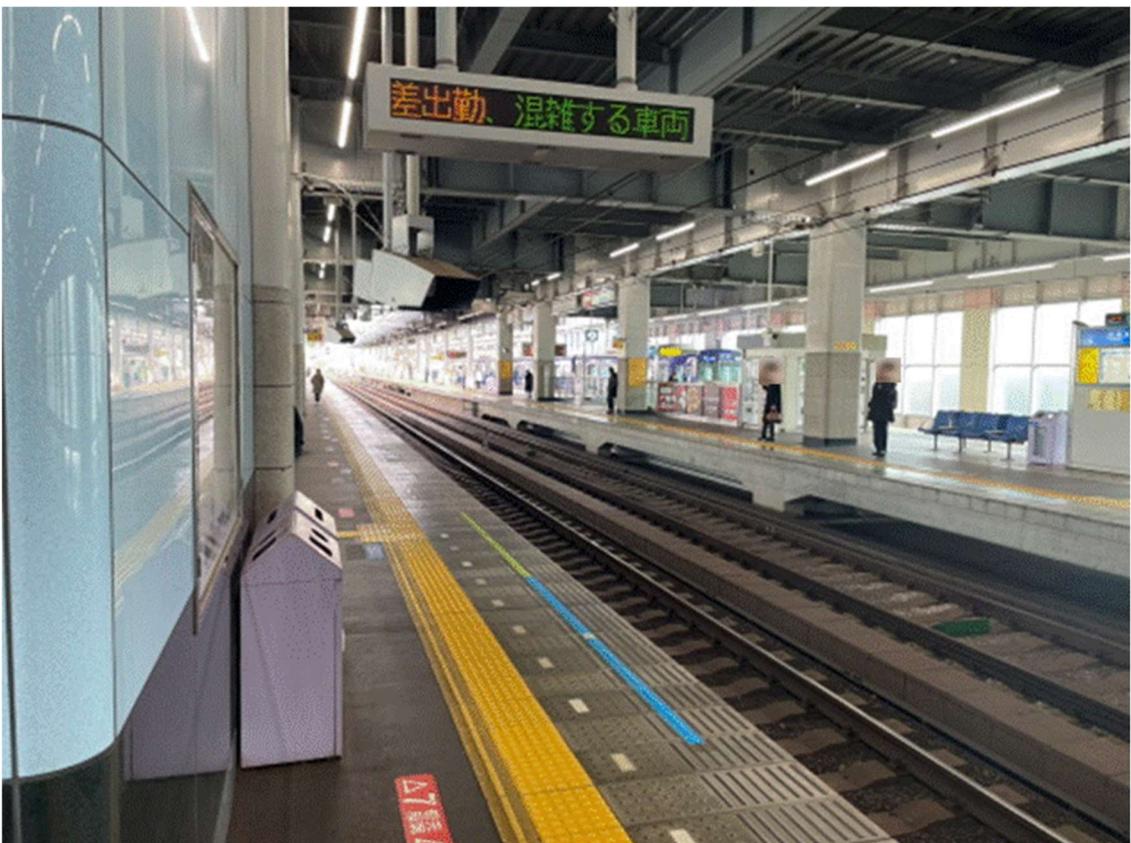


図 4.2-3 西宮駅

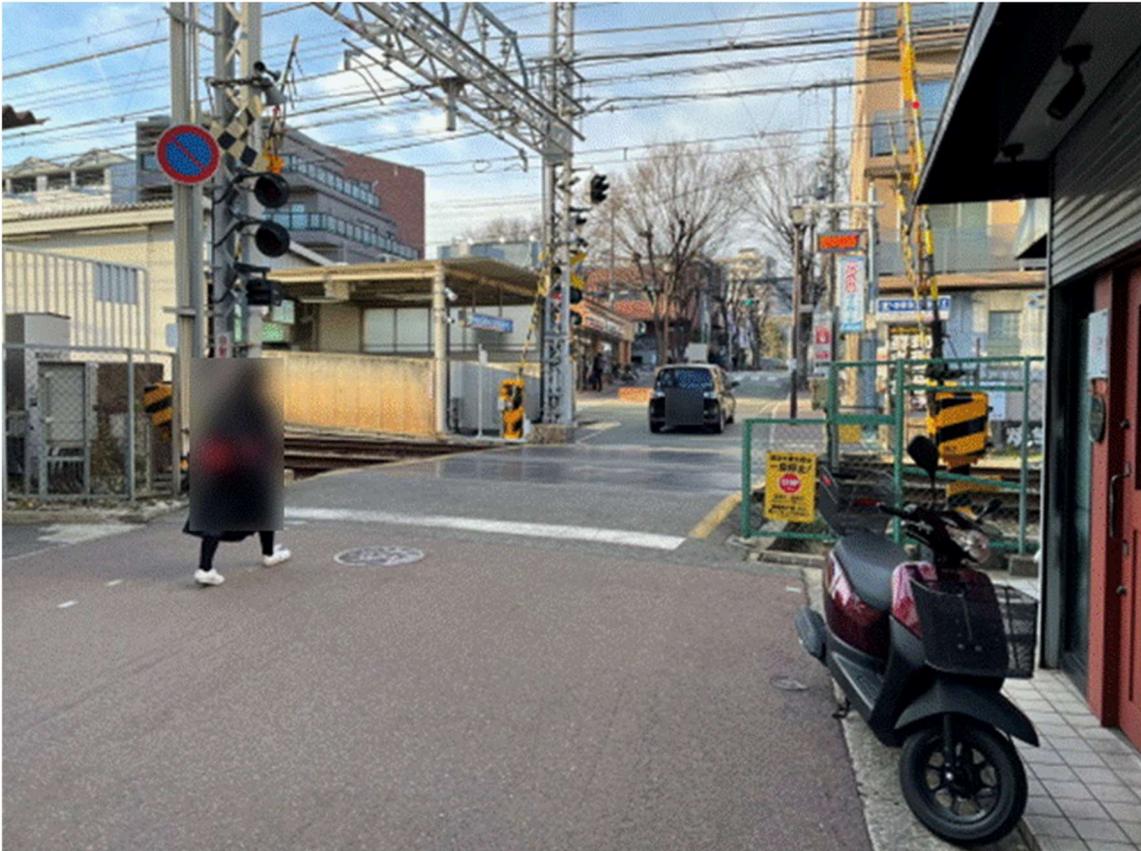


図 4.2-4 打出駅踏切

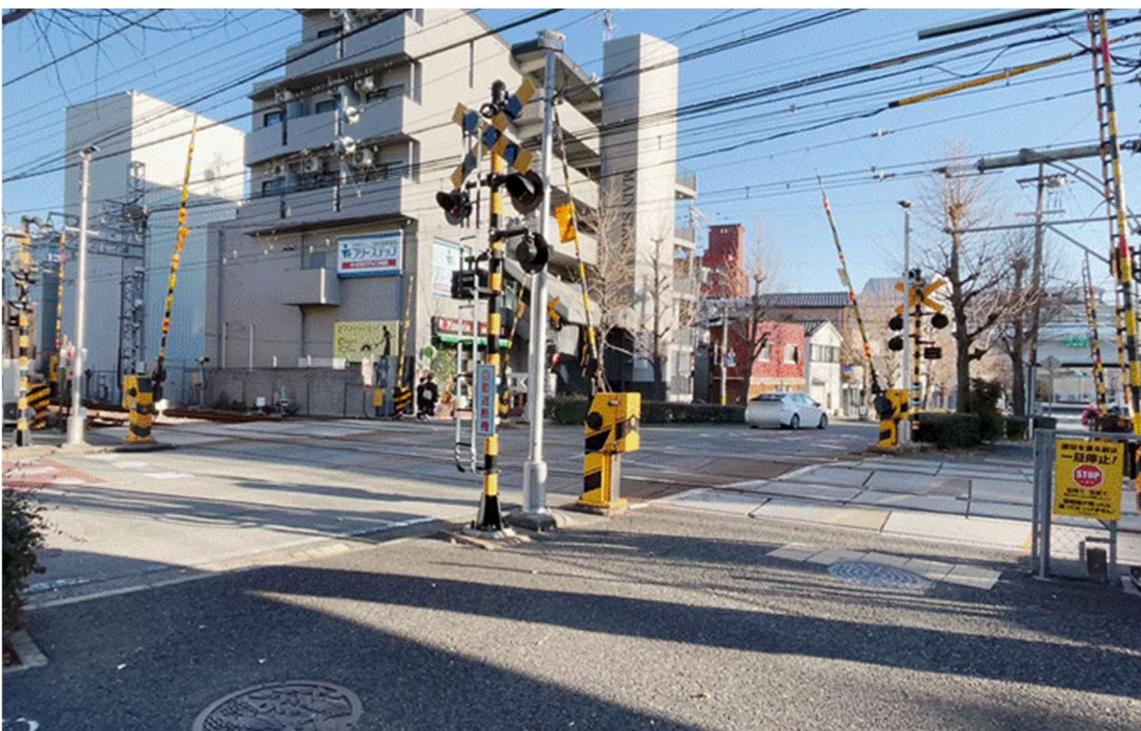


図 4.2-5 打出南宮町踏切



図 4.2-6 打出東口踏切

②車内状況の地上へのリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

芦屋駅－西宮駅区間一帯(高架区間、地上区間の両方が存在する区間)を対象に走行中列車内、駅係員及び運転指令にて課題実証を行う。なお、運転指令については鉄道施設内に運転指令を想定した環境(以下「模擬運転指令」という。)を構築して実証を行った(図 4.2-7)。本ソリューションは、線路内全域での動作が求められることから、本実証事業におけるローカル 5G カバーエリア全域(御影駅は飛び地のため除く)を対象とした。

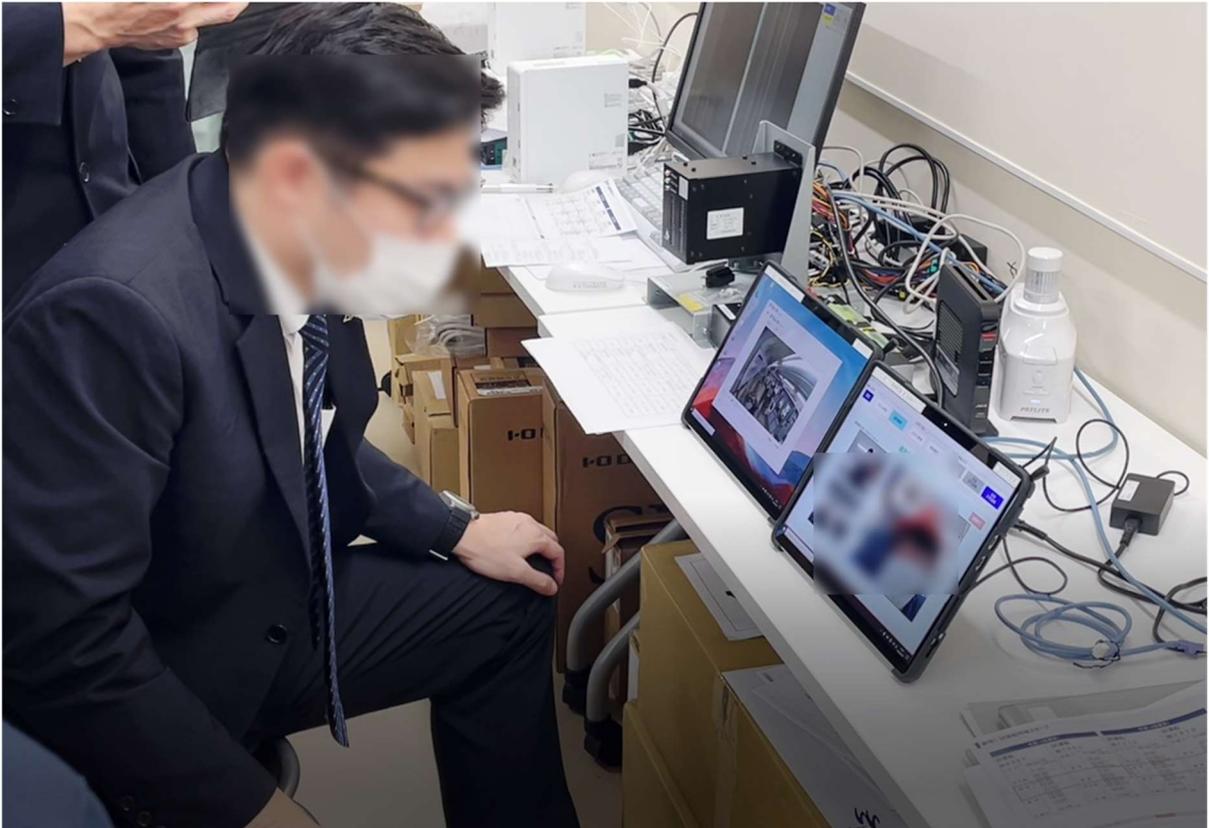


図 4.2-7 模擬運転指令から車内状況を確認している様子

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

芦屋駅－西宮駅区間一帯(高架区間、地上区間の両方が存在する区間)を対象に課題実証を実施する。②同様、本ソリューションは、線路内全域での動作が求められることから、本実証事業におけるローカル 5G カバーエリア全域(御影駅は飛び地のため除く)を対象とした。なお、巡視点検のための AI モデルの開発にあたっては、異常状態を含む限り多数の映像サンプルが必要になることから、訓練所等において異常状態を再現した映像等も利用した。

4.3 実施事項

4.3.1 ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する検証

(1) 機能検証

1) 検証項目

各ソリューションに共通する項目として、ローカル 5G の電波強度及びセキュリティを検証する。各ソリューションにおける検証項目を以下に示す。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

地上カメラで検知した異常を車上に伝達し、乗務員による安全対策をより高度化するためには、高速走行中の車内に迅速かつ正確に異常等の情報を伝達する必要があることから、以下の項目について検証する。

- ・踏切、ホーム上でのローカル 5G のスループット、遅延及び安定性(パケットロス率、ジッタ)
 - スループット:測定ソフトウェアで計測する上り/下りの通信速度
 - 遅延:ローカル 5G 端末からコアネットワークまでの ping の応答時間
 - パケットロス率:遅延測定時の ping 応答回数のうち正常でなかった回数の割合
 - ジッタ:遅延測定時の ping 応答時間の標準偏差
- ・走行列車内におけるローカル 5G のスループット、遅延及び安定性(パケットロス率、ジッタ)
 - システムに係る処理時間
 - ローカル 5G 端末からコアネットワーク間の通信時間(ローカル 5G の遅延と同義)
 - AI 解析サーバが映像を受信してから検知結果を出力するまでの時間
 - AI 解析サーバによる検知結果を受信した通知サーバがアラームを発報するまでの時間
 - タブレットが通知を受信してからアラームを表示するまでの時間
- ・AI 検知精度
 - 再現率:検知すべき事象が発生した回数のうち正しく検知できた割合
 - 誤検知率:AI が検知した回数のうち誤検知であった割合
 - 正解率:予測結果全体のうち正しく予測できた割合

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

車内カメラにより検知した異常を地上に伝達し、有事対応の迅速化を図るためには、遠隔地で正確な情報の取得が必要であることから、以下の項目について検証する。

- ・ローカル 5G 基地局間のハンドオーバー性能
 - 高速運行中(100km/h 前後)においてもローカル 5G 端末からコアネットワークまでの ping 応答が途切れないか
- ・走行列車内におけるローカル 5G のスループット及び安定性(パケットロス率、ジッタ)
- ・地上係員及び乗務員に連携された映像及び音声の品質

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

日常の巡視点検では連続する鉄道施設において異常を正確に検知している。巡視点検の省力化を想定した場合、データの正確性が求められることから、以下の項目について検証する。

- ・走行列車内におけるローカル 5G のスループット及び安定性(パケットロス率、ジッタ)
- ・AI 検知精度

2) 検証方法

前項で示した検証項目に関して、検証方法を表 4.3.1-1 に示す。

表 4.3.1-1 各項目の検証方法

検証項目	検証方法	実証目標との対応
ローカル 5G の電波強度	列車に乗車した状態でローカル 5G の電波強度を測定し、線路上におけるローカル 5G のカバーエリアを可視化する。	④拡張性
セキュリティ	システムログ等により不正アクセスの有無を確認する。	⑤強靱性
ローカル 5G のスループット	「LibreSpeed」等の測定ソフトウェアを用いて、踏切、ホーム、走行列車内それぞれにおいて上り、下りのスループットを測定する。	②安定性
ローカル 5G の遅延	Windows PC に標準的に搭載されているコマンドプロンプトの「ping」コマンド等を用いて、それぞれの場所においてローカル 5G 端末からコアネットワークまでの ping の応答時間を測定し、遅延とする。	③即時性
ローカル 5G の安定性(パケットロス率)	遅延と同様、「ping」コマンド等を用いてローカル 5G 端末からコアネットワークまでの ping 応答試験を連続的に実施することで、途切れの有無を確認する。総試行回数のうち正常でなかった回数の割合をパケットロス率とする。	①完全性
ローカル 5G の安定性(ジッタ)	遅延と同様、「ping」コマンド等を用いてローカル 5G 端末からコアネットワークまでの ping 応答試験を連続的に実施し、ping 応答時間の標準偏差を数値計算により算出しジッタとする。	②安定性
システムに係る処理時間	ログのタイムスタンプ等からシステムの各コンポーネントに係る処理時間を算出する。	③即時性
映像及び音声の品質	実験関係者へのアンケート調査により、映像のカクツキや音声の途切れがなかったか等を評価する。また、映像のカクツキや音声の途切れが発生した場合には、それらが実用に耐えうる程度であったかまで確認する。	①完全性
ハンドオーバー性能	基地局の境界部(本実証事業においては、RU-5、6 の境界)を列車で移動しながら、ping 応答試験を連続的に実施し、通信の途切れが発生しないか確認する。	②安定性

AI 検知精度	<p>AI で判定された結果とカメラの録画映像をもとに目視で判定した結果から混同行列を作成し、検知対象に応じて以下の項目を算出する。</p> $\text{再現率(事象が発生したもののうち正しく検知できた割合)} = \frac{\text{真陽性}}{\text{真陽性} + \text{偽陰性}}$ $\text{誤検知率(検知したもののうち誤検知である割合)} = \frac{\text{偽陽性}}{\text{真陽性} + \text{偽陽性}}$ $\text{正解率(予測結果全体のうち正しく予測できていた割合)} = \frac{\text{真陽性} + \text{真陰性}}{\text{データ全体}}$	②安定性
---------	---	------

3) 検証結果及び考察

各検証項目に対する結果を以下に示す。

・ローカル 5G の電波強度

測定器を用いて走行中の列車内で測定したローカル 5G の電波強度を図 4.3.1-1 に示す。本実証事業において、ローカル 5G 環境を構築した西宮駅から芦屋駅間において、SS-RSRP が -100dBm を下回る電波強度が弱い区間が 2 か所存在した(以下、「弱電界区間」という。図 4.3.1-1 中の丸印)。弱電界区間の 1 か所については、線路が高架から地上に切り替わる勾配のある区間で、坂上の基地局からの電波の指向方向と高低差が生じ、弱電界になったと考えられる。もう 1 か所については、基地局からの距離が 600m 程度でやや遠く、若干ではあるが線路がカーブしていることで弱電界になったと考えられる。本実証事業においては、電波伝搬シミュレーションの結果等をもとに線路のカーブ地点を意識しつつ、おおよそ 500m から 600m 間隔で基地局を配置し、極力見通しを確保したが、この結果から基地局の配置設計においては、基地局間隔を 500m 以下とし、カーブだけでなく 3 次元的な考慮が必要であるといえる。今後、本実証事業フィールドにおいて、アンテナ向きの調整や移設等によるカバーエリアの改善検討を進め、次ステップとしてトンネルや河川横断箇所等、本実証事業とは異なる条件下での検証を行う。

また、本実証事業で使用している端末(表 2.3-4)は、測定器と比較して 10dBm 前後受信感度が低いため、弱電界区間では通信断や基地局との接続切れが発生した。加えて端末の仕様上、基地局との接続が切れた場合、再接続までに 30 秒以上要することもあり、走行中列車内で安定して通信を行うには課題があった。今後、本実証事業で採用した物と異なるローカル 5G 端末を使用しての比較検証を進め、列車内での利用により適したローカル 5G 端末の調査を進める。また、端末の変更だけでは解決できない場合においては、ローカル 5G 端末を列車外部に設置する方法の検討や基地局の準同期運用の検証を進める。



図 4.3.1-1 走行列車内におけるローカル 5G 電波強度(地理院地図を加工して作成)

・セキュリティ

2.5.2 章で述べたとおり、本実証事業期間中において不正アクセス等の情報セキュリティインシデントは発生していない。本実証事業においては、インターネットを利用せず全ての通信が閉域網内で完結する構成として、セキュリティを高めている。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

・踏切、ホーム上でのローカル 5G のスループット、遅延及び安定性

各所におけるスループットの測定結果を図 4.3.1-2 及び図 4.3.1-3 に示し、それぞれの測定環境を図 4.3.1-4 から図 4.3.1-6 に示す。比較的電波状況の良い、西宮駅及び打出東口踏切においては、2.4 章で述べた上りのスループット要件を満たしているが、他の 3 か所については要件を下回る結果となった。要件を下回った 3 か所においては、基地局と端末の見通しが悪くいずれも電波の受信強度が-100dBm 前後と弱電界であることが要因と考えられる。本実証事業においては狭指向性アンテナを使用していることから、基地局と端末の間に少しのカーブがある、ホーム上に案内表示器などの遮蔽物がある等の理由により電波強度が大きく低下しているため、基地局の配置設計においては、他者土地への漏洩の観点だけでなく業務区域内のエリアカバーの観点でも線路の形状や沿線の構造物に対する配慮が必要である。今後、前述のアンテナ向きの調整や移設等によるカバーエリアの改善検討を進める。加えて、ローカル 5G 端末の設置位置も重要となることから、複数地点における通信速度測定により適切なローカル 5G 端末の配置を検証することで、本実証事業フィールドである踏切や駅ホームにおける通信品質の改善を図るとともに、将来の普及展開を見据えて基地局とローカル 5G 端末の配置に関するノウハウを蓄積する。

遅延及び安定性の測定条件及び測定結果を、表 4.3.1-2、表 4.3.1-3 に示す。今回の測定条件において、遅延については、いずれの場所においても最大値で要件である 200 ミリ秒以下を達成している。パケットロス率についても 1%未満(通信回線の安定性 99%以上)を達成し、ジッタは目標としていた 10 ミリ秒以下を上回り、非常に高品質な基準である 5 ミリ秒以下であることが確認できた。

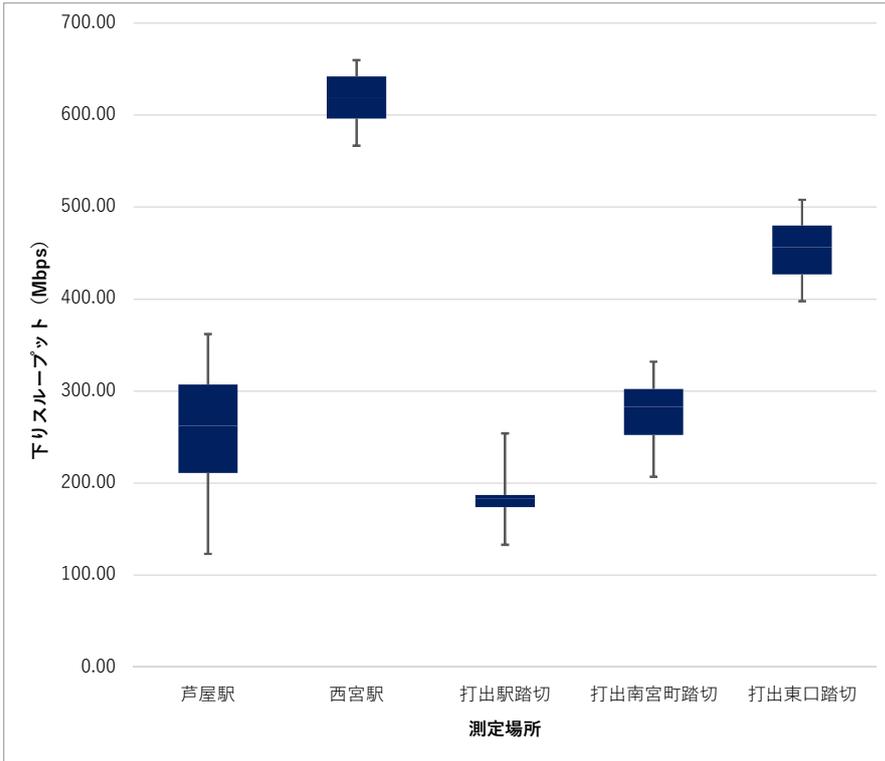


図 4.3.1-2 各所における下りスループット

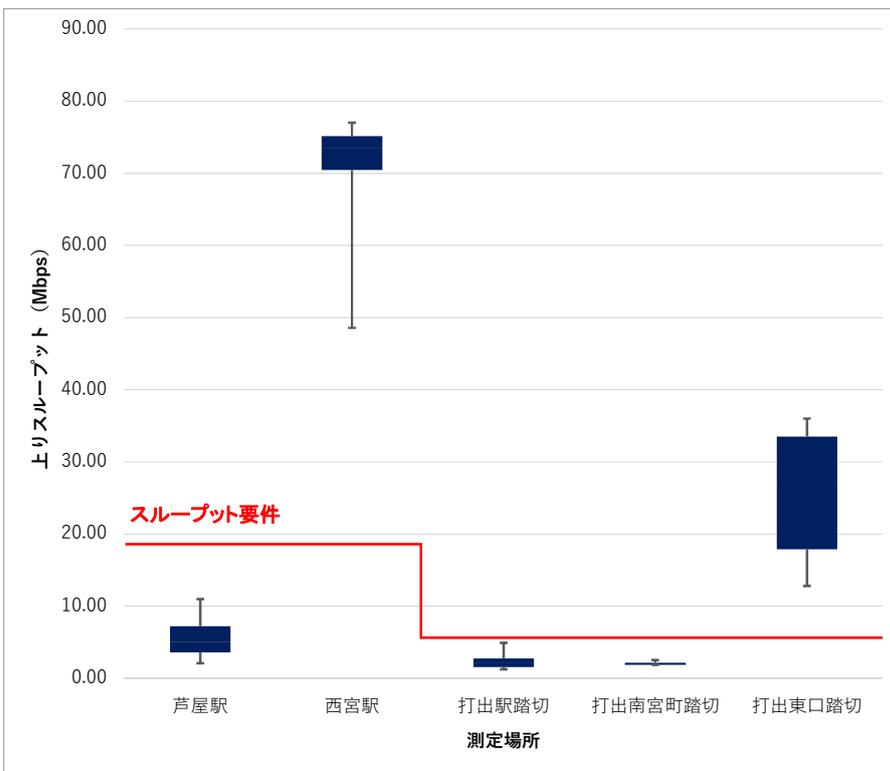


図 4.3.1-3 各所における上りスループット

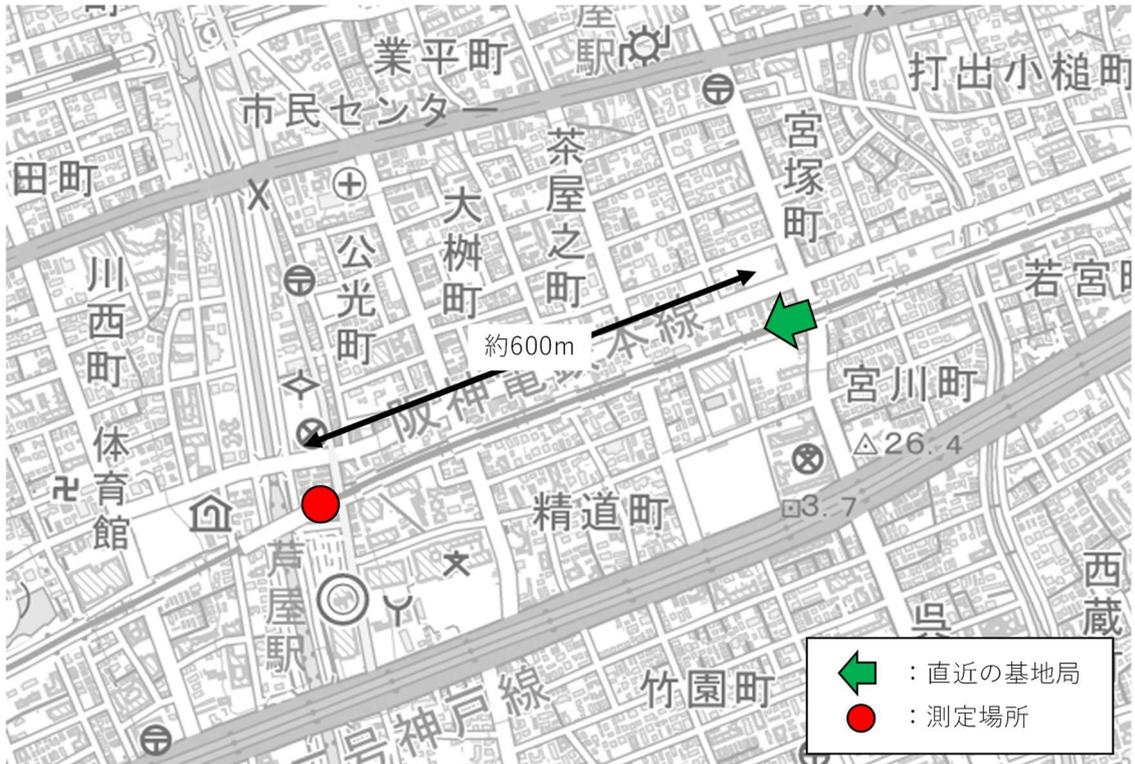


図 4.3.1-4 芦屋駅と基地局の位置関係(地理院地図を加工して作成)

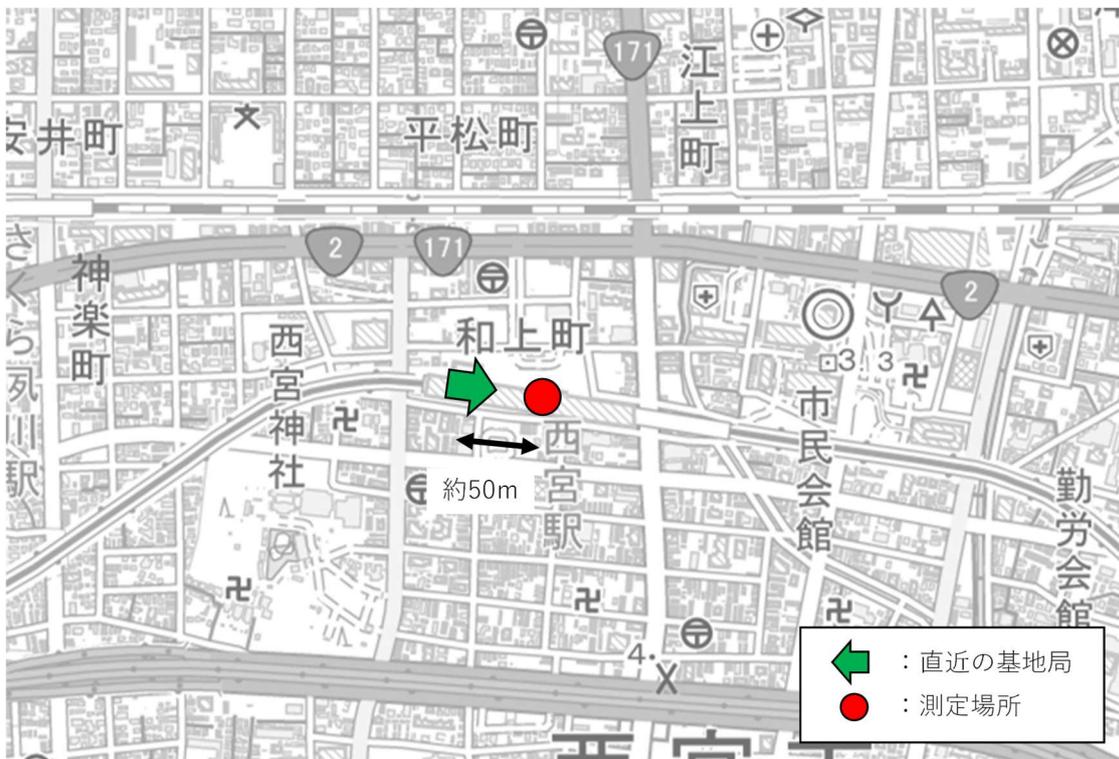


図 4.3.1-5 西宮駅と基地局の位置関係(地理院地図を加工して作成)

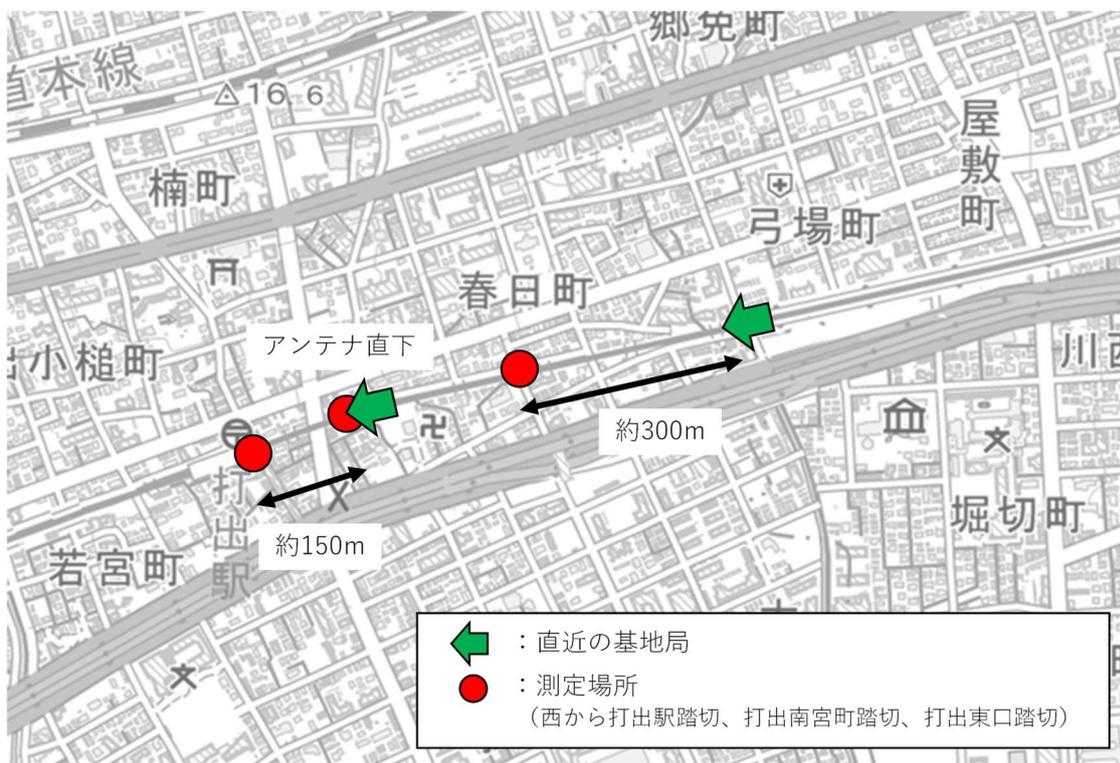


図 4.3.1-6 各踏切と基地局の位置関係(地理院地図を加工して作成)

表 4.3.1-2 遅延、安定性の測定条件

ping 送信先	5GC(青木信号所設置)
ping サイズ	128 バイト/回(1 パケットを想定)
試行回数	1 秒間隔で 100 回

表 4.3.1-3 各所における遅延、安定性の測定結果

場所	遅延(ミリ秒)			パケットロス率 (%)	ジッタ (ミリ秒)
	最小値	平均値	最大値		
芦屋駅	8.0	13.4	28.0	1.0	3.8
西宮駅	8.0	13.7	22.0	0.0	2.9
打出駅踏切	8.0	14.0	44.0	0.0	4.3
打出南宮町踏切	7.0	13.9	28.0	0.0	3.9
打出東口踏切	7.0	12.1	27.0	1.0	3.6

・走行列車内におけるローカル 5G のスループット、遅延及び安定性

ソリューション①において、車掌台(列車最後尾)で車掌が持つタブレットで AI による検知結果の通知を受信することとソリューション②において最後尾車両にカメラを設置することを想定し、走行列車内のうち最後尾の車両で測定を実施する。スループットの測定条件及び測定結果は、表 4.3.1-4、図 4.3.1-7 のとおり。弱電界区間で通信が途切れる区間を除いては、ソリューション②で求められる最低限のスループット要件も満たしているものの、実装時に映像を閲覧するタブレットが増加した場合に

は、帯域が不足することが予想される。

遅延、安定性の測定条件及び測定結果は、表 4.3.1-5、表 4.3.1-6 のとおり。今回の測定条件において、遅延については、最大値で要件である 200 ミリ秒以下を達成しているものの、表 4.3.1-3 で示した地上での測定結果と比較して数値が悪化していることがわかる。ジッタについても、数値が悪化し目標値を下回る結果となった。これは、車両内にローカル 5G 端末を設置したことで車体による電波の減衰の影響を受けていると考えられる。このため、車両内にローカル 5G 端末を設置して使用する場合、インフラ設計時において車体による減衰分も考慮したカバーエリアの設計が必要となる。また、パケットロス率については、図 4.3.1-1 で示した弱電界区間における通信の途切れにより、目標値を大きく下回った。ただし、弱電界区間を除いた区間においては、パケットロスはほぼ発生していないことを確認できた。

表 4.3.1-4 スループットの測定条件(列車最後尾)

測定方法	スループット測定ツール「NetMi」を使用し、走行列車内におけるリアルタイムなスループットを測定。なお、測定ツールの仕様上の都合により、ローカル 5G 端末からの上り通信のみ測定を実施。
測定区間	ローカル 5G 端末配下の PC から 5GC ネットワーク内の PC
サンプリング間隔	5 秒間隔
測定場所 進行方向	特急列車の東端(大阪梅田側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動

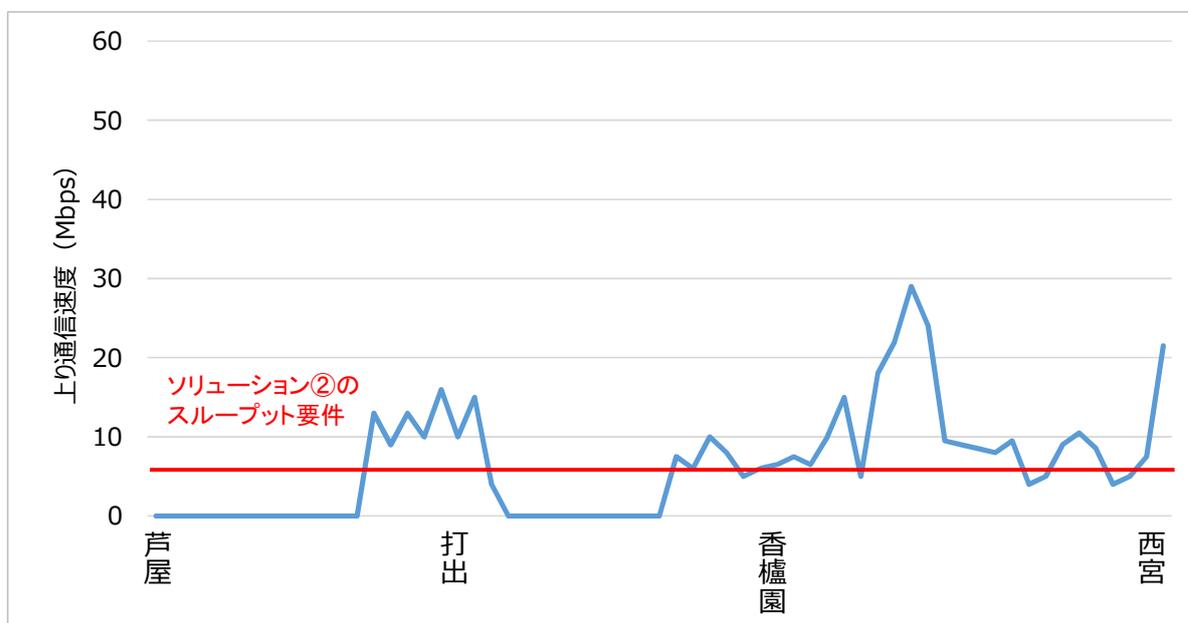


図 4.3.1-7 スループットの測定結果(列車最後尾)

表 4.3.1-5 遅延、安定性の測定条件(列車最後尾)

ping 送信先	5GC(青木信号所設置)
ping サイズ	128 バイト/回(1 パケットを想定)
送信間隔	1 秒間隔(タイムアウトは 3 秒)
測定場所 進行方向	以下それぞれにおいて測定を実施 ・特急列車の東端(大阪梅田側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の西端(神戸三宮側)車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動

表 4.3.1-6 遅延、安定性の測定結果(列車最後尾)

進行方向	遅延(ミリ秒) [※]			パケットロス率 (%)	ジッタ [※] (ミリ秒)
	最小値	平均値	最大値		
西向き	12.0	33.0	165.0	40.4	19.0
東向き	16.0	41.6	77.0	53.9	14.4

※タイムアウトの結果は含まない。

・システムに係る処理時間

図 4.3.1-8 内①から③の各処理にかかる時間を図 4.3.1-9 から図 4.3.1-11 に示し、合計の処理時間を図 4.3.1-12 に示す。なお、システムのログから無作為に 100 件抽出している。AI解析サーバにおける①映像の解析処理については、200 ミリ秒前後で安定して処理できていることがわかる。通知サーバにおける②解析結果の通知処理やタブレットにおける③受信した通知の表示処理については、概ね 300 ミリ秒未満で処理できているが、例外的に 5%程度 400 ミリ秒以上かかる場合があった。全体としては、94%が目標値である 700 ミリ秒以内で処理できており、残り 6%が目標値を下回り最大値は 761 ミリ秒であった。

ハードウェアの性能向上や AI モデル、プログラムの改良によりさらなる処理速度の向上は期待できる。また、ローカル 5G の電波環境を十分に整えられることができれば、表 4.3.1-3 にも示すとおり、ローカル 5G の通信遅延は 100 ミリ秒以下に抑えられる見込みであるため、現状構成においてもシステム全体での遅延要件である 1 秒(1,000 ミリ秒)以内での通知も可能であると考えられる。

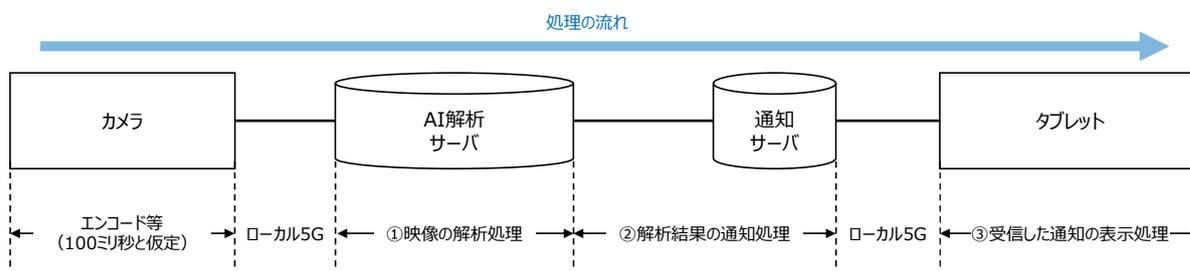


図 4.3.1-8 AI 解析からアラーム通知までの処理の流れ

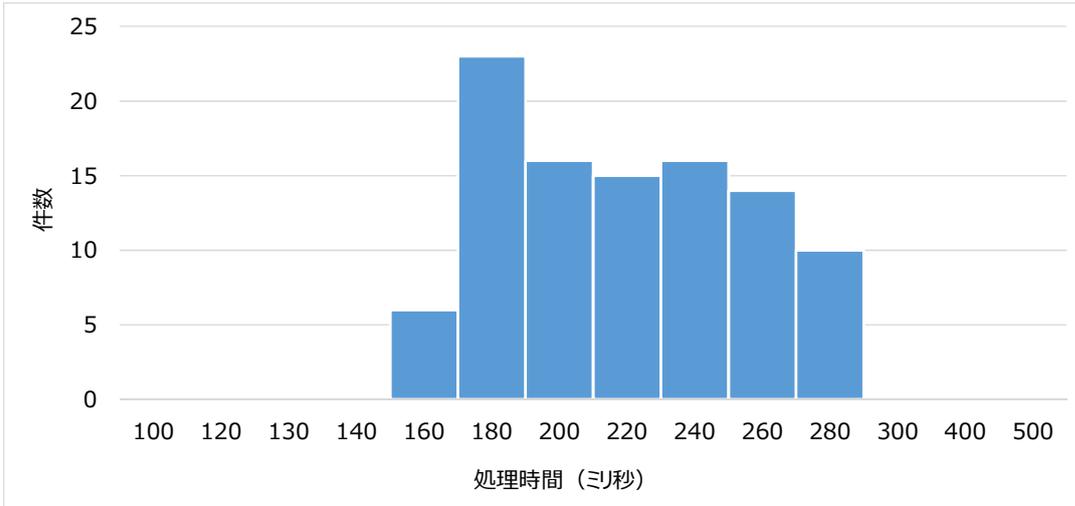


図 4.3.1-9 処理時間の分布(①映像の解析処理)

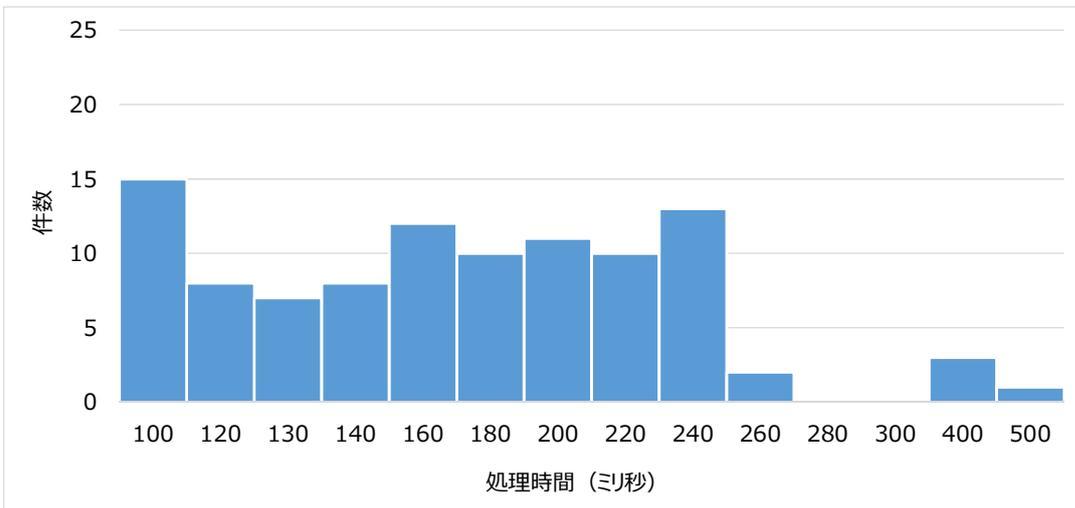


図 4.3.1-10 処理時間の分布(②解析結果の通知処理)

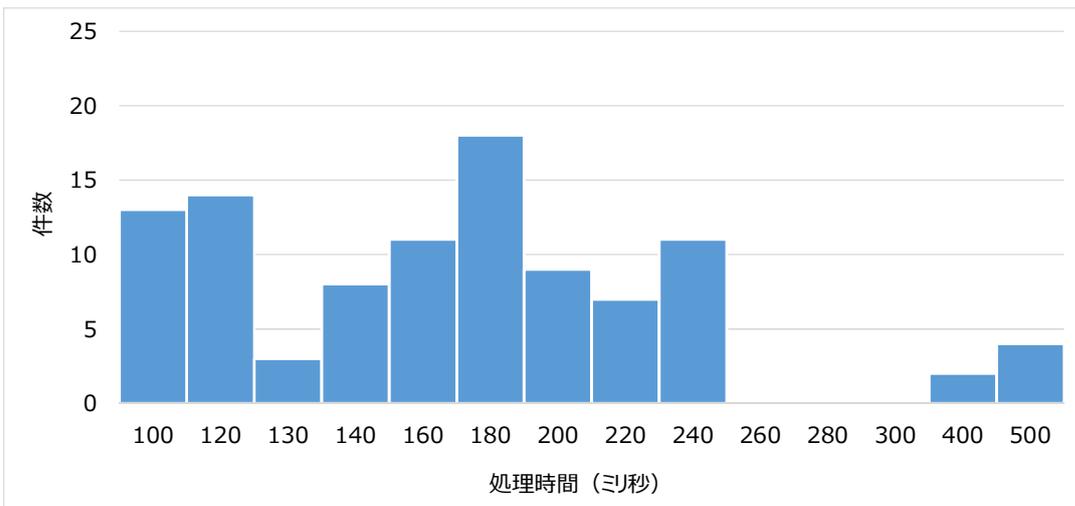


図 4.3.1-11 処理時間(③受信した通知の表示処理)

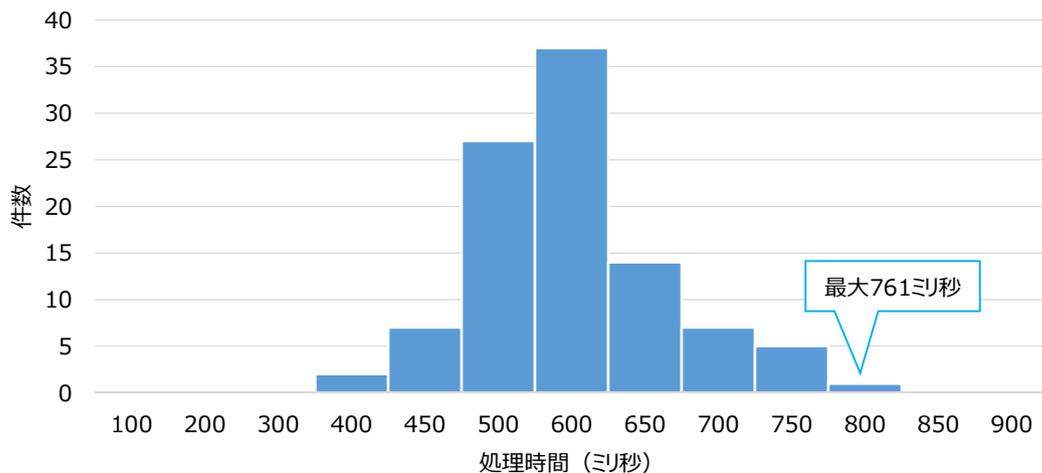


図 4.3.1-12 処理時間(①から③の全体)

・AI 検知精度

AIによる検知条件は表 4.3.1-7 のとおりであるが、AI 検知精度の算出のため、踏切の開閉状態や列車在線状況の検知条件によらず、検知対象物が検知場所を通過した際の検知可否を確認した。なお、白杖、車いす利用者の通行やホームからの転落等、通常の営業時では発生が稀もしくは発生しない事象については、作業員による模擬試験を実施し、データを収集した。各検知対象物のデータ取得方法を表 4.3.1-8 に示す。

表 4.3.1-7 AIによる検知条件

場所	事象	検知対象物	検知条件
踏切	線路内への侵入	人、自動車、二輪車、車いす、白杖	常時
踏切	踏切内での立往生	人、自動車、二輪車、車いす、白杖	踏切が閉じた状態
踏切	踏切内の通行	白杖	踏切が開いている状態
ホーム	ホームからの転落	人	列車非在線時
ホーム	ホーム端への寄付き	人	列車非在線時
ホーム	駆込み乗車	人	列車在線時

表 4.3.1-8 各検知対象のデータ収集方法

検知対象	形式	データ取得期間	環境条件
線路内への人の侵入	模擬	2023年1月31日	日中、晴れもしくは曇り
踏切内の人の通行	通常	2023年1月30日から2月3日	日中、晴れもしくは曇り
踏切内の自動車の通行	通常	2023年1月30日から2月3日	日中、晴れもしくは曇り
踏切内の二輪車の通行	通常	2023年1月30日から2月3日	日中、晴れもしくは曇り
踏切内の車いす	模擬	2023年1月31日	日中、晴れもしくは曇り
踏切内の白杖	模擬	2023年1月31日	日中、晴れもしくは曇り
ホームからの人の転落	模擬	2023年2月2日	夜間、晴れもしくは曇り
ホーム端への人の寄付き	通常	2023年1月30日から2月3日	日中、晴れもしくは曇り
駆込み乗車	通常	2023年1月30日から2月3日	日中、晴れもしくは曇り

a. 踏切

踏切における各検知対象物の検知精度は表 4.3.1-9 から表 4.3.1-15 のとおり。

線路内への人の侵入については、模擬実施時においては正解率が 100%となっており、検知漏れも誤検知も発生しなかった。一方で、模擬実施時とは別に一般の歩行者や自動車等が踏切を横断する通常営業中の映像データを AI 解析した場合においては、誤検知が多数発生した(表 4.3.1-9 は、模擬実施時の結果のみ集計している)。本実証事業においては、線路内を検知エリアとして定め検知エリア内で対象物を検知すると線路への侵入として検知する仕様としているが、踏切を通行している人の上半身がカメラの画角上、線路と重複することで線路内への侵入とみなしていた(図 4.3.1-13)。誤検知を低減するためにカメラの画角調整、赤外線センサ等の併用や単純な線路エリア内の検知ではない判定アルゴリズムの検討が必要である。

踏切内の人の通行については、一部検知漏れが発生した。これは、二輪車に乗っている人が二輪車の車体で一部隠れたことによって、人としての検知ができなかったことが例としてあげられる。実運用においては、踏切内に二輪車が検知された時点で立往生としてアラームを発報するため、二輪車さえ検知できれば運用可能と考える。ただし、表 4.3.1-12 に示すとおり二輪車も検知漏れが発生する可能性があるため、二輪車の検知に対して対策が必要となる。

踏切内の自動車の通行については、再現率が 100%であり検知漏れはなかった。一方で、踏切外の自動車を誤検知する事例が一部発生した。本実証事業においては、踏切内を検知エリアと定め検知エリア内で対象物を検知する仕様としている。対象物が検知エリア内に入っているかの判定は、対象物を矩形で囲んだ際の底辺の midpoint の座標で判定しているが、自動車が検知エリア外であっても写り方によって、midpoint 座標が検知エリア内に入ってしまったことが要因と考えられる(図 4.3.1-14)。midpoint 座標ではなく踏切から遠い頂点座標とする等の判定アルゴリズムの調整を検討する。

踏切内の二輪車の通行については、再現率が約 86%に留まった。一部踏切において、踏切全体を俯瞰する画角になっており、二輪車を上から撮影することになったため特徴を正しく抽出できなかったことが原因と考えられる(図 4.3.1-15)。これは、カメラの画角調整によって改善が可能であるが、線路内への人の侵入やその他検知対象も踏まえた最適なカメラ配置、台数の検討が今後必要となる。

車いすについては、利用者が乗った状態で踏切内に閉じ込められた状態と踏切内で転倒し、利用者と車いすが離れた状態(もしくは、利用者のみ急ぎ救出され車いすのみ踏切内に取り残された状態)を想定し、通常の利用者が座った状態での踏切内の通行と踏切内での車いす本体の転倒のそれぞれについて模擬を実施した。通常時においては、再現率は 100%、誤検知率は 0%であった。一方で、転倒させた場合については、大きく精度が下がり再現率が約 18%となった(図 4.3.1-16)。本実証事業においては、汎用的な AI 検知モデルを採用しているが、このモデルでは車いすを利用者が座った状態のみ学習を行っており、転倒など特殊な状態を考慮されていないことが要因と考えられる。今後、踏切で発生しうる状態を整理し、個別に AI 検知モデルの追加学習が必要となる。

最後に白杖については、白杖利用者の通行に加え誤検知に関して測定するため、ビニール傘を持った人の通行模擬も行い、AI 精度検証を行った。模擬実施時において、再現率は 90%、誤検知率は約 21%、正解率は約 78%であった。なお、本実証事業においては、白杖単体(利用者は含まない)の検知結果である。白杖単体については、検知漏れが 10%発生しているものの、実運用上は踏切が閉じた状態では白杖利用者を人物として検知できるため、立往生の検知という観点においては運用可能と考えられる。一方で、誤検知率や正解率については、やや低い値となった。模擬においてはビニール傘を白杖と誤検知していたが、このほか通常のデータ取得時において線路のレール部分が日光に照らされて白く写り込んだ場合に白杖と誤検知することがあった。本実証事業においては、再現率の向上を優先するためのパラメータ調整を行ったことが、誤検知が多く発生する要因として考えられる。再現率に悪影響を与えない範囲でのパラメータ調整により今後誤検知の低減を目指す。また、本実証事業においては、屋内環境下で撮影した映像をもとに AI 検知モデルを使用しているため、さらなる誤検知の低減にあたっては、踏切環境下の映像を使用した AI 検知モデルの追加学習を検討する。

表 4.3.1-9 AI 検知精度(線路内への人の侵入) ※数値は模擬実施時のみの値

線路内への人の侵入		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	100	0
	未検知(陰性)	0	
再現率		100.0%	
誤検知率		0.0%	
正解率		100.0%	



図 4.3.1-13 誤検知の例(線路内への人の侵入)

表 4.3.1-10 AI 検知精度(踏切内の人の通行)

踏切内の人の通行		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	1,535	5
	未検知(陰性)	30	
再現率		98.1%	
誤検知率		0.3%	
正解率		97.8%	

表 4.3.1-11 AI 検知精度(踏切内の自動車の通行)

線路内の自動車の通行		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	528	8
	未検知(陰性)	0	
再現率		100.0%	
誤検知率		1.5%	
正解率		98.5%	

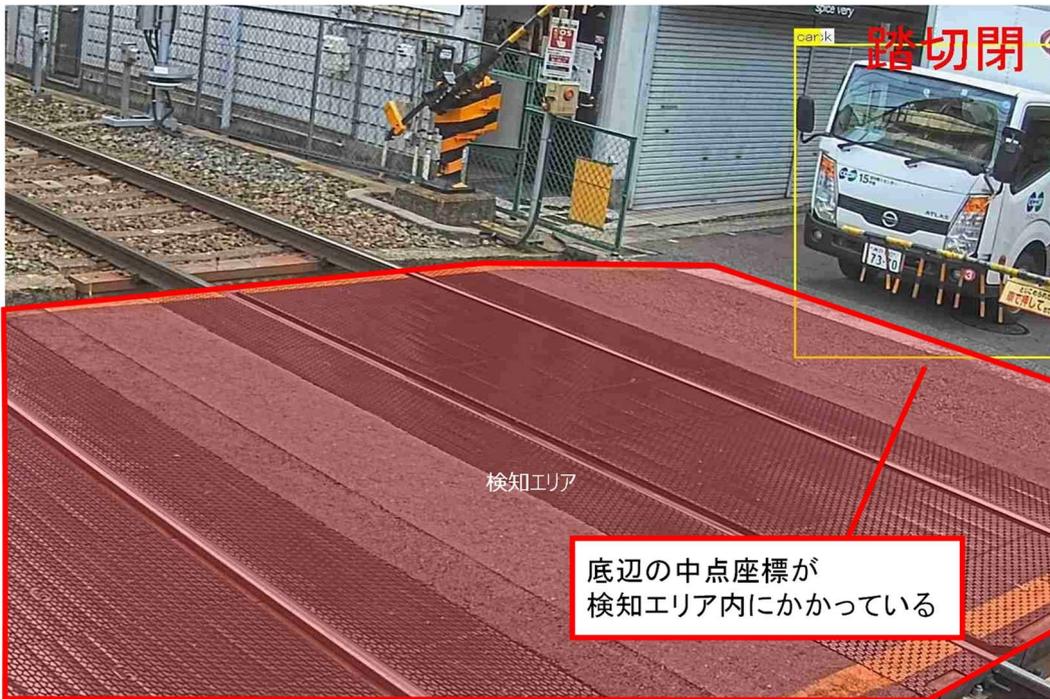


図 4.3.1-14 誤検知の例(踏切内の自動車の通行)

表 4.3.1-12 AI 検知精度(踏切内の二輪車の通行)

線路内の二輪車の通行		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	632	8
	未検知(陰性)	104	
再現率		85.9%	
誤検知率		1.3%	
正解率		84.9%	



図 4.3.1-15 検知漏れの例(踏切内の二輪車の通行)

表 4.3.1-13 AI 検知精度(線路内の車いすの通行) ※数値は模擬実施時のみの値

線路内の車いすの通行		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	40	0
	未検知(陰性)	0	
再現率		100.0%	
誤検知率		0.0%	
正解率		100.0%	

表 4.3.1-14 AI 検知精度(線路内の車いすの転倒) ※数値は模擬実施時のみの値

線路内での車いすの転倒		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	14	0
	未検知(陰性)	66	
再現率		17.5%	
誤検知率		0.0%	
正解率		17.5%	



図 4.3.1-16 検知漏れの例(転倒状態の車いす)

表 4.3.1-15 AI 検知精度(踏切内の白杖) ※数値は模擬実施時のみの値

線路内の白杖		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	72	19
	未検知(陰性)	8	21
再現率		90.0%	
誤検知率		20.9%	
正解率		77.5%	

b. ホーム

ホームにおける各検知対象物の検知精度は表 4.3.1-16 から表 4.3.1-18 のとおり。

ホームからの人の転落について、本実証事業においては、作業安全性と設備保全の観点からホームから線路上に敷いたエアマットに向けてマネキン人形を落下させることで模擬を行っている。このため、実際に人が転落した場合と比較して検知精度が異なる可能性があるが、ここでは得られた結果をもとに考察する。検知精度としては、再現率が約 89%であり、おおよそ 1 割の検知漏れが発生した。検知漏れの多くは転落箇所がカメラから離れた場合であり(図 4.3.1-17)、本実証事業の環境においてはカメラから 15m 程度が線路上で転倒状態の人物を安定して検知できる距離であった。カメラを 15m 間隔で複数設置することで高い検知精度を維持したままホーム全体を網羅することは可能であるが、1 駅あたりのカメラ台数が過大となりコスト面、運用保守面で課題が残ることから、カメラの解

像度を高くすることやホームの環境に合わせた AI の追加学習を行う等の対策により、効率的にホーム全体を網羅できる方法の検討を進める。

ホーム端への寄付き検知については、再現率が約 97%で誤検知は発生しなかった。検知漏れの要因としては、ホームからの転落と同様、カメラからの位置が離れている場合であったため(図 4.3.1-18)、同様の対策によって改善を図る。

最後に駆込み乗車は、本実証事業においては、人物を複数の映像フレームに渡って追従し、各映像フレーム上での座標の移動量から移動速度を求め、約 3m/秒を超えた場合に駆込み乗車として検知する仕様としている(図 4.3.1-19)。再現率は約 97%と高い結果を得られたが、一方で誤検知率が約 86%と非常に大きくなった。複数の映像フレームに渡って人物を追従する際には、同一人物と認識して追従する必要があるが、本実証事業においてはまだ追従性能が十分ではなく、異なる人物や物体の位置を 1 フレーム前の座標としてしまい誤った移動量を算出してしまっていることが起因している(図 4.3.1-20)。今後、追従性能向上や異なる判定方法の検討を進める。

表 4.3.1-16 AI 検知精度(ホームからの人の転落)

ホームからの人の転落		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	107	0
	未検知(陰性)	13	
再現率		89.2%	
誤検知率		0.0%	
正解率		89.2%	



図 4.3.1-17 検知漏れの例(ホームからの人の転落)

表 4.3.1-17 AI 検知精度(ホーム端への人の寄付き)

ホーム端への人の寄付き		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	536	0
	未検知(陰性)	16	
再現率		97.1%	
誤検知率		0.0%	
正解率		97.1%	



黄色線より線路側を歩行しているにも関わらず未検知

図 4.3.1-18 検知漏れの例(ホーム端への寄り寄り)

表 4.3.1-18 AI 検知精度(駆込み乗車)

駆込み乗車		実際の状態	
		事象あり(陽性)	事象なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	150	930
	未検知(陰性)	5	
再現率		96.8%	
誤検知率		86.1%	
正解率		13.8%	

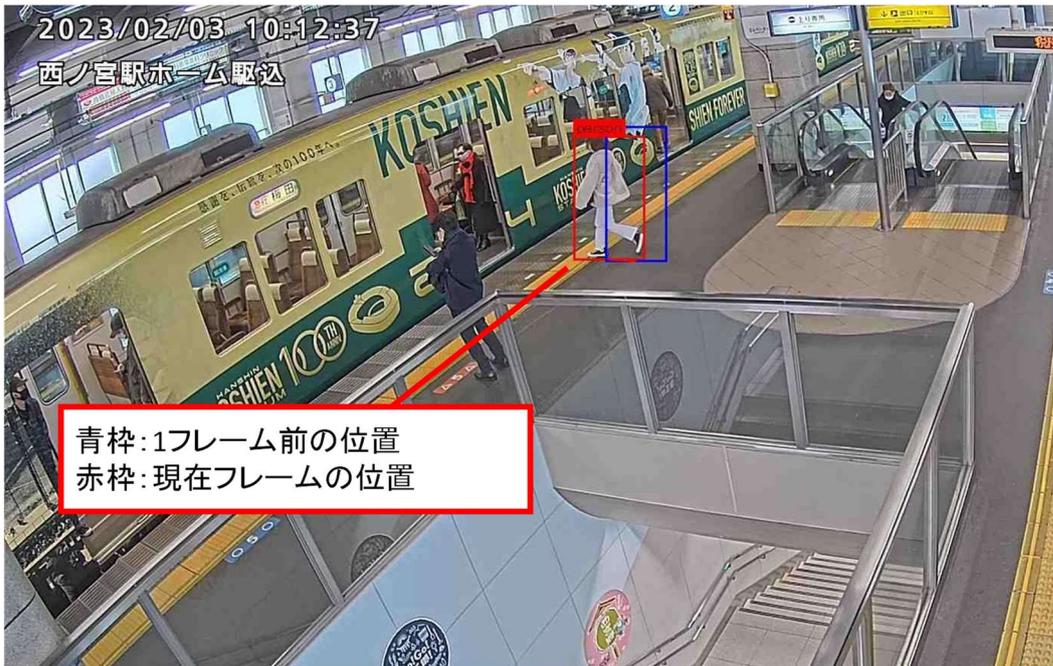


図 4.3.1-19 正しい検知例(駆込み乗車)



図 4.3.1-20 誤検知の例(駆込み乗車)

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

・ローカル 5G 基地局間のハンドオーバー性能

本実証事業においては、西宮駅から芦屋駅間において 6 台の RU を設置してローカル 5G 環境を構築しているが、複数の RU がカバーするエリアで 1 つのセルを構成する設定としている。具体的には、RU-2 から RU-5 でセル A を、RU-6 と RU-7 でセル B を構成しており、それぞれのエリアが

重なる RU-5 周辺でハンドオーバーが発生する(図 4.3.1-21)。なお、香櫨園駅を通過する特急列車では、ハンドオーバーが発生する付近で時速 100km/h 前後の高速運行を行っている。

走行列車内から連続的に ping 応答試験を実施しながら、セル間を移動しハンドオーバー時に通信の途切れが発生しないか確認した。ping 応答試験の測定条件及び測定結果を表 4.3.1-19、図 4.3.1-22 及び図 4.3.1-23 に示す。西向き(セル B からセル A への移動)であっても東向き(セル A からセル B)であっても、通信が途切れることなくハンドオーバーできていることがわかる。

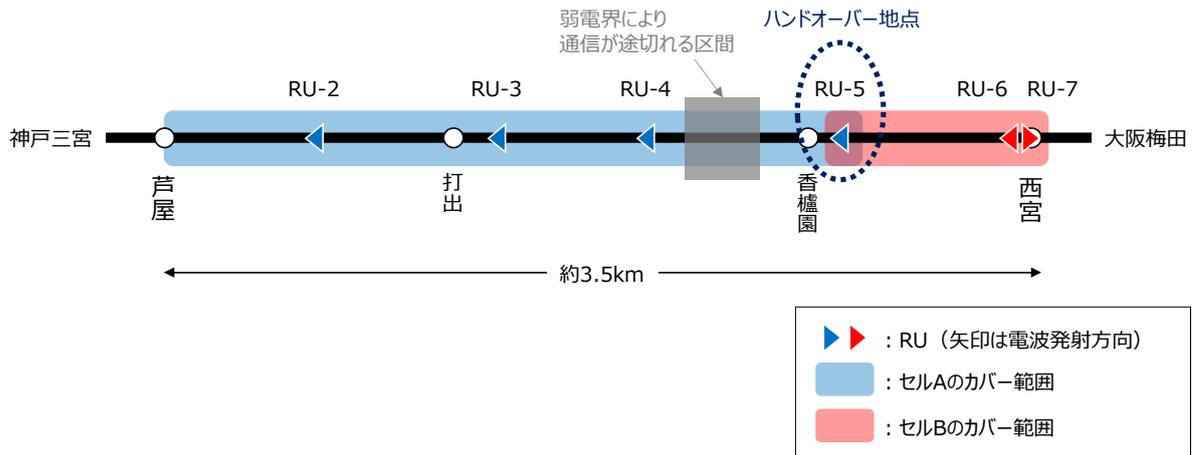


図 4.3.1-21 セル構成のイメージ図

表 4.3.1-19 ハンドオーバー検証時の測定条件

ping 送信先	5GC(青木信号所設置)
ping サイズ	128 バイト/回(1 パケットを想定)
送信間隔	1 秒間隔(タイムアウトは 3 秒) タイムアウト時は、便宜上応答時間を 0 秒とする
測定場所 進行方向	以下それぞれにおいて測定を実施 <ul style="list-style-type: none"> ・特急列車の東端(大阪梅田側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の中央車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の西端(神戸三宮側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の東端(大阪梅田側)車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動 ・特急列車の中央車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動 ・特急列車の西端(神戸三宮側)車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動

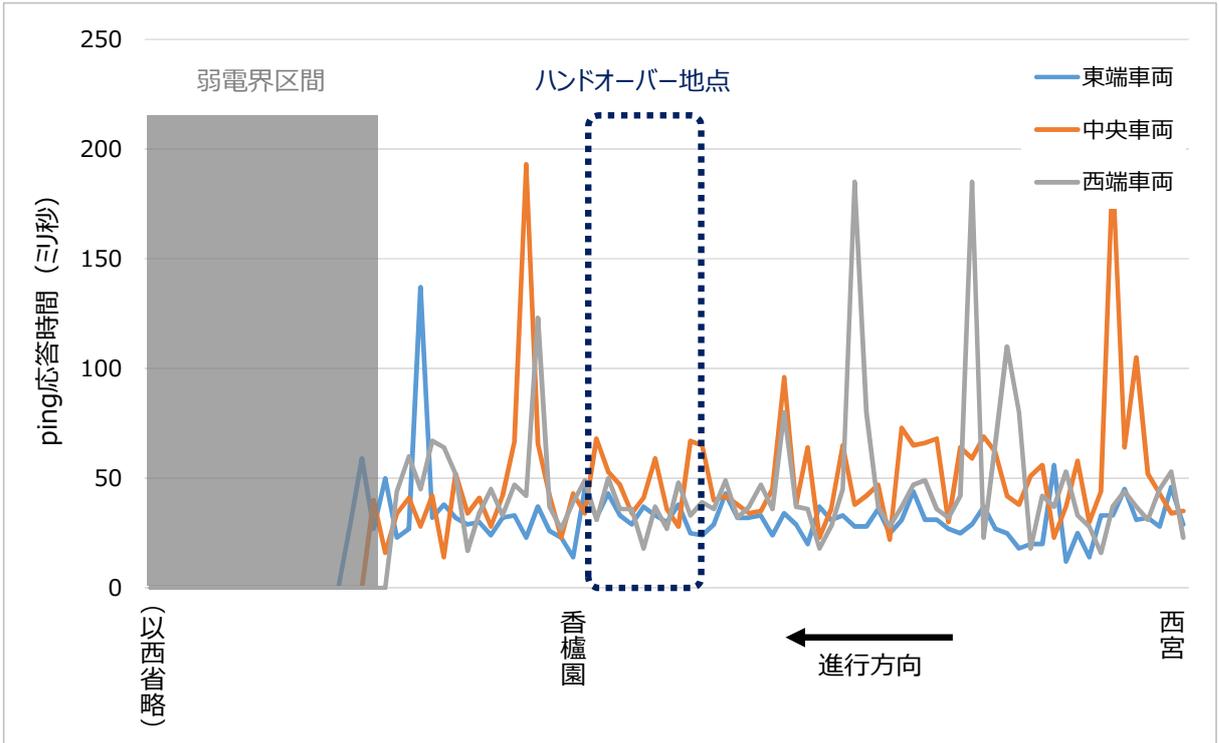


図 4.3.1-22 西向きに移動時の ping 測定結果

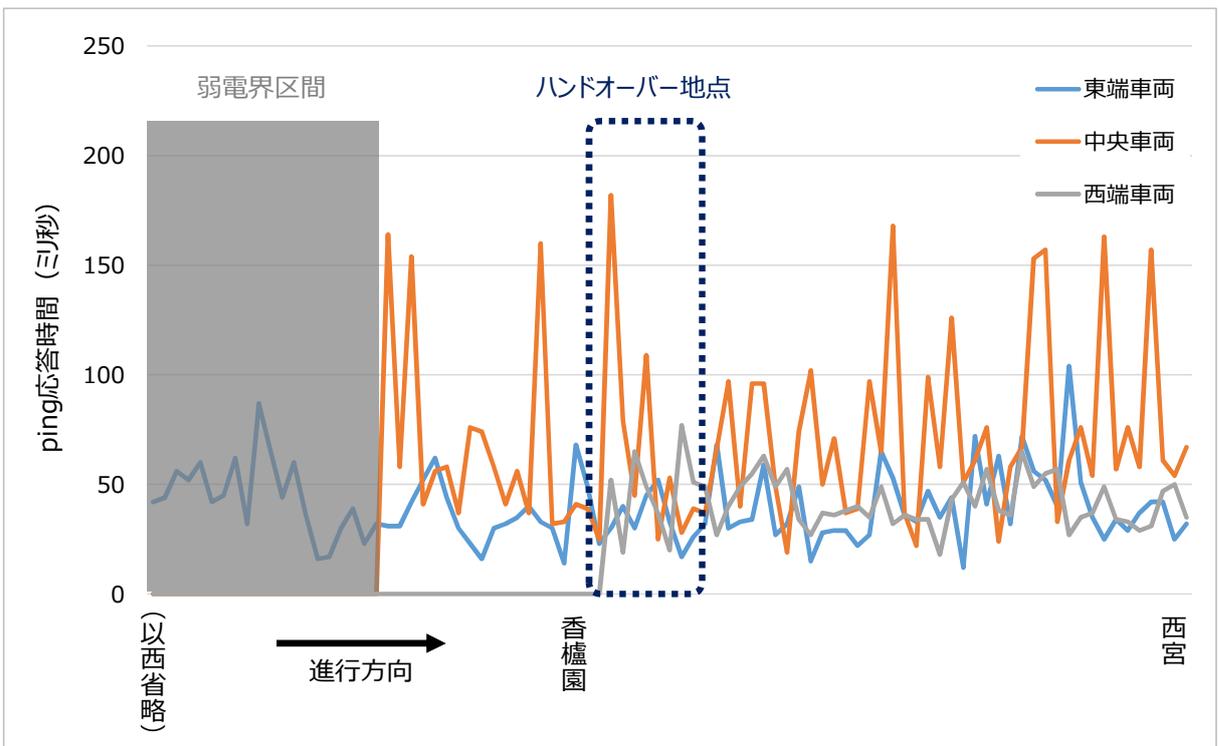


図 4.3.1-23 東向きに移動時の ping 測定結果

・走行列車内におけるローカル 5G のスループット及び安定性(パケットロス率、ジッタ)

前後に車両が存在し、最も電波の減衰が大きいと予想される列車中央部で測定を実施する。

スループットの測定条件及び測定結果は、表 4.3.1-20、図 4.3.1-24 のとおり。列車最後尾における結果(表 4.3.1-4)と同様、ソリューション②における最低限のスループット要件も満たしているものの、映像を閲覧するタブレットが増加した場合には、帯域が不足することが考えられる。

遅延、安定性の測定条件及び測定結果は、表 4.3.1-21、表 4.3.1-22 のとおり。列車最後尾における結果(表 4.3.1-6)と同様に地上における測定結果より悪化し、パケットロス率やジッタは目標値を下回る結果となった。

今後、これまでに述べたとおりアンテナ向きの調整や移設等によるカバーエリアの改善検討を前提として進め、必要に応じて本実証事業で採用した物と異なるローカル 5G 端末の選定、ローカル 5G 端末を列車外部に設置する方法の検討や基地局の準同期運用の検証を進めることで、列車走行中における安定的な上り通信速度の確保を図る。

表 4.3.1-20 スループットの測定条件(列車中央部)

測定方法	スループット測定ツール「NetMi」を使用し、走行列車内におけるリアルタイムなスループットを測定。なお、測定ツールの仕様上の都合により、ローカル 5G 端末からの上り通信のみ測定を実施。
測定区間	ローカル 5G 端末配下の PC から 5GC ネットワーク内の PC
サンプリング間隔	5 秒間隔
測定場所 進行方向	特急列車の中央車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動

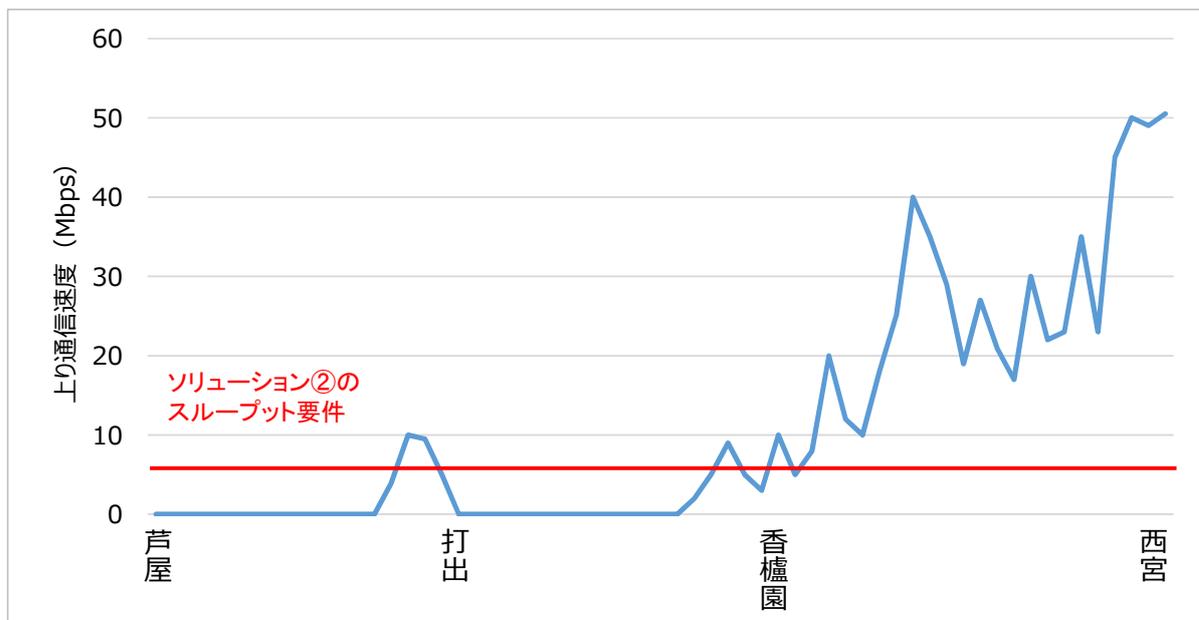


図 4.3.1-24 スループットの測定結果(列車中央部)

表 4.3.1-21 遅延、安定性の測定条件(列車中央部)

ping 送信先	5GC(青木信号所設置)
ping サイズ	128 バイト/回(1 パケットを想定)
送信間隔	1 秒間隔(タイムアウトは 3 秒)
測定場所 進行方向	以下それぞれにおいて測定を実施 ・特急列車の中央車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の中央車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動

表 4.3.1-22 遅延、安定性の測定結果(列車中央部)

進行方向	遅延(ミリ秒) [※]			パケットロス率 (%)	ジッタ [※] (ミリ秒)
	最小値	平均値	最大値		
西向き	14.0	50.6	193.0	60.7	29.7
東向き	19.0	71.1	192.0	44.9	40.0

※タイムアウトの結果は含まない。

・地上係員及び乗務員に連携された映像及び音声の品質

図 4.3.1-38 に示すとおり、映像及び音声の品質に不満はない(評価 3 以上)と回答した割合は、79%であり、僅かに目標値である 80%には届かなかった。これは、本実証事業においては、図 4.3.1-1 で示したとおり弱電界で通信が途切れる区間が生じ、電波環境が良い状態で利用できる区間が限られていたことが要因として考えられる。

また、ローカル 5G と携帯電話事業者の 4G を使用した場合それぞれの遅延の比較を実施した(図 4.3.1-25、図 4.3.1-26)。ローカル 5G を使用した場合は 0.4 秒前後であったのに対し、4G を使用した場合は 2.2 秒程度の遅延が生じた。車上と地上の間で時間差の違和感なく情報連携を行うためにローカル 5G は有効といえる。

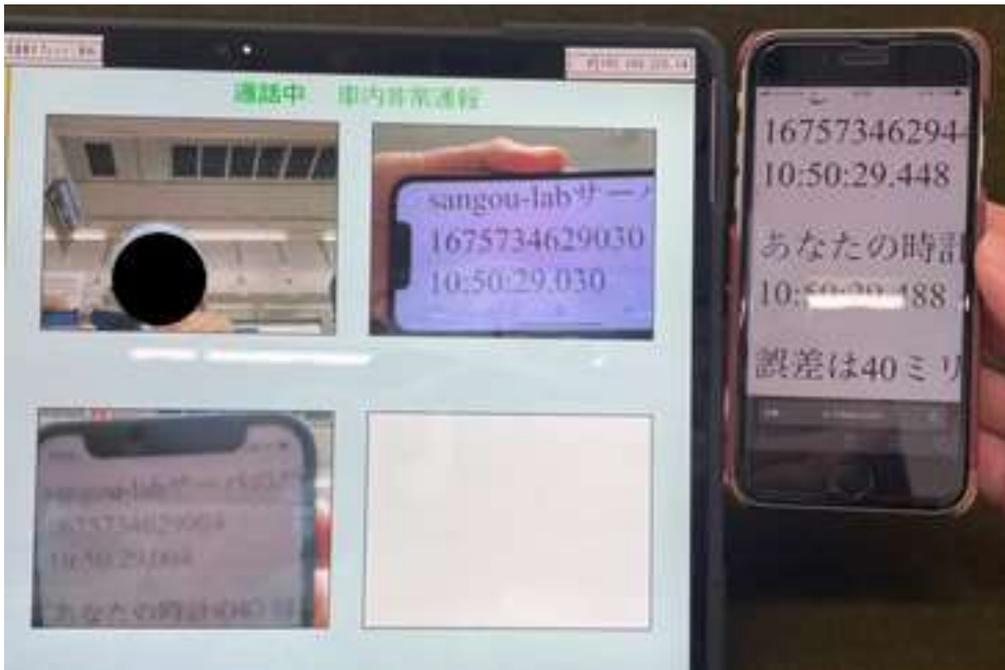


図 4.3.1-25 ローカル 5G 使用時の遅延計測の様子

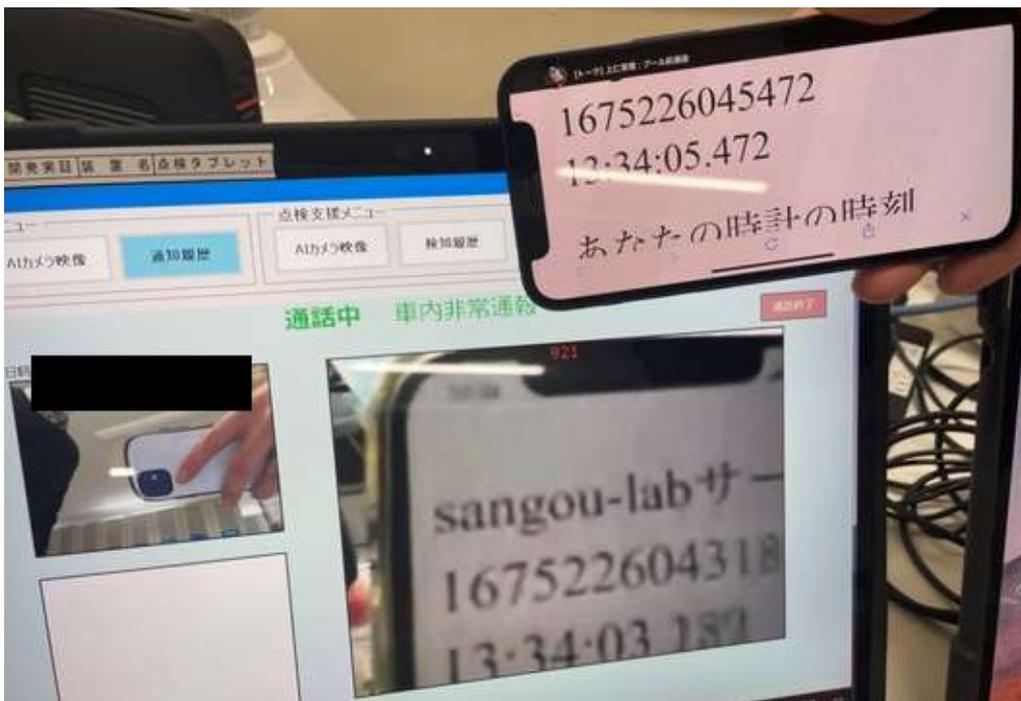


図 4.3.1-26 4G 使用時の遅延計測の様子

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

- ・走行列車内におけるローカル 5G のスループット及び安定性(パケットロス率、ジッタ)

ソリューション③において、列車前方にカメラ等の機器を設置しサーバとの通信を行うこととソリューション②において先頭車両にカメラを設置することを想定し、走行列車内のうち先頭の車両で測定を実施する。

スループットの測定結果は、表 4.3.1-23、図 4.3.1-27 のとおり。基地局の直近でローカル 5G 端末と基地局の見通しがある条件でなければ、ソリューション③のスループット要件を満たすことができない結果となった。ローカル 5G 端末について送信アンテナが複数搭載され MIMO が利用できる製品の選定や基地局の準同期運用など、上りスループットを向上させる対策が必要となる。ソリューション②の要件に対しては、列車最後尾、列車中央部と同様の傾向であった。

遅延、安定性の測定条件及び測定結果は、表 4.3.1-24、表 4.3.1-25 のとおり。列車最後尾や中央部における結果(表 4.3.1-6、表 4.3.1-22)と同様の傾向が見られた。

今後、前述の走行列車内におけるローカル 5G のスループット及び安定性への対策同様、アンテナ向きの調整や移設等によるカバーエリアの改善検討を前提として進め、必要に応じて本実証事業で採用した物と異なるローカル 5G 端末の選定、ローカル 5G 端末の列車外部への設置方法の検討や基地局の準同期運用の検証を進めることで、列車走行中における安定的な上り通信速度の確保を図る。

表 4.3.1-23 スループットの測定条件(列車先頭部)

測定方法	スループット測定ツール「NetMi」を使用し、走行列車内におけるリアルタイムなスループットを測定。なお、測定ツールの仕様上の都合により、ローカル 5G 端末からの上り通信のみ測定を実施。
測定区間	ローカル 5G 端末配下の PC から 5GC ネットワーク内の PC
サンプリング間隔	5 秒間隔
測定場所 進行方向	特急列車の西端(神戸三宮側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動

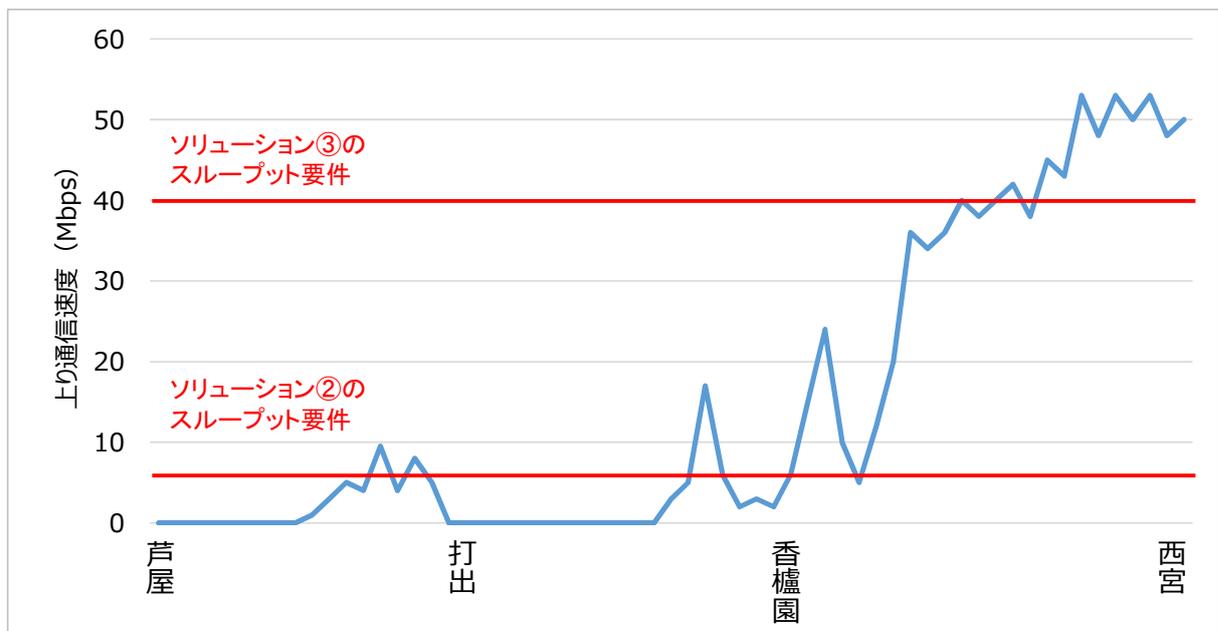


図 4.3.1-27 スループットの測定結果(列車先頭部)

表 4.3.1-24 遅延、安定性の測定条件(列車先頭部)

ping 送信先	5GC(青木信号所設置)
ping サイズ	128 バイト/回(1 パケットを想定)
送信間隔	1 秒間隔(タイムアウトは 3 秒)
測定場所 進行方向	以下それぞれにおいて測定を実施 ・特急列車の西端(神戸三宮側)車両に乗車し、西(神戸三宮方面)へ移動 ・特急列車の東端(大阪梅田側)車両に乗車し、東(大阪梅田方面)へ移動

表 4.3.1-25 遅延、安定性の測定結果(列車先頭部)

進行方向	遅延(ミリ秒) [※]			パケットロス率 (%)	ジッタ [※] (ミリ秒)
	最小値	平均値	最大値		
西向き	12.0	42.7	185.0	43.8	27.2
東向き	12.0	42.0	199.0	9.0	23.6

※タイムアウトの結果は含まない。

・AI 検知精度

本実証事業においては、第一ステップとして沿線設備の日常巡視点検にて確認している項目の中で比較的発生頻度の高い、支持物類(曲線引金具)の外れ、飛来したビニール袋の引掛かりを検知する AI モデルを開発した。また、沿線での異常発生箇所を記録するための手段として本実証事業では GPS を採用した。AI 検知精度及び GPS による位置情報取得精度について以下で述べる。

c. 曲線引金具の外れ

本実証事業においては、営業中の列車から映像を撮影した正常状態の金具のデータと訓練施設で撮影した異常状態(架線から金具が外れている状態)の金具のデータを教師データとして AI の学習を実施した。なお、学習には映像データからフレームを切り出した画像を使用している。学習手順の概要は表 4.3.1-26 のとおり。

学習した AI モデルから得られた混同行列及び AI 検知精度は表 4.3.1-27、表 4.3.1-28 のとおり。曲線引金具の検知については、再現率が 97.1%で目標値である 95%を上回る結果になっており、誤検知率についても 2.6%に抑えられているため、一段階目については十分学習できているといえる。一方で、正常・異常の判定を含めると再現率が 78.4%に低下し目標値を下回る。正しく検知できていない例として、図 4.3.1-29 に示すとおり、画角から金具の一部が見切れており検知漏れが発生していることがあげられる。今回、映像データからフレームを抽出し、それぞれのフレームに対して AI による判定を行っているが、検知漏れが発生した場合においても前後のフレームでは正しく検知できていることが多く、1 つの金具に対して複数フレームに渡って判定することで、より精度は向上する可能性がある。また、このほかの精度向上の対策として、学習に使用する異常状態のデータを充実させることが考えられる。しかし、異常状態のデータを蓄積することは時間がかかることや未知の異常状態については検知漏れが発生する懸念が残る。そこで、異常状態の学習に頼らない手法として正常状態との差分を検知する手法についても技術的な実現可能性を含めて今後検討を進める。

表 4.3.1-26 AI モデル学習手順の概要(曲線引金具)

項目	概要
学習用データの取得方法	以下 2 種類のデータを取得した。なお、いずれの場合も日中の時間帯で天候は晴れもしくは曇りの条件で撮影している。 ①営業列車の前方に高精細カメラを設置し、営業線の映像を撮影(異常状態は含まれない) ②訓練施設において、一部の金具の異常状態を再現し、高精細カメラで映像を撮影(正常状態と異常状態が混同)
学習用データの量 (フレーム数)	①2,806 枚 ②295 枚
学習手順	検知精度を高めるための手法として以下の要領で 2 段階学習を取り入れた。 一段階目:正常・異常を問わず、学習用データ①②に対して「曲線引金具」を検知するようアノテーションを実施し、300 回(epoch)学習させた。 2 段階目:STEP1 で学習したモデルを利用し、学習用データ①②から曲線引金具の特徴を抽出したうえで「正常」「異常」のアノテーションを実施した。
アノテーション数	①正常状態:10,768 個／異常状態:0 個 ②正常状態:591 個／異常状態:283 個

表 4.3.1-27 AI 検知精度(曲線引金具の検知)

		実際の状態	
		金具あり(陽性)	金具なし(陰性)
AI 予測結果	検知 (陽性)	1,620	44
	未検知 (陰性)	49	
再現率		97.1%	
誤検知率		2.6%	
正解率		94.6%	

表 4.3.1-28 AI 検知精度(曲線引金具の正常・異常判定)

		実際の状態	
		金具あり(陽性)	金具なし(陰性)
AI 予測結果	正しく判定 (陽性)	442	82
	判定誤り・未検知 (陰性)	122	
再現率		78.4%	
誤検知率		15.6%	
正解率		68.4%	

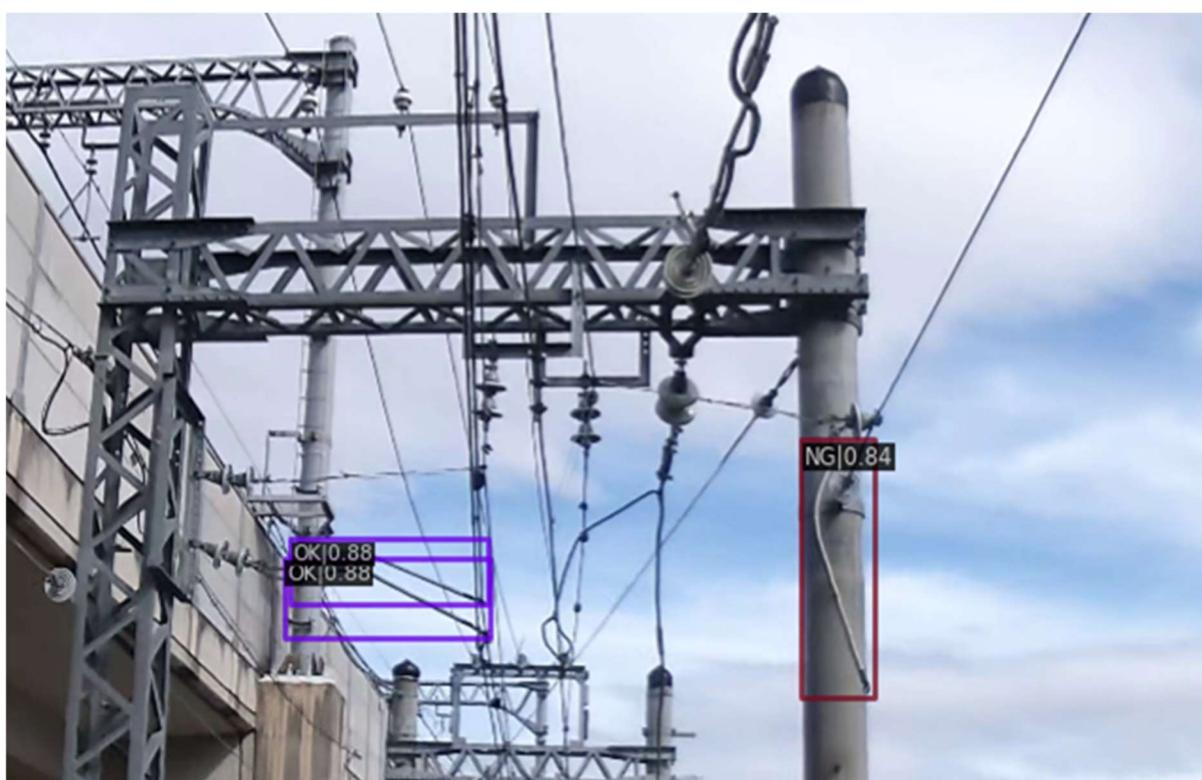


図 4.3.1-28 正しく検知できている例

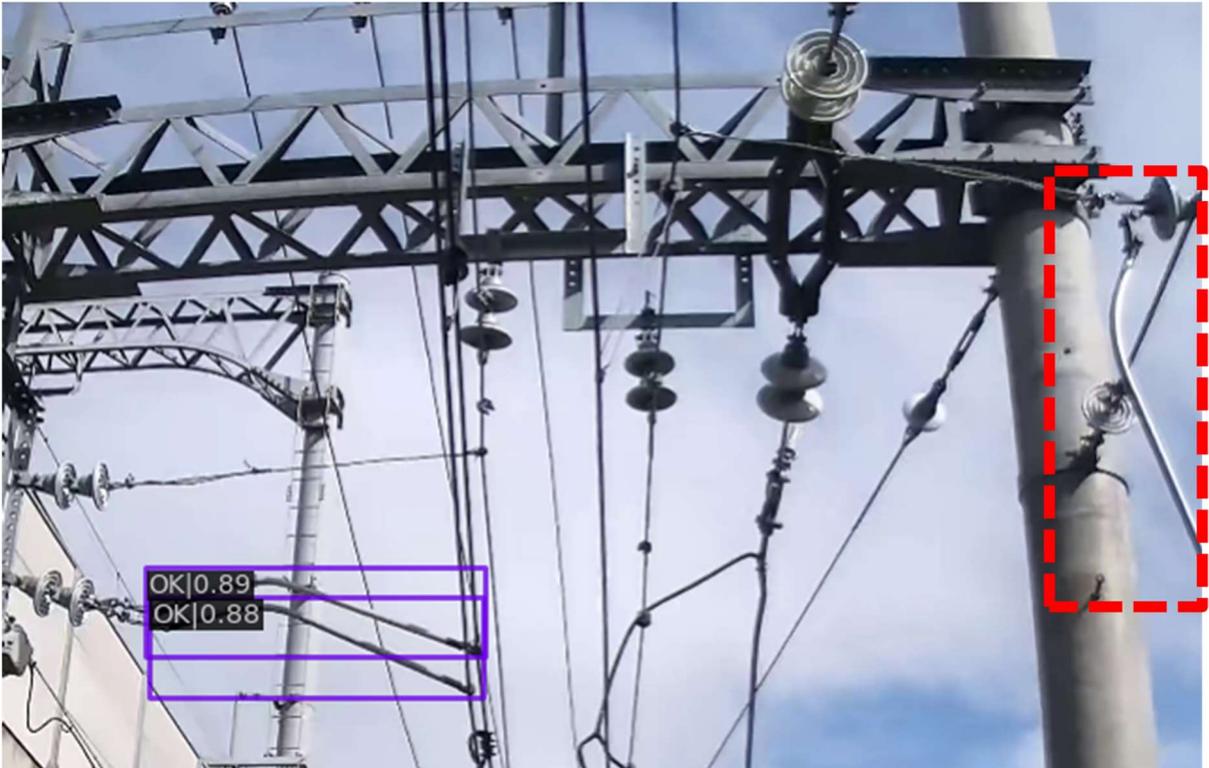


図 4.3.1-29 検知失敗例(右側赤枠部の金具外れを検知漏れ)

d. 架線へのビニール袋の引掛り

本実証事業においては、訓練施設で架線にビニール袋が引掛った状態を再現し、それらを撮影したデータを教師データとして AI の学習を実施した。なお、学習には映像データからフレームを切り出した画像を使用している。学習手順の概要は表 4.3.1-29 のとおり。

学習した AI モデルから得られた混同行列及び AI 検知精度は表 4.3.1-30 のとおり。再現率が 47.7%に留まっており目標値である 95%を大きく下回る結果となった。ビニール袋は不定形の物体であるため今回取得した学習用データの数量では学習が不十分であること、画角に映り込む大きさが小さいことが考えられる。検知結果の例を図 4.3.1-30、図 4.3.1-31 に示す。

精度向上のためには、学習用データの充実が不可欠であるため、今後継続してデータ収集を行い、追加学習による AI モデルの強化を検討する。なお、今回は学習用データの数量を増加させるため撮影したデータにビニール袋をトリミングした画像を合成した物を利用した学習も実施したが、期待していた精度向上は見られず数値が低下したため、合成データを使用しない学習モデルで評価を行っている。また、曲線引金具と同様、学習用データに頼らない手法として差分を検知する手法について並行して検討を進め、加えてより小さな対象物でも認識できるよう 8K 等の高精細カメラで撮影された映像の解析についても検討する。

表 4.3.1-29 AI モデル学習手順の概要(ビニール袋)

項目	概要
学習用データの取得方法	訓練施設において、架線へのビニール袋の引掛りを再現し、高精細カメラで映像を撮影
学習用データの量 (フレーム数)	646 枚(うちビニール袋が含まれるフレームは 287 枚)
学習手順	学習用データ内のビニール袋に対してアノテーションを実施し、学習させた。
アノテーション数	920 個

表 4.3.1-30 AI 検知精度(ビニール袋)

		実際の状態	
		袋あり(陽性)	袋なし(陰性)
AI 予測結果	検知(陽性)	95	22
	未検知(陰性)	104	
再現率		47.7%	
誤検知率		18.8%	
正解率		43.0%	

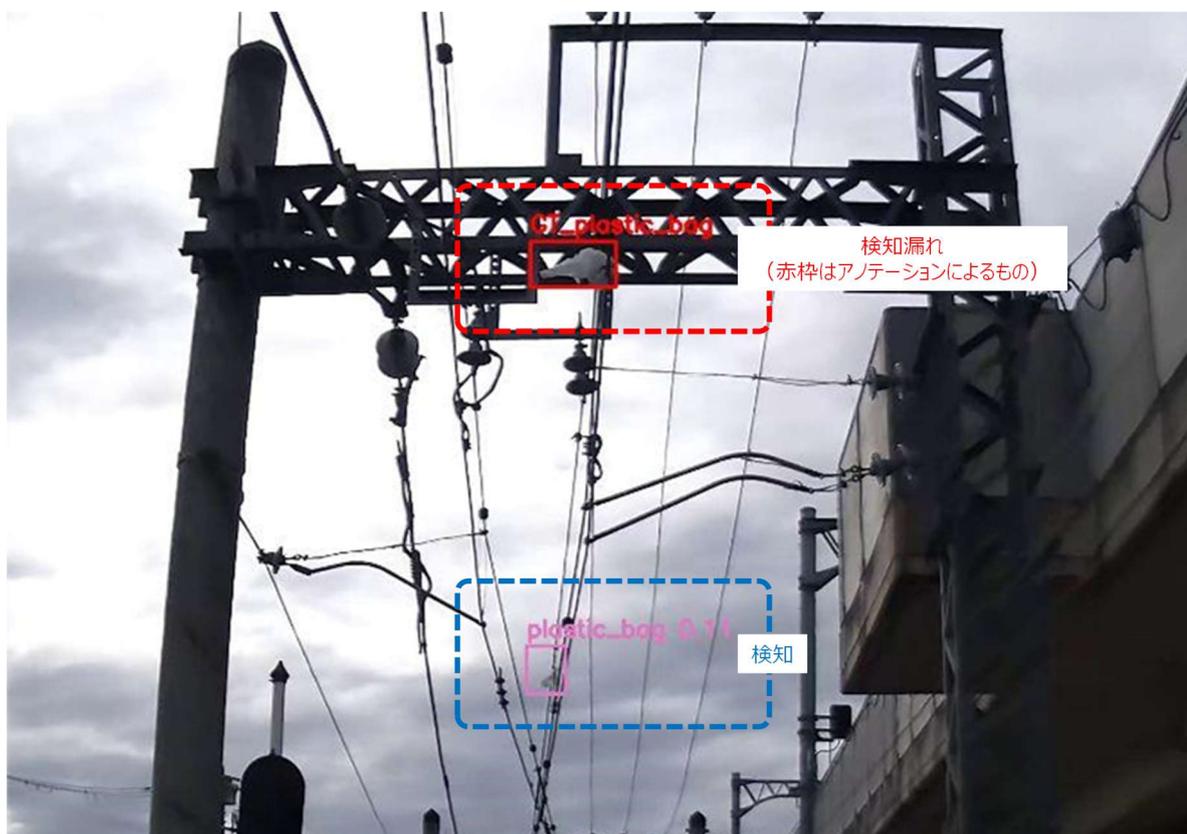


図 4.3.1-30 検知結果の例(正しく検知できている物・検知漏れ)



図 4.3.1-31 検知結果の例(背景の雲を誤検知)

e. GPS による位置情報

列車の前方に機器を設置し、実際の列車走行時においてGPSによる位置情報の取得を行った(図 4.3.1-32)。位置情報の取得結果は図 4.3.1-33 及び図 4.3.1-34 のとおり。屋外走行時においては、高速走行中の列車においても、10m 程度の間隔で位置情報を取得できている。沿線設備の保守においては、架線柱の番号で位置の管理を行っているが、架線柱の間隔(約 50m)より密度高く取得できているため異常検知箇所の把握のためには十分な分解能であるといえる。しかし、屋内など閉鎖空間を走行時には、GPS 信号を受信できなくなり、位置情報が乱れている。閉鎖空間における位置情報を補完するため、ビーコンによる位置情報の補足やカメラで撮影された映像から架線柱の番号をAIで読み取る等の追加検討が必要となる。



図 4.3.1-32 列車への機器設置の様子

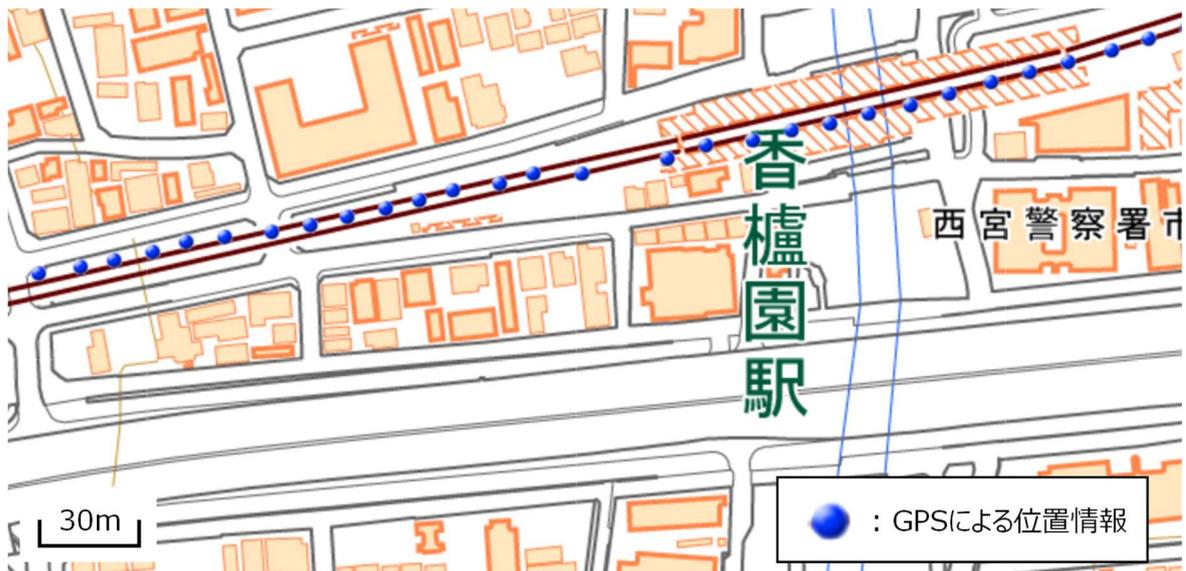


図 4.3.1-33 屋外走行時の位置情報の取得結果(地理院地図を加工して作成)

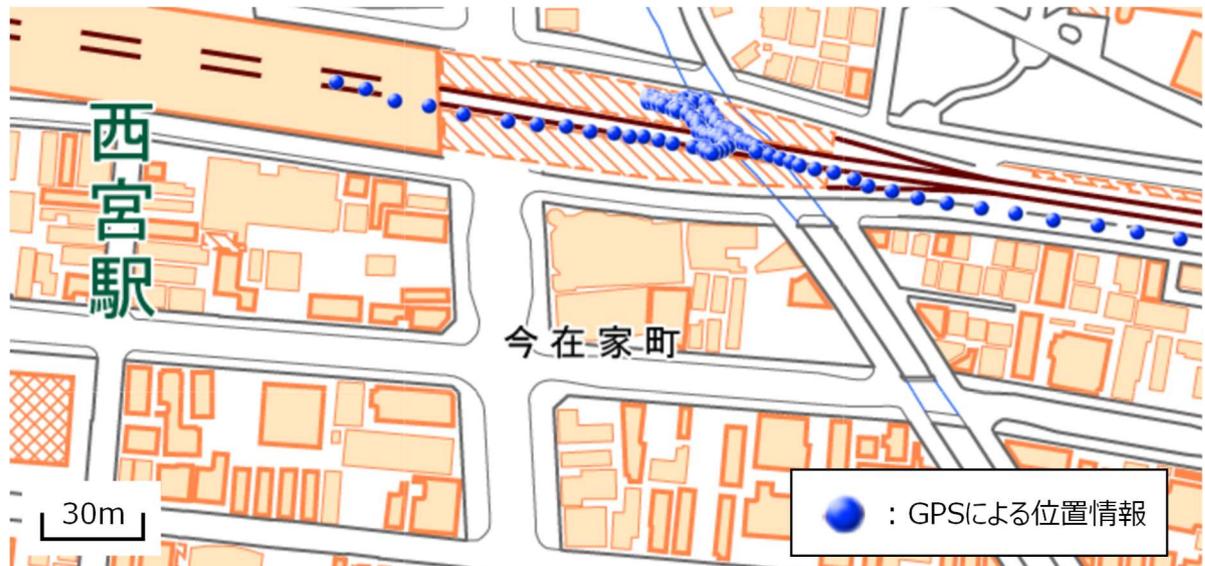


図 4.3.1-34 閉鎖空間走行時の位置情報の取得結果(地理院地図を加工して作成)

(2) 運用検証

1) 検証項目

今回構築するシステムは、年齢や技能によらず、幅広い乗務員が利用する想定であることから、全てのソリューションに共通する検証項目として、以下を確認した。

- ・ユーザが満足できるシステムとなっているか
 - 不足している機能があると感じたか
 - 不便に感じた点などあったか
 - ・ユーザが容易にシステムを使いこなせる設計となっているか
 - 使用方法がわからない点などあったか
 - ・操作誤りが発生しにくい設計となっているか
 - 意図した動作と異なる挙動をすることはあったか
 - ・有事発生時に的確に対応できるシステムとなっているか
 - 即時対応が求められる状況において、システムの応答性は適切か
 - いつでも誰でも簡単に操作できるインターフェースとなっているか
- 次にソリューションごとの検証項目を以下に示す。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

既存システムでは、踏切やホームでの異常発生時は、異常が発生している旨の音声に乗務員に伝わるのみで、現地の状況を確認する術がない。既存システムに対する安全性や運用面での比較を行うため、以下の項目を確認した。

- ・安全性向上に資するシステムとなっているか
 - 通知された時点で対処すれば危険を回避できるか
 - 同時に複数の危険を検知した際、適切な情報が通知されるか

・乗務員の操業に支障のないシステムとなっているか

- 通知頻度による煩わしさはないか
- 通知時、注意の惹きつけ方は適切か

②車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

既存システムでは、車内の異常発生時は乗客からの能動的な通報と会話でしか、状況を確認できない。既存システムと安全性や運用面での比較を行うため、以下の項目を確認した。

- ・安全性向上に寄与するシステムとなっているか
 - 必要となる映像が品質に問題なく速やかに閲覧できるか
- ・映像を誰でも閲覧できるシステムになっていないか
 - ユーザ管理が可能か

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

現状の目視による巡視点検に対して、作業時間や運用面での比較を行うため、以下の項目を確認した。

- ・巡視点検業務に代わるシステムとなっているか
 - 当該システムの導入により業務量の低減が図れるか
 - 必要となる映像が品質に問題なく速やかに閲覧できるか
- ・映像を誰でも閲覧できるシステムになっていないか
 - ユーザ管理が可能か

2) 検証方法

有効性・効率性・満足度の 3 つの指標から評価するため、利用者に対し、表 4.3.1-31 から表 4.3.1-33 に示す 5 段階評価式のアンケートを実施した。アンケート対象は現役の運輸部門係員 20 代から 50 代に加え、技術部門の関係者とし、幅広い所属、年齢の係員に対して実施した。また、ソリューションのブラッシュアップや考察に役立てるため、質問項目ごとにコメント欄を設けることで利用者の具体的な意見を集約した。利用者や実証の進め方を表 4.3.1-34 に示す。なお、有効性・効率性・満足度については、国際標準化機構で定められるユーザビリティの指標を引用し、以下のとおり定義する。

- ・有効性: ユーザが指定された目標を達成するうえでの正確さ、完全性
- ・効率性: ユーザが目標を達成する際に正確さと完全性に関連して費やした資源
- ・満足度: 製品を使用する際の不快感のなさ、肯定的な態度

表 4.3.1-31 ソリューション①に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意← →低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	不足している機能があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
2	不便に感じた点があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
3	使用方法がわからなかったことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
4	意図した動作と異なる挙動をしたことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
5	即時対応が求められる状況において、システムの応答性は適切だと感じますか。	<input type="checkbox"/>					
6	いつでもだれでも簡単に操作できると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
7	通知された時点で対処すれば危険を回避できると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
8	同時に複数の危険を検出した際、適切な情報が通知されていると思いますか。	<input type="checkbox"/>					
9	通知頻度は適切だと感じましたか。	<input type="checkbox"/>					
10	通知の際、注意の惹きつけ方は適切だと感じましたか。	<input type="checkbox"/>					

表 4.3.1-32 ソリューション②に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意← →低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	不足している機能があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
2	不便に感じた点があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
3	使用方法がわからなかったことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
4	意図した動作と異なる挙動をしたことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
5	いつでもだれでも簡単に操作できると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
6	必要となる映像が品質に問題なく速やかに閲覧できていると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
7	非常通報押下との連携は速やかに行われていると感じますか。	<input type="checkbox"/>					

表 4.3.1-33 ソリューション③に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意← →低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	不足している機能があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
2	不便に感じた点があれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
3	使用方法がわからなかったことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
4	意図した動作と異なる挙動をしたことがあれば記載ください。	<input type="checkbox"/>					
5	いつでもだれでも簡単に操作できると感じましたか。	<input type="checkbox"/>					
6	当該システム導入により、業務量の低減が図れると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
7	必要となる映像が品質に問題なく速やかに閲覧できると感じますか。	<input type="checkbox"/>					

表 4.3.1-34 利用者及び実証の進め方

利用者	<ul style="list-style-type: none"> ・乗務員：車掌、運転士 ・地上係員：駅係員、運転指令員、保守部員
実証の進め方	<ul style="list-style-type: none"> ① 運転所管部門/保守部門と実証実験にかかる協議の実施 ② 代表者と想定シナリオを協議の上決定し、実証実験説明会の実施 ③ 有事を想定したシナリオに基づいた実証実験の実施 ④ 利用者アンケートの実施 ⑤ アンケート結果の分析・評価

3) 検証結果及び考察

表 4.3.1-34 の通り実証を進め評価を実施した。阪神電気鉄道の都市交通事業本部では、役員及び各部部长クラスが出席し、各事業部間の情報連携や安全に関する事項や予算措置その他を決定する会議体を月 2 回実施している。その会議体において実証実験にかかる協議を実施して、部門間連携を図り本実証実験に取り組むことを決定した。決定した方針に従い運輸部門、保守部門と現場運用にソリューションを効果的に導入するためのケースを想定し、解決を図る課題をピックアップしシナリオを作成した。そのシナリオのもと現運用からソリューションを導入することでどの程度の効果が得られるかを評価することとした。

ソリューション①②については列車運行に関わることから実車による試運転実施し、走行中に異常が発生したことを想定したシナリオ(表 4.3.1-35、表 4.3.1-36)に基づいて現場担当経験のある係員が実演し、その有効性・効率性・満足度の指標にアンケート項目を分類し集計を行った。また、ソリューション③については、車上に設置したカメラにより、電路設備異常や飛来物の発生したことを表 4.3.1-37 に示すシナリオに基づいて模擬し、その検知が正常になされるか等を中心に現場の係員向けのアンケートにより評価した。なお、ソリューションごとの各指標の目標値と結果を表 4.3.1-38 に示す。

表 4.3.1-35 有事を想定したシナリオ抜粋(ソリューション①)

時間推移	現運用		ソリューション活用	
	車上	指令	車上	指令
0:00	踏切障害物検知装置による異常発報受信 注意運転実施	踏切障害物検知装置による異常発報受信	画像解析による異常検知・発報	画像解析による異常検知・発報
から 0:10		該当踏切の付近の車両に状況確認を指示	該当踏切の現在と異常発報時の映像を確認	
から 1:00	該当踏切付近で減速		該当踏切付近で減速	
から 1:30			目視による周辺確認 異常なしを連絡 注意運転解除	映像による周辺確認

から 4:00	目視による周辺確認 無理な横断が原因と 判明 指令に状況説明			
から 4:30	注意運転解除	異常がない旨 を、各列車に無 線で連絡		

表 4.3.1-36 有事を想定したシナリオ抜粋(ソリューション②)

時間推移	現運用		ソリューション活用	
	車上	指令	車上	指令
0:00	異常発生		異常発生	
から 1:00	旅客が非常通報 緊急停止処置		旅客が非常通報 緊急停止処置	
から 1:00	旅客から車掌、運 転士に状況説明		旅客から指令に状況 説明	カメラ映像の確認と ヒアリングで状況把 握
から 3:00	車掌→指令に報告 車掌が車内状況を 確認	車上より受報		状況を判断、運航再 開を指示
から 4:00			運行再開	
から 6:00				
から 8:00	運行再開	状況を判断、運 行再開を指示		

表 4.3.1-37 有事を想定したシナリオ抜粋(ソリューション③)

時間推移	現運用			ソリューション活用		
	車上	指令	保守	車上	指令	保守
0:00	架線の上に飛 来物を発見			架線の上に飛 来物を発見		車上監視カ メラが飛来物 を検知し、異 常発報
から 1:00	指令に状況 説明(○駅か ら△駅間に 飛来物あり)	車上より受報		指令に状況 説明(○駅か ら△駅間に 飛来物あり)	車上より受報	監視PCにて 飛来物映像 を確認

から 2:00		保守部門及び運行中の全列車に連絡	指令より受報		保守部門及び運行中の全列車に連絡	出動手配
から 3:00			作業員に状況説明し、出動手配			現場到着※
から 4:00						飛来物が確認できた架線まで直接徒歩移動
から 8:00			現場到着※			飛来物除去作業
から 14:00			○ 駅から △ 駅の架線を徒歩巡視で確認	指令より受報	保守部門より受報後、運行中の全列車に報告	指令に作業終了連絡
から 18:00			飛来物除去作業			
から 20:00	指令より受報	保守部門より受報後、運行中の全列車に報告	指令に作業終了連絡			

※:現場事務所から飛来物現場への移動時間は考慮しない

表 4.3.1-38 ソリューションごとに各指標の目標値と結果

目標値／結果	有効性		効率性		満足度	
ソリューション①	4 以上	4.19	3.5 以上	4.38	4 以上	3.73
ソリューション②	4 以上	3.96	3.5 以上	4.13	4 以上	4.70
ソリューション③	3 以上	3.47	3 以上	4.00	4 以上	3.60

ソリューション①、②は緊急性を要する有事の際を想定した内容となっていることから有効性・効率性の目標値を高め設定した。ソリューション③は、学習データとして使用する異常状態の設備のサンプル数が少ないことから、検知精度が課題になると見込まれるため、ソリューション①、②に比べ目標値を低く設定した。

各ソリューションについて、AI 検知精度や通信遅延等の技術面が要因となる課題と、使用感や使用規則等の運用面が要因となる課題に分けて、それぞれについて分析・考察を実施した。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

各アンケートの項目を、以下のように有効性・効率性・満足度の評価指標に分類した。また、目標値に対する達成度を測るため、5 段階評価のアンケート項目の平均を評価値として扱うこととする。それぞれの評価指標に対する結果は以下のとおりである。

■有効性(目標値 4 以上)

- ・即時対応が求められる状況において、システムの応答性は適切だと感じますか。

評価値:4.54

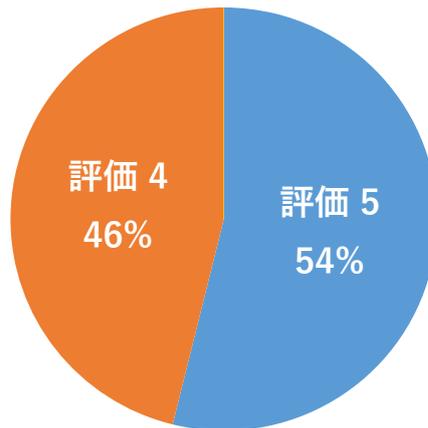
- ・通知された時点で対処すれば危険を回避できると感じますか。

評価値:4.54

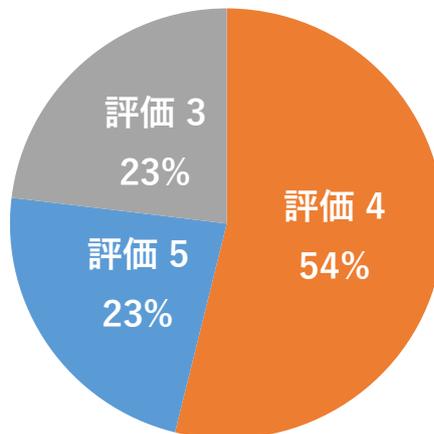
- ・同時に複数の危険を検知した際、適切な情報が通知されていると思いますか。

評価値:3.5

即時対応が求められる状況において、
システムの応答性は適切だと感じますか。



通知された時点で対処すれば
危険を回避できると感じますか。



同時に複数の危険を検知した際、
適切な情報が通知されていると思いますか。

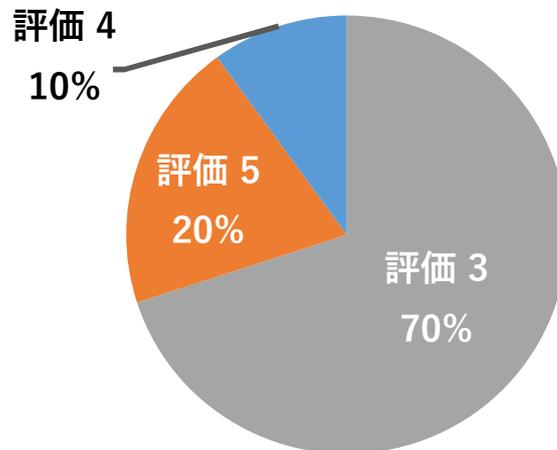


図 4.3.1-35 有効性に関するアンケート結果(ソリューション①)

【総合評価及び考察】

システム応答性に対する評価や通知が得られることによる危険回避への効果としては十分な効果が得られるとの評価が得られた。これは通信遅延や、AI 解析による処理時間が目標値を満たしており、操作者視点でも不便感を感じない程度の水準を達成したといえる。一方で、同時に複数の危険を察知した際の適切な情報通知については満足な結果が得られなかった。これは、本課題実証が限られた環境下で実施されたことから、運用側視点で実証が十分ではなかったと感じたことによるものであると考えられる。実装した場合はより多数のカメラの映像が飛び交う中、危険を察知し行動することが求められることから、さらに直感性が高く緊急時の応答が簡易である UI 構築が求められるなど、新たな課題が予想される。これらを踏まえ、今後はより実装環境に近い実証を積み重ねていくことで実装がより近づくと考えられる。

■効率性(目標値 3.5 以上)

・いつでも誰でも簡単に操作できると感じますか。

評価値:4.38

いつでもだれでも簡単に
操作できると感じますか。

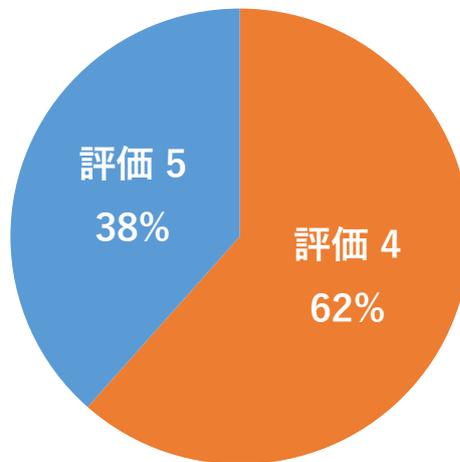


図 4.3.1-36 効率性に関するアンケート調査(ソリューション①)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・使用方法がわからなかったことがあれば記載ください。
アンケート参加者全員が「特になし」
- ・意図した動作と異なる挙動をしたことがあれば記載ください。
 - タイヤのついた車両を車いすと誤認することがあった。
 - 寄付きや転落等を検知した際は、自動的にリアルタイム映像に切り替わった方が使い勝手が良いのではないか。

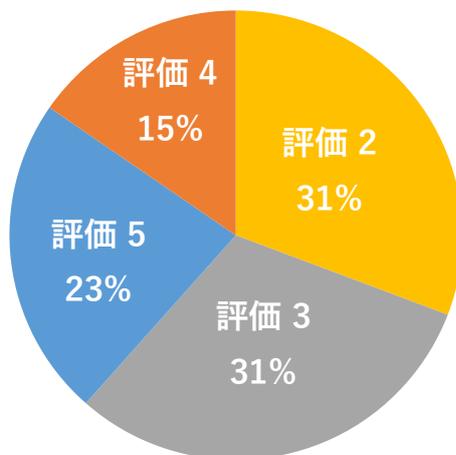
【総合評価及び考察】

効率性については誰でも簡単に操作できるかという観点で検証を行ったが、概ね問題ないとの結果が得られた。ソリューション自体が直感性を重視して作り込まれた成果であると考え。実装環境ではより多数のカメラの扱いが求められるが、ユーザの操作感が損なわれないように工夫することが課題である。

■満足度(目標値 4 以上)

- ・通知頻度は適切だと感じましたか。
評価値:3.3
- ・通知の際、注意の惹きつけ方は適切だと感じましたか。
評価値:4.15

通知頻度は適切だと感じましたか。



通知の際、
注意の惹きつけ方は適切だと感じましたか。

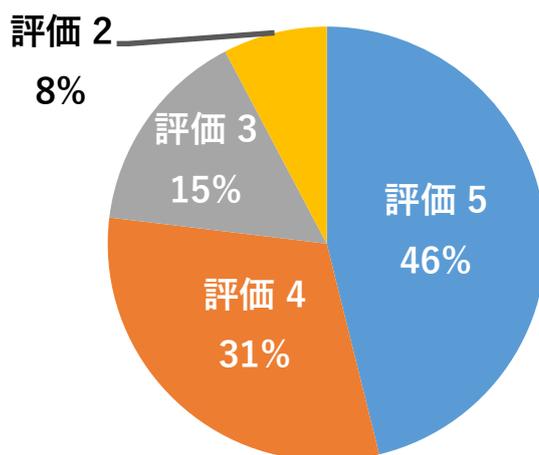


図 4.3.1-37 満足度に関するアンケート調査(ソリューション①)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・不足している機能があれば記載ください。
 - 人が被ると正しく検知しない、走り込みを検知しないなど、AI 画像認証の精度についてはより一層の向上が求められると感じた。
 - 非常通報装置と連動できると良い。
 - 列車在線中に間隙に落ちた場合の検知機能があると良い。
- ・不便に感じた点があれば記載ください。
 - リアルタイム映像へ切り替える手順が多い。
 - 踏切での異常検知は、障害物検知装置の動作原因が映像で把握できた場合であっても、現場一旦停止で安全確認が必要。
 - 誤検知が多い部分には工夫や改善が必要。

【総合評価及び考察】

満足度の評価指標とした通知頻度や注意の惹きつけ方については評価が大きく分かれた。特に、技術系係員と運輸系係員で評価が大きく分かれたが、これは、運輸系係員は操業への影響が出ることに大きな懸念を抱いたことによる結果であると考えられる。刻々と変化していく状況を的確に掴み、要否判断を連続的かつ正確に実施する必要があることから、ソリューションに求められる水準も高い。また、技術系係員と運輸系係員の視点に違いがあることから、求められる高水準を満たすソリューションの実現には継続的な試験運用と本実証同様運用側による評価を繰り返す必要があると考えられる。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

各アンケートの項目を、以下のように有効性・効率性・満足度の評価指標に分類した。また、目標値に対する達成度を測るため、5段階評価のアンケート項目の平均を評価値として扱うこととする。それぞれの評価指標に対する結果は以下のとおり。

■有効性(目標値 4 以上)

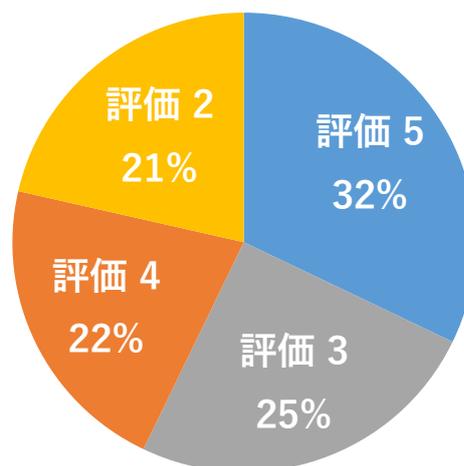
- ・必要となる映像が品質に問題なく速やかに閲覧できていると感じますか。

評価値:3.65

- ・非常通報押下との連携は速やかに行われていると感じますか。

評価値:4.26

必要となる映像が品質に問題なく 速やかに閲覧できていると感じますか。



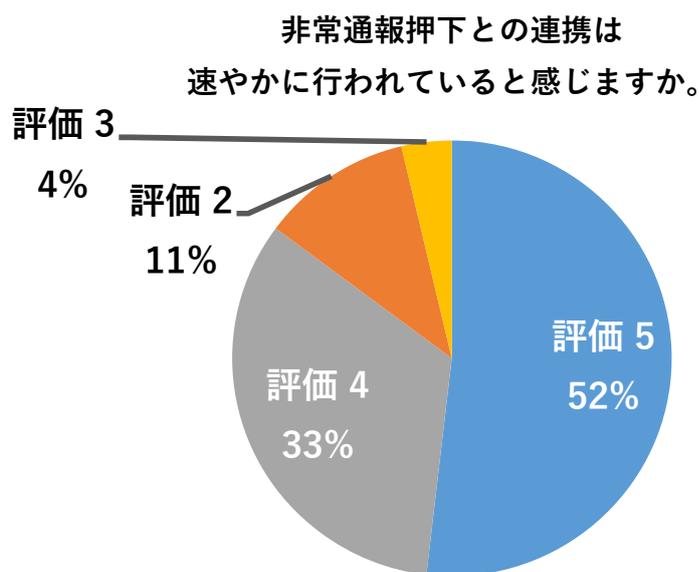


図 4.3.1-38 有効性に関するアンケート調査(ソリューション②)

【総合評価及び考察】

非常通報押下との連携に関しては満足度が高いという結果が得られた。現運用では音声のみであり、連携先が乗務員室に限られるが、映像による連携が多拠点で可能となる可能性が示されたと評価され、有効性を示せたと考える。一方で、映像品質と速やかな連携については評価が分かれた。本実証では映像の閲覧にタブレットを使用したことから細部が見つらく、ズーム機能を求める声があった。また、不感地帯が生じたことから通信が不通となったことを指摘する声等が低評価につながったと考えられる。

■ 効率性(目標値 3.5 以上)

・いつでも誰でも簡単に操作できると感じますか。

評価値:4.13

いつでもだれでも簡単に操作できると感じますか。

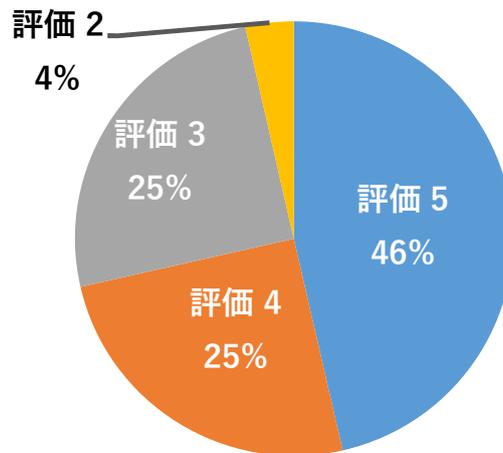


図 4.3.1-39 効率性に関するアンケート調査(ソリューション②)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・使用方法がわからなかったことがあれば記載ください。
 - 使用方法自体に問題はないが、タブレットの応答ボタン位置がわかりにくかったので、目立たせた方が良いと感じた。
- ・意図した動作と異なる挙動をしたことがあれば記載ください。
 - カメラを切り替える際に、「今見ているカメラの映像を終了します」旨の文言が出ている状態でダブルタップしても反応しなかった。
 - お客様側の端末で非常通報ボタンを押しても、反応が遅く、通報できたのか戸惑った。

【総合評価及び考察】

効率性に対する評価は思いのほか分かれた。実装に向けてはお客様も含めて、誰でも簡単に使用できる必要があるため、今回コメントで得られたように、案内文の構成やボタンの配置を含めて検討していく必要がある。本実証では限られた関係者向けのアンケートに留まったため、実装に向けてはより広く使用感についての評価を求め、誰でも簡単に使用可能なソリューションの実現に向けた検討を進めていく必要があると考える。

■満足度(目標値 4 以上)

5 段階評価ではなく自由記述形式でのアンケートであったため、評価値をアンケート回答者全体に対する肯定的なコメント数の割合とすると評価値は 4.7 であった。ただし、回答者が特にコメントを記載していない場合は、不満なし(肯定的)として扱った。

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・不足している機能があれば記載ください。
 - カメラ映像のズーム機能が必要。
 - 非常通報が押された号車がわかれば良い。
 - ミュート機能・カメラ OFF 機能(指令が、会話には参加しないがやり取りを確認したい場合用)
 - 非常通報アプリの仕様かと思われるが、呼出の回数が5回程度であったが、緊急時は応答したらずくに鳴動が止まって映像に遷移してほしい。
- ・不便に感じた点があれば記載ください。
 - カメラの切り替えについて、速度の面と操作性の面で煩わしさを感じた。
 - 通信環境によって映像がかくつくことがあった。
 - アプリの起動にはサーバとの通信が必須である仕様の都合上、ローカル 5G の電波が届かない場所でアプリを起動することができず、起動に時間を要した。次年度からは、タブレットにアプリを実装し、円滑に試験を実施したい。
 - 通信不具合の際には、本導入を見据え復旧方法を明確にすべき。

【総合評価及び考察】

目標値は達成したものの、ユーザからは多くの不足、不便な点へのコメントがあった。コメントはソリューションの機能面に由来するものと通信性能に由来するものに大別される。前者については、特に実装を想定した際に関わってくるが、本実証では想定していないお客様(第3者)が扱う点に対する意見が散見された。「誰でも使いやすい」という目標が定義する「誰でも」には一般のお客様も含まれることに課題があり、今後はその想定も含めた検証が必要であると考えます。また後者については、本実証ではエリア化が十分満たされていなかったことから通信の不安定さが散見されたため、安定した通信を実現するためのエリア設計についてより高度なものに仕上げていくことが今後の課題として求められる。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

各アンケートの項目を、以下のように作業時間・効率性の評価指標に分類した。また、目標値に対する達成度を測るため、5段階評価のアンケート項目の平均を評価値として扱うこととする。それぞれの評価指標に対する結果は以下のとおり。

■有効性(目標値3以上)

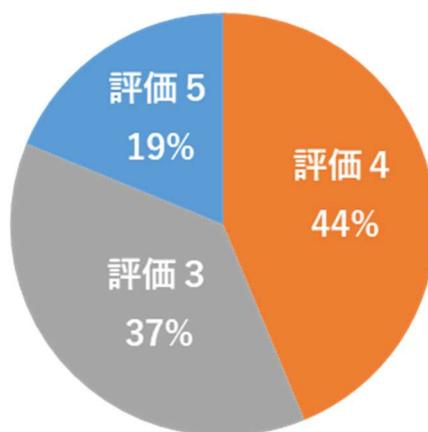
- ・当該システムの導入により業務量の低減が図れますか。

評価値:3.82

- ・必要となる映像の品質が問題なく速やかに閲覧できましたか。

評価値:3.12

当該システムの導入により
業務量の低減が図れますか。



必要となる映像の品質が問題なく
速やかに閲覧できましたか。

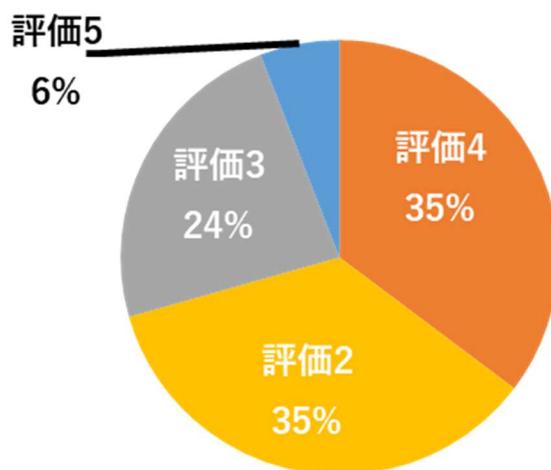


図 4.3.1-40 有効性に関するアンケート結果(ソリューション③)

【総合評価及び考察】

ソリューションとしての有効性は認められたものの、今回の実証実験ではAIの精度について課題が残る結果となった。点検業務における補完的な機能としては有効であるものの、現状のAIの精度では、業務量の低減にはつながらないとの評価が多かった。また、画質については、タブレットに表示されるAIによる検知結果を人が確認しても、誤検知か否かが判断できない解像度となっていた。UIについては、視認性向上のためさらなる改良が望まれる。

■効率性(目標値 3 以上)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・使用方法がわからなかった点があれば記載ください。

アンケート参加者全員が「特になし」

- ・意図した動作と異なる挙動があれば記載ください。

- OK/NG の判定が極端に遅かったり、沿線外の建造物を OK と誤検知したりしていた。

- 背景色(天候、建物等)による未検出

- ・いつでも誰でも簡単に操作できると感じますか。

評価値:4.0

いつでもだれでも簡単に
操作できると感じますか。

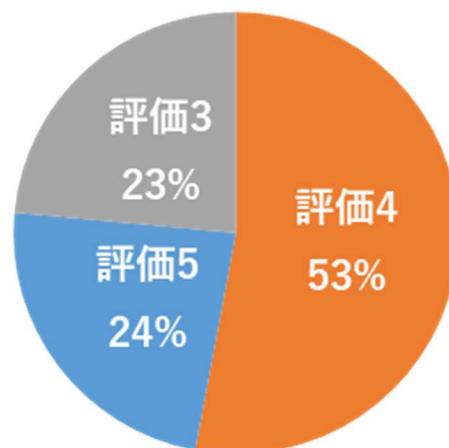


図 4.3.1-41 効率性に関するアンケート結果(ソリューション③)

【総合評価及び考察】

直感的に操作しやすいとの声が多かった。ユーザからは、実導入に際しては設備が電力系なのか通信系なのかで画面を分けてほしいといったニーズや、機能が増えた際の使用感を懸念する意見などがあり、ユーザインターフェースに関しては今後改善の余地がある。

■満足度(目標値 4 以上)

5 段階評価ではなく自由記述形式でのアンケートであったため、評価値をアンケート回答者全体に対する肯定的なコメント数の割合とすると評価値は 3.6 であった。ただし、回答者が特にコメントを記載していない場合は、不満なし(肯定的)として扱った。

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・不足している機能があれば記載ください。
 - 柱番号が表示されればなお良い。
 - 画像のズーム機能。
 - アラームと同時に危険度を示してほしい。
- ・不便に感じた点があれば記載ください。
 - 精度があまり良くない。
 - わずかな距離のテスト走行でも 2 件の誤発報があったため、本運用時には精度向上が必要。
 - 「OK・NG」の判定表示が少し邪魔な気がした。

【総合評価及び考察】

満足度についても、AI の検知精度の低さに起因するコメントが多く、目標値を下回った。カメラ自体の見直しや、画角の調整や設置台数の見直しなど、試行錯誤する必要があると考える。また、GPS 等を活用した位置情報との連携など、本運用にはまだまだ課題が残る結果となった。

(3) 効果検証

1) 検証項目

4.3.1 章(2)1)にて提示した検証項目に関して、定量面及び定性面から効果検証を行った。各ソリューションにおける検証項目を以下に示す。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

高速走行中の乗務業務において安全対策の高度化を実現するためには、有事発生時の対応迅速化が必須である。現行の運用と比較して、状況把握、状況判断、対応の各段階において高度化が実現できるかを以下の項目で評価した。

【定量評価】

ソリューションを導入することで、現行の地上で危険が発生した際の乗務員の目視による状況確認・対応にかかる時間短縮を見込めるか。

【定性面】

現行の乗務員の目視による状況確認に比べ、ソリューションを導入することで、踏切及びホーム上の安全性が向上するか。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

有事への対応は一刻を争う状況であるため、正確な情報伝達による遠隔地対応を含む迅速化が求められる。対応にかかる時間の短縮や映像確認が可能となることで対応の選択肢が広がるかなど、有効性を以下の項目で評価した。

【定量評価】

ソリューション導入をすることで、現行の走行列車で有事が発生した際の乗務員の目視による状況確認と、運転指令員への情報連携の時間短縮を見込めるか。

【定性評価】

有事発生時、車内の映像をリアルタイムで確認できることで、車内の安全性が向上するか。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

巡視点検の省人化の実現性は、ソリューションの導入による作業工数の効率化や負担軽減が見込めるかにより判断されるため、以下の項目について評価した。

【定量評価】

現行の車上巡視や点検業務と比較し、ソリューション導入により省力化及び高度化が見込める設備に対し、業務時間、費用の削減効果を比較検討する。

【定性評価】

ソリューションの導入により車上巡視や点検業務が省人され、作業員の安全性の向上や負担軽減が見込めるか。

2) 検証方法

前述の検証項目を踏まえ、検証方法を表 4.3.1-39 に示す。定量評価に関しては、各ソリューション導入時の連携時間及び削減人日を算出し、定性評価では、車掌、運転士、駅係員、運転指令員、保守部員にアンケートを実施して評価した。各ソリューションに関するアンケート内容を表 4.3.1-40 から表 4.3.1-42 示す。

表 4.3.1-39 検証方法一覧(定量面)

	検証方法
ソリューション①	地上での危険発生から乗務員への通知時間を測定し目標値と比較。
ソリューション②	車内非常通報が発報した場合、車内及び地上への状況連携時間を測定し、目標値と比較。
ソリューション③	削減可能な点検項目を洗い出し、省人化した場合の削減人日を算出。

表 4.3.1-40 ソリューション①に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意 ← → 低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	踏切異常時の映像をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
2	ホームからの転落、寄り付き、駆け込み乗車をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
3	走行中の列車でタブレット端末を確認することで、操業の妨げになることがありませんでしたか。	<input type="checkbox"/>					
4	当システムの導入により、業務負担が増えるようなことはありませんでしたか。	<input type="checkbox"/>					
5	本実証実験にて検知した異常以外に、事前検知できれば安全性向上に寄与できる機能があれば記入下さい。	/	/	/	/	/	
6	本システムを現場に導入すべきと感じますか。	<input type="checkbox"/>					
7	(No.16で「1.2」と回答された方へ) 導入に向けて何が課題になるとお考えでしょうか。	/	/	/	/	/	

表 4.3.1-41 ソリューション②に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意 ← → 低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	従来の音声のみでの乗客とのやり取りに比べ、状況把握の精度は向上したと感じますか。	<input type="checkbox"/>					
2	車掌と運転士が同じ動画を共有することで、平時より具体的な内容を報告ができると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
3	乗務室で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
4	運転指令で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。	<input type="checkbox"/>					
5	車内非常通報装置押下と映像伝送との連携以外に、安全性向上に寄与できる機能があれば記入下さい。	/	/	/	/	/	
6	本システムを現場に導入すべきと感じますか。	<input type="checkbox"/>					
7	(「1.2」と回答された方へ) 導入に向けて何が課題になるとお考えでしょうか。	/	/	/	/	/	

表 4.3.1-42 ソリューション③に関するアンケート様式

No	質問事項	高評価/同意 ← → 低評価/異議					コメント
		5	4	3	2	1	
1	AI検知により判断された設備状況は目視確認した際と差異は無かったですでしょうか。	<input type="checkbox"/>					
2	AI検知した方が優れていると感じた点があれば記入下さい。	/	/	/	/	/	
3	今回検知した設備以外に検知できればさらなる省人化が見込める事例があれば記入下さい。	/	/	/	/	/	
4	本システムを現場に導入すべきと感じますか。	<input type="checkbox"/>					
5	(No.11で「1.2」と回答された方へ) 導入に向けて何が課題になるとお考えでしょうか。	/	/	/	/	/	

3) 検証結果及び考察

【定量面】

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

表 4.3.1-43 に示すように危険発生から検知できるまでに要する時間についてを目標値とソリューション導入時の実証結果で比較し、危険の発生に対して迅速に対応できるかなど、安全性が向上したか評価した。目標値は、課題解決効果を表す適切な定量的な値とし、ソリューション導入によりどの程度目標値に近づけるか検証した。目標値の設定については、危険発生の要因それぞれについて現行の運用や法令による基準等を踏まえて以下のとおり目標値を設定した。

<目標値設定:踏切異常発生時、ホーム上からお客様の転落時>

異常発生時の事故を防止する観点から、法令で列車の制動距離を 600m 以下とするよう定められており、緊急停止を示す信号機(特殊発光信号機)は、列車が踏切の 600m 手前の位置から視認できるよう設置されている。ここで、100km/h で走行する列車の実際の制動距離は約 450m と計算できるため、現行の異常を認知可能な距離 600m と制動距離 450m の差分である 150m を走行するのにかかる時間が約 5 秒であり、この 5 秒以内に乗務員に伝達が行われれば、安全性の高度化が見込まれると判断した。よって、「5 秒以内」を遅延の許容目標値として設定した。

<目標値設定:お客様の駆込み乗車時>

お客様の駆込み乗車時は、乗務員がドア開放操作及び非常ブレーキ操作を行うことで危険を防止している。今回、お客様の駆込み乗車をカメラで撮影し、AI による判定結果をタブレットに表示するまでの時間を目標値と設定することとしたが、運用面を考慮し、「1 秒以内」とする。

表 4.3.1-43 危険発生から検知までにかかる時間の目標値との比較

危険発生の要因	目標値	実証結果
踏切異常発生時	5 秒以内	概ね 1 秒以下
ホーム上からお客様の転落時	5 秒以内	概ね 1 秒以下
お客様の駆込み乗車時	1 秒以内	概ね 1 秒以下

【総合評価及び考察】

いずれの要因に対しても、目標値を概ね下回る結果を得ることができた。現状のキャリア回線(4G)だと映像伝送に 4 から 5 秒程度かかっていることを踏まえると、ローカル 5G の大容量かつ高速通信は安全対策の高度化に大きく寄与できるとの結果が得られた。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

表 4.3.1-44 に示すように状況確認を把握するために要した時間を目標値とソリューション導入時の実証結果で比較することで、車内の異常をカメラ映像で連携できることにより、対応速度が向上するかどうか評価した。目標値については、以下のとおり設定した。

<目標値設定：非常通報から乗務員の車内状況確認>

車内非常通報鳴動から車掌による車内状況確認までの初動対応に現状約 90 から 210 秒かかっている。ソリューション導入後は、車内非常通報鳴動と同時にタブレットによる映像閲覧が可能となることを考慮し、「60 秒以内」を目標値とする。

<目標値設定：駅・指令への状況連携>

乗務員から指令への状況連携、及び指令から関係各所への情報連携には現状約 70 秒かかっている。ソリューション導入後は、指令からでも車内非常通報鳴動と同時にタブレットによる映像閲覧が可能となることを考慮し、「50 秒以内」を目標値とする。

表 4.3.1-44 有事発生時に状況把握するために係る時間の目標との比較

有事発生時の対応	目標値	実証結果
非常通報から乗務員の車内状況確認	60 秒以内	50 秒
駅・指令への状況連携	50 秒以内	25 秒

【総合評価及び考察】

非常通報から乗務員の車内状況確認については、非常通報ボタンが押下されてから乗務員が該当車両の車内防犯カメラ映像を閲覧するまでに約 25 秒、車内映像を見つつお客様と通話することによる車内状況の確認に約 25 秒で、合計 50 秒との結果が得られた。こちらは、目標値の 60 秒を下回る結果となり、課題であった車内異常発生時の状況確認を解決しうる可能性が示唆される。

また、駅・指令への状況連携についても、車内防犯カメラ映像は指令員も確認できるため、乗務員から指令員への報告が不要であり、指令員から駅への情報連携のみで対応可能となるため、目標値を大きく上回る結果が得られた。

以上のように、従来の車内異常発生から駅への情報連携に比べ、約 4 分程度短縮可能なうえ、各所で車内映像が閲覧できるため、本ソリューションにより早期の異常時対応を実現することが期待できる。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

車上巡視点検により確認している対象物のうち、本ソリューションで検知を行う対象物を表 4.3.1-45 に示す。それぞれの対象物に対し、ソリューション導入による効果と削減人日を記載する。

表 4.3.1-45 車上巡視点検にかかる工数の比較イメージ

対象物	現状の目視確認項目	ローカル 5G 導入後の効果	現状工数	削減工数
曲線引金具	・脱落していないか ・破損していないか	車上カメラ及び AI 解析サーバにより、曲引金具を検知・解析を行い、脱落や破損を検知する。検知した情報は、保守部門へと自動的に通知するため、初動対応速度の向上が見込める。	1 日に 1 回	2 日に 1 回
飛来物	・ビニールなどが落下もしくは電車線等に絡まっていないか ・台風の直後等、看板等の飛来物が落下していないか	車上カメラ及び AI 解析サーバにより、飛来物の有無を検知し、検知した情報は、保守部門へと自動的に通知するため、初動対応速度の向上が見込める。	1 日に 1 回	現状のまま

【総合評価及び考察】

表 4.3.1-28 のとおり、曲線引金具の正常・異常判定率は約 8 割であり、一定の削減人日は得られると判断した。また、現行の車上巡視での確認はその日の出勤者により若手社員が担当する場合もあり、その際の視覚的補助になりうる可能性も示唆される。しかし、表 4.3.1-30 のとおり飛来物の検知は約 5 割と低い検知率となっているため、今回の実験結果だと削減人日は得られないと判断した。しかし、表 4.3.1-37 の有事の際の対応速度比較では現状より約 5 分程度の短縮が見込め、早期の列車運行再開にはつながる結果だと示唆される。今後は、AI モデルの改良等により検知率の向上及び検知可能な機器の増加を図ることでさらなる削減人日の算出を目指す。

【定性面】

各ソリューションに対して行ったアンケートの結果を集計した。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

・踏切異常時の映像をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。

評価値:4.83

・ホームからの転落、寄付き、駆込み乗車をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。

評価値:4.50

・走行中の列車でタブレット端末を確認することで、操業の妨げになることはありませんでしたか。

評価値:3.00

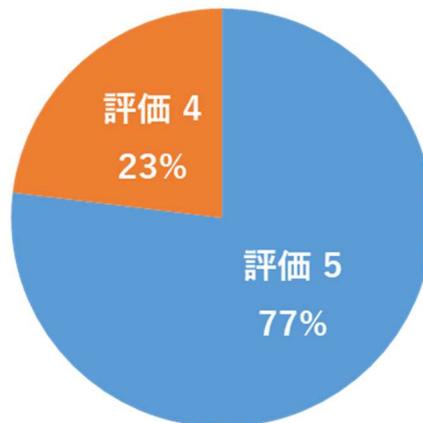
・当システムの導入により、業務負担が増えるようなことはありませんでしたか。

評価値:3.08

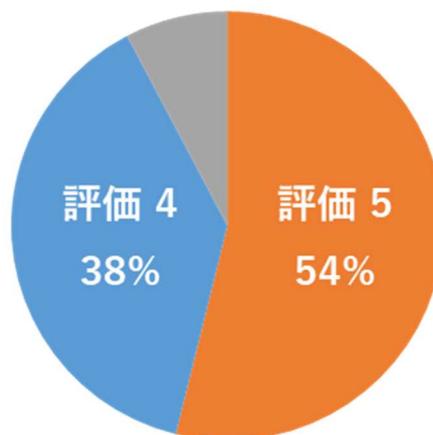
・本システムを現場に導入すべきと感じますか。

評価値:4.50

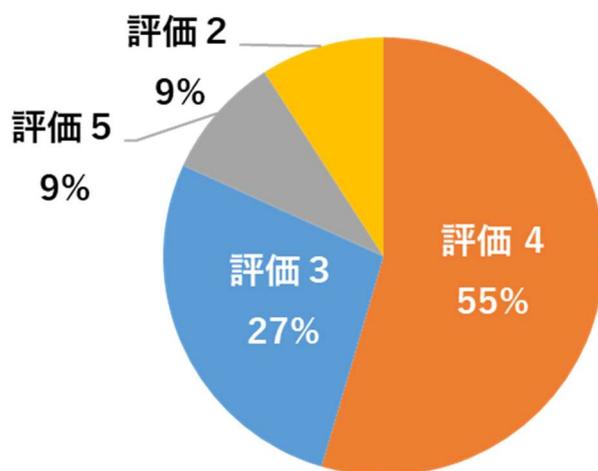
踏切異常時の映像をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。



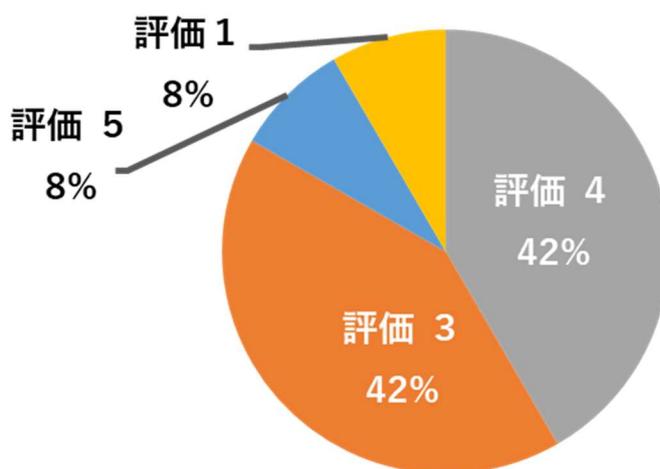
ホームからの転落、寄り付き、駆け込み乗車をリアルタイムで閲覧できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。



走行中の列車でタブレット端末を確認することで、
操業の妨げになることはありませんでしたか。



当システムの導入により、業務負担が増えるような
ことはありませんでしたか。



本システムを現場に導入すべきと感じますか。

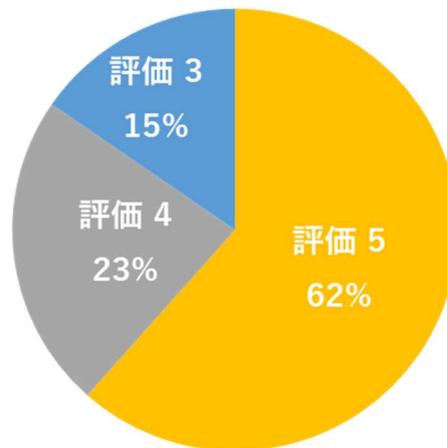


図 4.3.1-42 効果に関するアンケート結果(ソリューション①)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

・本実証実験にて検知した異常以外に、事前検知できれば安全性向上に寄与できる機能があれば記入ください。

- 線路上の置石等軌道上の危険物。
- ホーム上や踏切上で不審な動きをした人物。
- 列車在線中に列車とホームの間隙に落ちた人物や物。

【総合評価及び考察】

従来の踏切障害検知装置に比べ検知エリアが格段に増える等の安全性向上及び導入に対する評価値は非常に高かったが、操業の妨げといった業務負担の増加に対する懸念に対する評価値は低くなっていた。その中でも、運転手が映像の閲覧に気を取られかえって危険性が増すのではなど意見も得られたため、タブレット映像のUIの工夫などの課題を解決する必要があると思われる。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

・従来の音声のみでの乗客とのやり取りに比べ、状況把握の精度は向上したと感じますか。

評価値:4.14

・車掌と運転士が同じ動画を共有することで、平時より具体的な内容を報告ができると感じますか。

評価値:4.44

・乗務室で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。

評価値:4.41

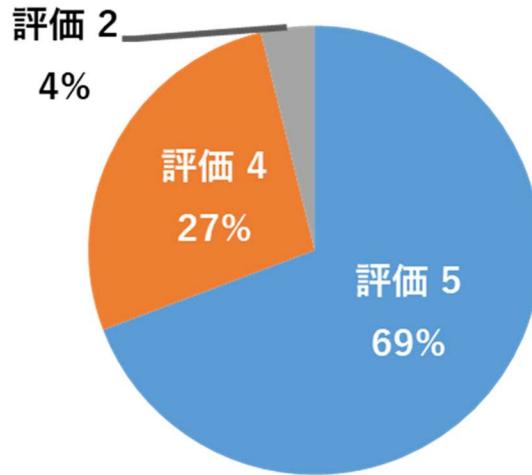
・運転指令で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。

評価値:4.62

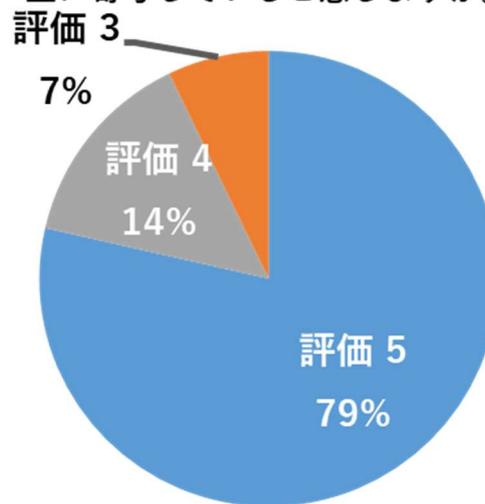
・本システムを現場に導入すべきと感じますか。

評価値:4.31

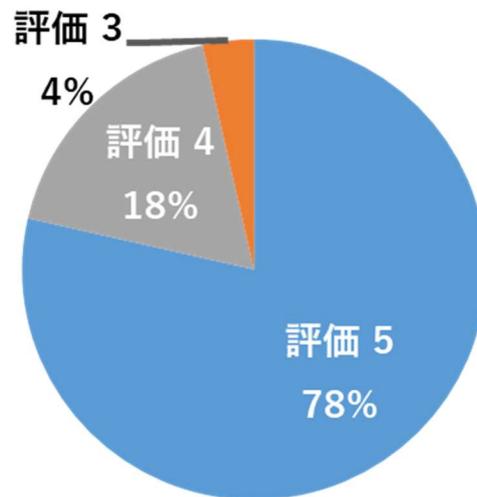
従来の音声のみでの乗客とのやり取りに比べ、状況把握の精度は向上したと感じますか。



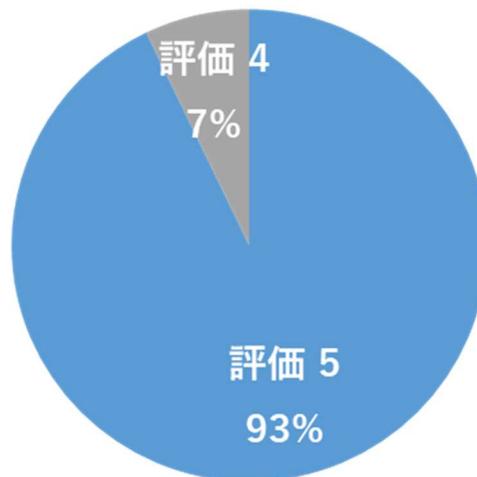
乗務室で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。



車掌と運転士が同じ動画を共有することで、平时より具体的な内容を報告ができると感じますか。



運転指令で現場状況が把握できることで、安全性の向上に寄与していると感じますか。



本システムを現場に導入すべきと感じますか。

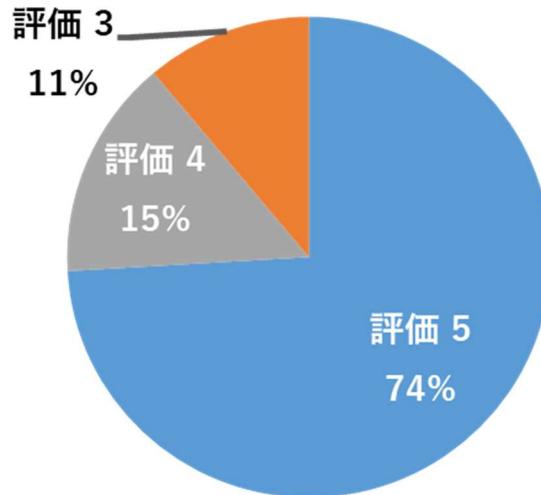


図 4.3.1-43 効果に関するアンケート結果(ソリューション②)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

・本実証実験にて検知した異常以外に、事前検知できれば安全性向上に寄与できる機能があれば記入ください。

- ドアロックの開閉との連携。
- 車内で不審な行動をしている人物。

【総合評価及び考察】

安全性向上及び導入に対する評価値は高く、その中でも、運転指令室で車内防犯カメラ映像を閲覧できることに対する評価が非常に高かった。理由として、運転指令は乗務員だけではなく各駅の運輸駅係員や本社部門との情報連携を司っており、乗務員の報告を待たず映像閲覧により車内の状況を事前に把握できるため、現場への助役手配といった対応速度が飛躍的に向上することがあげられる。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

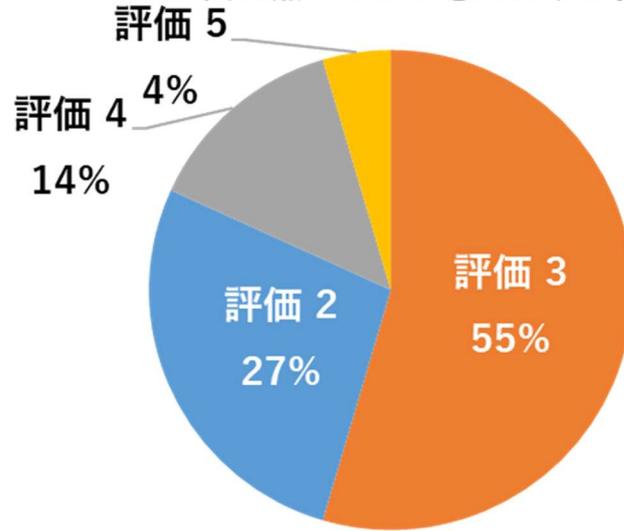
・AI 検知により判断された設備状況は目視確認した際と差異はなかったでしょうか。

評価値:2.92

・本システムを現場に導入すべきと感じますか。

評価値:3.79

AI検知により判断された設備状況は目視確認した際
と差異は無かったと感じますか。



本システムを現場に導入すべきと感じますか。

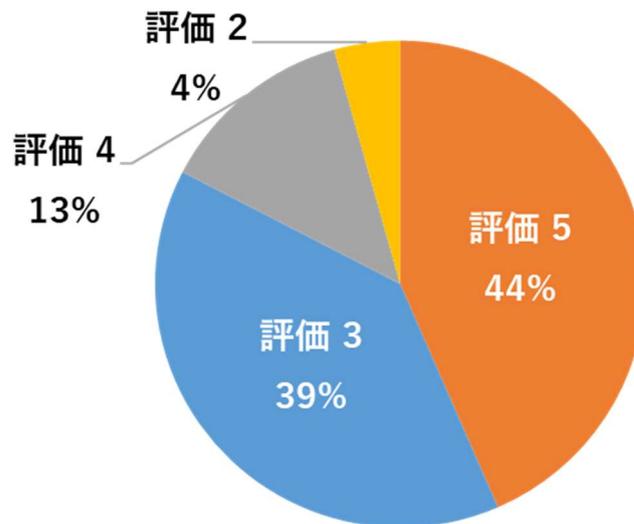


図 4.3.1-44 効果に関するアンケート結果(ソリューション③)

【利用者のコメント(一部抜粋)】

- ・AI 検知した方が優れていると感じた点があれば記入ください。
 - 動画で確認できることで、気になった部分がすぐ見返することができる。
 - AI の精度が上がれば見逃すリスクが少なく早期発見できる。
 - 例えば視野角の広いカメラを用いて本システムを実現できれば、人間の視野角や集中力には限界があるので、それをカバーすることができると感じる。

- ・今回検知した設備以外に検知できればさらなる省人化が見込める事例があれば記入ください。
 - カラスの巣の検知。
 - バランサの過剰伸縮
 - 沿線からの樹木や、防音シートの飛来危険予知など

【総合評価及び考察】

ソリューション①、②に比べ評価値は低かった。理由として、映像として記録できる点は良いものの、現状の画質だと細かい点を確認できず、故障の有無が確認できないといった点があげられた。しかし、課題を1つひとつクリアしていけば、人間の弱点を補助するツールとして保守点検業務の効率化や、将来的な保守人員不足の問題を解決しうるキラーコンテンツになりうるなど前向きな意見も得られたため、今回検知した設備以外の検知にも拡張し、実用に資するシステムを構築する。

(4) ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する総評

① 各ソリューションの導入により得られる効果とその実現性

・地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

即時性が求められるホーム上及び踏切道の安全確保においては、目標値以上の結果を得ることができた。また、AI の精度向上やアプリケーションの UI 改良などの課題はあるものの、さらなる鉄道の安全・安定輸送を実現するシステムとなりうる可能性を十分に認識できる結果が得られた。本実証事業では遅延のない映像データの伝送により危険をリアルタイムに通知できることが確認できたが、基地局とローカル 5G 端末の配置設計には見通しの確保などの配慮が必要であることがわかった。

・車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

社会的に要請のある車内防犯カメラの設置においては、現状の車内異常発生から関係各所への連携まで大幅な時間短縮が見込め、鉄道会社の課題である閉鎖的な車内環境における安全確保の解決に大きな可能性が感じられる結果が得られた。一方で、本実証事業においては、一部区間にて弱電界エリアが生じたことから、走行中の車上においては通信が安定しなかった。導入に向けては、走行する全区間にて通信が途切れないことが求められるため、ローカル 5G の電界強度やエリア化については課題が残る結果となった。

・車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

検知精度は想定より低い値となってしまったものの、車上カメラ映像をリアルタイムで閲覧できることにより保守部門への連携、現場への作業員の手配等の短縮が見込めることがわかった。通信環境が十分に整備されれば、映像データという大容量データをローカル 5G によって、場所を選ばず伝送できる結果が得られた。AI 検知精度については、省人化までに課題は残るものの、映像データの保管や遠隔地での確認など、現運用ではできないことが可能になることで、安全性や設備保安度の向上などの効果が期待できることがわかった。

② 導入に向け明らかとなった課題

表 4.3.1-38 の通り、ソリューション①③については満足度が、ソリューション②については有効性がそれぞれ目標値を下回るという結果であった。ソリューション②についてはローカル 5G の電界強度やエリア化の改善が課題であると考えられる。ソリューション①の満足度に関しては特に、関係各所でカメラ映像を閲覧するという事項に対し、「業務負荷が増えるのでは」「かえって安全性が低下するのでは」との意見も確認できたことから運用検証による課題が影響したと考えられる。これは現運用と大きく運用が異なってくることへの対応の難しさや新規アプリケーションへの対応が困難であるといった要因が背後にあり、運用面での整備やアプリケーション UI に対する工夫といったところに課題があることが明らかとなった。また、ソリューション③の沿線設備検知については、現状の検知精度だと点検の省力化は見込めないといった意見や、保守作業員のスキル低下につながってしまうのではないかとの意見もあげられ、現運用に併用させた形でアプリケーションを導入していくことに課題があることがわかった。また、ローカル 5G の実装に向けては、データ伝送の観点では実用性に大きな可能性が得られた一方、エリア化の難しさが明らかとなった。単純な信号のやり取り程度の通信であれば問題ない強度であっても、映像データの伝送には支障をきたすといった結果も見られた。安定した通信が可能な水準で、全線をエリア化するには設備構築に多大なコストを要することから、経済性にも配慮しつつ最適なエリア構築を実現していくことが今後の課題である。

③ 今後の予定

業務負担の増加等に関しては UI を工夫し利用者が使用しやすいシステムを構築することで解決を図る。具体的には運用検証の中でより直観性が高く誰でも使いやすいシステム構築には、運用に則したボタン配置や自動画面切替などの意見が出ていることから、課題実証のように現場係員へのヒアリング等を通して現場運用に則したシステム構築が求められている。また、沿線設備検知についてはサンプル数の増加やカメラ画質の変更(8K等)を行うことで、より正確な検知が可能か検証を行う。また、本検証では限られた駅や車内といった環境に加え、天候等も好条件ばかりでの実証に留まった。実装に向けては、夜間や荒天といった厳しい環境下での検証、対象をより広い路線や複数の車両に跨った検証を行うなど課題が多くあるため、実装に向け効率的に検証を進めていく必要がある。ローカル 5G の通信環境に関しては、最適なエリア構築に向けアンテナ向きの調整や移設による改善検討を進める。また、設備投資が過大とならない効率的な設計を行えるよう、電波伝搬シミュレーションと実測の差異や、周辺環境による影響等の分析を進め、設計精度の向上を図る。

4.3.2 ローカル 5G 活用モデルの実装性に関する検証

(1) 経済性・市場性の検証

1) 検証項目

経済性及び市場性に関する検証項目は以下のとおりである。

【経済性】

ローカル 5G 環境が整備された場合、従来の有線接続によるシステム構築と比べると配線設備やそれに伴う施工費用、継続的に発生する通信費、保守費等が削減できる可能性がある。そこで、従来のシステム構築方式と構築及び運用に要する費用の比較を行い、費用低減が見込めるか検証した。

【市場性】

本実証事業で得られた知見をまとめ、仮に他社へと展開を行った場合、鉄道会社全体のローカル 5G の発展に資することができるか検証した。

2) 検証方法

前述の検証項目を踏まえ、検証方法を以下に示す。

【経済性】

ローカル 5G 環境は構築済みであると想定し、既存の有線接続によるカメラ設置に発生する費用を、「材料費」「施工費」「通信費」「保守費」の観点で算出し比較を行った。

【市場性】

他の鉄道事業者へローカル 5G 及びその他 AI・IoT に関する取り組みについてヒアリングを行い、課題を抽出する。ヒアリングは以下の 3 点を重点に置いて実施した。

- ・ローカル 5G その他 AI・IoT 技術を活用している取り組み
- ・ローカル 5G その他 AI・IoT 技術に期待する効果
- ・現在の鉄道運営における課題(人手不足、安全性の向上等)

3) 検証結果及び考察

a. 経済性

ローカル 5G 活用時と既設環境活用時(有線接続)それぞれにおけるソリューション①②③に関する機器構成図及び概念図を図 4.3.2-1 から 4、及び費用を表 4.3.2-1 から 6 に示す。

①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

ローカル 5G 導入前にホームの異常検知等を行う環境を構築する場合、複数台のカメラ、ITV モニタ、電源線等の材料費だけでなくそれに付随する施工費も発生してしまう。ローカル 5G 導入後だと、LAN ケーブルの敷設等のみで対応でき、材料及び施工費を削減することができる。

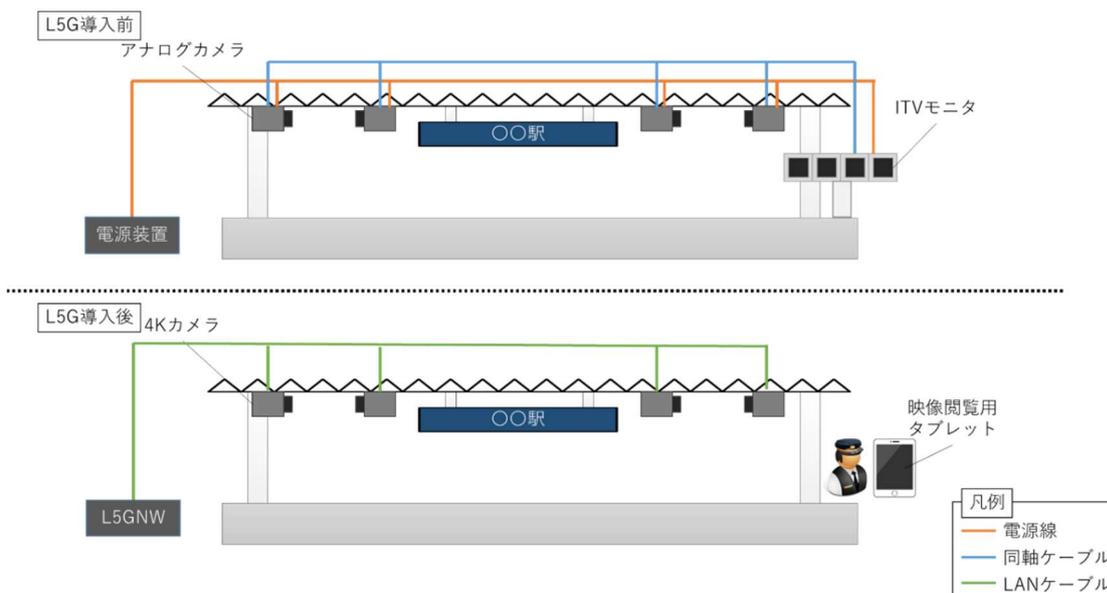


図 4.3.2-1 ローカル 5G 環境構築前後での機器構成図

表 4.3.2-1 材料費・施工費(既存方式)

項目	数量	単価	金額
材料費			
カメラ本体	10 台	100,000 円	1,000,000 円
ITV モニタ本体	2 台	150,000 円	300,000 円
ITV モニタケース	1 台	500,000 円	500,000 円
ITV 支持ポール	1 組	200,000 円	200,000 円
ITV 用遮光版	1 組	400,000 円	400,000 円
PoE HUB 本体	2 台	50,000 円	100,000 円
同軸ケーブル	300m	215 円	64,500 円
電源ケーブル	300m	290 円	87,000 円
LAN ケーブル	100m	120 円	12,000 円
電線管	300m	120 円	36,000 円
カメラ取付金物	10 個	200,000 円	2,000,000 円
ITV モニタ取付金物	1 組	100,000 円	100,000 円
エンコーダ	10 台	100,000 円	1,000,000 円
① 材料費計			5,687,500 円
施工費			
同軸ケーブル敷設	300m	450 円	135,000 円
電源ケーブル敷設	300m	380 円	114,000 円
LAN ケーブル	100m	380 円	38,000 円
電線管敷設	300m	920 円	276,000 円

項目	数量	単価	金額
エンコーダ、HUB 設置	2 人日	26,100 円	261,000 円
カメラ設置	4 人日	26,100 円	104,400 円
カメラ取付金物設置	10 か所	26,100 円	104,400 円
ITV モニタ設置	2 人日	26,100 円	52,200 円
ITV モニタケース設置	2 人日	26,100 円	52,200 円
ITV モニタ支持ポール設置	2 人日	26,100 円	52,200 円
ITV モニタ取付金物設置	2 人日	26,100 円	52,200 円
画角調整	4 人日	26,100 円	104,400 円
ITV システム取り込み	1 人日	26,100 円	26,100 円
②施工費計			1,372,100 円
①+②			7,059,600 円

表 4.3.2-2 材料費・施工費(ローカル 5G 利用時)

項目	数量	単価	金額
材料費			
カメラ本体	10 台	100,000 円	1,000,000 円
LAN ケーブル	300m	120 円	36,000 円
電線管	300m	120 円	36,000 円
PoEHuB	2 台	50,000 円	100,000 円
車掌用タブレット	1 台	200,000 円	200,000 円
カメラ取付金物	10 個	200,000 円	2,000,000 円
①材料費計			3,372,000 円
施工費			
カメラ本体取付	4 人日	26,100 円	104,400 円
カメラ取付金物設置	10 か所	26,100 円	104,400 円
PuEHuB 設置	2 人日	26,100 円	52,200 円
LAN ケーブル敷設	300m	380 円	114,000 円
電線管敷設	300m	920 円	276,000 円
画角調整	4 人日	26,100 円	104,400 円
ITV システム取り込み	1 人日	26,100 円	26,100 円
車掌用タブレットアプリ追加	1 人日	17,400 円	17,400 円
②施工費計			798,900 円
①+②			4,170,900 円

【総合評価及び考察】

今回の検証では一般的な対面式ホーム(課題実証を実施した芦屋駅と同様)をモデルとして検証を行った。従来の方法だと、各カメラ及び ITV モニタに同軸ケーブル、電源線を配線する必要があったが、ローカル 5G を活用し、IP カメラ及び ITV モニタの代替として車掌用タブレットを導入することで、1 駅あたり約 300 万円程度整備費を削減することができる。鉄道設備はそれぞれ独立した駅が多数存在している。効率的な運営を実施するため遠隔で監視することを想定すると、各駅への実装が必須であるが、阪神電気鉄道株式会社では 50 駅で営業しており、その全駅に設置する場合、削減効果はさらに得られると考えられる。これは同社に限らず、鉄道事業では多数の拠点を抱えたビジネスモデルであるため、同業他社に導入した場合も同様に効果を得られると考えられる。

②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

ローカル 5G 導入前後で機器、施工に特段変化はないが、ローカル 5G 導入前は各機器間の通信に一般のキャリア回線を使用している。ローカル 5G 導入後だと、構築したローカル 5G 環境を使用するため不要であり、通信費を大幅に削減可能である。

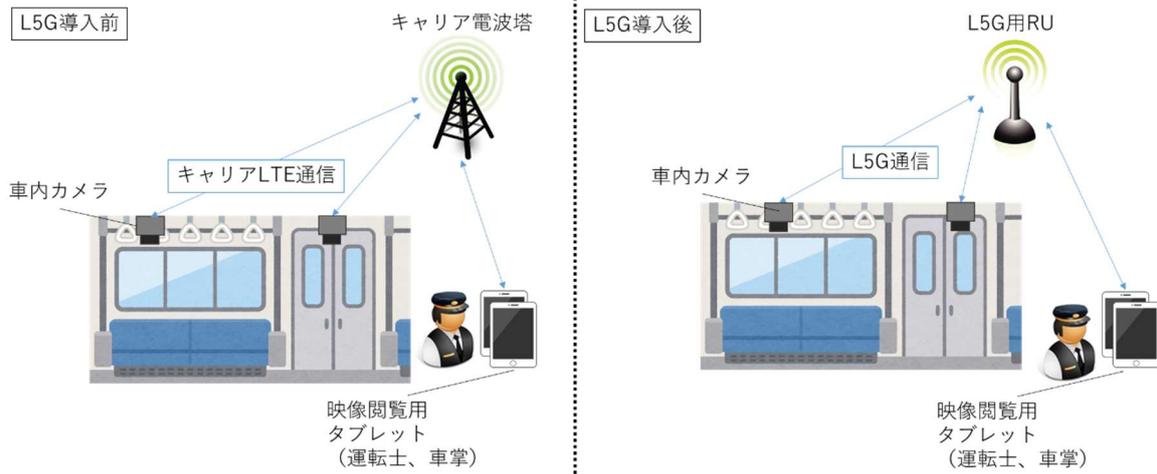


図 4.3.2-2 ローカル 5G 環境構築前後での機器構成図

表 4.3.2-3 通信費(既存環境活用時)

項目	数量	単価(月)	金額(月)
車内防犯カメラ	240 台	10,000 円	2,400,000 円
乗務員用タブレット	300 台	5,280 円	1,584,000 円
車上巡視用カメラ	10 台	10,000 円	100,000 円
計			4,084,000 円

【総合評価及び考察】

現在、阪神電気鉄道株式会社でキャリア回線を使用しているもしくは、使用予定がある機器に関する通信費を概算したところ、年間で 5,000 万円程度の通信費が発生している。ローカル 5G 網が整備された場合、自営網での通信が可能となるためこれら通信費を削減可能となる。前項同様これは同社に

限ったことではなく、今後効率的な運用が求められていく鉄道事業を行う同業他社であっても通信費の負担は大きく、削減効果を楽しむことは非常に大きなメリットであると考えられる。

③車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

現状、表 4.3.1-15 の点検に費やしている作業工数とローカル 5G 環境が構築されている前提で、保守作業の省人化を行うための材料費等の比較を行ったところ、表 4.3.2-4、5 のとおり削減可能な保守費で沿線設備検知の環境構築に発生する費用を十分に包括可能である。



図 4.3.2-3 現状の車上巡視点検

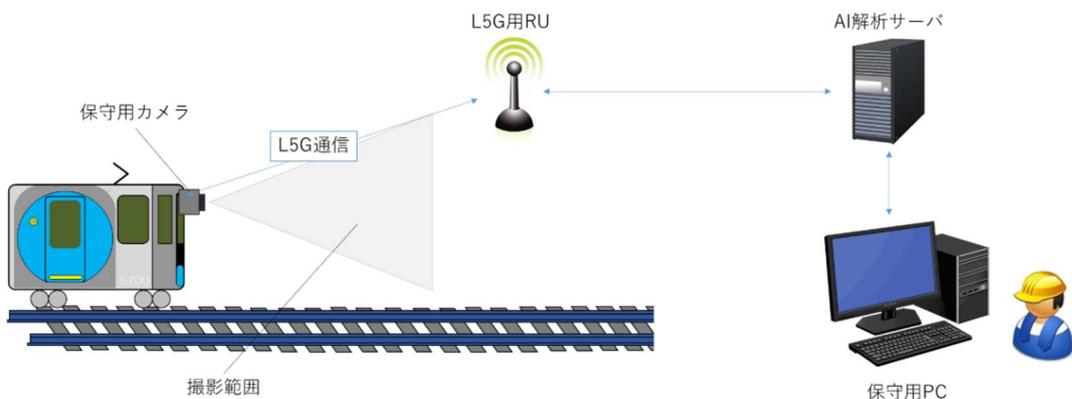


図 4.3.2-4 ローカル 5G 環境構築後の車上巡視点検

表 4.3.2-4 ローカル 5G 導入前後の保守費の比較

対象物		ローカル 5G 導入前		ローカル 5G 導入後	
		工数	労務費(年)	工数	労務費
電路 設備	き電線周 辺点検	39人	1,058,6161円	12人	325,368円
	電車線周 辺点検	35人	948,990円	2人	54,228円
	支持物周 辺点検	35人	948,990円	2人	54,228円
	電車線一 斉点検	53人	1,437,042円	4人	108,456円
信通 設備	電線路点 検	81人	2,196,234円	66人	1,789,524円
計		243人	6,588,702円	86人	2,331,804円

表 4.3.2-5 材料費・施工費(ローカル 5G 活用時)

項目	数量	単価	金額
材料費			
保守用カメラ	10台	200,000円	2,000,000円
保守用PC	1台	200,000円	200,000円
①材料費計			2,200,000円
施工費			
カメラ本体取付	10台	17,400円	174,000円
画角調整	10台	17,400円	174,000円
②施工費計			348,000円
①+②			2,548,000円

【総合評価及び考察】

表 4.3.2-4 より、本実証事業で部分的に実装した設備検知を電路設備全体に機能拡充することで、電路設備保守点検を中心として、年間 400 万円程度の削減が見込まれる。電路設備の点検は複数の項目を同時に行っていることから、今後の計画で想定している段階的な導入による段階的な経済効果の発現は難しいものの、保守係員による点検と並行運用する期間を設けることで、設備の保安度向上効果を得ながら、ソリューションの精度向上に向けたチューニングにより表 4.3.2 4 で記載している設備以外の、軌道の保守を実施している保線部門、トンネル等沿線の施設を保守・管理している施設部門への展開による、さらなる保守の効率化が期待できる。なお、表 4.3.2-5 のように、車両前方等に設備撮影用のカメラを設置する必要があるが、車内通信方法に Wi-Fi を織り交ぜるなど工夫し、多大な費

用を要する施工費を抑制することで、労務費の削減によりカバーできる範疇内に収められる可能性が十分に感じられる。

表 4.3.2-6 トータル削減効果

項目	ローカル 5G 活用時	既設環境活用時	備考
材料費	35,920,000 円	56,875,000 円	カメラ設置 10 駅展開時
施工費	8,337,000 円	13,721,000 円	カメラ設置 10 駅展開時
保守費	2,331,804 円/年	6,580,702 円/年	
通信費	0 円/年	49,008,000 円/年	
計※	67,575,040 円	626,475,000 円	※10 年使用時の合計

【総合評価及び考察】

通信費の削減効果が最も大きく、10 年間運用場合、約 5.5 億円の削減効果が期待できる。また、ホーム安全対策のカメラ整備範囲を拡大すると削減効果はさらに期待できる等、ローカル 5G 網を整備すると様々な費用が削減できることが本課題実証にて得られた。

b. 市場性

普及展開にあたってのターゲットとなる鉄道事業者である阪急電鉄株式会社、近畿日本鉄道株式会社、南海電気鉄道株式会社、京阪電気鉄道株式会社、大阪市高速電気軌道株式会社、神戸市交通局、泉北高速鉄道株式会社(順不同)に協力いただき、ヒアリングを実施した。鉄道運営にあたっては、各社概ね課題認識は共通しており、特に将来の人手不足や設備老朽化への対策を課題として捉えていることが浮き彫りとなった(図 4.3.2-5)。また、ヒアリング結果は、本実証事業において検証したソリューションで解決可能な課題と整合しており、需要を見込めるといえる。一方で、ローカル 5G の導入に関しては、各社ともに関心はあるが明確な利活用方法や効果の具体化ができず、現状では多くの事業者が検討できていないことがわかった(図 4.3.2-6)。本実証事業の結果により、具体的な利活用方法や想定される効果を訴求ことで検討を加速させることが期待される。訴求するための手段として、鉄道事業者向けの展示会である「鉄道技術展」へ出展し業界に対して広く周知することや、日頃の鉄道事業者に対する営業活動、情報交換の中で実績を紹介する機会を設け、ローカル 5G の活用に向けた動機づけを個別にも実施する。

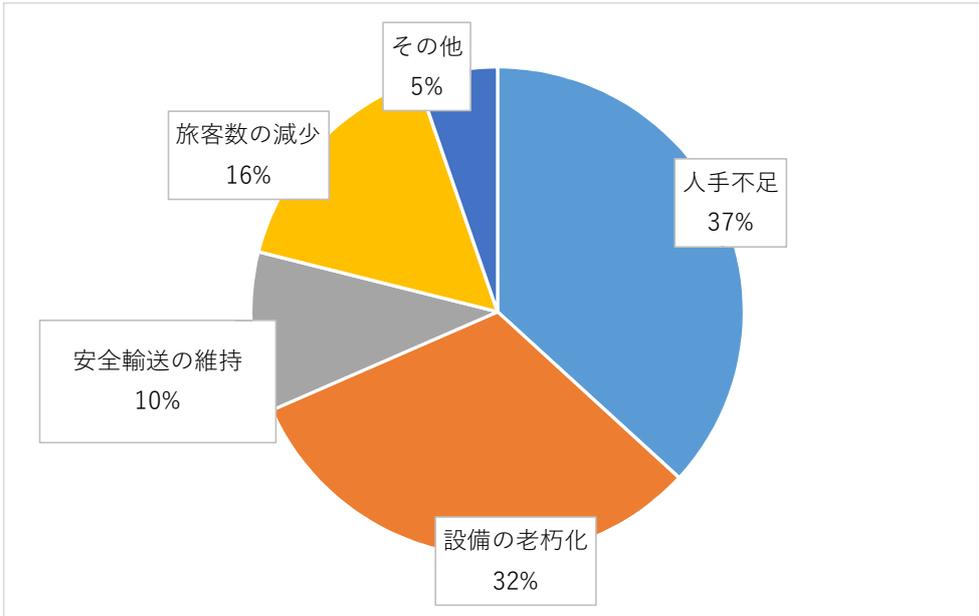


図 4.3.2-5 鉄道運営における課題(N=19、複数回答あり)

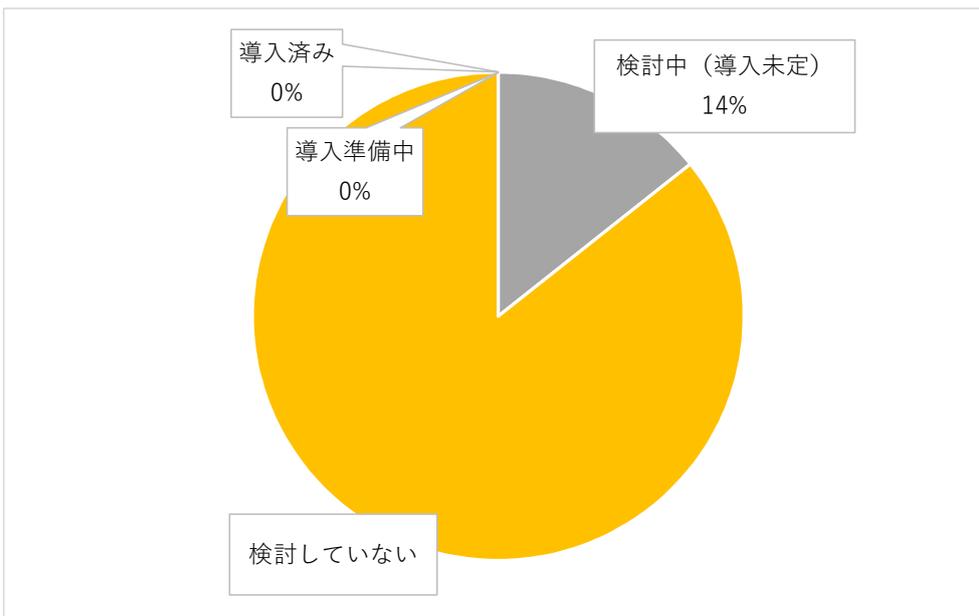


図 4.3.2-6 ローカル 5G 導入に関する検討状況(N=7)

(2) 運用スキーム・ビジネスモデルの検討

1) 検証項目

4.1.3 章(2)に示したケーブルテレビ事業者との連携において、想定するサービス提供モデルを図 4.3.2-7 に示す。本モデルの実装・横展開に向けた検証項目は以下のとおり。

①多様な環境条件への適応性

線路形状や周辺環境が異なる場合においても、他者土地へ影響を及ぼさない、かつ線路上全体を効果的にカバーできるエリア設計手法に関するノウハウを蓄積できるか

②ケーブルテレビ事業者によるローカル 5G インフラ運用の可能性

全国の鉄道事業者がローカル 5G を活用するにあたって、各地のケーブルテレビ事業者がローカル 5G インフラの担い手になりうるか。

③クラウド化の適用範囲

2.4 章で述べた要件を満たす範囲内で、システムのクラウド化をどの程度進められるか。

④ユーザとなる鉄道事業者の意向

想定しているビジネスモデルが鉄道事業者の意向に沿ったものであるか。

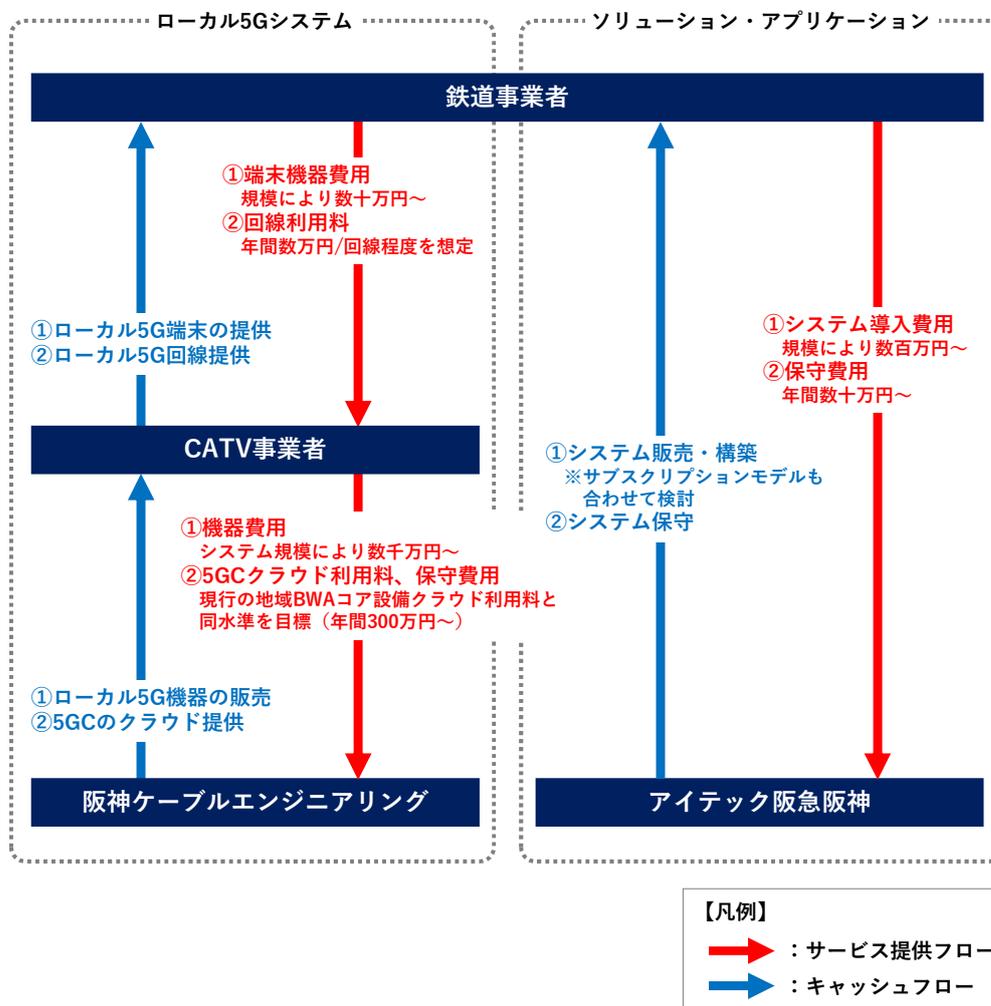


図 4.3.2-7 想定するサービス提供モデル

2) 検証方法

前述の検証項目を踏まえ、検証方法を以下に示す。

①多様な環境条件への適応性

3章の技術実証の結果を踏まえ、エリア設計を担う阪神ケーブルエンジニアリング株式会社のエンジニアにヒアリングを行う。ヒアリング観点は以下のとおり。

- ・本実証事業の成果から、他の鉄道事業者の路線においてもエリア設計を行えるか
- ・本実証事業において検証したほか、検証すべき環境条件はあるか

②ケーブルテレビ事業者によるローカル 5G インフラ運用の可能性

地域 BWA インフラの運用、活用において、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社と協業関係にある全国各地のケーブルテレビ事業者に対して、以下の観点でヒアリングを行う。なお、ローカル 5G インフラを継続的に運用するためには、特に事業採算性が重要と考えられることから鉄道事業者への回線サービス提供に留まらず、自治体へのサービス提供等、当該地域にて広く展開の可能性を模索するとともに、より実現可能性の高いサービス提供モデルがないかヒアリング結果を踏まえ検討する。また、一事業者ごとのヒアリングだけでなく、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社が主催する地域 BWA システムを運用しているケーブルテレビ事業者を集めた意見交換会等を活用し、複数事業者間での意見交換を実施することでケーブルテレビ業界としての意見や課題の抽出も行う。

- ・ローカル 5G インフラの導入、活用に関して既に取り組んでいるか
- ・ローカル 5G インフラの導入、活用に対して関心があるか
- ・ローカル 5G インフラの導入、活用にあたって課題と考えることは何か
- ・想定するサービス提供モデルで事業化可能か(展開先の見込みがあるか、採算が取れるか等)

③クラウド化の適用範囲

3章及び4章の結果を踏まえ、ローカル 5G の通信性能を整理したうえで、ベンダとも連携を図りながらクラウド化可能な範囲を検討する。特に、本実証事業においては遅延が重要な指標となっていることから、5G の C/U 分離技術を活用し、C-Plane の処理部分のみクラウド化する等、遅延への影響を最小限に抑える観点で検討を進める。また、クラウド化可能なシステムについてはサブスクリプション型での提供方式を検討する。

④ユーザとなる鉄道事業者の意向

鉄道事業者へのアンケート調査を通じて、以下の観点でヒアリングを行い、ローカル 5G インフラ保有の意思があるか等について確認する。ヒアリング結果を踏まえて想定しているビジネスモデルを適宜修正する。

- ・他社の整備したローカル 5G を回線利用することは問題ないか
- ・ローカル 5G インフラの運用主体は、自社もしくは他社いずれが望ましいか

3) 検証結果及び考察

各検証項目に対する結果は以下のとおり。

①多様な環境条件への適応性

基地局の配置設計や施工を行った 20 代から 40 代の作業員にヒアリングを実施。ヒアリング結果は表 4.3.2-7 のとおり。本実証実験においては、インフラ設計上の難しさや課題を認識し、ノウハウを蓄積できたものの、今後の実装・普及展開に向けてはまだ十分ではなく、異なる環境下における継続的な検証が必要である。

表 4.3.2-7 ヒアリング結果

設問	回答
他の鉄道事業者の路線においてもエリア設計を行えるか	<ul style="list-style-type: none"> ・本実証事業の環境における結果だけでは、全てを網羅できておらず、他路線で正確な設計を行うことは難しい。しかし、電波の指向方向(向きやチルト角)において、3 次元的な細やかな考慮が必要な点などのノウハウは蓄積できた。 ・本実証事業に近い環境であれば、おおよそ設計可能と思われる。ただし、環境が異なる場合や使用する製品が異なる場合は、シミュレーションやフィールドテストなどにより検証しながら設計を行う必要があると考える。
本実証事業において検証したほか、検証すべき環境条件はあるか	<ul style="list-style-type: none"> ・本実証事業では、高架上から地上へ向けての電波発射を行ったが、地上から高架上に向けて電波を発射した場合の特性の把握も必要と考える。 ・トンネルや地下区間など閉鎖空間における電波伝搬特性も検証が必要。 ・本実証事業では、周辺が市街地であったため建物からの電波の発射が見られたが、山間部などの環境は追加で確認が必要。

②ケーブルテレビ事業者によるローカル 5G インフラ運用の可能性

表 4.3.2-8 に示すケーブルテレビ事業者 28 社に協力いただき、アンケートによるヒアリングを実施した。アンケート結果は図 4.3.2-8 から図 4.3.2-10 のとおり。

ローカル 5G に対する検討状況については、導入済みの事業者も含め 75%の事業者が導入や利活用に向けて取り組んでおり、業界としての注目度の高さがうかがえる。一方で、現在は検討していない事業者の理由としては、他社事例を見ながら時期を見て検討を始める、現状の社内人員では検討にかかるリソースを割けない等があげられた。

ローカル 5G 導入にあたっての課題としては、コスト面が 50%を占め、続いて利活用方法を見いだせない点が 26%であった。その他の理由として、社内体制の構築、自己土地利用主体の免許制度やローカル 5G 端末の製品ラインナップが乏しいことがあげられた。

想定するサービスモデルへの意見としては、一部先行投資として積極的に事業化を進める意向の事業者も存在するが、採算が取れるなら事業化可能という意見が過半数を占めた。採算を取れるかどうかに関しては、図 4.3.2-9 で見られるコストに対する課題意識もあり、鉄道事業者へ対する回線提供

だけでは収支が見合うとは考えにくい。という意見が多かった。採算を取るための手段として一般コンシューマ向けのサービスを並行して展開する等があげられたが、現状の免許制度においては広域的にサービス展開することが難しい課題もある。結果的に、想定するサービスモデルを実現するためには、免許制度や鉄道事業者が利用する回線数の増加等、採算が取れる事業環境が整うことが条件となる。

表 4.3.2-8 アンケートに協力いただいたケーブルテレビ事業者一覧(五十音順)

No.	社名	本社所在地
1	株式会社アイ・シー・シー	愛知県一宮市
2	株式会社秋田ケーブルテレビ	秋田県秋田市
3	株式会社飯田ケーブルテレビ	長野県飯田市
4	伊那ケーブルテレビジョン株式会社	長野県伊那市
5	入間ケーブルテレビ株式会社	埼玉県入間市
6	株式会社上田ケーブルビジョン	長野県上田市
7	株式会社大垣ケーブルテレビ	岐阜県大垣市
8	金沢ケーブル株式会社	石川県金沢市
9	近鉄ケーブルネットワーク株式会社	奈良県生駒市
10	K ビジョン株式会社	山口県下松市
11	ケーブルテレビ株式会社	栃木県栃木市
12	株式会社 CCJ	三重県四日市市
13	株式会社シー・ティー・ワイ	三重県四日市市
14	株式会社シティーケーブル周南	山口県周南市
15	上越ケーブルビジョン株式会社	新潟県上越市
16	株式会社 ZTV	三重県津市
17	多摩ケーブルネットワーク株式会社	東京都青梅市
18	株式会社ちゅピ COM	広島県広島市
19	株式会社ちゅピ COM おのみち	広島県尾道市
20	西尾張シーエーティーヴィ株式会社	愛知県津島市
21	日本海ケーブルネットワーク株式会社	鳥取県鳥取市
22	ひらた CATV 株式会社	島根県出雲市
23	株式会社ベイ・コミュニケーションズ	大阪府大阪市
24	松阪ケーブルテレビ・ステーション株式会社	三重県松阪市
25	ミクスネットワーク株式会社	愛知県岡崎市
26	三原テレビ放送株式会社	広島県三原市
27	株式会社ラッキータウンテレビ	三重県桑名市
28	株式会社嶺南ケーブルネットワーク	福井県敦賀市

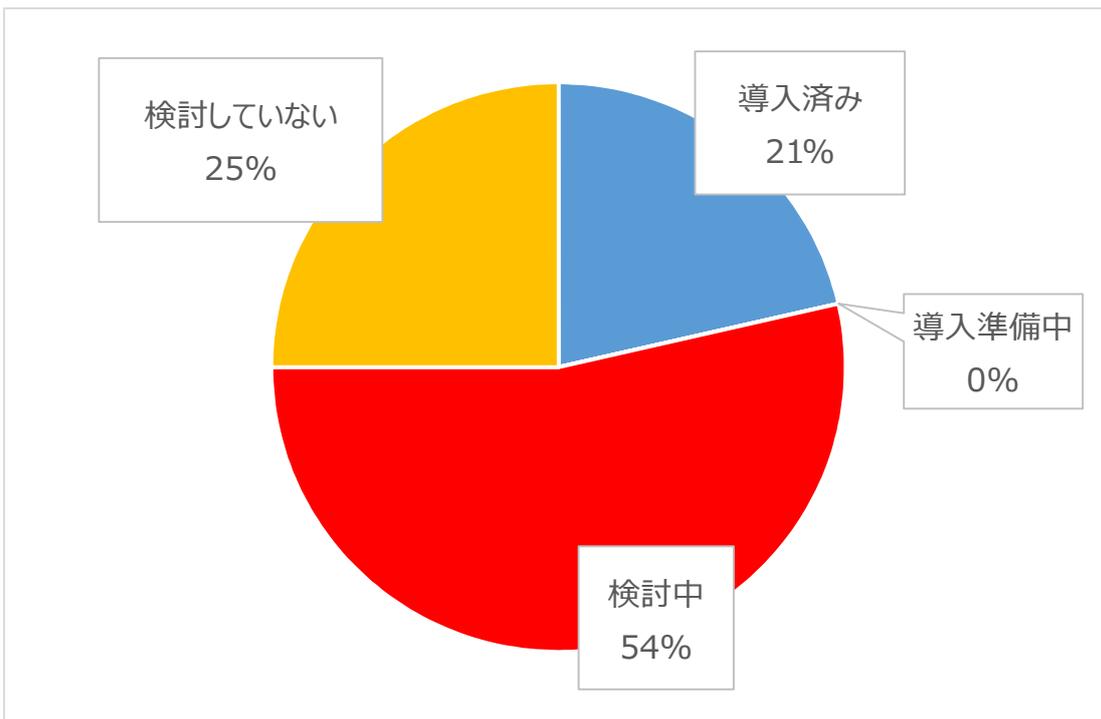


図 4.3.2-8 ローカル 5G の導入、活用に取り組んでいるか(N=28)

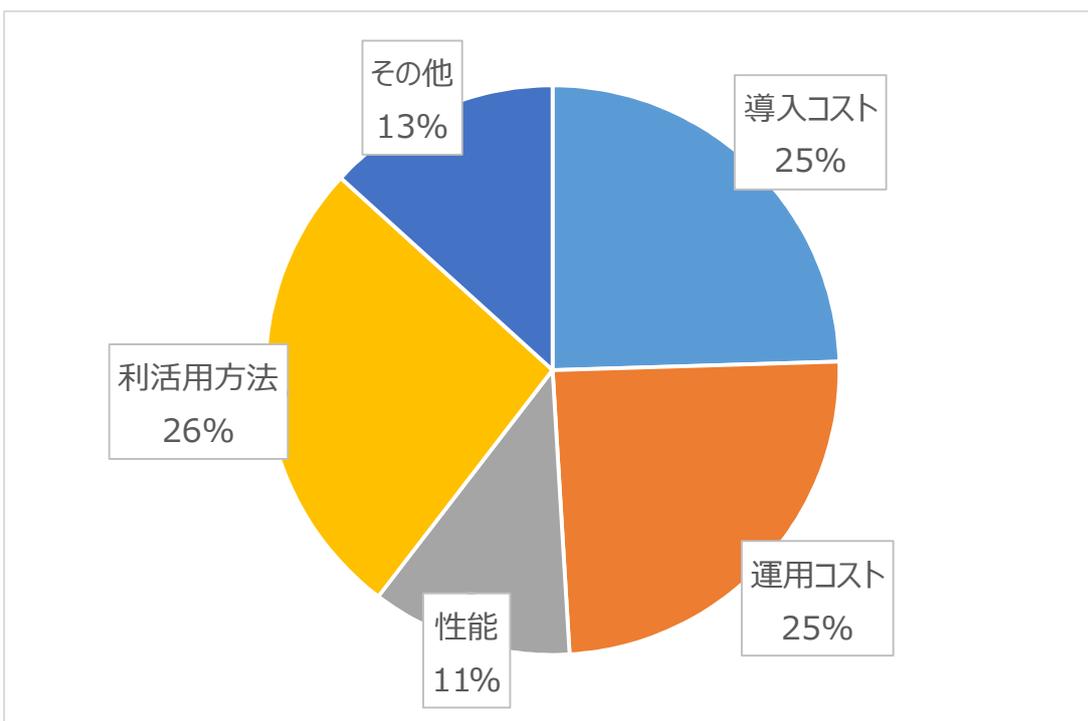


図 4.3.2-9 ローカル 5G の導入にあたっての課題は何か(N=53、複数回答あり)

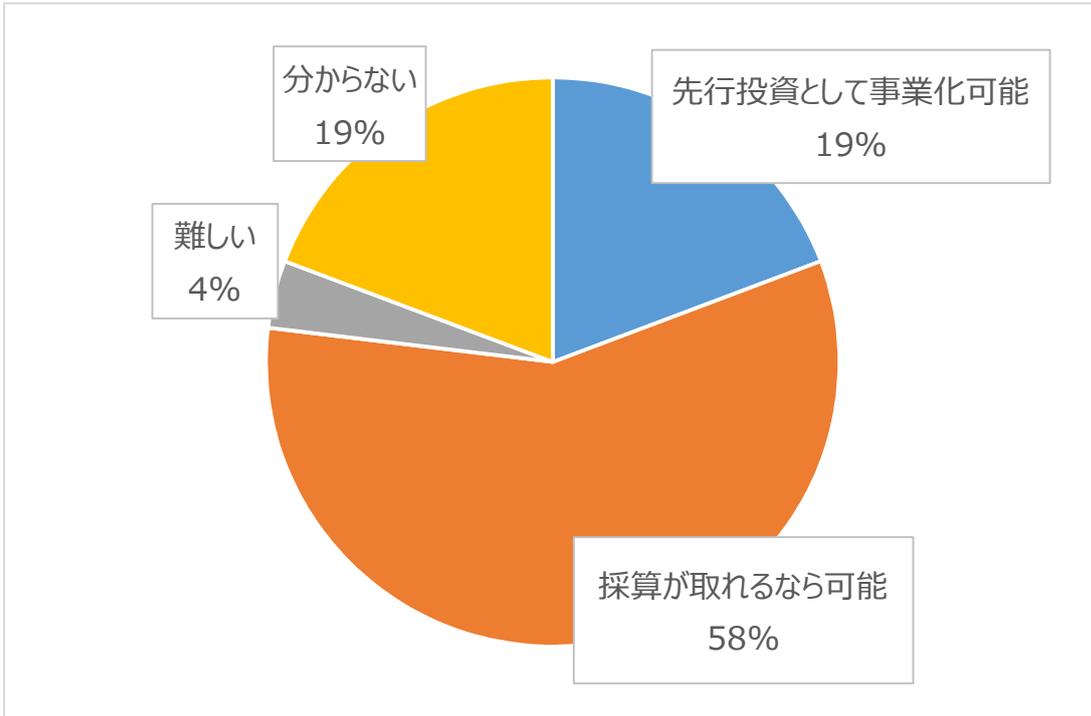


図 4.3.2-10 想定するサービスモデルで事業化可能か(N=26)

③クラウド化の適用範囲

ここでは、AWS 上へのシステム構築を例として、遅延の観点からクラウド化可能なシステムの機能を検討する。AWS 上にシステムを構築した場合の遅延時間を AWS の公式ツールである「AWS Global Accelerator Speed Comparison tool」(<https://speedtest.globalaccelerator.aws/#/>)を用いて測定する。測定条件及び測定結果は表 4.3.2-9、表 4.3.2-10 のとおり。4.3.1 章(1)の結果から、ローカル 5G の通信遅延やシステムに係る処理時間等を含めた全体の遅延は、ローカル 5G の通信環境が十分に整備できたと想定して 950 ミリ秒程度であるため、通信遅延の要件が 1 秒(1,000 ミリ秒)以内であるソリューション①については、ローカル 5G の UPF や AI 解析用サーバ等のデータ処理に係る機能を AWS 上に実現することが難しいことがわかる。以上を踏まえ、遅延の観点においては、ローカル 5G のデータ処理以外の機能やソリューション②及びソリューション③の各サーバをクラウド化の適用可能範囲と考える(図 4.3.2-11)。

ここでは、前述のクラウド化適用可能範囲とユーザ視点の利便性を踏まえサブスクリプション型でのサービス提供対象について述べる。5GC については、本実証実験の規模であっても初期費用として構築に 50,000 千円程度かかり、運用にあたってはコストやノウハウが特に多く必要な設備であることから、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社にて構築し、月額数十万円程度のサブスクリプション型のサービスとして提供し、複数ユーザで共用することを検討する。これにより、ユーザの設備投資負担を軽減し、ローカル 5G の導入障壁を下げる。また、クラウド上の EMS によって全てのユーザが運用する基地局等のローカル 5G 関連設備を阪神ケーブルエンジニアリング株式会社にて監視することで、ユーザの運用負担の軽減も図る。また、ソリューション②については、ユーザが車内防犯カメラを小規模導入から始め、徐々に台数を増やしスケールアウトしやすいよう、映像管理サーバについてはサブス

クリプション型での提供を基本とする。ソリューション③については、遅延の観点においてはクラウド化可能であるが、サーバにおける AI の解析処理にかかる負荷が大きく、複数ユーザで AI 解析サーバを共用することが難しいことが予想されることから、オンプレミスでの提供を基本とする。

表 4.3.2-9 AWS リージョンとの通信遅延の測定条件

送信先	国内にシステム構築することを想定し、以下リージョンに対して測定する。 東京リージョン、大阪リージョン
送信元	送信元によって遅延時間が異なることから以下複数地点から測定する。 東京 2 か所、大阪 1 か所(計 3 か所)
測定回数	各リージョンに対し、10 回/送信元(計 30 回)
送信パケットサイズ	50KB

表 4.3.2-10 AWS リージョンとの通信遅延の測定結果

送信先	遅延(ミリ秒)		
	最小値	平均値	最大値
東京リージョン	49	107.0	196
大阪リージョン	71	105.3	189
全体	49	106.2	196

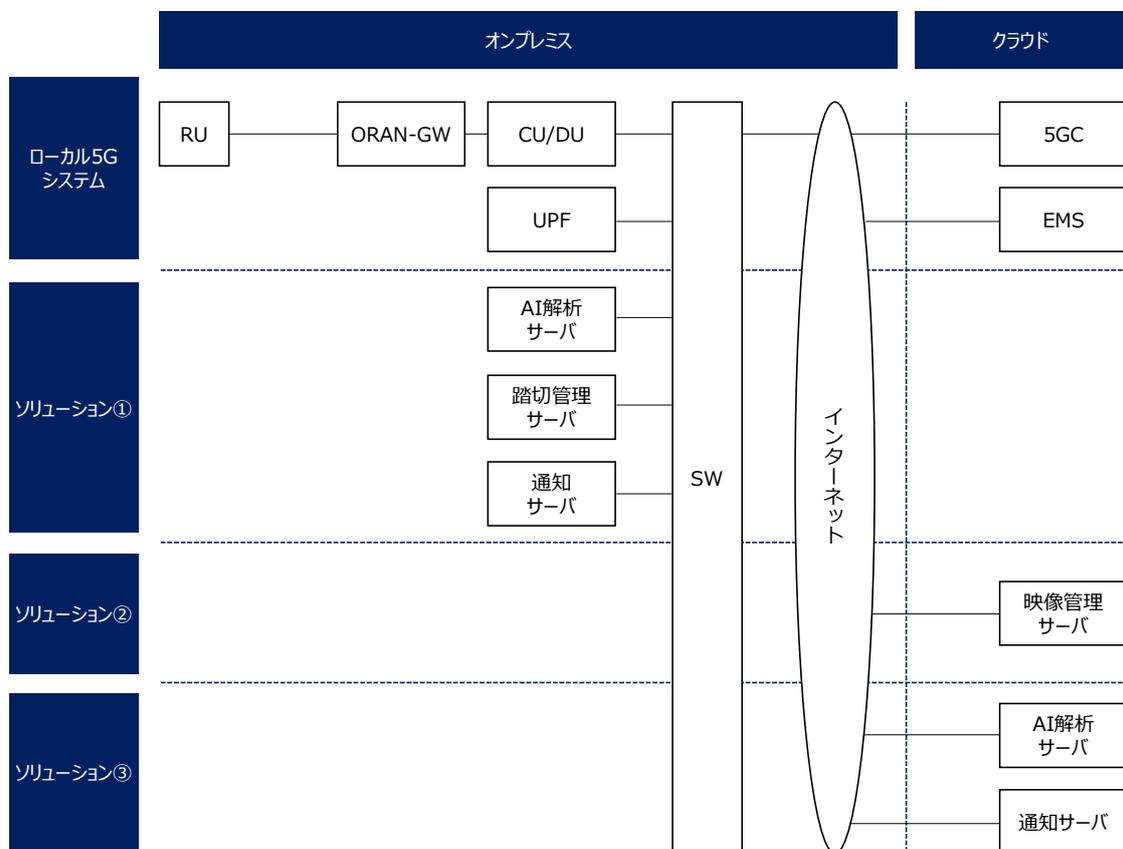


図 4.3.2-11 遅延の観点によるクラウド化の適用範囲イメージ

④ユーザとなる鉄道事業者の意向

4.3.2 章(2)と同様に鉄道事業者 7 社に対し、ヒアリングを行った(表 4.3.2-11)。他社のローカル 5G 回線を利用することに対しては、一部セキュリティの観点から難しいという意見があったものの多くの事業者が用途、通信の品質やサービスレベル等の条件を満たせば問題ないという意見であり、ケーブルテレビ事業者が整備したローカル 5G の回線を利用することに対しては、実現可能性があるといえる。また、ローカル 5G インフラの運用に関する意向としては、当初想定通りノウハウや体制の構築が難しいことから他社を利用することが望ましいという回答がある一方で、セキュリティや自社の技術力維持の観点から自社で運用する方が望ましいという回答もあり各社各様の姿勢であった。

普及展開にあたっては、ケーブルテレビ事業者でローカル 5G のインフラ整備を行うモデルに限らず、ユーザである鉄道事業者の意向を踏まえて適切なモデルを提案することが必要となる。

表 4.3.2-11 ヒアリング結果

設問	回答
他社の整備したローカル 5G を回線利用することは問題ないか	<ul style="list-style-type: none"> ・運転保安に直結する用途でなければ、現在も公衆回線を利用している物があるため問題ない。ただし、災害や障害発生時の輻輳や復旧時間などが他社設備であると予測しづらい懸念はある。 ・通信の秘匿性や必要な通信帯域の確保が可能であれば問題ない。 ・情報セキュリティ上、他社回線の利用は難しい。
自らローカル 5G インフラを運用する意向はあるか、他社を利用(回線利用、他社へ運用委託)する方が望ましいか	<ul style="list-style-type: none"> ・技術力低下を防ぐため、自社で運用することが望ましい。 ・情報セキュリティの観点から自社で運用することが望ましい。 ・自社でノウハウを蓄積し運用体制を構築することは難しいため、他社を利用するのが望ましい。 ・自社で運用できることが理想ではあるが、労働力の減少により体制を構築することが困難になることを踏まえると他社を利用するのも選択肢としてありうる。

(3) ローカル 5G 活用モデルの構築

1) ローカル 5G 活用モデルの全体像

a. ターゲット

本ローカル 5G 活用モデルの実装においては、4.1.2 章で示した当初仮説通り、本実証コンソーシアムの構成員でもあり実証環境を提供している阪神電気鉄道株式会社をユーザとし、同社路線内での導入検討を進める(表 4.3.2-12)。なお、ローカル 5G や AI システム等の構築・運用に際しては専門的なノウハウや保守体制が必要となるが、鉄道事業者が短期間で一から体制を構築し、ノウハウを持つ人材を確保することは困難であると考えられることから、同社グループ会社でもあるアイテック阪急阪神株式会社及び阪神ケーブルエンジニアリング株式会社と連携し実装を進める。

表 4.3.2-12 想定する具体的なターゲット

ユーザ名	阪神電気鉄道株式会社
導入候補地域	・阪神本線(大阪府大阪市、兵庫県神戸市、芦屋市、西宮市、尼崎市) ・阪神武庫川線(兵庫県西宮市) ・阪神なんば線(大阪府大阪市、兵庫県尼崎市)

b. 対象となるシステム

ローカル 5G 活用モデルの対象となるシステムの全体像を図 4.3.2-12 に示す。また、システムの機能要件、非機能要件をそれぞれ表 4.3.2-13 及び表 4.3.2-14 に示す。

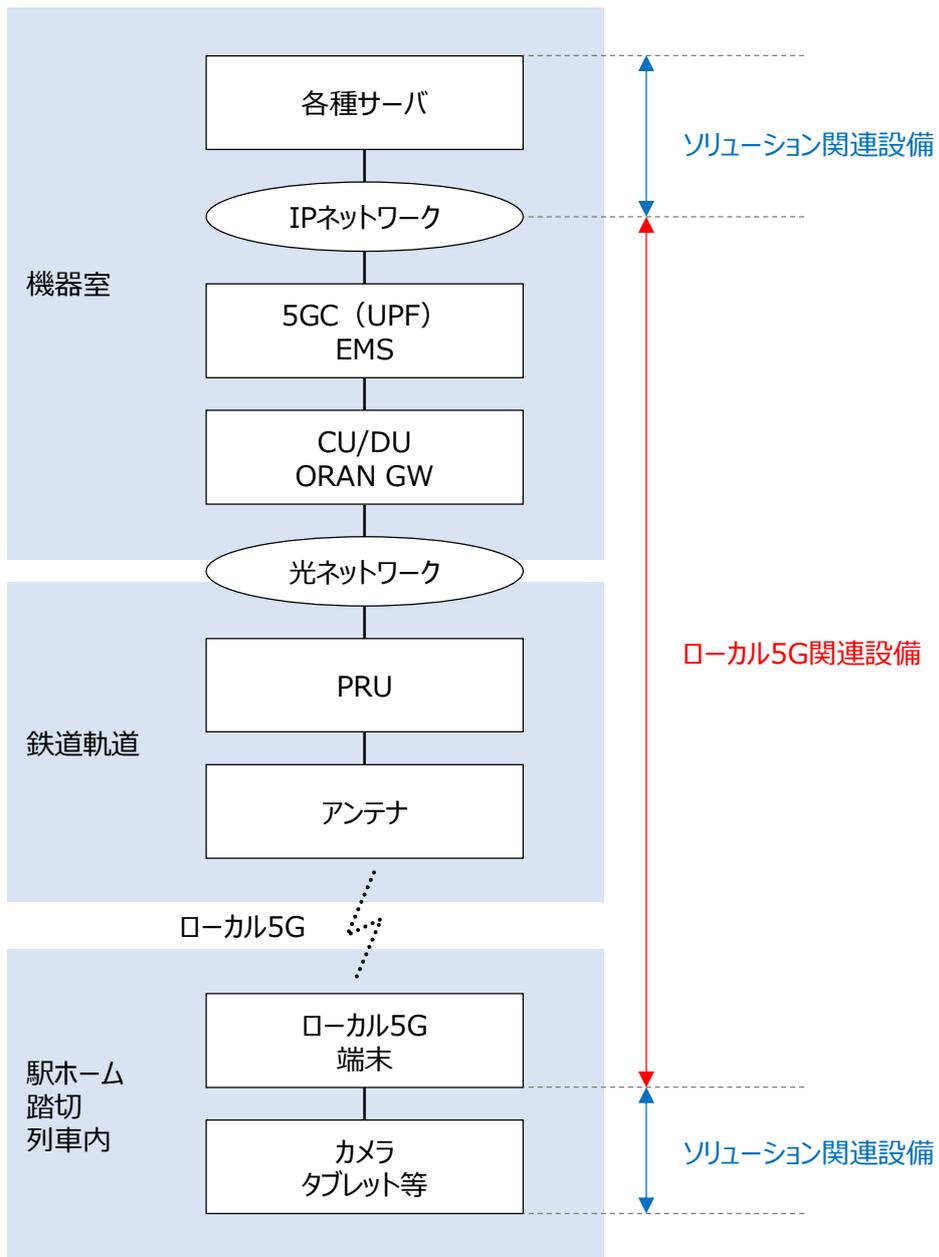


図 4.3.2-12 システムの全体像

表 4.3.2-13 システムの機能要件

区分	項目	要件
完全性	パケットロス率	1%以下
	車内防犯カメラの映像及び音声の品質	映像のかくつきや音声の途切れが目立たず、車内状況の把握に支障がないこと
安定性	スループット	【ソリューション①】 ・上り伝送帯域:18Mbps 【ソリューション②】 ・上り伝送帯域:36Mbps ・下り伝送帯域:36Mbps 【ソリューション③】 ・上り伝送帯域:40Mbps
	ジッタ	10 ミリ秒以下
	ハンドオーバー性能	通信が途切れずハンドオーバー可能であること
	AI 検知精度	【ソリューション①】 ・検知率: 100% (特に踏切における立往生やホームからの転落等、事故に直結する事象について) ・誤検知率:1%未満 【ソリューション②】 ・AI を利用しないため該当なし 【ソリューション③】 ・検知率:95%前後で安定すること
即時性	通信遅延	200 ミリ秒以下
	システムに係る処理時間	700 ミリ秒以下

表 4.3.2-14 システムの非機能要件

区分	要件
操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・緊急の場合においても的確に扱える必要があることから、操作誤りを起こしづらい使いやすいシステムであること。 ・即時対応が求められる状況における使用が考えられることから、システムの応答時間は迅速であること。
可用性	安定稼働のため、無停電装置の導入やシステムの冗長化等によりシステムの停止時間を短縮(可能な限り排除)する対策を施すこと。
拡張性	<ul style="list-style-type: none"> ・カメラの台数やタブレットの台数を容易に低コストで追加可能であること。 ・上記追加時に通信回線の容量の逼迫により機能要件を下回る性能低下が発生しないこと。 ・駅、踏切及び走行列車等、様々な利用場所で安定して通信が可能であること。
保守性	システムの監視や障害対応に対する体制が整備されていること。
セキュリティ	カメラ映像など個人情報を含むデータを取扱うことから、アクセス制限、データの秘匿等の対策が施されていること。

c. ビジネスモデル

ローカル 5G 活用モデルにおいて想定するビジネスモデルについて、当初仮説では、実装においては阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、普及展開においては各地のケーブルテレビ事業者がローカル 5G のインフラ構築(設備投資)を行い、ローカル 5G 活用モデルのユーザである鉄道事業者をはじめ、地域の自治体など幅広く回線提供を行うことで、回線利用料によって投資回収を行う(以下「CATV 事業者投資モデル」という。)ことを想定していた(図 4.3.2-13)。

一方で、コンソーシアム内での検討や意見聴取を進める中で、現状の事業環境においてはケーブルテレビ事業者がインフラ投資を行い、採算を取ることは難しいことや鉄道事業者に自らインフラ運用する意向があることがわかったため、鉄道事業者が自ら専用の通信インフラとしてローカル 5G に関する設備投資及び運用を行うモデル(以下「鉄道事業者単独モデル」という。)と鉄道事業者が設備投資を行い、設計構築や運用保守について地元ケーブルテレビ事業者の協力を受けるモデル(以下「鉄道事業者投資モデル」という。)を新たに検討した(図 4.3.2-14、図 4.3.2-15)。鉄道事業者投資モデルでは、ケーブルテレビ事業者が他社の通信インフラの運用を受託することになるが、この実現可能性について表 4.3.2-8 に示すケーブルテレビ事業者へヒアリングを実施した(図 4.3.2-16)。ケーブルテレビ事業者は、少人数で自社のケーブルテレビや通信設備の構築から運用までを行っている場合が多く、他社のインフラ運用を請け負えるだけの社内体制が整っていないことやローカル 5G に関しては検討中の段階で十分なノウハウを持っていないことから、鉄道事業者投資モデルの実現は難しい結果となった。

よって、鉄道事業者単独モデルを提案の主体として、ユーザとなる鉄道事業者の意向や利用規模によって、地元ケーブルテレビ事業者とのマッチングを適宜実施し CATV 事業者投資モデルを提案することにしたい。

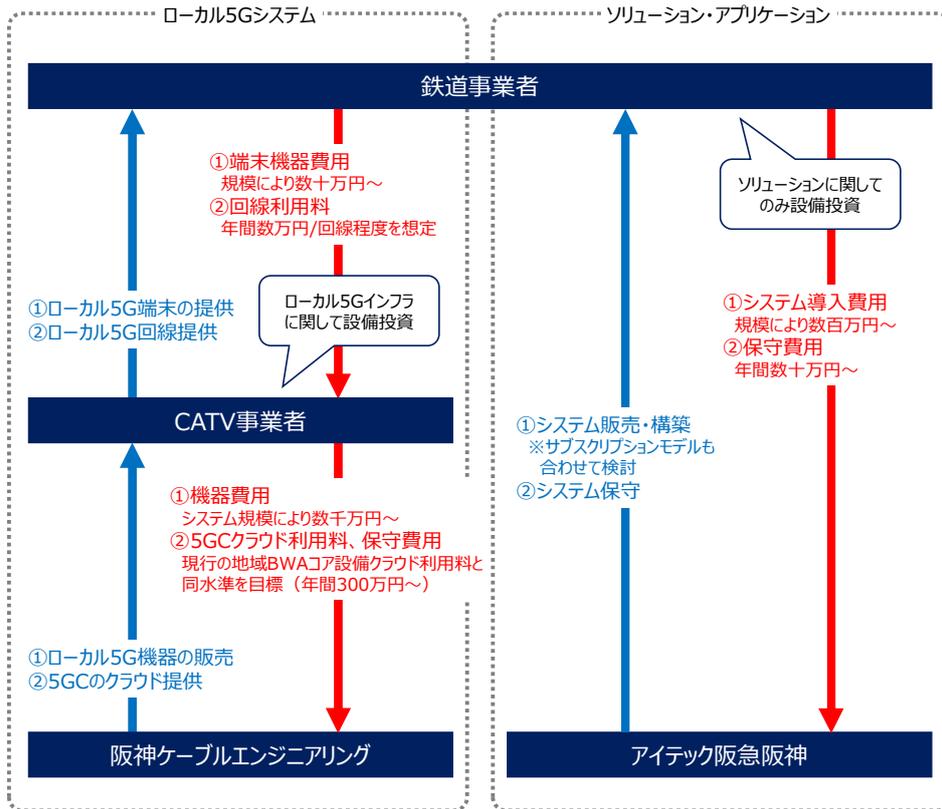


図 4.3.2-13 CATV 事業者投資モデルのイメージ

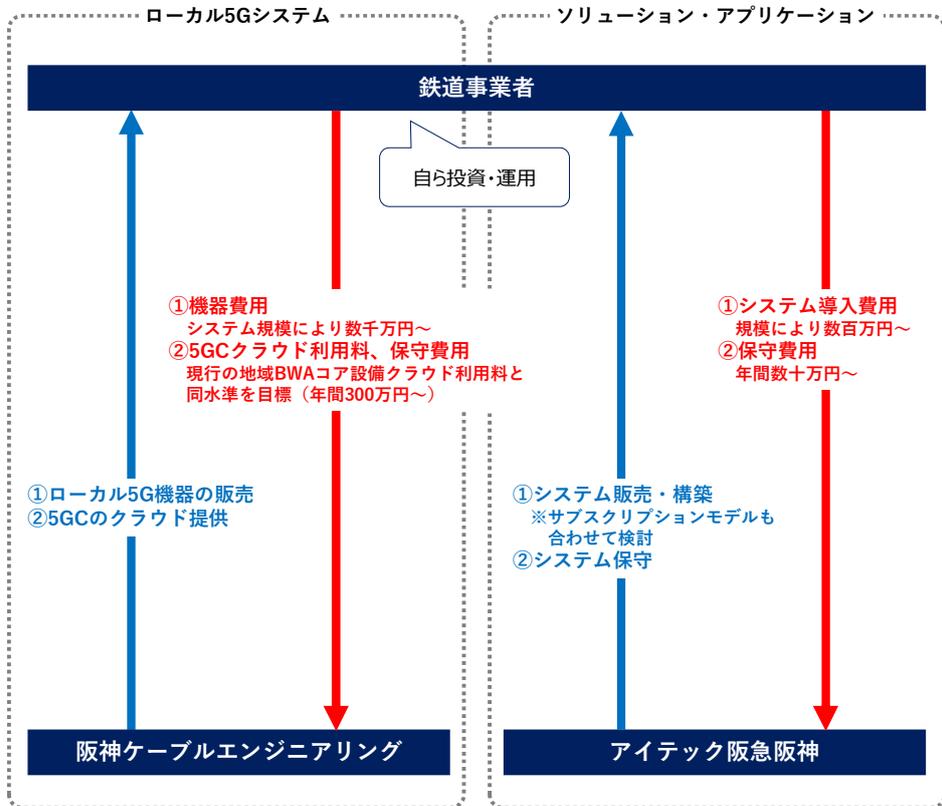


図 4.3.2-14 鉄道事業者単独モデルのイメージ

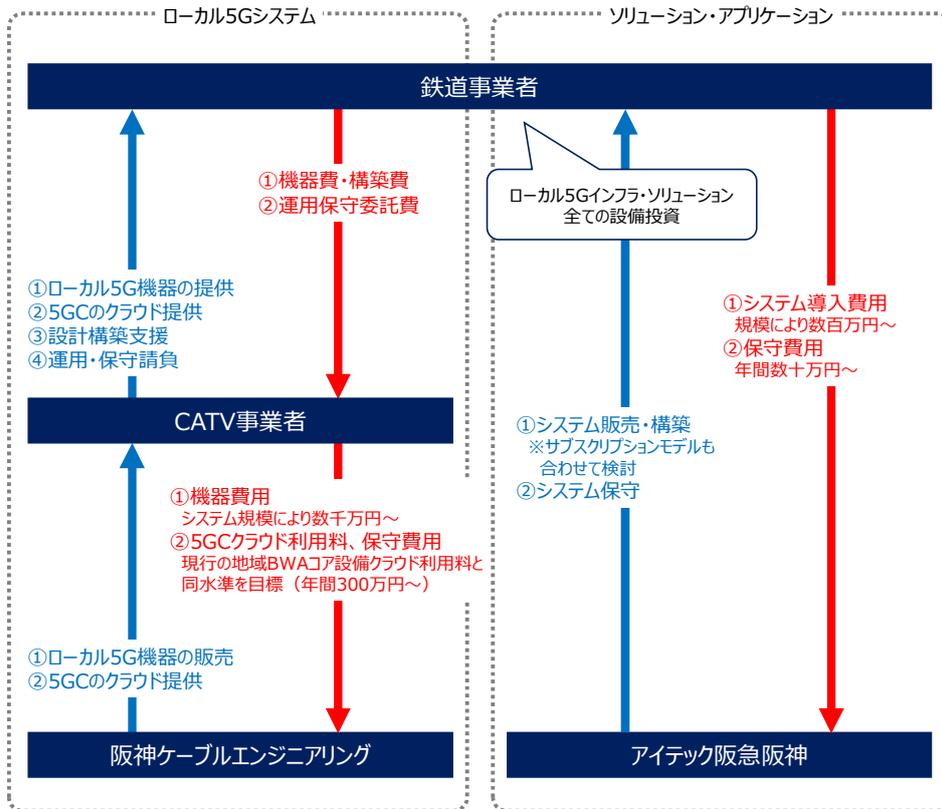


図 4.3.2-15 鉄道事業者投資モデルのイメージ

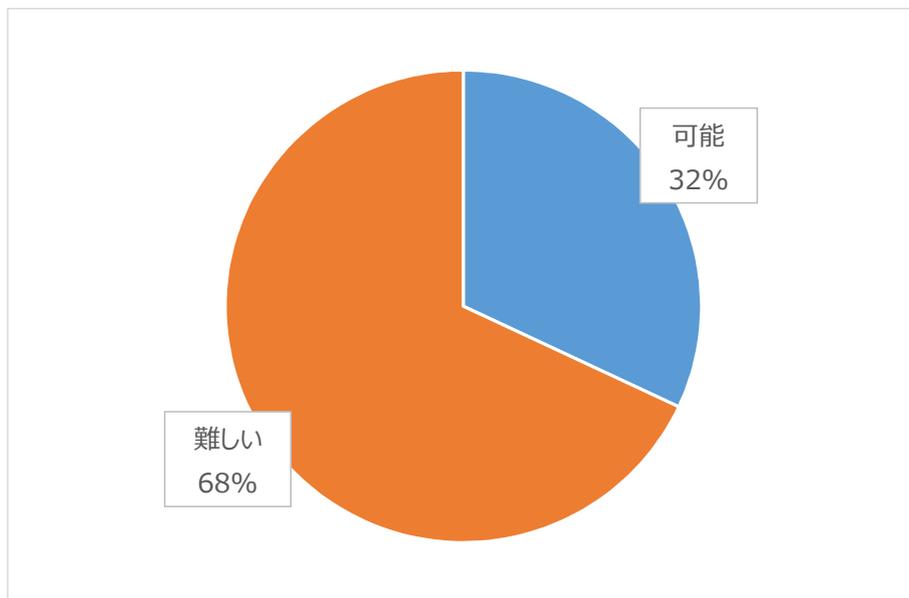


図 4.3.2-16 他社のローカル 5G インフラの運用を請け負うことは可能か(N=28)

2) 体制・役割分担

実装時における体制は図 4.3.2-17 のとおり。阪神電気鉄道株式会社をユーザとし、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社及びアイテック阪急阪神株式会社がサービス提供者となる。阪神ケーブルエンジニアリング株式会社は、ローカル 5G に関するサービスを提供し、阪神電気鉄道株式会社にて設備投資を行う基地局等の設備の運用保守を行うとともに免許人としてローカル 5G の免許取得も実施する。アイテック阪急阪神は、ソリューション関連のシステムを提供し、運用保守の支援を行う。

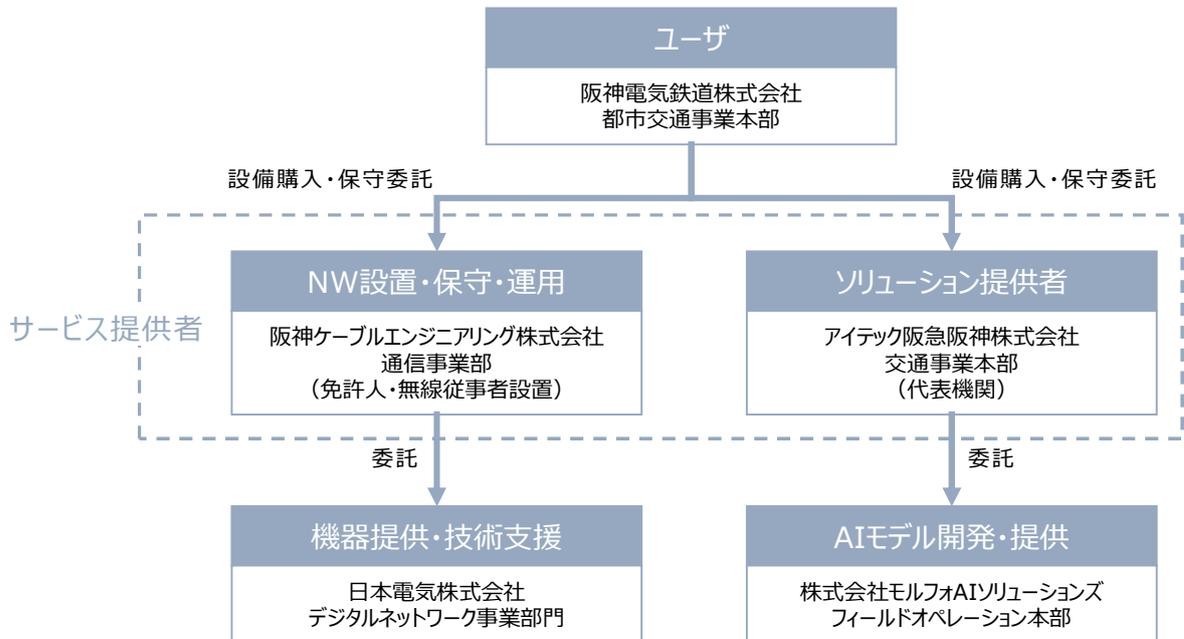


図 4.3.2-17 実装時における実施体制図

3) 導入効果

各ソリューションにおいて、本実証事業で明らかになった課題や未実施分の検証を全て解決し、実装水準に達した場合について考える。

a. ①地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化

踏切における立往生等の危険については現状、障害物検知装置によって安全対策を行っている。本ソリューションでは、踏切から線路内への侵入、白杖利用者通行時の注意喚起等、既存の障害物検知装置では検知対象とならない事象への対応が可能であり、障害物検知装置の補完システムとして、また現状障害物検知装置が設置されていない踏切の安全対策として活用でき、鉄道運行のさらなる安全性向上に寄与できる。本ソリューションについてはユーザが投資対効果を得られるよう、既存の障害物検知装置の設置・保守費用と同水準以下の金額でソリューションを提供することを考える。

また、ホーム上における危険については、これまでホーム上の非常通報ボタンを押すことで危険を通知しており、ホーム上の人の対応に頼る部分があった。本ソリューションによって自動的に危険を通知できるようになり、さらなる安全性の向上に期待できる。一方で、多くの鉄道事業者ではホーム上の安全対

策としてホームドアの導入を進めている。本ソリューションにおいては、ホームドア設置までの対策やホームドアの設置が困難な駅への導入等の活用を見込む。

b. ②車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化

有事の際の車内状況の確認について、現行の列車無線(口頭)による乗務員と運転指令間の情報連携では状況把握までに5分程度要するのに対し、本ソリューションにおいては、乗務員と運転指令が同じ映像を見ながら情報連携可能となることで、1分程度で情報連携が完了し大幅な時間短縮が可能となった。これは、有事の際の初動対応を迅速に行うことで乗客の安全を確保することや、仮にいたずら等で列車を停車した場合に早期に運転を再開させ、運行ダイヤへの影響を最小限へ抑える等の効果が期待できる。

c. ③車上カメラとAI画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

現在、阪神電気鉄道株式会社では、平日は毎日交代で1人が車上からの巡視点検を実施しており、人手と年間約6,000千円がコストとしてかかっている。同社は、鉄道事業者の中では比較的営業路延長が短いため、長い営業路線を持つ他の鉄道事業者においては、さらに人手とコストがかかっていることが予想される。将来の労働力不足が懸念される中、本ソリューションによって自動的に点検が可能となることで、点検にかかる人手の解消が可能となる。また、点検時の映像が記録されるため、異常発生時に映像を後から見直したり、係員の教育や工事を計画する際に映像を使用したりと副次的な効果も見込まれる。本ソリューションについても、他のソリューションと同じくユーザが投資対効果を得られるよう、阪神電気鉄道株式会社の巡視点検コストである6,000千円/年を基準としてサービスを提供したい。

(4) 実装性を高める手法の検討及び実行

1) 検証項目

ローカル5G活用モデルの実現において障壁として想定される項目は、以下①から④のとおり。

①安全性向上への活用において帯域輻輳による通信遅延が許容範囲外とならないか。

ローカル5G通信の活用が一定以上に輻輳した場合、帯域が逼迫することで遅延が発生する可能性が考えられる。実用化においては乗務員支援のほか保守業務など幅広い活用を想定している。安全性向上に活用する場合、通信の遅延は生死に関わる事故につながる可能性もあり、通信品質の維持は極めて重要な要件となる。

②安全性向上への活用において環境要因による通信遅延が許容範囲外とならないか。

通信遅延の要因は輻輳に限らない。例えば鉄道事業に活用する場合、地上区間のほか、曲線区間や構造物に覆われた駅構内等、様々な環境への適用が求められる。自己土地内に様々な環境を持つ鉄道

事業者にて実証することで、環境要因による通信遅延を評価・検証する。

③自己土地外への電波漏洩が許容範囲外とならないか。

鉄道線路は細長いという特徴を持つことから、ローカル 5G によりエリア化した際に外部への漏洩が許容量を超えることが想像される。外部への漏洩範囲が許容範囲を超えると沿線住民や他事業者への影響が予想されるためこれを防止することは必須である。実用化に向けては、エリア設計段階で漏洩範囲を正確に把握する必要があるため、これを検証する必要がある。

④ローカル 5G のカバーエリアが活用したいエリアを十分に網羅できるか。

安全性向上や保守業務の効率化に資する活用を行う場合、事業エリア内を漏れなく網羅する通信インフラの構築が求められる。エリア内を包含するために複数の基地局によるカバーや漏洩同軸ケーブルの使用など様々な手法を検証し、その網羅性を検証する。

2) 検証方法

前述の 4 項目について以下のとおり、それぞれ評価・検証する。

①安全性向上への活用において帯域輻輳による通信遅延が許容範囲外とならないか。

4.3.1 章(1)と同様、遅延測定を実施し評価を行う。例えば、踏切異常検知を運転士に通知する場合、運転士がブレーキ操作を行い危険物に接触するまでに停止できる十分な時間を確保できるかが基準となる。線形の違いや勾配により検証エリアごとに求められる水準は異なるが、その全てで許容値を満たすかについて、検知から通知までの時間を測定することで評価する。

②安全性向上への活用において環境要因による通信遅延が許容範囲外とならないか。

①と同様に検知から通知までの時間を測定し評価する。測定地点を曲線区間や踏切が多い区間、構造物に覆われた駅構内等複数の条件下の地点をピックアップして定めることで環境要因による通信速度への影響度を評価する。

③自己土地外への電波漏洩が許容範囲外とならないか。

3.3.2 章と同様、沿線エリアにおいて広く電波測定を実施することで自己土地外への電波漏洩範囲を測定する。また、電界測定結果をマッピングすることで漏洩範囲を評価する。基地局の種類や漏洩同軸ケーブル区間など異なる条件下での測定結果を明示することでそれぞれの電波伝搬特性を明らかにし、自己土地外への電波漏洩が許容値に留まるか評価する。

④ローカル 5G のカバーエリアが活用したいエリアを十分に網羅できるか。

3.3.1 章及び 3.3.2 章と同様、列車内、駅構内、地上区間等で電波測定を実施することでその網羅性を評価する。強度をマッピングすることで、基地局からの距離による因果関係のほか、環境要因(線区の状態や周辺環境など)を可視化し、評価する。

3) 検証結果及び考察

①安全性向上への活用において帯域輻輳による通信遅延が許容範囲外とならないか。

図 4.3.1-2 及び図 4.3.1-3 のとおり、環境によって電波強度が大きく変化しスループットが要件を下回る場所もあった。スループットが要件を下回るような電波状況が弱い場所においては、通信帯域が限られるため、利用が進むと輻輳による通信遅延の増大等が発生するおそれがある。

3 章の結果も踏まえ、業務区域内を強電界でカバーできる基地局の配置設計が重要となる。また、本実証事業で検証したソリューションは主に上り方向の通信を利用することから、送信アンテナが複数搭載され MIMO が利用できるローカル 5G 端末の選定や基地局の準同期運用など、上りスループットを向上させる対策も追加で検証が必要である。

②安全性向上への活用において環境要因による通信遅延が許容範囲外とならないか。

表 4.3.1-3、表 4.3.1-6、表 4.3.1-22 及び表 4.3.1-25 のとおり、本実証環境についていずれの測定場所においても、通信遅延は要件としている 200 ミリ秒より短く、許容値に収まる結果であった。ただし、走行列車内におけるジッタの値は目標値を下回る結果であった。①に記載の配置設計の際には、車内による電波の減衰や劣化の考慮も必要となる。また、基地局の配置設計による解決だけでは、構築コストの大幅な増加をもたらすおそれもあるため、受信性能の高いローカル 5G 端末を選定、開発するまたは、屋外設置可能なローカル 5G 端末を車体外に設置する等の対策も検討する。

③自己土地外への電波漏洩が許容範囲外とならないか。

3.3.2 章で述べたとおり、本実証事業の環境においては狭指向性アンテナ及び漏洩同軸ケーブルいずれを使用した場合においても、線路外(自己土地外)への電波漏洩を完全には防ぐには至らなかった。さらなる電波漏洩抑制の対策として、ビームフォーミング対応基地局の検証や電波の漏洩方向を指定できる漏洩同軸ケーブルの開発等、機器ベンダ、メーカーとも協議を行い、引き続き検討を進めていく。

④ローカル 5G のカバーエリアが活用したいエリアを十分に網羅できるか。

図 4.3.1-1 に示すとおり、走行列車内において通信が途切れる区間があった。また、①に記載のとおり、地上においても環境によって電波強度に差が大きく通信性能にばらつきが見られた。狭指向性アンテナの利用にあたっては、線路形状の影響を受けやすく、僅かなカーブや高低差でも電波強度が大きく変動するため、これまでの平面的なエリア予測だけでなく 3 次元的な配慮が必要である。

4.3.3 ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題の抽出及び解決策の検討

(1) ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題

課題と必要な対策について、図 4.3.3-1 から図 4.3.3-4 の 이슈ーツリーに示す。

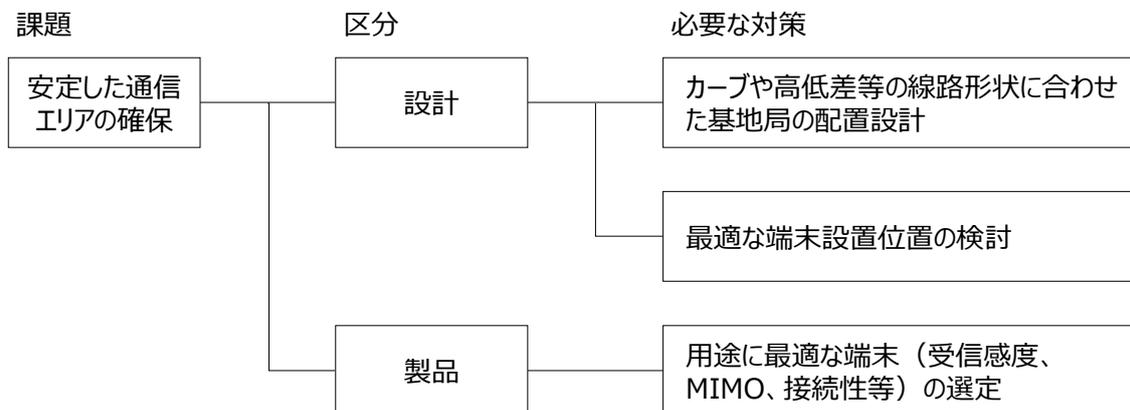


図 4.3.3-1 各ソリューションに共通の課題

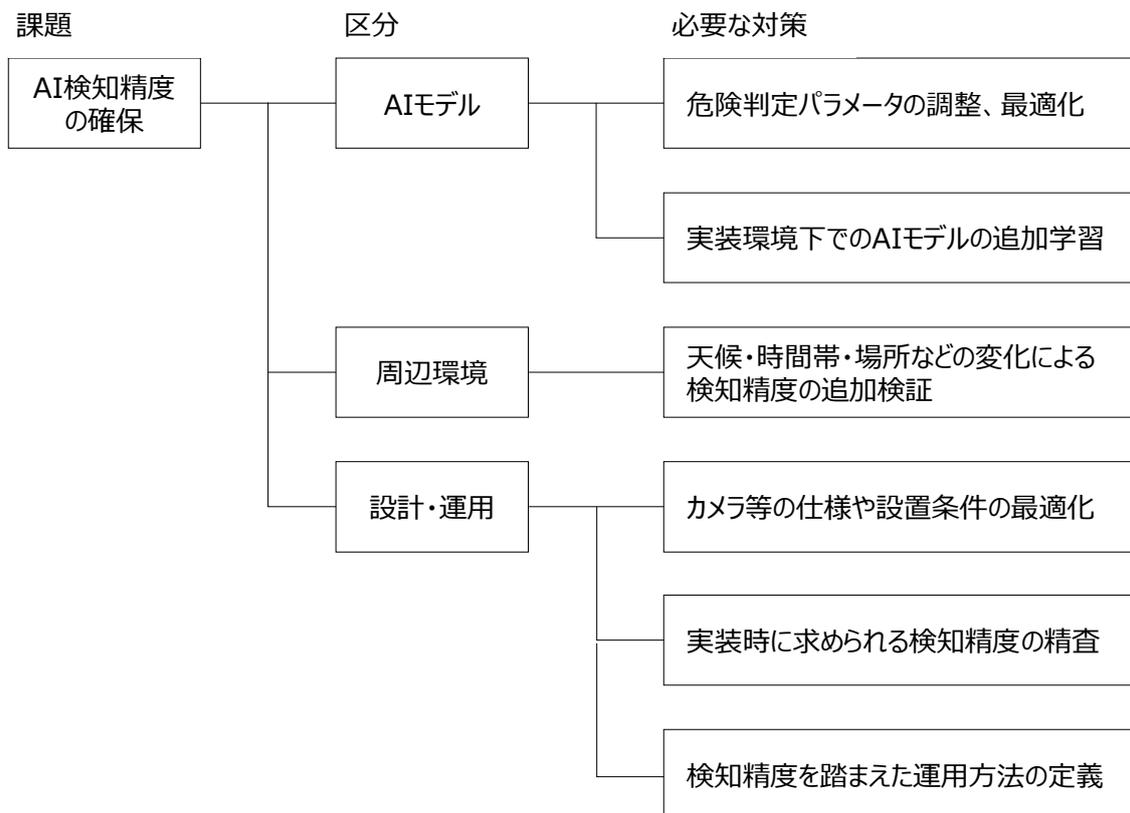


図 4.3.3-2 ソリューション①地上カメラと AI 画像認識を用いた事故の未然防止に関する 이슈ーツリー

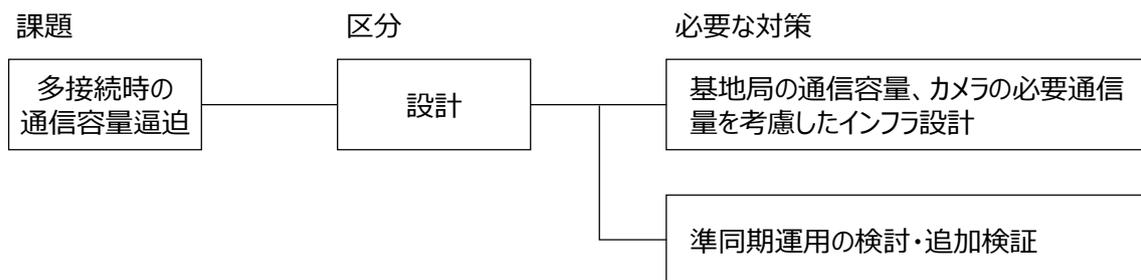


図 4.3.3-3 ソリューション②車地上間における車内映像等のリアルタイムな情報連携に関するイシューツリー

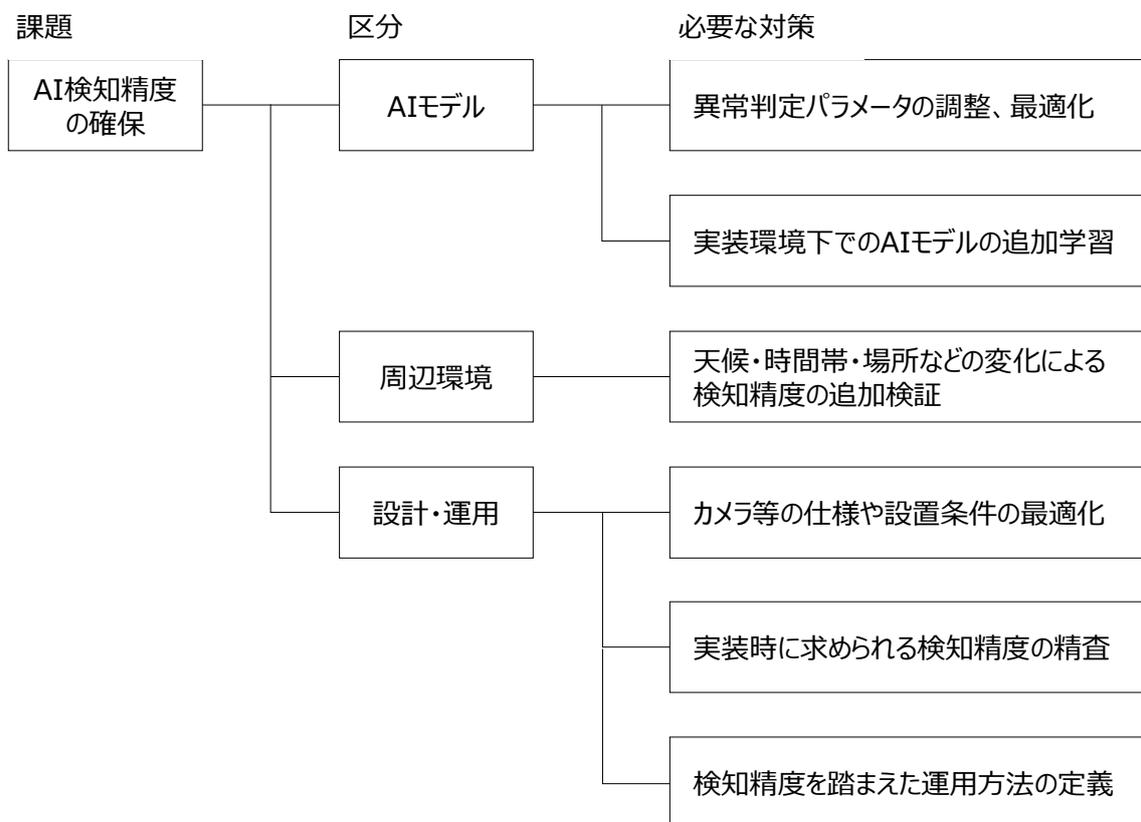


図 4.3.3-4 ソリューション③車上カメラと AI 画像認識を用いた日常巡視点検の省人化に関するイシューツリー

(2) ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題に対する解決策の検討

各課題における対策は、図 4.3.3-1 から図 4.3.3-4 のイシューツリー右側に記載しているとおりである。ここで、各ソリューションに共通の課題や多接続時の通信容量逼迫については、今後のローカル 5G 製品の性能向上や実装時の設計時の工夫により解決可能と捉えているため、本章では、各ソリューションの根幹となる AI の検知精度について述べる。検知精度については、検知率の向上と誤検知の低減の観点から解決策を検討する。

本実証事業においては、特に踏切やホーム上の危険検知については検知漏れが許されないことから検知率向上を優先したパラメータを設定し検証を行った。このため検知率は比較的高い結果が得られたが、カメラの画角等に起因して一部検知漏れが生じ、漏れゼロには至っていないことから、最適なカメラ配置などの検討を進めていく。また、検知精度は環境依存性が高いことから、本実証事業とは異なる条件下での検証が必要である。具体的には、夜間映像が暗い場合や雨天時における検証を今後実施する。また、今回は汎用的な AI モデルを利用しているが、検知漏れ回避のため個別の条件に合わせた AI モデルの追加学習にも必要に応じて取り組む。

次に、誤検知については、特に線路内への人の侵入、踏切内の白杖やホーム上での駆込み乗車において多数発生した。これらについては、検知を判定するアルゴリズムの修正や個別の条件に合わせた AI モデルの追加学習が必要であると考えられるため、検知漏れの低減対策と並行して取り組む。

4.3.4 ローカル 5G 活用モデルの実装・普及展開

(1) 実装・普及展開シナリオ

各ソリューションに対する課題と対策の観点及び実装・普及展開にあたってのターゲットユーザへのアプローチの観点に分けて検討ステップを記述する。

各ソリューションに対する課題と必要な対策については、図 4.3.3-1 から図 4.3.3-4 で示したとおり。これらの課題を踏まえ、実装に向けたロードマップを図 4.3.4-1 に示す。現状のローカル 5G 免許制度においては、各ソリューションの前提となる線路上での広域的な実運用は難しいことから、当該制度の改定によるローカル 5G の広域利用化を令和 7 年度中と想定し、令和 8 年度での実装に向けた取り組みを進めていくこととする。検討を進めるうえでは、AI 検知精度の向上が特に重要な課題であるが、AI 検知精度については段階的な向上が見込まれており、段階に合わせて例えば人手による業務を補佐する目的で利用するなど部分的な実装による業務負荷の軽減や安全性の向上から実現し、将来的には検知対象の増加や十分な精度向上を達成することで、鉄道事業を継続するために不可欠な労働力不足の解消を目指す。

普及展開に向けては、阪神電気鉄道株式会社での実装を踏まえ、まずは同じく阪急阪神ホールディングスグループに属する阪急電鉄株式会社への普及展開を目指す。その後、両社での実績をもって、両社と類似した事業環境下で鉄道運営を行っており、共通の課題を抱え、一定の経営体力を有すると予想される都市部の民営鉄道のうち、営業路線長が 150km 未満である事業者を特に注力ターゲットとして提案活動を行う。なお、導入検討に際しては、地元ケーブルテレビ事業者との連携を適宜進める(表 4.3.4-1)。

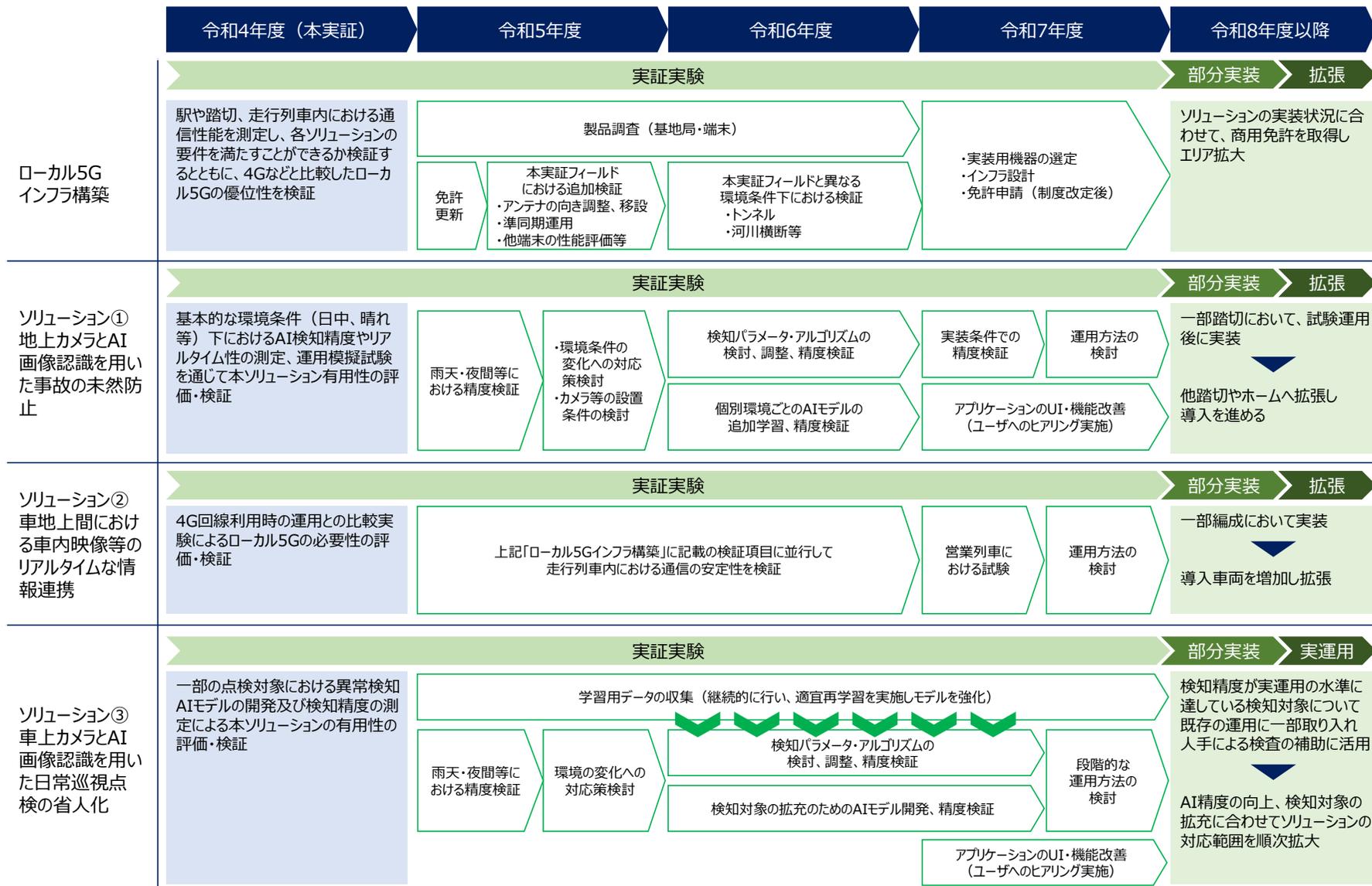


図 4.3.4-1 各ソリューションの実装に向けたロードマップ（ブロック矢印の終点が各対策の対応期限を示す） ※紙面都合により 90 度回転して掲載

表 4.3.4-1 想定ターゲットと当該地域のケーブルテレビ事業者等の対応

ターゲットとなる鉄道事業者名	沿線地域のケーブルテレビ事業者等
京浜急行電鉄株式会社	・J:COM 株式会社 ・横浜ケーブルビジョン株式会社
京王電鉄株式会社	・J:COM 株式会社 ・株式会社多摩テレビ
相模鉄道株式会社	・J:COM 株式会社 ・横浜ケーブルビジョン株式会社 ・阪神ケーブルエンジニアリング株式会社
京阪電気鉄道株式会社	・J:COM 株式会社 ・阪神ケーブルエンジニアリング株式会社
南海電気鉄道株式会社	・J:COM 株式会社 ・阪神ケーブルエンジニアリング株式会社

(2) 実装計画

1) 実装計画の作成方法

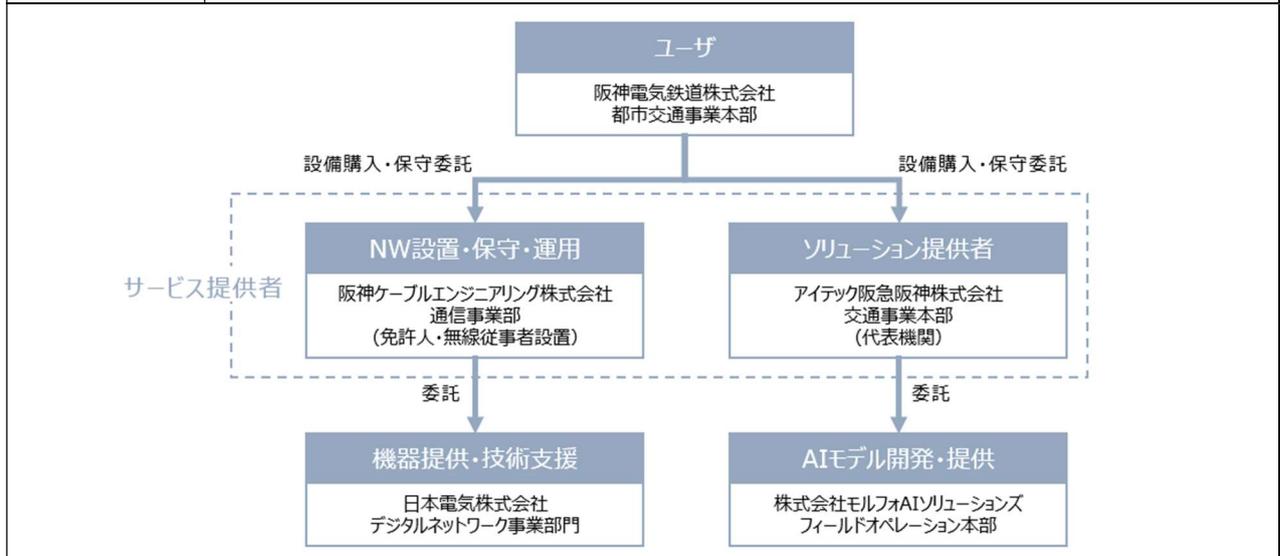
本実装計画は実証コンソーシアムの構成員でもある実証環境を提供している阪神電気鉄道株式会社、ローカル 5G システムを構築・運用を担う阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、AI システム等の構築・運用を担うアイテック阪急阪神株式会社の 3 社が主体であり、各社の役割や実証実験の費用負担に関する合意形成は得られている。

なお、提供コストの低減、各ソリューションの検知精度の向上、各ソリューションを活用した運用方法など検討課題はあるが、4.3.4 章(2) 2) d で記載する実装を確実にするための取り組みによって解決していく。

2) 実装計画の要約

■実装計画要約シート

特 04 代表機関名	アイテック阪急阪神株式会社	分野	鉄道
実証件名	ローカル 5G を活用した車地上間通信及び AI 画像認識等による鉄道事業のより安心安全かつ効率的な運営の実現		
実施体制	本実装計画の主体は実証環境を提供している阪神電気鉄道株式会社、ローカル 5G システムの構築・運用サービス提供者である阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、AI システム等の構築・運用サービス提供者であるアイテック阪急阪神株式会社の 3 社である。また、本実証事業に引き続きローカル 5G 機器の提供は日本電気株式会社、AI モデルの提供はモルフォ AI ソリューションズ株式会社を想定している。		



阪神ケーブルエンジニアリング株式会社の実装計画・収支計画

		令和4年度 (2022)	令和5年度 (2023)	令和6年度 (2024)	令和7年度 (2025)	令和8年度 (2026)	令和9年度 (2027)	令和10年度 (2028)
実装計画	ソリューション① 地上カメラとAI画像認識を用いた事故の未然防止	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ソリューション② 車地上間における車内映像等のリアルタイムな情報連携	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ソリューション③ 車上カメラとAI画像を用いた日常巡視点検の省人化	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ローカル5Gシステム	開発実証	実装(実証事業実施区間)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
収支計画(千円)	(1)ユーザから得る対価	-	-	-	-	-	149,490	840,542
	(2)補助金・交付金	-	-	-	-	-	-	-
	(3)収入((1)+(2))	-	-	-	-	-	149,490	840,542
	(4)ネットワーク設置費	-	-	-	-	-	117,025	687,050
	(5)ネットワーク運用費	-	7,550	7,550	7,550	7,550	7,550	13,401
	(6)ソリューション購入費	-	-	-	-	-	-	-
	(7)ソリューション開発費	-	2,450	2,450	2,450	12,450	-	-
	(8)支出 ((4)+(5)+(6)+(7))	-	10,000	10,000	10,000	20,000	124,575	700,451
	(9)収支((3)-(8))	-	△10,000	△10,000	△10,000	△20,000	24,915	140,090

アイテック阪急阪神株式会社の実装計画・収支計画

	令和4年度 (2022)	令和5年度 (2023)	令和6年度 (2024)	令和7年度 (2025)	令和8年度 (2026)	令和9年度 (2027)	令和10年度 (2028)	
実装計画	ソリューション① 地上カメラとAI画像認識を用いた事故の未然防止	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ソリューション② 車地上間における車内映像等のリアルタイムな情報連携	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ソリューション③ 車上カメラとAI画像を用いた日常巡視点検の省人化	開発実証	コンソ内投資による実証実験(課題対応)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
	ローカル5Gシステム	開発実証	実装(実証事業実施区間)			コンソ内実装による試験運用	コンソ内実運用グループ内横展開	路線拡大グループ外展開
収支計画(千円)	(1)ユーザから得る対価	-	10,000	10,000	10,000	20,000	225,600	451,200
	(2)補助金・交付金	-	-	-	-	-	-	-
	(3)収入((1)+(2))	-	10,000	10,000	10,000	20,000	225,600	451,200
	(4)ネットワーク設置費	-	-	-	-	-	-	-
	(5)ネットワーク運用費	-	-	-	-	-	-	-
	(6)ソリューション購入費	-	-	-	-	-	-	-
	(7)ソリューション開発費	-	20,000	20,000	20,000	40,000	188,000	376,000
	(8)支出 ((4)+(5)+(6)+(7))	-	20,000	20,000	20,000	40,000	188,000	376,000
	(9)収支((3)-(8))	-	△10,000	△10,000	△10,000	△20,000	37,600	75,200

収入、支出の算定根拠

- ・ローカル 5G システムは本実証事業に応じた提供価格を仮で設定
- ・AI システムは踏切障害物検知装置構築(15,000 千円/箇所)や年間の車上巡視費用(6,000 千円/年)など既存システム構築費、既存業務の費用を基準としてこの金額より安価となる提供価格を仮で設定

	どのようにして(手段、取り組み方法、アウトカム)	いつまでに	
実装を確実にするための取り組み	提供コスト低減	「コンソ内投資による実証実験(課題対応)」により、ローカル 5G や AI システム等の構築・運用に関する専門的なノウハウ取得や保守体制を構築することで構築・運用費の低減を図り、現在の想定価格から 10%低減を実現する。	令和 9 年 3 月まで
	ソリューション追加開発	「コンソ内投資による実証実験(課題対応)」より各ソリューションの検知精度向上及び検知対象数の増加を目的とした検証、開発を実施することにより、検知精度及び検知対象数を 10%から 15%向上させる。	令和 8 年 3 月まで
	顧客開拓	令和 5 年 11 月開催予定の鉄道事業者向け展示会「鉄道技術展」に出展し、ローカル 5G ソリューションについて訴求する。出展後には、個別のフォローアップを実施し、ユーザ固有の状況に合わせた提案活動へ移行する。また、鉄道事業者への訪問時に本実証事業の実績を紹介する機会を設け、ローカル 5G の活用に向けた動機づけを個別に実施する	令和 6 年 3 月まで
	運用面の改善	令和 5 年度から令和 7 年度で実施する実証実験を通じて、各ソリューションのユーザインターフェースを改善することにより、業務負荷の軽減や安全性の向上を目指す。	令和 8 年 3 月まで
	ルールメイキングへの貢献	令和 5 年度以降、「情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会 ローカル 5G 検討作業班」の一員として、本実証事業によって得られた結果をもとに鉄道環境などローカル 5G の幅広い利用に向けた提案を積極的に行い、制度改定に貢献する。	令和 8 年 3 月まで

計画した収入を下回った場合の対応方法(資金調達など) ・グループ会社である阪急電鉄株式会社との共同実証実験とすることで資金の調達を目指す。 ・令和5年度においては、「地域デジタル基盤活用推進事業」への応募・採択を目指す。
--

a. 実施体制

4.3.4(2) 1)で述べたとおり、本実装計画の主体は実証環境を提供している阪神電気鉄道株式会社、ローカル 5G システムの構築・運用サービス提供者である阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、AI システム等の構築・運用サービス提供者であるアイテック阪急阪神株式会社の 3 社である。また、本実証事業に引き続きローカル 5G 機器の提供は日本電気株式会社、AI モデルの提供はモルフォ AI ソリューションズ株式会社を想定している。各社の役割を表 4.3.4-2 に示す。

表 4.3.4-2 各社の役割

企業名	役割
阪神電気鉄道 都市交通事業本部	<ul style="list-style-type: none"> ・実装主体 ・実証実験フィールドの提供、現場作業支援 ・実装、普及に向けた検討 ・横展開に向けて、鉄道事業者目線での検討を行い、ローカル 5G 活用モデルのブラッシュアップを行う
阪神ケーブルエンジニアリング 通信事業部	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G 環境の構築(設計、免許申請等) ・実装、普及に向けた検討 ・横展開時においては、各地におけるローカル 5G インフラの構築、運用を支援
日本電気 デジタルネットワーク事業部門	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G 機器の提供 ・技術実証の支援
アイテック阪急阪神 交通事業本部	<ul style="list-style-type: none"> ・AI システムの開発、構築 ・実装、普及に向けた検討 ・横展開時においては、鉄道事業者の窓口としてローカル 5G 活用モデルの提案活動を実施
モルフォ AI ソリューションズ フィールドオペレーション本部	<ul style="list-style-type: none"> ・AI モデル(ソフトウェア)の提供 ・AI モデルの開発、学習作業

b. 実装計画(実施事項)

令和5年度から令和7年度における「コンソ内投資による実証実験(課題対応)」では、4.3.4(1)図 4.3.4-1 から図 4.3.4-3 のイシューツリーに示した各ソリューションに対する課題に対する必要な対策を順次進めていく。なお、本実証事業のために取得した実験試験局免許は令和5年6月末で期限を迎えるため、これまでに実験試験局免許を再取得する。

本実装計画では令和7年度に現状のローカル 5G 免許制度の改定による広域利用化を想定してい

るが、改定後は速やかに免許制度に則ったインフラ設計を実施し、試験局から商用局へ移行する。その際の免許人及び無線従事者は試験局と同様に阪神ケーブルエンジニアリング株式会社で担う予定である。令和 8 年度における「コンソ内実証による試験運用」では、前年度までに実施していた「コンソ内投資による実証実験(課題対応)」で検知精度向上及び検知対象数増加を行った各ソリューションを活用した鉄道運用における試験運用を実施する。なお、特にソリューション③車上カメラと AI 画像認識を用いた日常巡視点検の省人化における AI 検知精度や検知対象については段階的な精度向上や対象物の拡充が見込まれており、段階に合わせて例えば人手による業務を補佐する目的で利用するなど、既存の点検業務に部分的に取り入れながら、まずは業務負荷の軽減や安全性の向上から実現し、将来的には検知対象の増加や十分な精度向上を達成することで、既存の点検業務から省人化した運用方式へ移行し鉄道事業を継続するために不可欠な労働力不足の解消を目指す。

令和 9 年度には実運用を開始するとともに、コンソーシアム外であるがグループ会社である阪急電鉄株式会社への横展開を目指す。

さらに令和 10 年度以降は阪神電気鉄道株式会社及び阪急電鉄株式会社の対象路線を拡大するとともに、表 4.3.4-1 で記載したグループ外への展開も目指す。

なお、本実証計画は現状のローカル 5G 免許制度の改定による広域利用化を令和 7 年度中と想定したものであるが、改定が前倒しとなる場合には、計画を前倒して実施していく。

c. 収支計画

ア) 収支計画

4.3.4(2)2)の実証計画要約シートに記載したとおり、サービス提供者はローカル 5G システムを構築・運用を担う阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、AI システム等の構築・運用を担うアイテック阪急阪神株式会社であるため、各社分の収支計画を策定する。

令和 5 年度から令和 7 年度における「コンソ内投資による実証実験(課題対応)」及び令和 8 年度における「コンソ内実証による試験運用」の費用は、実証コンソーシアムの構成員でもある実証環境を提供している阪神電気鉄道株式会社、ローカル 5G システムを構築・運用を担う阪神ケーブルエンジニアリング株式会社、AI システム等の構築・運用を担うアイテック阪急阪神株式会社の 3 社での負担を予定しているため、「(1)ユーザから得る対価」にはユーザである阪神電気鉄道株式会社の負担分を見込んでいる。また、「(5)ネットワーク運用費」はローカル 5G システムの維持運用費であり、本実証事業における構築費をもとに算出、「(7)ソリューション開発費」は各ソリューション検知精度向上及び検知対象数の増加を目的とした検証費及び開発費であり、AI モデルの再学習のコストから算出している。

令和 9 年度の「グループ内横展開」及び令和 10 年度の「グループ外展開」の収入について、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社の収入は当該年度に構築する路線長から算出したローカル 5G システム構築費及び前年度までに構築したローカル 5G システムのネットワーク運用費の合算であり、本実証事業に応じた提供価格としている。令和 9 年度はグループ会社である阪急電鉄株式会社の構築分である 140,430 千円及び令和 8 年度までに構築したネットワーク運用費 9,060 千円の合算 149,490 千円、令和 10 年度は阪神電気鉄道株式会社及び阪急電鉄株式会社の路線拡大の構築分である 761,040 千円、グループ外の鉄道事業者の構築分である 63,420 千円及び令和 9 年度まで

に構築したネットワーク運用費 16,082 千円の合算 840,542 千円である。アイテック阪急阪神株式会社の収入は当該年度に新たに構築する AI システム構築費及び路線拡大の AI システム構築費の合算であり、既存の踏切障害物検知装置の構築費用(約 15,000 千円/箇所)や現行の車上巡視点検業務にかかる費用(6,000 千円/年)などを基準とすることで、ユーザが投資対効果を得られる提供価格としている。令和 9 年度はグループ会社である阪急電鉄株式会社の構築分である 225,600 千円、令和 10 年度は阪神電気鉄道株式会社及び阪急電鉄株式会社の路線拡大の構築分である各 112,800 千円、グループ外の鉄道事業者の構築分である 225,600 千円の合算 451,200 千円である。

また、「(4)ネットワーク設置」は当該年度に導入するローカル 5G システムの構築費、「(5)ネットワーク運用費」は前年度までに構築したローカル 5G システムの維持運用費、「(7)ソリューション開発費」は当該年度に導入する鉄道会社用の各ソリューション開発費である。

なお、より詳細な提供条件については、今後の営業活動の中で決定していく。

イ)ユーザにおける必要リソース(モデルケース)

4.3.4(2)b で述べたユーザのうち、実証コンソーシアムの構成員でもある阪神電気鉄道株式会社をモデルケースとして必要リソースを表 4.3.4-3 に示す。なお、4.3.4(2)c ア)で述べたとおり、ローカル 5G システムは本実証事業に応じた金額、AI システムは既存の踏切障害物検知装置の構築費用(約 15,000 千円/箇所)や現行の車上巡視点検業務にかかる費用(6,000 千円/年)などを基準として提供価格を設定している。

表 4.3.4-3 ユーザにおける必要リソース

項目		イニシャルコスト (初年度)	ランニングコスト (次年度以降、年間)
コンソ内実証による試験運用のうち、ユーザ負担分		10,000 千円	
ローカル 5G システム		64,175 千円	3,209 千円
a.	路線拡大の構築分	64,175 千円	
b.	ローカル 5G システムに係る運用業務委託		3,209 千円
ローカル 5G 活用モデルに係るソリューション			
a.	ソリューション① ^{※1}	68,500 千円	
	① 路線拡大の構築分	68,500 千円	
b.	ソリューション② ^{※2}	13,500 千円	
	① 路線拡大の構築分	13,500 千円	
c.	ソリューション③ ^{※3}	12,000 千円	
	① 路線拡大の構築分	12,000 千円	

- ※1. 地上カメラと AI 画像認識の活用による安全対策の高度化
- ※2. 車地上間における車内状況のリアルタイムな情報連携による有事対応の迅速化
- ※3. 車上カメラと AI 画像認識の活用による日常巡視点検の省人化

d. 実装を確実にするための取り組み

ア) 提供コスト低減

阪神電気鉄道株式会社(ユーザ)、阪神ケーブルエンジニアリング(サービス提供者)、アイテック阪急阪神株式会社(サービス提供者)の負担による実証実験により、令和 9 年 3 月までにローカル 5G システムや AI システム等の構築・運用に関する専門的なノウハウ取得や保守体制を構築することで構築・運用費の低減を図り現在の想定価格 409 百万円/一式の 10%低減(368 百万円/一式)を実現する。なお、想定価格のうち、ローカル 5G システムの構築費は 182 百万円、AI システム等の構築費は 227 百万円である。また、ローカル 5G システムの低減率は機器コストが不明確なため、AI システム等の過去実績と同水準である 10%とし、ローカル 5G システム及び AI システム等でそれぞれ 10%の低減とする。

イ) ソリューション追加開発

阪神電気鉄道株式会社(ユーザ)、阪神ケーブルエンジニアリング(サービス提供者)、アイテック阪急阪神株式会社(サービス提供者)の資金による各ソリューションの検知精度向上及び検知対象数の増加を目的とした検証、開発を実施することにより、令和 8 年 3 月までに、検知精度を要求水準まで向上させるとともに、検知対象を既存の点検対象全体へ拡充する。

ウ) 顧客開拓

アイテック阪急阪神株式会社(サービス提供者)の費用により、令和 5 年 11 月開催予定の鉄道事業者向け展示会「鉄道技術展」に出展し、ローカル 5G ソリューションのユースケース、提供価値について訴求する。出展後には、来場者に向けた個別のフォローアップを実施し、ユーザ固有の状況に合わせた提案活動へ移行する。

また、展示会だけでなく、日頃の営業活動の一環として鉄道事業者への訪問時に本実証の実績について紹介する機会を設け、顧客ごとの課題の深堀りやソリューション提案を通して、ローカル 5G の活用に向けた動機づけを個別に実施する。

エ) 運用面の改善

令和 5 年度から令和 7 年度で実施する実証実験を通じて、各ソリューションのユーザインターフェースを改善することにより、高いユーザビリティのソリューションとすることで業務負荷の軽減や安全性の向上を目指す。

オ) ルールメイキングへの貢献

令和 5 年度以降、「情報通信審議会 新世代モバイル通信システム委員会 ローカル 5G 検討作業班」の一員として、本実証によって得られた結果をもとに鉄道環境などローカル 5G の幅広い利用に向けた提案を積極的に行い、制度改定に貢献する。

e. 計画した収入を下回った場合の対応方法(資金調達など)

令和 5 年度から令和 7 年度のコソ内投資による実証実験においては、コンソーシアム外にはなるがグループ会社である阪急電鉄株式会社との共同実証実験とすることで不足した資金の調達を目指す。

また、令和 5 年度においては、「地域デジタル基盤活用推進事業」への応募・採択により不足した資金の補填を目指す。

5. 普及啓発活動の実施

5.1 映像制作

株式会社三菱総合研究所から指定のあった各シーンについて撮影を行い、映像素材を提供した。映像素材の提供実績は表 5.1-1 のとおり。また、3 分程度の映像制作を行った。

表 5.1-1 映像素材の提供実績

No.	撮影シーン	提供本数
1	駅や踏切(実証会場)の全景	5
2	普段の駅や保守点検作業の様子	4
3	地上カメラでの監視や異常検知の様子、カメラ部分のアップ	7
4	3 のデータを AI 映像解析している様子、モニタ画面、オペレータなどのアップ	1
5	4 からの指示が乗務員端末に届いている様子、端末のアップ	2
6	電車内カメラで異常を監視している様子、カメラ部分のアップ	2
7	6 のデータを遠隔で監視している様子、モニタ画面、オペレータなどのアップ	2
8	7 の指示が乗務員端末に届いている様子、端末のアップ	2
9	列車前方カメラをつけた車両、カメラ部分のアップ	3
10	9 のデータを AI 解析している様子、モニタ画面、オペレータなどのアップ	1
11	保守作業員支援端末に 10 からのデータが届いている様子、端末のアップ	4

5.2 実証視察会の実施

ローカル 5G に関心のある企業や関係省庁等に対する周知啓発の一環として、現地での実証視察会を開催した(図 5.2-1 及び図 5.2-2)。実証視察会の概要は表 5.2-1 のとおり。

表 5.2-1 実証視察会の概要

日 時	2023 年 2 月 13 日(月) 13:30 から 16:00	
実施形態	現地開催(オフライン)	
場 所	阪神電車 西宮駅、青木信号所及び試運転列車内(兵庫県西宮市、神戸市)	
参加者 (順不同)	総務省 情報流通行政局 近畿総合通信局 関係省庁 株式会社三菱総合研究所 関係企業・団体等 (合計 16 名)	
視察行程	13:30	集合、ご挨拶、諸連絡
	13:50 から 14:00	試運転列車に乗車し、車内設備のご紹介
	14:15 から 15:00	青木信号所(模擬指令所)におけるソリューション②デモ 資料によるその他取り組み紹介
	15:30 から 16:00	西宮駅ホームにおけるソリューション①デモ
	16:00	ご挨拶、解散



図 5.2-1 信号所におけるソリューション②デモの様子

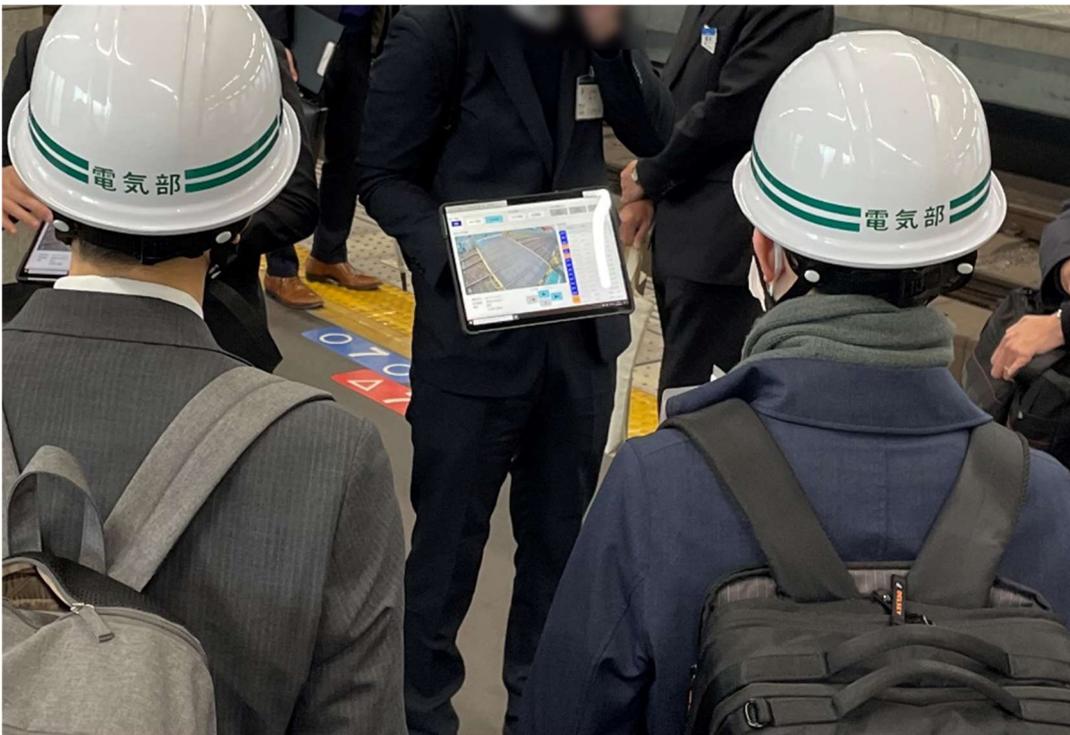


図 5.2-2 西宮駅ホームにおけるソリューション①デモの様子

5.3 その他普及啓発活動

以下のとおり普及啓発活動を行い、本実証事業の周知に取り組んだ。なお、実証終了後においても、各種イベントや展示会等での紹介や新聞等からインタビュー依頼があった場合の対応は継続して行う。

- ・2022年10月19日 CEATEC2022のオンラインセッションにて講演
- ・2022年12月5日 実証コンソーシアム各社から報道発表

6. 実施体制

6.1 実施体制の全体像

将来的な各地の鉄道事業者への横展開を見据え、鉄道事業者へのシステム提案、導入実績が豊富なアイテック阪急阪神株式会社を代表機関とし、鉄道事業者でありユーザ目線での活用モデルの評価、検討を行える阪神電気鉄道株式会社、地域 BWA 等の無線通信インフラの運用、構築ノウハウを有しローカル 5G においても実験試験局免許を取得し幅広く検討を進めている阪神ケーブルエンジニアリング株式会社及びメーカーとしてローカル 5G に関する技術的な知見が豊富な日本電気株式会社で実証コンソーシアムを形成した。

アイテック阪急阪神株式会社は、本実証事業全体の統括を担うとともに、株式会社モルフォ AI ソリューションズへの再委託を通して AI システムの開発、構築を行った。技術実証は、阪神ケーブルエンジニアリング株式会社を実証責任者とし、ローカル 5G の製品、電波測定や施工等に専門性を持つ日本電気株式会社、中央電設株式会社、AK Radio Design 株式会社、NEC ネットエスアイ株式会社、NEC プラットフォームズ株式会社、アンリツカスタマーサポート株式会社及び株式会社構造計画研究所へ再委託した。また、課題実証については阪神電気鉄道株式会社を責任者とし、構築したローカル 5G 及び AI システム等を活用した検証を実施した。実施体制図を図 6.1-1 に示す。

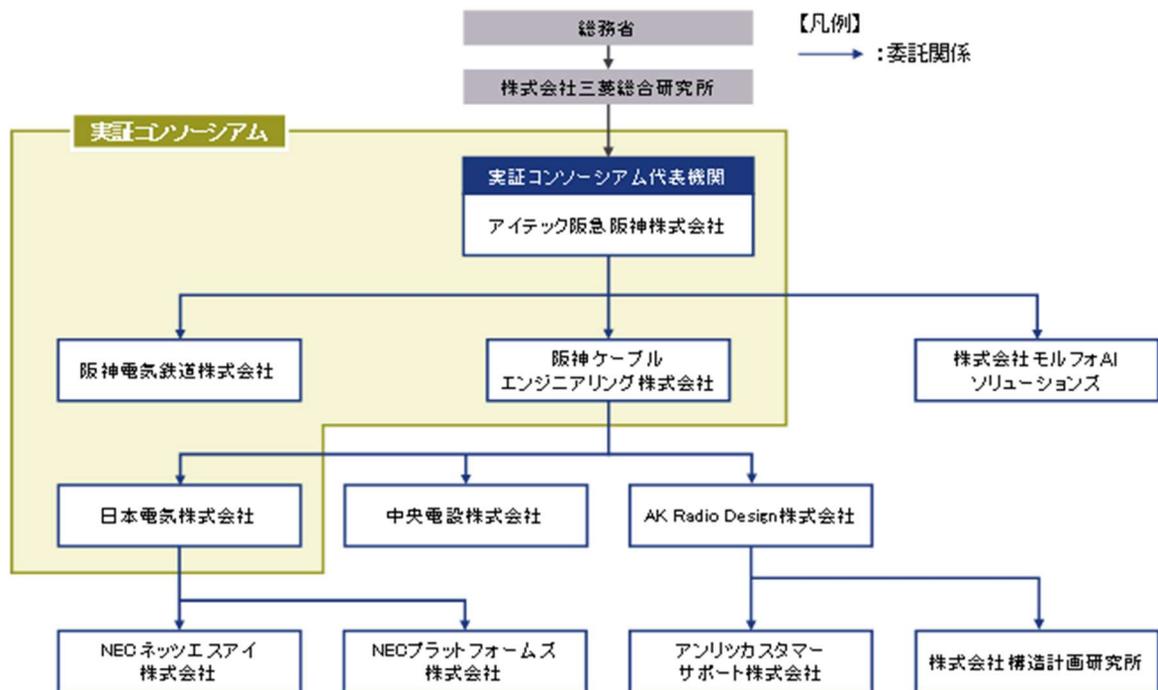


図 6.1-1 実施体制図

6.2 実施体制内の役割

実施体制内の各構成員の役割を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 各構成員の役割

企業名	役割
アイテック阪急阪神	<ul style="list-style-type: none"> ・実証事業全体の統括 ・AI システムの開発、構築 ・実装、普及に向けた検討 ・成果報告書の取りまとめ ・横展開時には、鉄道事業者の窓口としてローカル 5G 活用モデルの提案活動を実施
阪神電気鉄道	<ul style="list-style-type: none"> ・課題実証の統括、計画策定 ・実証フィールドの提供、現場作業支援 ・実装、普及に向けた検討 ・課題実証に関する成果報告書作成 ・横展開に向けて、鉄道事業者目線での検討を行い、ローカル 5G 活用モデルのブラッシュアップを行う
阪神ケーブルエンジニアリング	<ul style="list-style-type: none"> ・技術実証の統括、計画策定 ・ローカル 5G 環境の構築(設計、免許申請等) ・実装、普及に向けた検討 ・技術実証に関する成果報告書作成 ・横展開時には、各地におけるローカル 5G インフラの構築、運用を支援
モルフォ AI ソリューションズ	<ul style="list-style-type: none"> ・AI モデル(ソフトウェア)の提供 ・AI モデルの開発、学習作業
日本電気	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G 機器の提供 ・技術実証の支援
中央電設	<ul style="list-style-type: none"> ・実証事業の環境構築、施工
AK Radio Design	<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレーションと実測の計画策定及び結果の統合
NEC ネットズエスアイ	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G ネットワークの構築作業
NEC プラットフォームズ	<ul style="list-style-type: none"> ・技術実証支援
アンリツカスタマーサポート	<ul style="list-style-type: none"> ・電波測定作業
構造計画研究所	<ul style="list-style-type: none"> ・電波伝搬シミュレーション作業 ・測定結果との比較検証

7. スケジュール

本実証事業の実施スケジュールは以下のとおり。

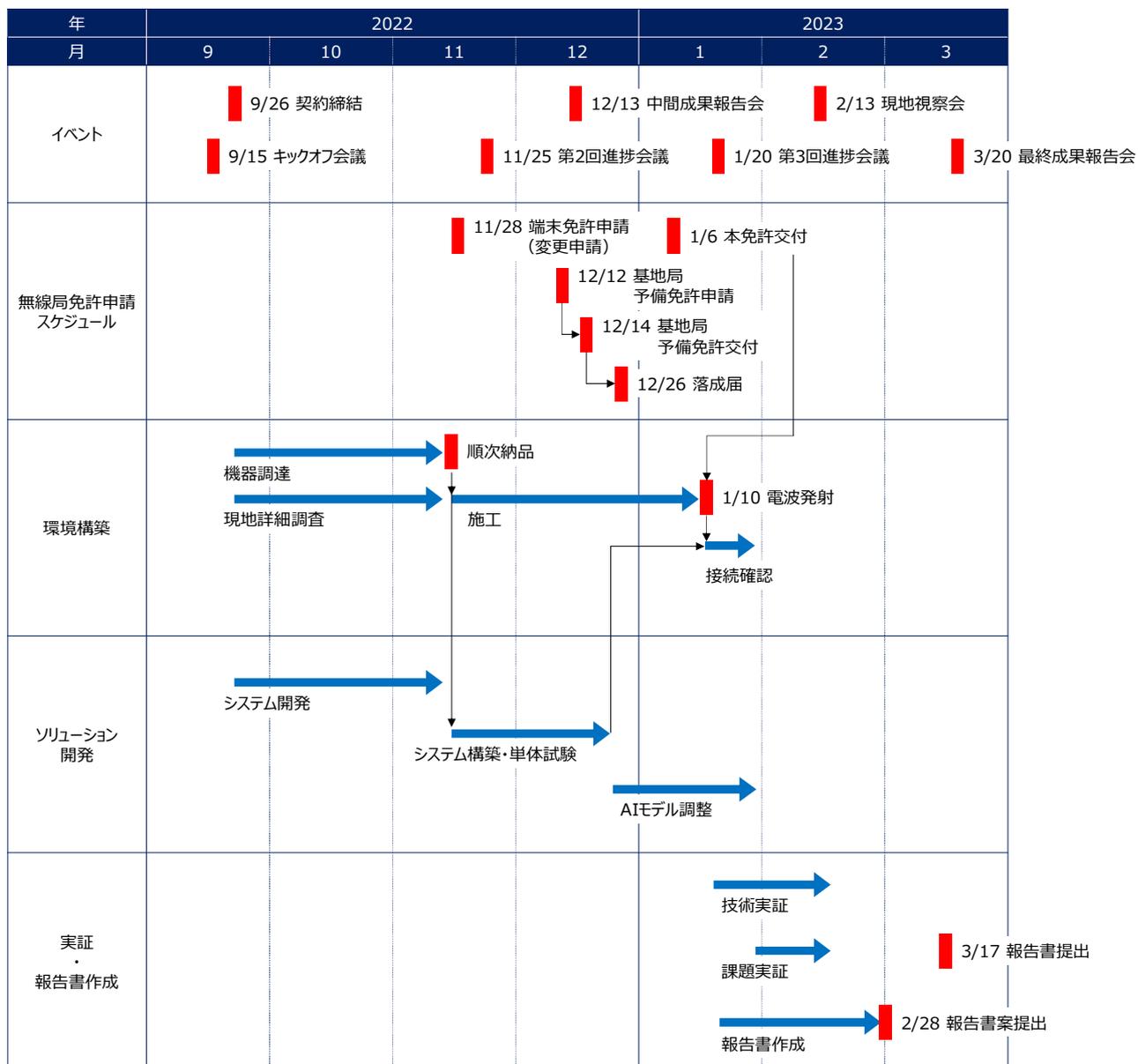


図 7-1 実施スケジュール

令和4年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証【特殊環境実証事業】

ローカル 5G を活用した車地上間通信及び AI 画像認識等による鉄道事業のより安心安全かつ
効率的な運営の実現

2023 年 3 月

アイテック阪急阪神株式会社
