

令和3年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証

中山間地域でのEVロボット遠隔制御等による
果樹栽培支援に向けたローカル5Gの技術的条件及び
利活用に関する調査検討

成果報告書

令和4年3月25日

北海道次世代ヴィンヤード実証コンソーシアム

東日本電信電話株式会社

目次

1. 実証概要	4
1.1 背景・目的	4
1.2 実証の概要	5
2. 実証環境の構築	6
2.1 実施環境	7
2.2 ネットワーク・システム構成	9
2.3 システム機能・性能・要件	47
2.4 免許及び各種許認可	51
2.5 その他要件	51
2.6 実証環境の運用	58
3. ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）	59
3.1 実証概要	59
3.2 実証環境	60
3.3 実証内容	64
3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定	64
3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化	92
3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化	120
3.3.4 準同期TDDの追加パターンの開発	146
3.3.5 その他のテーマ	172
4. ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）	180
4.1 実証概要	180
4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標	180
4.2.1 前提条件	181
4.2.2 実証目標とソリューション概要	187
4.2.3 調査検討事項と実証目標	187
4.3 実証環境	188
4.3.1 鶴沼ワイナリー	189
4.3.2 後志ヴィンヤード	192
4.3.3 鶴沼改善センター	194
4.4 実証内容	198
4.4.1 ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証	198
4.4.2 ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証	244
4.4.3 ローカル5Gの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討	251
4.4.4 継続利用の見通し・実装計画	254
4.4.5 課題実証における追加提案	256

4.4.6 活用ソリューションの拡張と共同利用化（5G ソリューション提供センター構想）	261
5. 普及啓発活動の実施	262
5.1 映像制作への協力	262
5.2 実証視察会の実施	262
5.3 その他普及啓発活動	263
6. 実施体制	265
6.1 体制及び役割	265
6.2 情報保全体制	267
7. スケジュール	269

1. 実証概要

1.1 背景・目的

我が国の農業は、農業従事者の高齢化、新規就業者の減少による労働力不足・技術継承の危機・収益力低下といった課題に直面しており、農業従事者数は、雇用機会の拡大による都市部への農家人口の流出や離農等により、昭和 25 年以降減少を続けています。

農業従事者減少の課題は、国内で生産されるほぼすべての作物における共通的な課題といえます。

しかし我が国の農業において、中山間地農業は農地の約 4 割、農業産出額の約 4 割を占め重要な地位を占めています。また米や麦といった穀物栽培に比べて、野菜や果物、花を生産する園芸分野は、国内自給率が比較的高く、高付加価値商品の開発や販売が積極的に行われており、我が国食料の安定供給や、農業収入向上に大きく貢献しています。しかし、園芸農業は、穀物栽培と比べて、栽培条件も厳しいため生産者の手作業すなわち毎日の手入れ等の作業が多く、自動化・省力化機械の導入が遅れており、高齢農業者等の人手に拠るところが多いことが課題となっています。

そのため、作業者の高齢化や減少、特に中山間地では集落人口の減少による働き手不足の恒常化（樹生産者の減少や高齢化）により、売れる農産物を作ることができるにもかかわらず、作業者不足で生産が出来ない、或いは生産量を拡大できない、労働力不足による廃園が進むといった問題が顕在化しています。なお果実の生産量は、戦後大きく増加し昭和 54 年にピークに達した後、現在に至るまで減少を続けています。輸入については、自由化に伴って段階的に増加傾向にありましたが、近年は減少傾向です。

先に述べたとおり、農業分野全体の課題である熟練作業者の高齢化と減少、後継者不足の深刻化に加え、果樹農業は、年間を通じた生育状態の把握とそれに基づいた日常的な最適管理作業が必要であること、農薬散布や除草作業は、危険かつ機器操作において相当の習熟が必要であることから、パートタイム労働者等への代替が困難であること、農薬散布は回数が多いため、作業者の健康被害も指摘されているなどの事情も加わり、栽培技術の承継と、果樹農業の継承をより一層困難にしています（その結果、廃園等が進む）。農業従事者の高齢化、新規就業者の減少による労働力不足・技術継承の危機・収益力低下といった課題の対応として、センサー、ビッグデータ等を活用した一次産業の生産性向上・高付加価値化を図る ICT への期待・重要性が益々高まっておりますが、更にこのような果樹農業の持続的発展を確保するためには「ロボットによる省人化および遠隔監視制御技術」や「データ駆動型の栽培技術」が不可欠であることから、超高速・超低遅延・多数同時接続といった特長をもつ 5G に対する期待も大きいと考えます。

なかでも、地域の様々な主体が自ら建物内や敷地内でスポット的かつ柔軟にネットワークを構築できる「ローカル 5G」は、今後、ますます産業、公的の様々な分野で活用が期待されている他、ローカル 5G を中心とした ICT 技術の導入による自動化・省力化、高生産性や高付加価値を実現する栽培管理技術の導入は、人手不足や高齢化により日々の生産管理が十分に行き届かなくなりつつある中山間地の園芸農業分野を中心に導入することが、

喫緊に解決すべき課題であり、できるだけ早く技術開発を進め、実証・実装を進めなければならないと考えます。

そこで、本事業では、中山間地の園芸農業で、比較的高付加価値な農産物を生産しているものの、日々の管理作業で多くの人手を要するため、地方・過疎地の人口減少と、新型コロナウイルス感染症による海外からの農業実習研修生の来日が困難になるなどの事情で、人手を確保することが困難な地域として、北海道の果樹農園を実証地域として選定し、「ロボットによる省人化および遠隔監視制御技術」や「データ駆動型の栽培技術」等に対するローカル 5G 等技術の活用可能性を検証し、日本全国の中山間地農業の展開を支える技術の実現に向けた課題と可能性を調査しました。

1.2 実証の概要

ローカル 5G および ICT を用いて、中山間地果樹園における労働力不足（高齢化・後継者不足）問題の解決や果樹栽培データの体系化による営農高度化・地域の再活性化に向けた、EV ロボットによる人手作業の代替、スマートデバイス、AI 等の活用によるデータ駆動型かつ体系化された果樹栽培を実現するための実証を行いました。なお冬期間積雪下での実行となったため、一部の实証では模擬環境を構築して実証をおこないました。



図 1.2.1 実証概要図

2. 実証環境の構築

本実証は北海道内にある醸造用ぶどうを栽培する果樹園を実証フィールドとしました。果樹園は平地ではなく、傾斜のある中山間地域に位置しており、果樹園の周囲には樹木の生い茂っているエリアもあり、また、ぶどうの木にも葉や果実が残っており、ポイントによっては電波伝搬への影響を与えることも考えられます。

また、IoT 等の ICT を活用したスマート農業の導入は著しいものの、樹木の遮蔽等により無線環境の構築が困難であることから中山間地域への ICT 導入はまだ十分と言える状況ではありません。果樹園等中山間地域へのスマート農業の導入促進のため、果樹園の地形的条件、および植生等の果樹園特有の条件下における電波伝搬の特性を把握し、ローカル 5G を活用した課題解決についての検討を実施しました。「1.2 実証の概要」でも述べた通り、冬期間積雪下での実証のため、模擬環境も構築しました。

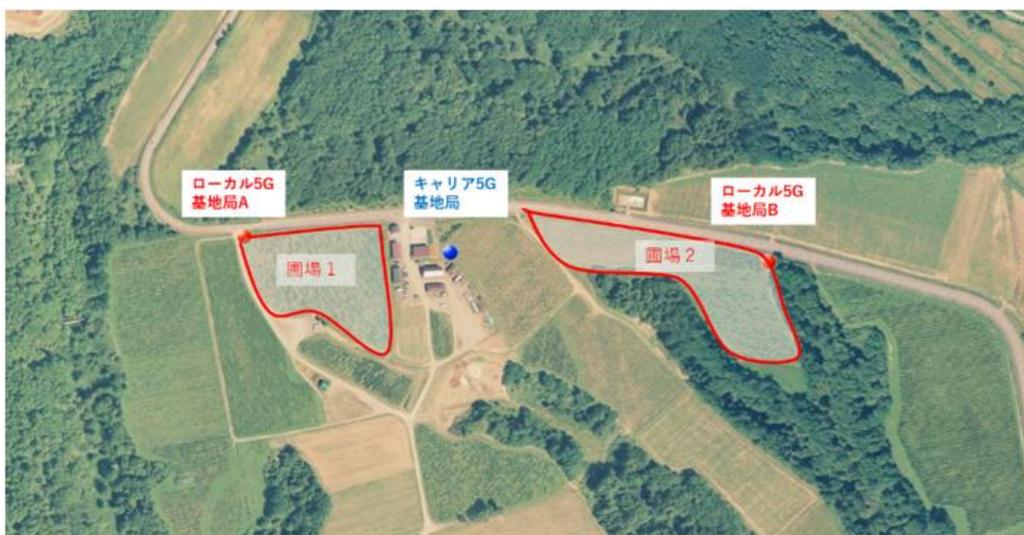


図 2.1 実証環境圃場 1、圃場 2 (鶴沼ワイナリー)
(出典：国土地理院地図 地理院地図)



図 2.2 実証環境圃場 3 (後志ヴィンヤード)
(出典：国土地理院地図 地理院地図)

2.1 実施環境

本実証では北海道内の醸造用ぶどう果樹園を実証フィールドとし、3か所の圃場に対して3基のローカル5G基地局を設置しました。圃場1と圃場2は同一果樹園内に位置し、圃場3は異なる地域の果樹園内に位置します。圃場1側の基地局をローカル5G基地局Aとし、RUを設置しました。圃場2側の基地局をローカル5G基地局Bとし、RUに指向性のあるセクターアンテナを外部アンテナとして取り付けました。なお、圃場1と圃場2の間には商用サービス開始済のキャリア5G基地局が1基設置されています。



図 2.1.1 ローカル5G基地局Aカバーエリア
(出典：国土地理院地図 地理院地図)



図 2.1.2. ローカル 5G 基地局 B カバーエリア
(出典：国土地理院地図 地理院地図)

圃場 3 の基地局をローカル 5G 基地局 C とし、RU を設置しました。



図 2.1.3 ローカル 5G 基地局 C カバーエリア
(出典：国土地理院地図 地理院地図)

2.2 ネットワーク・システム構成

(1) ローカル 5G ネットワーク

本実証のローカル 5G のネットワーク構成は下図のとおりです。コア 1 台でローカル 5G 基地局 A～C を收容し、コア装置を設置するセンター（鶴沼改善センター）と、CU/DU および RU を設置する拠点（鶴沼ワイナリー、後志ヴィンヤード）間は VPN 網で接続する構成としました。ローカル 5G 無線機器の諸元は下表のとおりです。

本実証で利用するローカル 5G 機器は Apresia 社の機器を選定しました。Apresia 社の機器は本実証構成のとおり、コア装置を複数拠点と共有して利用することが可能です。今年度の実証としては 2 拠点ですが、今後課題解決システムを横展開していくと拠点数は増えていくことが考えられ、同一システムとして各拠点で利用することにより、運用に関わるコストを抑えることができるため、複数拠点でのコア共用機能を有している機器を選定しました。

また、上りスロットを増やした追加準同期パターン TDD2 による上りスループットの改善を実証しました。

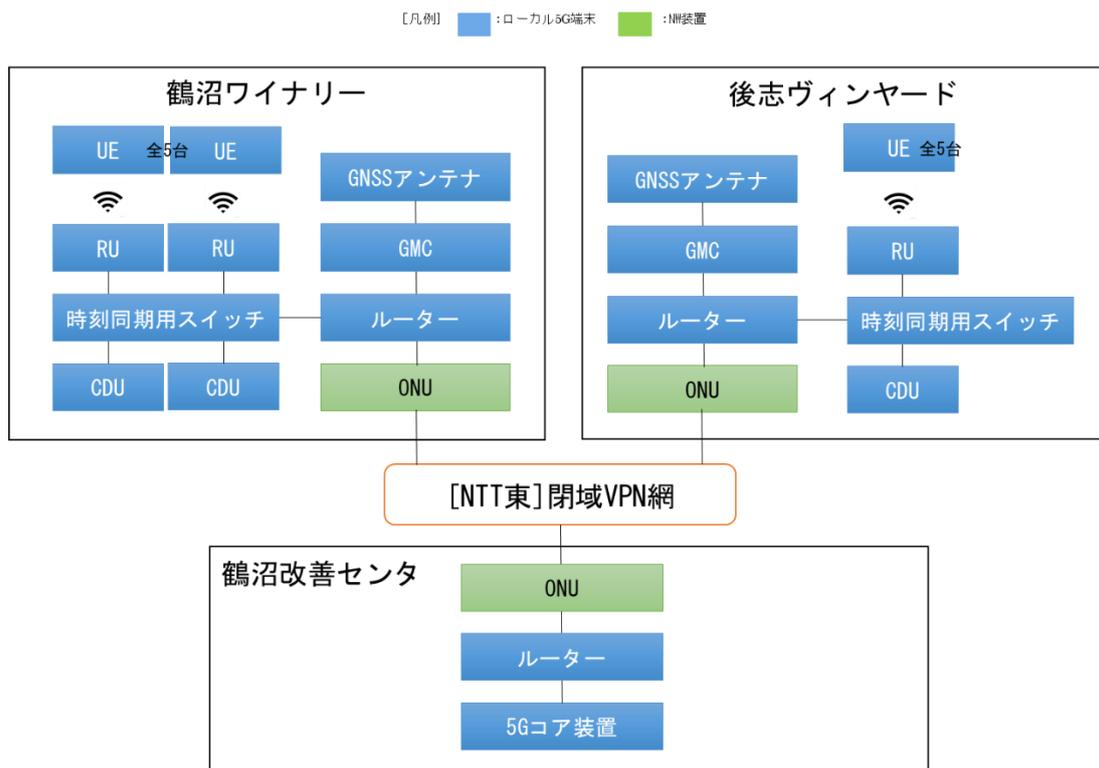


図 2.2.1 ローカル 5G ネットワーク構成図

表 2.2.1 ローカル 5G 無線システム諸元

項目	基地局相当装置	移動局相当装置
製造ベンダー	Apresia	Apresia
台数	3	10
設置場所（屋内/屋外）	屋外	屋外
同期/準同期	同期/準同期	同期/準同期
UL:DL 比率		
周波数帯	99.72MHz	99.72MHz
SA/NSA	SA	SA
UL 周波数	4.8~4.9GHz	4.8~4.9GHz
DL 周波数		
UL 帯域幅	100MHz	100MHz
DL 帯域幅		
UL 中心周波数	4849.86MHz	4849.86MHz
DL 中心周波数		
UL 変調方式	OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM)	OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM)
DL 変調方式	OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM)	OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM)
MIMO	2×2 MIMO	2×2 MIMO

ローカル 5G 基地局 B には外部アンテナを取り付けるため、上記基地局相当装置とはアンテナ指向性、アンテナ利得が異なります。具体的な仕様については後述します。

表 2.2.2 ローカル 5G ネットワーク機器一覧

No.	物品	設置場所	メーカー	型番	数量
1	5G コアサーバー	鶴沼改善センター	HPE	DL360 Gen10	1
2	ルーター（センター用）	鶴沼改善センター	YAMAHA	RTX3500	1
3	ルーター（拠点用）	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	YAMAHA	RTX830	2
4	CU/DU サーバー	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	Apresia	ApresiaAERO-CDU100	3
5	RU	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	Apresia	ApresiaAERO-RU100	3
6	時刻同期対応スイッチ	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	Apresia	Apresia20000-8X4T-AC	2
7	GMC (Grand Master Clock)	鶴沼ワイナリー/後志ヴィン	セイコー	TS-2950	2

		ヤード			
8	GPS アンテナ	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	セイコー	TS-213	2
9	ローカル 5G 対応端末	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	Apresia	ApresiaAERO-UE100	10
10	外部アンテナ	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	電気興業	VH65A-3545RTD	1
11	遠隔保守用 PC	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	富士通	FMVA8804GP	1
12	エリアテスター	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	アンリツ	MU878070A	1
13	シミュレーションソフト	鶴沼ワイナリー/後志ヴィンヤード	Ranplan Wireless	-	1

① 5G コアサーバー

ローカル 5G システムのコア装置は、5G コアサーバーにて構成されます。5G コアサーバーはスタンドアローン型のローカル 5G システムのソフトウェアを実装します。ハードウェアはサーバーを 1 台、鶴沼改善センター内のラックに設置しました。



図 2.2.2 5G コアサーバー外観

表 2.2.3 5G コアサーバー仕様

項目	仕様	備考
ソフトウェア仕様	スタンドアローン型 5G ソフトウェア ・ AMF ・ UDM ・ SMF ・ UDR ・ PCF ・ NRF ・ NSSF ・ UPF ・ AUSF	
ハード構成	・ DL360G10 S4215R 1P8C 32G 8SFF S100i NCGS	
準拠規格	・ 3GPP Release17	
システム規模	・ ユーザー数 : 16 ユーザー ・ UE 同時接続数 : 16 ユーザー (1CDU)	
CPU	1P/8Core intel Xeon Silver 3.2 GHz	
メモリ容量	64GB (32GBx2)	
ストレージ	物理容量 : 960GB (960GBx1)	12G SAS SSD
外部インターフェース	2x 10Gb 2-port SFP+ 4x 10GbE SR SFP+	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	4.29 x 43.46 x 70.7cm	
重量	16.27kg	
電源	2x AC100V 最大消費電力 : 1600w (2x 800w PS) 最大消費電流 : 8A	コネクタ 100V 用 NEMA5-15P 200V 用 C13-14

② ルーター（センター用）

VPN 網アクセスのためにルーターを 1 台構築しました。ルーターは鶴沼改善センター内のラックに設置しました。



図 2.2.3 ルーター外観

表 2.2.4 ルーター仕様

項目	仕様	備考
LAN ポート	4 ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, スト レート/クロス自動判別)	
WAN ポート	任意の LAN ポートを利用可能	
スループット	最大 4.0Gbit/s	
IPsec スループット	最大 2.0Gbit/s	
外形寸法	51.5 (W) × 215 (H) × 200 (D) mm	
重量	0.9Kg	
項目	仕様	備考
LAN ポート	4 ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, スト レート/クロス自動判別)	

③ ルーター(拠点用)

各拠点間 IP ネットワークを構成するルーターです。鶴沼ワイナリー、後志ヴィンヤード各拠点のラックに 1 台ずつ設置しました。



図 2.2.4 ルーター(拠点用)外観

表 2.2.5 ルーター(拠点用)仕様

項目	仕様	備考
LAN ポート	3 ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, ストレー ト/クロス自動判別)	
WAN ポート	任意の LAN ポートを利用可能	
スループット	最大 2.0Gbit/s	
IPsec スループット	最大 1.5Gbit/s	
VPN 機能	IPsec (VPN 機能 : NAT トラバース, XAUTH) + AES128/256, 3DES, DES (暗号機能 : ハードウェア 処理)+IKE/IKEv2 (メインモード, アグレッシブ モード), PPTP (VPN 機能) +RC4 (暗号機能), L2TP/IPsec, L2TPv3, L2TPv3/IPsec, IPIP トン ネル, マルチポイントトンネル (サーバー/クラ イアント)	
外形寸法	220 (W) × 42 (H) × 239 (D) mm	
重量	1.5Kg	

④ CU/DU サーバー

CU/DU サーバーは、5G システムの無線アクセスネットワークにおける集約ノード機能を担う CU(Central Unit)と DU(Distributed Unit)を実装する仮想サーバーです。CU/DU サーバーはルーター (拠点用)、時刻同期対応スイッチを接続しました。CU/DU サーバーは実証エリアに設置するラックに収容しました。



図 2.2.5 CU/DU 外観

表 2.2.6 CU/DU サーバー仕様

項目	仕様	備考
準拠規格	0-RAN	
CPU	Intel Xeon Gold(20 コア 40 スレッド)	
メモリ容量	256GB	
ストレージ	512GB	
外部インターフェース	8x 10BASE-R(SFP+) 4x 25GBASE-R(SFP+)	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	44 x 71 x 88cm	
重量	25kg 以下	
電源	AC100V~120V(±10%) AC200V~240V(±10%) 最大消費電力：800W 以下 最大消費電流：10A 以下(AC100V 時)	

⑤ RU(5G システム基地局)

RUは本実証エリアをカバーするように圃場 1、圃場 2 にそれぞれ 1 台、圃場 3 に 1 台構築しました。



図 2.2.6 RU 外観

表 2.2.7 RU仕様

項目	仕様	備考
準拠規格	0-RAN	
外部インターフェース	1x 10GbE (SFP+)	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	21.8 x 21.8 x 6.4cm	
重量	3kg 以下	
電源	PoE++ (802.3bt) AC100V~120V (±10%) 最大消費電力：150W 以下 最大消費電流：およそ 3.4A	
空中線	4T1R	
EIRP	MIMO パス当たり：28dBm、総 EIRP：34dBm	ビームフォーミング有
占有帯域幅	99.72MHz	
中心周波数	4849.86MHz	
変調方式	DL：OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM) UL：OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM)	
動作温度	-5°C~+40°C	
アンテナ指向性	オムニ	
アンテナ利得	5.0dBi/port	給電線損失含む

⑥ 時刻同期対応スイッチ

時刻同期対応スイッチは GMC(Grand Master Clock)と接続し、GPS アンテナから得た時刻等を接続される機器に同期させるためのスイッチです。ルーター(拠点用)、CU/DU、RU と接続しました。



図 2.2.7 時刻同期対応スイッチ外観

表 2.2.8 時刻同期対応スイッチ仕様

項目	仕様	備考
外部インターフェース	8x 1000BASE-X/10GBASE-R (SFP/SFP+) 4x 10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	4.38 x 21 x 22 cm	
重量	2.3kg 以下	
電源	AC100V~120V 最大消費電力：33W 以下 最大消費電流：0.33A	

⑦ GMC(Grand Master Clock)

GMCはGPSアンテナから受信した時刻情報を元に高精度な時刻同期をRU(5GCシステム無線基地局)に対して行いました。各拠点に設置しました。



図 2.2.8 GMC 外観

表 2.2.9 GMC 仕様

項目	仕様	備考
外部インターフェース	4x 10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	4.4 x 43 x 50 cm	
重量	約 10kg	
電源	AC100V~AC240V±10% 最大消費電力：39W 最大消費電流：0.48A	

⑧ GPS アンテナ

GPSからの通信を受診します。時刻同期対応スイッチと接続しました。GPSアンテナは各実証エリア内に設置し、RU(5Gシステム基地局)間の時刻同期をとるために使用しました。



図 2.2.9 GPS アンテナ外観

表 2.2.10 GPS アンテナ仕様

項目	仕様	備考
使用周波数範囲	DC~2000MHz	
VSWR	1.2 以下	
利得	40dB 以上	
仕様温度範囲	-40℃~85℃	
防水特性	IP67	
外形寸法(高さ×幅×奥行)	4.38 x 21 x 22 cm	
重量	2.3kg 以下	
電源	AC100V~120V	GPS 受信機(GMC)より同軸ケーブル経由にて受電

⑨ ローカル 5G 対応端末 (UE)

本実証におけるローカル 5G 端末 (UE) で本実証では圃場 1~圃場 3 で合計 8 台用意しました。



図 2.2.10 ローカル 5G 対応端末 (UE) 外観

表 2.2.11 ローカル 5G 対応端末 (UE) 仕様

項目	仕様	備考
無線規格	5G NR (FR1)/IEEE 802.11ac	
外部インターフェース	10/100/1000BASE-T ×2 1000/10GBASE-T ×1	
外形寸法 (高さ×幅×奥行)	23.3×15.4×10.5 cm	
重量	1.6Kg 以下	
電源	PoE++ (802.3bt) AC100 V~120 V (±10%) 消費電力 : 40W 以下 消費電流 (A) : 2.5A 以下	※AC アダプター使用
空中線	1T4R	
空中線電力	23dBm (200mW)	
占有帯域幅	99.72 MHz	
中心周波数	4849.86 MHz	
変調方式	DL: OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM) UL: OFDMA (QPSK, 16QAM, 64QAM)	
動作温度	-5 ~ 40°C	
アンテナ指向性	オムニ	
アンテナ利得	ant1:2.3dBi/ant2:2.0dBi/ ant3:1.1dBi/ant4:1.6dBi	給電線損失含む

⑩ 外部アンテナ

RU に接続する外部アンテナで、ローカル 5G 基地局 B に取り付けました。

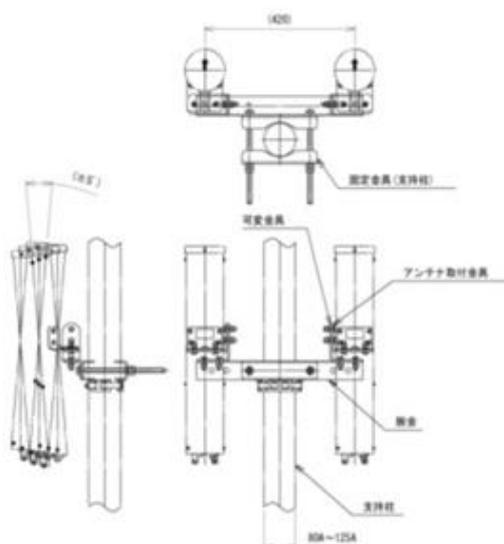


図 2.2.11 外部アンテナ外観

表 2.2.12 外部アンテナ仕様

項目	仕様	備考
使用周波数範囲	4800~5000MHz	
VSWR	1.5 以下	
利得	初期チルト 17.5dBi 以上 可変時 17.0dBi 以上	
水平面内指向性ビーム幅	55° ±10	
垂直面内指向性ビーム幅	6.5° ±1	
耐風速	75m/s	
外形寸法(直径×高さ)	φ105mm×550mm(コネクタ除く)	
重量	3.8kg 以下(アンテナ本体)	

⑪ 遠隔保守用 PC

ローカル 5G 機器に VPN でリモートアクセスできる PC を導入し、ローカル 5G 機器を遠隔から保守できる構成としました。



図 2.2.12 遠隔保守用 PC 外観

表 2.2.13 遠隔保守用 PC 仕様

項目	仕様	備考
メーカー名	FUJITSU	
メーカー型番	FMVA8804GP	
シリーズ名称	パリュウ-LIFEBOOK	
商品名	LIFEBOOK A5510/FX	
CPU	Intel Core i5-10210U プロセッサ	
メモリ	16GB	
ストレージ	SSD 512GB	
OS	Windows10 Pro 64bit	

⑫ エリアテスター

受信電力 (RSRP)、通信品質 (SIR または SINR) の測定にエリアテスターを用いました。



図 2.2.13 エリアテスター外観

5G NR TDD sub-6GHz測定ユニット MU878070A 規格

◆ 測定種別

▶ 5G NR TDD Sub-6GHz基地局測定

- 測定対象： SSS (Secondary Synchronization Signal)
DMRS for PBCH (Demodulation Reference Signal)
- Cyclic Prefix： Normal
- 測定項目： SS-RSRP, SS-RSRQ, SS-SIR, Transmission Power, RSSI
DMRS-RSRP, DMRS-SIR, フレームタイミング
- 測定PCI数： 最大40 (PCI: Physical Cell Identifier)
- チャンネル帯域幅： 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 MHz
- サンプリング時間： 1周波数測定 $N \times SS$ 周期 例：SS周期 = 5 ms、PCI数 = 1の場合、20 ms
例：SS周期 = 20 ms、PCI数 = 1の場合、40 ms
2周波数以上測定 1周波数あたり $N \times SS$ 周期 + 20 ms
例：周波数1：SS周期 = 20 ms、PCI数 = 3
周波数2：SS周期 = 20 ms、PCI数 = 5の場合、140 ms
- *SS周期が10ms以上の場合、Nは2以上の整数で $N \geq PCI$ 数 $\times 10ms / SS$ を満たす値であり、測定周波数ごとに異なる。
SS周期が5msの場合の最短測定時間は、SS周期が10msのときの最短測定時間と同じ。
- その他の測定： RS遅延プロファイル

▶ CW

- 周波数： ライセンスされている周波数から1周波数 (0.01 MHz単位)、BW：15 kHz
サンプリング時間：10 ms

▶ スペクトラムモニタ

- 周波数： ライセンスされている周波数から中心周波数を設定
スパン： 100, 200, 400 MHz, Full
※Full: 中心周波数が属する周波数帯域(3.7, 4.5 GHz)全体の測定

◆ 消費電力

9W以下 (MU878070A 1台あたり, ML8780A/81A は含まず)

測定ユニット	ソフトウェア	対応バンド	測定周波数[MHz]
5G NR TDD sub-6GHz 測定ユニット	MU878070A	MX878071A	3.7 GHz (Band n77, n78)
		MX878072A	4.5 GHz (Band n79)

図 2.2.14 エリアテスター概要

⑬ シミュレーターソフト

カバーエリアのシミュレーションにシミュレーターソフトを用いました。

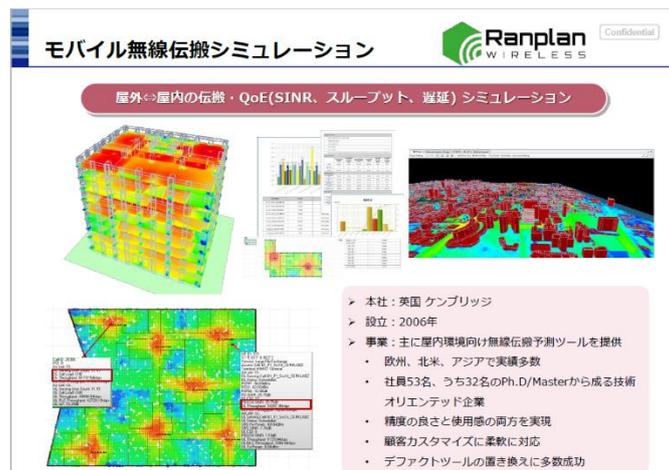


図 2.2.15 RANPLAN シミュレーションイメージ

特徴は以下の通りです。

- ・ 屋外と屋内の両デザインが同時に実行可能、プランニング、伝播予測、キャパシティシミュレーション
- ・ 3D RF 信号伝播予測を屋外信号からのインドア干渉シミュレーション
- ・ 屋外予測マップデータの取り込みとオープンかつプロフェッショナルなデータソースからのネットワーク製品
- ・ 自動化されたカプラー及びスプリッタ挿入機能、アンテナ、ケーブル間のシングルまたはグループコネクション
- ・ MIMO サポート (5 形態: SISO, SFBC, OLSM, CLSM, MU_MIMO) 8x8 (Rank 8)
- ・ クロスシステムに対応 キャパシティ・トラフィック
- ・ オフロードシミュレーション、分析
- ・ エレベータシャフト、階段、トンネル形状、傾斜形状に特化したデザインファンクション
- ・ ドアや窓のプリセットの作成を簡単操作で実現、スタンプ機能
- ・ スマートなプリント機能 事前定義した図面テンプレートでのスクリーンプリント

(2) リモート EV ロボット・コントロールシステム

リモート EV ロボット・コントロールシステムは、圃場を自動走行し、草刈、防除作業を実施することが可能な EV ロボット、および EV ロボットの遠隔制御を行う遠隔制御システムから構成されます。

鶴沼ワイナリーに 2 台、後志ヴィンヤードに 2 台の計 4 台の EV ロボットを配置し、遠隔監視制御拠点から EV ロボットの走行開始・停止、再開等の制御を行う構成となっています。

EV ロボットは、草刈、防除用の作業機を搭載し、無人で自動走行しながら草刈・防除作業を実施可能であり、中山間地を走行するのに適したオフロード用タイヤを装着し安定した走行・作業が可能です。また、レーザースキャナーによる障害物検知、前後カメラによる遠隔からの映像監視による緊急停止制御が可能であり、複数段階の安全制御を実現しています。

EV 車両の動作状態を遠隔から監視することを可能にする、前後カメラの映像は、ローカル 5G 等のネットワークで接続された監視拠点で確認することが可能です。

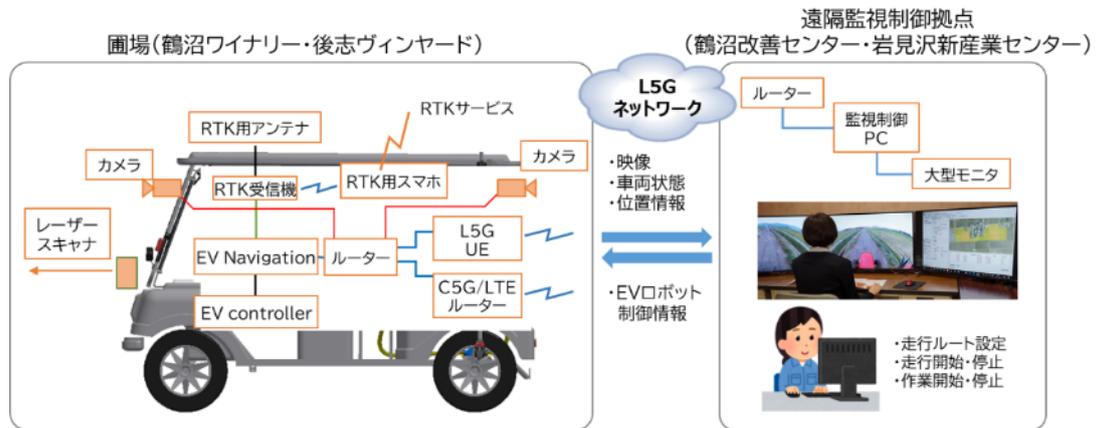


図 2.2.16 リモート EV ロボット・コントロールシステム構成

表 2.2.14 リモート EV コントロールシステム機器一覧

分類	機器名	数量	設置場所	機能	メーカー
EV ロボット	EV 車両	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	EV 本体	豊田通商
	作業機 (草刈)	2	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	自動草刈作業機	豊田通商
	作業機 (防除)	2	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	自動防除作業機	豊田通商
	レーザースキャナ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	前方障害物検知	—
	3D カメラ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	作業機動作位置把握	—
	RTK アンテナ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	GNSS 受信	NTT ドコモ
	RTK 受信機	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	GNSS 受信	NTT ドコモ
	RTK 用スマートフォン	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	RTK サービス	NTT ドコモ
	EV ロボット用 ポータブル 電源	8	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	EV ロボット搭載電源	Jackry
遠隔制御ソフト	1	鶴沼改善センター 岩見沢新産業支援センター	EV 制御情報送受信		

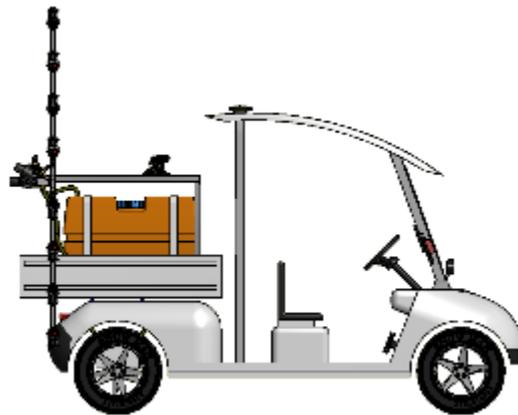


図 2.2.17 EV ロボット (防除) イメージ図

表 2.2.15 EV ロボット機器一覧

項目	仕様	備考
定格出力	20kw (37PS)	
最高速度	30km/h	
バッテリー種類	リチウムイオン電池 (6.4KWh)	
その他	オフロード用ラグ付きタイヤ装着 防水・防錆対応 AC100V	



図 2.2.18 RTK 受信機外観図

表 2.2.16 RTK 受信機諸元表

項目	仕様	備考
対応衛星	GPS L1C/A L2C、GLONASS L10F L20F、Galileo E1B/C E5b、BeiDou B1I B2I、QZSS(みちびき) L1C/A L2C L1S、SBAS	
対応測位方式	単独測位、RTK 測位、ネットワーク RTK 測位	
測位性能	単独測位 ・緯度方向：63.79cm RMS ・経度方向：75.94cm RMS ・高さ方向：148.92cm RMS RTK 測位 ・緯度方向：1.58cm RMS ・経度方向：1.77cm RMS ・高さ方向：4.96cm RMS	
外形寸法	90 (W) × 12 (H) × 45 (D) mm	
重量	40g	



図 2.2.19 EV ロボット搭載電源外観

表 2.2.172.2 EV ロボット搭載電源諸元表

項目	仕様	備考
容量	191400mAh/708Wh	
定格出力	500W (瞬間最大出力 1000W)	
AC100V コンセント	2 口 (純正弦波)	
外形寸法	300 (W) × 192 (H) × 191 (D) mm	
重量	6.8Kg	

(3) スマートガイドシステム

スマートガイドシステムは、圃場内の作業における作業員同士、または作業員と圃場管理者との双方向コミュニケーション、および EV ロボットの動作状況をリアルタイムに把握するシステムです。

システム構成は、圃場作業機器、EV ロボット機器と、圃場管理者側設備、サーバー設備に大別されます。圃場作業機器は、作業視野を撮影するウェアラブルカメラ、双方向通話を行うワイヤレススピーカー、データ通信機器から構成され、同様に EV ロボット機器は、前部・後部カメラ、データ伝送用機器から構成されます。圃場管理者側は、映像受信用 PC、ディスプレイ設備、サーバー設備は多地点接続サーバー、記録用ストレージから構成されます。

圃場作業員が装着したウェアラブルカメラ、および EV ロボットに搭載された前後カメラより送信される映像は、多地点接続サーバーを通じて複数拠点で任意の対象を表示することができるとともに、特定の相手と双方向コミュニケーションをとることが可能です。圃場管理者側各拠点では、作業員、EV ロボットから配信された映像を単独・分割で表示することが可能であり、大画面ディスプレイに表示することで圃場内の作業状況映像をリアルタイムに把握することが可能です。

圃場作業員が装着したウェアラブルカメラ、EV ロボットに装着したカメラで撮影された映像は、サーバー設備の記録用ストレージに自動保存されます。

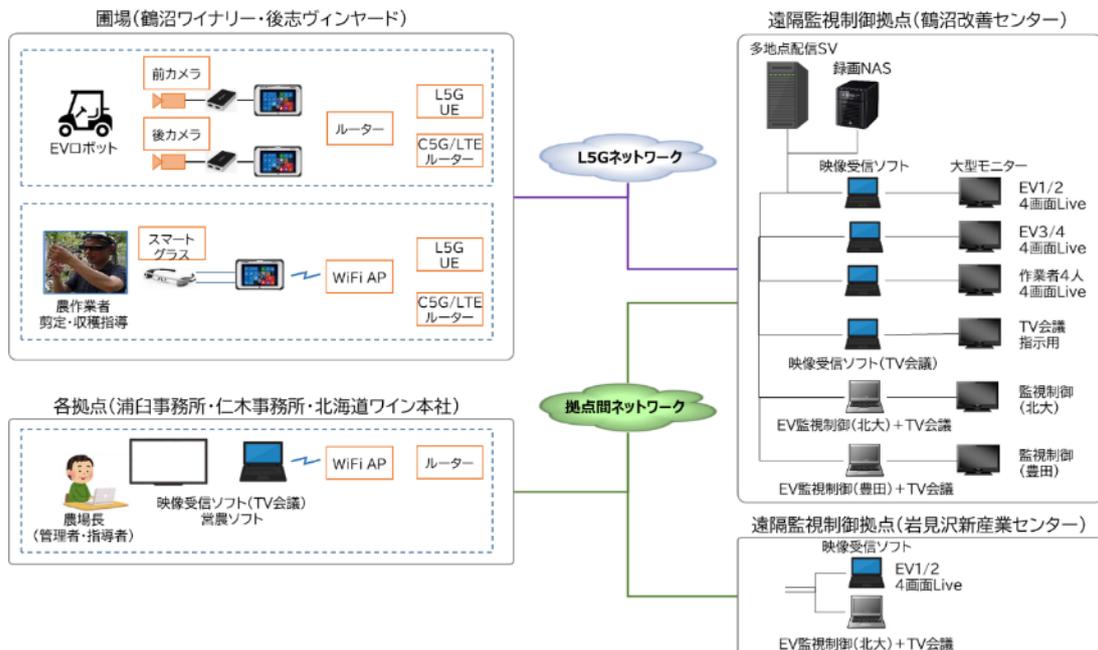


図 2.2.20 スマートガイドシステム構成図

表 2.2.18 スマートガイドシステム機器一覧

分類	機器名	数量	設置場所	機能	メーカー
圃場作業 者機器	ウェアラブルカメラ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	作業者視野撮影、映像表示	EPSON
	ビデオキャプチャー	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	HDMI 映像キャプチャー	Magewell
	タブレット端末	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	映像配信	Panasonic
	ヘッドマウントカメラ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	作業者視野撮影	Watec
	ワイヤレススピーカー	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	双方向通話	SANWA SUPPLY
	スマートフォン	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	映像配信	Kyocera
EV 側機器	カメラ	8	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	映像撮影	SONY
	ビデオキャプチャー	8	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	HDMI 映像キャプチャー	Magewell
	タブレット端末	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	映像配信	Panasonic
圃場管 理者設 備	PC 端末	3	鶴沼ワイナリー事務 所 後志ヴィンヤード事 務所 小樽本社	TV 会議端末	HP
	ディスプレイ	3		映像分割表示	Panasonic
	ディスプレイスタンド	3		ディスプレイ設置	audio-technica
監視セ ンター 設備	多地点接続サーバー	1	鶴沼改善センター	多地点 TV 会議接続サーバーハードウェア	DELL
	多地点接続サーバーソフトウェア	1		多地点 TV 会議接続サーバーソフトウェア	ENWA
	記録用ストレージ	1		配信映像記録	Baffalo
	PC 端末	6		TV 会議端末	HP
	ディスプレイ	6		映像分割表示	Panasonic
	ディスプレイ切替器	1		映像切替	TESmart
監視セ ンター (サブ 拠点)	PC 端末	1	岩見沢新産業支援センター	遠隔制御操作	HP



図 2.2.21 TV 会議サーバー外観

表 2.2.19 TV 会議サーバー諸元表

項目	仕様	備考
プロセッサ	インテル Xeon E-2200 製品ファミリー プロセッサ (プロセッサあたり最大 8 コア)	
メモリ	UDIMM	
ストレージ	3.5 インチ ホットプラグ機能対応 SAS/SATA/SSD	
外形寸法	434 (W) × 43 (H) × 596 (D) mm	
重量	12. 2Kg	



図 2.2.22 データ保存 NAS 外観

表 2.2.20 データ保存 NAS 諸元表

項目	仕様	備考
CPU	Annapurna LabsAlpine AL314	
メモリ	DDR3 ECC 8GB	
RAID 方式	ソフトウェア RAID	
対応 RAID	6/5/10/1/0 (出荷時 RAID6)	
外形寸法	481 (W) × 88 (H) × 767 (D) mm	
重量	約 25. 0kg (12 ドライブ) 約 19. 8kg (4 ドライブ、8 スロット空き)	



図 2.2.23 映像監視用ノート PC 外観

表 2.2.21 映像監視用ノート PC 諸元表

項目	仕様	備考
OS	Windows10 Pro 64bit	
プロセッサー	インテル Core i5-10210U プロセッサー	
メモリ	8GB	
ストレージ	256GB SSD	
無線機能	インテル Wi-Fi 6 AX201 a/b/g/n/ac/ax	
外形寸法	360 (W) × 234 (H) × 19.2 (D) mm	
重量	1.7kg	



図 2.2.24 監視センター大型モニター外観

表 2.2.22 監視センター大型モニター諸元表

項目	仕様	備考
画面サイズ	65v 型	
解像度 (H × V)	3840 × 2160	
輝度	300 cd/m ²	
消費電力	185W	
外形寸法	1466 (W) × 849 (H) × 93 (D) mm	
重量	18.2kg	



図 2.2.25 EV ロボット前後カメラ外観

表 2.2.23 EV ロボット前後カメラ諸元表

項目	仕様	備考
総画素数	約 2000 万画素	
動画記録画素数/フレームレート	5K/30p、4K/60p、2.7K/120p、1440/120p、1080/240p	
外形寸法	71.0 (W) × 55.0 (H) × 33.6 (D) mm	
重量	158g	
項目	仕様	備考



図 2.2.26 USB 接続型ビデオキャプチャー外観

表 2.2.24 USB 接続型ビデオキャプチャー諸元表

項目	仕様	備考
入力インターフェース	HDMI × 1 最大入力解像度 4096 × 2160	
オーディオ入出力 インターフェース	入力 マイク用 3.5 mm オーディオジャック 出力 ヘッドフォン用 3.5 mm オーディオジャック	
外形寸法	13.6 (W) × 13.2 (H) × 2.5 (D) mm	
重量	168g	



図 2.2.27 キャプチャー用タブレット外観

表 2.2.25 キャプチャー用タブレット諸元表

項目	仕様	備考
OS	Windows 10 Pro 64bit	
CPU	インテル Core i5 -7300U プロセッサ	
ストレージ	SSD 256 GB (Serial ATA)	
液晶	10.1 型 WUXGA	
ワイヤレス WAN	ワイヤレス WAN モジュール内蔵 (LTE 対応)	
外形寸法	270 (W) × 19 (H) × 188 (D) mm	
重量	1.1kg	



図 2.2.28 拠点大型モニター外観

表 2.2.26 拠点大型モニター諸元表

項目	仕様	備考
画面サイズ	65v 型 (1639 mm)	
解像度 (H × V)	3840 × 2160	
輝度	350 cd/m ²	
消費電力	185W	
外形寸法	1459 (W) × 835 (H) × 82 (D) mm	
重量	27kg	



図 2.2.29 指導用ヘッドマウントカメラ外観

表 2.2.27 指導用ヘッドマウントカメラ諸元表

項目	仕様	備考
撮像素子	1/3 型 CMOS イメージセンサー	
有効画素数	1305(H) × 977(V)	
出力サイズ	1280×960、1280×720、640×480、 320×240	
最大フレームレート	60 fps	
映像出力	USB Video Class 対応	
消費電力	0.75W	
外形寸法	50 (W) × 30 (H) × 36 (D) mm	
重量	85G	



図 2.2.30 指導用スマートフォン外観

表 2.2.28 指導用スマートフォン諸元表

項目	仕様	備考
ディスプレイ	約 5.0 インチ FHD TFT 液晶	
バッテリー容量	3,240mAh	
OS	Android 9 Pie / 10	
CPU	SDM630/2.2GHz × 4 コア + 1.8GHz × 4 コア	
対応通信規格	LTE : B1, B2, B3, B4, B5, B7, B12, B14, B19, B29, B30, B66 UMTS : B1, B2, B4, B5, B6, B19 GSM : 850MHz, 900MHz, 1,800MHz, 1,900MHz	
WiFi サポート	IEEE802.11 a/b/g/n/ac (2.4GHz & 5GHz) IEEE802.11 k/r	
衛星測位	GPS/GLONASS/BeiDou/Galileo/QZSS 対応	
外形寸法	73.4 (W) × 150 (H) × 13.6 (D) mm	
重量	235G	



図 2.2.31 指導用ワイヤレスネックスピーカー外観

表 2.2.29 指導用ワイヤレスネックスピーカー諸元表

項目	仕様	備考
ワイヤレス再生	Bluetooth (Bluetooth 標準規格 Ver. 5.0)	
最大通信距離	見通しの良い状態で 10m 以内	
電源	USB Type-C/充電電池	
駆動時間	連続再生 (MP3 モード) : 最大約 7 時間 連続通信 (Bluetooth モード) : 最大約 13 時間	
防水・防滴	IPX2	
重量	75G	

(4) IoT センシングシステム

IoT センシングシステムは、圃場内の環境データを自動で測定するセンシング機能と、病虫害等の状況を画像判断する AI 機能を提供します。

センシング機能部分は、圃場内に設置するセンサー本体と、受信機で構成され、本体と受信機間は LPWA で通信します。センサー本体はソーラーパネルで発電された電力で動作するため、外部電源なしで動作することが可能です。センサー部分は、気温、湿度、飽差、日射量、CO2 濃度、土壌水分、地中温度が測定可能であり、温度の測定部分はケーブルを延長し、ぶどうの生長点温度を測定することが可能です。測定されたデータはクラウド上のサーバーに送信され、スマートフォン等からサーバーに接続することで、集計したデータをグラフ、一覧表示等で確認することが可能です。

AI 機能部分は、EV ロボットに搭載します。果樹を撮影し、画像判断する AI カメラと、AI 学習データを作成するクラウドサーバーから構成されます。

実施には 2 ステップ有り、①AI 学習用の映像を撮影し、当該映像データを AI 学習作成用クラウドサーバーにアップロードし、学習用データを作成しておきます。②作成した学習データを AI カメラに保存して、以降撮影する映像の中から、リアルタイムに画像判断(推論)、物体認識、集計等を実行することが可能です。撮影している映像と画像判断情報は A 等のネットワークを介し、遠隔拠点等へ送信され確認することが可能です。

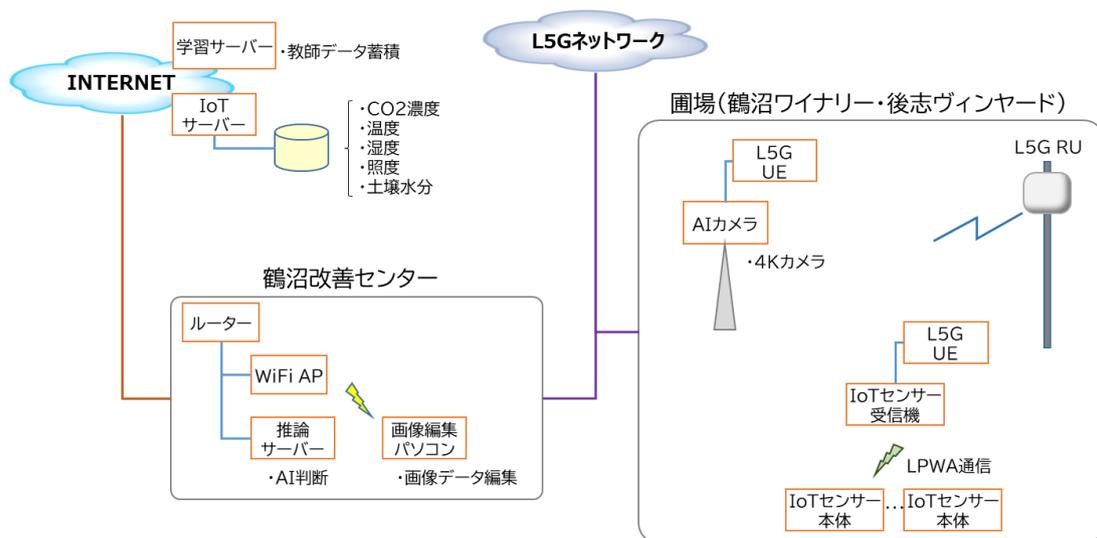


図 2.2.32 IoT センシングシステム構成

表 2.2.30 IoT センシングシステム機器一覧

分類	機器名	数量	設置場所	機能	メーカー
IoT センシング	IoT センサー本体	22	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	圃場環境データ自動 取得・送信	IOZ
	IoT センサー受信機	5	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	IoT 本体データ受信・ クラウド送信	IOZ
AI カメラ	カメラ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	画像撮影、AI 推論処 理、映像・AI 判断結果 伝送	IDS
	レンズ	4	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	カメラ用レンズ	IDS



図 2.2.33 IoT センサー本体・IoT センサー受信機外観

表 2.2.31 IoTセンサー本体・IoTセンサー受信機諸元表

項目	仕様	備考
動作温度/動作湿度	-10～50℃/0～95±3%	
CO2センサー測定範囲	300ppm～5000ppm	
温度サーミスタ測定範囲	-10～60℃	
湿度センサー測定範囲	0～95±3%	
照度センサー	0lx～100000lx	
土壌水分測定範囲	0%～100%	
通信機器	LoRa	
データ	インターネット上のサーバーに保存	



図 2.2.34 画像編集パソコン外観

表 2.2.32 画像編集パソコン諸元表

項目	仕様	備考
OS	Windows10 Pro 64bit	
プロセッサ	インテル Core i5-10210U プロセッサ	
メモリ	8GB	
ストレージ	256GB SSD	
無線機能	インテル Wi-Fi 6 AX201 a/b/g/n/ac/ax	
外形寸法	360 (W) × 234 (H) × 19.2 (D) mm	
重量	1.7kg	



図 2.2.35 AI カメラ外観

表 2.2.33 AI カメラ諸元表

項目	仕様	備考
センサー	CMOS	
解像度	5.0MP (2448 x 2048 ピクセル、アスペクト比 5:4)	
インターフェース	ギガビットイーサネット	
内蔵画像メモリ	128 MB	
外形寸法	34 (W) × 44 (H) × 73 (D) mm	

(5) C5G/LTE ネットワーク

C5G/LTE ネットワークは、株式会社 NTT ドコモが提供するキャリア 5G (C5G) サービス (4.5GHz~4.6GHz)、および LTE サービスを利用し、本実証の拠点間ネットワークにおける、圃場作業者、EV ロボット等と各拠点間を結ぶ、無線ネットワークとして使用します。

NTT ドコモの C5G は NSA 構成のため、5G の周波数帯とあわせて LTE の周波数帯を利用し、コア装置も LTE サービスのコア装置を利用しています。

C5G/LTE ネットワークは、C5G/LTE 端末と、携帯キャリアが提供するデータ通信、インターネット接続サービスで構成されます。



図 2.2.36 C5G/LTE ネットワーク構成

表 2.2.34 C5G/LTE 機器一覧

分類	機器名	数量	設置場所	機能	メーカー
C5G/LTE 端末	C5G/LTE ルーター	14	鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード	データ送受信 インターネット接続	NTT ドコモ



図 2.2.37 C5G・LTE 端末外観

表 2.2.35 C5G・LTE 端末諸元表

項目	仕様	備考
通信	5G : 受信時最大 4.2Gbps/送信時最大 480Mbps 4G : 受信時最大 1.7Gbps/送信時最大 131.3Mbps	
サイズ	157 (W) × 84 (H) × 16 (D) mm	
重量	約 268g	
無線 LAN 規格/最大伝送速度 (規格値)	IEEE802.11a/54Mbps IEEE802.11b/11Mbps IEEE802.11g/54Mbps IEEE802.11n(WiFi 4)/300Mbps IEEE802.11n(WiFi 5)/867Mbps IEEE802.11n(WiFi 6)/1201Mbps 2.4GHz 帯/5GHz 帯対応	
有線 LAN	IEEE802.3bz (2.5GBASE-T) IEEE802.3ab (1000BASE-TX) IEEE802.3u (100BASE-TX)	
同時接続台数	18 台 (WiFi : 16 台/有線 LAN : 1 台/USB : 1 台)	

(6) 拠点間ネットワーク

拠点間ネットワークは、本実証で使用する圃場作業側機器、EV ロボット側機器と、圃場管理者、監視センター拠点、データセンターを結ぶネットワーク、ローカル 5G コアと遠隔地にある CU/DU 拠点を結ぶネットワーク、およびインターネット接続環境を提供するネットワークから構成されます。

各拠点を結ぶネットワークは、東日本電信電話株式会社の光回線、および VPN ネットワークサービスを使用しました。同様に、インターネット接続環境は、東日本電信電話株式会社の光回線、ISP 事業者の提供するインターネット接続サービスを使用しました。

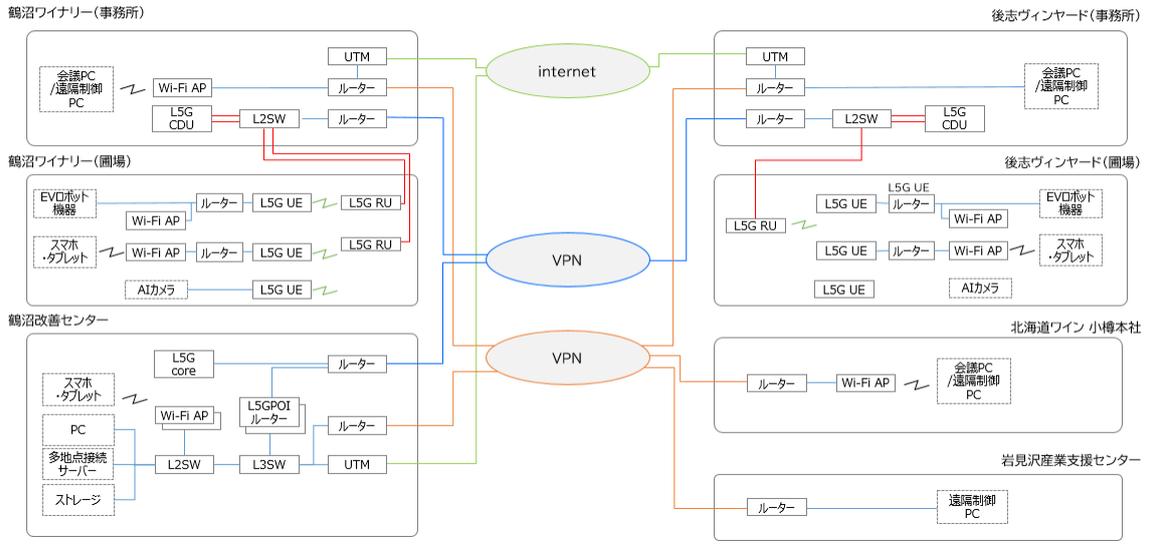


図 2.2.38 拠点間ネットワーク構成図

表 2.2.36 拠点間ネットワーク機器一覧

分類	機器名	数量	設置場所	機能	メーカー
拠点間	ルーター	5	鶴沼改善センター 鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード 小樽ワイン本社 岩見沢新産業支援センター	VPN ネットワーク接続	YAMAHA
	L3 スイッチ (L3SW)	1	鶴沼改善センター	拠点内 LAN 間接続	YAMAHA
	L2 スイッチ (L2SW)	3	鶴沼改善センター	拠点内 LAN 接続	YAMAHA
	Wi-Fi アクセスポイント (Wi-Fi AP)	12	鶴沼改善センター 鶴沼ワイナリー (事務所) 後志ヴィンヤード (事務所) 小樽ワイン本社	無線 LAN 接続	NEC
	ローカル 5G POI ルーター	2	鶴沼改善センター	ローカル 5G 端末 VPN 接続終端	YAMAHA
	EV ロボット・作業用ルーター	8	鶴沼ワイナリー (圃場) 後志ヴィンヤード (圃場)	ローカル 5G 端末 VPN 接続	YAMAHA
	EV ロボット・作業用 Wi-Fi AP	8	鶴沼ワイナリー (圃場) 後志ヴィンヤード (圃場)	無線 LAN 接続	NEC
ローカル 5G	ルーター	3	鶴沼改善センター 鶴沼ワイナリー (事務所) 後志ヴィンヤード (事務所)	VPN ネットワーク接続	YAMAHA
インターネット	UTM	2	鶴沼改善センター	インターネット接続 アクセス制御	Fortigate



図 2.2.39 監視センターL3SW 外観

表 2.2.37 監視センターL3SW 諸元表

項目	仕様	備考
LAN ポート数	12 (10G/5G/2.5G/1G/100M)	
SFP+スロット数	4 スロット	
スイッチング容量	320Gbit/s	
外形寸法	330 (W) × 44 (H) × 250 (D)	
重量	2.7Kg	



図 2.2.402.2 監視センターL2SW 外観

表 2.2.38 監視センターL2SW 諸元表

項目	仕様	備考
LAN ポート数	12 (10G/5G/2.5G/1G/100M)	
SFP+スロット数	4 スロット	
スイッチング容量	320Gbit/s	
外形寸法	330 (W) × 44 (H) × 250 (D)	
重量	2.7Kg	



図 2.2.41 監視センターUTM・DC用 UTM 外観

表 2.2.39 監視センターUTM・DC用 UTM 諸元表

項目	仕様	備考
ファイアウォールスループット	10 / 10 / 6 Gbps	
ファイアウォール同時セッション (TCP)	700,000	
ファイアウォールポリシー	5,000	
外形寸法	216 (W) × 38.5 (H) × 160 (D) mm	
重量	1.01Kg	



図 2.2.42 監視センター・各拠点 VPN ルーター外観

表 2.2.40 監視センター・各拠点 VPN ルーター諸元表

項目	仕様	備考
LAN ポート	3 ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, ストレート/クロス自動判別)	
WAN ポート	任意の LAN ポートを利用可能	
スループット	最大 2.0Gbit/s	
IPsec スループット	最大 1.5Gbit/s	
VPN 機能	IPsec (VPN 機能 : NAT トラバーサル, XAUTH) + AES128/256, 3DES, DES (暗号機能 : ハードウェア処理)+IKE/IKEv2 (メインモード, アグレッシブモード), PPTP (VPN 機能) + RC4 (暗号機能), L2TP/IPsec, L2TPv3, L2TPv3/IPsec, IPIP トンネル, マルチポイントトンネル (サーバー/クライアント)	
外形寸法	220 (W) × 42 (H) × 239 (D) mm	
重量	1.5Kg	



図 2.2.43 監視センター・各拠点 WiFi AP 外観

表 2.2.41 監視センター・各拠点 WiFi AP 諸元表

項目	仕様	備考
通信規格	IEEE802.11ax/ac/n/a/b/g	
伝送速度	5GHz : 最大 4804Mbps 2.4GHz 帯 : 最大 1147Mbps	
WiFi 接続台数	36 台	
外形寸法	51.5 (W) × 215 (H) × 200 (D) mm	
重量	0.9Kg	



図 2.2.44 ローカル 5G POI ルーター外観

表 2.2.42 ローカル 5G POI ルーター諸元表

項目	仕様	備考
LAN ポート	4 ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, ストレー ト/クロス自動判別)	
WAN ポート	任意の LAN ポートを利用可能	
スループット	最大 4.0Gbit/s	
IPsec スループット	最大 2.0Gbit/s	
外形寸法	51.5 (W) × 215 (H) × 200 (D) mm	
重量	0.9Kg	



図 2.2.45 監視センターUPS 外観

表 2.2.43 監視センターUPS 諸元表

項目	仕様	備考
最大設定可能電力 (W)	2.7kW / 3.0kVA	
運転方式	ラインインタラクティブ	
バッテリータイプ・充電時間	鉛蓄電池・4時間	
インターフェースポート	RJ-45 Serial, SmartSlot, USB	
外形寸法	432 (W) × 86 (H) × 671 (D) mm	
重量	44Kg	



図 2.2.46 監視センターデジタルビデオカメラ外観

表 2.2.44 監視センターデジタルビデオカメラ諸元表

項目	仕様	備考
動画解像度	4K	
有効画素数	動画 : 1420 万画素 静止画 : 1420 万画素	
ズーム	光学ズーム : 12 倍 デジタルズーム : 192 倍	
出力インターフェース	HDMI	
外形寸法	121 (W) × 104 (H) × 274.5 (D) mm	
重量	935G	

2.3 システム機能・性能・要件

技術実証に関するローカル 5G システム及び課題実証に関する各システムにおける、本実証の実施及び実証目標の達成に必要な機能、性能および要件について下記に示します。

(1) ローカル 5G ネットワーク

表 2.3.1 ローカル 5G ネットワーク機能・性能・要件

システム機能	<p>4.8~4.9GHz (Sub6) 帯のスタンドアローン (SA) 構成に対応した各コンポーネント機能 (コアネットワーク装置、集約ノード (CDU)、基地局 (RU)、陸上移動局 (UE)) を有する。</p> <p>超高速 (eMBB) を実装している</p> <p>複数拠点の基地局も同一コアにて収容することが可能</p>
要件	<p>基地局は TDD パターンの変更が可能かつ、追加準同期パターン TDD2 を実装可能</p> <p>外部アンテナの取り付けが可能</p> <p>RU は 3 台設置 (鶴沼ワイナリー 2 台、後志ヴィンヤード 1 台アンテナ位置は地上 7m 以上)</p> <p>サプライチェーンリスクへの対応については 2.6 その他の要件にて記載</p> <p>必要トラフィック (UE1 台あたり)</p> <p>上り: 約 63.5Mbps</p> <p>EV 前後カメラ映像 (2 台 計 12Mbps)、AI カメラ映像 (2 台 計 50Mbps) EV 制御等 (約 1.5Mbps) の場合</p> <p>下り: 約 24Mbps</p> <p>スマートガイドシステム作業員 4 名 TV 会議使用時 6Mbps × 4 台</p> <p>往復遅延時間 400msec (エンコーダー処理遅延、ローカル 5G 区間、遠隔制御システム遅延等含む)</p>
性能	<p>追加準同期 TDD パターン 2 の場合の理論値の最大スループットとしては、UL: 155Mbps、DL: 413Mbps となります。</p> <p>※実施計画書では、「UL: 約 200Mbps、DL: 約 630Mbps」と記載しておりましたが、本ローカル 5G システムの開発過程を経て、実際に使用する無線リソースに合わせた形での理論値を再度算出しております。</p>

(2) リモートEVロボット・コントロールシステム

表 2.3.2 リモートEVロボット・コントロールシステム機能・性能・要件

システム機能	(EVロボット) 圃場や農道を自動で走行する 果樹園の下草刈、防除を自動で実施する 障害物を検知し安全を確保した走行が可能 (遠隔監視制御) EVロボット自動走行ルートの設定 EVロボットの走行開始、停止等の遠隔制御 EVロボット情報の取得、表示
要件	未舗装の圃場、農道を走行可能なこと 指定された作業計画マップに沿った自動走行ができること 中山間地の斜面を走行可能なこと GNSSによる位置制御の他、非GNSS環境でも自動走行可能なこと 複数の検知機能による、多段の障害物検知、回避が可能なこと
性能	(EVロボット) カメラ映像、2Dレーザーによる障害物検知 緊急停止等の安全制御 オフロード用ラグ付きタイヤ (遠隔監視制御) EVロボット情報表示項目：速度、位置 EVロボット制御項目：走行開始、停止、再開

(3) スマートガイドシステム

表 2.3.3 スマートガイドシステム機能・性能・要件

システム機能	(多地点映像配信・双方向通話機能) 各拠点映像を単独・分割画面で表示する 双方向での通話が可能 (デスクトップ共有機能) 遠隔地PC画面の共有、遠隔地からの操作が可能 (映像記録機能) 配信映像を記録、蓄積する
要件	HDMI 外部カメラ入力対応であること 複数の配信元から1画面をクローズアップして視聴することが可能なこと 複数拠点の映像を分割して一覧表示することが可能なこと 低遅延での配信が可能であること PC、スマートフォン、タブレット端末、スマートグラスで利用可能なこと 自動で配信映像を記録することが可能なこと 外部ストレージに映像を記録可能なこと
性能	配信解像度 最大1080p 配信フレーム数 最大30frame/s 対応端末 OS Windows、iOS、android

(4) IoT センシングシステム

表 2.3.4 IoT センシングシステム機能・性能・要件

システム機能	<p>(IoT センシング：データ測定機能) 圃場の環境データを自動で定期的に測定する</p> <p>(IoT センシング：データ可視化機能) 測定データを蓄積し、現在値および過去測定値をグラフ表示等で可視化する</p> <p>(AI カメラ) 果樹の状態を自動で撮影する 撮影した画像データを分析し、害虫の発生有無を判定する</p>
要件	<p>(IoT センシング) 気温、湿度、飽差、日射量、CO2 濃度、土壌水分、地中温度が測定可能であること 太陽光発電で動作すること 設置場所の移動、再設置等が柔軟に実施できること スマートフォン、タブレットからデータを参照可能であること 測定データを CSV 形式でダウンロード可能であること</p> <p>(AI カメラ) リアルタイムに判定が可能であること 屋外での撮影が可能なこと 判別モデル作成回数に制限がないこと 学習データの追加が可能であること</p>
性能	<p>(IoT センシング) データ測定間隔 5 分以下 温度測定範囲 -10℃以上～50℃以下 CO2 測定範囲 300ppm 以上～5000ppm 以下 照度測定範囲 0lux～180000lux 以下 土壌水分測定範囲 0%～100% 本体～受信機間通信距離 1km 程度 データ保存期間 20 年以上</p> <p>(AI カメラ) 解像度 5MP 以上 画像メモリ 128MB 以上</p>

(5) C5G/ローカル 5G ネットワーク

表 2.3.5 C5G/LTE ネットワーク機能・性能・要件

システム機能	携帯電話キャリアが提供するサービスを使用して、C5G/LTE でインターネットへ接続する 圃場内の EV、作業用タブレット端末を有線 LAN、無線 LAN で接続する
要件	EV ロボット、作業用端末が他拠点と VPN 接続するための、ポートフォワーディング、DMZ 機能等を有していること バッテリー駆動すること C5G/LTE 自動切換接続、LTE 接続を選択できること DHCP 機能を有していること 有線 LAN ポートとして、2.5GBASE-T 以上のポートを有していること
性能	C5G : 受信時最大 4.2Gbps、送信時最大 480Mbps LTE : 受信時最大 1.7Gbps、送信時最大 130Mbps 連続通信時間 (5G/PREMIUM 4G/LTE) 約 290 分/約 280 分/約 400 分 バッテリー容量 4000mAh 無線 LAN IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax 対応 有線 LAN 100/1000/2.5G BASE-T 対応

(6) 拠点間ネットワーク

表 2.3.6 拠点間ネットワーク機能・性能・要件

システム機能	EV ロボット、農業者、EV 遠隔監視センター、圃場事務所、データセンター等を接続し、各課題解決システムにおけるデータ通信、およびローカル 5G コア～CU/DU 間のデータ通信を可能とする
要件	EV ロボット、農業者が利用するローカル 5G ネットワークを経由したデータ通信のボトルネックとならない十分な通信帯域、低遅延性を有していること 端末 IP アドレスが不定な C5G 端末等との VPN 接続が可能であること 監視センター、圃場事務所等の LAN 接続として、有線 LAN、無線 LAN での接続が可能であること
性能	インターネット接続回線 上り下り最大 1Gbps VPN サービスアクセス回線 上り下り最大 1Gbps 拠点内有線 LAN 接続 1000BASE-T 以上 拠点内無線 LAN 接続 IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax 対応

2.4 免許及び各種許認可

無線局の運用に必要となる無線局免許の申請にあたっては、実験試験局として、採択後速やかに北海道総合通信局に対して申請を行いました。免許申請の前提となる干渉調整については、未制度化の追加準同期パターンを一部実施することから、採択後に改めて北海道総合通信局に対し照会のうえ、速やかに各事業者に対する干渉調整を実施しました。

また今回使用するローカル 5G 無線機器は技術基準適合証明を取得済み機器のため、登録点検は省略しております。

電気通信事業法の適用については、本実証において構築するローカル 5G システムは免許人となる東日本電信電話株式会社が主体となり自己の需要として利用するため、電気通信事業には該当しないことから、本件に係る電気通信事業の届出も省略しております。

IMSI は、「自らコアネットワークを構築して 運用する場合」かつ「自らの通信の利用のみ」に指定されている「999-002」から始まる番号を使用するため、総務省への認定申請は行っておりません。

2.5 その他要件

構築するローカル 5G システムについては、3GPP 準拠の機器を使用し、将来的な機能拡張を考慮したシステム設計を行いました。拡張性については各機器の項に具体的に記載しました。

ローカル 5G 等を含む本実証で導入するシステムについては、図 2.5.1～図 2.5.4 のとおり、「IT 調達に係る国の物品等又は役務の調達方針及び調達手続に関する申合せ」（2018 年 12 月 10 日関係省庁申合せ）等に留意し、サプライチェーンリスク対応を含む十分なサイバーセキュリティ対策を講じております。

サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施

作成日：2021年6月29日
APRESIA Systems 株式会社

1. サイバーセキュリティ対策のための留意ドキュメント

1.1. 目的

「政府機関等の情報セキュリティ対策のための統一基準群（平成三十年度版）」、「IT調達に係る国の物品等又は役務の調達方針及び調達手続に関する申合せ（平成三十年十二月十日関係省庁申合せ）」並びに「第五世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設に関する指針（平成三十一年総務省告示第二十四号）」及び「ローカル5G導入に関するガイドライン（令和元年十二月総務省策定）」に留意していることを示す。

1.2. 留意ドキュメント

サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施のため、以下のドキュメントに留意して実施している。

[1] 「政府機関等の情報セキュリティ対策のための統一基準群（平成三十年度版）」

<https://www.nisc.go.jp/active/general/kiun30.html>

[2] 「IT調達に係る国の物品等又は役務の調達方針及び調達手続に関する申合せ（平成三十年十二月十日関係省庁申合せ）」

https://www.nisc.go.jp/active/general/pdf/shotatsu_moshiawase.pdf

[3] 「第五世代移動通信システムの導入のための特定基地局の開設に関する指針（平成三十一年総務省告示第二十四号）」

https://www.tele.soumu.go.jp/horei/reiki_honbun/a000111701.html

[4] 「ローカル5G導入に関するガイドライン（令和元年十二月総務省策定）」

https://www.soumu.go.jp/main_content/000683679.pdf

令和2年12月の最終改定版

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

2. サプライチェーンのサイバーセキュリティリスク対応のために講じている対策

2.1. 目的

導入事業者が意図しないシステムの変更や情報の窃取等が行われないよう、外部委託や他社製品の調達がある場合はそれも含めて、サプライチェーンリスク対応のために講じている対策を示す。

2.2. サプライチェーンリスクの例

留意ドキュメント[1]の中の1つである以下の資料を参考にし、APRESIA Systems（以降 APRESIA と称す）で講じているサプライチェーンリスク対策を示す。

©APRESIA Systems all rights reserved. Confidential

1

図 2.5.1 サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施（1/4）

「外部委託等における情報セキュリティ上のサプライチェーンリスク対応のための仕様書策定手引書」
<https://www.nisc.go.jp/active/general/pdf/risktaiou28.pdf>

図 2-1 にサプライチェーンリスクの例を示す。APRESIA が開発供給するローカル 5G システムは、ODM ベンダを使用する。ODM ベンダや部品サプライヤー、ソフトウェアサプライヤーから提供されるものには、吹き出しのようなリスク（不正な改造、不正プログラムの埋め込み）が存在する可能性がある。

また、APRESIA が導入事業者に、ローカル 5G システムを提供後、運用時に、吹き出しのようなリスク（不正な更新）が発生する可能性がある。

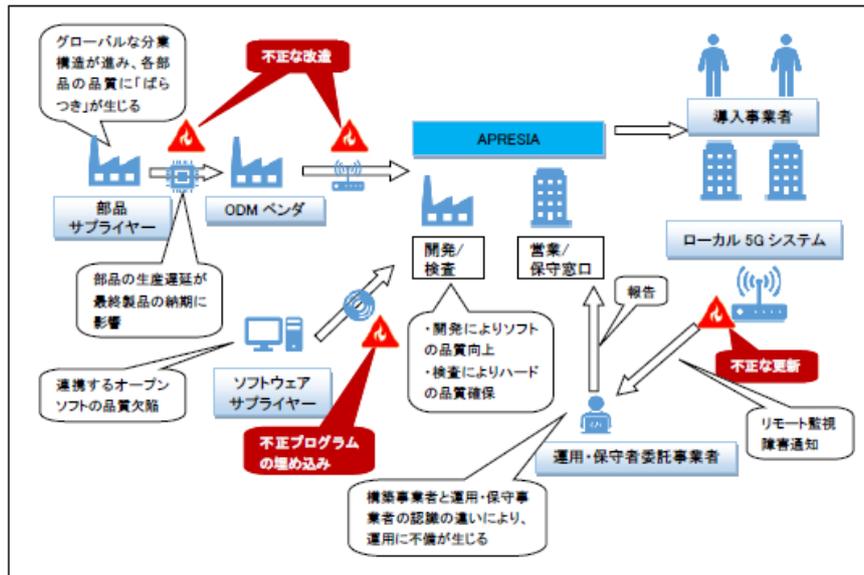


図 2-1 サプライチェーンリスクの例

（「外部委託等における情報セキュリティ上のサプライチェーンリスク対応のための仕様書策定手引書」の図-1 を元に作成）

2.3. サプライチェーンリスク対策の実施

ODM ベンダ、部品サプライヤー、ソフトウェアサプライヤーのサプライチェーンリスクに対しては、「外部委託等における情報セキュリティ上のサプライチェーンリスク対応のための仕様書策定手引書」の 4. 機器等の調達の際に考慮すべき事項及び仕様書記載例を参考にすると、表 2-1 に示すような対策が必要である。

©APRESIA Systems all rights reserved. Confidential

図 2.5.2 サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施 (2/4)

表 2-1 サプライチェーンリスク対策の実施

#	対策	APRESIA での対策
1	ODM ベンダでの当該機器等の製造工程において意図しない変更が加えられないよう適切な措置がとられており、当該措置を継続的に実施していること。	品質保証部での検査工程において、意図しない変更が加えられていないかを確認する。
2	ODM ベンダでの機器等の設計から部品検査、製造、完成品検査に至る工程について、不正な変更が行われないことを保証する管理が一貫した品質保証体制の下でなされていること。	品質保証での検査工程において、機器に不正が見つかったときに、追跡調査や立入検査等、ODM ベンダと APRESIA で迅速かつ密接に連携して原因を調査し、排除できる体制を整備している。
3	APRESIA が開発供給するシステムを構成する要素（ソフトウェア及びハードウェア）に対して不正な変更があった場合に識別できる管理体制が確立していること。	サイバーセキュリティを持続的に確保することを支援するための体制を整備している。
4	APRESIA が開発供給するシステムを構成する要素（ソフトウェア及びハードウェア）を導入した事業者において、不正な変更が加えられていないことを検査する体制を確立していること。	同上
5	APRESIA に ODM ベンダが納入する機器等の開発工程、製造工程等において、下記（ア）から（オ）の情報セキュリティに係るサプライチェーンリスクを低減する対策が行われていること。 (ア) 開発工程において信頼できる品質保証体制が確立されていること。 (イ) 脆弱性検査等のテストの実施が確認できること。 (ウ) 製造工程における不正行為の有無について、定期的な監査が行われていること。 (エ) 製造者が不正な変更を加えないよう、サプライチェーン全体が適切に管理されていること。 (オ) 不正な変更が発見された場合に、APRESIA と ODM ベンダが連携して原因を調査・排除できる体制を整備していること。	品質保証部での検査工程において、機器に不正が見つかったときに、追跡調査や立入検査等、ODM ベンダと APRESIA で迅速かつ密接に連携して原因を調査し、排除できる体制を整備している。

以上により、サプライチェーンのサイバーセキュリティリスク対応のために講じている対策を示しているため、要件を満たしていると考えられる。

©APRESIA Systems all rights reserved. Confidential

図 2.5.3 サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施 (3/4)

3. 主要構成要素のサプライヤーリスト

3.1. 目的

開発供給を行うシステムの主要な構成要素（例：FPGA、AD/DA）に他社製品を使用している場合、サプライヤーリストを示す。

3.2. 主要構成要素のサプライヤーリスト

APRESIA が開発供給するローカル 5G システムについて概要、システム構成を示し、それらの主要構成要素のサプライヤーについて示す。

(1) システム概要

対応周波数：4.8～4.9GHz、SA 方式、技適取得（工事設計認証番号：003-210060）、同期システム(準同期対応)、屋内システム

(2) システム構成

2021年3月末リリース版

RU、CU/DU 一体型：3GPP、O-RAN フロントホールインタフェース準拠

交換設備（5G コア）：ハードウェアは汎用サーバ、ソフトウェアは OSS ベース

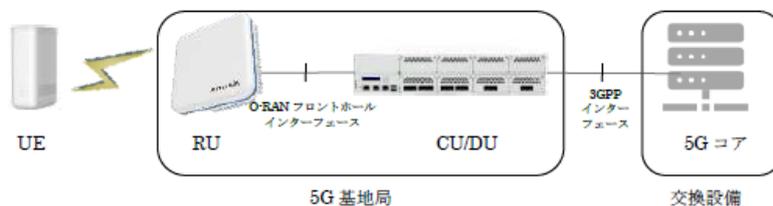


図 3-1 ローカル 5G システム

(3) 主要構成要素のサプライヤーリスト

表 3-1 に、APRESIA が開発供給するローカル 5G システムの RU、CU/DU、交換設備（汎用サーバ）のそれぞれについて、主要構成要素のサプライヤーを示す。

表 3-1 主要構成要素のサプライヤーリスト

種別	型番・型式	主要構成要素	サプライヤー	備考
RU	ApresiaAERO-RU100	FPGA	Xilinx 社	本社：米国
		RF IC	Analog Devices 社	本社：米国
		10G PHY	Aquantia 社	Marvel 社が買収 本社：米国
CU/DU	ApresiaAERO-CDU100	CPU	Intel 社	本社：米国
		FPGA	Xilinx 社	本社：米国
		サーバ筐体	AEWIN 社	本社：台湾
交換設備	ApresiaAERO-5GC	CPU	Intel 社	本社：米国
		FPGA	なし	

以上

©APRESIA Systems all rights reserved. Confidential

図 2.5.4 サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策の実施（4/4）

また、代表機関である東日本電信電話株式会社は ISMS 認証を取得しており、情報セキュリティが十分に確保されるように適正に管理しています。また、業務委託先に機密情報を提供するにあたり、安全かつ適切な取引を行うためのセキュリティ調査を行いました。さらに、業務委託先が再委託を行う場合には、再委託実施時の安全管理措置について確認しております。確認項目は以下のとおりです。

- ① 機密情報を取扱う業務委託の実施にあたって、情報を適正に取り扱っていると認められる企業等を選定するための基準が設けられている。
- ② 受託した業務の全部または一部を第三者に再委託する際は、弊社が求める水準またはそれと同等の水準を満たす事業者を選定することを、弊社との秘密保持契約において遵守する。
- ③ 機密情報を取扱う業務委託契約を締結する際は、情報の取扱い方法（受け渡しから廃棄まで）等の契約要件を明確化し、契約書を締結している。
- ④ 業務委託を実施する際は、締結した契約書に基づき、契約要件が履行されているか定期的及び不定期に確認（点検）している。

システム構築にあたり、サイバーセキュリティ対策の観点から、外部ネットワークとして IP-VPN 回線とインターネットアクセス回線を準備しリモートメンテナンス拠点とは VPN でアクセス先を制限した接続としました。インターネットアクセス回線は UTM を設置しインターネットからの不正アクセスなどに対するセキュリティ対策を実施しております。

今回使用する機器はメーカーによって既に市販されている機器ですが、その性能改善（スループット値の向上、同時接続数の改善、等）と追加準同期パターン（TDD2）については本実証期間中にも開発を行い、実装いたしました。なお、本実証機器については、事前にベンダーにて品質保証試験を行い、評価データの提供を受けております。試験項目としては距離ごとの RSRP、伝送スループット、伝送遅延値とし、試験内容の詳細についてはベンダーと協議のうえ決定しました。

品質保証試験は、実証に用いる機材（実証に用いる測定器等を含む）の実証前の品質担保確認として、メーカーから納品された際に検品と同時に行いました。検品後に必要な設定を行い、RU と UE 間を有線接続し、スループット等の性能試験を行いました。正常性が確認できた後、現地にて構築を行いました。なお、ローカル 5G の UE～コア装置間の試験を事前の結合試験とし、課題実証システムとの結合試験は現地にて行いました。

表 2.5.1 品質担保試験項目

試験方法	試験日程	備考
UE～コア装置間を有線接続し、Ping にて疎通確認	2021 年 12 月 6 日	
UE～コア装置間を有線接続し、Ping にて遅延値の測定	2021 年 12 月 6 日	
UE～コア装置間を有線接続し、iPerf にてスループットを測定	2021 年 12 月 6 日	

構築したシステム全体の試験は実証エリアにて行いました。ローカル 5G システムはベンダーのラボ環境がある東京で事前の試験を行いました。課題実証システムに関しては実証エリアのある北海道にて正常性確認を行いました。課題実証システムを東京のラボに輸送し結合試験を行うとさらに実証開始時期が遅れる可能性があるため、正常性が確認できた機器から実証エリアに構築を開始し、結合試験は現地にて行いました。また、本実証は VPN

網経由でコア装置と接続しますが、ラボ環境では VPN 環境が再現できないため、現地で最終的な試験を行いました。 結合試験内容は以下のとおりです。

表 2.5.2 総合試験項目

試験方法	試験日程	備考
UE～コア装置間を VPN 経由かつ無線接続し、Ping にて疎通確認	2021 年 12 月 17 日	
UE～コア装置間を VPN 経由かつ無線接続し、Ping にて遅延値の測定	2021 年 12 月 17 日	
UE～コア装置間を VPN 経由かつ無線接続し、iPerf にてスループットを測定	2021 年 12 月 17 日	
UE 下部に課題実証システムにて利用する各カメラを接続し、映像伝送ができていることを確認	2021 年 12 月 17 日	
コア装置下部の課題実証システムから UE 下部の各カメラへ設定のためのアクセスができることを確認	2021 年 12 月 17 日	

2.6 実証環境の運用

本実証における実証環境の運用について下記に示します。

(1) 運用環境の物理的セキュリティ

本実証の運用環境は、屋外圃場、新設の屋外柱の他、既設建物の事務所スペースや車庫等で運用実施しました。

各運用環境において、施錠可能な環境については施錠管理を徹底し、部外者の侵入、設備の盗難、破壊等への対策を図り実施いたしました。

(2) 物品管理

本実証にかかる機器は下記ので管理し紛失、盗難への対策を図ったうえ、定期的に所在の確認を実施いたしました。

- ・ 施錠したラックもしくは施錠した樹脂ボックス等の中に設置
- ・ 建物、柱等の構造物への固定等、容易に取外しできない状態で設置
- ・ 実証拠点内の施錠可能な保管庫等への保管

(3) 運用状況管理

ローカル 5G ネットワーク、拠点間ネットワーク等の常時稼働している機器については、使用時に運用状況の正常性確認を実施しました。

各システムにおける物品管理、運用状況管理の一覧を下記に示します。

(4) 運用者の管理

本実証において、不慮の事態により運用者が不在となることで実証が遅滞もしくは実施不可能となることを避けるため、実証作業の手順、機器操作マニュアル等を整備し、代替者が実証を遅滞なく実施できるよう配慮しました。また、感染が拡大している COVID-19（新型コロナウイルス感染症）への対策として、作業前後、入退室時の手指消毒、マスク着用を徹底して実証作業を実施しました。

3. ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）

3.1 実証概要

本実証において、ローカル 5G システムのエリア構築に関する技術の確立と他システムとの干渉調整の柔軟化を目的としました。エリアは中山間地域で、斜面及び樹木などによって電波が遮蔽されるポイントが発生しやすいため、斜面、樹木遮蔽の影響を踏まえたエリア化の手法について検証しました。

- a. ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定
- b-I. 電波伝搬モデルの精緻化
- b-II. 電波反射板によるエリア構築の柔軟化
- b-III. 準同期 TDD の追加パターンの開発
- b-IV. その他のテーマ 外部アンテナの利用によるエリア構築の効率化

本実証では広大な果樹園内における 3 か所の圃場にそれぞれローカル 5G 基地局を設置して各検証を行いました。中山間地域における電波伝搬特性を明らかにしたうえで、効率的なエリア構築を目標として反射板や外部アンテナを用いた検証を行いました。測定したデータをもとに中山間地域の地理的条件を踏まえたパラメーターの最適値を求め、エリア算出式の精緻化を行うとともに、反射板や外部アンテナの利用条件やエリア設計方法を取りまとめ、技術審査基準改定に向けた提言をまとめました。

また、本実証では高精細映像等、大容量の映像伝送を行うため、上りスロット比率を高めた準同期 TDD の追加パターンによる上りスループットの改善についても検証を行いました。2020 年 12 月に改訂された「ローカル 5G 導入に関するガイドライン」では準同期 TDD1 のパターンでは全国 MNO との事前の干渉調整は省略可とされているものの、本実証で検証を行う準同期 TDD2 のパターンについては定義されていないため、キャリア 5G との干渉影響についても測定し、共用検討に向けた提言をまとめました。

以上の技術実証を通じて、ローカル 5G の技術基準等の改定に貢献するべく、4.7GHz 帯の中山間地域における電波伝搬特性及び同周波数帯を用いたローカル 5G の性能に関する知見を得ることを目標としました。

表 3.1.1 技術実証の概要

項目		該当（○、×）	
技術実証の 実施環境	周波数帯	4.7GHz 帯	○
		28GHz 帯	×
		キャリア 5G の周波数帯	×
	屋内外	屋内	×
		屋外	○
		半屋内	×
	周辺環境	都市部	×
		郊外	×
		開放地	○
		その他	×

テーマ別 実証	I. 電波伝搬モデルの精緻化	Kの精緻化	×
		Sの精緻化	○
		Rの精緻化	×
		その他の精緻化	×
	II. 電波反射板によるエリア構築の柔軟化	実施の有無	○
	III. 準同期 TDD の追加パターンの開発	TDD2 の検討	○
		TDD3 の検討	×
		TDD2、3 以外のパターンの検討	×
追加パターンを具備した実機での検証		○	

3.2 実証環境

本実証では中山間地域にある果樹園を実証フィールドとし、3か所の圃場に対して3基のローカル5G基地局を設置しました。圃場1側の基地局をローカル5G基地局Aとして通常のRUを設置し、圃場2側の基地局をローカル5G基地局Bとし、通常のRUに指向性のあるセクターアンテナを外部アンテナとして取り付けました。圃場2には中心部分に樹木が生い茂っているエリアがあり、果樹園の形が複雑となっており傾斜もある地形であることから、圃場2のほうが中山間地域の電波伝搬の課題検証に適していると考え、圃場2で反射板及び外部アンテナの検証を行いました。反射板については、営農期に樹木が生い茂っているエリアの左端に設置し、樹木を超えたエリアへの電波伝搬を検証しました。

なお、果樹園内にはキャリア5G基地局も1基設置されており、そのキャリア5G基地局との干渉シミュレーション及びデータ測定を行いました。

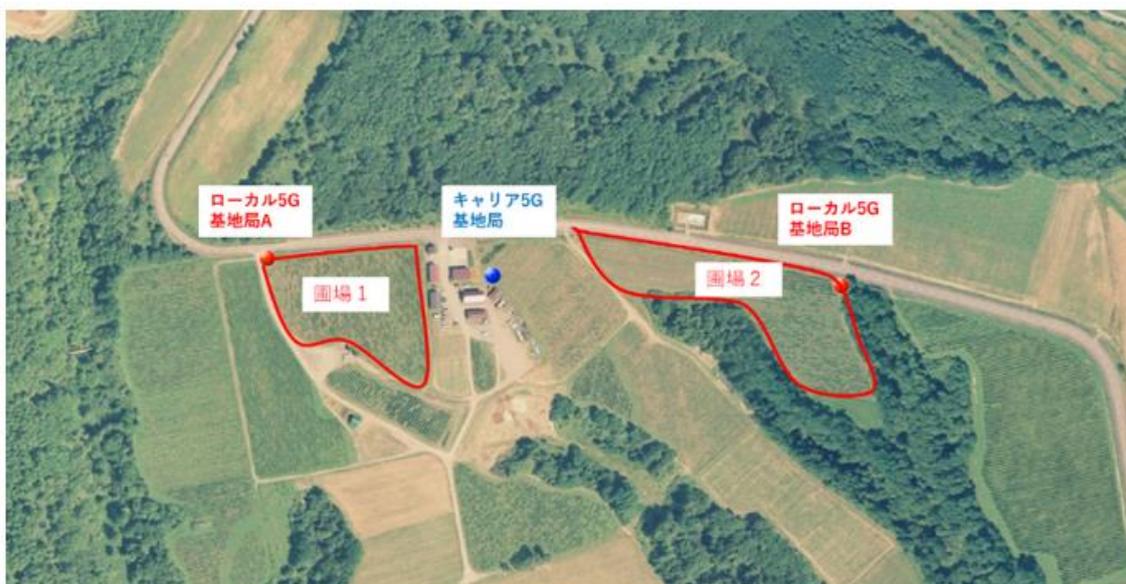


図 3.1.1 実証エリア 圃場1、圃場2全体図
(国土地理院(電子国土Web)(URL: <https://maps.gsi.go.jp/>)のデータを使用して作成)

また、圃場 1、圃場 2 とは異なるエリアに圃場 3 も実証エリアとして準備し、ローカル 5G 基地局を設置しました。圃場 3 の基地局をローカル 5G 基地局 C とし、通常の RU を設置しました。



図 3.1.2 実証エリア 圃場 3 全体図
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

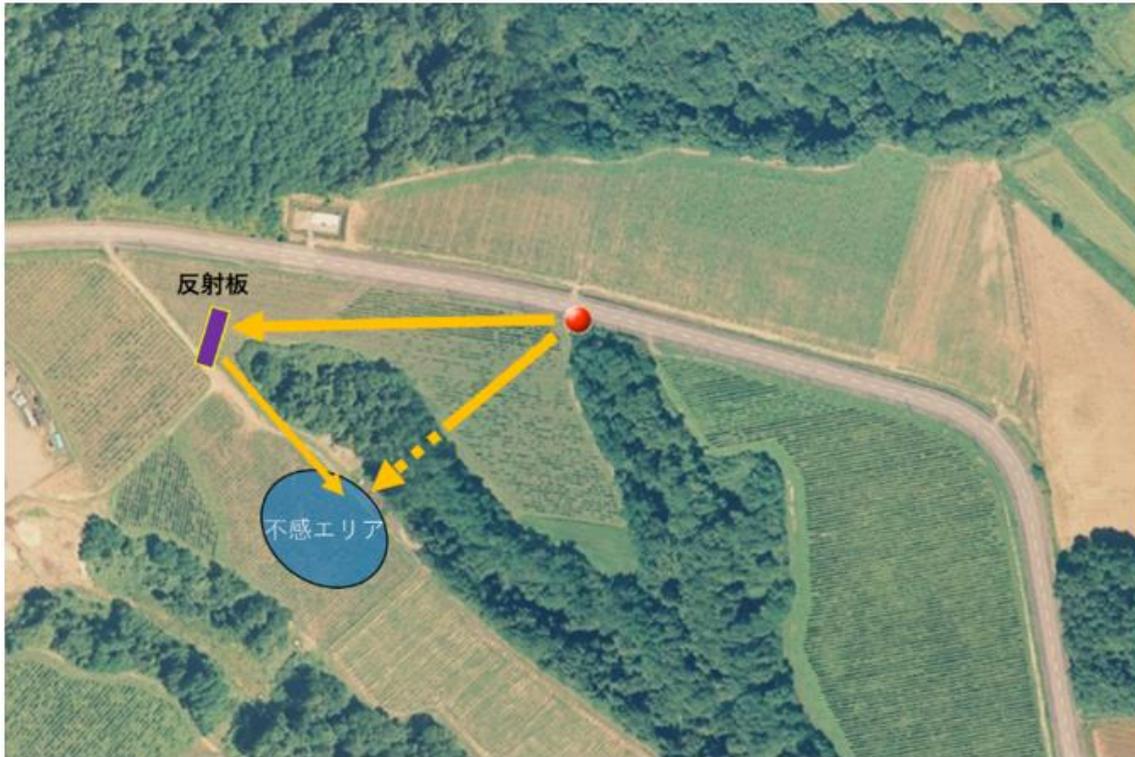


図 3.1.3 圃場 2 反射板設置位置
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

また、本実証において構築しましたローカル 5G システムですが、理論値と実測値に乖離が生じております。以下に本事象の要因について記載します。

本事象の主たる原因としましては、開発において発生した改善点の改修に時間を要していることとなります。具体的な改善点については、DMCS 未実装であること、耐ノイズの脆弱性の影響、無線リソースブロックの割り当てが非効率・不完全であることが挙げられます。

DMCS 未実装については受信電力が良好な地点であっても MCS の動的な変換が出来ず伝送性能が向上しない要因となっています。

耐ノイズの脆弱性については、本実証で用いた機器は、受信した電波信号からデータを復調する動作においてノイズへの耐性が弱く、エラーレートが上がってしまうという特徴を持っていることが分かりました。このノイズ耐性の弱さは機器のノイズ除去機能の性能不足に起因しており、そのため本実証で用いた機器は受信した変調信号を復調する際に元の信号を取り出す精度が低いことが考えられます。無線コントロール処理による過負荷について、各プロセスに割り当てる CPU のリソース配分が適切ではなく、無線レイヤーでの処理に当たる CPU が過負荷状態になっていることが分かりました。これは CPU が過負荷状態になることで、十分な性能を発揮できていなかった可能性を示唆しています。

無線リソースブロックの割り当てが非効率・不完全である点については、CDU から UE の集積回路に対して使用する無線リソースブロックの割り当ての指示が完全に最適化されていません。本実証で用いた機器は無線区間の安定性を向上させるため、一部の無線リソースを制御信号へ割いています。これにより伝送用に割り当てる無線リソースが減少し、スループットが低下しております。また、無線リソースブロックの割り当ての指示を UE に送信す

る際に処理が不十分であることが分かりました。複数 UE 収容時に、CDU から複数台の UE に無線リソースブロックの割り当て指示を出す処理で効率を上げられておりません。以上のことから、性能を向上するためには、以下のことが求められます。

- ・ DMCS (適応変調) の実装
- ・ 耐ノイズの脆弱性の改善
- ・ 無線リソースブロックの割り当ての効率化

上記 3 点がクリアできれば、受信電力値に応じて MCS 値を変更し接続安定性を維持しながら UL 性能を向上できると考えます。

次項「3.3 実証内容」では、上記ローカル 5G システム自体の性能要因の他、指向性アンテナや実証エリアごとの環境要因等より実測値の考察を行います。

3.3 実証内容

3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定

3.3.1.1 実証目標

本実証は中山間地域における EV 車や生育状況データ収集を組み合わせた農業の効率化を目標とし実証を行いました。圃場内の果樹の生育状況を遠隔地の熟練作業者に伝送し、指示・指導を受けることもあり、果樹の生育状況を正確に伝送する必要があります。本実証では、圃場からその他の監視拠点に高精細映像で果樹園の状況を配信します。そのため圃場のローカル 5G は上りスループットの性能を重視し、以下のとおりの性能目標を設定しました。また、遅延値については、圃場内を走行する EV 車の遠隔操作を安全に実現するための数値としました。

目標とする所要性能は以下のとおりです。

- 上りスループット：63.5Mbps
(内訳：EV 前後カメラ 6Mbps×2 台、AI カメラ 25Mbps×2 台、EV 遠隔制御等 1.5Mbps)
- 下りスループット：24Mbps
(内訳：スマートガイドシステム作業者 6Mbps×4 台)
- 伝送遅延：400msec
(エンコーダー処理遅延、ローカル 5G 区間、遠隔制御システム遅延等含む)

カバーエリアのシミュレーションについては、実証エリア地域の総通局への相談・指導により基地局設置位置や送信電力等を決定したうえで行いました。エリア算出法に基づき、基地局ごとにカバーエリア及び調整対象区域の図を作成するとともに、それぞれのエリア端における実際の受信電力を測定しました。その際、当該算出式のカバーエリア及び調整対象区域の閾値と異なっている場合は、それぞれの閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離の確認を行いました。

各基地局エリア 20 地点の測定点において、受信電力及び伝送性能（アップリンク（以下 UL）/ダウンリンク（以下 DL）別の伝送スループット、伝送遅延 等）を測定しました。測定の結果、ローカル 5G を用いたソリューションの所要性能を実現できない場合、実測データに基づき必要なローカル 5G を構築する方策（必要な帯域幅及び送信電力等）を導出しました。

なお、本項目にて測定したデータは次項以降の比較・分析にも利用しました。

3.3.1.2 評価・検証項目

本実証では基地局を 3 基設置するため、各基地局においてカバーエリアの作成及び 20 以上の測定点において受信電力（SS-RSRP）及び伝送性能（アップリンク（以下 UL）/ダウンリンク（以下 DL）別の伝送スループット、伝送遅延 等）を測定し、その測定結果当該算出式のカバーエリア及び調整対象区域の閾値と異なっている場合は、それぞれの閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離の確認を行いました。

3.3.1.3 評価・検証方法

下のとおり、(1) エリア算出法と実測値の比較及び(2) 受信電力・伝送性能の評価に分けて評価・検証を行いました。各基地局エリア 20 地点の測定点において受信電力及び伝送性能（アップリンク（以下 UL）/ダウンリンク（以下 DL）別の伝送スループット、伝送遅延 等）を測定しました。受信電力についてはエリアテスターにて測定し、伝送性能については UE 下部の測定用 PC とコア装置下部の測定用 PC 間で iPerf や Ping などの測定用アプリケーションを用いて測定を行いました。純粋な無線区間のみを測定することは各機器の具備するインターフェースの都合上不可能であることから、極力無線区間のみに近い区間として上記方法での測定を行いました。

(1) エリア算出法と実測値の比較

本実証における試験手順は、以下の表のとおりです。

表 3.3.1 エリア算出法と実測値の比較 試験手順

工程	実施内容	対応図表
1	エリア算出法を基にしたエリアシミュレーションにより、カバーエリアおよび調整対象区域を算出・図示	図 3.3.1 図 3.3.2 図 3.3.3
2	カバーエリアおよび調整対象区域の SS-RSRP の閾値と実測値の比較を行います。測定ポイントを定義	図 3.3.1 図 3.3.2 図 3.3.3
3	2 で定義した測定ポイントにて測定ツールを用いて受信電力（SS-RSRP）を測定します。 閾値と実測値が異なっている場合、GPS システムを用いて閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離を確認	—

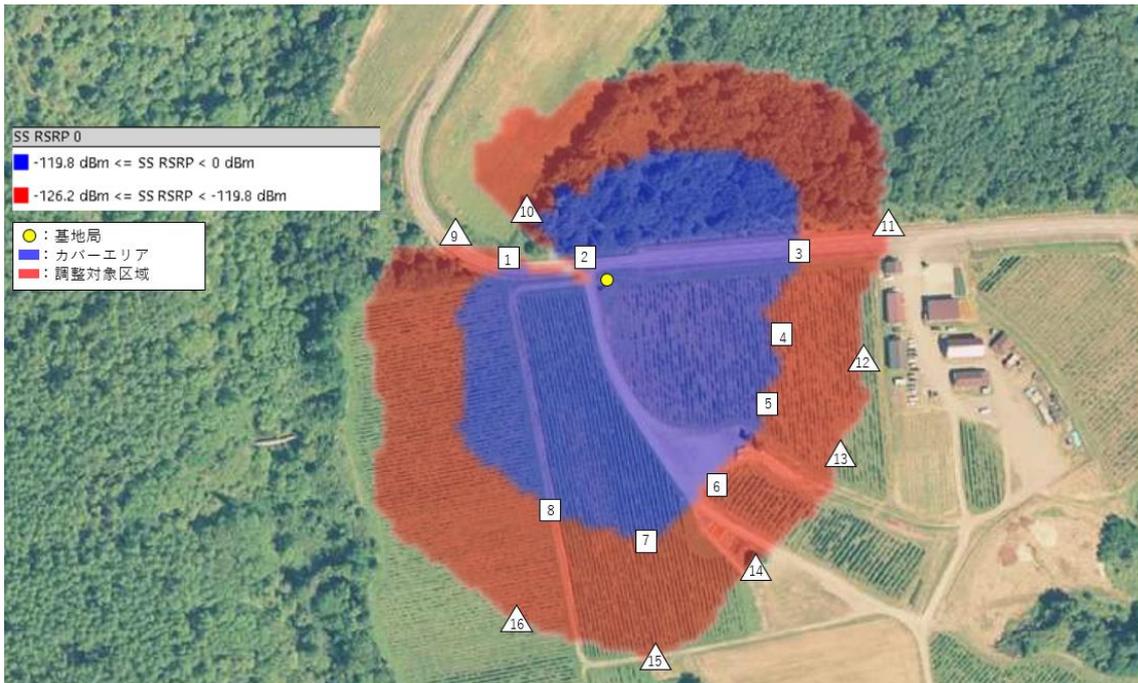


図 3.3.1 ローカル 5G 基地局 A 想定カバーエリア、調整対象区域及び測定ポイント (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

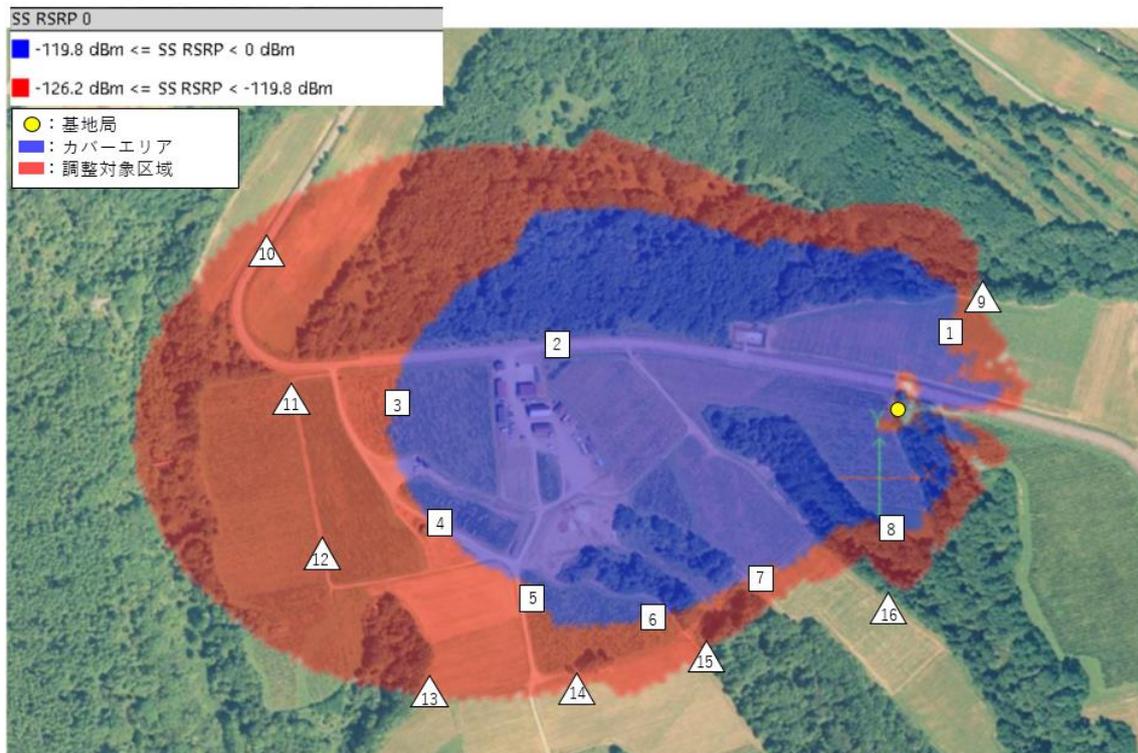


図 3.3.2 ローカル 5G 基地局 B 想定カバーエリア、調整対象区域及び測定ポイント (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

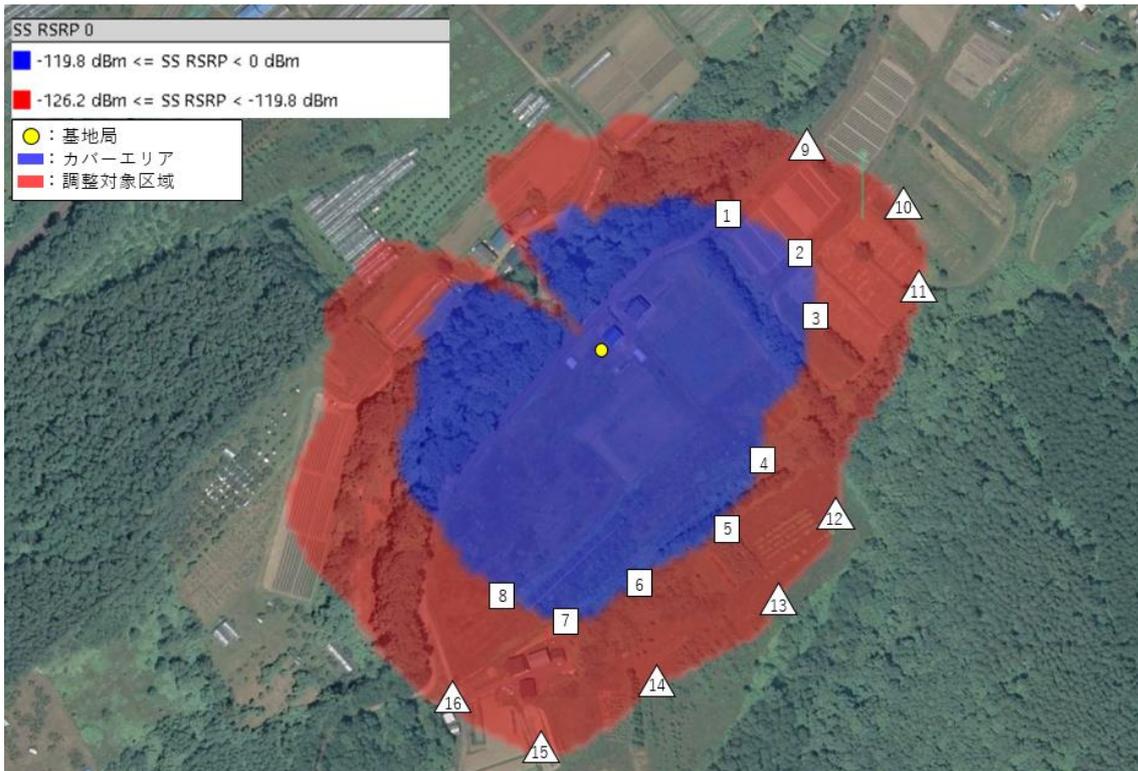


図 3.3.3 ローカル 5G 基地局 C 想定カバーエリア、調整対象区域及び測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

(2) 受信電力・伝送性能の評価

本実証における試験手順は、以下の表のとおりです。測定ポイントは各基地局エリア 20 地点しますが、ローカル 5G 基地局 B については一部カバーエリア外のポイントも測定しました。ローカル 5G 基地局 B については、外部アンテナを使って、特定の方向をカバーできるように設計しております。その設計通り特定の方向以外への電波伝搬が抑制されていることを確認するため、カバーエリア外のポイントも測定いたしました。

表 3.3.2 受信電力・伝送性能の評価 試験手順

工程	実施内容	対応図表
1	カバーエリア内外に測定ポイントを定義	図 3.3.5 図 3.3.6 図 3.3.7
2	1 で定義した測定ポイントにて測定ツールを用いて受信電力及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延) を測定	

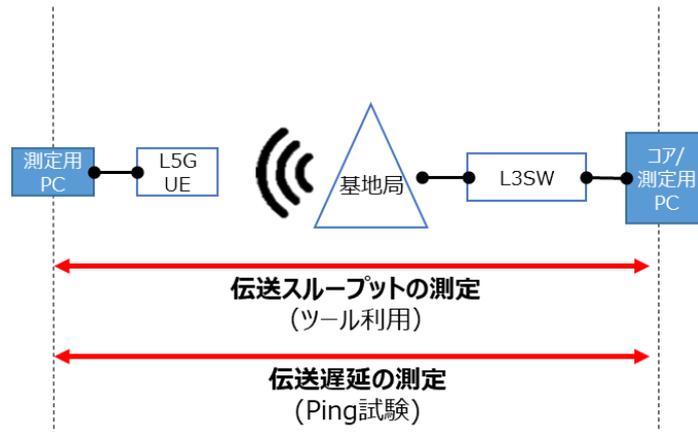


図 3.3.4 伝送性能測定区間 模式図

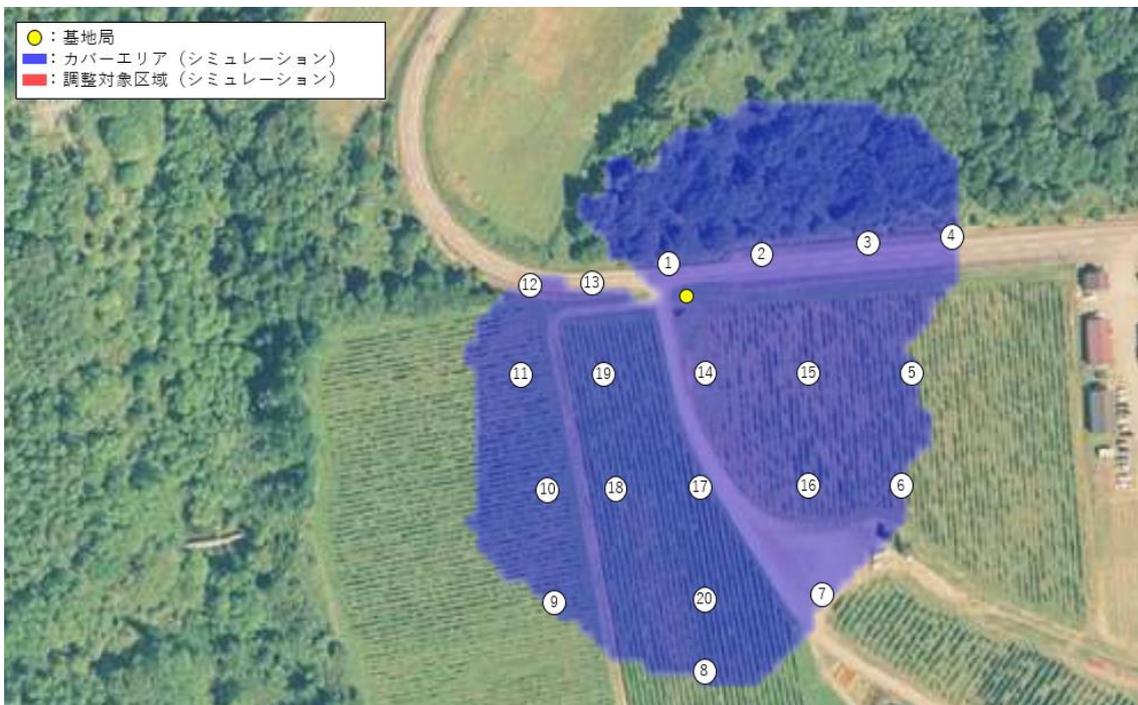


図 3.3.5 ローカル 5G 基地局 A カバーエリア内測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)



図 3.3.6 ローカル 5G 基地局 B カバーエリア内外測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

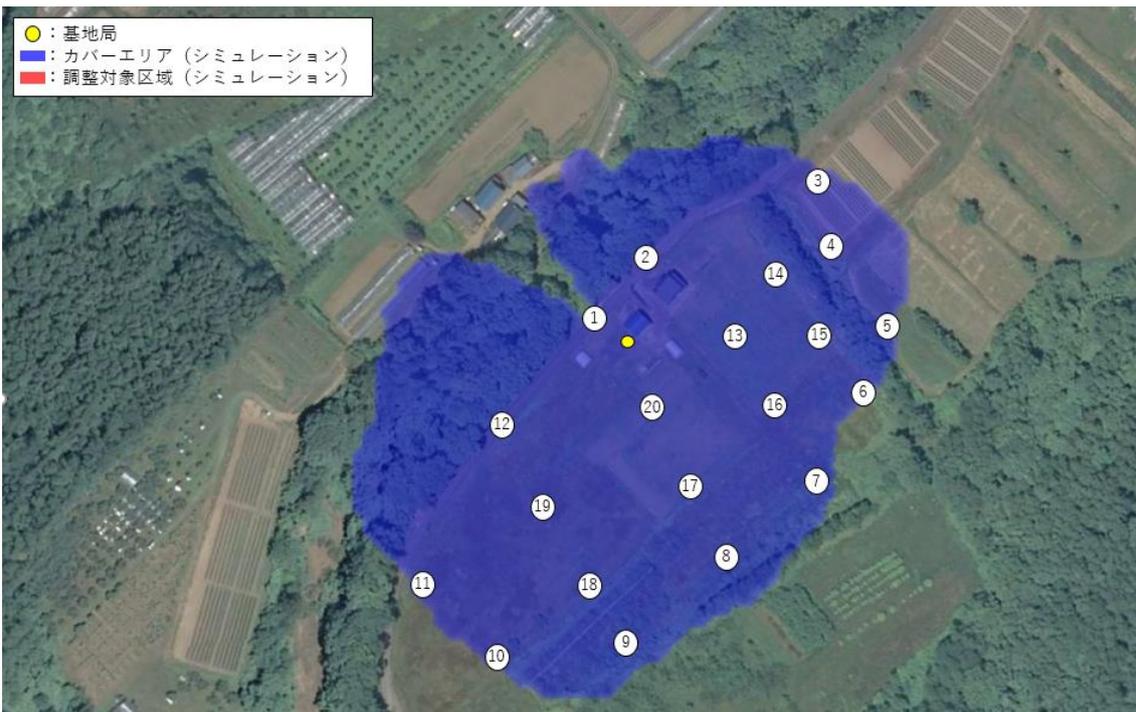


図 3.3.7 ローカル 5G 基地局 C カバーエリア内測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

3.3.1.4 実証結果及び考察

はじめにエリア算出法と実測値の比較を行います。エリア算出法によって算出されたカバーエリアおよび調整対象区域、測定ポイントは下図のとおりです。

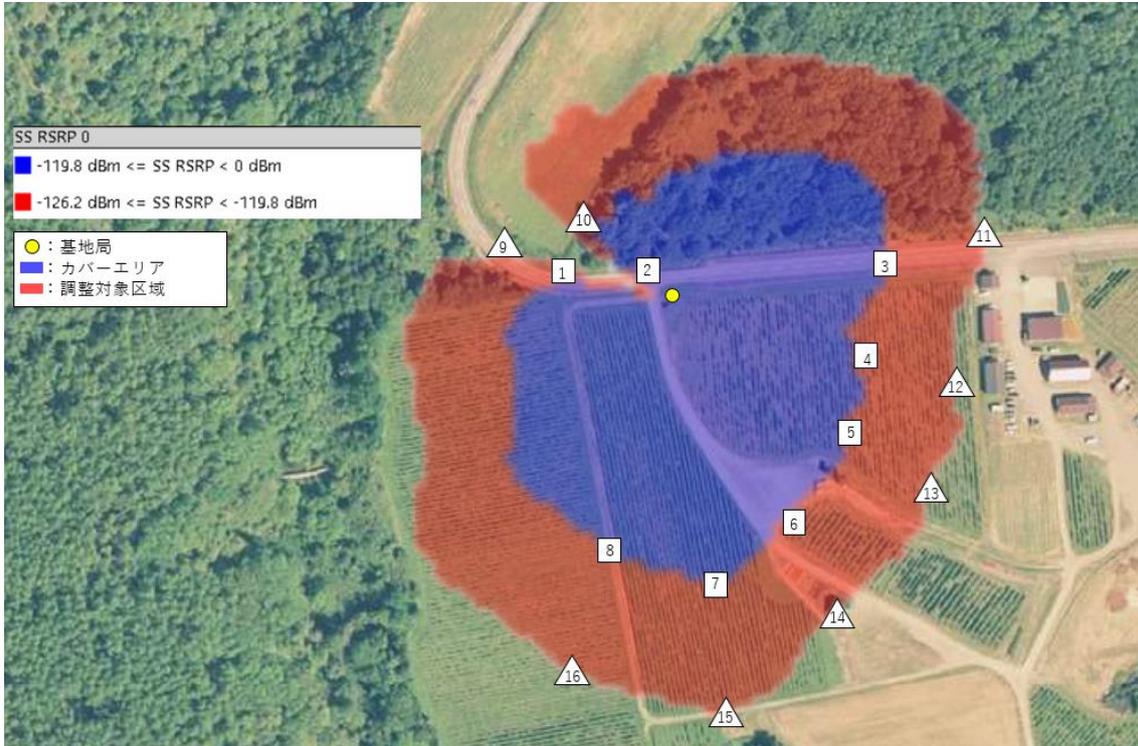


図 3.3.8 基地局 A エリア算出法で算出されたカバーエリアおよび調整対象区域 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

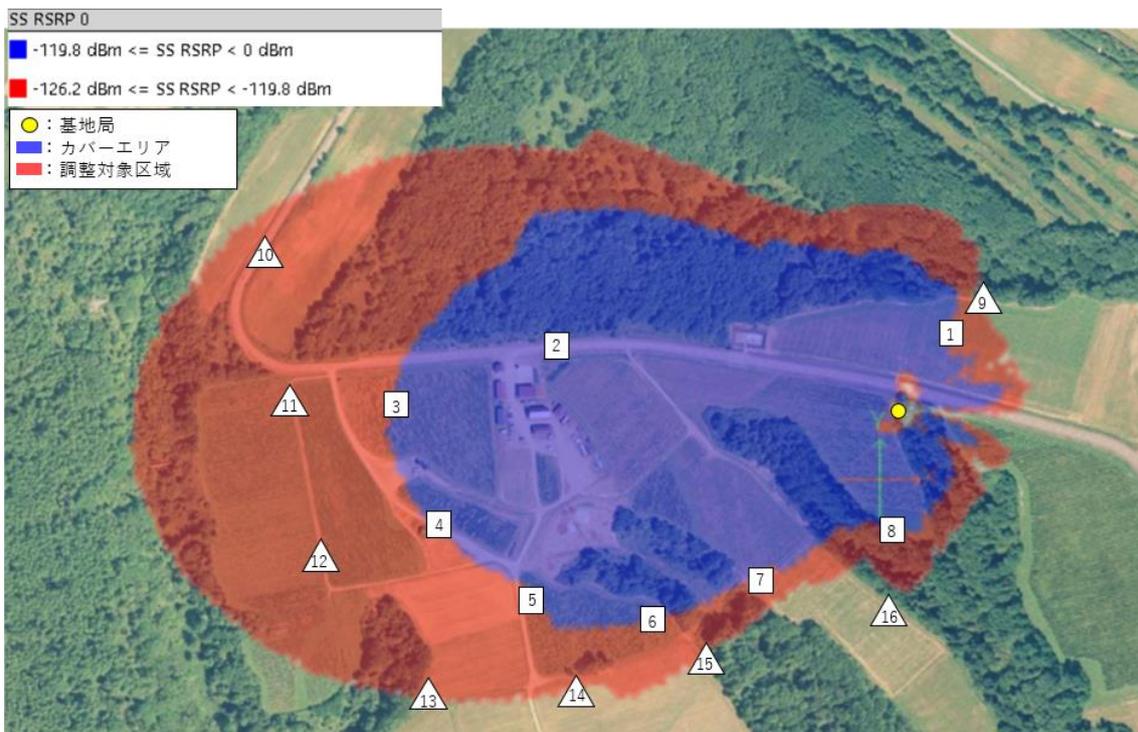


図 3.3.9 基地局 B エリア算出法で算出されたカバーエリアおよび調整対象区域
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

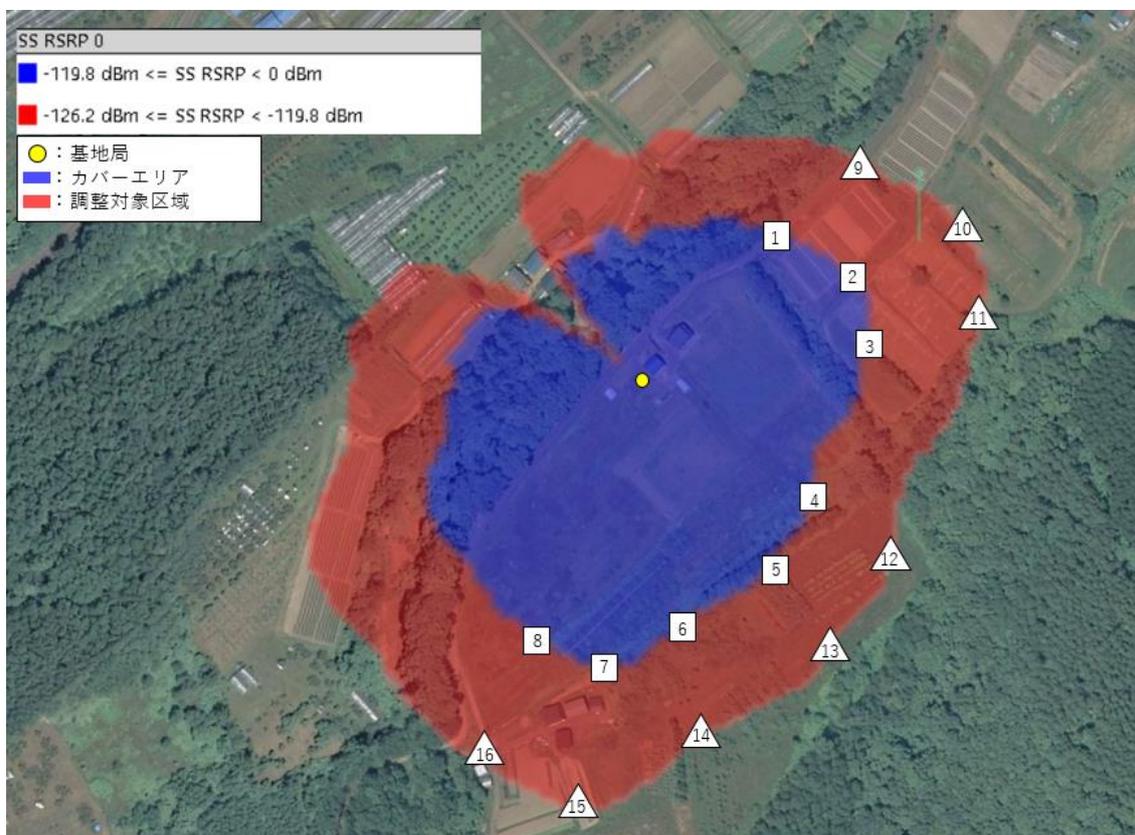


図 3.3.10 基地局 C エリア算出法で算出されたカバーエリアおよび調整対象区域
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

エリア算出法での閾値と各測定ポイントでの実測値を下表で比較いたします。

表 3.3.3 基地局 A エリア算出法で算出したカバーエリアでの SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-119.80	-120.17	0.37
2	-119.80	-103.76	-16.04
3	-119.80	-110.69	-9.11
4	-119.80	-110.77	-9.03
5	-119.80	-107.89	-11.91

6	-119.80	-112.90	-6.90
7	-119.80	-115.15	-4.65
8	-119.80	-111.69	-8.11

表 3.3.4 基地局 A エリア算出法で算出した調整対象区域での SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-126.20	-122.27	-3.93
2	-126.20	-126.08	-0.12
3	-126.20	-113.97	-12.23
4	-126.20	-119.50	-6.70
5	-126.20	-115.67	-10.53
6	-126.20	-119.39	-6.81
7	-126.20	-121.34	-4.86
8	-126.20	-131.68	5.48

表 3.3.5 基地局 B エリア算出法で算出したカバーエリアでの SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-119.80	-123.20	3.40
2	-119.80	-115.51	-4.29
3	-119.80	-116.79	-3.01
4	-119.80	-126.50	6.70
5	-119.80	-114.60	-5.20
6	-119.80	-123.19	3.39
7	-119.80	-126.29	6.49
8	-119.80	-116.66	-3.14

表 3.3.6 基地局 B エリア算出法で算出した調整対象区域での SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-126.20	-133.48	7.28
2	-126.20	測定不能	—
3	-126.20	-123.01	-3.19
4	-126.20	-128.48	2.28

5	-126.20	測定不能	—
6	-126.20	-129.47	3.27
7	-126.20	-125.12	-1.08
8	-126.20	-129.98	3.78

表 3.3.7 基地局 C エリア算出法で算出したカバーエリアでの SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-119.80	-117.89	-1.91
2	-119.80	-120.51	0.71
3	-119.80	-117.17	-2.63
4	-119.80	-121.60	1.80
5	-119.80	-119.61	-0.19
6	-119.80	-118.47	-1.33
7	-119.80	-119.94	0.14
8	-119.80	-118.00	-1.80

表 3.3.8 基地局 C エリア算出法で算出した調整対象区域での SS-RSRP の閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定ポイント	エリア算出法での閾値 (dBm)	実測値 (dBm)	差分 (dB)
1	-126.20	-123.02	-3.18
2	-126.20	-118.28	-7.92
3	-126.20	-113.85	-12.35
4	-126.20	-126.87	0.67
5	-126.20	-123.82	-2.38
6	-126.20	-115.39	-10.81
7	-126.20	-136.88	10.68
8	-126.20	-119.72	-6.48

上表での比較結果より値が異なっているポイントにおける、閾値が実測されたポイントの基地局からの距離を図示したものは下記のとおりです。

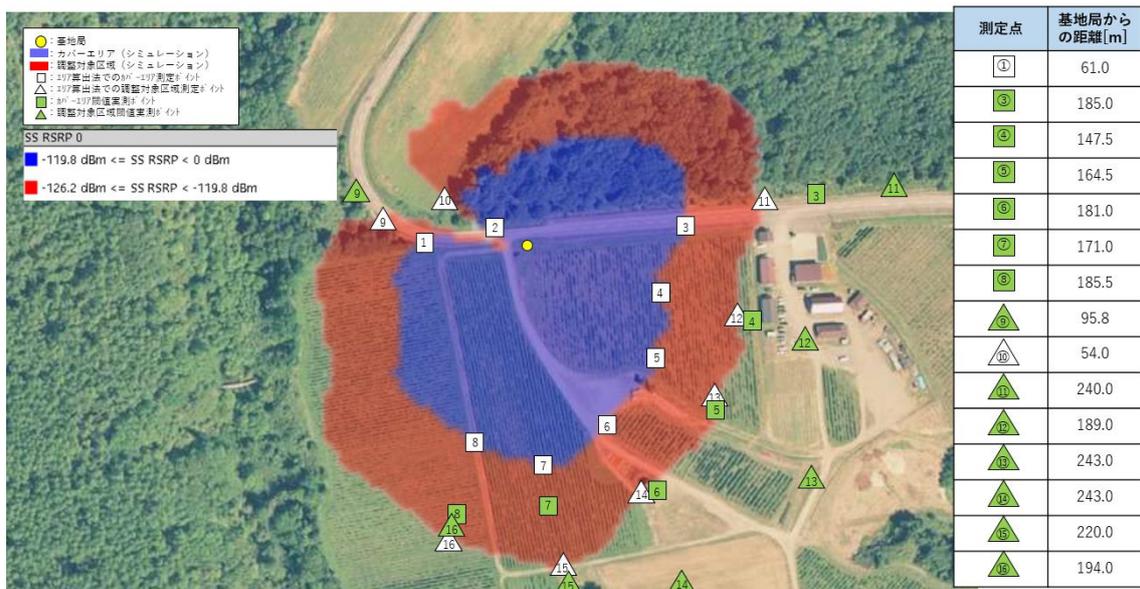


図 3.3.11 ローカル 5G 基地局 A の閾値が実測されたポイントと基地局からの距離 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

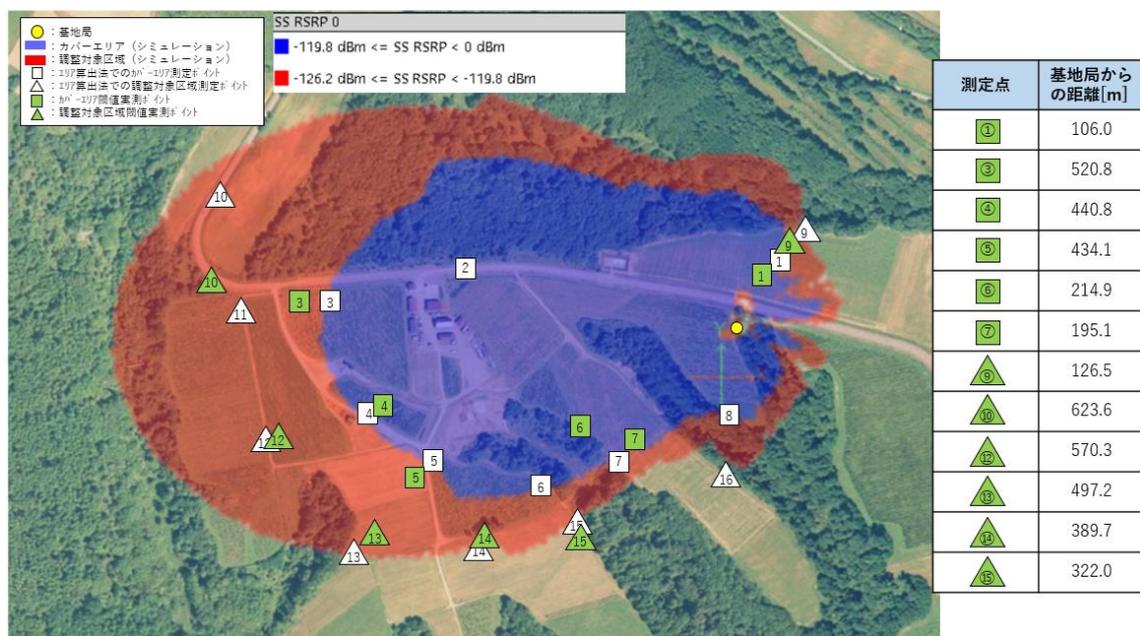


図 3.3.12 ローカル 5G 基地局 B の閾値が実測されたポイントと基地局からの距離 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

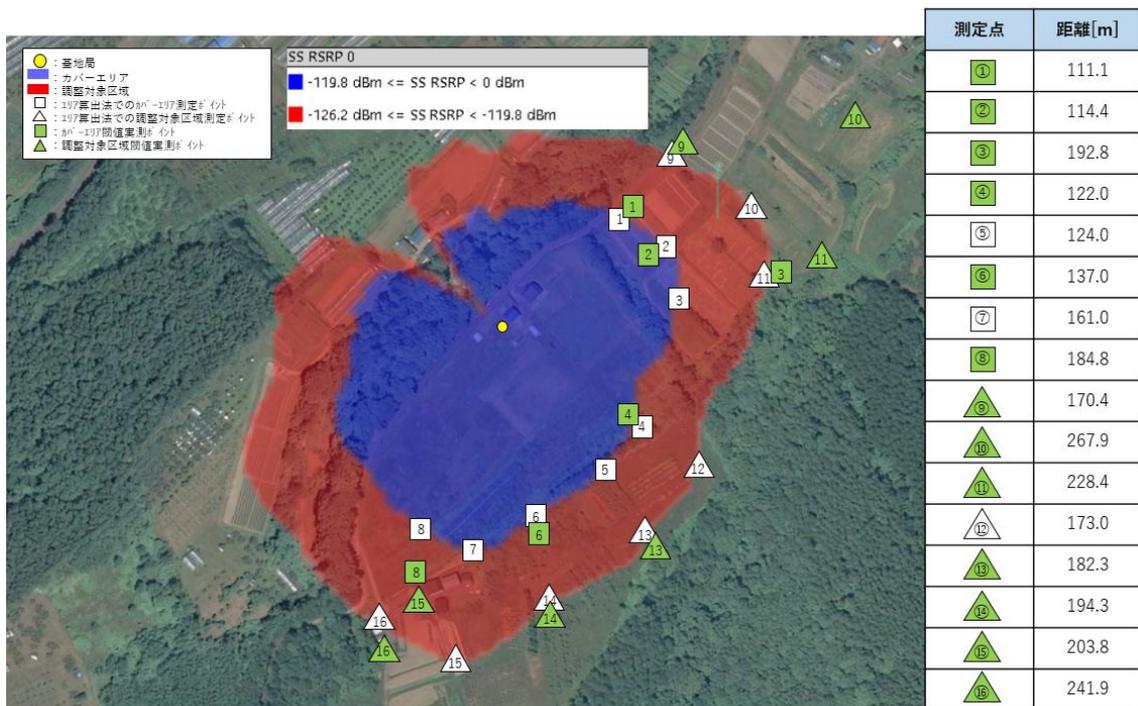


図 3.3.13 ローカル 5G 基地局 C の閾値が実測されたポイントと基地局からの距離 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

エリア算出法での閾値と各測定ポイントでの実測値に乖離が生じた理由について、以下のとおり考察いたしました。なお、分析及びエリア算出式への反映については次項の電波伝搬モデルの精緻化にて行います。

拡張秦式を利用して $S=32.5$ (開放地) でシミュレーションを実施しました。各圃場でのシミュレーション結果と実測値の比較を行った結果、部分的には一致しましたが、実測値によって示されるエリアとエリア算出法によって示されるエリアよりは基本的には一致しないという結果でした。この結果について、以下圃場毎に考察しました。

まず圃場 1 (基地局 A) について考察します。シミュレーションと実測値の比較をした図に、どのように違いがあったか、下図に示します。



図 3.3.14 基地局 A エリア算出法と実測値の比較
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

実測ポイントと基地局間の距離がエリア算出法で定めた測定ポイントと基地局間の距離よりも長くなったポイントについて、実測ポイントにおける基地局の見通しの観点から、以下基地局との距離毎にポイントを分けて考察します。測定ポイント 8 (距離 185.5m)、ポイント 6 (距離 181m) は互いの距離差が 10m 内であり、それぞれカバーエリアとして観測できています。測定ポイント 6、測定ポイント 8 の状況を下図に示します。(左がポイント 6、右がポイント 8) ※赤丸が基地局位置



図 3.3.15 測定ポイント 6 (左) と測定ポイント 8 (右)
 測定ポイント 6 は傾斜が無く、基地局までの見通しが良いポイントです。一方で測定ポイント 8 はやや傾斜があり基地局までの見通しが悪くなり始める地点ですが基地局を視認

することができます。基地局との距離が 170m 未満である測定ポイント 5, 測定ポイント 4 については、各測定ポイントの背後では建屋や傾斜があり基地局までの見通しが悪くなります。調整対象区域である測定ポイント 16 は、やや傾斜となっている測定ポイント 8 との距離差が 10m 未満ですが、基地局の見通しが非常に悪いです。

※下図は測定ポイント 16 の実測地



図 3.3.16 測定ポイント 16

以上の測定点の特性から、基地局との見通しが悪くなることで受信強度が下がるということが示唆されるため、基地局との見通しが電波伝搬距離に対して影響を及ぼしていると考えられます。測定ポイント 4・5 については、それぞれ建物、地形による電波伝播距離の短縮がされたのではないかと考えます。また、実測値とシミュレーション値が一致した場所、および測定ポイント 9 は、いずれも基地局との距離が 100m 以内であり、S 値が適用されるエリア算出法の範囲外であるため、今回は考察から除外しました。

次に圃場 2 (基地局 B) に着目して考察します。圃場 1 (基地局 A) の考察と同様に、シミュレーションと実測値の比較をした図に、どのような違いがあったか、書き足した図を以下示します。

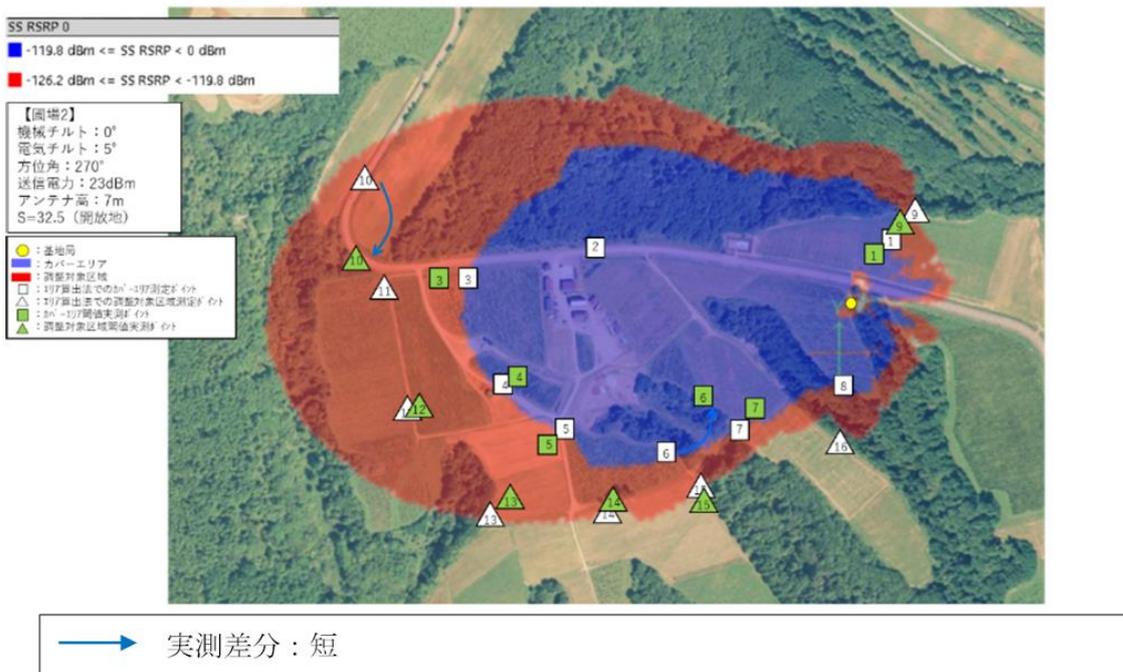


図 3.3.17 基地局 B エリア算出法と実測値の比較
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>)) のデータを使用して作成)

圃場 1 と異なり、圃場 2 では実測値とシミュレーションに大幅な差が無く、全体的に誤差の範疇で実測値に基づくカバーエリア・調整対象区域が狭まっているような測定結果となりました。この結果について下記のとおり考察しました。

圃場 1 では前述の通り、視認できるレベルで見通しが良い環境であり、その結果シミュレーションで利用しているエリア算出法 (S=32.5) に基づくカバーエリアと測定地に基づくカバーエリアが一致しませんでした。対して圃場 2 はシミュレーション結果と測定結果が概ね一致していることから、基地局を視認できないエリアが多いが、元々の S 値の条件 (電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300 ~ 400m 以内が開けているような畑地・田地・野原など) には当てはまっていると考えられます。

次に圃場 2 において、実測地がエリア算出法に基づく測定地と大きく異なっている測定ポイントについて考察します。エリア算出に基づく測定ポイント 6 では前方が谷になっており、近傍での実測が不可であったために代替として実測値の測定ポイントを谷前に設定しました。このため、測定ポイント 6 に関しては本事項の考察から対象外とし、測定ポイント 10 について以下考察しました。測定ポイント 10 の実測地とエリア算出法に基づいた測定地の状況は下図のとおりです。

※左図 : エリア算出法に基づく測定地 右図 : 実測地



図 3.3.18 エリア算出法に基づく測定地（左）と実測地（右）

まず、エリア算出法に基づく測定地 10 では基地局 B の電波を測定することができませんでした。また、調整対象区域の境界に近い測定地であったことから、測定できる境界を調査した結果、実測地 10 での測定となりました。基地局 B の電波を測定できなかった理由は、エリア算出法に基づく測定地 10 と圃場 2 の基地局 B の間に広大な森林があり、なおかつ 2 地点間の距離が実測地から推測すると 600m を超えているためであると考えられます。

つまり、前述の S 値 32.5 の条件とは大幅に距離的な条件範囲からずれ、なおかつ森林による電波妨害が影響していることが要因であると考えられます。

これまでの圃場 1（基地局 A）および圃場 2（基地局 B）での考察を基に以下総括します。圃場 1 の考察では、基地局が視認できるレベルの見通しの場合には $S=32.5$ で計算されたエリア算出法に基づくエリアよりも実測値に基づくエリアの方が広く、基地局を視認できなくなると狭くなると考えました。圃場 2 の考察では、基地局を視認できないが、エリア算出法で利用している S 値の条件と合致しているため、エリア算出法に基づく測定地と実測地が誤差のレベルで収まったのではないかと考えました。これらをまとめると、基地局が視認できる環境ではエリア算出法に基づくカバーエリア・調整対象区域よりも実際のカバーエリア・調整対象区域は広く、基地局が視認できず非常に大きな遮蔽物がない見通しの良い環境ではエリア算出法に基づくカバーエリア・調整対象区域が実際のカバーエリア・調整対象区域と近い結果が得られるということが考えられます。

上記の考察を基に、圃場 3（基地局 C）を考察します。圃場 1・2 の考察と同様に、エリア算出法に基づく測定地と実測地の比較をした図に、どのような違いがあったか書き足した図を以下に示します。

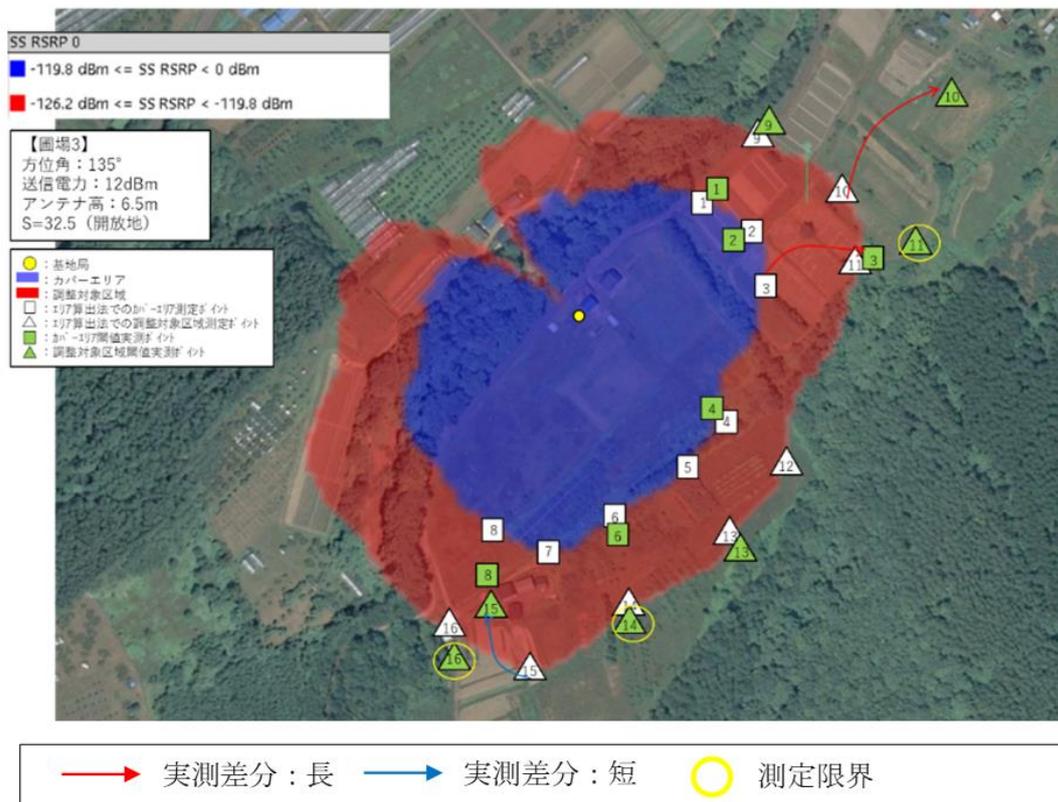


図 3.3.19 基地局 C エリア算出法と実測値の比較
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

まず全体の考察前に、測定限界・実測差分が短くなるポイントですが、こちらは樹木や崖等の測定環境に依存して測定場所を止む無く変更した箇所なので、考察から除外しました。

測定結果から、エリア算出法に基づく測定地と実測地が近いことが確認できますが、測定ポイント 3・10 についてはエリア算出法に基づく測定地と実測地と大きく異なっています。この点について以下考察します。

測定ポイント 3 の近くにある測定ポイント 2 と比較します。測定ポイント 2 は他の測定ポイントと同じくエリア算出法に基づく測定地と実測地が近いです。エリア算出法に基づく測定ポイント 3 と 2 の見通し状況を確認します。



図 3.3.20 エリア算出法に基づく測定ポイント 3



図 3.3.21 エリア算出法に基づく測定ポイント 2

いずれも基地局は視認できますが、図を比較して分かるように測定ポイント 2 は樹木によって見通しが測定ポイント 3 と比べて悪いです。一方、測定ポイント 3 は樹木が前面に開けており、基地局を視認することができます。このことから樹木による影響 (= 見通しの良さの違い) によって誤差が発生し、エリア算出法に基づく測定地と実測地の差が発生したと考えられます。このことは圃場 1・圃場 2 での結果・考察とも一致しており、基地局に対する視認レベル (見通しの良さ)・環境によって、想定する S 値が異なる、と考察しました。

測定ポイント 10 については、エリア算出法での算出結果よりも実測値が測定されたポイントの基地局からの距離が遠くなっていますが、基地局 C と測定ポイント 2 の延長線上のポイントであり、下図の通り、基地局 C との間には樹木が存在します。



図 3.3.22 実測値の測定ポイント 10

同じ樹木で遮られる測定ポイント 2・10 で結果に差分が出た要因としては、電波の回折が考えられます。測定ポイント 2・10 と基地局 C の間にある樹木は、葉が落ちていて、一様に電波を遮る遮蔽物ではないため、電波が複雑に回折し、同じ樹木で遮られるエリアでも受信電力の強度に差が出たと考えられます。このことから、測定ポイントを少しずらさずだけでも差分が出る可能性が高いため、測定ポイント 10 は考察の対象外とします。

次に、受信電力・伝送性能について各圃場ごとの測定結果を評価します。
カバーエリア内の測定ポイントを以下に図示します。



図 3.3.23 基地局 A カバーエリアと伝送性能の測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)



図 3.3.24 基地局 B カバーエリアと伝送性能の測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)



図 3.3.25 基地局 C カバーエリアと伝送性能の測定ポイント
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

上図 3.3.23～3.3.25 で示した測定ポイントでの受信電力及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延) を以下表にまとめました。

表 3.3.9 基地局 A 各測定ポイントでの受信電力及び伝送性能

測定ポイント	受信電力 SS-RSRP (dBm)	UL スループット (Mbps)	UL スループット (Mbps) [所要性能との 差分]	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms) [所要性能との 差分]
1	-120.17	41.00	-22.50	31.07	37.00	-363.00
2	-100.88	41.00	-22.50	31.08	38.00	-362.00
3	-103.21	41.20	-22.30	31.06	36.00	-364.00
4	-113.25	41.20	-22.30	31.06	39.00	-361.00
5	-113.87	41.30	-22.20	31.08	39.00	-361.00

6	-108.18	41.30	-22.20	31.08	36.00	-364.00
7	-109.47	41.20	-22.30	31.07	35.00	-365.00
8	-107.12	41.20	-22.30	30.96	38.00	-362.00
9	-117.97	41.30	-22.20	31.08	38.00	-362.00
10	-122.51	41.30	-22.20	28.57	38.00	-362.00
11	-108.19	41.20	-22.30	26.17	36.00	-364.00
12	-117.80	37.00	-26.50	31.07	37.00	-363.00
13	-118.83	41.20	-22.30	31.08	37.00	-363.00
14	-102.24	40.90	-22.60	31.08	38.00	-362.00
15	-107.19	41.20	-22.30	31.08	40.00	-360.00
16	-111.34	41.20	-22.30	31.01	38.00	-362.00
17	-103.22	41.20	-22.30	31.07	37.00	-363.00
18	-111.14	41.30	-22.20	31.07	38.00	-362.00
19	-113.38	41.30	-22.20	31.08	39.00	-361.00
20	-107.20	41.30	-22.20	31.08	38.00	-362.00

表 3.3.10 基地局 B 各測定ポイントでの受信電力及び伝送性能

測定ポイント	受信電力 SS-RSRP (dBm)	UL スループット (Mbps)	UL スループット (Mbps) [所要性能との 差分]	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms) [所要性能との 差分]
1	-119.29	15.90	-47.60	30.60	54.00	-346.00
2	-120.49	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
3	-125.70	13.30	-50.20	27.81	66.00	-334.00

4	-109.74	18.60	-44.90	26.08	37.00	-363.00
5	-108.85	18.50	-45.00	26.10	41.00	-359.00
6	-121.80	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
7	-125.04	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
8	-124.83	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
9	-120.01	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
10	-94.85	12.50	-51.00	31.02	41.00	-359.00
11	-101.55	18.40	-45.10	26.12	42.00	-358.00
12	-108.13	18.40	-45.10	26.13	40.00	-360.00
13	-118.13	18.50	-45.00	26.12	41.00	-359.00
14	-95.99	12.20	-51.30	31.07	41.00	-359.00
15	-93.16	18.60	-44.90	31.03	42.00	-358.00
16	-81.10	18.60	-44.90	29.26	41.00	-359.00
17	-83.67	18.60	-44.90	30.75	41.00	-359.00
18	-113.43	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
19	-122.64	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可	測定不可
20	-102.72	18.60	-44.90	26.08	41.00	-359.00

表 3.3.11 基地局 C 各測定ポイントでの受信電力及び伝送性能

測定ポイント	受信電力 SS-RSRP (dBm)	UL スループット (Mbps)	UL スループット (Mbps) [所要性能との差分]	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms) [所要性能との差分]
1	-102.76	15.90	-47.60	72.62	45.00	-355.00

2	-117.94	15.50	-48.00	72.59	54.00	-346.00
3	-112.03	15.90	-47.60	72.25	56.00	-344.00
4	-109.46	15.90	-47.60	72.68	52.00	-348.00
5	-105.66	15.80	-47.70	72.59	44.00	-356.00
6	-106.38	15.90	-47.60	72.58	44.00	-356.00
7	-113.00	15.50	-48.00	72.60	43.00	-357.00
8	-111.49	15.90	-47.60	65.17	46.00	-354.00
9	-105.34	15.90	-47.60	72.70	44.00	-356.00
10	-109.86	15.90	-47.60	72.67	45.00	-355.00
11	-115.55	13.30	-50.20	72.69	45.00	-355.00
12	-113.19	15.90	-47.60	72.68	51.00	-349.00
13	-95.38	15.80	-47.70	72.58	44.00	-356.00
14	-103.36	15.90	-47.60	72.58	46.00	-354.00
15	-105.46	15.90	-47.60	72.60	45.00	-355.00
16	-102.60	15.90	-47.60	72.60	45.00	-355.00
17	-102.30	15.90	-47.60	72.41	45.00	-355.00
18	-110.44	15.90	-47.60	72.68	45.00	-355.00
19	-107.05	15.90	-47.60	71.81	45.00	-355.00
20	-88.94	15.90	-47.60	72.60	49.00	-351.00

上表の伝送性能評価においてローカル 5G を用いたソリューションの所要性能を達成しなかった測定ポイントについて、以下考察を行います。

各圃場の各測定ポイントでは、概ね同程度の性能が出ており大きな差異はありませんでした。次に所要性能の達成可否について、伝送遅延はいずれも達成していますが、UL スル

ーPUTはいずれの圃場・測定ポイント全てにおいて所要性能を達成できませんでした。いずれの圃場・測定ポイントでも所要性能を達成できておらず、各測定ポイントでスループットに大きな誤差がないため、所要性能未達成の要因は実装環境および機器の性能によるものと考えられます。

性能向上を検討するために、測定結果を改めて確認します。各圃場における全測定ポイントの UL 平均値は圃場 1（基地局 A）：約 41Mbps、圃場 2（基地局 B）：約 17Mbps、圃場 3（基地局 C）：約 16Mbps でした。この圃場間の差について考察します。

本実証環境では圃場 1・2 は準同期（TDD-2）、圃場 3 は同期で基地局を運用しております。本実証環境において、長距離での通信をさせるためには、QPSK 変調(MCS=4~9)を用いる必要があります、スループットが所要性能よりも低い値となりました。また、本実証で導入した機器について DMCS(適応変調)機能がサポートされておらず、近距離、中距離でのスループットも所要性能に達しない結果となりました。本実証において長距離通信を実現するために QPSK 変調(MCS=4~9)を用いた理由は、機器の耐ノイズの脆弱性、無線コントロール処理による過負荷の 2 点です。これら点について、以下説明いたします。

まず耐ノイズの脆弱性について、本実証で用いた機器は、受信した電波信号からデータを復調する動作においてノイズへの耐性が弱く、エラーレートが上がってしまうという特徴を持っていることが分かりました。このノイズ耐性の弱さは機器のノイズ除去機能の性能不足に起因しており、そのため本実証で用いた機器は受信した変調信号を復調する際に元の信号を取り出す精度が低いです。

無線コントロール処理による過負荷について、各プロセスに割り当てる CPU のリソース配分が適切ではなく、無線レイヤーでの処理に当たる CPU が過負荷状態になっていることが分かりました。これは CPU が過負荷状態になることで、十分な性能を発揮できていなかった可能性を示唆しています。

本実証で用いた機器の UL 理論値は下図のとおりです。

表 3.3.12 本実証機器の UL 理論値 (単位は [Mbps])

MCS	UL理論値		DL理論値	
	同期	準同期 (TDD2)	同期	準同期 (TDD2)
4	9.0	20.0	87.6	54.2
5	10.9	24.3	109.5	67.8
6	12.8	28.6	128.3	79.4
7	15.2	34.0	150.2	92.9
8	17.4	38.9	172.1	106.5
9	19.4	43.2	194.0	120.0
10	19.4	43.2	194.0	120.0
11	21.8	48.6	219.1	135.5
12	25.2	56.2	250.4	154.9
13	28.1	62.7	281.7	174.3
14	31.9	71.3	319.1	197.4
15	35.8	80.0	350.6	216.9
16	37.7	84.3	375.7	232.4
17	37.7	84.3	375.7	232.4
18	40.6	90.8	400.7	247.8
19	44.5	99.4	438.0	270.9
20	49.4	110.3	488.2	302.0

上述の通り、本実証では各圃場における全測定ポイントの UL 平均値は圃場 1 (基地局 A) : 約 41Mbps、圃場 2 (基地局 B) : 約 17Mbps、圃場 3 (基地局 C) : 約 16Mbps でした。また、基地局 A では MCS を UL:9/DL:4、基地局 B では MCS を UL:4/DL:4、基地局 C では MCS を UL:9/DL:4 に設定し、全てのテーマにおいてこの値で実証を行いました。このことから、圃場 1 (基地局 A) では約 95%、圃場 2 (基地局 B) では約 85%、圃場 3 (基地局 C) では約 82%の理論値の性能を発揮していることが分かります。これは、本実証環境において本実証機器は機器自体の本来性能を発揮していたと言えます。

帯域幅の拡張による性能向上の可能性についても考察を行います。本実証でのローカル

5G システムでは、4.8-4.9GHz の帯域幅 100MHz において運用を行いました。今後、ローカル 5G システムの仕様変更、並びに、4.6-4.8GHz 帯における屋外利用への規制緩和が実現された場合、最大で 300MHz 幅での運用が可能になると推測されます。キャリアアグリゲーション技術の利用も相まって実装されれば、ローカル 5G システムの伝送性能が飛躍的に向上し、所要性能も問題なく達成されるものと考えます。また、新世代モバイル通信システムで検討が開始されている HPUE (High Power User Equipment) の制度化に伴い、離隔距離が大きい地点における UL スループットも向上できると期待されます。

また、測定不可となったポイントについて要因の分析を行いました。まず DL 方向に関して、カバーエリア内である -113dBm の地点でも接続不可となっているポイントがあるため、DL 方向の通信ではなく UL 方向の通信に起因するものと考えられます。UL 方向の通信を改善することで、本事象を解決できると推定され、有効と考えられる手法は以下の 2 点です。

- ・ UL 方向（端末→基地局）のレイヤー数増加

今回使用した端末製品は 1Tx 構成であったため、複数レイヤー構成とすることで UL 方向の無線品質が改善することが想定されます。

- ・ HPUE の制度化

HPUE (High Power User Equipment) の実現によって、端末から送信する電力上限が増加することで、無線品質の向上及び利用エリアを拡大することが可能となります。本実証フィールドのように 1Tx の端末を用いる場合は、UL 方向の回線設計が支配的となるケースが多く、端末の送信電力が向上することは、無線品質及びカバーエリアの向上に直結します。

標準化団体 3GPP では、端末の送信出力上限値は Power Class2 : 26dBm、Class1.5 : 29dBm が採用済みであり、米国や中国では既に制度化及び商用化されていますが、日本の電波法関係規定では上限値が 23dBm となっています。(注 1) 現在、日本での Power Class2 及び Class1.5 の HPUE 制度化について、新世代モバイル通信システム委員会でも検討が進められています。本実証フィールドのように、回線設計上で UL 回線が支配的となるケースにおいて、HPUE 制度化による通信品質の改善やカバーエリアの拡大が可能となるため、本制度化が期待されます。

注 1: 日本においても、BWA では CA (キャリアアグリゲーション) を行わない場合限り送信電力上限が 26dBm まで認められている

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

農業分野は高齢化及び人手不足が深刻化しており、システム等の導入による効率化が求められます。スマート農業の分野でセンサー等を活用した効率化が進められている一方、WiFi や LPWA はカバーエリアが狭く、広大な農地や電波が届きにくい中山間地域への導入はまだ十分といえる状況ではありません。広いカバーエリアが期待でき、なおかつ外部アンテナや反射板等による、特定の範囲にカバーエリアを構築することができる無線システムを導入することが、本実証フィールドのような中山間地域のスマート農業の導入に貢献すると考えられます。

効率的かつ生産的な農作業を実現するためには、本実証で検証する EV 車の走行や高精度カメラの利用が可能な無線ネットワークの構築が欠かせません。しかし、中山間地域では高低差の激しい地形や樹木、栽培している果樹が遮蔽物となりエリア設計が困難です。そこで、本項では樹木や植生による電波伝搬の影響を測定することで、中山間地域における電波伝搬モデルを考察し、同課題を持つ地域への横展開に貢献することを目標としました。

前項ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定において基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域と実測値の比較検証を行い、その比較データをもとにエリア算出法の精緻化を行いました。エリア算出式によるカバーエリアが実際のカバーエリアと異なっている場合、特にエリア算出式によるカバーエリアが実際のカバーエリアよりも広く算出されてしまう場合は免許申請時における干渉調整が不必要に発生することになり、ローカル 5G 普及の障壁となりかねません。本実証は次項以降でも効率的なエリア構築方法について検証するものですが、前項及び本項の実証においてはエリアの地形的特徴等による電波伝搬の特性について分析を行い、対象のパラメーターの最適値を求めることを目的としています。

(2) 実証目標

提案時には、精緻化パラメーターを「K (地形情報データにより算入し難い地形の影響等の補正值であり、通常は 0 とし、地形水面の反射、小規模の見通し外伝搬の影響等を特に考慮する必要のある場合に算入するパラメーター)」とし、果樹の植生や周囲の密生した樹木による電波伝搬への影響を検討することとしていましたが、各パラメーターの分類の整理の結果、植生や樹木の影響は「S」に含まれることとなったため、パラメーター S について精緻化の検討を行いました。

3.3.2.2 実証仮説

本実証エリアでは傾斜や果樹などの植生がありますが、その中でも最も電波伝搬に影響を与えるのは圃場周囲の樹木によるものと考えました。令和 2 年度地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証における「自動トラクター等の農機の遠隔監視制御による

自動運転等の実現」では防風林による遮蔽影響を測定しましたが、防風林の有無によって25dB以上の差分が生じました。昨年度の実証は冬季期間に行っており、落葉している樹木も多かった中でもこれだけの遮蔽影響があり、本実証においても影響の度合いは大きいと考えました。そこで、仮説としてはITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」を参考にして検討しました。ITU-R P.833-3では樹木の茂る範囲、葉の有無によってパラメーターを変えています。

本実証ではこの算出式を参考とし、圃場2の環境について以下の仮説を立てました。圃場2の中心にある樹木の範囲を70mとし、樹木の葉がある状態で42.3dB、葉がない状態で37.1dBの電波減衰が発生すると仮定しました。本電波減衰量の具体的な算出方法については3.3.2.5項に示します。なお、本仮説に則った想定受信電力については、電波反射板によるエリア構築の柔軟化の章にて記載しています。

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp(-d \gamma / A_m)] \quad (1)$$

where:

- d : length of path within woodland (m)
- γ : specific attenuation for very short vegetative paths (dB/m)
- A_m : maximum attenuation for one terminal within a specific type and depth of vegetation (dB).

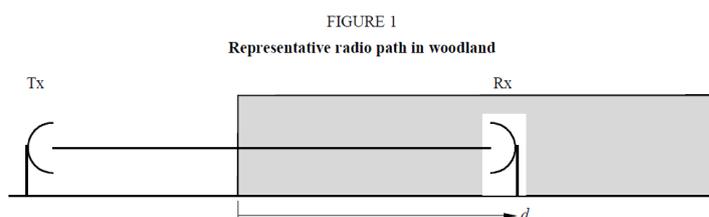


図 3.3.26 ITU-R P.833-3 植生による影響算出式例
(出典：ITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」)

3.3.2.3 評価・検証項目

本実証では精緻化の対象パラメーターを「S」とし、最適値の仮説を立て、その仮説に基づきカバーエリア及び調整対象区域を作成しました。24のポイントで受信電力を測定し、仮説に基づいたエリア算出法の閾値と実測値の比較を行いました。異なっている場合は閾値が実測されるポイントの基地局からの距離を記録し、エリア算出法で算出された閾値との差分の要因分析を行いました。分析結果から改めてSの最適値を修正し、再度カバーエリア及び調整対象区域を作成し、実測値に近い結果が得られていることを確認しました。

なお、本項にて検証を行うのはオムニアンテナを使用しているローカル5G基地局A及び指向性外部アンテナを使用しているローカル5G基地局Bとしました。測定ポイントの選定については、原則カバーエリア閾値となる地点12ポイント、調整対象区域閾値となる地点12ポイントとし、基地局を中心とした場合の等角度間隔で配置することを原則としました。しかし、実際には現地環境によっては、谷や急斜面、森といった危険地帯への侵入が

余儀なくされる場合があったため、一部測定点を変更しております。変更先の測定点については、樹木等の遮蔽が見込めるポイントを選定しました。各測定点の環境については、「別紙_3.3.2.1 各測定点の環境.xlsx」をご参照ください。

3.3.2.4 評価・検証方法

本実証は以下の方法で行いました。

表 3.3.13 エリア算出法精緻化 試験手順

工程	実施内容	対応図表
1	本実証にて対象とするエリアの状況について整理する。整理する項目としては植生の高さ、ローカル 5G 端末から基地局までの見通し (LOS/NLOS)、樹木の生えているエリアの面積とする。	
2	仮説に基づきパラメーターの値を修正したエリア算出法を基にしたエリアシミュレーションにより、カバーエリアおよび調整対象区域を算出・図示	図 3.3.27 図 3.3.28
3	カバーエリアおよび調整対象区域内において、基地局から全方位の測定ポイントを定義。なお、指向性アンテナを利用しても想定していない方角への電波送信が発生する可能性があるため、カバーエリアではない方位でも測定を行う。	
4	2で定義した測定ポイントにて測定ツールを用いて SS-RSRP を測定する。測定周期は 40msec とする。 定在波の影響を避けるため、1つの測定点において約 5 cm ずつ位置を動かし 6つの位置で計 1000 サンプルずつ取得する。 測定器のアンテナはオムニアンテナを使用する。	図 3.3.29 図 3.3.30
5	各測定点で取得した 1000 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。 その算出結果が閾値と異なっている場合、GPS システムを用いて閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離を確認。算出結果と実測値の距離の差分によってパラメーターの値を修正する。 ※閾値の実測については「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」での取得データを利用	
6	差分が出たポイントについて、環境条件を整理し、パラメーターの精緻化を行う。	
7	精緻化後のパラメーターにてカバーエリア及び調整対象区域を算出し、実測した閾値ポイントと近い結果になっていることを確認する。 残留する誤差が大きい場合、誤差が大きくなる条件を検討し、精緻化の結果が反映できる条件範囲を検討する。	
8	精緻化後のパラメーターに合わせて、現行の「開放地」についての表現についても必要な修正案を検討する。	
9	精緻化後のパラメーターの評価方法についても検討する。	

なお、測定にあたっては、エリア算出法上の数値や、ベンダーからの品質評価試験結果と比較し、測定方法の誤りがないよう確認を行いました。また、測定した際の環境条件 (天候、周囲の交通状況等) も記録し、異常値が発生した場合は一時的な環境の変化を受けたものか

どうか判断できるようにしました。



図 3.3.27 ローカル 5G 基地局 A 仮説パラメーターで算出したカバーエリア、調整対象区域及び測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

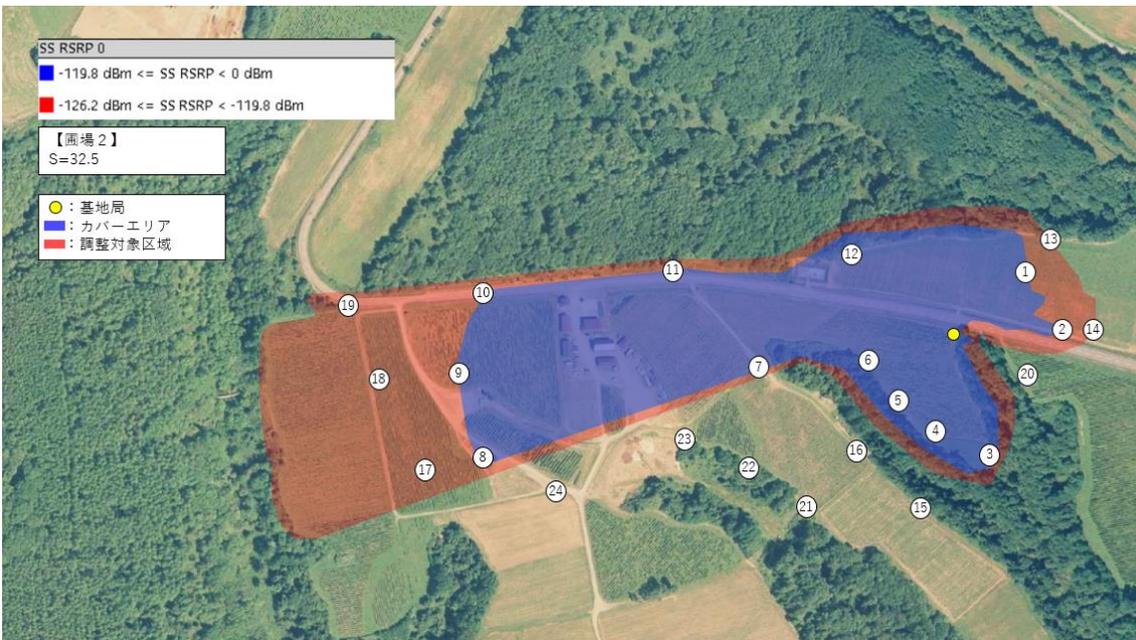


図 3.3.28 ローカル 5G 基地局 B 仮説パラメーターで算出したカバーエリア、調整対象区域及び測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作

成)

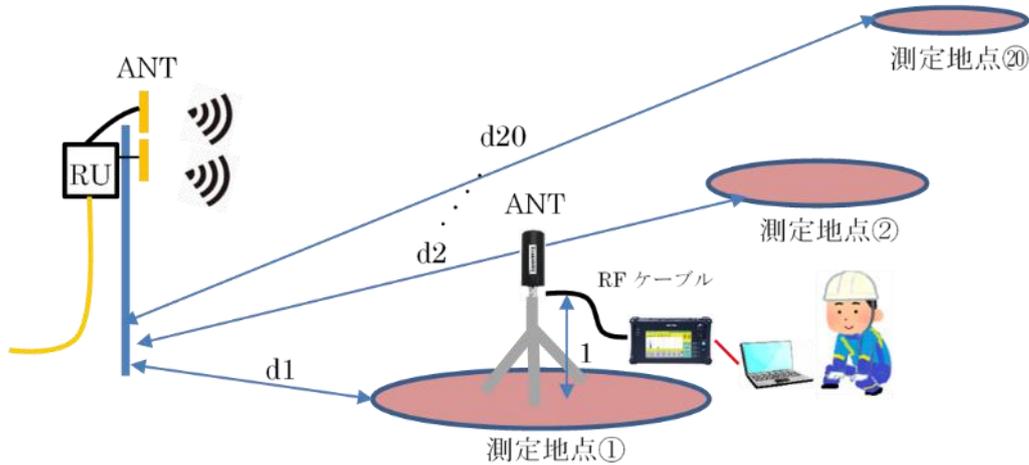


図 3.3.29 受信電力 (RSRP) の測定機材と測定方法

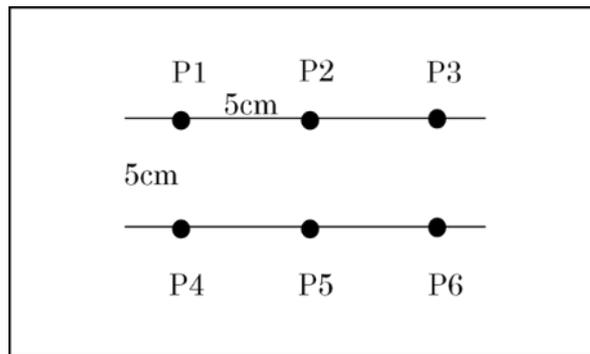


図 3.3.30 一つの測定ポイントにおける測定位置 (イメージ)

3.3.2.5 実証結果及び考察

前項での測定データから、エリア算出式によるカバーエリアと実測値との差分を以下分析し、 S のパラメーターの最適値を求めます。

まず、パラメーター S 値の検討を行います。本実証フィールドである圃場 1、圃場 2 の周辺環境は比較的に見通しのよい圃場であるため、パラメーターとして、 $S=32.5$ (開放地) を適用し本実証を行いました。

次に樹木による損失値を算出します。ITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」の算出式を用いて、樹木による損失値を検討しました。下図の(1)の算出式により樹木の損失値を以下のとおり求めます。

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp (-d \gamma / A_m)] \quad (1)$$

where:

- d : length of path within woodland (m)
- γ : specific attenuation for very short vegetative paths (dB/m)
- A_m : maximum attenuation for one terminal within a specific type and depth of vegetation (dB).

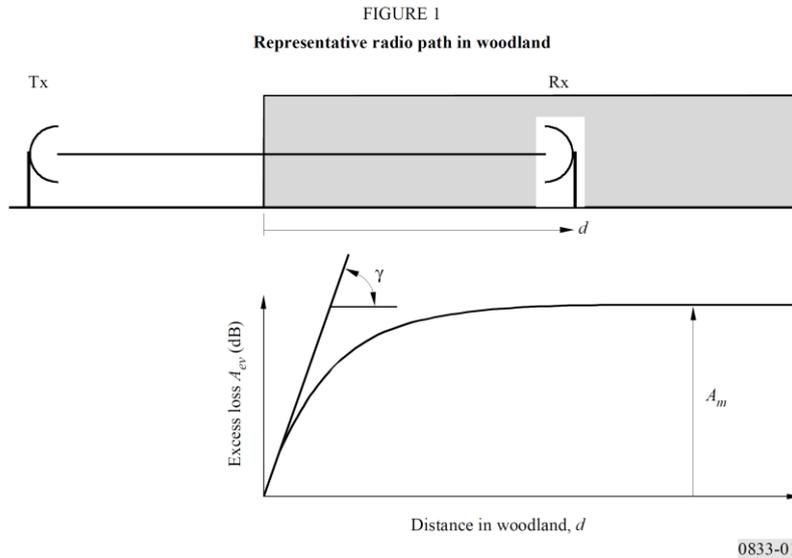


図 3.3.31 ITU-R P.833-3 植生による影響算出式
(出典：ITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」)

ここで、「 γ : specific attenuation」及び「 A_m : maximum attenuation」について求めます。

FIGURE 2
Specific attenuation due to woodland

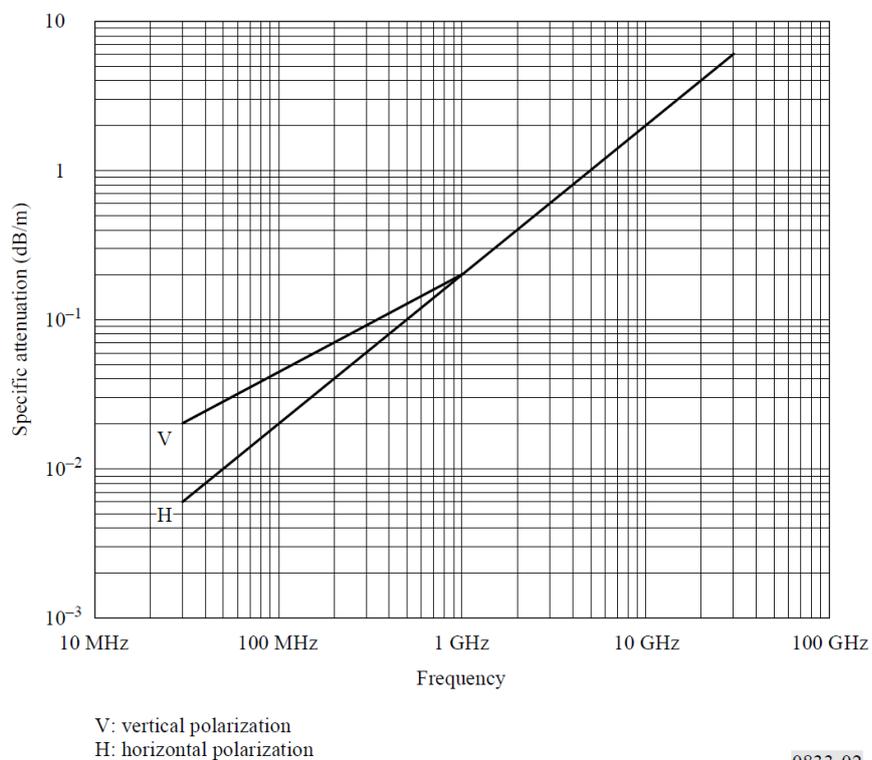


図 3.3.32 ITU-R P.833-3 Specific attenuation due to woodland
(出典：ITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」)

上図より、4850MHz≒5GHz として値を読んで $\gamma = 1 \text{ dB/m}$ としました。下表に、105.9～2117.5MHz までの実験値が示されています。この表より 4850MHz での A_m を推定しました。

表 3.3.14 105.9~2117.5MHz 実験値
(出典：ITU-R P.833-3 「Attenuation in vegetation」)

Parameter	Frequency (MHz) and polarization				
Frequency, MHz	105.9 Horizontal	466.475 Slant	949.0 Slant	1852.2 Slant	2117.5 Slant
γ (dB/m)	0.04	0.12	0.17	0.30	0.34
A_m (dB)	9.4	18.0	26.5	29.0	34.1

A_m は周波数とともに線形に増加すると仮定し、上記の表の実験値から線形近似します。

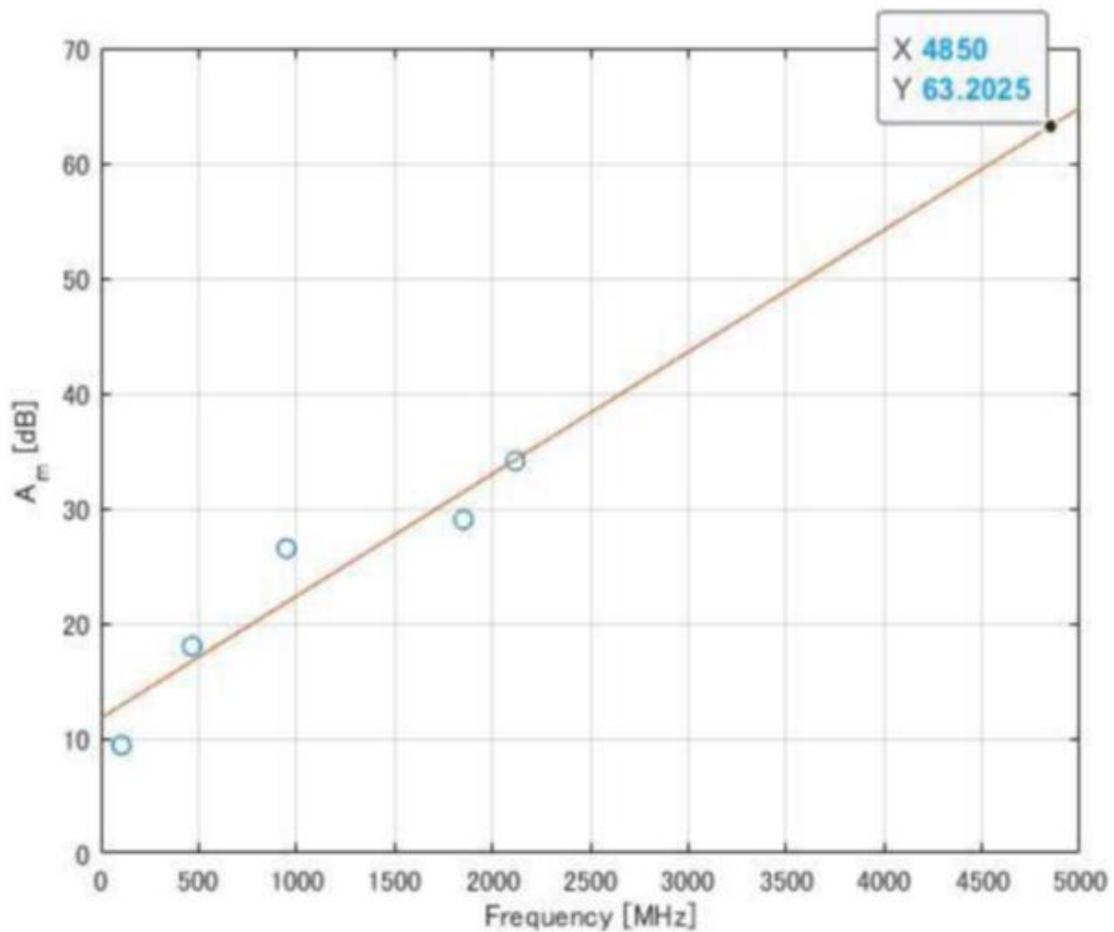


図 3.3.33 maximum attenuation

上図のとおり、線形近似の結果、4850MHz での値は下記としました。

$$A_m = 63.2 \text{ dB/m}$$

決定された γ 、 A_m を用いて図 3.3.31 の(1)の算出式から距離 d に対する損失値を求めました。

なお、「葉がある場合の損失 γ は、葉が無い場合に比べて 20%増加(dBm)」という記述より葉が無い場合の損失 γ は、 $\gamma = 0.8 \text{ dB/m}$ としました。

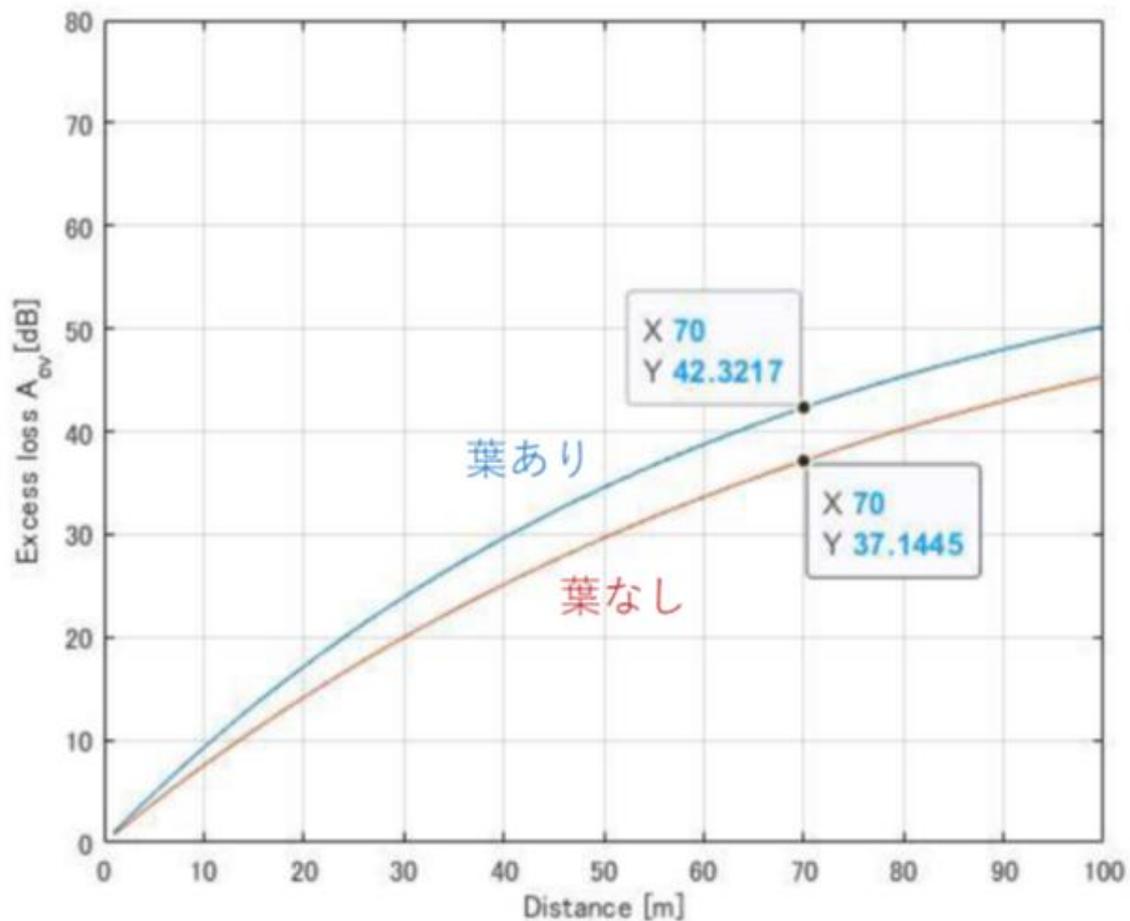


図 3.3.34 樹木による損失値（葉あり、葉なし）

上記の図から、例として樹木の距離 70m の場合の損失値は下記のとおりです。

- ・ 42.3dB（葉あり）
- ・ 37.1db（葉なし）

なお、今回は葉なしの値を使用しました。

次に樹木による損失値を考慮したカバーエリア、調整対象区域を算出します。S=32.5 で作図したカバーエリア、調整対象区域図の樹木エリア複数ポイントにおいて、エリア算出法での受信電力と上述にて算出した樹木距離による損失値によりカバーエリア端、調整対象区域端を下記の図のように算出しました。

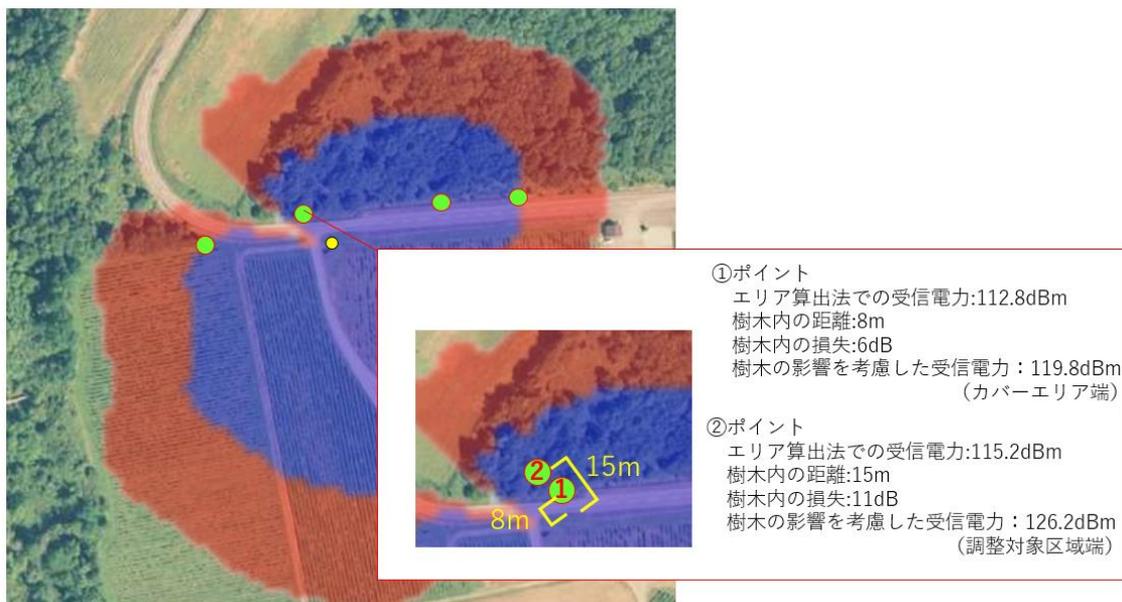


図 3.3.35 樹木による損失値を考慮したエリア図算出方法 (例)
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

このようにして得られたエリア算出法での閾値と各測定ポイントでの実測値を以下表にて比較します。

表 3.3.15 仮説に基づいたエリア算出法で算出したカバーエリアでの閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定点 ID	算出式による 受信電力 [dB]	実測値 [dB]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位 10%値	下位 10%値
1	-119.8	-117.40	-116.37	3.99	-109.61	-121.63
2	-119.8	-107.10	-105.71	4.23	-98.97	-111.72
3	-119.8	-110.25	-110.26	2.80	-106.34	-115.59
4	-119.8	-117.00	-117.23	3.90	-111.82	-125.23
5	-119.8	-110.00	-110.76	2.93	-107.49	-117.69
6	-119.8	-112.70	-112.75	2.04	-109.32	-116.60
7	-119.8	-120.95	-120.25	3.49	-114.97	-125.35
8	-119.8	-111.70	-112.75	3.17	-108.99	-119.42
9	-119.8	-113.30	-114.06	1.90	-111.65	-117.17
10	-116.7	-108.10	-108.43	1.26	-106.81	-110.86
11	-117.0	-114.60	-115.99	4.10	-111.17	-124.22
12	-126.2	-122.90	-123.04	4.03	-116.60	-130.87
13	-143.2	-119.10	-118.72	3.42	-112.53	-124.09
14	-126.2	-110.40	-110.68	2.67	-106.91	-115.82
15	-126.2	-116.30	-117.12	3.98	-111.80	-125.93
16	-126.2	-120.60	-120.26	5.49	-111.45	-129.98

17	-126.2	-115.95	-116.87	4.81	-110.05	-127.18
18	-126.2	-121.90	-122.64	3.43	-117.99	-129.71
19	-126.2	-118.10	-118.10	2.61	-114.12	-123.22
20	-126.2	-118.20	-118.48	1.76	-116.00	-122.00
21	-109.8	-103.40	-103.73	5.74	-96.58	-114.01
22	-149.2	-111.70	-111.93	2.25	-108.83	-115.92
23	-153.2	-118.40	-119.21	3.20	-115.19	-126.05
24	-156.7	-125.30	-125.82	3.38	-121.23	-133.08

表 3.3.16 仮説に基づいたエリア算出法で算出した調整対象区域での閾値と各測定ポイントでの実測値の比較

測定点 ID	算出式による 受信電力 [dB]	実測値 [dB]				
		中央値	平均値	標準偏差	上位 10%値	下位 10%値
1	-130.3	-114.50	-114.33	2.30	-110.79	-118.12
2	-119.8	-117.30	-117.24	2.57	-113.19	-121.50
3	-119.8	-116.30	-116.75	1.96	-114.14	-120.72
4	-112.8	-107.60	-108.09	2.32	-104.99	-113.30
5	-95.5	-98.40	-98.89	3.46	-94.13	-106.21
6	-91.0	-83.80	-84.35	2.52	-80.90	-89.84
7	-104.8	-109.50	-110.38	3.65	-104.93	-116.51
8	-119.8	-118.20	-118.37	1.91	-115.49	-121.95
9	-119.8	-117.80	-117.69	1.90	-114.06	-120.89
10	-119.8	-117.40	-117.43	2.14	-113.95	-121.23
11	-110.6	-100.90	-101.25	1.46	-99.15	-104.01
12	-104.4	-102.90	-103.09	2.65	-99.06	-107.79
13	-126.2	-130.40	-130.82	2.56	-127.42	-136.06
14	-126.2	-111.20	-111.36	1.35	-109.18	-113.74
15	-156.2	-122.10	-122.67	3.94	-116.91	-130.03
16	-133.8	-111.30	-111.81	4.12	-105.80	-120.25
17	-123.3	-122.40	-122.70	1.89	-120.15	-126.75
18	-122.7	-125.60	-125.81	2.41	-122.12	-130.54
19	-123.2	-118.60	-119.14	2.92	-114.52	-124.65
20	-147.8	-113.30	-113.17	2.23	-110.25	-117.66
21	-142.8	-121.70	-122.08	2.78	-117.93	-127.51
22	-145.7	-119.90	-119.89	3.53	-114.57	-126.26
23	-145.4	-121.20	-121.49	3.14	-116.87	-127.49
24	-153.8	-118.70	-118.55	3.50	-112.97	-124.67

上表での比較より、算出式における受信電力値と実測値が異なっているポイントにおける、閾値が実測された基地局相当の無線局からの距離を下図に示します。

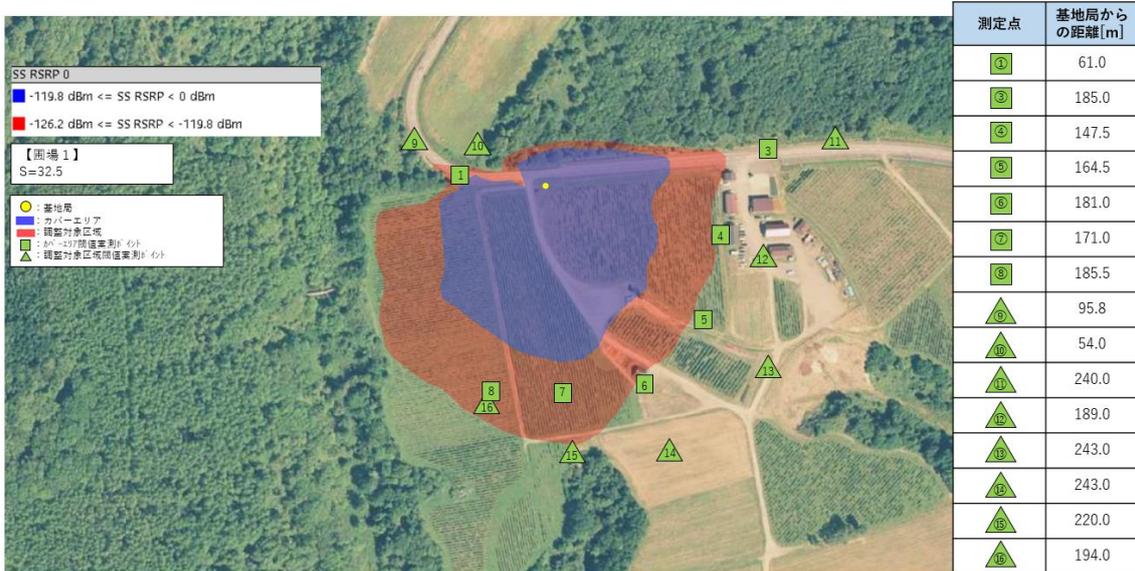


図 3.3.36 ローカル 5G 基地局 A において閾値が実測されたポイントと基地局からの距離 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

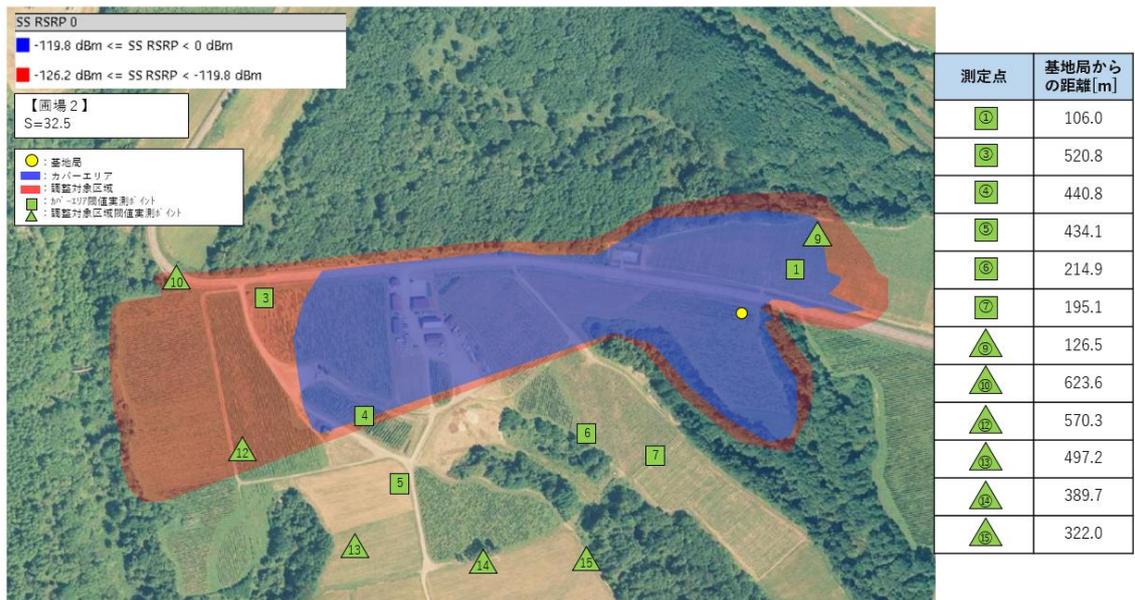


図 3.3.37 ローカル 5G 基地局 B において閾値が実測されたポイントと基地局からの距離 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

上図のとおり、エリア算出法での閾値と各測定ポイントでの実測値に乖離が生じました。この理由について、以降考察します。

本実証では圃場周囲に多くの樹木エリアがあることから電波伝搬に影響を与える要因として樹木によるものが大きく影響すると推測しました。「ITU-R P833-3」の算出式を参考に

樹木の損失を考慮し、これを仮説パラメーターとしてエリア算出を行いました。しかし、測定時の現地環境では想定以上に樹木が疎らで、樹木による損失を考慮した測定ポイントの一部では樹木の間隙から基地局が視認できました。例として図 3.3.27 の測定ポイント 22 から基地局方向を見た写真を次に示します。



図 3.3.388 基地局 A 測定ポイント 22 基地局方向見通し

基地局 A の測定ポイント 22 では、算出式の値と比べ受信電力の実測値が約 38dB 高い結果でした。

また、基地局 B の測定ポイント 16 から基地局方向を見た写真を下に示します。



図 3.3.3939 基地局 B 測定ポイント 16 基地局方向見通し

基地局 B の測定ポイント 16 から基地局アンテナは視認できませんでしたが、樹木の先の風景まで見通しがある状況でした。ここでは算出式の値と比べ受信電力の実測値は 22dB 高い結果でした。

以上のことから、仮説パラメーターに基づいたエリア算出法で算出した閾値について、一部の測定ポイントでは実測値と乖離した要因として、樹木の影響に対する推測と実態の差異によるもの、特に落葉した樹木による減衰が想定よりも少なかったことが考えられます。しかし基地局との間に樹木がない測定ポイントにおいても、乖離が生じています。こちらについては、「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」章の「3.3.1.4 ④」で述べたものと同様の要因によるものと考えられます。

上記考察結果を基にパラメーターを以下、精緻化します。具体的には差分のあった測定ポイントについて、下表のように各測定ポイントの環境条件を整理し、影響を与えたと考えられる条件を精査しパラメーター S に反映しました。

表 3.3.17 基地局 A 差分のあったポイントにおける環境条件の整理

測定点 ID	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	見通し	S [dB]	備考
1	-	-	LOS	35.93	
2	-	-	LOS	46.59	
3	-	-	LOS	42.04	
4	-	-	LOS	35.07	

5	-	-	LOS	41.54	
6	-	-	LOS	39.55	
7	-	-	LOS	32.05	
8	-	-	LOS	39.55	
9	-	-	LOS	38.24	
10	-	-	LOS	40.77	
11	-	-	LOS	33.51	
12	-	-	LOS	35.66	
13	14.00	23.00	LOS	56.98	樹木の間より基地局の目視確認可
14	-	-	LOS	48.02	
15	-	-	LOS	41.58	
16	-	-	LOS	38.44	
17	-	-	LOS	41.83	
18	-	-	LOS	36.06	
19	-	-	LOS	40.60	
20	-	-	NLOS	40.22	傾斜により NLOS
21	-	-	LOS	38.57	
22	14.00	44.00	LOS	69.77	樹木の間より基地局の目視確認可
23	14.00	44.00	NLOS	66.49	樹木により NLOS
24	14.00	44.00	NLOS	63.38	樹木により NLOS

表 3.3.18 基地局 B 差分のあったポイントにおける環境条件の整理

測定点 ID	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	見通し	S [dB]	備考
1	13.00	13.00	NLOS	37.97	樹木により NLOS
2	13.00	28.00	LOS	35.06	樹木の間より基地局の目視確認可
3	15.00	27.00	NLOS	35.55	樹木により NLOS
4	-	-	LOS	37.21	
5	-	-	LOS	29.11	
6	-	-	LOS	39.15	
7	9.00	31.00	NLOS	26.92	樹木により NLOS
8	-	-	NLOS	33.93	遠距離のため目視確認不可
9	-	-	NLOS	34.61	遠距離のため目視確認不可
10	-	-	NLOS	34.87	遠距離のため目視確認不可
11	-	-	LOS	41.85	
12	-	-	LOS	33.81	
13	13.00	13.00	NLOS	27.88	樹木により NLOS
14	13.00	28.00	LOS	47.34	樹木の間より基地局の目視確認可
15	14.00	50.00	NLOS	66.03	樹木により NLOS
16	14.00	45.00	NLOS	54.49	樹木により NLOS

17	—	—	NLOS	33.10	遠距離のため目視確認不可
18	—	—	NLOS	29.39	遠距離のため目視確認不可
19	—	—	NLOS	36.56	遠距離のため目視確認不可
20	15.00	51.00	NLOS	67.13	樹木により NLOS
21	14.00	45.00	NLOS	53.22	樹木により NLOS
22	14.00	45.00	NLOS	58.31	樹木により NLOS
23	14.00	60.00	NLOS	56.41	樹木により NLOS
24	14.00	60.00	NLOS	67.75	樹木により NLOS

上表で各測定ポイントにおける環境条件を整理し、受信電力について仮説に基づいたエリア算出法による値と実測値(中央値)の差分に $S=32.5$ を足すことで、各測定ポイントでの S 値を算出しました。算出した S 値を開放地 ($S=32.5$) と比較したところ、複数の測定ポイントにおいて 20dB を超える S 値の差分(増加)が見られました。当該測定ポイントはエリア算出法で受信電力を算出する際に樹木による損失値を考慮したという点が共通しています。そのため、樹木による損失値によってエリア算出式による受信電力が実際よりも大きく減少し、相対的に実測値が増大している状態にあると考えられます。よって当該 S 値の差分(増加)は、エリア算出式に樹木による損失値を考慮したことに起因するものと考えられます。樹木による影響を受けない測定ポイントと比べ、当該 S 値の差分(増加)は著しく大きいため、樹木による損失値を考慮した測定ポイントについては、本実証における実態とは乖離していると思慮され、仮説に基づいたエリア算出法による値と実測値(中央値)の差分を用いて S 値の精緻化検証を行うことは適当ではないものと考え、実測値(中央値)と基準値(市街地 $S=0$)との差分により S 値を推定することとしました。

1) 実証環境(基地局 A)におけるパラメーター S 値の検討

各測定ポイントでの RSRP 実測値(中央値)の距離特性を以下に記します。

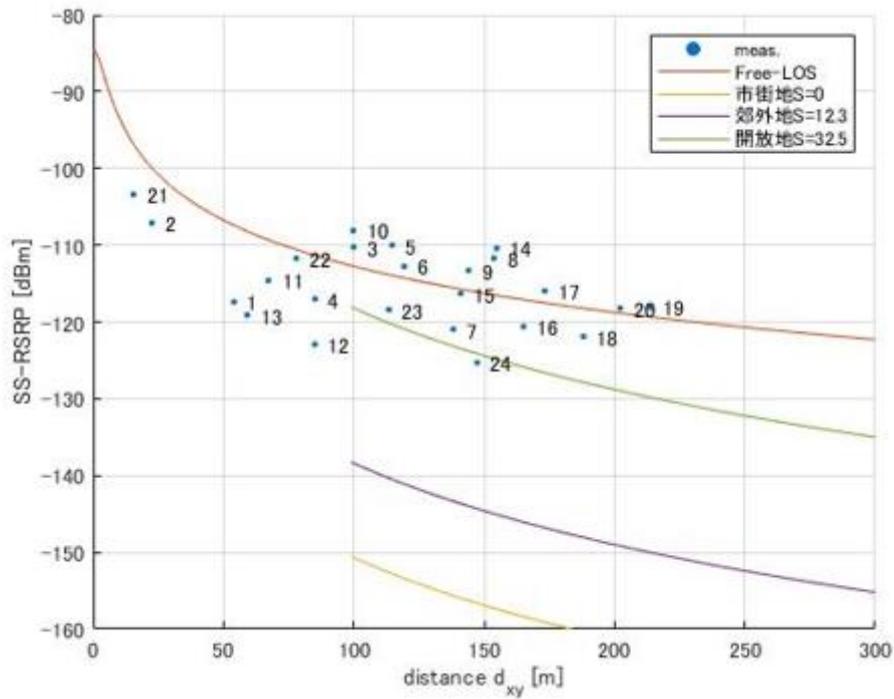


図 3.3.400 基地局 A 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ

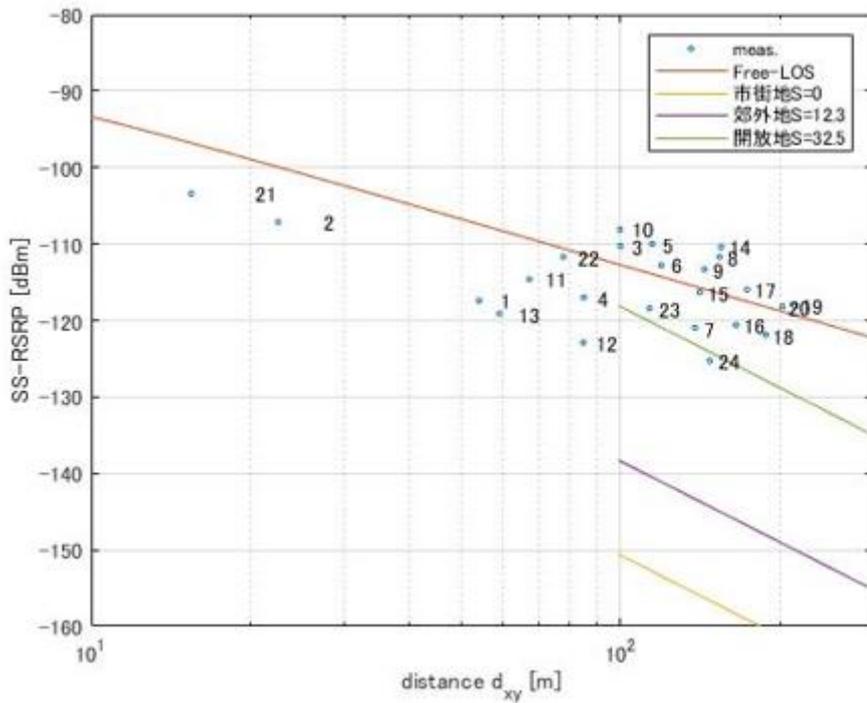


図 3.3.411 基地局 A 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ (距離対数)

複数の測定ポイントで自由空間伝搬式のカーブより高い受信電力となっています。通常 RSRP の値は自由空間伝搬式カーブより高い値になることはありませんが、自由空間伝

搬式カーブよりも RSRP の値が高くなっている理由として送信アンテナの指向性の影響が考えられます。

送信アンテナの指向性の影響を取り除いた RSRP の距離特性を以下示します。送信アンテナの指向性の影響を取り除くことにより、RSRP の値が自由空間伝搬式カーブよりも高い値をとる点なることが少なくなったため、指向性の影響があったと考えられます。

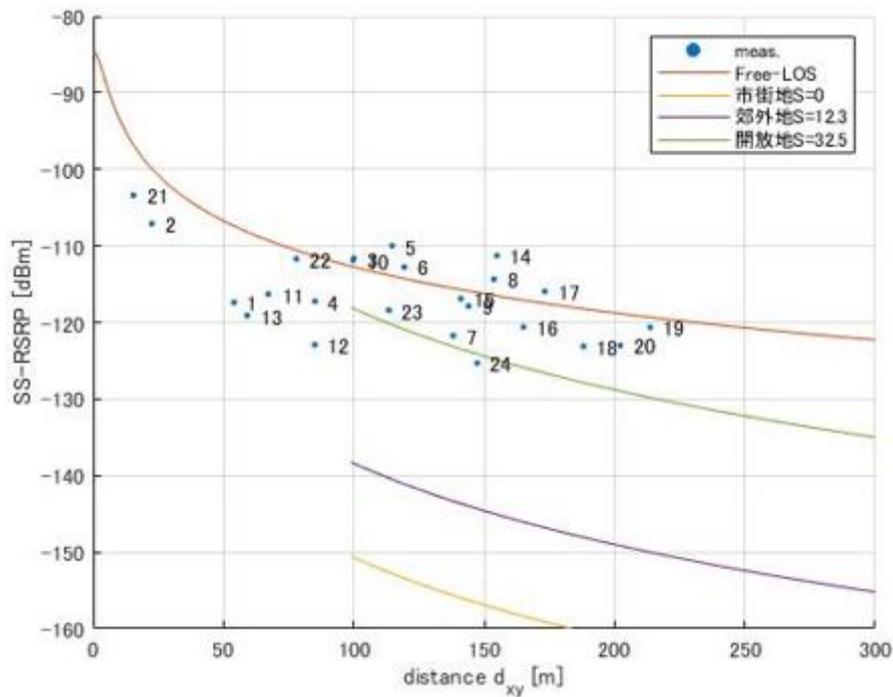


図 3.3.42 基地局 A 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ（指向性除去）

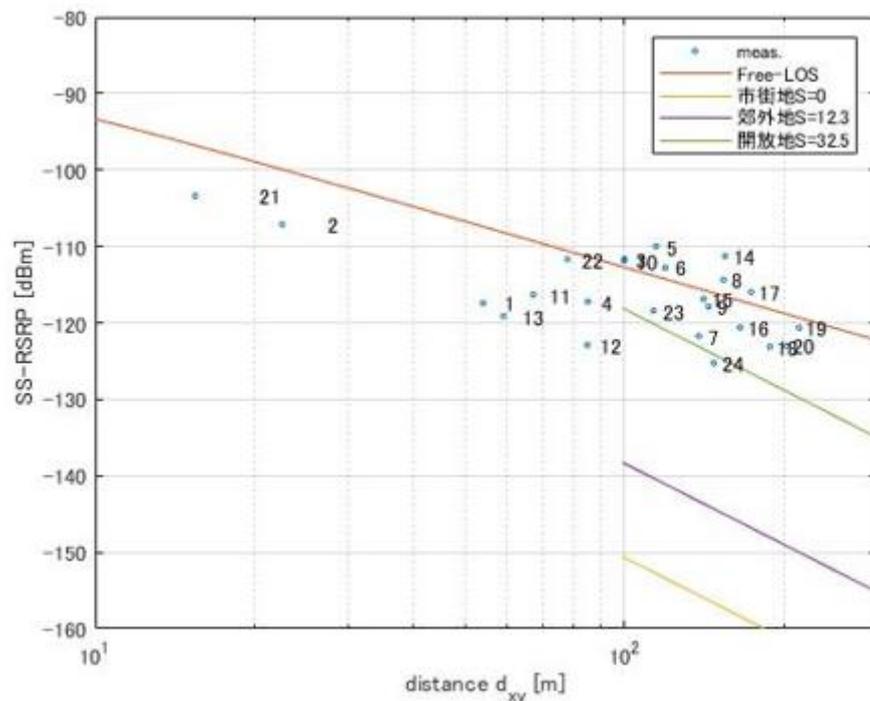


図 3.3.423 基地局 A 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ（指向性除去、距離対

数)

送信アンテナの指向性の影響を取り除いた RSRP の実測値と基準値 S=0 (市街地) との差 (偏差) の距離特性を以下に示します。

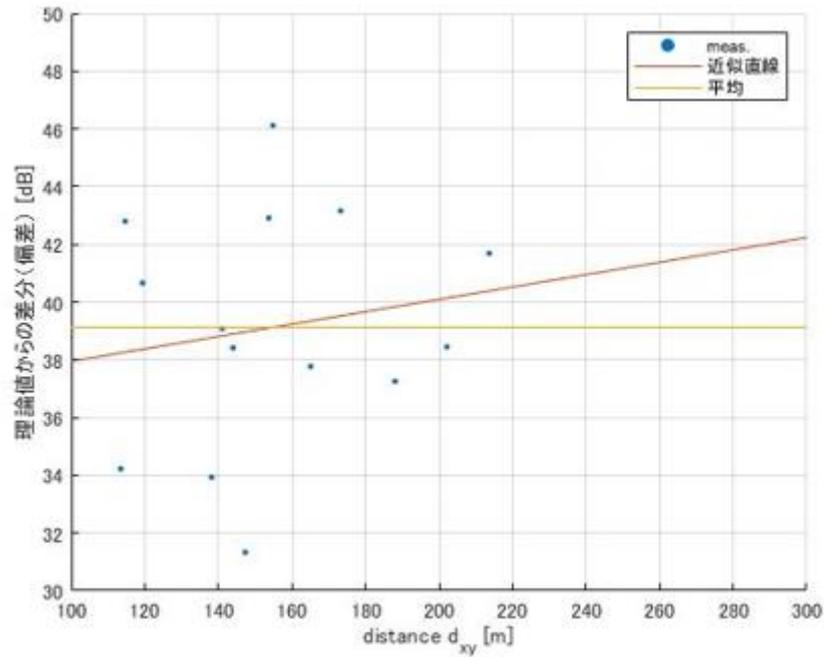


図 3.3.434 基地局 A RSRP の実測値と基準値 S=0 (市街地) との差 (偏差) の距離特性

拡張秦式は 100m 以上の距離で定義されているため、100m 以上での測定値を使用しました。実測値と基準値 S=0 (市街地) との差分 (偏差) に対して、平均値を求めて S 値を推定したところ、S=39.1 となりました。

推定誤差 [dB] (=測定値-推定 S 値) の度数分布及び累積確率分布並びに測定値から求めた平均 0dB、標準偏差 $\sigma=4.1$ dB による正規分布を以下に示します。

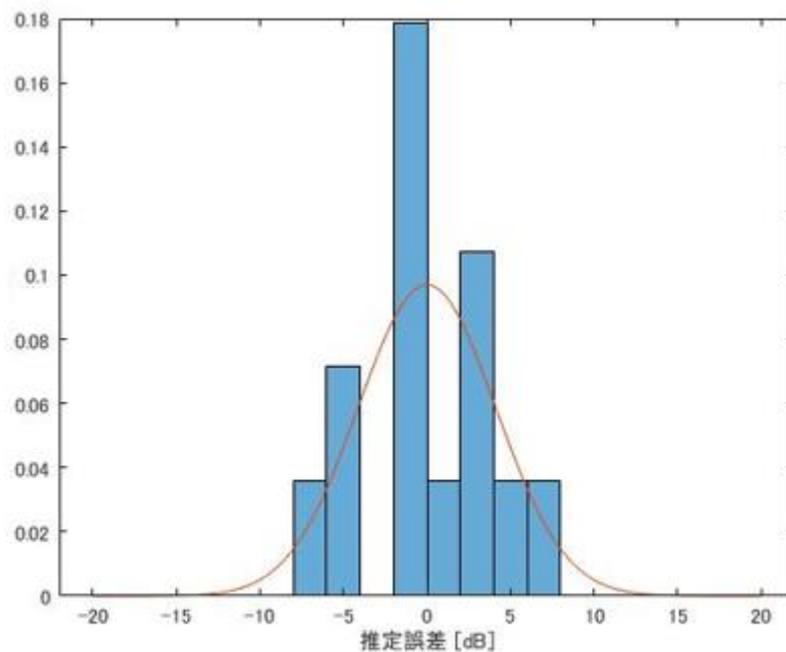


図 3.3.445 基地局 A 確率密度

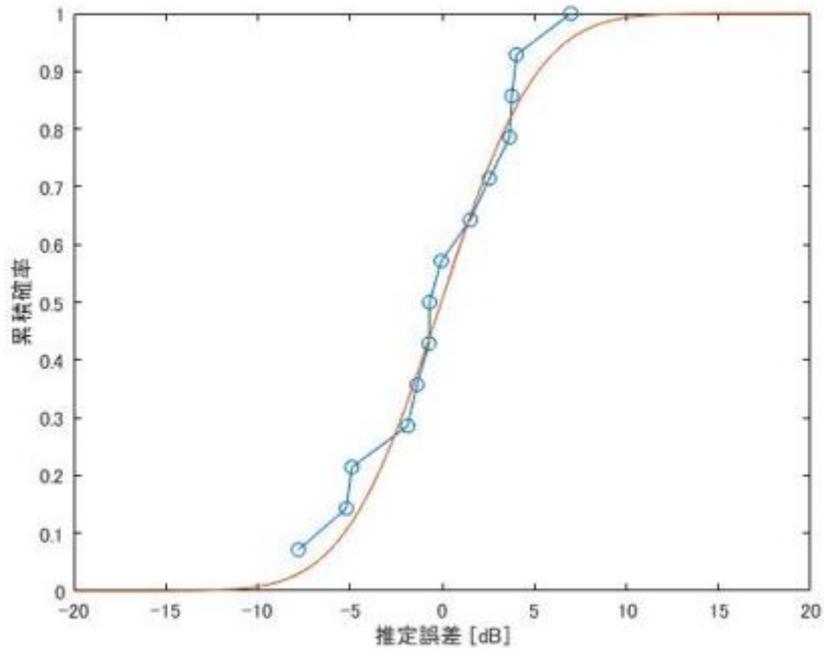


図 3.3.456 基地局 A 累積密度

推定誤差は、ほぼ正規分布していることから測定結果を類似していることにより、基地局 A における S 値は 39.1 と推測しました。よって、圃場 1 (基地局 A) のパラメーターを「S=39.1」としました。

2) 実証環境(基地局 B)におけるパラメーターS 値の検討

各測定ポイントでの RSRP 実測値 (中央値) の距離特性を以下に示します。

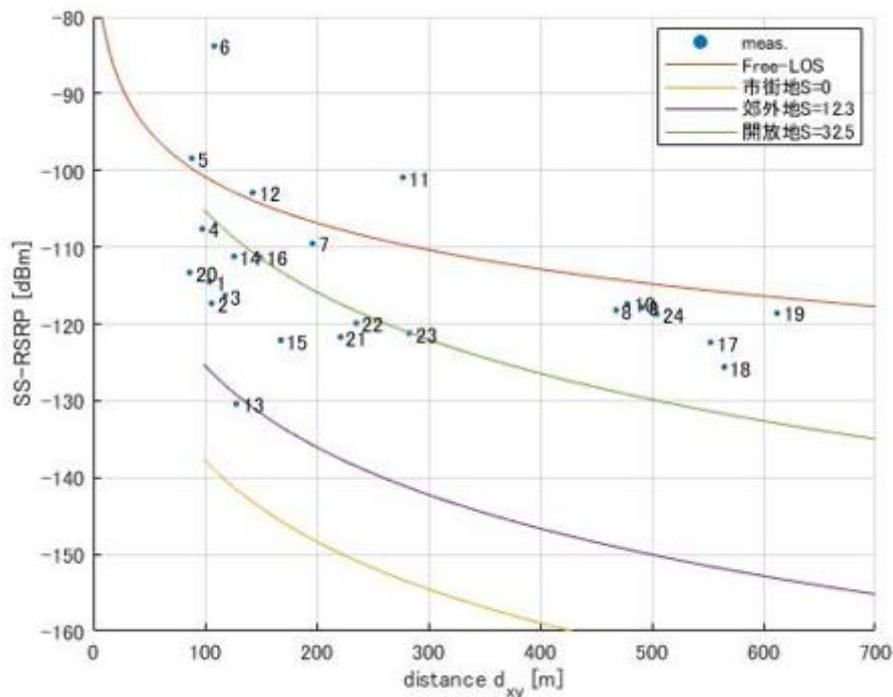


図 3.3.467 基地局 B 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ

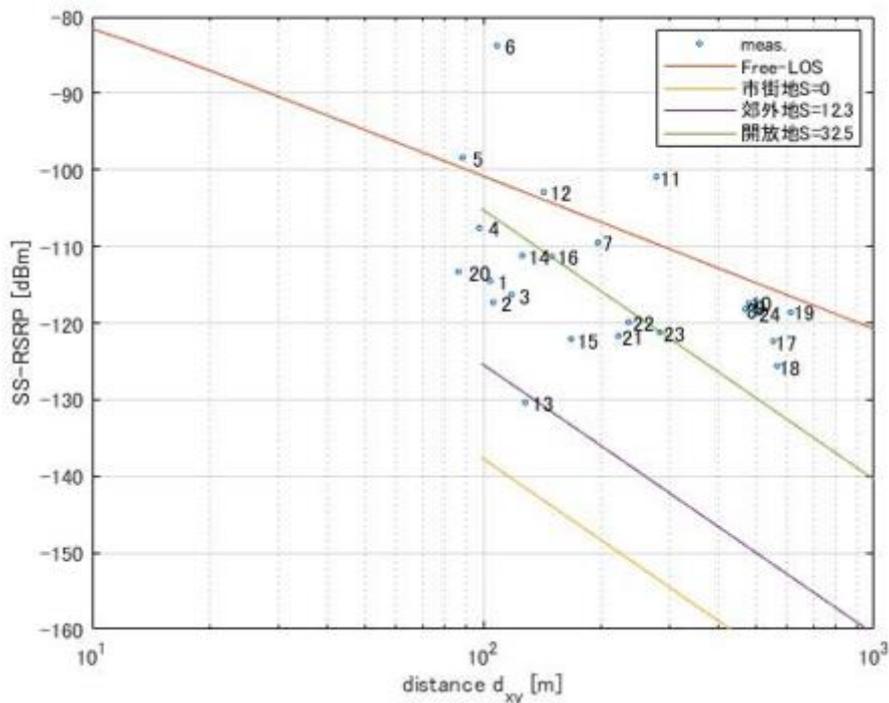


図 3.3.478 基地局 B 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ (距離対数)

通常 RSRP の値は自由空間伝搬式カーブより高い値になることはありませんが、自由空間伝搬式カーブよりも RSRP の値が高くなっている理由として送信アンテナの指向性の影響が考えられます。

送信アンテナの指向性の影響を取り除いた RSRP の距離特性を以下に示します。送信アンテナの指向性の影響を取り除くことにより、RSRP の値が自由空間伝搬式カーブよりも

高い値となる点が少なくなったため、指向性の影響があったと考えられます。

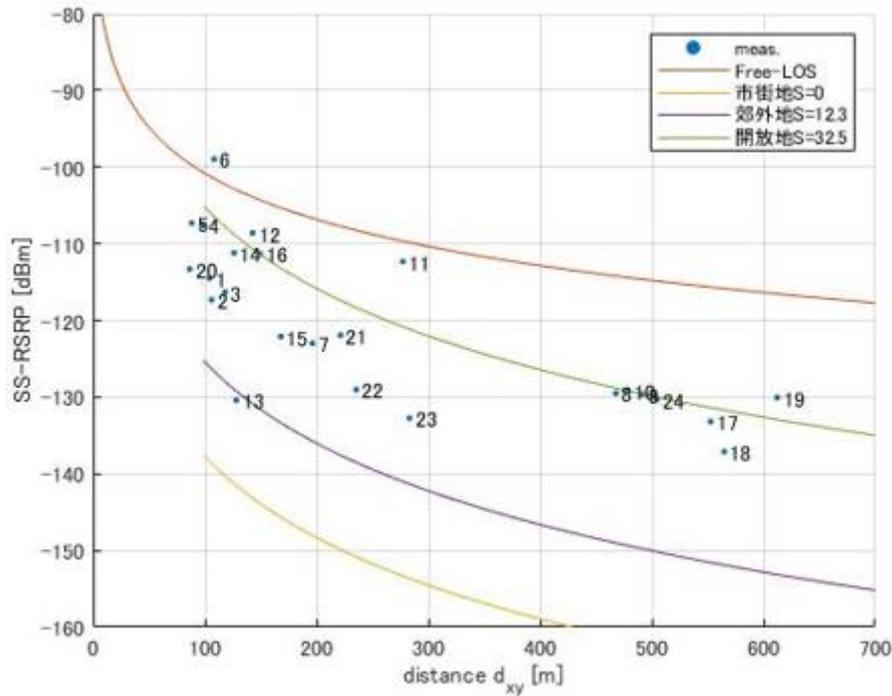


図 3.3.498 基地局 B 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ（指向性除去）

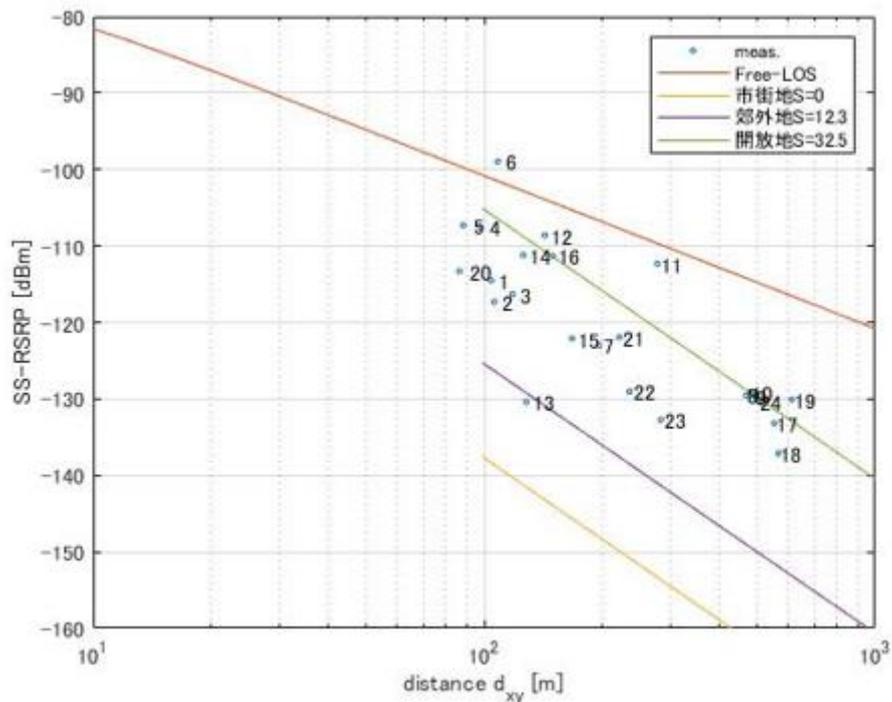


図 3.3.490 基地局 B 受信電力の実測値と自由空間伝搬式カーブ（指向性除去、距離対数）

送信アンテナの指向性の影響を取り除いた RSRP の実測値と基準値（市街地 $S=0$ ）との差（偏差）の距離特性を以下に示します。

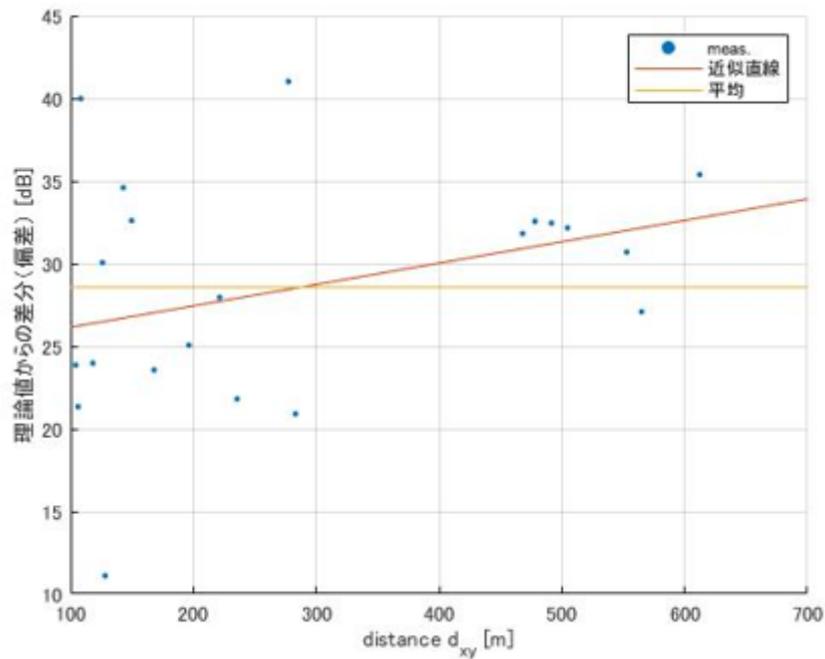


図 3.3.501 基地局 B RSRP の実測値と基準値 S=0 (市街地) との差 (偏差) の距離特性

拡張秦式は 100m 以上の距離で定義されているため、100m 以上での測定値を使用しました。実測値と基準値 S=0 (市街地) との差分 (偏差) に対して、平均値を求めて S 値を推定したところ、S=28.6 となりました。

推定誤差 [dB] (=測定値-推定 S 値) の度数分布及び累積確率分布並びに測定値から求めた平均 0dB、標準偏差 $\sigma=7.0$ による正規分布を以下に示します。

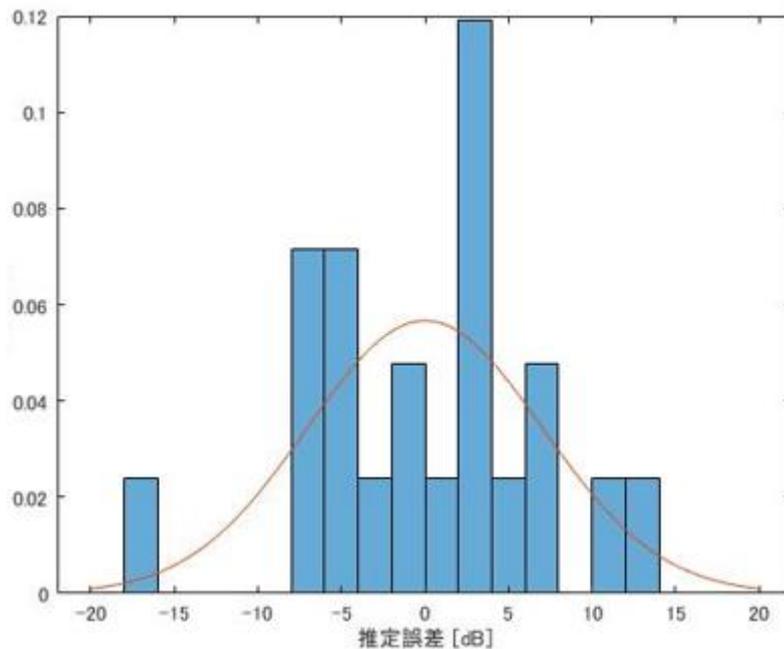


図 3.3.52 基地局 B 確率密度

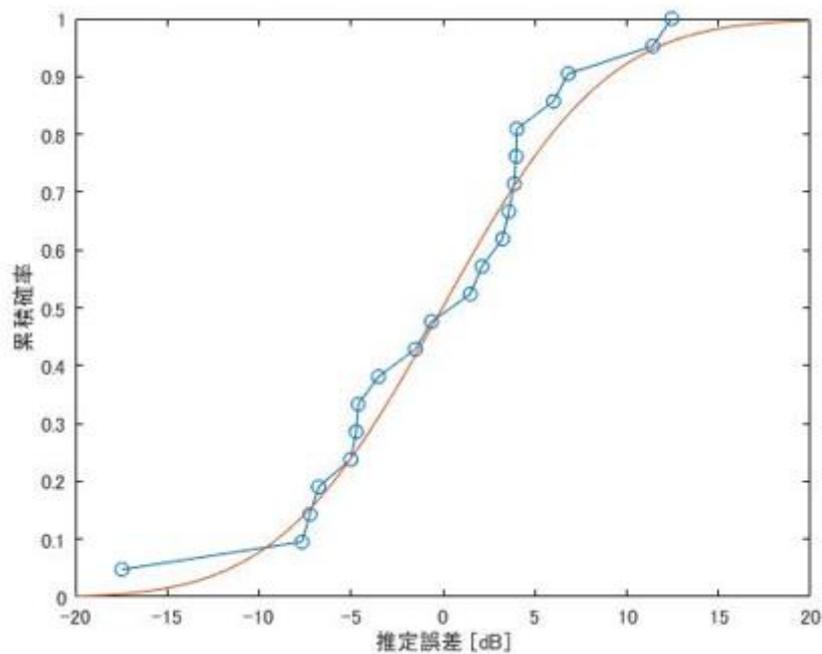


図 3.3.53 基地局 B 累積密度

推定誤差は、ほぼ正規分布していることから測定結果を類似していることにより、基地局 B における S 値は 28.6 と推測しました。よって、圃場 2 (基地局 B) のパラメーターを「S=28.6」としました。

この精緻化後のパラメーターについて基地局 A における S 値精緻化 (S=39.1) の効果の確認を行います。基地局 A について、樹木による損失は考慮せず、S 値を精緻化後の S=39.1 とした場合でエリア算出法を用いて受信電力を算出し、実測値(中央値)との比較を行いました。S 値を用いる拡張式は基地局からの距離 100m 以上で定義されているため、100m 以内の測定ポイントについては除外して比較しました。

表 3.3.19 基地局 A S=39.1 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較

基地局A S=39.1

測定点 ID	S=39.1による算出受信電力 [dB]	受信電力 実測値 [dB]	受信電力 差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
5	-118.44	-110.76	-7.68	-	-	
6	-118.48	-112.75	-5.73	-	-	
7	-117.12	-120.25	3.13	-	-	
8	-116.75	-112.75	-4.00	-	-	
9	-117.4	-114.06	-3.34	-	-	
14	-121.62	-110.68	-10.94	-	-	
15	-122.25	-117.12	-5.13	-	-	
16	-121.83	-120.26	-1.57	-	-	
17	-121.61	-116.87	-4.74	-	-	
18	-121.44	-122.64	1.20	-	-	
19	-120.68	-118.10	-2.58	-	-	
20	-121.21	-118.48	-2.73	-	-	傾斜によりNLOS
23	-123.37	-119.21	-4.16	14.00	44.00	樹木によりNLOS
24	-125.56	-125.82	0.26	14.00	44.00	樹木によりNLOS
		平均値	-3.43			

表 3.3.20 基地局 A S=32.5 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較

基地局A S=32.5

測定点 ID	算出式による 受信電力 [dB]	受信電力 実 測値 [dB]	受信電力 差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
5	-119.8	-110.76	-9.04	-	-	
6	-119.8	-112.75	-7.05	-	-	
7	-119.8	-120.25	0.45	-	-	
8	-119.8	-112.75	-7.05	-	-	
9	-119.8	-114.06	-5.74	-	-	
14	-126.2	-110.68	-15.52	-	-	
15	-126.2	-117.12	-9.08	-	-	
16	-126.2	-120.26	-5.94	-	-	
17	-126.2	-116.87	-9.33	-	-	
18	-126.2	-122.64	-3.56	-	-	
19	-126.2	-118.10	-8.10	-	-	
20	-126.2	-118.48	-7.72	-	-	傾斜によりNLOS
23	-153.2	-119.21	-33.99	14.00	44.00	樹木によりNLOS
24	-156.7	-125.82	-30.88	14.00	44.00	樹木によりNLOS
		平均値	-10.90			

エリア算出法による受信電力と実測値の差分は平均して 3.43dB であり、ほとんどのポイントにおいて 5dB 程度の差分に収まっています。S=32.5 及び樹木による損失を考慮してエリア算出式を用いた場合に比べ、S=39.1 としてエリア算出式を用いた場合の方が実測値に近い結果となりました。

次に、基地局 B における S 値精緻化 (S=28.6) の効果を確認します。基地局 B について、樹木による損失は考慮せず、S 値を精緻化後の S=28.6 とした場合でエリア算出法を用いて受信電力を算出し、実測値(中央値)との比較を行いました。S 値を用いる拡張秦式は基地局からの距離 100m 以上で定義されているため、100m 以内の測定ポイントについては除外して比較しました。エリア算出法による受信電力と実測値の差分の傾向及び測定ポイントの環境に応じて次の 2 パターンに分類し効果の確認を行いました。

- パターン 1 電波の到来方向に樹木または起伏があり基地局への見通しがないポイント
- パターン 2 基地局への見通しがあるポイント

はじめにパターン 1 について実測値との比較を行います。

表 3.3.21 基地局 B S=28.6 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較 (パターン 1)

基地局B パターン1(見通し無し) S=28.6

測定点 ID	S=28.6による 算出受信電力 [dB]	受信電力 実測値 [dB]	受信電力 差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
1	-123.03	-114.33	-8.70	13.00	13.00	樹木によりNLOS
3	-123.05	-116.75	-6.30	15.00	27.00	樹木によりNLOS
7	-108.56	-110.38	1.82	9.00	31.00	樹木によりNLOS
13	-127.94	-130.82	2.88	13.00	13.00	樹木によりNLOS
14	-127.63	-111.36	-16.27	13.00	28.00	樹木の間より基地局の目視確認可
15	-132.27	-122.67	-9.60	14.00	50.00	樹木によりNLOS
16	-114.68	-111.81	-2.87	14.00	45.00	樹木によりNLOS
18	-126.26	-125.81	-0.45	-	-	遠距離のため目視確認不可
21	-123.37	-122.08	-1.29	14.00	45.00	樹木によりNLOS
22	-116.06	-119.89	3.83	14.00	45.00	樹木によりNLOS
23	-115.85	-121.49	5.64	14.00	60.00	樹木によりNLOS
24	-123.50	-118.55	-4.95	14.00	60.00	樹木によりNLOS
		平均値	-3.02			

表 3.3.22 基地局 B S=32.5 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較 (パターン 1)

基地局B パターン1(見通し無し) S=32.5

測定点 ID	算出式による 受信電力 [dB]	受信電力 実測値 [dB]	受信電力 差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
1	-119.80	-114.33	-5.47	13.00	13.00	樹木によりNLOS
3	-119.80	-116.75	-3.05	15.00	27.00	樹木によりNLOS
7	-104.80	-110.38	5.58	9.00	31.00	樹木によりNLOS
13	-126.20	-130.82	4.62	13.00	13.00	樹木によりNLOS
14	-126.20	-111.36	-14.84	13.00	28.00	樹木の間より基地局の目視確認可
15	-156.20	-122.67	-33.53	14.00	50.00	樹木によりNLOS
16	-133.80	-111.81	-21.99	14.00	45.00	樹木によりNLOS
18	-122.70	-125.81	3.11	-	-	遠距離のため目視確認不可
21	-142.80	-122.08	-20.72	14.00	45.00	樹木によりNLOS
22	-145.70	-119.89	-25.81	14.00	45.00	樹木によりNLOS
23	-145.40	-121.49	-23.91	14.00	60.00	樹木によりNLOS
24	-153.80	-118.55	-35.25	14.00	60.00	樹木によりNLOS
		平均値	-14.27			

S=28.6 の時、エリア算出法による受信電力と実測値の差分は平均して 3.02dB であり、多くのポイントにおいて 5dB 程度の差分に収まっています。S=32.5 及び樹木による損失を考慮してエリア算出式を用いた場合に比べ、S=28.6 としてエリア算出式を用いた場合の方が実測値に近い結果となりました。

次に、パターン 2 について比較を行います。

表 3.3.23 基地局 B S=28.6 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較 (パターン 2)

基地局B パターン2(見通し有) S=28.6

測定点 ID	S=28.6による算出受信電力 [dB]	受信電力実測値 [dB]	受信電力差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
2	-121.19	-117.24	-3.95	13.00	28.00	樹木の間より基地局の目視確認可
8	-124.48	-118.37	-6.11	-	-	遠距離のため目視確認不可
9	-123.80	-117.69	-6.11	-	-	遠距離のため目視確認不可
10	-123.34	-117.43	-5.91	-	-	遠距離のため目視確認不可
11	-114.46	-101.25	-13.21	-	-	
12	-105.99	-103.09	-2.90	-	-	
17	-127.23	-122.70	-4.53	-	-	遠距離のため目視確認不可
19	-137.14	-119.14	-18.00	-	-	遠距離のため目視確認不可
		平均値	-7.59			

表 3.3.24 基地局 B S=32.5 の場合の算出受信電力と実測受信電力の比較 (パターン 2)

基地局B パターン2(見通し有) S=32.5

測定点 ID	算出式による受信電力 [dB]	受信電力実測値 [dB]	受信電力差分 [dB]	植生の高さ [m]	樹木の距離 [m]	備考
2	-119.80	-117.24	-2.56	13.00	28.00	樹木の間より基地局の目視確認可
8	-119.80	-118.37	-1.43	-	-	遠距離のため目視確認不可
9	-119.80	-117.69	-2.11	-	-	遠距離のため目視確認不可
10	-119.80	-117.43	-2.37	-	-	遠距離のため目視確認不可
11	-110.60	-101.25	-9.35	-	-	
12	-104.40	-103.09	-1.31	-	-	
17	-123.30	-122.70	-0.60	-	-	遠距離のため目視確認不可
19	-123.20	-119.14	-4.06	-	-	遠距離のため目視確認不可
		平均値	-2.97			

現行の「開放地（電波の到来方向に高い樹木、建物等の妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300～400m 以内が開けているような畑地・田地・野原等）」という条件に環境が合致しており、また、S=32.5 としてエリア算出式を用いた場合の方が S=28.6 の時よりも実測値に近い結果となりました。

圃場 1 において、S=39.1 の条件は 3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定における結果を合わせると、下記のとおりです。

条件 1：植生等の妨害の有無に関係なく、基地局から 170m 以内であること

条件 2：植生が無く、基地局が視認できる地域で 100m～200 m 以内であること

上記の条件をまとめると、S=39.1 での表現は下記を提案します。

「基地局が視認できる 200m 以内の畑地・田地・野原等、もしくは樹木等の妨害があり基地局が視認できない 170m 以内の畑地・田地・野原等」

圃場 2 において、S=28.6 の条件を確認すると、下記が条件であることが言えます。

条件 1：NLOS であること

条件 2：植生が 9m 以上あること

条件 3：基地局と対象地点の間の樹木エリアの距離が 10m 以上あること

条件 4：有効範囲は基地局からの距離が 100m～400m であること

上記の条件をまとめると、S=28.6 での表現は下記を提案します。

「基地局が樹木などで妨害され NLOS になるような地域で、目安として基地局からの距離が 100m～400m 以内で高さ 9m 以上の植生が距離 10m 以上ある畑地・田畑・野原等」

以上のことから、当該環境に適用する S 値は圃場 1 において $S=39.1$ 、圃場 2 においては $S=28.6$ と算出されましたが、 $S=39.1$ については既存の審査基準（①市街地(都市の中心部であって、2 階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など)； $S=0.0$ ②郊外地(樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域)； $S=12.3$ ③開放地(電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑地・田地・野原など)； $S=32.5$) における開放地； $S=32.5$ よりも大きい値です。このことから、本実証環境または類似した環境における保守的な S 値として $S=39.1$ を利用することを提案します。しかしながら、基地局 A、B において精緻化後の S を用いた算出値と実測値について、全体的な差分は小さくなったものの、ポイントによっては 10dB 以上の差がありました。また、同じ中山間地域に設置した基地局 A、B の精緻化後のパラメーターについても 10dB 以上の差があります。これらのことから、中山間地域においては各ポイントの地形的条件や環境条件がそれぞれ異なるため、1 つの基地局に一概に決められたパラメーター S を使用しても実測値と乖離が生じてしまうということが考えられます。一方で、本項で示した方法により S 値を求めることで算出値と実測値の乖離が小さくなった箇所もあったことから、中山間地域におけるローカル 5G システム導入前のシミュレーションを改善するためには、様々な中山間地域において地形的条件や環境条件でより細かくエリアを分類し、条件にあったパラメーター S を求める必要があると考えます。

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化

3.3.3.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

本実証エリアのように密集した樹木等自然の地形によって圃場等の作業エリアが分断されている場合には、電波が遮蔽される可能性があります。このような地形に対するエリア化について、基地局をむやみに増設することなく対処する方法として反射板によるエリア化の有効性を検討しました。なお、反射板の実証事例としては、令和2年度地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証における「eスポーツ等を通じた施設の有効活用による地域活性化の実現」が上げられます。ただし昨年度実証では28GHz帯を利用した屋内環境での実証であったため、電波の直進性が弱いSub6での有効性は明らかになっていません。本実証はSub6でも一定の条件で反射板の活用が可能であることを明らかにし、反射板を活用したエリア構築方法について取りまとめることを目的としました。ミリ波よりも回り込むSub6の特性に加えて、無指向性のアンテナを使用すると、反射板からの反射波と、遮蔽物を回り込んだ直接波が混ざり合い、反射板の評価が難しくなる可能性があると考えました。そのため、本実証では指向性外部アンテナと組み合わせて検証を行い、有効性を検証しました。

(2) 実証目標

本実証項目の目標としては、基地局からの直接波よりも反射板を利用したほうが不感エリアでの受信電力(RSRP値)が改善することを目標としました。具体的には反射板設置後の不感エリアにて、次項の仮説にて算出している想定受信電力の値と同程度の受信電力(-73.3dBm)を目標としました。また、伝送性能については、3.3.1.1項と同様に、上りスループット63.5Mbps、下りスループット24Mbps、伝送遅延400msecを目標としました。

3.3.3.2 実証仮説

下記の表に記載の通り、通常のRU及び各外部アンテナ利用時でも樹木の遮蔽により直接波の受信電力はかなり低い値になると予想され、不感エリアが発生すると考えました。

表 3.3.25 通常RU とセクターアンテナによる不感エリアへの受信電力比較

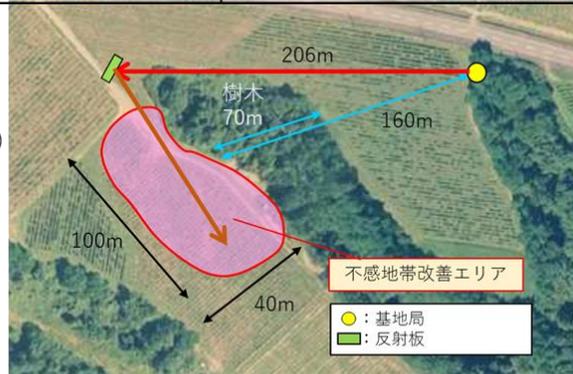
	通常RU	セクタアンテナ VH65A-3545RTD
アンテナ利得	5dBi	10dBi
想定受信電力 SS-RSRP 直接波 (葉あり)	-140.7dBm	-132.7dBm
想定受信電力 SS-RSRP 直接波 (葉なし)	-135.5dBm	-127.5dBm

【算出式】

想定受信電力(dBm)
 = RU送信電力(dBm)
 + 基地局アンテナ利得(dBi)
 - RU、UE間距離による自由空間伝搬損(dB)
 + UE利得(dBi)
 - 樹木による損失

自由空間損失 = $20 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot r / \lambda)$
 ※ λ = 波長(m)、 r = 距離(m)

樹木による損失はITU-RP.833-3を参考に算出
 葉がある状態では42.3dBの損失とし、
 葉がない状態では37.1dBの損失とした。
 (葉がない状態は葉がある状態の20%減と仮定)



上図表の仮説を踏まえると、反射板設置前のカバーエリア及び調整対象区域としては以下の図のようになりますと想定しました。

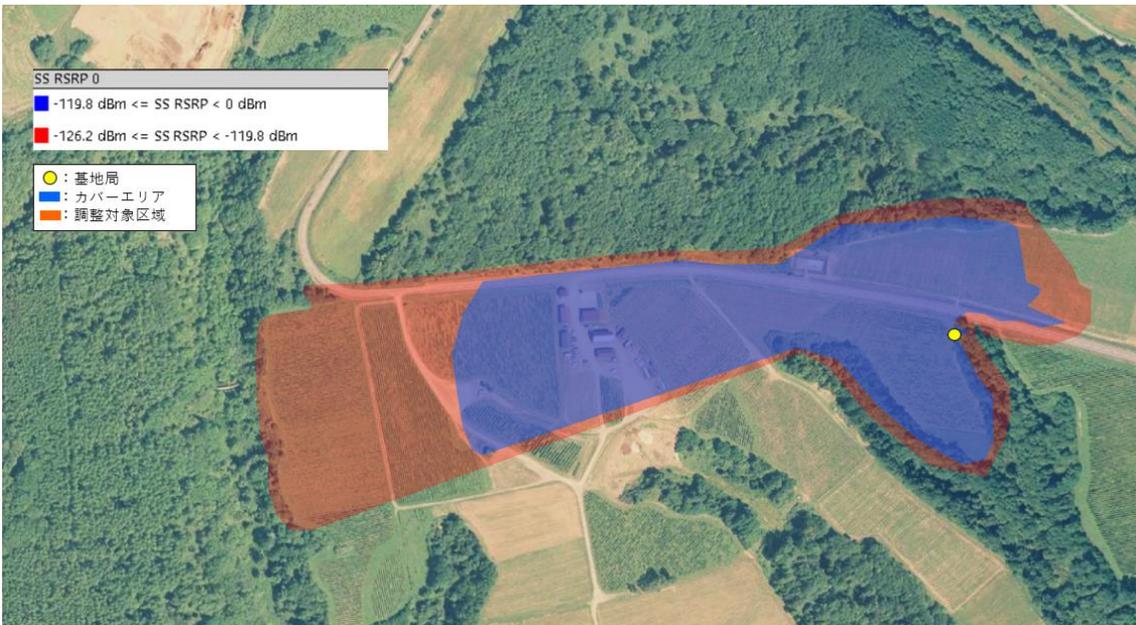


図 3.3.514 反射板設置前の想定カバーエリア
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

反射板によって樹木遮蔽を迂回した場合の想定受信電力は下記の図のとおりと想定しました。反射板を基地局に見立ててシミュレーションを行うことで、図を作成しました。通常のRUと反射板の組み合わせでも直接波と比較すると受信電力はかなり向上することが予想されますが、指向性のあるセクターアンテナと組み合わせた場合に最も受信電力が改善されると考えました。本実証では、反射板の効率的な方法として外部アンテナと組み合わせた検証を行い、本仮説を立証することを目標としました。

表 3.3.26 通常RU、セクターアンテナ、オムニアンテナによる反射板設置後の受信電力比較

	通常RU	セクタアンテナ VH65A-3545RTD	高利得オムニアンテナ VH360A-3545FTD
アンテナ利得	5dBi	10dBi	11dBi
想定受信電力	-116.5dBm	-108.5dBm	-113.5dBm

【算出式】

想定受信電力(dBm)
 =RU送信電力(dBm)
 + 基地局アンテナ利得(dBi)
 - RU反射板間距離による自由空間伝搬損(dB)
 - 反射板UE間距離による自由空間伝搬損(dB)
 + UE利得(dBi)
 + 2*反射板利得

自由空間損失 = $20 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot r / \lambda)$
 ※ λ = 波長(m), r = 距離(m)

反射板利得 = $10 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot Ae / \lambda^2)$
 ※ λ = 波長(m), Ae = 距離(m²)

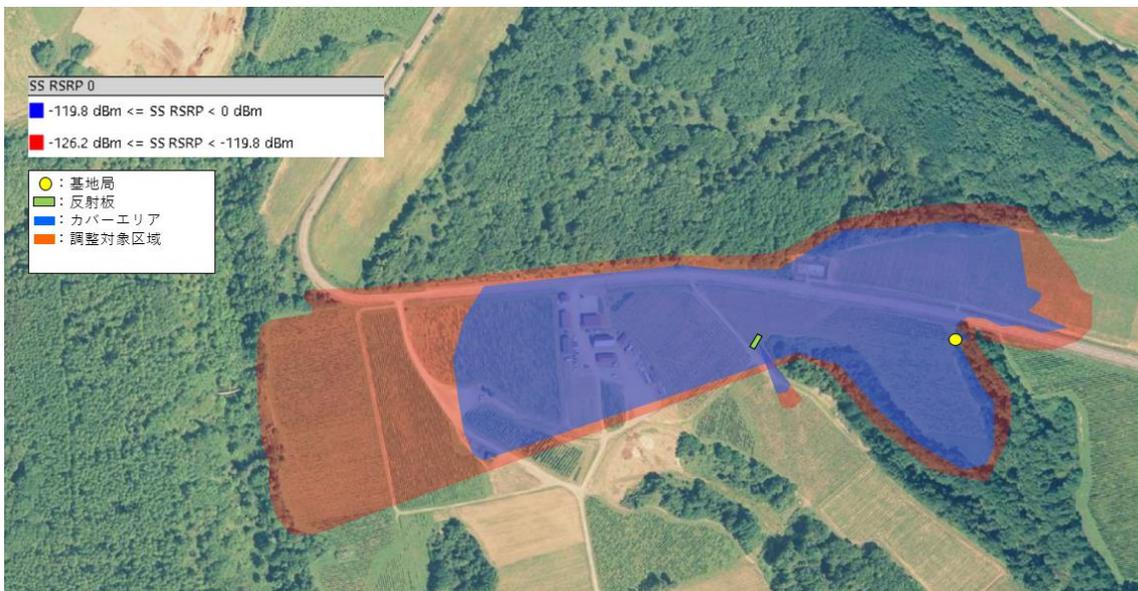
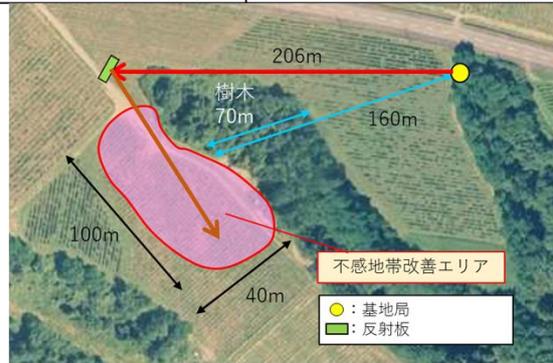


図 3.3.525 反射板設置後の想定カバーエリア及び調整対象区域
 (国土地理院(電子国土Web)(URL: <https://maps.gsi.go.jp/>)のデータを使用して作成)

3.3.3.3 評価・検証項目

本実証においてはシミュレーション等により、電波反射板設置前後のカバーエリアおよび調整対象区域を作図し、28 の地点において、反射板設置有り/無し状態で受信電力 (RSRP)、通信品質 (SIR または SINR)、及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延) を測定しました。

なお、受信電力がエリア設計に用いた算出式のカバーエリア及び調整対象区域の閾値と異なっている場合は、それぞれの閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離の確認を行いました。

3.3.3.4 評価・検証方法

本実証では Sub6 対応反射板を以下の図の仕様で設置して利用しました。

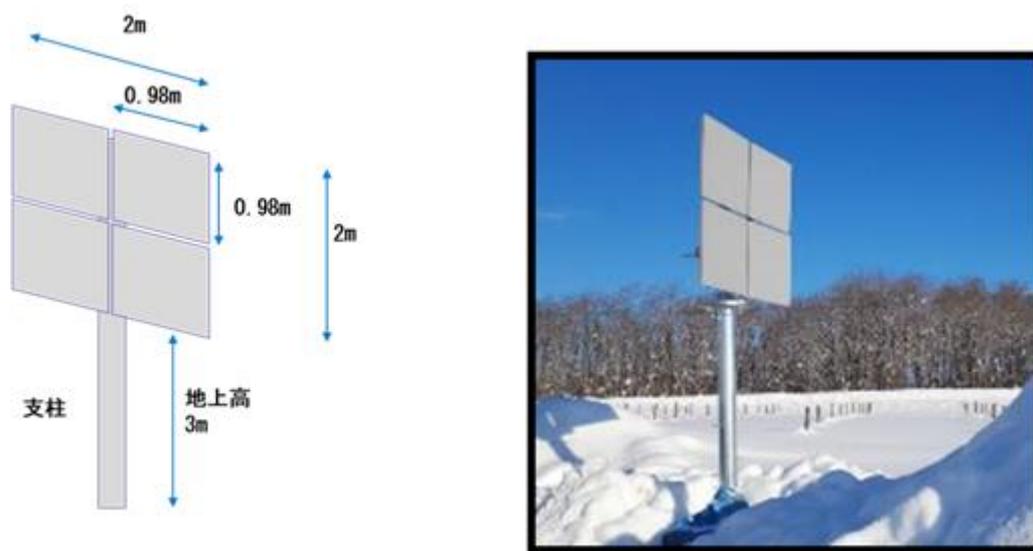


図 3.3.536 反射板イメージ (左) と実際に設置した反射板 (右)

表 3.3.27 反射板仕様

項目	仕様
種別	金属板
大きさ	全体 2m × 2m (0.98m × 0.98m のサブ反射板の 4 枚構成)
重量	総重量 425kg (反射板 : 64kg, 支柱 361kg)
利得	サブ反射板あたり 69dBi 全体反射板も 69dBi
ビーム幅	サブ反射板あたり, 水平面ビーム幅 3.7°, 垂直面ビーム幅 3.2° 全体反射板において, 水平面ビーム幅約 13°, 垂直面ビーム幅 3.2°
反射板設置自由度	各サブ反射板の調整角度 : 水平 ±10°, 垂直 ±10° 全体での調整角度 : 水平 ±5°, 垂直 ±5°
リンクバジェット	-70.4dBm
入反射角	鏡面反射
平面度	λ/16 以下 (Sub6 では 3.9mm 以下)

ただし、リベットを除く

利得についてはサブ反射板毎にビーム方向をずらしているため、サブ反射板当たりも全体反射板の値も同様の値になります。

ビーム幅については、以下の2つの式から算出します。

① カバーエリアを元に反射板の大きさを算出します。

(算出式)

$$\begin{aligned} \text{反射板利得 } b &= 10 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot A_e / \lambda^2) \times 2 \\ &= 20 \cdot \log(4 \cdot \pi \cdot A_e / \lambda^2) \end{aligned}$$

ここで、 $A_e(\text{m}^2)$ は実行面積を表します。

本実証で求められる範囲をカバーエリアとするためには、反射板利得を 69dBi にする必要があるため、反射板利得を 69、また $\lambda=0.062\text{m}$ のため、 $A_e=1 \text{ m}^2$ となります。

② 反射板の大きさからビーム幅を求めます。

(算出式)

$$\text{ビーム幅 } (^{\circ}) = 0.886 \times \lambda / D \times (180 / \pi)$$

ここで、 λ (m)は波長、 D (m)は反射板の実効長を表します。

今回は $\lambda=0.062\text{m}$ 、 $D=0.85\text{m}$ のため、各反射板のビーム幅は 3.7° になります。

また、4枚合計のビーム幅は各反射板を 3° ずつずらすため、以下図の通り約 13° となります。

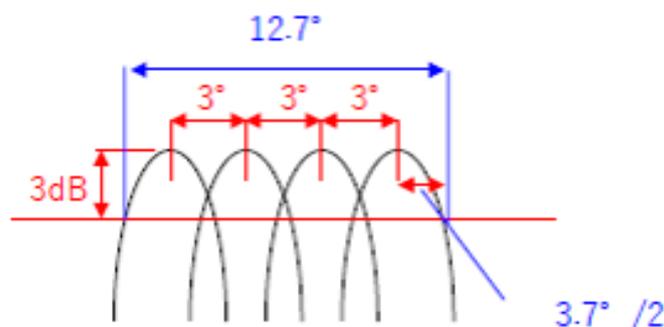


図 3.3.547 反射板 4 枚合計でのビーム幅

4枚の各サブ反射板の設置角度について、下図に示します。

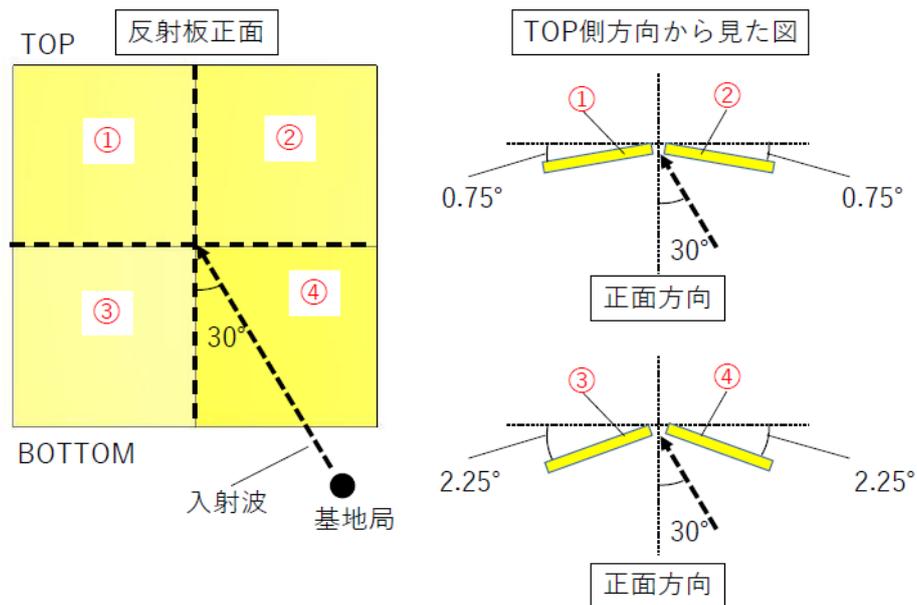


図 3.3.55 各サブ反射板の水平面設置角度

水平面の設定角度は、設計上は上側①②のサブ反射板が 0.75° 、下側③④のサブ反射板が 2.25° となっており、垂直面の設定角度は、サブ反射板①~④すべてにおいて 3° 下向きとなっています。

なお、実際の設置角度については反射板の目盛盤の精度上の関係で、設定角度を丸めて、上側①②のサブ反射板が 1° 、下側のサブ反射板③④が 3° となっています。

反射波の角度は、入射波の角度±サブ反射板の設置角度×2 となるため、各サブ反射板の反射波角度は以下となります。

- ・ 上側①のサブ反射板
 $\text{入射波角度 } 30^\circ - \text{設置角度 } 0.75^\circ \times 2$
 $= \text{反射波角度 } 28.5^\circ$
- ・ 上側②のサブ反射板
 $\text{入射波角度 } 30^\circ + \text{設置角度 } 0.75^\circ \times 2$
 $= \text{反射波角度 } 31.5^\circ$
- ・ 下側③のサブ反射板
 $\text{入射波角度 } 30^\circ - \text{設置角度 } 2.25^\circ \times 2$
 $= \text{反射波角度 } 25.5^\circ$
- ・ 下側④のサブ反射板
 $\text{入射波角度 } 30^\circ + \text{設置角度 } 2.25^\circ \times 2$
 $= \text{反射波角度 } 34.5^\circ$

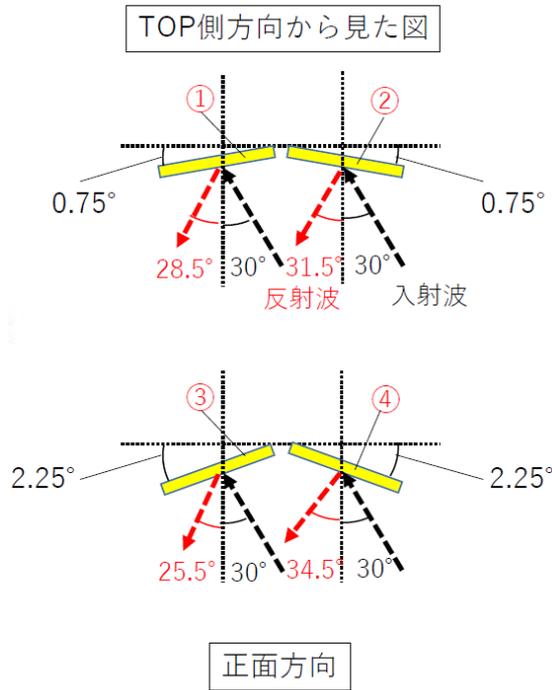


図 3.3.56 各サブ反射板の反射波角度

本反射板のビーム幅については、前述しているように4枚のサブ反射板を 3° ずつずらし約 13° に広げています。図 3.3.58 のビーム幅の図と各サブ反射板の設置角度の関係を下図に示します。

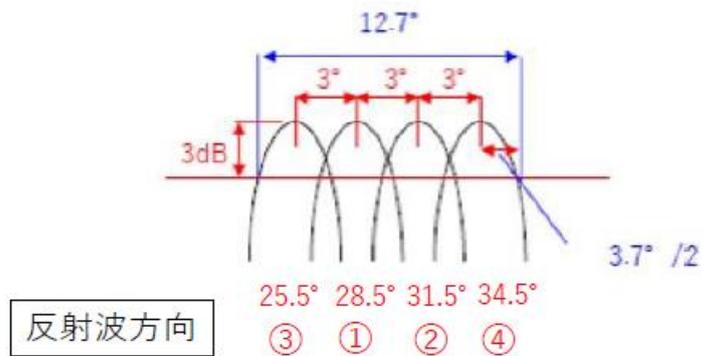


図 3.3.57 各サブ反射板の反射角度を反映させた4枚合計のビーム幅

反射板の数を増やす場合、配列する方向（垂直・水平）はあまり関係ありません。下記に反射板の数とビーム幅の関係についての図を示します。

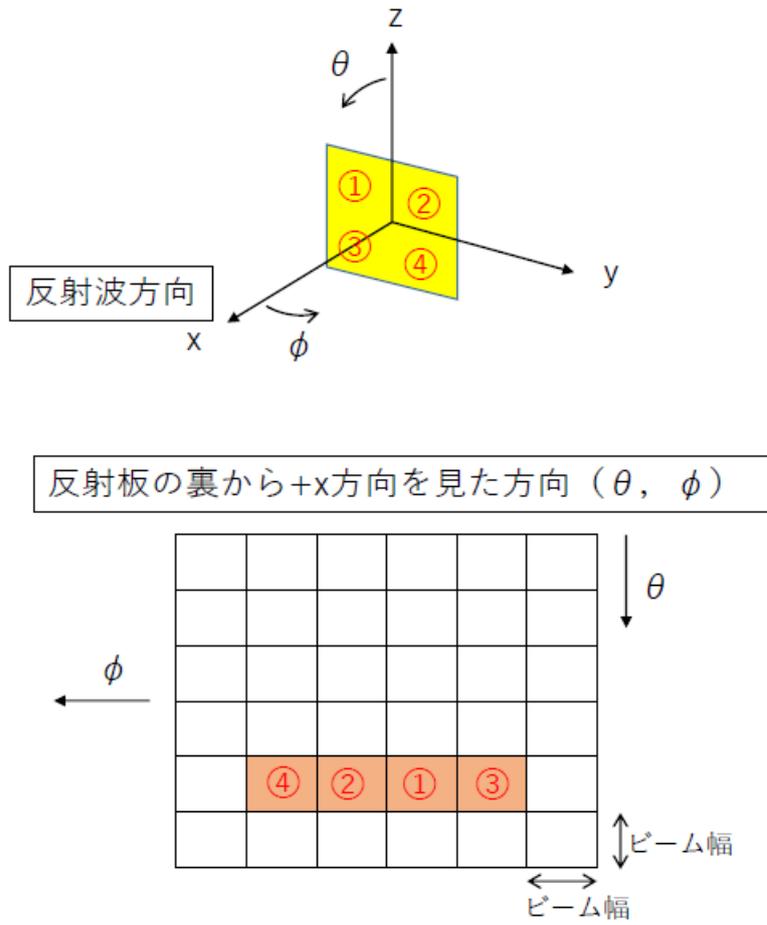


図 3.3.58 ビーム幅拡張のイメージ

ビーム方向 (θ , ϕ) を表す二次元グリッドを考えた場合、1マスがサブ反射板のビーム幅に相当します。反射板の数を増やしていった場合、各サブ反射板を目的の (θ , ϕ) 方向に反射波が向くように設置することで、グリッドのマスを埋めるように反射ビームのビーム幅を広げていくことができます。本実証では上図のように水平面のみビーム幅を広げています。

反射板の設置位置を以下の図に示します。

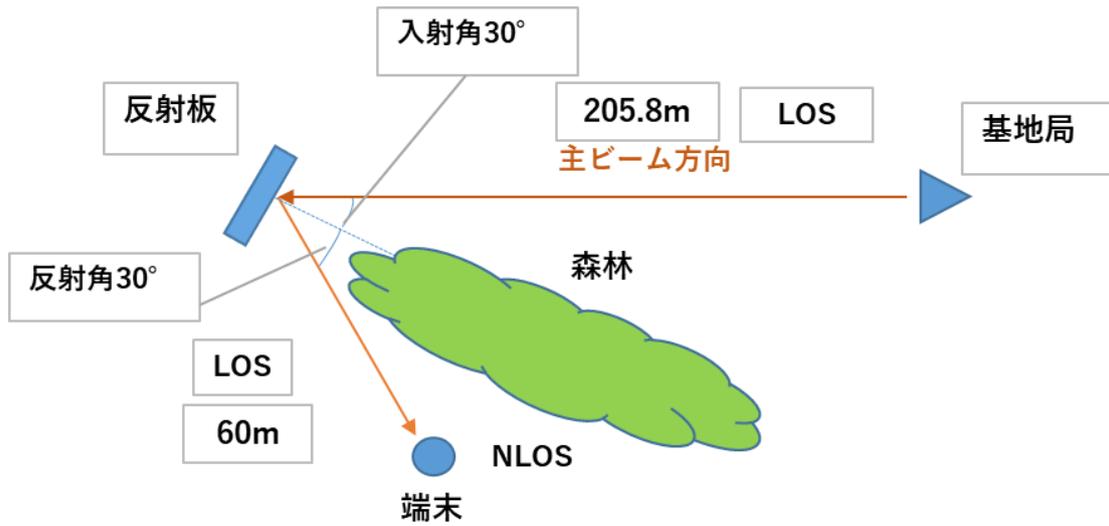


図 3.3.59 反射板設置位置水平図

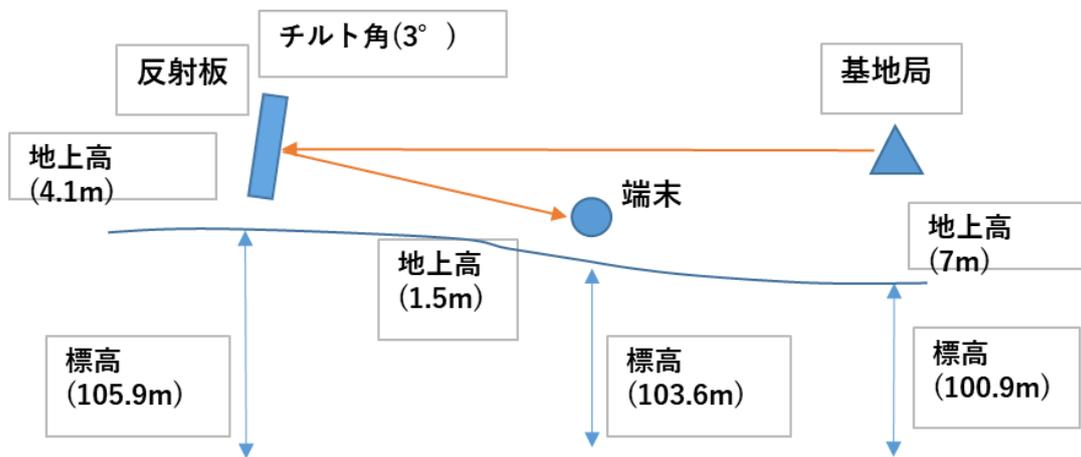


図 3.3.60 反射板設置位置垂直図

実証は以下の方法で行いました。

表 3.3.28 反射板によるエリア構築の柔軟化実証手順

工程	実施内容	対応図表
1	エリア算出法を基にしたエリアシミュレーションにより、反射板設置前後のカバーエリアおよび調整対象区域を算出・図示	図 3.3.54 図 3.3.55
2	20 以上の地点において、電波反射板未設置時及び設置時の受信電力（RSRP 値）、通信品質（SIR または SINR）を 2.2 項に記載のエリアテスターにて測定、及び伝送性能（UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延 等）を測定 なお、通信品質については、今回の機器で利用できる最大リソースブロックである DL 200RB/UL 260RB を利用 入射角、反射角については、設定された反射板のアジマス方向、エレベーション方向、そして送受信点、反射板の位置や高さ情報から算出	図 3.3.64 図 3.3.65
3	算出したカバーエリア及び調整対象区域の閾値と実測値が異なっている場合、GPS システムを用いて閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離を確認 水平精度誤差：1m 未満 垂直精度誤差：5m 未満 距離測定器はエリアテスターで、測定しました。	
4	電波反射板設置前後での受信電力（RSRP 値）、通信品質（SIR または SINR）、及び伝送性能（UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延 等）を比較し、電波反射板の有効性を評価	

測定器、測定方法は以下の下表の通りです。

表 3.3.29 測定器情報

項目	内容	備考
測定機器	ML8780A+5GNR TDD sub-6GHz 測定ユニット+ソフトウェア：MX878072A	メーカー：Anritsu
測定設定項目	<ul style="list-style-type: none"> ・測定対象：SSS (Secondary Synchronization Signal), DMRS for PBCH (Demodulation Reference Signal) ・Cyclic Prefix：Normal ・測定項目：SS-RSRP, SS-RSRQ, SS-SIR, Transmission Power, RSSI, DMRS-RSRP, DMRS-SIR, フレームタイミング ・測定 PCI 数：最大 40 (PCI: Physical Cell Identifier) ・チャンネル帯域幅：10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 MHz ・サンプリング時間：1 周波数測定 N×SS 周期 	その他の測定：RS 遅延プロファイル
測定方法	対象エリアおよび反射板を利用した際に、各測定ポイントで測定器を用いて測定を行い、PCI 毎に SSS-RSRP、SSS-RSRQ、SSS-SIR、SSS-RSSI を計測する	

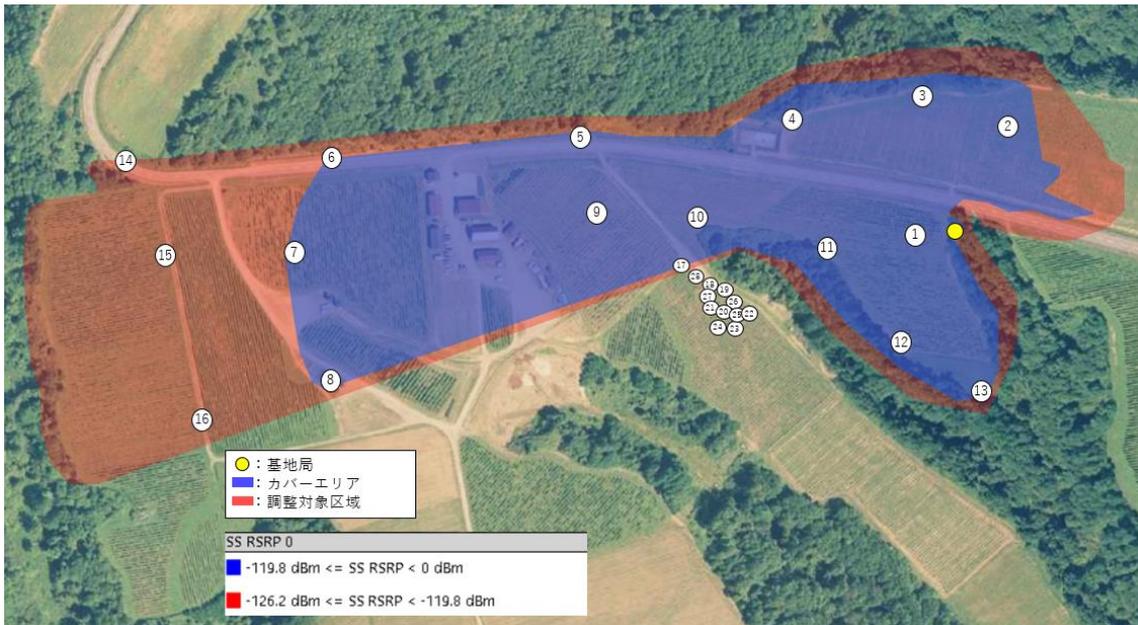


図 3.3.614 反射板設置前のカバーエリア及び調整対象区域内の測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

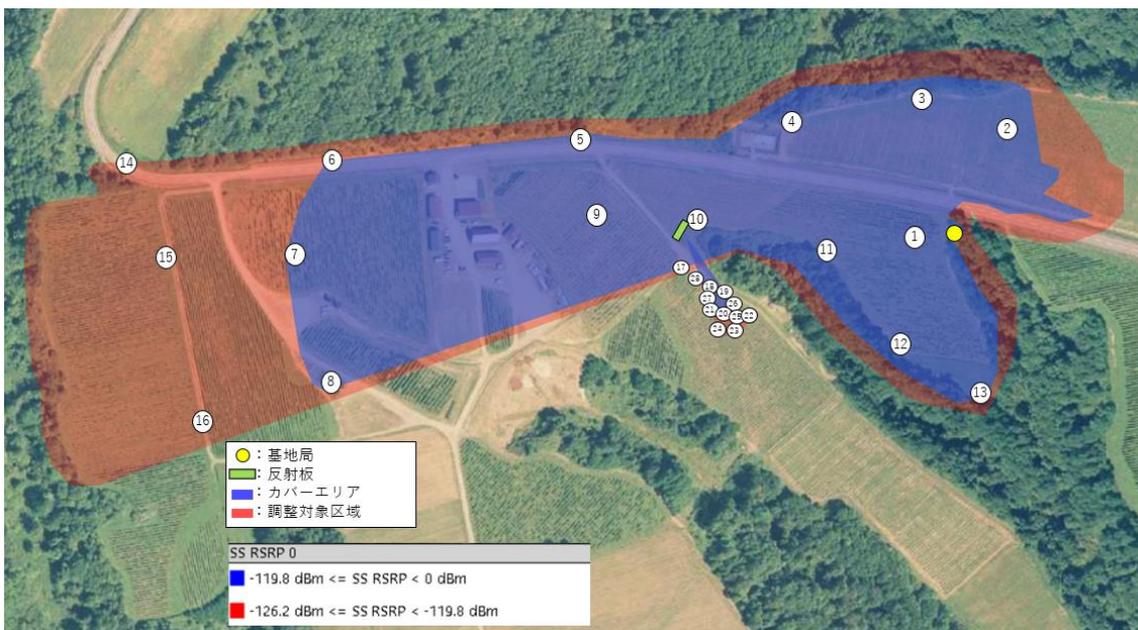


図 3.3.625 反射板設置後のカバーエリア及び調整対象区域内の測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

3.3.3.5 実証結果及び考察

エリア算出式で作成したカバーエリアと調整対象区域と実測データを下図のとおり比較しました。また、閾値と異なっている場合については、それぞれの閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離の確認を行いました。なお、反射板設置前の想定カバーエリアと閾値の実測ポイントの差分については「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」にて取得したデータ及び作図を利用しました。

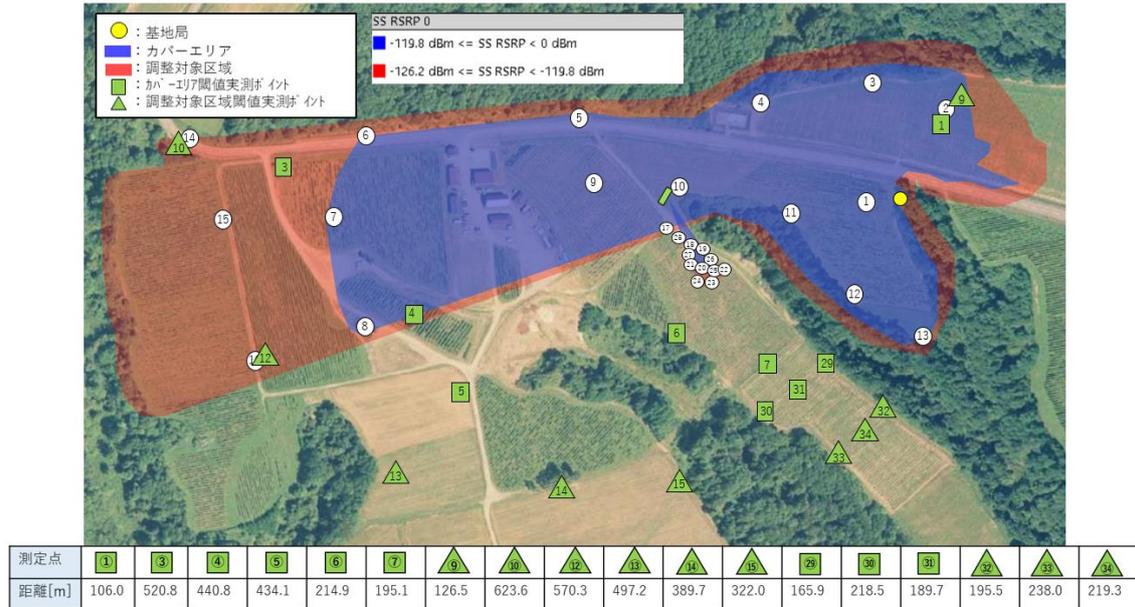


図 3.3.636 実測データ比較

(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

図 3.3.61 で示している実測ポイント 29~33 により、反射板設置後におけるカバーエリア、調整対象区域の閾値が実測されるポイントを確認しました。

エリア算出式で作成した調整対象区域付近より、反射板から遠ざかるように歩行し閾値ができる位置を探す方法で確認を行いました。この閾値が実測されたポイントについて、反射板設置前でも不感地帯想定エリア付近は基地局からの直接波が届いておりました。反射板設置前の「3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化」にて測定した同様のポイントの測定結果を見てもカバーエリア、調整対象区域内となっていることが確認できます。

次に、エリア設計によるカバーエリア、調整対象区域よりも実測が広い場合のエリア構築の方策について以下記載します。

1. 反射板の設置角度の調整

- エリアが縦方向に広がっている場合は反射板の垂直角度を深くすることでエリアの広がりを抑えます。
- エリアが横方向に広がっている場合、本実証で使用したマルチシート型反射板であれば各サブ反射板に方向調整を行うことによりビーム幅 (エリア幅) を狭くすることで広がりを抑えます。
- マルチシート型反射板での設置角度の調整方法としては、電波レベルを測定しながら、サブ反射板 1 枚毎に角度調整を行い希望するエリアとなっているか確認す

ることが重要です。

2.反射板のサイズ縮小

- 反射板の利得の値が下がることによりエリアの広がりを抑えることができますが、不感エリアへの必要な電波強度が確保されるように反射板サイズの検討を行う必要があります。
- 反射板の仕様変更に伴い、再製作が必要となる場合はコスト増・スケジュール遅延等が懸念されます。

3.基地局の送信出力の低下

- 基地局の送信出力を下げることにより、反射板でカバーするエリア以外の本来のエリアも変わるため、本来のエリアも含めた再設計が必要となります。

4.基地局アンテナ角度・方向の調整

- 基地局アンテナが指向性アンテナの場合は、基地局アンテナのチルト角、方向を調整し反射板方向への入射電力を下げることによりエリアの広がりを抑えます。
- 本来のエリアが変更されるため、本来のエリアも含めた再設計が必要となります。

以上の4項目のうち、優先順位としては、1、2の順序でエリア構築を再度行い、それでも不十分な場合は3、4の順序で行うことが望ましいと考えました。

次に、電波反射板を設置する際のエリア設計手法（シミュレーション条件やパラメーター等の選び方等）のモデル化について以下記載します。

1) エリア設計の条件

- 「基地局から反射板まで」及び「反射板から反射板でカバーするエリアまで」は完全な見通しがある状態を条件とします。フレネル半径内に障害物がないものとします。
- マルチパスは考慮しません。反射板においては基地局からの直接波が支配的とし、反射板でカバーするエリアにおいては反射板からの反射波が支配的とし、

2) エリア設計モデルの概要

- 「基地局から反射板まで」及び「反射板から反射板でカバーするエリアまで」の2区間に分けて設計します。
- 区間内での伝搬損失は自由空間伝搬損失によって算出します。
- 「基地局から反射板まで」の区間では反射板を受信アンテナとして扱い、反射板に到達する電力を受信電力として算出します。
- 「反射板から反射板でカバーするエリアまで」の区間は反射板を送信アンテナとして扱います。反射板に到達する電力を送信電力として、反射板でカバーするエリアにおける受信電力を算出します。

3) エリア設計モデルに用いるパラメーター

エリア設計モデルに用いるパラメーターを次表に示します。

表 3.3.30 エリア設計モデルに用いるパラメーター

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

4) エリア設計モデルの算出例

本実証における実環境へエリア設計モデルを適用します。以下、測定ポイント⑱について検証します。

まず「基地局から反射板まで」の区間における反射板に到達する電力を算出します。

反射板に到達する電力は電波法関係審査基準の回線設計において受信電力として扱い、次の式から算出します。

$$P_{r1} = P_t + G_t - L_D - L_f - L_1 + \frac{G_R}{2} - L_R$$

ここで P_{r1} は反射板に到達する電力[dBm]、 P_t は送信電力[dBm]、 G_t は送信アンテナ利得[dBi]、 L_D は送信指向性にかかる減衰[dB]、 L_f は給電線損失[dB]、 L_1 は「基地局から反射板まで」の区間における空間伝搬損失[dB]、 G_R は反射板の反射利得[dBi]、 L_R は反射効率から生じる損失[dB]を示しています。

本実証において基地局のパラメーターから、 $P_t=23$ [dBm]、 $G_t=17$ [dBi]、 $L_D=6.67$ [dB]、 $L_f=1.07$ [dB]です。 L_1 は完全な見通しがある状態でフレネル半径内に障害物がなく、マルチパスは考慮しないという算出条件より、次の自由空間伝搬損失式から算出します。

$$L_1 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_1}{\lambda} \right)$$

ここで d_1 は基地局から反射板までの距離[m]で本実証では 205.8[m]です。 λ は使用する電波の波長で本実証では 0.062[m]です。よって $L_1=92.43$ [dB]となります。

$G_R/2$ は反射板を受信アンテナとして扱ったときの受信利得です。反射利得 G_R は次の式から算出します。

$$G_R = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi A}{\lambda^2} \right)$$

ここで A は反射板の実効面積です。反射板の寸法、Azimuth 角度及び Elevation 角度から次式で算出します。

$$A = \text{横の寸法} \cos(\text{設置 Azimuth 角}) \times \text{縦の寸法} \cos(\text{設置 Elevation 角})$$

本実証では反射板の横の寸法=縦の寸法=0.98[m]、設置 Azimuth 角=30 度、設置 Elevation 角=3 度であり、 $A=0.8306[m^2]$ となります。よって、 $G_R=68.68[dB]$ となります。

L_R は反射板の反射効率によって生じる減衰で、次式から算出します。

$$L_R = 20 \log_{10}(\text{反射効率})$$

本実証では反射効率=0.85 であり、 $L_R=1.41$ です。

したがって、「基地局から反射板まで」の区間における反射板に到達する電力 P_{r1} は-27.24[dBm](SS-RSRP 換算：-62.39[dBm])となります。

次に、「反射板から反射板でカバーするエリアまで」の区間は反射板でカバーするエリアにおける受信電力を算出します。

反射板でカバーするエリアにおける受信電力は次の式から算出します。

$$P_{r2} = P_{r1} + \frac{G_R}{2} - L_2 + G_r$$

ここで P_{r2} は反射板でカバーするエリアにおける受信電力[dBm]、 P_{r1} は「基地局から反射板まで」の区間における反射板に到達する電力であり、これを送信電力[dBm]として扱います。 G_R は反射板の反射利得[dBi]、 L_2 は「反射板から反射板でカバーするエリアまで」の区間における空間伝搬損失[dB]、 G_r は受信アンテナ利得[dBi]を示しています。よって、 $P_{r1}=-27.24[dBm]$ 、 $G_R=68.68[dB]$ です。

なお、反射指向性は反射板実効面積で一様の開口分布のものとし、また UE のパラメータにより $G_r=-0.4[dBi]$ です。

L_2 は完全な見通しがある状態でフレネル半径内に障害物がなく、マルチパスは考慮しないという算出条件より、次の自由空間伝搬損失式から算出します。

$$L_2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_2}{\lambda} \right)$$

ここで d_2 は反射板から反射板でカバーするエリアまでの距離[m]で本実証では 58.6[m]です。 λ は使用する電波の波長で本実証では 0.062[m]です。よって $L_2=81.51[dB]$ となります。

したがって、「基地局から反射板まで」の区間における反射板に到達する電力

P_{r2} は-74.81[dBm] (SS-RSRP 換算：-109.96[dBm])となります。測定ポイント⑱の SS-RSRP 実測値 (平均) は-109.91[dBm]であり、算出式に非常に近い値となっています。

5) エリア設計モデルによって算出した値と実測値の比較

測定ポイント⑱～㉔について、算出値及び実測値の比較を次の表に示します。

表 3.3.31 測定ポイント⑱～㉔における算出値及び実測値

測定ポイント	RSRP算出値 [dBm]	SS-RSRP算出値 [dBm]	SS-RSRP実測値 (平均値) [dBm]	差分
18	-73.59	-108.74	-105.73	3.01
19	-74.81	-109.96	-109.91	0.05
20	-76.15	-111.3	-103.04	8.26
21	-74.45	-109.6	-111.89	-2.29
22	-77.42	-112.57	-100.20	12.37
23	-77.58	-112.73	-104.65	8.08
24	-76.54	-111.69	-108.84	2.85
25	-76.98	-112.13	-103.84	8.29
26	-75.53	-110.68	-108.51	2.17
27	-73.38	-108.53	-107.44	1.09
28	-70.91	-106.06	-110.84	-4.78

上表は算出値と実測値の差分に応じて次のように色分けしました。

無色で示した測定ポイントは反射板からの距離が 49.7[m]～63.6[m]の範囲内に位置しています。このポイントでは差分が概ね±3dB 程度であり、エリア設計モデルとの親和性が高いと推測されます。

黄色で示した測定ポイントは反射板からの距離が 68.3[m]を超える範囲内に位置しています。このポイントでの差分を見ると多くの場合受信電力の実測値がエリア設計モデルより+3dB 以上高いです。これは基地局からの直接波の到来、反射板からの大地反射波のマルチパス等の影響が考えられます。マルチパスの影響を考慮するには、本実証とは別に反射板の Elevation 角度、反射板からの距離及び大地面の状態(雪など)を考慮したさらなるサンプルの収集が必要と考えられます。

紫色で示した測定ポイント㉔は反射板からの距離が 37.4[m]と最も近い位置にあります。受信電力の実測値がエリア設計モデルより実測値の方が-4.78dB 低くなることから、伝送路上に障害物が存在する等の原因が考えられます。本実証の環境から積雪等による影響が推測されます。

電波反射板未設置時の各測定ポイントで電波性能を測定した結果をまとめたもの及び電波反射板設置時の各測定ポイントで電波性能を測定した結果をまとめたものを以下に記します。なお、各測定点の詳細（位置情報：距離・高低差の情報）については、「別紙_3.3.3.1 各測定点の詳細.xlsx」にて記載しております。

表 3.3.32 反射板設置前の電波性能測定結果

測定ポイント	受信電力 (dBm)	UL スループット (Mbps)	UL スループット (Mbps) [所要性能との差分]	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms) [所要性能との差分]
1	-83.67	18.63	-44.87	30.75	40.37	-359.63
2	-118.13	18.44	-45.06	26.12	40.83	-359.17
3	-108.13	18.40	-45.10	26.13	40.97	-359.03
4	-101.55	18.41	-45.09	26.12	41.93	-358.07
5	-94.85	12.28	-51.22	31.02	40.80	-359.20
6	-120.01	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
7	-124.83	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
8	-125.04	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
9	-95.99	12.67	-50.83	31.07	41.47	-358.53
10	-93.16	18.60	-44.90	31.03	41.90	-358.10
11	-81.10	18.64	-44.86	29.26	41.23	-358.77
12	-102.72	18.62	-44.88	26.08	40.90	-359.10
13	-109.74	18.60	-44.90	26.08	41.48	-358.52
14	-125.44	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
15	-127.97	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
16	-129.71	測定不能	-	測定不能	測定不能	-

17	-110.35	18.65	-44.85	31.07	42.13	-357.87
18	-114.95	16.75	-46.75	31.07	39.43	-360.57
19	-116.83	18.68	-44.82	31.07	38.03	-361.97
20	-107.07	18.67	-44.83	31.08	39.47	-360.53
21	-120.36	18.69	-44.81	31.07	41.87	-358.13
22	-111.83	18.65	-44.85	31.07	40.07	-359.93
23	-115.42	17.43	-46.07	31.07	41.27	-358.73
24	-113.53	18.69	-44.81	31.07	42.90	-357.10
25	-110.35	18.64	-44.86	26.09	42.90	-357.10
26	-112.89	18.50	-45.00	31.01	41.07	-358.93
27	-111.96	16.94	-46.56	31.01	50.24	-349.76
28	-112.59	16.72	-46.78	31.04	41.23	-358.77

表 3.3.33 反射板設置後の電波性能測定結果

測定ポイント	受信電力 (dBm)	UL スループット (Mbps)	UL スループット (Mbps) [所要性能との差分]	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms) [所要性能との差分]
1	-71.72	18.67	-44.83	31.06	43.20	-356.80
2	-121.41	15.97	-47.53	30.83	47.04	-352.96
3	-106.17	18.66	-44.84	31.07	40.97	-359.03
4	-102.19	18.60	-44.90	31.08	40.50	-359.50
5	-98.23	18.63	-44.87	31.07	40.93	-359.07
6	-123.54	測定不能	-	測定不能	測定不能	-

7	-118.17	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
8	-117.42	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
9	-102.75	18.68	-44.82	31.07	41.17	-358.83
10	-96.69	18.64	-44.86	31.07	41.77	-358.23
11	-72.69	18.66	-44.84	31.07	41.87	-358.13
12	-104.63	18.67	-44.83	31.08	42.30	-357.70
13	-115.34	18.49	-45.01	31.08	43.27	-356.73
14	-124.30	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
15	-132.75	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
16	-131.50	測定不能	-	測定不能	測定不能	-
17	-105.49	18.68	-44.82	31.06	42.77	-357.23
18	-105.73	18.60	-44.90	31.07	41.67	-358.33
19	-109.91	18.67	-44.83	31.07	41.97	-358.03
20	-103.04	18.62	-44.88	26.06	41.67	-358.33
21	-111.89	18.60	-44.90	26.09	40.87	-359.13
22	-100.20	18.69	-44.81	31.04	41.60	-358.40
23	-104.65	18.64	-44.86	26.09	42.77	-357.23
24	-108.84	18.48	-45.02	26.08	41.97	-358.03
25	-103.84	18.61	-44.89	30.93	42.10	-357.90
26	-108.51	18.61	-44.89	26.11	40.50	-359.50
27	-107.44	18.56	-44.94	26.08	37.67	-362.33
28	-110.84	18.58	-44.92	26.09	40.07	-359.93

まずは上記表より、受信電力の変化について確認します。想定した不感エリアは測定ポイントの18～28が該当します。測定ポイント18～28の反射板設置前後の受信電力差分を以下表に示します。

表 3.3.34 測定ポイント18～28の反射板設置前後の受信電力差分

測定点ID	受信電力(dBm)		
	反射板なし	反射板あり	差分
18	-114.95	-105.73	9.23
19	-116.83	-109.91	6.92
20	-107.07	-103.04	4.04
21	-120.36	-111.89	8.47
22	-111.83	-100.20	11.63
23	-115.42	-104.65	10.77
24	-113.53	-108.84	4.69
25	-110.35	-103.84	6.51
26	-112.89	-108.51	4.38
27	-111.96	-107.44	4.51
28	-112.59	-110.84	1.76

受信電力は全ての測定ポイントで改善しており、測定ポイント28はあまり変化がないですが、その他のポイントでは約4dB～12dBの範囲で高くなっていることが確認できます。各測定ポイントの反射板設置後の受信電力をみると、測定ポイント18、20、22、23、25は-105dBm以上になっているのに対し、その他のポイントは-105dBmより低い値となっている。この差異について考察します。

不感エリアでの測定ポイントの位置関係については下図のとおりです。



図 3.3.647 不感エリアでの測定ポイント詳細
(国土地理院(電子国土 Web)(URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作

成)

ここで、反射板による反射波のビーム幅を測定した際の受信電力のヒートマップを下記に示します。ビーム幅は、反射板からの距離 40m、60m、80m の 3 地点でホーンアンテナを反射板方向に向け横切るように歩行しながら受信電力を測定することで求めました。

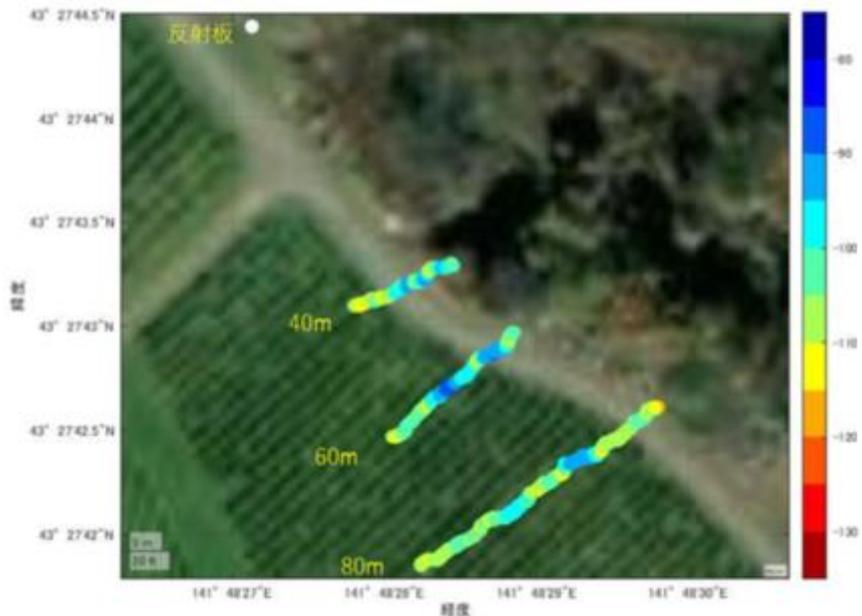


図 3.3.658 反射板ビーム幅測定データ (ヒートマップ)
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

ここで、机上計算の反射波ビーム幅を下図に示します。図の通り、ビーム幅の中で 2 つのピークが表れ、このピーク値から 3dB 減衰したポイント間をビーム幅としました。

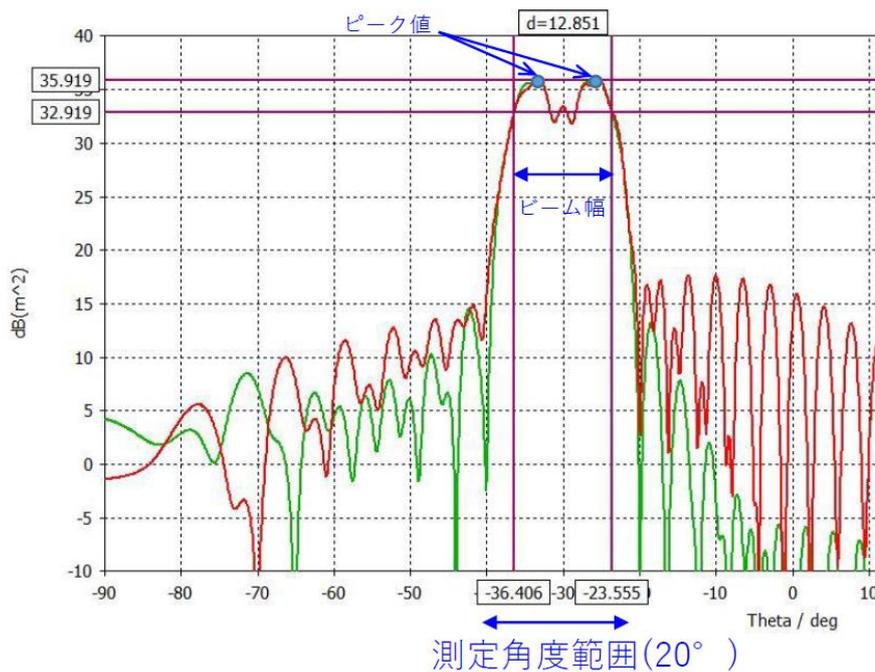


図 3.3.669 反射板ビーム計算値

上図の机上検討と同様に、ピーク値から 3dB 減衰したポイントをビーム幅の端とし、推定される実測のビーム幅を下図に示します。

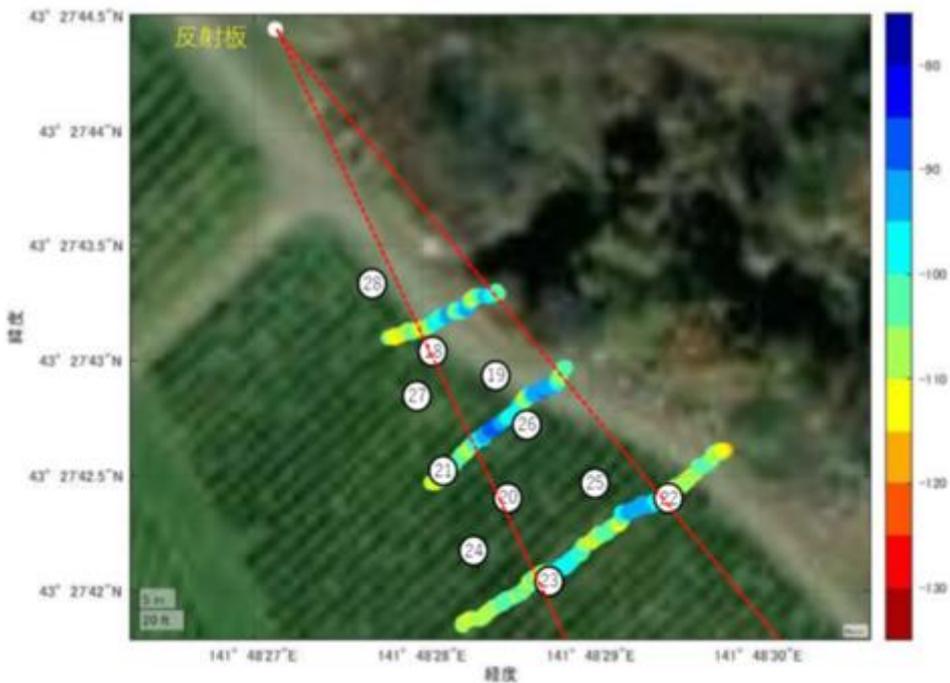


図 3.3.67 反射波と測定ポイントの位置関係 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>)) のデータを使用して作成)

上図から、実測のビーム幅は 12.1° でした。また、上図の通り、測定ポイント 21、24、27、28 は反射波の方向より左側に位置しています。反射板設置後の受信電力をみても測定ポイント 21、24、27、28 は -107dBm より低い値となっており一致するため、反射波の影響

が大きくないポイントと考えられます。また、同様に受信電力が-107dBm より低い値となっている測定ポイント 19、26 においては、反射波ビームの2つのピーク間の受信電力が下がる部分に位置しているのではないかと推測します。

次に通信品質、伝送性能（スループット、遅延）の変化について確認します。比較にあたっては、測定ポイントで反射波の影響度合いが異なることが分かったため、反射波の影響が大きいポイント（測定ポイント 22）と影響が小さいポイント（測定ポイント 24）で行うこととしました。

下表で、「SIR/SINR」、「DL スループット」、「UL スループット」、「伝送遅延」の反射板設置前後の差分を示します。

表 3.3.35 反射板設置前後の伝送性能差分

測定点ID	SIR (dB)			ULスループット [Mbps]		
	反射板なし	反射板あり	差分	反射板なし	反射板あり	差分
18	8.65	15.88	7.22	16.75	18.60	1.85
19	6.51	12.85	6.35	18.68	18.67	-0.01
20	15.04	17.54	2.50	18.67	18.62	-0.06
21	3.50	11.08	7.58	18.69	18.60	-0.09
22	10.87	18.92	8.05	18.65	18.69	0.04
23	8.15	16.48	8.33	17.43	18.64	1.21
24	9.73	13.30	3.57	18.69	18.48	-0.21
25	12.57	16.81	4.23	18.64	18.61	-0.03
26	10.68	14.12	3.44	18.50	18.61	0.11
27	11.27	14.88	3.61	16.94	18.56	1.62
28	10.90	12.20	1.30	16.72	18.58	1.86

測定点ID	DL伝送スループット 実測値 [Mbps]			伝送遅延[ms]		
	反射板なし	反射板あり	差分	反射板なし	反射板あり	差分
18	31.07	31.07	0.00	39.43	41.67	-2.23
19	31.07	31.07	-0.01	38.03	41.97	-3.93
20	31.08	26.06	-5.01	39.47	41.67	-2.20
21	31.07	26.09	-4.98	41.87	40.87	1.00
22	31.07	31.04	-0.03	40.07	41.60	-1.53
23	31.07	26.09	-4.99	41.27	42.77	-1.50
24	31.07	26.08	-4.99	42.90	41.97	0.93
25	26.09	30.93	4.84	42.90	42.10	0.80
26	31.01	26.11	-4.90	41.07	40.50	0.57
27	31.01	26.08	-4.93	50.24	37.67	12.57
28	31.04	26.09	-4.95	41.23	40.07	1.17

測定ポイント 22 においては、SIR/SINR は 8.05dB 高くなっており電波状況も良くなっています。「DL スループット」、「UL スループット」、「伝送遅延」は、多少の増減はあるものの、大きくは変わっていません。測定ポイント 24 においては、SIR/SINR は 3.57dB 高くなっており良くなっても測定ポイント 22 ほどではありません。「UL スループット」、「伝送遅延」は多少の増減があるものの、大きくは変わっておらず、「DL スループット」については 5Mbps 程度低下しています。

以上のことより、反射板により受信電力、SIR/SINR の値が向上した点から、不感地帯の改善手段として一定程度の効果が得られたと考えることができます。ただし、DL スループットが低下した点については、干渉波（直接波、大地面（雪）からの反射波）によるマルチ

パスなどの影響も考慮したさらなる要因分析が必要と考えます。

本実証では樹木による遮蔽影響が想定より小さく反射板による改善エリアに基地局からの電波が到来しており不感地帯とはなっていない状況でした。これは表 3.3.32 に記載のとおり、反射板設置前から不感地帯と想定したエリアにおいて、DL スループットが 26Mbps～31Mbps を実測されたことで示されています。そのため、反射板設置によって元々直接波が到来する測定点に到達する電波伝搬路が増えたマルチパス状態が発生する可能性が予想されます。表 3.3.31 にて SS-RSRP についてエリア設計モデルによって算出した値と実測値の比較をしていますが、該当の測定点の大半にて実測値の方が高い結果です。エリア設計モデルでは自由空間伝搬損失のみ考慮しており、それより高い実測値は反射板からの到来とは別に電波が到来している可能性を示唆していると考えられます。この可能性から、DL スループットが低下した要因について「直接波、大地面（雪）からの反射によるマルチパスなどの影響も考慮したさらなる要因分析が必要と考えます。」と記載しました。ただし、DL スループットが 26Mbps～31Mbps の範囲で変動することについては、反射板設置とは無関係と思われる測定ポイント 3 などでも発生しています。以上の状況から、本考察においては反射板設置前後の DL スループットの変動が単純に反射板設置に起因するものとは言い難いものと考え、考えられる要因として「直接波、大地面（雪）からの反射によるマルチパスなどの影響」を示唆するにとどめています。なお、実証システムにおいて D/U(DU 比)がスループットにどの程度影響するかについては、DL スループットを RSRP や SIR 等と比較した場合に本実証の結果の中ではその相関性は薄く、評価できません。

今回のような干渉の影響がみられる場合においては、基地局の送信電力を下げる、基地局のアンテナ方向（水平、垂直方向）を調整する、干渉波を遮断することにより、性能向上が見込まれます。また、本実証エリアのような自然環境により電波環境へ影響がある場合は、季節等で状況が変化することも考慮し検討する必要があると考えます。

設置の容易性やコストを、電波反射板を使用しない解決方法を以下表にて比較し、電波反射板が有効となる条件や使い方を記します。

表 3.3.36 設置の容易性比較

評価項目	電波反射板 (材質：金属板)	簡易基地局 (RU)	中継器 (リピータ)	アンテナ張出 (アンテナのみを張り出して、装置は地上の収容函等に設置する構成を想定)
設置位置 (アクセス容易、面積)	アクセス容易性：容易 面積：数 m×数 m の空きスペースが必要。 電源、伝送路は不要	アクセス容易性：やや困難。高所の場合は別途、高所作業車要。 面積：5～10m 四方の空きスペースが必要	アクセス容易性：比較的容易（平地の場合）。高所の場合は別途、高所作業車要 面積：数 m×数 m の空きスペース	アクセス容易性：比較的容易（平地の場合）。高所の場合は別途、高所作業車要 面積：数 m×数 m の空きスペースが必要

			が必要	
電源の必要性	不要	必要 (AC 電源)	必要 (AC 電源)	不要
伝送路の必要性	不要：自由空間	必要 光、電気の伝送路	必要 電気、同軸の伝送路	必要 同軸の伝送路
施工の容易性	難易度低～中 基礎工事が必要。 反射板サイズにより変動。	難易度高	難易度中	難易度中
導入リードタイム 設計～製作まで	3～4 ヶ月程度	5～6 ヶ月程度	3～4 ヶ月程度	4～5 ヶ月程度
移設の容易性	困難 電源、伝送路の移設はないが、基礎工事が発生	困難 電源、伝送路含み移設が必要	困難 電源、伝送路含み移設が必要	比較的困難 同軸ケーブルの移設が必要
総合評価	◎	△	○	△
電波反射板が有効となる条件や使い方	<p>反射板設置位置近辺に電源設備が無く、CDU、5GC サーバなどのセンター設備を設置できない環境であること。</p> <p>指向性アンテナを使用できる環境であること。</p> <p>電波反射板を設置する場所が強電界の電波が届く位置であること。</p> <p>カバーする不感地帯が比較的狭い範囲であること。</p> <p>不感地帯周辺で電波の到来を希望しないエリア（不要エリア）がある場合。</p> <p>既存の基地局及び不感地帯から見通しのある場所にスペースがあること。</p>			

表 3.3.37 設置のコスト比較

評価項目	電波反射板 (材質：金属板)	簡易基地局 (RU)	中継器 (リピータ)	アンテナ張出 (アンテナのみを張り出して、装置は地上の収容函等に設置する構成を想定)
設備費用	50 万～数百万程度	数百万～1 千万程度	100 万～数百万程度	100 万～数百万程度
設備施工費用	10 万～200 万程度	100 万～500 万程度	数十万～100 万程度	数十万～100 万程度

付帯設備費用 ※電源、コンクリート柱等	不要	数十万～100 万程度	数十万～100 万程度	数十万～100 万程度
付帯設備施工費用 ※電源、コンクリート柱等	不要	数百万～500 万程度	数十万～100 万程度	数十万～100 万程度
伝送設備費用 ※光、無線	不要	数十万～100 万程度	10 万～数十万程度	10 万～数十万程度
伝送設備施工費用 ※光、無線	不要	数百万～500 万程度	数十万～100 万程度	数十万～100 万程度
運用・保守費用	50 万～100 万程度 ※反射板が破損、故障想定。反射板サイズにより高所作業車を利用して交換を実施する場合もあり	100 万～数百万程度 ※コン柱上の機器や、伝送路が壊れたり高所作業での場合を想定	数十万～100 万程度 ※設置箇所が高所で、高所作業車を利用して交換を実施する想定	数十万～100 万程度 ※設置箇所が高所で、高所作業車を利用して交換を実施する想定
概算合計金額	100 万～1 千万程度	1 千万～数千万程度 ※5GC、CDU、GPS などの機器は含めず	数百万程度～1 千万程度	数百万程度～1 千万程度
総合評価	◎	△	○	△
電波反射板が有効となる条件や使い方	<p>予算の上限が1千万程度で、新規で基地局開設が困難な場合。 設置環境において伝送路・付帯設備構築の難易度が高く・コストが掛かることが想定される場合。 運用（ランニングコスト）・保守費を抑えたい場合。</p>			

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発

3.3.4.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

本実証では、圃場全体のスマート化を目指し、各種機器からのデータアップロードをローカル 5G 経由で伝送を行うため、上りスロットの多い準同期パターンを必要とします。令和 2 年度の実証では制度化済準同期パターンの「準同期 TDD1」で実証し、確かに同期パターンよりも上りスループットの改善が見られたものの、「自動トラクター等の農機の遠隔監視制御による自動運転等の実現」では準同期 TDD1 での上りスループットが 30Mbps 程度であり、全体的な性能改善が要求されると同時にユースケースとしてもさらに上りスループットの改善が望まれる結果でした。上りスループットが改善されることにより、ユースケースの多様化、複数同時利用による効率化が期待できます。そのため、本実証では高精細カメラ等の映像伝送を複数台同時に行うことを目的とし、追加準同期パターンである「準同期 TDD2」を開発の上、性能を検証しました。

また、令和 2 年度 12 月に改訂された「ローカル 5G 導入ガイドライン」では準同期運用は全国 MNO との事前の干渉調整を省略することが可能とされていますが、ここで該当するのは制度化済準同期パターンの「準同期 TDD1」のみであり、今回検証する追加準同期パターンについては干渉調整について整理する必要があります。圃場 1 と圃場 2 がある果樹園はローカル 5G 基地局 2 基だけでなく、キャリア 5G 基地局も 1 基設置されている環境であるため、各干渉パターンを検討の上、実際に測定することで、基地局間離隔距離及び端末間離隔距離、同時接続端末台数について考察、提言をまとめました。

なお、ローカル 5G 基地局 2 基については同一周波数で運用し、2 基とも同じ TDD パターンで運用しました。2 基の離隔距離は約 550m です。

(2) 実証目標

本実証の目標として追加準同期パターン「準同期 TDD2」を開発し、実証フィールドで実際に電波を送信することとしました。準同期 TDD2 を実証フィールドにて測定し、同期運用と比較した上りスループットの改善量を測定するとともに、キャリア 5G との干渉検討を複数のパターンで測定しました。

3.3.4.2 実証仮説

情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）第 4 章 4.7GHz 帯における 5G システムと他システムとの干渉検討及び移動通信システム相互間の干渉検討 「4.2 移動通信システム相互間における干渉検討」において、隣接周波数帯を利用する全国 5G 事業者（全国キャリア等）と非同期で運用する場合の検討が行われています。同報告書の干渉検討結果まとめでは、屋外環境における基地局間干渉については基地局の送信電力調整や、アンテナの向き、離隔の確保等により共用可能と整理されています。さらに移動局間干渉についてはモンテカルロ・シミュレーションによる確率的評価により共用可能という整理がされているものの、屋外同一エリアでの運用に際しては近接・接触を避ける運用上の工夫が求められています。

本実証の環境ではキャリア 5G 基地局 1 基及びローカル 5G 基地局 2 基を設置しました。各基地局間の離隔距離は、ローカル 5G 基地局 A とキャリア 5G 基地局間が約 200m、ローカル 5G 基地局 B とキャリア 5G 基地局間が約 350m です。ローカル 5G 基地局を片方ずつ停波することで離隔距離ごとの干渉影響を測定し、基地局間離隔距離について検証しました。基地局間離隔距離の算出に当たっては情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（総務省；令和 2 年 7 月）を参考として算出しました。本実証の干渉パターンはキャリア 5G とローカル 5G の隣接周波数帯の干渉検討に該当するため、帯域内干渉及び帯域外干渉の両方について検討を行いました。

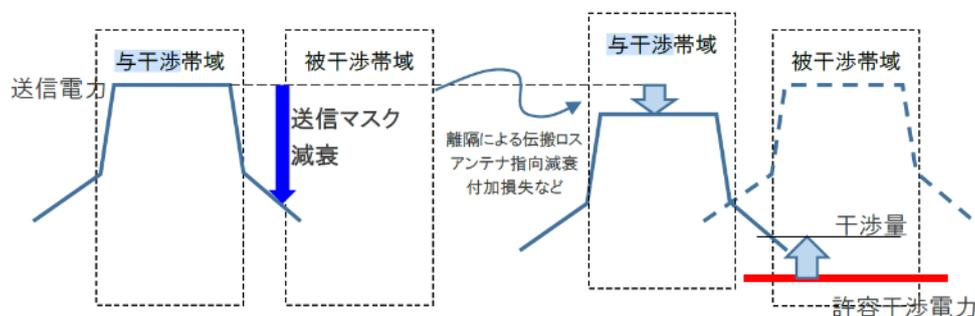


図 3.3.71 隣接周波数を利用した 5G システム間における最悪値条件での干渉検討（情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（総務省；令和 2 年 7 月）より抜粋）

(1) 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）にて明らかになっていること

基地局及び移動局について任意のパラメーターを設定し、最悪値条件での干渉検討を行っています。この際、基地局間の干渉及び移動局間の干渉について帯域内干渉と帯域外干渉の両方について検討を行っています。干渉検討結果については図 3.3.69、図 3.3.70 のとおりとなっているものの、具体的にどのような算出式を使用したかは明記されていません。諸元表内に「スプリアス領域における不要発射強度」のパラメーターが示されているため、帯

域内干渉については不要発射強度を与干渉量として算出していると考えられます。また帯域外干渉については等価等放射電力（EIRP）が示されていることから与干渉局の送信出力や電波強度を与干渉量として算出していると考えられます。

その結果、基地局間干渉については本実証フィールドと同様の「屋外⇒屋外」の環境では基地局のアンテナ向きを正反対に設置した場合はマクロセル基地局で離隔距離 221m を確保することで所要改善量がマイナスになるとされています。さらに「基地局タイプの選択、基地局アンテナの向きや離隔の確保、遮蔽対策等の事業者間調整により、GB に関わらず、共用は可能」と整理されました。

移動局間干渉については「屋外⇒屋外」の環境では、ガードバンドに関わらず帯域内干渉の所要改善量が残るものの、モンテカルロ・シミュレーションによる確率的な評価を行うことで所要改善量がマイナスに転じるとされています。この際、算出条件としては「最悪値条件」としては明記されておらず、また、モンテカルロ・シミュレーションを行っていることから、移動局間の離隔距離による影響の程度については検討がされていないものと考えられます。さらに「屋外や同一室内で遮蔽なく与干渉局と被干渉局が共存するケースであっても、確率統計的に共存可能と判断できるが、双方が近接したまま与干渉局が大きな送信電力で連続的に通信を行うような特殊な状況が起こると、被干渉局の性能が劣化する可能性もある。」と結果がまとめられていることもあり、与干渉局と被干渉局が近接した状態の干渉影響については明らかになっていないものと判断しました。

以上の報告内容から、任意の所要改善量を設定し、与干渉量（帯域内干渉の場合は不要発射強度、帯域外干渉の場合は何らかの計算処理を施した電波強度）が所要改善量を上回らなければ許容可能と判断できるとしました。ただし、算出方法については明記されておらず、

(1) 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）内の「参考資料 3 干渉検討における計算の過程」から仮説を立てました。

表 4. 2. 3. 1-1 基地局（与干涉）⇒基地局（被干涉）の干渉検討結果（最悪値条件）

	屋外⇒屋外	屋外⇒屋内	屋内⇒屋内	
帯域内干渉	マクロセル局 +53.3dB@3m 併設 (+80.1dB@20m 正対)	屋外（マクロ）⇒屋内（スモール） +19.2dB@3m +9.0dB@20m	同一室内	-4.8dB
	スモールセル局 +36.4dB@3m 併設 (+64.1dB@20m 正対)	屋内（スモール）⇒屋外（マクロ） +12.2dB@3m +2.0dB@20m	隣室	-21dB
帯域外干渉	マクロセル局 +38.3dB@40MHz 併設 3m (+65.1dB@40MHz 正対 20m)	屋外（マクロ）⇒屋内（スモール） +4.2dB@40MHz (3m) -6dB@40MHz (20m)	同一室内	-30.8dB@40MHz -26.8dB@100MHz
	+42.3dB@100MHz 併設 3m (+69.1dB@100MHz 正対 20m)	+8.2dB@100MHz (3m) -2dB@100MHz (20m)	隣室	-47dB@40MHz -43dB@100MHz
	スモールセル局 +10.4dB@40MHz 併設 3m (+38.1dB@40MHz 正対 20m)	屋内（スモール）⇒屋外（マクロ） -13.8dB@40MHz (3m) -9.8dB@100MHz (3m)	別建物	-63.2dB@40MHz -59.2dB@100MHz
	+14.4dB@100MHz 併設 3m (+42.1dB@100MHz 正対 20m)			

図 3.3.7268 基地局間干渉検討結果

表 4. 2. 3. 1-2 移動局（与干涉）⇒移動局（被干涉）の干渉検討結果（最悪値条件）

	屋外⇒屋外	屋外⇒屋内	屋内⇒屋内	
帯域内干渉	最悪値条件 +26.2dB@40MHz +22.2dB@100MHz	+10dB@40MHz z +6dB@100MHz	同一室内	最悪値条件 [屋外⇒屋外]の結果と同一 確率的評価 [屋外⇒屋外]の結果と同一
	確率的評価 -5.0dB@40MHz -8.5dB@100MHz		隣室	+10dB@40MHz z +6dB@100MHz
			別建物	-6.2dB@40MHz -10.2dB@100MHz
帯域外干渉	最悪値条件 +1.1dB@40~100MHz	-15.1dB@40~100MHz	同一室内	最悪値条件 [屋外⇒屋外]の結果と同一 確率的評価 [屋外⇒屋外]の結果と同一
	確率的評価 -34.7dB@40MHz -38.7dB@100MHz		隣室	-15.1dB@40MHz -15.1dB@100MHz
			別建物	-31.3dB@40MHz -31.3dB@100MHz

図 3.3.693 端末間干渉検討結果

(2) 本実証にて実施する机上検討内容

(1) にて記載したとおり、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和2年7月）では基地局間及び移動局間の干渉検討が行われているものの、算出式が明示されていないことから、同資料の参考資料として掲載されている計算の過程を参考に以下の方法で机上検討を行いました。

(1) 干渉モデル													
アンテナ高および指向性													
項目	値	単位	備考										
与干渉層アンテナ高	40m		マクロセル層										
被干渉層アンテナ高	40m		マクロセル層										
与干渉層アンテナ指向角	6 deg		屋外設置										
被干渉層アンテナ指向角	6 deg		屋外設置										
水平距離	3m		簡易モデル										
許容干渉レベル	4700	MHz											

(2) 干渉量の計算															
項目	0度指向性 帯域内干渉				10度指向性 帯域内干渉				帯域外干渉				単位	備考	
	送電→送電	送電→受信	受信→送電	受信→受信	送電→送電	送電→受信	受信→送電	受信→受信	送電→送電	送電→受信	受信→送電	受信→受信			
干渉モデルレイ	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0	dBm/MHz	
空中線電力	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	dB	
アンテナ利得	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB	
給電線損失	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB	
帯域幅	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	40	MHz	
帯域幅	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	51.0	71.0	MHz	帯域外干渉については、dBm/MHz
1/4パター	0	0(簡便)	10	20	40	0	0(簡便)	10	20	100	-	-	-	MHz	
オフセット損失(From center)	20	20	30	40	60	50	50	60	70	150	-	-	-	MHz	
送信マスキング(M)	0.0	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	0.0	-32.0	-32.0	-32.0	-32.0	-	-	-	dB	
帯域外利得(B)	51.0	19.0	19.0	19.0	19.0	51.0	19.0	19.0	19.0	19.0	67.0	71.0	67.0	dB/MHz	=EIRP+M
受信アンテナ利得(Grx)	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	dB	
受信給電線損失(Frx)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	dB	
許容干渉レベル(L)	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	-115	dBm/MHz	
許容感度許容電力(Y)														dBm	-52dBm(簡便20MHz帯) -52dBm(上記以外)
Minimum Coupling Loss(MCL)	185.0	154.0	154.0	154.0	154.0	185.0	154.0	154.0	154.0	154.0	129.0	143.0	143.0	dB	=EIRP+Fr-Y
伝送距離														m	
伝送ロス(L)						55.4								dB	=20Log(4πL/fc)
送信アンテナ指向減衰	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	dB	
送信干渉方向(垂直)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB	
垂直方向減衰	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	dB	最大パターンを使用
水平方向減衰	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	dB	最大パターンを使用
受信アンテナ指向減衰	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	dB	
受信干渉方向(垂直)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB	
垂直方向減衰	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	dB	最大パターンを使用
水平方向減衰	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	dB	最大パターンを使用
アンテナ指向減衰(A)	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	-63.28	dB	
付加損失(X)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB	
干渉量	86.3	53.3	53.3	53.3	53.3	86.3	53.3	53.3	53.3	53.3	34.3	34.3	49.3	dB	=MCL-L+A-X

項目	片側-90度 正反対 離隔距離			片側-90度 正反対 離隔距離			片側-90度 正反対 離隔距離		
	40	40	40	40	40	40	40	40	40
与干渉アンテナ高	40	40	40	40	40	40	40	40	40
被干渉アンテナ高	40	40	40	40	40	40	40	40	40
伝送距離	3.03	3.03	321.00	3.03	3.03	321.00	3.03	3.03	321.00
伝送ロス	55.4	55.4	32.8	55.4	55.4	32.8	55.4	55.4	31.3
送信アンテナ指向減衰	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63	-30.63
送信干渉方向(垂直)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
垂直方向減衰	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
水平方向減衰	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63	-29.63
受信アンテナ指向減衰	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64	-22.64
受信干渉方向(垂直)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
垂直方向減衰	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
水平方向減衰	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64	-21.64
アンテナ指向減衰(A)	-63.28	-61.27	-61.27	-63.28	-61.27	-61.27	-63.28	-61.27	-61.27
付加損失	0	0	0	0	0	0	0	0	0
干渉量	46.3	37.3	0.0	46.3	37.3	0.0	34.3	34.3	-11.1

図 3.3.74 基地局間干渉の計算表

こちらについてもあくまで「計算過程」であり、具体的な算出式は明示されていないため、本案件としては以下の算出式を仮説的に導出しました。基地局間干渉の帯域内干渉については、「空中線電力+アンテナ利得-給電線損失-送信マスク減衰+受信アンテナ利得*-受信給電線損失*-許容干渉レベル*-離隔距離に応じた自由空間伝搬ロス-アンテナ指向減衰-付加損失*」の算出式によって所要改善量を算出しました。本実証ではキャリア 5G 基地局とローカル 5G 基地局の設置位置が決まっており、離隔距離が 200m 及び 350m となっているため、この算出式で 200m 及び 350m の干渉量を算出し検討しました。また、送信干渉方向については想定ローカル 5G 基地局設置位置からキャリア 5G 基地局までの角度を算出し、200m 離隔距離基地局については 43 度、350m 離隔距離基地局については 8 度としました。

計算した結果、離隔距離 200m の無指向性アンテナの場合は所要改善量が-30.32dB となり、干渉影響はないものと考えられます。一方、離隔距離 350m の指向性アンテナの場合は所要改善量が 2.54dB となり、干渉が発生する可能性があります。指向性アンテナはアンテナ利得が強く、また、送信方向から 8 度しかずれていないため、離隔距離に反して干渉影響が強く出たものと考えられます。送信電力等を変えず、このままのパラメーターで利用する

場合は、所要離隔距離は 460m ほどと考えられます。

基地局間干渉の帯域外干渉については、「空中線電力+アンテナ利得—給電線損失—送信マスク減衰*+受信アンテナ利得*—受信給電線損失*—許容感度抑圧電力*—離隔距離に応じた自由空間伝搬ロス—アンテナ指向減衰—付加損失*」の算出式を用いて算出しました。許容干渉レベルに代わって許容感度抑圧電力を利用し算出しました。それぞれ机上検討した結果が表 3.3.17 のとおりです。帯域外干渉については、離隔距離 200m のほうで所要改善量-41.32dB、離隔距離 350m のほうで-8.46dB とどちらもマイナスの値になりました。そのため、基地局間干渉については帯域外干渉については問題なく、帯域内干渉に関して離隔距離 350m の基地局の影響を実測し確認する必要があると考えました。なお、帯域内干渉、帯域外干渉ともに算出条件としては審議会資料の算出条件を引用し、与干渉・被干渉の基地局はともに 40m 高で設置し、高度の差分はないものとしています。審議会の「屋外⇒屋外設置モデル」の数値を引用しました。ローカル 5G 基地局のアンテナチルト角度は指向性アンテナで 10 度、無指向性アンテナで 3 度としました。

表 3.3.38 基地局間干渉検討による机上検討結果（1対1対向モデル）

検討パターン	アンテナパターン	帯域内干渉			帯域外干渉		
		与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離 [m]	与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離 [m]
① (離隔距離 200m)	無指向性アンテナ	-145.3	-30.32	-	-93.3	-41.32	-
② (離隔距離 350m)	指向性アンテナ	-112.5	2.54	460	-60.5	-8.46	-

移動局間干渉については、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和2年7月）では離隔距離については触れられていないものの、参考資料としては「伝搬距離 1m」のパラメーターが利用されており、移動局間の離隔距離を 1m としたものと読み取れます。

(50移動局=40移動局)

(1) 干渉モデル

【アンテナ高さおよび指向角】

項目	値	単位	備考
伝送アンテナ高	1.5m		輻射指向性アンテナ
受信アンテナ高	1.5m		輻射指向性アンテナ
伝送アンテナ指向角	0 deg		屋外
受信アンテナ指向角	0 deg		屋外
水平距離	1m		正対モデル
帯域中心の周波数	4,700MHz		



(2) 干渉量の計算

項目	値												単位	備考
	40MHz 帯域内干渉				100MHz 帯域内干渉				帯域外干渉					
干渉モデルタイプ	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離	距離→距離		
空中線電力	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	dBm
アンテナ利得	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dBd
伝電線損失	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB
帯域幅	40	40	40	40	100	100	100	100	100	100	100	40	100MHz	
帯域効率	7.0	7.0	7.0	7.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	dB/MHz	帯域外干渉については、dB値
片一方利得	0 (輻射)	20	40	45	100	50 (輻射)	50	100	105	150	-	-	-	MHz
オフセット周波数 (from center)	20	20	40	60	50	50	100	150	150	200	-	-	-	MHz
送信マスク減衰 (dB)	0	-29.9	-29.9	-32	-37	-37	0	-29.9	-29.9	-29.9	-33	-33	-	dB
帯域外利得 (dB)	7.0	-22.5	-22.5	-25.0	-30.0	-30.0	3.0	-25.5	-25.5	-25.5	-30.0	-30.0	dB/MHz	=EFP+M
受信アンテナ利得 (Grs)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dBd
受信伝電線損失 (Frx)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB
許容干渉レベル (V)	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	-111	dBm/MHz
許容感度は電力 (V)														dBm
Minimum Coupling Loss (MCL)	119.0	88.1	88.1	96.0	81.0	81.0	114.0	84.1	84.1	84.1	81.0	81.0	-40.0	dB
伝搬距離							1							m
伝搬ロス (L)							45.88							dB
送信アンテナ指向減衰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB
受信アンテナ指向減衰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB
アンテナ指向減衰 (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dB
付加損失 (X)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	dB
干渉量	56.1	26.2	26.2	24.1	19.1	19.1	52.1	22.2	22.2	22.2	19.1	19.1	1.1	dB

(3) モンテカルロ・シミュレーション(移動局の送信電力:22dB(固定))

所要改善量	値	単位	備考
所要改善量	20.4	dB	

(4) モンテカルロ・シミュレーション(移動局の送信電力:100MHzシステムの送信電力分布を適用)

所要改善量	値	単位	備考
所要改善量	9.6	dB	

(5) モンテカルロ・シミュレーション(移動局の送信電力:100MHzシステムの送信電力分布、各系の正対条件:ランダム)

所要改善量	値	単位	備考
所要改善量	9.5	dB	

図 3.3.705 移動局間干渉の計算表

本実証では移動局間の離隔距離参考資料では伝搬距離が 1m と 0m として検討予定のため、この伝搬距離の値を変更し算出しました。帯域内干渉については「空中線電力+アンテナ利得—給電線損失—送信マスク減衰*+受信アンテナ利得*—受信給電線損失*—許容干渉レベル*—離隔距離に応じた自由空間伝搬ロス—アンテナ指向減衰—付加損失*」の算出式によって所要改善量を算出しました。また、付加損失については、審議会資料にて送信側、受信側ともに 8dB の人体吸収損失を付加し、計 16dB の損失を計上しました。計算した結果、帯域内干渉については離隔距離 1m の場合で 19.8dB、離隔距離 0m の場合で 59.8dB となり、干渉が起きる可能性があることがわかりました。審議会資料でも帯域内干渉について 22dB 程度の所要改善量が算出されていますが、モンテカルロ・シミュレーションの確立的な評価を行うことで、所要改善量がマイナスに転じていることから、離隔距離 1m については干渉影響なしと判断しました。離隔距離 0m については所要改善量が大きいため、モンテカルロ・シミュレーションを実施してもマイナスに転じるかは不明です。審議会資料ではモンテカルロ・シミュレーションの係数についても明示されていないため、本実証ではモンテカルロ・シミュレーションは実施せず、実測において影響を確認しました。

帯域外干渉については、許容干渉レベルに代わって許容感度抑圧電力を利用し算出しました。算出式は「空中線電力+アンテナ利得—給電線損失—送信マスク減衰*+受信アンテナ利得—許容感度抑圧電力」の算出式によって所要改善量を算出しました。

ナ利得*—受信給電線損失*—許容感度抑圧電力*—離隔距離に応じた自由空間伝搬ロス—アンテナ指向減衰—付加損失*」として算出しました。机上検討した結果が表 3.3.19 のとおりです。離隔距離 1m の場合、所要改善量は-39.2dB とマイナスの値になっており、干渉の影響はないと考えられます。また、離隔距離 0m の場合も所要改善量は 0.8dB となり、ほとんど干渉影響はないものとして判断しました。

表 3.3.39 移動局間干渉検討による机上検討結果（1対1対向モデル）

検討パターン	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離 [m]	与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離 [m]
① (離隔距離 1m)	-91.2	19.8	9.8	-39.2	0.8	1.1
② (離隔距離 0m)	-51.2	59.8	9.8	-0.8	40.8	1.1

上記検討結果より離隔 1m及び 0m時は移動機間での干渉が想定されるので、実測時に 0m から各々の所要離隔距離まで離れた状態での通信時の端末間干渉の実証を行いました。

干渉検討については、送信出力といった基地局・端末の設定パラメーターや与干渉局・被干渉局の離隔距離によって検討されるものですが、干渉影響の結果、無線性能にどのような影響が出ているのかも測定し検証を行いました。特に、TDD 追加パターンでの運用により、キャリア 5G の下り性能及びローカル 5G の上り性能に影響が表れると考えられるため、それぞれのスループット及び遅延値を測定し、検証を行いました。

キャリア 5G、ローカル 5G とともに単体運用の測定結果を基準値とするため、1a、2a、1b、2b の各測定ポイントにて 1 台のみの場合と 5 台全て通信状態にした場合の測定を行い、3a、3b の各測定ポイントにて 1 台のみ通信状態にした場合の測定を行いました。キャリア 5G、ローカル 5G とともに電波送信している、各干渉パターンの運用の際は、キャリア 5G が最もローカル 5G 基地局に近い 1a 及び 1b のポイントでキャリア 5G 端末 1 台に対し、ローカル 5G 端末 1 台の場合とローカル 5G 端末 5 台の場合でキャリア 5G の下り性能を測定しました。

なお、準同期 TDD2 で運用したローカル 5G では上りスループット 130Mbps 程度と期待しました。本数値は干渉影響を除外した開発上の目標値です。情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）の干渉検討結果まとめでは基地局間干渉、端末間干渉ともにガードバンドに限らず共用可能の整理となっており、さらに干渉影響を低減する方法として準同期 TDD による運用もあげられていることから、キャリア 5G からの影響を受けることなく目標数値の達成が可能であると考えました。

3.3.4.3 評価・検証項目

本実証としては前項に記載した各机上検討結果を検証するために、ローカル 5G、キャリア 5G それぞれで受信電力 (RSRP 値)、通信品質 (SIR または SINR)、及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延 等) を測定しました。実証仮説にて記載した干渉検討の机上検討の評価として、受信電力 (RSRP 値) を与干渉量とし、机上検討との差分を比較しました。通信品質及び伝送性能については干渉影響による性能評価のパラメーターとし、測定パターンとしては次項に記載の表 3.3.40 干渉検討パターン一覧の通りです。

3.3.4.4 評価・検証方法

本実証としては以下の干渉パターンにて受信電力 (RSRP 値)、通信品質 (SIR または SINR)、及び伝送性能 (UL/DL 別の伝送スループット、伝送遅延 等) を測定しました。キャリア 5G、ローカル 5G それぞれ単体運用の環境も準備し、単体運用の場合の測定データを基準値としました。

なお、ローカル 5G 導入ガイドラインでは同期運用優先のルールが定められているため、本実証ではキャリア 5G を被干渉、ローカル 5G を与干渉と想定しました。ただし、準同期の場合は上りスロットと下りスロットのタイミングが不一致のため、ローカル 5G の上り性能にも影響が出る可能性があります。ローカル 5G の上り性能への影響についても合わせて測定することで基地局との距離及び端末間離隔距離ごとのデータを比較し検証しました。

各パターンにおける測定は基地局との距離を変えて行いました。下図のとおり、ローカル 5G に近いポイント、中間地点、キャリア 5G に近いポイント 1a～3a、1b～3b の 3 か所ずつ行いました。



図 3.3.716 干渉検討測定ポイント
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

なお、端末間の離隔距離について、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告 (令和 2 年 7 月) の干渉検討まとめでは端末間を接触・近接距離に置いた際の影響が注意喚起されています。令和 2 年度地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証における「自動トラクター等の農機の遠隔監視制御による自動運転等の実現」ではローカル 5G を制度化済準同期パターン TDD1 で運用した際のキャリア 5G と

の干渉検討を行っており、端末間の離隔距離を 1m/10m/30m のパターンで変えて比較を行いました。1m 距離でも影響は見られませんでした。情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告及び昨年度実証の結果を踏まえ、本実証では端末間の離隔距離を 0m（隣接して設置）と 1m とし、接触・近接距離の端末間干渉の検証を行いました。また、不慮の測定誤差を未然に排除するために、ローカル 5G 端末については事前にラボ環境にて品質評価試験を行いました。なお、本実証では iperf を用いて与干渉側が最大限の無線リソースブロックを使用した状態で干渉を評価しました。

キャリア 5G の伝送性能の測定にあたっては、測定ツール Sigma-ML を搭載したキャリア 5G 対応スマートフォンを用いて、以下の図の区間で測定を行いました。

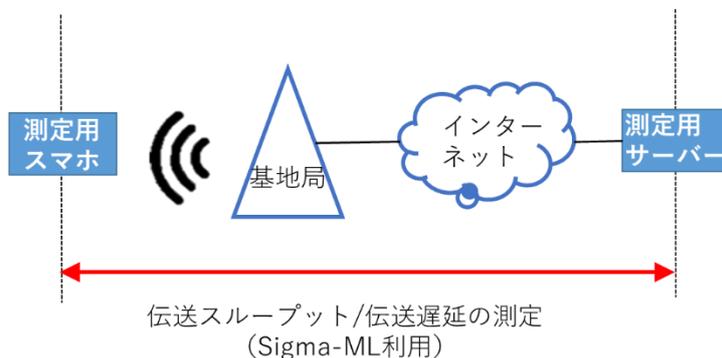


図 3.3.727 キャリア 5G 伝送性能測定区間 模式図

表 3.3.40 干渉検討パターン一覧

項番	干渉パターン	キャリア5G TDDパターン	ローカル5G TDDパターン	キャリア5G 設置ポイント	ローカル5G端末 隔離距離	キャリア5G端末 台数	ローカル5G端末 台数		
1	キャリア5G単体	同期	停波	1a	—	1台	-		
2						5台	-		
3						1台	-		
4						5台	-		
5						1台	-		
6						5台	-		
7						1台	-		
8						5台	-		
9						1台	-		
10						5台	-		
11						1台	-		
12						5台	-		
13	キャリア5G被干渉 (ローカル5G基地局 隔離距離200m)	同期	準同期TDD 2	1a	0m	5台	5台		
14					1m	5台	5台		
15					2a	0m	5台	5台	
16						1m	5台	5台	
17					3a	0m	5台	5台	
18						1m	5台	5台	
19	キャリア5G被干渉 (ローカル5G基地局 隔離距離350m)	同期		準同期TDD 2	1b	0m	5台	5台	
20						1m	5台	5台	
21						2b	0m	5台	5台
22							1m	5台	5台
23						3b	0m	5台	5台
24							1m	5台	5台
25	キャリア5G被干渉 (ローカル5G両基地局 送信)	同期	準同期TDD 2		1a	0m	5台	5台	
26						1m	5台	5台	
27						2a	0m	5台	5台
28							1m	5台	5台
29						3a	0m	5台	5台
30							1m	5台	5台
31				1b	0m	5台	5台		
32					1m	5台	5台		
33					2b	0m	5台	5台	
34						1m	5台	5台	
35					3b	0m	5台	5台	
36						1m	5台	5台	
37	ローカル5G単体	停波	準同期TDD 2	—	—	1a	-	1台	
38						-	5台		
39						2a	-	1台	
40							-	5台	
41						3a	-	1台	
42							-	5台	
43						1b	-	1台	
44							-	5台	
45						2b	-	1台	
46							-	5台	
47						3b	-	1台	
48							-	5台	

以下に各干渉パターンイメージを示します。下図はローカル 5G を停波し、キャリア 5G を単体運用した場合のイメージです。上表の項番 1～12 に該当します。本パターンにて取得できたデータを基準値とするため、1a～3b まで全ポイントで測定しました。

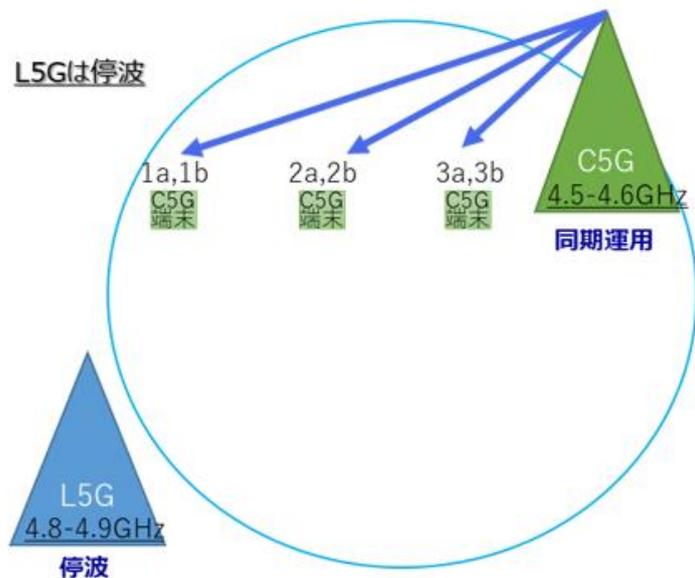


図 3.3.738 キャリア 5G 単体運用イメージ (干渉検討一覧表項番 1～12 に該当)

下図はローカル 5G を準同期 TDD2 で、キャリア 5G を同期で運用し、基地局との距離及び端末間の離隔距離を変えることによる干渉影響を把握するイメージです。キャリア 5G の設置位置は 1a～3b とし、各ポイントのキャリア 5G と 0m もしくは 1m の距離にローカル 5G 端末を設置します。各パターンでキャリア 5G の下り性能及びローカル 5G の上り性能を測定し、両端末の影響を検証しました。

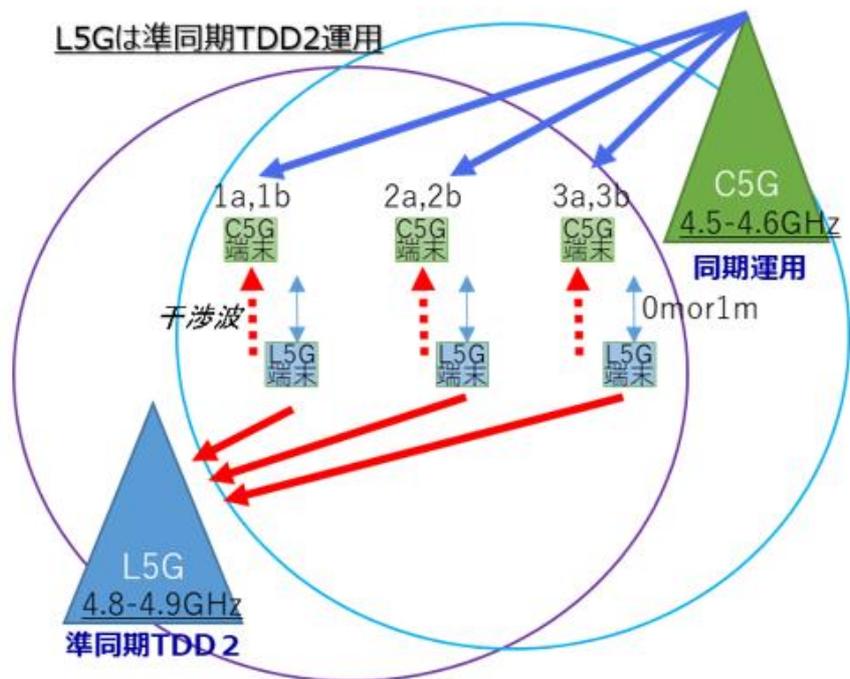


図 3.3.749 端末間干渉におけるキャリア 5G 被干渉イメージ (干渉検討一覧表項番 13～36 に該当)

各端末の設置パターンは以下のとおりです。キャリア 5G 端末、ローカル 5G 端末ともに 5 台ずつ準備するため隣接で設置した場合と、離隔距離 1m で設置した場合で測定し、干渉影響を比較しました。

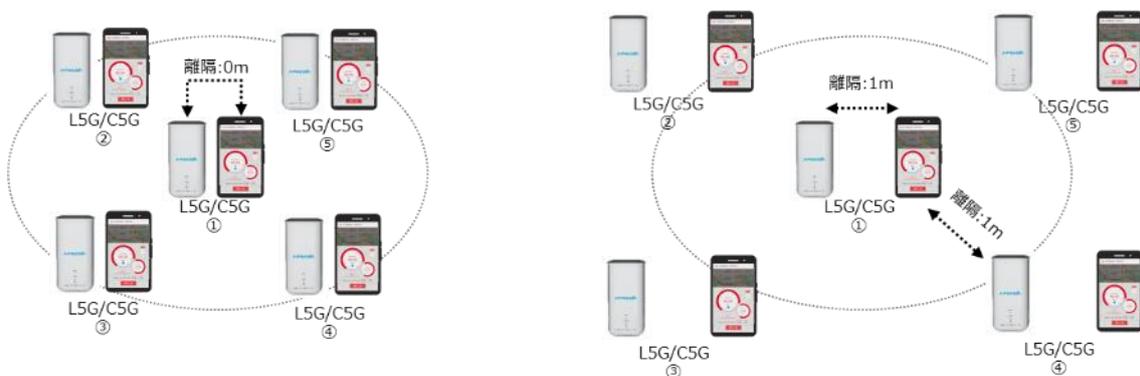


図 3.3.80 キャリア 5G 端末、ローカル 5G 端末の設置イメージ

下図はキャリア 5G を停波し、ローカル 5G を単体運用した場合のイメージです。本実証ではローカル 5G 基地局が通常の RU と外部アンテナ付き RU があるため、1a～3c まで全ポイントで測定し、外部アンテナの有無による差分の検証も行いました。

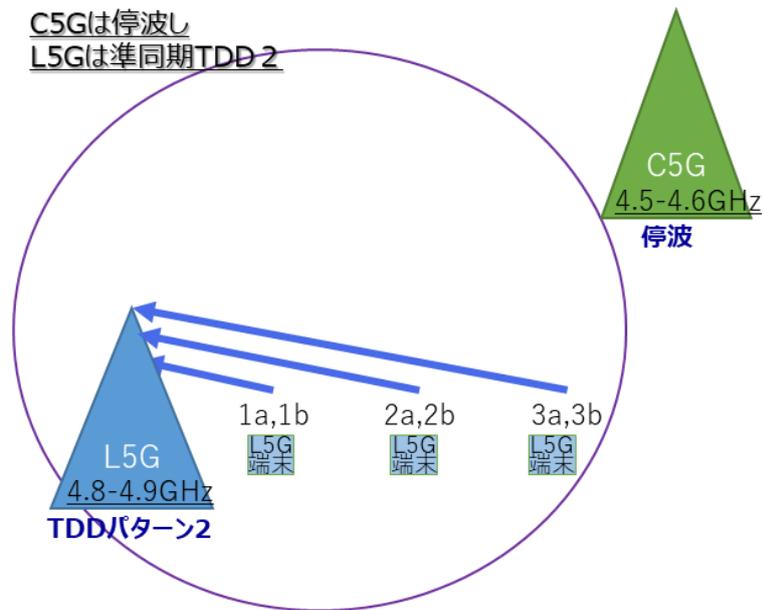


図 3.3.8175 ローカル 5G 単体運用イメージ (干渉検討一覧表項番 37~48 に該当)

3.3.4.5 実証結果及び考察

準同期運用時のローカル 5G の UL スループット、同期運用時のローカル 5G の UL スループットを「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」のデータを元に比較しました。同期運用時の値は基地局 C の値を用い、準同期運用時の値は基地局 C と同様の無指向性アンテナを使い MSC の値も同じである基地局 A の値を用いました。

表 3.3.41 準同期運用時と同期運用時の UL スループットと受信電力の平均

	受信電力 SS-RSRP (dBm)	UL スループット (Mbps)
基地局 A (準同期)	-110.86	40.99
基地局 C (同期)	-106.91	15.72

上表から、同期運用時と比較して準同期運用時の方が UL スループットは 2 倍以上大きな値となり、準同期による UL スループットの改善が見られました。測定ポイント毎に周辺環境は異なりますが、基地局 A、C ともに 3.3.1.4 項に記載の通り、測定ポイントの違いによる伝送性能の差分は確認されなかったため、平均値での評価をしました。

各干渉パターンの測定データを元に、与干渉については、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和 2 年 7 月)の干渉検討を参考に、与干渉量、所要改善量、所要離隔距離を取りまとめ、共用条件を以下の表に示します。干渉有りと想定されるものを赤字、干渉無しと想定されるものを青字にしています。

表 3.3.42 基地局間干渉検討 与干渉量、所要改善量、所要離隔距離

基地局間離隔距離	アンテナパターン	パラメーター	帯域内干渉			帯域外干渉		
			与干渉電力 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔(水平)距離 [m]	与干渉電力 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔(水平)距離 [m]
350m	指向性アンテナ	旧仮説シミュレーション	-112.50	2.54	470	-60.50	-8.46	—
		新仮説シミュレーション	-105.53	4.47	590	-73.53	-26.53	—
		実測値シミュレーション	-100.38	9.62	1,100	-68.68	-30.68	—
200m	無指向性アンテナ	旧仮説シミュレーション	-145.30	-30.32	—	-93.30	-41.32	—
		新仮説シミュレーション	-114.18	-4.18	—	-82.18	-35.18	—
		実測値シミュレーション	-120.40	-10.40	—	-88.70	-50.70	—

表 3.3.43 移動局間干渉検討 与干渉量、所要改善量、所要離隔距離

移動局間離隔距離	移動局	パラメーター	帯域内干渉			帯域外干渉		
			与干渉電力 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要(水平)離隔距離 [m]	与干渉電力 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要(水平)離隔距離 [m]
1m	同一機種	旧仮説シミュレーション	-91.20	19.80	10	-39.20	0.80	1.5
		新仮説シミュレーション	-91.50	19.50	10	-59.16	-19.16	—
		実測値シミュレーション	-89.30	20.70	11	-36.86	1.14	1.5
0m	同一機種	旧仮説シミュレーション	-51.20	59.80	10	0.80	40.80	1.5

	新仮説シミュレーション	-51.50	59.50	10	0.84	40.84	1.5
	実測値シミュレーション	-49.30	60.70	11	3.14	41.14	1.5

上記新仮説シミュレーション、実測値シミュレーションは、実証を進めるなかで、内容を再検討し、参照するパラメーターを増やして詳細化、実態にあうように修正をしたもので、仮説に記載のシミュレーション（旧仮説シミュレーション）とは、算出方法を変えたものとなります。なお、変更後の算出方法も 3.3.4.2 項に記載の通り、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）を参照している点は変わりません。旧仮説シミュレーションにおいて、送信・受信パラメーター両方に自局（ローカル 5G）の想定数値を代入しシミュレーションを実施しましたが、新仮説シミュレーションとの変更箇所については、以下の通り定義しました。

【新仮説シミュレーション定義】

パラメーター	変更内容
送信パラメーター数値	<ul style="list-style-type: none"> ・与干渉（キャリア 5G）の送信パラメーターの想定数値 ・与干渉（キャリア 5G）の送信アンテナ指向減衰の想定数値
受信パラメーター数値	<ul style="list-style-type: none"> ・被干渉（ローカル 5G）の受信パラメーターの想定数値 ・被干渉（ローカル 5G）の受信アンテナ指向減衰の想定数値

また、当初、3.3.4.4 項に記載の通り、ローカル 5G 導入ガイドラインでは同期運用優先のルールが定められているため、本実証ではキャリア 5G を被干渉、ローカル 5G を与干渉と考えておりましたが、以下の図の通り、基地局間干渉については同期局が与干渉局、準同期局が被干渉局となることから、本実証の基地局間干渉での与干渉局はキャリア 5G、被干渉局はローカル 5G と変更しました。

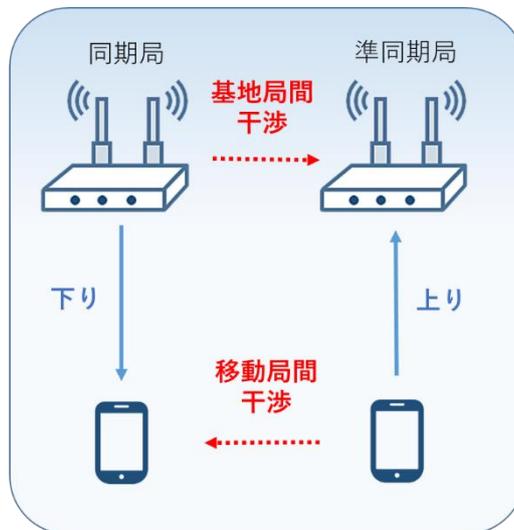


図 3.3.82 基地局間干渉及び移動局間干渉イメージ

上記定義に基づき、ローカル 5G およびキャリア 5G それぞれに該当するパラメーター値を代入しシミュレーションを実施しました。

基地局間干渉における新旧シミュレーションの結果を比較すると、新仮説シミュレーションの結果の方が、所要改善量のマイナス値の値が大きくなり、改善量が改善されました。この差分要因については、アンテナ指向減衰量が以下の要因から変わったことによる所要改善量が改善されています。

表 3.3.44 シミュレーションパターンと差分要因について

シミュレーションパターン	差分要因と考えられる変更項目
旧シミュレーションのアンテナ指向減衰	自局（ローカル 5G）の水平・垂直による干渉方向の指向減衰量のアンテナパターンデータにて検討
新シミュレーションのアンテナ指向減衰	送信アンテナは与干渉局（ローカル 5G）、受信アンテナは被干渉局（キャリア 5G）による各アンテナの水平・垂直による干渉方向の指向減衰量と与・被干渉局の高低差による指向減衰量のアンテナパターンデータにて検討

また、新仮説シミュレーションと実測値シミュレーション結果を比較すると、所要改善量が増えている要因は、仮説時のキャリア 5G の空中線電力をスモールセル局での値と想定していましたが、実際の空中線電力がマクロセル局であったことから、所要改善量が増加しました。

また、シミュレーションの結果より、指向性アンテナと無指向性アンテナの所要改善量が大きく変化していることが見受けられ、キャリア 5G との離隔距離を比較検討した場合、遠方の指向性アンテナ基地局より近傍の無指向性アンテナ基地局の所要改善量の方が小さい結果となっています。

こちらの要因として、指向性アンテナの場合は指向減衰量が小さく、無指向性アンテナの場合は指向減衰量が大いことより、干渉対向基地局に対し電波のアンテナ指向減衰量（水平・垂直、高低差）が大きく影響していることが考えられます。

移動局間干渉については、仮説記載のシミュレーション、新仮説シミュレーション、実測値シミュレーションの全てで結果にほぼ差分は生じませんでした。それぞれの項目に入れた値が同程度であったため、結果的に所要改善量にも差分が生じなかったと考えられます。

被干渉については、与干渉局からの距離を変数とした際の無線区間の伝送性能（スループット、遅延等）を取りまとめ、共用条件下でユースケースの所用性能が達成可能か以下評価し、伝送性能が干渉影響を受けていた場合には、改善策について考察します。また、実測データから干渉検討シミュレーションの妥当性を確認します。なお、所要性能については、同期運用のキャリア 5G 下り性能及び TDD 追加パターン 2 運用のローカル 5G 上り性能について取りまとめます。

表 3.3.45 同期運用した際のキャリア 5G 下り性能測定結果

項番	測定ポイント	ローカル 5G 端末との離隔距離	受信電力 SS-RSRP (dBm)	DL スループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)
1	1a	—	-74.50	554.00	530.67
2	1a	—	-74.98	477.13	454.67
3	2a	—	-78.26	477.13	484.67
4	2a	—	-77.63	491.27	582.33
5	3a	—	-76.73	513.96	510.00
6	3a	—	—	—	—
7	1b	—	-71.74	559.80	262.00
8	1b	—	-71.74	595.79	249.00
9	2b	—	-67.69	450.87	323.33
10	2b	—	-67.17	484.98	313.33
11	3b	—	-60.61	511.27	323.33
12	3b	—	—	—	—
13	1a	0m	-78.83	424.90	456.67
14	1a	1m	-77.96	441.54	441.33
15	2a	0m	-80.21	499.59	499.00
16	2a	1m	-81.20	521.09	515.67
17	3a	0m	-75.77	472.14	543.33
18	3a	1m	-75.73	479.03	535.33
19	1b	0m	-71.59	485.17	305.33
20	1b	1m	-74.76	532.08	340.33
21	2b	0m	-67.70	539.45	389.67
22	2b	1m	-68.95	516.48	415.67
23	3b	0m	-62.36	386.82	335.00
24	3b	1m	-63.16	375.54	365.33
25	1a	0m	-77.18	411.70	465.00
26	1a	1m	-77.44	410.78	465.67
27	2a	0m	-73.90	475.52	515.00
28	2a	1m	-75.91	515.45	514.67
29	3a	0m	-76.19	494.93	562.00
30	3a	1m	-75.64	439.19	584.67
31	1b	0m	-76.12	540.40	312.00
32	1b	1m	-76.44	480.44	336.67
33	2b	0m	-69.34	508.41	383.67
34	2b	1m	-69.92	504.37	394.00
35	3b	0m	-62.80	428.96	346.33
36	3b	1m	-63.17	470.35	381.00

表 3.3.46 準同期運用した際のローカル 5G 上り測定結果

項番	測定ポイント	キャリア 5G 基地局との離隔距離	受信電力 SS-RSRP (dBm)	上りスループット (Mbps)	上りスループット (Mbps)	伝送遅延 (ms)	伝送遅延 (ms)
					[所要性能との差分]		
13	1a	0m	-89.81	40.80	-22.7	42.00	-358
14	1a	1m	-90.89	40.80	-22.7	41.00	-359
15	2a	0m	-102.95	41.00	-22.5	42.00	-358
16	2a	1m	-101.94	41.00	-22.5	43.00	-357
17	3a	0m	-106.64	40.80	-22.7	41.00	-359
18	3a	1m	-108.87	41.00	-22.5	41.00	-359
19	1b	0m	-90.94	18.40	-45.1	40.00	-360
20	1b	1m	-86.87	18.40	-45.1	39.00	-361
21	2b	0m	-90.80	18.40	-45.1	45.00	-355
22	2b	1m	-93.18	18.40	-45.1	47.00	-353
23	3b	0m	-90.90	18.10	-45.4	41.00	-359
24	3b	1m	-98.13	18.10	-45.4	42.00	-358
25	1a	0m	-91.13	41.00	-22.5	41.00	-359
26	1a	1m	-92.33	40.90	-22.6	41.00	-359
27	2a	0m	-106.45	40.30	-23.2	40.00	-360
28	2a	1m	-107.35	40.20	-23.3	40.00	-360
29	3a	0m	-107.33	41.10	-22.4	41.00	-359
30	3a	1m	-107.93	41.00	-22.5	40.00	-360
31	1b	0m	-81.24	18.40	-45.1	41.00	-359
32	1b	1m	-86.65	18.40	-45.1	41.00	-359
33	2b	0m	-90.18	18.40	-45.1	41.00	-359
34	2b	1m	-91.06	18.40	-45.1	40.00	-360
35	3b	0m	-89.50	18.10	-45.4	41.00	-359
36	3b	1m	-91.30	18.20	-45.3	40.00	-360
37	1a	—	-92.32	41.10	-22.4	41.00	-359
38	1a	—	-90.69	27.20	-36.3	43.00	-357
39	2a	—	-112.70	41.10	-22.4	41.00	-359
40	2a	—	-113.00	37.60	-25.9	40.00	-360
41	3a	—	-111.53	40.90	-22.6	41.00	-359

42	3a	—	—	—	—	—	—
43	1b	—	-84.13	18.10	-45.4	41.00	-359
44	1b	—	-86.00	18.30	-45.2	41.00	-359
45	2b	—	-101.31	17.20	-46.3	42.00	-358
46	2b	—	-99.87	18.10	-45.4	48.00	-352
47	3b	—	-97.08	18.10	-45.4	40.00	-360
48	3b	—	—	—	—	—	—

上記の測定結果から、基地局間干渉及び移動局間干渉について考察を行います。各干渉に関するイメージは図 3.3.79 の通りです。

まず、移動局間干渉による影響について考察を行います。移動局間干渉では、ローカル 5G（準同期局）上り通信が与干渉、キャリア 5G（同期局）下り通信が被干渉となるため、キャリア 5G 下り性能に着目し評価を行います。

キャリア 5G 単体での測定の場合と比較して、ローカル 5G と同時測定の場合のスループットの値が小さい傾向があります。ただし、同期局の測定に関しては、図 3.3.74 の通り、測定区間にインターネット網が含まれるため、伝送性能には揺らぎが発生するものと考えられます。

表 3.3.47 キャリア 5G 単体測定時とローカル 5G 同時測定時の受信電力、伝送性能の比較

	受信電力 SS-RSRP (dB)	下りスループット (Mbps)	遅延値 (ms)
項番 1-11 の平均値 (キャリア 5G 単体測定)	-72.11	511.62	424.07
項番 13-36 の平均値 (キャリア 5G・ローカル 5G 同時測定)	-73.01	473.10	433.47

項番 1-11 の項番 13-36 に対するスループット値の割合としては、92%でした。遅延値の平均については項番 1-11 の項番 13-36 に対するスループット値の割合は 93%程の増加なので、どちらもインターネット網による揺らぎの範囲内と考えます。また、受信電力の値を見ても、項番 1-11 と項番 13-36 で同程度です。

加えて、その時の基地局と移動局間での電波品質・干渉確認も行いました。項番 1-11（キャリア 5G 単体測定）の平均値と、項番 13-36（キャリア 5G・ローカル 5G 同時測定）の平均値を確認したところ、同程度の値であり、どちらも通信を行うのに問題無いと評価できます。これらのことから、同期局の下り通信は、準同期局からの干渉影響を受けていないと考えられます。

表 3.3.48 キャリア 5G 単体測定時とローカル 5G 同時測定時の電波品質の比較

	RSRQ (dB)	SINR (dB)
項番 1-11 の平均値 (キャリア 5G 単体測定)	-10.36	28.56
項番 13-36 の平均値 (キャリア 5G・ローカル 5G 同時測定)	-10.38	26.06

次にキャリア 5G 端末との離隔距離に着目して考察します。

ローカル 5G 端末との離隔距離 0m、1m での RSRQ、SINR 及び上りスループット、伝送遅延の比較を下に示します。RSRQ、SINR については測定端末での測定データとしています。端末の離隔距離を 1m に離れた場合に数値が良くなった箇所は黄色で塗りつぶし、反対に数値が悪くなった箇所は赤字で示しています。

表 3.3.49 ローカル 5G 端末との離隔距離 0m と 1m の電波品質と伝送性能の比較

測定 ポイント	ローカル 5G 端末 との離隔 距離	RSRQ (dB)		SINR (dB)		下りスループット (Mbps)		遅延値 (ms)	
		C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方
1a	0m	-10.47	-10.40	22.28	23.89	424.90	411.70	456.67	465.00
	1m	-10.37	-10.39	25.27	24.66	441.54	410.78	441.33	465.67
	0m と 1m での差分	0.10	0.00	2.98	0.77	16.64	-0.92	-15.33	0.67
2a	0m	-10.31	-10.38	28.70	25.02	499.59	475.52	499.00	515.00
	1m	-10.42	-10.33	25.53	26.64	521.09	515.45	515.67	514.67
	0m と 1m での差分	-0.11	0.06	-3.17	1.63	21.50	39.93	16.67	-0.33
3a	0m	-10.46	-10.63	20.59	18.72	472.14	494.93	543.33	562.00
	1m	-10.49	-10.45	18.69	18.80	479.03	439.19	535.33	584.67
	0m と 1m での差分	-0.04	0.18	-1.91	0.08	6.90	-55.74	-8.00	22.67
1b	0m	-10.40	-10.31	24.95	28.90	485.17	540.40	305.33	312.00
	1m	-10.38	-10.37	26.07	25.56	532.08	480.44	340.33	336.67
	0m と 1m での差分	0.02	-0.05	1.12	-3.33	46.91	-59.96	35.00	24.67
2b	0m	-10.31	-10.32	28.61	27.16	539.45	508.41	389.67	383.67
	1m	-10.34	-10.35	32.38	32.14	516.48	504.37	415.67	394.00
	0m と 1m での差分	-0.03	-0.03	3.77	4.99	-22.97	-4.04	26.00	10.33

3b	0m	-10.35	-10.32	30.20	27.42	386.82	428.96	335.00	346.33
	1m	-10.31	-10.34	33.47	29.82	375.54	470.35	365.33	381.00
	0m と 1m での差分	0.04	-0.02	3.26	2.40	-11.28	41.40	30.33	34.67

上表を確認すると、ローカル 5G 端末を 0m から 1m に離れた場合に、数値が良くなる場合と、反対に数値が下がるという両方の結果が得られています。この結果については数値の変動も小さく、測定ポイント及び基地局の発射パターンに依らないため、電波干渉による影響とは考えにくいです。以上のことから、ローカル 5G 電波の干渉によるキャリア 5G システムへの電波品質・通信品質影響はない、と考えます。

次に、基地局間干渉による影響について考察を行います。基地局間干渉では、キャリア 5G 下り通信が与干渉、ローカル 5G 上り通信が被干渉となるため、ローカル 5G 上り性能に着目し評価を行います。下記はキャリア 5G 停波時 (=ローカル 5G 基地局 A/B 発射時) を基準にし、各パターンでの受信電力について表にしたものです。

表 3.3.50 各測定ポイントでのローカル 5G 受信電力

測定 ポイン ト	キャリア 5G 端末との 離隔距離	受信電力				
		L5G 単体 (dBm) (C5G 停波)	C5G+L5G 片 側 (dBm)	L5G 単体と の差分 (dB)	C5G+L5G 両 方 (dBm)	L5G 単体と の差分 (dB)
1a	0m	-90.69	-89.81	0.88	-91.13	-0.44
	1m		-90.89	-0.20	-92.33	-1.64
2a	0m	-113.00	-102.95	10.05	-106.45	6.55
	1m		-101.94	11.06	-107.35	5.65
3a	0m	-111.53	-106.64	4.89	-107.33	4.20
	1m		-108.87	2.66	-107.93	3.60
1b	0m	-86.00	-90.94	-4.94	-81.24	4.76
	1m		-86.87	-0.87	-86.65	-0.65
2b	0m	-99.87	-90.80	9.07	-90.18	9.69
	1m		-93.18	6.69	-91.06	8.81
3b	0m	-97.08	-90.90	6.18	-89.50	7.58
	1m		-98.13	-1.05	-91.30	5.78

黄色で塗りつぶした箇所は、キャリア 5G 停波時よりも数値が大きくなっている箇所を示しています。上記の表を確認すると、受信電力ではキャリア発射時の方が高い受信電力を得ている場合が散見されます。これらの測定ポイントに着目すると、いずれもキャリア基地局により近い場所で測定しているポイントであることが分かります。このことから、キャリア電波による干渉とは関係なく受信電力の差分が発生しているということが考えられ、キャ

リア電波の干渉による影響として受信電力は考慮する値にはならないと考えられます。

次に RSRQ と SIR/SINR についてまとめた表が下記になります。黄色で塗りつぶした箇所は、キャリア 5G 停波時よりも値が大きくなっている箇所を示しています。

表 3.3.51 各測定ポイントでのローカル 5G 電波品質

測定ポイント	キャリア 5G 端末との離隔距離	RSRQ (dB)					SIR/SINR (dB)				
		L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分	L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分
1a	0m	-10.39	-10.41	-	-10.46	-0.07	21.21	21.47	0.26	21.06	-0.15
	1m		-10.37	0.02	-10.29	0.10		21.16	-0.05	21.10	-0.11
2a	0m	-12.23	-10.45	1.78	-11.10	1.13	4.11	18.20	14.09	11.68	7.57
	1m		-10.49	1.74	-12.14	0.09		18.79	14.68	4.45	0.34
1b	0m	-10.83	-10.36	0.47	-10.55	0.28	20.10	20.46	0.36	20.54	0.44
	1m		-10.72	0.11	-10.51	0.32		15.25	-4.85	20.12	0.02
2b	0m	-11.35	-10.35	1.00	-10.50	0.85	18.63	20.45	1.82	20.18	1.55
	1m		-10.32	1.03	-10.68	0.67		20.04	1.41	20.06	1.43

仮にキャリア電波による干渉がある場合、RSRQ はキャリア停波時よりも低い値が確認される可能性があります。その観点で上記の表を確認すると、測定ポイント 1a(キャリア端末との離隔 0m)を除き、値が高くなっていることが分かります。

次に SIR/SINR について確認します。SIR/SINR についても RSRQ と同様にキャリア停波時よりもキャリアの電波が発射されているパターンで高い値になっていることが多く散見されます。

もし仮にキャリア基地局側の電波発射における干渉影響があるのであれば、RSRQ はキャリア停波時より値が低く、SIR/SINR も同様に低い値を得る結果となったと考えられます。

このことを踏まえて測定結果から考察すると、逆説的にキャリア基地局の電波発射における干渉影響はローカル 5G システムの受信品質には影響しないと考えられます。

次にキャリア基地局に一番近い測定ポイントの RSRQ、SIR/SINR を確認します。

表 3.3.52 3a/3b でのローカル 5G 電波品質

測定ポイント	キャリア 5G 端末	RSRQ (dB)					SIR/ (dB)				
		L5G	C5G+L5G	L5G	C5G+L5G	L5G	L5G	C5G+L5G	L5G	C5G+L5G	L5G

イント	との 離隔 距離	単体 (5G 停波)	片側	単体 との 差分	両方	単体 との 差分	単体 (5G 停波)	片側	単体 との 差分	両方	単体 との 差分
3a	0m	-	-10.06	1.02	-10.10	0.98	5.89	16.01	10.12	12.36	6.47
	1m	11.08	-10.65	0.43	-10.21	0.87		14.38	8.49	13.26	7.37
3b	0m	-	-10.39	0.17	-10.44	0.12	19.17	20.39	1.22	20.52	1.35
	1m	10.56	-10.47	0.09	-10.48	0.08		19.52	0.35	20.37	1.20

RSRQ について各測定ポイントで確認します。仮にキャリア電波による影響が強いのであれば、前述までのデータと違い、極端に RSRQ が低くなることも考えられます。しかしながら、上記の測定結果からキャリア 5G 電波停波時と電波発射時のそれぞれで比較してもキャリア 5G 電波発射時の方が値が高いことが確認されます。従って、キャリア 5G 基地局からの電波は RSRQ には影響しない、と考えられます。

またキャリア 5G 基地局に近づくにあっても、キャリア 5G 電波停波時とキャリア 5G 電波発射時でそれぞれの値で 2dB 以上の差分が出ないことから、この結果は測定誤差と考えました。

また SIR/SINR についても同様に確認します。キャリア電波が影響を及ぼすのであれば、これまでのデータと違い、SIR/SINR もキャリア基地局に近い 3a/3b で低い値が低くなる可能性が考えられます。しかしながら、上記の測定結果からキャリア基地局が近くともキャリア電波停波時より数値が高いことが確認されます。したがってキャリア基地局からの電波は SIR/SINR に影響しない、と考えられます。

上記より、電波品質が影響しないのであれば、通信品質（スループット・伝送遅延）にも影響しないのではないかと考えられます。

次にスループット・伝送遅延について測定結果を確認します。

表 3.3.53 1a/2a/1b/2b でのローカル 5G 伝送性能

測定ポイント	キャリア 5G 端末との離隔距離	上りスループット (Mbps)					伝送遅延 (ms)				
		L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分	L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分
1a	0m	27.20	40.80	13.60	41.00	13.80	43.00	42.00	1.00	41.00	2.00
	1m		40.80	13.60	40.90	13.70		41.00	2.00	41.00	2.00
2a	0m	37.60	41.00	3.40	40.30	2.70	40.00	42.00	-2.00	40.00	0.00
	1m		41.00	3.40	40.20	2.60		43.00	-3.00	40.00	0.00
1b	0m	18.30	18.40	0.10	18.40	0.10	41.00	40.00	1.00	41.00	0.00
	1m		18.40	0.10	18.40	0.10		39.00	2.00	41.00	0.00
2b	0m	18.10	18.40	0.30	18.40	0.30	48.00	45.00	3.00	41.00	7.00
	1m		18.40	0.30	18.40	0.30		47.00	1.00	40.00	8.00

測定結果より、キャリア 5G 電波発射およびキャリア 5G 基地局に近づくことによる影響によって、スループット低下及び伝送遅延の増加は確認できませんでした。逆にキャリア電波発射時のほうが良い結果になるケースも散見されることから、スループット・伝送遅延も同様にキャリア電波発射およびキャリア基地局が近い場合においても影響がないと考えられます。

これらのことから、キャリア 5G 電波の発射および、キャリア 5G 基地局に対する離隔は電波品質と同じく、通信環境に影響を及ぼさないと考えられ、このことを念頭に最もキャリア基地局に近い 3a/3b の測定結果を確認します。

表 3.3.54 3a/3b でのローカル 5G 伝送性能

測定ポイント	キャリア 5G 端末との離隔距離	上りスループット (Mbps)					伝送遅延 (ms)				
		L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分	L5G 単体 (C5G 停波)	C5G+L5G 片側	L5G 単体との差分	C5G+L5G 両方	L5G 単体との差分
3a	0m	40.90	40.80	-	41.10	0.20	41.00	41.00	0.00	41.00	0.00
	1m		41.00	0.10	41.00	0.10		41.00	0.00	40.00	1.00
3b	0m	18.10	18.10	0.00	18.10	0.00	40.00	41.00	-	41.00	-
	1m		18.10	0.00	18.20	0.10		42.00	-	40.00	0.00

上記の結果を確認するとキャリア停波・キャリア基地局に近くなることによるスループットおよび伝送遅延に影響がないことが確認できます。

次にキャリア 5G 端末との離隔距離に着目して考察します。キャリア 5G 端末との離隔距離 0m、1m での RSRQ、SNR 及び上りスループット、伝送遅延の比較を下記に示します。RSRQ、SNR については UE での測定データです。また、黄色で塗りつぶした箇所は端末の離隔距離を 1m に離した場合に数値が大きくなった箇所を示しています。

表 3.3.55 キャリア 5G 端末との離隔距離 0m と 1m の電波品質、伝送性能の比較

測定ポイント	キャリア 5G 端末との離隔距離	RSRQ (dB)		SNR (dB)		上りスループット (Mbps)		伝送遅延 (ms)	
		C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方	C5G+L5G 片側	C5G+L5G 両方
1a	0m	-10.36	-10.36	34.27	32.48	40.80	41.00	42.00	41.00
	1m	-10.36	-10.36	35.34	35.46	40.80	40.90	41.00	41.00
	0m と 1m での差分	0.00	0.00	1.07	2.98	0.00	-0.10	1.00	0.00
2a	0m	-10.57	-10.39	12.11	20.95	41.00	40.30	42.00	40.00
	1m	-10.51	-10.40	12.58	20.26	41.00	40.20	43.00	40.00
	0m と 1m での差分	0.06	-0.01	0.47	-0.69	0.00	-0.10	-1.00	0.00
3a	0m	-10.64	-10.65	10.90	9.72	40.80	41.10	41.00	41.00
	1m	-10.61	-10.84	11.29	8.03	41.00	41.00	41.00	40.00
	0m と 1m での差分	0.03	-0.19	0.39	-1.69	0.20	-0.10	0.00	1.00
1b	0m	-10.36	-10.37	27.73	27.79	18.40	18.40	40.00	41.00
	1m	-10.35	-10.38	27.69	27.55	18.40	18.40	39.00	41.00
	0m と 1m での差分	0.01	-0.01	-0.04	-0.24	0.00	0.00	1.00	0.00
2b	0m	-10.50	-10.38	14.63	22.85	18.40	18.40	45.00	41.00
	1m	-10.51	-10.38	16.88	23.07	18.40	18.40	47.00	40.00
	0m と 1m での差分	-0.01	0.00	2.25	0.22	0.00	0.00	-2.00	1.00
3b	0m	-10.41	-10.37	18.99	25.22	18.10	18.10	41.00	41.00
	1m	-10.50	-10.37	15.31	24.90	18.10	18.20	42.00	40.00
	0m と 1m での差分	-0.09	0.00	-3.68	-0.32	0.00	0.10	-1.00	1.00

上表を確認すると、キャリア 5G 端末を 0m から 1m に離した場合に、数値が上がった場合と、反対に数値が下がるといった両方の結果が得られています。この結果については数値の変動も小さく、測定ポイント及び基地局の発射パターンに依らないため、電波干渉による

影響とは考えにくいです。以上のことから、キャリア 5G 電波の干渉によるローカル 5G システムの電波品質・通信品質はない、と考えます。

ローカル 5G によるキャリア 5G の下り通信への干渉影響、キャリア 5G によるローカル 5G の上り通信への干渉影響は、ともに見られなかったことから、移動局間干渉、基地局間干渉はともになかったと考えられます。この結果は、基地局間干渉については、指向性アンテナの帯域内干渉以外のパターンにおいては実測値シミュレーション結果と一致するものとなりました。一方で、移動局間干渉については、全てのパターンで実測値シミュレーション結果と異なる結果となりました。このことから、シミュレーションは今後も更に精査を行う必要があると考えます。

また、今回の実測データから、干渉影響による伝送性能の悪化は確認できませんでしたが、ローカル 5G 端末の上りスループットについては本実証にて求められる所要性能を達成することができませんでした。上述のことから基地局間干渉、端末間干渉による影響は無かったため、要因は「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」で述べているとおりであると考察します。

3.3.5 その他のテーマ

3.3.5.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

本実証では外部アンテナの利用によるエリア構築の効率化の検証を行いました。外部アンテナを利用することにより、無指向性アンテナの基地局にも指向性を持たせたり、高利得でカバー範囲を広げたりすることが可能になると考えられます。外部アンテナは免許申請が必要かつ、基地局と組み合わせた登録点検や技術基準適合証明等の取得が必要になり、3.3.3 項で実証する反射板と比べると導入・運用のコストがかかります。しかし反射板と違い、特定のポイントに電波を届かせることが可能であり、逆に近隣に他の無線運用者がいた場合に電波の方向を限定することで不要な干渉調整を減らすことも可能と考えます。

本実証ではローカル 5G 基地局 B に指向性を持たせたセクターアンテナを外部アンテナとして利用し、カバーエリアの拡張及び特定方向以外への電波伝搬が抑制されていることの確認と、有効性の検証を行いました。

(2) 実証目標

本実証の目標は以下の 2 点を設定しました。

- ① 特定の方向に、通常の基地局設置よりもカバーエリアが拡大していること。
- ② 特定の方向以外への電波伝搬が抑えられていること。

①については本実証で利用するローカル 5G 基地局 3 基のうちローカル 5G 基地局 A・C

に無指向性の RU を、ローカル 5G 基地局 B に外部アンテナ付き RU を設置しました。ローカル 5G 基地局 B に無指向性の RU を設置した場合の想定カバーエリアはシミュレーションにて算出することとし、そのシミュレーション結果を実測データと比較することで検証します。なお、外部アンテナのカバーエリアについては「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」にて取得した閾値の実測ポイントのデータや図を利用します。

②については無指向性の RU を利用した場合にカバーエリアとなっていたと考えられる背面方向にて受信電波を測定し、電波伝搬が抑制されていることを確認します。

3.3.5.2 実証仮説

本項としての仮説は以下 2 点とします。

(1) 無指向性の RU 設置と比較し、特定方向へエリア拡張することが可能

本実証で利用する外部アンテナは、水平面に 55 度±10 度のビーム幅で電波を送信します。また、アンテナ利得は通常の RU が 5dB であるのに対し、外部アンテナは 17.5dB と高利得で電波送信することができます。そのため、通常の RU と比較して、外部アンテナを使った場合にはカバーエリアが拡張できると想定しました。また、カバーエリア及び調整対象区域閾値の実測ポイントは「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」にて明らかになっていることから、実際の比較にはこのデータを利用して行うこととします。

表 3.3.56 外部アンテナ (セクターアンテナ) 諸元表

型名: VH65A-3545RTD					
周波数範囲 [MHz]	3400-3600MHz	3600-4100MHz	4500-4600MHz	4600-4800MHz	4800-5000MHz
偏波面	垂直偏波, 水平偏波				
利得	初期チルト17.3dBi以上 可変時16.8dBi以上		初期チルト17.5dBi以上 可変時17.0dBi以上		
水平面内指向性 ビーム幅	65° ±10°	60° ±10°		55° ±10°	
垂直面内指向性 ビーム幅	9° ±1°	8.5° ±1°	7.5° ±1°	7° ±1°	6.5° ±1°
定在波比	1.5以下				
ビームチルト	電気チルト可変式(AISG2.0準拠)				
	初期チルト:10° 電気チルト可変範囲:±5°				
入出力インピーダンス	50Ω				
耐電力	1端子当たり120W				
入出力端子	N-J × 2				
耐風速	75m/s				
質量	3.8kg以下(アンテナ本体)				
寸法	φ105mm × 550mm(コネクタ除く)				
取付金具	取付径:80A~125A 機械チルト:±5°				

(2) 特定の方向以外への電波送信を抑制可能

圃場 2 以外のエリアへの電波送信は本実証として求めるものではなく、電波抑制を行うべきであると考えます。下図のとおり、水平面では特定の方向以外にはほとんど電波を送信しません。受信電力を測定し、特定の方向以外への電波抑制ができていることを確認します。

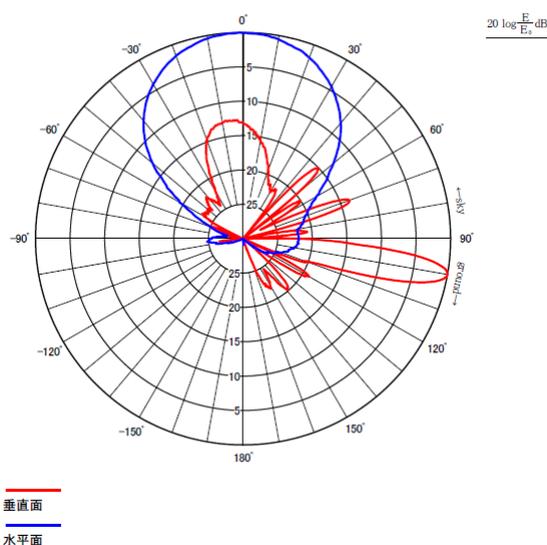


図 3.3.83 外部アンテナ放射パターン

3.3.5.3 評価・検証項目

目標 2 点についてそれぞれ以下の項目において評価・検証を行いました。

①については、エリア算出法に基づき無指向性の RU 利用時のカバーエリアを作成し、外部アンテナ利用時の受信電力と比較しました。特に外部アンテナの指向性により特定方向のカバーエリアが拡張されることを確認するためにエリア算出式のエリア端と外部アンテナ利用時のエリア端とを比較し、作図しました。

②については設計したカバーエリア以外への電波伝搬が抑制されていることを確認するために RU 背部にて受信電力を測定し、閾値以下の受信電力しか測定できないことを確認しました。

3.3.5.4 評価・検証方法

(1) 無指向性の RU を設置した場合の想定カバーエリアと外部アンテナ利用時の実測値の比較については以下の方法で行いました。

工程	実施内容	対応図表
1	エリア算出法を基にしたエリアシミュレーションにより、無指向性の RU 利用時のカバーエリアを算出・図示	図 3.3.81
2	無指向性の RU のエリアシミュレーション上の閾値のポイントで外部アンテナ利用時の受信電力を測定し、無指向性の RU の受信電力を上回っていることを確認	図 3.3.82
3	外部アンテナ利用時の閾値実測ポイント（「3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定」にて取得したデータを利用）と無指向性の RU 利用時のエリアシミュレーションを比較し、外部アンテナ利用時のカバーエリアが拡張していることを確認する	

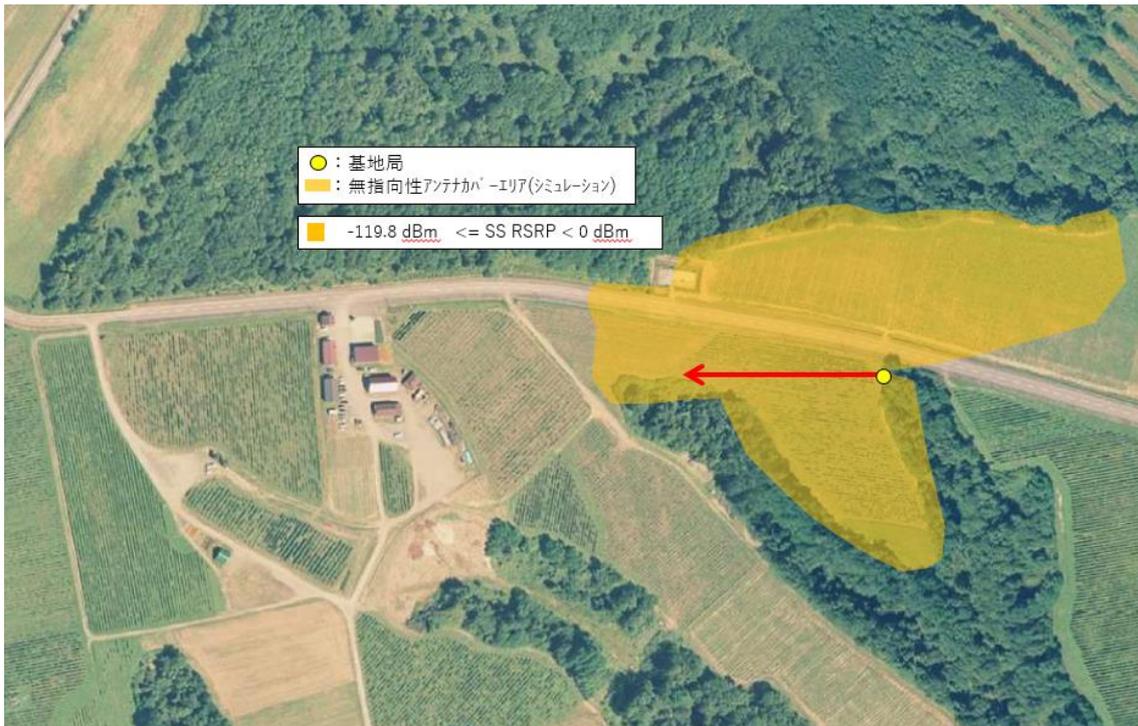


図 3.3.84 無指向性アンテナを持つ RU 利用時の想定カバーエリア
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

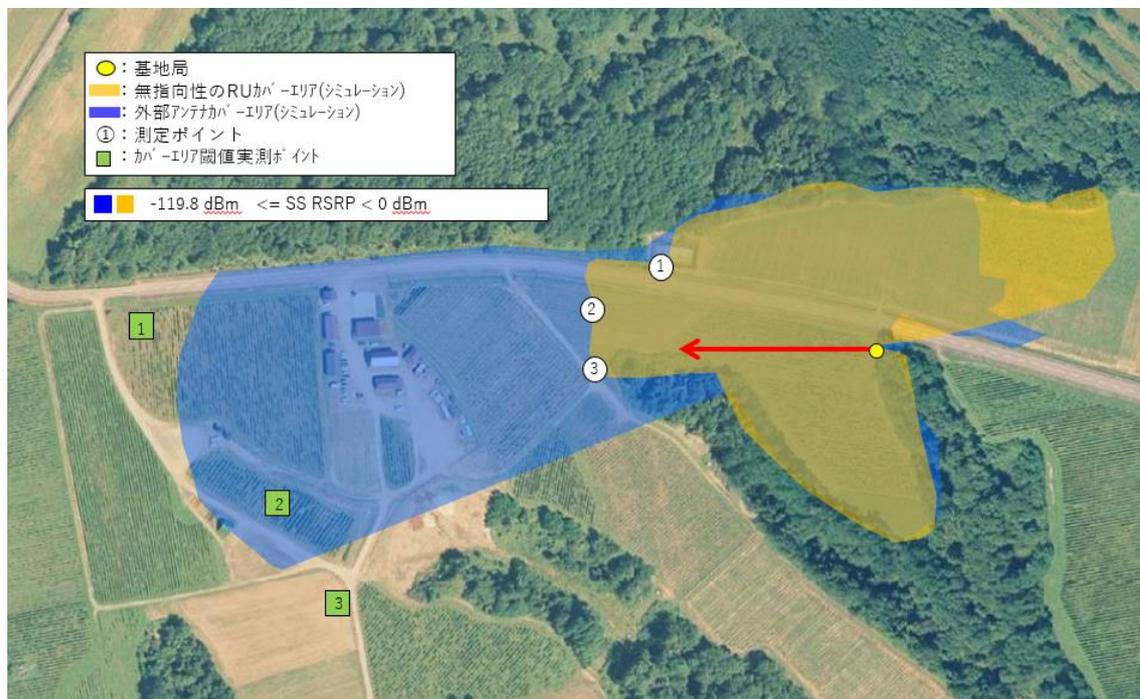


図 3.3.8576 無指向性の RU 利用時の想定カバーエリア閾値ポイントでの実測値と外部アンテナ利用時のカバーエリア閾値測定ポイントと比較
 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

(2) 特定方向以外への電波伝搬抑制を確認は以下の方法で行いました。

工程	実施内容	対応図表
1	エリア算出法を基にしたエリアシミュレーションにより、無指向性のRU利用時のカバーエリアおよび調整対象区域を算出・図示	図 3.3.83
2	特定の方向以外のポイントで受信電力を測定し、カバーエリア閾値以下であることを確認	図 3.3.84

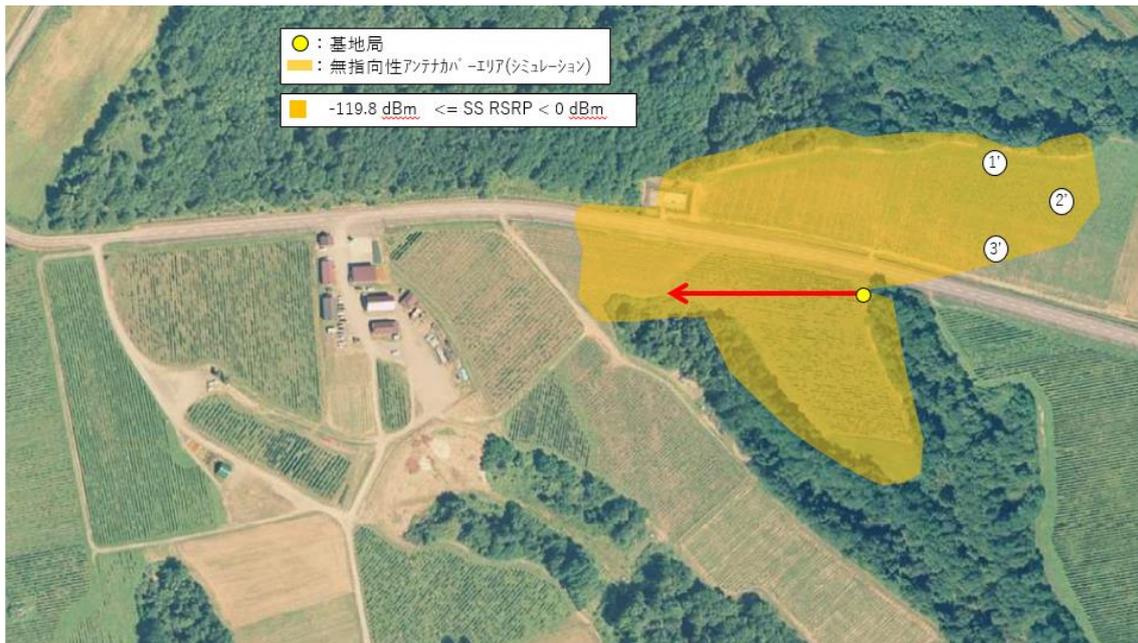


図 3.3.86 外部アンテナ送信方向以外のポイントでの受信電力測定
(国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

3.3.5.5 実証結果及び考察

本実証では、水平方向に電波を伝搬させるため、機械チルトを 0° 、電気チルトを 5° としました。まず、無指向性のRU利用時と比較した外部アンテナ利用時の拡張範囲及び電波伝搬抑制範囲の比較を以下行います。

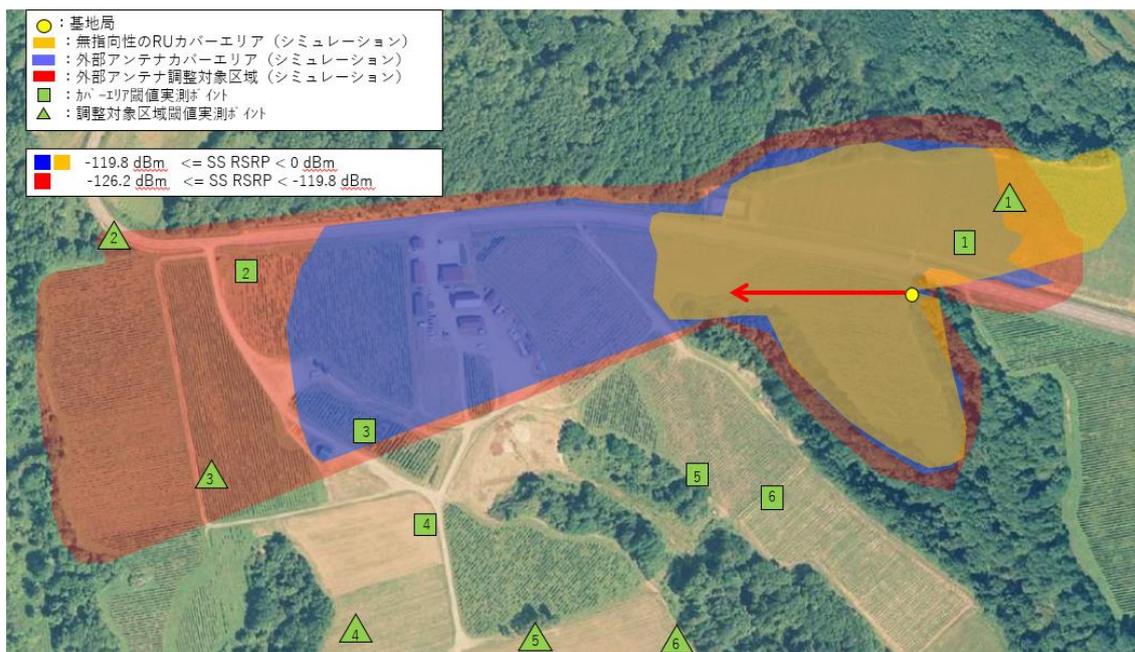


図 3.3.87 無指向性の RU 利用時と外部アンテナ利用時のカバーエリア範囲の比較 (国土地理院 (電子国土 Web) (URL : <https://maps.gsi.go.jp/>) のデータを使用して作成)

上図より、カバーエリア閾値実測ポイント及び調整対象区域閾値実測ポイントが、シミュレーション上での無指向性の RU カバーエリアよりも、外部アンテナのもつ指向性の方向に広い範囲に位置しており、また指向性アンテナの背面側では狭い範囲に位置しています。これは、指向性をもった外部アンテナの導入により、カバーエリア及び調整対象区域が指向性に準ずる方向に対して拡張され、指向性を持たない方向に対しては縮小されていることを示しています。

また、上図 3.3.80 と上図 3.3.81 における無指向性の RU 利用時のカバーエリア閾値実測ポイント 1~3 および、外部アンテナ送信方向以外のポイント 1'~3'における受信電力の中央値、平均値は下表のとおりです。

表 3.3.57 測定ポイント 1~3 および 1'~3'の比較

測定ポイント	RSRP(dBm)		測定ポイント	RSRP(dBm)	
	中央値	平均値		中央値	平均値
1	-103.70	-104.05	1'	-130.80	-131.15
2	-96.60	-96.68	2'	-126.20	-126.37
3	-105.10	-105.16	3'	-119.20	-119.03

この表から、いずれのポイントにおいても外部アンテナの指向性方向に位置する測定ポイント 1~3 の方が高い受信電力値をもつことが確認できます。以上のことから、外部アンテナの指向性によって特定方向へのカバーエリア及び調整対象区域の拡大、特定方向以外への縮小が示唆されます。

次に、外部アンテナ利用に適する条件を以下考察いたします。

本実証フィールドは中山間地域に位置する圃場であり、その広大なフィールドをカバー

するために外部アンテナを用いた実証を行いました。本実証環境下において、カバーエリア及び調整対象区域は仮説通りに、特定方向に拡大され、特定方向以外の方向について抑制されたことを確認できました。このことから、外部アンテナ利用が有効となる条件は以下のようによまとめられます。

- 開放地であり遮蔽の少ない中山間地域において、特定方向に対して広範囲に電波を飛ばしたい場合
- 開放地であり遮蔽の少ない中山間地域において、特定方向に対して電波が飛びすぎて欲しくない場合
- 無指向性の RU のように敷地の中心に設置する必要がなく自由度が高い設計をしたい場合
- 機械チルトおよび電気チルトが変えられるため、エリアの広さを可変したり、地面の傾斜等に合わせてエリアの調整をしたい場合

指向性を持った外部アンテナを利用することによるカバーエリア及び調整対象区域の拡大、抑制について、遮蔽物の多い郊外や市街地でも同等の効果が得られるかについては、その環境条件を持つフィールドにて検証を行う必要があると考えます。

4. ローカル 5G 活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）

4.1 実証概要

第 1 章で述べた通り、農業分野全体の課題である熟練作業者の高齢化と減少、後継者不足の深刻化に加え、果樹農業における農薬散布や除草作業は実施回数も多く、作業者の健康被害も指摘されているなどの事情も加わり、栽培技術の承継と果樹農業の継承をより一層困難にしています。

農業従事者の高齢化、新規就業者の減少による労働力不足・技術継承の危機・収益力低下といった課題の対応として、「ロボットによる省人化および遠隔監視制御技術」や「データ駆動型の栽培技術」が高まっている一方で、例えば産業機械の無人ロボットでは遠隔監視制御による安全確保が大事なことから、低遅延ネットワークを活用した監視制御が必要不可欠です。また今後 ICT 技術を活用したデータ駆動型栽培方法では多種多様、高品質、大容量なデータが要求されます。これら状況を鑑み、超高速・超低遅延・多数同時接続といった特長をもつローカル 5G を用いた実証を行いました。

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

イシューツリー

将来像	地域課題	課題解決策	今回実証	解決策の評価			付加価値
				モニタ項目	モニタ指標	評価方法	
世界に先駆けた醸造用果樹栽培のスマート化および 中山間地果樹栽培の体系化・活性化	作業者の高齢化や減少、特に中山間地では集落人口の減少による働き手不足	<ul style="list-style-type: none"> ロボットによる省人化 監視制御の効率化 	<ul style="list-style-type: none"> 無人走行EVRロボ(既存) *ローカル5G制御 EVRロボット 監視制御切替 広域遠隔監視センタ 多地点映像配信 	カメラ+センサーによる安全走行監視	遠隔から1m以内の緊急停止とセンサーでの停止	遠隔停止試験(映像遅延測定) センサー停止試験	熟練作業や失敗映像を録画・分析(データセットの作成)
	除草剤を利用できないため、増加する除草作業の件数削減対策。防除作業の健康被害対策	<ul style="list-style-type: none"> 草刈・防除作業の無人化 		複数台同時監視の映像画質・動作	遅延・ブロックノイズが発生しないこと	映像品質の官能検査(作業従事者)	
	未熟練者・臨時雇用労働者へ時間をかけて栽培技術を伝えるのに反復指導が必要 指導時の3密対策	<ul style="list-style-type: none"> 効率的な指導ツールの提供 	ウェアラブルデバイス(スマートグラス)	<ul style="list-style-type: none"> 未熟練者への集団オンライン指導 複数圃場と会議・指導 	<ul style="list-style-type: none"> 遅延・ブロックノイズが発生しないこと 遅延・ブロックノイズが発生しないこと 	<ul style="list-style-type: none"> 映像品質の官能検査(作業従事者) 映像品質の官能検査(作業従事者) 	
	新規の醸造用ブドウ生産者が参入しても、栽培技術が体系化されておらず、収量・品質の格差が生じる	<ul style="list-style-type: none"> データ駆動型農業(栽培管理システムと生育関連データの活用) 	<ul style="list-style-type: none"> IoTセンシング 虫害検知AI 栽培管理システム 	<ul style="list-style-type: none"> 高精細カメラによる虫撮影と害虫AI判定集計 果樹向け営農データ管理 	<ul style="list-style-type: none"> 判定精度が90%以上 各種データ投入統計管理・表示ができること 	<ul style="list-style-type: none"> 判定結果集計 アンケート評価(作業従事者) 	

図 4.2.1 イシューツリー

イシューツリーに表されるように、本コンソーシアムが目指す将来像は世界に先駆けた醸造用ぶどう栽培のスマート化とそれによる中山間地果樹栽培の生産性向上および中山間地果樹栽培の体系化および活性化です。また地域の課題点としても、人口減少・高齢化に端を発し担い手不足であるにも関わらず、除草・防除作業など果樹栽培特有の人手作業が残存し、その健康被害も見逃せません。現在の我が国の高品質な果実生産は、果樹生産者の労力と時間をかけた手作業によって支えられています。加えて、労働ピークが摘果や収穫時の短期間に集中しており、その時期に臨時的な雇用を確保することが必要となっています。醸造用ぶどう栽培においても、労働力を補うために臨時労働者を雇用が必要となりますが、反復指導が必要なこと、コロナ禍により長時間・集団指導に制限があること、スキルが身につく頃に雇用期限を迎えるなど思うような成果に至っていないのが現実です。また、醸造用ぶどうの栽培管理手法は未だ体系化されたものは少なく、病虫害予防といった課題もあり、その収量・品質にばらつきが生じています。このため、後述しますが、本実証で上記の将来像の達成に向けた取組みが併せて地域課題解決に向けた取組になるよう実証を進めました。

4.2.1 前提条件

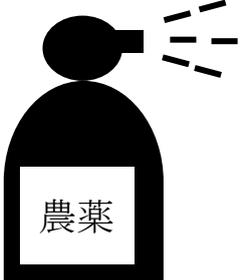
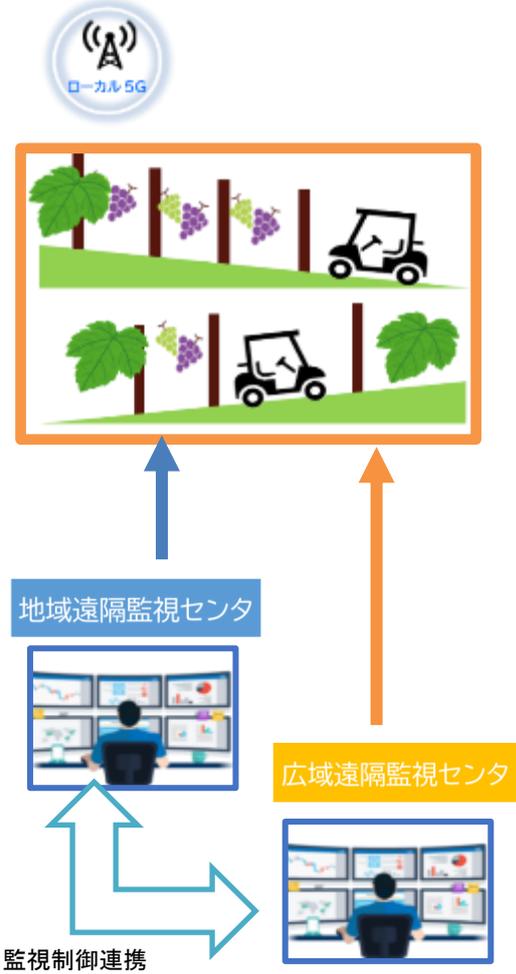
本実証では、自治体・北海道ワイン株式会社等をはじめとする、本実証コンソーシアムメンバー関係者への事前ヒアリング等を行い、実証地域における課題等について整理するとともに、当該地域が抱える課題解決に資する最も効率的なシステムの検討を行いました。

① リモートEVロボット・コントロールシステム

既に水稲・畑作ではスマート農機（ロボットトラクター、自動アシストコンバイン等）の遠隔監視制御による自動運転実証が進められていますが、中山間地でのスマート農機については、傾斜での安定した通信環境の確保や走行時の安全性という面で、まだ十分な実証が行われてはいません。

垣根式の醸造用ぶどう果樹園は、水稲の圃場と比べると傾斜地が多く、また、狭い樹体の隙間を走行することになるため運転者の疲労が大きく、農薬散布の回数も多いため作業者の健康被害も懸念されます。このような状況を打破すべく、地球温暖化対策にも効果的な電気自動車をベースとした作業ロボット（以下、EVロボット。本実証では草刈・防除ロボット）を遠隔監視制御により無人で動かす「リモートEVロボット・コントロールシステム」を、低遅延・広帯域なローカル5Gを活用したソリューションとして検証しました。

表 4.2.1 リモートEVロボット・コントロールシステム検証内容

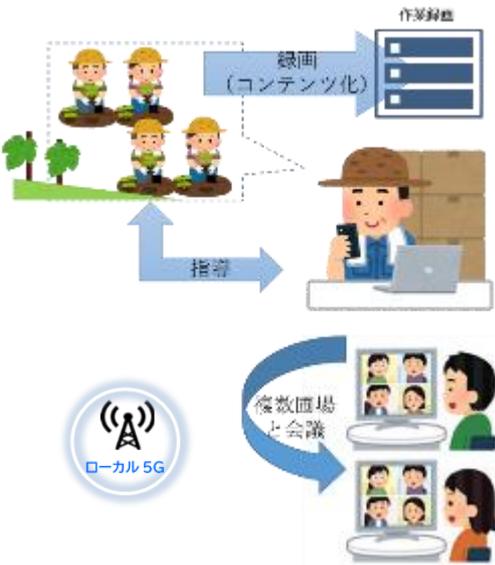
課題	ソリューションによる解決
<ul style="list-style-type: none"> ・ 労働力不足 ・ 高齢化 ・ 健康被害  	<ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔監視制御下でEVロボット自動作業《草刈・防除》 ・ 遠隔監視センター間の連携 

② スマートガイドシステム

果樹における整枝・せん定、摘果、収穫等は直接的な機械化が困難な作業でもあり、将来的にはAIやロボット等の進展で自動化・高度化が進むことが期待されることです。現時点では、臨時の雇用者などで人的リソースを確保し集中的に作業をする必要があるため、臨時の雇用者が短期で作業スキルを習得あるいは作業スキルの高度化を図る仕組みの整備が生産性向上に繋がります。

指導者がスマートデバイス等を通じ、リモートでの未熟練者指導、または指導者同士で圃場状態や果樹の高画質な映像等をやりとりするスマートな栽培指導の実現に向け、ローカル5Gの「大容量」「同時多接続」による効率的な指導手法を検証しました。

表 4.2.2 スマートガイドシステム検証内容

課題	ソリューションによる解決
<ul style="list-style-type: none"> 圃場現場で指導の反復 (複数対象・複数圃場) スケジュール繁忙 教育コンテンツ不足 指導時の3密対策が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 圃場現場の往来不要 多人数同時指導 複数圃場と同時会議 録画による指導コンテンツ化 指導時の3密対策が可能
 <p>The illustration shows two workers in a field planting seedlings, and a group of people in a meeting room discussing documents.</p>	 <p>The diagram illustrates the solution: a worker in a field is connected via '録画 (コンテンツ化)' (Recording/Content Creation) to a central server. This server provides '指導' (Guidance) to multiple workers in the field. Simultaneously, it enables '複数圃場と会議' (Multiple Fields and Meetings) via 'ローカル5G' (Local 5G) technology, allowing for simultaneous remote guidance and meetings.</p>

③ IoT センシングシステム

他の農作業と同様に、醸造用ぶどう果樹栽培においても病虫害対策は重要な課題の一つです。本実証では、病虫害に関するセンシングテーマとして、EVロボット車体に高精細カメラを設置し画角に現れる病虫害の予兆（枝・葉・房、虫など）のAI判定検出を行い、予兆の種類判別と集計をタイムリーに実施しました。また、閾値超えの際に即座にアラートを発出することで、病虫害によるロス果を減少させることを目指しました。映像をリアルタイムでAI判定集計するためには、高精細画像をエッジコンピュータに送信するため、大きな

帯域を利用する可能性があることから、ローカル 5G の「大容量性」により検証しました。

表 4.2.3 IoT センシングシステム検証内容

課題	ソリューションによる解決
<p>タイムリーな草刈防除のタイミング判断による病虫害等の対策</p> 	<p>高精細画像の AI による病虫害可能性の通知</p> 

醸造用ブドウ栽培では、年間を通じて繰り返し実施する草刈・防除作業が、長時間にわたる農機の運転による疲労だけでなく、薬剤の吸入による健康へのリスクもあることから、ロボット活用による無人作業の導入が期待されております。

一方で、新規就農者や臨時雇用者などの作業経験が少ない未習熟者を早期に育成する必要がありますが、現状、未習熟者へ簡単な資料による作業説明と、圃場で指導者が手本を見せて教えることでの、マンツーマン指導形態となっており、指導者は多くの時間と期間を費やしています。

また、醸造用ブドウ栽培では、DX 導入が比較的遅れているとの声もきいております。これは、水稲・畑作では市販パッケージとして多くの「栽培管理システム」が提供されていますが、栽培体系の異なる醸造用ブドウ栽培には利用し難いことが要因となり、既存の紙管理からの脱却が進まないという課題があるためです。

生産者からは新規就農者が醸造用ぶどう栽培に参入にしやすいするためには、勘と経験で行う農業から、気象データや IoT センサーなどを活用したデータ駆動型栽培の導入は今後必須と思われるとのコメントも頂いております。

また本実証の方向性について、北海道ワイン(株)の直轄農場でもある能登ヴィンヤード等の関係者へもヒアリングした結果、「高品質な国産醸造用ぶどうの国内ニーズは高く、輸出品目としてのポテンシャルも高い一方で、農家数の減少や、高齢化、技術継承の危機といった課題が多く存在する。これらの課題を解決するためロボットによる遠隔監視制御技術や AI、センシングを活用したデータ駆動型の栽培技術の実用化には高い期待を寄せている。」とのコメントを頂いており、本実証が地域課題解決に沿っていることを確認しました。

なお、本実証は、令和 3 年度農水省スマート農業実証プロジェクトとの連携事業として課題解決システムの実証をしております。

表 4.2.4 総務省事業と農水省事業における検証項目・費目概要整理表

課題解決システム	実施事業	検証項目 (概要)	予算支出項目 (概要)
1. リモートEVロボット・コントロールシステム	総務省	ア. 効果検証 ①EV ロボット遠隔監視制御 ・発信、停止、緊急停止 ②EV ロボットの安全性 ・緊急停止時の制動距離 ③映像監視 ・映像品質 ④複数施設遠隔監視 ・制御の切り替え イ. 機能検証 ①EV ロボット・コントロール ・推奨通信環境 ・カメラ映像伝送品質機能 ②監視センター ・監視拠点間制御切替機能 ・設置環境・映像配信 ③多地点配信サーバー ・正常な映像配信送受信 ウ. 運用検証： ①EV ロボット・コントロール ・事前準備、使用後作業 ・不具合時対応 ②監視センター ・監視制御操作	・EV ロボット遠隔制御システム ・EV 車両運搬費
	農水省	①ローカル 5G を用いた EV ロボットの遠隔監視制御による無人走行実証 無人 EV ロボットの遠隔監視制御による草刈・防除作業の稼働削減効果の実証	・EV 本体/作業機 (一体型)
2. スマートガイドシステム	総務省	ア. 効果検証 ①多地点配信 ・映像品質 ・録画映像品質 ②オンライン指導 ・スマートグラスの操作、機能、 ・スマートグラスの映像品質、音質 ・コミュニケーションのしやすさ イ. 機能検証 ①スマートグラス	・システム機器費 ・センター施設設備費

		<ul style="list-style-type: none"> ・バッテリーの持ち時間 ・着脱形式 ・視認性 <p>②多地点サーバー</p> <ul style="list-style-type: none"> ・正常な映像配信送受信 <p>ウ. 運用検証</p> <p>システム一式（多地点サーバー、録画サーバー、スマートグラス）</p> <p>メンテナンス</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用手順 ・故障時対応 	
	農水省	<p>②果樹営農コミュニケーションによる指導者の稼働削減</p> <p>スマートガイドシステムによる指導者の指導稼働削減効果の実証</p>	
3. IoT センシングシステム	総務省	<p>ア. 効果検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ AI による害虫分析精度 ・ 閾値越えのアラート検知精度 <p>イ. 機能検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 長距離通信機能 ・ 太陽光発電機能 ・ 表示機能（データやグラフ表示機能） <p>ウ. 運用検証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 使用手順 ・ 故障時対応 	
	農水省	<p>③IoT センシングと AI 病虫害判定カメラ活用によるロス果削減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ IoT センシングと AI 病虫害判定カメラ活用によるロス果削減効果の実証 <p>④栽培管理システムによるデータ記録・集計作業の稼働削減</p> <p>栽培管理システムによるデータ記録・集計作業の稼働削減効果の実証</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ IoT センサー機器費 ・ AI カメラ機器費 ・ 栽培管理システム構築費 ・ GIS システム構築費

4.2.2 実証目標とソリューション概要

本実証は、2章に述べた自治体等の地域課題をモデルケースとした、スマート農業導入による中山間地果樹栽培における課題解決に向けたローカル 5G を利用した情報システムの構築・運用を実施し、効果の検証、または構築・運用上の課題把握を目標としています。

4.2.2.1 ①「リモートEVロボット・コントロールシステム」

草刈作業や防除作業等による、労働者の稼働負担や健康被害の低減に資する、電気自動車をベースとした無人作業ロボット（以下、EV ロボット）の走行動作の実証を行いました。ローカル 5G の「低遅延」の特徴を活かした遠隔からの映像監視による緊急停止動作、および複数拠点からの遠隔監視制御による柔軟な運用体制等の検証を実施しました。

4.2.2.2 ②スマートガイドシステム

指導者の業務繁忙を解決すべくスマートデバイス等を通じ、リモートで複数人への未熟練者指導（新型コロナウイルス対策としても有効）、または指導者同士で圃場状態や果樹の高画質な映像等をやりとりするなど効率的・省力的な栽培指導の実現に向け、ローカル 5G の「大容量」「低遅延」による効率的な指導手法を検証しました。

また指導の効率化を進めるため、事前学習のための映像教育コンテンツの作成・活用の有効性についても検証しました。

4.2.2.3 ③IoT センシングシステム

病虫害によるロス果を減少させるため、タイムリーに草刈・防除を行うことを狙いとし、EV ロボット車体に高精細カメラを設置、多数の高精細画像をローカル 5G の「大容量性」によりエッジコンピュータに送信し病虫害の予兆の AI 判定を行い、リアルタイムな予兆の種類判別と集計について検証しました。

4.2.3 調査検討事項と実証目標

本実証では、構築した実証環境において効果、機能面、運用面等の観点から検証しました。いずれの事項においても、検証にあたっては技術的課題や社会実装を想定した場合の運用に係る課題について検討しました。

実証目標は、ユーザー企業等における着実な実装を目指す観点から、R3 年度の本実証および、連携する R3-4 年度のスマート農業実証（農研機構）の期間での「生産者のコスト低減、収量・品質向上等についての目標」ならびに、「社会実装を目指した実証中長期目標・マイルストーン（案）」を下記に示します。下記の目標を達成するために、各ソリューションにおける目標値をそれぞれ設定し実証致しました。

表 4.2.5 生産者のコスト低減、収量・品質向上等についての目標
 (農研機構：ローカル 5G を活用した中山間地における果樹農園のスマート農業実証)

①	草刈・防除作業の遠隔監視制御による無人 EV ロボット走行による稼働削減 (ア) 草刈→ 農作業の稼働 55%削減 (イ) 防除→ 農作業の稼働 42%削減
②	果樹営農コミュニケーションによる指導者の稼働削減 (ア) 映像コンテンツとリモート指導による指導者の稼働 50%削減
③	高精細 AI カメラによる病虫害判定などの IoT センシングと栽培管理システムによるデータ活用 (ア) 病虫害によるロス果の 50%削減 (イ) 日報データ記録・集計稼働 80%削減

表 4.2.6 社会実装を目指した実証中長期目標・マイルストーン

社会実装を目指した実証目標 (中長期)	R3年度	R4年度	R5年度	R6年度	R7年度
1 システム①②③の構築	←→				
2 システム①②③の運用試験	←→				
3 運用試験の課題整理・対策立案	←→				
4 実作業での実証試験・効果測定		←→			
5 実証試験の課題整理・対策立案		←→			
6 システム改良			←→		
7 他スマートロボット開発との連携 (自動走行支援AI、収穫AI、剪定AI等)			←→		
8 ソリューションシステム統合・ビジネス基盤化 (社会実装ゴールを目指す)				←→	

4.3 実証環境

本実証では、フィールドとする中山間地域として、北海道でも有数の醸造用ぶどう産地である空知地方の鶴沼ワイナリー（北海道樺戸郡浦臼町字オサツナイ 428 番地 17）および後志地方の後志ヴィンヤード（北海道余市郡仁木町東町 2 丁目 55 番 1）を選定し、高低差や傾斜のある果樹園でローカル 5G（4.7GHz 帯）基地局を活用した実地検証（安定した回線環境等の確認）を行い、その結果を評価・分析するとともに、前章の調査結果等も踏まえ、中山間地域（果樹園）におけるローカル 5G の活用可能性、具体的な活用方法を整理しました。

北海道ワイン株式会社の契約する 3 か所の圃場はそれぞれ特色があり、鶴沼ワイナリーは、樹齢 10 年などの樹体で、臨時の雇用者を多く使う作業形態、後志ヴィンヤードは、樹齢 0.3 年の若い樹体であり、新規農園就業者が就業直後に行う作業形態に類似します。余市町の契約農家の農園は、熟練作業者が高品質な生食用ぶどうを生産しており、棚式ぶどう栽

培における EV ロボット走行の検討において協力をいただきました。
課題実証を実施する主たる場所は、図 4.3.1 の通りです。

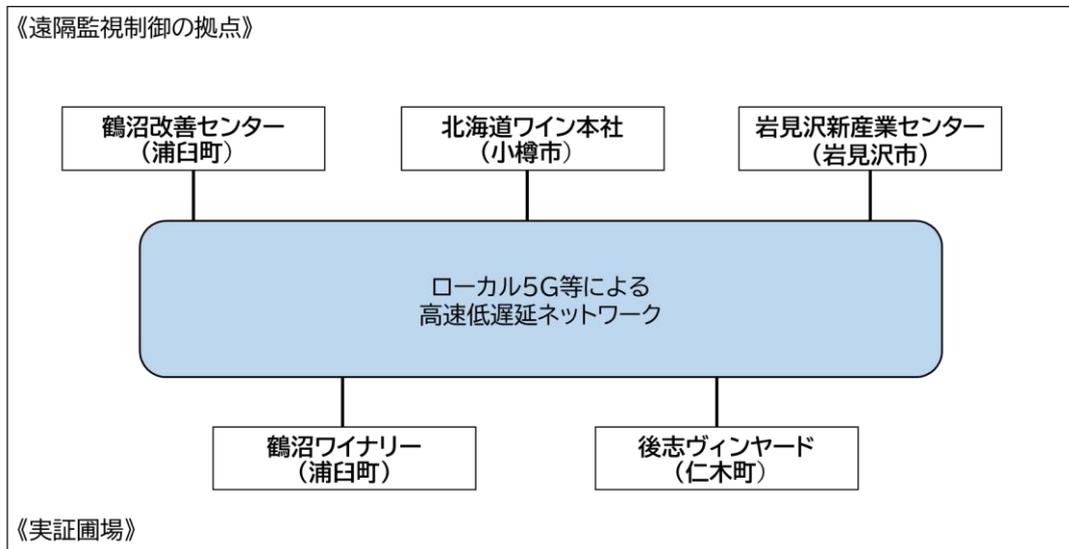


図 4.3.1 実証環境の全体図

4.3.1 鶴沼ワイナリー



図 4.3.2 実証地域および実証場所（鶴沼ワイナリー）
（出典：国土地理院地図 地理院地図）



図 4.3.3 鶴沼ワイナリーの実証圃場と面積
(出典：国土地理院地図 地理院地図)



図 4.3.4 鶴沼ワイナリー ローカル 5G アンテナ
(左写真：圃場 1、右写真：圃場 2)



図 4.3.5 反射板設置（圃場 2）

4.3.2 後志ヴィンヤード



図 4.3.6 実証地域および実証場所（後志ヴィンヤード）
（出典：国土地理院地図 地理院地図）

後志ヴィンヤード 北海道余市郡仁木町東町2丁目



図 4.3.7 後志ヴィンヤードの実証圃場と面積
（出典：国土地理院地図 地理院地図）



図 4.3.8 後志ヴィンヤード ローカル 5G アンテナ



図 4.3.9 模擬環境実証予定場所（後志ヴィンヤード）

4.3.3 鶴沼改善センター

EV ロボットの遠隔監視センターは実証場所の一つである鶴沼ワイナリーの所在地である浦臼町にある「鶴沼改善センター」（北海道樺戸郡浦臼町字オサツナイ 300-20）に新設しました。同施設は今後の実演デモや視察対応を考慮し、浦臼町役場にも近く、メインの実証場所である鶴沼ワイナリーからは 4km ほど離れた中間に位置しています。



図 4.3.10 鶴沼改善センター外観



図 4.3.91 鶴沼改善センター ホール(遠隔監視用モニター)



図 4.3.12 遠隔監視用ホール入口（鶴沼改善センター）



図 4.3.13 鶴沼改善センター内設置ラック

4.4 実証内容

本実証では、課題の解決等に資するローカル 5G を用いた、①「リモート EV ロボット・コントロールシステム」、②「スマートガイドシステム」、③「IoT センシングシステム」の 3 つのソリューションシステムについて、検証を実施しました。

4.4.1 ローカル 5G を用いたソリューションの有効性等に関する検証

4.4.1.1 効果検証

(1) リモート EV ロボット・コントロールシステム

1) 評価・検証項目

ローカル 5G ネットワークを使用したソリューションの有効性を評価するため、EV ロボットを遠隔から監視・制御するシステムにおけるローカル 5G の低遅延性が有効と想定される、遠隔からの走行制御、映像監視についての検証を実施しました。

遠隔から実施可能な項目は、EV ロボットの発信、停止動作の遠隔操作、および動作状態、安全確認を行うための映像監視のため、この 2 項目について、動作の正常性について評価するとともに、映像監視による異常検知時の安全性について評価しました。

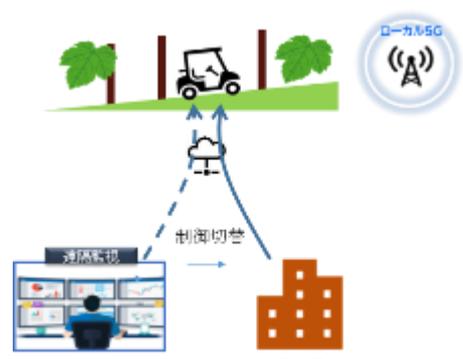
動作の正常性については、EV ロボット単体での動作確認、複数台での動作確認、複数拠点における同時複数台での動作確認を実施しました。

安全性確保については、遠隔監視映像により障害物等の危険を検知し緊急停止するケースを想定し、遠隔監視映像で疑似的な停止タイミングを発生させ、映像確認による緊急停止時の停止距離を計測しました。

また、遠隔監視・制御の効率的な管理環境の構築を想定し、複数の遠隔・監視拠点間で、運用を連携する構成についての動作正常性を評価しました。

表 4.4.1 評価・検証項目

評価項目	対象圃場・監視センタ
<p>EV ロボット・1 台遠隔制御 1 台の EV ロボットで走行を実施し、遠隔制御（発信・停止等）の正常性を評価します。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◆圃場 鶴沼ワイナリー ◆監視センター 鶴沼改善センター
<p>EV ロボット・1 台遠隔制御（緊急停止） 1 台の EV ロボットで走行を実施し、制御（緊急停止）の正常性と停止時の停止距離を評価します。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◆圃場 鶴沼ワイナリー ◆監視センター 鶴沼改善センター
<p>EV ロボット・2 台同時遠隔制御 2 台の EV ロボットで走行を実施し、制御（発信・停止等）の正常性を評価します。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◆圃場 鶴沼ワイナリー ◆監視センター 鶴沼改善センター
<p>EV ロボット・2 台同時遠隔制御 2 台の EV ロボットで防除作業を実施し、制御（発信・停止等）の正常性を評価します。</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ◆圃場 後志ヴィンヤード ◆監視センター 鶴沼改善センター

<p>EV ロボット・4 台同時制御 2つの圃場で2台のEVロボット走行を実施し、合計4台のEVロボットの制御（発信・停止等）の正常性を評価します。</p> 	<p>◆圃場 鶴沼ワイナリー 後志ヴィンヤード</p> <p>◆監視センター 鶴沼改善センター</p>
<p>1 拠点での映像監視 (EV ロボット 1/2/4 台操作時) 遠隔監視センターにてEVロボットに搭載された前後カメラの映像が、それぞれの台数制御時に正常に表示されているかを評価します。</p> 	<p>鶴沼改善センター</p>
<p>複数監視センター間連携 「映像監視およびEVロボット・監視制御（発信・一次停止・再開）」が異なる監視センター間で正常に実施できるかを評価します。</p> 	<p>鶴沼改善センター 新産業支援センター</p>

2) 評価・検証方法

ローカル 5G による EV ロボット遠隔制御の正常性、安全性を評価・検証した方法を下記に示します。各項目の動作については正常に動作することを基準とし、制御、映像の遅延時間については、キャリア 5G と比較した際の差を評価しました。

監視拠点から EV までの通信往復遅延時間については、同区間をキャリア 5G で接続した場合と、ローカル 5G で接続した場合を比較し、遅延時間の差を評価しました。

発進・停止の制御動作については、各操作が遠隔から正常に実施でき、走行区間において異常なく完了することを評価しました。

安全性評価として実施した緊急停止時の停止距離測定については、障害物等を検知する距離を約 15m 先、レーザースキャナーでの自動停止距離を 10m 先と想定しており、自動停止が正常に動作しなかった場合に、遠隔からの緊急停止動作でも安全性を確保するための停止距離として、遠隔での緊急停止の必要性認知から 1m 以内の停止を目標と設定し、EV ロボットの走行速度約 2.5km/h において、遠隔監視映像による障害物発見時の停止挙動から、空走距離、制動距離とあわせた停止距離が 1m 以内となることを評価しました。

遠隔映像の評価については、EV の前後カメラからの映像が設定した帯域通りに伝送できている事、および映像の伝送遅延時間を測定し、キャリア 5G よりも低遅延であること、映像品質に問題が無いことを確認しました。

複数監視センター間連携については、一方の拠点で走行開始、一時停止した EV ロボットを、もう一方の拠点から再開、停止するまでの動作を実施し、動作に異常がないこと、得遠隔監視映像の共有に問題が無いことを確認しました。

表 4.4.2 リモート EV ロボット・コントロールシステム評価・検証方法

評価項目	検証方法	評価基準
遠隔制御	<ul style="list-style-type: none"> 監視拠点から EV ロボットまでの通信遅延時間測定 発進・停止の制御動作試験 緊急停止時の停止距離測定 	<ul style="list-style-type: none"> 監視 PC～EV 搭載 PC 間の往復遅延時間が、キャリア 5G を使用した構成よりも低遅延であること 遠隔からの発信、一時停止、再開、停止処理が正常に実施できること 緊急停止時の停止距離 1m 以内であること
遠隔映像監視	<ul style="list-style-type: none"> 各 EV の送受信トラフィック測定 映像伝送遅延時間測定 映像品質 	<ul style="list-style-type: none"> 遠隔監視映像の設定帯域通りの伝送が実現できている事 EV 搭載 PC～監視 PC 間の映像伝送遅延が、キャリア 5G を使用した構成よりも低遅延であること 映像に途切れがなく、画質に問題が無いこと
複数監視センター間連携	<ul style="list-style-type: none"> 制御動作以降の正常性確認 監視映像共有動作の正常性確認 	<ul style="list-style-type: none"> A 施設から開始停止→手動停止を実施、B 施設から再開→停止を実施した際の動作が正常に実施できること

3) 実証結果及び考察

① 遠隔制御

監視 PC から EV ロボットに搭載した PC 間の往復遅延時間について、キャリア 5G を使用した場合、ローカル 5G を使用した場合の測定を行い、通信遅延時間を評価しました。

測定方法は、Windows 端末に標準でインストールされているコマンドプロンプトから ping コマンドを使用し、32Byte データを 100 回送信し、往復遅延時間の最小、最大、平均値を測定しました。

ローカル 5G 使用時の接続構成は、鶴沼改善センター内に接続した PC 端末と鶴沼ワイナリー圃場内の EV ロボットに搭載した PC 間を結んだネットワークであり、鶴沼改善センター内のローカル 5G コアを経由し、鶴沼ワイナリーの CU/DU、RU を通って EV ロボットに搭載された UE 配下の PC へ接続する構成としました。両拠点間の IP 通信を可能とするため、鶴沼改善センターの L5GPOI ルーターと、EV ロボット搭載のルーター間で VPN を構成しました。

キャリア 5G 使用時の接続構成は、鶴沼改善センターの UTM 経由からインターネット経由で EV ロボット搭載のキャリア 5G ルーター配下の PC へ接続する構成としました。鶴沼改善センター UTM と、EV ロボット搭載ルーター間にて VPN を構成し、拠点間 IP 通信を可能としました。

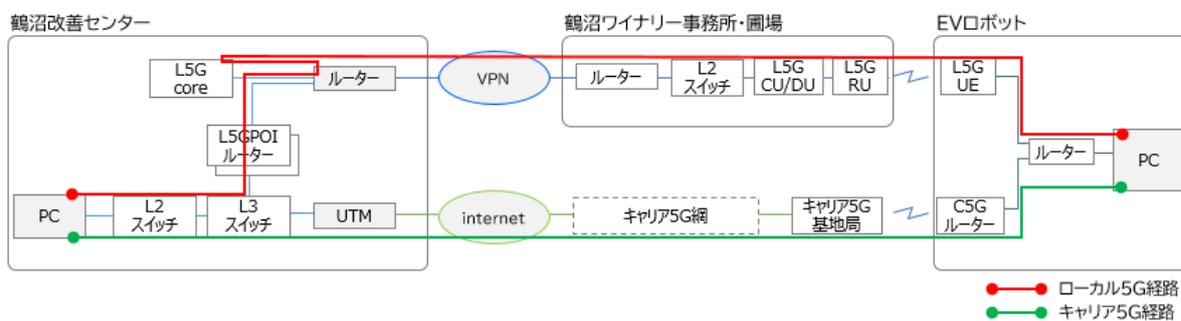


図 4.4.1 通信遅延測定接続構成概要図

キャリア 5G 使用時測定結果

表 4.4.3 キャリア 5G 使用時往復遅延時間

最小値	69 ms
最大値	297 ms
平均値	97 ms

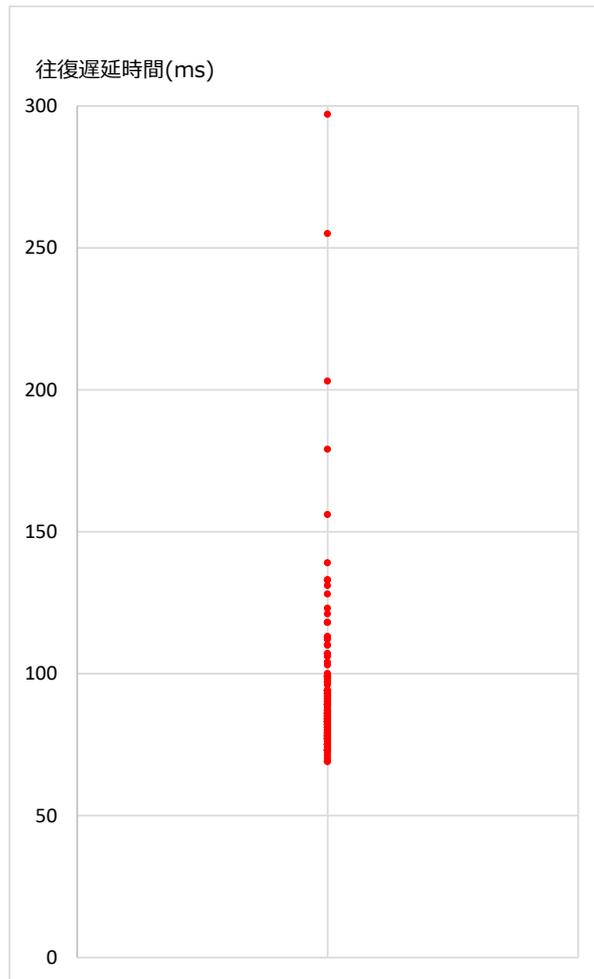


図 4.4.1 キャリア 5G 使用時往復遅延時間分布

ローカル 5G 使用時測定結果

表 4.4.1 ローカル 5G 使用時往復遅延時間

最小値	20 ms
最大値	60 ms
平均値	35 ms

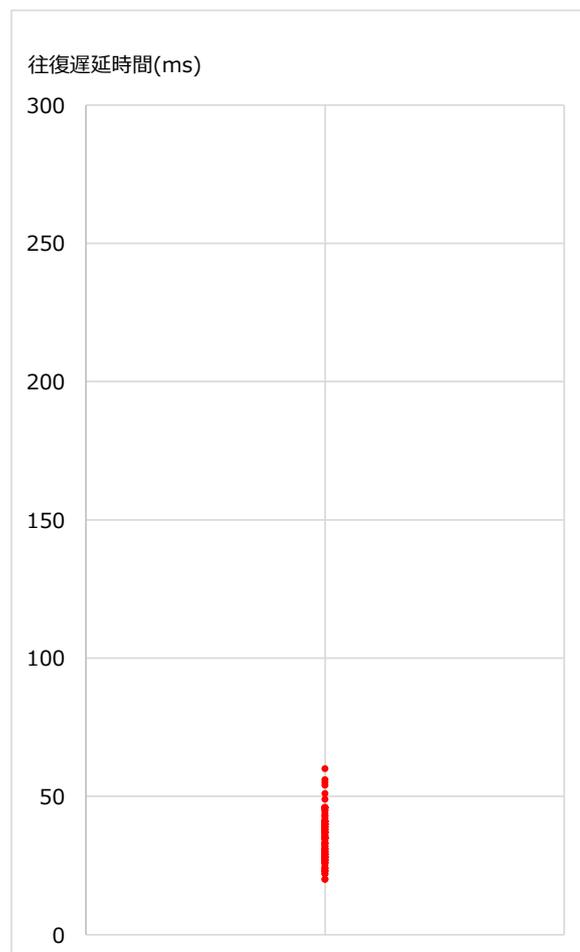


図 4.4.2 ローカル 5G 使用時往復遅延時間分布

上記より、キャリア 5G 使用時は平均 97ms、ローカル 5G 使用時は平均 35ms と、ローカル 5G の方が遅延時間は 1/2 以下であり、ばらつきも小さいことが確認できました。

当該遅延の差については、後述の遠隔監視での緊急停止動作において、時速 2.5km/h 時に、通信区間の遅延時間に相当する空走距離は、ローカル 5G で約 13cm、キャリア 5G で約 34cm であり、1m 以内の停止において大きく影響するものと考えられます。従いまして、EV ロボットの遠隔監視制御環境においてローカル 5G の低遅延性が有用であると考えられます。

次に、発進・停止の制御動作試験として、下記の検証を実施しました。遠隔制御拠点である鶴沼改善センターは、6 画面の大型モニターを使用し、EV ロボット 4 台の前後カメラ映像、遠隔制御ソフト、その他資料等を表示しました。本実証においては、限られた期間に実証項目を実施する上で必要な要員配置として、通信状況の監視要員、全体の進捗統括、映像監視用のスマートガイドシステム操作要員、遠隔制御 PC 操作要員の 3 名を配置して実施しました。実運用環境では、通信状況の監視は自動化することで、映像監視、制御 PC 操作を 1 名で実施する環境を想定しています。

各画面の配置概要図、および実際の画像を下記に示します。

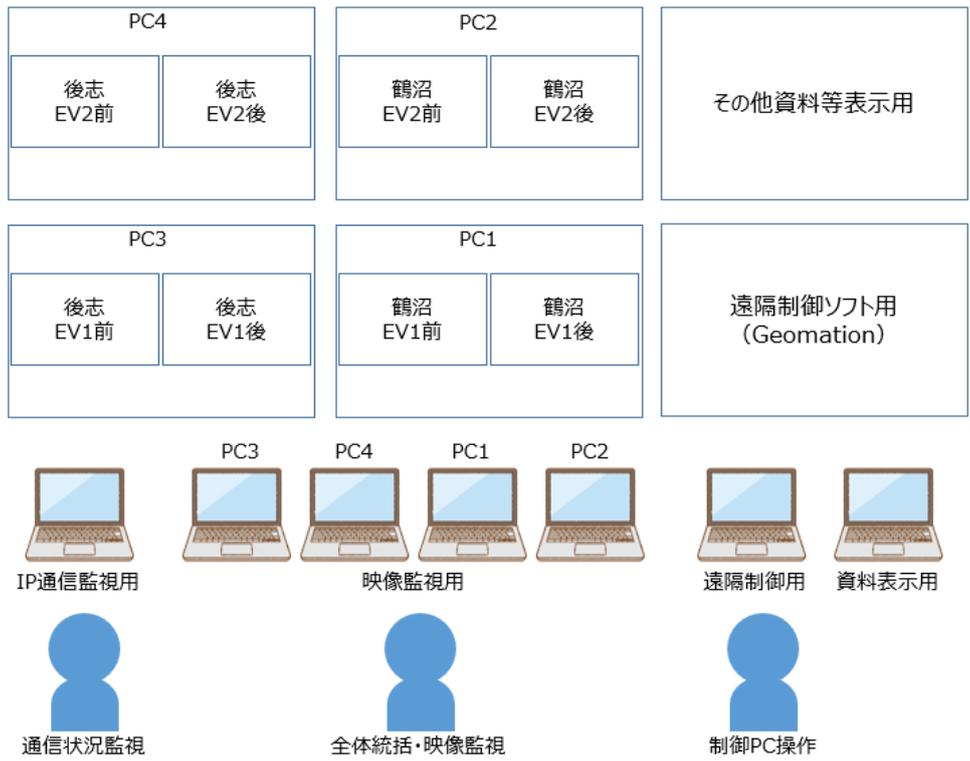


図 4.4.3 遠隔監視制御拠点モニター・要員配置構成概要図



図 4.4.4 遠隔監視制御拠点

EV ロボットは、ローカル 5GUE、キャリア 5G ルーター、VPN ルーター、Wi-Fi アクセスポイントを搭載し、EV コントロール用 PC を経由して EV ロボットの走行制御を行います。接続構成概要および外観を下記に示します。

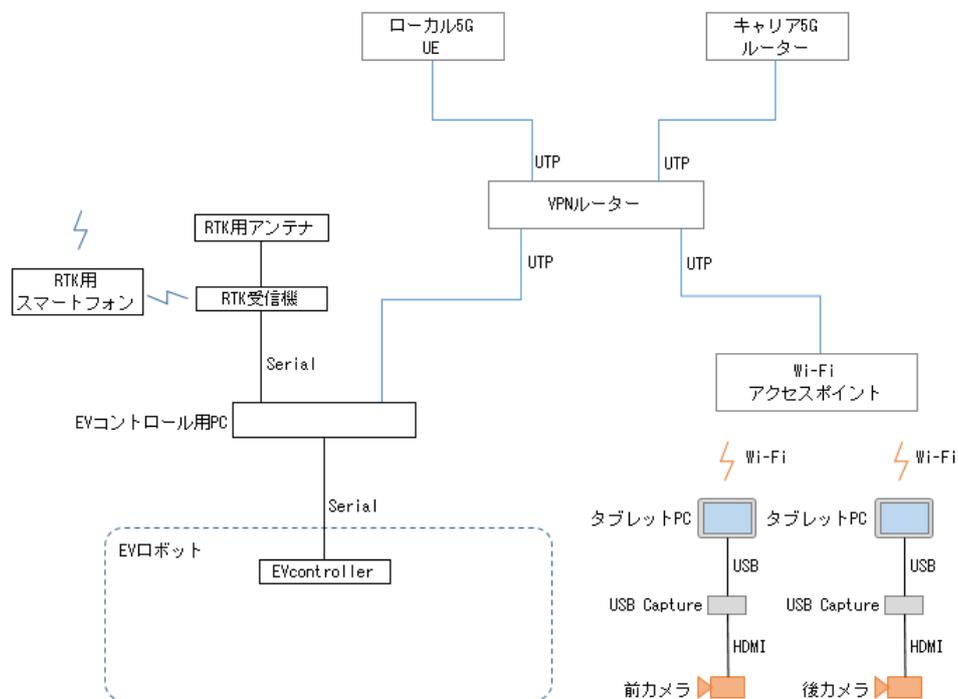


図 4.4.5 EV ロボット搭載機器接続構成概要図



図 4.4.6 EV 車両外観

遠隔制御試験として実施した項目、および試験結果を下記に示します。

表 4.4.2 EV ロボット制御動作試験

実証項目	EV ロボット 走行場所	台数	走行 速度	制御拠点	検証内容	評価基準	試験 結果
1 拠点 EV1 台	鶴沼ワイナリ ー	1	約 2km/h	鶴沼改善 センター	遠隔発信・ 停止	・制御操作を円 滑に実施できる か ・異常停止等が 発生せず正常に 完了できるか	異常 なし
1 拠点 EV1 台	後志ヴィンヤ ード	1	同上	同上	同上	同上	異常 なし
1 拠点 EV2 台	鶴沼ワイナリ ー	2	同上	同上	同上	同上	異常 なし
1 拠点 EV2 台	後志ヴィンヤ ード	2	同上	同上	同上	同上	異常 なし
2 拠点 EV4 台	鶴沼ワイナリ ー 後志ヴィンヤ ード	4	同上	同上	同上	同上	異常 なし



図 4.4.7 制御動作試験（鶴沼ワイナリー2台走行時）



図 4.4.8 制御動作試験（後志ヴィンヤード 2 台走行時）

EV ロボットの走行速度 2km/h 時において、単体での走行時、2 拠点 4 台同時走行時のいずれの環境においても、ローカル 5G 通信が途切れることなく正常に発信・停止の制御動作を行うことが可能であることを確認しました。

次に、緊急停止時の停止距離測定として、EV ロボット 1 台走行時の遠隔監視による緊急停止試験を行いました。

自動走行中の EV ロボットが、予めマーキングした位置に到達した際に、前カメラ撮影範囲に立っている人間が手を挙げ、遠隔監視映像で挙手確認後、緊急停止を遠隔から実施、EV ロボットの空走距離、制動距離を測定しました。

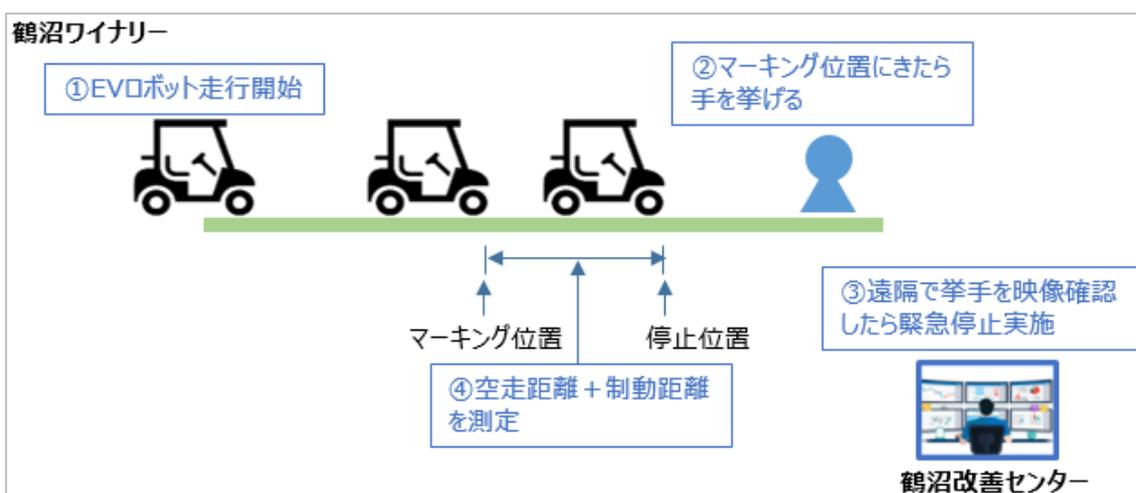


図 4.4.9 緊急停止距離測定概要図



図 4.4.10 緊急停止距離測定実施模様

参考として、有人走行時にブレーキ動作を行った際の、ブレーキ動作開始から停止までの制動距離を測定した結果を下記に示します。

表 4.4.3 有人走行時制動距離（積雪路面）

項番	走行速度 (km/h)	制動距離 (m)
1	11.9	1.5
2	5.8	0.3
3	4.2	0.1

自動走行時の緊急停止距離測定結果を下記に示します。

表 4.4.4 緊急停止距離測定結果（積雪路面）

項番	走行速度 (km/h)	空走距離 (m)	制動距離 (m)	停止距離 (m)
1	2.5	0.80	0.07	0.87
2	2.5	0.83	0.06	0.89

上記より、遠隔監視制御下において、目視による映像監視にて異常検知した場合でも、1m未滿で停止できることを確認しました。

② 遠隔映像監視

遠隔映像監視について、各 EV の送受信トラフィック測定を測定し、遠隔監視映像の設定帯域通りの伝送が実現できている事を確認しました。

測定については、EV ロボットに搭載した前後カメラ用 PC 上で TCP/IP ネットワークモニターを動使用して測定しました。

測定条件は、各カメラ用 PC の映像送信帯域設定を、1Mbps に設定し 10 分間の間、10 秒間隔で送信帯域を測定した結果を集計しました。

測定結果を下記に示します。

測定対象		最大 送信帯域 (Mbps)	最小 送信帯域 (Mbps)	平均 送信帯域 (Mbps)
鶴沼 EV ロボット 1号機	前カメラ用 PC	1.44	0.70	1.07
	後カメラ用 PC	1.36	0.97	1.07
鶴沼 EV ロボット 2号機	前カメラ用 PC	1.31	0.76	1.09
	後カメラ用 PC	1.22	0.89	1.09
後志 EV ロボット 1号機	前カメラ用 PC	1.13	0.98	1.06
	後カメラ用 PC	1.16	1.02	1.06
後志 EV ロボット 2号機	前カメラ用 PC	1.18	0.68	1.09
	後カメラ用 PC	1.12	0.71	1.04

上記より、4 台の EV ロボットに搭載した前後カメラ PC において、予め設定した送信帯域通りのデータ送信がされていることが確認でき、ローカル 5G ネットワークを使用した TCP/IP 通信が正常に実施できていることを確認しました。

映像伝送遅延時間測定として、EV ロボットに搭載したカメラで入力した画像が、別拠点の受信 PC 上に表示されるまでの遅延時間を測定しました。

測定方法は、EV ロボットのカメラでタブレットのストップウォッチ画面を撮影したものを、映像監視に使用しているスマートガイドシステムを使用して、別 PC の画面に表示させ、映像ソース、入力側 PC、出力側 PC の 3 台の PC 画面を同時に撮影することで、ストップウォッチ画像の時刻表示から遅延時間を算出しました。

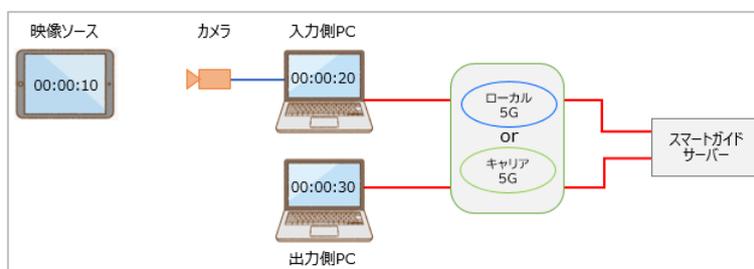


図 4.4.11 映像伝送遅延測定概要図



図 4.4.12 映像伝送遅延測定模様

参考として、入力映像を入力側 PC で表示するまでの遅延時間について、EV ロボット搭載カメラで撮影した場合と、タブレットから HDMI 出力したものを入力した場合で計測した結果を下記に示します。

表 4.4.5 入力映像撮影から入力側 PC 表示までの遅延時間

構成	最大値 (s)	最小値 (s)	平均値 (s)
EV ロボットカメラ撮影	0.26	0.16	0.21
タブレット HDMI 出力	0.22	0.13	0.18

結果としてはいずれも約 0.2 秒程度の遅延が発生していることが確認できました。

入力映像から出力映像までの遅延時間を計測した結果を下記に示します。実際の計測時間は往復経路となるため、前述の往復遅延時間の 1/2 を EV ロボットから鶴沼改善センターへの通信遅延とみなし、計測時間から除いたものを記載しています。

表 4.4.6 入力映像撮影から出力側 PC 表示までの遅延時間

構成	最大値 (s)	最小値 (s)	平均値 (s)
ローカル 5G	0.22	0.18	0.20
キャリア 5G	0.34	0.26	0.29

上記より、ローカル 5G 構成は、入力映像を入力側 PC で表示した結果とほぼ同一であり、キャリア 5G 構成と比較してローカル 5G が低遅延であることが確認できました。

映像品質について、遠隔監視拠点における EV ロボット前後カメラ映像を確認しました。映像配信の設定は、解像度 1920×1080、15fps として実施しました。



図 4.4.13 監視映像（鶴沼ワイナリー EV ロボット 1 上:静止中、下:走行中）



図 4.4.14 監視映像（鶴沼ワイナリー EV ロボット 2 上:静止中、下:走行中）



図 4.4.15 監視映像（後志ヴィンヤード EV ロボット 1 上:静止中、下:走行中）



図 4.4.16 監視映像（後志ヴィンヤード EV ロボット 2 上:静止中、下:走行中）

各 EV ロボットの監視映像について、静止中、走行中の映像を確認し、途切れ、ノイズ等がなく、EV ロボット直近の近傍から、約 30m 先の遠方において、走行路、車両、人物の判別が問題なく行えることから、遠隔からの映像監視の品質に問題が無いことを確認しました。

③ 複数監視センター間連携

複数監視センター連携の検証として、鶴沼改善センターから走行開始し、手動で一時停止を実施、岩見沢新産業支援センターへ操作の引継ぎを連絡、制御システムへ接続し、走行を再開した際の動作を検証しました。

遠隔監視制御の連携はスマートガイドシステムを使用し、EV ロボットカメラ映像、制御拠点映像を画面内に表示し、拠点間の映像・音声コミュニケーションを実施しました。



図 4.4.17 遠隔監視連携画面（鶴沼改善センター）

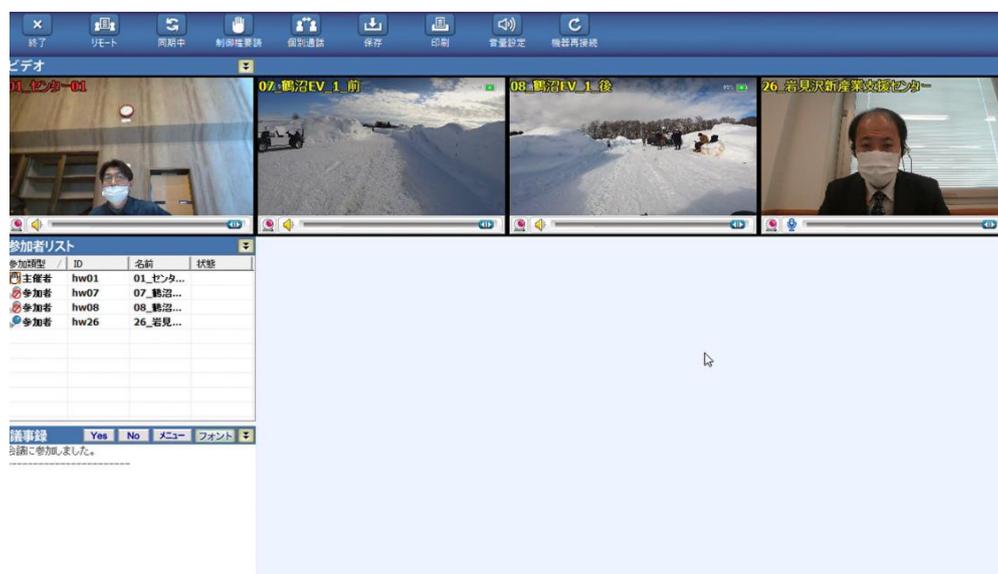


図 4.4.18 遠隔監視連携画面（岩見沢新産業支援センター）

遠隔制御連携は、鶴沼改善センターの制御用 PC へ、岩見沢新産業支援センターの PC からネットワーク経由でリモート接続することで実施しました。

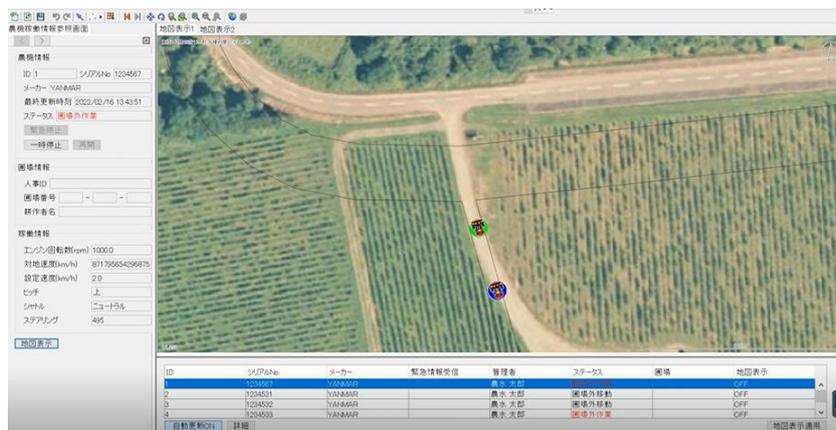


図 4.4.19 遠隔制御ソフト（リモート接続状態）

EV ロボットを一時停止後、岩見沢新産業支援センターへ操作引継ぎ依頼のための連絡開始から、状況説明、制御 PC へのリモート接続、操作の再開に要した時間を計測した結果は、を連絡、制御システムへ接続し、走行を再開した際の動作を検証しました。

	操作引継ぎ連絡開始からリモート接続開始	リモート接続開始から操作再開	遠隔制御連携全体
1	29s	12s	41s
2	16s	10s	26s

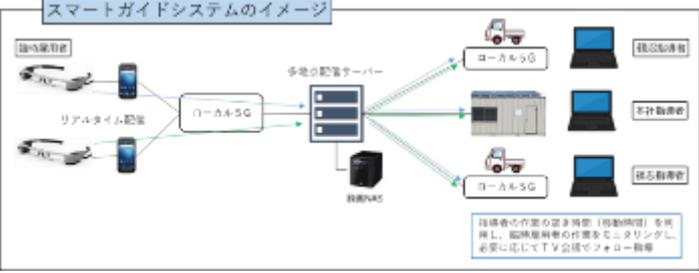
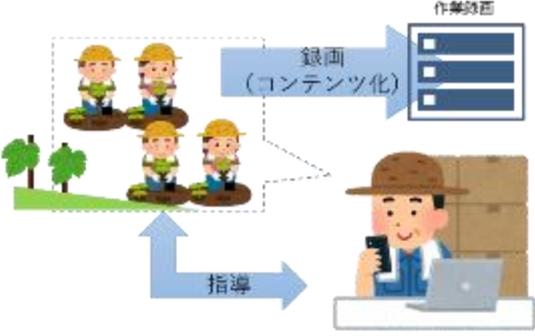
上記より、遠隔制御連携動作の正常性、監視映像共有動作の正常性を確認しました。遠隔制御連携にかかる所用時間は、連携操作連携依頼から制御動作再開までの時間で約 30 秒から 40 秒程度であり、運用上問題ないことを確認しました。

(2) スマートガイドシステム

1) 評価・検証項目

「栽培技術の習熟度が低い人員への遠隔からの効果・高率的な指導・育成による生産性の向上」「圃場作業員と離れた職場にいる管理者・指導者の双方向コミュニケーション」の実現に向け、ウェアラブルカメラを用いたローカル 5G の低遅延・多接続の特性を活かした高品質な映像配信の検証を行いました。加えて複数のポイントにて評価を実施し、映像品質を計測しました。また使用した映像は録画サーバーに保存されるため、あわせて録画映像品質も評価しました。

表 4.4.10 スマートガイドシステム検証内容

評価項目	対象圃場・施設
<p>ウェアラブルカメラ（スマートグラス）等を用いて鶴沼ワイナリーの作業員映像（作業員視線）を北海道ワイン（株）本社に送信し、その音声・映像品質を評価します。最大4台当該模様は録画し教育コンテンツとします。</p> 	<p>(作業員) 鶴沼ワイナリー (指導員) 北海道ワイン本社 契約農園</p>
<p>ウェアラブルカメラ等を装着した作業員と別圃場・別施設内職員（契約農家・農場長等）のPCやタブレット等のデバイスで作業指導ができるか、映像品質等を評価します。1～4台同時の際の品質を測定。</p> 	<p>鶴沼ワイナリー 北海道ワイン本社 後志ヴィンヤード</p>

2) 評価・検証方法

中山間地にてローカル5Gを用い、広大な圃場での複数人数同時指導・未熟練者のスキル向上に対応する指導方法の標準化および指導内容の向上を図りました。なおオフラインによる習熟を経てオンラインによる再現性の評価も併せて実施しました。評価項目は表 4.4.4 に示します。

表 4.4.11 スマートガイドシステム評価・検証方法

評価項目	検証方法	目標値
ウェアラブルカメラ(スマートグラス)等を用いた作業映像の多地点配信。作業カメラ映像の録画・再生	1. デバイス評価試験 ・スマートグラスカメラ等の装着性の評価 ・スマートグラスカメラ等の映像配信品質の確認 2. 4台同時の映像配信試験 ・スマートグラスカメラ等4台同時の映像を配信し、PCやタブレット等のデバイスで作業指導ができるかの確認 ・カメラ当りの帯域・フレームレート設定を変更し、指導が可能な画質等の品質を維持してTV会議コミュニケーションができるかを指導者(生産者)により評価 3. 録画機能試験 ・配信映像の録画 ・録画映像の品質確認 (再生時に教育用コンテンツとして部分切出しの上、利用可能か)	・アンケートによる満足回答80%以上 (スマートグラス等の装着性、リアルタイム映像品質・遅延、録画した映像品質)
スマートグラスを活用したオンライン栽培指導		

「試験項目表」を作成し、パターン別に結果を評価しました。分析・考察においては最適な回線種別や通信品質のパラメーターを設定し、スマート農業の運用に資するインフラ環境、映像伝送の品質調査を行いました。

・ 設問内容

映像等の品質について(a画素の細かさ、bノイズ発生有無、c映像・音声の遅延)の3つの観点で(満足3/やや難2/難あり1)の3段階で評価を実施。評価者による評価平均値を(○満足:2.5以上、△やや難:2.5未満~1.5以上、×難あり:1.5未満)で総合評価として記録し、評価者のコメントを記載。

・ 評価者属性

北海道ワイン(株)において、未習熟者の指導者となる立場の方

・ 人数

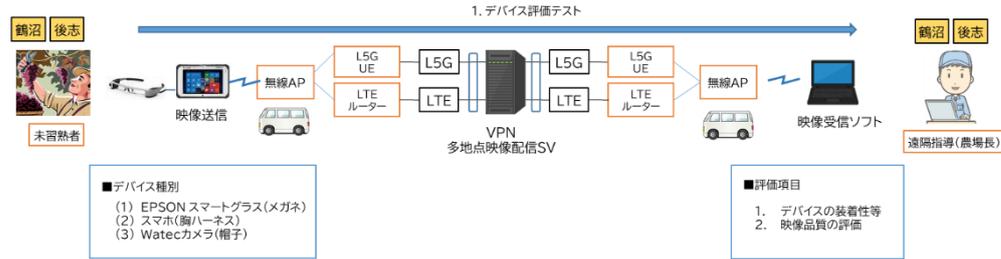
10名以上

・ 遅延測定

ウェアラブルカメラ→映像配信SV→指導者PCまでの映像伝送遅延を測定

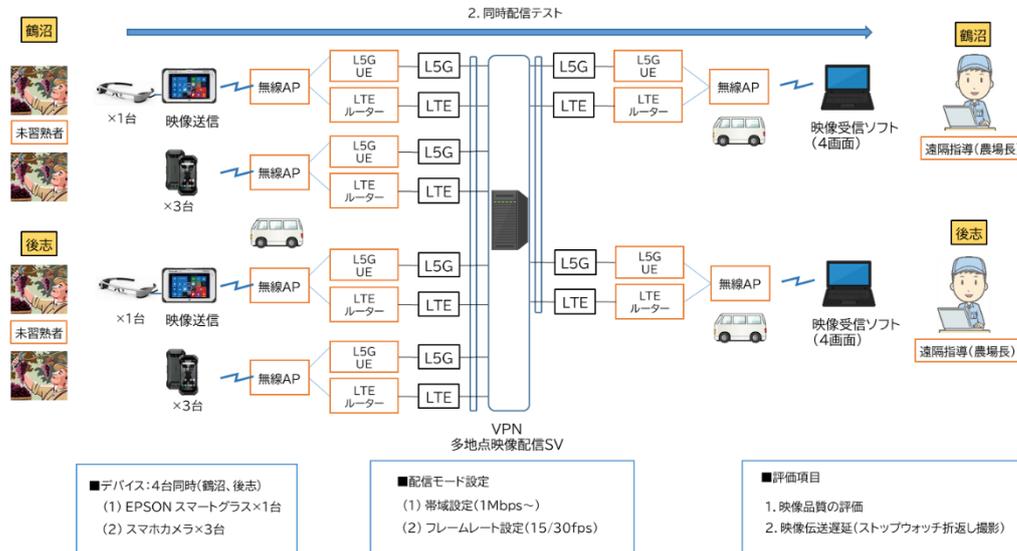
具体的には、カメラ(A)でストップウォッチ映像Xを撮影送信し、ローカル5Gの上り/下りの映像配信SV折返し通信区間を経由し、指導者PC(B)で受信したストップウォッチ映像Yを用意。別のカメラでXとYを同時撮影し、XとYの差分により折返し総遅延を算出

試験 1. デバイス評価テスト



		【評価】○：満足、△：やや難、×：難あり、【観点】a画素の細かさ、bノイズ発生有無、c映像・音声の遅延					
1 デバイス評価テスト		評価者A		評価者B		評価者C	
＜1台/1UE (鶴沼,後志)＞							
(1)	EPSON スマートグラス (メガネ)	評価	コメント	評価	コメント	評価	コメント
(カメラFHD設定、映像伝送6Mbps程度)							
	① 装着性						
	② 映像品質 (a.画素)						
	③ 映像品質 (b.ノイズ)						
	④ 映像品質 (C.遅延)						
(2)	スマホ装着 (胸ハーネス)						
(カメラ4K設定、映像伝送6Mbps程度)							
	① 装着性						
	② 映像品質 (a.画素)						
	③ 映像品質 (b.ノイズ)						
	④ 映像品質 (C.遅延)						
(3)	Watecカメラ (帽子)						
(カメラFHD設定、映像伝送6Mbps程度)							
	① 装着性						
	② 映像品質 (a.画素)						
	③ 映像品質 (b.ノイズ)						
	④ 映像品質 (C.遅延)						

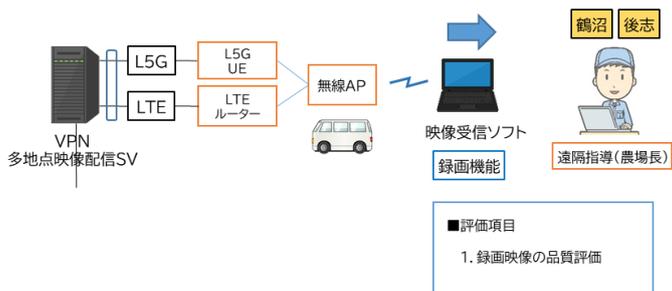
試験 2. 同時配信テスト



		【評価】○：満足、△：やや難、×：難あり、【観点】a画素の細かさ、bノイズ発生有無、c映像・音声の遅延					
2	同時配信テスト	評価者A		評価者B		評価者C	
<同時4台/1UE（鶴沼、後志）> （端末：スマホ3台、スマートグラス1台、カメラFHD設定、映像伝送帯域設定：1Mbps/カメラへ、フレームレート：15/30fps） （評価コンテンツ：①疑似ブドウ画像、②剪定動画のPC再生、③キーボードタッチの様子（音と指のスレ）、④ストップウォッチ映像）							
(1)	1Mbps×15fps						
	① 映像品質 (a.画素)						
	② 映像品質 (b.ノイズ)						
	③ 映像品質 (c.遅延)						
		msec					
(2)	1Mbps×30fps						
	① 映像品質 (a.画素)						
	② 映像品質 (b.ノイズ)						
	③ 映像品質 (c.遅延)						
		msec					
(3)	2Mbps×15fps						
	① 映像品質 (a.画素)						
	② 映像品質 (b.ノイズ)						
	③ 映像品質 (c.遅延)						
		msec					
(4)	2Mbps×30fps						
	① 映像品質 (a.画素)						
	② 映像品質 (b.ノイズ)						
	③ 映像品質 (c.遅延)						
		msec					
(5)	以降、映像が劣化するまで帯域を増やし実施						

試験 3. 録画映像の品質テスト

3. 録画映像の品質テスト(映像はテスト2の録画データを利用)



		【評価】○：満足、△：やや難、×：難あり、【観点】a画素の細かさ、bノイズ発生有無、c映像・音声の遅延					
3	録画品質テスト	評価者A		評価者B		評価者C	
<同時4台/1UEの録画映像のうち高評価のものを再生確認>							
(1)	高評価映像	評価	コメント	評価	コメント	評価	コメント
	① 映像品質 (a.画素)						
	② 映像品質 (b.ノイズ)						
	③ 映像品質 (c.遅延)						

3) 実証結果及び考察

試験 1. デバイス評価テスト

- カメラ装着テストは、各カメラデバイスを生産者が最良と考える方法で装着した
- カメラ解像度の設定は、各カメラデバイスの最良値で実施
- 映像伝送品質の設定は、6Mbps/カメラ帯域を固定で割当て
- カメラ装着は、装着した状態で作業姿勢などの動きを行い、その送信映像を指導者PCモニター側で装着者自身で確認し、装着性と映像品質の両方を評価した
- 映像品質は、a 画素の細かさ、b ノイズ発生有無、c 映像・音声の遅延の3つの観点で評価

生産者 12 名による評価結果を下記に示す。

		【指導評価】		○：満足、△：やや難、×：難あり					
No	実証場所	評価者	京セラ スマホ		EPSON スマートグラス		watec USBカメラ		
									
			4 K/FHD		FHD/HD		FHD/HD		
			胸ハーネス装着		メガネ装着		帽子装着		
			6Mbps/カメラ設定						
			装着性	映像品質 (観点a,b,c総合)	装着性	映像品質 (観点a,b,c総合)	装着性	映像品質 (観点a,b,c総合)	
1	鶴沼	1	○	○	×	△	△	○	
2	鶴沼	2	○	○	×	○	△	○	
3	鶴沼	3	○	○	×	○	△	○	
4	鶴沼	4	○	○	△	○	△	○	
5	鶴沼	5	○	○	×	△	×	○	
6	本部	6	○	○	×	△	△	○	
7	後志	7	○	○	×	○	△	○	
8	後志	8	○	○	×	○	△	○	
9	後志	9	○	○	×	○	×	○	
10	後志	10	○	○	×	△	△	○	
11	後志	11	○	○	×	○	△	○	
12	後志	12	○	○	×	○	△	○	
コメント			<ul style="list-style-type: none"> ・ハーネスで胸付近に着けると映像が安定して撮影できた ・ケーブルもなく装着性は良い ・映像を見て相手と会話で指導できれば十分なので、スマホ操作せずに使えるのがいい ・映像品質はどちらも良い ・PCモニタ/別スマホ側からも比較的安定した画像を確認できた 	<ul style="list-style-type: none"> ・メガネをしていると装着が難しい ・ケーブルがあり作業には不向き ・モニターは小屋の中でも見にくい。明るい場所だともっと見えない。 ・映像品質はFHD/HDどころかも変わらない気がする ・動きがある時にフォーカスが合わない感じがする ・PCモニタでは映像揺れが大きく、視聴時に酔う ・他のカメラと比べて画質が白飛びして細部が見にくいように感じる 	<ul style="list-style-type: none"> ・帽子に取付けると揺れが大きく不安定になる ・PCモニタ側では映像揺れが大きく、視聴時に酔う ・方向性を持たせて体に取り付ける方法が考えにくい ・ケーブルが邪魔になる ・映像品質はFHD/HDどころかも変わらない 				

(参考：装着イメージ)



スマホの胸ハーネス装着



帽子カメラ装着



スマートグラスを装着した映像伝送評価の様子

試験 2. 同時配信テスト

- 未習熟者を想定した 4 台のカメラ（スマホ 3 台、スマートグラス 1 台）から指導者へ映像を送信
- 映像伝送品質の設定は、フレームレートを 15/30 の 2 段階で評価し、カメラ当り 1Mbps から段階的に帯域を増加させる（品質が劣化するまで）
- 遅延はストップウォッチ映像を伝送しスナップショット撮影で計測
- 映像品質は、a 画素の細かさ、b ノイズ発生有無、c 映像・音声の遅延の 3 つの観点で評価（評価者 12 名の平均値で算出）

生産者 12 名による評価結果を下記に示す。

《鶴沼・本部》 【指導評価】 ○：満足、△：やや難、×：難あり										
No	帯域	フレームレート	スマホ端末数	グラス端末数	総帯域	遅延	a画素細かさ	bノイズ発生	c映像音声遅延	感想
1	1M	15	3	1	2M	0.40	△	○	△	音声より映像が少し遅れる感じがする、30fpsに比べると粗い
2	1M	30	3	1	2M	0.30	○	○	○	OK,4画面同時に手の動きが見える、遠隔からの営農指導には充分使える
3	2M	15	3	1	8M	1.83	×	×	×	音声より映像がかなり遅れる
4	2M	15	2	1	6M	0.58	×	×	×	音声より映像がかなり遅れる
5	2M	30	2	1	6M	0.39	×	×	△	音声より映像が少し遅れる感じがする
※鶴沼・本部の6名アンケート評価集計した総合評価値										
《後志》 【指導評価】 ○：満足、△：やや難、×：難あり										
No	帯域	フレームレート	スマホ端末数	グラス端末数	総帯域	遅延	a画素細かさ	bノイズ発生	c映像音声遅延	感想
1	1M	15	3	0	4M	0.34	△	○	○	音声より映像が少し遅れる感じがする
2	1M	30	3	1	4M	0.35	○	○	○	OK,4画面同時に手の動きが見える、遠隔からの営農指導には充分使える
3	2M	15	3	1	8M	1.03	×	×	×	音声より映像がかなり遅れる
4	2M	30	3	1	8M	0.30	×	×	×	映像が見えなくなる(時々固まる)
※後志の6名アンケート評価集計した総合評価値										

(参考)



遅延計測の様子



疑似樹体による映像伝送の様子



指導者 PC の映像品質評価の様子 (鶴沼)



指導者 PC の映像品質評価の様子 (後志)



指導者 PC の映像品質評価の様子 (後志 2)



1M30fps4 台時の映像品質 (評価○)



2M30fps4 台時の映像品質 (評価× : ノイズ発生)



カメラ当りの帯域設定画面

試験 3. 録画映像の品質テスト

- 試験 2 で録画した映像を再生し映像品質を評価
- 映像は試験 2 で高評価を得た項番パターン（1Mbps×30fps）
- 映像品質は、a 画素の細かさ、b ノイズ発生有無、c 映像・音声の遅延の 3 つの観点で評価（評価者 12 名の平均値で算出）

生産者 12 名による評価結果を下記に示す。

【指導評価】 ○：満足、△：やや難、×：難あり			録画映像(鶴沼1M×30fps)の品質評価		
			a画素細かさ	bノイズ発生	c映像音声遅延
1	鶴沼	1	○	○	○
2	鶴沼	2	○	○	○
3	鶴沼	3	○	○	○
4	鶴沼	4	○	○	○
5	鶴沼	5	○	○	○
6	本部	6	○	○	○
7	後志	7	○	○	○
8	後志	8	○	○	○
9	後志	9	○	○	○
10	後志	10	○	○	○
11	後志	11	○	○	○
12	後志	12	○	○	○

(3) IoT センシングシステム

1) 評価・検証項目

「ロス果減少の実現」に向け、EV ロボットに高精細カメラを設置し画角に現れる病虫害予兆の AI 判定を行いました。AI 判定カメラを用いて映像をリアルタイム判定し、ローカル 5G の大容量性により、高精細画像や判定結果をクラウドに送信し病虫害判定が正しくできているかを評価しました。また、結果の通知について、生産者のニーズを評価して営農としての遅延が無いよう考え方を整理しました。なお、IoT センサーの測定データを活用した効果の検証は、令和 4 年度のスマート農業実証（農研機構）の中で評価してゆく予定です。

表 4.4.12 IoT センシングシステム検証内容

評価項目	対象圃場・施設
ア) AI 判定結果 高精細カメラの映像配信による害虫の AI 判定の結果を評価します。	鶴沼ワイナリー 鶴沼改善センター

1) 評価・検証方法

中山間地にてローカル 5G を用いた高精細カメラによる大容量の映像配信を行い、広大な圃場における病虫害の正しい判定、正確な営農データ反映、および稼働の高効率化（正確さの向上と、実施の容易さ）を目標とし、既存の営農作業と比較し、より広範囲の圃場監視が行えること、もしくは同程度の圃場監視を想定した場合の稼働削減効果を評価しました。評価項目を表 4.4.13 に示します。

表 4.4.13 IoT センシングシステム評価・検証方法

評価項目	検証方法	目標値
ア) AI 判定結果	①病虫害画像をもとに AI 学習プログラムを作成し病虫害の分析精度を評価します。 ②AI 学習したカメラを EV ロボットに搭載し、サンプリングを実施して分析精度を評価します。AI により正しく、病虫害判定できているかを評価します。	・学習済画像での検出率 80%以上、未学習画像での検出率 60%以上 ※AI カメラの病虫害検出率が閾値 50%以上のため、検出精度を考慮して目標値としました。

病虫害の検出率（性能指標の適合率）は、AI 学習プログラムにより判定された病虫害の検出数で算出され、実証では正しく検出できることを目的に検出閾値 50%以上を評価対象として、AI 学習済の病虫害を含んだ学習済画像の判定では検出率を 80%以上、学習していない病虫害を含んだ未学習画像の判定では 60%以上を目標値として定義し評価しました。

事前準備として、AI カメラに病虫害を学習させるために必要な画像データの収集と分類および AI 学習を行いました。

病虫害画像による分析精度について、AI 学習済の病虫害サンプル画像を AI カメラで撮影し、検出した病虫害の数（検出率）を評価しました。

EV ロボット搭載による分析精度について、AI 未学習の病虫害サンプル画像を、EV に搭載した AI カメラで走行中に撮影し、検出した病虫害の数（検出率）を評価しました。

また、病虫害判定結果（病虫害画像・AI 判定ログ）をローカル 5G 経由で分析サーバーにファイル転送する際のスループットを測定し、ネットワークの有効性を評価しました。

3) 実証結果及び考察

① 病虫害画像の分類と AI 学習

昨年 9 月に鶴沼ワイナリーで撮影したブドウの樹体および病虫害サンプル画像（約 400 枚）を集めて、AI 学習に適した約 100 枚について、正常と病気の部位および害虫に画像を分類しました。部位は、枝、葉、花穂、果房のうち季節による樹体の成長度合いを考慮して「葉」と「果房」に、害虫は形状や大きさが様々であり分類も複雑になることから一括りに「虫」として、病虫害の分類（AI 判定クラス）としました。

表 4.4.74 病虫害の分類

No.	分類	画像数	学習量(件)	備考
01	葉（正常）	14	35	
02	葉（病気）	20	65	
03	果房（正常）	17	59	
04	果房（病気）	17	46	
05	虫	23	78	
	合計	91	283	

AI 学習は、分類した病虫害サンプル画像を AI 学習ツール（Lighthouse）にインポートして、葉の病気、果房の病気、虫の画像を参照し、学習させたい部位の特徴や大きさおよび範囲を決めて登録し、ツール上で AI 学習を実行してデータセットを構築し AI 学習プログラム（CNN）を作成しました。

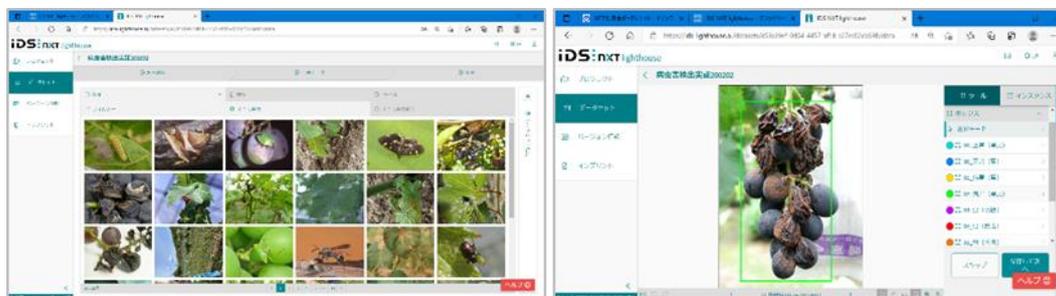


図 4.4.21 AI 学習ツールを用いた学習登録

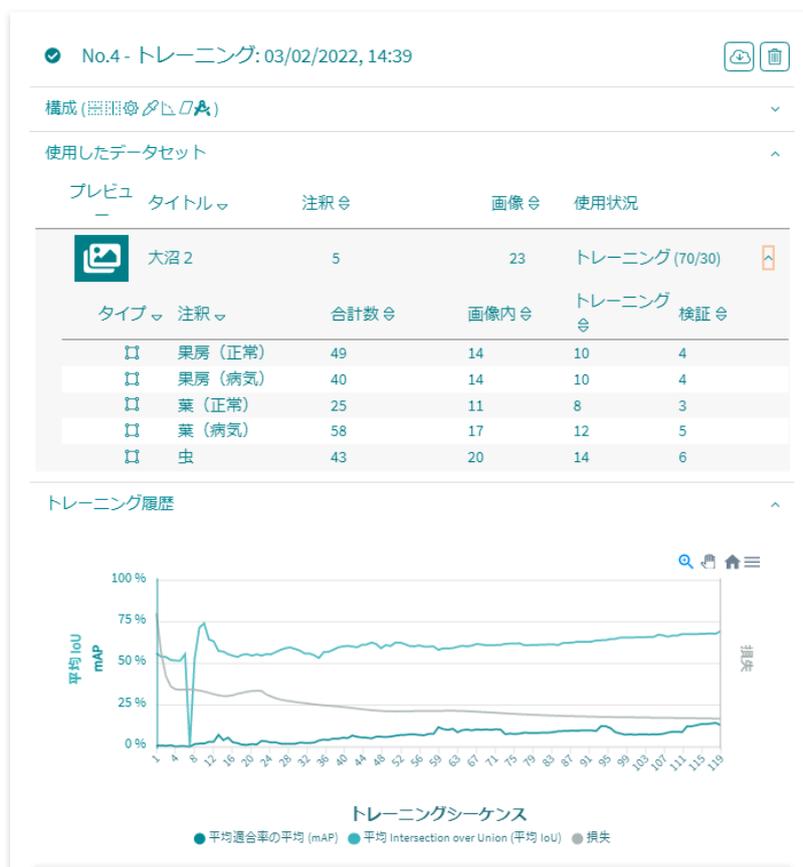


図 4.4.202 Lighthouse を用いた AI 学習

本実証では、病虫害サンプル画像による実証データとなりましたが、令和 4 年度のスマート農業実証（農研機構）では、圃場のブドウ樹体を EV 走行により繰り返し撮影して、季節や樹体の成長に合わせた数多くの画像を集めて学習し、AI 学習の精度を高めてゆく予定です。

② AI カメラによる病虫害判定（推論）テスト

AI カメラのログ取得ソフト（Logger）を用いて、AI カメラが病虫害を正しく検出できるかを評価しました。評価の方法は、病虫害を含んだ学習済のテスト画像 10 枚を用意して、画像に含まれる病虫害に対して、AI カメラが正しく検出できた数を測定して検出率を評価しました。

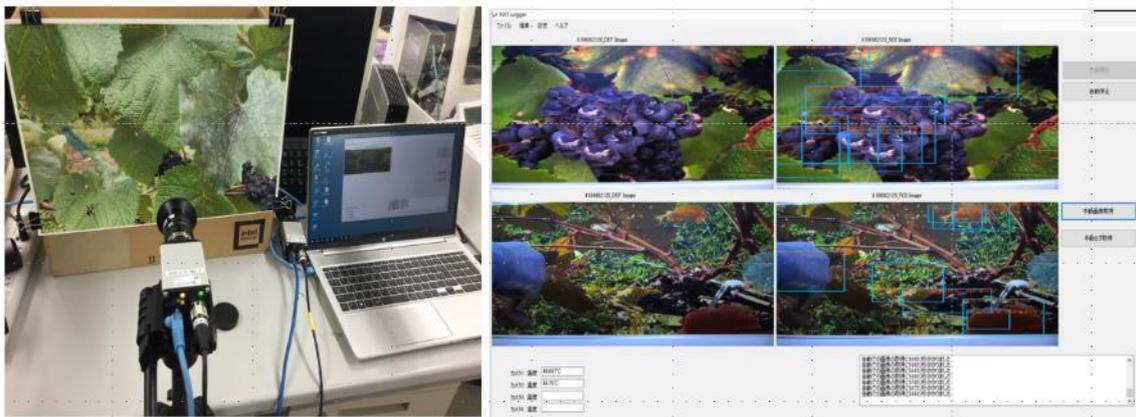


図 4.4.221 AI カメラによる病虫害判定テスト

実証の結果、AI 学習済画像での検出率は、「葉 (病気)」で 100%、「果房 (病気)」で 66.7%、「虫」で 12.5%となり、果房と虫の検出が学習済にもかかわらず低い検出率となりました。このことから、今後は果房、虫を中心に学習用サンプル画像を増やし AI 学習の仕方を工夫するなどしてデータセットを再構築して、学習精度を高めてゆく予定です。

表 4.4.15 病虫害検出結果 (学習済み画像)

実施日	2022/02/04 17:40 (4回目)	カメラ数	1					
CNN	No.4 - トレーニング: 03/02/2022, 14:39	備考	カメラと画像の距離: 20cm					
No.	画像名	判定	葉 (正常)	葉 (病気)	果房 (正常)	果実 (病害)	虫	合計
①	9月画像+べと病+毛虫	病虫害	22	1	6	1	1	8
		検出	0	1	5	1	0	7
②	収穫+晩腐病果房+カメムシ	病虫害	2	0	5	1	1	7
		検出	0	0	3	1	0	4
③	剪定画像+虫+黒糖病葉	病虫害	0	1	0	0	1	2
		検出	0	1	0	0	0	1
④	剪定画像+べと葉	病虫害	2	1	1	0	0	2
		検出	0	1	0	0	0	1
⑤	9月画像+べと病葉+晩腐病果房	病虫害	3	1	4	1	0	6
		検出	2	1	4	1	0	6
⑥	9月画像+晩腐病果房+羽根虫	病虫害	2	0	2	1	1	4
		検出	0	0	2	0	0	2
⑦	9月画像+ワイン病害+ワインカメ虫	病虫害	2	1	1	0	1	3
		検出	0	1	1	0	0	2
⑧	収穫画像+虫害果房+べと病葉+羽根虫	病虫害	6	1	3	1	1	6
		検出		1		1	0	2
⑨	収穫画像+灰色かび病果房+黒糖病葉+コガネムシ	病虫害	2	1	3	1	1	6
		検出	1	1	2	0	0	3
⑩	収穫画像+うどんこ病+昆虫	病虫害	3	1	3	0	1	5
		検出	2	1	3	0	1	5
合計		病虫害	44	8	28	6	8	50
		検出	5	8	20	4	1	33
		検出率	11.4%	100.0%	71.4%	66.7%	12.5%	66.0%

③ AI カメラの EV 搭載走行テスト

2 台の AI カメラを EV に搭載して、EV 走行時においても病虫害を正しく検出できるか、判定結果（病虫害画像・AI 判定ログ）はローカル 5G を経由して遠隔監視拠点の分析サーバーにリアルタイム性をもって転送できるかを検証しました。

評価の方法は、病虫害を含んだ未学習のテスト画像 10 枚を屋外に設置して、AI カメラの EV 搭載時でも画像に含まれる病虫害を AI カメラが検出できた数を測定して検出率を評価しました。また、判定結果（病虫害画像・AI 判定ログ）のファイル転送時の伝送速度を測定して、ローカル 5G を活用したネットワークの有効性について評価しました。

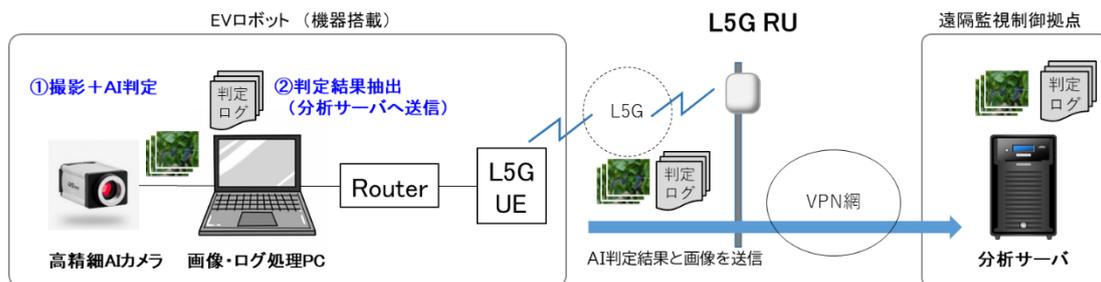


図 4.4.24 AI カメラによる AI 判定と病虫害画像のデータ転送



図 4.4.25 EV 走行による病虫害検出（実証の様様）

実証の結果、EV 走行時の AI 未学習画像での検出率は、「葉（病気）」で 65%、「果房（病気）」で 65%、「虫」で 69%となり、正常の葉、果房を含めた全体の平均検出率は 65%でした。

屋外での移動しながらの病虫害検出は、カメラ撮影時の照り返し部分を「虫」と誤認するパターンが多くみられました。EV ロボット走行時の揺れにともなうカメラ撮影および病虫害検出への影響は見られませんでした。また、EV ロボットの走行速度が速いことにより撮影被写体に対して連続した判定画角とならず画像間に隙間が発生するパターンが多く見ら

れました。このことから、撮影前に当日の天候に応じてカメラ露出、ホワイトバランス等のカメラ設定を調整して太陽光や反射の影響を少なくする工夫や、撮影画像が連続するように EV ロボットの走行速度を低く抑えるなどカメラ撮影時の最適な走行速度の調整が必要であることが分かりました。

また、AI カメラでの病虫害判定（画像）とログは、EV ロボット走行時においてもローカル 5G を経由して鶴沼改善センターの分析サーバーへリアルタイムにファイル転送できることを確認しました。その際の FTP 平均スループットは 3.86Mbps と低い結果となりました。

表 4.4.16 病虫害検出結果（未学習画像）

画像No	画像	評価項目	果房（正常）	果房（病気）	葉（正常）	葉（病気）	虫
1		平均 / probability	67%	59%	80%	70%	70%
		平均 / 検出個数	5.0	3.1	0.1	0.9	0.3
2		平均 / probability	57%	61%	0.555	61%	59%
		平均 / 検出個数	1.7	2.9	0.1	1.3	0.4
3		平均 / probability	57%	60%	53%	62%	67%
		平均 / 検出個数	1.5	1.6	0.2	1.8	0.2
4		平均 / probability	70%	68%	63%	61%	59%
		平均 / 検出個数	0.8	0.8	0.3	1.6	0.2
5		平均 / probability	65%	60%	54%	64%	58%
		平均 / 検出個数	1.2	2.6	2.3	0.4	0.2
6		平均 / probability	61%	61%	58%	64%	80%
		平均 / 検出個数	1.0	1.4	0.2	2.9	0.8
7		平均 / probability	61%	57%	0%	63%	57%
		平均 / 検出個数	1.2	0.3	0.0	4.6	0.1
8		平均 / probability	69%	64%	65%	68%	77%
		平均 / 検出個数	1.4	2.0	0.6	2.3	0.8
9		平均 / probability	81%	87%	50%	70%	90%
		平均 / 検出個数	1.4	0.6	0.1	2.1	1.3
10		平均 / probability	89%	75%	78%	69%	76%
		平均 / 検出個数	0.8	0.4	0.1	3.1	2.3
10画像		平均 / probability	68%	65%	56%	65%	69%
			65%				

表 4.4.18 ローカル 5G 経由の FTP スループット測定結果

実証年月日		2022年2月17日				
実証場所		鶴沼ワイナリー				
接続先		L5G				
実証態勢		EV搭載・移動				
カメラ数		2				
回数		1回目	2回目	3回目	4回目	
AIカメラ	カメラ開始時刻	11:10:45	11:40:30	11:50:30	12:00:04	
	カメラ最終時刻	11:11:30	11:41:42	11:51:14	12:00:55	
	撮影時間	0:00:45	0:01:12	0:00:44	0:00:51	
転送ログ	zip数 (Ftp数)	2	2	2	2	
	JPEG数	jpeg数カメラ 1	48	71	47	54
		jpeg数カメラ 2	48	71	47	54
	jpeg数合計	96	142	94	108	
FTP転送	1回目	Ftpサイズ	14,972,549	14,225,027	9,281,232	8,821,159
		秒	32.73	26.51	16.36	20.31
		KB/秒	457.39	536.53	567.31	434.37
	2回目	Ftpサイズ	21,070,437	22,355,276	27,375,440	13,286,868
		秒	44.59	50.50	53.80	30.04
		KB/秒	472.56	442.71	508.85	442.28
	総Ftpサイズ(byte)		36,042,986	36,580,303	36,656,672	22,108,027
	総Ftp時間(sec)		77.32	77.01	70.16	50.35
	平均Ftpスループット (k bps)		3,719.80	3,916.96	4,304.64	3,506.60
			3,862.00			

4.4.1.2 機能検証

(1) 評価・検証項目

各ソリューションにおいて評価・分析を行い、実装に必要な機能や推奨環境について検証しました。

(2) 評価・検証方法

下記に評価・検証方法を示します。

①リモートEVロボット・コントロールシステム

評価・検証項目		評価方法
EVロボット・コントロール	通信環境	スループット測定 往復遅延時間測定
	遠隔制御	遠隔からの走行開始、停止を確認
遠隔監視制御	遠隔監視による緊急停止	①遠隔監視者が障害物を検知した場所と時間 ②遠隔監視者が障害物を検知後、トラクター制御を行った時間 ③トラクターが停止した時間を測定
監視センター (単一)	監視映像モニター機能	各EVの前後カメラ映像の画面表示 複数のEV前後カメラ映像の分割表示
監視センター (複数)	監視拠点間制御連携	同一のEVに対して、発信、停止を複数の監視拠点から実行可能であること 一方の監視拠点から発信指示を行ったEVを一時停止し、もう一方の監視拠点から再開、停止処理が可能であること

②スマートガイドシステム

評価・検証項目		評価方法
ウェアラブル端末 (EPSON、WATEC、スマホ端末)	使用感（着脱、操作）	アンケート調査を実施
	カメラ画質	アンケート調査を実施 送信カメラ映像の画質評価
	音声品質 (スマホ端末、外付け スピーカ)	アンケート調査を実施 通話コミュニケーション時の音声評価
	モニター視認性 (EPSONのみ)	アンケート調査を実施 受信モニター映像の画質評価 屋外の順光・逆光での視認性評価 (透過率等の設定変更による対応性)
	バッテリー容量	屋外での最大使用時間の検証 充電時間の検証
多地点配信サーバー	①リモートEVロボット・コントロールシステムの監視映像モニター機能と同様	

③IoT センシングシステム

評価・検証項目		評価方法
AI カメラ	学習機能	オブジェクト認識させる学習機能（農家スタッフでも利用できるノンプログラミング形式）
	物体検出機能	学習させたオブジェクトを検出する機能
	ビューアー	物体検出の状況モニタリング、AI カメラの設定・ステータス確認機能
	ログ機能	物体検出結果、検出画像などのログ

(3) 実証結果及び考察

① リモート EV ロボット・コントロールシステム

1) EV ロボット・コントロール

スループット測定として、監視拠点 PC と EV ロボット搭載 PC 間のスループット測定を実施しました。

監視拠点である鶴沼改善センターと EV ロボット間について、ローカル 5G 経路、キャリア 5G 経路のスループットを測定しました。測定構成を下記に示します。

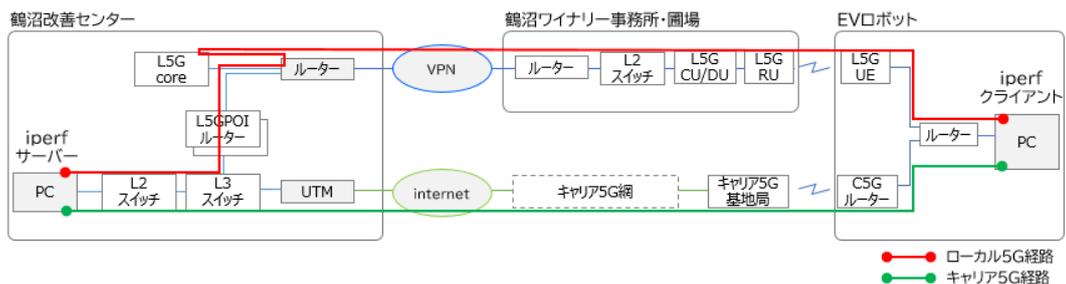


図 4.4.226 スループット測定構成

測定には iperf を使用し、監視拠点側を iperf サーバー、EV ロボット側をクライアントとして、TCP 接続における双方向のスループットを測定しました。参考として、測定 PC を LAN ケーブルで直結した場合の結果を下記に示します。

表 4.4.18 スループット測定 (測定 PC 直結時)

方向	最大スループット (Mbps)	最小スループット (Mbps)	平均スループット (Mbps)
サーバー →クライアント	950.0	946.0	949.0
クライアント →サーバー	951.0	931.0	947.9

ローカル 5G 経路、キャリア 5G 経路で測定した結果を下記に示します。

表 4.4.99 スループット測定 (監視拠点 PC から EV ロボット PC 間)

構成	方向	最大スループット (Mbps)	最小スループット (Mbps)	平均スループット (Mbps)
ローカル 5G	監視拠点 →EV ロボット	27.0	11.7	22.2
	EV ロボット →監視拠点	31.4	5.2	11.5
キャリア 5G	監視拠点 →EV ロボット	17.5	1.3	11.2
	EV ロボット →監視拠点	13.8	8.3	12.1

各測定結果をプロットしたスループット測定値の分布図を下記に示します。

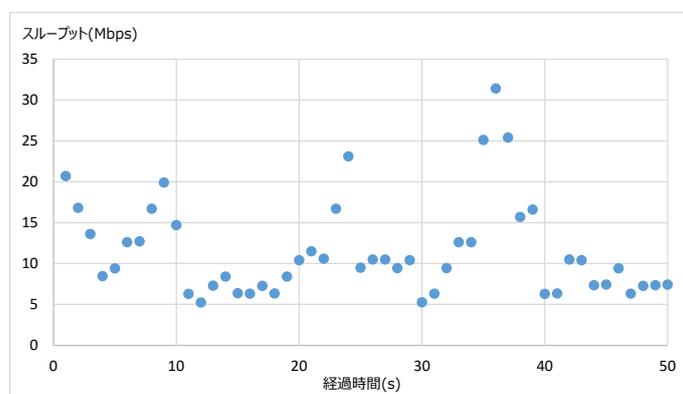


図 4.4.27 スループット測定値分布図 (ローカル 5G 経路)
(監視拠点→EV ロボット)

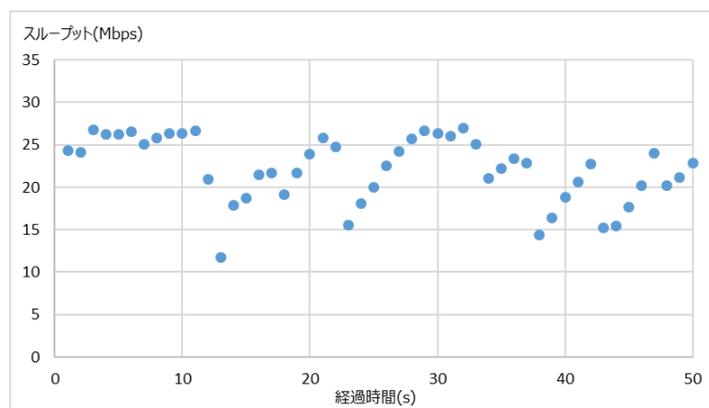


図 4.4.28 スループット測定値分布図 (ローカル 5G 経路)
(EV ロボット→監視拠点)

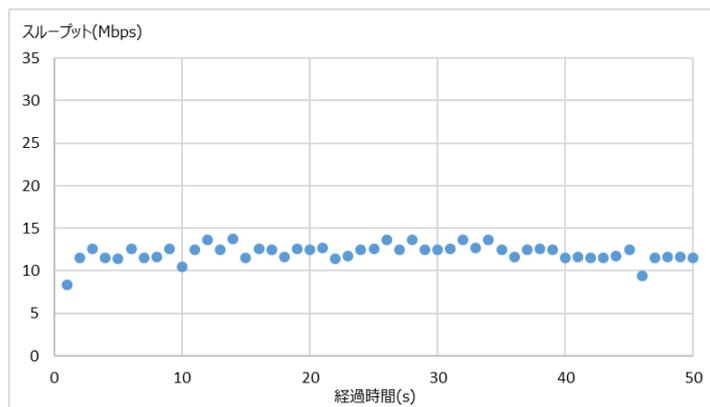


図 4.4.29 スループット測定値分布図 (キャリア 5G 経路)
(監視拠点→EV ロボット)

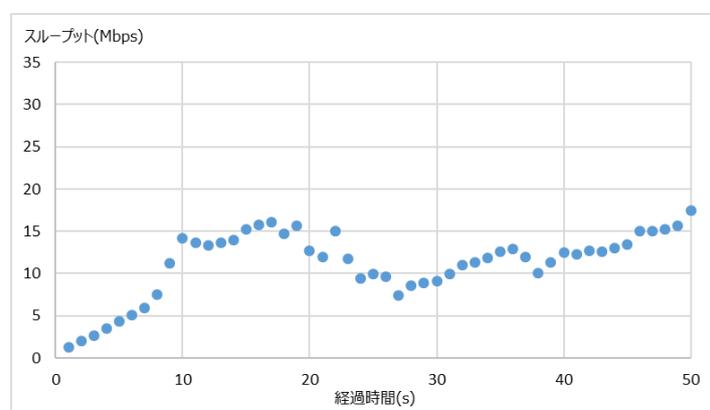


図 4.4.30 スループット測定値分布図 (キャリア 5G 経路)
(EV ロボット→監視拠点)

上記の測定結果より、EV ロボットからの上りトラフィックについて、最大値はローカル 5G の方がキャリア 5G 経路と比較して高いことが確認できましたが、平均としては約 11Mbps 程度と、キャリア 5G 経路と同等であること、EV ロボットへの下りトラフィックについては、ローカル 5G 経路の方が、最大値、最小値、平均値共にキャリア 5G 経路を上回っていることが確認できました。測定値の分布から、ローカル 5G 経路についてはばらつきが大きく、通信状態の変動がキャリア 5 経路と比較して大きいことが確認できました。

往復遅延時間については、前述の結果より、キャリア 5G 使用時は平均 97ms、ローカル 5G 使用時は平均 35ms と、ローカル 5G の方が遅延時間は 1/2 以下であり、ばらつきも小さいことが確認できています。

2) 遠隔監視制御

遠隔監視における緊急停止について検証を実施した結果より、遠隔監視映像で異常を検知してから、制御ソフトによる停止動作を行った際の、空走距離は、時速約 2.5km/h で走行時、0.8m 程度であり、実運用上問題ない値であることが確認できました。

3) 監視センター（単一）

単一の監視センターにおいて、EV ロボットを遠隔制御、および遠隔監視する構成の検証を実施した結果より、本実証構成において、4 台の EV ロボットが同時に走行する環境でも問題なく遠隔制御が実施できることを確認しました。

遠隔監視について、映像表示を検証した結果、走行状況を複数同時に監視するためには、大型ディスプレイに各 EV ロボットのカメラ映像を分割表示することが望ましく、本実証での、65 インチモニタに、EV ロボットの前後カメラを 2 分割表示する構成であれば、走行路面、人物の動きが確実に把握できる事が確認できました。

4) 監視センター（複数）

複数の監視センターにおける、遠隔監視制御の連携について検証を実施した結果より、2 箇所の監視制御拠点において、遠隔制御の連携動作、および遠視映像の連携動作の正常性を確認し、本実証構成で問題なく連携動作が可能であることを確認しました。

遠隔制御連携依頼に必要な映像、音声コミュニケーションについて検証し、本実証のスマートガイドシステムを使用した場合、音声、映像の品質に問題がなく、連携操作連携依頼から制御動作再開までの時間で約 30 秒から 40 秒程度であり、機能的に問題がないことを確認しました。

② スマートガイドシステム

評価・検証項目		評価結果	コメント
ウェアラブル端末 (EPSON、スマホ、WATEC等)	使用感（着脱、操作）	(効果検証を参照)	
	カメラ画質		
	音声品質（スマホ）		
	音声品質（外付けスピーカ）	○：満足	ケーブルが無いのでジャマにならない スマホ本体スピーカーよりも、耳に近いので 騒音（重機等）の影響が少なく感じた 騒音が多い環境の時は使いたい
	モニター視認性（EPSON）	×：難あり	・モニターは小屋の中でも見にくい。 ・明るい場所だともっと見えない。 ・屋外用のアタッチメントを取り付けても見 やすくならなかった
バッテリー容量	○：満足 ○：満足	TV会議の連続8時間：可能 充電：約3時間でフル充電可能	
多地点配信サーバー	(①リモートEVロボット機能検証を参照)		

(参考)



装着性評価したワイヤレスネックスピーカー

③IoT センシングシステム

昨年 9 月に鶴沼ワイナリーで撮影したブドウの樹体画像をサンプル画像として、AI 学習、物体検出を行いました。

AI 学習ツールはクラウド上に用意された「Lighthouse」を使い、学習させたい画像をアップロードして、画像の上で検出したい物体を指定して登録し、トレーニングさせることで容易に学習することができました。実証では 130 枚の画像で「果房」と「枝」を学習させることとし、それに要した時間は約 2 時間でした。

物体検出ツールはビューワー機能も備えた「ObjectDetector」を使い、ブドウの樹体写真を大型モニターに映し出し、それを AI カメラで撮影して「果房」「枝」を AI カメラが撮影しながら物体検出できること、および物体検出・判定をリアルタイムでモニタリングできることが確認できました。

カメラ設定ツールは「cockpit」を使い、設定は AI カメラのネットワーク設定、カメラ設定（撮影モード、露出等）、OS アップデート等のカメラ管理が容易にできることを確認しました。また、「Lighthouse」で作成した AI 学習プログラム (CNN) AI カメラにインストールする際はネットワーク経由で行うことができ簡単な操作でプログラムを更新することが確認できました。

ログツールは「Logger」ソフトを使い、AI カメラが画像（元画像）、AI カメラが物体検出した画像 (ROI 画像) および物体検出した分類ごとのログを出力し、内容を閲覧することができました。

このことから、専門知識のない生産者でも検知したい病気や虫の画像を登録して学習させるだけで、圃場状況に合わせて簡単に実践できることが確認できました。

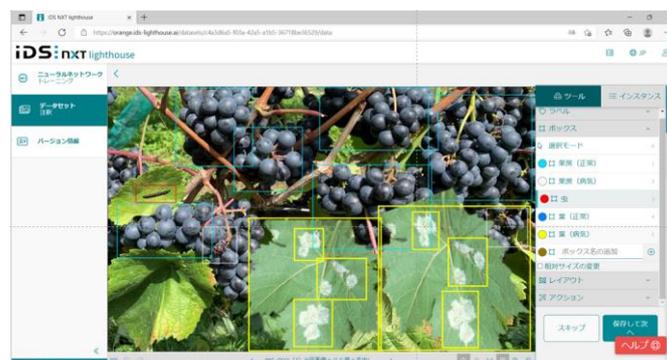


図 4.4.31 AI 学習ツール (Lighthouse)



図 4.4.32 物体検出ツール (ObjectDetector)

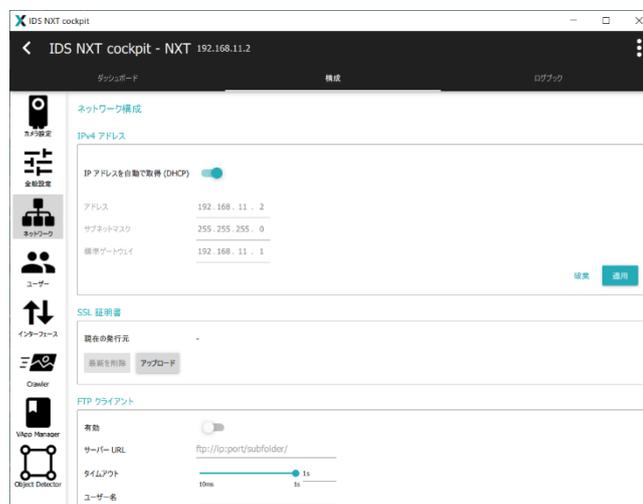


図 4.4.33 カメラ設定ツール (cockpit)

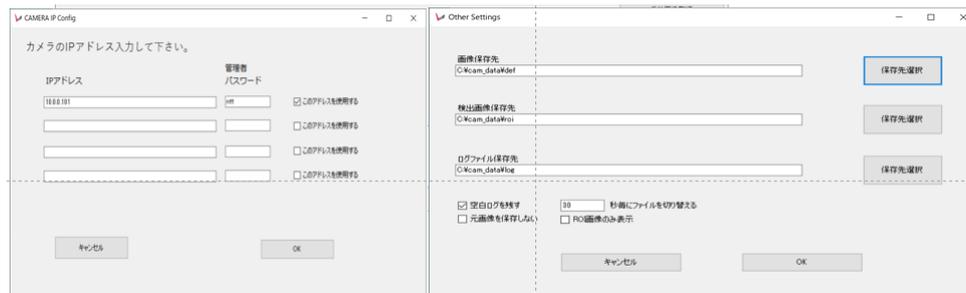


図 4.4.34 ログツール (Logger)

4.4.1.3 運用検証

(1) 評価・検証項目

各ソリューションにおいてあらかじめ実運用を想定して運用作業の洗い出しを行い、運用検証を実施しました。

(2) 評価・検証方法

実証を通じて、運用面に関する課題の抽出・解決策の検討を行いました。また、今後、果樹園運営者等がローカル 5G 等含むスマート農機を導入するにあたって、必要となる運用規定や安全対策等を検討しマニュアル化を行いました。

スマートガイドシステム、IoT センシングの運用体制及び想定する利用者としては、スマートガイドの映像配信サーバー機能および、IoT センシングのデータベースサーバー機能は「クラウドサービス」となることを想定しています。利用者となる醸造用ぶどう生産者は、クラウドサービスに接続する端末を利用し、ICT に詳しくない農家スタッフでも操作できる技術水準での運用を想定しています。ただし、IoT センシングデータの分析・活用は、醸造用ぶどう栽培の品質向上に関する専門知識を有することが前提となります。

① EV ロボット・コントロールシステム

表 4.4.20 EV ロボット・コントロールシステム評価検証方法

評価・検証項目		検証方法
EV ロボット・コントロール	設定・走行	実証での運用に基づいた走行経路設定、走行制御方法の確認
	保管	実証での運用に基づいた保管時等要件の確認
	メンテナンス	実証での運用に基づいたメンテナンス時要件の確認
監視センター	制御操作	実証での運用に基づいた制御設定、操作方法の確認
	監視操作	実証での運用に基づいた監視設定、操作方法の確認

② スマートガイドシステム

表 4.4.21 スマートガイドシステム評価検証方法

評価・検証項目		検証方法
多地点配信サーバー 録画機能 スマートグラス	システム一式の着脱・ 保管・メンテナンス	<ul style="list-style-type: none"> ・ 機器リスト、接続構成図の作成 ・ トラブル QA 等のマニュアル化 ・ システム利用管理簿の運用 ・ 故障等トラブル履歴運用

③ IoT センシングシステム

表 4.4.22 IoT センシングシステム評価検証方法

評価・検証項目		検証方法
AI カメラ	システム一式の着脱・ 保管・メンテナンス	接続構成図の作成 学習フェーズの操作マニュアル化 問い合わせ等の連絡先の体系化

④ ローカル 5G

表 4.4.23 ローカル 5G 評価検証方法

評価・検証項目		検証方法
ローカル 5G	ローカル 5G の運用	<ul style="list-style-type: none"> ・無線免許の取り扱い ・機器概要（設置状況・仕様） ・取扱留意点 ・不具合時の操作・回復方法 ・その他トラブルシューティング

(3) 実証結果及び考察

①EV ロボット・コントロールシステム

EV ロボットの自動運転を実運用するにあたって、必要となる事前設定として走行ルート¹⁾の記録、および走行マップ作製が必要であり、事前に手動運転で走行ルートを走らせる作業が発生します。本作業には、2D マップ上に位置情報の点群データをプロットした走行マップを作成する作業となるため、操作者が予めソフトウェアのスキルを習得しておく必要があります。作業については、今回の実証で使用した走行コース（走行時間 1 分程度）のマップ作製で、約 20 分程度の作業時間が必要であることが確認できました。

走行操作について、手動の場合は、本体起動のキー操作と、前進、後退選択、ハンドル、アクセル操作のみであるため、予備知識がない状態でも簡単に操作することが可能であることが確認できました。自動走行については、EV ロボットに搭載された走行制御用 PC 上で走行の開始、停止を制御する方法と、遠隔制御拠点から制御する方法があります。EV ロボット搭載の制御 PC を直接操作する場合は、EV ロボット本体に取り付けたディスプレイを確認しながら操作することが可能です。ただし、今回の実証では冬期間の運用であったことから、ディスプレイの表示部に不具合が発生し正常に動作することができませんでした。実際に運用される時期としては、4 月から 10 月を想定しているため、同様の不具合は発生しないものと考えられますが、冬期間の運用が必要な場合には、各機器の動作温度に留意する必要があると考えられます。

同様に運用環境の温度に起因する留意事項として、EV ロボットの保管場所の温度条件が運用に大きく影響することが確認できました。EV ロボットは起動時に制御部分を起動後、手動・自動での運転操作が可能になりますが、低温状態の場合、制御部が起動しないため一切の運転が不可となることが確認できました。今回の実証期間が 2 月中旬の厳冬期であっ

たことも影響していますが、実運用する際の留意事項として挙げられます。また運用に必須となるメンテナンス作業である充電対応について、バッテリー容量がほぼ無い状態から満充電までの時間は約 7 から 8 時間程度、1 日の使用程度の場合の充電時間は約 2 時間程度であることが確認できました。実運用において、複数の EV ロボットを運用する環境として、複数の充電コンセント、およびケーブルを用意しておくことが望ましいと考えられます。

監視センターの運用について、2 つの要素である制御操作と映像監視について検証しました。制御操作については、EV ロボットのリアルタイム位置情報をマップ上にアイコン表示し、走行の開始、停止操作を行うことが可能な制御ソフトウェアを使用して実施しました。本ソフトウェアでは、わかりやすい操作ボタン、マップ表示の画面構成であり、簡単に操作することが可能であることを確認しました。複数圃場を走行する EV ロボットを、同時に制御する場合でも、マップ表示をタブで切り替えることで対応可能であり、画面切り替え等による操作ミス、タイムラグを発生させることなく運用できることが確認できました。

映像監視については、スマートガイドシステムとして導入したテレビ会議システムを使用して検証を実施しました。

運用にあたっての事前設定としては、EV 前後のカメラ用 PC、および監視センターの PC を含むテレビ会議の設定を行う必要がありますが、対象の参加者を選択し追加する程度の容易な操作で実施する事が可能であり、高スキルが必要ないことを確認しました。テレビ会議への接続については、各 PC 端末に予めインストールしたソフトウェアにおいて、会議への自動接続を有効にすることで、各 PC 上の操作を行うことなく、拠点間の通信が可能な状態であれば自動で接続可能であることを確認しました。監視側の操作については、簡単な操作で画面分割の変更、監視映像の録画を行うことが可能であることを確認しました。

②スマートガイドシステム

No	評価・検証項目	検証方法	評価	コメント
1	システム一式の着脱・ 保管・メンテナンス	・ 機器リスト、接続構成図の作成	○	・機器リスト作成 ・機器にラベルシール等を貼付 ・接続構成図を作成 ・春に利用するまでの冬期間保管場所として一時的に鶴沼改善センターにて保管する運用実施
2		・ トラブルQA等のマニュアル化	○	・トラブルQAシートを作成 ・トラブルの都度追記
3		・ システム利用管理簿の運用	○	・利用実績を記録 ・トラブルの都度追記
4		・ 故障等トラブル履歴運用	○	・トラブル履歴シートを作成 ・トラブルの都度追記

③IoT センシングシステム

運用資料として、以下を作成しました。

- ・ AI カメラ接続構成図
- ・ AI カメラ管理表（シリアル番号、保管場所）
- ・ AI カメラセットアップマニュアル
- ・ AI 学習手順書
- ・ AI カメラ運用手順
- ・ AI カメラ製品マニュアル（収集）

次年度運用に向けて内容を充実してゆく予定です。

更に、AI カメラ販社との連絡先を体系化して問合せ等に活用する仕組みを整理しました。

4.4.2 ローカル 5G を用いたソリューションの実装性に関する検証

ローカル 5G 設備を含めた本実証システムの機器運用においては、農業分野特有の課題として、農作業場所周辺にサーバー室のような通信機器の設置に適した屋内環境がないことがあげられます。本実証においては鶴沼ワイナリーでは北海道ワインの事務所内に機器を設置することができましたが、後志ヴィンヤードでは車庫の一角に屋外用のラックを設置し、その中に機器を収容しました。横展開地域でも本実証システムの利用場所の近辺にはサーバー室のような機器の運用に適した場所は少ないと考えられ、防水・防塵対策が取られた屋外ラックの利用を推奨します。温湿度管理も含めて、機器の使用適正環境が保たれていることを確認することが重要となります。

また、本実証期間中は屋外用ラックを施錠することでセキュリティ対策を取りましたが、サーバー室のように入退室管理を行うことができないため、機器の盗難やデータの抜き取りへの対策も重要となります。ローカル 5G は SIM の認証を行っているため不正利用は発生しづらいと考えられますが、コア装置に接続されデータを抜かれてしまうと重要なデータの流出となることも考えられるため、物理レイヤーでの対策も必要だと考えます。監視カメラを合わせて設置する等、物理的にアクセスしづらい環境を整備する必要があると考えます。

防水・防塵対策については、精密機器は屋内保管や屋外用ラックによる運用を前提として実証を行い、農作業での ICT 運用として泥水等による故障リスクがどの程度発生したかなど生産者にヒアリングを行い運用面での課題等について整理いたします。

物理セキュリティについては、事務所・車庫などの施錠と監視カメラを設置することを前提として実証を行い、EV 車や軽トラに搭載して圃場利用するケースも含めて、物理セキュリティについて生産者ヒアリングで確認し整理いたします。

4.4.2.1 ローカル 5G 活用モデルの構築・検証

昨年度、本実証の圃場候補である鶴沼ワイナリーにて「中山間地域におけるローカル 5G 等を活用した地域課題の解決（果樹農業における電動ロボットの実現）に関する調査研究の請負」の電波調査を実施し、その調査結果を踏まえつつ本実証に臨みました。ローカル 5G を活用したスマートな醸造用ぶどう果樹栽培の実現に向けて北海道ワイン（株）の鶴沼ワイナリーおよび後志ヴィンヤードに設置したローカル 5G 環境及びスマートガイドシステムや IoT センシングシステムの環境は、実証終了後も実装フェーズとして、継続的に利用して参ります。今年度、別で採択されております「R3 年度イノベーション創出強化研究推進事業」とも連携し、剪定・収穫用 AI ロボット開発にも役立つプラットフォームとして有効活用の可能性を検討継続いたします。

特に後志ヴィンヤードは、北海道新幹線の札幌延長の効果を期待しており、スマートヴィンヤードのショールームとしての付加価値を持つべく取り組みを継続致します。本実証で構築したローカル 5G 環境下でのスマート果樹園の展開を見込み、有力な広報性を発揮する予定です。

本実証で構築したローカル 5G 環境を維持継続していくため、コンソーシアムが一体となって連携し積極的な活用・横展開を図っていきます。なお、別で採択されております、R3 年度イノベーション創出強化研究推進事業も主要なコンソーシアムメンバーが揃っていることから、引き続きスマート果樹園の高度化を図って参ります。更に、今回コンソーシアムメンバーに加わっていただいた各自治体と連携し、周辺エリアの果樹園や北海道ワイン（株）の契約農家などへの展開・利活用を検討しています。

具体的には、令和 4 年度のスマート農業実証（農研機構）の中で、本実証で構築したソリューションの実演デモ等を行い、周辺地域の自治体やワイナリー等の意見も聞いたうえで、ビジネス展開に必要な具体的なマイルストーン・KPI を設定します。各自治体は社会実装も踏まえて、地域農家の参加調整および活用に向けた検討・課題点の洗い出し等を行うなど、具体的な実装に向けてコンソーシアムメンバーと連携し進めて参ります。遠隔監視センター機能の利用拡充や運用については、東日本電信電話株式会社が主体となり、スマート農業およびローカル 5G の普及を目指します。各自治体には遠隔監視を含めた運営機関の在り方、他作物や他分野への活用・展開に関し、コンソーシアムメンバーと共に検討いただく予定です。

本実証終了後も継続して中山間地域の課題解決を図っていくため、ユーザーニーズ・経済性・運用管理方法・機器の所有権・契約・関係者間の役割分担の体制等多面的に検討することで事業モデル構築・実装計画の策定を行いました。

(1) 想定される具体的な主体・ターゲット

表 4.4.24 想定される具体的な主体・ターゲット

主体地域	ターゲット
果樹園のある自治体	果樹園営農者 ・新規参入者 ・既存営農者 北海道ワイン（株）契約農家

モデルとして中山間地の果樹園をターゲットとし、本実証は体系化された栽培管理システムを利用することで、新規参入者でも比較的容易に果樹営農に取組み、一定の品質まで平均化・体系化できるようにする「データ駆動型」果樹栽培を指向しているため、対象者は新規・既存の果樹園営農者とします。また早期の横展開の観点からコンソーシアムメンバーの北海道ワイン（株）の契約農家への展開を見込みます。

ターゲットを詳細なカテゴリに分類すると、①本実証の EV 走行機能の範囲である最大傾斜が 15 度以下の圃場、かつ、②省力樹形と言われる垣根式での醸造用ぶどう栽培を行う営農者を第一優先カテゴリとし、①かつ②' 棚式での醸造用ぶどう栽培を行う営農者（本実証の生産者 3 契約農家が該当）を第二優先カテゴリ、①かつ②” 棚式で他果樹栽培（りんご等）を行う営農者を第三優先カテゴリ、に分けることができます。

早期の横展開の観点から、まずはコンソーシアムメンバーの北海道ワイン（株）の契約農家（第一優先/第二優先カテゴリに相当）への展開を見込むとともに、コンソーシアム参加自治体のワイナリー営農者に対し、視察会・意見交換会等の機会を通じて展開を行う予定です。

(2) 対象となるシステム・パッケージ

表 4.4.24 対象となるシステム・パッケージ

システム名
①リモートEVロボット・コントロールシステム
②スマートガイドシステム
③IoT センシング
④栽培管理システム

本実証で取り組むシステムおよび令和3年度「スマート農業実証プロジェクト（ローカル5G）」で導入予定の栽培管理システム（果樹園向けの営農管理システム）とIoTセンシングを導入パッケージモデルとして検討しました。ヴィンヤード規模に応じた展開を予定しています。EVロボットは、大規模果樹園は購入・リースで所有する想定ですが、小規模果樹園はレンタルや業務委託で利用するケースも検討しました。

①リモートEVロボット・コントロールシステムは、まずは省力化樹形とされている垣根式栽培が主なターゲットとなりますが、日本国内に多い棚式栽培にも展開できるように実装性を評価・検討します。もし、棚式栽培への対応が可能になれば、醸造用ぶどう以外の果樹への展開可能性が高まると想定しています。

②スマートガイドは、パートやアルバイトを活用して繁忙期作業を行っている中大規模の果樹園と、指導者とのコミュニケーションが重要となる新規営農者の遠隔指導に活用できると想定しています。また、コロナ禍の環境を踏まえると、同居家族以外を作業員や指導者としている果樹園のすべてが対象ユーザーとなります。

③IoTセンシングの特に病虫害AIカメラは、AI学習がプログラムレスで行える容易さがメリットであり、病虫害の地域特性に近いエリアでは同じAI学習プログラムを転用利用可能と想定されることから、地域でのシェアリング利用もメリットが高いと考えます。また、利用に際しては①EVロボットとのセットである必要はなく、所有する農機車両等に搭載し低速度で走行させてサンプリング撮影で病虫害傾向を把握できることから、運用を含めて低価格サービス化ができれば普及可能性は高いと想定しています。

生産者である北海道ワイン（株）のニーズとしては、AIカメラの病虫害判定データは、IoTセンサーの温度・湿度・地温・日照データと合わせてGISで管理し、データ相関関係や圃場毎の最適防除時期等の分析に活用することを期待しています。また、栽培管理システムにおいて、防除作業の作業記録と薬剤散布量の最適化・防除効果の分析などとも連携したものとすることを期待しています。

これらのシステムは、北海道ワイン（株）のような大規模果樹園だけでなく、小規模果樹園でも手軽に利用できるように、生産者の意見を参考にフリーソフトGISを活用するなど展開に向けた工夫を行っていますが、今後も近隣ワイナリーの意見を参考にするなど普及展開に向けたニーズ把握に努めます。

(3) 前提条件

リモート EV ロボット・コントロールシステムに関して、費用対効果を出すためには遠隔監視センターが必要です。必ずしも導入する自治体に監視センターが設置、あるいは希望時間の運用ができるとは限らないため、広域遠隔センターの連携活用を視野に、柔軟な運用形態を検討範疇とする必要があります。本実証ではその運用形態に適合するパターンでの検証を行いました。

(4) 機能要件

表 4.4.25 機能要件

システム名	機能要件
①リモート EV ロボット・コントロールシステム	別途「機能検証」で整理
②スマートガイドシステム	別途「機能検証」で整理
③IoT センシング	別途「機能検証」で整理
④栽培管理システム	R3「スマート農業実証プロジェクト（ローカル 5G）」にて整理

機能要件やネットワーク要件ならびに事務処理フロー等は本実証の「機能検証」「運用検証」にて整理しました。

(5) 本事業で想定するビジネスモデル

ビジネスモデルは、令和 2 年度「農業分野の課題解決（自動トラクター等の農機の遠隔監視制御による自動運転の実現）に向けたローカル 5G 等の技術的条件及び利活用に関する調査検討」の報告同様、スマート農機、ネットワーク基盤、遠隔監視システム等の必要な機材を含めた作業委託サービス体制を構築し、生産者等が委託料を支払ってサービス利用するモデルの推進により、生産者の EV ロボット購入などのコスト削減、耕作面積拡大による収入増、農業の継続性向上を図ることを想定しております。

他地域への普及にあたっては、実演デモ等の広報活動を通じ、自治体やワイナリーとの連携を深めて、実証後も地域のスマート農業を牽引する『先進的農家』へのソリューション導入の技術サポートや、スマート農業を積極的に推進・助成する『自治体』と協力しインフラ整備・ソリューション導入を支援するなどの活動を検討しています。

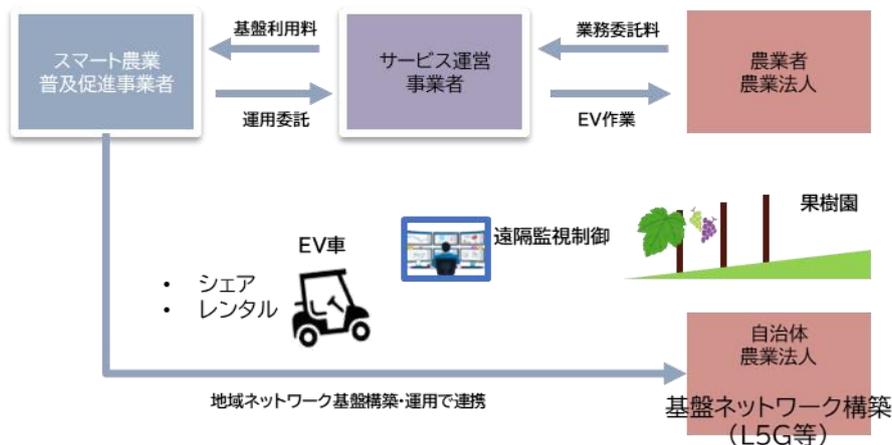


図 4.4.35 ビジネスモデルイメージ

(6) 事業主体と役割

表 4.4.26 事業主体と役割

事業主体	役割
サービス運営事業者	生産者、農業法人へ果樹園作業委託サービスの提供 ・EVロボットの運用（設定、移送、現地対応） ・ネットワーク基盤の運用（機器管理、無線局免許） ・遠隔監視センターの運用
スマート農業普及促進事業者	ネットワーク基盤、EVロボット、遠隔監視センターの基盤構築、保守 ・サービス運営事業者に対して通信や遠隔監視制御運転に関する技術支援 ・新たな農作業のスマート化検討 ・自治体、国などと通信インフラ整備、優遇税制などの連携 機能・役割として、①ロボット等のレンタル、②スマート農業を使った作業委託、③通信インフラ整備・提供、④ソリューション構築・運用、⑤農業クラウドサービス提供、⑥農業技術アドバイザを有し、現在の「コントラクター」組織がスマート農業の領域に拡大して普及促進することを期待
農業生産者、農業法人	・サービス運営事業者へ農作業委託サービスの依頼 ・作物種別、作業内容、作業面積検討
自治体、国	・スマート農業普及促進の支援 ・通信インフラの定住促進活用による構築費等負担 ・税制優遇措置の支援等 ・空知エリア、後志エリア、近隣自治体を想定

(7) 導入効果

EV ロボットやロボットトラクター等「スマート農機」の遠隔監視制御による無人走行の普及による労働力不足の解消、労働費の削減、耕作・栽培面積の拡大による収益増としました。

(8) 想定される課題と対応策

想定される課題は、以下が考えられます。

- ・ ユーザーニーズとコストの乖離
- ・ 監視制御に掛かる安全面の担保
- ・ シェアリングサービス、レンタルモデルのサービス内容の検討
- ・ 利用者・操作者 ICT レベルの向上

但し、本実証を通じて広域遠隔監視センターが実現することにより、扱うことのできるスマート農機の数や稼働数が増え、監視センター間での委託サービスも考えられます。小さくは地域での対応、発展形として自治体間での広域委託サービスが実現できれば、コストの圧縮化、スマート機器稼働率の向上に繋がると想定します。

ビジネスモデルのフィージビリティ課題に対しては、各ステークホルダーへのアプローチを継続して実施しており、農水省「農業機械の安全性確保の自動化レベル」におけるレベル2：使用者の監視下での無人状態での自律走行、からレベル3「無人状態での完全自律走行」までを段階的に進めていく必要があると考えています。

4.4.2.2 普及展開方策の検討

実証で活用したローカル 5G 機器および EV ロボット等の社会実装に向けて、今回の実証は各圃場や施設を模擬モデルとして検証しました。

表 4.4.27 実証時の圃場・監視センター・回線構成

【今回実証】

	浦臼町	仁木町	余市町	岩見沢市	別市町村
圃場	鶴沼ワイナリー	後志ヴィンヤード	契約農家	今後参加検討	—
監視センター	鶴沼改善センター	—	—	新産業支援センター	北海道ワイン(株)本社
通信回線	ローカル 5G	ローカル 5G	LTE	固定光	固定光

表 4.4.28 社会実装時の圃場・監視センター・回線構成

【社会実装モデルの構想】

	A 自治体	B 自治体	C 自治体	D 自治体	別市町村
圃場	大規模 ワイナリー	中規模 ヴィンヤード	小規模 ヴィンヤード	今後 参加検討	—
監視センター	地域遠隔 監視センター	-	-	広域遠隔 監視センター	自社監視 センター
通信回線	ローカル 5G	ローカル 5G	LTE	固定光 ローカル 5G	固定光

圃場については、様々な規模・環境になることを想定しています。そのため通信回線もローカル 5G は初期段階では大規模～中規模ヴィンヤードへの配置、小規模ヴィンヤードは中山間地では通信環境が整っていない可能性もあり LTE での検証も考慮し実証しました。また特に重要になるのが遠隔監視センター運用です。すべての自治体で夜間も含めた 24 時間の監視は難しく、監視ニーズも地域や圃場で区々と考えると機能別に配置できることが望ましく、かつ災害等に備え BCP 対策としての役割を担うこともできます。

機能分担案

- ・ 自社遠隔監視センター（企業内での監視、簡易設備）、運用は社内規定
- ・ 地域遠隔監視センター（自治体単位での監視）、運用は 9 時～17 時など
- ・ 広域遠隔監視センター（自治体跨りでの監視）、運用は 24 時間 365 日

今回の実証で複数の遠隔監視拠点からの制御自体の有効性・実効性は確認できました。様々な圃場で実証をしたことにより、実装について地域ごとの特性（圃場規模、必要なインフラ設備など）により経済効果や労働環境の改善効果は区々であると改めて認識しました。

ローカル 5G の特性は圃場が広く、また課題解決システムの利用台数（同時稼働：営農労力）が増えてくればより効果を発揮する反面、規模に応じては LTE 等のナローバンドで必ずしも不足とは限りません、使い分け・切り替え含めたインフラコストも社会実装および普及には欠かせない要素となります。また地域によっては、本実証における醸造用ブドウ栽培の技術をそのまま他の作物や地域で活用できるものではなく、作物種類や動作要件（勾配、栽培方式）等も異なるため、地域毎に特定の企業への活用や特定用途のみの活用を推進するのではなく、その地域への公平性も担保しながら導入システムの検討やロボットのチューニングが必要であり、経済効果の精査をしながら、その活用方法、ビジネスモデルの練度向上が重要です。

4.4.3 ローカル 5G の実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討

課題実証における各システムの目標と実証結果、実装に向けた課題についての表を下記に示します。

表 4.4.29 目標・結果・実装に向けた課題

システム名	目標	結果	実装に向けた課題
①リモート EV ロボット・コントロールシステム	遠隔からの映像監視による EV ロボット制御、および複数拠点からの遠隔監視制御の運用実現	走行速度約 2.5km/h において停止距離 1m を実現、複数拠点での EV 制御受け渡し 30 秒以内を実現	<ul style="list-style-type: none"> ・電波範囲の広域化 ・他無線システムとのシームレスな切替 ・機器の堅牢性強化
②スマートガイドシステム	スマートグラス等を装着した未熟練者への同時遠隔ライブ映像指導を実現	4 名同時遠隔ライブ映像指導を実現。オペニオン評価において運用可能との評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G 通信における課題無し デバイス起因課題有 <ul style="list-style-type: none"> ・装着性 ・屋外での可視性能（太陽光遮光）
③IoT センシングシステム	EV 走行の AI カメラ撮影でのリアルタイムな病虫害 AI 判定の実現	分析サーバーへのリアルタイム転送を実現	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル 5G 通信における課題無し AI 性能評価課題有 <ul style="list-style-type: none"> ・検出率向上等

(1) リモート EV コントロールシステム

本実証において、EV ロボットの遠隔監視制御において、単体、および複数の EV ロボットを同時に運用する環境、複数圃場の EV ロボットを遠隔監視拠点で制御する上で、ローカル 5G の低遅延性が有用であることは確認できましたが、実装に向けた課題としては、ローカル 5G システムの電波範囲の広域化と、温度、天候環境に対する堅牢性の向上があげられます。

電波範囲について、今回の実証では基地局からの離隔距離が 10m から 40m 程度の範囲で実施しており、問題なく動作していましたが、別途、UE を搭載した車両にて、遠隔監視制御等の TCP/IP 通信を実施しつつ移動を行い、遠隔監視の運用可能範囲を確認したところ、基地局から 100m 程度で通信が不安定になることが確認されました。実運用を想定した圃場内での運用を想定すると、非常に狭い範囲でしかローカル 5G の有効性を享受できない環境となり、費用対効果が非常に低いのが現状のローカル 5G システムの課題であると考えます。実運用においては、ローカル 5G、キャリア 5G・LTE とのシームレスな切替が必要になると考えられますが、その際の冗長性確保の方式について、メイン系とバックアップ系を切り替えて運用する方式、2 つまたはそれ以上のネットワークを同時に使用し、一方が切断されても片系で動作を継続する方式等が考えられますが、いずれの方式においても、遠隔制御に係る TCP/IP セッションの切断検知と切替に要する時間が重要と考えられます。本

実証において、遠隔制御システムの経路上で一部を意図的に切断し、異常停止するまでの時間を確認したところ、約 1 秒であったことから、ネットワークのシームレスな切替に必要な切断許容時間は 1 秒以内と考えられます。堅牢性の課題について、本実証で使用した UE 等の製品は、屋外対応製品ではありませんでしたので、2 月中旬の積雪、降雪、気温が 0℃ 以下という環境において動作させるために、本体の防護が必要でした。実運用時の 4 月から 11 月位の利用を想定した場合、今回の実証環境までの低温状況で運用することはないと思われませんが、耐水、防塵性について向上した屋外対応の UE を使用する、もしくは外部アンテナ端子を有した UE を対候性ボックスに収容する等の考慮が必要であると考えます。

(2) スマートガイドシステム

本実証内容を実現するという目標においてのローカル 5G 実装（通信）については、特段課題は見られませんでした。その他、システムの使用環境について、夏季炎天下の作業においてデバイスの装着性に煩わしさを感じる場面や、太陽光が強い場合にスマートグラスの映像が見えにくいなどの課題がありました。これらについては、頭部ではなく胸部に装着する形での作業カメラの運用等、引き続き検証を継続する予定です。

(3) IoT センシングシステム

上記(2)と同様に、本実証内容を実現するという目標においてのローカル 5G 実装（通信）については、特段課題は見られませんでした。AI での病虫害検出について、実運用環境での葉や果実への太陽光や雨粒の反射などがある場合でも同様の検出率を得られることが課題として挙げられます。実運用では検出のリアルタイム性よりも、検出率の向上が重要であるとの要望を果樹園から受けており、検出率向上についての検証を実施する予定です。

上記の継続検討課題につきましては、令和 4 年度は農林水産省「スマート農業加速化実証プロジェクト」事業にて実施いたします。

なお、上記に加え EV ロボットの自動運転のような利用においては、公道・私道及び複数の圃場（複数の土地所有者）を広くカバーすることが必要となります。現在のローカル 5G 制度では、このような利用は、他者の建物または土地等での利用（他社土地利用）に分類されるため、固定通信（原則として、無線局を移動させずに利用する形態。）の利用に限定されています。

ローカル 5G 機器の価格については、令和 2 年度の一式 1 億超といった価格帯から低廉化し、一式 5000 万円を切るまでになってきましたが、それでも 1 ユーザーが所有・運用するには高価なシステムです。複数のユーザーに利用してもらうことでコスト案分する必要があり、自己土地・他社土地で利用方法が制限される現状の制度では実運用が難しいと考えます。自治体協定等（特に今回のように同一振興局単位など）を結ぶことにより、公道等を含む広いエリアで移動通信が可能となるようなローカル 5G の制度改正が望まれます。

また、本実証のモデルとしては EV 車の遠隔作業を請け負うサービス運営事業者を立付ける想定であり、サービス運営事業者には ICT や無線システムを熟知した作業員を配置予定で、作業員は有資格者として無線従事者にも登録予定です。しかし、本実証モデルの場

合は EV 車が遮蔽物の陰に入ってしまった場合等、ローカル 5G の接続が切断され、機器の再起動が必要になる場面も発生すると考えられます。基地局については遠隔にて再起動の操作をすることが可能ですが、EV 車に搭載している UE についてはローカル 5G の無線接続が切断されてしまうと遠隔での作業ができません。そのため、基地局の再起動に関しては現地にて行う必要があります。本システムの効率的な運用を行うには作業員が現地に向かって再起動を行うのは現実的ではなく、各ほ場の所有者や責任者の協力を仰ぐことで対応することを検討しています。

ローカル 5G の現状の制度では、電波を発する機器を操作するには陸上特殊無線技士 3 級以上の資格を有し、無線従事者として申請しておかなくてはなりません。これまであまり ICT に触れてこなかった農業従事者の中から有資格者を集めるのは難しく、電波を発する機器の操作について条件付きでの緩和が必要だと感が増す。例えば、UE の再起動のような免許申請内容に影響を与えない軽微な作業については有資格者でなくても操作可能にする（再起動は利用エリアとして申請されている範囲内で行うことを前提とする）といった制度変更も必要であると考えます。

本実証システムを地域全体で利用し、スマート農業による地域活性化を実現するためにはこれまで ICT や無線システムに触れてこなかった農業従事者への教育も必要であると考えます。ハード面での補助だけではなくソフト面での補助・支援の充実も行い、スマート農業の気運を醸成することも重要であると考えます。

4.4.4 継続利用の見通し・実装計画

本実証において、課題解決システムとして行なった「EV ロボットリモートコントロールシステム」、「スマートガイドシステム」、「IoT センシングシステム」の継続利用について、コンソーシアムメンバーにて以下のとおり検討しました。

(1)維持管理費用

ローカル 5G 設備は、次年度以降も令和 3 年度「スマート農業実証プロジェクト（ローカル 5G）」で継続利用します。実証後のローカル 5G の免許人及び維持・費用運用は NTT 東日本が担う予定です。ローカル 5G 設備の維持管理費が今回導入構成の場合、1,000 万弱と高額であるため、次年度以降のマネタイズとのバランスを踏まえ利活用方法について引き続き検討していきます。

(2)性能評価

継続利用予定のローカル 5G は、今回模擬環境での検証が多かったため、翌年度改めて実圃場環境での再検証を進めていく予定です。また実利用も進めながら利用者目線での意見も収集していく予定です。

(3)地域課題解決

本実証システムは中山間地果樹栽培において、果樹園のニーズや期待感の高さもあり、地域貢献や地域活性化につながるものと考えており、本実証終了後も継続利用していきます。

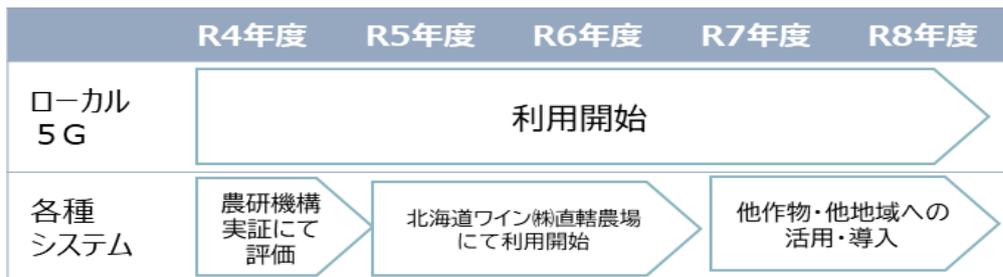
それらを踏まえ、課題解決システムの継続利用について表 4.4.17 のとおりまとめます。

表 4.4.30 課題解決システムの実証終了後の継続利用の見通し

課題解決システム	継続利用の見通し
EV リモートロボットコントロールシステム	<p>継続利用する</p> <p>ローカル 5G を用いた EV 遠隔制御に関しては、実用十分な形で動作が検証できたため継続利用する。模擬環境での実施に留まったため、樹木等の遮蔽環境下やはっきりとした傾斜下での影響有無を検証しながら、運用課題・方法を明確化していく。また後述する監視センター連携の運用についても視察回答を通じ地域への浸透を図る。</p>
スマートガイドシステム	<p>継続利用する</p> <p>ローカル 5G を用いた低遅延での配信による指導が実施できたことから、春から始まる営農指導等に活用していく。また配信プラットフォームはまだ性能余力もあり、周辺回線（C5G・LTE）との接続台数増や今回検証に用いたデバイス以外の活用余地も含めて検討および継続利用する。</p>
IoT センシングシステム	<p>継続利用する</p> <p>ローカル 5G を用いた EV 搭載 AI カメラ撮影に関しては、実用十分な形で動作が検証できたため継続利用する。模擬環境での実施に留まったため、樹木等の遮蔽環境下やはっきりとした傾斜下での影響有無を検証しながら、運用課題・方法を明確化していく。</p> <p>また病虫害学習のデータセット化など、地域へのフィードバックも加えて検討していく。</p>

(4)実装計画

本実証システムの実装計画を表 4.4.30 に示します。令和 4 年度は農林水産省「スマート農業加速化実証プロジェクト」事業にて、ローカル 5G・システムの経営評価を行い、令和 5 年度以降、実証農場である北海道ワインの直轄農場を主体として導入を進め、近隣農家等の連携・導入を模索します。特に地域のサービス事業者の検討は重要です。経営が成り立つようなマネタイズ方法や、事業継続性においても地域の雇用キャパシティ・労働時間、コントラクタ有無、単一/複数作物での運用検討、スキルの共有・引継ぎなど必要検討事項は多岐にわたります。そのため整備計画は令和 4 年度の経営評価結果を含め代表機関が主となりコンソーシアムで検討実施を行い、令和 7 年度以降、葡萄のみならず他の作物や近隣地域の農場への展開（広域化）を検討して参ります。



収支計画を以下の表のとおり検討しており、次年度実証においてサービス化モデルの検討も実施していく予定です。費用計画表はコア共用等を前提とし、拠点追加時の費用イメージです。年2ユーザの増加を見込んでいます。軌道に乗るまでは、スポットでの受託事業での実施を想定して算出しています。(回線費用等のランニングコストは導入範囲に応じて別途必要)

収支計画案

(単位：千円)

		2023年度	2024年度	2025年度
●収入		50,000	150,000	750,000
構築・保守含む		50,000	150,000	750,000
再掲	L5G 関連費用(CDU/RU/UE 等)	38,000	114,000	570,000
再掲	リモート EV コントロールシステム (2台利用、遠隔監視含む)	7,800	23,400	117,000
再掲	スマートガイドシステム	1,200	3,600	18,000
再掲	IoT センシングシステム	3,000	9,000	45,000
●支出		40,000	120,000	600,000
再掲	L5G 関連費用(CDU/RU/UE 等)	30,000	90,000	450,000
再掲	リモート EV コントロールシステム (2台利用、遠隔監視含む)	6,500	19,500	97,500
再掲	スマートガイドシステム	1,000	3,000	15,000
再掲	IoT センシングシステム	2,500	7,500	37,500
収支差額		10,000	30,000	150,000

4.4.5 課題実証における追加提案

本実証では、令和2年度「ローカル5G活用型スマート農業モデル実証スマート農業実証プロジェクト(ローカル5G)」でのロボットトラクターロボトラ遠隔間監視制御の機能拡張を考えています。具体的には、複数拠点での監視制御を実現するため、走行映像の複数拠点同時監視制御や、複数拠点にEV監視制御機能を持たせ複数個所から制御があった場合に予め設定したルールに基づきEVを制御するなどの機能拡張を実施しました。

具体的な利用シーンとしては、「北海道ワイン株式会社」によるユーザー監視から「鶴沼改善センター」での地域監視への切替え、さらに夜間作業は広域監視センターの「岩見沢市新産業ビル」との同時監視を想定しております。このように監視制御体制を柔軟に切り替えることが実現できると、ユーザーの急なスケジュール変更などで監視制御の業務を外委託する場合や、監視センター側の人材確保が難しい場合でも広域で連携し柔軟かつ経済的に体制確保ができるようになり、BCP対策を行うことも可能となります。

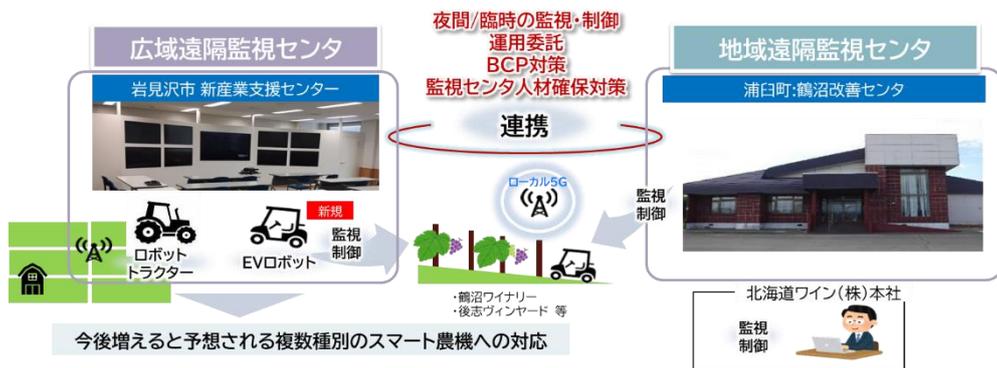


図 4.4.36 EV 監視制御の広域連携

表 4.4.31 社会実装モデルの構想

【社会実装モデルの構想】(再掲)

	A 自治体	B 自治体	C 自治体	D 自治体	別自治体
圃場	大規模 ワイナリー	中規模 ヴィンヤード	小規模 ヴィンヤード	今後 参加検討	—
監視センター	地域遠隔 監視センター	—	—	広域遠隔 監視センター	自社監視 センター
通信回線	ローカル 5G	ローカル 5G	LTE	ローカル 5G	固定光

機能分担案

- ・ 自社遠隔監視センター（企業内での監視、簡易設備）、運用は社内規定
- ・ 地域遠隔監視センター（自治体単位での監視）、運用は 9 時～17 時など
- ・ 広域遠隔監視センター（自治体跨りでの監視）、運用は 24 時間 365 日

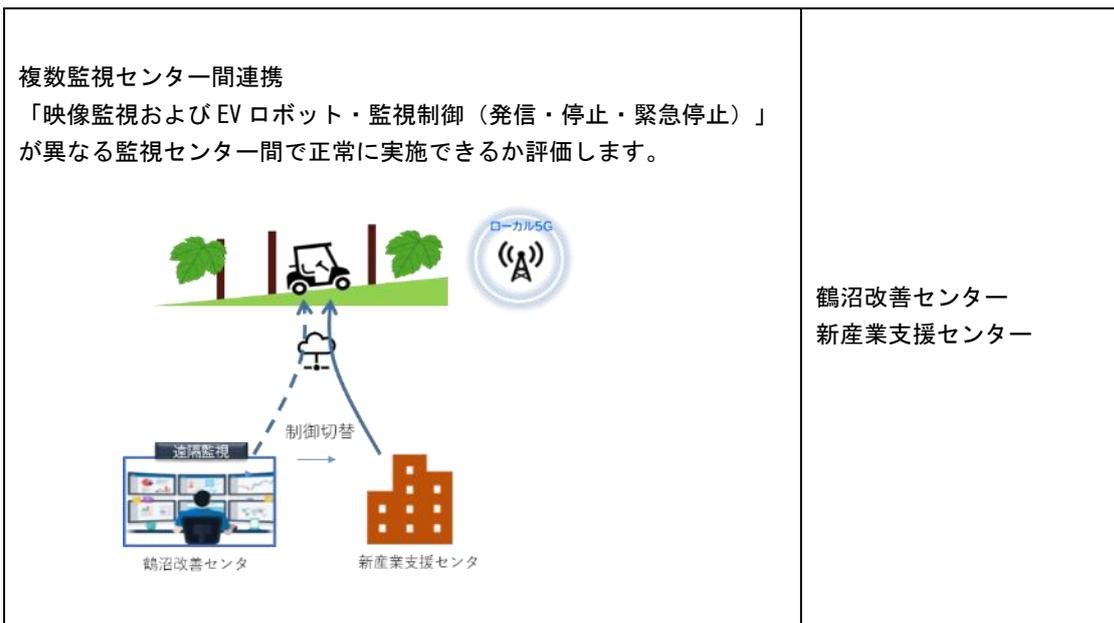
(1) 評価・検証項目 (4.4.1.1(1) 一部再掲)

「遠隔監視下での無人状態での EV ロボット自動走行制御（複数台農機及び複数圃場での同時作業を含む）」の実現に向け、傾斜のある圃場での安全走行等にむけてローカル 5G の低遅延な制御指示の検証を行います。そのため前述の圃場にて複数のポイントで評価を実施し、制動距離を計測しました。（測定ポイントは圃場状態を鑑み別途設定します。）

表 4.4.32 評価・検証項目

《ローカル 5G》

評価項目	対象圃場・施設
------	---------



(2) 評価・検証方法 (4.4.1.1(2) 一部再掲)

表 4.4.33 評価・検証方法

評価項目	検証方法
・ローカル5Gを用いたEVロボット制御試験	<ul style="list-style-type: none"> ・試験前スループット、Ping 応答試験 ・発信・停止の制御試験 ・緊急停止時の制動距離測定 <ul style="list-style-type: none"> ・複数ポイント（傾斜・遮蔽）測定（上り坂・下り坂） ・速度変更測定（3km/h、5km/h）
・EVロボットの安全走行	<ul style="list-style-type: none"> ・草刈/防除インプリメント付走行 ・障害物検知レーダー検証
・1拠点、複数拠点での映像監視（1台、2台、4台）	<ul style="list-style-type: none"> ・同一映像を、複数箇所に同時配信した場合のトラヒック計測（遅延やパケットロス増減） ・異なる複数映像を複数箇所に同時配信した場合のトラヒック計測（遅延やパケットロス増減） ・利用者のアンケート調査（品質、操作性）
・複数施設での監視制御連携	<ul style="list-style-type: none"> ・動作の正常性確認 ・Ping 応答測定 ・緊急制動した場合の遅延・制動距離測定 ・利用者のアンケート調査（品質、操作性）

(3) 広域遠隔監視センター候補地

岩見沢市新産業支援センター：岩見沢市有明町南1番地29

令和2年度「ローカル5G活用型スマート農業モデル実証スマート農業実証プロジェクト（ローカル5G）」にて構築したものを活用しました。



図 4.4.37 岩見沢市新産業支援センター外観



図 4.4.38 岩見沢市新産業支援センター内観



図 4.4.39 鶴沼改善センター、新産業支援センターとの連携模様

4.4.6 活用ソリューションの拡張と共同利用化（5G ソリューション提供センター構想）

5G ソリューション提供センターの具体的な提供サービス、提供形態は今後具体化される予定ですが、本実証においては 5G ソリューション提供センターに対してアプリケーション・ソリューションの提供が可能です。5G ソリューション提供センターにアプリケーション・ソリューションを提供することにより、より多くのユーザーの目に留まる機会が増え、普及が進むことを期待します。また、本実証システムはパッケージ化して展開していく計画ではあるものの、自動走行アルゴリズムや品種ごとの生育状況によるチューニング等現地での調整作業も発生します。5G ソリューション提供センターにアプリケーション・ソリューションの提供を行うことでこれらの調整作業を行う技術者の派遣・支援が可能となればよりスムーズに普及が進むと考えます。

ただし、本実証システムはまだ開発段階にあり、サービス提供形態等は未確定であるため、5G ソリューション提供センターの提供サービスや価格設定も鑑み、ユーザー企業への勧奨を行うこととします。

また、ローカル 5G 環境の整備に当たっては現地での基地局設置角度や基地局パラメータの調整が必要不可欠です。ローカル 5G は普及しつつあるシステムではあるものの、各利用ユーザー環境にてコンサルティングのうえ、現地調整を行うには技術者が十分にそろっているわけではありません。アプリケーション・ソリューションと同様にローカル 5G 部分についても 5G ソリューション提供センターにて技術者の派遣・支援がサービス化されると、より一層ローカル 5G 導入のハードルが下がると考えます。

5. 普及啓発活動の実施

ローカル 5G の普及のために以下のとおり、普及啓発活動として広報活動等を行いました。

5.1 映像制作への協力

ローカル 5G の普及を推進するため、三菱総合研究所様が制作する本事業の映像制作に本コンソーシアムも協力します。

また、代表機関グループ会社(NTT ラーニングシステムズ(株)等)と連携し、品質の高い映像コンテンツを提供致します。本コンソーシアムから提供する映像は三菱総合研究所様からいただいた「課題解決型ローカル 5G 開発実証動画撮影依頼書」にのっとり以下の表 5.1.1 のとおり撮影をしております。

表 5.1.1 映像制作について

撮影コンテンツ	具体的な撮影内容
ぶどう果樹園の風景	本実証フィールドである北海道ワイン様の果樹園の様子
草刈・防除ロボットの撮影	・草刈用に改造した自動運転 EV 車の走行の様子 ・防除用に改造した自動運転 EV 車の走行の様子 ※実証フィールドが積雪により走行できないため、別の模擬環境で走行させました。
草刈・防除ロボットを監視する姿	浦臼町内の監視センターにてワイナリーの自動運転 EV 車の走行状況を監視している様子
スマートデバイスのリモート指導	圃場での作業員にスマートグラスを身に付けてもらい、北海道ワイン(株)の熟練技術者が指導している様子
4K カメラでの果樹園撮影	・自動運転 EV 車に搭載する 4K カメラの様子 ・病虫害対策用の 4K カメラの様子
病虫害予兆の AI 判定の様子	・EV 車に病虫害 AI カメラ搭載して走行する様子 ・AI カメラ判定結果である ROI 画像の様子。

5.2 実証視察会の実施

今後、ローカル 5G を導入し地域・企業の課題を解決していくことに関心を持つ自治体・企業等に対し、本実証における背景・課題・実証内容・成果を説明することで、地域・企業のローカル 5G 導入検討の一助になることを目的とし、実証視察会を実施しました。

特に、これからローカル 5G の導入を検討する企業にとっては、現時点で目に見える形でのユースケースが少ないことから、本実証を視察することで具体的なユースケースをイメージして頂くことで検討の促進をはかりました。

弊社は「令和 2 年度 地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証」においても、2 件の実証視察会（オンライン）開催実績が有る為、参加者への訴求ポイントを熟知しているとともにオンライン開催運用の知見も有しております。

実証視察会においては、以下の項目について重点的に検討し開催しました。

表 5.2.1 実証視察会について

項目	内容
実証視察会における コンセプト	今後ローカル 5G の導入を検討する企業にとって、本実証を視察することで具体的なユースケースをイメージして頂き、具体的な検討の促進を目指します。
開催時期	2022 年 2 月 24 日 13 時～14 時
コンテンツ	<ul style="list-style-type: none"> ・コンソーシアムの紹介 ・プレゼン資料によるプロジェクトの説明 説明内容：実証事業の背景 実証デモ動画による説明 ローカル 5G のネットワーク・システム構成 実証内容（開発ポイント・ローカル 5G の活用内容） 今後の実装に向けて ・質疑応答・意見交換
開催方法	原則オンライン（Microsoft Teams の予定）
参加者	<ul style="list-style-type: none"> ・関係省庁等の出先機関（事業所管省庁） ・地方公共団体（地域の企業等の 5G 活用検討を促進する部署） ・総務省、総合通信局 等

5.3 その他普及啓発活動

本実証内容をコンソーシアム代表機関等ホームページにて報道発表を実施するとともに、各種講演会や媒体（Web・新聞等）を通じて広く普及啓発稼働を実施しました。

また、普及啓発活動や情報発信にあたっては、事前に総務省様、三菱総合研究所様と発表内容等の確認を行うことで相互に齟齬の無いよう努めました。

今年度の普及啓発活動の一覧は下表のとおりです。

表 5.3.1 普及啓発活動

発表日	発表媒体	概要
2021年9月22日	KISTEC（神奈川県立産業技術総合研究所）主催「第1回DX推進フォーラム」における講演	「NTT 東日本のローカル 5G に関する取り組み」をテーマに東日本電信電話株式会社 ビジネスイノベーション本部 テクニカルソリューション部 担当部長 門野貴明 が講演
2021年10月29日	「5G/IoT 通信展」における講演	「ローカル 5G 等自営無線が切り開く地域活性化」をテーマに東日本電信電話株式会社 執行役員 営業戦略推進室長 加藤成晴 が講演
2021年11月15日	スマート農業セミナー（一般社団法人北海道産学官研究フォーラム主催）における	「北海道におけるスマート農業最前線-スマートアグリシティの実現に向けて」をテーマにローカル 5G 実証について 北海道事業部ビジネスイノベーション部長が講演
2022年1月8日	「日本農業新聞」における記事	「ローカル 5G 地方に新風」として総務省実証における農業分野の取り組みとして紹介 ※取材は受けておりません
2022年1月24～28日	東日本電信電話株式会社オンライン展示会における事例紹介	「NTT 東日本グループのアセット」における「ローカル 5G オープンラボ」のアセット及び「オンライン展示」における「NTT 東日本によるローカル 5G の取り組み」にて本実証の取り組みを動画にて紹介

6. 実施体制

実施体制の構築にあたっては、農林水産省「スマート農業加速化実証プロジェクト（ローカル 5G）」のコンソーシアム機関に参画する機関を含むこととし、農林水産省の事業実施への協力、連携を行える体制としました。

6.1 体制及び役割

特に本実証における EV ロボット遠隔制御に関する検証にあたっては、EV ロボット遠隔制御を研究されている北海道大学大学院農学研究院の教授等に参加いただき、状況に応じた柔軟な対応を可能としました。

なお、体制構築にあたっては以下の点に留意しました。

- 実証地域での実装及び他地域への実装等の推進に必要な関係者が参加
- 実証で構築したローカル 5G 等の通信環境について、実証後も実証地域において継続的に利用し得る、学術機関、自治体、及び関係者を含めた体制
- 先進的な知見の活用、実際の農作業等による実証、協力農家との調整、通信関連の諸問題に対応できる体制

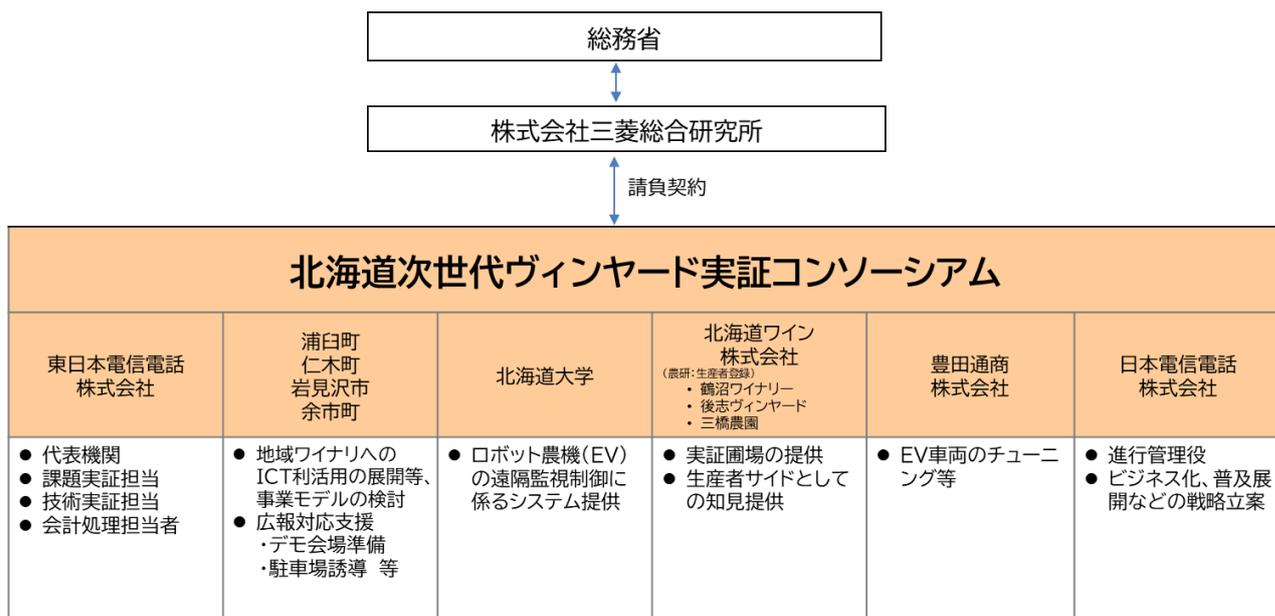


図 6.1.1 コンソーシアム体制

表 6.1.1 コンソーシアム体制および役割

	機関名	役割
代表機関	東日本電信電話株式会社	通信事業者。本実証では代表機関、プロジェクトマネージャとして全体統括及びローカル 5G 課題実証および技術実証等のソリューション検証を行う。
共同実証機関	北海道大学大学院農学研究院	研究機関。本実証では、EV ロボットの提供および遠隔監視制御に係るシステム調整と実証評価を行う。
	岩見沢市	行政機関。遠隔監視センター（新産業支援センター）の提供を行う。期間終了後を含め地域内外への技術普及に向けた広報活動、関連する他事業・施策との連動戦略を展開する。
	浦臼町	行政機関。本実証での圃場（鶴沼ワイナリー）所在地。本実証における遠隔監視センター（鶴沼改善センター）の提供を行う。また、期間終了後を含め地域内外への技術普及に向けた広報活動、関連する他事業・施策との連動戦略を展開する。
	仁木町	行政機関。本実証での圃場（後志ヴィンヤード）所在地。期間終了後を含め地域内外への技術普及に向けた広報活動、関連する他事業・施策との連動戦略を展開する。
	余市町	行政機関。本実証での圃場（契約農家）所在地。期間終了後を含め地域内外への技術普及に向けた広報活動、関連する他事業・施策との連動戦略を展開する。
	北海道ワイン株式会社	実証圃場（鶴沼ワイナリー、後志ヴィンヤード）の管理・提供を行うほか、契約農家との調整を実施する。課題解決ソリューションに対し生産者としての知見・フィードバックを提供する。
	豊田通商株式会社	本実証にて使用する EV ロボットの仕様・性能等に関する知見提供およびチューニングに関する支援を行う。
	日本電信電話株式会社	通信事業者。ビジネス化検討、社会実証等の戦略立案を行う。

6.2 情報保全体制

代表機関である東日本電信電話株式会社は、ISMS の認証登録(JIS Q 27001:2014, ISO/IEC 27001:2013)を受けております。ISMS 認証登録証を図 6.2.1 に示します。



図 6.2.1 ISMS 認証登録証

また、以下のとおり情報管理方法を定めています。

- 本実証で使用する情報は、弊社内のファイルサーバで管理する。
- 本実証で使用する情報は、本実証の業務従事者のみがアクセスすることができる。
- お客様より頂いた情報は、受渡管理簿で管理し、受取から廃棄までの管理を実施する。
- お客様にお渡しする情報に、ウイルス等が混入しないよう、ウイルススキャンの実施などの対策を実施する。
- 当社発注先にも、当社と同様のセキュリティ管理を依頼し、管理されていることを確認する。

加えて情報セキュリティ推進体制は図 6.2.2 のとおり定めています。

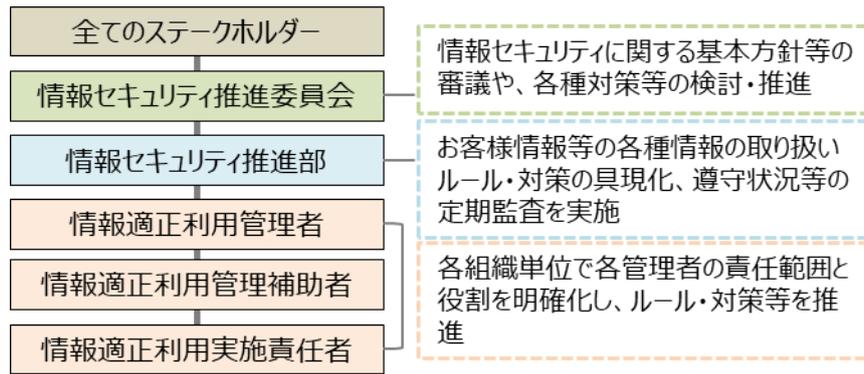


図 6.2.2 情報セキュリティ推進体制

また、保護すべき情報等の取扱いについては、次の履行体制を確保しました。

- ① 保護を要しないと確認するまでは保護すべき情報として取り扱う履行体制。
- ② 指定した取扱者以外の者に取り扱わせない履行体制。
- ③ 請負者に係る親会社や請負者に対して指導、監督、業務支援、助言、監査等を行う者を含む一切の請負者以外の者に対して伝達又は漏えいさせない履行体制。

また、本実証の情報保全責任者及び情報保全管理者も設置し、定期的に業務従事者に向けて要管理情報取扱いについて意識啓発や教育を実施しました。

業務責任者：東日本電信電話株式会社 北海道事業部 ビジネスイノベーション部長

業務管理者：東日本電信電話株式会社 北海道事業部 ビジネスイノベーション部
カスタマリレーショングループ 担当部長

業務責任者は業務従事者の監督を行い、業務における進捗管理や問題点の把握等を定期的に確認し、適切な指示を業務従事者に行い業務監督を実施し、また業務環境などの安全面についても監督し衛生管理を行いました。

要管理情報の管理は、アクセス権の設定や暗号化等を設定し、本委託業務の関係者のみ閲覧可能な環境を構築しました。

このため本実証を通じて知り得た保護すべき情報等について、代表機関の情報セキュリティ方針や規程等の社内規定ならびに情報セキュリティ推進体制に基づき、適切な方法で管理しました。

7. スケジュール

本実証の実施スケジュールを下記に示します。

表 7.1 実施スケジュール

大区分	小区分	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
契約処理等	受注契約			■				
	契約期間			■	■	■	■	■
	再委託契約・物品発注等			■	■	■	■	■
実証環境の構築	物品調達			■				
	機器設定			■	■			
	拠点間ネットワーク			■	■			
	ローカル5G設備				■			
	ローカル5G無線局免許申請				■			
技術実証	ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定				■			
	I. 電波伝搬モデルの精緻化					■		
	II. 電波反射板によるエリア構築の柔軟化						■	
	III. 準同期TDDの追加/パターンの開発							■
IV. その他のテーマ(外部アンテナ利用・反射板)							■	
課題実証	リモートEVロボットコントロールシステム							
	EV制御構築					■	■	
	事前検証						■	
	走行実証							■
	データ解析等							■
	スマートガイドシステム							
	システム構築				■			
	事前検証					■		
	実証作業						■	
	データ解析等							■
	IoTセンシングシステム							
	システム構築					■		
	事前検証						■	
	実証作業							■
	データ解析等							■
広域遠隔監視センタ(センタ連携)								
事前検証						■		
実証作業							■	
報告書作成	報告書作成					■	■	■
	報告書提出							●
								●