令和３年度　課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証

ローカル 5G を活用した山間部林業現場での生産性向上および安全性向上のための実用化モデル検証

成果報告書

令和 4 年 3 月 25 日

となみ衛星通信テレビ株式会社

目次

1. 実証概要 1

1.1 背景・目的 1
1.1.1 日本の林業の現状（全国） 2
1.1.2 林業担い手の概要（富山県） 4
1.1.3 労働条件について（富山県） 7
1.1.4 労働災害の発生について（富山県） 7
1.2 実証の概要 9

2. 実証環境の構築 11

2.1 実施環境 11
2.2 ネットワーク・システム構成 13
2.3 システム機能・性能・要件 26
2.4 免許及び各種許認可 27
2.5 その他要件 27
2.6 実証環境の運用 28

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) 30

3.1 実証概要 30
3.2 実証環境 30
3.3 実証内容 31
3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定 31
3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化 46
3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化 70
3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発 101
3.3.5 その他のテーマ: ローカル 5G の再送信におけるエリア構築の柔軟化 136
3.3.6 技術実証における追加提案 146

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） 147

4.1 実証概要 147
4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標 148
4.3 実証環境 154
4.3.1 ローカル 5G 基地局の構築 157
4.3.2 「作業車両の遠隔操作」システムの構築 161
4.3.3 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの構築 163
4.3.4 スケジュール 166
4.4 実証内容 167
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 167
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 260

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 271
4.4.4 継続利用の見通し・実装計画 273
4.5 その他普及啓発活動 276
5. 実施体制 277
6. スケジュール 280

1. 実証概要

1.1 背景・目的

【背景】

日本は世界有数の森林国である。国土の３分の２は森林であり、その４０％は人工林として育林され、その蓄積面積は年々増加している。また、そのうちの５０％が樹齢５０年以上を迎えており、資源を有効活用すると同時に、循環利用にむけて計画的に森林施業を実施していかなければならない。また、森林は多面的な機能を有しており、その発揮を通じて市民生活に恩恵をもたらす「緑の社会資本」として、地域の森林を保全していかなければならない。

その森林への国民の期待は、災害防止、温暖化対策、水源資源の涵養などの公益的機能が上位を占めているものの、特に近年は国内唯一の循環型資源としての木材生産機能への関心も高まってきていた。そして、昨今の「ウッドショック」といわれる現象で、国内の木材が不足し、木材の供給場所である、国内の森林林業への注目が高まっている。しかしながら、この旺盛な木材需要と価格の高まりという好機を活かせないという、産業として課題があらためて露呈している。林業の課題としては大きく下記の２つがある。

- 低い生産性
  林業現場は４G 電波が届かない場所も多いことから、IoT などを活用した生産性向上の取り組みも、農業など比較し遅れており、事業の採算性も低い水準となっている。

- 低い安全性
  全産業に比較し事故率が約10倍との統計もあり（令和 3 年 5 月 28 日林野庁発表資料に拠る）、新規参入や新規従事者の増加への障害となっている面もある。森林内で事故事案が発生した場合、その現場状況から救急体制が脆弱であり安全対策を十分にとることができない現場も多く見受けられる。

【目的】

目的は下記の①、②、③の３つである。

―課題解決実証―

① <u>安全性向上の課題解決実証と実装</u>
ローカル 5G 通信基盤と４K 映像および AI を用いた安全管理システムを構築のうえ、株式会社島田木材の実際の作業現場で運用し、定性面および定量面からの評価により安全性向上への実証を目的とする。本実証終了翌年の 2022 年度中に株式会社島田木材にて実装することを予定する。

② <u>生産性向上の課題解決実証と実装</u>
ローカル 5G 通信基盤と遠隔操作機能搭載フォワーダ（木材運搬作業車）を用いた遠隔操作システムを構築のうえ、株式会社島田木材の実際の作業現場で運用し、定性面および定量面からの評価により生産性向上への実証を目的とする。本実証終了後は、2023 年～2024 年より株式会社島田木材にて実装することを予定する。

―技術実証―

③　斜面および森林での電波伝搬モデルの構築
山間地をフィールドとする実証事業であることから、斜面および森林でのローカル 5G 電波伝搬実験も実施できる環境であり、様々なケースで今後活用が可能になる電波伝搬モデルの構築を目的とする。

1.1.1　日本の林業の現状（全国）

日本の総国土面積は約 3800 万 ha でこのうち約 2500 万 ha を森林が覆っている。割合にすると約 7 割もの面積が森林によって占められていることになっている。

この、国土面積に占める森林の割合を「森林率」というが、日本は、世界の中でもきわめて高い森林率を誇る国となっている。

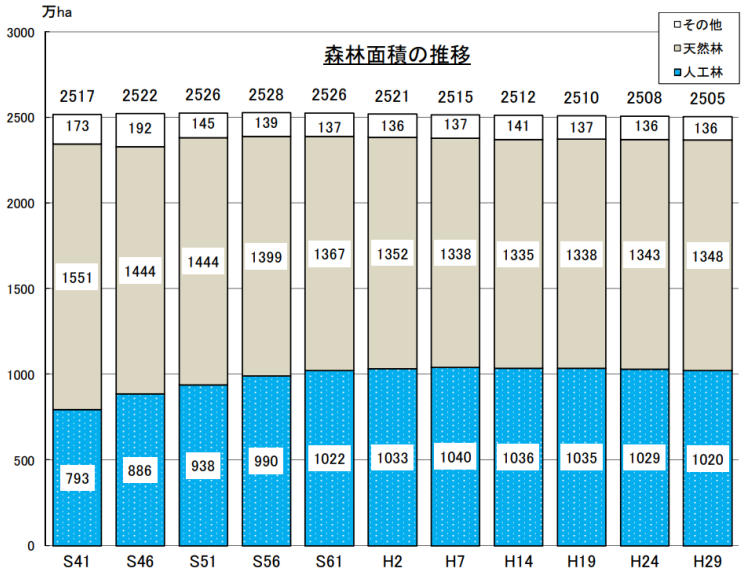


図 1　森林面積の推移

日本では森林に樹木の苗木を植えてから伐採に至るまでの行程を林業と総称している。苗木を植栽して、下刈り、間伐、枝打ちの作業を経て伐採可能な長さ、高さになるまで育て、成長をした樹木を伐採し運び出す行程をいう。

日本の森林所有の形態は、世帯で代々所有をしたり、民間や公共の法人が所有したりしているという形態が一般的である。

林業経営体の数は約 8 万 7000 経営体で保有山林面積は合計 518 万 ha である。このうち、1 世帯で事業を行う「家族林業経営体」の数は 7 万 8000 経営体で、林業の 9 割を占めており、残りの 1 割は「林業組織経営体」で株式会社や合同会社、森林組合、公益法人などで構成される。

表 1　林業経営体数の組織形態別内訳

（単位：経営体）

		林業経営体
家族経営体		78,080
	法人経営（会社等）	388
	個人経営体	77,692
組織経営体		9,204
	法人経営（会社・森林組合等）	5,211
	非法人経営	2,704
	地方公共団体・財産区	1,289
合　計		87,284

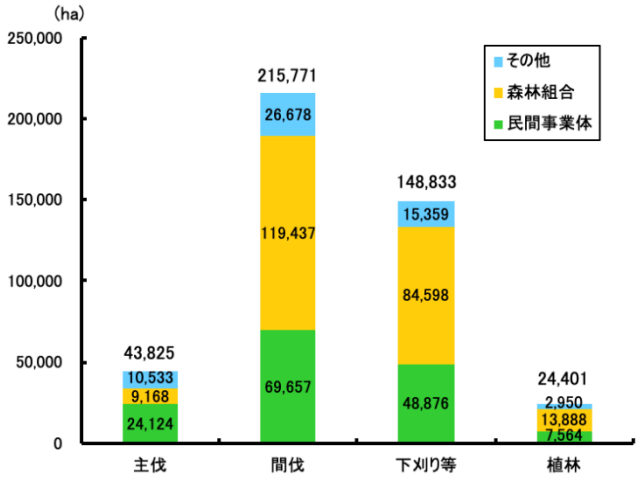
資料：農林水産省「2015年農林業センサス」

日本の森林所有の多くは育成や伐出を自分で行うことは少なく、多くは高度な技術や林業機械を有している森林組合などの林業経営体に委託し、作業費を引いた分の収益を得るのが一般的である。

伐期に達した樹木を伐採して素材（丸太）を生産する主伐では民間事業体の 3 分の２を占めている。

一方で、下刈りや間伐といった育林作業は、森林組合が全体の５割以上の面積を受諾しており、林森整備の中心的な担い手となっている。

表 2　林業委託割合

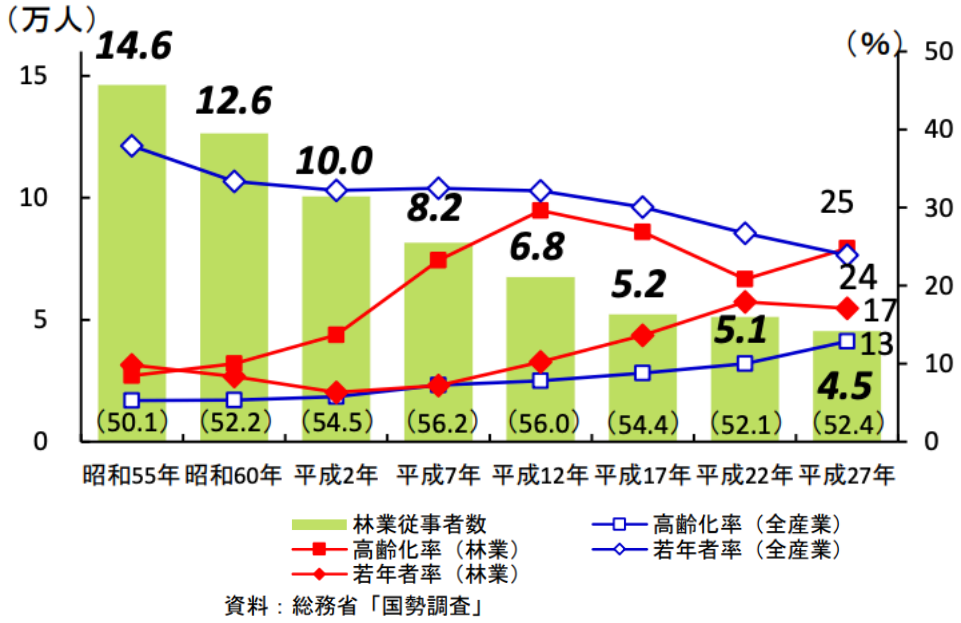


資料：農林水産省「2015 年農林業センサス」

森林施業は、主に山村で林業に就業して森林内の現場作業などに従事する林業就業者が担っている。林業に携わる労働力を雇用していくことは、山村の活性化や地方における雇用拡大のためにも重要であるが、長らく木材生産活動の停滞・縮小が影響し林業への従事者は年々減少している。

１９６０年には約４４万人であるが、１９８０年にはその 3 分の１の１４万人余り、直近の２０１０年にはさらに３分の１の約 5 万人となっている。この間、山村地域の高齢化も進行し、林業従事者の高齢化は１９８０年の８％から２０００年には３０％とピークをむかえ、２０１０年には２１％となっている。

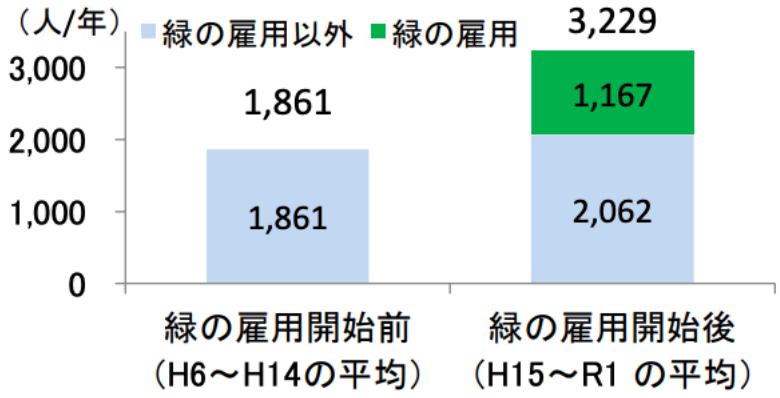
表 3　林業従事者数の推移



資料：総務省「国勢調査」

近年、林業従事者がやや増加に転じ、高齢化率化が減少しているのは一部の地域で若者の林業従事者が増えていることと、林野庁が実施している「緑の雇用」事業の影響があると考えられる。

表 4　緑の雇用割合



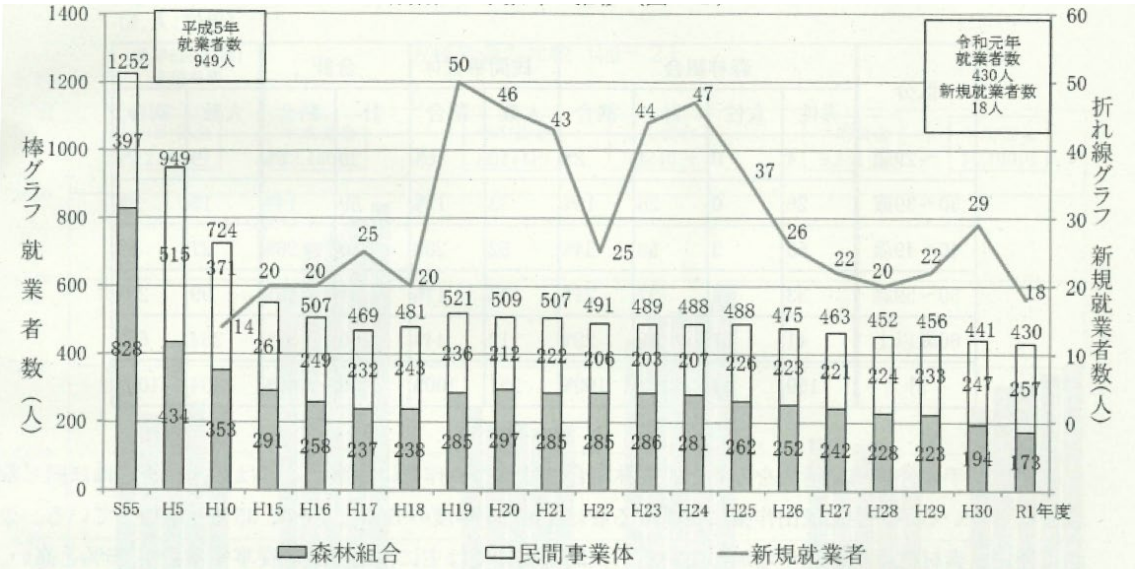
資料：林野庁業務資料

1.1.2　林業担い手の概要（富山県）

富山県における令和元年度の林業の担い手は 430 人で、内訳は森林組合が 173 人。民間事業体が 257 人となっている。

林業担い手数は、昭和 55 年以降著しい減少の後に一定の歯止めがかかり、近年は 450 人程度で推移してきたが、ここ 2 年は緩やかな減少傾向となっている。

表 5　林業担い手数等の推移



単位：人

年度	S55	H5	H10	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	R1
民間事業体	397	515	371	261	249	232	243	236	212	222	206	203	207	226	223	221	224	233	247	257
森林組合	828	434	353	291	258	237	238	285	297	285	285	286	281	262	252	242	228	223	194	173
計	1225	949	724	552	507	469	481	521	509	507	491	489	488	488	475	463	452	456	441	430

平成29年度における林業への新規就業者の3年後の定着率は59%で近年横ばいである。

表 6　林業への新規就業者の定着状況

就業年	H27	H28	H29	計	H30	R1	合計
新規就業者	22人	20人	22人	64人	29人	18人	111人
3年後就業者	11人	16人	13人	40人	(20人)	(15人)	(75人)
3年後定着率	50%	80%	59%	63%	(69%)	(83%)	

森林組合作業班員の年齢別構成をみると、平成 5 年度は 60 歳以上の者が占める割合が65%で平均年齢は 60 歳であったが、平成 16 年度には平均年齢が 40 歳代と若返りが図られ、以降平均年齢は横ばいで推移し、令和元年度には 50 歳となっている。

この要因としては、林業担い手センターの募集活動によるＩターン等の若者の参入や、これまで高齢者が担ってきた人力による作業（植栽、下刈り等）が減少し、間伐など高性能林業機械による効率化された作業が増加したこと等が考えられる。一方、民間事業体においては高齢者の割合が高い傾向にある。

表 7　令和元年度　作業員年齢別構成

（単位：人、%）

区分	森林組合				民間事業体		合計		(参考)H5年度 森林組合	
	男性	女性	計	割合	人数	割合	計	割合	人数	割合
～29歳	4	0	4	2%	16	6%	20	5%	9	2%
30～39歳	26	0	26	15%	33	13%	59	14%	15	3%
40～49歳	55	3	58	34%	52	20%	110	26%	27	6%
50～59歳	33	4	37	21%	44	17%	81	19%	99	23%
60歳以上	41	7	48	28%	112	44%	160	37%	284	65%
計	159	14	173	100%	257	100%	430	100%	434	100%

林業担い手の作業種別構成をみると、森林組合では３つの作業に従事する者は３割前後とほぼ同じ割合となっているが、主に伐出作業に従事する者は平成 20 年度の５％と比べて 35％と増加としている。これに伴い、素材生産量が近年増加している。民間事業体では主に伐出作業に従事する者が 55％と高い。

表 8　林業担い手作業種別構成

（単位：人、%）

区　分	県内森林組合		県内民間事業体		全国森林組合(H30)	
	人数	割合	人数	割合	人数	割合
主に伐出作業	61	35%	142	55%	4,807	33%
主に造林作業	62	36%	83	32%	6,285	43%
その他	50	29%	32	12%	3,609	25%
計	173	100%	257	100%	14,701	100%

林業担い手の定義

山林用苗木の育成、植栽、材木の保育・保護、材木からの素材生産、薪及び木炭の製造、樹脂、樹皮、その他の林産物の採集等に直接従事する者で、年間労働日数 30 日以上の者としている（林家の自家労力は除いている）。よって、森林組合の作業班員であっても、年間労働日数が、30 日未満の者は含んでいない。なお、産業分類上林業以外の業種であっても、上記に直接従事する者を含めるが、しいたけ等の栽培や林産加工業などで、ほだ木や材料の大部分を購入によって生産する者及びそこに雇用される者は除いている。

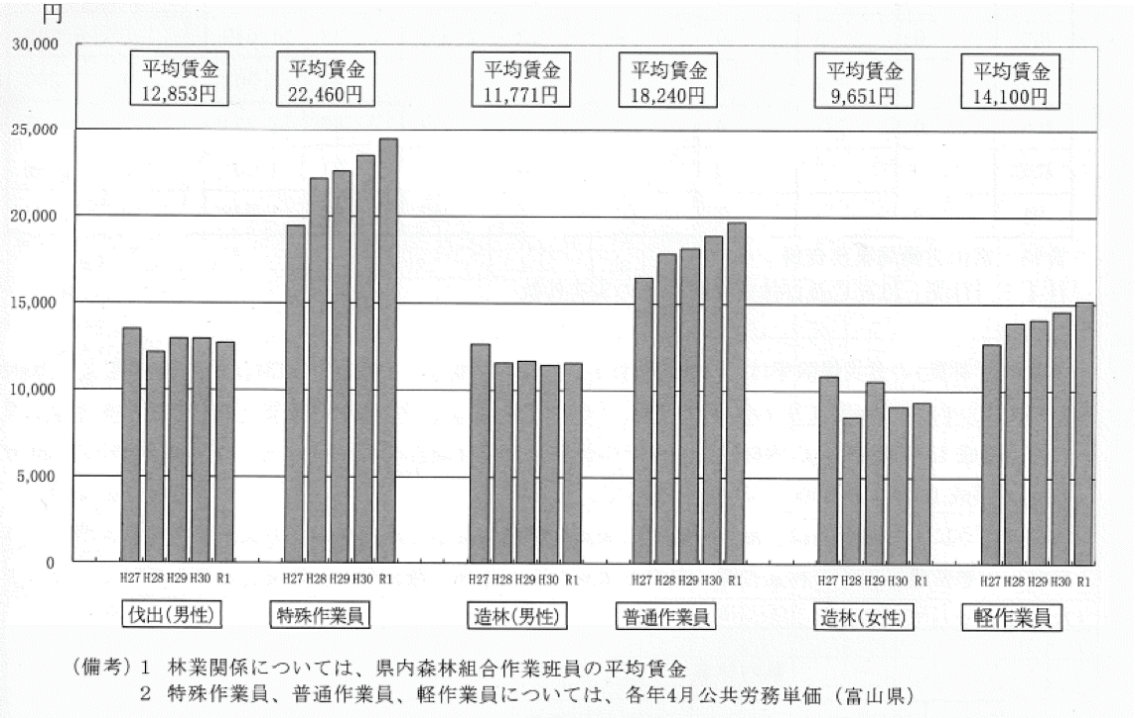
1.1.3 労働条件について（富山県）

林業労働は、天候や季節に制約されることから通年就労が確保されず、就業者等の雇用関係があいまいなことが多いことから、他産業に比べて社会保険制度の加入率、休日、雇用条件などにおいて不十分な点が多い。

また、現在の賃金水準については、公共労務単価よりも伐出業及び造林業のいずれも低い。（図－2）

さらに、高性能林業機械の導入や森林作業道等の路網整備が進んだことにより、以前に比べて労働負荷は軽減されているものの、未だに他産業に比べて労働災害の発生率が非常に高い。これらは、現在の林業担い手の定着や若年者の新規参入に対し、マイナス要因となっている。

表 9　労務賃金の比較



（備考）1　林業関係については、県内森林組合作業班員の平均賃金
2　特殊作業員、普通作業員、軽作業員については、各年4月公共労務単価（富山県）

しかしながら、森林組合作業員の年間就労日数は近年上昇傾向にあり、平成 26 年度から作業班員の約半数が 210 日以上の就業日数となっており、令和元年度のその割合は、72%である。以前の素材生産は、用材需要を中心に季節性があったが、近年はバイオマス等用途に応じた様々な供給先ができたため季節性が薄れ、また、冬季に林業を実施する等の取り組みによって通年雇用者が増加（25%（H25）→62%（R1））し、年間就労日数が上昇している。

1.1.4 労働災害の発生について（富山県）

富山県における死亡災害は、平成 26 年以降０件であったが、令和２年９月に１件発生している。また、労働災害に該当しない自ら施業する森林所有者等の死亡事故もほぼ毎年発生している。

表 10　労働災害発生数

年次	富山県						全国			
	林業		木材・木製品製造業		全産業計		林業		木材・木製品製造業	
	死亡（人）	休業（人）	死亡（人）	休業（人）	死亡（人）	休業（人）	死亡（人）	休業（人）	死亡（人）	休業（人）
H26	0	7	0	30	10	1,164	42	1,611	11	1,350
H27	0	3	0	18	12	1,052	38	1,619	7	1,233
H28	0	9	0	19	12	1,048	41	1,561	9	1,206
H29	0	7	0	17	11	1,189	40	1,274	6	1,185
H30	0	7	0	17	18	1,174	31	1,342	10	1,196
R1	0	4	1	17	11	1,083	33	1,248	10	1,161

資料：富山労働局業務資料
注１：「休業」は死亡及び休業４日以上の災害件数

なお、「林業」の労災保険率は、「木材伐出」が、平成７年度より 1000 分の 137、平成 10 年度より 1000 分の 134、平成 13 年度より 1000 分の 133、「その他林業」が、平成 10 年度より 1000 分の 39 となっており、平成 15 年度からは「木材伐出」と「その他林業」が「林業」に統合され、その労災保険率は 1000 分の 59、平成 18 年より 1000 分の 60 となっている。

このように、労働災害は、毎年労働力に直接打撃を与えるだけでなく、労災保険料の負担増に伴う経営への悪影響、若者の林業労働に対する嫌悪からくる林業離れなど、林業を振興していく上で大きな課題となっている。

表 11　富山県内林業の事故の型別災害発生数

年次	転落（人）	転倒（人）	倒壊・飛来（人）	激突・激突され（人）	切れ（人）	その他（人）	計（人）
H26	2	0	0	1	4	0	7
H27	1	0	0	1	0	1	3
H28	4	0	2	1	2	0	9
H29	4	1	0	1	1	0	7
H30	3	0	1	1	0	2	7
R1	2	1	1	0	0	0	4

資料：富山労働局業務資料

コンソーシアムメンバーの株式会社島田木材の島田優平社長は、実際に数年前にフォワーダ（木材運搬作業車）に搭乗作業中に、フォワーダごと見通しの悪い作業道から崖へ転落するという事故により大怪我を負った。経営者および作業員としても、現場の危険性を身をもって理解し、自社の範囲のみならず富山県内の林業業界全体においても、現場の安全性向上に関する啓蒙や取り組みを積極的に行っている。

図 2　実際の転落事故写真

（株式会社島田木材提供）

1.2 実証の概要

【フィールドエリア特性と実証環境の構築】

実証フィールドのエリアは、富山県南砺市の山間地でもひときわ山深いエリアにあり、ローカル 5G アンテナを置局するために必要なバックホール回線は、となみ衛星通信テレビ株式会社および地元自治体が所有する光回線を用いるしかない状況である（その他通信事業者は固定回線を敷設保有していない）。

加えて、４G 電波も届かないエリアであり、そのエリアにとなみ衛星通信テレビ株式会社が保有する光通信回線を用い、ローカル 5G 電波を使える環境を可能な限り安価に構築した。

また、となみ衛星通信テレビ株式会社局舎内に、ローカル 5G 設備、AI サーバ、NW 装置を設置し、極力実証フィールドに近い場所で必要なシステムを構築することにより、実用化の場合においても安定的なサービス提供につながる環境を構築した。

実証環境において下記の①、②、③の実証を行った。

【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）】

① 山間地斜面におけるローカル 5G 電波伝搬試験を行い、以下の 4 点の検証を行った。

a 電波伝搬特性やモデルの精緻化
b 反射板によるエリア構築の柔軟化
c 準同期 TDD の追加パターンの開発
d ローカル 5G の再送信におけるエリア構築の柔軟化

【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）】

② 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システム － 安全性向上分野
実証フィールド内に設置された高精細カメラ映像をもとに、AI を使った危険予知を可能とするシステム構築を行った。

③ 「作業車両の遠隔操作」システム － 生産性向上分野
作業車両に搭載した高精細カメラ映像および遠隔操作信号をローカル 5G のネットワーク経由で遠隔側に伝送し、作業員の安全を確保しつつ効率化を実現する作業車両の遠隔操作を可能にするシステムの構築を行った。

2. 実証環境の構築

本実証は林業分野における生産性や安全性の課題を解決するために、ローカル 5G を活用したシステムを富山県南砺市の利賀村（山林）に構築した。

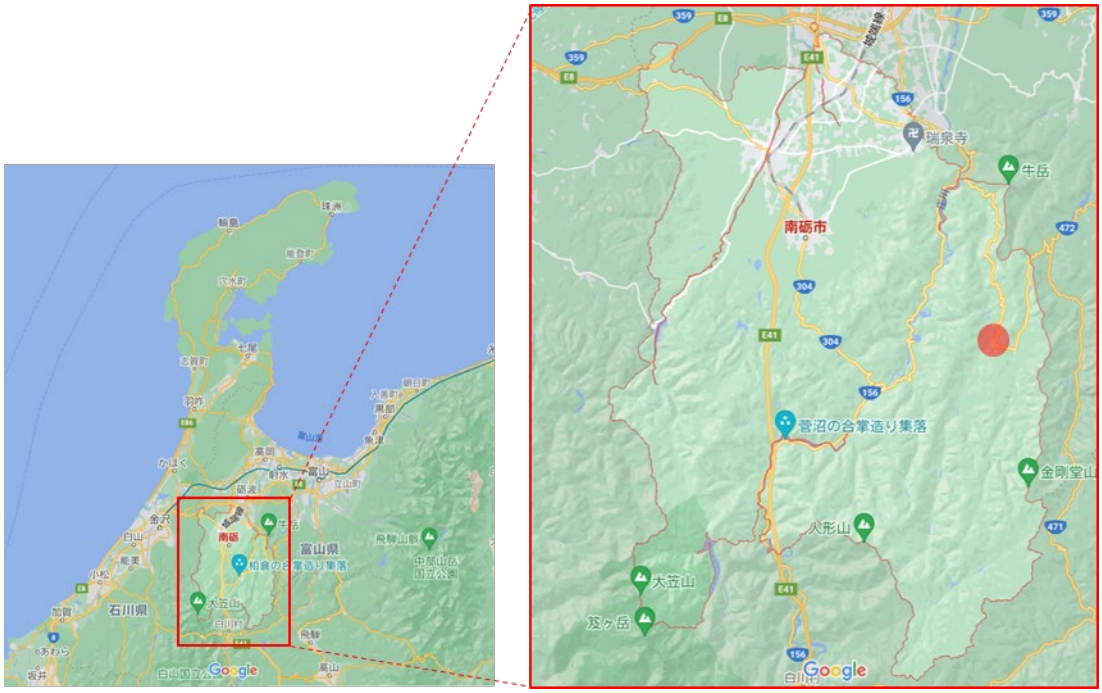


図 3 実証エリアの地図

南砺市は、実証コンソーシアム構成主体であるとなみ衛星通信テレビ株式会社のケーブルテレビサービスのエリアであり、実証を行う利賀村ではコンソーシアムメンバーである株式会社島田木材が土地を所有・管理し間伐作業を行っている。

本実証では実際に間伐作業を行っている場所でローカル 5G のシステムが有効であるかを実証して、検証した。

2.1 実施環境

実施した環境は富山県南砺市利賀村の山林であり、山林における斜面の状況による電波伝搬特性等の精緻化や、電波反射板等によるローカル 5G エリアの柔軟化について検証を行った。

本実証エリアはモバイルキャリアの回線が一部届いているが、微弱であり場合によっては３G ネットワークでの通信となり、映像伝送などの大容量通信を行うことは難しい。場所によっては通信回線が全くなく、緊急時に連絡が取れないことがある。林業においては天気の急変や河川の状況などにより危険度が高くなるため、林業における事故は大けがにつながる可能性が高い。また、林業では作業場所によって一面を伐採する場合と、間伐による伐採の場合があり、間伐になると生産性の低下が問題となる。このような林業の現状に対し、

ローカル5Gで通信回線を確保し、その回線を活用した重機の遠隔操作やAIの活用により、安全性と生産性の向上を図る。

図 4 の実証エリアでは現在林業の事業者である株式会社島田木材にて間伐作業中である。林業作業場はエリアが広く 1 基地局ではすべてをカバーすることは非常に難しい。そのため、本実証では反射板や追加のローカル 5G 基地局を使って中継することでより広いエリアをカバーできるか検証を行い、エリア構築の柔軟化を行った。また、映像伝送による上り帯域増加に備え準同期 TDD によるアップリンクとダウンリンクの比率を変えることによる林業分野へのローカル 5G の実用性を検証した。

図 4　実証エリアの航空写真

実施環境に対するエリアシミュレーション図が以下である。
今回の実証ではメーカーが違う基地局 2 局を使って実証エリアをカバーする。

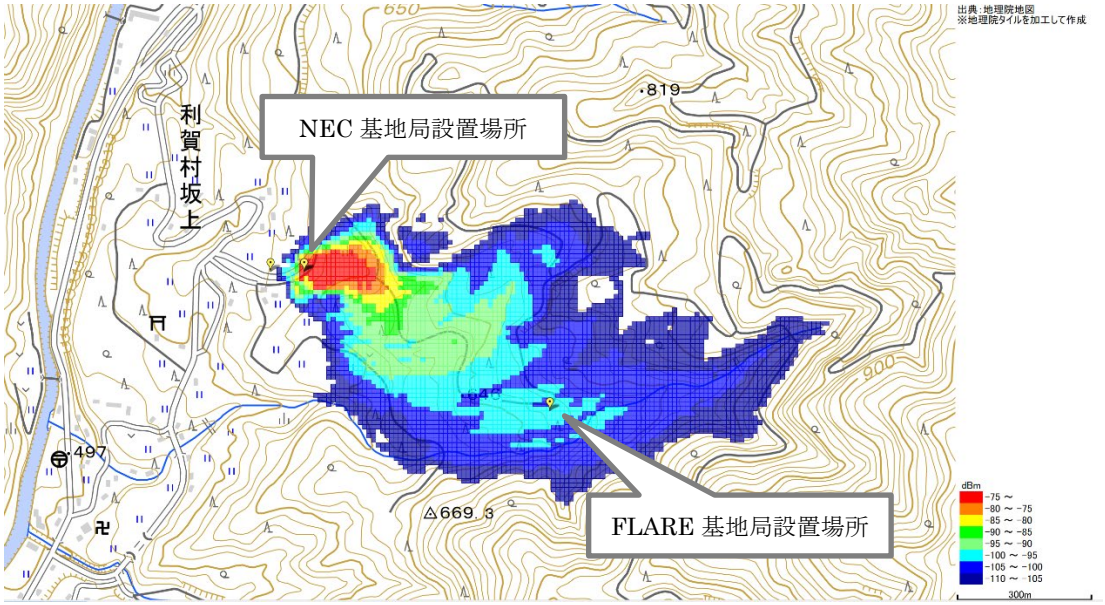


図 5　NEC 基地局の電波伝搬シミュレーション図

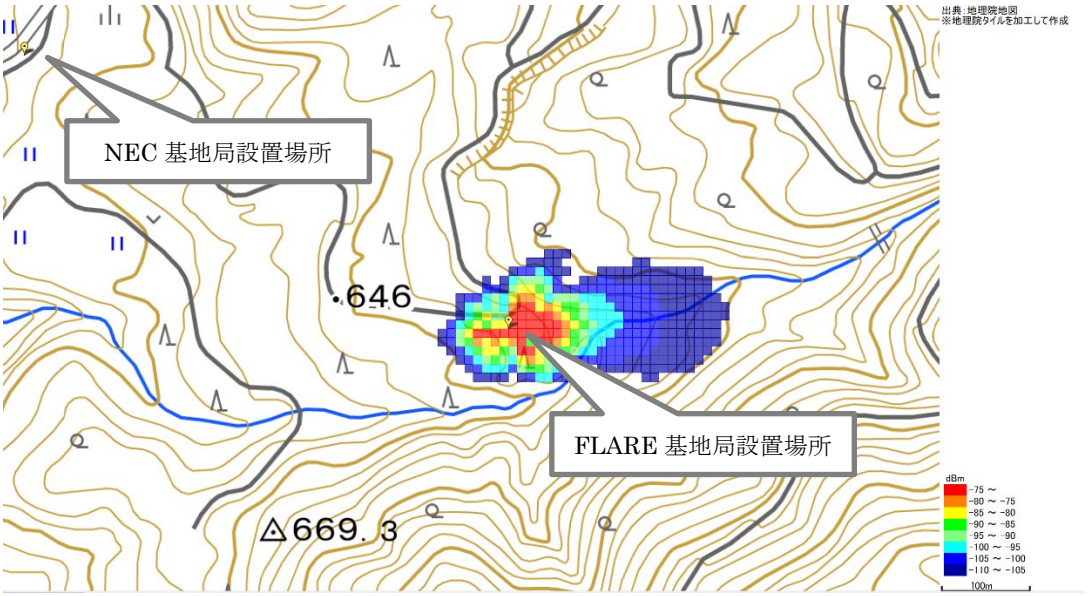


図 6　FLARE 基地局の電波伝搬シミュレーション図

2.2 ネットワーク・システム構成

本実証では日本電気株式会社製（以下 NEC と記載）と FLARE SYSTEMS 製（以下 FLARE と記載）の２つの基地局設備にてネットワークを構築した。

また、CPE 端末でローカル 5G を受信し、その先に４K カメラや作業車両と接続し、AI や遠隔操作を実現する。

（1）設置場所

図 7　設置場所全体図

※UPF 等を設置するデータセンタは保安上の都合により詳細な設置場所の記載を省略する。

図 8　RU/アンテナ（NEC 基地局）

図 9　NEC 基地局収容装置等設置小屋

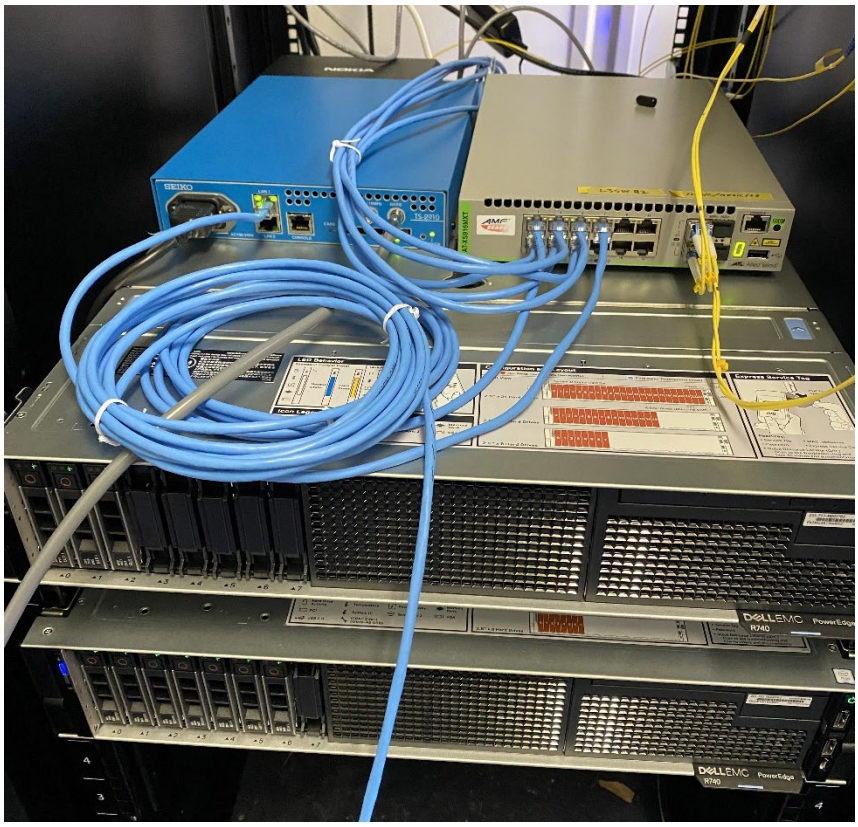


図 10　NEC 基地局収容装置等設置小屋内の GMC/L3-SW/CU/DU

図 11　金属反射板の設置

図 12　中継システムの設置

図 13　FLARE 基地局

図 14　使用した遠隔操作車両

(2) エリアシミュレーション図及び実証環境

NEC 基地局における電波伝搬シミュレーション（RSSI）は以下の通りである。
なお、シミュレーション結果は電波法審査基準に準じた計算式により実施した。

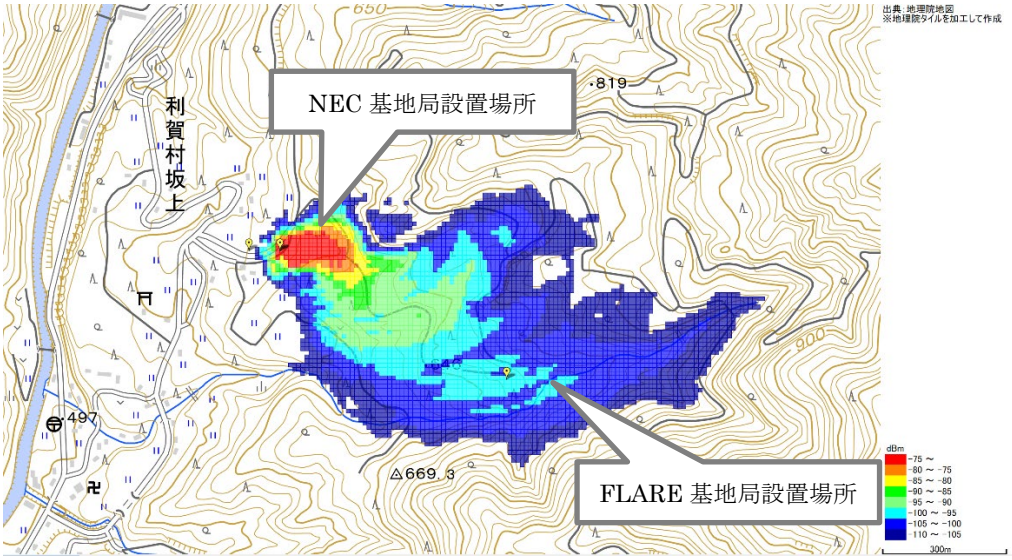


図 15　NEC 基地局の電波伝搬シミュレーション図

FLARE 基地局における電波伝搬シミュレーション（RSSI）は図 16　FLARE 基地局の電波伝搬シミュレーション図の通りである。

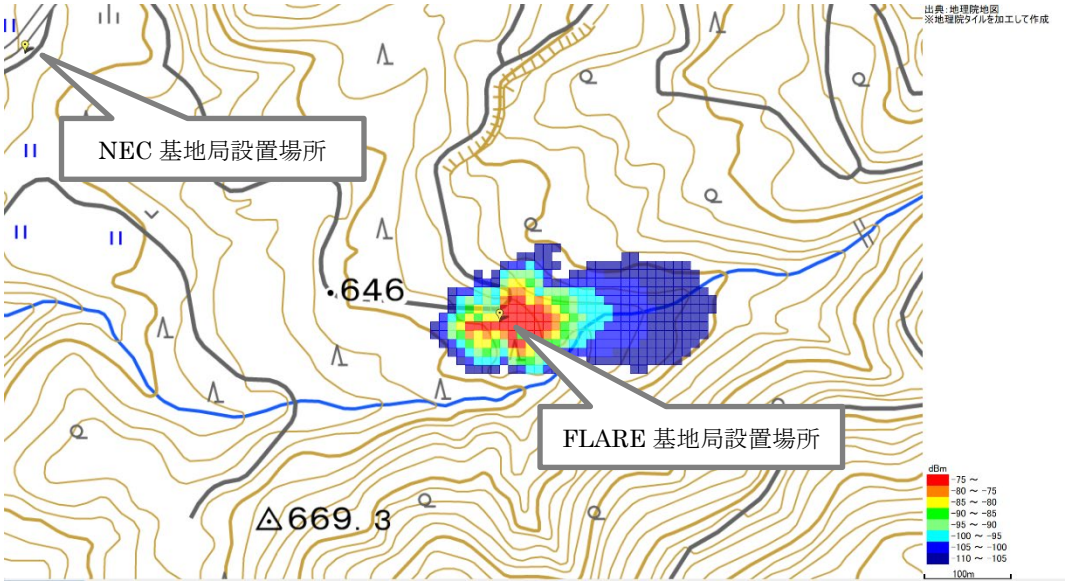


図 16　FLARE 基地局の電波伝搬シミュレーション図

NEC 基地局に比べ FLARE 基地局は送信出力が小さいためカバーエリアが狭い。
NEC 基地局からの電波を受けて、FLARE 基地局にて再送信を行うが、今回の電波伝搬シミュレーションでは受信点を地上高 1.5m で計算しているため FLARE 基地局に届く電波が弱い。そのため、実証では CPE 端末をバルーンで高い位置に上げることで受信電力を強めて、有線（LAN）で FLARE 基地局に接続する。

(3) ネットワーク・システム系統図

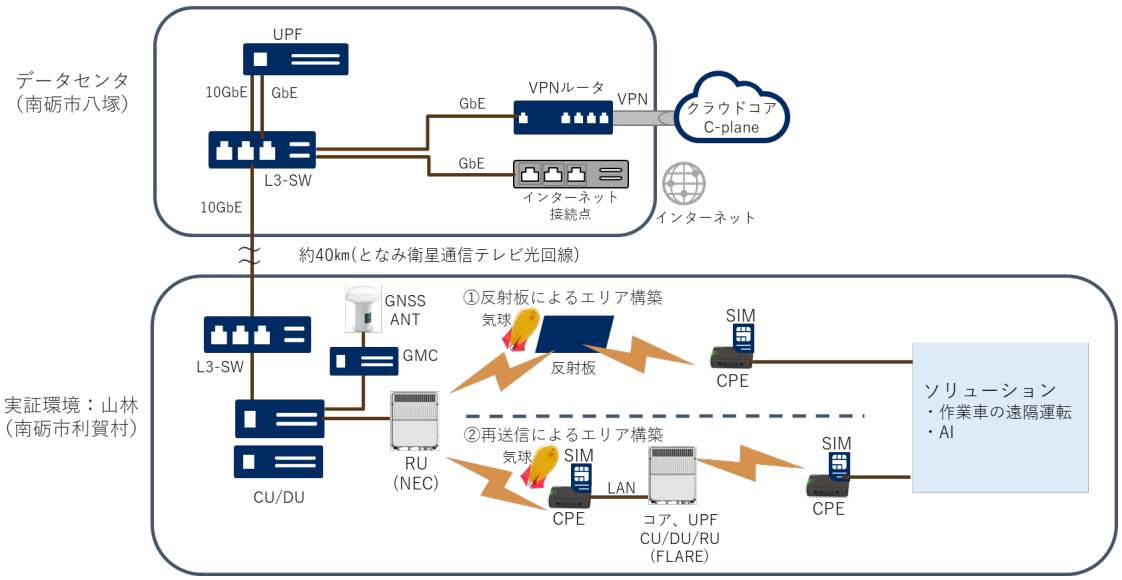


図 17　ネットワーク・システム系統図（ローカル 5G）

C-Plane：Control plane（認証・通信制御御処理部）
UPF:User Plane Function　（ユーザーデータ送受信処理）
RU：Radio Unit (5G 基地局・無線部)
DU：Distributed Unit (5G 基地局・デジタル部)
CU：Central Unit (5G 基地局・集約部)
CPE:Customer Premises Equipment（顧客構内設備）
GNSS ANT：Global Navigation Satellite System（測位衛星用アンテナ）
GMC：Grandmaster Clock（時刻同期システム）

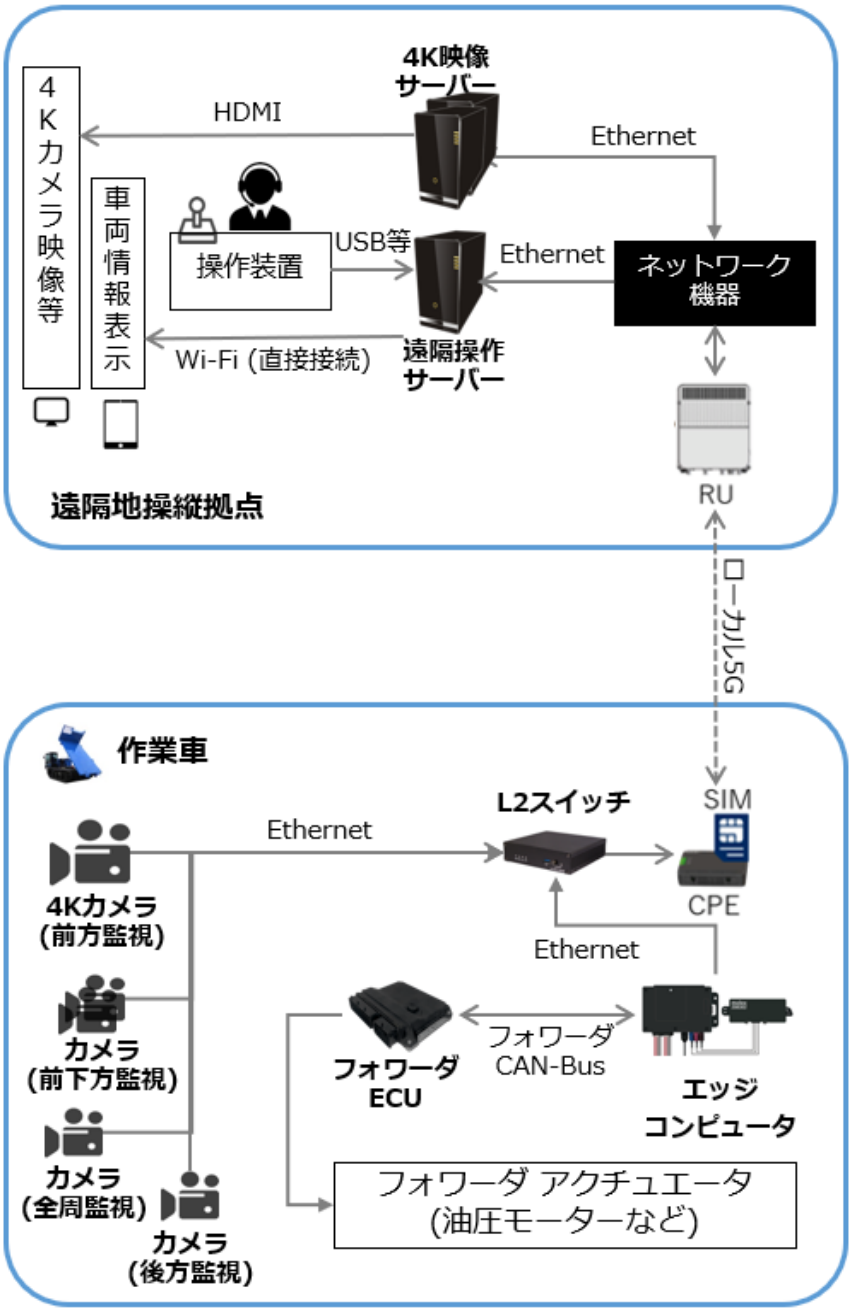


図 18　遠隔操作システムのシステム系統図

表 12　ローカル 5G システム（基地局）の概要

	基地局 A(型番)	基地局 B（型番）
製造ベンダ	NEC	FLARE SYSTEMS
台数	1 台	1 台
設置場所（屋内/屋外）	屋外	屋外
同期/準同期	同期	同期・準同期
UL：DL 比率	2:7	2:7,4:4,5:3,6:2
周波数帯	4.8GHz 帯	4.8GHz 帯
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	4.85GHz	4.85GHz
DL 中心周波数		
UL 変調方式	256QAM	256QAM
DL 変調方式		
MIMO	2×2MIMO	2×2MIMO

（4）基地局相当装置無線部特性

- 無線局数；2
- 周波数帯；Sub6 帯　4.8-4.9GHz
- 通信方式；TDD　NR
- SA/NSA の区別；SA
- 占有帯域幅；100MHz

（5）コアネットワーク性能（クラウドコア）

- 規格；3GPP で規定される 5G コアとして動作し、クラウドサービスとして提供される。
- 認証；ローカル 5G 基地局制御部(CU/DU)と接続し、SIM を用いて端末を認証し、データ通信を処理できる。
- 接続方法；VPN ルータとそれに対向する VPN ルータ機能をクラウド側で提供することによりインターネットを経由して本クラウドコアサービスへアクセスすることが可能である。
- 管理機能；加入者管理・認証機能(UDM)を有する。
- 最大収容端末数；10,000 以上
- 最大同時接続数；10,000 以上
- AMF（Access and Mobility Management Function）機能を有する。
- SMF（Session Management Function）機能を有し、ローカル 5G U-plane 装置(UPF)と接続できる。
- 冗長化；UDM,AMF,SMF の各機能が複数サーバで構成され冗長化されている。

（6）端末

本実証では、ローカル 5G を受信する端末を３種類用意する。

１つは「FG900CS」でアンテナが内蔵されている端末でローカル 5G を受信し、Wi-Fi ルータとして活用できるため、扱いやすく今後のユースケースの展開に有効的と考えている。もう一つは「iR730B」で、アンテナを外付けすることで受信電力が弱い場合でもアンテナを延長し受信しやすい場所へ取り付けることが可能なものである。

さらにスマートデバイスの「FCNT」はローカル 5G の接続実績のある端末であり、映像の確認や、簡易的な通信速度の計測を行う。携帯しやすいために林業における作業者が所持する端末として活用する。

①　CPE（FG900CS）

表 13　CPE（FG900CS）の概要

項目	値
変調方式（１次変調）	π/2BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200mW
アンテナ利得	1.85dBi,2.97dBi
給電線損失	0.0dB
最大 EIRP	25.97dBm
電波の型式	100MX7W

図 19　FG900CS の外観

② CPE（iR730B）

表 14　CPE（iR730B）の概要

項目	値
変調方式（１次変調）	π/2BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	外付け型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200mW
アンテナ利得	2.97dBi
給電線損失	0.0dB
最大 EIRP	25.94dBm
電波の型式	100MX7W

図 20　iR730B の外観

③　スマートフォン（FCNT）

表 15　スマートフォン（FCNT）の概要

項目	値
変調方式（1 次変調）	QPSK、16QAM、64QAM、256QAM
変調方式	DFT-s-OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200mW
アンテナ利得	-5.5dBi
給電線損失	0.0dB
最大 EIRP	17.5dBm
電波の型式	100MX7W

図 21　FCNT の外観

2.3 システム機能・性能・要件

システムの性能は技術実証および課題実証の内容を満たすカバーエリアを設計でき、また課題実証に必要十分な伝送速度を有する下記システムとする。

表 16　FLARE SYSTEMS ローカル 5G 基地局 諸元

FLARE SYSTEMS FW-L5G-1	
対応周波数帯	4.7GHz-4.8GHz/4.8GHz-4.9GHz
最大出力	23dBm(200mW)
空中線利得	12dBi
占有帯域幅	100MHz
MIMO レイヤ数	ダウンリンク 2x2 MIMO アップリンク 2x2MIMO
変調方式	最大 256QAM
最大スループット	理論値 ダウンリンク 800Mbps(同期 TDD) アップリンク 220Mbps(準同期 TDD)
ネットワーク接続方式	1Gbps LAN
時刻同期方式	GPS 同期方式
電源	AC100V

表 17　NEC ローカル 5G 基地局 諸元

NEC MB5420	
対応周波数帯	4.8GHz-4.9GHz
最大出力	33.6dBm(2300mW)
空中線利得	17.5dBi
占有帯域幅	100MHz
MIMO レイヤ数	ダウンリンク 2x2 MIMO
変調方式	最大 256QAM
最大スループット	理論値 ダウンリンク 700Mbps(同期 TDD) アップリンク 65Mbps(同期 TDD)
ネットワーク接続方式	10Gbps LAN
時刻同期方式	PTP 同期方式
電源	AC100V

2.4 免許及び各種許認可

（1）無線局免許

無線局の免許人はとなみ衛星通信テレビ株式会社であり、総務省北陸総合通信局と調整を行い、ローカル 5G の無線局免許申請を実施した。またその際には必要な無線従事者を配置し、無線従事者選任届を提出したうえで運用を実施した。

（2）その他の許認可

本実証では基本的にはコンソーシアムメンバーの株式会社島田木材の所有地で行う。しかし、基地局の設置場所や株式会社島田木材の所有地までの間の土地は森林組合や近隣住民の土地となっている。すでに基地局設置場所の所有者には許可を取っており、その他の土地についても相談済みである。正式に実証を行うことになった際には、改めて各土地の所有者に許可を取得する。

2.5 その他要件

本実証では NEC（日本電気株式会社）製と FLARE SYSTEMS 社製の２つの基地局設備を使用した。
本実証で取り扱うシステムについては基本的に国際規格やオープンな技術に依拠し、普及段階において機能拡張が可能な設計になっている。また、必要に応じて機能改善が可能であり、横展開に向けて柔軟に対応することができる。

（1）開発供給計画認定

日本電気株式会社製の基地局設備は特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律（令和２年法律第 37 号）に基づく開発供給計画認定を受けた実績を有する事業者が開発供給した機器に該当する。認定開発供給事業者名、開発供給計画認定番号、認定日等を下記に記載する。

認定開発供給事業者名：日本電気株式会社
開発供給計画認定番号：2021 開 1 総経第 0001 号－1
認定日等：令和３年２月１６日認定

（2）サイバーセキュリティに関する対策

FLARE SYSTEMS 製（基地局設備、コア設備）はサプライチェーンリスクを含むサイバーセキュリティ対策を施した。無線ネットワーク部分は SIM 認証を活用し、なりすましなどの不正アクセスを防止する対策を取った。また、優先ネットワーク部分においてはファイヤーウォールや UTM を活用することにより外部ネットワークとの接続時のリスクを極力減らす対策を施したうえで実証を行った。また、保守回線においては公衆モバイルネットワークを VPN などの手段で暗号化することにより攻撃を困難とする対策を施した。

（3）クラウドサービスの利用等、外部のネットワークへの接続やデータ伝送

本実証において個人情報はカメラで撮影した人物等の画像である。画像は原則としてコンソーシアムメンバーの内部にとどめており、クラウドサービス等の外部ネットワークには送信していない。

（4）開発を伴う機器

本実証においては開発を伴う機器を使用していない。開発を伴わない機器は必要に応じてベンダとの調整を行い品質保証データの入手及びコンソーシアムメンバーである NEC ネッツエスアイ株式会社のラボ設備（シールドルーム等を具備し免許申請前の機器の動作試験も行うことができる。）を活用し事前評価を行った。

2.6 実証環境の運用

以下のとおり役割分担及び責任を明確化することで、実証環境の運用を円滑に進めた。

実証環境全体統括責任：となみ衛星通信テレビ株式会社
基地局構築・運用責任：NEC ネッツエスアイ株式会社
実証フィールド提供責任：株式会社島田木材

「作業車両の遠隔操作システム」構築責任：AZAPA 株式会社
「高精細カメラと AI を組み合わせた危険予知システム」構築責任：株式会社 IoZ

表 18　役割分担

項目	実証前	実証中
ローカル 5G 環境	設置箇所調整：となみ衛星通信テレビ 環境構築・要件定義：NEC ネッツエスアイ	実証統括：となみ衛星通信テレビ 環境構築・運用：NEC ネッツエスアイ サービス利用：島田木材
「作業車両の遠隔操作」システム	実証要件定義：となみ衛星通信テレビ システム構築：AZAPA 株式会社	実証統括：となみ衛星通信テレビ システム構築・運用：AZAPA 株式会社 サービス利用：島田木材
「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システム	実証要件定義：となみ衛星通信テレビ システム構築：株式会社 IoZ	実証統括：となみ衛星通信テレビ システム構築・運用：株式会社 IoZ サービス利用：島田木材

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

本実証おいては NEC 製のローカル 5G 基地局と、FLARE SYSTEMS 製ローカル 5G 基地局の 2 種類の基地局を使って検証を行った。

ローカル 5G の電波伝搬特性やモデルの精緻化、反射板によるエリア構築の柔軟化については NEC 製のローカル 5G 設備を利用し、準同期 TDD の追加パターンの開発やその他テーマであるローカル 5G の再送信におけるエリア構築の柔軟化については FLARE 製ローカル 5G 設備も活用し実証を行った。

表 19　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	森林地区
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	○
	IV.その他のテーマ	実施の有無	○

3.2 実証環境

5G は山林でのネットワークとして有効的であるのかを検討した。

通常では CU/DU 設備は UPF と同じ場所であるデータセンタ等に整備することを想定しているが、本実証では、データセンタから実証場所までの距離が離れていることから、CU/DU 設備は実証場所に整備することとした。

また、今回は山林での実証になるため、ローカル 5G の電波伝搬が樹木によって阻害されることが想定される。そのため、ローカル 5G のエリアを広げるために中継システム等を活用するが、気球を使って高い位置に設置することで、より広いエリアをカバーすることを目指した。

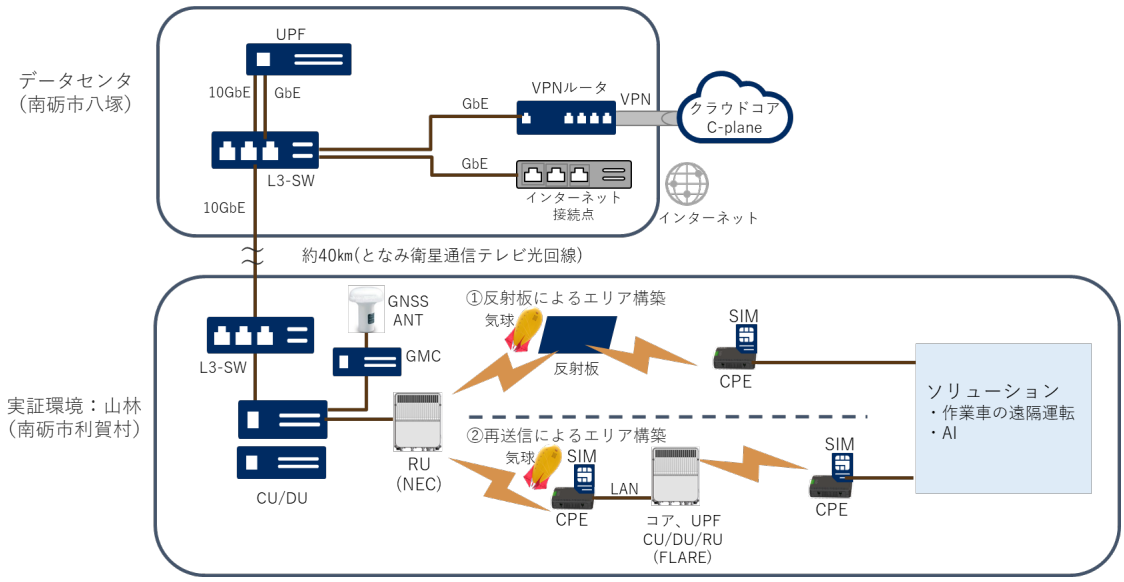


図 22　ネットワーク・システム系統図(ローカル 5G)

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

- 電波法関係審査基準に記載のローカル 5G Sub6 周波数帯のエリア算出法に基づき、基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域図を下記に貼付する。電波法関係審査基準の式を計算するソフトウェアは構造計画研究所社製 KCAMP を使用した。
- これらのカバーエリア端における実際の受信電力を測定した。
- なお、図の区別のために以降 NEC 製基地局を使用したシステムをシステム 1、FLARESYSTEMS 製基地局を使用したシステムをシステム 2 と呼称する。
- なお、電波法審査基準に定められた計算式は下記の式となる。
- Pr=Pt+Gt-Lf+Gr-L-8
- Pr[dBm]:受信レベル(受信電力)
- Pt[dBm]:送信電力(基地局の空中線電力)
- Gt[dBi]:送信アンテナ利得
- Lf[dB]:基地局の給電線損失
- Gr[dBi]:受信アンテナ利得
- L[dB]:伝搬損失
-

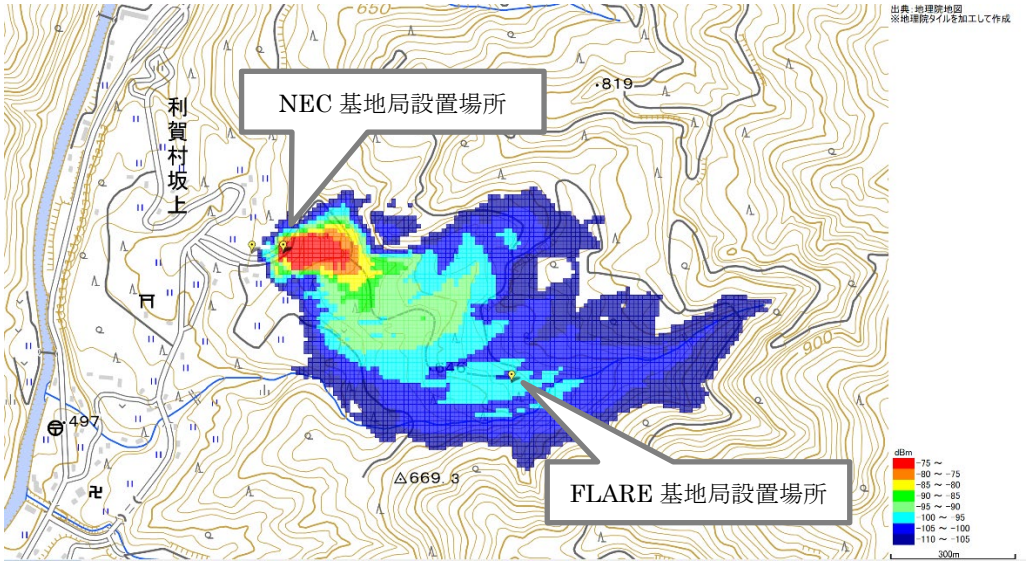


図 23　電波法関係審査基準に定められた式で計算した結果(システム 1)

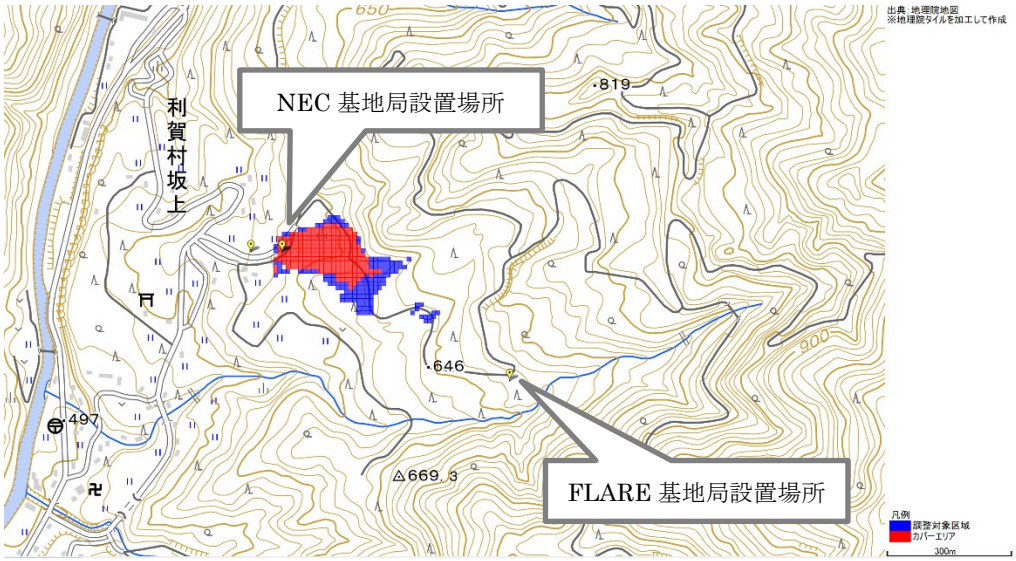


図 24　電波法関係審査基準に定められた式で計算した結果を
カバーエリアおよび干渉調整区域に凡例を変更した図(システム 1)

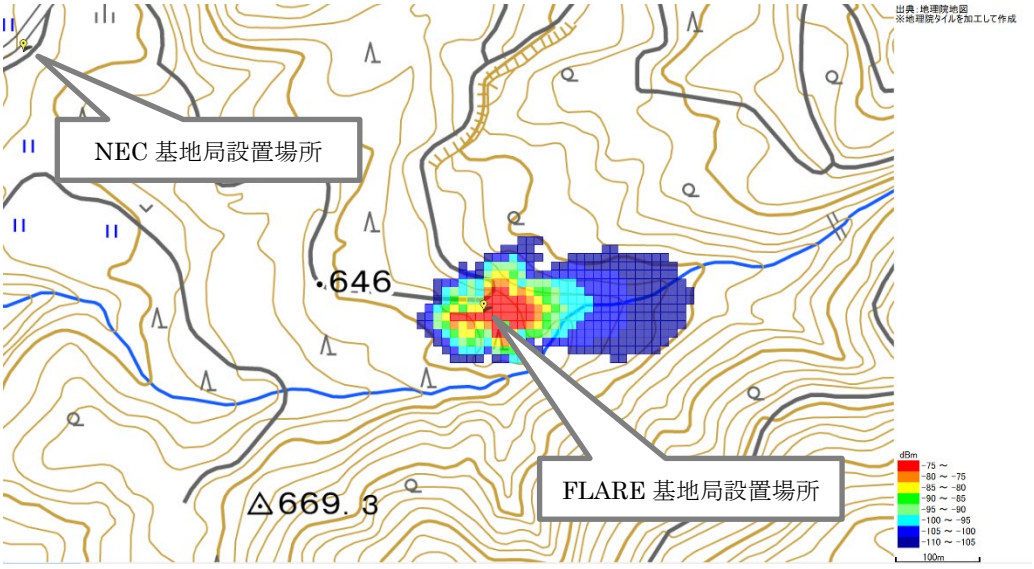


図 25　電波法関係審査基準に定められた式で計算した結果(システム 2)

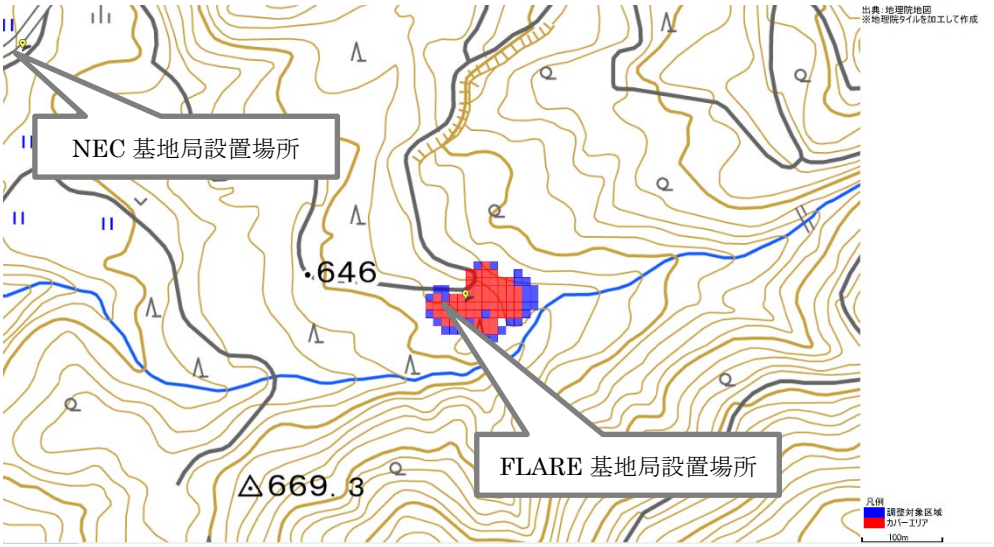


図 26　電波法関係審査基準に定められた式で計算した結果を
カバーエリアおよび干渉調整区域に凡例を変更した図(システム 2)

3.3.1.1 実証目標

(1) 実証を行うエリア

実証を行うエリアは下図の通りとなる。

図 27　実証エリア

(2) 実証に必要な所要性能

- 伝送速度

(ア) 作業車両の遠隔操作(4K カメラ部分)

4K カメラ等 4 回線で 80Mbps(20Mbps×4)が必要となる

(イ) 作業車両の遠隔操作(制御信号部分)

制御信号回線で 150kbps が必要となる

(ウ) 高精細カメラと AI を組合せた危険予知(4K カメラ部分)

4K カメラ 1 回線で 20Mbps(20Mbps×1)が必要となる

- 伝送遅延

(ア) 作業車両の遠隔操作(4K カメラ部分)

リアルタイム性が求められるため作業車両に設置したカメラと遠隔地に設置されるデコーダの間の伝送時間は 100ms 以下(エンドツーエンドの Ping を使用したラウンドトリップタイム)を想定した。

(イ) 作業車両の遠隔操作(制御信号部分)

リアルタイム性が求められるため作業車両と遠隔地に設置される操作端末の間の伝送時間は 100ms 以下(エンドツーエンドの Ping を使用したラウンドトリップタイム)を想定した。

(ウ) 高精細カメラと AI を組合せた危険予知(4K カメラ部分)

現場に設置したカメラと遠隔地に設置されるエッジ AI の間の伝送時間は 100ms 以下(エンドツーエンドの Ping を使用したラウンドトリップタイム)を想

定した。

- 同時接続台数
  (ア) 作業車両の遠隔操作システムでのカメラ接続数は 4 台であり、同時に使用する台数は最大 4 台である。
  (イ) 高精細カメラと AI を組合せた危険予知システムでの接続台数は 1 台であり、同時に使用する台数は 1 台である

表 20 実証に必要な所要性能

必要なシステム	伝送速度	伝送遅延	接続数
作業車両の遠隔操作(4K カメラ等)	80Mbps	100ms 以下	4
作業車両の遠隔操作(制御信号)	150kbps	100ms 以下	1
高精細カメラと AI を組合せた危険予知(4K カメラ)	20Mbps	100ms 以下	1

3.3.1.2 評価・検証項目

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において 20 地点の測定を行った。測定項目は RSRP、SIR、通信品質(スループット、遅延速度)とする。

表 21 評価・検証項目

測定項目	測定指標	測定手法	測定する値(単位)	測定機器
受信電力	RSRP	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
受信電力	RSSI	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
電波干渉	SIR	Anritsu エリアテスタ	dB	ML8780A
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE
遅延	遅延時間	Ping	msec	WindowsPC(Ping)

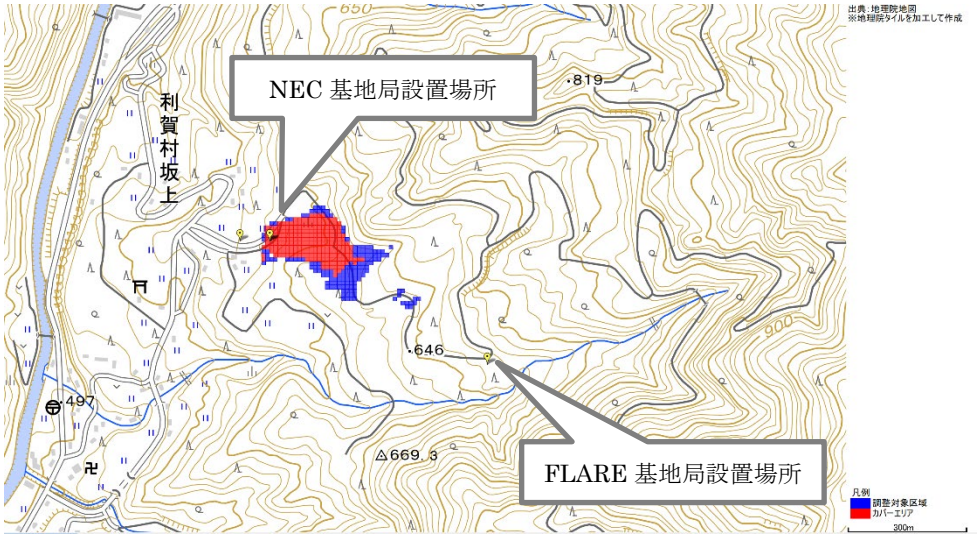


図 28　システム 1、干渉調整区域とカバーエリア図

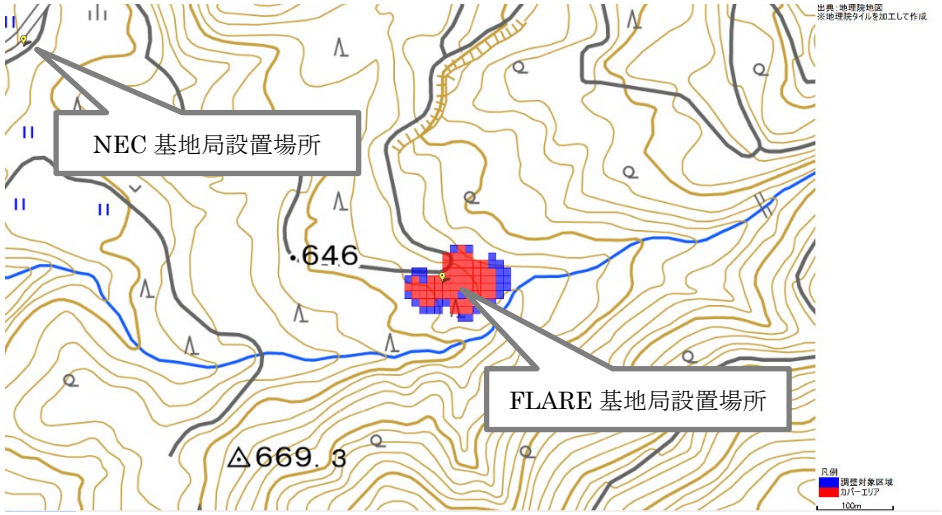


図 29　システム 2、干渉調整区域とカバーエリア図

3.3.1.3 評価・検証方法

(1) 受信電力

受信電力(RSRP)を基地局装置により異なるが 40 から 60 地点にて測定し、電波法関係審査に記載の伝搬モデルと比較した。比較の差異は電波法関係審査の伝搬モデルは受信電力(RSSI)を用いているため、測定した RSRP と RSSI を変換したうえで比較、検証を行った。RSRP と RSSI の変換式は下記の式を利用した。

$$\mathrm{RSRP(dBm)} = \mathrm{RSSI(dBm)} - 10\log(12N)$$

N;リソースブロック数　本実証においては 273 となる

受信レベルを比較のうえ、パラメータのチューニングを行いモデルの精緻化を実施した。

（2）その他の指標

通信品質であるスループット、遅延時間を測定し、RSRP との相関が取れているかの確認を行い、システムに必要な性能が出せることを確認した。

SIR、RSSI を測定し、外部からの干渉により通信品質が損なわれていないかを確認し、RSRP と通信品質の相関に外部からの影響がないことを確認した。

3.3.1.4 実証結果及び考察

（1）NEC 製基地局の実測結果

エリアシミュレーション図と実測結果を重ね合わせた図を作図した。

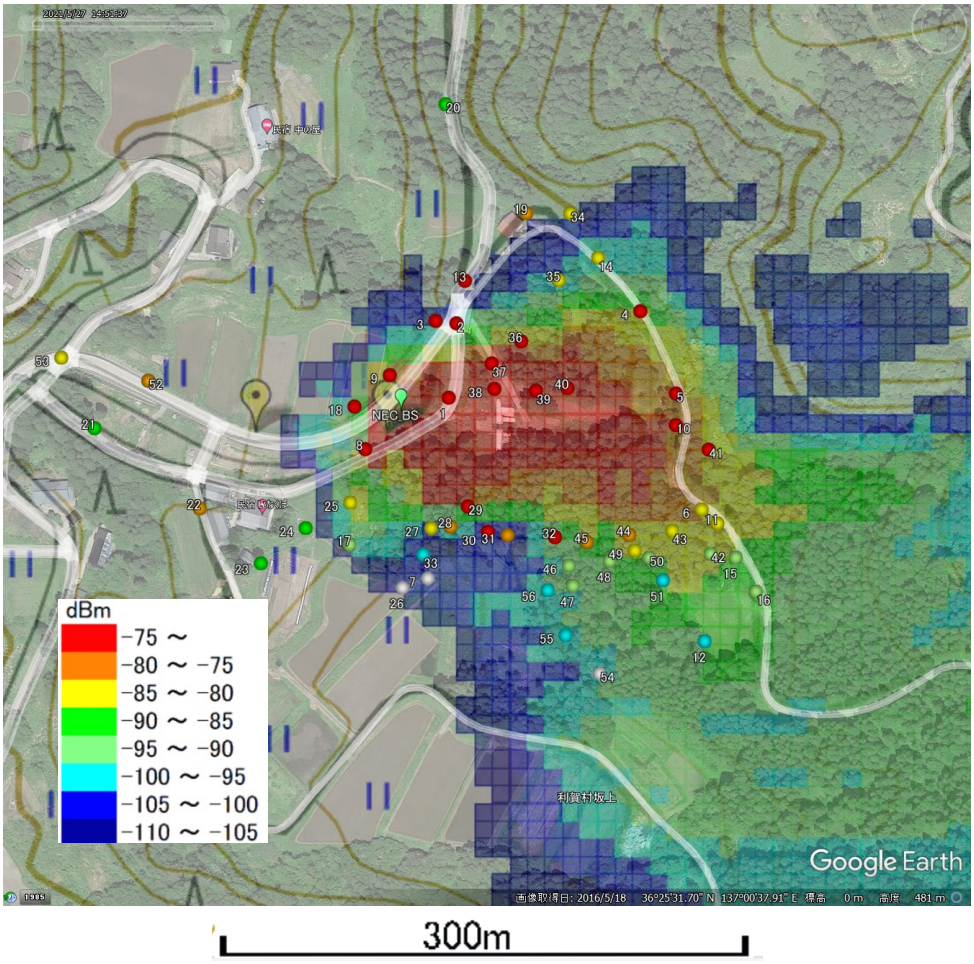


図 30　NEC 基地局の測定結果をシミュレーション結果と重ね合わせた図

56 か所の測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の平均値、標準偏差を記載する
サンプル数:すべての箇所で 1000 サンプル以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している
スループット・遅延:通信品質はスループットおよび遅延の測定により求める

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数
X_i = 測定値

表 22　NEC 製基地局の測定ポイント情報

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局からのチルト角度	RSRP(dBm)	標準偏差	スループット(DL/UL,Mbps)	遅延(ms)
1	36.425722	137.010303	329.08	29.85	-3.58	-95.56	4.79305	234.7/36.6	29
2	36.426097	137.010347	290.43	61.56	-2.89	-94.46	2.36578	91.8/14.3	31
3	36.426117	137.010214	279.67	57.32	-2.47	-100.51	4.41875	101.3/19.6	28
4	36.426172	137.011522	325.6	150.21	-3.20	-110.01	3.75682	87.3/12.6	32
5	36.425747	137.011747	344.47	159.31	-4.18	-101.21	4.90319	303.3/31.9	29
6	36.42515	137.011925	6.3	183.69	-5.79	-115.52	3.19412	-/-	-
7	36.424806	137.010169	68.93	94.46	-0.75	測定不可	測定不可	-/-	-
8	36.425439	137.009761	124.47	27.81	8.14	-106.91	3.35424	76.6/18.6	32
9	36.425792	137.009928	245.57	23.95	-3.31	-101.49	2.90548	156.3/26.1	35
10	36.425553	137.011758	351.43	160.74	-6.26	-94.69	2.01373	193.3/35.0	
11	36.425069	137.012014	7.94	194.64	-5.48	-115.50	2.97843	-/-	-
12	36.424453	137.011947	25.62	219.78	-5.59	-133.72	3.489982898	-/-	-
13	36.426289	137.010422	284.79	84.78	-0.74	-105.96	5.009182563	91.8/14.5	36
14	36.426428	137.011258	310.89	144.66	-1.93	-117.45	3.091529706	-/-	-
15	36.424883	137.012139	12.11	211.37	-5.46	-126.72	3.635982742	-/-	-
16	36.424719	137.012267	15.46	230.07	-5.11	-129.79	3.91334334	-/-	-
17	36.424922	137.009678	100.28	78.07	4.63	-127.56	2.803530528	-/-	-
18	36.425625	137.009711	182.34	26.04	3.89	-108.55	2.592730554	52.8/8.8	37
19	36.426656	137.0108	291.06	136.18	-0.68	-112.39	3.014656721	70.4/10.8	34
20	36.4272	137.010286	267.25	178.59	-0.29	-122.54	1.768309148	-/-	-
21	36.425528	137.008058	167.33	175.60	9.42	-122.23	2.490671603	-/-	-
22	36.425122	137.008725	144.36	125.08	8.91	-111.57	2.257757145	25.3/4.8	62
23	36.424836	137.009119	121.81	117.38	4.76	-123.89	2.397699387	-/-	-
24	36.425006	137.0094	119.33	83.40	5.34	-122.24	4.173949142	-/-	-

25	36.425167	137.009678	109.41	56.52	3.48	-115.38	2.315513011	-/-	-
26	36.424758	137.010008	78.19	98.01	0.62	測定不可	測定不可	-/-	-
27	36.425031	137.010194	63.28	67.95	-9.75	-115.70	3.106834429	-/-	-
28	36.425042	137.010317	54.32	71.85	-12.18	-112.23	2.908795307	19.4/4.3	53
29	36.425125	137.010425	42.26	67.11	-15.15	-103.07	3.848584845	26.7/4.3	52
30	36.425014	137.010553	42.17	86.66	-13.28	-110.05	2.856635247	-/-	-
31	36.425003	137.010681	37.19	94.43	-10.52	-112.04	3.136019472	25.0/2.0	75
32	36.424986	137.010978	27.2	117.25	-12.47	-109.92	2.778190835	-/-	-
33	36.424897	137.01015	68.87	80.47	-5.31	-132.01	3.153172748	-/-	-
34	36.42665	137.011083	299.6	150.38	-2.05	-116.05	2.604924534	-/-	-
35	36.426311	137.011011	308.73	119.71	-1.94	-118.06	2.386408081	-/-	-
36	36.425989	137.010775	317.92	81.43	-3.08	-92.43	1.912229647	188.0/21.1	32
37	36.425889	137.010583	319.88	60.16	-5.92	-100.98	3.729647843	256.7/36.4	29
38	36.425761	137.010592	333.88	56.47	-6.62	-80.97	2.754722399	463.3/62.0	28
39	36.425747	137.010858	339.01	79.27	-4.02	-92.15	3.234481781	332.3/54.1	34
40	36.425761	137.011056	339.98	97.82	-5.25	-89.27	3.007637208	322.3/55.5	29
41	36.425425	137.011958	355.53	179.85	-5.05	-102.08	4.705320657	103.2/24.3	31
42	36.424911	137.011972	13.07	197.84	-5.89	-126.85	3.582834127	-/-	-
43	36.425039	137.011728	12.21	172.44	-7.51	-117.87	3.374124811	-/-	-
44	36.424997	137.011456	16.76	151.47	-8.87	-112.81	2.946553856	-/-	-
45	36.424964	137.011183	23.29	133.12	-10.36	-111.55	4.668630525	25.9/4.8	71
46	36.424847	137.011067	30.64	132.05	-8.72	-127.51	3.500580947	-/-	-
47	36.424747	137.011097	33.75	141.42	-7.39	-129.24	3.913861198	-/-	-
48	36.424864	137.011331	23.89	149.27	-9.08	-125.71	3.600157076	-/-	-
49	36.424925	137.011486	19.1	158.99	-8.94	-118.38	2.897638628	-/-	-
5	36.42489	137.011564	18.85	168.3	-9.20	-127.73	3.50740053	-/-	-

0	2			7			3		
51	36.424781	137.011669	21.33	180.85	-7.24	-130.18	3.908016458	-/-	-
52	36.425781	137.008403	177.41	144.57	9.97	-111.65	1.666339972	25.9/83.0	62
53	36.4259	137.007847	178.94	196.82	10.11	-117.42	2.385508393	-/-	-
54	36.424317	137.011267	41.43	188.51	-4.28	測定不可	測定不可	-/-	-
55	36.424478	137.011053	41.99	160.21	-5.57	-132.39	3.760004001	-/-	-
56	36.424714	137.010933	38.93	133.22	-8.16	-131.29	3.771371528	-/-	-

※測定不可地点は測定器の受信感度限界を下回っていたため測定不可であった。

机上シミュレーションと実測値との比較を下表に示す。

表 23　NEC 製基地局の机上計算値との比較

ポイント番号	シミュレーション結果 RSRP(dBm)	実測値 RSRP(dBm)	シミュレーション値と実測値の差分
1	-91.67	-95.56	3.89
2	-134.46	-94.46	-40
3	-143.8	-100.51	-43.29
4	-119.79	-110.01	-9.78
5	-114.65	-101.21	-13.44
6	-114.86	-115.52	0.66
7	-139.29	測定不可	-
8	-117.64	-106.91	-10.73
9	-104.55	-101.49	-3.06
10	-111.75	-94.69	-17.06
11	-165.1	-115.50	-49.6
12	-122.93	-133.72	10.79
13	-142.13	-105.96	-36.17
14	-131.68	-117.45	-14.23
15	-120.9	-126.72	5.82
16	-121.96	-129.79	7.83
17	-122.59	-127.56	4.97
18	-121.09	-108.55	-12.54
19	-142.86	-112.39	-30.47
20	-166.19	-122.54	-43.65
21	-169.43	-122.23	-47.2
22	-166.39	-111.57	-54.82
23	-161.73	-123.89	-37.84
24	-160.27	-122.24	-38.03
25	-119.63	-115.38	-4.25
26	-139.95	測定不可	-
27	-136.78	-115.70	-21.08
28	-130.62	-112.23	-18.39

29	-107.46	-103.07	-4.39
30	-135.44	-110.05	-25.39
31	-138.22	-112.04	-26.18
32	-127.4	-109.92	-17.48
33	-140.03	-132.01	-8.02
34	-137.39	-116.05	-21.34
35	-130.73	-118.06	-12.67
36	-118.43	-92.43	-26
37	-102.26	-100.98	-1.28
38	-96.4	-80.97	-15.43
39	-102.5	-92.15	-10.35
40	-106.69	-89.27	-17.42
41	-115.22	-102.08	-13.14
42	-119.11	-126.85	7.74
43	-117.13	-117.87	0.74
44	-118.06	-112.81	-5.25
45	-123.73	-111.55	-12.18
46	-127.73	-127.51	-0.22
47	-129.19	-129.24	0.05
48	-125.6	-125.71	0.11
49	-119.61	-118.38	-1.23
50	-121.09	-127.73	6.64
51	-121.9	-130.18	8.28
52	-166.33	-111.65	-54.68
53	-175.64	-117.42	-58.22
54	-131.82	測定不可	-
55	-131.6	-132.39	0.79
56	-129.3	-131.29	1.99

※測定不可地点は測定器の受信感度限界を下回っていたため測定不可であった。

（2）FLARE SYSTEMS 製基地局の実測結果

エリアシミュレーション図と実測結果を重ね合わせた図を作図する。

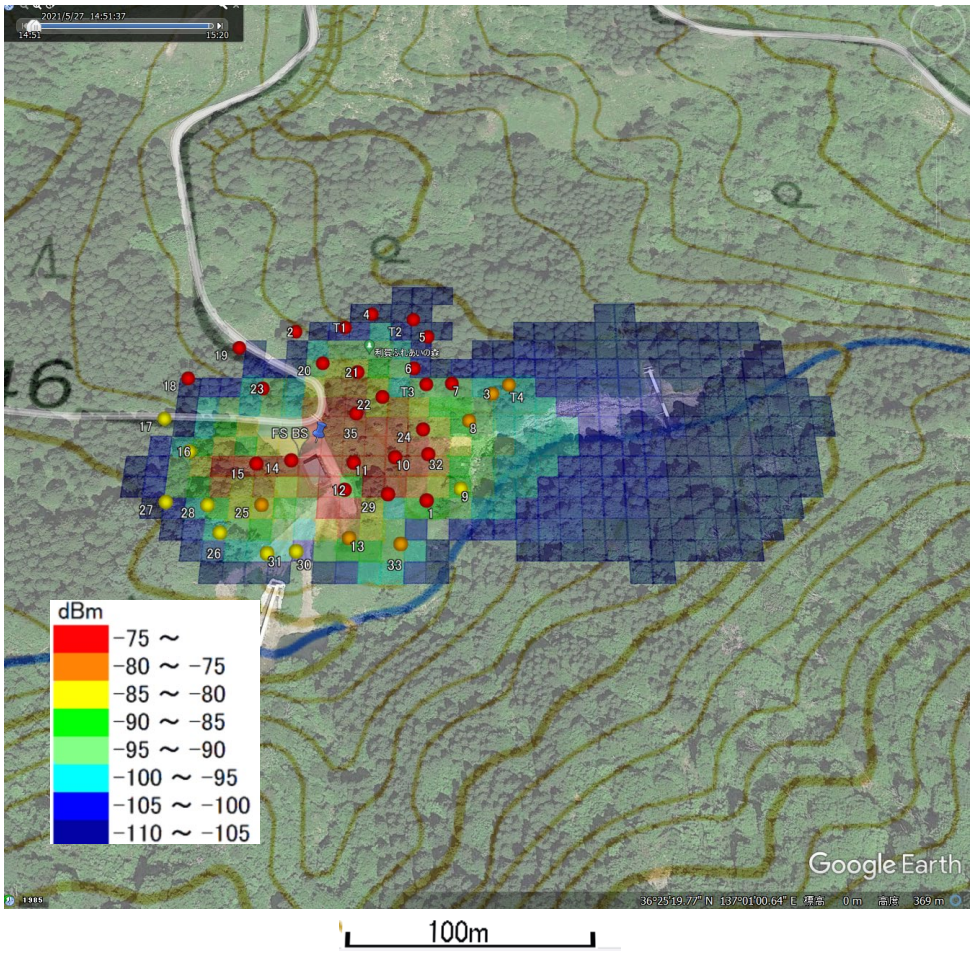


図 31　FLARE SYSTEMS 基地局の測定結果を
シミュレーション結果と重ね合わせた図

39 か所の測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の平均値、標準偏差を記載する
サンプル数:すべての箇所で 1000 サンプル以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している
スループット・遅延:通信品質はスループットおよび遅延の測定により求める

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数

X_i = 測定値

表 24　FLARE SYSTEMS 製基地局の測定ポイント情報

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局からのチルト角度	RSRP(dBm)	標準偏差	スループット(DL/UL,Mbps)	遅延(ms)
1	36.422472	137.016758	35.63	60.11	0.85	-101.48	3.71500	-/-	-
2	36.423242	137.016022	259.6	55.28	-5.45	-90.44	3.61823	202.4/34.2	53
3	36.422947	137.017092	349.63	85.52	-6.92	-113.56	4.87313	-/-	-
4	36.423328	137.016433	293.7	68.43	-9.11	-98.47	4.77032	120/8.1	120
5	36.423217	137.016742	318.83	72.59	-10.08	-99.86	4.85441	104/7.2	163
6	36.423064	137.016672	326.1	56.28	-10.45	-92.12	6.14379	184/28.8	68
7	36.422994	137.016878	341.14	69.28	-8.98	-107.29	4.80191	-/-	-
8	36.422822	137.016969	358.37	72.04	-5.36	-111.78	4.33161	-/-	-
9	36.422525	137.016931	24.75	71.93	0.21	-118.49	3.78875	-/-	-
10	36.422658	137.016589	20.53	38.37	-4.17	-94.69	4.66418	160/18	43
11	36.422636	137.016378	40.14	22.35	-3.32	-86.75	3.68842	184/36.9	41
12	36.422519	137.016339	64.9	30.12	3.71	-105.68	4.06946	-/-	-
13	36.422317	137.016375	74.45	51.99	6.22	-112.20	3.89809	-/-	-
14	36.422647	137.016056	134.78	16.94	12.18	-99.22	3.47236	108/7.2	201
15	36.422633	137.015878	157.75	30.89	11.19	-108.10	4.64497	-/-	-
16	36.422686	137.015525	176	59.59	8.57	-112.88	3.65919	-/-	-
17	36.422831	137.015372	190.42	72.84	6.54	-112.48	3.43626	-/-	-
18	36.423017	137.015469	208.62	70.00	4.26	-107.71	3.44286	-/-	-
19	36.423164	137.015725	232.45	60.84	0.86	-106.35	3.98928	-/-	-
20	36.423089	137.016183	274.35	37.60	-8.87	-85.53	3.29344	227.2/40.5	40
21	36.423047	137.016372	301.88	37.60	-11.87	-85.59	5.59357	219.2/37.8	38
22	36.422931	137.016511	330.56	36.22	-10.94	-81.74	3.77909	202.4/52.2	38
23	36.422969	137.015872	224.43	35.62	1.80	-100.82	4.08311	-/-	-
24	36.422783	137.016731	0.92	49.82	-6.25	-102.08	4.13243	-/-	-
25	36.422456	137.015922	128.61	40.86	10.29	-110.69	4.01656	-/-	-
26	36.422339	137.015728	135.15	62.01	9.23	-115.72	3.75320	-/-	-
27	36.422467	137.015436	158.05	74.73	9.51	-115.41	3.79953	-/-	-
28	36.422456	137.015650	148.28	58.90	9.63	-116.21	3.75285	-/-	-
29	36.422500	137.016561	43.81	44.74	0.52	-98.83	4.87306	118.4/6.3	173
30	36.422261	137.016114	99.97	56.02	7.97	-116.11	3.41058	-/-	-
31	36.422253	137.015972	112.45	59.11	8.64	-116.26	3.40119	-/-	-
32	36.422672	137.016758	14.11	53.35	-3.57	-98.62	3.27100	104/6.3	125
33	36.422292	137.016633	55.61	66.04	4.41	-114.75	3.50072	-/-	-
34	36.422486	137.016117	104.67	30.38	9.42	測定不可	測定不可	/	
35	36.422856	137.016375	331.47	21.94	-13.84	-75.82	3.19236	208.8/56.7	35
36	36.423261	137.016289	284.19	58.07	-9.08	-98.40	4.60987	128.8/7.2	85
37	36.423300	137.016661	309.97	75.37	-9.67	-101.99	4.94440	-/-	-
38	36.422989	137.016742	336.77	57.95	-10.10	-96.95	6.23371	144/4.5	48
39	36.422986	137.017181	348.2	94.53	-7.31	-110.34	4.69377	-/-	-

※測定不可地点は測定器の受信感度限界を下回っていたため測定不可であった。

机上シミュレーションと実測値との比較を下表に示す。

表 25　FLARESYSTEMS 製基地局の机上計算値との比較

ポイント番号	シミュレーション結果 RSRP(dBm)	実測値 RSRP(dBm)	シミュレーション値と実測値の差分
1	-124.74	-101.48	-23.25898148
2	-143	-90.44	-52.56069364
3	-128.1	-113.56	-14.54031142
4	-140.58	-98.47	-42.11147974
5	-140.33	-99.86	-40.47296228
6	-137.8	-92.12	-45.68359021
7	-129.32	-107.29	-22.03065421
8	-121.3	-111.78	-9.522310406
9	-123.26	-118.49	-4.768302239
10	-100.22	-94.69	-5.530511364
11	-92.86	-86.75	-6.107356322
12	-121.51	-105.68	-15.82583493
13	-123.19	-112.20	-10.98695222
14	-107.22	-99.22	-7.996043557
15	-103.58	-108.10	4.515918367
16	-131.47	-112.88	-18.58680517
17	-143.94	-112.48	-31.46021759
18	-141.68	-107.71	-33.97226468
19	-144.32	-106.35	-37.97046296
20	-125.85	-85.53	-40.32129187
21	-118.75	-85.59	-33.15693642
22	-118.74	-81.74	-36.99726496
23	-132.11	-100.82	-31.28807971
24	-110.17	-102.08	-8.090174588
25	-118.02	-110.69	-7.325311355
26	-131.28	-115.72	-15.55610294
27	-136.84	-115.41	-21.4315493
28	-123.27	-116.21	-7.056083854
29	-107.53	-98.83	-8.702049689
30	-137.74	-116.11	-21.63462295
31	-133.57	-116.26	-17.30716475
32	-114.51	-98.62	-15.8863981
33	-127.01	-114.75	-12.26394854
34	-127.09	測定不可	-
35	-110	-75.82	-34.17958375
36	-139.13	-98.40	-40.72913545
37	-141.96	-101.99	-39.96996622
38	-126.5	-96.95	-29.5490961
39	-134.51	-110.34	-24.16678295

※測定不可地点は測定器の受信感度限界を下回っていたため測定不可であった。

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

（1）背景となる技術的課題と実証目的

ア　　精緻化の背景と実証目的

本実証の山林地域においては斜面上に多数の樹木が生えている環境が特徴であり電波伝搬特性として一般的なモデルに当てはまらない可能性が高く、今後実用化された際に実際の置局を行った際のエリアシミュレーション(机上設計)と実測値の差異が発生する可能性がある。差異が発生した場合システム変更などのコストが発生し普及の妨げになることも想定されるため、エリア設計の精緻化が求められる。

イ　　ローカル 5G の利用環境、所要性能

本実証においては下図の要件が性能要件として定められており、電波法関係審査においては今回採用する 100MHz システムの場合、カバーエリアは-84.6dBm、干渉調整区域(許容干渉レベル)は-91.0dBm である。

表 26　システム性能要件表

必要なシステム	伝送速度	伝送遅延	接続数
作業車両の遠隔操作(4K カメラ等)	80Mbps	100ms 以下	4
作業車両の遠隔操作(制御信号)	150kbps	100ms 以下	1
高精細カメラと AI を組合せた危険予知(4K カメラ)	20Mbps	100ms 以下	1

表 27　受信電力一覧表

無線設備の区分	40MHz システム	50MHz システム	60MHz システム	80MHz システム	100MHz システム
カバーエリア	-88.6dBm	-87.6dBm	-86.9dBm	-85.6dBm	-84.6dBm
調整対象区域	-95.0dBm	-94.0dBm	-93.0dBm	-92.0dBm	-91.0dBm

※今回の実証においては 100MHz システムを採用する。

（2）実証目標

電波法関係審査基準に記載の電波伝搬モデルの伝搬損失 L の精緻化を目標とする。伝搬損失 L の中のどのパラメータの精緻化を行うかは後述する。受信レベル(受信電力)を求める計算式は下記の通りとなる。

Pr=Pt+Gt-Lf+Gr-L-8
Pr[dBm]:受信レベル(受信電力)
Pt[dBm]:送信電力(基地局の空中線電力)
Gt[dBi]:送信アンテナ利得
Lf[dB]:基地局の給電線損失
Gr[dBi]:受信アンテナ利得
L[dB]:伝搬損失

伝搬損失パラメータ L は自由空間伝搬損失式及び拡張秦式を基礎として算出され、伝搬距離により異なり、今回の実証においては距離最大 700m であり、以下の式で定義される。
本実証においては伝搬損失 L の中のパラメータ K およびパラメータ S の精緻化を目標とする。

$$\mathrm{L} = \mathrm{L_H} = 46.3 + 33.9\log_{10}(2000) + 10\log_{10}\left(\frac{\mathrm{f}}{2000}\right) - 13.82\log_{10}(\max(30, \mathrm{H_b})) + \{44.9 - 6.55\log_{10}(\max(30, \mathrm{H_b}))\}(\log_{10}(\mathrm{d_{xy}}))^{\mathrm{a}} - \mathrm{a}(\mathrm{H_m}) - \mathrm{b}(\mathrm{H_b}) + \mathrm{R} - \mathrm{K} - \mathrm{S}$$

f(MHz):使用する周波数　中心周波数 4850MHz を使用
H_b (m):基地局の空中線地上高
d_{xy} (km);基地局と伝搬損失を算定する地点との距離
H_m (m);陸上移動局の空中線地上高。地上高 1.5m とする。
R(dB);基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損(16.2)。実際の建物侵入損が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。
α;遠距離に対して考慮する係数であり、下記による。

$$\alpha = 1 : d_{xy} \leq 20km$$

$a(H_m)$:陸上移動局高に対して考慮する補正項であり、下記による。

$$\mathrm{a}(H_m) = \begin{cases} 0.057; \textit{中小都市の場合} \\ -0.00092; \textit{大都市の場合} \end{cases}$$

大都市;市街地のうち特に大規模な都市の領域であって、おおむね 5 階建て以上の建物が密集した地域

中小都市;市街地のうち、大都市に相当する地域以外のもの

b(Hb);基地局高に対して考慮する補正項であり、下記による

$$\mathrm{b}(H_b) = \begin{cases} 0; H_b \geq 30m \\ 20log_{10}\left(\frac{H_b}{30}\right); H_b < 30m \end{cases}$$

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

3.3.2.2 実証仮説

本実証の地域においては傾斜のやる地域であり、また林業を営む地域である。そのため K 値においては傾斜や川の影響が大きいことが考えられる、S 値についてはルーラルエリアではあるが、樹木の影響により郊外地と市街地の両側面がありそのどちらの特性に近いかを評価する必要がある。本実証で得られた結果は他の森林地区にて応用できると考えられる。

図 32　実証エリア

3.3.2.3 評価・検証項目

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において他の評価項目よりも精緻化に必要なデータ数が多く必要とされることが予想されるため NEC 製基地局において 56 地点の測定を実施した。測定項目は RSRP、SIR、通信品質(スループット、遅延速度)とする。

表 28　評価・検証項目

測定項目	測定指標	測定手法	測定する値(単位)	測定機器
受信電力	RSRP	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
受信電力	RSSI	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
電波干渉	SIR	Anritsu エリアテスタ	dB	ML8780A
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE
遅延	遅延時間	Ping	msec	WindowsPC(Ping)

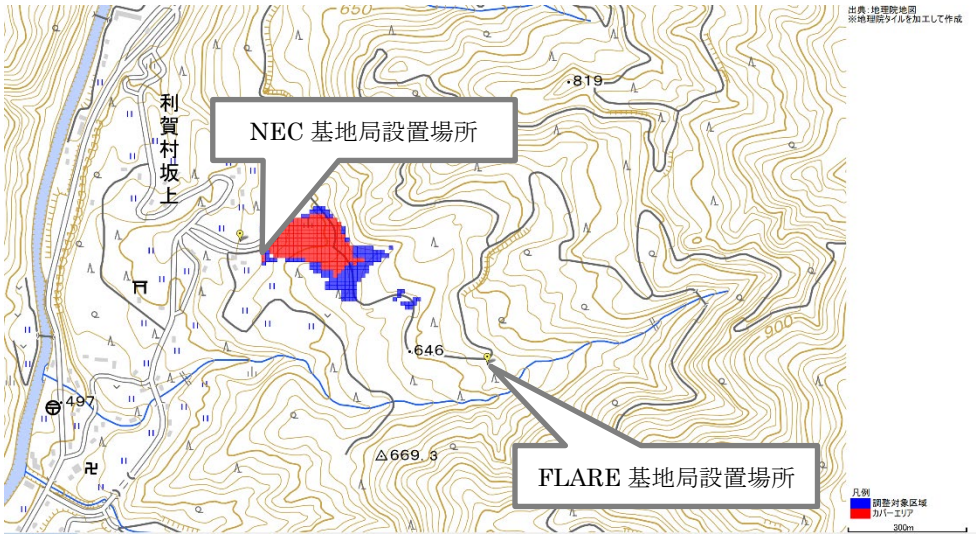


図 33　システム 1、干渉調整区域とカバーエリア図

■ 対象エリアのカバーエリア図と全測定点

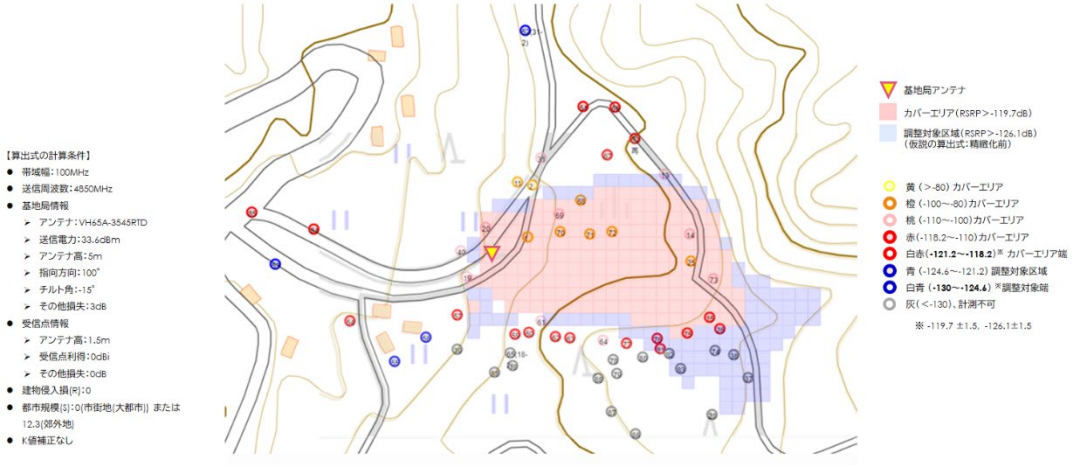


図 34　システム 1、測定点

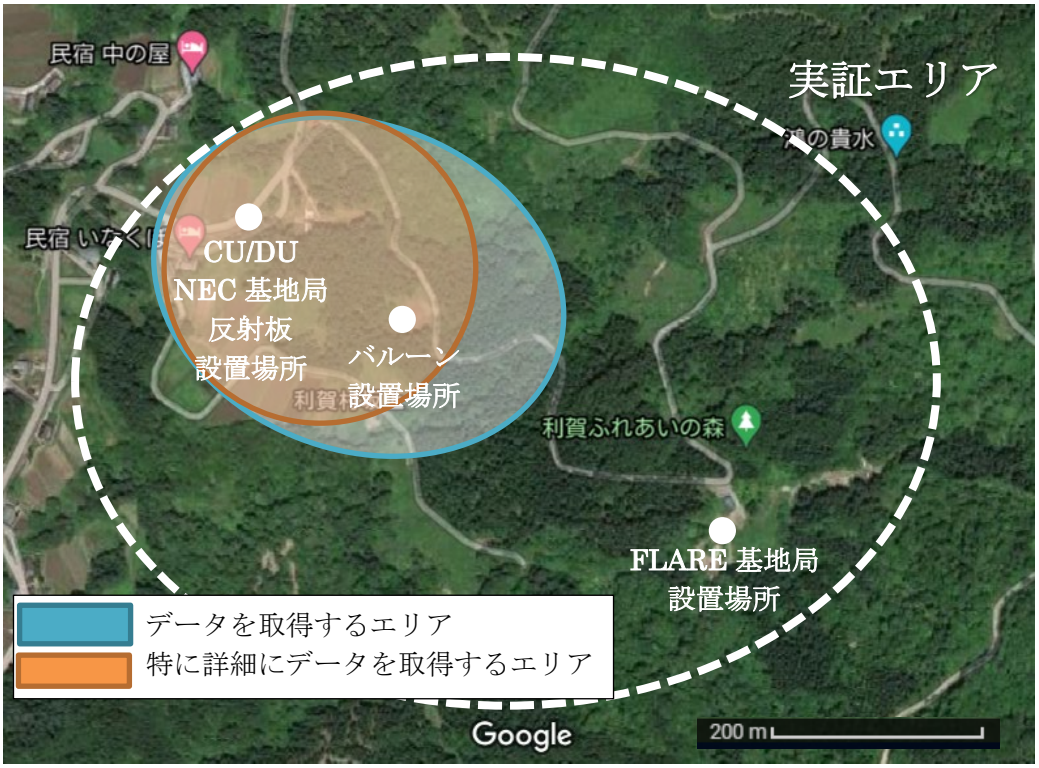


図 35　精緻化のためのデータ取得点

3.3.2.4 評価・検証方法

（1）検証方法の概要および使用測定器

受信電力(SS-RSRP)を 56 地点測定し、電波法関係審査に記載の伝搬モデルと比較した。測定の際比較的標高が高い場所であるため天候リスクを考慮し測定時期および測定地点を決定する。測定地点を決めるにあたり基地局を中心として全周囲においてエリア測定器を用い想定エリアより広い範囲を測定し、机上計算と比較のうえ測定点を決定した。なお、比較の際は電波法関係審査基準の伝搬モデルは受信電力(RSSI)を用いているため、測定した RSRP と RSSI を変換したうえで比較、検証を行った。RSRP と RSSI の変換式は下記の式を利用する。

$$\mathrm{RSRP(dBm)} = \mathrm{RSSI(dBm)} - 10\log(12N)$$

N;リソースブロック数　本実証においては 273 となる

受信レベルを比較のうえ、パラメータのチューニングを行いモデルの精緻化を実施する。精緻化の結果をフィードバックし再度机上計算を行い、比較することで精緻化の妥当性を検証した。

測定に際しては定在波の影響を避けるため、1 つの測定点において 10λ(λ は波長)の範囲で測定位置を動かしながら測定を実施し、得られたすべてのサンプルを統計処理し結果とする。

測定点あたり、合計 1000 サンプル以上の測定を実施し、中央値、標準偏差、上位 10%値、下位 10%値を算出する。

測定器の空中線は無指向性とする。

地形の影響を考慮するために国土交通省国土地理院のメッシュデータを活用する。本測定地の植生は大部分が杉(立山杉)であり、常緑針葉樹であるため、季節性の変化は少ないと考えられる。

測定器はアンリツ株式会社製 ML8780A を用いて測定を実施した。アンテナはメーカ純正の無指向性アンテナ(Z1911B)を利用した。ML8780A の Sub6 帯における内部補正パラメータを活用するため、アンテナゲインは 0dBi とみなし使用する。

図 36　ML8780A 外観図

規格

5GNR TDD sub-6GHz測定ユニット MU878070A

項　目		規　格
電気的性能	入力コネクタ	RF信号入力：SMA-J、50Ω（公称値） 上位ユニットインタフェース 特殊規格コネクタ：2B200-6430-8N2AB（挿抜回数：500回以上） 下位ユニットインタフェース 特殊規格コネクタ：2A200-6130-8N2AB（挿抜回数：500回以上）
	周波数範囲	MX878071A選択時：3600 MHz～4200 MHz MX878072A選択時：4400 MHz～4900 MHz 5G NR TDD測定時の確度保証範囲はSSBの中心周波数設定が以下の範囲 最小周波数 +3.6 MHz～最大周波数 −3.6 MHz CW測定時の確度保証範囲 最小周波数 +10 MHz～最大周波数 −10 MHz
	チャネル帯域幅	10/15/20/30/40/50/60/70/80/90/100 MHz
	設定分解能	0.01 MHz
	基準発振器	エージングレート：±1.0 ppm/年（水晶メーカ保証による）
	測定種別および測定対象信号	5G NR測定 Duplex Mode：TDD Cyclic Prefix：Normal SSB Block Subcarrier Spacing：30 kHz 被測定受信信号：SSS（Secondary Synchronization Signal） DMRS for PBCH（Demodulation Reference Signal） SS周期：5/10/20/40/80/160 ms 測定項目：SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SIR、Transmission Power、RSSI、DMRS-RSRP、DMRS-SIR、Timing CW測定 被測定受信信号：無変調波 測定項目：電力 スペクトラムモニタ 被測定受信信号：指定なし 測定項目：電力
電力測定	最大入力レベル	−25 dBm/20 MHz ＊：5G NR TDD測定 SS-RSRP、DMRS-RSRP測定では−53.2 dBmに相当する
	絶対最大入力	0 dBm、0 Vdc
	分解能	0.1 dB
	表示単位	5G NR TDD測定 SS-RSRP、DMRS-RSRP、Transmission Power、RSSI：dBm SS-RSRQ、SS-SIR、DMRS-SIR、遅延プロファイル：dB CW測定 dBm スペクトラムモニタ dBm、dBμV、dBμV/m
	5G NR TDD 測定確度	Es/Iot [dB] / 最大入力 40 / −56.2 dBm 3 / −58.0 dBm 0 / −59.3 dBm −3 / −61.0 dBm −6 / −63.2 dBm SSS RSRP：±2.5dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） ±4.7 dB（−129 dBm ≦ RSRP < −110 dBm、−6 dB ≦ Es/Iot） RSRQ：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） SIR：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） DMRS RSRP：±2.5dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） ±4.7 dB（−129 dBm ≦ RSRP <−110 dBm、−6 dB ≦ Es/Iot ） SIR：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP <最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB）
	CW測定確度	±2.5 dB（−110 dBm ≦ CW入力 ≦ −25 dBm）

図 37　ML8780A 用 Sub6 測定ユニット仕様図

図 38　ML8780A 用空中線(Z1911B)外観図

通信品質であるスループット、遅延時間を測定し、RSRP との相関が取れているかの確認を行い、システムに必要な性能が出せることを確認する。

SIR、RSSI を測定し、外部からの干渉により通信品質が損なわれていないかを確認し、RSRP と通信品質の相関に外部からの影響がないことを確認する。基準となる RSRP とスループットの相関については事前にラボで検証した上で評価を実施した。

空中線は下記のアンテナパターンであり、基地局からの角度、チルト方向の計算を行う際はアンテナパターンを考慮した。

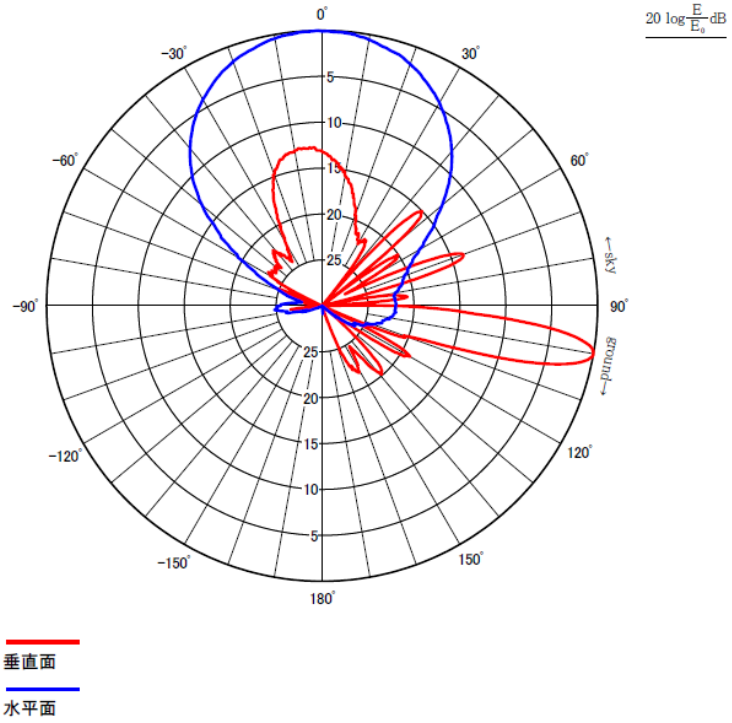
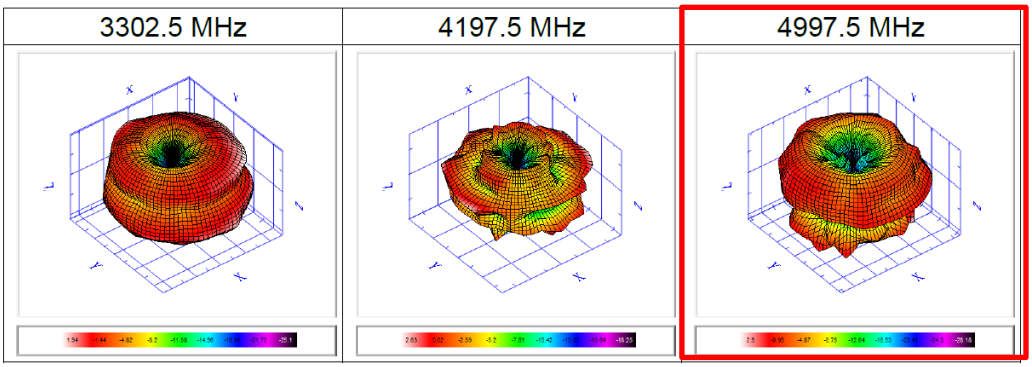


図 39 基地局相当装置のアンテナパターン(アンテナゲイン 17.5dBi)

※本図は最大利得の値を 0dB としたグラフであり、電気チルト 10° の空中線である



Frequency	3302.5	3525	3700	3975	4197.5	4402.5	4550	4700	4850	4997.5
E-Total Peak Gain (dBi)	1.94	2.41	1.67	2.94	2.63	2.9	2.42	1.87	2.93	2.9
Efficiency (%)	56.44	58.31	51.45	41.6	57.95	43.6	45.05	52.16	49.61	38.89
Average Gain (dB)	-2.48	-2.34	-2.89	-3.81	-2.37	-3.61	-3.46	-2.83	-3.04	-4.1

図 40　移動局相当装置(IDY 社 iR730B)のアンテナパターン

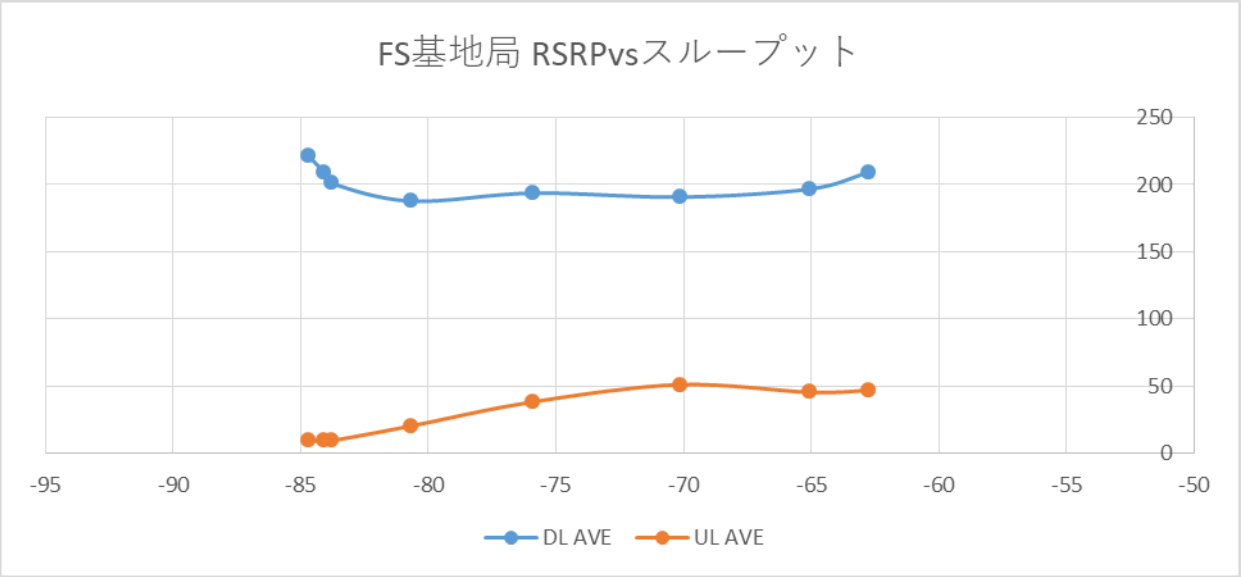


図 41　RSRP とスループットの相関

（2）測定対象箇所

測定対象箇所は下記とする

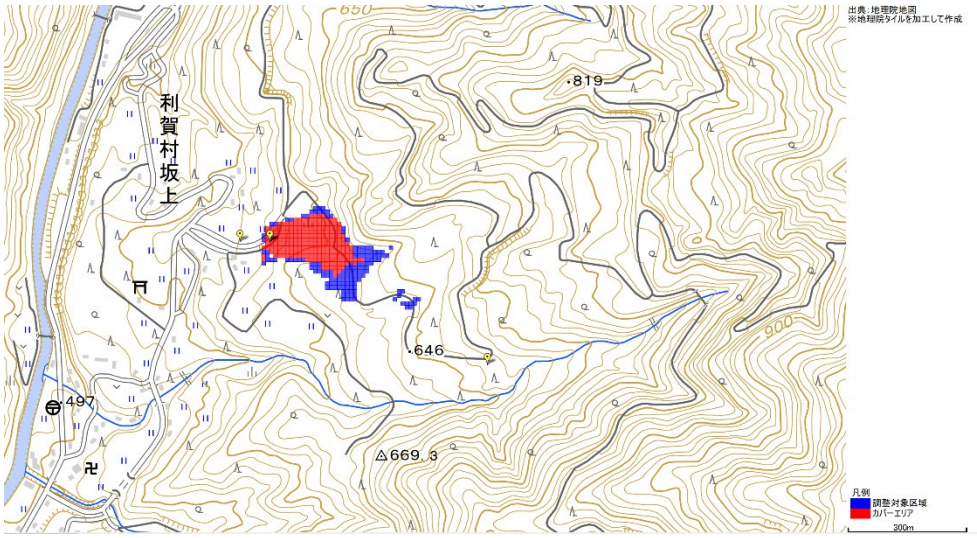


図 42　基地局設置場所(広域図)

■ 対象エリアのカバーエリア図と全測定点

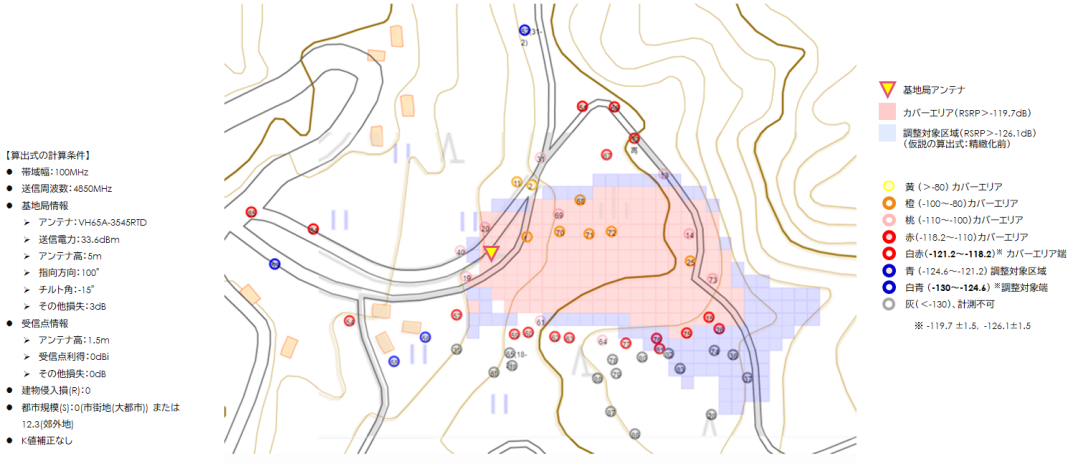


図 43　測定対象箇所図

（3）精緻化の進め方

精緻化は下記の手順で実施する。

ア、対象エリアから地形等のファクターを分析し、精緻化エリアを分割する

イ、対象の測定点において実測値と算出式の伝搬損失を比較する

ウ、最小二乗法により精緻化を行う

エ、標準偏差により精緻化の有効性を確認する

上記のステップで実施する。

手順アの分割は勾配の上下や角度により 4 合目、6 合目ともに 2 つのポイントに分割し精緻化を実施した。

表 29　全測定点から精緻化対象エリアを細分化した表

場所	エリア	番号	K仮説	環境、補足
富山県南砺市利賀村	NEC基地局：南側	01	0	対象地点の平均傾斜角11.14度の急な傾斜の山中で、20~30m級の樹木が多い林。
	NEC基地局：北東側	02	0	対象地点の平均傾斜角7.18度の車道に沿った緩やかな上り。

精緻化の分割図を下記に記載する。

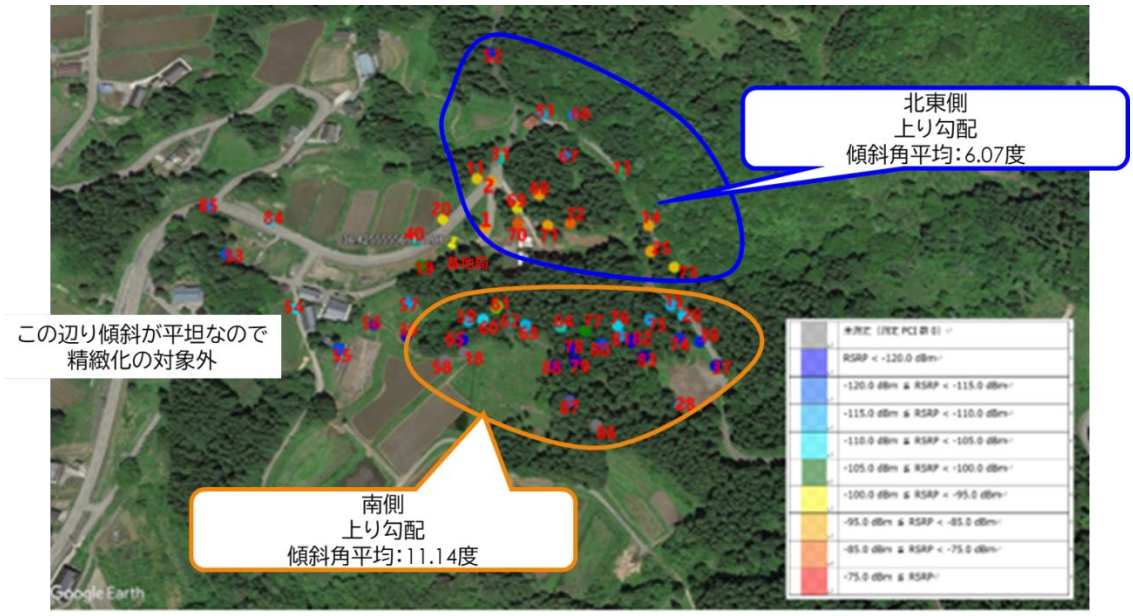


図 44　測定対象箇所図(分割後)

手順イからエとして下記の手順に基づき精緻化の作業を実施する。

・手順イ　対象の測定点において実測値と算出式の伝搬損失を比較

該当の測定点に対し、実測値と算出式の伝搬損失を比較
比較する伝搬損失= -Pr + Pt + Gt +Gr
※実測値の Pr:=実測値 RSRP の中央値 + 10log10(12 × 273)
計測方法により人体損失(8dB)の影響は含めず、基地局の給電線損失 Lf も含めず
Pr:受信レベル(受信電力) [dBm]
Pt:送信電力[dB]
Gt:送信アンテナ利得[dBi]
Gr:受信アンテナ利得[dBi](=0dBi)

・手順ウ　最小二乗法により精緻化を行う

各測定点 i の実測値 Lmes.(i) と算出式による値 Lpred.(i) から計算される、以下の E が最小となる K を最小二乗法により求める。

$$E = \sum_i \{L_{pred.} - L_{mes.}\}2$$

※ここで、 $L_{pred.}$ は、基地局との距離に応じた K の関数として与えられる。

・手順エ　標準偏差により精緻化の有効性を確認する

Lmes.(i)と Lpred.(i) に対して平均二乗偏差 RMSE で精緻化前後の値を評価する。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1} N(L_{mes.}(i) - L_{pred.}(i))^2}{N}}$$

3.3.2.5 実証結果及び考察

3.3.2.4 で記載した手順に基づき精緻化を行った結果を下記に記載する。

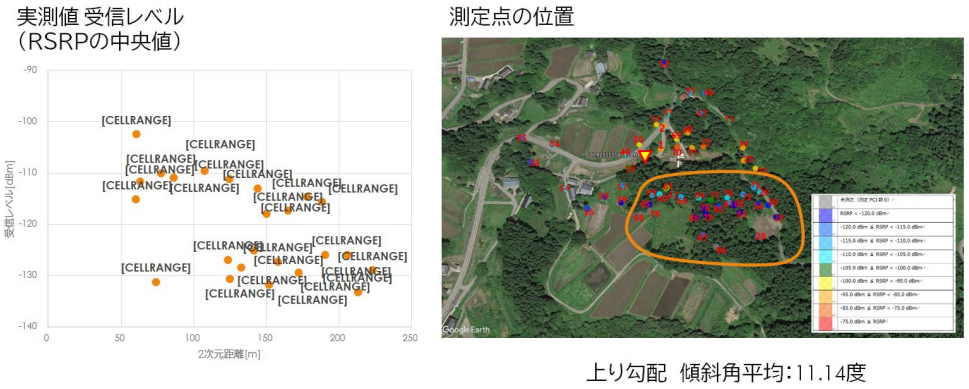


図 45　No.01 南側　実測結果

精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	10.14
精緻化後	-1.239	10.06

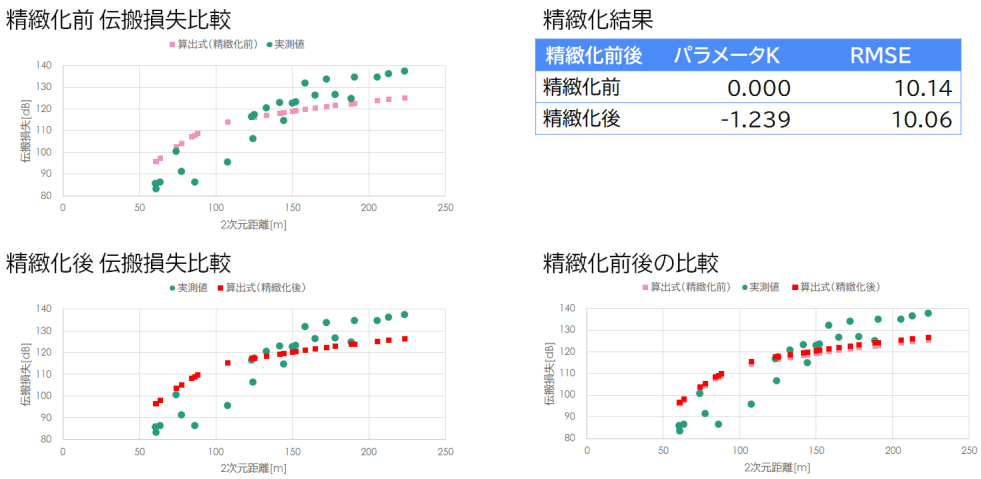
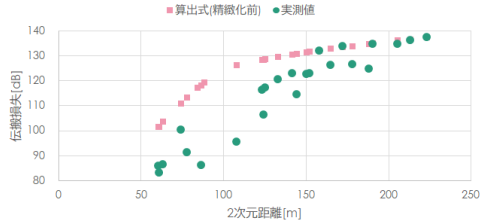


図 46　No.01 南側　精緻化　S=郊外地(12.3)

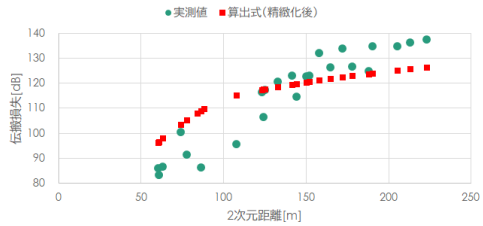
精緻化前 伝搬損失比較



精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	14.37
精緻化後	11.119	10.06

精緻化後 伝搬損失比較



精緻化前後の比較

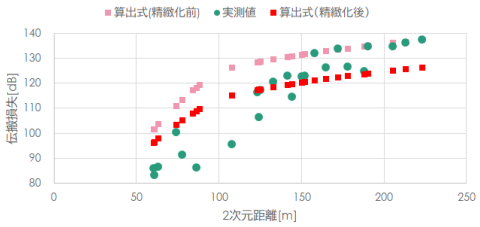


図 47　No.01 南側　精緻化　S=市街地(0)

精緻化前の仮説によるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K:0

精緻化後のパラメータによるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K: -1.239

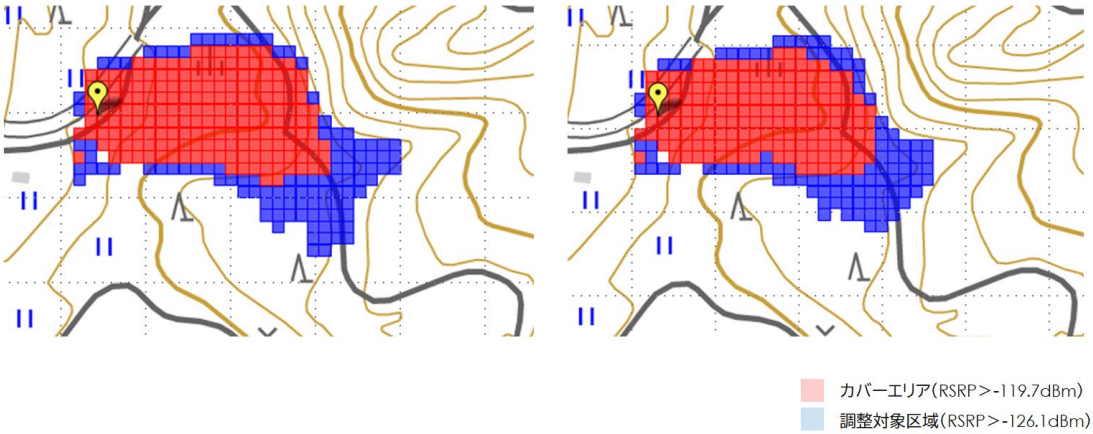


図 48　No.01 南側　精緻化後のカバーエリア図の変化

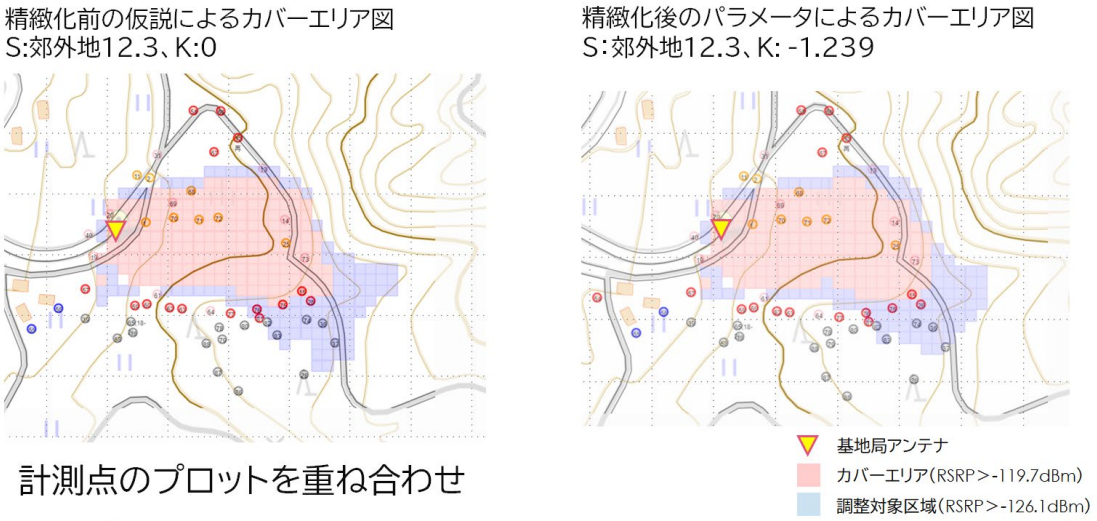


図 49　No.01 南側　精緻化後のカバーエリア図の変化(計測点をプロット)

以下に各測定ポイントの現状写真を掲載する。

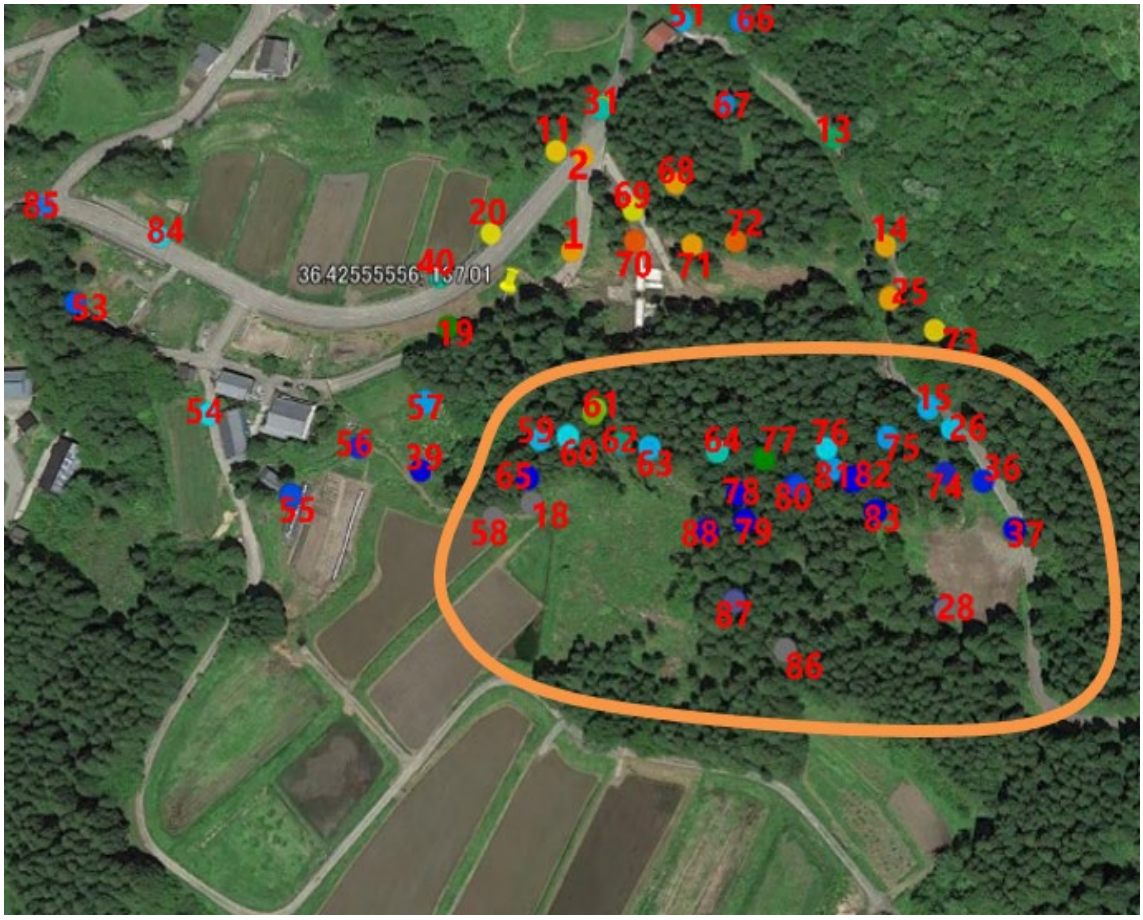


図 50　No.01 南側　写真撮影位置図

図 51　No.01 南側　測定中写真

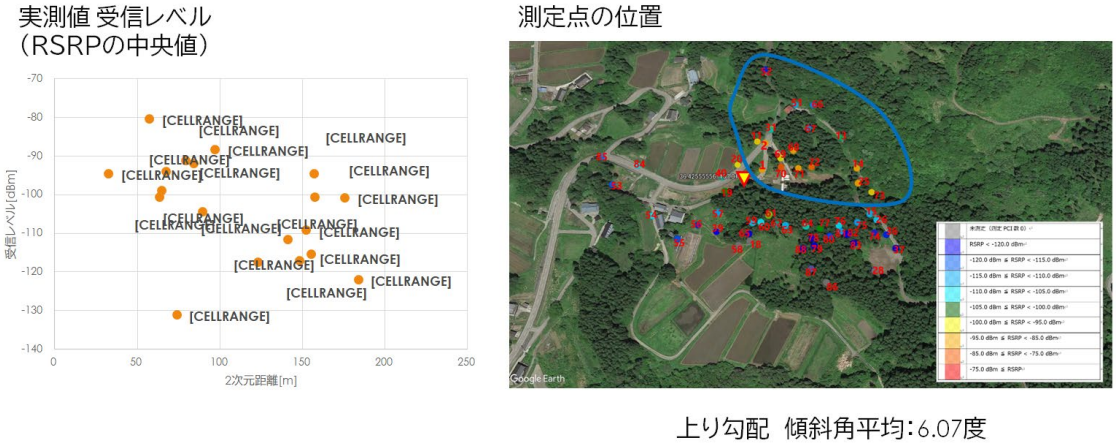
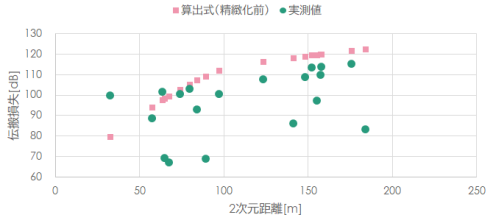


図 52　No.02 北東側　実測結果

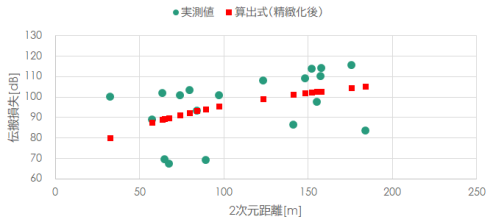
精緻化前 伝搬損失比較



精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	20.21
精緻化後	17.557	13.79

精緻化後 伝搬損失比較



精緻化前後の比較

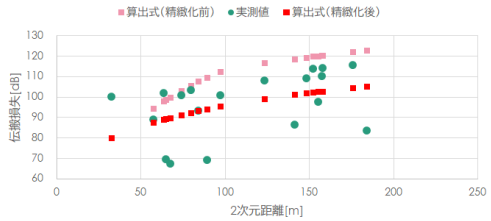
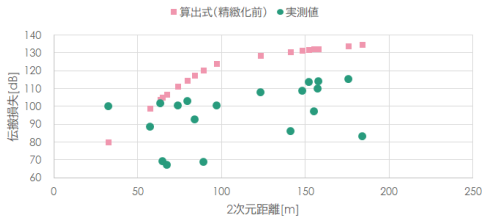


図 53　No.02 北東側　精緻化　S=郊外地(12.3)

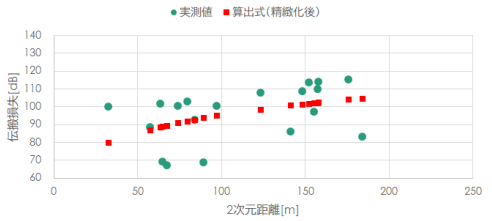
精緻化前 伝搬損失比較



精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	28.71
精緻化後	29.915	13.79

精緻化後 伝搬損失比較



精緻化前後の比較

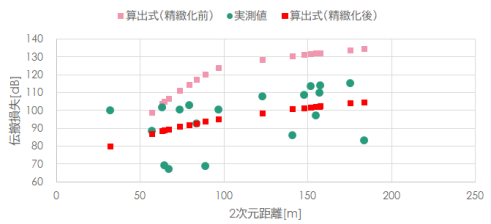
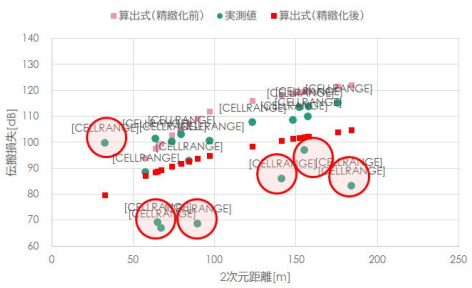


図 54　No.02 北東側　精緻化　S=市街地(0)



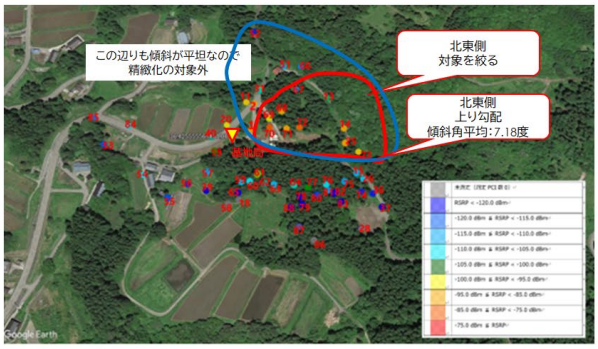
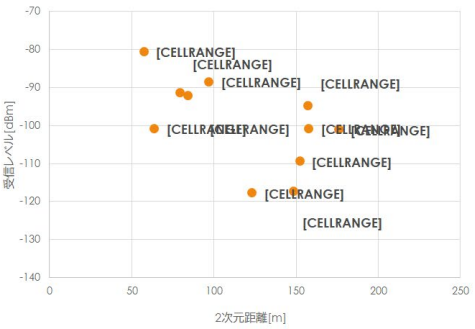


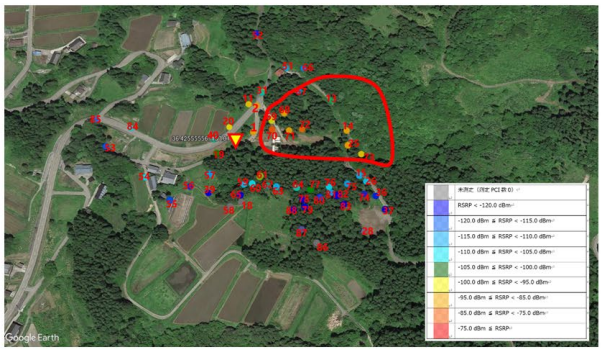
図 55　No.02 北東側　再エリア　対象エリアの絞り込み

赤囲みの測定点は、右の傾斜が緩く、道路上で見通しの良い個所に該当するため、伝搬損失の傾向が異なるため精緻化の対象から外すこととした。

実測値 受信レベル
（RSRPの中央値）



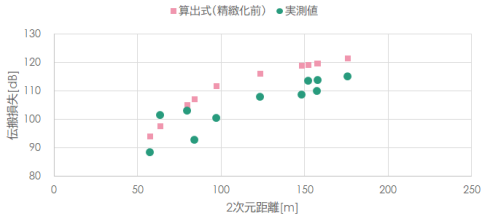
測定点の位置



上り勾配　傾斜角平均:7.18度

図 56　No.02 北東側　再エリア 実測結果

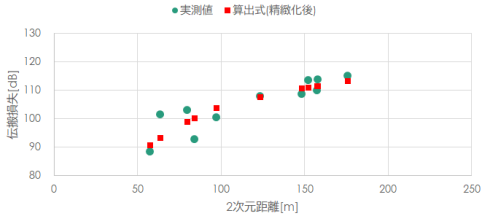
精緻化前 伝搬損失比較



精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	8.36
精緻化後	8.299	4.05

精緻化後 伝搬損失比較



精緻化前後の比較

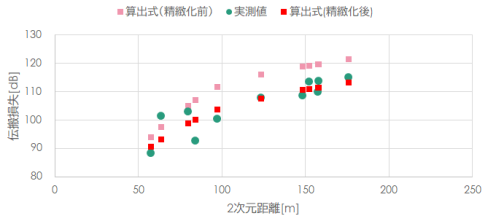
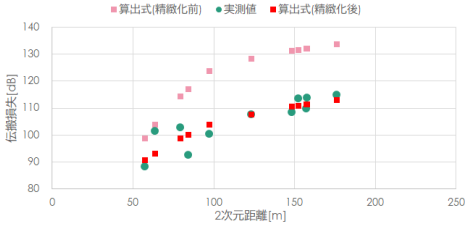


図 57　No.02 北東側　再エリア 精緻化　S=郊外地(12.3)

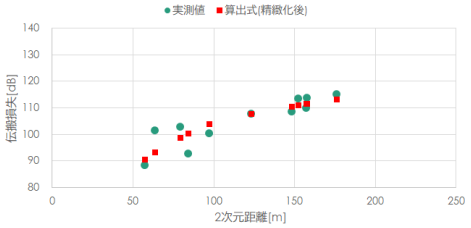
精緻化前 伝搬損失比較



精緻化結果

精緻化前後	パラメータK	RMSE
精緻化前	0.000	18.68
精緻化後	20.657	4.05

精緻化後 伝搬損失比較



精緻化前後の比較

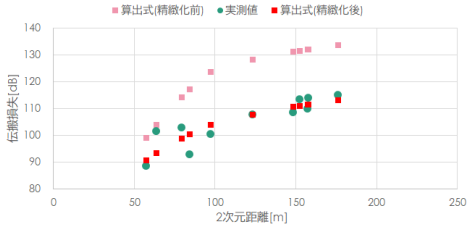
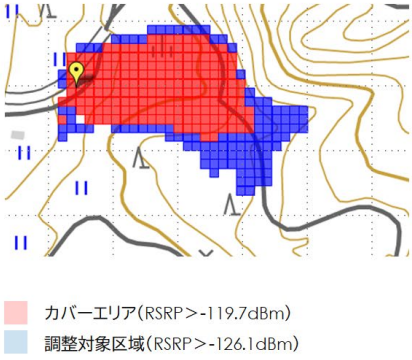
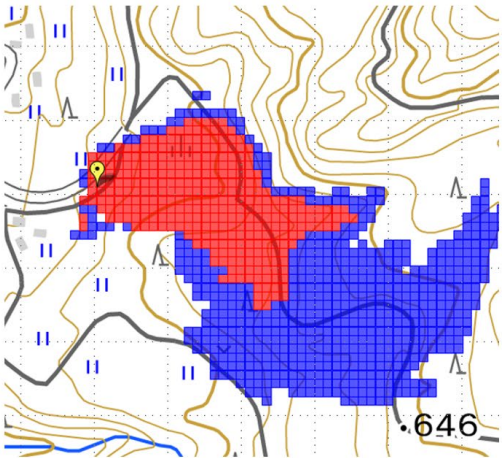


図 58　No.02 北東側　再エリア 精緻化　S=市街地(0)

精緻化前の仮説によるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K:0



精緻化後のパラメータによるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K:8.229

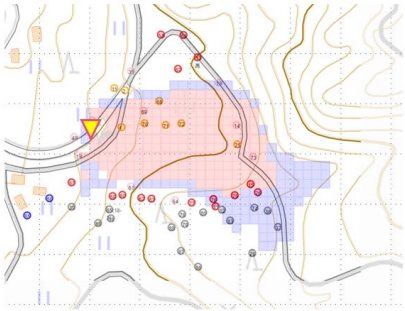


カバーエリア(RSRP>-119.7dBm)
調整対象区域(RSRP>-126.1dBm)

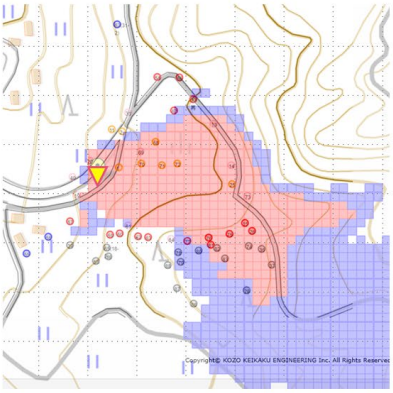
図 59　No.02 北東側　再エリア 精緻化後のカバーエリア図の変化

計測点のプロットを重ね合わせ

精緻化前の仮説によるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K:0



精緻化後のパラメータによるカバーエリア図
S:郊外地12.3、K:8.229



基地局アンテナ
カバーエリア(RSRP>-119.7dBm)
調整対象区域(RSRP>-126.1dBm)

図 60　No.02 北東側　再エリア 精緻化後のカバーエリア図の変化

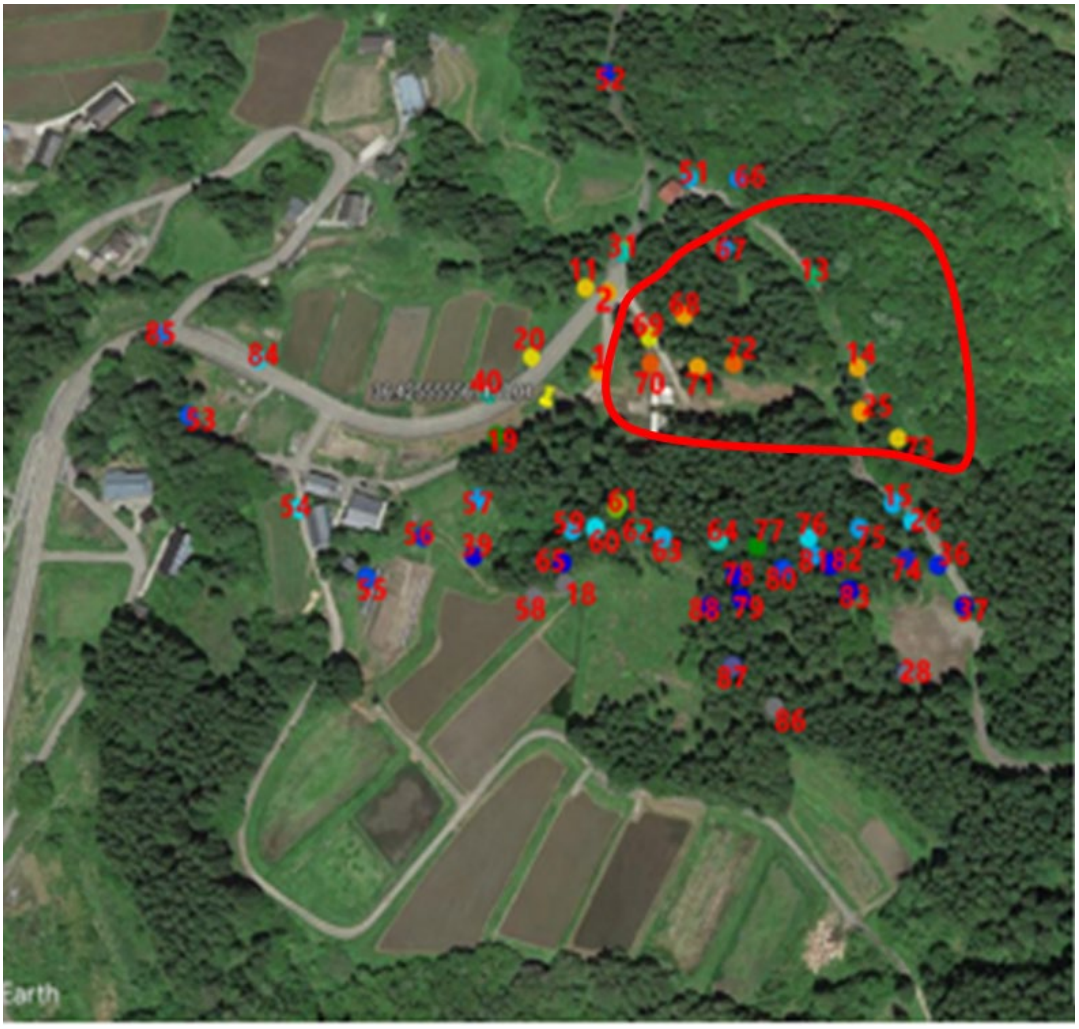


図 61　No.02 北東側　写真撮影位置図

測定点の写真

※全て基地局の方向に向けて撮影

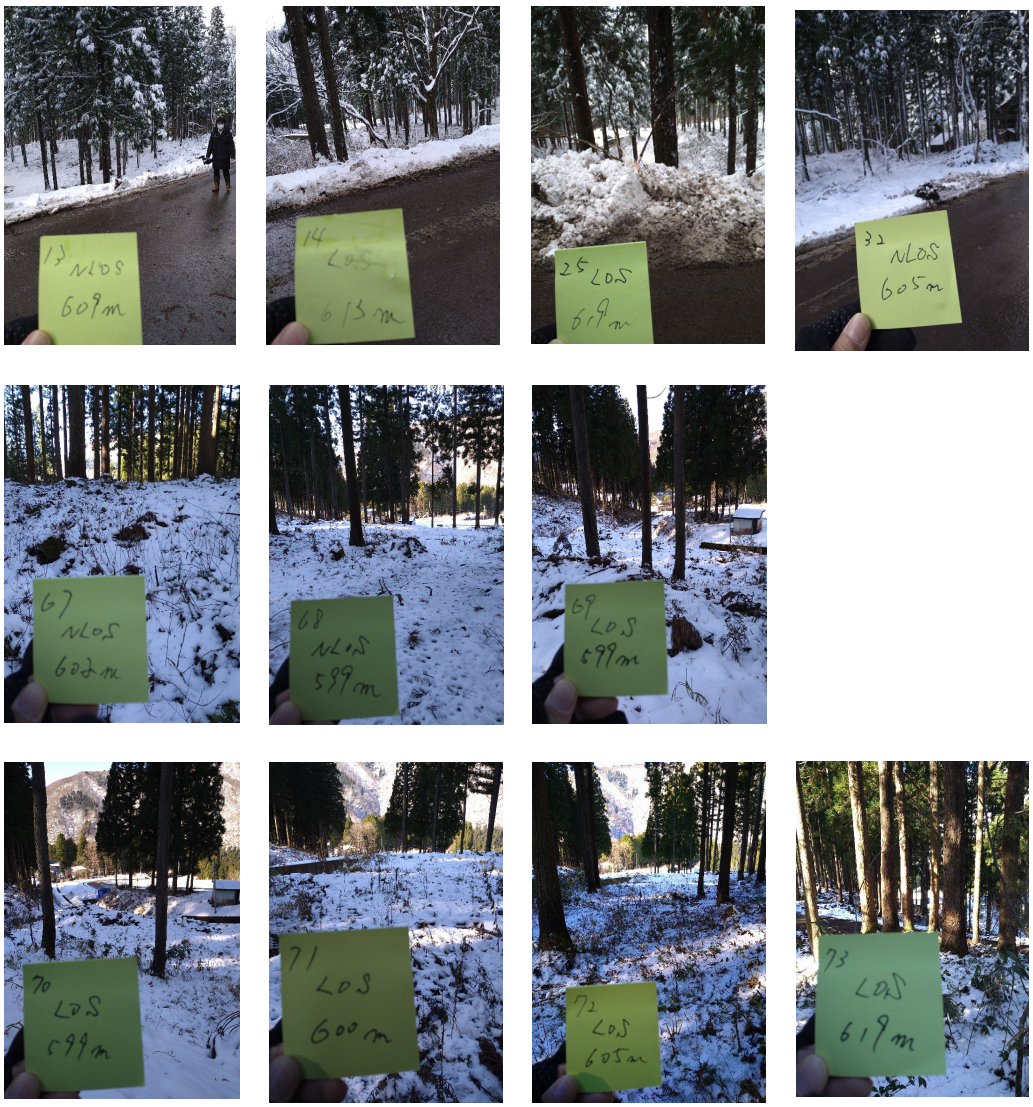


図 62　No.02 北東側　測定中写真

56 か所の測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の中央値、標準偏差 SD、上位 10%、下位 10%値を計算する
サンプル数:1000 ポイント以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数

X_i = 測定値

表 30　測定点の詳細データ

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)	標準偏差
1	36.425722	137.010303	70.08	29.83	-3.58	-95.56	4.79305
2	36.426097	137.010347	31.43	61.36	-2.89	-94.46	2.36578
3	36.426117	137.010214	20.67	57.18	-2.47	-100.51	4.41875
4	36.426172	137.011522	66.6	149.13	-3.20	-110.01	3.75682
5	36.425747	137.011747	85.47	157.78	-4.18	-101.21	4.90319
6	36.42515	137.011925	107.3	181.06	-5.79	-115.52	3.19412
7	36.424806	137.010169	169.93	94.27	-0.75	測定不可	測定不可
8	36.425439	137.009761	225.47	27.36	8.14	-106.91	3.35424
9	36.425792	137.009928	346.57	23.95	-3.31	-101.49	2.90548
10	36.425553	137.011758	92.43	158.28	-6.26	-94.69	2.01373
11	36.425069	137.012014	108.94	191.99	-5.48	-115.5	2.97843
12	36.424453	137.011947	126.62	216.64	-5.59	-133.72	3.48998
13	36.426289	137.010422	25.79	84.63	-0.74	-105.96	5.00918
14	36.426428	137.011258	51.89	143.98	-1.93	-117.45	3.09153
15	36.424883	137.012139	113.11	208.45	-5.46	-126.72	3.63598
16	36.424719	137.012267	116.46	227.08	-5.11	-129.79	3.91334
17	36.424922	137.009678	201.28	78.01	4.63	-127.56	2.80353
18	36.425625	137.009711	283.34	25.87	3.89	-108.55	2.59273
19	36.426656	137.0108	32.06	135.81	-0.68	-112.39	3.01466
20	36.4272	137.010286	8.25	178.12	-0.29	-122.54	1.76831
21	36.425528	137.008058	268.33	174.78	9.42	-122.23	2.49067
22	36.425122	137.008725	245.36	124.5	8.91	-111.57	2.25776
23	36.424836	137.009119	222.81	117.34	4.76	-123.89	2.39770
24	36.425006	137.0094	220.33	83.3	5.34	-122.24	4.17395
25	36.425167	137.009678	210.41	56.48	3.48	-115.38	2.31551
26	36.424758	137.010008	179.19	97.93	0.62	測定不可	測定不可
27	36.425031	137.010194	164.28	66.49	-9.75	-115.7	3.10683
28	36.425042	137.010317	155.32	69.56	-12.18	-112.23	2.90880
29	36.425125	137.010425	143.26	64.06	-15.15	-103.07	3.84858
30	36.425014	137.010553	143.17	83.27	-13.28	-110.05	2.85664
31	36.425003	137.010681	138.19	91.83	-10.52	-112.04	3.13602
32	36.424986	137.010978	128.2	112.8	-12.47	-109.92	2.77819
33	36.424897	137.01015	169.87	79.71	-5.31	-132.01	3.15317
34	36.42665	137.011083	40.6	149.63	-2.05	-116.05	2.60492
35	36.426311	137.011011	49.73	119.2	-1.94	-118.06	2.38641
36	36.425989	137.010775	58.92	81.04	-3.08	-92.43	1.91223
37	36.425889	137.010583	60.88	59.63	-5.92	-100.98	3.72965
38	36.425761	137.010592	74.88	55.9	-6.62	-80.97	2.75472
39	36.425747	137.010858	80.01	78.76	-4.02	-92.15	3.23448
40	36.425761	137.011056	80.98	96.81	-5.25	-89.27	3.00764
41	36.425425	137.011958	96.53	177.66	-5.05	-102.08	4.70532
42	36.424911	137.011972	114.07	194.9	-5.89	-126.85	3.58283

43	36.425039	137.011728	113.21	169.05	-7.51	-117.87	3.37412
44	36.424997	137.011456	117.76	147.83	-8.87	-112.81	2.94655
45	36.424964	137.011183	124.29	129.22	-10.36	-111.55	4.66863
46	36.424847	137.011067	131.64	129.05	-8.72	-127.51	3.50058
47	36.424747	137.011097	134.75	138.82	-7.39	-129.24	3.91386
48	36.424864	137.011331	124.89	145.58	-9.08	-125.71	3.60016
49	36.424925	137.011486	120.1	155.09	-8.94	-118.38	2.89764
50	36.424892	137.011564	119.85	164.03	-9.20	-127.73	3.50740
51	36.424781	137.011669	122.33	177.43	-7.24	-130.18	3.90802
52	36.425781	137.008403	278.41	143.68	9.97	-111.65	1.66634
53	36.4259	137.007847	279.94	195.7	10.11	-117.42	2.38551
54	36.424317	137.011267	142.43	186.57	-4.28	測定不可	測定不可
55	36.424478	137.011053	142.99	158.09	-5.57	-132.39	3.76000
56	36.424714	137.010933	139.93	130.46	-8.16	-131.29	3.77137

※測定不可は測定器の最低受信感度下回ったため、計測ができなかったことを指す

表 31　精緻化の結果

番号	エリア	S	前)精緻化(後 K		前)精緻化(後 RMSE		傾斜角
01	南側	12.3	0	-1.239	10.14	10.06	11.14
		0	0	11.119	14.37	10.06	
02	北東側	12.3	0	17.557	20.21	13.79	6.07
		0	0	29.915	28.71	13.79	
02	北東側(再エリア)	12.3	0	8.299	8.36	4.05	7.18
		0	0	20.657	18.68	4.05	

S 値は郊外地(12.3)が妥当と思われる。北東側エリアは計測環境のばらつきを抑えるため、エリアを絞って精緻化した方が良いと考えられる。

最終的に本実証として算出する K 値、S 値は下記の通りとなる。

表 32　本実証で算出する K 値、S 値

番号	エリア	上り/下り	傾斜角	S	精緻化K	RMSE前	RMSE後
01	南側	上り勾配	11.14	12.3	-1.239	10.14	10.06
02	北東側	上り勾配	7.18	12.3	8.299	8.36	4.05

双方のエリアとも 7.18 度から 11.14 度程度の斜面に位置した箇所の結果となる。今回の結果からは斜度の違いだけが K 値に影響を及ぼすとは考えづらい結果となった。測定地付近の樹木は立山杉となり、常緑樹のため年間を通じ概ね結果は変わらないものと思われる。また、電波伝搬に大きく影響すると考えられる葉の部分が比較的木の上部に集中しているため、実際に作業を行う(今回計測した)場所においては影響が少ないことも考えられる。地

点 01 と 02 においては樹木量が異なり、樹木が少ないエリア 02 よりも樹木が多い（密度の高い）エリア 01 の方が K 値が低くなる傾向が確認できた。また、本地域においては降雪のファクターがあり降雪により伝搬特性が変化する可能性があるが、林業現場においては降雪時期においては原則作業を実施しないため影響がないと思われる。今後さらなる精緻化を行うためには伐採前後で電波伝搬の比較を行うなど樹木の影響値を評価することによりより精度の高い精緻化を行うことができると考えられる。

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

ローカル 5G に使用される Sub6 帯、4.6-4.9GHz においてはキャリア移動通信システムなどで使われているサブギガヘルツ帯であるプラチナバンドなどの周波数と比べ回り込みが少ない。電波反射板を活用し無線装置を増やさずにカバーエリアを確保できるかを実証する。本実証においてはユースケースにて想定されるカメラでの映像伝送の際、光ファイバー網などが実証地まで届いていないため、ローカル 5G を活用する。ローカル 5G を用いた場合も見通し外になるため、電波反射板を用い散在するカバーエリアを少ない基地局でカバーすることが実証の目的となる。

（2）実証目標

電波反射板を用い伝搬範囲を拡大することを目標とする。基地局無線装置の数を減らし、システムの低廉化を図るとともに、バックホール回線が引けない場所や電源が確保できない場所においてもローカル 5G のエリアを確保する。

特に本実証においては、バックホールを引くことが難しい山岳地帯において、樹木により直接波が妨げられる地域に電波反射板を用いることによりローカル 5G の伝搬エリア拡大、ローカル 5G をバックホールとして活用できることを実証する。

ローカル 5G を用いたシステムにおいて 4K カメラを用いた場合下記の性能要件が必要となる。

表 33　システム性能要件表

必要なシステム	伝送速度	伝送遅延	接続数
高精細カメラと AI を組合せた危険予知(4K カメラ)	20Mbps	100ms 以下	1

本実証においては下図の要件が性能要件として定められており、電波法関係審査におい

ては今回採用する 100MHz システムの場合、カバーエリアは-84.6dBm、干渉調整区域(許容干渉レベル)は-91.0dBm である。

表 34　受信電力一覧表

無線設備の区分	40MHz システム	50MHz システム	60MHz システム	80MHz システム	100MHz システム
カバーエリア	-88.6dBm	-87.6dBm	-86.9dBm	-85.6dBm	-84.6dBm
調整対象区域	-95.0dBm	-94.0dBm	-93.0dBm	-92.0dBm	-91.0dBm

※今回の実証においては 100MHz システムを採用する。

3.3.3.2 実証仮説

(1) エリア構築における課題

本実証において樹木伐採を行うエリアは見通し外となっており、かつ別の基地局相当装置を配置することがバックホール回線確保の観点から難しい。今回は地上設置とバルーン設置の 2 パターンで電波反射板の利用可能性を検証した。

図 63　想定エリア図

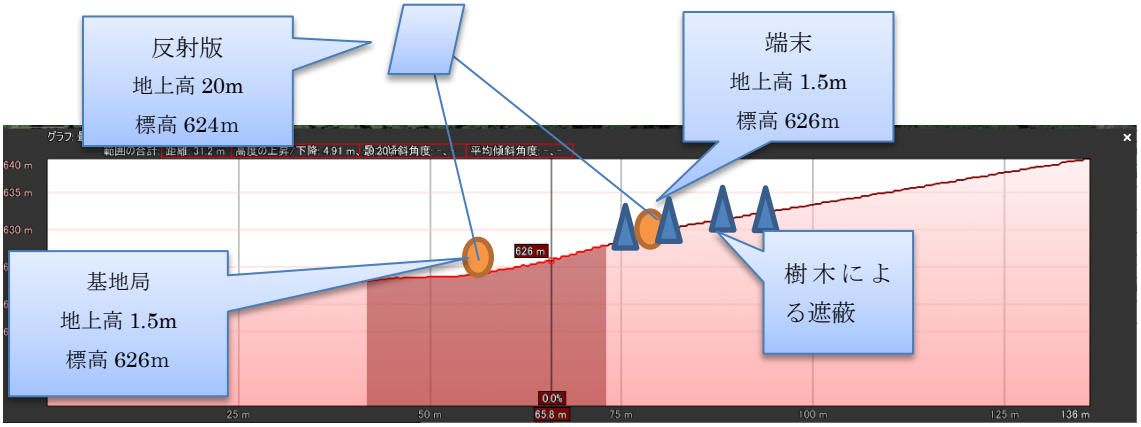


図 64 検証環境 1（バルーン設置）において想定される NLOS エリアとプロファイル図

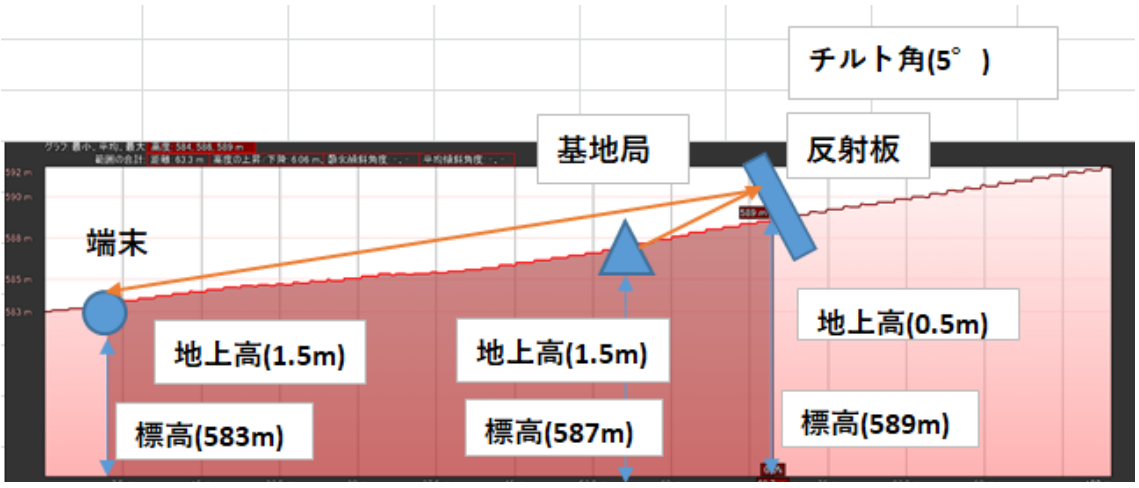


図 65 検証環境 2（地上設置）において想定されるカバーエリアとプロファイル図

(2) 電波反射板設置による解決法

反射板を設置することにより電波の向きを変えサービスエリアの拡大、複数のパスを使用した電波の到達を行うことができ、少ない基地局にて効率よく必要な範囲に電波を伝搬させることができることが想定される。

机上計算にあたり反射板をアンテナとみなし下記の設計方針にて計算を実施する。

$$\mathrm{Gd(dB)} = 10 * \log\left(\frac{4\pi \mathrm{Ae}}{\lambda^2}\right)$$

表 35 反射板パラメータ

パラメータ	パラメータ名称(単位)	値
反射板利得	Gd(dB)	35.1dB
波長	λ(m)	0.062m(4850MHz)
反射板面積	Ae(平方メートル)	1 平方メートル(1m*1m)
反射板種別	-	金属反射板
入反射角	-	鏡面反射
ビーム幅	°	3°
面精度	mm	1/32 波長以下:SUB6 では 1.9mm 以下
重量	Kg(キログラム)	10Kg

※メタマテリアル反射板は入反射角を変化させることができるため、金属反射板よりも設置の自由度が高くなると考えられる。今回のシステムにおいてがピンポイントに基地局の電波を照射することが目的のため反射板の角度調整を行うことで要件を満足すると考えられる。また、気球への設置のため、重量の制限があるため軽量で設置の自由度が高い金属反射板を選定した。(メタマテリアル反射板で設計した場合は約 6-7 キログラムの重量増加となる見込みである。)

※ビーム幅は下記式にて算出される。

$$\text{ビーム幅} = 0.886\,\mathrm{x}\frac{\lambda}{\mathrm{D}}[\mathrm{rad}]$$

λ=波長

D=反射板の見附幅

受信電力は下記の式にて求める。

$$\mathrm{Pr} = \mathrm{Pt} + \mathrm{Gt} - \mathrm{Lt} - \mathrm{Tl1} + 2\mathrm{Gd} - \mathrm{Tl2} + \mathrm{Gr} - \mathrm{Lr}$$

表 36 計算パラメータ(検証環境 1)

パラメータ	パラメータ名称(単位)	値
受信電力	Pr(dBm)	-54.6dBm
基地局送信電力	Pt(dBm)	16.3dBm
送信アンテナ利得	Gt(dBi)	12.0dBi
送信損失	Lt(dB)	0.0dB

伝搬損失(区間 1)	Tl1(dB)	73.0dB
反射板利得	Gd(dB)	35.1
伝搬損失(区間 2)	Tl2(dB)	80.1dB
受信アンテナ利得	Gr(dBi)	0dBi
受信損失	Lr(dB)	0dB

表 37　計算パラメータ(検証環境 2)

パラメータ	パラメータ名称(単位)	値
受信電力	Pr(dBm)	-51.3dBm
基地局送信電力	Pt(dBm)	16.3dBm
送信アンテナ利得	Gt(dBi)	12.0dBi
送信損失	Lt(dB)	0.0dB
伝搬損失(区間 1)	Tl1(dB)	69.7dB
反射板利得	Gd(dB)	35.1
伝搬損失(区間 2)	Tl2(dB)	80.1dB
受信アンテナ利得	Gr(dBi)	0dBi
受信損失	Lr(dB)	0dB

サービスエリア拡大のイメージと計算結果は以下の通り。

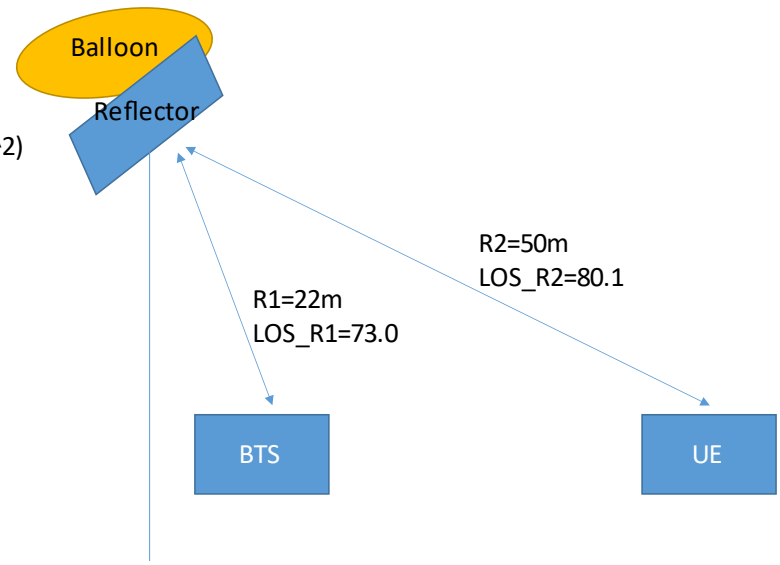
UEにおける受信電力[dB]
Pr_UE＝PWR + ANTgain –CableLoss–LOS_R1 –LOS_R2+2*Gd

16.3 + 12.0 - 0.0-73.0-80.1+2*35.1= -54.6[dBm](RSSI)
RSRP換算 -89.7dBm

□ □ □ □ □ □
LOS(dB)=20*log(4*π*r/λ)
λ=波長、r=距離

反射板利得
Gd(dB)=10*log(4*π*Ae/λ^2)
λ=□ □ｉ Ae=□ □ [m^2]

Ae=1のとき
Gd=35.1



PWR:16.3dBm
ANTgain:12.0dBm
Cable Loss:0.0dB

図 66 サービスエリア拡大のイメージ(検証環境 1（バルーン設置）)

UEにおける受信電力[dB]
Pr_UE＝PWR＋ ANTgain–CableLoss–LOS_R1 –LOS_R2+2*Gd

16.3＋12.0 -0.0-69.7-80.1+2*35.1=-51.3[dBm](RSSI)
RSRP換算 -86.4dBm

□ □ □ □ □ □
LOS(dB)=20*log(4*π*r/λ)
λ=波長、r=距離

反射板利得
Gd(dB)=10*log(4*π*Ae/λ^2)
λ=□ □ｉ Ae=□ □ [m^2]

Ae=1のとき
Gd=35.1

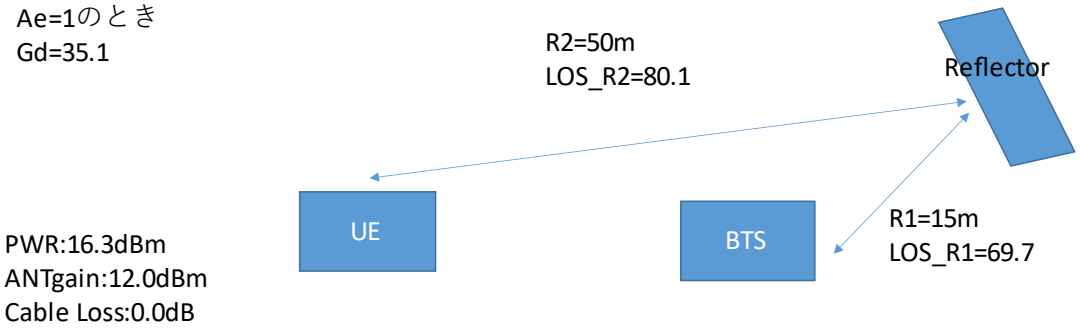


図 67 サービスエリア拡大のイメージ(検証環境 2（地上設置））

電波反射板のビーム幅が 3° と狭いため、広いエリアのカバーは難しいと考えられる。今回のシステムでは UE から別の基地局へ接続する中継システムとして活用を考えているため、一点に対し伝搬が可能であれば問題ないと考えられる。この方法は河川監視カメラなどの他者土地利用で固定的に利用されるシステムへの応用が可能であると考えられる。今回の基地局設備では実現できないが、マルチビームでの通信を行えるアンテナ制御機構が内蔵されたタイプの基地局であれば複数の反射板に対しマルチビームで通信を行うことで基地局の数を減らした上でエリアを広げることができると考えられる。

以下に反射板の気球への取り付け方法を記載する。気球は自身での位置調整機能を持たないため係留方法を工夫し、極力反射板の向きや角度が変わらないように運用を行う。反射板の固定はアイボルトを使用し、気球のワイヤー長を調整することにより柔軟に角度調整を行うことができるように設計を行う。今回の実証に必要な角度(垂直から下向きチルト方向)に調整することが可能である。

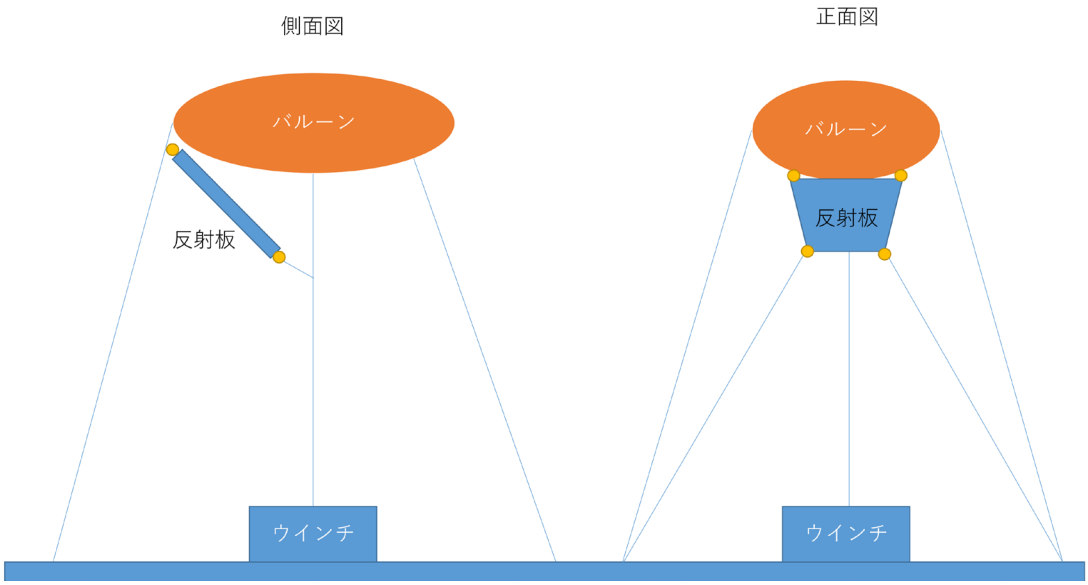


図 68 電波反射板の取り付け模式図(検証環境 1（バルーン設置）)

地上への設置の場合は調整が可能なように仮設置を行い、精密な角度計、コンパスで角度を調整の上使用する。

図 69 電波反射板を地上設置した様子(検証環境 2（地上設置）)

3.3.3.3 評価・検証項目

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において 20 地点の測定を行った。測定項目は RSRP、SIR、通信品質(スループット、遅延速度)とする。

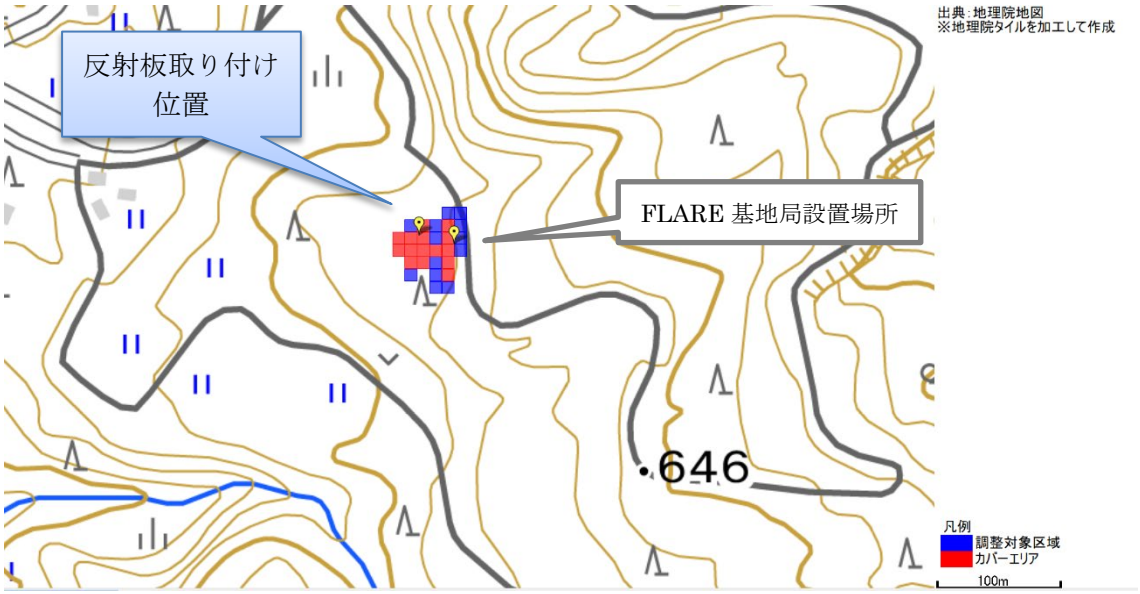


図 70 反射板を設置しない場合のカバーエリア、調整対象区域
(検証環境 1（バルーン設置）)

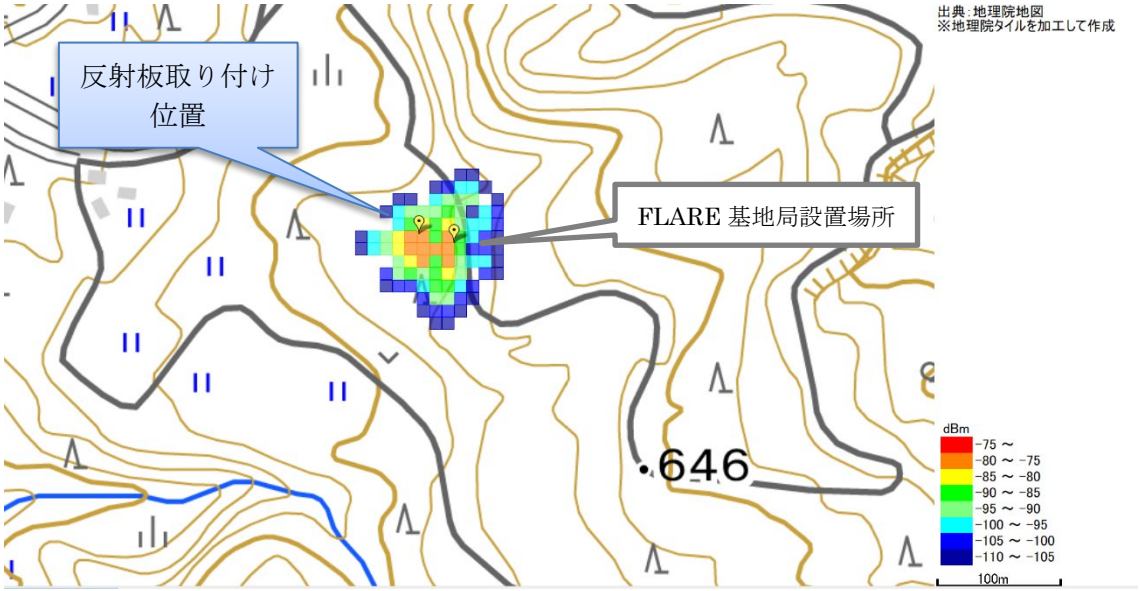


図 71 反射板を設置しない場合のシミュレーション結果
(検証環境 1（バルーン設置）)

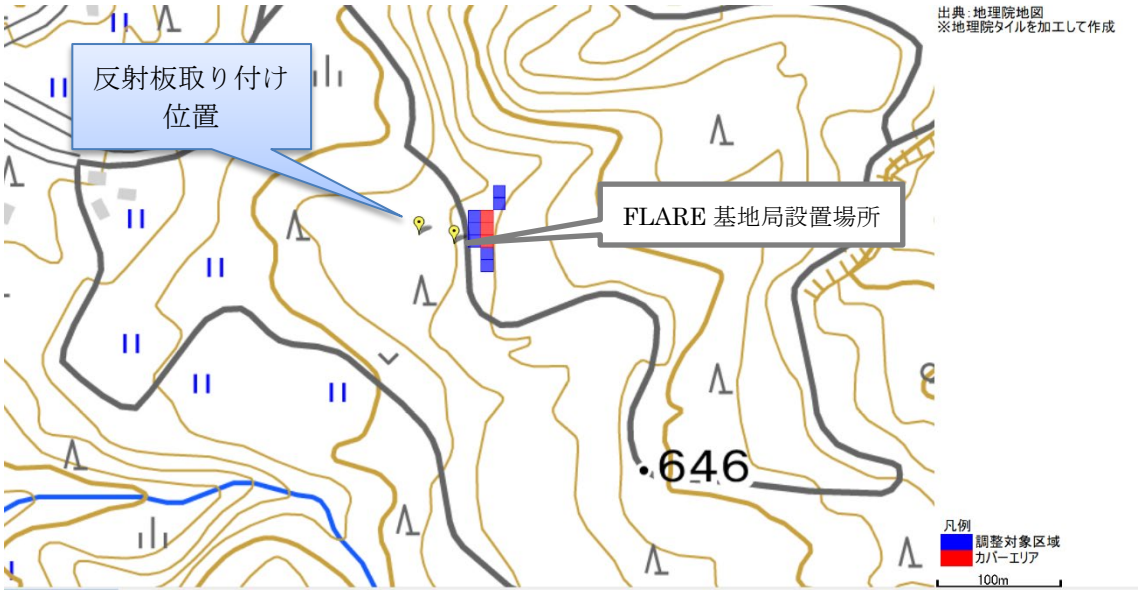


図 72 反射板にて反射した場合のカバーエリア、調整対象区域
（検証環境 1（バルーン設置））

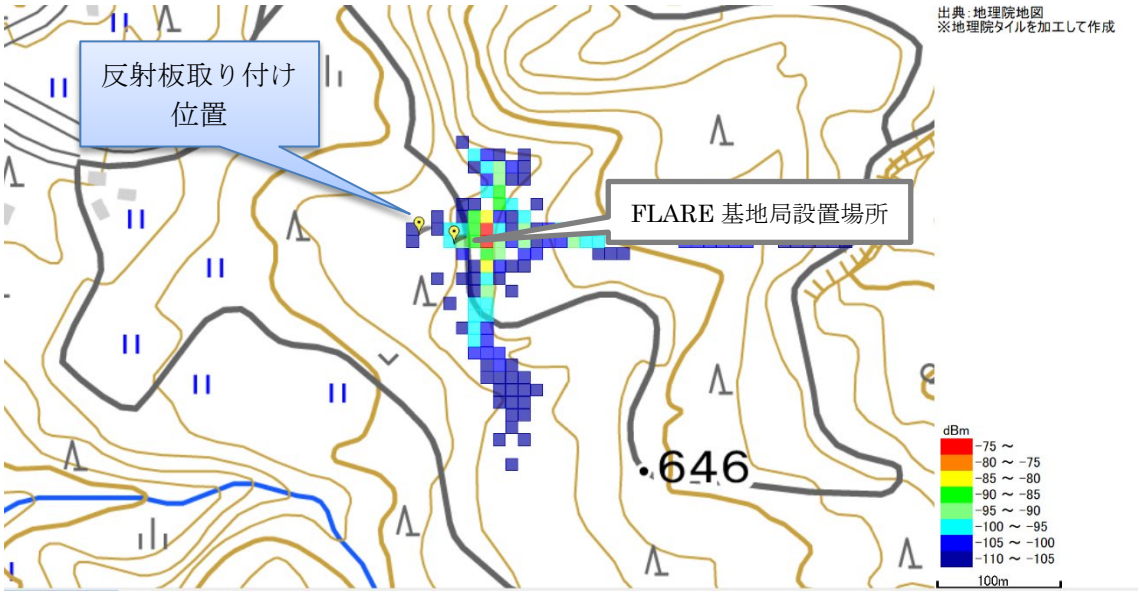


図 73 反射板にて反射した場合のシミュレーション結果
（検証環境 1（バルーン設置））

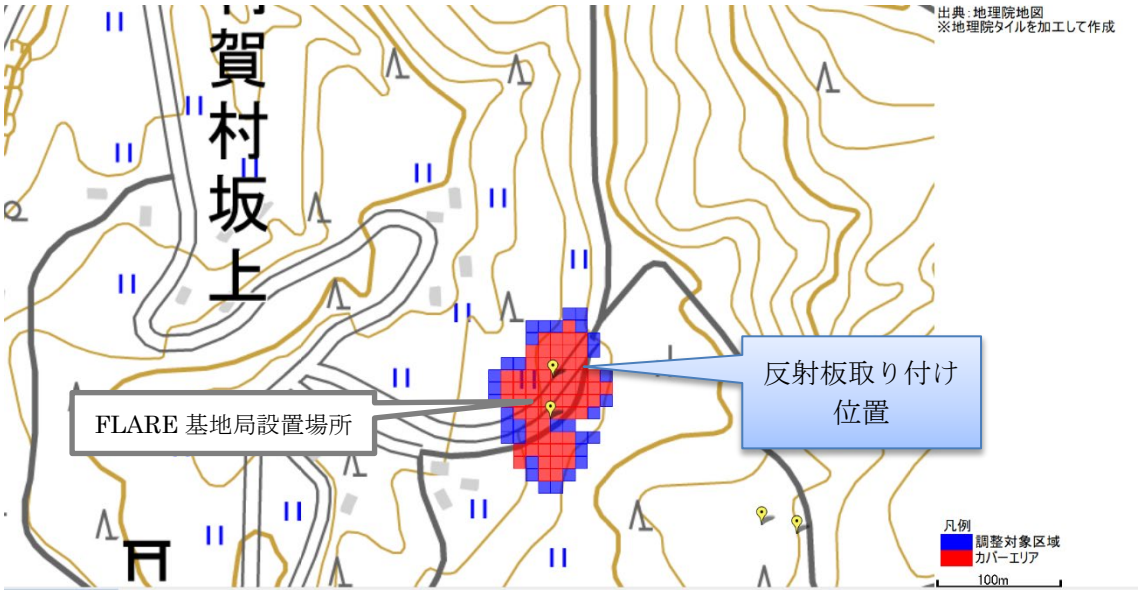


図 74 反射板を設置しない場合のカバーエリア、調整対象区域
（検証環境 2（地上設置））

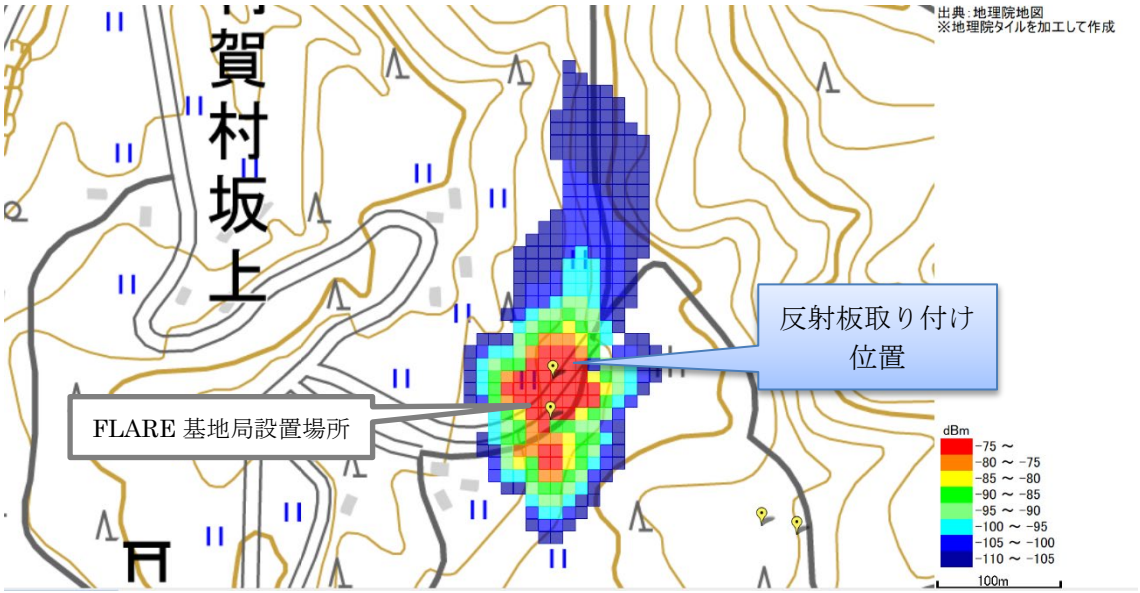


図 75 反射板を設置しない場合のシミュレーション結果
（検証環境 2（地上設置））

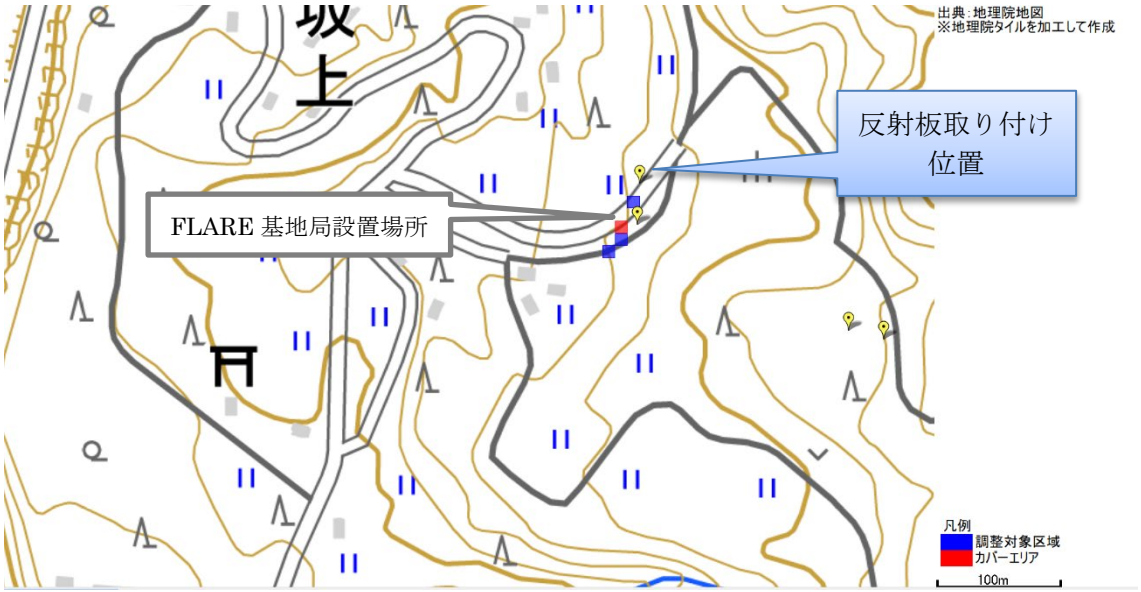


図 76 反射板にて反射した場合のカバーエリア、調整対象区域
（検証環境 2（地上設置））

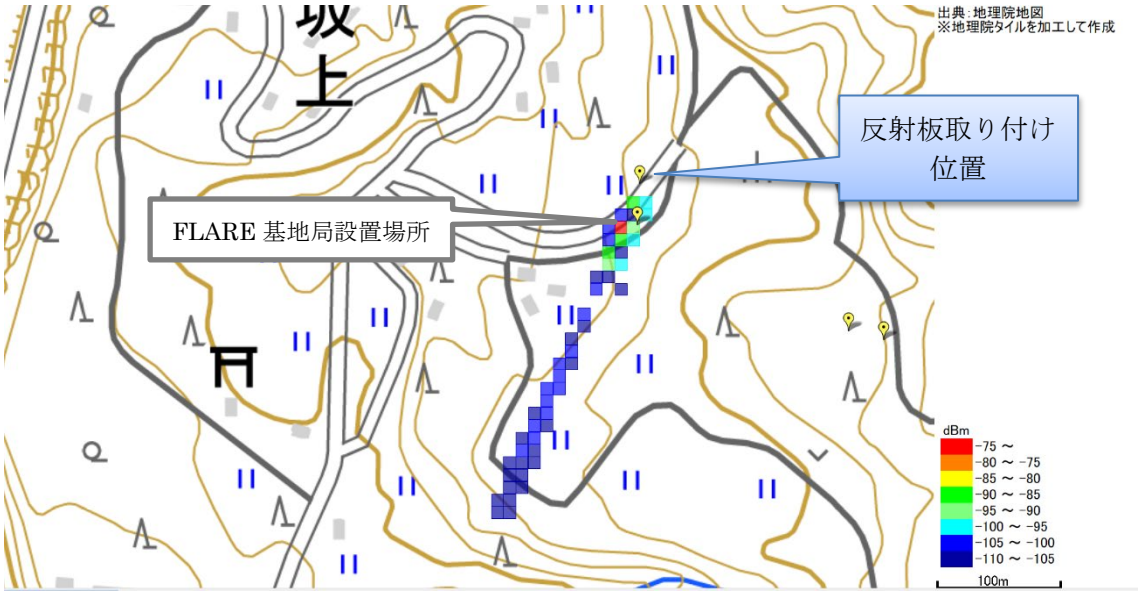


図 77 反射板にて反射した場合のシミュレーション結果
（検証環境 2（地上設置））

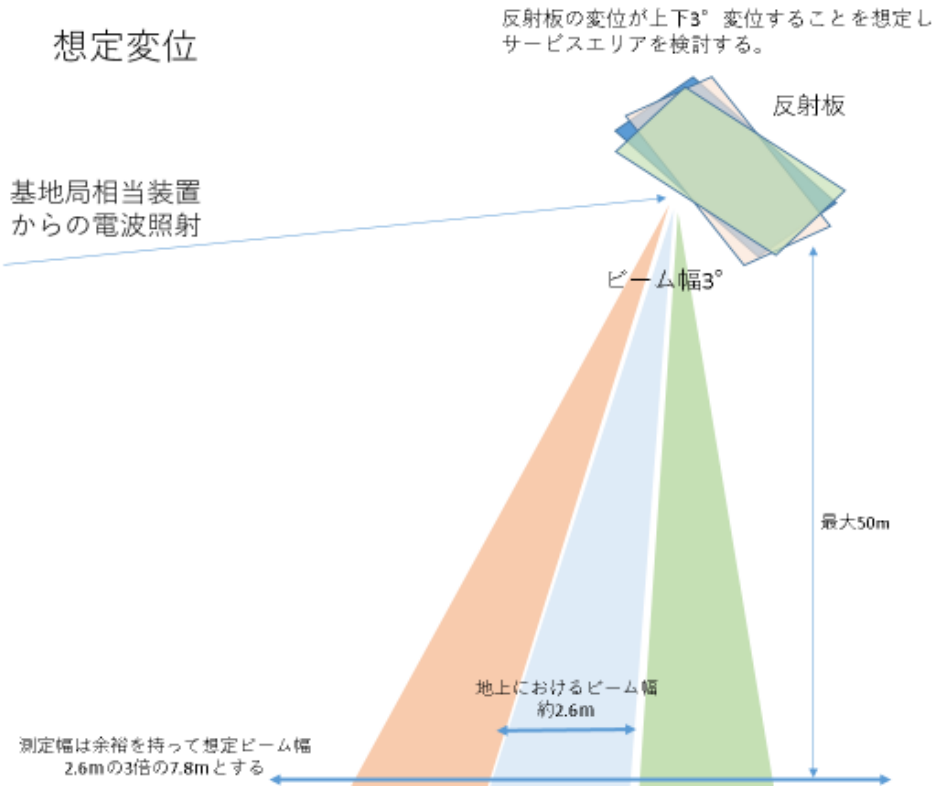


図 78 反射板の想定変位幅(検証環境１（バルーン設置））

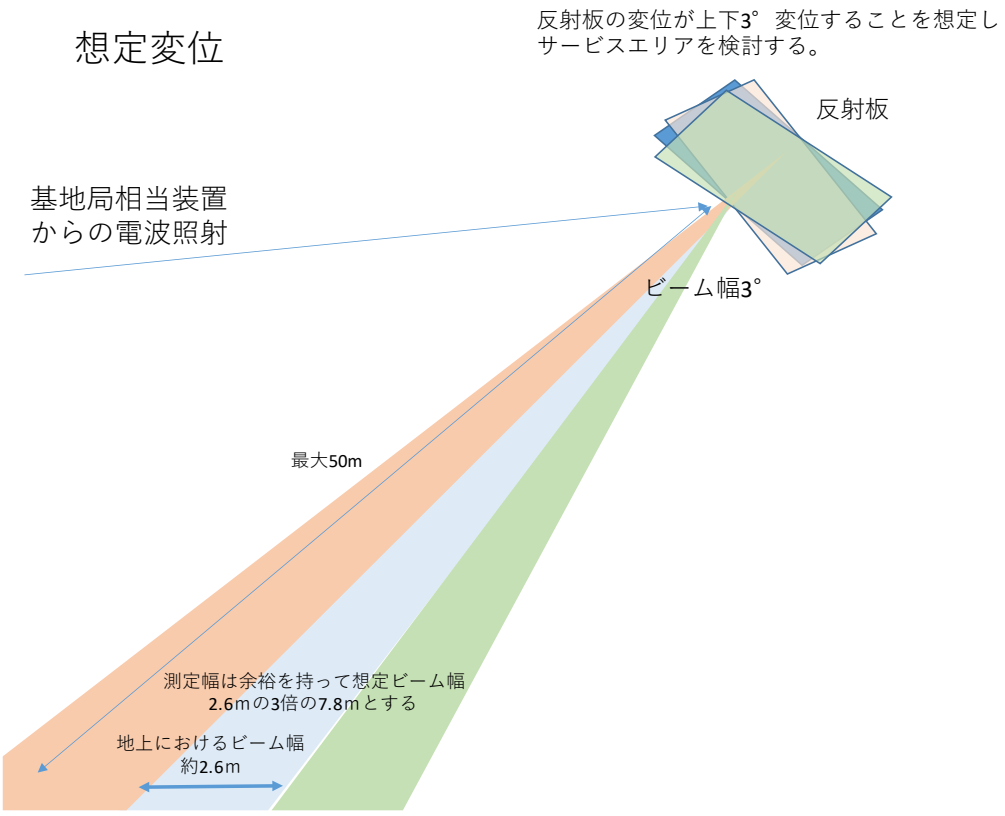


図 79 反射板の想定変位幅(斜め方向)(検証環境 1（バルーン設置）)

反射板は風での変位が考えられるため、想定角度から±3°の変位を想定して広域の測定を実施した。

表 38 評価・検証項目

測定項目	測定指標	測定手法	測定する値(単位)	測定機器
受信電力	RSRP	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
受信電力	RSSI	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
電波干渉	SIR	Anritsu エリアテスタ	dB	ML8780A
電波品質	遅延プロファイル	Anritsu エリアテスタ	usec	ML8780A
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE
遅延	遅延時間	Ping	msec	WindowsPC(Ping)
測定位置	基地局からの距離、方位	Anritsu エリアテスタ	緯度経度	ML8780A(内 蔵 GPS、誤差数 m)
ポイントあたりのサンプル数	回数	Anritsu エリアテスタ	回	ML8780A(1000 ポイント以上)

※GPS の水平誤差は受信状況によるが最高値で 2-10m 程度である。GPS の垂直誤差は大きいため、GPS で即位した水平面の位置の国土地理院地形データにアンテナ高を足すことにより、アンテナの海抜高とする。

3.3.3.4 評価・検証方法

測定器はアンリツ株式会社製 ML8780A を用いて測定を実施した。アンテナはメーカ純正の無指向性アンテナ(Z1911B)を利用した。ML8780A の Sub6 帯における内部補正パラメータを活用するため、アンテナゲインは 0dBi とみなし使用する。

図 80　ML8780A 外観図

規格

5GNR TDD sub-6GHz測定ユニット MU878070A

項　目		規　格
電気的性能	入力コネクタ	RF信号入力：SMA-J、50Ω（公称値） 上位ユニットインタフェース 特殊規格コネクタ：2B200-6430-8N2AB（挿抜回数：500回以上） 下位ユニットインタフェース 特殊規格コネクタ：2A200-6130-8N2AB（挿抜回数：500回以上）
	周波数範囲	MX878071A選択時：3600 MHz～4200 MHz MX878072A選択時：4400 MHz～4900 MHz 5G NR TDD測定時の確度保証範囲はSSBの中心周波数設定が以下の範囲 最小周波数 +3.6 MHz～最大周波数 −3.6 MHz CW測定時の確度保証範囲 最小周波数 +10 MHz～最大周波数 −10 MHz
	チャネル帯域幅	10/15/20/30/40/50/60/70/80/90/100 MHz
	設定分解能	0.01 MHz
	基準発振器	エージングレート：±1.0 ppm/年（水晶メーカ保証による）
	測定種別および測定対象信号	5G NR測定 Duplex Mode：TDD Cyclic Prefix：Normal SSB Block Subcarrier Spacing：30 kHz 被測定受信信号：SSS（Secondary Synchronization Signal） DMRS for PBCH（Demodulation Reference Signal） SS周期：5/10/20/40/80/160 ms 測定項目：SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SIR、Transmission Power、RSSI、DMRS-RSRP、DMRS-SIR、Timing CW測定 被測定受信信号：無変調波 測定項目：電力 スペクトラムモニタ 被測定受信信号：指定なし 測定項目：電力
電力測定	最大入力レベル	−25 dBm/20 MHz ＊：5G NR TDD測定 SS-RSRP、DMRS-RSRP測定では−53.2 dBmに相当する
	絶対最大入力	0 dBm、0 Vdc
	分解能	0.1 dB
	表示単位	5G NR TDD測定 SS-RSRP、DMRS-RSRP、Transmission Power、RSSI：dBm SS-RSRQ、SS-SIR、DMRS-SIR、遅延プロファイル：dB CW測定 dBm スペクトラムモニタ dBm、dBμV、dBμV/m
	5G NR TDD 測定確度	Es/Iot [dB] / 最大入力 40 / −56.2 dBm 3 / −58.0 dBm 0 / −59.3 dBm −3 / −61.0 dBm −6 / −63.2 dBm SSS RSRP：±2.5dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） ±4.7 dB（−129 dBm ≦ RSRP < −110 dBm、−6 dB ≦ Es/Iot） RSRQ：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） SIR：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） DMRS RSRP：±2.5dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB） ±4.7 dB（−129 dBm ≦ RSRP <−110 dBm、−6 dB ≦ Es/Iot ） SIR：±2.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP ≦ 最大入力、−3 dB ≦ Es/Iot ≦ +3 dB） ±3.5 dB（−110 dBm ≦ RSRP <最大入力、−6 dB ≦ Es/Iot <−3 dB）
	CW測定確度	±2.5 dB（−110 dBm ≦ CW入力 ≦ −25 dBm）

図 81　ML8780A 用 Sub6 測定ユニット仕様図

図 82　ML8780A 用空中線(Z1911B)外観図

図 83　反射板の基礎データを取得中の様子

図 84　金属反射板を評価のため地上設置した様子

（1）受信電力

受信電力(RSRP)を 20 地点にて測定し、電波法関係審査に記載の伝搬モデルと比較した。測定に際しては定在波の影響を避けるため、1 つの測定点において 10λ(λは波長)の範囲で測定位置を動かしながら測定を実施し、得られたすべてのサンプルを統計処理し結果とした。測定器の空中線は無指向性とした。比較の差異は電波法関係審査の伝搬モデルは受信電力(RSSI)を用いているため、測定した RSRP と RSSI を変換したうえで比較、検証を行った。RSRP と RSSI の変換式は下記の式を利用する。なお、測定高さは 1.5m を標準とする。

$$\mathrm{RSRP(dBm)} = \mathrm{RSSI(dBm)} - 10\log(12N)$$

N;リソースブロック数　本実証においては 273 となる

受信レベルを比較のうえ、必要に応じ反射板の角度の調整等を実施する。

（2）その他の指標

通信品質であるスループット、遅延時間を測定し、RSRP との相関が取れているかの確認を行い、システムに必要な性能が出せることを確認した。

SIR、RSSI を測定し、外部からの干渉により通信品質が損なわれていないかを確認し、RSRP と通信品質の相関に外部からの影響がないことを確認した。

電波の品質を計測するために遅延プロファイルの測定を行った。遅延プロファイルの測定は直接波と反射板から反射される電波がマルチパスとなり品質を低下させる可能性があるため計測を行った。なお、測定サンプルは 1 カ所につき 1000 ポイント以上とした。

（3）受信電力、通信品質、伝送性能が想定値と異なる場合の要因と解決方策検討

受信電力、通信品質、伝送性能が想定値と異なる場合は反射板を用いたマルチパスによる影響が考えられる。遅延プロファイル分析や CPE を金属板で覆うなどのマルチパスを最小化する方法を試行し影響を排除する試験を行った。

3.3.3.5 実証結果及び考察

（1）反射板設置時の容易性及びコストの検討

表 39 反射板設置の容易性比較

評価項目	電波反射板(反射板材質:金属アルミ)	簡易基地局	中継器
設置位置(アクセス容易、面積)	設置面積が少なく、電源、伝送路も不要	設置面積は電源、伝送路設備も必要なため電波反射板より大きくなる	設置面積は電源設備も必要なため電波反射板より大きくなる
付帯設備(電源・バッテリー等)の必要性	不要	必要	必要
伝送路の必要性	不要	必要	不要
施工の容易性	中程度	中程度	中程度
導入リードタイム	数か月~	6 か月程度~	6 か月程度~
移設の容易性	容易(電源、伝送路が無く簡易)	困難(電源、伝送路含み移設が必要)	中程度(電源の移設が必要)
総合評価	固定回線の構築には安価で電源が不要なため適ではあるが、反射角度や見通しなど設置の柔軟性が低い。	基地局の増設となるためコストが高いが空中線や設置の自由度が高い。	電源が必要となるが、空中線を選択可能なため自由な方向、指向性を決められる点が良いが、ドナーアンテナと基地局の見通しが必要となる。
電波反射板が有効となる条件や使い方	比較的ピンポイントでターゲットを狙う必要がある環境下では電波反射板を用いることで短納期で比較的容易に回線を構築できると考えられる。		

表 40 反射板設置の経済性比較

評価項目	電波反射板 (反射板材質:金属アルミ)	簡易基地局	中継器
設備費用	1300 千円	6000 千円	6000 千円
設備施工費用	500 千円	300 千円	300 千円
付帯設備費用(電源、バッテリー等)	-	300 千円	300 千円
付帯設備施工費用(電源、バッテリー等)	-	200 千円	200 千円
伝送設備費用(光、無線)	-	200 千円-500 千円	-
伝送設備施工費用(光、無線)	-	200 千円-500 千円	-
運用・保守費用	100 千円/年間	2000 千円/年間	500 千円/年間
総合評価	設計条件に問題がなければほぼランニングコストもかからず安価に運用できると考えられる。	比較的高価であり、回線も必要であるなどコストはかかるが安定した運用が可能となる。	現在は製品がなく簡易基地局と同程度の費用であり、また製品や制度がないが、回線費用(施工・ランニングとも)が必要ないなどのメリットがある。
電波反射板が有効となる条件や使い方	電波反射板は反射角度が限られており、複数の陸上移動局と通信を行うシステムには電波反射板は不適と考えられる。しかしながら FWA のような固定回線として Local5G のエリア拡大を比較的安価に構築することが可能となる点が反射板の有効性と考えられる。		

(2) 電波反射板を用いた際の実測結果と考察

(ア) 検証環境 1（バルーン設置）の検証結果

図 85 反射板をバルーンに搭載した様子

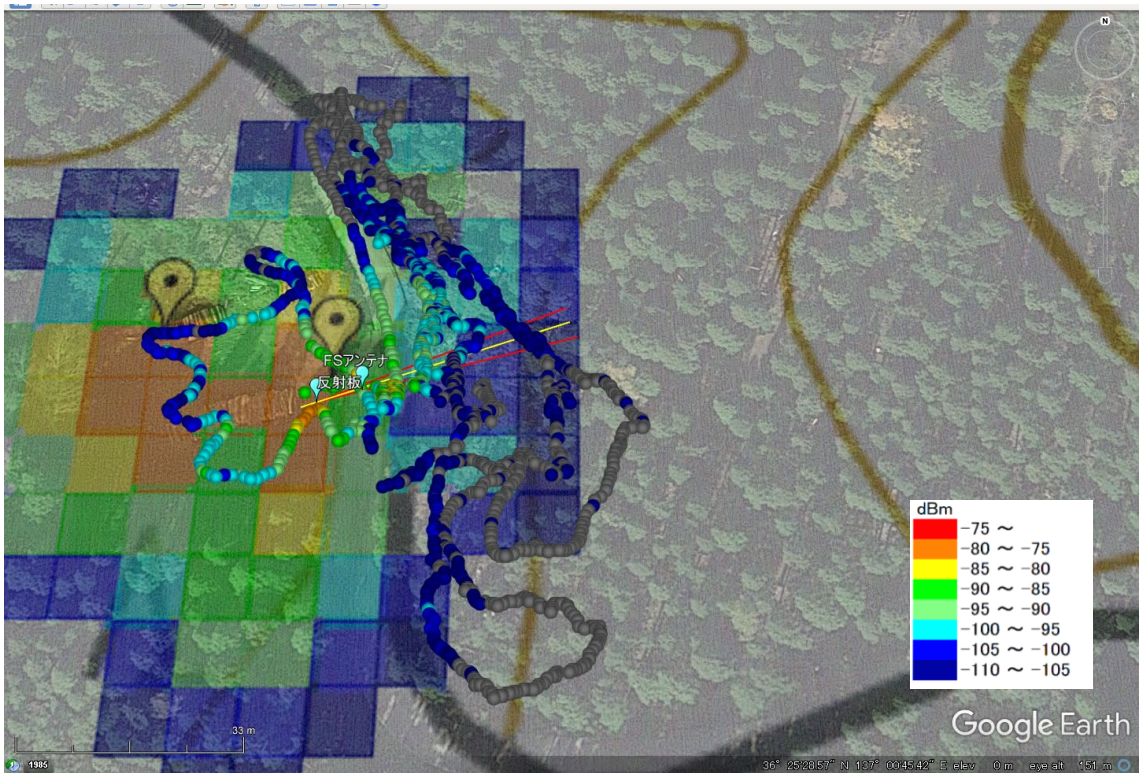


図 86 反射板未使用時の測定結果とシミュレーション図(検証環境 1（バルーン設置）)

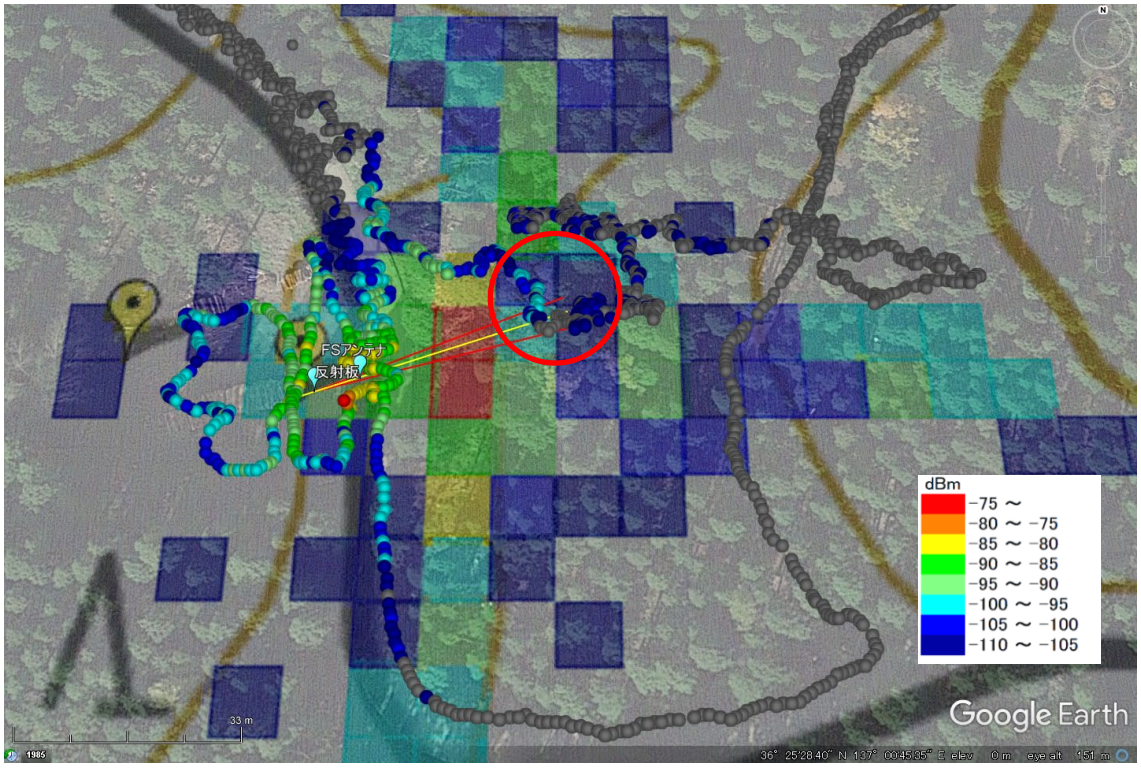


図 87 反射板使用時の測定結果とシミュレーション図(検証環境 1（バルーン設置）)

検証環境 1 のバルーン搭載の電波反射板を用いた場合は、改善できたエリアが 300 ㎡になると考えられる。上図の赤丸で示した点において受信電力の改善が見られる。しかしながら測定日は風が 5m/sec 程度吹いておりバルーン搭載の場合は変位が大きくスループットの測定を安定的に行うことや同箇所での安定的なデータ収集を行うことは困難であった。実証中のバルーン変位は、後述の表 47 実証中のバルーン変位（バルーン設置）に記載した。バルーン搭載の場合は後述する 2 システムを用いた中継システムを活用することを提案する。

（イ）検証環境 2（地上設置）の検証結果

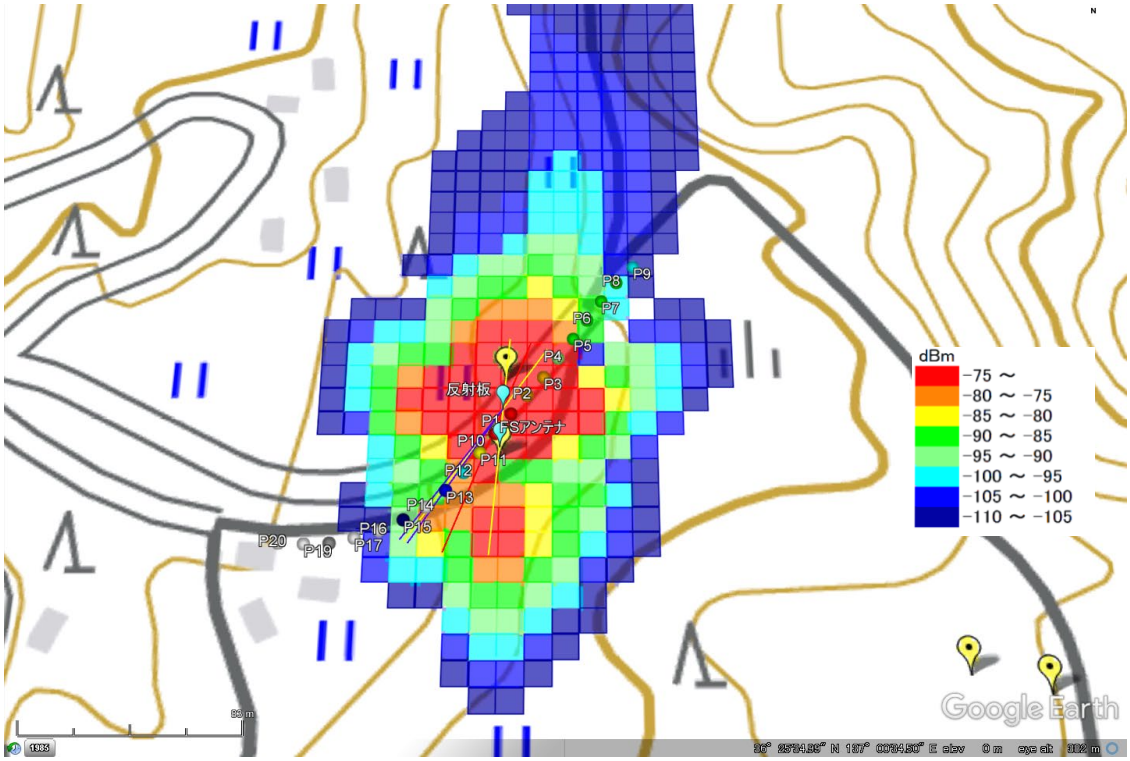


図 88 反射板未使用時の測定結果とシミュレーション図(検証環境 2（地上設置）)

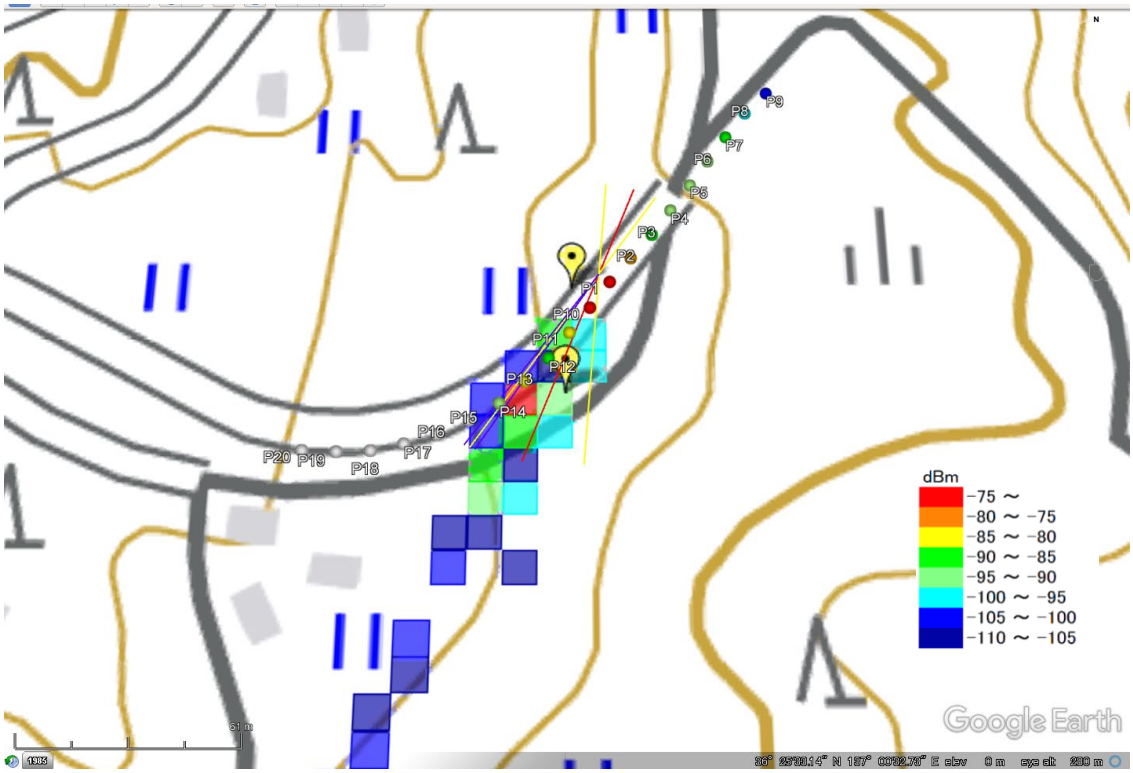


図 89 反射板使用時の測定結果とシミュレーション図(検証環境 2（地上設置）)

図 88 反射板未使用時の測定結果とシミュレーション図(検証環境 2（地上設置）)にて図示したとおり電波反射板の出射角方向に対しエリアが構築できていることが確認できた。計算値からもわかるとおり非常に狭い角度で扇状にサービスエリアが構築されている。

反射板を用いることでサービスエリア化した範囲は電波法審査基準に記載のカバーエリアの-84.6dBm を指標とすると 100 平方メートル、干渉調整区域の-91dBm を指標とすると 500 平方メートルとなる。

20 か所の測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の中央値、標準偏差 SD、上位 10%、下位 10%値を計算する
サンプル数:1000 ポイント以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数

X_i = 測定値

表 41 反射板未設置時の測定ポイントデータ(実証環境 2（地上設置）)

ポイント番号	北緯	東経	基地局-端末距離(m)	RSRP(dBm)	SIR(dB)	標準偏差
1	36.422472	137.016758	12.33	-72.74	19.74	2.83
2	36.423242	137.016022	22.73	-77.17	19.83	4.45
3	36.422947	137.017092	32.52	-75.89	20.20	2.14
4	36.423328	137.016433	42.35	-93.54	19.33	4.41
5	36.423217	137.016742	52.61	-86.30	19.38	2.50
6	36.423064	137.016672	62.39	-88.74	18.89	4.12
7	36.422994	137.016878	72.57	-88.17	20.24	1.75
8	36.422822	137.016969	82.79	-89.94	19.88	1.77
9	36.422525	137.016931	92.43	-98.14	18.84	2.66
10	36.422658	137.016589	4.39	-66.27	19.10	3.13
11	36.422636	137.016378	8.38	-81.21	19.38	4.76
12	36.422519	137.016339	17.81	-98.00	19.75	2.38
13	36.422317	137.016375	27.68	-104.98	17.28	2.00
14	36.422647	137.016056	37.54	-110.33	13.28	2.38
15	36.422633	137.015878	47.41	-106.88	15.99	2.24
16	36.422686	137.015525	57.41	-114.74	9.50	2.79
17	36.422831	137.015372	66.61	-115.01	9.54	2.78
18	36.423017	137.015469	75.92	-116.72	7.68	2.15
19	36.423164	137.015725	84.74	-119.69	4.83	3.61
20	36.423089	137.016183	93.53	-112.85	11.44	2.91

表 42 反射板設置時の測定ポイントデータ(実証環境 2（地上設置）)

ポイント番号	北緯	東経	基地局-反射板距離(m)	反射版-端末距離(m)	RSRP(dBm)	SIR(dB)	標準偏差
1	36.422472	137.016758	15.00	4.45	-71.01	20.16	1.51
2	36.423242	137.016022	15.00	10.66	-79.58	20.05	3.27
3	36.422947	137.017092	15.00	20.30	-85.89	20.71	3.04
4	36.423328	137.016433	15.00	29.82	-91.76	18.59	4.06
5	36.423217	137.016742	15.00	40.12	-91.57	19.08	3.87
6	36.423064	137.016672	15.00	49.61	-90.40	19.99	2.58
7	36.422994	137.016878	15.00	59.79	-87.40	19.85	2.07
8	36.422822	137.016969	15.00	70.07	-99.91	16.80	4.78
9	36.422525	137.016931	15.00	79.66	-100.63	18.46	2.32
10	36.422658	137.016589	15.00	11.36	-65.45	21.24	2.54
11	36.422636	137.016378	15.00	20.82	-83.42	19.53	3.16
12	36.422519	137.016339	15.00	30.53	-88.66	20.08	1.78
13	36.422317	137.016375	15.00	40.20	-83.58	20.28	1.06
14	36.422647	137.016056	15.00	49.98	-91.50	18.64	4.93
15	36.422633	137.015878	15.00	59.07	-111.48	11.70	2.30
16	36.422686	137.015525	15.00	68.49	-112.02	11.56	3.34
17	36.422831	137.015372	15.00	77.29	-114.89	8.85	2.67
18	36.423017	137.015469	15.00	85.83	-114.93	8.92	1.75
19	36.423164	137.015725	15.00	93.87	-113.51	10.22	2.39

20	36.423089	137.016183	15.00	101.75	-119.13	4.95	2.79

表 43 反射板設置時の共通データ(実証環境 2（地上設置）)

入射角	18 度
反射角	18 度

机上シミュレーションと実測値との比較を下表に示す。

表 44 机上シミュレーションと実測値との比較(実証環境 2（地上設置）)

ポイント番号	シミュレーション結果 RSRP(dBm)	実測値 RSRP(dBm)	シミュレーション結果と実測値の差分(dB)	反射板を使用しなかった場合のシミュレーション結果 RSRP(dBm)	反射板を使用しなかった場合の実測値 RSRP(dBm)	シミュレーション結果と実測値の差分(dB)
1	-85.14	-71.01	14.13	-85.14	-72.74	12.4
2	-98.6	-79.58	19.02	-98.6	-77.17	21.43
3	-94.61	-85.89	8.72	-94.61	-75.89	18.72
4	-109.87	-91.76	18.11	-109.87	-93.54	16.33
5	-113.11	-91.57	21.54	-113.11	-86.30	26.81
6	-123.02	-90.40	32.62	-123.02	-88.74	34.28
7	-124.47	-87.40	37.07	-124.47	-88.17	36.3
8	-134.64	-99.91	34.73	-134.64	-89.94	44.7
9	-142.08	-100.63	41.45	-142.08	-98.14	43.94
10	-88.21	-65.45	22.76	-88.21	-66.27	21.94
11	-87.22	-83.42	3.8	-87.22	-81.21	6.01
12	-114.51	-88.66	25.85	-114.51	-98.00	16.51
13	-103.81	-83.58	20.23	-110.88	-104.98	5.9
14	-103.81	-91.50	12.31	-114.9	-110.33	4.57
15	-126.47	-111.48	14.99	-126.47	-106.88	19.59
16	-140.62	-112.02	28.6	-140.62	-114.74	25.88
17	-151.94	-114.89	37.05	-151.94	-115.01	36.93
18	-159.25	-114.93	44.32	-159.25	-116.72	42.53
19	-162.14	-113.51	48.63	-162.14	-119.69	42.45
20	-166.52	-119.13	47.39	-166.52	-112.85	53.67

※反射板を使用した場合のシミュレーション結果は空中線を使用した場合と反射板からの反射波の強い方の値を記載することとする.

反射板を使用した場合と使用しない場合の比較

表 45 反射板使用時との比較(実証環境 2（地上設置）)

ポイント番号	実測値 RSRP(dBm)	反射板を使用しなかった場合の実測値 RSRP(dBm)	反射板使用時と未使用時と実測値の差分(dB)
1	-71.01	-72.74	1.72
2	-79.58	-77.17	-2.42
3	-85.89	-75.89	-10.01
4	-91.76	-93.54	1.78
5	-91.57	-86.30	-5.27
6	-90.40	-88.74	-1.66
7	-87.40	-88.17	0.77
8	-99.91	-89.94	-9.97
9	-100.63	-98.14	-2.49
10	-65.45	-66.27	0.82
11	-83.42	-81.21	-2.21
12	-88.66	-98.00	9.34
13	-83.58	-104.98	21.40
14	-91.50	-110.33	18.83
15	-111.48	-106.88	-4.60
16	-112.02	-114.74	2.72
17	-114.89	-115.01	0.12
18	-114.93	-116.72	1.79
19	-113.51	-119.69	6.18
20	-119.13	-112.85	-6.28

表 45 反射板使用時との比較(実証環境 2（地上設置）)から特にポイント 12,13,14 においてエリア改善されている点が実証された。これは机上計算図からも導出されており、反射板の出射側の延長線上であるため妥当な結果と考えられる。

また、エリア改善を行うことができたポイント 12,13,14 について遅延プロファイルの測定を行い、マルチパスにおける影響が発生していないかを確認した。

表 46 反射板使用時のマルチパスの測定結果(実証環境 2（地上設置）)

ポイント番号	マルチパスの有無	マルチパスの観測割合
12	観測あり	0.5% (遅延値 0.36us)
13	観測なし	0%
14	観測なし	0%

※マルチパスの観測割合は測定回数に対するマルチパス観測割合

・スループット vsRSRP、スループット vsSIR の相関に関する分析

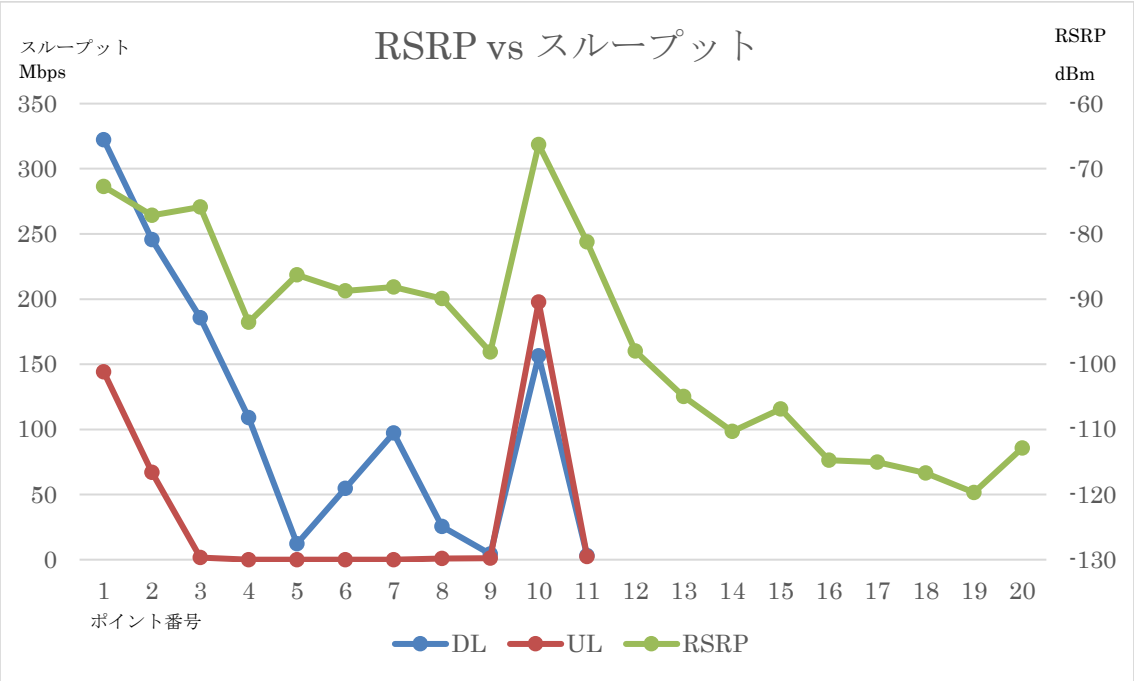


図 90 反射板未使用時の RSRP vs スループット表（地上設置）

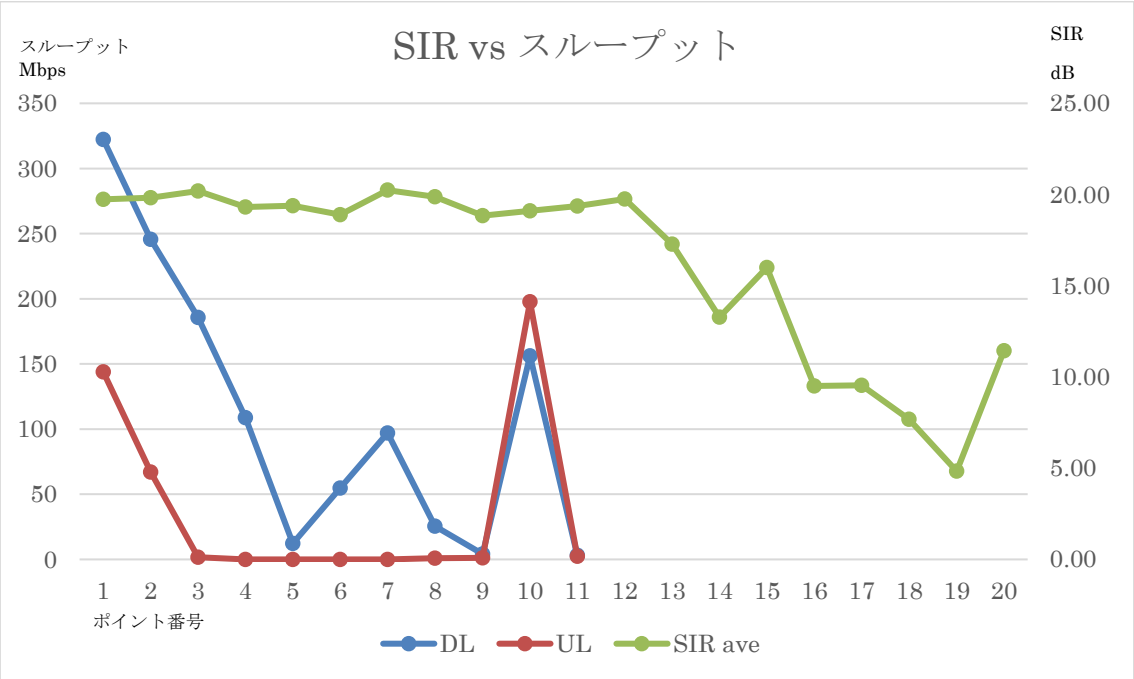


図 91 反射板未使用時の SIR vs スループット表（地上設置）

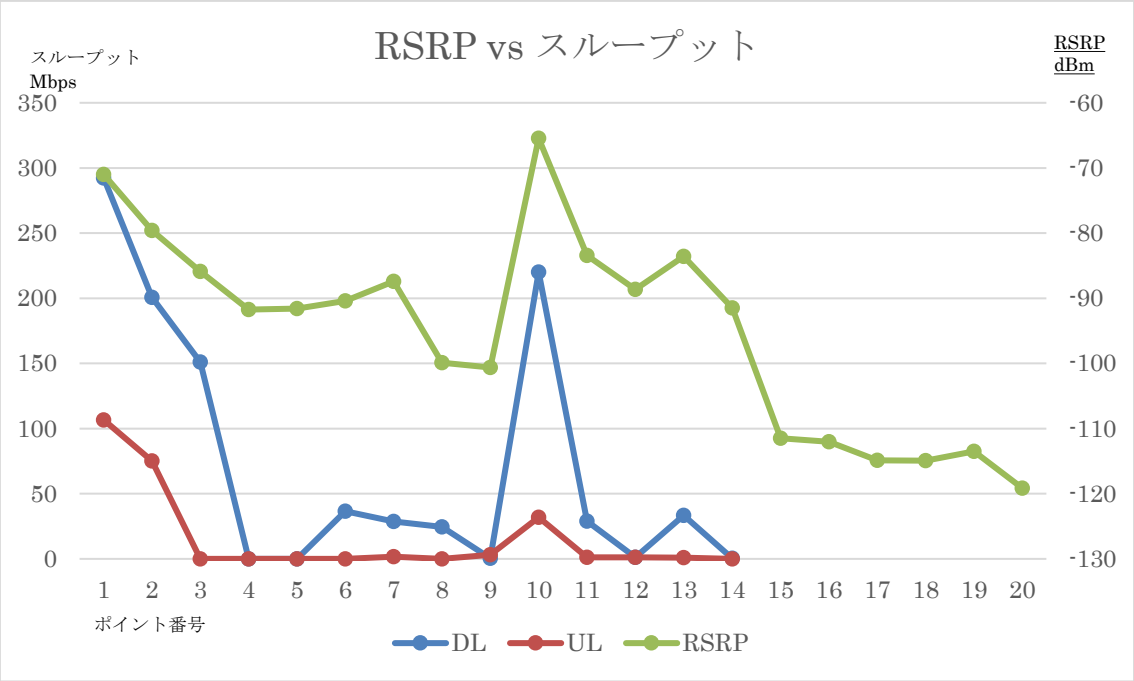


図 92 反射板使用時の RSRP vs スループット表（地上設置）

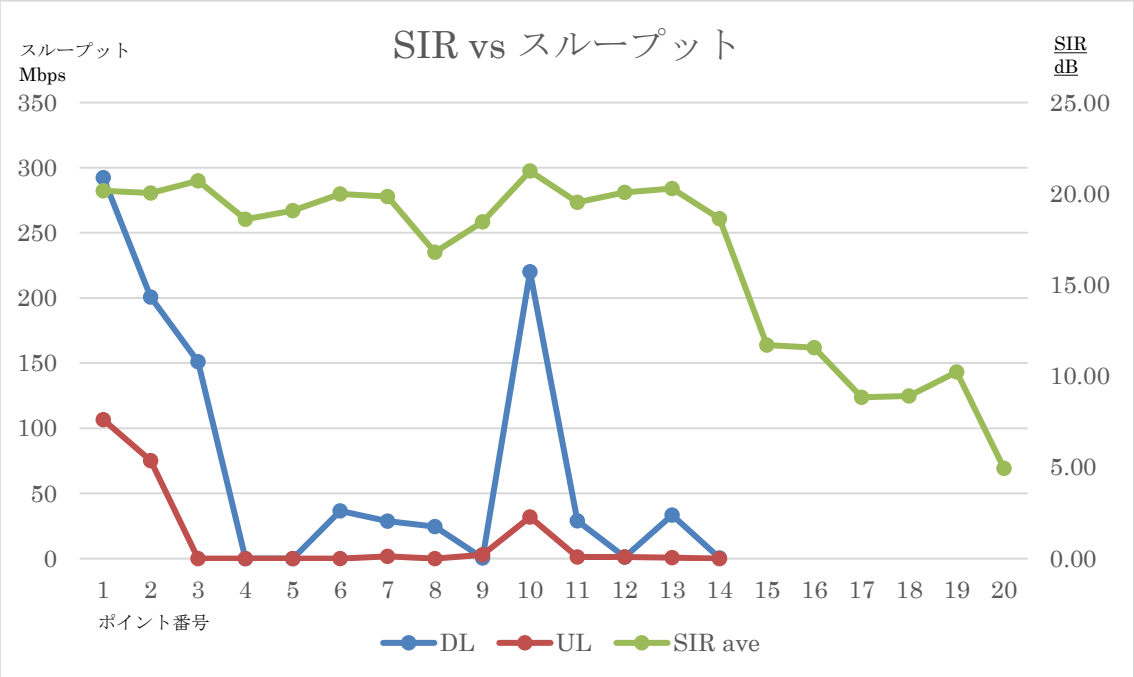


図 93 反射板使用時の SIR vs スループット表（地上設置）

検証環境 2（地上設置）の場合においては、改善できるエリアが 6300 ㎡になると考えられる。特に地点番号 12，13，14 付近において RSRP 値の向上及びスループットの測定を行うことができた。（地点番号 12，13，14 においては反射板未使用時には端末がアタッチせず測定不可）SIR 値は反射板未設置時に比べ設置時の方が値が高く、反射板からの電波が基地局からの電波よりも十分に強く、SIR 値が高いものと考えられる。反射板未使用時は基地局からの電波が弱いため SIR 値が低く表示されていると考えられる。

（3）電波反射板を利用したエリア設計手法の手順・モデル化(机上検討、シミュレーション)

反射板を空中線に見立て、エリアシミュレーションを実施する。下図のように反射板の反射パターンを計算で求め電波反射板を空中線に見立て、反射パターンを空中線パターンのように算出する。その反射パターンをビーム幅約 3.3°、入射方向 108°、反射方向 72°として電波伝搬シミュレーションソフトウェアに入力し電波伝搬シミュレーション図を作成し、反射板を用いたエリア構築の指標とする。

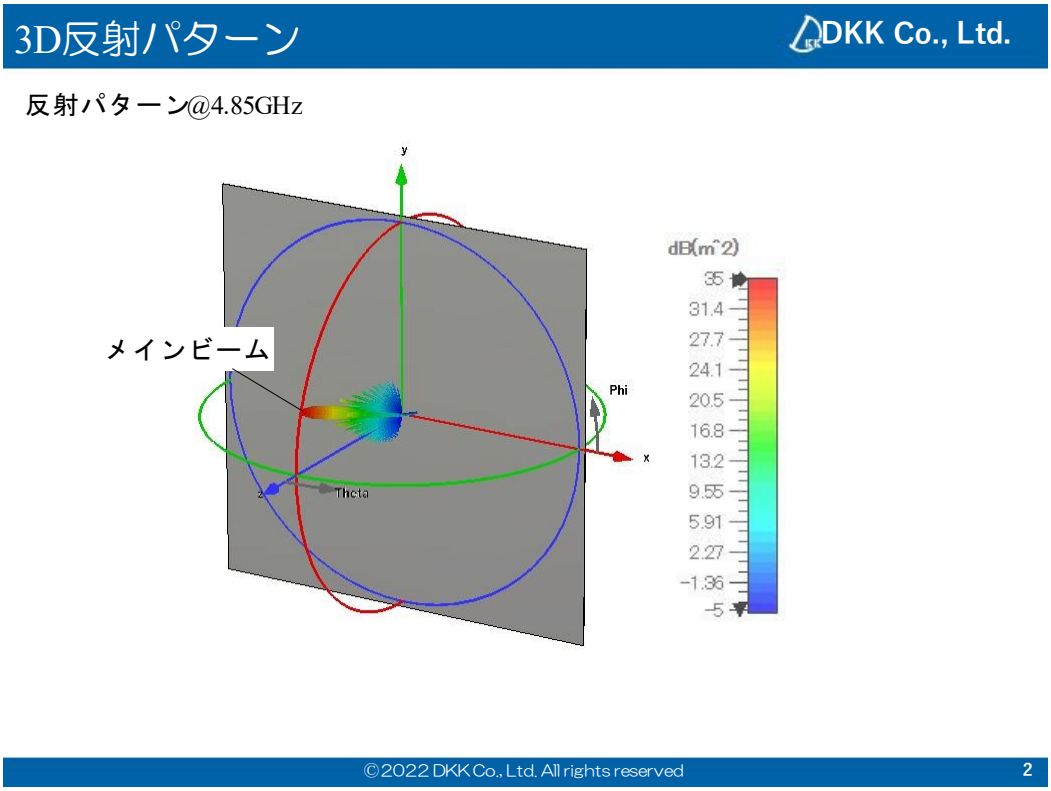


図 94 反射板の 3D 反射パターン（地上設置）

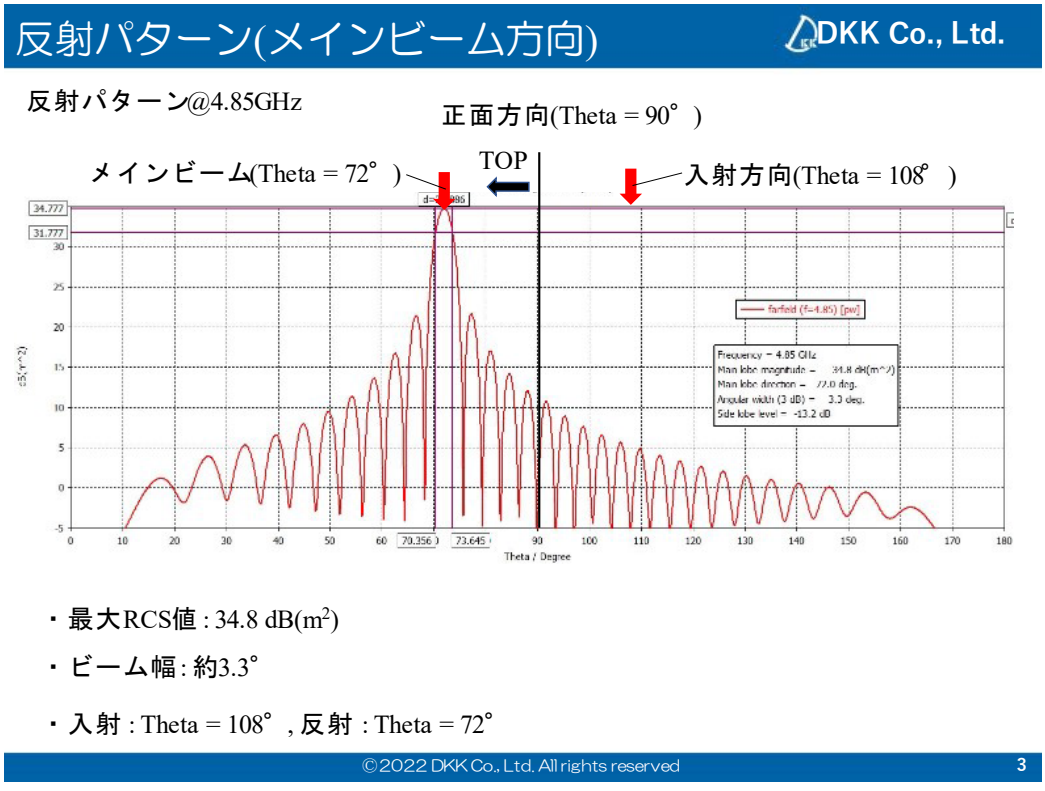


図 95 反射板の反射パターン（地上設置）

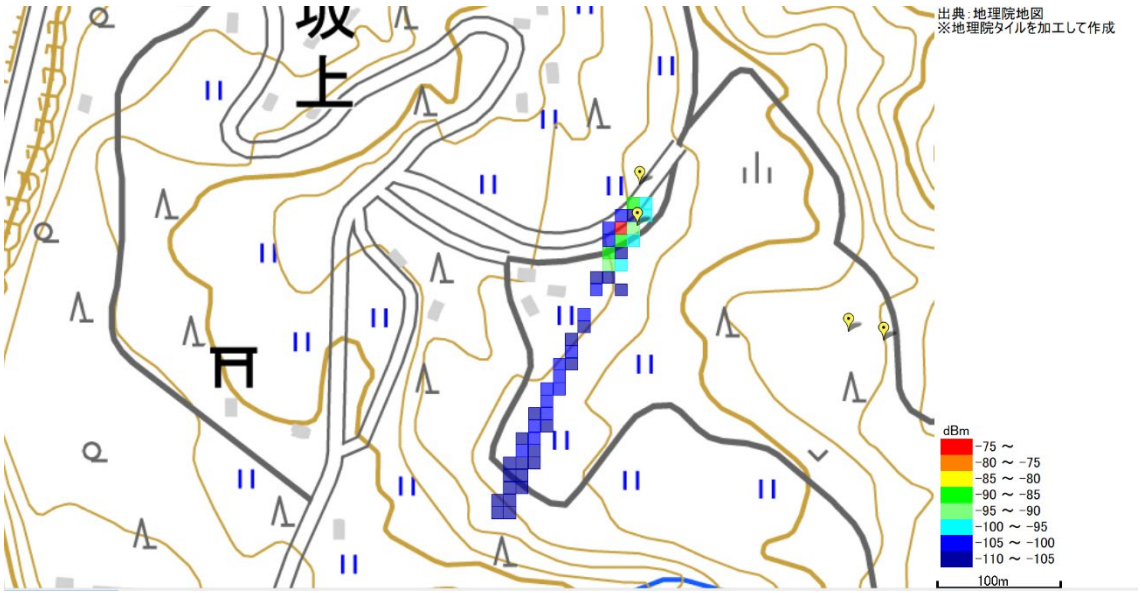


図 96 シミュレーション結果（地上設置）

(4)まとめと有効性評価結果

電波反射板を用いた場合、今回の手法では約 3 度という非常に狭い範囲であるが、エリアの拡張を行うことができた。この手法を用いることにより広範囲なエリア拡大を望む

ことは難しいが、今回の実証におけるユースケースのような固定カメラのサービスエリア化などの用途においては電波反射板が有効になると考えられる。しかしながら、前述の通り非常に狭い範囲をカバーすることになるため、実証環境 1（バルーン設置）のようなバルーン等の浮体に搭載することは表「実証中のバルーン変位（バルーン設置）」に記載するように反射板をバルーンの本体に固定した場合はバルーンの角度・位置の固定に非常に手間を要するため角度維持装置(電動ジンバル)のような方位を維持する仕組みが必要であり、かつ風速 5m/sec 以下、最低人員が 4 名必要なため、特に安定した通信を行うという観点においては 3.3.5 章に記載の 2 システムを使った中継システムを活用することが好ましいと考えられる。

表 47 実証中のバルーン変位（バルーン設置）

風向(TN)	風速(m/sec)	水平方向変位(度)	垂直方向変位(度)
120	2-5	最大±10	最大±5

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

5G 回線は超高速ネットワークであるが、全国キャリアが展開する 5G サービスにおいてはダウンロードを中心としたコンシューマーサービスを想定しており、TDD 方式においては設定で無線リソースの多くをダウンリンク側に割り振るため一般的にダウンロード方向と比較して、アップロード方向の通信速度は小さくなっている。ローカル 5G では全国キャリアとの干渉を防ぐため TDD の同期パターンを原則キャリアの 5G 網に合わせたパターンとなっているが、監視カメラ等の活用期待が大きいローカル 5G ではアップリンク側の無線リソースを増加させつつ全国キャリアとの干渉を抑制した準同期パターンでの運用が認められている。本実証においても、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」及び「作業車両の遠隔操作」を実現するためには、複数の 4K カメラを用いて断続的に大容量の画像データをコアネットワーク側にアップロードする必要があり、アップリンクスループットは最大 100Mbps になる可能性がある。この値を電波が減衰しやすい森林の中で安定して得るためには、アップリンクへの無線リソース配分を増やした新たな準同期パターンの開発が必要になる。

本実証で活用する FLARE SYSTEMS 製のソフトウェア基地局は既に準同期 TDD の追加パターンを実現しており、新たな制度化に向けた実証を目的として、山間地帯という電波減衰しやすい樹木が生い茂るエリアにて準同期 TDD の追加パターンの実証が可能である。

実証場所としては、同期 TDD システムである FLARE SYSTEMS 製基地局と、準同期 TDD パターンシステムである FLARE SYSTEMS 製基地局とを隣接させて実証を行うものとする。

（2）実証目標

準同期パターンの開発はアップロード通信の高速化の検証と、ダウンロードとのバランスを取った 3 パターンで実証を行う。同期パターンは下記に記載する。

表 48 同期パターン

スロット番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
同期 TDD	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D
準同期 TDD1	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U
準同期 TDD2	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U
準同期 TDD3	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U

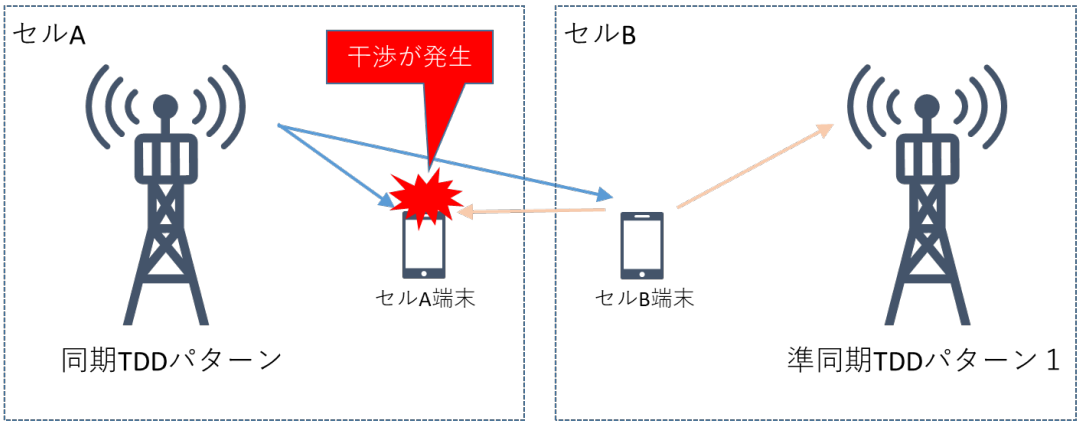
D:下りスロット　U:上りスロット　S:D から U への切り替えスロット

3.3.4.2 実証仮説

（1）同期タイミングパターンと干渉の可能性

実証環境においては同期 TDD パターンの基地局と準同期 TDD パターンを個別に運用する場合と同時に運用する場合の運用方法を実施する。同期 TDD パターンと準同期 TDD パターンの違いは上りスロット数の違いであり、準同期パターンにおける上りスロットの送信中には同期パターンシステムへの干渉量が一定値を超えた場合に干渉し、スループットの低下などの実運用上に関わる影響をもたらす可能性がある。今回の実証では同期システムと準同期システムを同時に運用する際の運用上の制約および必要な離隔距離を確認する。

スロット番号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
同期TDD	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D
準同期TDD1	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U	D	D	D	S	U	U	D	S	U	U
準同期TDD2	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U
準同期TDD3	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U



※セルAとセルBは同一周波数または隣接周波数
※スロット番号８の時点での状態を想定

図 97　移動局相当装置間の干渉

上記では移動局相当装置間の干渉について記載したが、基地局相当装置間での干渉、基地局相当装置と移動局相当装置間の干渉、移動局相当装置間の干渉の計算の必要があり、次節以降で計算を実施する。なお、基地局相当装置間の干渉は空中線を正対させた場合と空中線を併設した場合において机上計算を行う。その(計算を行った)うえで、実機において基地局相当装置間の干渉量(SIR により測定)と離隔距離の関係を測定、確認干渉量の増加とともにスループットや SIR 値が低下することを確認する。

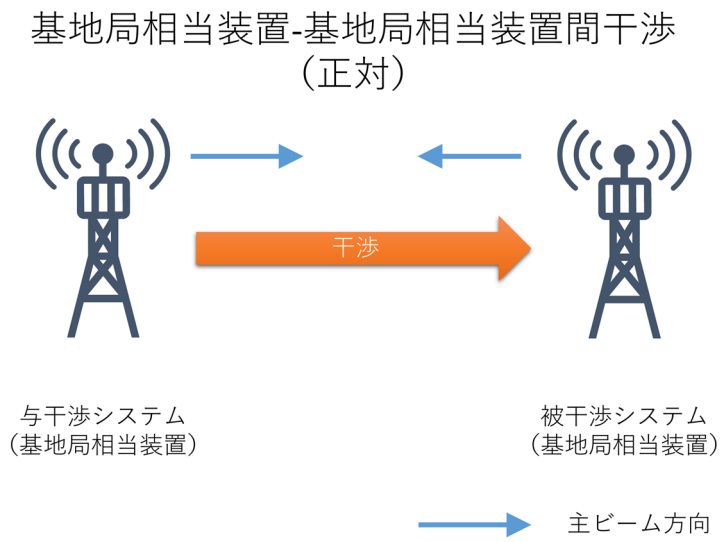


図 98 基地局相当装置間の干渉(空中線を正対させた場合)

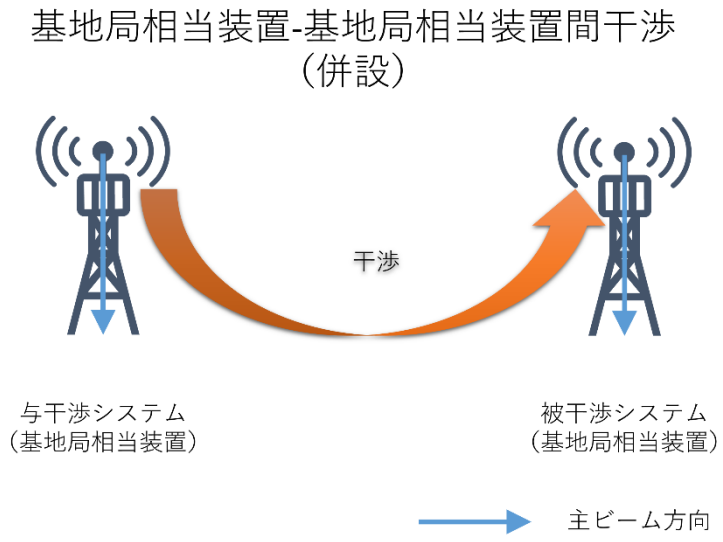


図 99 基地局相当装置間の干渉(空中線を併設、主ビームを平行にした場合)

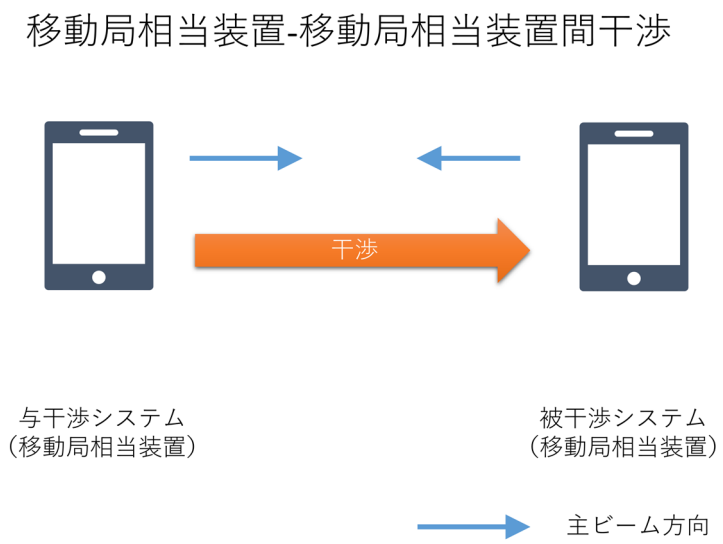


図 100 移動局相当装置間の干渉

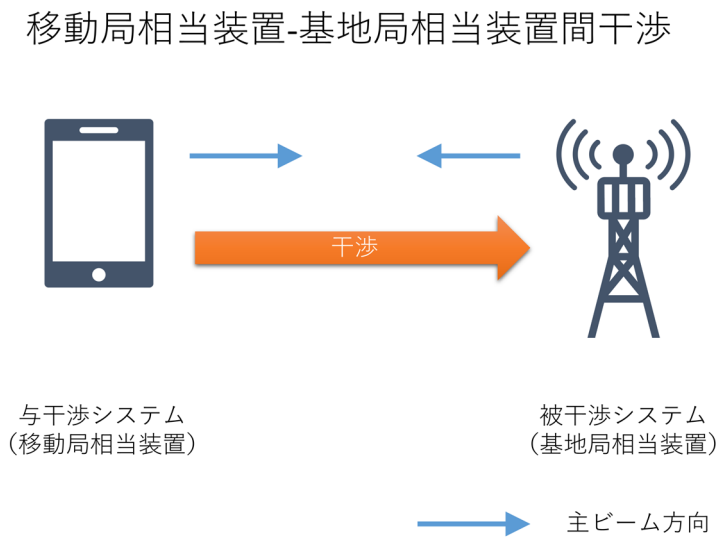


図 101 移動局相当装置-基地局相当装置間の干渉

（2）予想される干渉の計算

干渉量の計算においては下記条件にて計算を実施した。

・与干渉システム(基地局)と被干渉システム(移動局)が同時に送信された場合(D スロット-U スロット)

・与干渉システム(移動局)と被干渉システム(基地局)が同時に送信された場合(U スロット-D スロット)

・与干渉システム(移動局)と被干渉システム(基地局)が同時に送信された場合(U スロット-U スロット)

なお、与干渉側は TDD パターン 2,3 を想定し、被干渉側は同期パターンを想定する。

計算手法としては与干渉システムと被干渉システムが上記のスロット状態になった場合を対象とする。

帯域内干渉の計算

表 49　干渉量の事前計算結果

項番	パラメータ	帯域内干渉離隔距離（m）
基地局-基地局（正対）	計算値	19500
	実測値	
基地局-基地局（併設）	計算値	1.5
	実測値	
移動局-移動局（正対）	計算値	580
	実測値	
移動局-基地局（正対）	計算値	4000
	実測値	
移動局-基地局（併設）	計算値	3.5
	実測値	

表 50　机上計算の根拠(基地局相当装置間の干渉(正対))

基地局相当装置間の干渉(正対)			
与干渉局送信電力	-2	dBm/MHz	18dBm/100MHz
送信空中線利得	12	dBi	FS 12dBi ANT
送信諸損失	0	dB	
EIRP	10	dBm/MHz	28dBm/100MHz
離隔距離	19500	m	

受信空中線での入力電力	-121.9573	dBm/MHz	
受信機入力電力	-109.9573	dBm/MHz	
許容干渉電力	-110	dBm/MHz	
受信空中線利得	12	dBi	FS 12dBi ANT
受信諸損失	0	dB	
干渉量	0.042701	dB	
周波数	4850	MHz	
波長	0.061856	m	
伝搬損失	131.9573	dB	

表 51　机上計算の根拠(基地局相当装置間の干渉(併設))

基地局相当装置間の干渉(併設)			
与干渉局送信電力	-2	dBm/MHz	18dBm/100MHz
送信空中線利得	-29	dBi	FS 12dBi ANT
送信諸損失	0	dB	
EIRP	-31	dBm/MHz	
離隔距離	1.5	m	
受信空中線での入力電力	-80.67843	dBm/MHz	
受信機入力電力	-109.6784	dBm/MHz	
許容干渉電力	-110	dBm/MHz	
受信空中線利得	-29	dBi	FS 12dBi ANT
受信諸損失	0	dB	
干渉量	0.321568	dB	

周波数	4850	MHz	
波長	0.061856	m	
伝搬損失	49.67843	dB	

表 52　机上計算の根拠(移動局相当装置間の干渉(正対))

移動局相当装置間の干渉(正対)			
与干渉局送信電力	1.5	dBm/MHz	21.5dBm/100MHz
送信空中線利得	2.97	dBi	
送信諸損失	8	dB	人体損失
EIRP	-3.53	dBm/MHz	
離隔距離	580	m	
受信空中線での入力電力	-104.9552	dBm/MHz	
受信機入力電力	-109.9852	dBm/MHz	
許容干渉電力	-110	dBm/MHz	
受信空中線利得	2.97	dBi	
受信諸損失	8	dB	人体損失
干渉量	0.014833	dB	
周波数	4850	MHz	
波長	0.061856	m	
伝搬損失	101.4252	dB	

表 53　机上計算の根拠(移動局相当装置-基地局相当装置間の干渉(正対))

移動局相当装置-基地局相当装置間の干渉(正対)

与干渉局送信電力	1.5	dBm/MHz	21.5dBm/100MHz
送信空中線利得	2.97	dBi	
送信諸損失	8	dB	人体損失
EIRP	-3.53	dBm/MHz	
離隔距離	4000	m	
受信空中線での入力電力	-121.7278	dBm/MHz	
受信機入力電力	-109.7278	dBm/MHz	
許容干渉電力	-110	dBm/MHz	
受信空中線利得	12	dBi	
受信諸損失	0	dB	
干渉量	0.272193	dB	
周波数	4850	MHz	
波長	0.061856	m	
伝搬損失	118.1978	dB	

表 54　机上計算の根拠（移動局相当装置-基地局相当装置間の干渉（併設））

移動局相当装置-基地局相当装置間の干渉(併設)			
与干渉局送信電力	1.5	dBm/MHz	21.5dBm/100MHz
送信空中線利得	2.97	dBi	
送信諸損失	8	dB	人体損失
EIRP	-3.53	dBm/MHz	
離隔距離	35	m	
受信空中線での入力電力	-80.56797	dBm/MHz	

受信機入力電力	-109.568	dBm/MHz	
許容干渉電力	-110	dBm/MHz	
受信空中線利得	-29	dBi	
受信諸損失	0	dB	
干渉量	0.432032	dB	
周波数	4850	MHz	
波長	0.061856	m	
伝搬損失	77.03797	dB	

3.3.4.3 評価・検証項目

同期 TDD システムと各準同期 TDD パターンを採用したシステム間での干渉を評価する。評価にあたっては双方のシステムを独立して運用した状態と並行して運用した状態にてデータの取得を行う。

（1）システムの条件

- 与干渉および被干渉装置:FLARE SYSTEMS 製基地局相当装置
- 周波数隣接状況:同一周波数(4.8GHz―4.9GHz)
- 与干渉および被干渉装置の運用パターン:同期パターン・準同期 TDD パターン 1,2,3
- 与干渉および被干渉装置:移動局相当装置
- 周波数隣接状況:同一周波数(4.8GHz―4.9GHz)
- 運用パターン:同期パターン・準同期 TDD パターン 1,2,3

準同期システム基地局から同期基地局システムへの干渉はスロット配置の関係上発生しないため双方向での干渉試験は実施しない。

表 55　与・被干渉側の基地局相当設備

メーカ	FLARE SYSTEMS
型番	FW-L5G-1

空中線電力	18.0dBm
給電線損失	0.0dB
アンテナゲイン	12.0dBi
EIRP	30.0dBm
TDD パターン	同期・準同期 1、2、3

（2）測定する項目

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において 20 地点の測定を行う。測定項目は RSRP、SIR、電波品質(遅延プロファイル)、通信品質(スループット、遅延速度)とする。

表 56　測定項目

測定項目	測定指標	測定手法	測定する値(単位)	測定機器
受信電力	RSRP	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
受信電力	RSSI	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
電波干渉	SIR	Anritsu エリアテスタ	dB	ML8780A
電波品質	遅延プロファイル	Anritsu エリアテスタ	usec	ML8780A
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE
遅延	遅延時間	Ping	msec	WindowsPC(Ping)

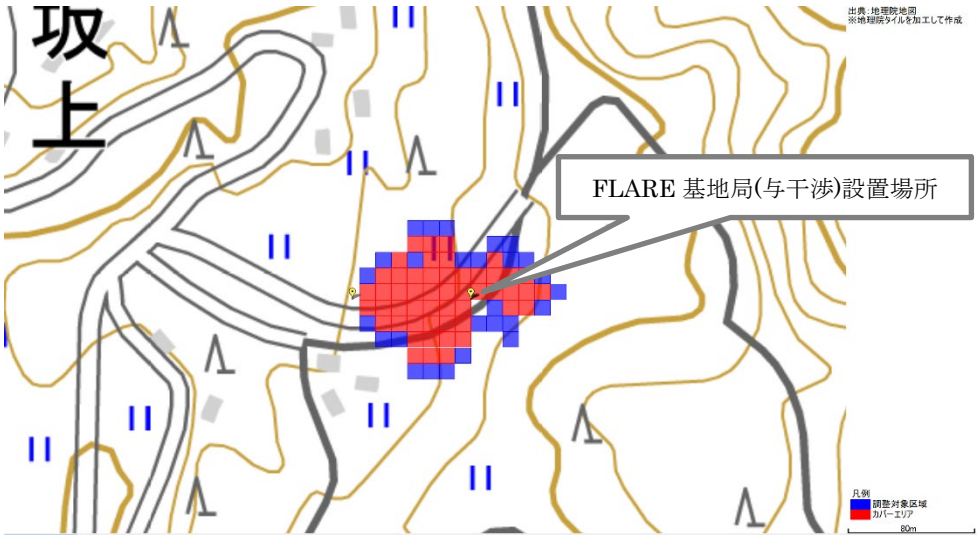


図 102 与干渉システムの伝搬シミュレーション図

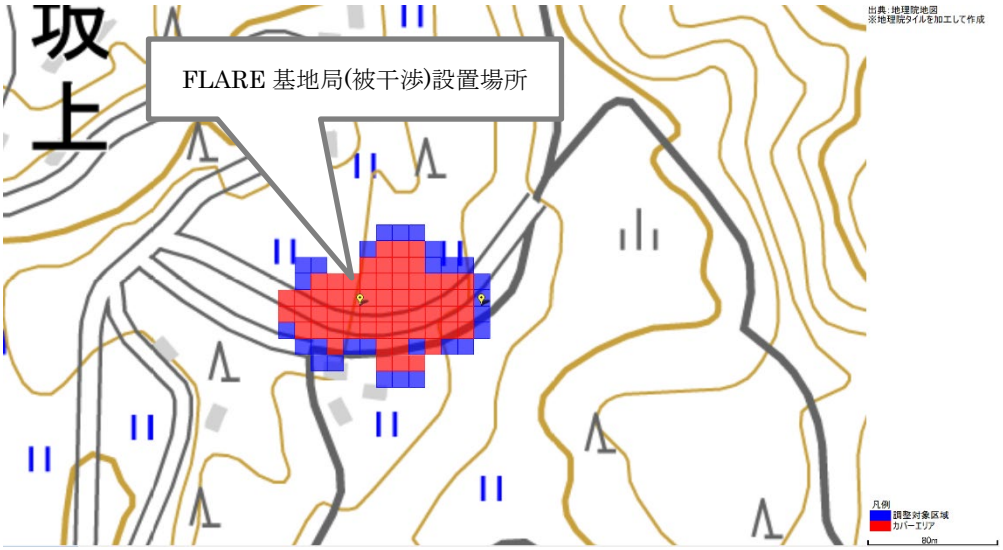


図 103　被干渉システムの伝搬シミュレーション図

3.3.4.4 評価・検証方法

下記評価項目を被干渉システム及び与干渉システムで片方を停止し単独で測定を行った。測定終了後、同時にシステムを運用し、再度測定を実施した。単独で測定を行った結果と同時に測定を行った結果を比較し、同期システムと準同期システムを共用した場合の影響度について評価を行った。

（1）受信電力

受信電力(RSRP)を 20 地点にて測定し、記録した。同時に RSSI も記録を行う。RSRP は基地局相当装置ごとの受信電力を識別することができるが、RSSI は送受信電力であり、他局からの干渉も含め記録が可能であり、双方のデータを取得した。なお、測定器はアンリツ株式会社製の ML8780A を使用した。ML8780A には Sub6 帯用の MU878070A を装着し、受信用の空中線は純正の Z1911B を使用した。

（2）スループット、伝送遅延

通信品質であるスループット、遅延時間を測定し、伝送状況を記録する。外部からの干渉により通信品質が損なわれていないかを確認した。

（3）通信品質(SIR)

無線通信区間における信号対干渉波比を記録する。SIR が低下し通信品質が低下していないかを記録した。

(4) スペクトラム

RSRP を送出していない移動局相当装置の電力を測定する際などの測定にはスペクトラムアナライザを使用した。スペクトラムアナライザはアンリツ株式会社製 MS2090A を使用した。その際の空中線は NATEC 製 NK086 を使用し、測定結果にはオフセットを入れることでアンテナゲイン分を相殺し測定を行った。

(5) 相関

記録された受信電力、SIR、通信品質(スループット)から相関関係を見出し、異なる TDD パターンの影響による通信への干渉度合いを見出す。また、その際に必要な離隔距離を情報通信審議会 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(https://www.soumu.go.jp/main_content/000697525.pdf)に記載の干渉許容電力と比較した。

(6) 試験時の出力

基地局-基地局(正対時)のように離隔距離が現実的に取れない組み合わせにおいては法令の範囲内において送信出力を低減するなどの手法を用いるなど現実に則した試験方法で実験を実施した。

(7) 試験パターンのイメージ

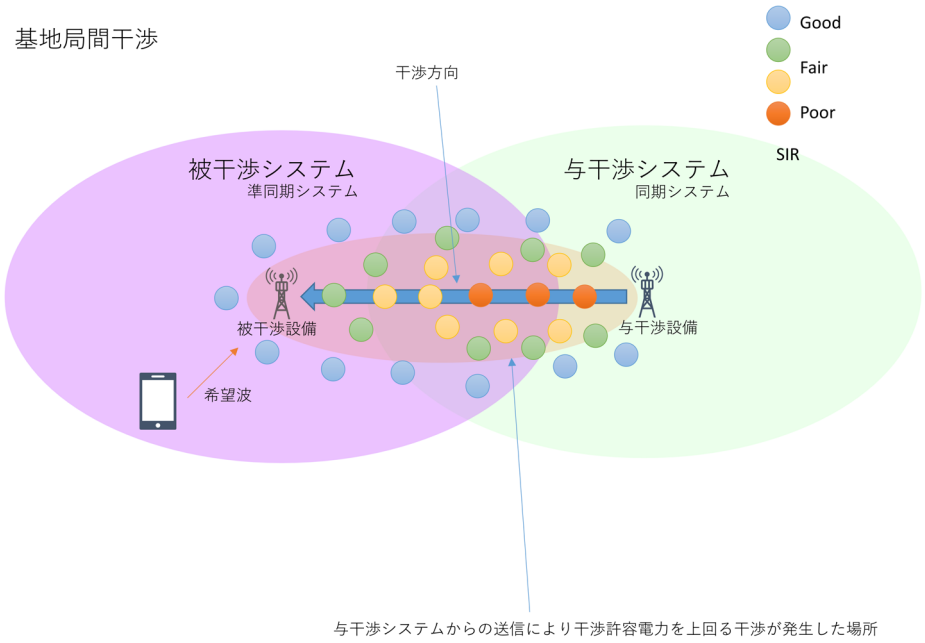


図 104 基地局間干渉のイメージ

基地局間干渉の試験では与干渉システム(基地局・同期)と被干渉システム(移動局・準同期)が同時に送信された場合(D スロット-U スロット)に被干渉システムの基地局が影響を受ける場合のイメージ図である。与干渉システムと被干渉システムの DU 比が悪くなった場所では SIR が低下し、通信速度の低下など通信品質の低下が予想される。凡例の Good は SIR が高く、Poor は SIR が低く通信品質が低下した場合を想定している。

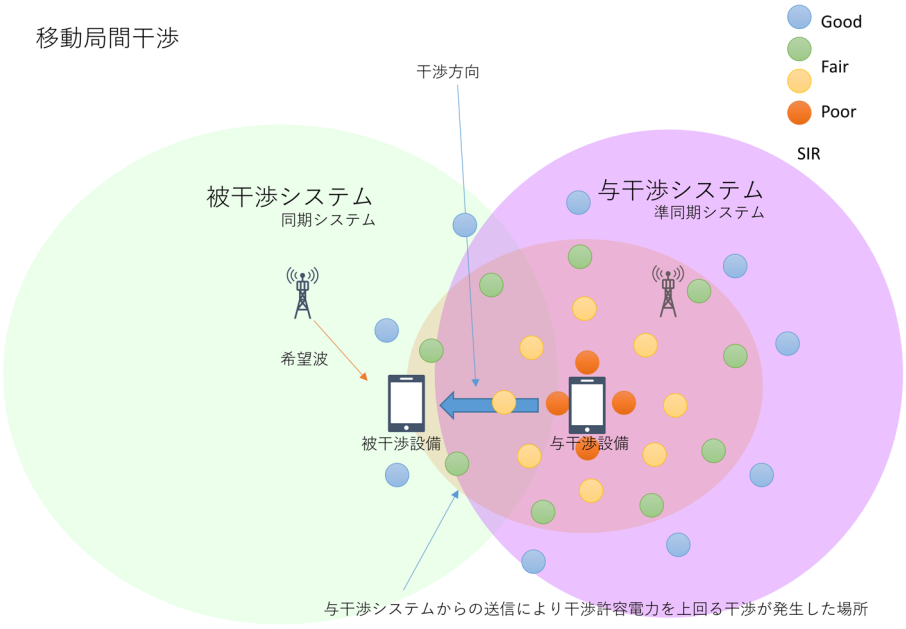


図 105 移動局間干渉のイメージ

移動局間干渉の試験では与干渉システム(移動局・準同期)と被干渉システム(基地局・同期)が同時に送信された場合(U スロット-D スロット)に被干渉システムの移動局が影響を受ける場合のイメージ図である。与干渉システムと被干渉システムの DU 比が悪くなった場所では SIR が低下し、通信速度の低下など通信品質の低下が予想される。凡例の Good は SIR が高く、Poor は SIR が低く通信品質が低下した場合を想定している。

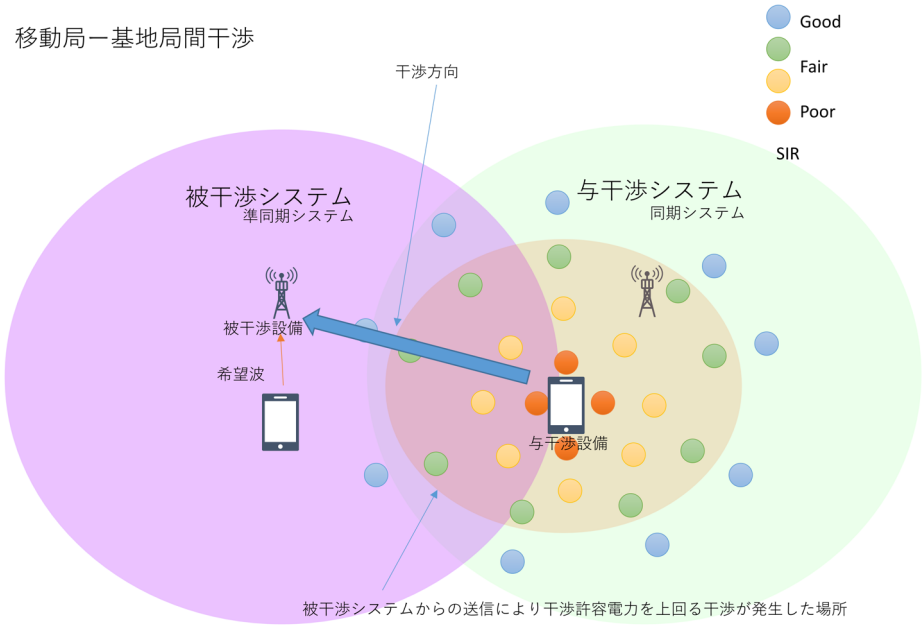


図 106 移動局-基地局間干渉のイメージ

移動局-基地局間干渉試験では与干渉システム(移動局・同期)と被干渉システム(基地局・準同期)が同時に送信された場合(U スロット-U スロット)に被干渉システムの移動局が影響を受ける場合のイメージ図である。与干渉システムと被干渉システムの DU 比が悪くなった場所では SIR が低下し、通信速度の低下など通信品質の低下が予想される。今回の測定は準同期システム側への影響を測定した。凡例の Good は SIR が高く、Poor は SIR が低く通信品質が低下した場合を想定している。

3.3.4.5 実証結果及び考察

(1) 離隔距離導出のアプローチ方法

(a) 単体特性の取得（ラボ）
基地局無線装置-移動局間において最大スループットを維持できる移動局端末装置入力レベルを導出する。

(b) 所要 D/U 比の取得（ラボ）
各干渉試験を実施し、所要 D/U 比を導出する。

(c) 干渉波の影響を受けない最大距離の導出（ラボ）
(b)で導出した D/U 比から干渉波の影響を受けない距離を導出する。

(d) ラボ結果の現地実証（現地）
現地での離隔距離を導出する。

（2）ラボ環境での実証

ラボにおいて現地評価を実施する前に事前評価を実施した。事前評価は外部要因を排除するためにケーブルでの接続で試験を行い、今回使用する基地局の特性をつかみスムーズに現地で評価を実施するための基礎データとして活用した。また、ラボにおいて離隔距離の算出を行った。

（ア） ラボでの系統図

ラボにおいて有線接続試験を実施した際の系統図を記載する。

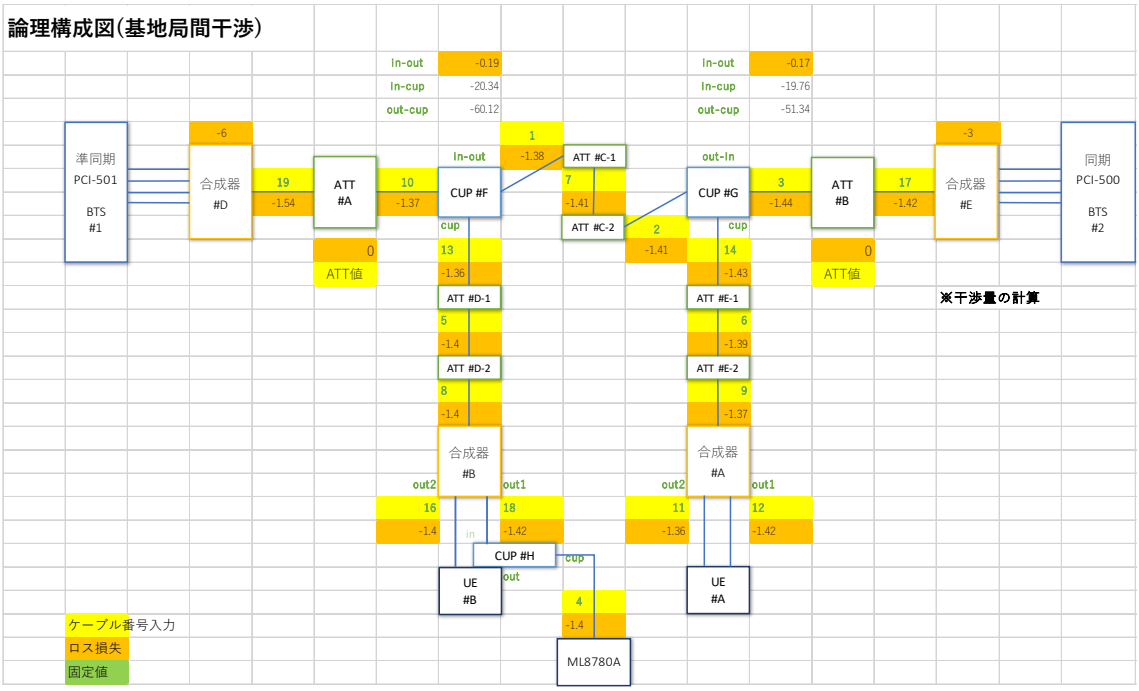


図 107 基地局-基地局間干渉の系統図

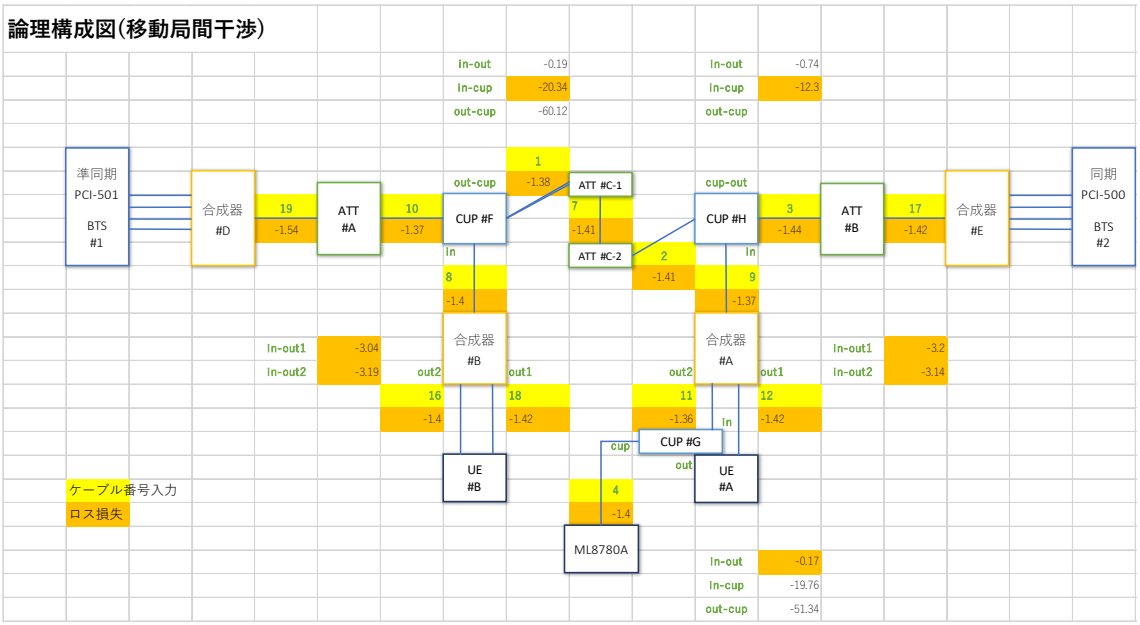


図 108 移動局-移動局間干渉の系統図

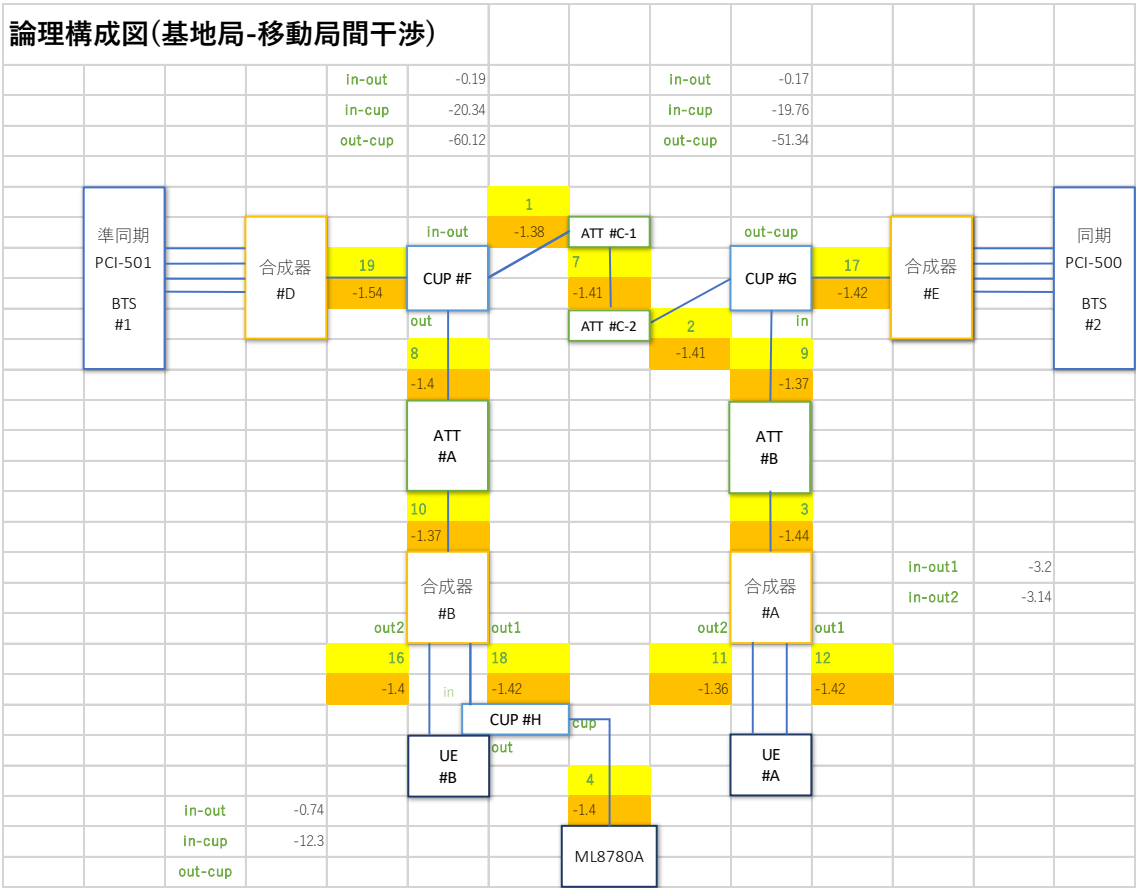


図 109 移動局-基地局間干渉の系統図

（イ） ラボでの評価結果データ

(a) 単体特性の取得

基地局無線装置と移動局無線装置を同軸ケーブルで直結し、可変アッテネータでレベルを調整することによりスループットを維持できる最低レベル（RSRP）の取得を行った。結果は下表および下図の通りとなった。

図 110 接続イメージ

表 57 測定結果

パターン	スループットを維持できる限界レベル(RSRP,dBm)
同期	-74.3
準同期 1	-74.2
準同期 2	-78.8
準同期 3	-79.2

根拠となる RSRP とスループット、MCS（符号化率：Modulation and Coding Scheme）の相関表を下記に記載する。

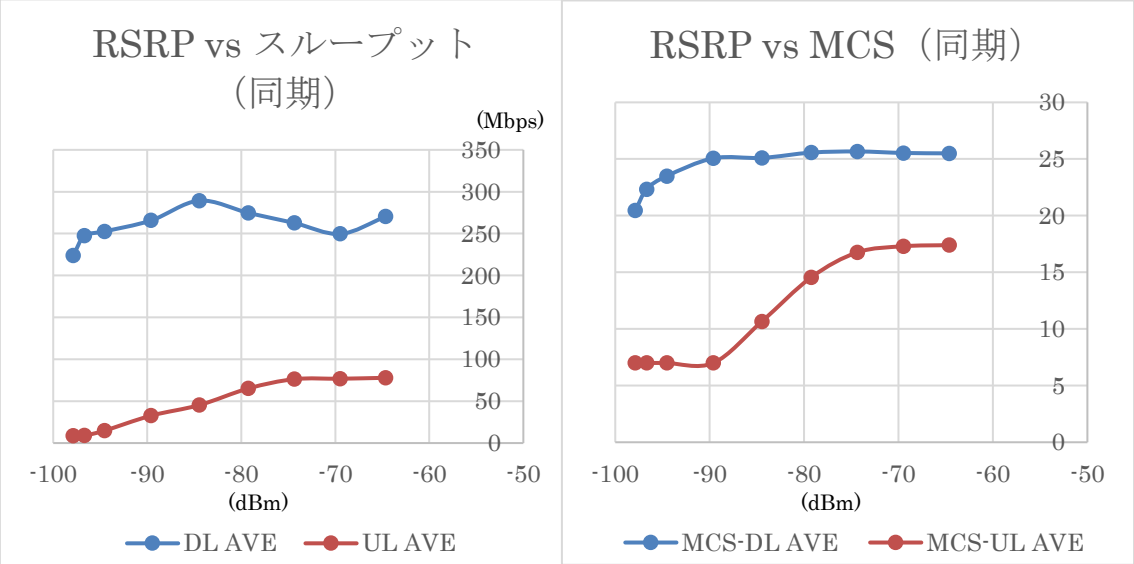


図 111 単体特性結果（同期）

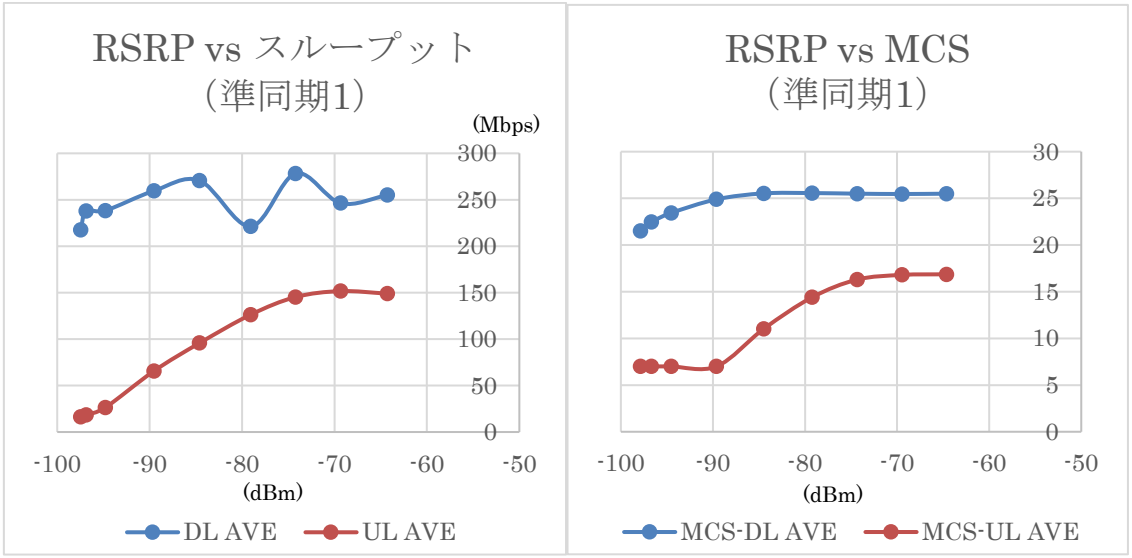


図 112 単体特性結果（準同期 1）

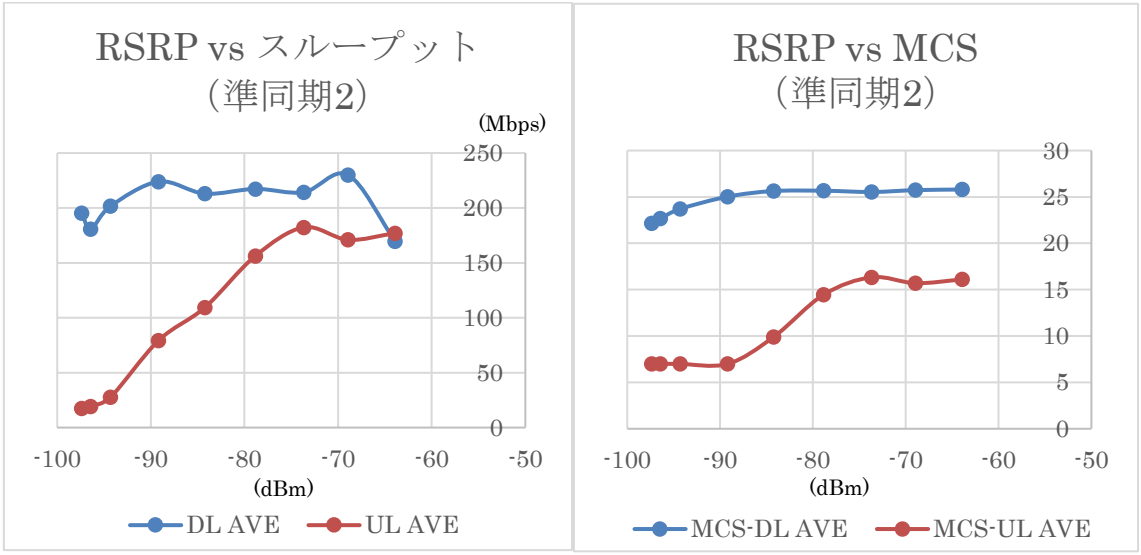


図 113 単体特性結果（準同期 2）

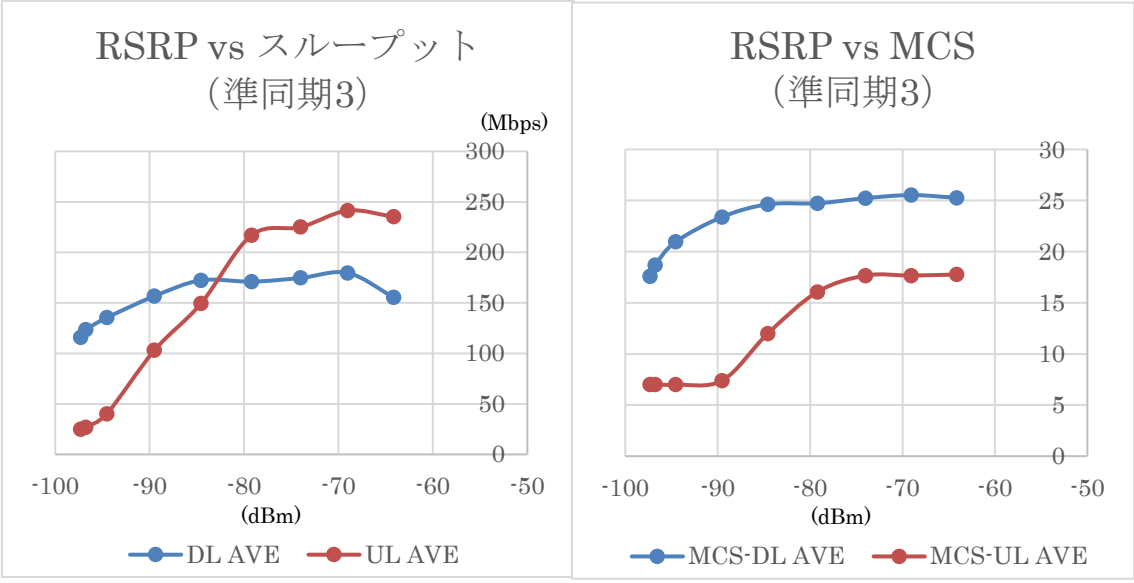


図 114 単体特性結果（準同期 3）

(b) 所用 D/U 比の取得

所用 D/U 比を取得するために希望波と干渉波を同時に被干渉設備に入力し、可変アッテネータでレベルを調整し、スループットや MCS の変化を確認しながら所用 D/U 比の算出を行う。なお、干渉波は iperf にて高負荷状態を維持し全リソースブロックを活用した状態での干渉波の送出が行えるように設定を行った上で実験を行っている。

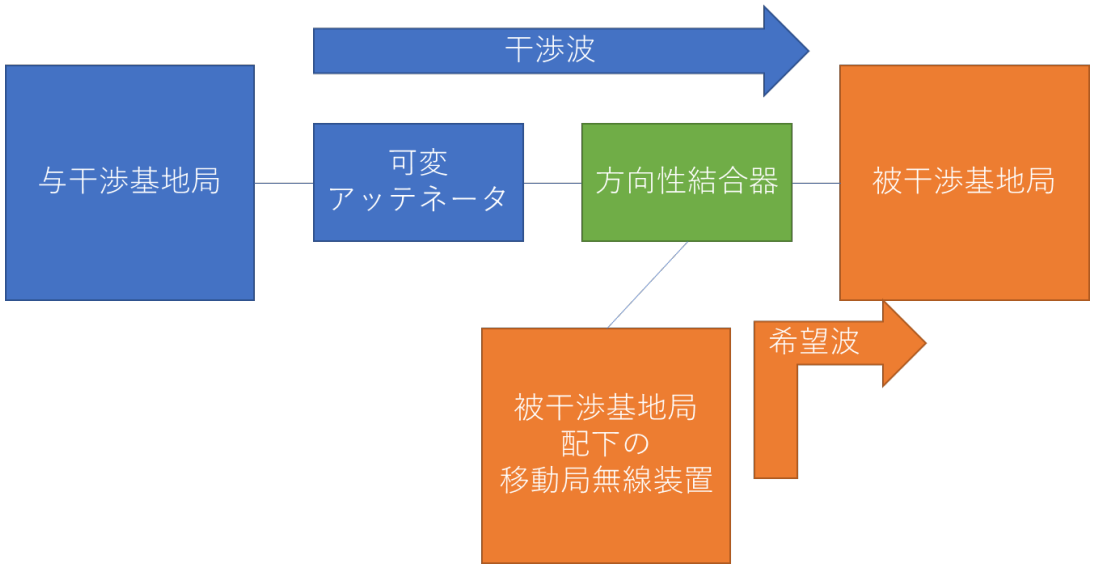


図 115 D/U 比の導出方法概念図（基地局間干渉の場合）

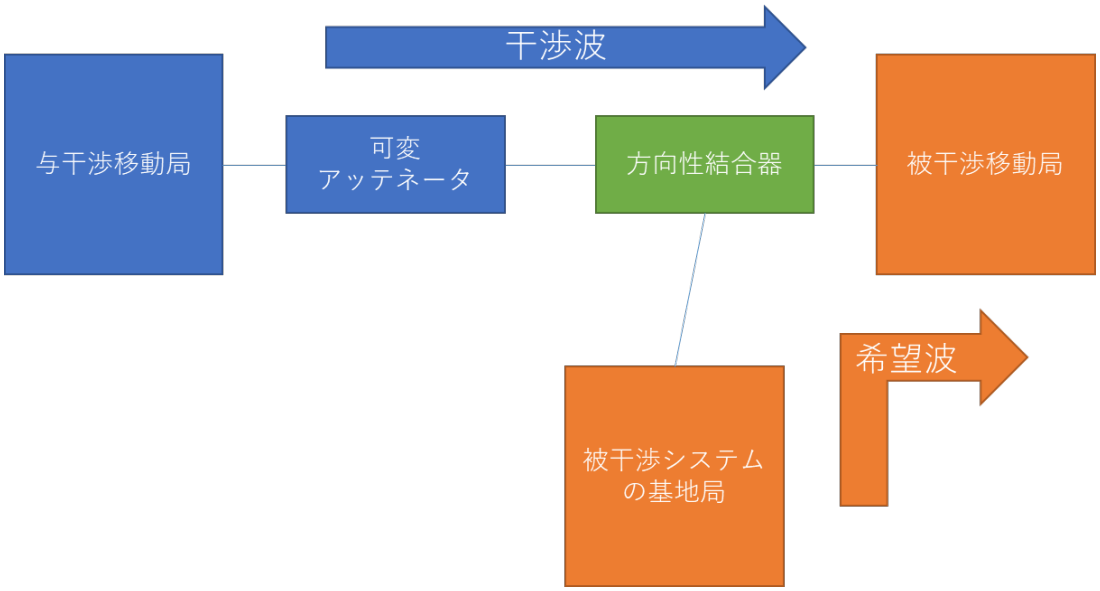


図 116 D/U 比の導出方法概念図（移動局間干渉の場合）

表 58　所用 D/U 比

与干渉局	被干渉局	与干渉パターン	被干渉パターン	所用D/U比
基地局	基地局	同期	準同期1	42.68
基地局	基地局	同期	準同期2	47.68
基地局	基地局	同期	準同期3	47.68
移動局	移動局	準同期1	同期	19.10
移動局	移動局	準同期2	同期	19.10
移動局	移動局	準同期3	同期	16.88
移動局	基地局	同期	準同期1	25.89
移動局	基地局	同期	準同期2	25.89
移動局	基地局	同期	準同期3	25.89

(c)干渉波の影響を受けない最大距離の導出

(a),(b)で求めた最低受信レベルと所用 D/U 比を用い下概念図に従い最大離隔距離を算出する。なお、この場合の最大離隔距離は被干渉システムが最大スループットを維持できる場合の距離と定義する。

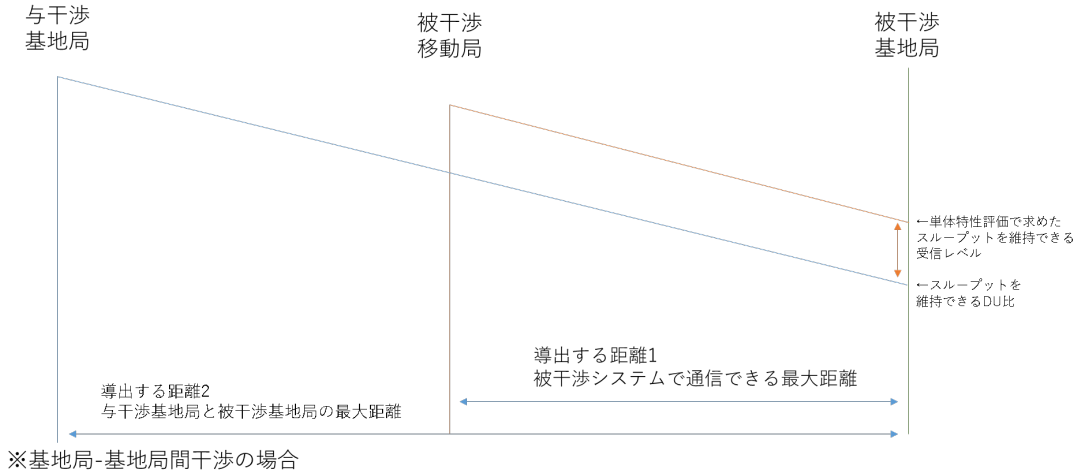


図 117 最大距離の導出方法概念図（基地局間干渉の場合）

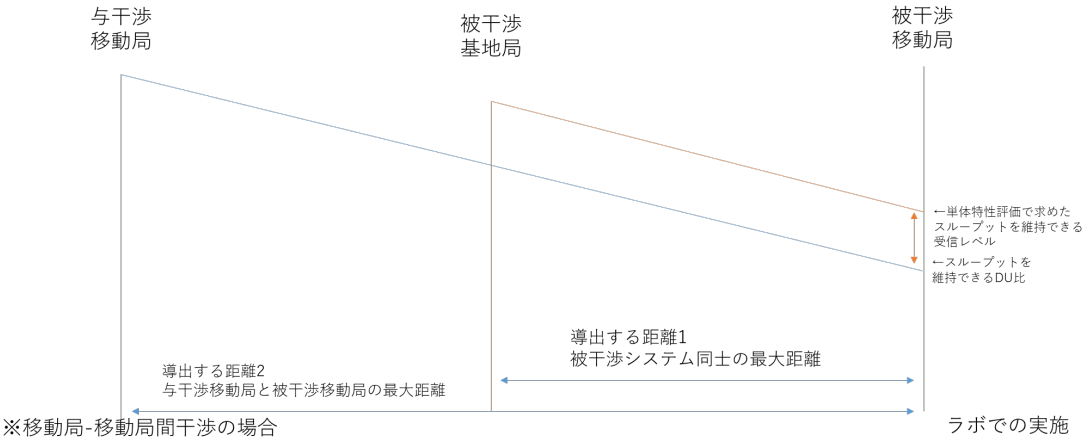


図 118 最大距離の導出方法概念図（移動局間干渉の場合）

表 59　最大距離の導出結果

正対・併設	与干渉局	被干渉局	与干渉パターン	被干渉パターン	算出する距離1(m)	算出する距離2(m)
正対	基地局	基地局	同期	準同期1	36.83	13964.16
正対	基地局	基地局	同期	準同期2	62.78	42333.24
正対	基地局	基地局	同期	準同期3	65.49	44158.55
併設	基地局	基地局	同期	準同期1	36.83	1.11
併設	基地局	基地局	同期	準同期2	62.78	3.36
併設	基地局	基地局	同期	準同期3	65.49	3.51
正対	移動局	移動局	準同期1	同期	11.85	38.34
正対	移動局	移動局	準同期2	同期	12.03	38.94
正対	移動局	移動局	準同期3	同期	23.02	57.70
正対	移動局	基地局	同期	準同期1	36.83	725.29
正対	移動局	基地局	同期	準同期2	62.78	1236.45
正対	移動局	基地局	同期	準同期3	65.49	1289.76
併設	移動局	基地局	同期	準同期1	36.83	6.46
併設	移動局	基地局	同期	準同期2	62.78	11.02
併設	移動局	基地局	同期	準同期3	65.49	11.50

※算出する距離 2（干渉対象-被干渉対象間の距離）は算出する距離 1 の最大距離にて測定したもの結果である。

表 60　シミュレーション値とラボでの離隔距離の比較

干渉方向	正対・併設	離隔距離(m)			
		シミュレーション値	ラボ実機評価		
		共通	同期-TDD1	同期-TDD2	同期-TDD3
基地局->基地局	正対	19500	13964.16	42333.24	44158.55
基地局->基地局	併設	1.5	1.11	3.36	3.51
移動局->移動局	正対	580	38.34	38.94	57.70
移動局->基地局	正対	4000	725.29	1236.45	1289.76
移動局->基地局	併設	3.5	6.46	11.02	11.50

上記の手順をふまえラボでの離隔距離の算出を行った。導出した距離から検討すると基地局間干渉は相当量の距離を離す必要があるが、今回のような高利得空中線においてはビームパターンの関係上、現実的に見通し通信において空中線同士が正対することを避けることは比較的容易なため、大きな問題とならないと考えられる。また、干渉量が少ない併設においては離隔距離が短いため他のシステムとの共存が比較的容易と考えられる。しかし、移動局間干渉を考慮する必要があるため異なる同期パターン同士の近隣システム構築には十分な検討が必要であると考えられる。

（3）フィールドでの実証結果

フィールドでの評価においては被干渉側のシステムを事前に単独にて測定し、干渉がある場合と干渉がない場合の比較を行い同一周波数下の干渉における影響を検証した。

（ア） フィールドと測定点

実証フィールドの状況を下図に記載する。1~23 までの番号が移動局相当装置が移動する箇所となる。

図 119　基地局および測定点位置

基地局間の距離は 68.5m とし、降雪のため立ち入りが困難なエリアが多かったため、設置可能である箇所に設置した。測定点は 10m 刻みで設定をしている。

（4）フィールドでの試験結果

下図に示したような、両局の位置関係と実測地点が分かる図を作成した。また干渉の発生状況を図示するため、SIR 値の差分(劣化の度合い)を色で識別して表示する。

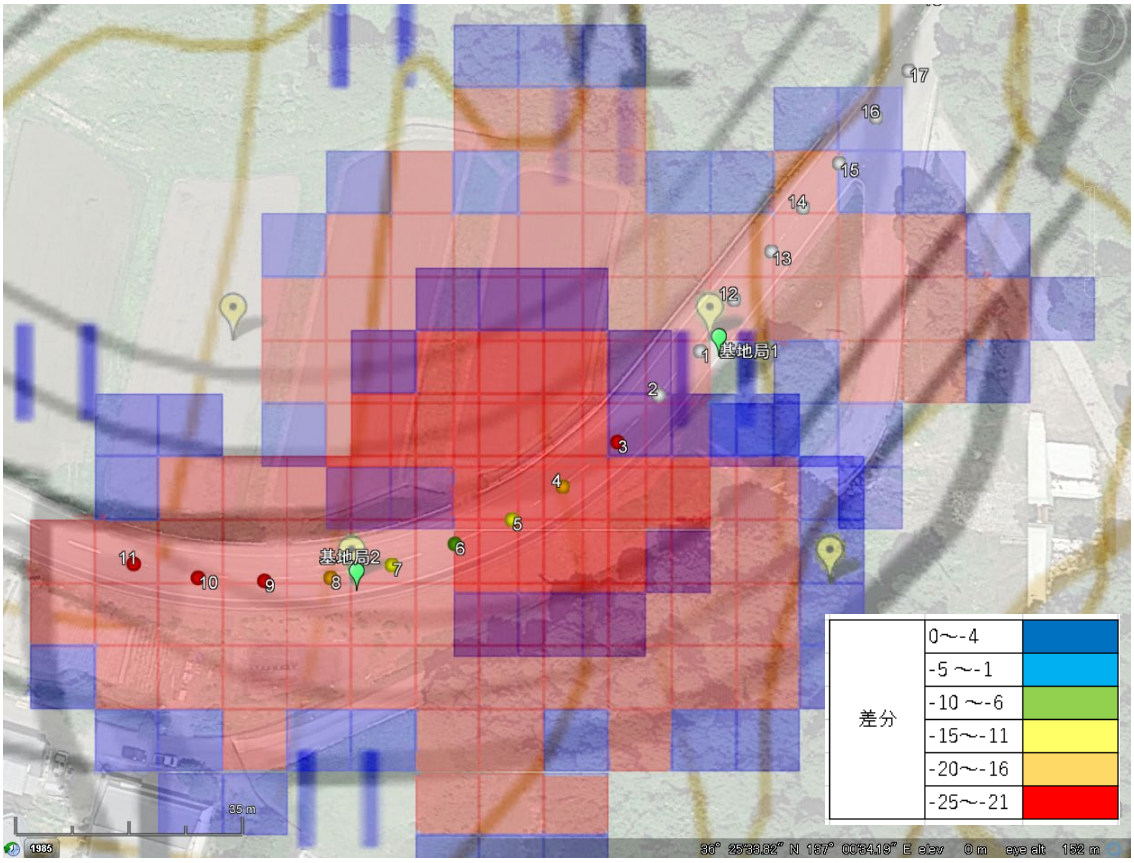


図 120　与干渉システムと被干渉システムの並行運用　基地局間干渉（正対）

表 61　基地局間干渉時（正対）の与干渉システムの SIR 値

与干渉				
同期				
ポイント番号	干渉時測定	単体測定	差分	備考
1	17.37	18.34	0.97	
2	14.01	21.53	7.52	
3	10.68	21.30	10.62	
4	1.64	21.44	19.81	
5	測定不可	20.86	-	CN比が悪く測定不可と考えられる
6	-6.56	18.01	24.57	
7	-9.90	20.05	29.95	
8	-3.87	14.38	18.25	
9	3.36	13.16	9.80	
10	8.29	14.70	6.41	
11	1.32	1.96	0.63	

表 62　基地局間干渉時（正対）被干渉システムの SIR 値

被干渉				
準同期3				
ポイント番号	干渉時測定	単体測定	差分	備考
1	測定不可	測定不可	-	測定レベル限界以以下
2	測定不可	測定不可	-	測定レベル限界以以下
3	-9.79	12.42	22.21	
4	-4.84	15.34	20.18	
5	9.54	20.10	10.56	
6	11.99	21.68	9.69	
7	9.44	21.25	11.81	
8	3.55	21.22	17.67	
9	-6.30	21.16	27.46	
10	-9.65	21.32	30.97	
11	-6.89	21.65	28.54	

凡例		
SIR	21～25	
	16～20	
	10～15	
	5～9	
	0～-4	
	-5 ～-1	
	-10 ～-6	

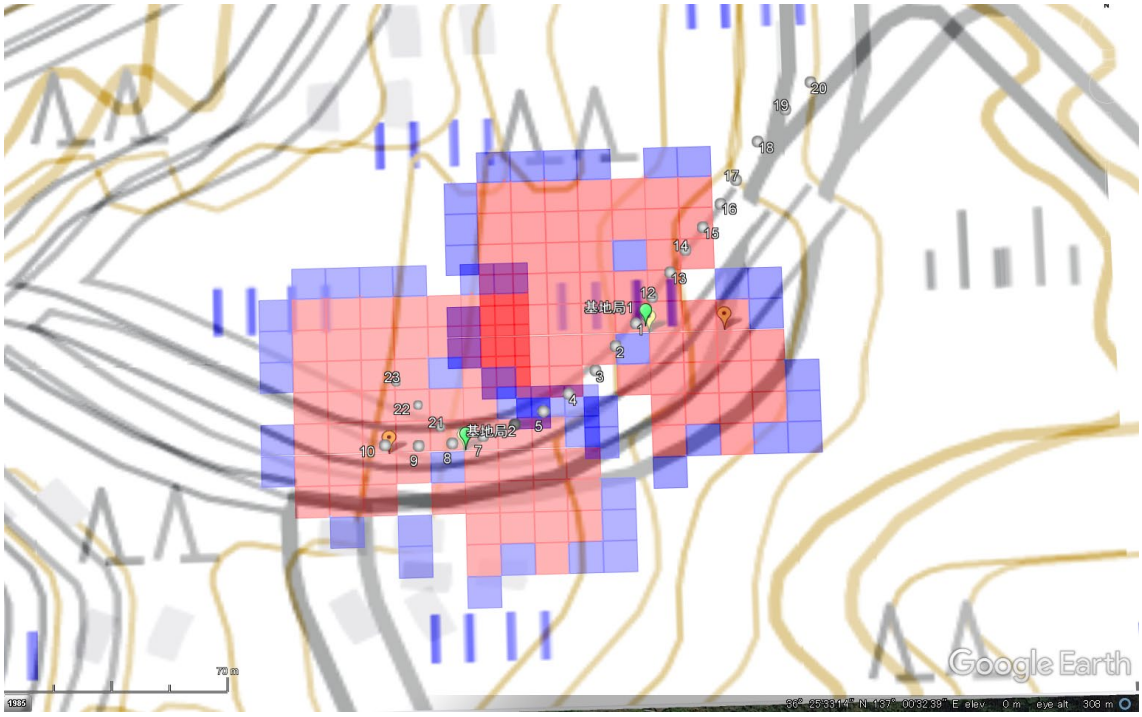


図 121　与干渉システムと被干渉システムの並行運用　基地局間干渉(併設）シミュレーション図の重ね合わせ

測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の中央値、標準偏差 SD、上位 10%、下位 10%値を計算する
サンプル数:1000 ポイント以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数
X_i = 測定値

表 63　同期システムのみの測定結果　基地局間干渉時（正対）

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
1	36.425811	137.010036	288.91	3.14	19.47	-85.88/-61.89	18.34	212.00/42.20	26.40	5.30
2	36.425750	137.009964	240.56	11.14	11.98	-80.03/-56.61	21.53	89.17/0.00	29.60	1.72
3	36.425683	137.009892	231.25	20.48	7.38	-87.30/-63.86	21.30	56.04/9.84	27.33	4.41
4	36.425622	137.009797	231.3	31.5	7.24	-87.39/-63.93	21.44	23.80/1.14	34.63	2.77
5	36.425575	137.009711	232.39	41.03	7.37	-93.57/-70.13	20.86	52.60/0.83	36.83	4.59
6	36.425542	137.009611	235.26	50.39	7.47	-92.86/-69.36	18.01	13.84/0.00	42.00	3.36
7	36.425514	137.009503	237.89	60.3	8.42	-98.55/-75.07	20.05	0.42/1.71	77.65	3.67
8	36.425494	137.009394	240.7	69.55	7.55	-108.76/-84.97	14.38			4.73
9	36.425492	137.009281	243.97	78.89	7.59	-110.80/-87.22	13.16			3.72
10	36.425494	137.009167	247.16	87.95	7.64	-108.93/-85.04	14.70			4.58
11	36.425514	137.009056	250.69	96.75	8.29	-122.65/-96.03	1.96			3.75
12	36.425883	137.010094	11.43	9.32	-4.32	-104.17/-79.74	15.74	0.23/3.47	62.80	4.64
13	36.425950	137.010158	25.52	18.25	-4.45	-103.46/-79.71	17.63			4.87
14	36.426011	137.010214	28.09	26.66	-4.62	-103.76/-80.15	16.65			4.91
15	36.426072	137.010278	31.47	35.27	-4.67	-107.15/-83.42	15.65			3.04
16	36.426136	137.010342	32.66	44.16	-4.66	-104.36/-80.89	17.85			2.12
17	36.426203	137.010397	33.13	53.31	-4.62	-108.76/-84.61	14.54			4.53
18	36.426308	137.010478	32.8	67.05	-4.16	-110.80/-87.14	12.94			4.16
19	36.426397	137.010578	34.58	79.91	-4.63	-113.31/-88.88	10.42			5.17
20	36.426472	137.010667	35.55	91.69	-4.42	-107.31/-83.67	15.65			4.12

表 64　準同期システムのみの測定結果　　基地局間干渉時（正対）

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm) /RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
1	36.425811	137.010036	54.68	65.47	-3.44					
2	36.425750	137.009964	56.58	56.46	-3.26					
3	36.425683	137.009892	59.72	46.97	-4.28					
4	36.425622	137.009797	62.41	35.98	-4.54					
5	36.425575	137.009711	64.44	26.6	-4.63	-86.63 /-63.26		178.00 /0.00	20.03	2.42
6	36.425542	137.009611	63.02	17.11	-4.87	-80.38 /-57.05		44.04 /1.22	24.17	1.85
7	36.425514	137.009503	52.28	7.05	1.80	-92.19 /-68.80		1.06 /1.19	39.90	3.50
8	36.425494	137.009394	301.57	4.79	1.80					
9	36.425492	137.009281	278.03	14.45	5.76					
10	36.425494	137.009167	275.44	24.73	6.42					
11	36.425514	137.009056	277.87	35.17	8.29					
12	36.425883	137.010094	51.85	74.02	-4.37					
13	36.425950	137.010158	50.37	83.28	-4.37					
14	36.426011	137.010214	49.16	91.5	-4.44					
15	36.426072	137.010278	48.24	100.32	-4.46					
16	36.426136	137.010342	47.33	109.12	-4.48					
17	36.426203	137.010397	46.62	117.98	-4.49					
18	36.426308	137.010478	44.94	131.52	-4.28					
19	36.426397	137.010578	44.61	144.46	-4.52					
20	36.426472	137.010667	44.5	155.88	-4.42					

表 65　基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の被干渉システムの測定結果
基地局間干渉時（正対）

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
1	36.425811	137.010036	54.68	65.47	-3.44					
2	36.425750	137.009964	56.58	56.46	-3.26					
3	36.425683	137.009892	59.72	46.97	-4.28	-96.24/-61.74	-9.79			3.53
4	36.425622	137.009797	62.41	35.98	-4.54	-93.64/-64.67	-4.84			2.72
5	36.425575	137.009711	64.44	26.6	-4.63	-84.66/-61.01	9.54			1.21
6	36.425542	137.009611	63.02	17.11	-4.87	-89.45/-65.65	11.99			3.88
7	36.425514	137.009503	52.28	7.05	1.80	-85.04/-61.27	9.44	0.22/1.77	35.25	3.15
8	36.425494	137.009394	301.57	4.79	1.80	-99.99/-74.40	3.55			5.12
9	36.425492	137.009281	278.03	14.45	5.76	-115.66/-85.07	-6.30			2.53
10	36.425494	137.009167	275.44	24.73	6.42	-119.09/-84.74	-9.65			2.67
11	36.425514	137.009056	277.87	35.17	8.29	-125.99/-93.77	-6.89			2.96

基地局相当装置間の距離　68.5 m

表 66　基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の与干渉システムの測定結果
基地局間干渉時（正対）

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	標準偏差
1	36.425811	137.010036	288.91	3.14	19.47	-77.75 /-54.13	17.37	2.07
2	36.425750	137.009964	240.56	11.14	11.98	-76.81 /-53.19	14.01	1.16
3	36.425683	137.009892	231.25	20.48	7.38	-85.24 /-61.50	10.68	1.17
4	36.425622	137.009797	231.3	31.5	7.24	-89.91 /-64.67	1.64	1.12
5	36.425575	137.009711	232.39	41.03	7.37			
6	36.425542	137.009611	235.26	50.39	7.47	-100.49 /-68.90	-6.56	3.38
7	36.425514	137.009503	237.89	60.3	8.42	-97.16 /-62.59	-9.90	1.94
8	36.425494	137.009394	240.7	69.55	7.55	-102.79 /-73.49	-3.87	3.02
9	36.425492	137.009281	243.97	78.89	7.59	-110.02 /-85.00	3.36	2.94
10	36.425494	137.009167	247.16	87.95	7.64	-108.86 /-84.93	8.29	1.77
11	36.425514	137.009056	250.69	96.75	8.29	-119.56 /-92.91	1.32	3.83

基地局相当装置間の距離　68.5m

表 67　基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の被干渉システムの測定結果
基地局間干渉時（併設）

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
21	36.425542	137.009356	316.6	10.6	7.19	-84.32/-53.34	3.07	83.39/10.27	28.97	3.85
22	36.425603	137.009281	316.07	20.49	10.13	-85.43/-64.28	4.64	52.10/9.07	31.74	5.69
23	36.425669	137.009208	316.64	30.33	7.45	-87.99/-69.77	3.36	25.07/0.18	32.55	5.98

基地局相当装置間の距離　68.5

表 68　移動局―基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の被干渉システムの測定結果

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
1	36.425811	137.010036	54.68	65.47	-3.44					
2	36.425750	137.009964	56.58	56.46	-3.26	-91.20/-67.30	7.46			1.88
3	36.425683	137.009892	59.72	46.97	-4.28	-92.78/-69.14	13.47	1.4/1.99	42.13	4.21
4	36.425622	137.009797	62.41	35.98	-4.54	-95.44/-71.92	15.78	6.65/0.00	36.05	4.87
5	36.425575	137.009711	64.44	26.6	-4.63	-96.15/-70.74	6.48			9.64
6	36.425542	137.009611	63.02	17.11	-4.87	-87.05/-63.62	15.50	71.32/1.29	31.1	1.36
7	36.425514	137.009503	52.28	7.05	1.80	-81.13/-57.74	21.48	25.97/1.28	27.1	2.25

基地局相当装置間の距離　68.5 m

表 69　移動局―基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の与干渉システムの測定結果

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(DL/UL)	伝送遅延	標準偏差
1	36.425811	137.010036	288.91	3.14	19.47	-81.65/-58.15	17.45			1.92
2	36.425750	137.009964	240.56	11.14	11.98	-104.91/-67.42	-11.51			2.95
3	36.425683	137.009892	231.25	20.48	7.38			1.4/1.99	42.13	
4	36.425622	137.009797	231.3	31.5	7.24			6.65/0	36.05	
5	36.425575	137.009711	232.39	41.03	7.37	-105.43/-78.22	0.37			1.36
6	36.425542	137.009611	235.26	50.39	7.47			71.3/1.29	31.1	
7	36.425514	137.009503	237.89	60.3	8.42			26/1.28	27.1	

基地局相当装置間の距離　68.5m

ラボでの評価結果および現地での測定結果を下記の表にまとめる。

表 70　共用検討結果

正対併設	与干渉局	被干渉局	与干渉パターン	被干渉パターン	算出する距離 1(m)	算出する距離 2(m)	現地実施有無	現地での評価結果	備考
正対	基地局	基地局	同期	準同期 1	36.83	13964.16			離隔距離が大きく不適と考えられる
正対	基地局	基地局	同期	準同期 2	62.78	42333.24			離隔距離が大きく不適と考えられる
正対	基地局	基地局	同期	準同期 3	65.49	44158.55	実施 表 53,54	スループットの低下が大きく実運用には不適	68.5m 離隔での試験時スループットが低下するものの通信は可能
併設	基地局	基地局	同期	準同期 1	36.83	1.11			準同期 3 での離隔距離とほぼ同等と考えられるため、運用可能と考えられる
併設	基地局	基地局	同期	準同期 2	62.78	3.36			準同期 3 での離隔距離とほぼ同等と考えられるため、運用可能と考えられる
併設	基地局	基地局	同期	準同期 3	65.49	3.51	実施 表 55	干渉量が小さいため実運用に適する	運用可能（根拠： 表 67　基地局間干渉にて同時にシステムを動かした場合の被干渉システムの測定結果 基地局間干渉時（併設））
正対	移動局	移動局	準同期 1	同期	11.85	38.34			離隔距離が 40ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる
正対	移動局	移動局	準同期 2	同期	12.03	38.94			離隔距離が 40ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる
正対	移動局	移動局	準同期 3	同期	23.02	57.70			離隔距離が 60ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる
正対	移動局	基地局	同期	準同期 1	36.83	725.29			離隔距離が大きく不適と考えられる
正対	移動局	基地局	同期	準同期 2	62.78	1236.45			離隔距離が大きく不適と考えられる
正対	移動局	基地局	同期	準同期 3	65.49	1289.76	実施 表 56,57	スループットの低下が大きく実運用には不適	68.5m 離隔での試験時スループットが低下するものの一部で通信は可能
併設	移動局	基地局	同期	準同期 1	36.83	6.46			離隔距離が 10ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる
併設	移動局	基地局	同期	準同期 2	62.78	11.02			離隔距離が 10ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる
併設	移動局	基地局	同期	準同期 3	65.49	11.50			離隔距離が 10ｍ程度でありシステム配置を適切に行うことで運用可能と考えられる

以上のように干渉システムの共用可能性について検討を行った。同一周波数での準同期TDDパターンでの運用条件をまとめることにより今後準同期パターンと同期パターンの共存可能性について検討することができた。表 70　共用検討結果の現地実施有無の列に、

現地での測定結果に対応する表番号を記載している。全般的に同一周波数帯での干渉となるため、空中線が正対する場合は離隔条件が厳しく運用に適さない場合が多いが、現実的には高利得空中線同士が正対するケースは少ないと考えられるため大きな問題とならないと考えられる。エリア設計の差異にセクタアンテナを使用し、ダウンチルトなど基地局無線装置同士が正対しないようにシステム設計を行うことが重要となると考えられる。実際の環境における離隔距離は、上記表 70　共用検討結果のように、算出する距離 1(m)が「被干渉システムで通信できる最大距離」、算出する距離 2(m)が基地局間干渉の場合は「与干渉基地局と被干渉基地局の最大距離」、移動局間干渉の場合は「与干渉移動局と被干渉移動局の最大距離」である。算出する距離 1(m)が算出した値以下となり、算出する距離 2(m)が算出した値以上になる双方の条件を満たした場合に D/U 比が確保できることとなる。

移動局間干渉においては移動局は一般的に無指向性アンテナを使用するため見通し環境において空中線角度の変更による干渉回避は困難である。しかしながら実証においては事前計算値よりも短い距離での運用が可能であった。これは移動局の送信電力制御により基地局からの距離が近い場合は送信出力を低減する仕組みを具備しているため干渉が少なかったことも影響していると考えられる。移動局間干渉においては移動局間距離を 60m 確保すれば所定 D/U 比を確保できるため、被干渉システムへの干渉量を押さえることが出来、共用が可能であると考えられる。

3.3.5　その他のテーマ: ローカル 5G の再送信におけるエリア構築の柔軟化

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

ローカル 5G は原則自己土地での自営ネットワークとなる。そのためサービスエリアがキャリア 5G よりも狭くなる。しかしながら今回の実証フィールドのように自己土地利用においても広大なエリアである場合も想定され、エリアの拡大が必要な可能性もある。エリア拡大に際し、今回のような山地のフィールドにおいては光ファイバー網によりバックホール回線を引くことが難しく、無線でのバックホール回線が必要となる。FWA のような固定回線でバックホール回線を引くこともできるが、今回はローカル 5G 回線をバックホール回線として活用することにより中継をしながらサービスエリアを拡大することを実証する。

（2）実証目標

エリア中継の実証を行う際に 2 つのシステムを通ることによる遅延の発生やバルーンを用いたシステムにおける中継が可能かどうかを明らかにし、エリア中継が実現可能か、また運用に耐えうるかの検証を行う。

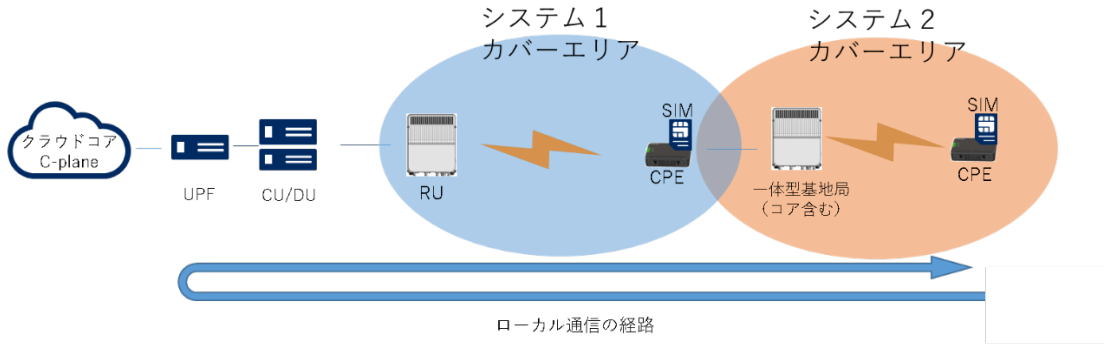


図 122　エリア中継時のシステム系統図(ローカル 5G)

図 123　システム 1 の RU/アンテナと CPE を搭載したバルーン

図 124　システム 1 CPE(NEC 基地局)と、
システム 2 一体型基地局(FLARE 基地局)との中継

図 125　エリア中継用 CPE(システム 1)の実装状態

図 126　一体型基地局(FLARE 基地局)・可搬構成

3.3.5.2 実証仮説

エリア中継を行う場合、2 つの 5G システムをまたぐため、ローカルでの通信を行う際にも遅延が発生することが予想される。また、同一周波数にて中継を行う際には電波干渉が発生する可能性もあり、システム 1 の UE とシステム 2 の基地局相当装置間の離隔を十分に取るなどの対策が必要になると考えられる。

3.3.5.3 評価・検証項目

システム 1 およびシステム 2 の UE(CPE)とシステム 1 の DN に接続した評価用の PC を用い伝送遅延やスループットの取得を行いトータルシステムとしての評価を行った。

表 71　システム 1 に使用する基地局相当設備仕様

メーカ	NEC
型番	MB5420
空中線電力	33.6dBm
空中線損失	-3.0dB
アンテナゲイン	17.5dBi
EIRP	48.1dBm
TDD パターン	同期

表 72　システム 2 に使用する基地局相当設備

メーカ	FLARE SYSTEMS
型番	FW-L5G-1
空中線電力	16.0dBm
空中線損失	0.0dB
アンテナゲイン	12.0dBi
EIRP	28.0dBm
TDD パターン	同期、準同期 1、2、3

測定する項目

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において 20 地点の測定を行った。測定項目は RSRP、SIR、電波品質(遅延プロファイル)、通信品質(スループット、遅延速度)とする。

表 73　測定項目

測定項目	測定指標	測定手法	測定する値(単位)	測定機器
受信電力	RSRP	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
受信電力	RSSI	Anritsu エリアテスタ	dBm	ML8780A
電波干渉	SIR	Anritsu エリアテスタ	dB	ML8780A
電波品質	遅延プロファイル	Anritsu エリアテスタ	usec	ML8780A
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE
遅延	遅延時間	Ping	msec	WindowsPC(Ping)

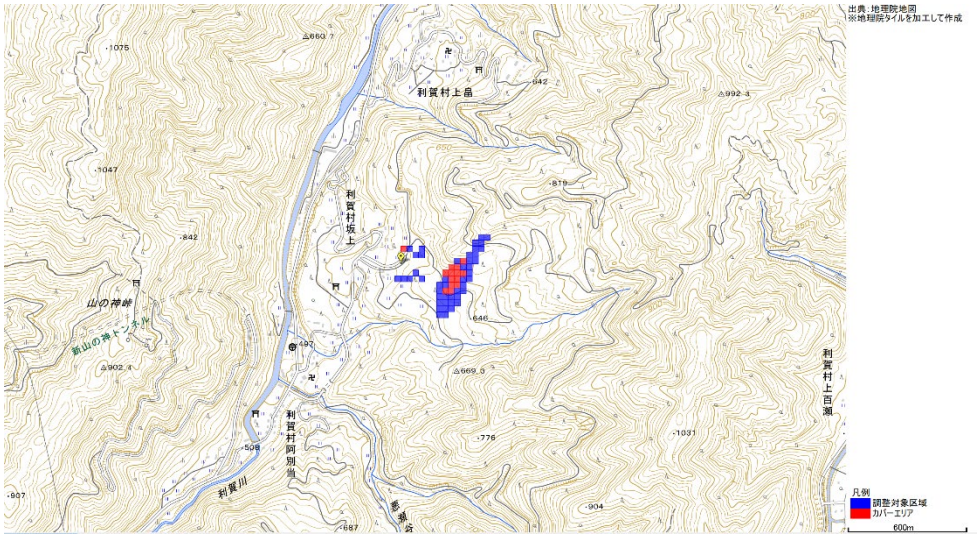


図 127 システム 1、干渉調整区域とカバーエリア図

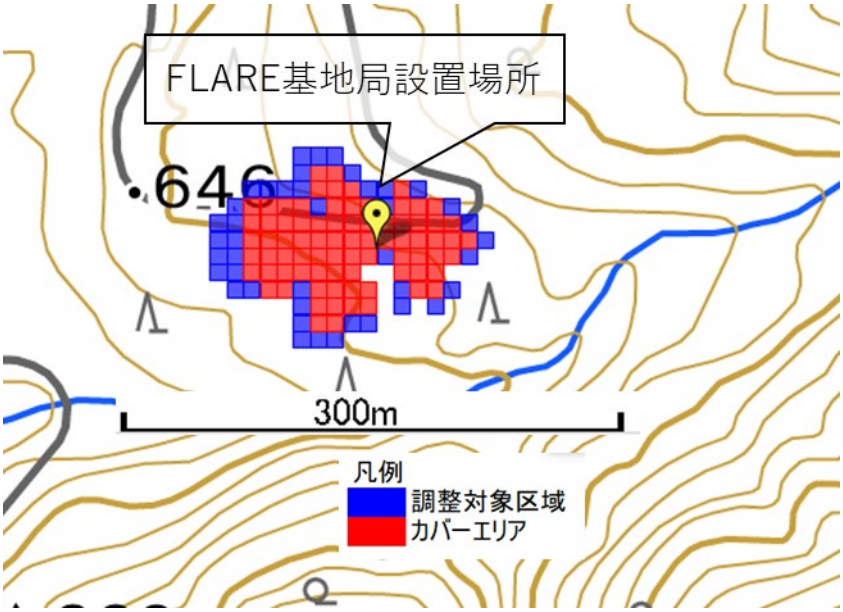


図 128 システム 2、干渉調整区域とカバーエリア図

3.3.5.4 評価・検証方法

下記評価項目を中継前、中継後の CPE またはエリアテスタにて測定を行う。

（1）受信電力

受信電力(RSRP)を 20 地点にて測定し、記録した。同時に RSSI も記録を行った。RSRP は基地局相当装置ごとの受信電力を識別することができるが、RSSI は総受信電力であり、他局からの干渉も含め記録が可能であり、双方のデータを取得した。

(2) スループット、伝送遅延

通信品質であるスループット、遅延時間を測定し、伝送状況を記録した。外部からの干渉により通信品質が損なわれていないかを確認した。また、中継を行うことにより遅延時間が増加していないかの確認を行う。

(3) 通信品質(SIR)

無線通信区間における信号対干渉波比を記録した。SIR が低下し通信品質が低下していないかを記録する。

(4) 中継システム(移動局相当装置)が他システムに与える干渉の計算と測定

中継システムの移動局相当装置をバルーンに搭載し見通しが良い高さまで浮遊させるシステムであり、他システムへの干渉が懸念される。見通しが 100%取れた場合においては自由空間伝搬損失で考えると下記の通りの値が干渉として発生するため、問題ないかの測定を行う。なお、バルーンの飛翔高度は業務が必要な区域においてフレネル径(最大距離 281m の場合約 2.0m)を確保できる高度、かつ基地局無線装置とバルーン間の見通しが取れる高度 130m にて実施した。

自己土地の範囲を仮に 500m と仮定し 500m 先の与干渉量を計算すると下表の通りとなる。

表 74　干渉の計算結果

移動局相当装置 EIRP	25.97dBm
自由空間伝搬損失	100.13dB
与干渉量	-74.16dBm

3.3.5.5 実証結果及び考察

エリアシミュレーション図と実測結果を重ね合わせた（システム 1 の測定結果)、（システム 2 の測定結果)を作図した。

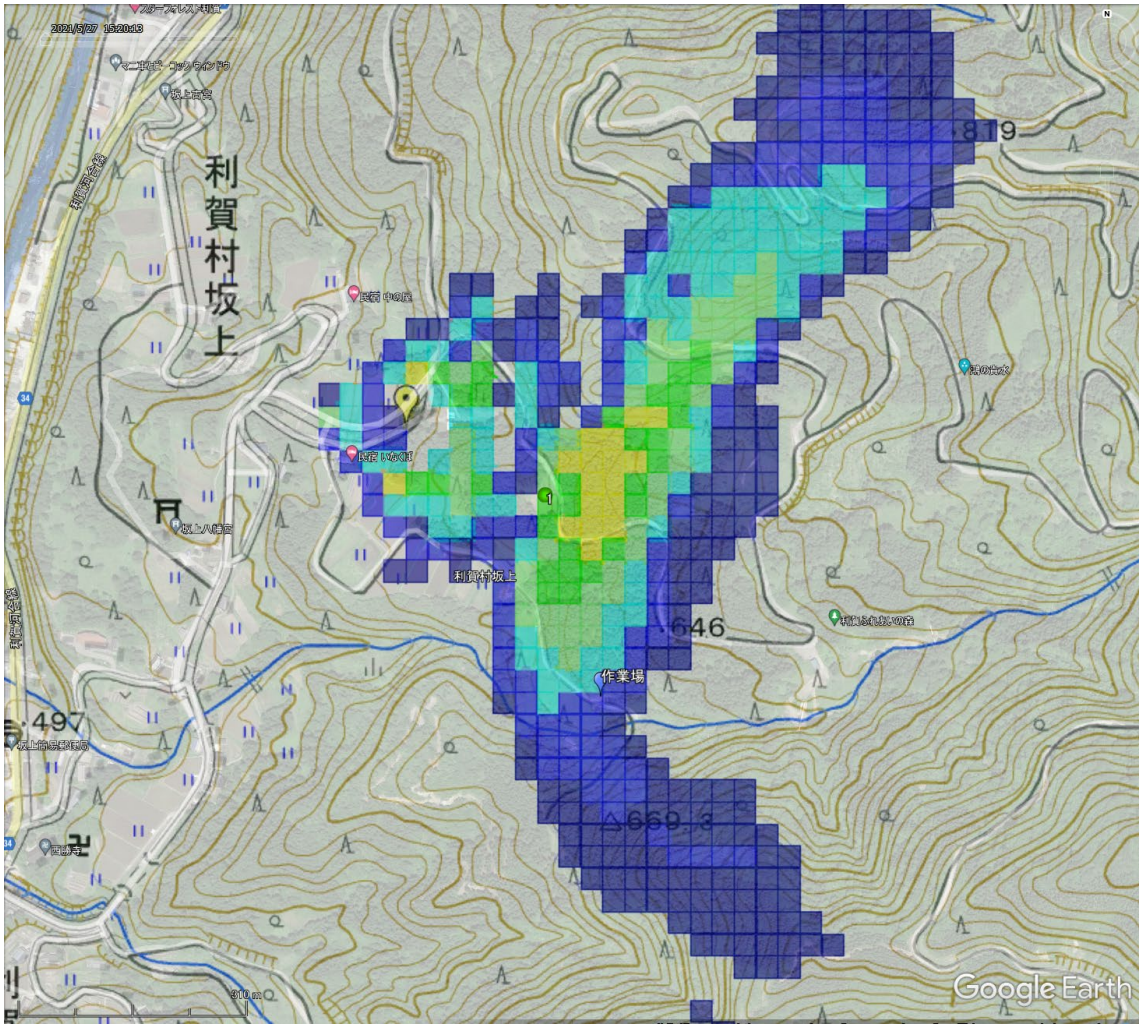


図 129 シミュレーション図と実測結果を重ね合わせた図(システム 1)

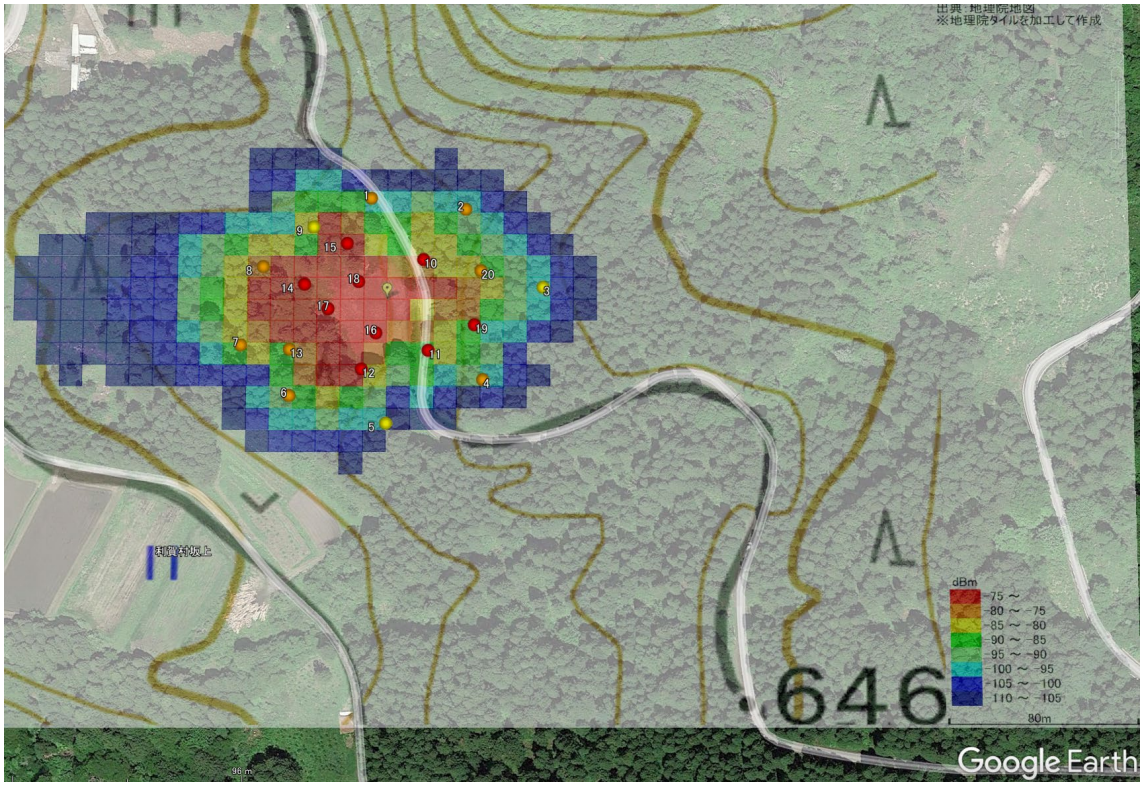


図 130 シミュレーション図と実測結果を重ね合わせた図(システム 2)

20 か所の測定ポイントの詳細を下記に記載する。

共通項目としては下記となる。
RSRP:測定結果の中央値、標準偏差 sd、上位 10%、下位 10%値を計算する
サンプル数:1000 ポイント以上とする
標準偏差:標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出している

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

n = サンプル数
X_i = 測定値

(1)システム 1 の配下にある CPE の測定結果

表 75　システム 1 の配下にある CPE の測定結果

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	測定回数(回)	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(Mbps) DL/UL	伝送遅延(ms)	標準偏差
1	36.4244	137.0119	116.0	281	36.34	1251	-106.68/-83.13	16.3	130/42	28	1.42

※バルーンの地上高 130m

システム 1 の配下にある CPE はバルーンに搭載されているため、位置は固定となる。

(2)システム 2 の配下にある CPE の測定結果

表 76　システム 2 の配下にある CPE の測定結果

ポイント番号	北緯	東経	基地局からの角度(TN)	基地局との距離(m)	基地局から見たチルト角度	測定回数(回)	RSRP(dBm)/RSSI(dBm)	SIR(dB)	スループット(Mbps) DL/UL	伝送遅延(ms)	標準偏差
1	36.4250	137.0121	350.24	43.1	1.80	1045	-79.5/-58.5	16.4	115/35	79	2.68
2	36.4250	137.0125	41.3	50.45	-9.41	1128	-78.1/-54.1	16.3	102/31	82	1.83
3	36.4247	137.0129	86.25	66.83	-10.03	1331	-84.8/-59.8	18.5	98/31	64	3.00
4	36.4243	137.0126	131.3	53.92	-6.64	1399	-78.6/-55.6	16.9	102/34	86	1.33
5	36.4242	137.0121	180.6	54.12	2.86	1399	-83.1/-63.1	14.9	112/29	87	2.91
6	36.4243	137.0117	224.75	59.81	8.48	1083	-78.2/-46.2	19.5	103/36	80	2.87
7	36.4245	137.0114	252.12	66.71	11.16	1184	-79.5/-52.5	15.1	105/32	67	1.88
8	36.4248	137.0116	283.37	55.26	12.06	1408	-78.6/-52.6	18.8	104/33	82	1.01
9	36.4249	137.0118	312.69	44.26	9.52	1228	-82.1/-53.1	14.9	97/34	88	1.00
10	36.4248	137.0123	43.59	21.97	-11.02	1071	-74.6/-44.6	19.4	98/37	66	1.29
11	36.4244	137.0123	143.5	28.67	-6.14	1376	-74.2/-41.2	19.3	103/33	50	1.53
12	36.4244	137.0120	200.5	32.96	3.54	1311	-74.6/-40.6	13.3	107/35	64	1.49
13	36.4245	137.0117	242.42	47.74	10.14	1188	-78.6/-52.6	19.4	105/32	66	1.03
14	36.4247	137.0118	278.27	36.4	11.16	1264	-73.5/-47.5	15.5	107/35	81	2.07
15	36.4249	137.0120	321.73	29.25	7.66	1456	-74.9/-47.9	16.8	95/34	77	1.62
16	36.4245	137.0121	198.14	16.35	1.80	1241	-72.1/-42.1	16.7	97/36	83	2.31
17	36.4246	137.0119	259.37	26.55	8.25	1302	-70.2/-41.2	14.9	105/31	68	1.90
18	36.4247	137.0120	297.23	14.44	5.76	1244	-65.1/-36.1	17.7	112/35	77	1.98
19	36.4245	137.0126	108.36	38.81	-9.85	1209	-74.5/-47.5	18.3	97/35	48	1.68
20	36.4248	137.0126	74.35	41.16	-11.86	1151	-79.2/-53.2	15.4	100/32	53	1.99

※スループット・伝送遅延はシステム 1 を経由した場合の値となる。

2 つの基地局システムを通すことにより遅延等のファクターが予想されたが、遠隔運転車両の遠隔運転を問題なく行うことができた。

3.3.6 技術実証における追加提案

技術実証における追加提案には取り組まない

3.3.6.1 協力内容

技術実証における追加提案には取り組まない

3.3.6.2 評価・検証項目

技術実証における追加提案には取り組まない

3.3.6.3 評価・検証方法

技術実証における追加提案には取り組まない

3.3.6.4 実証結果及び考察

技術実証における追加提案には取り組まない

4. ローカル 5G 活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）

4.1 実証概要

（実施概要）
スマート林業の社会実装を目的とし、ローカル 5G を用いて、①生産性の向上：遠隔操作による作業車両の移動や搬出作業効率化の検証②安全性の向上：高精細映像と AI を組み合わせた作業員の山林現場での安全管理の検証を行う。

（ローカル 5G の必要性）
山間地域において、本課題を実行するにあたり、端末を頻繁に移動することから、有線ではなく無線の利用が必須である。しかし、「1.2 実証の概要」にも詳述した通り、実証フィールドでは、山間地域という林業の作業現場の特性として不感地帯である場合が多く、4G の電波が届かない環境であることから、公衆網 5G の整備の遅れが予想され大容量通信ができない現状がある。 また、課題の解決には、少なくとも 4K画質の高精細な映像を大容量通信(1 台のカメラから少なくとも 20Mbps 以上）により、継続的にアップロードし、データセンタにリアルタイム提供する必要がある。
このようなデータ伝送は、遠隔操作、安全管理の用途から、安定してセキュアに運用ができることが必須である。 このようなミッションクリティカルな無線のアプリケーション・サービスを実現 するユースケースにおいては
(1) 免許制による安定した無線通信
(2) 運用上高度なセキュリティの保証
(3) 複数（5 台以上）のカメラから 100Mbps 以上のアップリンク性能を品質保証する通信が必要である。（100Mbps 以上必要な理由は、3.3.1.1(2)実証に必要な所要性能に記載のとおり。）
公衆網４G の通信は、前述のとおり、山間地域という林業の作業現場の特性として不感地帯である場合が多く電波が得られない状況であり、Wi-Fi を整備しようにもバックホール回線がないこと、また仮に Wi-Fi が整備できたとしても、電波干渉による不安定かつセキュアでない運用を強いられる。 従って、アップリンク帯域が 100Mbps 以上で安定かつセキュアなローカル 5G の通信が必須である。 なお、ローカル 5G であれば、3GPP で規定されたセキュアな認証プロトコルによる認証により、セキュアな認証、通信を確立することができる。

（ローカル 5G 導入の効果）
物理的に Wi-Fi 設備敷設も不可能かつ 4G 電波も無い環境において、ローカル 5G をベースとしたシステムの提供により

①生産性の向上：遠隔操作による作業車両の移動や搬出作業効率化
②安全性の向上：高精細映像と AI を組み合わせた作業員の山林現場での安全管理

の２点において、大きな効果が得られる（課題の内容、課題解決方法の詳細、解決度合いの測定・評価基準、解決度合いの定量的アウトプットは、「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」にて詳細は記載のとおり）。

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

- 課題「生産性向上」のための実装シナリオ・実証目標

(ア) 現状作業および課題の明確化

- 作業現場は地形、地質等の状況や樹種、樹高、直径などの諸条件の影響を大きく受けるものの、株式会社島田木材では一般的に一つの作業現場に 4 名の作業員を配置し間伐作業を実施している。
- 現場で実施する主な作業は次のとおりであり、④運搬作業に時間がかかり生産性の向上への大きな課題となっている。

① 伐倒木作業：作業員にてチェーンソーを使用
② 集材作業（作業道へ伐倒木を集約）：グラップルやウインチを使用
③ 造材作業（伐倒木を枝払いし丸太に造材をする作業）：ハーベスタ及びチェーンソーを使用
④ 運搬作業（丸太運搬）：フォワーダ（木材運搬作業車）を使用

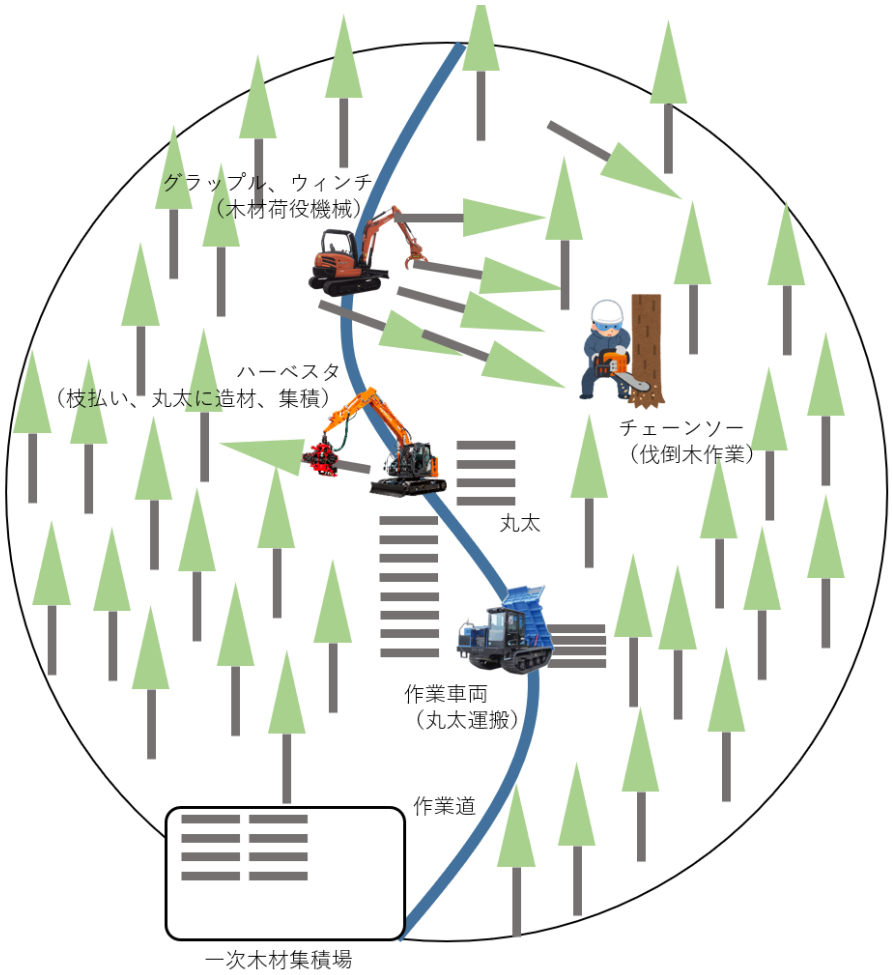


図 131　現場での作業内容概要図

(イ) 実証内容

株式会社島田木材の実際の作業現場において、遠隔操作機能を搭載した作業車両を遠隔地からローカル 5G での通信を通じて操作のうえ木材を運搬し、現場作業員の作業工数を減らす。

遠隔操作を実施するために必要な現場映像の確認には高精細カメラを利用する事から、高速な上り回線（80Mpbs 以上）が必要となること、また、キャリア 5G のエリア展開予定の目処が立っていない(2022.1.25 現在。NTT ドコモ、au、softbank の HP に掲載の 5G エリア予定にて確認)場所であること、Wi-Fi でのエリアカバーが困難な場所であること（斜面が多く、電柱もないため、電源確保、配線敷設、機器設置が困難な箇所）から、ローカル 5G を活用する。

図 132　使用した遠隔操作車両

(ウ) 実証目標

作業車の遠隔操作により、現場作業員の工数削減を明確化し生産性向上への寄与度合いを評価・実証することが目標。

(エ) 評価手法

（定量評価）

- 実証フィールドにて作業員が普段実施している作業フローを基に、必要な工数を算出する。（比較元データの作成）
- 上記作業フローを基に、作業車両の遠隔操作システムを取り入れた場合の作業フローについて整理、作成する。
- 作成した作業フローを基に、実証フィールドにて実際に作業車両の遠隔操作システムを稼働させ、実際にかかった工数を算出する。
- 遠隔操作を取り入れない場合と取り入れた場合の作業工数を比較し、工数の削減を数値でもって評価する。

（定性評価）

- 遠隔操作を行い木材等の搬出作業を実施することによる作業員の負担軽減や作業の効率化に関するヒアリングを実施し評価する。

(オ) アウトプット（定量評価面）のイメージ

遠隔操作作業車の使用の有無による工数・所要時間を明確化し、生産性向上への寄与度合いを評価・実証する。

表 77　アウトプット（定量評価側面）のイメージ

<table>
<tr><th>時間経過</th><th>作業者A</th><th>作業者B</th><th>作業者C</th></tr>
<tr><td>0:15</td><td>チェーンソーでの倒木作業
・
・
・</td><td>チェーンソーでの倒木作業
・
・
・</td><td>チェーンソーでの倒木作業
・
・
・</td></tr>
<tr><td rowspan="9">・
・
・</td><td>車両置き場からグラップルを作業道まで移動</td><td>車両置き場から作業車を作業道まで移動</td><td>車両置き場からハーベスタを作業道まで移動</td></tr>
<tr><td>グラップルで倒木を作業道まで集材
・
・
・</td><td rowspan="3">グラップル周辺での作業者Aの補助
・
・
・</td><td rowspan="3">ハーベスタにて造材作業
・
・
・</td></tr>
<tr><td>グラップルを造材積込場所まで移動</td></tr>
<tr><td>グラップルで作業車に造材を積込み</td></tr>
<tr><td>作業車で一時木材集積場へ移動</td><td>グラップルを次の造材積込場所まで移動</td><td>ハーベスタを作業道から車両置き場へ移動</td></tr>
<tr><td>雑作業（積降し補助）、休憩</td><td rowspan="2">・
・
・</td><td>グラップルで一時木材集積場へ造材を積降し</td></tr>
<tr><td>・
・
・</td><td>・
・
・</td></tr>
<tr><td>作業車で造材集約場へ移動</td><td>グラップルを次の造材積込場所まで移動</td><td rowspan="3">雑作業（一時木材集積場整理）、休憩</td></tr>
<tr><td>グラップルで作業車に造材を積込み</td><td>・　・　・</td></tr>
<tr><td>作業車で一時木材集積場へ移動</td><td>グラップルを車両置き場へ移動</td></tr>
<tr><td>8:00</td><td>・　・　・</td><td>・　・　・</td><td>・　・　・</td></tr>
<tr><td>作業工数合計</td><td>〇〇時間</td><td>〇〇時間</td><td>〇〇時間</td></tr>
</table>

- 課題「安全性向上」のための実装シナリオ・実証目標

(ア) 現状作業および課題の明確化

株式会社島田木材でも過去に遠隔操作車両の転落事故が発生しており、同様の課題を抱えている状況となっている。

林業・木材製造業労働災害防止協会のホームページに掲載されている労働災害発生状況を見ると、作業中に立木から転落した、立木のそばで倒れているのを発見された、森林調査中熊に襲われたなどの事故が発生していることがわかる。

(イ) 実証内容

株式会社島田木材の実際の作業現場において、作業現場に高精細カメラを設置し、ローカル 5G での通信を通じカメラ映像を AI システムにライブ伝送する。作業員の危険予知を AI で判定し、管理者へ通知を行う。

(ウ) 実証目標

労働災害想定パターンや安全管理パターンの基準を事前に AI 側に準備する。事前に準備したパターンと現場ライブ映像の AI による比較解析による危険有無判定が、作業員の安全性向上に寄与するか評価・実証することが目標。

(エ) 評価手法

（定量評価）

作業員の様子を高精細カメラで撮影、作業員に危険と想定される動作等を実施してもらい、AI で危険予知判定となるかの定量評価を行う。

（定性評価）

AI を用いなかった場合と AI を用いた場合の管理者への危険と想定される情報の量と認知時間について定性評価を行う。また、現場の管理監督者の負担軽減に関するヒヤリングを通じて定性評価を行う。

(オ) アウトプット（定量評価面）のイメージ

表 78　アウトプット（定量評価面）のイメージ

危険予知動作	AI 判定精度	備考
作業員のヘルメット未着用検知	○○%	10 回計測での成功割合
熊との遭遇		10 回計測での成功割合（熊を想定した検証方法は検討）
作業禁止エリアへの侵入判定		10 回計測での成功割合（熊を想定した検証方法は検討）

- 継続利用想定シナリオ

  実証実施前の実装計画の概要は下記のとおり。高精細カメラと AI を組合せた危険予知については、2022 年度中の実装、作業車両の遠隔操作は、現用の作業車の買い替えが必要となることから、実装には株式会社島田木材の実際の経営状況や計画などを十分に勘案しながら実装していくこととなる。

表 79　実装計画

内容	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度
高精細カメラと AI を組合せた危険予知	実証	実装	継続利用	継続利用
作業車両の遠隔操作	実証	作業車買替準備	実装	
L 5G 基地局の利用	実証	設置場所検討、本免許申請	継続利用	

実装の達成度評価

・高精細カメラと AI を組合せた危険予知

設定した危険予知動作それぞれの AI 判定精度について、80%達成を実用化の目標とする。

・作業車両の遠隔操作

遠隔操作作業車の使用の有無による工数・所要時間を明確化し、削減された工数の数値を基に、達成度を評価する。

4.3 実証環境

作業車両の遠隔操および高精細カメラと AI を組合せた危険予知ともに、株式会社島田木材所有の森林作業エリアである、富山県南砺市に構築した。

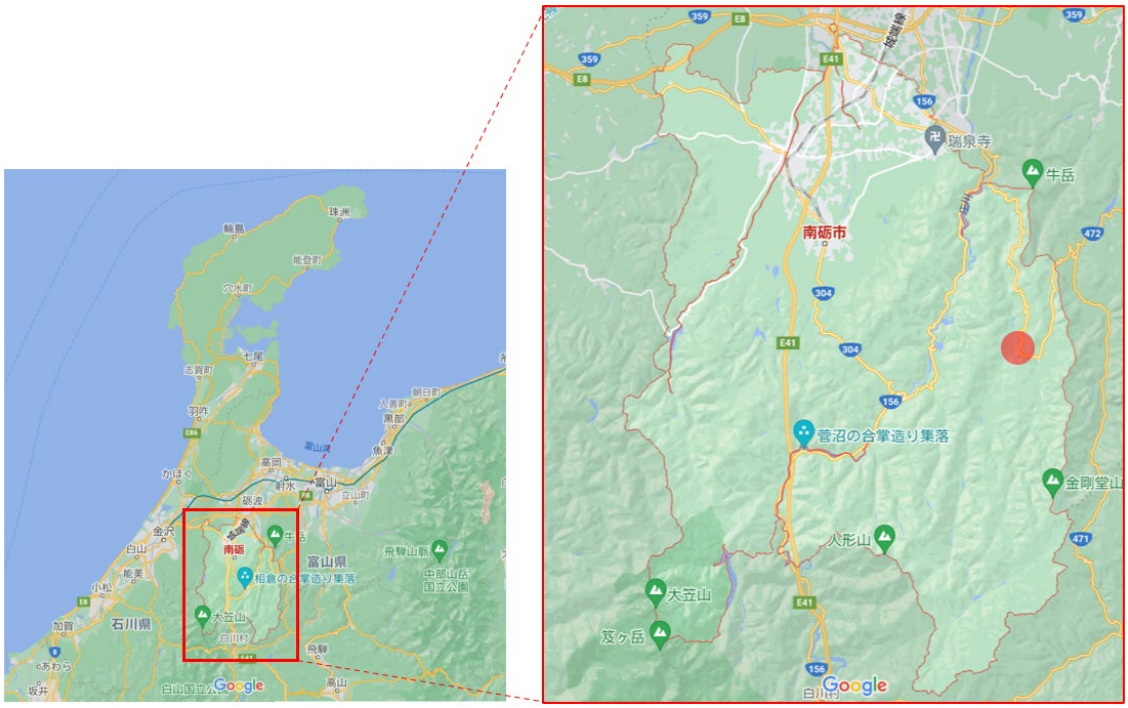


図 133　富山県南砺市実証場所周辺地図

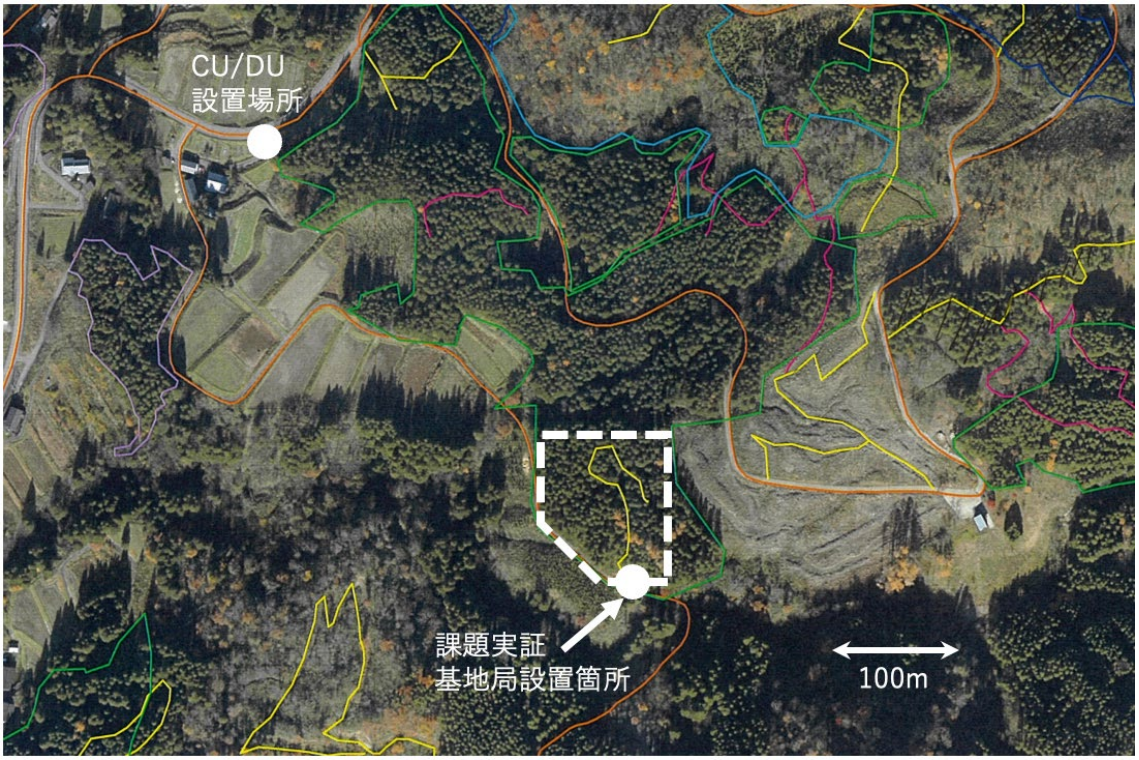


図 134　実証エリアの航空写真

図 135　実証フィールド図

図 136　実証フィールド図

4.3.1　ローカル 5G 基地局の構築

南砺市にある実証フィールドはキャリア 5G のエリア外となっており、当面エリア化の見通も立っていない。このような場所で大容量の 5G 技術を活用するためにローカル 5G を構築した。

ローカル 5G システムは sub6 対応でクラウドコア対応のシステムにて構築を行い、基地局を接続する光回線はとなみ衛星通信テレビの光回線を用いて接続を実施した。

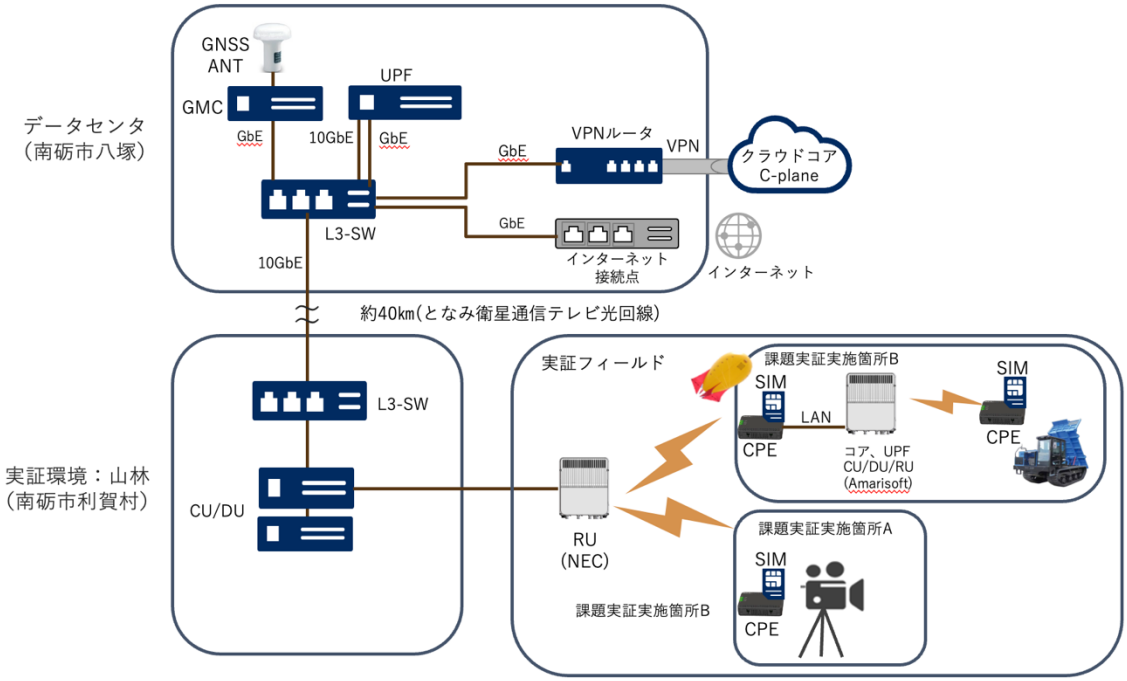


図 137　ローカル 5G 基地局構成

C-Plane：Control plane（認証・通信制御御処理部）
UPF:User Plane Function （ユーザーデータ送受信処理）
RU：Radio Unit (5G基地局・無線部)
DU：Distributed Unit (5G基地局・デジタル部)
CU：Central Unit (5G基地局・集約部)
CPE:Customer Premises Equipment（顧客構内設備）
GNSS ANT：Global Navigation Satellite System（測位衛星用アンテナ）
GMC：Grandmaster Clock（時刻同期システム）

（1） 基地局、アンテナ設置場所

図の箇所に 5G 基地局を設置し、実証フィールド内の一定範囲をローカル 5G のエリアとなるようにする

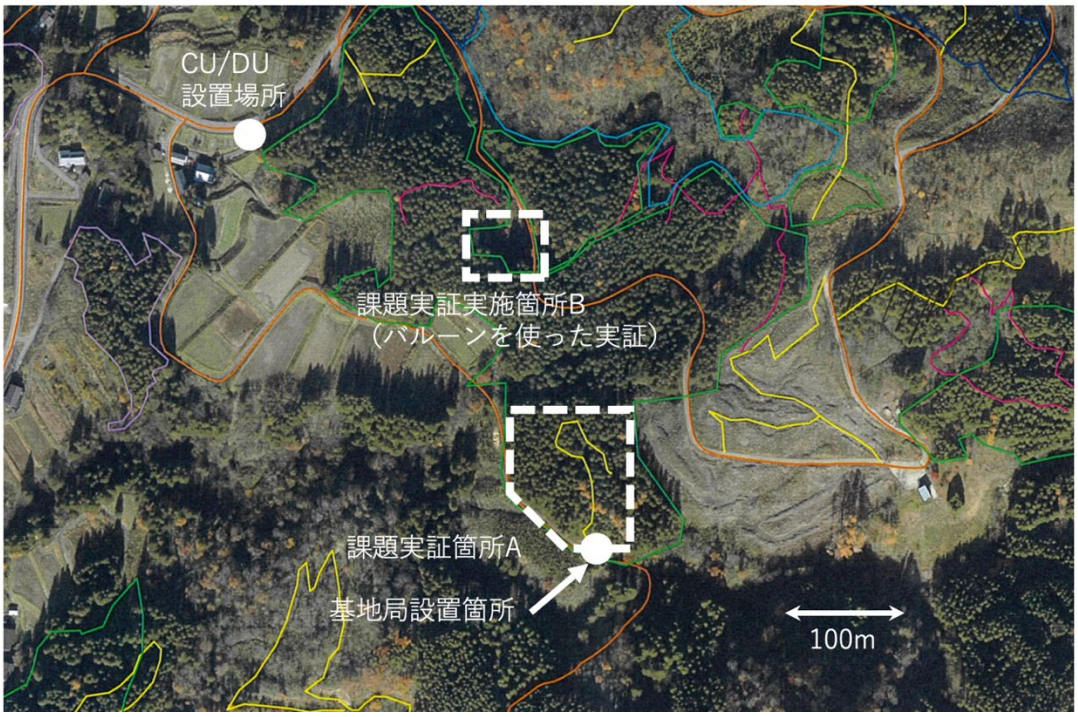


図 138　5G 基地局設備設置場所全体図

※UPF 等を設置するデータセンタは保安上の都合により詳細な設置場所の記載を省略する。

実証実施箇所 A

実証実施箇所 B

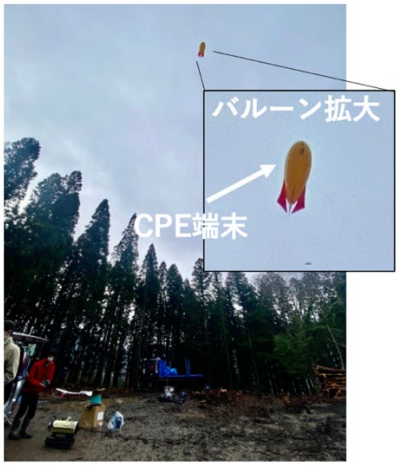


図 139　基地局、アンテナ設置図

図 140　基地局収容装置（CU/DU）等設置小屋

4.3.2 「作業車両の遠隔操作」システムの構築

作業車両に搭載した高精細カメラ映像および遠隔操作信号をローカル 5G のネットワーク経由で遠隔側に伝送し、作業員の安全を確保しつつ効率化を実現する作業車両の遠隔操作を可能にするシステムの構築を行った。

（1） 作業員の遠隔操作システム構築に必要な機器およびその仕様

- 作業員用遠隔監視システム
  - 車載高精細カメラ（前方監視用）(4K)
  - 車載カメラ（後方監視用）
  - 車載全周(360 度または、複数台の超広角)カメラ（全体監視用）
  - 車載カメラ(前下方、進行路面監視用)
  - 車載エンコーダ、デコーダ（遅延時間 200ms 以下で伝送きるもの）(カメラ付随なら不要)
  - 遠隔操縦拠点 映像ストリーミングサーバー
  - 映像表示ディスプレイ
- 作業員用遠隔操作システム
  - 車載エッジコンピュータ
  - 遠隔操縦サーバー
  - 遠隔車両情報表示タブレット
  - 遠隔操縦装置
- その他
  - L2 スイッチ

（2） 選定機器

- 作業員用遠隔監視システム
  - 車載高精細カメラ（前方監視用）(4K)　AXIS：P1378-LE
  - 車載カメラ（後方監視用）AXIS：P1378-LE
  - 車載カメラ(前下方 路面監視用) AXIS：P1378-LE
  - 車載全周(360 度または、複数台の超広角)カメラ（全体監視用）AXIS：P3717-PLE
  - 遠隔操縦拠点 映像ストリーミングサーバー MSI：GS66-11UG-1026JP
  - 映像表示ディスプレイ LG：43UN700-B、27UL850-W
- 作業員用遠隔操作システム
  - 車載エッジコンピュータ CONEXIO MS5776-JCH-I
  - 遠隔操縦サーバー マウスコンピュータ：G-TuneH5
  - 遠隔車両情報表示タブレット Apple：iPad
  - 遠隔操縦装置 Thrustmaster T.16000M FCS
- その他
  - L2 スイッチ（車載）アライドテレシス：AT-GS950/10PS
  - パワーインジェクタ（車載）YAMAHA：SWX2100-10PoE

- インバータ（車載）DENRYO：SP-1500-124A
- バッテリー（車載）Anker：PowerHouse Ⅱ 800
- 5G-CPE 端末（車載）　NEC：FG900CS

他

（３） システム構成図

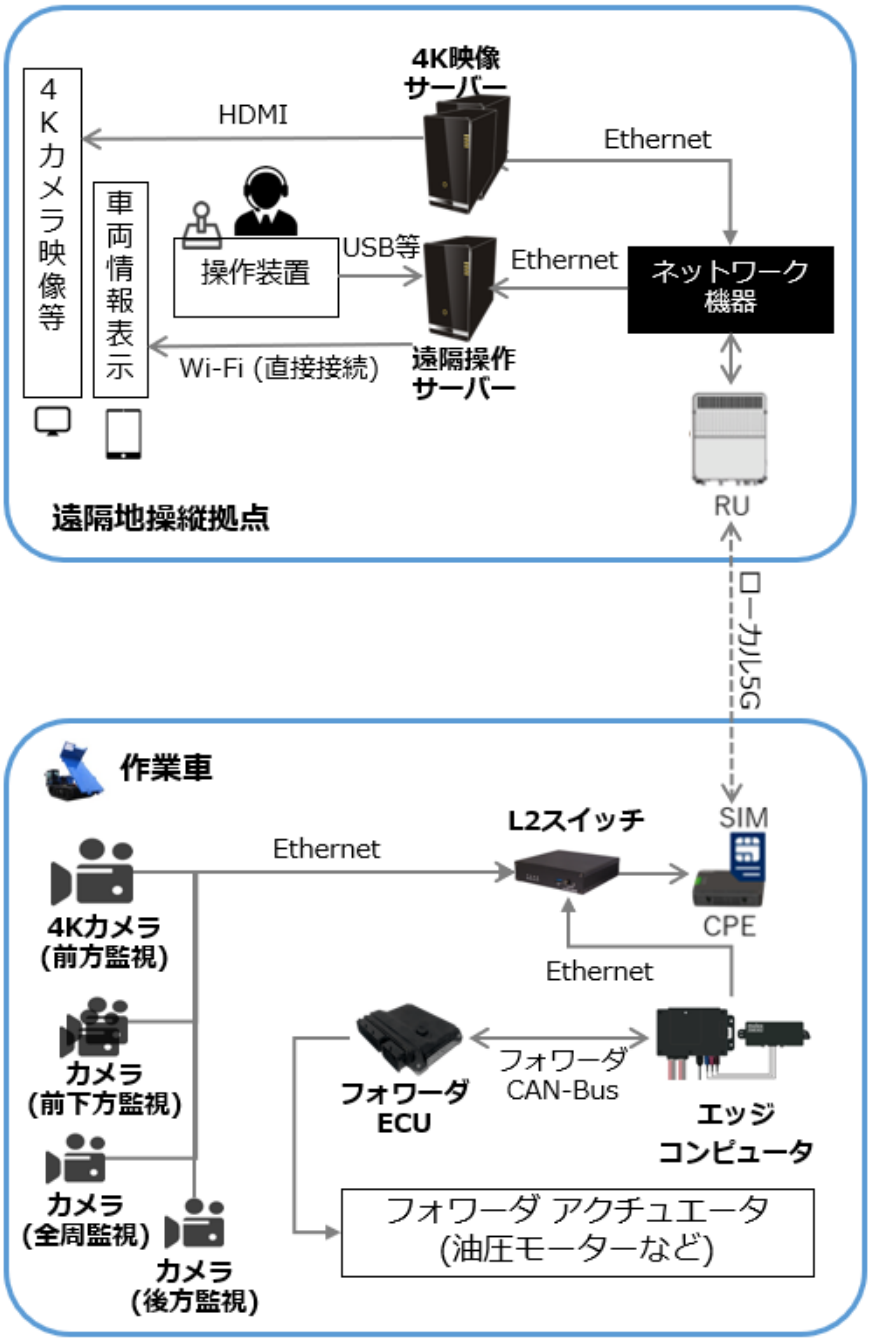


図 141　システム構成図

4.3.3 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの構築

実証フィールド内に設置された高精細カメラ映像をもとに、AI を使った危険予知を可能とするシステム構築を行う。

（1） 高精細カメラと AI を組合せた危険予知システムに必要な機器およびその仕様

- ４K カメラ
- カメラ端末（カメラの映像をエッジ AI サーバに伝送する部分。カメラに内蔵してあれば不要。）
- エッジ AI サーバ（AI システム動作、管理者への通知を実施）
  - ４K サイズの映像を AI 処理できるスペックのもの

（2） 選定機器

- ４K カメラ
  - DEPSTECH DW49-JP
- カメラ端末
  - Raspberry Pi 4 Model B 8GB RAM
- エッジ AI
  - 組立サーバー
    - CPU：AMD Ryzen 7 3700X
    - GPU：RTX3090 24GB
    - メモリ：32G(DDR4 PC4-25600)
    - ストレージ：6TB
- モバイルバッテリー
- その他
  - カメラ三脚：XXZU
  - モバイルバッテリー：Anker PowerCore
  - 5G-CPE 端末　NEC：FG900CS
  - 現地カメラ画像確認用ディスプレイ（HDMI 入力がある汎用モニタ）

（３） システム構成図

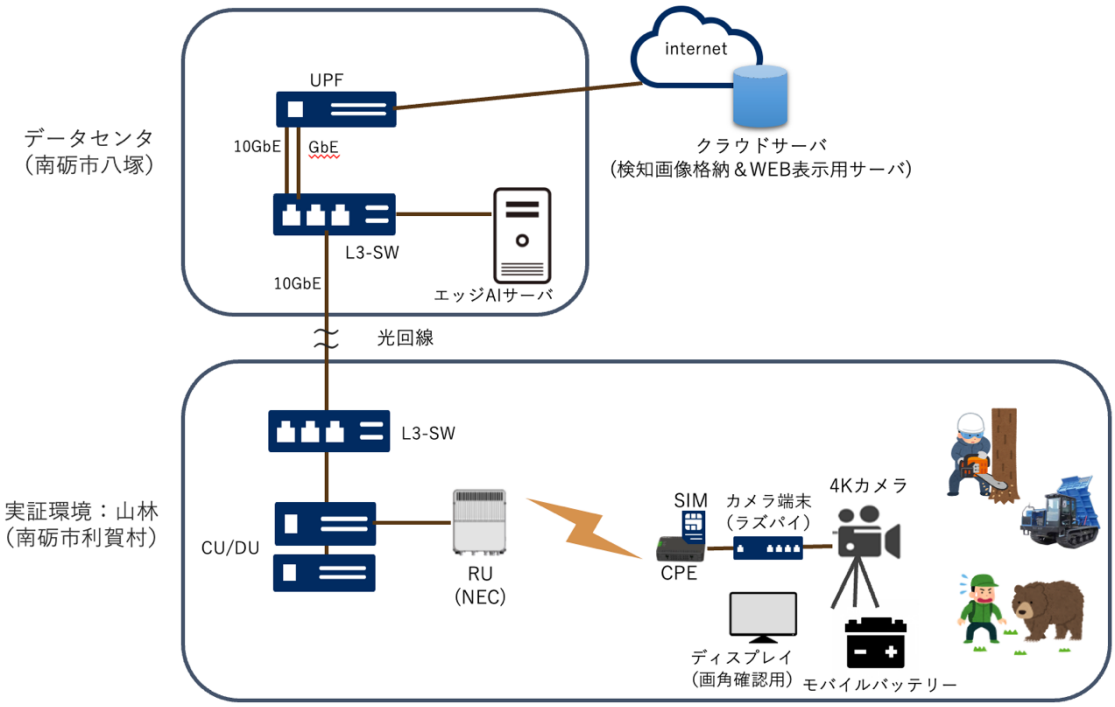


図 142　システム構成図

（４） 本実証で用いた AI システム

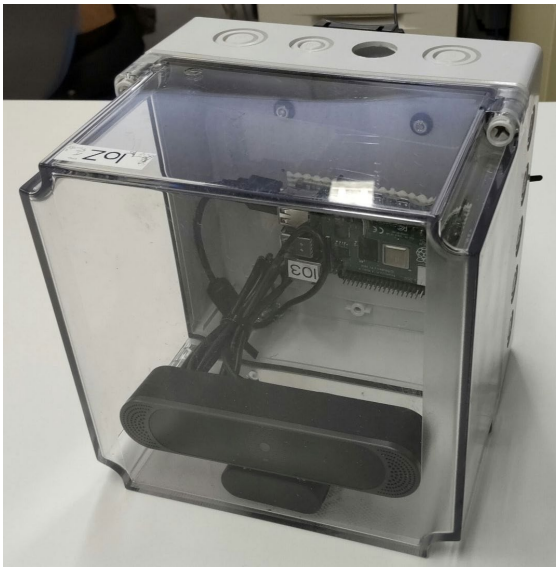


図 143　４K カメラ、カメラ端末収容ボックス

図 144　三脚に固定した図

上記ボックスに CPE 端末、バッテリー、画角確認用ディスプレイを接続するシステムを構築した。

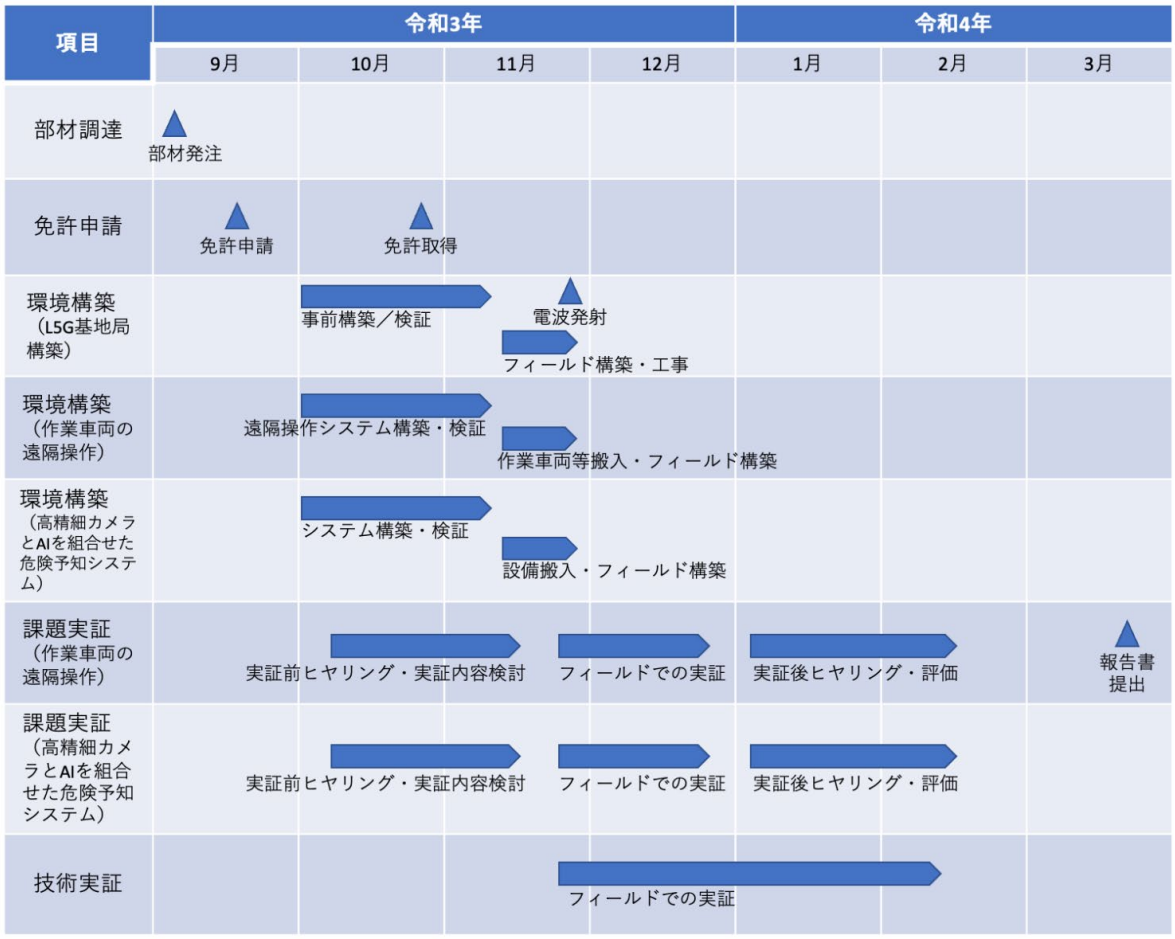
（5） AI システム仕様

- エッジ AI の役割
  - AI エッジサーバーは、カメラ機材より送られてきた画像情報を同サーバー内のファイルシステム上に保持。また、画像情報を保持すると同時に、画像内容を解析し、検知対象の画像が確認された場合にアラートメールを発信する。
  - また、アラートメールを発信すると同時に、検知した結果に関する情報を AI サーバー内のデータベースに記録する。
  - なお、AI エッジサーバー上の画像データは、ディスク容量の制限があるため、適宜削除される。
- クラウドサーバの役割
  - AI エッジサーバーにて記録された画像データ及び検知結果情報を Web ブラウザ画面上で閲覧可能にするために、情報を Fiware に蓄積する

4.3.4　スケジュール

構築開始から検証完了まで以下のスケジュールにて実施を行った。

表 80　スケジュール



4.4 実証内容

4.3 で構築した環境を使い、以下の通り実証を行う

- 「作業車両の遠隔操作」システムの実証

4.3.2 で構築したシステムを使い、作業員が遠隔操作を行うことにより、作業車両を操縦するための現場作業員が不要となり、結果として作業員の工数削減につながるかどうかの実証を行った。

- 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの実証

4.3.3 で構築したシステムを使い、高精細カメラと AI を組み合わせた危険予知システムを活用することにより、作業員の安全性が確保されるかどうかの実証を行う。なお AI の学習データは汎用性に配慮し、既存にあるモデルを利用し検証をおこなう事とする。

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

4.3 で構築した環境を使い、以下の通り効果検証を行う。

- 「作業車両の遠隔操作」システムの検証

(1) 評価・検証項目

評価検証項目は以下の通り

① 株式会社島田木材で実施している一般的な作業フローを整理し、その作業フローを基に、作業車両の遠隔操作を行った事により変化、削減される部分を反映した作業フローの作成を行った。その中で、遠隔操作を実施した場合の作業フローについて実際のフィールドを使った実証を行い、両作業フローで必要な工数を比較する事により、工数削減時間の定量評価を行った。

② 遠隔操作を行い木材等の搬出作業を実施することによる、上記の工数削減以外の視点で、作業員の負担軽減や作業の効率化に関するヒヤリングを通じて定性評価を行った。

(2) 評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り

① 実証フィールドにて作業員が普段実施している作業フローを基に、必要な工数を算出する。(比較元データの作成)

② 上記作業フローを基に、作業車両の遠隔操作システムを取り入れた場合の作業フローについて整理、作成する。

③ ②で作成した作業フローを基に、実証フィールドにて実際に作業車両の遠隔操作システムを稼働させ、実際にかかった工数を算出する。

④ 遠隔操作を取り入れない場合と取り入れた場合の作業工数を比較し、どの程度工数が削減されたかを評価検証する。

⑤ 上記作業後、遠隔操作を行い木材等の搬出作業を実施することによる作業員の負担軽減や作業の効率化に関するヒヤリングを実施し、定性評価を行う。

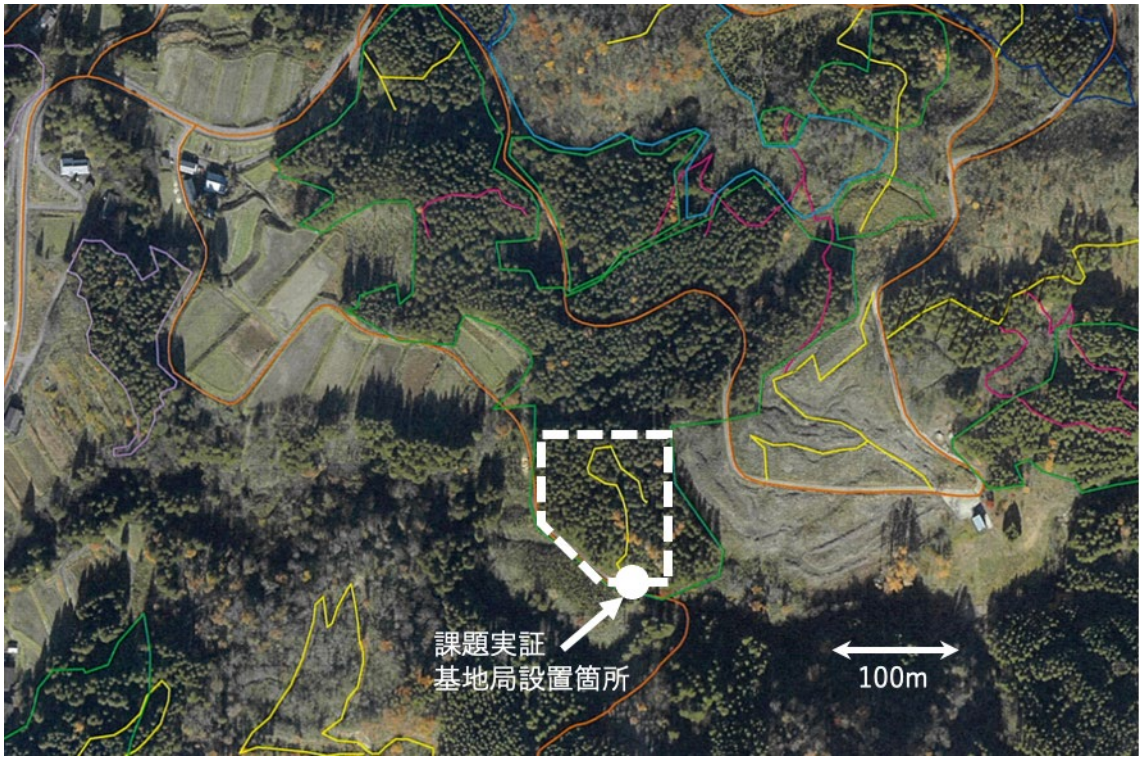


図 145　課題実証フィールド航空写真

白枠点線内が今回の実証実験における１日の作業を行うフィールドとなる。

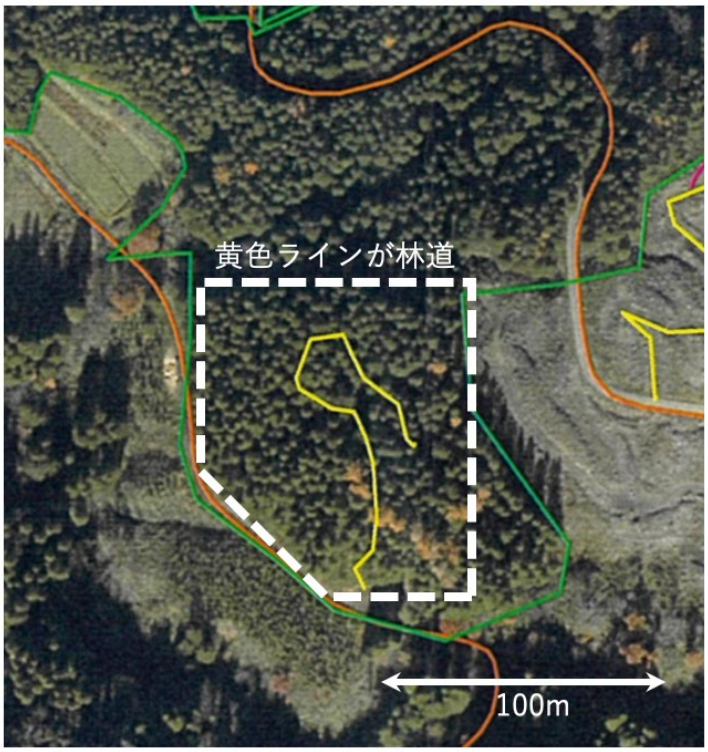


図 146　航空写真拡大図

課題実証フィールドの詳細情報は以下の通り。

＜実証フィールドの面積について＞
・間伐を実施する面積は赤枠内の 1ha
・本フィールドで間伐実施した場合に生産される木材量はおよそ 50m3
・遠隔操作をせずに 4 名で 1 日の作業で完了する面積となる。

＜林道の斜度について＞
島田木材からのヒヤリングより、林道の最大斜度は 16 度が最大、推奨は 10 度以下となっている。今回、上記を踏まえ課題実証エリアを精査し、以下斜度のフィールドを選定した。
・最大斜度は 7 度
・平均斜度 5 度

＜林道の道幅及び長さについて＞
道幅についても現状では 3 m の幅の確保が推奨されているところであるが、今回選定のフィールドは比較的古くに林道が作られたため、以下道幅となっている。
・道幅 2.5m
・全長 195m（左図の赤枠内の黄色ライン）

（3）実証結果及び考察

遠隔操作を取り入れない場合と取り入れた場合の工数比較（定量評価）

遠隔操作を取り入れた場合の工数削減効果は全体で約 315 分となった。主な差分は以下の通りである。

①作業工程を見直すことで現地に向かう人員を 1 人減らすことができた。（約 495 分減）
⇒作業車を運転する人員を遠隔地にて確保したため、現場に向かわずに必要なタイミングで作業することが可能となった。また、林道と討伐予定の木の確認を遠隔車両で行うことで工数削減が可能となった。
また、遠隔操作者について、遠隔作業時以外は、現場作業以外の業務を実施することができるため、この部分も工数として削減とした。
工数削減の観点のみならず、先述した通り、作業現場は危険に遭遇するリスクが大きいが、危険に遭遇するリスクを 1 人分排除することができるため、安全性の確保にも寄与すると考える。

②作業車による運搬作業の工数が増加した。（約 180 分増）
⇒遠隔操作環境の準備が必要となるため、追加工数が発生した。また、遠隔操作時にカメラ映像の遅延が発生していることと不慣れであることが影響して、遠隔操作車両を使用する運搬作業が遠隔操作をしない時の約 1.3 倍の時間を使ってしまう。これらの課題は遠隔操作における通信遅延の解消と作業者の習熟度を上げることで工数増加を必要最低限まで抑えることが可能であるため、今後の技術発展や社会実装が進めば効率化に寄与すると考える。

作業工程変化を以下に示す。

表 81　遠隔操作作業車両を使用しない場合の作業フロー及び工数・作業時間

遠隔操作車両導入前

作業者4人

時間経過	作業者A	作業者B（）	作業者C	作業者D
0:15	作業現場への移動	作業現場への移動	作業現場への移動	作業現場への移動
0:30				
0:45				
1:00				
1:15	グラップル１の暖気、グリスアップ	作業車の暖気、グリスアップ	グラップル2の暖気、グリスアップ	ハーベスタの暖気、グリスアップ
1:30				
1:45	林道の安全確認と伐倒木の確認	林道の安全確認と伐倒木の確認	林道の安全確認と伐倒木の確認	林道の安全確認と伐倒木の確認
2:00				
2:15	休憩時間	休憩時間	休憩時間	休憩時間
2:30	チェーンソーでの倒木作業	チェーンソーでの倒木作業	チェーンソーでの倒木作業	チェーンソーでの倒木作業
2:45				
3:00				
3:15				
3:30	車両置き場からグラップル１を作業道まで移動	グラップル1周辺での集材作業補助	ハーベスタ周辺での補助	車両置き場からハーベスタを作業道まで移動
3:45	グラップル１で倒木を作業道まで集材			ハーベスタにて造材作業
4:00				
4:15				
4:30		徒歩で一時木材集積場へ移動	徒歩で一時木材集積場へ移動	
4:45	昼食	昼食	昼食	
5:00				
5:15				昼食
5:30				
5:45	林道を移動しながらグラップル１	林道を移動しながら作業車で造材を運搬	集積場にてグラップル2にて作業者から	
6:00	で作業車に造材を積込み	※繰り返し	造材を積み下ろし	
6:15	※繰り返し		※繰り返し	ハーベスタにて造材作業
6:30				
6:45				
7:00				
7:15				
7:30				
7:45	グラップル1で集積場へ移動、停止	作業車で集積場へ移動、停止	片付け作業	ハーベスタを作業場へ移動、停止
8:00	片付け作業	片付け作業	会社への移動	片付け作業
8:15	会社への移動	会社への移動		会社への移動
8:30				
8:45				
9:00			7時間30分＋休憩75分	
合計時間	7時間45分＋休憩75分	7時間45分＋休憩75分		7時間45分＋休憩75分

表 82　遠隔操作作業車両を使用した場合の作業フロー及び工数・作業時間

遠隔操作車両導入時

3人+遠隔操作

時間経過	作業者A	作業者B	作業者C	遠隔作業者
0:15	作業現場への移動	作業現場への移動	作業現場への移動	現場作業以外の業務
0:30				
0:45				
1:00				
1:15	グラップル１の暖気、グリスアップ	作業車の暖気、グリスアップ	ハーベスタの暖気、グリスアップ グラップル２の暖気、グリスアップ	
1:30				
1:45	チェーンソーでの倒木作業	チェーンソーでの倒木作業	遠隔作業車両の起動準備作業	遠隔での作業車操作 林道の安全確認と 伐倒木の確認
2:00			チェーンソーでの倒木作業	
2:15				
2:30				休憩時間
2:45				現場作業以外の業務
3:00	休憩時間			
3:15	車両置き場からグラップル１を作業道まで移動	休憩時間	休憩時間	
3:30	グラップル１で倒木を作業道まで集材	グラップル1周辺での集材作業補助	車両置き場からハーベスタを作業道まで移動	
3:45			ハーベスタにて造材作業	昼食
4:00				
4:15				
4:30	ハーベスタの補助	ハーベスタの補助		
4:45				現場作業以外の業務
5:00	昼食	徒歩で一時木材集積場へ移動	昼食	
5:15		昼食		
5:30				
5:45				リモート操作作業準備
6:00	林道を移動しながらグラップル１		ハーベスタにて造材作業	遠隔での作業車操作
6:15	で作業車に造材を積込み	集積場にてグラップル2にて作業車から		
6:30	※繰り返し	造材を積み下ろし		
6:45		※繰り返し		
7:00				
7:15				
7:30				
7:45			ハーベスタを作業場へ移動、停止	
8:00			片付け作業	
8:15			会社への移動	
8:30				
8:45	片付け作業			
9:00	会社への移動	片付け作業		片付け作業
9:15		会社への移動	7時間45分＋休憩75分	現場作業以外の業務
9:30				8時間＋昼食1時間
9:45				
10:00	8時間30分＋休憩75分			
		8時間45分＋休憩75分		

表 83　遠隔操作を取り入れない場合と取り入れた場合の工数比較（定量評価）

【単位：分】

作業小区分	作業内容	遠隔車両なし	遠隔車両あり	削減時間
行き帰りの移動	会社と作業現場の移動時間	480	360	120
作業に伴う移動	森林内の移動時間	105	60	45
休憩時間		60	60	
昼食		240	240	0
	移動時間等　total	885	720	165
林道の安全確認と伐倒木の確認	林道の状態確認と伐倒する木の状態確認	120	45	75
重機の暖気・グリスアップ	重機の暖気とグリスアップを行う時間	120	90	30
倒木作業	森林内の木をチェーンソウにて手作業で切り倒す作業	240	240	0
片付け作業	作業機器などの片づけ作業	60	60	0
	基本作業　total	540	435	105
集材作業	倒木した木を造材して収集、運搬しやすくするように 作業道を開けながらその側に整理していく作業	60	60	0
集材作業補助	補助作業は、重機では手の届かいない或いは、 手作業のほうが効率のいい作業を行う	60	60	0
	集材作業　total	120	120	0
ハーベスタ造材	倒木した木の枝を切り、搬送するサイズにカットを行う	180	180	0
ハーベスタ補助	補助作業は、重機では手の届かいない或いは、 手作業（チェーンソウでの造材作業）のほうが効率のいい作業を行う	60	60	0
	ハーベスタ造材　total	240	240	0
			削減時間total	270
遠隔作業車両の起動、リモート操	作準備作業	0	30	-30
グラップル1での積み込み	造材を終えた木材を運び出すために作業車に積み込む作業	120	165	-45
作業車での運搬作業	木材を積んだ作業車の運搬作業	120	180	-60
グラップル2での積み下ろし	運搬を終えた作業車から木材を降ろす作業	120	165	-45
	運搬作業　total	360	540	-180
	林業現場での必要となる工数合計時間	**2145**	**2055**	90
			現場作業以外の業務	225
			遠隔車両導入により削減される工数合計時間	315

遠隔操作ありの場合の現地３名については、遠隔操作を実施した場合に現地に居なくなった１名分の作業が分配されている。

その分配によってそれぞれの現地作業員の業務量は増加となるが、１日の作業全体の合計工数で比較をすると、上記表に記載の通り、遠隔操作ありの場合３１５分の削減となる。

実証フィールドの林道の一部(約６０m)で遠隔操作あり/なしで作業速度の測定を行った。

図 147　遠隔操作の状況

表 84　作業時間の比較

	3回Ave.
	作業時間(秒)
遠隔操作あり	202
遠隔操作なし	151
比較	1.338倍

遠隔操作あり時、なし時にくらべて作業時間が約１．３３８倍となった。
そのため、遠隔操作あり時の作業車での運搬作業時間全体を１．３３倍とした。

なお、遠隔操作で発生した遅延について、上記定量評価以外に、定性評価を実施し、遅延が発生した要因とその解決可能性について以下の通り整理を行った。

表 85　課題の要因と解決策

項目	要因	解決可能性、対策・検討案
遠隔操作におけるデータ伝送の遅延	・5G 通信の電界強度が弱い場合、ネットワークパケットの大きな遅延が生じていた	・林間に最適化した 5G 通信基地局の設置 ・電界強度シミュレーションの実施による、遠隔操作が可能な範囲の事前確認の実施
	・回線状況が不安定なときなど、リアルタイム性(最大遅延時間)を常に保証できる 5G 環境の構築が現行のシステム構成では実現できていなかった	・林間に最適化した 5G 通信基地局の多数化(マイクロセル化など)、最適配置の検討 ・最大遅延時間、通信帯域を保証する 5G 通信の仕様検討 ・映像伝送に用いた UDP プロトコル伝送に最適化した 5G 伝送路のチューニングの検討
遠隔操作作業者の操作習熟度の問題	・モニタを見ながらコントローラで操作する遠隔操作についての習熟度が低く、慣れるためには、現場でのさまざまな環境での操作経験が必要。	・遠隔運転を習熟するトレーニングの実施
	・回線状況が不安定なときなどネットワーク遅延(ある程度の遅延)も見込んだ操作に慣れる必要がある。	・映像の中で自車の走行方向などを示す等、遠隔運転のしやすさを向上させる改善開発
カメラ映像から取得する視覚情報が限定的	・車両に搭乗した場合に比べて、全体の視野及び周囲の状況についての情報量が少なく、自車の位置が把握しづらい	・定性評価を基に、カメラ配置の最適化、増設の検討
	・周囲が薄暗い場合など、路面の凹凸が把握しづらく、より注意をしながら走行することが必要。	・定性評価を基に、照明機能の追加実装の検討

遠隔時の環境音が取得できない	・運転時の環境音(車両および、走行音)が聞こえず、画像のみでの運転であったため、より注意しながらの運転となった。	・環境音収集マイクの実装検討

ヒヤリングシートによる定性評価

実証実験に携わった島田木材の遠隔操作実施者及び経営層に以下の通り定性評価を行い、想定される対策について以下の通り整理を行った。

表 86　ヒヤリングシートによる定性評価

ヒヤリング項目	質問対象者	ヒヤリング結果	ヒヤリングを受け、想定される対策
作業車の遠隔操作について、現場で操作した場合と同等の作業効率を達成できているか？	遠隔操作実施オペレータ、現場作業員	・作業車の移動を遠隔操作した結果、現場にて手動で移動操作を実施した場合と比較し、移動に時間がかかる。 ・作業車の方向転換など、後進と前進を組合せた操作だと遠隔操作に慣れるまでは２倍程度の時間がかかる印象を受けた。 ・遠隔操作について、現地近辺の現場事務所などにある必要はなく本社事務所などに設置した環境でも十分使えると思う。	・実際の作業現場にて、斜度や林道のカーブ度合い、天候条件などのさまざまな状況を通して、遠隔操作作業の場数をこなし、遠隔作業に慣れてもらう事により、現場操作と同等の作業効率に近づける。
現地での直接操作と異なる点は何があるか？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・作業車が停止した場合の正確な位置が掴みにくい。 ・周囲の状況（作業側方の路面状況、作業車右側の景色）が掴みにくい。 ・作業車に搭載されている傾斜計の情報が見られない。 ・ぬかるみでのスリップで発生する際の振動や音など、作業車に乗っていれば分かる情報が掴みにくい	・作業側方の路面状況及び、作業者右側を移すため、搭載カメラ配置の最適化及びカメラ設置数の増加を検討する。 ・作業者に搭載されている計器情報を遠隔地で確認できる機能の実装

現在実装されていないが、必要な機能はあるか？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・現地の作業員が危険を感じた際に、安全性確保の観点から、強制的に遠隔作業車両を停止する機能や、遠隔操作者の判断でアラームを出す機能が必要ではないか。 ・周囲の音の情報を取れる機能（例えばキャタピラが外れた際、特有の音が発生する。これらを把握したい。また、グラップルに作業車を近づける際、作業車を止めるタイミングをグラップルのクラクションで合図している。これを確認するための音を聞きたい） ・周囲の状況をより知りたい。（作業側方の路面状況、作業車右側の景色） ・周囲の状況をモニタで確認する際、密集した樹木により周囲が暗くなる状況もあるため、照明で明るく照らす機能が欲しい。 ・現場で遠隔操作にトラブルが発生した場合、また遠隔操作での対応が難しい状況となった場合、手動操作に切り替えて現場作業が中断しないような作りとしてほしい。	・現地の作業員にて作業車の緊急停止ができる機能の追加（現場作業員に緊急停止リモコンを持たせるなど） ・作業車に異常があった場合、周囲の作業員に知らせるためのパトランプ、ホーン型スピーカーの搭載。 ・作業車両に周囲の音を拾うマイクと、遠隔操作車の声を出すためのスピーカーの搭載 ・作業側方の路面状況及び、作業者右側を移すため、搭載カメラ配置の最適化及びカメラ設置数の増加を検討する。 ・薄暗い周囲を確認するためのカメラ用照明の追加 ・遠隔操作、手動操作のモードを切替える機能の実装
現在実装されていないが、これがあるとより便利になるような機能はあるか？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・現場の作業員との連携を取るために会話出来る機能が欲しい。 ・作業車の位置情報が分かると作業現場での位置情報が確認できるため遠隔操作時に役立つと思う。 ・死角となる箇所に衝突防止センサや自動停止機能が欲しい。 ・遠隔操作で後進しやすいように、後進中に進路予想ラインをモニタ表示してほしい ・カメラが汚れた際の掃除が面倒ではないか？ ・枝等にぶつかってカメラがズレることが想定されるのでこれが分かるような機能があると便利ではないか？	・作業車周囲にいる現場作業員と、遠隔操作者がコミュニケーションをとるための機能の実装（IP を使ったトランシーバ機能などの実装） ・位置情報を把握するための GPS 機能及び、車両の方角や傾きを検知するセンサの搭載及びそれらを表示させる機能の実装 ・衝突防止センサの搭載＆自動停止機能の実装 ・カメラ映像に制御系と連動した補助線追加（イメージ：自動車の

			バックモニタの車両位置予想線） ・カメラ全面へのワイパー機能の実装 ・障害物等によってカメラが設定値からズレた際のお知らせ機能の実装
遠隔操作の良い点は何か？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・天候や季節により作業車の負担（暑さ寒さなどに伴う集中力の低下や体力の低下など）が発生しなくなる。 ・現地では一方向しか視覚的に確認できないが、遠隔操作システムだと、モニタに周囲の情報が全て表示されるので周囲の状況が把握しやすい ・遠隔操作であるため、作業車運転中に危険な状況が発生した場合でも安全性が確保され、重大事故の発生がなくなる。 ・現地に赴く必要がなく、移動時間の効率化が測れる	
遠隔操作の悪い点は何か？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・遠隔操作に慣れるまでに時間がかかる。 ・遠隔操作システムを動かす際に、作業車と操縦側の準備が必要となる	・遠隔操作に慣れるための現地トレーニング＆教育の実施 ・現地作業員やオペレータが準備できるよう、遠隔操作システム稼働マニュアルの作成

継続的に利用する際の課題は？	遠隔操作実施オペレータ、現作業員	・遠隔操作システムを導入した場合の作業フローの組直しの検討が必要 ・作業車の遠隔操作の際、遅延時間に揺らぎがあった。画質よりも遅延が少ない方が使えると思う。また、遅延時間がなるべく短い時間でかつ安定するような仕組みがあると遠隔操作システムがより使いやすくなると思う。	・遠隔操作システムを導入した場合の作業フローの構築 ・5G の電波強度をモニタ表示し、遅延が発生しそうな場合にお知らせをする機能の実装。 ・低遅延画像伝送コーデックの採用、及び伝送レートによる画質変更機能（伝送速度に応じた４K,HD の自動切替え、フレームレート変更など）の実装による、遅延発生低下の工夫について検討 ・5G での電波レベル低下に伴う遅延の場合、地域 BWA、キャリア携帯網への自動切替機能の実装を含めた遅延低下アプローチの検討
	経営者、管理者	・遠隔操作システム導入で発生するイニシャルコストの把握（L5G 基地局移設の建設コスト、遠隔操作車両購入費用など） ・導入後に発生する維持コスト（L5G サービス利用料、遠隔操作システムサービス利用料、保守費用など） ・多様な現場がある為、遠隔操作車両での稼働ができないような場所もあると想定されるため、稼働率が読みにくい。 ・遠隔操作システムがトラブルで停止した際の作業全体の停止リスク ・保険制度(車両保険で遠隔操作車両システム部分を賄えるのかどうかなど)が気になる。 ・遠隔操作システムを搭載した車両の耐用年数がどれくらいなのか気になる。	・ビジネスモデルの作成及び、L5G 展開サービスのためのパッケージ化の検討を行う ・遠隔操作が難しい場合に手動操作に切り替える機能を実装し、現場作業が中断されないような仕組みづくりを行う。 ・遠隔操作システムにトラブルが発生した場合に速やかに修繕ができるような保守サービスや体制の検討が必要。 ・保険制度の確認及び、遠隔操作システム部分の保守サービスの検討が必要。 ・遠隔操作システムの耐用年数検討が必要

その他意見など	遠隔操作実施オペレータ、現作業員、経営者、管理者	・本実証で出てきた課題はあるが、それらが払拭されれば、作業員の工数削減に寄与するためぜひ利用したいし、ICT 化が遅れている林業業界で導入できるよう期待している。 ・作業オペレータについては、会社単位で必要ではないので、遠隔操作システムを専門に実施するような業者などが出てきて場合に外部委託することも可能になると想定される。 ・今後はグラップルの遠隔操作システムも実現できれば、資材置き場にある木材の運搬などが遠隔化出来るため、更なる効率化が期待される。	

- 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの検証

（4）評価・検証項目

「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの導入により、現場作業員の危険な予兆を事前に察知し、作業管理者の負担軽減が確認できるかどうかの評価・検証を実施する。

（5）評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り

① 作業員の様子を高精細カメラで撮影、作業員に危険と想定される動作等を行なってもらい、AI で危険予知判定となるかの定量評価を行う。
② AI を用いなかった場合と AI を用いた場合の管理者への危険と想定される情報の量と認知時間について定性評価を行う。
③ 現場の管理監督者の負担軽減に関するヒヤリングを通じて定性評価を行う。
④ ②、③で実施した評価を基に、本システムを導入した場合に島田木材にて不要となるコスト（AI で実施した事を作業員が実施した場合にかかるコストなど）を算出し、費用対効果を求める。

（6）実証結果及び考察

AI 判定精度の定量評価

島田木材にて過去に発生している遠隔作業の転落事故を再発させない事、また林業・木材製造業労働災害派遣防止協会の HP に記載されている労働災害発生状況及び島田木材の経営者、現場監督者へのヒヤリングを行い、AI を用いて判断するための危険予知動作として以下の 4 項目を設定した。

・作業員のヘルメット未着用検知・・・林業業者として安全配慮義務を着実に達成するため、ヘルメットを被っていない作業者、もしくは部外者が林業現場に存在した場合、管理者、現場作業者に速やかに認知させ、注意喚起等を実施できる環境構築を狙う。

・熊との遭遇・・・現場作業で周囲の状況が把握しにくい環境の中で、作業員が熊に接触する前に管理者や現場作業者に事前に認知させ、突然背後などから襲われるリスクを低減することを狙う。

・作業禁止エリアへの侵入判定・・・作業車等が危険区域に侵入した際に管理者や現場作業者に速やかに認知させ、転落事故等の防止を狙う。

上記で設定した危険予知動作について、AI の判定ロジック及び AI 判定精度の評価基準についてそれぞれ以下のとおり設定し、実証を行った。

- AI を用いたそれぞれの危険予知動作の判定ロジックは以下の通り。

＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞

AI で人とヘルメットの矩形を検出し、 画像内の位置情報を使って装着を判定
ヘルメットが人と 50%以上重なっており、ヘルメットの位置が人矩形の上部にあるならばヘルメットを装着していると判定する。
指標で表すと 0.3≦P/H かつ b≦h（P：人とヘルメットの矩形面積、H：ヘルメットの矩形面積、h：ヘルメット矩形の縦幅 、 b：ヘルメットと人の上端の差）を満たすときである。
以下 P、H、h、b の場所を図示したものです
また誤検知防止のため、人の検出は確信度 80%以上かつ縦長長方形の場合のみ人と検知する判定とし、ヘルメットの検出は確信度 50%以上とする。

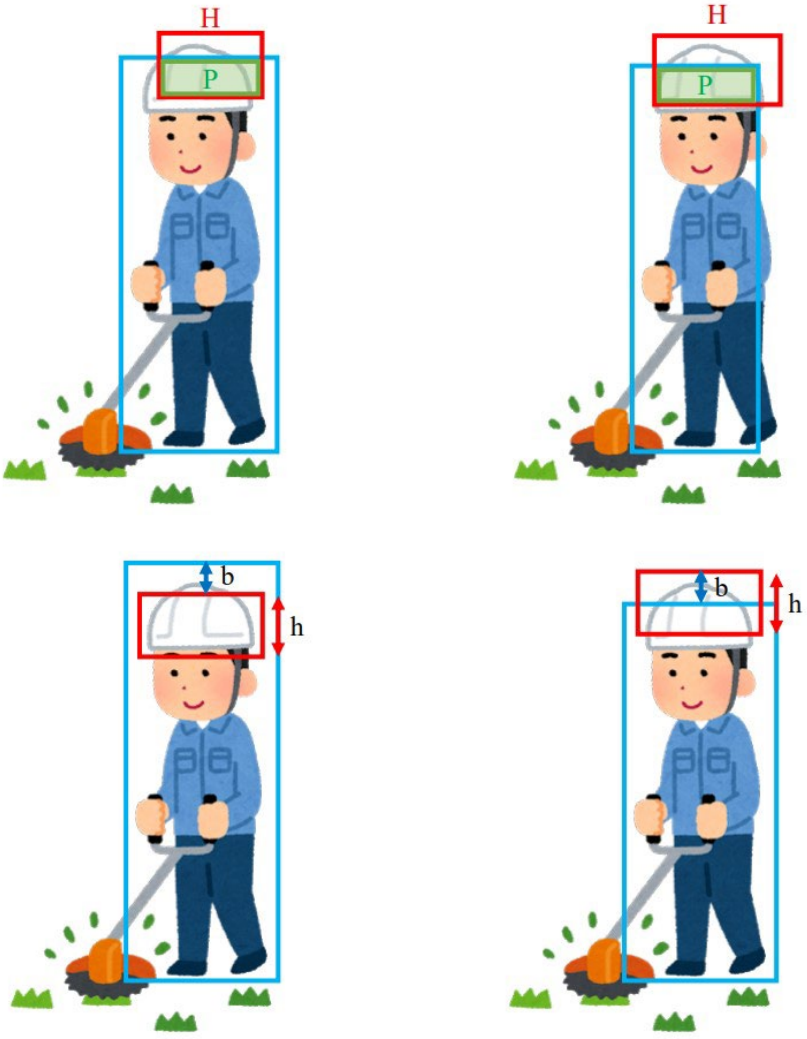


図 148　ヘルメット未着用の判断場所

図 149　ヘルメット未着用を未着用（＝正解）と判定した写真

図 150　ヘルメット着用を着用（＝正解）と判定した写真

図 151　ヘルメットをかぶっているがヘルメットが検知されず AI が誤検知した写真

尚、上記以外にもヘルメット未着用の場合に AI 誤検知（＝判定失敗）するパータンが以下２パターンある。今回の検証にてこれらのパターンが発生した場合も判定失敗として評価を行う。

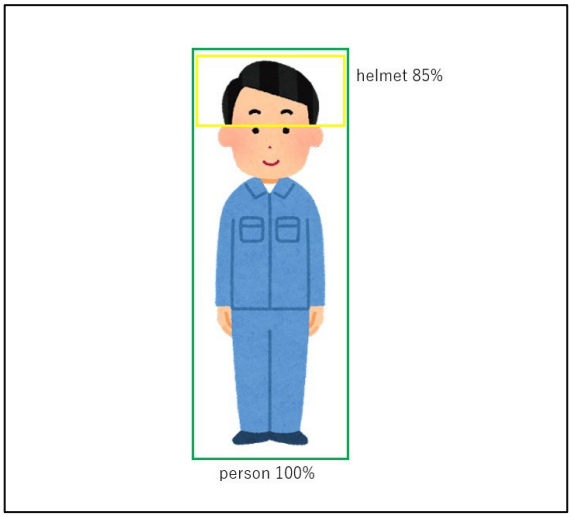


図 152　ヘルメット未着用写真をヘルメット着用と判定したイメージ（ヘルメットをかぶっていないがヘルメットが検知され AI が誤検知した写真）

図 153　AI ヘルメット未着用写真を AI が判定不可としたイメージ

＜危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定＞

作業禁止エリアをあらかじめ定義し、確信度 80%以上の作業車両の下辺が作業禁止エリアと交わった場合に侵入したと判定する。

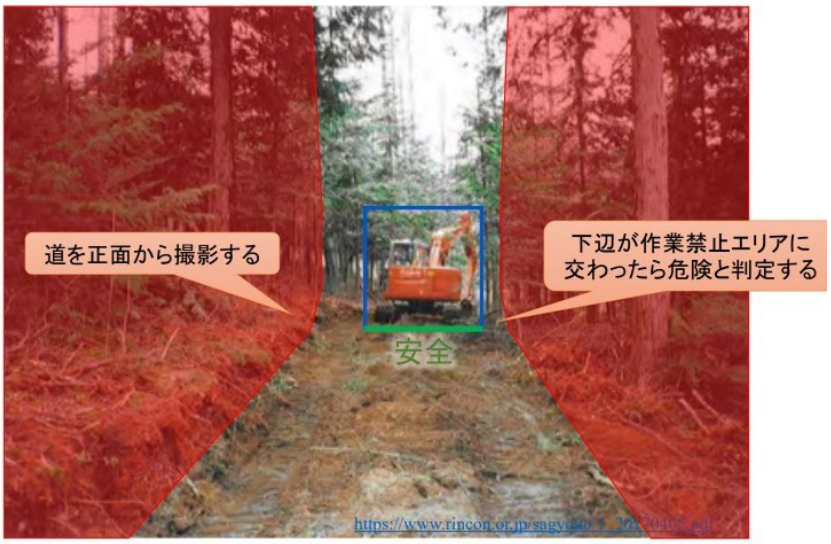


図 154　作業禁止エリアへの侵入判定

図 155　作業禁止エリアに侵入している状態を侵入（＝正解）と判定した写真

図 156　作業禁止エリアに侵入していない状態を侵入していない（＝正解）と判定した写真

＜危険予知動作：熊との遭遇＞

確信度 80%以上の熊を検知した場合に熊と遭遇したと判定

図 157　熊が存在している状態を存在（＝正解）と判定した写真

- 上記 AI 判定ロジックについての AI 判定精度の評価基準については以下の通り。

＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞

Ⅰ作業員のヘルメット未着用の判定を評価する基準
物体検出を行った画像を確認。AI で検知した denger helmet と判定された結果と目視にて確認した結果が異なっているか同じかで判定する
Ⅱ作業員のヘルメット着用と判定する基準
物体検出を行った画像を確認。AI で検知した person と helmet と判定された結果と目視にて確認した結果が異なっているか同じかで判定する

Ⅰ、Ⅱの判定結果を用いてトータルの判定精度とした

＜危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定＞
物体検出を行った画像を確認。AI で検知した枠の下辺で判定された結果と目視にて実際の作業車両が作業禁止エリアに重なっているか確認した結果が異なっているか同じかで判定し判定精度とした。検知の枠を大きくとってしまい AI は侵入していると判定したものでも、目視で侵入しているか確認し、侵入していないものが不成功となる

＜危険予知動作：熊との遭遇＞
物体検出を行った画像を確認。AI で検知した熊と判定された結果と目視にて実際熊が存在しているかを確認し結果が異なっているか同じか判定し判定精度とした

上記を踏まえ、それぞれの画質による AI での正解率を抽出し、定量評価を行った。

尚、AI 判定精度については、Recall(再現性) が 80%以上を実用化の判断基準とした。
理由は以下の通り。
・機械学習における性能指標には Recall(再現性) と Precision(適合性)がある。本システムでは危険な状態の見逃しが多いと命に係わるものであるため、安全性向上の観点から Recall(再現性)の指標を判断基準として採用した。
・Recall 意味としてはヘルメット検知を例にすると、ヘルメットを装着した作業者をＡＩ判定した場合、10 回中 2 回ヘルメットをかぶっていない判定をした場合 80%となる。
・80%設定の考え方については、100％の精度は現実的ではなない事を踏まえ、実際に危険予知通知を受け取る島田木材との相談の結果、上記三つの危険予知パターン全て一律で 80%の目標設定とした。尚、この数値については島田木材にて実際に利用を進める中で、必要に応じて変更する事も想定している。
・AI を用いなかった場合と AI を用いた場合の管理者への危険と想定される情報の量と認知時間について比較を行い、AI を用いた方が情報量が多く、通知が早ければ実用化に資すると判断する。

- 今回構築したシステムで実証を行った結果の正解率は以下の通り

今回実施した実証では、全ての危険予知動作において距離に応じてそれぞれ 13 回の AI 判定を行い、その判定結果のうち、正解の割合を正解率と定義し記載した。
尚、1 回の AI 判定において、判定精度（recall）の条件を満たしたものが危険予知動作であると判定（＝正解）している。

正解率については、80%を実用化の判断基準とした。尚、設定の考え方については、100%の精度は現実的ではない事を踏まえ、実際に危険予知通知を受け取る島田木材との相談の結果、危険予知パターン全て一律で 80%の設定とした。

今回実証を実施した結果、それぞれの危険予知動作での AI 正解率は以下の通りとなった。

＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞

表 87　距離別の AI 正解率

対象目標物との距離	カメラ方向	判定人数	カメラ画質別の正解率		
			SD	HD	4K
10m	正面	13 人	46%	77%	92%
10m	側面	13 人	46%	100%	100%
10m	背面	13 人	46%	100%	100%
15m	正面	13 人	46%	54%	92%
15m	側面	13 人	46%	69%	92%
15m	背面	13 人	54%	92%	92%
20m	正面	13 人	46%	46%	92%
20m	側面	13 人	46%	46%	92%
20m	背面	13 人	46%	53%	92%
25m	正面	13 人	46%	46%	62%
25m	側面	13 人	46%	46%	54%
25m	背面	13 人	46%	46%	85%
30m	正面	13 人	46%	46%	46%
30m	側面	13 人	46%	46%	69%
30m	背面	13 人	46%	46%	92%

表 88　作業者の露出度合い別の AI 正解率

対象目標物との距離	カメラ方向	作業者の露出度合い	判定台数	カメラ画質別の正解率		
				SD	HD	4K
15m	正面	全身	13 人	46%	54%	92%
15m	正面	上半身のみ	13 人	15%	46%	100%

表 89　周囲の明るさ別の AI 正解率

対象目標物との向きと距離	周囲の明るさ（輝度）	判定台数	カメラ画質別の正解率		
			SD	HD	4K
15m 正面	晴れ（6000 ルクス）	13 人	46%	54%	92%
15m 正面	曇り（3100 ルクス）	13 人	46%	46%	92%
15m 正面	雨天（1730 ルクス）	13 人	46%	69%	92%
15m 正面	夕方（1100 ルクス）	13 人	46%	54%	85%

＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞

表 90　ヘルメット正面撮影時の正解率

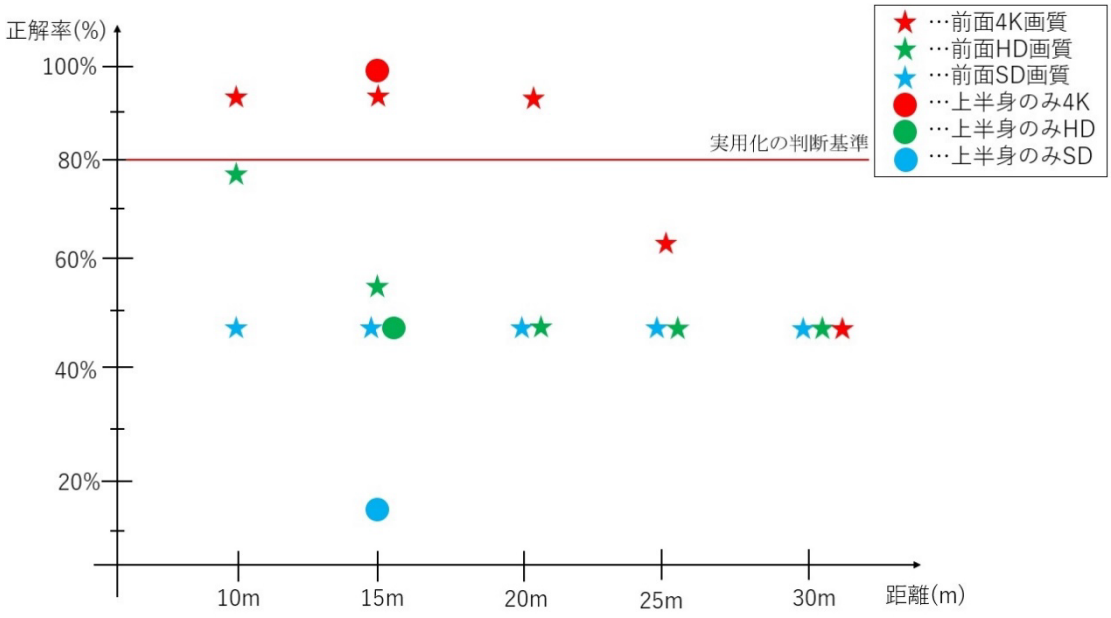


表 91　ヘルメット側面撮影時の正解率

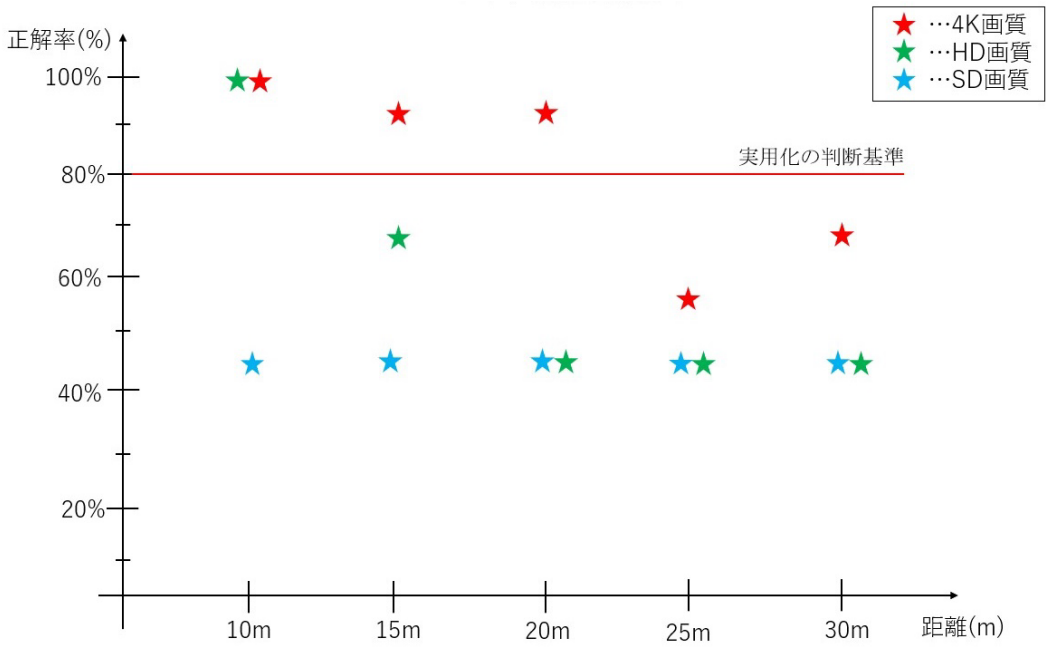


表 92　ヘルメット背面撮影時の正解率

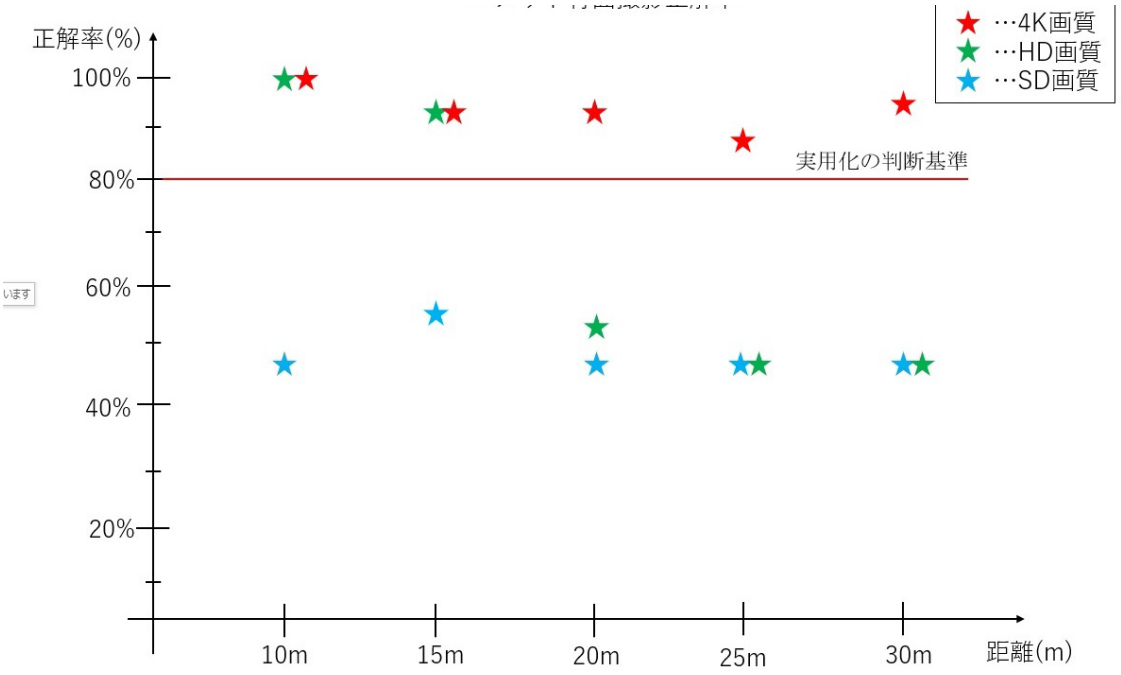
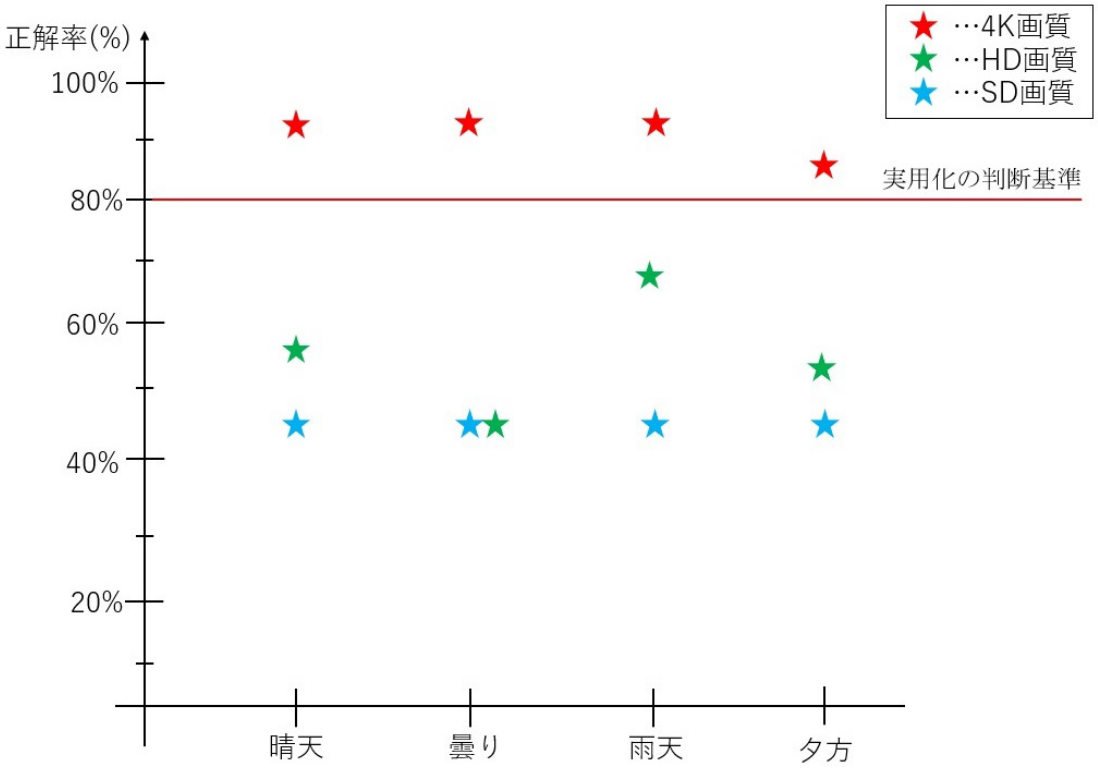


表 93　周りの明るさ別ヘルメット正解率



※対象目標物との距離は 15m で正面の状態での検証

＜危険予知動作：熊との遭遇＞

表 94　熊判定時の距離別 AI 正解率

対象目標物との距離	カメラ方向	判定数	カメラ画質別の正解率		
			SD	HD	4K
10m	正面	13 匹	100%	100%	100%
10m	側面	13 匹	100%	100%	100%
10m	背面	13 匹	100%	100%	100%
15m	正面	13 匹	100%	100%	100%
15m	側面	13 匹	100%	100%	100%
15m	背面	13 匹	100%	100%	100%
20m	正面	13 匹	100%	100%	100%
20m	側面	13 匹	100%	100%	100%
20m	背面	13 匹	100%	100%	100%
25m	正面	13 匹	100%	100%	100%
25m	側面	13 匹	0%	0%	0%
25m	背面	13 匹	100%	100%	100%
30m	正面	13 匹	69%	77%	85%
30m	側面	13 匹	0%	0%	0%
30m	背面	13 匹	77%	85%	85%

表 95　露出度合い別の AI 正解率

対象目標物との距離	カメラ方向	露出度合い	判定台数	カメラ画質別の正解率		
				SD	HD	4K
15m	正面	全身	13 匹	100%	100%	100%
15m	正面	上半身のみ	13 匹	100%	100%	100%

表 96　熊正面撮影時の正解率

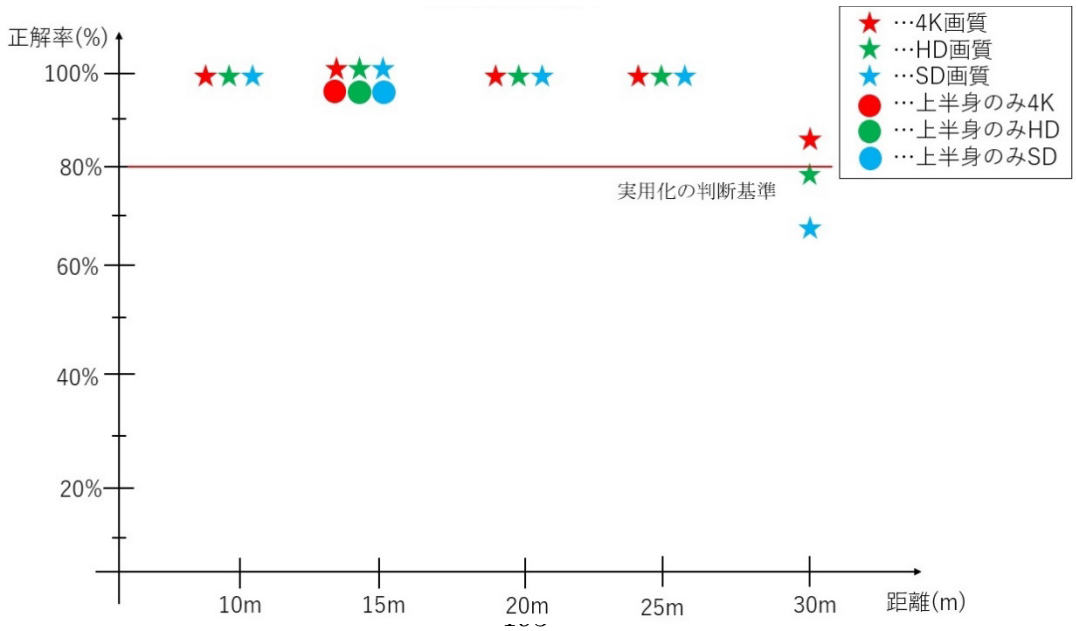


表 97　熊側面撮影時の正解率

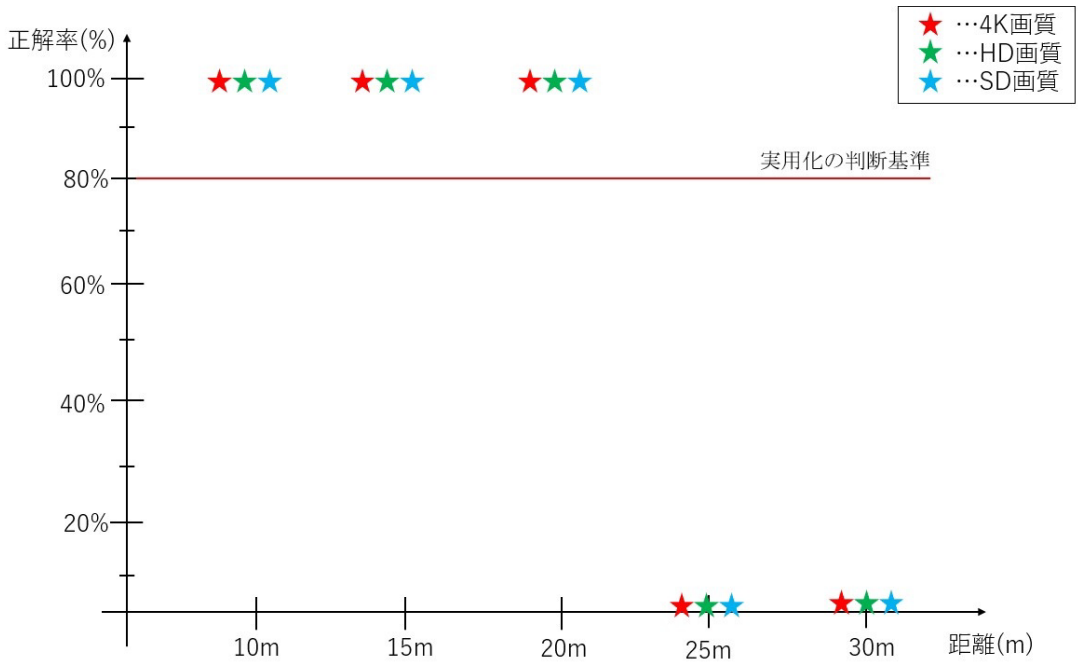
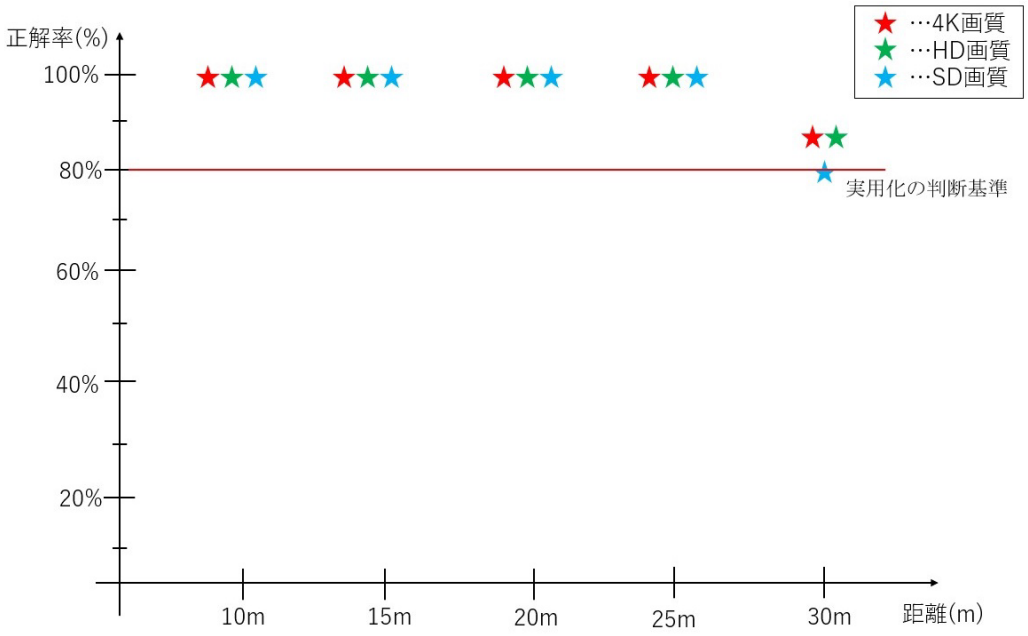


表 98　熊背面撮影時の正解率



＜危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定＞

表 99　距離別作業禁止エリアへの侵入判定正解率

対象目標物との距離	カメラ方向	判定台数	カメラ画質別の正解率		
			SD	HD	4K
10m	正面	13 台	100%	100%	100%
10m	側面	13 台	100%	100%	100%
20m	正面	13 台	100%	100%	100%
20m	側面	13 台	100%	100%	100%
30m	正面	13 台	100%	100%	100%
30m	側面	13 台	100%	100%	100%
40m	正面	13 台	100%	100%	100%
40m	側面	13 台	100%	100%	100%
50m	正面	13 台	100%	100%	100%
50m	側面	13 台	100%	100%	100%

表 100　作業者正面撮影時の正解率

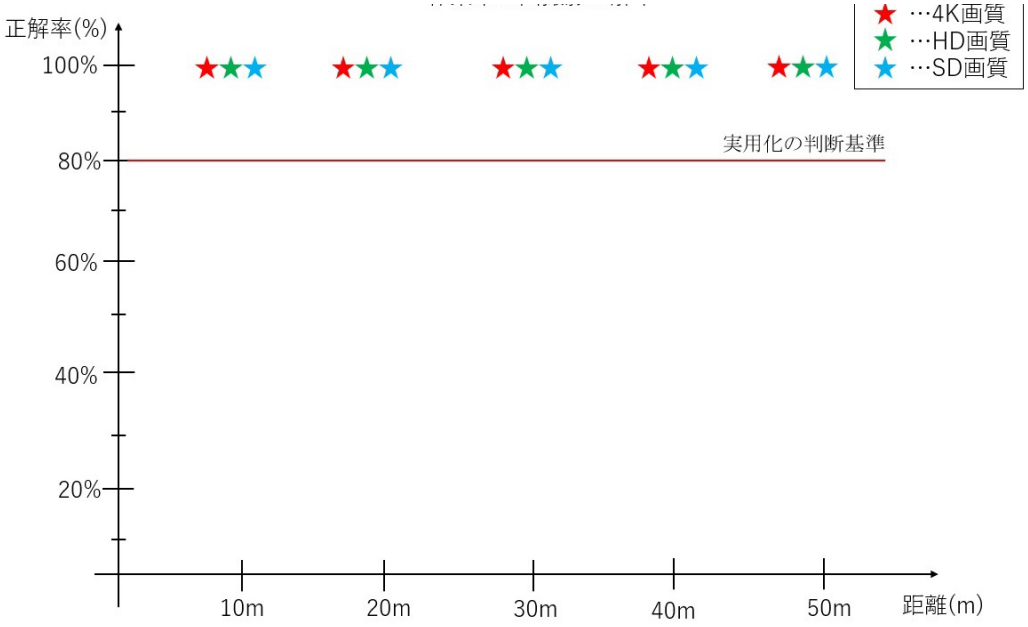
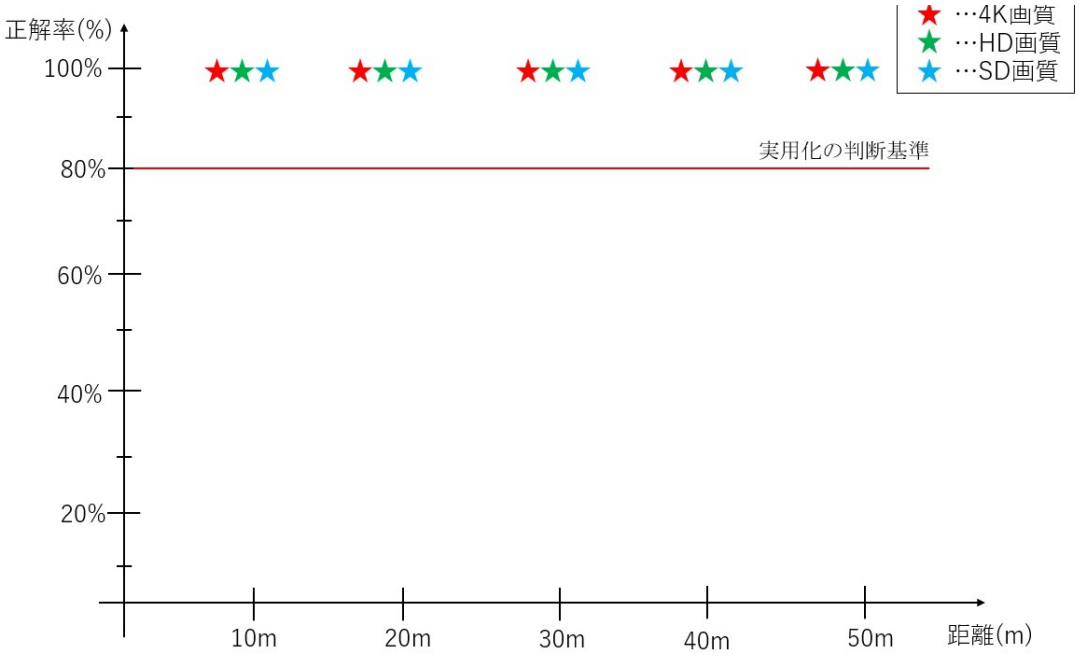


表 101　作業車両側面撮影時の正解率



AI 判定精度の定量評価について、上記検証結果、今回実証を行った精細カメラと AI を組合せた危険予知システムの評価は以下の通りとなった。

カメラ画質４K の場合の正解率が 80%以上となる距離は以下の通りとなった。
＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞
正面撮影 20m
側面撮影 20m
背面撮影 30m
＜危険予知動作：熊との遭遇＞
正面撮影 30m
側面撮影 20m
背面撮影 30m
＜危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定＞
正面撮影 50m
側面撮影 50m

上記より、
作業員のヘルメット未着用検知では、カメラ距離が 20m 以内であれば、4K カメラで 80%の正解率を達成できる事が実証された。
尚、周囲の照度を変化させた環境でも検証を実施したが、夕方想定の照度（1100 ルクス）であっても問題なく動作することが実証された。
また HD、SD カメラを用いた場合だと、80%の判定精度が達成できないことから、本システムの動作には 4K カメラが必須となる。

熊との遭遇検知では、カメラ距離が 20m 以内であれば、80%の正解率を達成できる事が実証された。また、熊の下半身を隠しての実証も行ったが、ＡＩ判定結果に変化は認められなかった。

作業禁止エリアへの侵入判定では、カメラ距離が 50m 以内であれば 80%の正解率を達成できる事が実証された。

上記結果を踏まえ、対象物との距離が 20m 以下となるようにカメラの配置を行えば、期待された危険予知を行うことが可能である。

尚、今回の実証結果の考察について以下に記す。

作業員のヘルメット未着用検知については、カメラとの距離が遠くなるにつれ人とヘルメットの大きさが小さくなる事が原因で AI 検知できなくなっている場合が多い形となった。特にヘルメットについては背景などと同化してしまうなどの原因で特に検知ができなくなる傾向があった。また、SD 画質、HD 画質については画素数が少ないことにより、４K 画

質よりも近い距離で AI 判定ができなくなる傾向が顕著であった。
この部分の精度を向上させるためには、4 K 画質だけでは限界がある事から、人を検知した後、光学ズームなどで対象物を拡大するなどの仕組みが考えられる。

熊との遭遇検知では、向いている方向によって正解率に変化があった。特に熊の側面の検知率が他と比較して低い状況となっており、原因については熊側面の学習データが少ない可能性があると推察している。
この部分については、利用していく中で熊の画像データが収集できれば、学習データとして利用し、正解率向上を図る必要があると考える

作業車禁止エリアの侵入判定については、作業員と比較して作業車両が非常に大きなサイズである事から、今回測定したカメラとの距離を 50m としても正解率が低下することはなく、まだ余裕があると想定される。

次ページ以降に、項目別の個別正答率の結果を記載する。

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 正面

表 102　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			
ヘルメット装着写真 2 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	77%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 側面

表 103　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 2 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 7 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	100%	100%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 背面

表 104　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 2 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 7 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	100%	100%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面

表 105　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目		○	
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	54%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 側面

表 106　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目		○	
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	69%	92%

AI 解析画像

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知の実証結果

対象目標物との距離 15m

カメラ方向 背面

表 107　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 2 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 7 枚目	○		
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	54%	92%	92%

AI 危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 正面

表 108　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 側面

表 109 正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 背面

表 110　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	54%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 正面

表 111　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			
ヘルメット装着写真 3 枚目			
ヘルメット装着写真 4 枚目			
ヘルメット装着写真 5 枚目			
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	62%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 側面

表 112　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			
ヘルメット装着写真 2 枚目			
ヘルメット装着写真 3 枚目			
ヘルメット装着写真 4 枚目			
ヘルメット装着写真 5 枚目			
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	54%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 背面

表 113　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	85%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 正面

表 114　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			
ヘルメット装着写真 2 枚目			
ヘルメット装着写真 3 枚目			
ヘルメット装着写真 4 枚目			
ヘルメット装着写真 5 枚目			
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	46%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 側面

表 115　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			
ヘルメット装着写真 5 枚目			
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	69%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 背面

表 116　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面
作業者の露出度合い:上半身のみ

表 117　正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目		○	○
正答率	15%	46%	100%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面
周囲の明るさ（輝度） **曇り(3100 ルクス)**

表 118 正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目			○
ヘルメット装着写真 6 枚目			
ヘルメット装着写真 7 枚目			○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	46%	92%

危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知**の実証結果**

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面
周囲の明るさ（輝度） **雨天（1730 ルクス）**

表 119 正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			
ヘルメット装着写真 2 枚目			○
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目		○	○
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	69%	92%

険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知の実証結果

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面
周囲の明るさ（輝度） 夕方（1100 ルクス）

表 120 正解率

	SD	HD	4K
ヘルメット装着写真 1 枚目			○
ヘルメット装着写真 2 枚目			
ヘルメット装着写真 3 枚目			○
ヘルメット装着写真 4 枚目			○
ヘルメット装着写真 5 枚目		○	○
ヘルメット装着写真 6 枚目			○
ヘルメット装着写真 7 枚目			
ヘルメット未装着写真 1 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 2 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 3 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 4 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 5 枚目	○	○	○
ヘルメット未装着写真 6 枚目	○	○	○
正答率	46%	54%	85%

AI 解析画像
危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 正面

個別正解率

表 121　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 側面

個別正解率

表 122　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

AI 解析画像
危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 背面

表 123　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面

表 124　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 側面

表 125　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 背面

表 126　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 正面

表 127　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 側面

表 128　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 背面

表 129　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 正面

表 130　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 側面

表 131　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目			
写真 2 枚目			
写真 3 枚目			
写真 4 枚目			
写真 5 枚目			
写真 6 枚目			
写真 7 枚目			
写真 8 枚目			
写真 9 枚目			
写真 10 枚目			
写真 11 枚目			
写真 12 枚目			
写真 13 枚目			
正答率	0%	0%	0%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 25m
カメラ方向 背面

表 132　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 正面

表 133　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目			○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目			
写真 12 枚目		○	○
写真 13 枚目			
正答率	69%	77%	85%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 側面

表 134　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目			
写真 2 枚目			
写真 3 枚目			
写真 4 枚目			
写真 5 枚目			
写真 6 枚目			
写真 7 枚目			
写真 8 枚目			
写真 9 枚目			
写真 10 枚目			
写真 11 枚目			
写真 12 枚目			
写真 13 枚目			
正答率	0%	0%	0%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 背面

表 135　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目		○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目		○	
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○		○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目			
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	77%	85%	85%

危険予知動作：熊との遭遇

対象目標物との距離 15m
カメラ方向 正面
作業者の露出度合い:上半身のみ

表 136　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 正面

表 137　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 10m
カメラ方向 側面

表 138　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 正面

表 139　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 20m
カメラ方向 側面

表 140　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 正面

表 141　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 30m
カメラ方向 側面

表 142　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 40m
カメラ方向 正面

表 143　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 40m
カメラ方向 側面

表 144　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 50m
カメラ方向 正面

表 145　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定**の実証結果**

対象目標物との距離 50m
カメラ方向 側面

表 146　正解率

	SD	HD	4K
写真 1 枚目	○	○	○
写真 2 枚目	○	○	○
写真 3 枚目	○	○	○
写真 4 枚目	○	○	○
写真 5 枚目	○	○	○
写真 6 枚目	○	○	○
写真 7 枚目	○	○	○
写真 8 枚目	○	○	○
写真 9 枚目	○	○	○
写真 10 枚目	○	○	○
写真 11 枚目	○	○	○
写真 12 枚目	○	○	○
写真 13 枚目	○	○	○
正答率	100%	100%	100%

AI 危険予知を実施した場合としていない場合の情報到達及び通知速度の比較（定性評価）

AI 危険予知システムについて、AI を用いなかった場合と AI を用いた場合の管理者への危険と想定される情報量と認知時間について以下の通り定性評価をおこなった。

尚、本システムからの通知手段について、島田木材との相談の結果、すでに会社で所有しているメールアドレスへの通知を行う方式とした。会社ですでに保有している PC 端末やスマートフォンを活用する事により、追加投資なしで即時に通知を確認できる事がその理由である。

上記を踏まえ、AI が危険であると判定した場合、管理者、現場作業員に対してメールによるプッシュ通知を行ない、これらの通知について、AI 危険予知を実施していない場合と比較し、どの程度通知速度に差があるかの比較を実施した。

表 147　AI 危険予知を実施した場合としていない場合の情報到達及び通知速度の比較

危険予知動作	情報到達※１		通知速度※２	
	AI あり	AI なし	AI　あり	AI なし
作業員のヘルメット未着用検知	○	×	即時	×
熊との遭遇	○	△	即時	他作業員による電話連絡。気づくスピードにより変化（また、作業に集中しているなど気づかない可能性もある）
作業禁止エリアへの侵入判定	○	△	即時	

※１　情報伝達については、AI ありの場合は管理者に対してメールによって伝達される事を指し、AI なしの場合は、管理者に対して現場作業員からの電話連絡等によって伝達される事を指す。

※２　情報速度については、AI ありの場合は危険予知動作が行われてから管理者へメールが届いた時間、AI なしの場合は、現場作業員からの電話連絡等によって管理者の電話に着信された時間を指す。

○・・・管理者に情報が到達される
△・・・状況によっては管理者に到達されない場合がある
×・・・管理者に情報が到達されない。

定性評価の結果、AI 危険予知システムを利用した場合、管理者へ即時で通知が届き、管理者が通知された内容を確認した上で、現場でどのような危険動作が行われたのか即時に認知でき、救急車の手配や現場作業員への連絡等を迅速に行う事が可能となることが実証さ

れた。
これにより、通知を受けた管理者が必要に応じて現場作業員へ連絡を行う事が可能となり、安全性向上に寄与できるシステムであると評価できる。
ただし、AI の判定精度による誤報も即時通知されてしまう事から、管理者や現場作業員での都度の確認が負担となってしまうという課題も判明した。
この課題を解決するために、AI 判定精度向上が求められる。AI 精度向上策として、学習データの収集及びカメラ複数台設置等により AI 精度向上を図る必要がある。
また、誤報を減らす観点から、本システムの運用を継続する中で AI 判定精度及び正解率基準のチューニングを実施し、管理者の手間と精度のバランスを見極めていく。
さらに、通知手段が現在メールアドレスのみとなっているが、メール障害が発生した場合を想定し、LINE などを用いた複数の通知手段確保も検討する。

経営者、管理者、現場作業員へのヒヤリングによる定性評価
実証実験に携わった島田木材の現場作業者及び経営層に以下の通り定性評価を行い、想定される対策について以下の通り整理を行った。

表 148　経営者、管理者、現場作業員へのヒヤリングによる定性評価

ヒヤリング項目	質問対象者	ヒヤリング結果	ヒヤリングを受け、想定される対策
AI 危険予知の実証を通して、実施しない場合と比較し、現場の安全性は向上すると感じるか？	経営者、管理者	現在携帯電波が届いていない環境での作業と比較し、AI 危険予知システムの導入により、安全性は向上すると感じている。	—
AI 危険予知で対応して欲しい項目はあるか？	経営者、管理者	尚、危険予知に関しては、ヘルメット着脱有無、熊検知、作業車の侵入検知だけでなく、倒木による作業員の事故判定や、重機横転等の判定なども実装してもらえるとより良いシステムになると思う。	倒木による事故判定や重機転倒判定については、学習データをベースにした AI の機能実装が必要
現地作業員として、現地に、作業現場を確認するためのカメラが設置される事について意見はあるか？	現場作業員	今回構築のシステムは、AI サーバにのみ映像情報が送られ、人間が見ることはないが、現地の作業員としては、作業の様子を第 3 者に見られたりしているのではないか？という心理的な抵抗がある	現地作業員に対して、プライバシーに配慮する旨の周知、理解が必要。
現地にてカメラ設置する際の準備は負担となるか？	現場作業員	雑に扱っても耐えられるようにして欲しい。	機器一式をワンボックスに固定して格納し、衝撃性、運搬性を向上するように工夫する

現在実装されていないが、これがあるとより便利になるような機能はあるか？	経営者、管理者 現場作業員	・現地の 4K 映像を会社で見られる仕組みと、コミュニケーションがとれる仕組みが欲しい。 ・危険を予知した場合、現地にて作業員が分かるような仕組みが欲しい	・映像配信機能の実装の検討、マイク＆スピーカーの実装の検討 ・パトランプ、スピーカー設置の検討 ・プライバシー配慮との兼ね合いが必要（企業のポリシーに準ずる。）
継続的に利用する際の課題は？	現場作業員	・準備する時間が必要となるため、現在実施している作業に追加される時間が知りたい ・カメラ設置においての教育が必要 ・昼食時の間、ヘルメット着脱するため、その間は AI 検知を無効にしてほしい	・設置、撤去の運用マニュアル作成してほしい ・昼食時にカメラに蓋をする、昼食時間は検知無効にするような検討が必要。
	経営者、管理者	・カメラ設置後に、危険箇所の範囲指定を管理者で実施したい。 ・維持コストを知りたい（L5G 利用料、遠隔操作サービス利用料、保守費用など	・簡便な L5G 展開サービスのためのパッケージ化が必要 ・5G 構築が難しい場合の地域 BWA、キャリア携帯網の活用を想定したチューニングの実施（カメラ映像を HD にするなど。）
その他意見など	経営者、管理者	・普段、携帯電波が届いていない環境での現場作業が多いが、インターネットが使えないと IoT 化は出来ない。本実証以外の携帯電波不感地帯でも L5G などのインフラ構築が展開される事を期待したい。	インターネットに接続される環境があれば、スマホ等を使った現場の画像データ等の送信も可能になることから、今回の実証に限らず、将来の IoT を活用したスマート林業に対応するための基礎インフラとしての活用も期待されている事がわかった。

4.4.1.2 機能検証

4.3 で構築した環境を使い、以下の通り機能検証を行う。

- 「作業車両の遠隔操作」システムの検証

（1）評価・検証項目

作業車両を問題なく遠隔操作できるための通信速度、遅延時間、カメラ性能を計測し、遠隔操作システムに必要な機能要件を確定するとともに、遠隔操作システムを搭載するために必要な作業車両の駆動方式、制御方式などの機能要件を確定するための評価検証を行う。

（2）評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り実施した。

① 作業車両を遠隔から問題なく操作可能な回線速度を検証し、最低限の通信帯域について、机上での計算により検証を行う。
② 作業車両の遠隔操作が可能な通信エリアについて、技術実証にて計測した電波計測結果を元に机上での計算により検証を行う。
③ 作業車両の遠隔操作を通じて、スムーズに操作する事が可能な現場映像のリアルタイム性について、最低限担保すべき遅延時間の定性評価を行う。
④ 映像のカメラ性能について、遠隔操作が可能な画像解像度について複数の画質で検証を行い、定性評価を行う。
⑤ 作業現場に合わせて遠隔操作システムを問題なく搭載が可能な車両の駆動方式、制御方式について、株式会社島田木材（作業員）へのヒヤリングおよび机上検討により検証を行う。

(3) 実証結果及び考察

① 作業車両を遠隔から問題なく操作可能な回線速度について

今回のシステムでは合計 4 台のカメラを利用した。カメラ画像を伝送するために必要な回線速度は以下の通り。尚、遠隔制御システムで利用する通信帯域は 150kbps となるため、0.2Mbps として試算した。

表 149　必要な通信回線速度

カメラ映像伝送帯域 システムコントロール帯域	回線速度	備考
前方カメラ映像（4K 画質 30fps）	20Mbps	
前下方カメラ映像（HD 画質 30fps）	5Mbps	
後方カメラ映像（HD 画質 30fps）	5Mbps	
全周カメラ映像（HD 画質 30fps）	10Mbps	HD 画質×左右 2 方向
システムコントロール帯域	0.2Mbps	
合計	40.2Mbps	

上記より、作業車両の遠隔操作システムを動かすために必要な最低限の通信回線速度は 40.2Mbps となる。

② 作業車両の遠隔操作システムが動作可能な通信エリアについて

今回、以下フィールド（下図の白枠部分）にて作業車両の遠隔操作システムの課題実証を実施した

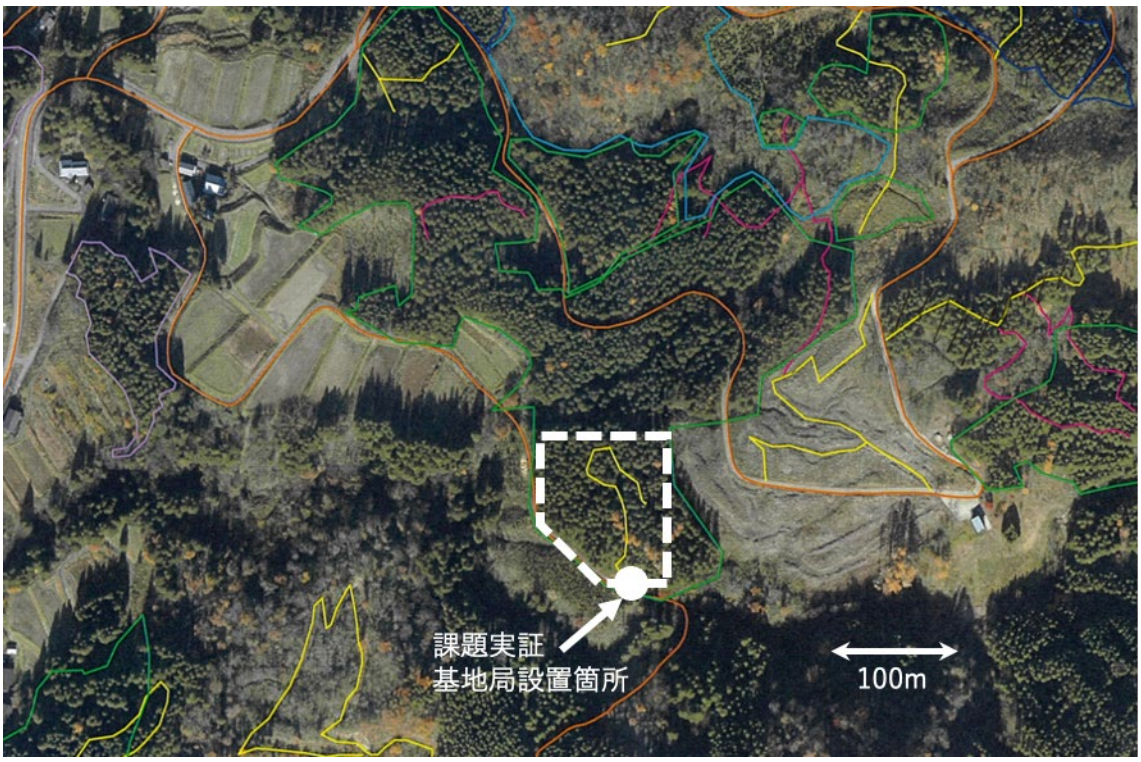


図 158　作業車両の遠隔操作システムが動作可能な通信エリア

設置したローカル 5G 基地局の電波シミュレーションを実施し、結果は以下の通りとなった。

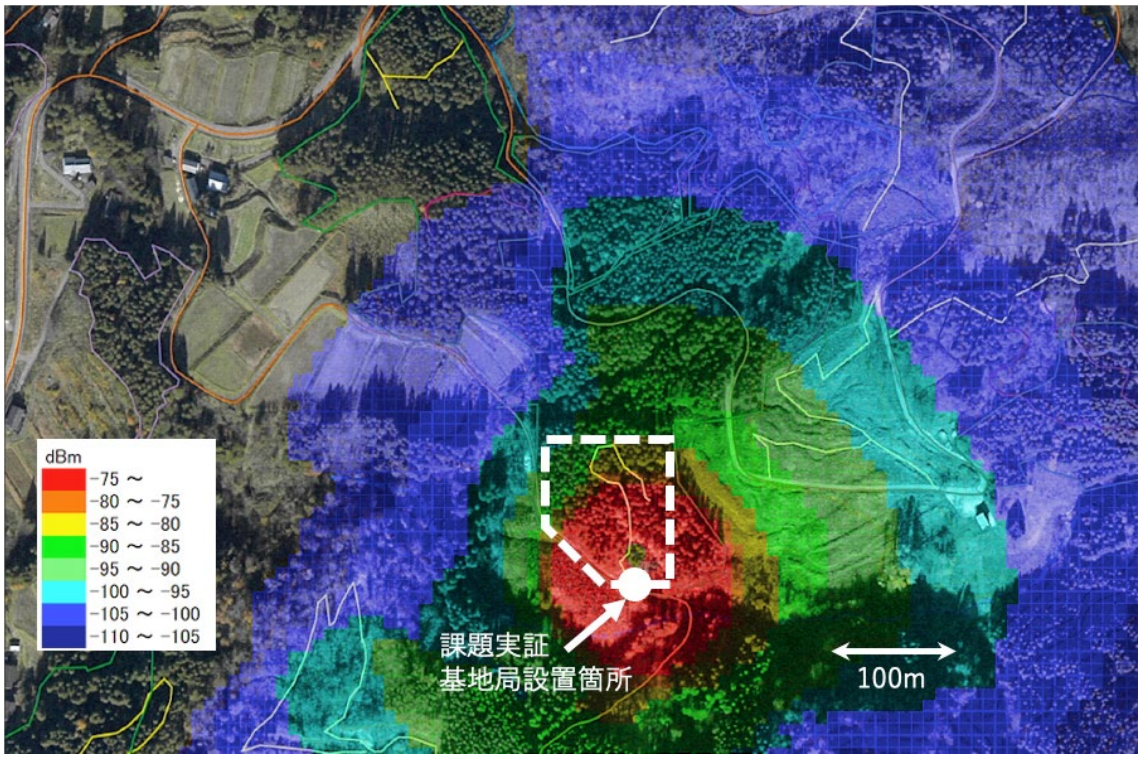


図 159　ローカル 5G 基地局の電波シミュレーション結果

上記シミュレーション結果から、作業車両の遠隔作業を実施したエリアの電波強度は、−75dBm～−90dBm の範囲であった。
また、技術実証で実施した電波強度とスループット検証結果は以下の通り。

表 150　電波強度とスループット検証結果

電界強度 RSRP（-dBm）	スループット （下り）	スループット （上り）	今回実証した課題実証エリアかどうか
−80.97dBm	463.3Mbps	62.0Mbps	エリア内
−92.15dBm	332.3Mbps	54.1Mbps	エリア内
−94.69dBm	193.3Mbps	35.0Mbps	エリア外

上記より今回課題実証を行ったエリアにおいては、必要な通信回線速度は確保されている。一方、−94.69dBm の電界強度だと、上りスループットが必要回線速度を下回ってしまうため、作業車両の遠隔操作システムが動作するエリアの最低電界強度は、−90dBm となり、今回のフィールドでのカバーエリアは、基地局から半径 120m 程度となった。

③ 作業車両の遠隔操作システムがスムーズに動作可能なリアルタイム性について
作業操作者が遠隔操作業を止めた際にモニタに表示される作業車両も停止するタイミング（＝操作のズレ）を遅延時間と定義し、定性評価の結果、どの程度の遅延までを許容できるか検証した。

表 151　遅延の許容範囲

伝送遅延	遠隔操作の可否判定	作業操作者の定性評価
100ms	○	○
200ms	○	○
400ms	△（状況によって操作難）	直線以外の操作が困難
1000ms	×	遅延が大きすぎ、斜面転落などのリスクが高く、操作不可

上記結果より、許容できる伝送遅延は 200ms 以内となった。
なお、5G 部分の遅延については、技術実証の結果、電界強度が-100dBm より強い場合、遅延はおよそ 30ms 程度となっており、それ以外の遅延（映像コーデックの圧縮、伸張時間）を 170ms 以内に抑える必要がある。

④ 作業車両の遠隔操作システムが必要なカメラ映像の解像度について
作業操作者に遠隔操作業を実施してもらい、定性評価の結果、どの程度の画質低下までを許容できるか検証した。
なお、評価には作業車両前方に取付けた４K カメラを使用し、画質設定を SD,HD,４K に変更し、それぞれの画質での定性評価を行った。

表 152　作業車両の遠隔操作システムが必要なカメラ映像の解像度

カメラ映像画質	遠隔操作可否判定	作業操作者の定性評価
SD 画質	×	画質が荒く路面判定が厳しい場合が多々あり、遠隔操作に支障をきたす場合があった。
HD 画質	△	路面の凹凸など、状況によっては判断が難しい場合があった。遠隔操作はできるが、不安がある状況での操作となった
４K 画質	○	手動で操作した場合と遜色ない画質であった。

上記より、手動と遜色無い画質をとするためには４K 画質である必要がある事が分かった。

⑤ 車両の駆動方式、制御方式について
車両の駆動方式については、島田木材及び重機メーカとの検証の結果丸太積載時の安定性に優れ、設置圧が低く不整地での走行性に優れたクローラ方式とした。
また、制御方式については、島田木材及び重機メーカとの検証の結果、電子制御方式とした。
尚、制御方式については、現在島田木材で所有している作業車両は電子制御方式ではないため、電子制御方式以外の実装も検討したが、電子制御がないタイプの作業

車両の場合、物理的に作業レバーや操作ボタンの操作が必要となる事、機種ごとの調整が必要であり拡張性に乏しいこと、物理的に制御が必要な制御システムを構築する必要があるため、コストが上がる事などから、実装を見送った。

- 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの検証

（1）評価・検証項目

「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」を実現させるために必要となる通信速度、カメラ性能を計測し、必要な機能要件を確定するための評価検証を行う。

（2）評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り

① 作業員を AI が問題なく判断可能な画質と通信速度を検証し、最低限の通信帯域について、机上での計算により検証を行う。

② 上記画質を伝送可能な通信エリアについて、技術実証にて計測した電波計測結果を元に机上での計算により検証を行う。

③ 本システムが動作するカメラの距離について、複数距離で検証を行う。

④ 上記結果を踏まえた考察をまとめる。

（3）実証結果及び考察

① 必要な画質及び回線速度について

4.4.1.1 の効果検証の結果から、AI が判断するために必要な画質は 4 K 画質となる。

今回のシステムでは 4 K カメラの映像を 2.5fps の間隔で AI サーバに送信する動作となっており、1 フレームあたりのファイルサイズは平均 1Mbyte となる。ここから算出される回線速度は以下の通り。

表 153 必要な通信回線速度

カメラ映像画質	回線速度	評価
カメラ映像（4 K 画質 2.5fps）	20Mbps	○ローカル 5G 上り回線必須

上記より、作業車両の遠隔操作システム 1 台を動かすために必要な最低限の通信回線速度は 20Mbps となる。

② 作業車両の遠隔操作システムが動作可能な通信エリアについて
今回、以下フィールド（下図の白枠部分）にて作業車両の遠隔操作システムの課題実証を実施した

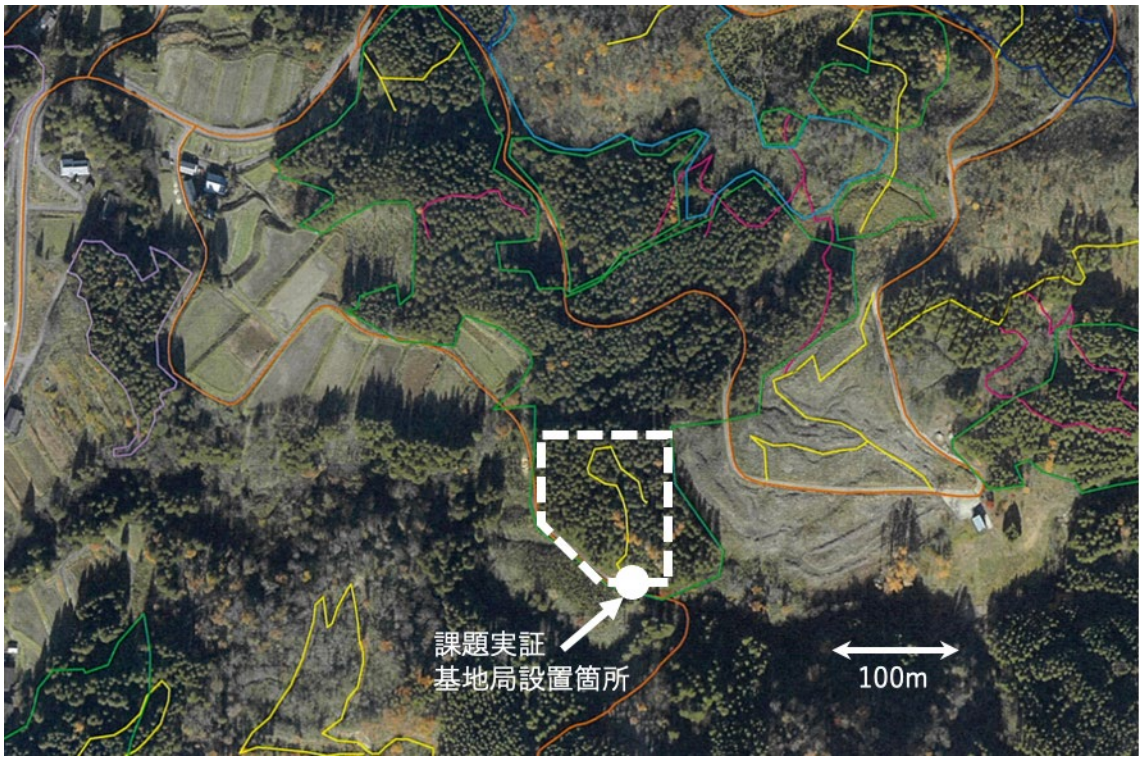


図 160　作業車両の遠隔操作システムが動作可能な通信エリア

設置したローカル 5G 基地局の電波シミュレーションを実施し、結果は以下の通りとなった。

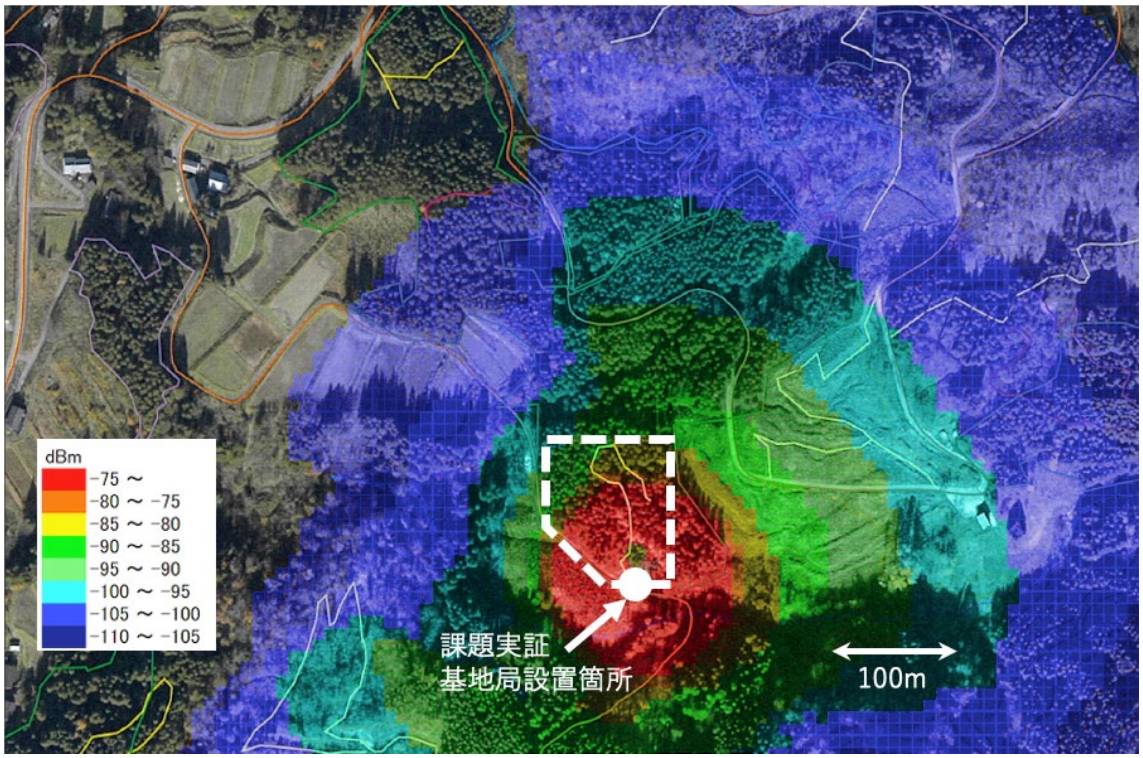


図 161　ローカル 5G 基地局の電波シミュレーション

上記シミュレーション結果から、高精細カメラと AI を組合せた危険予知システムを稼働させるエリアの電波強度は、75dBm～−90dBm の範囲であった。

また、技術実証で実施した電波強度とスループット検証結果は以下の通り。

表 154　電波強度とスループット検証結果

電界強度 RSRP（-dBm）	スループット （下り）	スループット （上り）	今回実証した課題実証エリアかどうか
−80.97dBm	463.3Mbps	62.0Mbps	エリア内
−92.15dBm	332.3Mbps	54.1Mbps	エリア内
−94.69dBm	193.3Mbps	35.0Mbps	エリア外
−100.51dBm	101.3Mbps	19.6Mbps	エリア外

上記より今回課題実証を行ったエリアにおいては、必要な通信回線速度は確保されている。

一方、エリア外の電界強度において、−100.51dBm の電界強度だと、上りスループットが必要回線速度を下回ってしまうため、高精細カメラと AI を組合せた危険予知システムが動作するエリアの最低電界強度は、−94.69dBm となり、今回のフィールドでのカバーエリアは、基地局から半径 120m 程度となった。

③ 検知可能なカメラ距離

4.4.1.1 の効果検証の結果から、カメラ画質 4 K の場合の AI 判定精度が 80%以上となる距離は以下の通り。

＜危険予知動作：作業員のヘルメット未着用検知＞
正面撮影 20m
側面撮影 20m
背面撮影 30m
＜危険予知動作：熊との遭遇＞
正面撮影 30m
側面撮影 20m
背面撮影 30m
＜危険予知動作：作業禁止エリアへの侵入判定＞
正面撮影 50m
側面撮影 50m

上記結果から、本システムを用いて上記全ての危険予知動作を利用する場合は、検知可能なカメラ距離は 20m となる。

④ 考察

高精細カメラを用いて検知検証を行ったが、総じて 20m 以下の比較的近い距離にいる対象物の場合には高い検知率を出すことができた。
なお、作業員のヘルメット未着用検知について、HD、SD カメラを用いた場合だと、20m 以下の場合でも 80%に満たない正答率となっている。
作業員や、ヘルメットなどは、目標対象物が小さいため、AI にて検知判定するための特徴点を見いだしにくい事が原因であると想定される。
このような状況下の場合は、高精細カメラを利用することで、HD カメラと比較し、目標対象物が画像解像度で 4 倍の情報量を持つため、検知率が向上されるというメリットが本実証で確認できた。
よって、本システムを有効に動作させるためには 4K カメラが必須となり、そのために必要な上り回線速度が 20Mbps 必要であることから、高速な回線速度を提供可能な L5G を使うことが必要となる。

また、検知される距離を伸ばす方法として、カメラの画角を変更する、動体検知を搭載した光学ズーム搭載カメラの設定などが考えられるが、カメラ費用が高額になること、現場単位で要求される画角が異なると想定される事から、採用にはさらなる検証が必要となる。

4.4.1.3 運用検証

4.3 で構築した環境を使い、以下の通り運用検証を行う。

- 「作業車両の遠隔操作」システムの実証

（1）評価・検証項目

実証終了後は、5G 基地局設置及び 5G 基地局運用はとなみ衛星通信テレビにて実施を想定している。利用者である株式会社島田木材にて、作業車両を遠隔操作する事から、そのために必要とされるスキル要素を洗い出しする。

（2）評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り

① 作業車両の遠隔操作をするにあたっての事前作業、事後作業にかかる稼働時間、専門知識、コストについて評価検証する。

（3）実証結果及び考察

① アウトプットイメージ

本作業について、専門性が必要な項目部分を本実証にてマニュアル化し、島田木材に提供する。

表 155 事前、事後の作業（車両立上げ手順）

作業	作業時間	専門性有無
遠隔操作用電源メインスイッチ ON	合計 1 分	現地トレーニングにて対応可能
インバータ電源 ON		
UPS 電源 ON		
補助電源 ON		
電源システム起動時間	15s	
遠隔操作用エッジコンピュータ L5G 接続待機	1 分	

※事後作業は上記電源を逆の順番で OFF にする

表 156　事前の作業（遠隔操作室側立上げ手順）

作業	作業時間	専門性有無
遠隔操作／監視用サーバ起動	1 分	現地トレーニング及び操作マニュアル作成にて対応可能
カメラ映像表示用アプリケーションの起動	20s	
遠隔操作アプリケーションの起動	1 分	
遠隔操作用デバイス認証	1 分	
遠隔車両の動作テスト	5 分	

※カメラ表示の表示レイアウトは初期設定時に調整済みとする

※事後作業は起動したサーバのシャットダウン実施となる。

表 157　定期メンテナンス作業

作業	作業時間	専門性有無
カメラの定期清掃（悪天候時などカメラ表面が汚れた際に都度実施）	10 分	現地トレーニングで対応可能
車載 UPS 充電チェック（月 1 回バッテリー容量を確認）	1 分	現地トレーニングで対応可能

※作業車起動時に UPS に自動的に充電される仕組みのため、容量はほとんど減らないがバッテリー老朽化も想定し、定期確認として実施。

- 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの検証

(4) 評価・検証項目

実証終了後は、5G 基地局設置及び 5G 基地局運用はとなみ衛星通信テレビにて実施を想定している。利用者である株式会社島田木材にて、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムを運用するために必要とされるスキル要素を洗い出しする。

(5) 評価・検証方法

評価・検証方法は以下の通り

① 「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムを運用するにあたっての事前作業、事後作業にかかる稼働時間、専門知識、コストについて評価検証する。

(6) 実証結果及び考察

① アウトプットイメージ

本作業について、専門性が必要な項目部分を本実証にてマニュアル化し、島田木材に提供する。

表 158 事前の作業

作業	作業時間	専門性有無
バッテリー残量チェック	1 分	操作マニュアルにて対応可能
現地でのカメラ設置	5 分	
システム電源 ON	合計 1 分	
CPE 端末電源 ON		
システム起動時間待機		
CPE 端末ランプにて電波強度確認	1 分	
現地用確認モニタ取付け、モニタにてカメラ画角を確認し画角の調整	5 分	
プッシュ通知確認（ヘルメット未装着でカメラ前に直立し、管理者へプッシュ通知されたか確認）	5 分	

※上記はシステム 1 台あたりに必要な作業時間を計上

表 159 事後の作業

作業	作業時間	専門性有無
バッテリー残量チェック	1 分	操作マニュアルにて対応可能
システム電源 OFF	1 分	
設置したカメラの撤去	5 分	
カメラボックス、三脚等の清掃	5 分	

※バッテリーは複数台所有し、会社事務所で充電を行うことを想定。

表 160　定期メンテナンス作業

作業	作業時間	専門性有無
カメラ用バッテリー充電作業	約 60 分	メンテナンスマニュアルにて対応可能
定期清掃（月に 1 回程度）	5 分	

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 を用いたソリューションの実装性に関する検証について以下に記載する。具体的には、ローカル 5G 活用モデルの構築・検証及び普及展開方策の検討について整理する。

ローカル 5G 活用モデルの構築・検証においては、ローカル 5G を用いたソリューションの実装を目指し、実証コンソーシアムを構成する団体や企業の一部または全部が、ローカル 5G を活用したソリューションを持続的に導入・利用するための検証を行う。特に、本モデルでは、継続利用するための経済条件が重要であることから、本実証における体制を前提とした費用低減方策について検証するとともに、各ステークホルダによる普及展開方策について検討を行う。

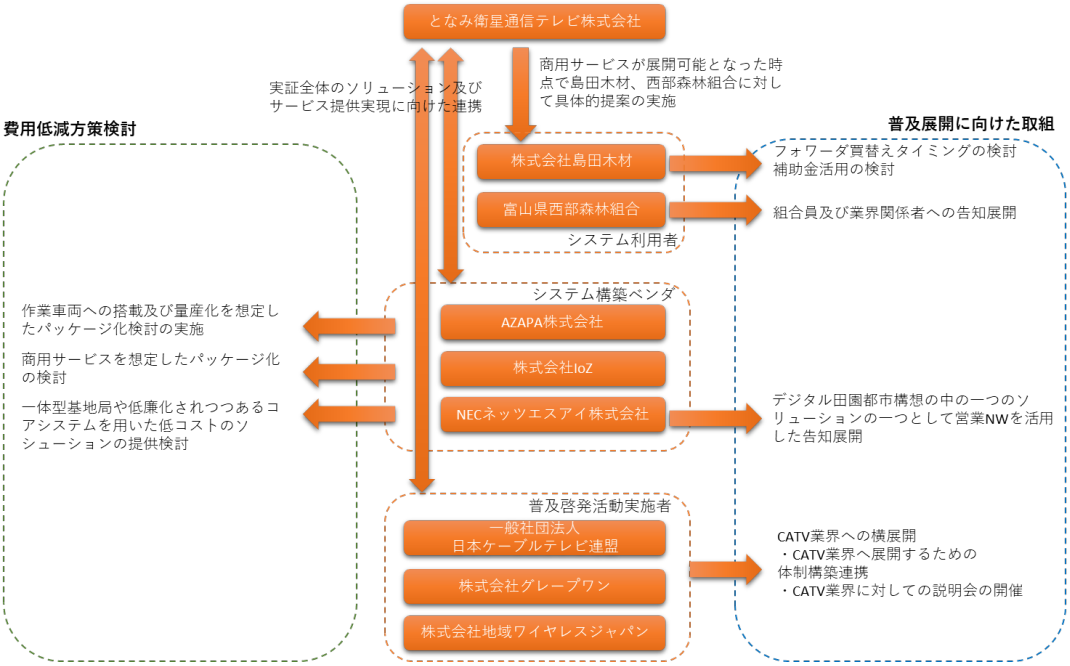


図 4-162 実装に向けた体制と本節における検討項目

4.4.2.1 ローカル 5G 活用モデルの構築・検証

ローカル 5G を活用したソリューションを継続的に導入・利用するために以下の項目について検討した。具体的には、想定される具体的なユーザやターゲット、継続利用されるための体制、実装に資する経済性等に関する検証結果について整理する。

（1）想定されるユーザ・ターゲット

本ローカル５Ｇ活用モデルにおけるユーザ（システム利用者）として、森林内の現場作業などに従事する林業業者や森林組合を想定する。特に、林業に携わる労働力の確保に係る課題を抱えている地域や企業等を想定する。なお、以降の経済性検証で明らかにするように、本ソリューションを導入・運用する観点からは、一定の規模を有する企業や組合を通じた共同利用などのモデルが考えられる。

（2）実装に係る体制

「作業車両の遠隔操作」システム、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムについてはローカル 5G システム環境が必須となっており、またローカル 5GNW 環境内へのサーバ設置等も必要になってくる事から、両システムの導入にあたってはローカル 5G 環境も含めた全体を把握できる能力のある会社が必要になると想定している。

本実証ではその役割をとなみ衛星通信テレビが担っており、実証全体のソリューション及びサービス提供について責任を持っている。となみ衛星通信テレビが、システム構築ベンダとソリューション及びサービス実現に向けて連携し、商用サービスの展開を行う。

今後本実証で構築した両システムを横展開していく際には地域 SIer のようなプレイヤーが必要であると考えられ、さらに、FTTH などの光インフラも所有している地域の C ATV 事業者がこれを担うことが望ましいと考える。

（3）継続利用するための前提条件

本実証で構築したローカル 5G 基地局について、実証終了後も継続的に活用を想定している。また、株式会社島田木材が所有する周辺エリアでの活用も目指し、運用フィールドの変更も含めた継続利用とその実装の確度を高めるため、本実証では以下の通り対応を行った。

- ✓ ４G 電波も届かないエリアであり、そのエリアにとなみ衛星通信テレビ株式会社が保有する光通信回線を用い、ローカル 5G 電波を使える環境を可能な限り安価に構築した。
- ✓ となみ衛星通信テレビ株式会社局舎内に、ローカル 5G 設備、AI サーバ、NW 装置を設置し、極力実証フィールドに近い場所で必要なシステムを構築することにより、実用化の場合においても安定的なサービス提供につながる環境を構築した。
- ✓ 基地局までの光回線確保についても、となみ衛星通信テレビが保有する光回線の空ファイバを活用し、安価に構築できる体制を整えている。

本実証で構築したローカル 5G 基地局について、L5G 基地局については、今後必要とされた際にすぐに提供できるよう、パッケージ化を行う。また、本実証において構築した「作業車両の遠隔操作」システムおよび「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムについてもパッケージ化しており、速やかな提供が可能である。

ただし、作業現場全てに L5G 基地局を構築することはコスト的な観点から現実的ではないため、基地局を移動する事で面的なカバーを実施する必要があると想定される。

（4）ソリューションを導入するための林業現場の標準モデル

「作業車両の遠隔操作」システムおよび「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムを構築するにあたって、標準モデルを以下の通り構築した。

1）実装環境

導入場所については、課題検証を実施した現場での実装を想定した標準モデルとして整理する。特に、実証で構築したソリューションの性能は、林道など現場における電波伝搬等環境に左右されることから、前提となる現場の面積・林道の斜度及び道幅・長さ等の詳細は、以下の通りである。

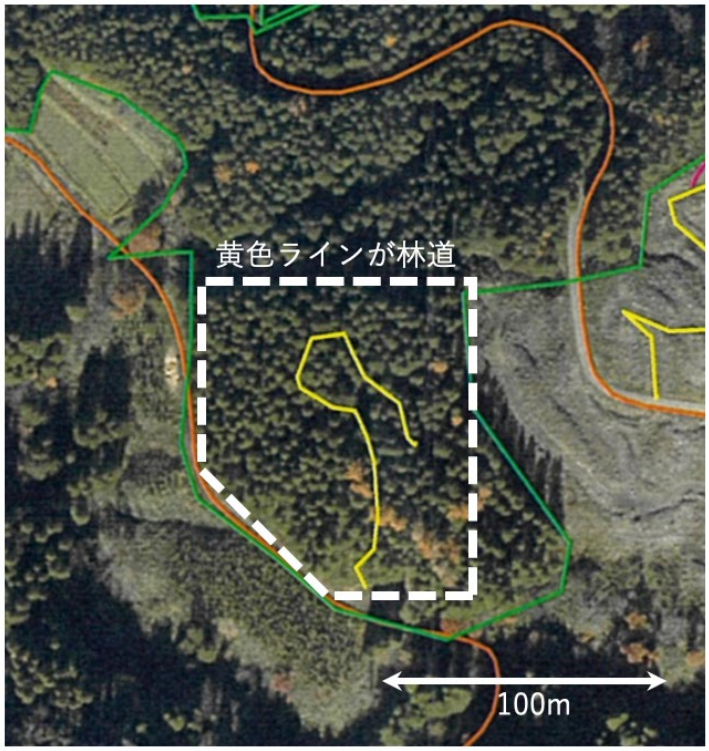


図 4-163 **実装環境（現場）**

・面積について
・間伐を実施する面積は赤枠内の 1ha
・本フィールドで間伐実施した場合に生産される木材量はおよそ 50m3
・遠隔操作をせずに 4 名で 1 日の作業で完了する面積となる。

・林道の斜度について
島田木材からのヒヤリングより、林道の最大斜度は 16 度が最大、推奨は 10 度以下となっている。今回、上記を踏まえ課題実証エリアを精査し、以下斜度のフィールドを選定した。
・最大斜度は 7 度
・平均斜度 5 度

・林道の道幅及び長さについて
道幅についても現状では３m の幅の確保が推奨されているところであるが、今回選定のフィールドは比較的古くに林道が作られたため、以下道幅となっている。

・道幅 2.5m
・全長 195m（左図の赤枠内の黄色ライン）

2）構築及び継続利用に関する費用

上記標準モデルにローカル 5G システム及び「作業車両の遠隔操作」システム、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの２つのソリューションを構築する場合の構築費用及び保守運用等継続利用に関する費用については以下の通りとなる。

＜構築費用（イニシャルコスト）試算＞

上記標準モデルの環境にローカル 5G システムを構築する場合のコストを試算した。今回の実証で実施した内容を基に費用を算出した。

なお、作業車両の費用については、遠隔操作システム導入有無に関わらず必要となる経費である事から、本試算では含めていない。

区分		費用項目	金額
ローカル 5G システム	L5G 基地局	L5G 基地局（RU）システム構築費用	700 万
		光ファイバ敷設工事費用（ファイバ敷設距離 500m と想定）	50 万
		基地局設置工事費用	100 万
		基地局電気工事費用	50 万
		小計	900 万
	基地局以外	L5G コア部分構築費用	1200 万
ソリューション・システム	作業車両の遠隔操作システム	遠隔操作システム構築費用	2280 万
		CPE 端末費用	15 万
		小計	2295 万
	高精細カメラと AI を組合せた危険予知システム	AI エッジサーバ費用（※AI エッジサーバ 1 台でカメラ 20 台の稼働が可能）	100 万
		危険予知システム構築費用(現地設置カメラ部分)	20 万
		CPE 端末費用	15 万
		小計	135 万

＜運用費用（ランニングコスト）試算（年額）＞

上記標準モデルの環境にローカル 5G システムを運用する場合のコスト（年額）を試算した。

区分		費用項目	金額
ローカル 5G システム	L5G 基地局	L5G 基地局（RU）システム保守費用	100 万／年
	基地局以外	L5G コア部分保守費用	1100 万／年

ソリューション・システム	作業車両の遠隔操作システム	作業車両の遠隔操作システム保守費用	40 万／年
	高精細カメラと AI を組合せた危険予知システム	危険予知システム運用費用	190 万／年

（5）費用回収モデル

本実証にて得られた山林での電波伝搬モデルを基に、カバーエリア面積および、そのエリア内にて本システムが有効に動作する面積を割り出し、それらの面積で本システムを活用した場合、全体としてどの程度の工数削減が可能かシミュレーションを行う。合わせてどのくらいの面積があれば本システムの導入が可能になるかの費用対効果分析も行い、生産性向上が可能となる条件（指標）を求めた。

上記の結果を踏まえ、全体として費用対効果が見込める費用低減策モデルを検討した。

1）導入効果（生産性向上）

島田木材が 1 シーズンで実施する間伐作業面積の平均は 50ha となっており、10ha 単位で 4 名の作業員での間伐作業を実施している。

また、標準モデルで記載したとおり、1ha の面積を間伐した場合、4 名の作業員で 1 日で作業が完了する規模とな、るが、10ha の面積を間伐した場合は、林道の長さが伸びる事、林道まで間伐を運ぶ距離が増える事から、作業時間が増加する。この部分を踏まえると、島田木材での実績から 10ha の間伐作業で 25 日か必要となる。

また、島田木材の 1 日の一人当たりの人件費は 3 万円となっている。

上記を踏まえ、島田木材にて遠隔操作システムを導入する事により削減される工数と費用について、以下の通り算出される。

面積あたりの間伐作業にかかる工数

面積	工数（4 人あたり）	備考
1ha	1 日	
10ha	25 日	作業時間増加のため工数は増加する。（島田木材実績ベースでの試算）
50ha	125 日	10ha の面積を 5 回実施する試算

遠隔操作システムを導入する事により、削減される工数と費用

面積	削減される時間	削減される工数（1 日 8 時間として試算)	削減された工数分の費用（1 人日 3 万円で試算）

1ha	315 分	0.65 人日	19,500 円
10ha	7,875 分	16.4 人日	492,000 円
50ha	39,375 分	82 人日	2,460,000 円

上記から、島田木材にて 1 年間の間伐作業（50ha）で削減されるコストは 246 万円となる。

2）費用分析（現状）

尚、上記で削減された費用を元手に各システムを導入した場合の費用は以下で試算される。その回収にかかる年月は以下のとおり試算される

＜システム構築費用（イニシャルコスト）＞

システム	構築費用	備考
ローカル 5G システム	2100 万	－
遠隔操作システム	2295 万	－
AI 危険予知システム	135 万	－
基地局追加コスト （追加分 3 台）	2700 万	半径 120m のカバーエリアから、林道 240m で 1 基地局設置と想定。10ha の林道が 1km 程度で、カーブしていることから、3 箇所程度の追加が必要と想定
AI 危険予知システム （追加分 2 台）	40 万	島田木材からのヒヤリングを受け、林道のスタート地点及び中間地点、最終地点の 3 か所の設置を想定して試算した。
合計	7270 万	－

＜保守費用（ランニングコスト）＞

システム	構築費用(年額)
ローカル 5G システム保守費	100 万
基地局保守費	1100 万
遠隔操作システム保守費	40 万
AI 危険予知システム保守費	190 万
基地局保守費（追加分 3 台）	300 万
AI 危険予知システム保守費用(追加分 2 台)	0 万
合計	1730 万／年

＜上記コストを回収する期間について＞

上記で算出したシステム構築費用を、遠隔操作システム導入により削減された工数から算出された削減費用元手に回収する場合、29.5 年必要となる。
また上記期間の間、保守費用も発生する事となる。

上記から、遠隔操作システム導入により削減される費用にて設備投資回収をする事は現実的ではないため、導入が難しい結果となった。
また、他事業者も含めた本システムの拡大を実施しても、事業者毎に上記費用が発生することから、導入するために必要なコストそのものについて、設備投資回収が可能となる費用の算出が必要となる。

3）費用分析（費用低減策）

前述の「1)費用分析（現状)」を踏まえ、構築した標準化モデルを基に現時点での設備コストや標準的な工事コストを算出の上、③で求めた生産性向上が可能となる条件を満たすための持続可能なビジネスモデルの構築を以下の通り検討した。

設備投資回収が可能となる持続可能なビジネスモデルの構築するため、実際の商用サービス展開を想定した価格での試算を行った。(一定の前提条件を満たした上での量産化モデルの想定)

＜構築費用（イニシャルコスト）試算＞
費用低減策は以下のとおり。

- ✓ L5G 基地局については、RU,CU/DU 一体型の基地局を採用する事により、基地局以外の設備コストの低減化を図った。
- ✓ L5G 中継局については、将来的な中継局システムの商用化を見据え、エリア拡大の際に中継局を利用する事により、コスト低減化を図った。
- ✓ 作業車両の遠隔操作システムについては、本実証で連携したイワフジ製フォワーダに組込を行う前提で試算した

区分		費用項目	金額
ローカル 5G システム	L5G 基地局（CU/DU 一体型）	L5G 基地局（CU/DU 一体型）システム構築費用	700 万
		光ファイバ敷設工事費用（ファイバ敷設距離 500m と想定）	50 万
		基地局設置工事費用	100 万
		基地局電気工事費用	50 万
		合計	900 万
	L5G 中継局	L5G 中継局構築費用	150 万
		工事コスト（電源は可搬型発電機で対応）	10 万
		合計	160 万
ソリューシ	作業車両の遠	遠隔操作システム構築費用	500 万

ョン・システム	隔操作システム	CPE 端末費用	15 万
		合計	515 万
	高精細カメラと AI を組合せた危険予知システム	AI エッジサーバ費用	100 万
		危険予知システム構築費用(現地設置カメラ部分)	20 万
		CPE 端末費用	15 万
		合計	135 万

＜運用費用（ランニングコスト）試算（年額）＞

区分		費用項目	金額
ローカル 5G システム	L5G 基地局（CU/DU 一体型）	L5G 基地局（CU/DU 一体型）システム保守費用	60 万／年
ソリューション・システム	作業車両の遠隔操作システム	作業車両の遠隔操作システム保守費用	40 万／年
	高精細カメラと AI を組合せた危険予知システム	危険予知システム運用費用	30 万／年

尚、上記で削減された費用を元手に各システムを導入した場合の費用は以下で試算される。その回収にかかる年月は以下試算される

＜システム構築費用（イニシャルコスト）＞

システム	構築費用	コスト低減化ポイント
ローカル 5G システム	900 万	一体型基地局を採用し、基地局以外の設備等のコストを削減
遠隔操作システム	515 万	今回採用した作業車両への搭載及び量産化を想定したパッケージを検討しコストを削減
AI 危険予知システム	135 万	
中継局追加コスト（追加分 3 台）	480 万	L5G 中継局採用を想定し、ハードコスト、工事コストを削減
AI 危険予知システム（追加分 2 台）	40 万	
合計	2070 万	

＜保守費用（ランニングコスト）＞

システム	構築費用(年額)
ローカル 5G システム保守費	60 万
遠隔操作システム保守費	40 万
AI 危険予知システム保守費	30 万
合計	130 万／年

尚、今回のシステムを導入する事により創出される費用について以下の通り算出を行った。

項目	費用	備考
遠隔操作システム導入により削減された工数から算出された削減費用	2,460,000 円	
ＡＩカメラ危険予知システムの導入及び、作業車両の遠隔操作にてもたらされる安全性向上に関わる費用	2,800,000 円	安全対策から得られる便益は目に見えない費用であり、定量化が困難であり、かつ 経営者が過小評価しがちな傾向がある事から、これらを踏まえ、島田木材へのヒヤ リングを実施し、削減費用を算出した。
総額	5,260,000 円	

＜上記コストを回収する期間について＞

上記で算出したシステム構築費用を、遠隔操作システム導入により削減された工数から算出された削減費用元手にシステム構築費用を回収する場合、3.9 年必要となる。尚、上記期間の間、保守費用も発生する事となる。

又、減価償却を踏まえた損益計算ベースでの試算では以下の通りとなり、4 年目から累計収支で黒字となる。

区分	項目名	N年度	N+1年度	N+2年度	N+3年度	N+4年度	N+5年度	N+6年度	N+7年度	N+8年度
収入（費用削減）	遠隔操作システムによる人件費削減費用	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000	¥2,460,000
	危険予知システムに導入による安全性向上に関わる費用	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000	¥2,800,000
収入（費用削減）計		**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**	**¥5,260,000**
費用	ローカル5Gシステム償却費（9年）	¥1,998,000	¥1,554,444	¥1,209,357	¥940,880	¥732,004	¥641,328	¥641,328	¥641,328	¥641,328
	中継局追加コスト償却費（9年）	¥1,065,600	¥829,036	¥644,990	¥501,803	¥390,402	¥342,042	¥342,042	¥342,042	¥342,042
	遠隔操作システム構築償却費（5年）	¥2,060,000	¥1,236,000	¥741,600	¥556,200	¥556,199	¥0	¥0	¥0	¥0
	AI危険予知システム構築償却費（追加分2台含む）（5年）	¥700,000	¥420,000	¥252,000	¥189,000	¥188,999	¥0	¥0	¥0	¥0
	ローカル5Gシステム保守費	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000	¥600,000
	遠隔操作システム保守費	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000	¥400,000
	AI危険予知システム保守費	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000	¥300,000
費用計		**¥7,123,600**	**¥5,339,480**	**¥4,147,947**	**¥3,487,883**	**¥3,167,604**	**¥2,283,370**	**¥2,283,370**	**¥2,283,370**	**¥2,283,370**
単年度収支		**-¥1,863,600**	**-¥79,480**	**¥1,112,053**	**¥1,772,117**	**¥2,092,396**	**¥2,976,630**	**¥2,976,630**	**¥2,976,630**	**¥2,976,630**
累計収支		**-¥1,863,600**	**-¥1,943,080**	**-¥831,027**	**¥941,090**	**¥3,033,486**	**¥6,010,116**	**¥8,986,746**	**¥11,963,376**	**¥14,940,006**

※減価償却費は定率法で算出

一般的な設備投資回収期間は 5 年と設定すると、それ以内の回収が可能となる事から、本試算を基にしたビジネスモデルの展開が可能であると考えられる。

尚、今回のコスト試算については前述の通り、実際の商用サービスが展開を想定した場合の（一定の前提条件を満たした上での量産化モデルの想定）試算となっている。

今後、以下についての検討も行う事により、回収年数のさらなる短期化を検討する。

- ✓ 今回の標準モデルでは、島田木材が実施する間伐作業の期間が、4 月～12 月の９ヶ月で試算しており、間伐作業のオフシーズンである 1 月～3 月の冬季期間はローカル 5G システムが利用されていない期間となる。
- ✓ この期間に、島田木材で実施している他の作業や、他業種等での利用をする事により、新たなビジネスモデルの創出が可能となる事から、その方法を引き続き検討していく事とする。
- ✓ また、ローカル 5G システムについては、日々新たなソリューションが生まれている状況となっており、年々費用低減化が進行している状況である。
- ✓ 一体型基地局（RU,CU,DU 内包型）や、低減化されつつあるコアシステムを用いた低コストのソリューションが提供されたタイミングで、こちらについても導入の検討を実施する。

4.4.2.2 普及展開方策の検討

同様の課題を抱えた森林事業者は全国に存在することから、4.4.2.1 で実施した費用対効果分析結果および生産性向上が可能となる条件を基に、本実証で得られた強みや特徴を生かした標準化モデルについて持続可能性を踏まえて構築検討し、コンソーシアムメンバなどと連携した普及展開方策について以下の通り検証した。

（1）取り組み方針

本実証にて検討したビジネスモデルの展開を図るために、コンソーシアムメンバに対して、本実証事業終了後も継続的な情報交換を行い、実装に向けた横展開計画の作成を継続検討する。

また、「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」で記載した通り、実際の商用サービスが（一定の前提条件を満たした上での量産化モデル）が展開可能となる時点で島田木材及び、コンソーシアムメンバである県西部森林組合に対して具体的提案を行い、横展開を行う事によりサービス提供可能エリアの拡大を図る。

また同じくコンソーシアムメンバである NEC ネッツエスアイ株式会社より、デジタル田園都市国家構想の中での一つのソリューションとして、日本全国に支社を持つ営業ネットワークを活用し、幅広い告知展開を行うことを想定している。

合わせて、今回遠隔操作システムを構築した AZAPA 株式会社にて、作業車両への遠隔操作機能のオプション化の実現に向けた検討を行い、林業事業者が作業車両を購入する際に遠隔操作機能を選択しやすくなるような取組みも視野に入れる。

（2）CATV 業界・他地域への横展開

県内の林業関係者にとどまらず、CATV 業界への横展開を視野に入れ、一般社団法人日本ケーブルテレビ連盟と株式会社地域ワイヤレスジャパン、株式会社グレープワンを通じてケーブルテレビ業界に展開するための体制構築の連携、およびケーブル業界に対しての説明会を行い、普及展開を推進する。

また、必要に応じて上記機関以外においても、今回実証をおこなった成果やメリットについて、報告会などを通じた啓蒙を行う。

（3）5G ソリューション提供センターとの連携

総務省にて検討予定の 5G ソリューション提供センターに、本実証を通じて得られたローカル 5G を用いたソリューションに関する情報提供を行い、ユーザ企業への 5G ソリューションの円滑な導入支援及び共創環境構築を行う構想の実現に向けた協力を行う。

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

4.4.3.1 実装する内容

① 安全性向上の課題解決実証と実装

ローカル 5G 通信基盤と 4K 映像および AI を用いた安全管理システムを構築のうえ、株式会社島田木材の実際の作業現場で運用し、定性面および定量面からの評価により安全性向上への実証を目的とする。本実証終了翌年の 2022 年度中に株式会社島田木材にて実装することを予定であったが、現時点において商用ベースでのビジネスモデルを使ったサービス展開が困難である事が分かったが、実装に向け、4.4.4 に記載した内容の実施を進めていく事とする。

② 産性向上の課題解決実証と実装

ローカル 5G 通信基盤と遠隔操作機能搭載フォワーダー（木材運搬作業車）を用いた遠隔操作システムを構築のうえ、株式会社島田木材の実際の作業現場で運用し、定性面および定量面からの評価により生産性向上への実証を目的とする。本実証終了後は、2023 年～2024 年より株式会社島田木材にて実装することを予定していたが、現時点において商用ベースでのビジネスモデルを使ったサービス展開が困難である事が分かったため、実装に向け、4.4.4 に記載した内容の実施を進めていく事とする。

尚、上記二つの実装に向けた 4.4.4 に記載した内容は以下の通り。

・導入するにあたっての現実的な事業規模として、10,000m3 以上の木材生産量及び、利益として 450 万円以上となる事業規模が必要と試算された。上記から、本実証を行った中小規模の林業業者の売上や利益率を想定した場合、現時点の商用サービスの想定費用を負担するには、1.3 倍程度の間伐作業面積があれば導入の実現性が高くなる評価が得られたため、島田木材の他に、本システムの実装が可能な企業を見つけるべく、4.4.2.2 に記載した普及展開方策の実施を行う。

・導入確度を上げるため、以下項目の利用を想定した事業計画の策定を行う。

1．フォワーダーの買替えタイミングについて、一般的に 10 年であることから、将来の買替えタイミングを踏まえた実装計画を視野に入れ検討する。尚、機材購入ではなくリースした場合は 5 年～7 年の買替えサイクルとなっている。

2．補助金活用部分については、年間生産量等の条件を基に、フォワーダー等の設備資金に活用でき、1/2 の補助率、補助額の上限 1000 万程度のものが一般的となっている。また先進的な取り組みに対しては 2/3 の補助率のものもあり、これらの積極的な活用を検討していく。

3．今回導入した基地局設備や AI 危険予知システムについて、持ち運びができるという特徴を活かして、島田木材の今後の作業現場等に必要に応じて構築し、引き続き実装に向けた検討を進めていく。

4.4.3.2 課題実証を実施して抽出された課題

課題実証を実施して抽出された課題を以下の通り記載する。

課題	原因			解決策
	技術	費用	運用	
商用サービス展開時期が未定	○	○	○	林野庁への展開も含め、林業現場でのニーズの掘起こしを継続して実施する。 また、今回検討した商用ベースでのビジネスモデルを用いたサービスの提案を継続して実施する。 商用サービス展開に向け、関係者と継続した情報交換を実施する。
ローカル5G電波特性による遠隔操作作業車の実用的なカバーエリアが小さい	○	○	○	5G基地局または5G中継局の追加によるカバーエリア拡大または、指向性アンテナによる放射角度の変更の検討
遠隔操作作業者の操作において現場作業員の技術習得に時間を要する			○	遠隔操トレーニングの実施
電源確保、ファイバ敷設を考慮した基地局設置箇所の選定		○		コスト低減箇所の選定
作業現場を変更するたびに基地局設置場所の移動が必要となる。その際の免許申請が煩雑となってしまう			○	免許制度の要件緩和の提言

4.4.4　継続利用の見通し・実装計画

4.4.4.1 継続利用の見通し

本実証で構築したローカル 5G 基地局について、実証終了後も継続的に活用を想定している。また、株式会社島田木材が所有する周辺エリアでの活用も目指し、運用フィールドの変更も含めた継続利用とその実装の確度を高めるため、継続検討する。

ただし、高精細カメラと AI を組合せた危険予知について、現時点において商用ベースでのビジネスモデルを使ったサービス展開が困難である事から、実装には株式会社島田木材の実際の経営状況や計画などを十分に勘案しながら継続検討していく。

4.4.4.2 実装に向けた体制

実装に向けた体制と役割分担は以下のとおりである。

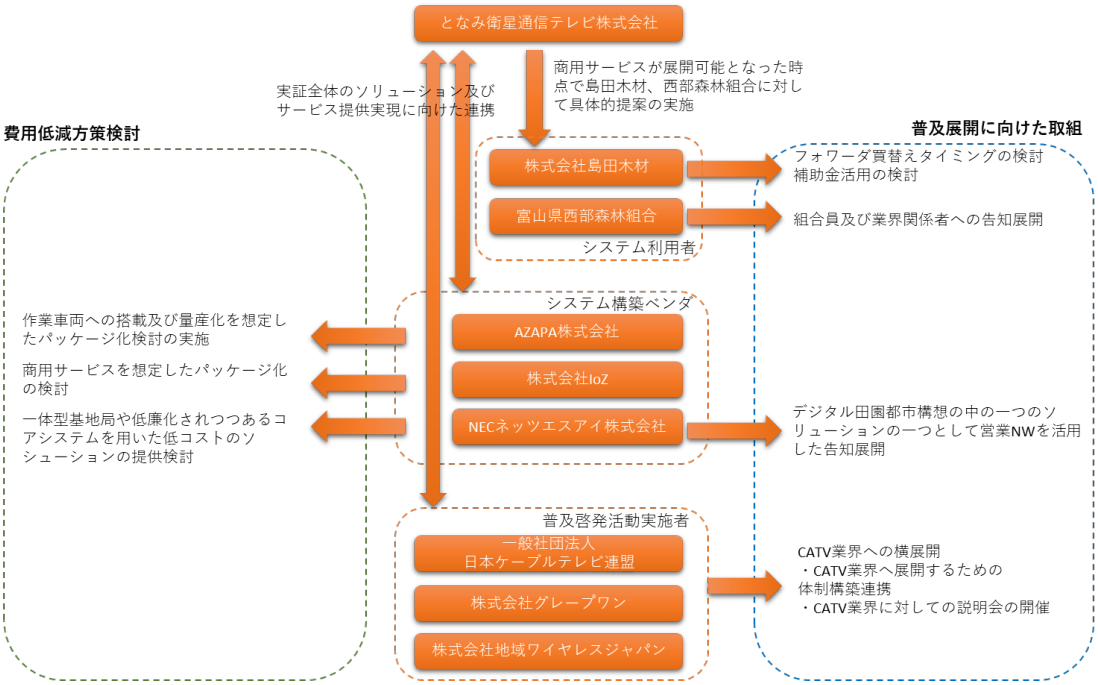


図 4-164　実装に向けた体制（再掲）

表 161　実証終了後の役割分担

項目	実証中	実証終了後	備考
ローカル 5G 環境	NEC ネッツエスアイ	環境構築：NEC ネッツエスアイ 所有、管理、運用：となみ衛星通信テレビ サービス利用：島田木材	実証で利用した基地局は撤去。島田木材が間伐作業を行う現場にて基地局を設置する事を視野に継続検討中
「作業車両の遠隔操作」システム	島田木材、AZAPA、となみ衛星通信テレビ	環境構築、システム提供：AZAPA システム所有、サービス利	活用についての有効性や課題について継続検討

		用：島田木材	
「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システム	となみ衛星通信テレビ	環境構築、システム提供：株式会社 IoZ システム所有、サービス利用：島田木材	活用についての有効性や課題について継続検討

「作業車両の遠隔操作」システム、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムについてはローカル 5G システム環境が必須となっており、またローカル 5GNW 環境内へのサーバ設置等も必要になってくる事から、両システムの導入にあたってはローカル 5G 環境も含めた全体を把握できる能力のある会社が必要になると想定している。

本実証ではその役割をとなみ衛星通信テレビが担っており、実証全体のソリューション及びサービス提供について責任を持っている。

今後本実証で構築した両システムを横展開していく際には地域 SIer のようなプレイヤーが必要であると考えられ、さらに、FTTH などの光インフラも所有している地域の C ATV 事業者がこれを担うことが望ましいと考える。

4.4.4.3 実装計画

実装計画案は下表のとおりである。本実証の成果を活かし、2022 年度～2023 年度において商用展開の継続検討を行い、2024 年度以降の商用判断及び展開について見込む。

表 162　実装計画案

システム	課題	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度
マイルストーン			商用展開検討		商用判断	商用展開見込み	
ローカル5G環境の構築	電源確保、ファイバ敷設を考慮した基地局設置箇所の選定		関係者でのブラッシュアップ	基地局及び中継器の開発状況を踏まえ場所選定の検討を実施			
	ローカル5G電波特性による実用的なカバーエリアが小さい		関係者でのブラッシュアップ	基地局及び中継器の開発状況を踏まえ場所選定の検討を実施			
	作業現場を変更するたびに基地局設置場所の移動が必要となる。その際の免許申請が煩雑となってしまう		免許制度要件緩和に向けた提言の実施				
高精細カメラとAIを組合せた危険予知	商用サービス展開時期が未定		ニーズの掘起し、関係者への継続提案の実施				
			関係者でのブラッシュアップ	商用化に向けたソリューション内容の検討			
作業車両の遠隔操作	商用サービス展開時期が未定		ニーズの掘起し、関係者への継続提案の実施				
			関係者でのブラッシュアップ	商用化に向けたソリューション内容の検討			
	遠隔操作作業者の操作において現場作業員の技術習得に時間を要する		関係者でのブラッシュアップ		遠隔トレーニングの実施（商用展開した場合）		

4.4.4.4 具体的な取り組み

（1）実装性を高めるための条件

2022 年度以降の実装を見据え売上及び、利益がどれくらいの状態になれば本システムの実装及び、継続利用が可能となるか以下の通り考察を行った。

尚、本考察においては島田木材からのヒヤリングに基づき作成をした。
一般的な中小規模の林業業者を想定した場合、1 シーズンで実施する間伐作業面積の平均は 50ha、主伐作業面積 8ha と想定される。また、それぞれの作業で生産される木材生産量は間伐作業で 3,000m3、主伐作業で 5,000m3 となり合計 8,000m3 と想定される。

これらの木材の単価は 9,000 円／m3 として年間 7,200 万円の売上になると想定される。上記売上を基に算出される利益は、利益率を５％と想定すると 360 万円となる。
これらを下記表にまとめる。

表　中小規模の林業業者の木材生産量等

伐採種類	面積	木材生産量	年間売上	年間利益 (売上の 5%)
間伐	50ha	3000m3	2,700 万	135 万
主伐	８ha	5000m3	4,500 万	225 万
計	―	8000m3	7,200 万	360 万

上記で試算した年間利益 360 万を基に今回検討した商用ベースのシステム構築費 2,070 万円及び、年間保守費用 130 万円の負担を行う場合、想定した事業規模より大きな事業にすることにより導入の現実性が高くなると考えられる。

具体的には、導入するにあたっての現実的な事業規模として、10,000m3 以上の木材生産量及び、利益として 450 万円以上となる事業規模が必要と想定する。
上記から、本実証を行った中小規模の林業業者の売上や利益率を想定した場合、現時点の商用サービスの想定費用を負担するには、1.3 倍程度の間伐作業面積があれば導入の実現性が高くなる評価が得られた。

（2）展開方針

上記の条件を踏まえ、2022 年度中は、費用低減方策として、L5G 設備の構築規模の効率化、2 つのソリューションを組み合わせたパッケージ化によるシステム構築費の調整、林業分野の補助金等の活用等について継続検討する。他地域を含め、一定の面積（規模）を確保するため、共同組合との連携による広域展開などのモデルも見据えながら、2023 年度以降の実装可能性を目指す。

さらに、以下要素についても継続検討し、実装可能性の確度を高めていく。
(ア) フォワーダーの買替えタイミングについて、一般的に 10 年であることから、将来の

買替えタイミングを踏まえた実装計画を視野に入れ検討する。尚、機材購入ではなくリースした場合は５年～7 年の買替えサイクルとなっている。

(イ) 補助金活用部分については、年間生産量等の条件を基に、フォワーダー等の設備資金に活用でき、1/2 の補助率、補助額の上限 1000 万程度のものが一般的となっている。また先進的な取り組みに対しては 2/3 の補助率のものもあり、これらの積極的な活用を検討していく。

(ウ) 今回導入した基地局設備や AI 危険予知システムについて、持ち運びができるという特徴を活かして、島田木材の今後の作業現場等に必要に応じて構築し、引き続き実装に向けた検討を進めていく。

4.5 その他普及啓発活動

現地視察会実施の際に報道関係各所へも報道発表を行い、大々的に取材対応を頂き普及に努めた。その他、講演会などでの説明や現地視察の受け入れを行った。

現地視察会を取材頂いた機関について

- 日本放送協会
- 富山テレビ放送
- 北日本新聞
- 富山新聞
- 中日新聞
- 読売新聞
- 日本農業新聞

講演

- 北陸情報通信協議会
- 九州テレコム振興センター（ローカル 5G シンポジウム in 延岡）
- 富山県（富山県地域リーダー育成研修）
- 日本ケーブルテレビ連盟（無線利活用委員会、IoT ビジネス TT）
- ケーブルテレビ情報センター（CRI フォーラム）

現地視察

- 林野庁
- 富山県西部森林組合

5. 実施体制

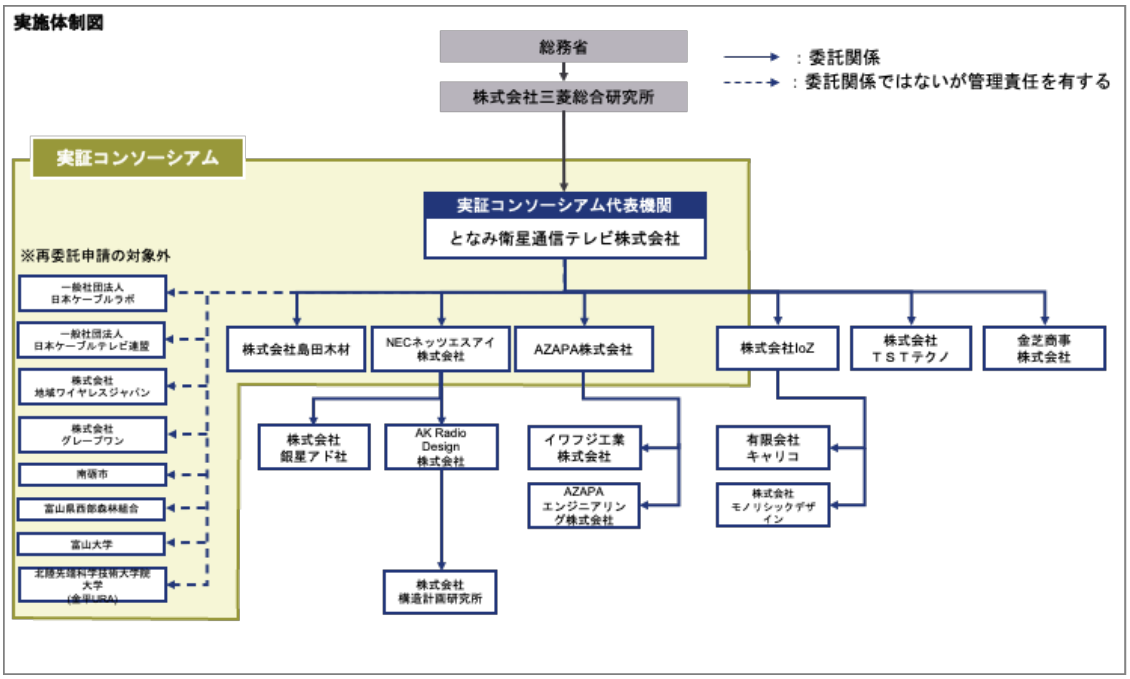


図 165　実施体制図

表 163　コンソーシアム機関

	実施機関	実施内容	実施期間
1	となみ衛星通信テレビ株式会社	代表機関。代表として【ローカル 5G を活用した林業の DX 化コンソーシアム】の取りまとめを行う。	2021/9/30～2022/3/25
2	NEC ネッツエスアイ株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築及び評価・検証データ等の計測を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	2021/11/6～2022/2/28
3	AZAPA 株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築及び評価・検証データ等の計測を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	2021/11/5～2022/2/28
4	株式会社島田木材	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、「高精細カメラと AI を組合せた危険予知」シ	2021/11/8～2022/2/28

		ステムの実証」のフィールドの提供及び林業における専門的知見の分野を担当する。	
5	株式会社TSTテクノ	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、「高精細カメラとAIを組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築（通信回線と機材の敷設）を担当する。	2021/11/8～ 2022/2/28
6	株式会社IoZ	となみ衛星通信ケーブル株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、「高精細カメラとAIを組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築及び評価・検証データ等の計測を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	2021/11/5～ 2022/2/28
7	金芝商事株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、サーバー等機器類の運用保全フィールドの提供を担当する。	2021/11/8～ 2022/2/28
8	株式会社銀星アド社	となみ衛星通信テレビ株式会社（実証コンソ代表機関名）が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、技術実証のためのバルーン打ち上げを担当する。	2021/12/6～ 2022/12/28
9	AK Radio Design株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社（実証コンソ代表機関名）が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、技術実証のための電波計測および解析を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	2021/12/2～ 2022/2/15
10	AZAPA エンジニアリング株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、課題実証のための「作業車両の遠隔操作」システムの構築のエンジニアリング支援を担当する。また、本システム構築に必要な部材の調達を行う。	2021/11/6～ 2021/12/31
11	イワフジ工業株式会社	となみ衛星通信テレビ株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において、課題実証のための「作業車両の遠隔操作」システムで活用する作業車両の提供および環境構築支援を担当する。	2021/11/6～ 2021/12/31
12	有限会社キャリコ	となみ衛星通信ケーブル株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証におい	2021/11/6～ 2022/2/21

		て､｢高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築のうち、Web システムの構築を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	
13	株式会社モノリシックデザイン	となみ衛星通信ケーブル株式会社が代表機関を務める実証コンソーシアムの実証において､｢高精細カメラと AI を組合せた危険予知」システムの実証」の環境構築のうち、AI システムの構築を担当する。また、当該実証コンソーシアムの報告書作成にあたり担当箇所の執筆支援を行う。	2021/11/6～ 2022/2/21
14	株式会社構造計画研究所	技術実証におけるシミュレーション結果考察と実測結果の差分考察を行う。	2021/12/2～ 2022/2/15

6. スケジュール

スケジュールは以下の通りで実施。

表 164　スケジュール