

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

高速道路上空の土木建設現場における、安全管理の
DX化に求められる超高精細映像転送システムの実現

成果報告書

令和4年3月25日

新名神大阪西 梶原コンソーシアム

清水建設株式会社

目次

1. 実証概要	1
1.1 背景・目的	1
1.2 実証の概要	4
2. 実証環境の構築	6
2.1 実施環境	7
2.2 ネットワーク・システム構成	8
2.3 システム機能・性能・要件	33
2.4 免許及び各種許認可	33
2.5 その他要件	39
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）	41
3.1 実証概要	41
3.2 実証環境	42
3.3 実証内容	43
3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定	43
3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化	118
3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化	166
3.3.4 準同期TDDの追加パターンの開発	166
3.3.5 その他のテーマ	186
3.3.6 技術実証における追加提案	186
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）	187
4.1 実証概要	187
4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標	188
4.3 実証環境	191
4.4 実証内容	193
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	209
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	284
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	290
4.4.4 継続利用の見通し・実装計画	293
4.4.5 課題実証における追加提案	300
5. 普及啓発活動	310
5.1 映像制作への協力	310
5.2 実証視察会の実施	310
5.3 その他普及啓発活動	311
6. 実施体制	312

6.1 実施体制及び役割.....	312
6.2 実証推進方法.....	313
6.3 情報保全体制.....	314
7. スケジュール.....	315
8. 添付資料.....	322

1. 実証概要

1.1 背景・目的

西日本高速道路株式会社関西支社新名神大阪西事務所（以降、「大阪西事務所」）は、淀川右岸部から高槻 JCT・IC 間の延長 4.4km の建設工事を所管しており、西日本有数の大動脈である名神高速道路、東海道新幹線および JR 京都線を跨ぐ非常に重要な物流インフラを横架する、難易度の高い工事全体を監理する役目を担っており、早期開通を目指している。その一部にある、新名神高速道路梶原トンネル工事は、清水建設株式会社関西支店新名神梶原トンネル建設所（以降、「梶原トンネル建設所」）が元請施工を受注している。本工事には、既往の名神高速道路梶原トンネル（高槻市）坑口直上に架設する橋梁下部工事が含まれており、日平均 10 万台以上の車両が往復する名神高速道路の直近・直上に、建設工事用の仮設構台を張り出して施工する計画をすすめている（図 1.1-1）。その安全管理にはリスクの最大抽出と詳細な細心の対策実施、適宜タイムリーな判断が求められている。

西日本高速道路株式会社では、社独自の取り組みとして、受発注者が一体となった工事安全への取り組みを定めた「重大事故リスクアセスメントガイドライン」や「安全管理項目チェックリスト」が定められており、大阪西事務所では、それらに基づいた安全対策が実施されている。発注者の工事監理者と元請の統括安全管理者は、両者がより密に連携支援してリスクを低減する方針となっている。今回、大阪西事務所と梶原トンネル建設所は、最新のテクノロジーを導入し情報共有の即時性や同時認識性を高めることでリスク低減を図る方策を導入し、実際の現場作業状況をリアルタイムにモニタリングすることで迅速な安全支援を可能とする映像共有システム/リアモステーション（リアルタイムモニタリングステーション）（図 1.1-2）の開発導入に合意し、本建設工事に着手している。



図 1.1-1 大阪西事務所所轄

（インターネット：<https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/18467/>より）

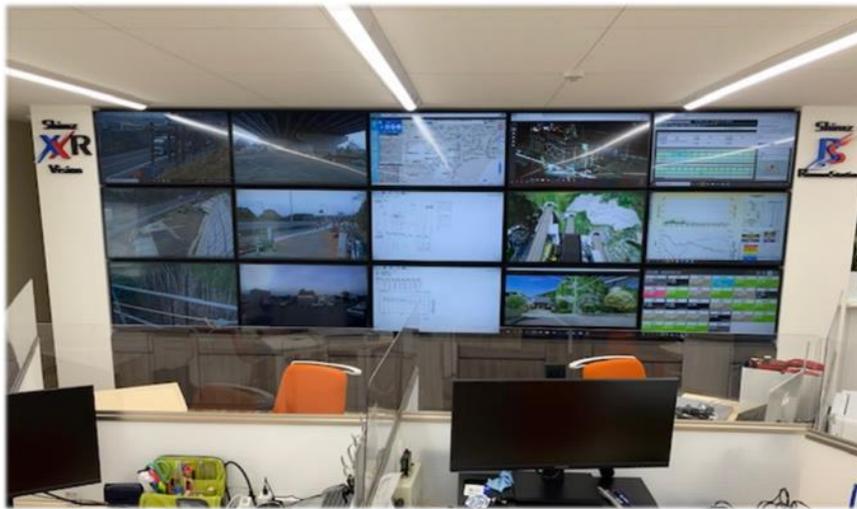


図 1.1-2 リアルタイム・モニタリング・ステーション

建設現場の管理項目として、何よりも優先される最重要事項は、安全と健康の管理である。社会全体を取り巻く少子高齢化は、建設業界においても急速に進んでおり、より一層の機械化、省力化・省人化を進める必要がある。このような背景において安全技術の教育指導を強化する必要があると共に、センサ技術群と多種の通信技術網を組み合わせた、建設現場の安全性・生産性を高度に支援する新たなシステム概念が導入実証され始めている（図 1.1-3, 図 1.1-4）。近い将来、建設現場においては、プロセスデータから安全リスク予測を支援するリアルタイムな予測ガイダンスシステムが一般化される時代も想像されている。

作業員の行動・姿勢、バイタルデータを利用した安全管理と生産性向上

行動のリアルタイムモニタリング

作業員の動きについて解析

物体検出を実施

作業員の姿勢について解析

リアルタイム生産管理に、ローカル5Gを利活用

姿勢・動きのリアルタイムモニタリング

待機中 or 移動中	運動中 (作業中)	

バイタルデータのリアルタイムモニタリング

バイタルデータのリアルタイムモニタリング

4事象に分類し各指標値を算出 時系列で各指標を集計

得られた脈波信号より揺らぎの解析を行い、「集中度」「ストレス度」「疲労度」などの指標値を算出

労働安全性の向上と施工生産性の向上に活用

建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト(PRISM採択、清水建設)

図 1.1-3 超高精細映像技術や無線通信技術の活用事例



図 1.1-4 点群データと 3D モデル、現地進捗写真との属性付けによる施工管理

従来のモニタリングシステムでは、HD カメラを設置するものの、通信環境に制約影響を受けて、満足ゆく映像解像度での機能が得られない状況が発生する場合がある。また、建設現場では、日々の工事進捗により作業場周辺の環境が変化してゆく条件（図 1.1-5）にモニタリング設備をフィッティングさせてゆく必要があり、適宜、必要個所に映像取得用カメラを移動させ、必要なタイミングでパンさせる、または、注目個所を適宜抽出してリアルタイムに映像を取得するニーズが高い。



図 1.1-5 さまざまな工事状況の例

建設現場内の通信環境には、Wi-Fi メッシュ網のセットアップが一般化されつつあるが、今後より一層の大容量伝送、低遅延、セキュリティ強度が求められ、まさに 5G の掲げる特徴が望まれている。また土木建設現場は、山間部など商用 5G がエリア展開されてい

い場所も多く、超高精細映像を安定的に配信するためのエリアネットワークを独自に設計して展開することができるローカル 5G に対する期待は非常に大きい。

今回の開発実証では、俯瞰的にとらえた超高精細映像より、必要とする者が必要箇所の映像を任意に切り出し確認できる機能を有するソリューションを導入することで、従来 HD カメラでは、利用者がその間占有する課題や、カメラパン、ズームイン/アウトおよび設備の移動手間を低減することができると思う。また、モニタリングエリアにおいてローカル 5G の特徴である大容量高速通信網を構築することで、超高精細カメラの設置箇所の自由度を高めると共に、光ファイバなどの有線設備を最小限にする。これらにより、多数拠点からの多数同時参加を可能として共時空間性を持つ本システムの導入が、次世代の安全管理支援システムとして新三現主義の実現を目指すものである。

近未来 DX においては、超高精細地球カメラが自律移動ロボットや人物に搭載され、その映像データはリアルタイムにクラウドサーバに通信転送される。そこにサイバー空間が構成されると共に、関係者はいつでもその中に没入することができる環境で、プロセスの判断行為をリアルタイムに行うことができる世界が用意されている。

1.2 実証の概要

目的の建設現場を網羅する範囲に、ローカル 5G 実験基地局を構築し (図 1.2-1)、超高精細 (8K) の映像取得カメラを 1 台ないし 2 台で俯瞰的に配置する。俯瞰カメラで得られる映像はモニタリングステーションまで転送する。映写される転送画像は、管理者の視線誘導を助けるために、転送された映像には、AI による人物および建設車両に抽出マーキングの映像処理を行う。これら処理映像データは、48 時間の保存後に破棄される上書き保存機能を有する記憶媒体 (ローカルサーバ、クラウドサーバ) に記録されるものとする。画像フレームレートは通信転送設備に合わせて設定することとし、外部端末 (固定 PC、Wi-Fi 無線ノート PC、および LTE タブレット端末など) から市中キャリア通信設備を通じたブラウザ機能で確認できる仕様とする (図 1.2-2)。

技術実証および課題実証の確認項目、および今後の展開性については、詳細を後章で述べるが、ローカルサイト内での通信強度ヒートマップ、および工事状況による環境変化から受ける影響、ローカルサイト内アップロード通信速度、光ファイバや LAN 設備内でのクリティカルポイント、先述の映像抽出の処理速度、市中キャリア通信設備を利用した外部端末でのブラウザ機能速度などを確認するものとする。

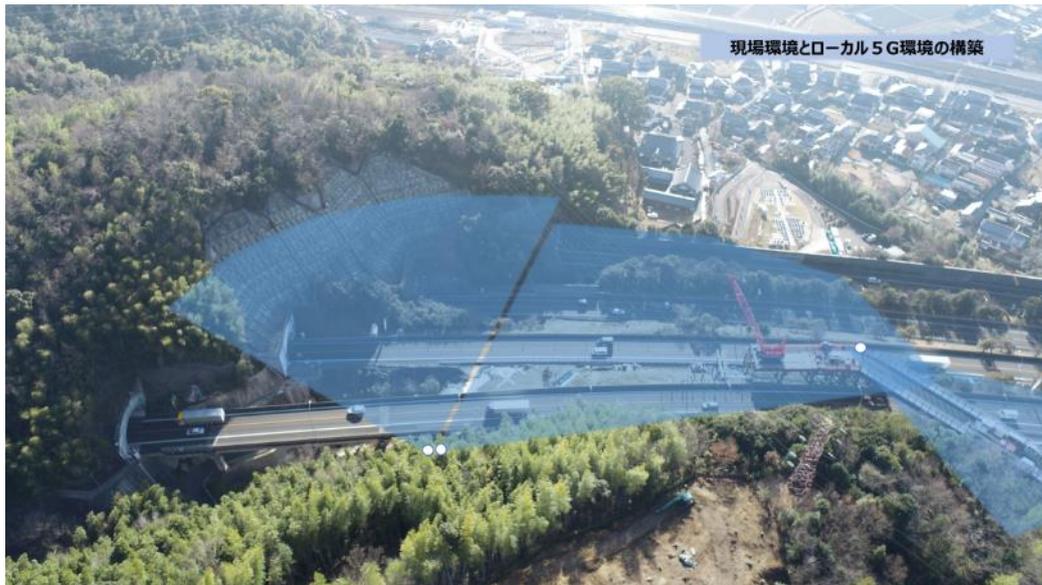


図 1.2-1 ローカル 5G 環境の設定



図 1.2-2 画像処理提案 (課題実証)

2. 実証環境の構築

今回の実証で対象とするのは、国内でも多くの事業化が今まさに進められ、また将来においても多数の事業化が想定される高速道路であり、とくに大規模トンネルの出入り口付近の土木建設現場をターゲットとする。当該工事作業現場においては、日平均10万台以上の車両が往復する名神高速道路の直近・直上に、工事用架設構台を張り出して施工する計画となっており、その安全管理にはリスクの最大抽出と対策の細心判断が求められている。その中で、これまで以上にリスク管理体制を強化することとし、リアルタイムモニタリングを可能とする映像共有システム/リアモステーション（リアルタイムモニタリングステーション）の開発導入を進めている。モニタリングシステムにおいては、超高精細映像の利用、それも建設現場は日々の工事進捗により作業場周辺の環境が変化してゆく条件にフィッティングさせてゆく必要があり、適宜、必要個所に映像取得用カメラを移動させ、必要なタイミングでパンさせる、または、適宜注目個所を抽出してリアルタイムに映像を取得するニーズが高いことから、ウェアラブルカメラのような小型移動カメラでありながら超高精細ブレ防止機能と大容量の無線通信システムの利活用に大きな期待が寄せられている。そのため、大容量かつ柔軟なネットワーク構築が可能であるローカル 5G の活用が期待される。

高速道路を対象とした実証試験を進めるにあたり、大阪西事務所と清水建設が一体となって早期開通を目指す新名神高速道路梶原トンネル建設工事を実証試験環境として選定した。図 2.1-1 は、想定環境の様子を示す。図 2.1-2 に示すように、対象トンネルと周辺構造物は、山間地域での建設が進められている。そのため、技術実証においては、ソリューションを展開するカバーエリア内の通信環境の検証は当然としながら、周辺の干渉対象地域に関する検証を行う。日本国内においては、今後も、同様の環境における建設が各所で推進されることが予想されることから、本実証環境によって得られる電波伝搬環境に関する知見および大容量通信実現に向けたノウハウは、将来の同様の事業においても有用となることが期待される。また、当該作業現場においては、既に工事が進行中であるが、当該工事は今後数年間続く計画となっており、本実証試験完了後においても、土木作業現場における技術・課題実証を継続的に実施していくにも適した環境である。

2.1 実施環境



図 2.1-1 実施環境（全体俯瞰図）

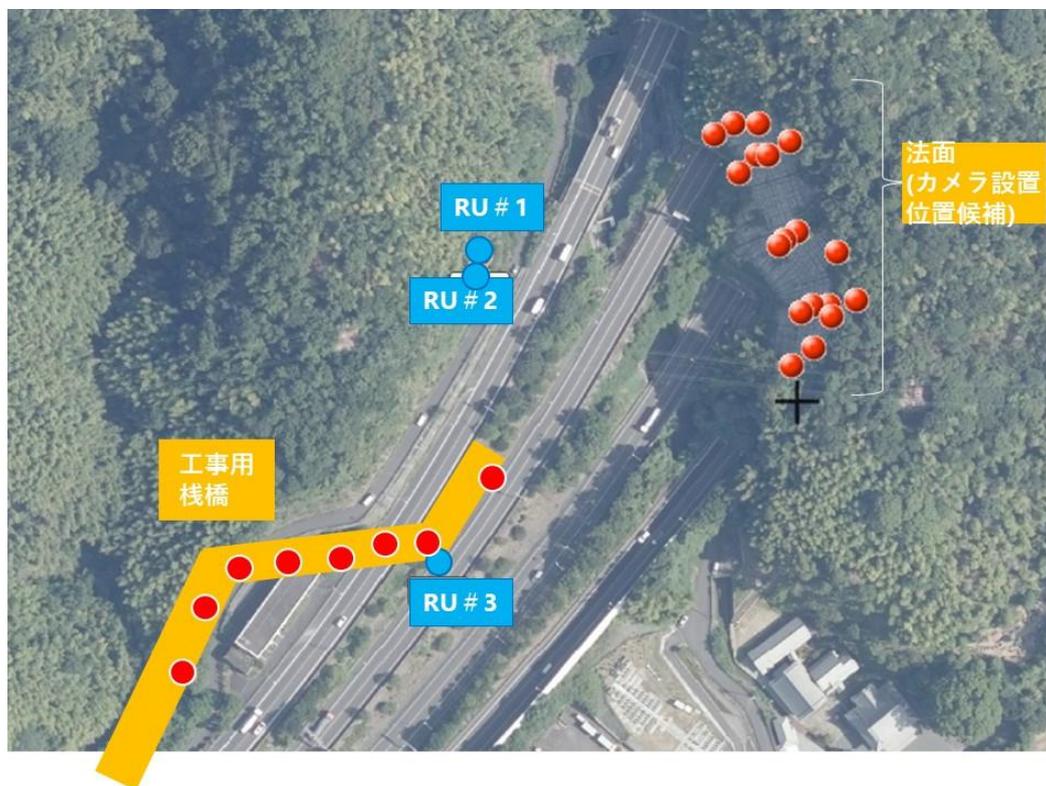


図 2.1-2 実施環境（試験対象エリア）

2.2 ネットワーク・システム構成

図 2.2-1 は、本実証試験で想定する基地局設置個所を示す概要図である。本実証試験では、カバーエリア近傍の風雨対策がなされた屋内に 5G コア装置およびセントラルユニット (Central unit : CU) およびディストリビューテッドユニット (Distributed unit : DU) を含むベースバンドユニット (Baseband unit : BBU) を設置し、アンテナユニット (Radio unit : RU) を分散して配置することで、試験対象エリア内のカバレッジを確保することを想定する。ここで、図 2.2-1 中に記載の RU のカバーエリアは、後述する本実証試験において、目標とする上りリンクにおけるアプリレイヤの最大スループット 120Mbps を達成できることが想定されるカバーエリアを表現しており、後述する本システムのカバーエリアとは異なることに注意されたい。

なお、当初計画では、すべての RU を作業栈橋上に展開する計画であったが、当該作業栈橋の工事進捗状況、および電源設備の準備の問題から、図 2.2-12 に示すように、RU#1 および RU#2 については、近傍の山道脇に設置するものとした。なお、今回の実証試験においては、大きく 2 つの通信エリア(法面エリアおよび作業栈橋周辺)を想定しており、RU#1 が法面をカバーし、RU#2 および#3 が作業栈橋周辺をカバーする計画であったが、今回の RU 設置場所においても、各 RU がカバーする通信エリアに変化はない。

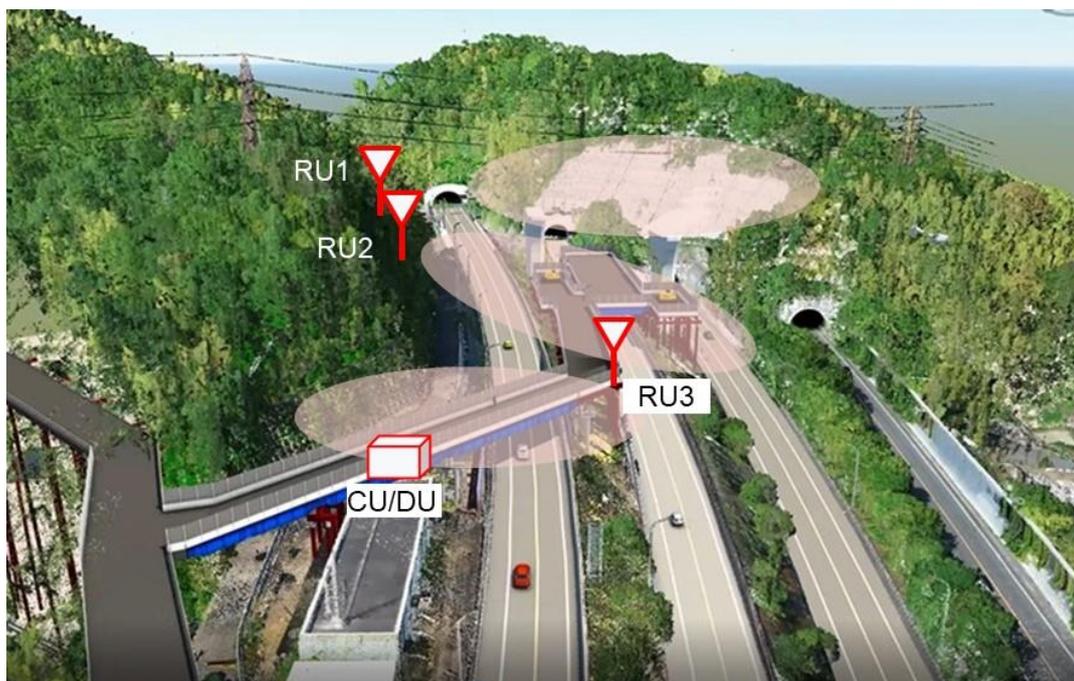
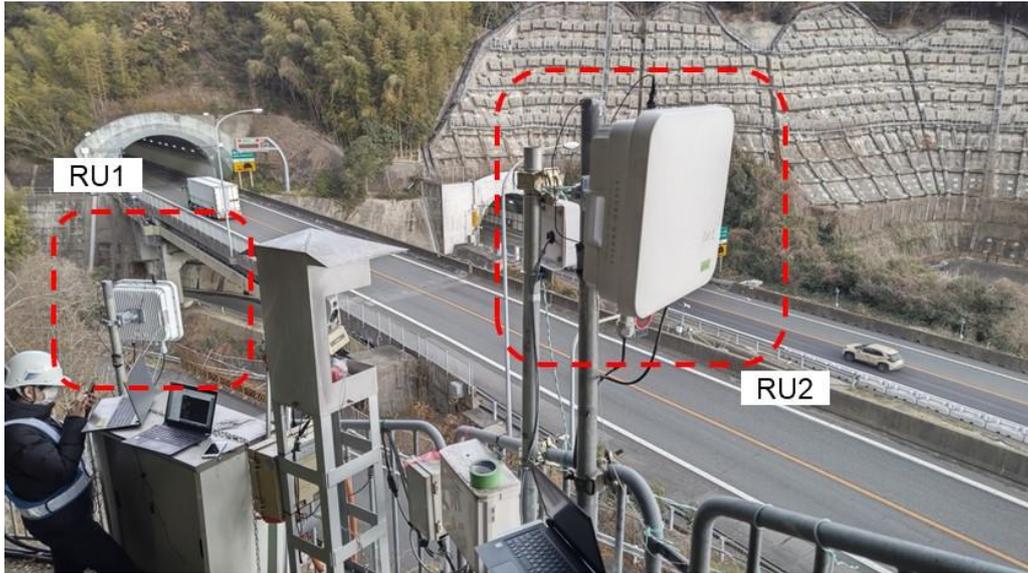
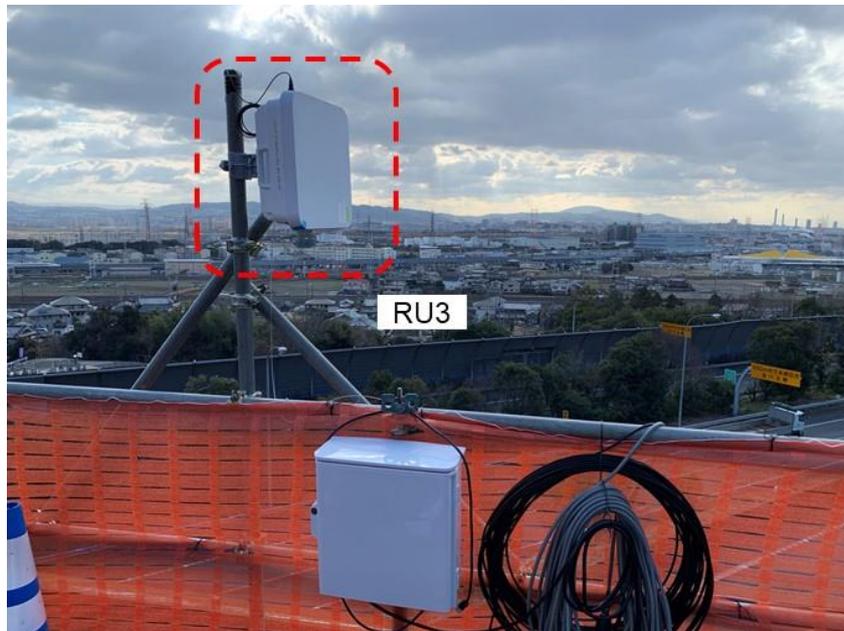


図 2.2-1 基地局設置場所について



(a) Radio unit(RU)1 および RU2



(b) RU3



(c) Central Unit(CU)/Distributed Unit(DU)/Core Network(CN)

図 2.2-2 各装置の様子

図 2.2-3 に電波法関係審査基準（平成 13 年総務省訓令第 67 号）が規定するエリア算出法（以下、「エリア算出法」という。）に基づいて算出したカバーエリアおよび調整対象区域を示す。なお、ここでは、後述する RU のアンテナパターンを考慮し、3 つの RU で実際に構成することが想定されるエリアパターンを記載する。本実証試験では 100MHz システムを使用するため、カバーエリア算出時の受信電力を-84.6dBm、調整対象区域の受信電力を-91.0dBm と想定している。

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

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

今回計算では、送信電力を SS-RSRP の送信電力である 25dBm、給電損失を 1dB、送信アンテナ利得は最大 11dBi とし、RU のアンテナ指向性パターンを考慮した。伝搬損失 L は以下の式を使用した。

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

f [MHz] ; 使用する周波数

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

R [dB] ; 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損

α ; 遠距離に対して考慮する係数であり、下記による。

$$\alpha = \begin{cases} 1 & : d_{xy} \leq 20\text{km} \\ 1 + (0.14 + 1.87 \times 10^{-4}f + 1.07 \times 10^{-3}H_b) \left(\log_{10} \frac{d}{20} \right)^{0.8} & : 20\text{km} < d_{xy} < 100\text{km} \end{cases}$$

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。

$$a(H_m) = \begin{cases} 0.057 & : \text{中小都市の場合} \\ -0.00092 & : \text{大都市の場合} \end{cases}$$

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(H_b) ; 基地局高に対して考慮する補正項であり、下記による。

$$b(H_b) = \begin{cases} 0 & : H_b \geq 30\text{m} \\ 20 \log_{10}(H_b/30) & : H_b < 30\text{m} \end{cases}$$

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值であり、通常は 0 とし、地形水面の反射、小規模の見通し外伝搬の影響等を特に考慮する必要が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值であり、下記による。

- (1)市街地(都市の中心部であって、2階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など) ; $S=0.0$
- (2)郊外地(樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域) ; $S=12.3$
- (3)開放地(電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方300~400m以内が開けているような畑地・田地・野原など) ; $S=32.5$

今回計算では、中心周波数として4.85GHz、基地局の空中線地上高を各RUの設置位置からのアンテナ高である1.75m、移動局の地上高を1.5m、 $K=R=0$ 、そして $S=32.5\text{dB}$ として計算した。

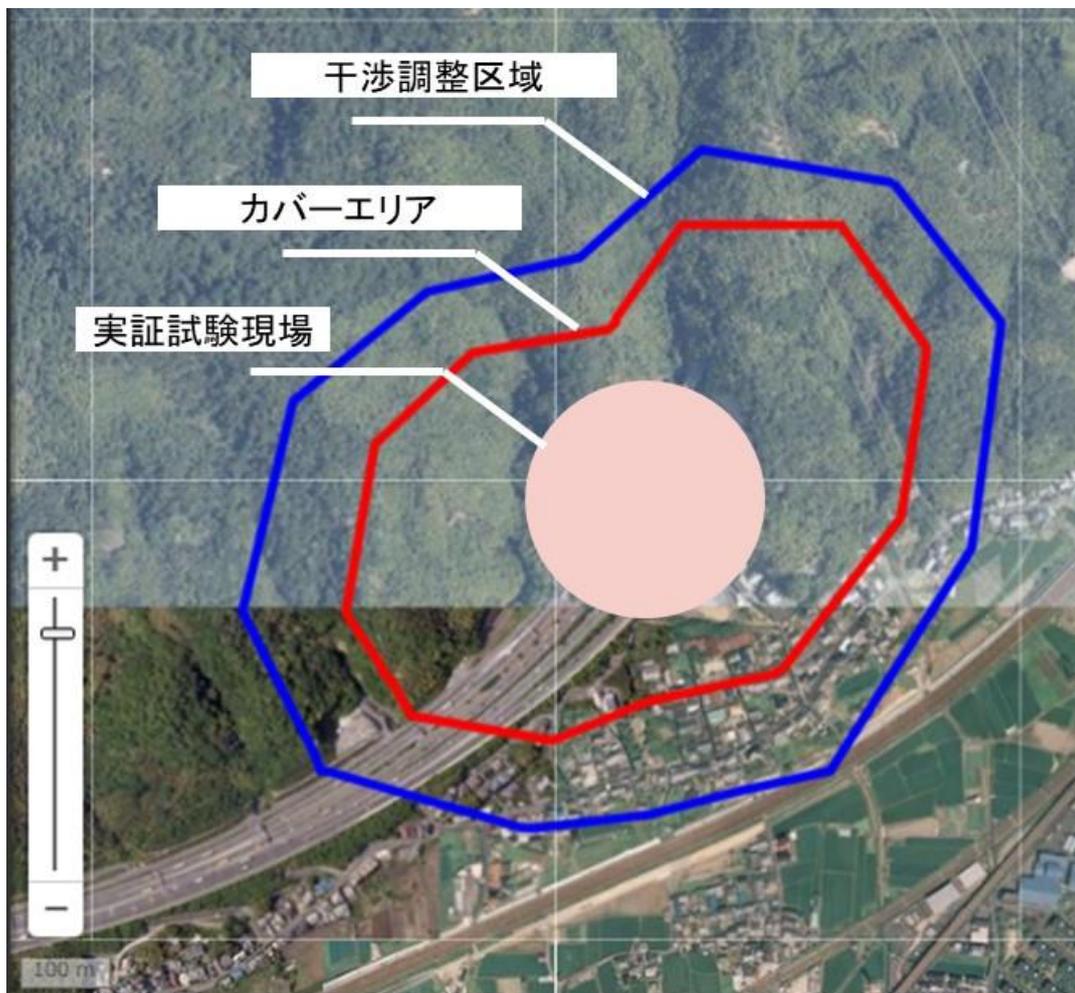


図 2.2-3 カバーエリアおよび干渉調整エリア

図 2.2-4 に、本実証試験のために構築したネットワーク構成の概要図を示す。まず、本システムは、ローカル 5G 基地局装置 (CU/DU、RU)、ローカル 5G コアネットワーク装置から構成される。8K カメラで工事現場を捉えるように撮影された 8K 映像は中継 PC を介してローカル 5G 端末装置 (UE : User Equipment) から無線伝送され、RU で受信さ

れた後に、配信サーバに格納される。8K映像はクラウド上に集約してリモート拠点に配信することとするので、配信サーバは最終的にはクラウド上に位置する。ただし、工事現場からクラウドへの通信疎通確認前の段階においては、本システムを設置している工事現場小屋内に配信サーバおよび8Kモニターも設置して、8K映像受信状況確認をすることも考慮しておく。クラウドに設置する8K映像処理サーバでは、工事現場から伝送されてきたオリジナルの8K映像に対して、2Kなどにダウンサイジングした映像切り出しや、人物や重機のトラッキング処理を実行し、リモート拠点に配信する。リモート拠点においては監督者などの工事関係者が、クラウドの8K映像処理サーバで処理された映像をタブレット端末やモニターで確認することを想定している。

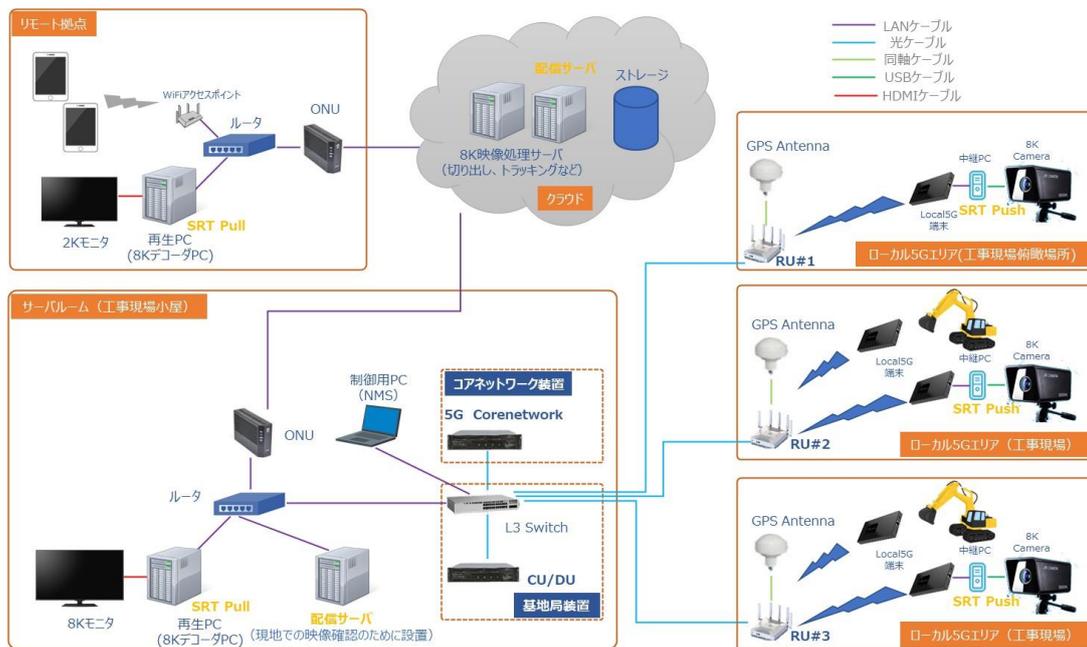
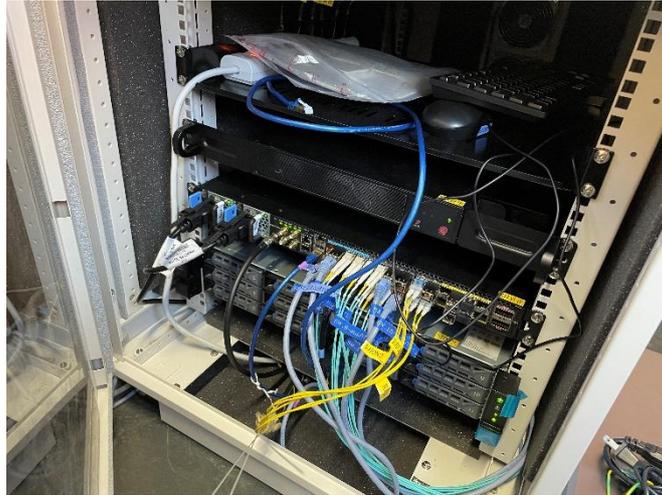


図 2.2-4 ネットワーク構成について

使用する構成機器を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 機器一覧

項番	システム名	メーカー名	型式	数量
1	ベースバンドユニット (CU/DU)	シャープ	試作品	1
2	アンテナユニット(RU)	シャープ	試作品	3
3	コアネットワーク(5GC)	シャープ	試作品	1
4	ローカル 5G 端末	シャープ	試作品	5
5	8K カメラ	BOSMA	DC0200	3
6	中継 PC	Dynabook	PD10KLM131BES21	3
7	配信サーバ兼、 再生 PC	サードウェーブ	GALLERIA XA7C-R37	2
8	8K モニタ	シャープ	8T-C60DW	2
9	制御用 PC	Dynabook	A6BEHSV8C921	1
10	クラウド 8K 映像処理サーバ	AWS	g4dn.xlarge	2
11	クラウドストレージ	AWS	t3.xlarge	1
12	ルータ	NEC	Aterm WG2600 HP3	2
13	iPhone	Apple	iPhone X	2
14	iPad 第 8 世代	Apple	iPad 8 th Wi-Fi	1
15	Amazon Fire HD	Amazon		5
16	Dynabook V83/HS	Dynabook	A6V7HSF8MB21	2
17	8K マルチパーパスカメラ (カメラ部)	アストロデザイン	AB-4830	1
18	8K マルチパーパスカメラ (入出力部)	アストロデザイン	AC-4829	1
19	8K エンコーダ	NxVi	NxVi880E Theia T1	1
20	カメラ側ハウジングケース	アストロデザイン	試作品	2
21	カメラオプション収納側 ハウジングケース	アストロデザイン	試作品	2



(a) ベースバンドユニット(CU/DU)、コアネットワーク (5GC)



(b) アンテナユニット(RU)

図 2.2-5 本ローカル 5G システム

表 2.2-2 本ローカル 5G システム (基地局) の概要
(a) ベースバンドユニット (CU/DU)

項目	諸元
製造ベンダ	シャープ(試作機)
台数	1 台
設置場所	屋外
同期方式	同期/準同期
周波数帯	4.7GHz 帯
対応仕様	3GPP Release 15
SA/NSA	5G SA (Standalone)
チャンネル帯域幅	100MHz (DL/UL)
中心周波数	4.85GHz (DL/UL)
MIMO 対応	下り 4x4 / 上り 2x2
TDD 設定	同期対応 (DDDSUUDDDD) 準同期対応 (DDDSUUUSUU) 準同期 2 対応(DDSUUUSUU) 準同期 3 対応(DSUUUUSUU) D:Downlink slot, U:Uplink slot, S:Special slot
変調方式	AMC(最大 256QAM)
遅延	10ms 以下
RAN 方式	1BBU に 3RU 接続(3 セル化)可能
接続ユーザ数	384 / 1BBU (128 / RU)
ハンドオーバー	RU 間サポート (Intra-frequency HO) *Inter-frequency HO については非サポート
優先制御	5GQI 2, 9 に対応
インタフェース	バックホール : NG フロントホール : O-RAN 標準規格(option 7.2)
外形寸法	約 446(W) x 711(D)x 87(H) mm
重量	約 30kg

(b) アンテナユニット (RU) の特性概要

項目	諸元
製造ベンダ	シャープ(試作機)
対応仕様	3GPP Release 15
ネットワーク方式	5G SA (Standalone)
対応バンド	N79 (4.8-4.9GHz)
使用周波数	4.84986GHz
帯域幅	100MHz
MIMO 対応	下り 4x4 / 上り 2x2 (8T8R)
変調方式	下り 256QAM / 上り 256QAM
最大空中線電力	24dBm/port
最大 EIRP	44dBm
TDD 設定	同期対応 (DDDSUDDDD) 準同期対応 (DDDSUUDSUU) D:Downlink slot, U:Uplink slot, S:Special slot
接続ユーザ数	128
フロントホール	O-RAN 標準規格(option 7.2)
時刻同期方法	PTP (IEEE1588v2)
外形寸法	約 389.6(W) x 389.6(D) x 134.9(H) mm
重量	約 12kg

(c) コアネットワーク (5GC) 諸元

項目	諸元
製造ベンダ	シャープ(試作機)
対応仕様	3GPP Release 15
NF (Network Function)	AMF/SMF/AUSF/UDM/UPF
インタフェース	N1, N2, N3, N4, N6
接続ユーザ数	最大 10,000
接続 BBU 数	最大 64
スループット	最大 6Gbps
ハンドオーバー	BBU 間サポート
優先制御	5GQI 2, 9 に対応
外形寸法	約 254(W)x226(D)x43(H) mm
重量	約 3.4kg

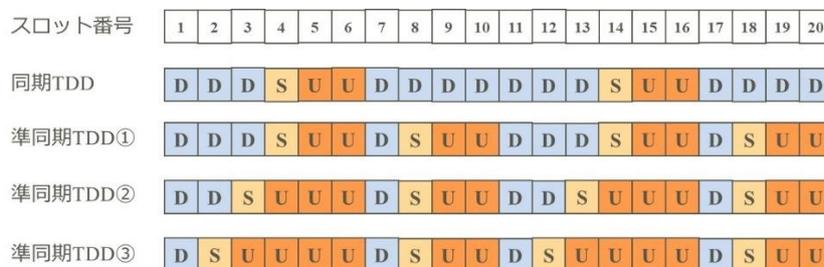


図 2.2-6 対応するフレーム構成について
(D:Downlink slot, U:Uplink slot, S:Special slot)

表 2.2-3 は、使用するローカル 5G 端末の諸元を示す。表 2.2-3 に示すように、本実証試験ではバッテリー駆動可能な端末装置を前提とする。これは、実装するソリューションにおいては、無線関連装置の可搬性を前提とするためである。

表 2.2-3 ローカル 5G 端末の概要

項目	諸元
製造ベンダ	シャープ(試作機)
対応仕様	3GPP Release 15
ネットワーク方式	5G SA (Standalone) / NSA (Non-standalone)
対応周波数帯	n79 (4.6 – 4.9GHz) :NSA, SA n257 (28.2 – 29.1GHz) :NSA
チャンネル帯域幅	100MHz
MIMO 対応	n79:下り 4×4 / 上り 1×1 n257:下り 2×2 / 上り 2×2
変調方式	n79 : 下り 256QAM / 上り 256QAM n257: 下り 64QAM / 上り 64QAM
通信速度	下り最大約 3Gbps / 上り最大約 600Mbps
最大空中線電力	23dBm
TDD 設定(n79)	同期対応 / 準同期対応 (準同期 TDD①, 準同期 TDD② ※ 準同期 TDD③は今後対応予定)
入出力端子	2.5G BASE-T ×1 / USB 3.0(Type-C) ×1
外形寸法	約 157 × 84 × 16mm
重量	約 270g

以下では、主に課題実証で使用する機材の概要を示す。超高精細 8K カメラの概要は以下のとおりである。



図 2.2-7 8K カメラ

表 2.2-4 8K カメラの概要

項目	諸元
製造ベンダ	Guangzhou BOSMA Corp.
解像度等	7680×4320@30fps 対応
映像符号化方式	H.265, H.264
符号化情報速度	最大 200Mbps
外形寸法	126×108×108.7mm (バッテリー、レンズ含まず)
重量	約 1.25kg (バッテリー、レンズ含まず)
入出力端子	USB3.0, Ethernet, Wi-Fi, HDMI2.1

課題実証では 8K 映像撮影現場が屋外に加え長時間の撮影となるため、小型且つハウジングケースを用いた防水防塵対策が可能である機種であることが必須となる。両条件を満たす 8K カメラであるため、本機種を選定した。

使用する中継 PC サーバの概要は以下のとおりである。



図 2.2-8 中継 PC

表 2.2-5 中継 PC の概要

項目	諸元
CPU	Intel Core m7-6Y75
メモリ	8GB
ストレージ	SSD 256GB
入出力	USB3.0 (Type-A, Type-C)
重量	約 310g (バッテリー込み)
外形寸法	約 165.0(縦)×85.0(横)×20.0(厚さ)mm
OS	Ubuntu 20.04

撮影した 8K 映像を伝送するにあたり必要となる中継 PC はハウジングケースに収納するため小型である必要がある。また今回用いる 8K カメラ BOSMA DC0200 を用いた映像伝送の実績があるため、本機種を選定した。

使用する超高精細 8K デコーダの概要は以下のとおりである。



図 2.2-9 8K デコーダ

表 2.2-6 8K デコーダの概要

項目	諸元
CPU	Intel Core i7-11700
メモリ	32GB
ストレージ	SSD 1TB
グラフィック機能	NVIDIA GeForce RTX 3070 8GB GDDR6
入出力	Gigabit ethernet / HDMI 2.1
重量	約 8.2kg
外形寸法	約 367×169×308 mm
OS	Windows10 pro

8K デコーダ(再生 PC)としてグラフィックカード NVIDIA GeForce RTX3070 を搭載した PC であるため、本機種を選定した。

使用する超高精細 8K モニタの概要は以下のとおりである。



図 2.2-10 8K モニタ

表 2.2-7 8K モニタの概要

項目	諸元
製造ベンダ	シャープ株式会社
型式	8T-C60DW1
画面サイズ	60V 型
最大解像度/フレームレート	7680×4320 60p 対応
入力端子	HDMI2.1×2 系統, HDMI2.0×2 系統,
重量	約 34.0 kg (スタンド込み)
外形寸法	約 135.6(W)×87.0(H)×29.0(D) cm

伝送した 8K 映像を確認するためには 8K 入力に対応したモニタを用いる必要があるため、本機種を選定した。

基地局装置を制御する PC の概要は以下の通りである。



図 2.2-11 制御用 PC

表 2.2-8 制御用 PC の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Dynabook
型式	A6BEHSV8C921
CPU	Intel Core i3-1115G4
OS	Windows 10 pro 64bit
メモリ	4GB
Wi-Fi	IEEE802.11 ax(2.4Gbps) + IEEE802.11 ac / a / b / g / n
Bluetooth	5.1
LAN	1Gb 対応 LAN ポート
SSD	128GB
外形寸法	379 × 257.9 × 16.9 ~ 23.9 mm
重量	2.3 kg

使用するクラウド上の 8K 映像処理サーバの概要は以下の通りである。

表 2.2-9 AWS クラウド g4dn.xlarge の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Amazon.com, Inc.
型式	g4dn.xlarge
GPU	NVIDIA T4 GPU × 1
vCPU	Intel Cascade Lake CPU × 4
メモリ	16 GB
ストレージ	125 GB
ネットワーク帯域幅	最大 25G bps
EBS 帯域幅	最大 3.5 Gbps

映像解析を行うクラウドサーバには GPU があることが必要不可欠であり、本クラウドサーバはその要件を満たしたサーバであるため、本クラウドサーバを選定した。

使用するクラウド上のストレージサーバの概要は以下の通りである。

表 2.2-10 AWS クラウド t3.xlarge の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Amazon.com, Inc.
型式	t3.xlarge
vCPU	Intel Cascade Lake CPU × 4
メモリ	16 GB
ネットワークバースト幅	5 Gbps
EBS バースト幅	最大 2780 Mbps

本クラウドサーバは 8K 映像データを一時的に貯めるためクラウドサーバであり、費用対効果の観点から本クラウドサーバを選定した。

使用するルータの概要は以下の通りである。



図 2.2-12 ルータ

表 2.2-11 ルータの概要

項目	諸元
製造ベンダ	NEC
型式	Aterm WG2600HP3
WAN インタフェース	8ピンモジュラージャック(RJ-45) × 1 1000BASE-T / 100BASE-TX (Auto MDI / MDI-X 対応) 1000Mbps / 100Mbps 全二重 / 半二重
LAN インタフェース	8ピンモジュラージャック(RJ-45) × 4 (スイッチング HUB × 4) 1000BASE-T / 100BASE-TX (Auto MDI / MDI-X 対応) 1000Mbps / 100Mbps 全二重 / 半二重
無線 LAN インタフェース	IEEE802.11ac / n / a / g / b (内蔵)アンテナ: 5GHz 送信 4 × 受信 4 2.4GHz 送信 4 × 受信 4
利用プロトコル	TCP / IP
外形寸法	約 38(W) x 129.5(D)x 170(H) mm
重量	約 0.6kg

本ルータは、コアネットワーク部とネットワークを分離する用途で使用しており、現場への設置を考慮しサイズの小さいルータであるため、本機種を選定した。

映像確認用に使用する端末は以下の通りである。



図 2.2-13 iPhone X

表 2.2-12 iPhone X の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Apple Inc.
型式	iPhone X
Wi-Fi	802.11 ac
Bluetooth	4.2
ディスプレイサイズ	5.8 インチ
解像度	2436 × 1125 458ppi
外形寸法	70.9 × 7.7 × 143.6 mm
重量	0.17kg

本機種は現場社員が使用している端末であるため、本機種を選定した。



図 2.2-14 iPad 第 8 世代

表 2.2-13 iPad 第 8 世代の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Apple Inc.
型式	iPad 8 th Wi-Fi
Wi-Fi	802.11 a / b /g / n /ac
Bluetooth	4.2
ディスプレイサイズ	10.2 インチ
解像度	2160 × 1620 264 ppi
外形寸法	174.1 × 7.5 × 250.6 mm
重量	0.49 kg

本機種は現場社員が使用している端末であるため、本機種を選定した。



図 2.2-15 Amazon Fire HD

表 2.2-14 Amazon Fire HD の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Amazon.com, Inc.
型式	
Wi-Fi	802.11 a / b / g / n / ac
Bluetooth	5.0
ディスプレイサイズ	10.1 インチ
解像度	1920 × 1200 224 ppi
外形寸法	166 × 9.2 × 247 mm
重量	0.47 kg

本機種は現場社員が使用している端末とは異なる機種であるが、OS 等による見え方の差異がないか確認するため、本機種を選定した。



図 2.2-16 Dynabook V83/HS

表 2.2-15 Dynabook V83/HS の概要

項目	諸元
製造ベンダ	Dynabook 株式会社
型式	A6V7HSF8MB21
CPU	Intel Core i5-113G7
OS	Windows 10 pro 64bit
メモリ	8 GB
Wi-Fi	IEEE802.11 ax(2.4Gbps) + IEEE802.11 ac / a / b / g / n
Bluetooth	5.1
LAN	1Gb 対応 LAN ポート
ワイヤレス WAN	5G 対応ワイヤレス WAN
SSD	256GB
外形寸法	166 × 9.2 × 247 mm
重量	1.05 kg

SIM カードを挿入することにより、ローカル 5G 端末として使用が可能であり、尚且つ携帯端末以外の映像確認端末としても利用が可能であるため、本機種を選定した。

使用する 8K マルチパーパスカメラの概要は以下の通りである。



図 2.2-17 8K マルチパーパスカメラ(カメラ部)

表 2.2-16 8K マルチパーパスカメラ(カメラ部)の概要

項目	諸元
製造ベンダ	アストロデザイン株式会社
型式	AB-4830
解像度等	7680×4320@30fps 対応
映像符号化方式	H.265, H.264
符号化情報速度	最大 200 Mbps
外形寸法	65(W)×65(H)×88.5(D) mm (突起物含まず)
重量	340 g
入出力端子	USB3.0, Ethernet, Wi-Fi, HDMI2.1



図 2.2-18 8K マルチパーパスカメラ(入出力部)

表 2.2-17 8K マルチパーパスカメラ(入出力部)の概要

項目	諸元
製造ベンダ	アストロデザイン株式会社
型式	AC-4829
解像度等	7680×4320@30fps 対応
映像符号化方式	H.265, H.264
符号化情報速度	最大 200 Mbps
外形寸法	210(W)×133(H)×370(D) mm (突起物含まず)
重量	約 4 kg
入出力端子	USB3.0, Ethernet, Wi-Fi, HDMI2.1

8KIP 配信に係る遅延要因を検証するにあたって、エンコード機能を有した 8K カメラとエンコード機能を有さない 8K カメラによる比較検証を行うことにより、遅延要因の一つとして考えられる映像のエンコード処理時間が明らかとなる。

映像のエンコード機能を有さず、比較対象である 8K カメラと同じ画角の映像撮影が可能なマイクロフォーサーズレンズに対応し、実証試験現場に設置可能である小型の 8K カメラであるため、本機種を選定した。

使用する 8K エンコーダの概要は以下の通りである。



図 2.2-19 8K エンコーダ

表 2.2-18 8K エンコーダの概要

項目	諸元
製造ベンダ	NxVi Microelectronics Technology
型式	NxVi880E Theia T1
解像度等	7680×4320@30fps 対応
映像符号化方式	H.265, H.264
符号化情報速度	最大 200 Mbps
外形寸法	210(W)×133(H)×370(D) mm (突起物含まず)
重量	約 4 kg
入出力端子	USB3.0, Ethernet, Wi-Fi, HDMI2.1

8KIP 配信に係る遅延要因を検証するにあたって 8K マルチパーパスカメラ AC-4829/AB-4830 を用い映像配信を実施するが、対象機種はエンコード機能を有していないため 8K エンコーダが必要となる。本機種は実証現場に設置可能である小型のエンコーダ且つ対象の 8K マルチパーパスカメラとの動作が検証されているため、本機種を選定した。

使用するハウジングケースの概要は以下の通りである。



図 2.2-20 カメラ側ハウジングケース

表 2.2-19 カメラ側ハウジングケースの概要

項目	諸元
製造ベンダ	アストロデザイン株式会社
型式	-
動作温度	-5 °C ~ 50 °C
動作湿度	~ 95 %
防水防塵	IP55 相当
電源	AC100V 接続
設置環境	屋外
ヒーター機能	ON 5 °C / OFF 15 °C (± 3 °C 100V 20W 想定)
ワイパー機能	手動
冷却ファン	ON 30 °C / OFF 20 °C (± 3 °C 100V 6W 想定)
曇り止め	ON 5 °C / OFF 15 °C (100V 2.5W 想定)
三脚取り付け穴	あり
取り付け方法	外装左側面に固定
外形寸法	180(W) × 212(H) × 500(D) mm
重量	8.5 kg



図 2.2-21 カメラオプション収納側ハウジングケース

表 2.2-20 カメラオプション収納側ハウジングケースの概要

項目	諸元
製造ベンダ	アストロデザイン
型式	-
動作温度	-5℃～50℃
動作湿度	～95%
防水防塵	IP55相当
電源	AC100V 接続
設置環境	屋外
ヒーター機能	ON 5℃ / OFF 15℃ (±3℃ 100V 20W 想定)
ワイパー機能	-
冷却ファン	ON 30℃ / OFF 20℃ (±3℃ 100V 6W 想定)
曇り止め	-
三脚取り付け穴	-
取り付け方法	外装背面に固定
外形寸法	300(W) × 121(H) × 400(D) mm
重量	7.5 kg

8K映像撮影現場は屋外であり、防水防塵対策が必須となる。カメラだけでなく、伝送に必要なPCやローカル5G端末等を収納する必要がある。そこで映像伝送に必要なカメラやレンズ、中継PCまたローカル5G端末を収納することが可能なハウジングケースであるため、本ケースを選定した。

使用する伝搬シミュレーションソフトウェアの概要は以下の通りである。

表 2.2-21 伝搬シミュレーションソフトウェア RapLab Advanced の概要

項目	諸元
調達先	(株)構造計画研究所
基本機能	3D レイトレース法(イメージング法)電波伝搬シミュレータ(受信レベル, 伝搬損失, 遅延プロファイル, 角度プロファイル, 周波数特性等)
他機能等	コース解析/エリア評価/TxRx 一括配置/電波吸収体対応/反射係数直接入力/バッチ計算ツール/地形データ作成ツール/建物データ変換ツール/表面の粗さ
OS	Microsoft Windows 7/8/8.1/10 64bit
CPU	Intel Core i7 4 コア以上のモデル (推奨)
RAM	8GB 以上 (推奨)
ストレージ	SSD 256GB 以上 (推奨)
解像度	1920×1080 以上 (推奨)

2.3 システム機能・性能・要件

本実証試験では、高速道路工事現場にローカル 5G エリアを構築し、遠隔から工事の進捗確認をするために、超高精細 8K カメラで撮影した映像を乱れなく伝送できることを確認する。具体的には、アップリンクとダウンリンクそれぞれにおいて最大 120Mbps、平均 80Mbps 程度(暫定)を確保できることを確認する。また、この時にローカル 5G 端末とコアネットワーク機器の間のラウンドトリップ時間が 200ms(暫定)以下となることを確認する。上記性能、特にアップリンクにおける伝送速度を確保するために、基地局装置は少なくとも制度化済準同期パターン (DDDSUUDSUU)に対応し、上りの変調方式として 256QAM に対応する機種を選定した。また、端末装置については上りの変調方式として 256QAM に対応し、送受信ともに最大 600Mbps 以上となっている機種を選定した。なお、実際の試験においては、動作安定を重視する観点から、最大の変調方式を 64QAM に設定して試験を行った。

なお、超高精細 8K 映像は最終的にはクラウド上の超高精細 8K 映像処理サーバにアップロードして、切り出しや人物トラッキングの映像処理を実行してコンテンツを生成し、遠隔にいる監督者、作業者に配信する応用方法を考えているため、乱れなく映像伝送することが必要となる。

2.4 免許及び各種許認可

本実証で申請した内容は以下の通りである

- ・対象周波数 4.8-4.9GHz (100MHz)
- ・システム構成 スタンドアローン(SA)構成

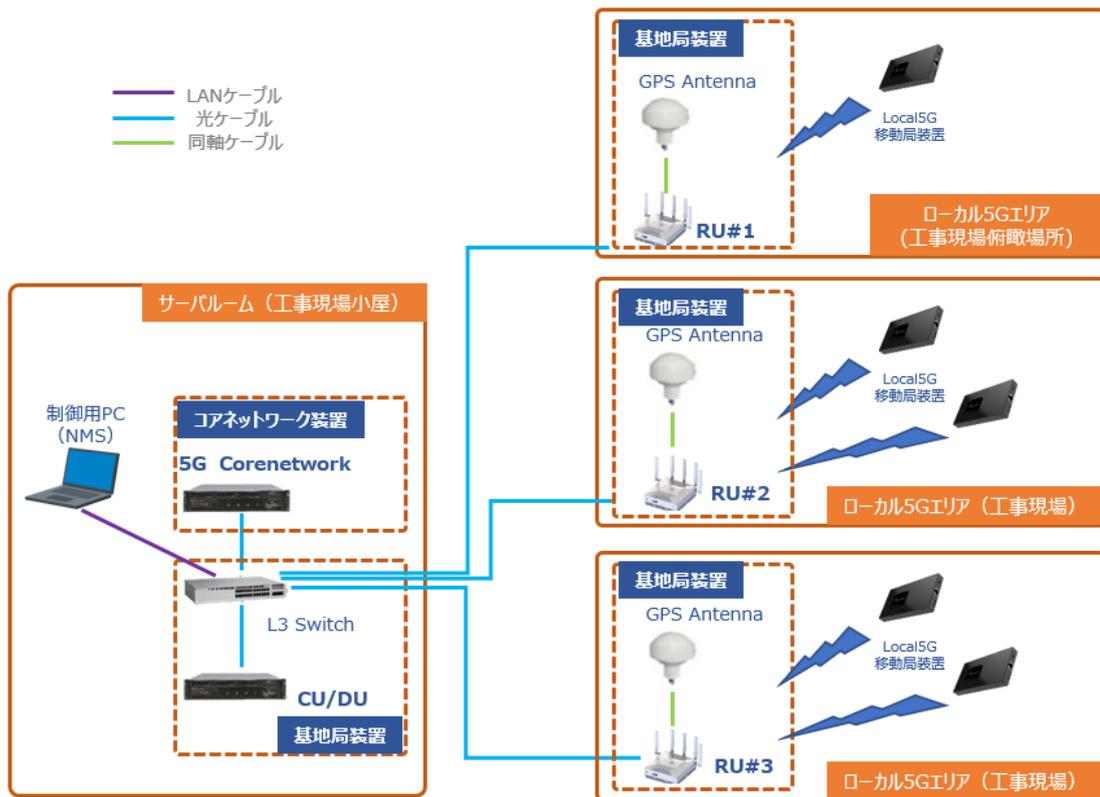


図 2.4-1 システム構成概要図

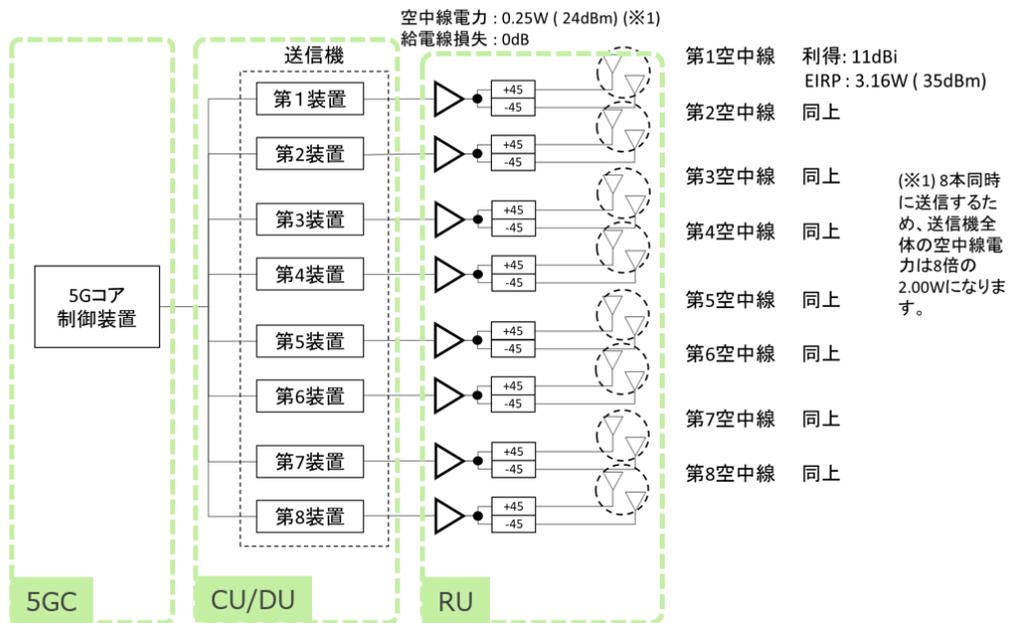


図 2.4-2 基地局系統図

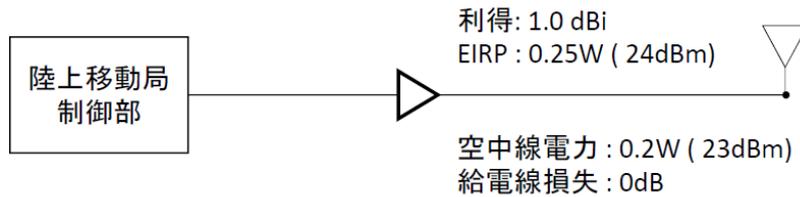


図 2.4-3 陸上移動局ブロック構成図

表 2.4-1 ローカル 5G 実験試験局（基地局相当）の諸元

局種	実験試験局（基地局相当）
局数	3
工事設計認証番号	020-210210
希望する免許の期間	令和3年11月16日から令和4年10月31日
希望する識別信号	シャープ ローカル5Gじっけん きち たかつき1～3
周波数	4.84986GHzの1波
占有周波数帯幅	99M7（4.80000 – 4.89972GHzの99.72MHz幅）
電波の型式	X7W
通信方式	TDD
多重化方式／多元接続方式	OFDMA および TDMA
変調方式	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
空中線電力	2W(33dBm)（8ポート合計）
常置場所	大阪府高槻市 新名神高速道路梶原トンネル工事現場 高槻高架橋周辺（北緯＝34度52分2秒197、東経＝135度38分54秒848）
移動範囲	大阪府高槻市 新名神高速道路梶原トンネル工事現場 高槻高架橋周辺（北緯＝34度52分2秒197、東経＝135度38分54秒848） 千葉県美浜区中瀬1-9-2 シャープ幕張ビル内
アンテナの種類	その他指向性アンテナ
利得	最大11dBi
指向特性	指向性あり
偏波面	45度偏波

表 2.4-2 ローカル 5G 実験試験局（陸上移動局相当）の諸元

局種	実験試験局（陸上移動局相当）
局数	5
工事設計認証番号	003-200154
希望する識別信号	シャープ ローカル 5G じっけん いどう たかつき 1～5
周波数	4.84986GHz
占有周波数帯幅	99M7（4.80000 – 4.89972GHz の 99.72MHz 幅）
電波の型式	D1A, D1B, D1C, D1D, D1F, D1X, D7W G1A, G1B, G1C, G1D, G1F, G1X, G7W
通信方式	TDD
多重化方式／多元接続方式	OFDMA 又は SC-FDMA
変調方式	Pi/2BPSK、QPSK、16QAM、64QAM、256QAM
空中線電力	200mW(23dBm)
免許の期間	令和 3 年 11 月 16 日から令和 4 年 10 月 31 日
常置場所	大阪府高槻市 新名神高速道路梶原トンネル工事現場 高槻高架橋周辺（北緯＝34 度 52 分 2 秒 197、東経＝135 度 38 分 54 秒 848）
移動範囲	大阪府高槻市 新名神高速道路梶原トンネル工事現場 高槻高架橋周辺（北緯＝34 度 52 分 2 秒 197、東経＝135 度 38 分 54 秒 848） 千葉市美浜区中瀬 1-9-2 シャープ幕張ビル内
アンテナの種類	単一アンテナ
利得	1.0dBi
指向特性	無指向性
本数	1 本
偏波面	垂直

本実証試験では、工事進行中の試験現場において、図 2.1-2 に示す法面エリアおよび棧橋エリアを必要カバーエリアとした。

本実証で検証するローカル 5G では、ローカル 5G の対象周波数である 4.7GHz 帯および 28GHz 帯のうち、重機などによる遮蔽等の影響を考慮し、比較的カバレッジの取りやすい 4.7GHz 帯を使用するものとした。また、屋外利用となることから、屋外解放されている 4.8～4.9GHz 帯について、実験局免許申請を実施した。

今回使用する周波数帯は、屋外解放されているものとなるが、商用免許で申請を行うことを考えた場合、現行の制度においては、移動体での通信は自己土地内ではしか認められていない。今回実証試験環境は、工事進行中の建設現場内での無線通信試験のみを行っているが、様々な建設現場への展開を考えると、自己土地内だけではなく、現場間の公道や他者の土地をまたがる可能性もあり、免許人の選定には注意を要すると考えられる。また、免許人の選定に加えて、移動体での通信が許可される場所と禁止される場所を明確にする等の運用面での対応も必要になると考えられる。

本実証試験では、シャープが開発中の試験機をローカル 5G 機器として選定した。試作機の段階であり、運用には注意を要する部分も存在するため、不測の事態に即時対応できることも想定し、シャープが免許人として免許申請をおこなった。免許申請は機器の常置場所が大阪府であることから近畿総合通信局に対して行った。

図 2.4-4 に免許申請に関わるスケジュールをまとめた。近畿総合通信局への事前相談から本免許交付までにおよそ 2 か月であったが、その間、本実証試験に使用した基地局アンテナユニットおよび移動局装置についての技適認証を別途進めていたことから、最終版の免許申請書の受理から本免許受領までは、約 10 日で完了することができた。



図 2.4-4 免許申請概要

ローカル5G用無線局の免許を付与

—近畿での令和3年度課題解決型ローカル5G開発実証の開始—

近畿総合通信局（局長：淵江 淳（ふちえ あつし））は、総務省が行う令和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」で用いる無線局に対し、本日、免許を付与しました。

総務省では、ローカル5Gのより柔軟な運用の実現及び低廉かつ安心安全なローカル5Gの利活用の実現に向け、令和2年度からローカル5G等を活用したソリューションを創出する「課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」に係る実証事業を実施しています。

本日、免許を付与した無線局の概要は下記の通りです。（50音順）

【無線局の概要】

開発実証案件1

免許人名	シャープ株式会社
無線局の種類別	実験試験局
周波数帯	4.7GHz帯
実証実験の地域	大阪府高槻市（新名神高速道路延長工事現場）
本無線局に係る実証の概要	別紙1のとおり

図 2.4-5 総務省近畿総合通信局様関連プレスリリース 一部抜粋

（全体：近畿総合通信局 報道資料 2021/12/17 ローカル5G用無線局の免許を付与—近畿での令和3年度課題解決型ローカル5G開発実証の開始—（soumu.go.jp））

表 2.4-3 には、本実証試験場所である大阪府高槻市における無線免許に係る調整相手を整理する。ここでは、先に示した調整対象区域内におけるキャリア5G、他免許人によるローカル5G、及び隣接周波数における無線アクセスシステムを調整対象とする。表 2.4-3 に示すように、本実証試験の周辺においては、近傍にて株式会社NTTドコモのキャリア5Gサービスが展開されており、また、調整対象区域内にはコニカミノルタ株式会社がローカル5G免許人として、JFEスチール株式会社が5GHz帯無線アクセスシステム免許人として登録されている。

5GHz帯無線アクセスシステムについては、本実証試験エリアから一定の距離があることから干渉が起きる可能性が低いと考え、調整の必要はないと検討した。キャリア5Gシステムについては、本実証試験エリアでサービスを展開する株式会社NTTドコモに問い合わせ、問題ない旨、回答を得た。他免許人のローカル5Gではコニカミノルタ株式会社様の通信エリアが、やはり干渉調整区域からは一定の距離があったものの、万が一を考慮し、11月上旬に先方と議論を行い、問題ない旨、回答をえた。

表 2.4-3 調整区域内における他無線免許人の状況

キャリア 5G (4.5-4.6GHz)	他免許人のローカル 5G (4.6-4.9GHz)	5GHz 帯無線アクセスシステム (4.9-5.0GHz)
株式会社 NTT ドコモ	コニカミノルタ株式会社	JFE スチール株式会社

最後に、表 2.4-4 に、本実証試験関係者内におけるローカル 5G 用無線局運用に係る資格取得者について整理する。本実証試験では、ローカル 5G 用無線局の運用は、装置製造メーカーであるシャープ(株)の人員が中心となって行ったが、不測の事態に備えること、また、令和 4 年度以降の継続的な運用の観点からも、コンソーシアム内で資格取得を進めた。なお、表 2.4-4 は、本実証試験に関係者に閉じた整理したものとなっており、本実証コンソーシアム参画企業のすべての資格取得者の状況を整理したものではないことに注意されたい。

表 2.4-4 資格取得者の状況

所属	資格取得の状況
シャープ	陸上特殊無線技師 1 級：3 名 陸上特殊無線技師 2 級：2 名 陸上特殊無線技師 3 級：3 名
清水建設	陸上特殊無線技師 1 級：0 名 陸上特殊無線技師 2 級：0 名 陸上特殊無線技師 3 級：5 名

2.5 その他要件

基地局装置、コア装置については、「ローカル 5G 導入に関するガイドライン」に留意し、サプライチェーンリスク対策を含むサーバーセキュリティ対策を実施している。「セキュリティ・バイ・デザイン」の考えで開発を行い、脆弱性を含まない安全設計、サイバーセキュリティに関するソフトウェアレビュー、セキュリティに関する脆弱性の評価により安全の確保を行っている。

本実証では外部ネットワークへの接続を行う計画であり、具体的には、クラウドサーバにおいて 8K 映像処理が行うが、データの取り扱いについては ISO27001 に従った、情報保護の対策を行う。また、現地での映像確認のために、現地にオンプレミスに配信サーバを設置する計画としているため、当該サーバの第三者からのアクセスが行われないように、当該サーバが設置されているハウスについては、試験実施中は、本実証試験関係者が必ず立ち合いの上で、立ち入り制限を行い、また夜間などは施錠を徹底する等の対策を行っている(図 2.5-1 参照)。

超高精細 8K 映像伝送で使用する送信サーバ、中継サーバ、超高精細 8K デコーダはシャープの開発品であるが、社内のラボ環境、5G を利用した映像伝送試験、並びにローカル 5G を利用した超高精細 8K 映像伝送試験で実績があるものを改良して使用する。



図 2.5-1 サーバ設置場所

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

図 3.1-1 および表 3.1-1 に、本実証試験で想定するローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）の概要を示す。本実証試験では、先に示した高速道路のトンネル出入口付近を試験環境として、ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定(第 3.3.1 節記載)、電波伝搬モデルの精緻化(第 3.3.2 節記載)および準同期 TDD の追加パターンの開発(第 3.3.4 節記載)を実施する。



図 3.1-1 実証概要

表 3.1-1 技術実証の概要

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

3.2 実証環境

先の実証試験環境図に示す通り、本実証試験環境は、高速道路トンネルの出入り口付近を対象としており、トンネルをはじめとした構造物の材質や、壁・柱等の形状により、伝搬環境が特徴づけられることが予想される。また、当該トンネルは山間部にその出入り口が存在することから、周辺の丘陵の形や植生の影響を受ける可能性もある。そのため、本実証試験では、電波伝搬特性を測定するとともに、当該環境における電波伝搬モデルの精緻化に取り組み、本実証試験が想定するソリューションの実装に資するのは当然として、同様の環境を想定したローカル 5G ソリューションの実装・横展開にも資することを目標とする。

報告書作成にあたっては、実証試験実施時期における作業工程の進捗に従い、通信エリア内における建造物の状況と、その材質、展開されている重機の形状や作業員の数、周辺の丘陵の状況（斜面角度等）や樹木の状況について、以下に記載の評価結果とともに分析・考察に活用する。

図 3.2-1 は、本実証試験のうち、準同期 TDD の追加パターンの検討に関する概要図であ

る。詳細は後述するが、本実証試験では、超高精細映像伝送を想定し、2020年12月に制度化された準同期パターンに加えて、図3.2-1に示す追加準同期パターンを用いた場合の伝送特性について評価を行い、主に、上りリンクへの大容量伝送が要求されるソリューションを想定したローカル5G伝送システムの開発を計画している。なお、追加準同期パターンを用いた場合の、共用検討については、現地環境を想定した電波伝搬シミュレーションによって、評価を行う。

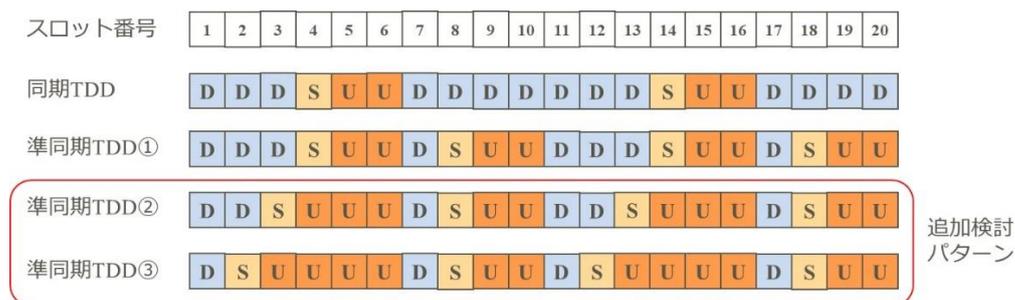


図 3.2-1 準同期 TDD の追加パターンの開発について

3.3 実証内容

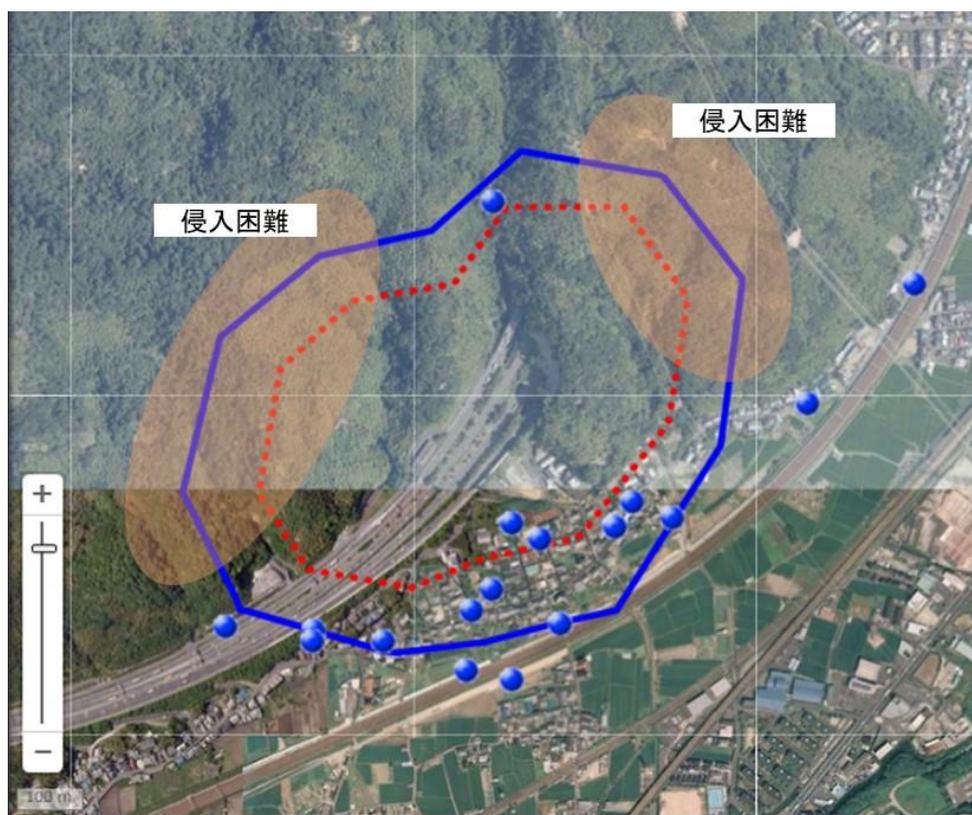
3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定

本実証試験では、図3.3-1に示す測定地点において、実際の受信電力の測定を実施する。また、実測値と、算出式の値との間に乖離が見える場合、後述するエリア精緻化の検討によって得られる想定ポイントを考慮にいれ、閾値が測定されるポイントの予測と実測を繰り返し行い、カバーエリア及び調整対象区域の閾値が測定される距離を確認する。

また、図3.3-2に示す想定測定地点においても、実際の受信電力と、ローカル5Gを用いたソリューションの所要性能を確認するために、アップリンクの伝送スループットの測定を実施する。



(a) カバーエリア端



(b) 干渉調整エリア端

図 3.3-1 想定測定地点(カバーエリア端および干渉調整エリア端)

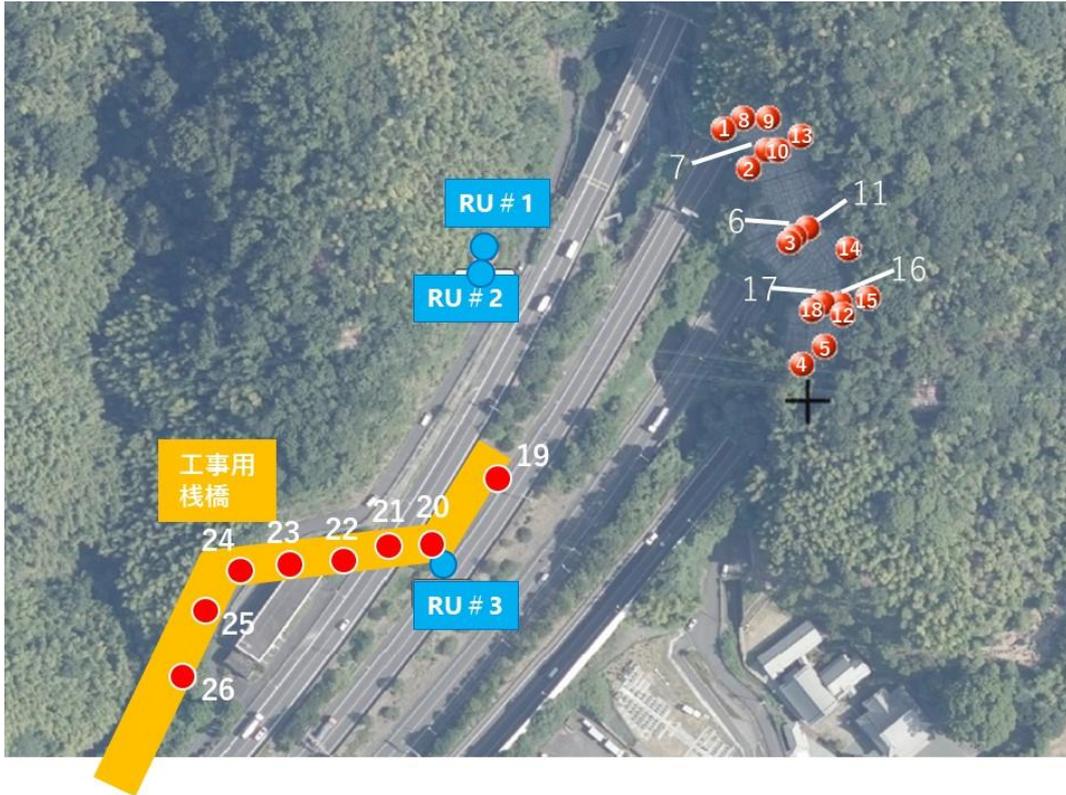


図 3.3-2 想定測定地点(カバーエリア内)

3.3.1.1 実証目標

表 3.3-1 に、本実証試験が想定するソリューションを想定したローカル 5G の所要性能をまとめる。本実証試験では、超高精細映像伝送を基本としたソリューションの実装を目指している。そのため、ローカル 5G には、大容量伝送、特に、端末装置から基地局装置への上りリンクの大容量伝送が期待される。具体的には、8K 解像度の超高精細映像伝送の実現のために、アプリケーションレイヤ（アプリレイヤ）において、最大 120Mbps のアップリンク伝送スループットの実現が要求される。また、画像処理を行うサーバに対して、安定して映像データを送るために、通信区間の遅延時間は 200ms 以下の実現が要求される。なお、ここでの通信区間は、無線区間に加え、カメラ出力からクラウドサーバまでの有線ネットワークを含めた区間を想定している。当該区間において課題実証のソリューション実現に要求される 200ms を要求値として設定する。

表 3.3-1 ローカル 5G の所要性能

想定ソリューション	所要品質
超高精細 8K 解像度の超高精細映像伝送	所要最大スループット：120Mbps (上りリンク/アプリケーションレイヤ) 所要遅延時間：200ms (上りリンク/通信区間)

3.3.1.2 評価・検証項目

本実証試験が想定する評価・検証項目をまとめる。本実証試験では、課題実証で検証するソリューションの実装を目指し、受信電界強度（受信電力）、スループットおよび遅延時間の評価を行う。なお、受信電界強度に関しては、本実証試験で実装を目指すソリューションにおいては、上りリンク伝送を主体とするが、下りリンク伝送における電波伝搬測定結果を測定する。複信方式として時間分割複信(TDD)を想定するから、伝搬路の可逆性により、当該電波測定結果は上りリンク伝送の受信電界強度として活用可能である。また、今後の土木作業現場や他ローカル 5G ソリューション展開において、上りリンク伝送と下りリンク伝送の活用のいずれに対する技術検討にも活用可能である。なお、遅延時間の測定については、8K 高精細カメラから、実際に映像解析を行う解析エンジンが実装されているクラウドサーバまでの間で ping による測定を実施する。ここでの通信区間は、無線区間に加え、カメラ出力からクラウドサーバまでの有線ネットワークを含めた区間を想定している。当該区間において課題実証のソリューション実現に要求される 200ms を要求値として設定する。

3.3.1.3 評価・検証方法

評価項目 1 受信電界強度及び遅延プロファイル

- ・評価範囲内において、端末(もしくは測定器)を移動させ、各測定ポイントにおける受信電力および遅延プロファイルを測定する。
- ・上記における受信電力測定結果において、電波法関係審査基準（平成 13 年総務省訓令第 67 号）が規定するエリア算出法（以下、「エリア算出法」という。）に基づいて算出したカバーエリア及び調整対象区域それぞれのエリア端に該当するポイントで実測した受信電力値と、エリア算出法によるカバーエリア及び調整対象区域の閾値とが異なっている場合、それぞれの閾値が実測されるポイントの基地局からの距離を確認する。
- ・電波伝搬シミュレーションにより、上記測定ポイントでの電波伝搬特性(受信電界強度、遅延プロファイル)を算出する。
- ・上記測定結果と、目標性能とを比較し、想定ソリューション実現に向けた見通しを得る。
- ・所要性能を満たしていないと判定した場合、解決の方策について検討し導出する（基地局設置場所に関する考察、基地局アンテナ高の見直しなど）。
- ・

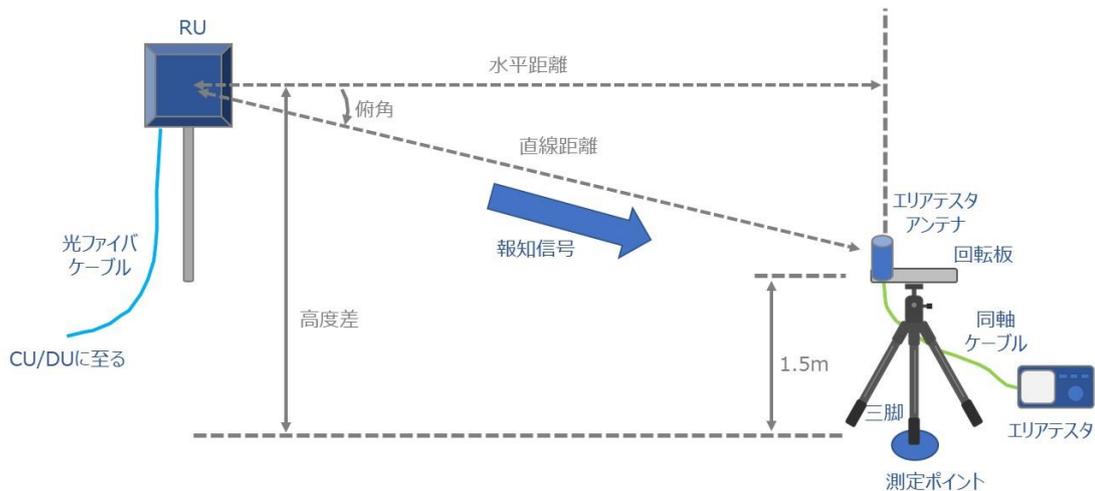


図 3.3-3 受信電界強度および遅延プロファイル測定概要

評価項目 2 スループット

- ・評価範囲内において、端末を移動させ、各測定ポイントにおける無線区間のスループットを測定する。スループットの測定においては、端末装置の実測値と、評価項目 1 で得られた受信電力から算出される想定値も併せて算出する。
- ・測定ポイントとして、最低 3 ポイントを選択し、同一個所によるスループットの時間変動を端末により測定する。
- ・測定ポイントとして、最低 3 ポイントを選択し、超高精細 8K カメラを用いて超高精細映像をアップリンク伝送し、超高精細 8K モニタで受信映像の状態を確認（画質主観評価）。併せて、超高精細 8K デコーダにおいて、アプリレイヤ（もしくは MAC レイヤ）のスループットを測定する。
- ・TDD のスロット構成は、準同期パターン①/②/③についてそれぞれ上記を実施する。
- ・並行して、電波伝搬シミュレーションにより得られるチャネルモデルを用いて 5G NR Release 15 想定のリンクレベルシミュレーションを実施し、想定スループットを評価する。
- ・上記測定結果と、目標性能とを比較し、想定ソリューション実現に向けた見通しを得る。所要性能を満たしていないと判定した場合、解決の方策について検討し導出する（TDD スロット構成の考察、レイヤ間のオーバーヘッドの削減など）。

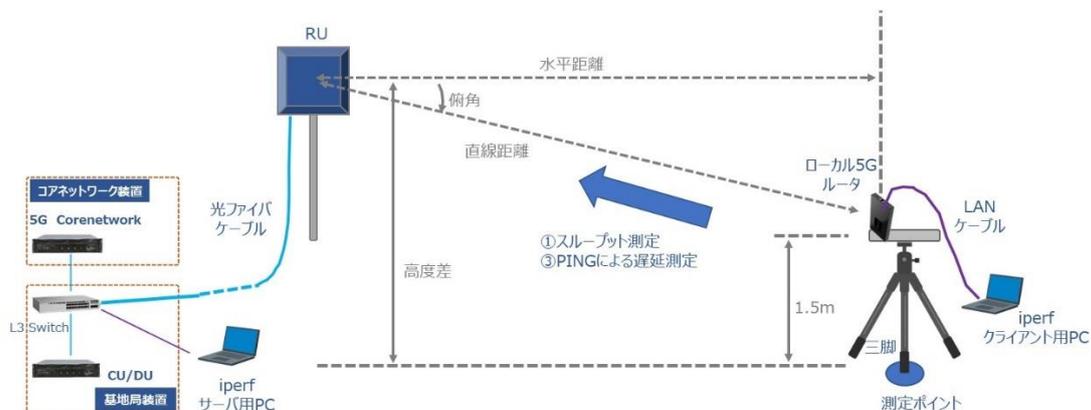


図 3.3-4 スループット測定概要

評価項目 3 遅延時間

- ・ 評価範囲内において、端末を移動させ、各測定ポイントにおいて、ping による想定通信区間の遅延時間の測定を行い、End-to-End のうち、通信区間に関する遅延時間を算出する。
- ・ 映像データを超高精細 8K モニタで観測し、End-to-End の遅延時間を算出する。
- ・ 上記測定結果と、目標性能とを比較し、想定ソリューション実現に向けた見通しを得る。
- ・ 所要性能を満たしていないと判定した場合、解決の方策について検討し導出する（ボトルネックの解析、映像伝送パラメータ（バッファサイズ）の調整等）。

3.3.1.4 実証結果及び考察

(i) カバーエリア内の測定について

カバーエリア内においては、(i-1) 受信電界強度および遅延プロファイルの測定、(i-2) スループットの測定、および遅延時間の測定をそれぞれ行った。以下に結果と考察を整理する。

(i-1) 受信電界強度および遅延プロファイルについて

表 3.3-2 に示す各測定点における受信電界強度および平均遅延スプレッドを整理する。なお、受信電界強度および平均遅延スプレッドについては、アンテナユニット毎の測定が可能であるため、アンテナユニット毎にデータを整理する。

表 3.3-2 受信電界強度及び遅延スプレッド
(a) RU1

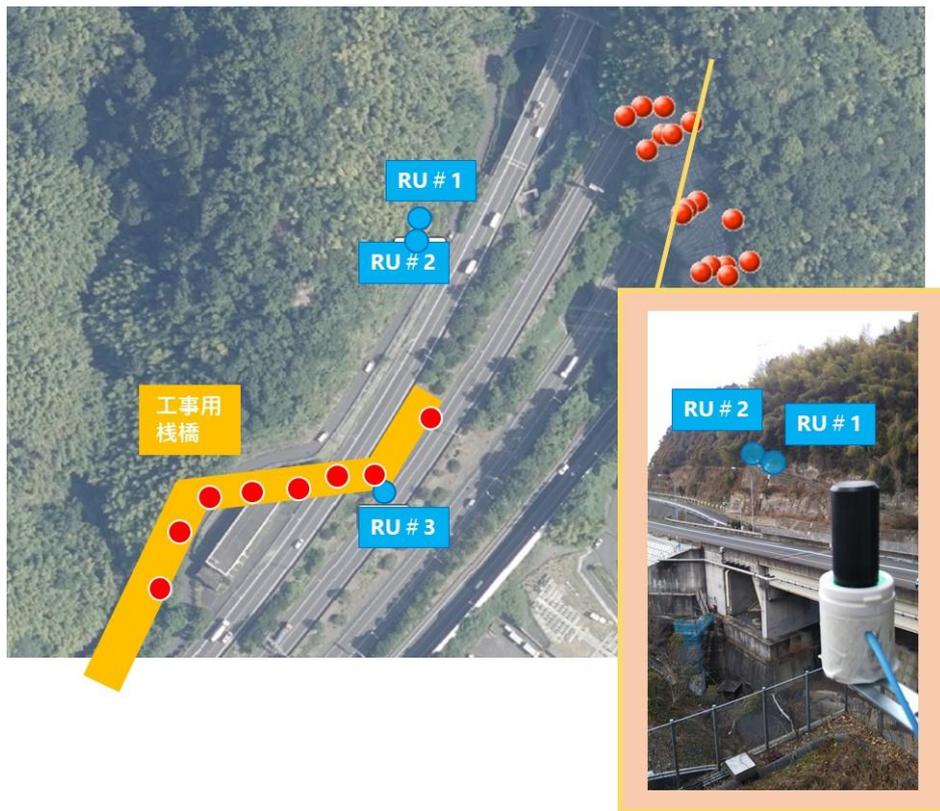
測定ポイント ID	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	-48.97	-49.43	2.00	-47.36	-52.47	0.21
2	-51.47	-51.59	2.76	-47.87	-54.97	0.22
3	-50.47	-51.67	3.87	-47.37	-57.07	0.21
4	-56.07	-56.31	1.51	-54.57	-58.47	0.21
5	-51.37	-51.89	2.84	-48.47	-55.97	0.20
6	-49.97	-50.35	2.82	-46.97	-53.97	0.21
7	-47.47	-47.47	1.73	-45.17	-49.77	0.21
8	-49.37	-49.47	2.90	-45.27	-52.77	0.21
9	-47.47	-48.89	4.45	-45.47	-56.27	0.22
10	-48.87	-48.65	2.40	-45.17	-51.67	0.21
11	-47.87	-48.23	2.95	-44.37	-52.37	0.21
12	-52.22	-52.80	5.02	-46.77	-61.77	0.21
13	-49.37	-49.58	1.94	-47.07	-52.27	0.21
14	-48.57	-48.77	2.31	-46.07	-51.77	0.21
15	-52.87	-53.09	2.40	-49.67	-56.57	0.21
16	-52.57	-52.56	2.18	-55.57	-49.67	0.21
17	-50.57	-51.55	3.04	-48.37	-56.07	0.21
18	-52.47	-52.27	2.46	-48.67	-55.37	0.21
19	-65.67	-66.14	2.50	-63.17	-69.67	0.35
20	-68.97	-69.12	2.02	-66.47	-72.07	0.30
21	-73.17	-73.05	2.11	-70.47	-75.67	0.31
22	-76.77	-76.35	2.86	-71.37	-79.47	0.29
23	-79.52	-79.38	2.56	-75.77	-82.67	0.25
24	-83.87	-83.68	2.61	-80.17	-86.87	0.28
25	-84.67	-84.91	2.01	-82.67	-87.57	0.59
26	-83.07	-83.09	2.55	-80.17	-86.47	0.24

(b) RU2

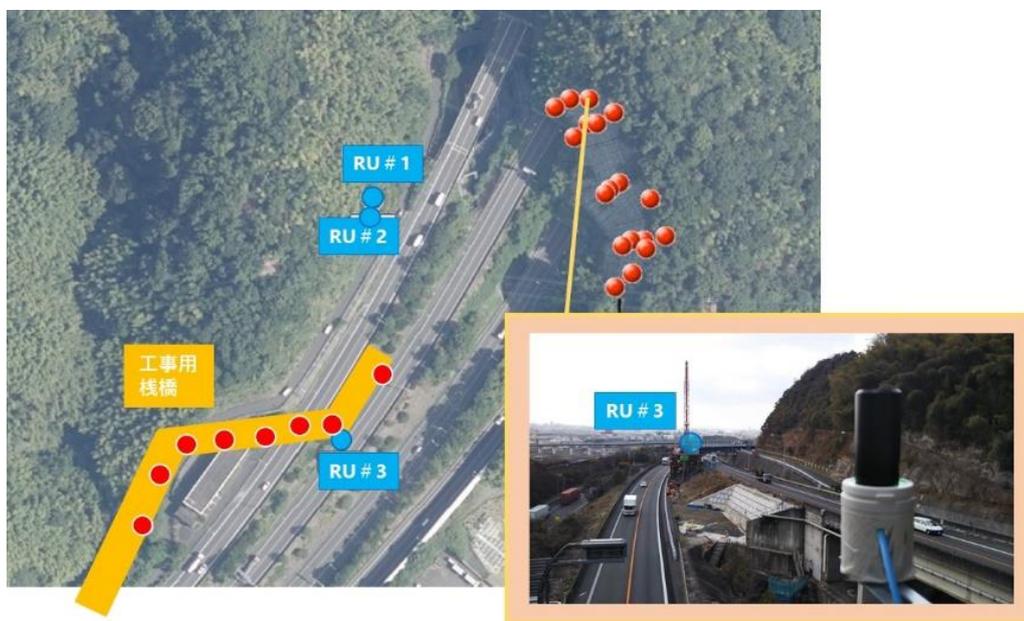
測定ポイント ID	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	-70.57	-70.31	2.43	-66.87	-73.27	0.33
2	-69.37	-69.30	2.71	-65.67	-72.67	0.25
3	-62.77	-62.99	2.67	-59.97	-66.37	0.21
4	-65.67	-66.16	3.57	-61.57	-70.77	0.22
5	-61.27	-61.69	3.16	-57.97	-66.47	0.23
6	-60.87	-61.27	2.49	-58.37	-64.97	0.22
7	-69.17	-69.18	3.05	-65.27	-73.27	0.26
8	-70.37	-70.55	3.07	-66.57	-74.57	0.30
9	-68.67	-68.96	2.92	-65.17	-73.17	0.27
10	-68.17	-68.42	2.81	-65.07	-72.17	0.30
11	-65.17	-65.34	2.54	-62.07	-68.58	0.24
12	-63.57	-63.83	2.18	-60.97	-66.87	0.22
13	-65.87	-65.74	2.32	-62.57	-68.67	0.21
14	-66.67	-66.92	2.86	-63.47	-70.77	0.23
15	-60.07	-60.35	2.10	-57.77	-63.07	0.24
16	-62.17	-62.40	2.86	-58.47	-66.57	0.22
17	-60.37	-60.35	1.40	-58.57	-62.07	0.21
18	-62.77	-63.11	2.08	-60.67	-66.07	0.23
19	-45.47	-45.83	2.21	-43.37	-48.97	0.20
20	-50.17	-50.74	3.39	-46.97	-56.88	0.21
21	-60.27	-59.92	4.00	-54.47	-65.07	0.19
22	-65.67	-66.84	4.98	-61.67	-74.47	0.31
23	-76.17	-76.38	2.78	-72.87	-79.97	1.13
24	-78.97	-78.79	3.95	-70.67	-83.17	0.33
25	-81.67	-81.24	2.86	-77.07	-84.77	0.66
26	-82.47	-82.93	3.05	-79.17	-87.27	0.48

(c) RU3

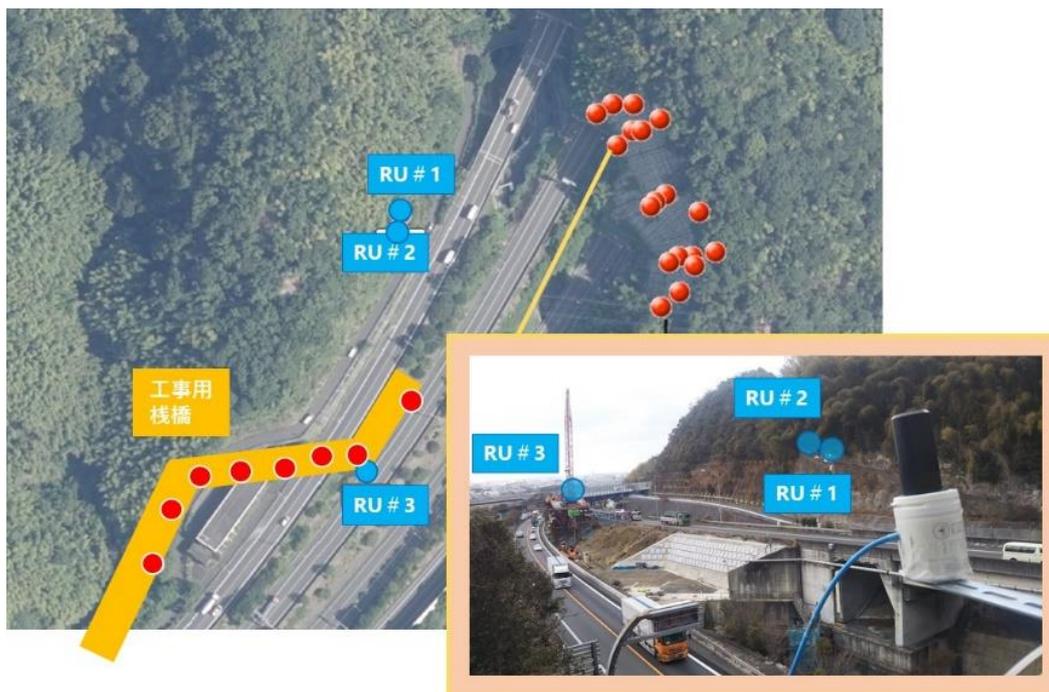
測定ポイント ID	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	-61.27	-61.65	1.62	-59.97	-64.07	0.23
2	-74.27	-73.75	3.60	-68.47	-78.17	0.34
3	-67.67	-68.01	1.73	-66.17	-70.57	0.42
4	-70.42	-70.37	1.21	-68.77	-71.97	0.28
5	-68.37	-69.66	3.01	-66.67	-75.07	0.26
6	-70.57	-70.27	1.86	-67.47	-72.47	0.33
7	-65.27	-65.17	2.34	-61.27	-68.27	0.22
8	-68.77	-68.40	3.05	-63.47	-71.97	0.27
9	-68.57	-68.04	3.55	-62.47	-72.27	0.29
10	-70.87	-71.61	3.33	-67.77	-76.37	0.36
11	-69.17	-69.46	2.67	-66.17	-73.07	0.34
12	-70.27	-70.27	2.59	-66.56	-73.47	0.39
13	-70.27	-70.60	2.12	-68.07	-73.47	0.30
14	-68.57	-68.31	2.18	-65.27	-71.07	0.28
15	-67.47	-67.62	3.03	-63.87	-71.97	0.26
16	-70.27	-70.60	2.12	-68.07	-73.47	0.38
17	-69.17	-69.88	2.38	-67.37	-73.97	0.33
18	-70.87	-70.95	1.81	-68.67	-73.37	0.42
19	-58.67	-58.27	4.12	-52.77	-64.37	0.23
20	-23.77	-25.55	4.32	-20.47	-32.27	0.21
21	-31.17	-31.76	3.03	-27.97	-37.87	0.23
22	-40.57	-41.29	4.65	-35.67	-49.57	0.20
23	-45.57	-46.19	4.30	-41.27	-52.08	0.21
24	-52.97	-53.92	4.23	-49.77	-58.87	0.22
25	-47.57	-48.02	2.01	-45.57	-51.27	0.20
26	-61.07	-61.37	4.31	-55.57	-67.87	0.23



(ID1-1) RU1 および RU2



(ID1-2) RU3



(ID2) RU1, RU2, RU3



(ID3-1) RU1/RU2



(ID3-2) RU3



(ID4-1) RU1/RU2



(ID4-2) RU3



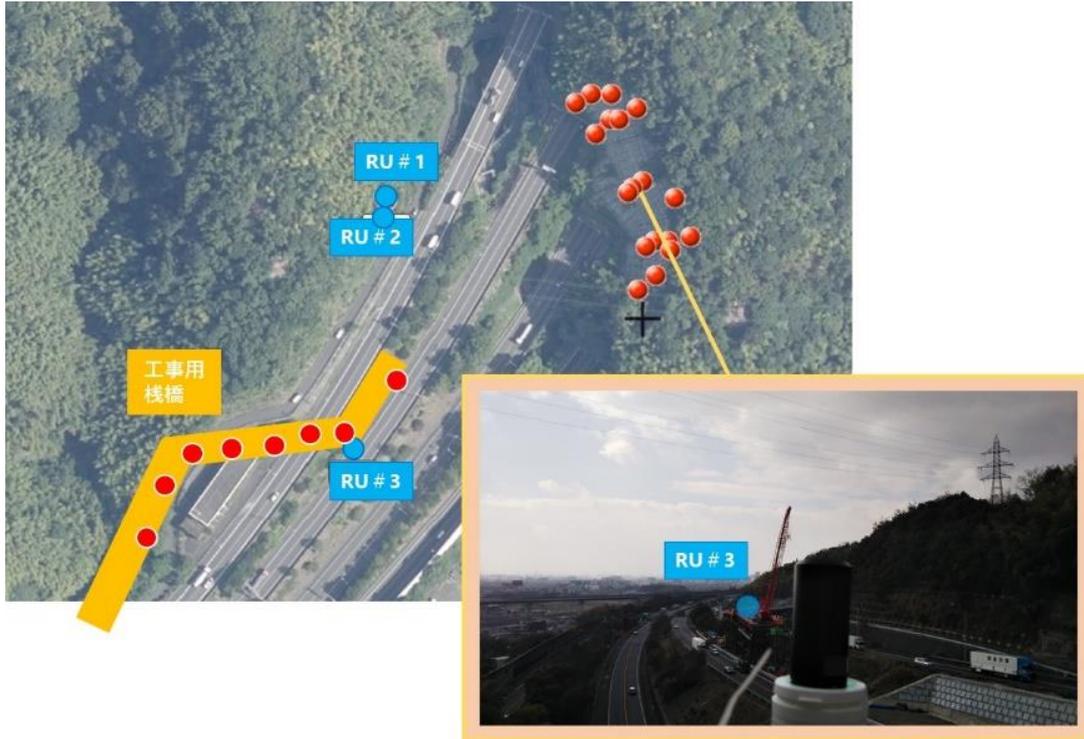
(ID5-1) RU1/RU2



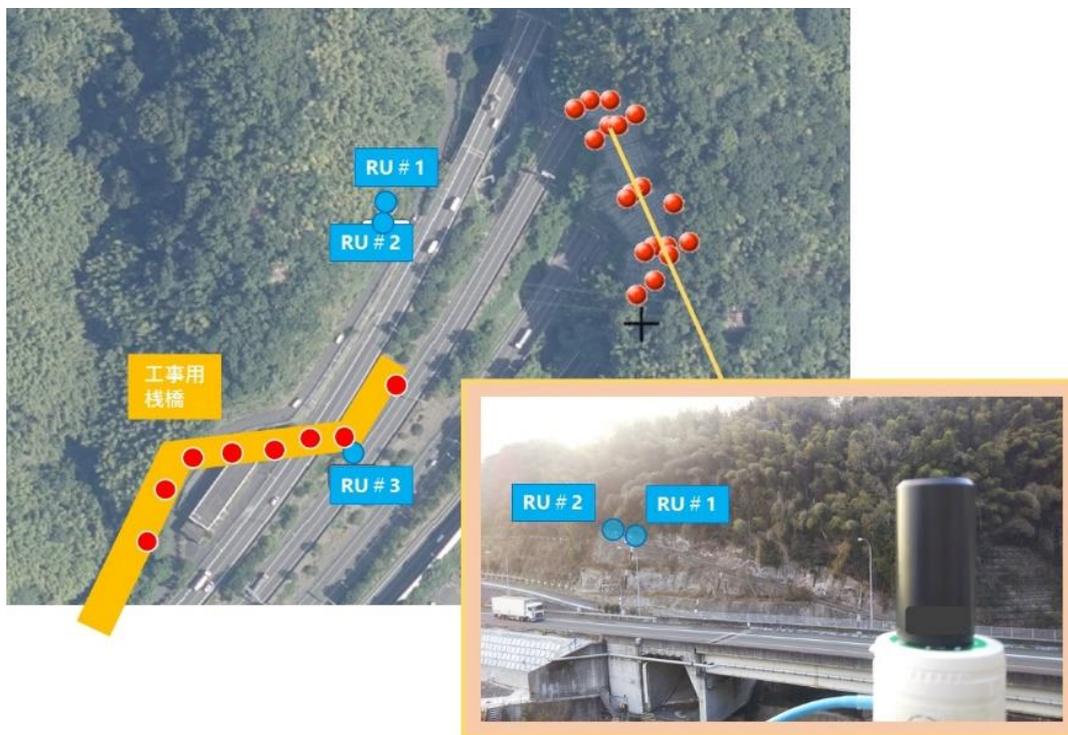
(ID5-2) RU3



(ID6-1) RU1/RU2



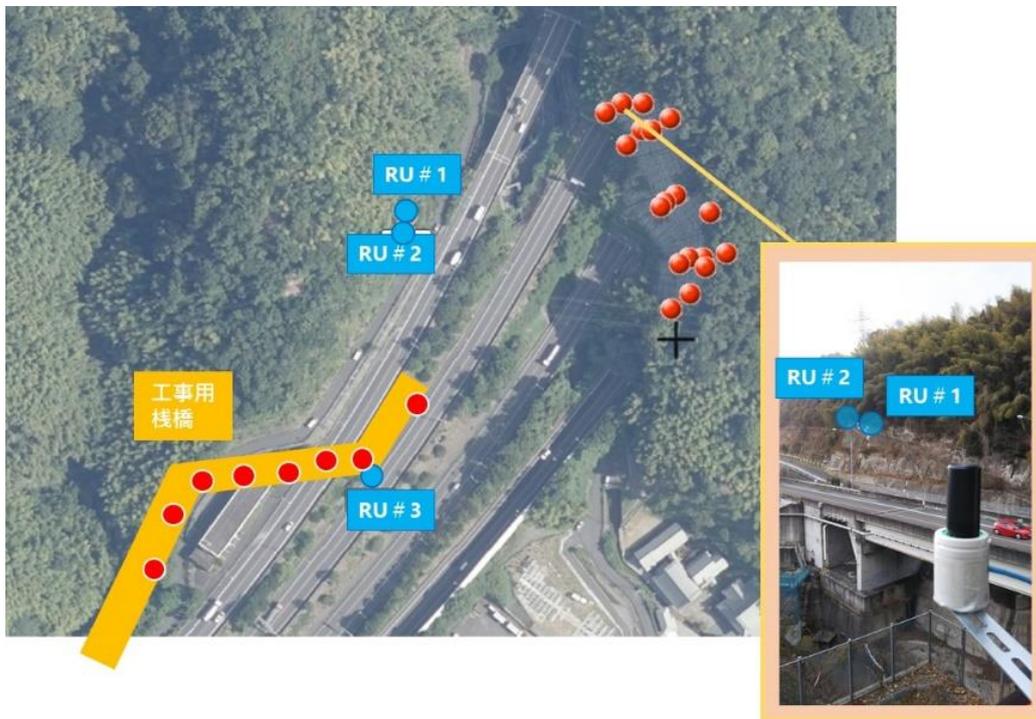
(ID6-2) RU3



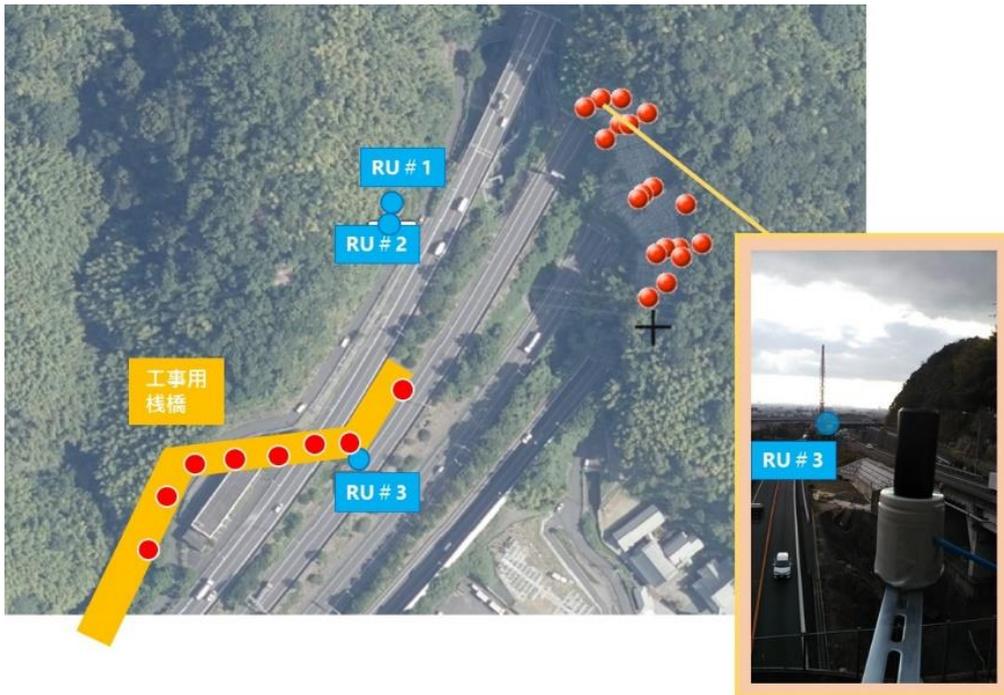
(ID7-1) RU1/RU2



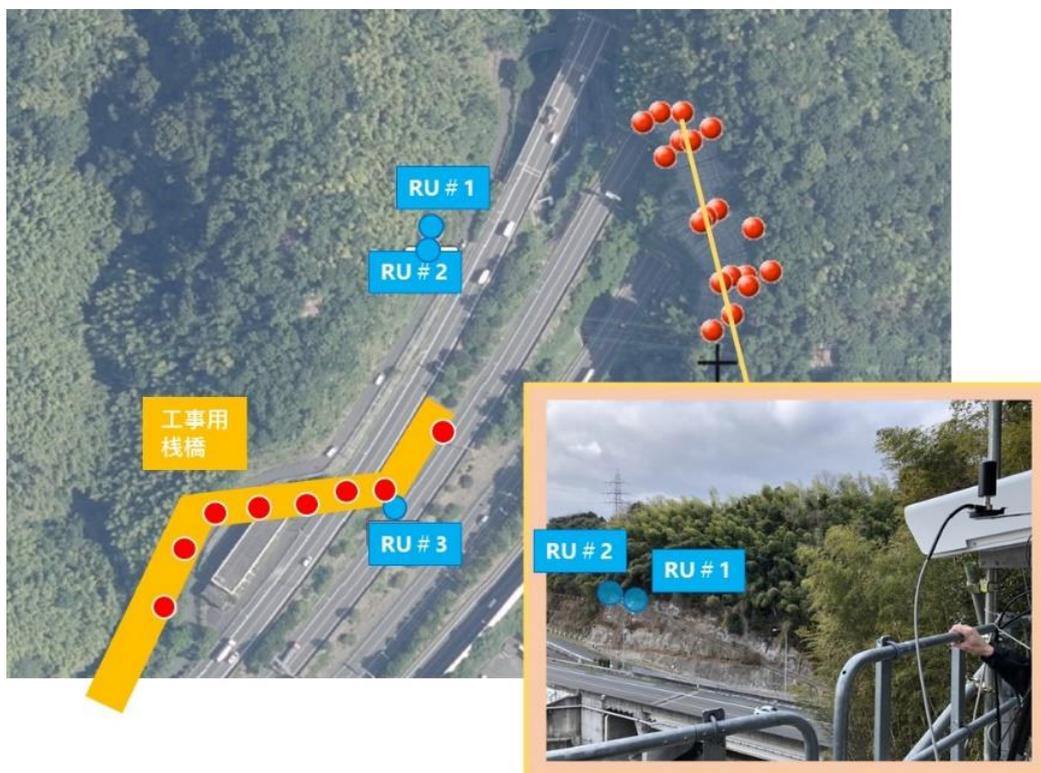
(ID7-2) RU3



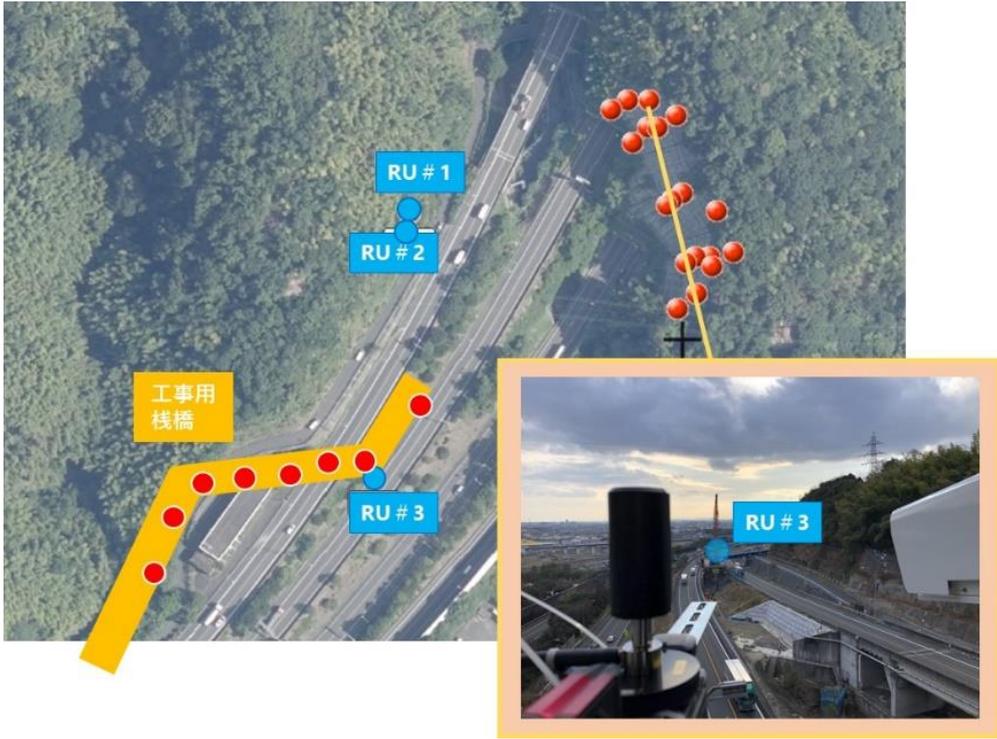
(ID8-1) RU1/RU2



(ID8-2) RU3



(ID9-1) RU1/RU2



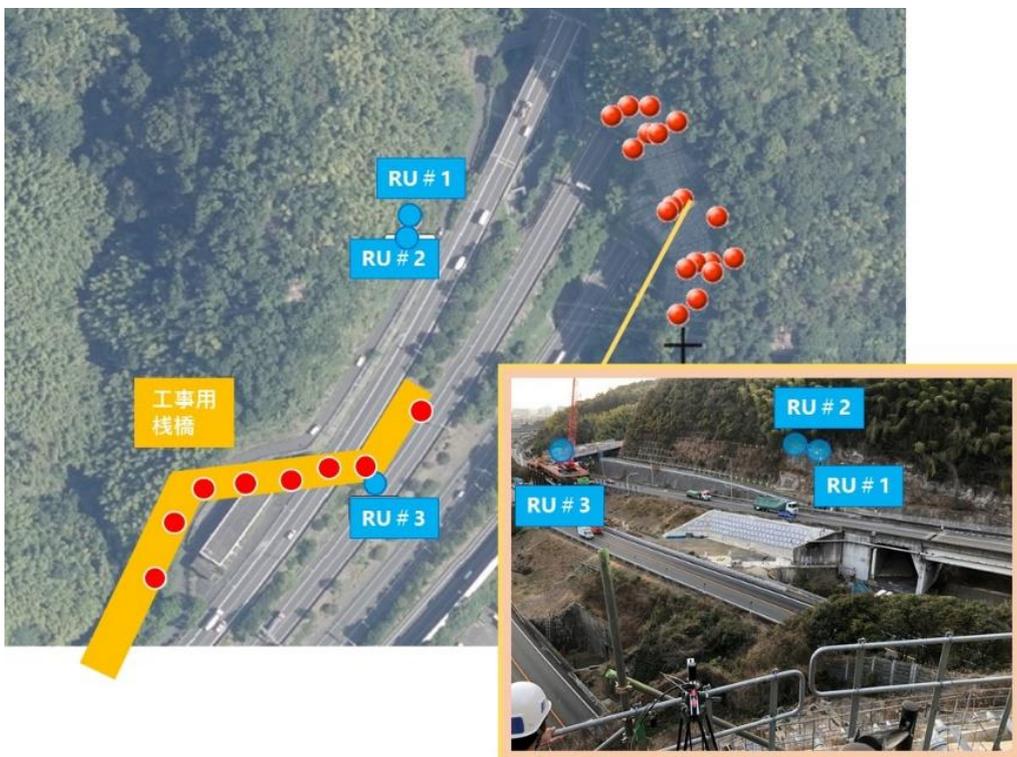
(ID9-2) RU3



(ID10-1) RU1/RU2



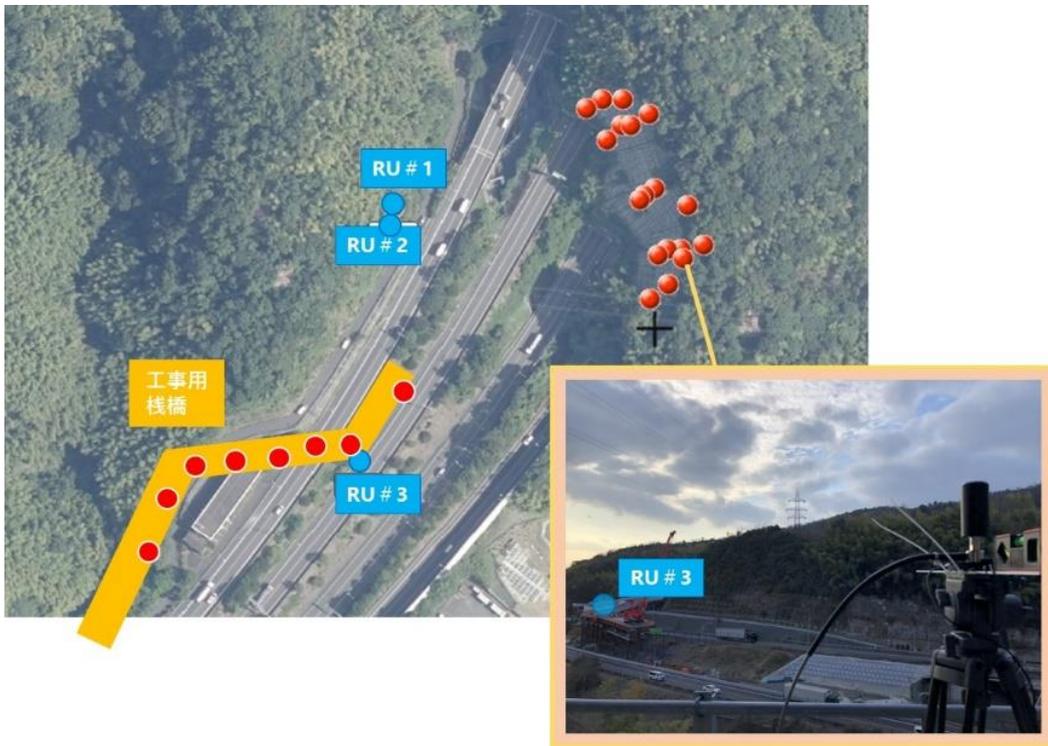
(ID10-2) RU3



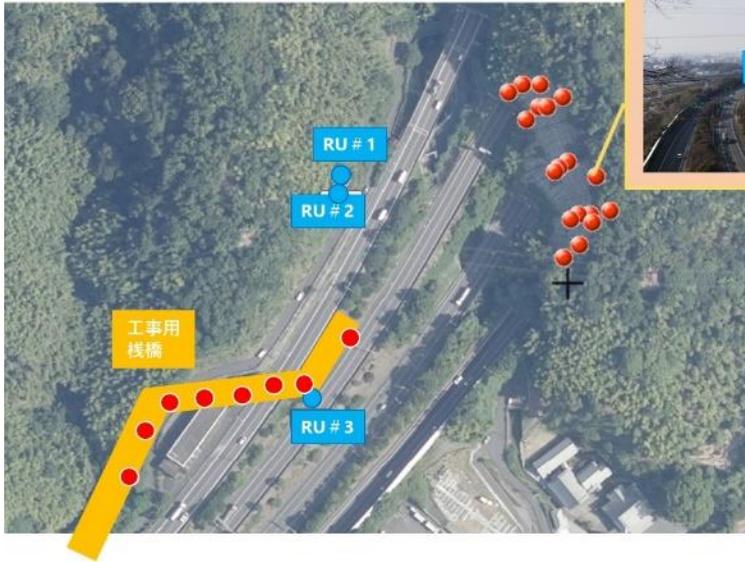
(ID11) RU1/RU2/RU3



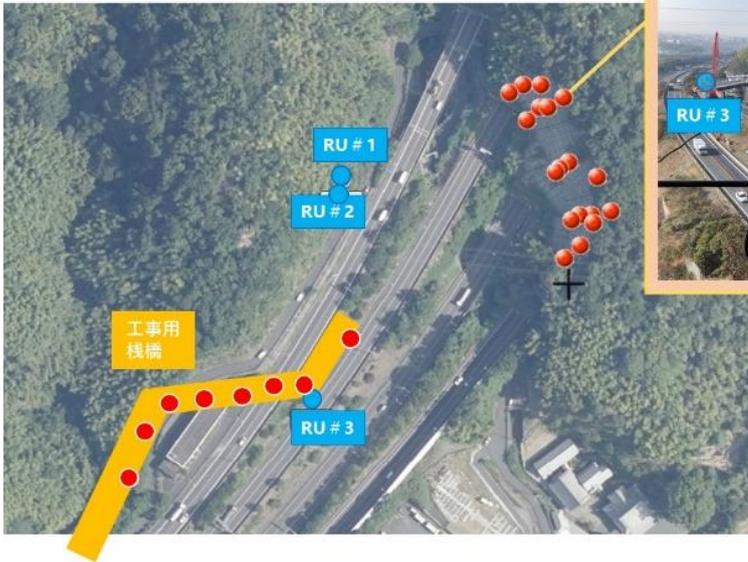
(ID12-1 RU1/RU2)



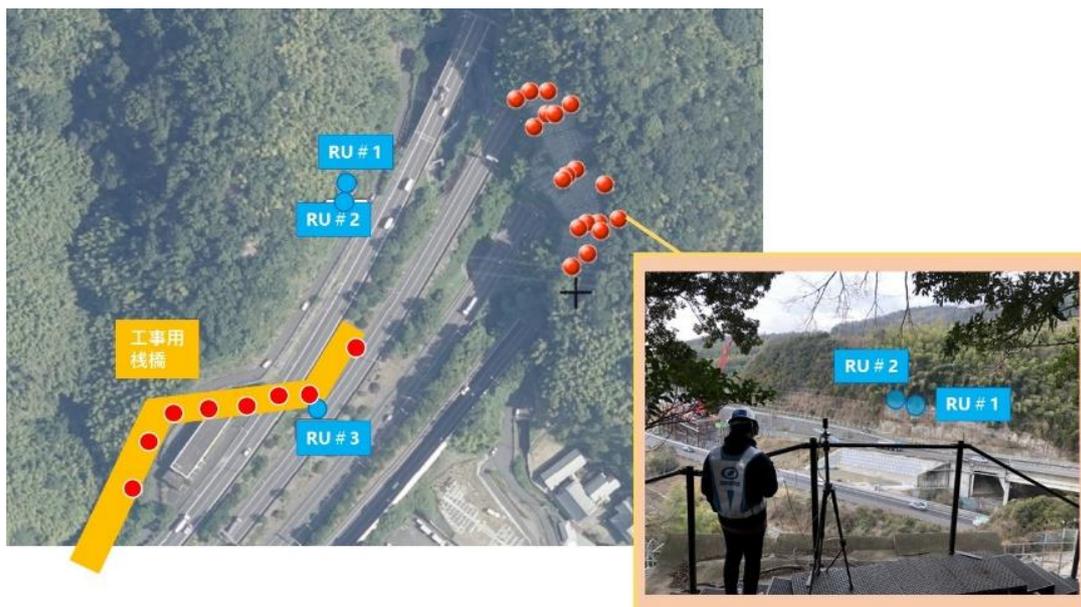
(ID12-2) RU3



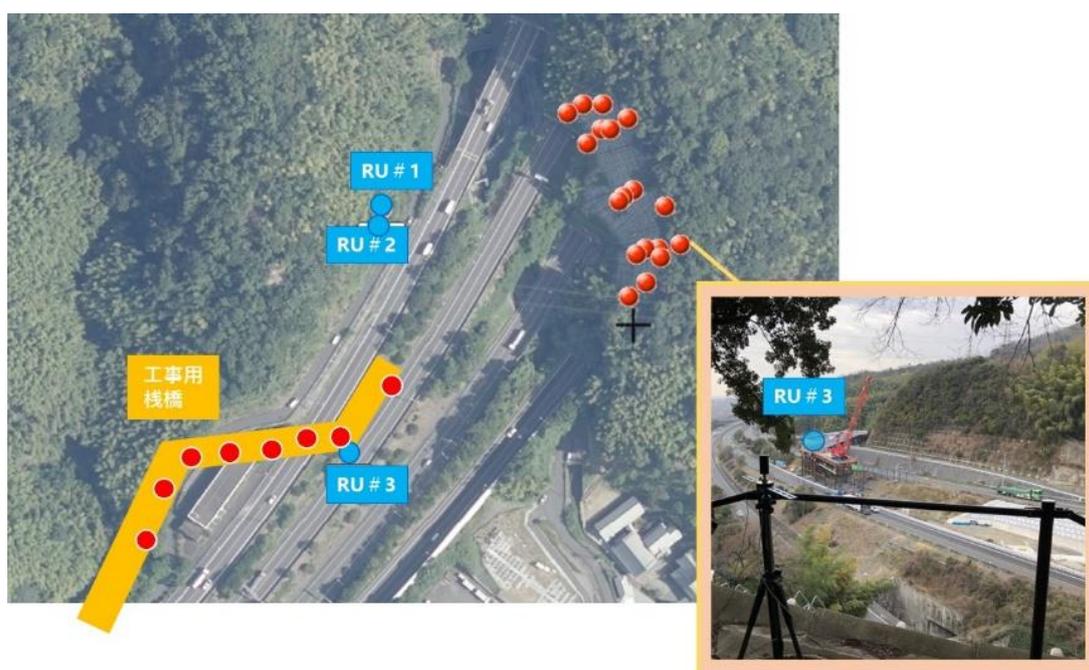
(ID13) RU1/RU2/RU3



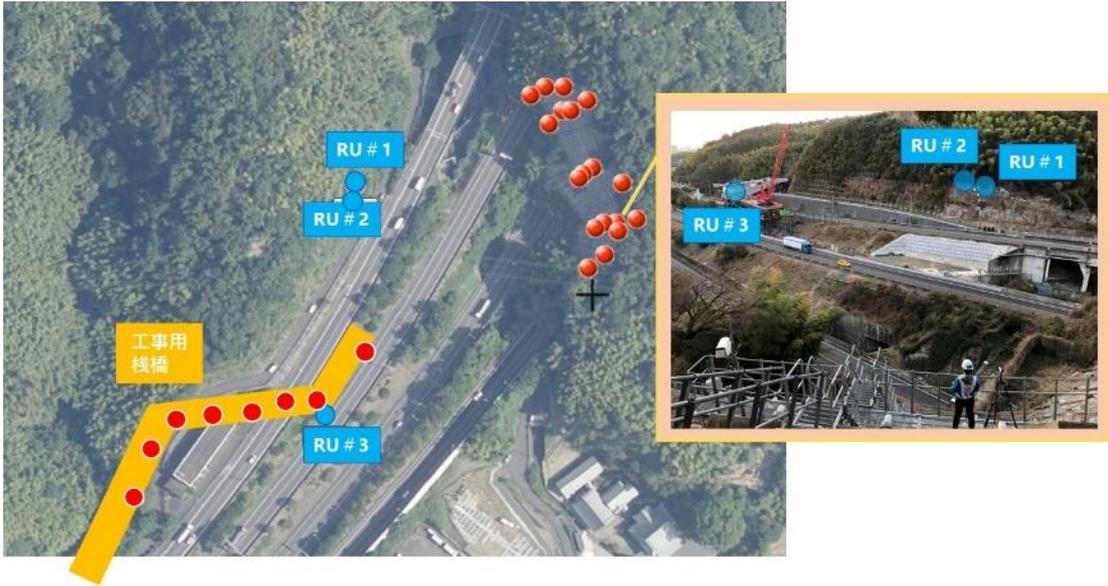
(ID14) RU1/RU2/RU3



(ID15-1) RU1/RU2



(ID15-2) RU3



(ID16) RU1/RU2/RU3



(ID17) RU1/RU2/RU3



(ID18-1) RU1/RU2



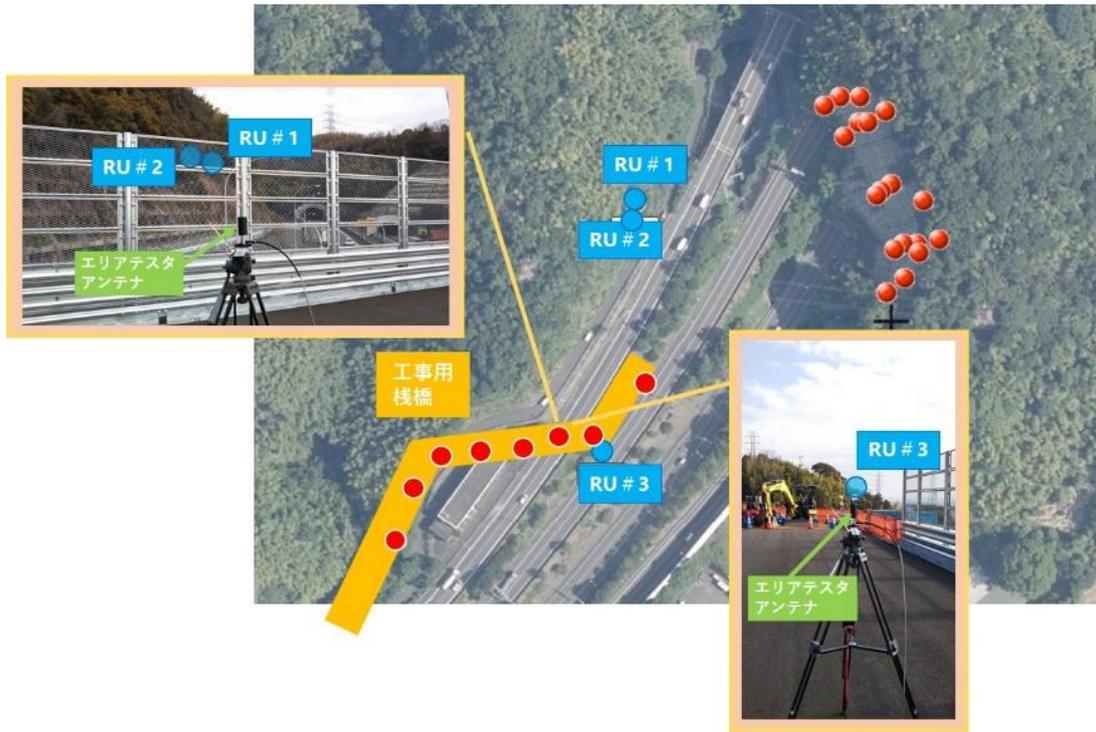
(ID18-2) RU3



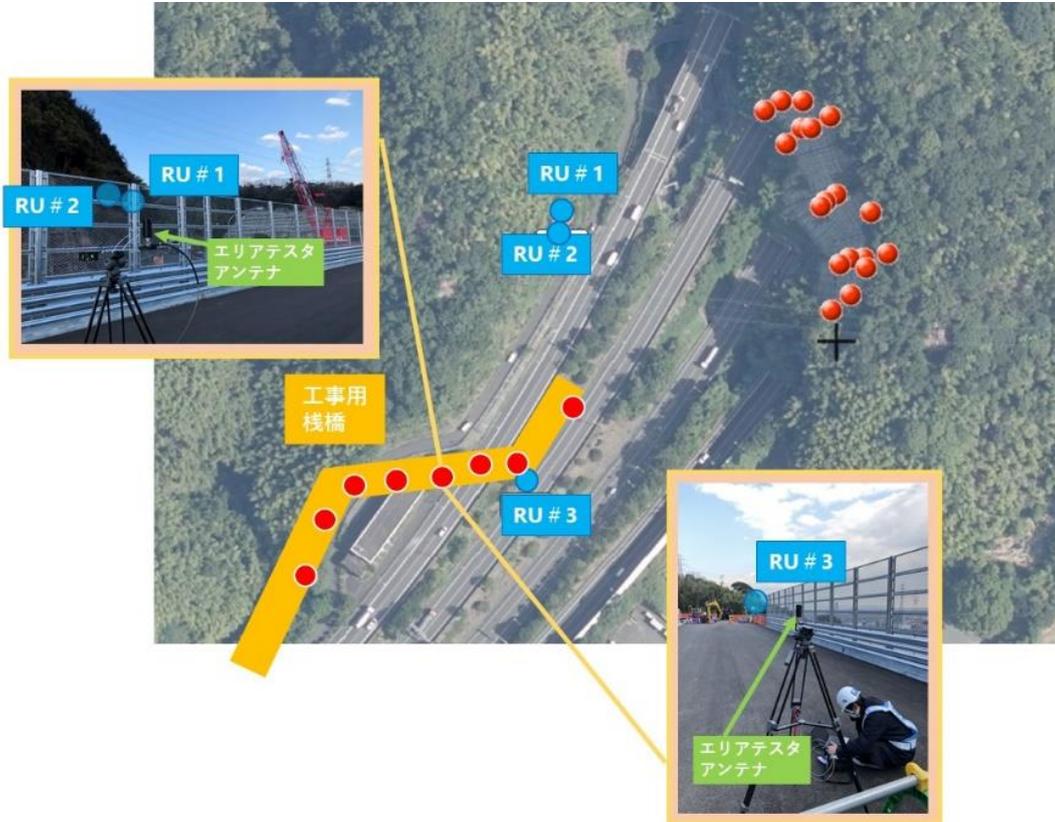
(ID19)



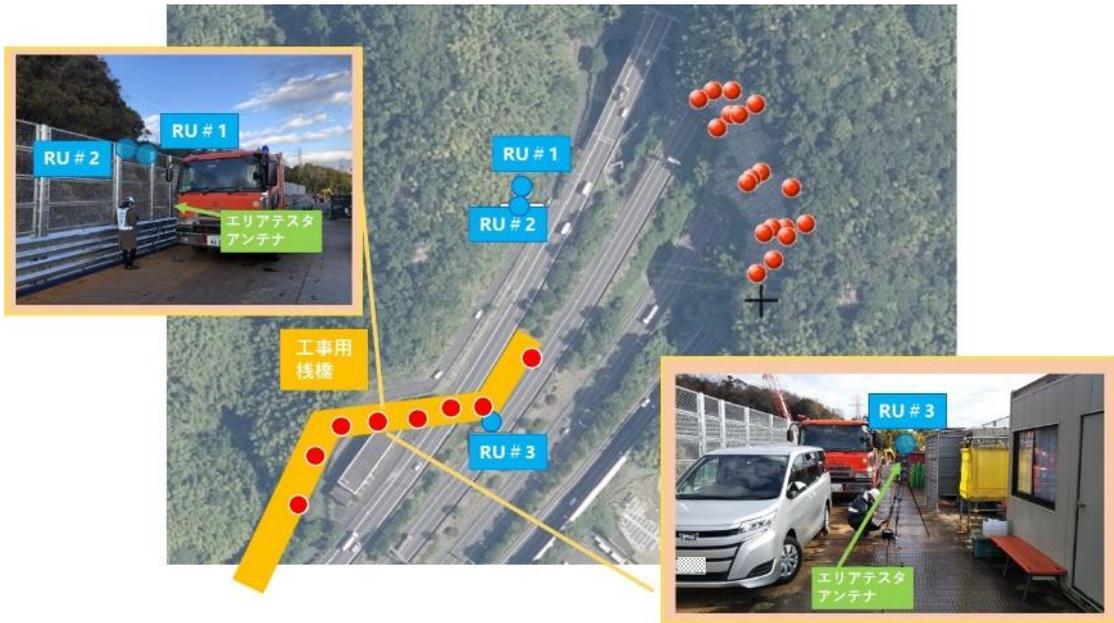
(ID20)



(ID21)



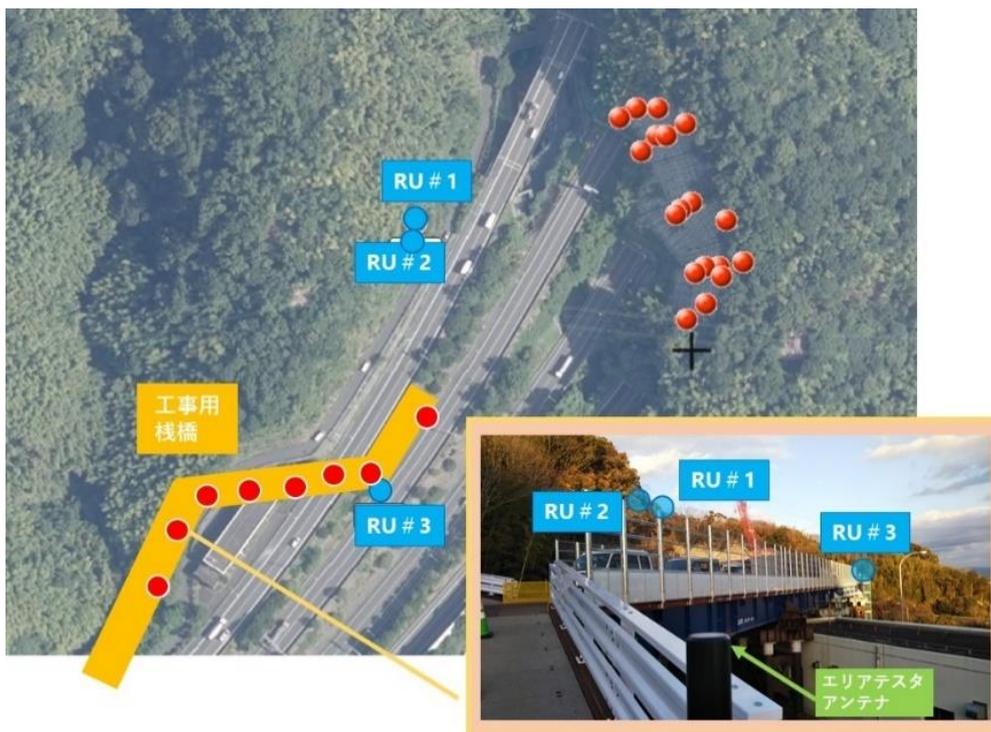
(ID22)



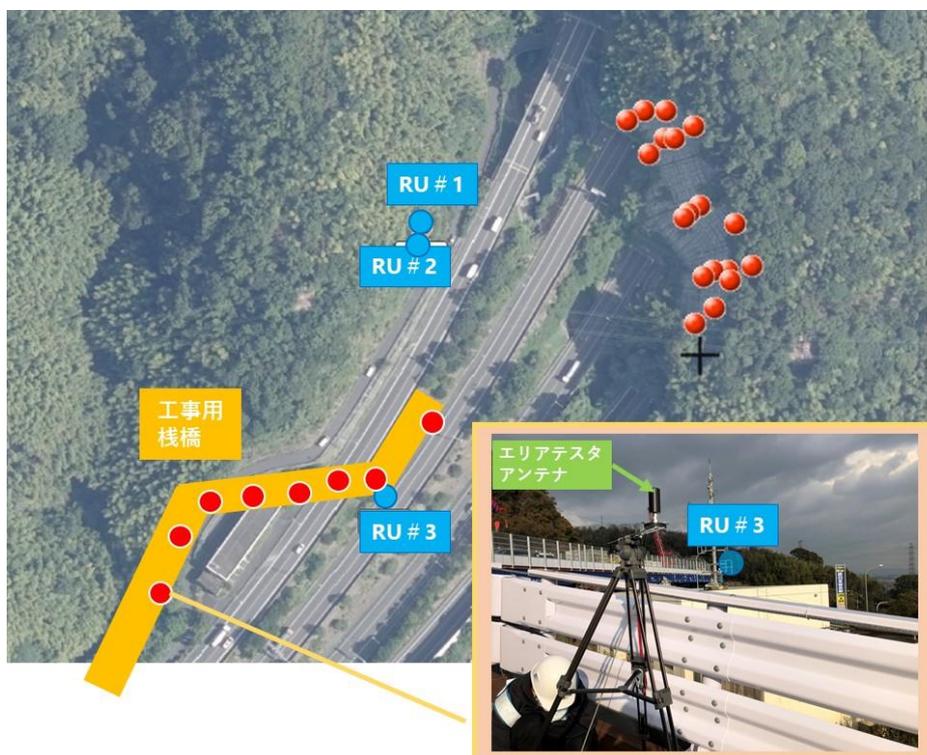
(ID23) ※RU1/RU2 は見通し外



(ID24) ※RU1/RU2 は見通し外



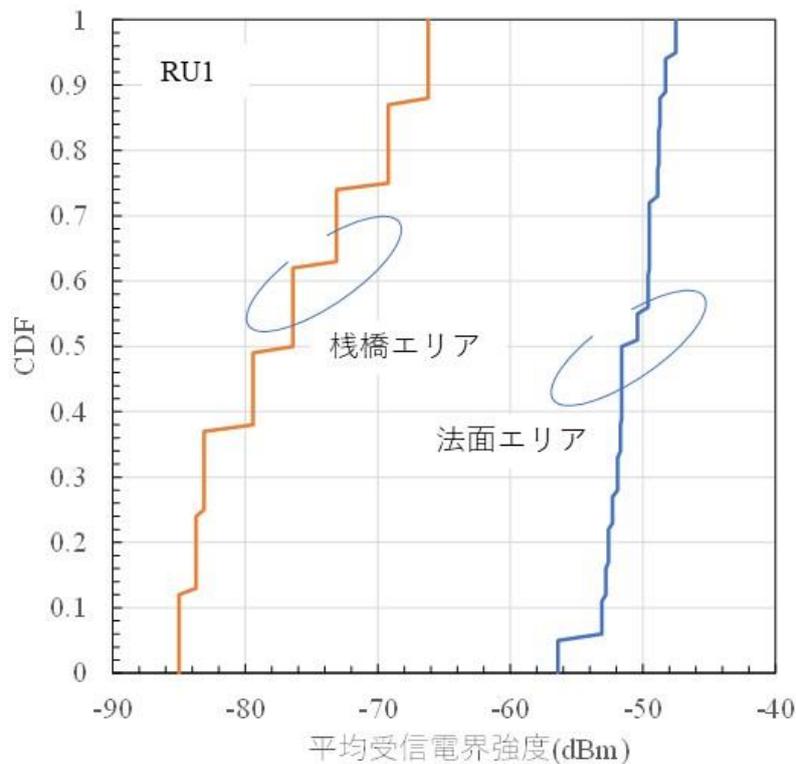
(ID25) ※RU1/RU2 は見通し外



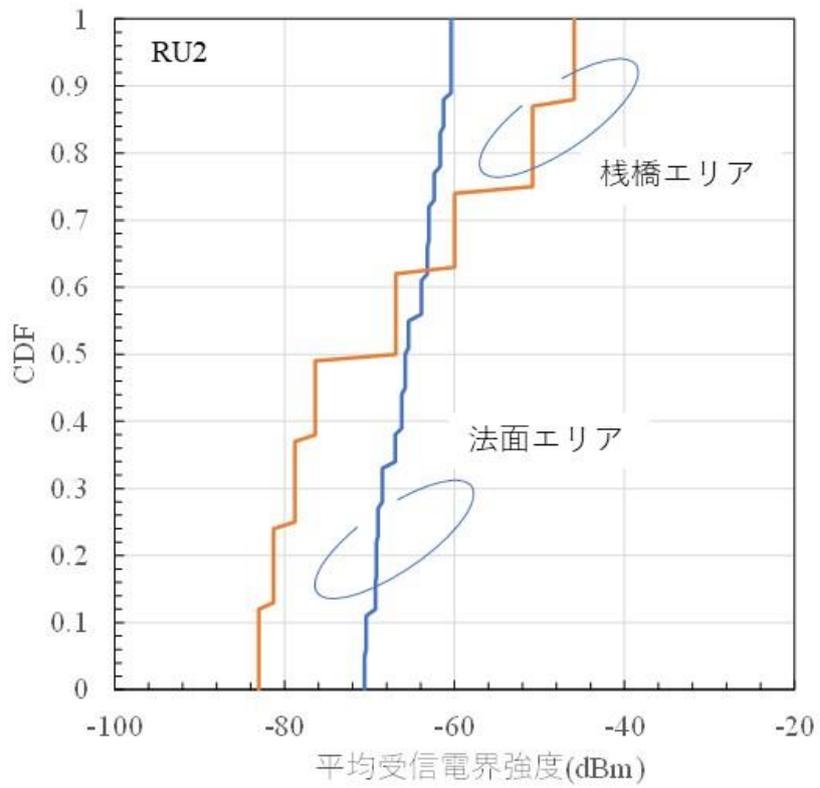
(ID26) ※RU1/RU2 は見通し外

図 3.3-5 測定点の様子

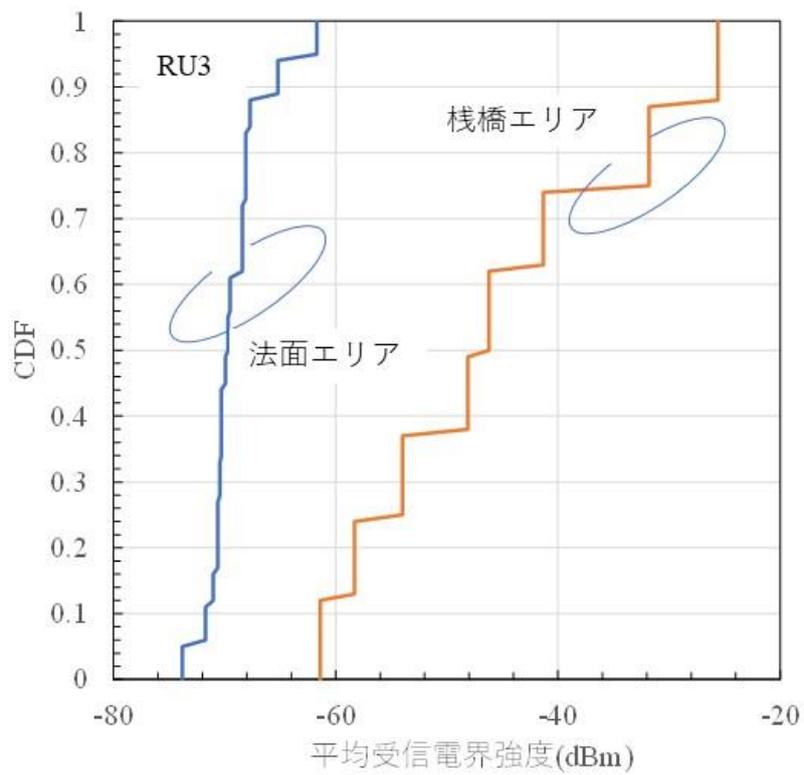
各測定結果から分かるように、各ポイントにおいて、おおよそ -60dBm 以上の受信電界強度が、RU1~RU3の何れかのRUによって達成できていることが分かる。特に、課題実証において実際にカメラを設置する測定ポイント9および測定ポイント12をはじめとした法面エリア(測定ポイントID1から測定ポイントID19)の受信電界強度については、ほぼ見通し環境となり、無線伝搬環境としては、変動が小さく、またかなり高い受信電力値で安定していることが分かり、無線伝搬環境としては、測定ポイントID1から測定ポイントID18、すなわち法面エリアにおける受信電界強度については、RU1からの受信電力が最も大きい。これは、RU1については、アンテナパターンのメインローブを法面方向に向けているためである。一方で、RU2とRU3を比較すると、いずれのアンテナもメインローブは法面方向には向けていないため、RU1に比して受信電界強度は小さくなるが、RU2の方が、測定ポイントまでの距離がRU3よりも短いため、受信電界強度は大きい点が多いが、トンネルに近い測定ポイントの中には、RU3の方の受信電界強度が強いことがわかる。これは、RU3のメインローブが周辺の丘陵に係っており、この反射波が受信されているためである。そのため、当該反射波の影響が強く出るトンネルに近い測定ポイントにおいて、このような傾向になったものと考えられる。一方で、RU2のメインローブは開放空間に向けており、反射が強い電力となって受信されることはない。測定ポイントID19から測定ポイントID26、すなわち栈橋エリアにおける受信電界強度については、RU3が測定ポイントに近いため、受信電力が強くなる。一方で、RU1およびRU2については、RU3と比較して伝搬距離が大きく、またRU1はメインローブが法面に向いているために、RU2の方がRU1より受信電界強度が大きくなる(図3.3-6)。



(a) RU



(b) RU2



(c) RU3

図 3.3-6 受信電界強度 累積分布の様子(RU 毎)

表 3.3-3 伝搬シミュレーション評価結果

測定ポイント	受信電界強度(dBm)	
	見通しパスあり	見通しパスなし
1	-51.40	-103.63
2	-49.06	-108.45
3	-48.45	-100.85
4	-49.51	-82.2493

表 3.3-3 に法面エリアにおける伝搬シミュレーション評価結果を示す。ここでは、RU1 と法面エリアを想定し、計算時間の関係で、最大反射回数を 2 回、最大回折回数を 1 回として評価を行っている。また、考察を行うために、実伝搬環境となる見通しパスありの場合と、直接波を意図的に削除して評価した見通しパスなしについてそれぞれ評価を行っている。表 3.3-3 と表 3.3-2 を比較すると、実測結果と、伝搬シミュレーション結果のうち、見通しパスありの結果は、同等の結果となっていることがわかる。

図 3.3-7 に測定ポイント 1 を例にとって、伝搬シミュレーション評価結果を示す。図 3.3-7 からわかるように、本実証試験環境における法面エリアは、基地局アンテナと各測定ポイントについては、見通し環境であるものの、周辺丘陵や、高速道路面からの反射波が複数観測されていることがわかる。しかし、表 3.3-3 の見通しパスなしと見通しパスなしを比較することで、複数観測されている反射の影響は小さく、本試験環境において、法面エリアの受信電界強度はほぼ直接波によって、特徴づけられていることがわかる。

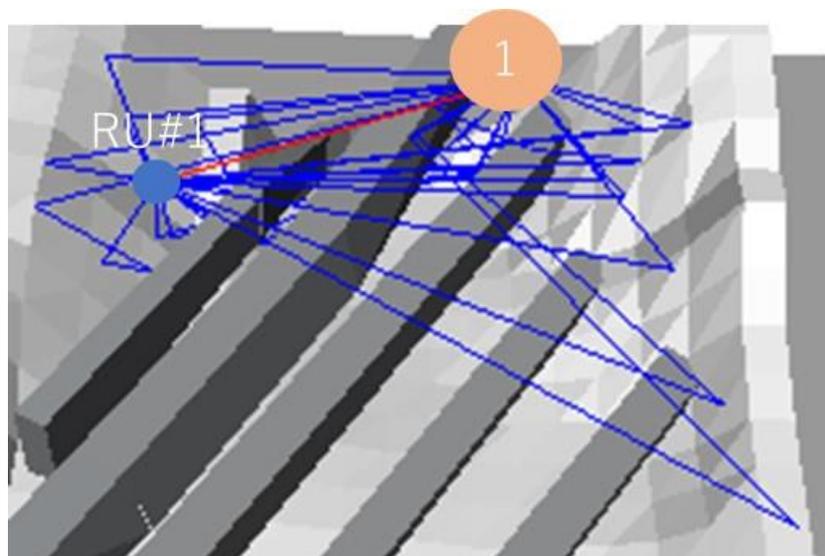
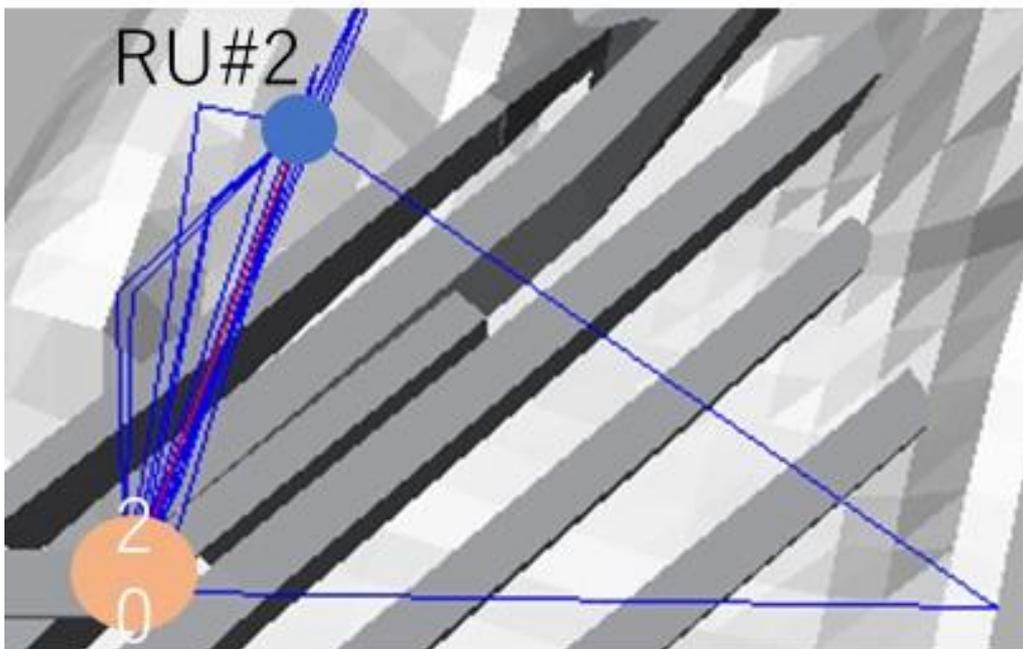


図 3.3-7 伝搬シミュレーション結果一例

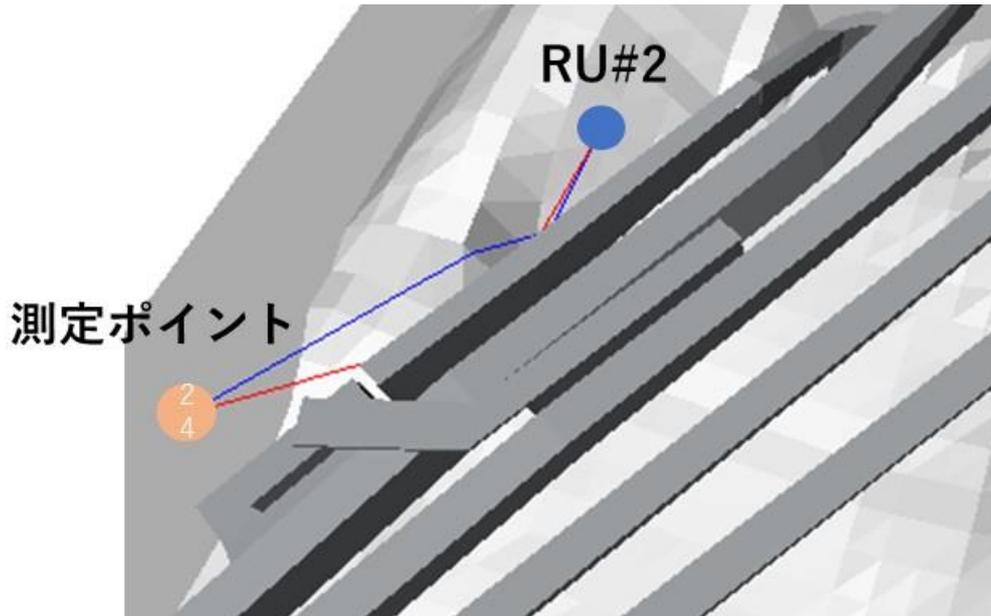
表 3.3-4 伝搬シミュレーション評価結果

測定ポイント	受信電界強度(dBm)
19	-47.98
20	-49.5
21	-53.14
22	-60.47
24	-71.15

同様に、表 3.3-4 に栈橋エリアにおけるシミュレーション評価結果を示す。ここでは、ここでは、RU1 と法面エリアを想定し、計算時間の関係で、最大反射回数を 2 回、最大回折回数を 1 回として評価を行っている。また、見通しパスがある場合を想定している。栈橋エリアは、RU2 については、測定ポイント 19 から測定ポイント 21 においては、見通しといえる環境であるのに対して、測定ポイント 22 において、ほぼ完全に見通し外の伝搬環境となり、伝搬シミュレーション結果においても、その傾向が見えていることがわかり、見通し環境を確保することが、高い受信電界強度を確保するうえで、重要なポイントであることが確認できる。



(a) 測定ポイント 20



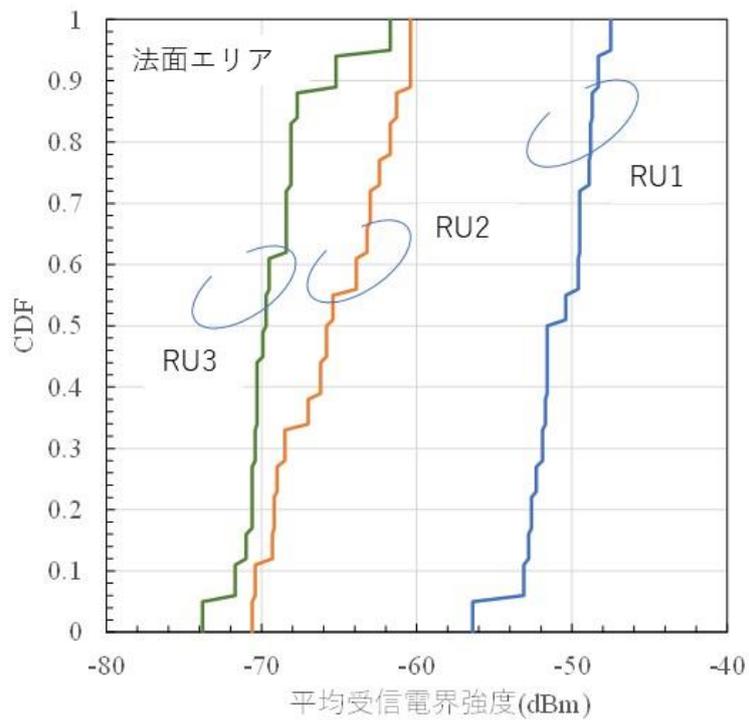
(b) 測定ポイント 24

図 3.3-8 伝搬シミュレーション結果一例

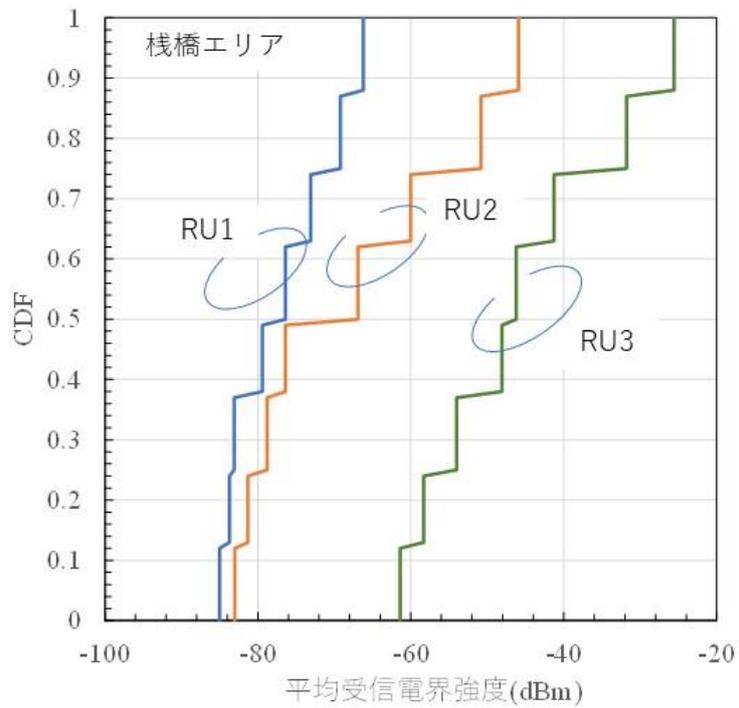
図 3.3-8 に RU2 からの伝搬シミュレーション結果の一例を示す。測定ポイント 20 では RU からの直接波が支配的である一方で、測定ポイント 24 になると、直接波が存在せず、反射波および回折波だけが存在していることがわかる。このことから、測定ポイント 22 以降においては、受信電界強度が大きく低下してしまう環境であることがわかる。

図 3.3-6(a)に RU1 より受信される受信電界強度について法面エリア(ID1～ID18)と栈橋エリア(ID19～ID26)のそれぞれについて累積分布を示す。なお、ここでは平均受信電界強度を示す。累積分布からもわかるように、法面エリアにおいては、受信電界強度の変動はほぼ無い一方で、栈橋エリアにおいては、変動が大きい。これは、測定ポイント間の伝搬距離の違い(法面エリアは 94.64m～131.43m に対して、栈橋エリアは 83.25m～186m)に加えて、栈橋エリアにおいては、周辺の重機等の遮蔽・反射物の影響により、測定ポイント間で受信電界強度が大きく変化するためと考えられる。

図 3.3-6(b)および(c)は RU2 および RU3 より受信される受信電界強度の累積分布をそれぞれ示す。図 3.3-6 からわかるように、RU2 と RU3 についても、法面エリアおよび栈橋エリアにおける受信電界強度の分布の傾向については、RU1 と大きく変わることはなく、本実証環境においては、栈橋エリアにおいては、重機・車両や安全対策のための構造物などによる電波反射や遮蔽の影響を受ける一方で、法面エリアにおいては、基地局アンテナ設置位置や測定ポイントの高さが、重機・車両に比べてかなり高く、その影響をほぼ受けていない環境であったことが確認できる。



(a) 法面エリア



(b) 栈橋エリア

図 3.3-9 受信電界強度 累積分布の様子(エリア毎)

図 3.3-9 にエリア毎の受信電界強度の累積分布の様子を示す。法面エリアにおいては、先に説明した通り、受信電界強度の変動は小さいが、RU1 の受信電界強度が大きく、また RU3 の受信電界強度が小さいことがわかる。これは、RU1 については、法面エリアにアンテナのメインローブが向いているのに対して、RU2 および RU3 はアンテナメインローブが栈橋エリアに向いているためである。そのため、図 3.3-9(b)からわかるように、栈橋エリアにおいては、RU3 が最も受信電界強度が高い結果となる。ところで、RU1 と RU2 については、栈橋エリアにおける測定ポイント間の伝搬距離差はほぼ同等である一方で、受信電界強度の分布については、RU2 の方が広がり大きいことがわかるが、これは、RU1 がアンテナメインローブが法面エリアに向いているために、アンテナメインローブが栈橋エリアに向いている RU2 と比較して、アンテナ利得の値が、角度に応じて、大きく変化しないためと考えられる。

表 3.3-5 モデル式算出結果との比較
(a) RU1

測定 ポイント ID	受信電界強度(dBm)		差分(dB)
	モデル式算出	実測値(平均値)	
1	-70.17	-49.43	20.74
2	-71.87	-51.59	20.28
3	-72.37	-51.67	20.70
4	-75.36	-56.31	19.06
5	-75.50	-51.89	23.61
6	-72.70	-50.35	22.35
7	-72.20	-47.47	24.73
8	-71.90	-49.47	22.43
9	-73.32	-48.89	24.43
10	-73.26	-48.65	24.61
11	-73.59	-48.23	25.36
12	-75.51	-52.80	22.71
13	-76.03	-49.58	26.45
14	-74.21	-48.77	25.43
15	-76.12	-53.09	23.03
16	-75.31	-52.56	22.76
17	-74.44	-51.55	22.89
18	-74.21	-52.27	21.94
19	-80.89	-66.14	14.76
20	-87.74	-69.12	18.62
21	-88.53	-73.05	15.48
22	-90.22	-76.35	13.87
23	-93.02	-79.38	13.64
24	-96.22	-83.68	12.54
25	-98.32	-84.91	13.41
26	-99.86	-83.09	16.77

(b) RU2

測定 ポイント ID	受信電界強度(dBm)		差分(dB)
	モデル式算出	実測値(平均値)	
1	-89.78	-70.31	19.47
2	-90.23	-69.30	20.93
3	-89.73	-62.99	26.74
4	-85.37	-66.16	19.21
5	-87.51	-61.69	25.82
6	-90.05	-61.27	28.78
7	-90.52	-69.18	21.34
8	-91.00	-70.55	20.45
9	-91.31	-68.96	22.35
10	-90.48	-68.42	22.06
11	-89.88	-65.34	24.54
12	-89.01	-63.83	25.18
13	-89.12	-65.74	23.38
14	-91.19	-66.92	24.27
15	-91.91	-60.35	31.56
16	-89.21	-62.40	26.81
17	-89.14	-60.35	28.79
18	-88.32	-63.11	25.21
19	-67.25	-45.83	21.42
20	-73.98	-50.74	23.23
21	-74.55	-59.92	14.63
22	-75.96	-66.84	9.11
23	-77.02	-76.38	0.63
24	-79.11	-78.79	0.32
25	-81.15	-81.24	-0.09
26	-83.04	-82.93	0.11

(c) RU3

測定 ポイント ID	受信電界強度(dBm)		差分(dB)
	モデル式算出	実測値(平均値)	
1	-95.28	-61.65	33.62
2	-95.56	-73.75	21.81
3	-99.11	-68.01	31.10
4	-104.10	-70.37	33.73
5	-105.55	-69.66	35.90
6	-99.59	-70.27	29.32
7	-96.63	-65.17	31.46
8	-96.24	-68.40	27.84
9	-97.35	-68.04	29.32
10	-97.39	-71.61	25.78
11	-100.44	-69.46	30.98
12	-107.85	-70.27	37.58
13	-109.03	-70.60	38.43
14	-98.77	-68.31	30.46
15	-109.91	-67.62	42.30
16	-109.04	-70.60	38.44
17	-108.94	-69.88	39.06
18	-108.25	-70.95	37.29
19	-64.09	-58.27	5.81
20	-34.12	-25.55	8.57
21	-45.96	-31.76	14.20
22	-50.94	-41.29	9.65
23	-56.87	-46.19	10.68
24	-63.84	-53.92	9.92
25	-68.58	-48.02	20.56
26	-72.87	-61.37	11.50

表 3.3-5 に制度化済みモデル式に基づいて算出した受信電界強度と測定値のうち、平均値との比較を整理する。なお、ここでは、制度化済みモデル式については、 $K=0$ 、 $S=32.5$ とし、基地局アンテナ地上高を 1.75m、受信局アンテナ地上高を 1.5m として計算するとともに、人体吸収損 8dB も考慮している。アンテナ指向性パターンは、図 3.3-39 にしめす実際のアンテナパターンを想定して計算した。表 3.3-5 に示すように、本試験環境による測定結果が、モデル式より算出される受信電界強度より大きい値となる測定ポイントが非常に多いことがわかる。これは、本試験環境における基地局アンテナ高および移動局が、本試験環境に存在する重機や車両といった遮蔽部に対して、高い位置に存在する場合が多かったためと考えられる。

測定ポイント ID1 から測定ポイント ID18 まで、すなわち法面エリアにおいては、基地局アンテナ高と受信局アンテナ地上高が、ともに周辺事物よりも高く、ほぼ直接波が支配的となり、伝搬モデルとしては、むしろ自由空間伝搬に近い状態となっており、そのため実測値がモデル式に対して、総じて高い値となったものと考えられる。RU の違いについて確認すると、RU3 が、他の RU に比して、想定される受信電界強度より高い値が得られていることがわかる。RU3 については、測定ポイントに対してアンテナのメインローブが向いていないが、測定ポイント方向に対しては遮蔽物の存在しない LOS 環境であり、またメインローブによって送信される電波の一部が、周辺丘陵および大型クレーンに反射して、測定ポイントで受信されたため、モデル式よりも高い受信電界強度になったものと考えられる。

一方で、測定ポイント ID19 から測定ポイント ID26 については、RU1 と RU3 は、実測された受信電界強度は、モデル式から算出される受信電界強度よりもかなり高い値となる。特に RU3 については、測定ポイント間の受信電界強度の差が、伝搬距離の差に比べて大きく、これは、測定ポイントとアンテナ間において、重機などの遮蔽物の影響が、測定ポイント間で大きく変化しているためと考えられる。RU2 の測定ポイント ID の 19 番から 26 番、すなわち棧橋付近の測定ポイントに関しては人体吸収損を考慮したうえで、モデル式と測定値がほぼ同等の値を示している。今回の測定においては、測定用アンテナと人体とは、十分に離れた状態で測定を行ったため、人体吸収損の算入は、本来は必要ない。このことは、8dB 相当の減衰が、棧橋付近に存在する重機や車両、安全対策のための構造物(フェンス等)によって、発生しているものと考えられる。この影響については、第 3.3.2 節における精緻化において検討する。

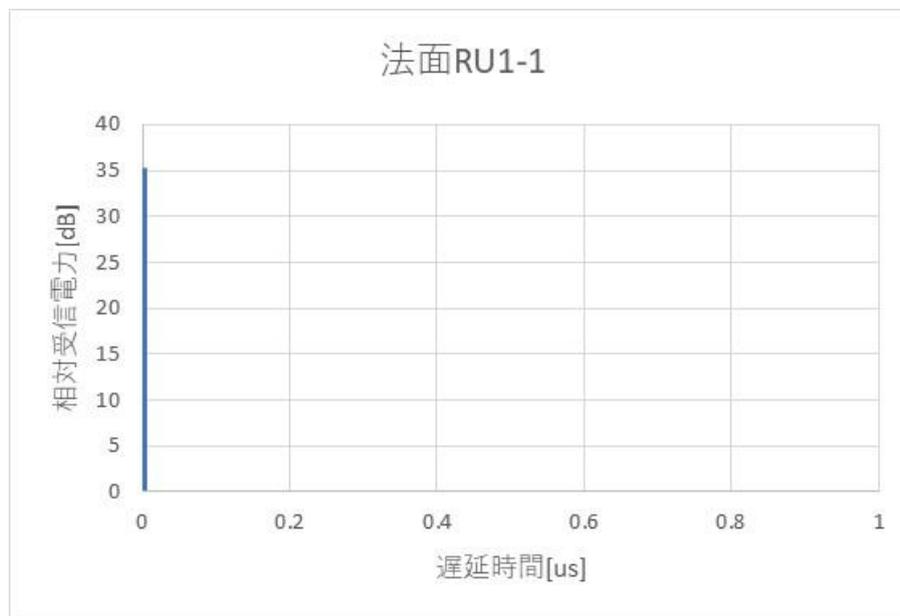
今回実証環境および基地局アンテナの設置位置によれば、各測定ポイントにおいて、3 つの RU 全てから、それぞれ信号受信が確認されていることもわかる。このことは、受信信号対干渉電力比(SIR)の観点では問題となる可能性があることを示唆している。

今回の実証では、上りリンク伝送での超高精細映像伝送を対象としており、その安定的な伝送に注力した関係で、各測定ポイントにおいて、-60dBm 以上の受信電界強度が得られるように試験環境の設定を行った。この結果として、後述する超高精細映像伝送の安定的な伝送を実現することができたが、今後、複数個所からの同時伝送を考えた場合は、当然ながら、上りリンクのお互いの信号が干渉となってしまう。今回実証で得られた受信電界強度の測定結果をもとに、今後、受信 SIR の最適化という観点で、他のアンテナに接続されている移動局からの受信電力を小さくするために、各アンテナの向きをさらに検討する必要があると考えられる。これは、各アンテナから具体的には、各アンテナのチルト角

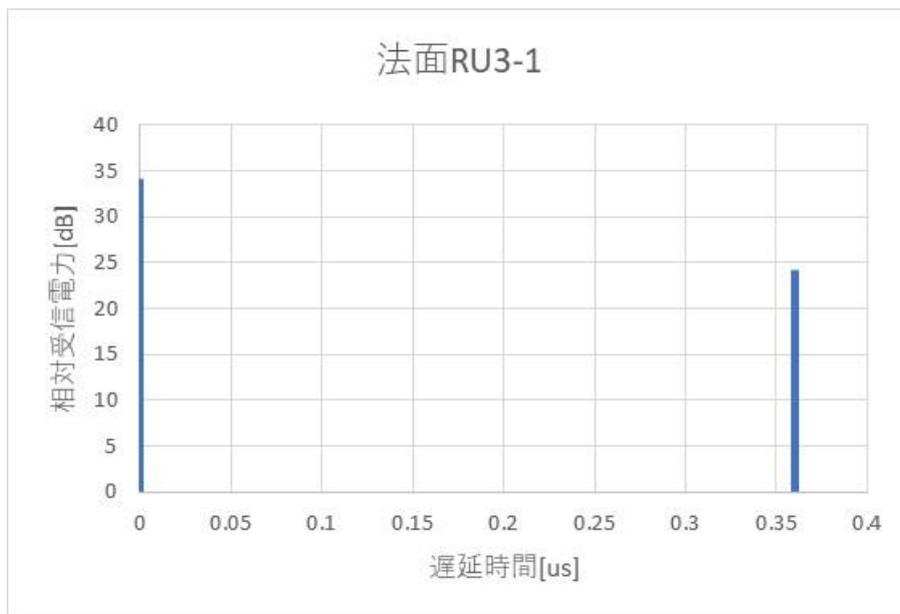
を変えることで、受信 SIR の改善が可能と考えられる。

遅延分散については、法面においては平均で 0.26us、栈橋においては平均で 0.33us となった。図 3.3-10 にいくつかの測定ポイントにおける遅延プロファイルの様子を示す。図 3.3-10 に示すように、法面、特に RU1 および RU2 からの電波については、直接波が支配的となっており、遅延波の影響はほぼ無い環境であることが分かる一方で、法面においても、RU3 については、周辺斜面からの反射波がある程度観測されていることが分かる(図 3.3-10(b))。

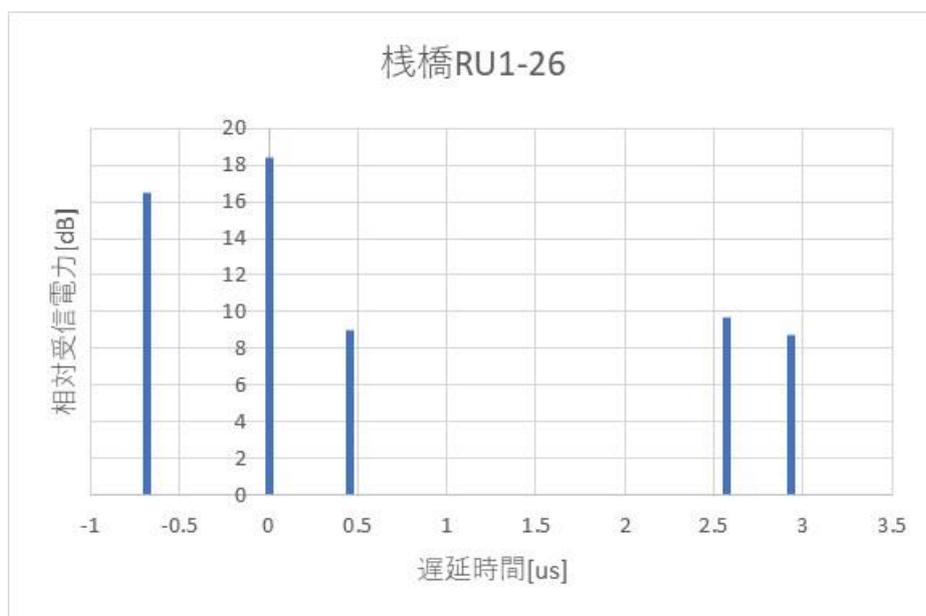
一方で、栈橋においては、RU3 からの電波については、周辺に重機や安全対策のフェンス等の遮蔽物や反射体はあるものの、遅延分散は小さく、ほぼ直接波しか観測されてない状況であることがわかる。一方で、RU1 および RU2 は、栈橋上からはアンテナが見えない見通し外環境となり、周辺丘陵からの反射波の影響が大きく、遅延分散が大きくなり、遅延波の方が強い電力をもって観測される状況も発生していることが分かる。



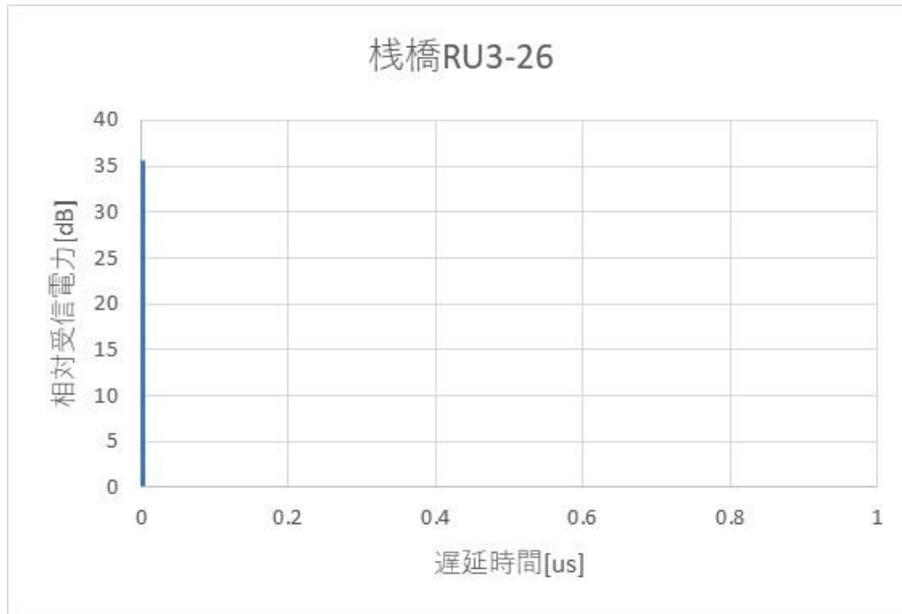
(a) RU1 と測定ポイント 1



(b) RU3 と測定ポイント 1



(c) RU1 と測定ポイント 26



(d) RU3 と測定ポイント 26

図 3.3-10 法面および栈橋における RU1, RU3 と測定ポイント 1, 26 との間の遅延プロファイル

(i-2 スループットおよび遅延時間の測定について

図 3.3-10 に示す各測定点における平均スループットの測定結果を整理する。なお、ここでは、TDD のスロット構成は上りリンクスロット数が最大となる準同期パターン 3 としている。

なお、参考として、(i-1) にて得られた受信電界強度および遅延スプレッドの値に基づいて、リンクレベルシミュレーションによって得られた物理レイヤのスループット特性も併せて示している (図 3.3-11、図 3.3-12)。

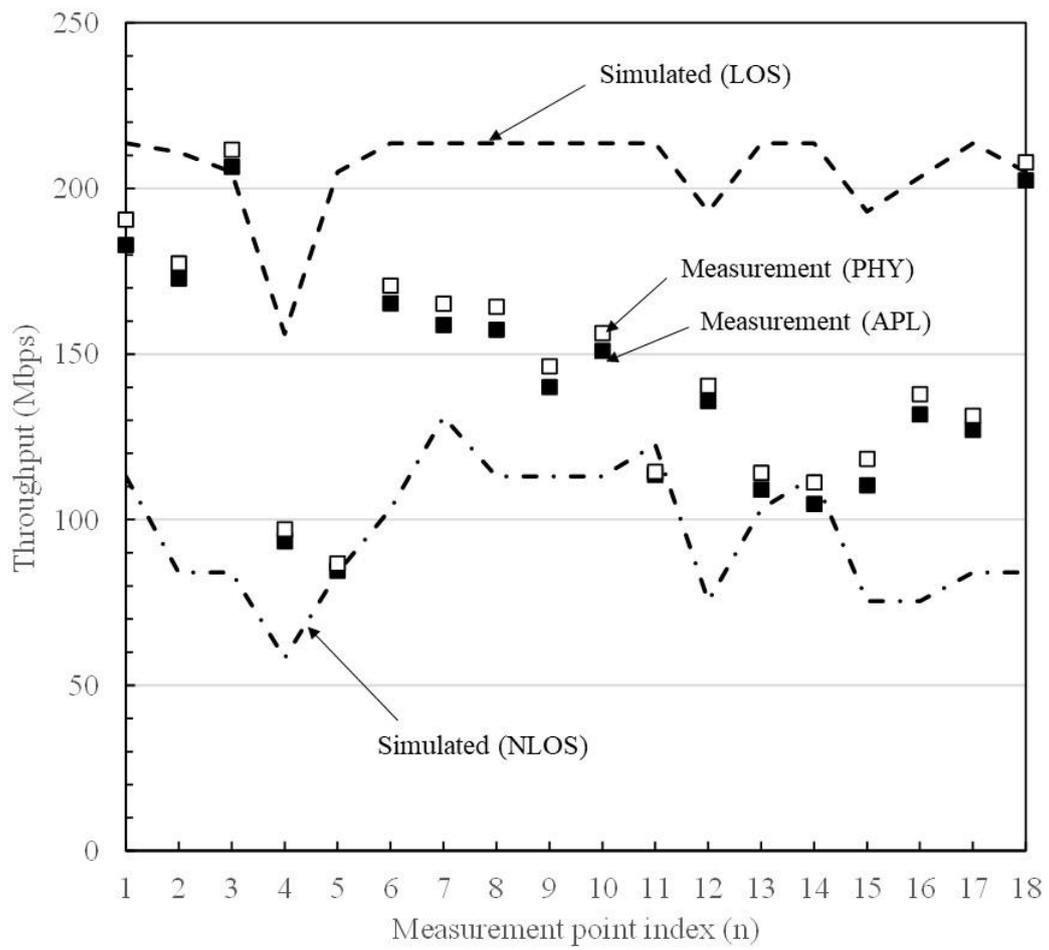
表 3.3-6 に主なシミュレーション諸元を示す。LOS は直接波のみを考慮したスループット特性となる。一方で、NLOS 環境については、マルチパスの影響が大きい状況を想定し、一般に無線シミュレーション評価においてよく用いられる CDL-A モデル (3GPP 仕様書) に対して、(i-1 で得られた遅延スプレッドより比較的大きな値である 600ns を用いた。すなわち、本シミュレーションで得られるスループット値は、LOS 環境の結果が、特性の上限を与え、NLOS 環境の結果が、特性の下限を与えるものと想定される。

表 3.3-6 主なリンクレベルシミュレーションパラメータ

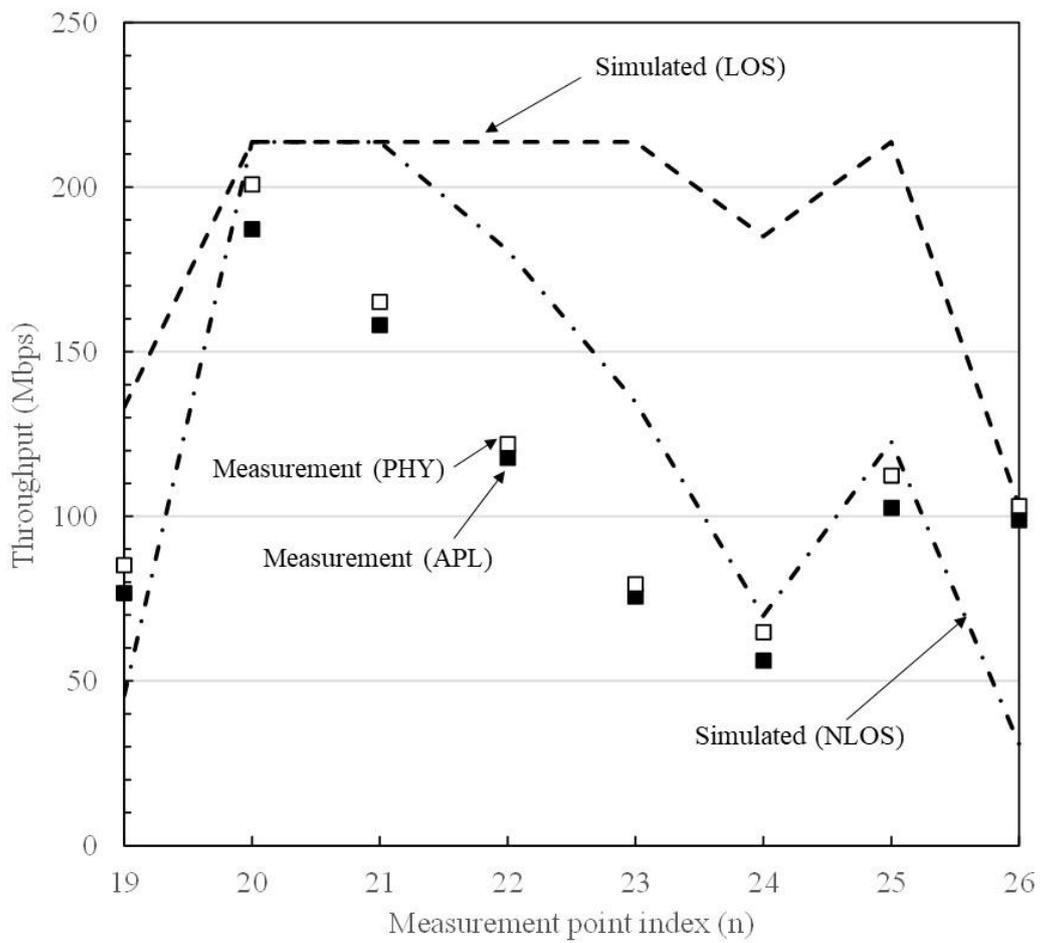
トラフィック方向	上りリンク
MCS セット	3GPP Release 15(64QAM テーブル)
所望 BLER	10%
想定オーバーヘッド	4 symbols / slot
チャンネルモデル	AWGN (LOS 想定) CDL-A(NLOS 想定 遅延スプレッド 600ns)

表 3.3-7 スループット測定結果

測定 ポイント	スループット実測値(Mbps)				シミュレーション値(Mbps)		遅延時間(ms)	
	アプリレイヤ (平均値)	アプリレイヤ (最大値)	無線レイヤ (平均値)	無線レイヤ (最大値)	LOS	NLOS	平均値	最大値
1	183	190	190.6	194.3	213.6608571	113.0267818	69.2	116
2	172.8333333	187.5666667	177.3666667	191.8166667	210.9687303	84.08545495	98	155
3	206.6400839	213.775446	211.7775446	218.3420776	204.9733714	84.08545495	84.8	135
4	93.53586498	121.4627286	97.17018284	124.140647	156.0579942	58.13914684	68.7	104
5	84.6344086	106.9354839	86.82795699	105.1075269	204.9733714	84.08545495	80.9	113
6	165.3663717	176.4389381	170.6619469	178.8460177	213.6608571	103.3015102	68.52	90.9
7	158.8624585	172.9594684	165.1880399	177.29701	213.6608571	131.0382357	75.96	116
8	157.4297977	168.436542	164.2673207	172.2722256	213.6608571	113.0267818	81.14	102
9	140.061792	151.0666471	146.3645726	154.0679712	213.6608571	113.0267818	119	171
10	150.9838596	163.2	156.3284211	166.0631579	213.6608571	113.0267818	91.7	106
11	113.52	134	114.5	133.8	213.6608571	122.6494745	62.9	82.6
12	135.8057143	157.1771429	140.4685714	159.5085714	193.0000286	75.45168498	70.08	101
13	109.0989011	133.5091575	114.1802198	116.5714286	213.6608571	103.3015102	97.65	155
14	104.730473	165.5738907	111.3135314	162.7810781	213.6608571	113.0267818	70.5	77
15	110.4188097	147.8912564	118.4129317	132.3027186	193.0000286	75.45168498	65.8	76.6
16	131.8061674	186.7254038	137.89721	190.4199706	203.4565685	75.45168498	61.1	114
17	127.1688312	163.9064935	131.4077922	167.0857143	213.6608571	84.08545495	128	182
18	202.504712	214.182199	207.9162304	216.7455497	204.9733714	84.08545495	92.2	135
19	76.57478006	98.3773216	85.08308895	103.6950147	133.1293071	45.54913876	76.325	111
20	187.136	212.16	200.736	220.32	213.6608571	213.6608571	96.55	194
21	158	174	165.1	180.4	213.6608571	213.6608571	70.82	82.7
22	117.7402788	140.6896552	121.9310345	144.0821717	213.6608571	180.7865136	59.4	97.7
23	75.57272727	134.4545455	79.28181818	143.8818182	213.6608571	134.6540811	77.1	142
24	56.05608856	66.24354244	64.73800738	68.75276753	185.0677274	69.81249495	68.5	94.2
25	102.5151515	188.030303	112.3030303	191.1212121	213.6608571	122.6494745	83.3	130
26	98.76504854	121.4757282	102.9902913	126.2291262	102.9955929	30.68067526	75.9	108



(a) ID1~ID18 (法面エリア)



(b) ID19~26 (栈橋エリア)

図 3.3-11 実測値とシミュレーション値の比較

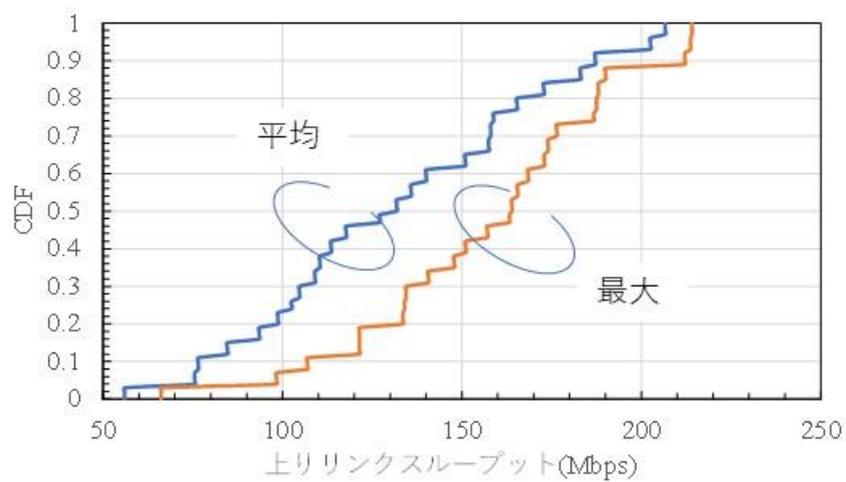


図 3.3-12 スループット累積分布

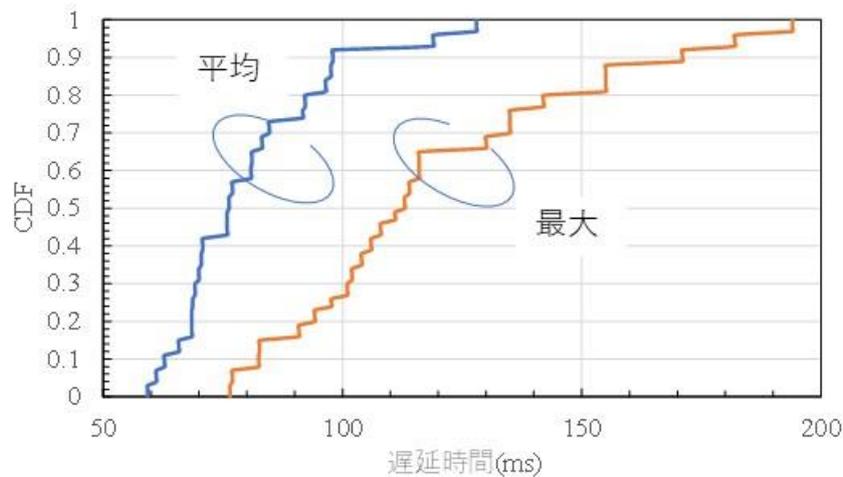
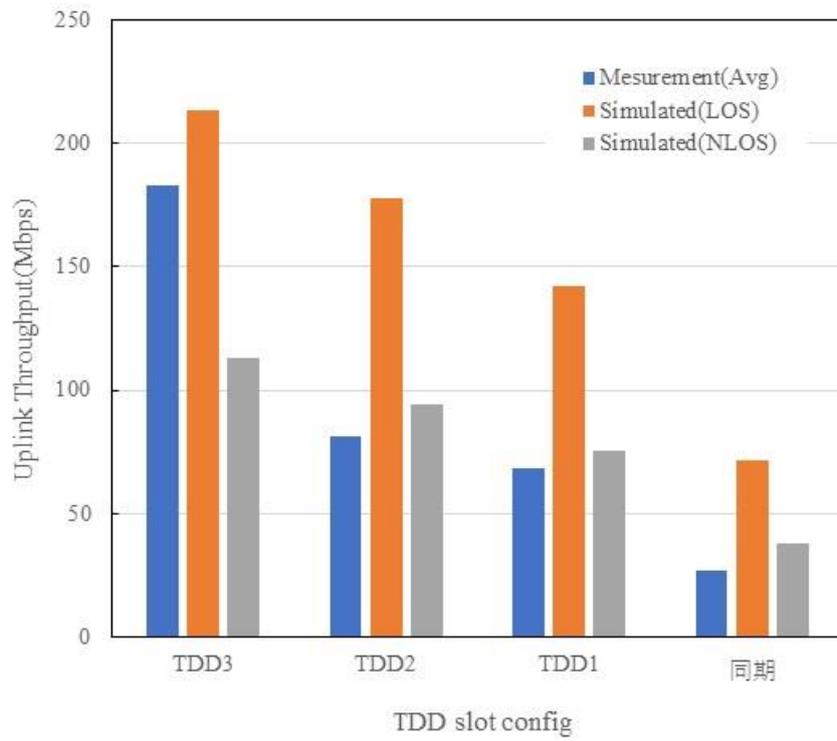


図 3.3-13 遅延時間累積分布

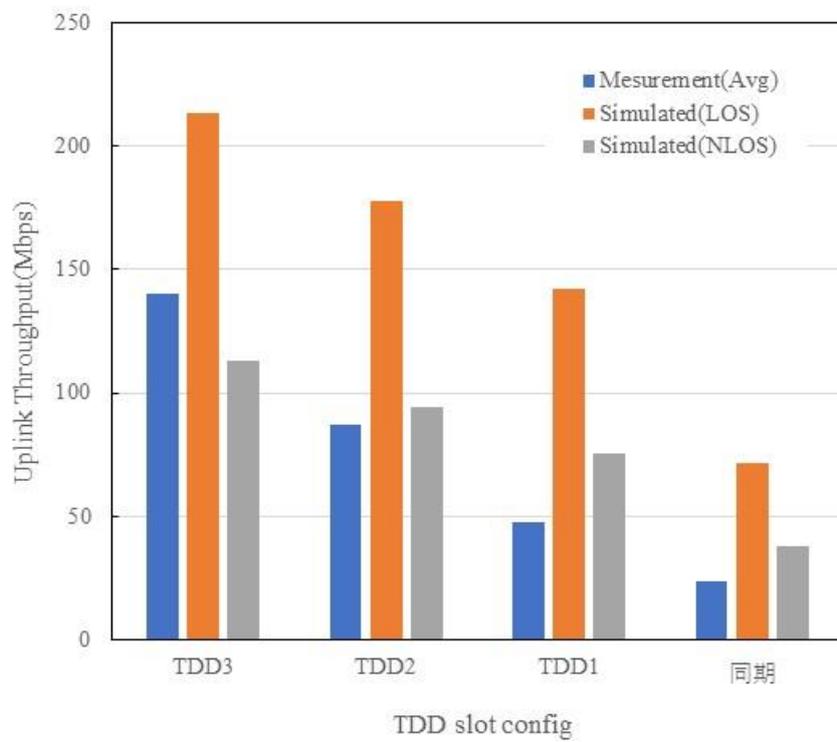
表 3.3-7 に示すように、各測定ポイントで測定されたアプリレイヤのスループットは、80%以上のポイントで平均 100Mbps および最大 120Mbps を達成できていることが分かる。また、遅延時間に関しては、すべての測定ポイントにおいて 200ms 未満にとどまっていることが分かる。また、図 3.3-11 は、実測値のうち、平均スループットの値と、LOS/NLOS 環境想定シミュレーション結果の比較を示すが、当初想定通り、実測値は LOS/NLOS 環境想定シミュレーション結果の間にほぼ収まっており、今回の測定結果がおおよそ想定通りの結果であったと考えることができる。

一方で、測定ポイント 4 および 5 については、平均スループットが 100Mbps を下回る結果となった。測定ポイント 4 は、他の測定ポイントと比較すると、近傍の植生による遮蔽の影響を受け、平均の受信電界強度が小さくなってしまったものと考えられる。一方、測定ポイント 5 は、瞬間的に非常に低い MCS を選択してしまっているタイミングが存在し、その後、高い MCS に復帰する前に、測定が完了してしまったものと推定される。今回測定環境においては、基本的には受信電界強度は安定していることから、MCS の復帰を比較的高速に行うリンクアダプテーションが適していると考えられる。

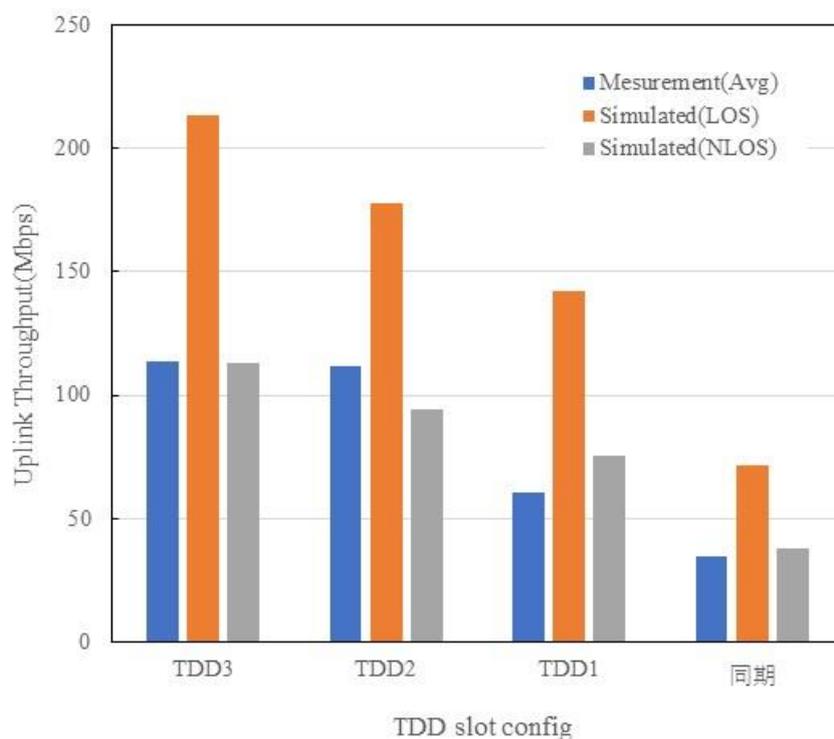
図 3.3-14 に示す測定点のうち、測定ポイント 1, 9, および 12 で取得した TDD スロット構成を変化させた場合の平均スループット特性の変化の様子を示す。追加準同期パターンである TDD3 および TDD2 を用いることにより、上りリンクスループットは同期パターンに対して、理論的には、それぞれ 300% および 250% の改善が見込めるが、図 3.3.1.4-5 によれば、実測結果の揺れはあるものの、追加パターンの利用によって、大きな上りリンクスループットの改善が得られていることが分かる。



(a) 測定ポイント 1



(b) 測定ポイント 9



(c) 測定ポイント 12

図 3.3-14 追加 TDD パターンによる実測結果

図 3.3-15 に測定ポイント 9 および 12 において、実際に映像伝送を行った様子を示す。測定ポイント 9 および 12 については、実際に設置された 8K 超高精細映像カメラからのライブ映像伝送を行ったが、他測定ポイントでは 8K 超高精細映像カメラの設置が困難であったため、測定ポイント 1 からは 8K 超高精細映像相当のトラフィック送信を行い、映像伝送試験に替えた。



(a) 測定ポイント 9 からの映像伝送



(b) 測定ポイント 12 からの映像伝送

図 3.3-15 8K 超高精細映像伝送(ライブ伝送の様子)

本試験で伝送した 8K 超高精細映像伝送は、後述する課題実証に用いる映像伝送ビットレートに合わせて、平均 50Mbps での伝送を行った。一時的に、映像が止まる状況も発生したが、クラウドサーバでの映像解析のための伝送という観点においては、問題ない品質で伝送できていることを確認した。

(ii カバーエリア端および干渉調整区域端の測定について

はじめに図 3.3-1 に示した、モデル式から想定される想定カバーエリア端および干渉調整区域端の測定結果を表 3.3-8 に示す。

表 3.3-8 モデル式から算出したエリア端における測定結果
(a)算出カバーエリア端

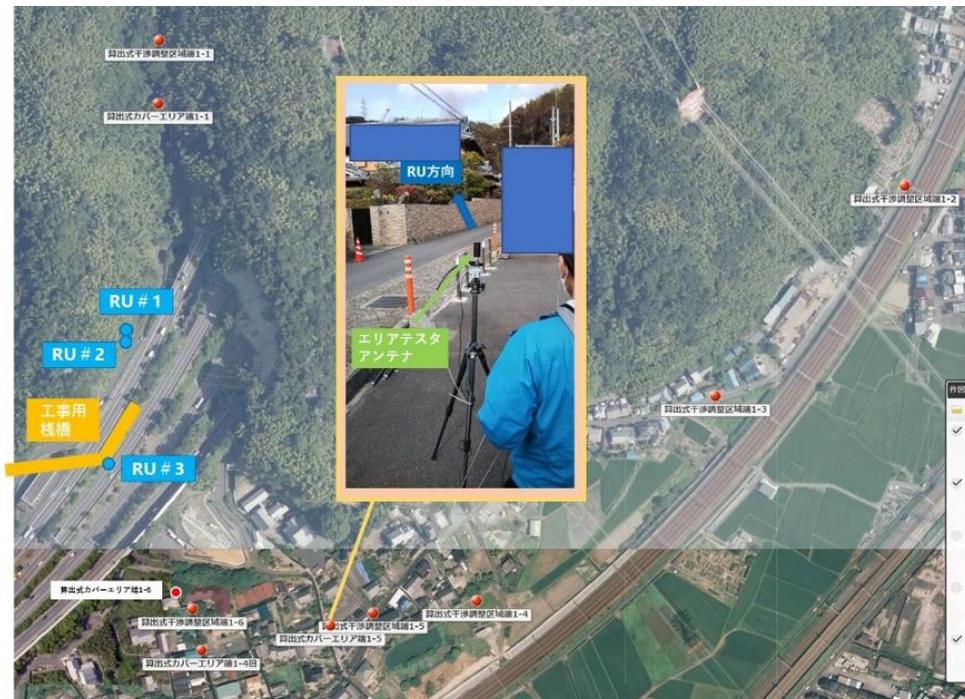
測定ポイント ID	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	-91.67	-92.22	3.79	-87.97	-97.47	0.31
2	undetected.					
3	undetected.					
4	-95.37	-95.41	2.30	-92.57	-98.17	1.05
5	-87.67	-88.02	2.33	-85.57	-91.17	0.21
6	undetected.					0.31
7	undetected.					
8	-84.67	-84.50	3.28	-79.97	-88.87	0.21
9	-85.17	-85.54	3.18	-81.87	-89.67	0.36
10	-87.97	-88.86	3.64	-85.17	-94.37	0.25
11	undetected.					
12	-90.27	-91.18	4.27	-86.37	-97.47	0.28
13	-92.57	-92.77	2.95	-89.17	-96.67	0.31
14	-88.67	-88.77	1.83	-86.47	-91.07	0.81
15	-77.17	-78.17	2.61	-75.47	-81.97	0.22
16	undetected.					
17	undetected.					
18	-89.47	-90.01	4.35	-84.77	-95.87	0.25

(b)算出干渉調整区域端

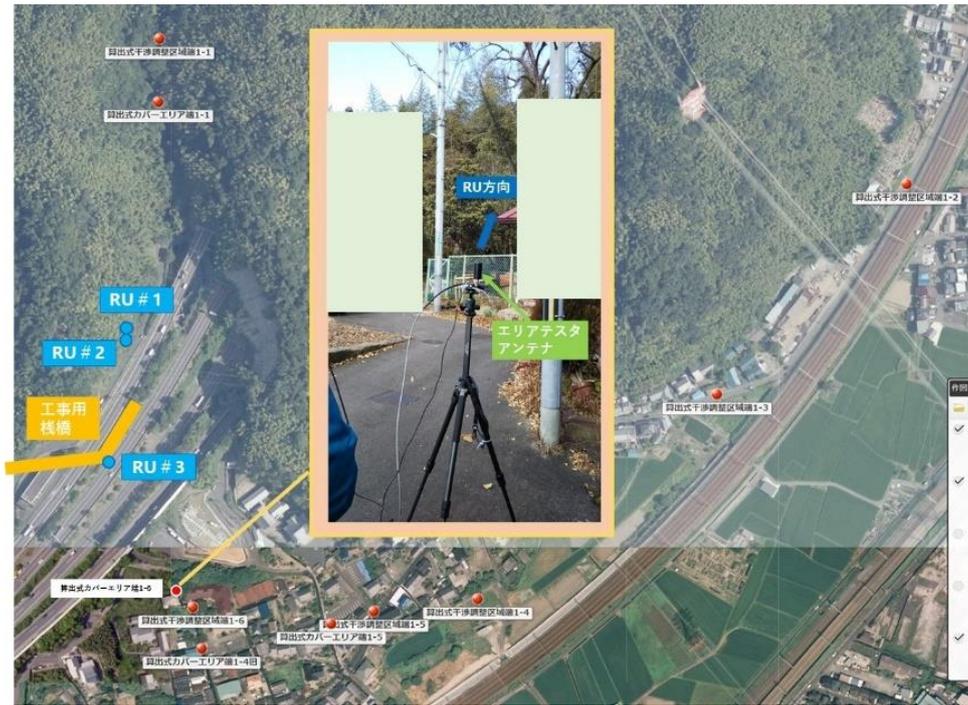
測定ポイント ID	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	undetected.					
2	undetected.					
3	undetected.					
4	undetected.					
5	-83.07	-83.27	2.40	-80.37	-86.27	0.18
6	undetected.					
7	-90.27	-90.58	2.08	-88.17	-93.17	0.26
8	-79.97	-80.51	3.06	-76.97	-84.77	0.22
9	-80.37	-80.56	2.47	-77.27	-83.97	0.30
10	-95.27	-95.78	3.37	-91.97	-100.57	0.33
11	undetected.					
12	undetected.					
13	-88.17	-88.32	2.14	-85.77	-91.07	0.47
14	-85.27	-85.82	2.74	-82.77	-89.67	0.26
15	-95.07	-95.17	3.03	-91.37	-99.07	0.32
16	undetected.					
17	undetected.					
18	undetected.					



(ID1)



(ID5)



(ID6)



(ID7, 8)



(ID9, 10)



(ID11, ID12)



(ID13, ID14, ID15)



(ID16, ID17, ID18)

図 3.3-16 算出カバーエリア端における測定点の様子
 ※一部、国土地理院公開データを含む



(ID1)



(ID4)



(ID5)



(ID6)



(ID7, 8)



(ID9, 10)



(ID11, 12)



(ID13, ID14, ID15)



(ID16, ID17, ID18)

図 3.3-17 算出干渉調整区域端における測定点の様子
 ※一部、国土地理院公開データを含む

表 3.3-8 に示す通り、モデル式から想定されるカバーエリア端および干渉調整区域端と想定されたポイントにおける実測結果は、それぞれを定義する受信電界強度、すなわち、 $-84.6\text{dBm}(-91.0\text{dBm})$ との乖離が大きいことが分かる。カバーエリア端の測定結果から検討すると、測定不能、すなわち、受信電界強度が測定器で測定できる限界値よりも低い受信電力しか到来していないことになるから、実際のカバーエリアはモデル式から算出される想定カバーエリアよりも相当に小さいということになる。

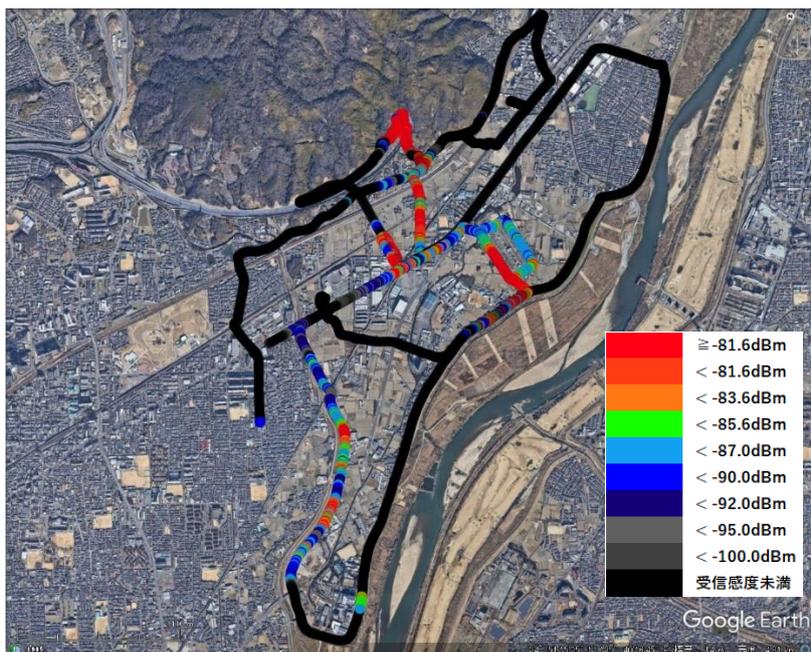
しかし、図 3.3-16 および図 3.3-17 に示す通り、想定カバーエリア端から RU 設置方向は、ほぼ見通し外の伝搬環境となっていることがわかる。また、基本的に、RU 設置方向を見上げる形になっていることも分かる。これは、アンテナ設置位置の標高が、想定カバーエリア端の測定位置に比べて相当に高く、そのためにアンテナ設置位置に近い方が、むしろ受信電界強度が小さくなってしまっているものと考えられる。このことは、並行して行った伝搬シミュレーション結果においても同様の傾向を示していることを確認している。

このことから、本試験環境においては、通信エリアの外、特に南側の標高が比較的低い方向には、想定カバーエリア端よりもさらに遠方に電波が到来している可能性が高いと考えた。また、この電波到来範囲は、想定カバーエリア端の近傍ではなく、かなり広範囲にわたっていることが予想され、測定ポイント周辺での測定では、実際に、カバーエリア端と干渉調整区域端の受信電力が実測されるポイントを探索するのは非常に困難であるとの結論を得た。

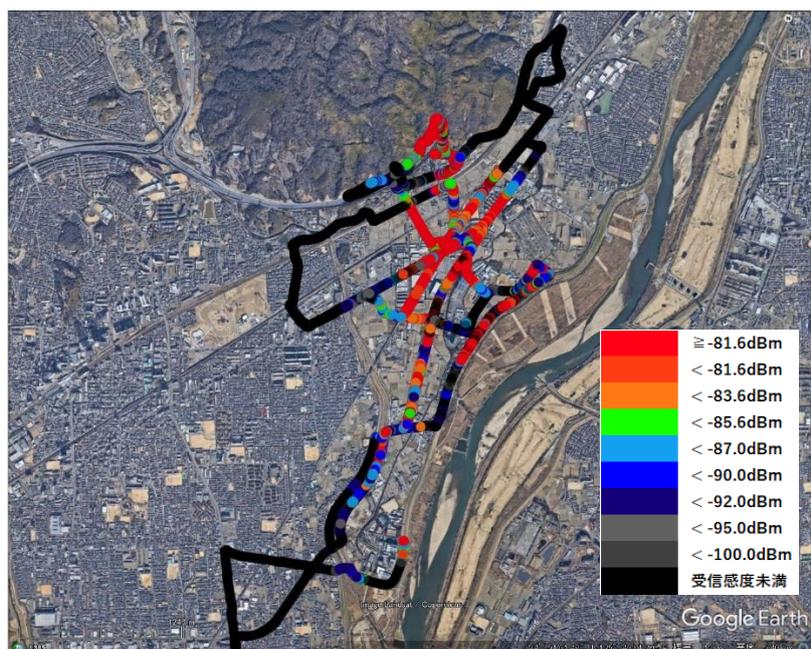
そこで、本実証試験では、カバーエリア端の実測に先立ち、測定器を持ち歩きながら受信電界強度の測定を行うことで、受信電界強度をパラメータとしたロードマップを作成することを考えた。

図 3.3-18 は作成されたロードマップの様子である。1 日で作成できるロードマップ範囲には限界があったため、日を分けて複数日にわたったロードマップの作成を行った。作成したロードマップによれば、試験環境を中心に考えた場合、東方向、北方向および西方向に関しては、算出カバーエリアに比較すれば電波到達距離は長いものの、極端にエリアが広がるということではないことが分かった。一方で、南方向については、3km に近い距離まで電波が到達していることが確認された。これは、南方向については大きな建物がなく、完全に基地局アンテナが見える見通し環境にはないものの、かなり遠い測定場所においても、試験現場付近が直接見える状況であるためである。

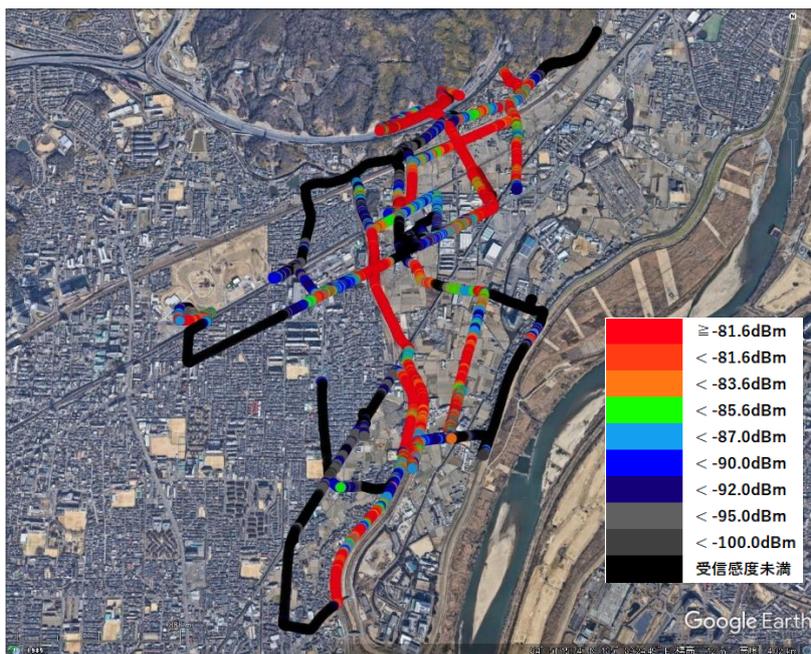
このロードマップに基づいて、カバーエリア端と干渉調整区域端の受信電力が実測されることが予測される測定ポイントを選定し、実測を行った。



(a) ロードマップ (RU1)



(b) ロードマップ 2 (RU2)



(c) ロードマップ 3 (RU3)

図 3.3-18 ロードマップの様子

表 3.3-9 に想定測定ポイントにおける実測受信電界強度を整理し、図 3.3-19 にはそれぞれの測定ポイントの様子を示す。

表 3.3-9 実測結果から想定したエリア端における測定結果
(a)想定カバーエリア端

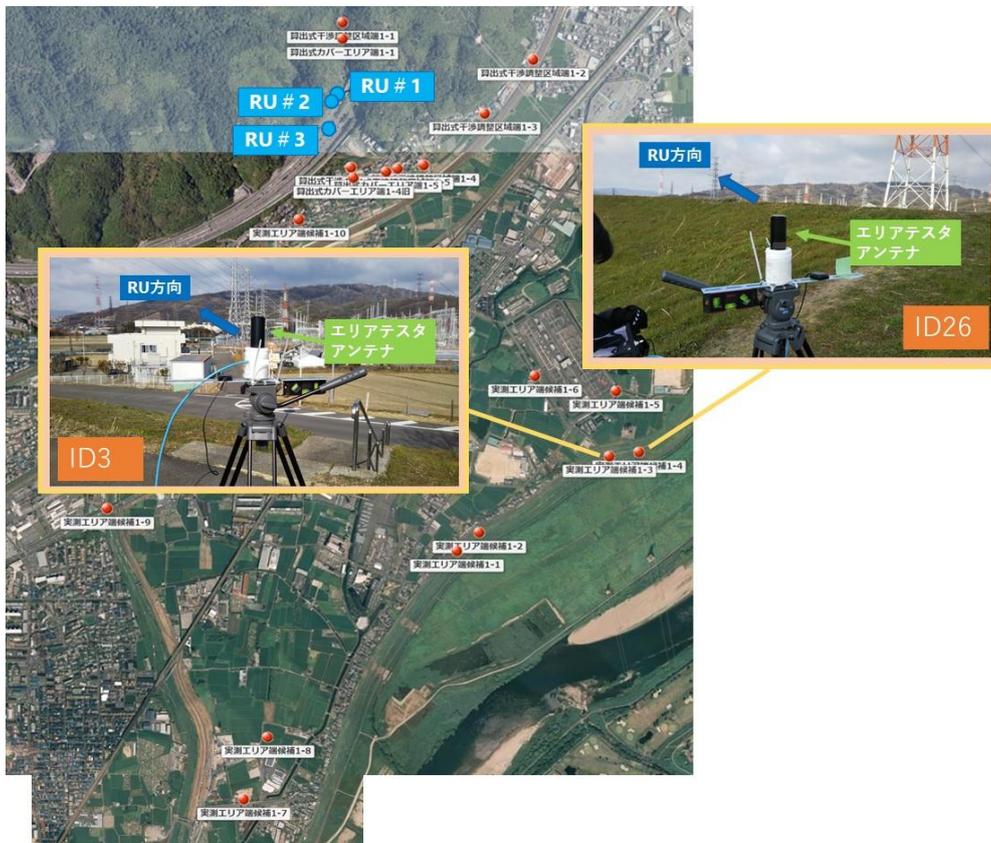
測定ポイント	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
1	-84.07	-84.34	2.04	-81.97	-87.17	0.26
2	-87.47	-87.50	2.10	-84.87	-90.27	0.23
3	-79.67	-80.11	2.33	-77.57	-83.17	0.28
4	-80.92	-81.46	2.84	-77.97	-85.57	0.34
5	-85.47	-85.79	2.14	-83.27	-88.67	0.30
6	-85.97	-86.05	3.18	-81.97	-90.18	0.32
7	-80.87	-81.39	2.84	-78.16	-85.47	0.33
8	-80.97	-81.76	3.11	-78.36	-86.27	0.45
9	-76.67	-77.84	4.12	-73.47	-84.37	0.39
10	-87.07	-87.57	2.66	-84.67	-90.88	0.92
11	-74.87	-75.29	4.22	-70.17	-81.07	0.94
12	-82.27	-82.71	2.82	-79.77	-86.28	0.22
13	-87.57	-88.20	3.37	-84.47	-93.37	1.24
14	-79.97	-80.74	4.12	-76.07	-86.37	0.20
15	-87.17	-87.36	3.44	-83.07	-91.67	0.28
16	-86.47	-86.72	3.43	-82.47	-91.27	0.28
17	-87.67	-87.83	2.24	-84.97	-90.87	0.44
18	-80.57	-80.71	2.48	-77.57	-83.97	0.20
19	-85.57	-85.62	3.80	-80.67	-90.67	0.29
20	-85.97	-86.24	2.18	-83.67	-89.07	0.36
21	-86.97	-87.58	4.63	-82.17	-94.17	0.22
22	-82.07	-82.69	4.67	-77.27	-89.07	0.19
23	-86.07	-86.58	3.50	-82.67	-90.58	0.20
24	-78.47	-78.51	2.43	-75.66	-81.67	0.20
25	-84.97	-86.14	4.31	-81.77	-91.68	0.25

(b)想定干渉調整区域端

測定ポイント	受信電界強度(dBm)					遅延スプレッド(us)
	中央値	平均値	標準偏差	90%値	10%値	平均値
26	-91.17	-91.12	3.34	-86.27	-94.97	0.90
27	-89.97	-89.82	2.76	-86.07	-93.27	0.30
28	-91.65	-91.65	2.34	-88.87	-94.57	0.35
29	-91.77	-91.99	2.90	-88.47	-95.67	0.36
30	-88.67	-88.75	3.26	-84.57	-92.97	0.29
31	-91.07	-91.58	4.56	-86.27	-97.57	0.34
32	-88.77	-89.78	5.63	-83.37	-97.97	0.28
33	-93.87	-94.07	4.54	-88.07	-99.87	0.38
34	-90.87	-90.96	3.11	-86.97	-94.87	0.40
35	-88.17	-88.43	3.62	-83.87	-92.97	0.28
36	-93.07	-93.58	2.77	-90.47	-97.37	0.84
37	-88.77	-88.65	3.91	-83.26	-93.17	0.78
38	-92.47	-92.68	2.83	-89.17	-96.47	1.87
39	-94.37	-94.85	4.50	-89.17	-101.07	0.31
40	-89.67	-89.98	2.35	-87.17	-93.17	0.55
41	-90.97	-91.93	4.55	-86.87	-98.47	0.31
42	-88.47	-88.18	2.88	-83.87	-91.57	0.46
43	-91.37	-92.27	3.80	-88.07	-97.77	0.62
44	-92.67	-93.23	2.62	-90.37	-96.87	0.63
45	-91.07	-91.41	2.00	-89.07	-94.17	0.27
46	-98.67	-99.45	2.80	-96.66	-102.95	0.36
47	-95.07	-95.68	2.74	-92.77	-99.28	0.33



(a) ID1 および ID2



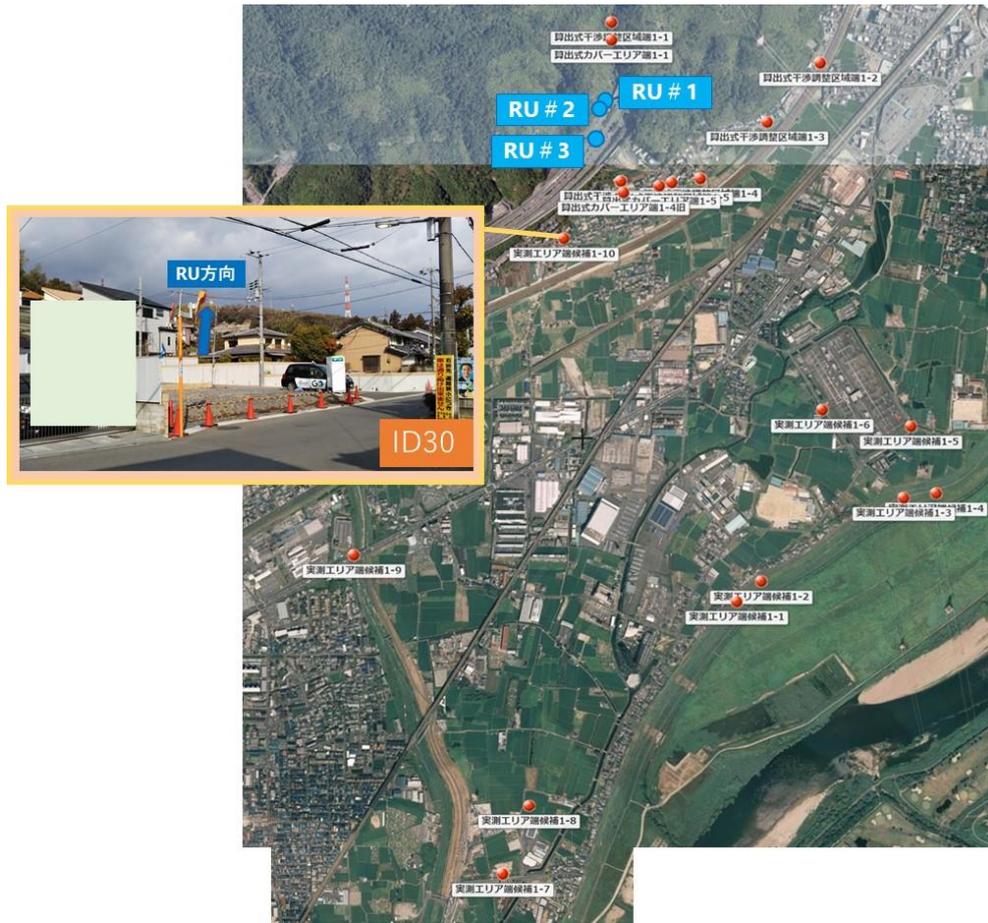
(b) ID3 および ID26



(c) ID4 および ID27



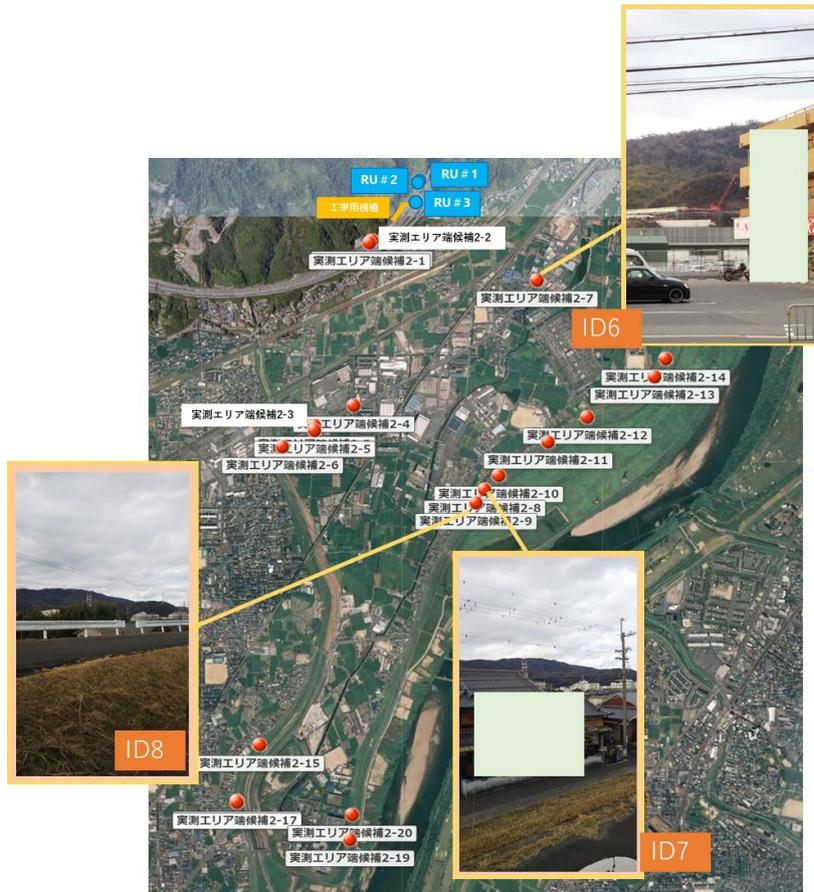
(d) ID5, ID28, ID29



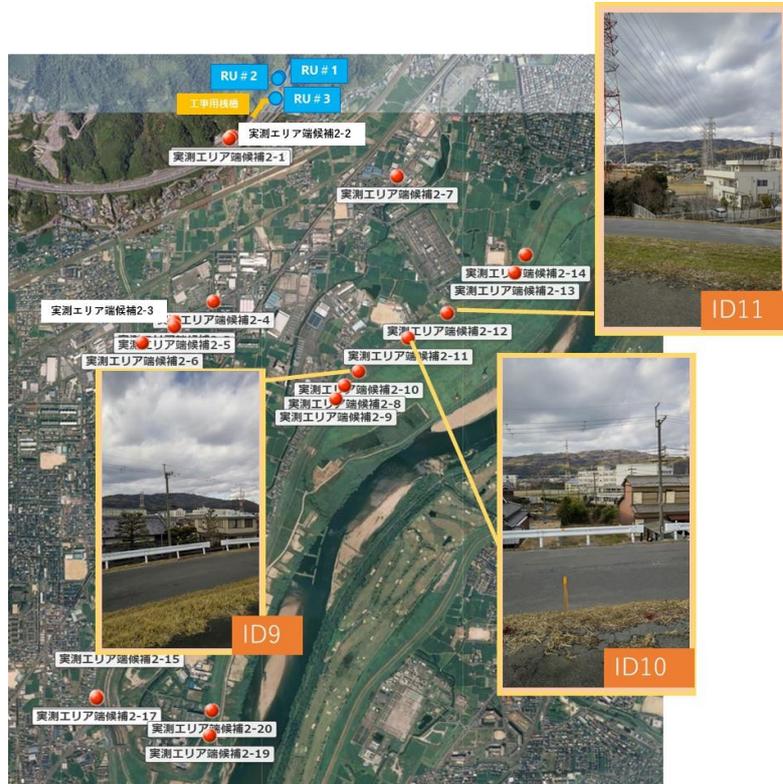
(e) ID30



(f) ID31~36



(g) ID6~ID8



(h) ID9~ID11



(i) ID37, 38



(j) ID12, 13, 14 および 39



(k) ID15~ID18, ID40 および ID41



(l) ID19, ID20, ID42~ID44



(m) ID21, ID22, ID45



(n) ID23, 24, 25 および ID47

図 3.3-19 測定点の様子
(一部国土地理院公開データ利用)

図 3.3-20 に測定結果から想定される、実際のカバーエリアおよび干渉調整区域を示す。



図 3.3-20 実測から想定されるカバーエリアおよび干渉調整区域

図 3.3-20 に示す通り、想定されていたカバーエリアに対して、実測データから推定されるカバーエリアは大幅に異なり、直線距離では最大で 3km 以上の異なっている結果となった。これは、測定点周辺の建物や地形起伏の影響、また試験現場における基地局アンテナ近傍の重機・建造物の影響もあるとは考えられるが、支配的な要因は、試験現場の標高が測定ポイントよりも相当に高いことによって、想定よりかなり遠方であっても、見通しの無線伝搬環境であるなど、アンテナ高自体が標高差相当に高いところに設定された場合と同等の大きなハイトゲインの効果が出ていると考えられる。

今回試験環境は、試験現場の標高が、カバーエリア端に比較して相当に高いという特徴

を有する環境であった。当然ながら、本試験環境と同様に、標高の高い建設現場であれば、今回の実証試験結果と同様の傾向を示すため、ハイトゲイン等を考慮する必要がある。一方で、すべての建設現場においても、同様の傾向を示すとは考え難い。他の建設現場において、カバーエリアの設計を行う際には、はじめに、当該試験環境および通信エリア外の電波伝搬において支配的な影響を与える要因を明確化し、その影響に基づいてカバーエリア設計を行うことが必要と考えられる。

なお、工事進捗状況に応じて建造物等の状態が変わる建設現場においては、機器設置場所に柔軟性を与えられる移動基地局が今後、重要となってくる可能性がある。建設現場における移動基地局の運用では、通信エリア内の構造物等の変更をトリガーとして、基地局の設置位置を変更し、一定期間は固定局として利用し、さらに一定期間後に設置位置変更という運用が想定されるが、構造物等の変更を考慮し、また複数の移動候補先について予め品質・干渉の評価が必要となるため、エリア設計に係る工数は増加するものと考えられる。移動基地局導入に向けては、品質・干渉評価の更なる簡易化が必要になってくるものと考えられる。

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

本実証試験では、高速道路での工事作業に関して、超高精細映像を活用したリアルタイムモニタリングを可能とする映像共有システム/リアモステーション（リアルタイムモニタリングステーション）の開発導入の実装を目指している。本実証試験では、建設作業が進められている新名神高速道路梶原トンネル建設工事のうち、特に、高速道路トンネルの出入り口周辺を技術実証環境として選定している。当該環境は、はじめに山間部環境であることが特徴として挙げられる。また、本実証試験で対象とする工事現場は、既に工事が進行中であり、今後数年間工事が続く環境であり、今回実証試験を行う期間においても、作業工程の進捗において、建築中構造物の状態および用いられる重機の種類・数が変化していくことが想定されることも特徴として挙げられる。これは、既に制度化されている電波伝搬モデル式において、特に周辺丘陵における斜面や植生の影響、および各パラメータの選択基準といった観点で、実測とは異なった振る舞いが想定される。

本実証試験において、伝搬モデルの精緻化を行うのは、まさにこの観点に基づいてであり、当該作業現場における、安定した通信品質を担保する通信エリアの構築は当然として、将来の同様の環境における通信エリア構築に際して、アンテナ設置個所の検討や、干渉調整エリアの正確な導出に必要な作業コストの低減に資することを目標とする。

(2) 実証目標

本実証試験では、無線免許審査基準別紙(16)-1 カバーエリア及び調整対象区域の算出法

に記載される伝搬等に関する計算式のうち、① $d_{xy} \leq 0.04\text{km}$ の場合、② $0.04\text{km} < d_{xy} < 0.1\text{km}$ の場合、および③ $d_{xy} \geq 0.1\text{km}$ の場合において、それぞれモデル化されている計算式に関する検証を行う。ここで d_{xy} は基地局装置と端末装置間の通信距離を表す。その目的は、モデル算出式の精度向上により、今後、同様の環境を想定したローカル 5G 展開における基地局設置の事前検証に係るコストを軽減することにある。

本実証試験では、計算式より算出される受信電界強度と、実測値および電波伝搬シミュレーションによって得られる受信電界強度とを比較し、計算式の妥当性を評価するとともに、更新の必要性が生じた場合には、その根拠と共に更新案を定めることを目標とする。

具体的には、少なくとも、表 3.3-10 に示すパラメータについて、評価・検討を行う。

表 3.3-10 検討パラメータ

周波数帯	精緻化対象パラメータ	精緻化の方向性
4.8~4.9GHz	S	選択基準の詳細化
	K	周辺丘陵の斜面や植生影響の定量化

また、本実証試験では、既に工事進行中の土木建築環境を試験対象として選定しており、作業工程の移り変わりが電波伝搬モデルに与える影響について評価・検討を行う。具体的には、建設工程進捗によって変化する構造物の形状、および持ち込まれる重機の数や種類の変化によって発生する受信電界強度の変化を解析し、エリア算出法で定義されている計算式において、当該変化に追随させるためのパラメータの追加を検討する。パラメータ追加の検討にあたっては、本実証試験環境に限定された変更となってしまう可能性を排除するため、電波伝搬シミュレーションによって、少なくとも 2 つの異なる伝搬環境を想定したレイアウトに基づいて受信電界強度を算出する。そして、検討するパラメータの追加が必要となる条件を明確とする。

なお、今回の実証試験環境は、およそ 150m 四方の中に収まる環境であるが、土木・建築といった工事現場で運用されるローカル 5G においては、周辺環境や実際の建築中構造物の形状や、使用される重機が多岐にわたることから、その範囲内においても、異なる伝搬環境となってしまう可能性が高い。本実証試験では、対象とする実証試験エリアのモデル精緻化は当然としながら、事業モデル毎に異なる通信環境が想定される土木・建築向けのローカル 5G の通信エリア構築において、多くの事業モデルにおいて参照可能な伝搬路モデルを構築するとともに、事業モデル毎にチューニングする際に着目すべき事項について、明らかにすることも併せて目標とする。

3.3.2.2 実証仮説

本実証環境は、作業進行中の土木建設現場を試験環境とするが、実際に通信エリアとするのは、実装する映像ソリューションに従い、①作業現場全体を俯瞰するカメラ設置箇所を対象とする通信エリア②作業現場近傍のカメラ設置箇所を対象とする通信エリア、の 2 つの通信エリアに大別される。

作業現場全体を俯瞰するカメラ設置箇所を対象とする通信エリアに関しては、カメラが実際に設置されるのは、作業現場から比較的離れた位置となり、その場所は、実際に重機

などが動作している状況とは異なり、山間部相当の環境に近い状況となる。そのため、電波伝搬に影響を与える事象としては、もちろん建築物や重機の影響も想定されるが、通信エリア周辺の丘陵や、周辺の植生から受ける影響のほうが強いと考えられる。特にトンネル出入口付近は、複数方向が斜面に囲まれる状況となるため、周辺斜面からの反射の影響を強く受ける可能性が高い。このような状況は、 S 、すなわち、現在の計算式では市街地、郊外地および開放地に対してそれぞれ定義されている値に関して、本実証環境では、それらには含まれないものと考えられ、郊外地と開放値の中間に値をとる補正項が必要になることが予想される。また、 K 、すなわち、地形情報データ以外の影響に対して算入する補正項に関しても、周辺斜面から反射波を受信できる一方で、植生の影響を受けることを考慮すると、基準値となる 0 dB より小さな値、すなわち伝搬損失を大きくする補正が必要となることが予想される。

作業現場近傍のカメラ設置個所を対象とする通信エリアに関しては、上記通信エリアと異なり、実際に電波が工事作業現場を伝搬することになる。そのため、周辺の丘陵や植生の影響は受けるものの、建築物や重機の形状等に、伝搬環境は大きく影響を受けるものと考えられる。このような状況は、 S 、すなわち、現在の計算式では市街地、郊外地および開放地に対してそれぞれ定義されている値に関して、先と同様にそれらには含まれないものと考えられ、実際に比較的大きな構造物が存在することを考えると、市街地の補正項に近い値が必要となる可能性がある。なお、 K 、すなわち、地形情報データ以外の影響に対して算入する補正項に関しては、周辺丘陵の影響を受ける一方で、建築物や重機などによる遮蔽が発生することを考慮すると、基準値となる 0 dB より若干小さな値、すなわち伝搬損失を若干大きくする補正が必要となることが予想される。

上記仮説に基づいた、測定前における修正算出式におけるカバーエリアおよび干渉調整エリアを図 3.3-21 に示す。ここでは、暫定的に $K=5\text{ dB}$ 、 $S=22.3\text{ dB}$ を想定した。現時点においては、カバーエリアと干渉調整エリアは、いずれも現行のモデル式によって算出されたエリアよりも狭くなることが予想される。実際には、アンテナを設置する向きや、アンテナ設置治具等の影響も加味する必要がある。実証試験の推進にあたっては、伝搬シミュレーション結果や、工事進捗状況などを踏まえて最終的に決定されるアンテナ設置位置なども考慮して、測定点を適宜補正し、カバーエリア端および干渉調整エリア端を明確とする。

なお、実測を進めるうちに、今回試験環境においては、制度化済モデル式から想定されるカバーエリア端よりも、相当に遠くにおいても、電波が観測されることが分かってきた。これは、今回試験環境の標高がおおよそ 50 m を超える環境であるのに対して、カバーエリア端や干渉調整区域端となり得る、数 100 m も離れた地域では、その標高が 10 m を下回る状況となっていることがわかり、この標高差から、アンテナ高を高くすることによって得られるハイトゲインに相当する利得が得られているためではないかと考えられ、精緻化においては、この観点についても検討を行うことにした。

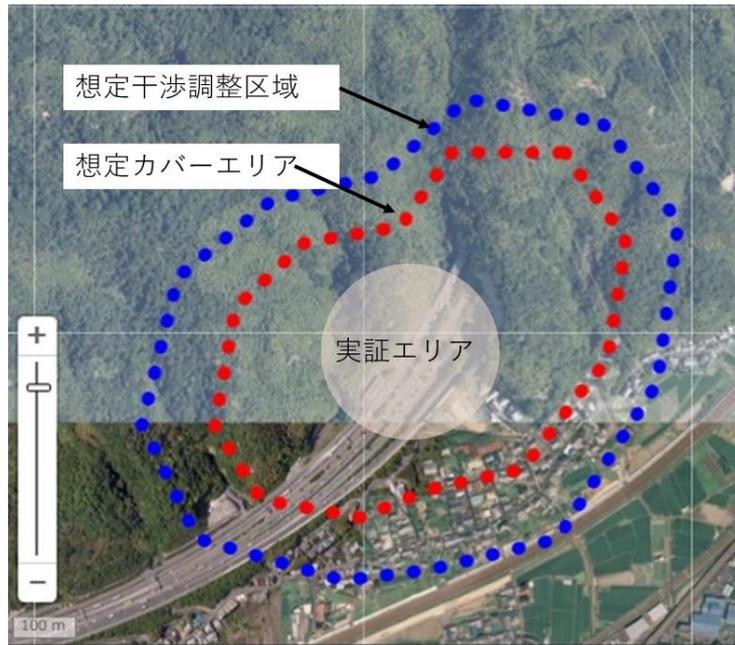


図 3.3-21 想定カバーエリアおよび想定干渉調整エリア

3.3.2.3 評価・検証項目

本実証試験では表 3.3-10 に記載の評価項目のうち、受信電界強度に関する評価で測定された実測結果および電波伝搬シミュレーションによる算出結果と、既に定義されているモデル式との比較・分析を行う。実施エリア等を表 3.3-11 に整理する。当該比較結果に基づいて、実証目標に示したパラメータの精緻化の検討を進める。なお、検討に従い、必要に応じて、他の補正項に関する検討も行う。

表 3.3-11 評価内容

実証箇所	作業俯瞰エリア (RU#1)	作業近傍エリア (RU#2/#3)	カバーエリア端周 辺 (RU#1~#3)	干渉調整エリア端 周辺 (RU#1~#3)
精緻化 パラメータ	S,K	S,K	S,K	S,K

3.3.2.4 評価・検証方法

実証環境における電波伝搬環境の測定では、表 3.3-12 に示す測定器を使用する。

表 3.3-12 使用測定器概要

エリアテスタ ML8780A (アンリツ株式会社)	
主要オプション構成	
ML8780A-003	同期用 GPS オプション
MU878070A	5G NR TDD sub-6GHz 測定ユニット
Z1911B	2.1/2.6/3.5/3.7/4.5GHz アンテナ (無指向性)

測定に当たっての主な設定を表 3.3-13 に示す。なお、本実証システムにおける SS 周期は 20ms とするため、表 3.3-13 の設定下での上記測定値の最短測定周期は 40ms となる。

表 3.3-13 測定における主な設定値

項目	設定値
中心周波数	4.84986GHz
帯域幅	100MHz
測定 PCI (Physical Cell Identifier) 数	3

上記測定値を使用した電波伝搬環境の測定方法は下記のとおり定めることとする。

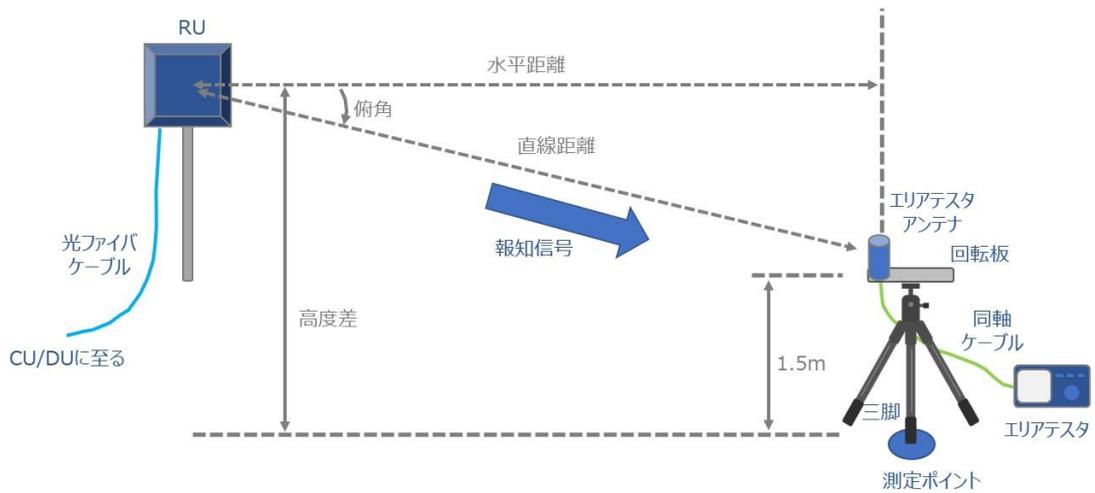
- 測定する受信電力は、SSS (Secondary Synchronization Signal) に基づく SS-RSRP とする。また、測定器の遅延プロファイル測定機能を用いて、同時に遅延プロファイルの測定 (パス毎の受信電力の相対値による測定) を行う。
- 各測定点において、合計 4500 サンプルの測定を行う。具体的な測定手順は以下の通りとする。

- (1) 定在波の影響を避けるため、三脚上に長さ 25cm の固定板を設置し、その先端に測定アンテナを設置し、当該固定版を 45°間隔で回転させ、同心円状で 8 点の測定と、三脚中央にも測定アンテナを設置した測定により、合計 9 点での測定を行う。なお、本実証システムのローカル 5G 搬送波中心周波数における波長 λ は約 6.2cm である。
- (2) 上記の各測定点において、40ms の測定周期で 20 秒間ずつ計 500 サンプルの測定を行う。
- (3) したがって 1 測定点における全サンプル数は 4500 サンプルとなり、これを統計処理して、各測定点における測定結果として、中央値、標準偏差 σ 、上位 10%値及び下位 10%値を算出する。

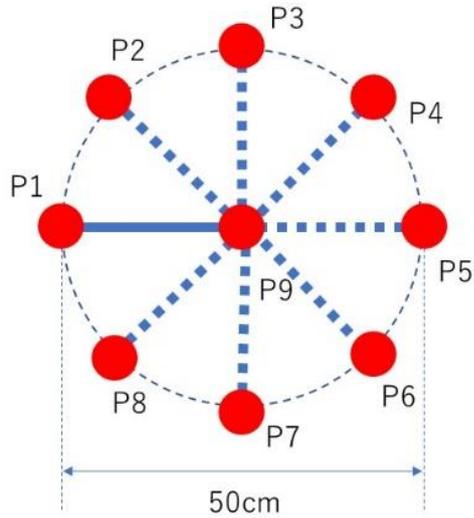
上記に基づく各測定点における測定手順を図 3.3-22 に示す。

当初計画では各測定点において、20cm 間隔の 3×3 の格子点 9 か所でアンテナ設置位置を移動させて測定を行う計画としていたが (図 3.3-24 の P1~P9)。カバーエリア内、特に法面での測定において、当初予定していたアンテナ設置が安全上困難であることが判明したため、上記の測定方法を採用した。測定点間の距離は 20cm 程度の離隔があるため、当初計画と同等の測定が行えるものと判断した。

なお、使用する測定器のアンテナ指向性パターンは、無指向性となっている。



(a) 全体概要



(b) アンテナ位置



(c) 測定状況

図 3.3-22 各測定点における測定器アンテナ設置位置

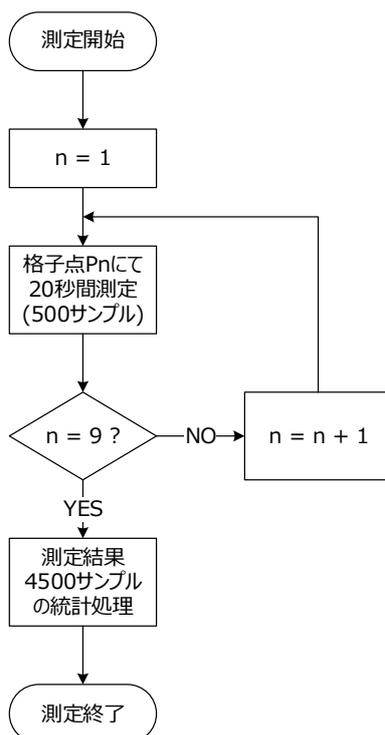


図 3.3-23 各測定点における測定手順

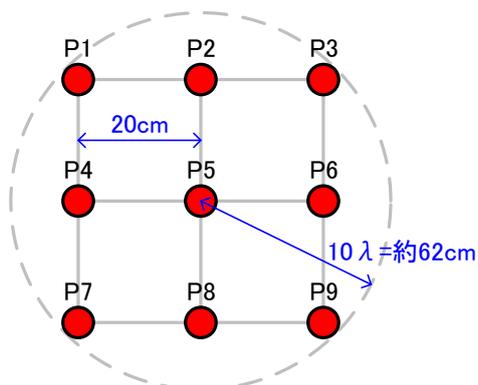


図 3.3-24 計画時における各測定点における測定器アンテナ設置位置

上記手順による測定パラメータと、その測定結果に対して比較対象となる、エリア算出値及び電波伝搬シミュレーション結果の比較項目一覧を表 3.3-14 に示す。

表 3.3-14 測定結果とシミュレーション値との比較項目

比較項目 (測定パラメータ)	測定結果	エリア算出法 計算結果	電波伝搬シミュレーシ ョン結果
受信電力	SS-RSRP 測定値 (中央値)	受信電力算出値	SS-RSRP シミュレーシ ョン値
遅延プロファイル	遅延プロファイル測定値	N/A	各パスの電力シミュレー ション結果

測定に関しては、既に図 3.3-1 および図 3.3-2 に記載した想定測定ポイントにおいて測定を行う。特に、計算式のパラメータの精緻化においては、 S の評価においては、基地局装置と測定点との距離が 100m 以上確保されている測定点の値を用いる。本実証試験では作業現場全体を俯瞰するカメラ設置個所を対象とする通信エリアと、作業現場近傍のカメラ設置個所を対象とする通信エリアの両エリアでの調査を行うが、今回、すべての RU に対して測定ポイントにおける受信電界強度測定を行った。

電波伝搬モデルの精緻化においては、作業現場全体を俯瞰するカメラ設置個所を対象とする通信エリアに対しては RU#3、作業現場近傍のカメラ設置個所を対象とする通信エリアに対しては RU#2 の測定データを主に用いる。なお、今回、各 RU には、それぞれ別々の PCI (Physical Cell Identifier) が設定されており、また使用する測定器は、PCI 毎の測定が可能であるから、3 局の RU を起動させている状態で、並行して、各 RU に対する測定を行うことが可能である。もし、建設工程の遅延などの不測の事態により、図 3.3.1-2 に記載の想定測定ポイントのみで 20 点以上の 100m 以上の離隔距離が確保された測定点が得られなかった場合は、さらに測定ポイントを増加させる。

1. 想定測定ポイントにおける受信電力として SS-RSRP を測定
2. 電波伝搬シミュレーションにより、各測定ポイントにおける受信電力のシミュレーション値を算出
3. 上記における SS-RSRP 測定結果において、エリア算出法に基づいて算出したカバーエリア及び調整対象区域それぞれのエリア端に該当するポイントで実測した SS-RSRP 値と、エリア算出法によるカバーエリア及び調整対象区域の閾値とが異なっている場合、閾値が測定されるポイントの予測と実測を繰り返し行って、それぞれの閾値が実測されるポイントの基地局からの距離を確認
4. エリア算出法による各測定ポイントにおける受信電力算出値と、実測値及びシミュレーション値とを比較して、樹木の状態や斜面との位置関係等も考慮して差分の要因を分析
5. 上記分析結果より、エリア算出法におけるパラメータ K 及び S の修正値を導出し、これら修正値を反映させた新たなエリア算出法に基づいて各測定ポイントにおける受信電力を算出
6. 5 の受信電力算出結果と実測値とを比較して一致度を確認
7. 十分な一致度が得られるまで、4 又は 5 から 6 までを繰り返し実施

測定にあたっては、測定前に RU#3 の近傍を見通しの測定点 1 点として理論値(自由空間伝搬)と比較し、設定・手順の確認を行う。エリア算出法の人体損失項の扱いを検討するために、測定時の状況を合わせて記録する。

本実証試験では、 K と S という 2 つの精緻化を進める計画である。評価にあたっては、はじめに、斜面の影響が大きいことが想定される K の精緻化から進める。このとき、 S の精緻化に影響を与える可能性が高い、エリア内の建築物および重機の占有率が同じ状況で測定した受信電界強度などのデータから、 K の精緻化を行う。本実証試験では、作業現場全体を俯瞰するカメラ設置個所を対象とする通信エリアと、作業現場近傍のカメラ設置個所を対象とする通信エリアの 2 か所において、主にカバーエリア内の実測を行う。前者は、

斜面近傍となる一方で、後者は、比較的斜面の影響が小さいことが予想される。両者の測定結果を用いることで、 K に影響を与えると考えられる斜面の影響を解析・検討を行うことが可能である。 K の値を算出したのち、 S の精緻化を行う。 S の精緻化にあたっては、すでに算出した K の値を前提に検討を進める。

なお、 K の条件を特徴づけると考えられる、カバーエリア内トンネル坑口上部の法面部分及び北西方向の山体斜面は、いずれも約 45° の急勾配となっている。

また、本実証試験では、最大で3つのRUを用いて実証試験を進めるが、それぞれは、異なるPCIが設定されており、本実証試験で用いる測定器は、PCI毎のデータ取得が可能である。そのため、測定データより、各RUのデータを取得することで、それぞれ独立に評価・解析が可能である。3局でそれぞれ測定されるデータを用いて、 K の精緻化の検討を進める計画である。

なお、カバーエリア内においては、山地80%、住宅地10%、高速道路5%、田畑5%のような構成の面積占有率となっている。各RUからの電波放射方向に存在する障害物は、RU#1についてはなし、RU#2については右方向に山肌や樹木が障害となる、RU#3については数mの距離に重機や資材が配置され、人通りも激しい(予定)、という状況である。

3.3.2.5 実証結果及び考察

(i) 作業現場全体を俯瞰するカメラ設置個所を対象とする通信エリア

表 3.3-15 に作業俯瞰エリアにおける受信電界強度測定結果を示す。SS-RSRP を対象として受信電界強度を測定する。

表 3.3-15 作業俯瞰エリアにおける受信電界強度測定結果

(a) 測定点情報(1/2)

測定 点 ID	基地局との 3D 距離 [m]	基地局との 水平距離 [m]	基地局 アンテナ 地点 標高 [m]	基地局 アンテナ 地上高 [m]	送信電力 Pt [dB m]	送信アン テナ利得 Gt [dBi]
1	94.64	94.60	0.00	1.75	25.00	10.80
2	99.76	99.70	0.00	1.75	25.00	10.60
3	102.89	102.80	0.00	1.75	25.00	10.60
4	117.18	117.10	0.00	1.75	25.00	9.60
5	121.40	121.40	0.00	1.75	25.00	10.00
6	107.90	107.90	0.00	1.75	25.00	11.00
7	103.71	103.70	0.00	1.75	25.00	10.90
8	101.71	101.70	0.00	1.75	25.00	10.90
9	109.43	109.20	0.00	1.75	25.00	10.60
10	109.05	108.80	0.00	1.75	25.00	10.60
11	112.13	112.00	0.00	1.75	25.00	10.70
12	124.69	124.60	0.00	1.75	25.00	10.40
13	128.16	127.50	0.00	1.75	25.00	10.30
14	114.48	113.80	0.00	1.75	25.00	10.40
15	131.43	131.10	0.00	1.75	25.00	10.60
16	124.69	124.60	0.00	1.75	25.00	10.60
17	119.30	119.30	0.00	1.75	25.00	10.80
18	113.05	113.00	0.00	1.75	25.00	10.20

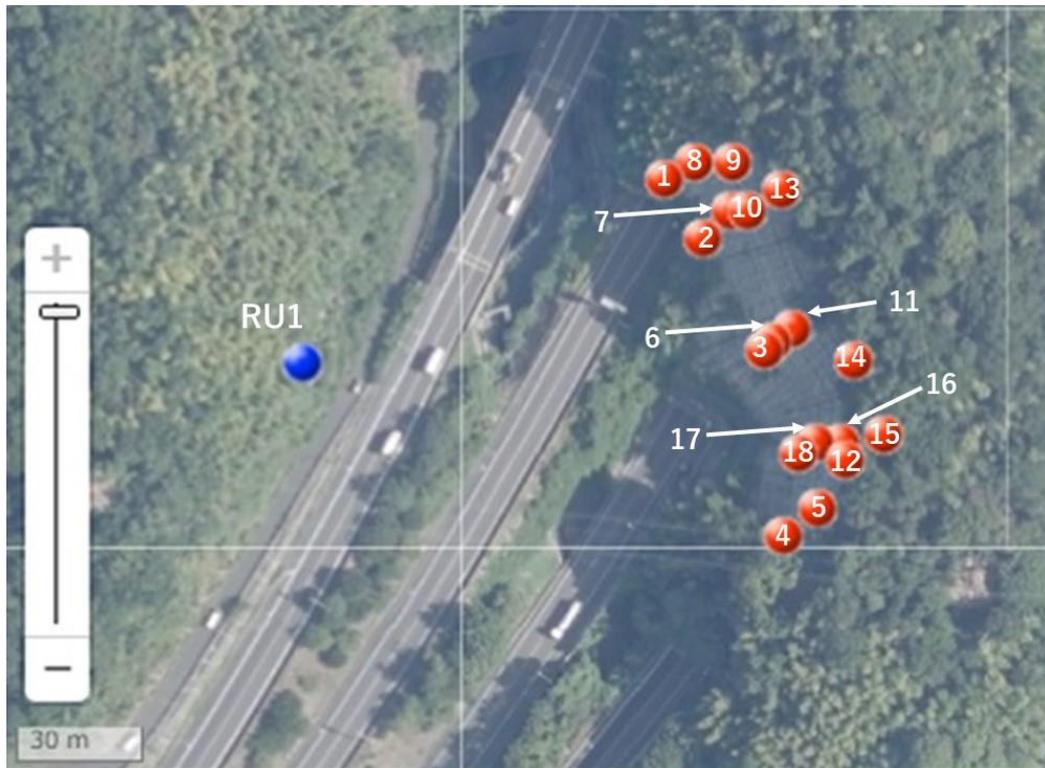
(b) 測定点情報(2/2)

測定点ID	基地局 給電線 損失 Lf[dB]	受信 アンテナ 利得 Gr [dBi]	受信 給電 線損 失 [dB]	測定 点標 高 [m]	端末 (測 定 器) アン テナ 地上 高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)	測定日 (yyyy/m m/dd)
1	1.00	0.00	0.00	-2.4	1.50	0	2022/01/27
2	1.00	0.00	0.00	-3.2	1.50	0	2022/01/27
3	1.00	0.00	0.00	-4.1	1.50	0	2022/01/27
4	1.00	0.00	0.00	-4.1	1.50	0	2022/01/27
5	1.00	0.00	0.00	-0.5	1.50	0	2022/01/27
6	1.00	0.00	0.00	-0.1	1.50	0	2022/01/27
7	1.00	0.00	0.00	1.6	1.50	0	2022/01/27
8	1.00	0.00	0.00	1.9	1.50	0	2022/01/27
9	1.00	0.00	0.00	7.3	1.50	0	2022/01/27
10	1.00	0.00	0.00	7.7	1.50	0	2022/01/27
11	1.00	0.00	0.00	5.6	1.50	0	2022/01/27
12	1.00	0.00	0.00	4.9	1.50	0	2022/01/27
13	1.00	0.00	0.00	13.2	1.50	0	2022/01/27
14	1.00	0.00	0.00	12.7	1.50	0	2022/01/27
15	1.00	0.00	0.00	9.5	1.50	0	2022/01/27
16	1.00	0.00	0.00	4.9	1.50	0	2022/01/27
17	1.00	0.00	0.00	-0.4	1.50	0	2022/01/27
18	1.00	0.00	0.00	-3.2	1.50	0	2022/01/27

(c)測定結果

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位 10%値	下位 10%値
1	-48.971213	-49.430301	2.00101298	-47.361213	-52.471213
2	-51.471213	-51.590901	2.76238768	-47.871213	-54.971213
3	-50.471213	-51.673368	3.86900358	-47.371213	-57.071213
4	-56.071213	-56.306901	1.51314304	-54.571213	-58.471213
5	-51.371213	-51.890213	2.84056119	-48.471213	-55.971213
6	-49.971213	-50.354724	2.82307384	-46.971213	-53.971213
7	-47.471213	-47.467168	1.72559467	-45.171213	-49.771213
8	-49.371213	-49.467079	2.8965659	-45.271213	-52.771213
9	-47.471213	-48.888435	4.45312712	-45.471213	-56.271213
10	-48.871213	-48.650124	2.39852587	-45.171213	-51.671213
11	-47.871213	-48.231457	2.95431803	-44.371213	-52.371213
12	-52.221213	-52.802168	5.02121716	-46.771213	-61.771213
13	-49.371213	-49.583835	1.9418252	-47.071213	-52.271213
14	-48.571213	-48.774435	2.30656759	-46.071213	-51.771213
15	-52.871213	-53.087346	2.40178585	-49.671213	-56.571213
16	-52.571213	-52.55639	2.1776012	-55.571213	-49.671213
17	-50.571213	-51.54779	3.04184927	-48.371213	-56.071213
18	-52.471213	-52.274057	2.46169786	-48.671213	-55.371213

図 3.3-25 に各測定点の様子を示す。



(a) 着目する RU および測定点概要



(b-1) ID1 : LOS



(b-2) ID2: LOS



(b-3) ID3: LOS



(b-4) ID4: LOS



(b-5) ID5: LOS



(b-6) ID6 : LOS



(b-7) ID7: LOS



(b-8) ID8: LOS



(b-9) ID9: LOS



(b-10) ID10: LOS



(b-11) ID11 : LOS



(b-12) ID12: LOS



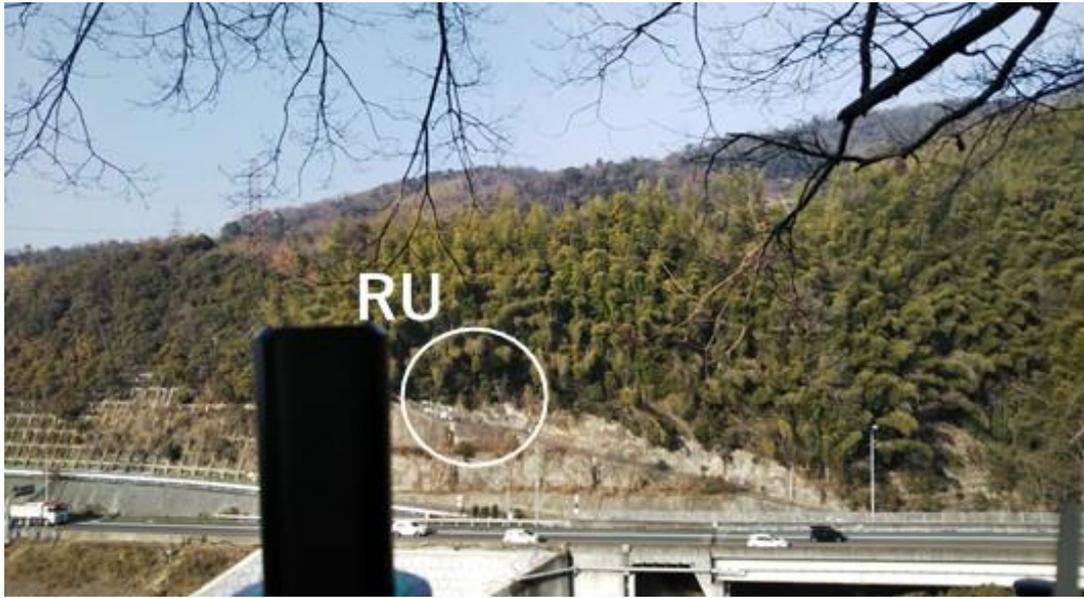
(b-13) ID13: LOS



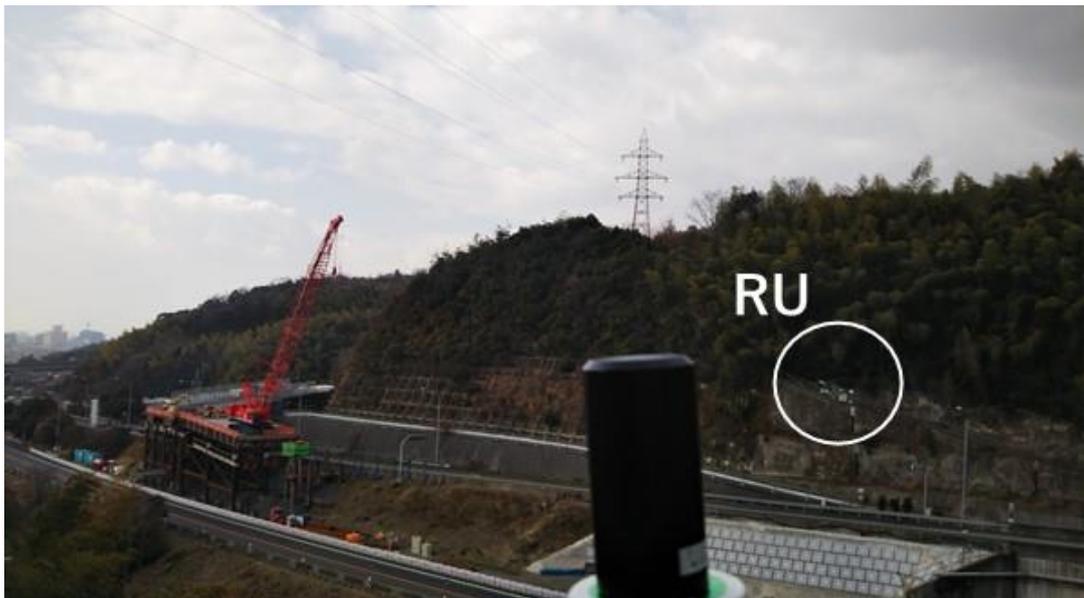
(b-14) ID14: LOS



(b-15) ID15: LOS



(b-16) ID16: LOS



(b-17) ID17 : LOS



(b-18) ID18: LOS

(b) 各測定点から RU を見た様子

図 3.3-25 各測定点の様子

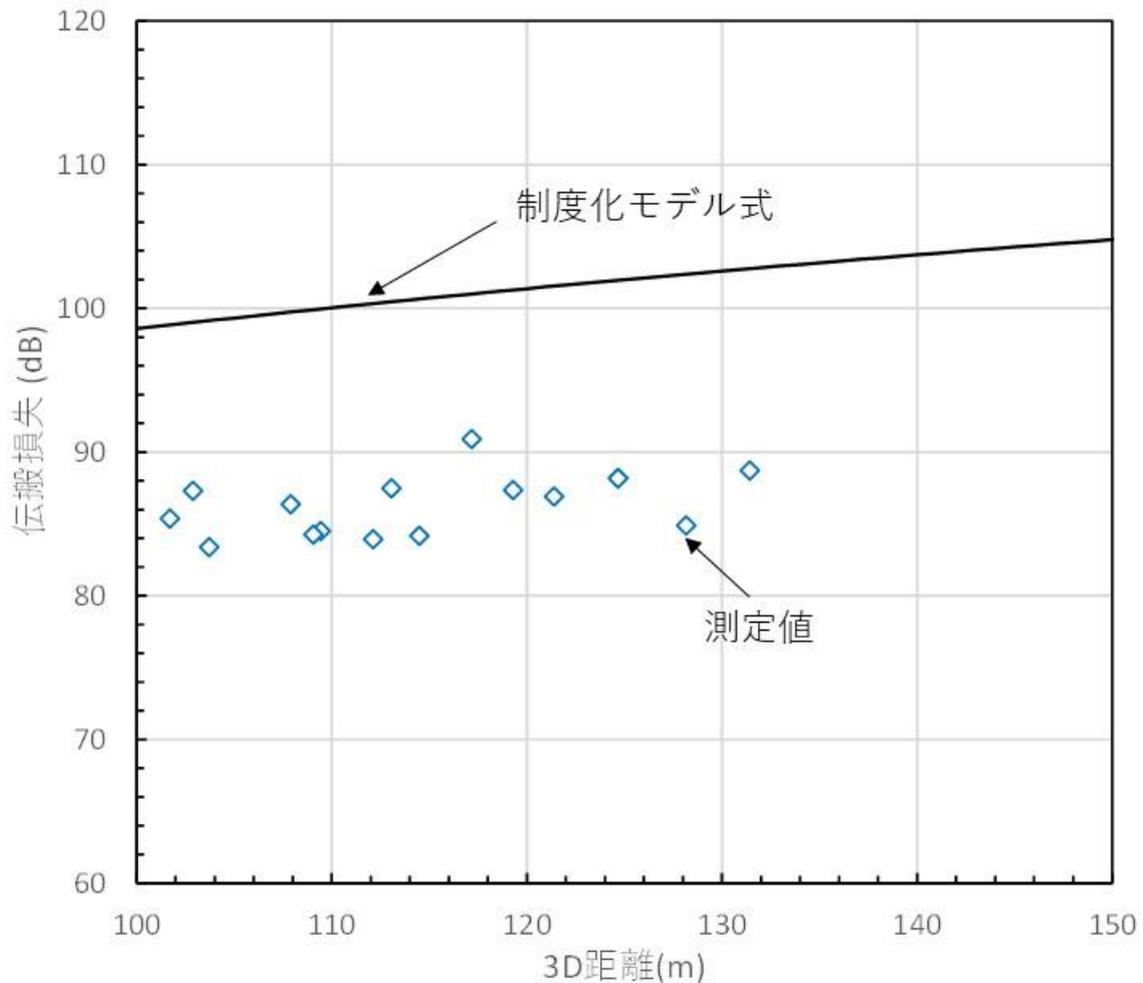


図 3.3-26 測定結果に基づいた伝搬損失の様子

図 3.3-26 に得られた測定結果に基づいて、距離に対する伝搬損失の値を算出した結果を示す。図 3.3-26 に示す通り、測定値より求められた伝搬損失の値は、制度化モデル式の値と比較して、相当に小さい値となっていることが分かる。これは、図 3.3-25 からも分かるように、今回の測定点においては、周辺の斜面や、建設現場に設置されている重機などに対して、RU の設置位置、および想定カメラ設置に基づいた測定点の高度が比較的高く、一部植生の影響を受けてはいるものの、ほぼ見通しの環境となっているためである。このような環境では、 K の値は、伝搬損失を小さくする方向へ補正する値にする必要があることが分かる。

測定結果に対して、妥当な補正値を前節記載の検証方法に基づいて検討した結果、 K の値は 13dB 程度に設定することが妥当であることが分かった。図 3.3-27 に補正値を用いた場合の補正済みモデル式と測定値との関係を示す。

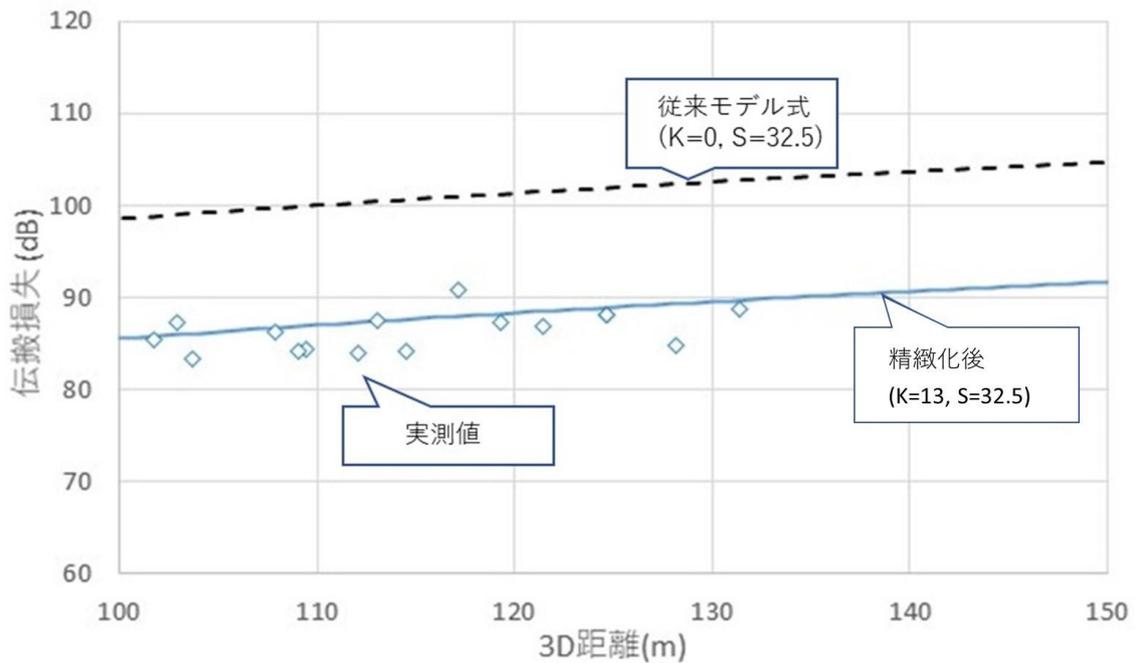


図 3.3-27 補正後の様子

$K=13(\text{dB})$ という値を用いることによって、実測値と精緻化後モデル式との間の誤差は平均で 1.8dB 程度、中央値で 1.45dB 程度に抑えることが可能となる。

図 3.3-27 からわかるように、実測値の分散が小さく、精緻化は所定の値をオフセットで参入することで実施することが可能である。今回実証環境において、法面エリアは、周辺丘陵や、植生、建設中の建造物や重機・車両による遮蔽・反射の影響を受けることを当初想定していたが、実測結果から計算される伝搬損失の分散の小ささは、当初想定の影響をほぼ受けていないことを示唆している。これは、基地局アンテナ高および測定ポイント(ここではカメラ設置位置)が、周辺影響物に対して、十分に高い位置にあるためと考えられる。このことは、建設現場における通信エリア構築においては、電源供給や、設置位置の安全性などを考慮したうえで、可能な限り高い位置に基地局アンテナを設置することが有効であることを示していると考えられる。

表 3.3-16 精緻化後モデル式との比較

測定 点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値(平均値) [dBm]
1	-56.21745965	-49.43030144
2	-57.91333487	-51.59090144
3	-58.41870985	-51.6733681
4	-61.408025	-56.30690144
5	-61.54945332	-51.89021255
6	-58.7458264	-50.35472366
7	-58.23967093	-47.4671681
8	-57.94246294	-49.46707921
9	-59.3607723	-48.88843477
10	-59.308598	-48.65012366
11	-59.63370136	-48.23145699
12	-61.55782518	-52.8021681
13	-62.0776554	-49.58383477
14	-60.2511797	-48.77443477
15	-62.16309234	-53.08734588
16	-61.35782518	-52.55639032
17	-60.48244593	-51.54779032
18	-60.25937741	-52.27405699

表 3.3-16 に、検討した精緻化パラメータを用いた場合の、算出式による受信電力と実測値との比較を示す。ここでは、 $K=13\text{dB}$ 、 $S=32.5\text{dB}$ を用いている。精緻化後の受信電力は実測値に対して、いまだ差異が見られるが、これは、算出式においては、人体吸収損である 8dB を算入しているためと考えられる。今回の測定方法によれば、測定端末から人体は十分に離れた位置で測定を行っており、人体吸収損については、算入する必要は必ずしもないことに注意されたい。

なお、今回の環境においては、ほぼ見通しの環境であることを考えると、たとえ今回の建設現場のように、周辺に伝搬に影響を与える斜面や重機などの存在があったとしても、基地局アンテナ位置や移動局位置が比較的高いところにあり、遮蔽の影響がほぼないことが想定される場合は、伝搬距離が 100m を超えるような状況であったとしても、自由伝搬損失の伝搬式によって、受信電界強度を見積もることも有効であると考えられる。

(ii) 作業現場近傍のカメラ設置個所を対象とする通信エリア

表 3.3-17 に作業現場エリアにおける受信電界強度測定結果を示す。

表 3.3-17 作業現場近傍エリアにおける受信電界強度測定結果

(a) 測定点情報(1/2)

測定点 ID	基地局との 3D 距離 [m]	基地局との 水平距離 [m]	基地局 アンテナ地点 標高 [m]	基地局 アンテナ 地上高 [m]	送信電力 Pt [dB m]	送信アンテナ利得 Gt [dBi]	基地局給電線損失 Lf[dB]
1	104.25	104.00	0.00	1.75	25.00	9.20	1.00
2	108.24	108.00	0.00	1.75	25.00	9.20	1.00
3	120.22	120.00	0.00	1.75	25.00	9.40	1.00
4	127.21	127.00	0.00	1.75	25.00	9.20	1.00
5	140.19	140.00	0.00	1.75	25.00	8.60	1.00
6	160.20	160.00	0.00	1.75	25.00	8.60	1.00
7	182.47	182.00	0.00	1.75	25.00	8.70	1.00

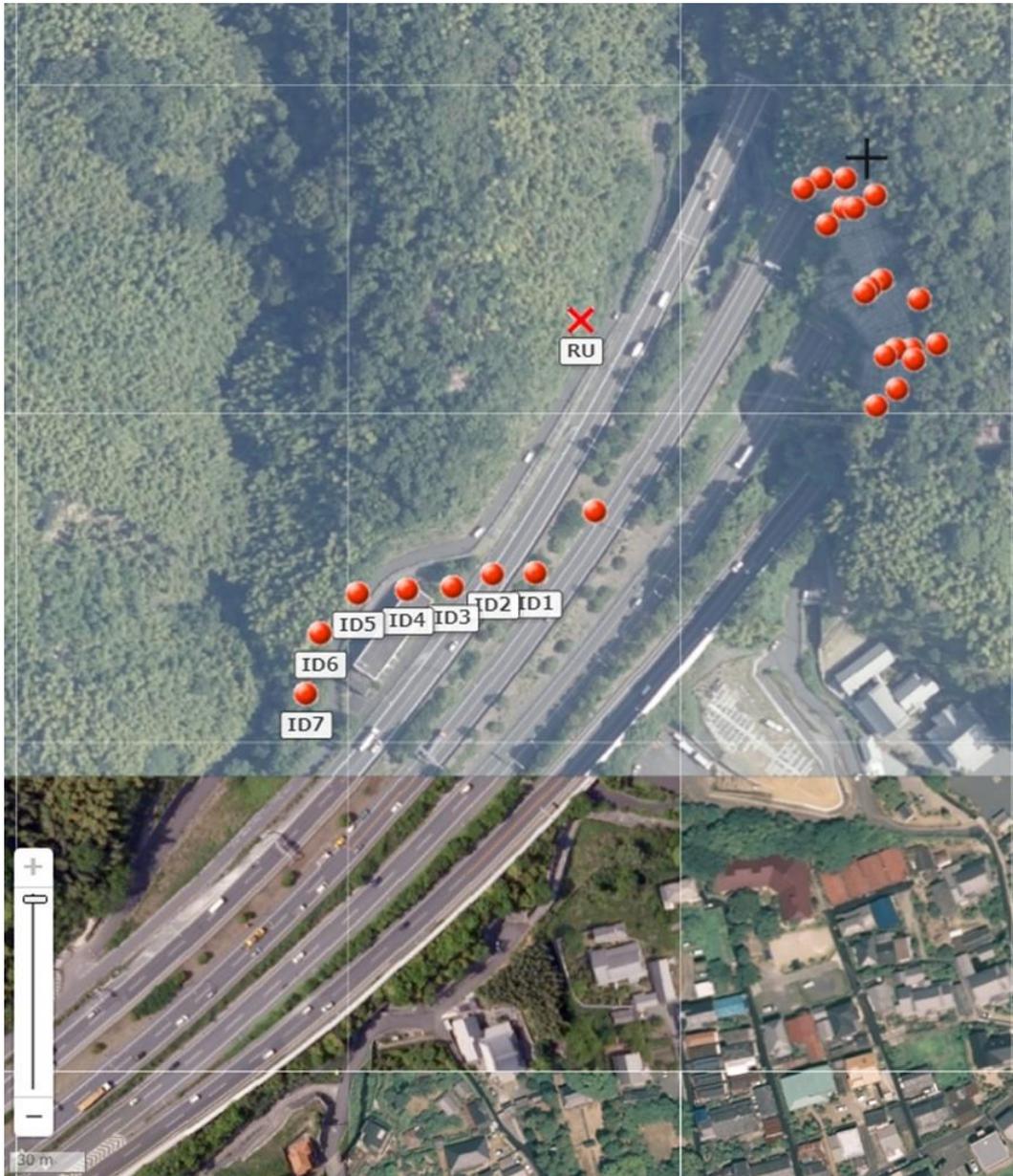
(b)測定点情報(2/2)

測定点 ID	受信アンテナ利得 Gr [dBi]	受信給電線損失 [dB]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ 地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)	測定日 (yyyy/m/dd)
1	0.00	0.00	-7	1.50	0	2022/1/26
2	0.00	0.00	-7	1.50	1	2022/1/26
3	0.00	0.00	-7	1.50	1	2022/1/26
4	0.00	0.00	-7	1.50	1	2022/1/26
5	0.00	0.00	-7	1.50	1	2022/1/26
6	0.00	0.00	-7.7	1.50	1	2022/1/26
7	0.00	0.00	-13	1.50	1	2022/1/26

(c)測定結果

測定点ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位 10%値	下位 10%値
1	-50.171213	-50.742813	3.38792399	-46.971213	-56.881213
2	-60.271213	-59.915079	3.99981446	-54.471213	-65.071213
3	-65.671213	-66.844079	4.97975896	-61.671213	-74.471213
4	-76.171213	-76.38439	2.77848194	-72.871213	-79.971213
5	-78.971213	-78.789035	3.95189155	-70.671213	-83.171213
6	-81.671213	-81.239168	2.85895005	-77.071213	-84.771213
7	-82.471213	-82.926168	3.04928259	-79.171213	-87.271213

図 3.3-25 に各測定点の様子を示す。



(a) 着目する RU および測定点概要
※一部国土地理院公開データを含む



(b-1) ID1:LOS



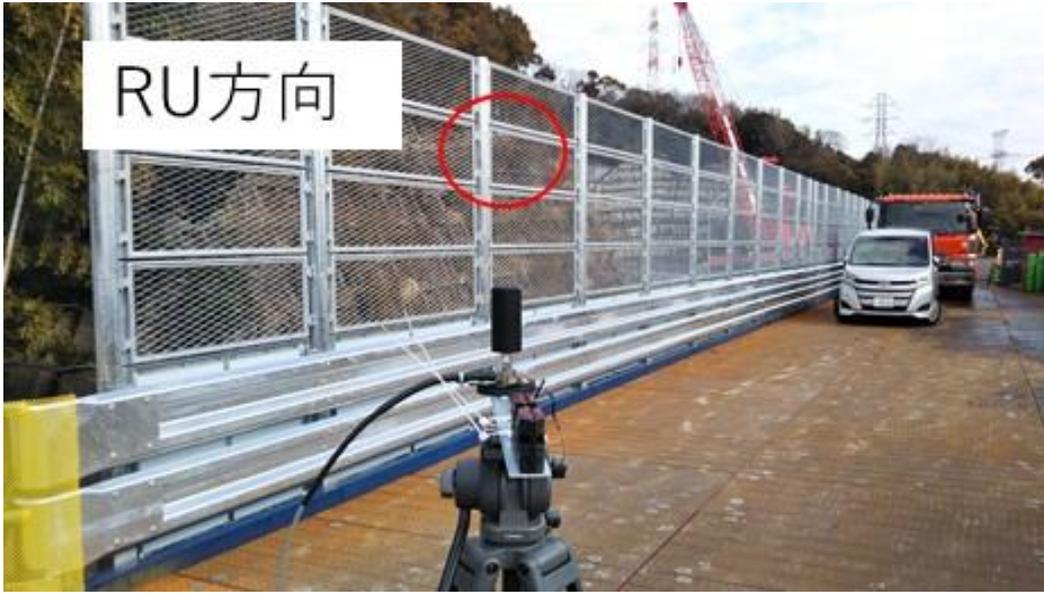
(b-2) ID2:NLOS



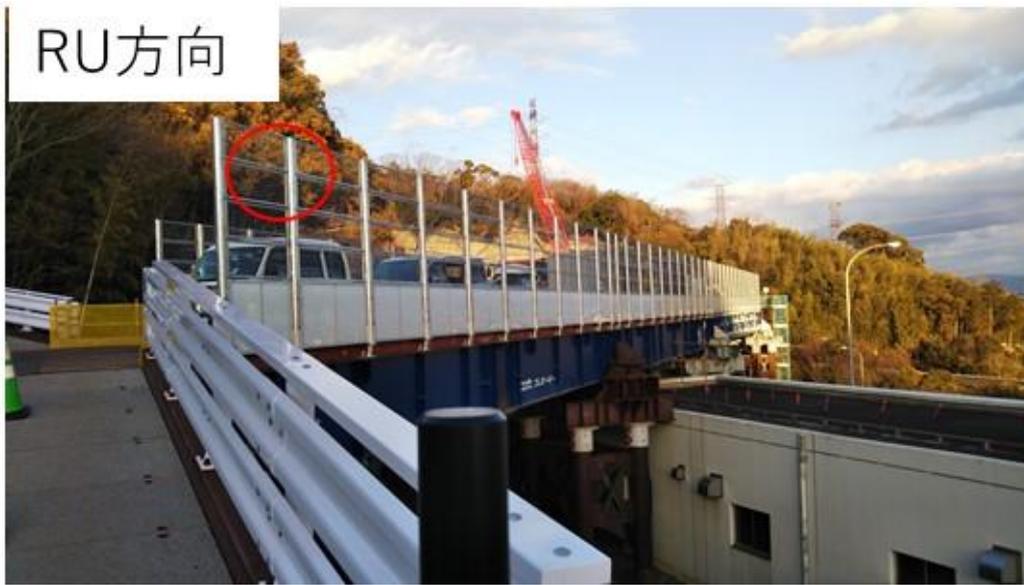
(b-3) ID3:NLOS



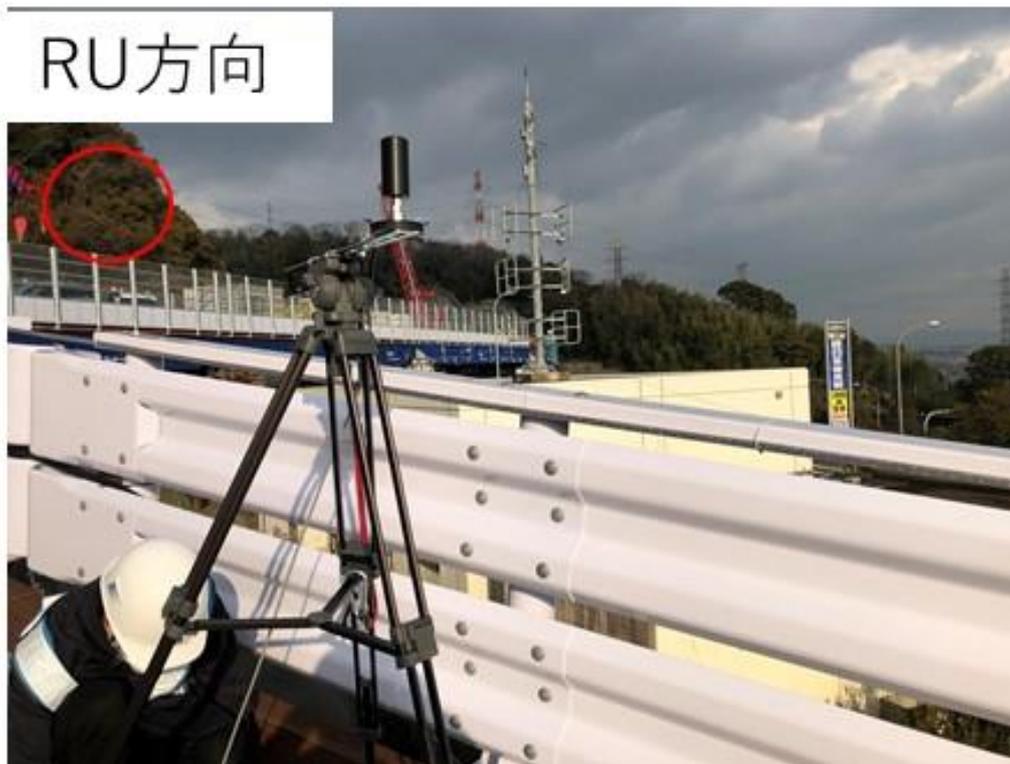
(b-4) ID4 :NLOS



(b-5) ID5:NLOS



(b-6) ID6:NLOS



(b-7) ID7:NLOS

(b) 各測定点から RU を見た様子

図 3.3-28 各測定点の様子

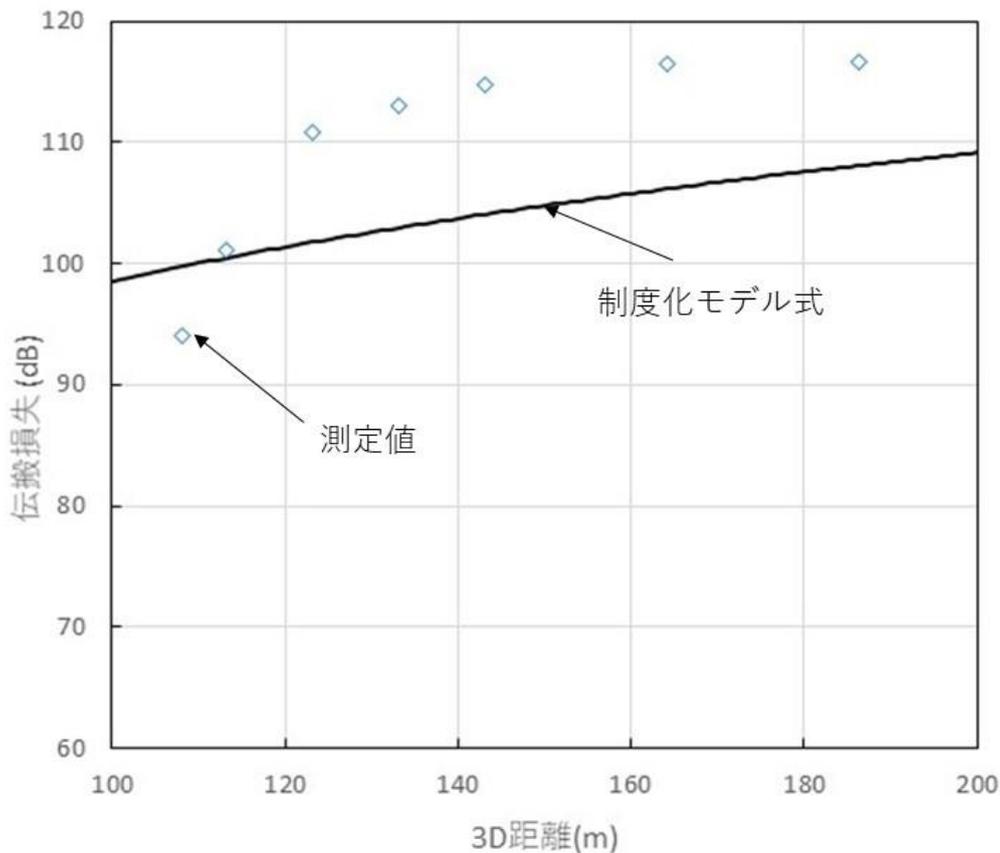


図 3.3-29 測定結果に基づいた伝搬損失の様子

図 3.3-29 に得られた測定結果に基づいて、距離に対する伝搬損失の値を算出した結果を示す。図 3.3-29 に示す通り、測定値より求められた伝搬損失の値は、制度化モデル式の値と比較して、若干大きい値となっていることが分かる。これは、図 3.3-29 から分かるように、測定ポイントと RU の間には、重機や植生などが存在し、その遮蔽の影響を受けしまっているためと考えられる。このような環境では、 K の値は、伝搬損失を大きくする方向へ補正する値にする必要があることが分かる。

測定結果に対して、妥当な補正値を前節記載の検証方法に基づいて検討した結果、 K の値は -8dB 程度に設定することが妥当であることが分かった。図 3.3-30 に補正値を用いた場合の補正済みモデル式と測定値との関係を示す。

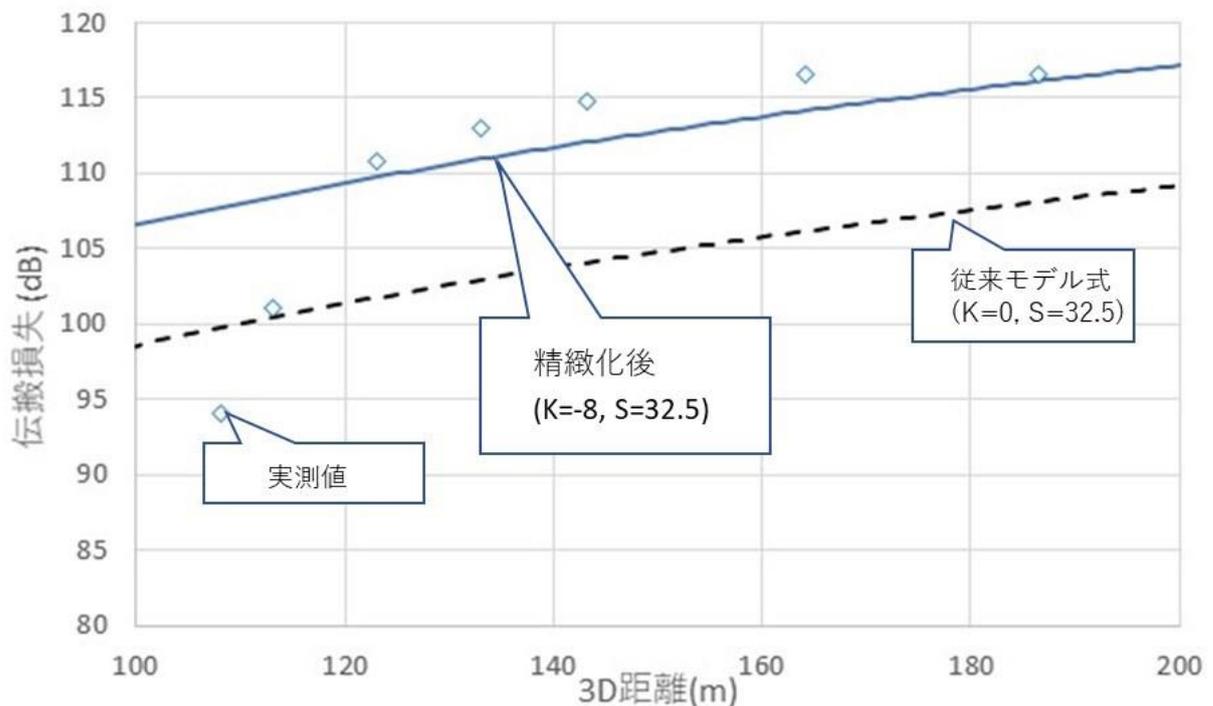


図 3.3-30 補正後の様子

図 3.3-30 から分かるように、補正を行ったとしても、比較的距離の短い測定ポイントにおいては、乖離が大きいが、これは当該測定ポイントが見通し環境であり、重機や植生による遮蔽の影響が他の測定ポイントよりも小さいためであり、実測値と精緻化後モデル式との間の誤差は平均では 7dB 程度であるが、中央値は 1.3dB 程度となる。伝搬距離が 120m を超える範囲においては、実測値と精緻化後モデル式との間の誤差は、平均で 2.4dB、中央値で 0.6dB 程度に抑えることが可能となる。

法面エリアに比べると、栈橋エリアにおいては、実測された伝搬損失の測定ポイント間の差異が大きく、これは、各測定ポイントにおいて、それぞれ基地局アンテナが直接見えるか否か、直接見えたとしても、十分な伝搬空間が確保されているか（フレネルゾーンが確保されているか）、周辺に重機が存在するか否か、またその重機の形状について、開放空間は存在するか否か、等、伝搬損失に影響を与える条件が大きく変化してしまうためである。そのため、本実証試験環境は単一のパラメータによって、精緻化を実施するのは非常に難しい環境であることがわかる。このことを踏まえると、モデル式による受信電界強度の計算においては、現在制度化されている式がおおよそ受信電界強度の平均値を示すものであることを考えると、これに加えて、受信電界強度の上限と下限を与えるようなモデルが有効となる可能性もあると考えられる。このような考え方に基づけば、例えば、下限を用いることで、通信エリアを想定し、上限を用いることで干渉調整区域を想定するといった事前検討には有効となる可能性がある。

表 3.3-18 精緻化後モデル式との比較

測定点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値(平均値) [dBm]
1	-82.54094733	-50.74281255
2	-83.23107119	-59.91507921
3	-84.32464539	-66.84407921
4	-85.71755564	-76.38439032
5	-87.42431385	-78.78903477
6	-89.51959492	-81.2391681
7	-91.36415054	-82.9261681

表 3.3-18 に、検討した精緻化パラメータを用いた場合の、算出式による受信電力と実測値との比較を示す。ここでは、 $K=-8\text{dB}$ 、 $S=32.5\text{dB}$ を用いている。精緻化後の受信電力は実測値に対して、いまだ差異が見られるが、これは、算出式においては、人体吸収損である 8dB を算入しているためと考えられる。今回の測定方法によれば、測定端末から人体は十分に離れた位置で測定を行っている。

なお、先にも述べたが、建設現場のように、周辺に伝搬に影響を与える斜面や重機などの存在があったとしても、必ずしも電波が完全に遮蔽されることはなく、アンテナ設置位置によっては、見通しの環境も得ることができる。通信エリアの検討にあたっては、今回補正值は、比較的、重機・植生などの影響が小さい状況ではないかと考えられる。それは、各測定ポイントからアンテナ方向を見通したときに、複数の遮蔽物によって電波が遮蔽される状況にはなっていないためである。重機や建築物の割合に応じて、今回補正の値よりもさらに伝搬損失を大きくする補正が必要になる可能性も考えられる。

(iii) 標高差に関する検討について

標高差に関する検討を行うため、直線距離で 500m を超える測定点における測定結果に基づいて、精緻化の検討を行った。表 3.3-19 に着目する測定ポイントにおける測定結果を示す。

表 3.3-19 標高差検討に係る測定ポイントにおける受信電界強度測定結果

(a) 測定点情報

測定点ID	基地局との3D距離 [m]	基地局との水平距離 [m]	基地局アンテナ地点標高 [m]	基地局アンテナ地上高 [m]	送信電力 Pt [dBm]	送信アンテナ利得 Gt [dBi]	基地局給電線損失 Lf[dB]
1	685.44	684.00	51.30	1.75	25.00	(4.40)	1.00
2	835.17	834.00	51.30	1.75	25.00	(6.30)	1.00
3	980.97	980.00	51.30	1.75	25.00	8.60	1.00
4	1060.85	1060.00	51.30	1.75	25.00	8.50	1.00
5	2230.41	2230.00	51.30	1.75	25.00	1.30	1.00
6	1950.51	1950.00	51.30	1.75	25.00	0.70	1.00
7	1840.40	1840.00	51.30	1.75	25.00	3.40	1.00
8	2300.45	2300.00	51.30	1.75	25.00	4.60	1.00
9	1670.57	1670.00	51.30	1.75	25.00	8.80	1.00
10	756.14	756.00	51.30	1.75	25.00	9.80	1.00
11	689.13	689.00	51.30	1.75	25.00	9.92	1.00
12	2180.45	2180.00	51.30	1.75	25.00	10.00	1.00

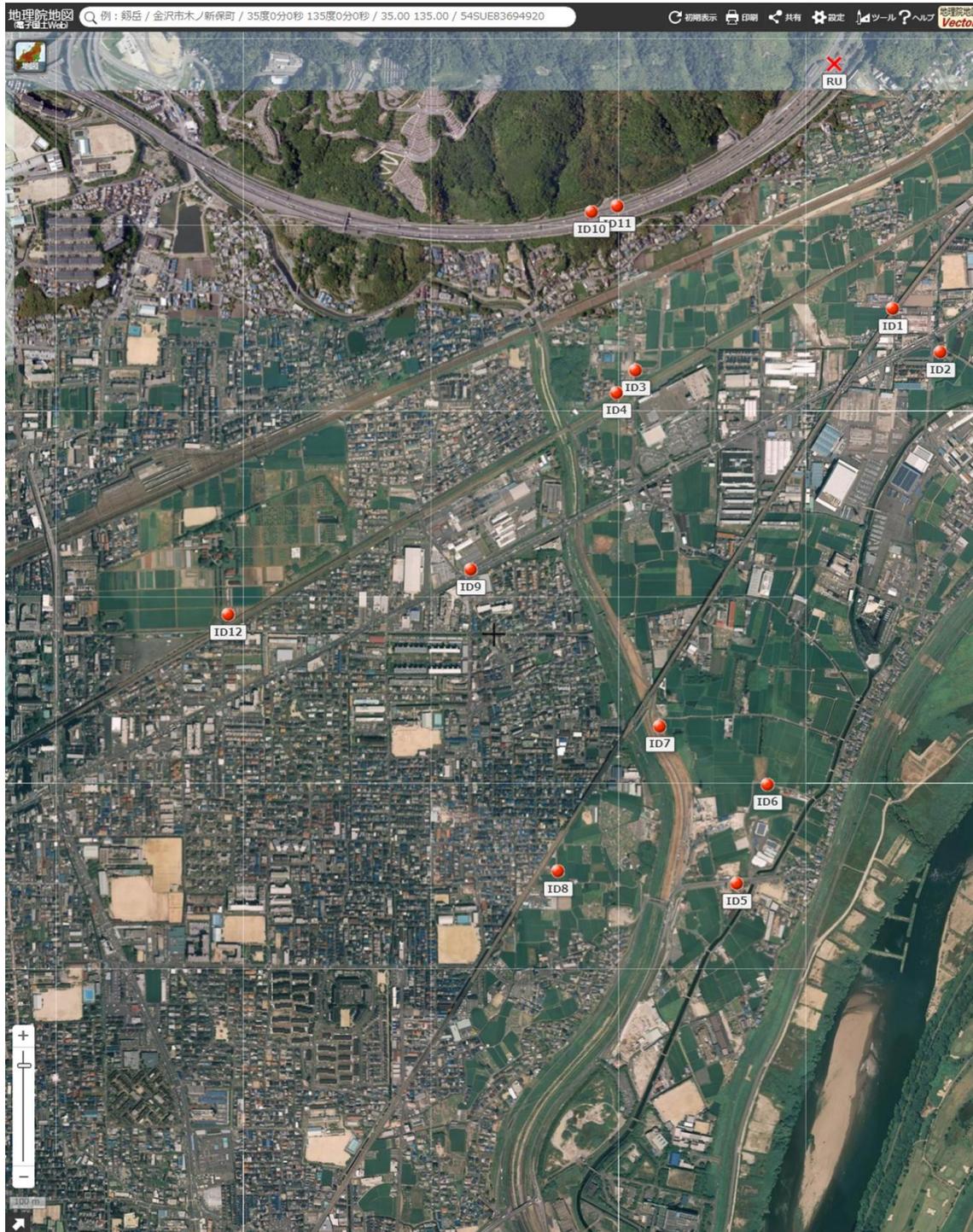
(b) 測定点情報(2/2)

測定点 ID	受信アンテナ利得 Gr [dBi]	受信給電線損失 [dB]	測定点標高 [m]	端末(測定器)アンテナ地上高 [m]	LOS (0:LOS 1:NLOS)	測定日 (yyyy/m/dd)
1	0.00	0.00	7.2	1.50	1	2022/2/3
2	0.00	0.00	7.4	1.50	1	2022/2/3
3	0.00	0.00	7.9	1.50	1	2022/2/3
4	0.00	0.00	9.1	1.50	1	2022/2/3
5	0.00	0.00	9	1.50	0	2022/2/3
6	0.00	0.00	7	1.50	1	2022/2/3
7	0.00	0.00	13.3	1.50	1	2022/2/3
8	0.00	0.00	6	1.50	1	2022/2/3
9	0.00	0.00	8.1	1.50	1	2022/2/3
10	0.00	0.00	37.1	1.50	1	2022/2/3
11	0.00	0.00	38.2	1.50	1	2022/2/3
12	0.00	0.00	7.5	1.50	1	2022/2/3

(c) 測定結果

測定点 ID	実測値 [dBm]				
	中央値	平均値	標準偏差	上位 10%値	下位 10%値
1	-87.671213	-87.832838	2.23621664	-84.971213	-90.871213
2	-89.671213	-89.979916	2.35123021	-87.171213	-93.171213
3	-80.571213	-80.706613	2.47607444	-77.571213	-83.971213
4	-90.971213	-91.927413	4.55092151	-86.871213	-98.471213
5	-85.571213	-85.619213	3.80329074	-80.671213	-90.671213
6	-88.471213	-88.17707	2.88398286	-83.871213	-91.571213
7	-91.371213	-92.269813	3.80448102	-88.071213	-97.771213
8	-92.671213	-93.230338	2.61599918	-90.371213	-96.871213
9	-85.971213	-86.242788	2.17821131	-83.671213	-89.071213
10	-86.971213	-87.580301	4.62588366	-82.171213	-94.171213
11	-82.071213	-82.688568	4.67172427	-77.271213	-89.071213
12	-91.071213	-91.40727	1.99617131	-89.071213	-94.171213

図 3.3-31 に各測定点の様子を示す。



(a) 着目する RU および測定点概要(一部国土地理院公開データを含む)



(b-1) ID1:NLOS



(b-2) ID2:NLOS



(b-3) ID3:NLOS



(b-4) ID4 :NLOS



(b-5) ID5:LOS



(b-6) ID6:NLOS



(b-7) ID7:NLOS



(b-8) ID8 : NLOS



(b-9) ID9 : NLOS



(b-10) ID10:NLOS



(b-11) ID11: NLOS



(b-12) ID12: NLOS

(b) 各測定点から RU を見た様子

図 3.3-31 各測定点の様子

得られた測定結果に基づいて、距離に対する伝搬損失の値を算出した結果を図 3.3-32 に示す。

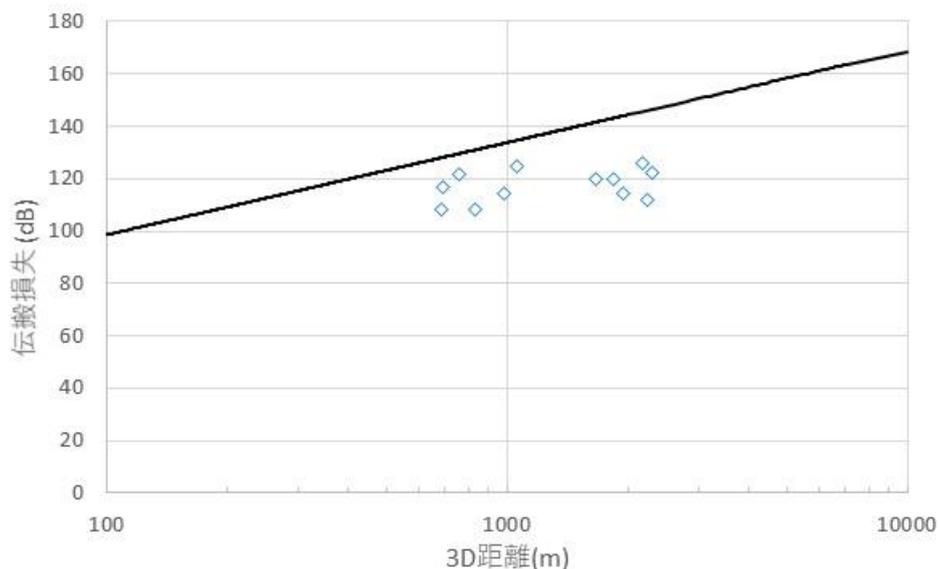


図 3.3-32 測定結果に基づいた伝搬損失の様子

図 3.3-32 に示す通り、測定値より求められた伝搬損失の値は、制度化モデル式の値と比較して、相当に小さい値となっていることがわかる。これは、RU 設置位置の標高が 50m を超えているのに対して、各測定ポイントの標高が 10m 未満となっており、標高差が 30m を超えてきていることによって、ハイトゲインが発生しているためと考えられる。このような環境においては、伝搬損失の値を小さくする方向へ補正する必要があると考えられ、この補正は S によって行うことが妥当と考えられる。

測定結果に対して、妥当な補正値を前節記載の検証方法に基づいて検討した結果、 S の値は 57.1dB 程度に設定することが妥当であることが分かった。なお、ここでは K の値は、先に行った精緻化後の値である $K=-8\text{dB}$ を設定した。図 3.3-33 に補正値を用いた場合の補正済みモデル式と測定値との関係を示す。

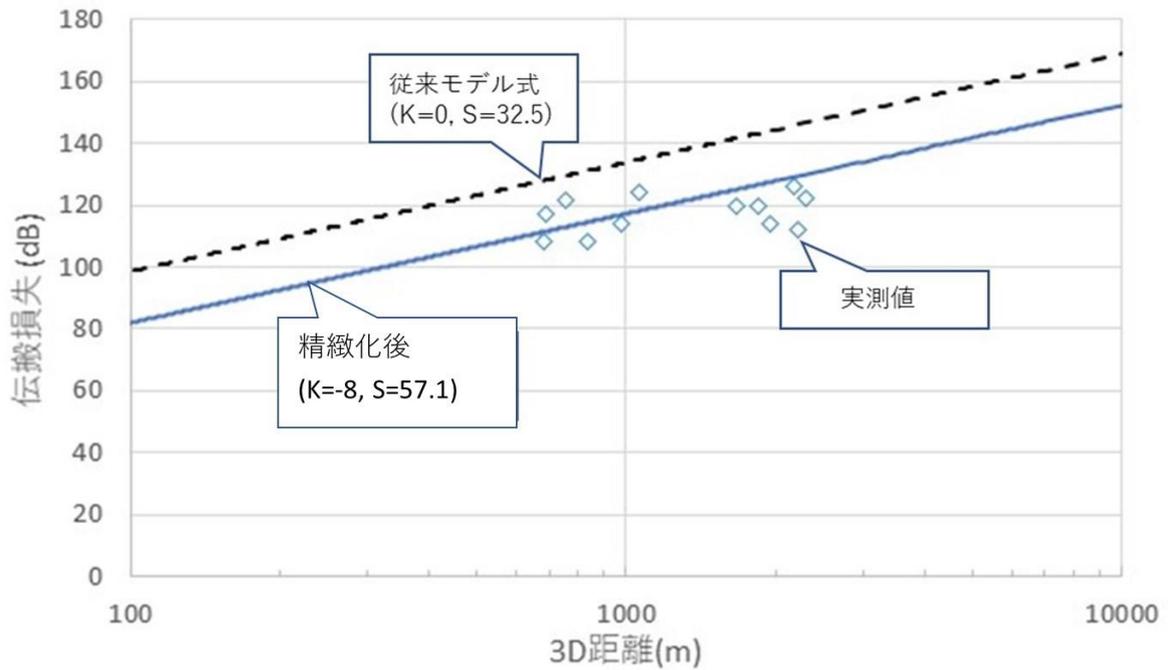


図 3.3-33 補正後の様子

図 3.3-33 に示す通り、実測値と制度化済モデル式とは、距離に応じた伝搬減衰量については、大きな変化はなく、ある程度の一定量の差分が存在していたことが分かる。この影響を S の補正によって補償することが可能となる。その誤差は、平均で 5.78dB 程度、中央値で 3.45dB 程度となる。

表 3.3-20 精緻化後モデル式との比較

測定点 ID	算出式による受信電力 [dBm]	実測値(平均値) [dBm]
1	-95.78448744	-87.83283755
2	-100.7071323	-89.97991625
3	-88.26880912	-80.70661255
4	-89.5663917	-91.92741255
5	-108.1346229	-85.61921255
6	-106.6832567	-88.17706969
7	-103.094314	-92.26981255
8	-105.3076601	-93.23033755
9	-96.21315497	-86.24278755
10	-83.08652854	-87.58030144
11	-81.54694267	-82.6885681
12	-99.08805094	-91.40726969

表 3.3-20 に、検討した精緻化パラメータを用いた場合の、算出式による受信電力と実測値との比較を示す。ここでは、 $K=-8\text{dB}$ 、 $S=57.1$ を用いているが、表 3.3-20 から分かるように、精緻化後の受信電力は実測値に対して、いまだ差異が見られるが、これは、算出式においては、人体吸収損である 8dB を算入しているためと考えられる。今回の測定方法によれば、測定端末から人体は十分に離れた位置で測定を行っている。

なお、今回の S の補正は、本実証試験環境で着目される建設現場特有の重機・建造物の影響や、周辺斜面や植生の影響に対する補正よりも、標高差に対する補正という側面が大きい。そのため、建設現場であれば、常にこのような補正が必要とは考え難い。想定する通信エリアが建設現場であるか否かを検討するものに加えて、通信エリア自体の地理的属性、今回環境であれば、標高が相当に高いということが該当するが、その影響を考えて、カバーエリアおよび干渉調整区域の検討を行う必要があることを示しているものと考えられる。

以上、ここまで検討してきた精緻化検討結果について最後にまとめる。

Kの精緻化

今回実証環境においては、 K の精緻化は以下に整理される。当初想定していた斜面の影響は本実証試験環境では大きな影響を与えることはなく、重機や植生等による影響が支配的となった。

表 3.3-21 精緻化検討まとめ①

影響要因	条件	K [dB]
重機・植生	測定点周辺に散在する状況	-8

Sの精緻化

今回実証環境においては、 S の精緻化は以下に整理される。当初想定していたトンネル出入口付近の斜面等の影響は、本試験環境では大きな影響を与えることはなく、開放地として設定された値でも十分に模擬できることが分かった。

表 3.3-22 精緻化検討まとめ②

影響要因	条件	S [dB]
開放地	周辺は郊外地と考えられる地方都市の環境であっても、基地局アンテナ高や移動局位置が重機・植生等の遮蔽物よりも比較的高い位置に設置される場合	32.5

本試験環境特有の条件

建設現場のような重機・建造物等の遮蔽物の影響が想定される環境であったとしても、基地局アンテナ位置や移動局位置の標高が高く、見通し環境が担保されるような状況の場合、 100m 以上の伝搬距離においても、伝搬損失を小さくするような K の補正を行うことが想定され、また自由伝搬損失の伝搬式によって、受信電界強度を見積もることも有効で

あると考えられる。

表 3.3-23 精緻化検討まとめ③

影響要因	条件	K [dB]
標高	基地局アンテナ位置や移動局位置が、遮蔽物よりも十分に高い位置にある場合	13

また、本実証試験環境のように、通信エリア外の周辺地域よりも、通信エリア自体の標高が高い場合、特に 500m を超える遠方地域に対しては、標高差によって生ずるハイトゲインを想定して S の補正を行うことが必要と考えられ、これは建設現場特有ではなく、屋外でのローカル 5G 通信エリアの構築においては、常に考慮すべき項目になり得ると考えられる。

表 3.3-24 精緻化検討まとめ④

影響要因	条件	S [dB]
標高	通信エリアと通信エリア外(離隔距離 500m 以上)において、標高差が 30m 以上ある場合	57.1

本実証試験では、高速道路工事現場を試験環境としているが、図 1.1-1 に示されるように、既設の高速道路のトンネル出入口近傍に架かる高架橋の建設を対象としており、建設現場において通常想定される重機・車両・建設中の建造物に加えて、周辺丘陵や植生、さらには、周辺エリアとの標高差等、電波伝搬に影響を与える要素が多岐にわたっている。栈橋付近のように、重機・車両に対して、移動局が近接するような環境においては、伝搬損失が大きくなる傾向となり、今回の試験結果によれば、 $K=-8$ (dB)程度を考慮する必要があった。一方で、法面付近においては、もともとの想定であれば、周辺丘陵や植生の影響を受けることが予想されたが、基地局アンテナ高と移動局高が共に重機・車両・建造物に対して比較的高く、伝搬損失はむしろ小さくなる傾向となり、今回の試験結果によれば、 $K=13$ dB 程度を考慮することで、おおよそ受信電界強度をモデル化できることが分かった。一方で、 S の観点に立つと、栈橋付近および法面付近の双方において、開放値相当の値である $S=32.5$ dB 程度を考慮すれば十分であることが分かり、これは基地局アンテナが周辺影響物に対して、比較的高所に設置されたためと考えられる。一方で、基地局アンテナや移動局が主に運用される試験エリアより 500m 以上離れ、標高差が 30m 以上存在する場合、基地局アンテナ高に比例して発生するハイトゲイン相当の利得が得られ、 $S=57.1$ dB 相当の考慮が必要となることが分かった。しかし、これは標高差が存在する場合にのみ発生する事象であり、試験エリア内において、 $S=57.1$ dB を考慮してしまえば、実際の受信電界強度を大きく異なる計算値となってしまうことが分かる。

以上を考慮すると、伝搬損失の計算精度を高めるには、単一の伝搬路構造(本実証試験であれば、電波法関係審査基準(平成13年総務省訓令第67号)が規定するエリア算出法が相当)で全体をカバーするのではなく、試験エリア内を細かく区分し、それぞれに適した伝搬路モデルを設定した上で、精緻化を行うことが有用となる可能性がある。試験エリア内の細分化は、今回試験環境であれば、LOS/NLOSの状態、基地局アンテナ高および測定点高に対する周辺影響物との標高差や距離等に応じて分類することが考えられる。この場合、伝搬シミュレーションや実測を行うことで得られる伝搬損失値の傾向と、事前検討によって設定した伝搬路モデルの傾向とが大きく異なっていないことを先に確認することが必要になる。そして、適切な伝搬路モデルの設定の上で、当該伝搬路モデル内におけるパラメータの精緻化、もしくはパラメータ追加等の検討を、更なる追加実測等に基づいて進めていく方法が考えられる。ただし、試験エリア内の細分化は、それだけカバーエリアや干渉調整区域の算出に係る工数が増加することを意味しており、悪戯に増加させることは好ましくないため、工数の増加と、カバーエリア/干渉調整区域算出精度向上とのトレードオフも考慮する必要があると考えられる。

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化

本テーマには取り組まない

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発

3.3.4.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

本実証試験では、高速道路での工事作業に関して、超高精細映像を活用したリアルタイムモニタリングを可能とする映像共有システム/リアモステーション(リアルタイムモニタリングステーション)の開発導入の実装を目指している。先にも記載したが、実装するソリューションの実現には、最大で120Mbpsの上りリンクスループットを実現する必要がある。このためには、上りリンクに利用可能な無線リソースを増加させる必要があるが、2020年12月に制度化された準同期パターンでは、ユーザニーズに対して十分なスループットが達成できない可能性がある。また、通信環境が時々刻々と変化する無線通信を考えれば、実力値として所要スループットよりも可能な限り高いスループットが実現できる通信システムを用意することが、安定したソリューションの実現に有効であることは言うまでもない。

そこで、本実証試験では、上りリンクスループットの改善を目標に、昨年度定義された準同期パターンに加えて、新たに2つの準同期パターンを用いて、超高精細映像伝送に基づいたソリューションの実現を目指す。

また、準同期パターンの追加においては、同一チャネルおよび隣接チャネルにおいて稼働している他の無線通信システムへの影響の評価、すなわち共用検討が重要である。本実証試験では、実証試験環境を想定した電波伝搬シミュレーション評価によって、与干渉/被

干渉の影響を評価し、追加準同期パターン運用時の条件、具体的には、隣接周波数を用いるキャリア 5G および同一／隣接周波数を用いるローカル 5G に対する離隔距離を明確とすることを旨とする。なお、運用環境としては、いずれも屋外に基地局装置が設置された状況を想定する。

(2) 実証目標

図 3.3-34 に、本実証試験で検討する準同期 TDD 追加パターンを示す。本実証試験では、既に制度化された準同期パターン①に加えて、準同期 TDD 追加パターン②および③を検討する。上りリンクの最大スループットは、同期パターンにおいておよそ 127 Mbps に対して、準同期追加パターン③によれば、383 Mbps となり、およそ 3 倍の効果が見込める。本実証試験では、追加設定パターンにより、超高精細映像の通信に必要なとなるアプリレイヤでの最大 120Mbps が達成可能であることを実証することを目的とする。

共用検討は電波伝搬シミュレーションおよび伝搬モデルの精緻化の取り組みで新たに算出する計算式の両方に基づいて行う。共用検討にあたっては、干渉相手の周波数や屋内/屋外の状況や、TDD スロット構成を想定し、それぞれ評価・検討を行い、所要性能を満たすための離隔距離等の共用条件を明らかとすることを目標とする。評価パラメータについては、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）に記載された内容に従うものとする。

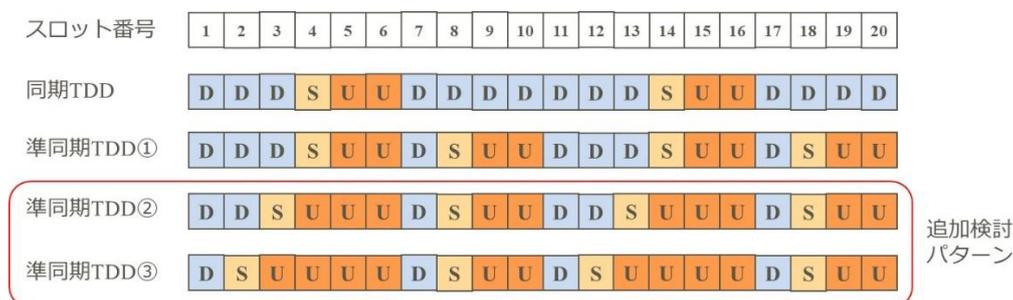


図 3.3-34 検討する TDD 追加パターン

3.3.4.2 実証仮説

図 3.3-35 は、本実証試験で想定する周波数帯域および与干渉/被干渉の様子を示す概要図である。本実証試験では、準同期 TDD 追加パターンの共用検討においては、シミュレーションによる評価を実施する。カバーエリアおよび干渉調整対象区域においては、本実証試験で使用する 4.8~4.9GHz 帯に対しては、現時点では、隣接チャンネルにキャリア 5G は設定されていない。しかし、今後、4.9~5GHz 帯でのキャリア 5G の展開、および 4.6~4.8GHz 帯でのローカル 5G ソリューションの展開を想定し、シミュレーション評価を実施する。

共用条件の検討においては、与干渉/被干渉の双方において、基地局アンテナと重機や建築物との距離、および周辺の丘陵の大きさが、与干渉電力および被干渉電力に対して影響を与える可能性が高い。特にトンネル出入口付近は、複数方向が斜面に囲まれる状況となるため、周辺斜面からの反射の影響を強く受ける可能性が高い一方で、アンテナ高によっては周辺への与干渉電力および周辺からの被干渉電力は低減される可能性があり、周辺ローカル 5G 基地局やキャリア 5G 基地局との間の離隔距離を小さくできる可能性がある。

本実証試験においては、本実証試験環境を想定し、電波遮蔽物の配置状況をパラメータとして、与干渉電力を算出した上で、共用条件を見極める。

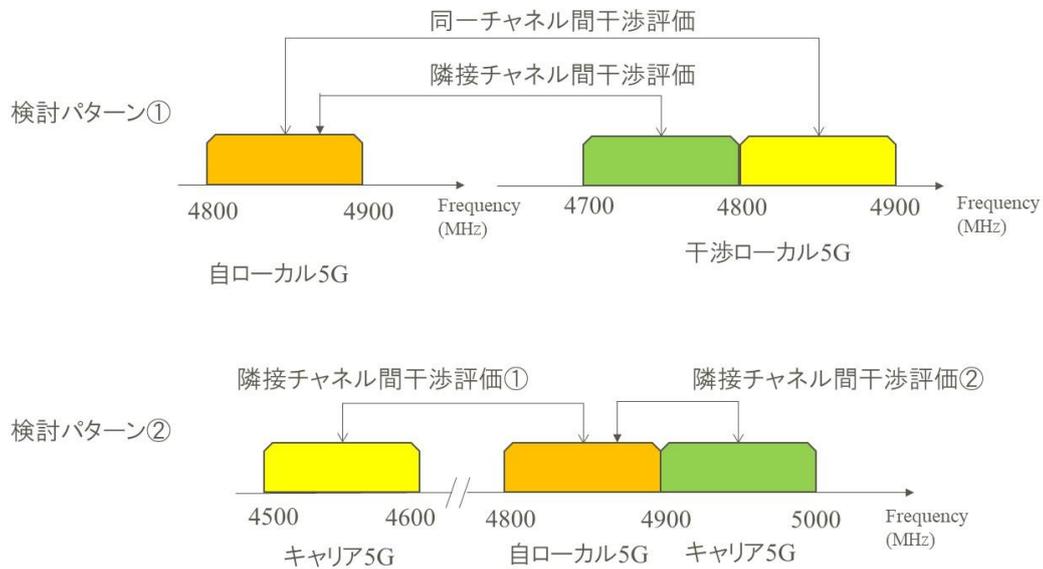


図 3.3-35 干渉検討パターン

現在制度化されている準同期パターンは準同期 TDD パターン①のみであり、今回検討する追加準同期 TDD パターン②および③については、制度上は非同期運用に分類される。しかし、本実証試験では、追加準同期 TDD パターン②および③が新たに準同期パターンとして追加されることを想定し、ローカル 5G 基地局同士、およびローカル 5G とキャリア 5G 基地局同士はスロット同期が取られていることを想定する。すなわち、共用検討先のキャリア 5G/ローカル 5G が下りリンク運用されているスロットにおいて、自ローカル 5G が上りリンク運用される可能性がある場合を想定する。以下では、本実証試験で対象とする超高精細映像伝送が自ローカル 5G で運用可能となる所要離隔距離および改善量を求める場合、すなわち被干渉の検討に必要なシミュレーション方法の概要を記載する。

はじめに、所定の離隔距離で設置した基地局同士、基地局端末同士、および端末同士の被干渉電力を算出する。被干渉電力の算出にあたっては、既にモデル化された電波伝搬損失のモデル式ではなく、今回実証試験を想定し、第 3.3.2 節にて求めた精緻化後のモデル式に基づいて計算を行う。なお、離隔距離は、あらかじめ予干渉の評価によって求める所要離隔距離を基準とする。

算出した被干渉電力と、自ローカル 5G と共用検討先のキャリア 5G/ローカル 5G のスロット構成に基づいて、スロット番号毎に、下りリンクおよび上りリンクの受信 SINR を算出する。3GPP で規定された MCS テーブルと別途シミュレーションによって得た MCS 対ブロック誤り率(BLER)特性データ(図 3.3-38 より、パケット誤り率 10%を所要品質として、達成可能なスループットをスロット番号毎に算出し、スループットを算出する。以上の処理を、移動局のドロップを繰り返し、十分な回数を繰り返すことで、平均スループットおよび最大スループットを算出する。

算出した平均スループットと最大スループットが、本実証試験で想定する目標値に達しているか否かを、設定した離隔距離に対して判定する。なお、本実証試験で想定するソリューションシステムは基本的には上りリンク伝送に大容量化が求められているため、所要離隔距離および改善量は主に上りリンク伝送において、品質を担保できるか否かに焦点を当てて検討を進める。

想定されるのは、当然ながら、自ローカル 5G での上りリンクスロットと、共用検討先の下りリンクスロットが衝突した場合、自ローカル 5G 基地局の上りリンク品質は、特に共用検討先が同一周波数を用いている場合、大きく劣化してしまうことが予想される。この場合、当該スロットにおいて、自ローカル 5G が利用可能な MCS は低いものとなってしまいうため、準同期②および③が準同期①に対して得られる上りリンクスループットの利得は低下してしまう可能性があるが、制度化済みの離隔距離によって、十分な干渉抑圧がなされることが期待され、本実証試験で構築するソリューション実現には十分な上りリンクスループットが得られる結果になるのではないかと考える。

表 3.3-6 は上記方法において、主に参照する無線パラメータを示す。ここに記載のないパラメータについては、基本的には情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）に準ずる。また、実機での測定後においては、送信電力分布の実測値(図 3.3-36 およびスペクトラムマスクの実測値(図 3.3-37)を用いて計算機シミュレーションを実施するものとする。

なお、伝搬損失については、無線局免許審査基準において定義されている伝搬損失式に対して、3.3.2 節において検討した精緻化パラメータを用いて計算している。

(i 直線距離で $d_{xy}(\text{km}) < 0.04\text{km}$ の場合

$$L = L_0 + 32.4 + 20\log_{10}(f) + 10\log_{10}\left\{\left(d_{xy}^2\right) + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6}\right\} + R$$

(ii $0.04\text{km} \leq d_{xy}(\text{km})$ かつ $d_{xy}(\text{km}) < 0.1\text{km}$ の場合

$$L = L_0 + \{2.51\log_{10}(d_{xy}) + 3.51\} \times (L_H - L_0)$$

(iii $0.1\text{km} \leq d_{xy}(\text{km})$ の場合

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

ここで、 $f(\text{MHz})$ は中心周波数、 $H_b(\text{m})$ は基地局の空中線地上高、 $H_m(\text{m})$ は移動局の空中線地上高、 R は建物侵入損(16.2dB)である。また今回検討では α は 1 とし、 $a(H_m)$ は、0.057 とした。また、 $H_b < 30\text{m}$ のため、 $b(H_b) = 20\log_{10}(H_b/30)$ とした。

K は、伝搬路モデルの精緻化検討において、重機などの影響を考慮した $K = -8\text{dB}$ を設定した。 S については、本節検討においては、基地局と移動局の間には大きな標高差は生じていないことを仮定し、 $S = 32.5$ を設定した。

表 3.3-25 主なパラメータ

移動局数	1, 3
移動局ドロップ	ランダム配置
スケジューリング	ラウンドロビン
MCS セット	3GPP Release 15(64QAM テーブル)
所望 BLER	10%
想定オーバーヘッド	4 symbol per slot
トラフィックモデル	Full buffer モデル※最悪ケースを想定

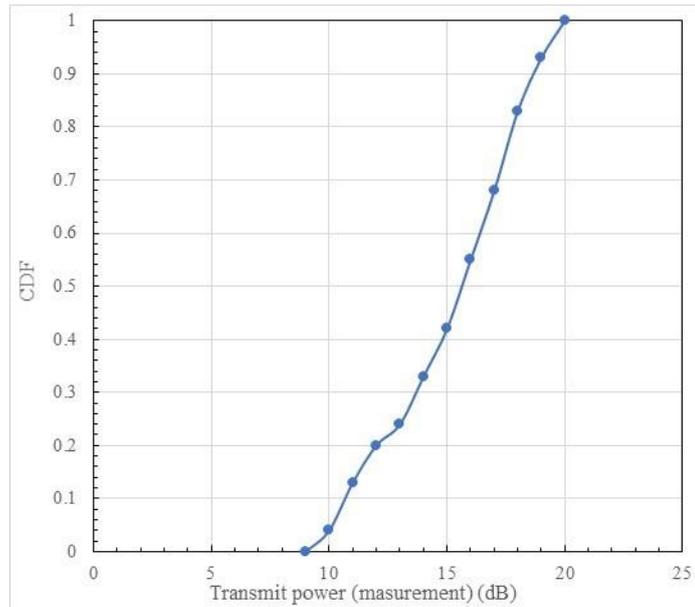


図 3.3-36 移動局の送信電力分布

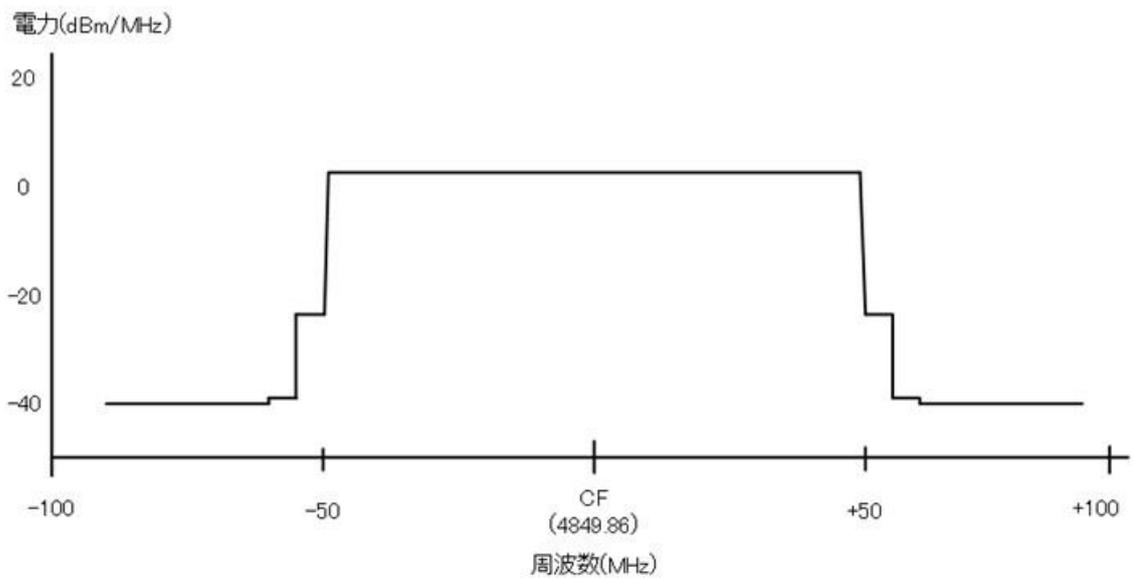


図 3.3-37 基地局のスペクトルマスク

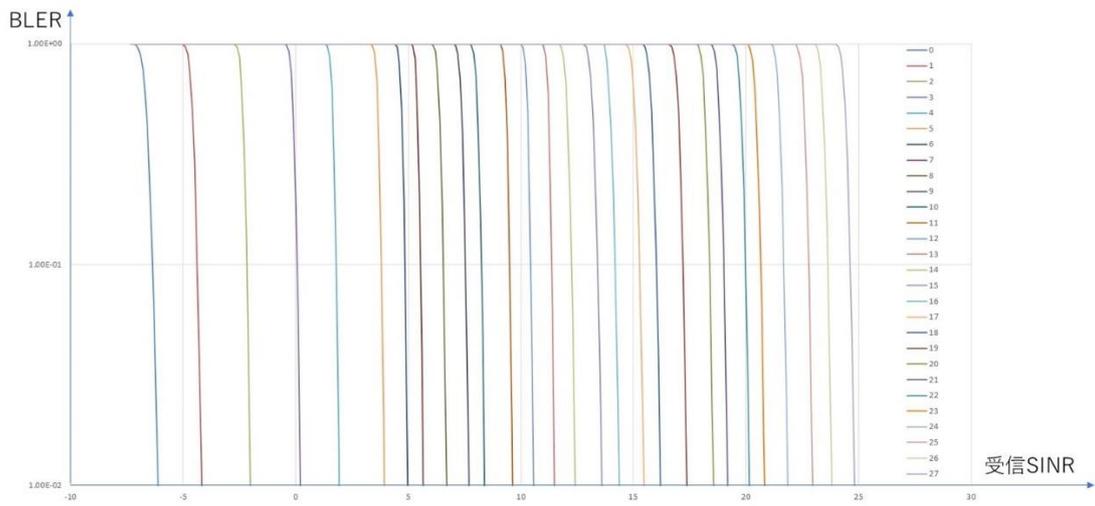
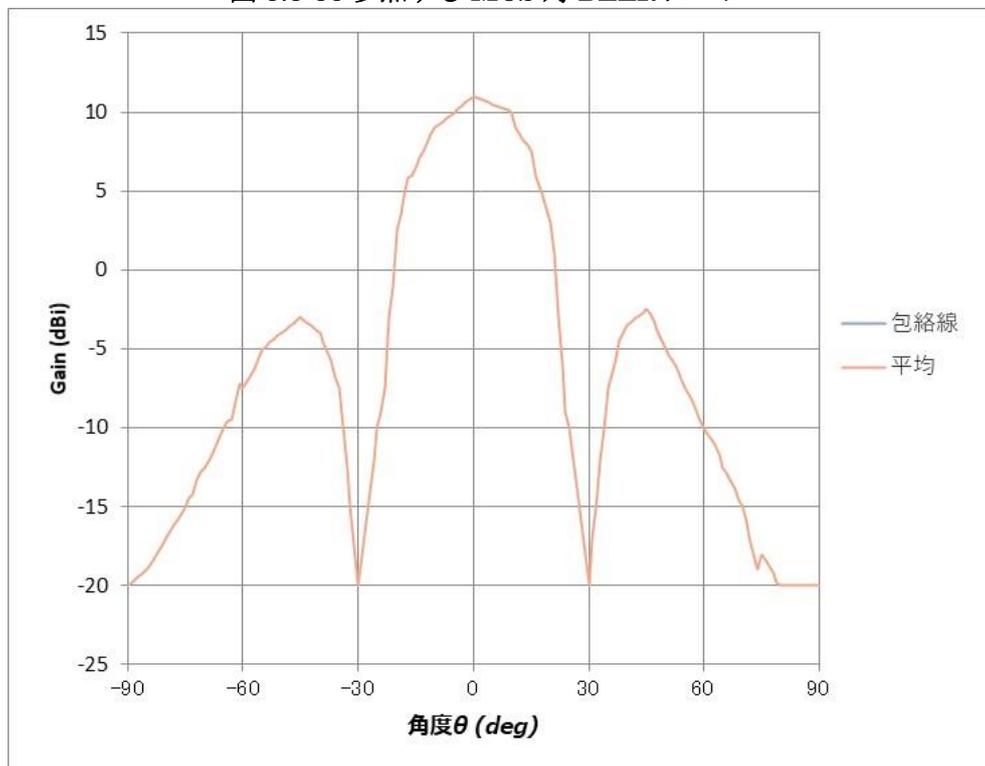
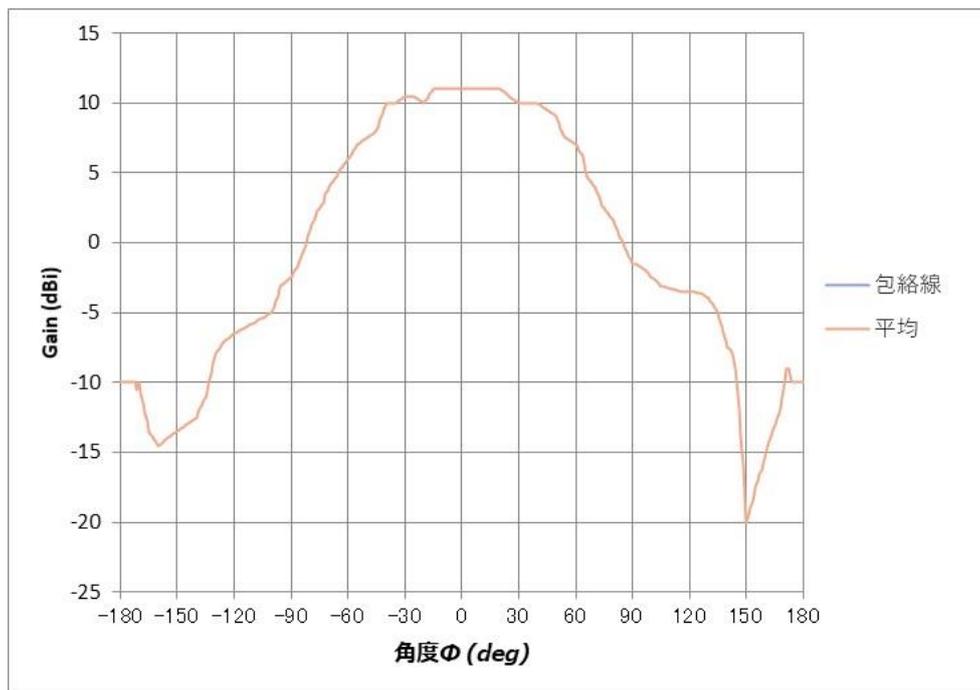


図 3.3-38 参照する MCS 対 BLER カーブ



(a) 垂直面



(b) 水平面

図 3.3-39 想定するスモール基地局アンテナパターン

表 3.3-26 各システム諸元
(a) スモール基地局

送信側		
項目	設定値	備考
空中線電力	24dBm	帯域幅 100MHz
空中線利得	最大11dBi 素子数8	
送信系各種損失	2dB	
等価等方輻射電力 (EIRP)	最大44dB	
空中線指向特性 (水平、垂直)	図3.3.3-4	
機械チルト	0°	
空中線高	2m	
送信帯域幅	100MHz (4.8~4.9GHz)	
隣接チャネル漏洩電力	下記または-4dBm/MHz の高い値	
	-44.2dBc (チャネル帯域幅MHz 離調)	注3
	-44.2dBc (2 × チャネル帯域幅MHz 離調)	
	※参照帯域幅は当該チャネル帯域幅の最大実効帯域幅	
スプリアス領域における不要発射の強度	-4dBm/100kHz (30MHz-1GHz)	
	-4dBm/MHz (1GHz 以上)	注3
	※周波数帯の端から40MHz 以上の範囲に適用	
受信側		
項目	設定値	備考
許容干渉電力 (帯域内干渉)	-110dBm/MHz (I/N=-6dB, NF=10dB)	注1
許容干渉電力 (帯域外干渉)	-47dBm (隣接20MHz 幅)	注3
	-38dBm (上記以外)	
空中線利得	最大11dBi 素子数8	
受信系各種損失	2dB	注1
空中線指向特性 (水平、垂直)	勧告TU-R M.2101	注1
機械チルト	0°	注1
空中線高	2m	注2

注 1 ITU-R における共用検討に基づく (ITU-R TG5/1 Contribution 36, 2017-02-28)

注 2 LTE-Advanced システムに対して実施された過去の共用検討に基づく

注 3 3GPP の標準仕様に基づく 注 4 同一周波数の干渉検討で考慮。隣接周波数の干渉検討においては、不要発射の強度の値が総合放射電力 (空間に放射される電力の合計値) で規定されているため考慮しない

(b) 移動局

送信側		
項目	設定値	備考
空中線電力	23dBm	
空中線利得	0dBi	
給電線損失	0dB	
空中線指向特性（水平、垂直）	無指向性	
送信空中線高	1.5m	
送信帯域幅	100MHz（4.8～4.9GHz）	
隣接チャンネル漏洩電力	下記または-50dBm/3.84MHz の高い値	
	-33dBc （チャンネル帯域幅/2+2.5MHz 離調）	注3
	-33dBc （チャンネル帯域幅/2+7.5MHz 離調）	
	下記または-50dBm/チャンネル帯域幅MHz の	
スプリアス領域における不要発射の強度	-36dBm/1kHz（9kHz-150kHz）	
	-36dBm/10kHz（150kHz-30MHz）	注3
	-36dBm/100kHz（30MHz-1GHz）	
	-30dBm/MHz（1GHz 以上）	
その他損失	8dB（人体吸収損）	注1
受信側		
項目	設定値	備考
許容干渉電力（帯域内干渉）	-110dBm/MHz	注1
	（I/N=-6dB、NF=10dB）	
許容干渉電力（帯域外干渉）	-47dBm（隣接20MHz 幅）	注3
	-38dBm（上記以外）	
空中線利得	0dBi	
給電線損失	0dB	
空中線指向特性（水平、垂直）	無指向性	
空中線高	1.5m	
その他損失	8dB（人体吸収損）	注1

注 1 ITU-R における共用検討に基づく（ITU-R TG5/1 Contribution 36, 2017-02-28）

注 3 3GPP の標準仕様に基づく

3.3.4.3 評価・検証項目

表 3.3-27 に評価・検証項目をまとめる。評価項目としては、同一チャンネルで運用されるローカル 5G 基地局との共用検討と、隣接チャンネルで運用されるキャリア 5G 基地局との共用検討を行う。なお、本実証試験で実際に技術試験を実施する 4.8~4.9GHz の隣接チャンネルには現在の所、キャリア 5G は設定されていないが、今後、様々な環境でのローカル 5G の活用を想定し、200MHz 離れた 4.5~4.6GHz のキャリア 5G との共用検討や、4.9~5GHz でのキャリア 5G 運用を想定しての共用検討、また 4.7~4.8GHz でのローカル 5G の屋外開放を想定した共用検討も併せて行う計画である。なお、評価にあたっては、基地局間の干渉だけではなく、移動局間の干渉についても考慮する。

表 3.3-27 評価・検討項目

共用検討先	周波数の関係	TDD スロット構成	評価項目
ローカル 5G	同一チャンネル/隣接チャンネル	同期/準同期①~③	所要改善量 所要離隔距離
キャリア 5G	4.5~4.6GHz および隣接チャンネル	同期	所要改善量 所要離隔距離

3.3.4.4 評価・検証方法

図 3.3-39 に示した各項目に対する、評価・検証方法を以下に記載する。

評価項目 1

ローカル 5G 同士の共用検討においては、同一チャネルで運用されている場合と隣接チャネルで運用されている場合を想定する。評価パラメータとしては、主に、離隔距離と、基地局設置環境(屋内/屋外)および TDD スロット構成を想定する。

評価項目 2

キャリア 5G との共用検討においては、運用チャネルの差をパラメータとする。併せて、評価項目 1 と同様に、離隔距離と基地局設置環境(屋内/屋外)および TDD スロット構成を想定する。

共用検討シミュレーションにおける干渉パターンについては、少なくとも以下の干渉パターンを検討する。

表 3.3-28 想定干渉パターン

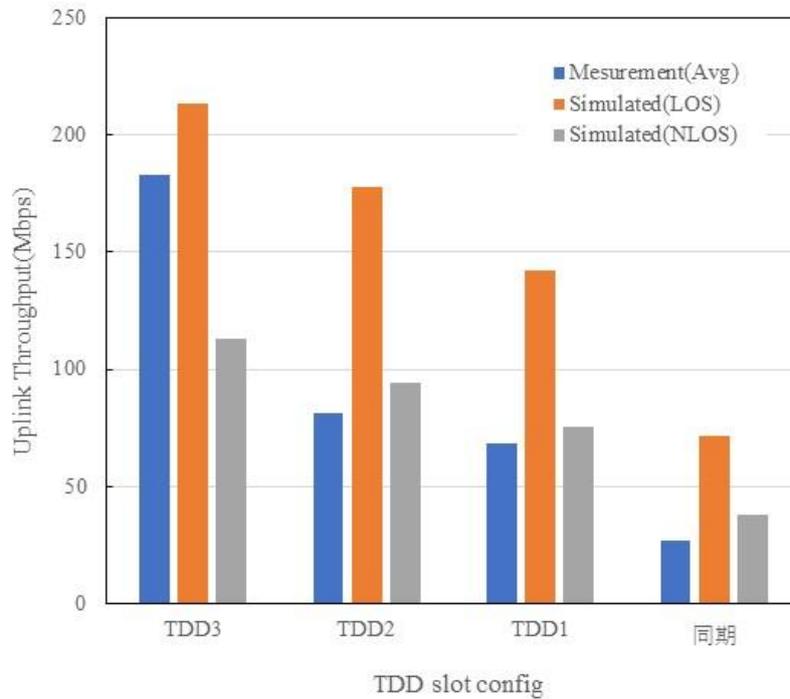
	対象	周波数	TDD
パターン 1	ローカル 5 G	隣接チャネル	同期
パターン 2	ローカル 5 G	隣接チャネル	準同期①
パターン 3	ローカル 5 G	隣接チャネル	準同期②
パターン 4	ローカル 5 G	隣接チャネル	準同期③
パターン 5	ローカル 5 G	同一チャネル	同期
パターン 6	ローカル 5 G	同一チャネル	準同期①
パターン 7	ローカル 5 G	同一チャネル	準同期②
パターン 8	ローカル 5 G	同一チャネル	準同期③
パターン 9	キャリア 5 G	4.5~4.6GHz	同期
パターン 10	キャリア 5 G	隣接チャネル	同期

分析・考察にあたっては、与干渉については、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（令和 2 年 7 月）の干渉検討を参考に、与干渉量、所要改善量、所要離隔距離をとりまとめ、所要改善量および所要離隔距離について共用条件を整理する。

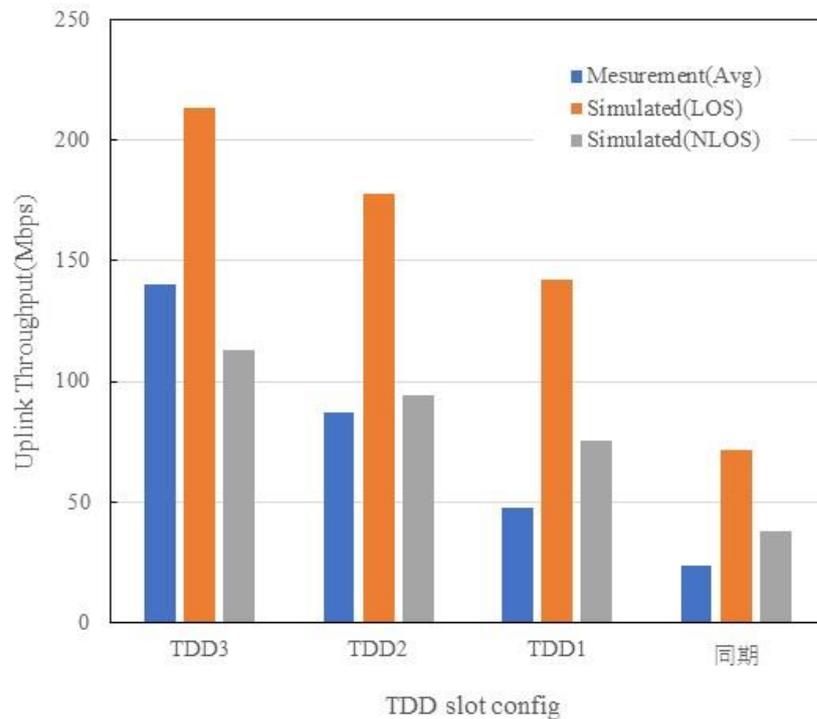
一方、被干渉については、先に示した計算機シミュレーション手法に基づいて、上記与干渉検討による共用条件において、自 L5G における超高精細映像伝送を実現できるか否かを判定する。万が一、達成できない場合は達成するために必要な方策について考察を行う。

3.3.4.5 実証結果及び考察

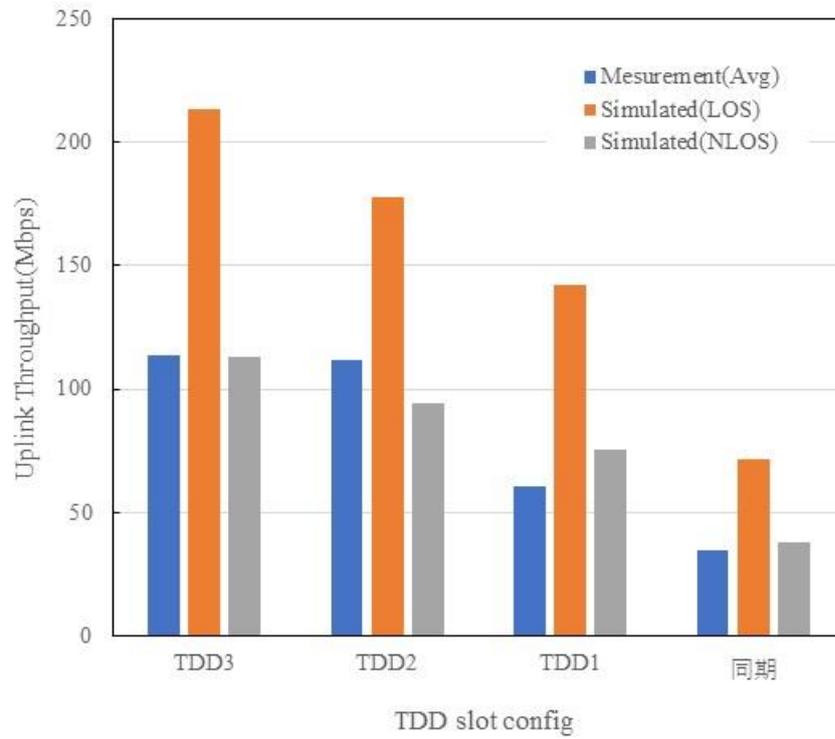
図 3.3-40 に、図 3.3.1-2 に示す測定ポイントのうち、測定ポイント 1、9 および 12 で測定した追加 TDD パターンを含むスループット測定結果と、シミュレーションによって求めた理論値を示す。



(d) 測定ポイント 1



(e) 測定ポイント 9



(f) 測定ポイント 12

図 3.3-40 追加 TDD パターンによる実測結果

図 3.3-40 によれば、追加準同期パターンである TDD3 および TDD2 によれば、同期パターンに対して、上りリンクスループットは、それぞれ 300%および 250%の改善が見込めるが、実測結果の揺れはあるものの、追加パターンの利用によって、大きな上りリンクスループットの改善が得られていることが分かる。

なお、理論値として示したシミュレーション結果に対しては、実測のスループット値は小さくなっていることが分かる。特に LOS 環境との乖離が大きいが、これは LOS 環境が直接波しか発生していない状況を模擬している一方で、本試験環境においては、直接波が支配的な環境ではあるものの、遅延波の影響が全くないわけではなく、若干のフェージングも発生しているためである。

図 3.3-40 に示した想定干渉パターンに基づいて、共用検討シミュレーション結果を示す。共用検討シミュレーション結果に基づき、与干渉システムである追加準同期パターンを用いる本システム他通信システムとの共存について、与干渉電力の観点から考察を行う。

(1)隣接周波数で運用されるローカル 5G システムに対して

想定干渉パターンのうち、パターン 1 からパターン 4 については、与干渉システムが中心周波数 4.85GHz で屋外運用されている本システムであり、被干渉システムは隣接周波数である中心周波数 4.75GHz で屋内運用されている他ローカル 5G システムである。

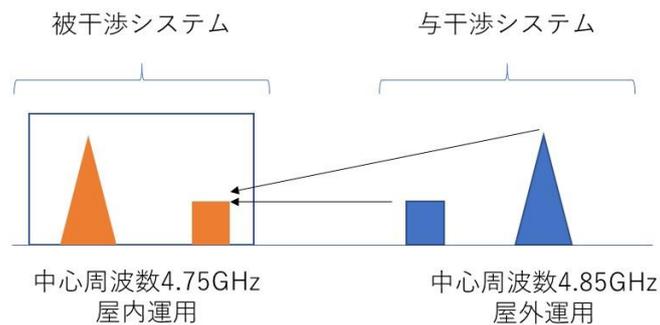


図 3.3-41 評価シナリオ 1 から 4 について

基地局→移動局の評価は最悪値ケースとして、基地局のアンテナ指向性利得が最大(本検討システムでは 11dBi が最大)となる方向に移動局が存在するものとし、基地局と移動局の離隔距離を 10m と設定したものを正対モデルと想定した。また、移動局→移動局の評価は最悪値ケースとして、移動局同士の離隔距離を 1m とした正対モデルを想定した。

また、本実証試験で用いる基地局は指向性アンテナを備えているため、被干渉システムの移動局の位置に応じて、与干渉電力が大きく変化してしまう。また、移動局同士の位置関係が変わった場合でも、与干渉電力は大きく変化してしまう。そのため、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和 2 年 7 月)の干渉検討を参考に、モンテカルロシミュレーションによっても干渉電力の評価を行った。

なお、モンテカルロシミュレーションの手法は、当該委員会報告の方法に準ずるが、基地局→移動局への与干渉評価においては、与干渉装置は 1 局として評価を行っている。

表 3.3-29 モンテカルロシミュレーション諸元

計算ソフトウェア	MATLAB
試行回数	20000 ドロップ
検討エリア半径	被干渉移動局を中心に半径 100m
移動局台数	1, 3
送信電力分布	図 3.3.3-2
干渉確率	3%以下(累積確率 97%の値で評価)

表 3.3-30 共用検討結果(最悪値ケース)

モデル	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	所要 離隔距離 (m)	与干渉量 (dBm)	所要改善 量 (dB)	所要 離隔距離 (m)
基地局 →移動局	-110.32	0.67	12	-57.3	-17.32	-
移動局 →移動局	-108.31	2.68	1.37	-55.3	-15.31	-

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

表 3.3-30 に最悪値での評価結果、表 3.3-31 にモンテカルロシミュレーションによる評価結果をそれぞれ示す。評価結果からは、特に基地局と移動局が 12m 以内に近接してしまうと干渉影響が発生してしまう可能性があることがわかる。そのため、与干渉の観点に立てば、与干渉システムと被干渉システムは見通し外での運用が好適である。一方で、見通し環境での運用が必要となれば、基地局の指向性アンテナのメインビーム方向を、被干渉システムの方向には向けない等の対策が必要となる可能性がある。

所要改善量の観点に立てば、移動局から移動局に与える干渉の影響が大きいことがわかる。このことは、与干渉システムが上りリンク伝送を行っているときに、被干渉システムが下りリンク伝送を行っているときに影響が大きいことを示唆している。そのため、想定干渉パターンのうち、パターン 4 である被干渉システムが準同期追加パターン 3 であった場合、隣接ローカル 5G システムにおいて、お互いのスロット構成は同期しているから、移動局→移動局の干渉影響はあまり大きくならないことを示唆している。

一方で、被干渉システムにおいて準同期追加パターン 2 が設定される場合(パターン 3 のケース)、被干渉システムが下りリンク伝送を行っている場合に、与干渉システムが上りリンク伝送がスペシャルサブフレーム内で発生してしまう。そのため、移動局→移動局において、移動局同士が近接してしまうと、被干渉システムの下りリンク伝送に影響を及ぼしてしまう可能性があることを意味しており、隣接システムへの対応を考える場合に、基地局側の対策に加えて、与干渉システム内における移動局の移動範囲を制限させるような、移動局同士の近接を防ぐ対応が必要になると考えられる。この傾向は、被干渉システムが、準同期パターン 1 や同期運用を行っている場合には、さらに強くなるものと考えられる。

表 3.3-31 共用検討結果(モンテカルロシミュレーション)

モデル	帯域内干渉		帯域外干渉	
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	与干渉量 (dBm)	所要改善量 (dB)
基地局 →移動局	-112.3	-1.3	-59.3	-19.3
移動局 →移動局	-118.3	-7.3	-55.3	-15.31

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

一方で、より実運用状態に近いといえるモンテカルロシミュレーション結果においては、帯域内干渉および帯域外干渉ともに、許容干渉量内にとどまっていることが分かる。このことから、与干渉システムと被干渉システムの間で、遮蔽物がほとんどない見通し環境のような極端な環境を除けば、両者は共用できる可能性があると考えられる。

(2)同一周波数で運用されるローカル 5G システムに対して

想定干渉パターンのうち、パターン 5 からパターン 8 については、与干渉システムが中心周波数 4.85GHz で屋外運用されている本システムであり、被干渉システムについても中心周波数 4.85GHz で屋外運用されている他ローカル 5G システムとなる。

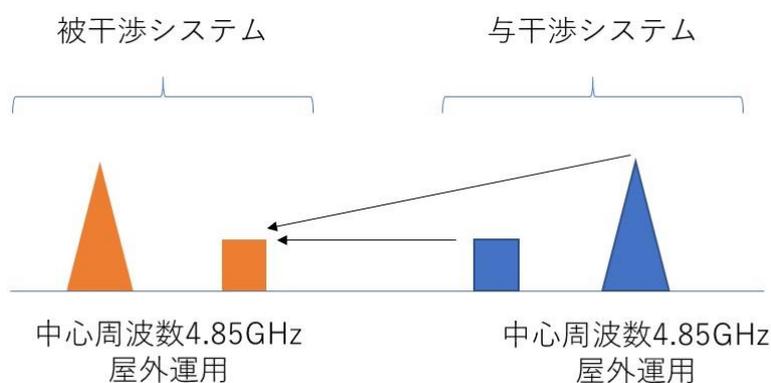


図 3.3-42 評価シナリオ 5 から 8 について

表 3.3-32 共用検討結果(最悪値ケース)

モデル	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	所要 離隔距離 (m)	与干渉量 (dBm)	所要改善 量 (dB)	所要 離隔距離 (m)
基地局 →移動局	-52.12	56.8	361	0.87	40.87	111
移動局 →移動局	-59.11	51.8	77	-6.1	33.88	43

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

表 3.3-32 に最悪値での評価結果、表 3.3-33 にモンテカルロシミュレーションによる評価結果をそれぞれ示す。最悪値ケースの評価結果からは、基地局と移動局が 360m 程度に近接してしまうと、干渉影響が発生してしまう可能性があることがわかり、この離隔距離は、隣接周波数で運用されるローカル 5G システム同士の場合と比してかなり大きい。

表 3.3-33 共用検討結果(モンテカルロシミュレーション)

モデル	帯域内干渉		帯域外干渉	
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	与干渉量 (dBm)	所要改善量 (dB)
基地局 →移動局	-54.2	56.8	-1.2	38.8
移動局 →移動局	-68.5	42.5	-15.5	24.5

※許容干渉量は帯域内干渉では-111dBm/MHz、帯域外では-40dBm で計算

また、モンテカルロシミュレーション結果においても、所要改善量は、比較的大きいことが分かる。このことから、同一周波数で運用されるローカル 5G システム同士の場合、与干渉システムでは、基地局においては、指向性アンテナを用いることに加えて、意図的に遮蔽物を併設するような対応が必要となる可能性がある。

(3)隣接周波数で運用されるキャリア 5G システムに対して

また、想定干渉パターンのうち、パターン 9 およびパターン 10 については、与干渉システムが中心周波数 4.85GHz で屋外運用されている本システムである一方で、被干渉システムは、隣接周波数である中心周波数 4.95GHz で屋外運用されているキャリア 5G システムおよび 4.55GHz で屋外運用されているキャリア 5G システムとなる。なお、与干渉電力の観点においては、隣接周波数である中心周波数 4.95GHz で屋外運用されているキャリア 5G システムに与える影響が大きいため、共用検討シミュレーションは、被干渉システムとして中心周波数 4.95GHz で屋外運用されているキャリア 5G システムを主に想定する。

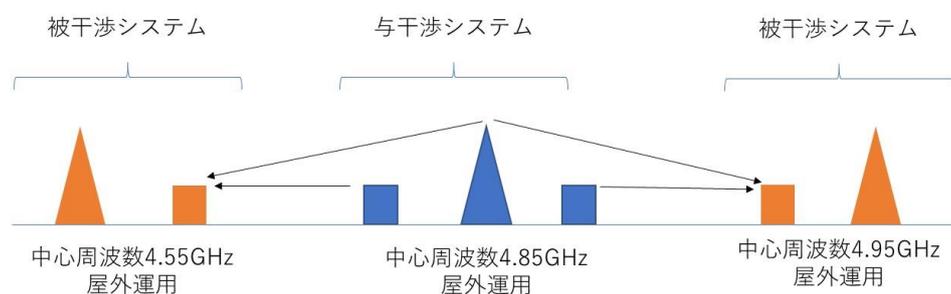


図 3.3-43 評価シナリオ 9 から 10 について

表 3.3-34 共用検討結果(最悪値ケース)

モデル	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	所要 離隔距離 (m)	与干渉量 (dBm)	所要改善 量 (dB)	所要 離隔距離 (m)
基地局 →移動局	-94.12	16.87	48.5	-41.12	-1.12	-
移動局 →移動局	-92.11	18.88	9	-39.11	0.88	1.11

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

表 3.3-34 に最悪値での評価結果、表 3.3-35 にモンテカルロシミュレーションによる評価結果をそれぞれ示す。最悪値ケースの評価結果からは、基地局と移動局が 48.5m 程度に近接してしまうと、干渉影響が発生してしまう可能性があることがわかる。一方で、移動局同士の所要離隔距離は 9m 程度であることが分かる。表 3.3-35 に示すモンテカルロシミュレーション結果においても、同様の傾向を示していることがわかる。

表 3.3-35 共用検討結果(モンテカルロシミュレーション)

モデル	帯域内干渉		帯域外干渉	
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	与干渉量 (dBm)	所要改善量 (dB)
基地局 →移動局	-96.9	14.1	-43.9	3.9
移動局 →移動局	-101.8	9.2	-48.8	8.8

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

なお、中心周波数 4.55GHz のキャリア 5G システムに対する共用検討結果を、表 3.3.4.5-8 と表 3.3.4.5-9 にそれぞれ最悪値での評価結果と、モンテカルロシミュレーションによる評価結果をそれぞれ示す。隣接周波数のキャリア 5G システムに対する評価結果に対して、全体として与干渉量は小さくなるものの、移動局間同士が近接してしまうと、干渉の影響が発生してしまう可能性があることは、隣接周波数の場合と同様である

表 3.3-36 共用検討結果(最悪値ケース)

モデル	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	所要 離隔距離 (m)	与干渉量 (dBm)	所要改善 量 (dB)	所要 離隔距離 (m)
基地局 →移動局	-101.12	9.87	30.1	-48.12	-8.12	-
移動局 →移動局	-98.11	12.89	4.5	-45.11	-5.11	-

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

表 3.3-37 共用検討結果(モンテカルロシミュレーション)

モデル	帯域内干渉		帯域外干渉	
	与干渉量 (dBm/MHz)	所要改善量 (dB)	与干渉量 (dBm)	所要改善量 (dB)
基地局 →移動局	-104.6	-9.87	-51.6	-11.6
移動局 →移動局	-108.2	-2.8	-55.2	-15.2

※許容干渉量は、帯域内干渉は-111dBm/MHz, 帯域外は-40dBm で計算

今回共用検討結果においては、キャリア 5G システムに対して干渉影響の可能性を排除するには、基地局の指向性アンテナのメインビーム方向を、キャリア 5G システムの運用エリアには向けない等の対策が必要であり、また見通し外での運用が好適であるといえる。

本実証環境の共用検討の結果においては、被干渉システムとして、隣接周波数でかつ屋内運用システムである場合を除くと、所要離隔距離が必要となることが分かり、建設現場というフィールドが、必ずしも離隔距離を小さくできる条件にはならないことが分かった。また、精緻化検討においては、ローカル 5G 基地局が設置される場所の標高が、周辺エリアよりも高い場合においては、伝搬損失を小さくする方向に精緻化が必要となることが分かっており、このことは離隔距離をさらに大きく取らなければならない環境も存在することを示唆している。そのため、実際に上りリンクスロット数が多い準同期 TDD を運用する場合、特に近接する被干渉システムが異なる TDD スロット構成で運用されている場合は、精緻化検討されたモデル式を用いて、与干渉電力の上限を計算したうえで、初期設計を行うとともに、実測によって与干渉電力を明確にする必要があると考えられる。許容干渉量を超える与干渉電力が実測される場合は、基地局アンテナのダウンチルトをさらにつけるといった対策を講ずる必要があると考えられる。しかし、精度の高いモデル式が定義されれば、意図せぬ大きな与干渉電力が発生する確率が小さくなり、このことは与干渉電力を低減させる際に、容易な手段で対応できる可能性が増加すると考えられるため、精度の高いモデル式の導出は、準同期 TDD の運用においても、今後も重要と考えられる。

3.3.5 その他のテーマ

本テーマには取り組まない

3.3.6 技術実証における追加提案

本テーマには取り組まない

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

ローカル5G技術の利活用ユースケースを述べるにあたり、適用する建設現場環境のイメージを図4.1-1に示す。本件におけるローカル5Gの利活用目的は、超高精細映像のリアルタイム大容量伝送において、遠隔地からの現場臨場に耐えうる精細度およびフレームレートを有し、安全リスクの抽出および遠隔での安全パトロール管理の実現を目指すものである。



図 4.1-1 建設現場環境のイメージ

供用中の高速道路（通行台数 10 万台/日以上）の近傍に鉄筋コンクリート造となる橋梁下部工（橋脚）を構築し、その直上に橋梁上部工（橋桁）を架ける工事となる。この為、高速道路直上に鋼製の作業構台とプロテクターを構築し、その構台面より大型クレーンによる資機材の揚重组立てと、高圧コンクリートポンプ車によるコンクリート打設が行われる。橋梁上部工（橋桁）が建設され、下部周辺の仮設構造物が撤去完了するまでは、工事監督者および施工者、そして道路維持管理者による、昼夜休日なしの厳戒管理体制が続く。そこでは、ハザードのリスクへの変化を早期に予測し、リスクの早期発見と回避策を発動することが重要となる。

建設作業エリアの環境は、図 4.1-2 の様な建設現場特有の鋼製構造物が様々に配置され稼働する。大容量無線通信環境下においては、これら大型揚重クレーンや高圧コンクリートポンプ車の巡回稼働、建設用仮設足場が通信電波環境へ与える影響は、予想できていない。また、建設機械に搭載されているジェネレータなどの動力源から発生する変動的な電磁ノイズや作業構台の下を通過する一般車両、業務用通信設備を搭載する車両などから発

生ずる電磁波環境との相互影響と、本建設作業エリアの近傍上空に架線されている高圧送電線のゆらぎ変化等による電磁波環境の評価・改善策の実施が必要になると予想している。



図 4.1-2 工事エリアの環境イメージ

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

本節では、現時点での課題とローカル 5G 環境の適用理由、およびローカル 5G を利活用する使用条件の定義、課題解決の実現性、及び実装に係る現時点の課題（ミッシングピース）を述べる。また、本実証内容がどのように位置付けられ、実証及びその後の自主的検討等によりどのようなステップで解決等の方向性を導き出すのか、最終的な実装の姿に基づく本件の実証内容の設計について説明する。

検証を実施する建設現場では、カメラ映像を用いた監督管理を導入している。しかしながら、カメラが低解像度のため視認性が低いこと、フレームレートが低く伝送遅延も発生することで確認に煩わしさがあることなど、施工監督および安全統括管理が遠隔地から臨場視を実施する際に課題がある。

また、建設現場は工事進捗に伴い水平及び鉛直方向に作業環境が変化しブラインドエリアも変化するため、安全管理で確認すべき範囲と方向が常時変化する。これに追従する必要があるため、光ケーブルなどの通信設備を定常的に配置することができず、ハンドリングの良い通信設備が求められている。

カメラ映像を用いた監督管理において、カメラの画角（ズームインアウト）や撮影方向範囲（パン、チルト）が限定的な映像は目的に合致していない場面が多く、映像確認者が

必要とするたびに画角と撮影範囲を調整する必要がある。また、他の確認者が同時に別途目的で同一カメラの映像確認を必要とする場合は待機する必要がある。この時間的な無駄がハザードおよびリスク回避を遅らせる原因であり画題である。改善方法の一つは、常時リアルタイムに超高精細での天球カメラ映像を取得し、複数人それぞれが目的とする多方向の映像を切り出して利用することである。これにより時間的な無駄が解消される。

図 4.2-1 に課題解決のシナリオを示す。従来、監督・管理経験者や多数のパトロール者が実施する実現場パトロールにより、作業している人や機械、資機材の状態や周辺環境をとらえ、その座標位置、移動速度と方向、状態の変化量（サイズや重さなど）から、リスクをハザードへ戻す行為が、常時行われている。しかし、今回の現場の様に 24 時間休日なくハザードが（高速道路の車両）通過し重大なリスクに結びつく変化を常時把握する必要があると予想されることから、映像による遠隔からのパトロールシステムの重要性が認識されている。得られる映像データへのアクセスは、多数が同時にアクセス確認できる〈多眼〉を目標とする。同時に確認可能なく多眼〉は、超高精細カメラ映像を活用し、高解像度かつ広範囲に撮影した映像から任意の領域を抽出することで実現できる。ただし、広範囲に撮影した場合、映像の中のどこに人や建設機械などの注目ポイントが位置しているかという気付きが困難な状況となる場合がある。そこで、取得映像の中に、人物や建設機械を抽出し、マーキング〈誘目〉を導入することとした。

超高精細カメラの画角、範囲、ポジションの設定、工事進捗にあわせた設置利用のハンドリング特性、必要なカメラポジションからの大容量データの高速度伝送特性を満足することが基本インフラとなる。

「ローカル 5G 活用モデル」の前提となる実装時の姿や方向性、また実装に向けた道筋やステップを説明する。現場環境は二度と同じとまらない状況で進捗してゆく中で、各ステップでの達成範囲と相互の関係を明確にした。また、基礎掘削工から橋梁下部躯体構築に移ってゆくにあたり、さらなる電磁波環境への影響が大きくなるものと想像されることから、工事進捗に伴い継続してキャリブレーションを進めてゆく。

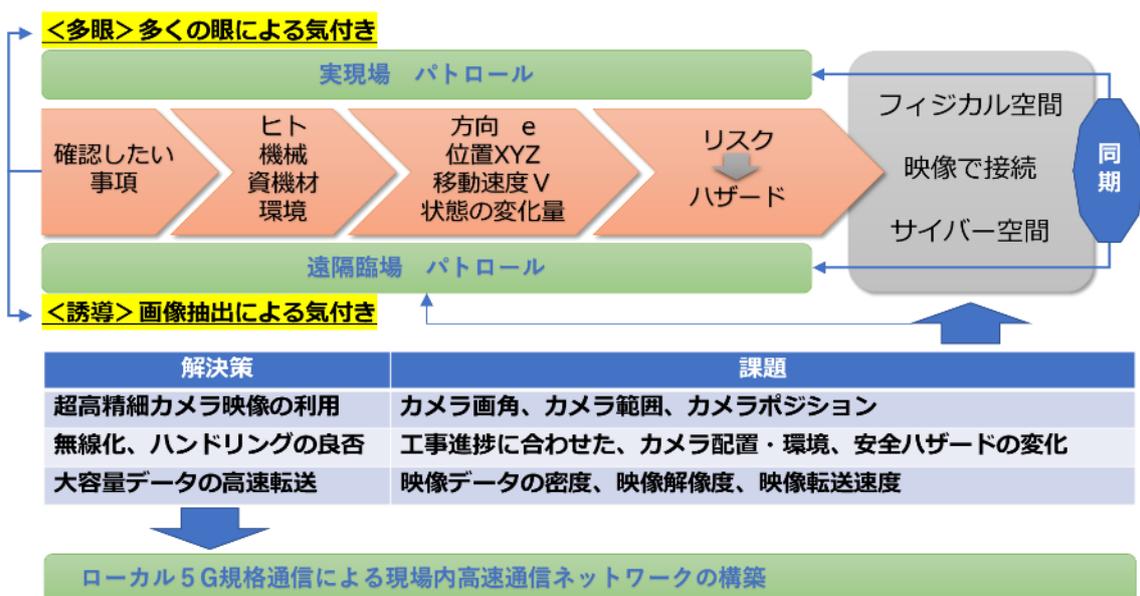


図 4.2-1 課題解決のシナリオ

上記課題において、本課題実証では以下を実現する。

- ・ 建設現場を超高精細カメラで撮影し、ローカル 5G ネットワークによって取得した超高精細映像をクラウドサーバへ伝送、保存するシステムを構築し、工事状況に応じて柔軟なカメラ設置ができるようにする。建設現場は地形や工事工程などの影響でカメラ設置場所の制限が多いため、超高精細映像を保存するための大型ストレージ装置の設置が不要となるシステムの簡素化は重要である。
- ・ 建設現場を広範囲に撮影した超高精細映像から任意の領域を切り出し、映像品質を確保して伝送することで、任意の場所の状況を監視できるようにする。
- ・ 遠隔の複数端末から同時にアクセスし、建設現場映像を確認できるようにする。
- ・ 超高精細映像から人と建設機械を検出してマーキング表示することで、広範囲に撮影した映像において人や建設機械がどこに位置しているかを誘目できるようにする。



図 4.2-2 検証工程

本課題実証の検証工程を図 4.2-2 に示す。検証項目①ローカル 5G ネット現場通信環境では、適宜、電波環境のヒートマップを作成し、工事進捗に合わせて変化状況を確認する。②市中ネットキャリア通信環境では、検証期間に通信評価を行い、通信環境を確認する。③超高精細映像システムでは、採択直後より学習用の映像を取得すると共に、工事進捗に合わせてカメラを移動設置させる運用手間と映像取得にて発生する課題について報告を作成する。④映像処理ソリューションは、視線誘導を行うための人や建設機械を検出しマーキングする処理プログラムを完成させる（映像解析①）。これを本検証での達成目標とする。なお、映像解析②処理プログラムは、映像解析①に比較して人や建設機械の検出率を高める改善について継続する。

本課題実証により、各検証項目について有効性の検証を実施するが、本ソリューションを実装（本格導入）するためには、さらに工事状況の変化の影響、カメラ位置・撮影環境変化の影響、運用面での課題・改善、運用ノウハウなど長期間の検証が必要と考えられる。

そのため、本課題実証期間後も本建設現場の工事終了まで検証を継続する予定である。本ソリューションの実装スケジュールは、2022年度までは、現場が大きく変容する条件下での検証と課題抽出を行い、重要な課題についてはほぼ抽出することを予定している。その後、工事完了の2023年度までに課題の改善と評価を行い、2023年度から本格導入に移行することを目標としている。実証を行う本建設現場では、現在の受注工事は23年度で完了するが、その後も別の建設業者による工事が推進される予定のため、そのまま本格導入することについても検討する。

特に、映像ソリューションの検証においては、本実証期間中では、特定位置に設置されたカメラ映像から、検出に必要な解像度や遮蔽のない条件において、人やその期間に稼働する建設機械に対して、適切に検出されているかの評価を実施する。また、実証期間後では、工事進捗に伴う建設現場の状況変化、カメラの位置を変更した場合の影響や季節に伴う外光条件の変化など、さらに多様な条件下での検出性能について確認する予定である。

人や建設機械の検出では、多くの画像を基にした学習用データが必要となるため、初期の検証の段階では一般的な画像を基に学習用データを作製し、建設現場での撮影データの蓄積に応じて建設現場の画像も基にした学習用データを作製し、検証を進める。

4.3 実証環境

課題実証を取り巻く環境は、建設現場の進捗により鋼製資機材の配置や建設用重機等の稼働状況が変化する、また、近傍の高速道路混雑状況や通過車両、高圧送電線からの影響で、電磁波環境が変化することが考えられる。一方、端末へ配信される映像品質は市中ネットキャリア通信環境の通信量変動にも影響を受けることが予想される。各端末に配信される映像品質が十分でない場合には、ローカル 5G の通信環境の影響によるものか、あるいは、キャリア通信環境によるものかを見極めるため、クラウドサーバから各端末までの通信経路については、キャリア通信網に限定せず、有線網、Wi-Fi 等についても検証する。作業員へのマーキング処理において、作業エリアに配置される人数は、平均 10~20 名程度であり、服装や色合いおよび背丈体格は統一されない。また、風雨雪の影響を受ける野天日照環境でもあることから、屋外設置の設備は耐環境性能を有する構成とし、取得するカメラ映像の陰影が AI 検出処理の検出精度に影響を与える可能性もあるため、多様な条件下での映像にて評価する。

本課題実証期間中の建設現場の状況について説明する。建設現場では、図 4.3-1 に示すように、両側を高速道路に挟まれた領域にて栈橋を建設する作業が進められている。工事の進捗と共に、高速道路の敷設方向に延びるように栈橋が建設される。建設工事は主に夜間工事で行われるため、工事作業中の撮影は夜間条件での撮影となる。夜間の建設工事では、図 4.3-2 の左側の高速道路が通行止めとなり、栈橋周辺および高速道路上で各建設機械や作業員により作業が行われる。図 4-3-2 に夜間工事のようすを示す。手前側高速道路上に資材搬送用の大型トラックやクレーンなどの建設機械が稼働し、その周辺で作業員による作業が行われる。また、栈橋上でも大型クレーンや油圧ショベルが稼働し、その周辺での作業員による作業が行われ、広範囲に作業領域が分布する。日程や時刻によっても作業員や建設機械位置、建設機械の種類が異なる。本課題実証で開発するモニタリングシス

テムでは、超高精細カメラによって図 4.3-2 に示すような広範囲の建設作業現場を撮影し、ローカル 5G を用いた映像伝送により遠隔から任意の領域を監視可能とする。

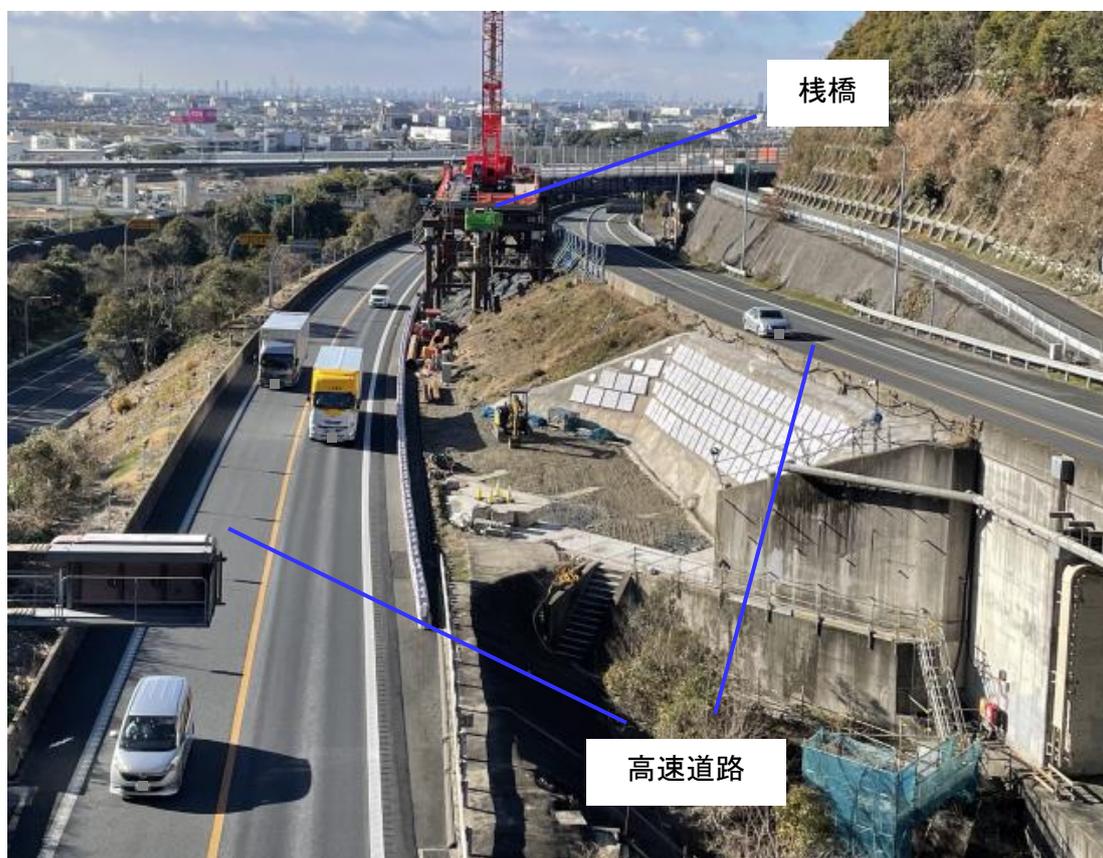


図 4.3-1 建設現場周辺の状況

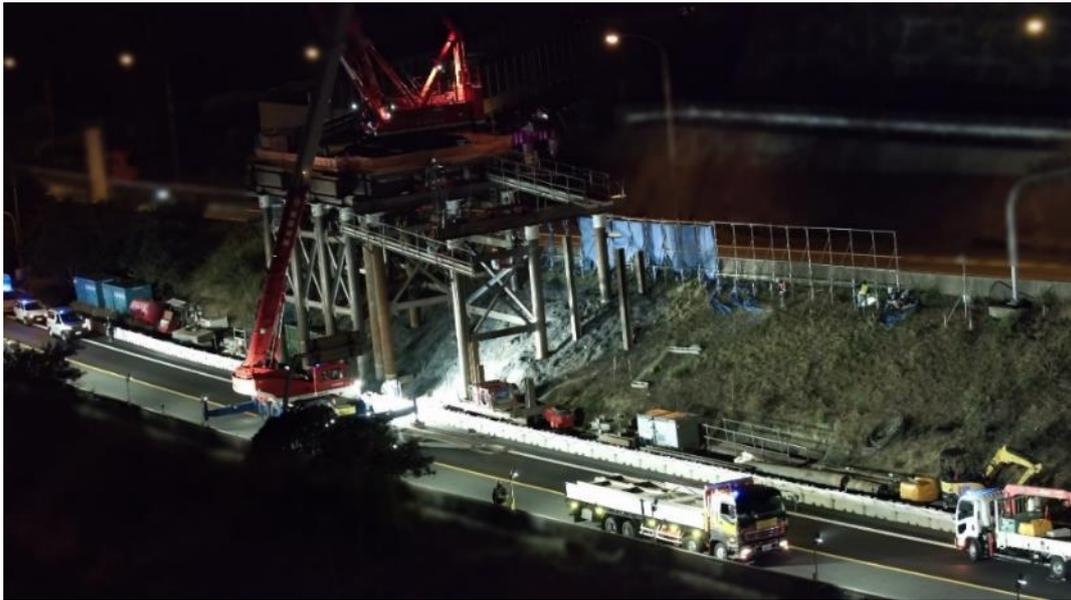


図 4.3-2 建設現場の夜間工事の状況

4.4 実証内容

土木建設現場における映像伝送システムへの要望として、以下のことが挙げられる。

- ・リアルタイムモニタリングによる共時空間性の確保
- ・低遅延、超高精細映像による、ストレスフリーな遠隔安全臨場（新三現主義）の確立
- ・個人とハザードの関係を常時デジタル評価し、リスクレベルの低減を促す自律型支援システムの確立

本課題実証では、このような要望に対して、超高精細映像をリアルタイムで遠隔地点に転送処理することにより、サイバー空間を同時多数の関係者で24時間、多地点より共有することを可能とする、超高精細な8K映像とローカル5Gを用いた映像ソリューションに関して有効性の検証を行う。

8K映像とローカル5Gを建設現場に適用するメリットとして図4.4-1に示すことが挙げられる。

8K超高精細カメラによる広範囲撮影映像伝送

- ・少ないカメラで広範囲をリアルタイムに監視
- ・切り出し映像を配信することにより、各監視者の所望領域を同時に監視
- ・鮮明な映像を基にしたAI検出処理

L5Gによる高速・大容量通信

- ・商用5Gエリア外の山間部でも安定的な映像伝送
- ・工事進捗に合わせたフレキシブルなカメラ配置・レイアウト

図 4.4-1 建設工事へ8K+ローカル5Gを適用するメリット

図4.4-2の画素数比較に示すように、8K映像(7,680×4,320)は、4K映像(3,840×2,160)の4倍、2K映像(1,920×1,080)の16倍の画素を有するため、8Kカメラと同じ範囲を4Kカメラと2Kカメラで撮影した場合、8K映像に比べて4K映像および2K映像の解像度は低下する。また、8Kカメラと2Kカメラで同程度の解像度で撮影しようとした場合、8Kカメラ1台で撮影した範囲に対して2Kカメラ16台が必要となる。そのため、8Kカメラで広範囲を撮影し、8K映像から2K範囲を切り出して拡大表示することで、8Kカメラ1台によって、従来の2Kカメラでの映像品質と同等でかつ、2Kカメラを16台並べて撮影した範囲の映像を得ることができる。



図 4.4-2 8K 映像と 4K 映像と 2K 映像の画素数

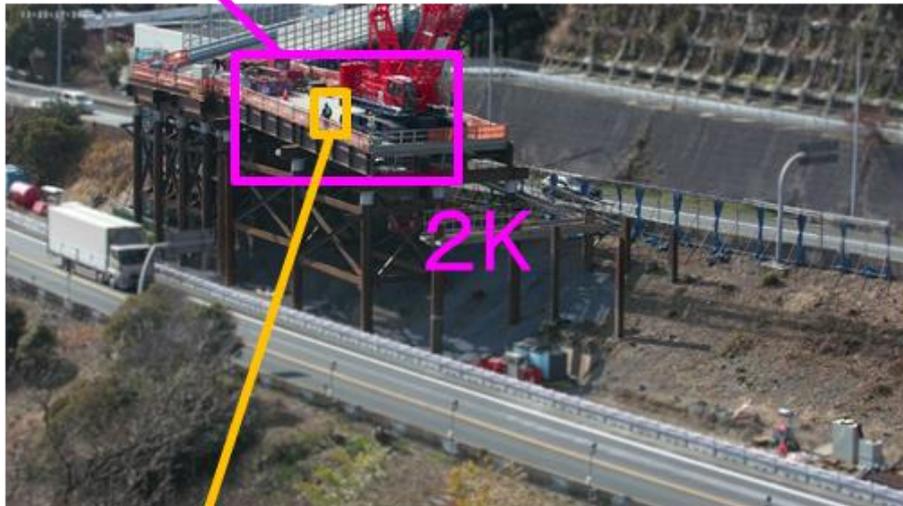
8K 映像から任意の 2K 範囲を切り出して拡大表示することができるため、8K 映像の範囲内であれば監視者の確認したい領域を自由に設定して映像を確認することができる。複数監視者がそれぞれ指定する領域を切り出して拡大表示させることで、同時に複数の監視者がそれぞれ確認したい領域の映像を監視することができる。8K カメラによって取得した鮮明な映像を用いることで被写体の特徴を取得しやすくなるため、検出処理に活用することができる。

図 4.4-3 に 8K カメラによって撮影した広範囲の 8K 映像と、8K 映像から切り出した 2K 映像の例と、同じ範囲を撮影した場合の 8K 映像、4K 映像、2K 映像の解像度の比較の概要を示す。広範囲に撮影した 8K 映像から 2K 範囲で切り出した場合にも、人や建設機械、周辺の状況など確認できるような鮮明な映像が得られている。また、同じ範囲を 4K カメラや 2K カメラで撮影した場合、8K 映像に比べて 4K 映像や 2K 映像では解像度が低下するため、被写体のエッジ周辺が不鮮明となり、映像の鮮明さが低下していることが分かる。

8K 映像は高精細である一方、データ量が大きくなるため、高速・大容量な通信ネットワークが必要となる。土木建設工事は山間部など商用 5G が使えない場合も多く、ローカル 5G を用いることで安定的な 8K 映像伝送が期待できる。また、工事の進捗と共に、カメラ配置を変更することも想定され、ローカル 5G のような無線ネットワークではフレキシブルに機器の配置を変更することもできる。このように、8K 映像とローカル 5G を組み合わせることで、建設現場に有用なリアルタイムモニタリングシステムが期待されるため、本実証においてシステムの開発とその有用性について実証を行った。以下に、本実証で開発したシステムおよび表示の概要について説明する。



切り出し映像(2K)



8K超高精細カメラによる広範囲映像

広範囲(同じ範囲)を撮影した場合

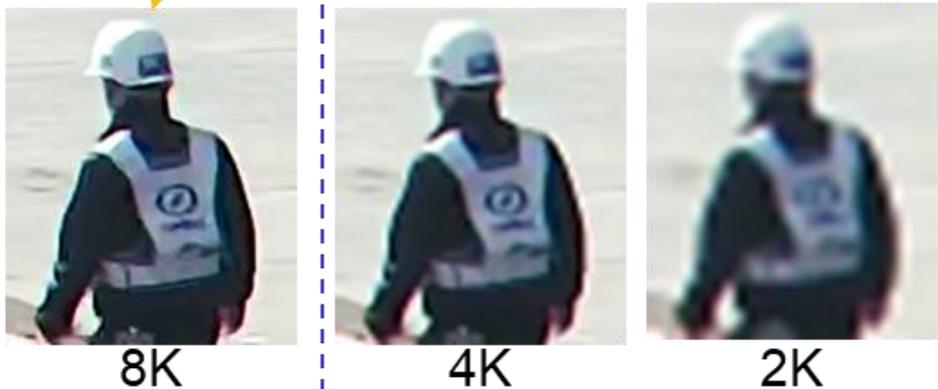


図 4.4-3 8K映像と2K切り出し映像及び解像度の比較

図 4.4-4 に課題実証ソリューションのシステム概要を示す。本課題実証における映像ソリューションは、超高精細な 8K カメラによって建設現場を俯瞰的に撮影し、ローカル 5G を通じて映像を伝送したのち、8K 映像配信・解析 PF（本実証ではクラウドサーバを使用）に入力される。8K 映像配信・解析 PF では、8K 映像から作業員や建設機械をリアルタイムに検出し、映像にマーキング表示することで、広範囲に撮影された建設現場映像に視線誘導を働きかけ作業領域の認知性を高める機能を持たせる。また、監視者からの 8K 映像の撮影範囲内における詳細状況の確認要求に対して、要求位置を 2K 範囲で切り出して拡大表示を行う機能を持たせる。

遠隔から接続する表示端末には、8K 映像を 2K 映像に変換し、作業員や建設機械の検出位置をマーキング表示した 2K 映像や、8K 映像から指定箇所を切り出した 2K 映像を配信して表示する。複数の表示端末が同時にクラウドサーバにアクセスすることが可能であり、遠隔から複数人が同時に配信映像を確認することができる。



図 4.4-4 課題実証ソリューション概要

図 4.4-5 に課題実証ソリューションで開発したシステムについて、設置機器の構成概要を示す。建設現場の北側に位置し、高所から俯瞰的に建設現場を見下ろすことが可能な法面上に 8K カメラを 2 台設置した。2 台の 8K カメラは建設現場に対して撮影角度が異なるように法面の両側に設置し、それぞれのカメラで撮影した 8K ストリーミング映像データを L5G ネットワークにて伝送する。ローカル 5G による 8K 映像伝送は、法面上の 8K カメラに接続した L5G 端末と、法面から高速道路を挟んだ山側の場所に設置したアンテナユニット RU1 との間で行われる。建設現場周辺には、他にもアンテナユニット RU2 とアンテナユニット RU3 を設置しているが、映像伝送にはアンテナ RU1 を使用して行う。栈橋上には検証用のハウスを設置し、ハウス内にはコアネットワーク装置やベースバンドユニット (CU/DU) を設置した。アンテナユニット RU1 と栈橋上のコアネットワーク装置とは光ファイバケーブルによって接続され、アンテナユニット RU1 によって受信された 8K 映像が光ファイバによって栈橋上のハウスまで伝送される。ハウス内には、ローカル 5G ネットワークによってリアルタイムに伝送された 8K ストリーミング映像を 8K 解像度で確認できるよう、60 型の大型 8K モニタも設置し、映像表示用の PC によってデコードされた 8K 映像が大型モニタに表示できるようにした。コアネットワーク装置からはインターネット回線を通じてクラウドサーバに 8K ストリーミング映像がアップロードされ、クラウドサーバからは、AI 検出処理により作業員や建設機械の位置を検出してマーキング表示した 2K 映像や、指定箇所を 2K で切り出した映像が各表示端末に配信される。表示端末は現場関係者が使用するスマートフォン、タブレット、PC と複数の機器を利用可能とし、遠隔地については特に制限を設けず、建設現場事務所や発注者の事務所など任意の遠隔地からクラウドサーバにアクセスできるようにした。

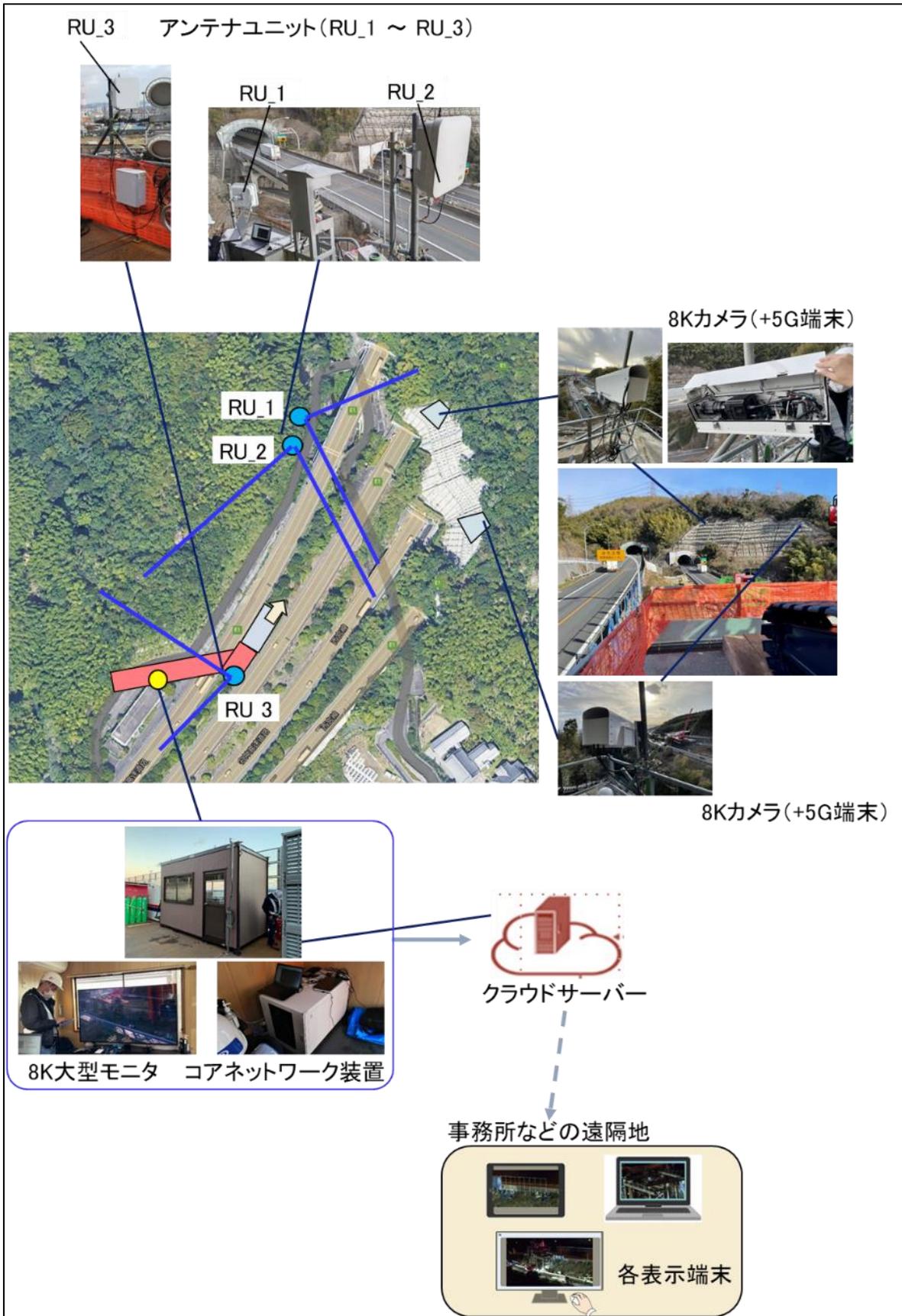


図 4.4-5 課題実証ソリューションの機器設置構成

8K カメラおよび撮影条件について説明する。表 4.4-1 にカメラ仕様、図 4.4-6 にレンズ装着時の 8K カメラ外観と、現場設置時のハウジング内部の様子を示す。本課題実証では 8K 画素数を有するカメラ「BOSMA D200 (Guangzhou BOSMA Corp.製)」と、焦点距離 40mm～150mm のズームレンズ「M.zuiko Digital ED 40-150mm f2.8 pro (オリンパス製)」を組み合わせた 8K カメラを使用した。8K カメラは、防水対応のカメラハウジング内に取り付け、建設現場を俯瞰して撮影できる法面に設置した。図 4.4-7 に示すように、法面に設置したカメラから建設現場の中央領域までの撮影距離は 150m 程度あり、建設現場全体が収まるようにレンズ焦点距離を 50mm に設定した。

建設工事は夜間に実施され、日中に比べて暗く撮影されるため、明るく撮影できるように絞りは最大開放である F2.8 に設定した。通常、絞りの値を小さく（解放）するほど、フォーカスの合う範囲である被写界深度が狭くなるが、被写界深度は撮影距離が遠くなるほど広がる。本課題実証でのカメラ 1 と栈橋間の撮影距離は 150m あり、撮影対象とする建設工事現場の領域に対して絞り F2.8 にて十分広い被写界深度を確保できる。

明るく撮影するためには、絞りの他にもシャッター速度（露光時間）や ISO 感度（ゲイン設定）の組み合わせを考慮する必要がある。シャッター速度は、被写体の動きボケが生じないことや、目標とするフレームレート 30fps 以下に設定する必要があるため、建設現場の状態が視認できるような明るさとなるようにするためには ISO 感度を上げる必要がある。本課題実証では、動きボケを考慮し、夜間撮影時にはシャッター速度を 1/50 に設定し、所望の明るさとなるよう ISO 感度を調整している。ISO 感度を上げる場合には映像が明るくなる一方、ノイズが増えて映像品質が低下するため、本課題実証では夜間撮影による映像品質低下の影響も考慮して検証を行った。

表 4.4-1 カメラ仕様
 (カメラ : BOSMA D200、レンズ : M.zuiko Digital ED 40-150mm f2.8 pro)

項目		仕様
カメラ	撮像素子	4/3 インチ CMOS(18.84mm×10.60mm) 画素数 7680×4320
	フレームレート	30fps(8K)
	ビットレート	最大 200Mbps(8K30fps)
	圧縮方式	H.265/H.264
	外形寸法	126×108×108.7mm
	重量	約 1.25kg
	入出力	Ethernet (他に USB3.0,Wi-Fi, HDMI2.1 あり)
レンズ	焦点距離	50mm (調整可能範囲:40mm-150mm)
	F 値	F2.8(調整可能範囲:F2.8-F22)
	外形寸法	Ø79.4×160mm
	重量	760g



図 4.4-6 設置した 8K カメラ概要

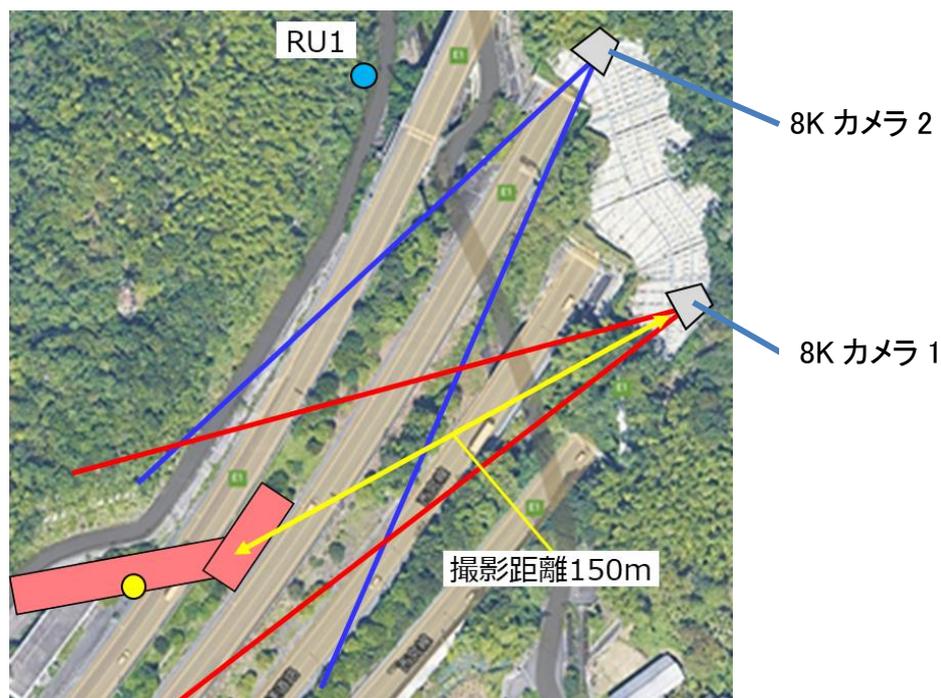


図 4.4-7 カメラ配置と撮影距離

図 4.4-8 と図 4.4-9 に 8K カメラ 1 と 2 の夜間工事の撮影映像の例を示す。作業領域が高速道路敷設方向に広がっているため、高速道路の横方向から撮影した 8K カメラ 1 と高速道路の敷設方向から撮影した 8K カメラ 2 の撮影映像を比べると見え方が大きく異なる。撮影方向によって、カメラへの車両のライトや作業灯の照明光の入射状態も異なる。例えば、8K カメラ 1 に比べて 8K カメラ 2 の撮影方向は高速道路の敷設方向であるため、車両や建設機械の照明光がカメラに入射しやすく、照明光による局所的な飽和が生じやすい。AI 検出処理による作業員や建設機械の検出精度の検証では、このような撮影角度の異なる映像も用いて検証を実施した。

現場関係者による本ソリューションの主観評価による検証では、現場担当者からのヒアリングにより、8K カメラ 2 に比べて建設現場の作業領域を画角内に広い範囲で撮影できる 8K カメラ 1 の撮影映像を基に評価を実施した。



図 4.4-8 撮影映像例 (8K カメラ 1)



図 4.4-9 撮影映像例 (8K カメラ 2)

AI 検出処理とマーキング表示について説明する。クラウドサーバでは、入力された 8K 映像からリアルタイムで作業員と建設機械を検出し、マーキング表示を行う。検出対象の建設機械は現場関係者との協議により、今回の建設現場で使用されるクレーン、大型トラック、油圧ショベルとした。クレーンは、稼働部分に対して作業員が近くにいる場合の安全リスクが高くなるため、稼働の中心である本体部分を検出対象とすることとした。図 4.4-10 に 8K 映像から AI 検出処理を実行し、マーキング表示した表示画面例を示す。マ

マーキング表示では、検出位置に対して矩形のマーキング（枠）を重畳表示する。図 4.4-11 から図 4.4-14 に作業員と建設機械の検出例を示す。マーキング表示では、作業員（青色）と建設機械（緑色）でマーキングの色を変えて表示する。

広範囲に撮影した場合、どこで作業が進められているか注視することが必要となるが、このように検出位置をマーキング表示することで、作業員や建設機械の位置、作業範囲が分かりやすくなる。特に、スマートフォンなど表示画面サイズの小さな端末では作業員が小さく表示されるため、マーキング表示による誘目の効果が期待できる。



図 4.4-10 AI 検出およびマーキング表示例（広範囲映像表示画面）
（青枠：作業員、緑枠：建設機械）

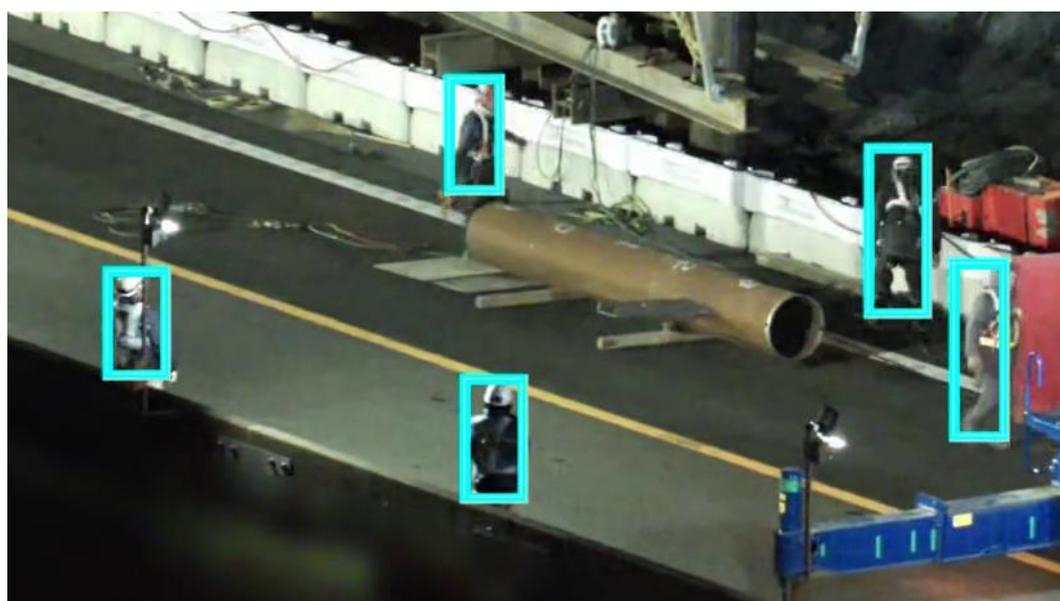


図 4.4-11 作業員検出結果例



図 4.4-12 建設機械(クレーン本体部)検出結果例

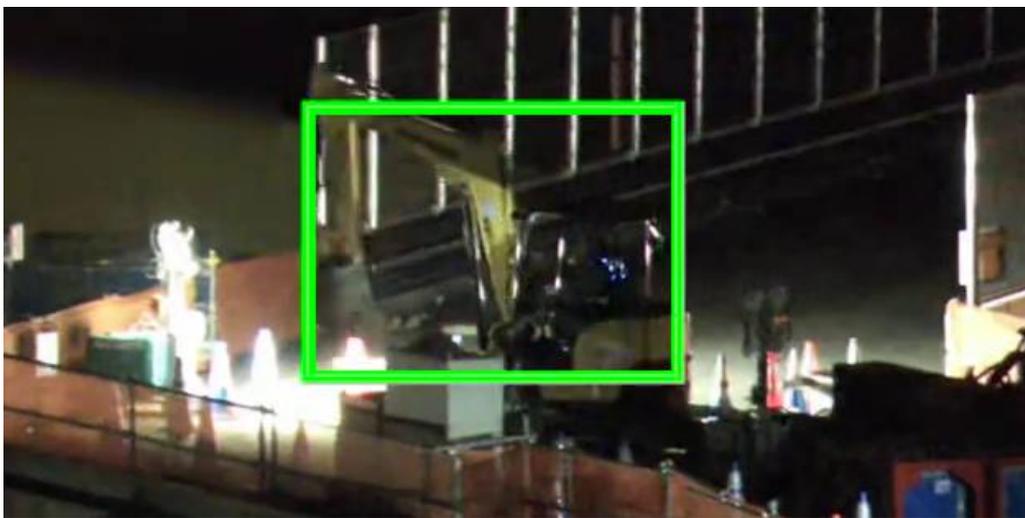


図 4.4-13 建設機械(油圧ショベル)検出結果例



図 4.4-14 建設機械(大型トラック)検出結果例

現場関係者から、稼働する建設機械に作業員が近づいた場合において危険のリスクが高まるとの意見があり、作業員と建設機械の位置が近い場合に警告表示ができないかとの要望があった。そこで、AI 検出結果を用いた応用機能として、検出した画像上の位置から建設機械と作業員が近接している場合に、作業員のマーキングの表示を変化させて通知する機能を実装した。図 4.4-15 に示すように、画像上で建設機械の検出領域に対して一定範囲に近づいた場合に、作業員のマーキングを強調し、「WARNING」の文字を表示する。



図 4.4-15 作業員と建設機械近接時の警告表示例

切り出し部分の拡大表示について説明する。AI 検出位置がマーキング表示された広範囲映像表示画面において、監視者が指定した箇所を基準に 8K 映像 (7,684×1,080) から 2K(1,920×1,080)の範囲を切り出した部分拡大映像を配信する。部分拡大表示への切り替えは、広範囲映像の拡大したい位置をタッチパネル操作やマウス操作で指定することで行う。

図 4.4-16 に、広範囲映像と部分拡大映像の例を示す。広範囲映像表示画面で手前の高速道路上に位置する大型クレーンの左側の作業員を中心に 2K 範囲で切り出し、拡大表示されている。部分拡大表示画面では、広範囲映像表示画面に比べて表示される範囲が狭く、マーキング表示が細部の状態確認に邪魔となるため、部分拡大映像表示ではマーキング表示を行わないものとした。ただし、将来的な運用の際に部分拡大映像でのマーキング表示が必要となった場合は、表示処理の修正によって対応可能である。

クラウドサーバへは複数同時アクセスが可能であり、各表示端末で指定された箇所の部分拡大映像が各表示端末に配信される構成のため、表示端末ごとに任意の部分拡大表示映像を監視することができる。



広範囲映像表示



部分拡大映像表示

図 4.4-16 切り出した部分拡大映像の例

4.4.1 ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証

4.4.1.1 効果検証

(1) 評価・検証項目

遠隔地から複数の監視者によって現場の状況を確認できることが重要であり、本実証で開発したソリューションについてその有効性を検証した。有効性検証を実施したシステム要件を図 4.4-17 に示す。ローカル 5G による 8K30fps の映像伝送によって取得した 8K 映像データに対して、リアルタイムで AI 検出処理と誘目表示の処理を実行し、複数の監視者が同時に広範囲映像上の所望領域の部分拡大映像を確認できるようにした。

本システムを建設現場に導入した際に、システムを扱う現場関係者によって、主観評価アンケートを実施し、実運用を想定したシステムの効果や有効性、課題について検証した。

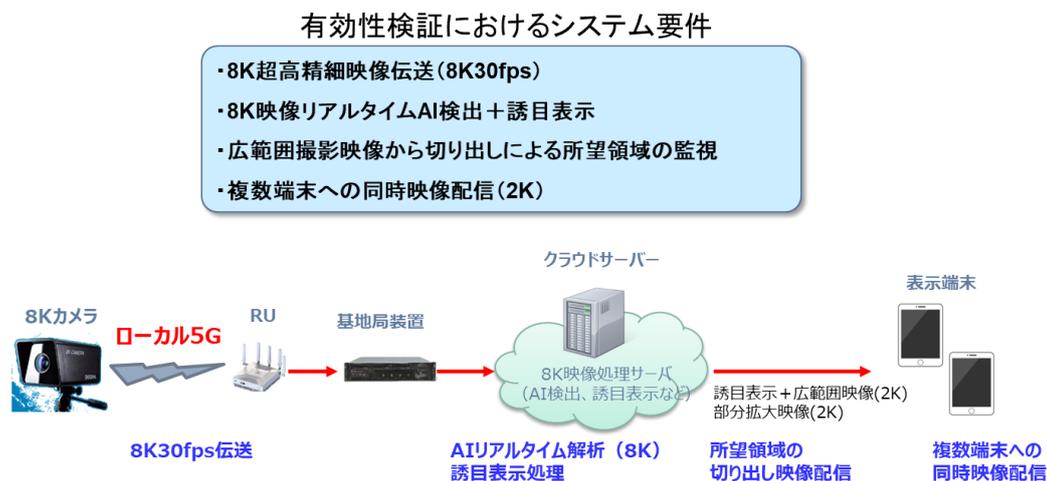


図 4.4-17 有効性検証におけるシステム要件

主観評価は、建設工事作業中の映像を用いて実施した。建設工事作業中のようすを 8K カメラで撮影し、撮影された 8K30fps のストリーミング映像をローカル 5G ネットワークの伝送によって取得したのち、8K 映像をクラウドサーバにアップロードする。

クラウドサーバでは、8K 映像からリアルタイムで作業員と建設機械の位置を検出し、マーキング表示を行う。

クラウドサーバから各表示端末には、広範囲映像にマーキング表示した 2K 映像や、評価者が指定した箇所を中心に 8K 映像から 2K 範囲で切り出した部分拡大映像を配信する。主観評価アンケートを実施する現場関係者は、表示端末にてクラウドサーバにアクセスし、配信された映像を見ながら、映像品質や使い勝手、用途などの各評価項目に対して回答す

る。回答結果を基にシステムの効果を検証した。

主観評価では、実運用を想定し、スマートフォンやタブレットなど建設現場関係者が業務で使用する機種を対象として実施した。また、映像監視場所に制限を設けずに、任意の時間、場所からクラウドサーバにアクセスして建設現場の映像を確認できる環境にて評価を行った。

現場関係者による主観評価アンケートの評価項目を、表 4.4-2 に示す。

主観評価の実施環境が分かるようにアクセス日時や使用端末、ネットワーク環境などの評価項目を設けた。また、利用者によって映像から確認したい内容が異なる場合が想定されるため、所属など評価者に関する情報の評価項目を設けた。

検証するシステムでは、図 4.4-18 に示すような建設現場全体を撮影した広範囲映像表示画面と、図 4.4-19 に示すような指定箇所を切り出して拡大表示した部分拡大映像表示画面の 2 パターンの表示で確認が可能であるため、主観評価では表示パターンごとに、その効果や、映像品質や操作性に関する評価項目を設定した。

広範囲映像表示画面では、検出された作業員や建設機械がマーキング表示されるため、AI 検出に対する評価項目を設け、その効果を評価した。部分拡大映像表示画面では、部分拡大映像表示画面にて確認したい内容や確認のための映像品質が得られているかという評価を行った。また、本ソリューションの用途や要望、導入時の利用頻度などに関する評価項目を設け、今後の導入に向けた有効性や課題、改善について検討した。

主観評価では、本ソリューションの効果に関する評価項目以外にも、機能性に関する評価も併せて実施した。機能性に関する検証では、ノイズや明るさなど映像品質に影響する評価項目や、画面表示切り替え時の応答性といった操作性に影響する評価項目を設定し、各機能に影響を与える要因について評価した。機能に関する評価については 4.4.1.1.2 節の機能検証にて詳細を説明する。

評価結果の傾向を確認できるよう、評価者 20 名以上を目標に主観評価を実施した。

表 4.4-2 アンケートの評価項目

No.	主観評価の分類	設定した評価項目
1	利用日時	<ul style="list-style-type: none"> ・クラウドサーバへのアクセス日時
2	利用者に関する情報	<ul style="list-style-type: none"> ・立場や役職 ・映像による監視経験の有無 ・従来システムの利用頻度
3	利用環境	<ul style="list-style-type: none"> ・接続場所 ・使用端末 ・ネットワーク環境
4	広範囲映像表示の品質	<ul style="list-style-type: none"> ・広範囲映像の範囲 ・鮮明さや明るさ ・動きの滑らかさ
5	広範囲映像表示の操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・使用時の操作性 ・表示にかかる時間
6	広範囲映像の AI 検出と誘目表示	<ul style="list-style-type: none"> ・作業員や建設機械の AI 検出精度 ・誘目表示の効果
7	部分拡大映像表示の品質	<ul style="list-style-type: none"> ・部分拡大表示の範囲 ・利用用途 ・用途における映像品質（満足度） ・鮮明さや明るさ ・動きの滑らかさ
8	部分拡大映像表示の操作性	<ul style="list-style-type: none"> ・使用時の操作性 ・表示にかかる時間
9	システム全体の効果、有効性、課題	<ul style="list-style-type: none"> ・任意箇所の部分拡大表示の効果 ・導入時の用途や利用頻度 ・要望・課題



図 4.4-18 配信映像画面例（広範囲映像表示）

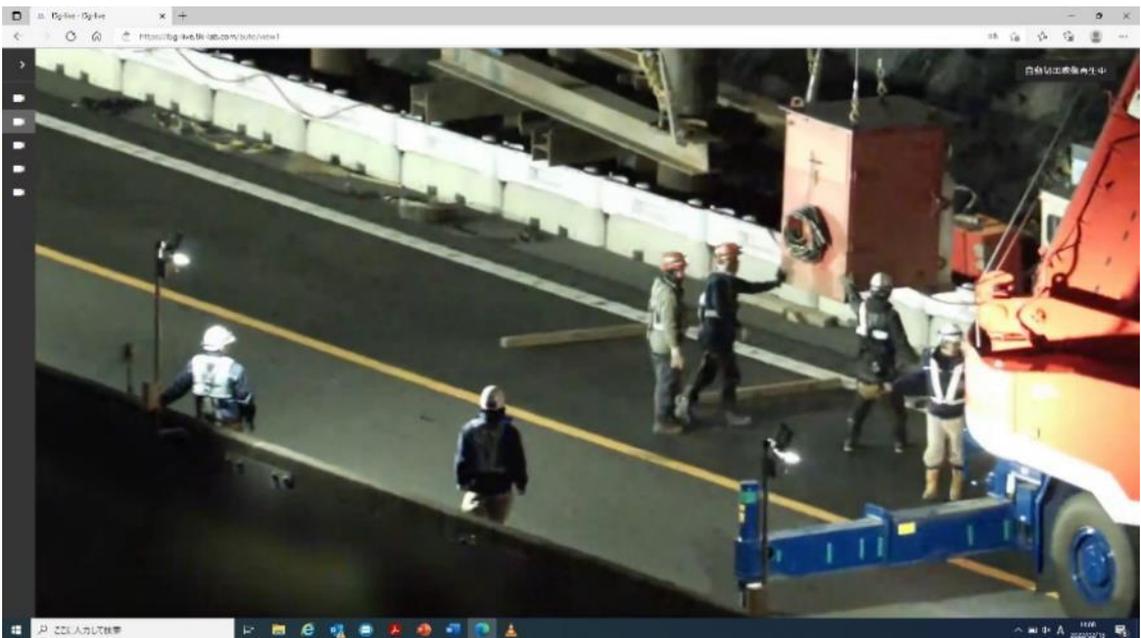


図 4.4-19 配信映像画面例（部分拡大映像表示）

(2) 評価・検証方法

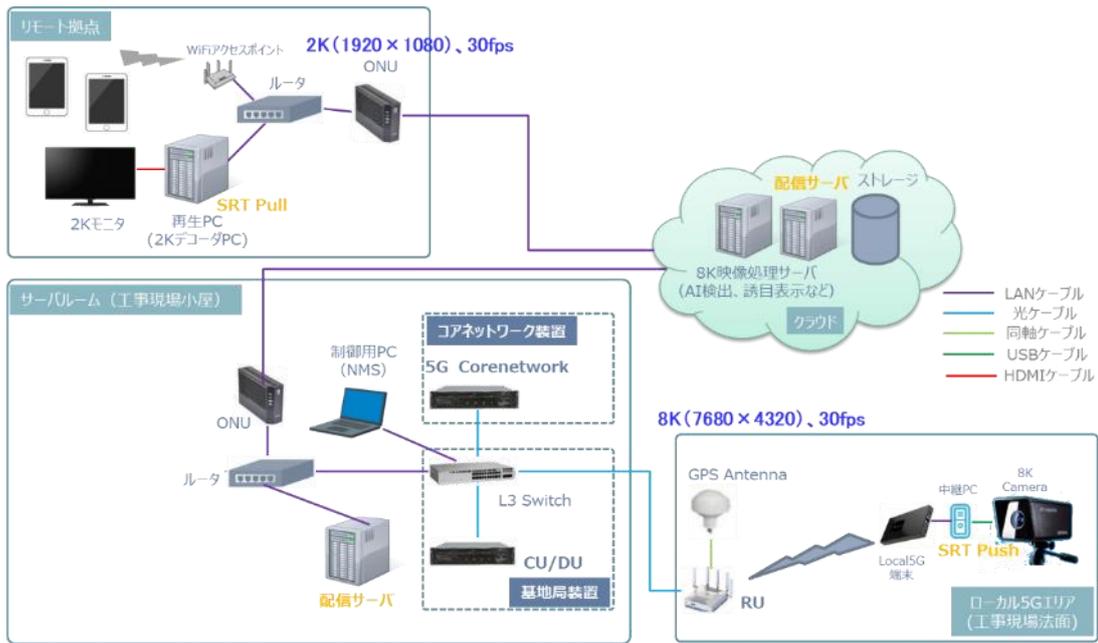
本課題実証を行った検証システムおよび検証方法について説明する。検証システム構成を図 4.4-20 に示す。

建設現場近くの法面に設置した 8Kカメラで建設現場を俯瞰的に撮影した 8K30fps の映像ストリーミングデータを中継 PC、ローカル 5G 端末を通じてローカル 5G ネットワークによりアンテナユニット RU1 に伝送する。アンテナユニット RU1 から基地局装置やコアネットワーク装置までは光ファイバーケーブルを通じて映像データを伝送し、クラウドサーバにアップロードする。クラウドサーバにアップロードされた 8K 映像データに対してリアルタイムで AI 検出処理によって作業員や建設機械の検出が行われ、配信用の 2K 映像の生成や誘目表示のマーキング表示処理を行い、クラウドサーバにアクセスした表示端末へ映像配信を行う。

本ソリューションの評価では、実際に建設作業を実施している映像によって評価する必要があるが、今回対象となる建設現場は、夜間工事が主体であり、日中は工事作業が実施されない。また、高速道路工事の制限により、雨や降雪などの天候によっては工事が実施できないなどの制限があり、限られた期間で多人数による評価が困難である。そのため、以下①～④の処理手順で評価を実施した。評価検証ではローカル 5G 伝送後に一旦、映像データを保存し、保存したストリーミング映像データをクラウドサーバに入力してリアルタイム処理を行うが、カメラから直接ストリーミング映像データを入力する場合と、映像伝送経路や処理内容は同一である。事前に撮影した共通の映像データを主観評価に用いることで映像のどのような点が評価に影響しているかも解析しやすくなる。

<評価における映像配信までの実行手順>

- ① 8K カメラで事前に夜間工事を撮影
- ② ①で撮影した 8K ストリーミング映像データをローカル 5G ネットワークによって伝送し配信サーバに一時的に保存
- ③ 8K 映像データを配信サーバからクラウドサーバにアップロードしてリアルタイムで 8K 映像の AI 検出処理と誘目表示処理を実行
- ④ クラウドサーバにアクセスした各表示端末に 2K30fps の映像を配信



夜間工事実施時に 8K 映像を保存

図 4.4-20 検証システム構成

建設機械の種類や位置、作業員の作業領域も異なることから、高速道路や栈橋上など作業領域が広範囲にわたる評価用映像 A~C を用いて主観評価を実施した。図 4.4-21 から図 4.4-23 に評価映像 A、評価映像 B、評価映像 C の 1 シーンを示す。1 つの評価映像は約 5 分であり、評価映像 A~C の 3 つの映像が順に繰り返し各表示端末に配信される。このとき、各評価映像に対してリアルタイムで AI 検出処理とマーキング表示（誘目表示）が実行される。これら評価用映像データは、個人情報保護の観点から、映像データを保存する前に、一般車両の通行する高速道路領域に対してぼかし処理を行った。



图 4.4-21 評価映像 A



图 4.4-22 評価映像 B



図 4.4-23 評価映像 C

主観評価アンケートの実施条件について説明する。現場関係者の主観評価期間は 2022 年 2 月 7 日～2 月 28 日として一定の評価期間を設けた。クラウドサーバにアクセス可能な時間は 9:00～18:00 とし、その期間は任意のタイミングでクラウドサーバにアクセスできるようにした。セキュリティの関係からクラウドサーバへのアクセス時にはログイン ID とパスワードを必要とし、関係者以外が配信映像を閲覧できないようにした。撮影実施期間において、工事関係者には事前に撮影を実施することを通知し、了承を得て評価を実施した。

次に主観評価アンケートについて説明する。図 4.4-24 から図 4.4-27 に実施したアンケートを示す。主観評価アンケートの始めには、評価者や評価環境によって結果に影響する可能性もあるため、利用環境に関する設問を設けた。

主観評価で対象とする建設現場関係者は、実際の利用が想定される発注者、元請けのメンバーとした。また、現場での役割・立場による違いによって、映像から確認したい内容や要求される性能が異なる場合が想定されるため、マネージャーや係員といった役職についても確認した。過去にリモートによる映像監視業務の経験がある場合、従来の監視システムとの比較によって結果に影響する可能性があるため、映像監視業務経験の有無やその頻度も合わせて確認した。

評価に使用する表示端末は、現場関係者が業務で利用する機種を基準に選定し、スマートフォン、タブレット、PC、大型モニターとした。また、各表示端末からクラウドサーバへのアクセスのしやすさを考慮して、Web ブラウザを用いてクラウドサーバにアクセスし、映像を表示する構成とした。各表示端末に標準で搭載される Web ブラウザを用いるため、各表示端末で専用のアプリケーションソフトが不要であり、汎用性が高くなるようにした。

遠隔から現場の監視が可能であることの検証が必要であるため、評価場所（接続場所）や、ネットワーク環境についても確認した。

主観評価アンケートでは、本課題実証ソリューションの効果の確認と共に、映像の品質や操作性といった機能性の検証も合わせて実施した。機能性検証の項目では、夜間撮影による映像品質低下の要因となるノイズや明るさに関わる設問を設けてその影響を確認した。各設問に対しては5段階で評価する選択肢を設け（一部設問は除く）、各設問に対してどの程度の効果や満足度が得られているか判断できるようにした。

本ソリューションの用途や有用性については自由回答欄を設け、今後どのように活用したいかについて調査を行った。最後にソリューションの活用において、その費用対効果について検討した。

[A-3] 広範囲映像のざらつき(ノイズ)について①～⑤から選択下さい

① 映像のざらつき(ノイズ)が認められず、気にならない
 ② 映像のざらつき(ノイズ)が認められるが、気にならない
 ③ 映像のざらつき(ノイズ)が認められ、わずかに気になる
 ④ 映像のざらつき(ノイズ)が認められ、気になる
 ⑤ 映像のざらつき(ノイズ)が認められ、非常に気になる

[A-4] 広範囲映像の明るさについて①～⑤から選択下さい

① 十分に満足 ② ほぼ満足 ③ 普通 ④ わずかに不満 ⑤ 非常に不満

[A-5] 広範囲映像の動きの滑らかさ(フレームレート)について①～⑤から選択下さい

① 動きのカクつきが認められず、気にならない
 ② 動きのカクつきが認められるが、気にならない
 ③ 動きのカクつきが認められ、わずかに気になる
 ④ 動きのカクつきが認められ、気になる
 ⑤ 動きのカクつきが認められ、非常に気になる

【操作性】

[A-6] システムを利用開始する際に広範囲映像が表示されるまでの操作性(容易に操作できるか)について①～⑤から選択下さい

① 非常によい ② よい ③ 普通 ④ 悪い ⑤ 非常に悪い

[A-7] 広範囲映像が表示されるまでの時間について①～⑤から選択下さい

① 遅延が認められず、気にならない
 ② 遅延が認められるが、気にならない
 ③ 遅延が認められ、わずかに気になる
 ④ 遅延が認められ、気になる
 ⑤ 遅延が認められ、非常に気になる

【AI 検出による誘目表示機能】

[A-8] “作業員”と“建設機械”の検出精度(作業員や建設機械の位置とマーキングの位置関係)について、それぞれ①～⑤から選択し、回答欄にご回答下さい

・作業員の AI 検出 回答欄[]
 ・建設機械の AI 検出 回答欄[]

① 検出漏れや誤検出が認められず、気にならない
 ② 検出漏れや誤検出が認められるが、気にならない
 ③ 検出漏れや誤検出が認められ、わずかに気になる
 ④ 検出漏れや誤検出が認められ、気になる
 ⑤ 検出漏れや誤検出が認められ、非常に気になる

※建設機械の検出は現状、「クレーン本体部分」「大型トラック」「油圧ショベル」を対象としています

[A-9] “作業員”と“建設機械”の検出の追従性能(動く作業員や建設機械の位置とマーキングの位置関係)について、それぞれ①～⑤から選択して回答欄にご回答下さい

・作業員の AI 検出 回答[]
 ・建設機械の AI 検出 回答[]

① マーキングのずれが認められず、気にならない
 ② マーキングのずれが認められるが、気にならない
 ③ マーキングのずれが認められ、わずかに気になる
 ④ マーキングのずれが認められ、気になる
 ⑤ マーキングのずれが認められ、非常に気になる

図 4.4-25 評価アンケート (2/4)

[B-6] 部分拡大映像の動きの滑らかさ(フレームレート)について①～⑤から選択下さい

- ① 動きのカクつきが認められず、気にならない
- ② 動きのカクつきが認められるが、気にならない
- ③ 動きのカクつきが認められ、わずかに気になる
- ④ 動きのカクつきが認められ、気になる
- ⑤ 動きのカクつきが認められ、非常に気になる

【操作性】

[B-7] 広範囲映像から指定箇所の部分拡大映像を表示するまでの操作性(容易に操作できるか)について①～⑤から選択下さい

- ① 非常によい
- ② よい
- ③ 普通
- ④ 悪い
- ⑤ 非常に悪い

[B-8] 部分拡大映像が表示されるまでの時間について①～⑤から選択下さい

- ① 遅延が認められず、気にならない
- ② 遅延が認められるが、気にならない
- ③ 遅延が認められ、わずかに気になる
- ④ 遅延が認められ、気になる
- ⑤ 遅延が認められ、非常に気になる

(C) 本映像監視システムについて、以下ご回答下さい

[C-1] 広範囲映像の指定箇所を拡大表示する(任意の箇所が確認できる)機能についてよいと思いますか。

- ① 非常によい
- ② よい
- ③ 普通
- ④ 悪い
- ⑤ 非常に悪い

[C-2] 本システムをどのような管理業務に使用したいですか。活用できそうな用途があればご回答下さい(複数回答可)

[]

[C-3] 本システムによってどのような効果が得られますか。管理強化や業務効率改善など、有用性についてご意見あればご記入下さい。

(現場に行く回数を減らせる、確認頻度を上げることができる など)

[]

[C-4] 本システムをどの程度の頻度で利用したいですか

- ① 毎日数回
- ② 毎日1回程度
- ③ 週に数回
- ④ 月に数回
- ⑤ それ以下 []

[C-5] 本システムについて要望があればご回答下さい

(改善してほしい箇所、このような機能がほしいなど)

[]

以上、アンケートへのご協力ありがとうございました。

図 4.4-27 評価アンケート (4/4)

(3) 実証結果及び考察

実施した主観評価アンケートの評価者および評価環境について説明する。評価した人数は45人で、評価者の所属・役職に関する評価者の構成比は図4.4-28のようになり、評価者の約40%が発注者、評価者の約60%が元請けであった。

評価の実施場所の構成比を図4.4-29に示す。発注者は主にNEXCO西日本の事務所やその他遠隔地から評価した場合が多く、元請けは主に清水建設現場事務所から接続して評価が行われている。いずれも建設現場から離れた遠隔地からクラウドサーバにアクセスし、建設現場の映像を確認するような環境で評価が行われている。

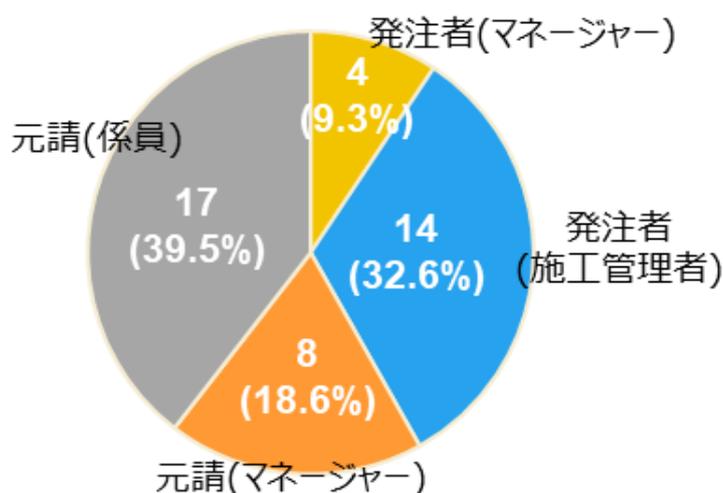


図4.4-28 評価者の構成比 (回答者43名)

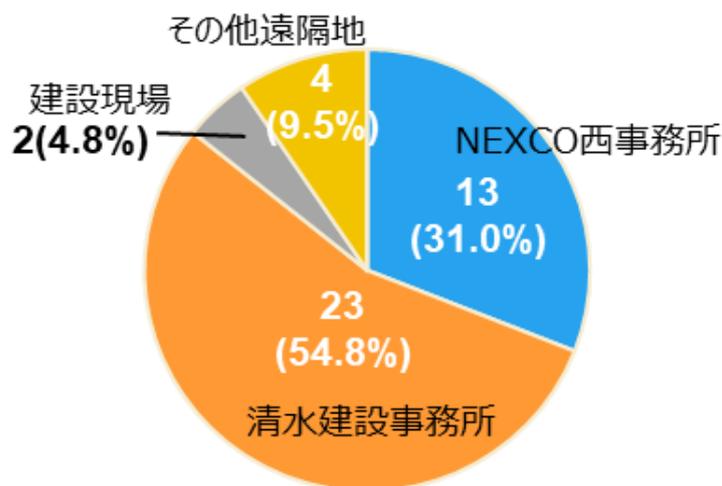


図4.4-29 評価を実施した場所 (回答者42名)

映像を用いたリモートでの管理業務の経験について、評価者全体の約30%が映像による

リモートでの管理業務経験があり、発注者と元請けともに経験の有無の割合は同程度であった。図 4.4-30 に映像による管理業務の頻度の評価結果を示す。半数以上が毎日扱っており、評価者の 15%が普段から高い頻度で従来の映像による管理を行っていることを確認した。

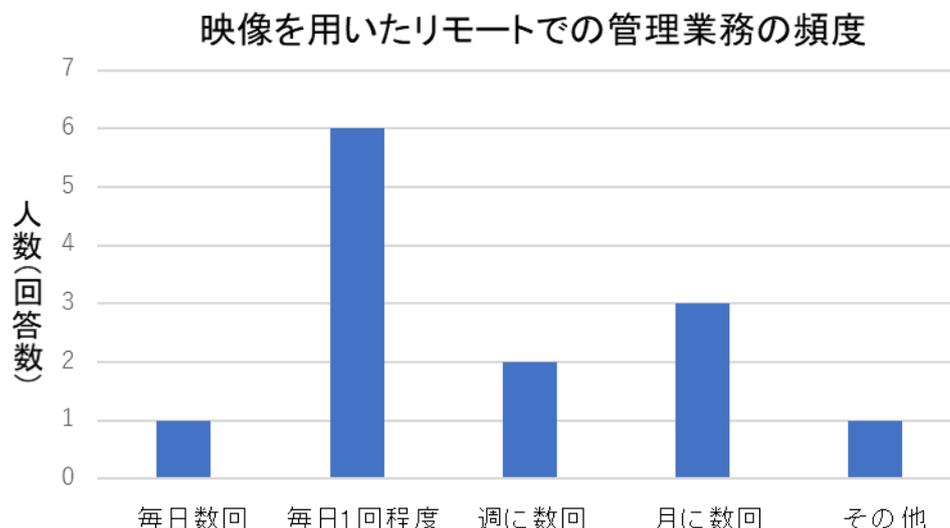


図 4.4-30 映像を用いたリモートでの管理業務の頻度の調査結果 (回答者 13名)

評価に使用した表示端末の評価結果を図 4.4-31 に示す。評価に使用したネットワーク環境の評価結果を図 4.4-32 に示す。使用した表示端末はタブレット、スマートフォンが約 75%を占め、多くがモバイル端末にて評価している。残り 25%は PC を用いた評価となり、大型モニタでの評価はなかった。モバイル端末での評価が多いため、図 4.4-32 に示すように、Wi-Fi や公衆回線でクラウドサーバに接続しての評価が多い。建設現場では、業務でタブレットやスマートフォンを利用することが多いため、本主観評価も通常の業務での利用環境に近い状態にて評価されているものと考えられる。

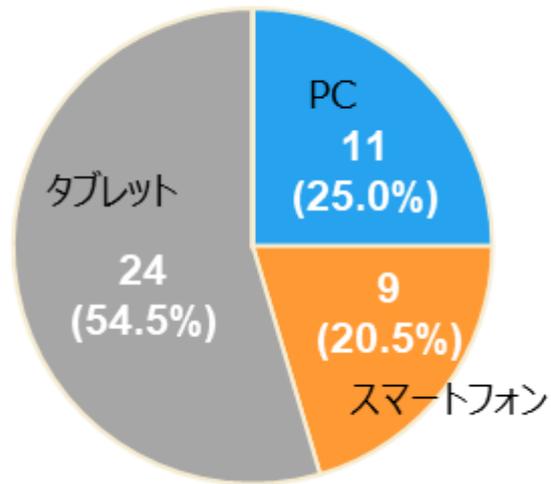


図 4.4-31 評価に使用した表示端末（回答者 44 名）

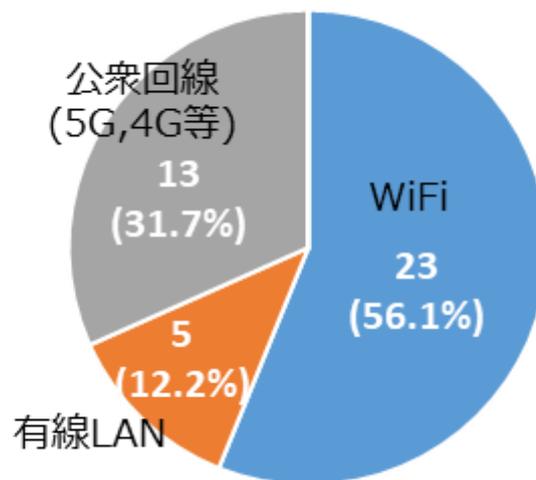


図 4.4-32 評価したネットワーク環境（回答者 41 名）

主観評価結果について説明する。ここでは主観評価項目のうち、本ソリューションの目的である部分拡大表示映像による監視の評価やAI検出を用いた誘目性の評価、本システムの今後の活用に関する検討を行い、映像品質や操作性など機能性に関する評価は、次の「4.4.1.2 機能検証」で行う。

部分拡大表示映像による所望領域の監視についての評価結果を説明する。本ソリューションの主な目的は、遠隔から複数の監視者がそれぞれ所望の領域を監視できるようにすることであり、広範囲に撮影した超高精細映像から任意箇所を切り出した部分拡大表示映像により監視できるシステムとした。このとき、部分拡大映像によって評価者が所望

する対象の監視ができることが必要である。本評価では、評価者が監視したい対象と、その対象を監視するための映像品質が得られているかどうかについて評価した。

主観評価アンケートの評価項目には、事前に建設現場関係者にヒアリングを行い、建設現場の安全管理の点で監視が必要と考えられるものを選択肢として設定することで、対象の抽出の漏れが少なくなるようにした。図 4.4-33 に、主観評価アンケートにおいて、部分拡大映像を用いて確認したいものに関する選択肢を示す。主観評価の際は、複数選択可として実施した。

<p>部分拡大映像で確認したいものに関する選択項目</p> <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> 保護具の状態(ヘルメット、チョッキ、ゴーグル、高所作業時の安全帯など)<input type="checkbox"/> 火元<input type="checkbox"/> 吊荷(揚重中)やその周辺<input type="checkbox"/> 建設機械の稼働状態、工事車両の運行状況<input type="checkbox"/> 転倒、飛散しそうなものはないか<input type="checkbox"/> 工事エリア外にはみ出たもの、揺れていて出そうなもの<input type="checkbox"/> 第三者、第三者車両の進入はないか<input type="checkbox"/> その他

図 4.4-33 主観評価アンケートにおける部分拡大映像で確認したいものの選択項目

図 4.4-34 に、部分拡大映像で確認したいものの調査結果を示す。部分拡大映像によって確認したいものは、「保護具の状態」や「吊荷(揚重中)や周辺」が最も多く、続いて「建設機械の稼働状態や工事車両の運行状況」や「転倒、飛散」、「工事エリア外への進入」などの結果となった。

図 4.4-35 に、図 4.4-34 を元請と発注者に分類した結果を示す。元請、発注者ともに大きな傾向の差はなかった。「保護具の状態」や「吊荷(揚重中)や周辺」は特に安全リスクの高い項目であり、常時注意して監視が必要となるため、回答者が多いと考えられる。これらを映像で監視する場合、作業員が身に着けている保護具の有無や着用状態など映像から細かな状態が識別できる映像品質が要求される。「建設機械の稼働状態、工事車両の運行状況」、「第三者の進入」は比較的大きなものが対象となり、保護具の識別に比べて分解能が低くても識別できるため、監視対象によって必要とされる映像品質に影響することが考えられる。

部分拡大映像からどのようなものを確認したいか

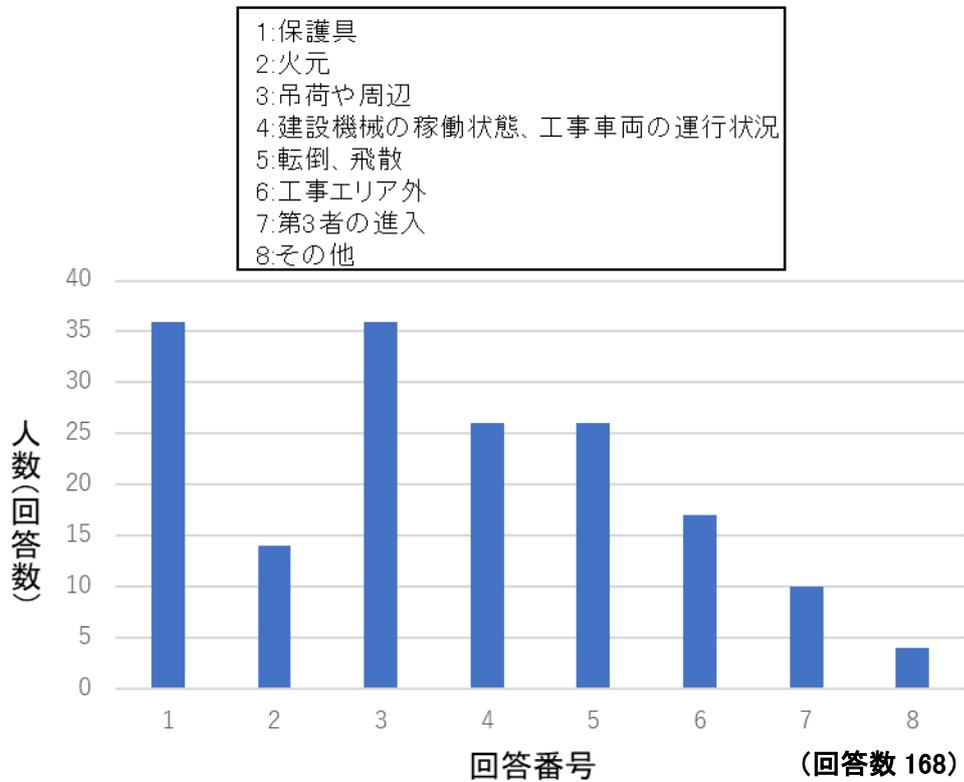


図 4.4-34 部分拡大映像から確認したいものの調査結果 (全体)

部分拡大映像からどのようなものを確認したいか

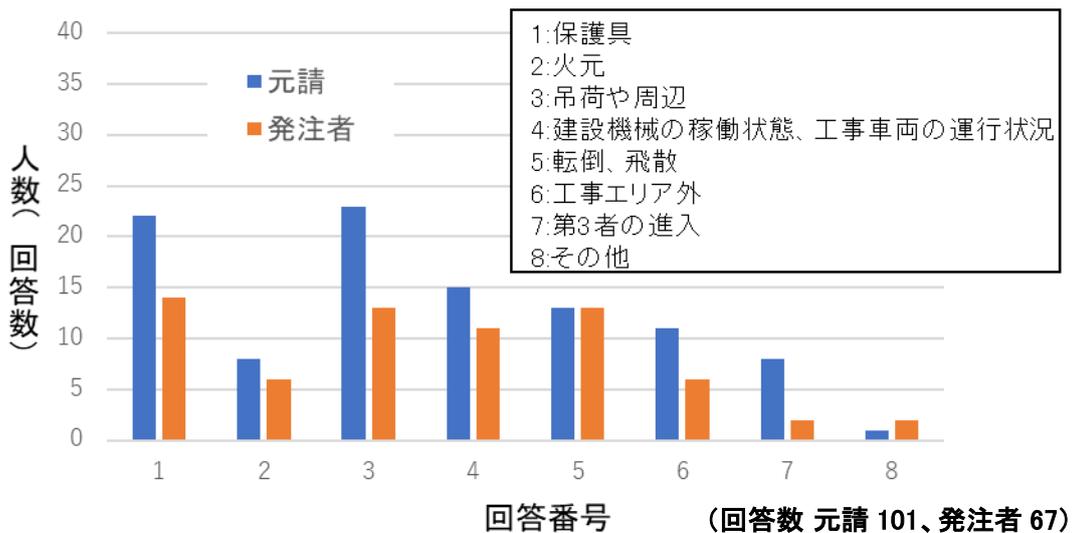


図 4.4-35 部分拡大映像から確認したいものの調査結果 (元請、発注者)

図 4.4-36 に、選択した対象を監視する際の部分拡大映像の品質の満足度について調査した結果を示す。評価者全体の約 56%が「ほぼ満足」以上、約 87%が「普通」以上の結果となり、本ソリューションによって目的とする対象の確認を行うことができる映像品質であることの確認ができた。約 13%が「わずかに不満」と回答しており、映像品質面ではさらなる改善要望があると言える。「十分に満足」の結果が約 11%と少ない原因は、夜間撮影のためノイズが多くざらついた表示となることや、照明の入射光や反射光によって部分的に飽和したり、影の暗い領域が生じたりするなどの映像品質低下が要因と考えられる。

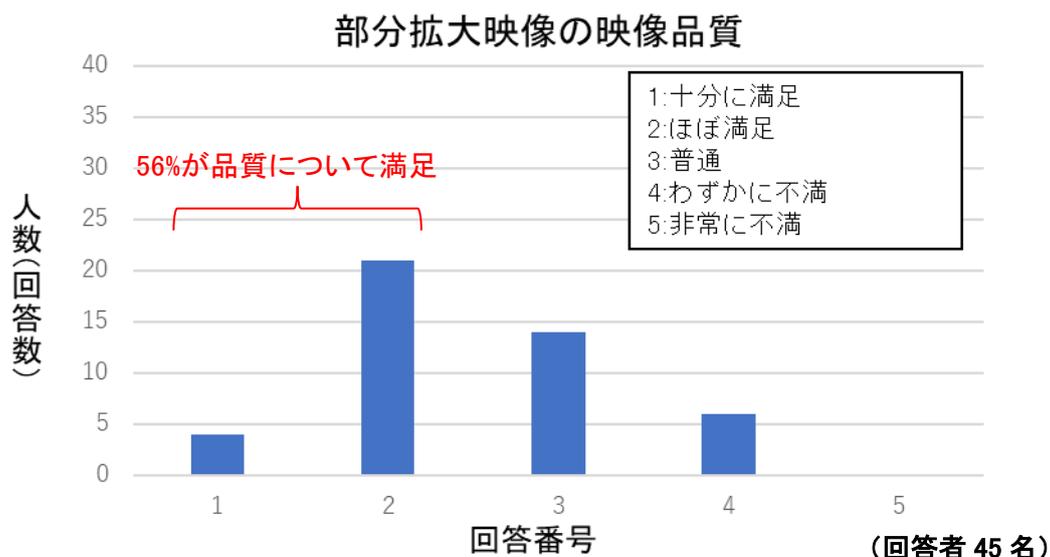


図 4.4-36 確認したいものに対する部分拡大映像品質の調査結果 (全体)

図 4.4-37 に、図 4.4-36 に示した結果を、元請と発注者に分類した結果を示す。表 4.4-3 に「ほぼ満足」以上、「普通」以上の評価結果の割合を示す。元請に対して発注者の方が満足度の低い傾向が確認された。部分拡大映像の品質について「わずかに不満」と回答した発注者の意見を図 4.4-38 に示す。土埃や溶接の状態、手元などとても詳細な確認をしたいという要望に対して十分な映像品質でなかったと考えられる。

本実証でのカメラ設置では、広範囲に撮影した映像から人の目や口の位置などの特徴が識別できる程度の分解能を有する設定としており、シミュレーションでは撮影距離 150m で 1 画素あたり 7.4mm 程度の分解能、撮影距離 200m で 1 画素あたり 10mm 程度の分解能である。しかしながら、土埃や溶接の状態、手元を監視する場合、さらに高い分解能が必要と考えられ、分解能を上げる方法としてレンズの焦点距離を長くすることが考えられる。ただし、レンズ焦点距離を長くすると、撮影範囲が狭くなるため、必要とされる撮影範囲と監視対象に必要な分解能のバランスを考慮して、カメラの設置やレンズの焦点距離などのシステム仕様を決める必要がある。

また、鮮明さなどの映像品質は、分解能以外にもレンズの解像性能、動画データの圧縮処理の影響、センサの ISO 感度調整によるノイズの影響など様々な要因によって変化

する。特に主観評価に使用した映像は、夜間に撮影されているため、日中の明るい外光環境下の撮影に比べて映像品質が低下する。夜間の映像品質を向上させる方法として、建設現場の照明を増設して外光条件を改善する方法や、画像処理によりノイズを除去したり、コントラストを調整したりして視認性の高い映像を生成する方法が考えられる。

また、動きボケが許容される範囲で、カメラのシャッター速度を 1/50sec から 1/30sec とし、露光時間（カメラのセンサに光を取り込む時間）を長くし、ISO 感度の設定を下げてノイズを低減する方法が考えられる。

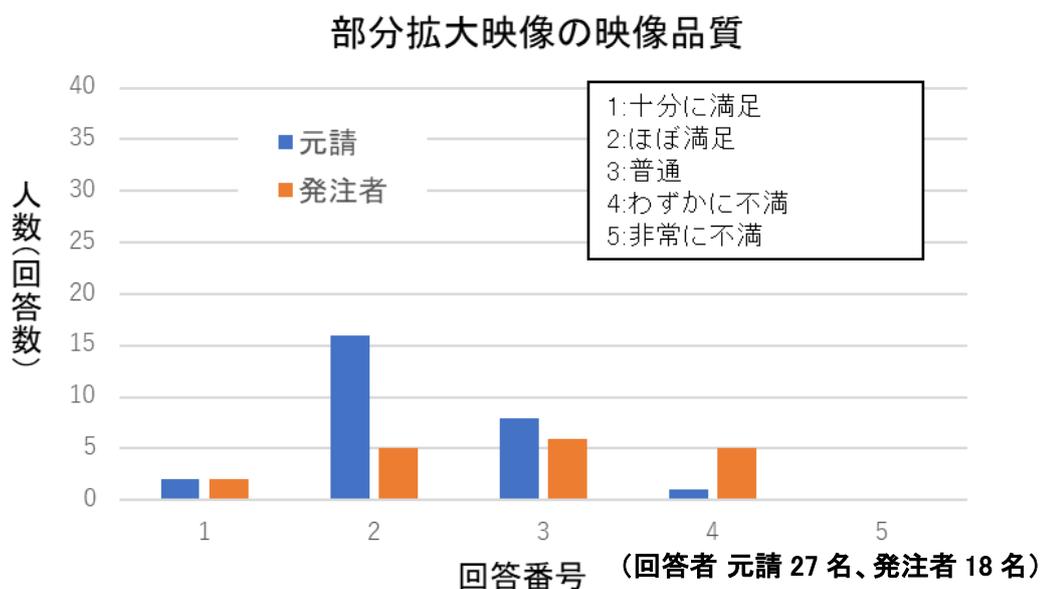


図 4.4-37 確認したいものに対する部分拡大映像品質の調査結果（元請、発注者）

表 4.4-3

	「ほぼ満足」以上	「普通」以上
全体	56%	87%
元請	67%	96%
発注者	39%	72%

「わずかに不満」の回答に関する意見

- ・土埃や溶接の状況を確認出来る画質ではないと思う
- ・作業員の手元や足元が確認しづらい
- ・拡大した時のサイズが固定であり、任意のサイズに出来ないのが使いづらい

図 4.4-38 部分拡大映像に関して「わずかに不満」の場合の調査結果

次に、本ソリューションの目的とする、広範囲に撮影した超高精細映像から任意箇所領域の映像を切り出した部分拡大表示映像により、遠隔から所望の領域を監視できるようにする機能の効果について評価した。図 4.4-39 に、指定箇所を切り出して見たいところを確認する機能に関する有効性の調査結果を示す。「よい」以上は評価者全体の約 96%との結果が得られた。図 4.4-40 に、元請と発注者それぞれの主観評価結果を示す。

元請と発注者ともに「よい」以上の評価が多く得られ、元請では約 33%、発注者では約 44%が「非常によい」と回答しており、高い評価が得られた。広範囲映像から評価者が見たい箇所を基準に切り出して表示することで、遠隔から複数の評価者がそれぞれの所望領域を監視できることについて有効性が確認できた。

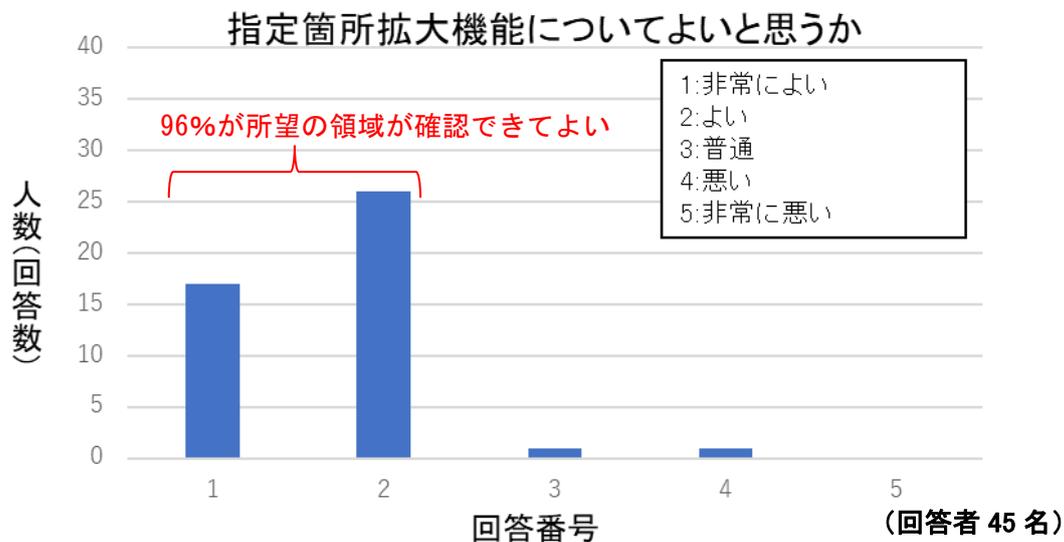


図 4.4-39 指定箇所の拡大機能の有効性に関する調査結果 (全体)

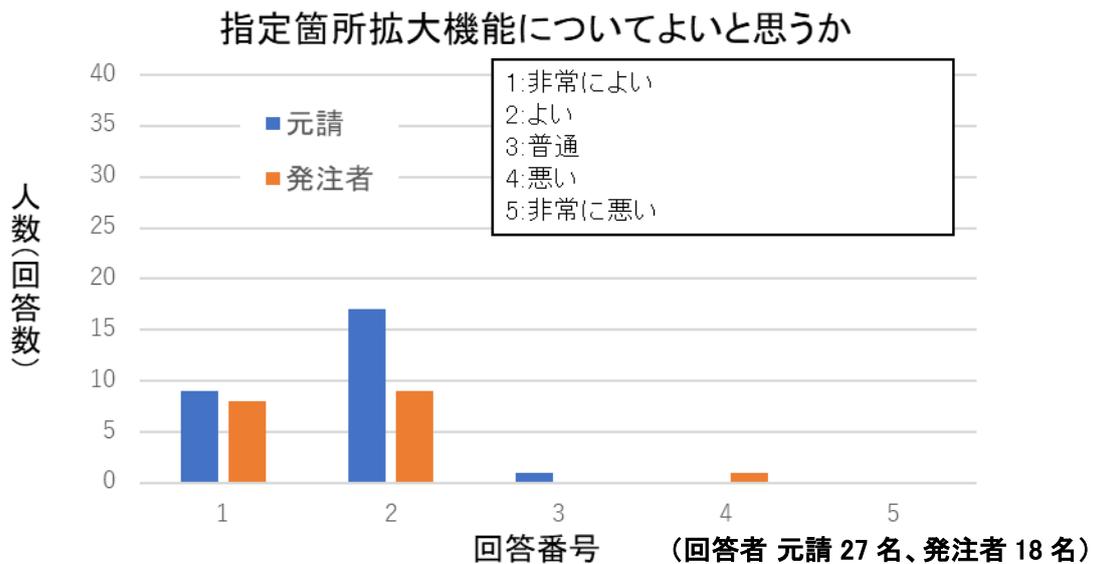


図 4.4-40 指定箇所の拡大機能の有効性に関する調査結果（元請、発注者別）

次に、作業員と建設機械への AI 検出によるマーキング表示の評価結果について説明する。本ソリューションでは、建設現場を広範囲に鮮明な映像によって撮影できることが特長であるが、広範囲になるほど作業員や建設機械が小さく撮影されるため、どこで作業が行われているか把握し難くなる。そのため、作業員と建設機械の位置を AI 検出し、マーキング表示することで、作業領域を認識しやすくすることを目的としている。

図 4.4-41 に AI 検出によって作業員や建設機械を検出し、マーキング表示による誘目の効果について調査した結果を示す。評価者全体の約 91% が認識しやすいとの結果が得られ、その効果が確認できた。特にモバイル端末で表示する場合、表示画面サイズが小さく、広範囲撮影映像の中で人や建設機械も小さく表示されるため、マーキング表示することでどこに位置して作業しているかが分かりやすくなると考えられる。

一方で、「作業員のマーキングで人がつぶれて作業状況が確認しづらい」といったコメントもあり、広範囲映像を用いて作業状況を確認する際などの状況に応じて、マーキング表示の ON/OFF を切り替える機能を設けることも考えられる。

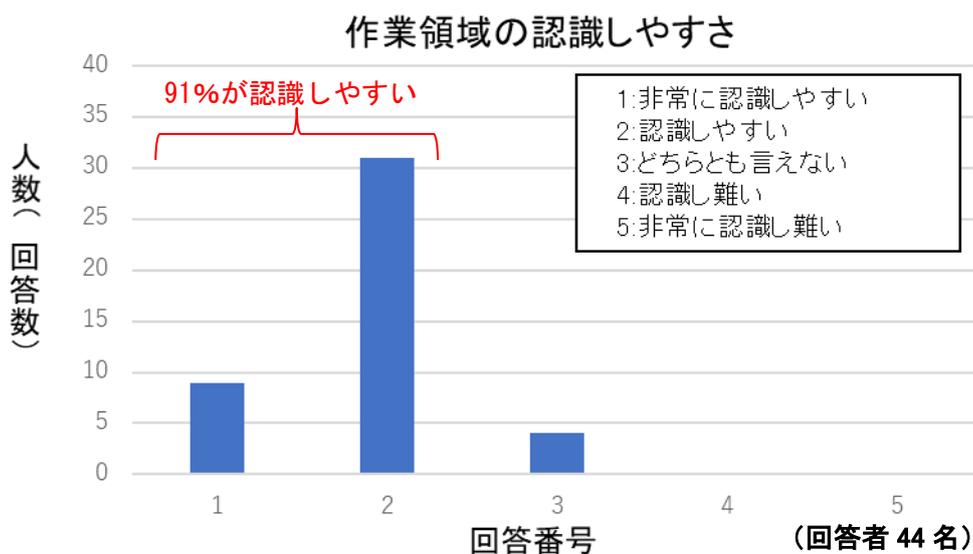


図 4.4-41 AI 検出によるマーキング表示の有効性に関する調査結果

本課題実証ソリューションの効果や有用性について、評価者から寄せられた意見を整理した。図 4.4-42 に評価者の意見を整理したものを示す。分類すると、安全管理の強化、管理業務効率化、緊急時の対応が挙げられる。

安全管理の強化の面では、複数人同時に遠隔から現場の状況をリアルタイムに確認できることで、これまで以上に頻度を上げて現場の確認できるといった効果が得られる。また、普段とは異なる目線にて俯瞰的に建設現場を監視できることや、複数人の目で監視できるといった効果が得られる。

管理業務効率化の面では、遠隔から監視を行うことで、直接現場に行って巡視する回数を減らすことで移動にかかる時間を削減したり、遠隔から現場の状況を確認しながら指示を出したり、事務所から離れた建設現場の状況を確認できるなど管理業務の効率化の効果が得られる。

緊急時の対応では、第三者の進入など想定外のことが発生した場合に早期に気付くことや、何か問題が生じた際に遠隔からすぐに現場の状況を把握することができること、映像として残すことで検証データとして活用する効果が得られる。

<p><安全管理強化></p> <ul style="list-style-type: none"> ・安全面の管理を強化することができる ・多くの目で現場をフォローできる ・目線と異なる角度から俯瞰的に確認できる <p><管理業務効率化></p> <ul style="list-style-type: none"> ・巡視頻度の削減、業務の効率化ができる ・現場に行く回数が減らせるので業務効率化は図れる ・事務所から現場の動きを把握できる ・事務所から経験ある社員が指示や確認ができる <p><緊急時の対応></p> <ul style="list-style-type: none"> ・第三者(車両)の侵入を早期に気づくことができる ・緊急に現場を確認する際に役立つ ・トラブル時(事故、第三者の侵入等)の検証
--

図 4.4-42 本ソリューションの効果や有用性に関する調査結果

図 4.4-43 に、本ソリューションの今後の活用について、評価者の意見を整理した結果を示す。今後の活用について、安全管理や作業管理への用途が多い結果となった。

安全管理用途では、建設現場内で、安全帯の使用状態を監視する安全帯監視員が必要であり、本システムを用いて遠隔からその監視業務を行う用途の意見があった。超高精細映像を用いた本システムを用いることで、現場に行かずに遠隔から安全帯の着用状態を監視できることが期待されている。

他の用途として、立ち入り禁止区域に進入などの問題が生じた場合を監視するといった用途があった。特に、映像上で設定した立ち入り禁止区域に対して、人や建設機械、一般車両の進入を検知し通知するような機能が期待されている。このような用途では、すぐに現場へフィードバックすることが必要であるため、監視機能の高度化に加えて現場に警告音を鳴らしたり、現場で作業している担当者のスマートフォンなどの端末に通知を出したりするなど、現場と連動した機能が必要になると考えられる。

本ソリューションの用途として、作業管理の用途に関する意見も多かった。具体的な活用としては、建設作業の進捗確認や、作業員や建設機械の位置や数、社内など関係者への状況説明などの意見が挙げられた。特に、遠隔から建設作業の進捗確認ができる点で非常に効果が大いとの意見が多かった。これらは、鮮明な広範囲映像による効果が大いと考えられる。

本課題実証では、広範囲映像の一部を切り出した部分拡大映像によって所望の領域を監視できることを目的として検証を進めてきたが、広範囲映像に関する評価も高かった。本ソリューションのように、建設現場の“広範囲映像”と“部分拡大映像”の2つの映像から建設現場の状況を確認できることの効果は高いと考えられる。評価者からは、広範囲映像と部分拡大映像を切り替えながら見たいといった意見もあり、建設現場全体を把握しつつ、細部も確認できることでより現場の状況を把握する効果が期待されていると考えられる。

<p><安全管理></p> <ul style="list-style-type: none">・安全帯使用状況確認・安全巡視、安全帯監視員の代替・不安全行動等による作業員の動きについてリアルタイムの指導・不安性行動の確認(安全帯監視、体調不調の予見など)・無断立ち入り禁止箇所に立ち入りがあった時警報・緊急時の現場状況確認・危険予測・不具合の発見 <p><作業管理></p> <ul style="list-style-type: none">・作業進捗確認・作業員、機械等の数量確認・作業員の配置等の確認、監視員の有無・機械や人員の稼働状況確認・社内会議等での活用・品質管理、作業環境管理、周辺環境管理
--

図 4.4-43 本ソリューションの活用（用途）に関する調査結果

次に、本ソリューションを建設現場に導入して運用した場合に、どの程度の頻度で利用したいかについて調査した結果を図 4.4-44 に、元請と発注者ごとに分類した評価結果を図 4.4-45 に示す。評価者全体で約 88%が毎日利用したいとの回答であり、元請、発注者ともに毎日高い頻度で利用したいとの結果が得られており、本ソリューションの有効性が確認できた。

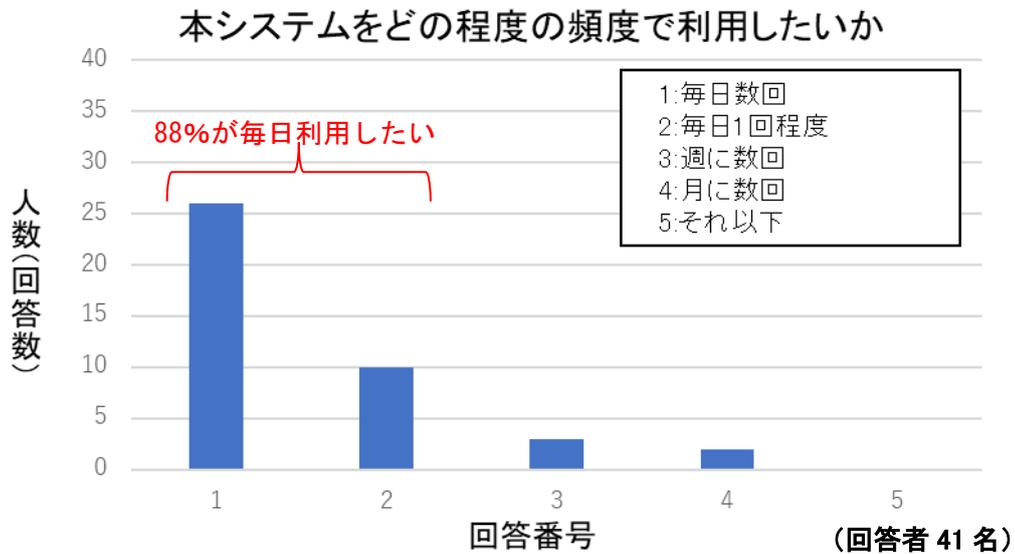


図 4.4-44 本ソリューション運用時の利用頻度に関する調査結果（全体）

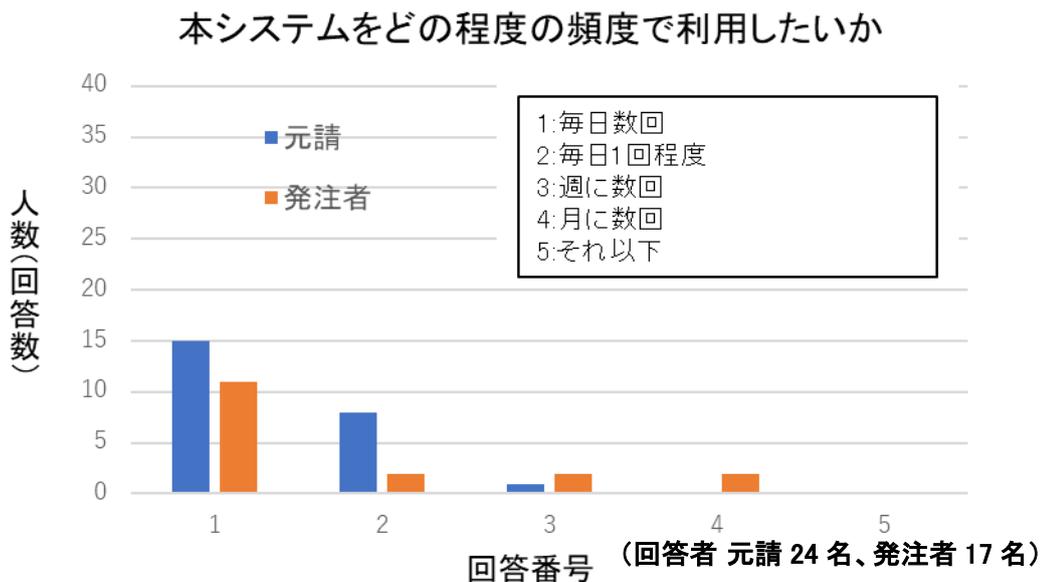


図 4.4-45 本ソリューション運用時の利用頻度に関する調査結果（元請、発注者別）

次に、本ソリューションを導入した場合に期待される監視業務の効率化について説明する。

遠隔から所望の監視ができることによって、従来のように直接建設現場に行って実施していた管理業務を遠隔から行える可能性がある。この場合、現場に行く回数を削減できる効果と確認する人数や頻度を上げて安全管理を強化する効果が考えられる。それぞれについて、以下に概要を説明する。

① 現場に行く回数を削減する

現場に行く回数を減らすことによって、事務所と現場間の移動時間削減（現場によっては往復1時間以上かかる場合もあり、重要）・業務の効率化、移動にかかる燃料費およびCO2排出量の削減、移動に使用する車両の調整が不要、他業務との調整が容易になるといった効果が考えられる。

さらに、映像視点の変更（複数カメラによる映像をユーザが任意に切り替え、またはカメラの首振りにより別方向の映像を確認など）や映像鮮明度の向上ができれば、高速道路の夜間規制開始判断に必要な交通量など現場周辺状況を確認でき、情報の迅速な共有により現場判断の支援になることができるといった付加価値・効果も期待できる。

② 場所や時間に捉われず、監視頻度を上げる

遠隔での監視回数を増やすことでトータルでの効果が高まる（効果については①と同様）。例えば、安全管理強化のため、現場巡回する人数や巡回頻度を増やす場合には、人や時間もかかることになり、その分の費用も増加するが、本ソリューションにより費用を抑制することが可能となる。

次に、現場に行かずに遠隔から監視することで現場に行く回数を減らした場合の費用対効果について検討した。条件として以下のように設定した。

（設定条件）

- ・建設現場に行く頻度として、発注者(マネージャー)は週1回、発注者(施工管理者)は1回/日とし、元請(マネージャー)は2回/日、元請(係員)は4回/日とする。
- ・発注者、元請の各作業者の1日あたりの費用は業務時間約8時間に該当するものとする。
- ・従来の現場巡回時間と本ソリューションでの監視時間は同じとし、事務所から現場に移動する時間を削減できるものとする。
- ・発注者が事務所と現場間の移動や準備にかかる時間は往復で約1時間、元請が事務所と現場間の移動や準備にかかる時間は往復で約0.5時間とする。
- ・監視人員はそれぞれ2人とする。
- ・月に4週、稼働日は22日/月として、年間の削減費用を算出する。

表4.4-4に削減費用を示す。単に遠隔から監視業務を行える場合には年間で約17,700,000円の削減効果となる。このとき、システムの導入費用を約5,000万円、システムのメンテナンス費用400万円/年とした場合、システムコストの方が多くなり、費用対効果が得られない。現状はシステムコストが高額になるため、費用対効果が得られにくいですが、今後低コスト化によりシステムコストが1,000万円程度になれば、費用対効果が得られるようになると考えられる。

表 4.4-4 現場に行く回数を削減した場合の削減費用見込み

巡回者		費用 [人・日]	現場巡回 頻度	往復時間	人数	削減費用/年	備考
発注者	マネージャー	100,000	1 回/週	1 時間	2 人	1,200,000	4 週/月
	施工管理者	50,000	1 回/日	1 時間	2 人	3,300,000	稼働日数 22 日/月
元請	マネージャー	100,000	2 回/日	0.5 時間	2 人	6,600,000	稼働日数 22 日/月
	係員	50,000	4 回/日	0.5 時間	2 人	6,600,000	稼働日数 22 日/月
合計						17,700,000	

映像処理（AI 処理）の高度化が行われて、例えば安全带などの装備状態を自動で判定し、問題がある場合に現場作業員へ通知するような自動フィードバック機能を実装した場合、安全带監視員のような現場常駐者を削減できる可能性がある。

映像処理を高度化したシステムによって、現場班員削減と安全監視員の増員削減がなされた場合に、以下のようにその効果を試算することができる（ここでは映像処理によって計 4 名分の監視効果が得られるものとする）。

- ・現場班員(安全带監視員)の費用削減効果：

$$1,000,000 \text{ 円/月} \times 12 \text{ か月} = 12,000,000 \text{ 円}$$

- ・複数人による安全監視員の増加（3 人分）分の費用削減効果：

$$1,000,000 \text{ 円/月} \times 12 \text{ か月} \times 3 \text{ 人} = 36,000,000 \text{ 円}$$

現場に行く回数を削減した場合の効果と合わせると 65,700,000 円の効果を得ることができ、システム導入価格に対して費用対効果が得られることが分かる。このように、十分な費用対効果を得るためには、システムの低コスト化と映像処理の高度化による価値の向上が必要になると考えられる。

4.4.1.2 機能検証

本ソリューションの各機能について評価・検証を行った。AI 検出に関して、検出性能や検出処理時間について評価を行い、表示端末で確認する配信映像に関して、映像の表示範囲や操作性および映像品質について評価した。超高精細 8K カメラから検出処理の映像処理を実行するクラウドサーバへの伝送について、ローカル 5G とその他の通信システムによるスループットの測定と伝送可能な品質の映像を比較評価し、ローカル 5G の有効性に関して検証を行った。本課題実証試験で評価・検証するため、表 4.4-4 に示した 6 項目を設定した。各項目の詳細は以下の通りである。

表 4.4-5 評価項目と評価方法

	評価項目	評価方法
1	作業員、建設機械の検出性能評価	・再現率と適合率評価、主観評価
2	検出処理時間、フレームレートの評価	・検出処理時間の測定、主観評価
3	撮影範囲、表示範囲の評価	・表示範囲に関する主観評価
4	表示画面の操作性評価	・操作性に関する主観評価
5	映像品質の評価	・映像品質の主観評価
6	ローカル 5G の有効性評価 (その他通信システムとの比較)	・スループット測定 ・映像品質の主観評価

(1) 評価・検証項目

1. 作業員、建設機械の検出性能評価

検出対象とする作業員や建設機械（クレーン本体部、油圧ショベル、大型トラック）について、検出精度に関する評価を行った。検出精度では指標を設けて定量的に評価した。検出精度の評価では、特定のカメラ配置、撮影条件だけでなく、カメラ位置の変更や日中、夜間含めた外光条件も考慮した評価方法を検討した。また、今後の運用を想定した場合の検出性能について評価を行った。

2. 検出処理時間、フレームレートの評価

クラウドサーバでの 8K 映像のリアルタイム AI 検出処理において、処理時間に関する評価を行った。本実証では 8K30fps の映像データをリアルタイムで処理することを目標とし、AI 検出処理後に出力されるフレームレートや 1 フレームあたりの処理時間について評価した。また、AI 検出後に出力する表示端末への配信映像データについて、表示端末での動きについて評価した。

3. 撮影範囲、表示範囲の評価

建設現場での撮影範囲の設定に関して検討した。また、表示端末に表示される広範囲映像の範囲（撮影範囲）および部分拡大映像範囲について、評価を行った。

4. 表示画面の操作性評価

本課題実証ソリューションにおける、表示端末での操作性について評価した。広範囲映像表示画面と部分拡大表示画面の 2 種があるため、2 つの表示画面それぞれの操作性について評価した。

5. 映像品質の評価

本課題実証ソリューションにおける、表示端末での映像品質について評価した。表示端末に表示される映像には、広範囲映像と部分拡大映像の 2 種があるため、2 つの映像表示それぞれの映像品質について評した。

6. ローカル 5G の有効性評価（その他通信システムとの比較）

8K カメラで撮影した 8K ストリーミング映像について、ローカル 5G を用いて映像伝送した場合と、他の通信を用いて映像伝送した場合と比較検証することでローカル 5G の有効性について評価した。ローカル 5G との比較検証を行う通信システムとして、一般に広く普及している、商用キャリア網、Wi-Fi、有線 LAN（Ethernet）について検証を行う。評価では、ローカル 5G とその他の通信システムによるスループットの測定と伝送可能な品質の映像について比較評価した。

(2) 評価・検証方法

表 4.4.1.2-1 に示した各評価方法について説明する。

1. 作業員、建設機械の検出性能評価

検出精度の評価の指標として、適合率と再現率を用いた評価を行う。適合率と再現率は以下のような式によって示すことができる。

$$\text{適合率} = (\text{正解検出数}) / (\text{総検出数})$$

$$\text{再現率} = (\text{正解検出数}) / (\text{総正解(対象)数})$$

適合率は、AI 検出処理によって検出された対象のうち、正しく検出された結果の割合であり、検出結果の正しさを示す。誤検出率は、1-適合率で表現することができ、適合率が高いほど誤検出が少ないことがいえる。再現率は、全体の正解数に対して検出された正解数の割合であり、どれだけ正解を検出できたかを示す。再現率が高いほど、どれだけ検出

対象を見逃さないで検出できたかを示す。適合率と再現率はトレードオフの関係があり、例えば、検出対象を見逃さないことを優先とする場合、誤検出が増える傾向が生じる。用途に応じて、検出対象の見逃しがないよう再現率を高めることを優先とした設定とするか、誤検出が少なくなるよう適合率を高めることを優先とした設定をするかを考える必要がある。

作業員や建設機械の検出性能評価では、カメラ設置条件が変わることも考慮し、法面に設置した2つの8Kカメラ（カメラ1とカメラ2）の映像や、カメラ1、カメラ2と異なる位置で撮影した8K映像を用いて評価を行い、カメラ設置位置が変わる場合も考慮した検出性能評価とした。また、異なる外光条件での検出性能も評価するために、日中や夜間など外光条件の8K映像も用いて評価を行った。検出性能の評価では、このように撮影角度や外光条件の異なる映像から静止画をランダムに197枚抽出し、抽出した静止画に対して正解データと照合して検出精度の評価を行った。評価用の静止画には、作業員、クレーン本体部分、油圧ショベル、大型トラックの検出対象が合計2135サンプル撮影されており、AI検出処理による検出精度を検証した。

検出精度を算出するためには、画像のどこに作業員や建設機械が撮影されているかを示す正解データを準備する必要がある。正解データとして、評価用として抽出した静止画サンプルに対して、人が目視で検出対象についてマーキングしたデータを作製して用いた。

次に、正解データに対して、AI検出処理によって検出した結果を照合して、検出結果が正しく検出できているかについて検証を行った。正解データの検出対象位置とAI検出によって検出された位置との照合において、手動で作成した正解データでの検出位置とAI検出による検出位置がほぼ一致していても、それぞれの検出範囲に差が生じる場合があるため、検出範囲に一定の重複領域が得られる場合には正しい位置で検出されたとみなすことにした。図4.4-46に正誤判定方法の概要を示す。重複領域の判定閾値は検出結果の目視確認により設定した。

検出結果の正誤判定は、AI検出処理による検出位置と正解データの位置から図4.4-46に示す条件となっているか自動で判定するツールを作成して評価を行った。

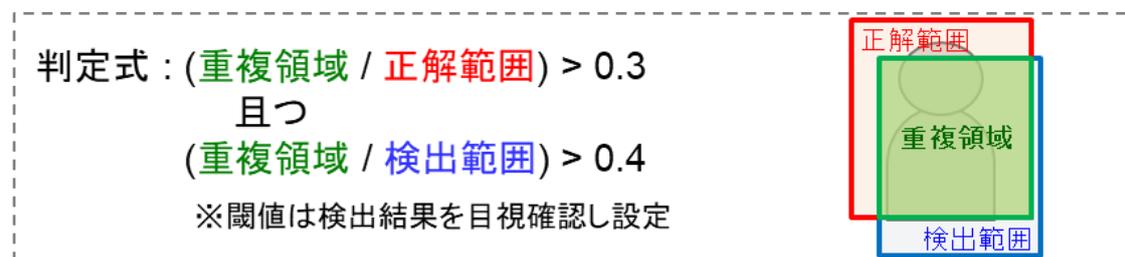


図 4.4-46 正誤判定方法

検出精度評価に用いた画像の例を図4.4-47、図4.4-48に示す。



図 4.4-47 検出精度の評価用画像例

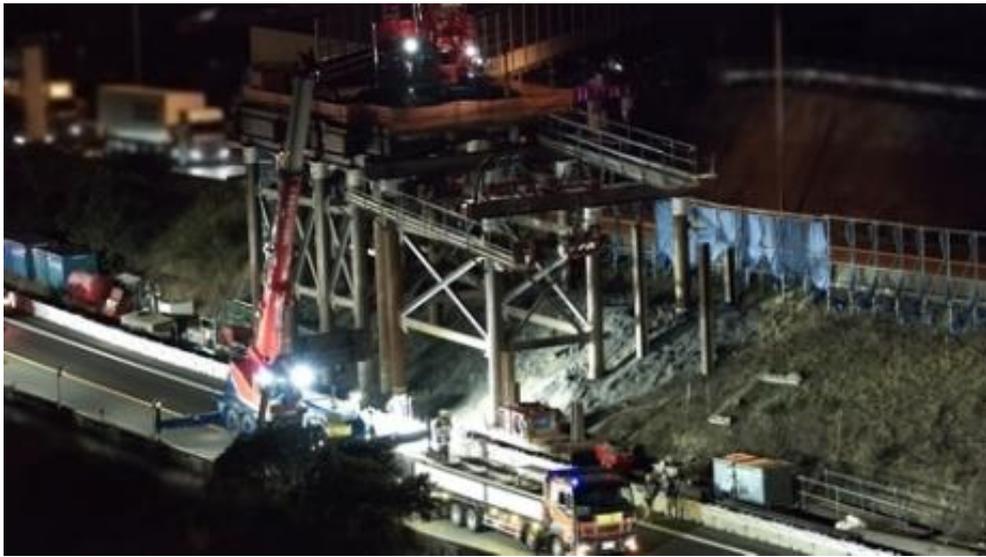


図 4.4-48 検出精度の評価用画像例

2. 検出処理時間、フレームレートの評価

8K30fpsの映像入力において、クラウドサーバでのAI検出処理によるフレームレートを評価した。また、クラウドサーバ上でのAI検出処理にかかる1フレームあたりの処理時間を計測した。また、AI検出処理結果を基に誘目のマーキング表示を行った表示端末への配信映像のフレームレートについて確認すると共に、表示端末に表示された映像について、その動きの滑らかさに関して主観評価によって検証した。主観評価は4.4.1.1節の効果検証で説明したように、建設現場関係者を評価者として行い、その結果について評価した。

3. 撮影範囲、表示範囲の評価

本課題実証で設置した8Kカメラの撮影範囲や分解能について検討した。また、図4.4-49に示すような表示端末に表示される広範囲映像の範囲と図4.4-50と図4.4-51に示すような8K映像から2K領域を切り出した部分拡大映像の範囲について、建設現場関係者による主観評価によって評価した。その評価結果とカメラ設置条件について考察した。



図 4.4-49 広範囲映像の範囲



図 4.4-50 部分拡大映像範囲（領域 A）



図 4.4-51 部分拡大映像範囲（領域 B）

4. 表示画面の操作性評価

本ソリューションの表示端末では、Web ブラウザを用いてクラウドサーバにアクセスして撮影された映像を表示させる。クラウドサーバアクセス時に表示される広範囲映像から部分拡大映像の表示切り替えについては、簡単な操作となるように、広範囲映像の表示画面内で拡大表示したい箇所 1 点を指定することで部分拡大映像表示に切り替えを行うことができるようにしている。スマートフォンやタブレットの場合は、広範囲映像の表示画面上でタッチ入力することで表示が切り替わり、PC の場合は広範囲映像の表示画面上でマウ

スのクリック入力を実行することで表示が切り替わる。クラウドサーバ側では画面上で指定された座標データを基準に 2K の切り出し範囲を設定し、8K 映像から 2K 範囲を切り出した部分拡大映像を生成し、表示端末への配信映像を切り替える。表示の切り替えの操作性や表示が切り替わる際の時間について、建設現場関係者による主観評価によって評した。主観評価では、5 段階評価によって有効性を確認し、広範囲映像表示画面と部分拡大表示画面についてそれぞれ評価を行った。

5. 映像品質の評価

表示端末に配信される映像品質について評価した。評価は、広範囲映像と部分拡大映像の 2 つの映像において、現場関係者による主観評価によって行った。本課題実証では夜間工事を対象とするため、日中に比べて映像品質の低下が確認されるため、映像品質に関する主観評価アンケートには、夜間撮影での映像品質低下の要因となるノイズの影響や明るさに関する設問を設けて評価した。

夜間の撮影映像に関する映像品質低下について説明する。図 4.4-52 に日中に撮影した 8K 映像から抽出した画像、図 4.4-53 に夜間に撮影した 8K 映像から抽出した画像を示す。それぞれの 8K 画像から同じ領域 A を切り出した画像を図 4.4-54 に示す。また、それぞれの 8K 画像から人の位置する領域 B を切り出した画像を図 4.4-55 に示す。広範囲に撮影した映像を縮小表示して見た場合は差が分かり難いが、拡大して比較した場合に、日中の撮影画像に対して夜間に撮影した画像の方のノイズが多く、全体がざらざらした状態で撮影されていることが分かる。これは夜間の方が暗いため、カメラの ISO 感度を上げて撮影することが必要であり、それによってノイズが増えて映像品質が低下するためである。また、図 4.4-53 の照明周辺が局所的に明るく撮影されているように、夜間撮影では照明光によって局所的に明るく撮影されて飽和したり、照明の当たらない領域が暗く撮影されて黒潰れしたりするので、照明光による明るさの変化の影響も受けやすい。主観評価ではこのようなノイズによるざらざらした映像や明るさの影響について評価し、運用上課題とならないか検討した。



図 4.4-52 8K 撮影画像（日中）

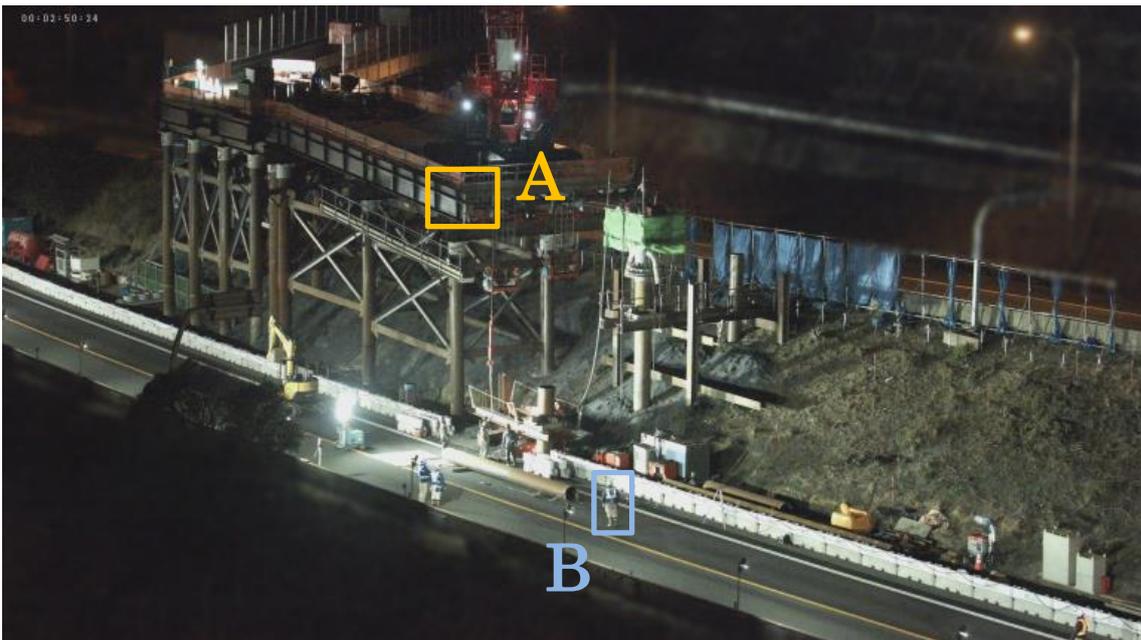


図 4.4-53 8K 撮影画像（夜間）



図 4.4-54 日中、夜間の切り出し画像比較（領域 A）

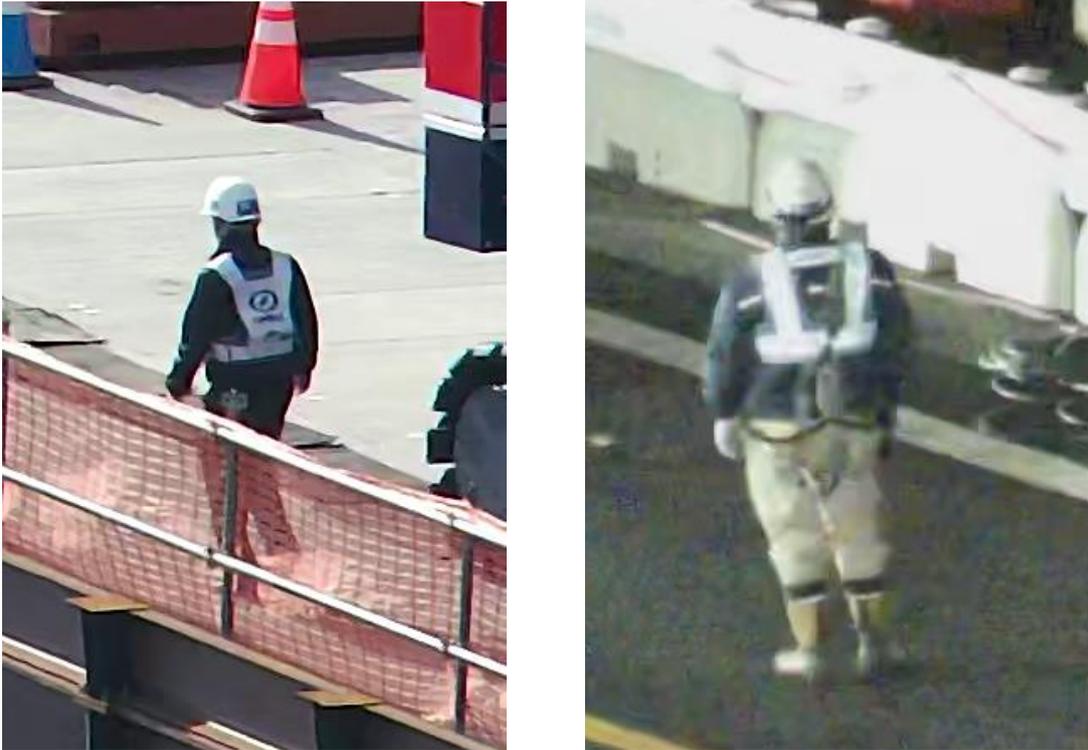


図 4.4-55 日中、夜間の切り出し画像比較（領域 B）

6. ローカル 5G の有効性評価（その他通信システムとの比較）

超高精細カメラから映像の検出処理を実行するクラウドサーバへの伝送について、ローカル 5G と商用キャリア網、Wi-Fi、有線 LAN によって伝送可能な品質の映像データを評価し、同等品質の映像における検出性能について比較検証した。検証では実際に商用キャリア網、Wi-Fi、有線 LAN の環境下で伝送可能な実効スループットに対応した品質の映像データを用いて比較検討を行った。

各通信システムでのスループットの測定は、図 4.4-56、図 4.4-57、図 4.4-58、図 4.4-59 に示す構成で行った。

なお、ローカル 5G、商用キャリア網の環境下でのスループットについては、図 4.4-56、図 4.4-57 に示す通り、実証現場の中継 PC をクライアント PC として使い、中継 PC からクラウドサーバまでの間で測定した TCP スループットを用いるものとする。

有線 LAN の環境下でのスループットについては、図 4.4-58 に示す通り、現場のインターネットの終端装置である ONU 近傍に設置した中継 PC をクライアント PC として使い、中継 PC からクラウドサーバまでの間で測定した TCP スループットを用いるものとする。

Wi-Fi の環境下でのスループットについては、図 4.4-59 に示す通り、Wi-Fi 機器の実証現場への設置が困難であるため、インターネット網の影響を排除し、中継 PC をクライアント PC として使い、中継 PC からローカルサーバ（後述する iperf3 が実行可能な PC）までの間で測定した TCP スループットを用いるものとする。

なお、各機器間の TCP スループットの測定には、クライアント、サーバ間のスループット測定が可能なソフトウェアである iperf3 を用いた。

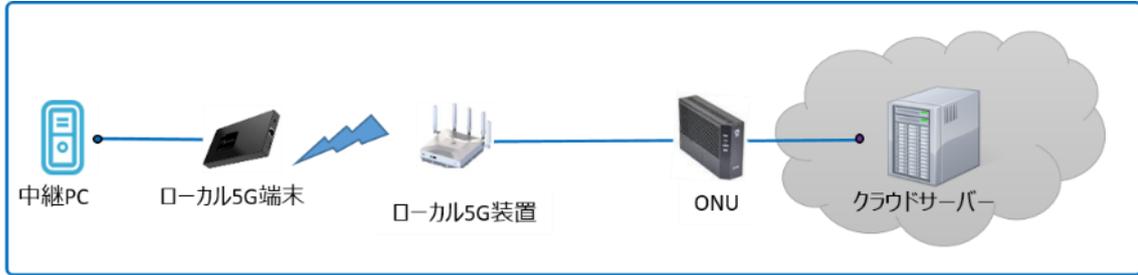


図 4.4-56 ローカル 5G スループット測定区間図

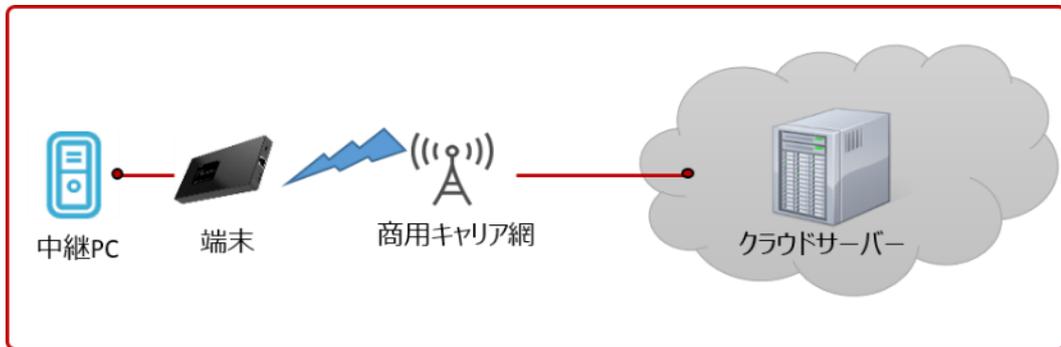


図 4.4-57 商用キャリア網スループット測定区間図

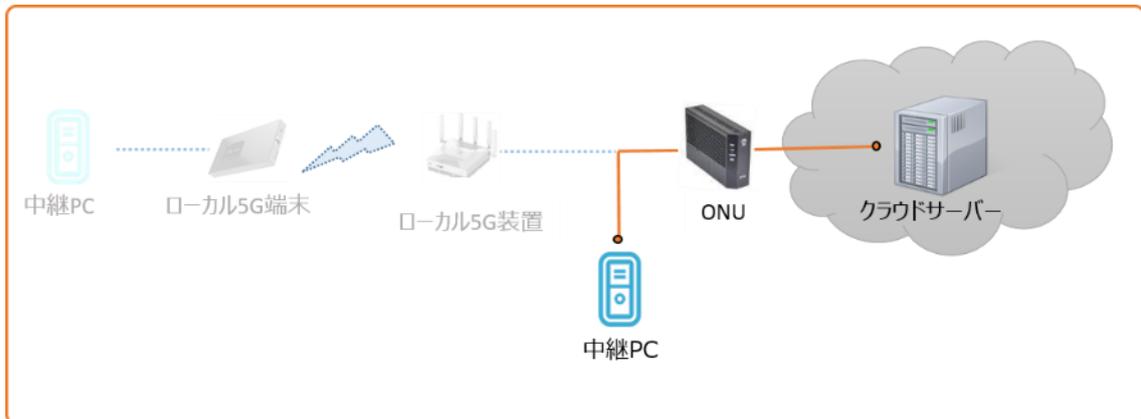


図 4.4-58 有線 LAN スループット測定区間図

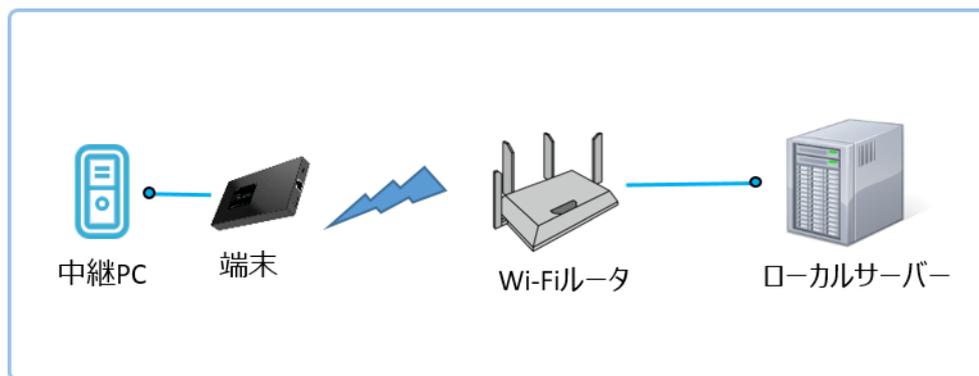


図 4.4-59 Wi-Fi スループット測定区間図

なお、カメラから出力される映像データは、カメラに内蔵された HEVC (High Efficiency Video Coding) Encoder にて、所定のエンコードビットレートで圧縮され出力するため、安定した映像伝送を継続的に行うには、常時、エンコードビットレートを上回る実効スループットが求められる。したがって、本検証では、各通信システムで映像伝送可能な実効スループットとして、測定されたスループットの最小値を用いるものとする。

(3) 実証結果及び考察

表 4.4-5 に示した各評価結果について説明する。

1. 作業員、建設機械の検出性能評価

作業員と建設機械の AI 検出についての評価結果を説明する。AI 検出処理では、検出対象に対応した学習モデルと呼ばれるものが必要となり、本課題実証において、建設現場向けの学習モデルを生成し、AI 検出に用いた。建設現場の場合、ヘルメットや安全帯を着用した作業員や、特徴的な形状を有する建設機械など建設現場特有のものがあり、それに対応した学習モデルが必要となる。機械学習向けに大量の画像データを基にしたオープンな学習モデル（オープンデータ）もあるが、検出漏れが多く生じたことから、建設現場で撮影した多数の画像データを基に学習モデルを作成した。図 4.4-60 にオープンデータを用いた場合の検出結果例、図 4.4-61 に本実証で作成した学習モデルを用いた場合の検出結果の例を示す。図 4.4-60 では、一部の作業員や建設機械が検出されていないが、図 4.4-61 では、検出されていることが確認できる。このような学習モデルを用いて検出精度の評価を行った。



図 4.4-60 検出結果例 (オープンデータ)

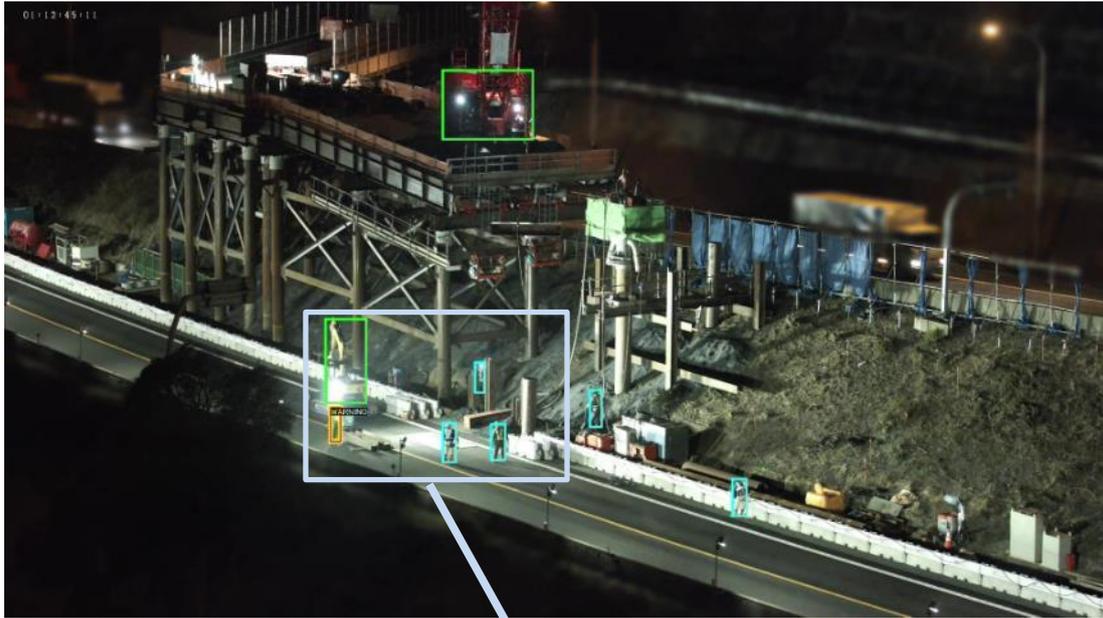


図 4.4-61 検出結果例（作成した学習モデル）

各評価サンプルにおいて、AI 検出結果と正解データを図 4.4-162 に示すような判定ツールにて正誤判定を行い、適合率と再現率について算出した。検出精度評価ツールでは、AI 検出結果と正解データを参照し、正しく検出、誤検出、検出漏れのいずれに該当するかを判定する。なお、検出精度の評価では、撮影角度や外光条件の異なる評価画像を用いて行い、作成した学習モデルには評価サンプルの画像は用いていない。

図 4.4-63～4.4-65 に AI 検出結果と正解データの位置が重畳表示された正誤判定結果の画像例を示す。

ここで、検出精度の低下する要因について説明する。図 4.4-63 では、暗所領域に位置する作業員の検出漏れが確認される。作業員の一部分が黒つぶれによって特徴が取得できず正しく検出できていないためだと考えられる。夜間撮影の場合には、照明光の影響によって、影ができやすく、検出精度に影響が生じていることが確認できた。

また、個人情報保護の観点から撮影では高速道路など建設現場以外の領域に対してぼかすマスク処理を行ってから映像データを保存する構成となっているが、マスク処理に検出対象がかかると検出精度に影響が生じている。建設現場の状況に応じてマスク領域も変わるため、建設現場の作業領域に応じてマスク領域を適切に設定することが必要となる。

図 4.4-64 では、2 人の作業員の位置が重複しており、奥側の作業員に検出漏れが生じている。検出対象の遮蔽領域によって検出精度に影響が生じている。また、作業員周辺で照明光による飽和（白飛び）が生じており、照明光による影響も受けている可能性がある。

図 4.4-65 では、周辺の作業員によって遮蔽されていることや作業員の下半分が柵で遮蔽されている影響で検出漏れが生じていると考えられる。同様な条件で正しく検出されている作業員もいることから、学習モデルのデータ数が不足している可能性もある。特に、日中は工事作業が少ないため、学習モデルのサンプル数が少ないことも影響している可能性が考えられる。

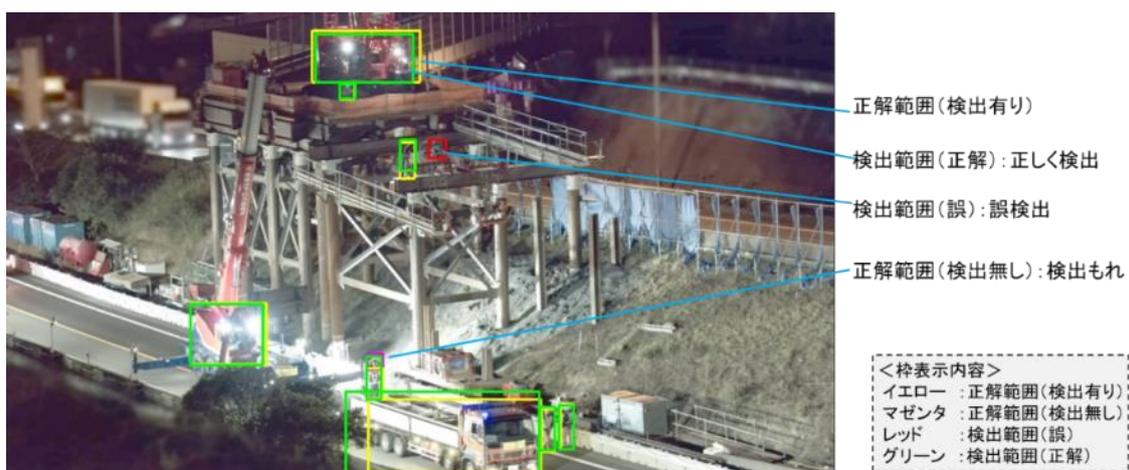
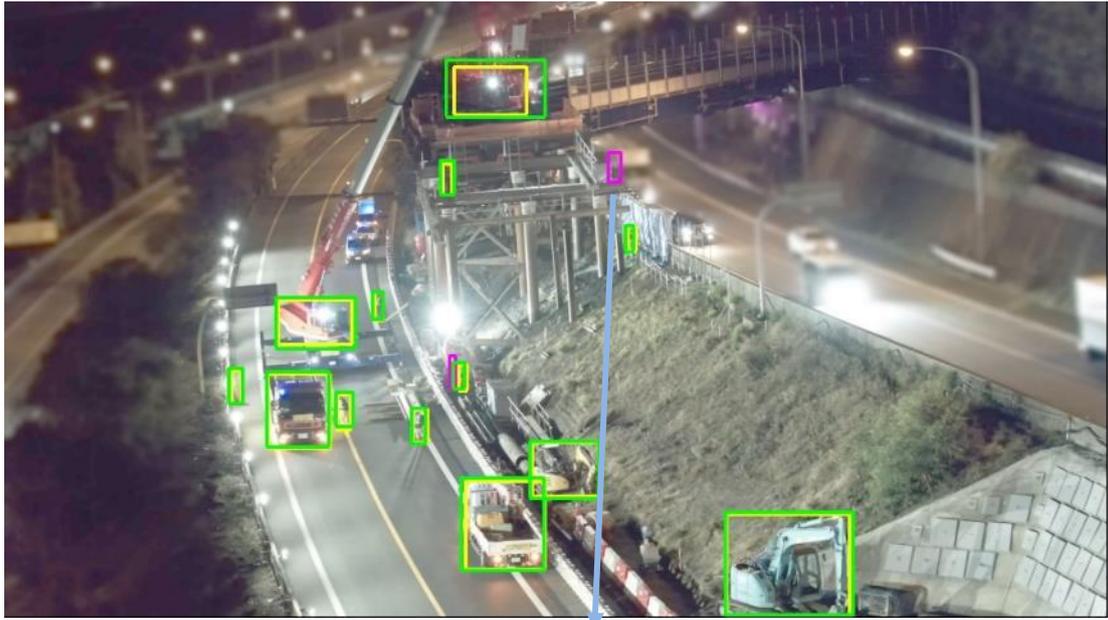


図 4.4-62 検出精度評価ツールの画面表示



高速道路領域にマスク処理

検出漏れが生じた作業員

影による黒つぶれ

図 4.4-63 検出精度評価の正誤判定画面例



図 4.4-64 検出精度評価の正誤判定画面例



図 4.4-65 検出精度評価の正誤判定画面例

検出精度の結果について説明する。表 4.4-6 に適合率と再現率の結果を示す。これは 1 画
 像あたりの検出精度を示す結果である。検出精度は、適合率 94.4%、再現率 76.1%の結果
 となった。適合率は検出された結果のうち正解である割合であるため、適合率が高いほど
 誤検出が少ない。この場合、誤検出率は 5.6%となる。再現率は正解に対してどれだけ検
 出されているかの割合であるため、本結果の場合は検出漏れが約 24%生じていることが分
 かる。

表 4.4-7 に検出対象ごとの検出精度について示す。作業員に比べて建設機械は種類が少
 なく、大きな移動や撮影時の条件の変化も小さいため、検出精度が高い結果となっている。
 作業員については、再現率が低くなっており、撮影される条件によって検出漏れが生じて
 いる。これは、作業員が立ったりしゃがんだり動きの変化が大きいことや照明光の当た
 り方や暗所領域に位置している場合、周辺物による遮蔽などの影響が要因と考えられる。
 学習モデルにおけるデータ数が足りないことも想定され、さらに多様な条件での画像を基
 にした学習モデルとすることで改善の可能性がある。

表 4.4-6 検出精度結果 (全体)

適合率[%] (正解検出数/総検出数)	再現率[%] (正解検出数/総正解数)
94.4 (1624 / 1720)	76.1 (1624 / 2135)

表 4.4-7 検出対象ごとの検出精度結果

検出対象	適合率[%]	再現率[%]	サンプル数 (検出対象数)
人	90.4	63.3	1305
トラック	98.5	89.5	296
油圧ショベル	97.6	100.0	163
クレーン	100.0	99.7	371

次に、本課題システムの AI 検出性能について評価した結果について説明する。表 4.4-6 に示した検出精度は 1 画像に対して AI 検出処理を実行した場合の検出精度であるが、実際のシステムでは 30fps で入力される映像データに対して、各フレームに AI 検出処理を実行している。この場合、1 秒間に 30 画像の検出処理を行うため、そのうち数フレーム分の検出漏れが生じた場合でも人の目で見えた場合には気付かない可能性がある。そのため、実際に表示端末に配信される映像データでの評価も必要となる。配信される映像での検出性能に関する評価について、建設現場関係者による主観評価を行った。

図 4.4-66 に作業員と建設機械の検出精度に関する主観評価結果を示す。作業員については「検出漏れや誤検出が認められるが、気にならない」の回答が最も多く、建設機械では「検出漏れや誤検出が認められず、気にならない」が最も多い結果となった。映像で見た場合でも建設機械に対して作業員の検出の検出漏れや誤検出が認知されている結果となっている。このとき、主観評価結果では、作業員の検出については約 76%、建設機械については約 93%が検出漏れや誤検出が気にならないとの回答となっており、作業員の検出については、わずかに気になるまで含めると約 98%となっているため、改善は期待されるものの作業領域を認識するための検出性能は得られているものと考えられる。次に、図 4.4-67 に AI 検出の追従性に関する結果を示す。作業員の検出で約 84%、建設機械の検出で約 95%が検出対象への検出のずれについて気にならないとの結果が得られている。

本検証において、映像で表示した場合の検出性能について運用上問題ないということが確認できた。ただし、今後、工事が進捗して環境が大きく変わる、あるいは主観評価が実施されなかった日中の工事作業では太陽光の影響が生じる可能性も考えられ、建設現場の

環境に応じた検出性能の見極めと課題抽出、改善が必要になる。

“作業員”と“建設機械”の検出精度 (作業員や建設機械の位置とマーキングの位置関係)

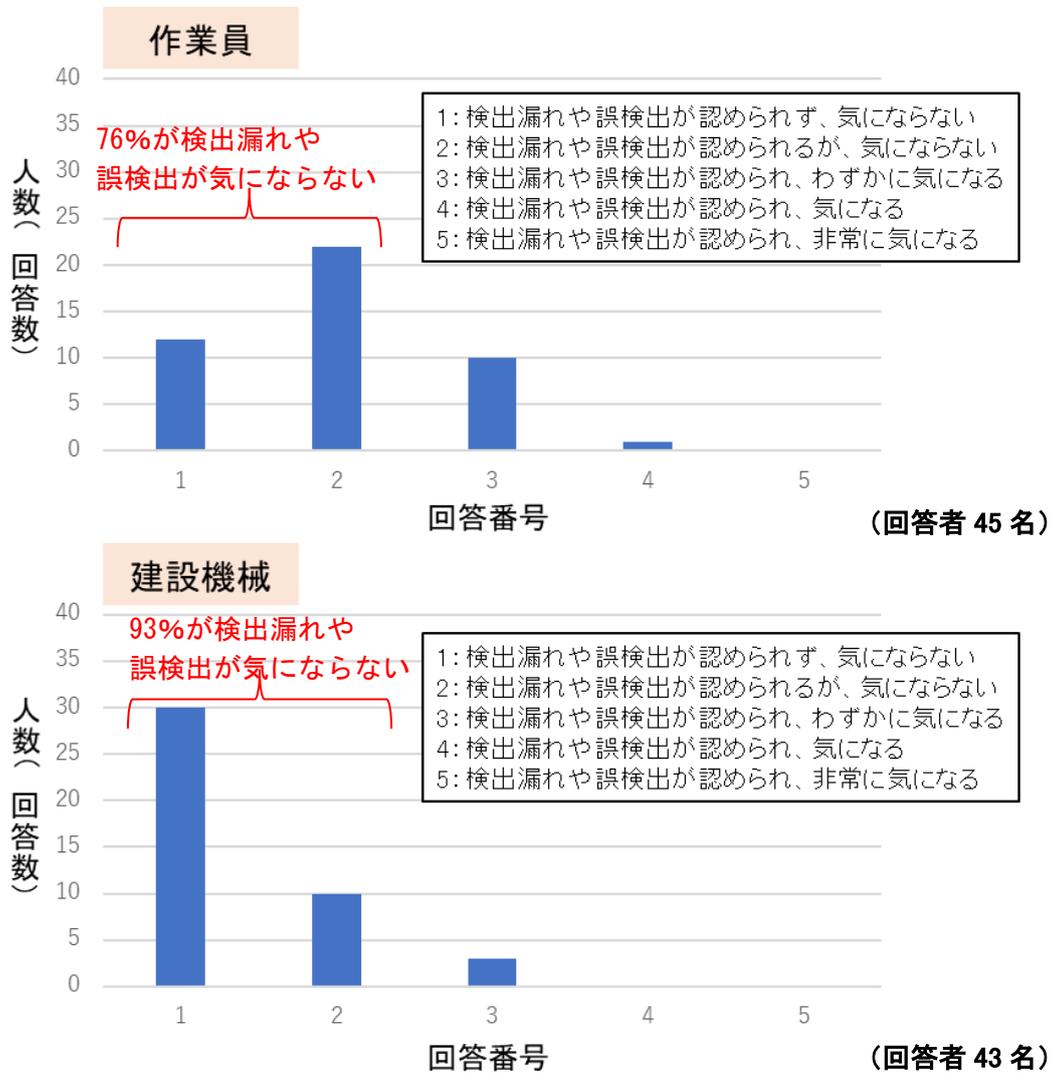


図 4.4-66 検出精度の主観評価結果

“作業員”と“建設機械”の検出の追従性能
 (動く作業員や建設機械の位置とマーキングの位置関係)

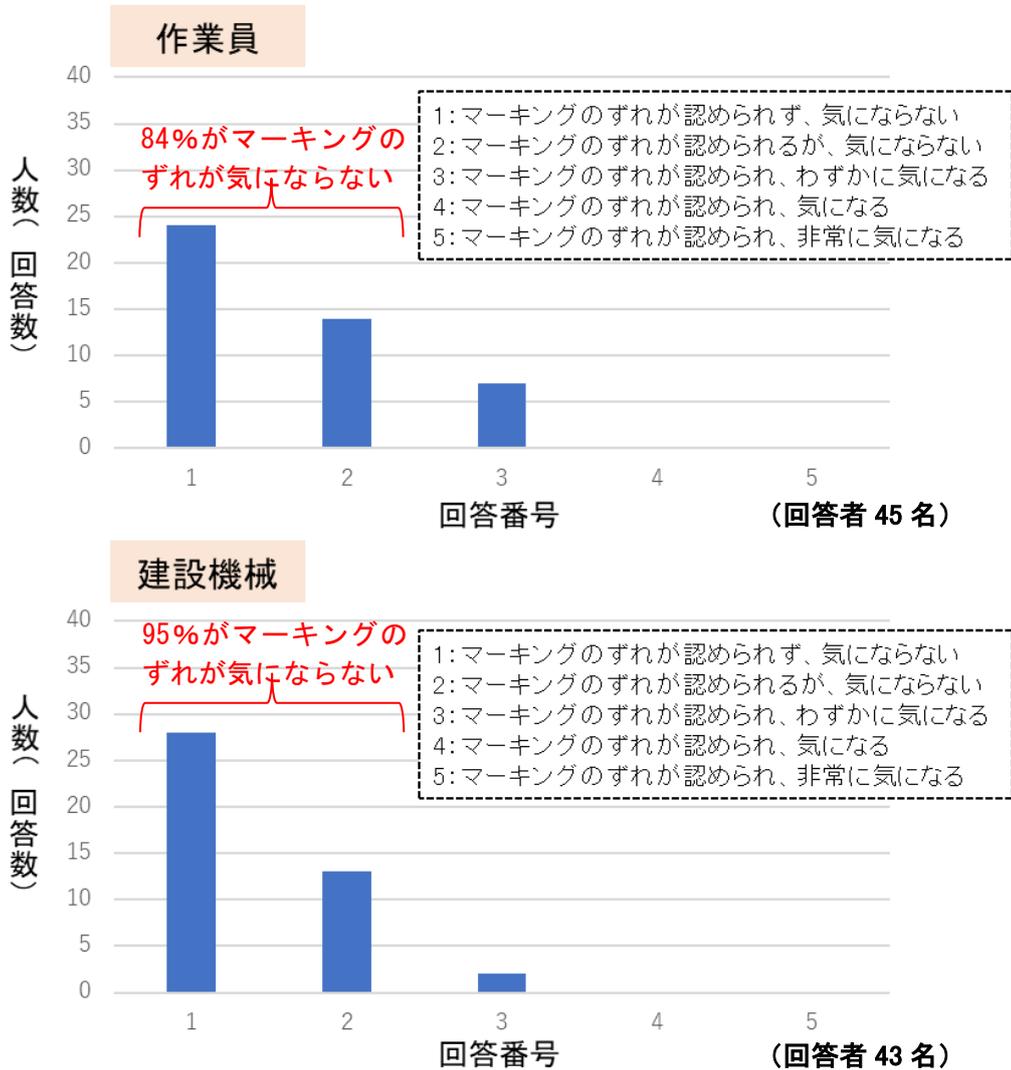


図 4.4-67 検出の追従性に関する主観評価結果

2. 検出処理時間、フレームレートの評価

AI 検出処理に関して、クラウドサーバでの処理時間について評価した。8K30fps 映像データをクラウドサーバにアップロードし、各フレームで AI 検出処理を実行した場合の処理速度の確認を行った。入力の 30fps のフレームレートに対して AI 検出処理による遅延は生じておらず、8K30fps で処理できていることが確認できた。また、今回実証を行ったシステムにおいて、クラウドサーバ上での 1 フレームあたりの処理時間は平均 1/60sec であり、8K30fps の映像伝送での処理時間として問題ないことを確認した。30fps のフレームレートは地デジ放送と同程度のフレームレートであり、建設現場で動く作業員や建設機械の追従についても問題ないと判断できる。ただし、AI 検出での処理時間はクラウドサーバの

GPUの容量や周辺の処理によっても変わるため、実際に運用する場合には、全体の処理量とGPU容量を考慮する必要がある。また、システムの構成上、AI検出の処理量を減らす必要がある場合は、入力映像データの全フレームに対してAI検出処理を実行する構成から、一定間隔のフレームのみを処理させる構成にすることによって、映像自体のフレームレートを落とさずにAI検出の処理量を削減することもできる。

安定して映像データを送るためにローカル5Gの通信区間の遅延時間が200ms以下を目標としているが、遅延が大きい場合には伝送される映像品質に影響する。遅延が大きい場合、伝送される映像のビットレートかフレームレートを低くする必要がある。映像のビットレートが低下してフレームレートを30fpsで維持した場合、映像の品質が悪くなるため、検出精度の低下に影響することが考えられる。また、映像のビットレートを固定とした場合にはフレームレートが低下するため、映像のカクツキに影響する可能性がある。フレームレートが低下した場合には、フレーム間の間隔が長くなるため、30fpsでAI検出処理ができていれば伝送遅延による検出処理時間への影響は生じないと考えられる。本課題実証システムで用いている8Kカメラはビットレートを動的に制御できないため、ローカル5Gの遅延が大きくなる場合には映像のフレームレートが落ちることになる。

次に、建設現場関係者による表示端末での動きの滑らかさに関する主観評価結果を図4.4-68と図4.4-69に示す。クラウドサーバからは8K映像を2Kサイズに縮小し、AI検出処理で検出した位置に対してマーキング処理した映像が2K30fpsで配信される。配信される映像自体のフレームレートでは滑らかに動くが、一部の評価者からは動きのカクツキが認められる結果となった。これば表示端末を接続した通信環境や表示端末の表示性能の影響を受けている可能性がある。主観評価結果では、広範囲映像は約89%、部分拡大映像は約84%以上が動きのカクツキが気にならないとの回答であるため、運用上は問題ないと考えられる。ただし、50%以上の評価者によって動きのカクツキが生じていることが知覚されており、クラウドサーバから表示端末までのインターネット回線による影響が生じているものと考えられる。今後、2Kの切り出し範囲を拡げるなど、クラウドサーバから配信する映像データ量を増やす場合には、インターネット回線の影響を考慮する必要がある。

広範囲映像の動きの滑らかさ(フレームレート)

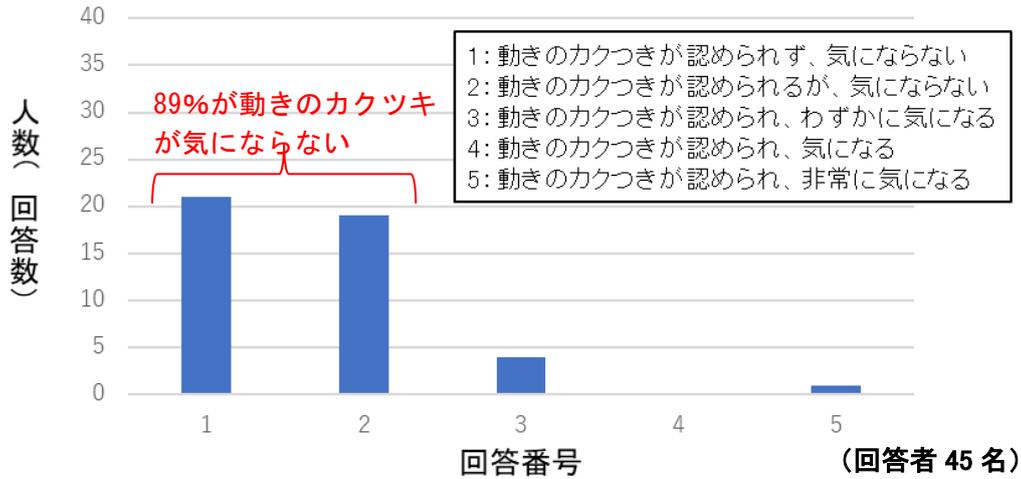


図 4.4-68 広範囲映像の動きの滑らかさに関する主観評価結果

部分拡大映像の動きの滑らかさ(フレームレート)

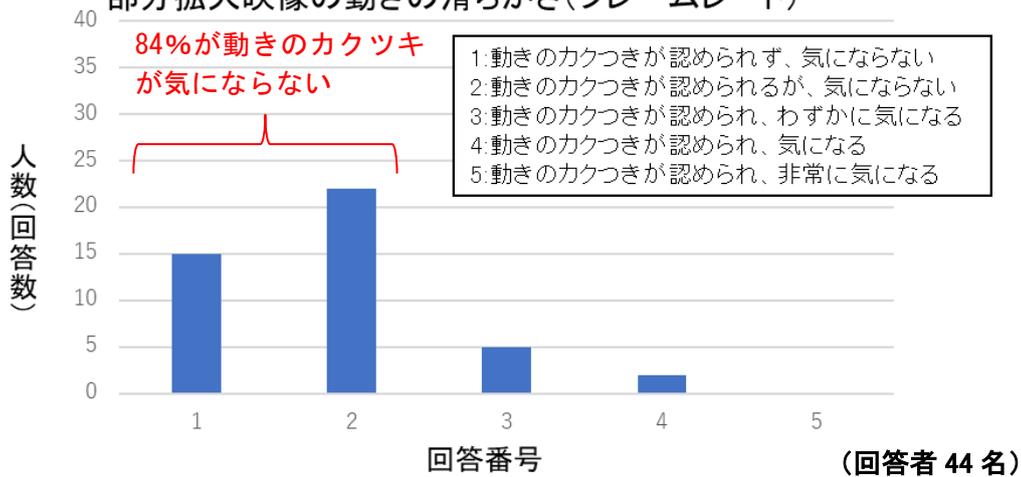


図 4.4-69 部分拡大映像の動きの滑らかさに関する主観評価結果

3. 撮影範囲、表示範囲の評価

本ソリューションでは建設現場を広範囲に撮影することが特長となるが、撮影範囲を拡げるほど分解能が低下する。分解能はカメラのセンサ 1 画素あたりで解像できる大きさに該当し、細かいものを撮影する場合には 1 画素あたりで解像できる大きさを小さくする必要がある。表 4.4-8 に撮影距離と撮影範囲、分解能に関するシミュレーション結果を示す。本実証の建設現場では残橋上まで撮影距離が約 150m あり、高速道路の敷設方向に作業領域が広がっている。レンズ焦点距離によって撮影画角が変わり、レンズ焦点距離が長くなるほど撮影範囲は狭くなる（ズームで撮影される）。本実証では、基準となる撮影距離

150m で 50m 以上の撮影範囲とし、撮影距離 200m で分解能が 10mm を超えないことを目安としており、レンズ焦点距離を 50mm と設定している。シミュレーション結果では、撮影距離 150m でセンサ平面方向の範囲（横方向）が 56.5m、分解能が 7.4mm となる。分解能の設定については、遠隔からの監視の際にある程度細かな現場の状況を確認できることと、AI 検出精度への影響も考慮して作業員の装備や顔の大まかなパーツが識別できる程度の分解能となるよう設定している。図 4.4-70 に栈橋上(撮影距離 130m~150m 程度)に位置する人を撮影した画像を示す。実際には、分解能以外にもレンズの解像性能や動画の圧縮による劣化、センサノイズなど様々な要因で品質は低下するが、装着している装備や目の位置など顔のパーツが識別できる分解能であることが分かる。

表 4.4-8 撮影距離と撮影範囲・分解能の関係

項目	シミュレーション値		
焦点距離[mm]	50		
水平画角[deg]	21.3		
撮影距離[m]	100	150	200
撮影範囲[m]	37.7	56.5	75.4
分解能[mm/画素]	4.9	7.4	9.8

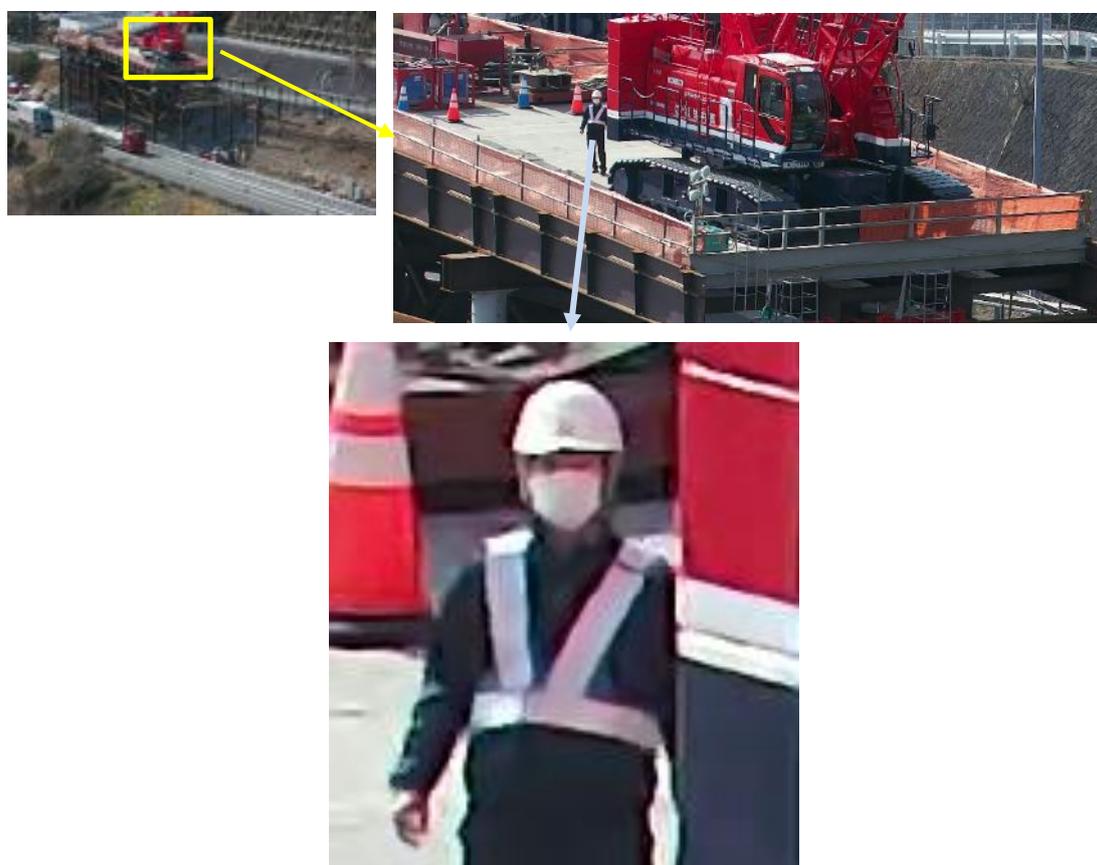


図 4.4-70 人の撮影画像（撮影距離 130m～150m 程度）

設定した撮影範囲である広範囲映像範囲と 2K に切り出した部分拡大映像範囲に関して、現場関係者による主観評価結果を行った。それぞれの評価結果を図 4.4-71 と図 4.4-72 に示す。広範囲映像では約 80%が範囲は十分広いとの結果が得られており、建設現場を広範囲で撮影できることについての有効性が確認できた。ただし、一部の評価者からは「わずかに狭い」との回答もある。撮影範囲をさらに広げる場合には前述したように分解能が低下して細かな対象が視認し難くなったり、AI 検出精度にも影響したりするため、監視した

い対象や AI 検出処理の精度への影響も考慮して撮影条件の仕様を決める必要がある。

部分拡大映像の範囲では、約 57%が「範囲は十分」との結果となり、広範囲映像に比べて範囲が狭いと感じる評価者が多い。本実証では、表示端末のネットワークも考慮し、2Kサイズの映像を配信しているが、切り出しサイズについては広げることできる。今後の運用では、クラウドサーバから表示端末までの回線容量の影響を考慮しながらどの程度の広さで切り出しが必要かについて仕様を決めることが良いと考えられる。

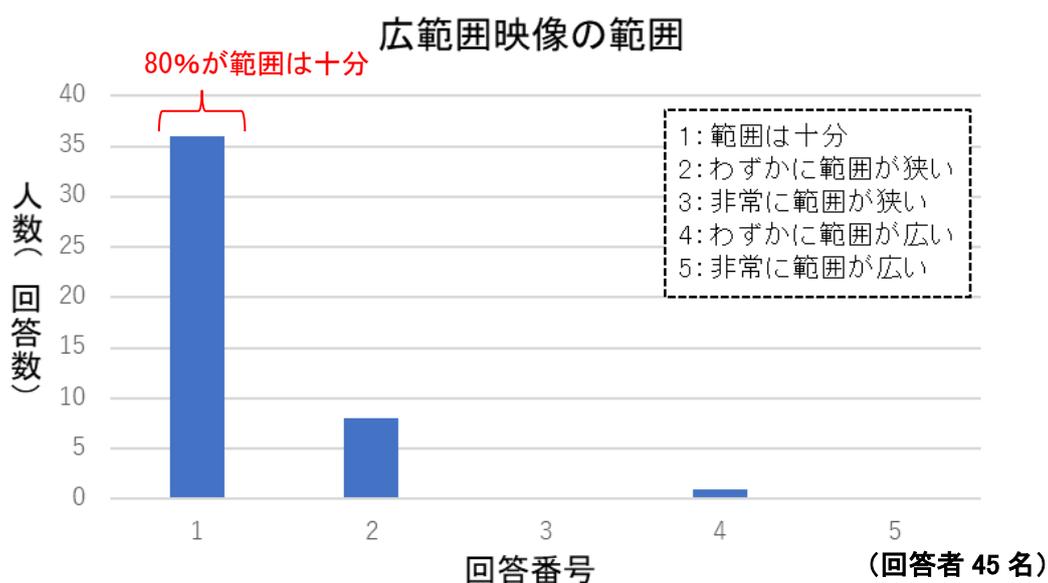


図 4.4-71 広範囲映像の撮影範囲に関する主観評価結果

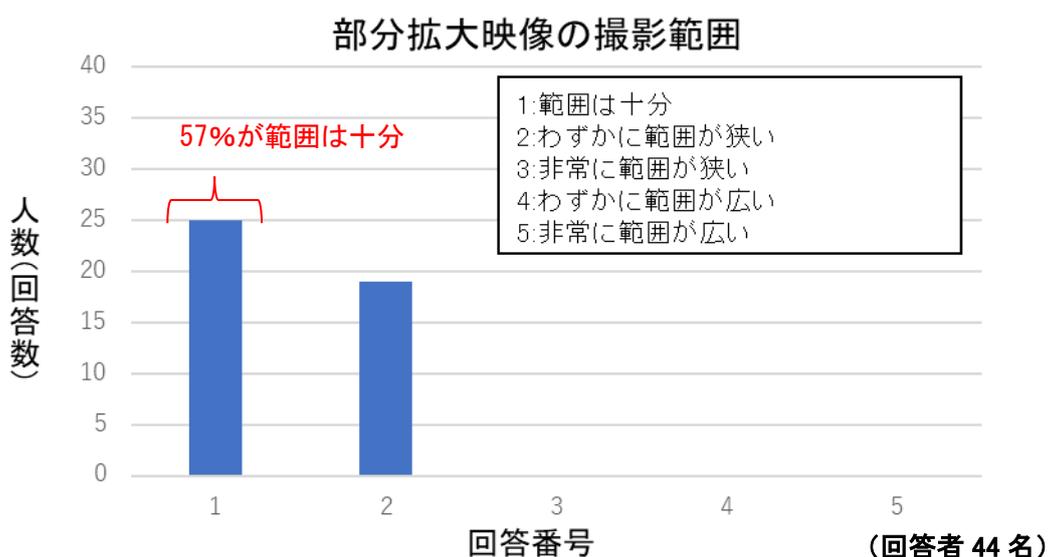


図 4.4-72 部分拡大映像の切り出し範囲に関する主観評価結果

4. 表示画面の操作性評価

本ソリューションの表示端末での遠隔監視に関して、表示端末での広範囲映像表示画面と部分拡大表示画面について、操作性や応答性に関する主観評価を行った。広範囲映像の操作性や応答性に関する主観評価結果を図 4.4-73 と図 4.4-74 に示す。広範囲映像を表示までの操作に関して、Web ブラウザで指定されたアクセス先に接続し、ユーザ ID やパスワードを入力したのち、AI 検出処理による作業員と建設機械にマーキング表示された広範囲映像が表示される。広範囲映像表示までの操作性についての主観評価結果では、「普通」が最も多い。「よい」以上は約 47%、「普通」以上は約 93%となっており、操作性に問題はないとの結果が得られた。クラウドサーバへのアクセスについては、モバイル端末であれば QR コードを読み込むことでアクセスできるようにしており、特に複雑な操作を必要としないことが反映されたと考えられる。広範囲映像が表示されるまでの時間では、「遅延が認められるが、気にならない」が最も多く、評価者の約 82%が気にならないとの結果となっており、運用上は問題ないことが確認できた。

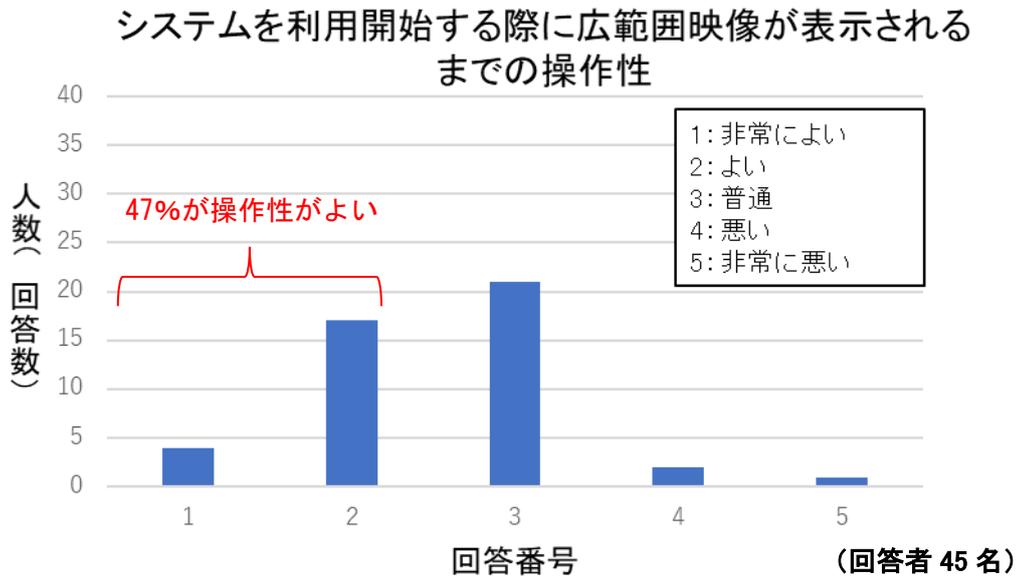


図 4.4-73 広範囲映像表示の操作性に関する主観評価結果

広範囲映像が表示されるまでの時間

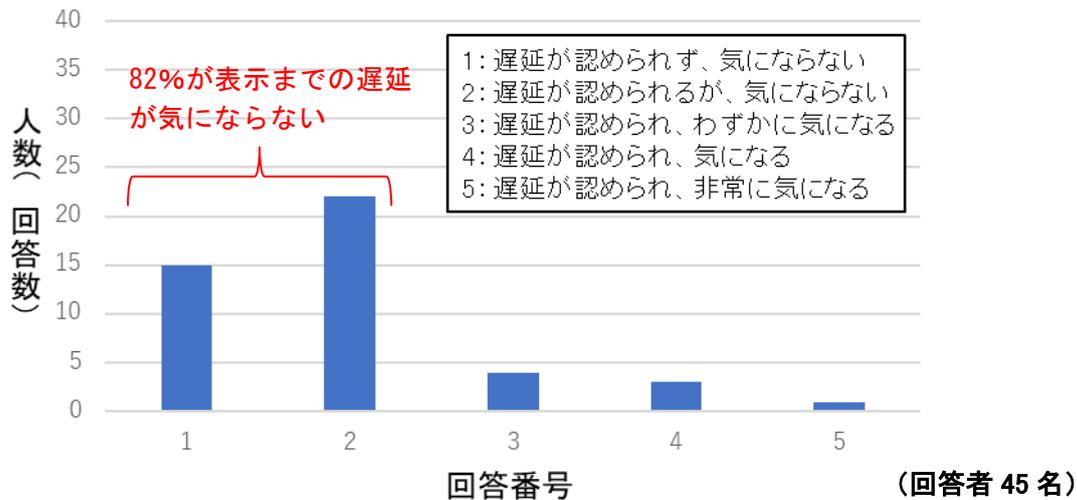


図 4.4-74 広範囲映像表示の応答性に関する主観評価結果

次に、部分拡大映像表示画面に関する操作性や応答性の主観評価結果をそれぞれ、図 4.4-75 と図 4.4-76 に示す。部分拡大表示に関する操作性については「よい」の回答が最も多く、「よい」以上の回答は約 55%、「普通」以上の回答は約 91%となった。部分拡大映像は広範囲映像の画面上 1 点を指定することで、指定箇所を基準とした部分拡大映像が表示され、複雑な操作は不要であるため、「悪い」との意見も少ないと考えられる。部分拡大映像への切り替え操作について、今後も改善が期待されるが、運用面で支障が生じるような課題はないと考えられる。ここで、部分拡大表示の操作に対して、部分拡大映像の範囲を任意の大きさに変更できないため、一部で「悪い」との回答も得ている。本実証では、表示端末のネットワーク回線や切り出し処理と GUI の複雑さを考慮し、部分拡大映像の範囲を 2K に制限しているが、部分拡大映像の大きさ（画素数）を変えることは可能である。ただし、任意の範囲を調整できるようにした場合には、範囲の調整に関する操作手順が増えるため、システム全体の操作がより煩雑になる可能性もあるため、全体の操作性を考慮して設定する必要がある。

広範囲映像から部分拡大映像への切り替えについては、広範囲映像の表示に比べて「遅延が認められ、気になる」との回答が増えている。これは、広範囲映像と部分拡大映像を切り替えながら見たいという意見もあり、素早く表示が切り替わることが要望されている。表示の切り替え時間については、クラウドサーバの性能やネットワークの影響もあるため、システム全体を考慮して検討が必要である。表示切り替え時の遅延については評価者の約 68%は「気にならない」との回答であり、「わずかに気になる」まで含めると約 84%になる。部分拡大表示の応答性については、運用面で問題はないものの、今後の改善が要望される。

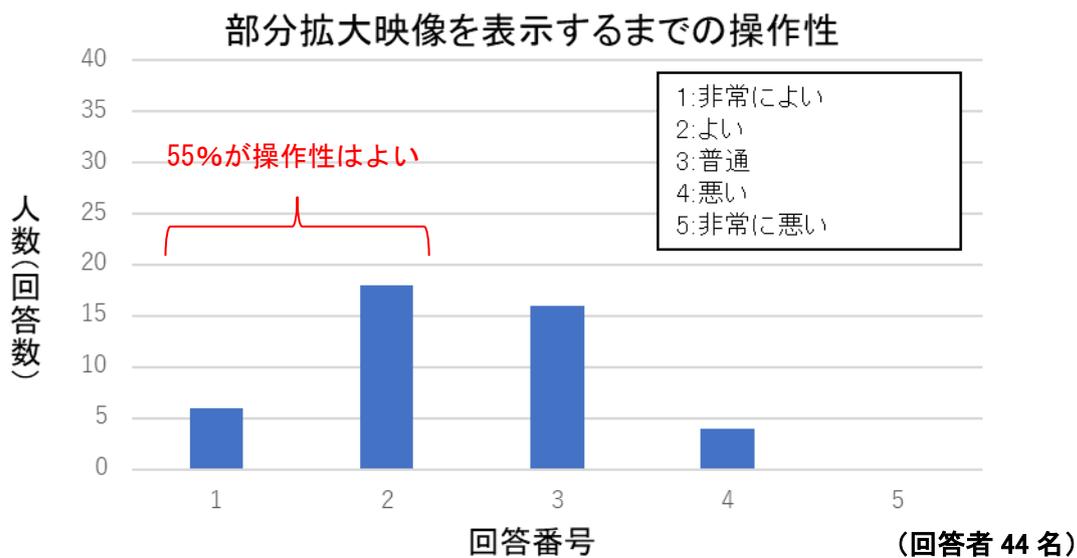


図 4.4-75 部分拡大映像表示の操作性に関する主観評価結果

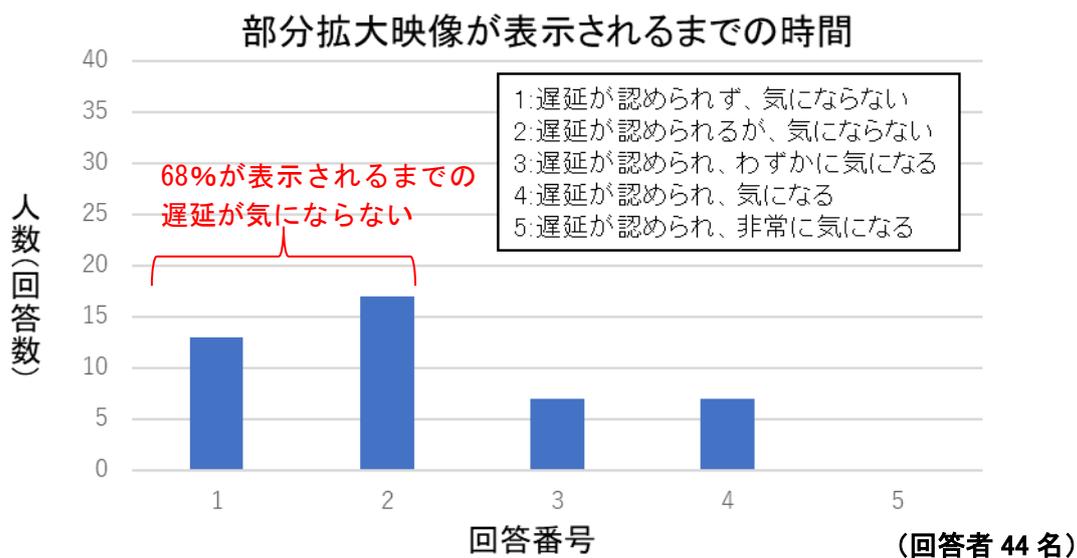


図 4.4-76 部分拡大映像表示の応答性に関する主観評価結果

部分拡大表示について、部分拡大表示をしながら表示位置を変更したいとの要望があった。これは、作業員や建設機械が動く際に移動量によっては部分拡大表示の範囲外に見切れる場合があることが考えられる。この場合、評価者の指定の方向に表示範囲を移動させるためには監視者の指定箇所の動きに合わせて切り出し領域範囲の移動と配信映像の制御を行う必要があり、同時に複数の監視者が操作をする場合にシステムの制御が複雑になる。本実証では検出された作業員や建設機械位置から 3 つのグループにクラスタリングし、それぞれクラスタリングされた領域を自動で切り出して部分拡大表示する機能を実装するこ

とで自動的に動く対象を追従して表示させるようにした。図 4.4-77 示す広範囲映像に3つの自動部分拡大表示枠が表示されており、検出された作業員と建設機械の位置の分布から自動的に部分拡大表示範囲を設定されている。検出された作業員や建設機械が下の高速道路上と栈橋上に分布しており、それぞれの作業領域付近で設定されていることが分かる。

図 4.4-77 の表示画面左のアイコンによって、3つの自動部分拡大表示に切り替え表示することができる。図 4.4-78 と図 4.4-79 は、自動で設定された部分拡大表示枠の一つを示し、人の動きに応じて部分拡大表示枠の位置が移動しているようすを示す。図 4.4-78 に対して図 4.4-79 では右側の大型クレーン側に作業員が移動しており、それに合わせるように表示範囲が移動している。このように、自動的に追従して表示することで、複雑な操作作業を必要とせず、制限された表示範囲の中で、作業領域が移動してもそれに追従して、作業領域を表示することができる。



自動設定した部分拡大表示画面への
表示切替アイコン

検出結果の分布を基に自動的に設定した部分拡大表示枠

図 4.4-77 広範囲映像と自動設定された部分拡大表示枠

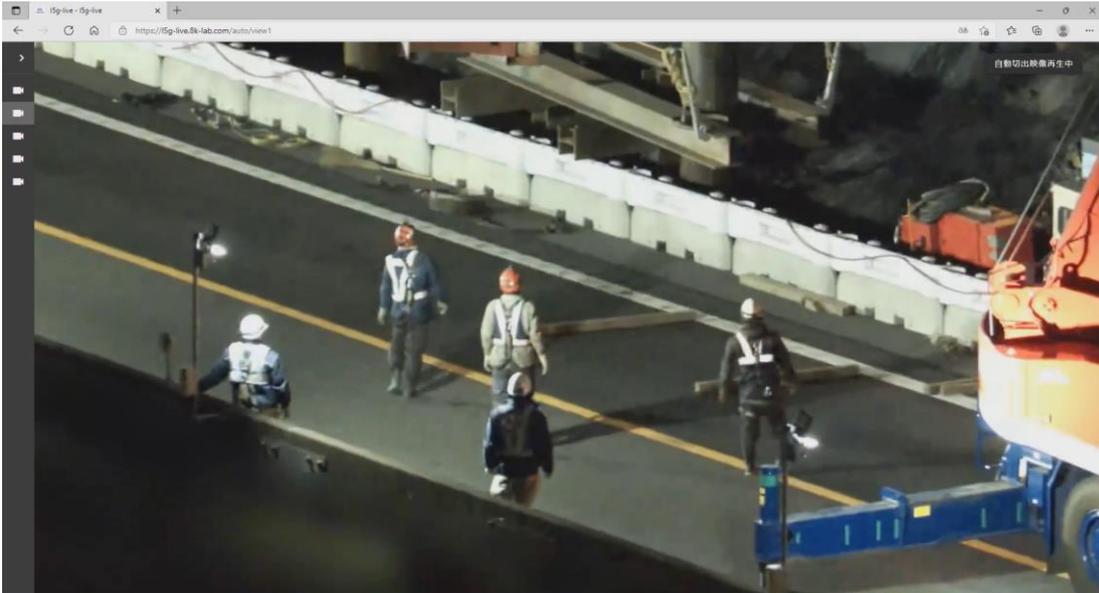
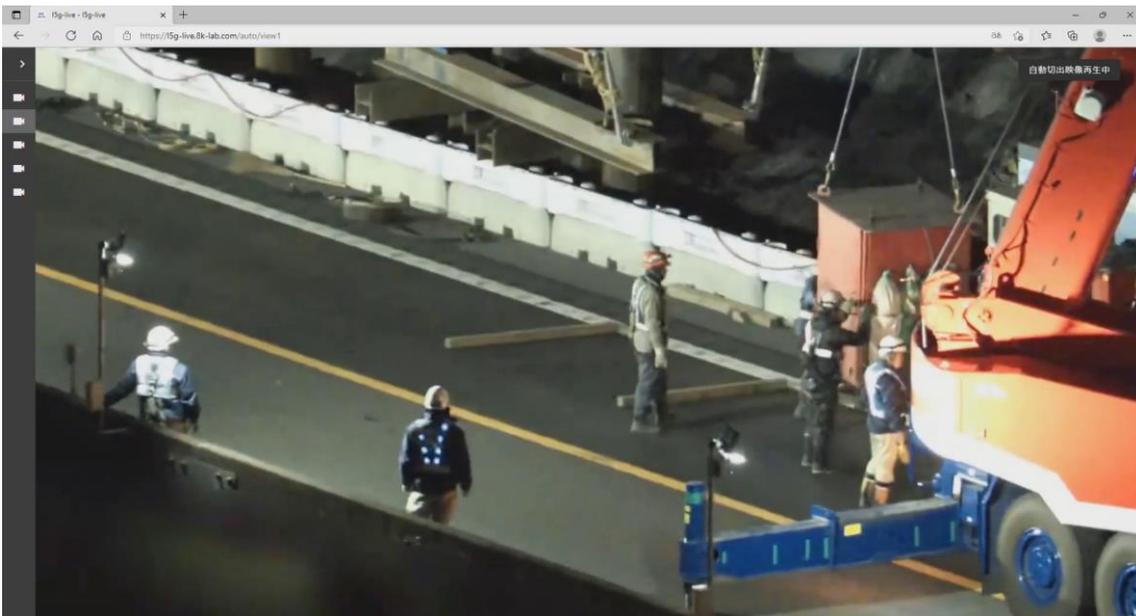


図 4.4-78 自動設定された部分拡大表示画面 1



作業員の移動に合わせて表示位置が移動

図 4.4-79 自動設定された部分拡大表示画面 2

5. 映像品質の評価

端末で表示する映像の品質について現場関係者による主観評価結果を行った。主観評価では広範囲映像と部分拡大映像に関する映像品質について評価した。図 4.4-80 から図 4.4-82 に広範囲映像に関して、鮮明さ、ノイズによるざらつき、明るさに関する調査結果を示

す。図 4.4-80 は広範囲映像の鮮明さに関する評価結果であり、「ほぼ満足」以上の回答は評価者の約 84%となり、高い評価を得ている。また、図 4.4-81 に示す広範囲映像のざらつきに関しては、約 98%が「気にならない」との回答であり、表示端末で見た場合の夜間撮影によるノイズの影響は小さいと考えられる。これは、広範囲映像は 8K 映像を 2K 映像に縮小して配信しているため、縮小時にフィルタ処理のような効果が得られて映像内のノイズが低減されていることが要因と思われる。次に、図 4.4-82 に示す広範囲映像の明るさについては、「ほぼ満足」以上の回答は約 73%、「普通」以上回答は約 91%となっている。明るさが他の項目に比べて低い評価となっているのは、夜間撮影のため、照明があたって局所的に明るく見えづらい領域や、逆に暗くて見えづらい領域が生じていることが考えられる。明るさについては夜間撮影の品質低下の影響を受けているものの、概ね良好な評価は得られており、広範囲映像の品質については運用上問題ないと言える。

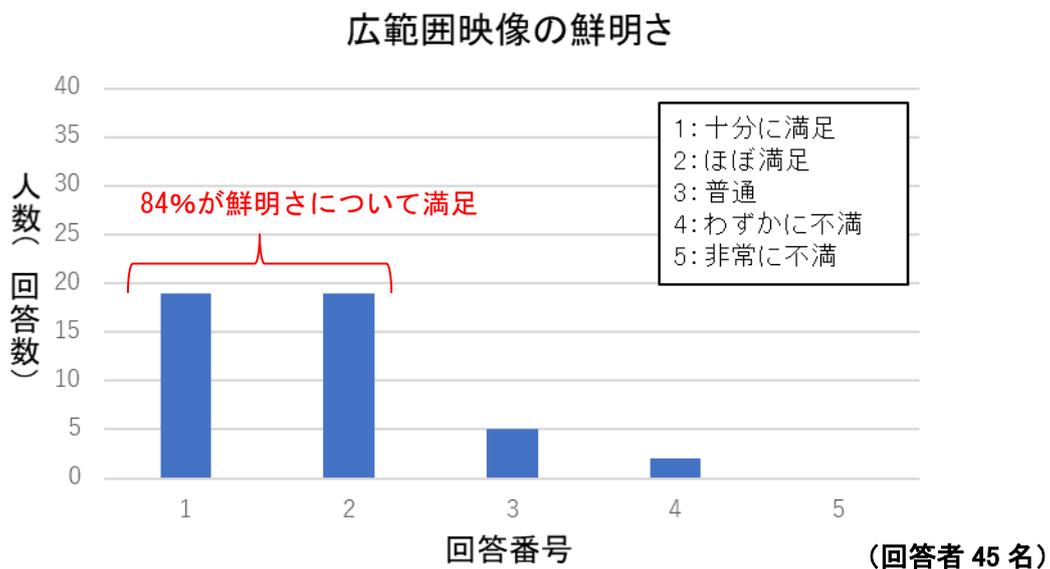


図 4.4-80 広範囲映像表示の映像品質(鮮明さ)に関する主観評価結果

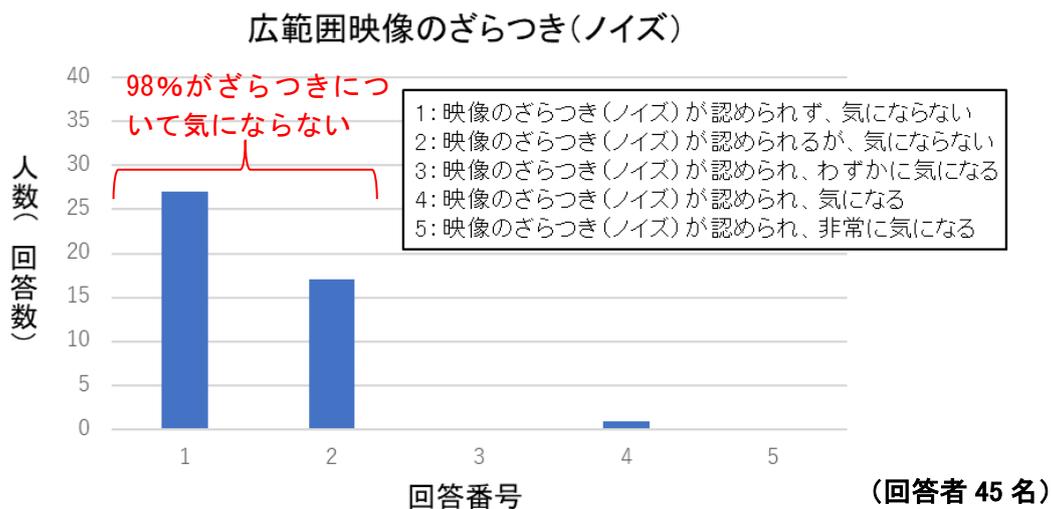


図 4.4-81 広範囲映像表示の映像品質(ざらつき)に関する主観評価結果

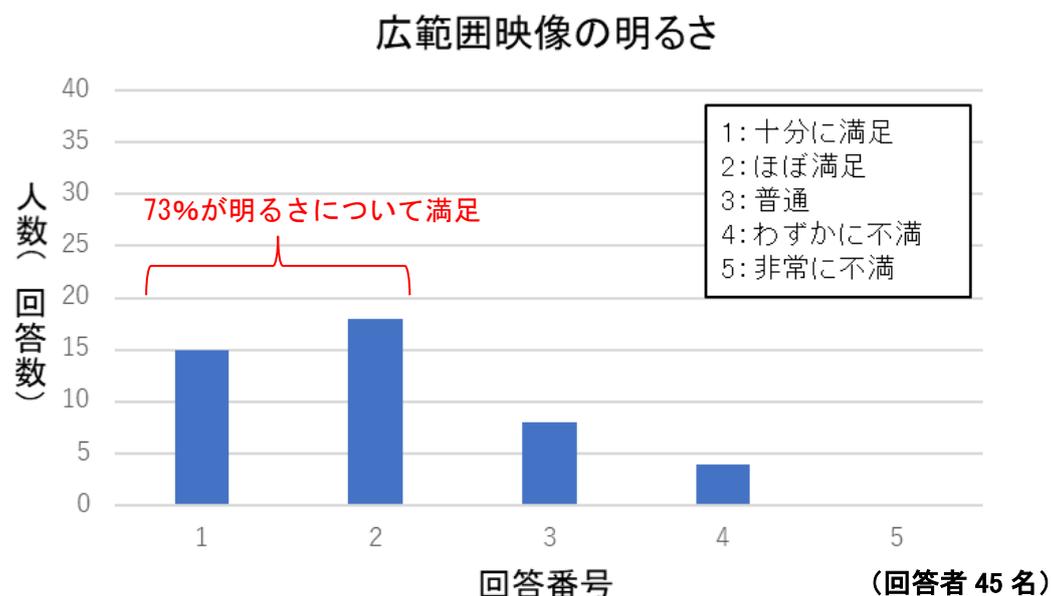


図 4.4-82 広範囲映像表示の映像品質(明るさ)に関する主観評価結果

次に、部分拡大映像の品質に関する主観評価結果について、図 4.4-83 に映像のざらつきの評価結果、図 4.4-84 に明るさの評価結果を示す。広範囲映像に比べて、ざらつきに関する評価が低くなっていることが確認できる。これは、部分拡大映像の方が夜間撮影による影響が大きく、映像全体に白っぽい粒状のノイズが視認されるためだと考えられる。ざらつきの評価については、「映像のざらつき(ノイズ)が認められるが、気にならない」が全体の約 67%と多くを占め、ノイズによるざらつきが知覚されていることが分かる。主観評価結果では、約 78%がそのようなざらつきを「気にならない」と回答しているが、部分拡大映像から安全帯の状態など細かな部分も監視することを考慮すると、今後も改善が必要な項目と考えられる。また、部分拡大映像の明るさについては、約 62%が「ほぼ満足」

以上の評価となり、広範囲映像に比べると映像品質の評価が低くなっている。これは部分拡大映像の方が、照明光など外光の影響を受けやすく、明るさの変動が目につきやすくなるためだと考えられる。外光を考慮した場合、建設現場を撮影に適した明るさで照明することや、カメラに直接照明光が入射し難い設置角度にするなどが考えられる。

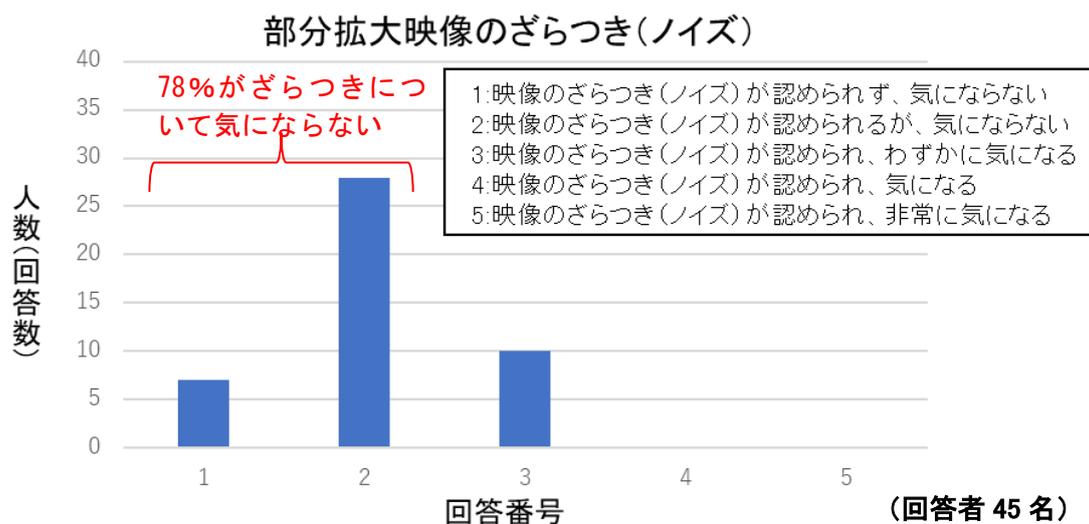


図 4.4-83 部分拡大映像表示の映像品質(ざらつき)に関する主観評価結果

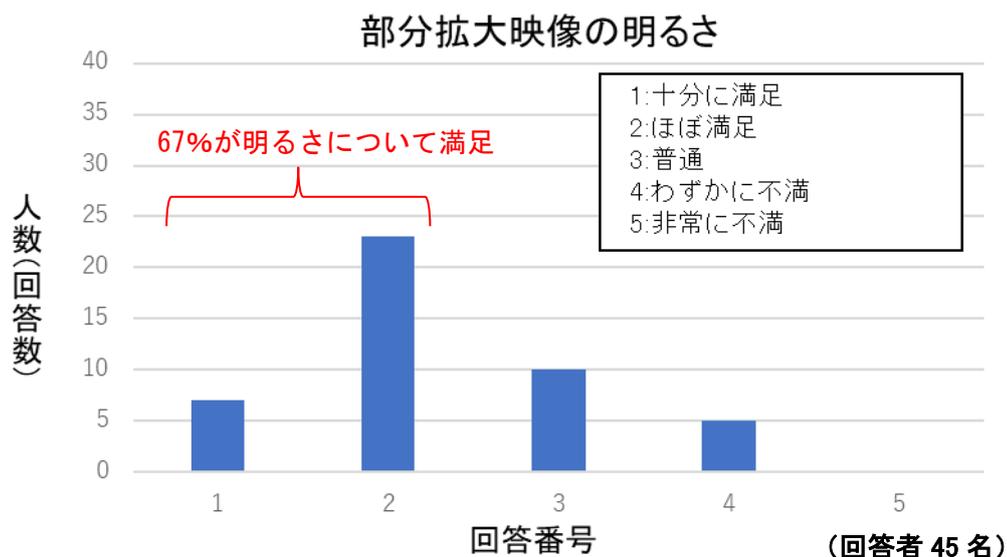


図 4.4-84 部分拡大映像表示の映像品質(明るさ)に関する主観評価結果

6. ローカル 5G の有効性評価（その他通信システムとの比較）

ローカル 5G と商用キャリア網、Wi-Fi、有線 LAN で伝送可能な映像データに対する機能性能比較について評価する。このとき、通信システムの敷設・運用に想定される要求条件についても考察する。

表 4.4-9 および図 4.4-85 に各通信システムでの TCP スループット測定結果を示す。なお、測定時点では、実証現場周辺は商用 5G 網のサービスが提供されていなかったため、商用キャリア網については、A社とB社の商用4G網を対象としてスループットを測定し、比較を行った。また、Wi-Fiについては、ローカル 5G を含む他の通信システムでのスループット測定条件に近づけるために、下記の 2 つの測定条件にてスループットを測定し、比較を行った。

- ・測定条件 1：端末と Wi-Fi ルータ間の距離を 80m 離してスループットを測定
- ・測定条件 2：端末と Wi-Fi ルータ間の距離を 100m 離してスループットを測定

表 4.4-9 各通信システムの TCP スループット比較

	ローカル 5G	商用キャリア網 (A社)	商用キャリア網 (B社)	Wi-Fi (測定条件1)	Wi-Fi (測定条件2)	有線 LAN
平均(Mbps)	100	21.7	8.04	30.4	23.5	213
最小(Mbps)	60.3	13.0	2.49	20.7	16.0	84.0
最大(Mbps)	115	28.5	15.6	40.8	31.1	377

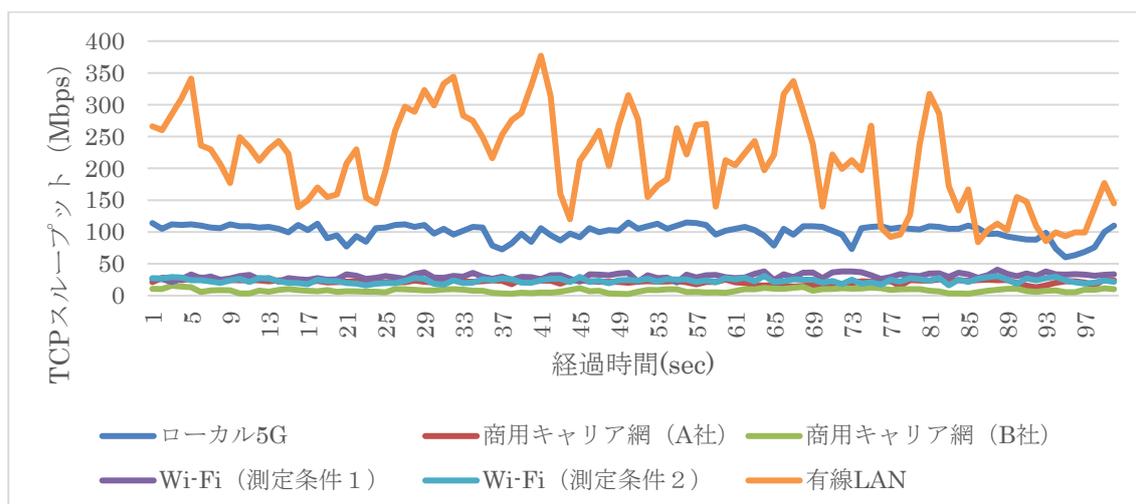


図 4.4-85 各通信システムの TCP スループット測定結果

上記の測定結果から、各通信システムの最小スループットを、映像伝送可能な実効スル

スループットとし、各通信システムでの映像伝送可能な実効スループットを基に、実効スループットを超えない範囲で HEVC エンコーダにて設定可能なエンコードビットレートを算出した。各通信システムでの、映像伝送可能な実効スループットと、HEVC エンコーダにて設定可能なエンコードビットレートを表 4.4-10 に示す。

なお、商用キャリア網の値については、スループットの測定結果が良かった、A 社の商用 4G 網で計測した値を用いた。また、Wi-Fi の値については、2 つの測定条件のうち、スループットの測定結果が良かった、測定条件 1 で計測した値を用いた。

表 4.4-10 各通信システムでの伝送可能な映像スペック

	ローカル 5G	商用キャリア網	Wi-Fi	有線 LAN
実効スループット (Mbps)	60.3	13.0	20.7	84.0
エンコードビットレート (Mbps)	60	10	20	80

さらに、各通信システムで実現可能な映像品質を評価するために、高精細映像を各エンコードビットレートでエンコードし、映像品質の評価を行った。各エンコードビットレートでエンコードされた評価画像を図 4.4-86 から図 4.4-89 に示す。



図 4.4-86 80Mbps でエンコードされた評価画像



図 4.4-87 60Mbps でエンコードされた評価画像



図 4.4-88 20Mbps でエンコードされた評価画像



図 4.4-89 10Mbps でエンコードされた評価画像

各エンコードビットレートにてエンコードされた評価画像に対して、映像品質の評価を行ったところ、10Mbps、20Mbpsでエンコードされた画像については、中央にある赤い物体の側面に書かれた文字が潰れており、認識できなかったが、60Mbps、80Mbpsでエンコードされた画像については、中央にある赤い物体の側面に「双海」と書かれていることが認識できた。このことから、高精細映像の性能を生かすには、最低でも60Mbps以上のエンコードビットレートが必要であると言える。

また、本課題実証試験においては、超高精細カメラの設置場所からONUまでの間には、自動車が多数走行している高速道路や、工事用の重機が稼働している工事現場があるため、超高精細カメラとONUをLANケーブルで直結することは困難であった。したがって、本ソリューションで用いられる通信システムは、無線通信が可能なが必須とされる。

各通信システムの内、60Mbps以上の実効スループットを満たし、さらに、無線通信が可能である通信システムは、ローカル5Gのみであった。逆に、本ソリューションにおける、通信システムの敷設・運用に必要とされる要求条件を満たす通信システムが、ローカル5G以外に存在しなかった。

4.4.1.3 運用検証

(1) 評価・検証項目

ローカル 5G を用いた本課題実証ソリューションを実運用した場合、どのようにして建設現場に導入し、保守メンテナンスを含めて運用していくかについて検討した。

システムの導入や保守・運用面の課題に関して、実際に建設現場にシステムの導入を行い、保守や運用を実施する建設現場担当者目線での課題の抽出が必要となる。本ソリューションの検証を進めるにあたって、建設現場の協力のもと、建設現場内の各所に機器を設置し実証を行ってきた。本ソリューションの建設現場への導入する際の課題や運用面での課題に関して、このような建設現場内への機器設置に関する調整などを担当された現場関係者からの意見を整理した。

また、実際に本ソリューションを運用する際にどのような用途で利用するかについて現場関係者の意見を基に運用方法について検討した。

(2) 評価・検証方法

建設現場に本課題実証ソリューションを導入する際の運用面での課題について、建設現場へ機器導入を担当する現場関係者にヒアリングを行った。運用面の課題に関して、大きく分けると下記に示すように「導入前の段階」、「導入時の段階」、「導入後の段階」の3つの段階が考えられ、それら各段階の課題についてヒアリングを行った。

- ・ 導入前の段階： システムを建設現場に導入する際の課題
- ・ 導入時の段階： 実際に建設現場へ機器を敷設する際の課題
- ・ 導入後の段階： 建設現場へ導入後、運用を進めていく際の課題

上記ヒアリングから得られた意見を整理し、その内容について検討した。

また、効果検証で実施した主観評価アンケートから本ソリューションをどのような管理業務で利用するかについて整理し、その管理業務での運用方法について検討した。

(3) 実証結果及び考察

本ソリューションの導入および保守運用に関して建設現場の設備に関する担当者にヒアリングを実施した。導入や保守運用の課題に関するコメントについて表 4.4-11 示す。

表 4.4-11 導入・保守運用の課題に関するコメント

	導入段階の分類	コメント
1	導入前	・本ソリューションの価格が高額であり、現場への導入費用が問題。
2	導入前	・本ソリューションを導入するにあたって、どのような方法で導入できるのかが分からない。
3	導入時	・実際に建設現場に導入して、各機器の敷設を進める際の建設現場内への機器設置に関して、各機器を設置して電源配線などを敷設する作業は建設現場の方でも対応できると考えている。しかし、通信機器に関する知識がないため、通信機器のセットアップについては現場での対応は難しい。そのような通信機器のセットアップ作業はメーカー（または納品業者）側で実施するような仕組みがほしい。
4	導入後	・ローカル 5G 機器を運用していくにあたって、免許が必要になるが、免許の申請の簡素化ができるとうい。
5	導入後	・本ソリューションに不具合が生じた場合に、リモートですぐ復旧対応してくれるようなサポート体制がほしい。
6	導入後	・今後、工事の進捗に応じて現場の状況が変わる中で、何か不具合が生じた際に、電波環境が変わることによる原因か、映像処理による原因かの切り分けできるような仕組みがほしい。

以下、表 4.4-11 の各項目に関して、意見交換内容を説明する。

1. ローカル 5G の価格について

一般的に、ローカル 5G のシステムが高額なため、そのままでは現場への導入が難しい。建設現場に導入しようとするともっとコストを下げる必要がある。

今回検証した本システムは試作機段階であり、多くの機種が普及している状況ではないため、システム価格が高額になることが課題である。システムの価格については、今後の

開発が進むことで多少の低コスト化が想定されるが、導入台数が増えないと大きなコスト削減は難しいことが考えられる。一方で価格が下がらないと現場への導入も進まないことも想定され、普及台数の増加か低コスト化のどちらを先に推し進めることも難しい状況であると思われる。

そのため、初期の普及段階では、本実証のような補助金によって現場にシステムを導入し、導入台数を増やすといったことで導入コストを下げることができるとよいと考えられる。

2. ローカル 5G の導入方法について

現在、ローカル 5G を活用したシステムのビジネスモデルがないこともあり、現場からは本ソリューションはどのような方法で導入されるかがよく分からないとの意見があった。

システム導入するにあたって、システム機材自体を購入する場合と必要な期間レンタルやリースで購入する方法が考えられる。建設工事は限られた期間で実施するため、高額なシステム機材を購入するのに比べて、その期間レンタルやリースで購入できる仕組みがあると、現場にも導入しやすいように考えられる。建設業界では、建設機械などを扱っているレンタル業者や仮設資材リース会社、電気設備仮設業者などがあり、これらサプライヤから購入するような仕組みがあると、建設業界にも精通しており、導入がスムーズに実施できると想定される。ただし、本ソリューションは従来の他の建設向けの機器とは大きく異なるものであるため、どのような業者が取り扱うことができるかが問題となる。また、需要や台数の見込みがないとこのようなサプライヤで取り扱うことも難しいため、建設現場での実績の積み増しによって具体的な需要を証明することが必要であると考えられる。

3. ローカル 5G 導入時の機器設置・敷設について

本ソリューションを建設現場に設置・敷設する場合、機器を所定の場所に設置したり、電源などを配線したりすることについては現場の方でも対応できると考えられるが、通信機器のセットアップについては不安が大きいとの意見があった。

現場の担当者がマニュアルを見て簡単に設定など行える程度であれば、現場側でも対応できるかもしれないが、現場側ではローカル 5G の通信機器に関する専門の知識がないため、通信機器のセットアップについては現場側での対応は難しく、導入のサポート含めた体制が必要である。スムーズに現場への導入を進めるためには、システムを納入するサプライヤがこれら通信機器の設置サポートも合わせて行う仕組みがよいと考えられる。

4. ローカル 5G の免許申請に関する意見交換について

免許申請の手続きに手間がかかるため、申請手続きの簡素化ができると助かるとの意見があった。また、実際の運用を進めるにあたって誰が免許を取得しローカル 5G を運用していくかについても考えていく必要がある。システムをレンタルやリースなどで購入して運用する場合は、サプライヤ側で免許を取得して運用することが建設現場の負担も低減されるため、望ましいと考えられる。

5. 本ソリューションの不具合時のサポートについて

本ソリューションに不具合が生じた場合に、現場側では専門の知識がないため、対応が

困難であり、すぐに復旧対応してくれるようなサポート体制がほしいとの意見があった。本実証のような安全管理に向けたシステムでは、何か不具合が生じた場合には、早期の復旧が必要になるため、リモートで復旧対応できる仕組みが望まれている。

このような運用に関するサポートも一本化し、レンタルやリース会社が導入時のサポートと合わせて実施する体制が考えられる。

6. ローカル 5G の不具合の切り分けについて

今回の課題実証システムの場合、ローカル 5 G システムの通信部分と映像処理部分があるが、今後、工事が進捗していく中で不具合が生じた場合に、現場では通信による不具合か映像処理による不具合かが判断できないとの意見があった。

今回の実証期間は短いため、工事進捗による影響について十分な検証ができていない。今後、建設現場環境の変化によって電波状況が悪くなることによって映像伝送の安定化に影響することや、建設現場の変化によって AI 検出精度が低下したりする可能性がある。そのため、通信状況をモニタリングして表示する仕組みを設け、建設現場の担当者が見て通信状態が悪いのか、映像処理の影響なのかが判断できるような機能を設けるような対応が考えられる。

次に、本ソリューションの用途とその運用方法について検討した。

現場で使用する他の機械や設備と同様に、現場設置機材として、表 4.4-12 のような運用とメンテナンスが必要と考える。

表 4.4-12 運用管理マニュアル記載事項

項目	対応
設備点検（毎週）	定めた点検カルテにより、月曜日の午前中に実施する。
始業点検（毎日）	定めた点検カルテにより、8:30 を目安に実施する。 （月曜日は日常点検に含む）
不具合対応	発生した不具合の状態と原因、対処した実施策を記録する。
修理対応	予見された事象に対して実施した修理、対応策を記録する。
技術指導・教育	システムエンジニアから技術的な教育指導を受けた場合や、ユーザ側への使用方法の指導を実施した場合のそれぞれ内容を記録する。

また、本ソリューションの用途として、安全管理、工程管理、環境管理への活用が期待される。各管理の運用方法について説明する。

1. 安全管理

(ア) リアルタイムモニタリング（安全巡回）

- ① 作業手順書・作業手順周知会で規定した手順・人員で作業が行われているかを確認する
- ② 作業には必要な保護具を使用しているかを確認する
- ③ 天候悪化や、他作業との作業場所・使用資機材の調整や作業変更が必要かを確認する。

- ④ 資機材の転倒・落下・飛散等が予見されるかを確認する。
- ⑤ 上記①～④の安全巡回の結果、是正が必要な場合は現場にいる施工管理者または現場作業員への即座にフィードバックし、対応を指示する。

(イ) 映像履歴の活用

- ① 繰り返し作業や類次作業の手順改善に向けて、過去の映像記録から作業手順の振り返り・反省会へ活用する。
- ② 現場内で発生した労働災害や現場周辺で発生した第三者との事故等の状況分析に映像履歴を活用する。

2. 工程管理

- (ア) 映像履歴・リアルタイム映像を利用し、工事進捗を確認し、工程管理へ活用する。
- (イ) 各作業に関わる作業員や建設機械の歩掛りを確認し、繰り返し作業や類次作業の工程改善に活用する。

3. 環境管理

- (ア) 夜間工事での現場仮設照明による外部への影響を測定し、必要に応じて照明設備を変更する。
- (イ) 粉塵・土埃が飛散状況を測定し、必要に応じて散水等の処置を即座に実施する。

次に、本ソリューションのようなインフラ分野への適用に関して、インフラ分野のDXにおけるローカル5G通信技術の必要性について説明する。

技術革新の進展（Society5.0）や行政のデジタル化、および新型コロナウイルス感染症対策として「非接触・リモート化」の働き方が急速に展開される、社会経済情勢の激しい変化に対応して、2020年7月、国土交通省は、インフラ分野においてもデータとデジタル技術を活用して、国民のニーズを基に社会資本や公共サービスを変革すると共に、業務そのものや、組織、プロセス、建設業や国土交通省の文化・風土や働き方を変革し、インフラへの国民理解を促進すると共に、安全・安心で豊かな生活を実現すべく、産学官が一体となった横断的な取り組み推進を開始した。

その中には、ロボット・AI等の活用で人を支援する現場の安全性や効率性の向上、デジタルデータを活用した仕事のプロセスや働き方を変革するための基盤整備が盛り込まれている。具体的なアクションプランとして、無人化・自律建設機械による施工やICT活用による安全で快適な労働環境の実現、また、調査業務、監督検査業務、点検管理業務などのAI等の活用による判断支援を行うシステムの構築などが挙げられている。これらを実現するためには、様々な情報がデジタル化されると共に、公共通信不感地帯を含めた建設フィールドにおけるローカル通信技術の確保が非常に重要な課題となっている（図4.4-90）。

インフラ分野のデジタル・トランスフォーメーション(DX) 資料1



図 4.4-90 国土交通省が掲げるインフラ分野の DX

(国土交通省：<https://www.mlit.go.jp/tec/tec tk 000073.html>)

続いて、建設分野におけるICT活用に関する動向について説明する。ローカル5Gと親和性のある技術としては、ロボットやAI等による施工や検査、点検の自動化・自律化によって、ヒトによる作業の支援・代替を行い、危険作業や苦渋作業を減少させるとともに、安全性・生産性を向上させることが挙げられ、国土交通省のロードマップでは、2025年度までの社会実装を目指している。土木研究所では、多種多様な建設現場環境や作業内容に対応できる柔軟な建設ロボットの開発、自動化を念頭に置いた法令・規制の整備、協調領域の明確化と技術の標準化による研究開発体制の整備、それによる開発コスト削減を目指した取り組みがなされている(図 4.4-91)。

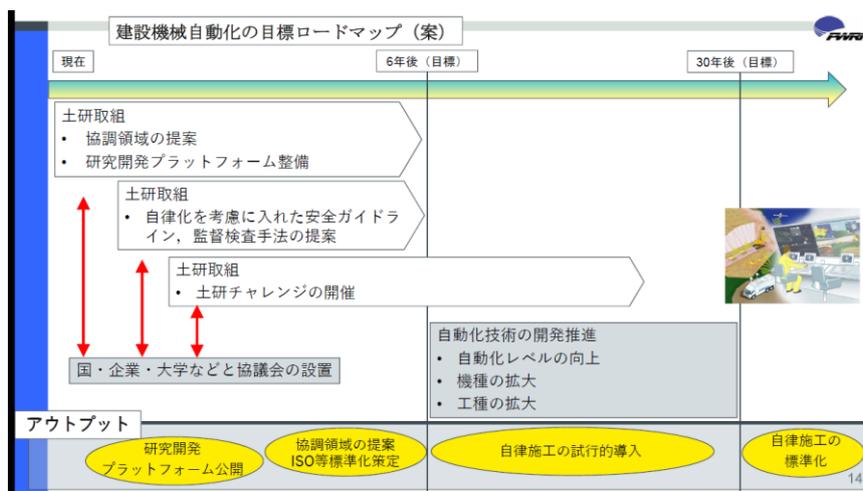


図 4.4-91 PWRI 土木研究所における建設自律施工の研究開発に向けた取り組み

(土木研究所：<https://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/event/2021/1020/pdf/kouen01.pdf>)

これらのデジタル変革(建設DX)を推進、開発技術の社会実装を早期に実現するために、東京大学 i-Construction 寄付講座などを中心として、産学官が一体となった協調領域での仕組みづくりも始まっている。建設施工の分野では、(一社)日本建設業連合会にて組織委員会を立ち上げ、個別テーマでワーキングを開始する(図 4.4-92)。

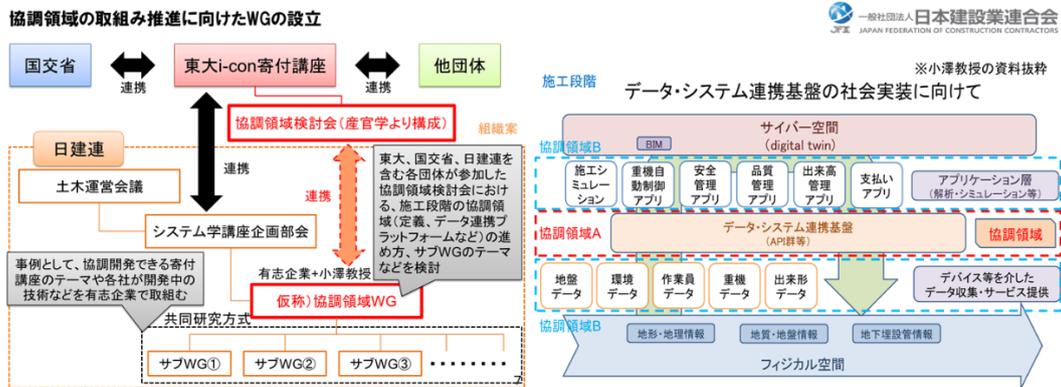


図 4.4-92 (一社)日本建設業連合会の協調領域 WG

各建設会社が独自に様々な技術開発を行っている一部は、データ基盤や建設プロセス仕様を共通化することで、効率よく高度化することができると期待されている。建設フィールドにおける無線通信技術の導入の簡便性も共通の課題となっている(図 4.4-93)。

The figure presents four examples of autonomous construction technology. Each example consists of a photograph of the machinery in operation and a list of automated tasks.
 1. **自動運転油圧ショベル 土木研究所 (2007年)**: Research facility. Tasks include: automatic grading, rotation, and loading of the hydraulic excavator; automatic transport by crawler dumper; and realization of individual action automation for a single machine.
 2. **大林組WebSiteより (2019年～)**: Research facility. Tasks include: automatic grading, rotation, and loading of the hydraulic excavator; automatic transport by crawler dumper; and realization of individual action automation for a single machine.
 3. **鹿島建設提供 (2017年～)**: Dam site. Tasks include: automatic transport and unloading of soil by dumper; automatic unloading of bulldozer; automatic grading by roller; and realization of limited new use cases through combination of multiple machines.
 4. **大成建設WebSiteより (2021年～)**: Real facility. Tasks include: automatic grading and loading of the hydraulic excavator; automatic transport and unloading of soil by dumper; automatic unloading of bulldozer; automatic grading by roller; and realization of limited new use cases through combination of multiple machines.
 A concluding statement at the bottom reads: '今後は単独の建設機械による作業だけではなく、複数の機械の組合せ作業、全体の施工計画、施工後の検査などの自動化も必要' (In the future, automation is also necessary for work by multiple machines, overall construction planning, and inspection after construction). Below this, a red banner states: '民間企業・大学などにおける研究開発の加速化が必要!!' (Acceleration of R&D in private companies, universities, etc. is necessary!!).

図 4.4-93 建設自律施工技術の例

(土木研究所 : <https://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/event/2021/1020/pdf/kouen01.pdf>)

また、西日本高速道路（株）の新名神高速道路では以下の様な最新技術も公開されている(図 4.4-94)。供用線のトンネル坑内において、事故発生時にカメラを直ちに現場へ移動（時速 20km）させ、火災通報押ボタンや非常電話のフックアップに連動することにより、被写体の近接撮影が可能となり、いち早く、より詳細な状況把握が可能となるものである。非常時のトンネル坑内の状況把握は、二次災害への拡がりも防止する為にも、情報の迅速性かつ精度が求められるものである。



図 4.4-94 自走式カメラロボット

<https://corp.w-nexco.co.jp/activity/branch/kansai/shinmeishin/outline/outline04/05/>

道路管理者は、高速道路維持メンテナンスのために車線規制を行う場合もある。このような場合にも新技術の導入が図られている。交通規制注意喚起システム（図 4.4-95、図 4.4-96）は、一般車両が誤って規制帯に侵入した場合に、作業関係者の安全を確保することは重要な課題である。注意・退避支援を行うもので人的災害を限りなく防止するシステムとなっている。これらのインフラ管理に展開が図られている技術においても、ローカル 5G のような通信環境をローカルエリアで確保することは、重要な要素として求められている。



図 4.4-95 交通規制注意喚起システムの概要

<https://corp.w-nexco.co.jp/techno/product/ele01.html>



図 4.4-96 交通規制注意喚起システムのデバイス組み合わせ

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

本課題実証にて導入するソリューションの実装性は、超高精細(8K)映像に関わる処理装置とクラウドサーバ、市中キャリア通信設備、情報セキュリティ性能に依存する。ここでは、本開発検証でのコンソーシアムユーザ企業が本実証の業務終了後においても本ローカル5Gを用いたソリューションの一部または全てを継続的に利活用、あるいは他のユーザ企業等への普及展開も視野に入れて検証を続けることを前提に、実装性に関する検証結果を示す。

4.4.2.1 ローカル5G活用モデルの構築・検証

本課題実証ではローカル5Gと8K超高精細映像処理を組み合わせ、超高精細映像を用いて遠隔から建設現場の状況を監視可能なシステムの構築に関して検討を行った。本ソリューションのシステムでは建設現場を高精細な広範囲映像で取得すると共に、広範囲映像から所望の領域を部分的に切り出し表示することで複数人が所望の領域を同時に監視可能な機能を有する。また、AI検出の映像処理により、作業員や建設機械を検出して誘目表示する監視支援機能を有する。

本ソリューションのベースとなるモデルは上記機能を有し、以下のことを目的としたリアルタイム遠隔監視システムである。主に建設現場向けの安全監視を想定したシステムであるが、同様な遠隔監視が要求される用途への適用も可能であると考えられる。

- 複数人が任意領域を監視可能なリアルタイムモニタリングによる共時空間性の確保
- 低遅延、超高精細映像による、ストレスフリーな遠隔監視
- 映像処理によるリスクレベルの低減を促す支援

本ソリューションのモデルに関して、以下にシステム構成や機能要件、課題などについて説明する。

・システム構成について

本システムの主な構成機器として、ローカル 5G 機器（アンテナ、基地局装置など）、8K 超高精細カメラ、映像処理サーバ、配信サーバから構成される。現場で撮影した 8k 超高精細映像をローカル 5G ネットワークで伝送し、映像処理サーバで所定の映像処理を実行したのち、接続された複数の表示端末に対して映像処理を加味した映像を配信する。

今回実証した建設現場のように、工事の進捗に応じてカメラ位置などのレイアウト変更が想定される場所や、商用 5G の電波が届かない場所に対して、ローカル 5G による大容量の無線ネットワークの映像伝送は有効である。

ローカル 5G 機器は、8K 超高精細映像を安定的に伝送する設置条件が要求される。高品質な 8K30fps の映像を安定的に伝送する場合、100Mbps 程度の伝送が安定して行えることが望まれる。カメラ台数を増やして監視領域を拡大する場合には、ローカル 5G ネットワークに接続されたカメラ全体の映像伝送容量とローカル 5G の伝送容量を考慮して 1 カメラあたりの伝送容量を調整する必要がある。例えば、全体の映像伝送容量がローカル 5G の伝送容量を超える場合、監視対象の動きを考慮した上でフレームレートを下げて 1 カメラあたりの伝送容量を下げるよう映像品質を優先して調整する方法がある。一方、速い動きの生じる対象の監視など動きの追従性が要求される場合、映像品質を許容可能な範囲にてカメラ映像のビットレートを下げるよう調整を行うという方法もある。

映像処理サーバや配信サーバは、本実証ではクラウドサーバを用いたが、処理量や接続数を加味した上で、サーバ構成を決める必要がある。映像処理の高度化や端末への配信数の増加に伴い、必要とされるサーバ容量が増大するため、サーバの容量と運用方法、費用を考慮してサーバ構成を検討する。例えば、クラウドサーバの容量を減らす場合には、エッジサーバを設け、一部の映像処理をエッジサーバ上で実行してクラウドサーバに伝送することでクラウドサーバの負荷を軽減するというようなサーバを分離させた構成も可能である。

・映像処理について

本ソリューションの検証では、AI 検出処理により映像から作業員と建設機械を検出し、誘目表示することで作業領域を把握しやすいような支援機能を実装した。AI 検出には、検出対象や環境に適用した学習モデルが必要である。特に、建設現場のように、カメラの設置場所によって大きく環境が変化したり、建設機械など特殊な対象を検出したりする場合

には、それに対応した学習モデルが必要になる。そのため、システムを現場に設置した初期の段階では、設置したカメラの映像を基に学習モデルのアップデートを行う必要があると考えられる。

また、本実証期間は短かったため、工事の進捗状況が大きく変化する際の検出精度の検証が十分でなかった。今後様々な現場に展開するためには、環境変化に伴う学習モデルについて検証を継続して進める必要がある。

・機能拡張について

本ソリューションモデルは映像処理部分を高機能化することで、システムの機能拡張を行うことができる。例えば、今回の実証のようにAI検出で作業員や建設機械の位置を検出するだけでなく、検出した作業員の安全帯の状態判定なども行うことで、従来人手による安全帯監視作業を自動化し、業務効率化を図ることができる。他にも、進入区域への進入を検知し、進入が確認された際に警告を通知する機能に拡張することで、新しい価値を創出することができる。このように、ハードの構成はそのままに、映像処理サーバの処理機能を高度化することで容易に機能拡張することができる。

これら機能は、建設現場によって必要とされる機能も異なるため、各機能はモジュール化し、導入場所や費用に応じて適用する機能を使い分けるようにすることが考えられる。

・運用、メンテナンスについて

本ソリューションを導入する際に、通信の電波状態も考慮して設置が必要であり、専門的な知識が要求される。システムの導入において、建設現場などの現場担当者にそのような専門知識を要求することは難しく、現場からも敬遠されて導入が進まないと考えられる。そのため、システム導入時における各機器の設置調整やセットアップ、実稼働後のサポートを含めてシステムを納品するサプライヤが行うことがよさそうと考えられる。限られた工期の建設現場において、サプライヤとしてはレンタル業者やリース業者が考えられる。特に、建設現場の導入においては、建設業に特化したレンタル業者やリース業者もあり、そのような建設現場に関する知識も豊富なサプライヤであれば、比較的規模の大きいローカル 5G システムの設置調整含めた現場導入も進めやすいと思われる。

ローカル 5G の免許の取得について、導入先の現場にて免許の取得まで行くと現場の負担が大きくなると思われる。そのため、機器を納品するサプライヤが免許の取得も行い、それらサポート費用も合わせて料金を徴収する構成が現場にとっては運用しやすいと考えられる。

・課題について

本ソリューションの課題として以下が挙げられる

- 導入コスト、保守運用コストが高額
- 試しに導入することが困難
- 免許申請が手間
- 導入後の不具合などのサポート体制
- AI 検出における学習モデルの構築

ローカル 5G 機器は高額であるため、高額なシステムコストが導入において大きな壁になると考えられる。特に、新しい分野でソリューション展開する場合、運用実績も少ないことから導入の判断材料も少なく、導入まで踏み切れないことが想定される。装置の低コスト化と共に、長期的な試験運用による課題の抽出や効果の検証が必要となると考えられ、今後も継続して検証を行うことが重要である。ただし、資金面についてすぐには解決が難しいため、今後も補助金の獲得含めて推進する予定である。

免許申請や運用サポートについては、前述したように現場で対応必須とした場合には導入に影響することが想定され、サプライヤ側で免許の申請から不具合のサポートまで一括して対応する体制が望ましい。その際に免許申請方法の簡素化も必要になると思われる。

設置場所や環境、検出対象に応じて AI 検出に用いる学習モデルをどのように構築するかが課題である。これについても、継続検討の中で、工事進捗により環境が変化する建設現場への適用性について検証を行い、多様な条件でのモデルデータの追加と汎用化の検討を進める必要がある。

4.4.2.2 普及展開方策の検討

本実証により検証したソリューションを他の建設現場に普及展開することに関して、以下 2 つのことについて検討した結果を記載する。

(1) 基本機能の展開

他の場所へ展開するための、ローカル 5G 環境の構築やカメラ設置方法などのシステム敷設のための課題と対応策について記載する。

ローカル 5G 環境の構築においては、メーカーから納品されたシステムを、実際に建設現場に立ち入り設備設置を行う工事業者の存在が不可欠である。ローカル 5G の仕組みやロバスト性に関する知識があることは当然として、土木建設現場の労働安全衛生の知識を有する統括責任者を配置できることが重要である。建設現場における導入・展開をスムーズに行うためには、メーカーと建設施工者の間を取り持てるシステムインテグレータなどの存在が非常に重要である。

(2) 拡張機能の展開

検出した作業員や建設機械の画像上の位置情報を取得することができるため、ハザードをリスクレベルに上げないための支援的システムとすることができる。例えば映像上で、何かしらの閾値に基づきリスク状態を検出すると、その状態にある個人に対して、ヘルメット振動器などを通じてアラートを送り、周辺注意を促すシステムなども構築できると想像している。

ハザード（人に対して、何らかの危険な状態を発生させる関係にあるもの）は、接近することによりリスクとなる。その時は、ヒトの姿勢や位置、接近速度や上下高さ関係のポテンシャル量であったりするが、閾値を設けることによりリスク状態を判断することができる。ハザードを四方から確認すること、ヒトの状態を確認すること、ハザードとヒトの関

係を明確にすることは、これまで現場の安全管理において常に巡回パトロールという形で行われてきた事である。これらを支援することで見落としやヒューマンエラーに関する災害を防止できると考えている。

ローカル 5G 活用モデルの普及展開の加速に向けた、ローカル 5G 活用モデルを同様の課題を抱える他のユーザ企業等や他分野への普及するための方策として、本取り組みの外部への積極的な発信を検討実施する。具体的には、建設工事監督者の立場にある大阪西事務所の意見・評価を加えて、学会論文寄稿、各地方整備局が主催する建設技術展示会での発表活動、建設業界誌への投稿等を通じた情報活動を容易に行うことができる。また、清水建設が所属する（一社）日本建設業連合会での技術委員会活動や国土交通省 i-Construction コンソーシアム活動を通じた、同業界への情報公開を積極的に行うことで、ユーザサイドの展開活動を実施する。

今回は、建設会社の施工現場におけるローカル 5G の利活用例として、安全監視ソリューションのオンサイト運用を示したが、国土交通省をはじめ各建設会社では、大型建設機械の遠隔化、無人化、自動ロボット化に対する利活用へも大きな期待がある。機械操作と映像/風景、オペレータが感じ取る周辺環境の物理情報（機械の状態、振動などの感触、気象、地盤など）を遠隔地に転送し、よりリアルに臨場感のある環境から現場施工を実現することで、多様な人材の活躍が期待されていることから、実証の広報や結果の情報提供、インターネット上への展開により展開のきっかけが広がると考える。

一社）日本建設業連合会（以下、日建連）での技術委員会活動や国土交通省 i-Construction コンソーシアム活動、その他の展開方法について具体的に述べると、①土木学会全国大会での報告、②土木情報学シンポジウムへの投稿発表、③日建連での各種技術委員会への情報提供、④日建連内に発足する予定の協調領域検討ワーキングへのテーマアップ、⑤同業他社との共同研究開発コンソーシアムの設立などが考えられる。時間軸としては、建設業界にとっては、技術開発の投資資源を鑑み、システムのコスト面からも協調領域の技術開発として展開することが望ましいことから、各社への問い合わせから始めることとなる。一方で、建設施工業者は、本システムを資産として保有することはないことから、ローカル 5G に係わるインテグレータや Sier、建設設備・機械等をレンタルする業者などの専門家内でのエンジニアリング力が育つことも非常に重要である。これについては、産業界全体の話となることから、産学官が連携して方針を示してゆく必要があると考える。

建設 DX が始まる中で、遠隔化、無人化、自動ロボット化は進むものとなる。映像転送技術もさることながら、各種情報端末、各建設設備や建設機械、作業場の環境・状況や人の状態、動き、測量、計測情報に加えて、安全支援だけではなく、ガイダンス情報や指揮命令情報など、あらゆるものが ICT により連携することとなる。それらの多目的、多種類、大容量、高速通信を支えるためには、次世代の安定したシステム技術に期待が寄せられている。下図（図 4.4-97）は、建設生産システムの近い将来像を描いたものである。

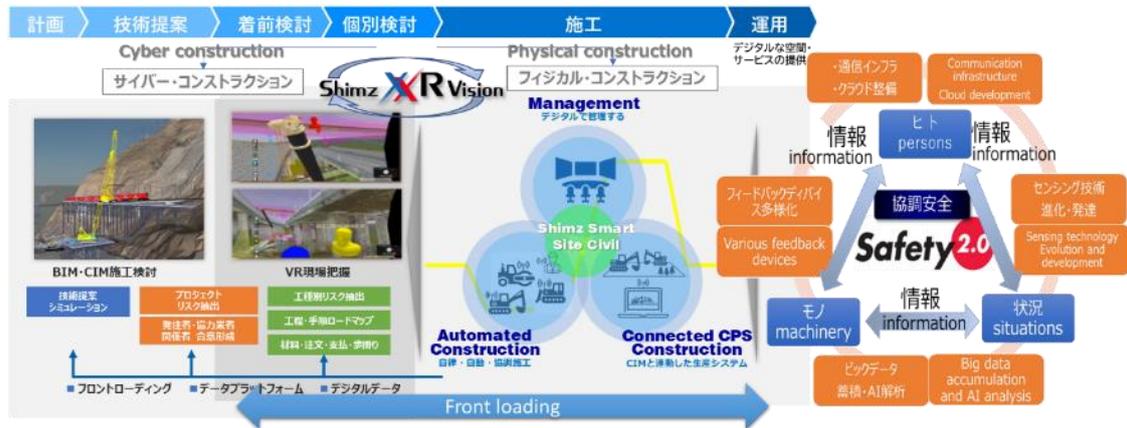
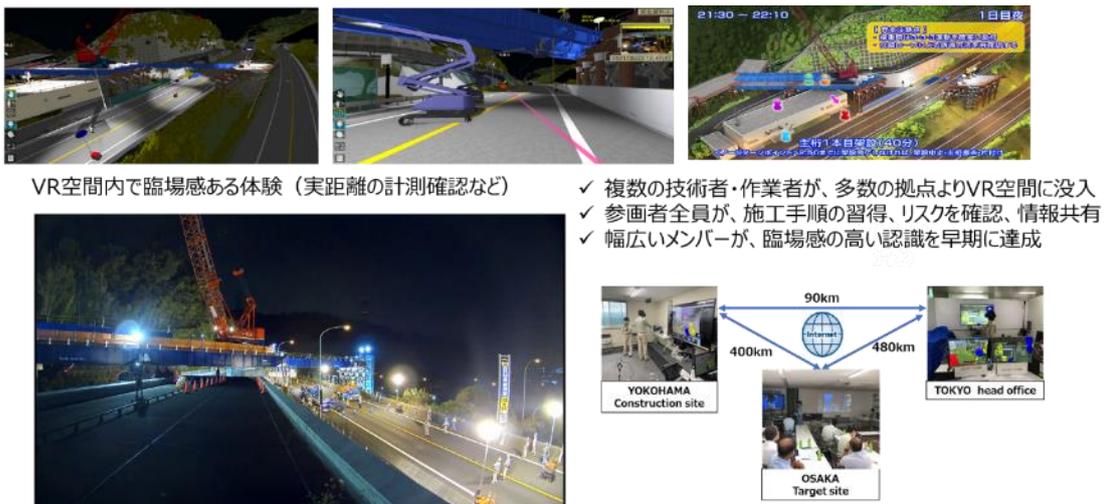


図 4.4-97 ICT を活用したデジタルツインによる建設生産システム

従来は、中央部の「施工」フィジカルコンストラクションの部分をおおそ人力かつアナログで行ってきたが、センサ技術と情報処理技術の進化によるデジタル化は、すでに加速化されている。スマートフォンやタブレットなどの情報端末の利活用も多様になり、大型建設現場などのモデル現場においては、大型モニタによる情報ダッシュボードの配置や商用メタバースの利活用も始まっている（図 4.4-98）。BIM/CIM モデル空間内にて施工をフロントローディングし、リスク抽出と対策工、不測の事態に備えたメニュー揃えと、受発注者間での関係者全員による情報共有、教育訓練により、1 度きりの施工を不具合なく、または、生産性を上げて施工することが可能となっている。建設現場は屋外現場生産を基本であるため、現場環境や構築する構造物によって工程管理を含めて施工管理を柔軟に変更して行く必要がある。ただ、同種の現場においては共通した重機を使用している場合や、作業方法が標準化されている場合がある。そういった既に標準化された情報と、本実証で実施したような映像解析で得られた情報とを総合的に検討していくことにより、工程管理や原価管理の高度化につなげることができると考えられる。



VR空間内で臨場感ある体験（実距離の計測確認など）

- ✓ 複数の技術者・作業者が、多数の拠点よりVR空間に没入
- ✓ 参画者全員が、施工手順の習得、リスクを確認、情報共有
- ✓ 幅広いメンバーが、臨場感の高い認識を早期に達成

図 4.4-98 遠隔地からの VR 空間への没入（メタバース）会議と実施工の様子

今回の課題実証やここまでの紹介は、以下の様な将来図からバックキャストした取り組みである（図 4.4-99）。



図 4.4-99 若手が考える未来の建設施工の様子

これら、すべてを支えるためには、高度で安定した通信技術は不可欠である。

4.4.3 ローカル 5 G の実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討

4.4.1.1～4.4.2 の実証結果を踏まえ、ローカル 5G 活用モデルの実現や実装に係る構造的な課題（ミッシングピース）やさらなる検討事項について検証した。

本ソリューションを展開する上で想定される課題について説明する。

- ・ 技術的な課題について
 - 夜間撮影による映像品質

本実証では、主に夜間工事を対象として実証を行った。日中の明るい環境に比べて、夜間は暗いため映像品質の低下が確認された。現場関係者による主観評価では、部分拡大映像についてノイズによる映像品質低下の影響が生じており、監視対象の細部を確認する場合には映像品質の改善が必要であるとの結果が得られた。建設現場のような屋外作業の監視環境も対象としてシステム実装する場合、用途に応じて夜間撮影の映像品質が十分であるか考慮する必要がある。カメラのセンサ感度はデバイスに依存するため改善が難しく、夜間の映像品質を改善するためには、動きぼけの生じない範囲で露光時間を長くする撮影設定や、現場を一定の明るさを保つように照明環境を最適化するなどの方法が考えられる。また、照明光が直接カメラに入射しないようなカメラ設置レイアウトにすることも必要である。今後、照明設備や撮影条件の最適化により、映像品質の改善を図っていく。

- AI 検出精度

本実証では、AI 検出により作業員と建設機械を検出し、誘目表示を行う機能について検

証を行った。建設現場では、ヘルメットや安全帯を着用した作業員、建設現場特有の建設機械など一般的な環境とは異なる条件となる。公開されているオープンデータによる学習モデルを用いて検出の評価を行ったが、一般的な人と作業員では特徴が異なることや建設機械の学習モデルデータが不足していることもあり、実証現場で取得した画像から学習モデルを構築する方が検出精度を改善できることがわかった。

AI 検出精度に関して、検出漏れや誤検出も確認しており、現場関係者の主観評価にて24%が「検出漏れや誤検出が認められ、わずかに気になる」との結果も得おり、検出精度の改善が必要である。今後、工事の進捗と共にさらに大きく環境も変わるため、未学習のパターンも増えて検出精度に影響が生じることが想定され、学習モデルの汎用性の改善と環境変化による検出精度の検証が必要と考えている。

他の建設現場へ展開する場合、大きな環境の変化が生じるため、設置場所での学習モデルデータの追加を行うことが必要と想定される。そのため、システム設置後の初期の段階ではその現場で取得した映像データを基に学習モデルをアップデートする作業が必要になる。

学習モデルの構築にはある程度の手作業が必要であるため、自動化を目標に効率的に学習モデルの作製が行える環境構築を行うことも必要となる。また、システム導入時のサポートの一つとして、システムの納入先が初期の学習モデルの構築作業まで実施することで現場関係者による作業の生じない仕組みとすることも必要になると考えられる。

建設現場以外の他用途へ展開する場合にも、検出対象に応じた学習モデルの構築となり、AI検出の検証を実施することが必要である。今後、多様化する監視対象物も考慮し、AI検出精度の向上に取り組んでいく。

・導入面および運用面の課題

建設現場関係者からはローカル 5G 機器の扱いについて不安であるとの意見があった。機器設置時の設定や運用時に生じた不具合などは専門知識が要求されるため、導入先で対応が必須となると導入が難しくなることが想定される。そのため、システムの提供と共に設置や不具合対応といった専門知識の要求される作業についてはサプライヤ側で一括してサポートする仕組みが必要であると考えている。

免許申請についても、建設現場のように利用期間が限られている場合には、建設現場側で免許取得まで行うと非常に手間が生じる。そのため、免許申請についても納入先のサポートとして製品パッケージに含むようにして提供することで、現場の負担を軽減することが考えられる。

・導入効果・機能の課題について

本実証では、広範囲に撮影した超高精細映像から、監視者の所望する任意の領域を切り出した部分拡大映像を配信することで複数人が同時に監視できるシステムの効果について実証した。

遠隔から監視できることによって、現場に行かずに監視業務が行えるため、業務効率化に繋がる。ただし、ローカル 5G 機器が高額であることを考慮すると、単に遠隔から従来と同様な監視業務を行えるだけでは移動に伴う時間の削減は図れるが、監視業務自体の大幅な効率化とはならないため、システム導入に伴う費用対効果は十分でないと言える。費

用対効果を高めるためには、さらに監視業務の効率化を図るための高機能化に取り組む。

ハードウェアを高機能化するとその分のコストがかかるため、ハードウェアはそのままに映像処理を高機能化することがよいと考えられる。例えば、建設現場では安全帯の着用状態を監視するための監視員を必要とするが、映像から作業員を検出するだけでなく、安全帯の着用状態まで識別できるようにすることで、安全帯監視員の人員を削減することができる。システムの導入先の監視業務内容に合わせて、従来の監視作業を映像処理に置き換え可能な業務を抽出し、映像処理機能として高機能化することで大幅な費用対効果の改善が見込める。映像処理の高機能化では、映像処理サーバのソフトウェアアップデートでの対応が見込めるため、システム構成の変更することがなく、容易にアップデートできることが期待できる。

建設現場でも場所によって必要とされる機能は異なるため、必要な映像処理機能を組み合わせることで現場に実装できることが望ましい。他の用途展開でも、システム構成を変えずに映像処理部分のソフト変更により対応できると考えている。

・普及に関する課題

本ソリューションは導入コストも高額であり、システムの規模も大きいことが導入時の課題となる。システムの導入について、本格導入前に試験的に導入し、その結果を基に本格的に導入できるような仕組みがあるとよいと考える。また、建設現場のような工期が決まっており、限られた期間で利用したい場合にその期間だけシステムを導入できるような仕組みが必要と考える。本システムについても、レンタルやリースといった必要な期間だけ運用できる構成であると導入しやすくなると思われる。

現場での実証実績が少ないため、多様な建設現場においても長期的に運用可能なシステムであるかの検証試験による実証データが必要となる。検証試験を推進する上で、資金面の問題が生じるが、総務省の本開発実証や、国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」のような公募による資金獲得、またはコンソーシアム各企業の自己資金により検証を推進することを考えている。

ローカル 5G の実装に向けた課題解決の方向性を導き出すための検討方法としては、学識経験者への相談と意見収集を検討・実施する方針とする。西日本高速道路（株）は、技術アドバイザー学識経験者らと連携した様々な取り組みを行っているが、本検証取り組みが、事業活動の中で他のソリューションを支える基盤インフラとなる可能性等を含む技術検討題材として適宜連携した展開を検討する。

検討は以下のような手順を進めることを想定する。

建設現場の状況に応じて設置条件などの調整が生じる可能性があるため、建設現場に設置するシステム構成や設置条件の決まった初期の段階で、実装状況において課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、実装に反映させる。

建設現場にシステムを構築し、動作検証を進める際に想定外の不具合等が生じる可能性があるため、現場での実証開始された段階で、実装状況に課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、実装に反映させる。

映像処理による遅延などの課題が生じる可能性があるため、システムの稼働が進んだ段階で試験運用中のシステムに関して、課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、実装に反映させる。

各段階での課題の抽出については、評価時期に応じて現場関係者を交えるなど意見を集約し、実際の運用を想定したシステム実装となるよう方向付けを行う。

課題実証における個人情報・プライバシー情報の取り扱いについては、総務省・経済産業省より「カメラ画像利活用ガイドブック（平成30年3月 ver2.0）」および「個人情報の保護と利活用に向けた経済産業省の取組」が発行されている。当コンソーシアムではこれらガイドブック等を理解し従っており、本実証で用いるカメラ画像は対象にあたらなかったが、建設現場内に入り出す複数の関係者のいる場所での実証であり、かつ高速道路を通行する車両ナンバープレートや乗車人物の顔などは取得画像で把握できないものの、本開発実証に関係のない第三者が映り込む環境であるため、状況に応じた配慮事項の対応を行った。具体的には、画像内の建設工事エリアおよび作業エリア以外の部分については、モザイク処理の後に保存し、元画像は破棄した。また、この周辺を撮影中であることを告知する看板を撮影エリアの出入りに掲示した（図 4.4-100）。本ソリューションを展開するにあたっては、撮影対象の環境や特性に考慮し、必要に応じてプライバシー情報の対策を講じることが重要である。



図 4.4-100 カメラ撮影を周知する看板の設置

4.4.4 継続利用の見通し・実装計画

本課題実証では、実施計画書および本報告書 4.2 章に記載した実証目標を達成することができた。一方、現場での実証期間が実質 2 ヶ月程度であり、実証現場の工事進捗の影響により実証環境に大きな変化が見られなかったため、建設現場特有の事象として考えられ

る①実際の工事進捗に合わせての電波環境、②映像取得要求の変化に対する運用面での課題については今後も継続した検証を行う。引き続き、同一現場で検証を続けることで、予想している電波伝搬環境の変化の確認（技術実証の継続的な確認）や、工事進捗に対応した、映像取得位置の変更と解析・安全管理ソリューションの継続更新（課題実証の継続的な確認）での課題確認が重要と考えている。

本ソリューションを実装するためには、長期的な運用検証が必要であり、今後も継続して検証を進めることを想定している。実装に向けては 4.4.3 章で記載した課題解決策の実行が求められるが、国内外における関連技術の研究開発動向の影響を受ける項目や本コンソーシアム単独での実行が不可能な項目も含まれるため、実装の達成時期を推測することは非常に困難である。そのため、あくまでも暫定的な推測に過ぎないが、現時点で想定される 2027 年度までのスケジュールを図 4.4-101 に示す。実装目標は 2027 年度とし、以下に各課題解決策の実行計画について説明する。なお、本ソリューションは、広範囲な屋外不感地帯の現場、有線敷設が困難な場面を対象としており、ローカル 5G を活用することが前提条件と考えているため、部分実装やキャリア 5G によるソリューション実装は本システムの実装展開としては想定していない。

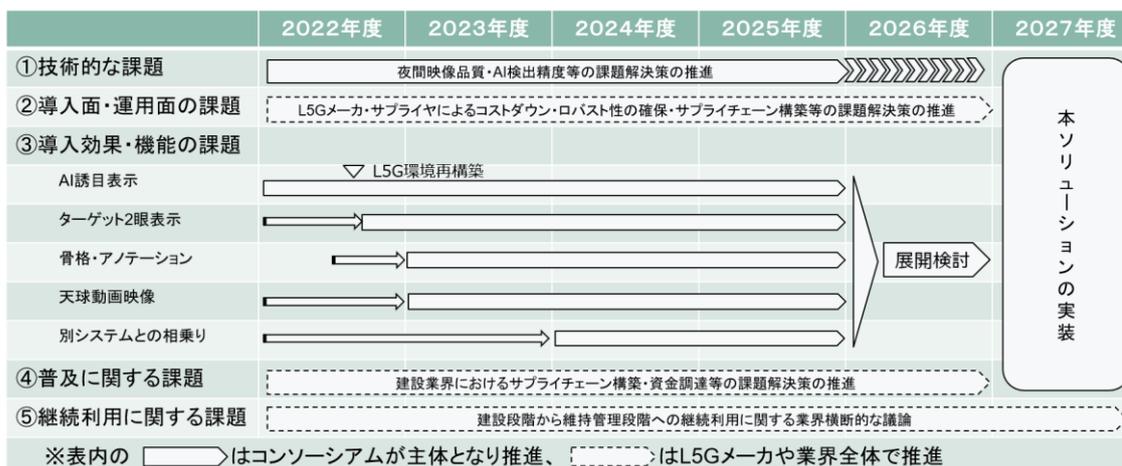


図 4.4-101 安全ソリューションの課題解決の実行計画

① 技術的な課題

本実証現場のように夜間工事を対象とした遠隔映像監視が求められる場合、監視内容・用途に応じて夜間の映像品質確保が課題である。解決策としては、撮影機材の内部設定の調整や監視対象周辺の照明環境の最適化、撮影映像の品質に影響のないような照明設備やカメラの配置調整が考えられる。また、工事現場によって異なる監視対象物（様々な保護具を装着した作業員、用途によって形状・サイズの異なる様々な建設機械）を高精度に AI 検出するために必要な学習データが不足しているという課題がある。解決策としては、導入環境に応じた学習モデルの構築を円滑に実施可能な仕組みづくりおよび学習モデルの汎用化に向けた改善、環境変化による検出精度の検証を実施していくことが必要である。

検証スケジュールとしては、2025 年度までにこれらの解決策を実行し、それ以降は導入現場のニーズに合わせて、改良を継続する予定である。

② 導入面および運用面の課題

現地一品受注生産という特徴をもつ建設業では、発注者への納品物である構造物を構築するために施工上必要な建設機械や資材、電気設備、機械設備は工事ごとに異なる。そのため、建設現場では工事ごとに仮設資材リース会社や電気設備・機械設備仮設業者から工事期間に限定してこれらをレンタルまたはリースして使用する。レンタル・リースした資機材は工事完了と共に返却または廃棄することが一般的であり、建設業者がこれらを常時保有・転用する例は極めて少ない。このことから、建設業者はこれら資機材の借り手という立場であり、多種多様な機械や設備に関する高度な専門知識を持つ人材は少ないのが現状である。現状を踏まえて本ソリューションの建設現場への実装について考えた場合、建設業者のみによる導入と運用は困難であるという課題がある。解決策としては、本ソリューションを建設業におけるサプライチェーンに組み込むことが考えられる。それには、ローカル5Gを活用した多様なソリューションとその効果に関する情報を建設業界全体に広く発信し、認知度を高め、多様なローカル5Gシステムの導入価値を高めていく取り組みが求められる。また、建設現場の環境に即した本ソリューションのロバスト性の確保に加え、取り扱いの容易さや設備設定値の余裕度合いが重要な条件になるとともに、24時間のサポートサービスが必要となる。サポートサービスには、導入時のシステム設定や運用中の不具合対応といった技術的支援に加え、免許の申請・取得・変更・延長についても事務代行する仕組みが重要である。

建設現場へのシステム導入について、下記⑤に詳細を記述するが、建設後の供用・維持管理の段階においても同システムおよびローカル5G機材を継続利用することは現状では想定されない。そのため、建設現場における一時的な利用を前提条件として、本システムの導入における課題を記載する。導入ステップとしては、建設工事の元請である建設業者が建設工事の発注者からシステム導入・運用方法に関する計画について承諾を得たのち、リース会社やレンタル会社からシステムを借り受け、現場への導入を進めるという流れが想定される。建設現場に本システムをどのような機器配置で導入するかについては、エリア設計を含め専門知識が要求されるため、導入先の現場側で検討することは難しい。そのため、システム導入に関する計画段階から、用途に合わせてローカル5G機器の配置や、カメラの仕様・設置構成に関するコンサルティングサポートができる仕組みも必要になると考えられる。納入は建設向けのリース会社やレンタル会社から行い、サポートは別の業者が実施するというように分業することも考えられる。しかし、工事進捗に応じて機器の設置条件が変更になることを考慮すると、機器のトラブルなのか、設置位置の変更によるトラブルなのか不具合発生時の切り分けが難しくなることも想定される。そのため、機器の導入・設置から運用のサポートまでを一括して対応できるサポート体制が望ましいと考えられる。ローカル5G機器の導入・運用には専門知識も必要であるため、納入業者をサポートするような仕組みづくりも重要になる。例えばリース会社やレンタル会社といった納入業者に対してある程度の運用サポートサービスが実施できるように関連の知識を習得す

る場の提供や、納入業者のサポートの範疇を超えてより高度な知識が必要な場合に、メーカーによる対応といったことが考えられる。

スケジュールとしては、上述した解決策の性質上、ローカル5G メーカーやサプライヤによる推進が必要であるため、実行計画のシミュレーションを具体化することは難しいが、システムの長期試験にて一定の成果が確認された段階で実装検討と並行してサプライヤを含めた仕組み構築についても協議を推進し、実装の短縮化を図る。

③ 導入効果・機能の課題

本システムにより遠隔映像監視が実現されることにより、現場に行かずとも監視業務が行えるため、現場・事務所間の移動に関わるコスト削減は図れるものの、監視業務自体の大幅な効率化には至らず、システム導入の費用対効果が限定的という課題がある。解決策としては、システム導入・メンテナンスに関わるコストを抑えるためにハードウェアの仕様はそのままに、映像処理の高機能化を目指すことによる費用対効果の改善が望ましい。現状のシステムでは未搭載であるが、例えば作業員が身に着ける安全帯の着用状態の判定機能が追加されれば、安全帯監視員の人員削減につながる。

映像解析による安全ソリューションの高度化、例えば、ヒトのポジショニングとハザードの関係から、安全アラートを個人にフィードバックする支援的保護システムの構築に向けた検証に取り組む予定である。その他の追加機能としては、多数のカメラによる安全ターゲット周辺の多面ピックアップ表示や、骨格抽出・アノテーション（図 4.4-102、図 4.4-103）による、リスク評価解析と個人へのガイダンスを促す支援的保護システムの開発、また、遠隔より臨場感を得る天球動画映像の配信による VR パトロール（例えば NTT グループによる SmartStream に類次：<https://www.smartstream.ne.jp/solution/live/>）なども検討推進していく考えである。

検証スケジュールとしては、図 4.4-101 に記載の通り、現状のシステムに搭載されている AI 誘目表示の高度化を引き続き進めるとともに、多数のカメラによる安全ターゲット周辺の多面ピックアップ表示、骨格抽出・アノテーション、天球動画映像の検証に順次、取り組んでいく。さらに、支援的保護システム等の別システムとの連携についても、2024 年度頃から検証を開始する。概ね 2026 年度頃までに、これら機能の一定レベルでの構築完了を目指し、その後は遠隔監視ニーズに合わせて展開を検討する予定である。



図 4.4-102 目的対象物の検出例

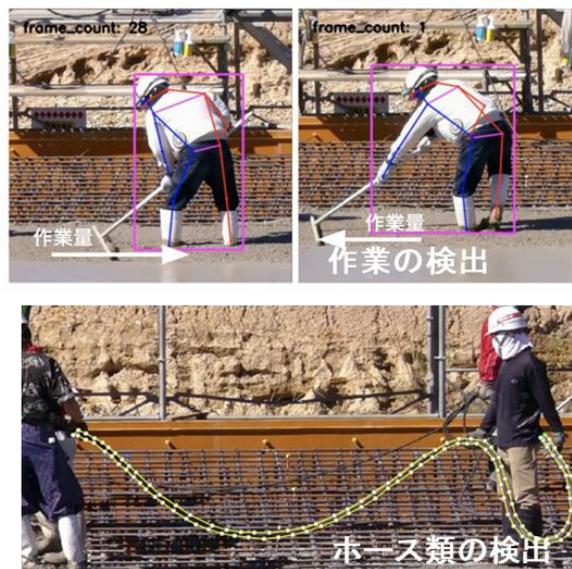


図 4.4-103 目的対象物の数的解析例（位置・移動量や延長・運動量の評価ガイダンス）

④ 普及に関する課題

本ソリューションは規模が大きく、高額な導入コストが掛かるため、長くても数年間での現地生産という特性を持つ建設分野においては、システム導入時の課題となる。解決策としては、システム本格導入前に現地にて試用できる制度や、短期間でのレンタルまたはリースとしてシステムを利用できる仕組みづくりが考えられる。建設業態でのサプライチェーンを担っているのは、仮設資材リース会社や、電気設備仮設業者であり、彼らの協力が無い限り、普及展開は厳しいものとなるのが現状である。また、彼らの事業活動において、ローカル5Gへの設備投資が、利益メリットを生み出すまでは、元請施工会社としても容易に導入を要

求することができないともいえる。

また、受注一品生産のため建設現場には多様な利用環境が想定され、システムのロバスト性向上に向けた検証が必要であるが、検証継続のためには資金面の課題がある。解決策としては、本開発実証や国土交通省の「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」のような公募による資金獲得が考えられる。

スケジュールとしては、上述した解決策の性質上、仮設資材リース会社や電気設備仮設業者を含む業界全体での推進が必要であるため、実行計画のシミュレーションを具体化することは難しいが、システムの長期試験にて一定の成果が確認された段階で実装検討と並行して関係者との協議を推進し、実装の短縮化を図る。

⑤ 継続利用に関する課題

建設工事完了後、構築した構造物の維持管理業務へシステムを継続して利用する場合、以下のような課題がある。

ビルや物流倉庫など民間工事が主体である建築分野では、大都市における再開発プロジェクト等においてローカル5Gを建設段階から現場へ導入し、竣工引き渡し、以降の利用を一気通貫で、エリアを限定しての長期的な運用が検討される可能性も今後生じるかもしれない。しかし、トンネルやダムといった重要社会インフラの公共工事が主体である土木分野では、上記②に記載したように、現状では建設段階から供用・維持管理にわたる継続利用を想定することは難しい。先のトンネル内の監視モニタの様な環境において、ローカル5G環境を構築利用する概念がある場合においても、本設設備として敷設構築を行うため、建設段階の仮設利用からそのまま、本設利用に移行することはない。また、サービスエリアなどでのローカル5G環境の構築利用も、本設設備としては同様の取り扱いとなる。建設段階での仮設利用であれば、同じく仮設利用を必要とする者との相乗りになる範囲での運用となる。

そのため、建設工事完了後に検査や維持管理のためのシステムとして本監視システムを導入して運用する場合には、別途、本設設備として用途に合わせてソリューション内容を改修した上で導入することが必要になる。建設工事では長くても数年間の利用であるため、短期間で運用可能なレンタルやリースが適しているが、維持管理を目的とした本設設備として運用する場合には数十年以上の長期的な利用が想定されるため、エリア全体の土地所有者、あるいは構造物の所有者や維持管理業務を委託された管理会社が本監視システムを購入するといった選択肢も考えられる。この場合においても、建設工事での運用と同様に本ソリューションの運用には専門知識が要求されるため、本設設備としての敷設や長期的な運用サポートも必要である。

このようなことから、本課題については業界横断的な議論が必要であり、各事業者の活用ニーズによっては継続利用が有効でないケースも生じると考えられるため、具体的な解決達成時期を明示することはできない。

次に、本システムの実装に向けた今後5年間における収支計画（図4.4-104）について記載するが、これはあくまでも本報告書を記載する時点で想定し得る収支であり、検証を進めていく中で大幅な金額変更が発生する可能性は大きい。その要因としては、例えばローカル5Gが全産業で普及が進み、製造やメンテナンスに関わるコストが下がれば導入費や運用費の削減が見込まれる。また、システム改良費として挙げている開発項目についても、技術革新が進み、同類技術が容易に安価に利用できるようになれば、本ソリューションへの組み込みに関する開発費用を抑えることができると推測される。

このような前提条件において、この継続検証を進めていく場合、費用としては本開発実証現場に導入したシステムの運用費として年間400万円程度に加え、新たな実証現場への本ソリューションの新規導入費5,000万円程度、安全ソリューションの高度化に関わる各種検証費用として最低でも5,000万円程度が必要と想定されることから、5年間で合計1.28億円と見積もる。一方、収入としては、本開発実証、もしくは国土交通省等の助成金の獲得により、おおよそ5,000万円のほかに、展開技術やシステムが建設現場での施工管理にとって有益な形であれば導入現場から利用料として50万円/月程度、1現場あたり年間600万円程度が見込まれることから、5年間で合計6,800万円と見積もる。したがって、全く採算の取れないことが推測され、収支を改善するためには4.4.1.1章の最後に記述したように、システムコストの低価格化が必須条件である。多様な業界におけるローカル5G活用思想の普及、適度な価格下落、ローカル5G機材やローカル5G活用モデルに関わるサプライヤの増加、サプライチェーンの整備が推進されることにより、導入現場が増え、多様な現場でのローカル5G活用ソリューションの運用検証が充実することで、ソリューションの高度化や追加機能の実装が加速され、建設分野においても労働安全性や生産性の向上などの導入効果がさらに増大する、といった好循環が期待できる。

	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	合計
費用						12,800万円
導入費				5,000万円		5,000万円
運用費	400万円	400万円	400万円	800万円	800万円	2,800万円
システム改良費						
AI誘目表示	200万円	250万円	250万円	250万円	50万円	1,000万円
ターゲット2眼表示	50万円	300万円	300万円	300万円	50万円	1,000万円
骨格・アノテーション		300万円	300万円	300万円	100万円	1,000万円
天球動画映像		300万円	300万円	300万円	100万円	1,000万円
別システムとの相乗り			450万円	450万円	100万円	1,000万円
収入						6,800万円
国の助成金	5,000万円 × 1件					5,000万円
導入現場の利用料				600万円	1,200万円	1,800万円

図 4.4-104 収支計画

4.4.5 課題実証における追加提案

本実証では、追加実証(課題1：ローカル 5G を用いたソリューションの高度化に関する実証)として、超高精細映像伝送の高度化について取り組む。

無線通信システムとして低遅延・大容量の伝送を実現するローカル 5G ではあるが、高品質な 8K 超高精細映像を IP ネットワーク上に長時間、安定的にストリーミング伝送することは容易ではない。8K 超高精細映像を高品質かつ低ビットレートで効率的に伝送する場合、HEVC による非可逆圧縮(エンコード)を用いることが一般的である。HEVC を用いる場合、8K 超高精細映像を高品質にエンコードするには、少なくとも 50Mbps~100Mbps 程度のビットレートが必要である。またストリーミング伝送では、予めターゲットレートとして定めたビットレートでエンコードを行う CBR (Constant Bitrate)を用いることが一般的である。無線網であるローカル 5G では、実効スループットの時間変化が有線網に比べ大きく、常時 50Mbps~100Mbps の実効スループットを維持することが困難であり、長時間、安定的にストリーミング伝送の実現は容易ではない。そこで、本追加実証においては、図 4.4-105 に示すようなシステム構成にて、2種類の映像伝送方式を用いて本課題の解決が可能であるか検証を行う。

1つ目の提案方式としては、TCP ベースの映像伝送方式である MPEG-DASH(Dynamic Adaptive Streaming over HTTP)方式を提案方式1として採用し、その有効性について比較・評価を実施する。実効スループットの時間変化が大きいローカル 5G において、安定した超高精細映像伝送を実現するためには、実効スループットの時間変化を吸収する再生遅延(バッファ時間)及び、実効スループットの時間変化に即時対応し、パケットロスやパケット再送を最小限に抑えるフロー制御が不可欠と考えられる。課題実証(基本実証)においては、低遅延・高スループットを謳う SRT(Secure Reliable Transport:以下、従来方式)を用いて 5G アップリンクでの映像伝送を行ったが、低遅延向けに最適化された伝送方式であるため、ローカル 5G 環境で想定される実効スループットの時間変化を吸収するために必要十分な再生遅延(バッファ時間)の確保が困難であることが想定される。また従来方式である SRT は、UDP ベースの伝送プロトコルであるため、独自のフロー制御が実装されているが、様々なネットワーク、アプリケーションに適應できるよう、長い年月を掛けて改良が続けられてきた TCP のフロー制御の方が、ローカル 5G 環境での超高精細映像伝送に適應し、パケットロスや再送の発生を最小限に抑えられる可能性が高いと想定される。したがって TCP ベースの MPEG-DASH 方式を提案方式1として採用し、その有効性について比較・評価を実施する。

また提案方式1の内容に加え、複数のローカル 5G 端末(UE)に分散して映像伝送を行う方式を提案方式2として採用し、その有効性について、比較・評価を実施する。ローカル 5G 環境においては、一定速度で連続したデータ伝送を行った場合、図 4.4-106 に示すような最大 300msec の間、まったくデータ伝送が停止するパケ詰まり現象が断続的に発生することが判明しており、ローカル 5G 環境における実効スループットの時間変化が大きい要因の1つとなっていると考えられる。提案方式2は、提案方式1の効果に加え、複数の UE にトラフィックを分散することで、UE で発生する不通区間によるスループット低下を他の UE でカバーすることで、より安定した映像伝送の実現する効果を狙う方式である。

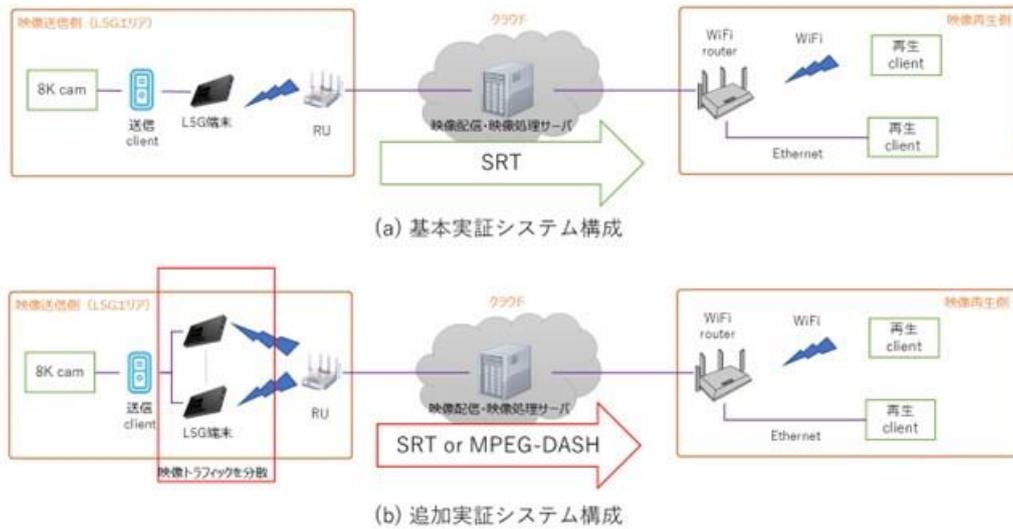


図 4.4-105 システム構成の違い

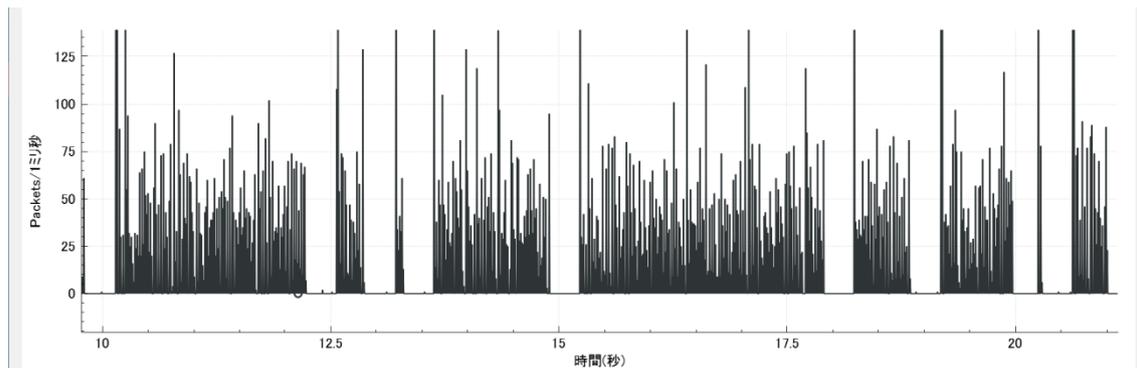


図 4.4-106 ローカル 5G 環境で観測されたパケ詰まり現象の発生例

(1) 評価・検証項目

表 4.4-13 は、本実証試験が想定する評価・検証項目である。本追加実証では、複数のターゲットビットレートでエンコードされた 8K 超高精細映像伝送を伝送システム構成（従来方式、提案方式 1，提案方式 2）每で行い、各項目の評価検証を行う。

表 4.4-13 評価・検証項目

評価・検証項目	評価内容
映像伝送品質評価	実効スループット、デコードエラー、フレームドロップ等の再生異常が認められるフレームの発生率を計測・評価
再生遅延時間評価	End-to-End での再生遅延時間を計測・評価
主観評価	再生映像品質を主観評価

(2) 評価・検証方法

表 4.4-13 に示した評価・検証項目に対して、それぞれ評価方法を示す。

◇評価項目 1 映像伝送品質評価

8K カメラにて所定のターゲットレートにてエンコードされ、ローカル 5G を介して伝送される映像データを、映像配信・映像処理サーバに受信・記録し、所定のターゲットレートを満足する実効スループットが得られたかを測定・評価する。

また映像処理サーバにて、リアルタイムトランスコードされた映像データを記録し、当該映像データに含まれるデコードエラーやフレームドロップ等の再生異常が認められるフレームの発生頻度から、各方式で実現される映像伝送品質を評価する。

◇評価項目 2 再生遅延時間

図 4.4-107 に示す通り、実証現場に設置したモニタ上に表示される現在時刻①を 8K カメラにて撮影、従来方式、提案方式 1、提案方式 2 のそれぞれで伝送し、映像配信・映像処理サーバでの処理を経て、再生クライアントで再生表示された時刻情報②を撮影し、①-②を求めることで当該方式における再生遅延を測定・評価する。

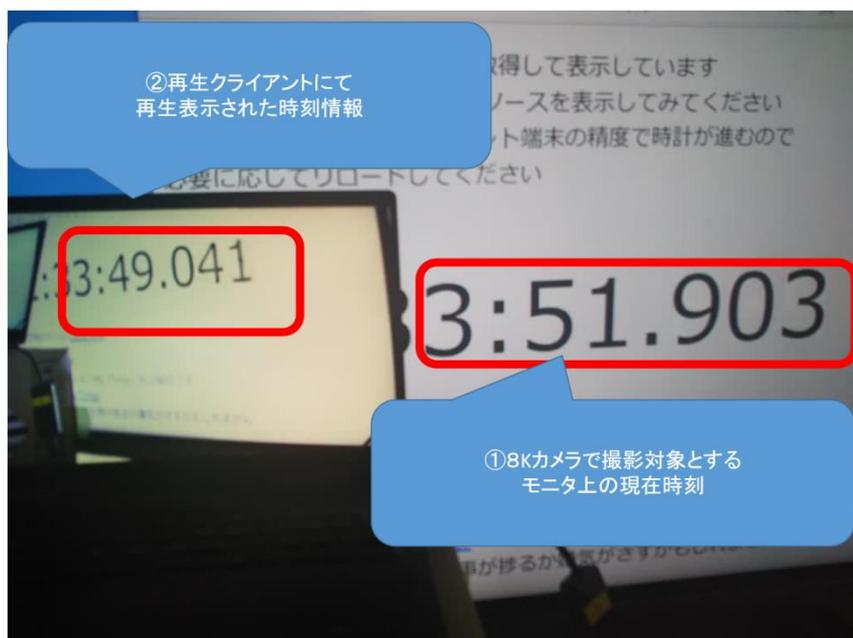


図 4.4-107 再生遅延測定方法

◇評価項目 3 主観評価

再生される映像データの視聴により、評価者が映像品質の主観評価を行う。

(3) 実証結果及び考察

表 4.4-13 に示した評価・検証項目に対する実証結果及び考察を以下に示す。

◇評価項目 1 映像伝送品質評価

従来方式、提案方式 1、提案方式 2 の各方式での伝送品質評価に先行し、実証環境で達成可能な映像伝送品質の目安を得る目的で、iperf3 による配信クライアント・映像配信／映像処理サーバ間の TCP スループットの測定を実施した。その測定結果を表 4.4-14 及び図 4.4-108 に示す。3 回実施した各測定において、平均スループットは 92.3~100Mbps と比較的バラつきが小さいが、最小スループットは、17.3~60.3Mbps とバラつきが非常に大きいことが確認された。

表 4.4-14 TCP スループット測定結果

TCP スループット	測定1回目	測定2回目	測定3回目
平均(Mbps)	92.3	100	92.8
最小(Mbps)	20.1	60.3	17.3
最大(Mbps)	119	115	118
分散	504	143	549

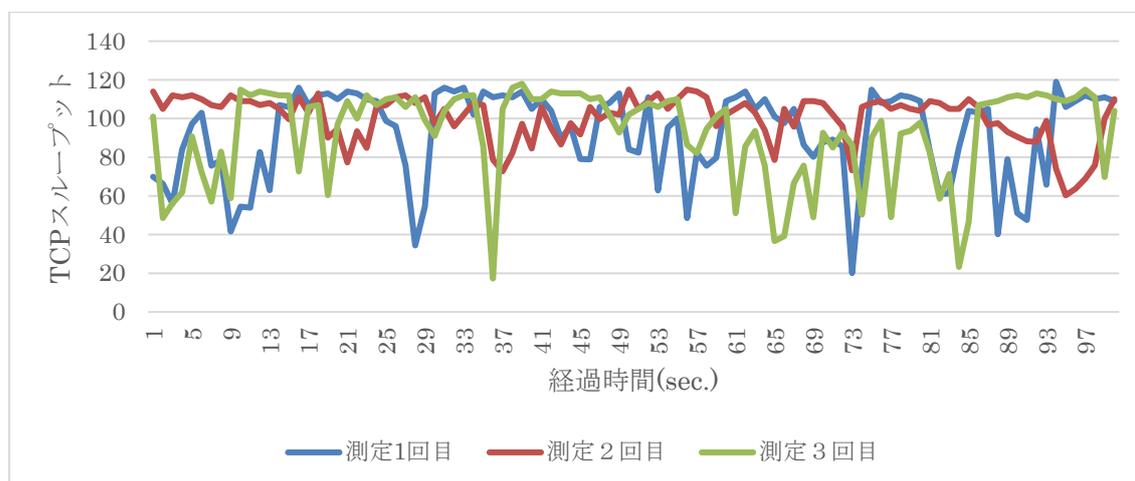


図 4.4-108 TCP スループットの時間変化

次に提案手法において、スループット変動の影響を軽減し高スループットでの映像伝送を実現する再生遅延（バッファ時間）の検討として、測定された TCP スループットの移動平均を求めた結果を、表 4.4-15、図 4.4-109、および図 4.4-110 に示す。この結果から、10 秒の再生遅延（バッファ時間）を設けることで、最小スループットが 66.5~80.1Mbps へ改善することがわかる。言い換えれば、本実証環境において、ターゲットビットレートを 66.5Mbps 以上に設定し 8K 超高精細映像を高品質で安定的に伝送するには 10 秒以上の再生遅延を許容する必要があると推測される。

表 4.4-15 最小スループット変化

	測定1回目	測定2回目	測定3回目
計測値(Mbps)	20.1	60.3	17.3
5 秒移動平均(Mbps)	59.1	68.5	53.4
10 秒移動平均(Mbps)	71.0	80.1	66.5

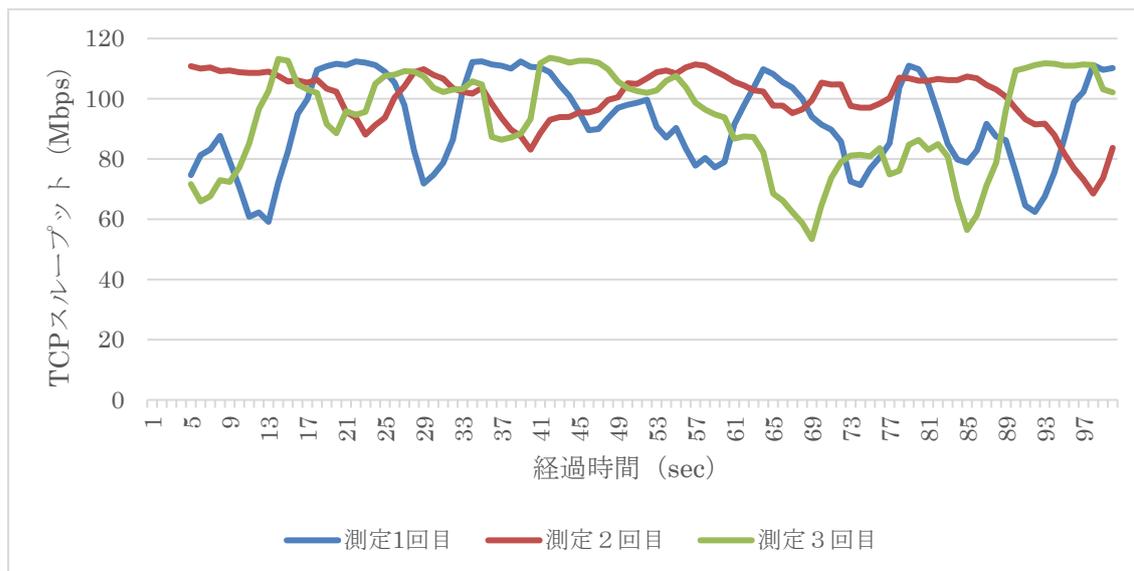


図 4.4-109 TCP スループット (5秒移動平均)

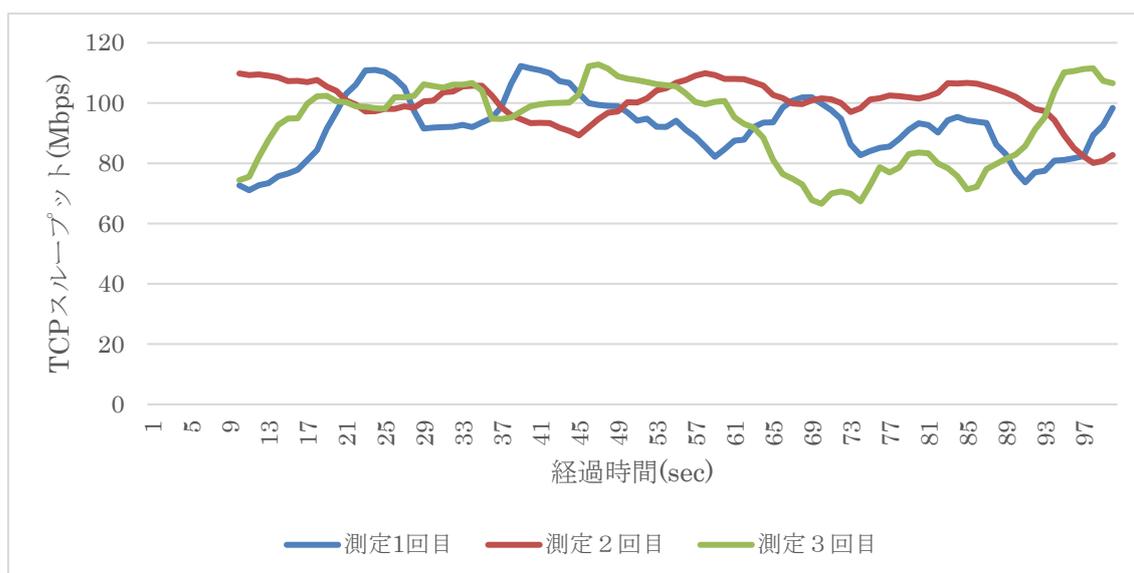


図 4.4-110 TCP スループット (10秒移動平均)

そこで本実証の提案手法においては、10 秒の再生遅延バッファを用いる構成で超高精細映像伝送の検証を行った。なお従来手法である SRT においては、10 秒の再生遅延バッファでの運用を行うことは困難なため、基本実証でも用いた 0.75 秒の再生遅延バッファを用いて検証を行った。

以下、ターゲットレートを 60,70,80Mbps とした場合の各方式での伝送結果を示す。また、評価項目 3 の再生映像品質の主観評価結果についても併記する。

表 4.4-16 および図 4.4-111 に従来方式の映像伝送結果を示す。平均実効スループットは、いずれも、ターゲットレートを上回っていたが、ターゲットレートが 60Mbps 以外の伝送

では、スループットが長時間ターゲットレートを下回った区間でいずれも再生異常、および目視による再生映像のコマ落ちが確認された。

表 4.4-16 従来手法の映像伝送結果

ターゲットレート	60Mbps	70Mbps	80Mbps
平均(Mbps)	63.0	72.9	80.2
最小(Mbps)	55.3	66.4	66.3
最大(Mbps)	71.8	80.3	95.2
再生フレーム異常(%)	0.0	2.83	15.4
主観評価	○良好	△数回コマ落ちの発生を確認	×長時間のコマ落ちの発生を確認

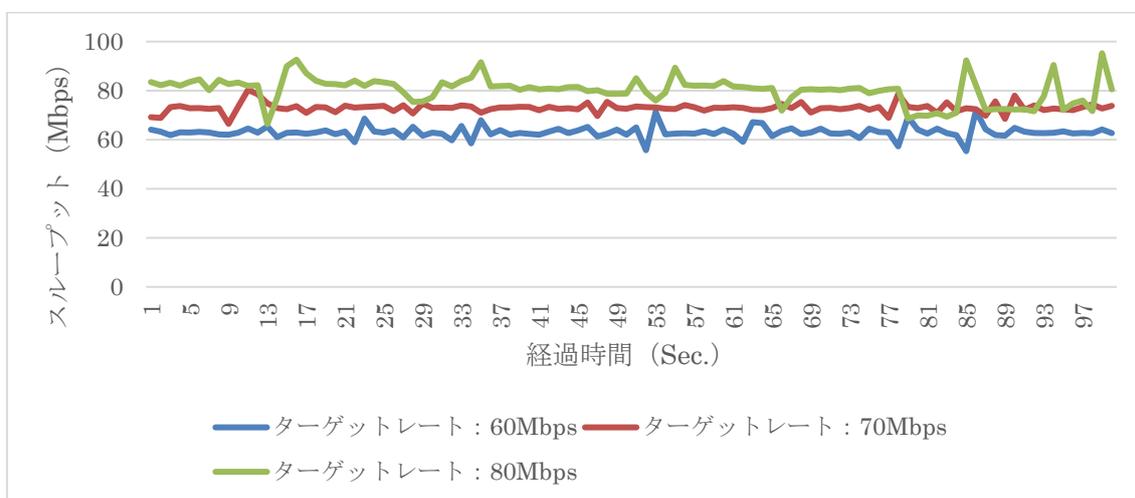


図 4.4-111 従来方式の映像伝送結果

表 4.4-17 および図 4.4-112 に提案方式1の映像伝送結果を示す。実効スループットの時間変化は、従来方式に比べて大きいものの、10秒の再生遅延バッファを用意したことで、全てのターゲットレートにて録画データにおける再生フレーム異常はなく、目視による主観評価でも良好な再生を確認することができた。

表 4.4-17 提案手法1の映像伝送結果

ターゲットレート	60Mbps	70Mbps	80Mbps
平均(Mbps)	62.3	73.0	81.2
最小(Mbps)	49.0	51.6	63.6
最大(Mbps)	77.5	98.4	106
再生フレーム異常(%)	0.0	0.0	0.0
主観評価	○良好	○良好	○良好

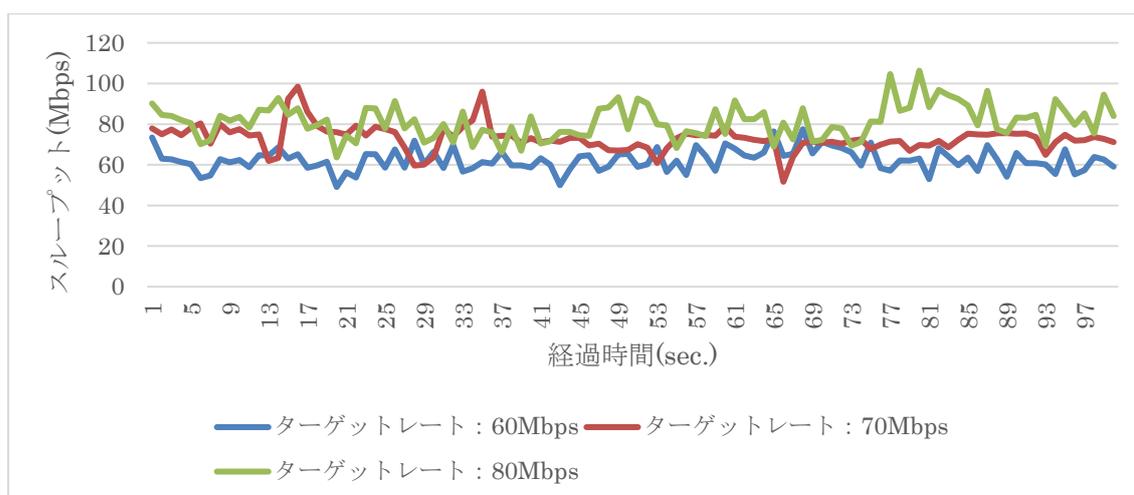


図 4.4-112 提案手法 1 の映像伝送結果

表 4.4-18 および図 4.4-113 に提案方式 2 の映像伝送結果を示す。提案手法 2 では、想定した結果と異なり、従来手法でも安定した伝送が可能であったターゲットレート 60Mbps においても、実効スループットがターゲットレートを大きく下回り、正常な再生を全く実現することができなかった。図 4.4-113 に示す通り、2 台のローカル 5G 端末 (UE1,UE2) のうち UE2 のスループットが 30Mbps を大幅に下回った状態が続いたことが伝送失敗の直接的な要因である。また、MPEG-DASH のセグメントデータ (映像データ 2 秒分に相当) 毎に各 UE への分散伝送のスケジューリングを行う実装としたため、2 台の実効スループットが大きく異なるケースにおいて、伝送スケジューリング変更の柔軟性に欠け、ターゲットレートを満たすスループットを得られなかった要因となったと考えられる。なお、ターゲットレート 70Mbps,80Mbps については 60Mbps での映像伝送が失敗に終わったため計測を見送った。

表 4.4-18 提案手法 2 の映像伝送結果

ターゲットレート	60Mbps	70Mbps	80Mbps
平均 (Mbps)	49.5	未計測	未計測
最小 (Mbps)	33.8	未計測	未計測
最大 (Mbps)	68.3	未計測	未計測
再生フレーム異常 (%)	100.0	未計測	未計測
主観評価	×	実施せず	実施せず

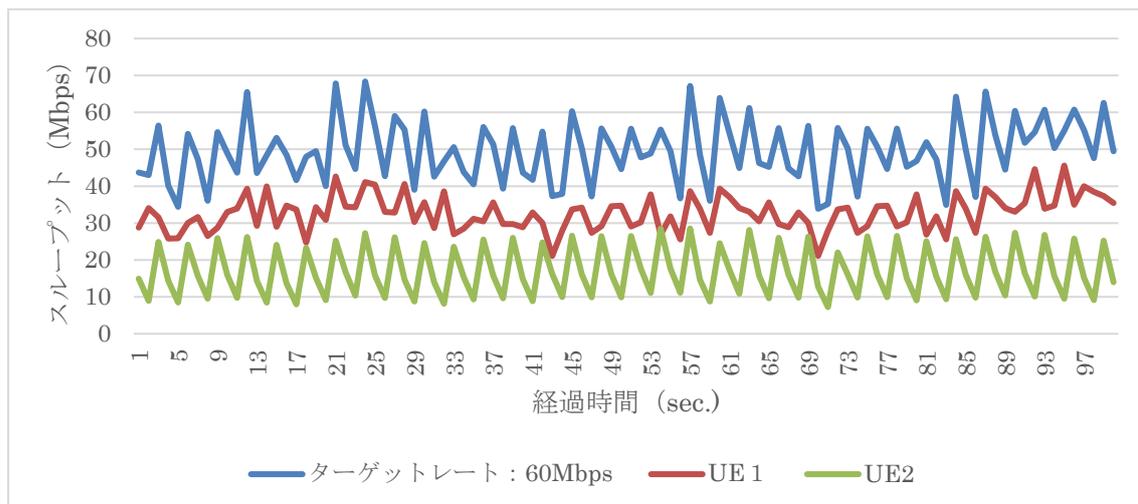


図 4.4-113 提案手法 2 の映像伝送結果

◇評価項目 2 再生遅延時間

従来手法および提案手法 1 で計測された End-to-End の再生遅延時間を表 4.4-19 に示す。なお、従来手法と提案手法 1 の違いは、5G アップリンクにおける映像伝送方式のみであり、映像配信/映像処理サーバで実行されるリアルタイムトランスコード処理および AI 認識処理、再生クライアントへの映像伝送方法については共通なため、提案手法 1 の再生遅延時間については、PC を再生クライアントとした場合のみを記載した。再生クライアント実装の違いやアクセス経路の違いによる差分はあるが、概ね 3 秒程度の再生遅延を達成できているのに対し、提案手法 1 においては、約 12 秒の再生遅延が発生している。その内訳は、本実証のために導入した再生遅延バッファ (10 秒) が大半を占め、残りを従来手法と共通な 8K カメラ内蔵 HEVC エンコーダで生じる符号化遅延 (約 1 秒) + 映像配信/映像処理サーバでのリアルタイムトランスコードから各再生クライアントでの表示までの一連の処理遅延 (約 1 秒) である。なお、本実証で用いた 8K カメラ (DC0200) の代わりに 8K マルチパーパスカメラおよび 8K エンコーダ (NxVi88E Theia T1) を用いる構成 (図 4.4-115) でも、ほぼ同等な再生遅延および符号化遅延 (約 1 秒) が発生することを別途確認しており、システムを構成する機器によらず、提案手法 1 では約 12 秒の再生遅延が必要になると推測される。

表 4.4-19 再生遅延評価

		従来手法			提案手法 1	
再生クライアント	PC	PC	タブレット	スマートフォン	スマートフォン	PC
再生クライアントの NW アクセス手段	有線 LAN	Wi-Fi	Wi-Fi	Wi-Fi	商用キャリア網	Wi-Fi
再生遅延時間 (sec.)	2.9	2.9	2.9	3.0	3.6	12.2

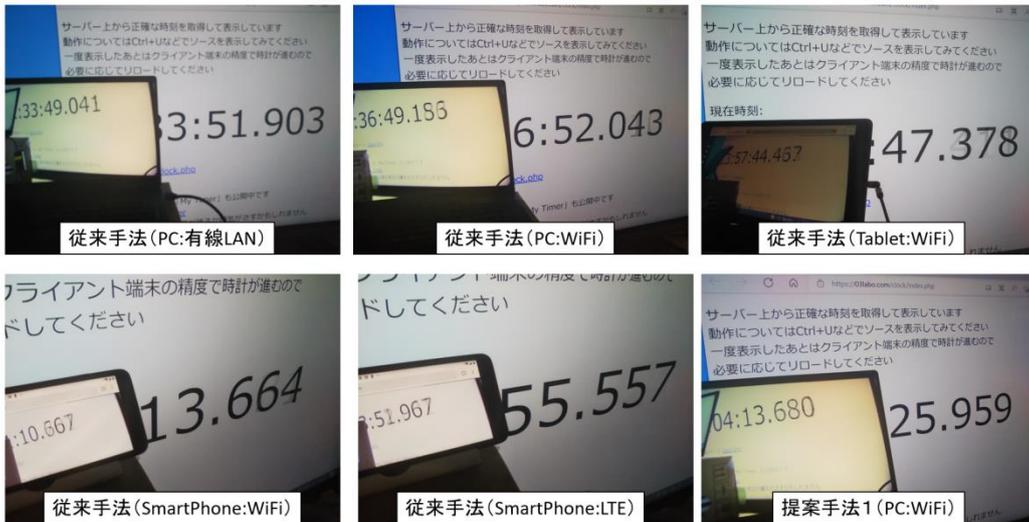


図 4.4-114 再生遅延測定結果例

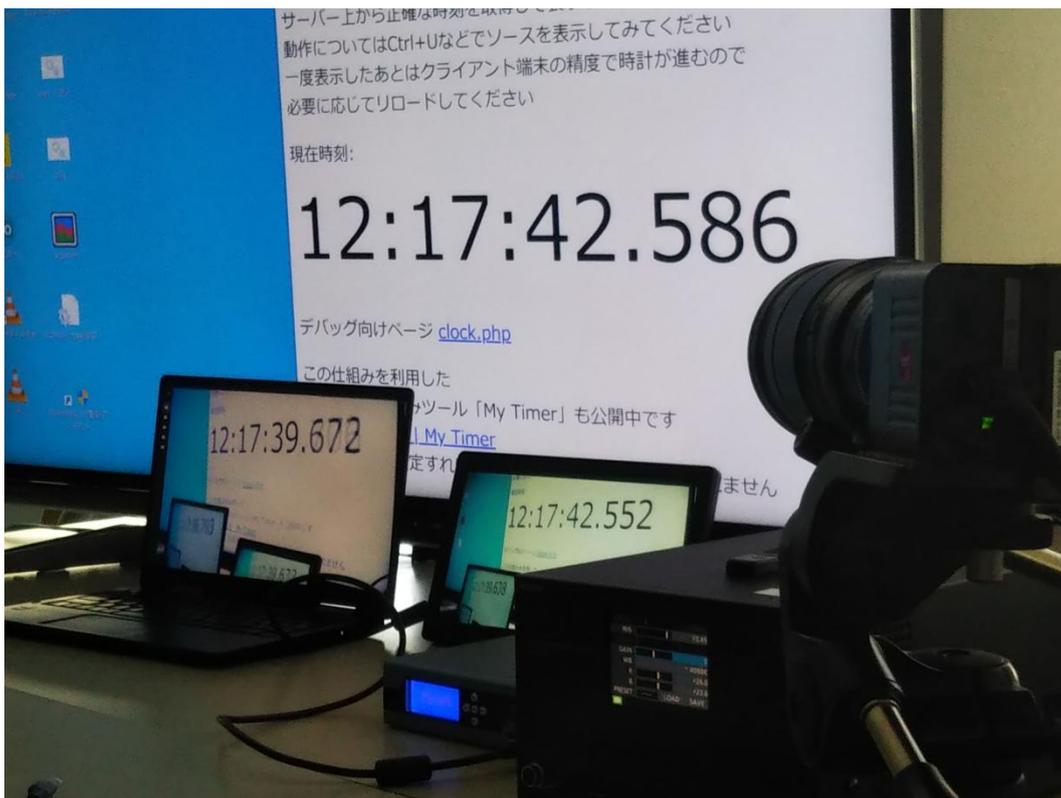


図 4.4-115 別構成の 8K 撮影機材での再生遅延測定例

◇評価項目 3 主観評価

評価項目 1 に記載済みで詳細な説明を割愛する。

以上、1～3の評価項目で示した通り、提案手法 1 にて従来手法を上回る高スループットで高品質な超高精細映像伝送が可能であることを示した。一方提案手法 2 では、想定するような高スループットで高品質な超高精細映像伝送を実現できずに終わった。

また高スループットでの安定動作と再生遅延はトレードオフの関係にあり、ローカル 5 G 環境のようにスループット変動の大きい環境化では、再生遅延の増加が避けられない。

再生遅延の課題については、既存の 8 K 撮影機器で用いる符号化制御 (CBR) の影響が大きく、今後、これらを両立する形で改良を進める場合には、映像伝送方式のみで対応することは困難で、ローカル 5 G 環境特有のスループット変動に素早く対応可能なビデオエンコーダの符号化制御技術の取り組みが重要になると考えられる。

5. 普及啓発活動

5.1 映像制作への協力

本開発実証の実施状況に関して、三菱総合研究所より映像制作を目的とした素材提供の依頼があったため、コンソーシアムで撮影を実施し、下記項目の映像素材を提出した。映像撮影はすべて新名神高速道路梶原トンネル建設工事内で行い、映像取得にあたっては、梶原トンネル建設所の担当者レベルで協議調整し、安全管理体制のもと撮影を行った。また、撮影した映像は西日本高速道路(株)大阪西事務所、梶原トンネル建設所およびコンソーシアムの承認を得たのち、三菱総合研究所へ提出した。

【提出した映像素材】

- ・ 建設現場の風景
- ・ 8K カメラ機材と建設現場
- ・ 8K カメラ
- ・ 8K 映像をモニタリングしている様子
- ・ AI 解析により人や建設機械を誘目表示している様子
- ・ 超高精細映像（8K 映像）
- ・ 実証概要を説明するコメント映像

5.2 実証視察会の実施

本開発実証の実証視察会は当初、実証現場現地およびオンラインのハイブリッド開催とする計画であったが、新型コロナウイルス感染拡大の状況を鑑み、全視察者が現地訪問を自粛されたため、フルオンラインでの開催となった。視察会準備および開催にあたっては、大阪西事務所および梶原トンネル建設所と連携調整し、に示すプログラムで実施した。また、視察会での質疑応答や視察者名簿を含む実施報告書、発表資料および Teams 配信録画映像を三菱総合研究所へ提出した。

1. 開催日程：2022年2月17日(木) 午後3時～午後4時
2. 配信会場：新名神高速道路 梶原トンネル工事事務所（清水建設）
3. 視察者数：計39名（コンソーシアム構成企業からの参加者を除く）
4. 議事次第（表 5.2-1）：全プログラムを Teams 会議にて配信

表 5.2-1 実証視察会プログラム

時間	プログラム	担当者
15:00～15:05 5分	開会挨拶・コンソーシアム紹介	清水建設(株)土木技術本部 イノベーション推進部長 小島 英郷
15:05～15:10 5分	実証現場の事業概要・工事概要説明	西日本高速道路(株)新名神大阪西事務所 高槻成合工事区工事長 櫻谷 慶治
15:10～15:15 5分	実証システム概要の説明	シャープ(株)研究開発事業本部 副本部長 藤本 昌彦
15:15～15:35 20分	実証内容(技術実証・課題実証)及び 結果の説明	シャープ(株)研究開発事業本部 ソリューション事業推進センター 課長 留場 宏道 主任研究員 有田 真一
15:35～15:45 10分	ローカル5Gユーザ評価と期待	西日本高速道路(株)新名神大阪西事務所 高槻成合工事区工事長 櫻谷 慶治 清水建設(株)梶原トンネル建設所 建設所長 木村 厚之
15:45～15:55 10分	質疑応答	コンソーシアム
15:55～16:00 5分	閉会挨拶	西日本高速道路(株)新名神大阪西事務所 所長 徳田 尚器

5.3 その他普及啓発活動

その他普及啓発活動としては、大阪西事務所および梶原トンネル建設所と連携調整し、下記の3段階で広報活動をすべく、準備を行っている(表 5.3-1)。

表 5.3-1 その他普及啓発活動

No	内容	実施予定時期
1	清水建設による実証概要・実証視察会に関するプレスリリース	2022年4月頃
2	令和4年度土木学会全国大会への論文投稿	2022年4月
3	2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会への論文投稿	2022年6月

6. 実施体制

6.1 実施体制及び役割

本プロジェクトのプロジェクトマネージャーは、清水建設（株）土木技術本部イノベーション推進部長が担い、西日本高速道路（株）、清水建設（株）およびシャープ（株）の3社でコンソーシアムを構成した（図 6.1-1）。

西日本高速道路（株）大阪西事務所は、ユーザ定義・試験運用・評価および意見を担当する。一方、清水建設（株）は関西支店と本社の2ユニットで構成し、関西支店梶原トンネル建設所は、建設所統括管理の立場から、西日本高速道路（株）と一体となり、ユーザ定義・試験運用・評価の意見取り纏めを担当するとともに、実証現場の作業調整および一部技術評価を担う。一方、清水建設（株）本社土木技術本部が本開発実証の全体管理を行うとともに、現場環境構築、実証調整および技術評価を取りまとめる。シャープ（株）は、本ソリューションの提供および導入、技術実証および課題実証を担当する。契約および経理処理については、コンソーシアム構成各社に担当責任者を配置するとともに、取りまとめは清水建設（株）土木技術本部イノベーション推進部主任が担当した（図 6.1-2）。そのほか、普及啓発活動の幹事は、清水建設（株）土木技術本部イノベーション推進部が担う。

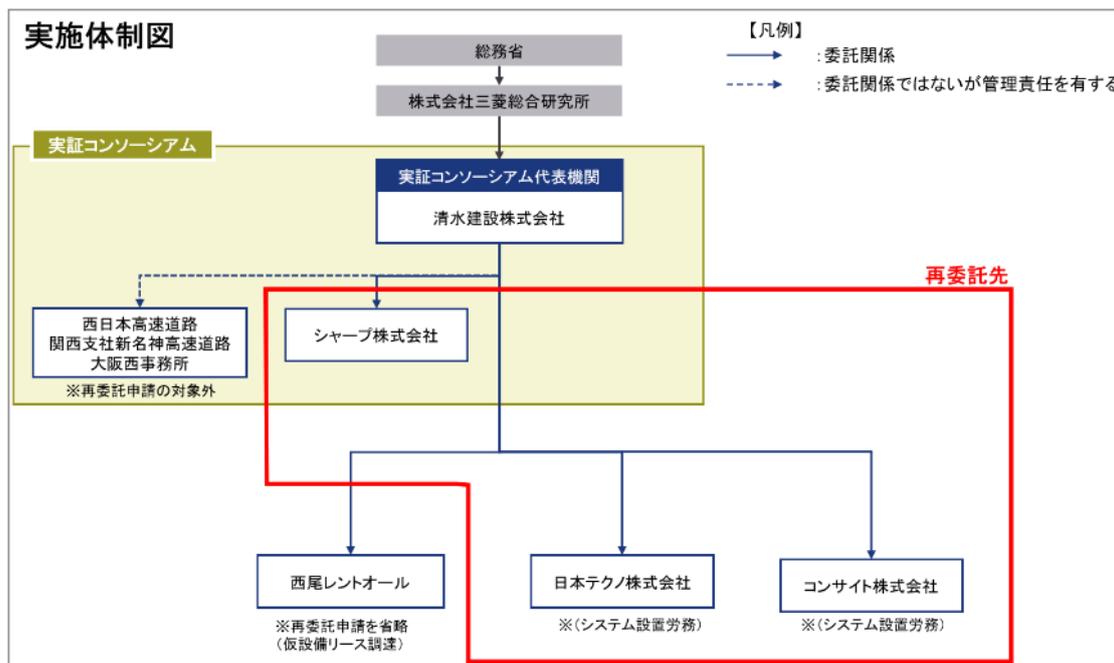


図 6.1-1 実施体制図

コンソーシアム

組織図

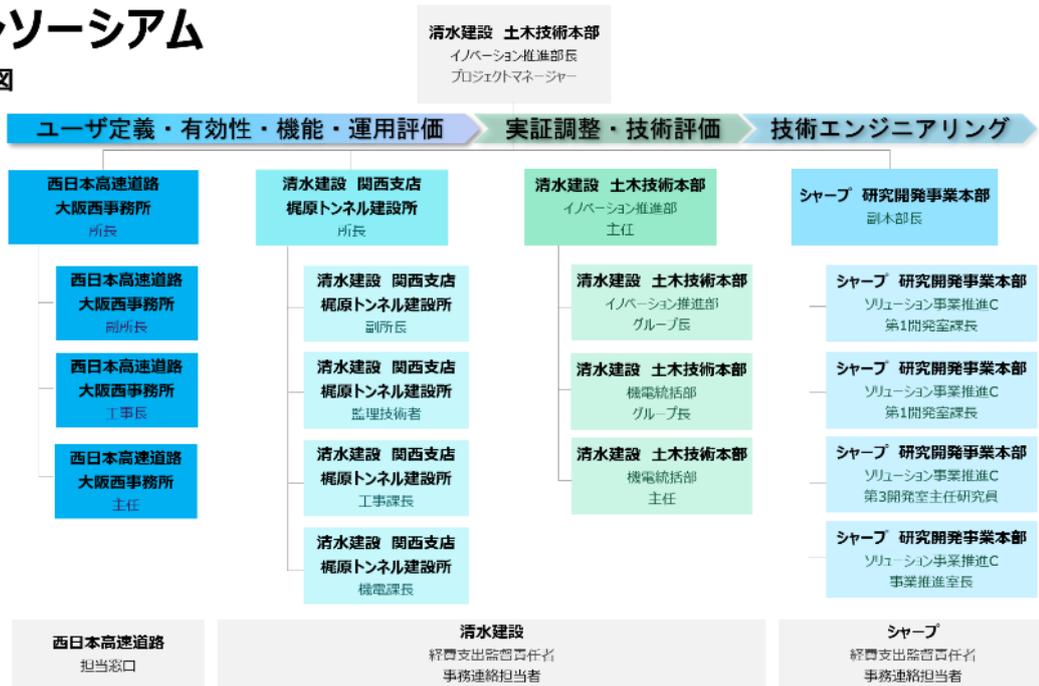


図 6.1-2 コンソーシアム組織図

6.2 実証推進方法

本開発実証および実証現場である梶原トンネル工事に関する各種情報を共有し、円滑に実証を推進、成果報告を取り纏めるため、下記のように、清水建設（株）とシャープ（株）の実証担当者および関係者出席のもと、実証定例会を開催した。また、三菱総合研究所への週次報告・月次報告、成果物作成・提出、その他提出物対応、全3回の経理検査、三菱総合研究所との各種打合せ、コンソーシアム構成会社間および梶原トンネル建設所との各種連携・調整は、清水建設（株）がコンソーシアム全体を取り纏め、推進した。

1. 受託後より清水建設およびシャープでオンライン定例会を実施（毎週水曜日2時間）。
2. 定例会の幹事および議事録書記は、清水建設が担当
3. 定例会での議事内容は、以下の表 6.2-1 のとおり。

表 6.2-1 清水建設・シャープ定例会議事

No	次第	担当
1	出席者・アジェンダの確認	清水建設
2	建設工事の進捗状況の報告	清水建設
3	各検証の進捗状況確認	シャープ
4	各検証の課題共有・協議	清水建設、シャープ
5	工程確認（全体・月間・週間）	清水建設、シャープ
6	普及啓発活動の進捗報告・協議	清水建設
7	会計処理報告	清水建設、シャープ
8	その他検討事項	清水建設、シャープ

6.3 情報保全体制

コンソーシアム構成メンバーは、メール誤送信や記憶媒体の紛失等による情報セキュリティ事故を防止するため、各社各々のセキュリティ対策を遵守するとともに、建設工事に関わる情報および本実証に関わる情報に関してセキュリティ事故が発生した場合は、直ちにコンソーシアム構成メンバーで共有し、対策を講ずる計画とした。

本開発実証を通じて得られる特許性のある技術内容のうち、技術の利活用方法の工夫に関する事項については、コンソーシアムで協議し全社合意により適宜場合に応じて共同出願契約等を締結する。

7. スケジュール

実施計画書に記載した工程に対し、三菱総合研究所と代表機関の清水建設との契約が約 1 ヶ月遅延したことに伴い、実証用機材の調達。実証環境の構築開始が後ろ倒しされた。これに加え、1 月初旬に実証現場に導入した本ソリューションの想定外のトラブルの発生により、約 2 週間、実証開始が遅延した。これに対し、主に次のような工程挽回策を講じた。技術実証では測定人員および追加機材を確保することで、当初計画していた 1 班ではなく、2 班体制で各種測定作業を実施し、測定期間を計画の半分以下に短縮した。課題実証では実証環境での機材導入前に、学習用およびソフトウェア実装時の動作検証用の現場映像を撮影し、動作検証を先行して実施することにより、実証開始後に取り組む予定であった映像解析の課題抽出や改善対応を可能な限り事前に行った。これらの対策によって、計 1.5 ヶ月の遅延という実証全体の課題に対しても、コンソーシアムが一体となって柔軟に対応することで、実証期間を確保し、予定していた実証項目を全うすることができた。以下に、各項目に関する詳細なスケジュールについて述べ、実績スケジュールを表 7-1 に示す。

実証環境の構築

実験に用いる機材については、契約締結後、速やかに装置導入の手続きに入るが、10 月中旬より、同型機による品質保証確認を 2 週間の期間を設定して行う予定としていた。確認に関しては、シャープ幕張ビルに設置されている電波暗室内にて試験を実施した。

無線機の品質保証確認に続き、11 月上旬より、技術実証および課題実証で用いる 8K 映像伝送機材も含めたシステム全体の検証をシャープ幕張ビルにて、2 週間の期間を設定して行った。なお、上記記載の電波暗室内の試験において、後述する測定器による測定も行い、当該測定器の品質保証確認も実施した。なお、シャープ幕張ビルにおけるシステム全体の検証後、11 月下旬より、実証試験環境における設置工事を進め、12 月中旬より、技術実証におけるローカル 5G の電波伝搬特性等の測定より、試験を開始する計画であった。

実際には機器手配のずれ込み等が生じ、1 月の中旬に現場への機器設置、1 月の中旬より計測開始する工程となった。

免許申請は契約締結後に速やかに申請を行うため、事前に近畿総合通信局に免許申請書面に関する記載内容詳細を確認し、周辺のキャリア 5G およびローカル 5G 基地局設置事業者との干渉調整を進め、10 月上旬には近畿総合通信局に免許申請を行う予定とした。なお、本実証試験に採用する無線機器は技術基準適合証明取得予定の機材を用いるため、予備免許に伴う登録点検は不要であり、11 月中には本免許取得を見込んでいた。

しかしながら、ローカル 5G 基地局システムの技術基準適合証明取得が 12 月 3 日に遅れたため、12 月 6 日の近畿総合通信局への免許申請となり、12 月 17 日に免許取得となった。

ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定

当初の実実施計画では下記<>内を予定していた

<10 月上旬より、実証試験環境周辺の地理データを用いた伝搬シミュレータの構築を開始する。11 月上旬より、無線装置と測定器の品質保証確認ののち、当該測定器を用いた実

際のカバーエリアおよび干渉調整区域のエリア端およびカバーエリア内の測定計画を、伝搬シミュレーション結果なども用いて策定する。シャープ幕張ビル電波暗室などを活用し、測定に関するシミュレーションを繰り返し、現地での測定において発生し得るリスクを洗い出し、対応策をまとめ、12月中旬からの実測に備える。

12月中旬より、電波放射と同時に、カバーエリア内の測定を開始する。測定は年内に完了することを目指す。測定データの取得と並行して、測定器ログの解析を行い、目標達成の見込みをえるとともに、順次グラフ化などのアウトプットデータの整理を進める。

1月上旬より、カバーエリア端と干渉調整エリア端の測定を開始する。カバーエリア端と干渉調整エリア端の測定は、測定ポイントに加えて、実際のカバーエリア端と干渉調整エリア端の測定を含め、1月下旬までの測定完了を目指す。こちらも並行して、アウトプットデータの整理を進める。

アウトプットデータの整理は1月中に完了を見込む。2月は最終報告書の整理に注力する計画であるが、不足データが判明した場合には、2月中に追加試験を行うことも想定して進める。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

しかしながら、本ソリューションの機材手配の遅延、シミュレータ手配の遅延等が発生したため、実施工程は後ろ倒しする形となった。

実証環境の構築にも記載したが機器設置が1月上旬の実施になったため測定の開始は1月中旬からとなった。実測に並行してシミュレーションの実施を行い、測定エリアの策定を実施したが、予測した値よりも電波の到達エリアの実測値は広い傾向を示した。そのため、計測が完了したのは2月の中旬となった。

測定開始の後ろ倒しに伴い、アウトプットデータの整理も先送りされ、当初計画では1月中にデータ整理が完了する予定であったが、2月末までデータ整理に時間を要する結果となった。幸い、不足データの補填に関する再計測の実施は発生しなかった。

電波伝搬特性等の精緻化

当初の実施工程では下記<>内を予定していた

<10月上旬より、実証試験環境周辺の地理データを用いた伝搬シミュレータの構築を進める。11月上旬より、伝搬シミュレーションによって得られた伝搬損失情報に基づいて、精緻化の検討を開始する。伝搬シミュレーションの時点でモデル式との乖離がみられる場合、補正について検討を開始する。11月下旬には一度検討内容について整理する。

12月上旬より、電波伝搬特性などの測定によって得られる実測データに基づいた精緻化の検討を開始する。現地環境の情報、伝搬シミュレーション結果と先行検討結果、および実測データに基づいて、KおよびSの精緻化を進める。

1月も引き続き実測データによる精緻化の検討を進め、検討内容を整理する。アウトプットデータの整理は1月中に完了を見込む。2月は最終報告書の整理に注力する計画であるが、追加試験が行われ、データの追加が発生した場合は、当該データを用いた検討も並行して進める。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

しかしながら、ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定にも記載した通り本ソリューション機材の手配の遅延、シミュレータ手配の遅延等が発生した。そのため精緻化に関しても実施工程は後ろ倒しする形となった。

機器設置が1月上旬の実施になったため測定の開始は1月中旬からとなった。実測に並行

してシミュレーションの実施を行い、測定エリアの策定を実施したが、予測した値よりも電波の到達エリアの実測値は広い傾向を示した。そのため、計測が完了したのは 2 月の中旬となった。

測定開始の後ろ倒しに伴い、アウトプットデータの整理も先送りし、当初計画では 1 月中にデータ整理が完了する予定であったが、2 月末までデータ整理に時間を要する結果となった。幸い、不足データの補填に関する再計測の実施は発生しなかった。

準同期 TDD の追加パターンの開発

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<10 月上旬より、実証試験環境周辺の地理データを用いた伝搬シミュレータの構築を進める。11 月上旬より、構築した伝搬シミュレータを用いたシミュレーション評価を開始する。シミュレーション評価については、干渉パターン①より順次すすめ、アウトプットの整理を並行して進める。11 月中には一度検討内容を整理するが、11 月中には、実測前のシミュレーション評価は完了する予定である。

12 月上旬より、電波伝搬特性などの測定によって得られる実測データに基づいた実測後のシミュレーション評価を開始する。基本的には、実測データを用いた受信 SIR の算出を行っていくが、必要に応じて、実証試験で実際に得られたパラメータを用いた追加シミュレーションを実施する。

1 月も引き続きシミュレーション評価を進め、検討内容を整理する。アウトプットデータの整理は 1 月中に完了を見込む。2 月は最終報告書の整理に注力する計画であるが、追加試験が行われ、データの追加が発生した場合は、当該データを用いた検討も並行して進める。3 月 4 日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

しかしながら、ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定にも記載した通り本ソリューション機材の手配の遅延、シミュレータ手配の遅延等が発生した。そのため準同期 TDD パターン開発に関しても実施工程は後ろ倒しする形となった。

機器設置が 1 月上旬の実施になったため測定の開始は 1 月中旬からとなった。実測に並行してシミュレーションの実施を行い、測定エリアの策定を実施したが、予測した値よりも電波の到達エリアの実測値は広い傾向を示した。そのため、計測が完了したのは 2 月の中旬となった。またシミュレータの手配も 1 月上旬となったため、シミュレーション評価の開始も後ろ倒しした。

測定開始の後ろ倒しに伴い、実測データを用いたシミュレーションも遅延することになった。アウトプットデータの整理は、当初計画では 1 月中にデータ整理が完了する予定であったが、2 月末までデータ整理に時間を要する結果となった。幸い、データの追加による検討の追加は生じなかった。

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

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<実験に用いる機材については、契約締結後、速やかに装置導入の手続きに入るが、10 月中旬より、同型機による建設現場の事前撮影を行い、学習用またはソフトウェア実装時の動作検証用映像データの取得を行う予定である。10 月末から検出処理に関するソフトウ

ウェア実装を行い、11月末から取得した撮影データを基に動作検証を進める予定である。

12月中旬より、建設現場へのカメラ設置等の撮影環境構築後、建設現場の撮影映像を用いて映像解析に関する実証試験を開始する。その後、課題抽出や改善対応を実施し、1月中旬より運用検討を実施する。アウトプットデータの整理は1月中に完了を見込む。2月は最終報告書の整理に注力する計画であるが、追加試験が行われ、データの追加が発生した場合は、当該データを用いた検討も並行して進める。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

しかしながら、本ソリューション機材の手配の遅延が発生したため、実施工程は後ろ倒しする形となった。また、実証環境が夜間作業主体になったため新たにデータ取得する必要が生じた。12月の初旬に夜間作業の事前データ撮影を実施し、学習用の撮影データの取得を行い検出処理に関するソフトウェアの実装に着手した。その後、1月中旬に実証環境への8Kカメラの設置を行い、撮影映像を用いたソリューションの有効性の検証を開始した。8K映像伝送の検証は、予定より遅れて2月初旬からの実施となり、夜間工事の撮影映像の伝送を実施して、主観評価用映像の取得を行った。建設現場関係者による主観評価は2022年2月7日～2月28日の期間で実施し、本ソリューションの有効性について検証を行い、評価結果の整理と検討を実施した。

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

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<11月上旬より、本ソリューションの普及方法について、建設現場関係者交えてその方針について検討を開始する予定である。1月上旬より、今後ソリューションを普及させるための構成や課題について検討を実施する。また、並行して普及活動について検討を行い、情報公開等含めて活動を推進する。1月中旬より、今後の継続的な検証も含めて課題の抽出や対応策について検討し、本システムの継続的な利用について協議を進める。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

他コンソーシアムとの意見交換会を実施した上で、本ソリューションに関する普及展開活動を実施する予定であったが意見交換会の実施はなかった。そのため、当コンソーシアム内で普及するための方法について検討を行った。今回の実証では人への誘目表示、建設機械への誘目表示を行い、建機と人の近接を認識した場合にアラートを出すソリューションの開発を行った。施主である西日本高速道路(株)と施工者である清水建設梶原トンネル建設所より意見をもらい、クレーン作業で吊荷下部に位置する人へのアラートや高所作業で安全帯やハーネスが適切に使用されているか検出できれば安全管理に貢献でき、建設現場に広く普及するのではないかという意見を頂戴した。

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

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<10月下旬より、初期の検証段階での実装状況において課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、実装に反映させる。12月中旬より、現場での実証開始のタイミングに合わせて、実装状況に課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、実装に反映させる。1月中旬より、試験運用中のシステムに関して、課題が生じていないか評価し、抽出された課題に対して改善対策を検討し、

実装に反映させる。課題の抽出については、評価時期に応じて現場関係者を交えるなど意見を集約し、実際の運用を想定したシステム実装となるよう方向付けを行う。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

当初予定では10月中旬からの実装内容に関する確認を行う予定であったが、契約締結の遅れによる着手遅延のため11月よりソリューションの検討を開始した。当初は日中作業の工事に対してソリューションの開発を撮影対象が夜間作業となったため、夜間作業における撮影感度等の課題が生じた。そのため、夜間作業時の撮影を行い、取得データに基づいた学習モデルの作成を行った。作成したモデルによる検出に影響がないか、実証に支障がないか評価を行い、撮影時のバリエーションの中から最適と思われるレンズやフレームレートの選定を行った。既に記載の通り機器設置が遅延したことからソリューションを実証現場へ導入するタイミングは1月下旬になったが、課題抽出を事前に行い対処することで実装されたものを現場へ導入することができた。

ローカル5Gの実装シナリオの見直し

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<10月中旬より、建設工事現場の状況を基に本ソリューションの実装内容について確認を行う。11月下旬より、実装状況および建設現場の状況を確認し、実装シナリオについて修正が必要かを検討する。1月上旬より、再度、実装状況および建設現場の状況を確認し、実装シナリオについて修正が必要かを検討する。修正が必要となった場合には、関連する検証項目において対応を検討し、スケジュールに反映する。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

当初予定では10月中旬からの実装内容に関する確認を行う予定であったが、契約締結の遅れによる着手遅延のため11月よりソリューションの検討を開始した。当初は日中作業の工事に対してソリューションの開発を撮影対象が夜間作業となったため、その際に実装シナリオの最初の修正を図った。その後も、本開発実証に取り組む中でサンプルのデモや実装状況に関しては適宜情報共有を行うことで適宜実装シナリオの見直し・修正を行った。当初は高速道路の通行車に Car、Truck、人に Person、重機に Machinery、クレーンに対して Crane の表示をしていたが、画面に文字や枠が飽和して誘目が過剰となった。そのため、文字表示をしない実装へ変更した。また、車両に関するプライバシー配慮等の観点から撮影対象である工事現場以外＝供用中の高速道路等へはマスキング処理を行いAI検出の対象から除外した。また、現場での管理での使用者等へも実装状況は適宜報告して意見のフィードバックをもらい実装へ反映させた。

追加実証

当初の実施計画では下記<>内を予定していた

<10月上旬より、MPEG-DASH方式を用いた超高精細映像伝送システムの開発を進める。10月下旬より、複数台のローカル5G端末に映像トラフィックを分散・伝送するシステムの開発を進める。11月中旬より、電波暗室内の試験を開始し、得られた試験結果を基に、各種映像伝送パラメータのチューニング及び映像伝送方式の改良を進める。各種映像伝送パラメータのチューニングは年内完了を予定している。

1月上旬より実証環境において、当該システムの有効性検証を開始する。1月下旬までの

測定完了を目指すのと並行し、アウトプットデータの整理を進める。

2月は最終報告書の整理に注力する計画であるが、追加試験が行われ、データの追加が発生した場合は、当該データを用いた検討も並行して進める。3月4日には、最終報告書の初版を提出する計画である。>

しかしながら、本ソリューション機材の手配の遅延が発生したため、実施工程は後ろ倒しする形となった。

実証環境の構築にも記載したが機器設置が1月上旬の実施になったため技術実証に関する測定は1月中旬から開始され2月上旬までかかった。そのため、追加実証の実施は2月中旬からの実施になった。

測定開始の後ろ倒しに伴い、アウトプットデータの整理も先送りされ、当初計画2月は成果報告書の対応を予定していたが2月末までデータ整理に時間を要する結果となった。幸い、不足データの補填に関する再計測の実施は発生しなかった。

表 7.1-1 スケジュール (実績)

No	大区分	小区分	9月			10月			11月			12月			1月			2月								
			27日	4日	11日	18日	25日	1日	8日	15日	22日	29日	6日	13日	20日	27日	3日	10日	17日	24日	31日	7日	14日	21日	28日	
	全体		▲8/31採択				▲MRI・清水建設契約			▲清水建設・シャープ契約																▲2/17実証発表会
		実施環境の準備		▲機材手配				▲機材手配																		
		▲干渉問題						▲干渉問題完了																		
	実証環境の構築	NW・システム構築					▲無線装置品質保証システム全体の検証																			
		免許及び各種許可認可		▲免許申請																						
		電波伝搬特性等の測定		▲伝搬シミュレーション構築																						
	技術実証	テーマI		▲伝搬シミュレーション構築																						
		テーマII		▲伝搬シミュレーション構築																						
		有効性検証		実証環境の構築			▲ソフトウェ ア実装		▲映像 取得																	
		実装性検証																								
		実装に向けた課題抽出及び解決策の検討																								
		実装シナリオの見直し (追加提案)		▲実装内容の確認			▲実装内容の確認																			
				▲ソリューション開発開始			▲ソリューション開発開始																			

▲: 当初予定(原色)
■: 実績(赤)
●: 今後の予定(青)
---: 当初予定からのずれ

8. 添付資料

本開発実証で使用了本システムのマニュアルを添付する。

ローカル 5G システムマニュアル

令和 4 年 3 月

シャープ株式会社

【目次】

第 1 章：システム仕様・構成	3
1-1. システム概要について	3
1-2. システム構成について	4
第 2 章：システム操作方法	7
2-1. 基本操作	7

第1章:システム仕様・構成

1-1. システム概要について

本実証で使用したローカル 5G システム仕様は以下の表 1 の通り、3GPP の Release15 に準拠し、対応周波数 4.8~4.9GHz とする SA 構成システムで実施した。また、通信方式は Uplink・Downlink で周波数を共用利用する TDD(Time Division Duplex)方式を用い、全国キャリアと Uplink・Downlink が同じタイミングになっている同期方式をはじめ、図 1 各 TDD 構成のフレーム構成に記載したように一部のスロットを変更したフレーム構成で運用可能とする準同期方式 1/2/3 に対応している。

表 1 システム仕様

項目	仕様	
3GPP仕様	Release 15	
NW方式	5G SA (Standalone)	
対応バンド	n79 (4.8-4.9GHz)	
使用周波数	4.84998 GHz	
帯域幅	100MHz	
MIMO対応	上り	2 x 2
	下り	4 x 4
変調方式	上り	256QAM
	下り	256QAM
最大空中線電力	24dBm/port	
TDDコンフィグレーション	同期 (DDDSUDDDD) 準同期1 (DDDSUUDSUU) 準同期2(DDSUUUDSUU) 準同期3(DSUUUUDSUU) D:DL, U:UL, S:Special slot	
RAN方式	C-RANシステム	

【無線フレーム構成】

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	
	D:Downlink Slot													U:Uplink Slot			S:Special Slot				
同期方式	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D	D	S	U	U	D	D	D	D	
準同期1方式	U	U	U	S	U	U	U	S	U	U	U	U	U	S	U	U	U	U	S	U	U
準同期2方式	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D	D	S	U	U	U	D	S	U	U	
準同期3方式	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	D	S	U	U	U	U	D	S	U	U	

1フレーム 10ms

図 1 各 TDD 構成のフレーム構成

1-2. システム構成について

(1)システム構成

本実証で使用したローカル 5G システム構成は以下の図 2 システム構成図に示した。

本ローカル 5G システムは、5Gcore、L3switch、CU/DU、RU、GPS アンテナ、制御 PC から構成され、このうち 5Gcore、L3 switch および CU/DU はラックに収容、屋外に RU と GPS アンテナを設置した。これら屋内外に設置された各機器は L3 switch を通じて接続されている。本システムの同期、準同期運用に必要な時刻同期をするために、GPS アンテナで受信した信号を PTP 信号に変換する役割も L3switch が担っている。また、制御 PC からこれら各機器の制御を実施するために使用した。

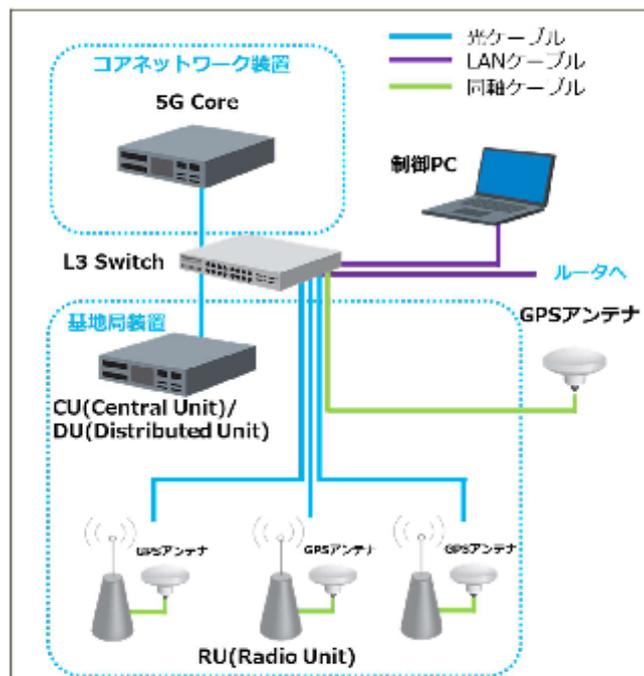


図 2 システム構成図

(2)システム機器



図 3 5G Core



図 4 CU/DU (Central Unit/Distributed Unit)



図 5 RU (Radio Unit)



图 6 L3 Switch



图 7 制御 PC

第2章:システム操作方法

2-1. 基本操作

(1)システム立上げ方法

1. 各機器同士をシステム構成図のように光ケーブル、LAN ケーブル、同軸ケーブルを用いて接続する。
2. 全機器(CU/DU、5Gcore、L3Switch、RU、制御 PC)の電源を投入する。5Gcore 及び CU/DU は機器の電源スイッチを押下して機器の電源を投入する。(電源投入から機器が立ち上がり安定動作するまで数分程度要する。) このとき、L3 Switch は GPS 衛星からの信号を補足して時刻情報を取得し PTP 信号を生成し時刻同期を行う。L3 Switch の GNSS LED 点灯がオレンジ色から緑色に変われると時刻同期完了となる。
3. 各機器の立ち上げ完了後、RU のソフトウェアを起動させるため、制御 PC から専用のアプリケーションを起動する。RU のパラメータ設定を行い、始動のコマンドを入力すると RU のソフトウェアが起動を開始する。起動直後から RU も L3 Switch 同様に時刻同期を開始する。(衛星の補足完了には約 5~10 分程度要する。)
4. RU からログを取得して補足状況を確認する。
5. CU/DU のソフトウェアを起動させ電波を放出させるために、制御 PC から専用アプリケーションを起動する。専用アプリケーションにて必要なパラメータ設定を実施し、所定のコマンドを入力してソフトウェアを起動させる。(起動には 5 分程度要する。) 起動コマンド入力後に動作完了を示す所定の表示がされると起動完了となる。
6. CU/DU のログから動作状況を確認し、ログ表示から問題なく電波が放出されていることを確認する。

以上でシステム立上げ手順は完了となる。

(2)システムシャットダウン方法

1. CU/DU のソフトウェアが起動している場合は、停止のコマンドを入力しソフトウェアを停止させる。(停止完了には 1 分程度要する。)
2. RU のソフトウェアも同様に停止させる。停止完了後に電源をオフするためのコマンドを実施して RU の電源を落とす。
3. RU の電源オフ後に、CU/DU、5Gcore、L3Switch の各機器の電源を落とす。

以上で、システムシャットダウン手順は完了となる。

(3)TDD コンフィグレーション変更方法

1. TDD コンフィグを変更するとき、CU/DU のソフトウェアが起動していないことを確認する。
CU/DU ソフトウェアが起動している場合は、停止コマンドを入力し停止させる。
2. 制御 PC 内の CU/DU 専用のアプリケーションから同期方式、準同期 1 方式、準同期 2 方式、準同期 3 方式の中から利用する TDD コンフィグ設定を選択する。
3. 設定変更後は、CU/DU のソフトウェアを再起動または起動の所定のコマンドを入力することで、TDD コンフィグが変更された状態でシステムが起動する。(起動には 5 分程度要する。)
4. CU/DU ログから動作状況を確認し、ログ表示から問題なく電波が放出されていることを確認する。

以上で、TDD コンフィグレーション変更手順は完了となる。

(4)運用セルの変更方法

以下の方法により 3 台の RU の中から、使用する任意の RU を設定できる。

1. 運用セルを変更するときは、TDD コンフィグ同様、CU/DU のソフトウェアが起動していないことを確認する。起動している場合は、停止コマンドを入力して停止させる。
2. CU/DU 停止後、専用アプリケーションから使用するセル数と使用する RU を選択する。
その後、起動または再起動コマンドを入力することで運用するセルが変更されて起動する。
(起動には 5 分程度要する。)
3. CU/DU ログから動作状況を確認して、ログ表示から問題なく電波が放出されていることを確認する。

以上で、運用セル変更手順は完了となる。