

地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた  
開発実証に係る工場分野におけるローカル5G等の技術的  
条件等に関する調査検討の請負  
(工場内の無線化の実現)

成果報告書

2021年3月30日

日本電気株式会社

(L5G実証 工場無線化コンソーシアム)

日本電気、サンリツオートメイション、構造計画研究所、

三菱重工工作機械、NTTドコモ)



# 目次

<b>1. 全体概要</b> .....	<b>1</b>
1.1 背景・目的 .....	1
1.2 実施事項および実証目標 .....	1
1.3 実施体制 .....	3
1.4 実証のスケジュール .....	5
1.5 免許申請の概要 .....	7
<b>2. 実証地域</b> .....	<b>8</b>
2.1 実証地域の概要 .....	8
2.2 地域課題等 .....	9
<b>3. 実証環境</b> .....	<b>11</b>
3.1 5G テストベッドを用いた実証環境 .....	11
3.1.1 ネットワーク構成 .....	11
3.1.2 ネットワーク機器の設置環境 .....	11
3.1.3 ネットワーク機器の諸元・仕様 .....	11
3.1.4 構築スケジュール .....	13
3.2 キャリア 5G を用いた実証環境 .....	14
3.2.1 ネットワーク構成 .....	14
3.2.2 ネットワーク機器の設置環境 .....	15
3.2.3 ネットワーク機器の諸元・仕様 .....	17
3.2.4 構築スケジュール .....	23
3.3 システム機能・性能・要件 .....	25
3.3.1 機器の諸元・仕様 .....	26
3.4 実証環境の運用 .....	39
<b>4. 課題解決システムの実証</b> .....	<b>40</b>
4.1 前提条件 .....	40
4.2 実証目標 .....	42
4.3 課題実証システムに関する全体像 .....	43
4.4 課題解決システムに関する検証および評価・分析 .....	46

4.4.1	ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化 .....	46
4.4.1.1	ア-1 評価方法 .....	48
4.4.1.2	ア-1 評価結果 .....	50
4.4.1.3	ア-1 考察 .....	54
4.4.2	ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御 .....	54
4.4.2.1	ア-2 評価方法 .....	59
4.4.2.2	ア-2 評価結果 .....	64
4.4.2.3	ア-2 考察 .....	72
4.4.3	ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援 .....	77
4.4.3.1	ア-3 評価方法 .....	83
4.4.3.2	ア-3 評価結果 .....	84
4.4.3.1	ア-3 考察 .....	86
4.5	課題解決システムに関する効果検証 .....	88
4.5.1	ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化 .....	88
4.5.1.1	ア-1 検証方法 .....	88
4.5.1.2	ア-1 検証結果 .....	88
4.5.1.3	ア-1 考察 .....	88
4.5.2	ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御 .....	89
4.5.2.1	ア-2 検証方法 .....	89
4.5.2.2	ア-2 検証結果 .....	90
4.5.2.3	ア-2 考察 .....	93
4.5.3	ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援 .....	94
4.5.3.1	ア-3 検証方法 .....	94
4.5.3.2	ア-3 検証結果 .....	95
4.5.3.3	ア-3 考察 .....	97
4.6	課題解決システムに関する機能検証 .....	100
4.6.1	ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化 .....	100
4.6.1.1	ア-1 検証方法 .....	100
4.6.1.2	ア-1 検証結果 .....	100
4.6.1.3	ア-1 考察 .....	101
4.6.2	ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御 .....	101
4.6.2.1	ア-2 検証方法 .....	101
4.6.2.2	ア-2 検証結果 .....	102
4.6.2.3	ア-2 考察 .....	104
4.6.3	ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援 .....	105
4.6.3.1	ア-3 検証方法 .....	105
4.6.3.2	ア-3 検証結果 .....	112

4.6.3.3	ア-3 考察 .....	133
4.7	課題解決システムに関する運用検証 .....	142
4.7.1	ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化 .....	142
4.7.1.1	ア-1 検証方法 .....	142
4.7.1.2	ア-1 検証結果 .....	150
4.7.1.3	ア-1 考察 .....	171
4.7.2	ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御 .....	172
4.7.2.1	ア-2 検証方法 .....	172
4.7.2.2	ア-2 検証結果 .....	172
4.7.2.3	ア-2 考察 .....	174
4.7.3	ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援 .....	176
4.7.3.1	ア-3 検証方法 .....	176
4.7.3.2	ア-3 検証結果 .....	176
4.7.3.3	ア-3 考察 .....	178
4.8	まとめ .....	180
<b>5.</b>	<b>ローカル 5G の性能評価の技術実証 .....</b>	<b>181</b>
5.1	前提条件 .....	181
5.2	実証目標 .....	184
5.3	ユースケースに基づくローカル 5 G の性能評価等 .....	186
5.3.1	評価方法 .....	189
5.3.1.1	基本性能評価方法 .....	189
5.3.1.2	端末高による影響評価方法 .....	193
5.3.1.3	チルト角による影響評価方法 .....	195
5.3.1.4	移動による影響評価方法 .....	196
5.3.1.5	工場外の電波漏洩評価方法 .....	197
5.3.2	類似案件調査結果 .....	200
5.3.3	評価結果 .....	205
5.3.3.1	基本性能評価結果 .....	205
5.3.3.2	端末高による影響評価結果 .....	214
5.3.3.3	チルト角による評価結果 .....	221
5.3.3.4	移動による影響評価結果 .....	227
5.3.3.5	工場外の電波漏洩評価結果 .....	234
5.3.4	考察 .....	241
5.3.4.1	基本性能評価の考察 .....	241
5.3.4.2	端末高による影響評価の考察 .....	244

5.3.4.3	チルト角による評価の考察.....	245
5.3.4.4	移動による影響評価の考察.....	246
5.3.4.5	工場外の電波漏洩評価の考察.....	246
5.4	ローカル5 Gのエリア構築やシステム構成の検証等.....	248
5.4.1	評価方法.....	248
5.4.1.1	同時多数接続の試験方法.....	248
5.4.1.2	動的電波 MAP 作成試験方法.....	251
5.4.2	評価結果・分析.....	252
5.4.2.1	同時多数接続の試験結果.....	252
5.4.2.2	動的電波 MAP 作成試験結果.....	256
5.4.3	考察.....	270
5.4.3.1	同時多数接続の試験考察.....	270
5.4.3.2	動的電波 MAP 作成試験考察.....	271
5.5	その他ローカル5 Gに関する技術実証.....	272
5.5.1	評価方法.....	272
5.5.2	評価結果.....	275
5.5.3	考察.....	282
5.6	まとめ.....	284
<b>6.</b>	<b>実装および横展開に関する検討.....</b>	<b>286</b>
6.1	前提条件.....	286
6.2	持続可能な事業モデル等の構築・計画策定.....	286
6.2.1	事業モデル.....	287
6.2.2	事業構築計画.....	291
6.3	横展開に資する普及モデルに関する検討.....	292
6.4	共同利用型プラットフォームに関する検討.....	293
6.4.1	共同利用型プラットフォームに対する考え方.....	293
6.4.1.1	汎用性.....	293
6.4.1.2	メンテナンス機能.....	294
6.4.1.3	標準化.....	294
6.4.2	共同利用型プラットフォームの設計例.....	295
6.4.2.1	クラウド構築.....	295
6.4.2.2	API 決定.....	296
6.5	まとめ.....	298
<b>7.</b>	<b>会合等の開催（該当する活動がある場合）.....</b>	<b>299</b>

8. まとめ .....	300
9. 参考資料 .....	301

## 1. 全体概要

### 1.1 背景・目的

工場では、労働者・熟練工不足の人材問題、顧客ニーズの多様化による多品種少量生産への対応などの課題が山積しており、これらへ対応し、省力化・無人化、熟練技術者の一人当たりの対応範囲の拡大、製造ラインの自由度の向上による生産性の向上を図る必要がある。

本調査の目的は、「地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証」の一環として、工場分野について、特に無線通信システムの活用が困難な製造現場に求められる利用要件の下で最適にローカル5G等の導入を促進するため、金属製設備・部材等の環境下にある工場におけるローカル5G等の電波伝搬特性の解明および課題解決システムによる具体的なアプリケーションを想定した映像伝送等に基づくローカル5Gの性能評価を実施することである。

本テーマに取り組むにあたり、5G等で無線化が求められる3つの課題解決の為の具体的なアプリケーションに着目し、5Gを利用することによる課題解決方法を検証する。さらに、特に製造現場において問題となる大型金属の移動や遮蔽物による電波伝搬特性の動的な変化に着目した性能評価の実施により、誰もが安心して利用できる課題解決事例のリファレンスモデルの構築を目指す。

### 1.2 実施事項および実証目標

日本の製造業の課題として、人材不足、ITの活用不足、技術継承の3つの課題があると考えられる。本実証の地域となる三菱重工工作機械の工場でも、上記の課題は例外ではなく、大きな危機感がある。また、滋賀県栗東市を含む周辺は、工場が多い地域であり、製造業に従事する人口率が高くなっているため、上記の課題が解消できずに製造業が衰退していくことは、地域経済にとって大きなインパクトを持つものと考えられる。(詳細については、2.2節を参照)

以上の製造業の課題、および地域の課題を解決するものとして、3つの課題解決システムの実証を行った。

#### ● 課題ア-1 変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

変種変量生産を実現する為には、製造ラインのレイアウト変更の自由度の向上が必要であり、レイアウト変更の都度発生する配線コストの削減を求められている。その中で、特に性能要件が厳しい制御系ネットワークの無線化が5Gにより実現できるのではないかと期待されており、本調査において実際に5Gで制御ネットワークを動作させ検証を行う。

本実証の目的は、工場内において有線接続で使用している制御系ネットワークをローカル5Gによる無線化を行い、現在利用されている機器が、どの程度動作できるかを検証し、ローカル5Gによる無線化が可能な範囲を明らかにすることである。なお、検証は、制御系ネットワークで広く利用されているプロトコルであるEthernet/IP、およびCC-Link IEで検証を行う。

#### ● 課題ア-2 無軌道AGVの遠隔制御

現在、工場内での部品や完成品の搬送はフォークリフトによる物が多く、一部先端的な



工場で無人の軌道型 AGV(Automatic Guided Vehicle)の採用が始まっている。しかし、製造現場のレイアウトフリー化を行うには無軌道型 AGV が必要となり、その運用には安定かつ広範囲の無線が必要となる。本調査では WiFi と 5G の無線を組み合わせる事により、無軌道型 AGV の遠隔制御を実現する。

本実証の目的は、5G を用いた広範囲の移動が可能となる無軌道型 AGV システムを構築し、どの程度のエリアで AGV の遠隔制御が可能となるかを明らかにすることである。さらに、5G(特に 28GHz)では金属遮蔽等による通信品質の劣化が懸念される為、無線 LAN のエリアも併設し、5G の無線を組み合わせる事により、広範囲をカバーできる無軌道型 AGV システムの実用性について検証を行うことである。

### ● 課題ア-3 熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守支援作業

現在、特に古い工作機械の保守には高度な知識と経験を持った熟練工が欠かせない存在となっている。しかし、熟練工の人数は限られており、少ない熟練工で保守を実施する必要がある。そのため、5G の大容量・低遅延の特性を活かし、AR/VR 等のリモート環境とセンシング技術および AI を組み合わせる事により、遠隔での熟練工による保守業務支援を実現する。

本実証の目的は、従来の WiFi では実現できないデータ品質と通信のリアルタイム性を 5G を利用することで、解決できるかを検証することである。AI を用いた現地設備の振動データ解析による設備状態の共有および現地作業員⇔遠隔保守員の相互映像配信・共有のためのシステムを利用し、遠隔保守作業支援の実用性について検証を行う。映像共有によって現地・遠隔双方の状況を正確に把握するためには、十分な視認性を持つ映像品質が不可欠である。本検証では、複数パターンの解像度、ビットレート下における受信映像品質を映像内に写る QR コード認識率によって定量的に評価し、有用性および課題を整理する。また、スマートグラスによる現地作業員への情報提供および遠隔保守員への現地設備状態の提供の有用性および課題については、アンケート・ヒアリングによって定性的に評価する。

### 1.3 実施体制

図 1.3-1 に実施体制図を示す。本実証は、総務省の実証事業であり、工場分野の受託事業者として、NEC が受託した。本実証は、ローカル 5G 全体の課題実証を総括する三菱総合研究所、ローカル 5G 全体の技術実証を総括する電波産業会(ARIB)、ローカル 5G の工場分野を総括する PwC コンサルティング、ローカル 5G の工場分野の PM である情報通信研究機構(NICT)と連携をとり、実証を推進した。

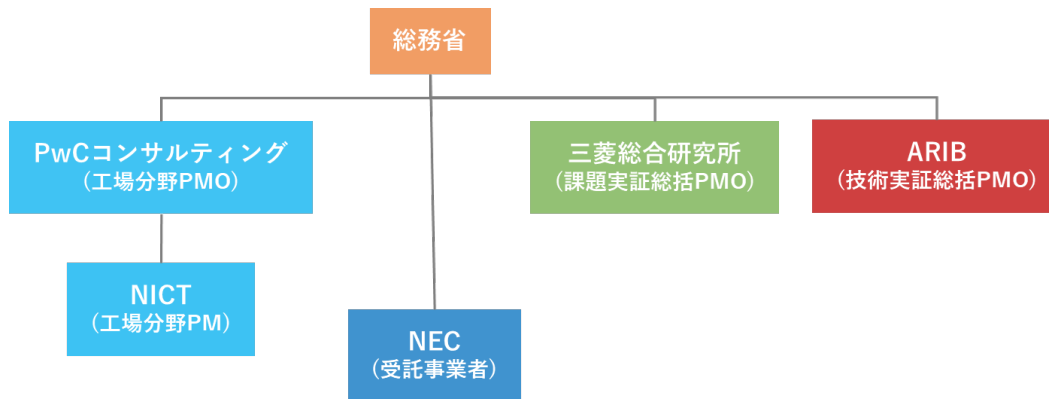


図 1.3-1 実施体制図

本実証を実施するため、ローカル 5G 実証 工場無線化コンソーシアムを立ち上げ、コンソーシアムは、NEC、サンリツオートメーション、構造計画研究所、三菱重工工作機械、NTT ドコモの 5 社で構成した。図 1.3-2 にコンソーシアム内の実施体制図を示す。実施に当たっては、プロジェクト推進グループを中心に、システム構築および実証業務を遂行した。

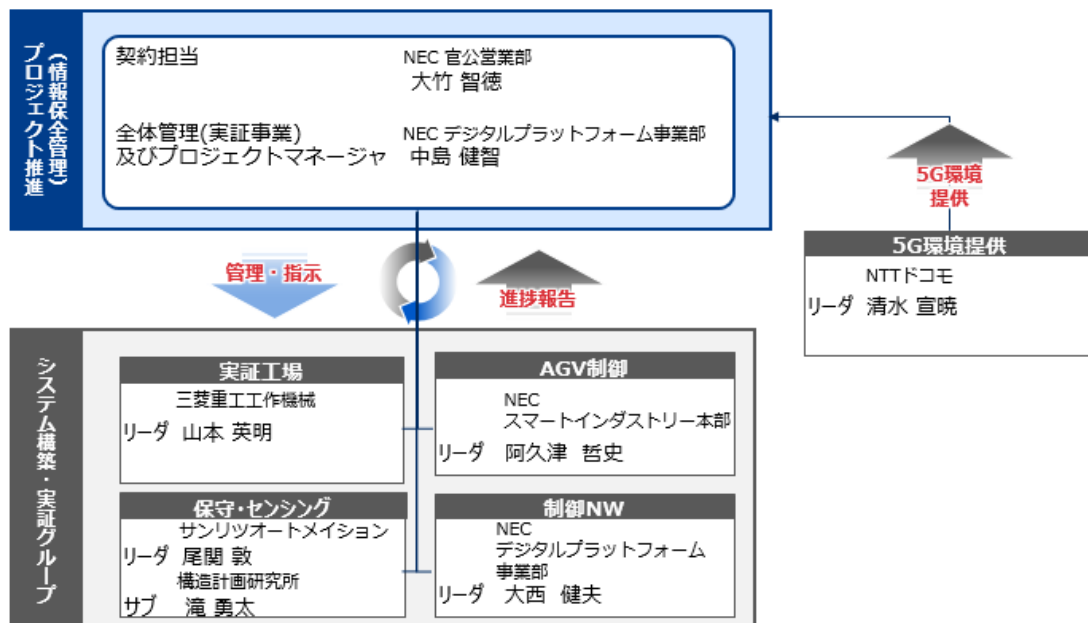


図 1.3-2 コンソーシアム内の実施体制図

表 1.3-1 に本実証における各社の役割を示す。NEC が本実証の代表企業であり、ローカル 5G 技術試験事務実施者、構築、ソリューション開発等の中心を担う。サンリツオートメイション、構造計画研究所は、課題ア-3 の熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守支援作業に関する検証を担当する。三菱重工工作機械は、実証環境の整備・配線および工場ユースケース検討の支援を担当する。NTT ドコモは、実証に使用する 5G システムの提供を行う。

表 1.3-1 各社の役割

企業・団体名	役割
日本電気株式会社 (NEC)	代表企業 ローカル 5G 技術試験事務実施者、構築、ソリューション開発等の中心を担う
サンリツオートメイション	振動センシング関連の担当
構造計画研究所	AR/VR、AI 関連の担当
三菱重工工作機械	実証環境の整備・配線および工場ユースケース検討の支援
NTT ドコモ	5G システムの提供

## 1.4 実証のスケジュール

図 1.4-1 に本実証の全体のスケジュールを示す。

スケジュールについての考え方は以下の通りである。本実証を進めるにあたり、対応のフェーズとして、実証準備、実証実験、報告書作成の3つを定義した。マイルストーンとしては、報告書作成の期間を1.5か月程度見込むと、実証実験は、1月末から2月頭実証を行う必要があった。1月末から実証実験を始めるにあたり、それまでに実証準備をすべて完了するスケジュールとした。

タスク区分としては、5G設備の構築対応、3つの課題実証の対応、技術実証の対応、報告書作成対応と4つ定義した。5G設備の構築対応は、三菱重工工作機械、およびNTTドコモを中心に対応を行い、2020年12月までに設備関係の調達、免許関連の対応を完了し、2021年1月から5Gシステムの構築を開始し、実証実験開始予定の2021年1月末に構築とした。

図 1.4-2 に課題実証・技術実証の詳細スケジュールを示す。

3つの課題実証の対応については、制御系ネットワーク無線化およびAGVの遠隔制御に関してはNECが、遠隔保守作業支援に関しては、サンリツオートメイション、構造計画研究所が対応した。技術実証に関してはNECが対応を行った。実証に必要なシステム開発は、2020年9月～とし、実証実験開始予定の2021年1月末に構築および事前評価も含め、すべて完了するものとした。

報告書作成対応に関しては、コンソーシアム企業が分担して実施した。実用化に向けた検討に関しては、2020年10月からPMOおよび滋賀県等の関連部門と順次検討を行い、3月までの報告書提出までに検討を完了とした。

なお、当初計画した上記スケジュールと実績の差分については、課題実証の制御系ネットワーク無線化の実証実験開始が2週間程度遅延した。理由は、5Gのテストベッドを構築するにあたり、プロトコルコルテストの仕様調整・調達、ローカル5G対応の端末・周辺機器の調達に想定よりも時間を要したためである。リカバリ策としては、他の課題実証、技術実証に関する作業を前倒しして実施することで、全体のスケジュールをキープした。

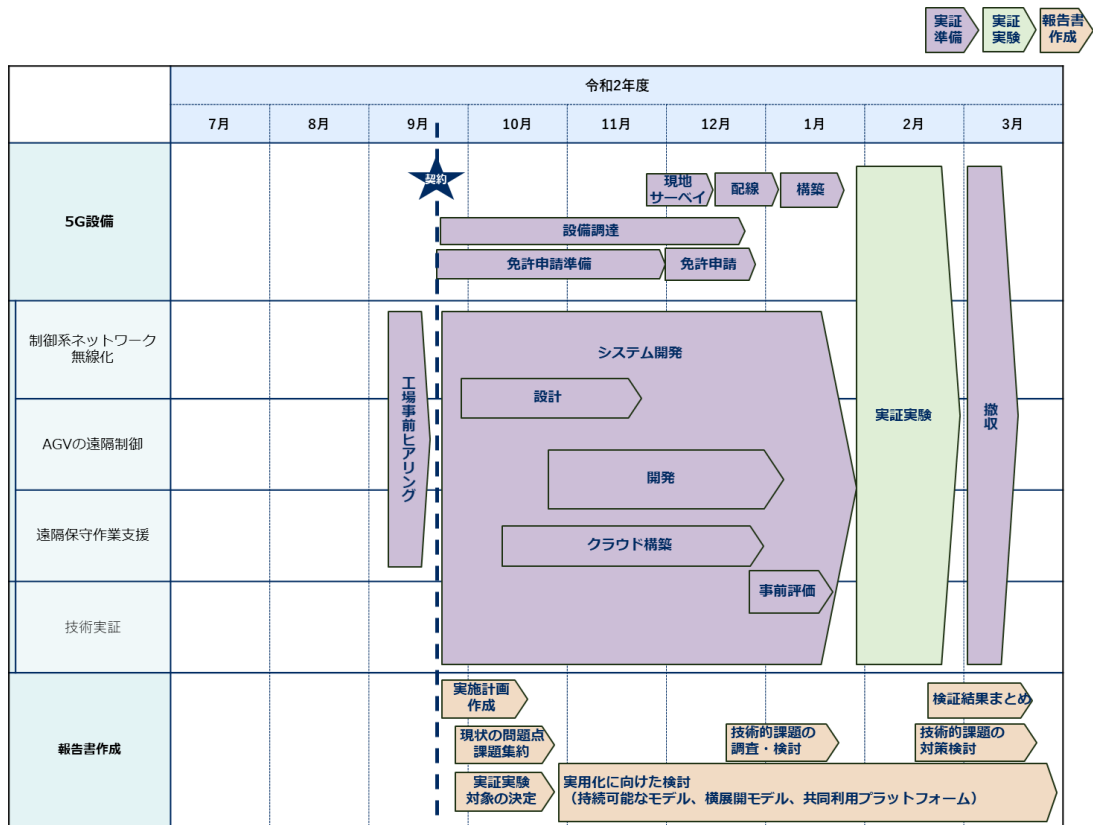


図 1.4-1 全体スケジュール

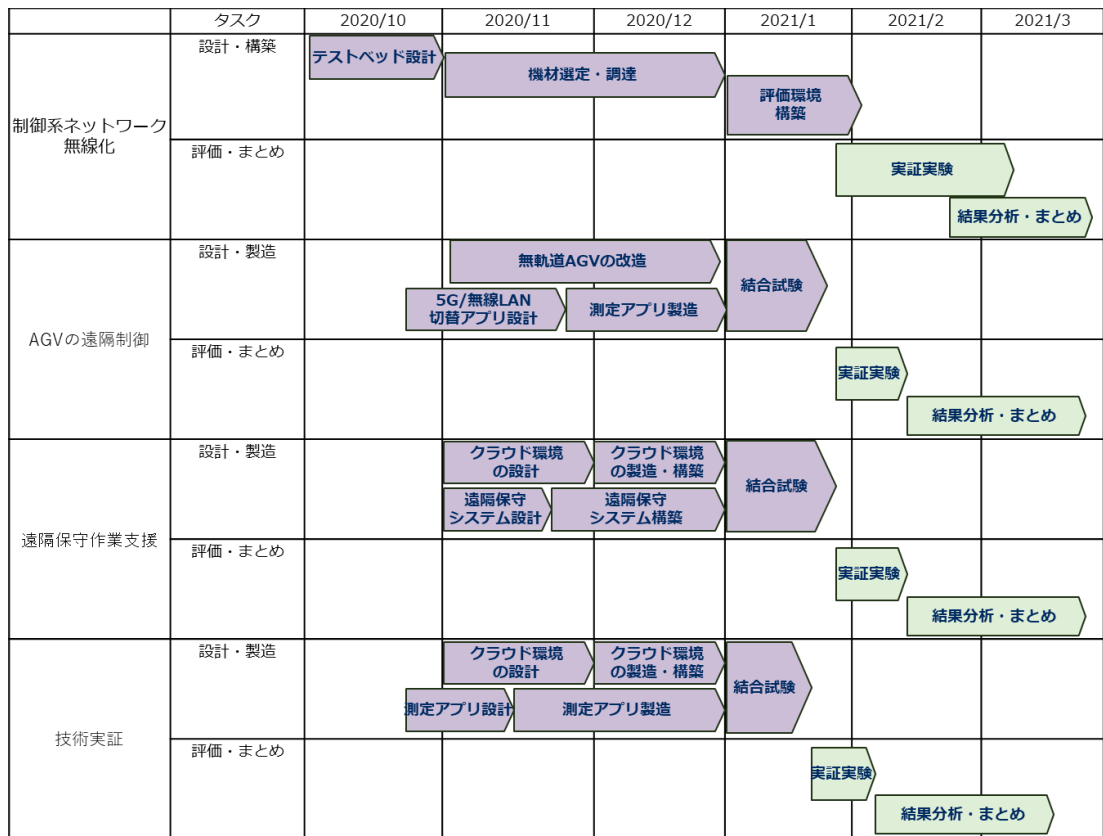


図 1.4-2 課題実証・技術実証の詳細スケジュール

## 1.5 免許申請の概要

今回の実証で使用する 5G システムは、NTT ドコモのキャリア 5G のため、NTT ドコモから近畿総合通信局へ商用局の申請を行った。

表 1.5-1 に免許申請に関する概要を示す。

なお、免許申請・取得のスケジュールは、2020/12/2（水）に免許申請を行い、2020/12/21（月）に免許許可となった。なお、干渉調整については、28GHz 帯の屋内局(閉空間)であったため、不要であった。

表 1.5-1 免許申請の概要

申請者	株式会社 NTT ドコモ代表取締役社長 井伊 基之		
申請先	近畿総合通信局		
申請概要	5G 実証実験のための NR (28GHz 帯) ・LTE (2G/1.7G/1.5G/800MHz 帯) の無線局事項書および工事設計書による電波免許申請 (反射板の使用を含む)		
電波の型式、周波数及び空中線電力	100MX7W	27.45096 GHz	51 mW
	100MX7W	27.55032 GHz	51 mW
	100MX7W	27.64968 GHz	51 mW
	100MX7W	27.74904 GHz	51 mW

## 2. 実証地域

### 2.1 実証地域の概要

実証地域は、滋賀県栗東市にある三菱重工工作機械株式会社の大型金属の加工工場である。図 2.1-1、表 2.1-1 に実証地域の全景、および実証地域の工場の概要を示す。工場内は、金属製設備および部材が多くある環境である。

5G システムの基地局装置の無線局である RU(Radio Unit)の配置および実証場所は、第二工作機械工場の A 棟内となる。詳細は、3.2 節で説明する。



図 2.1-1 実証地域の全景

表 2.1-1 実証地域の工場の概要

会社名	三菱重工工作機械株式会社
工場名	栗東工場 第二工作機械工場
所在地	滋賀県栗東市六地藏 130
実証を行う面積	15,150m <sup>2</sup>
工場内の作業内容	大型金属の加工

## 2.2 地域課題等

日本の製造業の課題として、様々なことが言われているが、主に以下の 3 つの課題があると考えられる。

### <人材不足>

少子高齢化が進む日本において、各業界での人材確保は質、量ともに重大な課題となっている。特に、中小規模の製造業では、専門知識や技術を持った職人や経営者の高齢化と継承者不足に悩まされている。

### <IT の活用不足>

日本の製造業をはじめ多くの企業において、他の先進国に比べて IT 化が遅れていると言われている。設備投資が見送られる傾向にあると同時に、導入している設備の老朽化が進んでいる状態となっている。最新の IT を活用した設備への切り替えがなされていないケースが多い理由は、IT 化を進めるコストの確保が難しいこと、さらには IT 化によって実現できる生産性の向上といった効果が理解できていないこと、IT 化を進める目的が明確になっていないことなどが挙げられる。また、IT 化を進めても使いこなせる技術者がいなことも理由として考えられる。

### <技術継承>

上述の人材不足や IT の活用不足でも触れたように、それらが企業文化とも言える技術力やノウハウを継承できない要因のひとつになっている。日本の製造業は世界に誇る技術力に対して自負を持っており、事実、現在でも日本の技術力は海外でも高く評価されている。この高い技術力は、長年培われた職人と呼ばれる技術者の経験と勘によって支えられてきたものでもある。

現在、日本の製造業の技術力を支えてきた技術者（職人）の高齢化が進んでいる。さらに、過酷な労働環境を起因とする人材確保の難しさが原因で、技術継承ができない状況にも陥っている。今後、技術力を維持することは難しくなり、その技術を誰もが使えるものとして継承していく方法を構築する必要がある。

滋賀県栗東市の地域で大規模な部類の三菱重工工作機械の工場でも、上記の 3 つの課題は例外ではなく、大きな危機感を抱いている。また、滋賀県栗東市を含む周辺は、中小の工場も含め多くの工場がある地域であり、製造業に従事する人口率が高くなっている。そのため、上記の課題を解消できずに製造業が衰退していくことは、地域経済にとって大きなインパクトを持つものと考えられる。

以上の製造業の課題、および地域の課題を解決するものとして、3 つの課題解決システムの実証を行った。

変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化(課題ア-1)に関しては、ライン変更などによって発生する現場の機器の移動の際に、配線変更の作業が不要になるものであり、主に人材不足、および IT の活用不足の課題の解消に寄与するものと考えられる。

無軌道 AGV の遠隔制御(課題ア-2)に関しては、現状、人が行っている運搬作業を自動化できるものであり、主に人材不足の課題の解消に寄与するものと考えられる。工場の中では、運搬作業は付加価値が低い部類の作業であると考えられるため、自動化することによるメリットは大きいものと考えられる。

熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守支援作業(課題ア-3)に関しては、熟練工が



現場に行かずに、遠隔から現場の工員に具体的な指示ができるようになるものであり、かつ、IT 化により従来よりも熟練工が効率的に技術伝承を行えるようになるものである。本システムは、上記の 3 つの課題すべての解消に寄与するものと考えられる。

### 3. 実証環境

本実証では、2つの実証環境を使用した。1つ目は、5G テストベッドを用いたローカル5G のシステムの実証環境であり、2つ目は、キャリア 5G を用いた実証環境である。課題ア-1 変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化に係る実証では、前者の 5G テストベッドでの実証を行った。実際の 5G システムを用いなかった理由としては、現在の 5G 基地局機器が eMBB(enhanced Mobile Broadband)、つまり高速大容量に特化した物が主流であり、この状況で遅延要求の厳しい制御系ネットワークを動作させても、有意な性能検証が難しいと考えたためである。それ以外の課題実証ア-2、ア-3 および技術実証は、eMBB でも有意な検証が可能であると考え、実際の 5G システムを用いた実証環境を用いて実施した。

#### 3.1 5G テストベッドを用いた実証環境

##### 3.1.1 ネットワーク構成

##### 3.1.2 ネットワーク機器の設置環境

図 3.1-1 に 5G テストベッドを用いた実証環境のネットワーク構成を示す。テストベッドは、NEC 玉川事業所(神奈川県川崎市)内の実験室に設置し、周波数 4.6~4.9GHz 帯の SA(Standalone)構成を使用した。また、性能の上限を確認するための実証とするため、すべて有線接続の構成とし、無線の電波を外部に出さずに実施した。

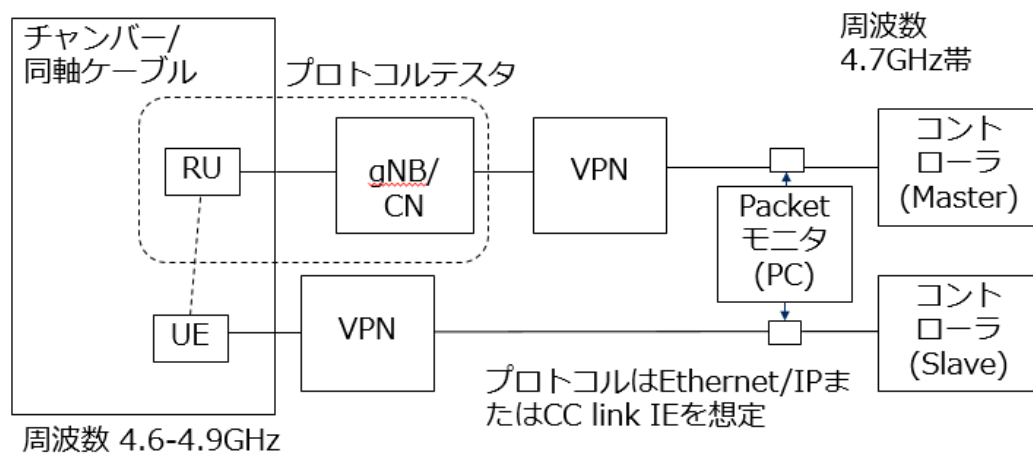


図 3.1-1 5G テストベッドを用いた実証環境のネットワーク構成

##### 3.1.3 ネットワーク機器の諸元・仕様

表 3.1-1 に 5G テストベッドを用いた実証環境におけるネットワーク機器の明細を示す。ネットワーク機器の外観、詳細な諸元・仕様については、図 3.1-2~図 3.1-4、表 3.1-2~表 3.1-4 にそれぞれ記載した。

表 3.1-1 5G テストベッドを用いた実証環境におけるネットワーク機器の詳細

項目	装置	数量	設置形態	調達先	役割	機能
NW 機器	プロトコル テスタ	1	固定	アンリツ(レ ンタル)	ローカル 5G の コア NW・gNB の protocols	ローカル 5G シス テムの代替え
	VPN ルータ	2	固定	NEC	ネットワーク中 計機器 (VPN 機 器)	IP 網 (ローカル 5G) と Ethernet の 変換
	5G エッジゲ ートウェイ	1	固定	株 式 会 社 IDY	5G 対応ルータ	ローカル 5G 対応 端末



図 3.1-2 プロトコルテスタの外観

表 3.1-2 プロトコルテスタの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	MT8000A(RF 0.4~6GHz)	
対応バンド	n78(3.5GHz)、n79(4.5GHz)	n79(4.5GHz)を使用



図 3.1-3 VPN ルータの外観

表 3.1-3 VPN ルータの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	UNIVERGE IX2106	
転送性能 (IPv4)	最大 2Gbps	
転送性能 (IPv4-IPsec)	最大 1.2Gbps	
VPN 機能	Ethernet over IP (EtherIP)に対応	



図 3.1-4 5G エッジゲートウェイの外観  
表 3.1-4 5G エッジゲートウェイの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	5G エッジゲートウェイ iR730B	
サイズ	約 24.8 × 125 × 77.9mm	高さ x 幅 x 奥行
重量	380 g	
対応モード	NSA / SA	
対応バンド	5G: n77, n78, n79	

### 3.1.4 構築スケジュール

図 3.1-5 に 5G テストベッドを用いた実証環境のネットワーク構成スケジュールを示す。実証実験開始予定を 2021 年 1 月末としてスケジュールした。

最初に 2020 年 10 月に 5G テストベッド構成の詳細検討を実施し、それに基づき、2020 年 11 月から 12 月にかけて、プロトコルテストのモジュール・オプション検討を実施した。並行して、ローカル 5G の SA (Stand Alone) 構成に対応した 5G ルータの選定・調達、VPN ルータやパケットキャプチャ用の PC 等の周辺機材の調達を実施した。2020 年の 12 月から 1 月にかけて、調達機材のセットアップ・構築を実施し、2021 年 1 月末のプロトコルテスト納入と同時にテストベッドを用いた 5G の基本検証を開始した。Ethernet/IP、CC-Link IE の機材については、2021 年 2 月頭に構築完了し、制御系ネットワークの無線化に向けた本格実証に着手した。

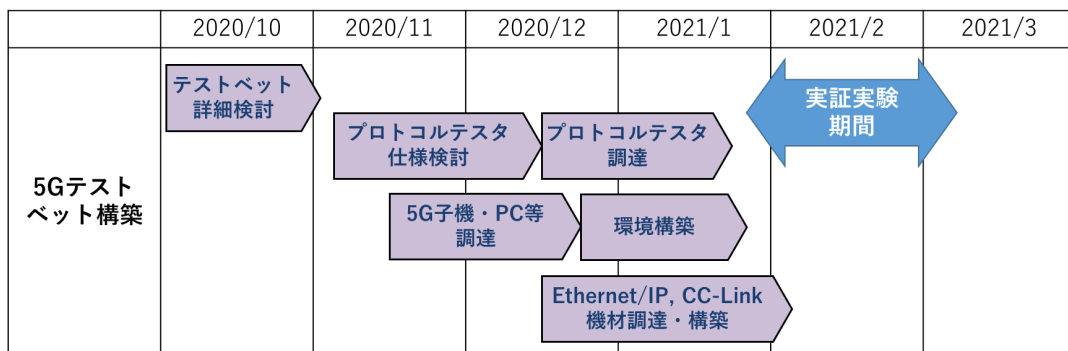


図 3.1-5 5G テストベッドを用いた実証環境の構築スケジュール

## 3.2 キャリア 5G を用いた実証環境

### 3.2.1 ネットワーク構成

図 3.2-1 にキャリア 5G を用いた実証環境のネットワーク構成を示す。今回、NTT ドコモの商用 5G システム(28GHz 帯、NSA 構成)を三菱重工工作機 栗東工場内に構築した。

三菱重工工作機械 栗東工場 第 2 工場内には、28GHz 帯(バンド n257)の 5G NR(New Radio)に対応した無線子機(RU : Radio Unit)を 3 局設置し、第 2 工場脇の屋外に設置した移動式基地局 gNB(gNodeB)に接続した。さらに、NSA 構成であるため、1.5GHz 帯(バンド n3)、1.7GHz 帯(バンド n21)の 4G LTE に対応した光張出し基地局用の無線装置 (RRE: Remote Radio Equipment)も各 RU の横に設置し、第 2 工場脇の屋外に設置した移動式基地局 eNB(eNodeB)に接続した。gNB および eNB からは、第一工場内の光ケーブルを經由し、公衆光回線で NTT ドコモのコアネットワークに接続した。コアネットワークからは、Internet を經由し、NEC のクラウド環境に構築したクラウドサーバにアクセス可能とした。

5G 対応のスマートフォンやルータ等の 5G 端末(UE : User Equipment)から無線の電波を出して実証するのは、第二工場内となる。NSA 構成のため、5G の接続時は、28GHz 帯(バンド n257)の 5G NR だけではなく、4G LTE の 1.5GHz 帯(バンド n3)、1.7GHz 帯(バンド n21)の何れかと接続する。なお、5G NR で使用した 28GHz 帯の周波数は、ローカル 5G に割り当て予定の 28.2GHz~29.1GHz の周波数帯に近く、同様な実証結果を得られると考えられる 27.4GHz~27.8GHz の 400MHz の帯域である。

上記の 5G のシステム構築にあたり、既設の光ケーブルが 1Gbps までの対応であったが、帯域不足になる可能性が高かったため、10Gbps 対応の光ケーブルを新規に敷設した。実際、技術実証のスループット測定では、1Gbps 超の速度が確認できており、既設の 1Gbps の光ケーブルでは、有意な検証ができなかったと考えられるため、新規敷設は妥当な判断であったと考えられる。

## 三菱重工工作機械 栗東工場

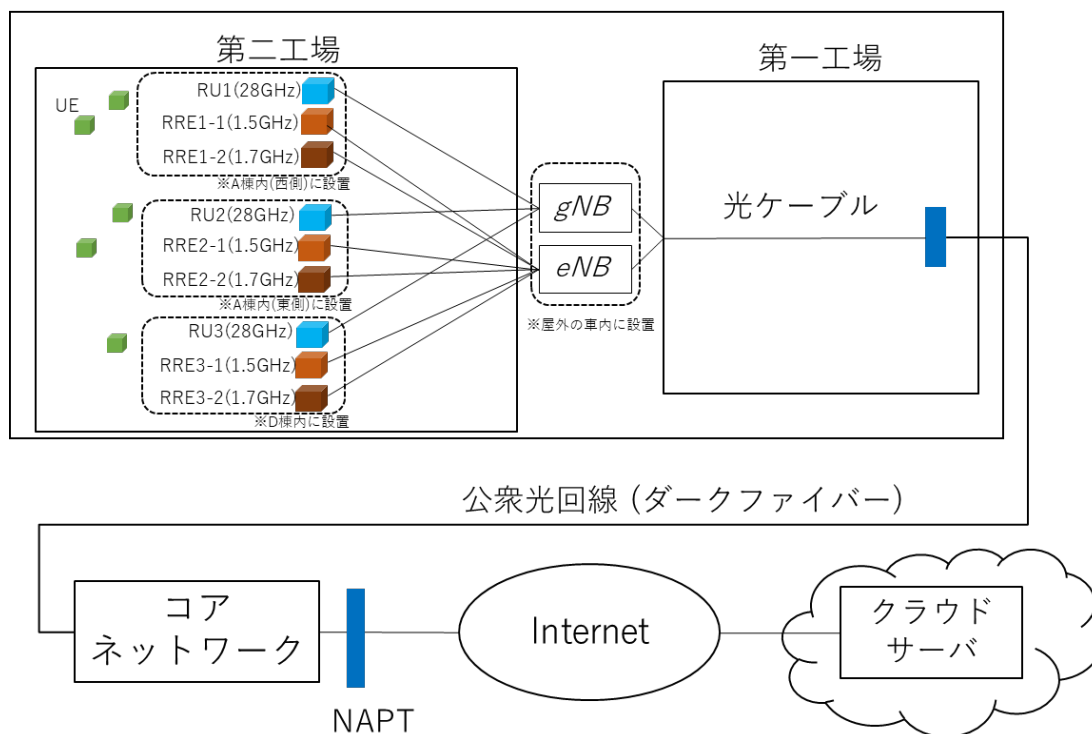


図 3.2-1 5G システムを用いた実証環境のネットワーク構成

### 3.2.2 ネットワーク機器の設置環境

設置場所は、三菱重工工作機 栗東工場 第二工場となり、工場全体の大きさは、長さ 153m × 幅 99m × 高さ 18m(max)である。工場内は、A 棟～E 棟まで 5 つの棟に区切られており、B 棟と C 棟の間に壁はないが、それ以外は金属製の壁で区切れている。ただし、A 棟～E 棟まで、大型のトラックやフォークリフトが通り抜けできるように、その通路部分には、開閉式のシートシャッターが設置されている。天井高は、B 棟のみ少し高く、18m であり、その他のエリアは 11m である。高さ 8m 付近には、各棟、大型のクレーンが設置されており、本実証中も頻繁に動作していた。

図 3.2-2 基地局の設置場所に基地局の設置場所および各 RU の想定カバーエリアを示す。第二工場の A 棟内に 2 か所、E 棟内に 1 か所の計 3 か所に RU、RRE を設置した。なお、アンテナは、RU1 用の平面アンテナと RRE1-1、1-2 の共用の平面アンテナの計 2 本を設置した。

RU1、RRE1-1、1-2 は、A 棟の右端から 92m に位置する柱の西側の高さ 9m の場所に設置した。アンテナ方向は、A 棟内の西側をカバーするように、図面の建物の北方向(図の上方向)に対して西に 50 度の向きとした。

RU2、RRE2-1、2-2 は、A 棟の右端から 92m に位置する柱の東側高さ 9m の場所に設置した。アンテナ方向は、A 棟内の東側をカバーするように、図面の建物の北方向(図の上方向)に対して東に 40 度の向きとした。

RU3、RRE3-1、3-2 は、D 棟の右端から 118m に位置する柱の高さ 9m の場所に設置し

た。アンテナ方向は、D棟内の東側をカバーするように、図面の建物の南方向(図の下方向)に対して東に5度の向きとした。

gNBおよびeNBの積載車両は、B棟の西側の屋外に停車させ、工場内の各RU,RREと接続した。

本実証環境で実施した実証(課題ア-2、課題ア-3、技術実証)の実施エリアは、図3.2-2 基地局の設置場所に示した通りである。課題ア-2に関しては、主にA棟内に設置した2つのRU1、2を用いて実証を行い、図示したAGV走行エリアにAGVおよび5Gルータが設置され、それ以外の構成機器は、図示したC棟内の区画に設置した。課題ア-3に関しては、D棟に設置したRU3を用いて実証を行い、5G対応スマートフォン、ルータ、およびそれ以外の構成機器は、図示したD棟内の実施エリアに設置した。技術実証については、基本的に、A棟に設置したRU1、2を用いて実証を行い、測定用の5G対応スマートフォンは、A棟内に設置した。各実証の詳細な構成、5G端末の設置場所に関しては、後述の各章で記載する。

コアネットワークの機器およびクラウドサーバについては、工場の敷地には設置しておらず、ネットワーク経由で接続する形としているため、工場内に設置した5GシステムのNW機器は以上のみとなる。

今回の実証環境では、上述のように5GのRUを図3.2-2 基地局の設置場所に示したように3局設置した。ただし、上述のように技術実証、課題実証ア-2の実施エリアであるA棟内の一部が重複しており、同時に実証を行うと、有意な試験結果を得られない可能性がある。そこで、RUのエリア設計の段階から、実証のスケジュールを分けることを計画し、技術実証を先行して実施し、その後に課題実証ア-2を実施することとした。上記のような工夫により、最低限の実証環境を用い、有意な実証を実施することができたと考えられる。

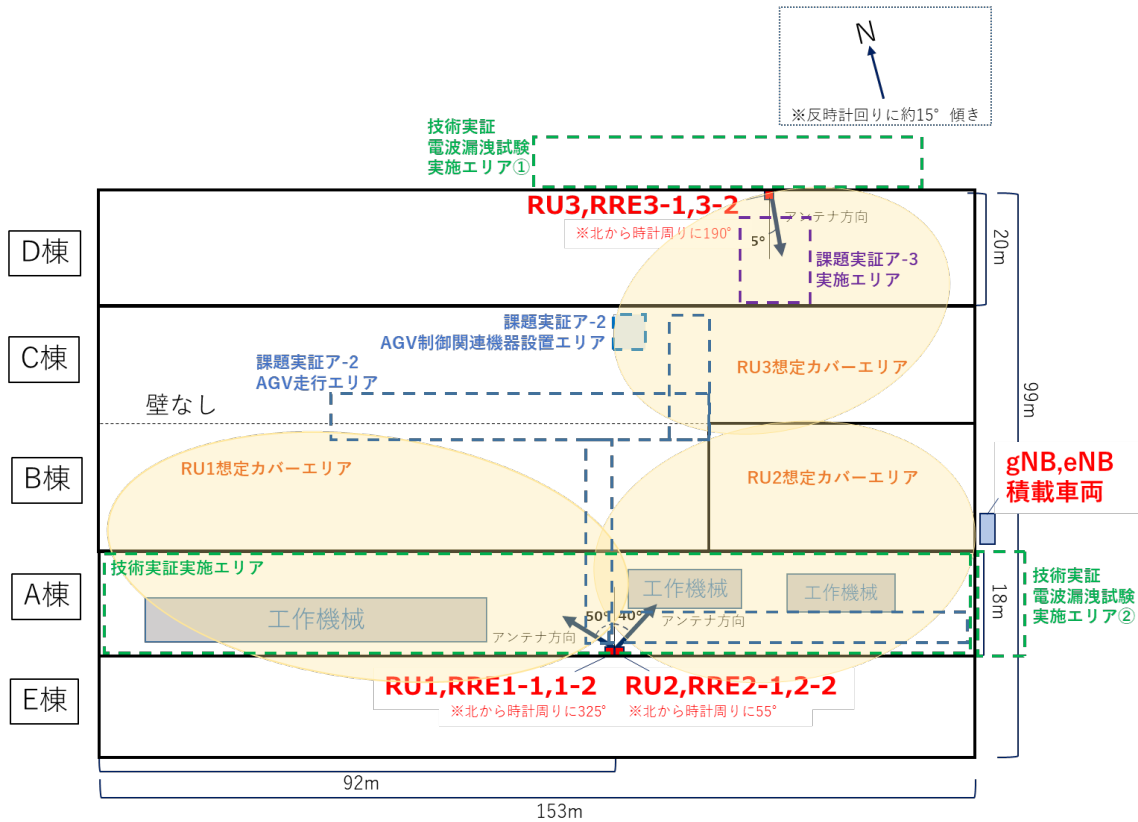


図 3.2-2 基地局の設置場所(第二工場 平面図)

### 3.2.3 ネットワーク機器の諸元・仕様

本実証環境は、NSA 構成のネットワークを使用した。5G の方は、周波数は 27.4～27.8GHz(バンド n257)の帯域幅 400MHz である。無線局数は 3 である。4G の方は、安定的な通信環境となるように 2つの周波数を併用した。1つは、周波数は 1495.9～1510.9MHz (バンド n3)の帯域幅 15MHz である。無線局数は 3 である。もう 1つは、周波数は 1860～1880MHz (バンド n21)の帯域幅 20MHz である。無線局数は 3 である。従って、4G の無線局数は 6 となる。

表 3.2-1 基地局無線部の特性概要

	バンド	周波数	帯域幅	無線局数
5G	n257	27.4～27.8GHz (UL, DL)	400MHz	3
4G	n3	1447.9～1462.9MHz (UL)	15 MHz	3
		1495.9～1510.9MHz (DL)		
	n21	1764.9～1784.9MHz (UL)	20MHz	3
		1859.9～1879.9MHz (DL)		

表 3.2-2 実証環境におけるネットワーク機器の明細 に本実証環境におけるネットワーク機器の明細を示す。アンテナ部分を含む無線機器である 5G の RU、および 4G の RRE は、工場内の固定的に設置するものである。一方、無線機の信号処理部分となる 5G の gNB、および 4G の eNB は、車載可能な可搬型である。



5G 端末は、NTT ドコモから発売されている汎用の Samsung 製のスマートフォン 20 台と Sharp 製のモバイルルータ 6 台を使用した。なお、提供元は、基地局、端末ともにすべて NTT ドコモとなる。

基地局装置、および 5G 端末の外観、詳細な諸元・仕様については、図 3.2-3～図 3.2-7、表 3.2-3 5G gNB、4G eNB 搭載車両の諸元・仕様 ～ 表 3.2-8 モバイルルータの諸元・仕様にそれぞれ記載した。適宜、参照されたい。

表 3.2-2 に 5G、4G の基地局の無線部の特性概要を示す。

5G の方は、周波数は 27.4～27.8GHz(バンド n257)の帯域幅 400MHz である。無線局数は 3 である。4G の方は、安定的な通信環境となるように 2 つの周波数を併用した。1 つは、周波数は 1495.9～1510.9MHz (バンド n3)の帯域幅 15MHz である。無線局数は 3 である。もう 1 つは、周波数は 1860～1880MHz (バンド n21)の帯域幅 20MHz である。無線局数は 3 である。従って、4G の無線局数は 6 となる。

表 3.2-1 基地局無線部の特性概要

	バンド	周波数	帯域幅	無線局数
5G	n257	27.4～27.8GHz (UL, DL)	400MHz	3
4G	n3	1447.9～1462.9MHz (UL)	15 MHz	3
		1495.9～1510.9MHz (DL)		
	n21	1764.9～1784.9MHz (UL)	20MHz	3
		1859.9～1879.9MHz (DL)		

表 3.2-2 実証環境におけるネットワーク機器の明細 に本実証環境におけるネットワーク機器の明細を示す。アンテナ部分を含む無線機器である 5G の RU、および 4G の RRE は、工場内の固定的に設置するものである。一方、無線機の信号処理部分となる 5G の gNB、および 4G の eNB は、車載可能な可搬型である。

5G 端末は、NTT ドコモから発売されている汎用の Samsung 製のスマートフォン 20 台と Sharp 製のモバイルルータ 6 台を使用した。なお、提供元は、基地局、端末ともにすべて NTT ドコモとなる。

基地局装置、および 5G 端末の外観、詳細な諸元・仕様については、図 3.2-3～図 3.2-7、表 3.2-3 5G gNB、4G eNB 搭載車両の諸元・仕様 ～ 表 3.2-8 モバイルルータの諸元・仕様にそれぞれ記載した。適宜、参照されたい。

表 3.2-2 実証環境におけるネットワーク機器の明細

項目	装置	数量	設置形態	提供元	役割	機能
5G システム	5G gNB	1	可搬型	NTT ドコモ	5G の gNB 機能	車載型
	28GHz 5G RU	3	固定	NTT ドコモ	5G の 28GHz の無線局	
	4G eNB	1	可搬型	NTT ドコモ	4G の eNB 機能	車載型
	1.5GHz 4G RRE	3	固定	NTT ドコモ	4G の 1.5GHz の無線局	
	1.7GHz 4G RRE	3	固定	NTT ドコモ	4G の 1.7GHz の無線局	
5G 端末	スマートフォン	20	可搬型	NTT ドコモ	5G 対応スマートフォン	デバイス接続
	モバイルルータ	6	可搬型	NTT ドコモ	5G 対応モバイルルータ	5G エッジ端末接続



図 3.2-3 5G gNB、4G eNB 搭載車両の外観

表 3.2-3 5G gNB、4G eNB 搭載車両の諸元・仕様

諸元	内容	備考
車両寸法	全長 6.7m 全幅 2.1m 車高 3.0m	

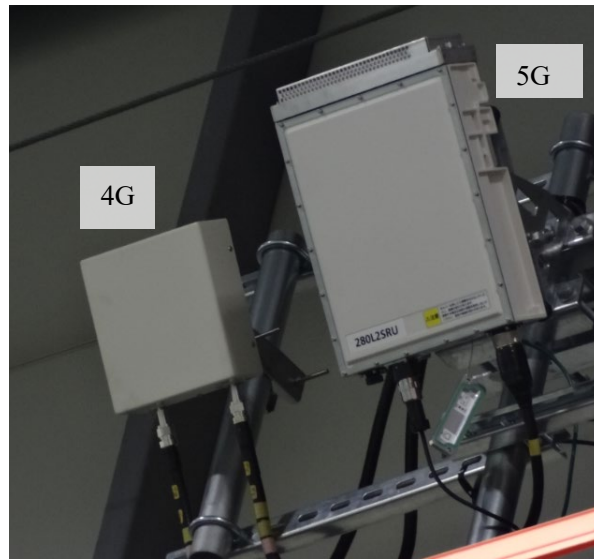


図 3.2-4 5G RU(右側)、4G RRE アンテナ部分(左側)の外観  
 表 3.2-4 28GHz 5G RU の諸元・仕様

諸元	内容	備考
周波数	27.4~27.8GHz (UL, DL)	TDD
設定可能帯域	400MHz	
電源 AC/DC	AC	
冷却方式	空冷	
アンテナ分離/一体	一体	

表 3.2-5 1.5GHz 4G RRE の諸元・仕様

諸元	内容	備考
周波数	1447.9~1462.9MHz (UL) 1495.9~1510.9MHz (DL)	FDD
設定可能帯域	15MHz	
電源 AC/DC	AC	
冷却方式	空冷	
アンテナ分離/一体	分離	

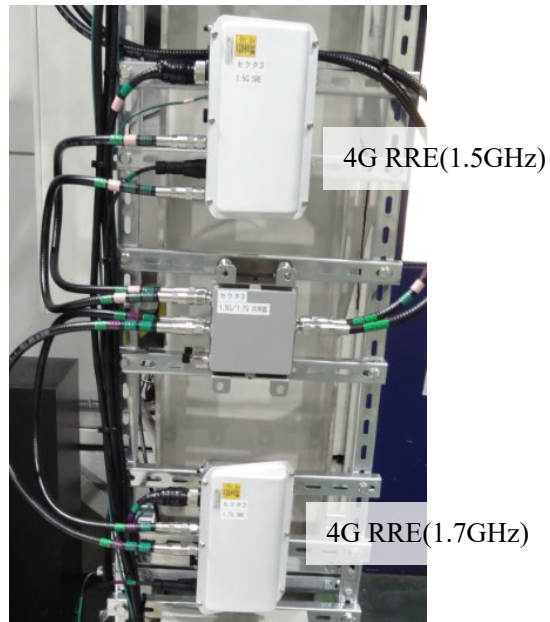


図 3.2-5 5G 4G RRE 本体部分の外観  
 表 3.2-6 1.7GHz 4G RRE の諸元・仕様

諸元	内容	備考
周波数	1764.9~1784.9MHz (UL) 1859.9~1879.9MHz (DL)	FDD
設定可能帯域	20MHz	
電源 AC/DC	AC	
冷却方式	空冷	
アンテナ分離/一体	分離	



図 3.2-6 スマートフォンの外観  
 表 3.2-7 スマートフォンの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	SC-53A	
最大受信速度(5G)	4.1Gbps	実証実験時
最大送信速度(5G)	480Mbps	
最大受信速度(4G)	1.7Gbps	
最大送信速度(4G)	75Mbps	
周波数(5G)	n78(3.7GHz) n79(4.5GHz) n257(28GHz)	
周波数(4G)	n1 (2.0GHz) n3 (1.7GHz) n19 (800MHz) n21 (1.5GHz) n28 (700MHz) n42 (3.4GHz,3.5GHz)	



図 3.2-7 モバイルルータの外観  
表 3.2-8 モバイルルータの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	SH-52A	
最大受信速度(5G)	4.1Gbps	実証実験時
最大送信速度(5G)	278Mbps	実証実験時
最大受信速度(4G)	1.7Gbps	
最大送信速度(4G)	131.3Mbps	
周波数(5G)	n78(3.7GHz) n79(4.5GHz) n257(28GHz)	
周波数(4G)	n1 (2.0GHz) n3 (1.7GHz) n19 (800MHz) n21 (1.5GHz) n28 (700MHz) n42 (3.4GHz,3.5GHz)	

### 3.2.4 構築スケジュール

図 3.2-8 にキャリア 5G を用いた実証環境の構築スケジュールを示す。実証実験開始予定の 2021 年 1 月末をターゲットとしたスケジュールとした。

調達・免許申請に関しては、2020 年 11 月に免許申請準備、5G 機材の準備を行い、2020 年 11 月に免許申請・取得を行い、2020 年 1 月中旬に電波発射を開始とした。また、5G を設置するにあたり、工場内の配線・電源等の工事が必要であったため、2020 年 10 月に 5G 基地局の設置場所、配線等の検討を行い、2020 年 11 月を構築に必要な部品類の調達期間とした。2020 年 12 月に、工場内の配線・電源の工事を実施し、2021 年 1 月中旬に基地局設置工事を行った。

	タスク	2020/10	2020/11	2020/12	2021/1	2021/2	2021/3
キャリア5Gの ネットワーク構築	調達・免許申請		免許申請準備 → 5G機材準備	免許申請・取得	電波発射		
	ネットワーク 工事構築・工事	5G基地局設置方針・配線等の検討	構築部品類調達	光ケーブル・電源工事	基地局設置	実証実験期間	

図 3.2-8 キャリア 5G を用いた実証環境の構築スケジュール

### 3.3 システム機能・性能・要件

表 3.3-1 に実証における 3 つの課題解決システムの機能要件、性能要件に示す。

#### ① 変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

ネットワークの機能要件は、制御系ネットワークの検証に資する帯域、遅延および連続稼働時間の担保することである。具体的なネットワーク性能の目標としては、32Byte のパケットを 100ms 以下で送信可能あること、および 10 時間の連続稼働可能なこととした。妥当性としては、本コンソーシアムメンバーも参画している FFPJ(Flexible Factory Project)内で議論、検討された結果のホワイトペーパーによると、制御系ネットワークの遅延要求は、制御対象によって、1msec 以下から 1sec 程度まで幅があるが、制御系ネットワークの中で、比較的遅延要求が中間程度である情報系のプロトコルと想定し、100ms 以下とした。また、連続稼働時間は、工場の稼働時間を想定し、10 時間とした。

#### ② 無軌道 AGV の遠隔制御

ネットワークの機能要件は、AGV の制御が途切れない遅延および瞬断時間を担保することである。具体的なネットワーク性能の目標としては、カメラ画像を活用し、遠隔から制御することを想定し、帯域 10Mbps、遅延を正常時に 0.5sec 以下、5G から無線 LAN の無線リンクの切り替えを実施する場合の瞬断時間として、1sec 以下とした。32Byte のパケットを 100ms 以下で送信可能あること、および 10 時間の連続稼働可能なこととした。妥当性としては、FFPJ 内で議論、検討された結果では、無軌道 AGV の遠隔制御は、0.5～1sec 程度の性能が必要であるとされているため、正常時に 0.5sec 以下、遅延の伸びが想定される 5G から無線 LAN の無線リンクの切り替えを実施する場合は、1sec 以下とした。

#### ③ 熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業

ネットワークの機能要件は、20 台以上の 5G 端末による同時通信が可能な帯域、および遅延性能の担保することである。とした。AGV の制御が途切れない遅延および瞬断時間を担保することである。具体的なネットワーク性能の目標としては、カメラ画像を活用することを想定し、帯域 10Mbps×20 台、遅延を 1sec 以下とした。妥当性としては、FFPJ 内で議論、検討された結果では、予防保全や設備保全に求められる遅延は 0.1～10sec と幅があるとされており、今回の実証内でのターゲットは、中間の 1sec とした。

出所) FFPJ ホワイトペーパー 製造現場における無線ユースケースと通信要件

表 3.3-1 システム機能・性能・要件

課題解決システム	ネットワークへの機能要件	ネットワークの性能目標	妥当性
①変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化	制御ネットワークの検証に資する帯域・遅延、および連続稼働時間の担保	帯域:32byte のパケットを 100msec 以下の間隔で送信できる帯域を有する事 遅延:100msec 以下 連続稼働時間:10H	FFPJ の調べにより制御 NW に求められる遅延性能は 100msec 以下である。また 10H は工場の稼働時間を想定。
②無軌道型 AGV の遠隔	AGV 制御が途切れ	帯域:10Mbps(カメラ	FFPJ の調べにより無軌道型



制御	ない遅延および瞬断時間の担保	画像) 遅延:通常時 0.5sec 以下の遅延の通信遅延の確保、切り替え時 1sec 以内の遮断時間	AGV に求められる遅延性能は 0.5~1sec である。通常時 0.5sec とし、エリア境界での無線切り替え時の瞬断時間で 1sec とした。
③熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援	20 台以上の 5G 端末による同時通信が可能な伝送帯域および実用的な遅延性能の担保	帯域:10Mbps×20 遅延:同時通信時に各端末のアプリケーション遅延が 1 秒以下のリアルタイム性を有する	配信先で高画質な映像の物体認識精度を得るため full HD で高画質とされる 10Mbps/台とした。 FFPJ の調べにより予防保全や設備保全に求められる遅延は 0.1~10sec と幅がある為、中間の 1sec とした。

本システムを構築するにあたり、以下のようなサイバーセキュリティ対策を実施している。

- ・現場の情報をクラウドサーバのデータベースに蓄積する構成としているが、現場の端末からクラウドサーバにアクセスする際に、ユーザ管理(ユーザ ID、およびパスワード認証)を行い、不正なユーザのアクセスができないようにしている。
- ・現場の情報をクラウドサーバのデータベースにアクセスする際に、クラウドのファイアウォールにおいて、使用するポートのみを開放し、その他のポートを閉鎖した。
- ・クラウドを使った事前準備の際に、クラウドサーバにアクセスできる IP アドレスを限定し、不正な IP アドレスからのアクセスを排除した。

### 3.3.1 機器の諸元・仕様

本節では、ネットワーク機器以外の構成機器の外観、および諸元・仕様をそれぞれ示す。

課題実証ア-1 で使用した構成機器を図 3.3-1~図 3.3-5、および表 3.3-2~表 3.3-6 に示す。



図 3.3-1 パケットモニタ PC の外観

表 3.3-2 パケットモニタ PC の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	NUC10i5FNK	
CPU	第 10 世代 インテル® Core™ i5-10210U プロセッサ	
RAM	16 GB (DDR4-2666 8GB x2)	W4N2666PS-8G
ストレージ	500 GB (M.2 SSD)	CT500P1SSD8JP
サイズ	117 x 112 x 38 mm	

インターフェース	HHDMI 2.0a, Thunderbolt 3, USB 3.1 Gen2 TypeC, USB 3.1 Gen2 x2	
ネットワーク	ギガビット LAN、Wi-Fi6、Bluetooth v5	
その他	USB イーサネットアダプタ (EDC-GUA3-B) 利用	



図 3.3-2 Master 局 (CC-Link IE)の外観

表 3.3-3 Master 局 (CC-Link IE)の緒元・仕様

諸元	内容	備考
品名	三菱電機株式会社 CNC 数値制御装置 M800S	
サイズ	380 x 290 x 80	



図 3.3-3 Slave 局 (CC-Link IE Field)の外観

表 3.3-4 Slave 局 (CC-Link IE Field)の緒元・仕様

諸元	内容	備考
品名	三菱電機株式会社 NZ2GF2BIN-16D	CC-Link IE フィールドネットワークリモート I/O ユニット
入力	DC 入力 : 16 点 DC24V 6mA	
入力応答時間	0ms / 0.2ms / 1ms / 1.5ms / 5ms / 10ms / 20ms / 70ms	
通信インターフェース	RJ-45 (1000BASE-T)	

サイズ	50 x 133 x 68 mm	高さ x 幅 x 奥行き
質量	0.31 kg	



図 3.3-4 Slave 局 (CC-Link IE Field Basic)の外観  
表 3.3-5 Slave 局 (CC-Link IE Field Basic)の緒元・仕様

諸元	内容	備考
品名	CONTEC CPSL-08P1EN	
ポート	IO-Link ポート 8 チャンネル	
通信プロトコル	CC-Link IE Field Basic; EtherCAT; EtherNet/IP; Modbus TCP; OPC UA; PROFINET	



図 3.3-5 パケットジェネレータの外観  
表 3.3-6 パケットジェネレータの緒元・仕様

諸元	内容	備考
品名	Anritsu MD1230A Data Quality Analyzer	
外部インターフェース	RS-232C、GPIB、イーサネット(10BASE-	

	T/100BASE-TX)、USBポート × 2、PS/2 キーボードコネクタ、GPS アンテナ、ビ デオ出力(VGA)	
サイズ	320 x 177 x 350 mm	幅 x 高さ x 奥行き
質量	15 kg	オプションやモジュール除 く

課題実証ア-2 で使用した構成機器を図 3.3-6～図 3.3-10、および表 3.3-7～表 3.3-11 に示す。無軌道 AGV(図 3.3-6 参照)には、28GHz 帯に対応した 5G モバイルルータ(図 3.2-7 参照)、および無線 LAN の無線モジュールに通信経路を切り替えが可能なソフトウェアを搭載した無線切り替えデバイス(図 3.3-10)を搭載した。無軌道 AGV には、カメラ(図 3.3-11 参照)も設置し、遠隔からカメラの画像を確認しながら、AGV を制御できる構成とした。

無軌道 AGV と対向となる制御側のネットワークは、5G モバイルルータ(図 3.2-7 参照)、無線 LAN アクセスポイント(AP)(図 3.3-8 参照)、端末装置(図 3.3-10 参照)、AGV 制御コントローラ用の PC(図 3.3-9 参照)、無線切り替え制御用の PC(図 3.3-9 参照)から構成される。端末装置は、5G/無線 LAN を切り替えた無線経路を終端するソフトウェアを搭載した。

無軌道 AGV を制御する際に流れるデータは、AGV の制御情報(双方向)、カメラ画像の情報(AGV からの片方向のみ)となり、基本的なデータの流れは AGV 制御コントローラ用の PC⇄端末装置⇄無線区間(5G ルータ or 無線 LAN AP)⇄無線切り替えデバイス⇄AGV(カメラ)となる。

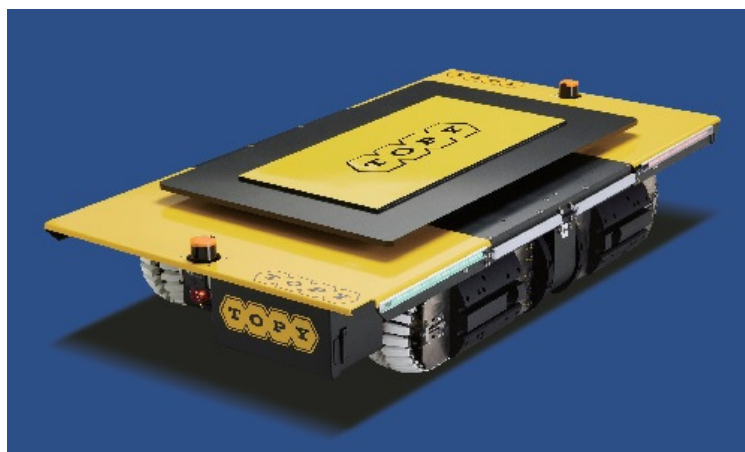


図 3.3-6 無軌道 AGV の外観

表 3.3-7 無軌道 AGV の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	セキシュウ・クローラー	
積載量	最大 500 kg	
走行速度	最大 2 km/h(前後移動) 最大 0.5 km/h(左右移動)	
移動機構	前後左右移動クローラー	
使用目的	遠隔制御対象	
データ種別	AGV 制御用データ	



図 3.3-7 監視カメラ(VB-S30VE)の外観

表 3.3-8 監視カメラ(VB-S30VE)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	キャノン ネットワークカメラ VB-S30VE	
解像度	1920 x 1080	
有効画素数	210 万画素	
走査方式	プログレッシブ方式	
レンズ	オートフォーカス機能付光学 3.5 倍ズームレンズ (デジタルズーム 4 倍)	
センサ	1/4.85 型 CMOS (原色フィルター)	
フォーマット	JPEG、H.264	
パン角度範囲	350° (±175°)	
チルト角度範囲	90°	水平方向を 0° とする
駆動速度	パン角速度：最大 120° / 秒 チルト角速度：最大 120° / 秒	
ネットワーク IF	LAN x 1	
使用環境温度	-25℃～50°	
サイズ	φ 132 x 65mm	カメラのみ
使用目的	AGV 周辺カメラ映像転送	
データ種別	カメラ映像	



図 3.3-8 無線 LAN AP(WXR-5950AX12)の外観  
表 3.3-9 無線 LAN AP(WXR-5950AX12)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	WXR-5950AX12	
無線 IF (チャンネル)	5GHz : W52 36/40/44/48ch (5180~5240MHz) W53 52/56/60/64ch (5260~5320MHz) W56 100/104/108/112/116/120/124/128/132/136/140ch (5500~5720MHz) W56(新電波法対応) 144ch 2.4GHz : 1~13ch (2412~2472MHz)	
有線 IF	RJ-45 型 8 極	
性能	無線 5GHz : IEEE 802.11ax:4803Mbps (80MHz 8x8 、 160MHz 4x4) IEEE 802.11ac:3466Mbps (80MHz 8x8 、 160MHz 4x4) IEEE 802.11n: 1000Mbps (40MHz 4x4) ※1 IEEE 802.11a: 54Mbps 2.4GHz : IEEE 802.11ax: 1147Mbps (40MHz 4x4) IEEE 802.11n : 1000Mbps (40MHz 4x4) ※1 IEEE 802.11g : 54Mbps IEEE 802.11b : 11Mbps  有線 LAN ポート : 最大 10Gbps×1、最大 1Gbps×3 INTERNET ポート : 最大 10Gbps×1	※1 最大 1,000Mbps は 11n 1024QAM 対応機種に 限ります

USB インターフェース	USB Type-A × 1	
電源	AC100V 50/60Hz	
動作温度	0℃～40℃	
サイズ	300mm x 195mm x 75mm	
質量	約 1580g	
使用目的	無線 LAN 通信中継	
データ種別	- (転送のみ)	



図 3.3-9 AGV 制御コントローラ/無線切り替え制御 PC(VKH18/D-7)の外観  
表 3.3-10 AGV 制御コントローラ/無線切り替え制御 PC(VKH18/D-7)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	VKH18/D-7	
OS	Windows10 Pro 64bit	
CPU	Intel Core i7	
RAM	16GB	
ストレージ	512GB SSD	
サイズ	376mm x 254mm x 24.9mm	
重量	2200g	
インターフェース	USB Type-A x 4 USB Type-C x 1	
ディスプレイ	15.6 型 1920 x 1080	
使用目的	制御コントローラ(AGV 制御・カメラ映像表示・無線切り替え制御)	
データ種別	AGV 制御用データ・カメラ映像・無線切り替え制御用データ	



図 3.3-10 無線切り替えデバイス/終端装置 (NEC AI Accelerator)の外観

表 3.3-11 無線切り替えデバイス/終端装置 (NEC AI Accelerator)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	NEC AI Accelerator	
OS	EMLinux	
CPU	Marvell ARMADA 88F3720 Dual-core ARMv8 Cortex-A53 (1GHz)	
RAM	2GB	
ストレージ	8GB	
無線	LTE/無線 LAN (IEEE 802.11ac/a/b/g/n 2X2)	
サイズ	152mm(W)× 145mm(D)× 30mm(H)	
使用目的	無線切り替え制御	
データ種別	無線切り替え制御用データ	

課題実証ア-3 で使用した構成機器を図 3.3-11～図 3.3-16、および表 3.3-12～表 3.3-17 に示す。各機器のシステム内での位置づけと、各機器で取り扱うデータ種別についても、各表中で説明する。



図 3.3-11 カメラの外観



表 3.3-12 カメラの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	RICOH THETA Z1	
解像度	3840x1920(動画解像度)	
階調	RGB256 階調	
ピクセルフォーマット	RGB888	カラー
センサ	1.0 型裏面照射型 CMOS イメージセンサ	
フォーマット	H.264(ストリーミング)	
ピクセルサイズ	不明	
外部入力/出力	USB Type-C:USB3.0	
使用環境温度	0℃～40°	
サイズ	48mm(幅) x 132.5mm(高さ) x 29.7mm(24mm*9)(奥行)	
使用目的	現地作業員の手元及び設備撮影	
データ種別	映像データ	



図 3.3-12 スマートグラスの外観  
表 3.3-13 スマートグラスの諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	MOVERIA BT-300	
方式	シリコン OLED(有機 EL)	
液晶パネルサイズ	0.43 型ワイドパネル(16:9)	
液晶パネル画素数	1280x720(HD)	
色再現	24bit カラー(1677 万色)	
対応動画	MP4(MPEG4/H.264+AAC)、MPEG2(H.264+AAC)、VP8	

対応静止画	JPEG、PNG、BMP、GIF	
動作温度	5℃～35℃	
質量	69g(ヘッドセットのみ)	
防水防塵性能	-	
使用目的	現地作業員へのマニュアル等の情報表示	
データ種別	画像ファイル	
使用目的	現地作業員の手元及び設備撮影	
データ種別	映像データ	



図 3.3-13 映像中継端末の外観  
表 3.3-14 映像中継端末の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	OneMix1 S+	
OS	Windows10 Home 64bit	
CPU	第8世代インテル Core m3-8100Y	
RAM	8GB	
ストレージ	256GB SSD	
サイズ	182mm x 110mm x 17mm	
重量	515g	
インターフェース	USB 3.0 Type-A x 1 USB 3.0 Type-C x 1 Micro HDMI x 1	
ディスプレイ	7inch 1920 x 1200	

使用目的	カメラ(Theta Z1)映像を配信する際の中継用端末	
データ種別	カメラ映像	



図 3.3-14 遠隔保守員用・映像録画用端末の外観  
表 3.3-15 遠隔保守員用・映像録画用端末の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	Razer Blade Stealth13	
OS	Windows10	
CPU	第 11 世代 Intel Core i7-1165G7	
GPU	NVIDIA GeForce GTX 1650 Ti Max Q デザイン 4GB GDDR6 VRAM	
RAM	16GB	
ストレージ	512GB SSD	
サイズ	15.3mm x 304.6mm x 210mm	
重量	1.41kg	
インターフェース	Thunderbolt 4(USB-C) x 2 Type-A USB 3.1 Gen1 x 2	
ディスプレイ	13.3inch 1920 x 1080	
使用目的	現地映像を遠隔保守員が視聴するための 端末 機能検証のための映像録画用端末として も使用	
データ種別	映像	

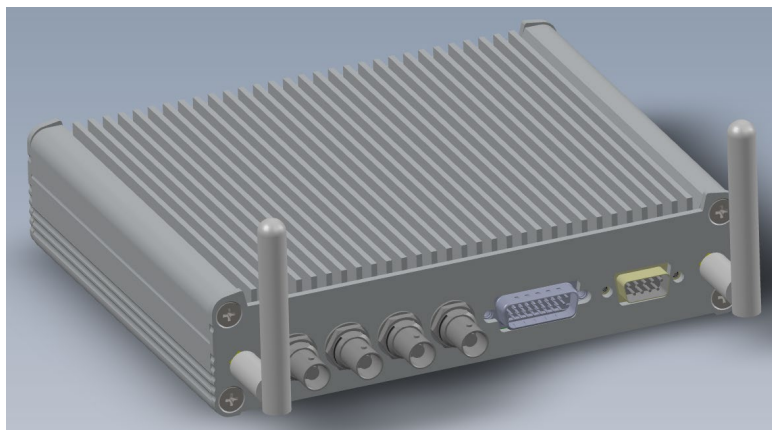


図 3.3-15 センシング機器(TTIO-TG2)の外観

表 3.3-16 センシング機器(TTIO-TG2)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	TTIO-TG2	
センサ I/F	BNC コネクタ x 4ch 0~20V AC or ±10V DC	ピックアップは外付け
通信 I/F	RJ45 コネクタ x 2ch Ethernet 1000Base-T	
性能	分解能 24bit、最大 500kSPS	
電源	DC 5V±5%、2A	
動作温度	0°C~40°C	
サイズ	187mm x 44mm x 148mm	



図 3.3-16 センシング機器(ZNST3520)の外観

表 3.3-17 センシング機器(ZNST3520)の諸元・仕様

諸元	内容	備考
品名	ZNST3520	
センサ	MEMS 加速度センサ x 1 軸	センサを内蔵
通信 I/F	Bluetooth Low Energy	
性能	応答範囲 DC~11kHz	

	最大 60kSPS	
電源	内蔵一次電池	
動作温度	-10℃～60℃	
サイズ	80mm x 60mm x 60mm	
質量	約 200g	

### 3.4 実証環境の運用

キャリア 5G の実証環境を使用するにあたり、実証期間中の障害に対応するための体制を構築した。図 3.4-1 にヘルプデスク体制図を示す。

現場の実証 PM の NEC からのキャリア 5G のネットワーク関連の問い合わせは、NTT ドコモ ソリューションサービス部を一次問い合わせ先とし、現場の機器・工関連は NTT ドコモ 関西支社と連携を取れる体制とした。

課題実証ア-3 のシステムに関する問い合わせは、構造計画研究所の IoE ビジネス部に、課題実証ア-2、および技術実証にシステムに関する問い合わせは、日本電気通信システムを行う体制とし、それぞれリモートで問い合わせを受けられる体制を構築し、常に、現場と連携を取れる体制とした。

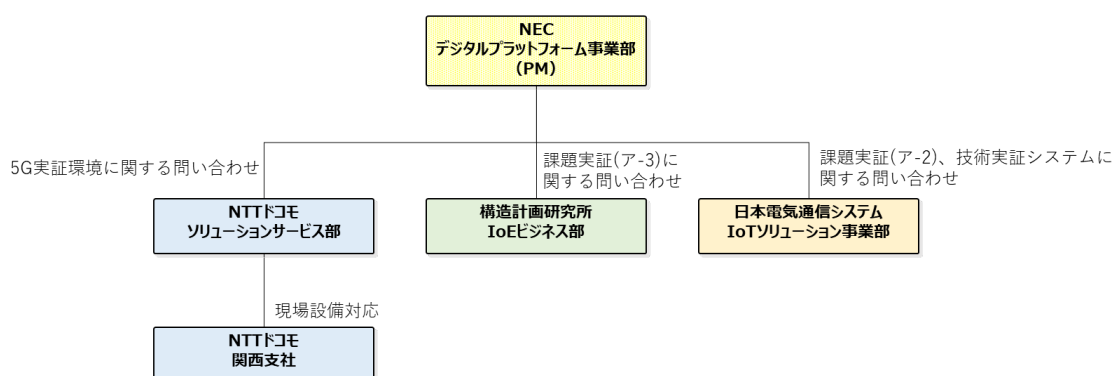


図 3.4-1 ヘルプデスク体制図

また、三菱重工工作機械の工場の現地で実証実験に対応するコンソーシアムのすべてのメンバに対し、工場内で実証実験を安全に進めるための注意点について、教育を実施した(表 3.4-1 安全教育の概要を参照)。安全講習では、三菱重工工作機械の安全衛生心得を基に進められ、一般的な注意事項、工場内での服装・保護具の取り決め、工場内の交通規制、安全原則、確認を必要とする作業、火災予防、緊急時の連絡先連絡についての説明を受けた後に、確認テストを行った。

表 3.4-1 安全教育の概要

日時	2021/1/25、2/1
説明者	三菱重工工作機械 教育担当者
対象者	現地で実証実験に対応するコンソーシアムの全メンバ
教育名	安全教育
内容	一般的な注意事項 工場内での服装・保護具の取り決め 工場内の交通規制 安全原則 確認を必要とする作業 火災予防 緊急時の連絡先連絡

## 4. 課題解決システムの実証

### 4.1 前提条件

課題解決システムについての実証実験を通して評価・分析し、導入効果および実装に向けた機能面、運用面の検証を行う。

- ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

少子高齢化が進む中、製造業においては更なる生産性の向上が喫緊の課題である。制御系ネットワークの無線化は、製造業において変種変量生産が主流となる中、頻繁に実施されるライン変更時の配線作業の省力化や、IT 活用によるオペレーション最適化・自動化による生産性向上に寄与するものである。

本実証では、制御系ネットワークをローカル 5G により無線化する検証を実施する。本実証に関しては、5G の実環境ではなく、プロトコルテストを用いた 5G テストベッドを用いて実証を実施する。これは、現状の 5G 製品は主に大容量通信である eMBB に最適化されているため、低遅延性能が要求される制御系ネットワーク向けの有意な評価・実証が困難なためである。そこで、本実証では、5G のパラメータを比較的自由に変更できるプロトコルテストを用いて、制御系ネットワークに適した 5G 環境を構築し、制御系ネットワークの無線化の実現性の検証や、適した 5G パラメータ探索といった運用面の検証を行う。なお、プロトコルテストの電波を外部に放出することはできないため、同軸ケーブルを用いてプロトコルテストと端末を接続し、検証を行う。電界強度はプロトコルテストの機能を用いて調整可能であるため、実環境に近い電界強度での評価は可能である。実環境で生じる電界強度の変動の再現は困難であるが、変動分のマージンを取った電界強度での評価を実施することとする。

- ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

少子高齢化が進む日本において、各業界での人材確保は重大な課題となっている。工場の中では、運搬作業は付加価値が低い部類の作業であると考えられ、自動化することによるメリットは大きく、人材不足の課題の解消に寄与するものであると考えられる。今回の工場の運用でもクレーン・フォークリフト・手作業による運搬があるが必ず人が介在しており、事前ヒアリングにて部品などを自動で運搬する定期便があると良いとの意見も得られた。本実証では、無軌道 AGV の走行を無線通信により遠隔制御することで、人が行っている従来の運搬作業を自動化する検証を行う。

留意点として、本課題検証ではキャリア 5G を用いた。ローカル 5G とは異なり、実証と無関係のトラフィックも発生しうる。今回の実証中は影響少なかったものの、遅延やスループットにも影響する可能性がある。また、本課題ではアップリンクとダウンリンク双方を使用するが、DU 比が 4:1 固定であるため、アップリンク性能に影響を受けやすい点にも注意が必要となる。

- ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

ベテラン技術者の減少や働き方改革、昨今のコロナ禍に伴うリモートワーク等の背景もあり、製造業を含め多くの分野で作業効率化や知識伝承が重要な課題として認識されてい

る。また、工場内では設備稼働などの環境音によりコミュニケーションが阻害されるといった課題もあり、映像を用いた情報伝達が有用であると考えられる。本実証では、生産設備の保守作業を遠隔支援するシステムの検証を行う。現地映像の共有、スマートグラスによる現地作業員への情報提供、Web アプリケーションによる遠隔保守員への設備状態に関する情報提供という一連のシステムを用いて、その有効性について検証を行う。



## 4.2 実証目標

各課題の実証目標は、以下の通りとなる。

- ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

本実証では、工場内において有線接続で使用している制御系ネットワークをローカル 5G による無線化を行い、現在利用されている機器が、どの程度動作できるかを検証し、ローカル 5G による無線化が可能な範囲を明らかにする。なお、検証は、制御系ネットワークで広く利用されているプロトコルである Ethernet/IP、および CC-Link IE で検証を行う。

- ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

本実証では、従来人手をかけて運んでいた部品など、最大積載量 500kg 以内の重量物を AGV による運搬に変える想定で、AGV を自動搬送に利用できるかを検証する。

5G を用いた広範囲の移動が可能となる無軌道型 AGV システムを構築し、どの程度のエリアで AGV の遠隔制御が可能となるかを明らかにする。さらに、5G(特に 28GHz)では金属遮蔽等による通信品質の劣化が懸念される為、無線 LAN のエリアも併設し、5G の無線を組み合わせる事により、広範囲をカバーできる無軌道型 AGV システムの実用性について検証を行う。

- ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

本実証では、5G を利用することで、遠隔保守員(熟練工)が現地状況を正確に把握し現地作業員への指示出しを行うにあたって不可欠となるデータ品質と通信のリアルタイム性を実現できるかを検証する。

本検証では、門形五面加工機(金属加工機)の主軸に設置された振動センサ及び現地に設置されたカメラ映像を用いて以下 2 つの観点でシステムの有用性を明らかにする。

- ① 振動センサーデータの計測・可視化による設備稼働状況の共有
- ② 現地映像の共有による遠隔からの保守作業支援

①に関して、高速に動作する設備の状態把握には高サンプリングレート(=容量大)を遅延なく配信する必要がある。本検証では、データの計測からクラウド上の DB へ格納されるまでの時間を計測することで評価する。なお、得られた振動データ及び AI による異常検知結果は Web アプリを通して遠隔保守員が確認するユースケースを想定する。

②に関して、映像共有によって現地・遠隔双方の状況を正確に把握するためには、十分な視認性を持つ映像品質が不可欠である。本検証では、複数パターンの解像度、ビットレート下における受信映像品質を映像内に写る QR コード認識率によって定量的に評価し、有用性および課題を整理する。また、スマートグラスによる現地作業員への情報提供および遠隔保守員への現地設備状態の提供の有用性および課題については、アンケート・ヒアリングによって定性的に評価する。

### 4.3 課題実証システムに関する全体像

以下では、課題実証毎に上記の NW 構成を含む全体の構成について説明する。

#### ● 変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化(課題ア-1)

図 4.3-1 に課題ア-1 に係る全体の構成を示す。5G 基地局としてプロトコルテスタ (MT8000A)を用いて評価を行った。プロトコルテスタに 5G ルータ (iR730B) を同軸ケーブルで接続し、ローカル 5G の周波数帯である 4.7GHz 帯で 5G の実信号を流して通信を実施した。プロトコルテスタと 5G ルータにはそれぞれ VPN ルータ (IX2106) を接続した。VPN ルータは Ethernet over IP トンネルを利用するために用いており、Ethernet レベルで通信を実施する産業用プロトコルを IP 通信のみ対応する 5G 機材を通すために利用している。VPN ルータの先には、それぞれ制御を行う機器(Master 局)、制御を受ける機器(Slave 局)を接続した。Ethernet/IP の試験に関しては Master 局・Slave 局として PC(Intel NUC)を用いた。また、CC-Link IE Field Basic の試験には Master 局として NC 装置 (M800S) を、Slave 局としてリモート I/O ユニット (CPSL-08P1EN)を用いた。また、通信遅延を測定するために、Master 局・Slave 局が送受信するパケットは全て、VPN ルータのポートミラーリング機能を用いて、パケットモニタ用の PC (Intel NUC) に転送した。パケットモニタ用 PC では、転送されたパケットをキャプチャし、そのタイムスタンプを参照する。これらのタイムスタンプは、Master 局が送信 (受信) した直後 (直前) の時刻と、Slave 局が受信 (送信) した直前 (直後) の時刻となるため、差分を取ることで 5G を介した通信の通信遅延を取得することが可能となる。なお、本実証システムはプロトコルテスタを利用している関係上、実験室に構築した。図 4.3-2 は実際に構築した評価系である。

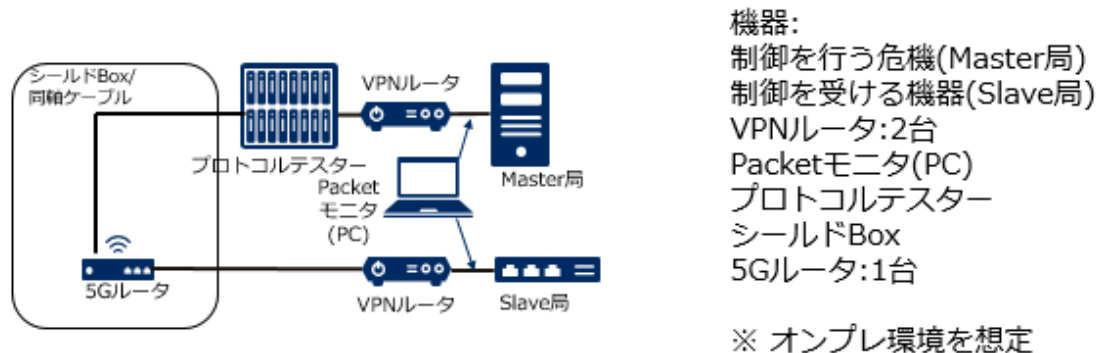


図 4.3-1 課題ア-1 の実証環境の全体の構成



図 4.3-2 課題ア-1 の実証環境

- 無軌道 AGV の遠隔制御(課題ア-2)

図 4.3-3 に課題ア-2 に係る全体の構成を示す。AGV には、28GHz 帯に対応した 5G モバイルルータ、および無線 LAN の無線モジュールに通信経路を切り替えが可能なソフトウェアを搭載した無線切り替えデバイスを接続した。工場内では、上記のキャリア 5G の実証環境に加え、無線 LAN アクセスポイントを設置することにより、AVG の無線切り替えデバイスと 5G または無線 LAN で切り替えながら無線通信を実施可能な構成とした。端末装置は、切り替えた無線経路を終端するソフトウェアを搭載し、AGV の制御を行う制御コントローラを搭載した PC と接続する。AGV には、カメラも設置し、カメラの動画像と制御コントローラからの制御信号を 5G と無線 LAN をシームレスな切り替えが出来るかを検証した。

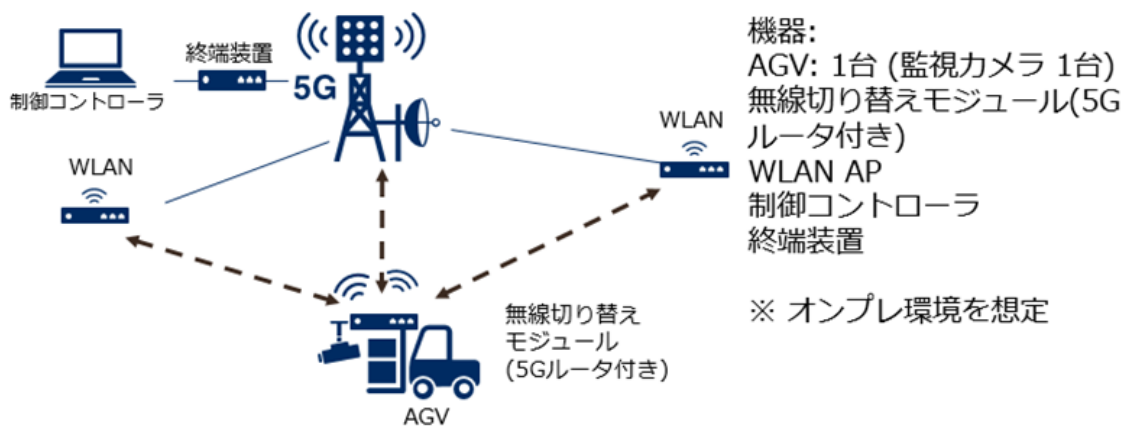


図 4.3-3 課題ア-2 の実証環境の全体の構成

- 熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守支援作業(課題ア-3)

図 4.3-4 課題ア-3 の実証環境の全体の構成に課題ア-3 に係る全体の構成を示す。遠隔保守の対象となる機器については、28GHz に対応したスマートフォンタイプおよびルータタイプの端末を合計 20 台接続した。工作機械に取り付けた振動センサーや現地作業員からのカメラ映像を、本社保守員がリモートで監視、かつ現地作業員の AR メガネやスマホに指示や動画像を表示し、遠隔保守が可能かどうかを検証した。

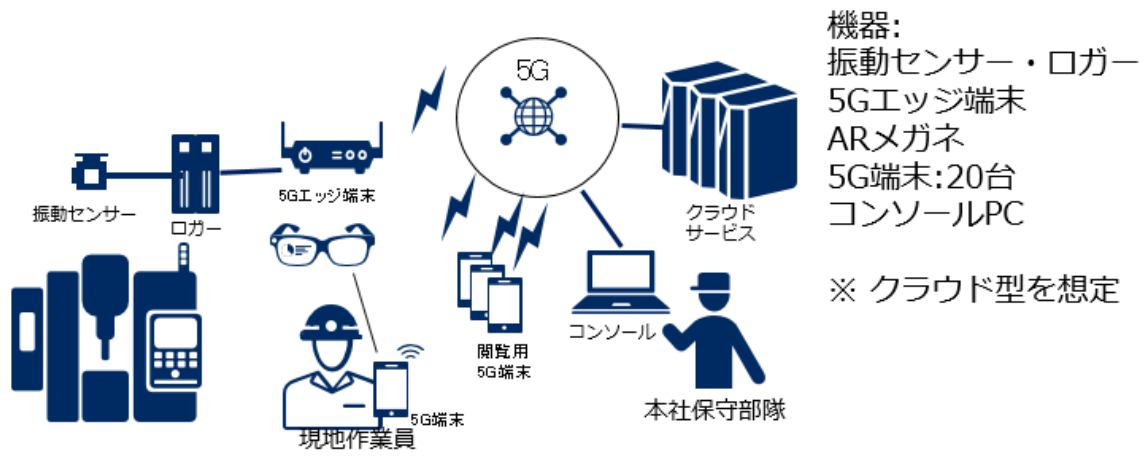


図 4.3-4 課題ア-3 の実証環境の全体の構成

## 4.4 課題解決システムに関する検証および評価・分析

### 4.4.1 ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

本実証では、工場内において有線接続で使用している制御系ネットワークをローカル 5G による無線化を行い、現在利用されている機器が、どの程度動作できるかを検証し、ローカル 5G による無線化が可能な範囲を明らかにする。

工場内のネットワークは、図 4.4-1 に示すように情報系ネットワーク、コントローラ間ネットワーク、フィールドネットワークの 3 階層で構成される。

情報ネットワークはオフィス内の管理用 PC や、製造管理を行う MES (Manufacturing Execution System) 等が接続される。製造現場の情報を収集し、製造スケジュールリングや作業指示等を行う役割を担っている。情報系ネットワークは、リアルタイムな制御を目的とした階層ではないため、高い応答性能は要求されない。コントローラ間ネットワークは、PLC (Programmable Logic Controller) や NC (Numeric Control) 装置などのコントローラが接続される。PLC は産業用ロボットやベルトコンベア等の機器を動作させる順番・回数などを制御する装置である。NC 装置は金属加工機のような工作機械をコンピュータ制御する装置である。

コントローラ間ネットワークでは、作業の連携や動作の同期などのため、一定時間内に通信を実施する必要がある。要求される遅延性能は、数十ミリ秒から数百ミリ秒以内である。

フィールドネットワークは PLC などがマスタとなり、センサやアクチュエータ等の I/O 機器などがスレーブとして接続される。マスタとスレーブ間の遅延性能としては、用途にも依存するが、一般的には数十ミリ秒以下となる。特に、モーション制御に関してはミリ秒以下の超低遅延性能が要求される。

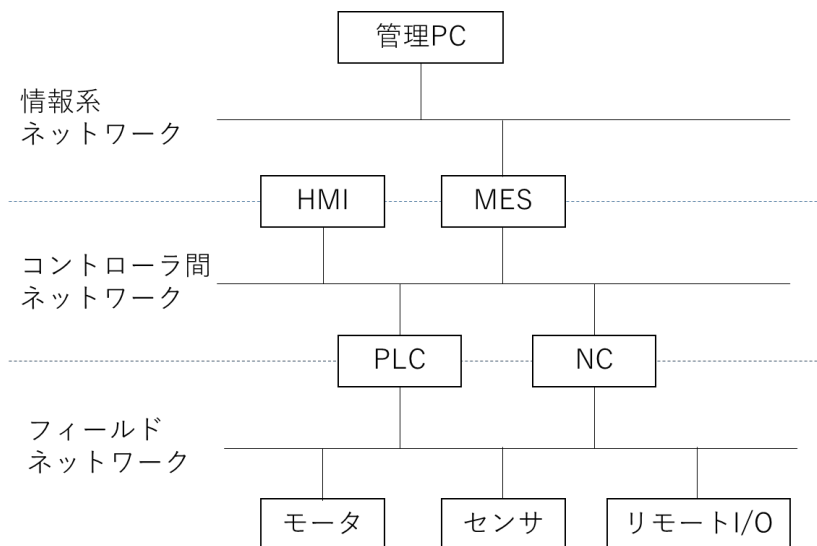


図 4.4-1 工場内ネットワークの構成

コントローラ間ネットワークやフィールドネットワークでは、従来ベンダ固有の独自仕様によるネットワークが敷設されていたが、柔軟性 (マルチベンダの機器を組み合わせられない) やコストに問題があった。そのため、1990 年代後半以降、汎用のイーサネットを利

用する産業用イーサネットの活用が進んでいる。ベンダ間での相互接続性を高めるため、様々な産業用イーサネット規格が提唱されており、Ethernet/IP, PROFINET, CC-Link IEなどが一例である。本実証では、制御ネットワークのサイクリック通信に利用されるこれらの産業用イーサネット規格の内、Ethernet/IP と CC-Link IE について評価を実施した。Ethernet/IP は制御ネットワークで比較的広く利用されていることが特徴である。また、CC-Link IE は、大容量の情報通信とリアルタイムな制御通信を両立し、情報系からフィールドまでをシームレスに接続できる柔軟性が特徴であり、それぞれ対象として選定した。

Ethernet/IP は、ODVA (Open DeviceNet Vendor Association) が主となって管理を実施している産業用イーサネットの規格である。Ethernet/IP のプロトコルスタックは図 4.4-2 に示す通りで、標準の Ethernet、TCP/IP の上に、CIP (Common Industrial Protocol) という上位プロトコルから構成される。CIP はセンサ・アクチュエータの通信に利用される CompoNet や、デバイスレベル通信に利用される DeviceNet 等の上位プロトコルとして共通で利用されるプロトコルで、各ネットワークをまたがった透過的な通信を実現できる。Ethernet/IP には、Explicit メッセージと Implicit メッセージの 2 種類が存在する。Explicit メッセージは、遅延の制約は厳しくなく任意のタイミングで送受信される。Implicit メッセージはリアルタイム性を必要とし、定期的を送受信される。Implicit メッセージは UDP のポート番号 2222 を使用することが定義されており、ネットワーク内のスイッチ等が QoS 設定にポート番号を指定することで Ethernet/IP のパケットを優先的に扱うことができる。

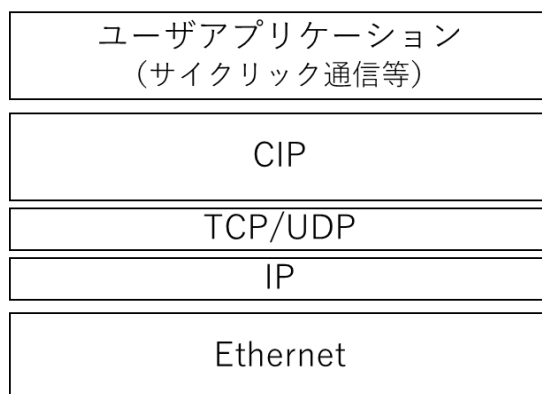


図 4.4-2 Ethernet/IP のプロトコルスタック

CC-Link IE は、CC-Link 協会 (CLPA: CC-Link Partner Association) によって運営されるイーサネットベースの産業用統合ネットワークの総称である。機器管理、機器保全、データ収集機能によるシステム全体の最適化を目的とし、コントローラネットワークからフィールド・モーションネットワークまでをイーサネットで、シームレスに接続することを特徴としている。フィールドネットワーク向けには、CC-Link IE Field、CC-Link IE Field Basic が公開されている。両者の違いは、Basic はフィールドネットワークで利用されるサイクリック通信をソフトウェアで実現している点で、比較的遅延要件が緩い小規模な装置に展開しやすい特徴がある。図 4.4-3 は CC-Link IE Field と Field Basic のプロトコルスタックを示しており、Field は Ethernet の上に直接 CC-Link IE のレイヤが乗るのに対し、Field Basic は、Ethernet と CC-Link IE Field Basic の間に IP、TCP/UDP レイヤが入るという違いもある。

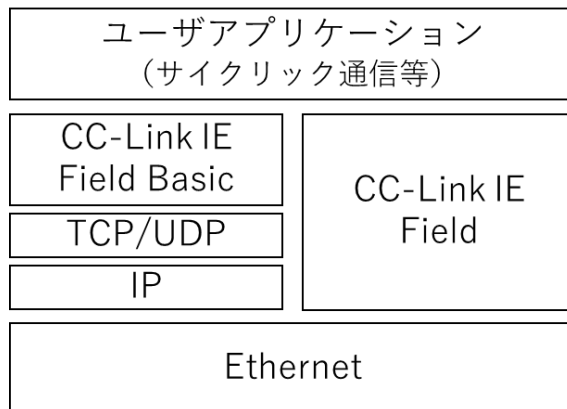


図 4.4-3 CC-Link IE Field Basic のプロトコルスタック

以下、制御系ネットワークの無線化に関して、Ethernet/IP と CC-Link IE Field Basic を利用して検証した評価方法、結果、考察について詳細を述べる。

#### 4.4.1.1 ア-1 評価方法

制御系ネットワークの無線化に関して、Ethernet/IP と CC-Link IE Field Basic を利用して実証を実施した。工場内ネットワークでの遅延要件の目安は前述したとおりであるが、より詳細にみると用途に応じて異なる。用途の分類としては、制御、品質、管理、表示、安全などがある。FFPA の調べによれば、制御や安全用途に利用されるものに遅延要件が短いものが多く、それ以外に関しては比較的要件が緩めである。従来、無線化が困難であった制御用途に関して無線化を推進することが出来れば、工場の柔軟性・生産性への寄与が大きいと考えられる。従って、本実証では、制御用途での無線利用と目指し、制御用途での遅延要件は約 100 ms 以下である。また、生産性向上のためには安定性が重要であることから、約 100 ms 以下の遅延時間を長時間安定的に達成することを目指す。なお、長時間の連続稼働の目安として、本実証では 10 時間とした。また、Ethernet/IP や CC-Link IE Field Basic に関して、サイクリック通信の周期やタイムアウト時間を変更して、稼働可能な周期・タイムアウト時間の探索についても実施した。

表 4.4-1 評価項目一覧

項目	内容	備考
<b>Ethernet/IP の長期稼働実証</b>	連続 10 時間稼働すること、遅延時間が約 100ms 以下であることを確認	
<b>CC-Link IE Field Basic の長期稼働実証</b>	連続 10 時間稼働すること、遅延時間が約 100ms 以下であることを確認	
<b>無線化可能なサイクリック通信周期/タイムアウト値の探索</b>	Ethernet/IP でサイクリック通信の周期と CC-Link IE Field Basic でタイムアウト時間を変更し、現状の 5G で適用可能な制御系ネットワークの周期/タイムアウト値を探索する	

ネットワーク構成に関しては 4.3 節において説明したとおりである。5G のパラメータに関しては後述する課題解決システムに関する運用検証の結果に基づき表 4.4-2 の様に設定

した。周波数はローカル 5G の割り当て周波数であるバンド n79 の中心周波数 4709.85 MHz (NR ARFCN 713990) に設定した。TDD のダウンリンク (DL)、アップリンク (UL) の割り当ては同期運用と同一の DDDDDDDSUU のパターンとした。サイクリック通信は通信データレートよりもむしろ低遅延要件重視であるので、MCS については最低値で設定した。電界強度に関しては、プロトコルテストの機能により調整可能とする。5G エッジゲートウェイ側で観測してセル端周辺に相当する ss-RSRP より十分に弱い -120dBm になるように設定する。これは、セル端でフェージングや遮蔽等で電界強度が更に悪化した場合にも実用的な運用が可能であることを示すためである。なお、一般的にセル端での電波強度は -100dBm 程度であり、後述する 5.4 節の結果から変動分は 10dBm 強であるので、それよりも多めにマージンを取り、-120dBm とした。

表 4.4-2 課題ア-1 の 5G 設定一覧

項目	内容	備考
バンド	n79	
周波数	4709.85 MHz (NR ARFCN 713990)	ローカル 5G の割り当て周波数範囲内
Duplex モード	TDD (DL,UL 割り当ては同期運用に準ずる)	
電界強度(ss-RSRP)	-120 dBm	
MCS	UL, DL 共に 64QAM テーブルののインデックス 0	QPSK の符号化率 120/1024

サイクリック通信の設定を Ethernet/IP, CC-Link IE それぞれについて表 4.4-3 と表 4.4-4 に示した。

表 4.4-3 Ethernet/IP の設定

項目	内容	備考
周期	100 ms	
データサイズ	32 Byte	
タイムアウト時間	周期と同一	
タイムアウト回数	3 回	

表 4.4-4 CC-Link IE Field Basic の設定

項目	内容	備考
周期	15 ms	
データサイズ	371, 347 Byte	Slave から Master, Master から Slave
タイムアウト時間	100 ms	
タイムアウト回数	3 回	



#### 4.4.1.2 ア-1 評価結果

最初に Ethernet/IP の長期稼働実証について結果を述べる。Ethernet/IP の長期稼働実証において、通信遅延によるタイムアウトエラーは一度も発生しなかった。以下、詳細に結果を記載する。

図 4.4-4 と図 4.4-6 はそれぞれ、10 時間分の Ethernet/IP パケットのダウンリンク (DL) とアップリンク (UL) の遅延である。なお、図 4.4-5 は DL の遅延に関して、y 軸の値域を変更し、低遅延側の値を見やすく表示したものである。それぞれのグラフでは、5 分ごとに遅延の最小値 (min と表記)、平均値 (mean と表記)、最大値 (max と表記) を記載している。図を見て分かる通り、一度の例外を除き、DL、UL ともに定常的に 10 ms 以下の通信遅延を維持できていることが分かる。DL に関しては一度だけ 80 ms の遅延が発生しているが、Ethernet/IP の周期 (=タイムアウト) が 100 ms であるため、エラーとはならなかった。

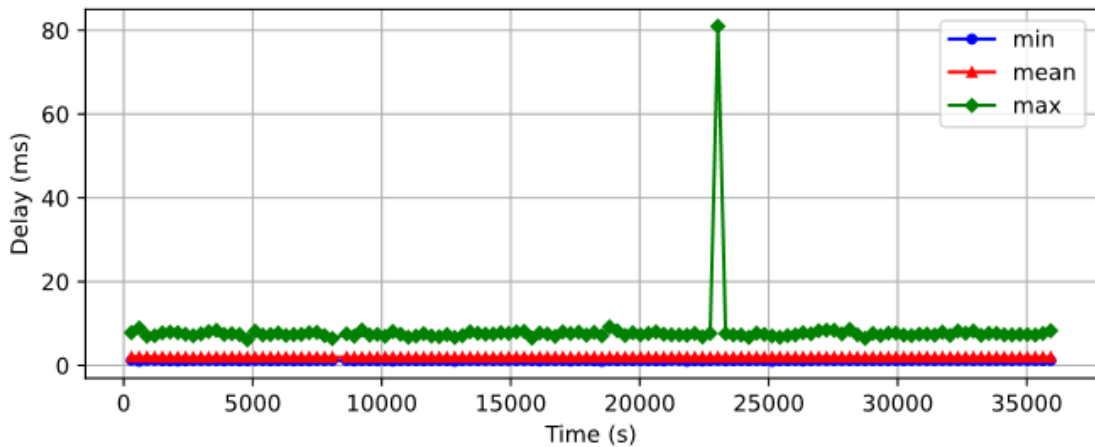


図 4.4-4 Ethernet/IP DL の遅延

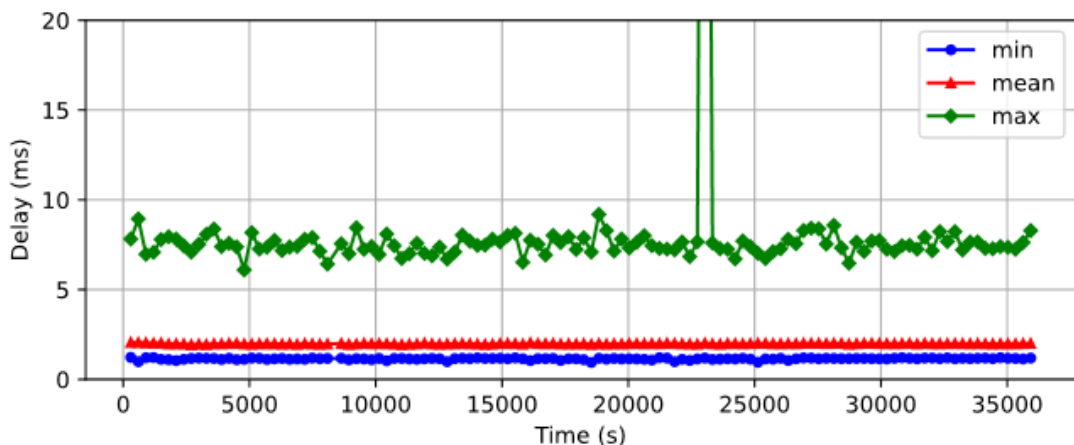


図 4.4-5 Ethernet/IP DL の遅延 (y 軸拡大)

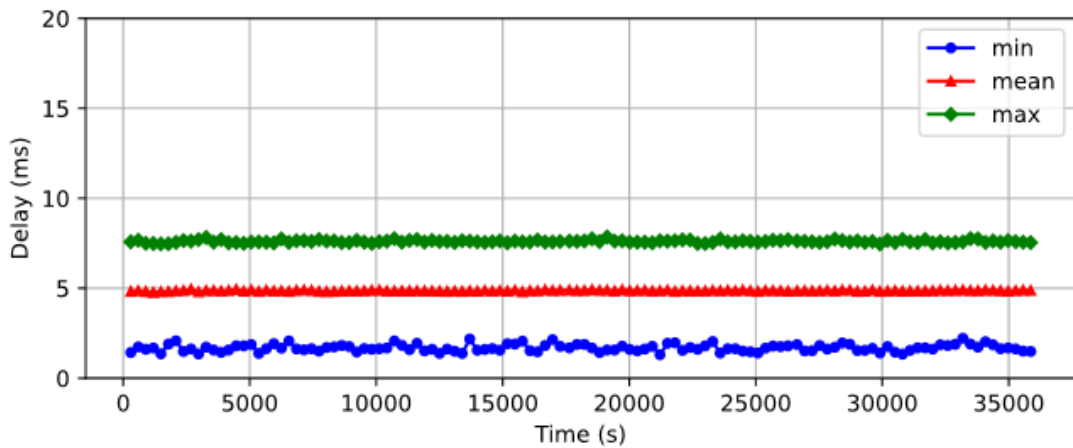


図 4.4-6 Ethernet/IP UL の遅延

次に CC-Link IE Field Basic の長期稼働実証について述べる。CC-Link IE Field Basic に関しても Ethernet/IP と同様にタイムアウトエラーは発生しなかった。以下、詳細に遅延時間に関して結果を記載する。

図 4.4-7 と図 4.4-9 は、それぞれ、10 時間分の CC-Link IE Field Basic パケットのダウンリンク (DL) とアップリンク (UL) の遅延である。x 軸の時間は測定開始時刻を 0 s とし、そこからの経過時間である。なお、図 4.4-8 と図 4.4-10 は、DL と UL の遅延に関して、y 軸の値域を変更し、低遅延側の値を見やすく表示したものである。それぞれのグラフでは、5 分ごとに遅延の最小値 (min と表記)、平均値 (mean と表記)、最大値 (max と表記) を記載している。

DL に関しては、開始後 13600 秒後に一度 80 ms の遅延が発生している。それ以外の時間に関しては、10 ms 以下の遅延が維持されている。UL に関しては、DL に比べて遅延が大きくなっている回数が多く、28600 s に 90 ms の遅延、13000、15100、31900 s に 25 ms の遅延が発生している。いずれの遅延値もタイムアウト値 (=100 ms) に比べて小さいため、タイムアウトエラーとはなっていない。遅延が発生する要因は不明であるが、DL と UL で遅延が 20 ms を超えるタイミングは一致していなかったため、受信側での瞬間的な機器内ノイズや機器の発熱等の可能性が考えられる。

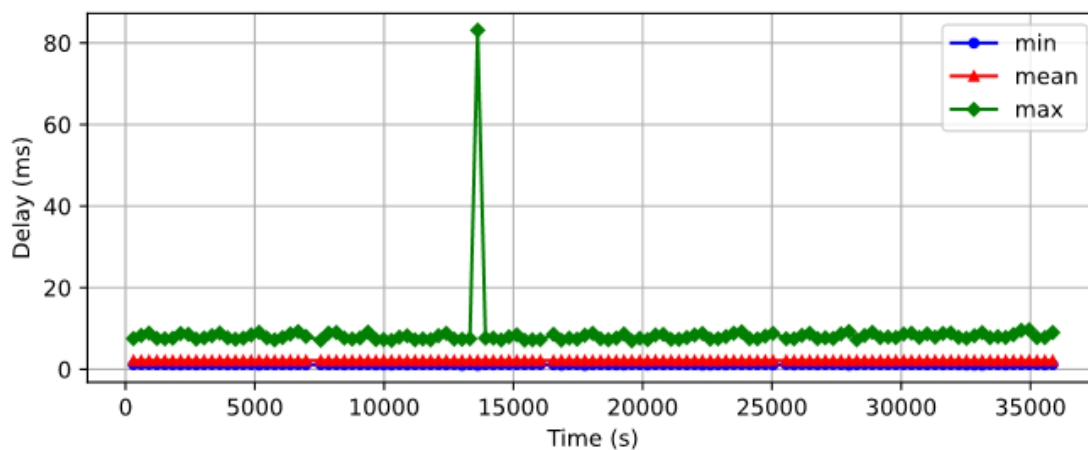


図 4.4-7 CC-Link IE Field Basic DL の遅延

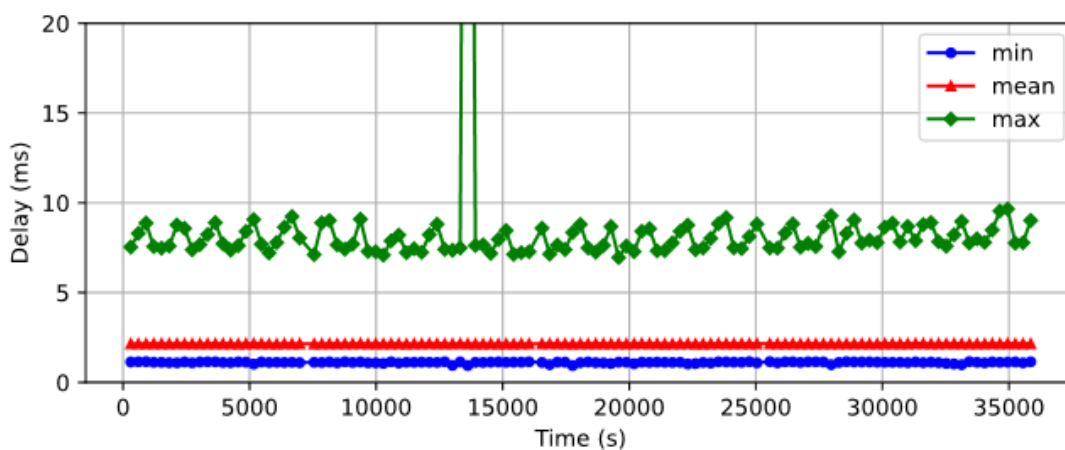


図 4.4-8 CC-Link IE Field Basic DL の遅延 (y 軸拡大)

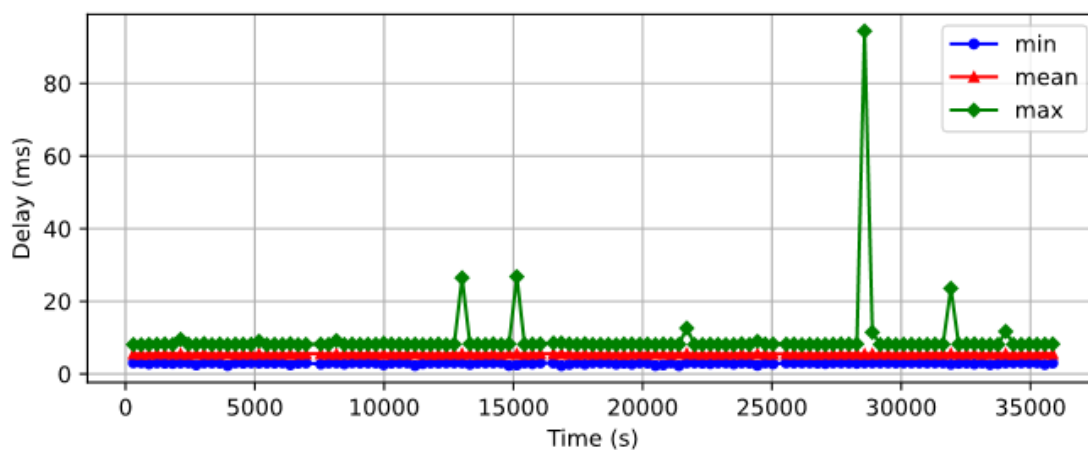


図 4.4-9 CC-Link IE Field Basic UL の遅延

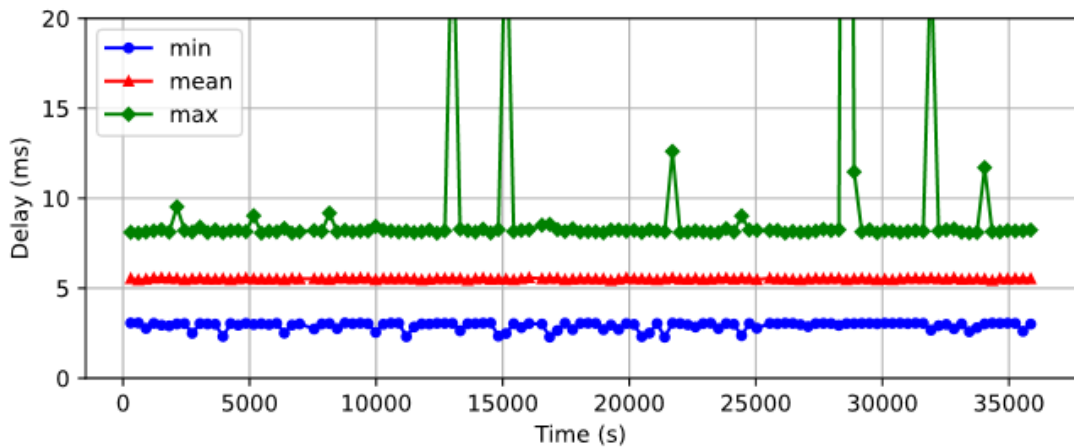


図 4.4-10 CC-Link IE Field Basic UL の遅延 (y 軸拡大)

次に、安定稼働可能な通信周期やタイムアウト値の探索に関して結果を述べる。

表 4.4-5 は CC-Link IE Field Basic についてタイムアウト値を変更した際の通信遅延によるタイムアウトエラー回数をまとめたものである。また、ss-RSRP の値と試験時間も記載している。なお、CC-Link IE Field Basic の機材に関しては、周期は変更できなかったためタイムアウト値のみ変更した。タイムアウトが 3 回連続で発生することでタイムアウトエラーとなる。

最初にタイムアウト値を 20 ms に設定したが、電界強度の強弱に関わらず 5 時間に 1 度程度の割合でタイムアウトエラーが発生した。長期稼働実証において、稀に発生した遅延は電界強度に依存せず発生しているようである。その後、タイムアウト時間を上げていき、最終的に 60 ms で長期的にエラーが発生しなくなった。

表 4.4-5 CC-Link IE Field Basic のタイムアウト値とタイムアウトエラー回数

タイムアウト値 (ms)	ss-RSRP (dBm)	試験時間 (h)	タイムアウトエラー回数	備考
20	-120	15.25	3	
20	-115	16	3	
20	-100	1	1	
20	-60	21.25	2	
50	-60	14.25	2	
60	-60	10	0	

表 4.4-6 は Ethernet/IP についてサイクリック通信周期を変更した際の通信遅延によるタイムアウトエラー回数をまとめたものである。Ethernet/IP では、タイムアウト値は通信周期と同一となり、タイムアウトが 4 回連続で発生することで、タイムアウトエラーとなる。Ethernet/IP についてはサイクリック通信周期が 20 ms で長時間 (10 時間) にわたってエラーが発生しなくなった。

表 4.4-6 Ethernet/IP のサイクリック通信周期とタイムアウトエラー回数

通信周期(ms)	ss-RSRP (dBm)	試験時間 (h)	タイムアウトエラー回数	備考
10	-60	1.25	1	
20	-60	10	0	
100	-120	10	0	

なお、CC-Link IE Field の機材に関しては、現状の 5G テストベッドでは通信エラーが発生し疎通しなかった。数 ms 程度以下の遅延時間が必要となると考えられる。

#### 4.4.1.3 ア-1 考察

本実証により、100 ms 程度のサイクリック通信周期・タイムアウト値の制御系ネットワークの通信に関してはローカル 5G（無線）で置き換えても長時間安定的に稼働できることが実証できた。

本実証では、電界強度は実証系の制約から固定値（ss-RSRP で-120 dBm）としている。実環境ではフェージング等で電界強度に変動が発生するが、一般的にセル端での電界強度が ss-RSRP が-100 dBm であるため、電界強度の振れ幅を考慮に入れて考えても、ネットワーク設計時のエリア範囲内であれば十分に実用レベルであると言える。

また、稀に発生する通信遅延が 100 ms 弱であることから、それに対応するサイクリック通信周期・タイムアウト値であれば、同様に長時間の安定稼働が可能となる。Ethernet/IP では 20 ms 周期・タイムアウト回数連続 4 回、CC-Link IE Field Basic であれば、タイムアウト値 60 ms・タイムアウト回数連続 3 回に関しては、10 時間以上エラー無く動作した。

それ以下の通信周期やタイムアウト値での動作も可能であるが、5 時間に一度程度タイムアウトエラーが発生する点には留意が必要である。ローカル 5G（無線）を適用するアプリケーション側で何らかの考慮をするか、もしくは、1 日に 1,2 度程度の停止が安全性や生産性の観点で許容可能なアプリケーション（用途）に対して利用するなどが必要である。

#### 4.4.2 ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

本実証の機器構成は図 4.3-3 を基にしており、検証時のイメージを示して説明する。

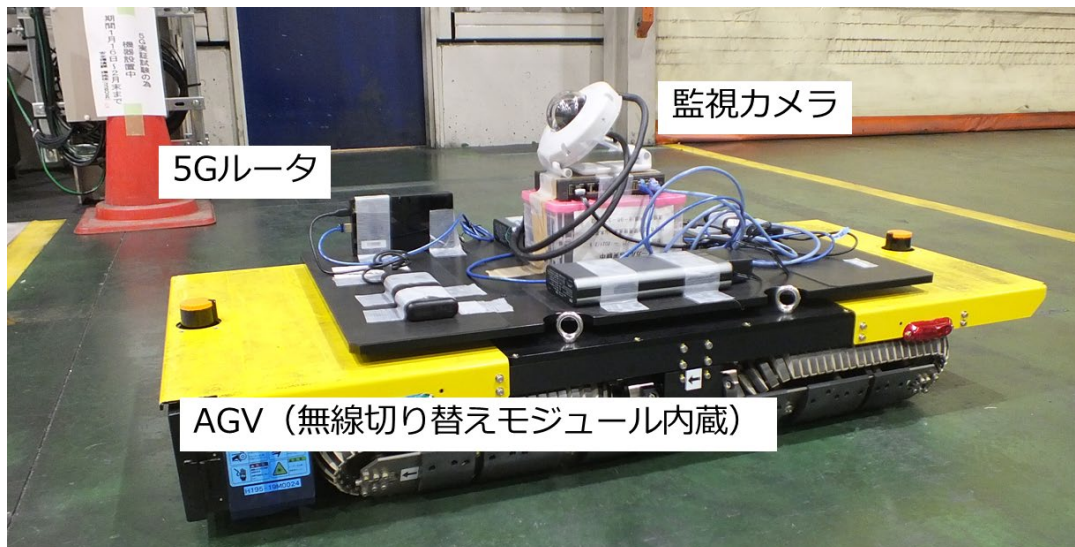


図 4.4-11 AGV 搭載機器

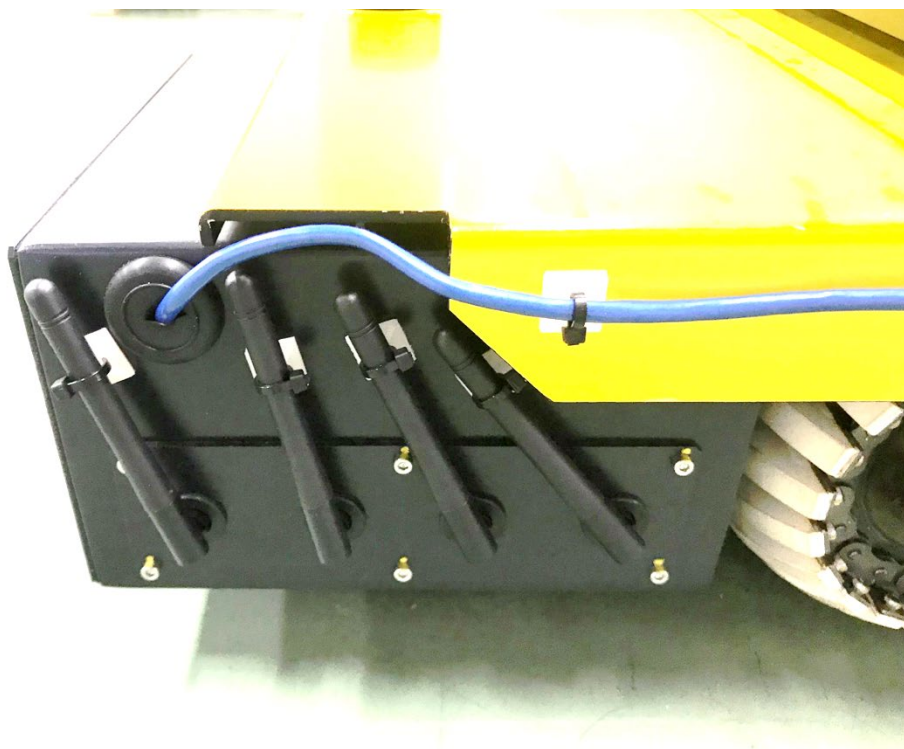


図 4.4-12 無線切り替えモジュール内蔵装置の無線 LAN 用アンテナ

まず、図 4.4-11 に示すように、AGV 上には無線切り替えモジュール内蔵装置、5G ルータ、監視カメラを搭載した。

無線切り替えモジュール内蔵装置は、制御コントローラである無線切り替え制御からの指示により 5G か無線 LAN のどちらの通信経路を使用するかを決定する。同装置は無線 LAN 機能を有しており、無線 LAN の通信経路を選択した場合に使用される。無線 LAN の電波を受信しやすくするため、図 4.4-12 のようにアンテナを AGV 側面に外出ししている。

5G の通信経路を選択した場合は、Ethernet 経由で 5G ルータと通信する。

5G ルータは AGV 制御とカメラ映像転送・制御の 5G 側の通信経路として使用される。対向機の 5G ルータと通信することが可能で終端装置経由で AGV と制御コントローラで通信を可能とする。

監視カメラは RTP over UDP プロトコルを使用してカメラ映像を転送する。

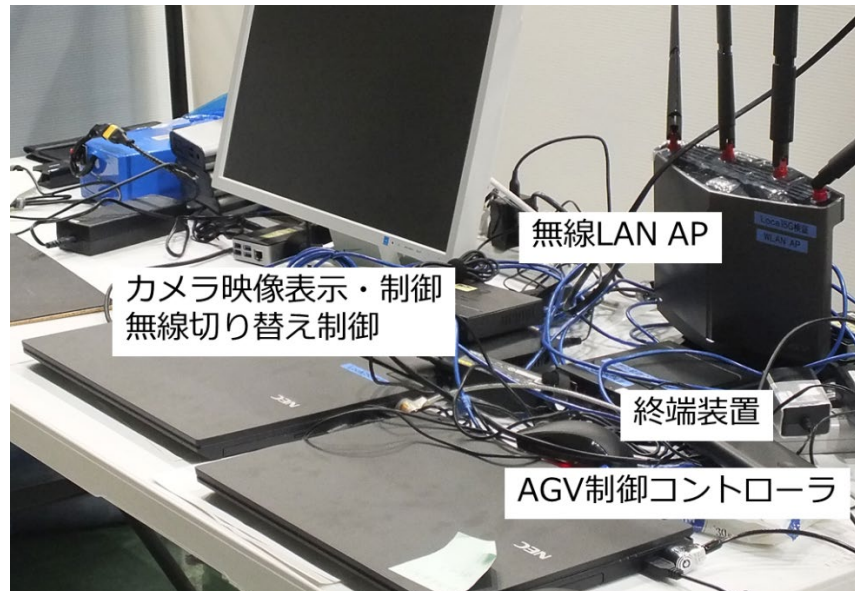


図 4.4-13 AGV 制御とカメラ制御機器

次に遠隔制御側の機器を図 4.4-13 に示す。

制御コントローラのうち、AGV 制御コントローラは AGV と通信して、移動を指示したり、移動量の報告を受けたりする。

制御コントローラのうち、無線切り替え制御は無線 LAN と 5G の無線通信経路の切り替え制御を AGV 搭載の無線切り替えモジュールに対して指示を行う。制御ポリシーは、AGV 搭載の無線切り替えモジュールから通知される無線 LAN 品質(RSSI)に応じてアルゴリズムにより生成される。

終端装置は、5G と無線 LAN の複数無線通信経路を 1 本に仮想化して AGV 側通信し、その仮想化経路を終端する機能を持つ。

無線 LAN AP は AGV 制御とカメラ映像転送の無線 LAN 側の通信経路として使用する。

カメラ映像表示・制御は AGV に搭載されている監視カメラの登録を行い、監視カメラ映像の表示、監視カメラ角度の制御を行う。

上記の機器を使用した評価環境のネットワーク構成を図 4.4-14 に示す。

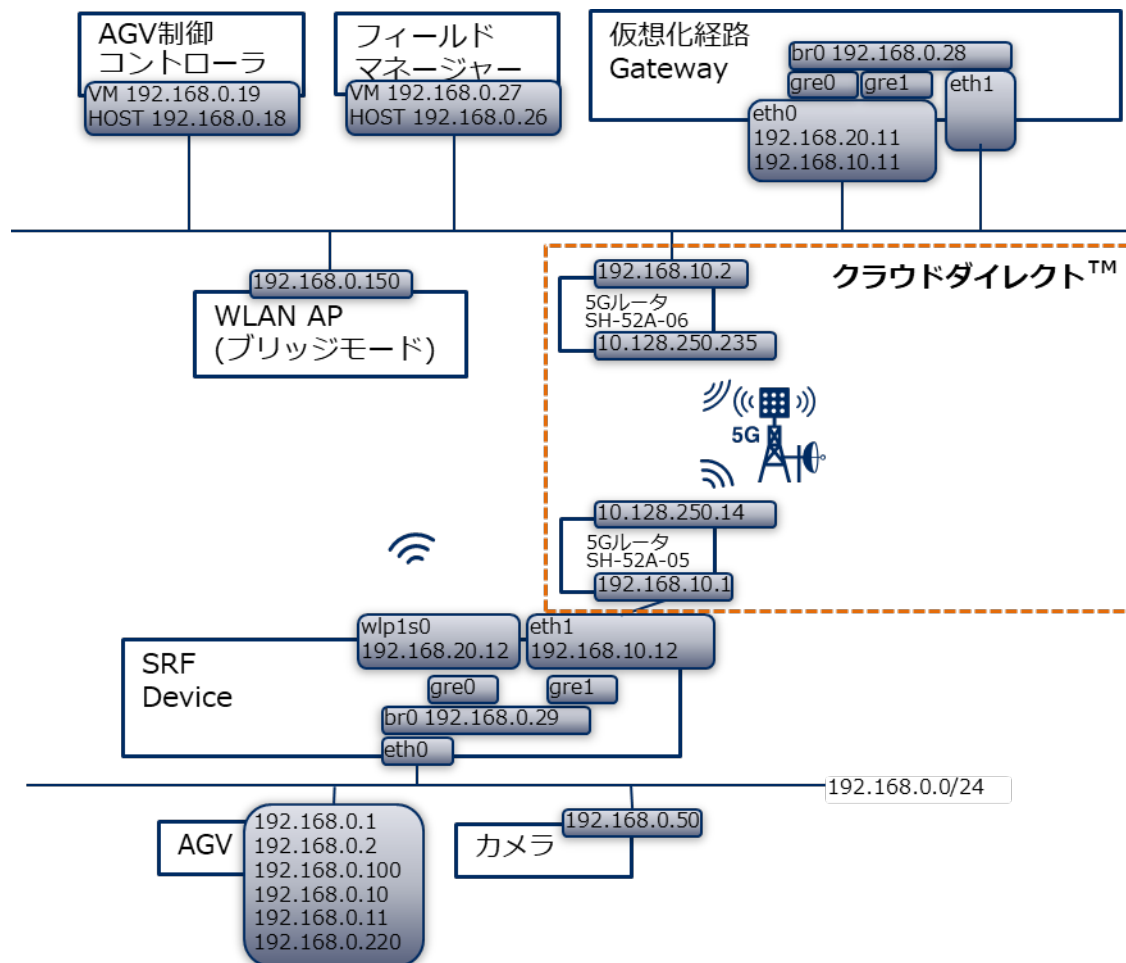


図 4.4-14 ネットワーク構成図

AGV 制御通信のため、AGV と AGV 制御コントローラ間で TCP 通信し、カメラ映像通信のため、カメラ映像表示・制御と監視カメラ間で UDP 通信を行う。この 2 種類の通信は、それぞれ後述の無線切り替え要求に従って無線 LAN もしくは 5G の無線通信経路を使いわけける。なお、無線切り替えモジュールと端末装置間で、GRE のトンネル機能で 1 本の仮想化経路を確立し、途中の IP アドレス変換(NAT)などを各機器が意識しなくても済むようなネットワーク構成とする。

無線切り替え要求と無線 LAN 品質報告のため、制御コントローラの無線切り替え制御と AGV 上の無線切り替えモジュール間で通信を行う。無線切り替えをアップリンクとダウンリンク双方向で同期して実行するため、AGV 上の無線切り替えモジュールと端末装置間で通信を行う。

5G ルータ同士の通信は、クラウドダイレクト™によりドコモオープンイノベーションクラウド@に接続し通信を行う。クラウドダイレクト™は、ドコモネットワーク内のクラウド基盤に直接接続するため、他のネットワークからのアクセスを防止するほか、登録された SIM 以外からのアクセスを制限する閉域網を構築することが可能になる。閉域網では、SIM グループごとに管理されており、通信先の SIM と同じ SIM グループに設定し、Direct 接続を行うことで 5G ルータ同士の直接通信が可能になる。



クラウドダイレクトの提供する以下の機能を使用し評価を実施した。

- ドコモのネットワークとダイレクトに接続することによるセキュリティの高い閉域通信の提供
- クラウドダイレクト™の管理機能として、モバイル回線の接続先の閉域網やクラウド拠点をユーザー自身が柔軟に変更できるネットワーク・オン・デマンド機能を提供

ドコモのネットワークとクラウド基盤をダイレクトにつなぐため、インターネットなど他網からのアクセスを防止でき、あらかじめドコモ網に登録した回線以外からの接続が制限される閉域アクセスにより、セキュリティの高い通信が実現可能。

ローカルエリアネットワーク内固定 IP アドレスの払い出しにより端末間通信が可能な Direct 方式と、ローカルエリアネットワーク内動的 IP アドレスが払い出される Connect 方式を選択でき、本実験では Direct 方式を使用した。

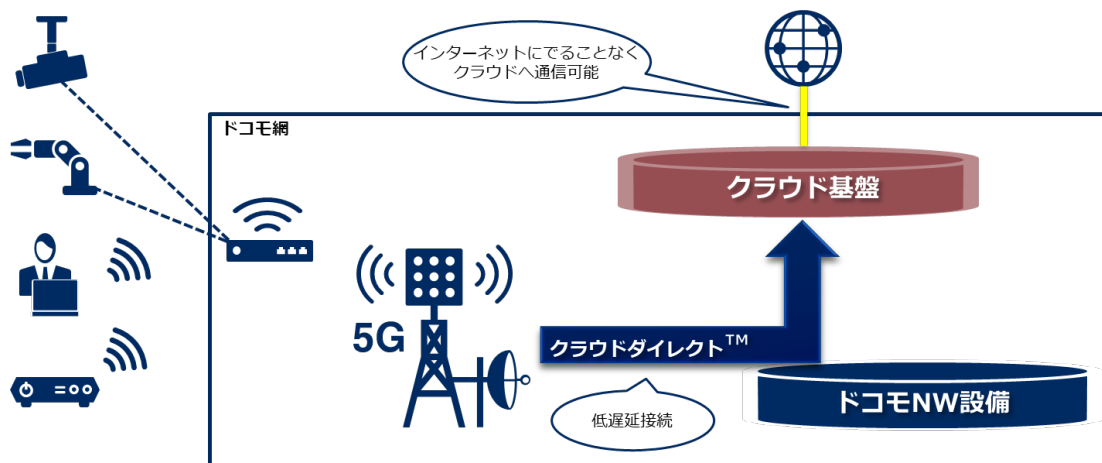


図 4.4-15 セキュリティの高い通信を実現する閉域アクセス

クラウドダイレクト™の管理機能として、モバイル回線の接続先のクラウド拠点や閉域網をユーザ自身が柔軟に変更できるネットワーク・オン・デマンド機能が提供されているため、今回の評価では実験実施場所の関係から大阪拠点を選擇した。

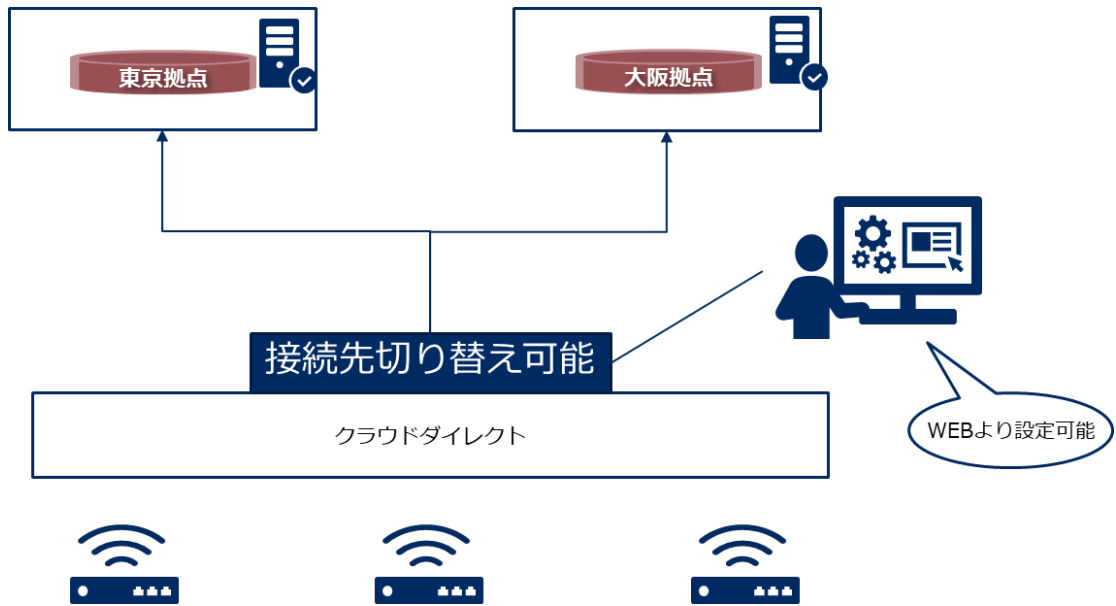


図 4.4-16 ネットワーク・オン・デマンド機能

本実証向けの主な開発内容は、無線切り替えモジュールと終端装置間の無線通信経路切り替え機能、および制御コントローラの無線切り替え制御機能となる。

#### 4.4.2.1 ア-2 評価方法

本評価では、以下の 3 つの項目について評価を行う。各評価の評価方法は以下の通りである。

##### 1. AGV が走行できるエリアの検証

図 4.4-17 のように工場内に設置した 5G システムのカバーエリアの境界まで AGV を走行させ、遠隔制御が可能なエリアを明らかにする。さらに、AGV 上には、監視カメラを搭載してカメラ映像を表示できるように通信しながら走行する。さらに、AGV 上には、測定用の 5G 対応スマートフォンを搭載し、Android API 経由で、1 秒毎に SS RSRP を測定しておく。さらに、遠隔制御サーバ側でパケットキャプチャを行い、パケット解析ツールを使用し、AGV 走行中のスループットおよび通信遅延(RTT)をケース 1 として評価する。

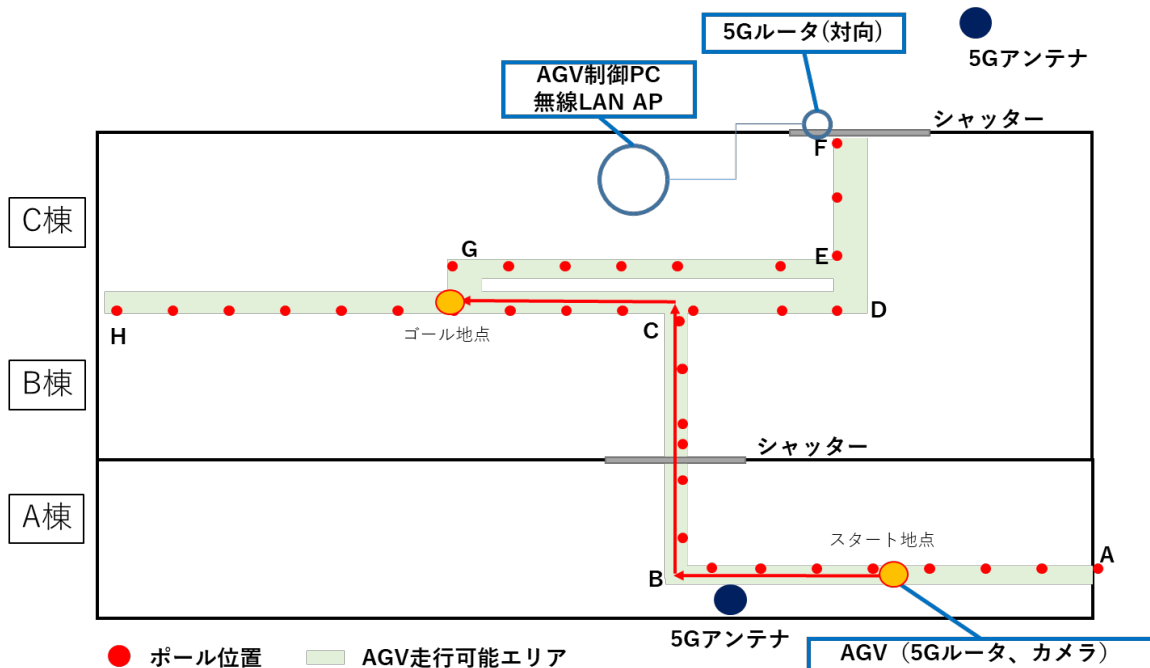


図 4.4-17 AGV 移動ルート (ケース 1)

2. 5G エリアと無線 LAN エリアとの切り替え時の動作連続性
3. AGV 搭載の監視カメラ動画の連続性

上記の 2 つの検証は、以下の方法で同時に検証を行う。工場内に設置した 5G システムのカバーエリアの境界となるエリアが無線 LAN のカバーエリアになるように、無線 LAN のアクセスポイントを設置した上で、AGV を走行させ、5G と無線 LAN を切り替えながら、AGV の遠隔制御が途切れることなく実現できるかを検証する。さらに、AGV に監視カメラを搭載して動画を流しながら走行し、5G と無線 LAN を切り替えながら、監視カメラの動画が途切れることなくスムーズに流せるかを検証する。図 4.4-18 のように 5G から無線 LAN に切り替える場合をケース 2 として、図 4.4-19 のように無線 LAN から 5G に切り替える場合をケース 3 として評価する。

また、定量的なデータを取得するために、走行する AGV には、測定用の 5G 対応スマートフォンを搭載し、Android API 経由で、1 秒毎に SS RSRP を測定する。さらに、遠隔制御サーバ側でパケットキャプチャを行い、パケット解析ツールを使用し、AGV 走行中における AGV 制御信号および監視カメラの動画データのスループットおよび遅延を評価する。スループットおよび遅延は、5G 側経路通信時と無線 LAN 側経路通信時に分けてデータをまとめ、現在よく利用されている無線 LAN を従来技術とし、新技術の 5G と比較する。

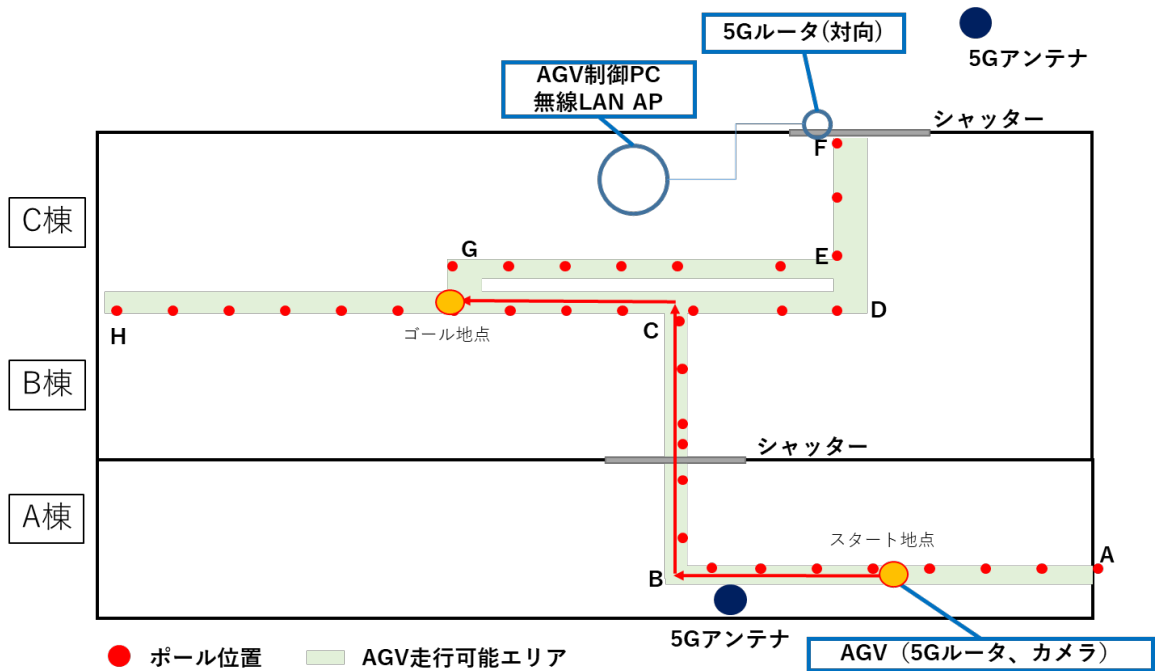


図 4.4-18 AGV 移動ルート (ケース 2)

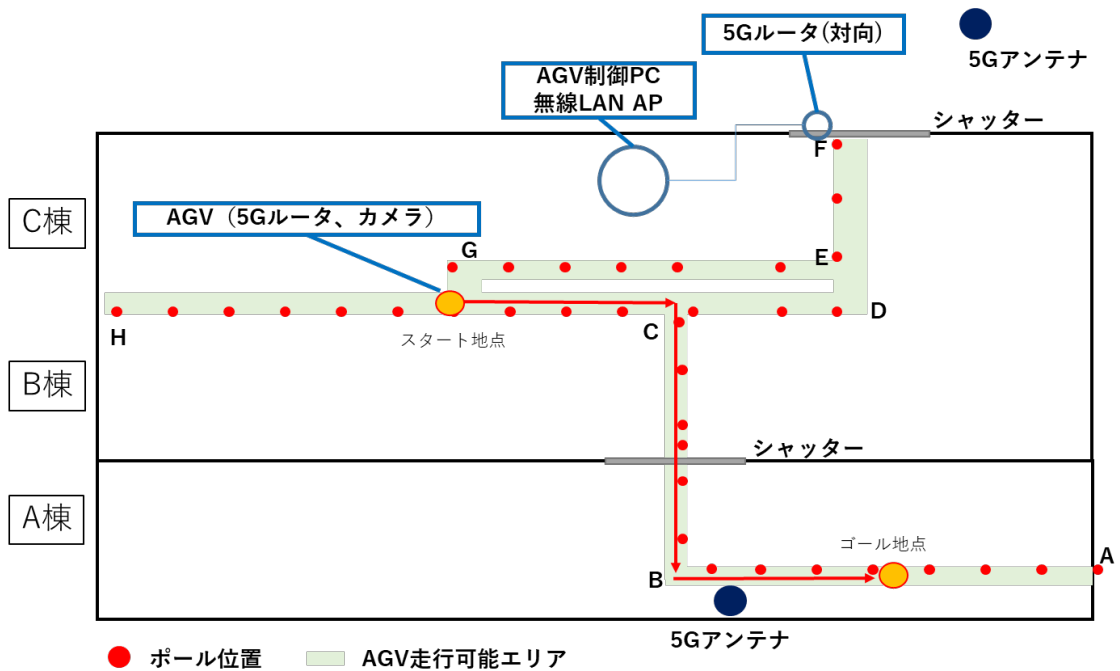


図 4.4-19 AGV 移動ルート (ケース 3)

経路切り替えは、無線 LAN の RSSI を基準として実施することとした。無線 LAN 側の情報を基にした理由は、5G ルータからは RSRP などの情報を得られないためである。RSSI の値は、ケース 1) と同等の試験を事前に行い、下記の閾値として 5 秒継続した時に経路を切り替えることとした。

5G→無線 LAN 切り替え閾値	-58dBm
無線 LAN→5G 切り替え閾値	-63dBm

AGV 移動による評価の概要および評価方法を表 4.4-7 で示す。本評価の狙いは、AGV が移動する経路で、5G を使用した場合の 3.3 節で定義したネットワーク性能目標を満たせるかを評価することである。

表 4.4-7 AGV 移動による評価の概要、評価方法

計測の狙い	AGV 遠隔制御のためのカメラ映像と AGV 制御の通信確認
計測場所	第二工場 A、B 棟の AGV 移動可能経路
計測方法	終端装置でパケットキャプチャを行い、スループットと RTT を集計
基地局のアンテナチルト	30 度
カメラ映像	1920x1080 / 20FPS
カメラ動画の通信方式	RTP over UDP
AGV 制御の通信方式	TCP
端末の台数	1
端末の設置高	0.15m

本実証を安全に実施するにあたり、AGV が走行可能な通路などを工場側担当者と打合せして調整した。今回の工場では、従来から図 4.4-20 のようにフォークリフトと人の通路を分けており、AGV はフォークリフトと同じ通路を利用することとした。また、AGV の自動走行時の位置補正用として、図 4.4-21 のポールを図 4.4-22 のように設置する必要があるが、これにより人が見ても AGV 走行通路であることがわかりやすくなっている。さらに、評価期間中のため、AGV が走行する場合は近くに実証作業員一人以上が立ち会うこととし、非常時に AGV を手動停止させることも可能とした。

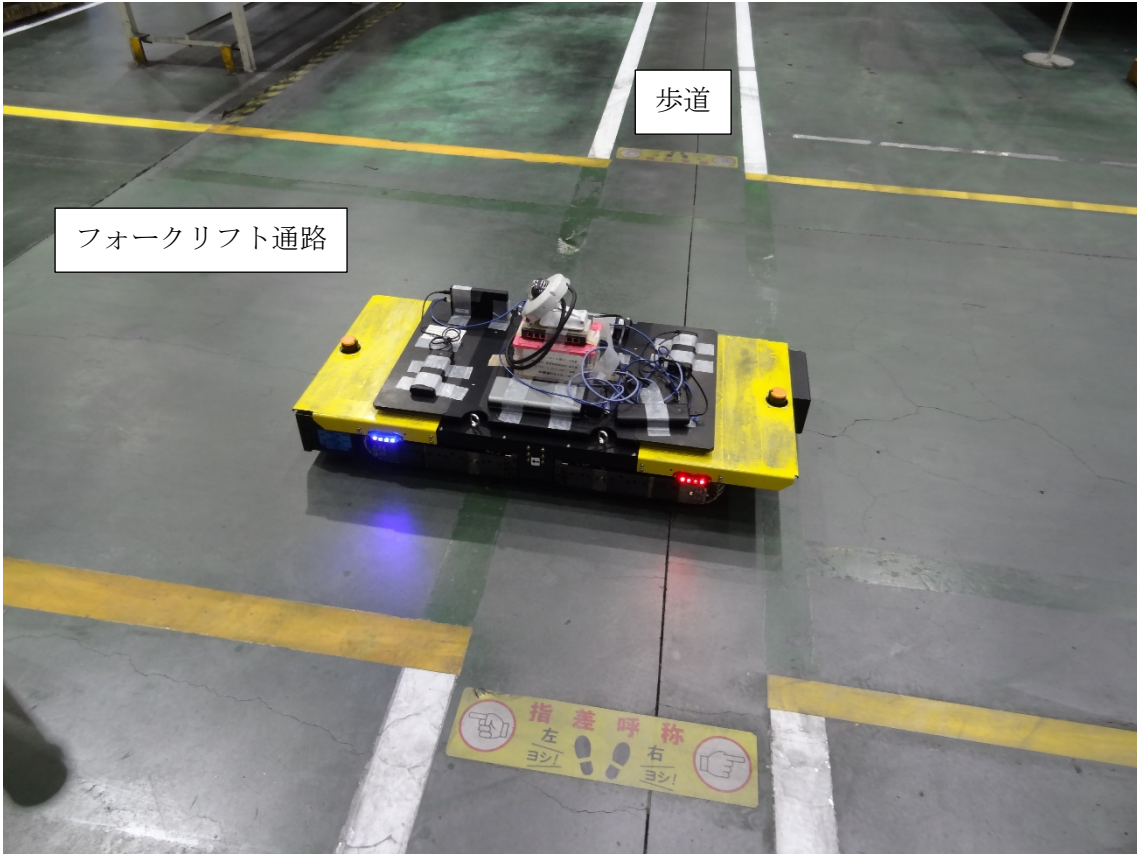


図 4.4-20 工場内通路



図 4.4-21 AGV 用ポール

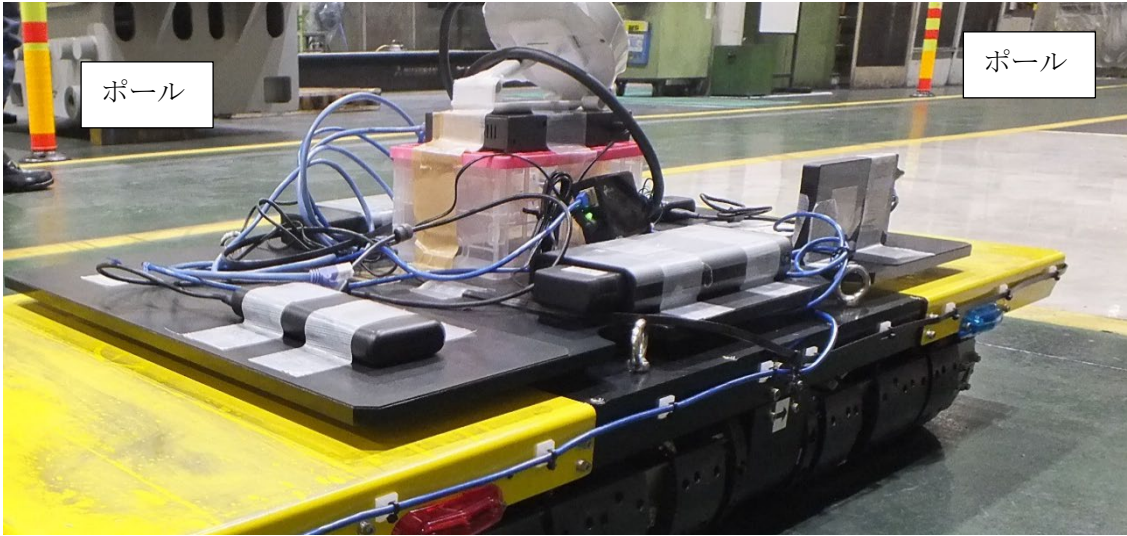


図 4.4-22 AGV 用ポール設置状況

#### 4.4.2.2 ア-2 評価結果

- ・ケース 1) AGV が走行できるエリアの検証

図 4.4-23 に実際に AGV が走行したルートを示す。C 地点手前で、AGV が走行不能になった。5G アンテナから 30m ほど離れたところである。

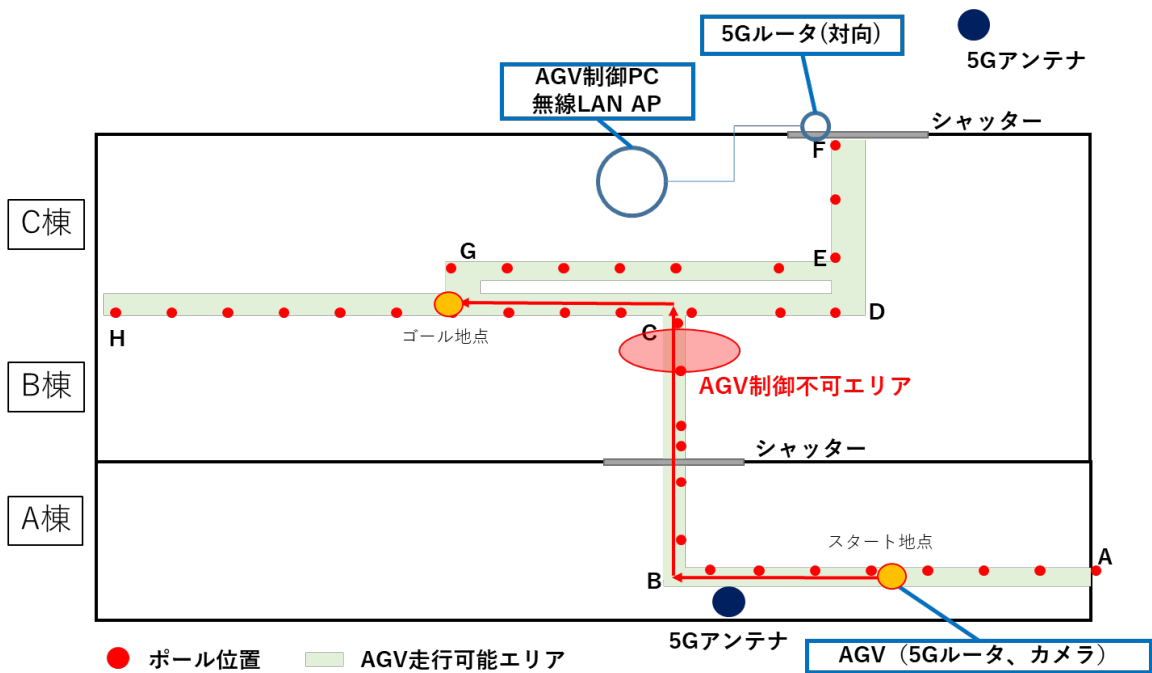


図 4.4-23 AGV 移動ルート (ケース 1)

図 4.4-24 にカメラ映像の平均スループットを時系列で示す。図 4.4-25 に AGV 制御の RTT を時系列で示す。図 4.4-26 に SC-53A で測定した RSRP を時系列で示す。

カメラ映像の平均スループットは評価中 10Mbps 以上を保っていたが、AGV 制御の RTT

が 10:45:50 あたりから急激に大きくなって制御不能となり、AGV は停止した。RSRP の図をみても、同時刻あたりから、-90dBm ほどに低下している。

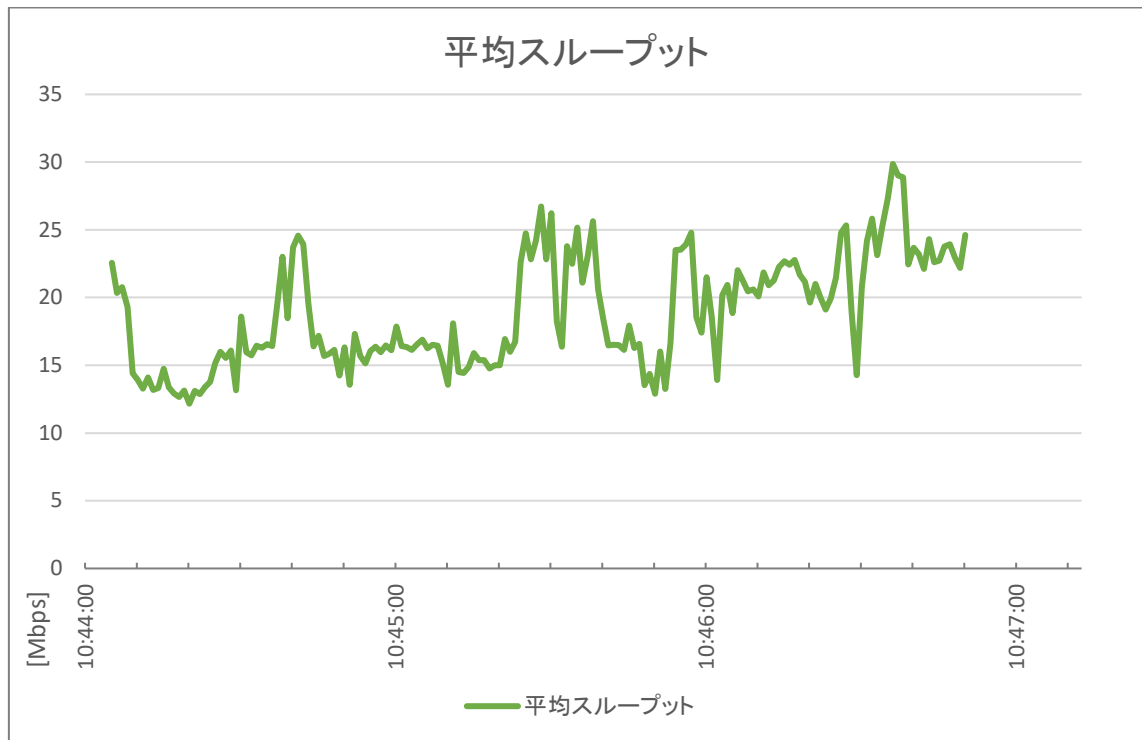


図 4.4-24 ケース 1) 平均スループット

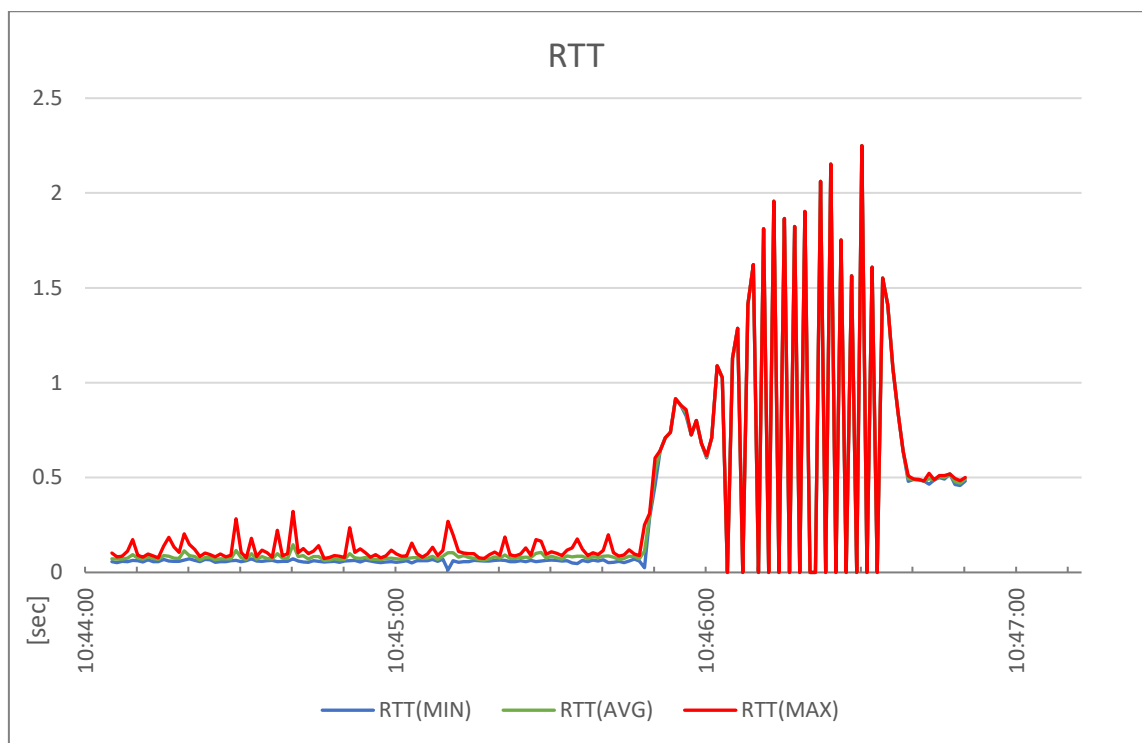


図 4.4-25 ケース 1) RTT



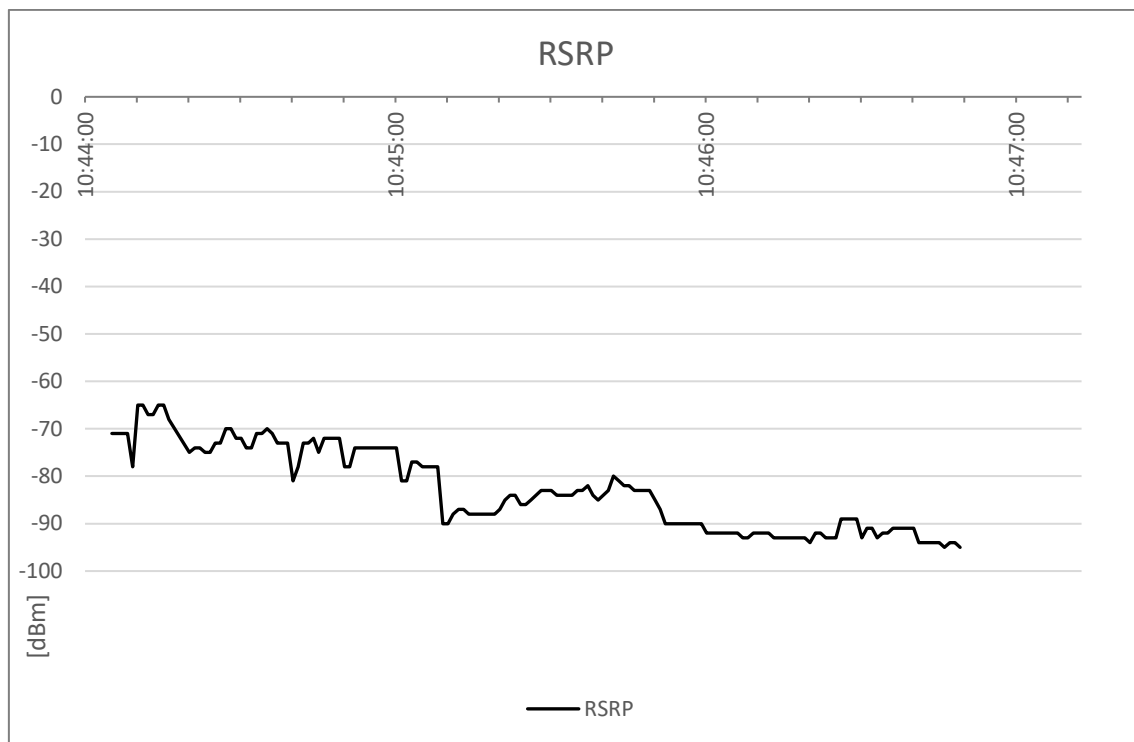


図 4.4-26 ケース 1) RSRP

・ケース 2) 5G→無線 LAN 切り替え時の動作連続性

図 4.4-27 に実際に AGV が走行したルートを示す。C 地点手前で 5G→無線 LAN 切り替えが発生した。5G アンテナから 30m ほど離れたところである。

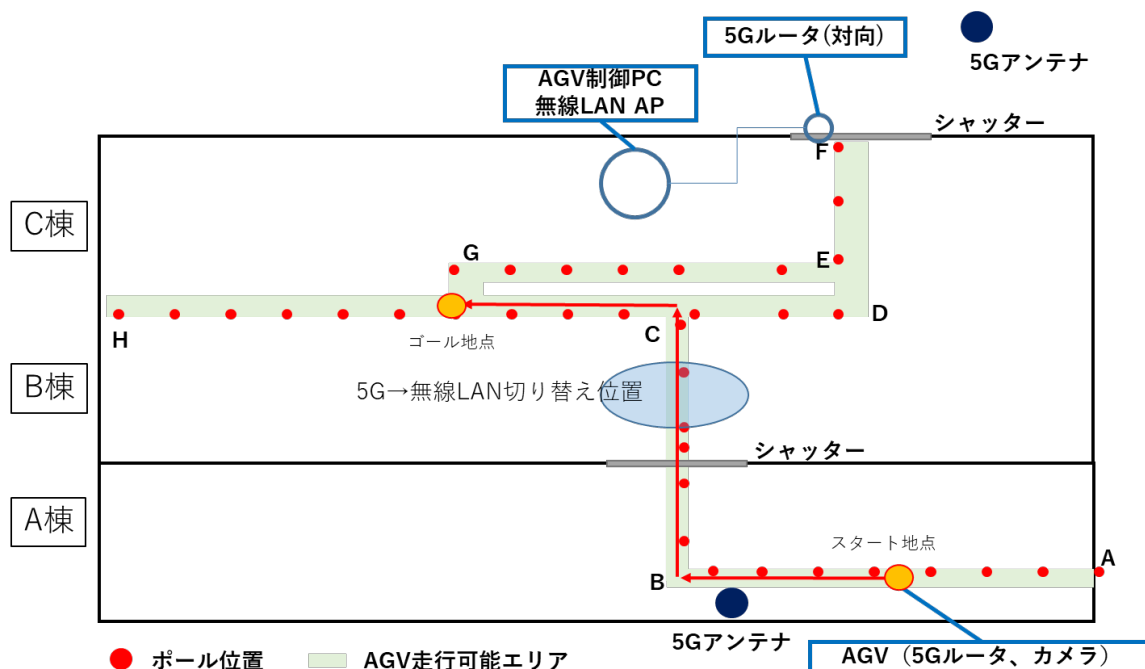


図 4.4-27 AGV 移動ルート (ケース 2)

図 4.4-28 にカメラ映像の平均スループットを時系列で示す。図 4.4-29 に AGV 制御の

RTT を時系列で示す。図 4.4-30 に SC-53A で測定した RSRP と SRF Device で測定した RSSI を時系列で示す。

カメラ映像の平均スループットは安定的に 10Mbps 以上保ち続けられることが確認できた。AGV 制御の RTT 観点では、5G 側経路で通信中は平均 80msec 弱ほどで、最大 343msec も確認されたが、AGV 制御に支障は無かった。無線 LAN 側経路で通信中は平均 20msec 弱ほどで、最大 78msec も確認されたが、同じく AGV 制御に支障は無かった。

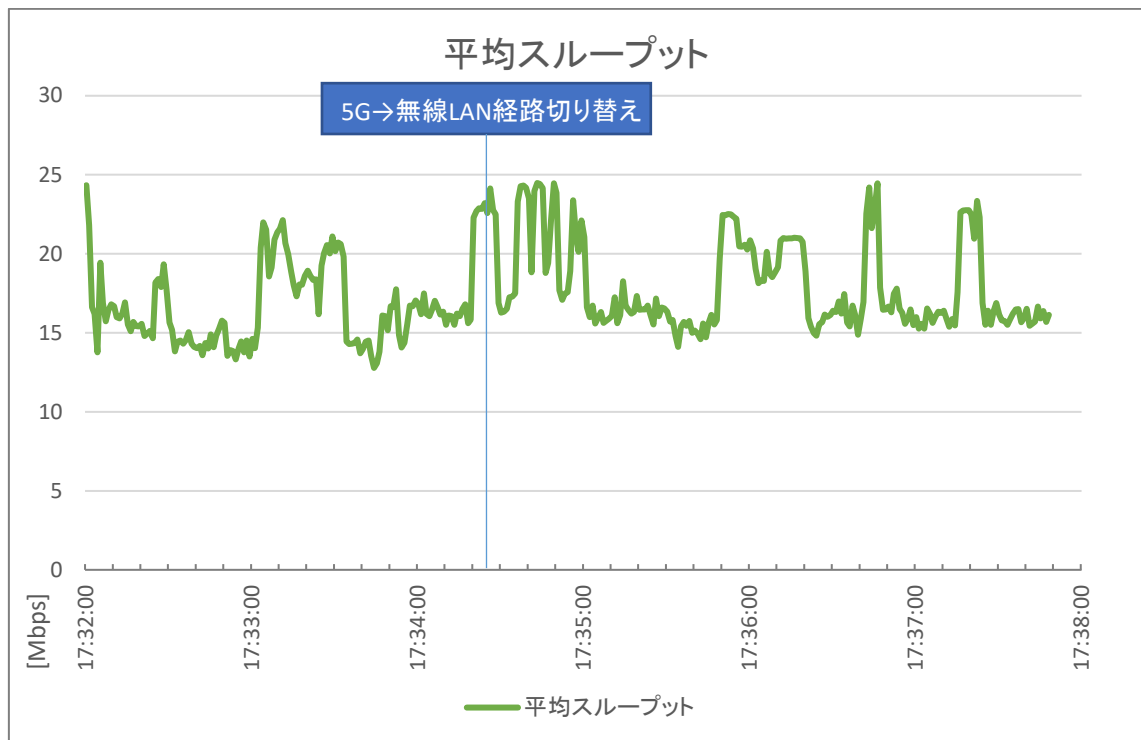


図 4.4-28 ケース 2) 平均スループット

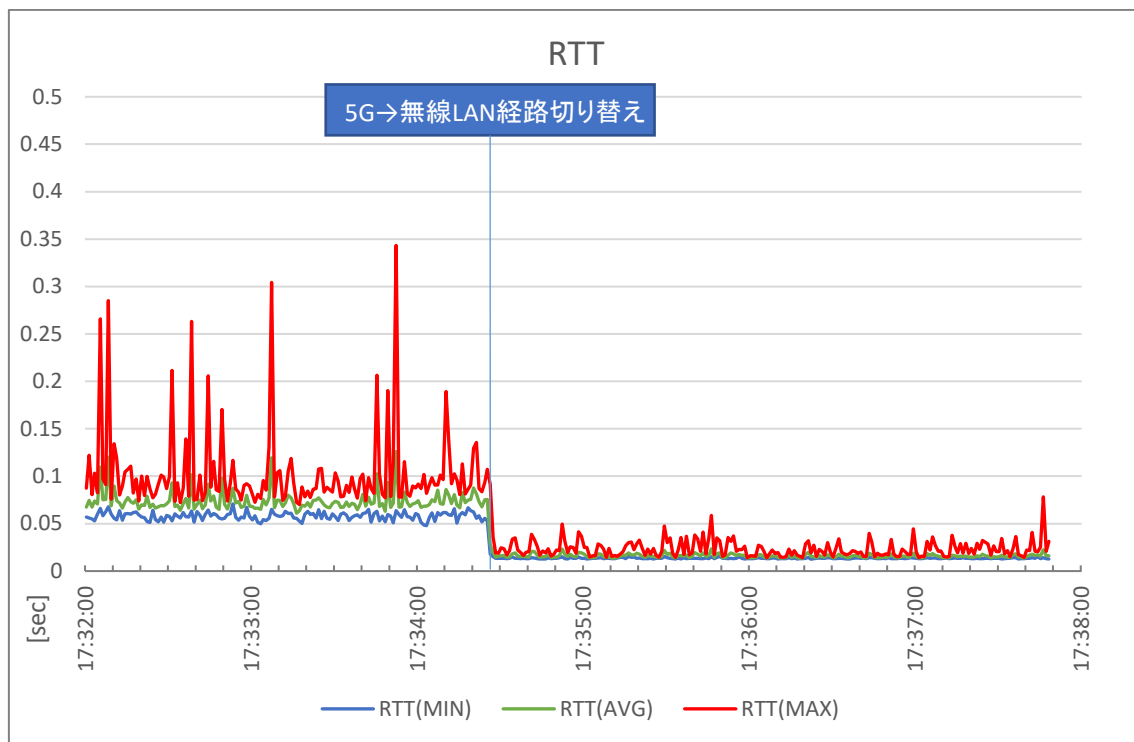


図 4.4-29 ケース 2) RTT

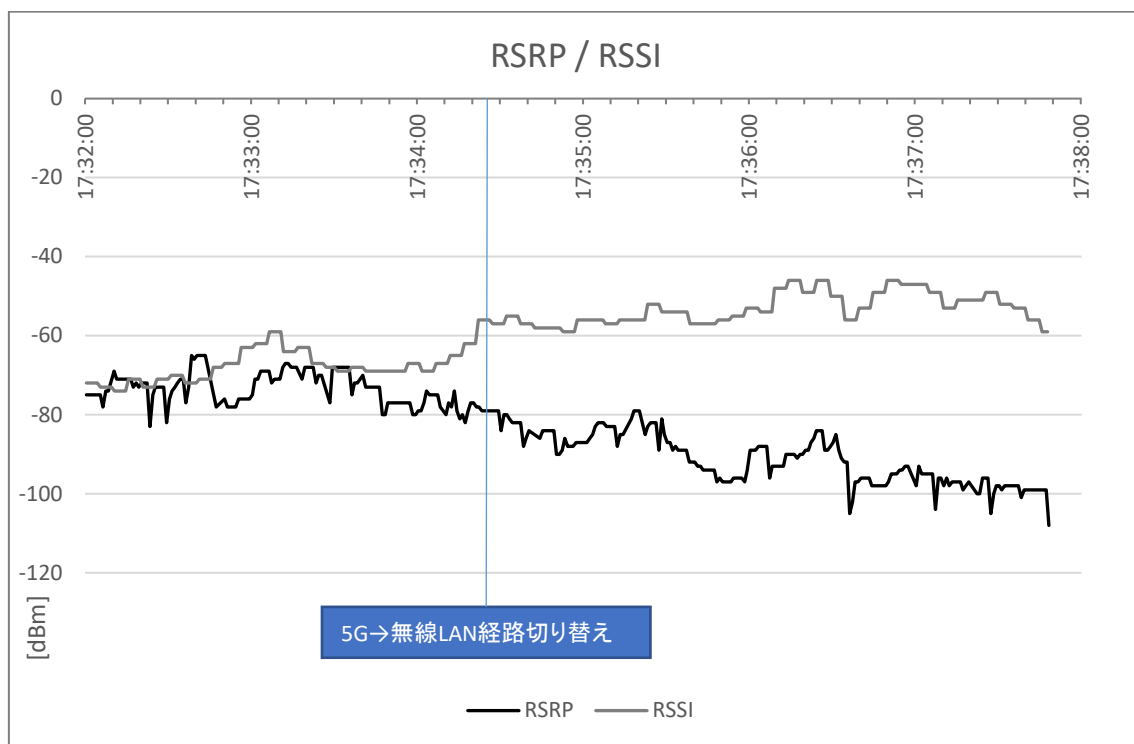


図 4.4-30 ケース 2) RSRP/RSSI

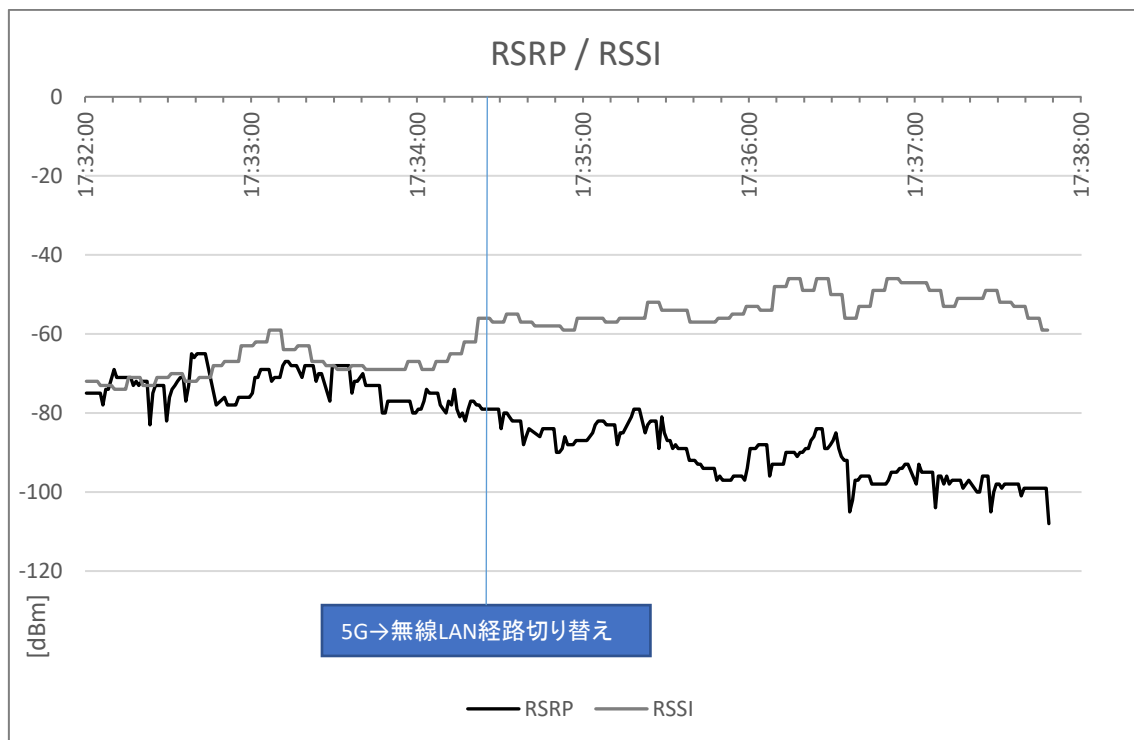


図 4.4-31 ケース 2) RSRP/RSSI

表 4.4-8 にカメラ映像の平均スループットを 1 秒間ごとの平均スループット値を示す。

表 4.4-9 に AGV 制御の RTT を 1 秒間ごとの MAX 値、AVG(平均)値、MIN 値を示す。

カメラ映像の平均スループットは目標の 10Mbps を上回っており、経路ごとの目立った差分は見られなかった。AGV 制御の RTT 観点では、5G 側経路で通信中は平均 74msec で、無線 LAN 側経路で通信中は平均 24msec と、5G 側経路の方が定常的に RTT は大きかった。ただし、5G 側経路・無線 LAN 側経路それぞれの MAX 値でも目標の 500msec を超えておらず、AGV 制御の通信に支障はなかった。

表 4.4-8 ケース 2) 平均スループット

経路	平均スループット
5G	16.7Mbps
無線 LAN	18.0Mbps
目標値	10.0Mbps

表 4.4-9 ケース 2) RTT

経路	RTT(MAX)	RTT(AVG)	RTT(MIN)
5G	0.343sec	0.074sec	0.048sec
無線 LAN	0.078sec	0.024sec	0.012sec
目標値	0.5sec 以下 (経路切り替え時 1sec 以下)		

・ ケース 3) 無線 LAN→5G 切り替え時の動作連続性

図 4.4-32 に実際に AGV が走行したルートを示す。B 地点手前で無線 LAN→5G 切り替えが発生した。5G アンテナから 10m ほど離れたところである。

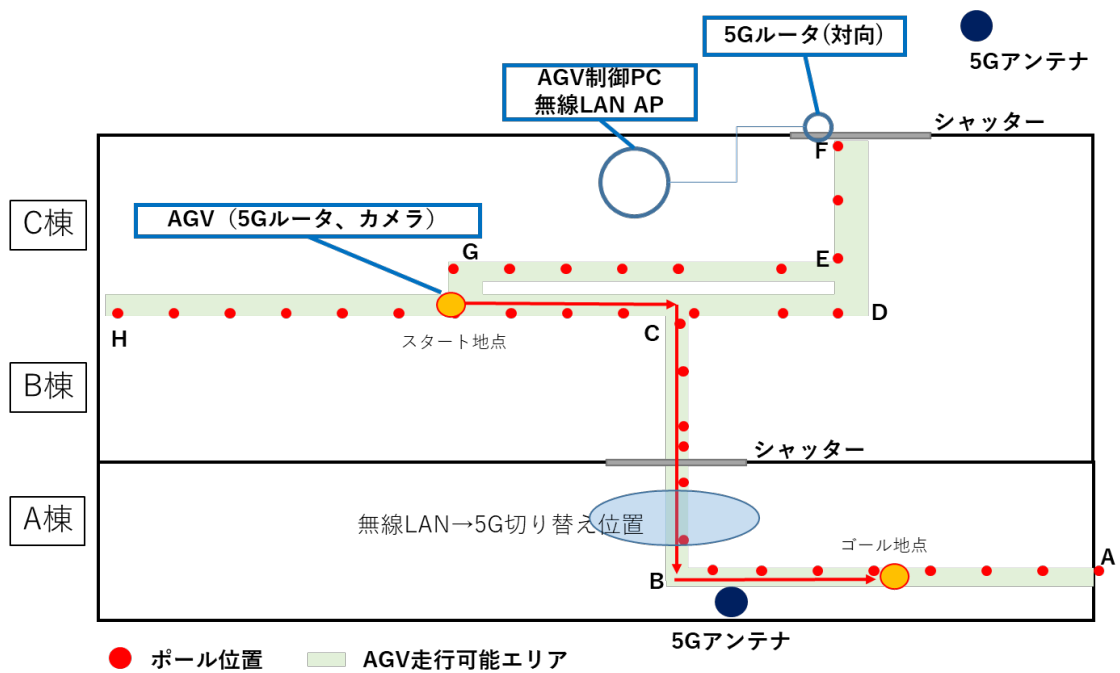


図 4.4-32 AGV 移動ルート (ケース 3)

図 4.4-33 にカメラ映像の平均スループットを時系列で示す。図 4.4-34 に AGV 制御の RTT を時系列で示す。図 4.4-35 に SC-53A で測定した RSRP と SRF Device で測定した RSSI を時系列で示す。

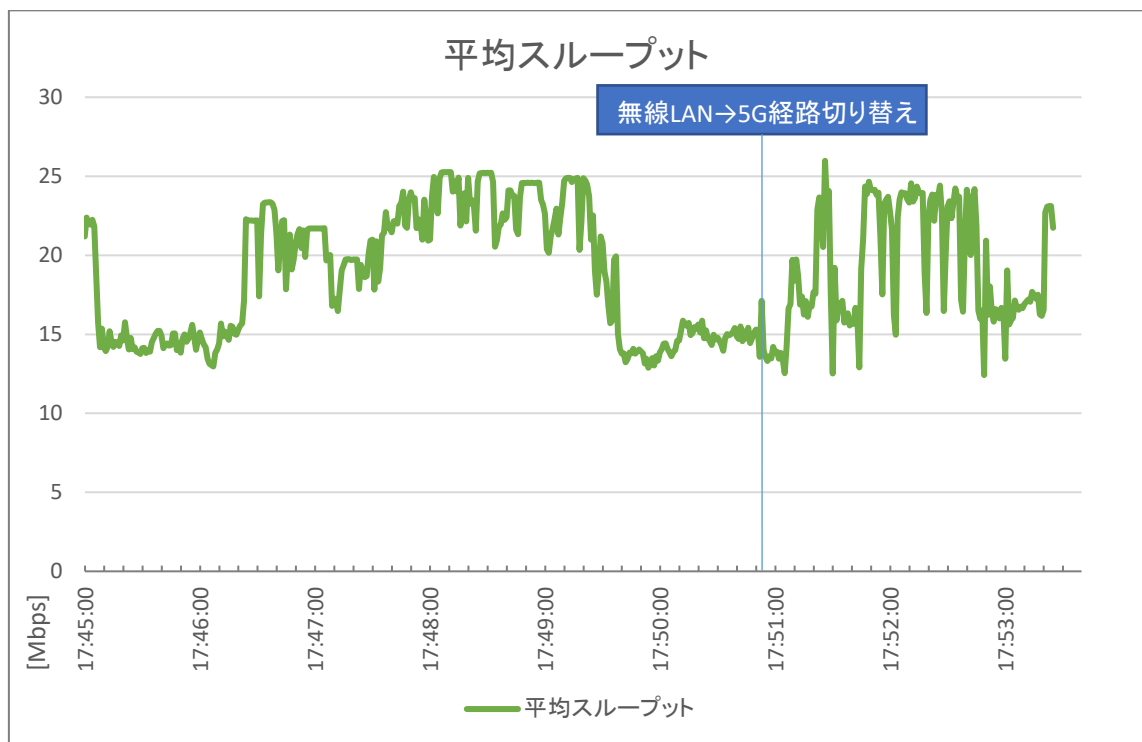


図 4.4-33 ケース 3) 平均スループット

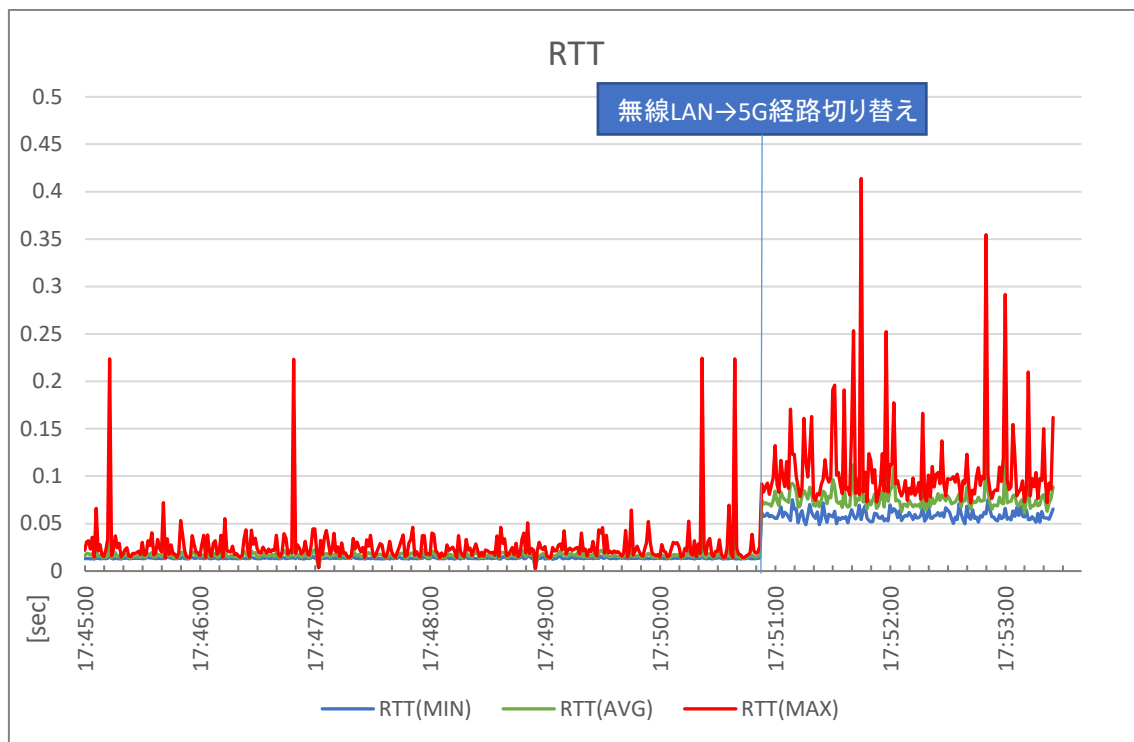


図 4.4-34 ケース 3) RTT

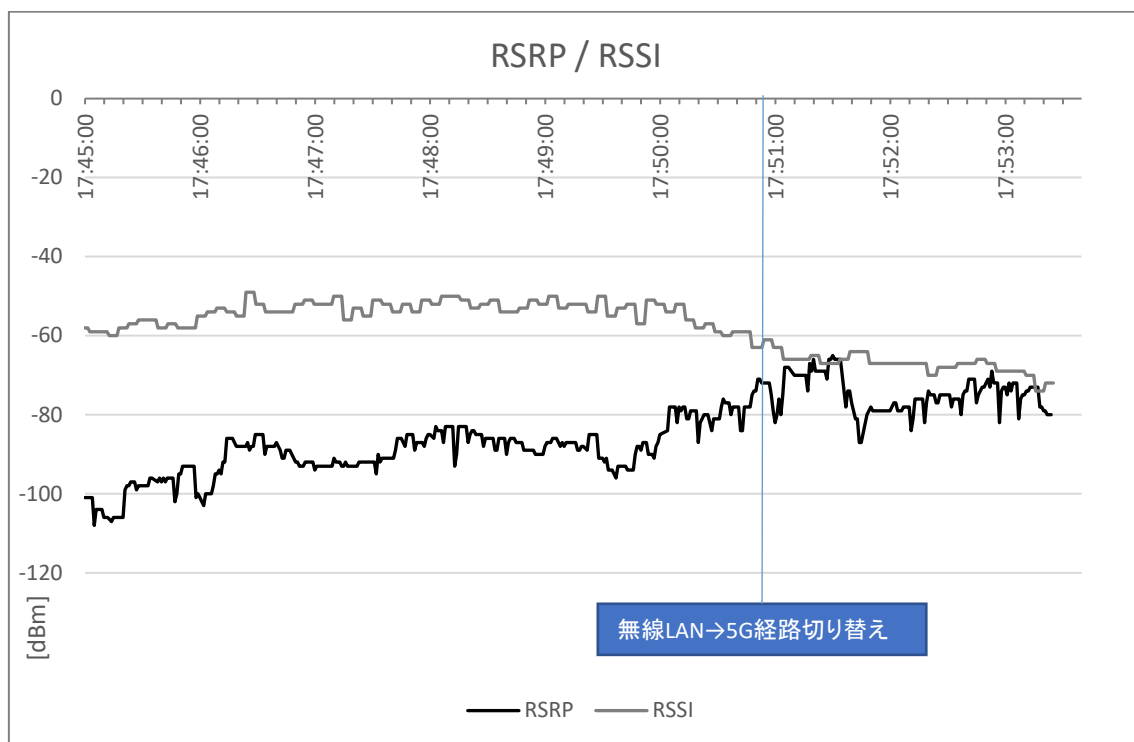


図 4.4-35 ケース 3) RSRP/RSSI

表 4.4-10 にカメラ映像の平均スループットを 1 秒間ごとの平均スループット値を示す。  
 表 4.4-11 に AGV 制御の RTT を 1 秒間ごとの MAX 値、AVG(平均)値、MIN 値を示す。  
 カメラ映像の平均スループットは目標の 10Mbps を上回っており、経路ごとの目立った

差分は見られなかった。AGV 制御の RTT 観点では、5G 側経路で通信中は平均 130msec で、無線 LAN 側経路で通信中は平均 17msec と、無線 LAN 経路の方が RTT は小さかった。ただし、5G 側経路・無線 LAN 側経路それぞれの MAX 値でも目標の 500msec を超えておらず、AGV 制御の通信に支障はなかった。

表 4.4-10 ケース 3) 平均スループット

経路	平均スループット
無線 LAN	18.8Mbps
5G	19.2Mbps
目標値	10.0Mbps

表 4.4-11 ケース 3) RTT

経路	RTT(MAX)	RTT(AVG)	RTT(MIN)
無線 LAN	0.224sec	0.017sec	0.003sec
5G	0.414sec	0.130sec	0.049sec
目標値	0.5sec 以下 (経路切り替え時 1sec 以下)		

#### 4.4.2.3 ア-2 考察

ケース 1 の結果から、5G アンテナから 30m ほど離れたところで AGV 制御が不可能となり、大容量低遅延の通信が前提となる場合の 5G エリアは広くない。

制御不可能になった理由は、AGV 制御の通信遅延が伸びたためである。通信遅延は、AGV 制御の TCP 通信だけでなく、同時通信していたカメラ映像の UDP 通信でも発生しており、RSRP 低下による影響と考えられる。AGV が停止してしまうと、復旧が必要となり作業効率が落ちる。そのため、通信の安定性を確保しつつ、高スループットで低遅延を確保することが必要となる。

カメラ映像に関しても、今回の使用した UDP 通信の場合、一部パケットが欠損しても大きな問題にならないアプリケーション仕様であるべきだが、作業員によりカメラ映像で安全性を確認できる程度の通信スループットが必要である。

よって大容量かつ低遅延の通信をどう確保するかが課題となる。この点は、将来多数台の AGV を導入する場合、さらに余裕を持った設計が必要になる。次のような検討が必要となる。

一つ目は、エリアを広げることである。ケース 2・ケース 3 で検証したような、無線 LAN との無線切り替え機能を持ち、無線通信可能なエリアを補完することである。無線切り替え時の遅延増加が懸念されたが、ケース 2・ケース 3 の検証にて、カメラ映像の確認や AGV 制御について定量的にも体感的にも影響を与えることなく、本機能の有効性が確認できた。

二つ目として、通信プロトコルによる影響が想定される。カメラ映像の通信は当初 TCP 通信を使う想定であったが、事前検証で 5G での TCP 通信ではスループットが出ないとの判断から、UDP 通信を使うことに変更した。TCP 通信の安定性をより確保できるならば、5G エリアをもう少し広げられる可能性がある。

三つ目は、AGV 停止時の運用である。今回使用した AGV は通信が一定時間途切れると

走行停止する仕様だが、無線通信を用いて制御する場合は必須の仕様であろう。AGV 走行が停止した位置でも、カメラ映像の通信を止めれば、AGV 制御の通信は可能になった。そのため、もし通信が途絶えた場合は、カメラ映像を止めて、AGV の場所まで行き、手動操作による復旧など、運用方針を決めておくことも望まれる。

なお 5G での TCP 通信でスループットが出なかった問題について、後日 NTT ドコモのキャリアネットワークで再現確認を行った。

再現試験は、iPerf3（ネットワークパフォーマンス測定ツール）を使用して 5G の通信経路（クラウドダイレクト™）でのスループット測定を行う。ネットワーク構成を図 4.4-36 に示す。

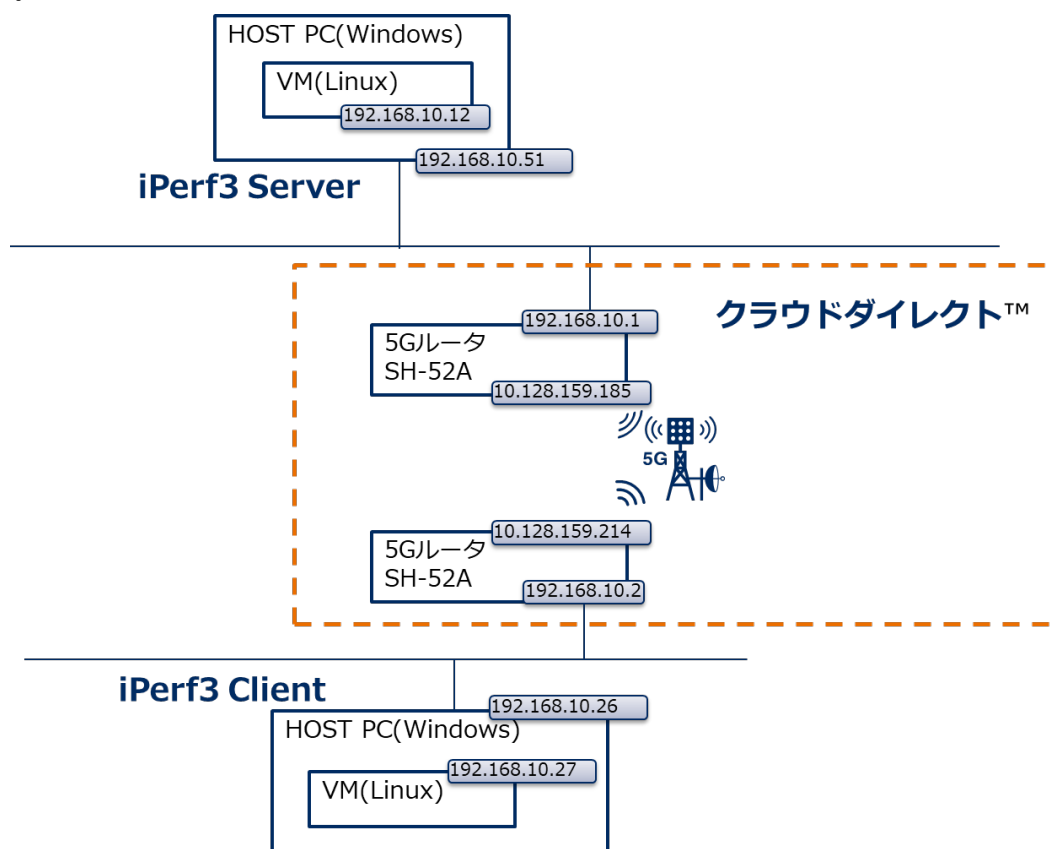


図 4.4-36 5G スループット検証ネットワーク構成図

5G ルータに接続した対向の PC 同士で iPerf3 の Server と Client を起動してスループットの計測を行う。通信対象は 5G と LTE で、検証 OS は HOST PC 上の Windows と VM(Virtual Maschine)上で動作する Linux とする。また iPerf3 の試験条件は以下とする。

- TCP の Single Session

iPerf3 Client コマンド : `iperf3 -c 10.128.159.185 -i 1 -t 30`  
iPerf3 Server コマンド : `iperf3 -s`

- TCP の Multi Session(Session 数 : 15)

iPerf3 Client コマンド : `iperf3 -c 10.128.159.185 -i 1 -t 30 -P 15`  
iPerf3 Server コマンド : `iperf3 -s`



- UDP

iPerf3 Client コマンド : `iperf3 -c 10.128.159.185 -i 1 -t 30 -u -b 100M`

iPerf3 Server コマンド : `iperf3 -s`

上記条件で実施した結果を表 4.4-12 に示す。本結果から工場で発生したような TCP でスループットが 10Mbps を下回るような結果は再現しなかったが、UDP と比べて TCP でスループットは下がる傾向は確認できた。TCP スループットは応答時間の影響を受ける。5G と LTE の応答差は 11~25msec であることから、応答時間の改善が小さく 5G と LTE で TCP スループットに差が小さかったと考えられる。同じ試験でも時間帯により、大きく結果が変わることがあったことも付け加えておく。例えば、LTE での TCP 通信時と比較して、UDP 通信時は低いスループットになっているが、検証準備時に 40Mbps 以上の TCP と同水準となった時もあった。

表 4.4-12 5G スループット検証結果

経路	実施 OS	iPerf3			Ping 応答
		TCP Single Session	TCP Multi Session	UDP	
5G	Windows	18.8Mbps	33.4Mbps	89.3Mbps	64.5msec
	Linux	43.5Mbps	48.9Mbps	85.5Mbps	56.0msec
LTE	Windows	18.5Mbps	44.3Mbps	29.9Mbps	75.5msec
	Linux	40.9Mbps	44.4Mbps	33.7Mbps	80.8msec

Windows での TCP Single Session 時のみ、スループットが 20Mbps 程度で頭打ちであった。理由として、図 4.4-37 に示すように受信ウィンドウサイズが 200000Byte 程までにしか上がってないためと考えられる。Ping 応答の値も含めて考慮すると、スループットは 1Session で 20Mbps 程度が上限となるであろう。これは Windows の設定を変えることにより、回避できる可能性がある。

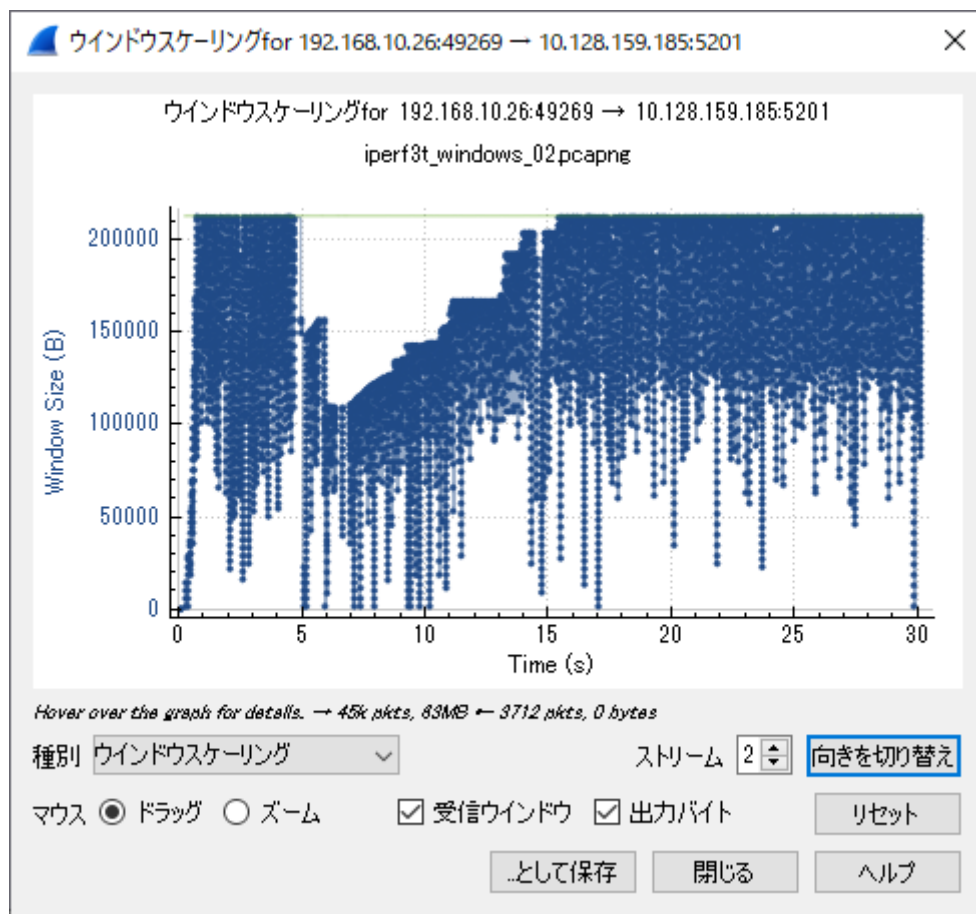


図 4.4-37 5G スループット検証(Windows/TCP Single Session)ウィンドウサイズ

工場検証時の話に戻るが、検証準備中にスループットテストとして iperf3 を TCP Single Session で 5Mbps 程しか出なかった際のウィンドウサイズを図 4.4-38 に示す。条件が色々異なると思われるが、この時は受信ウィンドウサイズが 800000Byte 程度あり、それによるスループット制限ではないようである。図 4.4-39 に示すように、TCP エラーが継続的に発生しており、そららの大半が TCP dup ack であった。これからパケットの到着順序入れ替わりやパケットロスにより輻輳制御機能が働いてスループットが出なかった可能性が考えられる。



図 4.4-38 工場スループット検証(Windows/TCP Single Session)ウィンドウサイズ

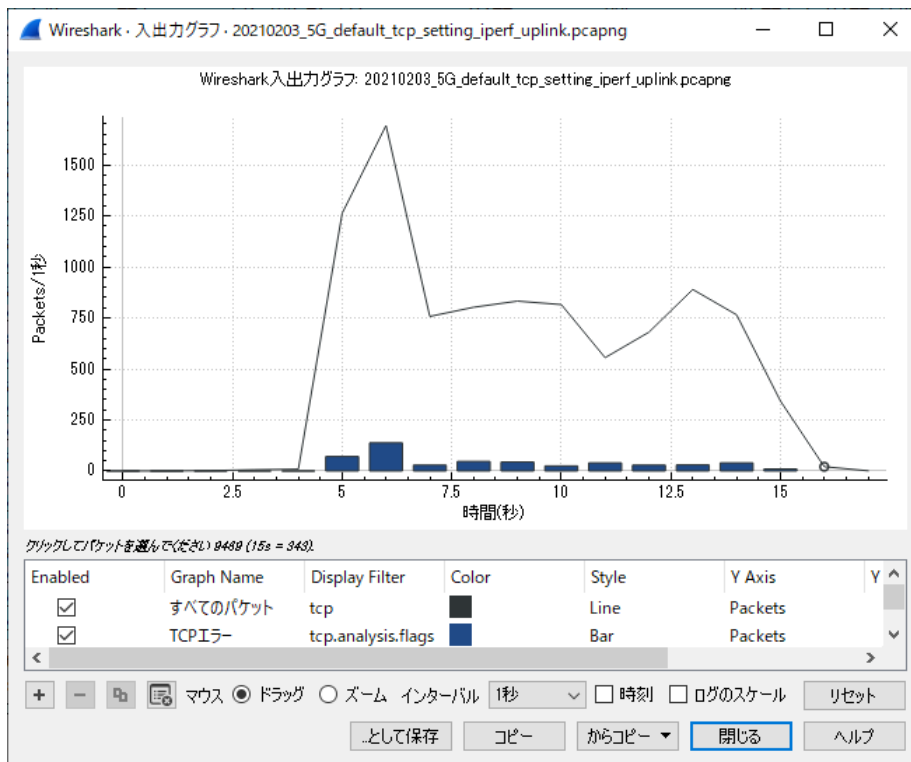


図 4.4-39 工場スループット検証(パケット数・TCPエラー)

#### 4.4.3 ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

設備の運用・保守にあたっては、現状では何らかの事象(異常や故障に伴うチョコ停・ドカ停)は発生や、熟練工の経験に基づく不具合予兆の発見後に保守作業員が現地に出向き診断や修理を行う形態が取られる。保守人員には限りがあるため、保守対象とする設備の増加に伴い、保守員の負荷が高くなる。また、経験に依存する部分に関しては不具合の発見や保守作業には個人差が生じる。

本検証では、上記課題を解決するために、設備保守に関して十分な知見を持つ技術者(熟練工)が遠隔で指示を出し、その指示に従って現地作業員が保守作業を行う「遠隔保守作業支援」の仕組みを検証する。遠隔保守作業支援では、図 4.4-40 の構成をとる。

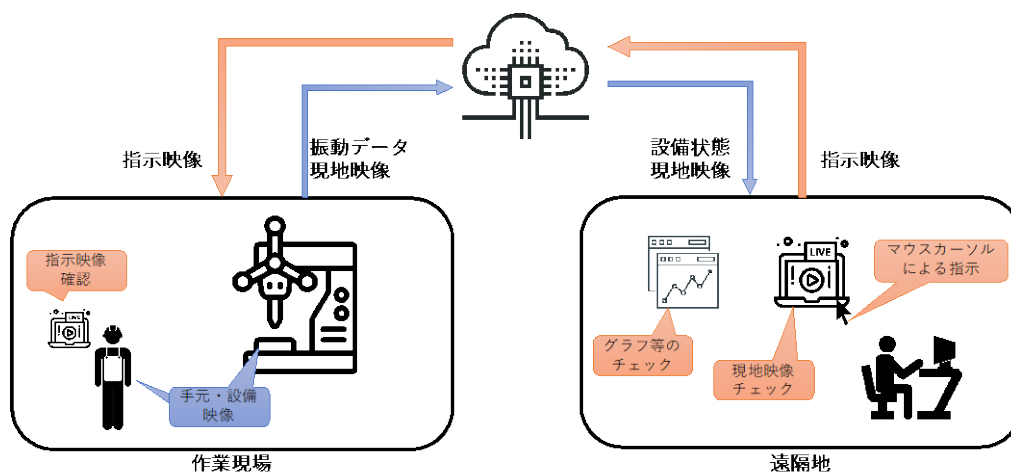


図 4.4-40 課題ア-3 の実証環境の評価概要

上記構成により、前述の課題が以下のように改善されると考えられる。

- 遠隔保守員(熟練工)
  - 実作業を現地作業員が請け負うことによる保守業務の負荷低減
  - 現地映像の共有による現地状況の把握
  - 振動データ及びAIによる異常検知結果を利用した診断の効率化
- 現地作業員
  - 熟練工の指示による作業の効率化
  - スマートグラスによるマニュアル・設備状態等の情報取得の効率化
- その他
  - 振動データによる設備状態の監視による異常・故障の早期発見

遠隔保守作業支援の実証にあたり、「現地作業員」と「遠隔保守員」それぞれで、以下の情報の取得・共有を行う。

現地、遠隔およびクラウド環境のシステム構成は図 4.4-41 の通りである。

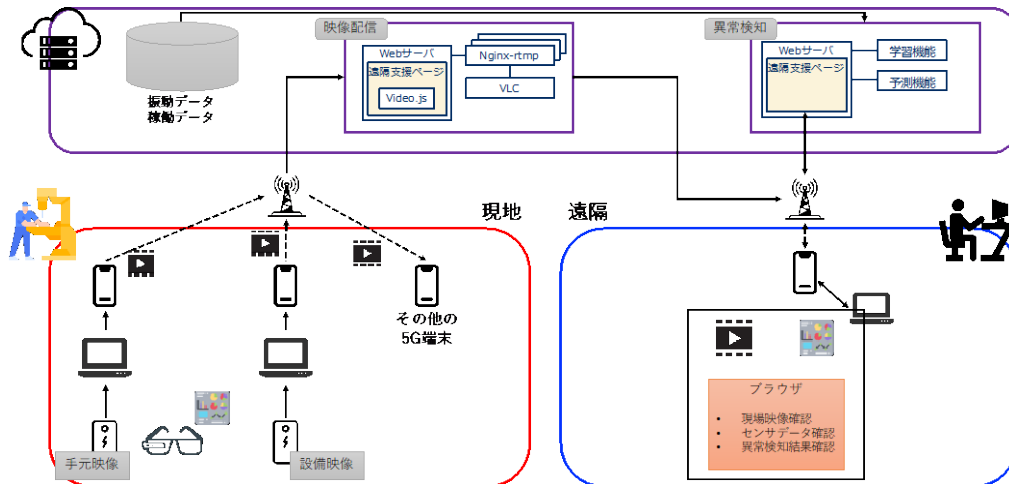


図 4.4-41 課題ア-3 のシステム構成概要

クラウド環境の構成は図 4.4-42 の通りである。映像配信は図中の「UbuntuAR」仮想サーバを介して行う。

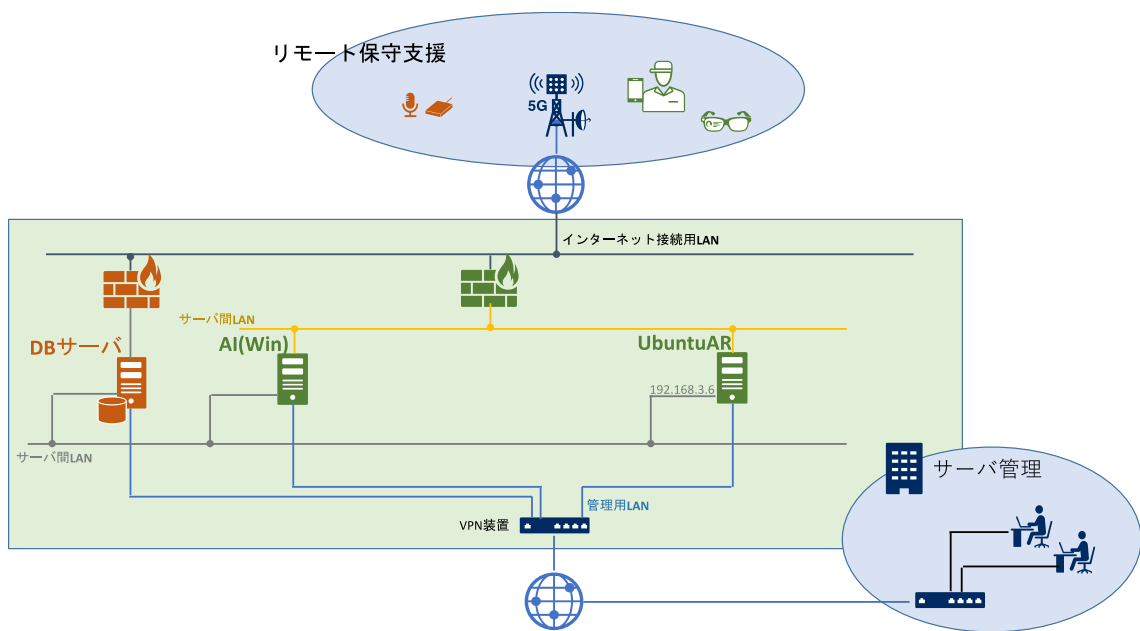


図 4.4-42 クラウド環境の構成

また、AI による設備振動データの解析および Web アプリの配信は図中の「AI サーバ」を介して行う。振動データは定期的に「DB サーバ」へ問い合わせを行い、前回問い合わせ時から追加データが登録されていれば、そのデータを取得し解析を行う。AI サーバに実装されたシステムを図 4.4-43 に示す。

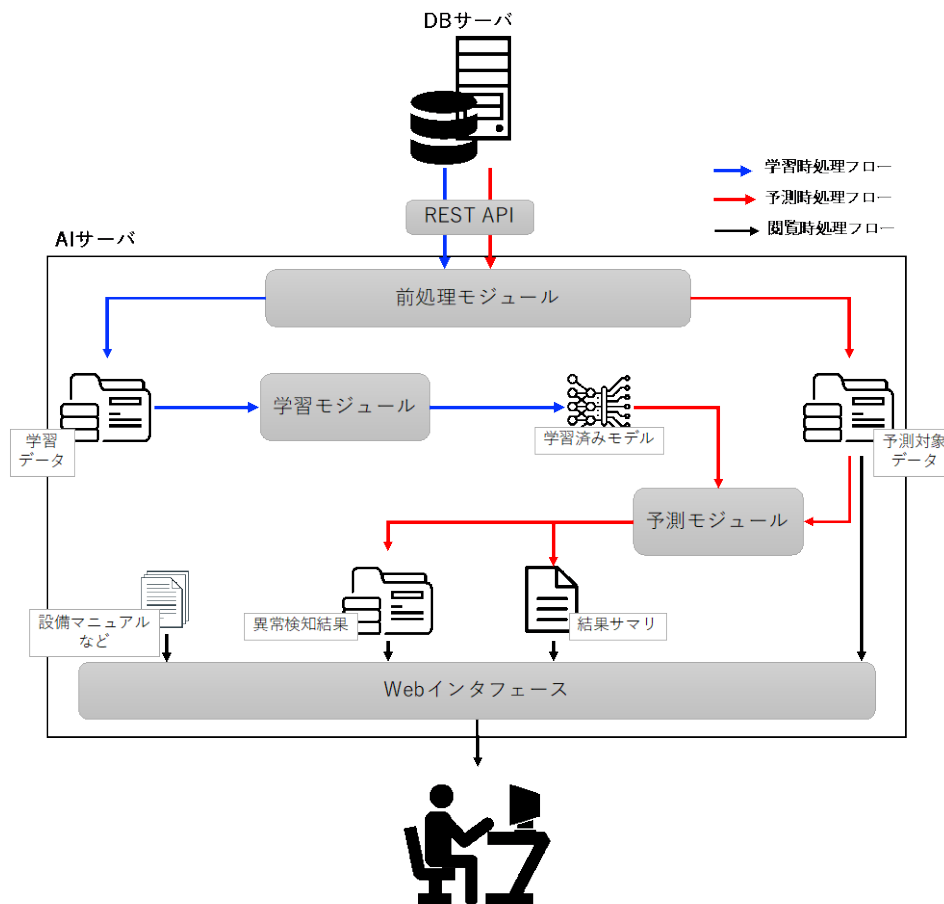


図 4.4-43 AIによる異常検知の機能構成

本実証で開発したシステムの機能構成は表 4.4-13 の通りである。

表 4.4-13 AR / AI システム構成要素

位置	名称	機能
現地工場内	映像配信アプリ	Theta Z1 により撮影される映像を中継用端末 (OneMix) を介して 5G 端末によりクラウド上の映像配信サーバに配信を行う。 5G 端末と中継用端末は USB テザリングによって接続する。 映像配信にはサードパーティ製のソフトウェアである OBS を利用する。
	AR アプリ	スマートグラス (Moverio BT-300) 上に設備マニュアルや異常検知結果のサマリ情報を表示する。 スマートグラスで特定のマーカを注視することで、スマートグラス上に情報を表示する。
遠隔地	映像受信アプリ	映像配信サーバを介して現地から配信される

		<p>映像を受信・視聴する。</p> <p>また、異常検知サーバ上で振動データ解析を行った結果及び振動波形をブラウザ上で閲覧する。</p> <p>視聴・閲覧用端末は 5G 端末と USB テザリングによって通信を行う。</p> <p>映像の視聴はサードパーティ製のソフトウェアである VLC メディアプレーヤーを利用する。</p>
クラウド	映像配信サーバ (AR サーバ)	<p>現地で撮影・送信される映像を、リバースプロキシサーバである Nginx を使用してインターネット配信する。</p>
	異常検知サーバ (AI サーバ)	<p>DB サーバ内のデータベースに格納された振動データを取得し、AI を用いた異常検知を行う。</p> <p>また、異常検知を行った結果を Python ライブラリである dash を用いて Web アプリとして配信する。</p>

現地作業員は、遠隔保守員へ現地状況を伝えるための手段として「ウェアラブルカメラ」を装着し、常時現地状況を撮影・配信する。また、スマートグラス上に設備保全に有用な情報を表示し、利用する。現地作業員が装着する機器のイメージは図 4.4-44 の通りである。なお、5G 通信網を利用するため、カメラはノート PC と有線で接続し、5G 端末と USB テザリングを介して 5G 通信を行う。5G 通信を行う 5G 端末は表 3.2-7 のものを利用する。



図 4.4-44 現地作業員の機器装着イメージ



図 4.4-45 機器装着イメージ(左：現地作業員体験時、右：装着時正面)

また、スマートグラスに情報を表示させる際には、現地の複数箇所に設置されたコンテンツ表示用マーカーを注視する。マーカーおよび表示対象コンテンツは図 4.4-46 の通りである。

マーカー	コンテンツ	マーカー	コンテンツ
	 マニュアル		 動画①
	 図面①		 動画②
	 図面②		 異常検知履歴

図 4.4-46 スマートグラス用データ(マーカーおよびコンテンツ)

コンテンツはヒアリングによって有用とされた以下のものを対象としている：

- 加工機操作マニュアル(ドキュメント)
- 加工機操作 / 処置動画
- 電気図面
- 振動データ / 異常度履歴

現地作業員はスマートグラスに表示される上記のような設備マニュアル及び AI による



異常検知結果、さらに遠隔保守員からの指示を元に設備の保守を行う。

また、遠隔保守員が閲覧する振動データ / 異常検知結果 Web サイトは図 4.4-47 から図 4.4-49 のコンテンツを提供する。

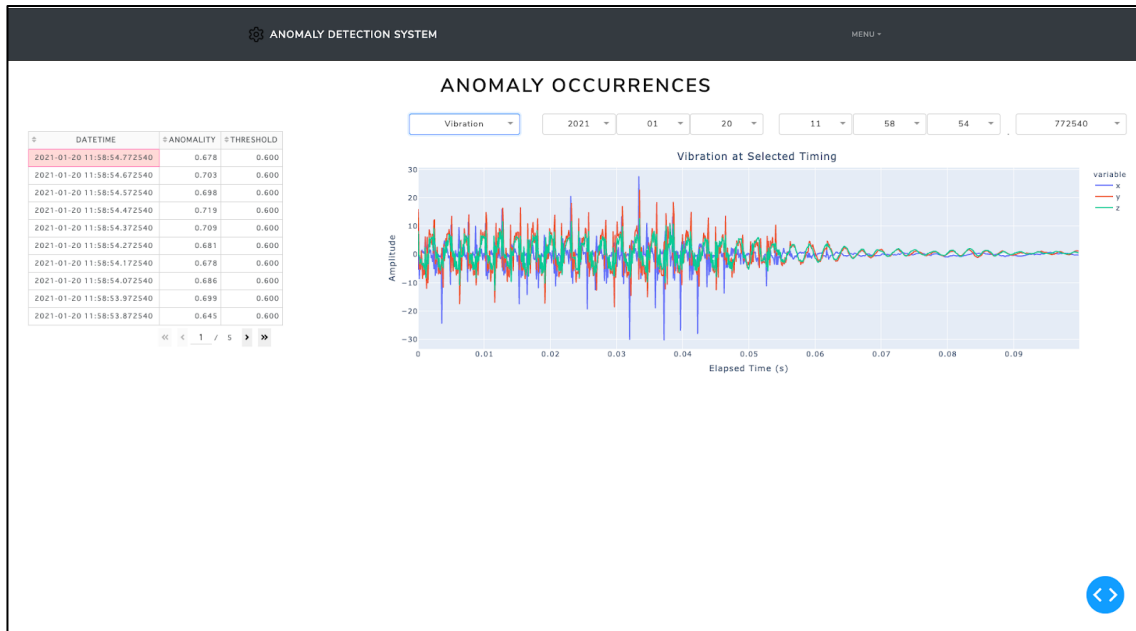


図 4.4-47 振動データ異常検知結果閲覧サイト：トップページ

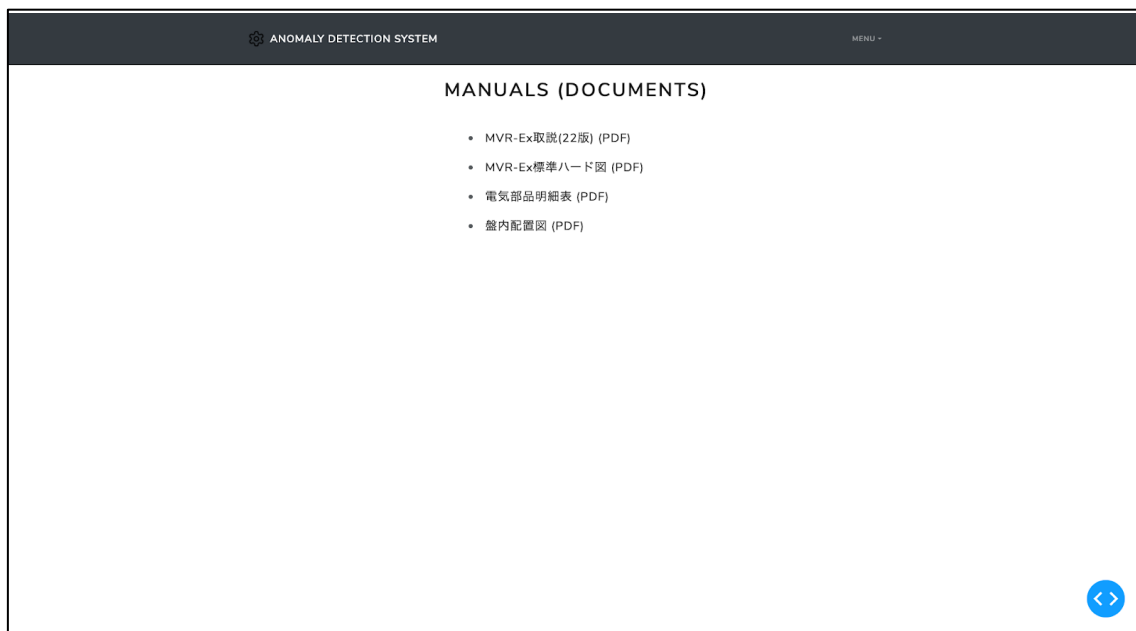


図 4.4-48 振動データ異常検知結果閲覧サイト：マニュアル確認ページ



図 4.4-49 振動データ異常検知結果閲覧サイト：動画マニュアル閲覧ページ

トップページには、AI 手法の一つである Isolation Forest と呼ぶ手法による異常検知の結果、異常度が「閾値」を超えた際の履歴を示す表と、各種グラフが表示される。グラフで表示対象とするデータは以下のとおりである：

- 振動データ生波形
- 周波数スペクトル
- 異常検知手法 (Isolation Forest) による異常度
- ndata から抽出される位置データ

遠隔保守員は、現地から配信される映像および上記 Web サイトに表示される情報を確認しながら現地作業員へ指示を出す。

今回は指示出しの手段として、遠隔保守員が使用する端末(ノート PC)上でマウスカーソルを利用する。遠隔保守員が閲覧している現地映像およびマウスカーソルによる指示を現地作業員向けに配信する。

#### 4.4.3.1 ア-3 評価方法

本評価では、以下の 3 つの項目の評価を行う。各評価の評価方法は以下の通りである。

##### 1. ウェアラブル機器の装着性および情報の有用性

図 4.4-44 の機器を装着した上で、以下の観点での評価を行う。

- 各種機器の装着が作業に支障をきたさないか
- スマートグラスに表示される情報は有用か
- 映像による遠隔からの指示は有用か

実際に各種機器を装着した状態で図 4.4-44 のユースケースを想定して現地で体験いただき、ヒアリングにより評価を行う。

##### 2. 配信される映像品質・視認性

現地作業員と遠隔保守員は、現地作業員が装着するカメラによって撮影される映像に基づいて情報共有を行う。したがって、配信される映像品質が現地状況の把握に十分であることが要求される。本評価では、複数パターンの解像度およびビットレートでの映像配信を行い、映像の品質評価を行う。

映像品質を定量的に評価するため、現地に設置されたQRコードを一定時間撮影し、固定フレーム数中のQRコード認識率を算出する。なお、通信負荷や撮影対象の情報量の多寡によって認識率に差が出るかを検証するため、QRコード撮影用端末以外の端末で映像を受信し通信負荷をかけた状態及び撮影対象に動くものが映り込む状態の2つのパターンで負荷及び情報量を増減させたパターンを検証する。

### 3. 振動センシング通信のリアルタイム性

センシングしたデータをDBサーバに格納した後は計算リソースの豊富なクラウド上の処理となるため、リアルタイム性を左右するのはセンシングしたデータをDBサーバに格納するまでの時間となる。ここでは、振動のセンシング開始から、クラウド上のDBサーバへデータの格納を終えるまでの所要時間を計測することでリアルタイム性の評価とする。

#### 4.4.3.2 ア-3 評価結果

評価結果の要点を以下に記載する。

- 機能検証

映像品質評価のためのQRコード認識率の結果を表4.4-14、表4.4-15、表4.4-16にまとめる。表タイトルの「負荷なし / あり」はQRコード撮影用端末以外の端末で映像を受信することで通信(ダウンリンク)に負荷をかけた状態(負荷あり)とかけない状態(負荷なし)を意味する。また「静止 / 動きあり」は撮影範囲に動くものが映っていない状態(静止)と映っている状態(動きあり)を意味する。また行名は配信ビットレート、列名は配信解像度を示す。

表 4.4-14 QRコード認識率：負荷なし，静止

	854x427	1366x683	1920x960	3840x1920
1Mbps	100%	100%	94.3%	97.1%
3Mbps	100%	97.3%	100%	99.9%
5Mbps	99.7%	85.9%	100%	100%
15Mbps	96.4%	100%	100%	92.4%
30Mbps	92.4%	100%	100%	98.8%
60Mbps	97.3%	100%	99.9%	7.2%

表 4.4-15 QRコード認識率：負荷あり，静止

	854x427	1366x683	1920x960	3840x1920
1Mbps	98.3%	97.5%	100%	99.9%
3Mbps	100%	99.9%	100%	99.7%
5Mbps	96.7%	100%	100%	100%

15Mbps	100%	100%	99.9%	99.7%
30Mbps	100%	100%	5.6%	0%
60Mbps	100%	100%	19.5%	0%

表 4.4-16 QR コード認識率：負荷なし，動きあり

解像度	1366x683	1920x960	3840x1920		
ビットレート	3Mbps	5Mbps	15Mbps	30Mbps	60Mbps
認識率	98.2%	97.0%	83.2%	51.9%	10.4%

帯域負荷や映像中の動きによる情報量の増大に伴い、映像品質が劣化することが明らかとなった。

また、振動センシングであるが、振動計測機(TTIO-TG2)にて振動データを計測開始してから DB サーバへの格納が完了するまでに要した時間は、最小 8.2 秒、最大 15.6 秒、平均 10.1 秒であった。今回の加工では、工作機械の加工周期(ワーク上を端から端まで 1 回削る時間)が 1~2 分であるため、加工周期内でデータ格納が完了しており、データの逐次的な分析が可能であった。

- 効果検証

業務改善の観点では、現場とのコミュニケーションの効率化が図れるとのことであった。また、移動時間や作業の準備時間を削減できるという結果が得られた。一方で、安全性向上やリスク低減などに効果があるとの意見はそれほど多くなかった。

人員配置の観点では、実証システムの導入により遠隔から指示・サポートする熟練工の方が対応可能な範囲が広がるとの回答が多数を占めた。実証システムの導入により保守業務従事者が減るとの回答は少数であったが、「効率は向上する」、「多様性が出る(特定機種に限定されない担当者が増える)」、「雇用形態が変化する」と、実証システムの効果を認められた。

人材育成の観点では、動画も活用できる点や熟練工の作業を閲覧できる点を評価していた。一方で適用出来ないと回答した被験者は「熟練工のノウハウを伝える困難性」や「映像では伝えることが出来ない触覚の必要性」を訴えていた。

- 運用検証

システム導入の観点では、高価な機器では運用時に気になり作業に影響が得る可能性があるとの指摘があった。また AR 機器に関しては機器の選定や耐用年数が挙げられた。さらに現場のセキュリティ方針への対応や無線機器等の海外での適用範囲が挙げられた。

システム運用の観点では、作業の妨げとならない装着性と AR 機器の現場に対する耐用性(耐衝撃、防水、耐油性等)の他に AR 機器の準備の容易性が挙げられた。また、運用時に特に気になる点としてバッテリーの持続時間が挙げられた。スマートグラスに表示するコンテンツについては、表示に気付き難いという意見と輝度が高く周囲の状況の視認の妨げとなり危ないとの真逆の意見があった。

システムの汎用性・拡張性の観点では、実証システムが他の現場等に展開できる汎

用性・拡張性を有しているとする意見と、更なる映像品質の改善が必要とする意見に分かれた。共通する意見は、遠隔保守員が配信映像内の文字を読める程度の解像度が必要であった。また被験者によっては実証システムで実装したカメラ程の画角(カメラが撮影できる範囲の広さ)は必要ないとの意見があった。その他、海外現場への対応として画像からの翻訳機能、AR 機器の操作をハンズフリー化(音声認識等)が拡張機能として望まれることが分かった。

#### 4.4.3.1 ア-3 考察

各検証に関する考察を以下に記載する。

- 機能検証

全体として、今回の検証ではアップリンク、ダウンリンクどちらに関しても、帯域不足になるような設定では映像配信を行っていない。特にダウンリンクは1Gbps 相当の帯域幅を持つとされているものの、帯域負荷環境下および高ビットレート時に映像品質の劣化が見られた。

ヒアリングの結果から、制御盤の文字などのような小さな文字 / 物を鮮明に遠隔保守員へ伝えるためには、4K 映像は必須であると考えられるが、今回の構成では 4K 映像を品質担保しつつ運用するにはいくつか課題が挙げられる。

一つ目は、アプリケーション側での設定の課題である。今回の検証では解像度とビットレートの組み合わせによって映像品質に差異が発生することが明らかとなっている。映像を利用した遠隔保守支援アプリケーションの構築にあたっては、要求される映像によって解像度とビットレートを適切に設定した上で開発・運用していく必要がある。

二つ目は、通信網における特性の把握である。実用にあたってはアプリケーションで使用するプロトコルや帯域負荷によるパケットロス、パケット順序の入れ替えによる映像品質の劣化などの特性を解決もしくは考慮した上でアプリケーションの構築あるいは通信方法の選択を行う必要がある。

振動センシング通信のリアルタイム性の面であるが、DB サーバへデータの格納を終えるまでの時間にバラツキが大きいと言える。データロガーがセンサからデータを取得する時間はほぼ一定(バラツキは 0.1 秒程度)であったが、クラウド上の DB との通信にかかる時間が大きく揺らいでいた。加工周期の短縮等により厳しいリアルタイム性が求める場合には通信時間のワーストケースをいかに抑えるかが重要となるため、通信時間の揺らぎ幅を抑えると同時に通信時間自体を短縮できる通信方法を用いる必要がある。

- 効果検証

現場の状況を必要十分なレベルで共有することが重要であり、提供する業務毎にそのレベルを見極める必要がある。また情報の提示機能により作業者が把握できる範囲を拡張することも業務効率化を促進する重要な機能となる。そのためシステム導入時にセンシングすべき情報の選定が重要である。

また保守の現場は自社のみでなく顧客先や海外にまで及ぶため、遠隔から熟練工がサポートできる環境の実現は移動費の大きな削減につながる。また準備不足

や想定外の状況に直面することによる出戻り工事が生じることもあるとのこと  
で、これらについても移動費削減の効果が得られる。

人員配置の観点では、熟練工が必ずしも現場に行く必要が無くなるため、熟練工が対応可能な範囲が広がる。また、若手作業員の投入や場合によっては営業担当者による対応が可能となる。その結果、対応可能機種が特定機種に限定されることが無くなり、いわゆる多能工化に繋がる可能性も秘めている。人員配置の柔軟性が上がりさらなる業務効率の向上に寄与できると思われる。

実証システムの教育への適用性は評価されており、特に熟練工の作業の様子の閲覧等に大きな期待が寄せられている。したがって、本システムにより配信される映像から教育用コンテンツを作成する機能や映像分析による作業の評価・分析機能についても潜在的なニーズがあると思われる。

今後の課題は、システムの効果を最大限に活かす人員配置の検討と必要スキルの整理およびシステムの人材育成での活用方法の検討である。

- 運用検証

導入時にシステム活用範囲とその内容を踏まえ吟味する必要がある。またシステムを提供する側においては、これらニーズを満たす機能の整備とサービス形態の検討が必要になると思われる。

AR 機器については、操作性およびバッテリーの持続時間が主な課題であることが分かった。現在の携帯電話の発展を見ると、AR 機器についてはニーズが高まれば小型化、軽量化やより現場に適合したモジュールとしての実装は可能であると考えられる。一方でバッテリーの持続時間やシステム活用時の安全性に対する要求レベルは非常に高いため、ソフトウェア、ハードウェアおよび運用方法の工夫により、要求レベルを満たす必要がある。例えば予備バッテリーの準備や簡便な切替方法、作業員の視野を狭めることなく必要なタイミングで効果的に情報を表示する仕組みや映像の遅延を警告する機能等が考えられる。その他、AR コンテンツの作成・管理に関する懸念点もあるため、AR 機器を用いたコンテンツのオーサリング機能および管理機能も必要である。

システムの汎用性・拡張性に関しては、現場映像および遠隔での指示の様子(マウスカーソルの動きや配信映像上への落書き機能)の共有機能で十分様々な業務に展開できる可能性があることが分かった。また付加機能として翻訳機能や音声認識機能にニーズがあることも明らかとなった。

## 4.5 課題解決システムに関する効果検証

### 4.5.1 ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

#### 4.5.1.1 ア-1 検証方法

「制御系ネットワークの無線化」がもたらす効果を検証する。システム導入による業務改善できる作業や改善効果について、工場の作業員に対するヒアリングにより検証した。

実際に工場に携わる現場の方が感じているネットワークに関する課題を洗い出すため、以下のような項目でヒアリングを実施した。

1. ライン変えの頻度
2. ライン変え時の配線に要する時間やコスト
3. 機器の調整等に要する手間
4. 後付け機器の配置で不自由に感じる事
5. 制御線の断線などのトラブル有無
6. 安全に対する規定

#### 4.5.1.2 ア-1 検証結果

「制御系ネットワークの無線化」がもたらす効果について、以下で説明する。

ヒアリングは、ライン変えの頻度やそれに伴うコスト、機器の調整等に要する手間や課題等について実施した。ライン変えの頻度に関しては、ヒアリングを実施した工場が大型の工作機械を複数配置する工場であったため、頻繁には実施していないとのことであったが、自動車工場などでは頻繁であるとの意見もあった。一方で、大型機械であることから機器内の配線変更の方が頻度としては高いとのことであった。ライン変えの頻度自体は高くはないものの大規模な変更が入る場合は配線コストだけでも数百万程度を要するとのことで、制御系ネットワークによる無線化の効果が期待できる。

機器の調整等の現場作業では、表示器を用いて実施することもあり、可動範囲を広くしたいとのことであった。現状、物理メディアを用いてデータ更新を実施していることもあり、無線ネットワーク経由で実施することが出来れば作業効率が改善するとのことであった。

その他の意見として、可動部への通信線は一定時間が経過するとどうしても切断が生じるとのことで、可動部への無線適用も有効との声があった。

#### 4.5.1.3 ア-1 考察

「制御系ネットワークの無線化」がもたらす効果検証結果について、以下で考察を行う。

ライン変えに伴う配線コストに関しては、大規模なものであると数百万程度のコストがかかる場合もあるとのことで、頻繁に発生する場合は無線化によるメリットが大きいと考えられる。ただ、5G 自体の導入コスト自体が高くなることが想定され、費用対効果でメリットを享受するためには、5G 自体のコスト低減や他システムとの共用など、費用対効果を高める工夫が必要であると考えられる。一方で、作業工数に関しては、複数の観点で効果があるとの声があった。例えば、表示器の持ち運び範囲を広くすることで現場作業が容易にな

ったり、可動部の存在により配線自由度が制限される個所での対応を容易にしたり、断線時の対応工数を不要にしたり、等の声があった。コストだけではなく、作業効率の改善も考慮した上での費用対効果を考える必要がある。

## 4.5.2 ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

### 4.5.2.1 ア-2 検証方法

4.4.2 節に記載した、RTT500msec 以下を十分満足し、定常的に支障なく AGV 制御可能なサービスレベルの実証システムを用い、「無軌道型 AGV の遠隔制御」がもたらす効果を検証する。検証項目は以下の通りである。

1. 業務改善

実証システムがもたらす効率化、高度化について検証する。業務改善できる作業の内容はどのようなものであるのか、またシステムに期待される機能等について検証する。

2. 導入費用

5G のシステム自体が高価である為、無線 LAN 等の他システムで構成された場合の具体的な費用を比較し、本課題解決システムがどの無線方式で採用が望まれるかのヒアリングを行う。

被験者に実証システムを体験していただいた後、アンケートにより実証システムの効果を評価/推定していただいた。体験に際しては、現場作業員がカメラ映像を見ながら、AGV の遠隔制御する想定で体験していただいた。

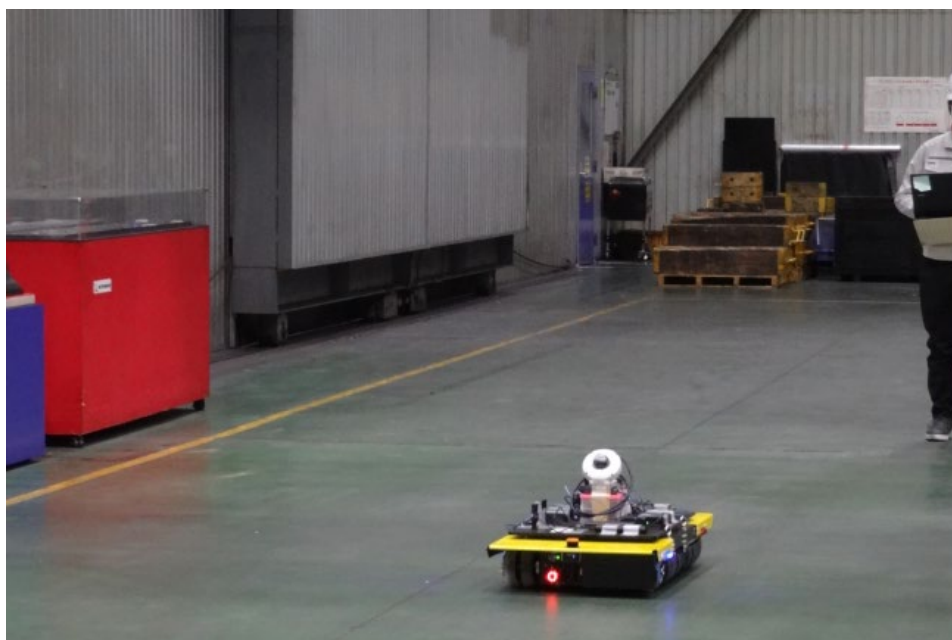


図 4.5-1 AGV の遠隔操作実験(体験)の様子 1





図 4.5-2 AGV の遠隔操作実験(体験)の様子 2



図 4.5-3 AGV の遠隔操作実験(体験)の様子 3

#### 4.5.2.2 ア-2 検証結果

まず、「無軌道型 AGV の遠隔制御」がもたらす効果検証結果について、体験していただいた作業員 5 名のアンケート回答を基に、以下で説明する。

##### 1. 業務改善

本システムの導入により、期待される業務改善についてのアンケート結果を図 4.5-4 に示す。アンケートの質問内容は「本システムの導入により、どのような業務改善を期待されますか」とした。なお、この設問は複数選択の回答を可とした。選択項目は「人件費・機材費等のコスト削減、人材配置の最適化、人材育成、作業効率化・作業時間の短縮、作業の高度化、安全性の向上、その他」とした。図 4.5-4 より、本システムの導入することで「作業効率化・作業時間の短縮」や「安全性の向上」の面

で業務改善の期待が持てることが分かった。次いで、「人件費・機材費等のコスト削減」について期待が挙げられた。「人材配置の最適化」「作業の高度化」「人材育成」についての期待もあった。

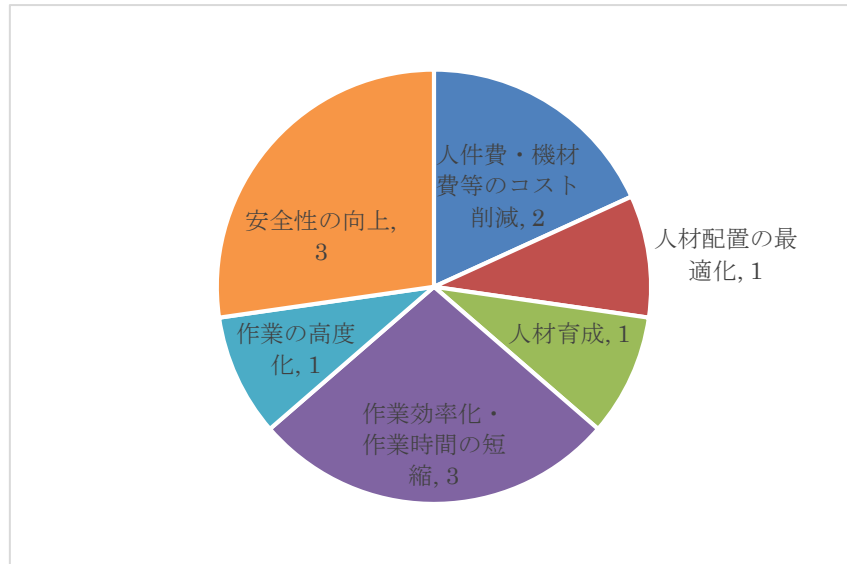


図 4.5-4 効果検証に関するアンケート集計結果(業務改善)

## 2. 導入費用

5G システムを新規に導入する費用についてのヒアリング結果を図 4.5-5 に示す。アンケートの質問内容は「新規に 5G システムを導入する場合、どの程度の価格であれば導入されますか」とした。選択価格は「～1000 万円、1000 万円～、3000 万円～、5000 万円～、1 億円～」とした。また、質問の前提として、本実証エリアへの無線 LAN 単独での同システム新規導入価格を「3000 万円～」と参考記載している。図 4.5-5 より、価格「1000 万円～」の回答が最も多く、無線 LAN 単独での参考価格より少額での導入が求められる結果となった。一方で、「3000 万円～、5000 万円～」の回答もあった。

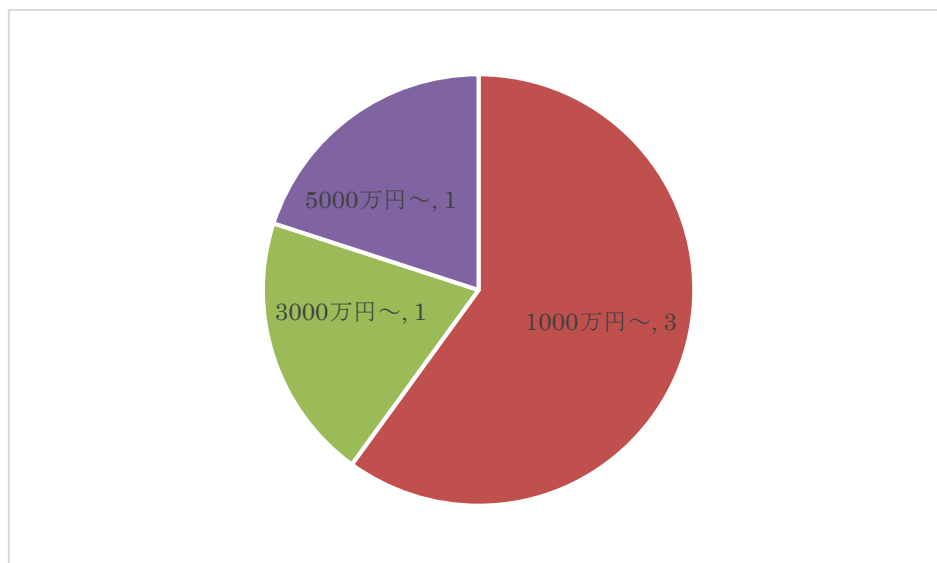


図 4.5-5 効果検証に関するアンケート集計結果(新規導入費用)

次に、既存の 5G 環境を利用できる状況下で、追加で 5G 端末を導入する費用についてのヒアリング結果を図 4.5-6 に示す。既存の 5G 環境とは、例えば、同工場内の別部署が既に 5G システムを導入しており、それに相乗りできる場合などを想定している。また、5G 端末としては、本実証で使用したスマートフォンやルータ等を想定している。アンケートの質問内容は「既に 5G システムが導入されている環境があるとしたら、どの程度の価格であれば相乗りでの導入を検討されますか」とした。選択価格は「～1 万円、1 万円～、3 万円～、5 万円～、10 万円～」とした。また、質問の前提として、無線 LAN 端末価格を「1 万円～」と参考記載している。

図 4.5-6 より、5G 端末としては 5 万円以下が良いという回答が大部分を占めていた。また、(月額) 利用料についてもヒアリングしたところ、無線 LAN 端末には月額利用料がかからないものも多いため、5G 端末についても無線 LAN と同程度のサービス料金を求めているとの意見が多かった。

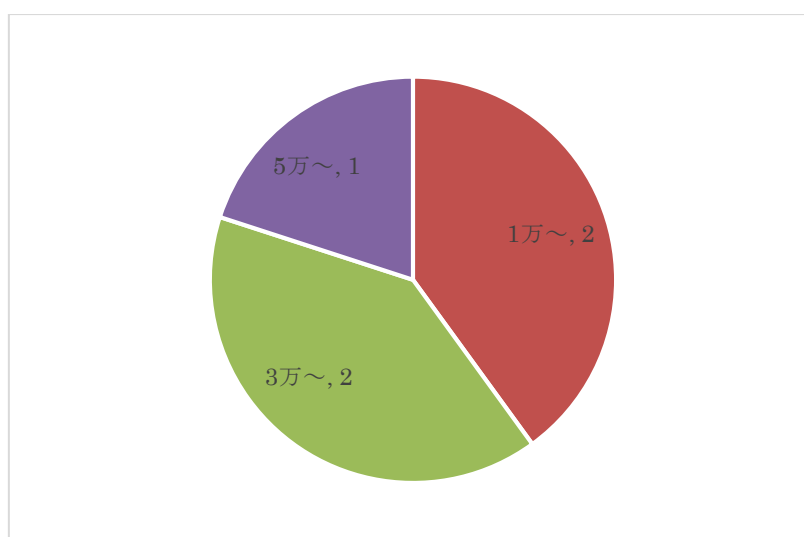


図 4.5-6 効果検証に関するアンケート集計結果(導入費用)

#### 4.5.2.3 ア-2 考察

「無軌道型 AGV の遠隔制御」がもたらす効果検証結果について、以下で考察を行う。

##### 1. 業務改善

業務改善については、「作業効率化・作業時間の短縮」や「安全性の向上」が期待された。

「作業効率化・作業時間の短縮」に関しては、現在使用している人の操縦が前提となるフォークリフトとは異なり、現場に赴かなくとも AGV を遠隔操作し業務を遂行できるためである。これは、「人材配置の最適化」による人手不足の解消や、最適化による「人件費・機材費等のコスト削減」にもつながると考えられる。

「安全性の向上」に関しては、工場では安全への意識が非常に高く、重量ある荷物などを人手による輸送よりも安全に行えるためであると考えられる。

「作業の高度化」についての期待もあり、無軌道型 AGV の移動ルートを制御 PC から設定、スケジューリングできるためであると考えられる。ヒアリングでは、定期便の様な仕組みがあると現場間や建屋間を移動する回数を減らせて助かるというような声もあり、これについても期待されていると見受けられる。

したがって、本システム導入における費用対効果としては、人件費等のコスト削減や時間短縮による作業効率化のメリットが挙げられる。

本実証の工場のように、人が通る通路と、機器が移動する通路が分かれていることは AGV 導入の前提となるであろう。その前提下でも、人が操作するフォークリフトと AGV のどちらをどう優先するなどの詳細なルール決めは必要となるだろう。

##### 2. 導入費用

5G システムを新規に導入する費用としては「1000 万円～」の回答が最も多く、参考で記載した無線 LAN 単独での同システムの導入「3000 万円～」よりも低い額となっている。一般的に無線 LAN よりも、5G で構成する方が費用は高くなると想定され、無線 LAN 単独と同等の費用対効果を得るためには現状以上に費用を下げる努力が必要と考えられる。ただ、費用は対象範囲や導入台数などにより大きく変動するため、費用はより一層具体的な検証が必要と思われる。5G 端末単体としても現状以上にコストを抑える方向にもっていく必要がある。

費用対効果の試算として、まず費用をアンケート回答の平均に近い 2000 万円と置く。効果として、AGV1 台により、既存の 1 人分の作業を置き換えるとする。ただし、AGV の運用操作や必要に応じたカメラ映像確認の作業は発生するため、毎月 0.5 人分の人件費が浮くと想定する。人件費を年収 436 万円と仮定すると、一年で 218 万円が浮く計算になる。かなりラフな試算ではあるが、費用を回収するには 9 年以上かかり、現実的な投資に値しないと思われる。そのため、システムや設備・機器の共有による費用分担などの検討が必要であろう。AGV の遠隔制御に限定したものとしては、AGV 複数台運用によって 1 台あたりの費用圧縮・さらなる作業効率化も考えられる。

#### 4.5.3 ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

##### 4.5.3.1 ア-3 検証方法

4.4.3 節に記載の実証システムを用い、「熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援」が保守業務にもたらす効果を検証する。検証項目は以下の通りである。

###### 1. 業務改善

実証システムが保守業務にもたらす効率化、高度化について検証する。効率化できる作業やもたらされる高度化の内容はどのようなものであるのか、またシステムに期待される機能等について検証する。アンケート項目は以下の通りである。

- 実証システムにより効率化される作業
- 実証システムによる効率化・高度化の内容

###### 2. 人員配置

実証システムにより、担当者に求められるスキルや資質が変わるのか、保守業務の人員配置にどのような影響が生じるのかについて検証する。また高度な知識と経験を持つ熟練工が一人当たりの対応可能範囲の変化についても検証する。アンケート項目は以下の通りである。

- 熟練工一人当たりの対応可能範囲
- 実証システムによる保守業務従事者数の変化
- 実証システムによる保守業務コストの変化

###### 3. 人材育成

実証システムの導入による人材育成の変化、または実証システムを用いた人材育成の可能性について検証する。アンケート項目は以下の通りである。

- 実証システムの若手の教育等への適用可能性

被験者に実証システムを体験していただいた後、アンケートにより実証システムの効果を評価/推定していただいた。体験に際しては、現場作業員の保守・点検業務を遠隔保守員(熟練工を想定)がサポートするシーンを想定し、被験者に自由に体験していただいた(図 4.5-7)。上記各項目のアンケートを表 4.5-1 に示す。なお各質問は実証システムを導入した場合に業務で利用する立場からの意見の収集を意図しており、現場作業員および遠隔保守員によるシステム導入検討を前提としている。

表 4.5-1 効果検証に関するアンケート項目

検証項目	質問
1.業務改善	
実証システムにより効率化される作業	本システムの導入により、保守業務のどのような作業が効率化できると感じましたか(自由記述)
実証システムによる効率化・高度化の内容	本システムの導入により、保守業務の効率化・高度化が図れると感じたものはありますか(複数選択可) ● 作業時間の短縮

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 作業準備・移動などの時間の削減</li> <li>● 作業や判断の精度の向上</li> <li>● 安全性の向上</li> <li>● リスクの軽減</li> <li>● その他</li> </ul>
2.人員配置	
熟練工一人当たりの対応可能範囲	本システムの導入により、熟練工がカバーできる範囲(現場の数・種類)が増える可能性がありますか。またそれはどの程度でしょうか(自由記述)
実証システムによる保守業務従事者数の変化	本システムの導入により、保守業務に従事する方の人数はどのように変化すると思われますか(自由記述)
実証システムによる保守業務コストの変化	本システムの導入により、保守業務に必要なコストはどのように変化すると思われますか(自由記述)
3.人材育成	
実証システムの若手の教育等への適用可能性	本システムを若手の教育等に活用(教材としての活用、熟練工の作業の様子を閲覧、OJTでの活用等)出来る/したいと感じましたか。またそれはどのような活用方法ですか(自由記述)



図 4.5-7 実験(体験)の様子

#### 4.5.3.2 ア-3 検証結果

「熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援」が保守業務にもたらす効果検証結果について、以下で説明する。

図 4.5-8、図 4.5-9 にアンケート集計結果を以下に示す。

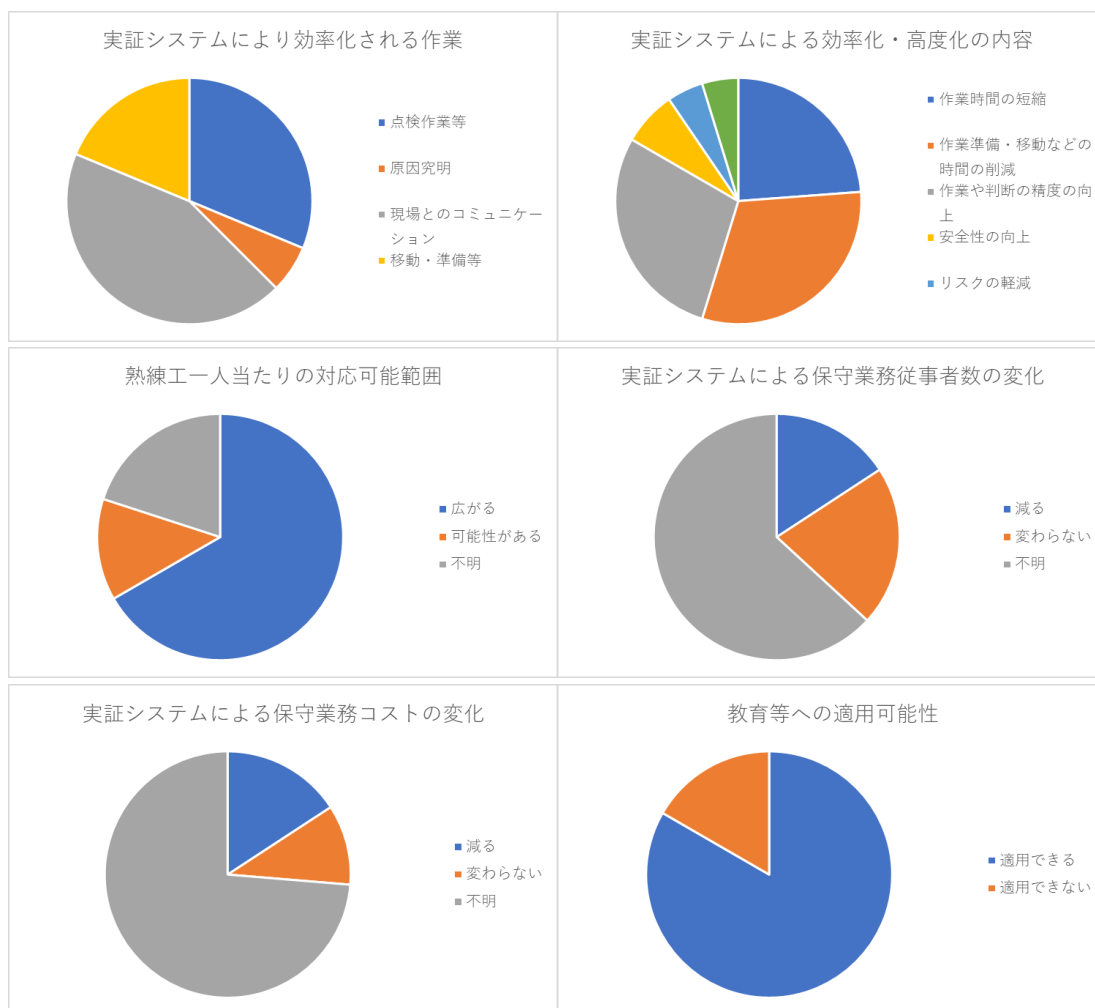


図 4.5-8 効果検証に関するアンケート集計結果

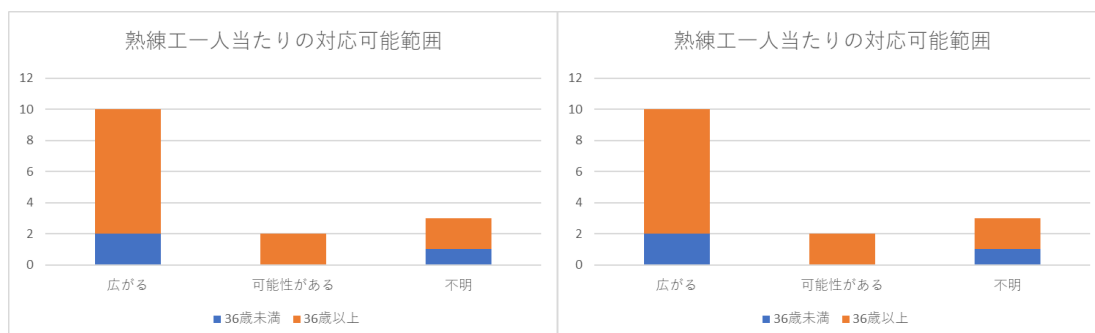


図 4.5-9 効果検証に関するアンケート結果(年齢別)

### 1. 業務改善

- 実証システムにより効率化される作業

現場とのコミュニケーション(現場状況の説明・共有や現場担当者への指示)が効率化さ

れるとの回答が一番多かった。また移動時間が無くなる・手順書等を探す時間が短縮できるといった、移動・準備の効率化との回答も多かった。

- 実証システムによる効率化・高度化の内容

作業時間および作業準備や移動の時間が短縮可能との回答が過半数を占めた。また作業時間の短縮に繋がる要因でもあるが、作業や判断の精度向上との回答も多くみられた。安全性向上やリスク削減について効果が出るとの回答は比較的少なかった。

## 2. 人員配置

- 熟練工一人当たりの対応可能範囲

実証システムの導入により遠隔から指示・サポートする熟練工の方が対応可能な範囲が広がるとの回答が多数を占めた。対応可能範囲が広がるかは不明との回答理由として、「熟練工のノウハウはなかなか伝わらない」、「目だけでなく触覚も必要」との意見があった。また熟練工一人当たりの対応可能範囲の広がりについては、年代による傾向の違いは特になく、熟練度合いに関わらず実証システムの効果が期待できる結果となった。

- 実証システムによる保守業務従事者数の変化

実証システムの導入により保守業務従事者が減るとの回答は少数であった。なお従事者数が変わらないと回答した被験者も「効率は向上する」、「多様性が出る(特定機種に限定されない担当者が増える)」、「雇用形態が変化する」との意見であり、実証システムの効果を認めており、効果がないから従事者数が変化しないとの意見ではない。

- 実証システムによる保守業務コストの変化

不明との回答が多数であった。コストが削減できる理由として、移動費の削減が挙げられた。

## 3. 人材育成

- 実証システムの若手の教育等への適用可能性

適用出来るとの回答が多数を占めた。適用出来ると回答した被験者は動画も活用できる点や熟練工の作業を閲覧できる点を評価していた。一方で適用出来ないと回答した被験者は「熟練工のノウハウを伝える困難性」や「映像では伝えることが出来ない触覚の必要性」を訴えていた。また年代による傾向の違いはなく、教育に関わる立場の違いに関わらず実証システムの人材育成への効果が期待されている結果となった。

## 4. 費用対効果

- 導入コストと実証システム導入により削減可能な費用

導入コストについては、追加で必要となる機器が高価であることを懸念する意見があった。システム導入により削減可能な費用としては、上述の通り移動費が挙げられる。また保守業務従事者が減るとの回答は少なかったため、保守業務従事者の人件費削減については可能性が低い。

### 4.5.3.3 ア-3 考察

「熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援」が保守業務にもたらす効果検証結果について考察を行う。

実証システムの実現目標として、8割以上の被験者から実用可能との評価を得ることを目標とした。実証システム体験後の被験者アンケートにより、84%の被験者から何らかの保守



業務作業が効率化できるとの評価を得ることができ(19名の被験者のうち16名から本システムの導入により効率化できる作業を回答いただいた)、目標を達成することができた。

業務効率化については、現場とのコミュニケーションの効率化が一番評価された。したがって、現場の状況を必要十分なレベルで共有することが重要であり、提供する業務毎にそのレベルを見極める必要がある。また点検対象機器のセンシング結果や稼働中のプログラム情報の閲覧機能の有効性も評価されており、それら情報の提示機能により作業者が把握できる範囲を拡張することも業務効率化を促進する重要な機能となる。そのためシステム導入時にセンシングすべき情報の選定が重要である。

またシステムの導入により大きな効果が得られる点として、移動費の削減が挙げられた。保守の現場は自社のみでなく顧客先や海外にまで及ぶため、遠隔から熟練工がサポートできる環境の実現は移動費の大きな削減につながる。また準備不足や想定外の状況に直面することによる出戻り工事が生じることもあるとのことで、これらについても移動費削減の効果が得られる。

また人員配置の観点では、熟練工が必ずしも現場に行く必要が無くなるため、熟練工が対応可能な範囲が広がる。またシステムおよび遠隔からの熟練工のサポートにより現場作業員に求められるスキルのハードルが下がるため、若手作業員の投入や場合によっては営業担当者による対応が可能となる。その結果、対応可能機種が特定機種に限定されることが無くなり、いわゆる多能工化に繋がる可能性も秘めている。アンケート結果によると、保守業務に従事する人数の削減については不明だが、人員配置の柔軟性が上がりさらなる業務効率の向上に寄与できると思われる。

一方で熟練工のノウハウ継承の困難性に関する指摘もあり、業務効率化や人材育成の課題となっていることが分かる。実証システムの教育への適用性は評価されており、特に熟練工の作業の様子の閲覧等に大きな期待が寄せられている。したがって、本システムにより配信される映像から教育用コンテンツを作成する機能や映像分析による作業の評価・分析機能についても潜在的なニーズがあると思われる。

最後に費用対効果について考察する。アンケート結果より、実証システム導入前後で大きく変化する費用としては、追加費用となる機器(現場作業員が装着するAR機器類)の購入費とシステム導入により削減が期待できる保守業務作業員の移動に要する費用(交通費や移動時の人件費)が考えられる。実証システムで準備した現場作業員のための機器は、「カメラ」、「スマートグラス」、「映像中継端末」、「5G 端末」であり、1セット当たりの購入価格の合計は約43万円であった。仮に東京-大阪間の移動を想定すると往復交通費はおおよそ2.8万円であり、約16回分の交通費に相当する。これは機器の耐用年数が1年である場合でも、月に1.4回程度の往訪ペースであり、現実的なものと思われる。更に今回のアンケートにより、現場が顧客先であり移動が多いこと、また現場が海外であることもあることがアンケートやヒアリングにより分かったため、交通費の削減のみでも費用対効果を見込むことが出来ると考える。また被験者に実証システム導入による業務効率向上も認められたため、効率化による単位時間当たりの案件数増加や顧客満足度向上による案件増加等による収入増加も期待でき、この観点でも費用対効果が見込める。その他5G環境やクラウド環境の構築・運用費用の検討が別途必要となるが、これは導入台数の検討や他システムとの共用により、各システムの費用対効果の向上を図ることが望ましい。

今後の課題は、システムの効果を最大限に活かす人員配置の検討と必要スキルの整理お

よびシステムの人材育成での活用方法の検討である。

## 4.6 課題解決システムに関する機能検証

### 4.6.1 ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

#### 4.6.1.1 ア-1 検証方法

4.4.1 節や 4.7.1 節の検証結果に基づき、「変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化」で必要となる機能を整理する。整理の観点として、以下に挙げるように、ネットワークそのものに必要とされる機能と、無線通信固有の問題に対処するためのアプリやシステム側の機能の二つの観点で整理した。

##### 1. 無線ネットワーク側の機能

制御系ネットワークの通信をローカル 5G 上で実現するために必要となる機能である。例えば、通信をエンド・エンドで疎通させるためなどに必要となる機能などである。

##### 2. アプリ・システム側の機能

4.4.1 節では、制御系ネットワークの無線化について実用性が十分であることを実証したが、それは適切なネットワーク設計あつてのことである。また、設計時に十分に考慮しきれない事象も考えうるので、それらに対処するためにアプリ側や無線システム側に必要となる機能について整理する。

#### 4.6.1.2 ア-1 検証結果

最初にネットワーク側に必要とされる機能について整理する。4.4.1 節で構築したシステムは VPN ルータを用いて、Master や Slave 局の通信を IP パケットでカプセル化する対処を実施している。現状の 5G (LTE) ネットワークは IP 通信を前提としたものが多い一方で、産業用イーサネット規格の多くは、L3 (IP) ではなく、L2 (Ethernet) の上に直接構築されているものが多いためである。例えば、今回検証した CC-Link IE Field は L2 の上に直接 CC-Link IE Field のプロトコルが乗っている。本実証では、VPN ルータで Ethernet フレームを IP パケットでカプセル化することで、対処したが、5G 装置側での対処が望まれる。5G のスペック上は Ethernet フレームで通信できるようにはなっているため、今後、Ethernet を直接疎通可能な製品も市場にリリースされると考えられる。

Ethernet 通信を見据えた 5G 側の機能として、例えば、NR の Rel.16 では、PDCP レイヤにイーサネットヘッダ圧縮 (EHC: Ethernet Header Compression) と呼ばれる機能が規定されている。制御系ネットワークの通信ではペイロードサイズがヘッダサイズに比べて比較的小さいことが多いため、このような機能を有効に活用することで周波数利用効率を高めることも期待できる。

次に、アプリやシステム側に必要となる機能について整理する。無線ネットワークの通信品質を担保するためには、適切なネットワーク設計が必要になる。しかしながら、事前にネットワーク設計を実施したとしても、新規システム追加や現場のラインレイアウト変更などで、設計時の状況と実際の状況に乖離が発生する可能性がある。こういった状況を想定して、無線品質が想定以上に悪くなり、遅延が大きくなった場合にアプリ側でそれをカバーする機能が必要となる。例えば、遅延が大きくなった場合に安全のため、一旦機器を

停止し、無線品質が改善した場合にリスタートする等である。アプリ側の対処で安全面の担保は可能であるが、想定外の停止が頻発すると生産性を下げることとなるため、システム側で事前の設計との乖離を監視・是正する仕組みがあることが望ましいと考えられる。例えば、想定外に電波強度が弱い UE が発生していないか、ネットワーク全体にトラフィック量が想定以上に発生していないか、等を常時監視し、ネットワーク管理者に通知する等である。

また、有線ネットワークでも同様であるが、アプリ側に各トラフィックの QoS 設定を適切に実施する機能も必要である。詳しくは 4.7.1 節にて後述するがバーストトラフィックが発生するとキューイング遅延によって大きな遅延が発生しうる。特に UE や基地局は通信品質がある程度変動してもスループットが出せるように比較的大きなバッファ（4.4.1 節で見るように秒オーダー）を有することが多い。キューイング遅延の発生を抑制するために、遅延センシティブなトラフィックに対して適切な QoS 設定を実施することが必要である。

#### 4.6.1.3 ア-1 考察

以上の様に、「変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化」で必要となる機能を整理した。産業用イーサネット規格への対応として、L2(Ethernet)通信の疎通を挙げた。ここでは、特に上記について、機能レベルだけでなく運用レベルの観点も交えて考察を加える。

オフィスや工場など、多数の端末が接続するネットワークはいくつかのサブネットに分割して運用するのが通常である。特に、無線 LAN と有線 LAN の間にはルータ (L3 スイッチ) が入るのが通常の運用である。また、無線 LAN も場所ごとにいくつかのサブネットに分割する場合もある。これは、サブネットごとに区切った方が管理上容易になるため、また、サブネットを大きくとりすぎると、ブロードキャストフレーム等による無線リソースの消費量が大きくなるため等の理由による。従って、機能レベルで Ethernet 通信に対応が出来たとしても、運用レベルでの考慮が必要になることには留意しておく必要がある。Master 局と Slave 局が両方 5G につなげるという運用の場合、問題になりにくいだが、無線で折り返す分、倍の無線リソースが必要になる点と、場所ごとにサブネットを区切ったりしている場合への対応は必要になる。対応方法はいくつか考えるが、例えば、ベアラ (APN) 毎に VLAN を切るなどして対応することが想定される。

### 4.6.2 ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

#### 4.6.2.1 ア-2 検証方法

4.4.2 節に記載の実証システムを用い、「無軌道型 AGV の遠隔制御」で必要となる機能を検証する。検証項目は以下の通りである。

##### 1. 映像視野

AGV の遠隔制御では、AGV 周辺の安全性を確保して操作させる必要があるため、周辺の

状況をカメラ映像で確認できる必要がある。今回の監視カメラはパン・チルト・ズーム機能により、監視カメラを遠隔地から自在に操作できる特徴がある。これら機能を用いながら、AGV 操作を体験していただく。

## 2. 映像品質

AGV の遠隔制御では、周囲を広く確認する以外にも、映像品質が重要になる。カメラ映像の秒間フレームレート(FPS)が下がると、リアルタイムに現場状況を検知しづらくなり、危険性も上がる。今回の検証では、5FPS から 30FPS まで段階的に変更し、ユーザ体感品質(QoE: Quality of Experience)に基づく観点で、どの程度の品質要求があるかを確認する。

被験者に実証システムを体験していただいた後、アンケートにより実証システムの機能を評価/推定していただいた。体験に際しては、現場作業員がカメラ映像を見ながら、AGV の遠隔制御する想定で体験していただいた。

### 4.6.2.2 ア-2 検証結果

まず、「無軌道型 AGV の遠隔制御」で必要となる機能の検証結果について説明する。体験していただいた作業員 5 名のアンケート回答から、次のような結果が得られた。

#### 1. 映像視野

カメラ映像による周辺確認の結果について、手動走行時を図 4.6-1 に、自動走行時を図 4.6-2 に示す。アンケートの質問内容は「カメラ映像を見ながらの AGV 制御は、周囲の状況を確認しながら操作をすることができましたか」とした。

手動走行時・自動走行時ともに、5 段階評価で 4 または 5 の「できた」側の回答が多かった。対して、最も低い 1 の「できなかった」という回答もあり、監視カメラで全体を見渡せることが必要との意見があった。今回の実験では、通路上のラインを確認できるようにするため、監視カメラを前方に傾けて設置していた。このため、監視カメラがチルト機能を有しているが、それを操作しても後方までは確認できず、確認「できなかった」とのアンケート回答ととなっていた。

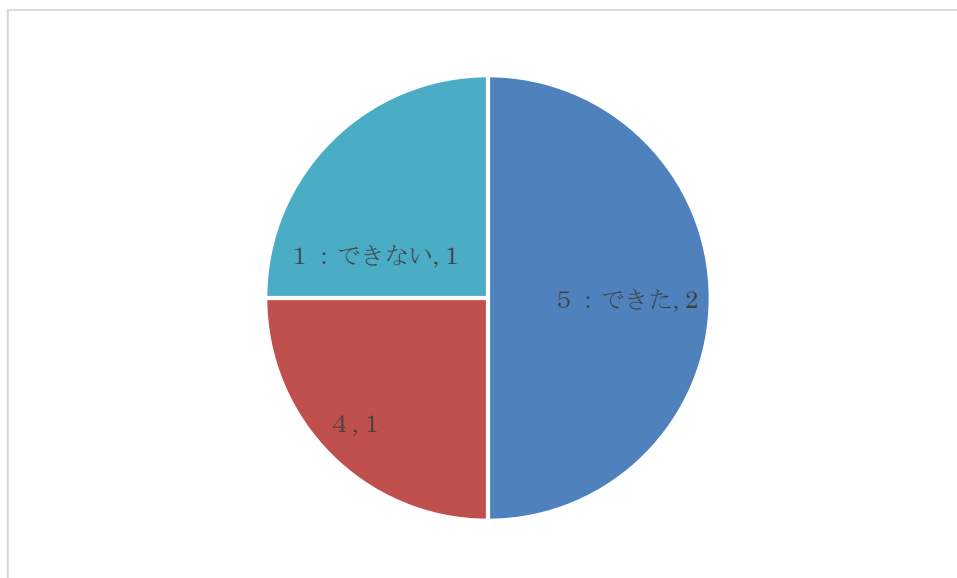


図 4.6-1 機能検証に関するアンケート集計結果(映像視野 手動走行)

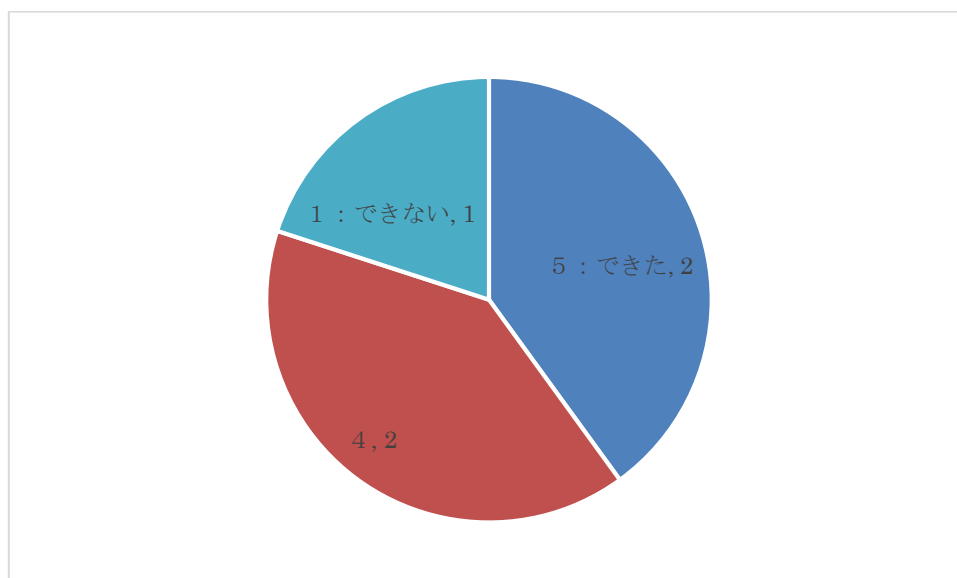


図 4.6-2 機能検証に関するアンケート集計結果(映像視野 自動走行)

## 2. 映像品質

カメラ映像品質についての結果を図 4.6-3 に示す。アンケートの質問内容は「遠隔操作時の映像について、どの程度の品質が要求されますか」とした。選択項目は「～5FPS、5FPS程度、15FPS程度、24～30FPS、30FPS～」とした。また、質問の前提として、5FPS程度を監視カメラ、24～30FPSを動画やテレビで使用と参考記載している。遠隔操作時の映像について、「15FPS程度」の品質が要求されるとの回答が多かった。一方で、監視カメラのようにある程度カクツキが許容される「5FPS程度」で問題ないという回答や、動画再生で要求される滑らかな品質「24FPS～」が要求されるとの回答も見受けられた。

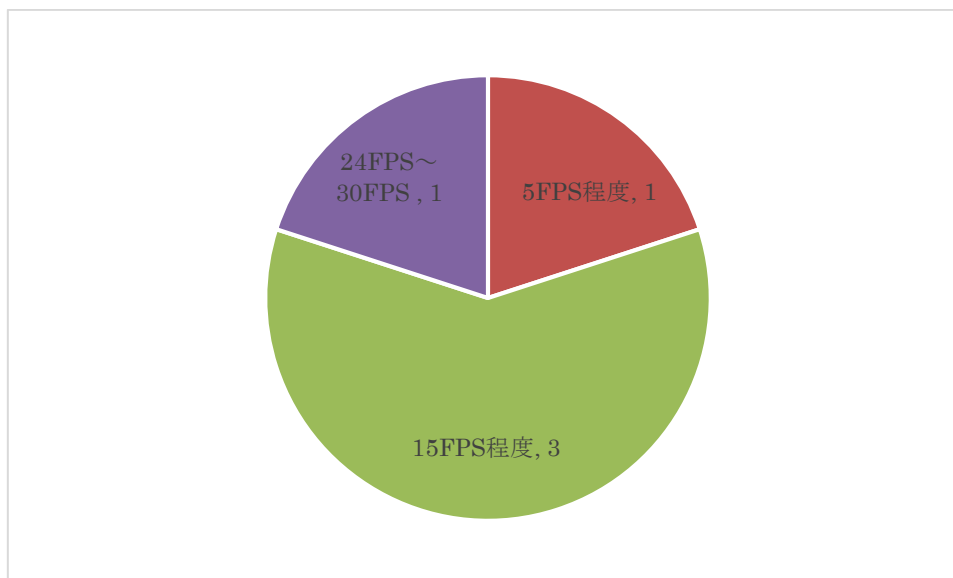


図 4.6-3 機能検証に関するアンケート集計結果(映像品質)

#### 4.6.2.3 ア-2 考察

まず、無軌道型AGVの遠隔制御で必要となる機能の検証結果について、以下に考察する。カメラ映像を見ながら操作可能であったという回答が多かったが、これは、工場作業員にヒアリングした際の、「走行中の制御は映像を見ずともAGVのシステム側で自動制御が望ましく、積み荷を乗せる/降ろす際の確認ができれば良い」という声にあるように、常時映像を見ながらといった運用は想定していないためだと考えられる。

また、アンケート結果より、15FPS程度のデータ量を安定的に通信できる環境が必要となることが分かった。これは、FPSが低すぎると、手動走行時に障害物などをリアルタイムに検知できず、安全性に関わるためである。また、操作員によって感じ方は異なるため、必要に応じてFPSを変化させるのが良いと感じた。必要以上のデータを使用しないことは全体のスループット確保にもつながる。つまり、本実証のような周囲の監視目的であればQoS(映像品質)の向上に伴うQoE(工場作業員の体感品質)の向上はある程度(今回であれば15FPS程度)あれば十分であり、それ以上QoS向上のためにコストや通信品質への負荷をかける必要はないとも考えられる。

ただし走行するために必要なAGV制御の通信のために、図4.4-29や図4.4-34で示したようにRTTが500msecを超えないようにする運用は必要となる。

カメラ映像を見ながら操作可能であったという回答が多かった一方で、操作できなかったという回答もあった。今回の実証では、幅広く見渡せる監視カメラを用いても、死角ができるという課題が生じたためである。本実証ではAGVの天板上に監視カメラを設置したため映像視野が限定されてしまったが、カゴ車を使用し、その上方部に監視カメラ設置することで、360度をカバーすることが可能と考えられる。また、バック走行をせずに、必ずAGVを進行方向に旋回してから走行するなど、運用による回避も考えられる。現場での走行ルートに応じて、監視カメラの設置位置や設置台数をより深く検討する必要もある。

#### 4.6.3 ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

##### 4.6.3.1 ア-3 検証方法

遠隔保守支援では、映像配信時の設定(解像度およびビットレート)を QoS と定義し、受信される映像品質を QoE と定義する。QoE の定量化にあたっては、映像の視認性が一つの重要な指標であるため、一定フレーム数中での QR コード認識率を用いる。機能の検証観点には表 4.6-1 の通りである。

表 4.6-1 映像品質検証対象の機能一覧

検証対象機能	検証の観点	説明
映像送信機能	映像解像度	送信する映像の解像度に関して複数パターンで検証を行う。 現地の状況、特に文字など、を正確に遠隔保守員に伝えるためには、4K のような高い解像度が必要であると考えられる。
	送信ビットレート	解像度に応じて適切なビットレートでの配信が必要である。 各解像度での推奨ビットレートを参考に複数パターンで検証を行う。
	送信時スループット	設定されたビットレートでの送信が可能な帯域を要するか検証を行う。
映像受信機能	受信時スループット	解像度に応じたビットレートでの受信に必要な帯域を要するか、送信時スループットと比較することで検証を行う。
	映像品質(視認性)	受信した映像が、現地状況の把握に十分な品質を要するか検証を行う。 検証では映像品質(視認性)を QR コードが認識可能かという観点で、固定フレーム数あたりの認識成功フレーム数にて定量的に測定する。

本検証では、UDP ベースの映像配信プロトコル(RTP)を使用した p2p の構成により、映像の送受信および映像・通信量の記録を行う(図 4.6-4)。なお、ここでは図 3.2-7 の 5G モバイルルータを使用して通信を行う。

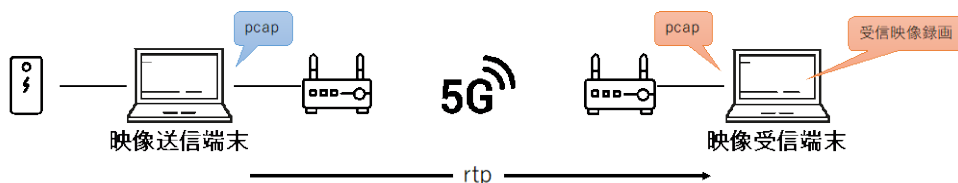


図 4.6-4 映像品質検証の構成

映像配信時の設定は表 4.6-2 のパターンを実施する。



表 4.6-2 映像品質評価パターン

	854x427	1366x683	1920x960	3840x1920
1Mbps	1	7	13	19
3Mbps	2	8	14	20
5Mbps	3	9	15	21
15Mbps	4	10	16	22
30Mbps	5	11	17	23
60Mbps	6	12	18	24

表中の番号は評価パターン ID である。解像度に関しては、左から順に、FWVGA、FWXGA、1080(2K)、4K 相当の解像度である。また、ビットレートに関しては、概ね対角線上のものが要求される(パターン ID : 1, 8, 15, 22)。なお、ビットレートに関しては、高いほど良いというわけではないものの、ある程度余裕を持ったレートでの配信を行うことが望ましい。Youtube Live における配信時の推奨設定値は表 4.6-3 となっている(参考 : <https://virtualcast.jp/wiki/deliveryweb/resolution>)。

表 4.6-3 解像度と推奨ビットレート範囲

映像規格	解像度	本検証対応解像度	ビットレート範囲
2160p[30FPS]	3840x2160	3840x1920	20 – 51 Mbps
1080p	1920x1080	1920x960	3 – 6 Mbps
720p	1280x720	1366x683	1 – 4 Mbps
480p	854x480	854x427	0.5 – 2 Mbps

上記パターンと同様の検証を、帯域に負荷をかけた状態でも実施する。その際の負荷は、同一環境内にある 10 台の 5G 端末(図 3.2-6)に別途撮影される映像を配信することで与える。配信する映像は 2K(1920x960)、ビットレート 4Mbps とする。

さらに、QR コードの撮影のみの場合、ほぼ静止状態の映像となり情報量(通信量)が低く抑えられることが想定される。したがって、表中のパターン 8, 15, 22 に関しては周辺に動くものが存在する環境下でも実施し、同様に QR コードの認識率を評価する。なお、その際の検証は帯域に負荷をかけない状態で行う。

フレーム数は、動きなしのケース(負荷なし / 負荷あり)では 750 フレーム(25 秒)分、動きなしのケースでは 3000 フレーム(100 秒)分を QR コード認識の対象とした。

QR コード認識実験の様子を図 4.6-5 から図 4.6-7 に掲載する。

図 4.6-5 は QR コードを撮影時の環境を撮影したものである。やや見えづらいが、QR コードの手前にカメラ(Theta Z1)を設置し、QR コードを撮影する。カメラ映像はノート PC を中継機として 5G 端末から受信用のノート PC に配信される。受信側のノート PC では、受信した映像を録画するとともに、受信時の通信量を記録する。

図 4.6-6 は帯域負荷をかけるための映像を撮影・配信する機器である。帯域負荷用の映像は多端末に配信するため、クラウド上の映像配信サーバを介して RTMP を利用して映像のストリーミング配信を行う。

図 4.6-7 は帯域負荷をかけるために、10 台の 5G 端末で映像を受信している様子を撮影したものである。各端末で RTMP サーバに接続し、同じ映像を受信する。

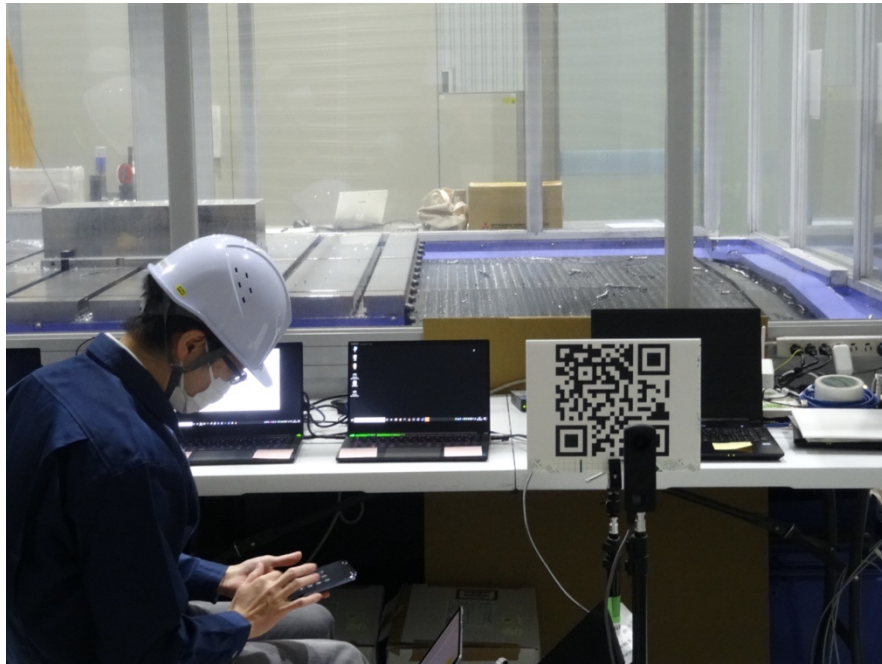


図 4.6-5 QR コード実験の様子



図 4.6-6 帯域負荷用映像配信機材

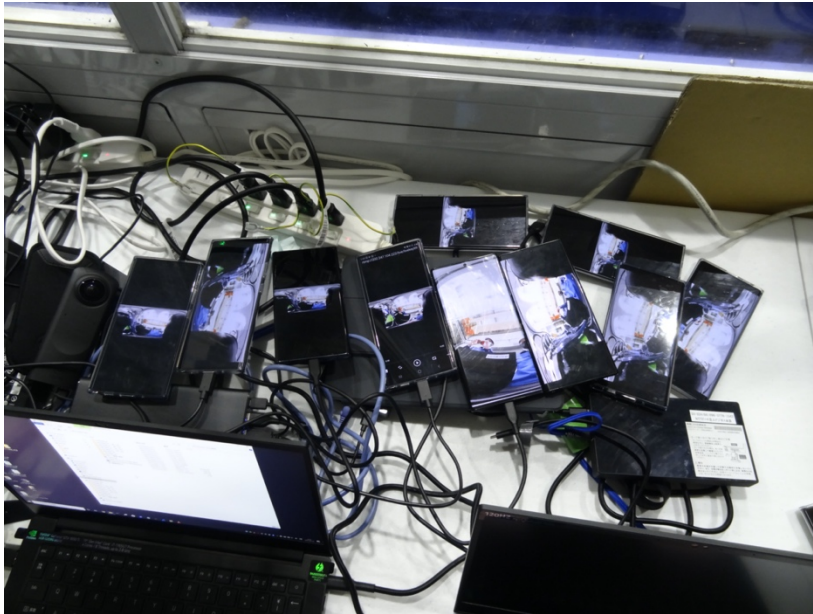


図 4.6-7 帯域負荷のための 5G 端末(10 台)への映像配信

振動計測部については、振動データをクラウド上のサーバにアップロードするために要する時間を QoS とする。振動計測機として、ZNST3250、TTIO-TG2 という 2 種類の振動計測器を用いる。これらは、データのバッファリングや通信データの扱いが異なり、計測の場では用途に応じで使い分けられる。ZNST3250 は、データを内部に蓄積し、信号処理まで行った上で、データをアップロードするタイプである。このため、エッジ側ですぐに処理結果を確認できるが、クラウド側まで含めたシステム全体として見るとリアルタイム性に欠ける。また、出力されるデータも大きくなる。一方、TTIO-TG2 はセンサの生データをそのまま出力タイプであり、リアルタイムにデータの出力が可能である。ただし、信号処理は行わないため、クラウド側に処理能力を必要とする。また、伝送されるのが最小限の生データのみであるため、データが小さいという特徴がある。今回の実証では、特性の異なるこれら 2 種類の振動測定器が、どちらも 5G 環境で問題無く利用できるかどうかを検証する。

ZNST3250 による測定系を図 4.6-8 に、TTIO-TG2 による測定系を図 4.6-9 に示す。図中、赤の矢印はデータの流れを示している。両測定系共に、操作者が切削加工機の様子を目視しながら PC を操作することで、データのサンプリングを開始する。(今回の実験で用いる切削加工機は、加工状況を外部に通知する仕組みが無い場合、操作者による目視確認が必要になっている。)

ZNST3250 では、操作者が開始操作を PC 上で行うと、サンプリングが行われる。サンプリング結果は PC に BLE 経由で転送され、アップロード用のデータを生成し、USB 接続された 5G 対応スマートフォン経由でクラウド上のサーバにデータを送信する。

TTIO-TG2 を使ったシステムは有線 LAN 経由で 5G ルータを通す構成となっている。TTIO-TG2 側の構成では通信状況の確認のためにパケットキャプチャデバイスを挟んでいる。パケットキャプチャデバイスは、ミラーポートを持つハブによって分岐させているため、本来の通信のパフォーマンスには全く影響を及ぼさない構成としている。

クラウド側のサーバとは、REST 型の API(TCP による通信)でデータの受け渡しが行われる。

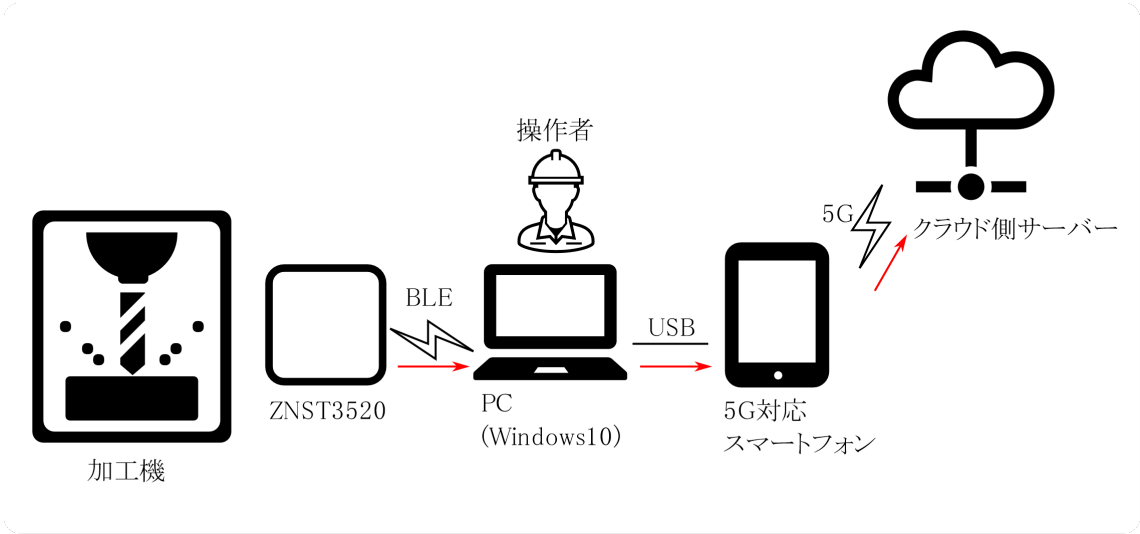


図 4.6-8 ZNST3250 による振動計測部の構成

AI による振動データの異常検知システムに関しては、上記構成で得られる振動データを解析し、Web アプリ上で結果の閲覧が可能であることを確認する。

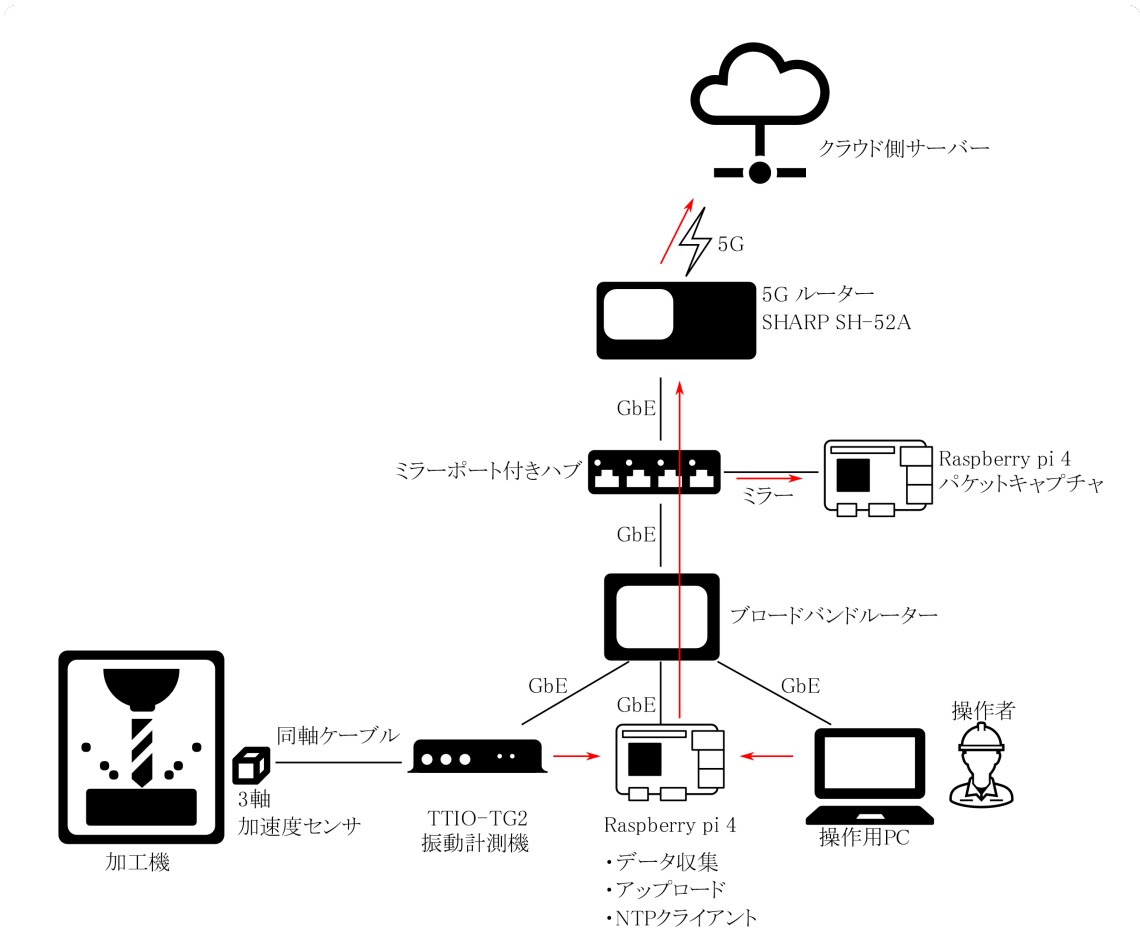


図 4.6-9 TTIO-TG2 による振動計測部の構成

実際に切削加工機に対して振動センサを取り付けた様子を以下に示す。図 4.6-10 が切削加工機の全景である。主軸の先端に加工のための工具が取り付けられており、この工具が回転することでワーク(加工対象)を切削する。この主軸の振動を振動測定器によって計測する。

主軸にセンサの取り付け様子を図 4.6-11 に示す。ZNST3520 は電源や無線を内蔵しており、磁力で吸着できるタイプであるため、主軸脇に貼りつけるのみで設置が完了する。一方 TTIO-TG2 は、センサを治具によって固定し、そこから同軸ケーブルを引き回している。図 4.6-12 に ZNST3520 用の PC とスマートフォンの設置の様子を、図 4.6-13 に TTIO-TG2 本体およびデータ通信のための機器を設置した様子を示す。

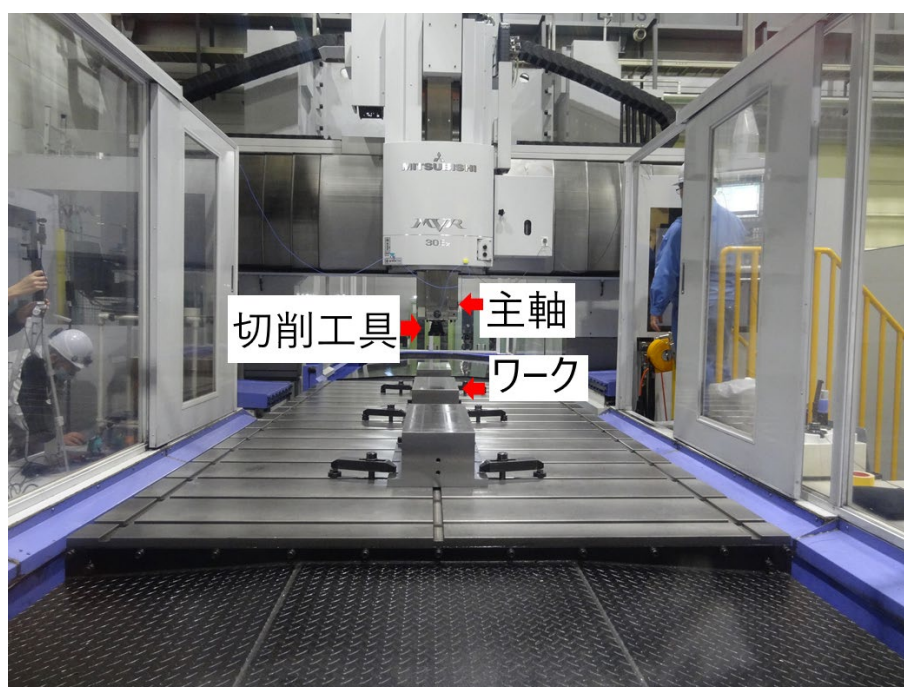


図 4.6-10 切削加工機全景

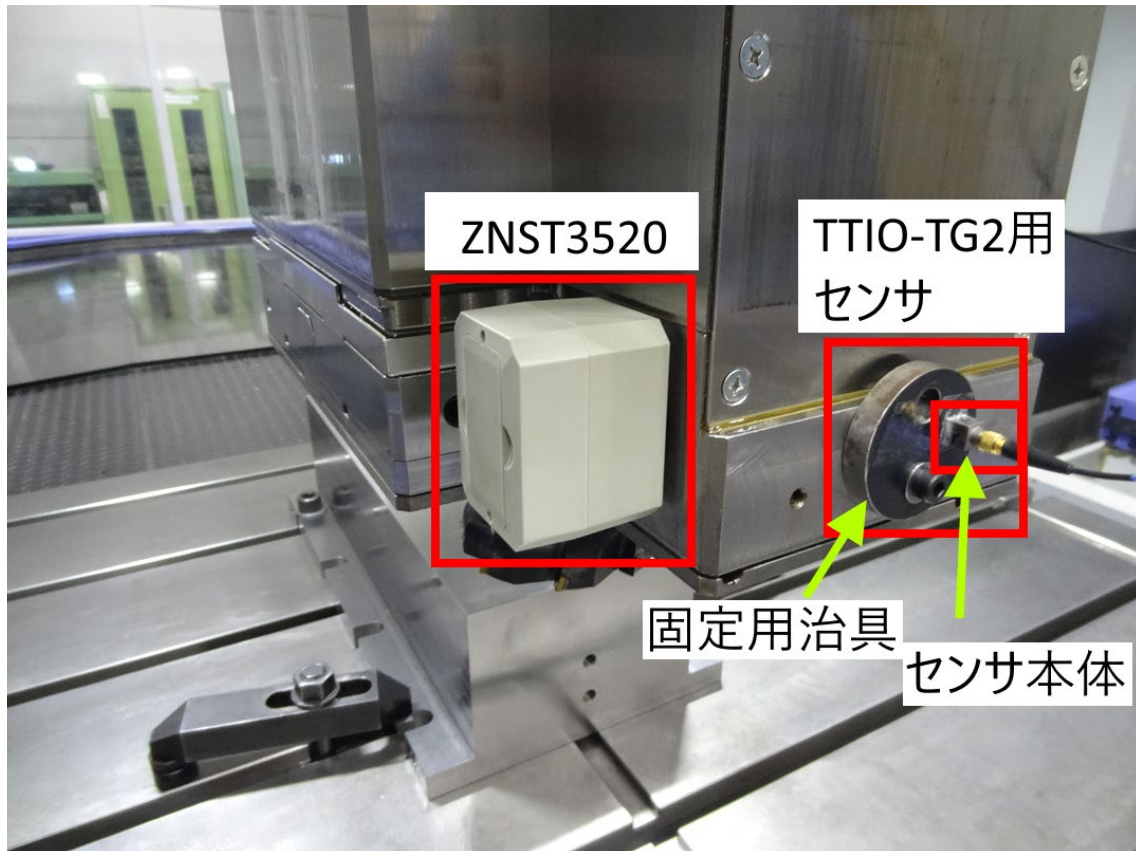


図 4.6-11 主軸に取り付けたセンサ

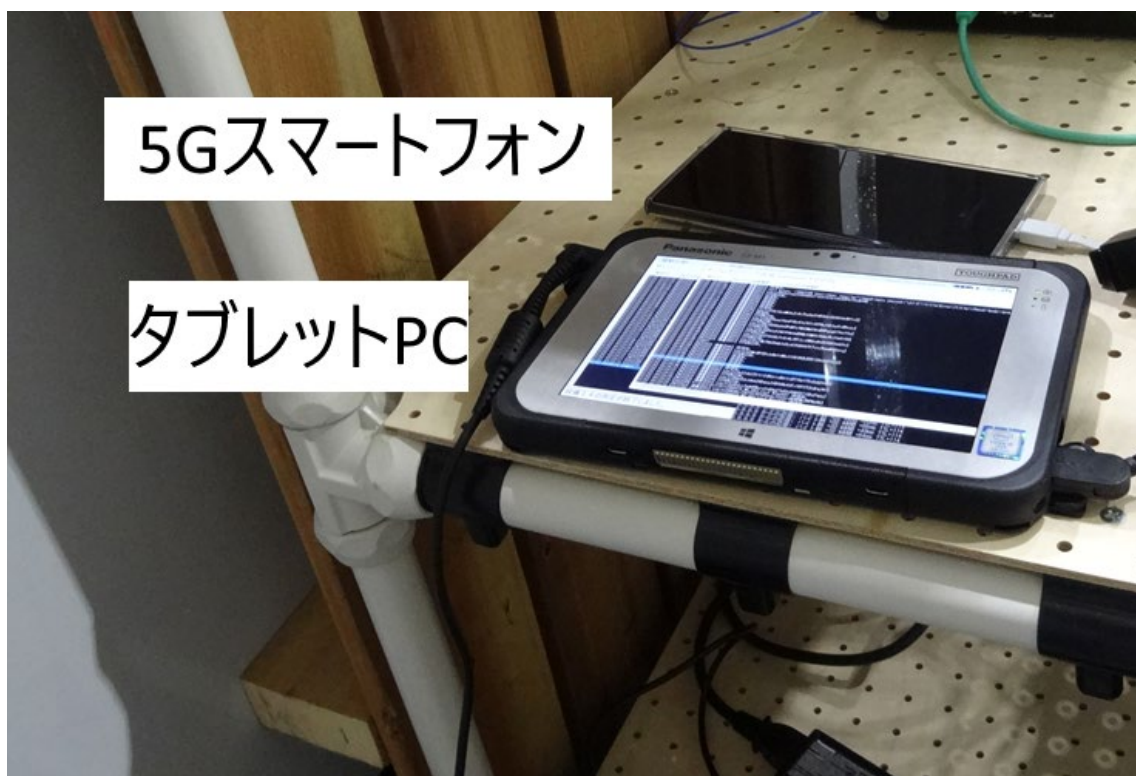


図 4.6-12 ZNST3250用のPCとスマートフォン

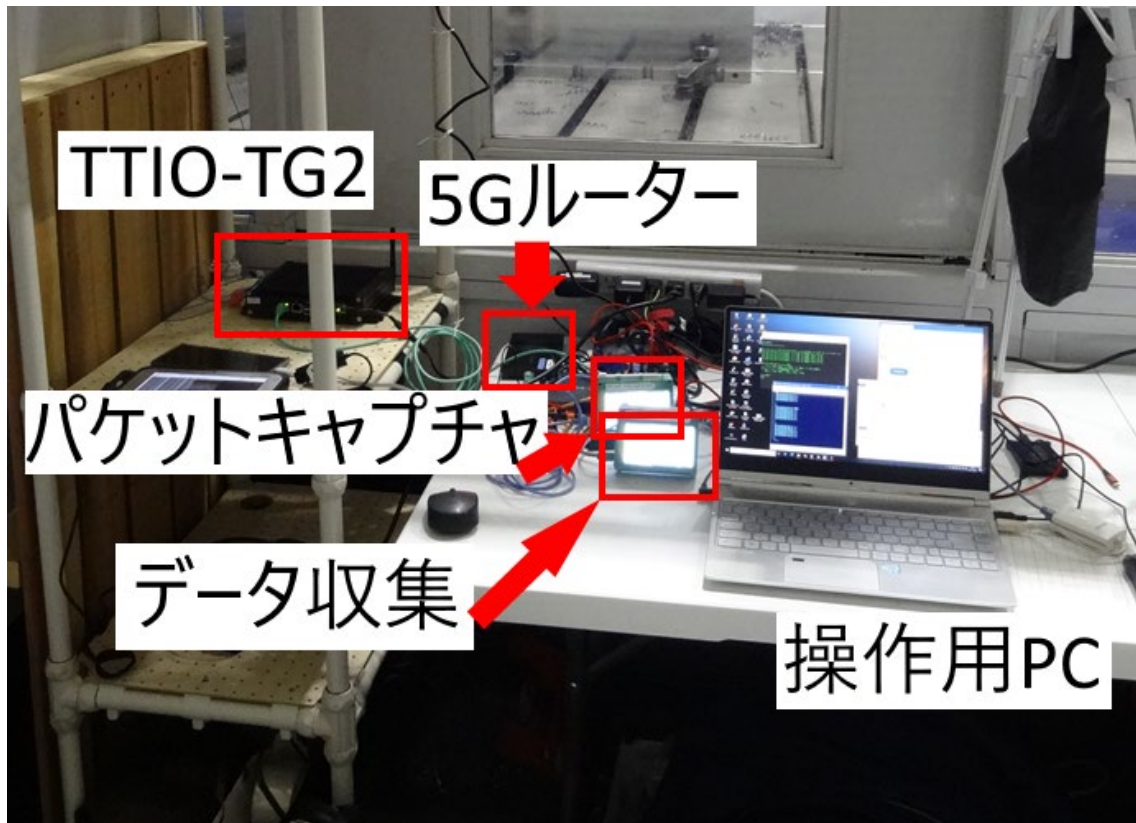


図 4.6-13 TTIO-TG2 を用いたセットアップ

#### 4.6.3.2 ア-3 検証結果

表 4.6-4 から表 4.6-6 に各パターンでの QR コード認識率を示す。認識率は、対象フレーム数(静止状態：750 フレーム、動きあり：3000 フレーム)中で、正しく QR コードに記録された文字列を読み取ることができたフレーム数によって算出する。

青色でハイライトされたセルは、QR コード認識率が他のパターンと比較して低いものを示している。なお、静止状態(750 フレーム)では 96%の精度の場合、25 秒中 1 秒分の認識不可状態が存在し、動きありの状態(3000 フレーム)では 99%の精度の場合に、100 秒中 1 秒分の認識不可状態が存在する計算になる。

表 4.6-4 QR コード認識率：負荷あり，静止

	854x427	1366x683	1920x960	3840x1920
1Mbps	100%	100%	94.3%	97.1%
3Mbps	100%	97.3%	100%	99.9%
5Mbps	99.7%	85.9%	100%	100%
15Mbps	96.4%	100%	100%	92.4%
30Mbps	92.4%	100%	100%	98.8%
60Mbps	97.3%	100%	99.9%	7.2%

表 4.6-5 QR コード認識率：負荷あり，静止

	854x427	1366x683	1920x960	3840x1920
1Mbps	98.3%	97.5%	100%	99.9%
3Mbps	100%	99.9%	100%	99.7%
5Mbps	96.7%	100%	100%	100%
15Mbps	100%	100%	99.9%	99.7%
30Mbps	100%	100%	5.6%	0%
60Mbps	100%	100%	19.5%	0%

表 4.6-6 QR コード認識率：負荷なし，動きあり

解像度	1366x683	1920x960	3840x1920		
ビットレート	3Mbps	5Mbps	15Mbps	30Mbps	60Mbps
認識率	98.2%	97.0%	83.2%	51.9%	10.4%

上表中の青色ハイライトにおける受信側 QR コード映像の様子と送受信の通信量を図 4.6-14 から図 4.6-33 に示す。各グラフ横軸は計測開始からの経過時間[秒]、縦軸は通信量 [bps]を表す。





図 4.6-14 QR コード映像の様子：負荷なし，静止，ケース 24

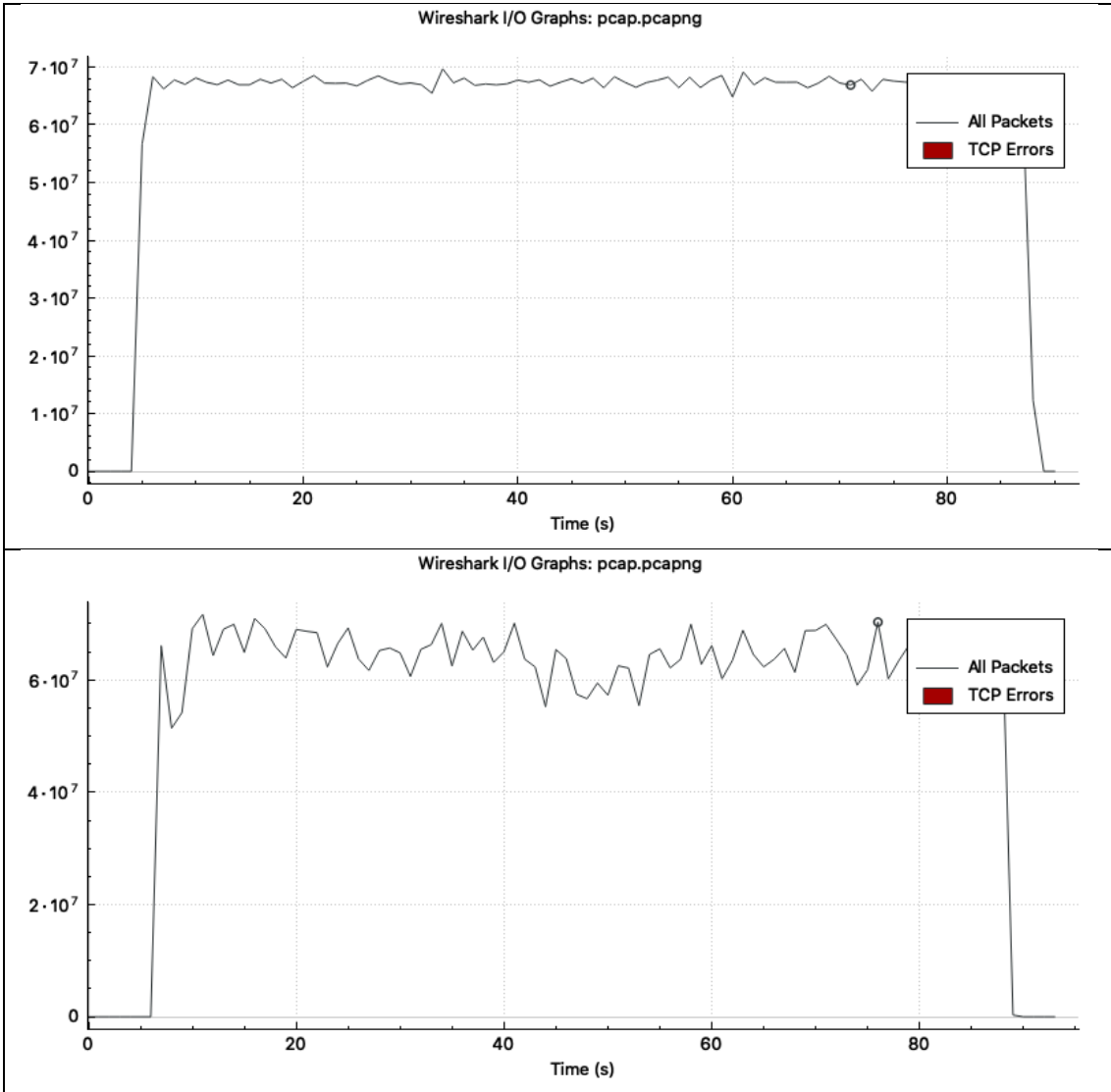


図 4.6-15 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷なし，静止，ケース 24



図 4.6-16 QR コード映像の様子：負荷あり，静止，ケース 17

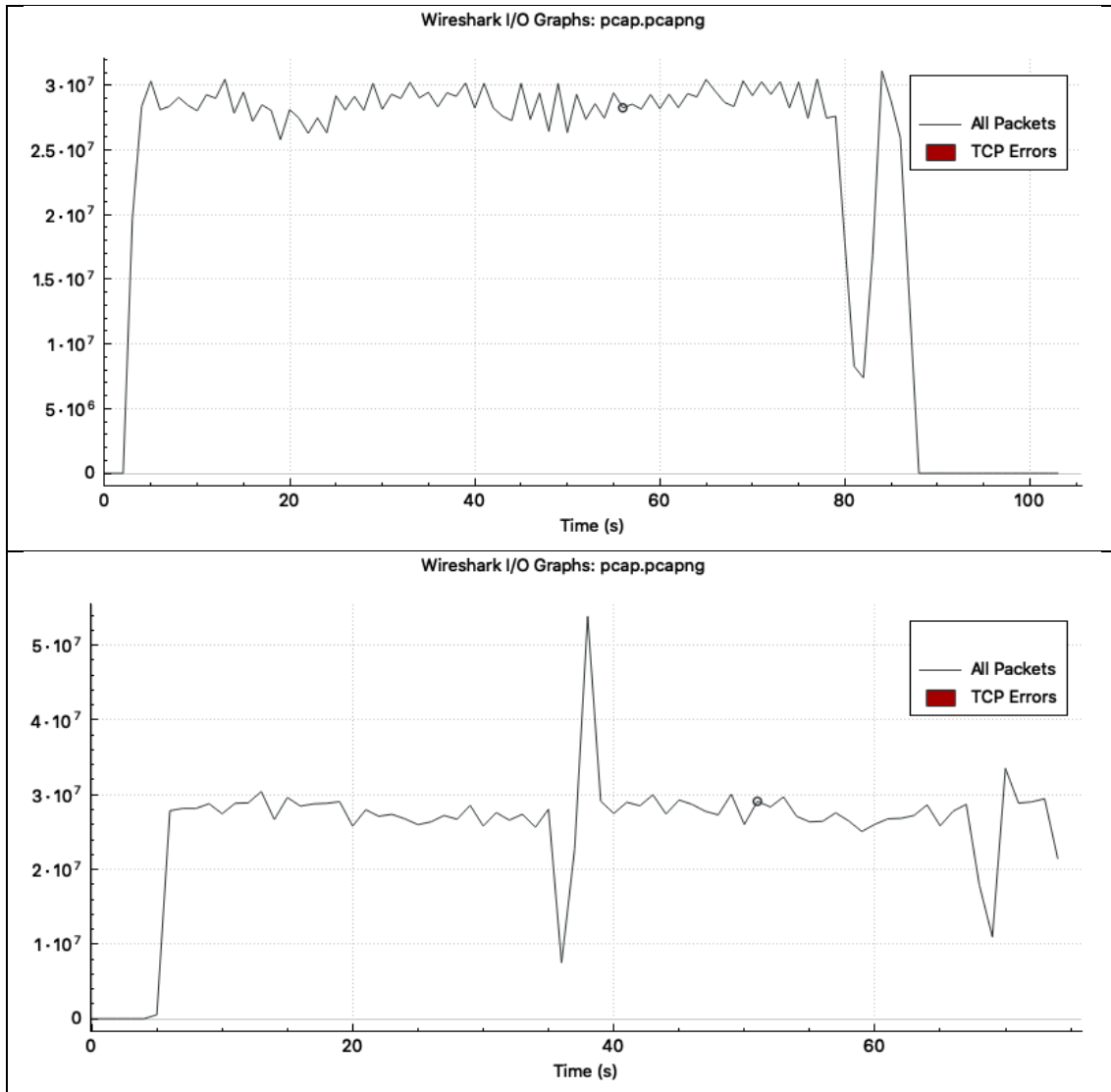


図 4.6-17 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷あり，静止，ケース 17

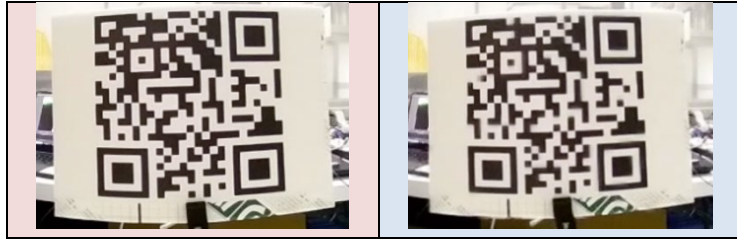


図 4.6-18 QR コード映像の様子：負荷あり，静止，ケース 18

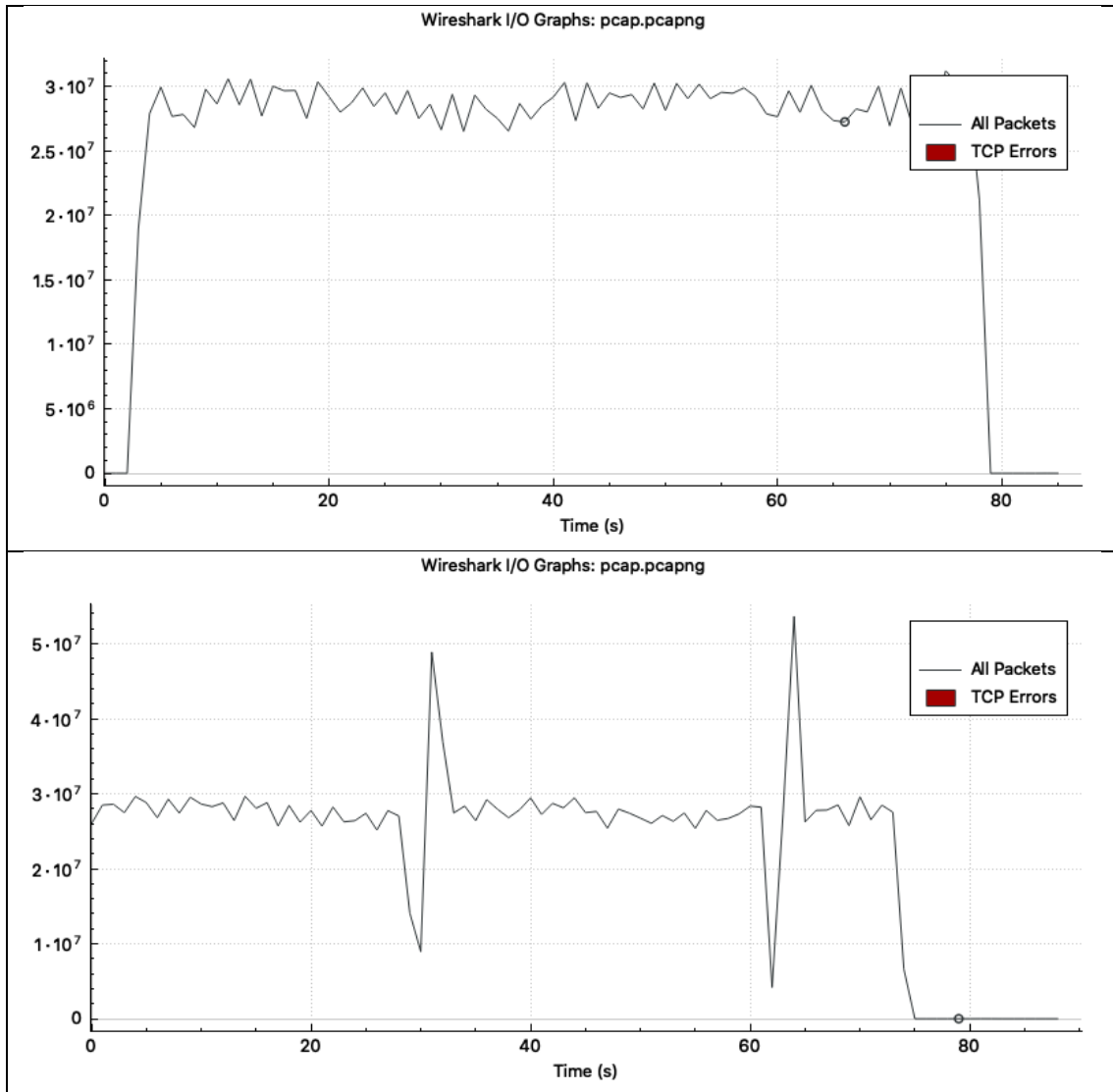


図 4.6-19 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷あり，静止，ケース 18

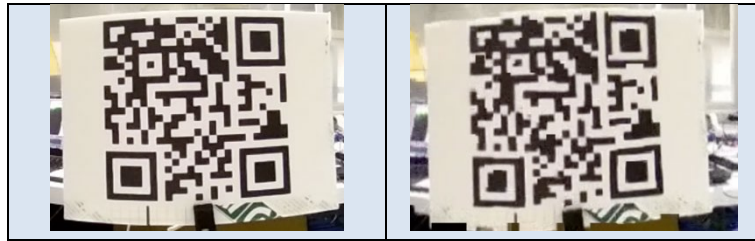


図 4.6-20 QR コード映像の様子：負荷あり，静止，ケース 23

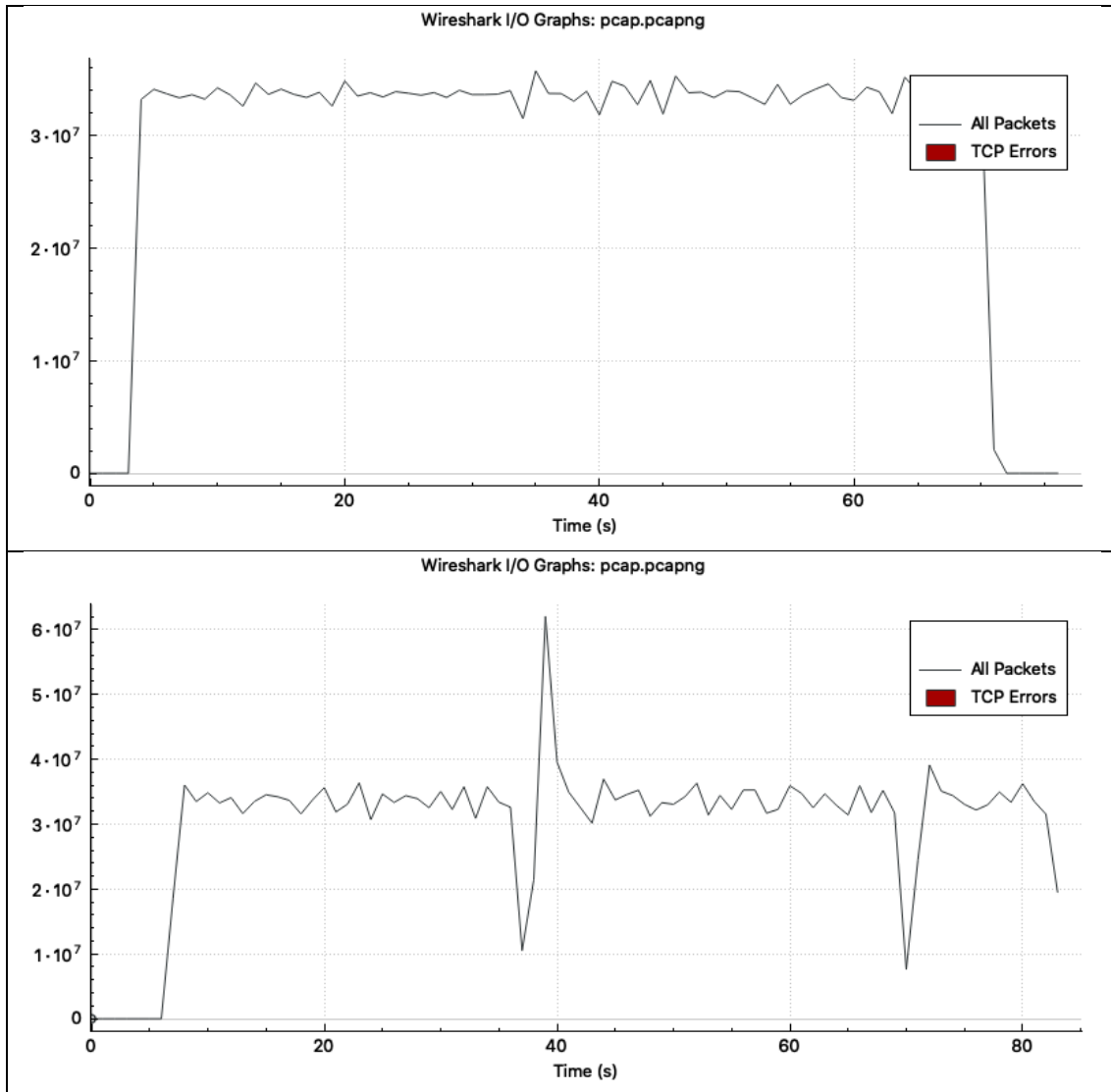


図 4.6-21 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷あり，静止，ケース 23



図 4.6-22 QR コード映像の様子：負荷あり，静止，ケース 24

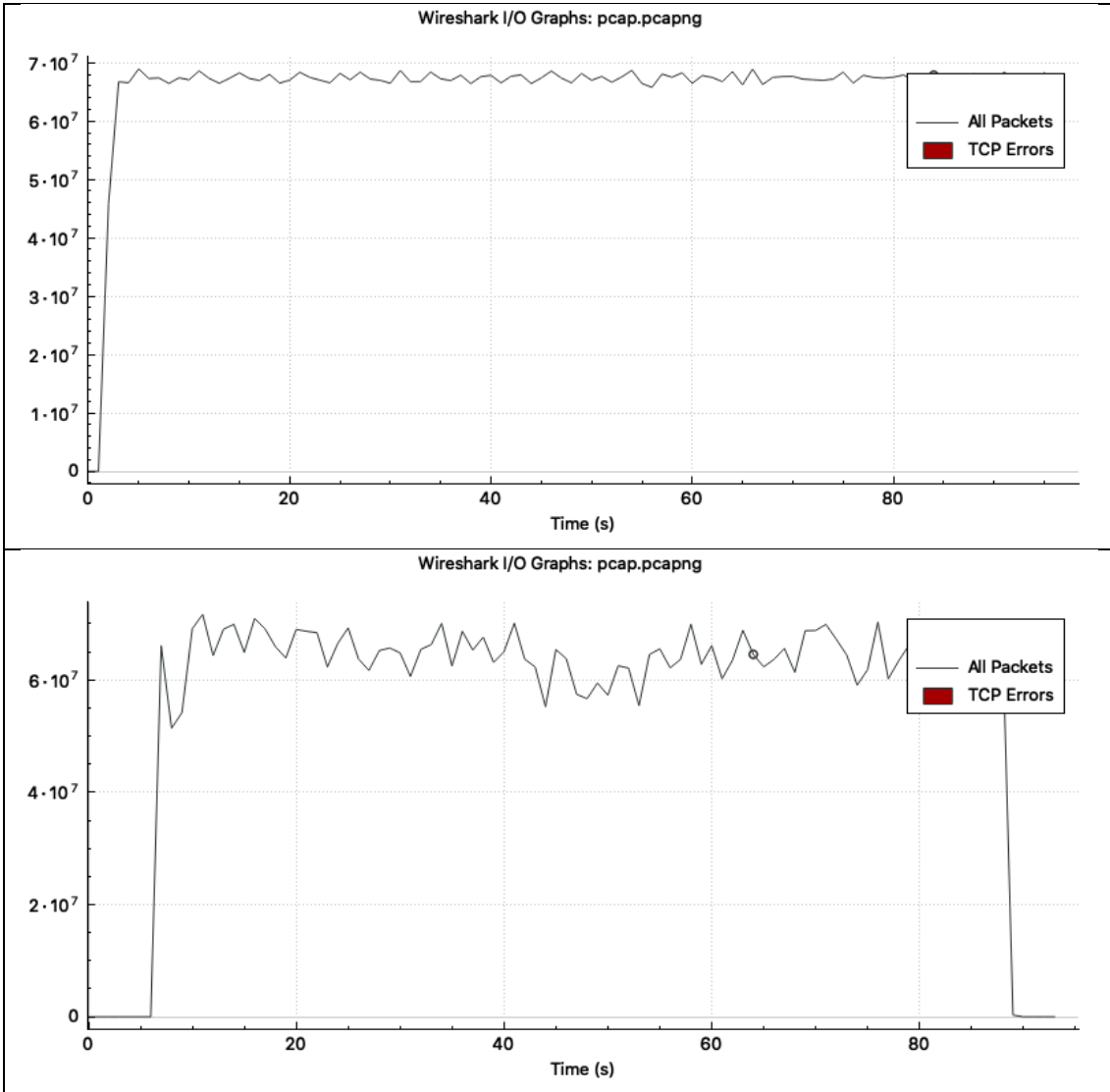


図 4.6-23 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷あり，静止，ケース 24



図 4.6-24 QR コード映像の様子：負荷なし，動き，4K-15Mbps

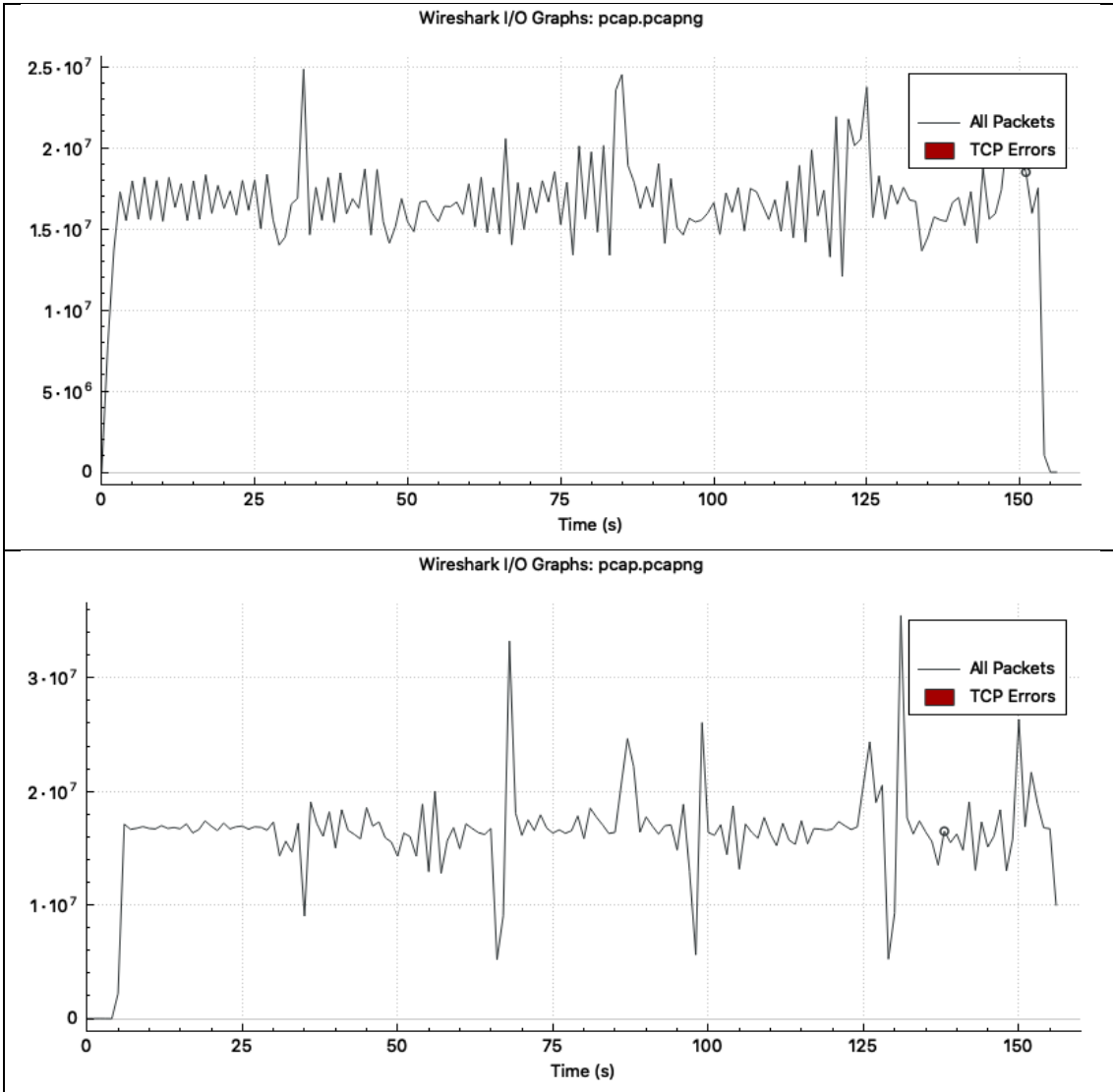


図 4.6-25 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷なし，動き，4K-15Mbps



図 4.6-26 QR コード映像の様子：負荷なし，動き，4K-30Mbps

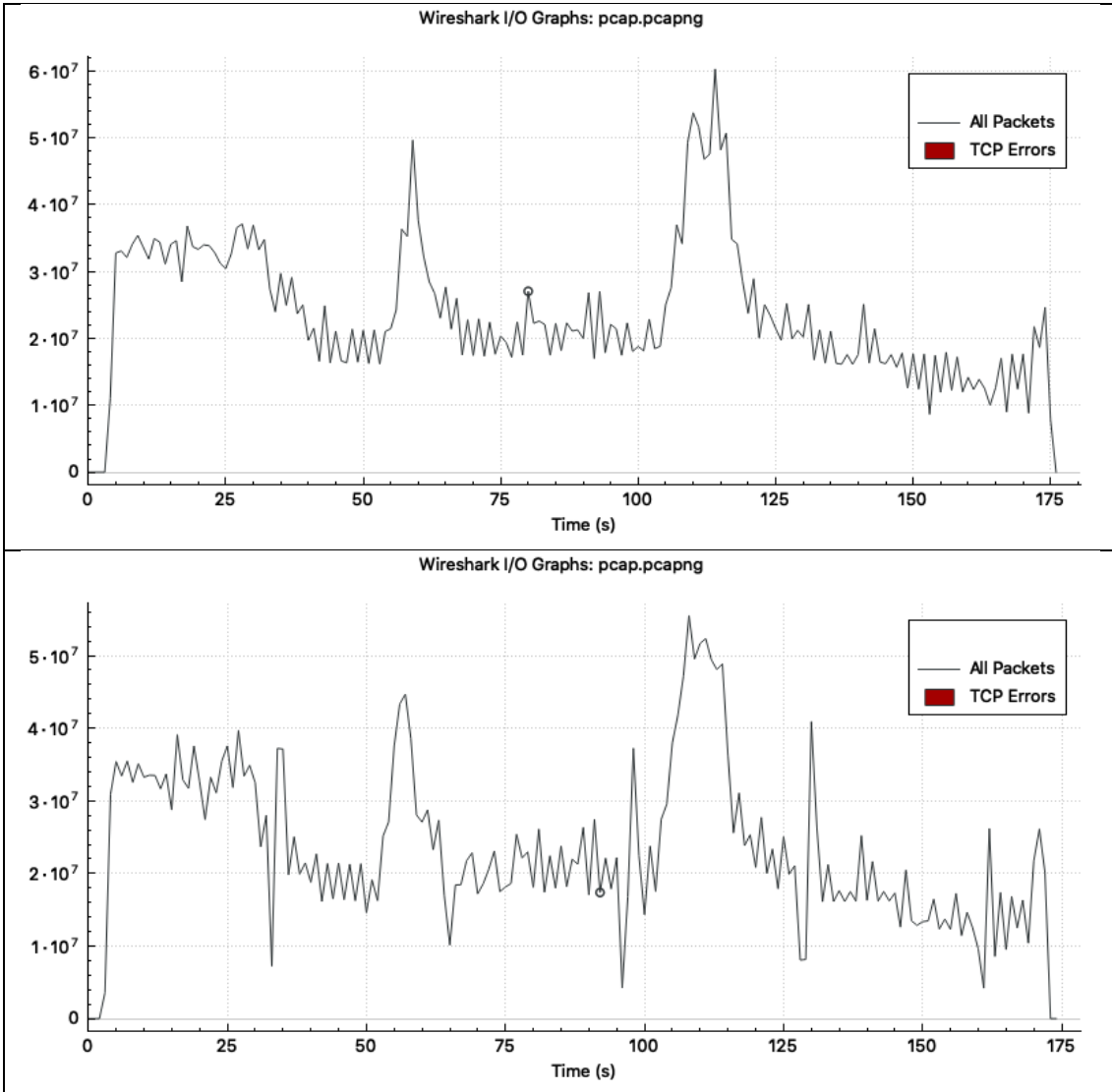


図 4.6-27 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷なし，動き，4K-30Mbps

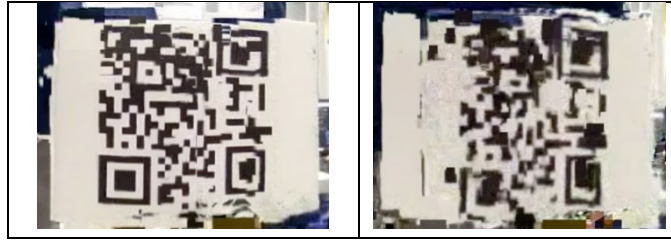


図 4.6-28 QRコード映像の様子：負荷なし，動き，4K-60Mbps

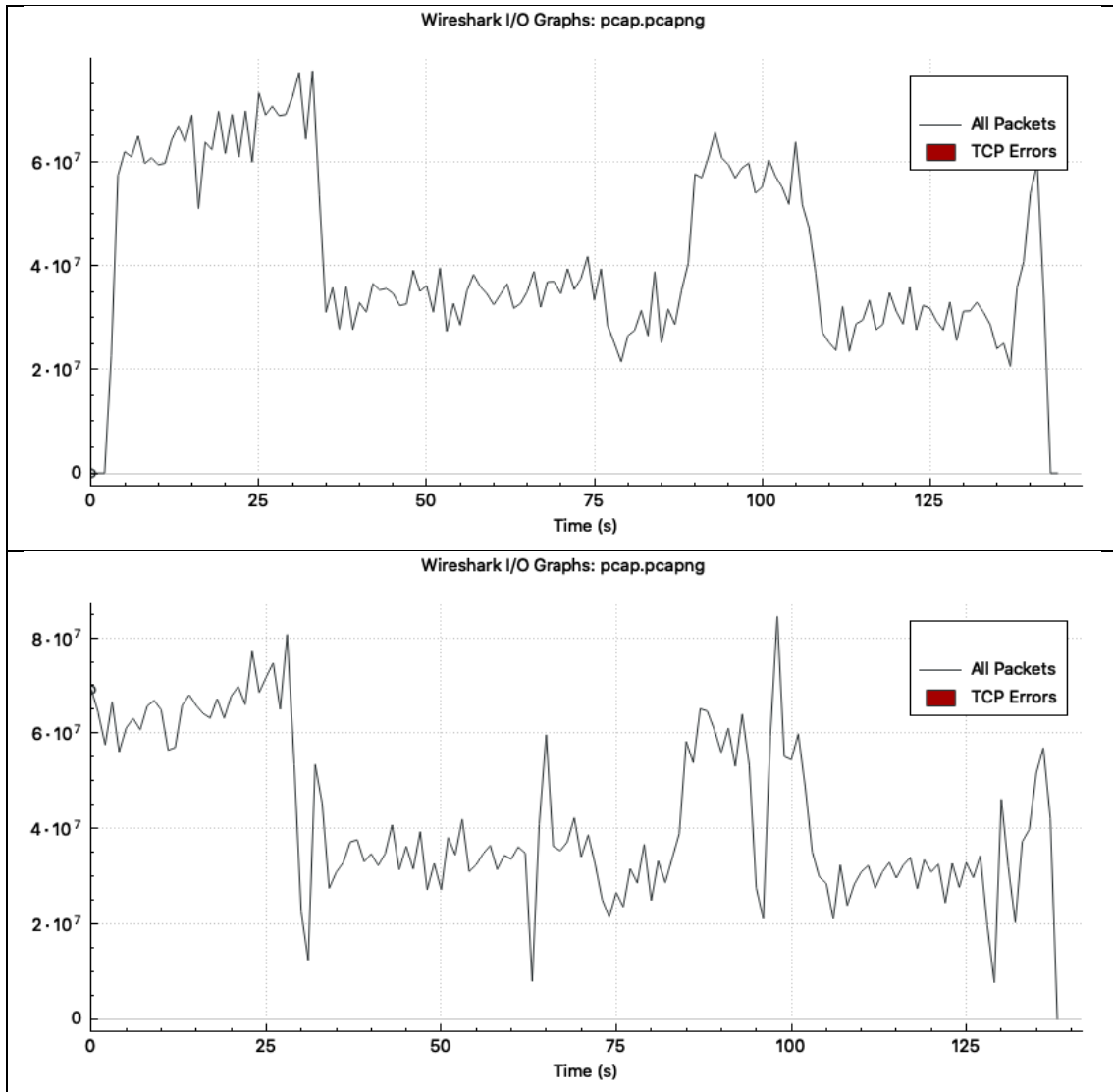


図 4.6-29 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷なし，動き，4K-60Mbps



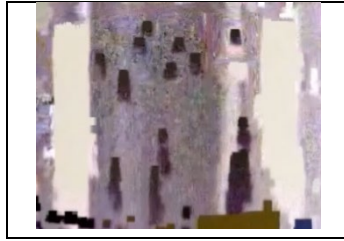


図 4.6-30 QR コード映像の様子：負荷なし，静止，4K-100Mbps

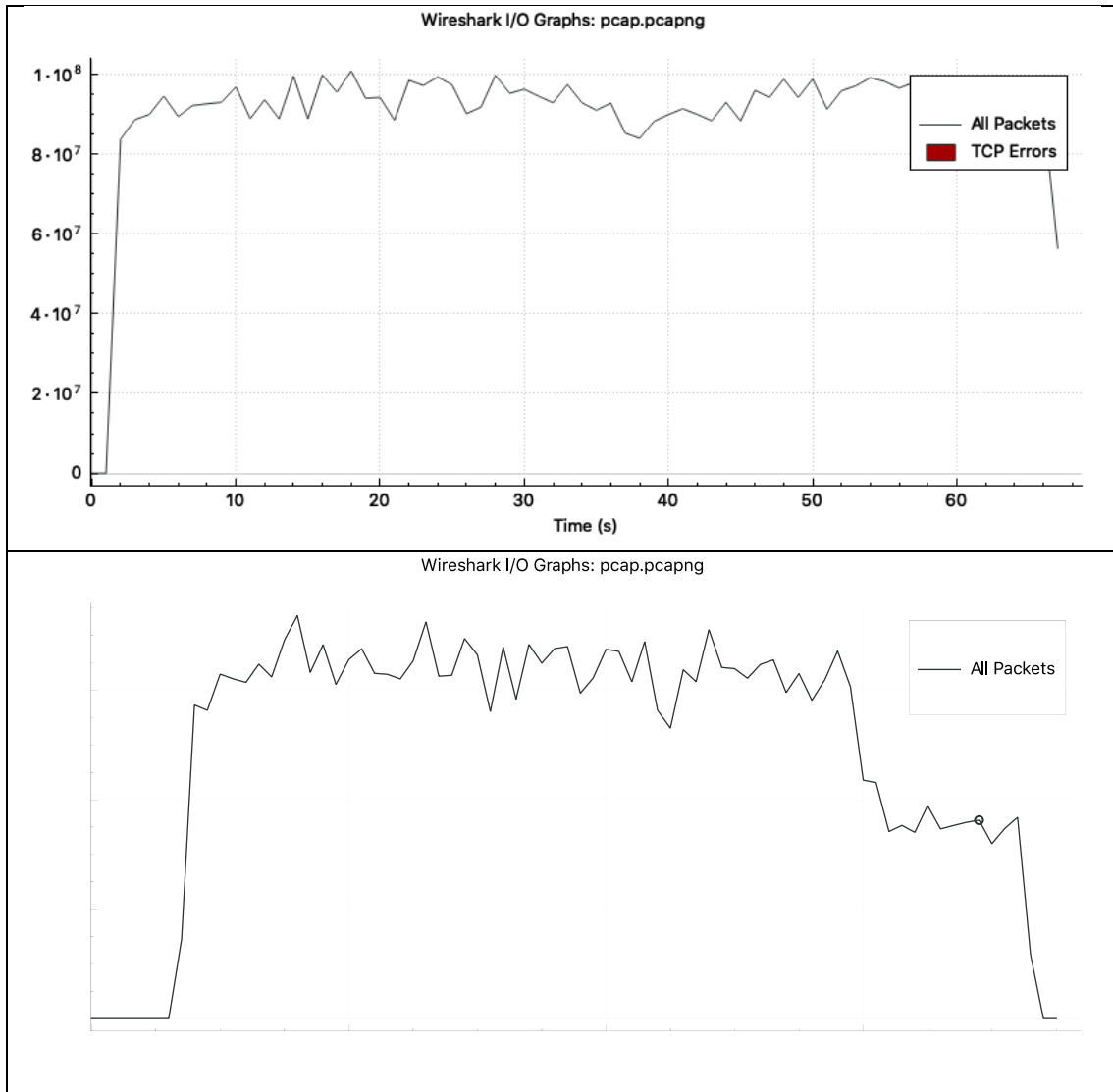


図 4.6-31 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷なし，静止，4K-100Mbps

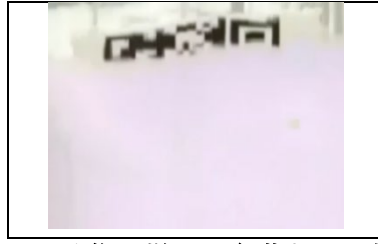


図 4.6-32 QR コード映像の様子：負荷あり，静止，4K-100Mbps

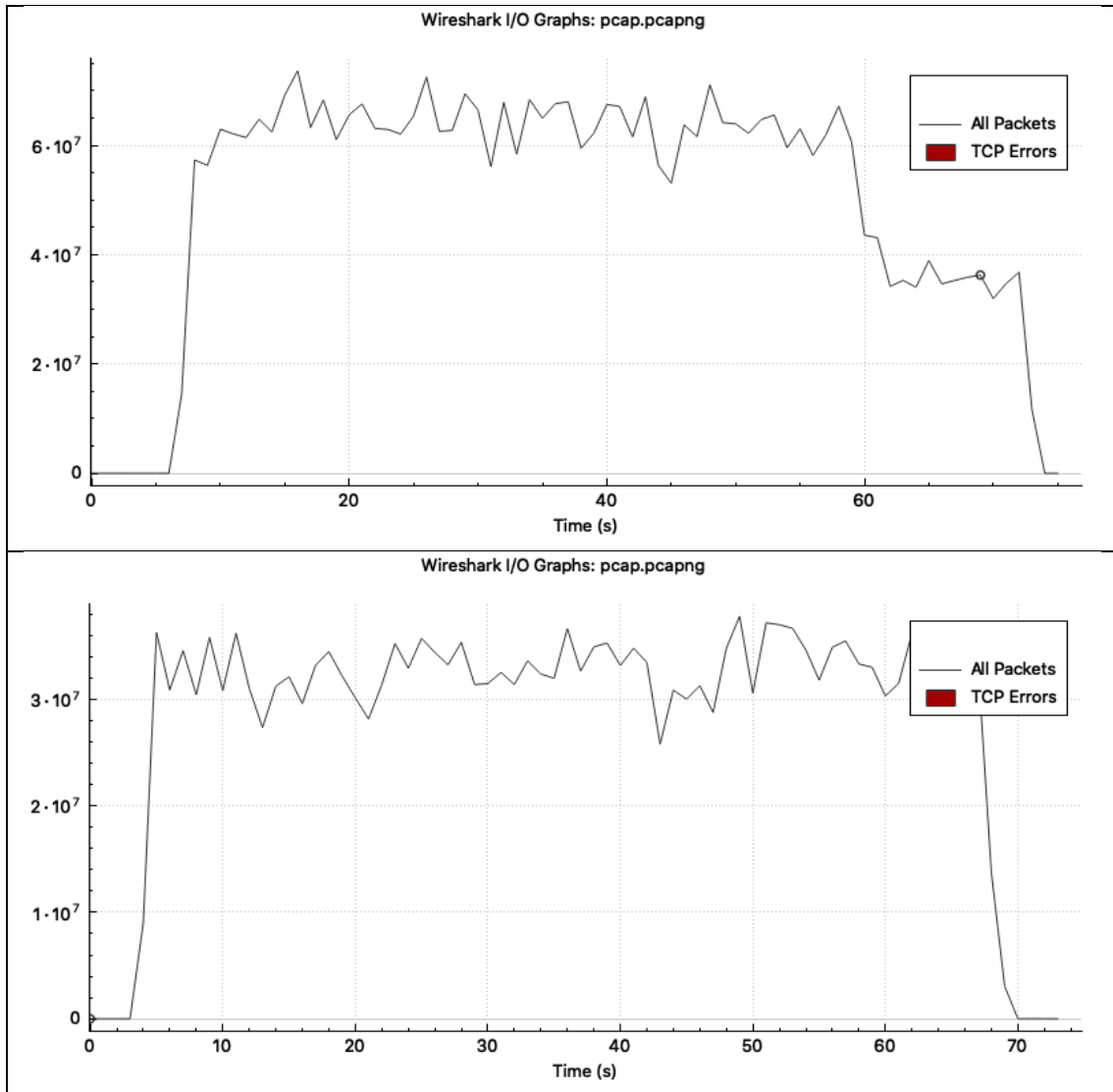


図 4.6-33 送受信パケット(上送信，下受信)の様子：負荷あり，静止，4K-100Mbps

また参考までに、認識率が高かったケースにおける通信量の様子を図 4.6-34 から図 4.6-39 示す。映像の様子は正しく QR コードが表示されている状態であるため割愛する。

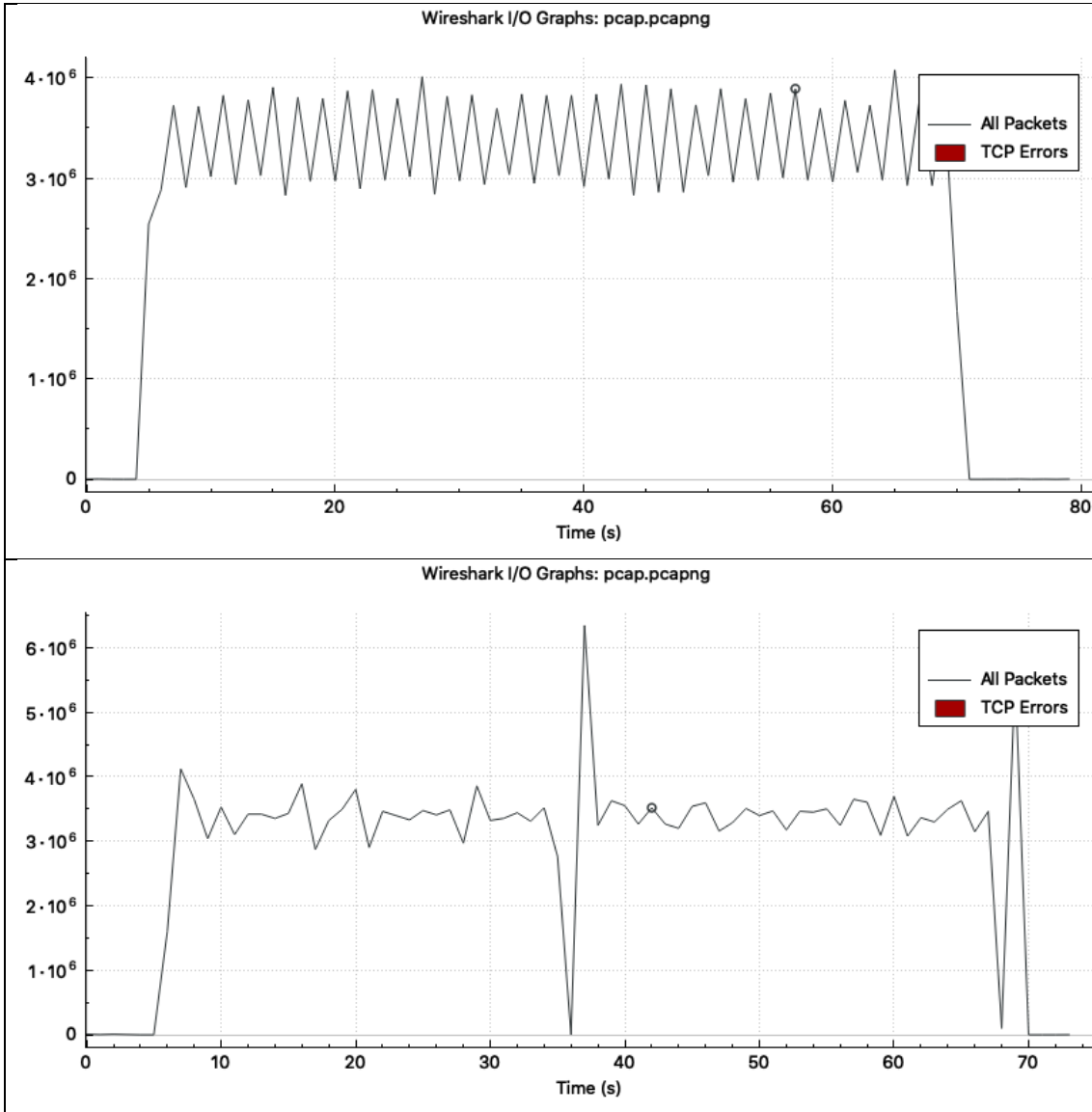


図 4.6-34 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子: 負荷なし, 静止, 720p-3Mbps

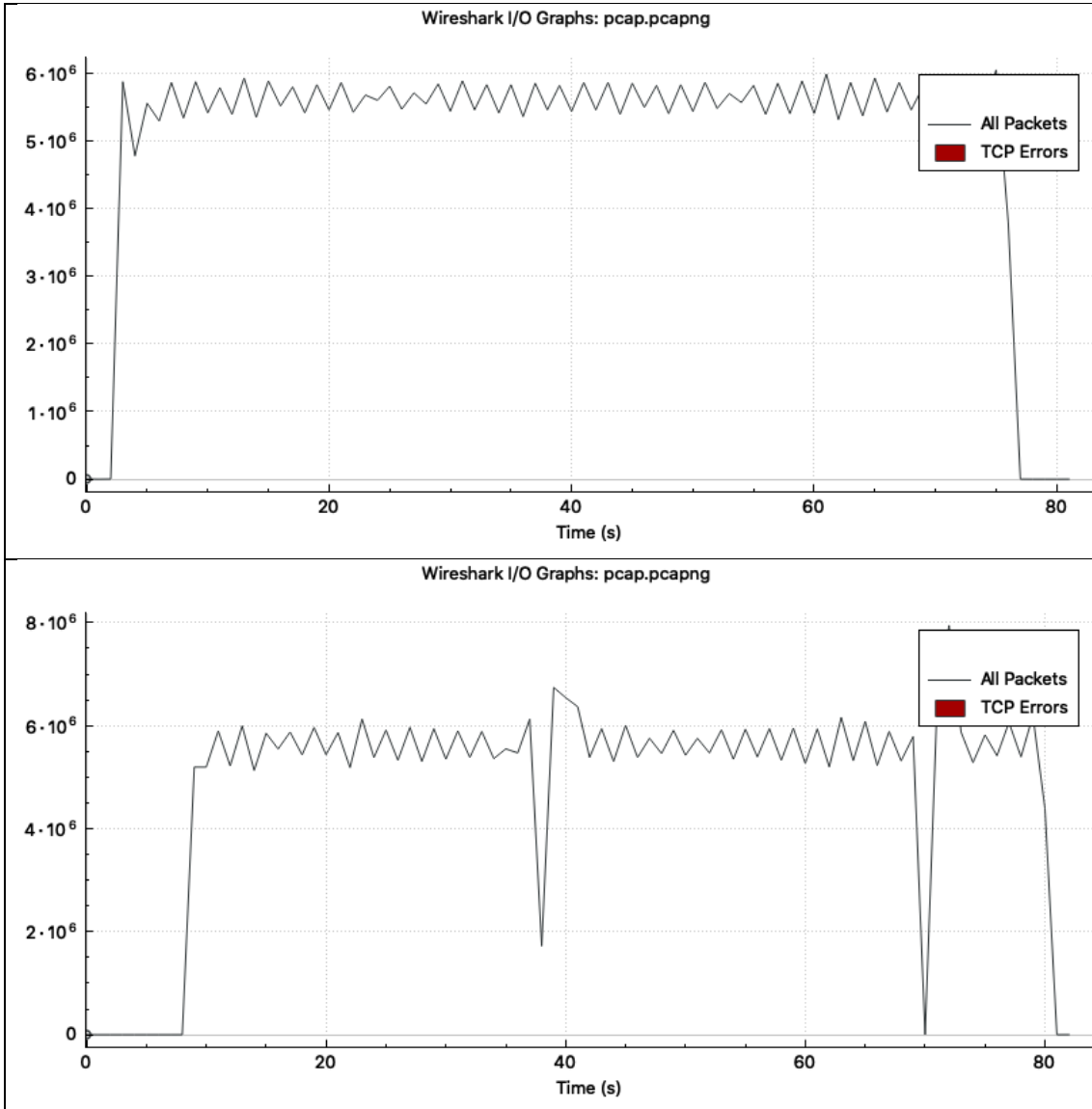


図 4.6-35 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子: 負荷なし, 静止, 1080p-5Mbps

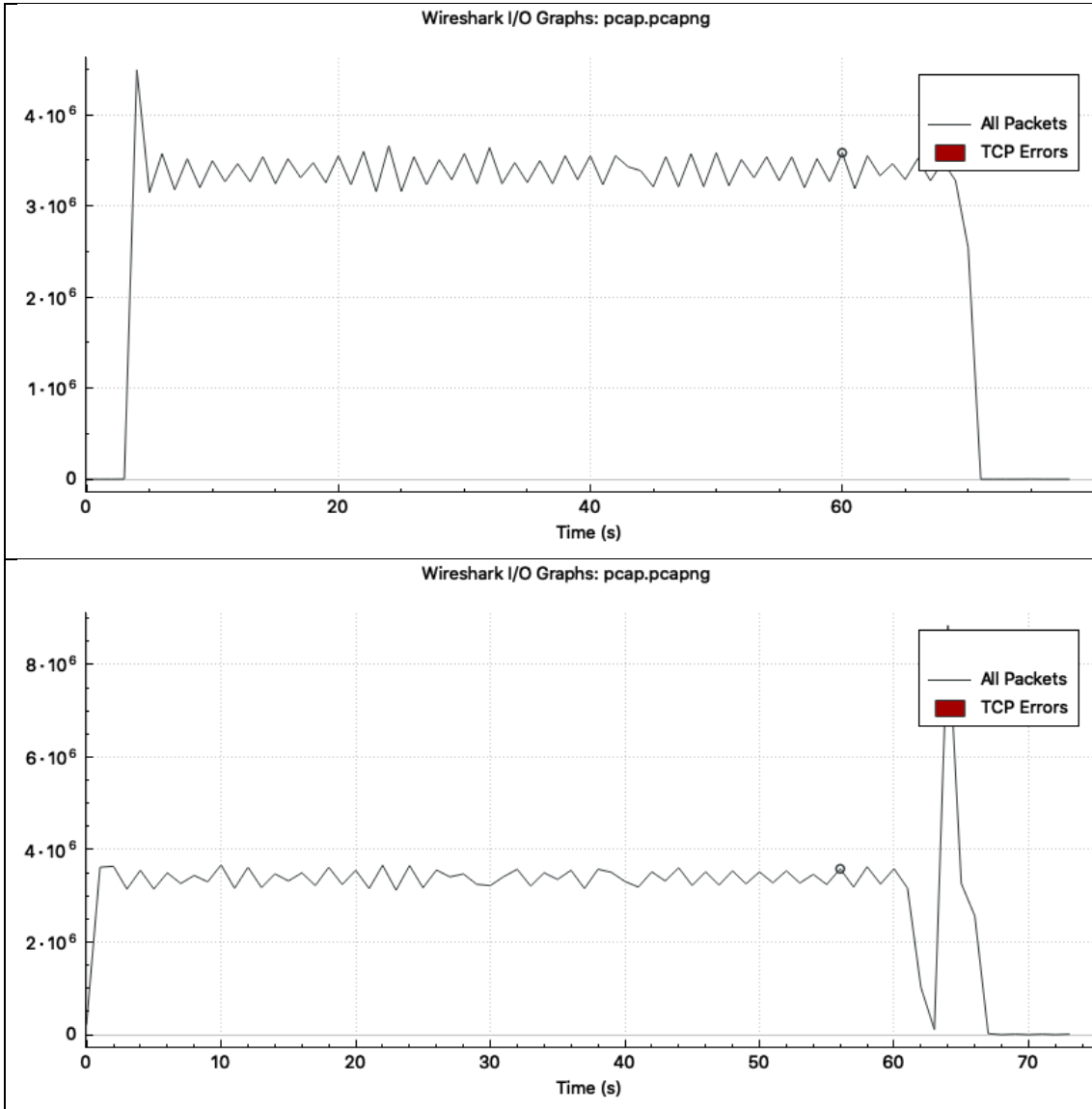


図 4.6-36 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子: 負荷あり, 静止, 720p-3Mbps

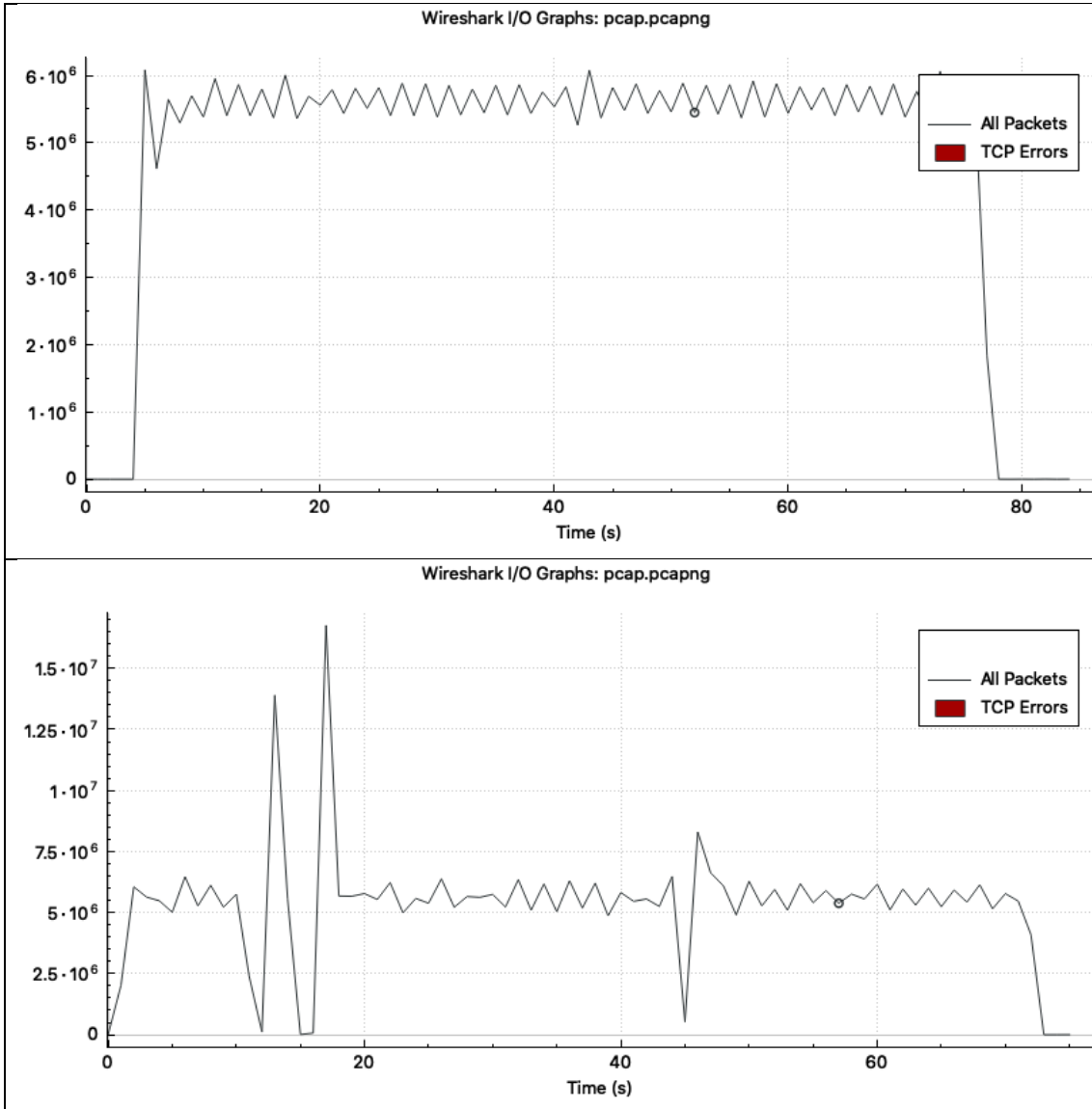


図 4.6-37 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子: 負荷なし, 静止, 1080p-5Mbps

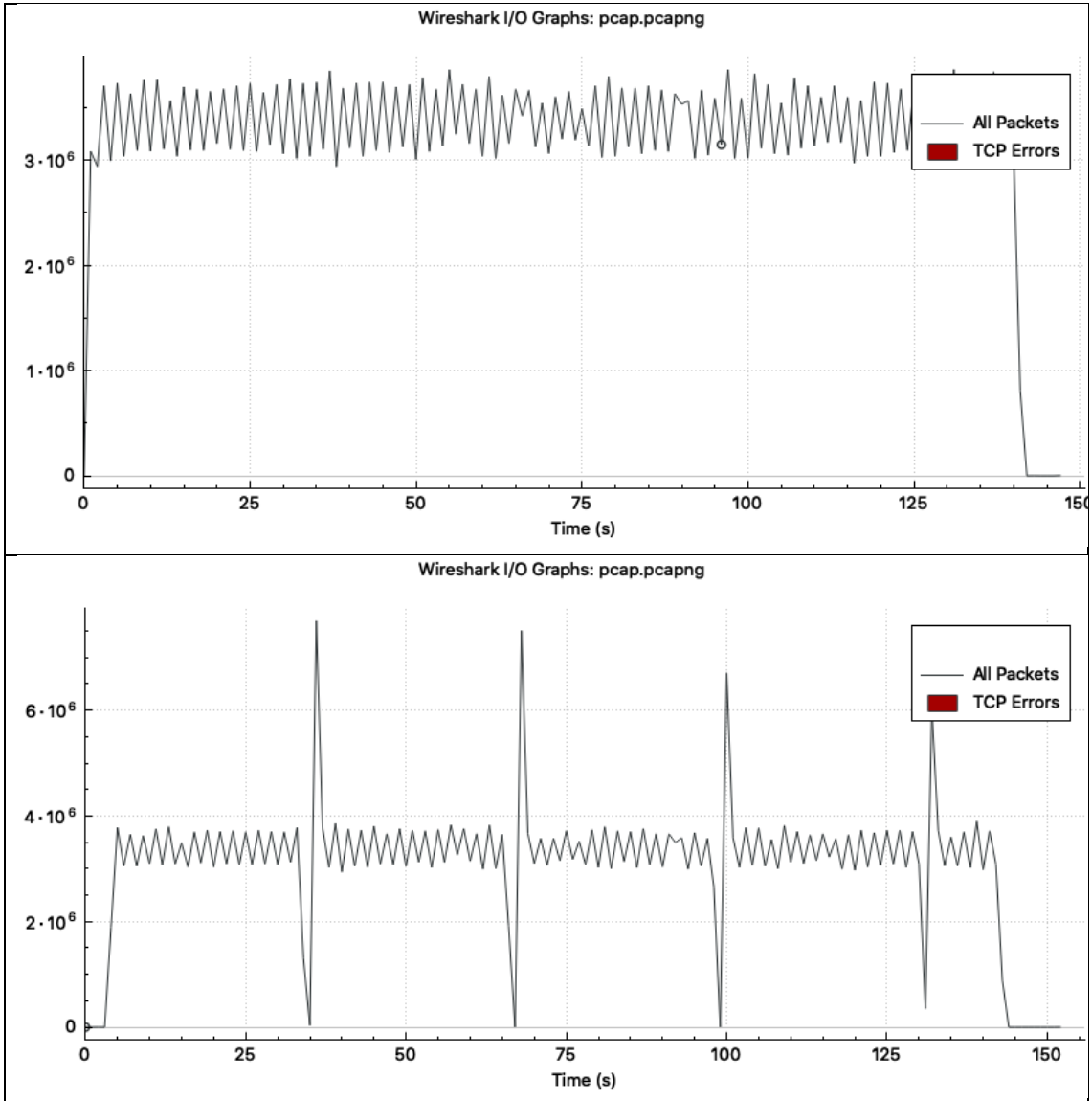


図 4.6-38 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子: 負荷なし, 動き, 720p-3Mbps

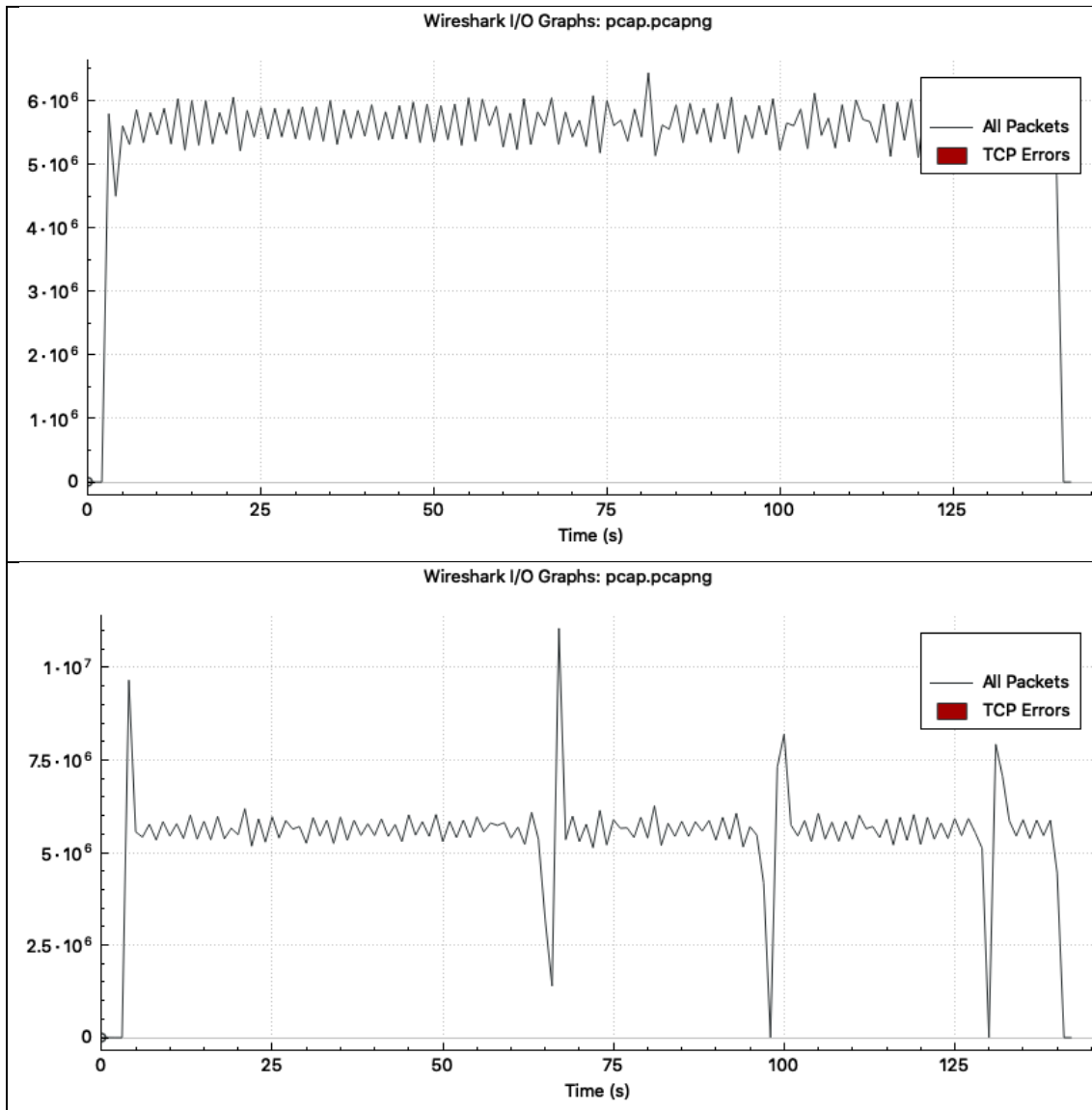


図 4.6-39 送受信パケット(上送信, 下受信)の様子 : 負荷なし, 動き, 1080p-5Mbps

受信量が一時的に低下しているタイミングが確認できるが、認識率の大きな低下は見られないため、ドロップしても問題のないタイミングかもしくは数フレーム分の瞬間的なノイズ発生であると考えられる。実際、それほど通信負荷が高くないケース(低解像度, 低ビットレート)であっても、瞬間的なノイズは見られた。そのようなケースの一部は送信側の映像にノイズが発生したケースもあり、カメラやカメラから PC へ映像を送る際のデータ欠損の可能性もある。いずれにしてもそのようなケースはごく稀であった。

また、認識率が高いケースでは、送信側、受信側ともに定常的に安定したスループットが得られており、認識率が低いケースで見られたような大きなばらつきや送信量と受信量の乖離は見られない。

振動計測部における、データのアップロードに要した時間および、得られた実効伝送レートを以下に示す。

ZNST3520 は、全体で 215 回、TTIO-TG2 は 305 回のアップロードを行っている。1 回あたりにアップロードされるデータのサイズは、ZNST3520 は約 6.6Mbytes、TTIO-TG2 は



約 1.6MBytes になる。

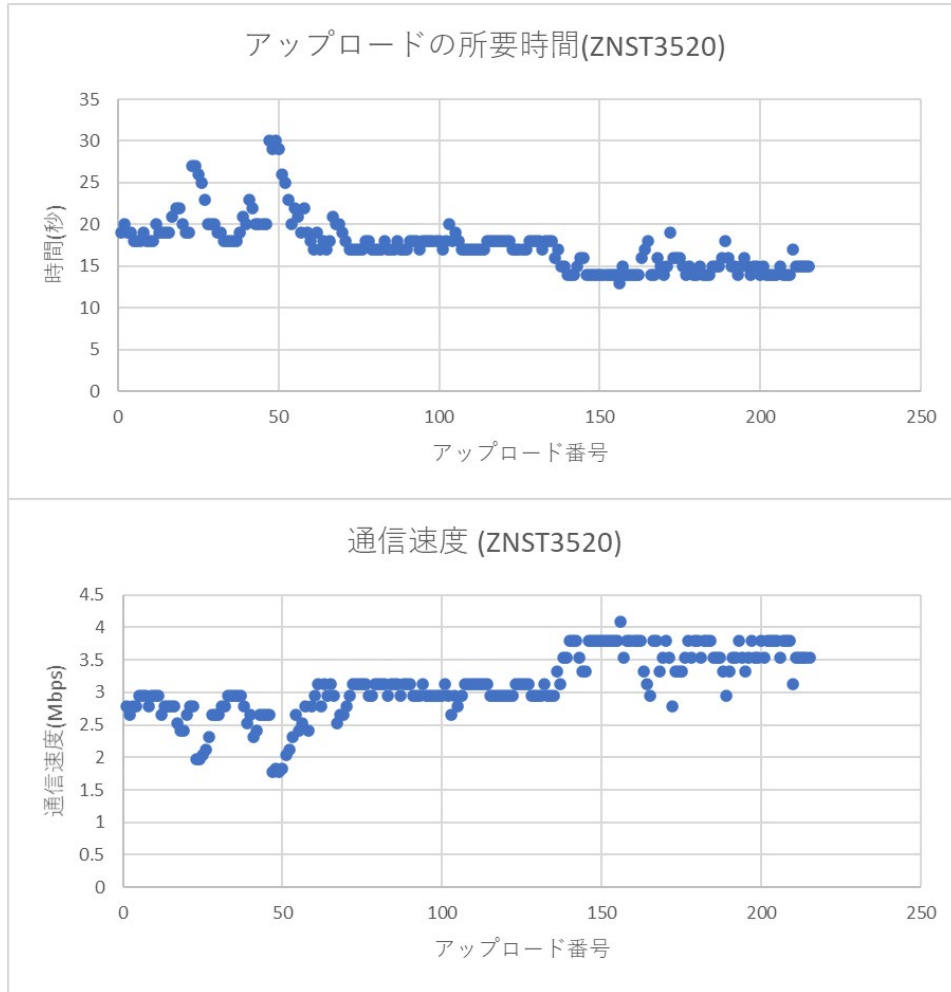


図 4.6-40 ZNST3520 でのアップロード時間と通信速度

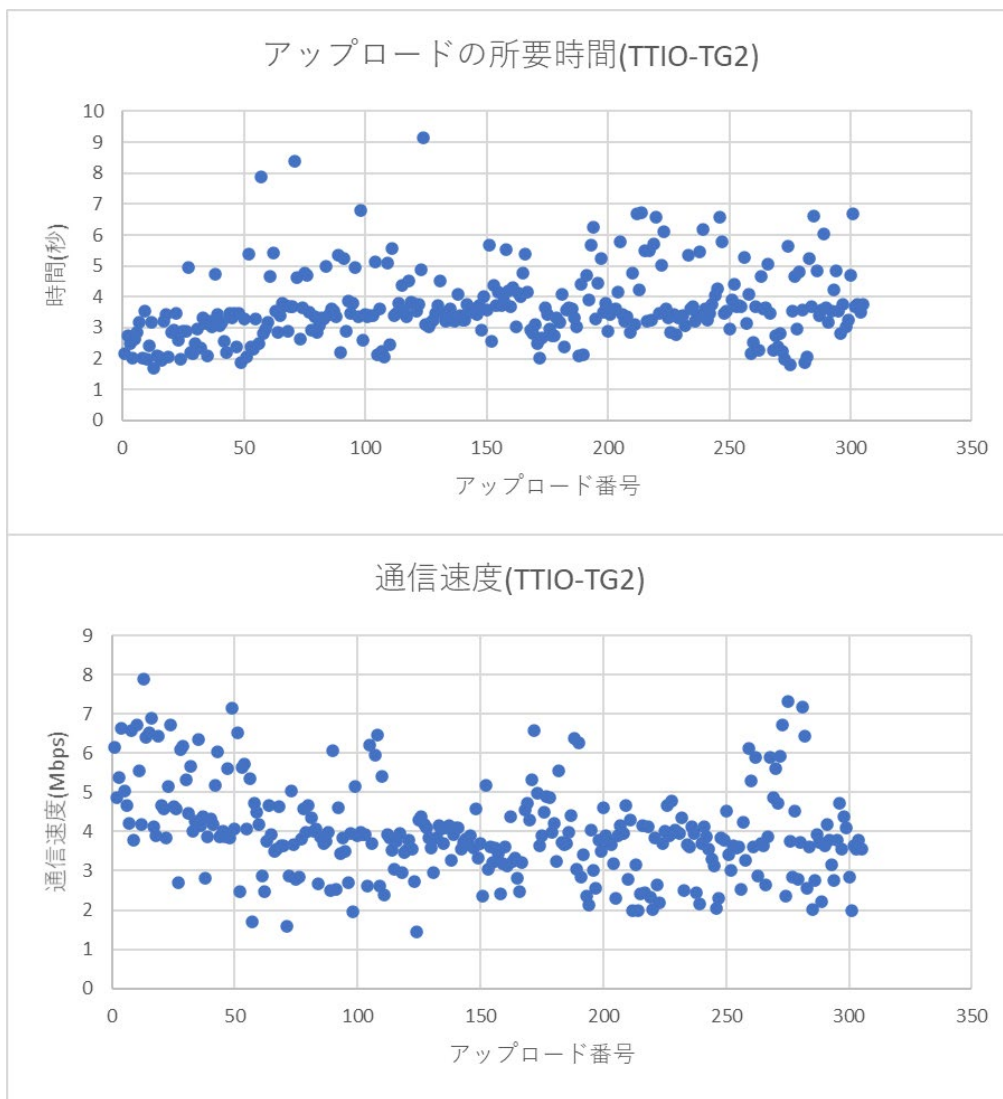


図 4.6-41 TTIO-TG2 でのアップロード時間と通信速度

表 4.6-7 振動データ送信における通信速度(Mbps)

構成	最小	平均	最大	標準偏差
ZNST3520	1.8	3.1	4.1	0.47
TTIO-TG2	2.2	4.8	10.3	1.6

図 4.6-42、図 4.6-43、図 4.6-44 に実験期間中に得られた振動データに対する出力結果を示す。順に、振動データ、周波数解析後の周波数スペクトル、異常検知 AI により算出される異常度グラフとなる。

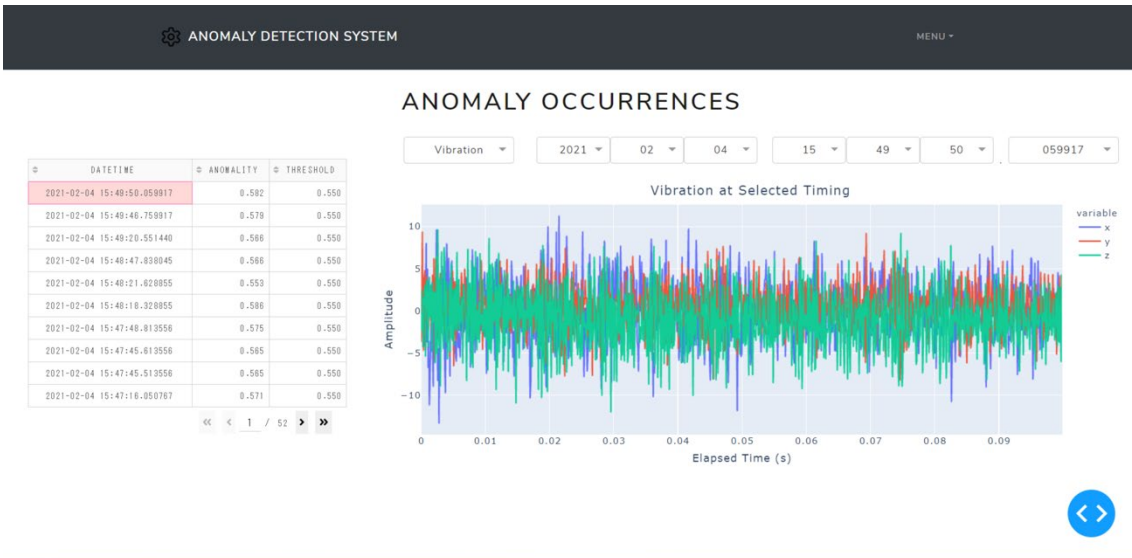


図 4.6-42 遠隔保守員向け Web アプリ：振動データ可視化結果

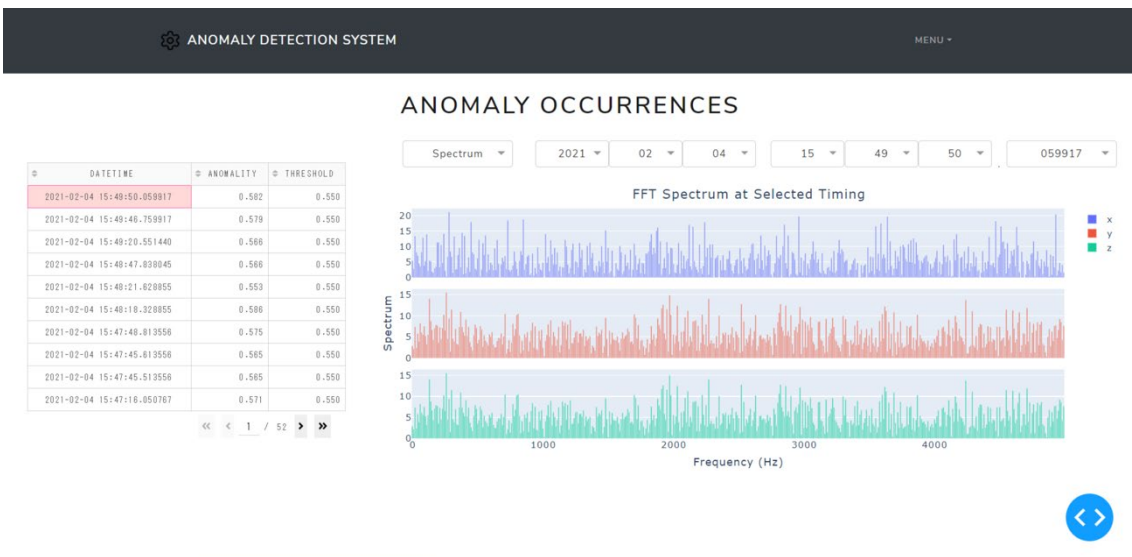


図 4.6-43 遠隔保守員向け Web アプリ：周波数解析結果

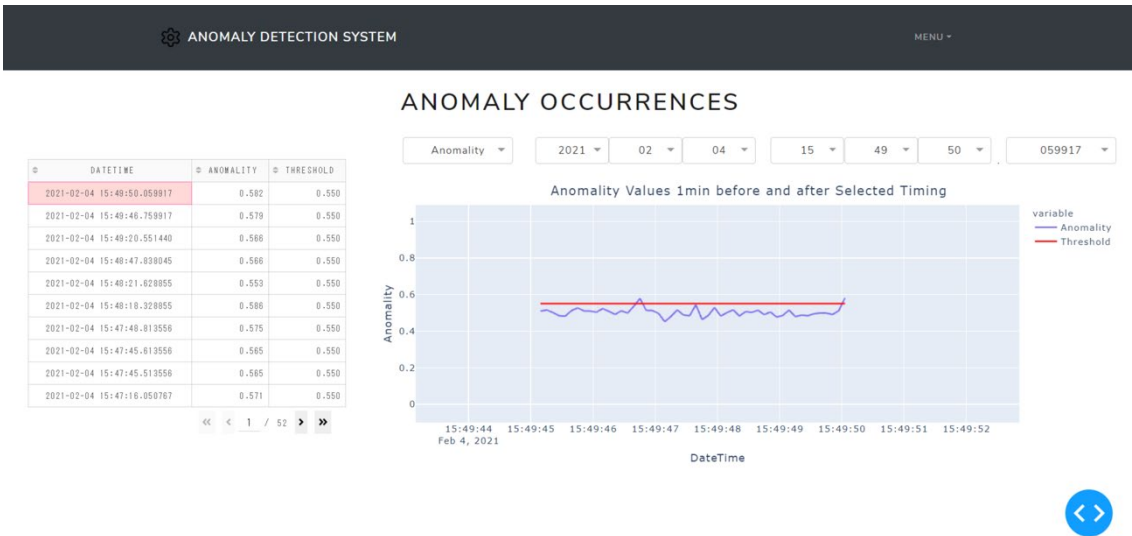


図 4.6-44 遠隔保守員向け Web アプリ：異常検知結果(異常度グラフ)

#### 4.6.3.3 ア-3 考察

遠隔保守支援の機能検証結果について、以下で考察する。

結果全体としては、

表 4.6-4、表 4.6-5 および表 4.6-6 の通り、概ね以下の傾向にある：

- ① ～2K の解像度であれば、表 4.6-3 に記載の推奨ビットレート範囲において良好な映像品質が得られる
- ② 帯域負荷環境下では、高ビットレート(30Mbps、60Mbps)で品質低下が見られる
- ③ 映像に動きがある(=情報量が多い)場合、4K – 15Mbps においても品質低下が見られる
- ④ ビットレートを高い値(100Mbps)に設定した場合、送信側と受信側でパケット量が大幅に異なる

全体として、今回の検証ではアップリンク、ダウンリンクどちらに関しても、帯域不足になるような設定では映像配信を行っていない。特にダウンリンクは 1Gbps 相当の帯域幅を持つとされているものの、帯域負荷環境下および高ビットレート時に映像品質の劣化が見られた。

ヒアリングの結果から、制御盤の文字などのような小さな文字 / 物を鮮明に遠隔保守員へ伝えるためには、4K 映像は必須であると考えられるが、今回の構成では 4K 映像を品質担保しつつ運用するにはいくつか課題が挙げられる。

一つ目は、アプリケーション側での設定の課題である。今回の検証では複数パターンの解像度およびビットレートにて検証を行った。その結果、解像度とビットレートの組み合わせによって映像品質に差異が発生することが明らかとなっている。映像を利用した遠隔保守支援アプリケーションの構築にあたっては、要求される映像によって解像度とビットレートを適切に設定した上で開発・運用していく必要がある。

二つ目は、通信網における特性の把握である。本課題の詳細については他章に譲るが、本

検証では、ビットレートを高くした際に送信パケットの何割かが受信できていない(パケットロス)が発生している。また、概ね正しく送受信できている場合にも映像品質の劣化が見られたことから、パケットの順序の入れ替えなどが発生している可能性がある。実用にあたってはこれらの特性を解決もしくは考慮した上でアプリケーションの構築あるいは通信方法の選択を行う必要がある。

なお、補足的な実験として、WiFi6 対応の無線 LAN ルータを使用したクローズドな環境で映像配信を行い、送受信のスループットを評価する検証を行った。実験環境の構成は図 4.6-45 及び図 4.6-46 の通りである。なお、本検証に関しては映像解像度は 4K(3840x1920)で行った。

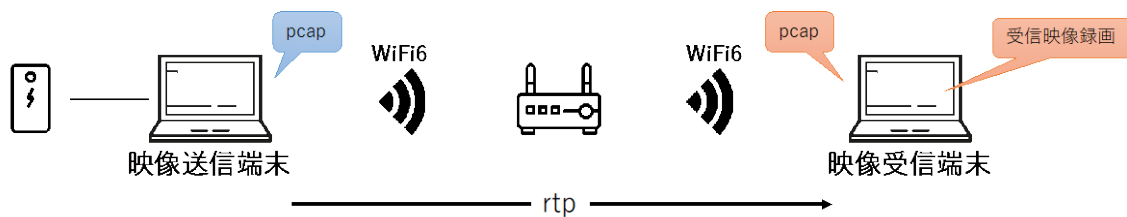


図 4.6-45 クローズドな無線 LAN 環境での実験構成



図 4.6-46 実験時の写真

結果を図 4.6-47 から図 4.6-52 に示す。

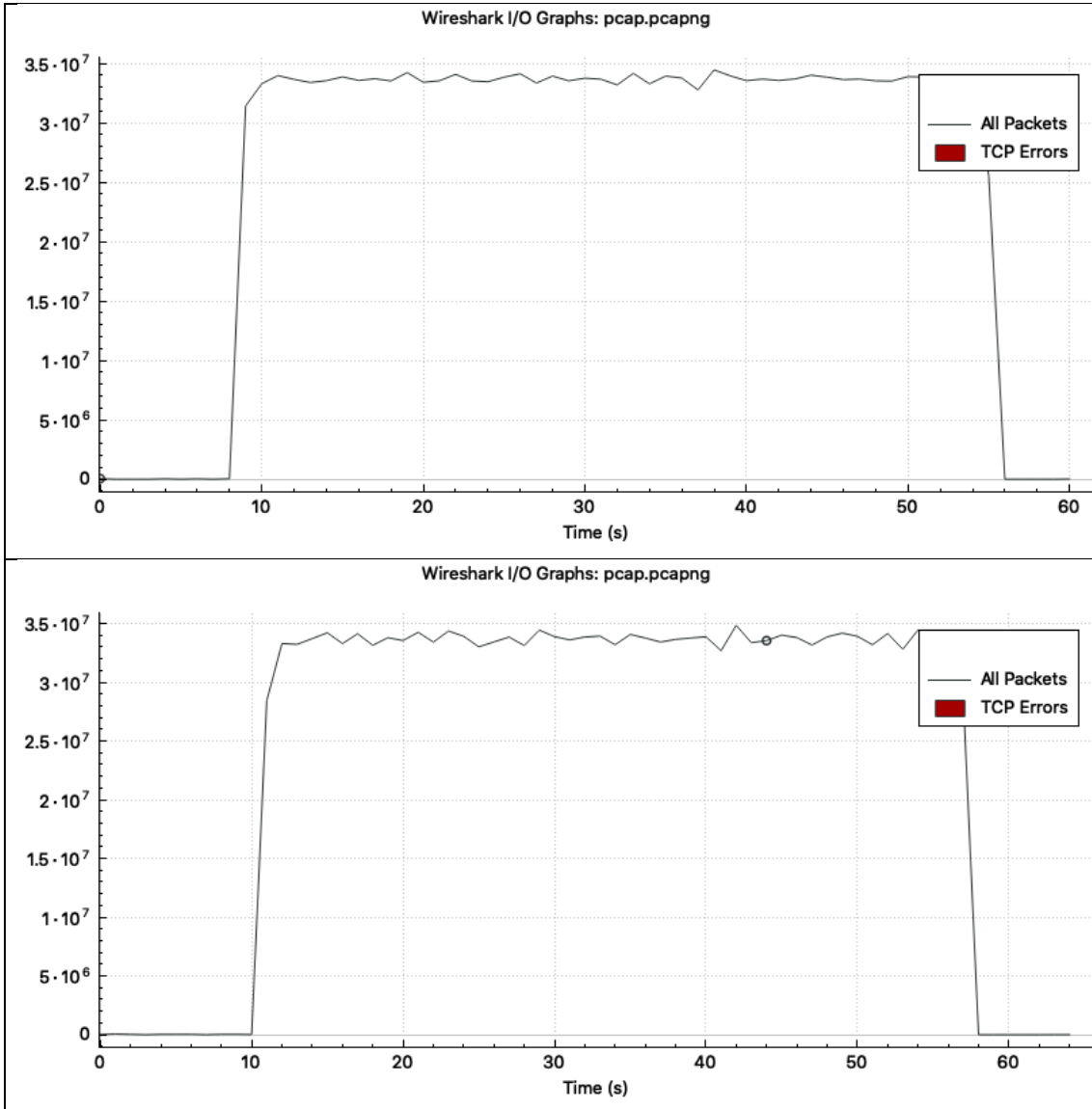


図 4.6-47 30Mbps – 動きなし

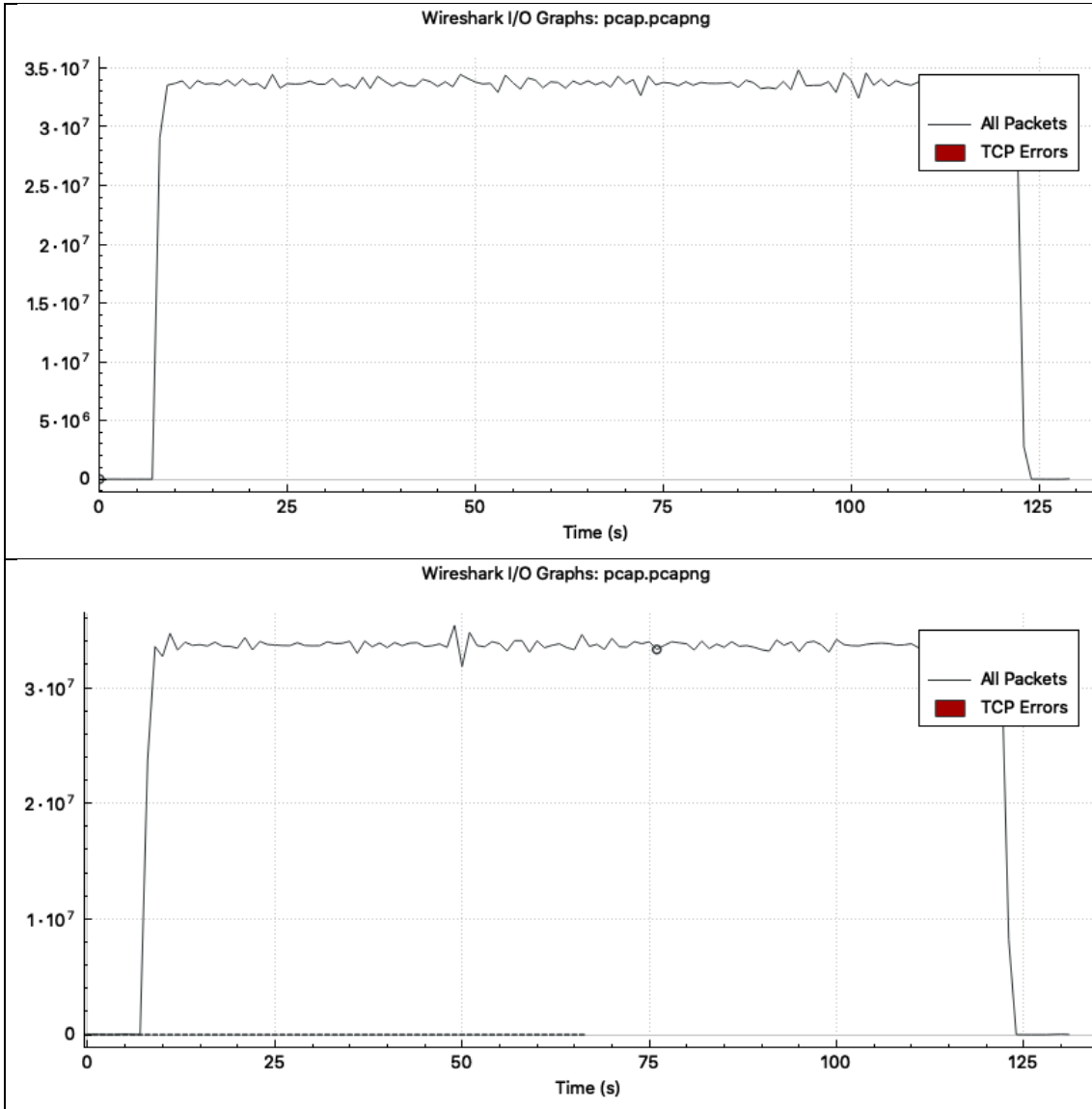


図 4.6-48 30Mbps – 動きあり

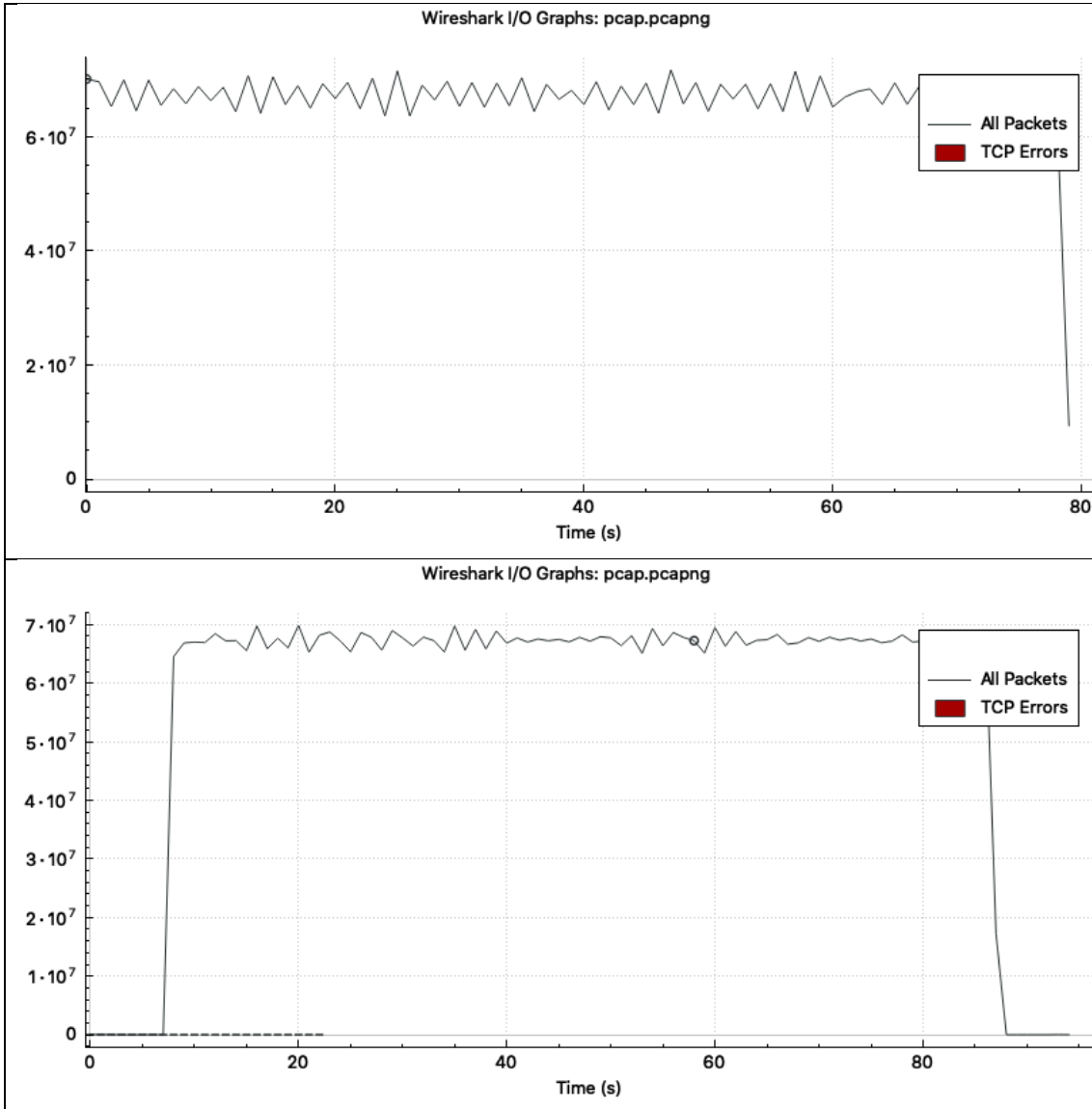


図 4.6-49 60Mbps – 動きなし



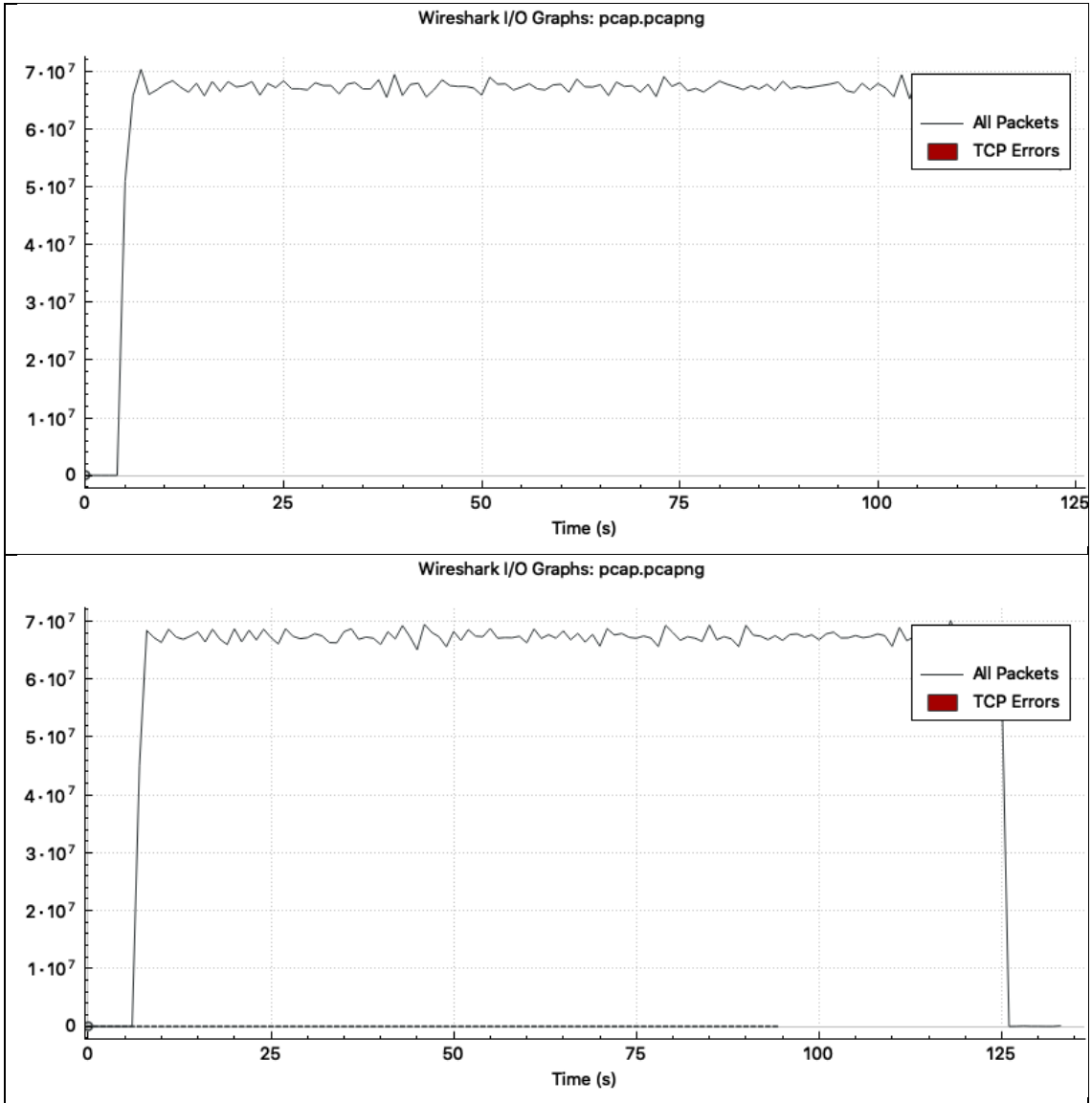


図 4.6-50 60Mbps – 動きあり

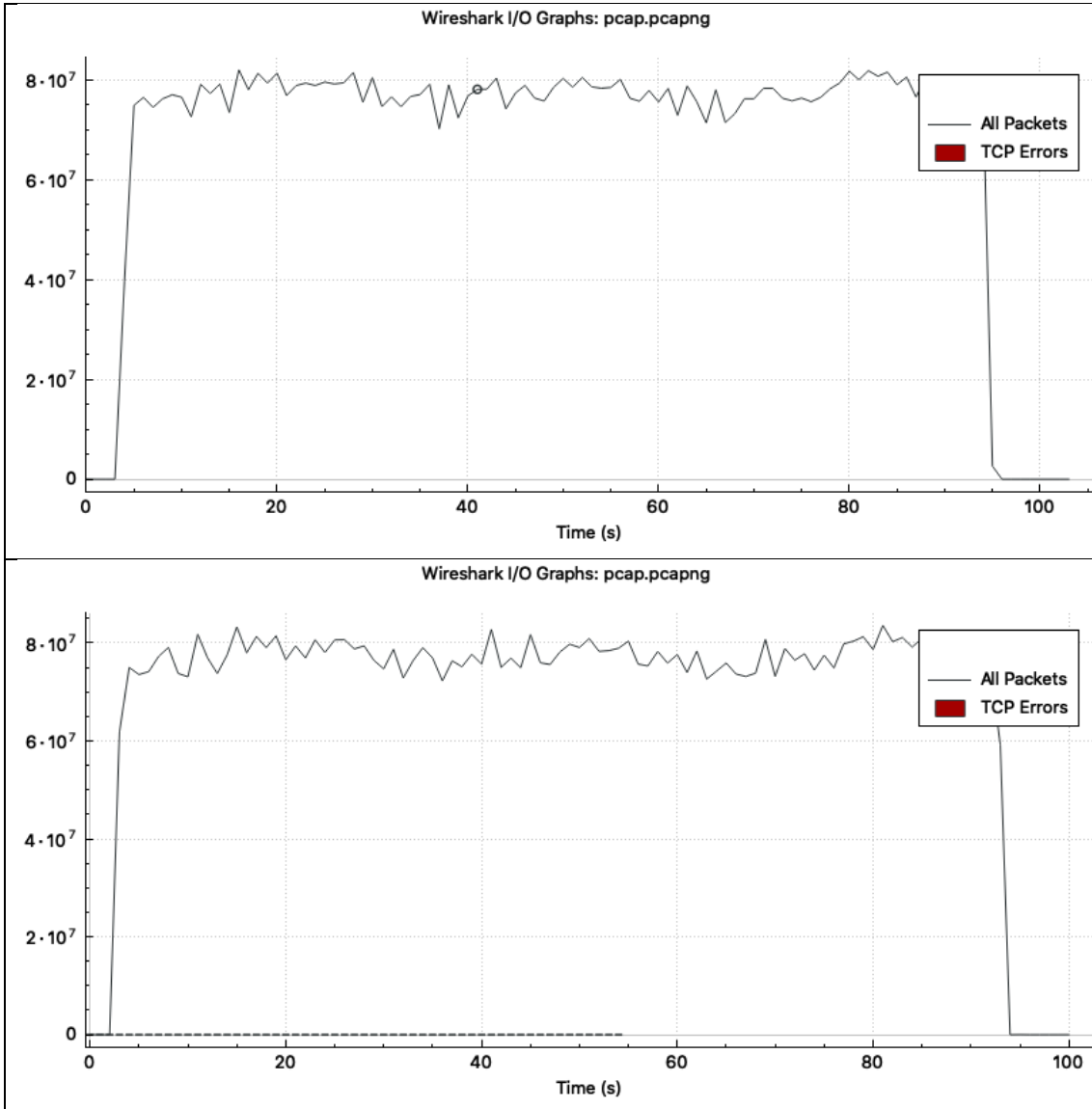


図 4.6-51 100Mbps – 動きなし

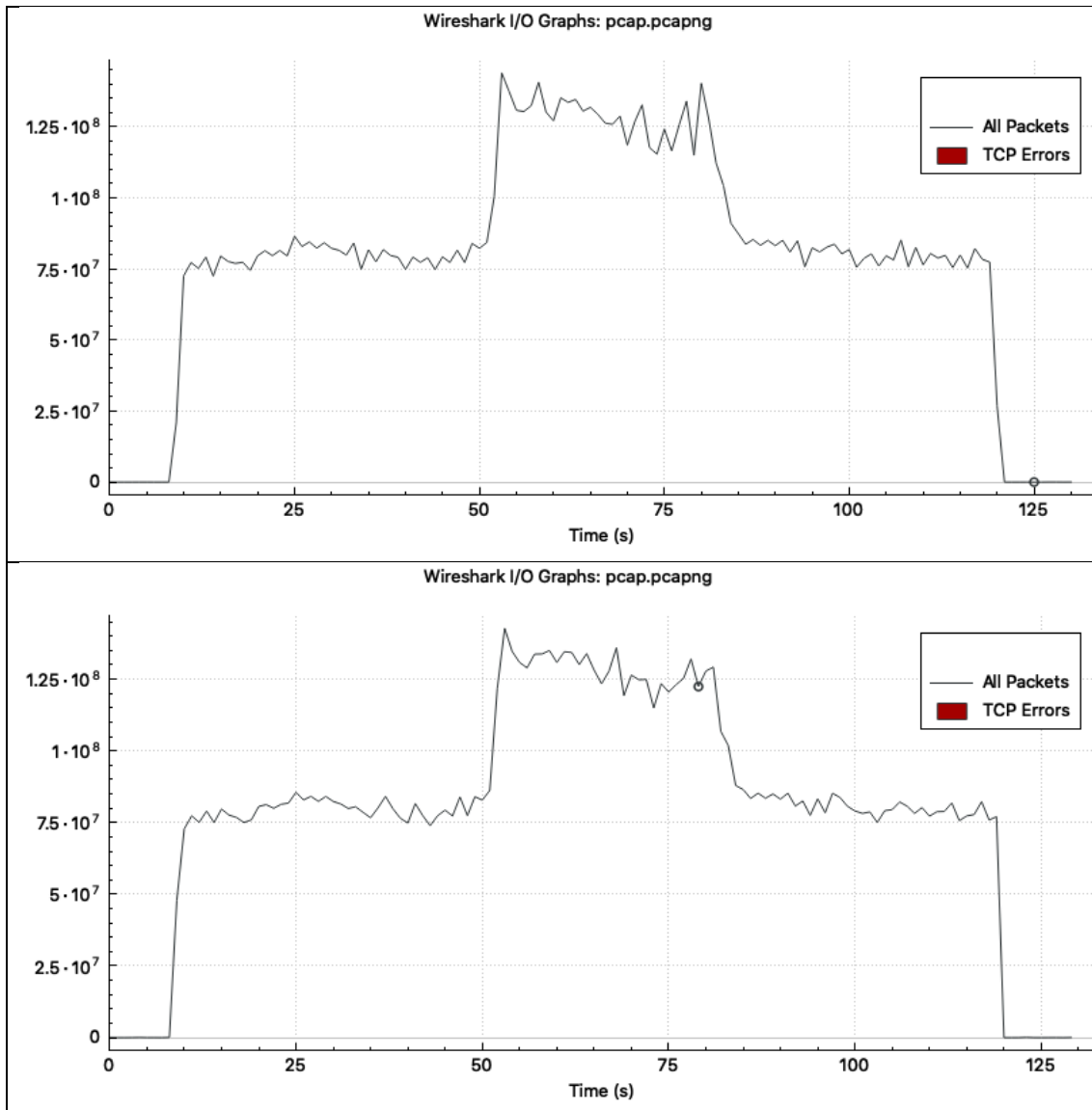


図 4.6-52 100Mbps – 動きあり

100Mbps のケースを除き、工場内での検証時よりも安定してデータの送受信ができることが確認できる。ただし、映像品質の観点では、工場内での検証時よりは良好となるものの、ノイズや停止が多くみられたためパケットロス(特にキーフレーム)が発生していると考えられる。また、100Mbps のケースでは 80Mbps 弱で安定しているため「動きのない」4K 映像は 80Mbps 程度の帯域確保が出来れば送信可能であることが確認できる。ただし、動きあり(グラフ中 50 – 80[s]の範囲)では情報量が多くなり 125Mbps の通信量となっている。動きありのこのような傾向は工場内実験時には見られなかった現象であるため、その要因及び対策に関しては今後検討する必要がある。

ZNST3250、TTIO-TG2 の両方の構成で、平均通信速度が 3~4Mbps と非常に低い値に留まった。パケットロスもしくは何らかのパケットの滞留が発生しており、TCP の再送によってスループットが低下していることが考えられる。特に、データが小さい TTIO-TG2 側で通信速度のバラツキが大きいことから、常にパケットロスが起きるわけではなく、比較的低い確率で起きているものと推察される。

データ出力のリアルタイム性を期待できる TTIO-TG2 の構成において、5 秒間の計測時間に対して通信に 5 秒以上かかってしまうことが度々発生しており、計測頻度を上げたい、もしくは、途切れなくデータを計測したいという要求がある場合には、この状況では伝送が間に合わないことになる。クラウド側が REST 型の API を使っている以上、通信は TCP に限られるため、データを分割し複数の TCP ストリームを用いるといった工夫が必要になる。

振動データを利用した AI による異常検知に関して、今回はシステム構成要素の検証のためにリアルタイムに取得される振動センサの抽出及び異常検知処理の実行・結果の可視化を行った(図 4.6-42、図 4.6-43、図 4.6-44)。実験期間中に取得された振動データに関して、DB に格納された振動データの抽出・前処理を行い、学習済みモデルによる判定処理を行った上で、Web アプリ上で結果を閲覧できることを確認した。モデルの学習は実験期間中に取得されたデータの一部を使用した。

なお、今回は AI システムの作り込み(精度向上や処理の高速化)は実証範囲外であることや、対象設備への振動センサ設置及びデータ取得が実験期間中のみであることなどから、通常 AI システムの検証で行われる異常データを用いた精度評価や判定時の処理速度検証は行っていない。機能検証としての AI 活用に関しては、今後本実証と同様の構成により学習・評価用データ取得を行い精度担保のためのチューニング(PoC)などを行った上で、模擬異常を発生させるユースケースを通して異常発生・異常検知・現地作業員及び遠隔保守員への通知などの検証を実施し、異常検知精度、処理速度、提供する情報に関して定性的・定量的な評価を行っていく必要がある。

## 4.7 課題解決システムに関する運用検証

### 4.7.1 ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化

#### 4.7.1.1 ア-1 検証方法

ア-1 で検証した課題解決システムにおいて、5G 設定方法の検証を行う。具体的には、制御ネットワークに求められるサイクリック通信の運用にあたり、多種の 5G システムのパラメータ設定の中から、制御ネットワークの特性にあった設定を抽出し検証する。

4.4.1 節に記載の実証システムを用い、「制御系ネットワークの無線化」システムを運用する上で課題等を検証する。検証項目は以下の通りである。

##### 1. 制御系ネットワーク向け 5G の制御パラメータ

5G では、制御系ネットワークで必要とされる低遅延性能を達成するための種々の仕様が導入されている。制御系ネットワーク向けに 5G を適切に運用可能とするため、低遅延性能に関わる制御パラメータと遅延の関係を明らかとし、適切な運用方法について明確化する。

##### 2. 制御系ネットワークでの運用上の課題

干渉回避のために導入されている TDD の同期運用など、制御系ネットワークの無線化に関わる将来的な運用上の課題について明確化する。

制御ネットワークの通信は特に低遅延特性が重要となることから、5G システムのパラメータの内、低遅延特性に特に関わるパラメータを選択し、それらの影響について検証する。

低遅延特性に関わるパラメータとして、TTI (Transmission Time Interval)、TDD (Time Division Duplex)等におけるリソース割り当て、再送、MCS (Modulation and Coding Scheme)、QoS、冗長化が挙げられる。以下、これらについて概略を述べた後、検証方法について説明する。

#### ・TTI (Transmission Time Interval)

TTI は無線リソースの割り当て単位で Slot 長となる。LTE において、Slot 長は 1ms となっていたが、5G では Slot 長を柔軟に変更できるようになっている。Slot 長は Numerology (サブキャリア幅とシンボル長)に応じて決定され、表 4.7-1 に示すように、サブキャリア幅が 15 kHz であれば 1 ms、60 kHz であれば 0.25 ms となる。現状のローカル 5G においては、後述する TDD におけるアップリンク(UL)・ダウンリンク(DL)のスロット割り当ての影響が大きいことから、Numerology はさほど低遅延を達成する上での影響度は小さい。しかしながら、将来的にモーション制御のようなミリ秒オーダーの低遅延性が要求される用途に適用する場合、Numerology は重要なパラメータとなる。

表 4.7-1 5G の Numerology 一覧

Numerology	サブキャリア幅 (kHz)	Slot 長 (ms)
0	15	1
1	30	0.5
2	60	0.25
3	120	0.125
4	240	0.0625

### ・リソース割り当て

現状のローカル 5G は TDD が採用されており、5G 基地局間や 5G 端末間の干渉を防止するため、同期運用と呼ばれる方式がとられている。同期運用では、図 4.7-1 のように、ダウンリンクとアップリンクの時間スロットを区切って、時間スロットを基地局間で同期することで干渉を防止している。アップリンクの時間スロットは 5 ms 毎に配置されるため、現状の運用ではアップリンクに関しては 5 ms 程度の遅延が発生することとなる。現在、この制限を緩める準同期運用の検討が行われており、準同期運用が導入されることで、1-2 ms 程度の RTT が実現可能であると言われている。

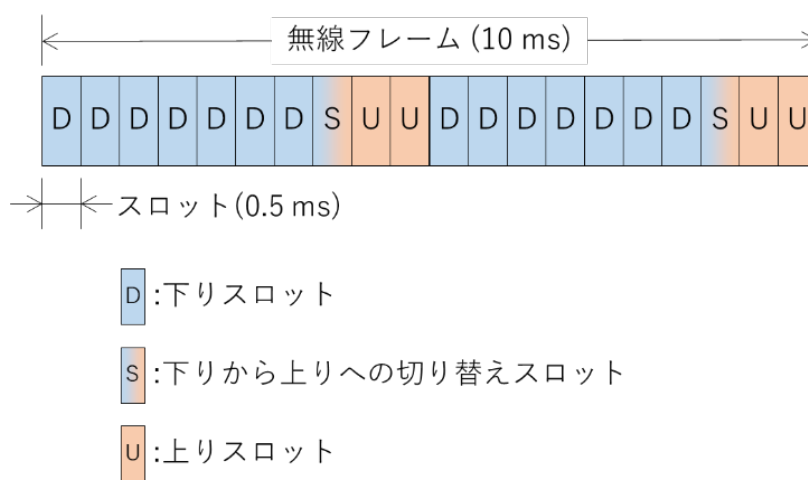


図 4.7-1 TDD の同期運用

アップリンクに関しては、基地局から UE に対してリソース割り当て (UL Grant) を実施した後、初めてデータを送信できるようになるため、UL Grant に要する時間も遅延性能に影響する。UL Grant に関しては動的に実施する方式と半固定的 (SPS: Semi Persistent Scheduling) に実施する方式がある。動的に実施する場合は、送信データを有する UE が基地局に対して BSR (Buffer Status Report) と呼ばれる情報を送信し、それを受信した基地局が BSR に含まれる情報 (送信する必要があるデータ量) に応じて割り当てる無線リソースを決定し、UE に通知する。UE は基地局からのリソース割り当てに従い、データを送信する。同期運用の場合、BSR を実施後、最短でも次の時間スロットまで待つ必要があるため、アップリンクの遅延が最低でも 5 ms から 10 ms となる。SPS の場合は、予め半固定的に UE に対してアップリンク用のリソースを割り充てるため、データ送信都度の UL Grant が不要となり、同期運用では最低で 5 ms 以下の遅延で通信可能となる。一方で、SPS はデータを送信しなかった場合にリソースが無駄になったり、端末数への制約が強くなったりすることから、必要に応じて割り当て方法を選択する必要がある。

### ・再送

LTE や 5G には、フレームの伝送エラーが発生した場合に再送してエラー回復を図る機能が実装されている。再送を利用する場合は、フレームの伝送エラーはネットワークの上位層から見てパケットロスではなく伝送遅延として現れることとなる。図 4.7-2 は 5G のプロ

トコルスタックを示しており、このうち、再送機能に関わるのは MAC レイヤ、RLC (Radio Link Control)レイヤ、PDCP (Packet Data Convergence Protocol)レイヤである。

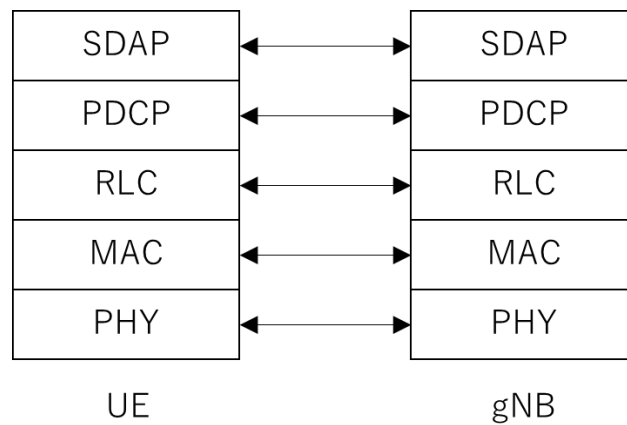


図 4.7-2 5G のプロトコルスタック

MAC レイヤでは、HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) と呼ばれる方式で再送が実施される。まず、HARQ のベースになる ARQ (Automatic Repeat reQuest)から簡単に説明すると、データの受信側がデータの到着応答である Ack/Nack (Acknowledgement / Negative Acknowledgement)を送信側にフィードバックすることで、到着していないデータを特定し、再送を実施する方式である。HARQ は、データの受信に失敗した一部分のみを再送することで ARQ をより効率化した方式となっている。LTE においては、データ送信から HARQ の ACK/NACK までの応答タイミングが、例えば、FDD の場合は 4 ms という具体に固定されていた。5G では、ACK/NACK 応答までの時間を柔軟に構成できるようになっており、例えば、30 kHz のサブキャリア幅の場合は最短で 0.4 ms 程度で応答できるようになっており、送信エラーが発生した場合も短時間で再送が可能となっている。但し、ローカル 5G における同期運用では、上り通信のタイミングが 5 ms に一度に制限されるため、HARQ の往復時間もそれに律速されるところとなる。

RLC レイヤでは ARQ による再送が実施される。MAC レイヤの HARQ で回復しきれなかった伝送エラーは RLC レイヤで再度解消が試みられる。RLC レイヤには、ARQ を実施するモード(AM: Acknowledgement Mode)と、実施しないモード(UM: Unacknowledgement Mode)が存在する。RLC レイヤにおける ARQ 再送のトリガは数種類存在するが、その一つとして ACK が一定時間 (t-PollRetransmit パラメータで設定される) 届かないことで再送が発生する。低遅延性が重要な場合は、例えば、t-PollRetransmit を小さめに設定するなどの対処も考えられうる。

PDCP レイヤは、再送によって順序が前後して受信されるパケットの順序を、送信側が送り出した順序通りに並び替える機能を有する。再送中のデータの後続データが先に届いた場合、後続データは前のデータの再送を完了するまで待つ必要がある (Head of Line Blocking と呼ばれる) ため、パケットロスよりもジッタ性能が重要視される場合は、順序制御を行わない、という選択肢もありうる。

・ MCS (Modulation and Coding Scheme)

変調 (Modulation)と符号化 (Coding)の方法を表すパラメータで、MCSによって送信可能なデータ量とノイズ耐性が変化する。5Gでは、変調方式として、QPSK, 16QAM, 64QAMと 256QAM がサポートされている。256QAM は一つの電波シンボル (RE: Resource Element) に載せることができるビット数が最も大きいかわりに、ノイズ耐性が低くなる。一方で、QPSK は一つの RE で送信できるビット数は少ないがノイズ耐性は強い。符号化は送信データに対して冗長情報を載せて符号化を施すことで、一部が伝送エラーとなっても受信側でエラー回復を可能とする。実データ量に対する冗長情報量の比率 (符号化率) で、送信可能データ量とエラー耐性が変化する。

変調と符号化の組み合わせは MCS Index によって指定される。また、MCS Index の指定方法には 3 種類の表があり、それぞれ 64QAM Table、256QAM Table、Low SE (Spectral Efficiency) 64QAM Table となる。Low SE 64QAM Table は特に URLLC が必要とされるアプリケーション向けに用意された Table である。表 4.7-2、表 4.7-3、表 4.7-4 はそれぞれの Table における MCS Index である。表中の Modulation は、1 シンボルのビット数 ( $2^{\text{modulation}}$ ) を表しており、2/4/6/8 はそれぞれ、QPSK/16QAM/64QAM/256QAM に対応する。

表 4.7-2 64QAM MCS テーブル

MCS Index	Modulation	Code Rate	Spectral Efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	157	0.3066
2	2	193	0.3770
3	2	251	0.4902
4	2	308	0.6016
5	2	379	0.7402
6	2	449	0.8770
7	2	526	1.0273
8	2	602	1.1758
9	2	679	1.3262
10	4	340	1.3281
11	4	378	1.4766
12	4	434	1.6953
13	4	490	1.9141
14	4	553	2.1602
15	4	616	2.4063
16	4	658	2.5703
17	6	438	2.5664
18	6	466	2.7305
19	6	517	3.0293
20	6	567	3.3223
21	6	616	3.6094
22	6	666	3.9023
23	6	719	4.2129
24	6	772	4.5234
25	6	822	4.8164
26	6	873	5.1152
27	6	910	5.3320
28	6	948	5.5547
29	2	reserved	
30	4	reserved	
31	6	reserved	



表 4.7-3 256QAM の MCS テーブル

MCS Index	Modulation	Code Rate	Spectral Efficiency
0	2	120	0.2344
1	2	193	0.377
2	2	308	0.6016
3	2	449	0.877
4	2	602	1.1758
5	4	378	1.4766
6	4	434	1.6953
7	4	490	1.9141
8	4	553	2.1602
9	4	616	2.4063
10	4	658	2.5703
11	6	466	2.7305
12	6	517	3.0293
13	6	567	3.3223
14	6	616	3.6094
15	6	666	3.9023
16	6	719	4.2129
17	6	772	4.5234
18	6	822	4.8164
19	6	873	5.1152
20	8	682.5	5.332
21	8	711	5.5547
22	8	754	5.8906
23	8	797	6.2266
24	8	841	6.5703
25	8	885	6.9141
26	8	916.5	7.1602
27	8	948	7.4063
28	2	reserved	
29	4	reserved	
30	6	reserved	
31	8	reserved	

表 4.7-4 Low SE 64QAM MCS テーブル

MCS Index	Modulation	Code Rate	Spectral Efficiency
0	2	30	0.0586
1	2	40	0.0781
2	2	50	0.0977
3	2	64	0.125
4	2	78	0.1523
5	2	99	0.1934
6	2	120	0.2344
7	2	157	0.3066
8	2	193	0.377
9	2	251	0.4902
10	2	308	0.6016
11	2	379	0.7402
12	2	449	0.877
13	2	526	1.0273
14	2	602	1.1758
15	4	340	1.3281
16	4	378	1.4766
17	4	434	1.6953
18	4	490	1.9141
19	4	553	2.1602
20	4	616	2.4063
21	6	438	2.5664
22	6	466	2.7305
23	6	517	3.0293
24	6	567	3.3223
25	6	616	3.6094
26	6	666	3.9023
27	6	719	4.2129
28	6	772	4.5234
29	2		reserved
30	4		reserved
31	6		reserved

・ QoS 制御

5G における QoS 制御において大きな役割を担うのが、5G で新たに導入された SDAP (Service Data Adaptation Protocol)レイヤとなっている。SDAP レイヤは、主に二つの役割がある。一つ目が、パケットをクラス分けし、QFI (QoS Flow Identifier)でマークする事である。二つ目が、QFI に従い、各フローを Data Radio Bearer に振り分けることである。

基地局 (gNB) は QFI に応じて、所定のスループットや BER となるように無線リソースを端末 (UE) に対して割り当てる。QoS 制御は、特に、混雑環境下において遅延センシティブな特定のアプリケーションフローに対して、遅延増大を抑止するために有効である。複数の UE 間での無線リソースの競合に関しては、一般的に基地局側で Proportional Fairness 等の UE 間の無線リソースの公平性を担保する仕組みが動作しているため、影響が出にくい。一方で、一つの UE で複数のアプリケーションを収容する場合には、適切な QoS が重要である。ファイルやログ転送のようなバースト通信と、遅延センシティブな通信が混在すると、バースト通信によりキューイング遅延が発生し、遅延センシティブな通信の遅延も同時に増大してしまう。このような場合に QoS 制御によって遅延センシティブな通信に対して優先的に無線リソースを割り当てることで、遅延増大を防止することができる。

## ・冗長化

複数の周波数帯や経路を同時に利用し、エラー耐性を高めることで遅延抑止が期待できる。冗長化に関しては、PDCP レイヤと PHY レイヤの二つのレイヤで定義されている。

PDCP レイヤでの冗長化については、PDCP レイヤでパケットをコピーし、複数の RLC に流す方式である。本構成は Dual Connectivity 構成を前提としており、5G (NR) の Rel 15 では 5G と LTE の Dual Connectivity 構成で可能となっており、Rel 16 では NR 同士での Dual Connectivity も定められている。

PHY レベルで冗長化する仕様としては、地理的に離れた複数の基地局から (で) 同時に電波を送出する (受信する) Multi-TRPs が定められている。

これらの冗長化に関する仕様はシステム全体の無線リソースやコストとの兼ね合いではあるが、利用することで通信の信頼性を向上することができる。

次に、検証方法の詳細について述べる。本検証では、ア-1 で検証した課題解決システムと同一の評価系を用いた。なお、本評価に関しては様々なパケットサイズ、データレートで検証を実施するため、Master 局、Slave 局ではなく、パケットジェネレータ (MD1230A) を用いた。

検証においては、最初に 5G の基本的な遅延特性を検証するため、プロトコルテストの設定を表 4.7-5 の様に設定し、トラフィックパターンを表 4.7-6 に従い変動させ、遅延値を取得した。遅延時間に関しては、パケットキャプチャ用の PC (Intel NUC) で、送信側と受信側のパケットを取得し、同一パケットの時間差を算出した。また、受信側のパケットに関して、連続する二つのパケットの到着時間の差を算出することでジッタを算出した。

その後、前述した 5G のパラメータの内、プロトコルテストで設定可能な項目に関しては設定を変更して影響を検証し、設定変更不可の項目については設定値から類推される挙動について検証することとした。具体的には、表 4.7-7 に記載のパラメータについて、表に記載した検証方法で検証した。TDD に関しては、準同期運用を想定して、図 4.7-3 の様に UL 側の割り当てを増加させた場合の遅延に対する影響を観測する。なお、Numerology については TDD の割り当ての影響の方が大きく、有意な検証ができないことから今回の検証からは割愛した。また、冗長化に関しても、本実証のテストベッドでは利用できないため、検証から割愛した。

表 4.7-5 プロトコルテストの設定

設定項目	設定値	備考
バンド	n79	
周波数 (NR ARFCN)	4709.850 MHz (713990)	
Duplex	TDD	DL,UL 割り当ては同期運用 (DDDDDDDSUU)に準ずる
サブキャリア幅	30 kHz	
バンド幅	100 MHz	
アンテナ数	1	
MCS (DL)	256QAM index 24	
MCS (UL)	64QAM index 10	

表 4.7-6 遅延測定用のトラフィックパターン

項番	通信レート	パケットサイズ	方向
1	100 Kbps	128 Byte	DL
2	100 Kbps	128 Byte	UL
3	100 Kbps	1024 Byte	DL
4	100 Kbps	1024 Byte	UL
5	1 Mbps	128 Byte	DL
6	1 Mbps	128 Byte	UL
7	1 Mbps	1024 Byte	DL
8	1 Mbps	1024 Byte	UL
9	10 Mbps	128 Byte	DL
10	10 Mbps	128 Byte	UL

表 4.7-7 5G パラメータの遅延への影響の検証方法

検証パラメータ	変更有無	検証方法
TDD の UL/DL 割り当て	有	同期運用と、準同期運用を想定して UL 割り当てを増加させた場合を検証
HARQ	有	再送回数を変更し、その影響を検証
ARQ	無	ARQ 発生時の遅延時間を観測
MCS	有	MCS インデックス毎にフレームエラーレートが 10%程度となる電界強度を検証
QoS	無	無線帯域を超えるデータを入力し、キューイング遅延による影響を観測する
冗長化	無	評価機材では評価不可のため評価対象外

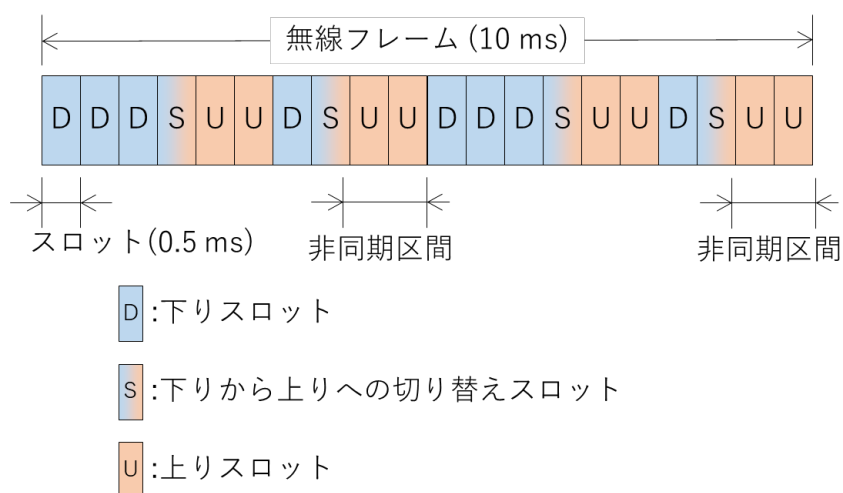


図 4.7-3 UL 割り当て増加時のスロット構成

#### 4.7.1.2 ア-1 検証結果

最初にトラフィックパターンを変動させて測定した DL、UL の遅延特性の結果について述べる。図 4.7-4 から図 4.7-11 に各トラフィックパターンでの遅延（左側）とジッタ（右側）を示した。遅延時間に関しては平均値をオレンジの線で記載している。ジッタに関しては、受信側で取得した前後するパケットの到着時間差から、パケットの到着時間差の平均値（≒パケットの送信周期）を引いて、到着時間の揺れが分かるようにしている。各トラフィックパターンでの到着時間差の平均値は表 4.7-8 に示した通りである。

どのトラフィックパターンにおいても、下りは約 2 ms、上りは約 5 ms の遅延時間となっている。同期運用のスロット割り当ては、DL の方が多いため、下りに関しては即座にデータを送信できることが多い一方で、上りに関しては 5 ms 毎の割り当てとなるため、遅延時間が長くなると考えられる。

より詳細に特性を観測するため、トラフィックパターン 1（100kbps、パケットサイズ 128 Byte、DL 方向）の遅延時間（図 4.7-4 の左図）を頻度分布にしたものを図 4.7-14 に示す。図を見ると 1.8 ms にピークが存在し、それより遅延の長い側に肩のような構造が見て取れる。これは、DL 方向のパケットが TDD で DL 方向に割り当たっている瞬間に到着した場合に、1.8 ms の遅延時間になっていると考えられる。一方で、スロットが TDD の UL 方向に割り当たっている時にパケットが到着した場合は、DL 方向の割り当て時間になるまで、パケット送信を待機する必要があるため、0 ms から 1 ms 強の遅延が発生し、肩のような構造になると考えられる。同様に、UL 方向であるトラフィックパターン 2（100kbps、パケットサイズ 128 Byte、UL 方向）を図 4.7-15 に示す。UL 方向も DL 方向と同様の構造が見て取れる。但し、DL 方向に比べ、UL 方向の割り当てが少ないために、肩の部分が DL より長い約 4 ms となっている。

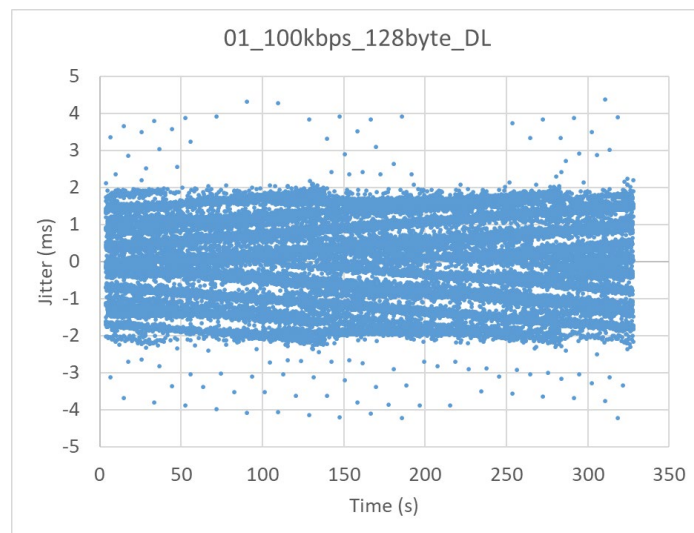
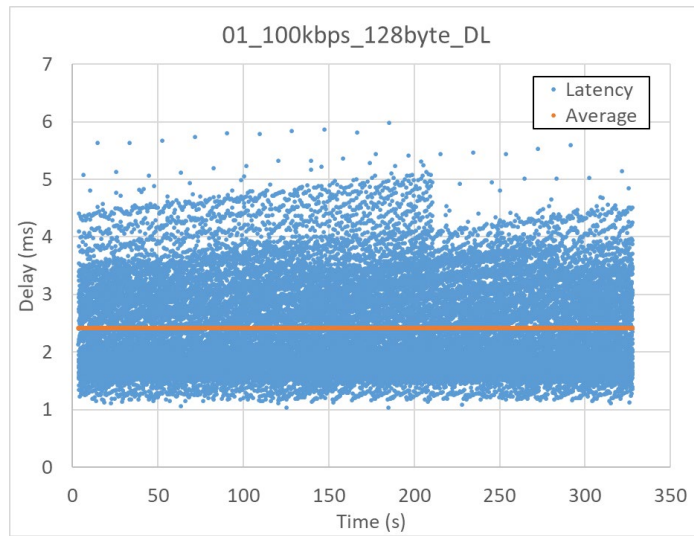


図 4.7-4 トラフィックパターン 1 の遅延とジッタ

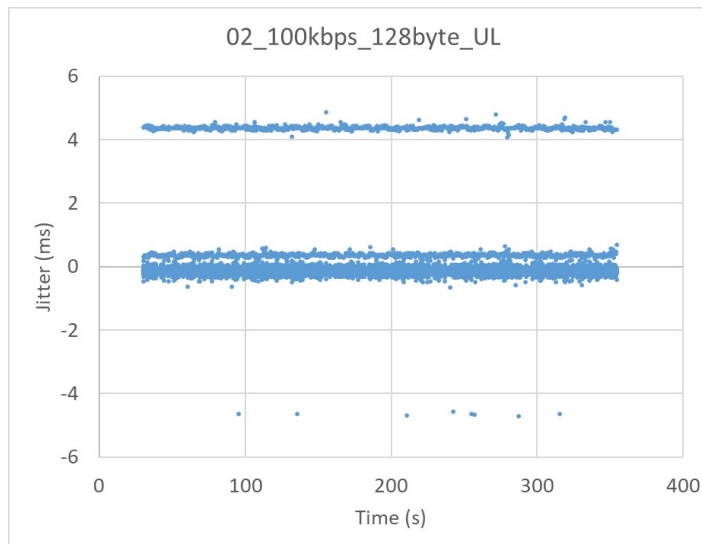
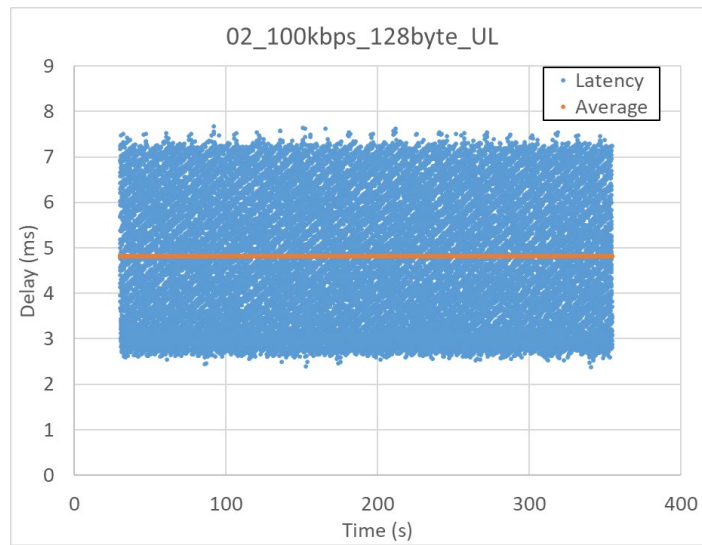


図 4.7-5 トラフィックパターン 2 の遅延とジッタ

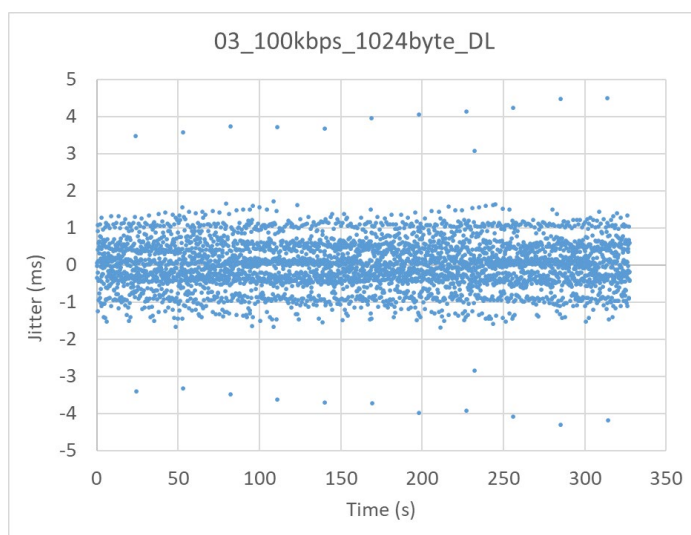
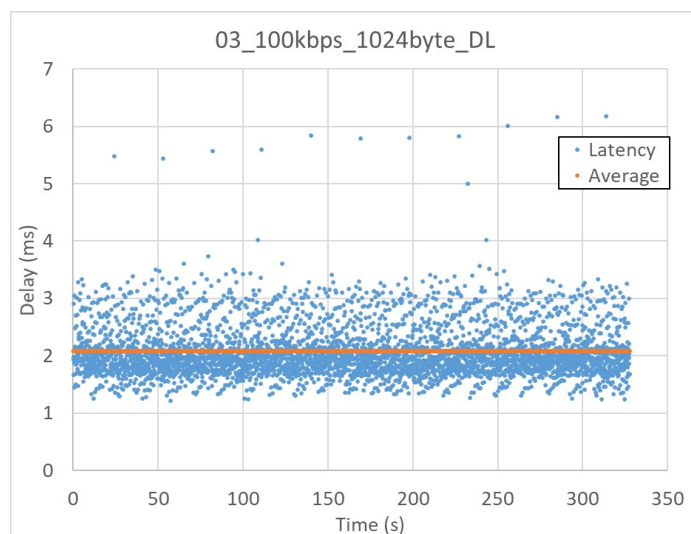


図 4.7-6 トラフィックパターン 3 の遅延とジッタ



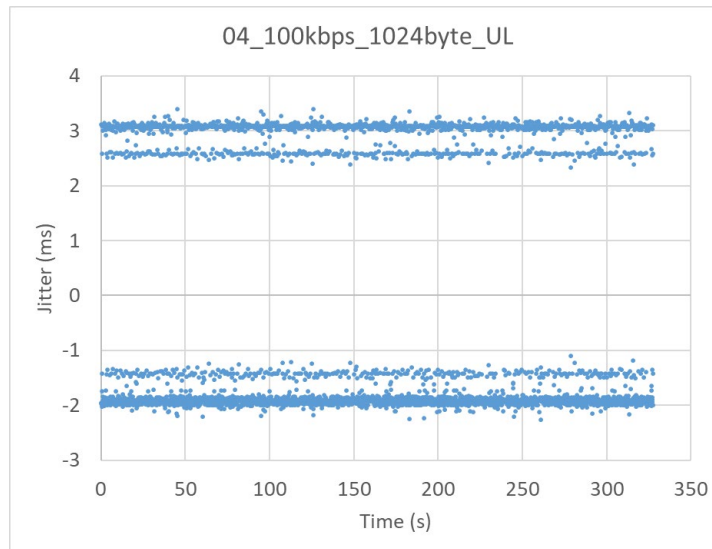
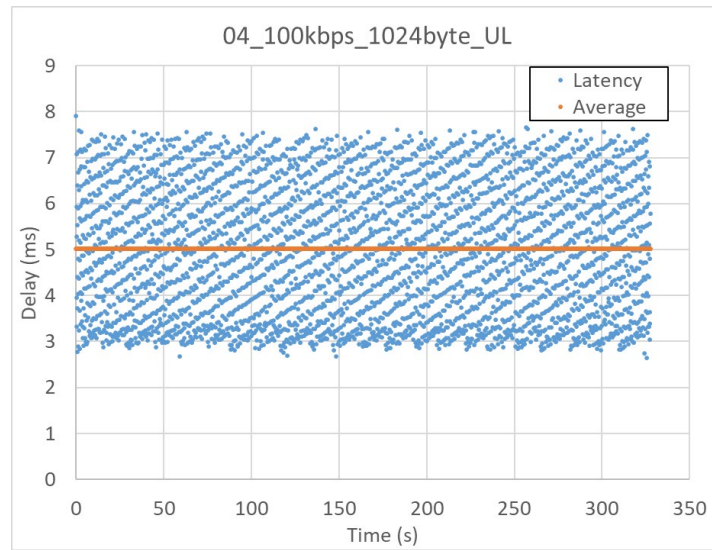


図 4.7-7 トラフィックパターン 4 の遅延とジッタ

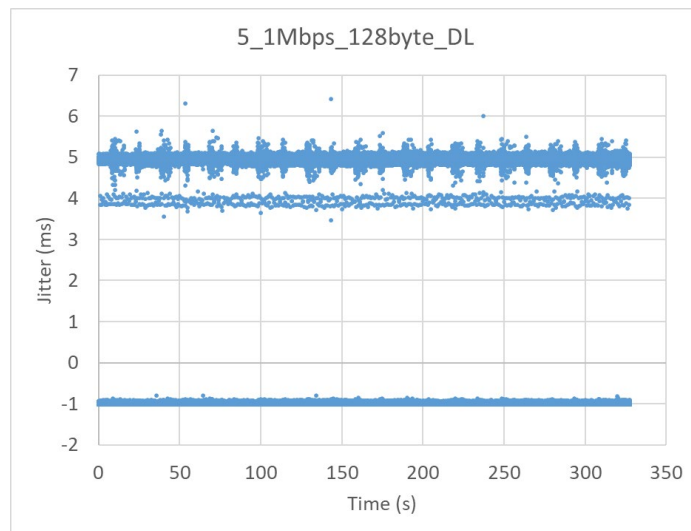
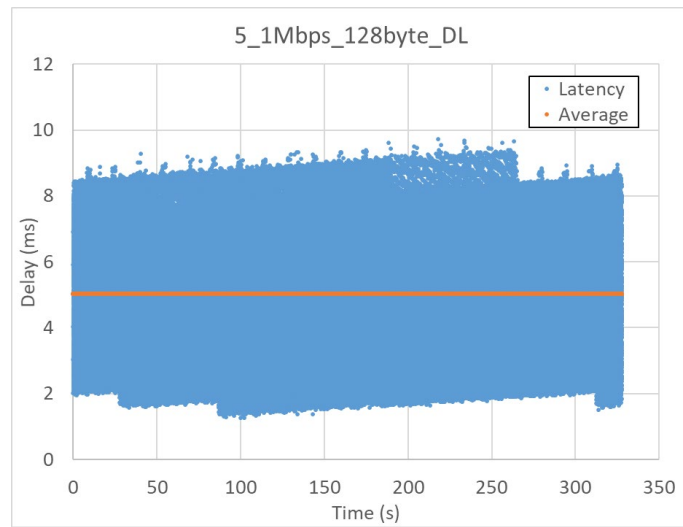


図 4.7-8 トラフィックパターン 5 の遅延とジッタ

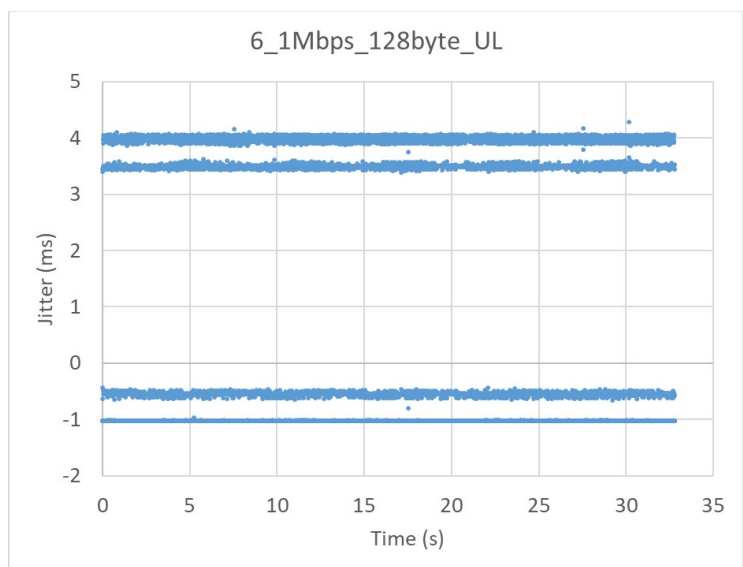
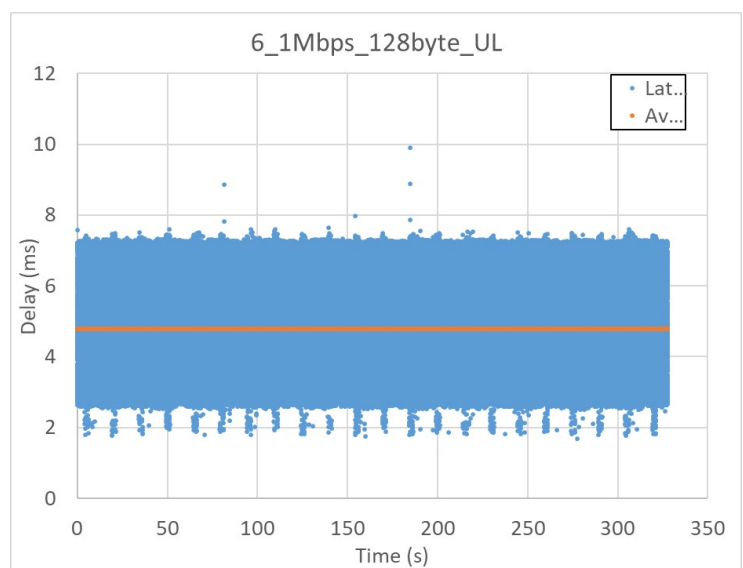


図 4.7-9 トラフィックパターン 6 の遅延とジッタ

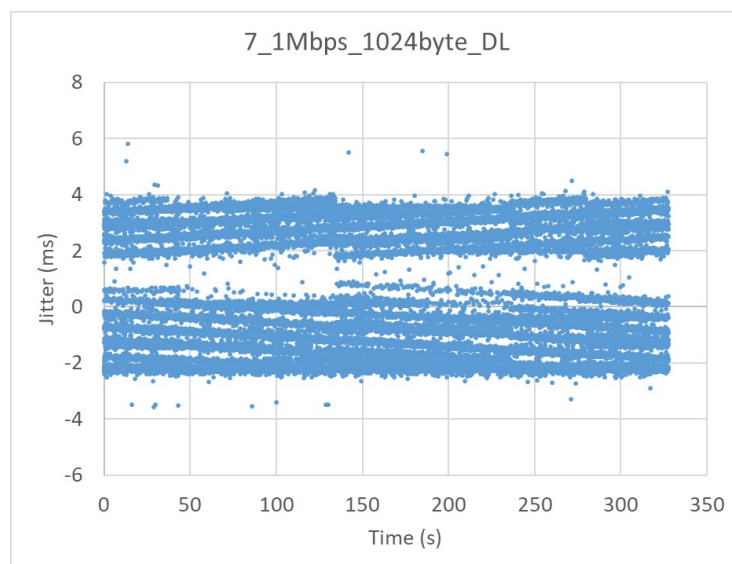
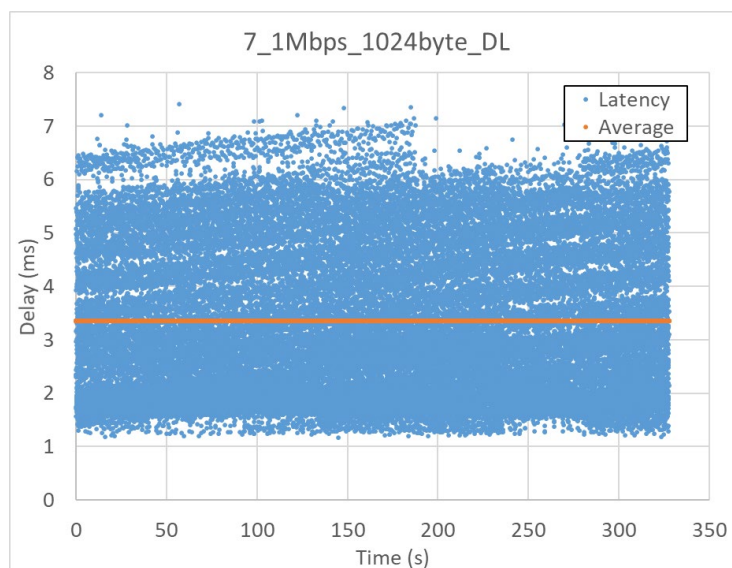


図 4.7-10 トラフィックパターン7の遅延とジッタ

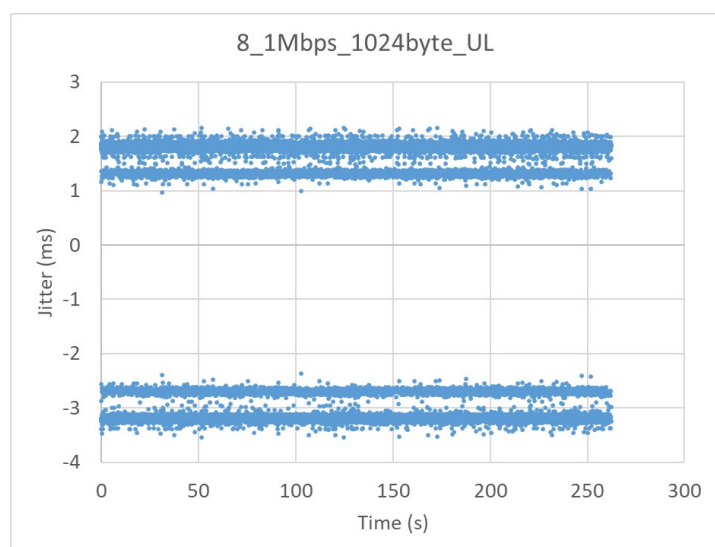
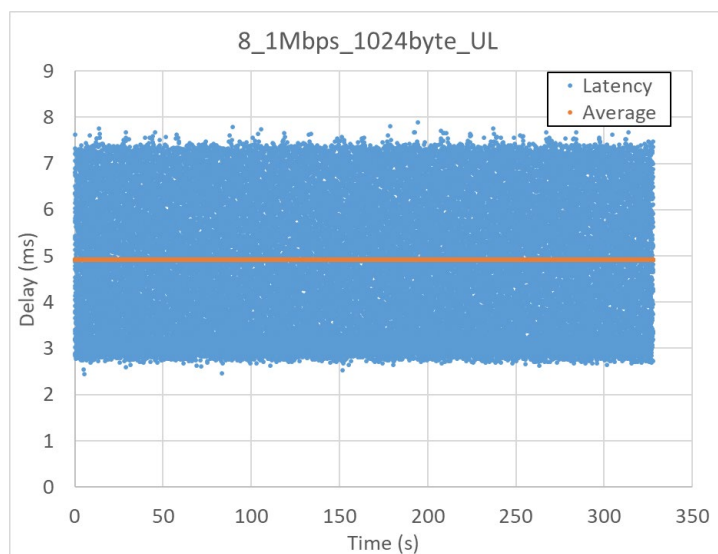


図 4.7-11 トラフィックパターン 8 の遅延とジッタ

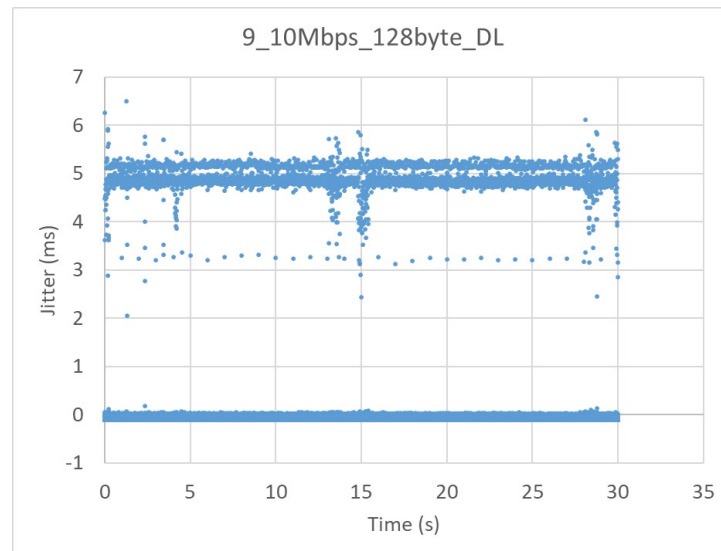
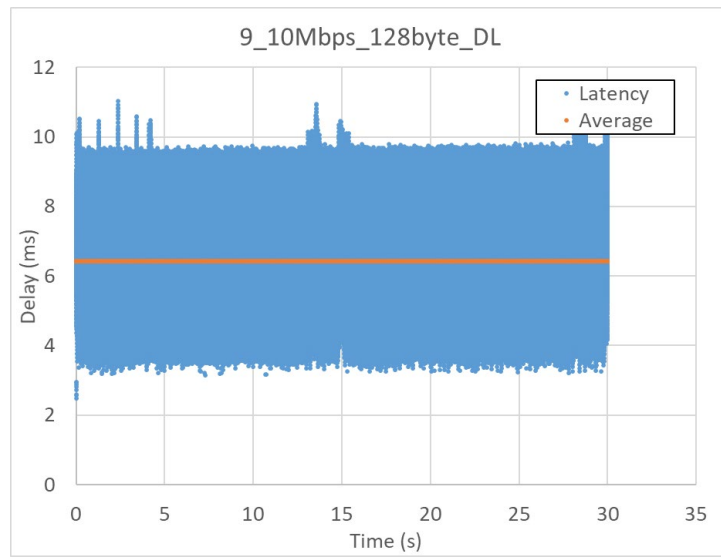


図 4.7-12 トラフィックパターン 9 の遅延とジッタ

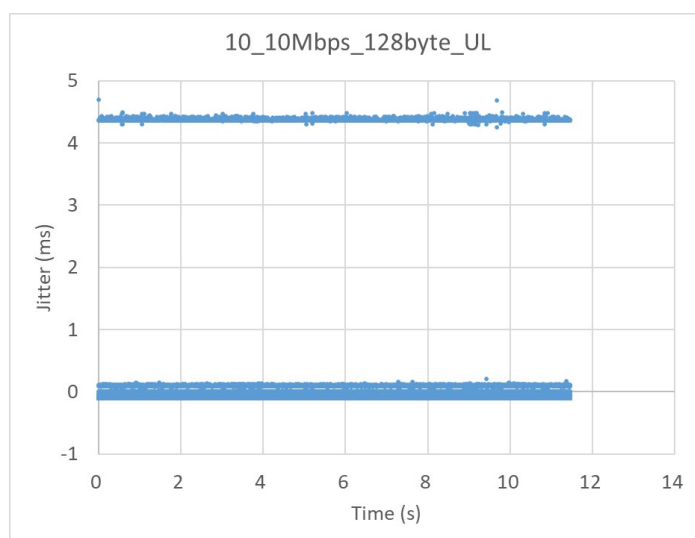
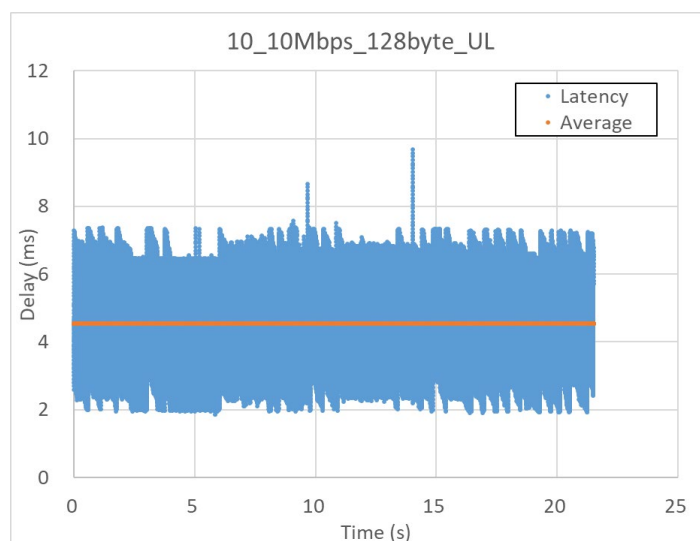


図 4.7-13 トラフィックパターン 10 の遅延とジッタ

表 4.7-8 各トラフィックパターンでの平均受信間隔

項番	受信間隔平均値	備考
1	10.14 ms	
2	10.14 ms	
3	81.92 ms	
4	81.92 ms	
5	1.02 ms	0ms が 5 パケット連続後、6ms となる
6	1.02 ms	
7	8.19 ms	
8	8.19 ms	
9	0.10 ms	
10	0.10 ms	

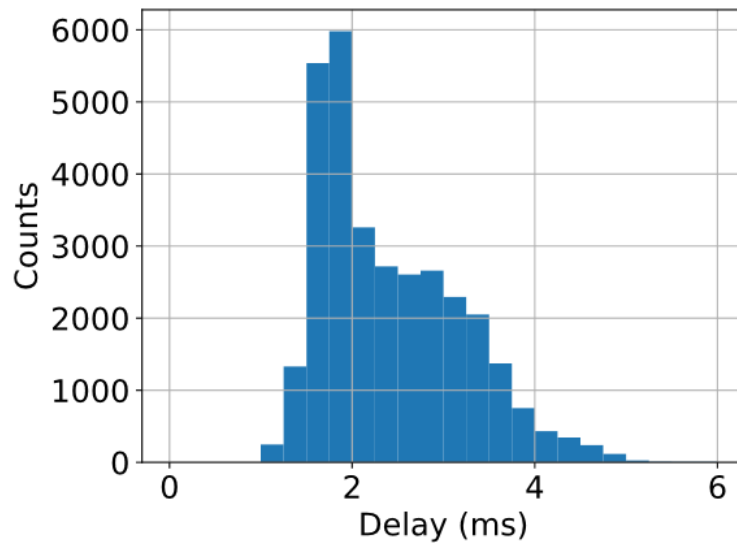


図 4.7-14 トラフィックパターン 1 の遅延頻度分布

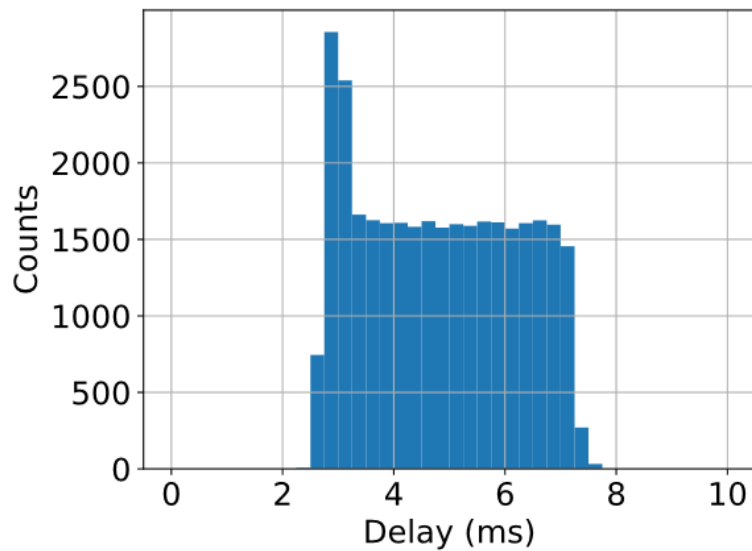


図 4.7-15 トラフィックパターン 2 の遅延頻度分布

次に TDD の DL/UL 割り当て比による遅延に対する影響を確認するため、TDD の割り当てパターンを図 4.7-3 の通りに割り当てた場合の DL と UL の遅延とジッタをそれぞれ、に示す。DL に関しては、同期運用時の場合と割り当てを増やした場合で、平均的な遅延時間は約 2.4 ms と同程度となっている。一方で、UL に関しては約 4.8 ms から約 3.7 ms へと改善している。図 4.7-18、図 4.7-19 は、DL と UL の遅延の頻度分布を表している。特に、UL の遅延に関して図 4.7-15 と比較した場合、3 ms のピーク部分の比率が向上している。ピーク部分は、パケットが UL の割り当て中に到着した場合に相当すると考えられ、UL の割り当てが増加している分、比率が向上する。また、肩の部分の長さが同期運用の割



り当てパターンでは、7.5 ms 程度まで伸びているのに対し、UL スロット増加時には 5 ms 程度までとなっている。分布の肩の部分は、パケットが UE に到着してから UL が割り当てるまでの待機時間を表しており、UL スロットを増加させることで待機時間が減少していることが分かる。以上の様に、TDD の割り当てパターンに応じて遅延時間が変化することが分かる。

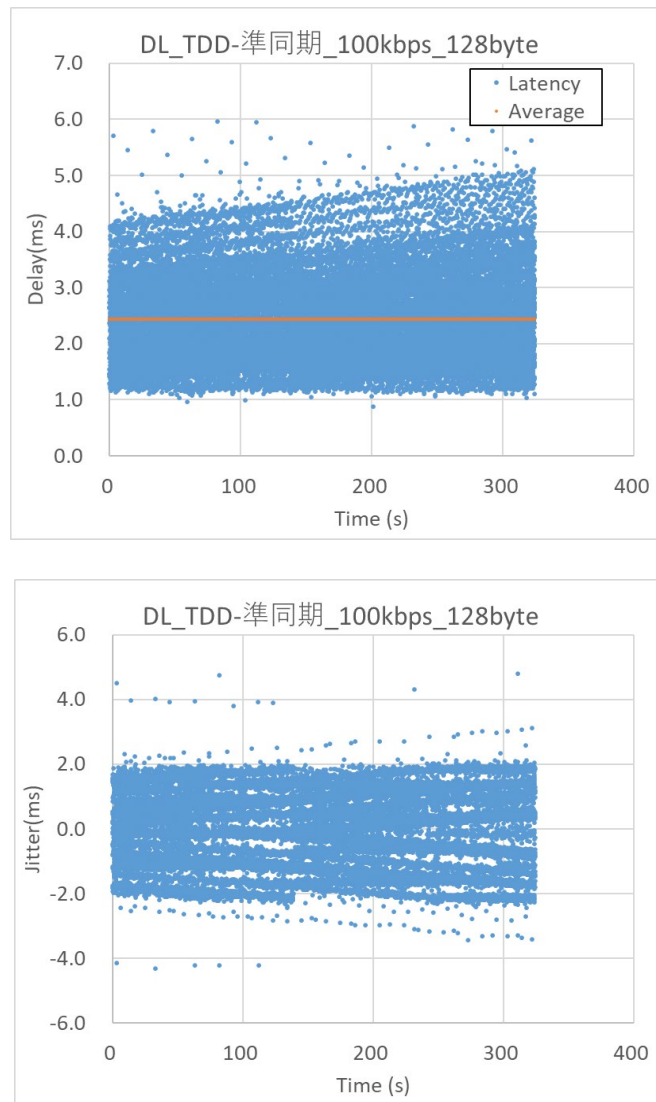


図 4.7-16 UL 割り当て増加時の DL の遅延とジッタ

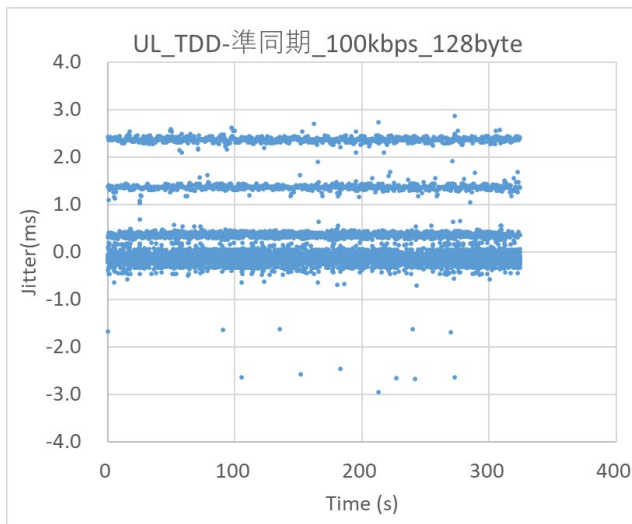
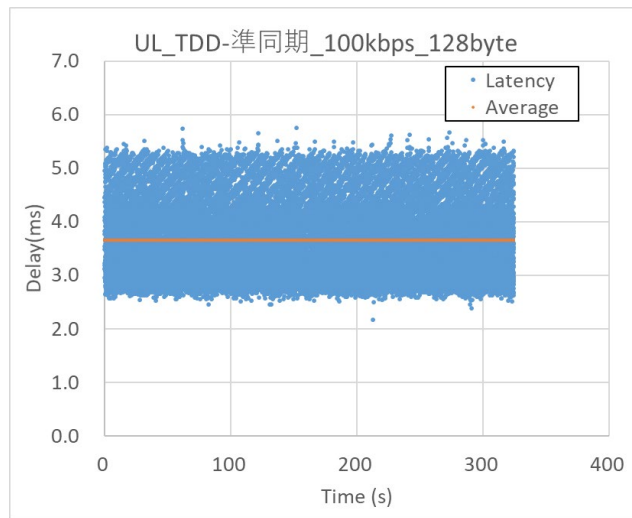


図 4.7-17 UL 割り当て増加時の UL の遅延とジッタ

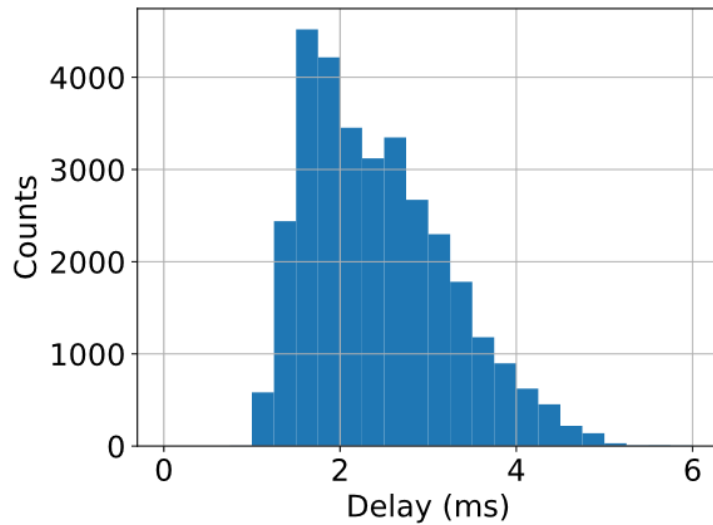


図 4.7-18 UL 割り当て増加時の DL の遅延の頻度分布

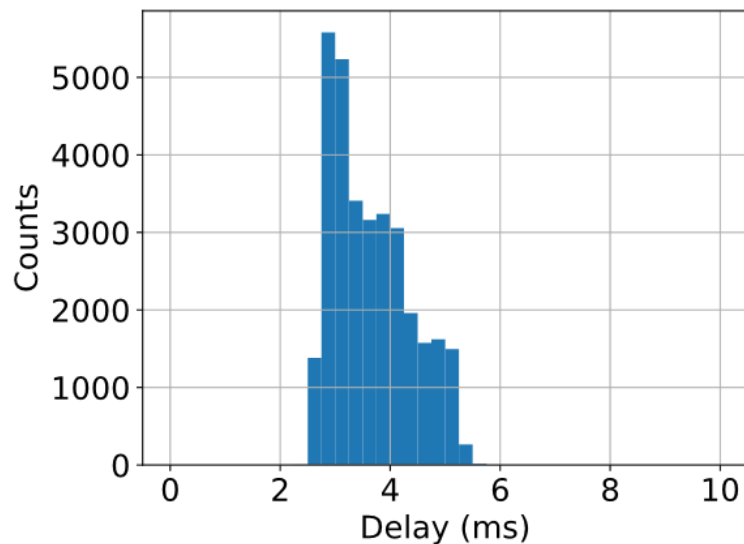


図 4.7-19 UL 割り当て増加時の UL の遅延の頻度分布

送信エラーの影響についても調査を実施した。MCS の値を固定したまま、電界強度を落とし、MAC 層での送信エラー率が 30%と 70%になるように調整し、遅延の値を観測した。図 4.7-20 と図 4.7-21 は、それぞれ、MAC 層での送信エラー率が 30%、70%の時の UL 側の遅延とジッタである。図 4.7-20 (右図) のジッタを見ると、5 ms 間隔の縞が観測される。これは、UL の割り当てが同期運用に準じており、5 ms 周期になっていることに起因している。送信エラーが発生後、次の UL の割り当てまでの 5 ms 間、再送を待機する必要があるため、図のような 5 ms 間隔の縞が発生する。図 4.7-20 (右図) のジッタをヒストグラムにしたものを図 4.7-22 に示す。0 ms のピーク部分が初送でパケットの送信に成功したものの、5、10、15 ms のピークがそれぞれ、再送 1 回、2 回、3 回で送信に成功したものに对应する。全体で 31999 のデータが存在し、そのうち 3 回再送しているものが 3 回のみであり、

エラー率が 30%程度であれば 3 回程度の HARQ でエラーをカバーできていることが分かる。一方で、図 4.7-21 を見ると、フレームエラー率が 70%程度の場合では、100 ms 以上の遅延が発生していることが分かる。これは HARQ での再送でエラーをカバーできず、ARQ での再送が発生していることを示している。すなわち、遮蔽やフェージング等で電波強度が急激に悪くなり、HARQ ではエラーをカバーできなくなった場合は HARQ ではなく、ARQ が発生するまでの時間に遅延が律速されることとなる。

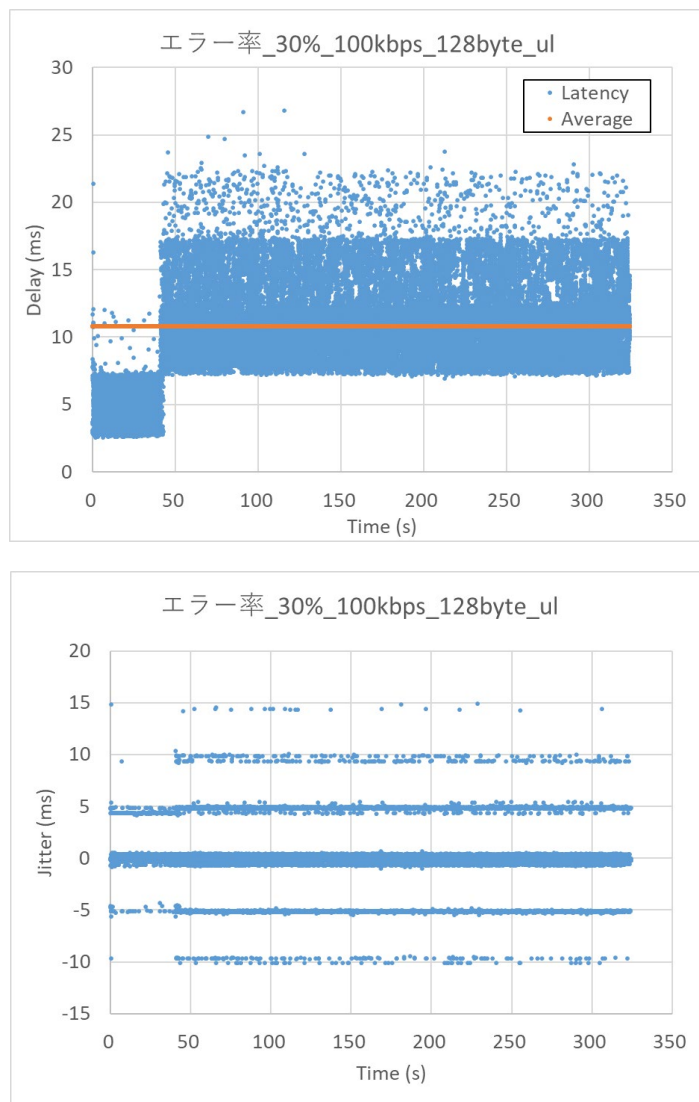


図 4.7-20 エラー率を 30%に調整した場合の遅延 (UL)

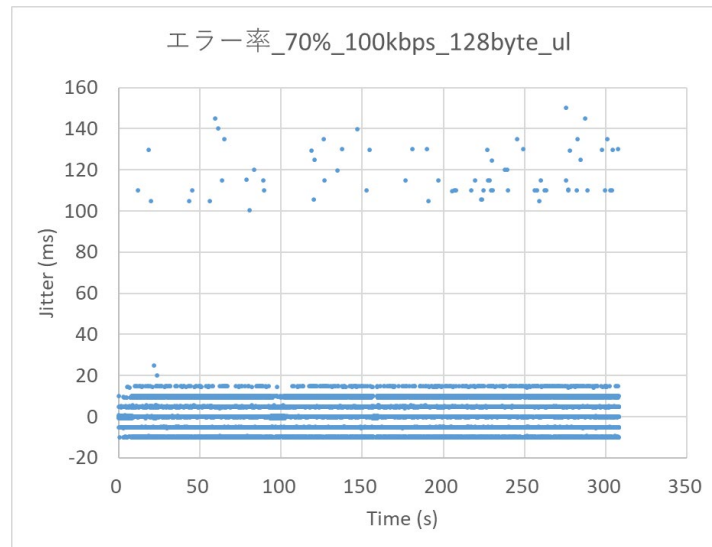
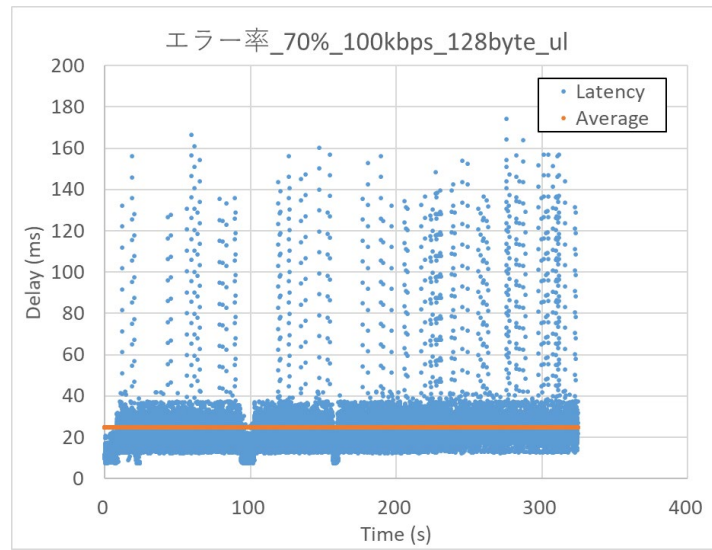


図 4.7-21 エラー率を 70%に調整した場合の遅延 (UL)

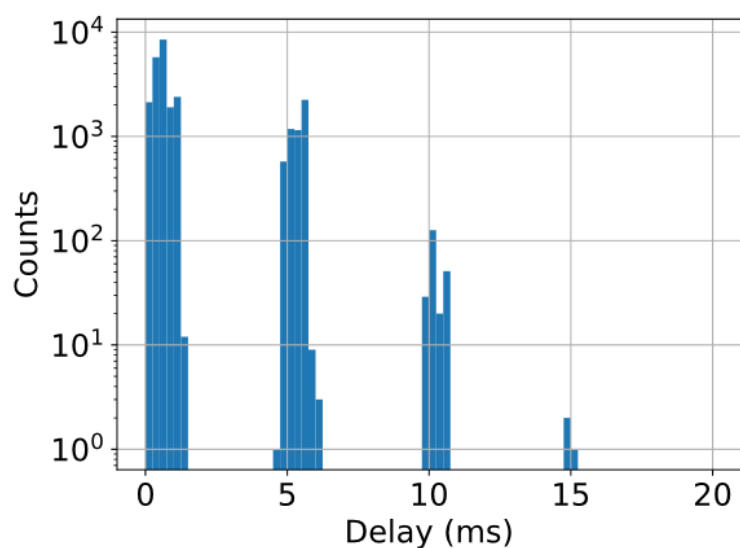


図 4.7-22 エラー率を 30%に調整した場合のジッタ (UL)

HARQ の回数による遅延の影響を示したのが図 4.7-23 と図 4.7-24 である。それぞれ、HARQ の回数を 5 回に設定した場合と 1 回に設定した場合の遅延時間とジッタを示している。MAC 層での送信エラー率を 20%程度になるように電界強度を調整している。HARQ による再送回数が最大 5 回の場合には遅延時間が 20 ms で収まっているのに対し、1 回の場合には 300 ms 弱の遅延が発生している場合もある。このように ARQ での再送は再送タイムアウトが発生するまで待つ必要があるため、遅延が増大する傾向がある。

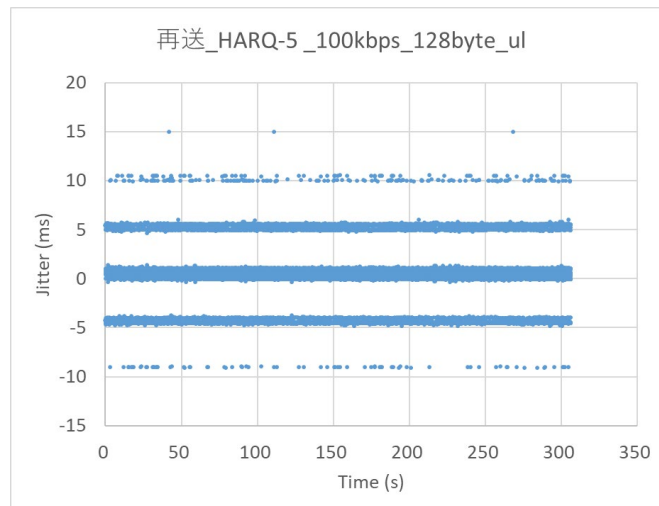
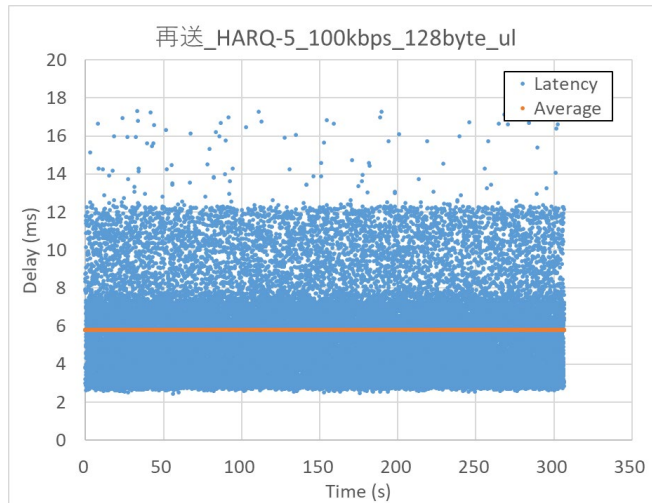


図 4.7-23 HARQ の最大値を 5 回に設定した場合の遅延 (UL)

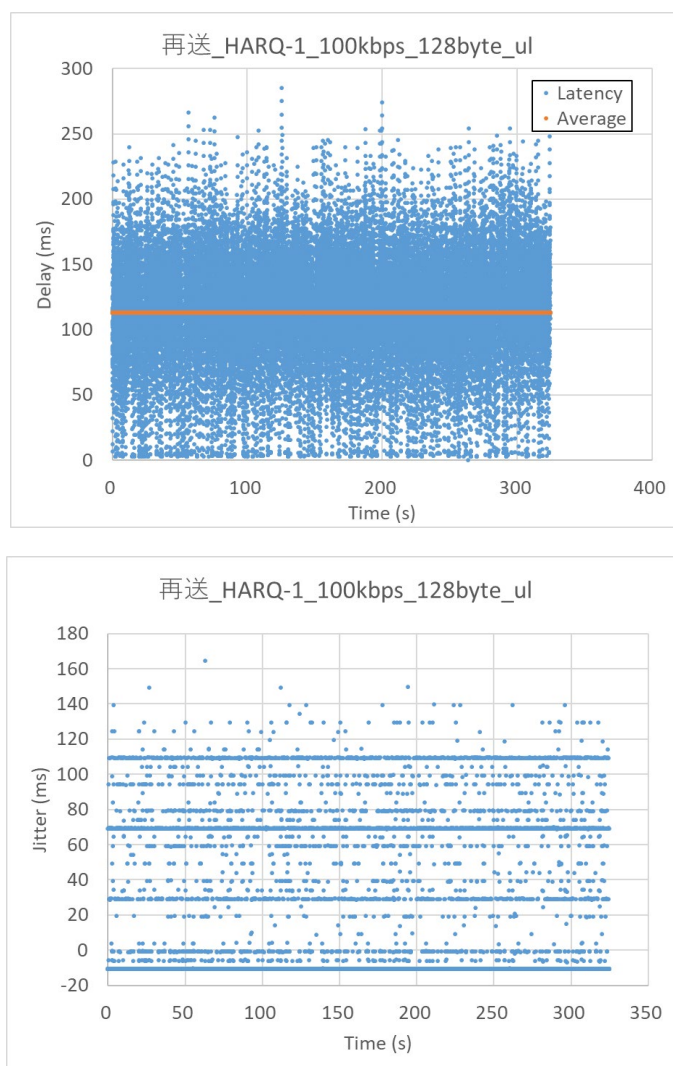


図 4.7-24 HARQ の最大値を 1 回に設定した場合の遅延 (UL)

MCS に関しては、各 MCS index で MAC 層でのエラーが約 10%になる電界強度 (ss-RSRP) の値を調査した。なお、10%としたのは、データ転送効率が良いとされるのが、一般的に数%から 10%程度であり、通常この程度のエラー率になるように MCS の値を制御するためである。図 4.7-25 は、64QAM テーブルの MCS index 値に対してエラー率 10%となる ss-RSRP の値を示したグラフである。MCS index が小さくなるほどエラー耐性が高まるため、低い ss-RSRP でもデータを転送可能であることが分かる。一方で、MCS index が下がると伝送可能なデータ量が下がることにも留意が必要である。遅延が重要となる制御系ネットワークの通信では、図 4.7-25 に対して電界強度の変動分のマージンを持たせた MCS index に制御すると良いと考えられる。



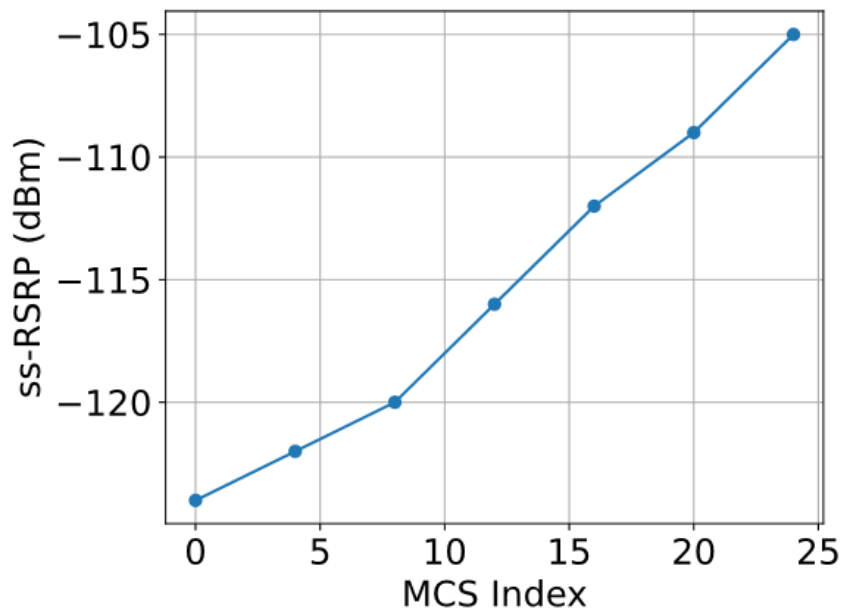


図 4.7-25 MCS index と ss-RSRP の関係

最後に、バースト通信発生時のキューイング遅延の影響について検証した。図 4.7-26 は UL 方向に無線帯域以上のレートでデータを流した場合の UL 方向の遅延時間である。図を見て分かるように、大量のデータをインプットすることで 1 s 以上の遅延が発生している。なお、遅延時間が 1.5 s 以上増加しないのは、UE のバッファが溢れパケットロスが発生しているためと考えられる。画像データやログデータ等の大容量のファイルを送信する場合は瞬間的に大量のデータを送信することになるため、遅延センシティブなフローが混在していると遅延要件が満たせなくなる。そのため、一つの UE に対して複数のフローが混在する場合は適切に QoS 制御を実施することが肝要である。

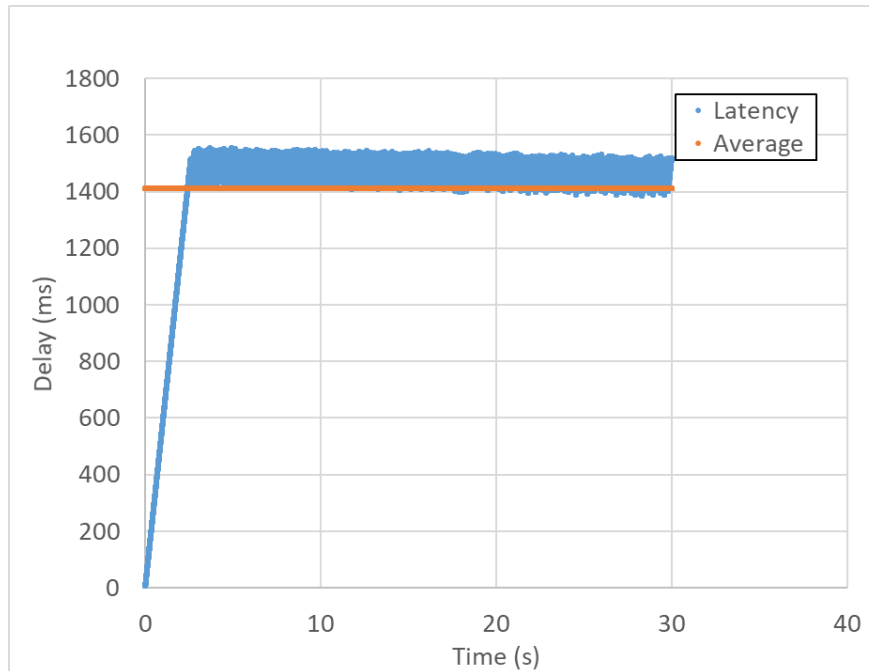


図 4.7-26 キューイング遅延

#### 4.7.1.3 ア-1 考察

以上、制御系ネットワークの運用検証に関して、制御系ネットワークで重要となる遅延性能に関わる 5G パラメータとその遅延への影響について実測した。上記で記載・実測した結果を基に現状の 5G において、どのような運用が必要か、また、将来、モーション制御等のより低遅延な領域に 5G を適用する場合にどのような課題が存在するかについて述べる。

まず、現状の 5G における運用であるが、これまでの無線ネットワークは MCS を大容量通信向けに最適制御し、数百 ms 程度の遅延発生は許容していた。具体的には MAC 層での送信エラーが数%から 10%程度発生する程度に MCS index を制御するわけであるが、これだと、フェージングや遮蔽等で電界強度が変動した瞬間に遅延が増大することとなる。制御系ネットワークの通信では、MCS index の設定を MAC 層の再送が発生しない程度に調整するのが適切である。システムに存在する UE 数が十分に少ない場合には、単純に MCS index を最低に設定しても良いが、一般的には無線リソース不足に陥ると考えられるため、UE から報知される CQI (Channel Quality Indicator) を基に、想定される電界強度の変動分をマージンとして乗せた MCS index 設定にするのが良いと考えられる。

また、遅延抑制のために再送に関する設定も重要である。課題解決システムに関する検証及び評価・分析のア-1 で見た通り、電界強度が十分に強くともエラーが発生するため、そのエラーをなるべく早期に回復することが肝要である。一般的に RLC 層の ARQ による再送よりも MAC 層の HARQ の方が高速に動作するため、HARQ の最大回数を少なくとも数回程度以上に設定しておくのが良いと考えられる。

単一の UE に性質の異なる通信フローを生成する複数のアプリケーションの通信が関わる場合は、適切に QoS の設定を行う必要がある。特に、画像やログ等の大容量ファイルをバースト的に送信する場合には、キューイング遅延による影響を回避するために QoS 制御が必要である。

将来に向けては、TDD の同期運用が大きな課題となる。同期運用では、スロット割り当ての制約上、上り通信に 5 ms 程度の遅延が発生するため、これ以上の遅延性能が要求されるものに関しては適用が困難である。非同期運用で若干の改善が期待されるが、モーション制御等の 1 ms 以下の遅延性能を達成するためには、FDD の周波数バンドの割り当てが必要となる。

#### 4.7.2 ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御

##### 4.7.2.1 ア-2 検証方法

ア-2 で検証した課題解決システムにおいて、エリア運用指針の検討の検証を行う。今回の実証において、5G のカバーエリアの評価に基づき、5G のエリア管理方法を明確化し、5G でカバーすべきエリアと無線 LAN 等の別システムと共存するエリアなどのエリア運用指針を明確化し検証する。

4.4.2 節記載の実証システムを用い、「無軌道型 AGV の遠隔制御」を運用する上で課題などを検証する。検証項目は以下の通りである。

##### 1. 5G と無線 LAN の通信品質

AGV の遠隔制御は 5G で実現できるものとして、無線 LAN でも同様に実現可能かを確認する。まず、5G と無線 LAN で通信品質に差分があるかを確認する。また、それぞれの無線方式で通信品質が十分であるかを確認する。

##### 2. 無線切り替え時の品質

AGV を 5G のエリアと無線 LAN のエリアを跨いで走行する運用ができれば、両無線方式の特徴を活かしながら、柔軟な運用が可能になると考えられる。無線方式が変わるエリア跨ぎ時に通信品質に問題ないかを確認する。

被験者に実証システムを体験していただいた後、アンケートにより実証システムの運用性に問題ないかを評価/推定していただいた。

##### 4.7.2.2 ア-2 検証結果

##### 1. 5G と無線 LAN の通信品質

体験していただいた作業員 5 名のアンケート回答から、次のような結果が得られた。5G と無線 LAN の通信品質比較の結果を図 4.7-27 に示す。アンケートの質問内容は「WLAN エリアと 5G エリアで、通信品質（カメラ映像や AGV の応答性）はどちらが良かったですか」とした。5G と無線 LAN を比較しても、「同程度」の回答が多かった。次いで、「5G」という回答が多かった。

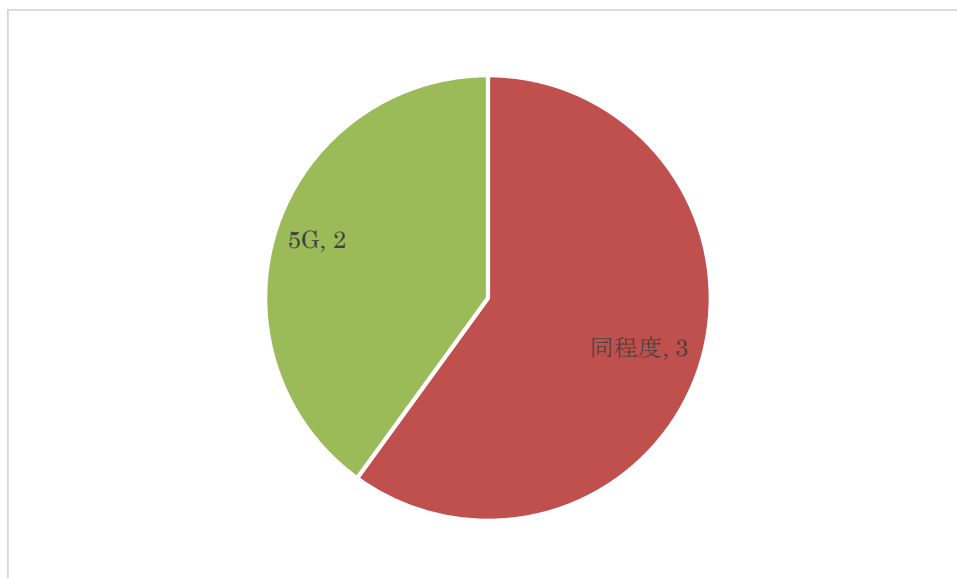


図 4.7-27 運用検証に関するアンケート集計結果(5G と無線 LAN の通信品質比較)

5G の通信品質の結果を図 4.7-28 に、無線 LAN の通信品質の結果を図 4.7-29 に示す。アンケートの質問内容は「WLAN エリアと 5G エリアで、通信品質は実運用上十分でしょうか」とした。両無線方式とも、全員揃って「十分」という回答であった。

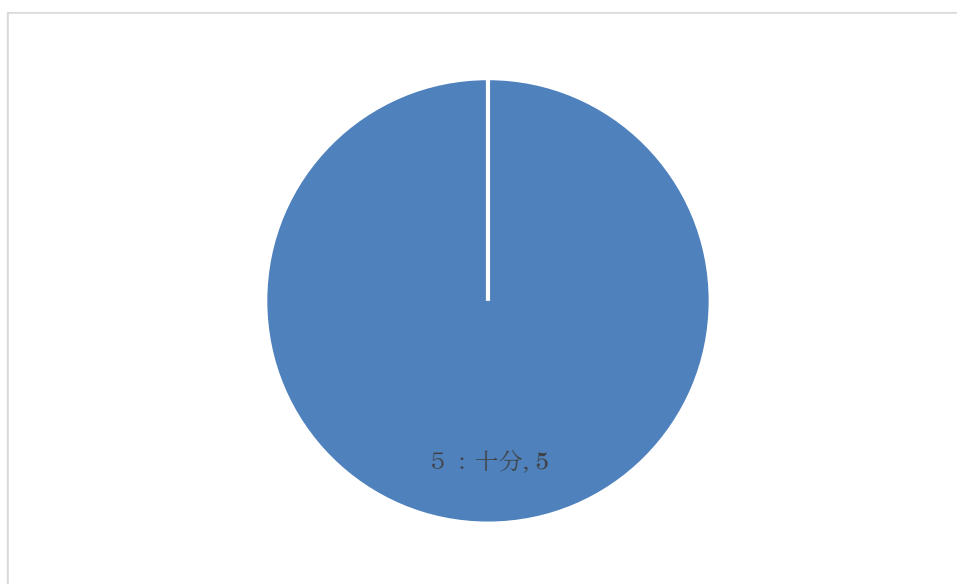


図 4.7-28 運用検証に関するアンケート集計結果(5G の通信品質)

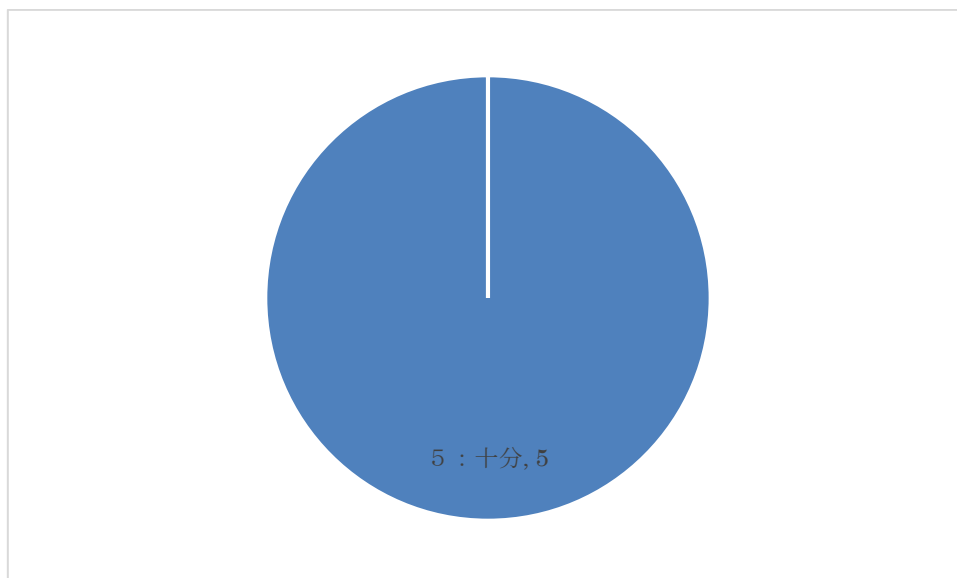


図 4.7-29 運用検証に関するアンケート集計結果(無線 LAN の通信品質)

## 2. 無線切り替え時の品質

WLAN エリアと 5G エリア間でのエリア跨ぎ時において、通信品質に違和感あったのかの確認結果を図 4.7-30 に示す。アンケートの質問内容は「WLAN エリアと 5G エリア間でのエリア跨ぎ時において、通信品質に違和感を覚えましたか」とした。全員揃って「なし」という回答だった。

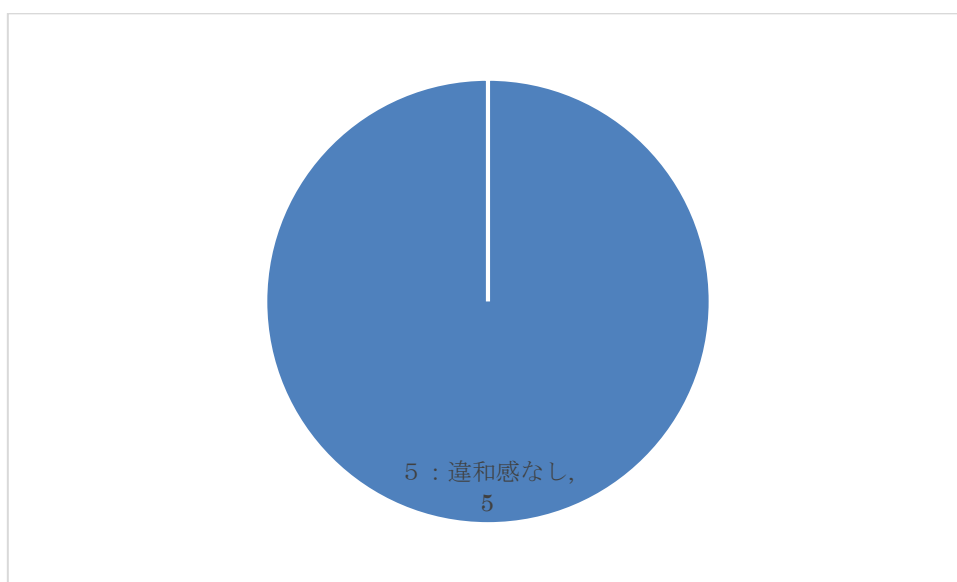


図 4.7-30 運用検証に関するアンケート集計結果(エリア跨ぎ)

### 4.7.2.3 ア-2 考察

5G のカバーエリアは、本課題ア-2 の利用方法では 4.4.2.2 節の結果から 30m 程度のエリアと広くないため、それを考慮した設計が重要となる。その 30m 程度のエリアと無線

LAN のエリアが少し重なるようにエリア設計して運用することを推奨する。本検証では、上記のようにエリア設計を行い、両無線方式で受信強度を保つことができ、無線切り替え時に違和感のない（遅延が増大しない）品質を達成できたと考えられる。

今回の検証は AGV 1 台であったが、AGV を多数台運用することが当然考えられ、その分の高スループットが必要される。その一方で、人が常にカメラ映像を監視しているわけにはいかない。効率化のためにも、異常事態が起きた場合や、時分割で各 AGV のカメラ映像を切り替えていくことが想定される。ただし、実際の利用可能なエリアは現場ごとの環境や通信量などの利用形態により変わると予想され、現場ごとの検証は必要である。

5G と無線 LAN では、それぞれメリット・デメリットを持つ。5G のメリットは、無線 LAN と比較して、干渉影響が少なく安定的な通信が期待できる。5G のデメリットは、設置時や運用中の変更（基地局追加やチルト変更など）時の作業が容易でなく、その場合は無線 LAN の方が適しているだろう。そのため、5G と無線 LAN でお互い補完しあうことが適切だと考えられる。

図 4.7-31 にシステム運用時に必要となる作業フローを、表 4.7-9 に実証システムの運用に関する今後の課題をまとめる。

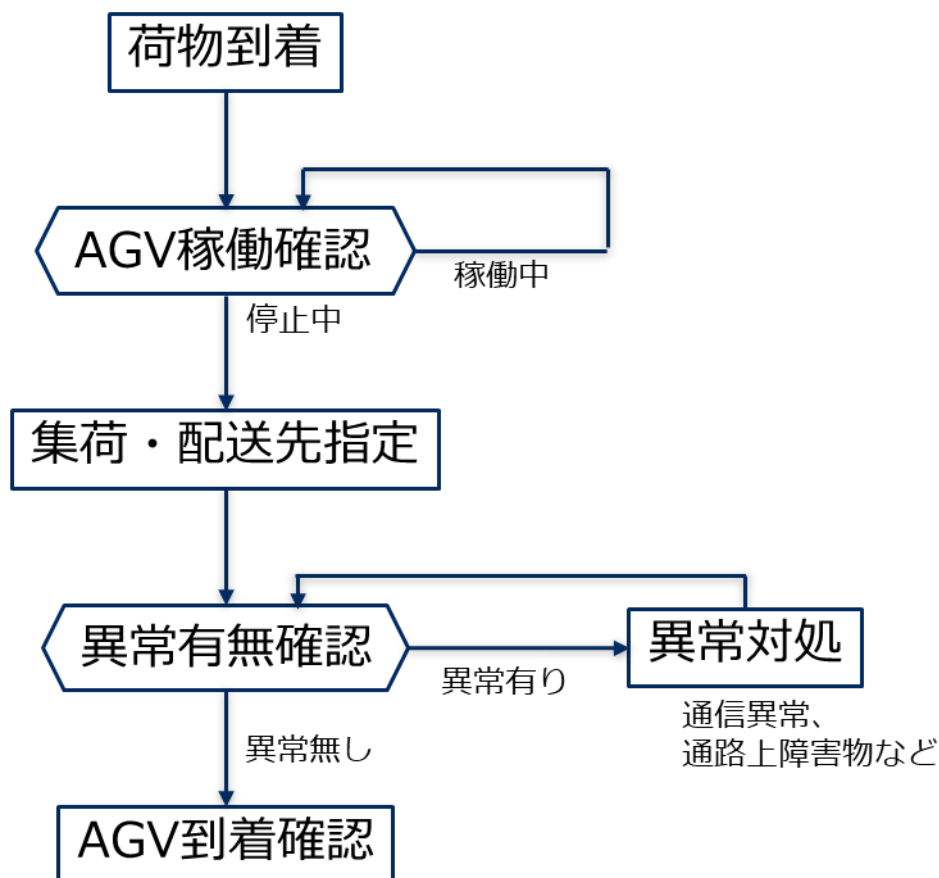


図 4.7-31 システム運用時作業フロー

表 4.7-9 システム運用に関する今後の課題

項目	今後の課題
導入	導入費用の捻出
	現場ごとにエリア設計をカスタマイズ
	制御系機器の設置場所確保・有線ケーブルの取り回し
	現場ごとの AGV 走行のルール作り
運用	通常使用量に応じたバッテリー交換時間の把握
	カゴ車に重量物を積む場合のカメラ設置位置確認
	通信異常時のアラート通知方法の策定
汎用性 拡張性	AGV 多数台対応の拡張
	別の AGV 機種・別のカメラ機種の対応
	カメラ映像とともに音声も同時に送信

#### 4.7.3 ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援

##### 4.7.3.1 ア-3 検証方法

ア-3 で検証した課題解決システムにおいて、運用保守とリモート環境との連動の検証を行う。振動センサの情報は、実際に切削を行っている刃の種類や切削動作の違いにより異なる。その為、実際に機械がどのように動作しているかの情報を入力し、予防保全につなげる必要があり、その運用方法の明確化と検証を行う。

##### (1) 検証項目

図 4.4-36に記載の実証システムを運用する際に留意すべき事項や課題を検証する。検証項目は以下の通りである。

##### 1. システム導入

実証システムを保守業務に導入する際に留意すべき事項を検証する。

##### 2. システム運用(保守業務での活用)

実際に業務に実証システムを使用する際に留意すべき事項について検証する。

##### 3. 汎用性・拡張性

実証システムが他業務・他地域へ横展開を可能とする汎用性・拡張性を有しているか検証する。また横展開に必要な要求事項・機能等を汎用性・拡張性の観点から整理する。

##### (2) 検証方法

被験者に実証システムを体験していただき、運用に関する留意点や意見を収集する。意見等の収集は、体験後のアンケート、体験中および体験後のヒアリングにより行った。

##### 4.7.3.2 ア-3 検証結果

アンケート、ヒアリングを通して収集したシステムの導入・運用に関して気になる点および実証システムの汎用性・拡張性に関する意見を表 4.7-10 に記す。

表 4.7-10 運用に関するアンケート結果

項目	アンケート回答結果
導入	導入コスト(AR 機器が高額)
	AR 機器の選定
	AR 機器の耐用年数
	現場のセキュリティ方針への対応
	海外での適用範囲(技適含む)
運用	AR 機器の管理
	AR 機器の準備の容易さ
	AR 機器の装着性(重量、配線)
	AR 機器の作業に対する耐性(耐衝撃、耐水、耐油)
	バッテリーの持続時間
	AR 機器のトラブル時の対応(復旧の容易性・時間)
	AR 機器故障時の対応(システム提供者の対応)
	AR 機器を用いたコミュニケーション特有のスキルの獲得
	AR コンテンツの視認性(悪いと危険度が高まる)
	AR コンテンツの作成・管理
汎用性・拡張性	既に汎用性・拡張性を有している
	映像品質の改善が必要
	AR 機器の装着性・操作性(大きさ、重量、スマホ並みの操作性)
	翻訳機能
	音声認識等、ハンズフリーによる AR コンテンツ閲覧機能
	5G 以外の無線環境での実現

### 1. システムの導入

システム導入に際し気になる点として、AR 機器の価格が挙げられた。AR 機器の価格については費用対効果の観点だけでなく、運用時に高価な機器だと気になり作業に影響が得る可能性があるとの指摘もあった。また AR 機器に関しては機器の選定や耐用年数が挙げられた。

その他、保守業務の現場が顧客先や海外であることもあることから、現場のセキュリティ方針への対応や無線機器等の海外での適用範囲が挙げられた。製造現場では撮影やカメラ(カメラ機能を備える携帯電話等の機器含む)の持ち込みを禁じていることも多く、導入に際して検討が必要だと思われるとのことであった。

### 2. システム運用

運用面に関しては、作業の妨げとならない装着性と AR 機器の現場に対する耐用性(耐衝撃、防水、耐油性等)の他に AR 機器の準備の容易性が挙げられた。これは実証システムでは



スマートグラス、カメラおよび通信機器と多数の機器を装着する必要があったため、懸念点として挙げられたと思われる。実証実験ではそれら機器をセットアップした作業着を羽織れば良いようにセットアップしていたにも関わらずこのような懸念点が挙げられたため、使用する機器は1つのモジュールになっている等、複雑性を感じ支えない形態であることが望ましいと考えられる。

また運用時に特に気になる点としてバッテリーの持続時間が挙げられた。現場作業は場合によっては長時間になるため、理想的には10時間は持つて欲しいという意見もあった。その他、システムのトラブル時の対応の手厚さや迅速な復旧が求められることが分かった。

スマートグラスに表示するコンテンツについては、表示に気付き難いという意見と輝度が高く周囲の状況の視認の妨げとなり危ないとの真逆の意見があった。これはスマートグラスの装着性とコンテンツの表示方法の両者の改善で対応する必要がある。またメガネ着用者にも配慮した(メガネの上から着用できるスマートグラス)に対する要望の多かった。

### 3. システムの汎用性・拡張性

システムの汎用性・拡張性については、実証システムが他の現場等に展開できる汎用性・拡張性を有しているとする意見と、更なる映像品質の改善が必要とする意見に分かれた。映像品質に関してはカメラの解像度の過不足に関するものもあり、想定される点検対象およびそれらに記載されている文字の大きさにより過不足の判断に差が表れたと考えられる。共通する意見は、遠隔保守員が配信映像内の文字を読める程度の解像度が必要であった。また被験者によっては実証システムで実装したカメラ程の画角(カメラが撮影できる範囲の広さ)は必要ないとの意見があり、適用する作業によってカメラのスペックを検討する必要があることが分かった。

その他、海外現場への対応として画像からの翻訳機能、AR機器の操作をハンズフリー化(音声認識等)が拡張機能として望まれることが分かった。

#### 4.7.3.3 ア-3 考察

アンケートの結果、ネットワーク速度や映像配信の品質以外にAR機器と適用作業とのマッチング、現場(特に顧客先や海外)のルールとシステムの適合性に課題があることが明らかとなった。これらはシステムを活用する現場や業務/作業により求められる機器や機能等が異なることを示唆している。したがって、導入時にシステム活用範囲とその内容を踏まえ吟味する必要がある。またシステムを提供する側においては、これらニーズを満たす機能の整備とサービス形態の検討が必要になるとと思われる。

AR機器については、主に運用面において装着性や作業を阻害しないこと、AR機器のトラブル時の復旧方法を含む操作性およびバッテリーの持続時間が主な課題であることが分かった。現在の携帯電話の発展を見ると、AR機器についてはニーズが高まれば小型化、軽量化やより現場に適合したモジュールとしての実装は可能であると考えられる。一方でバッテリーの持続時間やシステム活用時の安全性に対する要求レベルは非常に高いため、ソフトウェア、ハードウェアおよび運用方法の工夫により、要求レベルを満たす必要がある。例えば予備バッテリーの準備や簡便な切替方法、作業員の視野を狭めることなく必要なタイミングで効果的に情報を表示する仕組みや映像の遅延を警告する機能等が考えられる。その他、ARコンテンツの作成・管理に関する懸念点もあるため、AR機器を用いたコンテ

ンツのオーサリング機能および管理機能も必要である。

システムの汎用性・拡張性に関しては、現場映像および遠隔での指示の様子(マウスカーソルの動きや配信映像上への落書き機能)の共有機能で十分様々な業務に展開できる可能性があることが分かった。また付加機能として翻訳機能や音声認識機能にニーズがあることも明らかとなった。

表 4.7-11 にシステム運用時に必要となる作業を、表 4.7-12 に実証システムの運用に関する今後の課題をまとめる。

**表 4.7-11 システム運用時に必要となる作業**

作業	作業概要
AR 機器の保管	AR 機器の整理整頓、スケジューリング(複数名で共有する場合)
AR 機器の装着	AR 機器類の装着、配線類が作業に支障をきたさないか確認
AR 機器の接続・動作確認	ネットワークへの接続や遠隔保守員との通話確認
AR 機器のバッテリー交換	バッテリー残量が少なくなった場合、予備バッテリーへ交換
AR 機器の清掃	AR 機器が油等で汚れた場合、清掃
AR コンテンツの作成・管理	コンテンツの作成・修正と対象設備に合わせた更新

**表 4.7-12 システム運用に関する今後の課題**

項目	今後の課題
導入	適用する作業と AR 機器の適合性確認(作業姿勢を確保できるか等)
	適用現場のルールへの適応(法律および現場のポリシー等)
運用	限られたバッテリー持続時間への対応
	安全性を確保するための AR 機器および機能の設計およびルール作り
	AR コンテンツのオーサリング・管理機能の整備
汎用性 拡張性	必要な映像品質の定義と実現可能性の確認
	AR 機器の改善(装着性・操作性)
	付加機能の検討(翻訳機能、音声認識機能)
	5G 以外の無線環境での実現可能性の見極め

## 4.8 まとめ

本実証では、3つの課題解決システムの評価・分析を行い、効果検証、機能検証、運用検証を行った。

まず、それぞれの課題解決システムの検証の評価結果は以下の通りである。

- ア-1：変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化  
ローカル 5G のテストベッド環境において、実運用を想定したエリア設計内の電界強度環境(SS-RSRP:-120dBm)で、性能目標である 100mssec 周期(タイムアウト 4 回以下)の 10 時間以上の稼働を確認できた。また、低ノイズ環境(SS-RSRP:-60dBm)において、最高で 20msec 周期(タイムアウト 4 回以下)の 10 時間以上の稼働を確認できた。
- ア-2：無軌道型 AGV の遠隔制御  
5G を用いた無軌道型 AGV システムを構築し、カメラ映像と AGV 制御の通信は、約 30m の距離まで可能であることを確認した。さらに、5G では金属遮蔽等による通信品質劣化が懸念される為、無線 LAN エリアも併設し、5G と無線 LAN の経路切り替え機能の導入により、性能目標を達成する高スループット低遅延の実現を確認できた。
- ア-3：熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援  
5G を用いて振動データの収集を行い、AI による機器の異常検知を行うシステムを構築するとともに、現地映像のリアルタイム配信による情報共有システムを構築した。実証では、振動データのアップロードには平均で 3 から 5 秒程度要しており、TCP による通信速度の担保が課題として明らかとなった。映像配信に関しては、60Mbps の送信に対して概ね 60Mbps の受信が担保できているが、パケットロス等により映像品質がやや劣化することが分かった。

効果検証については、業務効率化の面では大きな効果が認められたと考えられる。一方で、費用対効果の面では、システムの導入費を大きいため、単一のソリューションのためにローカル 5G を導入するのは、高いハードルとなるそうであることが分かった。

機能検証については、今回の映像配信を活用した課題解決システムの実証を通し、映像品質(解像度・ビットレート)だけではなく、カメラの映像視野等も各システムによって要件が異なるため、目的に応じたデバイス・映像品質・アプリケーションを構築し、運用していくことが望ましいことが分かった。

運用検証については、工場という特性上、システムを安全に使用するためのルール作り、体制作りが重要であることが分かった。また、耐用性(耐衝撃・防水・耐油性等)や機器の準備の容易性、バッテリーの持続時間に留意する必要があると考えられる。

また、ローカル 5G システム自体の運用も、従来の無線 LAN 等の無線インフラと比較し、高度な専門知識が必要になると考えられるため、運用については機器ベンダや Sier と一体となって構築する必要があると考えられる。

## 5. ローカル 5G の性能評価の技術実証

### 5.1 前提条件

本技術実証で使用した測定機材は、高価な測定器ではなく、汎用のスマートフォンを使用し、5G の無線状態の測定用の Android アプリケーションを導入するだけで、測定可能となる仕組みとした。その理由としては、実際のローカル 5G の運用時にも簡易に測定できる仕組みが必要になると考えており、高価な測定器を使用すると計測項目は増えるものの、コストや測定器を扱える人材などが導入のハードルになると考えている。そこで、導入のハードルを下げることを念頭に、測定項目は制限されるものの、汎用のスマートフォンでも測定できる仕組みでどの程度まで有効な測定が可能になるかを検証することとしている。さらに、スマートフォンで測定した測定結果の集約先として、クラウドサーバを使用することで、工場内に設置する機材を最小化し、実証地域以外にも横展開が容易になるシステムを意識し、構築している。

本技術実証の測定で対象とするユースケースは、ア-2 無軌道型 AGV の遠隔制御、およびア-3 熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守作業支援とした。この理由を以下とする。

今回の実証環境として使用する NTT ドコモのキャリア 5G では、高速・大容量のユースケースをターゲットとする eMBB の機能が先行して提供されている。ア-2、およびア-3 は、動画ストリーミングが可能な広帯域な通信性能が求められ、一方で、求められる遅延性能が 500ms 程度と、eMBB のみがサポートされたシステムでも、十分に目標性能を達成でき、有意な評価ができると考えたためである。

一方、低遅延で信頼性の高い機能を実現する URLLC の機能が、3GPP における標準化が遅れている背景もあり、現段階では、サポートされていない。従って、ア-1 変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化では、低遅延な無線接続が 10 時間など長時間安定して実現する必要があり、URLLC の機能をサポートしていないキャリア 5G を用いて無線品質の変動要素が多い実際の工場環境で測定を実施しても、上記の要件を満たすことが困難で有意な評価にならないとと考えたため、今回の技術実証の評価対象のユースケースからは除外している。

なお、上記のそれぞれのソリューションにおける性能要件の拠り所は、本コンソーシアムメンバーも参画している FFPJ(Flexible Factory Project)内で議論、検討された結果が以下の文献にて公開されている。特に、遅延特性の性能について、アプリケーションごとに記載があり、ア-2 における無軌道 AGV の遠隔制御では、0.5～1sec 程度の性能が必要であるとされている。また、ア-3 における予防保全や設備保全に求められる遅延は 0.1～10sec と幅があるとされており、今回の実証内でのターゲットは、中間の 1sec とした。

出所) FFPJ ホワイトペーパー 製造現場における無線ユースケースと通信要件

カメラ映像の配信のために必要な帯域に関しては、使用する人の体感に関わる部分のため、明確な規定がない。そこで、今回の実証では、遠隔で現場のカメラ映像を細かく確認する必要があるユースケースに使用できるように、Full HD で高品質の映像の送信を想定し、カメラ 1 台当たりの帯域のターゲットを 10Mbps に設定した。

表 5.1-1 に今回構築した実証環境の基本的な諸元を示す。

NTT ドコモが商用化しているキャリア 5G を使用しており、NSA 構成となる。NSA 構成につき、5G だけではなく 4G のシステムも併設しており、使用周波数帯は、それぞれ、5G では 28GHz 帯、4G では 1.5GHz 帯および 1.7GHz である。無線局は、第二工場 A 棟の屋内に、5G の RU 2 局、4G の RRE 4 局(1.5GHz 帯および 1.7GHz の対応のものをそれぞれ 2 局ずつ)と、第二工場 D 棟の屋内に、5G の RU 1 局、4G の RRE 2 局(1.5GHz 帯および 1.7GHz の対応のものをそれぞれ 1 局ずつ)を設置した。アンテナに関しては、5G と 4G のアンテナが 1.5GHz 帯および 1.7GHz で共用となるため、第二工場 A 棟に 5G、4G のアンテナがそれぞれの 2 本ずつ、第二工場 D 棟に 5G、4G のアンテナがそれぞれの 1 本ずつ、高さ 9m となる位置に設置した。無線局、アンテナの設置場所に関しては、図 3.2-2 を参照されたい。

本技術実証で使用した測定端末は、汎用のスマートフォン(図 3.2-6、表 3.2-7 を参照)である。測定端末の使用台数は、基本性能等の単一の端末での評価では 1 台、同時測定等の複数の端末での評価では 20 台である。端末の設置高は、課題実証ア-3 のユースケースを想定し、スマートグラスでの使用を意識した高さの 1.5m、および課題実証ア-2 のユースケースを想定し、AGV での使用を意識した高さの 0.15m とした。設置場所の素材が測定評価への影響を少なくするように、樹脂製のスマートフォン用スタンドに端末を固定して実施した。基本、設置場所に端末を固定して測定を行い、一部、AGV のユースケースに関する移動評価のみ、端末を固定した樹脂製のスマートフォン用スタンドを台車に乗せて、測定を行った。なお、端末の設置に関する詳しい説明は、各実証の評価方法 (5.3.1 5.4.1 5.5.1 参照)で後述する。

また、本実証環境は、同期運用となっており、DU 比は固定で 4 : 1 であり、ダウンリンクに 4、アップリンクに 1 と無線リソースをダウンリンクに優先的に割り当てる設定である。

技術実証の測定を実施した第二工場 A 棟内の環境は、以下のとおりである。第二工場 A 棟内には、金属製の大型工作機械が 10 台弱設置されていた。大型工作機械の高さは、最高で 5m 程度の高さとなり、その陰は電波が遮蔽することが考えられる。大型工作機械は、技術実証の測定中、頻繁に動作しており、動作中は、工作機械の金属部分が激しく動く形であった。また、第二工場 A 棟内は、高さ 8m 付近に大型のクレーンが設置されており、大型の金属体を運ぶために、頻繁に動作していた。さらに、大型の金属体を運ぶために、フォークリフトが通路沿いに通っていた。以上のように、工作機械も含め、大型クレーンおよびフォークリフトなどの大型の金属体が頻繁に動く環境であり、その影響により、電波の遮蔽、反射等で、電波環境が頻繁に変動することが想定される環境である。

表 5.1-1 実証環境の基本的な諸元

SA/NSA 構成	NSA 構成
使用周波数帯	28GHz(5G)、1.5GHz(4G)、1.7GHz(4G)
屋内外環境	屋内
基地局の台数、設置環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・キャリア 5G 対応の基地局を設置</li> <li>・5G の無線局 : 3 局、4G の無線局 : 6 局</li> <li>・アンテナ高 : 9m に設置</li> </ul>
端末の台数、設置環境	・キャリア 5G 対応の汎用スマートフォンを使用

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 1 台、または 20 台</li> <li>・ 設置高：1.5m、0.15m</li> <li>・ 樹脂製のスマートフォン用スタンドを使用</li> <li>・ 基本、場所を固定、一部、AGV のユースケースに関する評価では、AGV の移動ルートに沿って移動</li> </ul>
同期・非同期運用	同期運用
DU 比	4 : 1 (DL : UL)
遮蔽物・反射物の概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金属製の大型工作機械が 10 台弱設置</li> <li>・ 天井付近に設置された金属製の大型のクレーン 2 台が頻繁に動作</li> <li>・ 通路には、金属製のフォークリフトが動作</li> </ul>

既存の無線システムに影響を与えないよう検証を行うことについては、今回、以下のような対応を行った。今回の実証環境では、NTT ドコモのライセンスバンドである 28GHz(5G)、1.5GHz(4G)、1.7GHz(4G)を使用したため、工場内で NTT ドコモのキャリアサービスを使用していない既存の無線システムに干渉することはないと考えられる。事後確認ではあるが、本実証中に既存の無線システムの品質劣化に関する問題が出ていなかったことから、事前の想定通り、既存の無線システムへの悪影響はなかったと言える。

一方で、工場内で使用できていた NTT ドコモの 4G 回線のサービスの品質劣化が発生しないよう、NTT ドコモの指導の下、以下の対策を行った。第二工場の屋外に設置した基地局搭載車に 4G のアンテナを設置し、新たな 4G のエリアを生成し、工場外から入ってくるユーザに対して、新たな 4G エリアに収容したのちに、屋内に設置したローカルな 4G、5G システムへのハンドオーバーできるようにすることで、4G 回線の瞬断等の劣化が発生しないような工夫を行った。

なお、本技術実証で必要となった実証環境、および測定機器類は、本コンソーシアムで準備を行った。

## 5.2 実証目標

本技術実証を実施するにあたり、背景となる技術的な課題は以下の3つと考える。

### ① 28GHz 帯の周波数のカバーエリアの狭さ

本実証で使用する28GHz帯の周波数は、サブ6GHz帯と比較し、周波数が高いために直進性強く、電波の回り込みの影響が出にくいいため、大型の金属体による遮蔽の影響が大きく、屋内環境では限定的なエリアしか形成できないという課題があると考えている。その結果、工場内のすべてをカバーしようとする、これまで以上の基地局数を設置する必要があり、システム導入コストが高くなってしまいうことが、ローカル5Gの普及のハードルになるということが考えられる。

### ② 同時接続数増加による実際に使用可能なスループットの低下

一般的に、同時に使用する端末が増えた場合、5Gのシステム帯域幅が複数の端末でシェアされることにより、実際に期待できるスループットは低下することが考えられる。そのため、同時に接続する端末数によるスループットの低下度合を考慮したシステム設計をする必要があるという課題があると考えている。

### ③ 反射体、遮蔽物が頻りに動く環境における無線環境変動による通信品質劣化

本実証で測定を実施する環境は、金属製の工作機械、大型クレーン、フォークリフト等の反射体、遮蔽物が頻りに動く環境のため、マルチパスフェージングの影響により受信レベルが変動することが考えられる。これにより、常時、無線環境の良い環境で使用することが難しく、実際に期待できるスループットに時間的な変動が出るという課題があると考えている。

以上の3つの技術的な課題を踏まえ、本実証の目標は以下に設定した。

- a. 工場環境において、28GHz帯を使用したローカル5Gのエリア設計を行う際に考慮すべき項目を明らかにすること
- b. 工場環境において、5G通信性能の劣化リスクを踏まえ、5Gを適用するシステム構築を行う際に考慮すべき項目を明らかにすること
- c. 工場環境において、ローカル5Gのエリア改善に効果があるアプローチを提示すること

上記の実証目標を達成するために行った実証項目とその狙いについて以下に述べる。

まず、上記の目標aを達成するために、ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等(5.3節参照)では、課題実証ア-2、およびア-3のユースケースにおいて5Gを使用した場合を想定し、基本的な実力値を工場内の様々な測定点で測定する。さらに、測定点や周りの環境による影響だけではなく、基地局のアンテナチルト変更による通信性能の優劣を明らかにし、その要因を考察することにより、ローカル5Gのエリア設計を行う際に考慮すべき項目を明らかにする。

次に、上記の目標bを達成するために、ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等(5.4節参照)では、同時複数端末接続による実質的に使用できるスループット低下、および無線環境変動による通信品質の劣化による影響を明らかにする。その影響の要因を考察することにより、5G通信性能の劣化リスクを踏まえ、5Gを適用するシステム構築を行う際に考慮すべき項目を明らかにする。

最後に、上記の目標cを達成するために、その他のローカル5Gに関する技術実証(5.5

節参照)では、28GHz 帯の周波数のカバーエリアの狭さという技術的課題を解消する 1 つのアプローチとして、調達が容易な金属板を使った反射板を用いて、狙ったエリアの通信性能の改善効果を明らかにする。その改善効果を鑑みて、反射板を用いたエリア改善を実施する場合の注意点、および実用的な適用ケースを提示する。

また、以上の 3 つの目標達成に向かう取り組みにおいて、ローカル 5G の技術基準等の見直しに関し、以下の 2 つの項目に対する提言を行う。

- 工場環境で 28GHz 帯の 5G システムの電波伝搬に関する評価・分析を通じて、電波法関係審査基準に記載のあるローカル 5G のエリア算出法に関連する記載の改善点について提言を行う。
- 工場環境で技術実証のユースケースの性能基準を満たすかどうかの評価を通じて、情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会におけるローカル 5G に関する検討の中で議論されている基地局間の非同期・準同期運用の必要性について提言を行う。



### 5.3 ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等

本技術実証に係る測定項目およびその測定手法は、すべて共通とした。測定項目数は以下の6項目とし、汎用のスマートフォンでも測定可能、かつ、無線品質を測定する際に基本的な項目とした。測定項目の6項目について、以下で説明する。

#### 1. SS-RSRP (Synchronization Signal - Reference Signal Received Power)

SS-RSRP は 1 リソースエレメント当たりの Secondary Synchronization Signal (SSS)の受信電力である。トラフィック量に左右されないため、SS-RSRP は基地局からの電波の受信レベルを評価する基本的なパラメータとなり、基地局の送信電力やアンテナの向きと高さなど、基地局の固定的な設置条件と、基地局からの距離や障害物などの測定環境によってほぼ決定する値として用いられる。

#### 2. SS-RSRQ(Synchronization Signal - Reference Signal Received Quality)

SSS の受信品質を表す指標の 1 つである。SS-RSRP と RSSI の比によって算出される。RSRQ は、干渉によって値が変化し、近隣基地局の干渉が増大すれば RSRQ が小さくなる。4G の場合では、アンテナ 1 つの場合で最大-3 dB、アンテナ 2 つの場合で最大-6 dB であるが、5G の場合、干渉がない場合、理論上 Sub-Carrier Spacing(SCS)が 30 kHz で-10.16 dB、SCS が 120 kHz で-10.45 dB となる。

#### 3. SS-SINR (Synchronization Signal - Signal-to-interference-plus-noise ratio)

SSS の受信品質を表す指標の 1 つである。干渉が大きくなるとスループットに影響を与えるため、SS-RSRP だけでなく SS-SINR も同時に評価する必要がある。SINR では SSS と同じ帯域内に存在する干渉および雑音電力を分母とする。

#### 4. DL スループット

基地局から 5G 端末へ送信されるスループットである。

#### 5. UL スループット

5G 端末から基地局へ送信されるスループットである。

#### 6. 遅延

本実証の中では、5G 端末がデータを送信し、そのデータに対応する応答が返ってくる際にかかる往復遅延時間である。

表 5.3-1 にそれぞれの測定項目の測定仕様を示す。SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR の測定に関しては、Android API から各測定値を取得する自製の Android アプリケーションを使用した。図 5.3-1 は、自製の Android アプリケーションで SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR 測定を実施したときの測定画面である。測定頻度は、1 秒毎となるため、測定値は 1 秒間の区間平均値となる。測定粒度は、Android API の仕様につき、1dB 刻みである。測定した各測定値は、10 秒毎にクラウドサーバに送信され、クラウドサーバに測定値が蓄積される仕組みとなっている。各測定値は、5G 経由でクラウドサーバに送信されるが、5G の帯域に対して情報量は小さいため、スループット測定に与える影響はほぼ無視できるものである。

一方、DL スループット、UL スループット、遅延の測定に関しては、汎用の Android アプリケーションを活用した。測定頻度は、1 分毎とした。測定粒度は、スループットに関しては、0.01Mbps 刻み、遅延に関しては 1 ミリ秒刻みである。図 5.3-2 は、汎用の Android アプリケーションでスループット、遅延測定を実施したときの測定画面である。今回使用したアプリケーションでは、遅延(ping を使用した測定)、DL スループットの測定、UL スル

スループットの測定は個別、かつ順番に実施され、それぞれ、1秒、10秒、10秒程度の測定時間となっている。従って、遅延の測定値は、1秒程度の平均値、DLスループット、およびULスループットの測定値は10秒程度の平均値となる。上記の自製のAndroidアプリケーションとは異なり、測定した各測定値は、スマートフォン内にログとして蓄積される仕組みとなっている。

なお、スループットを測定する際に送信する通信量は設置可能となっているが、今回はスループットが1Gbps以上となることも予想されたため、制限なしに設定した。この場合、1Gbps超の超高速の場合であっても測定可能であることを事前に確認した。また、遅延に関しては、1ミリ秒刻みで測定可能であり、課題実証のAGV制御の遅延の要求性能は500ミリ秒のため、十分な精度で測定できると考えられる。

今回実証に使用する実証環境がキャリア5Gということもあり、スループット、および遅延測定に使用する測定サーバはインターネット上のものを使用している。従って、有線区間と無線区間の遅延を分解して分析は評価構成上、困難である。しかし、現在地を基に使用するサーバの最適化できる機能を持っているため、5Gシステム外で発生するインターネットによる遅延等は最大限抑える構成になっている。ただし、本実証環境の5Gのコアネットワークは商用網を使用しているため、商用網を使用する他のトラフィックによるネットワーク負荷増の影響はある程度受けることは想定される。

以上が技術実証で共通部分である測定項目に関する説明であった。測定の狙い、測定場所、測定期間、測定方法については、それぞれの測定内容によって異なるため、以降の評価方法の部分でそれぞれ説明する。

表 5.3-1 測定項目の測定仕様

測定項目(単位)	測定手法	測定頻度	備考
SS-RSRP(dBm)	自製 Android アプリケーション	1秒毎	
SS-RSRQ(dB)	自製 Android アプリケーション	1秒毎	
SS-SINR(dB)	自製 Android アプリケーション	1秒毎	
DLスループット(Mbps)	汎用 Android アプリケーション	1分毎	測定時間は10秒/回
ULスループット(Mbps)	汎用 Android アプリケーション	1分毎	測定時間は10秒/回
遅延(sec)	汎用 Android アプリケーション	1分毎	往復遅延 測定時間は1秒/回

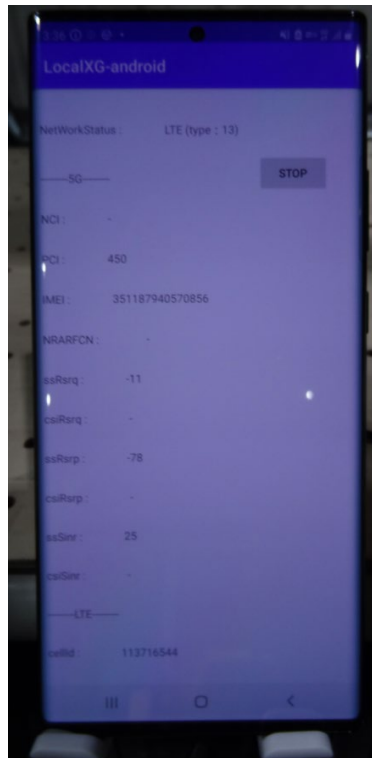


図 5.3-1 SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR 測定の測定画面

タイプ	日付時間	ピン ms	ダウン Mbps	アップ Mbps
	26-01-2021 10:51	19	779.32	74.17
	26-01-2021 10:50	21	774.30	100.46
	26-01-2021 10:49	25	199.10	49.30
	26-01-2021 10:48	37	278.31	71.36
	26-01-2021 10:47	33	256.10	78.00
	26-01-2021 10:46	20	792.79	103.26
	26-01-2021 10:45	17	792.32	80.68
	26-01-2021 10:44	16	758.50	80.73
	26-01-2021 10:43	21	664.57	99.76

図 5.3-2 スループット、遅延測定の測定画面

表 5.3-2 に技術実証の各評価を行ったスケジュールを示す。実証実験の期間は、三菱重工工作機械の工場側と調整を行い、2021/1/25～2021/2/5 とした。今回、工事が伴うチルト変更の予定があったため、第 1 週の最終日である 2021/1/29 に実施と事前に計画した。また、反射板の設置は、免許人である NTT ドコモしかできないため、2021/2/3 に実施と事前に計画した。それ以外の測定に関しては、評価時間とチルト角を考慮し、効率よく測定できるよう以下のようなスケジュールで実施した。

表 5.3-2 技術実証の評価スケジュール

2021/1/25(月)	2021/1/26(火)	2021/1/27(水)	2021/1/28(木)	2021/1/29(金)
測定準備	基本性能評価 端末高による影響評価	動的電波MAP作成試験	基本性能評価 端末高による影響評価 同時多数接続試験 工場外の電波漏洩評価	チルト変更工事 (5度→30度)
2021/2/1(月)	2021/2/2(火)	2021/2/3(水)	2021/2/4(木)	2021/2/5(金)
チルト角による影響評価	移動による影響評価	反射板の影響評価	予備	撤収

### 5.3.1 評価方法

#### 5.3.1.1 基本性能評価方法

表 5.3-3 に基本性能評価の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、課題実証ア-3 のスマートグラスを使用する端末高(1.5m)を想定し、5G を使用した場合、0 節で定義したネットワーク性能目標を満たせるカバーエリアを明確化することである。さらに、類似案件の電波伝搬損失モデル(5.3.2 節参照)を踏まえ、本測定の SS-RSRP の測定結果を基に電波伝搬損失を算出し、工場環境におけるローカル 5G のエリア構築に活用可能な電波伝搬モデルを導出する。

測定場所は、三菱重工工作機械 栗東工場 第二工場 A 棟内とし、測定点を 20 か所設定した。図 5.3-3 に 20 か所の測定点の位置を第二工場 A 棟の平面図上に示す。測定点は、見通し (LOS: Line of sight)、見通し外 (NLOS : Non-line of sight) をバランス良く 10 点ずつ混在させ、かつ、RU からの距離もばらけるように選定を行った。測定点の測定点番号は、1~10 が LOS の測定点、11~20 が NLOS の測定点とし、それぞれ RU との距離が近い順に並べた(測定点と RU の距離は、表 5.3-4 を参照のこと)。測定点と周りの遮蔽物の高さの関係を表すために、図 5.3-4 に測定点の垂直断面図を示す。A 棟内の遮蔽物は、主に大型クレーンと工作機械となる。大型クレーンは、RU を設置した 9m のすぐ下の 8m あたりを通過する。工作機械は、最も高い所は 5m 程度であり、約 2m 程度の高さのところもある構造となっている。図のように、高さ 1.5m に端末を設置すると、工作機械の最も高い所が邪魔になり NLOS になるが、工作機械や端末の上部の空間は開けており、電波が完全に遮蔽されることはない環境である。図 5.3-5~図 5.3-8 は、LOS の測定点 1、2 および NLOS の測定点 11、16 での測定中の写真である。測定環境の様子を確認するため、適宜、参照されたい。

測定端末の設置に関しては、工場内の棚等に置く方法では、設置場所や設置高の制約が大きく、上記の測定点の要件を満たすことが困難であったため、台車に固定したラック上に 1 台の測定端末を設置し、20 点の測定点を順次回る方法とした。図 5.3-9 は、測定台として使用した台車に固定したラックの写真である。端末の設置方法により測定結果が変わらないように配慮し、ラックの天板は木製とし、その上に樹脂製のスマートフォン用スタンドにスマートフォンを固定して測定を行った。

本評価の測定時間は、3 分の測定を 1 セットとして実施し、試行回数は測定点当たり 3 セット実施した。従って、SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR に関しては、1 秒毎の測定を 3 分間実施し、それを 3 回繰り返した。一方、DL、UL スループット、遅延の測定に関しては、

1分毎の測定を3分間実施し、それを3回繰り返した。  
 なお、RUのアンテナのチルト角は5度とした。

表 5.3-3 基本性能評価の概要、評価方法

測定の狙い	<ul style="list-style-type: none"> <li>・スマートグラスを使用する端末高での計測し、性能要件を満たすエリアを明確化</li> <li>・工場の伝搬損失モデルの検討、考察</li> </ul>
測定場所	第二工場 A棟内の20点固定(場所は図 5.3-3を参照) LOSとNLOSの測定点が均等(10点ずつ)になるように選定
測定方法	台車に固定したラック上に測定端末を設置し、20点の測定点を順次回る方法
測定時間	1点あたり3分×3回
RUのアンテナチルト	5度
端末の台数	1
端末の設置高	1.5m

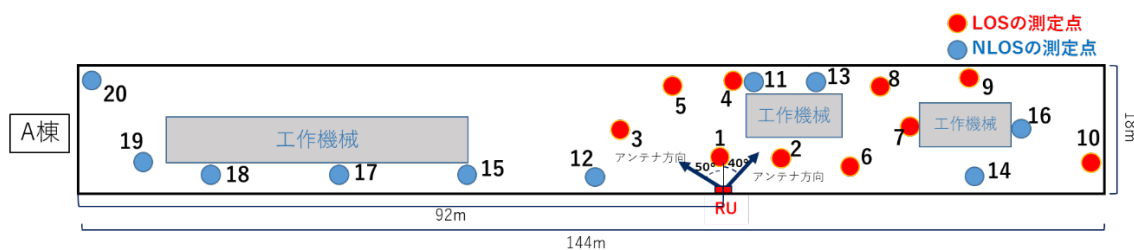


図 5.3-3 測定点の位置(端末高: 1.5m)

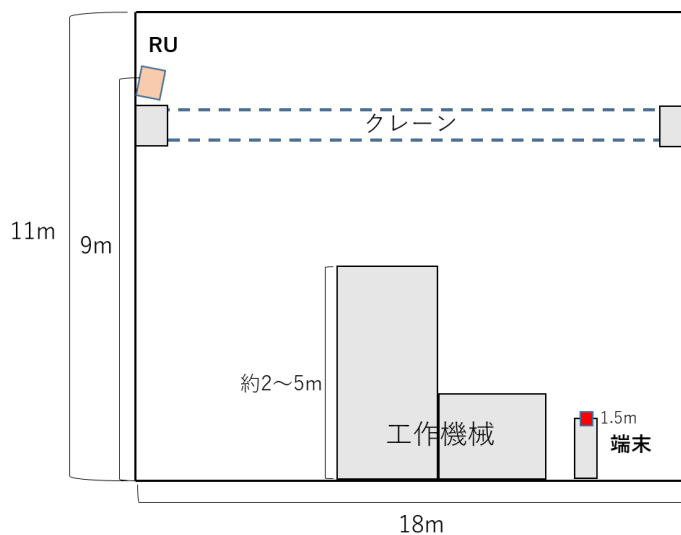


図 5.3-4 測定点の垂直断面図

表 5.3-4 測定点の情報(測定点1~20)

測定点番号	RUとの3D距離(m)	端末高(m)	LOS/NLOS
1	10.3	1.5	LOS
2	13.7	1.5	LOS
3	18.2	1.5	LOS

4	18.7	1.5	LOS
5	19.2	1.5	LOS
6	19.9	1.5	LOS
7	28.4	1.5	LOS
8	30.5	1.5	LOS
9	40.4	1.5	LOS
10	54.9	1.5	LOS
11	18.8	1.5	NLOS
12	23.1	1.5	NLOS
13	23.1	1.5	NLOS
14	36.8	1.5	NLOS
15	38.5	1.5	NLOS
16	45.9	1.5	NLOS
17	54.6	1.5	NLOS
18	72.4	1.5	NLOS
19	81.5	1.5	NLOS
20	91.4	1.5	NLOS



図 5.3-5 測定点 1(LOS)での測定の様子



図 5.3-6 測定点 2(LOS)での測定の様子



図 5.3-7 測定点 11(NLOS)での測定の様子



図 5.3-8 測定点 16(NLOS)での測定の様子



図 5.3-9 使用した測定台

#### 5.3.1.2 端末高による影響評価方法

表 5.3-5 に端末高による影響評価の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、無軌道 AGV で使用する端末高(0.15m)を想定しし、5G を使用した場合、0 節で定義したネットワーク性能目標を満たせるカバーエリアを明確化することである。



図 5.3-10 に測定点の位置と測定点番号を示す。評価点の平面図上の場所は、基本性能評価で設定した測定点(図 5.3-3 参照)と同一であるが、端末高のみ異なる。測定点番号は、21～30 が LOS の測定点、31～40 が NLOS の測定点とし、それぞれ RU との距離が近い順に並べた(測定点と RU の距離は、表 5.3-6 を参照のこと)。

測定点の高さを、1.5m から 0.15m に変更した以外の条件は、0 節で記載した基本性能測定と同一であるため、ここでは詳細な説明は割愛する。

表 5.3-5 端末高による影響評価の概要、評価方法

測定の狙い	AGV が使用する端末高での計測し、性能要件を満たすエリアを明確化
測定場所	第二工場 A 棟内の 20 点固定(場所は図 5.3-10 を参照) LOS と NLOS の測定点が均等(10 点ずつ)になるように選定
測定方法	台車に固定したラック上に測定端末を設置し、20 点の測定点を順次回る方法
測定時間	1 点あたり 3 分×3 回
RU のアンテナチルト	5 度
端末の台数	1
端末の設置高	0.15m

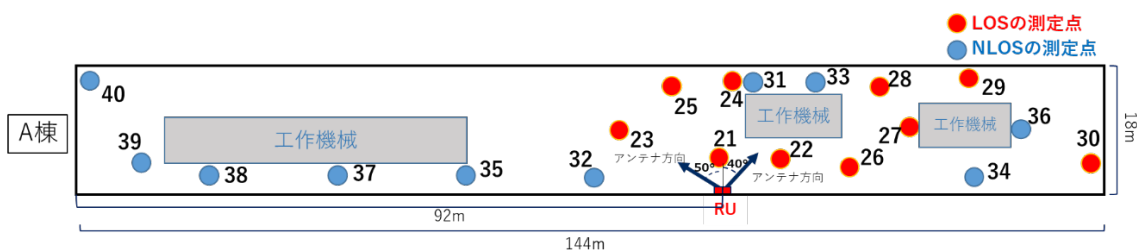


図 5.3-10 測定点の位置(端末高 : 0.15m)

表 5.3-6 測定点の情報(測定点 21～40)

測定点番号	RU との 3D 距離(m)	端末高(m)	LOS/NLOS
21	11.3	0.15	LOS
22	14.5	0.15	LOS
23	18.8	0.15	LOS
24	19.3	0.15	LOS
25	19.7	0.15	LOS
26	20.5	0.15	LOS
27	28.8	0.15	LOS
28	30.9	0.15	LOS
29	40.7	0.15	LOS
30	55.1	0.15	LOS
31	19.3	0.15	NLOS
32	23.6	0.15	NLOS
33	23.6	0.15	NLOS
34	37.1	0.15	NLOS
35	38.8	0.15	NLOS
36	46.1	0.15	NLOS
37	54.8	0.15	NLOS

38	72.6	0.15	NLOS
39	81.7	0.15	NLOS
40	91.5	0.15	NLOS

### 5.3.1.3 チルト角による影響評価方法

表 5.3-7 にチルト角による影響評価の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、RU のチルト角を変更した場合、そのカバーエリアの変化を明確化することである。

測定場所は、無軌道 AGV で使用する端末高(0.15m)を想定したので、設置点の場所および測定点番号は、図 5.3-10、表 5.3-6 で示したものと同一となる。その他は、RU のチルト角を 5 度から 30 度に変更した以外の条件は、0 節で記載した基本性能測定と同一であるため、ここでは詳細な説明は割愛する。

図 5.3-11 に RU のチルト角変更の工事中的様子、図 5.3-12 にチルト角変更の完了後のアンテナの外観を示す。図で示すように、チルト角は、5G のアンテナのチルト角だけではなく、4G のアンテナも同様に、5 度から 30 度に変更した。

表 5.3-7 チルト角による影響評価の概要、評価方法

測定の狙い	RU のチルト角変更によるカバーエリアへの影響を調査
測定場所	第二工場 A 棟内の 20 点固定(場所は図 5.3-10 を参照) LOS と NLOS の測定点が均等(10 点ずつ)になるように選定
測定方法	台車に固定したラック上に測定端末を設置し、20 点の測定点を順次回る方法
測定時間	1 点あたり 3 分×3 回
RU のアンテナチルト	30 度
端末の台数	1
端末の設置高	0.15m

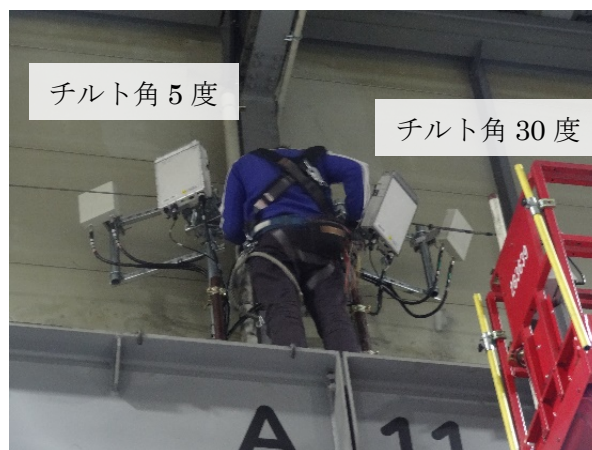


図 5.3-11 チルト変更作業中様子  
(左側アンテナ変更前チルト 5 度、右側アンテナ変更後チルト 30 度)

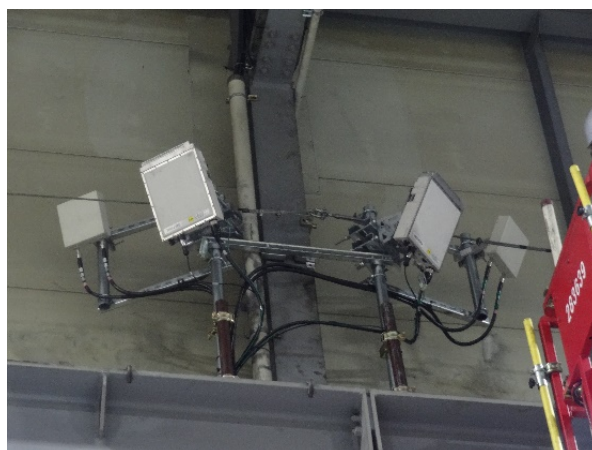


図 5.3-12 チルト変更作業完了後のアンテナ  
(左側、右側共にアンテナチルト 30 度)

#### 5.3.1.4 移動による影響評価方法

表 5.3-8 に移動による影響評価の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、課題実証ア-2 の課題実証において AGV が移動する経路で、5G を使用した場合、0 節で定義したネットワーク性能目標を満たせるかを明確化することである。

測定場所は、第二工場の A 棟～C 棟の通路となり、ア-2 の課題実証における無軌道 AGV の経路となる。図 5.3-13 に測定を行った移動ルートを示す。C 棟 通路上の A 地点からスタートし、B 棟を経由して A 棟の B 地点まで移動し、折り返すルートである。図 5.3-9 に示した台車の固定した測定台の高さ 0.15m に 1 台の測定用スマートフォンを設置し、台車を AGV の最大走行速度の約 2km/h で押しながら測定した。片道で約 3 分 15 秒程度のルートであったが、B 地点から折り返し時に時間調整を行い、A 地点からスタート後の 4 分後に B 地点から折り返し移動を開始した。

測定時間は、上記の時間調整を含めた移動にかかる時間であり、約 7 分程度であった。約 7 分間、SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR に関しては、1 秒毎の測定を繰り返し、DL、UL スループット、遅延の測定に関しては、1 分毎の測定を繰り返した。

なお、ア-2 の課題実証における条件に合わせ、RU のアンテナのチルト角は 30 度とした。

表 5.3-8 移動による影響評価の概要、評価方法

計測の狙い	AGV が使用する端末高で移動する実際に近い形での計測
計測場所	第二工場 A、B、C 棟の AGV の移動経路上
計測方法	台車に固定したラック上に測定端末を設置し、台車を移動しながら計測
計測時間	約 7 分(AGV の移動経路移動に時間)
RU のアンテナチルト	30 度
端末の台数	1
端末の設置高	0.15m

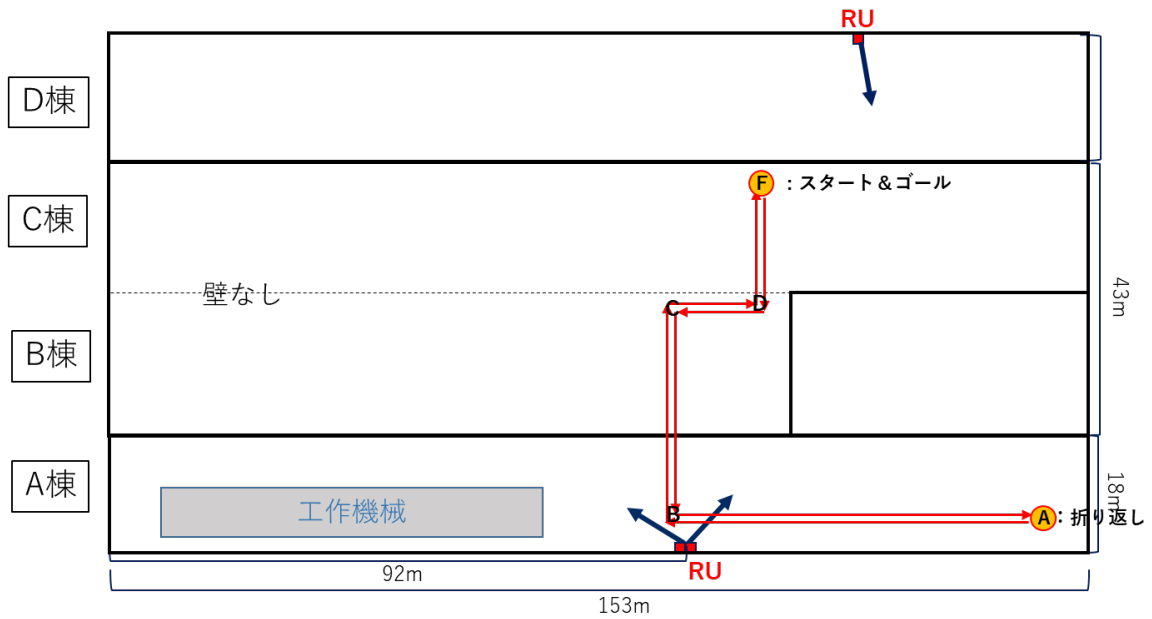


図 5.3-13 移動測定ルート

### 5.3.1.5 工場外の電波漏洩評価方法

表 5.3-9 に工場外の電波漏洩評価の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、工場外の電波漏洩の影響を明確化することである。

図 5.3-14 に工場外の電波漏洩評価の測定点の位置を示す。第二工場の D 棟の北側エリアの 4 点、A 棟の東側エリアの 1 点の計 5 点とした。前者の 4 点(測定点 41~44)は、D 棟に設置した RU(チルト角 40 度)からの屋外への電波漏洩の影響を評価するために、後者の 1 点(測定点 45)は、A 棟に設置した RU(チルト角 5 度)からの屋外への電波漏洩の影響を評価するために設定した(測定点と RU の距離は、表 5.3-10 を参照のこと)。基本性能評価の方法と同様に、台車に固定したラック上に 1 台の測定端末を設置し、屋外の 5 点の測定点を順次回る方法とした。図 5.3-15~図 5.3-18 は、測定点 41、42、44、45 での測定中の写真である。測定環境の様子を確認するため、適宜、参照されたい。

その他の条件は、0 節で記載した基本性能測定と同一であるため、ここでは詳細な説明は割愛する。

本評価の測定時間は、3 分の測定を 1 セットとして実施し、試行回数は測定点当たり 2 セット実施した。従って、SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR に関しては、1 秒毎の測定を 3 分間実施し、それを 2 回繰り返した。一方、DL、UL スループット、遅延の測定に関しては、1 分毎の測定を 3 分間実施し、それを 2 回繰り返した。

表 5.3-9 工場外の電波漏洩評価の概要、評価方法

測定の狙い	工場外の電波漏洩を調査
測定場所	第二工場の屋外の 5 点固定(場所は図 5.3-14 を参照)
測定方法	台車に固定したラック上に測定端末を設置し、5 点の測定点を順次回る方法
測定時間	1 点あたり 3 分×2 回
RU のアンテナチルト	40 度、5 度

端末の台数	1
端末の設置高	1.5m

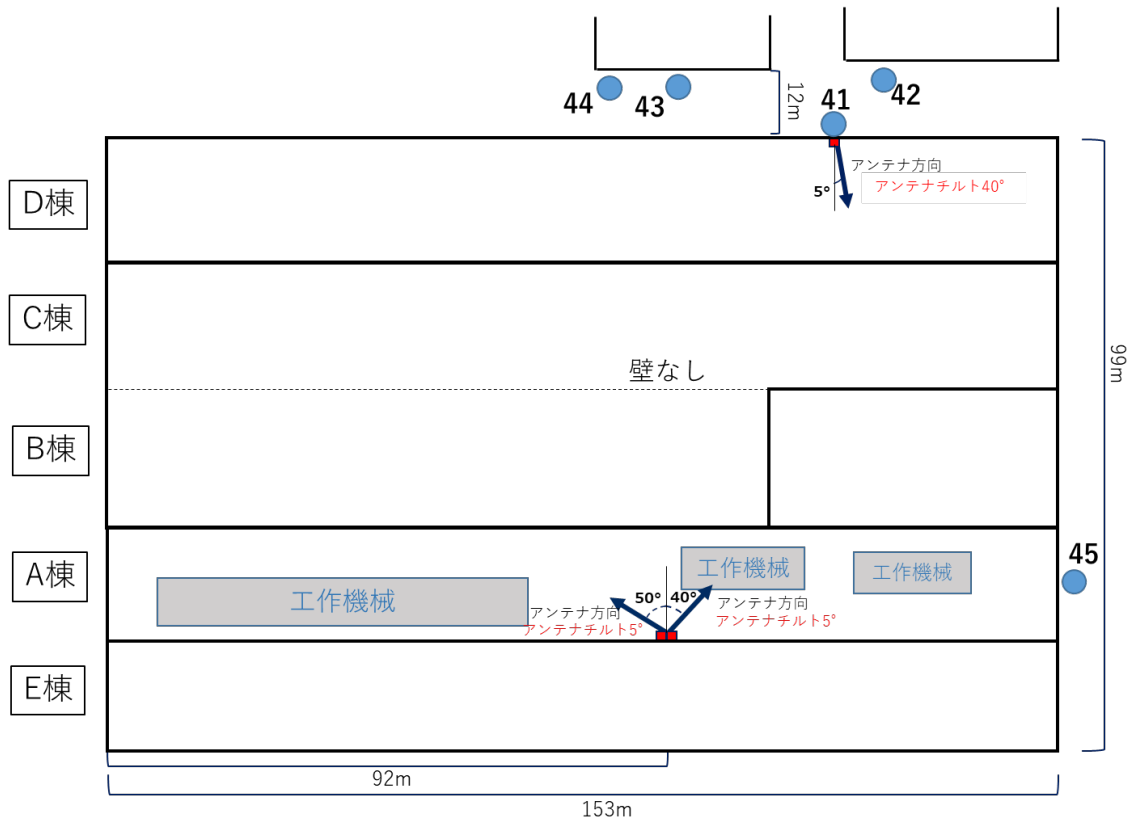


図 5.3-14 工場外の電波漏洩評価における測定点の位置

表 5.3-10 測定点の情報(測定点 41~45)

測定点番号	RU との 3D 距離(m)	端末高(m)	LOS/NLOS
41	7.5	1.5	NLOS
42	19.6	1.5	NLOS
43	27.1	1.5	NLOS
44	41.1	1.5	NLOS
45	65.9	1.5	NLOS



図 5.3-15 測定点 41 での測定の様子



図 5.3-16 測定点 42 での測定の様子



図 5.3-17 測定点 44 での測定の様子



図 5.3-18 測定点 45 での測定の様子

### 5.3.2 類似案件調査結果

本実証では、基地局を屋内に設置をするため、屋内の電波伝搬モデルの定義がある ITU-R P. 1238、工場における屋内の電波伝搬モデルの定義がある 3GPP InF (Indoor Factory) の電波伝搬損失式の調査を行った。また、主に屋外をターゲットとした電波法関係審査基準に記載のある電波伝搬モデルについての調査も併せて行った。上記 3 つの電波伝搬モデルを用いて、技術実証の実証測定の実施前に SS-RSRP の実測値の期待値の算出を行った。また、電波法関係審査基準に記載のあるエリア算出法を使用して、カバーエリアの期待値を算

出した。

$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n)$  dB (式に ITU-R P. 1238 で定義されている電波伝搬損失式を示す。

$$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n) \text{ dB} \quad (\text{式 5.3-1})$$

ここで、

$N$  : Distance power loss coefficient

$f$  : frequency (MHz)

$d$  : separation distance (m) between base station and portable terminal (where  $d > 1$  m)

$d_0$  : reference distance (m)

$L(d_0)$  : Path loss at  $d_0$ (dB), for a reference distance  $d_0$  at 1m, and assuming free-space propagation  $L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28$  where  $f$  is in MHz

$L_f$  : floor penetration loss factor (dB)

$n$  : number of floors between base station and portable terminal ( $n \geq 0$ ),  $L_f = 0$  dB for  $n = 0$

である。

表 5.3-11 に  $L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n)$  dB (式 5.3-1 で用いるパスロス係数  $N$  の値を示す。表より、28GHz 帯における工場モデルの記載はなく、オフィス(表中の Office)と商業施設(表中の Commercial) のモデルのみが記載されていることが分かる。そこで、ITU-R P. 1238 の調査対象としては、28GHz 帯におけるオフィスと商業施設のモデルとした。オフィスにおける 28GHz 帯の値は LOS 環境で 18.4、NLOS 環境で 29.9 となる。商業施設における 28GHz 帯の値は、複数の値があるが、LOS 環境で 17.9、NLOS 環境で 24.8 のものを調査対象とした。

表 5.3-11 パスロス係数(Distance power loss coefficient) の値

Frequency (GHz)	Residential	Office	Commercial	Factory	Corridor	Data Centre
5.8	-	24	-	-	-	-
26	-	19.5 <sup>(14)</sup>	-	-	-	-
28	-	18.4 <sup>(12)</sup> 29.9 <sup>(12)</sup>	27.6 <sup>(8)</sup> 17.9 <sup>(12, 13)</sup> 24.8 <sup>(12, 13)</sup>	-	-	-
37	-	15.6 <sup>(14)</sup>	-	-	-	-
38	-	20.3 <sup>(12)</sup> 29.6 <sup>(12)</sup>	18.6 <sup>(12, 13)</sup> 25.9 <sup>(12, 13)</sup>	-	-	-
51-57	-	15 <sup>(10)</sup>	-	-	13 <sup>(10)</sup> 16.3 <sup>(4, 10)</sup>	-
60	-	22 <sup>(1)</sup>	17 <sup>(1)</sup>	-	16 <sup>(1)(7)(9)</sup>	-
67-73	-	19 <sup>(11)</sup>	-	-	16 <sup>(11)</sup> 17.6 <sup>(4, 11)</sup>	-
70	-	22 <sup>(1)</sup>	-	-	-	-
300	-	20 <sup>(15)</sup>	-	-	19.5 <sup>(9, 15)</sup>	20.2 <sup>(15)</sup>

出所) ITU-R P.1238-9 より作成



次に、3GPP の文献調査を行った。3GPP TR 38.901 では、工場の屋内の電波伝搬モデル InF が定義されている。LOS 環境のモデル、および NLOS 環境は工場内の環境の違いにより 4 つのモデルが定義されている。4 つのモデルとは、InF-SL (sparse clutter, low BS)、InF-DL(dense clutter, low BS)、InF-SH(sparse clutter, high BS)、InF-DH(dense clutter, high BS)であり、今回、実証環境に近いものとして、InF-DH を調査対象とした。InF-DH は、金属体が密に置かれている環境で金属体よりも基地局アンテナが高い位置にある環境であり、4 つのモデルの中では、最も伝搬損失が小さく、電波が飛ぶモデルである。

$PL_{LOS} = 31.84 + 21.50\log_{10}(d_{3D}) + 19.00\log_{10}(f_c)$  dB (式 5.3-2、 $PL = 33.63 + 21.9\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c)$  (式 5.3-3 に 3GPP TR 38.901 に記載されている電波伝搬モデルの LOS 環境、および NLOS 環境(InF-DH)の電波伝搬損失式をそれぞれ示す。

$$PL_{LOS} = 31.84 + 21.50\log_{10}(d_{3D}) + 19.00\log_{10}(f_c) \text{ dB} \quad (\text{式 5.3-2})$$

$$PL = 33.63 + 21.9\log_{10}(d_{3D}) + 20\log_{10}(f_c) \quad (\text{式 5.3-3})$$

$$PL_{NLOS} = \max(PL, PL_{LOS})$$

ここで、

$d_{3D}$ : 3D distance (m)

$f_c$ : frequency (GHz)

である。

出所) 3GPP TR 38.901 V16.1.0 (2019-12)より作成

最後に、電波法関係審査基準に記載のある電波伝搬モデルについて調査を行った。28GHz 帯の電波伝搬損失式は、以下のとおりである。

$d_{xy} \leq 0.04\text{km}$  の場合

$$L = L_0 = 32.4 + 20\log_{10}(f) + 10\log_{10}\left\{\left(d_{xy}^2\right) + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6}\right\} + R \quad (\text{式 5.3-4})$$

ここで、

$f$ (MHz): 使用する周波数

$H_b$ (m): 基地局の空中線地上高

$D_x$ (km): 基地局の伝搬損失を算定する地点との距離

$H_a$ (m): 移動局の空中線地上高。

$R$ (dB): 建物侵入損 [今回は  $R = 0\text{dB}$  で算出]

である。

$0.1\text{km} \leq d_{xy}$  の場合

$$L = L_0(d_{xy} = 0.04) + \{2.51 \times \log_{10}(d_{xy}) + 3.51\} \times \{L_H(d_{xy} = 0.04) - L_0(d_{xy} = 0.04)\} \quad (\text{式 5.3-5})$$

$0.04\text{km} < d_{xy} < 0.1\text{km}$  の場合

$$L = L_H = 46.3 + 33.9\log_{10}(2000) + 10\log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) - 13.82\log_{10}(\max(30, H_b))$$

$$+\{44.9 - 6.55\log_{10}(\max(30, H_b))\}(\log_{10}(d_{xy}))^\alpha - a(H_m) - b(H_b) + R - K - S \quad (\text{式 5.3-6})$$

ここで、

$R(\text{dB})$  : 建物侵入損 [今回は  $R=0\text{dB}$  で算出]

$\alpha$  : 遠距離に対して考慮する係数 [今回は  $\alpha=1$  で算出]

$a(H_m)$  : 移動局高に対して考慮する補正項 [今回は  $a(H_m)=0.057$  で算出]

$a(H_b)$  : 基地局高に対して考慮する補正項 [今回は  $a(H_b)=20\log_{10}(H_b/30)$  で算出]

$K$  : 地形の影響等の補正值 [今回は  $K=0$  で算出]

$S$  : 市街地、郊外、解放地に対して考慮する補正值 [今回は  $S=12.3$  で算出]

である。

図 5.3-19 に ITU-R、3GPP、電波法関係審査基準のモデルの電波伝搬損失特性を示す。電波法関係審査基準に記載のある電波伝搬モデルは、屋外をターゲットとしているため、パラメータが屋内向けにすることが難しかったため、参考値としてプロットする。今回の評価では、屋内の電波伝搬モデルがある ITR-R、3GPP を主な評価対象とする。

まず、LOS 環境のモデルに注目すると、3GPP のモデルと比較して ITU-R のモデルの方が、電波伝搬損失が小さく、電波が飛ぶモデルとなっていることが分かる。一方で、NLOS 環境のモデルに着目すると、逆に、3GPP のモデルの方が電波伝搬損失が小さく、電波が飛ぶモデルとなっていることが分かる。

以上の比較結果を踏まえると、以下の 2 つのことが考えられる。

- ITU-R のモデルは、工場モデルではなくオフィス、商業施設モデルであるため、反射が多い実際の工場の環境では、ITU-R のモデルの LOS 環境と比較して、電波伝搬損失が小さくなり、飛ぶ結果になる可能性もあると考えられる。
- 反射が多い実際の工場の環境では、3GPP の工場モデルと同様に、LOS 環境と NLOS 環境の伝搬損失の差がオフィスなどと比べると、小さくなるだろうと予測される。これは、これまでも栗東工場の第二工場で伝搬実験を行ってきたが、反射の影響が大きく、NLOS 環境でもよく飛ぶ結果が出ていたため、納得感のあるものである。

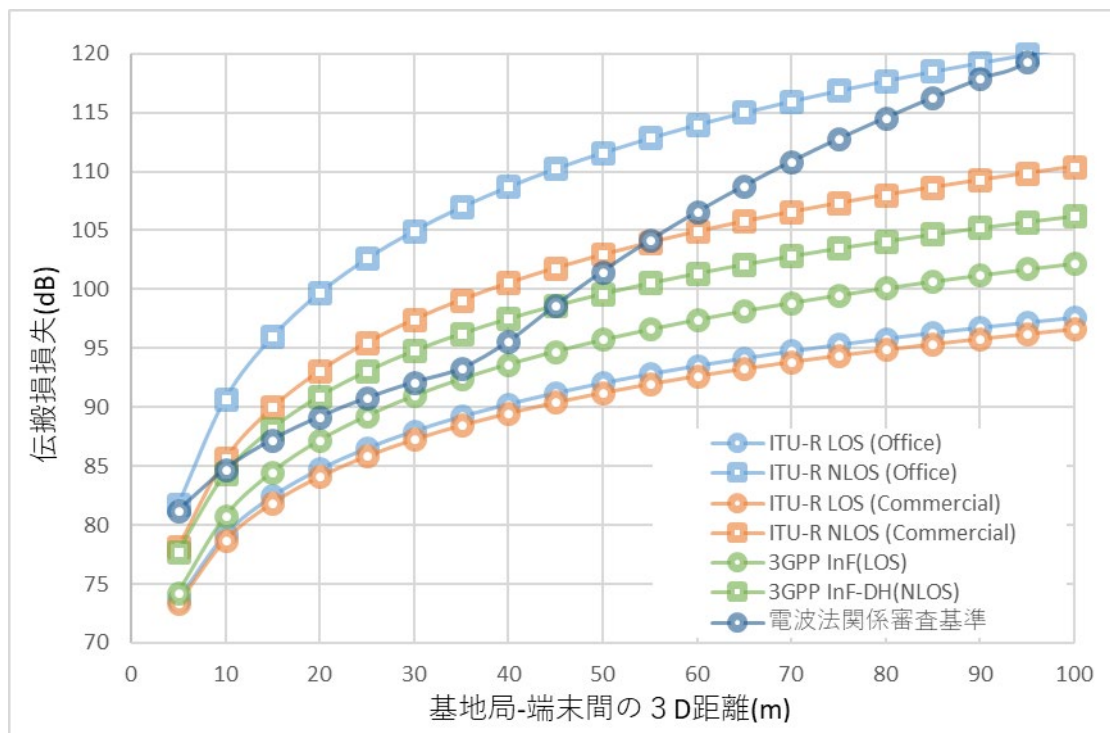


図 5.3-19 ITU-R および 3GPP モデルの電波伝搬損失特性

上記の伝搬損失モデルを基に、SS-RSRP(Synchronization Signal - Reference Signal Received Power)の期待値を算出した。伝搬損失と SS-RSRP の変換式として、以下の式を用いた。

$$L = P_t + G_t - L_f + G_r - P_r - 4 \quad (\text{式 5.3-7})$$

ここで、

L: 伝搬損失 (dB)

$P_r$ : 受信レベル(受信電力) SS-RSRP (dBm)

$P_t$ : 送信電力(基地局の空中線電力) SS の送信電力 (dBm)

$G_t$ : 送信アンテナ利得 (dBi)

$L_f$ : 基地局の給電線損失 (dB)

$G_r$ : 受信アンテナ利得 (dBi)

である。なお、 $P_t$ 、 $P_t$ 、 $G_t$ 、 $L_f$ 、 $G_r$  の個別の数値については、NTT ドコモの開示不可情報となる。

出所) 総務省 電波法関係審査基準 [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000711787.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000711787.pdf)

図 5.3-20 に ITU-R および 3GPP モデルの電波伝搬損失を基に算出した SS-RSRP の期待値を示す。上記の電波伝搬損失の比較のところでも述べたように、LOS 環境の実際の測定値が、ITU-R の現状のオフィスや商業施設の LOS 環境よりも飛ぶ可能性があり、かつ、反射の影響で LOS 環境と NLOS 環境の差が小さいと考えると、SS-RSRP の期待値は全体的に上振れする可能性もあると考えられる。

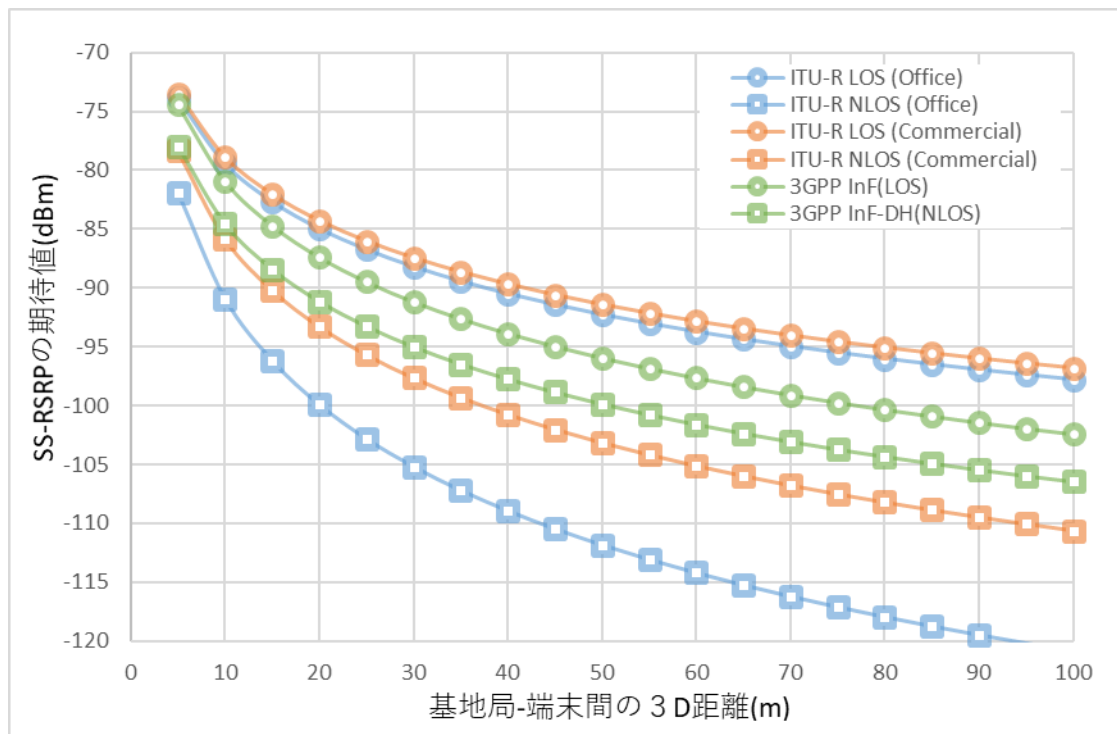


図 5.3-20 SS-RSRP の期待値

なお、電波法関係審査基準のエリア算出法によると、28GHz 帯の 400MHz システムのカバーエリアは、-75.2dBm、調整対象区域が-84dBm となっている。図 5.3-20 を見ると、一番電波が飛ぶモデルであっても、調整対象区域で 20m 程度となっており、かなり狭いエリアが該当する結果となった。

### 5.3.3 評価結果

#### 5.3.3.1 基本性能評価結果

本評価の測定項目(SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR、DL スループット、UL スループット、遅延)の測定値について、まず、各測定項目の最大値、最小値、中央値をプロットしたグラフを示す。

図 5.3-21 に SS-RSRP の測定結果を示す。LOS の測定点は、中央値が-70~-80dBm の範囲に収まることが多く、NLOS の測定点は、中央値が-70~-100dBm の範囲に収まることが分かる。最小値に注目すると、中央値から 10dBm ほど悪いサンプルが LOS、NLOS に関わらず、存在していることが分かる。これは、稼働中の工場で測定したため、周りの環境が変化することによるマルチパスフェージングの影響が出ていると考えられる。最大値に注目すると、中央値に近い値を取っている測定点が多いことが分かるため、マルチパスフェージングによる大きな劣化の頻度は限定的であると考えられる。

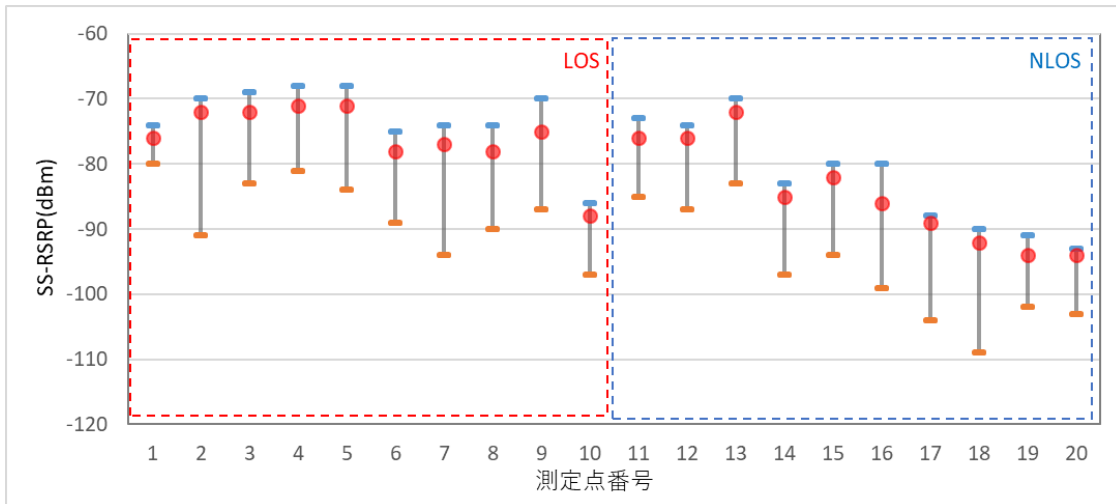


図 5.3-21 SS-RSRP の最大値、最小値、中央値

図 5.3-22 に SS-RSRQ の測定結果を示す。中央値は、ほぼすべての測定点において、理論的な上限値の近傍の-11dB となっていることが分かる。今回の測定環境では、28GHz 帯における他の干渉が入る余地がなく、RSSI がほぼ自身の信号電力であるため、RSRP が悪くなる場合は、同時に RSSI も悪くなるためと考えられる。

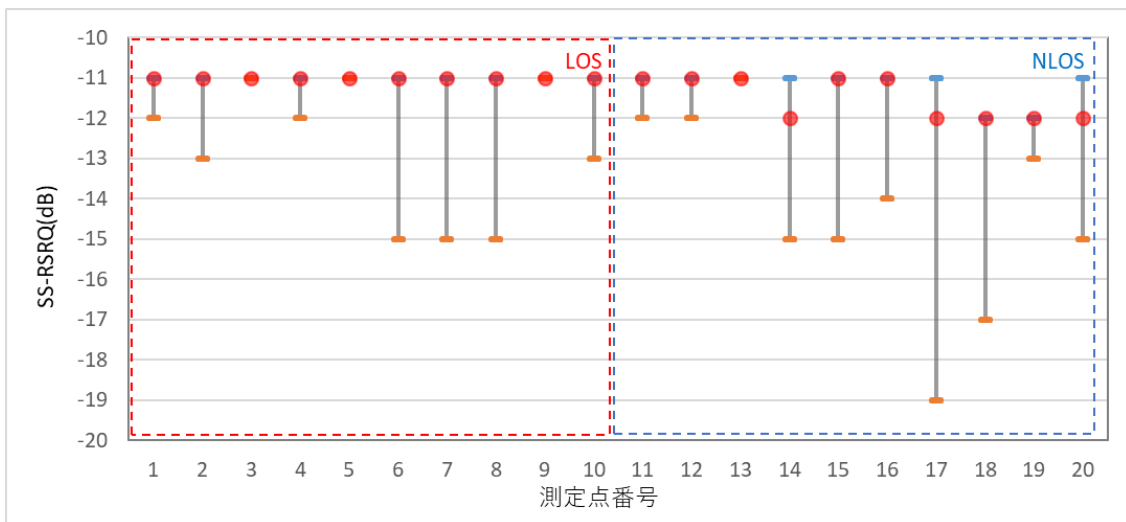


図 5.3-22 SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値

図 5.3-23 に SS-SINR の測定結果を示す。傾向は、SS-RSRP の結果と近い結果となった。LOS の測定点では、中央値が 25dB 付近であることが多いものの、最小値は、中央値よりも 10dB 以上悪いことがほとんどであった。上記の SS-RSRP のところでも考察したように、マルチパスフェージングの影響でこのように結果になったと考えられる。

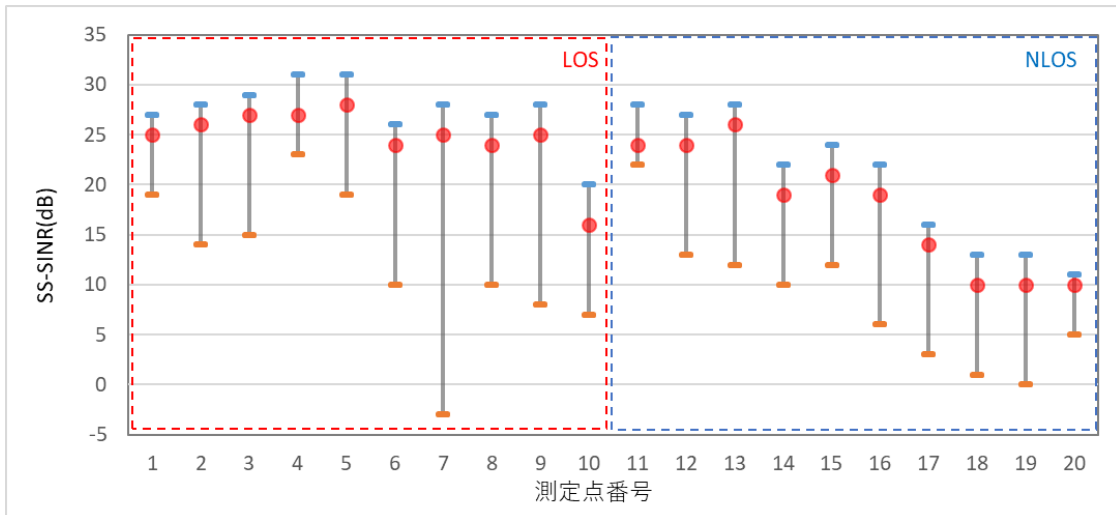


図 5.3-23 SS-SINR の最大値、最小値、中央値

図 5.3-24 に DL スループットの測定結果を示す。LOS では、中央値で 1Gbps 超のスループットが出ている測定点がある一方で、RU 近傍で SS-SINR が良好な測定点で、200～300Mbps のスループットとなっていることもあることが分かる。一般的に、スループットは、SINR と相関が高いと考えられるが、今回の測定では、その相関が低く見えている。この理由は、マルチパスフェージングの影響、および無線区間以外の劣化の影響の 2 点にあると考える。以下で、詳しく説明する。

まず、1 点目のマルチパスフェージングの影響について考察を行う。図 5.3-25、および図 5.3-26 に DL スループットの測定結果が高かった測定点 1 と DL スループットの測定結果が低かった測定点 3 の SS-RSRP、SS-SINR の時系列データをそれぞれ示す。横軸は、測定サンプルであり、測定周期は 1 秒となる。図より、DL スループットの測定結果が低かった測定点 3 の方が、SS-RSRP、SS-SINR の時間変動が大きく、かつ、値が悪くなる時間も多いため、測定点 3 の DL スループットが悪かった一因であると考えられる。

2 点目の無線区間以外の劣化の影響について考察を行う。測定点 4 は、DL スループットの測定値は低かったが、データを確認すると、マルチパスフェージングによる SS-RSRP、SS-SINR の落ち込みの影響は少なかったため、マルチパスフェージングの影響だけではスループットの劣化は説明できないことも分かった。そこで、考えられる要因が、無線区間以外の劣化の影響である。今回のスループット測定は、無線区間だけではなく、ネットワーク側まで含む経路を用いた測定であるため、ネットワーク側の劣化も影響すると考えられる。今回の実証環境は、キャリア 5G を使用しており、コアネットワークは、商用網と共用する形となっているため、ネットワークの負荷による劣化の影響も含む結果であり、DL スループットに影響が出ていることが考えられる。

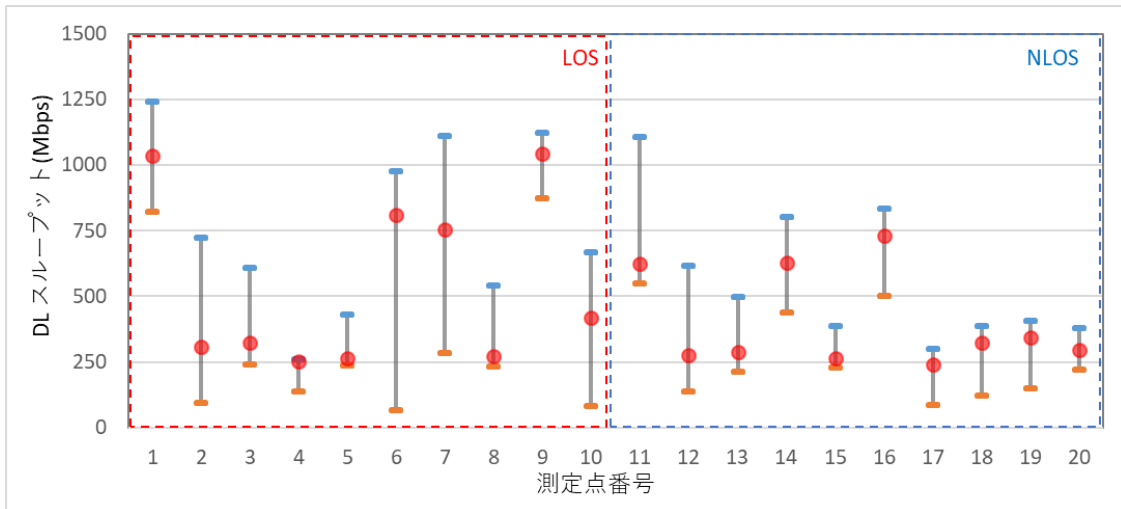


図 5.3-24 DL スループットの最大値、最小値、中央値

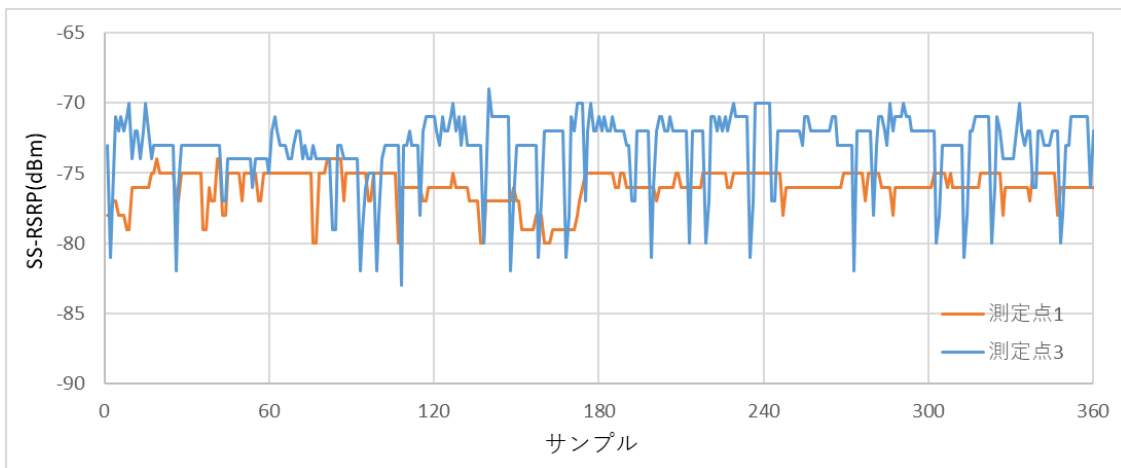


図 5.3-25 SS-RSRP の時系列データ(測定点 1 と 3 の比較)

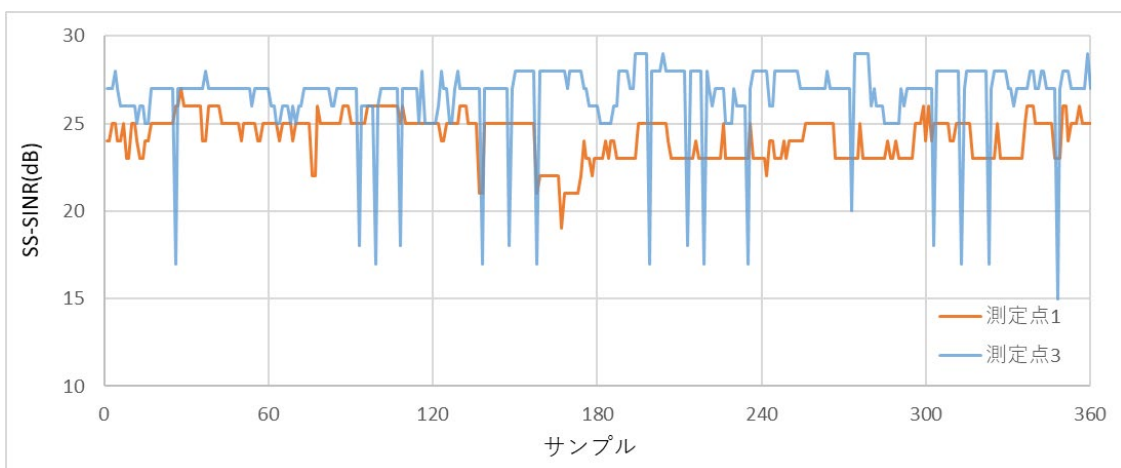


図 5.3-26 SS-SINR の時系列データ(測定点 1 と 3 の比較)

図 5.3-27 に UL スループットの測定結果を示す。DL スループットの測定結果と比較すると、素直な結果となっており、SS-SINR と相関が高い結果となっている。LOS では、中

中央値で 100Mbps 超のスループットが多く、観測できた。NLOS では、中央値で 50~100Mbps の範囲の測定点が多く、RU から遠い測定点 18、19、20 では、中央値で 50Mbps 以下となっている。

DL スループットの結果と傾向が異なり、UL スループットは SINR を相関が高い結果となった理由を以下で考察する。今回、RU のアンテナは、遮蔽や反射の要因となる工作機械等よりも十分に高い位置に設置したので、UL では受信側となる RU アンテナの付近では、電波の変動要素が少なく、マルチパスフェージングの影響がダウンリンクと比較して、小さくなった可能性が考えられる。また、ピークレート自体も小さいため、変動幅が小さく、今回のサンプル数でも十分に平滑化されたことも要因の 1 つの可能性もあると考える。

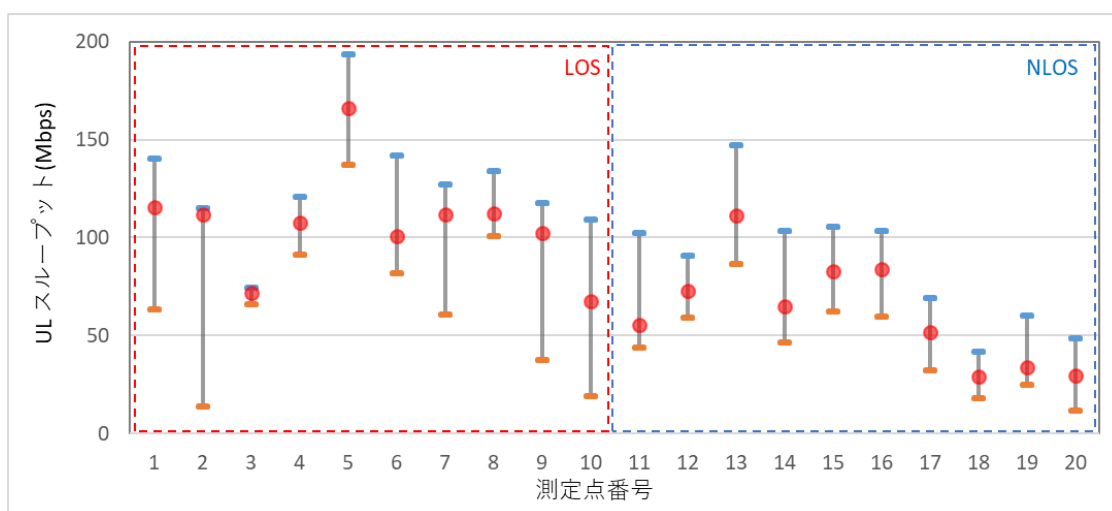


図 5.3-27 UL スループットの最大値、最小値、中央値

図 5.3-28 に遅延の結果を示す。上述のように、測定した遅延は、Ping で測定した往復遅延である。遅延の結果では、LOS、NLOS や測定点の違いによる変化は見いだせなかったが、DL スループットとの相関は高い傾向があることが分った。つまり、DL スループットが高い場合は遅延が小さく、DL スループットが低い場合は遅延が大きくなる傾向が確認できた。この理由は、上述の DL スループットのところで考察した通り、マルチパスフェージングの影響、および無線区間以外のネットワークの劣化の影響の 2 点にあると考えられる。

以降では、各測定項目の中央値に用いて、分析を進めた。



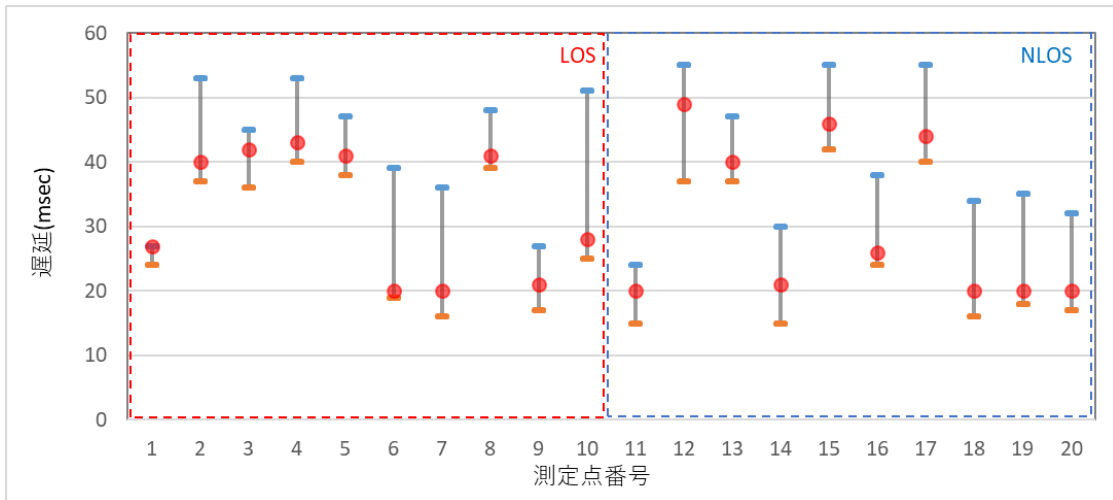


図 5.3-28 遅延の最大値、最小値、中央値

次に、各測定項目をマップ上にプロットした図で分析を進める。図 5.3-29～図 5.3-34 に各測定項目の中央値をマップ上にプロットした図を示す。

工作機械の陰になるような NLOS の測定点である測定点 11、12 あたりでも、周辺の LOS の測定点である測定点 4、8 と比較しても、SS-RSRP、SS-SINR が大きく劣化していないことが分かる。事前の想定では、NLOS の環境の中でも、大型の工作機械の陰になるような測定点では、電波の遮蔽の影響により、周辺の LOS の測定点と比較して、SS-RSRP、SS-SINR といった無線指標は大きく劣化するのではないかと考えていたが、事前の想定とは異なる結果となることが分かった。この理由を、以下で考察する。

大型の工作機械の陰になるような測定点でも SS-RSRP、SS-SINR といった無線指標が大幅に悪くならなかった要因は、以下の 2 つと考える。1 つ目は、工作機械の高さの最大高である約 5m よりも RU アンテナの設置高が 9m と高かったため、電波の通り道が完全に遮断されることがほぼない環境であったことである。2 つ目は、工場の壁、工場に設置してある工作機械等がすべて金属製であるため、反射波が非常に多く、その反射波が有効に使える環境であったことである。これら 2 つの要因が重なったことで、大型の工作機械の陰になるような測定点でも大幅な劣化に繋がらなかったと考えられる。

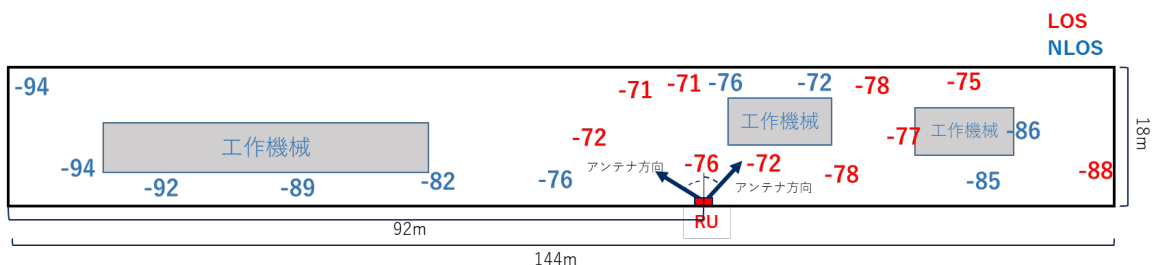


図 5.3-29 各測定点の SS-RSRP(dBm)

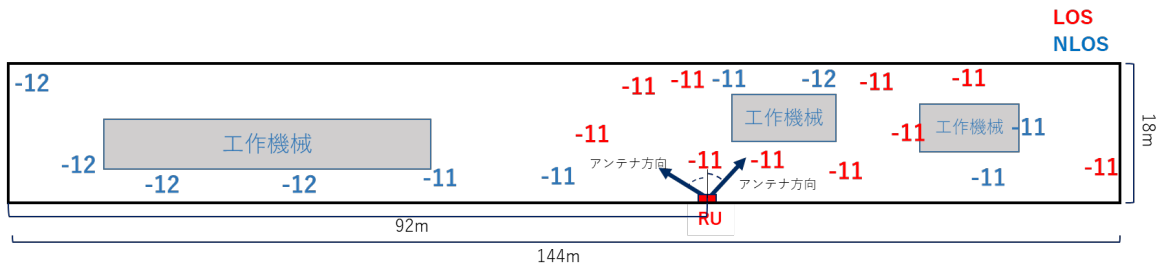


図 5.3-30 各測定点の SS-RSRQ(dB)

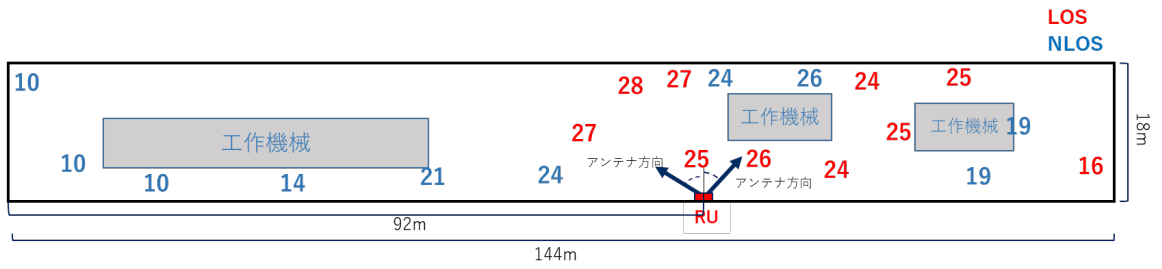


図 5.3-31 各測定点の SS-SINR(dB)

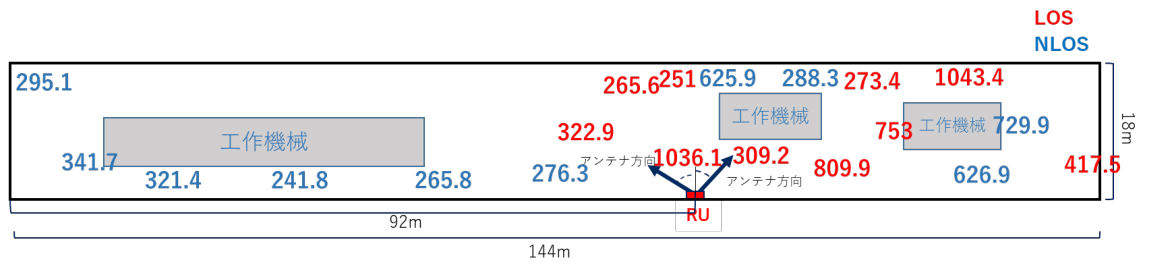


図 5.3-32 各測定点の DL スループット(Mbps)

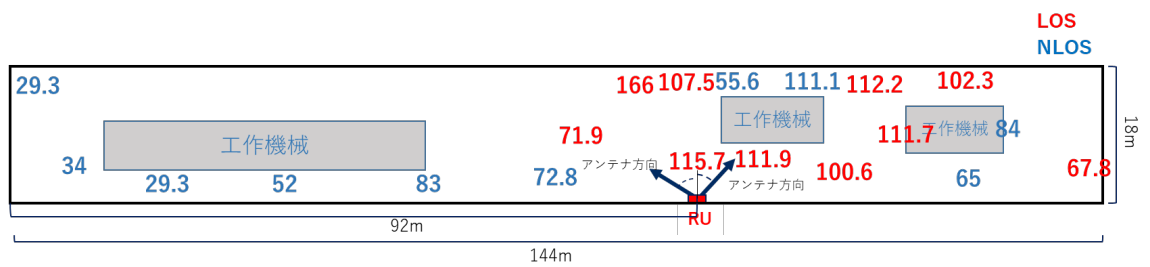


図 5.3-33 各測定点の UL スループット(Mbps)

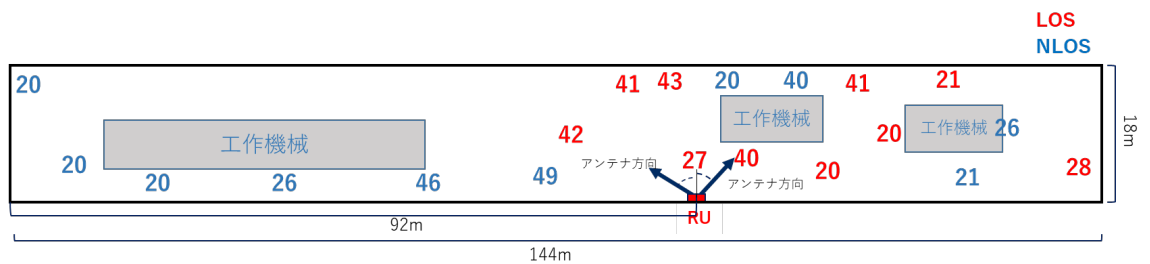


図 5.3-34 各測定点の遅延(msec)

次に、各測定項目とRUとの距離の関係について、分析を進める。図 5.3-35～図 5.3-40に各測定項目の中央値 - 距離特性を示す。

SS-RSRP、SS-SINR に関しては、多少のばらつきはあるものの、基本的には距離が大きくなるにつれて、測定値が小さくなる素直な傾向がみられることが分かる。また、LOS、NLOS の差に関しては、同一距離で比較すると、若干ではあるが、LOS の方が良い結果になった。

DL スループットに関しては、ばらつきがかなり目立つ結果となっているが、同一距離で比較すると、全体的に LOS の方が良い点が多い結果となっていることが分かる。ばらつきの理由については、上述したように、マルチパスフェージングの影響、および無線区間以外のネットワーク側の影響と考えられる。

UL スループットに関しては、多少のばらつきがある結果となっているが、同一距離で比較すると、LOS の方が良い結果と言えそうである。DL スループットよりも、距離に比例して悪くなるという想定に近い結果が出ていると言える。

遅延に関しては、距離との相関関係は見いだせなかった。DL スループットの分析でも述べたように、マルチパスフェージングの影響、および無線区間以外のネットワーク側の影響の方が大きく、距離との依存関係は小さく見えていると考えられる。

以上を総合すると、同一距離で比較では、LOS の方が NLOS よりも多少のばらつきはあるものの、若干ではあるが全体的に良い結果になったと言えそうである。

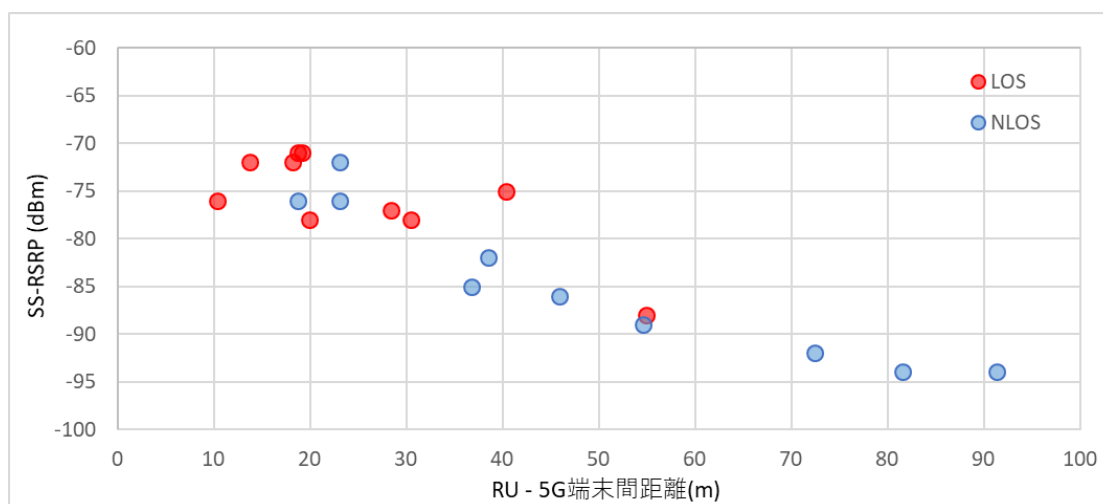


図 5.3-35 SS-RSRP - 距離特性

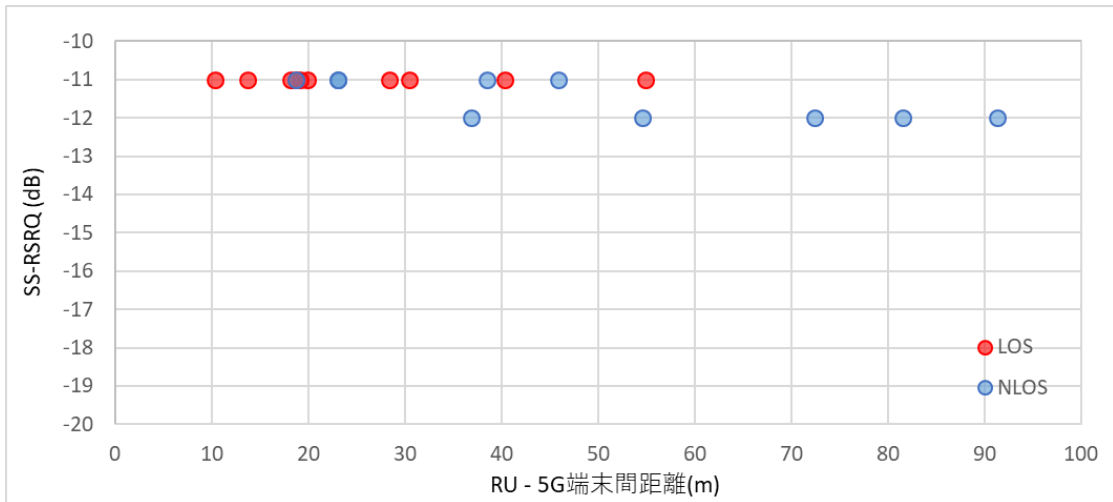


図 5.3-36 SS-RSRQ - 距離特性

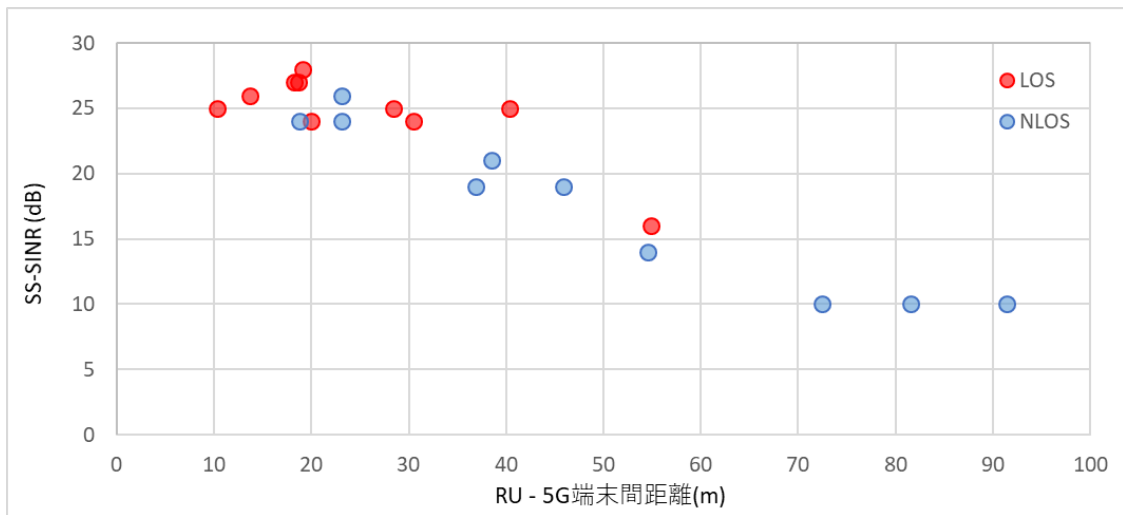


図 5.3-37 SS-SINR - 距離特性

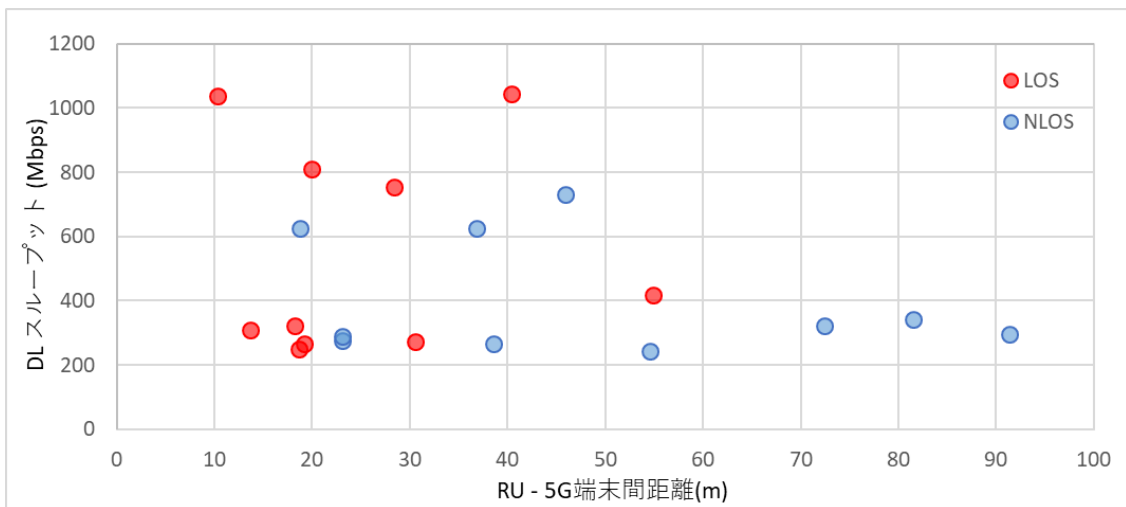


図 5.3-38 DL スループット - 距離特性

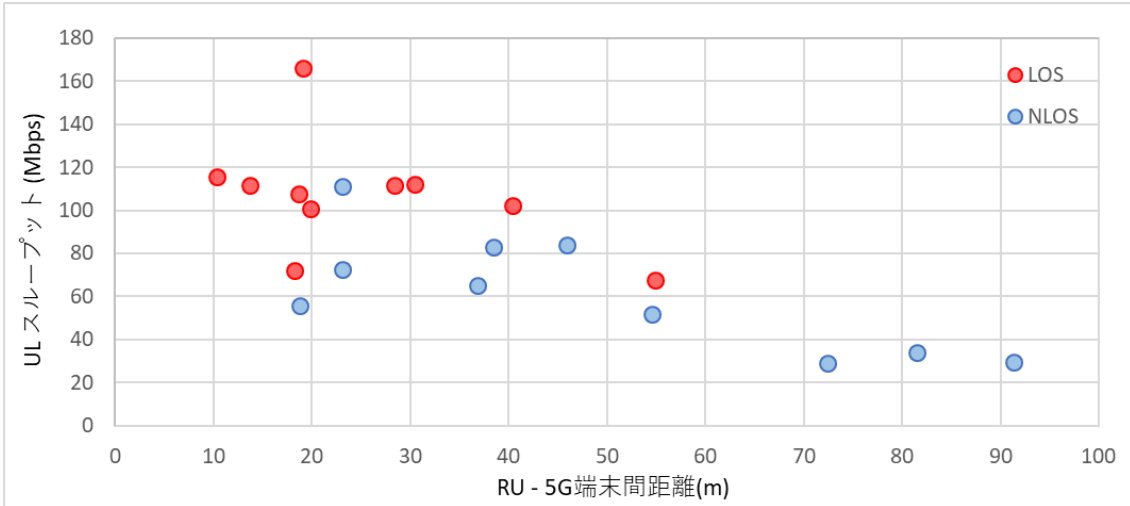


図 5.3-39 UL スループット - 距離特性

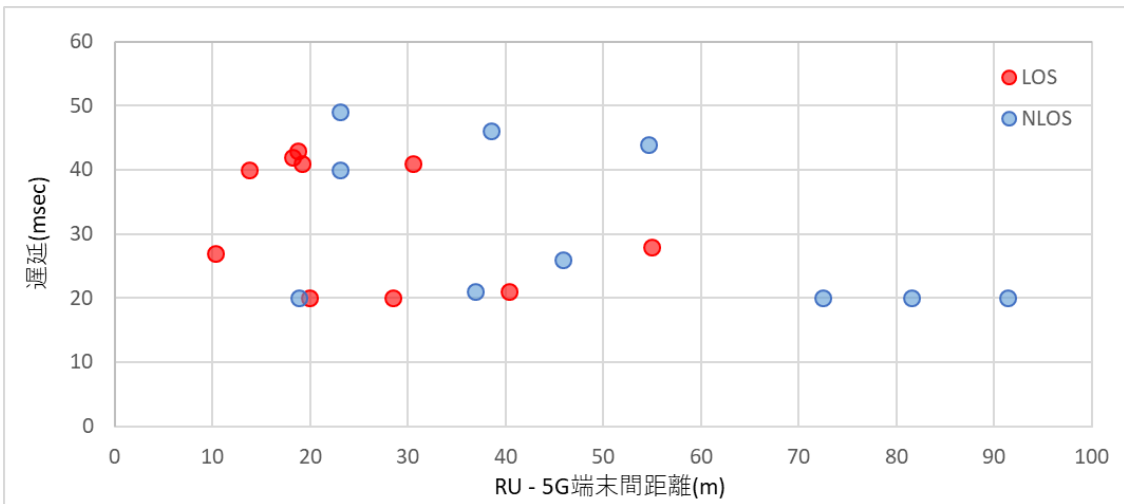


図 5.3-40 遅延 - 距離特性

### 5.3.3.2 端末高による影響評価結果

図 5.3-41～図 5.3-46 に端末高を 1.5m から 0.15m に変えた時の各測定項目の最大値、最小値、中央値を示す。

SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR に関しては、端末高を 1.5m から 0.15m に変えても、ほぼ似たような結果となっており、これらの図からは、端末高によって有意な差が出ると言えない結果となった。

DL スループット、UL スループットに関しては、端末高を 1.5m から 0.15m に変えたことによって、測定点によって改善していたり、劣化したりしており、端末高の違いによる傾向の違いは見いだせなかった。

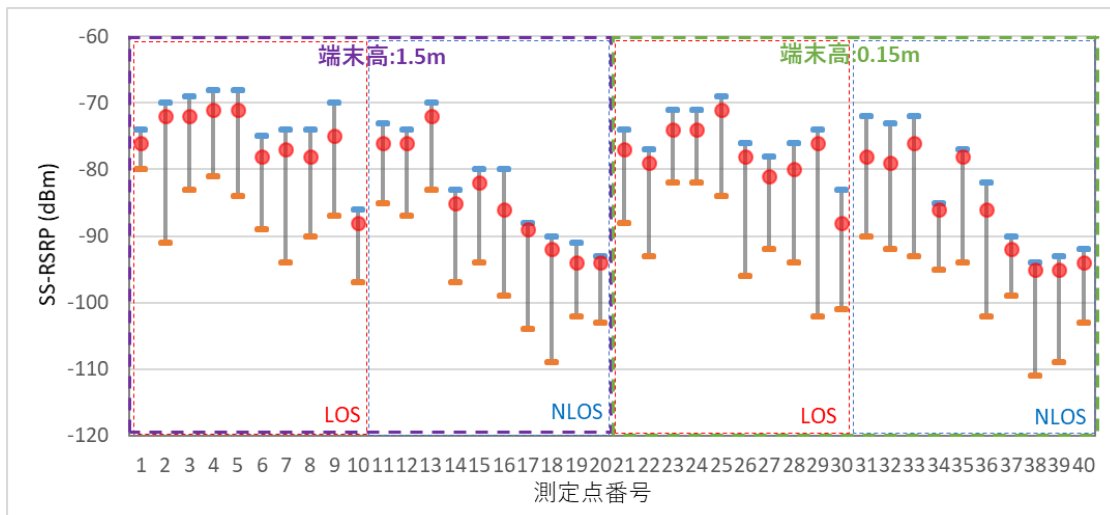


図 5.3-41 端末高を変えた場合の SS-RSRP の最大値、最小値、中央値の比較

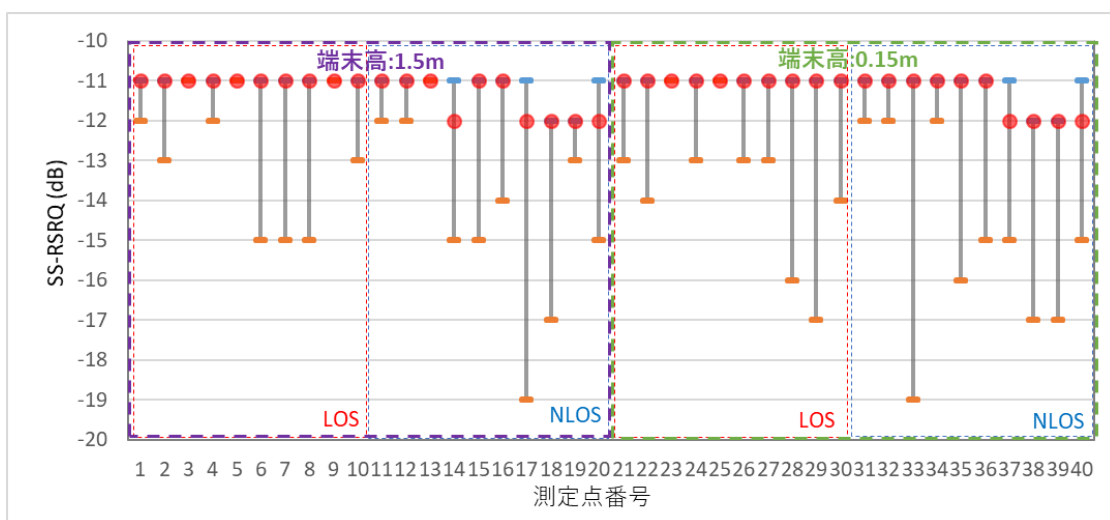


図 5.3-42 端末高を変えた場合の SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値の比較

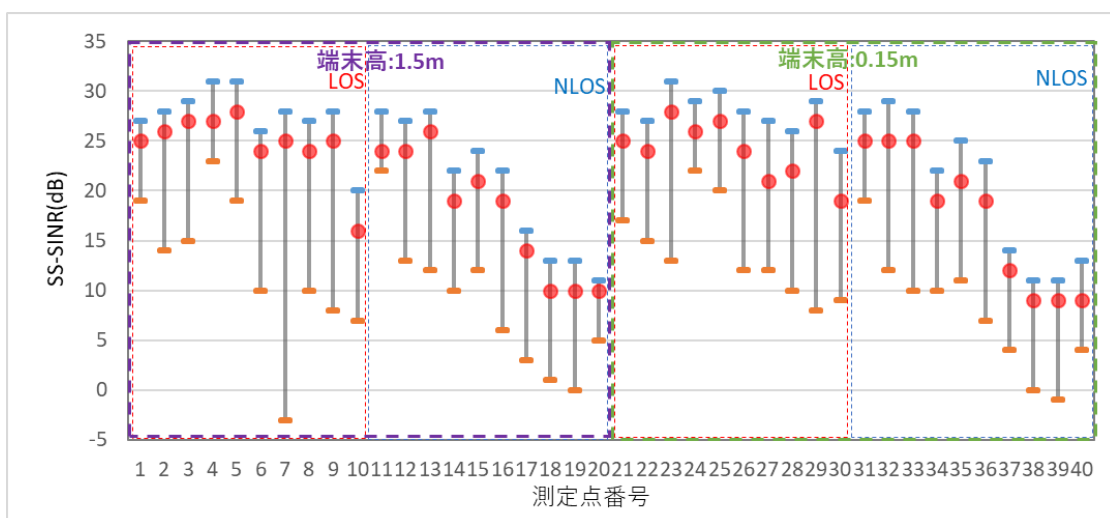


図 5.3-43 端末高を変えた場合の SS-SINR の最大値、最小値、中央値の比較

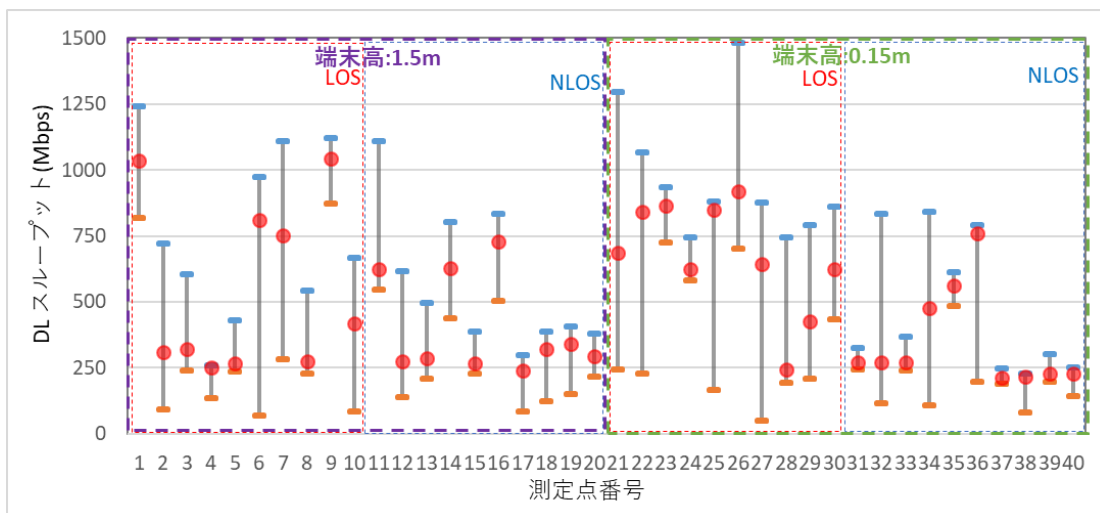


図 5.3-44 端末高を変えた場合の DL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

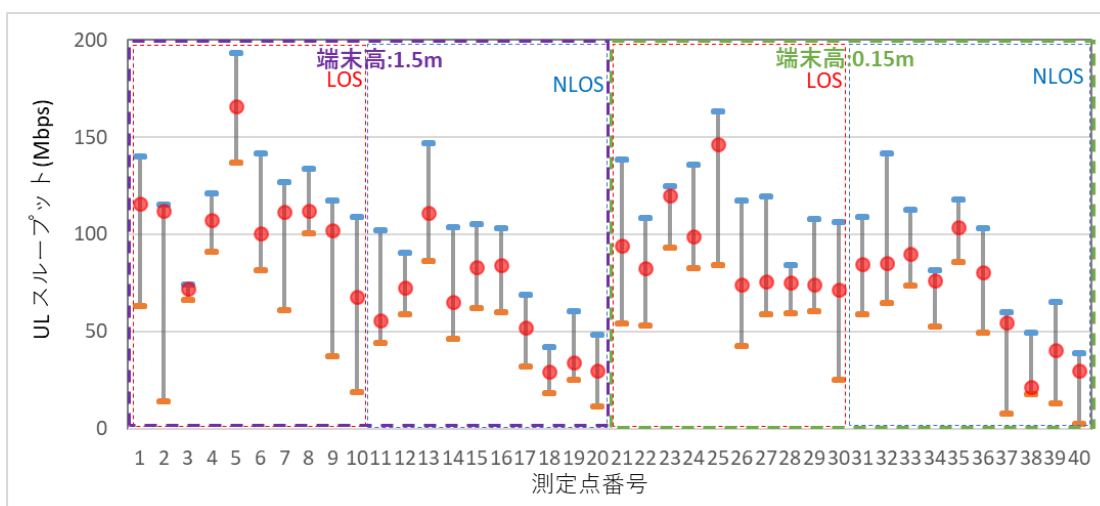


図 5.3-45 端末高を変えた場合の UL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

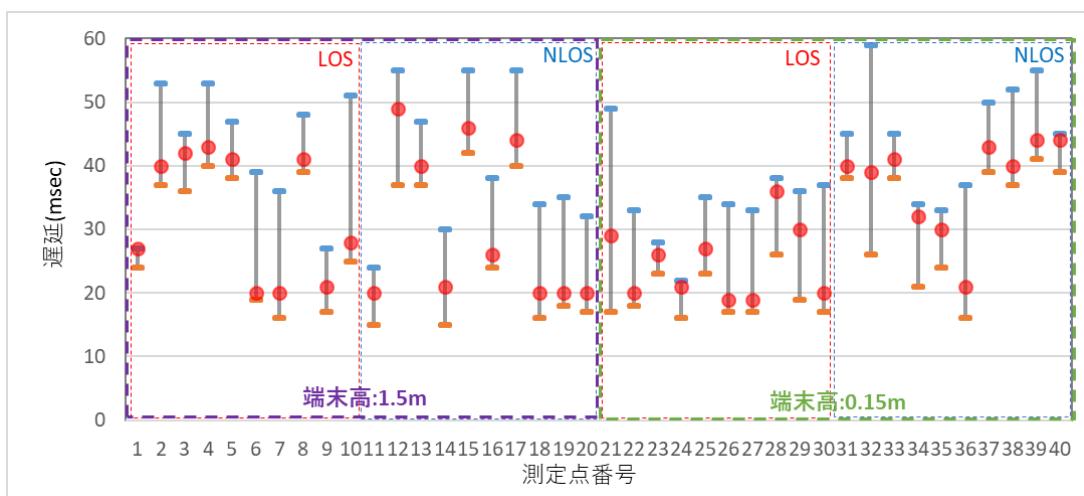


図 5.3-46 端末高を変えた場合の遅延の最大値、最小値、中央値の比較

各測定項目の最大値、最小値、中央値のデータだけでは、これ以上の分析は難しいことが分かったため、以降では、各測定点における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データの比較を行った。特に、端末高を変えたことによって、DL スループットに差があった測定点をピックアップした。

図 5.3-47、図 5.3-48 は、測定点 1(端末高:1.5m)と測地点 21(端末高:0.15m)の SS-SINR、SS-SINR の時系列データの比較結果となる。ちなみに、DL スループットの測定結果は、測地点 1(端末高:1.5m)の方が良好な結果となっている。図より、測定点 1の方が、マルチパスフェージングによる測定値の落ち込みが少なく、スループットの劣化リスクが小さいことが分かる。

図 5.3-49、図 5.3-50 は、測定点 3(端末高:1.5m)と測地点 23(端末高:0.15m)の SS-SINR、SS-SINR の時系列データの比較結果となる。ちなみに、DL スループットの測定結果は、測地点 23(端末高:0.15m)の方が良好な結果となっている。図より、測定点 23の方が、マルチパスフェージングによる測定値の変動が少なく、スループットの劣化リスクが小さいことが分かる。

以上より、測定点 1(端末高:1.5m)と測地点 21(端末高:0.15m)の比較結果、測定点 3(端末高:1.5m)と測地点 23(端末高:0.15m)の比較結果では、逆の傾向が見られることから、端末高による無線特性への影響は少なく、測定点の周りの環境や測定時間の違いによるフェージングなどの発生状態に依存すると考えられる。

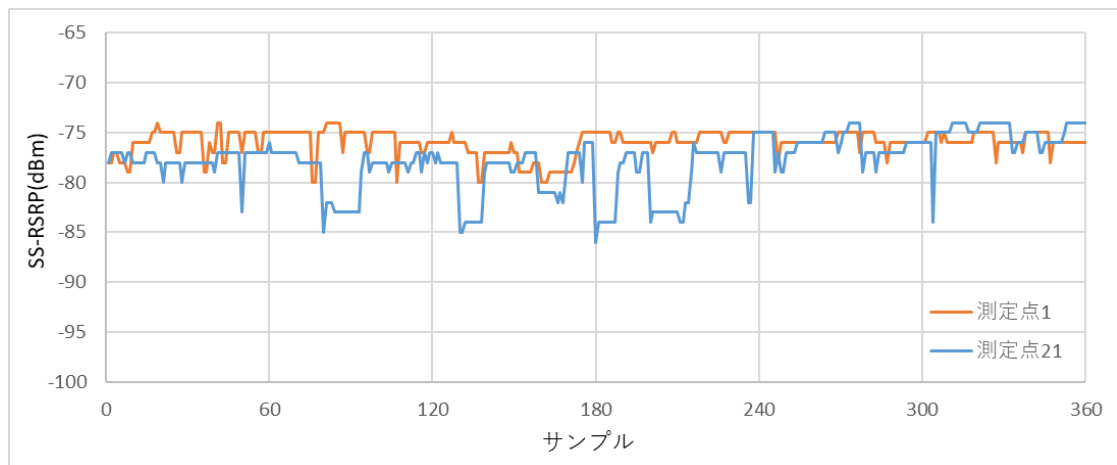


図 5.3-47 SS-RSRP の時系列データ(測定点 1 と 21 の比較)



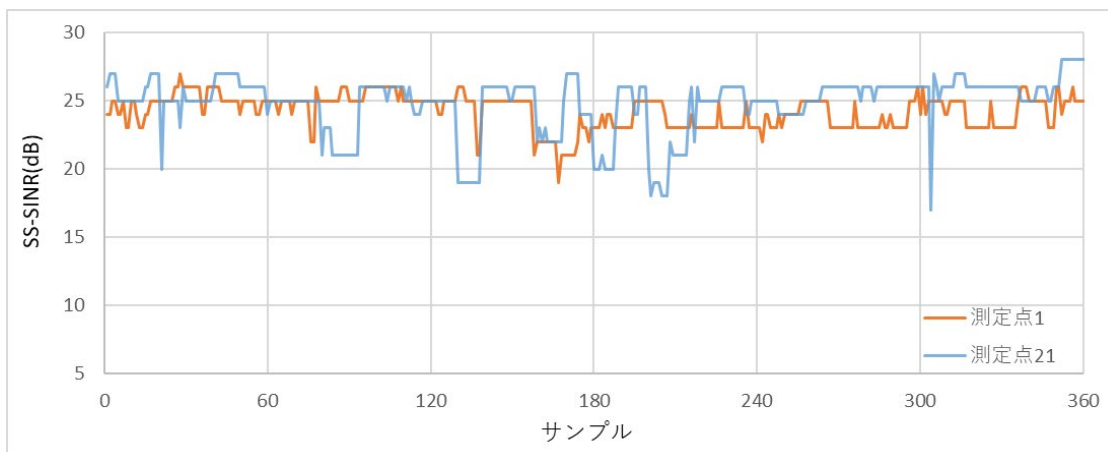


図 5.3-48 SS-RSRP の時系列データ(測定点 1 と 21 の比較)

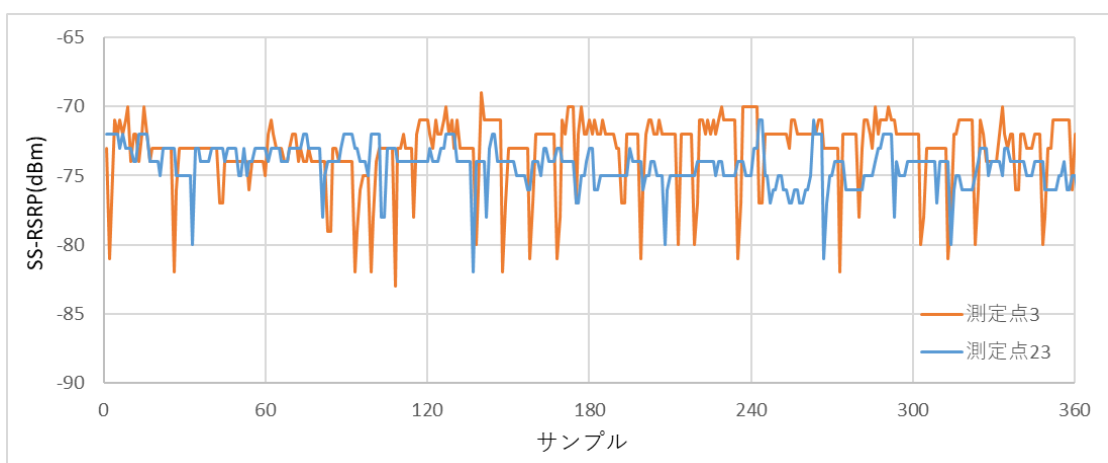


図 5.3-49 SS-RSRP の時系列データ(測定点 3 と 23 の比較)

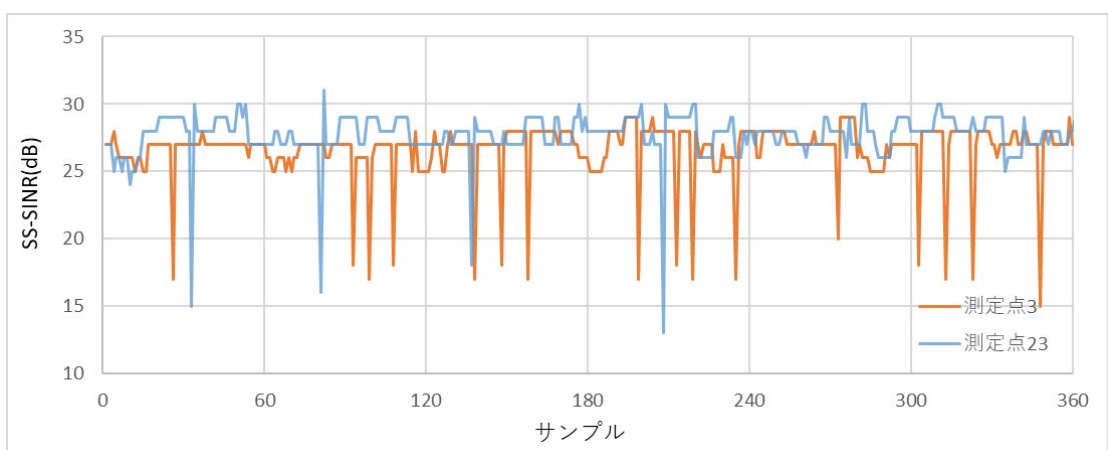


図 5.3-50 SS-SINR の時系列データ(測定点 3 と 23 の比較)

図 5.3-51～図 5.3-56 に端末高を 1.5m から 0.15m に変えた時の各測定項目と距離の特性比較を示す。上述のように、端末高を 1.5m から 0.15m に変えたことによって、各測定項目 - 距離特性に大きな変化は発生しなかったと考えられる。

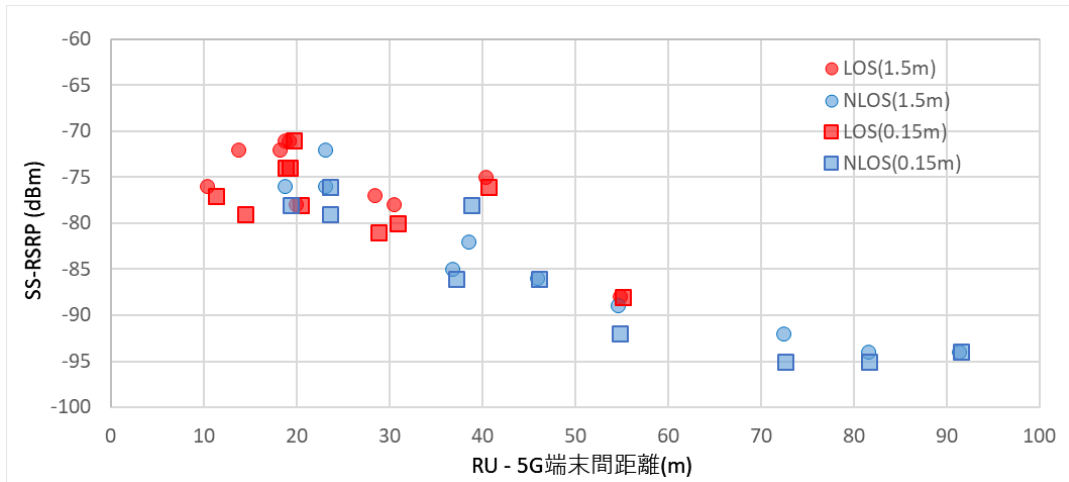


図 5.3-51 端末高を変えた場合の SS-RSRP - 距離特性の比較

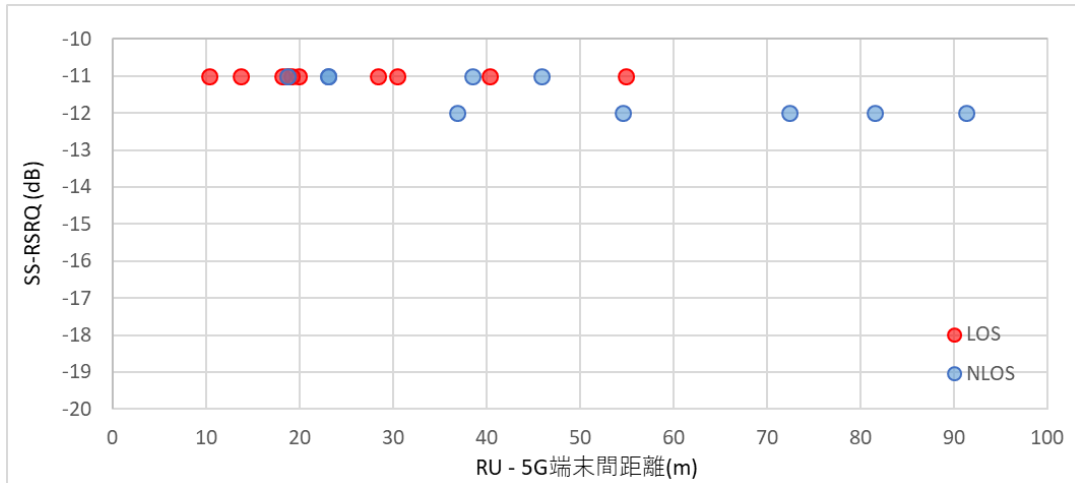


図 5.3-52 端末高を変えた場合の SS-RSRQ - 距離特性の比較

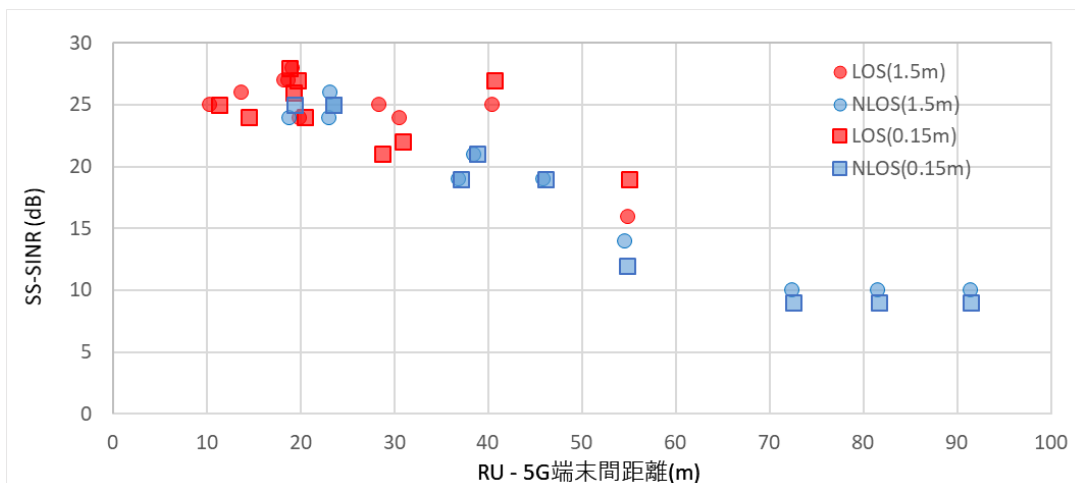


図 5.3-53 端末高を変えた場合の SS-SINR - 距離特性の比較

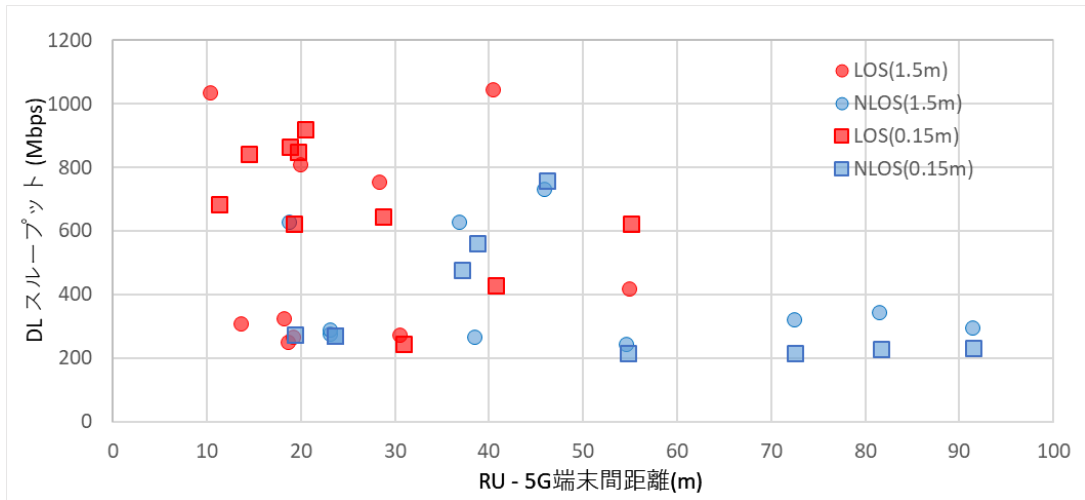


図 5.3-54 端末高を変えた場合の DL スループット - 距離特性の比較

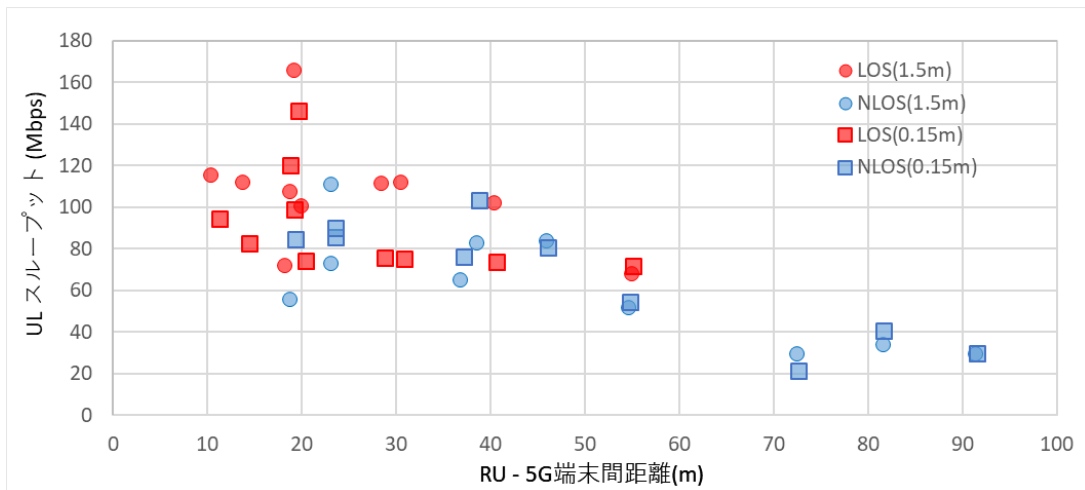


図 5.3-55 端末高を変えた場合の UL スループット - 距離特性の比較

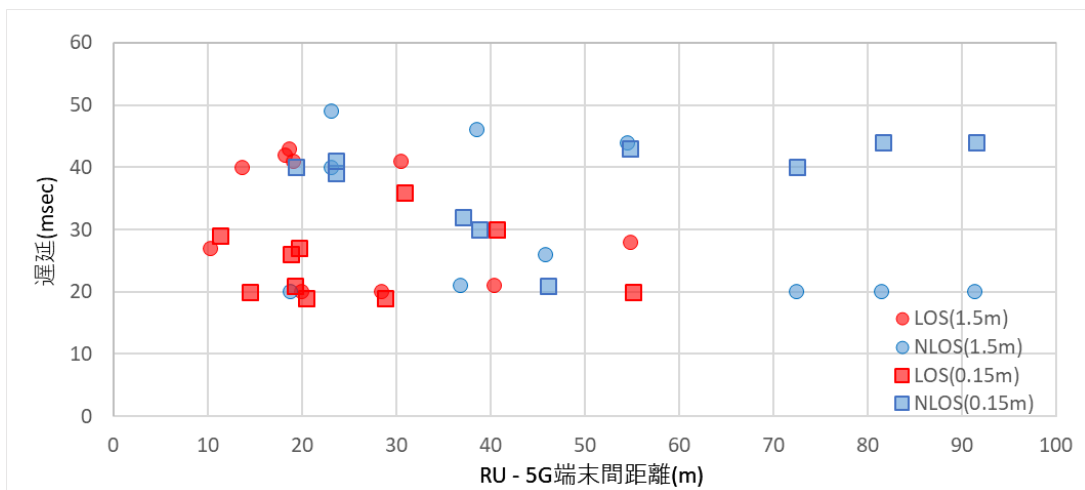


図 5.3-56 端末高を変えた場合の遅延 - 距離特性の比較

### 5.3.3.3 チルト角による評価結果

図 5.3-57～図 5.3-62 に RU のチルト角を 5 度から 30 度に変えた時の各測定項目の最大値、最小値、中央値を示す。

SS-RSRP に関しては、チルト角が 30 度の方が、RU 近傍の測定点(20、21、31、32)では改善し、RU から 40m 程度離れた測定点(28、29、35)が劣化してことが分かる。一方で、RU から 50m 以上離れた測定点に関しては、大きな差が出ていない結果となった。この結果から、チルト角を深くすることにより、想定通り、良好なエリアがより RU の近くの方に移動していることができていると考えられる。一方で、RU から 50m 以上離れた測定点に関しては、チルト角 5 度の方が有利であると想定されたが、SS-RSRP では、チルト角による大きな差は確認できなかった。

SS-SINR、DL スループット、UL スループットにも同様な傾向がみられ、特に、DL スループットに関しては、RU に近い測定点では、チルト角が 30 度の方が、全体的に高い値になっていることが分かる。

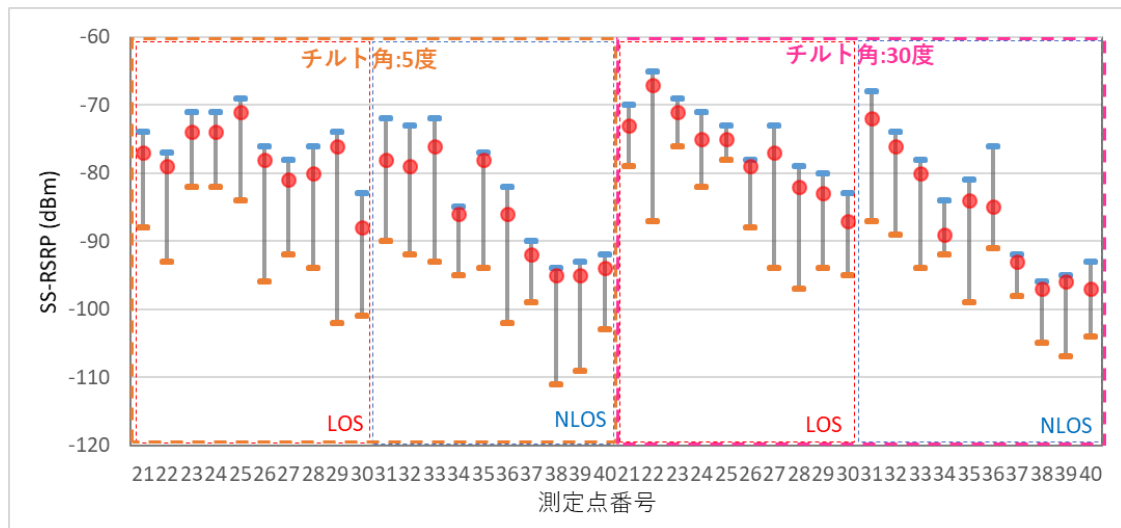


図 5.3-57 チルト角を変えた場合の SS-RSRP の最大値、最小値、中央値の比較

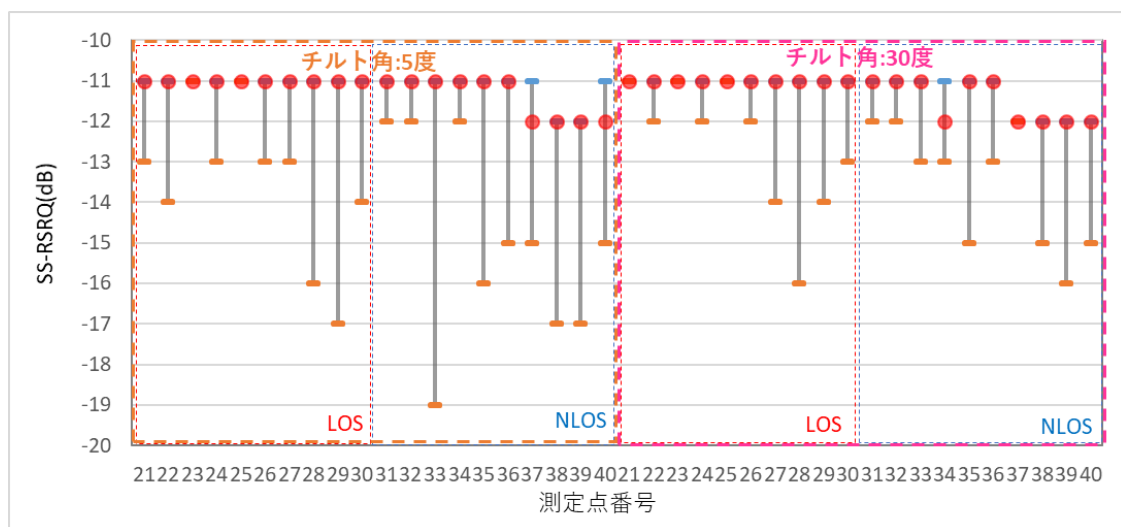


図 5.3-58 チルト角を変えた場合の SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値の比較

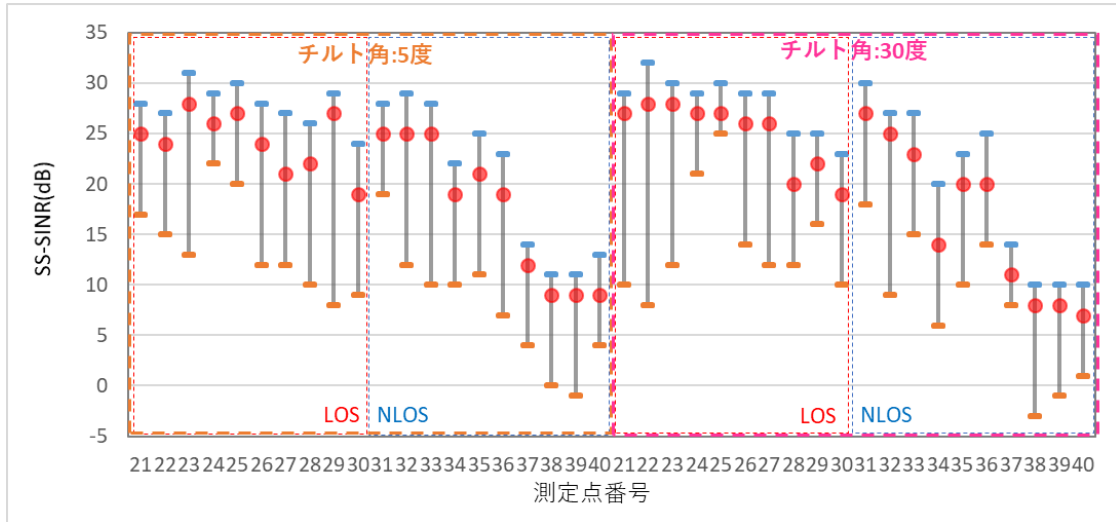


図 5.3-59 チルト角を変えた場合の SS-SINR の最大値、最小値、中央値の比較

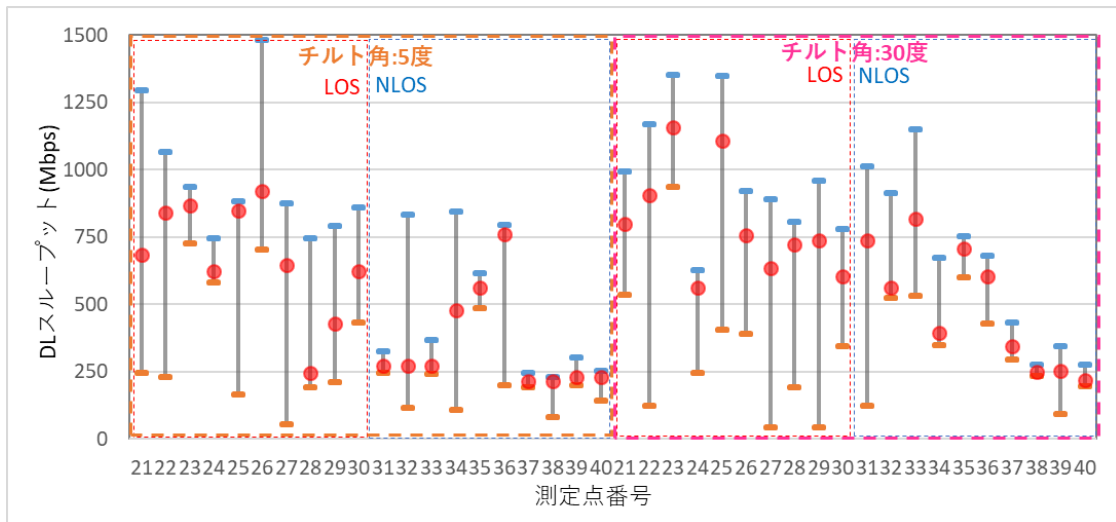


図 5.3-60 チルト角を変えた場合の DLスループットの最大値、最小値、中央値の比較

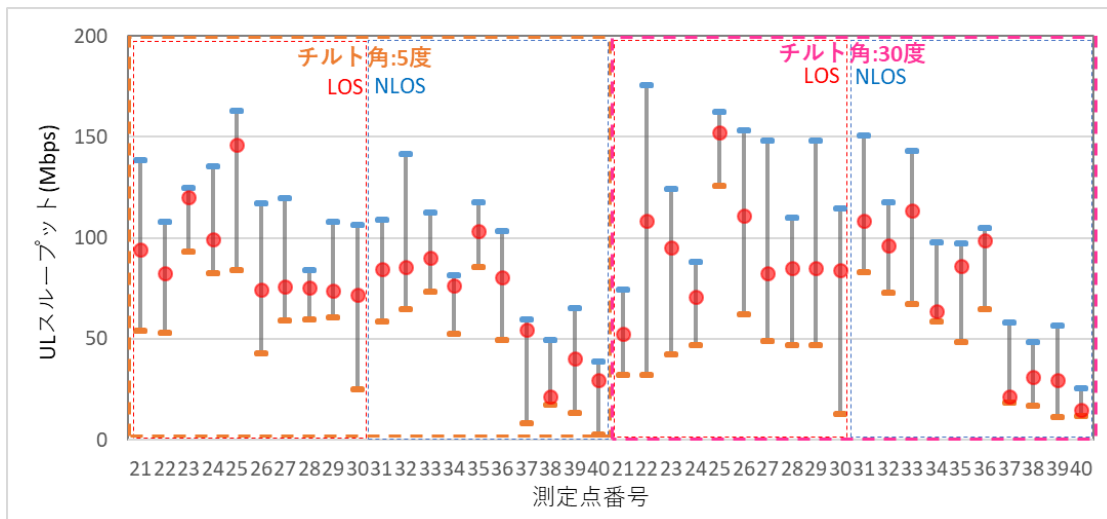


図 5.3-61 チルト角を変えた場合の UL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

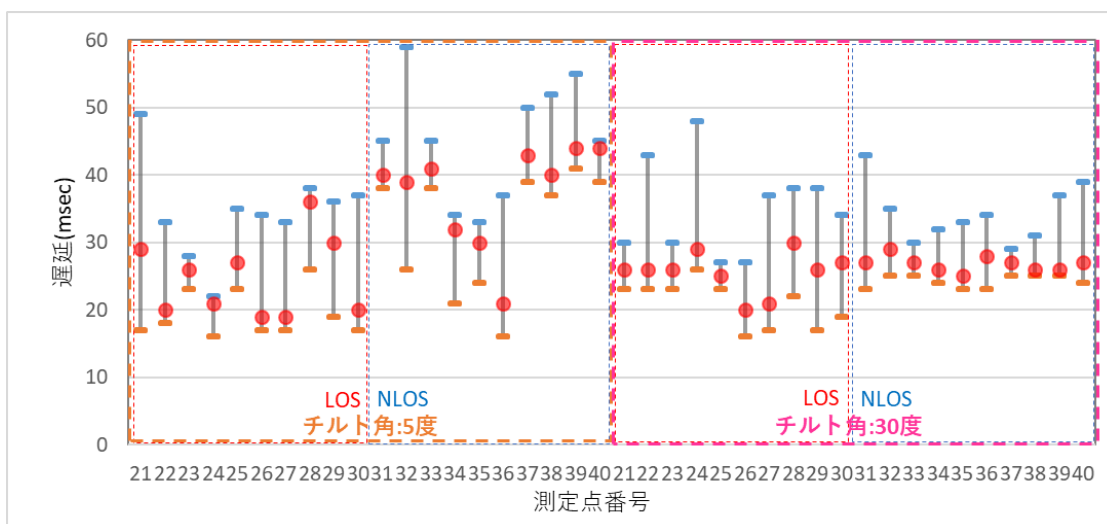


図 5.3-62 チルト角を変えた場合の遅延の最大値、最小値、中央値の比較

図 5.3-63～図 5.3-68 にチルト角を 5 度から 30 度に変えた場合の各測定点の各測定項目の変化を示す。

チルト角を 5 度から 30 度に変えたことによる変化は、SS-RSRP において、素直な結果が見えており、RU から半径 20m のエリアでは改善しており、RU から半径 40m の付近では劣化しており、RU から半径 50m 以上のエリアでは差が出ていないことが分かる。また、DL スループットの結果に関しても、RU 近傍のエリアでは、チルト角を 5 度から 30 度に変えたことによって、改善している測定点が多いことが分かる。

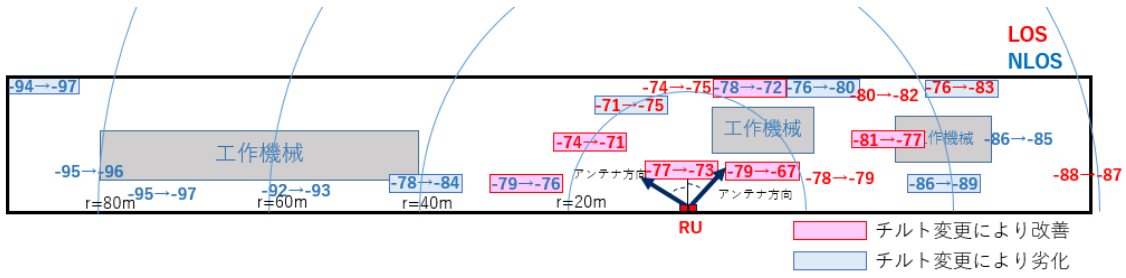


図 5.3-63 チルト角を変えた場合の SS-RSRP(dBm)の変化

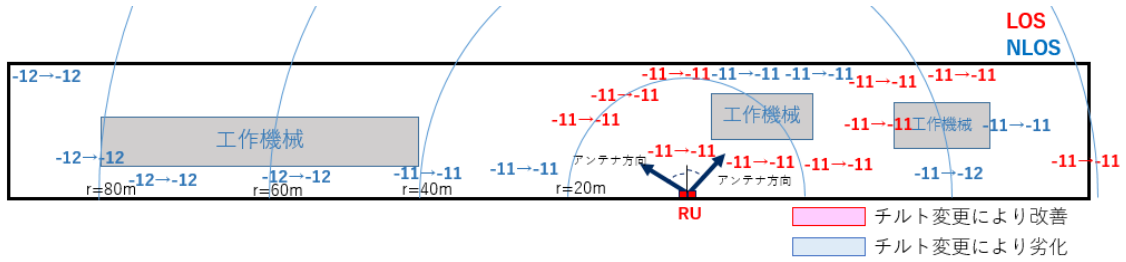


図 5.3-64 チルト角を変えた場合の SS-RSRQ(dB)の変化

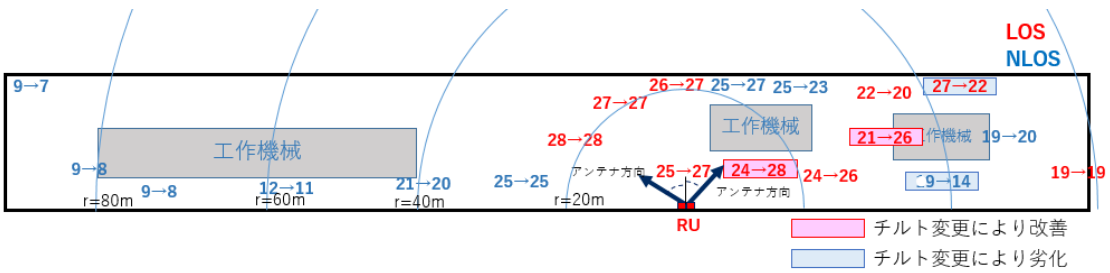


図 5.3-65 チルト角を変えた場合の SS-SINR(dB)の変化

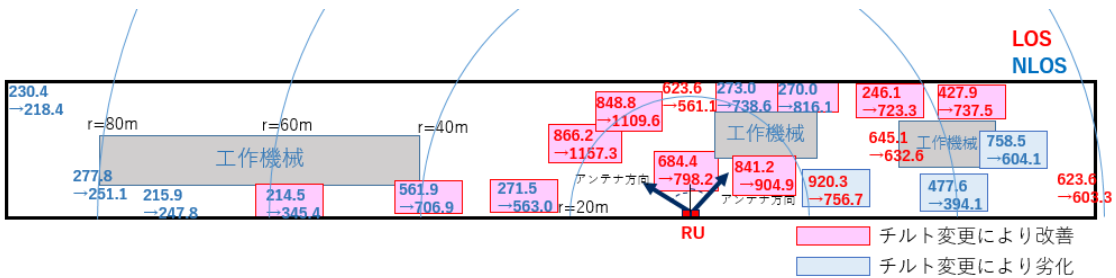


図 5.3-66 チルト角を変えた場合の DL スループット(Mbps)の変化

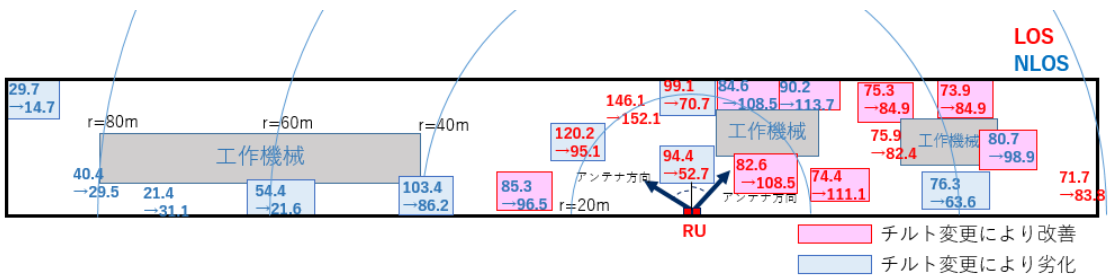


図 5.3-67 チルト角を変えた場合の UL スループット(Mbps)の変化

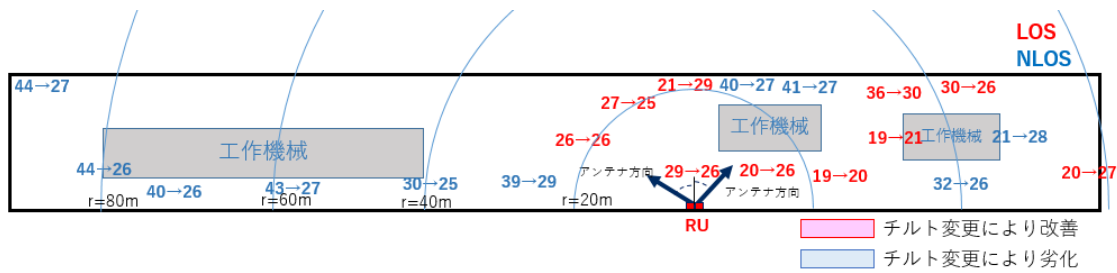


図 5.3-68 チルト角を変えた場合の遅延(msec)の変化

図 5.3-69～図 5.3-74 にチルト角を 5 度から 30 度に変えた時の各測定項目と距離の特性比較を示す。

SS-RSRP、SS-SINR、DL スループット、UL スループットの距離特性を俯瞰的にみると、チルト角を 30 度にすることによって改善する範囲は、RU から 30m 程度以内であることが分かる。一方、チルト角が 5 度の方が良い結果が得られた範囲は、RU から 40m 程度の近傍であることが分かる。RU から 50m 以上離れると、若干、チルト角が 5 度の方が良いものの、大きな差はない結果となっていることが分かった。

RU のアンテナの高さが 9m の場合、アンテナビームの正面方向と地面(高さ 0m)が交差する点は、チルト角が 5 度の場合 102.9m、チルト角が 30 度の場合 15.6m である(図 5.3-75 参照)。チルト角が 30 度の場合は、無線品質の改善が大きかったエリアとほぼ一致していると考えられる。一方で、チルト角が 5 度の場合は、RU から 100m 付近は、距離が遠いためか、チルト角 30 度からのゲインが見えにくく、RU から 40m の付近でゲインが一番大きく見えたと考えられる。

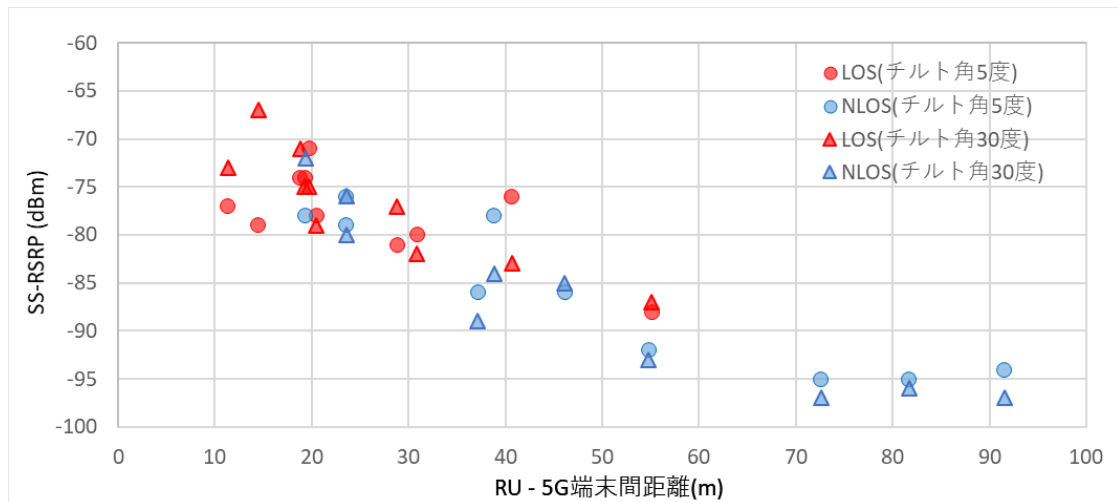


図 5.3-69 チルト角を変えた場合の SS-RSRP - 距離特性の比較



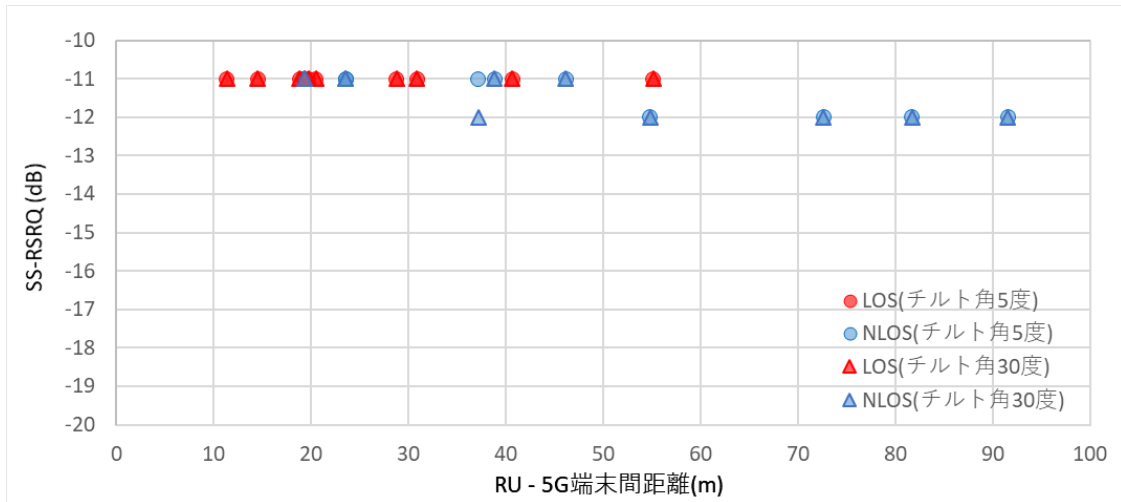


図 5.3-70 チルト角を変えた場合の SS-RSRQ - 距離特性の比較

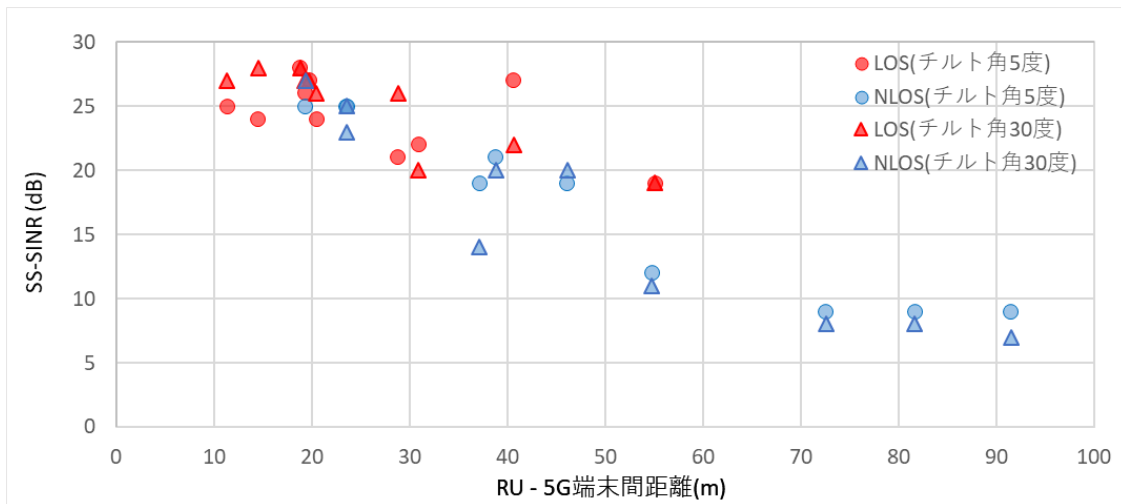


図 5.3-71 チルト角を変えた場合の SS-SINR - 距離特性の比較

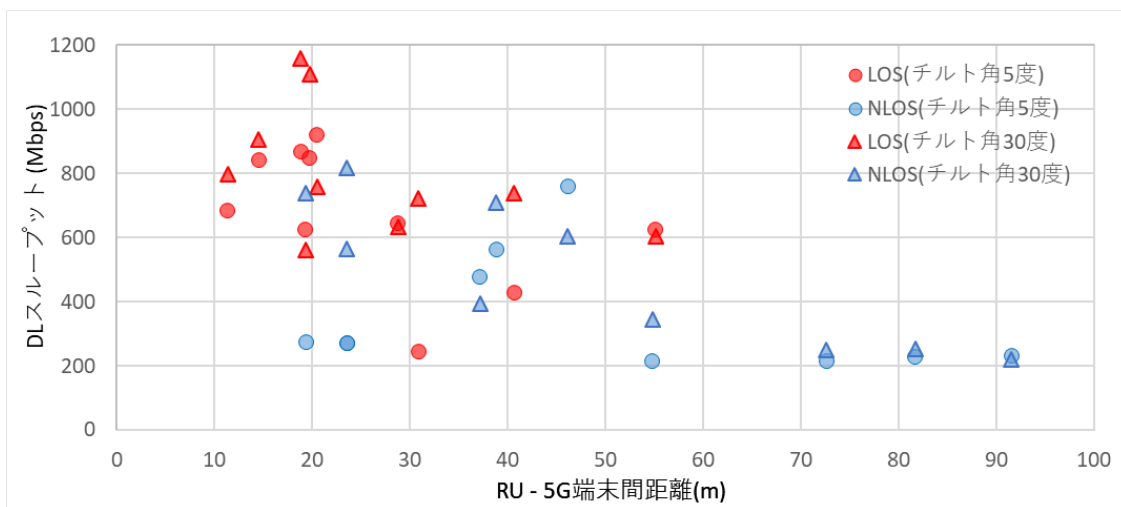


図 5.3-72 チルト角を変えた場合の DL スループット - 距離特性の比較

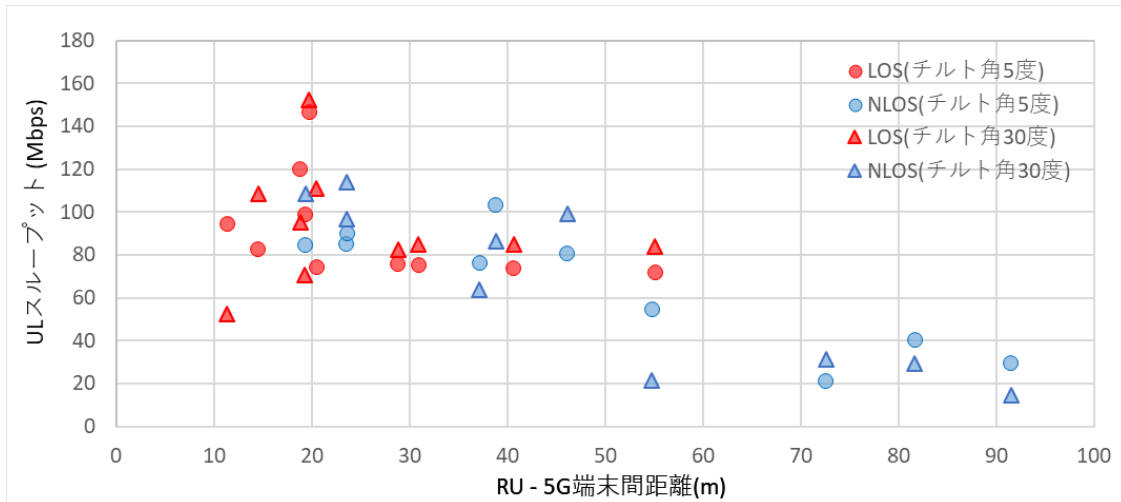


図 5.3-73 チルト角を変えた場合の UL スループット - 距離特性の比較

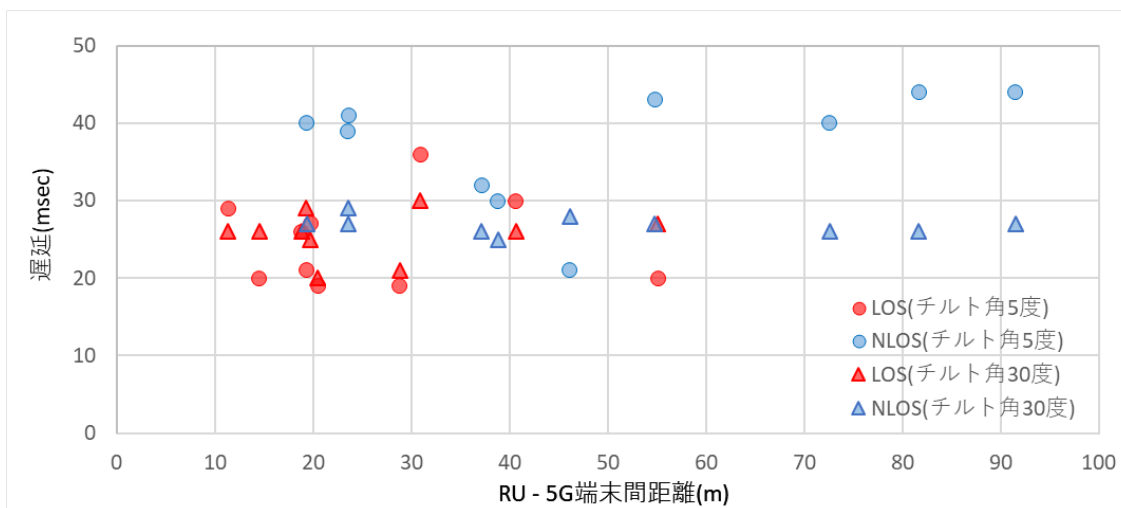


図 5.3-74 チルト角を変えた場合の遅延 - 距離特性の比較

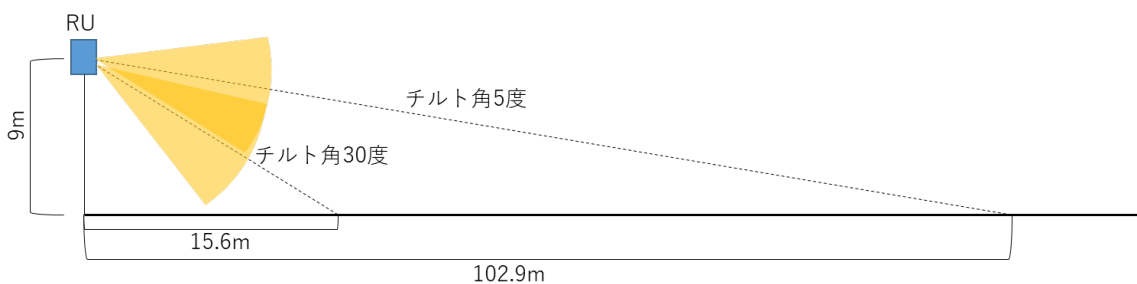


図 5.3-75 チルト角の変更によるアンテナビームの正面方向の違い

#### 5.3.3.4 移動による影響評価結果

図 5.3-76～図 5.3-78 に測定のために移動したルート上の各地点における SS-RSRP、SS-RSRQ、SS-SINR の測定値をプロットした図を示す。SS-SINR、SS-SINR、SS-SINR に関しては、1 秒毎の測定であるが、測定値の 10 秒毎の中央値を 1 つの点として、5 つの品質レベルに分け、色で品質レベルが分かるように示している。

まず、SS-RSRP の推移を確認すると、地点 F のスタート地点では、D 棟内北側の RU と接続しており、-80dBm 程度と良好な品質となっている。スタートして、D 棟内北側の RU 距離が離れるにつれて、SS-RSRP が劣化していき、地点 C 付近で-98dBm と行きのルート上では一番劣化していることが分かる。地点 C 付近が D 棟内北側の RU のカバーエリアの端となるため、品質が劣化していると考えられる。その後、A 棟に入る直前で、SS-RSRP が改善し、-79dBm となっていることが分かる。これは、北側の RU から A 棟内南側の RU へハンドオーバーしたためと考えられる。その後、A 棟に入ってすぐの地点 B 付近は、南側の RU と見通し環境となり、行きのルート上では一番品質が良くなっている。その後、地点 A に近づくにつれて、南側の RU と遠ざかることになるので、SS-RSRP は徐々に劣化していることが分かる。地点 A から地点 F への帰りのルートでは、地点 A からスタートすると、徐々に SS-RSRP が良くなっていき、地点 B 付近で一番良い値となっている。その後、地点 B から離れるに従い、徐々に SS-RSRP が悪くなっている。地点 D 付近を過ぎた辺りで、帰りのルートでは SS-RSRP が最悪値となり、-104dBm となっていることが分かる。その後、地点 F のゴール付近では、SS-RSRP が急改善し、-73dBm となっている。これは、南側の RU から北側の RU へハンドオーバーしたためと考えられる。行きのルートと帰りのルートでは、ハンドオーバーのタイミングが少し異なっているが、接続セルになるべく留まろうとするように、ハンドオーバー関連のパラメータが調整されているためであると想定される。SS-SINR に関しても、SS-RSRP と同様な傾向が出ていることが分かる。

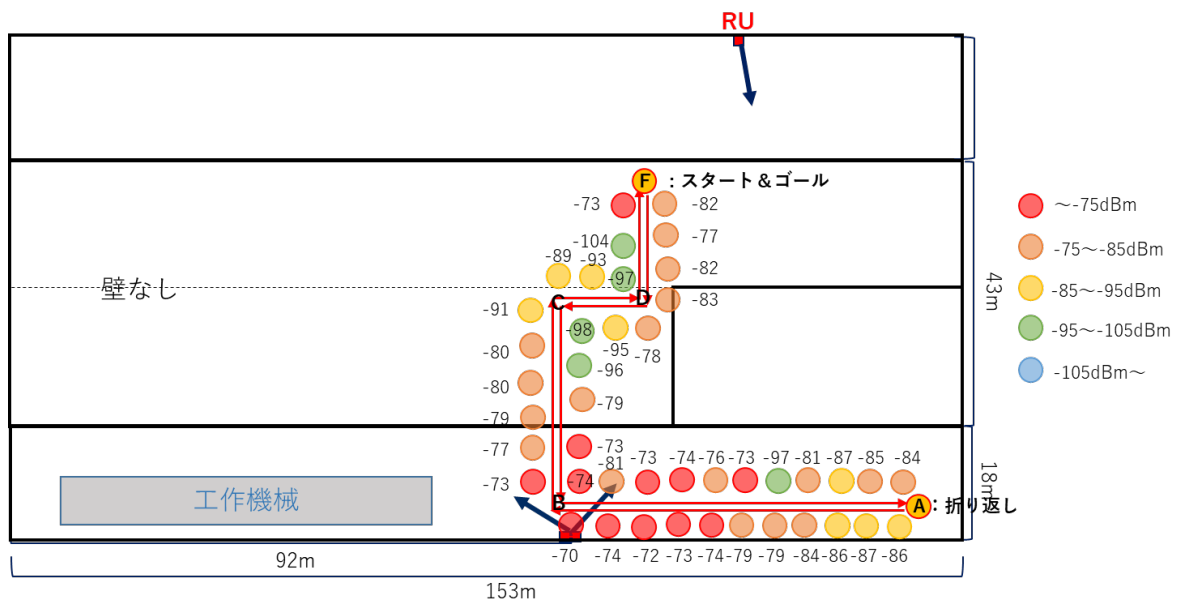


図 5.3-76 移動ルート内の各地点の SS-RSRP

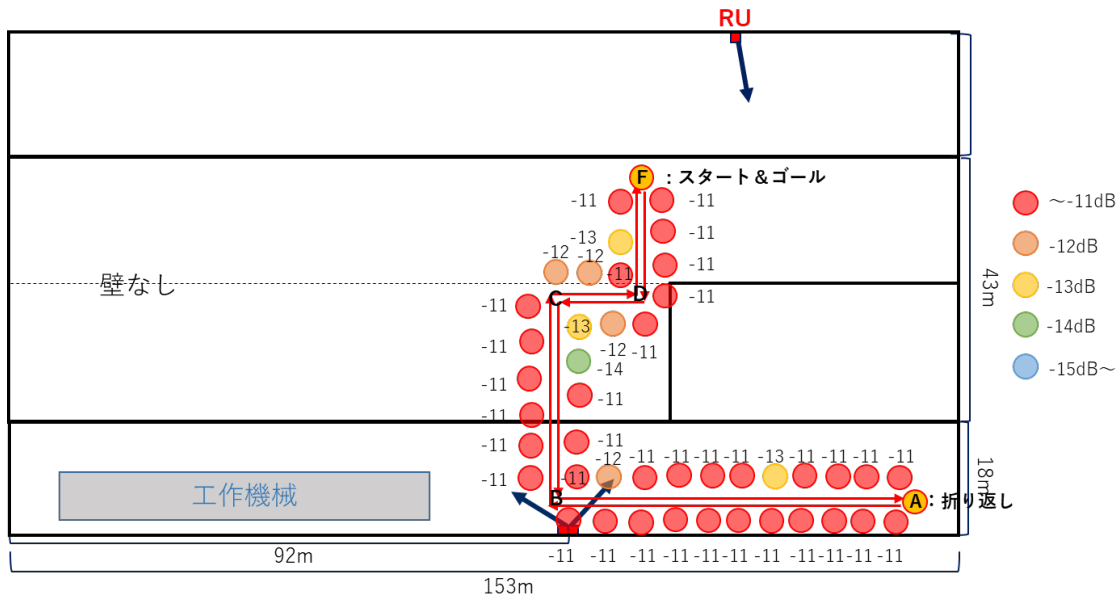


図 5.3-77 移動ルート内の各地点の SS-RSRQ

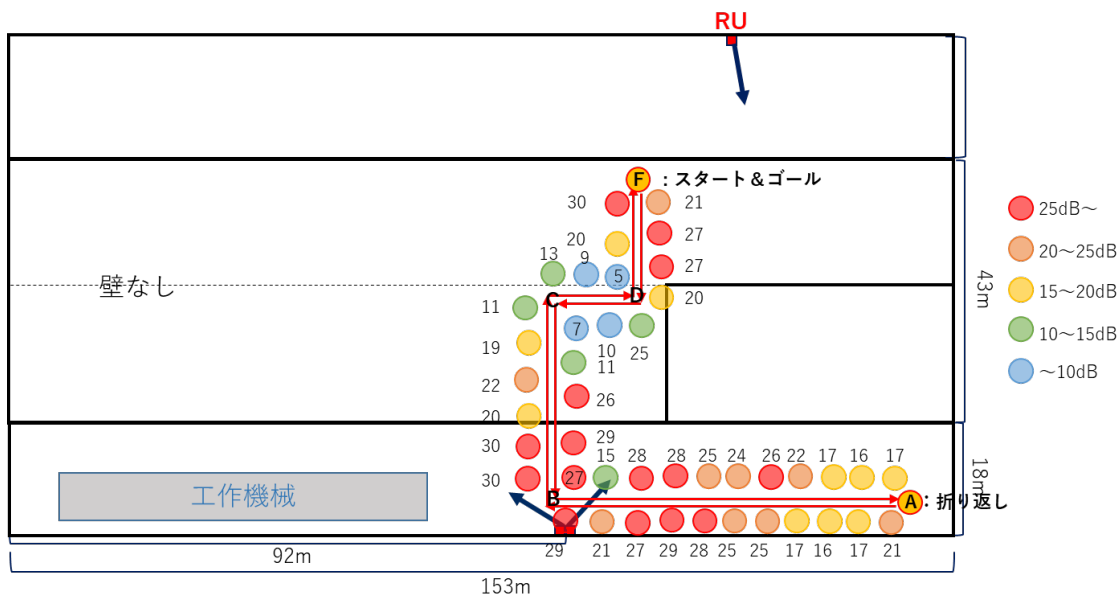


図 5.3-78 移動ルート内の各地点の SS-SINR

図 5.3-85～図 5.3-87 に測定のために移動したルート上の各地点における DL スループット、UL スループット、遅延の測定値をプロットした図を示す。DL スループット、UL スループット、遅延に関しては、1 分毎の測定のため、1 分毎の測定値を 1 つの点として、地点に 5 つのレベルに分け色別で品質が分かるように示した。

図より、RSRP、SINR が劣化していた地点 C から地点 D 付近において、DL スループット、UL スループットが劣化していることが分かる。特に、UL スループットは劣化度合いが大きく、行きのルートの地点 C 付近において、15.7Mbps となっている。さらに、地点 A 付近においても、地点 C から地点 D 付近ほどではないものの、スループットの多少の劣化も確認できた。

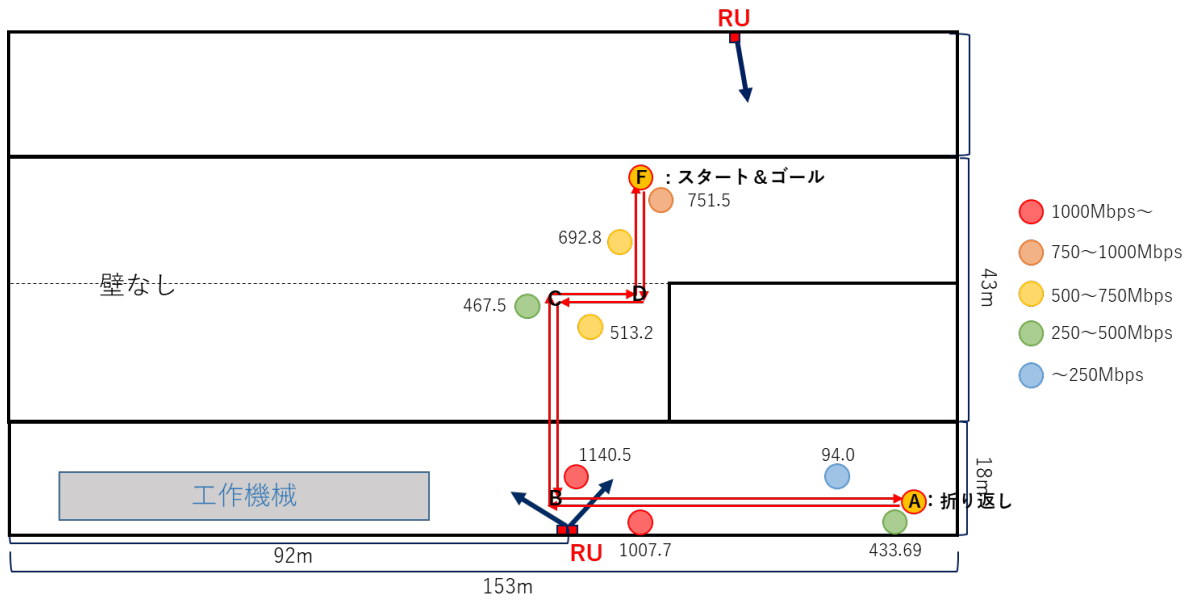


図 5.3-79 移動ルート内の各地点の DL スループット

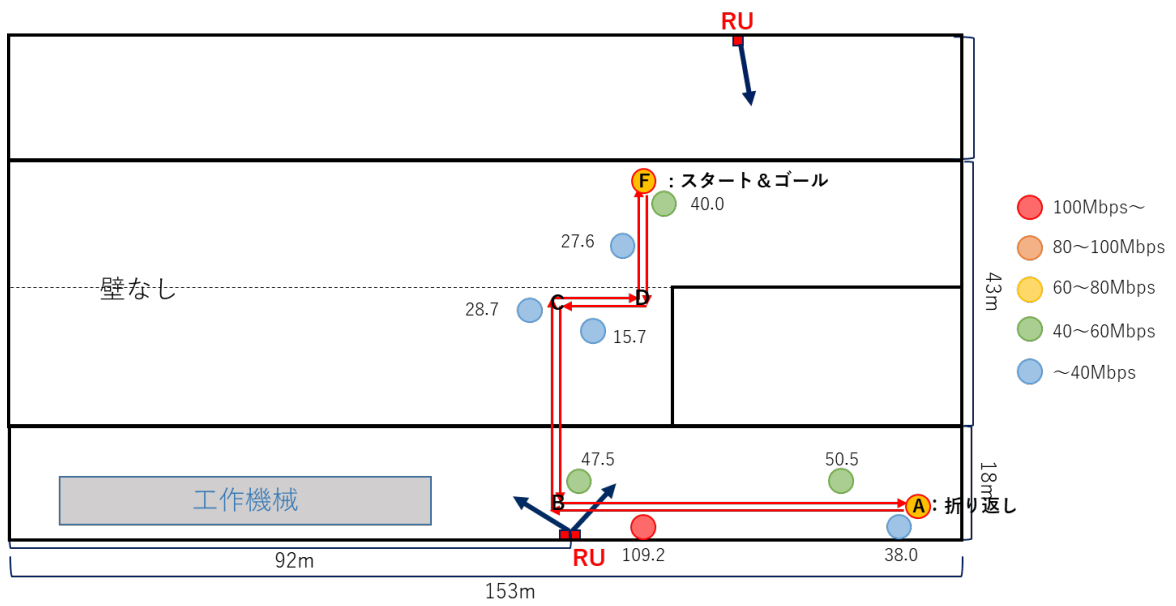


図 5.3-80 移動ルート内の各地点の UL スループット

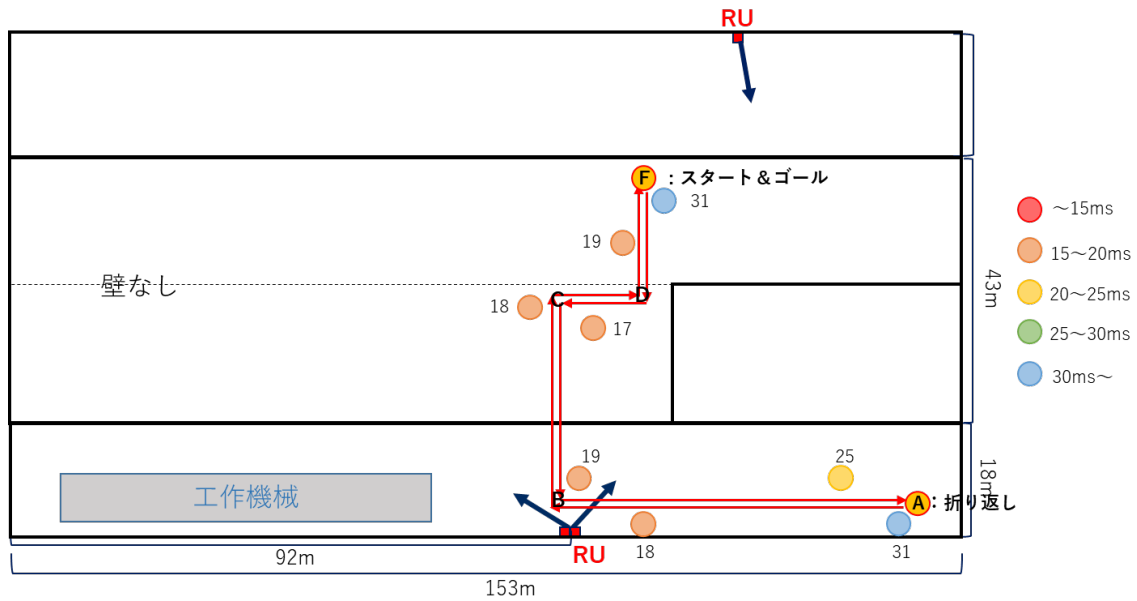


図 5.3-81 移動ルート内の各地点の遅延

各測定項目の時間推移を細かく確認するために、図 5.3-82～図 5.3-86 に移動時の各測定項目の時系列データを示す。横軸は、時刻となっている。

図より、地点 C、地点 D 付近において、品質が悪い時間が多いことが分かり、最低値では、SS-RSRP で-105dBm 以下、SS-SINR で 0dB 以下の時間があることが分かった。また、行きのルートの北側の RU から A 棟内南側の RU へハンドオーバーのタイミングについては、地点 C と地点 B の間で SS-RSRP、SS-RSRQSS-SINR のが急激に改善している 12:27:20 付近であったと推測される。帰りのルートのハンドオーバータイミングに関しては、地点 D 付近であったと推測されるが、測定値の変動が大きく、詳細なタイミングの特定が困難であった。

DL スループット、UL スループットに関しては、A 棟内南側の RU に近い地点 B 付近で高くなっている傾向が確認できた。一方で、RU のカバーエリアの端付近に位置する地点 A、C、D 付近では、スループットが劣化している傾向が出ていることが分かる。

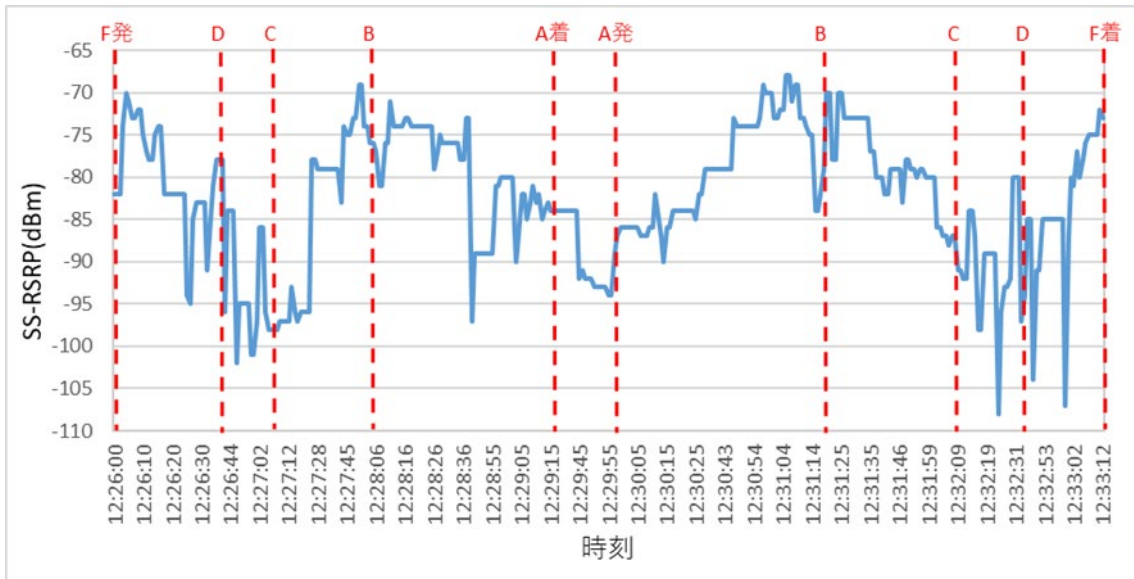


図 5.3-82 移動時の SS-RSRP の時系列データ

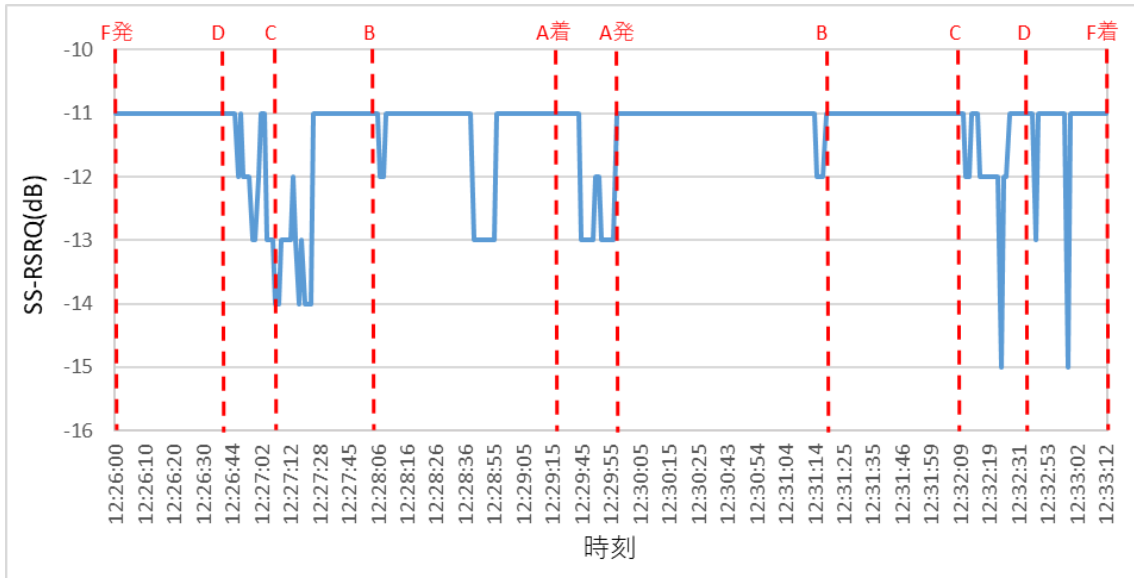


図 5.3-83 移動時の SS-RSRQ の時系列データ

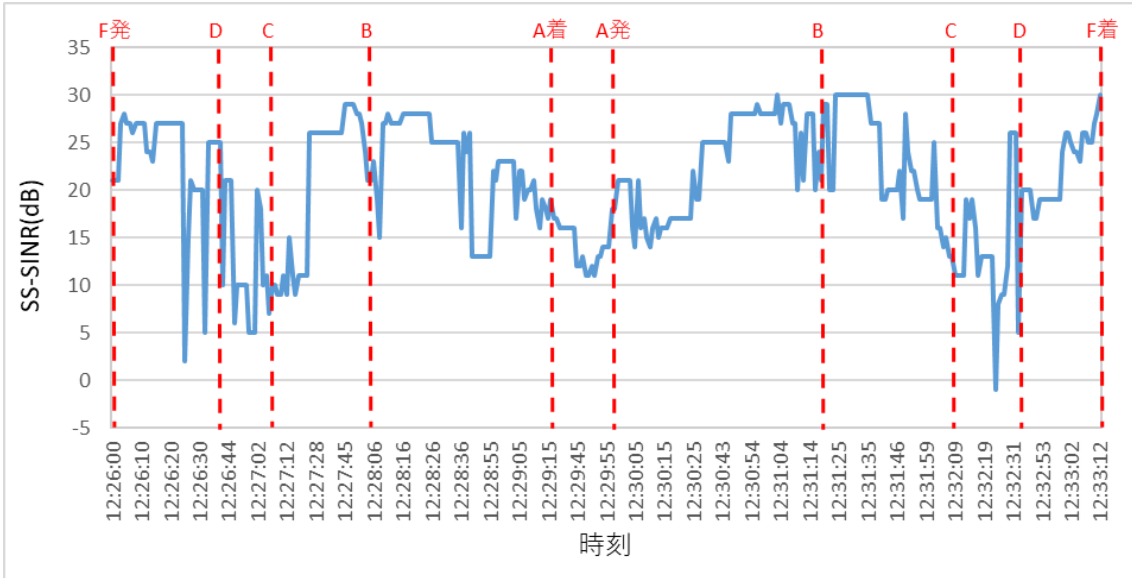


図 5.3-84 移動時の SS-SINR の時系列データ

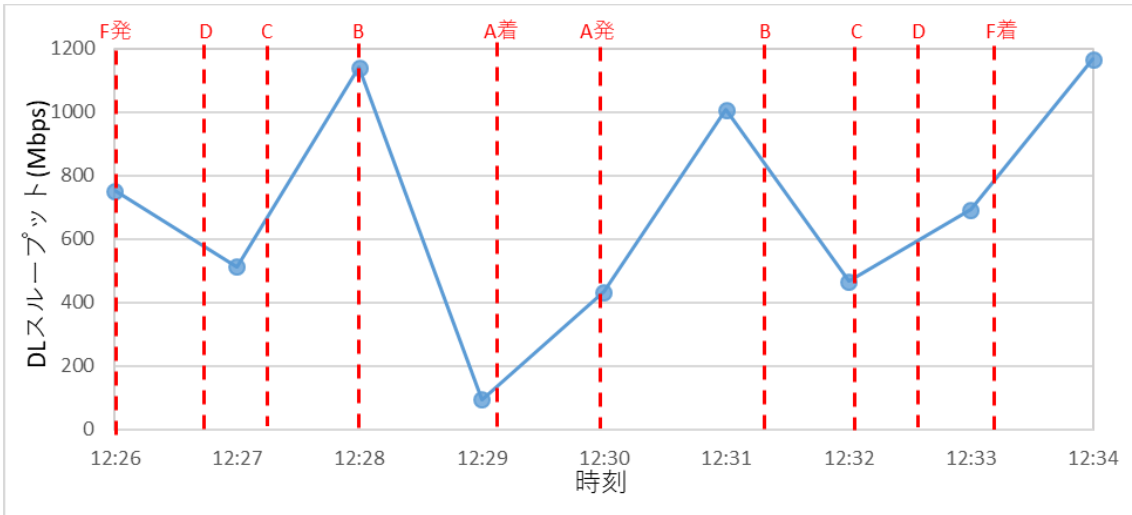


図 5.3-85 移動時の DL スループットの時系列データ

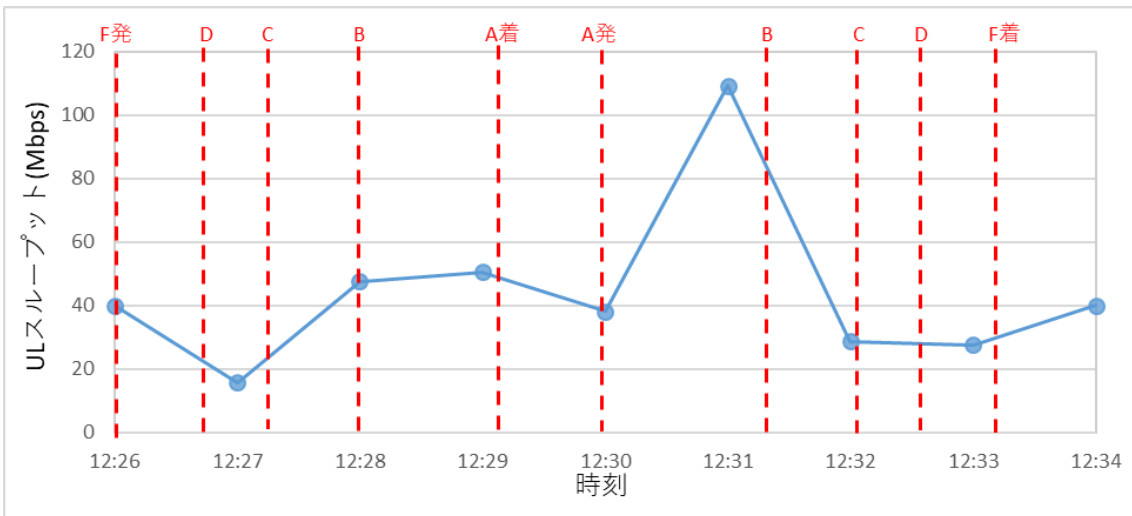




図 5.3-86 移動時の UL スループットの時系列データ

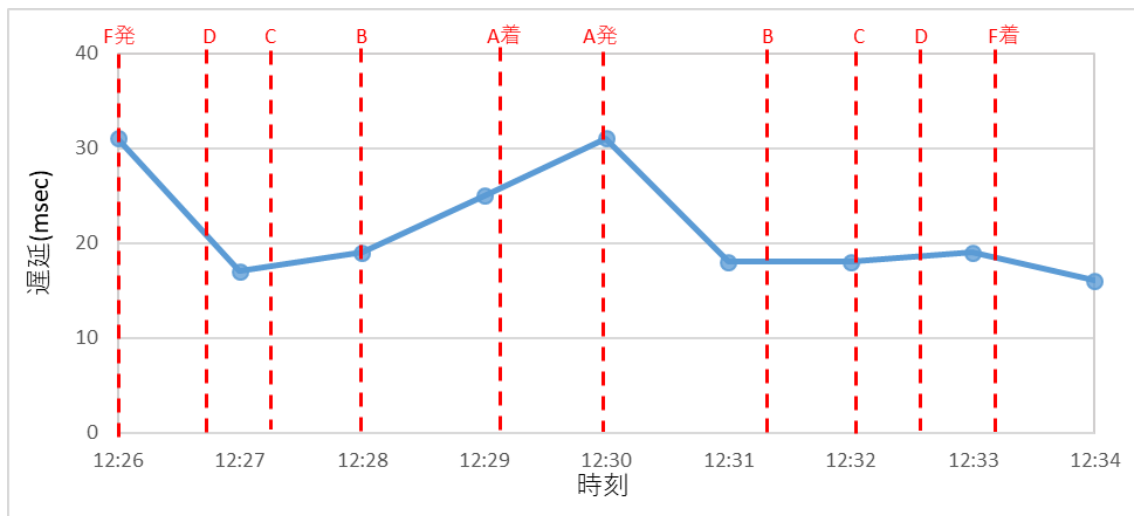


図 5.3-87 移動時の遅延の時系列データ

### 5.3.3.5 工場外の電波漏洩評価結果

図 5.3-88 図 5.3-93 に工場外の電波漏洩評価における各測定項目の最大値、最小値、中央値を示す。

第二工場の北側エリアでは、SS-RSRP で-90dBm 以下ではあるが、28GHz 帯の電波が漏洩していることを観測できた。これは、D 棟内に設置した RU のアンテナの横に樹脂製の縦 5m×横 6m 程度のシートシャッター(図 5.3-94 参照)となっており、この部分から電波が漏洩していると考えられる。ただし、アンテナが設置されている 9m 付近の D 棟の北側の壁は金属製となっているため、直接波ではなく、工場内からの反射波が漏洩している可能性が高いと考えられる。一番特性の良かった測定点 42 であれば、DL スループットも 500Mbps 超、UL スループットでも 70Mbps 超と、十分に使用できるレベルとなっていた。

一方、第二工場の東側エリアでは、測定点 45 で測定を試みたが、5G のセルに接続することができず、今回の測定方法では、測定不可という結果となった。従って、電波が漏洩していたとしても、5G が使用できないレベルの電波の漏洩であると言える。これは、対象となる A 棟内に設置した RU が測定点から遠く、かつ東側の壁は金属製の 2 重になっていたためであると考えられる。

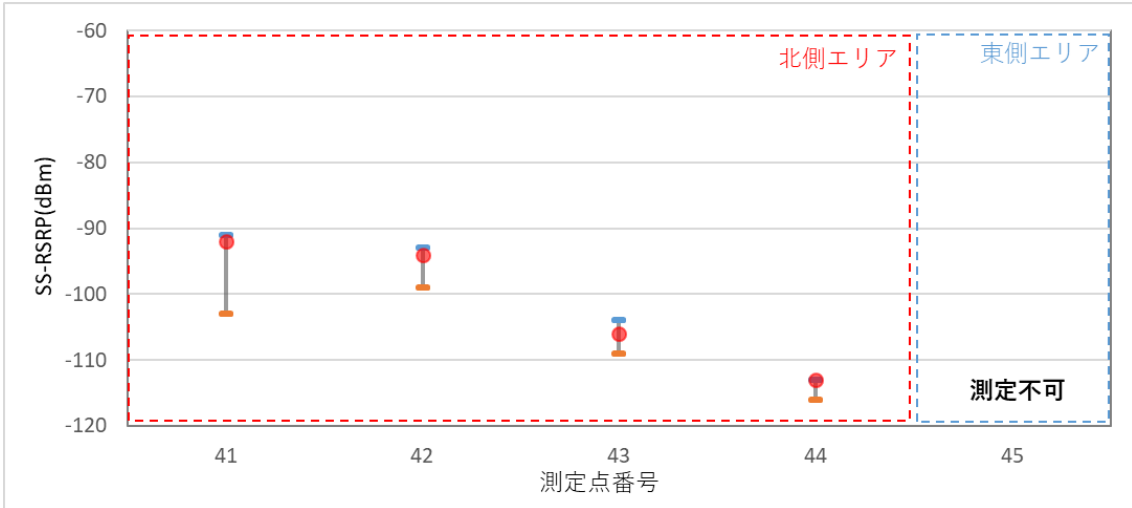


図 5.3-88 工場外の電波漏洩評価における SS-RSRP の最大値、最小値、中央値の比較

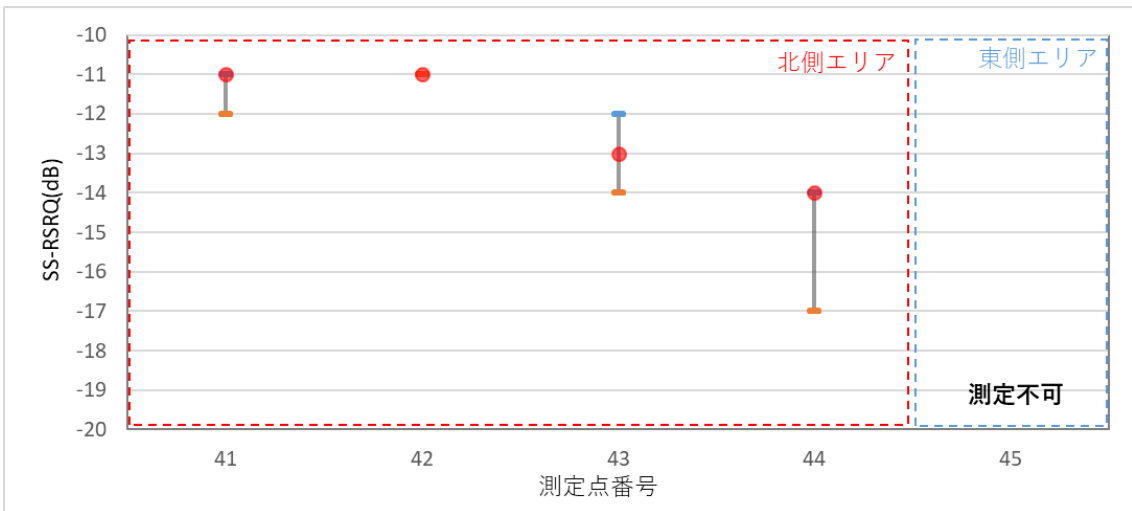


図 5.3-89 工場外の電波漏洩評価における SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値の比較

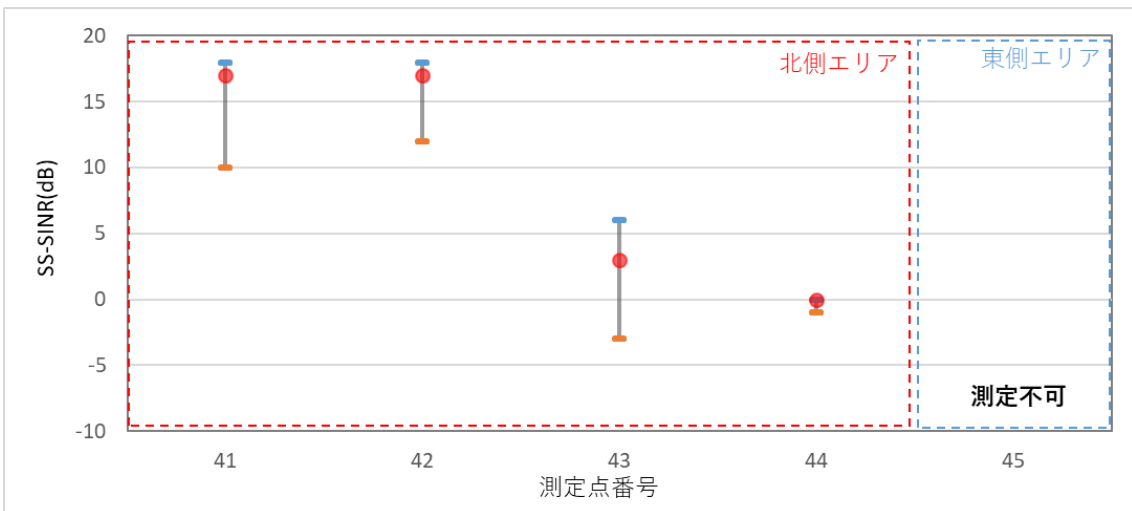


図 5.3-90 工場外の電波漏洩評価における SS-SINR の最大値、最小値、中央値の比較

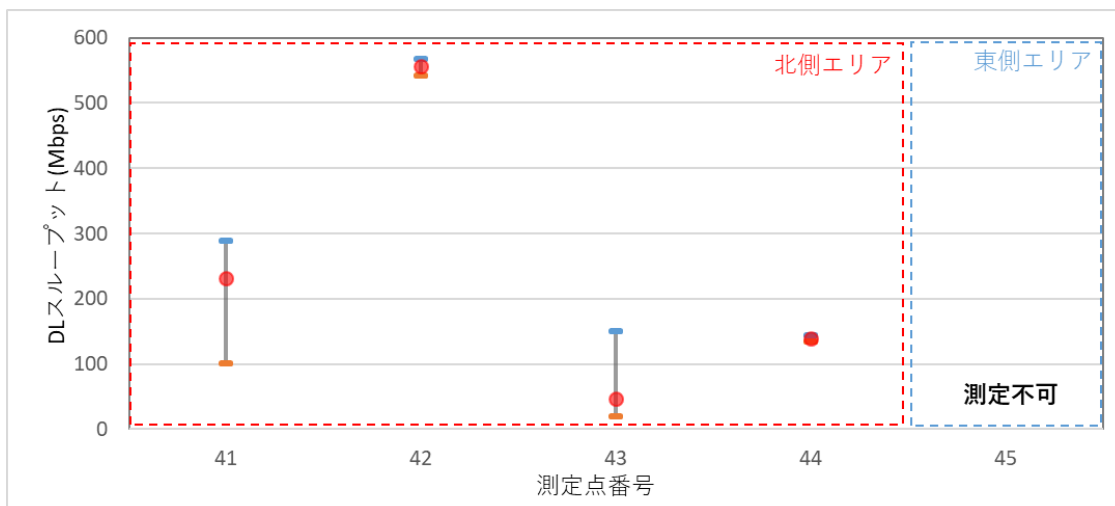


図 5.3-91 工場外の電波漏洩評価における DL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

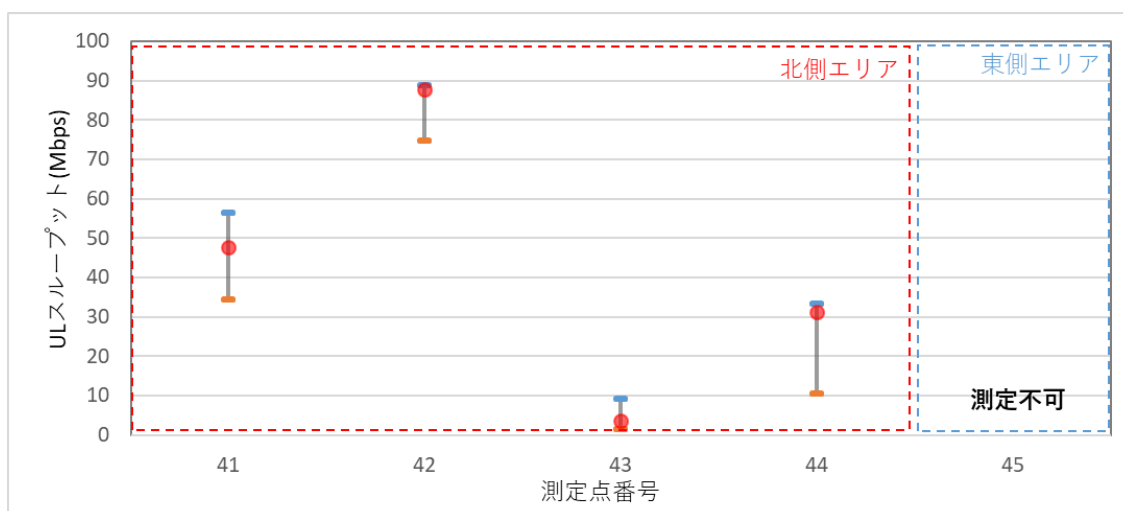


図 5.3-92 工場外の電波漏洩評価における UL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

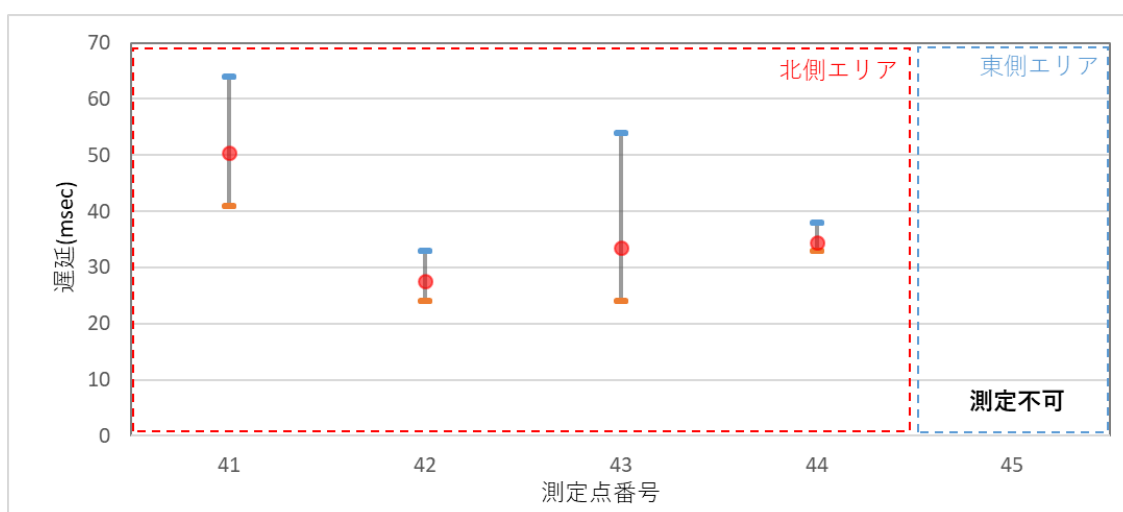


図 5.3-93 工場外の電波漏洩評価における遅延の最大値、最小値、中央値の比較



図 5.3-94 D 棟北側のシートシャッターの外観

図 5.3-95～図 5.3-100 に工場外の電波漏洩評価における各測定点の各測定項目の値を示す。北側に設置された RU から最も離れた測定点 44 は、アンテナから約 40m 離れた位置であり、中央値で-113dBm となっていた。一般に、RSRP が-115dB 程度以下になると通信が困難になることが多いとされており、かつ、本評価においても 40m 以上離れると、5G のセルと接続できない状態に陥っていたため、今回の評価環境の場合では、約 40m が電波漏洩の範囲と言える。

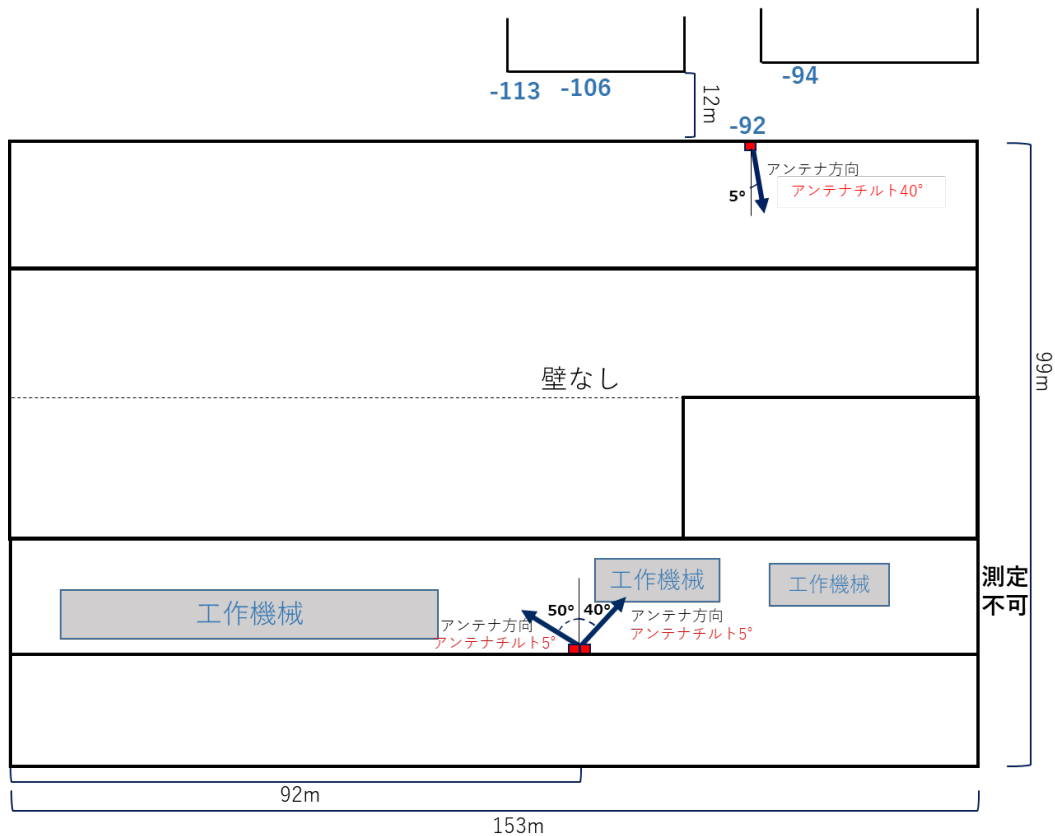


図 5.3-95 工場外の電波漏洩評価における各測定点の SS-RSRP(dBm)

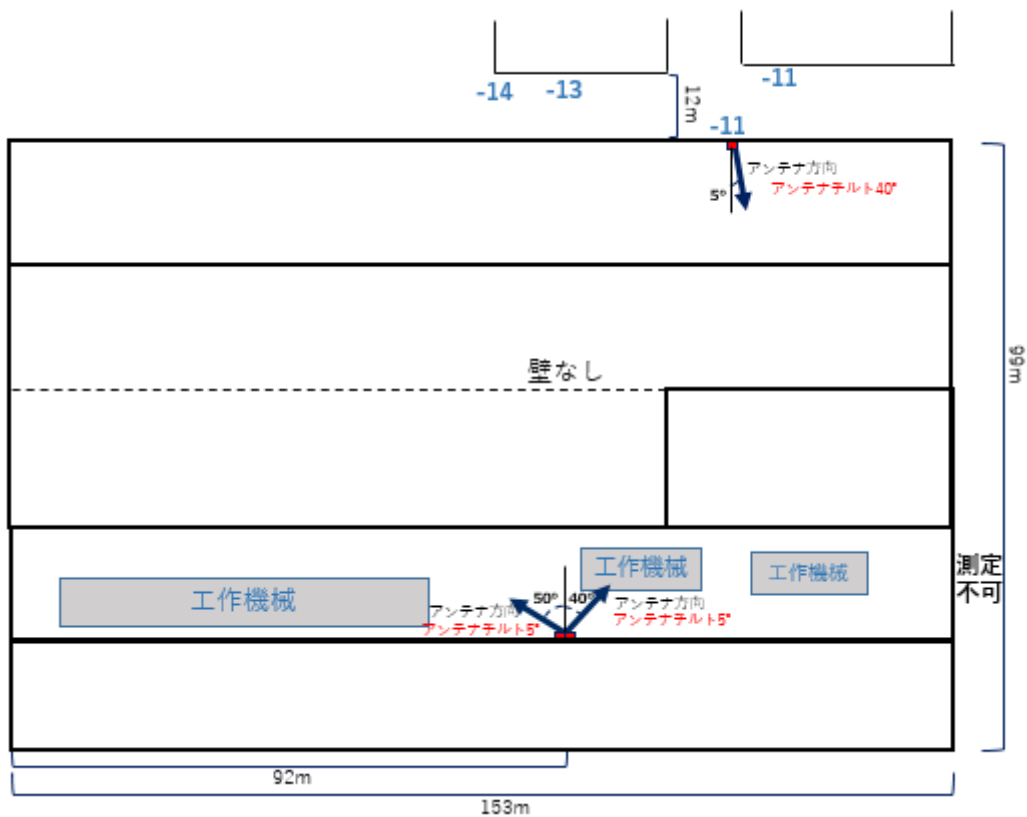


図 5.3-96 工場外の電波漏洩評価における各測定点の SS-RSRQ(dB)

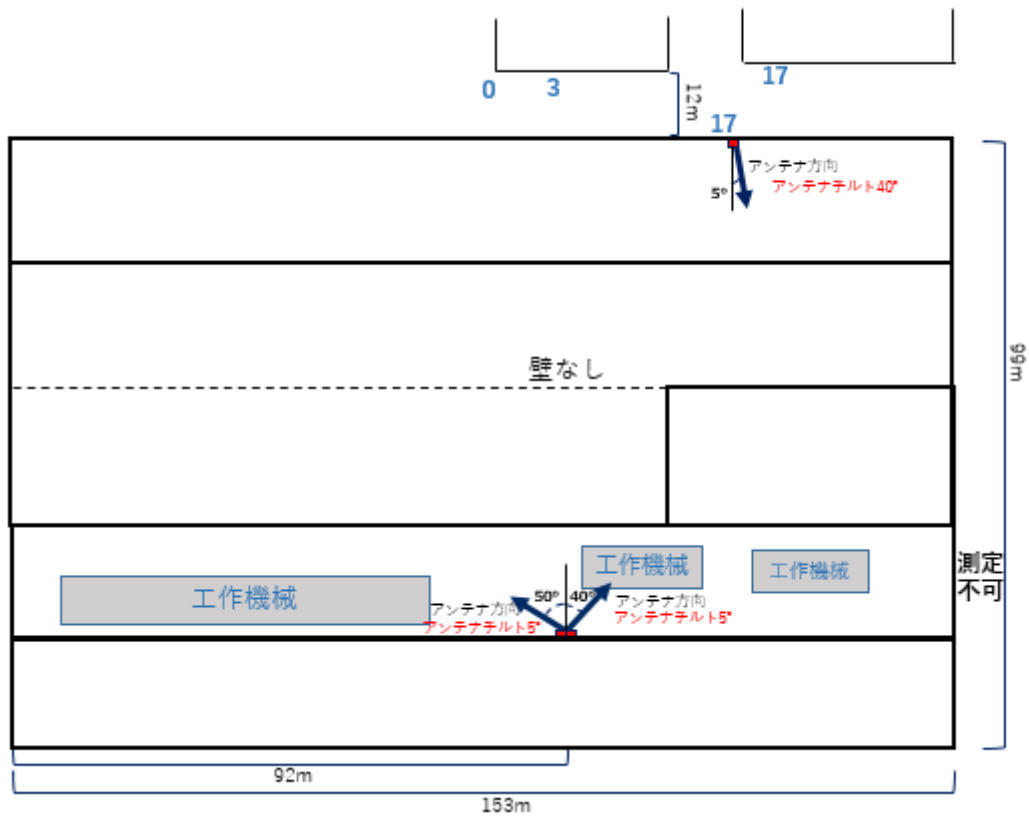


図 5.3-97 工場外の電波漏洩評価における各測定点の SS-SINR(dB)

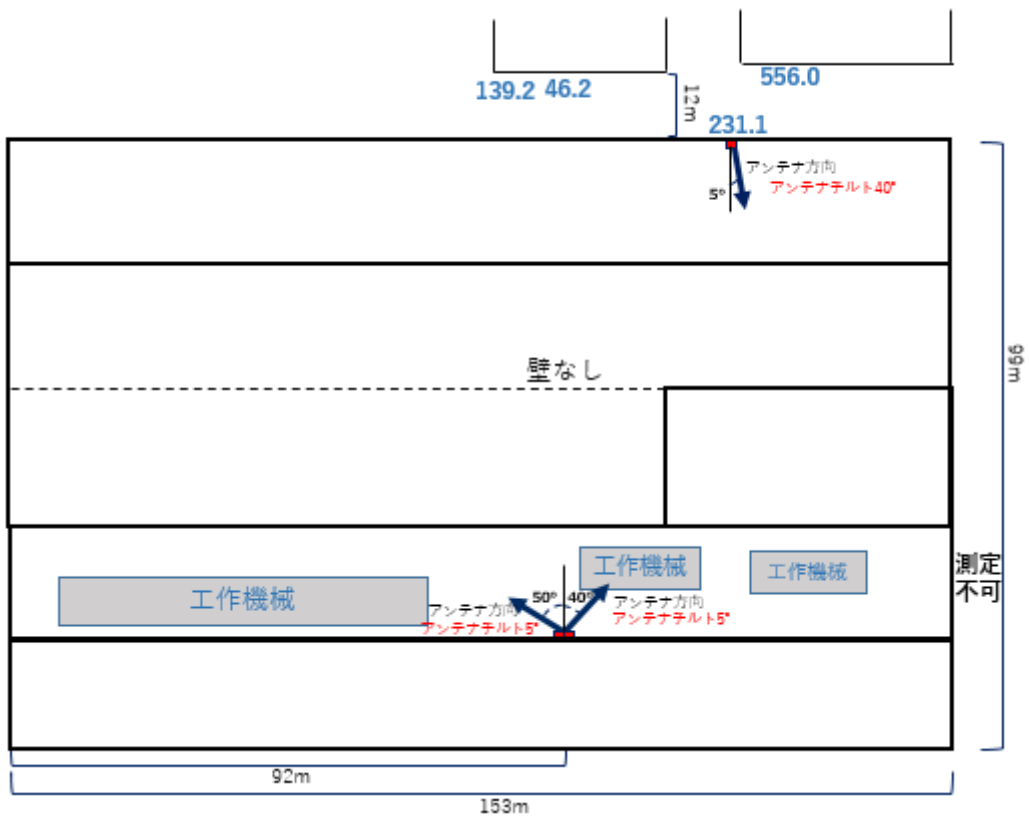


図 5.3-98 工場外の電波漏洩評価における各測定点の DL スループット(Mbps)

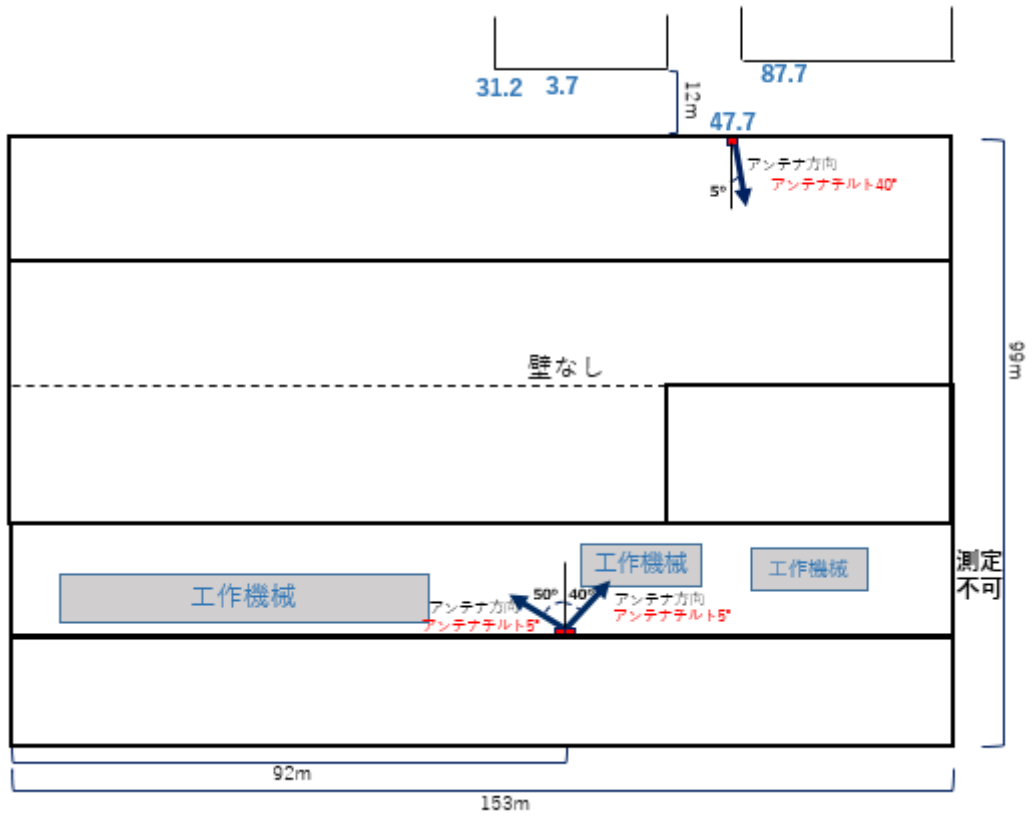


図 5.3-99 工場外の電波漏洩評価における各測定点の UL スループット(Mbps)

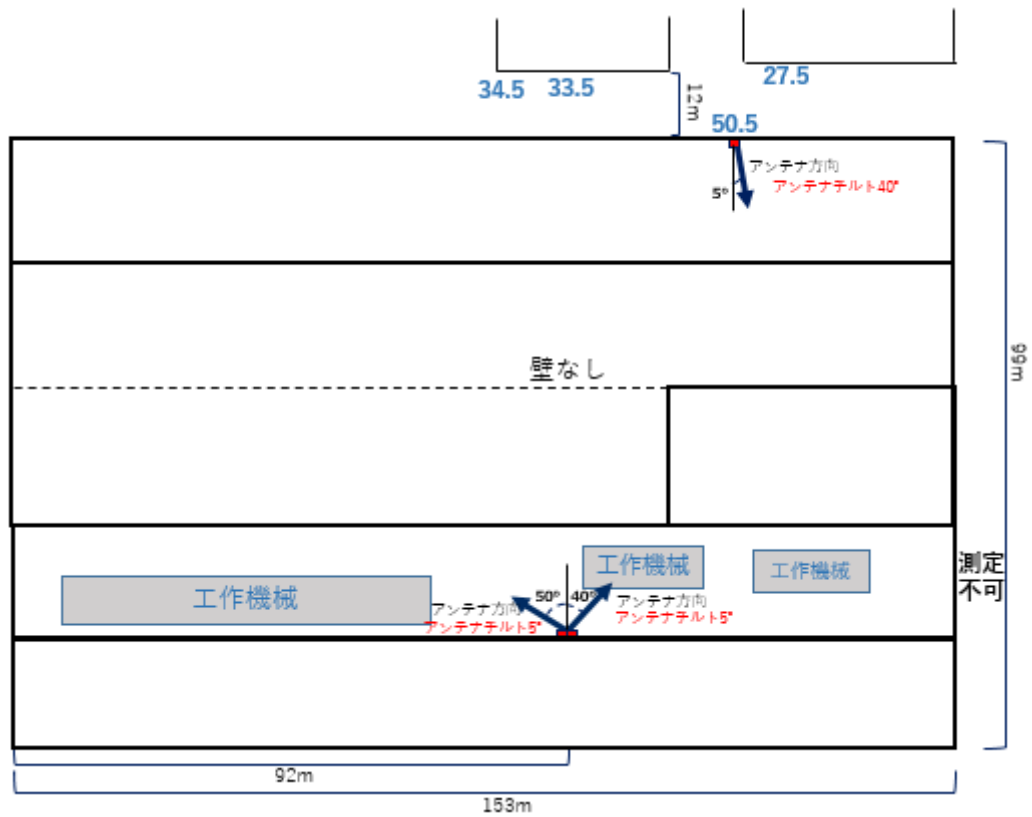


図 5.3-100 工場外の電波漏洩評価における各測定点の遅延(msec)

### 5.3.4 考察

#### 5.3.4.1 基本性能評価の考察

最初に、本評価の狙いであった以下の2つの項目について考察を行う。

- ・スマートグラスを使用する端末高での計測し、性能要件を満たすエリアを明確化
- ・工場の電波伝搬モデルの検討、考察

課題実証ア-3のスマートグラスを使用する遠隔保守におけるネットワーク性能要件は、0節でも記載した通り、帯域はスマートグラス1台当たり10Mbpsで20台、遅延に関しては1秒以下というものであった。

遠隔保守では、現場の動画をアップロードするものが主要なデータとなるため、ULスループットが10Mbps×20台=200Mbps程度がターゲットとなる。今回の基本性能評価で得られたULスループットは、無線品質が最良の場所であっても、200Mbpsを達成することはなかった。従って、今回の実証環境においては、最良のエリアで使用したとしても、設定したネットワーク性能要件の帯域の部分を満たすことは極めて難しいと考えられる。一方で、遅延に関しては、今回の測定結果でも、切断等がなければ、100ms以下は十分達成できており、遅延の要件1sec以下に関しては、満たせると考えられる。

今回の実証環境は、DU比が4:1で固定となっており、DLスループットを優先する設定となっていた。今回の測定でも、DLスループットが200Mbpsであれば、達成できるエリアは広く、アップロードの帯域が必要なユースケースの場合は、DU比をよりアップロード優先にすることで、十分達成できる範囲であると考えられる。

次に、工場の電波伝搬モデルについて考察を行う。

まず、LOS環境の測定点1~10、20~30で測定したSS-RSRPの中央値に対して、 $L=P_t+G_t-L_f+G_r-P_r-4$  (式 5.3-7 を用いて電波伝搬損失を算出し、ITU-R、および3GPPのLOSのモデル式と比較を行った。なお、RUのアンテナ指向性を考慮し、算出を行った。図 5.3-101 に比較結果を示す。

LOSの測定値から算出した電波伝搬損失は、ITU-R、および3GPPのモデル式と比較して小さく、より電波が飛ぶ環境である結果であることが分かった。これは、今回の実証環境の工場が金属で囲まれた環境で電波がA棟の外に抜けにくく、かつ、電波の減衰、吸収するようなものがほぼない環境であったためであると考えられる。

$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n)$  dB (式 5.3-1 の ITU-R のモデル式の  $N$ : Distance power loss coefficient を 11.5、13、14.5 とした場合の電波伝搬損失特性も図 5.3-101 にプロットした。20mより近いエリアはITU-Rのモデル式の $N$ の変更だけでは、測定値の方が電波伝搬損失が小さくなるが、20mより遠いエリアについては、 $N=13$ が今回の測定値による距離特性と一番フィットしていることが分かる。

同様に、NLOS環境の測定点11~20、31~40で測定したSS-RSRPの中央値に対して、 $L=P_t+G_t-L_f+G_r-P_r-4$  (式 5.3-7 を用いて電波伝搬損失を算出し、ITU-R、および3GPPのNLOSのモデル式と比較を行った。図 5.3-102 に比較結果を示す。

NLOSの測定値から算出した電波伝搬損失は、LOS環境の場合と同様の結果となり、ITU-R、および3GPPのモデル式と比較して小さく、より電波が飛ぶ環境である結果となった。



これは、NLOS 環境であっても、今回の実証環境の工場の金属製の壁、工作機械等の金属体からの反射波をうまく活用できるためと考えられる。

$L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \frac{d}{d_0} + L_f(n)$  dB (式 5.3-1 の ITU-R のモデル式の  $N$ : Distance power loss coefficient を 14.5、16、17.5 とした場合の電波伝搬損失特性も図 5.3-102 にプロットした。20m~30m のエリアは ITU-R のモデル式の  $N$  の変更だけでは、測定値の方が電波伝搬損失が小さくなるが、40m より遠いエリアについては、 $N=16$  が今回の測定値による距離特性と一番フィットしていることが分かる。

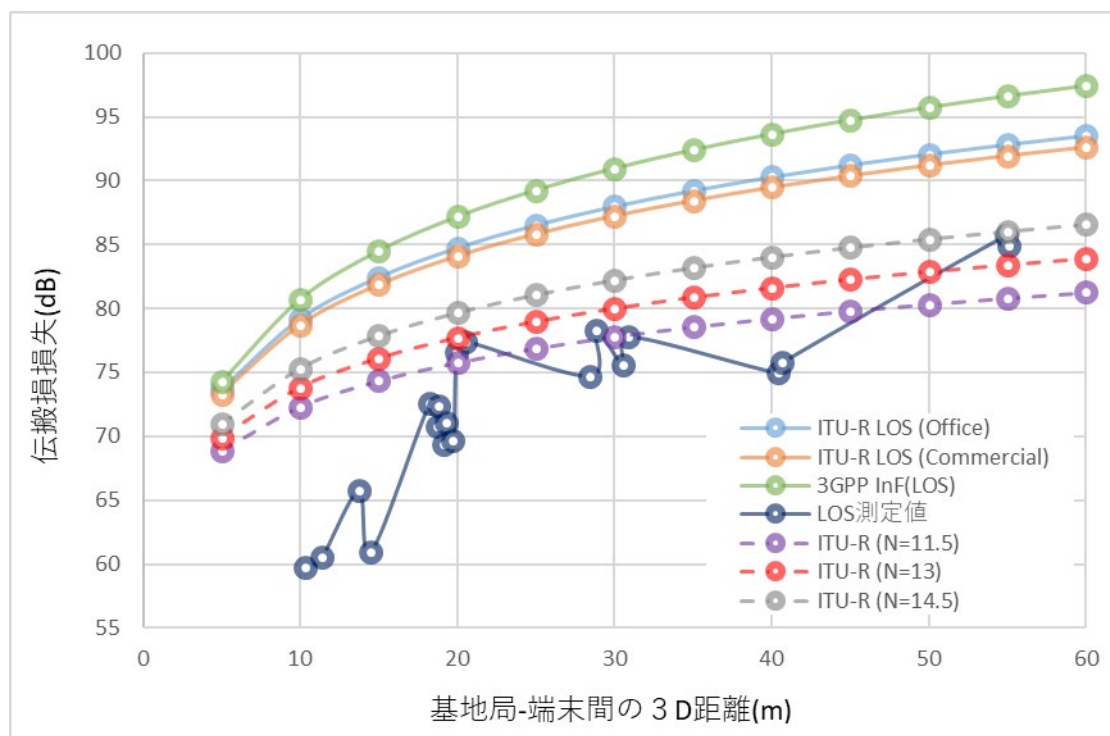


図 5.3-101 測定結果から算出した電波伝搬損失特性(LOS)

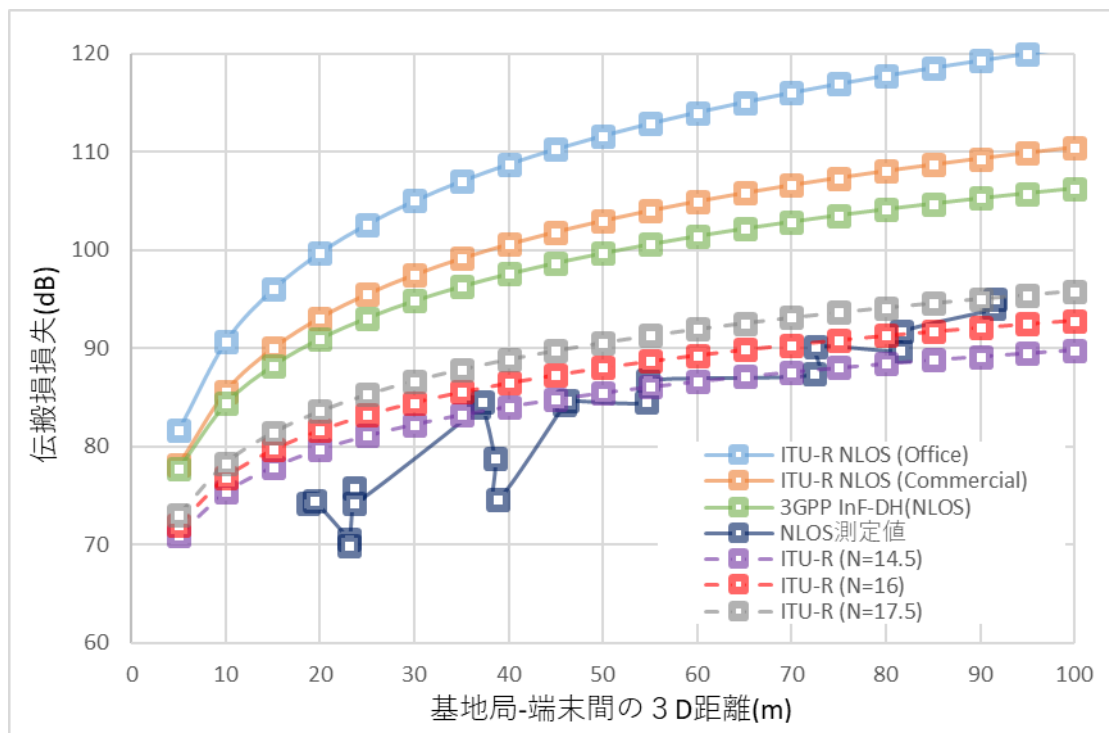


図 5.3-102 測定結果から算出した電波伝搬損失特性(NLOS)

図 5.3-103 に本評価による測定結果から導出した提案モデルと ITU-R および 3GPP モデルの比較結果を示す。提案モデルは、LOS、NLOS とともに、ITU-R および 3GPP の既存モデルと比較して、電波が飛ぶ特性となっていることが分かる。一方で、提案モデルと既存モデルとの共通点に関しては、3GPP の工場モデルの LOS と NLOS の電波伝搬損失の差は他のモデルと比べると小さかったが、今回の提案モデルでも同様な傾向が確認できたと言える。

なお、3GPP の工場のモデルの NLOS 環境では、基地局のアンテナが低い場合のモデル (InF-SL、InF-DL) も用意されており、そのモデルは、NLOS の電波伝搬損失が大きくなり、LOS と NLOS の電波伝搬損失の差が広がることを示唆している。このことから、金属に囲まれた反射波が有効に使える環境に加え、アンテナ高を遮蔽物よりも高い位置に設置したことも、NLOS 環境が良好となった一因であると考えられる。アンテナの設置高に関しては、ローカル 5G のエリア設計する際には、考慮すべきポイントの 1 つであると考えられる。

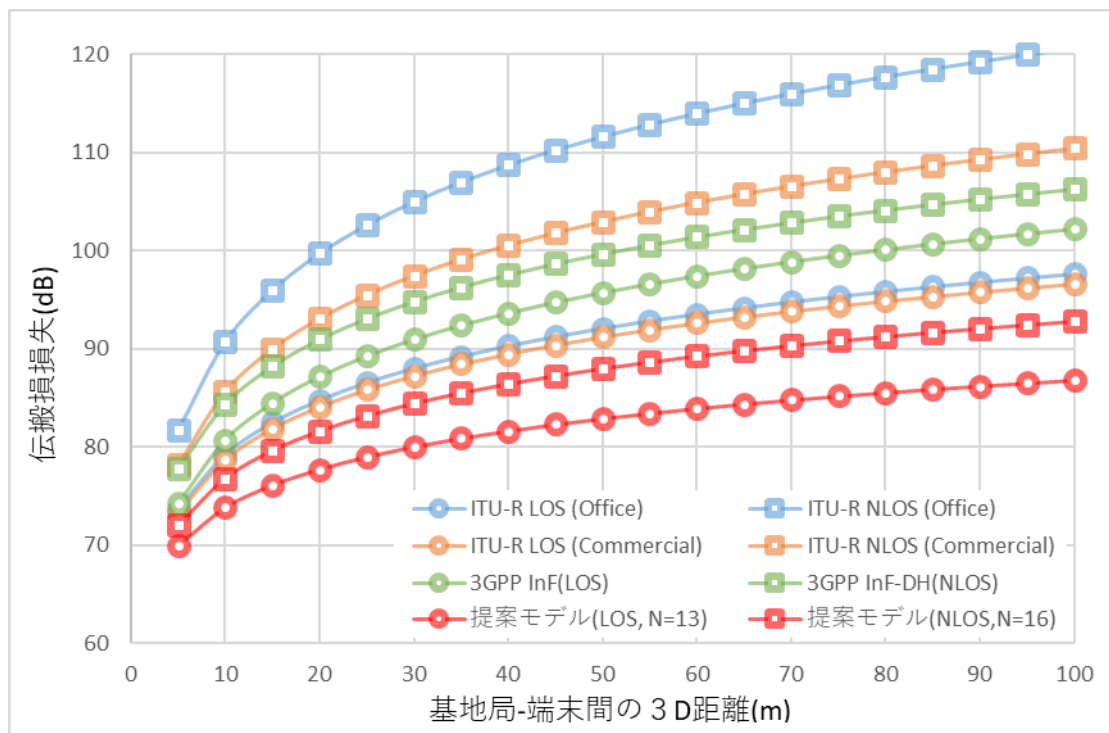


図 5.3-103 測定結果から導出した提案モデルと ITU-R および 3GPP モデルの比較

なお、電波法関係審査基準のエリア算出法の基準(カバーエリア：-75.2dBm、調整対象区域；-84dBm)に照らし合わせると、図 5.3-35 の結果より、カバーエリアは変形 20m 程度、調整対象区域は半径 40m 程度となった。図 5.3-38、図 5.3-39 のスループットの距離特性を見ると、カバーエリアとしては、少し厳しめの基準になっていると考えられる。

#### 5.3.4.2 端末高による影響評価の考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・AGV が使用する端末高での計測し、性能要件を満たすエリアを明確化

課題実証ア-2 の無軌道 AGV の制御におけるネットワーク性能要件は、0 節でも記載した通り、帯域はカメラ動画をアップロードするための 10Mbps、遅延に関しては 500msec 以下というものであった。

今回、端末高を 0.15m としても、1.5m の場合とほぼ同等の性能であったことは、5.3.3.2 節の結果のところでも示している。遅延に関しては、5.3.4.1 節のスマートグラスの要件に関する考察でもあったように、今回の測定結果でも、切断等がなければ、100ms 以下は十分達成できており、遅延の要件 1sec 以下に関しては、満たせると考えられる。従って、UL スループットがボトルネックとなるため、常時 10Mbps 出るエリアが無軌道 AGV の制御におけるネットワーク性能要件を満たせるエリアと考えられる。

図 5.3-104 に端末高による影響評価で測定した各測定点の UL スループットの最小値を示す。10Mbps を満たせない測定点の中で、RU に一番近い測定点は、測定点 37(UL スループットの最小値：7.9Mbps) となり、RU からの 3D 距離で約 54m であった。これを踏まえると、RU から半径 50m 程度が無軌道 AGV の制御の要件を満たせるエリアの目安にな

ると考えられる。

ただし、無軌道 AGV は、低速ながらも移動するため、棟間の跨ぎやマルチパスフェージングの影響により、場所を固定して測定した今回の測定値よりも劣化する可能性もあるため、半径 50m よりも小さくなる可能性もあると考えられる。5.3.3.4 節の移動による影響評価結果の考察も考慮した上で、5.3.4.4 節で無軌道 AGV の要件を満たすカバーエリアについて再検討を行うこととしたい。

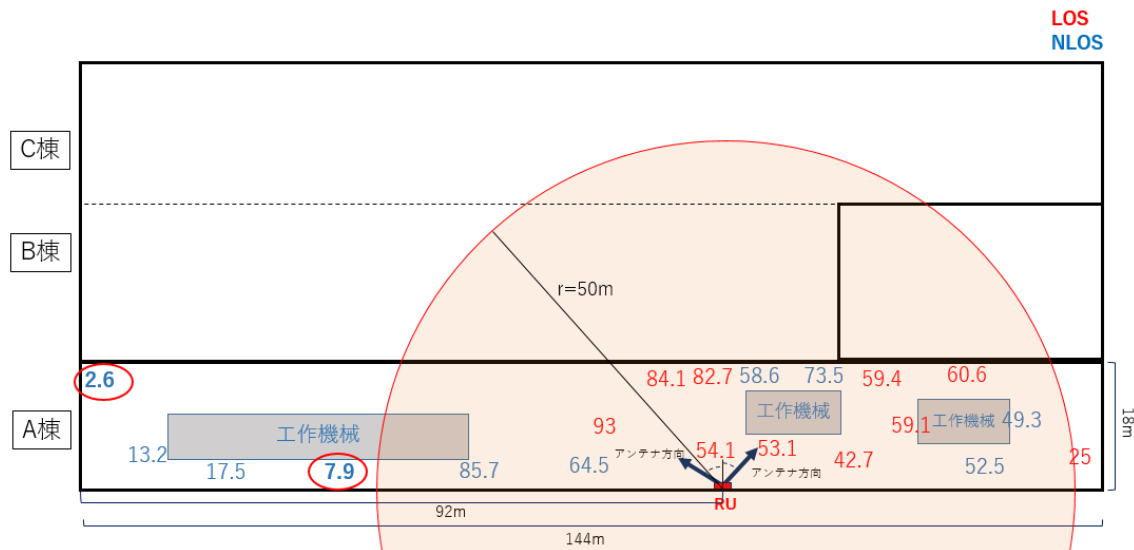


図 5.3-104 各測定点の UL スループットの最小値と無軌道 AGV の要件を満たすカバーエリア(暫定)

### 5.3.4.3 チルト角による評価の考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・RU のチルト角変更によるカバーエリアへの影響を調査

アンテナのチルト角を 5 度、30 度の評価結果を比較すると、RU からの距離によって、傾向が異なることが分かった。RU からの距離別の傾向は以下の通りであった。

RU から 30m 以内のエリア：チルト角 30 度の方が良好な性能

RU から 30～50m のエリア：チルト角 5 度の方が良好な性能

RU から 50m 以上のエリア：チルト角 5 度の方が若干良いものの、チルト角 30 度もほぼ同等な性能

これらの結果から、チルト角を深く変更することにより、想定通り、性能が良好なエリアを RU から近いエリアに変更することができると言える。5G システムをどのエリアで主に使用するかを考慮した上で、チルト角を設定することにより、より良いローカル 5G の利用環境を構築することが可能になると考えられる。また、今回のような反射波が有効に使えるような工場環境であれば、アンテナのチルト角を深く設定したとしても、カバーできる範囲が制限されるリスクは小さいと考えられる。しかし、屋外など電波が飛ばない環境であると、アンテナのチルト角を深く設定することにより、エリアが制限されることも予想されるため、環境に合わせて設定が必要と考える。

以上、チルト角に関しては、ローカル 5G のエリア設計する際には、最適なエリア形成に

は、重要なポイントの1つであると言える。

#### 5.3.4.4 移動による影響評価の考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・ AGV が使用する端末高で移動する実際に近い形での計測

今回の移動測定では、南側の RU と接続した場合、B 棟と C 棟の境目である地点 B 付近で SS-RSRP が中央値で -100dBm 程度、SS-SINR が中央値で 5dB 程度となっており、今回の評価結果からみると、UL スループットを常時 10Mbps というのは少し厳しい印象であった。図 5.3-104 に無軌道 AGV の要件を満たすカバーエリアを示したが、B 棟と C 棟のエリアはもう少し狭い可能性が高い。これは、A 棟と B 棟の境目は、基本的に金属の壁となっており、一部、樹脂製のシートシャッターの部分から A 棟 RU の電波が漏れ出ていると考えられるが、壁のない A 棟内の電波の飛びと比較すると、A 棟から B 棟への電波の飛びの方が悪くなるのが考えられる。

以上の考察を踏まえ、図 5.3-105 無軌道 AGV の遠隔制御のネットワーク要件を満たすカバーエリアに無軌道 AGV の遠隔制御のネットワーク要件を満たすカバーエリアを示す。B 棟、C 棟内のカバーエリアは、A 棟よりも 10m 程度小さくなり、RU から 40m 程度のエリアになると考えられる。

なお、実際に無軌道 AGV の尖閣制御システムを稼働させた場合、4.4.2.2 節で示したように約 30m 程度のカバーエリアとなっており、想定内の結果と言えそうである。

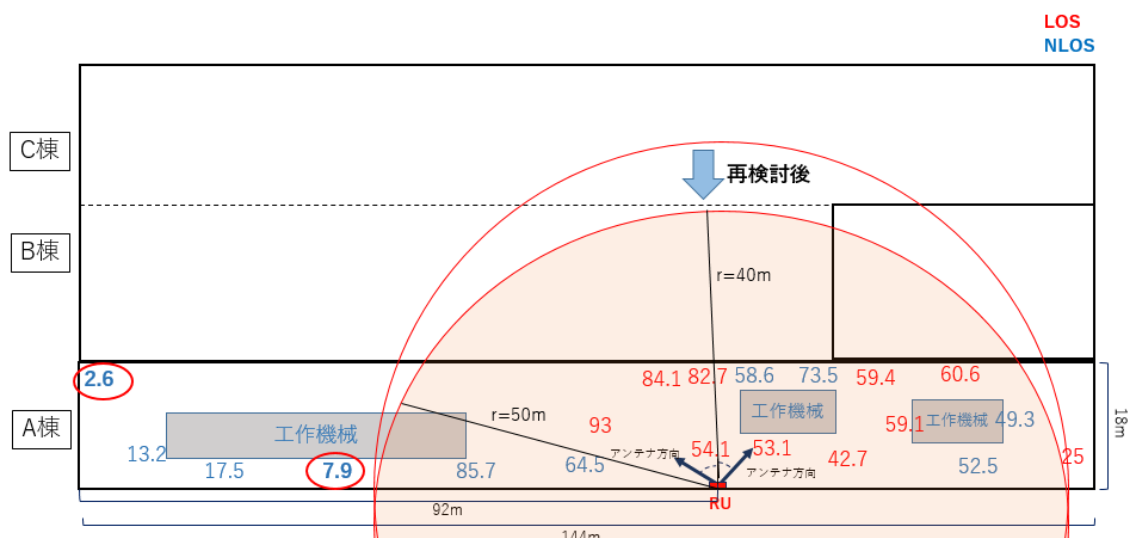


図 5.3-105 無軌道 AGV の遠隔制御のネットワーク要件を満たすカバーエリア

#### 5.3.4.5 工場外の電波漏洩評価の考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・ 工場外の電波漏洩を調査

今回の評価では、アンテナが工場外と近い場所に設置され、電波の透過損が小さい素材で、かつ、広い電波の透過エリアがあれば、工場外への電波揺曳はある程度発生することが分か

った。一方、電波が遮断される金属製の壁などで囲まれていれば、工場外への電波の漏洩リスクは小さいことも分かった。

ローカル 5G を設置する際に、キャリア 5G との干渉等の問題で、工場外への電波漏洩を防ぎたい場合は、以下の対策が考えられる。

- ・工場外から距離のある工場を中心エリアに RU を設置する。
- ・樹脂製のシートシャッターやガラス製の窓等の電波の大きな通り道となりそうなエリアの近くに RU の設置を避ける。
- ・樹脂製のシートシャッターやガラス製の窓等の電波の大きな通り道を電波遮断シートで被う。
- ・アンテナのチルトを深くすることにより、電波の飛びを抑える。
- ・RU の送信電力を抑える。

以上の対策の中では、ローカル 5G の通信性能や利用エリアに制限を与えるものも服有れるため、ローカル 5G のシステム導入の際は、慎重に対策を選択する必要があると考えられる。

## 5.4 ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等

本実証においても、測定方法および測定項目については、ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等と同様であるため、ここでは説明を割愛する。(5.3 節を参照)

ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等では、同時多数接続の試験、および動的電波 MAP 作成試験を行う。

同時多数接続試験の目的は以下の通りである。稼働中の工場では、様々なローカル 5G を活用したユースケースが併用されることが想定され、複数の端末が同時に通信をするケースが想定される。ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等で実施した試験は、単一の端末での評価であるため、同時通信をしたときの影響範囲を考慮できない。そこで、複数の端末が同時に通信をしたときの測定を行い、各端末のスループットがどの程度低下するかを考察し、ローカル 5G のエリア構築時やローカル 5G を活用したユースケースのシステム構成を検討する上で、考慮すべき項目を明らかにする。

動的電波 MAP 作成試験の目的は以下の通りである。本実証で試験環境は、稼働中の工場であり、工作機械や大型クレーン等の動きにより無線環境が動的であることが考えられる。ため、ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等で実施した短時間の測定方法だと、上記の電波変動の影響が正確に把握できない。そこで、長時間に亘って測定を行い、無線品質が劣化する時刻やその品質と劣化した時刻の無線環境変化を考慮した上で、リスクを明らかにし、ローカル 5G の運用時に必要な測定システムについて考察する。

### 5.4.1 評価方法

#### 5.4.1.1 同時多数接続の試験方法

表 5.4-1 に同時多数接続試験の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、同時に使用する端末が増えた場合、その帯域幅が複数の端末でシェアされることにより、各端末が使用できるスループットは低下するため、その低下度合を確認することである。

測定場所は、第二工場の A 棟内の 20 点に設定した。図 5.4-1 同時多数接続の試験の測定点の位置に測定点の位置を示す。本試験では、20 端末で同時に測定する必要があるため、複数の端末を長時間、同じ場所に設置し続ける必要があるため、工場内の棚等に置く方法とした。そのため、LOS、NLOS のバランスが悪く、端末の設置高にばらつきが生じている。ただし、東西の 2 つのセルに均等に接続するようにするため、東西のエリアでバランスよく測定点を配置した。測定点の番号は、46~48 が LOS の測定点、49~65 が NLOS の測定点とし、それぞれ RU との距離順に並べた(詳しくは、表 5.4-2 参照のこと)。図 5.4-2~図 5.4-5 は、LOS の測定点 46、および NLOS の測定点 55、57、59 での測定中の写真である。測定環境の様子を確認するため、適宜、参照されたい。

測定時間は、約 1 分の測定を 1 セットとして実施し、試行回数は測定点当たり 10 セット実施した。従って、SS RSRP、SS RSRQ、SS SINR に関しては、1 秒毎の 1 分間の測定を 10 回繰り返した。DL、UL スループット、遅延の測定に関しては、1 分毎の測定を 10 回繰り返した。

なお、RU のアンテナのチルト角は 5 度とした。

表 5.4-1 同時多数接続の試験の概要、測定方法

測定の狙い	・複数端末が同時接続した場合、実効的に使用できるスループットを確認
測定場所	第二工場 A 棟内の 20 点固定 (場所は図 5.4-1 を参照) 稼動する工場で邪魔にならない場所を選定
測定方法	工場内の棚等に台車に測定端末を設置し、20 台の端末を同期させて自動測定
測定時間	1 分×10 回
RU のアンテナチルト	5 度
端末の台数	20
端末の設置高	0.5~1.9m

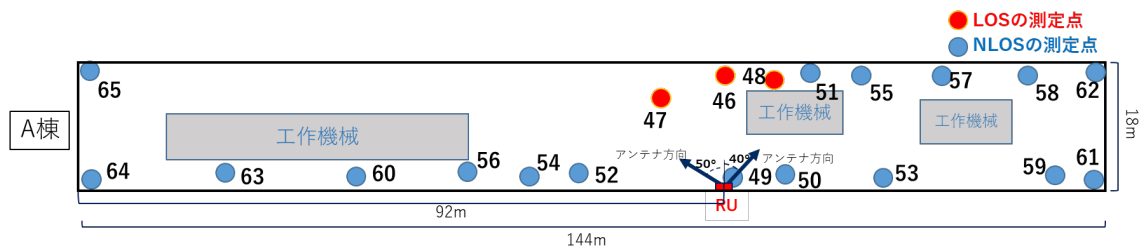


図 5.4-1 同時多数接続の試験の測定点の位置

表 5.4-2 測定点の情報(測定点 46~65)

測定点番号	RU との 3D 距離(m)	端末高(m)	LOS/NLOS
46	16.7	1.3	LOS
47	18.7	1.2	LOS
48	19.0	1.3	LOS
49	8.1	0.5	NLOS
50	11.6	1.2	NLOS
51	21.3	0.9	NLOS
52	21.8	0.9	NLOS
53	24.6	1.3	NLOS
54	26.7	1.3	NLOS
55	27.2	1.2	NLOS
56	36.5	0.6	NLOS
57	37.6	1.9	NLOS
58	45.9	0.5	NLOS
59	46.8	0.6	NLOS
60	52.3	1.1	NLOS
61	56.1	1.3	NLOS
62	59.0	0.7	NLOS
63	69.8	0.7	NLOS
64	91.8	1.3	NLOS
65	93.9	0.9	NLOS





図 5.4-2 測定点 46(LOS)の測定の様子



図 5.4-3 測定点 55(NLOS)の測定の様子



図 5.4-4 測定点 57(NLOS)の測定の様子



図 5.4-5 測定点 59(NLOS)の測定の様子

#### 5.4.1.2 動的電波 MAP 作成試験方法

表 5.3-3 に同時多数接続試験の概要および評価方法を示す。本評価の狙いは、ローカル 5G の保守・運用ツールとして可視化できる仕組みが必要と考えているため、動的電波 MAP の導入効果を検証することである。さらに、稼働中の工場では、工作機械や大型クレーン等によって無線環境の変化が発生するため、その変化による無線品質への影響を明らかにすることである。

測定時間は、工場の稼働時間である 7.5 時間とした。測定項目は、SS RSRP、SS RSRQ、SS SINR の 3 項目とし、他の測定と同様に 1 秒毎の 1 分間の測定を繰り返した。今回の測定システムでは、DL スループット、UL スループット、遅延の測定は汎用の Android アプリケーションを活用したため、リアルタイムな測定結果の可視化が困難なことから、DL ス

ループット、UL スループット、遅延に関しては、本評価では測定項目の対象外としている。

その他の条件は、5.4.1.1 節で記載した同時多数接続試験の内容と同一であるため、ここでは詳細な説明は割愛する。

表 5.4-3 動的電波 MAP 作成試験の概要、測定方法

測定の狙い	<ul style="list-style-type: none"> <li>動的電波 MAP を作成し、導入効果を確認</li> <li>工場稼働中の無線品質の変動に伴う無線品質への影響を確認</li> </ul>
測定場所	第二工場 A 棟内の 20 点固定 (場所は図 5.4-1 同時多数接続の試験の測定点の位置図 5.3-3 測定点の位置を参照) 稼働する工場で邪魔にならない場所を選定
測定方法	工場内の棚等に台車に測定端末を設置し、20 台の端末を同期させて自動測定
測定時間	7.5 時間
RU のアンテナチルト	5 度
端末の台数	20
端末の設置高	0.5~1.8m

## 5.4.2 評価結果・分析

### 5.4.2.1 同時多数接続の試験結果

図 5.4-6~図 5.4-11 に 20 台の端末を同時に接続した場合の各測定項目の最大値、最小値、中央値を示す。

SS-RSRP に関しては、リファレンス信号の受信電力であり、多数接続により影響を受ける値でないため、基本性能評価で実施した端末 1 台ごとの測定結果(図 5.3-21 参照)の同様な傾向となった。

SS-RSRQ に関しては、多数接続により干渉が出るため、影響を受ける値である。結果としては、RU から遠い測定点において、最小値の劣化が目立つ結果となった。中央値が劣化しない理由としては、スループット測定も常時しているわけではなく、1 分毎に DL、UL それぞれ 10 秒ずつ計 20 秒程度の測定となるため、干渉も常時出ているわけでないためと考えられる。

SS-SINR に関しては、多数接続の影響により、最大値、中央値の傾向は基本性能評価(図 5.3-23)で実施した端末 1 台ごとの測定結果と変わらなかったが、最小値は、多数接続の方が劣化しているように見える。今回の環境では、20 台の端末が南側 A 棟内の 2 つの RU に分かれて接続することになるため、セル間の干渉の影響が出ていると考えられる。また、中央値が劣化しない理由としては、SS-RSRQ のところでも述べたように、スループット測定を常時していなかったためと考えられる。

DL スループット、UL スループットに関しては、基本性能評価(図 5.3-24、図 5.3-27 参照)で実施した端末 1 台ごとの測定結果と比較すると、多数接続によりスループットが大きく低下していることが分かる。ただし、長時間測定用のスマートフォンを置けるスペースの制約により、基本性能評価と測定点が変わっており、単純な比較ができないため、スループットと距離の関係性から特性の比較を以下で実施した。

なお、遅延に関しては、基本性能評価(図 5.3-28)で実施した端末 1 台ごとの測定結果と

比べても、大きく劣化しておらず、複数端末を接続したことによる変化点は見いだせなかった。

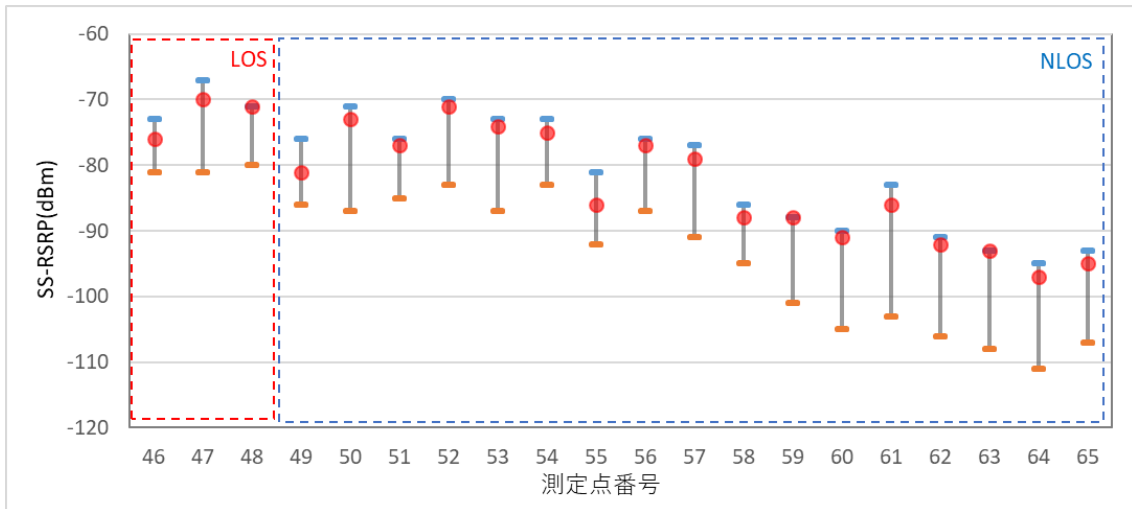


図 5.4-6 同時多数接続試験における SS-RSRP の最大値、最小値、中央値

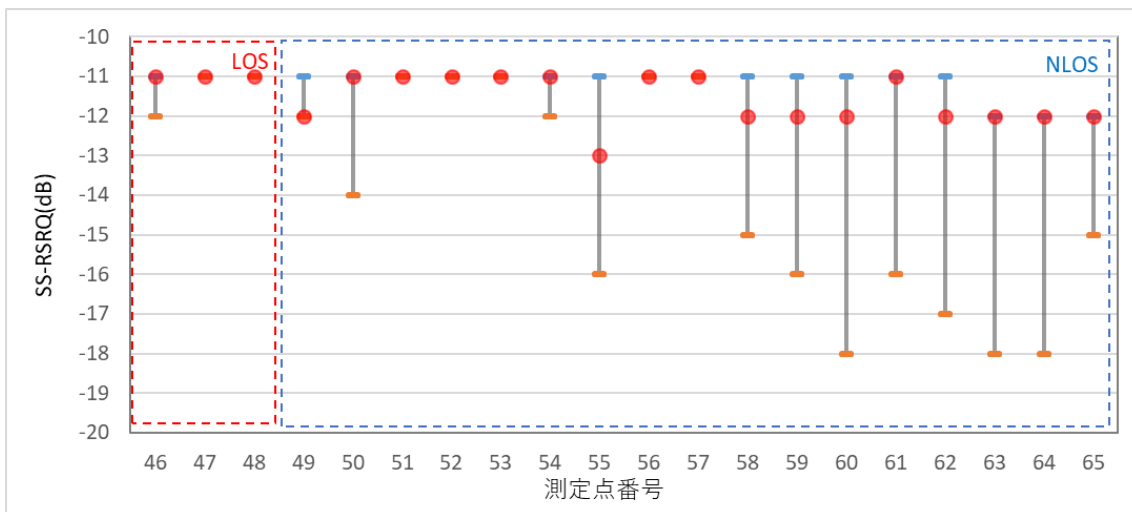


図 5.4-7 同時多数接続試験における SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値

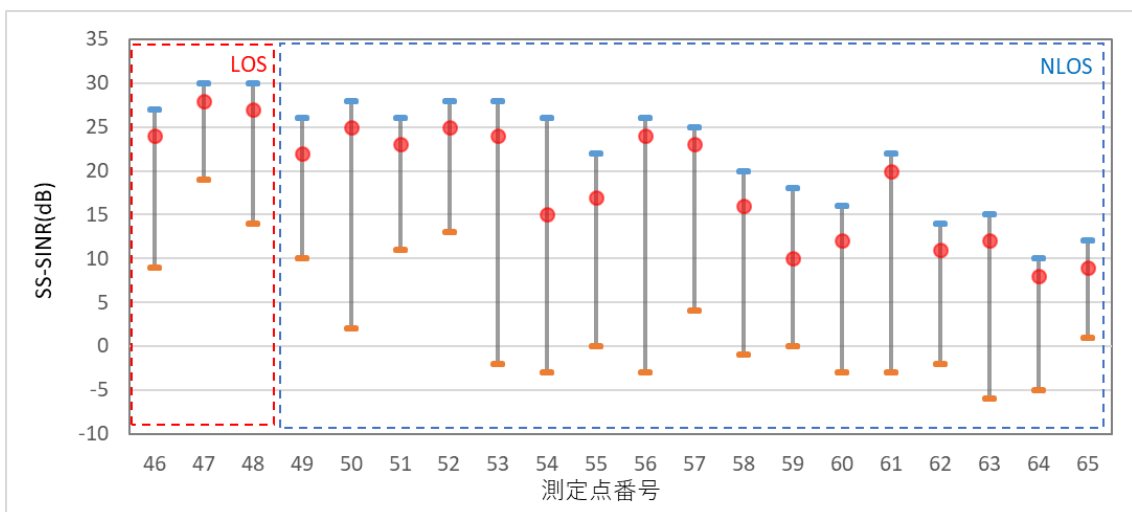


図 5.4-8 同時多数接続試験における SS-SINR の最大値、最小値、中央値

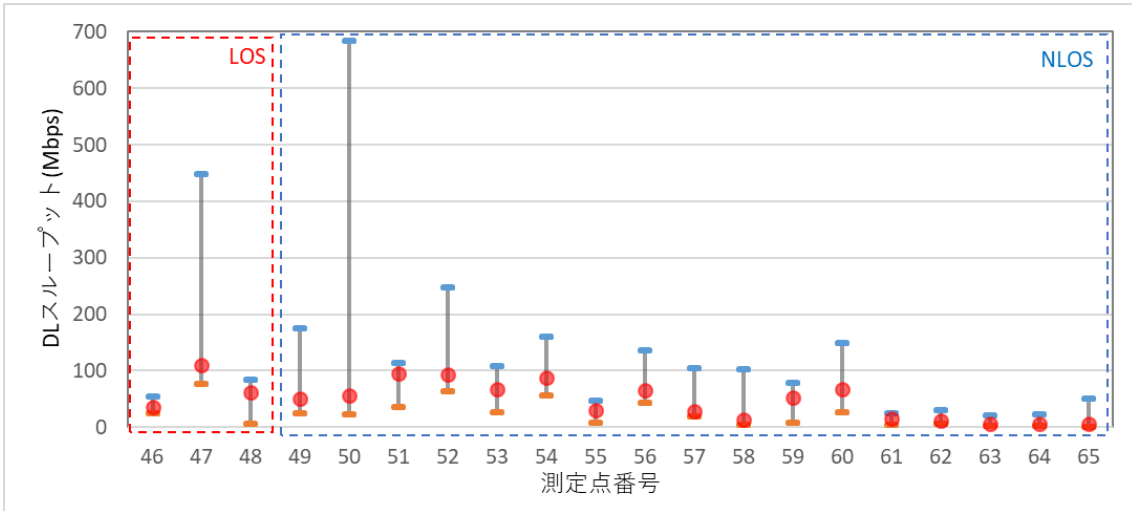


図 5.4-9 同時多数接続試験における DL スループットの最大値、最小値、中央値

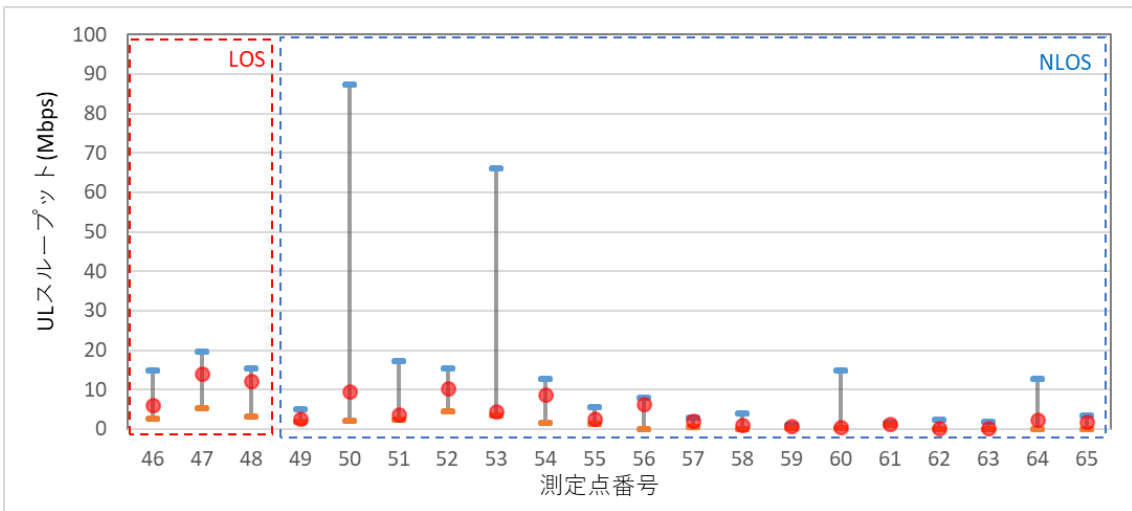


図 5.4-10 同時多数接続試験における UL スループットの最大値、最小値、中央値

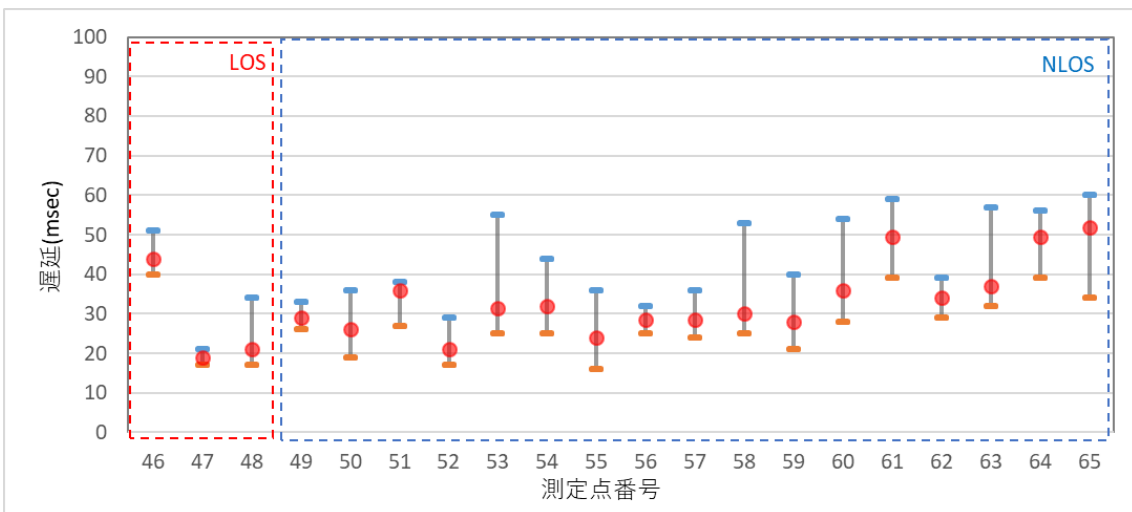


図 5.4-11 同時多数接続試験における遅延の最大値、最小値、中央値

長時間測定用のスマートフォンを置けるスペースの制約により、基本性能評価と測定点が変わっており、単純な比較ができないため、スループットと距離の関係性から同時接続によるスループット低下の影響を分析する。図 5.4-12 に多数接続時の DL スループット - 距離特性、図 5.4-13 に多数接続時の UL スループット - 距離特性を示す。

基本性能評価で実施した端末 1 台ごとの測定結果では、DL スループットの中央値が 1Gpbs~300Mbps で推移していた。(図 5.3-38 参照)、図 5.4-12 より、多数接続時の DL スループットは、100~10Mbps 程度となっていることが分かる。今回の測定では、A 棟内に設置した東西の 2 つセルにほぼ均等に接続するように測定点を置いているため、1 セル当たり 10 端末の接続をしているとすると、想定どおり、1/10 程度の低下の範囲になっていることが分かった。

UL スループットの方も確認すると、基本性能評価では、中央値が 120~30Mbps で推移していた(図 5.3-39 参照)。多数接続時では、図 5.4-13 より、12~1Mbps 程度となっており、DL と同様に、1/10 程度の低下の範囲と言えそうな結果であった。

ただし、特に、無線環境が悪い測定点では、1/10 以上の低下している点もあったため、実運用上のリスクとしては、抑えておくポイントであると考えられる。

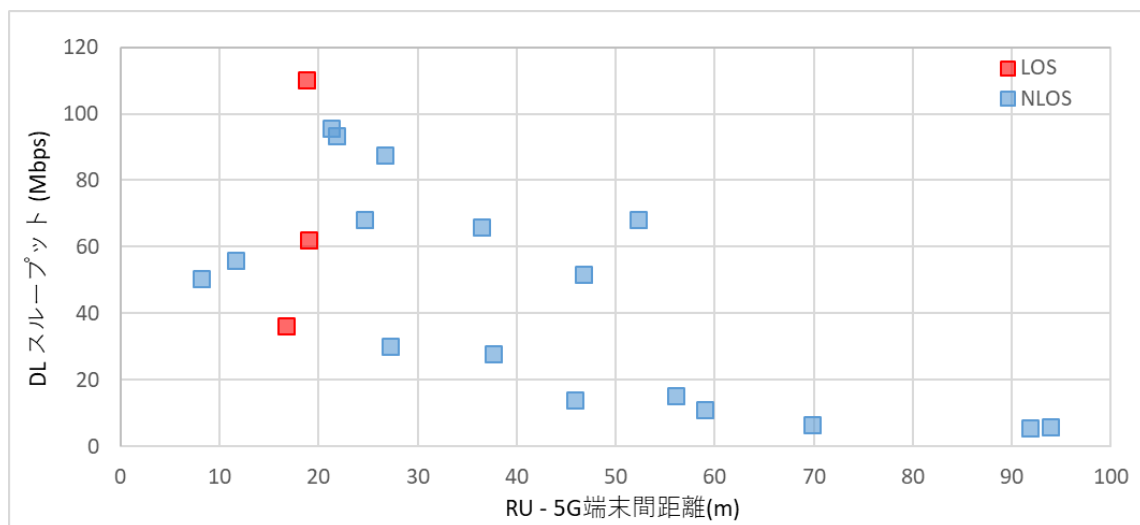


図 5.4-12 多数接続時の DL スループット - 距離特性

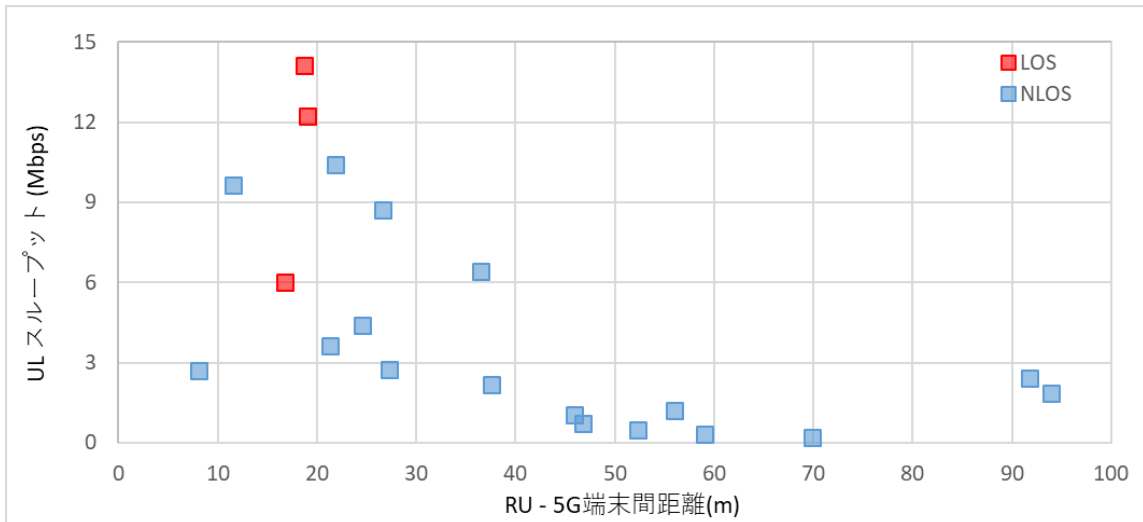


図 5.4-13 多数接続時の UL スループット - 距離特性

#### 5.4.2.2 動的電波 MAP 作成試験結果

図 5.4-14～図 5.4-19 に本試験において作成した動的電波 MAP を示す。これらの MAP は、可視化表示用の PC をインターネット経由でクラウドサーバの Web サーバに接続し、ブラウザ上で表示した画面をキャプチャしたものである。電波 MAP の生成方法は、測定値を集約して蓄積しているクラウドサーバにおいて、各測定点で測定した SS-RSRP 値を基に、クリギングアルゴリズムを使用して、測定点の間のエリアの SS-RSRP の値を補間し、補完した値も含めて SS-RSRP の高いエリアは暖色系(赤からオレンジ)、低いエリアは寒色系(緑から青)の色を付け、工場の MAP 上にマッピングしている。なお、MAP 中の測定点にある数字が各測定点の SS-RSRP の測定値であり、図中の赤丸は SS-SINR のレベルを示しており、赤色が濃いほど、SS-SINR のレベルが高いことを示している。

基本的には、SS-RSRP が高い測定点では、SS-SINR も高い傾向となっているが、時刻によっては、その関係が崩れ、SS-SINR のみ劣化している測定点が発生していることが分かる。



図 5.4-14 2021/1/27 9:30 の動的電波マップ(東側 RU のみ)

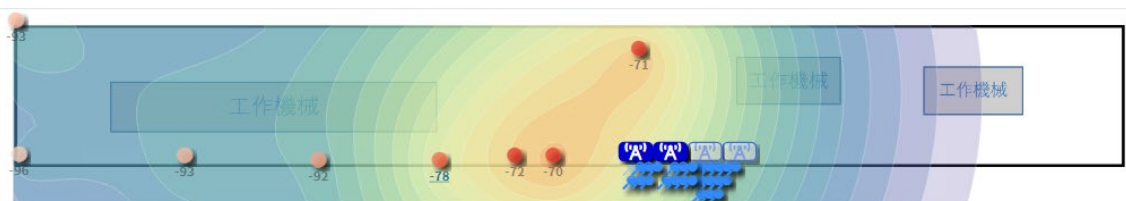


図 5.4-15 2021/1/27 9:30 の動的電波マップ(西側 RU のみ)

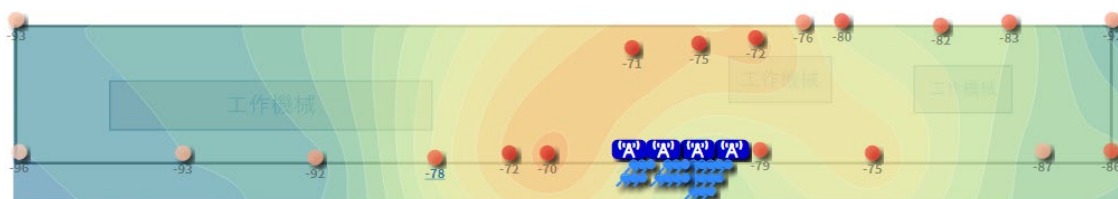


図 5.4-16 2021/1/27 9:30 の動的電波マップ(東側 RU+西側 RU)

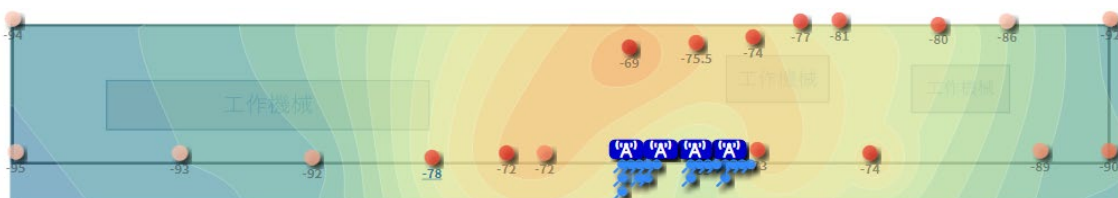


図 5.4-17 2021/1/27 12:00 の動的電波マップ(東側 RU+西側 RU)

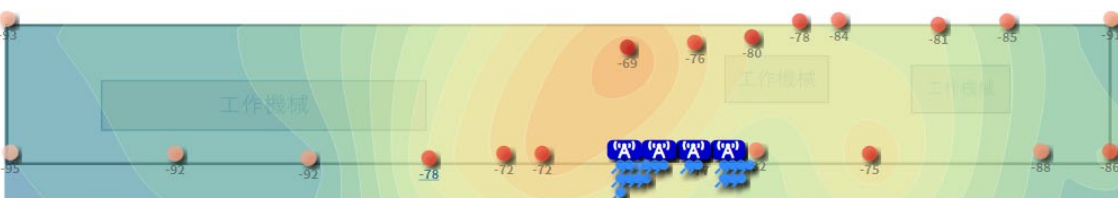


図 5.4-18 2021/1/27 15:00 の動的電波マップ(東側 RU+西側 RU)

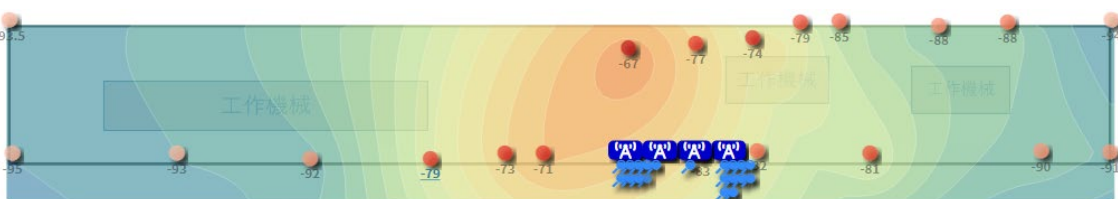


図 5.4-19 2021/1/27 16:59 の動的電波マップ(東側 RU+西側 RU)

動的電波 MAP だけでは、分析が難しい現状もあることを考慮し、今回の測定システムでは、SS-RSRP と SS-SINR の時系列データも併せてグラフ表示できるようにした。

図 5.4-20 に測定点 46 の SS-RSRP、SS-SINR の系列データを含む全可視化画面、図 5.4-21 に測定点 56 の SS-RSRP、SS-SINR の系列データを含む全可視化画面を示す。時系列データの表示範囲は、1/27 9:30~17:00 の 7.5 時間分であり、SS-RSRP、SS-SINR の測定は 1 秒毎としているが、データ量が膨大となるため、1 分毎の中央値にデータを変換して表示している。なお、クラウドサーバ上のデータベースの接続セルの管理は、Android API の制約につき、4G の PCI(Physical Cell ID)毎に行っている。時系列のグラフにおいて、グラフの色が変化しているところは、4G セル間でハンドオーバーをしていることを意味している。なお、4G セル間、5G セル間のハンドオーバーは、独立で発生するようになっているため、色が変わったからと言って 5G セルもハンドオーバーが発生しているわけではない。

測定点 46 の SS-SINR は全時間に亘って安定しているが、測定点 56 の SS-SINR は変動が大きく、特に 10:00~10:30 は、他の時刻と比較しても、5dB 程度劣化していることが分かる。このような 10 分以上の長周期の劣化は、大型クレーンやトラックなどの電波の遮蔽



などで発生することが多い現象であると考えられる。

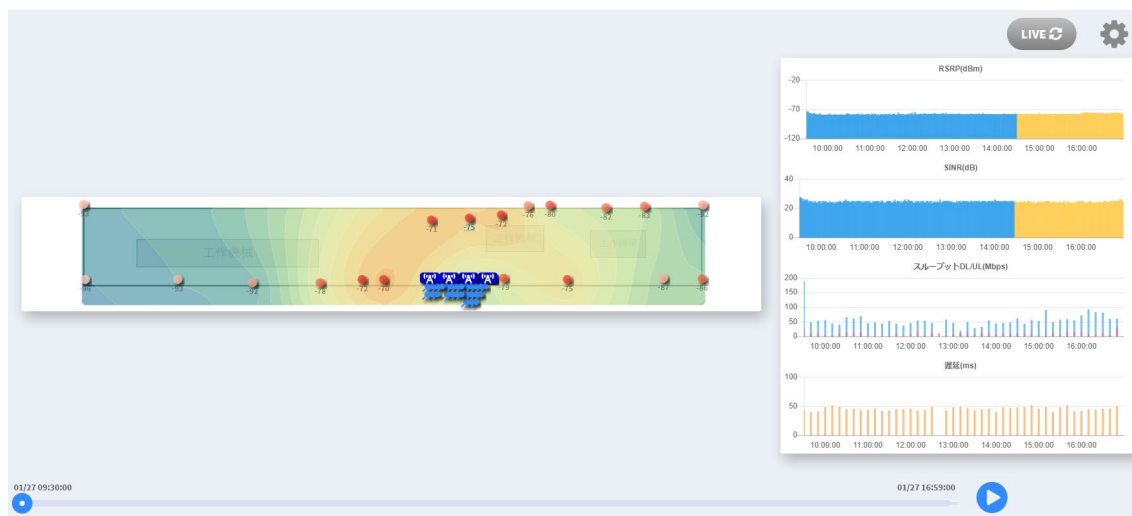


図 5.4-20 測定点 46(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データを含む全可視化画面(1/27 9:30-17:00)

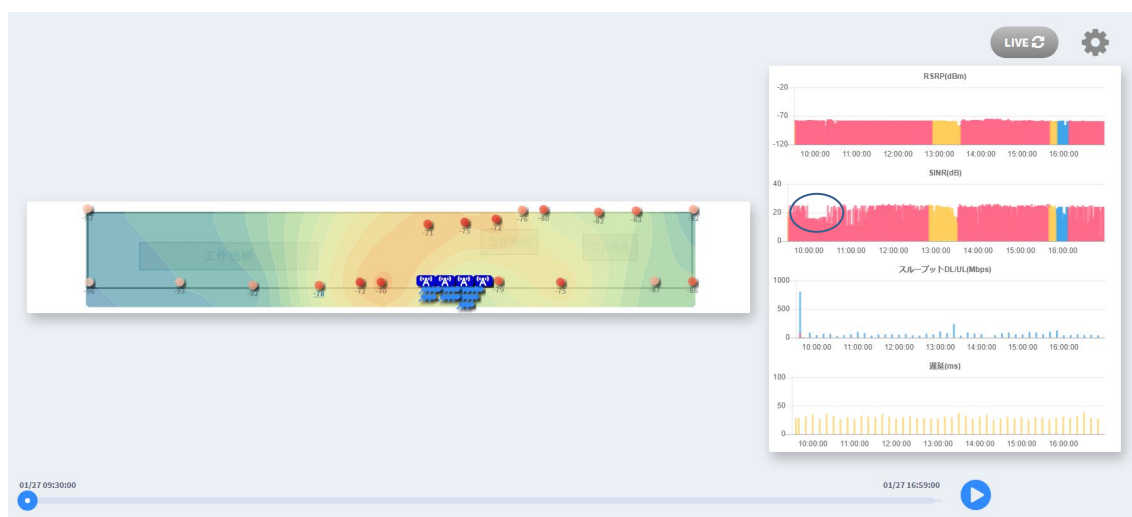


図 5.4-21 測定点 56(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データを含む全可視化画面(1/27 9:30-17:00)

図 5.4-22 に測定点 46 の SS-RSRP、SS-SINR の系列データを含む全可視化画面を示す。SS-SINR の時系列データは、一見、安定しているように見えるが、SS-SINR の 12:00 前のデータが短周期で細かく変動しているように見える。この短周期の変動を確認するために、30 分毎のデータで確認する。

図 5.4-23 に測定点 46 の SS-RSRP、SS-SINR の 11:30~12:00 の系列データ、図 5.4-24 に測定点 46 の SS-RSRP、SS-SINR の 12:00~12:30 の系列データを示す。本データは、1 分毎の中央値にデータを変換したものではなく、1 秒毎に測定した SS-RSRP、SS-SINR の測定値をそのままプロットしている。

測定点 46 における 11:30~12:00 と 12:00~12:30 のデータを比較すると、同一の測定点にも関わらず、11:30~12:00 の方が SS-SINR の変動が明らかにあることが分かる。変動の

原因を特定するために、測定中に工場内の実作業を確認していたが、11:24～11:57は、測定点46の近傍の工作機械が稼働していた時間であった。このように、短周期の変動、劣化は、金属体の工作機械や大型クレーンが動くなど、周辺の環境の変化によって発生するマルチパスフェージングが原因であることが多いと考えられる。

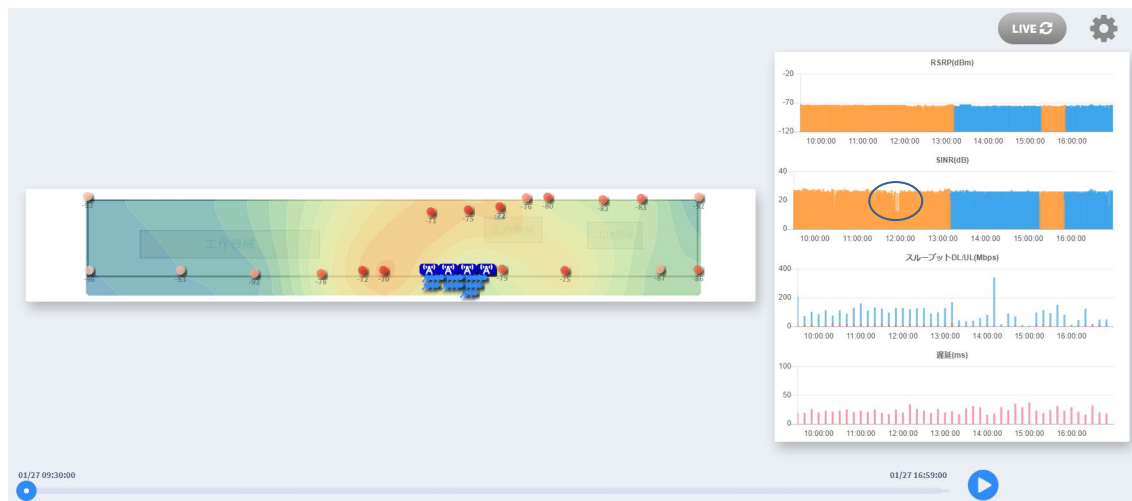


図 5.4-22 測定点 48(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データを含む全可視化画面(1/27 9:30-17:00)



図 5.4-23 測定点 48(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ (1/27 11:30-12:00)

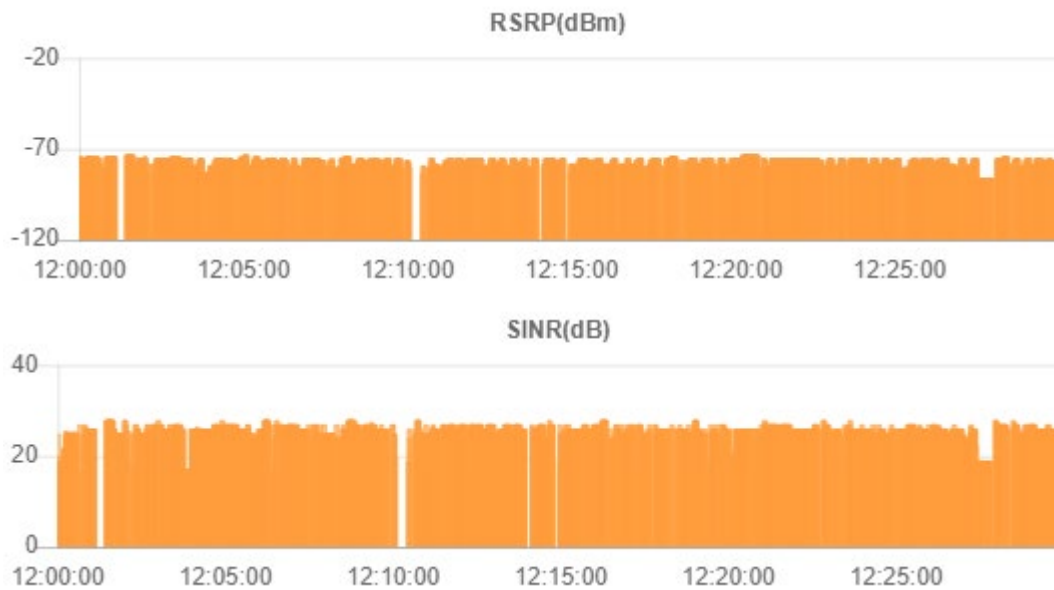


図 5.4-24 測定点 48(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ (1/27 12:00-12:30)

図 5.4-25～図 5.4-44 に各測定点の SS-RSRP、SS-SINR の系列データ(1/27 9:30-16:59)を示す。測定点 50、52、55 等は、特に、SS-SINR の短周期の変動が目立つ結果となった。これは、クレーンの稼働が多かった A 棟の中央付近、および東側の工作機械周辺の測定点であるため、マルチパスフェージングの影響を受けやすかったエリアであったと考えられる。一方で、測定点 61、62 等は、SS-RSRP、および SS-SINR の長周期の変動が結果となった。これは、通路沿いであったため、大型のトラックを使った積み荷作業などで、電波が遮蔽されやすいエリアであったと考えられる。



図 5.4-25 測定点 46(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-26 測定点 47(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-27 測定点 48(LOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-28 測定点 49(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-29 測定点 50 (NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-30 測定点 51(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-31 測定点 52(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-32 測定点 53 (NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-33 測定点 54(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-34 測定点 55(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-35 測定点 56(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)





図 5.4-36 測定点 57(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-37 測定点 58 (NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-38 測定点 59(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-39 測定点 60(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-40 測定点 61(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-41 測定点 62(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-42 測定点 63(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-43 測定点 64(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)



図 5.4-44 測定点 65(NLOS)における SS-RSRP、SS-SINR の時系列データ(1/27 9:30-16:59)

### 5.4.3 考察

#### 5.4.3.1 同時多数接続の試験考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・複数端末が同時接続した場合、実効的に使用できるスループットを確認

本評価の結果を踏まえると、複数端末が同時接続した場合のスループットは、1台で接続した場合のスループットの接続台数分の1程度まで低下することが分かった。無線リソースを等分でシェアすると考えると、想定通りの結果と言える。ただし、劣化度合いは目安であり、スループットが低いエリアでは、接続台数分の1以上の劣化も確認できたので、注意が必要であることが分かった。

ローカル5Gを活用するにあたり、同時接続数が増えることによって問題が起りやすそうなこととしては、所要のスループットが大きく、かつ、リアルタイムに送信や応答が常時必要なアプリケーション(例えば、動画のストリーミング等)の使い方において、接続する端末数が増える時間があると、急激にスループットが低下する時間が発生し、アプリケーションの体感品質が低下してしまうことが考えられる。さらに、5Gの場合は、ピークのスループットが高く、その変化量も大きくなっているため、通常のTCPプロトコルとの相性が悪く、5Gの通信能力をうまく使いこなせないことも考えられる。また、さらに、1つのローカル5Gシステムにおいて、複数のユースケースで共用する場合、ローカル5Gを使用するアプリケーションを追加することにより、これまで動いていたアプリケーションが動作しなくなるリスクも考えられる。

以上、想定されるリスクを考慮した上で、ローカル5Gの導入時には、ネットワーク部分だけではなく、アプリケーションを含めたシステム全体で設計することが重要となると考えられる。

#### 5.4.3.2 動的電波 MAP 作成試験考察

本評価の狙いであった以下の2つの項目について考察を行う。

- ・ 動的電波 MAP を作成し、導入効果を確認
- ・ 工場稼働中の無線品質の変動に伴う無線品質への影響を確認

今回、動的電波 MAP を作成するシステムを構築したが、見えない電波のカバーエリアの様子が汎用スマートフォンを現場に置くだけで確認できるため、ローカル 5G の構築、および運用を行うフェーズでは、重要なツールになりえると考えられる。特に、工場環境は、周辺の環境の変動頻度、電波の飛び方など、無線環境が三者三様であるため、このような簡易な可視化システムは、不可欠になると考えられる。さらに、測定データがクラウドサーバに蓄積されるため、遠隔地からリアルタイムで無線の状況を確認できることも、ローカル 5G の保守・運用を効率よくできる大きな要素であると言える。

また、動的電波 MAP だけではなく、SS-RSRP、SS-SINR 等の測定項目を、時系列データとして、測定点毎に可視化できることも、分析する上では重要であると考えられる。時系列データにおいても、1 種類のサンプル間隔でなく、複数の周期のサンプル間隔で可視化できることは、様々な劣化要因を切り分けることに重要な要素であると考えられる。

さらに、今回はリアルタイム(約数分後にデータ表示可能)で動的電波 MAP を可視化するシステムを構築したが、実際の運用フェーズでは、過去のデータを振り返って表示することも重要になると考えられるため、過去データの表示機能も実装している。無線の不具合は、再現性がないことも多いため、過去のデータを様々な形で確認することができれば、無線の不具合の発生時のデータ分析を確実に行うことができ、かつ、不具合の発生タイミングから分析も可能となるなど、実際の運用フェーズでは、メリットが多いと考える。

## 5.5 その他ローカル5Gに関する技術実証

本実証においても、測定方法および測定項目については、ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等と同様であるため、ここでは説明を割愛する。(5.3節を参照)

その他ローカル5Gに関する技術実証では、反射板を設置することにより、狙ったエリアの5Gの無線性能を改善できるかを検証する。

### 5.5.1 評価方法

表 5.5-1

に反射板を用いたエリア改善効果実証の概要および測定方法を示す。本評価の狙いは、反射板を用いることによる電波の陰となるエリアの品質改善効果を明らかにし、反射板を用いた実用的なエリア改善方法を検討することである。

測定場所は、第二工場のA棟内において、電波の陰となるエリアの8点に設定した。図5.5-1に反射板、測定点の設置位置とその測定点番号を示す。電波の到達状況が一番良好な場所に反射板を置き、反射板から反射波で電波の陰を狙える位置を測定点とした。(詳しい測定点の情報は、表5.5-2参照のこと)反射板は、図5.5-2に示すように、80cm四方のアルミ板を使用し、中心の高さは約1.2mである。反射板の設置に関しては、レーザポインタを使用し、反射波が測定点の1m付近に来るように調節を行った。測定方法は、台車に固定したラック上に1台の測定端末を設置し、5点の測定点を順次回る方法とした。なお、測定する端末高は、基本的にはレーザポインタで光軸を合わせた1mとしたが、垂直方向の改善度合いも確認するため、0.15m、1.5mも追加で測定を行い、高さ方向のパリエーションを含めて計8点の測定を行った。図5.5-3～図5.5-5に測定時の様子を示す。反射板からRUはLOS環境となるが、各測定点からRUは、クレーンや棚等により、NLOSの環境となっていた。測定環境の様子を確認するため、適宜、参照されたい。

測定時間は、約3分の測定を1セットとして実施し、試行回数は測定点当たり3セット実施した。従って、SS RSRP、SS RSRQ、SS SINRに関しては、1秒毎の3分間の測定を3回繰り返した。一方、DL、ULスループット、遅延の測定に関しては、1分毎の3分間の測定を3回繰り返した。

なお、RUのアンテナのチルト角は30度とした。

表 5.5-1 反射板を用いたエリア改善効果実証の概要、測定方法

測定の狙い	電波の陰となるエリアに反射板を使って、どの程度の品質改善ができるかを確認
測定場所	・第二工場 A 棟内の 8 点固定 (場所は図 5.5-1 を参照) ・電波の陰となるエリアを選定
測定方法	反射板設置前、設置後で、それぞれ、台車に固定したラック上に測定端末を設置し、8 点の測定点を順次回る方法
測定時間	3 分×3 回
RU のアンテナチルト	30 度

端末の台数	1
端末の設置高	0.15m、1m、1.5m
反射板	80cm 四方のアルミ板、反射板の中央付近の高さ 1.2m 反射波の半値幅 2度

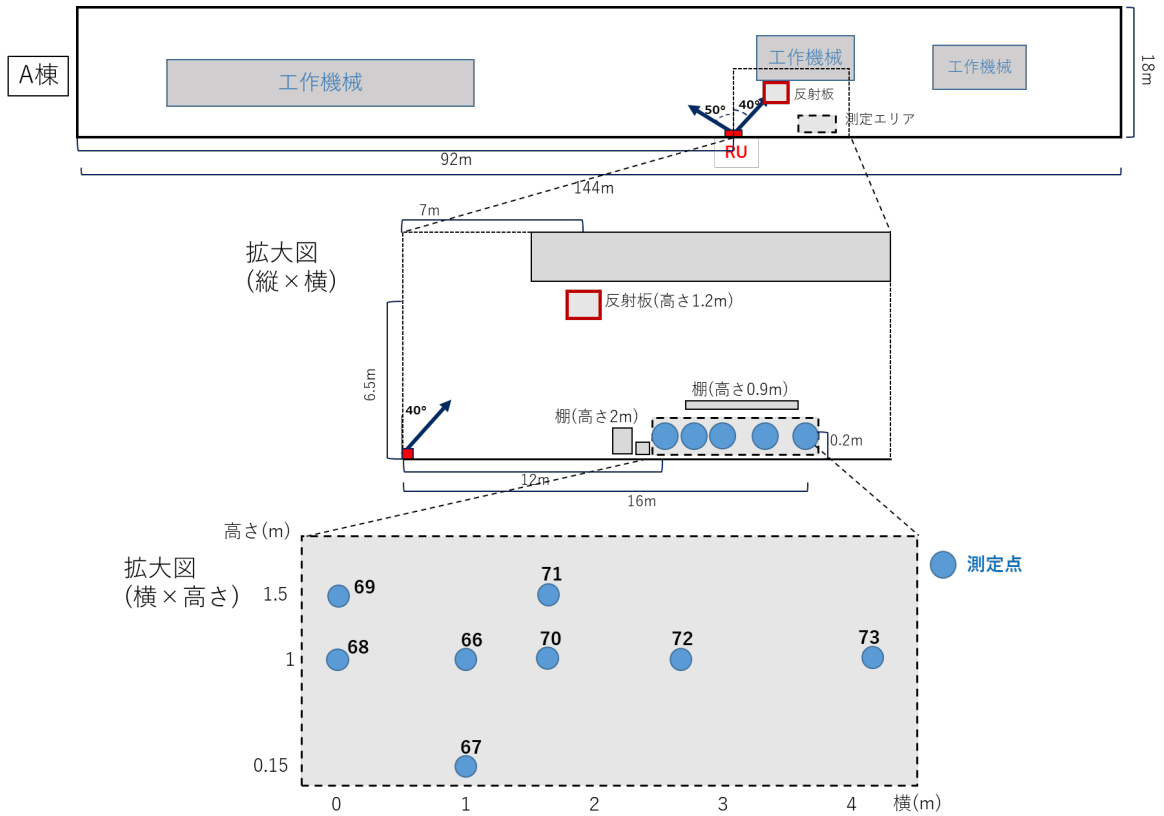


図 5.5-1 反射板、測定点の設置位置

表 5.5-2 測定点の情報(測定点 66~73)

測定点番号	RU との 3D 距離(m)	端末高(m)	LOS/NLOS
66	15.4	1	NLOS
67	15.9	0.15	NLOS
68	14.6	1	NLOS
69	14.3	1.5	NLOS
70	15.9	1	NLOS
71	15.7	1.5	NLOS
72	16.8	1	NLOS
73	18.2	1	NLOS





図 5.5-2 反射板の外観



図 5.5-3 評価時の様子 1(反射板から RU への様子)



図 5.5-4 評価時の様子 2(反射板から測定点への様子)



図 5.5-5 評価時の様子 3(測定点から RU への様子)

## 5.5.2 評価結果

図 5.5-6～図 5.5-11 に反射板の設置前後における各測定項目の最大値、最小値、中央値の比較結果を示す。

SS-RSRP に関しては、測定点 67～70 では、反射板による改善がみられ、最大値、中央値で 5dB 以上の改善がみられる点もあった。特に、測定点 70 では、反射板による改善効果が大きく、中央値で -82dBm から -75dBm と 7dB の改善幅であった。一方で、最小値に関しては、測定点 67～70 においても、悪くなっている傾向が見て取れた。また、測定点 71～73 については、反射板による改善効果はほとんど見られないことが分かる。

SS-RSRP に関しても、SS-RSRP での傾向と同様に、測定点 66～70 では、反射板による改善がみられ、最大値、中央値で 5dB 以上の改善がみられる点もあった一方で、最小値に関しては、劣化している点が多いことが分かる。

DL スループットに関しては、まちまちの結果となっており、測定点 66、70 に関しては、改善している一方で、測定点 67～69 に関しては、劣化しているように見える。また、測定点 71～73 については、SS-RSRP、SS-SINR と同様に、反射板による改善効果はほとんど見られないことが分かった。

UL スループットも、傾向としては、DL スループットに近く、測定点によってまちまちの結果となった。

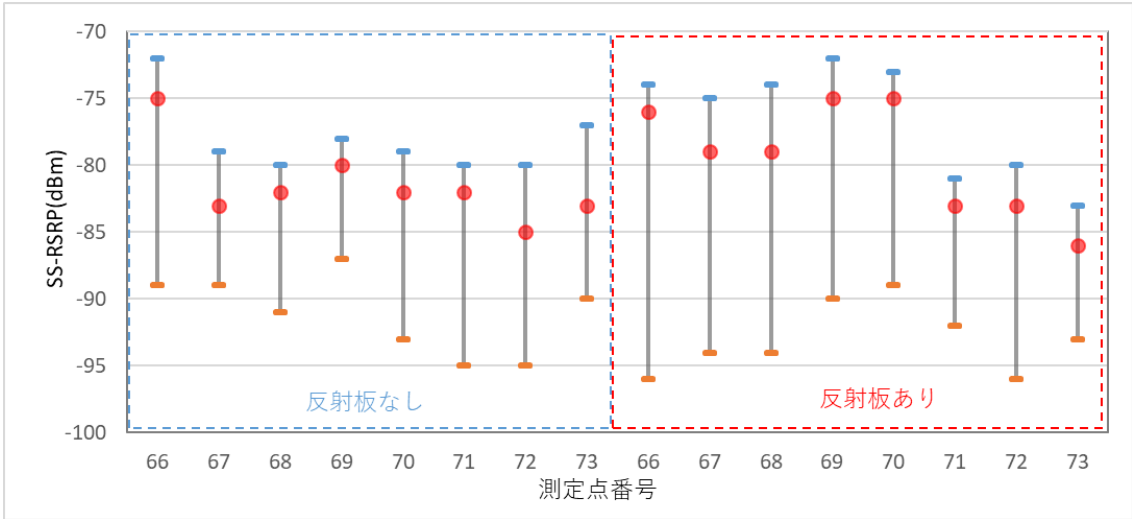


図 5.5-6 反射板の有無による SS-RSRP の最大値、最小値、中央値の比較

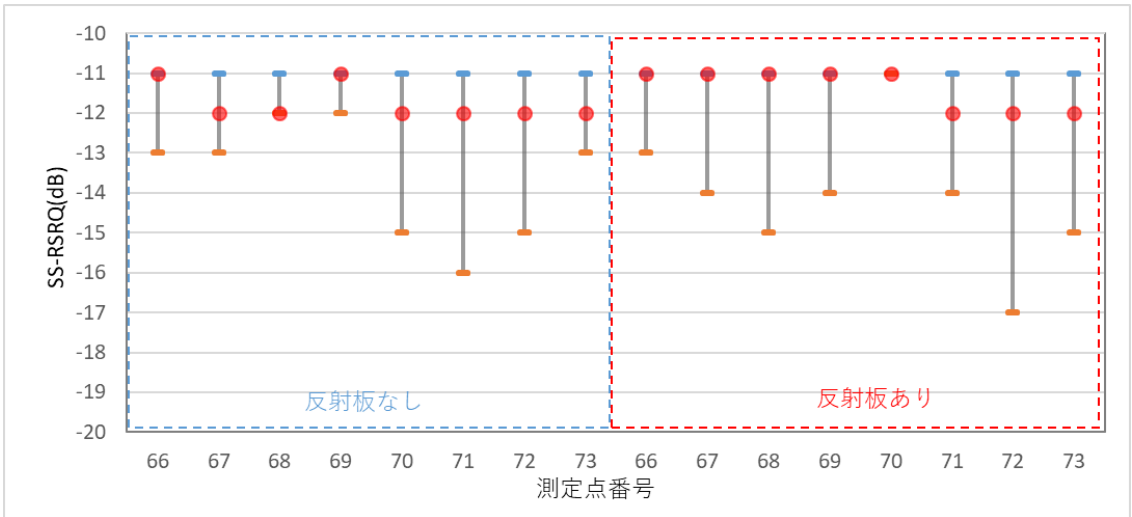


図 5.5-7 反射板の有無による SS-RSRQ の最大値、最小値、中央値の比較

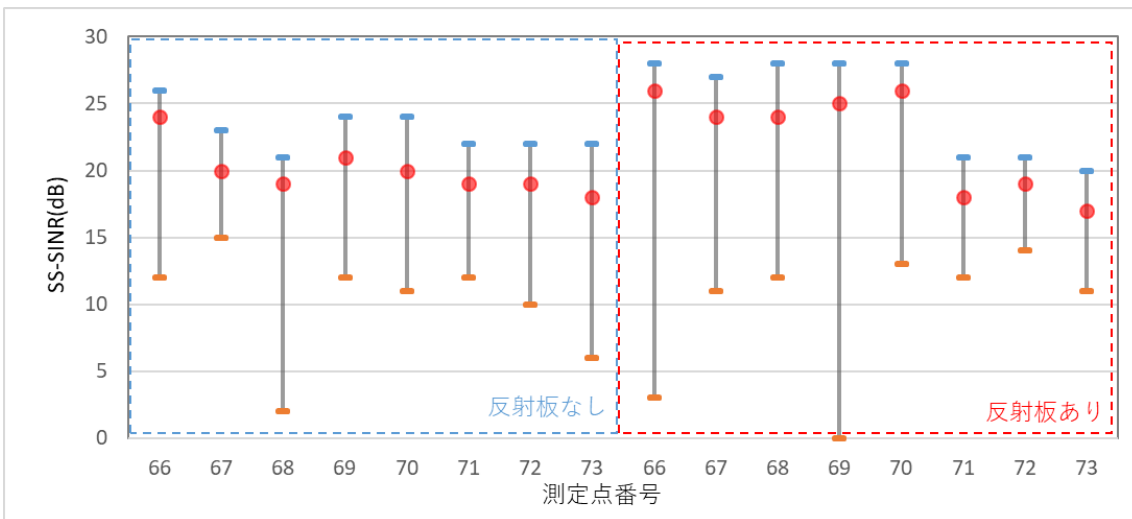


図 5.5-8 反射板の有無による SS-SINR の最大値、最小値、中央値の比較

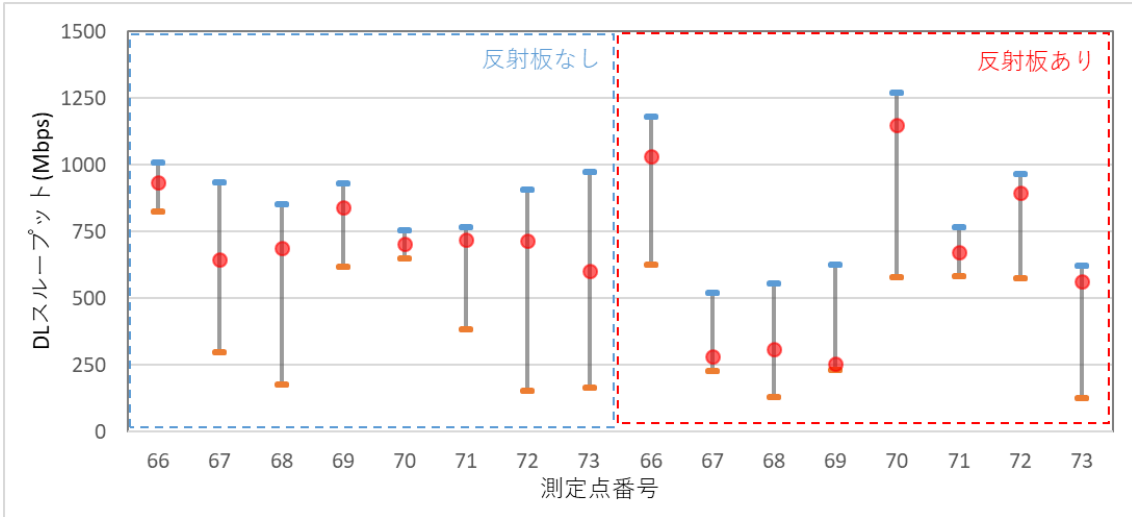


図 5.5-9 反射板の有無による DL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

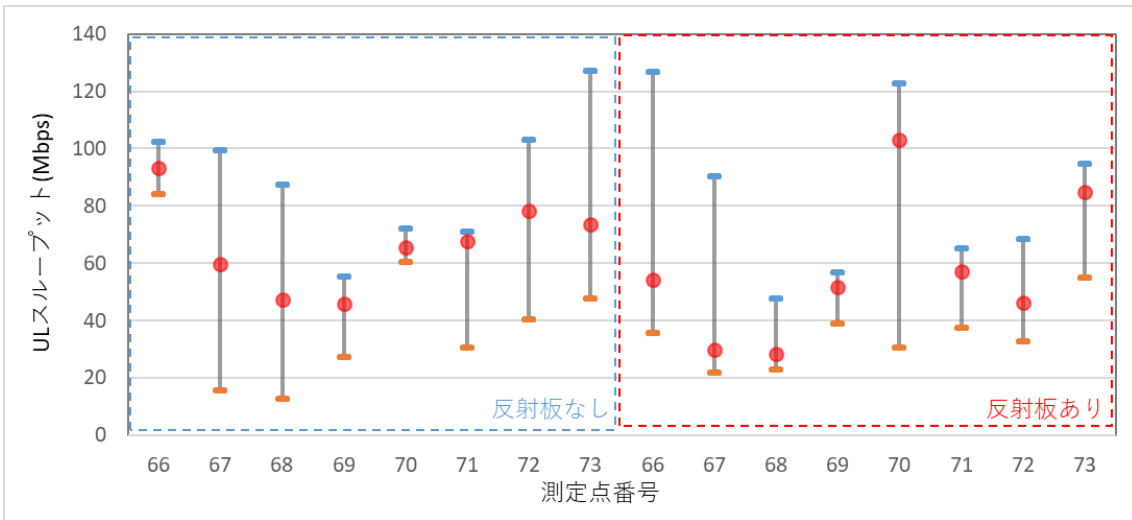


図 5.5-10 反射板の有無による UL スループットの最大値、最小値、中央値の比較

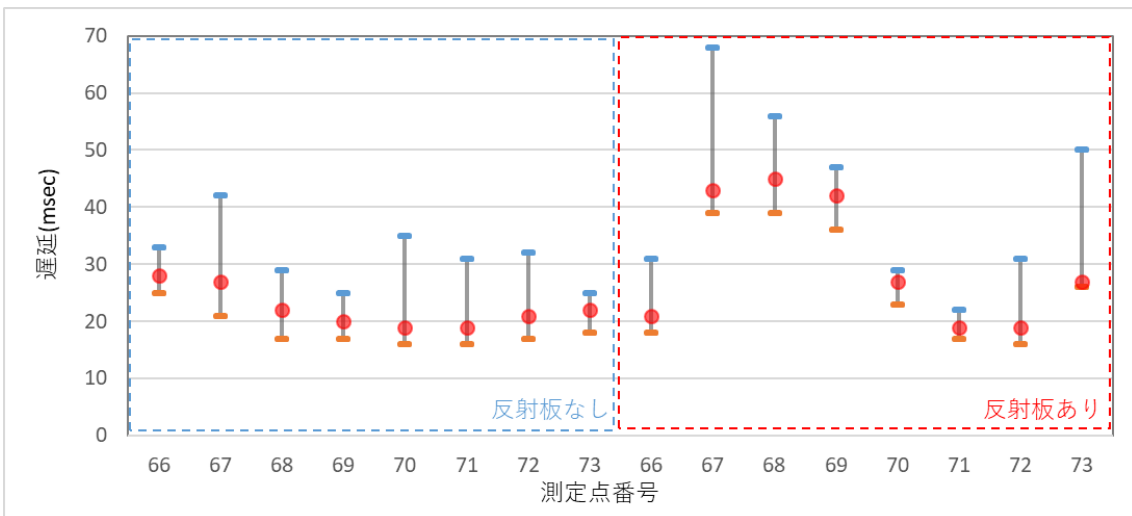


図 5.5-11 反射板の有無による遅延の最大値、最小値、中央値の比較

SS-RSRP や SS-SINR の中央値が改善しているにもかかわらず、スループットの改善効果が出なかった原因について探るために、SS-RSRP、SS-SINR の時系列データの確認を行った。

図 5.5-12 に、SS-RSRP の中央値の改善は見られたものの、DL スループットの改善が見られなかった測定点 68 における SS-RSRP の時系列データを、図 5.5-13 に、SS-RSRP の中央値だけではなく、DL スループットの改善も見られた測定点 70 における SS-RSRP の時系列データを示す。横軸は、測定サンプルであり、測定周期は 1 秒となる。

比較をすると、両者ともに平均的に SS-RSRP が改善しているが、マルチフェージングによる SS-RSRP の落ち込みの頻度に違いがある。DL スループットの改善が見られなかった測定点 68 の方が、落ち込みの頻度が高く、全体的に落ち込みの幅も大きいことが分かる。大きいところでは、15dB 以上の落ち込みがあることが確認できた。

図 5.5-14 に、測定点 68 における SS-SINR の時系列データを、図 5.5-15 に、測定点 70 における SS-SINR の時系列データを示す。SS-SINR の比較でも、SS-RSRP の傾向と同様な結果となっており、落ち込みの頻度が高く、全体的に落ち込みの時間が長いことが分かる。大きいところでは、10dB 以上の落ち込みがあることが確認できた。

以上の結果から、測定点 68 は、マルチパスフェージングによる品質の落ち込み頻度が高く、スループットの性能が出なかった可能性が高いと考えられる。また、反射板を用いることにより、強い反射波への通信性能の依存度が高くなり、周りの環境変化による変動の影響が大きく出るようになった面も可能性としてはあり得そうと考える。

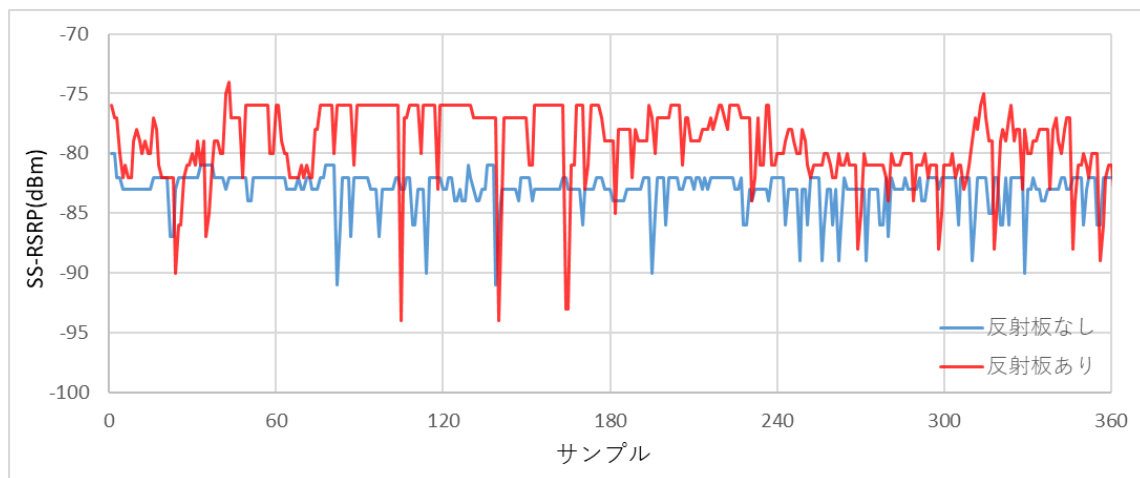


図 5.5-12 SS-RSRP の時系列データの比較(測定点 68)

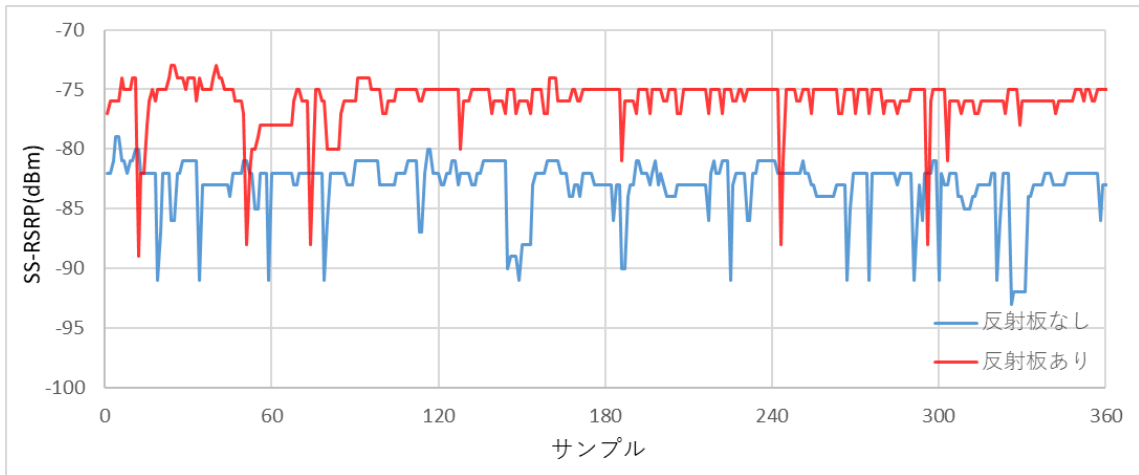


図 5.5-13 SS-RSRP の時系列データの比較(測定点 70)

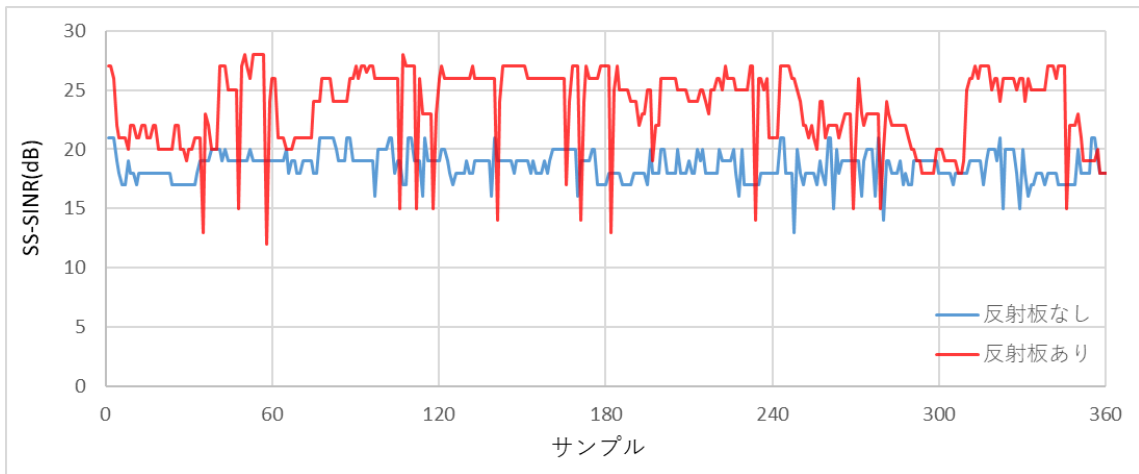


図 5.5-14 SS-SINR の時系列データの比較(測定点 68)

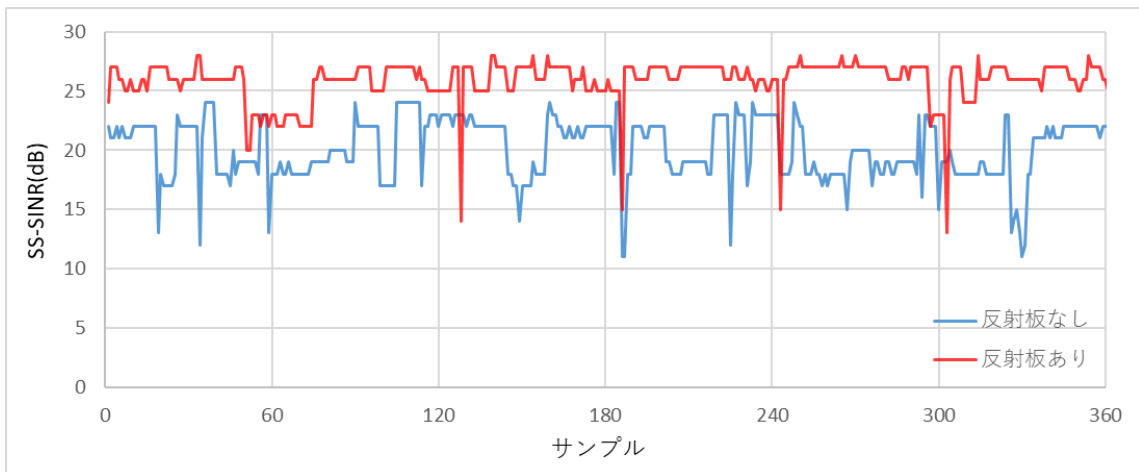


図 5.5-15 SS-SINR の時系列データの比較(測定点 70)

反射板による性能改善が期待できる範囲を確認するために、各測定点の SS-SINR、SS-SINR の改善効果を確認する。図 5.5-16 に SS-RSRP の中央値、図 5.5-18 に SS-SINR の中央値の反射板の有無による変化を示す。

測定点 67、68、69、70 に関しては、SS-RSRP および SS-SINR で 3dB 以上の改善がみられるため、反射板による改善効果があったと考えられる。一方、測定点 71、72、73 は、改善効果が小さい結果となった。

これを踏まえると、今回の改善効果があった範囲は、半径数 m 程度でかなり限定したエリアであると言える。今回、使用した反射板による反射ビームの半値幅が 2 度と、狭いビームとなるものを使用し、反射板からの距離も 10m 以内と近かったため、限定されたエリアになったと考えられる。

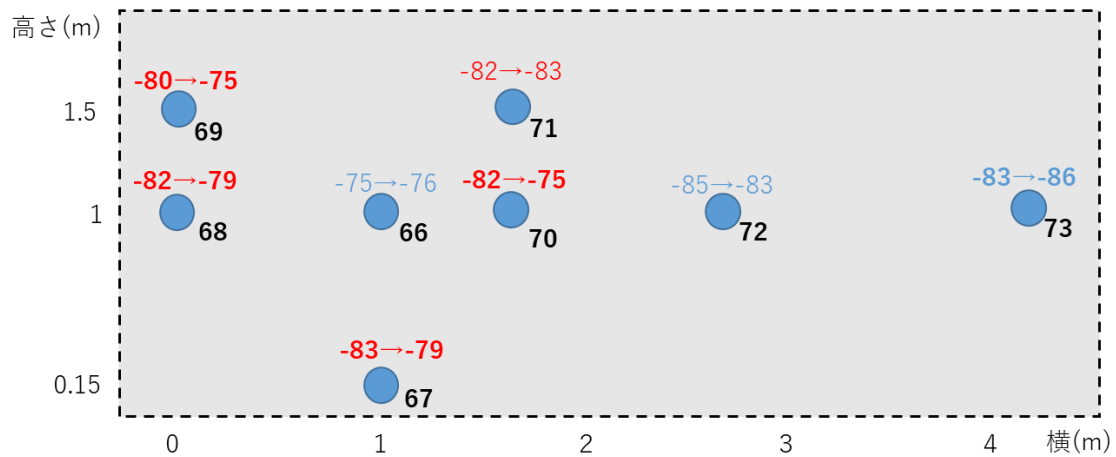


図 5.5-16 反射板による各測定点の SS-RSRP(dBm) の変化

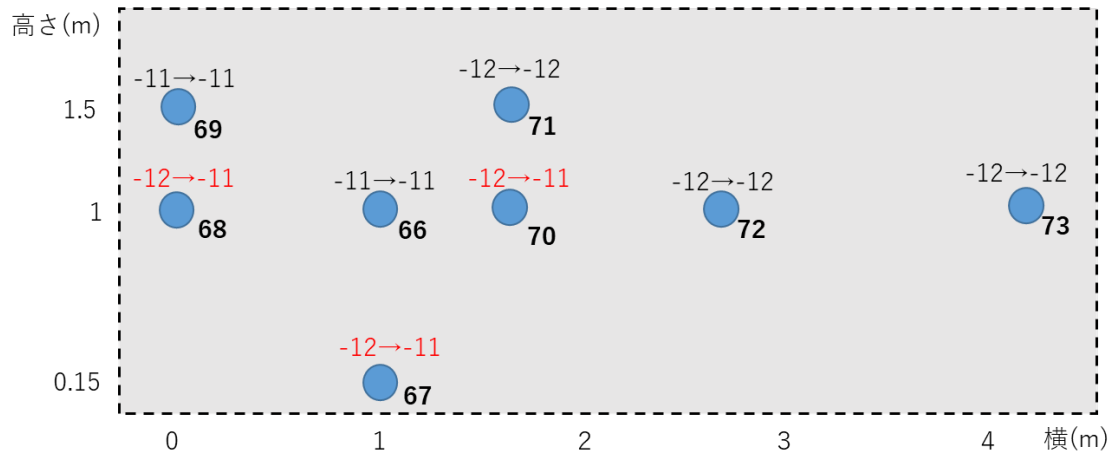


図 5.5-17 反射板による各測定点の SS-RSRQ(dB) の変化

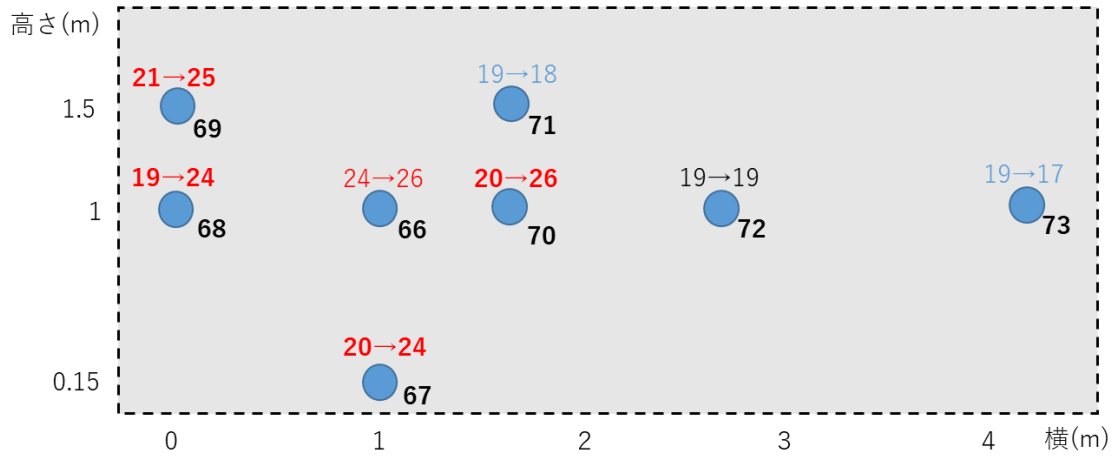


図 5.5-18 反射板による各測定点の SS-SINR(dB)の変化

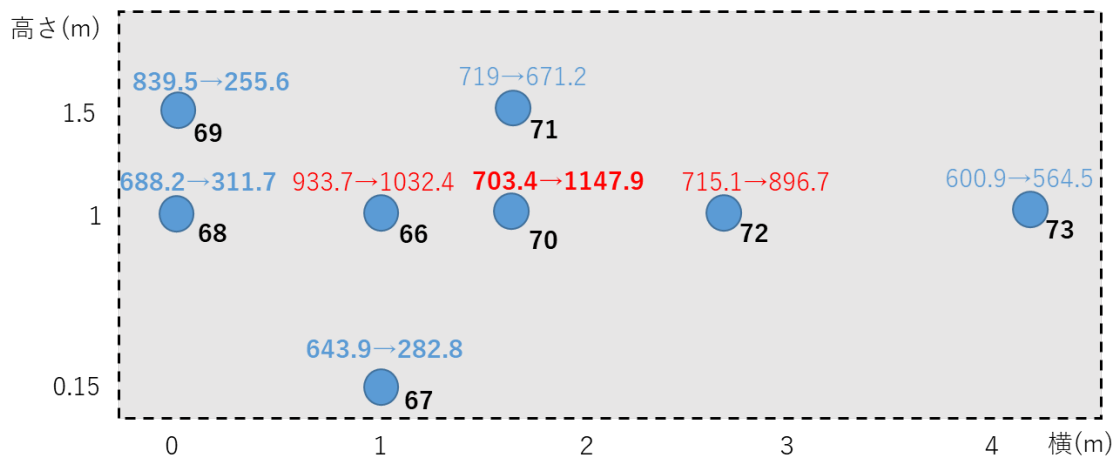


図 5.5-19 反射板による各測定点の DL スループット(Mbps)の変化

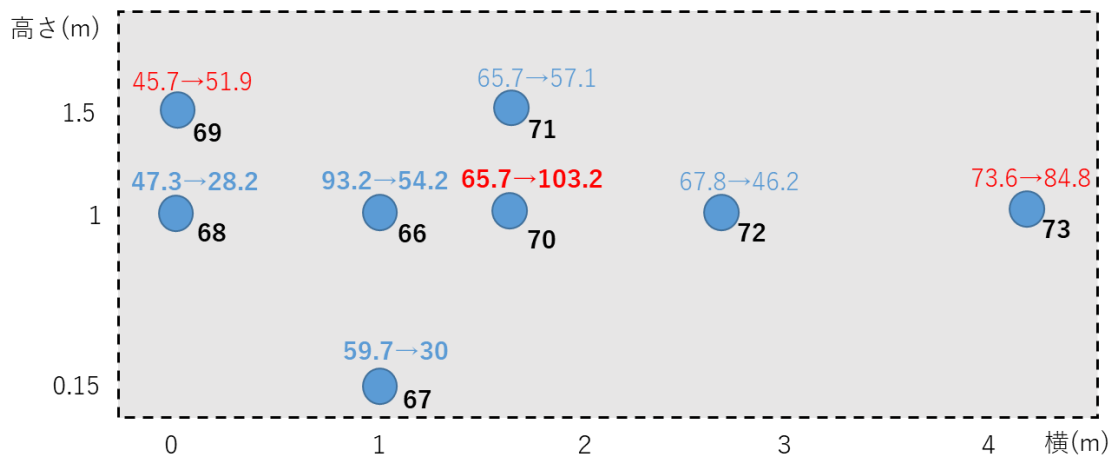


図 5.5-20 反射板による各測定点の UL スループット(Mbps)の変化



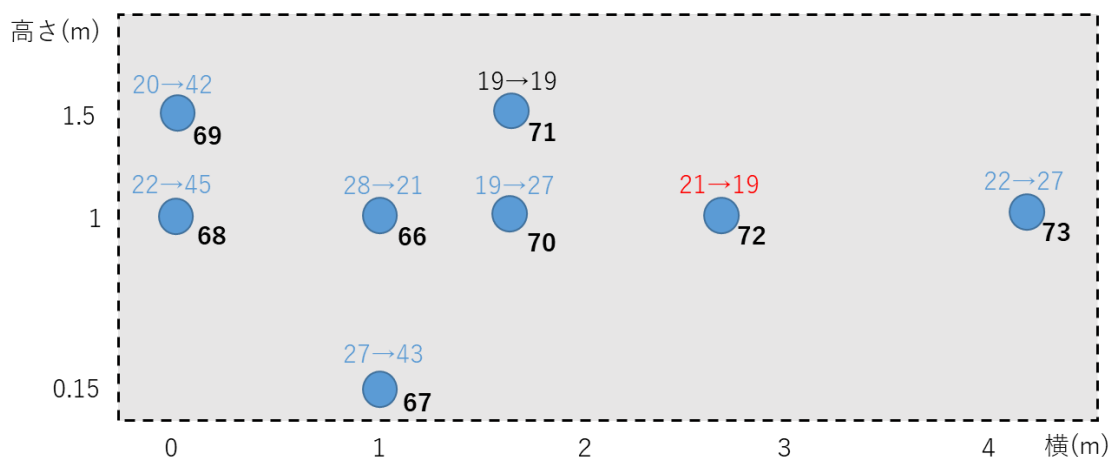


図 5.5-21 反射板による各測定点の遅延(msec)の変化

### 5.5.3 考察

本評価の狙いであった以下の項目について考察を行う。

- ・電波の陰となるエリアに反射板を使って、どの程度の品質改善ができるかを確認

まず、今回の測定環境において、反射板での改善効果は、SS-RSRP や SS-SINR で約 5dB 程度、DL スループットの中央値の改善効果は最大 63%、UL スループットの中央値の改善効果は最大 57%(ともに、測定点 70 の結果)となった。また、今回の金属板の反射板を用いた場合、改善するエリアは、半径数 m 程度とかなり限定的なエリアとなった。

以上の改善効果、および今回の測定時の場所の選定や反射板の設置状況も踏まえ、反射板を用いた実用的なエリア改善方法について以下で考察を行う。

まず、今回の反射板の評価をするにあたり、反射板で改善すべきエリアの狭さが想定外であった。事前の想定では、大型の金属体の陰となるエリアは、著しく無線品質が劣化すると考えていたが、実際は、前述のように、反射波が有効に使えることにより電波の飛びが良く、大型の金属体の陰となるエリアでも著しく無線品質が劣化するエリアがほとんどなかった。

次に、今回の評価時の気づきとして、反射板の設置の難易度の高さもあった。今回用いた金属板の反射板は、反射波の半値幅が 2 度とかなり狭いことも有り、方向と高さの両方を合わせて、想定エリアに金属板からの反射波を誘導するのにかなり苦労した。また、実際の工場環境であると、反射板の設置場所にも制限があったので、反射波を誘導する難易度がさらに上がったと考えられる。

最後に、性能面についてだが、今回の測定環境において、反射板を使うことによって、SS-RSRP、SS-SINR の最大値、中央値が改善しているのにも関わらず、最小値が劣化してしまった測定点があったことは、重要なポイントだと考える。つまり、反射板で強い反射波を使うことにより、周りの環境変化にセンシティブになり、安定したスループットが出ないリスクもあるということである。

以上を踏まえ、反射板を用いた実用的なエリア改善の指針を以下にまとめる。

- ・金属板の反射板を使う場合、改善エリアがかなり狭いため、現場設備などの通信や無線コンバータのバックホールなど動かない特定のものに対しての使用が現実的である。

・複数のものや移動を伴うものとの通信を改善したい場合、広めのエリアでの改善が必要となるため、反射波のビームが広いメタサーフェスの反射板等の使用を考えるべきである。

・反射波が有効に使える今回のような工場ではなく、電波が飛びにくい環境の方が、反射板の導入メリットは大きい。

また、今回、反射板を使う評価を行った際に、気づいた注意点として以下を挙げておく。

・今回のような環境変動が大きい工場の場合、反射板を使う場合、環境変化にセンシティブになるリスクがあるため、そのリスクを踏まえた上でのシステム設計、アプリケーション適用が必要である。

・今回の実証システムが、NTT ドコモのキャリア 5G の商用局免許ただことから、今回の反射板の設置に関しては、免許人である NTT ドコモに実施していただいた。ローカル 5G についても同様であるとする、免許人のみが反射板の設置や移動ができることになるため、キャリア 5G のような大きな制約にならないと考えるが、注意が必要である。

## 5.6 まとめ

技術実証の結果から、5.2 節の評価目標で挙げた背景となる 3 つの技術的な課題に関する知見は以下の通りである。

### ① 28GHz 帯の周波数のエリアカバーの狭さ

5G ならではの高速・大容量が期待できるエリアは半径 50m 程度、通信が可能なエリアは半径 100m 程度であったが、大型の金属体による遮蔽の影響は小さく、NLOS 環境でも LOS 環境と匹敵するくらいの性能が出る環境もあることが分かった。

### ② 同時接続数増加による実際に使用可能なスループットの低下

同時に使用する端末が増えた場合、その帯域幅が複数の端末でシェアされることにより、想定通り、接続端末数に比例したスループットの低下が出るということが分かった。特に、接続端末数が大きくなると、電波の遮断、マルチパスフェージング等の無線環境の変化によるスループット劣化よりも大きくなる可能性も高いことが分かった。

### ③ 反射体、遮蔽物が頻繁に動く環境における無線環境変動による通信品質劣化

本実証で測定を実施する環境は、金属製の工作機械、大型クレーン、フォークリフト等の反射体、遮蔽物が頻繁に動く場合、マルチパスフェージングの影響によりスループットが劣化してしまうことが分かった。特に、LOS 環境では、NLOS 環境と比べて、1 つのパスに対する依存性が高いため、環境変化にセンシティブであることが分かった。

上記の知見を踏まえ、本実証で設定した以下 3 つの目標の対する見解は以下の通りである。

#### a. 工場環境において、28GHz 帯を使用したローカル 5G のエリア設計を行う際に、考慮すべき小項目を明らかにすること

- ・屋内に基地局を設置する場合、NLOS 環境の改善のため、屋内の主要な遮蔽物よりも十分に高い位置にアンテナを設置することが重要である。
- ・5G ならではの高速・大容量が期待できるエリアは半径 50m 程度であり、1 つのアンテナでは、大きな工場全体をカバーするのは難しいため、導入前に使用するユースケース、その使用場所、およびダウンリンク・アップリンクの所要スループットのバランスを考慮した上で、設置することが重要である。

#### b. 工場環境において、5G 通信性能の劣化リスクを明らかにし、5G を適用するシステム構築を行う際に考慮すべき項目を明らかにすること

- ・使用できるスループットの変動幅(ジッタ)が大きいため、通常の TCP プロトコルとの相性が良くない。5G というネットワークレイヤだけではなく、アプリケーションを含めたフルレイヤでのシステム設計が重要である。

#### c. 工場環境において、ローカル 5G のエリア改善に効果があるアプローチを提示すること

- ・金属板の反射板を使う場合、改善エリアがかなり狭いため、現場設備などの通信や無線コンバータのバックホールなど動かない特定のものに対しての使用が現実的である。
- ・複数のものや移動を伴うものとの通信を改善したい場合、広めのエリアでの改善が必要となるため、反射波のビームが広いメタサーフェスの反射板等の使用を考えるべきである。
- ・反射波が有効に使えた実証での工場より、電波が飛びにくい環境の方が、反射板の導

入メリットは大きいと考える。

最後に、ローカル 5G の技術基準等の見直しに関し、以下の 2 つの項目に対する提言を行う。

- **電波法関係審査基準に記載のあるローカル 5G のエリア算出法に関連する記載の改善点についての提言**

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におけるローカル 5G に関する検討では、屋外だけでなく、屋内での利用も想定されているが、電波法関係審査基準の中では、屋内における電波伝搬モデルに関する記載がなく、5G エリアの算出が困難であった。本実証において、IRU-R、3GPP の屋内の電波伝搬モデルと比較を行ったが、本実証の比較結果、および他のローカル 5G の実証事業の調査の結果を踏まえ、屋内における電波伝搬モデルの定義を追記する必要があると考える。

- **実際にローカル 5G を使用する場合に基地局間の非同期・準同期運用の必要性についての提言**

今回の技術実証では、工場内環境では、2 つのユースケースについて検証を行ったが、実際にローカル 5G を導入する際には、異なるユースケースでローカル 5G システムを併用する形になると考えられる。また、ユースケース毎に求められる性能要件が異なるだけでなく、使用する時間やエリアもバラバラになることが想定される。そのような利用状況を想定すると、基地局間の同期運用だけでは、ローカル 5G システムを最大限に活用することが難しい。そのため、基地局間の非同期・準同期運用を容易に使用できる仕組みや法整備が必要であると考ええる。

上記の知見、見解、提言を追求するために、今後、以下のような調査検討が必要になると考える。

- 今回のローカル 5G の実証事業も含め、ローカル 5G の導入が想定される様々な環境での電波伝搬特性、カバーエリアのデータを蓄積し、適用環境毎のローカル 5G のカバーエリアの設計指針が導出するための調査検討
- 非同期・準同期運用時のそれぞれの与干渉の影響を調査し、非同期・準同期運用の規制緩和に向けて、どのような形で実現できるかの調査検討

## 6. 実装および横展開に関する検討

### 6.1 前提条件

今回の工場での実証は、主に期間や機器調達の問題がありキャリア 5G を用いて構築しており、ただしキャリア 5G のサービスエリア外の地域であったことから 5G の RU、および 4G の RRE を実証用に臨時で設置し、また 5G の gNB、および 4G の eNB は車載で移動可能な物を利用し、5G のエリア化を行った。

その為、本課題解決システムは実証完了後に臨時で設置した機器や車載した装置はそのまま継続して利用するのは困難であるが、キャリア 5G が圏内になった後や、4G で運用できる範囲での利用、または別にローカル 5G の基地局装置及び端末を用意すれば利用が可能である。

また今年度実証では実際の基地局調達が無かったため、価格は現時点での一般的な相場感を前提としている。

### 6.2 持続可能な事業モデル等の構築・計画策定

本実証の舞台である滋賀県は、人口に占める第二次産業従事者の割合が 3 割程と、富山県に次いで日本全国の都道府県中第二位であり、大規模な工場も数多くある。滋賀県庁や滋賀県の工業技術センターへヒアリングを実施したところ、第二次産業の発展は滋賀県としても望んでおり、また「滋賀県産業振興ビジョン 2030」では、本件のような工場の自動化を含めた実証実験の場としても、滋賀県企業の積極的な活用を推進しているという土壌がすでにある。

その中で工場にとって有益なユースケースが誕生すれば、そのユースケースとセットで中小企業に対するローカル 5G 導入に対する補助金をつける事できるとコメントを頂いている。補助金を出すには、単に漠然とローカル 5G を導入するというのではなく、導入に至る明確な目的が必要であり、その為には前例としてユースケースが有用と聞いている。

その為、本実証にて 5G を利用した各ユースケースを実用可能な物として、そのシステム全体をショールーム化しリファレンスモデルを作る事が、最初にやらなければならない地域課題である。リファレンスモデルさえ確立されていれば、同じシステムを入れる目的で、中小企業へ補助金を使い導入を促進することができる。これらより、工場の生産性や収益も向上し、地域の活性化にもつながる。

なお本事業で開発した課題解決システムは、可搬型のキャリア 5G を使っていた都合上、ローカル 5G へと置き換えなければならない。その為、早い時期にローカル 5G システムへ置き換え及び全建屋への展開を行う必要がある。特に屋外でのキャリア 5G 自体のエリア化なども視野に入れながら、新規に導入するローカル 5G とキャリア 5G の組み合わせ利用も加味しながら、事業の範囲を広げていく予定である。

### 6.2.1 事業モデル

ローカル 5G 機器は、制度化及び免許の交付が始まっており、開発も完了している為、令和 3 年度より安定した供給体制が出来上がりつつある。その為、令和 3 年度にはローカル 5G 基地局を本格導入し、今回導入した機材を再利用し定常的なサービスとして定着させる計画である。

実装や横展開の主体は本コンソーシアムとなる。工場の現場に強いサンリツオートメイションが工場に対し直接サービス提供を行い、NTT ドコモのキャリア網や MEC(キャリアウチのクラウドサービス/閉域網)サービス、NEC のローカル 5G 基地局及び各種クラウドサービス(クラウド本体、IoT 基盤、ロボットコントローラ、無線の運用管理ソフトウェア)及び KKE の AR や AI といったアセットを組み合わせ、パッケージサービスとして提供をしていくモデルが適切であると考えている。ローカル 5G の免許人は、キャリア 5G であれば NTT ドコモ、ローカル 5G であれば NEC が対応するのが適切であると考えているが、免許申請の手続きや設置工事は専門性が高い為、申請事務及び設置工事は専門業者へ委託する事が基本でした。

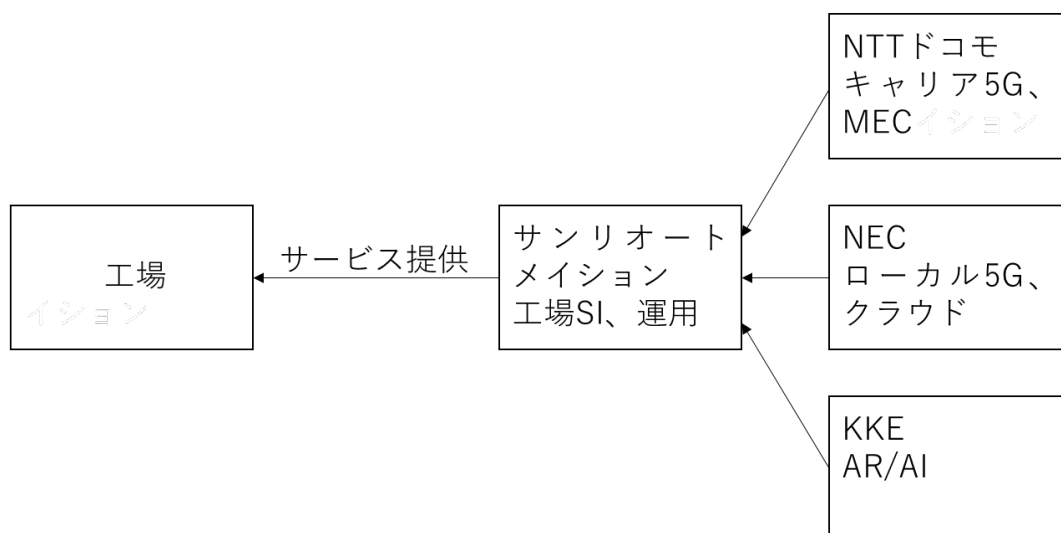


図 6.2-1 実装や横展開の体制と役割分担

現代のような 5G の時代では「物売り」や「土管屋」は極力避けるべきであり、定期的なメンテナンスや電波環境変動への追従が欠かせない 5G ようなシステムは、積極的にサービスとして提供する事により継続的な収益をあげることができる。その為には、ローカル 5G だけを導入するのではなく、ローカル 5G と様々な工場向けのサービスと組み合わせた物にする必要がある。

このようなサービスモデルの場合、工場側に設備導入を求める事はなく各サプライヤーが設備を保持したまま、かかる維持費や利用料をサービス提供者(上図ではサンリツオートメイション)がアプリケーションを含め一括して工場利用者から徴収する事になる。

利用料としては、ローカル 5G 機器が施工含め凡そ 1 億円すると仮定すると、3 年間で原価を回収するモデルと仮定した場合、単純計算で月額 300 万円程度となる。支払えるだけ

の余裕がある大企業は良いが、中小企業等ではおそらく無理がある金額となる為、1/3～1/5程度への原価低減が必須であると考えられる。

また製造業の多くが一括の買い切り型モデルを求める傾向が強く、また保守対応もスポット保守のような物を求める傾向が根強い。しかし、5Gを含めたシステムとしてのインテグレーションや維持管理は無線LANなどと比べると専門性が高く、自前での運用は難しい。自社のIT部門などにローカル5G専任の運用専門部隊を作る必要があり、結局は定常的な内部コストを抱えることになるのは注意が必要である。

事業モデルの比較を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 事業モデルによる比較

事業モデル	設備保持者	運用主体	維持管理	費用
サービスモデル	設備提供者	設備提供者	設備提供者	月 300 万円程度
売り切りモデル	工場	工場 (IT 部門)	スポット保守	1 億円程度 + 維持費

サービスモデルと売り切りモデルのどちらが良いかは一概に言えないが、大きくは顧客の資本力で決まると考えている。資本力の大きな工場は、一気に導入し自社で運用する事によりトータルのコストが抑えられると考えてられ、逆に資本力の乏しい中小工場では、大きな設備投資や自社運用が難しいため、サービスモデルの方が扱いやすいと考えられる。

ただし経済性を考えると、中小工場ではなかなか5Gの導入・運用コストを賄うことは難しい。その為、さらに地域で設備の共用利用化を行うことにより、より少ないコストで導入・運用することを検討している。そこで、目をつけているのが、自治体の持つL5Gインフラとの共同利用である。表 6.2-2 に地域と連携した5G導入施策をまとめた。

表 6.2-2 地域と連携した5G導入施策

地域の課題	工場の課題	マッチング方法
地域産業の育成 企業誘致	生産性の向上 製品の価値向上	先進事例の共同構築 5Gインフラを利用した誘致
インフラとしての通信手段の 確保（災害時等）	地域メンバーとしての社 会貢献	共用利用型5Gインフラ
インフラの導入は出来るが、 維持管理のコストがでない	初期導入コストが高い 維持管理は可能	導入時の補助金利用による地域 と工場が連携した導入政策の作 成

表中で災害時のインフラ共同利用について述べているが、その理由を以下に述べる。

まずは図 6.2-2 に東日本大震災の携帯電話の通話規制の状況（総務省資料）に示す。

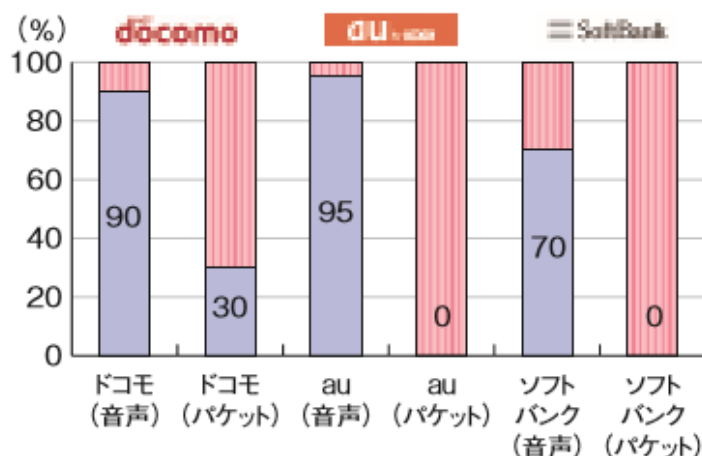
## 移動通信

### 輻そう状況

- 各社で、音声では、最大 70%~95%の規制を実施（※）。
- 他方、パケットの規制は、非規制又は音声に比べ低い割合。

※イー・モバイルは音声・パケットとも規制を非実施

〈最大発信規制値〉



出所) <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h23/pdf/n0010000.pdf>

図 6.2-2 東日本大震災の携帯電話の通話規制の状況（総務省資料）

東日本大震災発生当初は、音声通話は輻輳状態になりほとんど通信ができなくなり、パケット通信は規制が緩いことから、Line や Twitter などのパケット通信でのやり取りができた。さらに、時間がたつにつれ徐々に基地局を維持していたバッテリーがなくなり、通信ができなくなっていくという状況であった。

このような状況であれば、非常時にキャリアの通信のトラフィックを逃がす別の手段が必要となり、各自治体でローカルな互助を促進するためにも、ローカルな通信手段を個別に確保しておくことが望ましい。そして、避難所など普段より狭いところに多くの人が集まるため、ローカル 5G のような多数接続ができる通信方式が望ましい。

一方で非常時に使うためには常にメンテナンスが必要で、自治体が単独で導入しても、維持するにはコストがかかりすぎる課題がある。

その為、平常時の共有もあるが、非常時の BCP 活動も含めた共有もあると考え、以下に平常時と災害時それぞれの 5G 共有モデルを検討した。



- 地域で5G基盤を管理し、各工場には無線基地局(RU)のみを配備
- 共有すべきサービス(APL)を決め、地域5G基盤を整備

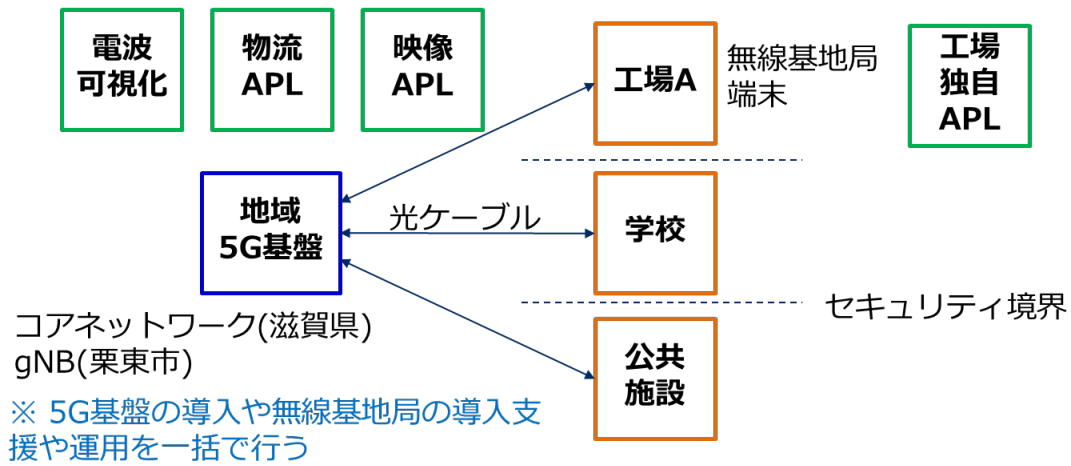


図 6.2-3 平常時の 5G 共有モデル

- 地域の工場や学校は避難所として利用。通信網として5G利用。
- 一般ユーザ(スマートフォン等)のローミングを許可

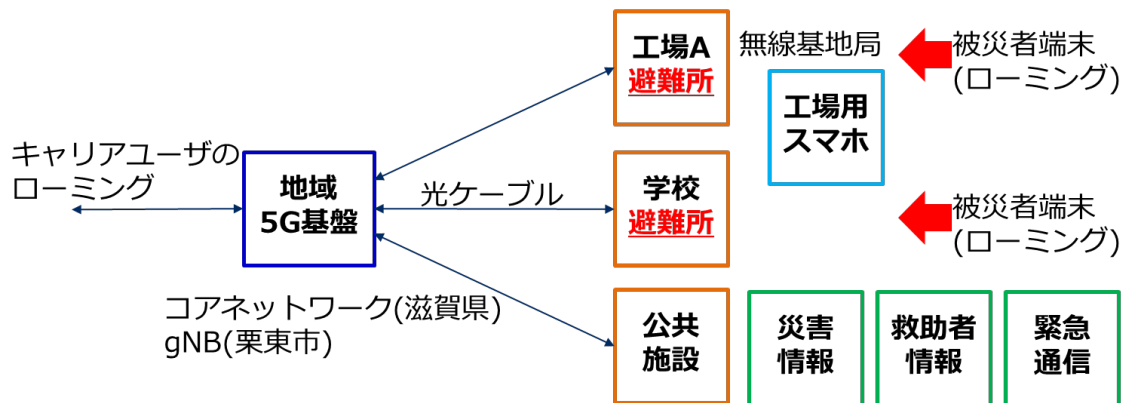


図 6.2-4 災害時の 5G 共有モデル

5G システムの中で、特に価格が高いのは gNB やコアネットワークと言ったネットワークの基幹システムであり、特にキャリア向けに作られた物は高性能であるが、中小の工場の利用だけではオーバースペックである。そこで、高性能なコアネットワークや gNB を地域で共有しようという考えである。ただし無線基地局(RU)は各工場に設置する必要があり、一台当たり数百万と高価ではあるが、それでもコアネットワーク機器や gNB は数千万円する為、十分コスト削減につながると考えられる。

なお上記のような共有モデルの採用には、売り切り型モデルよりもサービス型の方が親和性がある。サービスモデルの場合、セキュリティさえしっかり分離できていれば、個々の企業間の調整が不要であり、さらに共通的なアプリケーションの共同利用や運用管理が一括でできる。

なお三菱重工工作機械株式会社は湖南防火保安協会災害時支援登録事業所であり、大規模

災害に備え、災害時支援登録事業所が地域の防災力の担い手になれるよう、協力体制を確立している。

(<http://www.konan-kouiki.jp/konanshoubou/mokuteki/report/h29/2746.html> 参考)

しかし本件を滋賀県庁にヒアリングしたところ、実際の工場の立地場所近くには集落が存在せず、災害発生時に避難所として利用するケースはごくまれとのこと。このモデルを開拓するのであれば、場所を選ぶ必要があるとコメント頂いた。そのため、このモデルは、現実的には町中の比較的建屋の広い中規模工場に適用するのがふさわしいことがわかり、今後横展開をするときの参考としたいと考えている。

## 6.2.2 事業構築計画

図 6.2-5 に現時点での工場向け 5G サービスの計画を示す。

令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
ローカル5G 第2工場全体導入	ローカル5G全建屋(3棟) 導入 URLCC基地局導入			
センシングAI高度化 汎用映像サービスの 取り込み		5Gを利用したリモート保守サービス		
建屋間含む移動体への ローカ5G適用		移動体向け 5G制御サービス		
制御NWへのローカル5G適用の 実工場実証・標準化			クラウド型制御NW 製品化・サービス化	

図 6.2-5 工場向け 5G サービスの計画

令和3年度では、まずは本格的にローカル 5G 基地局を第二工場に導入し、より実際の利用形態に近くまた長期間の運用ができるように商用免許含めた導入対応を行う。

センシングデータの AI の学習強化による高度化を行いながら、さらに利便性向上を目的として AR と microsoft の termas 等の汎用的映像サービス(映像・音声によるコミュニケーションツール)との結合を行い、より実際の保守サービスに近い形にし実証を行う必要がある。

移動体への 5G 適用に対しては、ローカル 5G の屋内運用だけではなく、建屋間等の移動を考慮しキャリア 5G(または LTE)も含め屋外利用も考慮したハイブリッドネットワークでの利用を想定した構成で、より幅広いユースケースに対応できるように拡張していく。ただしローカル 5G の屋外利用の制限の適用状況により、屋外をローカル 5G で対応するかキャリア 5G で対応するかは、その状況を見て判断する必要がある。

制御 Network への 5G 適用に対しては、少なくとも Rel16 の URLCC に対応した基地局・端末が必要であり、また無線区間を標準規格に対応させるだけでなく、システム全体として end-to-end で低遅延を達成する必要がある。さらに制御 network 無線化の標準化を進める必要がある。加えてローカル 5G の同期/準同期運用による特に上りトラフィックへの URLCC の動作制限への影響を踏まえる必要があり、実用化は令和 6 年以降となると考えている。その為に、必要な工場実証、標準化や URLCC 基地局の導入・実証を令和 5 年までに完了させる必要がある。

上記のため、今年度を含め三か年で実用的なサービスへと仕上げていく前提が必要であり、令和 3 年度と令和 4 年度はそれぞれ今年度と同等程度の予算となる。令和 5 年度以降は商用フェーズとして、サービス収益から原価を回収するモデルへと移行する事が前提となり、より原価低減や設備の共同利用といった普及時期のモデルにあうような取り込みが必要となる。

### 6.3 横展開に資する普及モデルに関する検討

今回の実証にあたり、実証テーマは特定の工場や業種に強く依存する物ではなく、構内物流やリモート保守サポート、制御ネットワークの無線化といった、特に工場における共通性の高い課題を中心に選定している。その為、同じ工場分野においては、水平展開については、ほぼ同じフォーマーションで実施する事が可能である。

工場と特に親和性の高い分野として物流業がある。工場にも物流は必要であり、また物流に使う各搬送機器も工場と同じものが多い。課題やニーズも自動化による省人化であり、工場よりも物量が多い為、完全な自動化に伴う恩恵が見込まれる。

次に親和性の高いのは建設業である。建設業は、特に高所作業におけるコミュニケーションが難しく、リモートで映像を用いたリアルタイムコミュニケーションができることが望まれている。また建設機械のリモート操作も求められており、安全面から高信頼で低遅延な制御 Network と同等な通信も求められている。

表 6.3-1 異業種とのニーズマッチング

業種	近い課題	ニーズ
物流	自動搬送	自動化による物流の省人化
建設	遠隔サービス 制御 NW	高所等における映像を利用したリアルタイムコミュニケーション 建設機械のリモート操作

物流については、人手不足も相まって、無線による自動化に対する問い合わせも多く貰っている。例えば、本実証の成果を応用し、無線 LAN と LTE(5G はまだ利用が難しい為)を利用した、軌道型の物流機器との通信に使えないかといった要望も受けている。

その為、まずは物流分野より横展開を進めていく予定である。具体的には、令和 3 年度より、無線 LAN と LTE(できれば 5G)の併用による、トライアルを開始する予定である。トライアル成功後は、速やかな実用化を予定している。

また今回の実証地域である滋賀県とも連携し、スマートシティなど社会インフラ部門

への応用の議論も行っている。具体的な検討はこれからとなるが、共有型のサービスモデルとして、5G の他分野への応用も含めた、新たな事業モデルの開拓と確立を進めていくして予定である。

#### 6.4 共同利用型プラットフォームに関する検討

本実証で想定している共同利用型プラットフォームを図 6.4-1 に示す。

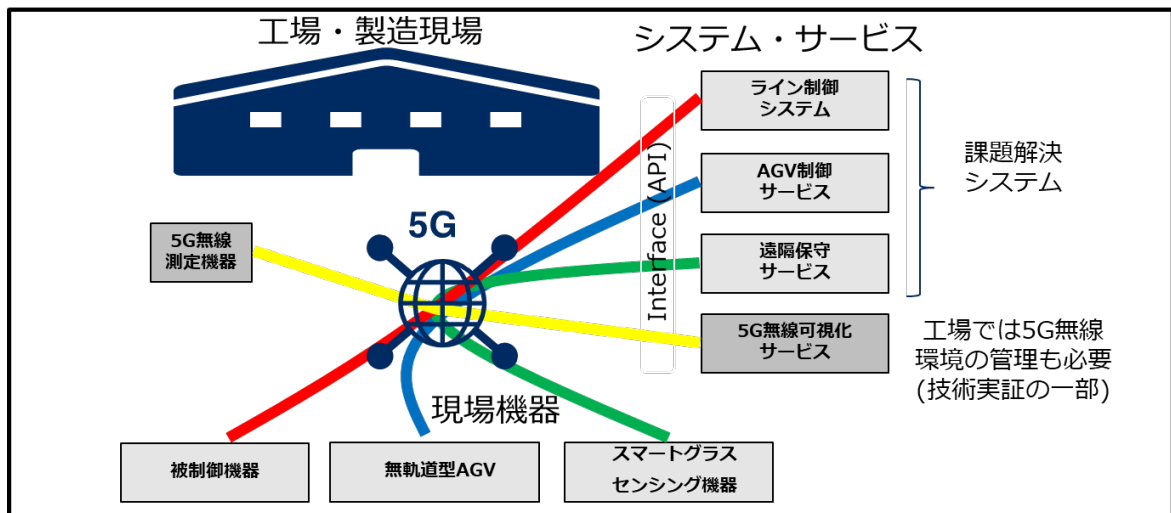


図 6.4-1 想定する共同利用型プラットフォーム

共同利用型プラットフォームは基本的にクラウド型のサービスを想定しており、現場機器との通信を 5G 経由で行う。

##### 6.4.1 共同利用型プラットフォームに対する考え方

共同利用型のプラットフォームを構築するにあたり、汎用化、メンテナンス機能、標準化の 3 つの観点が必要と考えらる。

###### 6.4.1.1 汎用性

プラットフォームを共同利用するにあたり、ある特定の企業特有のシステムに特化した物が提供されても、他の企業がそのシステムを使いこなす事は難しい。従って、複数の企業で共通にある課題の解決システムを提供する汎用化が求められる。

本実証を行うに当たり、「制御ネットワークの無線化」「構内物流の自動化」「遠隔保守支援」は、複数の企業で比較的共通的に言われているユースケースである。

制御ネットワークの無線化では、すでに多くの企業で導入が進められている汎用的な産業用イーサネットの 5G による無線化を行っている。もともと産業用イーサネットはその名の通り、有線ネットワークを想定して作られた物であり、無線化する事を想定して作られていない。その為、そのままでは単純には利用できない。この部分を、無線適用できるように

することにより、もともと産業用イーサネットのもつ汎用性がある為、無線化においても汎用的に利用する事が可能であると考えている。

構内物流の自動化については、マルチロボットコントローラを利用して AGV 等の自動搬送ロボットを制御する物であるが、特定の AGV 向けに作られたコントローラではないため、複数の規格の AGV に対して適用可能である。

遠隔保守支援では、当初からクラウド型のサービスを前提して構築されており、また振動の時系列データや映像データ等の直接対象機械には関係しない汎用的な素材を扱っている事により、特定の工場に特化した部分はすくない。

上記のような汎用的なサービスをまとめて、共同利用型プラットフォームを構築するのが良いと考えている。

#### 6.4.1.2 メンテナンス機能

工場では生産システムが 24 時間連続稼働していることもあり、1 時間製造が止まると数千万円の損害が発生する場合もある。その為、可用性は重要なポイントであり、5G の無線環境が不安定だからシステムが停止したというような事故は避けなければならない。その為、安定性や保守性については特に重要視される。

また制御ネットワークに対しては、1 秒以下の無線の障害が製造システムの停止につながる事もあり、停止が頻発すると生産性の大幅な低下につながる。

5G 自体は、もともとセルラーシステムという事もあり、24 時間運用を想定して作られていおりシステム自体の稼働についての問題は少ない。しかし、電波が安定して利用できるとは別であり、特に工場のような電波が遮蔽・反射する環境では通信の安定性が悪化する。

上記のような環境でも安定的に利用できるように、技術実証で構築したクラウド型の 5G 電波可視化サービスを共同利用型プラットフォームにて提供する事を提案する。

無線の可視化は、近年工場におけるニーズの高いソリューションであり、エリア構築時のみならず運用時にも無線起因のトラブル解析に利用される場合が多い。特に 5G の場合、実際に工場の作業員といったユーザからは無線や通信の状態はほとんどわからない為、自分自身でメンテナンスする事が難しい。その為、誰でも利用できる可視化ツールの存在は導入や運用への有用性がある。

なお本実施で用いた 5G 電波可視化サービスは、一般的な 5G のスマートフォンで利用する事ができる為、特定の工場に依存しない汎用性もある。

#### 6.4.1.3 標準化

特に工場の分野において、特定の企業への依存性が高すぎるシステムの導入に忌避される傾向がある。一度導入すると、たとえ独占的な価格設定がされても、代替えが効かなくとされている。

その為、共同利用型プラットフォームにはオープン性や標準化が求められる。オープン性があればいざとなれば自分達や他のベンダでもメンテナンスが可能であり、標準化されていれば同じ機能を提供している他社サービスへの乗り換えも可能である。

その為、本実証では可視化機能や 5G と WLAN の切り替え機能を FFPA(Flexible factory partner alliance)への提案を通じて標準化を行っている。FFPA は工場の無線利活用を推進する団体であり、また技術仕様書を発行している。工場等で様々な無線方式に対応し、複数の無線機器の管理・制御できる smart resource flow(SRF)無線プラットフォームを標準化している。

本実証では 5G と WLAN の切り替えに FFPA で規定された SRF 無線プラットフォームの機能を利用し、また逆に 5G の可視化機能を FFPA へ提案し、標準化を進めている。

#### 6.4.2 共同利用型プラットフォームの設計例

共同利用型プラットフォームの構成のベースとして、本実証で構成したクラウドサービスの構成図を下図に示す。

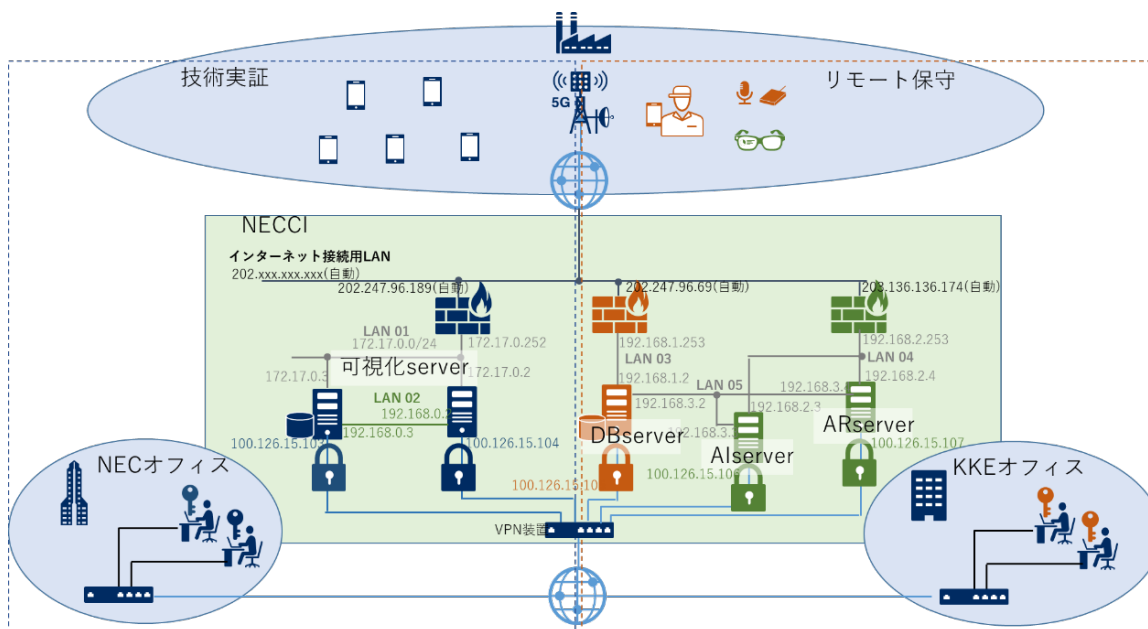


図 6.4-2 本実証で構築したクラウドサービスの構成図

##### 6.4.2.1 クラウド構築

本実証では NECCI(NEC Cloud IaaS)という IaaS(Infrastructure as a Service)型のクラウド基盤に、技術実証で利用した 5G 無線の可視化 server、課題実証で利用したセンサーデータの収集・保存を行う DBserver、センサーデータの解析をする AI server、動画像を扱う AR server を仮想的に構築し、サービス単位で分離した Firewall を通して工場に配置した各機器に対して、インターネット経由でかつ 5G を利用し通信をする物である。

またマルチベンダでのクラウド構築を行っており、NECCI 自体の提供と可視化 server 及び DB server は NEC(日本電気)で構築し、AI server や AR server は KKE(構造計画研究所)で構築し、各社のオフィスから VPN 経由で設定及びメンテナンスができるようにしている。また工場に配置したセンシング機器はサンリツオートメーションが作成した。

Internet と接続する Firewall の速度は、映像は 1Gbps、映像以外は基本料金で利用できる 10Mbps の設定をしている。1Gbps と設定したのは映像伝送では高い速度が求められる為である。ただし利用料金も月額 5~15 万円程度かかるため、一般的なクラウドサービスの利用形態としてはいささか高価である。映像関連のサービスを本格的に行うには、クラウドではなく光回線接続とオンプレミス型のサーバの組み合わせの方が現時点ではコストパフォーマンスが高いと言える。

#### 6.4.2.2 API 決定

この様にマルチベンダでサービスを構築するにあたり特に重要なのは、各社機器・サービスの境界を決定する API(Application Programming Interface)である。

図 6.4-2 で DB server と記載されているセンシングデータ格納用のサーバがあるが、ここは NEC がサーバを構成し、サンリツオートメイションがセンシングデータを 5G 経由で保存し、KKE(構造計画研究所)がクラウド内で利用するという 3 社間の境界となっている。従って、API の定義が必要となる。

そこでは、本実証では REST API と言われる IoT で標準的な定義手法を用いて API を規定している。以下に示すような JSON と言われる形式に沿ったテキストをやり取りする事により API を定義でき、可読性も高い。

図 6.4-3 本実証で使用した EEST API

```
{
  "node_id": 1,           // 整数：機材の ID
  "timestamp": 1607045173.0, // 実数：先頭データの unixtime
  "freq": 20000.0,       // 実数：サンプリング周波数(Hz)
  "channels": 3,         // 整数：チャンネル数(今回は 3 に固定)
  "points": 1000,        // 整数：データ点数
  "wave": [[1.0,2.0,3.0], [4.0,5.0,6.0], .....] // 実数 N 行 3 列
}
```

5G の無線可視化についても、センシングと同様に REST API で設計した。設計にあたり、3GPP に記載のパラメータ及びスマートフォンのセルラ関連の 5G API の情報を参考に必要なパラメータを決定した。なお API を定義した物の、すべての情報がスマートフォンの API で取得できるわけではなく、今後追加されると想定される物も必要に応じて追加している。例えば Physical Cell Identifier などがそれにあたる。

5G の無線可視化で設計した API のうち、5G に関係する部分を以下に示す。

図 6.4-4 無線可視化で設計した REST API

JSON format	description
<pre>{   "srfgwId": "YourSrfGwId",   "timestamp": 1569855600,   "measurmentDuration": 10,    "communicationInterfaces": [     {       "ifInfo": {         "ifType": "NR FDD",          "name": "wwan0"       },       "plmn": "001-01",       "tac": 9752,       "imsi": "0120120123456789",       "tmsi": "01234567890",       "imei": "867722031333947",       "phoneNumber": "01234567890",       "currentRate": 54000,        "linkInfos":[         {           "nci": 0,           "pci": 1007,           "nrarfcn": 428000,            "band": [1,2],           "bandwidth": 20,           "ssRsrq": -9,           "csiRsrq": -9,            "ssRsrp": -50,            "csiRsrp": -50,            "ssSinr": 9.0,           "csiSinr": 9.0,            "state": "CONNECTED",            "txPacket": 100,</pre>	<p>Identification of SRF Gateway  UNIX timestamp [sec]  Duration how long the SRF Gateway measure cumulative parameters, e.g. number of packets [sec]</p> <p>“NR FDD”, “NR, TDD”, “NR SDL” or “NR SUL”  Physical I/F name</p> <p>Public Land Mobile Network Number  Tracking Area Code  International Mobile Subscriber Identity  Temporary Mobile Subscriber Identity  International Mobile Equipment Identifier  Phone Number  Current transmission data rate of modulation and coding [kbps]</p> <p>NR Cell Identity  Physical Cell Identifier  NR Absolute Radio-Frequency Channel Number  Band  Channel bandwidth [MHz]  SS Reference Signal Received Quality [dB]  CSI Reference Signal Received Quality [dB]  SS Reference Signal Received Power [dBm]  CSI Reference Signal Received Power [dBm]  SS Signal to Interference plus Noise power ratio [dB]  CSI Signal to Interference plus Noise power ratio [dB]  RRC Status: "CONNECTED" or "IDLE" or "INACTIVE"  Number of packets sent (*1)</p>



<pre> "txByte": 112233, "rxPacket": 100, "rxByte": 112233, "txFailed": 10, "txError": 50.01, "txRetry": 100     }   ],   "vendorOption": {     }   } ] } </pre>	<p>Number of bytes sent [Byte] (*1)  Number of packets received (*1)  Number of bytes received [Byte] (*1)  Number of transmission failures  Tx error rate [%]  Number of retry packets (*1)</p> <p>Vendor options</p>
---	--

(\*1) The count is not differential value but total value since the I/F started

上記の様に、API は IoT で広く利用されている REST API を用い、パラメータ定で JSON を利用することにより、直感的で簡単に利用可能な API を定義することができる。

## 6.5 まとめ

5G システムの実装及び横展開には、まず有効なユースケースを確立しモデルケースを作り上げる事が重要である。そのうえで、現状の高いコストを緩和する為に、売り切り型からサービス型への転換、または自治体や他企業との 5G システムの共同利用が有効であると考えている。

5G の共同利用型プラットフォームは汎用性、安定性、標準化が求められており、構築には IoT で一般的に利用されている REST API を用いる事により、簡単で効率的に立ち上げることができると思う。

## 7. 会合等の開催（該当する活動がある場合）

以下の会議にて本実証に関するプレゼンテーションを実施(又は予定)

2020/11/27 MWE2020

2020/11/30 近畿ローカル 5G 推進フォーラム 第2回会合

2021/2/12 NICT オープンラボ 2021

2021/6/17 5G/IoT 入門セミナーin名古屋（案）

## 8. まとめ

日本の製造業の課題である労働者・熟練工不足の人材問題、ITの活用不足、技術継承、顧客ニーズの多様化による多品種少量生産への対応などを解決するものとしてため、3つの課題解決システムによる実証「変種変量生産に資する制御系ネットワークの無線化」、「無軌道AGVの遠隔制御」、「熟練工を対象とした効率的な機器等の遠隔保守支援作業」の効果をそれぞれ検証した。また、ローカル5Gの技術的課題に対し、新たな知見を得ることができた。

ローカル5Gによる工場設備の制御系ネットワークの無線化を行った場合に、制御系システムの伝送遅延の要件である100ミリ秒以内の伝送が可能であり、低ノイズ環境下では、LTEや無線LANでは困難であった20ミリ秒周期のサイクリック通信(一定間隔の同期通信)の長時間稼働が可能であることを確認できた。

無軌道型AGVについて5Gを用いた遠隔制御にて運用が可能となることを確認できた。また、5Gのエリア端では無線LANとのハンドオーバーが可能であり、作業効率化に向けた工場エリア全体でのハイブリッド運用が可能となることを確認できた。

ローカル5G等を活用した遠隔での機器保守を支援するシステムとして、スマートグラスを用いた保守支援が可能となることを確認できた。また、工場設備に付随した振動センサーの情報をクラウドへ伝送し、機械の異常個所をリアルタイムに分析できることを確認できた。

一方、5Gシステムの性能を100%出し切る事には非常に苦勞し、アプリケーションの動作との組み合わせによっては、スループットがでないなどの難しさがある事も分かってきた。工場環境では、工作機械の稼働やクレーンの移動により無線通信性能劣化が生じることも判明した。

5Gやローカル5Gは高性能であり工場においても期待が大きいですが、その使いこなしに関してはかなりのノウハウを要するのが現状である。実際に現在多く出回っている5Gシステムは、主にbest effort型のシステムであり、すべての要件に対して高性能を保障する物ではない。その期待から誤った使い方を行い、かえってがっかりさせるシステムにならないかを危惧している。

その為、現状まずは5Gやローカル5Gの特徴を正しく理解し、正しく使いこなし、その性能を100%引き出すようにチューニングし、ユースケースを構築していくのが急務である。今回の実証の成果がその手助けになって頂けると幸いである。

## 9. 参考資料

- [1] Flexible Factory Project (FFPJ), “ホワイトペーパー 製造現場における無線ユースケースと通信要件,” 2017年3月
- [2] ITU-R P.1238-9, “Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz,” 2017年6月
- [3] 3GPP TR 38.901 V16.1.0, “ Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz,” 2019年12月
- [4] 総務省 電波法関係審査基準, [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000711787.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000711787.pdf), 2019年10月