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鉄道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

（遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現）

成果報告書

2021 年 3 月 31 日

中央復建コンサルタンツ株式会社

目次

1. 全体概要 1

1.1 背景・目的 1

1.1.1 背景 1

1.1.2 目的 6

1.2 実施事項及び実証目標 9

1.3 実施体制 9

1.4 実証のスケジュール 10

1.5 免許申請の概要 10

2. 実証地域 12

2.1 調査検討内容 12

2.1.1 実証概要 12

2.1.2 実証地域 12

2.2 実証地域の概要 13

2.2.1 京浜急行電鉄の概要 13

2.2.2 久里浜工場の概要 14

2.3 地域課題等 18

2.3.1 鉄道インフラ分野の維持管理における課題 18

2.3.2 鉄道インフラ分野における課題解決システムの構築 23

2.3.3 地域課題の解消におけるローカル 5G の有用性 25

3. 実証環境 26

3.1 ネットワーク構成 26

3.1.1 キャリア５G 基地局の構築 26

3.1.2 キャリア５Gの基地局との送受信用システムの構築 28

3.1.3 AI 解析基盤 32

3.2 システム機能・性能・要件 33

3.2.1 キャリア５G 基地局 33

3.2.2 キャリア５Gの基地局との送受信用システム 34

3.2.3 AI 解析基盤 35

3.2.4 システム全体の性能要件 36

3.3 実証環境の運用 36

3.3.1 システム運用の説明 36

3.3.2 運用体制 37

4. 課題解決システムの実証 38

4.1 前提条件 38

4.2 実証目標 41

4.3 課題解決システムに関する検証及び評価・分析 41

4.3.1 映像受配信システムの検証及び評価・分析 41
4.3.2 5G と AI を活用した列車検査の遠隔・自動監視システム 49
4.3.3 5G と AI を活用した線路巡視の遠隔・自動監視システム 98
4.4 課題解決システムに関する効果検証 135
4.4.1 5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システム 135
4.4.2 5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システム 137
4.5 課題解決システムに関する機能検証 139
4.5.1 検証内容 139
4.5.2 検証結果の評価・分析 143
4.6 課題解決システムに関する運用検証 143
4.6.1 5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システム 143
4.6.2 5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システム 147
4.7 まとめ 149
5. ローカル 5G の性能評価の技術実証 151
5.1 前提条件 151
5.1.1 対象とするユースケース 151
5.1.2 実証環境 151
5.1.3 基本的な諸元 153
5.2 実証目標 154
5.2.1 技術的課題 154
5.2.2 実証目標（技術実証として） 154
5.2.3 実施事項 155
5.3 ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等（課題ア） 159
5.3.1 ユースケースに基づく性能要件 159
5.3.2 評価・検証項目 159
5.3.3 評価・検証方法 159
5.3.4 類似の調査 165
5.3.5 性能評価結果 166
5.3.6 技術的課題の解決方策 178
5.3.7 更なる技術的課題等 191
5.4 ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等（課題イ） 192
5.4.1 評価・検証項目 192
5.4.2 評価・検証方法 192
5.4.3 検証結果 193
5.4.4 技術的課題の解決方策 204
5.4.5 更なる技術的課題等 204
5.5 その他、ローカル 5G に関する技術実証（課題ウ） 205
5.5.1 評価・検証項目 205
5.5.2 評価・検証方法 206
5.5.3 検証結果 216
5.5.4 技術的課題の解決方策 221

5.5.5 更なる技術的課題等 222
5.6 まとめ 222
6. 実装及び横展開に関する検討 226
6.1 前提条件 226
6.1.1 実装・横展開の視点 226
6.1.2 5G・ドローン導入にあたっての技術的制約 227
6.2 持続可能な事業モデル等の構築・計画策定 228
6.2.1 固定カメラによる車両の瑕疵検知 228
6.2.2 ドローン等を活用した巡視・検知 233
6.2.3 課題対応に向けた検討体制・役割分担 237
6.3 横展開に資する普及モデルに関する検討 241
6.3.1 他の鉄道事業者への横展開 241
6.3.2 他のインフラ事業者への横展開 261
6.4 共同利用型プラットフォームに関する検討 284
6.4.1 クラウド基盤の構築 284
6.4.2 構築したクラウド基盤と共同利用型プラットフォームのコンセプトの親和性 285
6.4.3 共同利用型プラットフォーム検討に向けて提示可能な仕様書案 286
6.5 まとめ 287
7. 会合等の開催（該当する活動がある場合） 288
7.1 協議会の目的 288
7.2 協議会の構成員 288
8. まとめ 293
9. 資料 295

1. 全体概要

1.1 背景・目的

1.1.1 背景

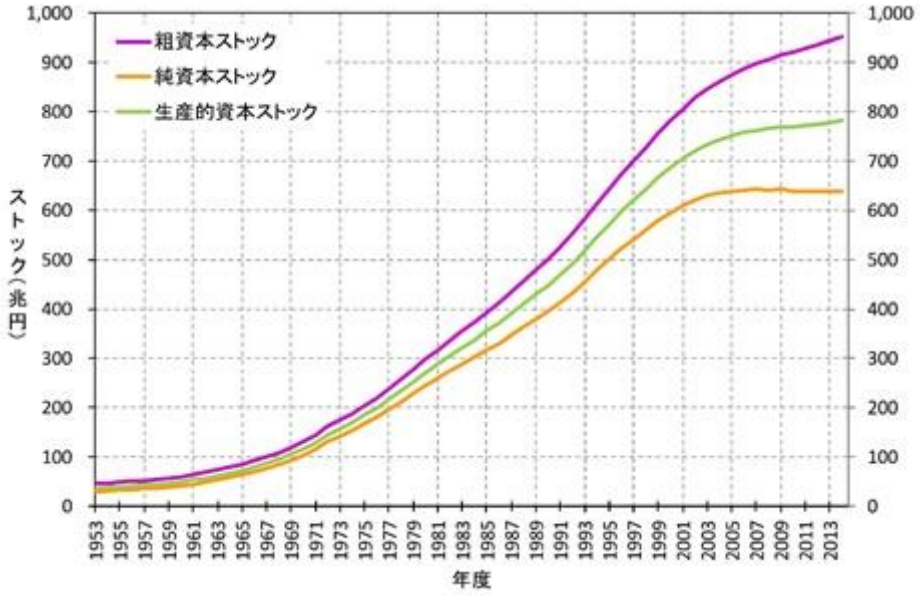
（1）我が国のインフラストック

我が国における社会資本（以下、「インフラ」という。）のストックはすでに膨大な量に達している。内閣府によると、事業主体が公的な機関であるインフラ（鉄道を含む 18 部門）のストック量は 2014 年度時点で粗資本ストックで 953 兆円、粗資本ストックから供用年数の経過に応じた減価を控除した純資本ストックで 638 兆円に達すると推計されている。

これまでに整備された我が国の膨大なインフラについて、国は「経済財政運営と改革の基本方針～脱デフレ・経済再生～」（平成 25 年 6 月 14 日閣議決定）において「インフラの老朽化が急速に進展する中、『新しく造ること』から『賢く使うこと』への重点化が課題」とし、「公共投資などの分野への民間参入を促し、民間の資金やノウハウを活用することが重要である。」としている。インフラは国民の生活や経済を支える重要な社会基盤であり、これまでに整備されたインフラを対象に地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証を行うことは非常に有効であると考えられる。

［我が国のインフラストック量］

ストックの種類	粗資本ストック	純資本ストック	生産的資本ストック
ストック額（2014 年度）（１８部門計・全国値）	953 兆円	638 兆円	781 兆円



※1　事業主体が公的な機関である社会資本 18 部門（道路、港湾、航空、鉄道、公共賃貸住宅、下水道、廃棄物処理、水道、都市公園、文教施設、治水、地山、海岸、農林漁業、郵便、国有林、工業用水道、庁舎）が対象。

※2　粗資本ストック、純資本ストック、生産的資本ストックの定義は下表のとおり。

粗資本ストック	現存する固定資産について、評価時点で新品として調達する価格で評価した値
純資本ストック	粗資本ストックから供用年数の経過に応じた減価（物理的減耗、陳腐化等による価値の減少）を控除した値
生産的資本ストック	粗資本ストックから供用年数の経過に応じた効率性の低下（サービスを生み出す能力量の低下）を控除した値

出典：内閣府政策統括官（経済社会システム担当）、日本の社会資本 2017、平成 30 年 3 月（一部改訂）https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/

図 1.1.1-1　我が国のインフラストック量

（2）鉄道インフラの課題

様々なインフラのうち、鉄道は我が国において重要な交通インフラの一つである。鉄道インフラの特徴として保守管理における課題を以下に示す。

1）老朽化の進行

鉄道インフラは、道路等のインフラと比べてストック量は多くないものの、我が国のインフラ整備の黎明期に国策として整備されてきたことから、他のインフラと比べて老朽化が進んでおり、輸送の安全を確保するため保守管理の高度化と精度向上が求められている。

［鉄道の橋梁とトンネルの施設数］

出典：国土交通省社会資本の老朽化対策情報ポータルサイト、インフラメンテナンス情報、各社会資本の老朽化の現状（鉄道、一部抜粋）

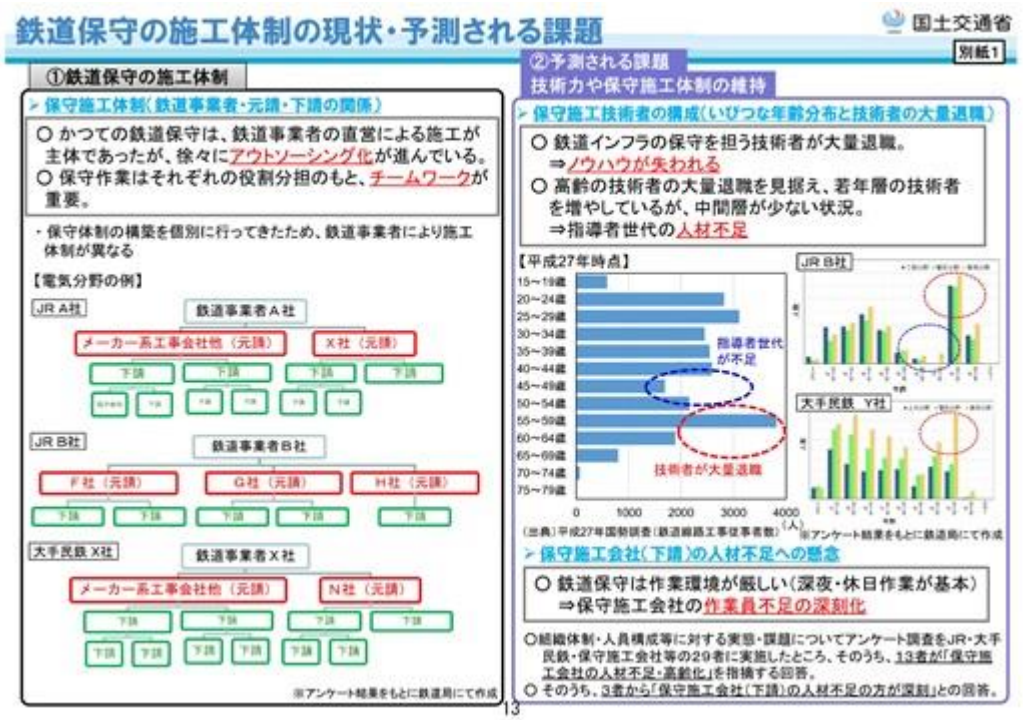
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/_pdf/research01_pdf12.pdf

図 1.1.1-2　鉄道の橋梁とトンネルの施設数

2）人材の不足

鉄道は軌道、土木、建築、車両、電気、信号、通信など様々な種類の施設で構成されており、古くから人の経験に基づく保守管理体制が構築されている。近年における人口減少と少子高齢化の影響から鉄道インフラの保守管理も人材不足が課題となっており、ローカル 5G を含む新技術による保守の省力化が期待されている。

［鉄道保守の課題］



出典：鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会、「鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会とりまとめ」（平成 30 年 7 月 27 日）
https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000023.html

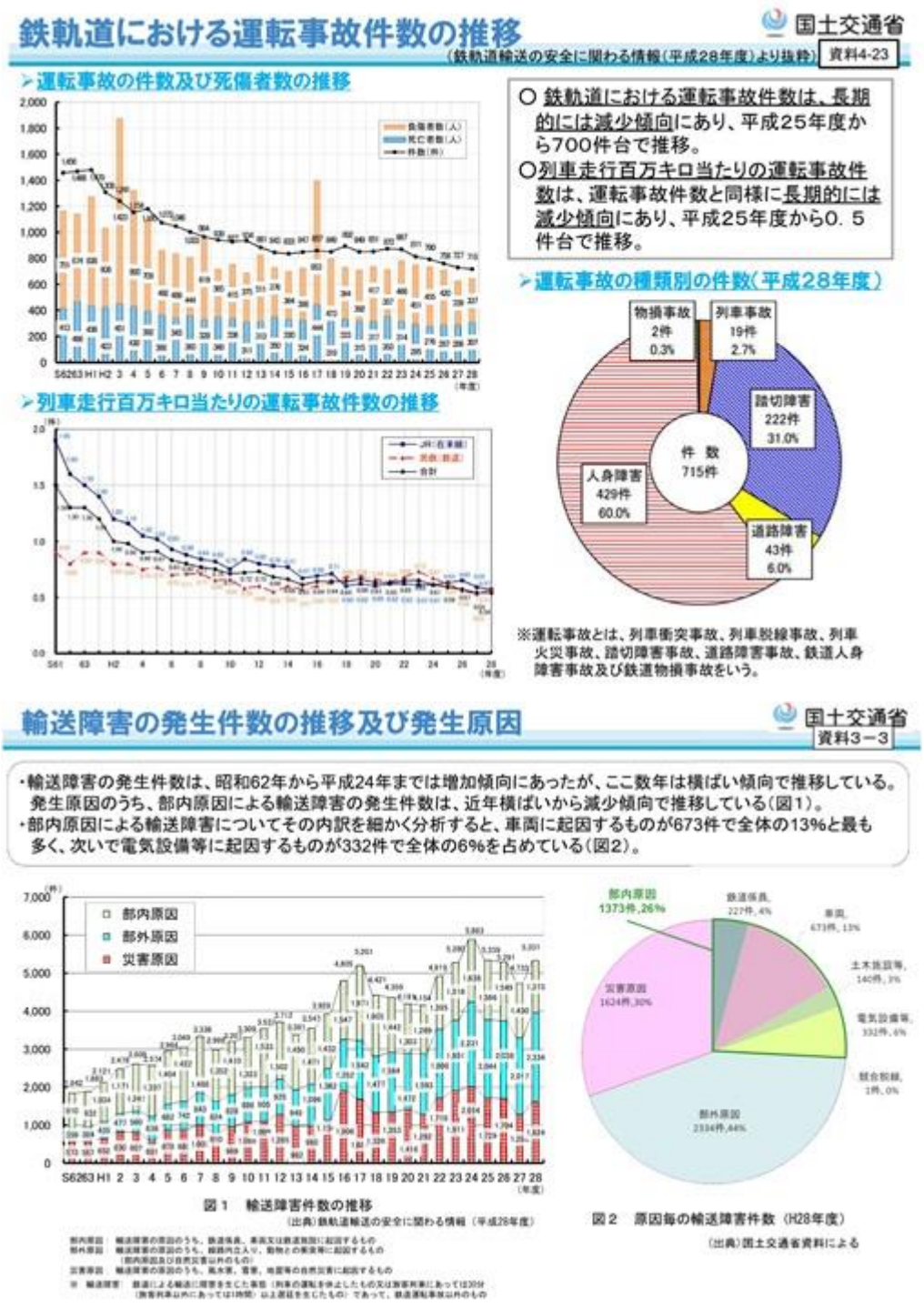
図 1.1.1-3　鉄道保守の課題

3）さらなる安全とサービス水準の向上

鉄道は、旅客や貨物の料金対価として輸送サービスを提供する事業を営んでおり、安全はもちろんのこと、定時性や快適性等のサービス水準の確保が要求されている。近年、鉄道の運転事故件数は減少しているものの、毎年一定の事故が発生しており、遅延等の輸送障害の発生件数は近年増加傾向を示している。

このような傾向を踏まえて、鉄道事業者はグループ会社や協力会社を含めた教育・訓練に取り組んでいるが、輸送の安全とサービス水準は鉄道事業の根幹であることから、さらなる安全とサービス水準の向上が求められている。

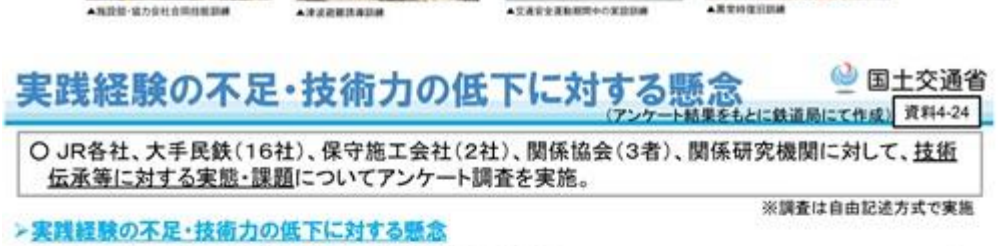
［鉄道における運転事故と輸送障害発生件数の推移］



出典：鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会、「鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会とりまとめ」（平成 30 年 7 月 27 日）
https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000023.html

図 1.1.1-4　鉄道における運転事故と輸送障害発生件数の推移

［鉄道保守管理の教育・訓練］



出典：鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会、「鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会とりまとめ」（平成 30 年 7 月 27 日）
https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000023.html

図 1.1.1-5　鉄道保守管理の教育・訓練

（3）総務省におけるローカル 5G の位置づけ

総務省は 2019 年 12 月 24 日、ローカル 5G の一部制度化を実施したが、今後も周波数の拡張が予定されており、そのため、引き続き、実際のユースケースの利用環境における性能評価試験や既存無線局との共用可能性に関する試験等を行い、更なる技術的条件等の検討を行うとともに、ローカル 5G の導入促進を図る必要があるとしている。

1.1.2 目的

鉄道施設の安全は「検査」によって確保されており、検査による損傷の早期発見は事故を未然に防止するための基本である。検査は、①短い周期で簡易に行われる「日常検査」、②一定の周期で入念に行われる「定期検査」、③災害発生時などに臨時的に行われる「臨時検査」の 3 つに分類され、検査の周期や内容は、鉄道事業者が法令（「鉄道営業法」（明治 33 年法律第 65 号)、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」（平成 13 年国土交通省令第 151 号)、「施設及び車両の定期検査に関する告示」（平成 13 年国土交通省告示第 1786 号）で定められた範囲において独自に設定していることが一般的である。

表 1.1.2-1　検査業務の種類

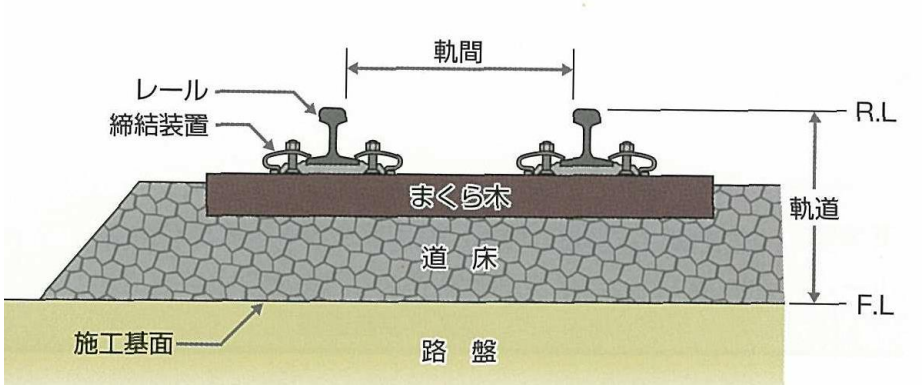
	概　要	詳　細
日常検査	短い周期で簡易に実施	車両の検査については、法令上 10 日以内の間隔での実施が定められている
定期検査	一定の周期で入念に実施	一般的に、対象によって数日～数年などの間隔で行われる
臨時検査	災害発生時などに臨時的に実施	－

本請負では、鉄道施設の検査のうち、「鉄道車両検査」や「線路巡視業務」にフォーカスし、ローカル 5G 等の電波伝搬特性の解明及び課題解決システムにおける具体的なアプリケーション（鉄道車両の傷等、線路の障害等を自動検知）を想定した実証を実施した。

これにより、鉄道車両検査や線路巡視業務へのローカル 5G 等の導入を促進し、鉄道インフラの維持・管理における人手不足や熟練作業者不足等の課題解決に寄与することを目的とする。

≪参考≫軌道の構造に関して

- 線路巡視では、「軌道」と呼ばれる鉄道施設の異常の有無を巡視している。
- 軌道には大きく「バラスト軌道」と「スラブ軌道」の 2 つがある。
- バラスト軌道は、「レール」、「まくら木」、「道床（バラスト）」で構成されており、バラスト軌道が設置されている地盤は「路盤」と呼ばれる。

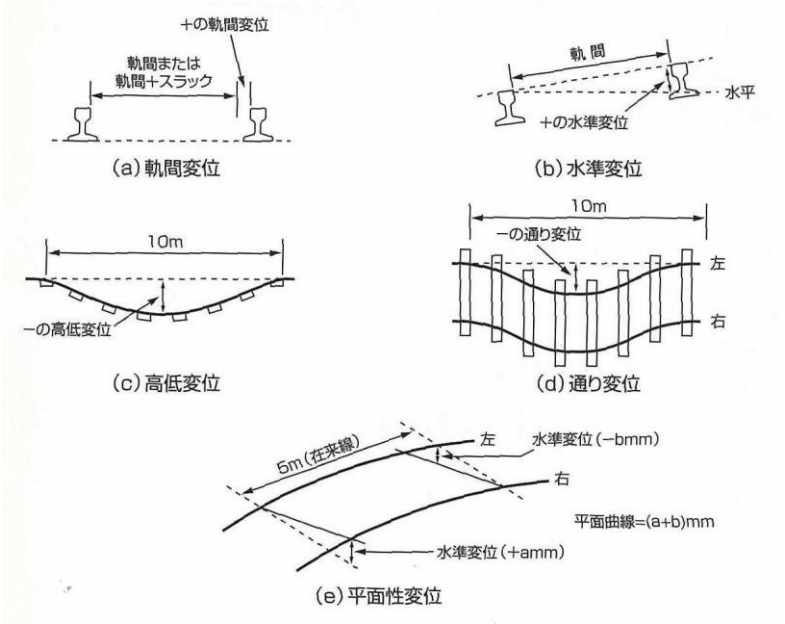


※レールとまくら木で構成される梯子状のものは「軌きょう」と呼ばれる。

図 1.1.2-1 バラスト軌道の構造（上）と写真（下）

出所）よくわかる 最新 鉄道の基本と仕組み

- レールに求められる主な機能は車両を安全に走行させることであり、鉄道事業者は「軌間」、「水準」、「高低」、「通り」、「平面性」の 5 つに対して整備基準値を設定している。
- まくら木の主な機能は、レールの軌間を保持するとともに、車両の荷重をバラストに伝えることである。
- バラスト（道床）の主な機能は、レールとまくら木（軌きょう）の位置と耐久性を保持するとともに、車両と軌きょうの荷重を路盤（地盤）に伝えることである。
- 路盤の主な機能は、軌道と軌道に作用する荷重を支えることである。



線区の区分 / 変位の種別	整備目標値				整備基準値			
	1級線	2級線	3級線	4級線	1級線	2級線	3級線	4級線
軌間	+10(+6) −5(−4)				・直線および半径600mを超える曲線 20(14) ・半径200m以上600mまでの曲線 25(19) ・半径200m未満の曲線 20(14)			
水準	11 (7)	12 (8)	13 (9)	16 (11)	平面性に基づき整備を行なう。			
高低	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23(15)	25(17)	27(19)	30(22)
通り	13 (7)	14 (8)	16 (9)	19 (11)	23(15)	25(17)	27(19)	30(22)
平面性	−				23 (18) (カントの逓減量を含む)			

(注) 数値は高速軌道検測車による動的値、( ) 内は静的値を示す。

図 1.1.2-2 軌道（レール）整備の項目（上）と基準値（下）

出所）よくわかる 最新 鉄道の基本と仕組み

1.2 実施事項及び実証目標

列車検査や線路巡視にローカル 5G 等を活用した新技術を適用し、列車検査や線路巡視への適用性や新技術の導入効果を確認した。

具体的には、4k カメラにて撮影した車両台車及び軌道の高画質画像をローカル 5G 等にて送信し、AI にて異常を検知することによって、台車に発生する疲労き裂等や線路周辺における異常の検知能力を確認した。

また、列車検査を実施している鉄道事業者の職員へのヒアリング等を通じて、新技術（ローカル 5G 等＋AI による画像検査）の適用性や導入効果、及び鉄道以外のインフラ点検に対する適用性等を検証した。

1.3 実施体制

本請負では、中央復建コンサルタンツ(株)、(株)NTT ドコモ、京浜急行電鉄(株)、横須賀市の 4 者でコンソーシアムを組成して実施した。

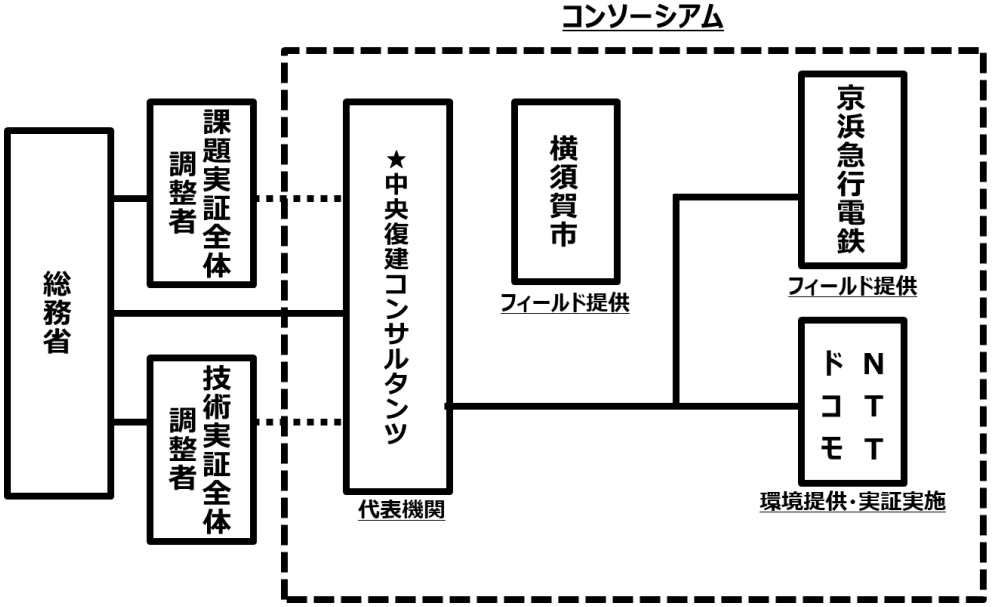


図 1.1.2-1　実施体制

各社の担う具体の役割は以下のとおりである。

表 1.1.2-1　各社の担う役割

	各社の担う役割
中央復建コンサルタンツ株式会社	本検討の全体総括
株式会社ＮＴＴドコモ	5G・MEC クラウド環境構築、4k 映像配信・AI 解析システムの構築
京浜急行電鉄株式会社	実証フィールド提供
横須賀市役所	地域における課題提供および地域横展開に向けた知見の提供

1.4 実証のスケジュール

実証のスケジュールは以下のとおりである。

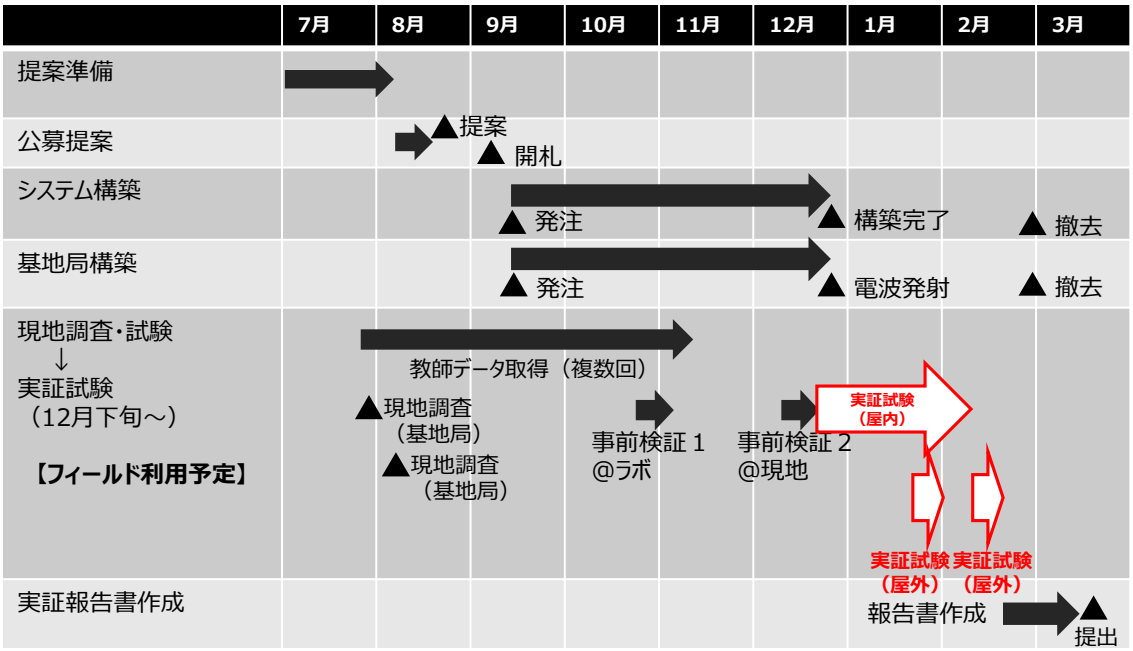


図 1.1.2-1　実施体制

1.5 免許申請の概要

本実証では、NTT ドコモのキャリア５G 基地局（4.5GHz）を 2 局、構築した。また、線路巡視の課題検証に特化した用途として、５G 実験局（28GHz）を 1 局構築した。

各基地局の免許申請情報は以下のとおりである。

包括免許人の氏名又は名称	株式会社ＮＴＴドコモ		
包括免許人の住所	＊＊＊＊＊		
特定無線局の種別	基地局		
特定無線局の目的	電気通信業務用	包括免許の番号	＊＊＊＊＊
包括免許の年月日	令2.7.1	包括免許の有効期間	令4.9.30まで
無線設備の設置場所とすることができる区域	関東総合通信局管内	運用開始の期限	
通信の相手方	免許人所属の陸上移動局		
包括免許人の事務所	東京都千代田区		
電波の型式、周波数及び空中線電力			
99M9X7W　　4550.01 MHz　　696.16　W			

図 1.1.2-1　キャリア５G 基地局

出所：NTT ドコモ公表資料

≪参考≫電波測定箇所

本実証では、キャリア 5G を使用したことから、実証のための免許申請は行っていないが、参考として本実証における電波測定箇所を示す。（詳細は 5.3.5　章に詳述）

図 1.1.2-2　屋外局周辺での測定場所（合計 36 地点で測定）

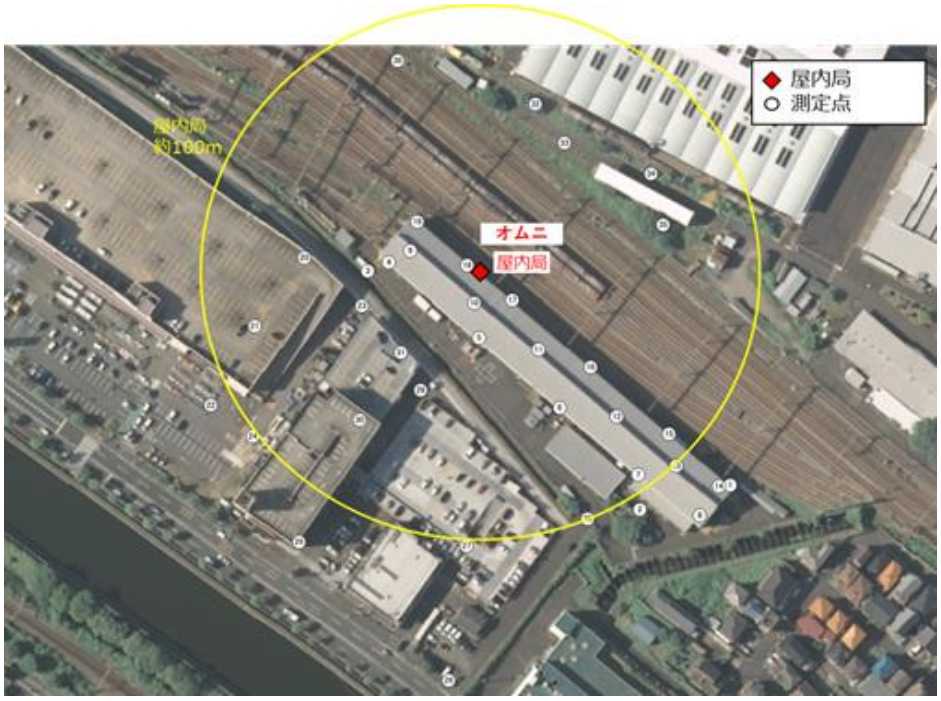


図 1.1.2-3　屋内局周辺での測定場所（合計 36 地点で測定）

2. 実証地域

2.1 調査検討内容

本調査検討事業の内容として「課題解決システムの実証」「ローカル 5G の性能評価等の技術実証」「実装及び横展開に関する検討」を実施した。

2.1.1 実証概要

インフラ分野の課題解決に資するローカル 5G 等の無線通信システムの具体的なユースケースとして、鉄道車両基地において鉄道インフラの維持管理に関する課題解決システムを構築し、各種検証を実施するとともに、鉄道車両基地におけるローカル 5G の導入に向けた技術実証を行った。

2.1.2 実証地域

横須賀市では、産業構造の変化、平坦地が少ないという地形的特徴から、少子高齢化の進行や若年層の市外転出といった課題が他都市よりも早く顕在化し、産業の活性化と市民生活の利便向上が急務であるという都市課題に基づき、(株)NTT ドコモが研究開発拠点を置く、横須賀リサーチパーク（以下、YRP）をはじめとした横須賀市内において、スマートモビリティを活用した社会課題の解決、および新たなビジネスの創出を図り、その成果による「地域の活性化等」の推進を目指している。

また、これまでにスマートモビリティの開発・実証を通じた地域課題の解決、新規ビジネスの創出を目的として、2018 年より、「ヨコスカ×スマートモビリティ・チャレンジ推進協議会」を立ち上げ、様々な実証プロジェクトに取り組んでいる。

これらの背景を踏まえ、本実証では、横須賀市内を運行する京浜急行電鉄をフィールドに選定した。また、車両及び線路等を検証の対象としているが、通常の路線を利用して実証を行うと列車の運行に支障をきたすため、実際の環境に近く安全性の確保された実証可能地域として、京急久里浜工場を選定した。

本地域においてローカル 5G 等を用いたシステムを実装することで、将来的な公共交通の安全性の確保と効率化に伴う地域の活性化が見込まれる。

2.2 実証地域の概要

2.2.1 京浜急行電鉄の概要

京浜急行電鉄は、本線と 4 つの支線を持ち、営業キロ 87.0km を有する関東地方を代表する私鉄である。この間に、73 駅が存在する。

表 2.2.1-1 線別区間距離

線 名	区 間	区間距離
本 線	泉岳寺～浦賀	56.7km
空 港 線	京急蒲田～羽田空港第1·第2ターミナル	6.5km
大 師 線	京急川崎～小島新田	4.5km
逗 子 線	金沢八景～逗子・葉山	5.9km
久里浜線	堀ノ内～三崎口	13.4km
	計	87.0km

出所）京急グループ会社要覧 2020-2021

輸送人員をみると、2019 年度までは概ね増加傾向で推移している。

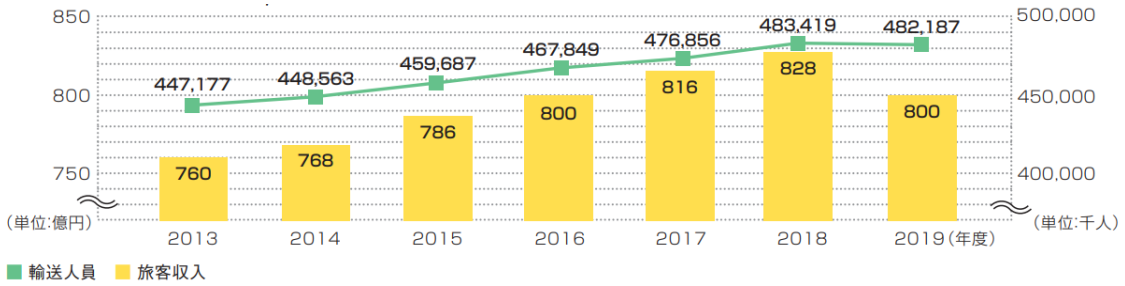


図 2.2.1-1 旅客収入と輸送人員

在籍車両数は 796 両である。

表 2.2.1-2 在籍車両数

電動客車		附随客車		客車計	電動貨車		総車両数
形式	在籍車両数	形式	在籍車両数		形式	在籍車両数	
デハ800	0			0	デト11	1	
デハ1500	118	サハ1900	40	158	デト12	1	
デハ600	58	サハ600	30	88	デト17	2	
デハ2100	40	サハ2100	40	80	デト18	2	
デハ1000	333	サハ1000	131	464			
合計	549	合計	241	790	合計	6	796

出所）京急グループ会社要覧 2020-2021

営業区間内における橋梁は 328 か所、トンネルは 36 か所存在している。

■土木設備

まくら木の敷設延長		186,065m
道床砂利の敷設延長		157,722m
橋梁	328か所	7,791m
高架橋	163か所	40,899m
こう橋	5か所	21.2m
構内地下道	21か所	101.9m
トンネル	36か所	14,624m
停車場	72か所	
踏切道	86か所	

1.橋梁の内訳	
(1) 河川に架かるもの：77か所	1,523m
(2) 道路に架かるもの：246か所	3,581m
(3) 線路に架かるもの：3か所	79.8m
(4) その他：9か所	22.8m
2.主な橋梁 ……	六郷川橋梁 550.6m
3.主なトンネル	
(1) 羽田トンネル（穴守稲荷～天空橋）	829.251m
羽田第2トンネル（天空橋～羽田空港）	4,441.95m
(2) 野比トンネル（京急久里浜～YRP野比）	681.400m
(3) 野毛山トンネル（戸部～日ノ出町）	658.624m
(4) 汐留トンネル（汐入～横須賀中央）	514.990m

図 2.2.1-2　管理する土木設備

2.2.2　久里浜工場の概要

久里浜工場は、京浜急行電鉄の車両を検査する 3 検車区の 1 つであり、これらの 3 検車区においてすべての列車をローテーションしながら検査している。

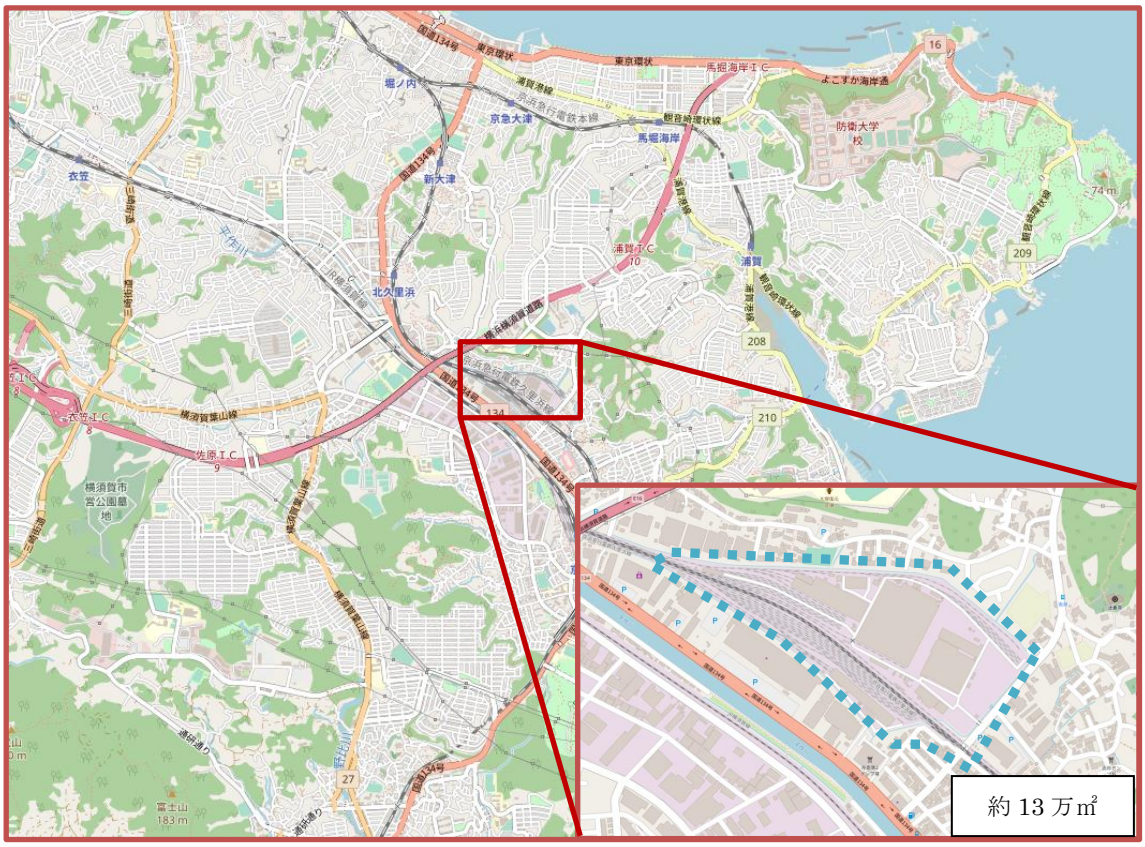


図 2.2.2-1　京急久里浜工場の概要

図 2.2.2-2　京急久里浜工場の内観

≪参考≫保有する車両の詳細

新１０００形
（貫通形・1800番台）

●製造初年／2007 年 3 月
＜4 両編成 14 本（56 両）、
6 両編成 24 本（144 両）、
8 両編成 18 本（144 両）＞

新１０００形
（ステンレス車）

新１０００形
（１２００番台）

●製造初年／2002 年 2 月
＜4 両編成 12 本（48 両）、
8 両編成 9 本（72 両）＞

新１０００形
（アルミ車）

２１００形

●製造初年／1998 年 2 月
＜8 両編成 10 本（80 両）＞

600形

●製造初年／1994 年 3 月
＜4 両編成 6 本（24 両）、
8 両編成 8 本（64 両）＞

1500形（VVVF制御車）

●製造初年／1990 年 8 月
＜6 両編成 15 本（90 両）、
8 両編成 5 本（40 両）＞

1500形（界磁チョッパ制御車）

●製造初年／1985 年 3 月
＜4 両編成 7 本（28 両）＞

KEIKYU BLUE SKY TRAIN

●製造初年／2005 年　＜2 編成＞

KEIKYU YELLOW HAPPY TRAIN

●製造初年／2014 年　＜1 編成＞

2.3 地域課題等

2.3.1 鉄道インフラ分野の維持管理における課題

2.3.1.1 列車検査業務

（1）現状把握

京浜急行電鉄に、実際の検査状況についてヒアリングを実施した。

京浜急行電鉄では、車両に対して「列車検査」、「月検査」、「重要部検査」、「全般検査」、「臨時検査」の 5 種類の検査を実施しており、このうち列車検査が日常検査、月検査、重要部検査、全般検査が定期検査に分類されている。

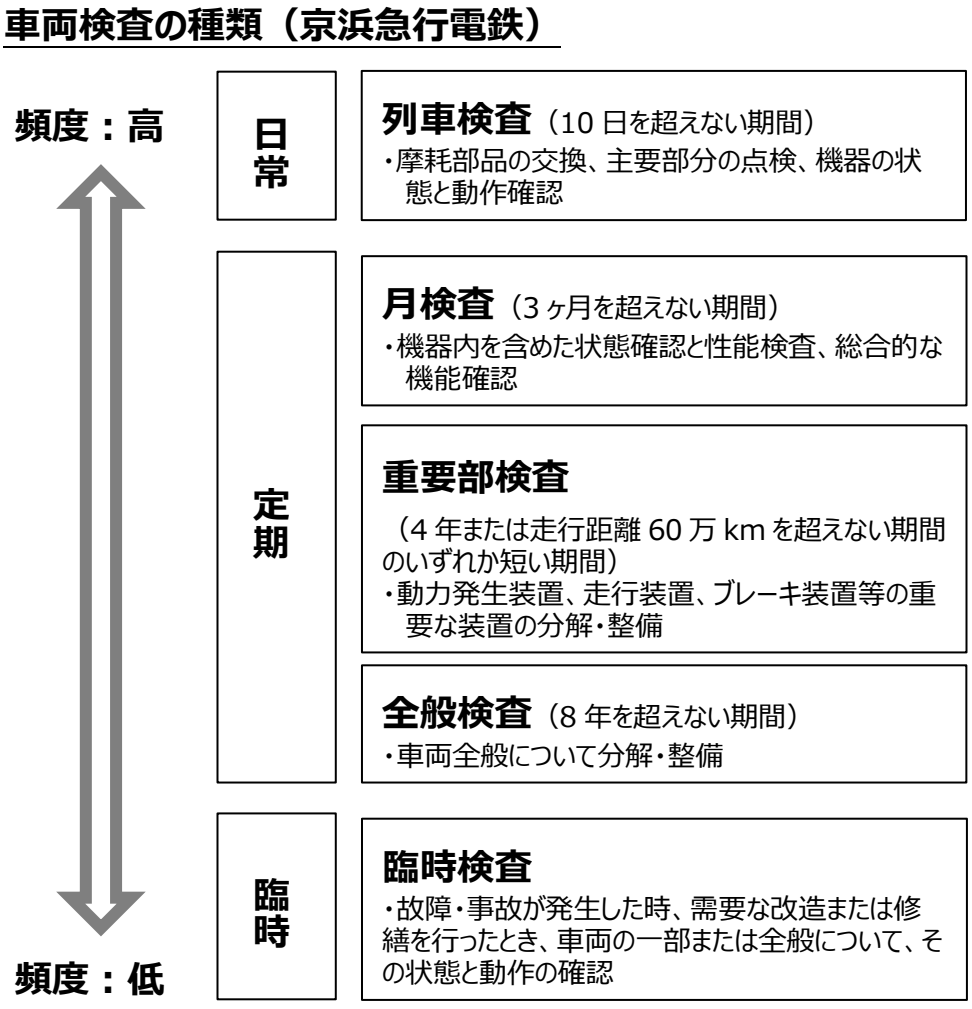


図 2.3.1-1　車両検査の種類（京浜急行電鉄）

また、車両の日常検査である「列車検査」では、異常の有無を 1 編成あたり 5 人体制で「近接目視」によって検査している。車両の異常は事故や輸送障害に直結するため、鉄道事業者は検査周期をできるだけ短くて異常を早期に発見したいものの、現在の保守管理体制では 6 日に 1 度の頻度での検査が限界であるが、この場合、最大で 5 日間、状態が把握できない可能性があることが明らかとなった。

列車検査

☞実施頻度：6 日に 1 度
- 京浜急行電鉄保有の約 800 両の列車を、3 つの検車区（久里浜検車区、新町検車区、金沢検車区）にてローテーションで検査

☞点検方法：近接目視
- 床下、車体、台車（車輪、車軸、モーター）、屋根上、客室の装置外観を目視により確認（≒異常がないことを確認）

☞点検時間：1 編成あたり概ね 30 分
- 編成ごとに 5 人体制で点検

図 2.3.1-2　近接目視による車両検査

出所）京成ファインテック HP

（2）課題認識

疲労き裂等の異常を早期に発見して安全を確保するためには列車検査の間隔を短くする必要があるが、京浜急行電鉄の現在の車両保守体制では列車検査を 6 日に 1 度の頻度で行うことが限界である。そのため、現在の列車検査では状態を把握できないまま数日間は列車が運行し、輸送障害や運転事故につながる可能性がある。

これまでの安全対策によって、近年、運転事故件数は減少しているものの、少子高齢化に伴う熟練技術者をはじめとした保守担当職員の将来的な減少など鉄道の安全輸送を取り巻く環境は年々厳しくなっていることから、ローカル 5G を含む新技術を活用した、「状態監視」による効率化・高度化が期待されている。

列車検査における現状と課題（現場の課題）

【現状】

・列車の運行中に重要な装置の故障が発見されると、重大事故につながりかねない

※2017 年 12 月新幹線のぞみ台車き裂など

・日常検査といえども、6 日に 1 度の頻度であるため、異常が最大 5 日間把握できない可能性がある

【課題】

・「状態監視」等の視点を含めた日常検査の効率化・高度化が求められる

図 2.3.1-3　許容できない疲労き裂（「のぞみ」のトラブル）

出所）東洋経済オンライン（https://toyokeizai.net/articles/-/211007）

［疲労き裂による重大インシデント例］

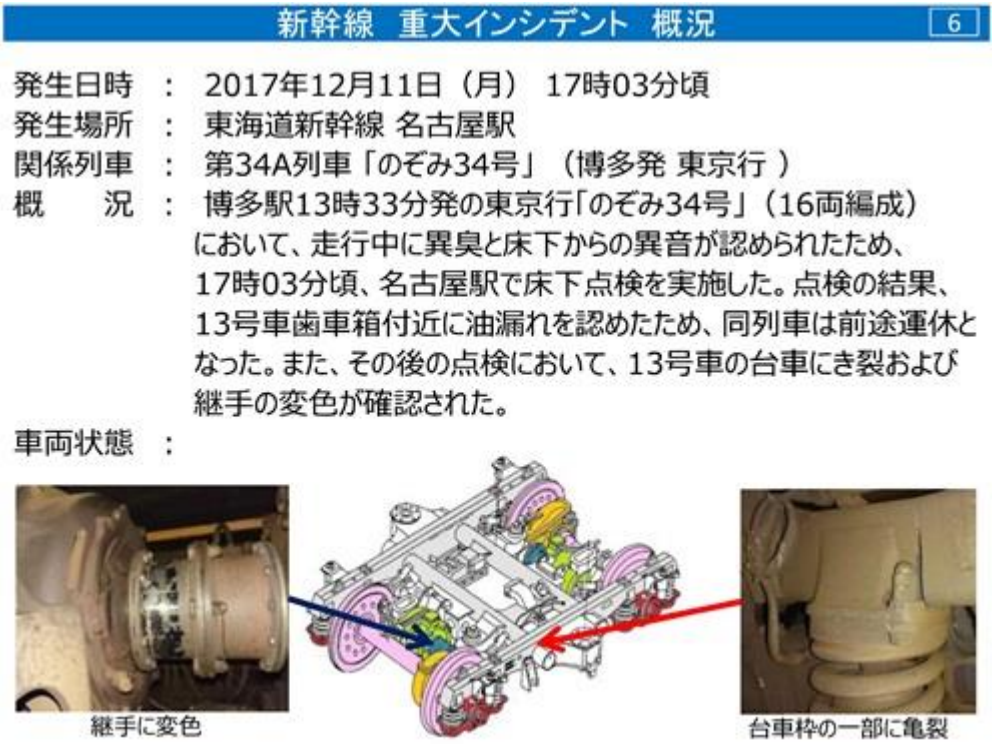


図 2.3.1-4　疲労き裂による重大インシデント例

出所）鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会、「鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会とりまとめ」（平成 30 年 7 月 27 日）（https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr7_000023.html）

2.3.1.2 線路巡視業務

（1）現状把握

京浜急行電鉄に、実際の巡視状況についてヒアリングを実施した結果を以下に示す。

列車運行の安全を確保するため、線路巡視は複数の人によって行うことが基本であり、体制の確保が課題となっている。特に、災害等の異常時には多くの人員による体制の確保が必要となっており、「徒歩での巡視」を行っていることが明らかとなった。

線路巡視の種類（京浜急行電鉄）

【日常時】あらかじめスケジュールされた日常時の巡視

乗車巡視（週 1 回）

・通常運転と同様の条件で、異常な列車動揺の有無、きしみ音の有無、線路周辺の環境変化で巡視

徒歩巡視（2 週間に 1 回）

・2 人 1 組で線路上を歩いて、軌道変位、レール（損傷、摩耗、腐食、傷）、各種装置の状態、線路周辺の環境変化などを巡視

超音波探傷（3 ヶ月に 1 回）

・検測車（超音波レール探傷車）による軌道変位検査や非破壊検査でレールの欠陥を検知

【緊急時】異常時の緊急出動・警戒による巡視

状況確認＋緊急時対応

・異常発見の際に出動・悪天候等の際に警戒実施し、周辺設備の状況確認、必要に応じて応急復旧

図 2.3.1-5　線路巡視の種類（京浜急行電鉄）

京浜急行電鉄の緊急時の出動・警戒状況

出動回数（全線）

・異常発見による出動：100 件程度/年
・悪天候等による警戒：20 件程度/年

出動・警戒時の対応

①2～4 名程度で出動し、周辺設備の状況確認
②確認のみで終わるものは現地時間で数十分程度
③応急復旧が必要なものは、8 名程度の応援を呼んだ上で数時間かかる事例が多い
④警戒時は、運行再開前に全線徒歩巡視を実施

（2）課題認識

列車運行の安全を確保するため、線路巡視は複数の人によって行うことが基本であり、体制の確保が課題となっている。

これまでの安全対策によって、近年、運転事故件数は減少しているものの、輸送障害は増加しており、さらなる安全の向上が求められている。一方、少子高齢化に伴う熟練技術者をはじめとした保守担当職員の将来的な減少や鉄道施設の老朽化など鉄道の安全輸送を取り巻く環境は年々厳しくなっており、体制の確保が課題となっている。

特に、災害等の異常時には、被災による損傷や運行の支障となる異物の有無をはじめとした現場の状況を確認してからでないと運行が再開できないことから、多くの人員による体制の確保が必要である。

このため、現地の映像を早期に確認できるよう、ローカル 5G を含む新技術を活用した、安全確認の効率化・高度化が期待されている。

保線業務における現状と課題（現場の課題）

【現状】

・警戒実施時には体制を構築しているものの、運行再開前の徒歩巡視には多くの人員が必要である

【課題】

・警戒明けの運行再開時の線路巡視の効率化の観点から、リアルタイムで線路の周辺状況が把握できる仕組みが求められる

2.3.2 鉄道インフラ分野における課題解決システムの構築

（1）列車検査の課題解決システムに求められる要件

前述のとおり、現在の列車検査では状態を把握できないまま数日間は列車が運行し、輸送障害や運転事故につながる可能性がある。仮に、4k カメラによる高画質画像と人工知能（AI）による異常検知を組み合わせによって異常を早期に発見できれば、列車検査の合間に異常が発生しても直ちに異常を検知することにより運行の安全を格段に向上させることができる。また、4k カメラ高画質画像を撮影し、ローカル 5G 等にて送信した画像から AI にて異常の早期検知が可能となれば、目視による列車検査の効率化や見逃し防止等への効果も期待できる。

課題	列車検査の間隔を埋める“日常検査の高頻度化スキーム”が必要（新たに人を増やすことはできない）
解決策	5G 技術を活用した、4k カメラ画像の AI 解析による日常定点観測＋異常検知システムの導入
導入効果	① 効率性の観点 ・リアルタイムで人の目や判断を補う機能（常時観測＋異常のアラート）に

	より、**人員の増強なしに検査の高頻度化が実現**（通常のオペレーションの省人化にも寄与する可能性） ② 安全性の観点 ・目視検査は欠かせないものの、日常定点観測・異常検知（≒危険予知）による**安全性の向上（早期発見・早期復旧に貢献）** ・目視検査とのクロスチェックによる**検査精度の向上**

（2）線路巡視の課題解決システムに求められる要件

前述のとおり、災害等の発生後に、現地に投入できる人数には限界がある。また、軌道の安全は徒歩による目視によって確認するため、土砂流出等によって人が立ち入れない場合は確認範囲が限られる。仮に、ドローンにて 4k カメラ高画質画像を撮影し、ローカル 5G 等にて送信した画像から AI にて軌道周辺の異の早期検知が可能となれば、災害発生後等の安全確認に要する時間を短縮し、短時間で列車運行を再開できる可能性がある。また、ローカル 5G 等を用いた遠隔からの安全確認によって、現場での二次災害の抑制効果も期待できる。

課題	警戒明けの運行再開時の線路巡視の効率化の観点から、リアルタイムで線路の周辺状況が把握できる仕組みが求められる
解決策	5G 技術を活用した、ドローン等に搭載した 4k カメラ画像の AI 解析による線路周辺状況把握＋異常検知システムの導入
導入効果	① 効率性の観点 ・リアルタイムで人の目や判断を補う機能（運行再開時の線路周辺状況把握＋異常のアラート）により、**将来の省人化に貢献**する ・遠隔観測により、運行再開時の確認作業および復旧作業などの**業務フローの効率化**により、早期復旧が実現し、顧客にとっての**サービス水準の維持**にもつながる ② 安全性の観点 ・無人のモニタリングにより、係員の安全確保が可能

2.3.3 地域課題の解消におけるローカル 5G の有用性

鉄道インフラに関する地域課題に導入する通信技術としての有用性・適用性を評価するため、下表において、ローカル 5G と Wi-Fi の比較を行った。

表 2.3.3-1　ローカル 5G と Wi-Fi の比較

	ローカル 5G	Wi-Fi（Wi-Fi6 を想定）	光ケーブル
有線/無線	無線	無線	有線
周波数帯	28GHz 帯、4.5GHz 帯	2.4GHz 帯、5GHz 帯	数 THz
免許の必要性	要	不要	不要
通信の安定性	高	低 （非免許帯のため 干渉・混信対策が困難）	高 （ただし、コードの曲げ等 による故障の可能性あり）
通信範囲における障害物の影響	直進性が高く 影響が低い	影響を受けやすい	影響なし
セキュリティ	承認制のため 強度が高い	公共回線のため ローカル 5G より低い	有線のため 強度が高い

鉄道インフラについては、安全性確保の観点から、情報管理について非常に高い機密性が求められることに加え、検査庫のように建屋等が複数存在する環境下で通信環境を構築することを想定した場合、コードを設置しなくとも通信が可能となる「5G 技術」が有用と考えられる。

また、公衆回線であるキャリア 5G の場合、アップリンクトラフィックとダウンリンクトラフィックの割り当てが固定されており、ダウンリンクの方に多くを割り当てられている。一方で、検知対象の拡大や高解像度カメラ等を使用することで、アップリンクトラフィックが増大することも懸念される。

このことから、アップリンクとダウンリンクの状況を踏まえた、将来の柔軟な運用を考慮すると、ローカル 5G が優位と考えられる。

3. 実証環境

実証で構築した課題解決システムの「ネットワーク構成」「システム性能・要件」「実証環境の運用」は以下のとおりである。

3.1 ネットワーク構成

京浜急行電鉄の久里浜工場に、キャリア 5G 基地局を使用し、クラウド基盤は NTT ドコモ社が提供するキャリア網内プラットフォームである「ドコモオープンイノベーションクラウド（以下、dOIC)」を使用するネットワークを構築した。

3.1.1 キャリア５G 基地局の構築

屋内での列車検査業務用として線路南側の検査庫内に 4.5GHz 帯キャリア 5G の基地局を１局（屋内局)、また、屋外での線路巡視業務用として線路北側の 18 番試走線沿いの信号柱に 4.5GHz 帯のキャリア 5G の実験局を 1 局（屋外局)、合計 2 局構築した。(図 3.1.1-1、図 3.1.1-2 参照)

3.1.1.1 屋内局の設置場所と運用方針

線路南側の「検査庫」内に設置し、建屋内部に 5G エリアを展開した。なお、アンカーバンドとなる LTE 電波のスループットが　高い場所を選定するとともに、車両が必ず横断する入出口付近を選定した。

3.1.1.2 屋外局の設置場所と運用方針

線路北側にある 18 番試走線の東側「信号柱」に設置し、当試走線上に 5G エリアを展開した。

図 3.1.1-1　京急久里浜工場内でのキャリア 5G 構築エリア

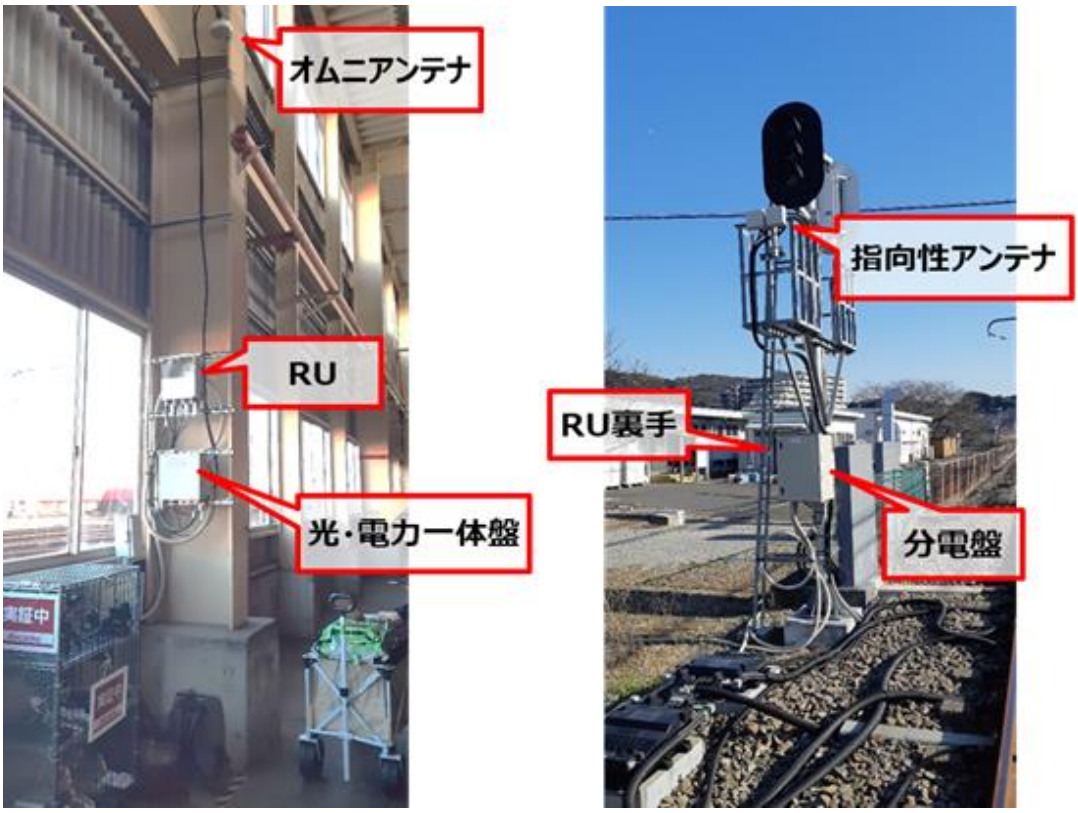


図 3.1.1-2　屋内及び屋外に設置したキャリア５Ｇ基地局

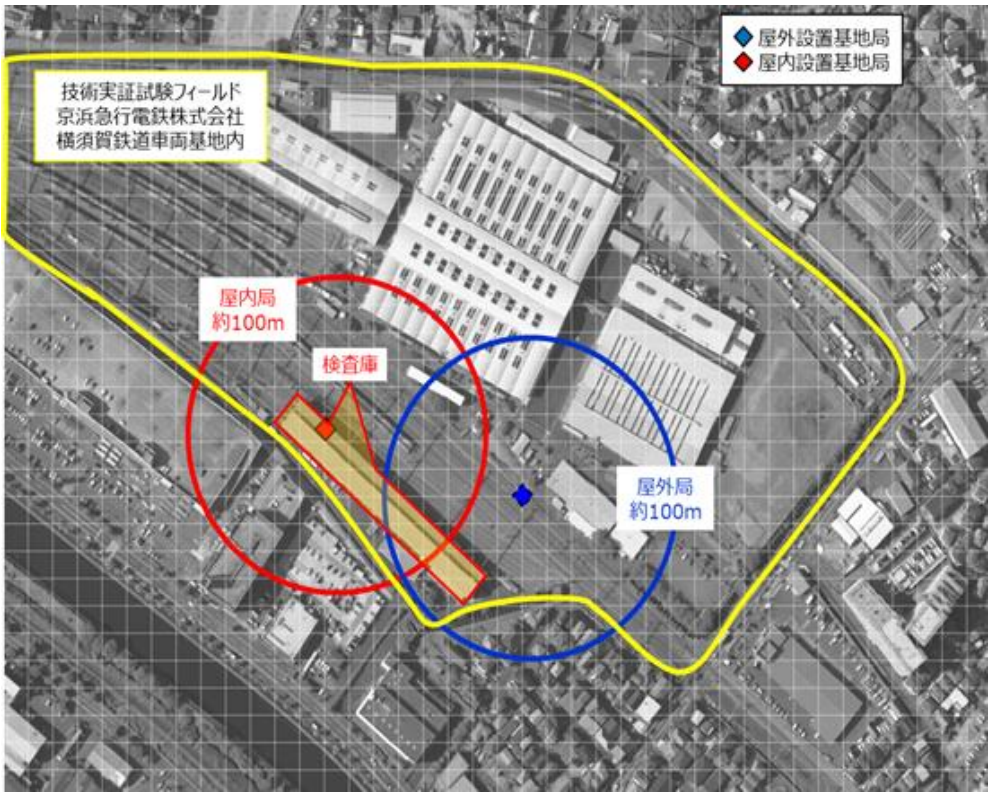


図 3.1.1-3　フィールド概要（京急久里浜工場内）差替え可能性あり

3.1.2 キャリア５Ｇの基地局との送受信用システムの構築

列車検査業務においては固定の高精細 4k カメラ及びサーマルカメラ、線路巡視業務においてはドローン搭載の高精細 4k カメラで撮影した映像をキャリア 5G 経由で dOIC に送信し、dOIC 上に構築された AI 解析基盤によって異常箇所（列車検査業務においては主に列車の台車異常、線路巡視業務においては線路周辺状況の異常）を解析し、その解析結果を遠隔監視拠点に設置される PC 端末等にキャリア 5G 経由で送信して表示させるシステムを構築した。（図 3.1.2-1）

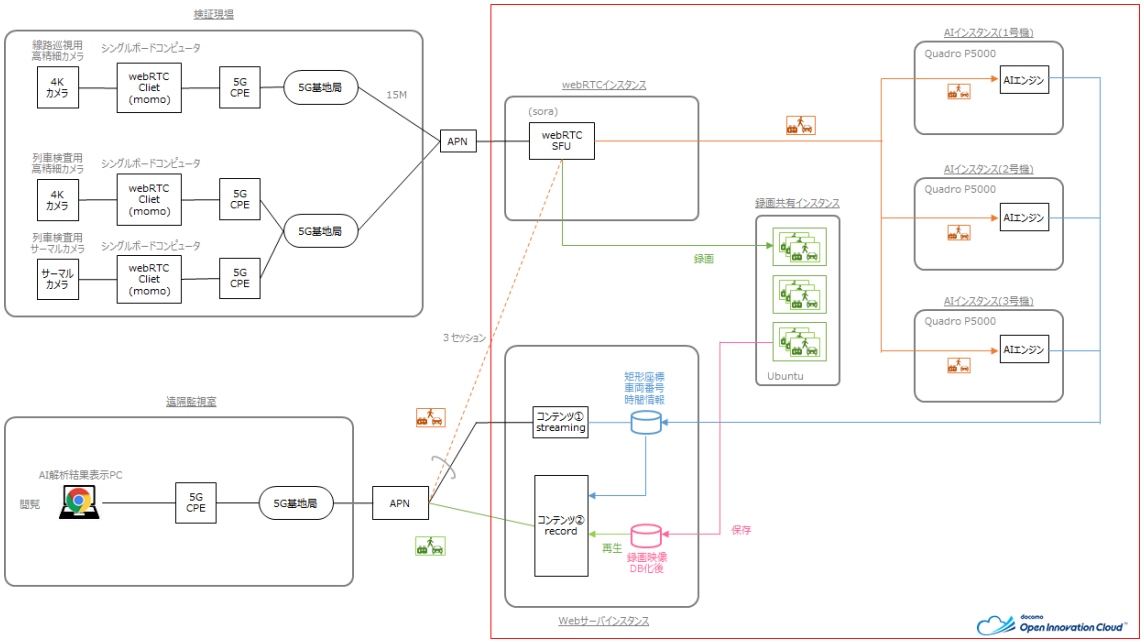


図 3.1.2-1　システム構成図

3.1.2.1 5G 端末

5G 4.5GHz が利用可能な 5G ルータを京急久里浜工場の屋内、屋外に合計 7 台設置した。7 台の内訳は以下のとおりである。

・列車検査 4k 映像アップロード用：1 台
・列車検査サーマル映像アップロード用：1 台
・線路巡視 4k 映像アップロード用：1 台
・AI 解析結果表示ダウンロード PC 等用：4 台（列車検査用：2 台、線路巡視用：2 台）

表 3.1.2-1　スペック・概要（5G 端末）

カテゴリー	スペック
メーカー	SHARP
型式	SH-52A
通信	5G：受信時最大4.2Gbps／送信時最大480Mbps
	4G：受信時最大1.7Gbps／送信時最大131.3Mbps
サイズ	高さ 約 84mm×幅 約 157mm×厚さ 約 16mm
重量	約 268g
無線LAN規格／最大伝送速度（規格値）※3	IEEE802.11a／54Mbps
	IEEE802.11b／11Mbps
	IEEE802.11g／54Mbps
	IEEE802.11n（Wi-Fi 4）／300Mbps
	IEEE802.11ac（Wi-Fi 5）／867Mbps
	IEEE802.11ax（Wi-Fi 6）／1201Mbps
	2.4GHz帯／5GHz帯対応
有線LAN	IEEE802.3bz（2.5GBASE-T）
	IEEE802.3ab（1000BASE-T）
	IEEE802.3u（100BASE-TX）
同時接続台数	18台（Wi-Fi：16台／有線LAN：1台／USB：1台）
かんたん接続機能	WPS、QRコード接続※4
バッテリー容量	4000mAh
本体付属品	USBケーブル A to C（試供品）
連続通信時間（5G／PREMIUM 4G／LTE）※5	約 290分／約 280分／約 400分
LTE連続待受時間（静止時［自動］）※5	約 200時間
WORLD WING	LTE／3G
USBテザリング	対応

3.1.2.2 クラウド基盤

クラウド基盤として、dOIC を利用し、5G 端末からキャリア網内設備に直接接続を行うことにした。

3.1.2.3 映像受配信システム

dOIC 上に以下の機能を持つ映像受配信システムを構築した。

・作業現場においてカメラで撮影された列車検査用映像、線路巡視用映像をシングルボードコンピュータから受信し、AI 解析システムへ送信することが可能。

・作業現場においてカメラで撮影された列車検査用映像、線路巡視用映像を遠隔監視拠点の PC 等からの要求に対して映像配信することが可能。

・振り返り確認のため、列車検査映像及び線路巡視映像のを録画や蓄積が可能。

また、映像撮影用カメラ、映像送受信用シングルコンピュータ、AI 解析結果表示用 PC 等を用意した。

（1）シングルボードコンピュータ

カメラ映像を dOIC 上の映像受配信システムに送信する機能を持つシングルボードコンピュータを京急久里浜工場の屋内、屋外に合計 3 台設置した。3 台の内訳は以下のとおりである。

・列車検査 4k 映像アップロード用：1 台

・列車検査サーマル映像アップロード用：1 台

・線路巡視 4k 映像アップロード用：1 台

表 3.1.2-2　スペック・概要（シングルボードコンピュータ）

カテゴリー	スペック
メーカー	NVIDIA
型式	Jetson Xavier NX 開発者キット
GPU	384 コア NVIDIA Volta™ GPU と 48 基の Tensor コア
CPU	6 コア NVIDIA Carmel ARM®v8.2 64 ビット CPU
メモリー	8 GB 128 ビット LPDDR4x
ビデオエンコード	2x 4Kp30 | 6x 1080p 60 | 14x 1080p30 (H.265/H.264)
ビデオデコード	2x 4Kp60 | 4x 4Kp30 | 12x 1080p60 | 32x 1080p30 (H.265) | 2x 4Kp30 | 6x 1080p60 |16x 1080p30 (H.264)
PCIe	1 x1 (PCIe Gen3) + 1 x4 (PCIe Gen4)、
ディスプレイ	2 マルチモード DP 1.4/eDP 1.4/HDMI 2.0
USB	4x USB 3.1、USB 2.0 Micro-B
ネットワーキング	10/100/1000 BASE-T イーサネット
サイズ	69.6 mm x 45 mm

（2）**列車検査用高精細 4k カメラ**

列車検査映像撮影用高精細 4k カメラ 1 台を京急久里浜工場の屋内に設置した。

表 3.1.2-3　スペック・概要（列車検査用高精細 4k カメラ）

カテゴリー		スペック
メーカー		SONY
型式		ZV-1
レンズ		
レンズタイプ		ZEISSバリオ・ゾナーT*レンズ(レンズ構成：9群10枚(AAレンズを3枚含む非球面レンズ9枚))
F値(開放)		F1.8(ワイド端時) -2.8(テレ端時)
虹彩絞り		7枚
NDフィルター		オート/入(3段分)/切
焦点距離		f=9.4-25.7mm
画角(35mm判相当)(静止画) *1		84° -34° (24-70mm*2)
撮影距離(レンズ先端から)		AF約5cm-∞(ワイド端時)、約30cm-∞(テレ端時)
光学ズーム	光学ズーム	2.7倍(動画記録中光学ズーム対応)
全画素超解像 ズーム *3	静止画時	20Mサイズ 約5.8倍/ 10Mサイズ 約8.2倍 / 5.0Mサイズ 約11倍 / VGAサイズ 約44倍
	動画時	約4.35倍 (4K)、約5.8倍 (HD)
デジタルズーム *3	静止画時	20Mサイズ 約11倍/ 10Mサイズ 約16倍 / 5.0Mサイズ 約23倍 / VGAサイズ 約44倍
	動画時	デジタルズーム 約11倍
明るさ調節機能		マニュアル(5段階) / 屋外晴天
角度調節機能		オープン角：約176度、チルト角：約270度
カメラ		
手ブレ補正機能		光学式
動画時光学式手ブレ補正(アクティブモード対応)		●(光学+電子併用、回転方向対応)
フォーカスモード		オートフォーカス（AF-S）、オートフォーカス（AF-A）、オートフォーカス（AF-C）、ダイレクトマニュアルフォーカス、マニュアルフォーカス
フォーカスエリア		ワイド（315点（位相差検出方式）/425点（コントラスト検出方式））、ゾーン、中央、フレキシブルスポット(S/M/L)、拡張フレキシブルスポット、トラッキング(ワイド/ゾーン/中央/フレキシブルスポット(S/M/L)/拡張フレキシブルスポット)
被写体追尾		●（トラッキング）
測光モード		マルチパターン、中央重点、スポット(標準/大)、画面全体平均、ハイライト重点
露出補正		±3.0EV、1/3EVステップ
露出制御		●
ISO感度（動画）		Auto：(ISO125相当-ISO12800相当、上限/下限設定可能)、
最低被写体照度（動画）		Auto：1.2lux（シャッタースピード 1/30秒）
ホワイトバランス設定		オートホワイトバランス、太陽光、日陰、曇天、電球、蛍光灯(温白色)、蛍光灯(白色)、蛍光灯(昼白色)、蛍光灯(昼光色)、フラッシュ、水中オート、色温度&カラーフィルター、カスタムWB
ホワイトバランス微調整		G7-M7(全57段階)、A7-B7(全29段階)
シャッタースピード（メカ）		おまかせオート（4-1/2000秒）/ プログラムオート（30-1/2000秒）/ マニュアル露出(バルブ、30-1/2000秒)/ 絞り優先(30-1/2000秒)/シャッタースピード優先(30-1/2000秒)
シャッタースピード（電子）		おまかせオート（4-1/32000秒）/ プログラムオート（30-1/32000秒）/ マニュアル露出(30-1/32000秒)/ 絞り優先(30-1/32000秒)/シャッタースピード優先(30-1/32000秒)
ノイズリダクション		長秒時ノイズリダクション（入/切）、シャッタースピード1/3秒からバルブに適用、高感度ノイズリダクション（標準/弱/切）、マルチショットノイズリダクション（オート/ISO200-25600）
ダイナミックレンジ機能		切、Dレンジオプティマイザー（オート/レベル設定（Lv1-5））、オートHDR（露出差オート/露出差レベル設定（1.0-6.0EVの間で1.0EVごと6段階））
ピクチャープロファイル		切/PP1-PP10（ブラックレベル、ガンマ(Movie, Still, Cine1-2, ITU709, ITU709 [800%], S-Log2, S-Log3, HLG, HLG1, HLG2, HLG3)、ブラックガンマ、ニー、カラーモード、彩度、色相、色の深さ、ディテール、コピー、リセット）
動画撮影モード		AVCHD: 24M FX(1,920x1,080/60i) / 17M FH(1,920x1,080/60i)、XAVC S 4K: 30p 100M(3,840x2,160/30p) / 30p 60M(3,840x2,160/30p) / 24p 100M(3,840x2,160/24p) / 24p 60M(3,840x2,160/24p)、XAVC S HD:60p 50M(1,920x1,080/60p) / 60p 25M(1,920x1,080/60p) / 30p 50M(1,920x1,080/30p) / 30p 16M(1,920x1,080/30p)/ 24p 50M(1,920x1,080/24p) / 120p 100M(1,920x1,080/120p) / 120p 60M(1,920x1,080/120p)
HFR(ハイフレームレート)		<記録>XAVC S HD:60p 50M(1,920x1,080/240fps)、60p 50M(1,920x1,080/480fps)、60p 50M(1,920x1,080/960fps)/30p 50M(1,920x1,080/240fps)、30p 50M(1,920x1,080/480fps)、30p 50M(1,920x1,080/960fps)/24p 50M(1,920x1,080/240fps)、24p 50M(1,920x1,080/480fps)、24p 50M(1,920x1,080/960fps)
		<センサー読み出し有効画素数>画質優先:240fps(1,824x1,026),480fps(1,824x616),960fps(1,244x420)/撮影時間優先:240fps(1,824x616),480fps(1,292x436),960fps(912x308)
インターフェース		
入出力端子		マルチ/マイクロUSB端子 *14、Hi-Speed USB（USB2.0対応）、HDMIマイクロ端子、マイク端子（3.5mmステレオミニジャック）、マルチインターフェースシュー
電源		DC3.6V（同梱バッテリー）
4K出力		●
電子水準器		●（水平垂直の傾きに対応）
外形寸法(幅×高さ×奥行、CIPA準拠)		約105.5x60.0x43.5 mm
質量(CIPA準拠)		約294g(バッテリーNP-BX1、"メモリーカード"を含む)/約267g(本体のみ)

（3）**列車検査用サーマルカメラ**

列車検査サーマル映像撮影用サーマルカメラ 1 台を京急久里浜工場の屋内に設置した。

表 3.1.2-4　スペック・概要（列車検査用サーマルカメラ）

カテゴリー	スペック
メーカー	FLIR
型式	E53
イメージングとレンズ	
F値	f/1.3
MSX	フル解像度赤外線画像でビジュアル詳細を浮き彫りにする
カラーパレット	アイアン、グレー、レインボー、アークティック、ラバ、レインボー HC
スペクトル範囲	7.5～ 14.0 µm
デジタルカメラ	5 MP、53° × 41° FOV
デジタルズーム	1-4x 連続
ピクチャー・イン・ピクチャー	ビジュアルイメージにサーマル測定ツール(ボックス)を集中
画像モード	サーマル、ビジュアル、スーパーファインコントラスト(スーパーファインコントラスト(MSX®) 、Picture-in-Picture
画像周波数	30 Hz
視野角[FOV]	24° × 18°
焦点	マニュアル
赤外線・可視動画録画(温度情報なし)	H.264からメモリカードへ
赤外線解像度	240 × 180 (43,200 ピクセルs)
赤外線動画保存(温度情報なし)	H.264 or MPEG-4 over Wi-Fi; MJPEG over UVC or Wi-Fi
赤外線動画保存(温度情報付き)	有り、UVCまたはWi-Fiにより
赤外線動画録画(温度情報付き)	実時間放射記録(.csq)
測定解析	
Accuracy [Drift] in Screen-EST Mode	Accuracy (drift): ±0.3° C (±0.5° F)
スポットメーター	ライブモードで3
温度分解能	30℃で<0.04℃、24° レンズ
計測プリセット	測定なし、センタースポット、ホットスポット、コールドスポット、3スポット、ホットスポットースポット
精度	周囲温度15℃～35℃では±2℃、対象温度が0℃を超える場合は±2%
対象物温度範囲	-20℃～120℃ 0℃～650℃
接続と通信	
ビデオ出力	USB Type-C経由表示ポート
通信インターフェース	USB 2.0、Bluetooth、Wi-Fi、表示Port
その他	
寸法[L×W×H]	278.4 × 116.1 × 113.1 mm
重量[レンズ含む]	1 kg

（4）線路巡視用高精細カメラ

線路巡視映像撮影用高精細 4k カメラ（列車検査用と同じ）を 1 台ドローンに搭載した。

（5）HDMI 変換器

UVC 対応の HDMI 変換器をカメラとシングルボードコンピュータの間に設置した。

表 3.1.2-5　スペック・概要（HDMI 変換機）

カテゴリー	スペック
メーカー	INOGENI(カナダ)
型式	4K2USB3
概要	HDMI to USB 3.0
ビデオ入力	HDMI 1.4
	4K2USB3: 最大 4K30
	HD2USB3 : 最大 1080p60
入力カラースペース	RGB、YCbCr、4:4:4、4:2:2
出力コネクタ	USB 3.0(Type-B)
出力カラースペース	YCbCr(YUY2) - 4:2:2 8 ビット
	NV12/I420/YV12 - 4:2:0 12 ビット
ビデオ処理	スケーリング・カラースペース変換・フレームレート変換(ハードウエア処理)
対応ソフトウェア口	UVC 対応, DirectShow , AV Foundation , V4L2 準拠のソフトウェアに対応
寸法	8.1cm x 7.4cm x 1.9cm
重量	120g

（6）線路巡視用アクセスポイント

線路巡視用ドローンーコントローラ間 Wi-Fi 通信用に、ドローン側に Wi-Fi 子機、コントローラ側にアクセスポイントを設置した。

表 3.1.2-6　スペック・概要（線路巡視用アクセスポイント）

カテゴリー	スペック
メーカー	CommScope
型式	T610s
Wi-Fi 規格	802.11 a/b/g/n/ac
対応バンド	2.4 GHz / 5 GHz
MIMO:空間ストリーム数	SU-MIMO / 4×4:4,
	MU-MIMO / 4×4:3
最大 PHY レート	600 / 1733 Mbps
ポート	PoE In:1×10/100/1000 Mbps,
	PoE Out:1×10/100/1000 Mbps,
	USB2.0
電源/802.3 af (PoE) 対応	×/○(802.3atで完全動作)
アンテナパターン / band	16
アンテナ利得	6 dBi(2.4GHz) / 8dBi(5Ghz)
BeamFlex利得	6dB
干渉除去	15dB
Polarization	Dual
同時接続ユーザー数	512
SSID/WLAN ※1	15(2.4GHz), 16(5GHz)

（7）映像受配信用サーバ

以下の、各システムから構成される映像受配信用サーバを構築した。

1）カメラ映像受配信システム

機能：列車検査用カメラ、線路巡視用カメラから受信した映像を AI 解析システムと録画共有システムへ配信する。

数量：1

2）録画共有システム

機能：振り返り確認のため、線路・列車配信映像を録画・蓄積する。

数量：1

3）AI 解析結果配信システム

機能：列車検査映像及び線路巡視映像の AI 解析、検知結果の蓄積・配信、振り返り録画映像の配信を行う。

数量：1

（8）AI 解析結果表示用 PC

遠隔監視拠点に設置する AI 解析結果表示用 PC を 2 台用意した。

表 3.1.2-7　スペック・概要（AI 解析結果表示用 PC）

カテゴリー	スペック
メーカー	DELL
型式	ALIENWARE m15 R3 プレミアム
CPU:	第10世代 インテルREG Core i7-10875H (16MB キャッシュ, 最大 5.1 GHzまで可能, 8 コア)
OS:	Windows 10 Pro (64ビット) 日本語
メモリー:	32GB(16GB×2)DDR4 2,666MHz(オンボード)
ハードディスク:	512GB PCIe M.2 SSD
ビデオ カード:	NVIDIAREG GeForceREG RTX 2070 SUPER 8GB GDDR6
ディスプレイ:	15.6インチ 4K有機EL (3840 x 2160) 60Hz 1ms 400-nits DCI-P3 色域 + Tobii Eyetracking テクノロジー(ライト)
ワイヤレス:	Killer Wi-Fi 6 AX1650 (2x2) 802.11ax ワイヤレス と Bluetooth 5.1
プライマリバッテリ:	86Wh バッテリー(6セル)
電源 ユニット:	240W パワーアダプター
プロセッサー ブランディング:	インテルREG Core i7 プロセッサー ラベル
ネットワークカード:	Killer E3000 10/100/1000Mbps/2.5Gbpsイーサネット

3.1.3 AI 解析基盤

列車両監視および線路巡視に用いる dOIC 上の AI エンジンを図 3.1.3-1 に示す。4k30fps のストリーミング映像を解析するにあたり、dOIC 上の複数のインスタンス上のリソースを同時に利用する構成で構築し、これにより理論上の想定値として 4k 映像を 20fps で解析可能となった。

このとき、データとしては WebRTC Client からデータを受け取る際に、ストリーミング映像をフレームごとに分解し、解析後に解析結果をフレームごとに整列したタイムスタンプとともに座標情報として出力する構成とした。これにより、dOIC 内でのデータ伝送容量の効率化（リソース最適化）を実現した。

AI エンジンの解析については、Front API での前処理と、Back API での後処理を行った。

前処理について、車両監視 AI は台車やその他の物体検知を行った上でバウンディングボックスの座標情報を含む画像情報を Back API に出力した。一方で、線路巡視 AI は線路の

軌道を認識し、軌道外（検出対象外）のピクセルを無視した画像情報を Back API 向けに出力した。

後処理について、車両監視 AI は前処理で検知した解析対象（台車やその他対象物）に対して、さらなる精細な特徴量の解析を行った。このとき、車両監視 AI での Back API 処理時間は、映像情報の時刻整列のため一律 0.42 秒と設定した。また、線路巡視 AI は前処理で検知した解析対象（線路のレール軌道内）に対して、過去に学習した正しい線路状態を元にさらなる異常検知の解析を行った。このとき、車両監視 AI での Back API 処理時間は、映像情報の時刻整列のため一律 0.80 秒と設定した。

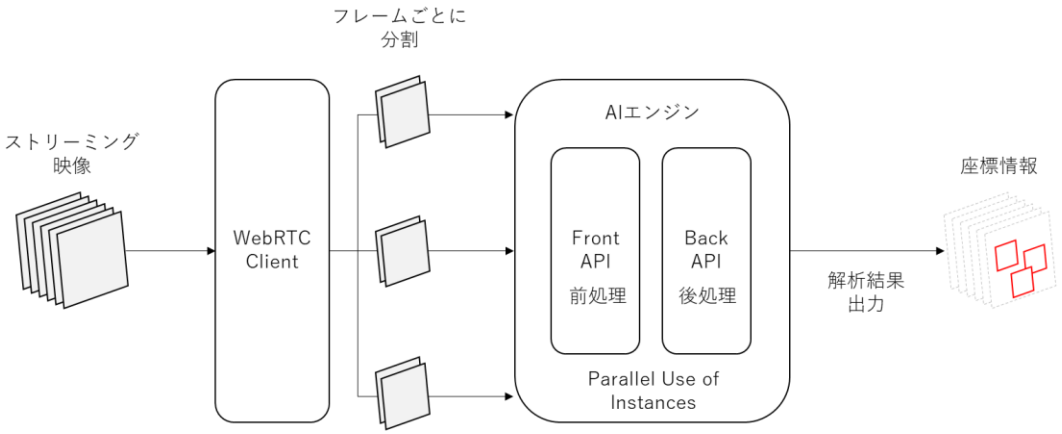


図 3.1.3-1　dOIC 上の AI エンジン

3.2 システム機能・性能・要件

以下に、本システムの機能・説明・要件を記載する。

3.2.1 キャリア５G 基地局

・キャリア 5G を利用可能なこと、かつローカル 5G 周波数帯域での干渉検討を行うため、同システムの　隣接　周波数帯域が使用可能であること。（4.5GHz を利用）

・実証にあたり、列車検査用の屋内局については、周囲に適切なエリア（φ10m 以上）を構築し、そのエリア内において、本課題解決システムを円滑に利用するための、上り方向の最低スループット 30Mbps 以上を安定して提供できること。（変調方式：256QAM、アクセス方式：OFDMA、複信方式：TDD）

・実証にあたり、線路巡視用の屋外局については、周囲に適切なエリア（縦：80m、幅 3m 以上）を構築し、そのエリア内において　、本課題解決システムを円滑に利用するための、上り方向の最低スループット 30Mbps 以上を安定して提供できること。（変調方式：256QAM、アクセス方式：OFDMA、複信方式：TDD）

※なお、将来的には複数の系を同時に運用することも想定されるため、より大きな上りスループットが必要となる可能性がある。

3.2.2 キャリア５Ｇの基地局との送受信用システム

3.2.2.1 ５Ｇ端末

・5G を利用して、シングルボードコンピュータからのデータを dOIC 上の AI 解析基盤にアップロード通信が可能であること。また、シングルボードコンピュータとは LAN または USB で接続可能であること。
・AI 解析結果を遠隔監視拠点の PC 等へ広帯域なダウンロード通信が可能であること。
・AI 解析結果表示用 PC 等とは LAN、USB、Wi-Fi で接続可能であること。

3.2.2.2 クラウド基盤

・クラウド基盤上で映像受配信システムやAI解析システム等を柔軟に構成可能。実証利用に必要なリソース（CPU、MEM、DISK、GPU）が準備可能であること。
・特に AI 解析には GPU リソースを利用するため、AI システムが利用可能な GPU を多数準備可能であること。

3.2.2.3 映像受配信システム

（1）シングルボードコンピュータ

・列車検査用高精細4kカメラ、サーマルカメラで撮影された映像をリアルタイムでHDMIまたはUSB経由で受信し、適切な映像フォーマットへリアルタイムに近しい高速度でのコーデック変換可能な GPU を実装していること。
・AI 解析基盤へ映像配信するアプリケーションを実装可能であること。

（2）列車検査用高精細 4k カメラ

・車両の状態を AI 解析するための元データとして、高精細映像(4k:3840*2160)が 30 フレームで撮影可能であること。
・HDMI または USB でリアルタイム出力が可能であること。
・同一車体部を高精細 4k カメラ映像とサーマルカメラ映像で撮影した映像から AI 映像解析を同時実施することにより、台車のき裂等の検出、車軸の不良等よる温度上昇の検出の両面から異常検出が可能であること。

（3）列車検査用サーマルカメラ

・車軸の不良による温度上昇を取得するためのデータ（物体の温度を色別表示）として、解像度 QVGA(320＊240)～VGA(640＊480)が 10～30 フレームで取得可能であること。
・HDMI または USB でリアルタイム出力が可能。

・同一車体部を高精細 4k カメラ映像とサーマルカメラ映像で撮影した映像から AI 映像解析を同時実施することにより、台車のき裂等の検出、車軸の不良等よる温度上昇の検出の両面から異常検出が可能であること。

（4）線路巡視用高精細 4k カメラ

・線路の状態を AI 解析するための元データとして、高精細映像(4k:3840*2160)が 30 フレームで撮影可能であること。
・HDMI または USB でリアルタイム出力が可能であること。

（5）映像受配信サーバ

・作業現場のカメラで撮影されたリアルタイム映像および録画映像を、想定する映像コーデックで 4k・30 フレームで集配信することが可能であること。
・リアルタイム映像に、リアルタイム映像から AI 解析した結果の検出異常位置情報・時間情報等を示すバウンディングボックスのデータを配信が可能であること。またデータベースへ同情報を格納可能であること。
・録画映像については、リアルタイム映像解析の結果として異常位置情報・時間情報等データとしてデータベースへ格納した情報を利用し、同一録画映像と併せてバウンディングボックスのデータを配信が可能であること。

（6）AI 解析結果表示 PC 等

・クラウド基盤上の映像配信サーバに接続して、配信要求し、解析結果を表示可能な UI（ブラウザ）を具備していること。
・リアルタイム映像については、リアルタイム配信映像と AI 解析した結果の異常位置を示すバウンディングボックス等を合成した映像を表示することが可能であること。
・録画映像については、AI 解析した結果の異常位置を示すバウンディングボックス等を合成した映像、合成前の保存録画映像を再生することが可能であること。
・配信された映像を 4k・30 フレームで再生することが可能であること。
・5G 端末（ルータ機材）とは LAN、USB、Wi-Fi で接続可能であること。

3.2.3 AI 解析基盤

3.2.3.1 列車検査用 AI 解析システム

・検査庫等に固定設置された 4k カメラで撮影した車両台車の状態の高精細映像を AI 解析して、台車のき裂等の異常をリアルタイム検出し、バウンディングボックスとして検出座標データ配信を行うことができること。
・サーマルカメラで撮影した車両台車のサーマル映像を AI 解析し、車軸の不良による温度上昇の異常を検出してバウンディングボックスとして検出座標データ配信を行うことができること。

・撮影・シングルボードコンピュータから配信される元映像から、AI 追加学習用データを生成し、追加学習を行うことができること。

3.2.3.2 線路巡視用 AI 解析システム

・ドローン搭載の 4k カメラで撮影した線路上の状態に関する高精細映像を AI 解析して、異物等の異常をリアルタイム検出し、バウンディングボックスとして検出座標データ配信を行うことができること。
・撮影・シングルボードコンピュータから配信される元映像から、AI 追加学習用データを生成し、追加学習を行うことができること。

3.2.4 システム全体の性能要件

3.2.4.1 通信スループット

・高精細 4k カメラ(4k:3840*2160)からの映像伝送は、コーデックを「H.264、VP8 または VP9」、30 フレーム（fps）と想定し、通信スループット 15～30Mbps とする。
・サーマルカメラからの映像伝送は、解像度 QVGA(320＊240)～VGA(640＊480)、10～30 フレーム（fps）と想定し、通信スループット 2.5～5Mbps とする。
・上記を踏まえ、屋内及び屋外の 5G 基地局の周囲で適切に構築したエリア内でアップリンクスループット 30Mbps の機能を発揮できるものとする。

3.2.4.2 End-to-End 通信遅延、AI 解析処理遅延

・本システムを設計する上で、撮影映像の伝送から遠隔監視拠点での AI 解析結果映像確認までの通信遅延を 2 秒以内とする。
・AI 解析処理遅延時間は上記遅延時間内の 1 秒以内とする。

3.3 実証環境の運用

実環境の運用として「高精細映像の AI 解析を使った課題解決システムの構築」、「システム運用の説明」、「運用体制」を策定し、実施した。

3.3.1 システム運用の説明

実証を開始する前に、実証フィールドである京浜急行電鉄の車両部門及び保線部門の責任者に対して、コンソ代表者である中央復建コンサルタンツ及び実証実施者である NTT ドコモから、本実証の概要、京浜急行電鉄の運行に支障を生じない実証実施のための安全担保策の説明をするとともに、実証の実施及び機材保守のための立ち入り作業許可及び実証実施後のアンケート協力等の依頼を行った。

3.3.2 運用体制

3.3.2.1 キャリ 5G 基地局

キャリア 5G 基地局に関しては、NTT ドコモが遠隔集中管理を行っており、異常が発生した場合は、即座に遠隔オペレーションセンタから一次切分けと復旧措置を実施する。それでも現地設備が復旧しない場合は、NTT ドコモの各県域拠点の保守人員が駆けつけ保守を実施する体制となっている。

3.3.2.2 課題解決システムの運用方針

今回の現地設備については、京急久里浜工場内の建屋内に設置しているため、ドコモは自由に現地保守に入ることができない。そのため、工場の稼働時間外の異常検知は一時的に NTT ドコモで受け、その後、翌日には現地保守に入ることができる体制を、コンソーシアム内で構築した。

4. 課題解決システムの実証

「課題解決システムの実証」に関しては、ローカル 5G 等無線通信システムを用いたリアルタイムでの遠隔からの列車検査、線路巡視等による効率的なインフラ維持管理を実現するための「課題解決システム」を構築し、それを使って実証し、結果の評価及び分析を行った。

4.1 前提条件

(1) 課題解決システムが具備すべき要件

課題解決システムが具備すべき要件は、下記の 3 つと考える。

１）一般性・汎用性

課題解決システムが、広く他事業者でも適用できる一般性、汎用性を有する（すなわち、高い横展開の可能性を有する)。ここには、危険を伴わずにシステムを運用できる「安全性」、システムが遅延なく使い心地よく運用できる UI の「利便性」、システムそのものの「持続可能性」を含むものとする。

２）拡張可能性

課題解決システムが、対象とする事業により変化させることができる、事業規模の変化に応じてシステムを拡張できるスケーラビリティを有する。

３）経済性

課題解決システムが、イニシャル・ランニングコストに見合う、財政面の効果（必要な人員、時間、経費など）をもたらすという経済性を有する。特に、土木インフラ等と比較して一定程度短期間でのコスト削減効果を求められる民間の鉄道経営の観点にも留意する。

(2) ヒアリングによる課題の抽出

鉄道インフラ分野の維持・管理における新技術の適用可能性を把握するため、鉄道事業者である京浜急行電鉄に対し、事前ヒアリングを実施した。事前ヒアリングでは、質問内容を予め京浜急行電鉄の車両保守担当に送付して回答を受領した上で、ウエブ会議システムによる対面にて質問と回答に対する内容をヒアリングした。

＜列車検査に関する主なヒアリング内容＞

１）検査について

［列車検査の対象］

- 車両の列車検査（日常点検）では鉄道車両のすべてを対象に検査している。
- 鉄道車両は客室の床下と屋根上に多くの機器が設置されているため、列車検査では床下と屋根上にある機器の異常の有無を特に注意して検査している。

［列車検査の方法］

・ 列車検査には、ブレーキパッド（制輪子）やパンタグラフの摺板等の摩耗部品は消耗の程度を、消耗部品以外は損傷や異常の有無を目視によって確認している。
・ 列車検査では、様々な部品の異常（疲労き裂、ボルトのゆるみ、割ピンの抜け、わりふのずれ等）を短時間で検査しなければならないため、現状では人による目視が最も効率的で確実である。

［列車検査の時間］
・ 列車検査は夜間ではなく日中に検査している。

［列車検査の頻度］
・ 列車検査は 6 日に 1 度の頻度で検査している。

［列車検査の数量］
・ 京浜急行電鉄では現在約 800 両の車両を保有している。
・ 久里浜工場ではこのうち約 1/3 の車両があり、1 日あたり 50 両弱を検査している。

［列車検査に要する時間］
・ 京浜急行電鉄の車両編成には 4 両、6 両、8 両があり、列車ごとに編成車両数が異なるが、1 編成の列車検査に要する時間は概ね 30 分である。

［異常の検知頻度］
・ 列車検査で異常を検知する頻度は決して高くない。特に、疲労き裂のような小さな異常を検知することはほとんどないが、安全確保のためにはできるだけ小さい段階で異常を検知したい。

2）清掃について

［清掃頻度］
・ 車両は概ね 3 日に 1 度の頻度にて清掃している。
・ 現時点では汚れの程度によって車体や客室の清掃頻度を変更することは検討していない。

［清掃方法］
・ 車体は日中に自動機械で洗浄し、客室は外注の作業員が清掃している。

3）新技術の導入について

［カメラによる監視］
・ 現時点では車両に内部や外部を監視するためのカメラは搭載していない。
・ カメラを搭載するとすれば客室内を監視して記録する防犯カメラの設置が想定される。
・ 車両の床下は目視しにくいため、カメラによる監視を列車検査に導入するなら台車などの床下機器の異常検知に導入したい。例えば、駅のプラットフォームの下にカメラを設置し、停車する車両台車の異常が検知できれば、安全運行に有効である。

［センサーによる振動計測］
・ 他の鉄道事業者では、車両振動の変化から台車の異常を検知するために振動センサーの設置を試みている事例もあるものの、異常の判定が困難でありまだ実用されていない。

［その他］

・ 車内の乗客に対する体温や咳・くしゃみ等の検知ニーズは車両部門の範疇外であり、判断できない。

＜線路巡視に関する主なヒアリング内容＞

1）安全確認のための出動について

［出動頻度］

・ 2019 年度に線路異常または状況確認のために保線職員が出動した回数は約 100 件（全線、人身事故を除く）であった。また、その他天候による警戒待機が約 20 件であった。

［出動体制］

・ 一般的に初め 2～4 名程度で出動し、措置が必要な場合は追加の人員を要請する。要請人員の数は状況によって異なるが、8 名程度が多い。

［出動時間］

・ 現地作業に要する時間は現地確認のみで措置が必要でない場合は数十分程度，応急復旧が必要な場合は数時間かかることが多い。

2）線路巡視について

［線路巡視のスケジュール］

・ 線路巡視（徒歩・乗車）は年間のスケジュールが組まれている。
・ 線路巡視の頻度は月 1 回であり、毎月進捗を管理している。線路巡視の結果は保線システムに入力し、いつでも確認することができる。

［線路巡視の内容］

・ 線路巡視（徒歩・乗車）は目視にて危険の有無を確認している。
・ 軌道以外の構造物や周辺の異常を線路巡視にて気づくこともある。
・ 詰所や事務所からリアルタイムで疑似的な線路巡視を行う事が出来れば，レールの温度上昇時や台風前の警戒前に線路と周辺の状況確認への活用が期待出来る。
・ 民地から倒れそうな木など、危険が想定される映像が得られれば，要注意状態として職員教育に使うことも想定される。

3）軌道検測について

［軌道検測の役割］

・ 検測車による軌道変位検査や非破壊検査による超音波探傷は，線路巡視より頻度が少ないものの目視より正確である。
・ 距離を測定できるカメラ（プロファイルカメラ）と濃淡が分かるカメラ（ラインセンサーカメラ）を列車の床下に搭載し，レールとまくら木を固定する締結装置や継目ボルトの状態を撮影して遠隔監視できれば線路巡視の効率化が期待できる。ただし、車両は高速で走行しているため、検測に必要な画像を得ることは困難と思われる。

４）新技術の導入について

［ドローンによる線路巡視］

・ 台風等の災害後には軌道や架線に様々な障害物が飛散する。軌道脇の地上からでは目視しにくい場所もあり、ドローンによって上空から障害物が確認できれば災害後の安全確認に有効である。

4.2 実証目標

人手不足や安全性の向上を目的として、ローカル 5G 無線通信システムを用いたリアルタイムでの遠隔からの列車検査、線路巡視等により、人員の増強なしに検査の高頻度化や効率化が実現できることにより、安全性の向上や顧客にとってのサービス水準の確保に寄与することを目指す。

4.3 課題解決システムに関する検証及び評価・分析

「課題解決システム」に関する「検証及び評価・分析」、「効果検証」、「機能検証」、「運用検証」を実施した。

4.3.1 映像受配信システムの検証及び評価・分析

列車検査及び線路巡視において共通に使用するために構築した映像受配信システムの検証及び評価・分析を行った。

4.3.1.1 基本通信性能評価

（1）基本通信性能評価 -1

dOIC（クラウドダイレクト接続)、アマゾン・ウェブ・サービス（AWS）（インターネット経由）の伝送品質と遅延等を計測、比較した。

図 4.3.1-1 に示すように、

環境１：Xavier NX（クラウドダイレクト利用）～クラウドダイレクト経由～dOIC 上インスタンスの間

環境２：Xavier NX（020SIM 利用）～インターネット経由～AWS 上インスタンスの間

のアップリンクスループット、ダウンリンクスループット、ジッタ、パケットドロップ率、遅延量を iperf、ping のツールを使って計測した。

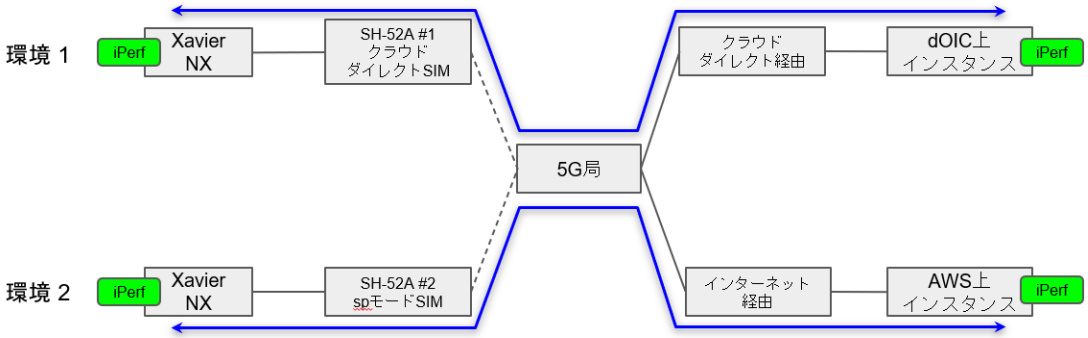


図 4.3.1-1　クラウドダイレクト接続とインターネット経由接続の基本通信性能比較システム構成

測定結果を

表 4.3.1-1 に示す。

アップリンクのスループット、ダウンリンクのスループットはクラウドダイレクト接続（dOIC）とインターネット経由（AWS）の間で顕著な違いはなかった。これより 5G 環境で適切な無線リソースのもとで一定のパケットを送る場合、スループット自体はインターネット経由の AWS と dOIC では同程度であると言える。一方、遅延量に関しては、クラウドダイレクト接続の方がインターネット経由の 4 分の 1 以下となった。これは、インターネット経由でのクラウド環境接続と比較して、クラウドダイレクト経由でのクラウド環境接続のほうが、より少ないノード数を経由して到達しているためであると考えられる。

以上より、本課題解決システムはリアルタイム性が必要となるサービスであることからも、MEC クラウド環境（dOIC 等）を活用する利点が示された。

表 4.3.1-1　クラウドダイレクト接続とインターネット経由（AWS）接続の基本通信性能比較結果

区間	試験	試験区分	パケットサイズ (byte)	送信時間 (sec)	送信帯域 (Mbps)	試験回数 (回)	スループット結果 (Mbps)	jitter (ms)	パケットロス (%)	min (ms)	avg (ms)	max (ms)	stddev (ms)
Xavier NX ～ クラウドダイレクト ～ dOIC	iPerf	上り	1300	180	30	1	26.32	0.51	10.1%				
						2	33.48	0.27	1.9%				
						3	29.55	25.42	1.3%				
						※avg	29.78	8.73	4.4%				
		下り	1300	180	30	1	29.97	0.13	0.0%				
						2	29.93	0.12	0.0%				
						3	29.93	0.13	0.0%				
						※avg	29.94	0.13	0.0%				
		上り	1300	180	100	1	92.20	0.68	9.2%				
						2	89.24	0.35	15.1%				
						3	98.06	0.28	5.2%				
						※avg	93.16	0.44	9.8%				
		下り	1300	180	100	1	95.05	0.11	4.8%				
						2	95.05	0.12	4.8%				
						3	95.04	0.14	4.8%				
						※avg	95.05	0.12	4.8%				
	ping	--	1300	180	--	1				26.057	39.119	69.561	7.685
						2				26.171	36.947	63.396	4.048
						3				26.273	46.192	955.597	68.217
						※avg				26.167	40.753	362.851	26.650
Xavier NX ～ インターネット ～ AWS	iPerf	上り	1300	180	30	1	28.48	0.10	0.049				
						2	20.84	1.36	0.304				
						3	28.29	0.10	0.055				
						※avg	25.87	0.52	0.136				
		下り	1300	180	30	1	30.00	0.48	0.001				
						2	30.01	0.53	0.001				
						3	29.99	0.46	0.000				
						※avg	30.00	0.49	0.001				
		上り	1300	180	100	1	97.10	0.23	0.027				
						2	97.04	0.03	0.028				
						3	96.18	0.05	0.037				
						※avg	96.77	0.11	0.031				
		下り	1300	180	100	1	95.59	0.17	0.045				
						2	95.01	0.16	0.050				
						3	96.32	0.15	0.037				
						※avg	95.64	0.16	0.044				
	ping	--	1300	180	--	1				161.555	176.096	201.324	6.615
						2				166.789	184.251	223.188	11.780
						3				165.915	185.587	227.711	13.096
						※avg				164.753	181.978	217.408	10.497

（2）基本通信性能評価 -2

送信端末～dOIC 上のインスタンス、dOIC 上のインスタンス～受信端末の伝送品質と遅延等を計測した。

図 4.3.1-2 に示すように、

①Xavier NX(送信端末)～dOIC 上のインスタンス

②dOIC 上のインスタンス～Xavier NX(受信端末)

におけるアップリンクスループット、ダウンリンクスループット、ジッタ、パケットドロップ率、遅延量を iperf、ping のツールを使って計測した。なお、課題解決システムのデータフローを想定し、①区間の下り方向、②区間の上り方向は主なデータは発生しないため、性能評価としては対象外とした。

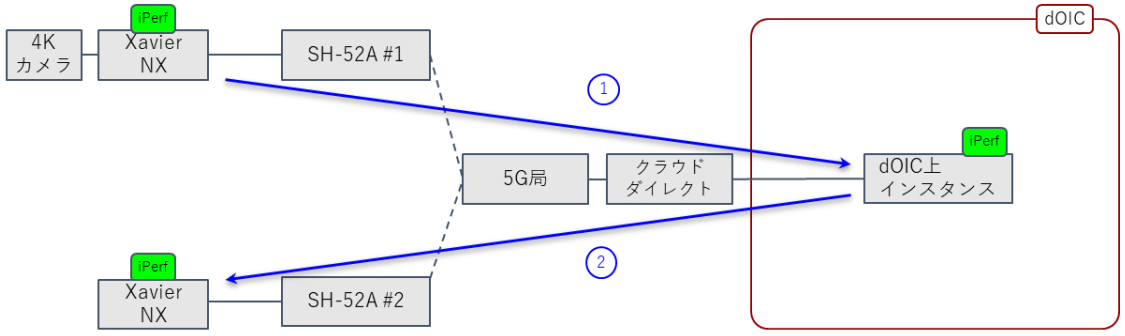


図 4.3.1-2　測定区間ごとの基本性能評価システム構成

測定結果を

表 4.3.1-1 に示す。

高精細映像（4k 映像）の送受信に関する送信端末～dOIC 上のインスタンス、同インスタンス～解析結果表示 PC を模擬した受信端末の区間における伝送品質と遅延等を計測した。

区間①　上り方向：

送信パケットを 30Mbps と 100Mbps に設定すると、スループットがそれぞれ 29.78Mbps、93.16Mbps となった。これにより、本課題解決システムの上りパケット（30Mbps）を送信するには十分な帯域を確保できていることがわかる。

区間②　下り方向：

送信パケットを 30Mbps と 100Mbps に設定すると、スループットがそれぞれ 29.94Mbps、95.05Mbps となった。これにより、本課題解決システムの下りパケットの送信にも十分な帯域を確保できていることがわかる。

4.3.1.2 コーデックごとの基本性能評価

映像伝送に用いるコーデックを評価・選定するために、本映像受配信システムにおけるコーデックごとの基本性能評価を行った。

図 4.3.1-3 に示すように、映像伝送技術として代表的な 3 つのコーデック（H.264、VP8、VP9）を用いて、図 4.3-3 に示す区間において受信した映像の解像度及び、フレームレート数と、XavierNX、配信サーバインスタンス、ノート PC それぞれのリソースを計測した。なお、計測時は映像パラメータとして映像解像度、フレームレート、送信帯域の 3 点を指定した。解像度、フレームレートについては 4k カメラ側を 4k30fps で固定、サーマルカメラ側はカメラ性能に合わせ VGA30fps で固定した。送信帯域については 4k カメラ側を 4 パターン（15/20/25/30 Mbps）、サーマルカメラ側を 2 パターン（2.5/5.0 Mbps）の評価を行った。

H.265 コーデックについては今回実証で使用する chrome ブラウザ非対応のため計測対象外とした。

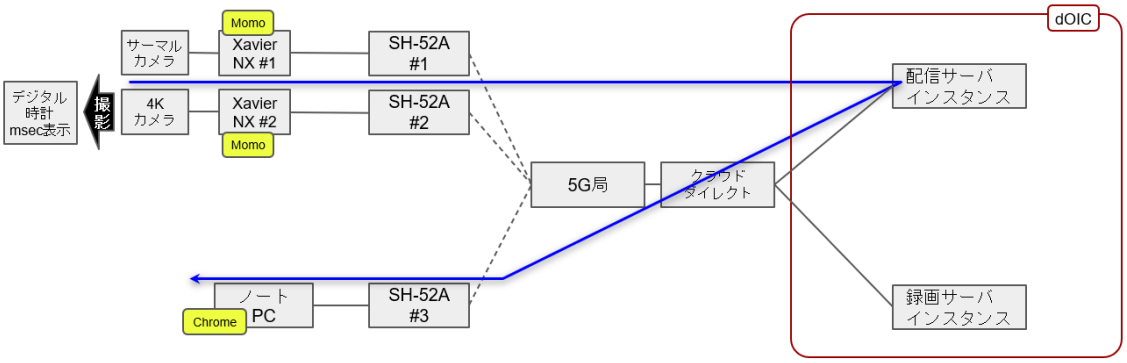


図 4.3.1-3　コーデックごとの基本性能評価システム構成

計測した受信映像の解像度及び、フレームレート数また、各リソースの計測結果を表 4.3.1-2 に示す。

4k 映像伝送において、コーデック VP8 においてはどのパラメータの組み合わせでも 4k 解像度に達することはなかった。VP9 においては、解像度が 4k に達することがあったもののフレームレート数が上がらず 30fps に達することはなかった。H.264 に限り解像度及びフレームレート数が目的の 4k30fps に達することが確認できたため、本実証においては H.264 を使用することとした。

VP8 は今回利用した Xavier NX 上での動作確認が保証されておらず、ハードウェアスペックとして円滑な処理が実現できなかったと推察される。VP9 については Xavier NX 上での動作確認が保証されているものの、事前検証の結果、フレーム数が十分に伝送できず、今回は不適とした。

参考として、各コーデックのパラメータ毎の解像度とフレームレート数の推移状況について、分布図化したものを図 4.3.1-4 及び図 4.3.1-5 に示す。

表 4.3.1-2　コーデックごとの基本性能評価

							Xavier NX			配信サーバインスタンス		ノートPC			Chrome WebRTCデバッグ（ノートPC）			
区間	試験	フレームレート (fps)	送信時間 (sec)	送信帯域 (Mbps)	エンコード	試験回数 (回)	CPU (%)	MEM (%)	GPU (%)	CPU (%)	MEM (%)	CPU (%)	MEM (%)	GPU (%)	解像度 (px)	受信フレーム数 (fps)	デコード フレーム数(f)	ドロップ フレーム数(f)
4Kカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	WebRTC	30	180	15	H.264	1	24.0	1.2	0	1.40	0.009	4.00	26.0	22.0	3840x2160	30	5489	3
						2	28.3	1.2	0	2.20	0.019	4.00	26.0	22.0	3840x2160	30	5429	0
						3	25.6	1.2	0	2.10	0.019	5.00	26.0	22.0	3840x2160	30	5415	18
						※avg	26.0	1.2	0	1.90	0.016	4.33	26.0	22.0		30	5444	7
					VP8	1	28.8	4.1	0	1.40	0.021	13.00	38.0	0.0	960x540	43	7783	35
						2	37.0	4.0	0	2.10	0.021	17.00	39.0	0.0	960x540	42	7550	0
						3	29.6	4.0	0	1.60	0.010	14.00	41.0	0.0	960x540	43	7724	29
						※avg	31.8	4.0	0	1.70	0.017	14.67	39.3	0.0		43	7686	21
					VP9	1	26.0	1.3	0	2.30	0.008	0.10	43.0	22.0	3840x2160	22	3905	0
						2	21.6	1.3	0	1.90	0.009	9.00	43.0	35.0	3840x2160	20	3603	32
						3	14.5	1.3	0	2.10	0.009	19.00	44.0	2.0	3840x2160	22	4030	38
						※avg	20.7	1.3	0	2.10	0.009	9.37	43.3	19.7		21	3846	23
				20	H.264	1	26.6	1.2	0	1.80	0.019	4.00	26.0	22.0	3840x2160	30	5327	0
						2	22.0	1.2	0	1.00	0.019	7.00	27.0	22.0	3840x2160	30	5446	2
						3	27.6	1.3	0	3.10	0.019	6.00	26.0	22.0	3840x2160	30	5344	0
						※avg	25.4	1.2	0	1.97	0.019	5.67	26.3	22.0		30	5372	1
					VP8	1	35.8	4.0	0	3.00	0.020	17.00	40.0	0.0	960x540	42	7607	34
						2	28.5	4.0	0	1.40	0.019	22.00	40.0	0.0	480x268	40	7279	146
						3	25.3	4.0	0	1.00	0.020	31.00	40.0	0.0	960x540	40	7139	6
						※avg	29.9	4.0	0	1.80	0.020	23.33	40.0	0.0		40	7342	62
					VP9	1	20.6	1.2	0	1.20	0.009	8.00	42.0	7.0	3840x2160	22	3977	102
						2	23.0	1.1	0	1.40	0.009	13.00	24.0	4.0	2880x1620	15	2757	38
						3	27.6	1.3	0	2.00	0.009	14.00	23.0	11.0	2880x1620	15	2739	53
						※avg	23.7	1.2	0	1.53	0.009	11.67	29.7	7.3		17	3158	64
				25	H.264	1	28.0	1.3	0	3.50	0.019	4.00	26.0	17.0	3840x2160	25	4590	30
						2	22.2	1.1	0	0.40	0.010	12.00	24.0	22.0	3840x2160	29	5177	20
						3	26.3	1.3	0	1.20	0.010	12.00	25.0	23.0	3840x2160	29	5273	0
						※avg	25.5	1.2	0	1.70	0.013	9.33	25.0	20.7		28	5013	17
					VP8	1	30.8	4.0	0	2.00	0.020	31.00	39.0	0.0	480x268	40	7355	99
						2	40.0	4.0	0	3.50	0.019	15.00	39.0	0.0	720x396	38	7019	91
						3	34.0	4.0	0	2.40	0.019	33.00	39.0	0.0	720x396	40	7321	127
						※avg	34.9	4.0	0	2.63	0.019	26.33	39.0	0.0		40	7232	106
					VP9	1	20.3	1.0	0	1.30	0.010	9.00	24.0	4.0	2880x1620	15	2786	27
						2	23.1	1.3	0	2.90	0.010	15.00	24.0	8.0	2880x1620	14	2685	173
						3	25.2	1.2	0	2.10	0.010	5.00	24.0	11.0	2880x1620	16	2834	28
						※avg	22.9	1.2	0	2.10	0.010	9.67	24.0	7.7		15	2768	76
				30	H.264	1	23.8	1.0	0	0.50	0.009	4.00	24.0	13.0	2880x1620	27	4970	21
						2	21.3	1.1	0	0.90	0.009	12.00	24.0	13.0	2880x1620	29	5245	2
						3	27.7	1.0	0	1.00	0.010	15.00	24.0	22.0	3840x2160	28	5088	0
						※avg	24.3	1.0	0	0.80	0.010	10.33	24.0	16.0		28	5101	8
					VP8	1	41.8	1.0	0	2.20	0.019	6.00	27.0	0.0	960x540	25	4527	30
						2	27.3	1.0	0	3.20	0.019	5.00	27.0	0.0	960x540	20	3637	72
						3	34.5	1.0	0	1.50	0.010	9.00	24.0	0.0	1440x804	21	3893	64
						※avg	34.5	1.0	0	2.30	0.016	6.67	26.0	0.0		22	4019	55
					VP9	1	25.0	1.2	0	1.50	0.010	8.00	24.0	8.0	2880x1620	16	2851	49
						2	25.8	1.0	0	1.80	0.010	15.00	24.0	5.0	1920x1080	15	2789	76
						3	27.7	1.0	0	1.00	0.010	17.00	24.0	5.0	1920x1080	15	2715	61
						※avg	26.2	1.1	0	1.43	0.010	13.33	24.0	6.0		15	2785	62
サーマルカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	WebRTC	30	180	2.5	H.264	1	25.8	0.8	0	0.40	0.009	14.00	24.0	1.0	640x480	22	3966	57
						2	18.0	0.8	0	0.50	0.009	18.00	24.0	1.0	640x480	21	3889	79
						3	26.7	0.8	0	0.40	0.009	17.00	24.0	1.0	640x480	21	3888	37
						※avg	23.5	0.8	0	0.43	0.009	16.33	24.0	1.0		21	3914	58
					VP8	1	22.5	0.8	0	0.50	0.009	15.00	24.0	0.0	640x480	23	4078	0
						2	20.3	0.8	0	0.40	0.009	14.00	24.0	0.0	640x480	22	3998	0
						3	24.0	0.8	0	0.30	0.009	12.00	24.0	0.0	640x480	23	4076	0
						※avg	22.3	0.8	0	0.40	0.009	13.67	24.0	0.0		23	4051	0
					VP9	1	17.5	0.8	0	0.50	0.009	15.00	24.0	1.0	640x480	22	3983	0
						2	22.3	0.8	0	0.30	0.009	17.00	24.0	1.0	640x480	22	3932	0
						3	23.7	0.8	0	0.60	0.009	15.00	24.0	1.0	640x480	22	4005	0
						※avg	21.2	0.8	0	0.47	0.009	15.67	24.0	1.0		22	3973	0
				5.0	H.264	1	26.3	0.8	0	0.80	0.010	16.00	24.0	1.0	640x480	19	3495	79
						2	23.8	0.8	0	0.70	0.009	18.00	24.0	1.0	640x480	22	3990	0
						3	17.6	0.8	0	0.60	0.009	16.00	24.0	1.0	640x480	22	3957	0
						※avg	22.6	0.8	0	0.70	0.010	16.67	24.0	1.0		21	3814	26
					VP8	1	20.8	0.8	0	0.50	0.009	12.00	24.0	0.0	640x480	22	3999	0
						2	25.3	0.8	0	0.80	0.009	11.00	24.0	0.0	640x480	22	4021	1
						3	18.3	0.8	0	0.70	0.009	11.00	24.0	0.0	640x480	23	4157	0
						※avg	21.5	0.8	0	0.67	0.009	11.33	24.0	0.0		23	4059	0
					VP9	1	21.2	0.8	0	0.60	0.009	16.00	24.0	1.0	640x480	22	4000	0
						2	18.0	0.8	0	0.60	0.009	17.00	24.0	1.0	640x480	22	3992	0
						3	21.6	0.8	0	0.80	0.009	13.00	24.0	1.0	640x480	22	3984	0
						※avg	20.3	0.8	0	0.67	0.009	15.33	24.0	1.0		22	3992	0

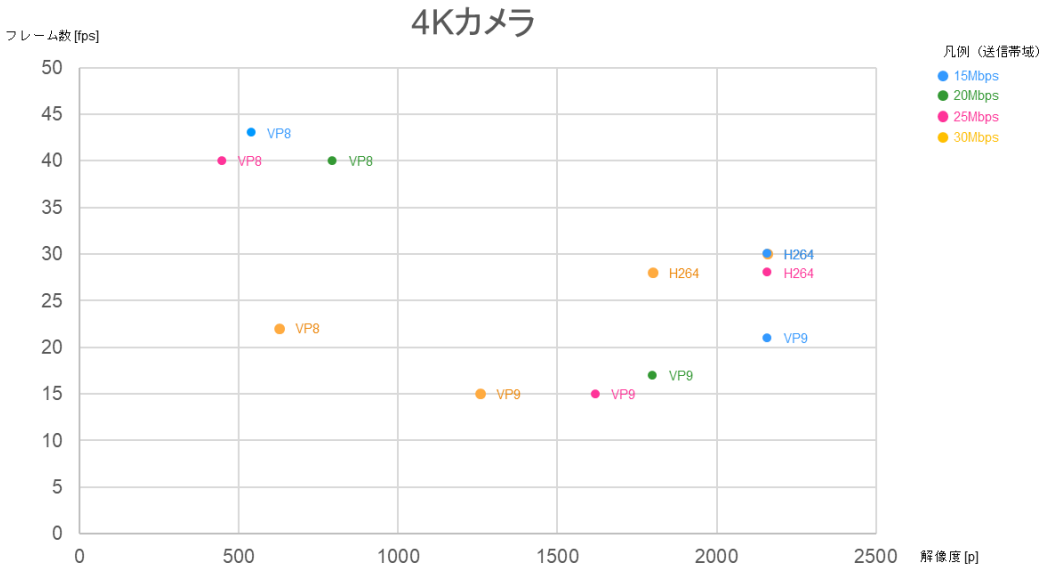


図 4.3.1-4　4k カメラ映像のコーデック比較結果

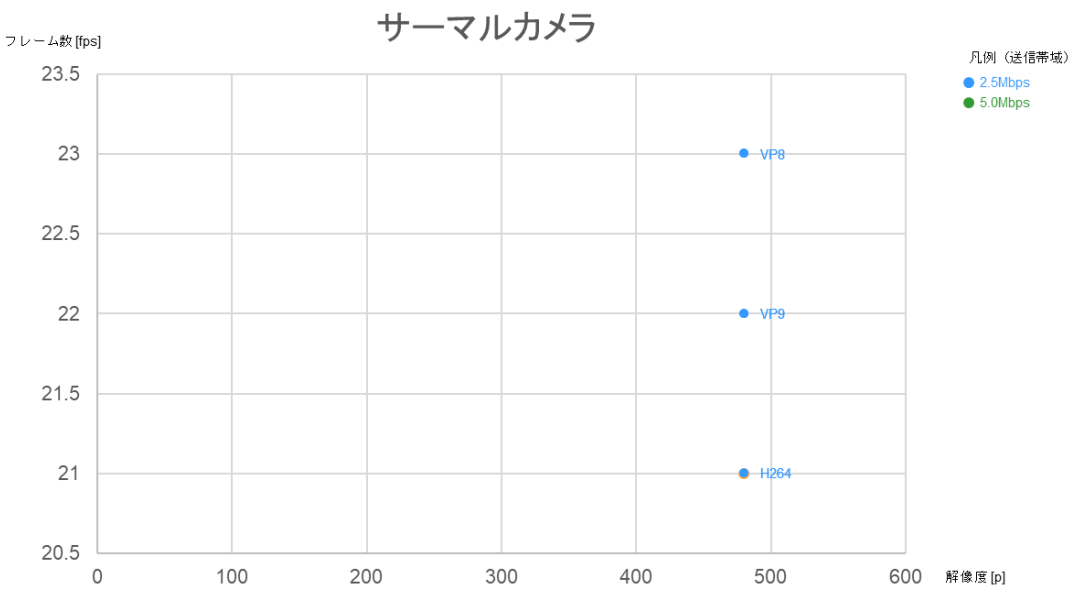


図 4.3.1-5　サーマルカメラ映像のコーデック比較結果

4.3.1.3 映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価

カメラ映像の伝送における、一定時間経過後の遅延量推移を計測するため、送受信された映像へ映る時計の時間差を比較した。

図 4.3.1-6 に示すように、Xavier NX に接続している 4k カメラ前にノート PC を配置し、ミリ秒まで表示可能なデジタル時計をデスクトップ上に表示したうえで、配信された映像をブラウザで受信し、同じくディスプレイ上で横並びに表示することで時計の時間差を確認した。

計測する経過時間の設定は 30 分後と 1 時間後として、各経過時間時の解像度及び、フレームレート数やリソース状況を合わせて確認した。

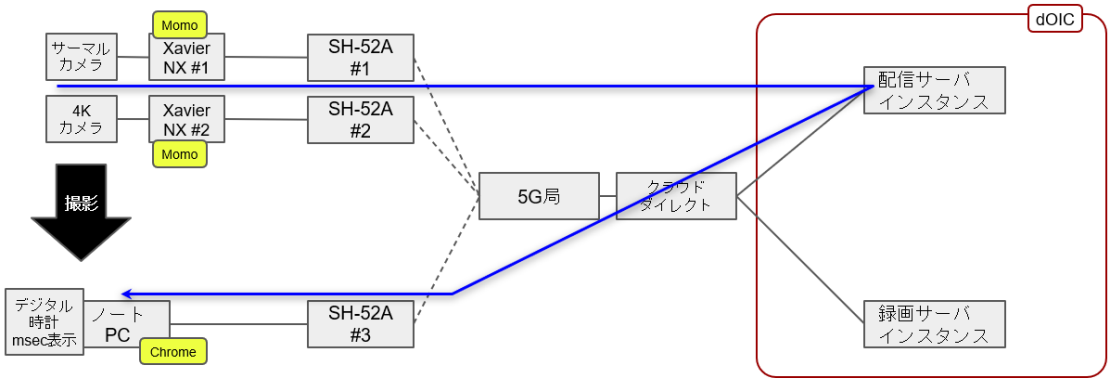


図 4.3.1-6　映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価システム構成

測定結果を表 4.3.1-3 に示す。

測定は実証環境と同じ 4k カメラ及びサーマルカメラの映像を同時に伝送した。また、各々の伝送パラメータは 4k カメラが 4k30fps 映像を 15Mbps で、サーマルカメラは VGA30fps 映像を 2.5Mbps にて伝送した。

結果として、遅延量は 0.33～0.41ms となり、安定した低遅延の映像配信が可能であることが確認できた。時間の経過による遅延量の増加傾向は見られなかったことから、時間と遅延量には依存性がないことが考えられる。

表 4.3.1-3　映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価

区間	試験	エンコード	フレームレート (fps)	送信時間 (min)	送信帯域 (Mbps)	試験回数 (回)	30分 経過時 タイマー遅延時間量	Xavier NX CPU (%)	Xavier NX MEM (%)	Xavier NX GPU (%)	配信サーバインスタンス CPU (%)	配信サーバインスタンス MEM (%)	ノートPC CPU (%)	ノートPC MEM (%)	ノートPC GPU (%)	Chrome WebRTCデバッグ（ノートPC） 解像度 (px)	受信フレーム数 (fps)	デコードフレーム数(f)	Dロップフレーム数(f)
4Kカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	遅延量	H.264	30	60	15	1	0.38	27.2	1.3	0	2.30	0.010	50.00	46.0	1.0	3840x2160	30	53956	103
	WebRTC					2	0.36	28.5	1.2	0	3.30	0.010	23.00	47.0	33.0	3840x2160	29	51977	0
						3	0.33	27.8	1.2	0	2.70	0.010	23.00	47.0	38.0	3840x2160	30	53964	5
						※avg	0.36	27.8	1.2	0	2.77	0.010	32.00	46.7	24.0		30	53299	36
サーマルカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	遅延量	H.264	30	60	2.5	1		26.0	0.8	0	2.30	0.010	50.00	46.0	1.0	640x480	22	38870	0
	WebRTC					2		25.7	0.8	0	3.30	0.010	23.00	47.0	33.0	640x480	22	40204	0
						3		18.8	0.8	0	2.70	0.010	23.00	47.0	38.0	640x480	22	39633	0
						※avg		23.5	0.8	0	2.77	0.010	32.00	46.7	24.0		22	39569	0

区間	試験	エンコード	フレームレート (fps)	送信時間 (min)	送信帯域 (Mbps)	試験回数 (回)	1時間 経過時 タイマー遅延時間	Xavier NX CPU (%)	Xavier NX MEM (%)	Xavier NX GPU (%)	配信サーバインスタンス CPU (%)	配信サーバインスタンス MEM (%)	ノートPC CPU (%)	ノートPC MEM (%)	ノートPC GPU (%)	Chrome WebRTCデバッグ（ノートPC） 解像度 (px)	受信フレーム数 (fps)	デコードフレーム数(f)	Dロップフレーム数(f)
4Kカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	遅延量	H.264	30	60	15	1	0.41	27.8	1.3	0	2.10	0.010	21.00	46.0	25.0	3840x2160	28	100399	543
	WebRTC					2	0.37	25.0	1.2	0	2.90	0.010	32.00	47.0	25.0	3840x2160	29	105594	0
						3	0.36	29.7	1.2	0	2.60	0.010	36.00	48.0	25.0	3840x2160	30	108561	5
						※avg	0.38	27.5	1.2	0	2.53	0.010	29.67	47.0	25.0		29	104851	183
サーマルカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	遅延量	H.264	30	60	2.5	1		23.3	0.8	0	2.10	0.010	21.00	46.0	25.0	640x480	22	77719	27
	WebRTC					2		19.3	0.8	0	2.90	0.010	32.00	47.0	25.0	640x480	22	80097	0
						3		19.5	0.8	0	2.60	0.010	36.00	48.0	25.0	640x480	22	80056	0
						※avg		20.7	0.8	0	2.53	0.010	29.67	47.0	25.0		22	79291	9

4.3.1.4 並列処理の可能性を踏まえた背景トラフィック印加時の映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価

送信端末が複数あって並列処理を行うユースケースを想定し、背景トラフィックを印加した状態での映像伝送における、一定時間経過後の遅延量推移を計測した。4.3.1.3 と同様に時計を使った時間差の確認を行い、同じく解像度やフレームレート数等の確認も行った。

背景トラフィックの印加方法としは iperf ツールを使用し、30Mbps/60Mbps の送信パラメータを設定し比較した。

なお、4.3.1.3 の検証において時間と遅延量の依存性は少ないことが確認されたため、計測時間は 10 分間で十分と判断した。

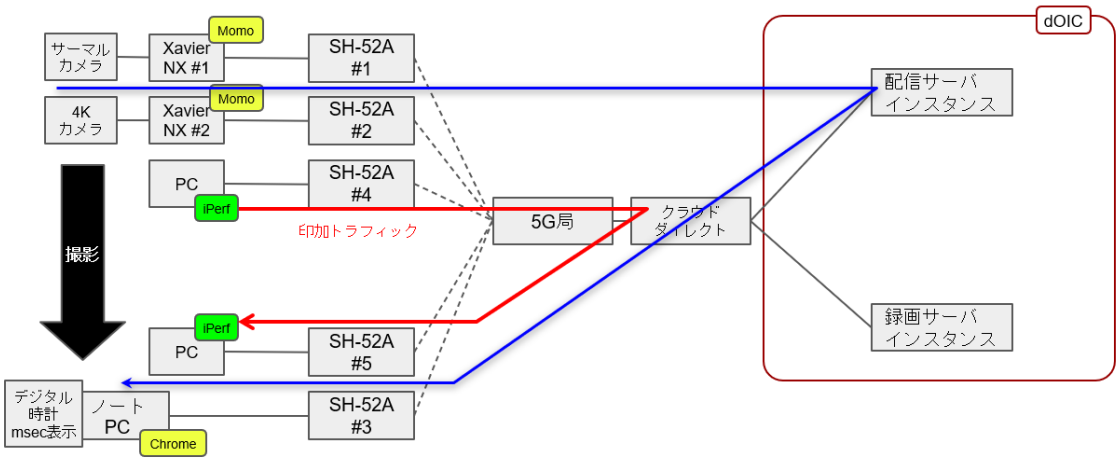


図 4.3.1-7　並列処理の可能性を踏まえた背景トラフィック印加時の映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価システム構成

測定結果を表 4.3.1-4 に示す。

背景トラフィックがない状態と 30Mbps のトラフィックを印加した場合とでは平均値を取った場合に差は現れなかった。2 倍にあたる 60Mbps のトラフィックを印加した場合においても遅延時間は＋60msec と今回は遅延が上乗せされるもののストリーミング映像の伝送が確認できたため、問題ないと判断した。ユースケースとして、列車を両面から監視する場合においても、ストリーミング映像伝送が実現できることが確認できた。

表 4.3.1-4　背景トラフィック印加時の映像インプットから画面表示までの遅延量推移評価

区間	試験	試験区分	フレームレート (fps)	UDP印加量 (Mbps)	送信時間 (min)	送信帯域 (Mbps)	試験回数 (回)	タイマー遅延時間	Xavier NX CPU (%)	Xavier NX MEM (%)	Xavier NX GPU (%)	配信サーバインスタンス CPU (%)	配信サーバインスタンス MEM (%)	ノートPC CPU (%)	ノートPC MEM (%)	ノートPC GPU (%)	Chrome WebRTCデバッグ（ノートPC） 解像度 (px)	数 (fps)	デコードフレーム数(f)	ドロップフレーム数(f)
4Kカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	WebRTC	H.264	30	30	10	15	1	0.33	28.0	1.2	0	3.30	0.011	21.0	41.0	39.0	3840x2160	28	17119	91
							2	0.38	28.2	1.2	0	3.10	0.011	25.0	42.0	23.0	3840x2160	27	16454	244
							3	0.40	25.7	1.2	0	3.20	0.011	21.0	42.0	42.0	3840x2160	29	17466	63
							※avg	0.37	27.3	1.2	0	3.20	0.011	22.3	41.7	34.7		28	17013	133
				60	10	15	1	0.60	26.5	1.2	0	4.70	0.008	23.0	42.0	25.0	3840x2160	29	17622	187
							2	0.39	28.5	1.2	0	2.60	0.011	25.0	43.0	25.0	3840x2160	30	17878	12
							3	0.34	20.6	1.2	0	1.20	0.011	45.0	44.0	25.0	3840x2160	27	16555	80
							※avg	0.44	25.2	1.2	0	2.83	0.010	31.0	43.0	25.0		29	17352	93
サーマルカメラ ～ 配信サーバインスタンス ～ ノートPC	WebRTC	H.264	30	30	10	2.5	1		22.5	0.8	0	3.30	0.011	21.0	41.0	39.0	640x480	22	12939	0
							2		21.5	0.8	0	3.10	0.011	25.0	42.0	23.0	640x480	22	13175	0
							3		21.8	0.8	0	3.20	0.011	21.0	42.0	42.0	640x480	22	13187	0
							※avg		21.9	0.8	0	3.20	0.011	22.3	41.7	34.7		22	13100	0
				60	10	2.5	1		17.3	0.8	0	4.70	0.008	23.0	42.0	25.0	640x480	22	13221	0
							2		18.0	0.8	0	2.60	0.011	25.0	43.0	25.0	640x480	22	13174	0
							3		19.2	0.8	0	1.20	0.011	45.0	44.0	25.0	640x480	22	13236	0
							※avg		18.2	0.8	0	2.83	0.010	31.0	43.0	25.0		22	13210	0

4.3.2 5G と AI を活用した列車検査の遠隔・自動監視システム

列車検査の遠隔・自動監視システムを構築し、列車検査に関する検証を行った。

図 4.3.2-1～図 4.3.2-3 に示すように、京浜急行電鉄の久里浜工場の検査庫等に車両台車の模擬き裂などを撮影するための高精細 4k カメラと、車軸の温度情報を取得するためのサーマルカメラを設置した。このとき、撮影対象物（列車の台車等）との距離は約 2m とした。撮影された車両台車の映像を、キャリア 5G 経由で dOIC 上に構築された AI 解析インスタンスへ伝送し、AI 解析を行った後に配信先へ AI 解析結果と元映像を合成した状態で再配信する際の伝送性能について評価した。

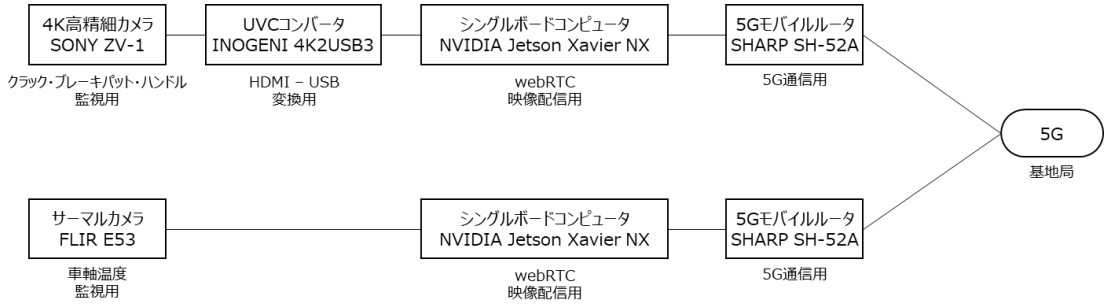


図 4.3.2-1 検査庫における列車検査機器構成

図 4.3.2-2 検査庫に設置された列車検査機器全景

図 4.3.2-3　検査庫に設置された列車検査機器（4k カメラとサーマルカメラ）

この構成における①End-End 遅延量と②アップロード帯域を図 4.3.2-4 に示すように計測した。表 4.3.2-1 に示すように、4k カメラ映像がモバイルルータを介し 5G 網経由でクラウド上の AI エンジンへ伝送され、AI 解析を経て Web サーバを通り解析結果表示 PC へ表示されるまでの映像遅延時間が 1 秒を切る 940ms という低遅延性能を実現することができた。このとき、現地から dOIC への上り方向の最大スループットは、98.06 Mbps であった。

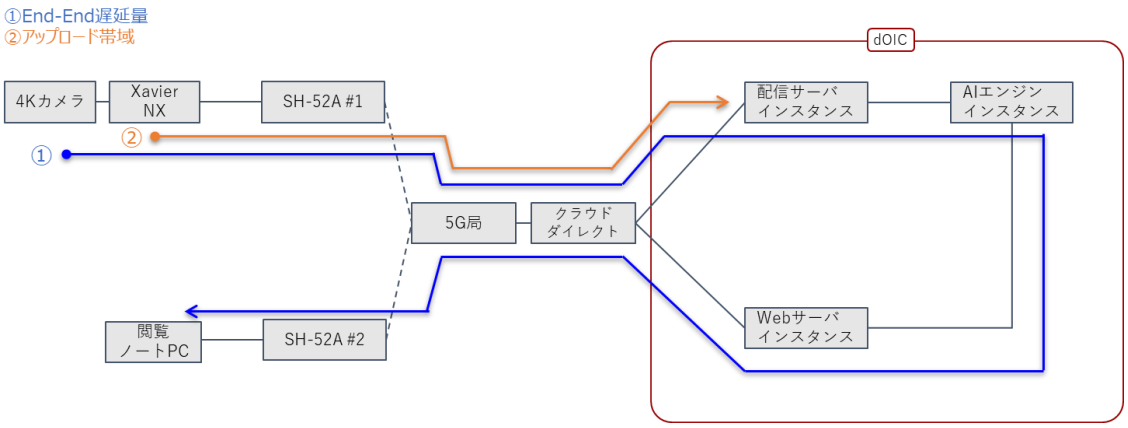


図 4.3.2-4　列車監視システムフロー図

表 4.3.2-1　End-End 遅延量及びアップロードスループット

配信構成	End-End遅延量	アップロード スループット
列車監視	940 ms	98.06 Mbps

4.3.2.1 AI 解析システム

（1）4k 固定カメラで撮影した高精細映像の AI 解析検出率等評価

1）検証内容

透明テープ上に模擬のき裂を描き、

表 4.3.2-3 に示すシナリオに沿って一定速度（5km/h 及び 10km/h）で走行する車両の 4k 固定カメラで撮影した高精細映像から、台車に添付した模擬き裂（幅：0.1～2.0mm、長さ：20.0～80.0mm）シールを水平方向及び垂直方向に貼り、その AI 解析検出の検証を行い、Precision（適合率）※及び Recall（再現率）※を計測した。

また、同様に 4k 固定カメラで撮影した高精細映像から、台車のブレーキパッドの摩耗状態、収容函ハンドルの位置に関しても AI 解析検出の検証を行った。

表 4.3.2-2　模擬き裂のパターン記号

き裂発生位置		溶接端に生じたき裂(並行き裂:P)		
		き裂長(mm)		
		20	60	80
き裂幅 (mm)	0.1	P-0.1-20	P-0.1-60	P-0.1-80
	0.2	P-0.2-20	P-0.2-60	P-0.2-80
	1.0	P-1.0-20	P-1.0-60	P-1.0-80
	2.0	P-2.0-20	P-2.0-60	P-2.0-80

き裂発生位置		溶接端から垂直に生じたき裂(垂直き裂:V)		
		き裂長(mm)		
		20	60	80
き裂幅 (mm)	0.1	V-0.1-20	V-0.1-60	V-0.1-80
	0.2	V-0.2-20	V-0.2-60	V-0.2-80
	1.0	V-1.0-20	V-1.0-60	V-1.0-80
	2.0	V-2.0-20	V-2.0-60	V-2.0-80

※Precision（適合率）：
システムが出した結果において、本当に正しかったものの割合を、人が解析映像を確認の上評価する。

※Recall（再現率）：
結果として出てくるべきもののうち、システムが正しく認識できたものの割合を、人が解析映像を確認の上、評価した。

表 4.3.2-3　検証パターン

シナリオno	内容
1	・台車上に、「**水平向きに、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)**」を付与する ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(1回目)
2	(・台車上に、「水平向きに、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)」を付与する) ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(2回目)
3	(・台車上に、「水平向きに、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)」を付与する) ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(3回目)
4	・台車上に、「**垂直方向に、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)**」を付与する ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(1回目)
5	(・台車上に、「垂直方向に、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)」を付与する) ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(2回目)
6	(・台車上に、「垂直方向に、長さ(20/60/80mm)・幅(0.1/0.2/1.0/2.0mm)」を付与する) ・WebRTCの配信を、**4k解像度で開始**する ・車両を**5km/h**で走らせる(3回目)
7	(シナリオno1の速度を10km/hに変更して実施)
8	(シナリオno2の速度を10km/hに変更して実施)
9	(シナリオno3の速度を10km/hに変更して実施)
10	(シナリオno4の速度を10km/hに変更して実施)
11	(シナリオno5の速度を10km/hに変更して実施)
12	(シナリオno6の速度を10km/hに変更して実施)

2）**模擬き裂の検出**

a）**検出結果**

表 4.3.2-3 の検証シナリオに沿って、検証を行い、その結果を以下に示す。シナリオ no.1～6 における模擬き裂の AI 解析結果を表 4.3.2-4～表 4.3.2-5、図 4.3.2-5～図 4.3.2-7 に示す。また、シナリオ no.7～12 における AI 解析結果を表 4.3.2-6～表 4.3.2-7、図 4.3.2-8～図 4.3.2-10 に示す。

表 4.3.2-4　模擬き裂シールを水平に貼った場合の AI 解析検出結果(5km/h)

no	試験数	車両側情報			走行速度(km)	クラック条件			集計結果		性能評価			
		台車設定				向き	幅	長さ	検出結果	検出フレーム数	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
											True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
1	N=1	1両目	後続台車	後側	5	水平	2.0	80	○	6	1	0	0	0
2	N=1	1両目	後続台車	前側	5	水平	2.0	60	○	8	1	0	0	0
3	N=1	1両目	先頭台車	後側	5	水平	2.0	20	○	8	1	0	0	0
4	N=1	1両目	先頭台車	前側	5	水平	1.0	80	○	8	1	0	0	0
5	N=1	2両目	後続台車	後側	5	水平	1.0	60	○	8	1	0	0	0
6	N=1	2両目	後続台車	前側	5	水平	1.0	20	○	5	1	0	0	0
7	N=1	2両目	先頭台車	後側	5	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
8	N=1	2両目	先頭台車	前側	5	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
9	N=1	3両目	後続台車	後側	5	水平	0.2	20	×	0	0	0	0	1
10	N=1	3両目	後続台車	前側	5	水平	0.1	80	×	0	0	0	0	1
11	N=1	3両目	先頭台車	後側	5	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
12	N=1	3両目	先頭台車	前側	5	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
13	N=1	4両目	後続台車	後側	5	水平	－	80	×	0	0	0	1	0
14	N=1	4両目	後続台車	前側	5	水平	－	60	×	0	0	0	1	0
15	N=1	4両目	先頭台車	後側	5	水平	－	－						
16	N=1	4両目	先頭台車	前側	5	水平	－	－						
17	N=2	1両目	後続台車	後側	5	水平	2.0	80	○	4	1	0	0	0
18	N=2	1両目	後続台車	前側	5	水平	2.0	60	○	8	1	0	0	0
19	N=2	1両目	先頭台車	後側	5	水平	2.0	20	○	5	1	0	0	0
20	N=2	1両目	先頭台車	前側	5	水平	1.0	80	○	7	1	0	0	0
21	N=2	2両目	後続台車	後側	5	水平	1.0	60	○	8	1	0	0	0
22	N=2	2両目	後続台車	前側	5	水平	1.0	20	○	8	1	0	0	0
23	N=2	2両目	先頭台車	後側	5	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
24	N=2	2両目	先頭台車	前側	5	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
25	N=2	3両目	後続台車	後側	5	水平	0.2	20	×	0	0	0	0	1
26	N=2	3両目	後続台車	前側	5	水平	0.1	80	×	0	0	0	0	1
27	N=2	3両目	先頭台車	後側	5	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
28	N=2	3両目	先頭台車	前側	5	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
29	N=2	4両目	後続台車	後側	5	水平	－	80	×	0	0	0	1	0
30	N=2	4両目	後続台車	前側	5	水平	－	60	×	0	0	0	1	0
31	N=2	4両目	先頭台車	後側	5	水平	－	－						
32	N=2	4両目	先頭台車	前側	5	水平	－	－						
33	N=3	1両目	後続台車	後側	5	水平	2.0	80	○	5	1	0	0	0
34	N=3	1両目	後続台車	前側	5	水平	2.0	60	○	8	1	0	0	0
35	N=3	1両目	先頭台車	後側	5	水平	2.0	20	○	5	1	0	0	0
36	N=3	1両目	先頭台車	前側	5	水平	1.0	80	○	5	1	0	0	0
37	N=3	2両目	後続台車	後側	5	水平	1.0	60	○	8	1	0	0	0
38	N=3	2両目	後続台車	前側	5	水平	1.0	20	○	7	1	0	0	0
39	N=3	2両目	先頭台車	後側	5	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
40	N=3	2両目	先頭台車	前側	5	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
41	N=3	3両目	後続台車	後側	5	水平	0.2	20	○	1	1	0	0	0
42	N=3	3両目	後続台車	前側	5	水平	0.1	80	×	0	0	0	0	1
43	N=3	3両目	先頭台車	後側	5	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
44	N=3	3両目	先頭台車	前側	5	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
45	N=3	4両目	後続台車	後側	5	水平	－	80	×	0	0	0	1	0
46	N=3	4両目	後続台車	前側	5	水平	－	60	×	0	0	0	1	0
47	N=3	4両目	先頭台車	後側	5	水平	－	－						
48	N=3	4両目	先頭台車	前側	5	水平	－	－						

表 4.3.2-5　模擬き裂シールを垂直に貼った場合の AI 解析検出結果(5km/h)

no	試験数	車両側情報				クラック条件			集計結果		性能評価			
		台車設定			走行速度(km)	向き	幅	長さ	検出結果	検出フレーム数	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
											True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
49	N=1	1両目	後続台車	後側	5	垂直	2.0	80	×	0	0	0	0	1
50	N=1	1両目	後続台車	前側	5	垂直	2.0	60	○	2	1	0	0	0
51	N=1	1両目	先頭台車	後側	5	垂直	2.0	20	○	1	1	0	0	0
52	N=1	1両目	先頭台車	前側	5	垂直	1.0	80	○	3	1	0	0	0
53	N=1	2両目	後続台車	後側	5	垂直	1.0	60	×	0	0	0	0	1
54	N=1	2両目	後続台車	前側	5	垂直	1.0	20	×	0	0	0	0	1
55	N=1	2両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
56	N=1	2両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.2	60	×	0	0	0	0	1
57	N=1	3両目	後続台車	後側	5	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
58	N=1	3両目	後続台車	前側	5	垂直	0.1	80	×	0	0	0	0	1
59	N=1	3両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
60	N=1	3両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
61	N=1	4両目	後続台車	後側	5	垂直	シール(約1mm)	80	○	5	0	1	0	0
62	N=1	4両目	後続台車	前側	5	垂直	シール(約1mm)	60	○	8	0	1	0	0
63	N=1	4両目	先頭台車	後側	5	垂直	−	−						
64	N=1	4両目	先頭台車	前側	5	垂直	−	−						
65	N=2	1両目	後続台車	後側	5	垂直	2.0	80	○	1	1	0	0	0
66	N=2	1両目	後続台車	前側	5	垂直	2.0	60	○	4	1	0	0	0
67	N=2	1両目	先頭台車	後側	5	垂直	2.0	20	○	1	1	0	0	0
68	N=2	1両目	先頭台車	前側	5	垂直	1.0	80	○	4	1	0	0	0
69	N=2	2両目	後続台車	後側	5	垂直	1.0	60	○	1	1	0	0	0
70	N=2	2両目	後続台車	前側	5	垂直	1.0	20	×	0	0	0	0	1
71	N=2	2両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
72	N=2	2両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.2	60	○	1	1	0	0	0
73	N=2	3両目	後続台車	後側	5	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
74	N=2	3両目	後続台車	前側	5	垂直	0.1	80	×	0	0	0	0	1
75	N=2	3両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
76	N=2	3両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
77	N=2	4両目	後続台車	後側	5	垂直	シール(約1mm)	80	○	4	0	1	0	0
78	N=2	4両目	後続台車	前側	5	垂直	シール(約1mm)	60	○	4	0	1	0	0
79	N=2	4両目	先頭台車	後側	5	垂直	−	−						
80	N=2	4両目	先頭台車	前側	5	垂直	−	−						
81	N=3	1両目	後続台車	後側	5	垂直	2.0	80	○	2	1	0	0	0
82	N=3	1両目	後続台車	前側	5	垂直	2.0	60	○	4	1	0	0	0
83	N=3	1両目	先頭台車	後側	5	垂直	2.0	20	○	1	1	0	0	0
84	N=3	1両目	先頭台車	前側	5	垂直	1.0	80	○	5	1	0	0	0
85	N=3	2両目	後続台車	後側	5	垂直	1.0	60	○	1	1	0	0	0
86	N=3	2両目	後続台車	前側	5	垂直	1.0	20	×	0	0	0	0	1
87	N=3	2両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
88	N=3	2両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.2	60	×	0	0	0	0	1
89	N=3	3両目	後続台車	後側	5	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
90	N=3	3両目	後続台車	前側	5	垂直	0.1	80	×	0	0	0	0	1
91	N=3	3両目	先頭台車	後側	5	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
92	N=3	3両目	先頭台車	前側	5	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
93	N=3	4両目	後続台車	後側	5	垂直	シール(約1mm)	80	○	2	0	1	0	0
94	N=3	4両目	後続台車	前側	5	垂直	シール(約1mm)	60	○	8	0	1	0	0
95	N=3	4両目	先頭台車	後側	5	垂直	−	−						
96	N=3	4両目	先頭台車	前側	5	垂直	−	−						

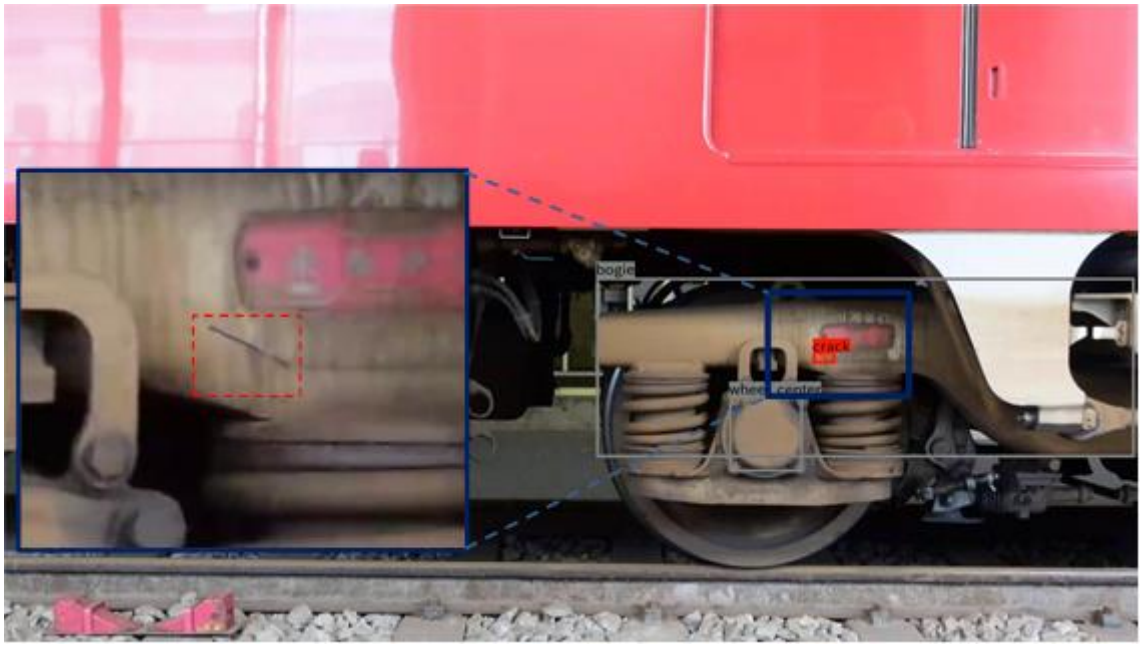


図 4.3.2-5　水平に貼った模擬き裂（幅 2.0mm，長さ 60mm)シールの検出

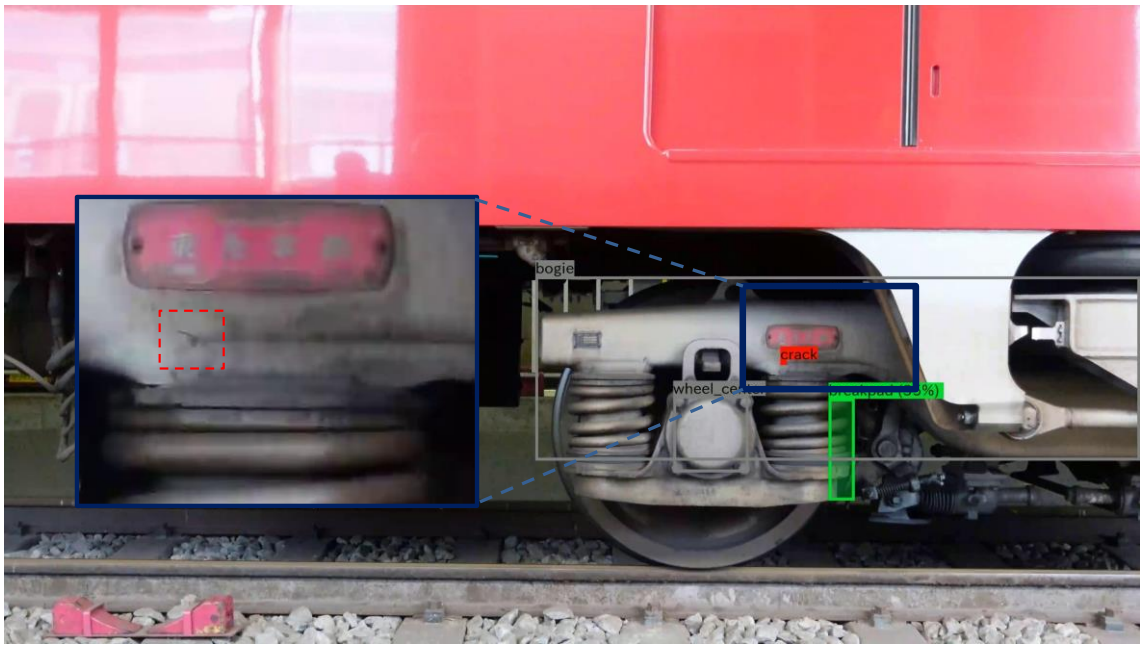


図 4.3.2-6　水平に貼った模擬き裂（幅 1.0mm，長さ 20mm)シールの検出

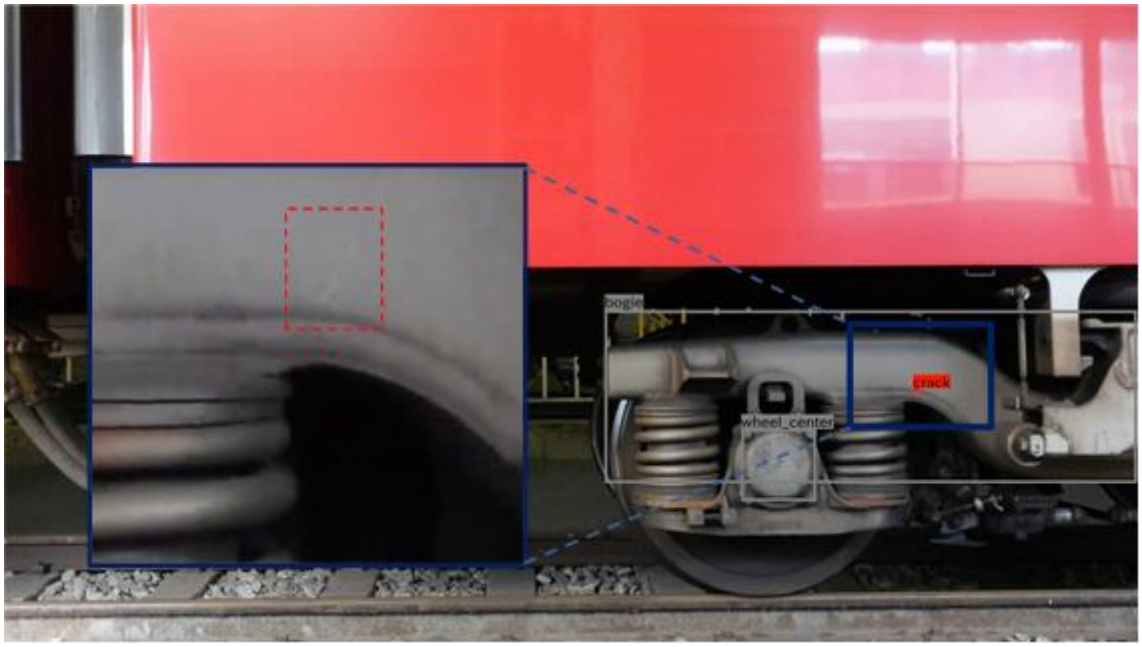


図 4.3.2-7　垂直に貼った模擬き裂（幅 0.2mm, 長さ 60mm)シールの検出

表 4.3.2-6　模擬き裂シールを水平に貼った場合の AI 解析検出結果(10km/h)

no	試験数	車両側情報				クラック条件			集計結果		性能評価			
		台車設定			走行速度(km)	向き	幅	長さ	検出結果	検出フレーム数	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
											True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
1	N=1	1両目	後続台車	後側	10	水平	2	80	○	3	1	0	0	0
2	N=1	1両目	後続台車	前側	10	水平	2	60	○	3	1	0	0	0
3	N=1	1両目	先頭台車	後側	10	水平	2	20	○	5	1	0	0	0
4	N=1	1両目	先頭台車	前側	10	水平	1	80	○	5	1	0	0	0
5	N=1	2両目	後続台車	後側	10	水平	1	60	○	5	1	0	0	0
6	N=1	2両目	後続台車	前側	10	水平	1	20	○	3	1	0	0	0
7	N=1	2両目	先頭台車	後側	10	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
8	N=1	2両目	先頭台車	前側	10	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
9	N=1	3両目	後続台車	後側	10	水平	0.2	20	×	0	0	0	0	1
10	N=1	3両目	後続台車	前側	10	水平	0.1	80	×	0	0	0	0	1
11	N=1	3両目	先頭台車	後側	10	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
12	N=1	3両目	先頭台車	前側	10	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
13	N=1	4両目	後続台車	後側	10	水平	−	80	×	0	0	0	1	0
14	N=1	4両目	後続台車	前側	10	水平	−	60	×	0	0	0	1	0
15	N=1	4両目	先頭台車	後側	10	水平	−	−						
16	N=1	4両目	先頭台車	前側	10	水平	−	−						
17	N=2	1両目	後続台車	後側	10	水平	2	80	○	5	1	0	0	0
18	N=2	1両目	後続台車	前側	10	水平	2	60	○	3	1	0	0	0
19	N=2	1両目	先頭台車	後側	10	水平	2	20	○	5	1	0	0	0
20	N=2	1両目	先頭台車	前側	10	水平	1	80	○	5	1	0	0	0
21	N=2	2両目	後続台車	後側	10	水平	1	60	○	5	1	0	0	0
22	N=2	2両目	後続台車	前側	10	水平	1	20	○	3	1	0	0	0
23	N=2	2両目	先頭台車	後側	10	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
24	N=2	2両目	先頭台車	前側	10	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
25	N=2	3両目	後続台車	後側	10	水平	0.2	20	×	0	0	0	0	1
26	N=2	3両目	後続台車	前側	10	水平	0.1	80	○	1	1	0	0	0
27	N=2	3両目	先頭台車	後側	10	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
28	N=2	3両目	先頭台車	前側	10	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
29	N=2	4両目	後続台車	後側	10	水平	−	80	×	0	0	0	1	0
30	N=2	4両目	後続台車	前側	10	水平	−	60	×	0	0	0	1	0
31	N=2	4両目	先頭台車	後側	10	水平	−	−						
32	N=2	4両目	先頭台車	前側	10	水平	−	−						
33	N=3	1両目	後続台車	後側	10	水平	2	80	○	3	1	0	0	0
34	N=3	1両目	後続台車	前側	10	水平	2	60	○	4	1	0	0	0
35	N=3	1両目	先頭台車	後側	10	水平	2	20	○	5	1	0	0	0
36	N=3	1両目	先頭台車	前側	10	水平	1	80	○	6	1	0	0	0
37	N=3	2両目	後続台車	後側	10	水平	1	60	○	5	1	0	0	0
38	N=3	2両目	後続台車	前側	10	水平	1	20	○	4	1	0	0	0
39	N=3	2両目	先頭台車	後側	10	水平	0.2	80	×	0	0	0	0	1
40	N=3	2両目	先頭台車	前側	10	水平	0.2	60	×	0	0	0	0	1
41	N=3	3両目	後続台車	後側	10	水平	0.2	20	○	1	1	0	0	0
42	N=3	3両目	後続台車	前側	10	水平	0.1	80	×	0	0	0	0	1
43	N=3	3両目	先頭台車	後側	10	水平	0.1	60	×	0	0	0	0	1
44	N=3	3両目	先頭台車	前側	10	水平	0.1	20	×	0	0	0	0	1
45	N=3	4両目	後続台車	後側	10	水平	−	80	×	0	0	0	1	0
46	N=3	4両目	後続台車	前側	10	水平	−	60	×	0	0	0	1	0
47	N=3	4両目	先頭台車	後側	10	水平	−	−						
48	N=3	4両目	先頭台車	前側	10	水平	−	−						

表 4.3.2-7　模擬き裂シールを垂直に貼った場合の AI 解析検出結果(10km/h)

no	試験数	車両側情報				クラック条件			集計結果		性能評価			
		台車設定			走行速度(km)	向き	幅	長さ	検出結果	検出フレーム数	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
											True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
49	N=1	1両目	後続台車	後側	10	垂直	2	80	×	0	0	0	0	1
50	N=1	1両目	後続台車	前側	10	垂直	2	60	×	0	0	0	0	1
51	N=1	1両目	先頭台車	後側	10	垂直	2	20	×	0	0	0	0	1
52	N=1	1両目	先頭台車	前側	10	垂直	1	80	×	0	0	0	0	1
53	N=1	2両目	後続台車	後側	10	垂直	1	60	×	0	0	0	0	1
54	N=1	2両目	後続台車	前側	10	垂直	1	20	×	0	0	0	0	1
55	N=1	2両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
56	N=1	2両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.2	60	×	0	0	0	0	1
57	N=1	3両目	後続台車	後側	10	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
58	N=1	3両目	後続台車	前側	10	垂直	0.1	80	×	0	0	0	0	1
59	N=1	3両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
60	N=1	3両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
61	N=1	4両目	後続台車	後側	10	垂直	シール(約1mm)	80	○	1	0	1	0	0
62	N=1	4両目	後続台車	前側	10	垂直	シール(約1mm)	60	○	3	0	1	0	0
63	N=1	4両目	先頭台車	後側	10	垂直	−	−						
64	N=1	4両目	先頭台車	前側	10	垂直	−	−						
65	N=2	1両目	後続台車	後側	10	垂直	2	80	×	0	0	0	0	1
66	N=2	1両目	後続台車	前側	10	垂直	2	60	×	0	0	0	0	1
67	N=2	1両目	先頭台車	後側	10	垂直	2	20	○	1	1	0	0	0
68	N=2	1両目	先頭台車	前側	10	垂直	1	80	○	1	1	0	0	0
69	N=2	2両目	後続台車	後側	10	垂直	1	60	×	0	0	0	0	1
70	N=2	2両目	後続台車	前側	10	垂直	1	20	○	1	1	0	0	0
71	N=2	2両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
72	N=2	2両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.2	60	×	0	0	0	0	1
73	N=2	3両目	後続台車	後側	10	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
74	N=2	3両目	後続台車	前側	10	垂直	0.1	80	○	1	1	0	0	0
75	N=2	3両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
76	N=2	3両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
77	N=2	4両目	後続台車	後側	10	垂直	シール(約1mm)	80	○	4	0	1	0	0
78	N=2	4両目	後続台車	前側	10	垂直	シール(約1mm)	60	○	5	0	1	0	0
79	N=2	4両目	先頭台車	後側	10	垂直	−	−						
80	N=2	4両目	先頭台車	前側	10	垂直	−	−						
81	N=3	1両目	後続台車	後側	10	垂直	2	80	×	0	0	0	0	1
82	N=3	1両目	後続台車	前側	10	垂直	2	60	×	0	0	0	0	1
83	N=3	1両目	先頭台車	後側	10	垂直	2	20	×	0	0	0	0	1
84	N=3	1両目	先頭台車	前側	10	垂直	1	80	×	0	0	0	0	1
85	N=3	2両目	後続台車	後側	10	垂直	1	60	×	0	0	0	0	1
86	N=3	2両目	後続台車	前側	10	垂直	1	20	×	0	0	0	0	1
87	N=3	2両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.2	80	×	0	0	0	0	1
88	N=3	2両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.2	60	×	0	0	0	0	1
89	N=3	3両目	後続台車	後側	10	垂直	0.2	20	×	0	0	0	0	1
90	N=3	3両目	後続台車	前側	10	垂直	0.1	80	×	0	0	0	0	1
91	N=3	3両目	先頭台車	後側	10	垂直	0.1	60	×	0	0	0	0	1
92	N=3	3両目	先頭台車	前側	10	垂直	0.1	20	×	0	0	0	0	1
93	N=3	4両目	後続台車	後側	10	垂直	シール(約1mm)	80	○	5	0	1	0	0
94	N=3	4両目	後続台車	前側	10	垂直	シール(約1mm)	60	○	3	0	1	0	0
95	N=3	4両目	先頭台車	後側	10	垂直	−	−						
96	N=3	4両目	先頭台車	前側	10	垂直	−	−						

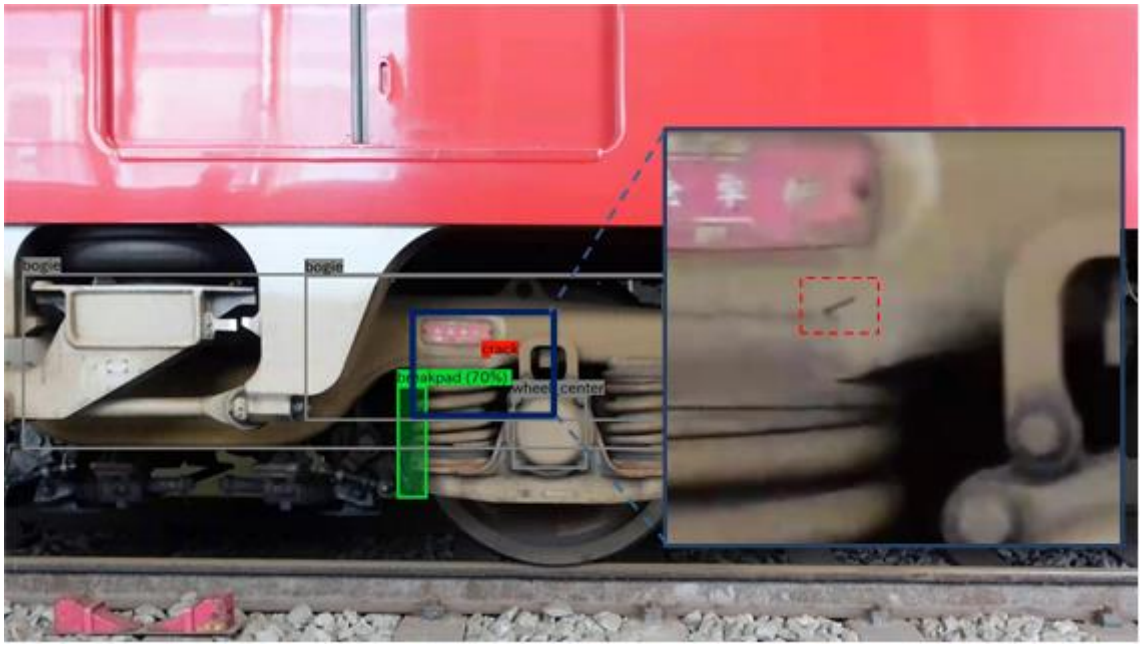


図 4.3.2-8　水平に貼った模擬き裂（幅 2.0mm，長さ 20mm)シールの検出

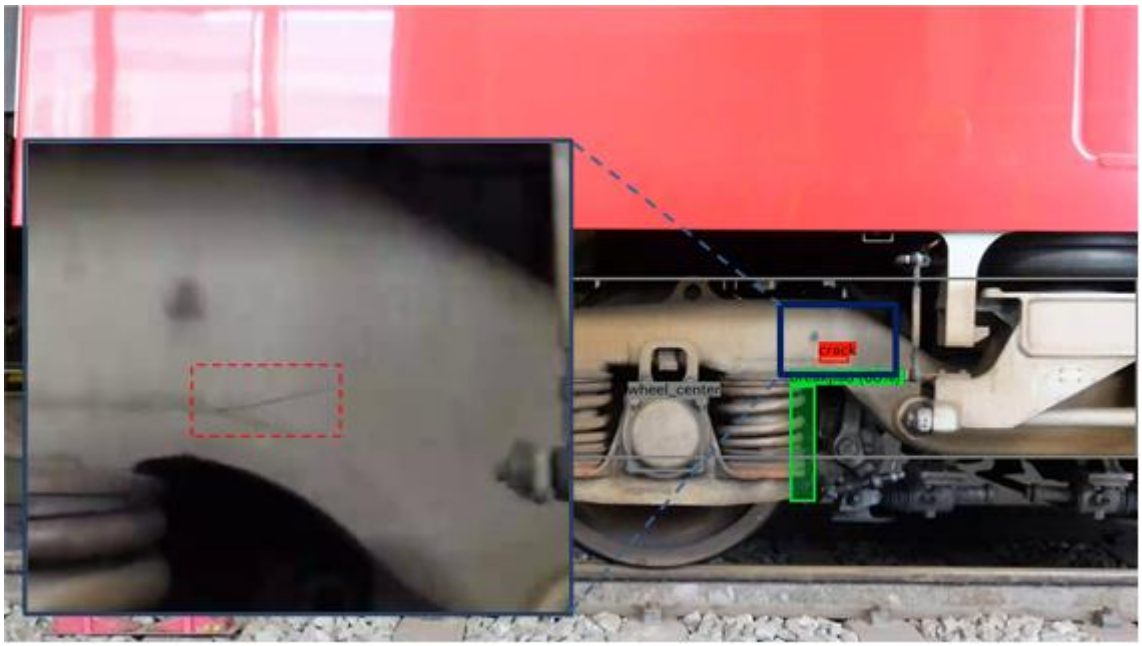


図 4.3.2-9　水平に貼った模擬き裂（幅 1.0mm，長さ 80mm)シールの検出

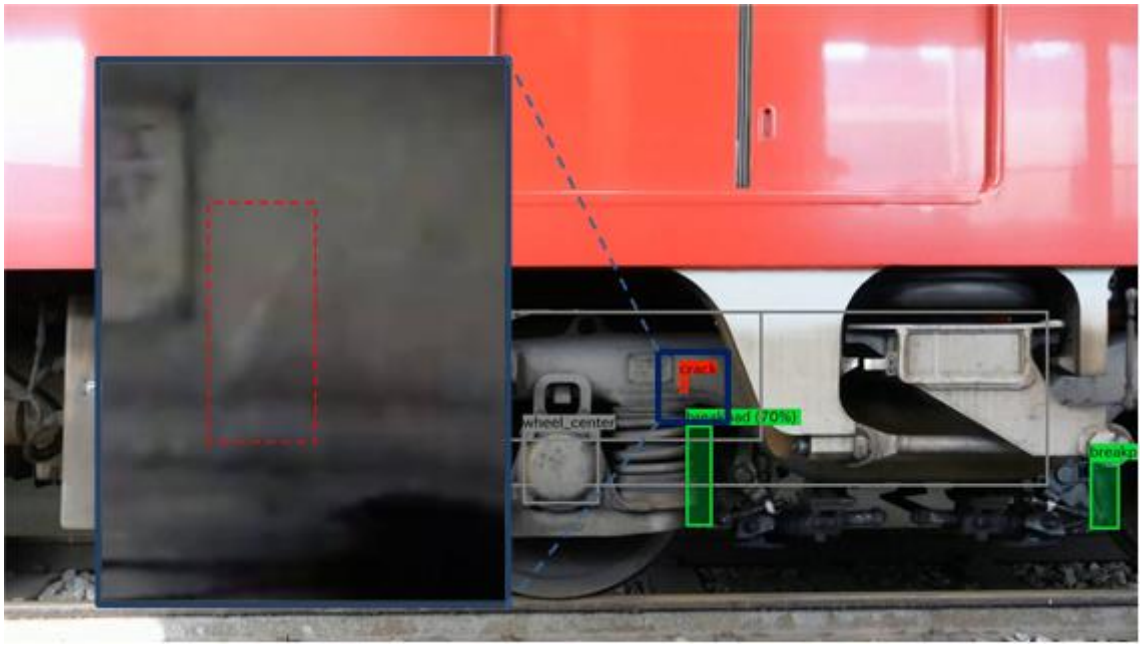


図 4.3.2-10　垂直に貼った模擬き裂（幅 0.1mm，長さ 80mm)シールの検出

b）検出性能の評価

本試験においては、京浜急行電鉄職員（実務者）と協議の上、映像のフレームごとに検出精度を評価する Precision/Recall の評価軸ではなく、新たに「検出率」、「網羅率」を指標として導入する。

※検出率：

１回の試行あたりにシステムが出した結果を積み上げ、「システムが検出したもののうち、真に正しい結果の割合」を評価した。

※網羅率：

１回の試行あたりにシステムが出した結果を積み上げ、「システムが検出すべきと定めた事物のうち、それを少なくとも１回、システムが検出した割合」を評価した。

表 4.3.2-4～表 4.3.2-5 および表 4.3.2-5～表 4.3.2-6 で示した試験結果から、クラックの幅・長さの評価軸を除いて集計した結果を下記に示す。

表 4.3.2-8　試験回毎の検出率・網羅率一覧

試験情報		集計結果				性能評価	
走行速度(km)	向き	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数		検出率	網羅率
		True_positive	False_positive	True_negative	False_negative		
5	垂直	14	0		22	100%	39%
5	水平	19	0		17	100%	53%
5 集計		33	0		39	100%	46%
10	垂直	4	0		32	100%	11%
10	水平	20	0		16	100%	56%
10 集計		24	0		48	100%	33%
総計		57	0		87	100%	40%

まず、時速 5km 走行時における、き裂進展の向きに応じた AI 解析結果について評価した。性能評価において、垂直方向の模擬き裂の検出率が 100%、網羅率が 39%であるのに対して、水平方向の模擬き裂の検出率は 100%、網羅率 53%であった。つまり、垂直方向、水平方向ともに模擬き裂でないものを AI がき裂と判断したことはなかったが、対象の模擬き裂を網羅的に AI 検出することはできなかった。特に、垂直方向の模擬き裂の網羅率については、水平方向のものよりも 14%減であった。

次に、時速 10km 走行時における、車両走行速度およびき裂進展の向きに応じた AI 解析結果について評価した。性能評価において、垂直方向の模擬き裂の検出率が 100%、網羅率が 11%であり、時速 5km 走行時の同条件の結果よりも、特に網羅率が 28%減となることがわかった。このことから、速度上昇に応じて 4k30fps の映像中で、各フレームの画像にブレが生じ、AI 解析精度が低下していることが考えられる。一方、水平方向の模擬き裂の検出率は 100%、網羅率 56%であった。時速 5km 走行時の同条件の結果と比較して、検出率は変わらず、網羅率は 3%増（重要な差ではない）となることがわかった。このことから、水平方向の模擬き裂については、走行速度の上昇による影響を受けにくいことが示唆される。

また、このとき、垂直方向の模擬き裂の AI 検出性能は、水平方向と比較して、検出率は変わらないが、網羅率が 45%減であり、クラック進展の向きに応じた AI 検出精度は、時速 5km のときと比較してより顕著となることがわかった。

以上より、検出率と網羅率に関して、さらなる深堀が必要であると判断し、模擬き裂の幅と長さに応じた検出率と網羅率の分析も行った（表 4.3.2-9、図 4.3.2-11）。

表 4.3.2-9　模擬き裂の検出率・網羅率の一覧

試験情報				集計結果				性能評価	
走行速度 (km)	向き	幅	長さ	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数		検出率	網羅率
				True_positive	False_positive	True_negative	False_negative		
5	垂直	0.1	20	0	0	0	3	0%	0%
5	垂直	0.1	60	0	6	0	3	0%	0%
5	垂直	0.1	80	0	6	0	3	0%	0%
5	垂直	0.2	20	0	0	0	3	0%	0%
5	垂直	0.2	60	1	6	0	2	14%	33%
5	垂直	0.2	80	0	6	0	3	0%	0%
5	垂直	1.0	20	0	0	0	3	0%	0%
5	垂直	1.0	60	2	6	0	1	25%	67%
5	垂直	1.0	80	3	6	0	0	33%	100%
5	垂直	2.0	20	3	0	0	0	100%	100%
5	垂直	2.0	60	3	6	0	0	33%	100%
5	垂直	2.0	80	2	6	0	1	25%	67%
5	水平	0.1	20	0	0	0	3	0%	0%
5	水平	0.1	60	0	0	6	3	0%	0%
5	水平	0.1	80	0	0	6	3	0%	0%
5	水平	0.2	20	1	0	0	2	100%	33%
5	水平	0.2	60	0	0	6	3	0%	0%
5	水平	0.2	80	0	0	6	3	0%	0%
5	水平	1.0	20	3	0	0	0	100%	100%
5	水平	1.0	60	3	0	6	0	100%	100%
5	水平	1.0	80	3	0	6	0	100%	100%
5	水平	2.0	20	3	0	0	0	100%	100%
5	水平	2.0	60	3	0	6	0	100%	100%
5	水平	2.0	80	3	0	6	0	100%	100%
10	垂直	0.1	20	0	0	0	3	0%	0%
10	垂直	0.1	60	0	6	0	3	0%	0%
10	垂直	0.1	80	1	6	0	2	14%	33%
10	垂直	0.2	20	0	0	0	3	0%	0%
10	垂直	0.2	60	0	6	0	3	0%	0%
10	垂直	0.2	80	0	6	0	3	0%	0%
10	垂直	1.0	20	1	0	0	2	100%	33%
10	垂直	1.0	60	0	6	0	3	0%	0%
10	垂直	1.0	80	1	6	0	2	14%	33%
10	垂直	2.0	20	1	0	0	2	100%	33%
10	垂直	2.0	60	0	6	0	3	0%	0%
10	垂直	2.0	80	0	6	0	3	0%	0%
10	水平	0.1	20	0	0	0	3	0%	0%
10	水平	0.1	60	0	0	6	3	0%	0%
10	水平	0.1	80	1	0	6	2	100%	33%
10	水平	0.2	20	1	0	0	2	100%	33%
10	水平	0.2	60	0	0	6	3	0%	0%
10	水平	0.2	80	0	0	6	3	0%	0%
10	水平	1.0	20	3	0	0	0	100%	100%
10	水平	1.0	60	3	0	6	0	100%	100%
10	水平	1.0	80	3	0	6	0	100%	100%
10	水平	2.0	20	3	0	0	0	100%	100%
10	水平	2.0	60	3	0	6	0	100%	100%
10	水平	2.0	80	3	0	6	0	100%	100%

表 4.3.2-9 において、クラックの幅・長さについても、検出率と網羅率の分析を行った。

まず、水平方向の模擬き裂に関して、検出率と網羅率を分析する。時速 5km 走行時においては、幅 1.0mm 以上の模擬き裂は全て検出率・網羅率ともに 100%で検出できている。一方、幅 0.2mm 以下の模擬き裂については、幅 0.2mm/長さ 60mm のサンプルは一部検出できたものの、それ以外は検出率・網羅率ともに 0%となった。一方で、時速 10km 走行時おいては､幅 1.0mm 以上の模擬き裂は全て検出率･網羅率ともに 100%で検出できている。これは時速 5km 時の結果と同様であり、表 4.3.2 7 で示したとおり、水平方向の模擬き裂が速度影響を受けにくいことを示唆している。さらに、幅 0.2mm 以下の模擬き裂については、幅 0.1mm/長さ 80mm および幅 0.2mm/長さ 20mm のサンプルは一部検出できたものの、それ以外は検出率･網羅率ともに 0%となった。時速 5km 走行時の結果と比較すると、関連性を確認することはできなかった。このことから､0.2mm 以下の模擬き裂については、極度に微細な異常であるため、シールの貼付環境（台車の色合いや影の付き方など）に影響を受けやすく安定的な検出ができていないと推察される。

次に、垂直方向の模擬き裂に関して、検出率と網羅率を分析する。時速 5km 走行時においては、幅 2.0mm の模擬き裂は、検出率は 25%～100%とばらつきがあった一方、網羅率は 67%～100%と安定的な結果となった。しかし、幅 1.0mm の模擬き裂については、長さ 20mm のサンプルでは検出率・網羅率ともに 0%となり、検出ができなかった。同幅長さ 60mm 以上のサンプルであれば検出率が 25%～33%､網羅率は 67%～100%に向上するが、水平方向の同様の幅・長さのき裂ほど高い検出性能は見られなかった。一方で、時速 10km 走行時おいては､幅 1.0mm 以上のき裂であっても検出率は 0%～100%で大きくばらつき、網羅率は 0%～33%と比較的低水準となった。このことから、垂直方向のき裂は、幅 1.0mm 以上のき裂の検出率・網羅率において、特に速度影響を受けていたことがわかった。

ここで、上記の解析時に利用した画像を用いて、車両走行速度に応じた視覚的な影響について調査する。特に、図 4.3.2-11、図 4.3.2-12 において、幅 2.0mm の模擬き裂シールが貼られている、1 両目の後続車両の画像を示す。

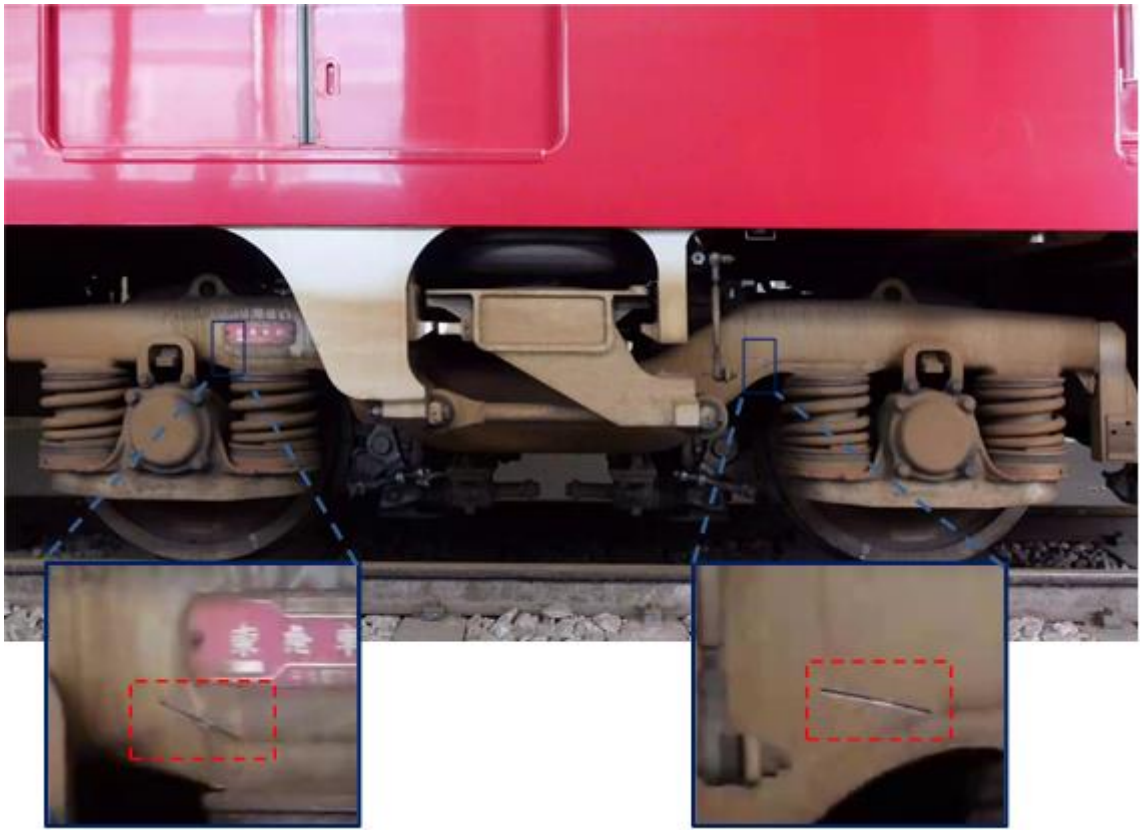


図 4.3.2-11　水平に貼った模擬き裂幅 2.0mm の画像(長さ 60mm(左), 80mm (右))

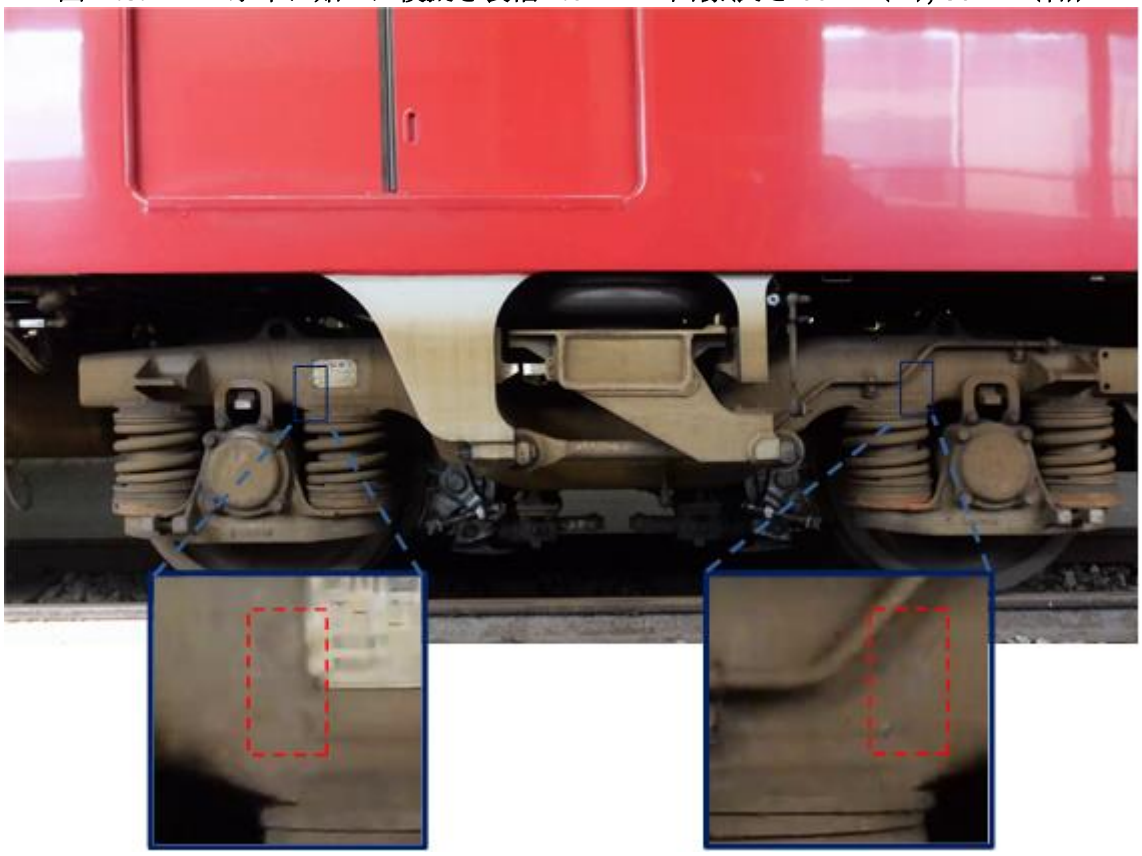


図 4.3.2-12　垂直に貼った模擬き裂幅 2.0mm の画像(長さ 60mm(左), 80mm (右))

図 4.3.2-11 に示すように水平方向に貼った模擬き裂は、ピクセルの色合いで視覚的に判断可能であるのに対して、図 4.3.2-12 に示すように、垂直方向に貼った模擬き裂は横方向に画像が乱れ、ピクセルの色合いで視覚的な判別すらもできない状態であることがわかった。

水平方向のき裂と比較して、垂直方向のき裂は、車両走行方向（水平方向）に占めるピクセル数が少ないため、走行速度に応じた検出精度が劣化しやすいことが考えられる。

c）総検知フレーム数の評価

模擬き裂の検知において、異常検出のフレーム数を調査した。検知フレーム数は、「どれだけ安定的にその結果を異常として判断できているか」の指標と考えることができる。その。結果を図 4.3.2-13 に示す。

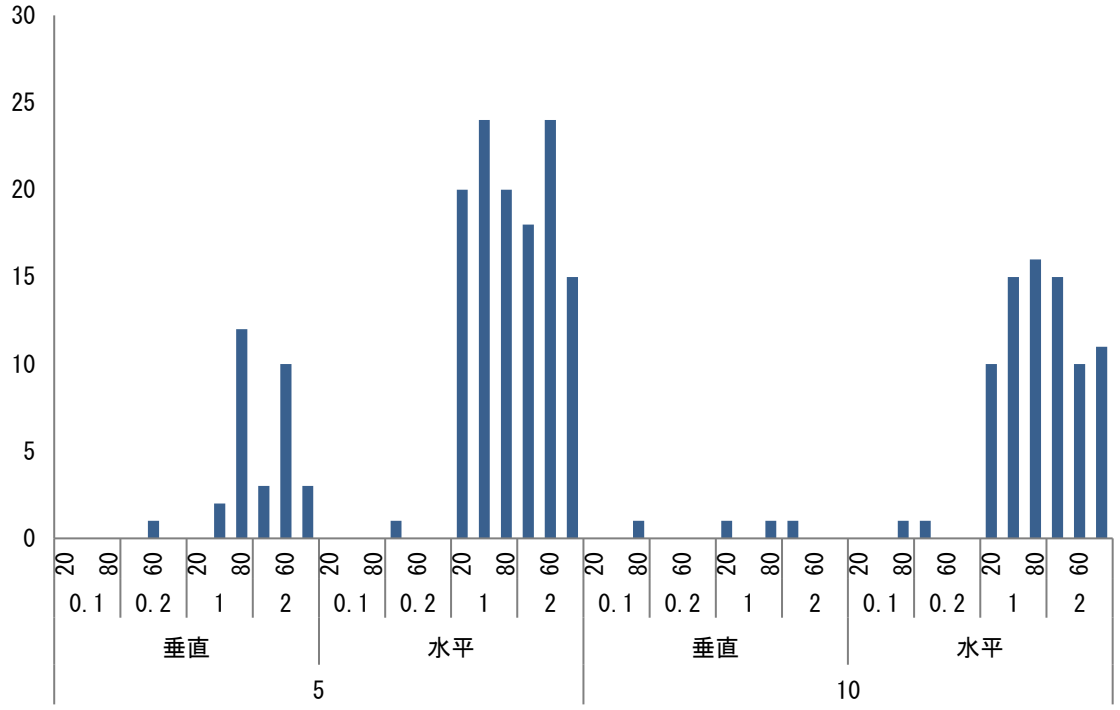


図 4.3.2-13　車両点検モデルの検出総フレーム数

まず、時速 5km のサンプルにおいて、模擬き裂の幅・長さに応じた比較分析を行った。幅 1mm 以上のき裂は比較的安定的に取得できているものの、幅 0.2mm 以下のき裂は、検出できている場合も 1 フレーム程度の検出にとどまっている。つまり、0.2mm 以下のき裂は「環境・画角によっては取得できる可能性はあるが、安定的には検出できていない」といえる。また、垂直・水平のき裂の検出フレーム数を比較すると、水平のき裂のほうが、はるかに多くのフレーム数を安定的に検出できていた。これは、b）で述べた、垂直・水平方向のき裂の、速度に対する検出精度の安定性の考察内容と一致し、それを裏付ける結果といえる。

次に、時速 10km のサンプルにおいて、模擬き裂の幅・長さ、およびき裂進展の方向に応じた比較分析を行った。結果として、垂直のき裂は、幅・長さによらず安定的に検出できていなかった。一方、水平のき裂のうち、特に、幅 1mm 以上のき裂については、（時速

5km の同サンプルには劣るが）安定的に検出できていることがわかる。これも、ｂ）で述べた、垂直・水平方向のき裂の、速度に対する検出精度の安定性の考察内容と一致し、それを裏付ける結果といえる。そのため、図 4.3.2-14 に示すように時速 5km と時速 10km 時で、同じ台車についての映像の結果を比較した。

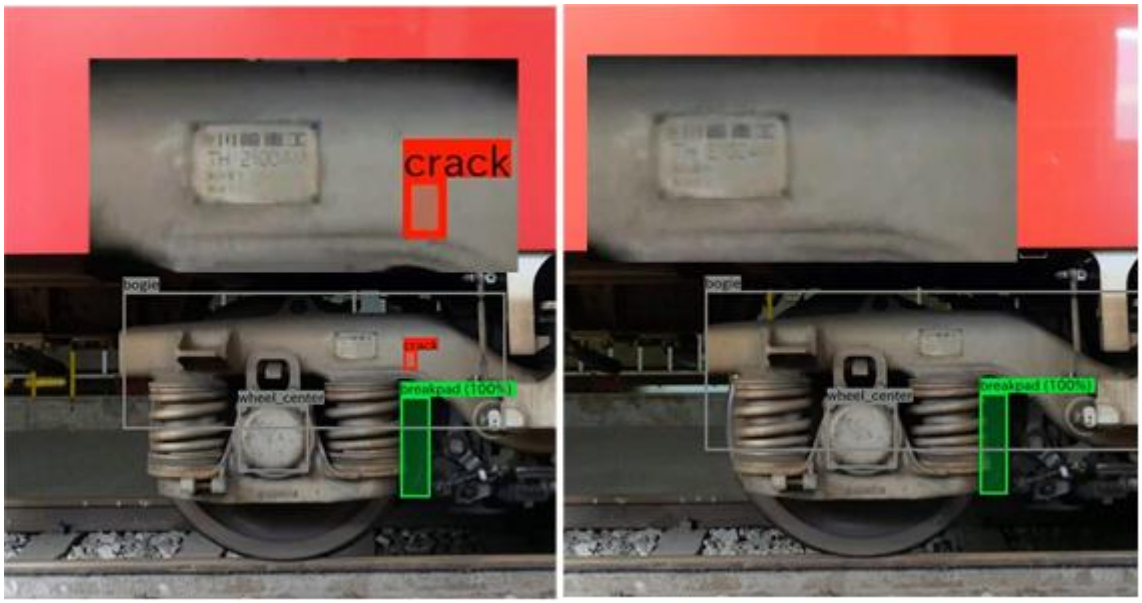


図 4.3.2-14　時速 5km と 10km での模擬き裂シール検出の映像比較

実際の模擬き裂について、時速 5km 走行時と時速 10km 走行時で比較すると、検出できている時速 5km 走行時はかすかにクラックの影が残っているが、時速 10km 走行時は完全にピクセルが潰れて視覚的に消失していることがわかる。

ネットワークの品質が十分である中で、速度に対する映像品質を改善するには、以下の２点が想定される。

・カメラ性能等の向上

・ビデオコーデックの圧縮効率向上

１点目のカメラ性能の向上については、①フレームレート②屋内環境の照度の２点について考察する。①フレームレートを向上させるためには、ハイスピードカメラ等の利用が考えられる。しかし、ハイスピードカメラの場合、伝送容量が飛躍的に大きくなるだけでなく、現状の製品ではリアルタイムに映像出力できず、4k 品質を担保できないため、今後の検査機器の技術向上に応じて導入を検討していく必要がある。②屋内環境の照度については、屋外環境よりも照度が低く（天候に応じてはさらに低下する可能性あり）、光感度を調整したものの、カメラのシャッター速度が下がってしまっていた。これにより、屋外で利用するよりも、検査物体のブレが大きく見えていた可能性がある。これを改善するためには、追加照明を利用することに加え、周辺の照度変化によってシャッター速度が変わらないカメラ機材を選定することが求められる。

２点目のビデオコーデックの圧縮効率向上については、今回利用した H.264 ではなく、より圧縮効率が高いとされる VP9 の利用が考えられる。本検証においては、VP9 利用時に映像伝送のフレームレートが向上しなかったため不適としたが、エンコーダ（シングルボ

ードコンピュータ）の技術革新によりマシンパワーが向上すれば、理論上は問題なく 30fps のフレームを送り出すことが可能であり、その場合は物体の移動速度に応じた映像劣化についても、H.264 よりも抑制できると推察される。

3）ブレーキパッド摩耗確認

a）検出結果

ブレーキパッドの摩耗確認試験については、車両に装着されている実際のブレーキパッドを検出した。このとき、ブレーキパッドの厚みを残存割合として算出し、一定閾値以下のものを異常として設計した。

今回の車両は、実用性の観点から通常車両を用いているため、異常値（通常は残存割合 30%～50%で物品取替え）を返すサンプルが非常に少ない。そのため、異常の閾値を残存割合 60%まで引き上げることにより、異常検出性能を評価した。その結果を

表 4.3.2-10～表 4.3.2-11、及び図 4.3.2-15～図 4.3.2-17 に示す。

表 4.3.2-10　ブレーキパッドの試験結果(5km/h)

no	試験回目	車両側情報				性能評価	
		台車設定			速度(km)	残存割合(%)	異常/正常
1	1	1両目	後続台車	後側	5	74	正常
2	1	1両目	後続台車	前側	5	100	正常
3	1	1両目	先頭台車	後側	5	100	正常
4	1	1両目	先頭台車	前側	5	100	正常
5	1	2両目	後続台車	後側	5	67	正常
6	1	2両目	後続台車	前側	5	100	正常
7	1	2両目	先頭台車	後側	5	100	正常
8	1	2両目	先頭台車	前側	5	100	正常
9	1	3両目	後続台車	後側	5	100	正常
10	1	3両目	後続台車	前側	5	100	正常
11	1	3両目	先頭台車	後側	5	100	正常
12	1	3両目	先頭台車	前側	5	55	異常
13	1	4両目	後続台車	後側	5	100	正常
14	1	4両目	後続台車	前側	5	100	正常
15	1	4両目	先頭台車	後側	5		
16	1	4両目	先頭台車	前側	5		
17	2	1両目	後続台車	後側	5	81	正常
18	2	1両目	後続台車	前側	5	100	正常
19	2	1両目	先頭台車	後側	5	100	正常
20	2	1両目	先頭台車	前側	5	100	正常
21	2	2両目	後続台車	後側	5	77	正常
22	2	2両目	後続台車	前側	5	100	正常
23	2	2両目	先頭台車	後側	5	100	正常
24	2	2両目	先頭台車	前側	5	100	正常
25	2	3両目	後続台車	後側	5	100	正常
26	2	3両目	後続台車	前側	5	100	正常
27	2	3両目	先頭台車	後側	5	100	正常
28	2	3両目	先頭台車	前側	5	52	異常
29	2	4両目	後続台車	後側	5	100	正常
30	2	4両目	後続台車	前側	5	100	正常
31	2	4両目	先頭台車	後側	5		
32	2	4両目	先頭台車	前側	5		
33	3	1両目	後続台車	後側	5	92	正常
34	3	1両目	後続台車	前側	5	96	正常
35	3	1両目	先頭台車	後側	5	100	正常
36	3	1両目	先頭台車	前側	5	96	正常
37	3	2両目	後続台車	後側	5	83	正常
38	3	2両目	後続台車	前側	5	81	正常
39	3	2両目	先頭台車	後側	5	98	正常
40	3	2両目	先頭台車	前側	5	76	正常
41	3	3両目	後続台車	後側	5	83	正常
42	3	3両目	後続台車	前側	5	66	正常
43	3	3両目	先頭台車	後側	5	76	正常
44	3	3両目	先頭台車	前側	5	64	正常
45	3	4両目	後続台車	後側	5	100	正常
46	3	4両目	後続台車	前側	5	97	正常
47	3	4両目	先頭台車	後側	5		
48	3	4両目	先頭台車	前側	5		

表 4.3.2-11　ブレーキパッドの試験結果(10km/h)

no	試験回目	車両側情報				性能評価	
		台車設定			速度(km)	残存割合(%)	異常/正常
49	1	1両目	後続台車	後側	10	85	正常
50	1	1両目	後続台車	前側	10	100	正常
51	1	1両目	先頭台車	後側	10	100	正常
52	1	1両目	先頭台車	前側	10	100	正常
53	1	2両目	後続台車	後側	10	70	正常
54	1	2両目	後続台車	前側	10	100	正常
55	1	2両目	先頭台車	後側	10	100	正常
56	1	2両目	先頭台車	前側	10	100	正常
57	1	3両目	後続台車	後側	10	100	正常
58	1	3両目	後続台車	前側	10	100	正常
59	1	3両目	先頭台車	後側	10	100	正常
60	1	3両目	先頭台車	前側	10	48	異常
61	1	4両目	後続台車	後側	10	100	正常
62	1	4両目	後続台車	前側	10	100	正常
63	1	4両目	先頭台車	後側	10		
64	1	4両目	先頭台車	前側	10		
65	2	1両目	後続台車	後側	10	74	正常
66	2	1両目	後続台車	前側	10	100	正常
67	2	1両目	先頭台車	後側	10	100	正常
68	2	1両目	先頭台車	前側	10	100	正常
69	2	2両目	後続台車	後側	10	73	正常
70	2	2両目	後続台車	前側	10	100	正常
71	2	2両目	先頭台車	後側	10	100	正常
72	2	2両目	先頭台車	前側	10	100	正常
73	2	3両目	後続台車	後側	10	100	正常
74	2	3両目	後続台車	前側	10	100	正常
75	2	3両目	先頭台車	後側	10	100	正常
76	2	3両目	先頭台車	前側	10	49	異常
77	2	4両目	後続台車	後側	10	100	正常
78	2	4両目	後続台車	前側	10	100	正常
79	2	4両目	先頭台車	後側	10		
80	2	4両目	先頭台車	前側	10		
81	3	1両目	後続台車	後側	10	98	正常
82	3	1両目	後続台車	前側	10	94	正常
83	3	1両目	先頭台車	後側	10	97	正常
84	3	1両目	先頭台車	前側	10	97	正常
85	3	2両目	後続台車	後側	10	85	正常
86	3	2両目	後続台車	前側	10	80	正常
87	3	2両目	先頭台車	後側	10	96	正常
88	3	2両目	先頭台車	前側	10	70	正常
89	3	3両目	後続台車	後側	10	79	正常
90	3	3両目	後続台車	前側	10	74	正常
91	3	3両目	先頭台車	後側	10	90	正常
92	3	3両目	先頭台車	前側	10	70	正常
93	3	4両目	後続台車	後側	10	100	正常
94	3	4両目	後続台車	前側	10	98	正常
95	3	4両目	先頭台車	後側	10		
96	3	4両目	先頭台車	前側	10		

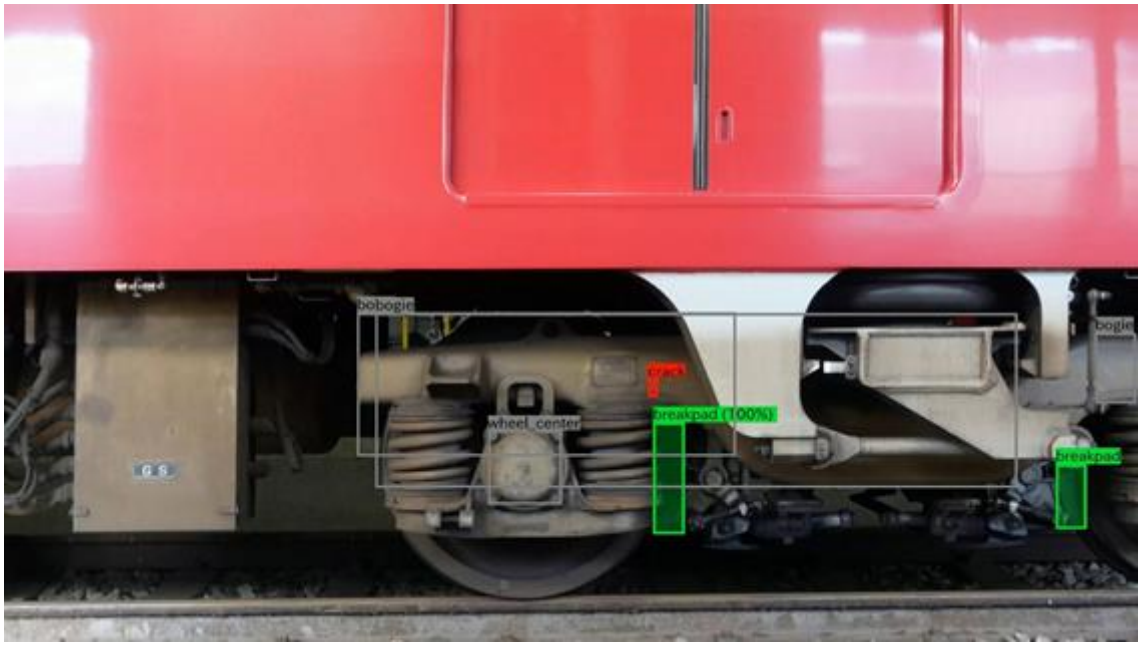


図 4.3.2-15　ブレーキパッドの検出結果(100%)

図 4.3.2-16　ブレーキパッドの検出結果(76%)

図 4.3.2-17　ブレーキパッドの検出結果(54%)

物体検出の観点では、検出すべきブレーキパッドは網羅率 100%で取得できていた。また、厚みの検出についても、49%～100%として、適切に算出できていた。また、異常検出の性能（閾値を用いた異常検出）について、今回設定した閾値（60%）以下であるサンプルは適切に異常値として検出できていたことを確認した。

ここで、時速 5km 走行時と時速 10km 走行時の、各 3 回の試行において、どの程度安定してブレーキパッドの厚みを検出できていたのかを評価するべく、標準偏差を指標として導入した（表 4.3.2-12、表 4.3.2-13）。

まず、時速 5km 走行時のブレーキパッドの厚み検出性能は、標準偏差の平均値は 7.07%程度であった。一方、時速 10km 走行時のブレーキパッドの厚みの検出性能は、標準偏差の平均値は 7.47%程度であった。

このとき、時速 10km 走行時の方が標準偏差が大きくなっており、検出した値のブレが大きいことがわかった。また、時速 5km 走行時の平均厚みと、時速 10km 走行時の平均厚みは、これは、速度上昇によって、ピクセル単位のブレが大きくなり、検出結果の誤差が大きくなったと推察される。

表 4.3.2-12　ブレーキパッド厚みの３回試行時の平均と標準偏差（時速 5km 走行時）

性能評価（時速5km走行時）			平均	標準偏差
1回目	2回目	3回目		
残存割合(%)	残存割合(%)	残存割合(%)		
74	81	92	82.33	9.07
100	100	96	98.67	2.31
100	100	100	100.00	0.00
100	100	96	98.67	2.31
67	77	83	75.67	8.08
100	100	81	93.67	10.97
100	100	98	99.33	1.15
100	100	76	92.00	13.86
100	100	83	94.33	9.81
100	100	66	88.67	19.63
100	100	76	92.00	13.86
55	52	64	57.00	6.24
100	100	100	100.00	0.00
100	100	97	99.00	1.73
				偏差平均
				7.07

表 4.3.2-13　ブレーキパッド厚みの３回試行時の平均と標準偏差（時速 10km 走行時）

性能評価（時速10km走行時）			平均	標準偏差
1回目	2回目	3回目		
残存割合(%)	残存割合(%)	残存割合(%)		
85	74	98	85.67	12.01
100	100	94	98.00	3.46
100	100	97	99.00	1.73
100	100	97	99.00	1.73
70	73	85	76.00	7.94
100	100	80	93.33	11.55
100	100	96	98.67	2.31
100	100	70	90.00	17.32
100	100	79	93.00	12.12
100	100	74	91.33	15.01
100	100	90	96.67	5.77
48	49	70	55.67	12.42
100	100	100	100.00	0.00
100	100	98	99.33	1.15
				偏差平均
				7.47

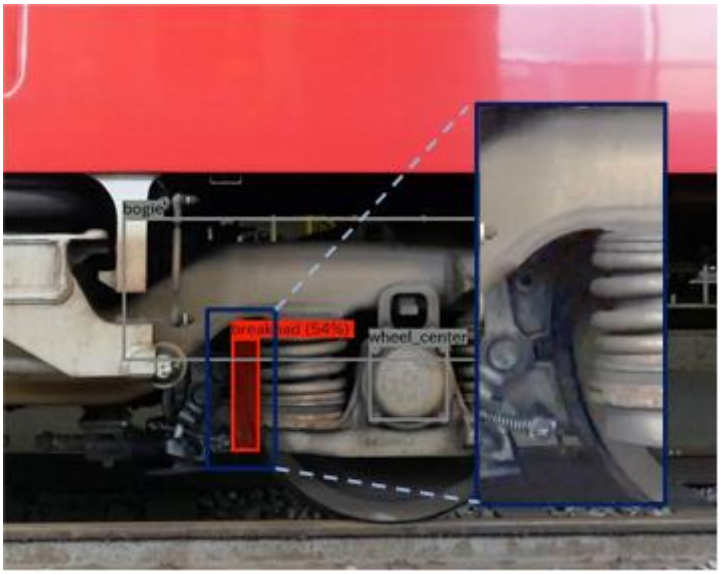


図 4.3.2-18　異常ブレーキパッドの拡大結果

図 4.3.2-19　ブレーキパッドの完全状態図（再掲）

実際の該当部分をより拡大し、画像処理で明るさ補正をした結果を図 4.3.2-18 に示す。図 4.3.2-19 の状態と比較すると、ブレーキパッドの厚みが半分程度まで摩耗していることが確認できた。

以上より、本システムでは、標準偏差約 7%程度の誤差で適切に摩耗したブレーキパッドを検出できており、目視でもその摩耗度合いの妥当性を確認することができた。

4）ハンドル開閉検出

a）検出結果

収容函のハンドル開閉について、今回利用した検査後の商用車両においては全てのハンドルが閉まっているため異常が検出できないため、試験用に開いている状態のハンドルを試験的に準備した。

なお、今回はハンドル開閉を異常値として認識する閾値は、水平面から傾き 30 度と設定した。水平サンプル（正常）と垂直サンプル（異常）を準備した上で、AI が正しく正常・異常を判断できているかを試験結果（正解・不正解）として集計した。

検証結果を表 4.3.2-14 及び図 4.3.2-20～図 4.3.2-22 に示す。

表 4.3.2-14　ハンドル開閉検出結果

no	試験回目	車両側情報		ハンドル条件		試験結果				集計結果・性能評価			
						AIが正常と検出		AIが異常と検出		AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
		車両数目	速度(km)	正常	異常	正解	不正解	正解	不正解	True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
1	N=1	1両目	5	7	3	7	0	3	1	10	1	0	0
2	N=1	2両目	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	N=1	3両目	5	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
4	N=1	4両目	5	7	3	7	0	3	0	10	0	0	0
5	N=2	1両目	5	7	3	7	0	3	0	10	0	0	0
6	N=2	2両目	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	N=2	3両目	5	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
8	N=2	4両目	5	7	3	7	0	3	0	10	0	0	0
9	N=3	1両目	5	10	3	10	0	3	1	13	1	0	0
10	N=3	2両目	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	N=3	3両目	5	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
12	N=3	4両目	5	7	1	7	0	1	0	8	0	0	0
13	N=1	1両目	10	7	3	7	0	3	1	10	1	0	0
14	N=1	2両目	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	N=1	3両目	10	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
16	N=1	4両目	10	7	3	7	0	3	0	10	0	0	0
17	N=2	1両目	10	7	1	7	0	1	1	8	1	0	0
18	N=2	2両目	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	N=2	3両目	10	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
20	N=2	4両目	10	7	3	7	0	3	0	10	0	0	0
21	N=3	1両目	10	10	3	10	0	3	1	13	1	0	0
22	N=3	2両目	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	N=3	3両目	10	6	0	6	0	0	0	6	0	0	0
24	N=3	4両目	10	7	1	7	0	1	0	8	0	0	0

図 4.3.2-20　ハンドルの検出結果（1）

図 4.3.2-21　ハンドルの検出結果（２）

図 4.3.2-22　ハンドルの検出結果（３）偽陽性

まず、上図「ハンドルの検出結果（１）」より、複数のハンドルを同時に検出しており、かつ１つの異常値を検出できていることがわかる。また、この異常な開閉状態のハンドルは視覚的にも明らかに水平面から 30 度以上の傾きがあることがわかる。

次に上図「ハンドルの検出結果（２）」より、複数のハンドルを同時に検出しており、かつ一枚の画像の中でも複数の異常値を同時に検出することもできていることがわかる。また、この異常な開閉状態のハンドルは視覚的にも明らかに水平面から 30 度以上の傾きがあることがわかる。

他方で、上図「ハンドルの検出結果（３）偽陽性」より、ハンドルではない縦長形状の

突起を異常な開閉状態のハンドルと認識している例があった。これは、素人の視覚的には、開いているハンドルにも受け取れる。一方で、現場ヒアリングを通じて、熟練技術者が見れば色合いや影等から判断ができるという意見が上がっていた。このことから、この偽陽性は学習データを集め、追加学習することで、改善することが可能であると考えている。

b）検出性能の評価

表 4.3.2-14 に示した検出結果を、実用性に則した追加評価軸として、検出率・網羅率を導入して評価した。その集計結果を表 4.3.2-15 に示す。

表 4.3.2-15　試験回毎の検出率・網羅率一覧

試験情報		集計結果				性能評価	
走行速度(km)	試験回	AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数		検出率	網羅率
		True_positive	False_positive	True_negative	False_negative		
5	N=1	26	1	0	0	96%	100%
5	N=2	26	0	0	0	100%	100%
5	N=3	27	1	0	0	96%	100%
5 集計		79	2	0	0	98%	100%
10	N=1	26	1	0	0	96%	100%
10	N=2	24	1	0	0	96%	100%
10	N=3	27	1	0	0	96%	100%
10 集計		77	3	0	0	96%	100%
総計		156	5	0	0	97%	100%

上表より、時速 5km および時速 10km 走行時、各試行において、常に網羅率は 100%であり、ハンドル（正常/異常）の検出漏れは発生しなかった。また、検出率については、96%以上の高水準であった。数%検出率が低下している理由は、「ハンドルの検出結果（３）偽陽性」で示したような偽陽性（AI がハンドルと認識したが、実際はハンドルではなかったもの）が発生していたためである。先述の通り、さらなる教師データ収集および追加学習を行うことで、検出率はさらに向上させ、限りなく 100%に近づけることができると考えている。

5）AI 処理時間の結果

AI エンジン（車両点検 AI モデル）の処理速度に関する評価を行った。その結果を図 4.3.2-23 に示す。

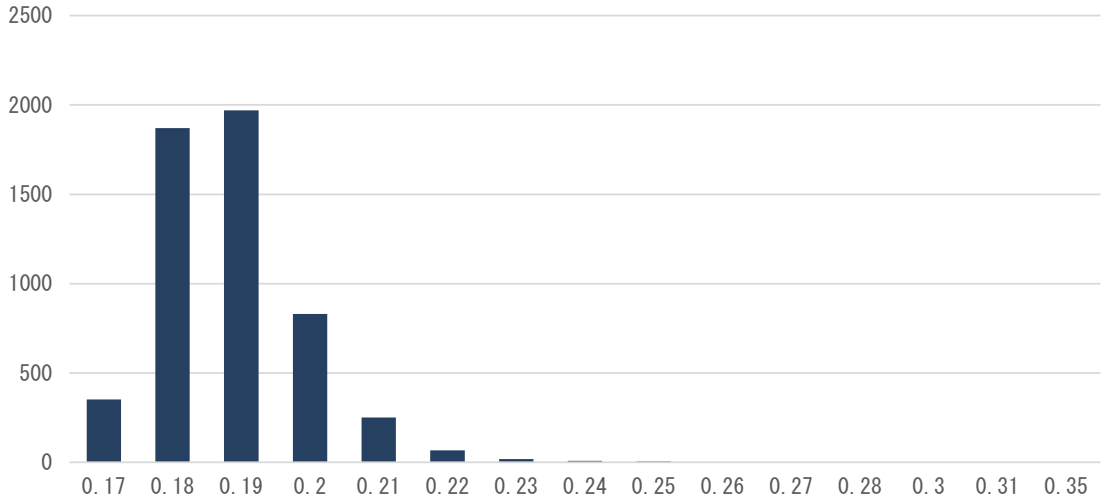


図 4.3.2-23　車両点検モデルの AI 処理時間(京急久里浜工場)

上図で、縦軸が試行あたりのフレーム数、横軸が処理時間（s）を示す。片側検定 5%以下の棄却域とみなしたとき、処理時間は 0.17～0.21s であったと言える(0.22s 以上は棄却)。

今回、AI エンジン（車両点検 AI モデル）の処理時間については、システム全体の時刻同期のため、BackAPI の一定処理時間 0.42s を設定していたが、現地実証の結果を踏まえるとさらなる高速化（BackAPI の一定処理時間 0.21s に設定するなど）が可能であると考えている。その場合、End-End のデータフローにおける AI 処理時間をさらに 0.21s 短縮することが可能である。

なお、参考として、今回、設定した処理時間の一定値（0.42s）を設定した経緯としては、単体試験を通じた処理時間の試験結果（図 4.3.2-24）を参考に決定した。

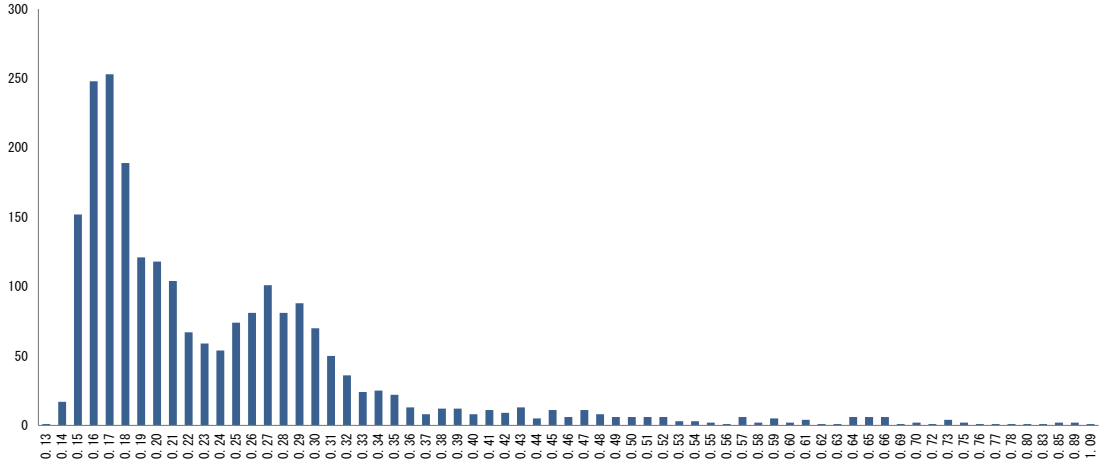


図 4.3.2-24　車両点検モデルの AI 処理時間(NTT ドコモ本社山王ラボ)

上図の結果と、京急久里浜工場での検証とは処理時間の分布が異なることがわかった。NTT ドコモ本社山王ラボにおける、単体検証試験での処理時間が実地の検証結果よりも長くなった理由は、実地検証までの間に最適なモデルを選定（より早いモデルにチューニング）したことが主たる要因であると推察される。

6）fps 数の結果

流れる映像（4k30fps）に対して、試行あたりに AI エンジン（車両点検 AI モデル）が処理したフレーム数を計測し、その結果を図 4.3.2-25 に示す。

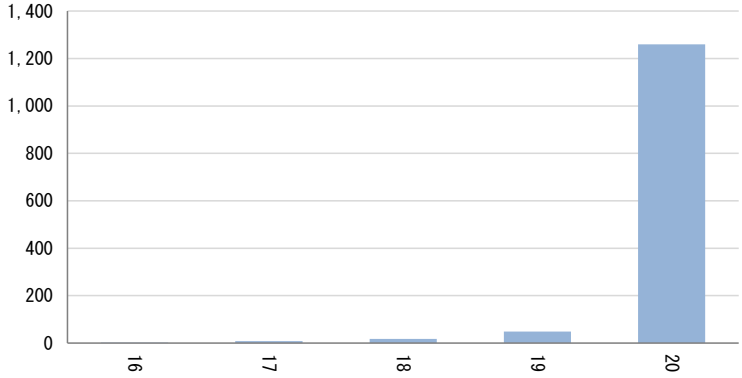


図 4.3.2-25　車両点検モデルの fps

3.1.3　AI 解析基盤で今回の AI エンジンの理論的な最大処理フレーム数は 20fps である。図 4.3.2-25 より、今回の AI エンジン（車両点検 AI モデル）は概ね 20fps を処理できていることが、実験的にも示された。

（2）サーマルカメラで撮影した映像の AI 解析検出可能性の確認

列車検査においては、現場技術者のニーズに基づいて、センシングデバイスとして、サーマルカメラを導入した。ここでは、サーマルカメラで撮影した映像から AI 解析により異常温度を検出することとする。

サーマルカメラの必要性としては、台車のき裂・歪み等よる内部応力の集中および摩擦熱が、特に車軸ベアリング周辺に発生することが熟練技術者の経験的に広く知られている。今回の 4k 映像からは、視覚的な情報のみになるため、複数のセンシング手法を融合（センサフュージョン）させることで、より精緻に漏れなく車両台車・車輪等の異常を発見することを目的として、本系を導入した。

1）検証内容

サーマルカメラ映像からの検出イメージを、図 4.3.2-26 に示すように、検出対象箇所は異常時に摩擦熱が発生しやすい台車の車軸ベアリング部分（図中白枠内）とした。映像に映り込む範囲において検査庫の床温度と車軸部分の温度差をもとに、可変の閾値を設定し、異常温度の検出を行った。本来は、同一車両（同一の走行履歴をもつ）における車軸間での相対的な異常温度を取得する必要があるが、今回は試験的な温度上昇を模擬（複数枚のカイロを利用し 20℃～30℃模擬）するにあたっては、車両の走行による温度上昇（～50℃程度）により正しく検出できない可能性があった。そのため、今回は絶対的な指標として床温度をもとに車軸部分の温度差を検出している。

なお、実運用を想定すると、同様の機能を同一車両における車軸間の相対温度に対して適用することを想定している。

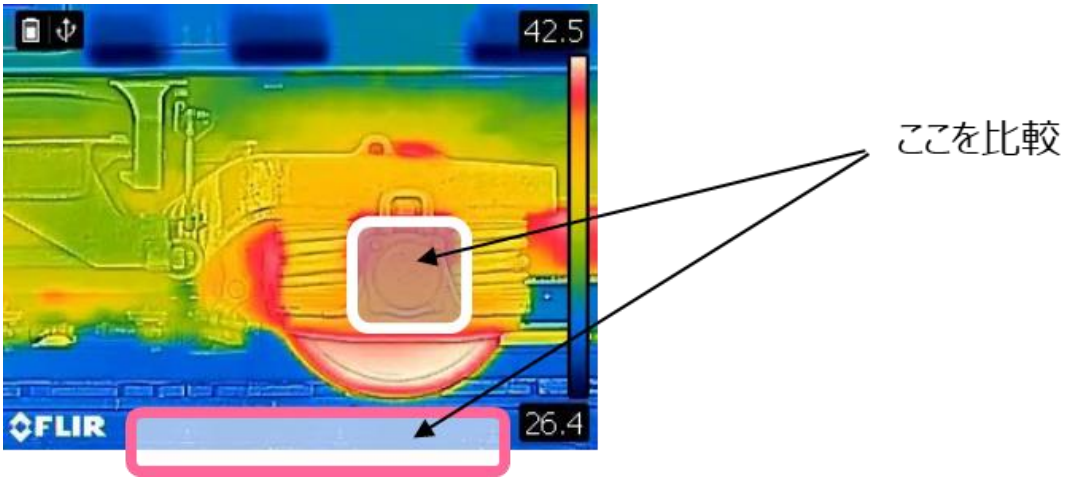
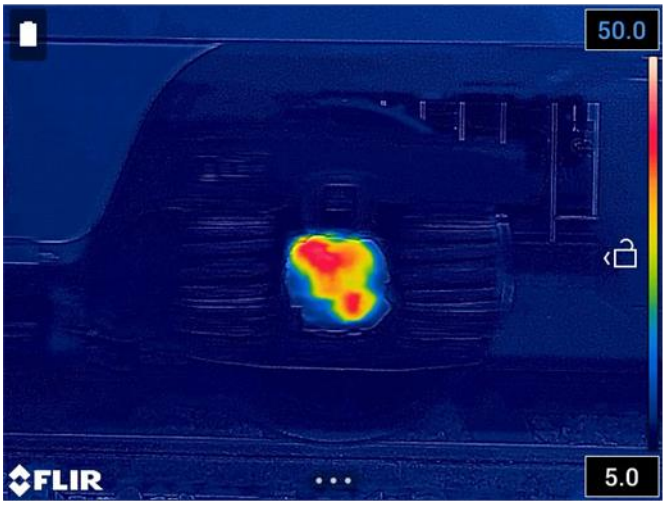


図 4.3.2-26　サーマルカメラで撮影した映像の AI 解析検出可能性の確認内容

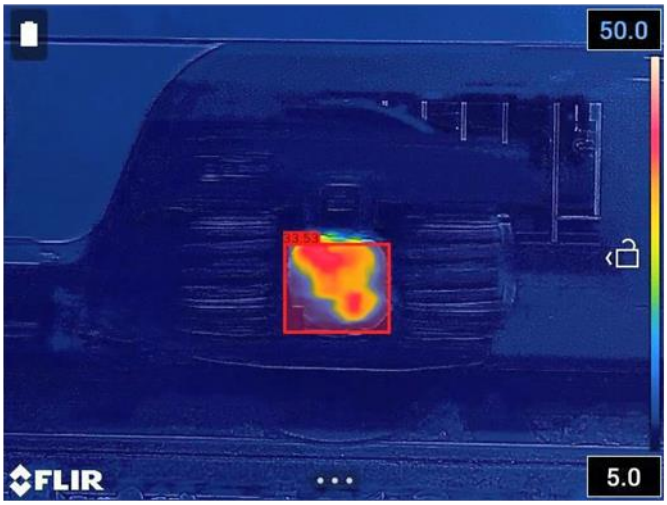
2）検出結果

図 4.3.2-27 に、車軸異常温度の検出イメージと閾値調整等を行った結果を示す。今回、車軸と床温度の閾値を 10℃、30℃に変更した。

検出前



検出後(閾値10度)



検出後(閾値30度)

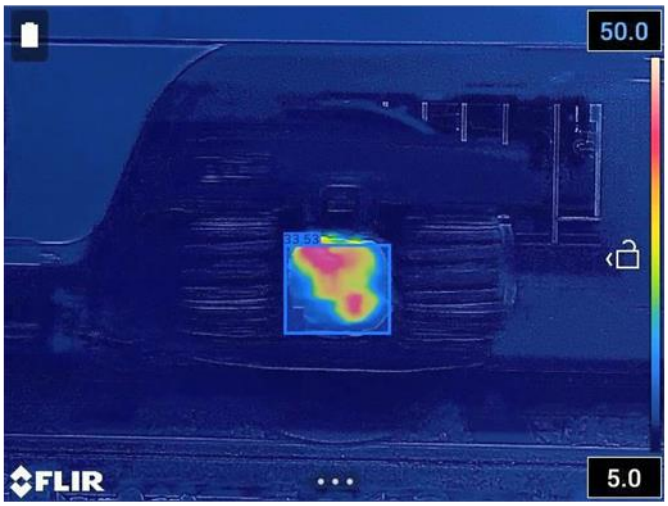


図 4.3.2-27　閾値調整後の異常温度検出結果（5km/h）

まず、閾値 10℃に設定して検出すると、車軸自体の温度が 33.53℃であることが、サーマル検出結果からわかった。床温度（12℃～13℃）から 10℃以上の差が生じており、実際に異常値として、バウンディングボックスが赤く表示され、異常フラグを発出することができている。

次に、閾値を 30℃に設定すると、床温度（12℃～13℃）から 30℃未満の温度差であり、バウンディングボックスは正常値を返しており、想定した通りの機能を発揮していることがわかる。

時速 5k/h 走行時における車軸異常温度の検出結果を表 4.3.2-16 に示す。また、車両を 10k/h 走行時における車軸異常温度の検出結果を表 4.3.2-17 に示す。

表 4.3.2-16　サーマル映像からの異常温度検出の試験結果(5km)

no	試験回目	車両側情報			走行速度(km)	車軸異常	性能評価		
		台車設定				カイロ有無	温度	異常/正常	
								閾値10度	閾値30度
1	1	1両目	後続台車	後側	5	－	7.59	正常	正常
2	1	1両目	後続台車	前側	5	－	8.39	正常	正常
3	1	1両目	先頭台車	後側	5	－	7.83	正常	正常
4	1	1両目	先頭台車	前側	5	－	7.82	正常	正常
5	1	2両目	後続台車	後側	5	－	7.64	正常	正常
6	1	2両目	後続台車	前側	5	－	7.9	正常	正常
7	1	2両目	先頭台車	後側	5	－	7.57	正常	正常
8	1	2両目	先頭台車	前側	5	－	7.85	正常	正常
9	1	3両目	後続台車	後側	5	－	7.96	正常	正常
10	1	3両目	後続台車	前側	5	－	7.61	正常	正常
11	1	3両目	先頭台車	後側	5	－	7.82	正常	正常
12	1	3両目	先頭台車	前側	5	－	7.88	正常	正常
13	1	4両目	後続台車	後側	5	－	7.8	正常	正常
14	1	4両目	後続台車	前側	5	○	14.47	正常	正常
15	1	4両目	先頭台車	後側	5				
16	1	4両目	先頭台車	前側	5				
17	2	1両目	後続台車	後側	5		7.39	正常	正常
18	2	1両目	後続台車	前側	5		7.65	正常	正常
19	2	1両目	先頭台車	後側	5		7.91	正常	正常
20	2	1両目	先頭台車	前側	5		7.75	正常	正常
21	2	2両目	後続台車	後側	5		7.86	正常	正常
22	2	2両目	後続台車	前側	5		7.98	正常	正常
23	2	2両目	先頭台車	後側	5		7.83	正常	正常
24	2	2両目	先頭台車	前側	5		7.45	正常	正常
25	2	3両目	後続台車	後側	5		8.03	正常	正常
26	2	3両目	後続台車	前側	5		8.01	正常	正常
27	2	3両目	先頭台車	後側	5	○	40.17	異常	正常
28	2	3両目	先頭台車	前側	5		7.92	正常	正常
29	2	4両目	後続台車	後側	5		7.99	正常	正常
30	2	4両目	後続台車	前側	5	○	25.67	異常	正常
31	2	4両目	先頭台車	後側	5				
32	2	4両目	先頭台車	前側	5				
33	3	1両目	後続台車	後側	5		7.56	正常	正常
34	3	1両目	後続台車	前側	5		7.57	正常	正常
35	3	1両目	先頭台車	後側	5		7.55	正常	正常
36	3	1両目	先頭台車	前側	5		7.95	正常	正常
37	3	2両目	後続台車	後側	5		7.83	正常	正常
38	3	2両目	後続台車	前側	5		7.95	正常	正常
39	3	2両目	先頭台車	後側	5		7.91	正常	正常
40	3	2両目	先頭台車	前側	5		7.95	正常	正常
41	3	3両目	後続台車	後側	5		8.08	正常	正常
42	3	3両目	後続台車	前側	5		7.65	正常	正常
43	3	3両目	先頭台車	後側	5	○	35.26	異常	正常
44	3	3両目	先頭台車	前側	5		8.05	正常	正常
45	3	4両目	後続台車	後側	5		7.67	正常	正常
46	3	4両目	後続台車	前側	5	○	25.56	異常	正常
47	3	4両目	先頭台車	後側	5				
48	3	4両目	先頭台車	前側	5				

表 4.3.2-17　サーマル映像からの異常検出試験結果(10km)

no	試験回目	車両側情報				車軸異常	性能評価		
		台車設定			走行速度(km)	カイロ有無	温度	異常/正常	
								閾値10度	閾値30度
49	1	1両目	後続台車	後側	10		7.71	正常	正常
50	1	1両目	後続台車	前側	10		7.74	正常	正常
51	1	1両目	先頭台車	後側	10		7.84	正常	正常
52	1	1両目	先頭台車	前側	10		7.98	正常	正常
53	1	2両目	後続台車	後側	10		7.45	正常	正常
54	1	2両目	後続台車	前側	10		7.5	正常	正常
55	1	2両目	先頭台車	後側	10		7.77	正常	正常
56	1	2両目	先頭台車	前側	10		7.96	正常	正常
57	1	3両目	後続台車	後側	10		7.81	正常	正常
58	1	3両目	後続台車	前側	10		7.53	正常	正常
59	1	3両目	先頭台車	後側	10		7.8	正常	正常
60	1	3両目	先頭台車	前側	10		7.68	正常	正常
61	1	4両目	後続台車	後側	10		7.53	正常	正常
62	1	4両目	後続台車	前側	10	○	13.7	正常	正常
63	1	4両目	先頭台車	後側	10				
64	1	4両目	先頭台車	前側	10				
65	2	1両目	後続台車	後側	10		8.45	正常	正常
66	2	1両目	後続台車	前側	10		7.7	正常	正常
67	2	1両目	先頭台車	後側	10		8	正常	正常
68	2	1両目	先頭台車	前側	10		8.33	正常	正常
69	2	2両目	後続台車	後側	10		8.25	正常	正常
70	2	2両目	後続台車	前側	10		8.47	正常	正常
71	2	2両目	先頭台車	後側	10		7.84	正常	正常
72	2	2両目	先頭台車	前側	10		7.46	正常	正常
73	2	3両目	後続台車	後側	10		8.62	正常	正常
74	2	3両目	後続台車	前側	10		8.35	正常	正常
75	2	3両目	先頭台車	後側	10	○	23.15	異常	正常
76	2	3両目	先頭台車	前側	10		7.93	正常	正常
77	2	4両目	後続台車	後側	10		8	正常	正常
78	2	4両目	後続台車	前側	10	○	13.75	正常	正常
79	2	4両目	先頭台車	後側	10				
80	2	4両目	先頭台車	前側	10				
81	3	1両目	後続台車	後側	10		7.73	正常	正常
82	3	1両目	後続台車	前側	10		7.7	正常	正常
83	3	1両目	先頭台車	後側	10		7.82	正常	正常
84	3	1両目	先頭台車	前側	10		8.08	正常	正常
85	3	2両目	後続台車	後側	10		8.09	正常	正常
86	3	2両目	後続台車	前側	10		7.98	正常	正常
87	3	2両目	先頭台車	後側	10		8.12	正常	正常
88	3	2両目	先頭台車	前側	10		8.11	正常	正常
89	3	3両目	後続台車	後側	10		7.88	正常	正常
90	3	3両目	後続台車	前側	10		8.15	正常	正常
91	3	3両目	先頭台車	後側	10	○	23.18	異常	正常
92	3	3両目	先頭台車	前側	10		8.27	正常	正常
93	3	4両目	後続台車	後側	10		8.41	正常	正常
94	3	4両目	後続台車	前側	10	○	13.08	正常	正常
95	3	4両目	先頭台車	後側	10				
96	3	4両目	先頭台車	前側	10				

時速 5km 走行時および時速 10km 走行時のそれぞれにおいて、車軸自体の物体検出は概ね網羅的に成功していることがわかる。なお、両表において、試行回数 1 回目と、2 回目/3 回目は数時間の差が開いており、2 回目/3 回目は各連続で実施した結果である。そのため、試行回数 1 回目と、各 2 回目/3 回目の結果は整合性が取れないが、各 2 回目/3 回目の結果は概ね整合するものとなる。時速 5km 走行時の 2 回目/3 回目と、時速 10km 走行時の 2 回

目/3 回目では、10 分程度のタイムラグが生じていたため、カイロの温度低下が発生していた。

なお、No.27, 43 において、閾値を 30℃に設定した際に、車軸温度が 30℃以上で正常値が出ているが、これは正しい解析結果である。なぜなら、閾値温度は車軸温度と床面温度の差分であり

(閾値温度) = (検出された車軸温度)- (床面温度 12～13℃)

となるため、例えば閾値を 30℃に設定した場合は、概ね車軸温度が 42℃以上で反応し始めると言える。

3）検出性能評価

サーマルカメラを用いた車軸異常温度の検出において、検出率・網羅率の指標を導入した。その結果を表 4.3.2-18 に示す。

表 4.3.2-18　試験回毎の検出率・網羅率一覧

検出対象		AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数		検出率	網羅率
走行速度	閾値	True_positive	False_positive	True_negative	False_negative		
5	10	42	0	0	0	100%	100%
5	30	38	0	4	0	100%	100%
10	10	42	0	0	0	100%	100%
10	30	40	0	2	0	100%	100%

上表より、走行速度によらず、検出率・網羅率ともに 100%となり、高精度な検出ができていた。

4）AI 処理時間の結果

AI エンジン（車両点検 AI モデル）の処理速度に関する評価を行った。その結果を図 4.3.2-28 に示す。

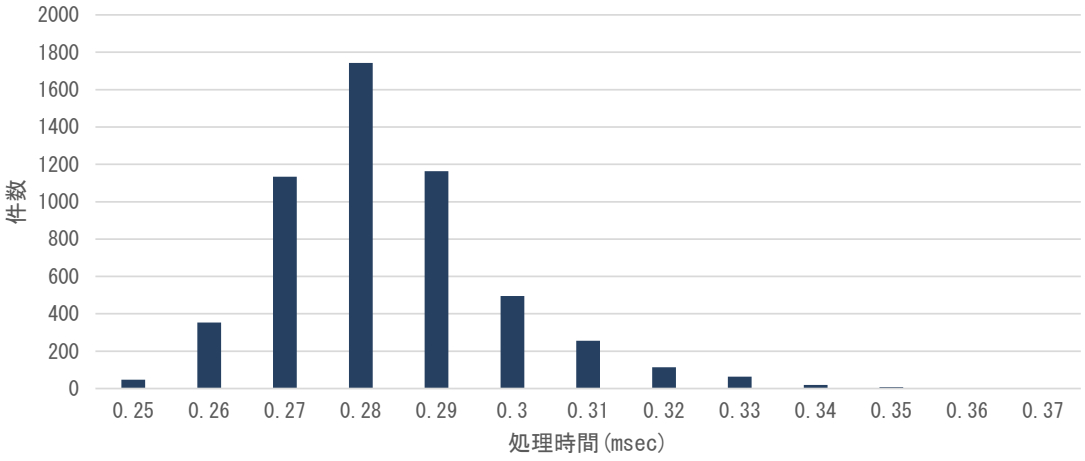


図 4.3.2-28　サーマル異常検出モデルの AI 処理時間

上図で、縦軸が試行あたりのフレーム数、横軸が処理時間（s）を示す。片側検定 5%以下の棄却域とみなしたとき、処理時間は 0.25～0.31s であったと言える（0.32s 以上は棄却）。

今回、AI エンジン（車両点検 AI モデル）の処理時間については、システム全体の時刻同期のため、BackAPI の一定処理時間 0.42s を設定していたが、現地実証の結果を踏まえるとさらなる高速化（BackAPI の一定処理時間 0.31s に設定するなど）が可能であると考えている。その場合、End-End のデータフローにおける AI 処理時間をさらに 0.11s 短縮することが可能である。

5）fps 数の結果

本解析で実験的に処理したフレーム数について、図 4.3.2-29 に示す。結果として、安定的に 5fps での処理ができており、想定した通りの動作をしていることが確認できた。

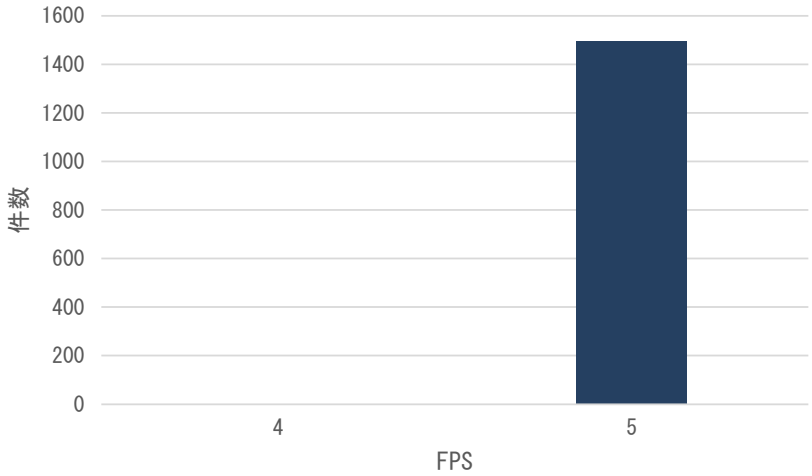


図 4.3.2-29　サーマル異常検出モデルの fps

4.3.2.2 ユーザインターフェース（UI）

（1）UI の構築

本システムは、現場技術者の可用性を高めるために、現場技術者へのヒアリングをもとにしたユーザインターフェースを構築した。これらは、遠隔監視室と想定する試験室内 PC 等の端末（図 4.3.2-30）により利用することが可能である。また、可用性の観点から汎用的な Chrome ブラウザ上での動作するように構築しているため、別拠点の端末からのアクセスも可能である。

図 4.3.2-30　試験室設置の PC 上での UI 表示

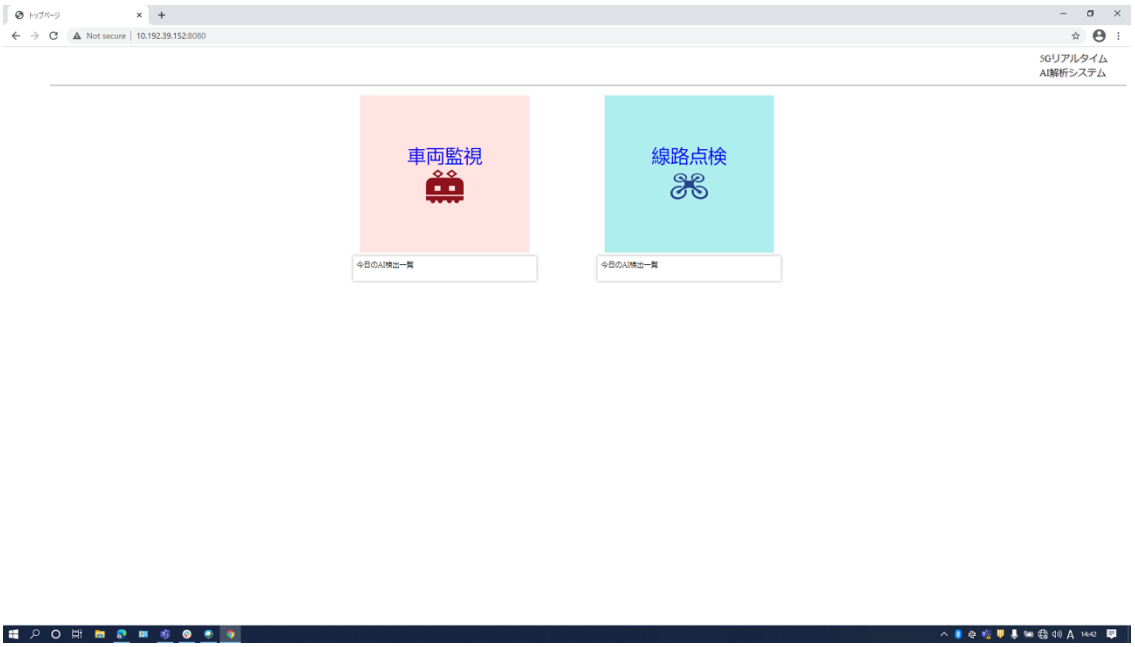


図 4.3.2-31　ユーザインターフェースのトップ画面

まず、上図にユーザインターフェースのトップ画面を示す。ここでは、車両監視、線路点検のアイコンをクリックすることでそれぞれの映像監視ページにジャンプすることができる。また、今日の AI 検出一覧というボックスには、自動監視機能として、AI が異常検知した場合に、該当する日時が表示され、そのリンクをクリックすることで該当の録画映

像の再生画面に直接ジャンプすることができる仕様となっている。

以下、本項では車両監視の UI について、ライブ映像画面（下図）から説明する。

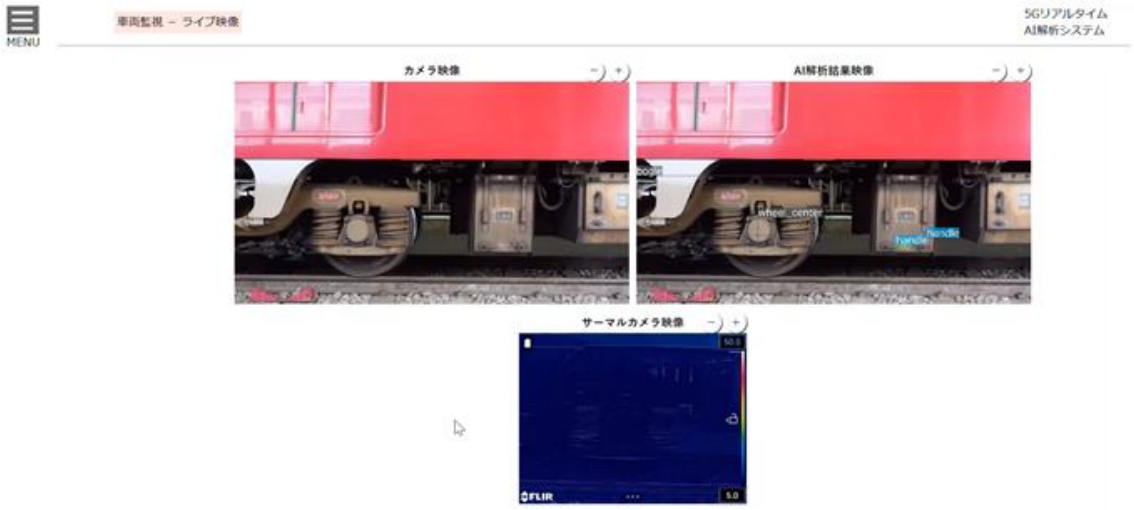


図 4.3.2-32　車両監視のライブ映像 UI

上図は、車両監視 UI のリアルタイム監視映像（ライブ映像）画面である。ここでは、左上にカメラからの生映像と、右上に生映像をベースに AI 監視結果が表示された AI 解析結果映像、さらに下段にサーマルカメラ映像を表示している。これら 3 系統の映像は時刻同期のもと、同時に流れる仕様となっている。

想定利用シーンとしては、AI 結果表示がアドオンされた右上の結果表示画面を見て、異常検知の種類と箇所を把握し、その後、カメラの生映像から異常検知箇所のみに注目して人の目で確認する。これにより、要点を絞って技術者の稼働を集中することができるため、例えば複数系統を集中管理するようなオペレーションも現実的に可能であると考えている。

このとき、センサフュージョンとして、サーマルカメラによる車軸温度の異常検知を導入することで、視覚的にわからない情報であっても察知し、即座に必要箇所に必要な検査を人が実施することができる。これにより、人の目の検査よりも一層の安全性に寄与するオペレーションが可能になると考えている。

続いて、録画映像画面（下図）について、説明する。

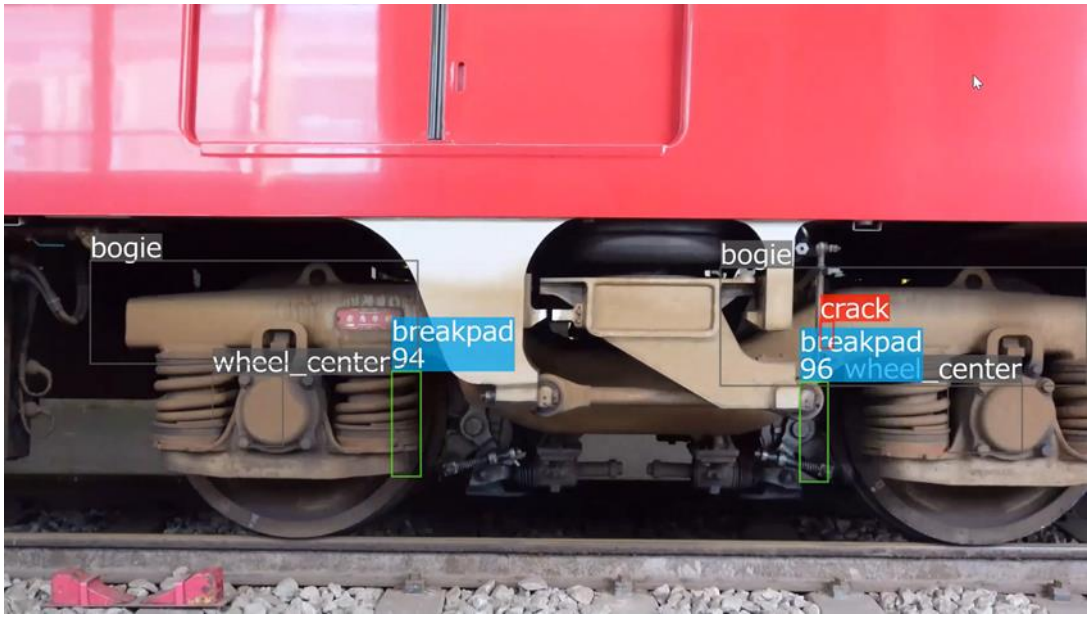


図 4.3.2-33　車両監視ライブ映像表示画面（車軸及び模擬クラック検出：拡大画面）

また、上図に示すように、特定の画面をワンクリックすると、即座に対象画面を拡大表示することができ、現場の技術者がより簡単かつ精細に異常状態を確認することができるように工夫されている。

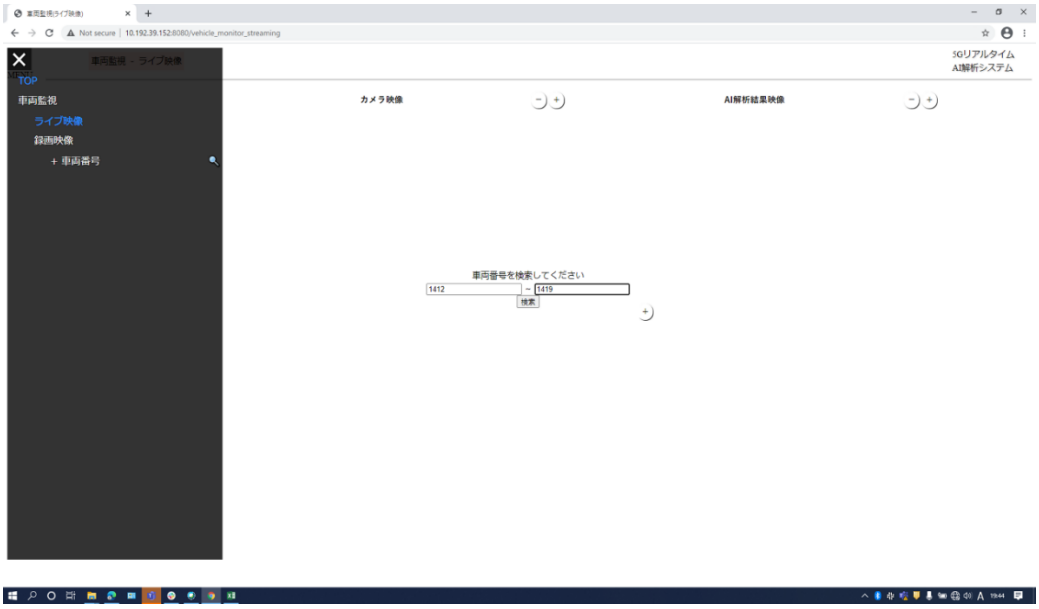
今回、リアルタイムの遠隔・自動監視システムを構築するだけでなく、より実用性を向上させるため、現場技術者の声から、録画映像の振り返り確認機能を実装した。

録画映像については、クラウド環境中の録画共有インスタンスに格納されており、UI に搭載した検索機能を利用して、車両番号や撮影した日時から検索し、簡単に録画映像を確認することが可能である。

車両番号検索機能を図 4.3.2-34 に示す。ここでは、現場技術者が編成車両（通常は連番車両）で複数車両を同時に検査するニーズがあることから、車両番号の範囲検索が可能になっている。これにより特定車両の過去日時の映像を確認できるため、例えば検査で瑕疵が見つかった場合にそれがいつから発生・進展していたのか、経緯や原因究明に活用することも可能である。

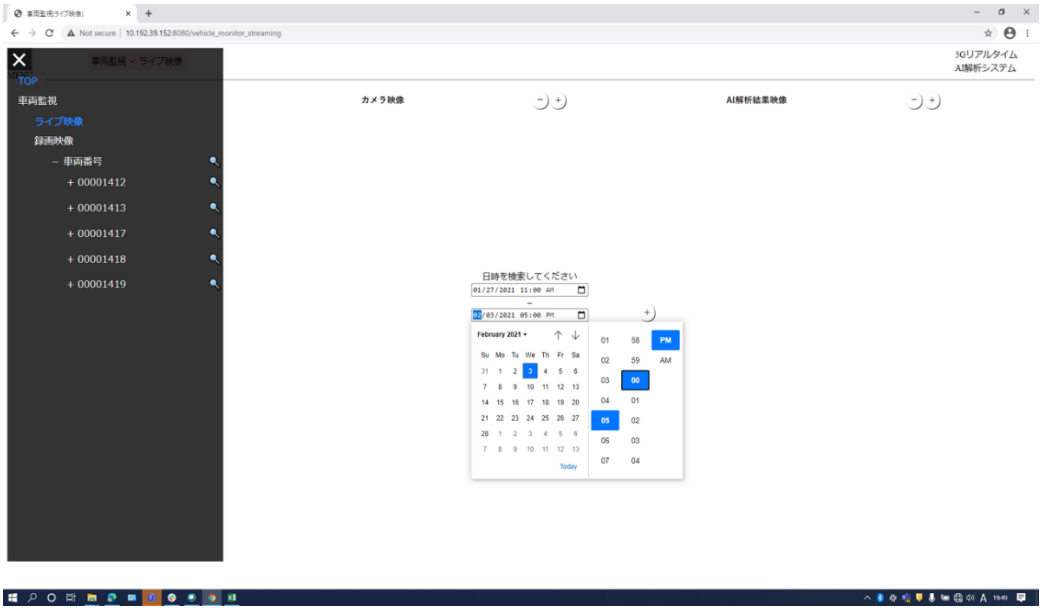
日時検索機能を図 4.3.2-35 に示す。ここでは、日時の範囲検索だけでなく、カレンダー検索機能を搭載することで、現場技術者が視覚的に瞬時に間違いなく日時を検索できるように工夫している。

続いて、録画映像の再生画面を下図に示す。



※ライブ映像がある場合には、「カメラ映像」「AI 解析結果映像」がそれぞれ表示される。
この例はライブ映像がない場合

図 4.3.2-34　録画映像がある車両監視検索の車両指定画面



※ライブ映像がある場合には、「カメラ映像」「AI 解析結果映像」がそれぞれ表示される。
この例はライブ映像がない場合

図 4.3.2-35　録画映像がある車両監視検索の日時指定画面

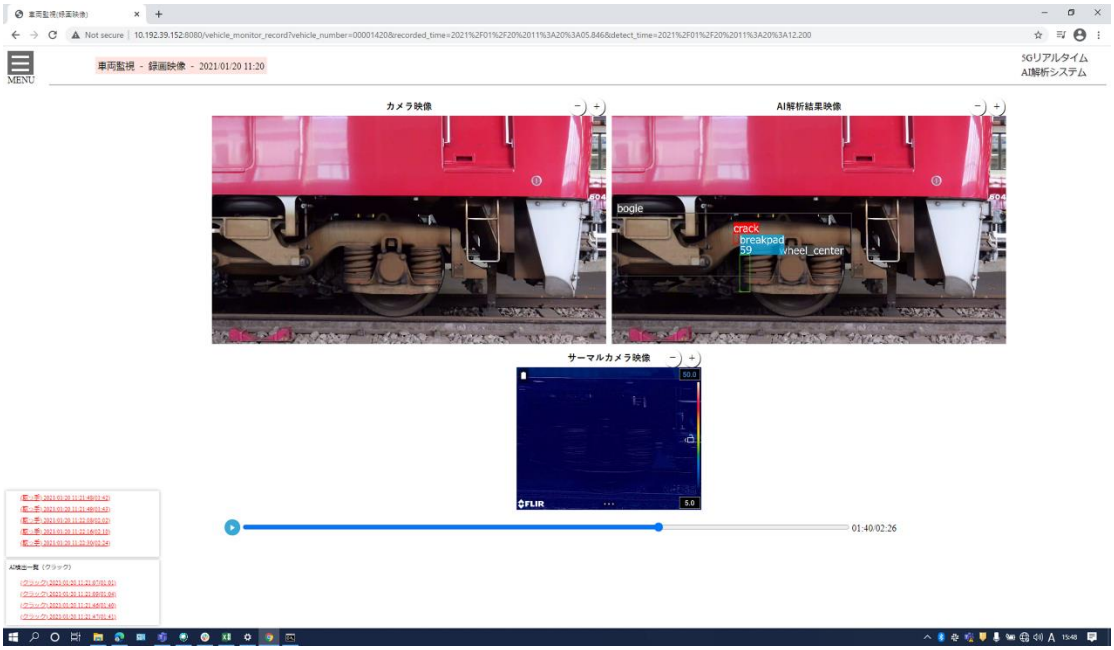


図 4.3.2-36　車両監視録画映像表示画面（指定された車両及び日時の検索結果表示）

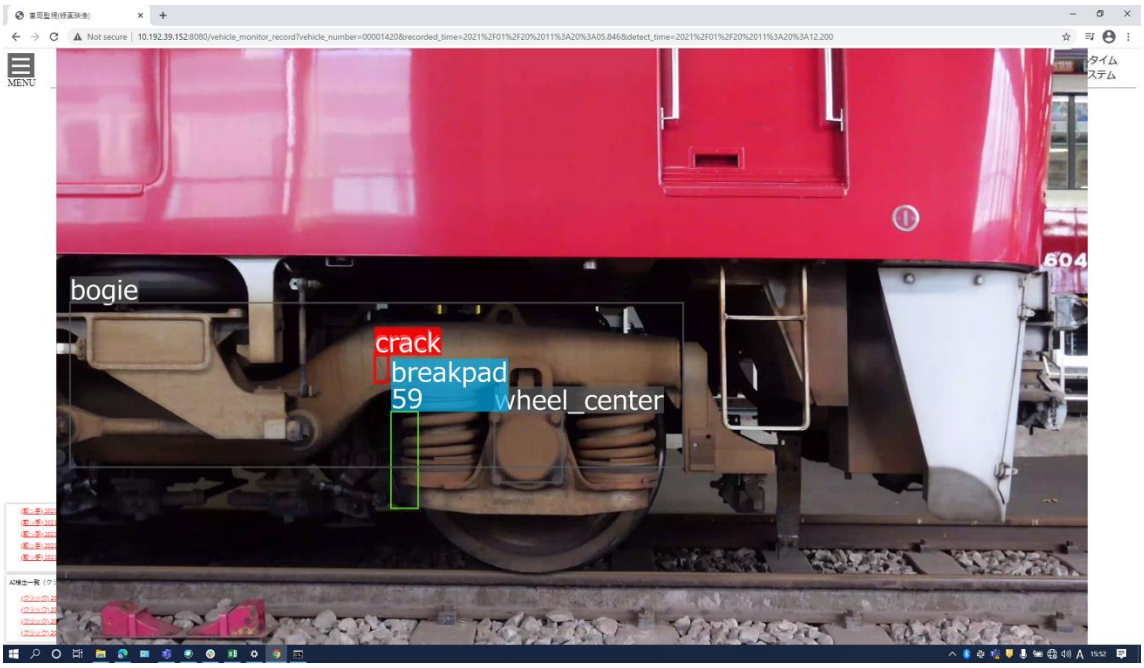


図 4.3.2-37　車両監視録画映像表示画面（車軸及び模擬クラック検出：拡大画面）

録画映像画面については、図 4.3.2-36 に示すとおり、ライブ映像と同様に 3 系統の映像が同時に流れる仕様となっている。追加機能としては、みたい時刻に即座に合わせられるように、動画共有サイト等で一般的に利用される「シークバー」を機能として搭載した。これにより、現場技術者がより感覚的に動画を操作することができる。

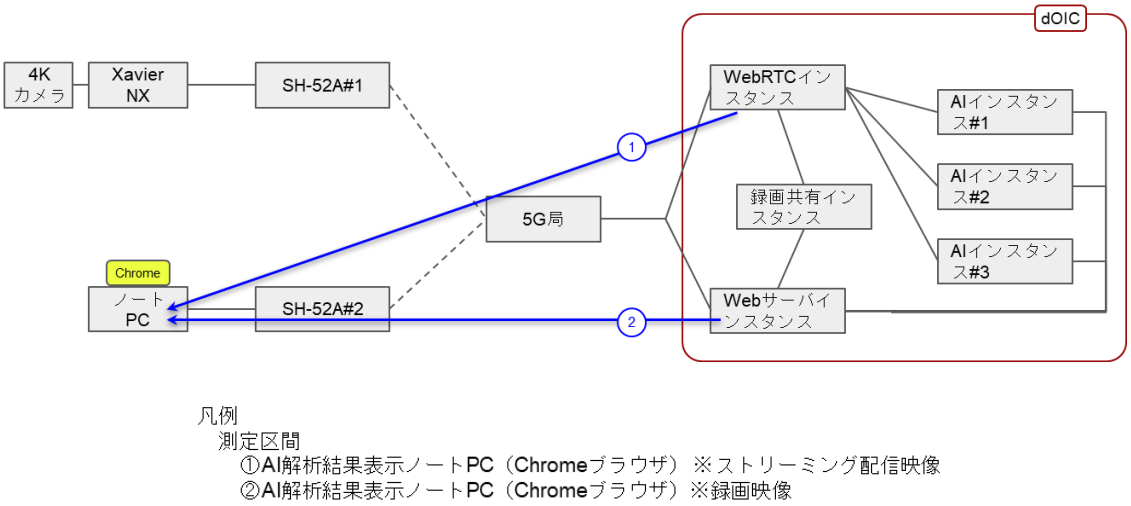
また、ライブ映像と同様に、特定の映像をワンクリックするだけで、即座に図 4.3.2-37 に示すような拡大表示が可能であり、より精細な映像確認が可能である。4k 画質により、

大画面でも鮮明に映像確認できるため、現場での人の目を介した詳細分析だけでなく、熟練技術者からの事象共有、判断基準の伝達（技術伝承）にも利用しやすい機能である。

（2）UI の評価

1）AI 解析 Web サイトへの接続性評価

図 4.3.2-38 に示すように、結果表示 PC のブラウザから AI 解析結果 Web サイトへ接続し、想定した接続（正常接続、複数同時接続、異種端末接続（PC 等）、接続時リードタイム）ができることを確認した。



凡例
測定区間
①AI解析結果表示ノートPC（Chromeブラウザ）※ストリーミング配信映像
②AI解析結果表示ノートPC（Chromeブラウザ）※録画映像

図 4.3.2-38　AI 解析 Web サイトへの接続性評価システム構成

2）結果表示各機能の想定動作評価

映像品質、ストリーミング映像、録画映像、レイアウト表示の各機能が想定した動作であることを確認した。

①ストリーミング映像の表示、AI 検知箇所のバウンディングボックスの表示、ストリーミング映像の描画に必要な時間

②録画映像の表示、シークバーによる複数映像の同時再生操作、元映像と AI 検出映像の時間同期、AI 検知箇所のバウンディングボックスの表示、録画映像の描画にかかる時間

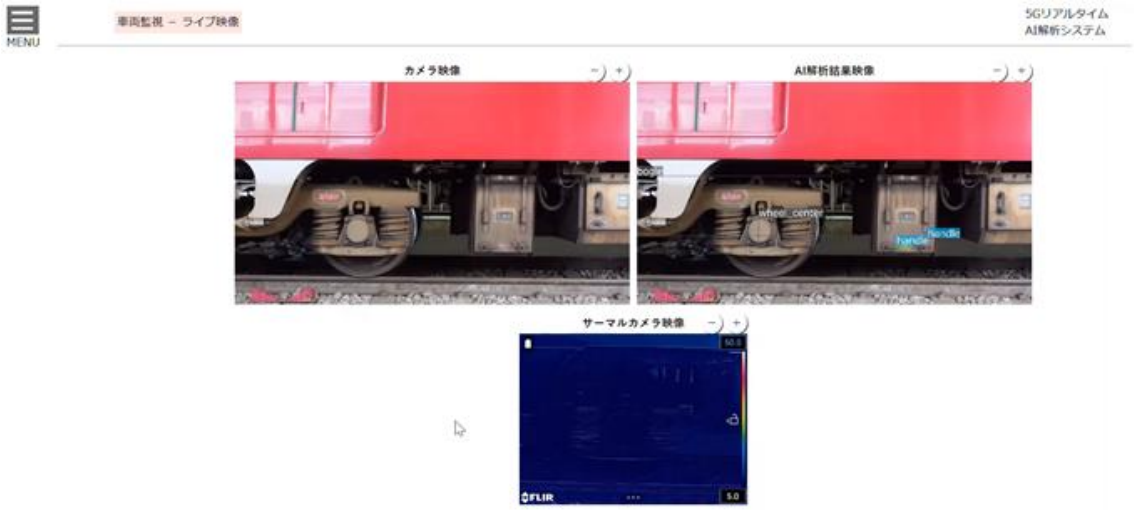


図 4.3.2-39　車両監視のライブ映像表示画面（再掲）

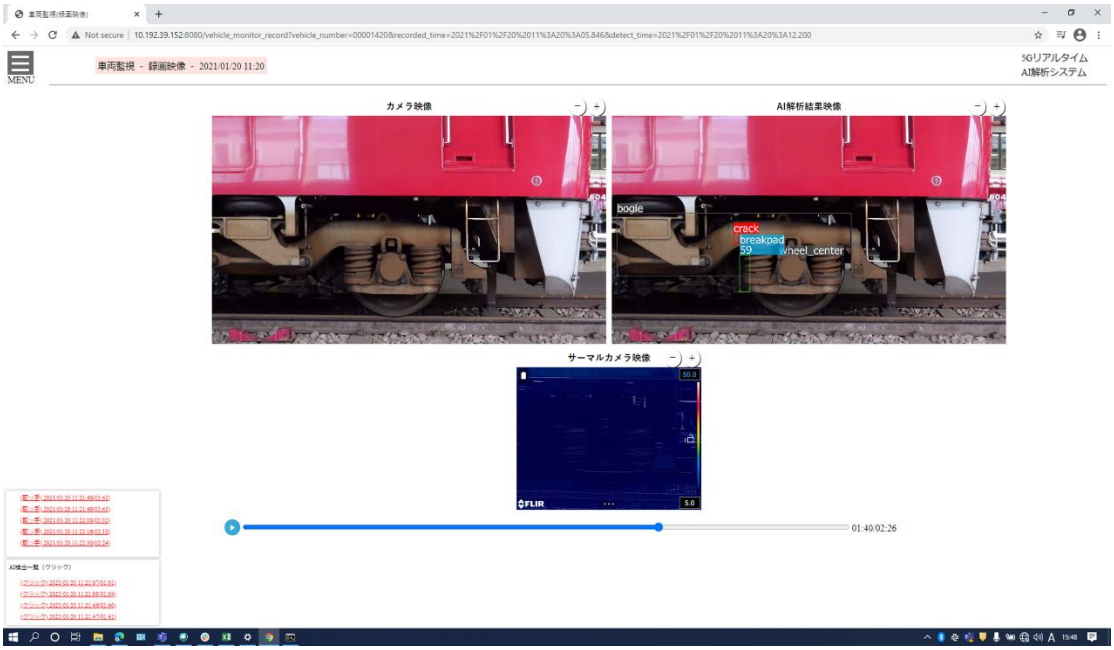


図 4.3.2-40　車両監視の録画映像表示画面（再掲）

表 4.3.2-19　4k30 フレーム映像が正常表示されるかの評価

4Kカメラ 映像配信規格	映像種別	試験対象区間	確認方法	経過時間	解像度	フレーム数
4K30fps	ストリーミング配信	webRTCインスタンス～ AI解析結果表示ノートPC	chromeデバック	1分後	3840x2160	30
				5分後	3840x2160	30
				10分後	3840x2160	30
4K30fps	録画配信	webサーバインスタンス～ AI解析結果表示ノートPC		-		

表 4.3.2-20　目的映像が適切に表示されるかの評価

対象UI	確認端末	確認方法	該当映像が再生される（○×）	再生が開始されるまでの時間
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	該当リンクをクリックする	○	2秒以下
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	該当リンクをクリックする	○	車両：1分38秒/3回平均 線路：1分05秒/3回平均

表 4.3.2-21　AI 検知箇所特定のバウンディングボックスが適切に表示されるかの評価

対象UI	確認端末	確認方法	異常箇所数（1画像当たり）	バウンディングボックスが適切な位置に表示される（○×）
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	意図的に異常状態を作り、適切な位置にバウンディングボックスが表示されるか目視で確認する。	1ヶ所	○
			2か所	○
			3か所	○
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	意図的に異常状態を作り、適切な位置にバウンディングボックスが表示されるか目視で確認する。	1ヶ所	○
			2か所	○
			3か所	○

表 4.3.2-22　録画映像総合シークバーによる再生指定の評価

対象UI	確認端末	確認方法	時間軸の同期が取れている（○×）
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	シークバーを任意の場所へ移動したとき、生映像と矩形付き映像が同じ時間軸で再生されることを確認する	○

③表示映像種別の選択による正常表示動作、映像選択時のレイアウト切替時間

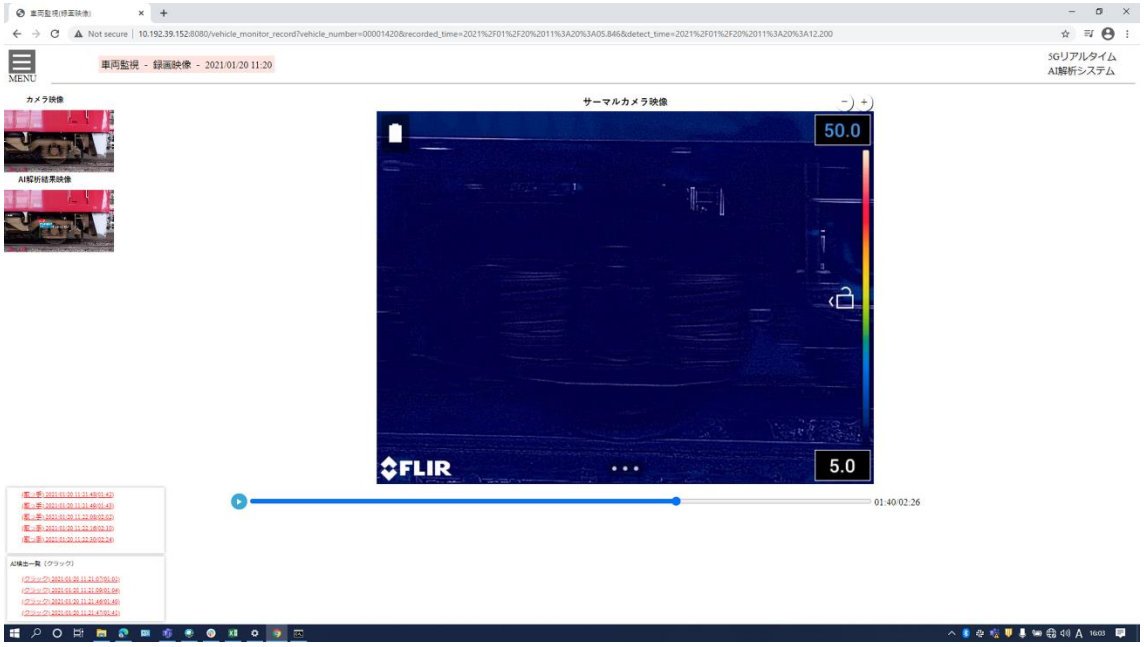


図 4.3.2-41　表示映像種別の選択機能の評価内容

表 4.3.2-23　表示映像種別の選択による正常表示、映像選択時のレイアウト切替時間の評価

対象UI	確認端末	確認方法	クリック対象の映像種別	映像が切り替わるまでの時間	該当の映像種別が正常に切り替る（○×）
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	該当の映像種別をクリックしレイアウトが切り替わる（フェードアウトする）ことを確認する	生映像	1秒以下	○
			ストリーミング映像	1秒以下	○
			サーマル映像	1秒以下	○
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	該当の映像種別をクリックしレイアウトが切り替わる（フェードアウトする）ことを確認する	生映像	1秒以下	○
			ストリーミング映像	1秒以下	○
			サーマル映像	1秒以下	○

まず、ストリーミング映像について、～10 分間の経過時間に応じて、遅延が重畳されることなく正常に 4k30fps の映像を表示できていることを確認した。

次に、映像表示の Web ページリンクをクリックした後、何秒後に映像を表示できるかを評価した。このとき、ストリーミング映像はクリック後 2 秒で表示された。一方で、録画映像は 1 分 38 秒後に表示された。これは、録画映像の全編をダウンロードしてから表示する仕様であったため、時間を要している。ダウンロードと表示を同時に行う仕様に変更することで、録画映像表示までのリードタイムを短くすることが可能であると考えられる。

また、本実証の映像中には複数の解析結果（バウンディングボックス）が同時に表示される必要があるため、その表示性能を確認した。結果として、異常状態の数によらず、適切に複数の異常状態を検出することができていることを確認した。

特に録画映像については、機能として、シークバーの再生操作が、複数映像に適切に作用しているかを評価した。シークバーを操作したとき、生映像、AI 解析結果映像、サーマルカメラ映像の全てを、時刻同期させた状態で、適切な時刻に移動・再生することができることを確認した。

最後に、映像選択時の特定映像への表示切り替え機能について確認した。ライブ映像、録画映像ともに、即座の切替えが可能であることを確認した。

3）アンケートによる定性評価

本システムを列車検査業務に携わる現場技術者が利用するにあたり、実務者目線での利便性に関する調査を行い、その結果を図 4.3.2-42 に示す。評価内容をユーザインタフェース（UI）の利便性、機材の有用性、導入可能性の 3 カテゴリとし、アンケート調査を実施した。なお、本結果は、調査時に職員が複数人で協議しながら、久里浜工場職員としての意見を取りまとめていただいたものである。

まず、カテゴリ 1 ：ユーザインタフェースの利便性について、ヒアリングを行った。事前の現場ヒアリングを重ねて構築していたこともあり、実運用を想定したときに高い評価を得ることができた。

まず、本システムの UI に実装している機能としては、録画映像の振り返り検索機能およ

びデザイン性について高評価を受けた。前者の振り返り映像の検索機能では、日時、時間の範囲検索や通知からのリダイレクト、さらに編成車両の一気通貫の確認ができるように車両番号検索までできるようにシステムを構築しており、その点が特に高く評価された。なお、車両番号については、人が手作業でインデックス付与を行うのではなく、映像からAIが自動で判断し、録画映像をクラウド環境内で適切なインデックスを付与して保存しているものである。本機能は、現場の声を実現する上での稼働効率化の観点から必須と判断し、設計時に追加導入した。また、後者のデザイン性については、作業者が屋外作業中にも容易に利用できる視認性を持たせるために、大きめのアイコンデザインとし、さらに識別性を高めるために車両監視と線路点検で明確な色彩（RGB）の差分をつけるなど、注意して設計した。

追加で必要な機能としては、音の再生についての要望を受けた。本システムは、音に関する認識は行っていなかったものの、音声認識を活用した点検の必要性がうかがえる。UI設計について、音声付与も技術的に可能であるため、今後の課題として、設計検討を行うこととしたい。

次に、カテゴリ２：使用した機材について、ヒアリングを行った。ここでも、事前の現場ヒアリングを通じた機材選定を行っていたことから、実運用を想定したときに高い評価を得ることができた。

本システムに実装している機材として、４k カメラ、映像の視認性・AI 検知結果の表示確認の観点で、サーマルカメラについては、温度の視認性・AI 検知結果の表示確認の観点で、実運用に資すると評価を受けた。また、追加機材の要望としては、カテゴリ１から一貫して振動・音の検知機材が挙げられた。振動・音の検知は、商用機材により取得可能であること、および振動・音の波形分析もAIディープラーニングにより技術的には実現可能であることから、今後の課題として設計検討を行うこととしたい。

また、本システムで検知した対象物（台車のき裂、ハンドルの開閉、ブレーキパッドの摩耗）についても、実運用を想定したときに必要性が高いことを確認でき、本システムの実用可能性を示唆する結果である。さらなる検知対象としては、構成部材の「変形」が挙げられた。これは、現場で発見された際に、いつから変形が発生していたのか、その経緯を振り返り検索機能を駆使しながら人の目で確認できることに意義があると、現場の意見を受けた。さらに、これを時間スケールで振り返り映像からAI検知させることについては、技術的に非常に難しいことがわかっている。画像認識 AI に Recurrent Neural Network（RNN）を導入することが考えられるが、今後の課題として技術検討を続けていくこととしたい。

最後に、カテゴリ３：５G-AI システムの機能と導入可能性について、ヒアリングを行った。より一層の安全性向上に関しては高い評価を受けたものの、現場技術者の目線では、稼働効率化について、判断がつかないため稼働削減はできないことと、その前提であればシステム管理側の稼働が増えるのではないか、という意見を受けた。実運用に向けては、安全性がどの程度向上し、人のオペレーションとどのように親和していけるのか、より深い運用評価が必要であることが本実証で明らかとなった。導入にあたっての課題としては、AI 検知システム、５G ネットワークともに、システムの安全性・信頼性と導入時のイニシ

ャル費用と保守管理の稼働およびランニング費用である。私鉄各社はコロナ禍の情勢を受け、非常に経済的に厳しい現状に直面している状況もあり、導入費用等の課題を乗り越えるには１社の取組みではなく私鉄各社一丸となっての取組みに期待する声も上がった。

鉄道インフラのリアルタイム遠隔・自動監視の実証実験に関するアンケート（車両部門）

この度は、総務省 5G 実証実験へご協力いただき、誠に有難うございます。
利用者にとって、本システムの利便性をより一層向上させるべく、下記アンケートにご協力いただけますと幸いです。記入にあたっては、会議中のご説明・議論をもとに、ご対応いただけますと幸いです。
ご多用のところ恐れ入りますが、よろしくお願いいたします。

１．ユーザインタフェースの利便性

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. Web 画面のレイアウト・見た目はいかがでしたか。

回答：　□1　□2　□3　□4　□(5)

上記を選択された理由についてご記入ください。

通知から，日時から，車両番号からの確認が選択できる点が良い。

Q2.（会議内トピック）実業務を想定すると、Web 画面上のどのような機能が良かったと思いましたか？
3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①大き目のアイコン（理由：誰でもが分かりやすくするため　）
②＿＿＿＿＿＿（理由：　）
③＿＿＿＿＿＿（理由：　）

Q3.（会議内トピック）実業務を考えると、Web 画面上において、どのような追加機能が必要だと思いましたか？
3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①音の再生＿＿＿＿（理由：異常の判定に音も活用できる　）
②＿＿＿＿＿＿（理由：　）
③＿＿＿＿＿＿（理由：　）

２．使用した機材について

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. 4Kカメラについて、AI解析や人の確認を伴う実運用を想定したときに十分な映像品質だと感じましたか？

回答：　□1　□2　□3　□4　□(5)

上記を選択された理由についてご記入ください。

判定ができているので問題はないと考えます。

Q2. サーマルカメラについて、AI解析や人の確認を伴う実運用を想定したときに十分な性能だと感じましたか？

回答：　□1　□2　□3　□4　□(5)

上記を選択された理由についてご記入ください。

温度が数値化されていたので十分であると考えます。

Q3. データ取得用の機材について、AI解析や人の確認を伴う実業務を想定して4Kカメラやサーマルカメラ以外を選ぶとしたら、何を利用したいと思いますか？（振動計測器、音波計測器など）　3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①振動＿＿＿＿＿＿（理由：数値化できる機材のため　）
②音＿＿＿＿＿＿（理由：異常の判断となるため　）
③＿＿＿＿＿＿（理由：　）

Q3. 検出対象物について、今回は台車亀裂（初期）、ハンドル開閉、ブレーキパッドを選定しましたが、実業務を想定したときの、各対象物の異常検出の必要性について教えて下さい。

台車の亀裂	□1	□2	□3	□4	□(5)
ハンドルの開閉	□1	□2	□3	□4	□(5)
ブレーキパッドの摩耗	□1	□2	□3	□4	□(5)

Q4. 検出対象物について、実業務を想定して上記の3種類以外の検出対象物を選ぶとしたら、何を対象に選びますか？3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①変形＿＿＿＿＿＿（理由：何か衝突した際に発生する現象（前回記録画像との比較）　）
②＿＿＿＿＿＿（理由：　）
③＿＿＿＿＿＿（理由：　）

３．5G - AI監視システムの機能と導入可能性について

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. AI検知により、異常箇所を見分けやすいと感じましたか？

回答：　□1　□2　□3　□4　□(5)

上記を選択された理由についてご記入ください。

警報があるため。

Q2. AI検知により、将来的に実業務の効率化やより一層の安全性向上に貢献できると感じますか？

回答：　□1　□2　□3　□4　□5

上記を選択された理由についてご記入ください。

安全性向上となるが実業務の効率化にはならない。 監視システムの管理が必要で負担が増加する。

Q3. AI検知システムを導入するにあたり、実業務を想定した課題を教えて下さい。3つ以内でお答え下さい。

・費用 ・保守管理（経年劣化・システム維持） ・

Q4.（会議内トピック）今回は5G技術を活用することで、4K映像等を用いたAI検知システムを構築しました。
将来的に鉄道事業（**車両部門**）における5Gの導入可能性（領域・用途）と課題について、ご意見下さい。

回答：　□1　□2　□(3)　□4　□5

導入可能性（領域・用途）に関するコメント：

車両の遠隔操作。

導入に向けた課題に関するコメント：

・安全および信頼性 ・費用 ・保守性

図 4.3.2-42　アンケート回答結果（列車検査）

4.3.3 5G と AI を活用した線路巡視の遠隔・自動監視システム

線路巡視の遠隔・自動監視システムを構築し、ドローンを活用した線路点検に関する検証を行った。

映像取得時に用いたドローンの外観を図 4.3.3-1~図 4.3.3-2 に示す。

図 4.3.3-1　線路巡視用ドローン（前面）

図 4.3.3-2　線路巡視用ドローン（背面）

また、ドローンを利用した構成としては、ドローンとの通信を Wi-Fi 構成で行うものと、28G を用いた 5G 上空利用構成で行うものの 2 種類を利用した。

1 つは図 4.3.3-3 に示すように、ドローンとの通信に Wi-Fi を使うパターンである。線路上を飛行するドローンに 4k カメラを搭載し、映像伝送装置の Wi-Fi 機能で線路脇に設置された無線アクセスポイントへ伝送する。その後は列車監視システム同様、モバイルルータを介しクラウド上の AI エンジンを通り PC へ表示される。

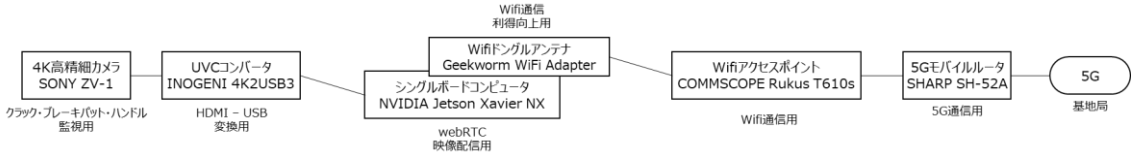


図 4.3.3-3　線路巡視用ドローンへの搭載機材（Wi-Fi 構成）

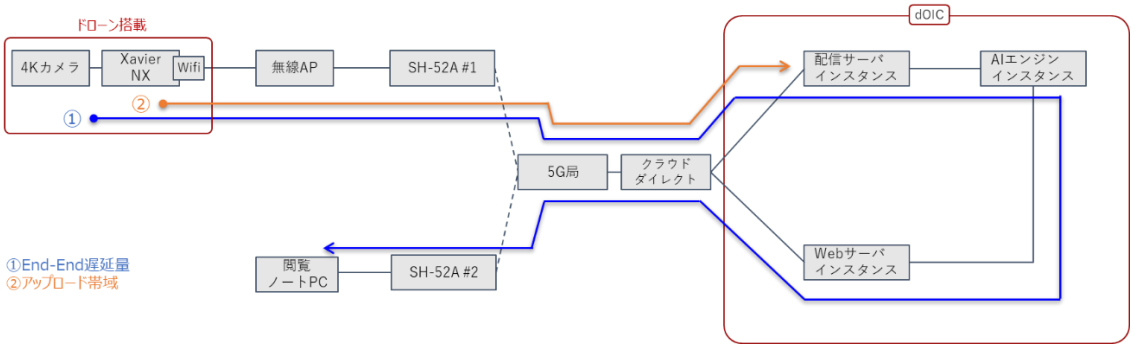


図 4.3.3-4　ドローンとの通信に Wi-Fi 構成を使った線路巡視システムフロー図

この構成における①End-End 遅延量と②アップロード帯域を図 4.3.3-4 に示すように計測した。このとき、①End-End 遅延量は、1,260ms（表 4.3.3-1）となり、これは車両監視システム（遅延量 940ms）と比較して 320ms 遅いことがわかる。これは、主に AI エンジンの設計時に、処理速度を考慮して設定した BackAPI の一定処理時間に起因すると考えられる。BackAPI の処理時間として、車両監視システムでは 420ms であるのに対し、線路巡視システムは 800ms としており、これによる差分は 380ms であり、概ね今回の遅延量の大きさを説明することができる。その他、構成の差異による変動要素があり、数十 ms 程度の誤差が生じていると推察される。なお、②アップロード帯域（現場から dOIC への上り方向のスループット）は最大 94.90Mbps であり、本システム要件としては十分な値であることを確認した。

表 4.3.3-1　ドローンとの通信の構成毎の遅延量

配信構成	End-End遅延量	アップロード スループット
線路巡視(Wi-Fi構成)	1,260 ms	94.90 Mbps
線路巡視(上空利用構成)	1,330 ms	22.10 Mbps

28GHz を用いた 5G 上空利用構成について、構成図概要を図 4.3.3-5 に示す。本構成は、追加機材として 28GHz 実験局をドコモが持ち出しで準備し、必要な免許申請を行った上で、将来的な拡張を見越した構成の検証を行ったものである。4k カメラが搭載されているドローン機体へ実験局用の 5G モバイルルータを搭載し、線路脇に設置された 5G 実験局まで映像を伝送した。その後、実験局から 5G モバイルルータを有線接続した上で、4.5GHz の無線区間を経由しキャリア 5G の網内クラウド上へデータ伝送を行った。AI エンジンで解析後の結果とマージしたストリーミング映像を、遠隔監視 PC へ表示させることで、監視システムの機能を実現した。

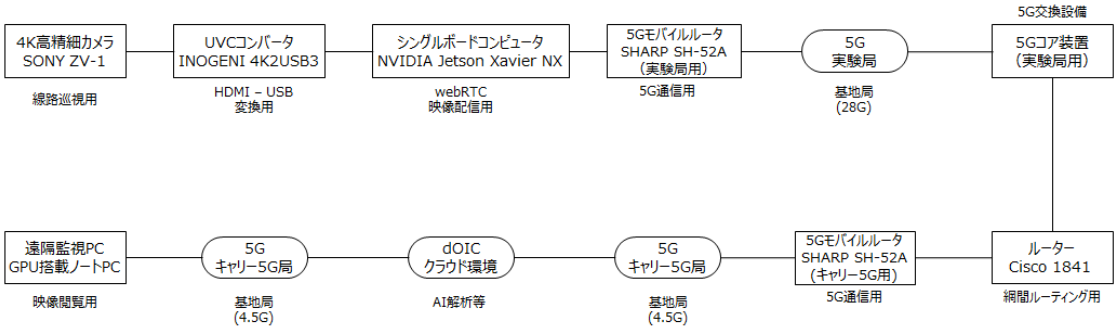


図 4.3.3-5　線路巡視用ドローンへの搭載機材（5G 上空利用構成）

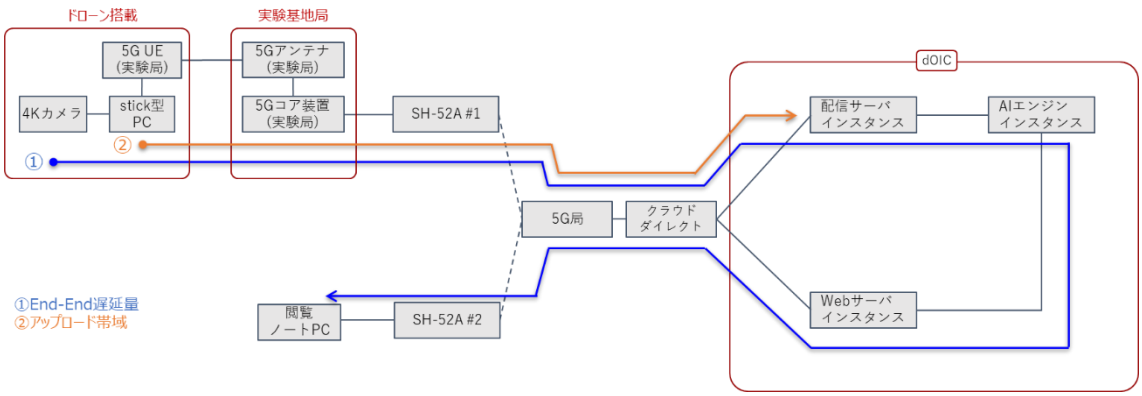


図 4.3.3-6　ドローンとの通信に 5G 上空利用構成を使った線路巡視システムフロー図

この構成における①End-End 遅延量と②アップロード帯域を図 4.3.3-6 に示すように計測した。①End-End 遅延量については、1,330ms（表 4.3.3-1）であり、Wi-Fi 構成より 70ms の差分があるが、構成の差異に起因する誤差範囲の変動であると考えている。②アップロード帯域（現場から dOIC への上り方向のスループット）については、22.10Mbps であり、事前検証結果とも整合する。本システムにおける 4k30fps の映像配信に必要な帯域が 15Mbps であることから、システム要件上は十分な帯域が確保できている。なお、アップロード帯域が Wi-Fi 構成より低下している要因としては、ドローン積載用にスペックが高くない軽量機材（スティック PC 等）を採用しているためであると推察される。この点は、予め 5G 端末積載等を見込んだ大型の重積載ドローンを準備することで、より高性能な機材を搭載し、スループットを向上させることが可能であると考えられる。

なお、実際のオペレーションでは、安全確保のためドローンを線路の上空を高度約 2m で、人の歩行速度程度で飛行させた。特に飛行高度については、墜落時の架空電線への接触リスクを回避するため、京浜急行電鉄と協議の上、架空電線から十分に下方であり、かつ現行オペレーションで実施している人の目線～運転士の目線程度の高さとして高度約 2m に設定した。）

また、本検証を行うフィールドである京急久里浜工場内の試走線は、商用の旅客運送を行う本線と隣接している環境のため、ドローンが制御を失った際も事故につながらないように非導電性・非伸縮性のロープをドローンに装着して運用した。さらに、本線を車両が通過している際は、旅客の不安を煽る可能性があるため、フライトを中断することとして、入念な安全対策のもとで検証を行った。（図 4.3.3-7~図 4.3.3-9　ドローン安全対策（1）、

（２）、（３））

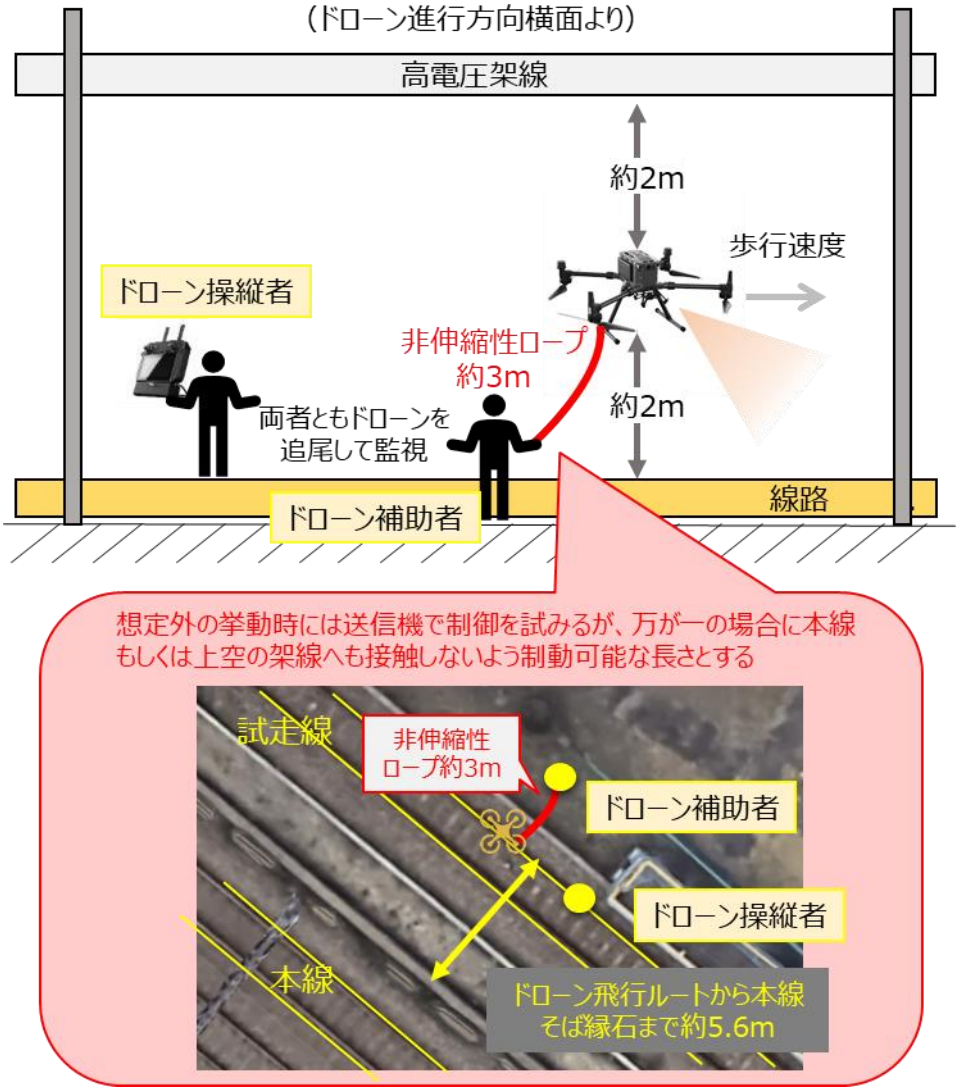


図 4.3.3-7　ドローン安全対策（１）緊急時ドローン制御の冗長化

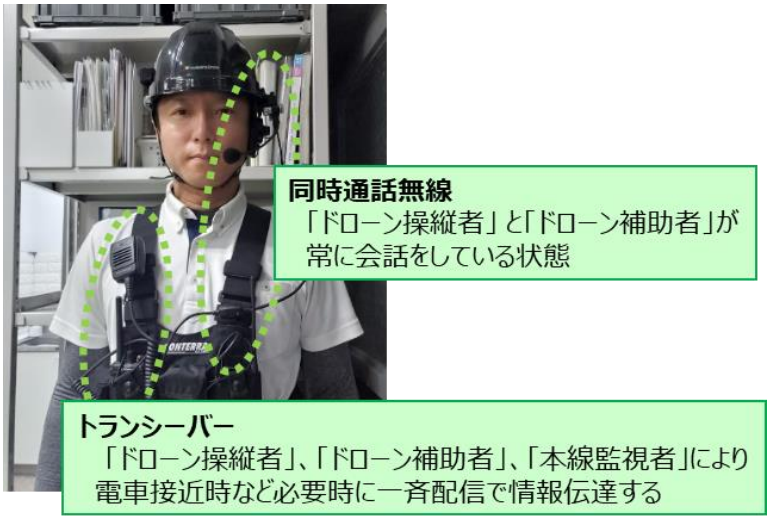


図 4.3.3-8　ドローン安全対策（２）オペレータの装備

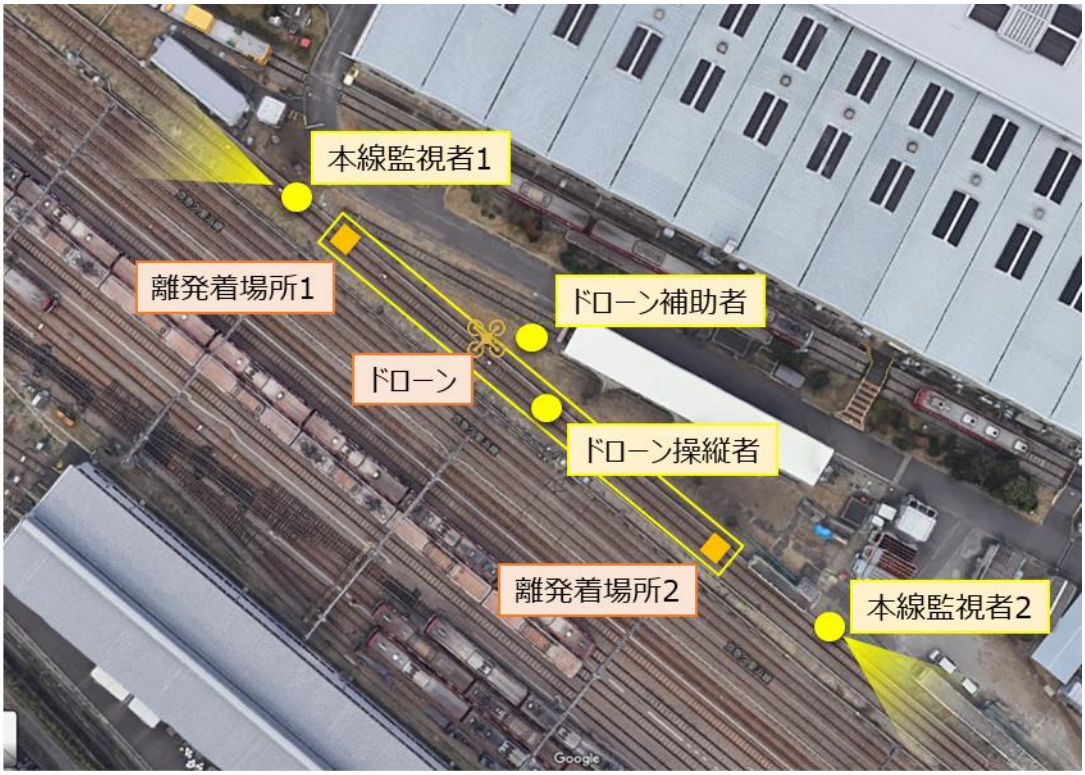


図 4.3.3-9　ドローン安全対策（３）本線車両等の往来監視

4.3.3.1 AI 解析システム

（1）ドローン搭載の 4k カメラで撮影した高精細映像の AI 解析検出率等評価

本検証では、ドローンに搭載した 4k カメラで撮影した形状や大きさの異なるダミーの対象物の 4k ストリーミング映像を、キャリア 5G 経由で高速 AI 解析が可能なクラウド上の AI 解析システムに伝送し、AI 解析を行った後にその結果を遠隔 PC に投影してシステムの性能を確認した。なお、ドローン構成については、Wi-Fi、5G 上空利用のどちらも 4k30fps の映像伝送ができており、dOIC 内における AI 解析は、構成の影響なく実施できることを事前に確認できており、本書では、構成によらず AI 解析結果について評価するものとする。

1）検証内容

表 4.3.3-2 に示す障害物を線路の両側に 5m 間隔で配置し、図 4.3.3-10 **エラー! 参照元が見つかりません。**、図 4.3.3-11 に示す検証シナリオに沿って、障害物との距離を変化させながら一定速度で航行するドローン搭載の 4k カメラで撮影した高精細映像から障害物の AI 解析検出の検証を行い、Precision（適合率）及び Recall（再現率）を計測した。

表 4.3.3-2　障害物の配置一覧

ネットワーク構成	シナリオ	障害物1	障害物2	障害物3	障害物4	障害物5	障害物6	障害物7	障害物8	障害物9
4.5G局＋Wi-Fi	テストパターン①	木片（10×10）	ペットボトル（260ml）	木片（20×20）	ペットボトル（500ml）	ペットボトル（2000ml）	ペットボトル（260ml）	ペットボトル（500ml）	木片（20×20）	ペットボトル（2000ml）
4.5G局＋Wi-Fi	テストパターン②	ハンガー	傘	ハンガー	傘	ハンガー				
28G局	テストパターン①		ペットボトル（260ml）	木片（20×20）	ペットボトル（500ml）	ペットボトル（2000ml）	ペットボトル（260ml）	ペットボトル（500ml）	木片（20×20）	ペットボトル（2000ml）

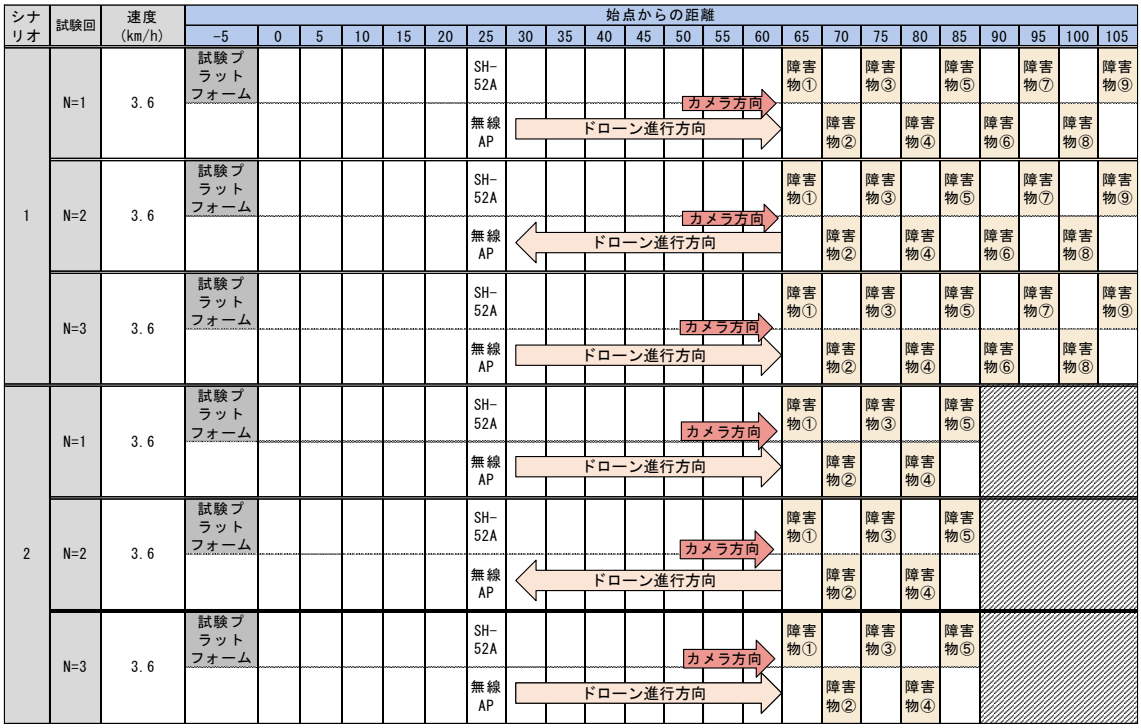


図 4.3.3-10　線路巡視の検証（Wi-Fi）

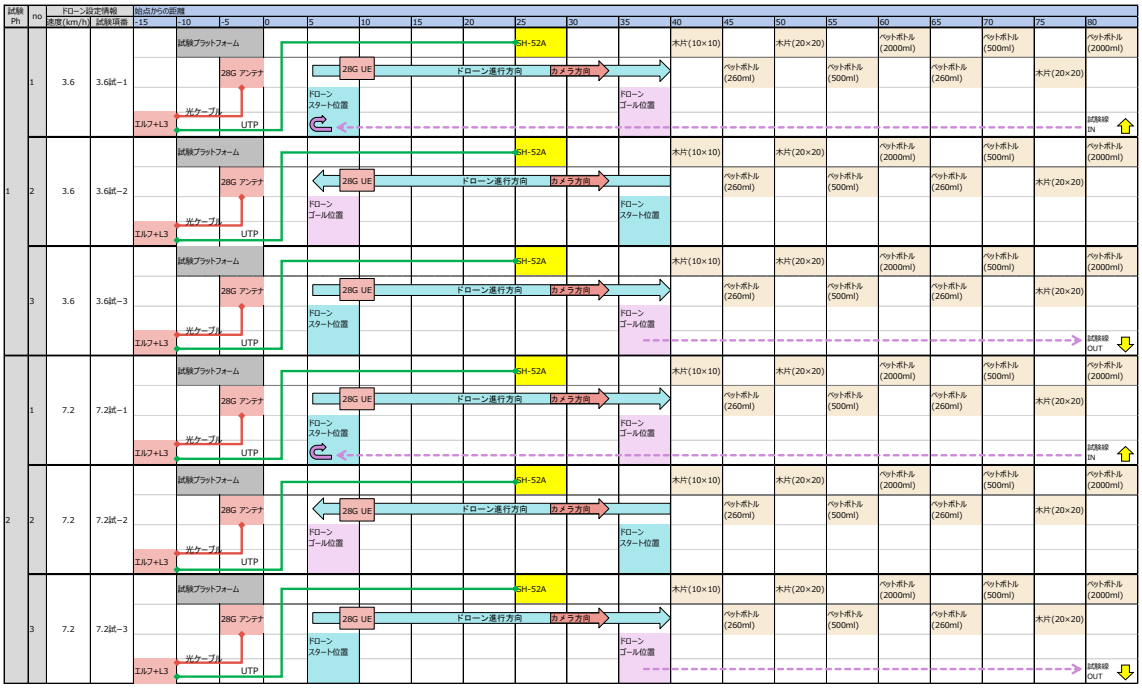


図 4.3.3-11　線路巡視の検証（5G 上空利用）

2）検出結果

ドローンとの通信に Wi-Fi 構成を使った場合の線路上の障害物の AI 検出試験結果を表 4.3.3-3 に示す。

表 4.3.3-3　線路上の障害物の AI 検出試験表結果（Wi-Fi 使用時）

no	検出対象				検出結果																		集計結果			
	シナリオ	試行回数	検出対象	検出対象名	最長検出距離(m)	総検出フレーム数	各距離帯での検出フレーム数																AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
							5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
1	テストパターン①	N=1	障害物1	木片(10×10)	35	240		70	75	46	46	0	3											1		本検証では存在しない概念のため集計対象外	0
2	テストパターン①	N=1	障害物2	ペットボトル(260ml)	41	242		60	78	46	43	8	3	4										1			0
3	テストパターン①	N=1	障害物3	木片(20×20)	46	424			63	72	82	82	59	30	36									1			0
4	テストパターン①	N=1	障害物4	ペットボトル(500ml)	51	191				65	69	53	4	0	0	0								1			0
5	テストパターン①	N=1	障害物5	ペットボトル(2000ml)	36	86					75	8	3	0	0	0	0							1	1		0
6	テストパターン①	N=1	障害物6	ペットボトル(260ml)	44	22						7	8	7	0	0	0	0						1			0
7	テストパターン①	N=1	障害物7	ペットボトル(500ml)	44	28							28	0	0	0	0	0	0					1			0
8	テストパターン①	N=1	障害物8	木片(20×20)	72	259								69	82	51	28	15	7	7				1			0
9	テストパターン①	N=1	障害物9	ペットボトル(2000ml)	54	6									6	0	0	0	0	0	0			1			0
11	テストパターン①	N=2	障害物1	木片(10×10)	32	211		59	63	62	13	14	0											1			0
12	テストパターン①	N=2	障害物2	ペットボトル(260ml)	38	367		71	65	59	52	50	70	0										1			0
13	テストパターン①	N=2	障害物3	木片(20×20)	44	394			68	67	78	64	58	59	0									1			0
14	テストパターン①	N=2	障害物4	ペットボトル(500ml)	47	102				67	7	7	7	8	6	0								1			0
15	テストパターン①	N=2	障害物5	ペットボトル(2000ml)	34	98					83	15	0	0	0	0	0							1	1		0
16	テストパターン①	N=2	障害物6	ペットボトル(260ml)	48	10						7	0	0	3	0	0	0						1			0
17	テストパターン①	N=2	障害物7	ペットボトル(500ml)	36	16							16	0	0	0	0	0	0					1			0
18	テストパターン①	N=2	障害物8	木片(20×20)	69	271								68	69	52	57	18	7	0				1			0
19	テストパターン①	N=2	障害物9	ペットボトル(2000ml)	45	14									14	0	0	0	0	0	0			1			0
21	テストパターン①	N=3	障害物1	木片(10×10)	26	240		65	80	61	16	18	0											1			0
22	テストパターン①	N=3	障害物2	ペットボトル(260ml)	40	368		68	69	72	60	51	48	0										1			0
23	テストパターン①	N=3	障害物3	木片(20×20)	48	412			63	64	69	60	78	53	25									1			0
24	テストパターン①	N=3	障害物4	ペットボトル(500ml)	41	136				73	53	3	0	7	0	0								1			0
25	テストパターン①	N=3	障害物5	ペットボトル(2000ml)	33	134					66	68	0	0	0	0	0							1	0		0
26	テストパターン①	N=3	障害物6	ペットボトル(260ml)	52	53						43	6	0	0	4	0	0						1			0
27	テストパターン①	N=3	障害物7	ペットボトル(500ml)	38	3							3	0	0	0	0	0	0					1			0
28	テストパターン①	N=3	障害物8	木片(20×20)	69	231								67	54	52	27	24	7	0				1			0
29	テストパターン①	N=3	障害物9	ペットボトル(2000ml)	46	5									5	0	0	0	0	0	0			1			0
30	テストパターン②	N=1	障害物1	ハンガー	37	384		67	90	84	77	54	12											1			0
31	テストパターン②	N=1	障害物2	傘	33	294		69	54	77	73	21	0	0										1			0
32	テストパターン②	N=1	障害物3	ハンガー	44	308			58	57	73	79	33	8	0									1	0		0
33	テストパターン②	N=1	障害物4	傘	51	445				56	81	83	72	56	73	24								1			0
34	テストパターン②	N=1	障害物5	ハンガー	56	343					71	67	66	81	43	8	7							1			0
37	テストパターン②	N=2	障害物1	ハンガー	38	390		72	67	54	66	64	67											1			0
38	テストパターン②	N=2	障害物2	傘	40	364		72	74	60	68	55	28	7										1			0
39	テストパターン②	N=2	障害物3	ハンガー	48	487			81	77	81	79	70	59	40									1	1		0
40	テストパターン②	N=2	障害物4	傘	52	479				72	64	72	78	80	67	46								1			0
41	テストパターン②	N=2	障害物5	ハンガー	58	484					64	86	68	65	82	76	43							1			0
45	テストパターン②	N=3	障害物1	ハンガー	37	422		80	83	63	61	69	66											1			0
46	テストパターン②	N=3	障害物2	傘	42	497		73	70	68	84	79	61	62										1			0
47	テストパターン②	N=3	障害物3	ハンガー	47	457			55	66	62	77	69	66	62									1	0		0
48	テストパターン②	N=3	障害物4	傘	52	436				65	72	61	76	50	54	58								1			0
49	テストパターン②	N=3	障害物5	ハンガー	57	446					75	64	81	69	71	16	70							1			0

試行回毎に、AI が検出を始めた最も遠い距離(最遠距離)、AI が障害物を検出した総フレーム数と、5m 間隔での検出フレーム数を集計した。網掛け部は該当の距離にドローンが移動していないことを示している。また、各結果に基づいて、True positive、False positive 等の集計を行った。

a）テストパターン①の結果

テストパターン①においては、試行ごとにすべての対象物を検出できていることが確認できた。また、検出限界距離としては、ドローンから 70m 離れたポイントの対象物（木片）まで検出できていることを下図（テストパターン①の検出結果画像（１））より確認した。また、60m 以下の地点で、安定的に複数物体を同時に検知できていることを、下図（テストパターン①の検出結果画像（２）～（５））より確認した。

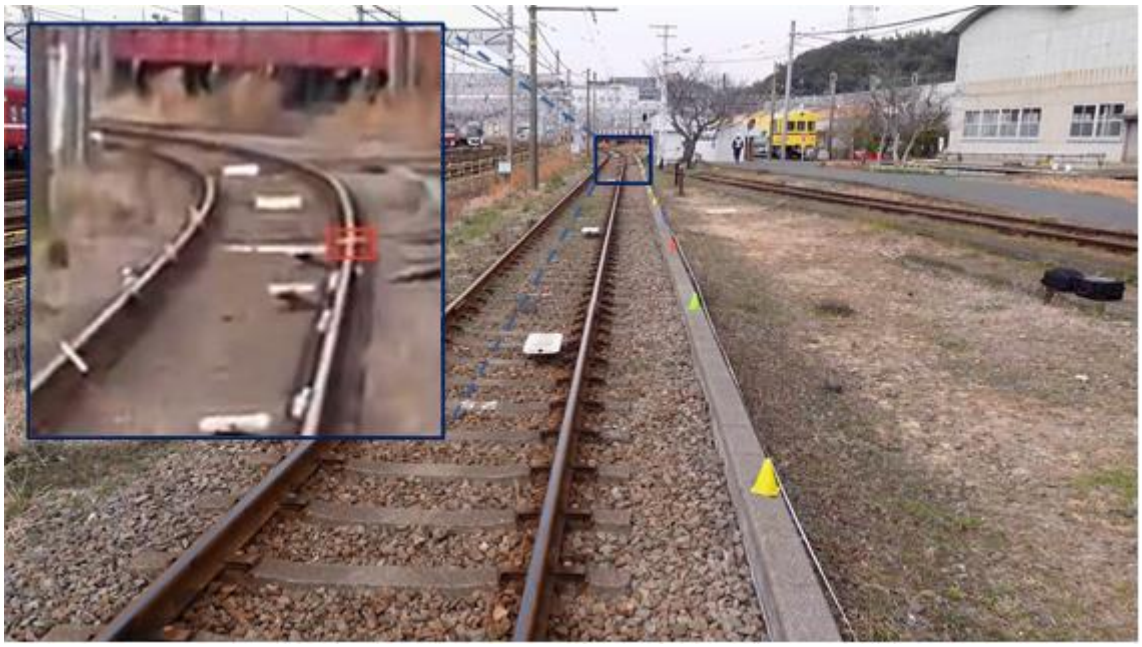


図 4.3.3-12　テストパターン①の検出結果画像（１）

図 4.3.3-13　テストパターン①の検出結果画像（２）

図 4.3.3-14　テストパターン①の検出結果画像（３）

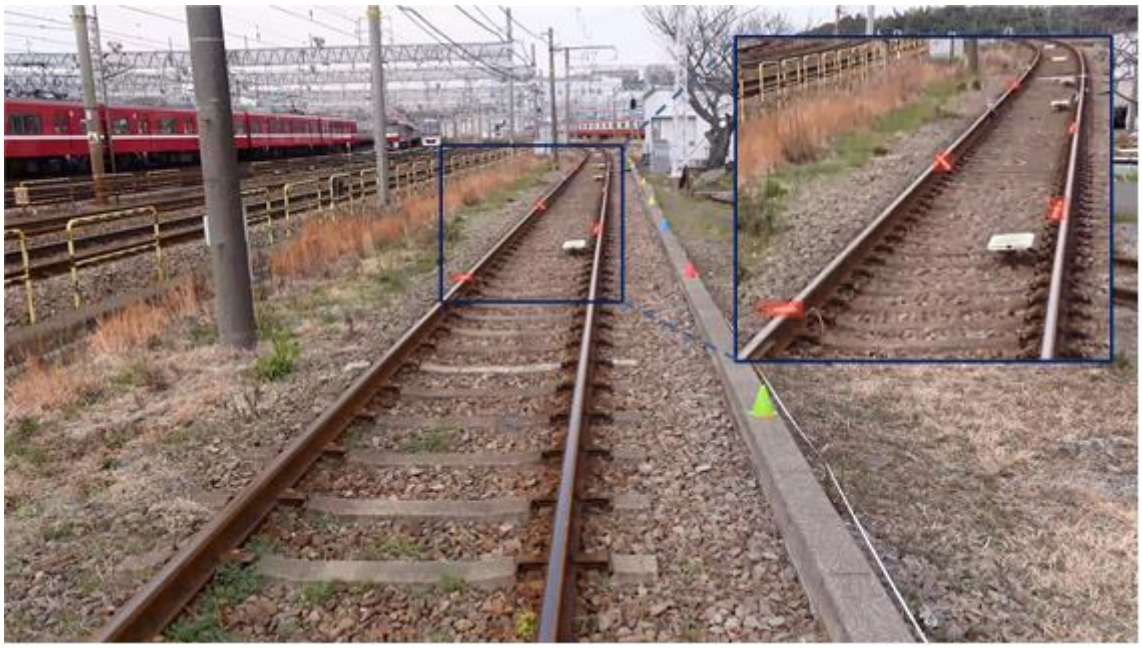


図 4.3.3-15　テストパターン①の検出結果画像（4）

図 4.3.3-16　テストパターン①の検出結果画像（5）

テストパターン①において、偽陽性サンプル（AI が異常として検知したものの、対象物体ではないもの）が検出された。下表（テストパターン①の偽陽性検出リスト一覧）および下図（テストパターン①の偽陽性画像（1）（2））に示す偽陽性サンプルは、実際の運行オペレーションには支障を来さないため、今後は検出しないように「不正解」であることを AI モデルに追加学習させ、そのパラメータをアップデートすることで改善可能であると考えられる。

表 4.3.3-4　テストパターン①の偽陽性検出リスト一覧

no	シナリオ	試行回数	名称
1	テストパターン①	N=1	線路中に配置されていた茶色の看板
2	テストパターン①	N=2	木の枝

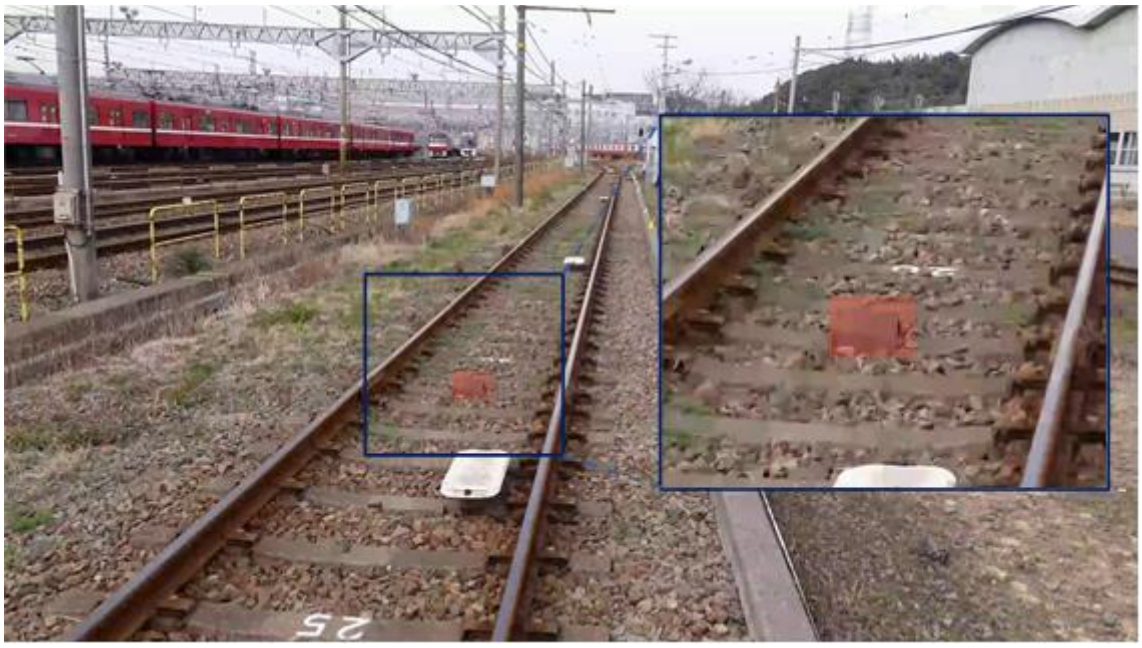


図 4.3.3-17　テストパターン①の偽陽性画像（1）

図 4.3.3-18　テストパターン①の偽陽性画像（2）

b）テストパターン②の結果

テストパターン②においても、試行ごとにすべての対象物を検出できていることが確認できた。また、下図（テストパターン②の検出結果画像（1）（2））を通じて、安定的に

複数物体を同時に検知できていることを確認した。

図 4.3.3-19　テストパターン②の検出結果画像（1）

図 4.3.3-20　テストパターン②の検出結果画像（2）

テストパターン②においても、テストパターン①と同様に、偽陽性サンプルが検出された。実際の運行オペレーションには支障を来さないため、AI モデルに「不正解」サンプルとして追加学習させることで、検知性能を改善することが可能であると考えられる。

表 4.3.3-5　テストパターン②の偽陽性検出リスト一覧

no	シナリオ	試行回数	名称
1	テストパターン②	N=2	線路の内側についている部品

図 4.3.3-21　テストパターン②の偽陽性画像

ドローンとの通信に 28GHz 帯 5G 上空利用構成を使った場合の線路上の障害物の AI 検出試験結果を表 4.3.3-6 に示す。

表 4.3.3-6　線路上の障害物の AI 検出試験結果（上空利用構成）

no	検出対象				検出結果																	集計結果			
	シナリオ	試行回数	検出対象	検出対象名	最遠検出距離(m)	総検出フレーム数	各距離帯での検出フレーム数															AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数	
							5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	True_positive	False_positive	True_negative	False_negative
1	テストパターン①	N=1	障害物2	ペットボトル(260ml)	35	283		83	62	58	18	26	15	21									1	2	本検証では存在しない概念のため集計対象外	0
2	テストパターン①	N=1	障害物3	木片(20×20)	40	269			71	59	71	39	19	7	3								1			0
3	テストパターン①	N=1	障害物4	ペットボトル(500ml)	45	207				56	62	22	35	13	15	4							1			0
4	テストパターン①	N=1	障害物5	ペットボトル(2000ml)	39	140					69	45	19	7	0	0	0						1			0
5	テストパターン①	N=1	障害物6	ペットボトル(260ml)	41	49						17	21	7	4	0	0	0					1			0
6	テストパターン①	N=1	障害物7	ペットボトル(500ml)	35	16							9	7	0	0	0	0	0				1			0
7	テストパターン①	N=1	障害物8	木片(20×20)	65	321								71	64	69	51	38	22	6			1			0
8	テストパターン①	N=1	障害物9	ペットボトル(2000ml)	40	8									8	0	0	0	0	0	0		1			0
9	テストパターン①	N=2	障害物2	ペットボトル(260ml)	35	304		67	84	80	46	7	6	14									1	1		0
10	テストパターン①	N=2	障害物3	木片(20×20)	37	241			80	59	38	47	13	4	0								1			0
11	テストパターン①	N=2	障害物4	ペットボトル(500ml)	40	298				80	68	62	50	32	6	0							1			0
12	テストパターン①	N=2	障害物5	ペットボトル(2000ml)	38	212					76	68	54	14	0	0	0						1			0
13	テストパターン①	N=2	障害物6	ペットボトル(260ml)	43	183						66	42	46	29	0	0	0					1			0
14	テストパターン①	N=2	障害物7	ペットボトル(500ml)	32	21							21	0	0	0	0	0	0				1			0
15	テストパターン①	N=2	障害物8	木片(20×20)	65	347								74	73	70	73	31	18	8			1			0
16	テストパターン①	N=2	障害物9	ペットボトル(2000ml)	40	8									8	0	0	0	0	0	0		1			0
17	テストパターン①	N=3	障害物2	ペットボトル(260ml)	36	391		72	78	67	45	24	37	68									1	2		0
18	テストパターン①	N=3	障害物3	木片(20×20)	37	252			73	64	52	34	22	7	0								1			0
19	テストパターン①	N=3	障害物4	ペットボトル(500ml)	46	158				28	22	28	32	21	13	14							1			0
20	テストパターン①	N=3	障害物5	ペットボトル(2000ml)	34	114					56	46	12	0	0	0	0						1			0
21	テストパターン①	N=3	障害物6	ペットボトル(260ml)	43	25						8	6	7	4	0	0	0					1			0
22	テストパターン①	N=3	障害物7	ペットボトル(500ml)	33	19							19	0	0	0	0	0	0				1			0
23	テストパターン①	N=3	障害物8	木片(20×20)	65	248								50	60	77	31	14	7	9			1			0
24	テストパターン①	N=3	障害物9	ペットボトル(2000ml)	40	7									7	0	0	0	0	0	0		1			0

ドローンとの通信に 28GHz 帯の 5G 上空利用構成を使った場合の試験において、Wi-Fi 利用時と同様に全ての物体について検出していることが確認できた。また、最長 65m 離れた地点の障害物も検出していることからも、AI 検出性能としては Wi-Fi 構成と同程度であると確認した。

なお、障害物 1 の木片（10×10）については、現地の風の影響でレールの軌道外に転落しており、測定対象外として除外した。

図 4.3.3-22　テストパターン①の検出結果画像（1）

図 4.3.3-23　テストパターン①の検出結果画像（2）

また今回の試験中に、以下の偽陽性が確認できた。

表 4.3.3-7　テストパターン①の偽陽性検出リスト一覧

no	シナリオ	試行回数	名称
1	テストパターン①	N=1	線路間を結合する部品
2	テストパターン①	N=2	線路間を結合する部品
3	テストパターン①	N=2	線路間を結合する部品
4	テストパターン①	N=3	白線
5	テストパターン①	N=3	線路間を結合する部品

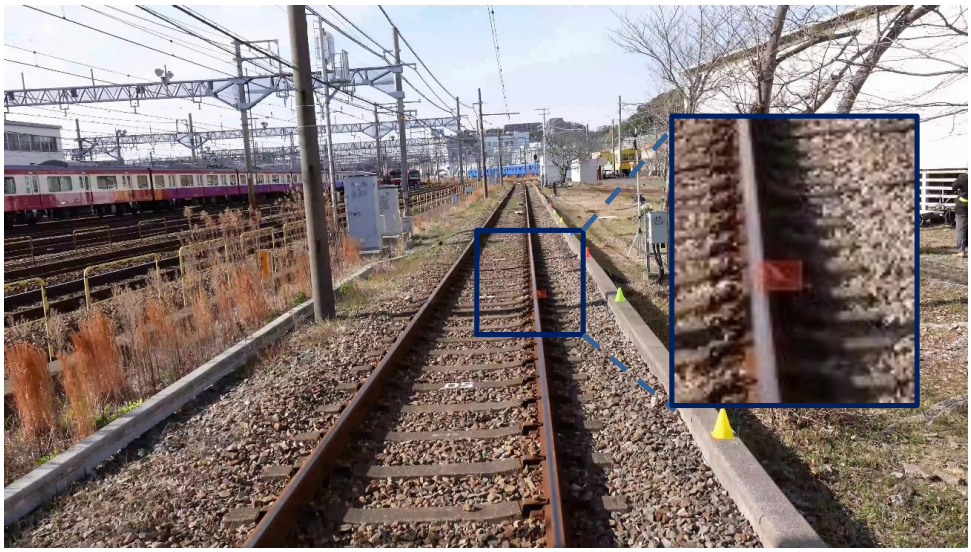


図 4.3.3-24　テストパターン①の偽陽性画像（1）

図 4.3.3-25　テストパターン①の偽陽性画像（2）

図 4.3.3-26　テストパターン①の偽陽性画像（３）

3）検出性能の評価

本試験においては、車両監視の検証と同様に、京浜急行電鉄職員（実務者）と協議の上、映像のフレームごとに検出精度を評価する Precision/Recall の評価軸ではなく、「検出率」、「網羅率」を指標として導入する。

※検出率（再掲）：

１回の試行あたりにシステムが出した結果を積み上げ、「システムが検出したもののうち、真に正しい結果の割合」を評価した。

※網羅率（再掲）：

１回の試行あたりにシステムが出した結果を積み上げ、「システムが検出すべきと定めた事物のうち、それを少なくとも１回、システムが検出した割合」を評価した。

表 4.3.3-8　検出率・網羅率の一覧(3 回試行の累計)

検出対象		AIが検出した対象数		AIが検出しなかった対象数		検出率	網羅率
検証区分	シナリオ	True_positive	False_positive	True_negative	False_negative		
4.5G局＋Wi-Fi	テストパターン①	27	2	0	0	93%	100%
4.5G局＋Wi-Fi	テストパターン②	15	1	0	0	94%	100%
28G局	テストパターン①	24	5	0	0	83%	100%

いずれの条件でも網羅率が 100%を達成できている。また、検出率については、約 85-95%程度という結果が得られ、良好な結果が得られた。また、検出された偽陽性も AI に繰り返し「不正解」として学習させることで、更に精度を向上させることが可能と思われる。

4）検出開始最遠地点の評価

ドローンとの通信に Wi-Fi 構成を使った場合のドローン搭載の 4k カメラで撮影した高精

細映像の AI 解析の結果から、各障害物の検出し始めた最遠地点（検出限界距離）を集計した。その結果を図 4.3.3-27 **エラー! 参照元が見つかりません。**に示す。

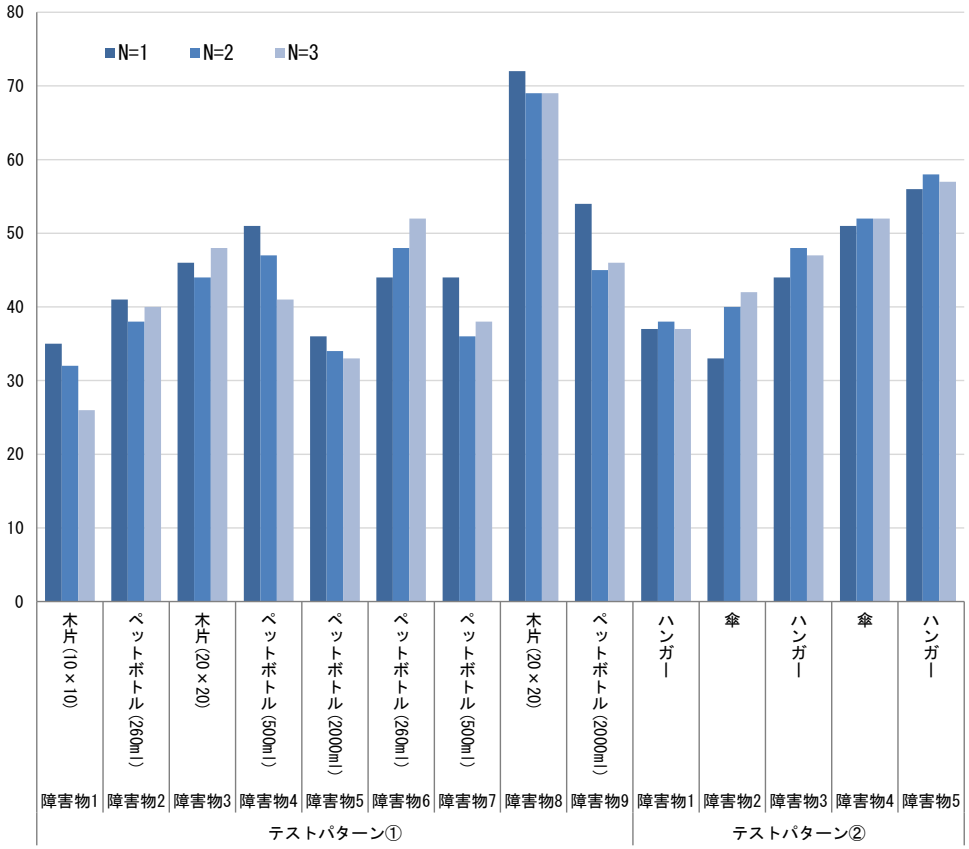


図 4.3.3-27　各障害物検知の最遠地点集計図

上図は、縦軸がドローン飛行時に物体が検出できた最遠地点を示し、横軸が障害物の種別を表す。テストパターン①で記載したとおり、最遠地点の中でも最も距離が離れていたのは障害物 8（20×20）であった。これは、レールの軌道上に形状の異なる明るい色合いの木片が乗っている状況であったため、形状と色合いの差分が得られ、とりわけ AI が判断しやすい環境であったためであると考えられる。なお、障害物 3 と障害物 7 で、同サンプルでも大きく再遠距離が異なるのは、試験設計の都合上、確保できた離隔距離によるものであることから、サンプルの大きさや形状によるものではない。（表 4.3.3-3）

また、障害物 2, 4, 5, 6, 7, 9 のペットボトルは大きさによらず、30～50m ほどの距離で検出できていることがわかる。通常は大きさが大きいものほど画像中に占めるピクセルの数が多いため検出しやすいと考えられるが、ペットボトルについては異なる傾向が得られた。ペットボトルについては（木片サンプルと異なり）レール軌道上ではなく軌道の内側に立てかける形で設置しており、元の線路との形状の差異がわかりにくい状態である。そのため、AI エンジンが主に色合いの差異のみに依存して異常検知を行っていたため、大きさによる違いが顕著に現れなかったと推察される。

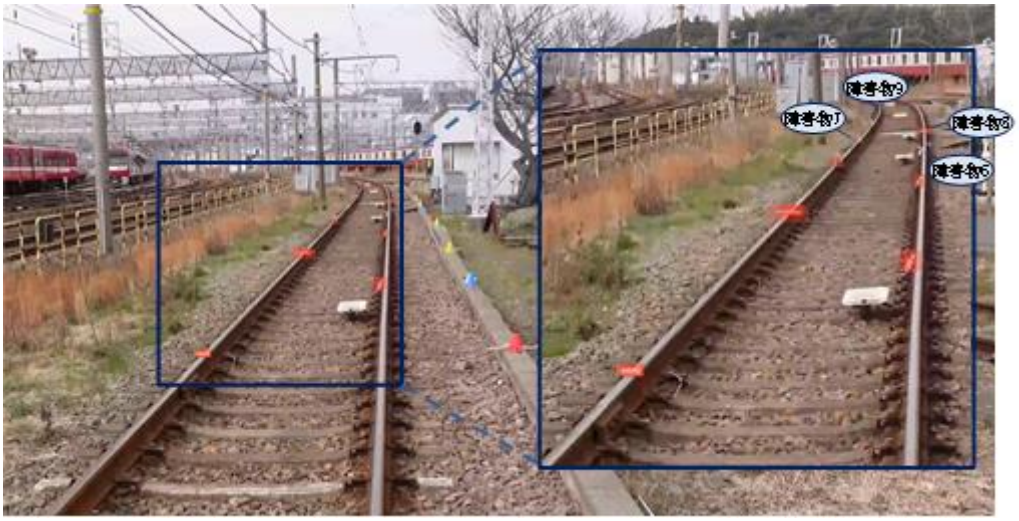


図 4.3.3-28　線路異常検知モデルの予測画像（１）

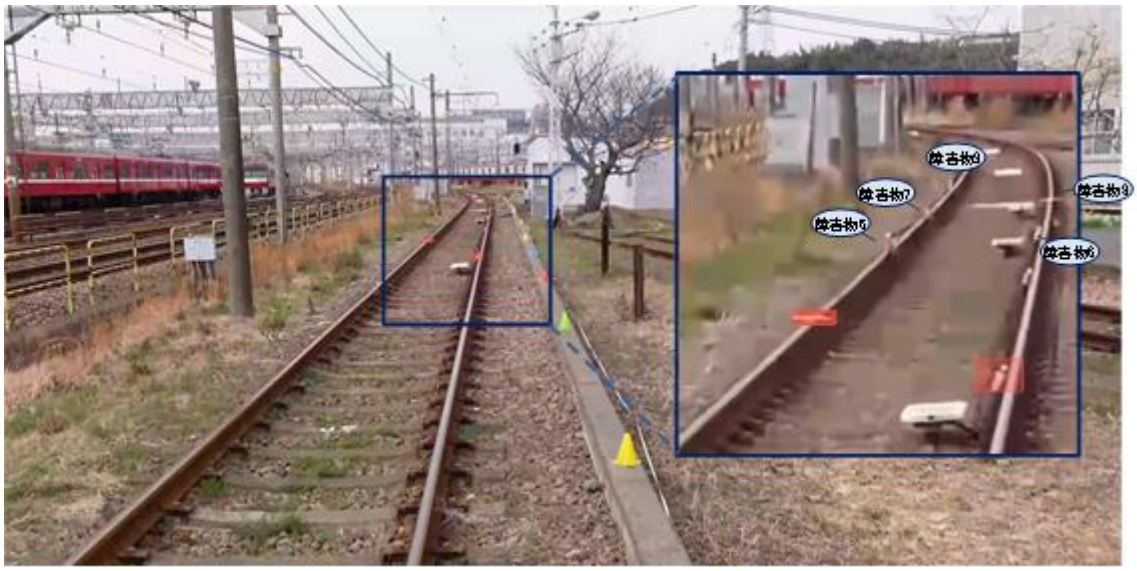


図 4.3.3-29　線路異常検知モデルの予測画像（２）

また、上図（線路異常検知モデルの予測画像（１）（２））より、検出対象物の距離が遠いサンプルにおいて、検知できない理由を分析した。より遠くに位置するサンプルは、画像中に占めるピクセル数が小さいため、精細な外形を描くことができず、形状が崩れてしまっていることがわかる。

ネットワークの品質が十分である中で、速度に対する映像品質を改善するには、以下の２点が想定される。

・カメラ性能等の向上

・ビデオコーデックの圧縮効率向上

１点目のカメラ性能の向上については、さらなる高精細映像を取得可能なカメラの導入が考えられる。8k カメラ等の導入により、より精細な映像が得られるため、再遠距離（検出限界距離）を向上させることができると考えられる。

２点目のビデオコーデックの圧縮効率向上については、車両監視システムと同様に、今

回利用した H.264 ではなく、より圧縮効率が高いとされる VP9 の利用が考えられる。本検証においては、VP9 利用時に映像伝送のフレームレートが向上しなかったため不適としたが、エンコーダ（シングルボードコンピュータ）の技術革新によりマシンパワーが向上すれば、理論上は問題なく 30fps のフレームを送り出すことが可能であり、その場合は物体の移動速度に応じた映像劣化についても、H.264 よりも抑制できると推察される。

次に、ドローンとの通信に 28GHz 帯 5G 上空利用構成を使った場合も同様に、最遠地点の結果を集計した。

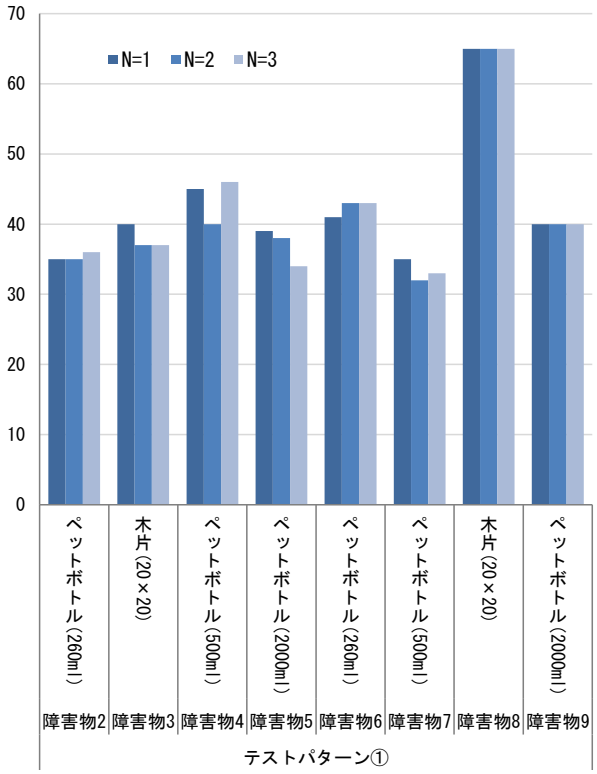


図 4.3.3-30　28GHz 帯構成使用時の最遠地点集計図

本検証においては、Wi-Fi 構成で測定した結果と、整合の取れる傾向を確認した。

5）総検知フレーム数の評価

ドローンとの通信に Wi-Fi 構成を使用した場合の各障害物の検出に関する試験回毎での検出総フレーム数を集計した。結果を図 4.3.3-31 に示す。

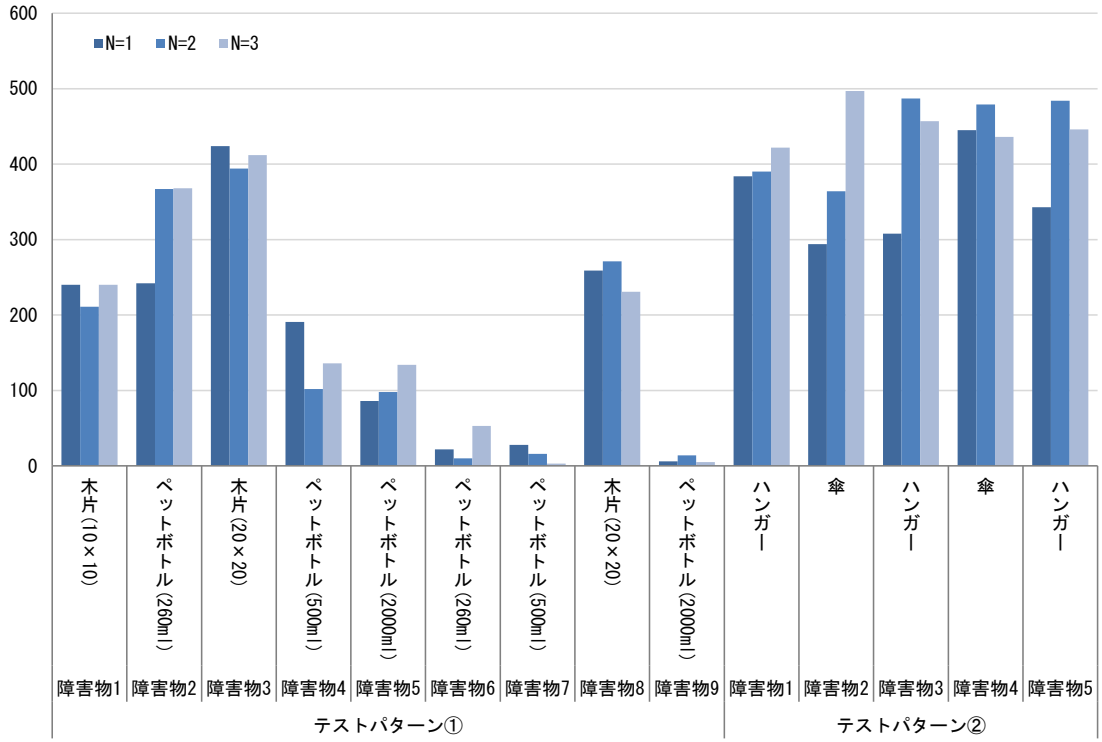


図 4.3.3-31　検出総フレーム数

各試行回において、外的な条件を揃えた環境で試行しているが、特にテストパターン①の障害物 4-7 について、試行回 N=2 での検出性能が悪いように見受けられた。無線のゆらぎや不安定性が影響していると仮説を設定し、その検証を行った。

このとき、dOIC に接続するネットワークの品質を確認するため、図 4.3.3-32 に示すように試験時のパケットロスの遷移を可視化した。

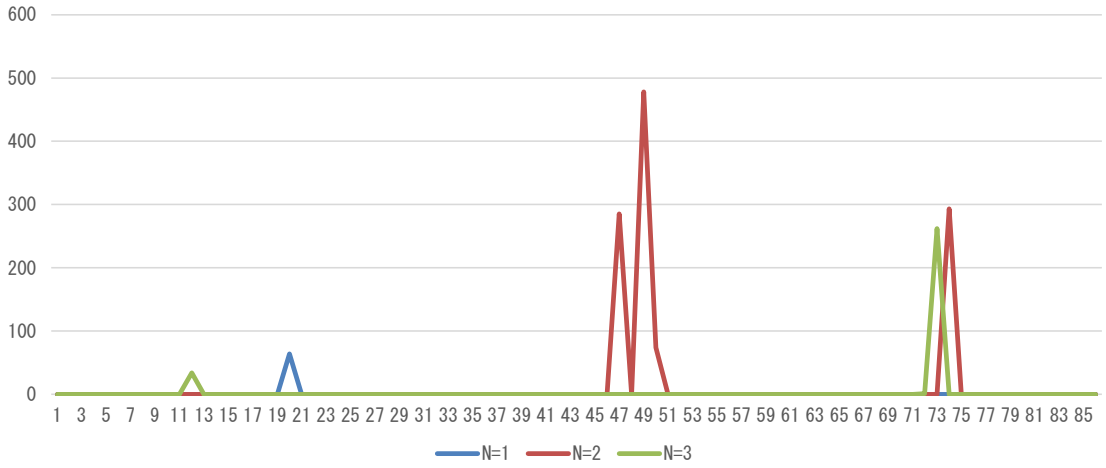


図 4.3.3-32　テストパターン①のパケットロスの遷移

その結果、N=2 の時について、パケットロスが数回生じていることが分かった。そこで、パケロスが生じている瞬間を、N=2 と N=3 の時との画像を比較した。

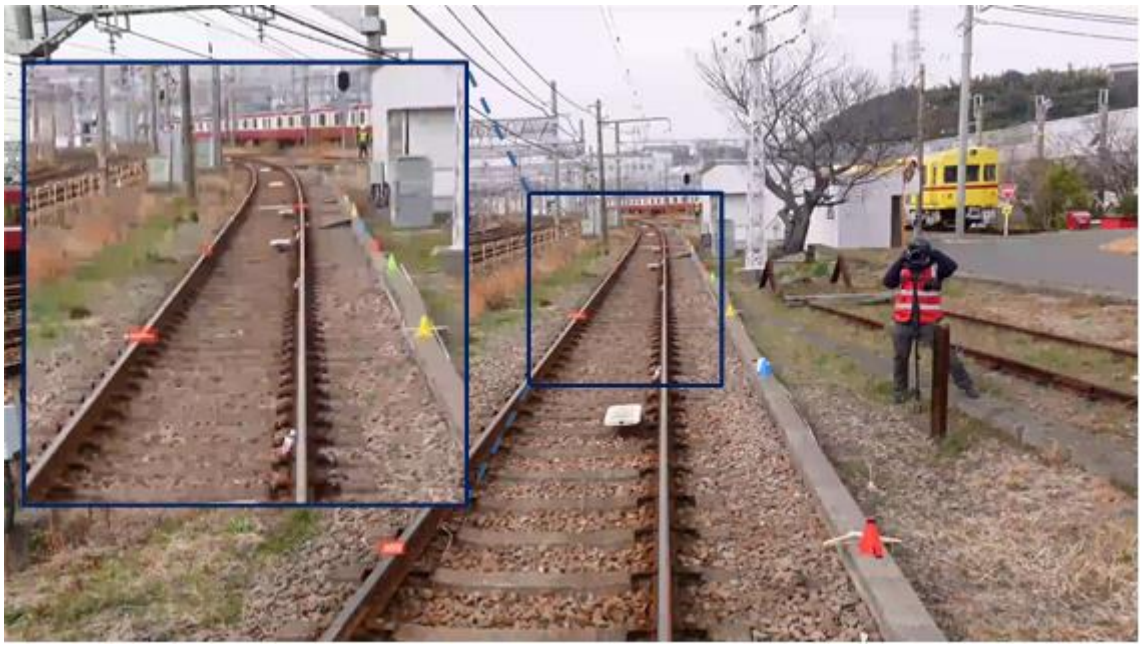


図 4.3.3-33　テストパターン①の予測画像（N=2）

図 4.3.3-34　テストパターン①の予測画像（N=3）

2 つの画像を比較してみると、N=2 の試験時の方が、映像のピクセルが潰れていることが見て取れた。このことから、ネットワークの品質が不安定になると、パケットロスが生じ、その結果として描画される映像のピクセルに乱れが生じることが示唆された。

同様に、テストパターン②についても、N=1 の検出性能が悪いように見受けられたため、パケットロスと、それが生じたときの画像を抽出し、確認した。

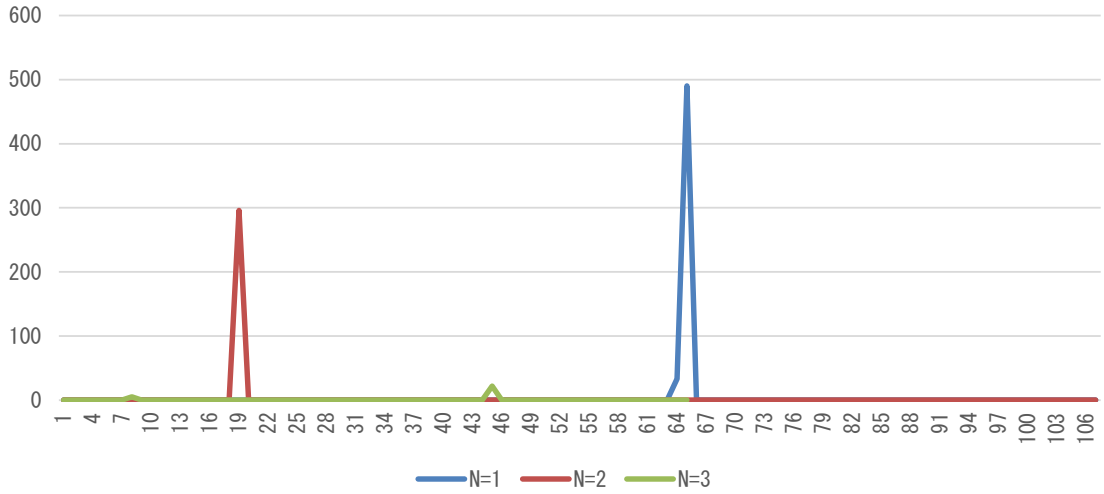


図 4.3.3-35　テストパターン②の予測画像（N=1）

図 4.3.3-36　テストパターン②のパケットロスの遷移

こちらもテストパターン①同様、パケットロスが生じた際には映像に乱れが生じたような状態になるため、AI の検出性能に影響を与え、N=1 の試行では検出総フレーム数が比較的少なくなっていたことが考えられる。

次に、ドローンとの通信に 28GHz 帯 5G 上空利用構成を使った場合についても同様に、総検出フレーム数を可視化した。

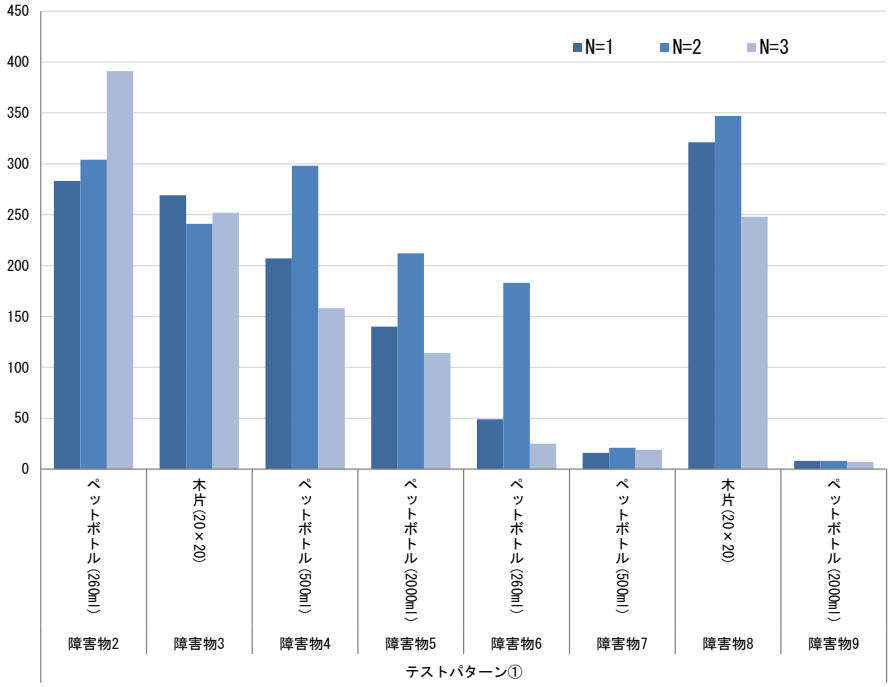


図 4.3.3-37　28GHz 帯構成使用時の検出総フレーム数

上空利用構成においては、検出総フレーム数の傾向については、Wi-Fi 構成での試行と同様の傾向が見られた

なお、Wi-Fi のアクセスポイントよりも 5G 実験局の利得が高いためか、無線ネットワークの不安定性（パケットロス）に起因する映像の乱れは発生しなかった。

6）AI 処理時間の結果

映像を受け取った瞬間から、MQTT に送信するまでの処理結果を集計した。その結果を図 4.3.3-38 に示す。

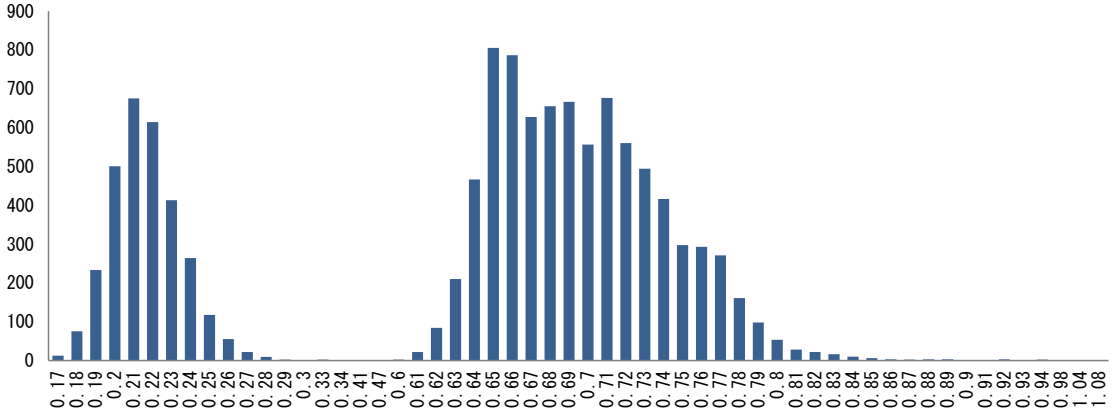


図 4.3.3-38　線路異常検知モデルの AI 処理時間

処理時間の分布に、双峰性が確認できた。「線路検出モデル」だけの処理時間と、「線路検出モデル+障害物検出モデル」の処理時間の 2 パターンが存在するためと思われる。「線路検出モデル+障害物検出モデル」が使われた場合、片側 95%の信頼区間を考慮すると、0.77 秒で処理されていると言える。このことから、Back API 800ms の処理時間設定は妥当な水準であったと考えている。

7）fps 数の結果

実証実験時の処理結果から、fps 数を集計した。理論値である 20fps、もしくはそれに近しい水準での処理ができていることを確認した。

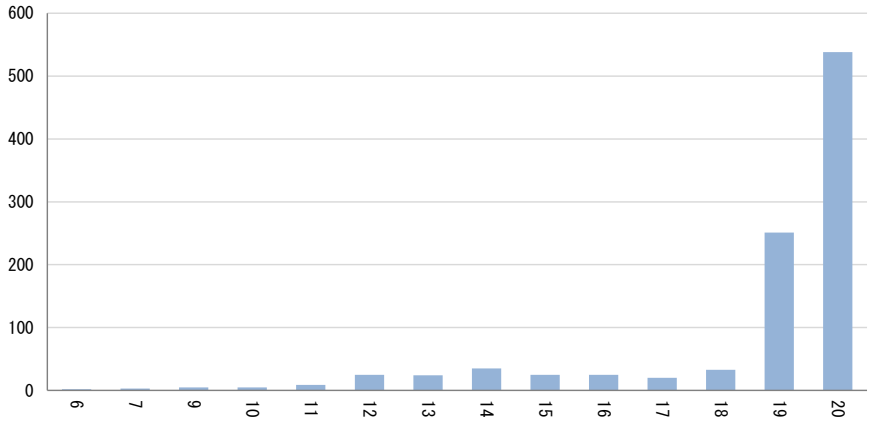


図 4.3.3-39　線路異常検知モデルの fps 数

4.3.3.2 ユーザインターフェース（UI）

（1）ユーザインターフェース（UI）の構築

図 4.3.3-41~図 4.3.3-45 に示すユーザインターフェースを構築し、試験室 PC 等の端末で表示できるようにした。（図 4.3.3-40）

図 4.3.3-40　試験室設置の PC 上での UI 表示

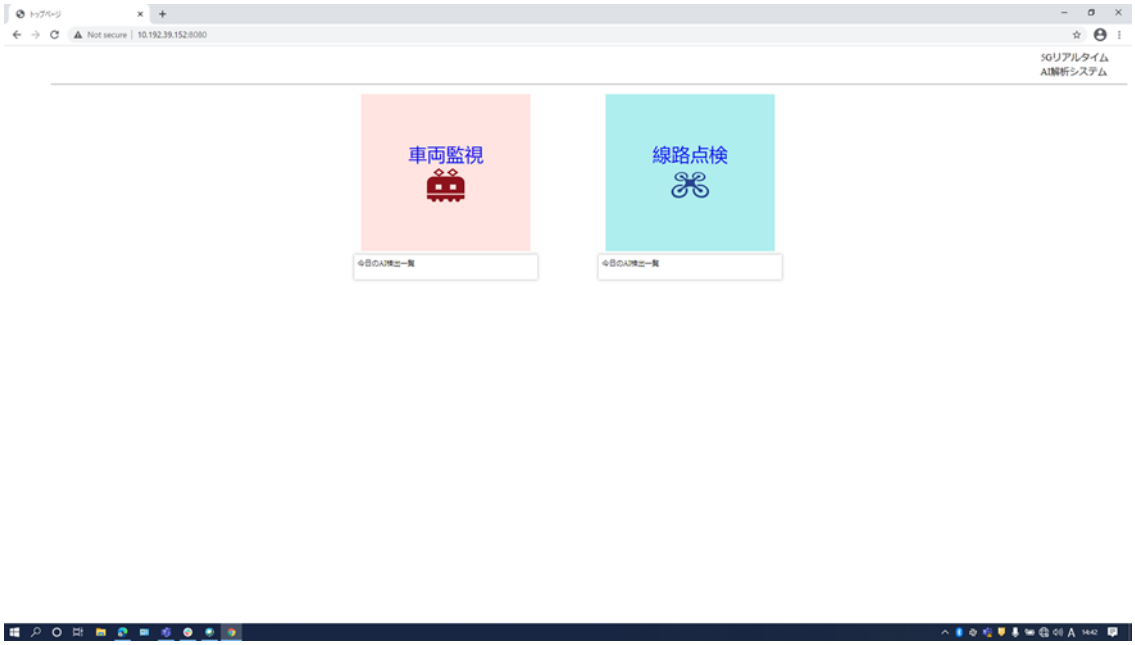


図 4.3.3-41　ユーザインターフェースのトップ画面

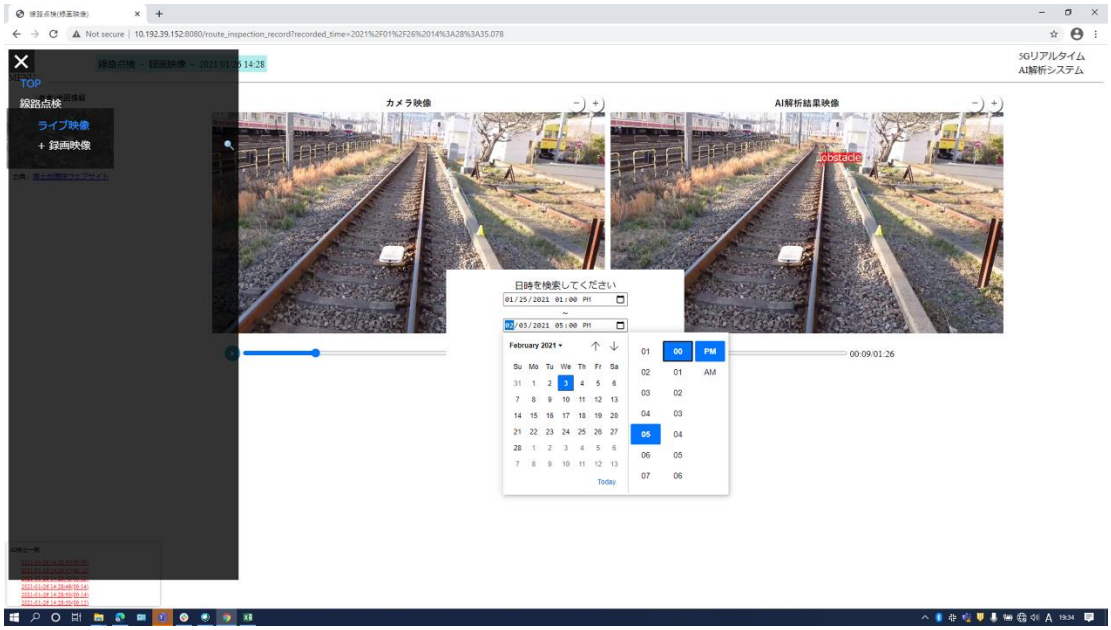


図 4.3.3-42　録画映像がある線路巡視検索の日時指定画面

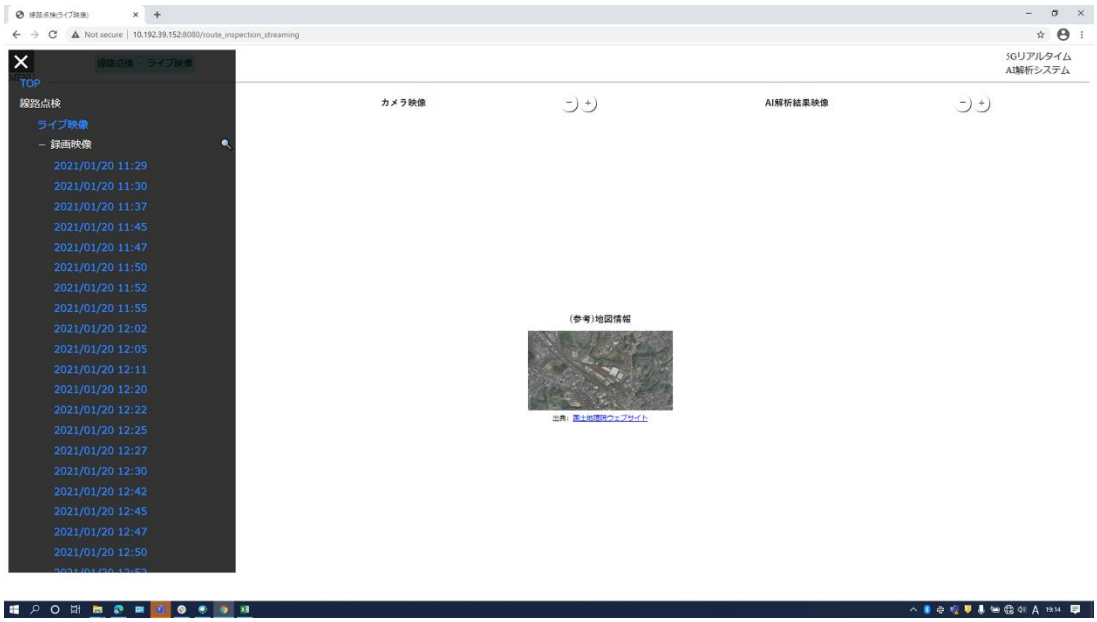


図 4.3.3-43　録画映像のある車両番号の録画日時指定検索結果表示画面

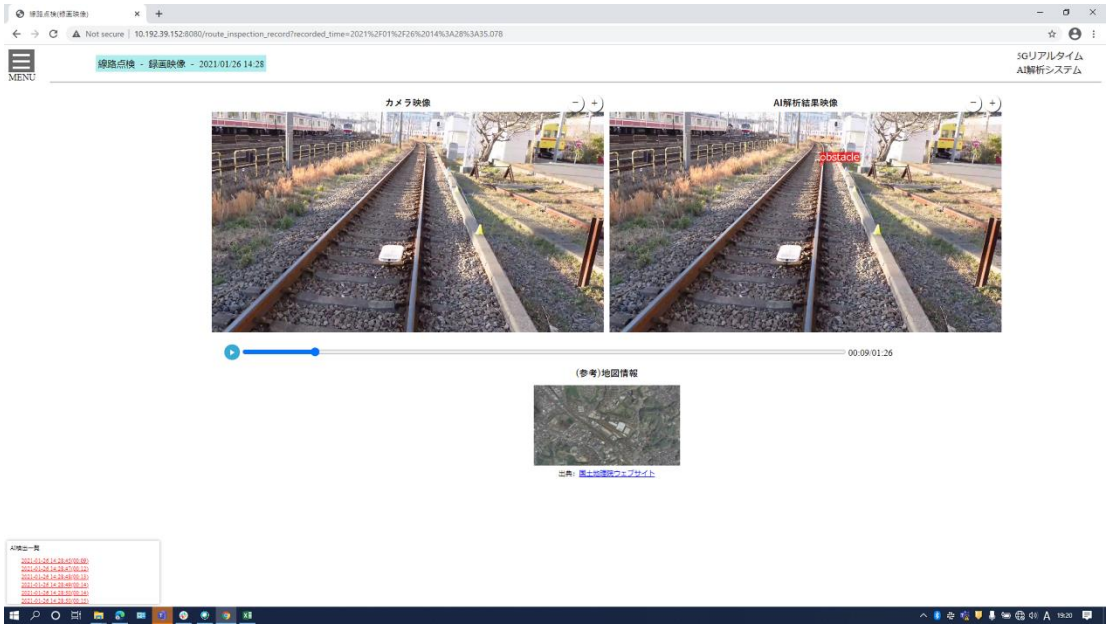


図 4.3.3-44　線路巡視視録画映像表示画面（線路上の異物検出）

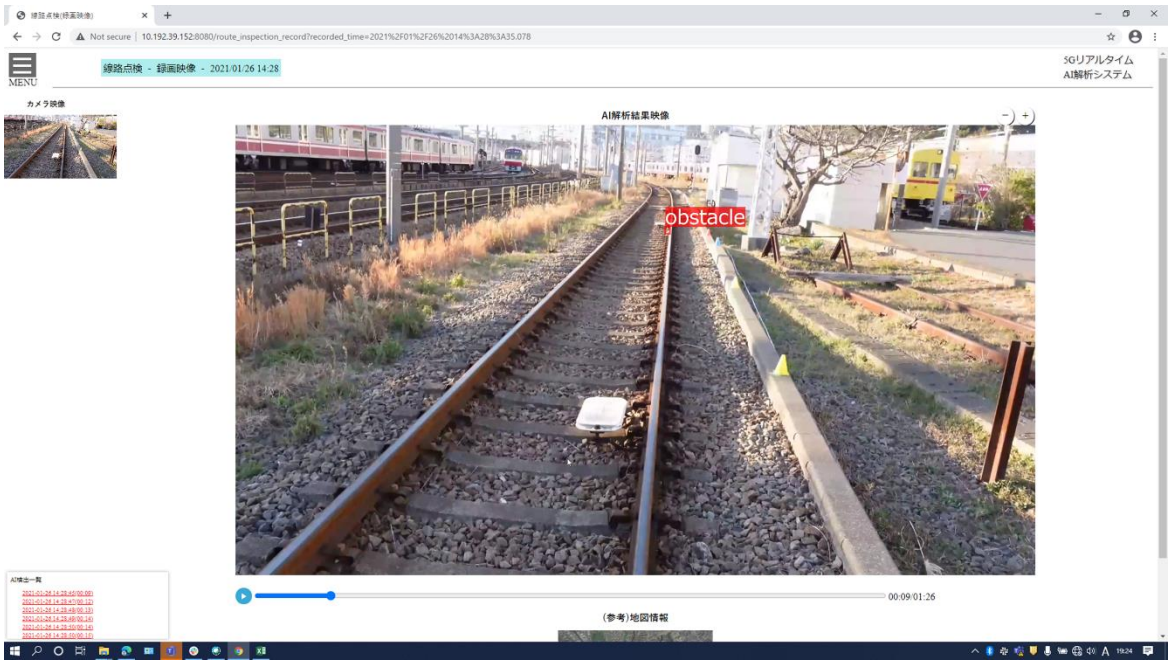


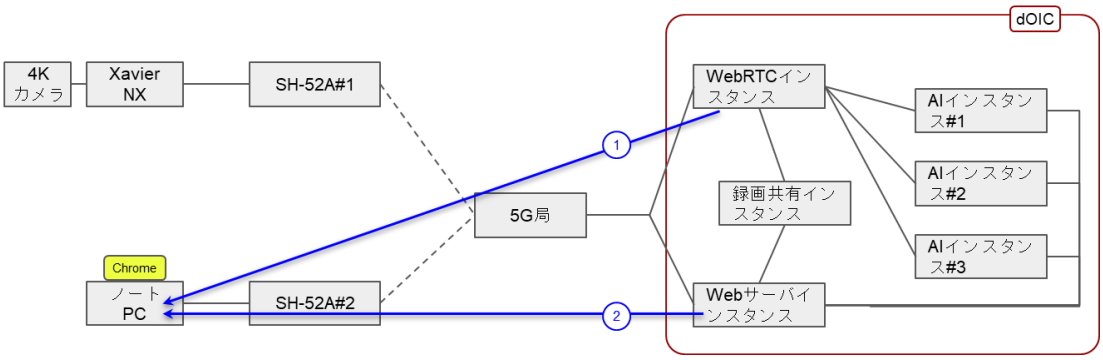
図 4.3.3-45　線路巡視視録画映像表示画面（線路上の異物検出：拡大画面）

ライブ映像の確認、振り返り映像の確認においては、車両監視の UI と同様の機能（車両番号からの振り返り機能を除く）を搭載している。

（2）UI の評価

1）AI 解析 Web サイトへの接続性評価

図 4.3.3-46 に示すように、結果表示 PC のブラウザから AI 解析結果 Web サイトへ接続し、想定した接続（正常接続性、複数同時接続性、異種端末接続性（PC 等）、接続時リードタイム）ができることを確認した。



凡例
測定区間
①AI解析結果表示ノートPC（Chromeブラウザ）※ストリーミング配信映像
②AI解析結果表示ノートPC（Chromeブラウザ）※録画映像

図 4.3.3-46　AI 解析 Web サイトへの接続性評価システム構成

2）結果表示各機能の想定動作評価

映像品質、ストリーミング映像、録画映像、レイアウト表示の各機能が想定した動作であることを確認した。

①目的ストリーミング映像の適切表示、AI 検知箇所特定のバウンディングボックスの適切表示、ストリーミング映像描画までの時間

図 4.3.3-47　結果表示各機能の想定動作評価内容

表 4.3.3-9　4k30 フレーム映像が正常に表示されるかの評価

4Kカメラ 映像配信規格	映像種別	試験対象区間	確認方法	経過時間	解像度	フレーム数
4K30fps	ストリーミング配信	webRTCインスタンス～ AI解析結果表示ノートPC	chromeデバック	1分後	3840x2160	30
				5分後	3840x2160	30
				10分後	3840x2160	30
4K30fps	録画配信	webサーバインスタンス～ AI解析結果表示ノートPC		-		

②目的録画映像の適切表示、総合シークバーによる再生指定、元映像と AI 検出映像の時間同期 AI 検知箇所特定のバウンディングボックスの適切表示、録画映像描画までの時間

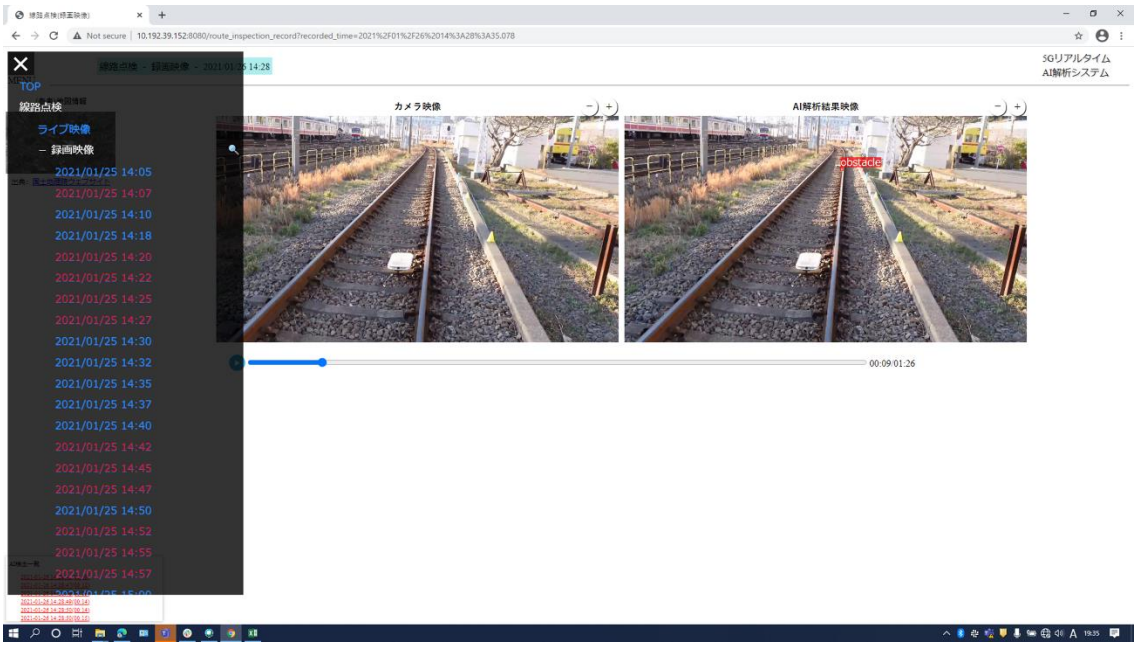


図 4.3.3-48　録画映像表示各機能の想定動作評価内容

表 4.3.3-10　目的映像が適切に表示されるかの評価

対象UI	確認端末	確認方法	該当映像が 再生される（○×）	再生が開始される までの時間
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	該当リンクをクリックする	○	2秒以下
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	該当リンクをクリックする	○	車両：1分38秒/3回平均 線路：1分05秒/3回平均

表 4.3.3-11　AI 検知箇所特定のバウンディングボックスが適切に表示されるかの評価

対象UI	確認端末	確認方法	異常箇所数 （1画像当たり）	バウンディングボックスが適切な位置に表示される（○×）
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	意図的に異常状態を作り、適切な位置にバウンディングボックスが表示されるか目視で確認する。	1ヶ所	○
			2か所	○
			3か所	○
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	意図的に異常状態を作り、適切な位置にバウンディングボックスが表示されるか目視で確認する。	1ヶ所	○
			2か所	○
			3か所	○

表 4.3.3-12　録画映像総合シークバーによる再生指定評価

対象UI	確認端末	確認方法	時間軸の同期が取れている（○×）
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	シークバーを任意の場所へ移動したとき、生映像と矩形付き映像が同じ時間軸で再生されることを確認する	○

③表示映像種別の選択による正常表示動作、映像選択時のレイアウト切替時間

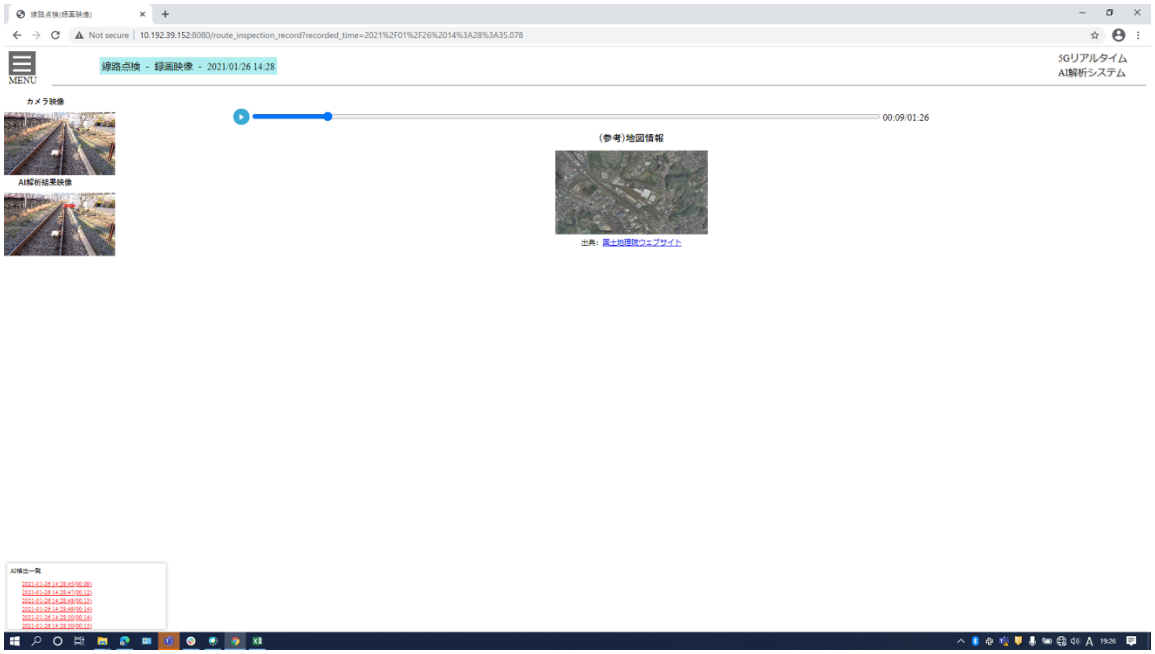


図 4.3.3-49　表示映像種別の選択機能の評価内容

表 4.3.3-13　表示映像種別の選択に依る正常動作、映像選択時のレイアウト切替時間の評価

対象UI	確認端末	確認方法	クリック対象の映像種別	映像が切り替わるまでの時間	該当の映像種別が正常に切り替る（○×）
ストリーミング配信	AI解析結果表示ノートPC	該当の映像種別をクリックしレイアウトが切り替わる（フェードアウトする）ことを確認する	生映像	1秒以下	○
			ストリーミング映像	1秒以下	○
			サーマル映像	1秒以下	○
録画配信	AI解析結果表示ノートPC	該当の映像種別をクリックしレイアウトが切り替わる（フェードアウトする）ことを確認する	生映像	1秒以下	○
			ストリーミング映像	1秒以下	○
			サーマル映像	1秒以下	○

3）アンケートによる定性評価

本システムを線路巡視業務に携わる現場技術者が利用するにあたり、実務者目線での利便性に関する調査を行い、その結果を図 4.3.3-50 に示す。評価内容をユーザインタフェース（UI）の利便性、機材の有用性、導入可能性の３カテゴリとし、アンケート調査を実施した。なお、本結果は、調査時に職員が複数人で協議しながら、久里浜工場職員としての意見を取りまとめていただいたものである。

概ね車両監視 UI と同様の結果が得られている。改善点としては、映像表示の Web ページリンク（録画映像）をクリックしたときに、1 分 38 秒後に表示された点である。これは、録画映像の全編をダウンロードしてから表示する仕様であったため、想定以上に時間を要している。ダウンロードと表示を同時に行う仕様に変更することで、録画映像表示までのリードタイムを短くすることが可能であると考えられる。

まず、カテゴリ１：ユーザインタフェースの利便性について、ヒアリングを行った。事前の現場ヒアリングを重ねて構築していたこともあり、実運用を想定したときに良好な評価を得ることができた。一方で、みやすさのために余白を多くした部分で、より密なデザインにできないかと要望を受けた。デザイン観点では、車両部門とは大きく異なる意見であったが、実装に向けてはより深い現地ヒアリングを通じて作業者の使いやすさを追求していく必要がある。また、新たな意見として、システムの機能として、検知物体の大きさや位置を記録する機能があるとより良いという声を受けた。技術的には可能であると考えられ、今後の課題として検討していきたい。

次に、カテゴリ２：使用した機材について、ヒアリングを行った。ここでも、事前の現場ヒアリングを通じて高精細のカメラを導入していたことから、実運用を想定したときに高い評価を得ることができた。また、カメラについては、Q3 にあるように、本実証ではスコープ外とした車両搭載カメラへの応用についても言及された。これらのセンシング方式については、今後、鉄道各社とのヒアリングを通じて、ニーズの掘り下げを行う予定である。また、実装の課題として、ドローン運行の安全性について、誤作動対応、悪天候時の運用、夜間運用の３点についてコメントを受けた。誤作動対応については、ドローンのフィードフォワード制御（360 度センサ対応、高精度位置補足）だけでなく、フィードバック制御（異常状態を察知し、安全サイドに倒すファイルセーフ設計など）を取り入れること

が考えられる。しかし、新規ドローン開発は莫大なコストが掛かるため、ドローン機体ベンダの動向調査を第一に行うべきであると考える。また、悪天候時は風速 10m 程度までは飛行可能であり、運用制限を設けることが適切である。最後の夜間運用については、LED ライトを用いることで実施可能であると考えている。以上の要素は、運用に向けたより一層のヒアリングを通じて、要否を検討しながら、スキームに則した機能選定、機材調達を検討するよう、今後の課題としたい。

最後に、カテゴリ３：5G-AI システムの機能と導入可能性について、ヒアリングを行った。概して高評価を受け、車両部門とは異なり、機能的な課題は少なく稼働効率化への寄与を期待するコメントを得た。一方で、導入にあたっての課題としては、安全性をどの程度向上させられるのか、より深い運用評価が必要であることが本実証で明らかとなった。

鉄道インフラのリアルタイム遠隔・自動監視の実証実験に関するアンケート（保線部門）

この度は、総務省 5G 実証実験へご協力いただき、誠に有難うございます。
利用者にとって、本システムの利便性をより一層向上させるべく、下記アンケートにご協力いただけますと幸いです。記入にあたっては、会議中のご説明・議論をもとに、ご対応いただけますと幸いです。
ご多用のところ恐れ入りますが、よろしくお願いいたします。

１．ユーザインタフェースの利便性

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. Web 画面のレイアウト・見た目はいかがでしたか。
回答：　　□1　　□2　　？3　　□4　　□5
上記を選択された理由についてご記入ください。

シンプルで見やすいと思います。余白が多いので，改良の余地もありそうです。

Q2.（会議内トピック）実業務を想定すると、Web 画面上のどのような機能が良かったと思いましたか？
3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）
②＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）
③＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）

Q3.（会議内トピック）実業務を考えると、Web 画面上において、どのような追加機能が必要だと思いましたか？
3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①検知物の詳細＿＿＿（理由：検知か所一覧に時刻だけではなく，位置や大きさ等の補足情報があると良い。位置はレール上か否か等。大きさはペットボトル程度のものか大きめの樹木の枝程度か等）
②＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）

２．使用した機材について

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. ドローン搭載 4K カメラについて、AI 解析や人の確認を伴う実運用を想定したときに十分な映像品質だと感じましたか？

回答：　　□1　　□2　　□3　　？ 4　　□5

上記を選択された理由についてご記入ください。

映像は見やすいと感じました。

Q2.（会議内トピック）ドローン搭載 4K カメラについて、ドローン飛行の安全性に極めて留意して試験を行いました。実運用に向けて、ドローン運行（直近では有人 / 将来的には無人）にあたっての課題を教えて下さい。
3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①誤作動誤操作対策（理由：実運用に際し，最低限必要な安全性の確保。　　）
②悪天候への対応　（理由：天候が不安定な状況の使用を想定した時，ドローンによる二次災害防止　）
③夜間の視認性　（理由：始発電車前で日の出前の時間帯に必要な視認性が確保できるか　　）

Q3. データ取得用の機材について、AI 解析や人の確認を伴う実運用を想定したときに、ドローン搭載 4K カメラ以外を選ぶとしたら、何を利用したいと思いますか？（振動計測器、音波計測器など）　3つ以内で理由も含めてご意見下さい。

①車輌搭載カメラ　（理由：ドローンより機動性は劣るが，安全性は高い。　　）
②＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）
③＿＿＿＿＿＿＿＿（理由：　　）

Q4. 検出対象物について、今回は検証用途でこぶし大の木片から２Ｌペットボトル、ビニル傘などを用いましたが、災害後の警戒時作業を想定したとき、どのような障害物が対象になりますか？3つ以内でご意見下さい。

①車輌が走行不可となる規模の土砂・落石・倒木・倒壊物
②シートやトタン板などの風に飛ばされやすい物
③線路設備（看板等）の脱落や損傷による物

３．5G - AI 監視システムの機能と導入可能性について

※以下、回答は5段階数値　1：悪い　～　5：良い　にて評価をご記入ください。

Q1. ドローン 4K カメラによる AI 検知により、異常箇所を見分けやすいと感じましたか？

回答：　　□1　　□2　　□3　　？ 4　　□5

上記を選択された理由についてご記入ください。

カメラの精度も含め，映像として見やすいと思いました。

Q2. ドローン 4K カメラによる AI 検知システムを導入するにあたり、実業務を想定した課題を教えて下さい。3つ以内でお答え下さい。

・線路内の雑草等による誤認知。 ・問題のある物，無い物の判定基準。 ・

Q3.（会議内トピック）AI 検知により、将来的に実業務の効率化やより一層の安全性向上に貢献できると感じますか？　※ドローン 4K カメラ以外の検査機材を利用する場合も含む

回答：　　□1　　□2　　□3　　？ 4　　□5

上記を選択された理由についてご記入ください。

AI に限らず，新技術等による既存体系の改善は常に検討していくべき課題と思っています。

Q4.（会議内トピック）今回は 5G 技術を活用することで、4K 映像等を用いた AI 検知システムを構築しました。将来的に鉄道事業（**保線部門**）における 5G の導入可能性（領域・用途）と課題について、ご意見下さい。
※ドローン 4K カメラ以外の検査機材を利用する場合も含む

回答：　　□1　　□2　　？ 3　　□4　　□5

導入可能性（領域・用途）に関するコメント：

人による点検の時短・効率化。AI 判定による補助，見落としの防止。

導入に向けた課題に関するコメント：

・同じことばかりで申し訳ないが，安全性の確保。 逆に安全性さえ確保されているならば，導入へのハードルは低いと思われます。 ・

図 4.3.3-50　アンケート回答結果（線路巡視）

4.4 課題解決システムに関する効果検証

4.4.1 5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システム

実証結果を踏まえ、5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システムの効果を、京浜急行電鉄（車両部門）の現場技術者へのヒアリング結果や協議会での委員からの指摘等に基づき評価した。

4.4.1.1 効果検証の内容

具体的な評価手法は、①課題解決システムの性能（AI 解析による対象物の検出性能）、②課題解決システムにより高度化可能な業務項目を明確化し、課題解決システムが実装された際に想定される導入効果を下記の観点から評価した。

（1）列車運行の安全性の向上の観点

・日常定点観測・異常検知による安全性の向上（早期発見・早期復旧に貢献）が実現できるかを確認
・進行性の台車の不具合の“疑い”を把握することの支援につながるか（不具合の疑いを運転手、車掌など乗務員が感知することに加え、課題解決システムが客観的に検知することで、安全性が向上するか）を確認

（2）作業の効率化の観点

・リアルタイムで人の目や判断を補う機能（常時観測＋異常のアラート）により、人員の増強なしに検査の高頻度化が実現できるか
・目視検査とのクロスチェックによる検査精度の向上が実現できるかを確認
・ヒューマンエラーの抑制につながるかを確認

4.4.1.2 効果検証の結果

5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システムの評価の結果を表 4.4.1-1、想定される導入効果の評価を表 4.4.1-2 に示す。定量評価は実証結果、定性評価は現場技術者に対するヒアリング結果に依拠することを基本とした。課題解決システムの性能に関する定量評価では、異常を確実に把握することが実用の観点では重要であるため、網羅率 100%（一部“オオカミ少年”は許容するものの、検出漏れはない状態）を数値目標と定める。

表 4.4.1-1　課題解決システムの評価

評価項目	定量評価	定性評価
①　課題解決システムの性能	【台車のき裂】 ・幅 1mm までの疑似的なクラックが 5km/h および 10 km/h の走行状態でも検出可能 ・幅 0.2mm 以下の疑似的なクラックは、検出できる可能性はあるものの、検出精度は低い ・クラックの方向が水平方向の場合は、相当程度の検出性能があるものの、垂直方向の場合は検出性能が低下する	・幅 1mm までのクラックを精度よく検出できることの有用性は高い（検出精度に応じた運用方法を確立する必要がある）
	【収容函のハンドル】 ・正常な対象物を異常として検出する場合があるものの、異常な対象物はすべての異常を検出可能（**網羅率 100%**）	・実運用に資する性能である
	【ブレーキパッド】 ・摩耗により 60%以下になっている状態を漏れなく検出可能（**網羅率 100%**）	・実運用に資する性能である
	【車軸の温度】※参考 ・サーマルカメラによる車軸の温度上昇（温度差しきい値以上の相対差分）が検出可能（**網羅率 100%**）	・部材の異常の判定に活用できる点で有用である
②　課題解決システムにより高度化可能な業務項目	・台車のき裂、収容間のハンドル、ブレーキパッドの３項目について、検査車両の入庫時に異常検出することで、異常の確認機会が 2 倍になる ・上記項目は、列車の運行中でも確認可能であるため、鉄道駅に設置することで、複数の通過車両の異常を日常的に確認することが可能になる	・列車検査を「代替」するものではなく、状態監視による「新たな安全向上策（検出した異常を人が確認）」と考えられるため、列車検査の実作業の直接的な業務効率化には貢献しない ・一方、日常定点観測により、不具合を発見し、列車を入庫させることで安全性向上に資する ・また、問題事象が発生した際の事実確認ができることもメリットとして挙げられる

表 4.4.1-2　課題解決システム導入で想定される効果の評価

観点	想定される導入効果の評価
（1）列車運行の安全性の向上の観点	・日常定点観測・異常検知により早期発見（6 日に 1 度の列車検査の間を埋める）・早期復旧が可能となり、安全性の向上に資する具体的には、不具合を発見し、列車を入庫させるオペレーションが可能となる ・また、ブレーキパッドや車軸の温度の例のように、日常定点観測により、進行性の台車の不具合の“疑い”を把握することが可能となり事故の未然予防につながる
（2）作業の効率化の観点	・人の目による確認は必須であるものの、リアルタイムで人の目や判断を補う機能により、人員の増強なしに検査の高度化が実現できる（目視検査とのクロスチェックによる検査精度の向上が実現できる） ・客観性のあるデータの蓄積により、安全性の向上は見込めるものの、現時点では列車検査の実作業の直接的な業務効率化・省人化には貢献しない

4.4.2　5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システム

実証結果を踏まえ、5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システムの効果を、京浜急行電鉄（保線部門）の現場技術者へのヒアリング結果や協議会での委員からの指摘等に基づき評価した。

4.4.2.1 効果検証の内容

具体的な評価手法は、①課題解決システムの性能（AI 解析による対象物の検出性能）、②課題解決システムにより高度化可能な業務項目を明確化し、課題解決システムが実装された際に想定される導入効果を下記の観点から評価した。

（1）線路巡視作業の効率化の観点

・リアルタイムで人の目や判断を補う機能（運行再開時の線路周辺状況把握＋異常のアラート）により、係員の稼働削減が可能かを確認

（2）サービス水準向上の観点

・遠隔観測により、運行再開時の確認作業および復旧作業などの業務フローの効率化により、早期復旧が実現し、顧客にとってのサービス水準の維持にもつながるかを確認

（3）線路巡視作業の安全性の観点

・遠隔で人の目や判断を補う機能（運行再開時の線路周辺状況把握＋異常のアラート）により、作業員の安全確保が可能となるかを確認

4.4.2.2 効果検証の結果

5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システムの評価の結果を表 4.4.2-1、想定される導入効果の評価を表 4.4.2-2 に示す。定量評価は実証結果、定性評価は現場技術者に対するヒアリング結果に依拠することを基本とした。課題解決システムの性能に関する定量評価では、異常を確実に把握することが実用の観点では重要であるため、網羅率 100%（一部“オオカミ少年”は許容するものの、検出漏れはない状態）を数値目標と定める。

表 4.4.2-1　課題解決システムの評価

評価項目	定量評価	定性評価
①　課題解決システムの性能	【木材】 ・レール上に設置した、大きさの異なる直方体木材 2 パターン（厚さ：20 mm、底面積：100 / 400 mm2）を漏れなく検出可能（**網羅率 100%**）	・実運用に資する性能である
	【ペットボトル】 ・レール脇に配置した大きさの異なるペットボトル 3 パターン（容積：260 / 500 / 2000ml）を漏れなく検出可能（**網羅率 100%**）	
	【ハンガーと傘】 ・レール脇に設置した 2 パターンの異なる形状の物体を漏れなく検出可能（**網羅率 100%**）	
	【人】※参考 ・線路上を通過する人を異常として検出可能	・実運用に資する性能である（作業員の安全対策の観点からの運用の検討とさらなる検証が必要）
②　課題解決システムにより高度化可能な業務項目	・警戒明けの線路巡視では、ドローンによる遠隔巡視で、復旧作業の人員配置の効率化が一定程度想定されるものの、5G エリアのメンテナンスやドローンの管理の作業（＋現時点の技術動向）を考慮すると業務フロー全体における定量的な効果の測定が難しい	・列車検査同様に、人の目による確認は必須であるため、復旧すべき事象の大きさを予め確認できること、危険を伴わず確認できることに有用性が認められる ・災害復旧では、復旧作業が伴うため省人化が難しいものの、点検作業の効率化、見落とし防止などの点検精度向上に資する

表 4.4.2-2　課題解決システム導入で想定される効果の評価

観点	想定される導入効果の評価
（1）線路巡視作業の効率化の観点	・災害対応という対象の性質により、リアルタイムで人の目や判断を補う機能（運行再開時の線路周辺状況把握＋異常のアラート）では、係員の稼働削減は難しいものの、点検作業の効率化、見落とし防止などの点検精度向上に資する
（2）サービス水準向上の観点	・遠隔観測により、復旧作業の要員計画の最適化、点検作業の効率化など早期復旧の実現可能性が向上するため、顧客にとってのサービス水準の維持にもつながり得る
（3）線路巡視作業の安全性の観点	・遠隔で人の目や判断を補う機能（運行再開時の線路周辺状況把握＋異常のアラート）により、危険性の事前把握が可能になり、作業員の安全確保に資する

4.5 課題解決システムに関する機能検証

「課題解決システム」に関する機能検証を行い、その結果の評価・分析を行った。

4.5.1 検証内容

「課題解決システム」に関する「機能検証」を、課題解決システムを構成するシステムのジャンル（伝送メディア、映像取得、映像蓄積、映像解析、映像配信、結果表示 ）ごとに行い、その検証結果の評価・分析を行った。

4.5.1.1 伝送メディア

以下の表に示すように、伝送メディアとして、「キャリア 5G」「ローカル 5G」「Wi-Fi」「光ケーブル」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-1　機能検証（伝送メディア）

伝送メディア	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
キャリア5G	3	2	5	4	16	場所が選べない、下り通信優位、保守性が高い
ローカル5G	4	4	5	2	17	場所が選べる、上りスロット増加可能、コストが高い
Wi-Fi	1	2	3	4	10	小規模・複数でのエリア設計が難しい、有線ポートが複数必要
光ケーブル	4	3	3	4	15	場所が選べる、上り・下りとも帯域良好、保守性が悪い
総合的な評価	例えば、鉄道の車両監視においては、有線敷設が最小限となる無線通信エリアで、事業者が設置しやすい場所に設置でき、上り帯域を増加可能なローカル5Gが適している。一方、広域をカバーする必要のある道路インフラや橋梁点検等のユースケースについては、キャリア5Gの活用が、イベント・エンタメ施設など特定機材からの安定通信には光ケーブルが適している。					

4.5.1.2 **映像取得**

以下の表に示すように、映像取得機材として、「8k カメラ」「4k カメラ」「ハイスピードカメラ」「サーマルカメラ」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-2 機能検証（映像取得）

映像取得	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
8kカメラ	5	2	2	1	10	映像品質が極めて高い、帯域次第でフレーム数が減少、エンコード・デコード技術が開発中で、クラウド上に実装不可
4kカメラ	3	4	4	4	15	映像品質が高い、フレーム数が多い、エンコード・デコードの汎用技術を利用可能、クラウド上にも実装可能
ハイスピードカメラ	4	2	2	1	9	映像品質が低い、フレーム数は極めて多い、一般市場の機材では、ストリーミングでの映像伝送は実装不可
サーマルカメラ	3	4	4	3	14	映像品質は低いが温度情報を取得可能、フレーム数は機材次第で増減、仮想ドライバでストリーミング伝送可能
総合的な評価	リアルタイム遠隔・自動監視システムを構築するにあたり、映像品質とフレームレート、ストリーミング映像伝送が可能であることが不可欠である8kカメラやハイスピードカメラも、それぞれ映像品質の良さとフレームレートの多さが際立ち検討したが、ストリーミング伝送それ自体が機器スペックの観点で不可能であった。一方で、4kカメラは汎用技術を用いて、安定したストリーミング映像伝送が可能であったため採用した。また、センサフュージョンとして、視覚的な映像品質自体は低いが、映像からは読み取れない温度情報を取得できるサーマルカメラも、デバイスを組み合わせる前提で非常に有用性が高いため、採用した。（※今後、8Kカメラやハイスピードカメラのストリーミング伝送が可能となれば、4kカメラの代わりに、それらを採用する可能性もある。）					

4.5.1.3 **映像蓄積**

以下の表に示すように、映像蓄積用に使う基盤サービスとして、「dOIC」「AWS」「Azure」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-3 機能検証（映像蓄積）

映像蓄積	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
dOIC	5	3	4	3	15	本実証ではNTTドコモ５Ｇ利用のため、ドコモ網内設備として低遅延で接続可能なMEC環境「dOIC」を活用できた。サービス開始して間も無いため、現状では拡張性等機能は他クラウドサービスと比較すると見劣りする。
AWS	4	4	4	3	15	本実証でのdOIC・AWSとのレイテンシ比較では、インターネット経由して接続するAWSは、RTT(Avｇ) 約100msecの差分があった。KDDI (au) ５Ｇを利用する場合は、AWS Wavelengthという低遅延接続可能なMECが活用できると思われる。
Azure	3	4	4	3	14	クラウドサービスは活用しやすい機能と構成である。しかし、5Gを利用して低遅延性を求める場合には、現時点で５Ｇ直接接続する構成がない。このため低遅延性についてはは、dOIC・AWSと比較すると見劣りする。
総合的な評価	本課題実証での「４k映像をクラウドでリアルタイムAI解析し、利用を想定するロケーションでリアルタイムで活用する」事を前提で評価する。 本実証では、伝送メディアとしてNTTドコモの５Ｇを活用した。このためドコモ網内で低遅延で接続可能なクラウド・MEC(Multi-access Edge Computing)環境として、ドコモオープンイノベーションクラウド（以降、dOIC）を用いた。 ５Ｇルータ配下端末から、dOIC、AWSとのRTT(Round-Trip Time)を試験計測・比較した場合、AWSはインターネット経由することもあって、dOICよりもRTT約100msec遅延が多い結果となった。 KDDI(au) ５Ｇを利用する場合は、AWS Wavelengthが、ドコモ5G+dOICと同等な構成になると思われる。 Azureについては、現時点でdOIC、AWS Wavelengthと同等な低遅延接続構成が存在しないようである。					

4.5.1.4 **映像解析**

以下の表に示すように、映像解析手法として、「単純画像解析」「ディープラーニング」「人の目」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-4 機能検証（映像解析）

映像解析	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
単純画像解析	2	2	4	5	13	精度が低く移動体にも活用可能、特定物体の検知のみで拡張性が少ない。シンプルで、保守性とコスト面では高評価である。
ディープラーニング	5	4	4	4	17	精度が高く移動体にも活用可能、判断材料を学習させ同様物体の検知要否を判断可能。保守性が高く低コストに運用可能。
人の目	3	5	3	2	13	精度が高いが移動体の検知が困難、経験的に幅広い判断軸をもつが、維持する人件費や稼働時間の制約が発生する。
総合的な評価	リアルタイム遠隔・自動監視システムを構築にあたっては、移動体に対する検知を複数同時かつ高精度に実施する必要がある。このとき、単純画像解析では精度が上がらず、人の目では運用コストが莫大になってしまう。そのため、ディープラーニングのAIエンジンを導入し、同様の映像を常時検知し続け、異常状態を発見した時のみ、専門の技術者が確認した上で、対処するのが理想である。					

4.5.1.5 **映像配信**

以下の表に示すように、映像配信規格として、「WebRTC」「HLS」「RTSP」を対象とし、また、コーデック規格として「H.264」「VP8」「VP9」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-5 機能検証（映像配信規格）

映像配信	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
WebRTC	5	5	4	3	17	4k30フレーム映像を低遅延で配信可能であり、拡張性として同時接続数を柔軟に増やせ、他拠点配信が可能な商用パッケージが存在する。パッケージ製品のため、問題発生時はベンダへ問い合せ可能であり、運用・保守性に優れる。製品のため、年間ライセンス費用が発生する。
HLS	3	4	3	4	14	４k30フレーム映像を配信可能だが、他方式と比較すると遅延が大きくなり、リアルタイム性に欠ける。拡張性・汎用性はHTTP利用端末であれば映像受信可能。
RTSP	5	3	3	4	15	4k30フレーム映像を低遅延で配信可能。拡張性（同時接続）はWebRTCには劣る。商用パッケージが少なく、オープンソースソフトウェア（OSS）が選択肢になる。OSSでは実装・テスト・運用の問題発生時には、提供団体・コミュニティへ問合せのため、解決が長時間化する懸念がある。
総合的な評価	本課題実証での「４k映像をクラウドでリアルタイムAI解析し、利用を想定するロケーションでリアルタイムで活用する」事を前提で評価する。 本実証では、リアルタイム配信（低遅延）、サーバを経由した同時接続配信、実装を目指した運用・保守性を考慮した。 選択したWebRTCは、配信のみで1秒以内、サーバを経由して柔軟な同時接続数、商用パッケージのため運用・保守性に優れている。 HLS(HTTP Live Streaming：)は拡張・汎用性はあるが遅延量が大きいことから候補から除外した。 RTSPは低遅延が望めそうだが、商用パッケージが少なく、オープンソースソフトウェア(OSS)が選択肢になる。同時接続数の拡張性、OSSのため問題発生時に提供団体・コミュニティに問合せすることから、解決の長期間化の懸念がある。					

表 4.5.1-6　機能検証（コーデック規格）

映像配信（コーデック）	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
H264	5	5	5	3	18	従来方式であるMPEG-2などの2倍以上の圧縮効率を実現する。HDTVクラスの高ビットレート用途に至るまで幅広く利用されることを想定されている。
VP8	2	3	2	5	12	ロイヤリティフリーとして発表されたコーデック。ビットレートハンドリングに優れており比較的低めのビットレートでも性能を発揮するが、エンコードが遅い上、同等の品質を持つH.264が広く普及した事と、後継のVP9があるためVP8を選択するメリットは少ない。
VP9	4	2	3	5	14	VP8の後継としてロイヤリティフリーで発表されたコーデック。動画の圧縮率が最も高く低ビットレートでも高い画質を実現できるが、高圧縮することからVP8よりもCPUの使用率が20～30%上がってしまう。
総合的な評価	より細かな物体検知を行うことを目指し、可能な限り高精細な映像をAIエンジンへ伝送する必要がある。 安定した4k30fpsの映像伝送が行えることを前提とし、各コーデックにおいて4k映像伝送時の受信解像度とフレーム数の比較を行った結果、コーデックVP8は目指す4k解像度に達する事が無く、VP9は解像度が4kに達する事があったもののフレームレート数が上がらず30fpsに達する事は無かった。H.264に限り解像度及びフレームレート数が目的の4k30fpsに達することが確認できた為、本実証においてはH.264を使用することとした。					

4.5.1.6 結果表示

以下の表に示すように、UI 設計（デバイス）として、「PC」「タブレット」「スマートフォン」を対象とし、また、UI 設計（媒体）として「ブラウザ」「アプリ」「専用デバイス」を対象とし、それぞれの「性能・スペック」、「拡張性」、「運用保守性」、「コスト・汎用性」の点からそれぞれを検証し、総合的に評価した。

表 4.5.1-7　機能検証（UI 設計（デバイス））

UI設計（デバイス）	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
PC	5	5	3	2	15	4K高精細映像をそのままの画質で再生可能なGPUメモリ等リソースの選択肢が最も柔軟なデバイスとなる。AIで解析された結果を画面上からでも十分に確認が可能であり、遠隔点検には最も適したデバイスと考えられる。 ただし、持ち運びには難があり、デスクトップ型であれば常時給電が必要であるし、バッテリーを搭載したノート型であっても、高性能な物になれば消費電力も高くなり、バッテリー運転時間は比較的短くなってしまうケースもある。
タブレット	4	2	4	3	13	持ち運びが容易な上、画面も比較的大きな物が多く現場でAI解析結果映像と実物を比較するなど幅広い利用ケースが考えられる。PCほどの高スペックは期待できないが、それを十分カバーできるほどの機動性がメリットである。
スマートフォン	2	1	2	5	10	小型で持ち運びに優れており、導入コストも比較的安くなる一方リソースも低く異常検知箇所を確認するには画面も小さい為、4K高精細映像で伝送をするメリットが低いと考えられる。 業務用としても導入率が上昇しているため、AI異常検知時の通知の受取や、一次確認など運用面での工夫によりその機能を十分に発揮できると考えられる。
総合的な評価	今回実証においては、4K高精細映像を低遅延で高画質のまま投影することを目的としたため、性能が一番優れるPCを選択したが実際の導入時オペレーションを考えた場合には現場での常時監視と即時対処が必要と考えられることから、点検者の容易に常備できるタブレットやスマートフォンがより適しているケースも考えられる。 特にスマートフォンについては、ゲーミングスマートフォンと呼ばれる高性能な物や4Kディスプレイを搭載した機種などが発売されてきている。今後、PC並みの性能に近づくことで十分に代わることができる端末になることが考えられる。 また、スマートフォンは業務用としても導入率が上昇しており、日本の携帯電話等の保有率は100%を超えているが、今後は業務用スマートフォンの保有率も近い数値になることが考えられることからシステムの導入が加速すると考える。					

表 4.5.1-8　機能検証（UI 設計（媒体））

UI設計（媒体）	性能・スペック	拡張性	運用保守性	コスト・汎用性	評点	コメント
ブラウザ	3	5	5	5	18	PCやタブレット、スマートフォンなどで共通提供されている物が多く、拡張性や汎用性には最も優れていると考えられる。 今回検証・採用した映像コーデックにも対応しているものが多く選択肢の幅が広くなる。一般的なものはOSに付属されいたり無償提供されており導入が容易である。 アプリケーションと違い提供するサーバー等のコンテンツを変更するだけでUIの変更が可能であり、拡張性や横展開、保守性に非常に優れていると考えられる。
アプリ	5	2	3	2	12	各ユースケースにおいて市販されているアプリケーションと完全マッチングするケースは少ないと考えられ、アプリケーションによる展開にはスクラッチでの開発が予想されコストが高くなると考えられる。その一方、専用に開発できることから視認性や操作性などは希望にあったものを実現可能である。 また、アプリケーションを搭載するデバイスについては汎用的なものを選択可能なケースが多いため、既存デバイスの流用など展開面に優れている面もある。
専用デバイス	5	1	1	1	8	専用性が高く、目的の機能だけを実現するためには最も優れたデバイスになると考えられる。 デバイス及び搭載されるOS等は専用に開発されるものとなるため、コストが高く拡張性は低いと考えられる。 同じ環境下での横展展開には即時導入が可能と思われるが、ケース毎に変更するのは困難であり、都度コストが発生してしまう。 ハードもソフトも専用となるため、既存デバイスへの展開は不可能と考えられる。
総合的な評価	今後の横展開を見据えた場合に専用のデバイスやアプリケーションでの構築では独占となってしまい市場の競争性がなくなり、コスト面などが要因となり普及展開にブレーキがかかってしまうと考えられる。 普及展開と公平な競争性の実現、導入のし易さを考慮した場合、既に十分な普及が実現しているブラウザを利用した展開が最適な選択肢であると考える。また、今回実証において選択したChromeブラウザには対応する映像コーデックが豊富であり、WebRTC方式に着目した場合にも、受信中の解像度やフレームレート、ドロップ率など実証検証の数値取得に優れた機能を持つWebRTCデバックモードを持つため、開発提供者側にとっても高いメリットが得られる。					

4.5.2 検証結果の評価・分析

本実証において構築した「鉄道分野における課題解決システム」を構成するジャンルごとの機能検証を行った結果、①伝送メディアでは「ローカル 5G」、②映像取得では「4k カメラ」及び「サーマルカメラ」、③映像蓄積用基盤サービスでは「dOIC」、④映像解析手法では「ディープラーニング」、⑤映像配信規格では「WebRTC」及び「H.264」、⑥UI 設計では「PC」及び「ブラウザ」を採用することが適切であることが分かった。

4.6 課題解決システムに関する運用検証

4.6.1 5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システム

実証結果を踏まえ、5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システムの実装を想定した運用面の課題の抽出・解決策の検討を実施した。効果検証と同様、京浜急行電鉄の現場技術者（車両部門）へのヒアリング結果や協議会での委員からの指摘等に基づき評価した。

ここでは、複数回にわたる京浜急行電鉄へのヒアリングにより、課題解決システムが従来の列車検査業務そのものを（一部）代替するものではなく、状態監視による“より一層の”安全性向上の観点が極めて重要であることが把握できたため、現状のオペレーション

とは切り離して評価した。

4.6.1.1 運用検証の内容

課題解決システムが具備すべき要件として挙げた、①一般性・汎用性、②拡張可能性、③経済性の観点から下記の項目の運用検証を実施した。

（1）実運用に関する作業

・課題解決システムの運用方法のうち「（各駅における）状態監視による日常定点観測」に着目し、実運用に関する作業項目を抽出したうえで評価

（2）運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業

・課題解決システムの運用方法のうち「（各駅における）列車の状態監視による日常定点観測」に着目し、運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業項目を抽出したうえで評価

4.6.1.2 運用検証の結果

5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システムの運用検証の結果を表 4.6.1-1 に示す。

表 4.6.1-1　運用検証の結果

分類	運用作業	課題（P）と対応策（S）	①一般性・汎用性、 ②拡張可能性、③経済性
(1)	・課題解決システムの管理	P 問題なく運用は可能であると想定されるものの、システムの起動、運用、停止などの管理（保守は分類（2））を実施する際の人的負担が必要となる S 日常業務の一環とすることで、人的負担軽減を図る	①システムの管理に特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②観測点の追加などのシステム拡張は本作業の付加を大きくするものではなく拡張可能性は高い ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
	・異常検知のアラートの認知	P 問題なく運用は可能であると想定されるものの、アラートを適時認知する体制が必要 S 人的リソースの割り当てだけでなく、異常検知のアラートを然るべき担当者に伝達するシステムの構築が必要	①特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②観測点の追加などのシステム拡張によりアラート件数の増加が想定されるものの、運用上は拡張可能性が高い ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
	・異常検知のアラートの確認・判断	P アラートは人の目で確認することが必須であり、遠隔監視による 4K 画像は有効であると考えられる。一方、アラートを“真の”異常と「判断」する技術者が必要 S アラートの情報が滞りなく伝達されることができれば、運行管理の一環とすることが想定される（重大な事象であれば、運転手や駅係員による判断もあり得る） S 画像だけでなく、音の遠隔観測の情報があるとさらなる判断の高精度化に資するため、センサフュージョンを推進する	①現場技術者の判断を伴う（運行の条件により異なるものの、鉄道会社の運行管理体制で対応可能） ②観測点の追加などのシステム拡張により必要な「判断」の増加が想定されるものの、運用上は拡張可能性が高い ③大きな費用増は伴わない
	・アラートを受けた対応	P“真の”異常（疑いを含む）と判断されれば、異常の度合いにより運行継続／運行取り止め＋最寄りの検車場に入庫の対応が必要 S 異常の度合い別の対応パターンをマニュアル化するこ	①特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②対応パターンのルールが事業者によって異なるため、システムの拡張性の観点からの評価はできない

		とで、円滑な運用に資する（対応のマニュアル化は必須と考える）	③現場に即したマニュアルを作成する費用が発生するものの、本運用による安全性の向上は極めて大きな経済的効果を有すると考える
	・事後の振り返り（事実確認）	P アラートを受けた不具合への対応を事後検証し、オペレーションや判断基準の継続的なブラッシュアップを図る必要がある S 記録された振り返り画像により確認する（※振り返り画像の確認システムを構築済み）	①システムは一般的に活用可能（事後検証には現場技術者による評価が必要）。一般的に事業者ごとのオペレーション改善に資する ②対応パターンのルールが事業者によって異なるため、システムの拡張性の観点からの評価はできない ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
(2)	・機器の設置	P 設置作業自体はサービス提供者によるものと想定。一方、制約条件内における最適配置（段階的に設置する場合の、異常を検知する駅の優先順位付け）の決定などの検討が必要 S（1）のオペレーションを踏まえて検討する必要がある	①現場作業員が実施する作業の枠組みは一般性、汎用性のある内容である。 ②サービス提供者によるパッケージ化により他事業者への拡張性がある（ただし、各事業者の状態監視に関するニーズに応じた柔軟な対応が必要） ③サービス提供者の収益モデルに依存する
	・機器の管理	P 点検・清掃など機器に関する一般的な管理は現場担当者が実施可能であるものの、システムの稼働に係る管理はサービス提供者が管理する必要がある S 現場とサービス提供者の役割分担・連携のスキームを明確化し、問題が発生した場合に速やかに対応できる仕組み（バックアップ体制含む）を構築する必要がある	
	・5G エリアの保守 ・クラウド環境の保守	※サービス提供者の対応事項と想定	

分類：(1) 実運用に関する作業、(2) 運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業

4.6.2 5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システム

実証結果を踏まえ、5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システムの実装を想定した運用面の課題の抽出・解決策の検討を実施した。効果検証と同様、京浜急行電鉄の現場技術者（保線部門）へのヒアリング結果や協議会での委員からの指摘等に基づき評価した。

ここでは、複数回にわたる京浜急行電鉄へのヒアリングにより、課題解決システムが従来の線路巡視業務そのものを（一部）代替するものではなく、遠隔監視による“より一層の”安全性向上の観点が極めて重要であることが把握できたため、現状のオペレーションとは切り離して評価した。

4.6.2.1 運用検証の内容

課題解決システムが具備すべき要件として挙げた、①一般性・汎用性、②拡張可能性、③経済性の観点から下記の項目の運用検証を実施した。

（1）実運用に関する作業

・課題解決システムの運用方法のうち「ドローンによる無人での遠隔監視」に着目し、実運用に関する作業項目を抽出したうえで評価

（2）運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業

・課題解決システムの運用方法のうち「ドローンによる無人での遠隔監視」に着目し、運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業項目を抽出したうえで評価

4.6.2.2 運用検証の結果

5G と AI を活用した線路巡視の遠隔化・自動化システムの運用検証の結果を

表 4.6.2-1 に示す。

表 4.6.2-1　運用検証の結果

分類	運用作業	課題（P）と対応策（S）	①一般性・汎用性、 ②拡張可能性、③経済性
(1)	・課題解決システムの管理	P ドローンの取扱（自動運行のため、操縦を除く）に一定程度の技術を要することと合わせて、システムの起動、運用、停止などの管理（保守は分類（2））を実施する際の人的負担が必要となる S 日常点検と組み合わせることで、人的負担軽減を図る（災害対応のみの目的では、運用が難しいことが考えられる）	①ドローンの取扱に慣れる必要があるものの、特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②巡視範囲の拡大などのシステム拡張は基地局の増設を伴う ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
	・異常検知のアラートの認知	P 問題なく運用は可能であると想定されるものの、アラートを適時認知する体制が必要 S 人的リソースの割り当てだけでなく、異常検知のアラートを然るべき担当者に伝達するシステムの構築が必要	①特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②運用上は拡張可能性が高い ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
	・異常検知のアラートの確認・判断	P アラートは人の目で確認することが必須であり、遠隔監視による 4K 画像は有効であると考えられる。一方、アラートを“真の”異常と「判断」する技術者が必要 S アラートの情報が滞りなく伝達されることができれば、線路巡視のスクリーニングとすることができる	①現場技術者の判断を伴う（運行の条件により異なるものの、鉄道会社の運行管理体制で対応可能） ②観測点の追加などのシステム拡張により必要な「判断」の増加が想定されるものの、運用上は拡張可能性が高い ③大きな費用増は伴わない
	・アラートを受けた対応	P “真の”異常（疑いを含む）と判断されれば、異常の度合いにより点検・復旧体制を構築し作業員を現場に派遣する必要がある S 遠隔画像の高精細化により判断の精度を向上させることが可能となる	①特別な技術を必要としないため、事業者を問わず運用可能 ②事業者ごとに判断の観点が異なる場合も想定されるものの、運用上の拡張性は高い ③確認のための作業員派遣が不要になるため作業にかかる時間短縮となり、コストの縮減に資する。
	・事後の振り返り（事実確認）	P アラートを受けた不具合への対応を事後検証し、オペレーションや判断基準の継続的	①システムは一般的に活用可能（事後検証には現場技術者による評価が必要）。一

		なブラッシュアップを図る必要がある S 記録された振り返り画像により確認する（※振り返り画像のの確認システムを構築済み）	般的に事業者ごとのオペレーション改善に資する ②対応パターンのルールが事業者によって異なるため、システムの拡張性の観点からの評価はできない ③本作業の人的負担（費用）は純増となる
(2)	・機器の管理	P 点検・清掃など機器に関する一般的な管理は現場担当者が実施可能であるものの、システムの稼働に係る管理はサービス提供者が管理する必要がある S 現場とサービス提供者の役割分担・連携のスキームを明確化し、問題が発生した場合に速やかに対応できる仕組み（バックアップ体制含む）を構築する必要がある	①現場作業員が実施する作業の枠組みは一般性、汎用性のある内容である。 ②サービス提供者によるパッケージ化により他事業者への拡張性がある（ただし、各事業者の状態監視に関するニーズに応じた柔軟な対応が必要） ③サービス提供者の収益モデルに依存する
	・5G エリアの保守 ・クラウド環境の保守	※サービス提供者の対応事項と想定（特に線的な 5G エリアの構築に関しては、さらなる技術実証による深化が必要と考える）	

分類：(1) 実運用に関する作業、(2) 運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業

4.7 まとめ

(1) システムに関する検証

- ✧ 高精細 4k カメラで撮影した車両検査映像を AI 解析した結果、台車の模擬き裂としては、幅 1mm までの疑似的なクラックが 5km/h および 10 km/h の走行状態でも検出可能であることを把握した。
- ✧ 加えて、ブレーキパッドの摩耗については 60%以下になっている状態を漏れなく検出することができたほか、収容函ハンドルの位置ズレが漏れなく検出できていることを確認した。
- ✧ サーマルカメラで撮影した車両検査映像についても、車軸の温度上昇が高い精度で AI 検出できている（網羅率 100%）ことも確認できた。
- ✧ また、構築した UI による車両検査映像の AI 解析表示に関するアンケートの結果、遠隔監視拠点の PC 等での UI は遠隔・リアルタイムでの線路巡視の実現に必要と想定した性能を満たしていることが確認できた。

(2) 効果検証

- ✧ 列車検査の観点からは、「日常定点観測・異常検知」により、早期発見（6 日に 1 度の列車検査の間を埋める）や早期復旧が可能となり、安全性の向上に資することが確認できた。特に、目視可能な台車き裂に加え、目視では確認できない車軸温度（サーマル）についても十分な結果が得られたことで、センサフュージョンによる「実装・横展開の幅」を広げることができたといえる。
- ✧ 線路巡視の観点からは、遠隔観測により、復旧作業の要員計画の最適化、点検作業の効率化など早期復旧の実現可能性が向上するため、顧客にとってのサービス水準の維持や線路巡視にもつながり得ることが、精度面からも把握できた。

(3) 機能検証

- ✧ 本実証を行うにあたり、「鉄道分野における課題解決システム」を構成するジャンルごとの機能検証を行った。この結果、以下を採用することが望ましいことを把握した。

伝送メディア	: ローカル 5G
映像取得	: 4k カメラ および サーマルカメラ
映像蓄積用基盤サービス	: dOIC
映像解析手法	: ディープラーニング
映像配信規格	: WebRTC 及び H.264
UI 設計	: PC およびブラウザ

(4) 運用検証

- ✧ 「実運用に関する作業」「運用スキームの持続性等に関するシステムのメンテナンス作業」の観点から、列車検査・線路巡視のそれぞれにおいて、「5G と AI を活用した遠隔化・自動化システム」の運用検証を行った。
- ✧ システムを導入し、異常を取りこぼさない形で適切にアラートが発信される場合、事業者によって対応パターンのルールに違いはあると想定されるものの、一般性・汎用性及び拡張可能性の観点からは運用に資するシステムと考えられる。
- ✧ ただし、人員の増強なしに検査の高度化が期待できる（目視検査とのクロスチェックによる検査精度の向上が実現できる）一方、現時点で列車検査・線路巡視を即座に「代替」することは難しいとの意見も受けており、「客観性のあるデータの継続的な蓄積」と「さらなる応用可能性の検討」が必要と考えられる。

5. ローカル 5G の性能評価の技術実証

5.1 前提条件

5.1.1 対象とするユースケース

鉄道インフラ分野における課題実証では、“列車検査における鉄道車両の傷等の自動検知、線路巡視における線路の障害物等を遠隔かつリアルタイム自動検知に関する実証”を目的としている。技術実証においても、このユースケースを前提に各種検討を行う。その際、今回得られた知見が、市街地に隣接する同様の環境下における他の鉄道車両基地でも適用できるよう、“鉄道車両基地における電波伝搬特性”及び“ターゲットエリアに市街地が隣接する場合におけるエリア展開の在り方”を意識しながら検討を進めていくこととする。

また、電波伝搬特性の解析や共用検討においては、国際電気通信連合（ITU）や 3GPP における 5G 検討で用いられているパラメータ等を活用して検討を行なう。

5.1.2 実証環境

鉄道インフラ分野におけるローカル 5G 等の性能評価等の技術実証においては、京浜急行電鉄の久里浜工場内にある検査庫の屋内に設置されるキャリア 5G 基地局 1 局と、試走線脇の屋外に設置されるキャリア 5G 基地局 1 局を用いて実証試験を行った[1]。

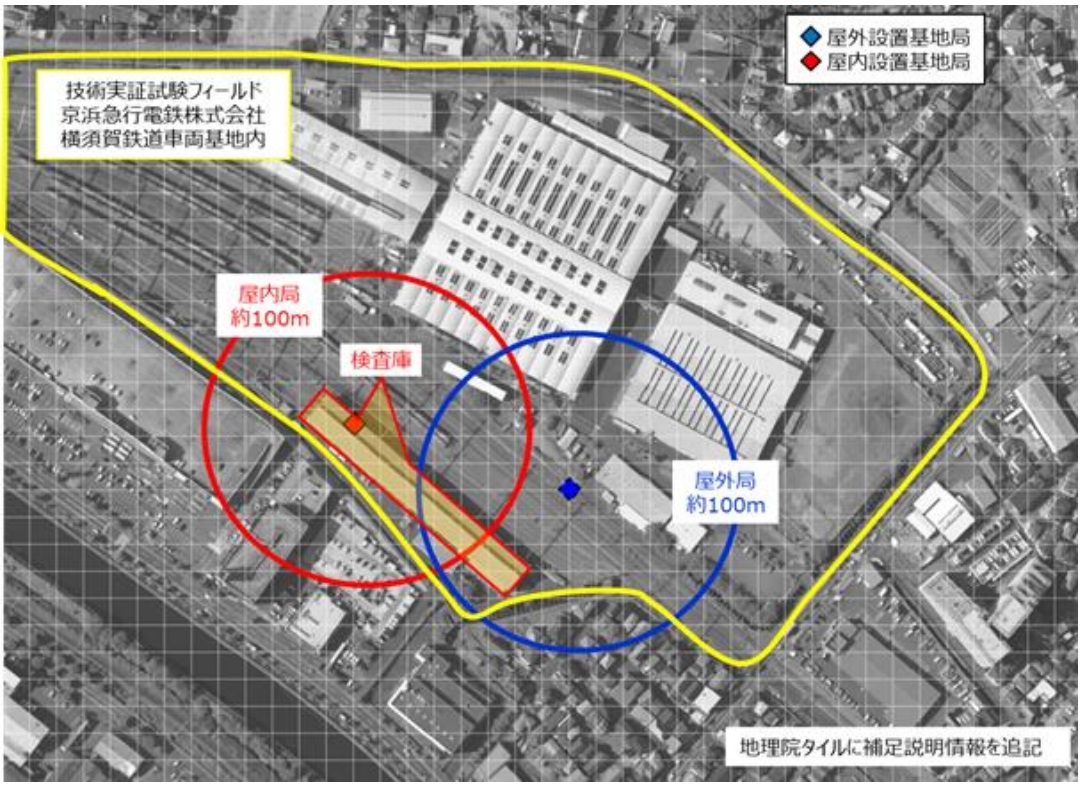


図 5.1.2-1 に技術実証試験フィールドを、図 5.1.2-2 に基地局設置状況を示す。

[1] 本実証試験では、ローカル５G の代わりに、キャリア５G（4.5-4.6GHz 帯）を利用。

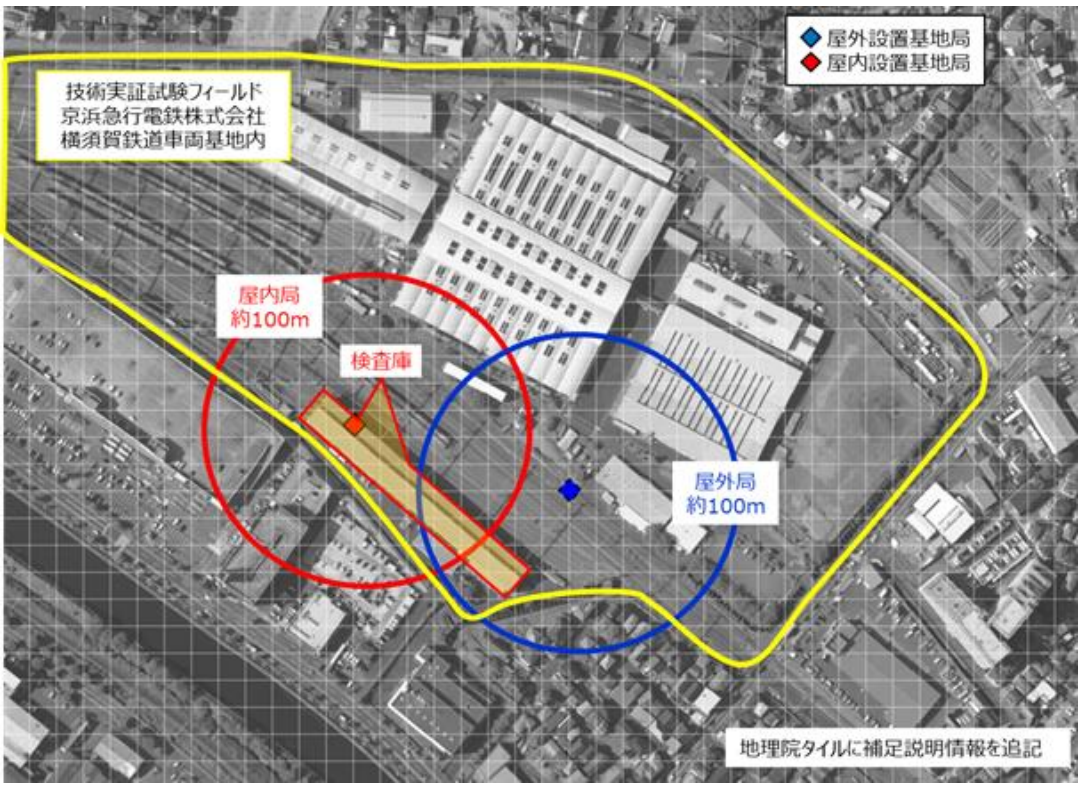


図 5.1.2-1　技術実証試験フィールド（京急久里浜工場内）

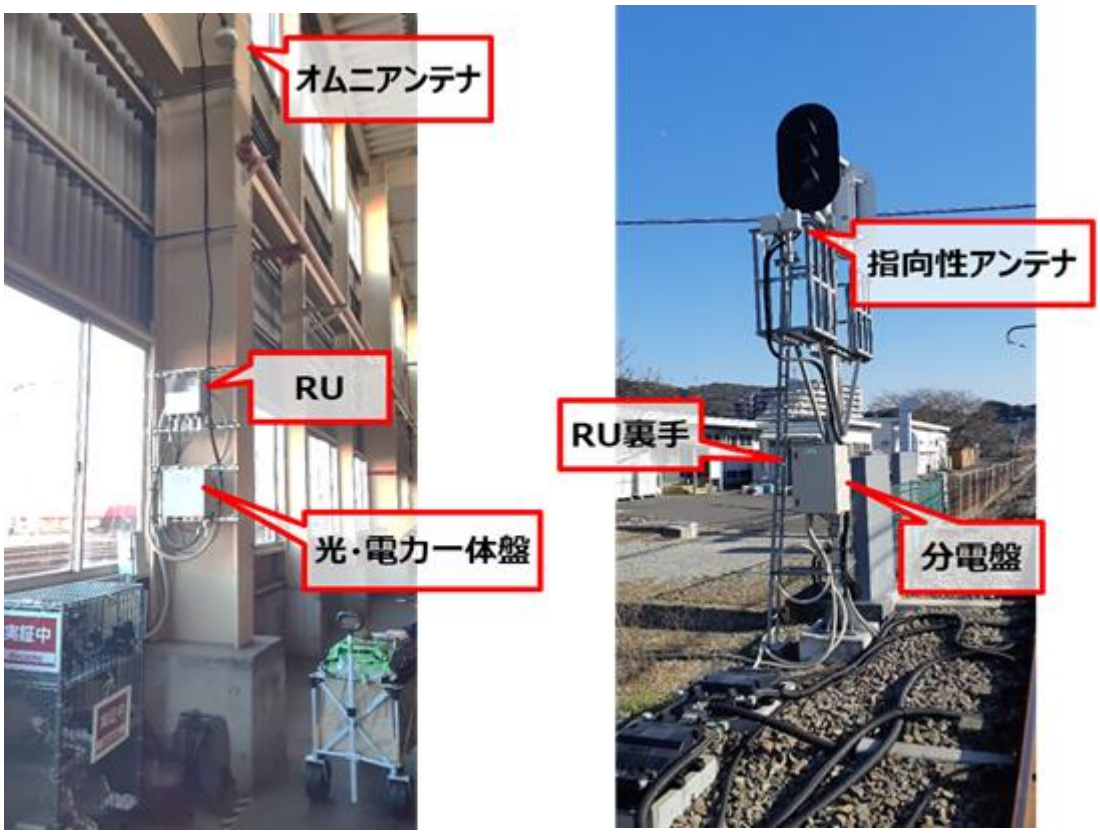


図 5.1.2-2 基地局 ANT 設置状況

（左：検査庫内に設置した屋内局 ANT、右：試走線脇に設置した屋外局 ANT）

5.1.3 基本的な諸元

技術実証試験において用いた基地局、移動局装置の仕様を表 5.1.3-1 に示す。

表 5.1.3-1　基地局、移動局装置の仕様

項目	屋外基地局 1 局	屋内基地局 1 局	移動局 1 局 （屋外、屋内）
緯度	35.240953	35.24125556	
経度	139.697471	139.6961472	
標高（m）	1.5	1.7	
周波数（MHz）	4550		
帯域幅（MHz）	100		
ANT 高（m）	4	3.1	1.5
チルト（°）	0	0	
最大 EIRP(dBm)	19	5.5	23
同期･非同期運用	同期運用		
許容干渉電力 （帯域内干渉）	-115dBm/MHz (I/N= -6dB,NF=5dB)	-110dBm/MHz (I/N= -6dB,NF=10dB)	-111dBm/MHz (I/N= -6dB,NF=9dB)
許容干渉電力 （帯域外干渉）	-52dBm （隣接 20MHz 幅） -43dBm （上記以外）	-47dBm （隣接 20MHz 幅） -38dBm （上記以外）	-40dBm （CH 帯域幅と同一幅の隣接干渉波）
SA/NSA 構成	NSA 構成		

5.2 実証目標

5.2.1 技術的課題

市街地内に存在する鉄道車両基地において、鉄道インフラ分野におけるユースケースを前提とした場合、2 つの課題が挙げられる。まずは、車両基地内の鉄道車両や計器類による電波の反射や遮蔽等の影響である。次に、隣接する住宅街や商業施設に対する電波の漏れだしである。そのため、鉄道車両基地内における電波伝搬特性を把握し、最適なエリア構築を行う事が重要となる。

今回、課題実証では、“列車検査における鉄道車両の傷等の自動検知、線路巡視における線路の障害物等を遠隔かつリアルタイム自動検知に関する実証”を目的としており、鉄道車両基地内の試走線及び、２つの検査庫内のターゲットエリアをカバーするため、計 3 局の NTT ドコモの 5G 商用局を活用して実証を行っている。今回、技術実証においては、試走線に置局された屋外局と、1 つの検査庫内に置局された屋内局を用いることで、鉄道車両基地内の電波伝搬特性を網羅的に効率的に把握することができる。

4.7GHz ローカル 5G バンドの隣接帯域には、携帯電話事業者のキャリア 5G バンドが存在するため、ローカル 5G 基地局の周辺には、隣接帯域で運用しているキャリア 5G 基地局が存在する可能性がある。このような環境で、ローカル 5G 事業者が、所望するローカル 5G 性能を得るためには、キャリア 5G との間で必要となる離隔距離、ガードバンド等を事前に把握し、回線設計や、システム設計に反映しておくことが望ましい。特に、ローカル 5G 基地局を準同期で運用する場合には、より詳細な事前検討を実施しておかなければ、ローカル 5G 基地局側が有害な混信影響を被ることも考えられる。

本技術実証では、課題ア、イに記載されている 4.7GHz 帯電波伝搬特性評価、ローカル 5G 性能評価、エリア構築等の評価に加え、隣接周波数帯において、同期運用するキャリア 5G と、準同期運用するローカル 5G の共用検討（机上検討）を行い、互いに干渉なく運用可能となるために必要な所要改善量、所要離隔距離等を評価する。

5.2.2 実証目標（技術実証として）

課題ア（ユースケースに基づくローカル５G の性能評価等）については、技術実証試験フィールドにおいて、より適切な電波伝搬モデルを、既存の電波伝搬モデルの中から選定すると共に、ローカル 5G 性能向上のための課題抽出と解決策を検討する。得られた知見については、総務省が策定しているローカル 5G ガイドラインにおいて、モデルケースとして記載することで、ローカル５G の利活用に活かされることを想定している。

課題イ（ローカル５Gのエリア構築やシステム構成の検証等）については、総務省提供のエリア算出法と実測値との比較検証を行い、エリア算定式の適切性を評価すると共に、エリア構築等の側面からの課題抽出と解決策を検討する。エリア算出法と実測値との乖離が大きい場合、実測値を踏まえ、ユースケースに応じて、審査基準におけるエリア算定式を見直す等の制度改正につながることを想定している。

課題ウ（その他ローカル５Gに関する技術実証）については、隣接周波数帯において、同期運用するキャリア 5G と準同期運用するローカル 5G の共用検討（机上検討）を行い、

互いに干渉なく運用可能となるために必要な所要改善量、所要離隔距離等を評価する。キャリア 5G との共存方策についても、総務省が策定しているローカル 5G ガイドラインにおいて、モデルケースとして記載することで、ローカル 5G の利活用に活かされることを想定している。

5.2.3 実施事項

課題ア（ユースケースに基づくローカル５Ｇ の性能評価等）については、各基地局の周囲 100m 内及びその周辺エリアにおいて、下り受信電力値、伝送スループット、往復遅延時間（RTT）を実測する。実測した下り受信電力値より、実測地点における伝搬ロスを算出し、技術実証フィールドにおける適切な電波伝搬式の選定を行う。さらに、実測したデータを用いて、ローカル 5G 性能評価を行う。ここでは、ローカル 5G の性能として、エリア形成の観点、ユーザへのサービス提供品質の観点からの評価を行う。これらの評価を通じて、ローカル 5G 性能向上のための課題抽出と解決策を検討する。

課題イ（ローカル５Ｇのエリア構築やシステム構成の検証等）については、総務省提供のエリア算出法と基地局送信電力の実測値との比較検証を行い、総務省提供のエリア算定式から得られるエリア端までの距離について評価する。また、エリア構築、システム構成の検証のため、実測値とレイトレーシング法によるエリア設計値との比較検証、屋内局から屋外環境、自己土地外への電波漏洩具合等を検討する。これらを通じて、エリア構築等の観点の課題抽出と解決策を検討する。

課題ウ（その他ローカル５Ｇに関する技術実証）については、隣接周波数帯において、同期運用するキャリア 5G と準同期運用するローカル 5G の共用検討（机上検討）を行い、互いに干渉なく運用可能となるために必要な所要改善量、所要離隔距離等を評価する。この際、実測した基地局送信スペクトラムや、移動局送信電力値の累積分布データを用いることで、実際の電波伝搬環境に即した共用検討を実施する。

表 5.2.3-1 に、実測する各種データと課題項目との関係を示す。

表 5.2.3-1　技術実証試験において測定した項目

測定項目	概要	関連する課題
受信電力	技術実証試験フィールドにおける下り受信電力の測定	課題（ア）、（イ）
伝送スループット及び RTT[2]	技術実証試験フィールドにおける伝送スループット、RTT の測定	課題（ア）
送信電力等	技術実証試験、基地局送信スペクトラム、移動局送信電力値の測定	課題（ウ）

[2] 今回の技術実証試験では、NTT ドコモの商用基地局設備を利用しているため、実測する伝送スループット、RTT は、無線区間におけるデータではなく、移動局～サーバ間のデータであることに留意されたい。詳細は 5.3.2.2 参照。

表 5.2.3-1 に示す各種データは、2020 年 12 月と 2021 年 1 月の 2 度にわたり、技術実証フィールドで測定したものである。

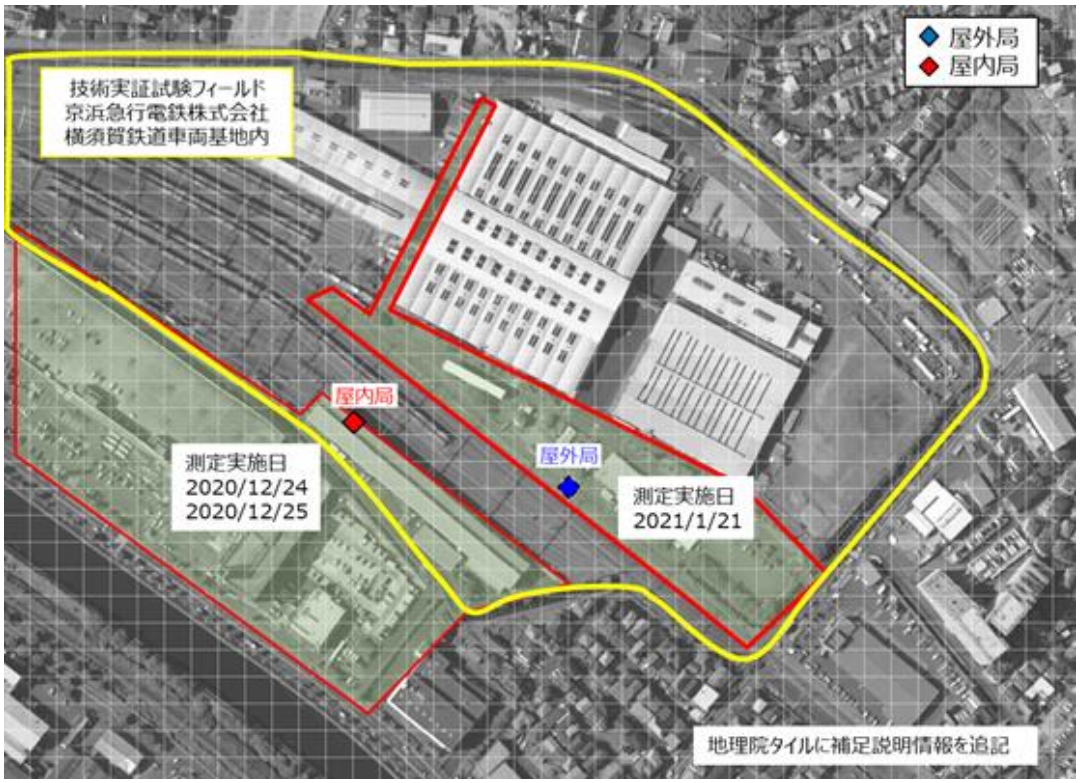


図 5.2.3-1 に試験日程ごとの実測対象エリア（赤線内で測定）を示す。また、実測模様を図 5.2.3-2～3 に示す。

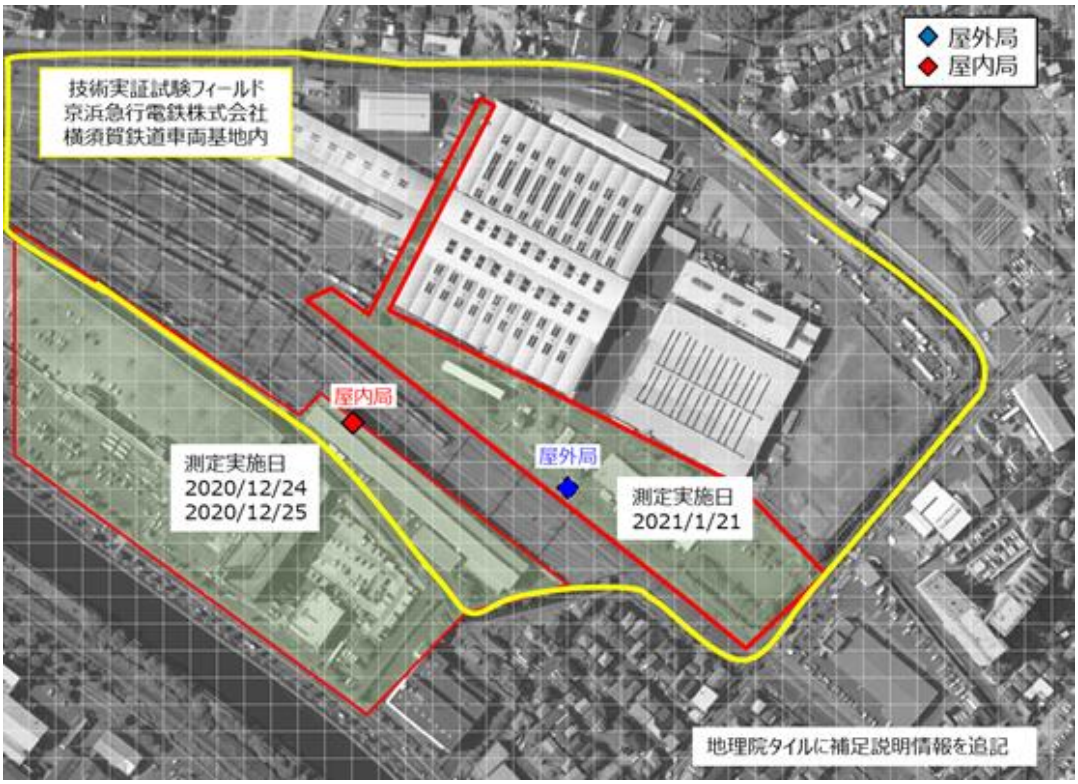
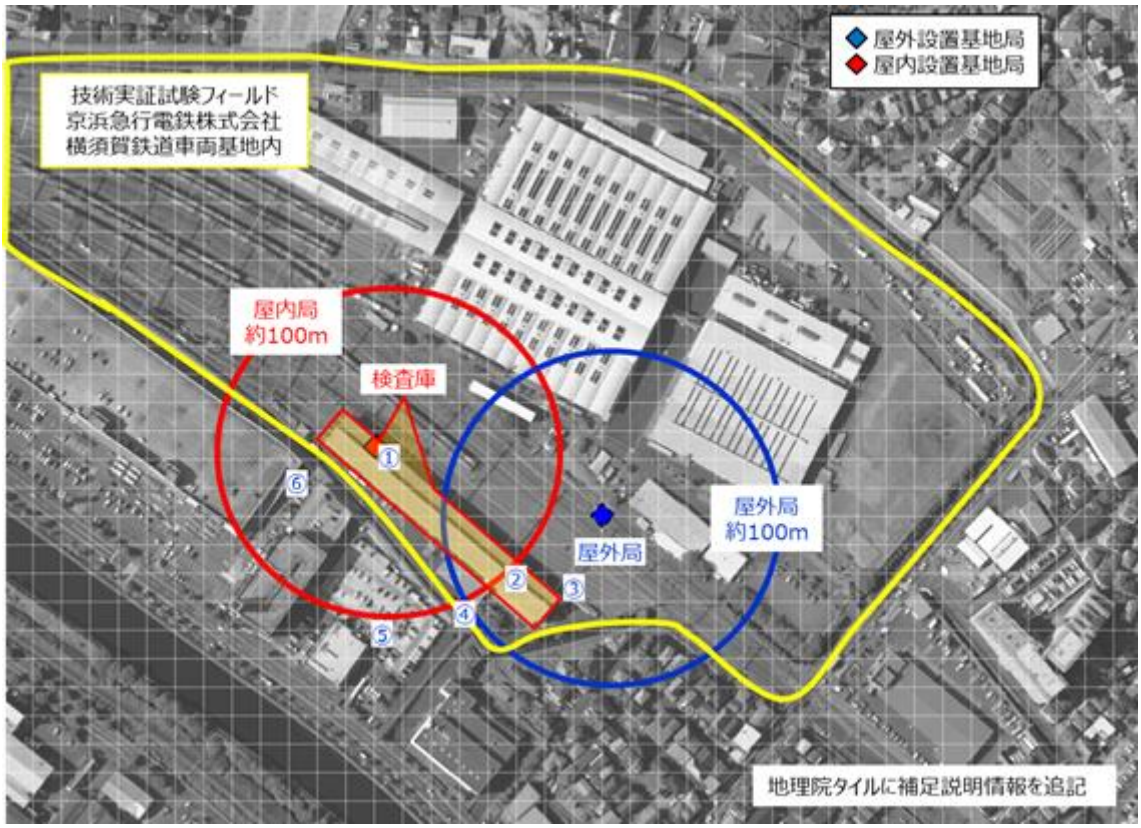


図 5.2.3-1　各日程における実測対象エリア



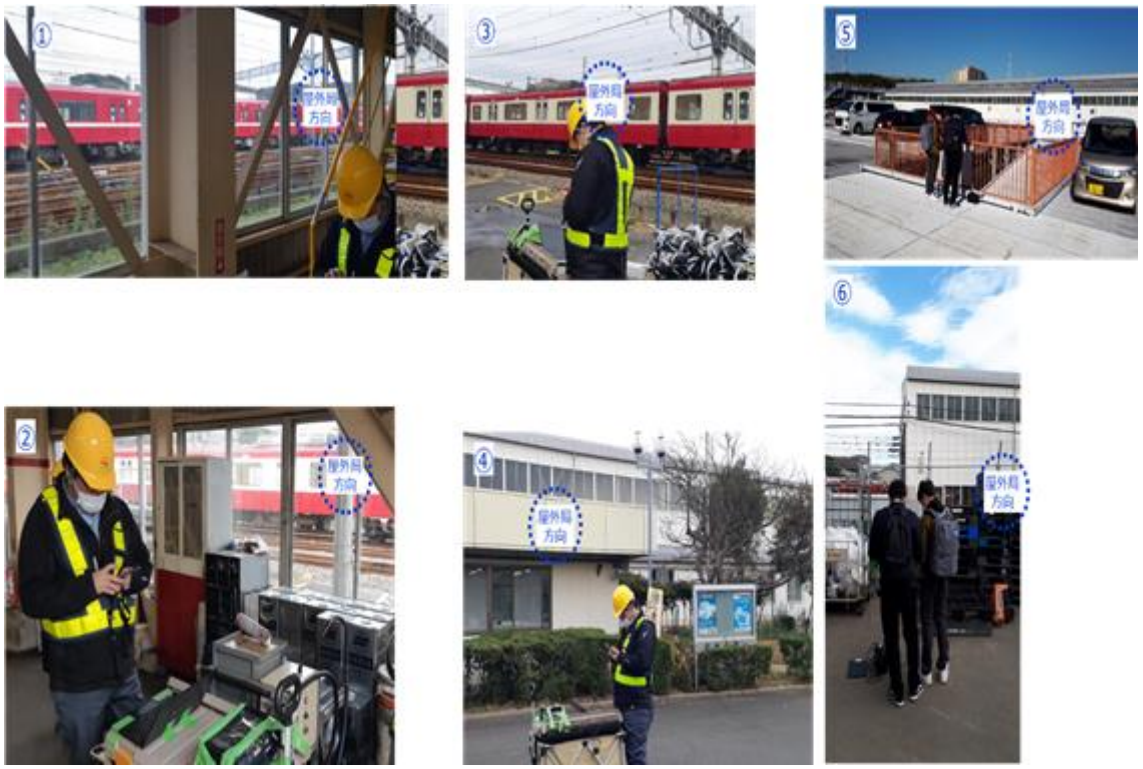


図 5.2.3-2　屋外での実測模様

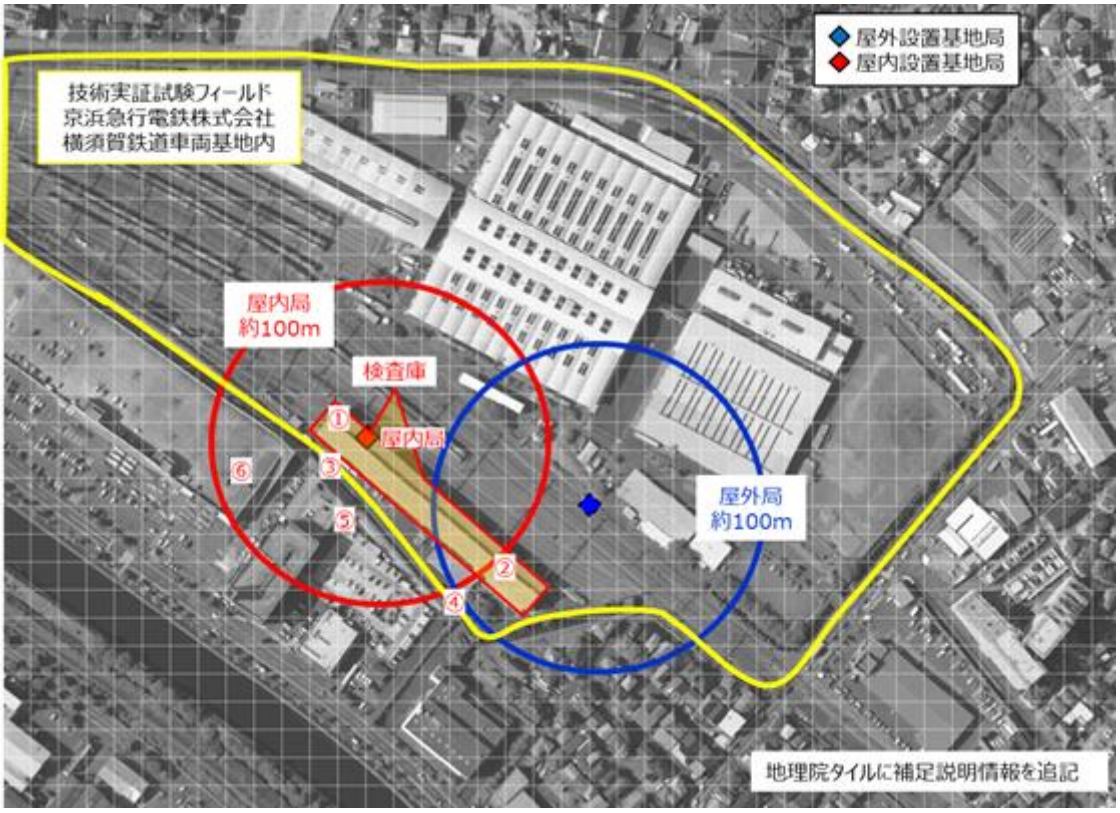


図 5.2.3-3　屋内での実測模様

5.3 ユースケースに基づくローカル 5G の性能評価等（課題ア）

5.3.1 ユースケースに基づく性能要件

鉄道インフラ分野における課題実証では、“列車検査における鉄道車両の傷等の自動検知、線路巡視における線路の障害物等を遠隔かつリアルタイム自動検知に関する実証”を目的としている。課題実証では、上り回線において、高精細カメラ（4k 画質）からの映像を伝送することを前提としているため、ローカル 5G 性能としては、上り回線の伝送スループットが重要となる。課題ア（ユースケースに基づくローカル５G の性能評価等）においては、上り回線における伝送スループットが所望の性能を得られるようにすることを主眼として各種検討を行うこととする。

具体的な上り伝送スループットの目標値としては、過去に、NTT ドコモが実施した 4.5GHz 帯における 5G 総合実証試験[3]を参照する。当該実証試験では、様々なユースケースにおける検証が行われており、NSA 構成における総合伝送スループットとして 600Mbps 以上、UL におけるアプリ伝送レートとして、20Mbps(4k 画像)が実証目標とされている。今回の目標値は、過去の実証例と比較しても同等かそれ以上の目標値となっていることがわかる。今回、技術実証においても、課題実証と同じ目標値である UL 伝送スループット 30Mbps を適用して評価を行う。

5.3.2 評価・検証項目

最初に、電波伝搬環境について、実測した下り受信電力値を用いて評価する。次に、ローカル 5G の性能評価として、エリア形成の観点とユーザへのサービス提供品質の観点からの評価を行う。前者は、伝送スループット、RTT のデータについて、下り受信電力値との関係性で評価する。後者は、上述した上り伝送スループットが目標値を達成できているかの観点で評価を行う。

5.3.3 評価・検証方法

5.3.3.1 下り受信電力の測定

下り受信電力の測定については、仕様書の規定に従い、以下の考え方で実施した。

- 測定の前提条件

下り受信電力の測定における前提条件は、表 5.1.3-1 を参照。

[3] 2019 年度 5G 総合実証試験 G1 「屋外において複数基地局、複数端末の環境下で平均 4.8Gbps の超高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件に関する調査検討」

（1）測定地点選定の考え方

①基地局を中心に、その周辺に等間隔のメッシュを描く。
②調査項目（ア）に対応するため、基地局から半径 100m 以内のエリアに存在する 20 メッシュの中心を測定地点とする（図 5.3.3-1 内の青▼。障害物等により測定困難な地点については、測定点をずらす等で調整）
③調査項目（ア）～（ウ）での考察に必要となる地点を選定（図 5.3.3-1 では、屋内外での伝搬特性の差を考察するために必要な追加測定地点を緑▼で示している）
④調査検討項目（イ）に対応するため、カバーエリア端、調整対象区域端の測定に必要と考えられる地点を選定（図 5.3.3-1 内の赤▼）

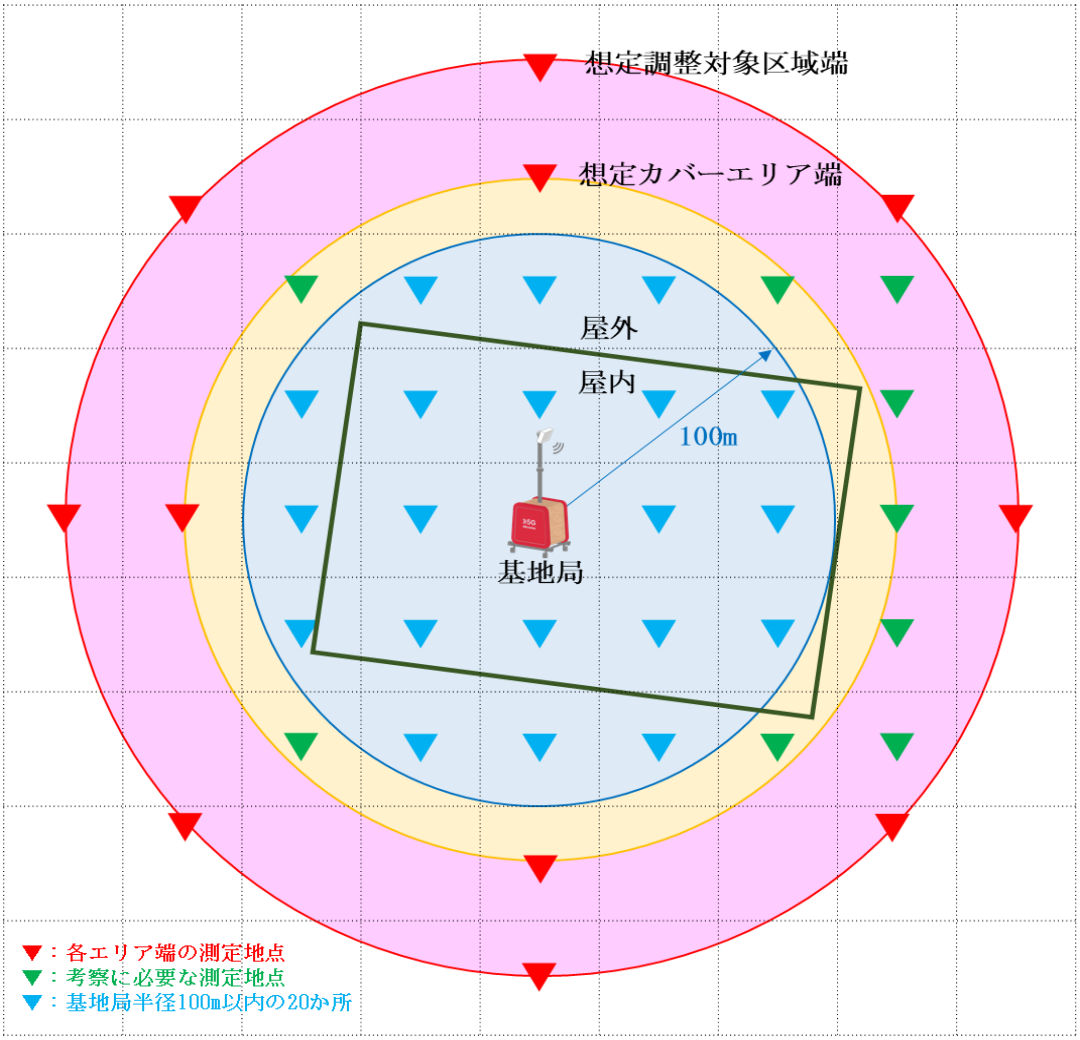


図 5.3.3-1　測定地点のイメージ

（2）測定項目

一般的に 5G NR のエリア指標として用いられている以下に付いて実測した。

・SS-RSRP(Synchronization Signal-Reference Signal Received Power)

・SS-RSRQ(Synchronization Signal-Reference Signal Received Quality)

SS-RSRP は、1 リソースエレメント当たりの SSS(Secondary Synchronization Signal)の受信電力であり、基地局からの電波の受信レベルを評価する基本的なパラメータである。SS-RSRQ は、受信品質を評価するパラメータであり、近隣基地局の干渉が増大すれば RSRQ が小さくなる。

また、後述する電波伝搬特性評価や周波数共用検討において必要なデータとして、基地局送信スペクトラム、パスロス、移動局送信電力についても実測を行った。

（3）測定機器

受信電力の実測に使用した測定機器を表 5.3.3-1 に示す。

表 5.3.3-1　受信電力の実測に使用した測定機器

測定機器名	測定項目	備考
Anritsu エリアテスタ ML8780A[4]	SS-RSRP SS-RSRQ	図 5.3.3-2
Anritsu ハンドヘルドスペクトラムアナライザ MS2720T[5]	受信電力値 スペクトラム	図 5.3.3-3
Sigma-ML[6]	移動局送信電力 パスロス	図 5.3.3-4
Garmin eTrex30xJl[7]	GPS 座標	図 5.3.3-5

[4] https://dl.cdn-anritsu.com/ja-jp/test-measurement/files/Product-Introductions/Product-Introduction/ml8780a-81a-jl11400.pdf

[5] https://www.anritsu.com/ja-jp/test-measurement/products/ms2720t

[6] http://meritechsolutions.com/meritech-jp/products.php

[7] https://buy.garmin.com/en-US/US/p/518048/pn/010-01508-10#specs

図 5.3.3-2　Anritsu エリアテスタの外観

図 5.3.3-3　Anritsu ハンドヘルドスペクトラムアナライザ MS2720T の外観

図 5.3.3-4　Sigma-ML の外観

図 5.3.3-5　Garmin eTrex30xJ の外観

（4）測定手法と実測模様

下り受信電力の実測については、上記の考え方に基づき選定した測定地点に測定員が赴き、表 5.3.3-1 に示す測定器を用いて実測した。ただし、建物等立ち入りが難しい場所については測定点をずらすなどで対応した。

SS-RSRP 及び SS-RSRQ は、エリアテスタを用いて、1 秒周期 3 分間程度の測定を実施した。

測定においては、多数の測定点における測定を効率的に実施するため、図 5.3.3-6 に示すような測定補助用の治具を作成して測定を実施した。

図 5.3.3-6　実測に用いた測定補助用治具

5.3.3.2 伝送スループット及び RTT の測定方法

伝送スループット及び RTT については、仕様書において、測定手法に関する具体的な規定はないが、様々な調査検討項目において、受信電力値と合わせて考察を行うことが有益と考えられるため、受信電力と同じ測定点で実測した。

（1）測定地点選定の考え方

測定地点のイメージは、図 5.3.3-1 を参照。

（2）測定機器

伝送スループット及び RTT の実測に使用する測定機器を表 5.3.3-2 に示す。

表 5.3.3-2　伝送スループット及び RTT の実測に使用した測定機器

測定機器名	測定項目	備考
ドコモスピードテストアプリ[8]	伝送スループット RTT	図 5.3.3-7

[8] https://www.nttdocomo.co.jp/area/speed_test/

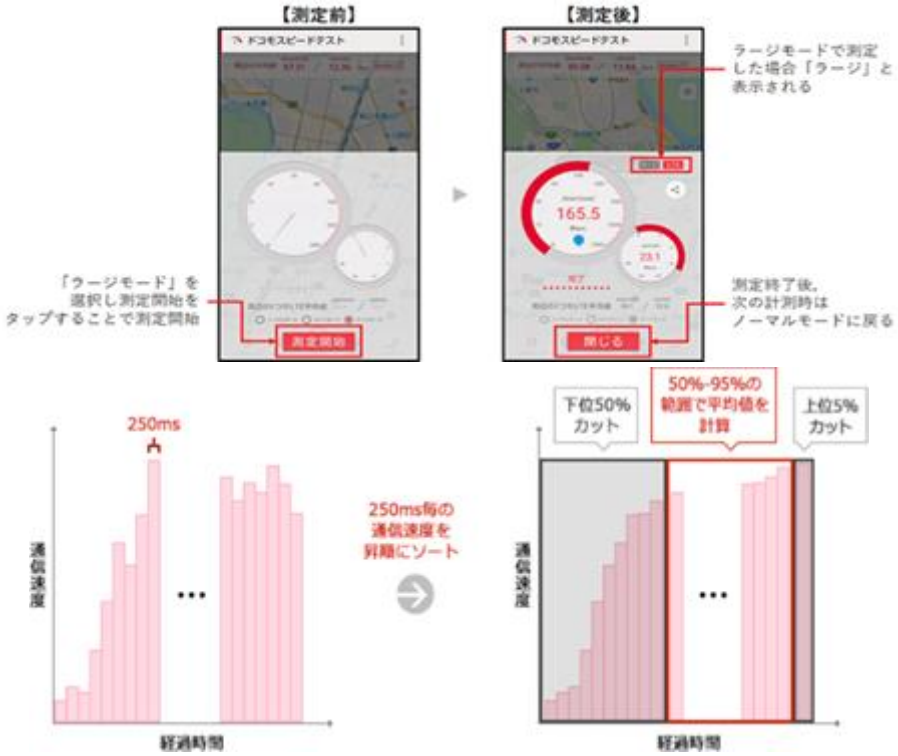


図 5.3.3-7　ドコモスピードテストの概要

（3）測定手法と実測模様

伝送スループット及びRTTの実測については、下り受信電力の測定と同じ場所で、同時に表 5.3.3-2 に示す測定器を用いて実測した。ただし、建物等立ち入りが難しい場所については測定点をずらすなどで対応した。伝送スループット及びRTTは、ドコモスピードテストを用いて各測定点において3回の測定を実施した。

今回の技術実証試験では、基地局として実験局ではなく、NTT ドコモが商用運用する基地局を利用しているため、純粋な無線区間における伝送スループットやRTTは計測することができない。そのため、伝送スループットについては、総務省がガイドライン、計測手法を定め、各携帯電話事業者が実測、公表している実効伝送スループット[9]と同じ手法（サーバと端末の間の伝送スループット）で計測した。RTT についても、同様に、サーバと端末間のRound Trip Timeを計測している。また、NTTドコモの商用環境を利用しているため、計測値は、5Gに加え、NSA構成のLTEも含めたデータであることに留意されたい。

5.3.4　類似の調査

今回は、課題実証において目標としているULの伝送スループット30Mbpsを適用して技術実証の評価を行う。

5Gシステムにおいては、過去に、NTTドコモが実施した4.5GHz帯における5G総合実

[9] https://www.nttdocomo.co.jp/area/effective_speed/

証試験[10]において、様々なユースケースにおける検証が行われている。この 5G 総合実証試験によると、今回の技術実証と同様に NSA 構成における総合伝送スループットとして 600Mbps 以上、UL におけるアプリ伝送レートとして、20Mbps(4K 画像)が実証目標とされている。今回の技術実証においては、これらの実証試験と同じ周波数帯、同じNSA構成ではあるものの、ユースケースが完全に同じではない。しかし、上りにおいては 4K 画像相当の情報を伝送している点が同じであり、過去の実証例と比較しても同等かそれ以上の目標値となっているため、上り伝送速度 30Mbps を比較対象とする。

5.3.5 性能評価結果

5.3.5.1 下り受信電力測定結果

調査検討項目（ア）で指定されている「基地局から半径 100m 以内にある 20 箇所程度の測定地点」の測定については、測定対象エリアが、鉄道線路上を含むことから、測定員の安全にも配慮し、測定可能なエリアにおいてのみ実測を行った。

測定地点数は、

図 5.3.5-1（屋外基地局）、

[10] 2019 年度 5G 総合実証試験 G1 「屋外において複数基地局、複数端末の環境下で平均 4.8Gbps の超高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件に関する調査検討」

図 5.3.5-4（屋内基地局）において白丸で示した地点であり、各基地局から半径 100m 以内で 20 地点以上の測定を実施したほか、100m 以遠においてもいくつかの地点で測定を行っている（合計 36 地点で測定）。

実測結果を

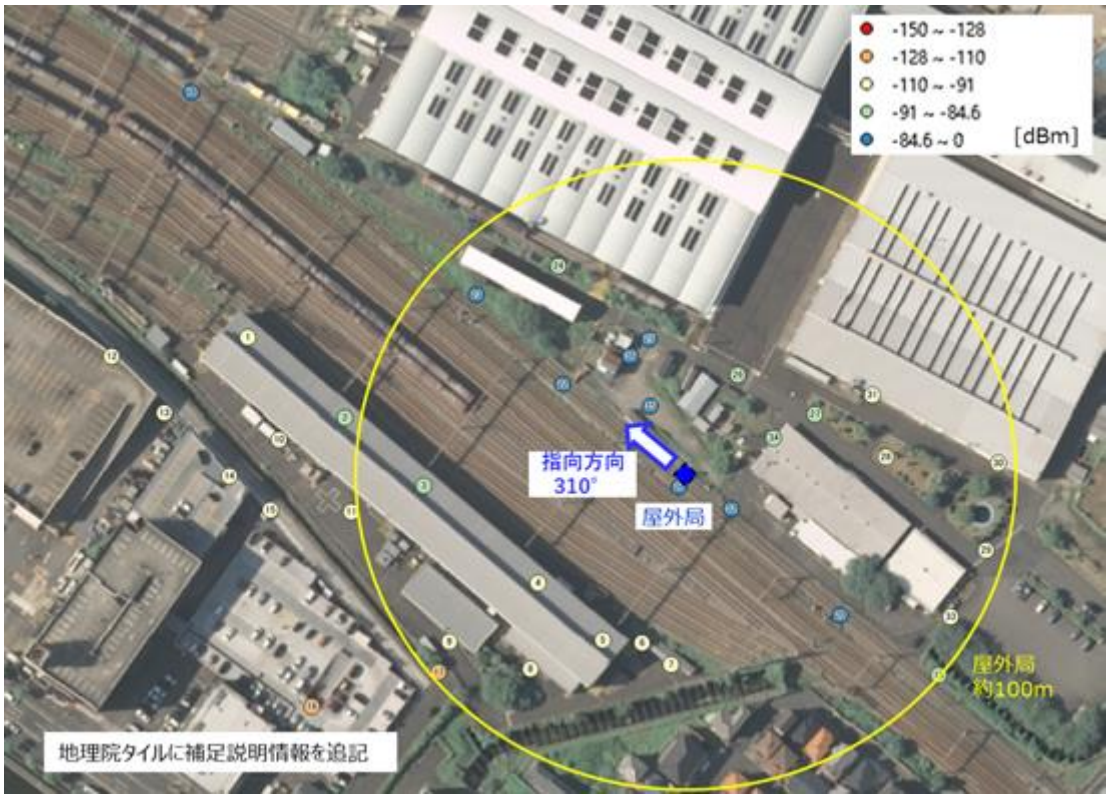


図 5.3.5-2～

図 5.3.5-3 及び表 5.3.5-1（屋外基地局）及び

図 5.3.5-5～

図 5.3.5-6 及び表 5.3.5-2（屋内基地局）に示す。

図 5.3.5-1　屋外局周辺での測定場所（合計 36 地点で測定）

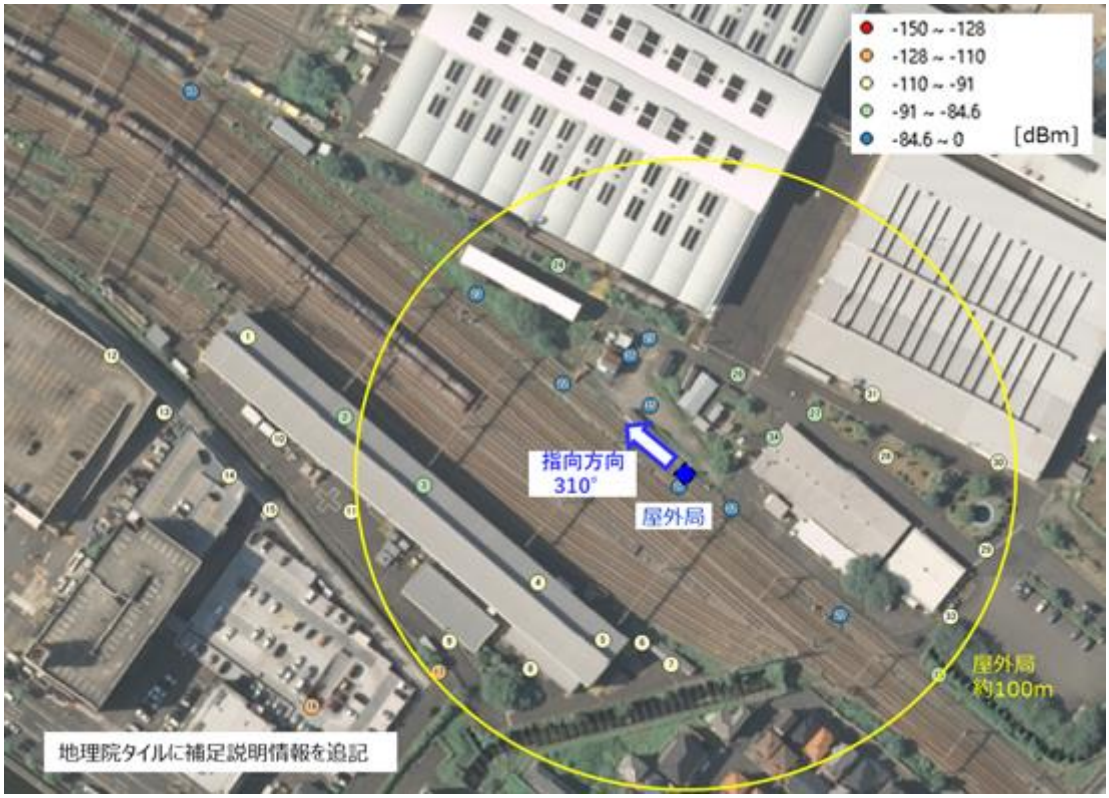


図 5.3.5-2　屋外局周辺での SS-RSRP 測定結果

図 5.3.5-3　屋外局周辺での SS-RSRQ 測定結果

表 5.3.5-1　屋外局周辺での SS-RSRP、RSRQ 測定結果

測定地点＃	SS-RSRP[dBm]	SS-RSRQ[dB]
1	-91.2	-10.9
2	-90.5	-11.3
3	-85.7	-10.8
4	-92.7	-10.7
5	-92.5	-9.8
6	-95.5	-11.7
7	-96.6	-12.1
8	-107.5	-10.4
9	-109.4	-10.9
10	-101.0	-10.5
11	-107.1	-12.7
12	-109.9	-11.2
13	-108.3	-10.7
14	-103.4	-11.4
15	-104.7	-10.6
16	-111.9	-11.5
17	-111.0	-11.5
18	-68.7	-10.6
19	-87.2	-9.5
20	-80.0	-9.4
21	-63.2	-10.4
22	-57.1	-10.4
23	-66.0	-10.4
24	-88.0	-13.0
25	-72.8	-10.8
26	-85.6	-12.3
27	-87.4	-9.8
28	-97.0	-10.6
29	-99.6	-10.1
30	-97.5	-10.5
31	-97.7	-11.9
32	-80.7	-10.4
33	-92.3	-10.6
34	-90.5	-12.3
35	-70.5	-11.1
36	-61.7	-10.6

図 5.3.5-4　屋内局周辺での測定場所（合計 36 地点で測定）

図 5.3.5-5　屋内局周辺での SS-RSRP 測定結果

図 5.3.5-6　屋内局周辺での SS-RSRQ 測定結果

表 5.3.5-2　屋内局周辺での SS-RSRP、SS-RSRQ 測定結果

測定地点＃	SS-RSRP[dBm]	SS-RSRQ[dB]
1	-102.1	-9.3
2	-115.0	-12.1
3	-81.2	-12.4
4	-67.1	-9.9
5	-78.2	-10.5
6	-89.3	-9.8
7	-101.3	-11.5
8	-99.2	-11.3
9	-72.6	-10.3
10	-71.9	-10.1
11	-85.6	-10.1
12	-97.3	-10.9
13	-102.3	-10.7
14	-99.8	-10.6
15	-97.6	-14.4
16	-85.1	-9.7
17	-77.9	-10.9
18	-59.2	-10.8
19	-72.2	-12.3
20	-104.6	-10.3
21	-106.1	-11.4
22	-113.6	-11.0
23	-90.6	-10.4
24	-94.5	-9.9
25	-102.4	-11.4
26	-116.6	-11.6
27	-103.4	-10.6
28	-80.8	-10.0
29	-107.9	-11.5
30	-104.8	-10.7
31	-84.4	-10.1
32	-95.2	-12.2
33	-88.3	-10.6
34	-100.4	-10.6
35	-95.1	-9.2
36	-97.4	-10.5

5.3.5.2 伝送スループット、RTT 測定結果

伝送スループット、RTT の測定地点については、屋外局、屋内局共に、下り受信電力の測定地点（図 5.3.5-1：屋外局）、図 5.3.5-4：屋内局）と同じである。

実測結果を図 5.3.5-7～9 及び表 5.3.5-3（屋外基地局）及び図 5.3.5-10～12 及び表 5.3.5-4（屋内基地局）に示す。

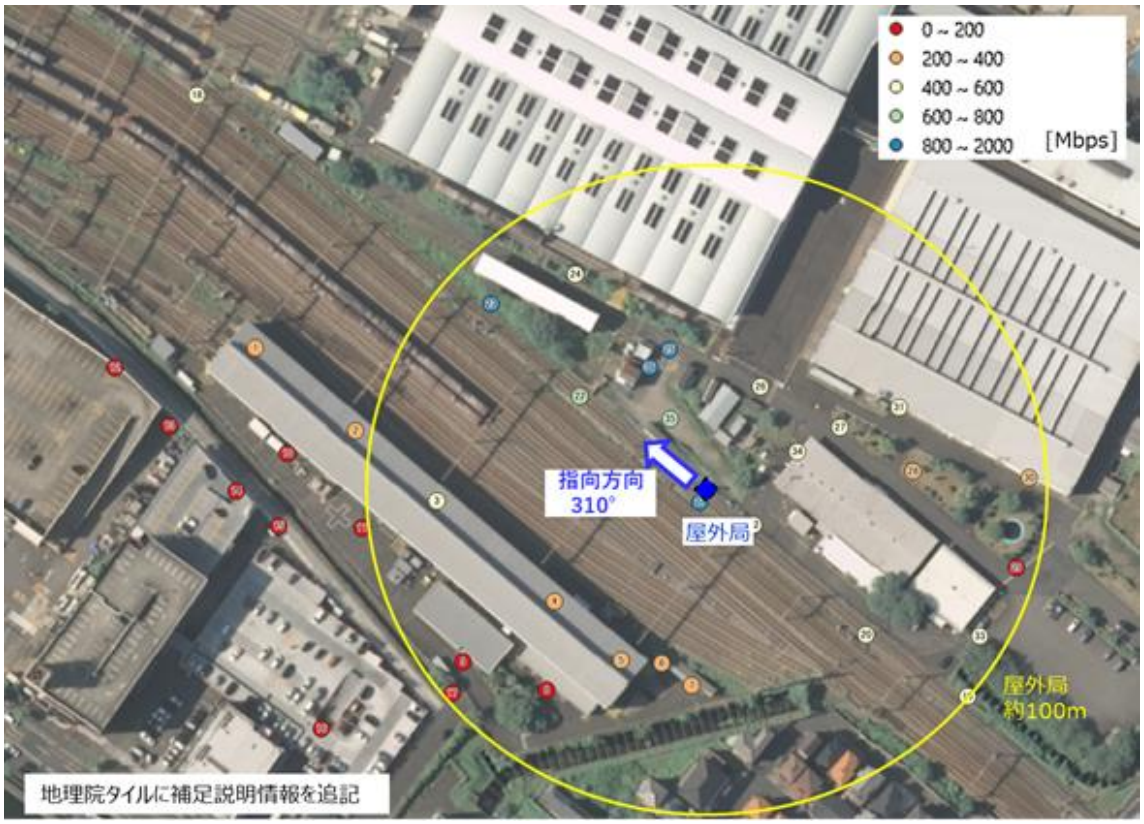


図 5.3.5-7　屋外局周辺での伝送スループット（DL）測定結果

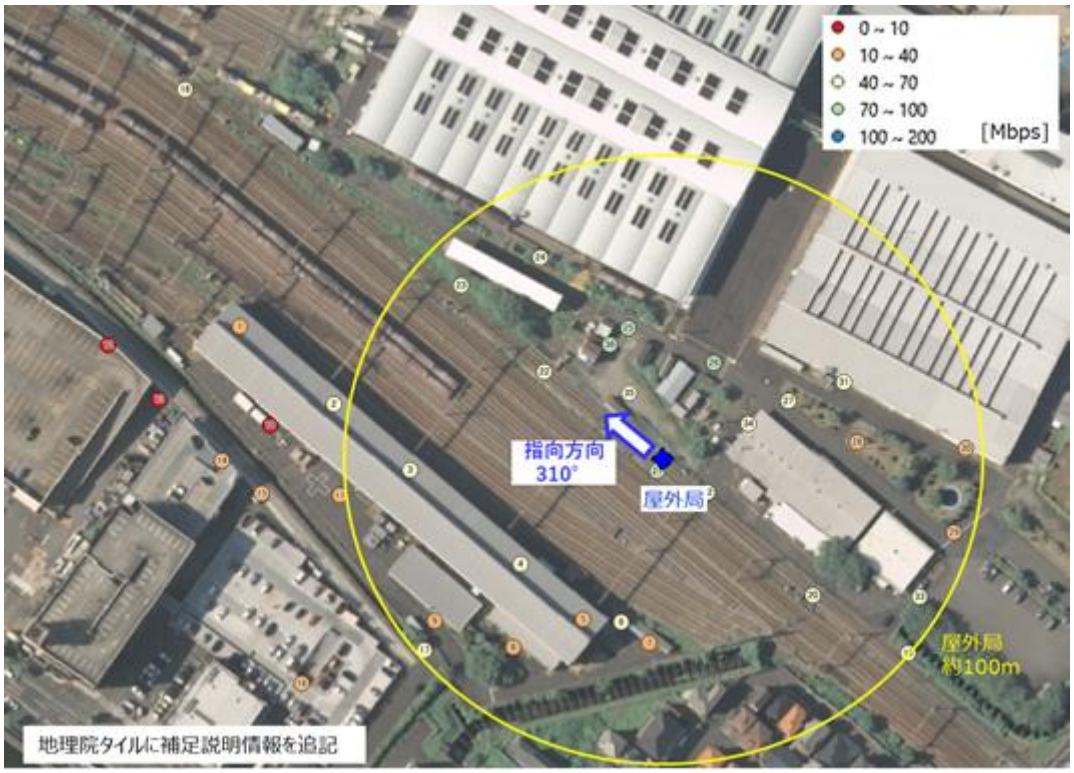


図 5.3.5-8　屋外局周辺での伝送スループット（UL）測定結果

図 5.3.5-9　屋外局周辺での RTT 測定結果

表 5.3.5-3　屋外局周辺での伝送スループット、RTT 測定結果

測定地点#	DL T-put[Mbps]	UL T-put[Mbps]	RTT[ms]
1	223.3	30.6	292.2
2	291.2	47.0	230.0
3	487.5	68.7	219.2
4	367.7	46.9	231.3
5	356.4	28.3	245.9
6	395.7	42.5	248.3
7	388.8	31.6	216.1
8	148.9	16.5	218.2
9	86.6	14.2	240.1
10	89.3	7.5	323.1
11	148.9	10.5	280.4
12	31.2	3.8	1407.6
13	61.5	3.5	1593.3
14	178.7	17.1	499.0
15	111.6	10.5	282.7
16	32.8	24.6	179.7
17	15.8	42.6	129.1
18	549.3	41.5	393.1
19	409.3	69.9	194.2
20	511.3	65.9	171.9
21	808.2	87.7	174.0
22	762.8	54.4	247.2
23	824.2	58.8	235.7
24	516.7	59.5	232.1
25	879.4	89.9	173.9
26	473.2	73.7	180.3
27	432.8	57.8	249.7
28	328.3	34.7	361.0
29	118.2	35.5	405.5
30	270.4	34.4	346.2
31	402.7	41.2	324.1
32	513.1	65.8	213.5
33	502.3	60.7	227.0
34	494.7	57.8	242.9
35	646.6	68.2	209.5
36	885.1	98.4	156.5

図 5.3.5-10　屋内局周辺での伝送スループット（DL）測定結果

図 5.3.5-11　屋内局周辺での伝送スループット（UL）測定結果

図 5.3.5-12　屋内局周辺での RTT 測定結果

表 5.3.5-4　屋内局周辺での伝送スループット、RTT 測定結果

測定地点#	DL T-put[Mbps]	UL T-put[Mbps]	RTT[ms]
1	200.6	31.5	143.5
2	117.3	21.3	398.3
3	392.5	32.8	243.1
4	151.6	10.3	258.4
5	445.0	58.5	217.3
6	353.2	51.4	263.6
7	133.3	15.6	206.1
8	165.2	25.6	154.5
9	722.1	89.5	174.8
10	680.8	84.3	183.2
11	476.9	67.1	223.7
12	186.1	21.9	254.2
13	243.0	20.0	174.3
14	362.1	26.1	152.5
15	391.0	50.7	185.1
16	563.5	80.5	180.3
17	597.7	89.0	182.4
18	591.5	67.6	180.9
19	520.0	59.6	208.7
20	9.1	5.8	400.8
21	130.7	6.9	372.3
22	6.0	6.1	413.8
23	351.5	59.1	250.9
24	159.2	8.2	992.1
25	243.2	23.2	1132.2
26	187.4	9.6	280.9
27	81.3	32.1	143.5
28	41.1	6.4	487.1
29	47.5	8.2	342.0
30	390.2	70.0	195.9
31	291.4	43.2	203.0
32	368.3	60.6	227.3
33	320.4	53.3	189.8
34	191.2	32.9	316.8
35	297.4	24.5	604.6
36	176.8	17.0	519.2

5.3.6 技術的課題の解決方策

5.3.6.1 鉄道車両基地等の環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性の評価

図 5.2.3-2～図 5.2.3-3 に示すように、鉄道車両基地屋内外には、複数の鉄道車両が存在することに加え、保守・点検用の機材等、多数の遮蔽物や機材等が存在している。このような環境においては、想定外の電波の反射、回折等が発生する可能性が高いため、単純な見通し環境と比較して、受信品質、伝送スループット、RTT といったローカル 5G の性能指標に大きな影響が生じる可能性がある。そのため、まずは、技術実証試験フィールド環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性の評価を行った。

5.3.5 章に示した下り受信電力の実測データ（SS-RSRP）を用いて、鉄道車両基地等の環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性を考察する。

具体的には、実測した下り受信電力値から伝搬ロスを算出し、それらの距離特性を求める。さらに、携帯電話システムの設計等に用いられている、いくつかの電波伝搬モデルから求められる伝搬ロスとの比較を行なうことで、鉄道車両基地等の環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性の評価を行う。

ここで、実測値との比較に用いる伝搬式を表 5.3.6-1 に示す。

表 5.3.6-1　実測値との比較に用いた電波伝搬式

電波伝搬式	概要
自由空間伝搬	開放地に適用。周波数範囲、伝搬距離、送受信機の高さなどの適用制限はない。 $L = 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20\log\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) = 20\log f + 20\log d + 20\log\left(\frac{4\pi}{c}\right)$ $= 20\log f + 20\log d + 32.4[\mathrm{dB}]$ f: 周波数[MHz]、d: 距離[km]、c: 3.0×10^8[m/s]
ローカル 5G 審査基準	電波法関係審査基準（平成 13 年総務省訓令第 67 号） 令和 2 年 12 月 18 日制定
3GPP モデル[11]	ITU-R P.1411 ベースの伝搬式。環境により基地局、移動局高が規定されている。 RuralMacro:基地局 10～150m、移動局 1～10m UrbanMacro:基地局 25m、移動局 1.5～22.5m UrbanMicro:基地局 10m、移動局 1.5～22.5m InH Office(LOS):直線距離 1～100m InH Office(NLOS):直線距離 1～86m InH ShoppingMall:直線距離 1～150m

[11] 3GPP TR-38.900

（1）屋外環境における電波伝搬特性について

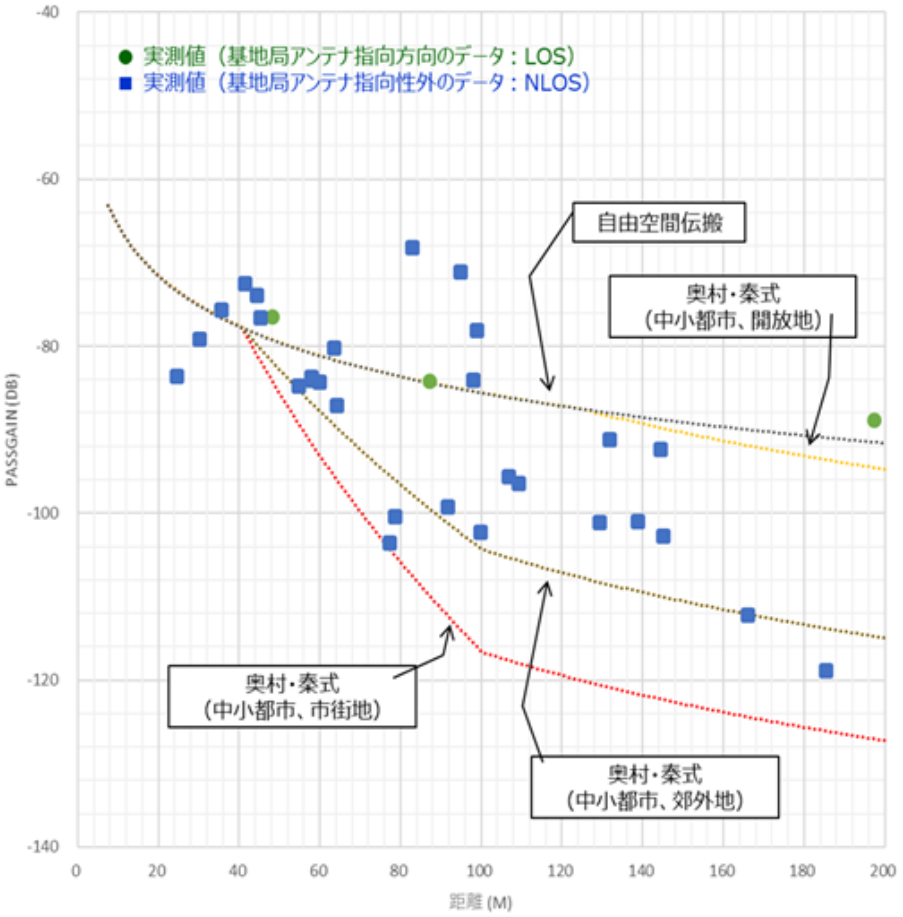


図 5.3.6-1 に、屋外局について実測した下り受信電力データから算出した伝搬特性を示す。図中、緑は、屋外基地局指向性方向のデータ、青は指向性外のデータを示している。

実測値と比較した伝搬式は、自由空間伝搬と、ローカル 5G 審査基準で用いられている伝搬式（奥村・秦式）である。

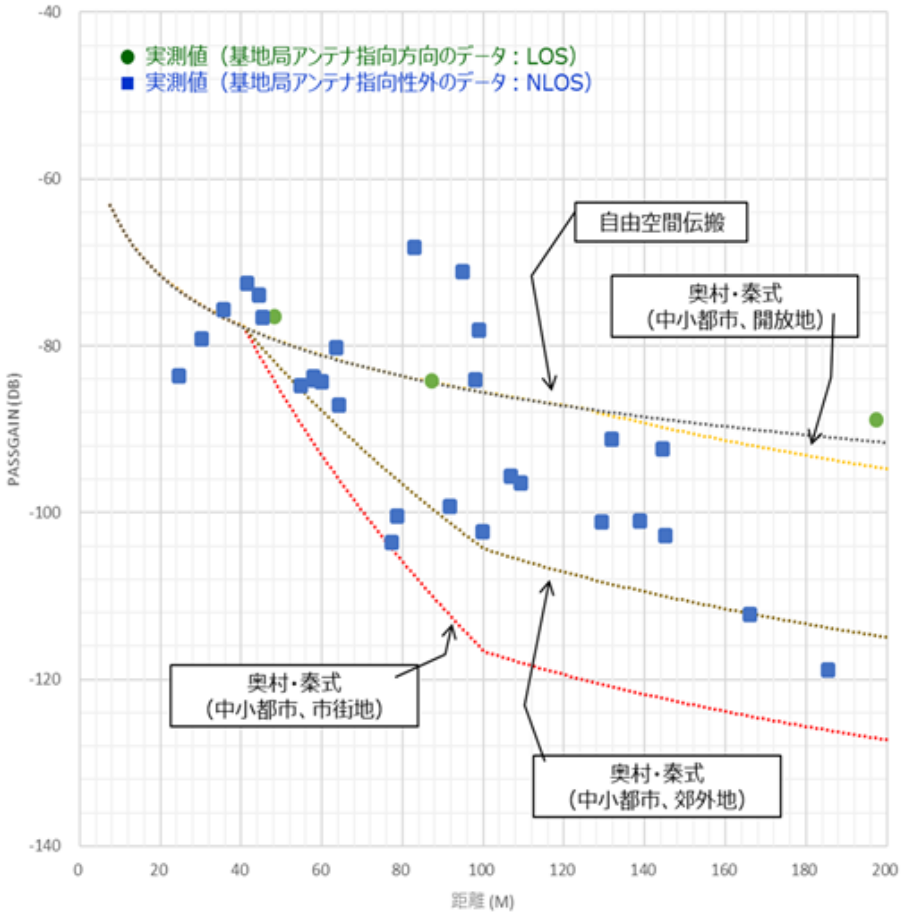


図 5.3.6-1 からは、屋外基地局指向性外も含めた全体傾向としては、奥村・秦式（中小都市、郊外地モデル）が比較的よく一致しているように見える。一方、取得したデータから屋外基地局指向性方向の値だけ抽出すると（図中緑丸の 3 点）、自由空間伝搬によく一致していることがわかる。今回の技術実証試験フィールドである鉄道試走線路上では、屋外基地局指向性方向には、何も障害物がないことから、自由空間伝搬が最も一致する結果になったと思われる。

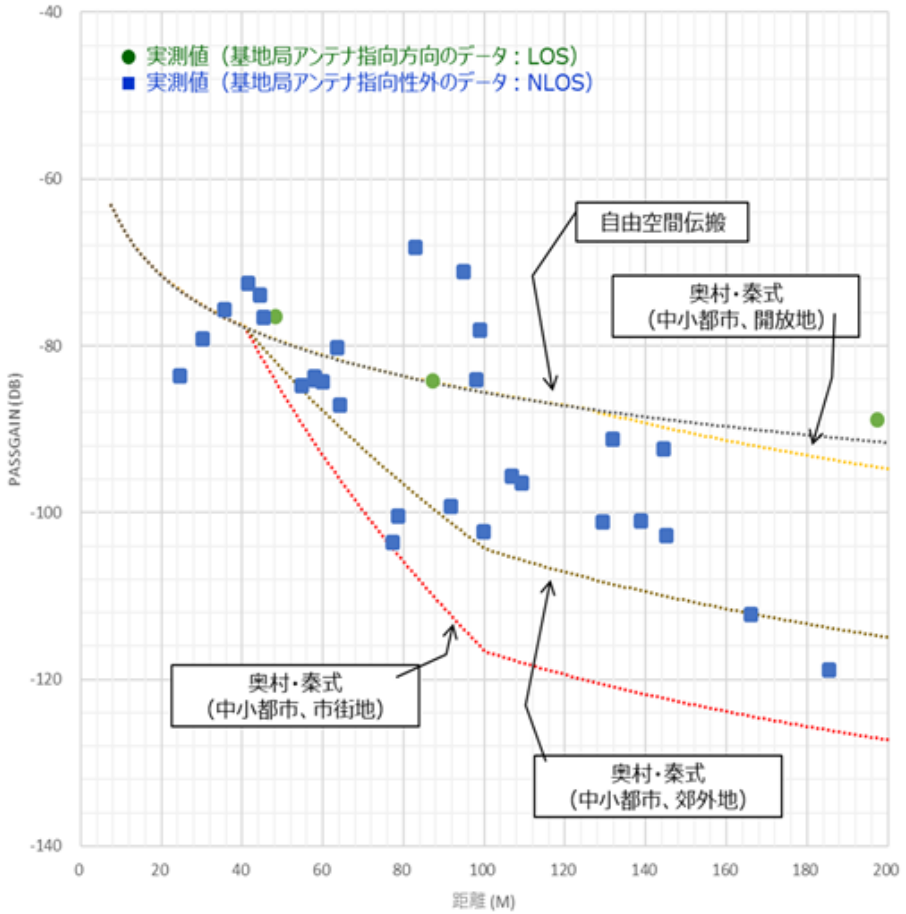


図 5.3.6-1　鉄道車両基地等の屋外環境における伝搬ロスの距離特性

※上記グラフでは、パスゲインの算出は、反射波等を考慮しない直接波のみを前提に算出している。従って、アンテナ指向性のヌルにあたる測定点では、基地局送信電力値が極端に小さくなり、実測値も小さくなるはずである。しかい、基地局近傍の測定点では、地局から見通しかつ距離も近いため、それほど小さくない電力値が観測されるため、計算したパスゲイン値がかなり大きくなる現象が起きる。今回の電波伝搬特性の評価においては、パスゲイン値がかなり大きい測定点を除いて実施している。

（2）屋内環境における電波伝搬特性について

図 5.3.6-2 に、屋内局（無指向性）について実測した下り受信電力データ（屋内地点のみ抽出）から算出した伝搬ロスの距離特性を示す。図中、丸は LOS のデータ、四角は NLOS のデータを示している（LOS か NLOS かの判断は、測定員の目視による）。

実測値と比較した伝搬式は、自由空間伝搬と、奥村・秦式（中小都市・郊外地モデル）、3GPP モデル（InH Office NLOS）である。図 5.3.6-2 からは、奥村・秦式と 3GPP 屋内環境モデルとの一致が良いと考えられる。

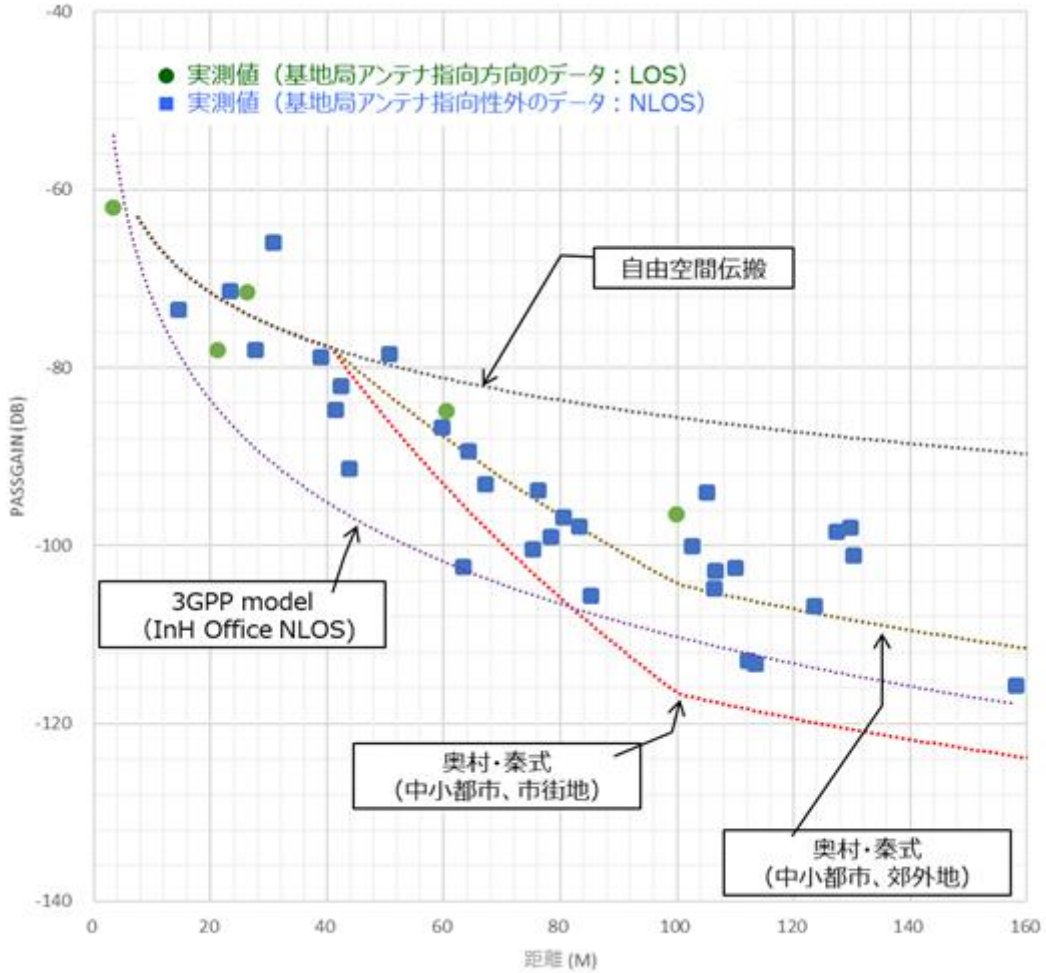


図 5.3.6-2　鉄道車両基地等の屋内環境における伝搬ロスの距離特性

5.3.6.2 鉄道車両基地屋内外環境におけるローカル 5G 性能評価

実際の鉄道車両基地屋内外環境において、ローカル 5G の性能が想定通りに実現できているかを、実測した SS-RSRP、SS-RSRQ、伝送スループット、RTT により評価した。

ローカル 5G の性能評価は、エリア形成の観点の観点と、ユーザへのサービス提供品質の観点から実施した。前者については、基地局からの受信レベルを用いて、設計通りのエリアが構築できているか否か、できていない場合は、どのような原因が想定され、対策として、どのような方策が取りえるのかを考察した。後者については、ローカル 5G ネットワーク上に構築されるアプリケーションやシステムのパフォーマンスに直接的な影響を与えると考えられる、伝送スループットと RTT の測定結果を用いて考察した。

ローカル 5G 性能評価の前提となる、各基地局のターゲットエリア（サービスを提供したいエリア）を

図 5.3.6-3 に示す。屋外基地局は、高さ 4m、指向方向 310°（線路方向）、チルト角 0°の指向性アンテナを線路脇に設置した。ターゲットエリアは、試験線路上約 150m である。一方、屋内基地局は、検査庫内高さ 3.1m に、無指向性アンテナをチルト角 0 度で設置した。ターゲットエリアは、検査庫内のアンテナ設置位置から半径 10m 内である。

図 5.3.6-3　久里浜工場内屋外基地局、屋内基地局のターゲットエリア

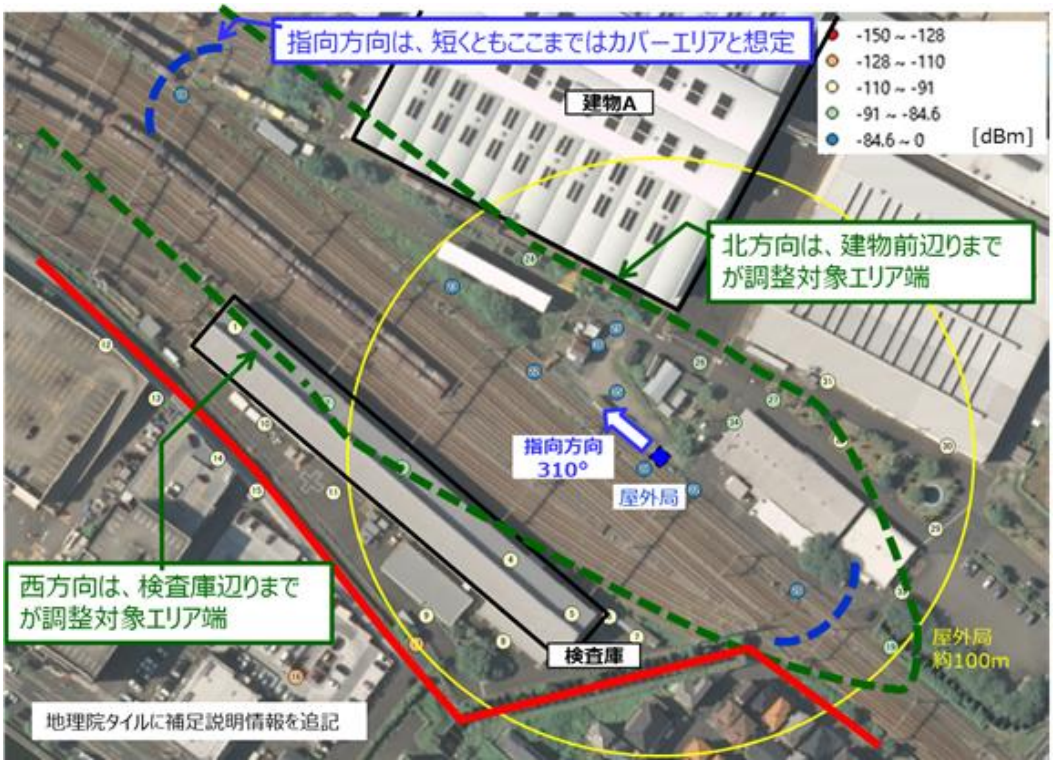
（1）屋外環境におけるローカル 5G 性能評価について

最初に、下り受信電力(SS-RSRP)の測定結果から、エリア形成の観点での評価を行う。

図 5.3.6-4 に屋外基地局のエリア形成状況を示す。図中、青点線は、4.6-4.9GHz 帯におけるローカル 5G 審査基準で定められている“カバーエリア端レベル(100MHz 幅の場合：-84.6dBm）”を前提に実測値から評価した想定カバーエリア端、緑点線は、同様に審査基準で定められている“調整区域端レベル（100MHz 幅の場合：-91.0dBm）“を前提に実測値から評価した想定調整区域である。

実測した下り受信電力からは、想定通り、線路上にきれいにカバーエリアが形成されていることがわかる。さらに、想定カバーエリア内においては、SS-RSRQ 値も比較的良好であると考えられる[12]。

調整対象区域については、アンテナ指向方向においては、最も距離のある測定点でもカバーエリア端レベル以上のレベルであったため、実測値から推定することは困難である。しかし、試験線路の両サイドについては、アンテナ指向方向と平行にきれいに調整対象区域が形成されていると考えられる。今回の実証フィールドでは、検査庫より南側が自己土地境界線（図中赤線）となっているが、調整対象区域端レベルは、この境界線を越えてはいないことがわかる。従って、仮に、自己土地境界線に隣接して他のローカル 5G 免許局が存在したとしても、調整不要とすることができるはずであり、免許申請手続きの観点でも、より容易にサービスエリア構築ができると考えられる。



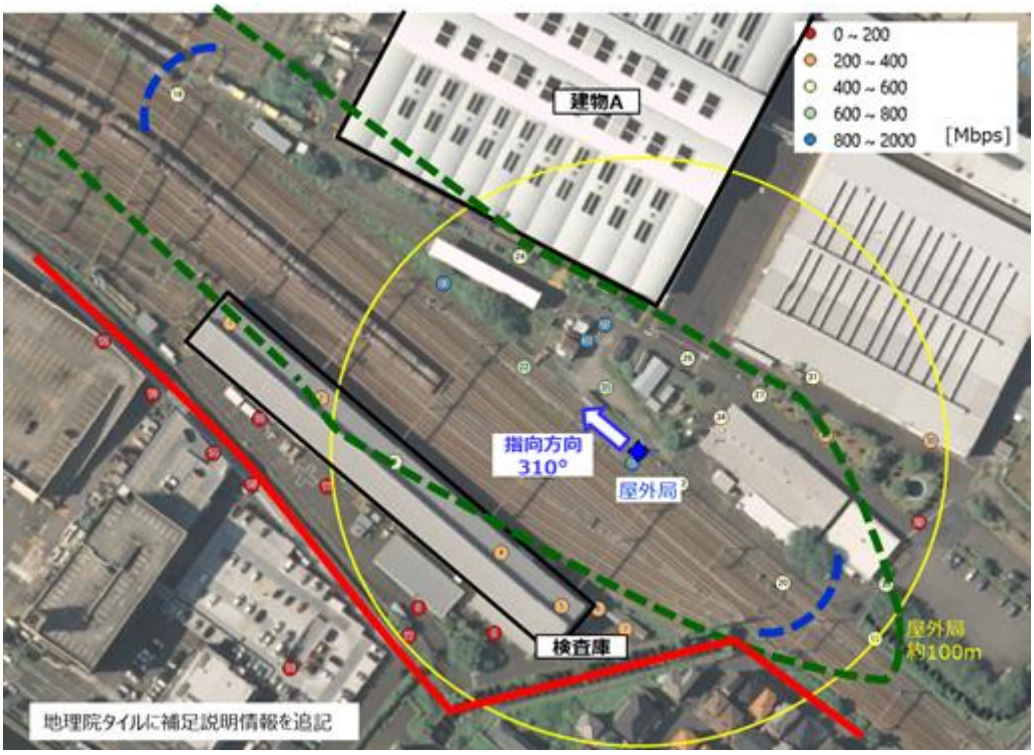
(a)下り受信電力（SS-RSRP）から評価した想定エリア

[12] 今回の技術実証試験では、同一、隣接周波数帯で運用する他の 5G 基地局が存在しない状況で実測を行ったため、干渉により変化する SS-RSRQ を用いて精密な評価を行うことは難しいと考える。

(b)想定カバーエリア内における SS-RSRQ の測定結果

図 5.3.6-4　屋外局におけるエリア形成に対する評価

次に、伝送スループット、RTT の測定結果から、ユーザへのサービス提供品質の観点での評価を行う。

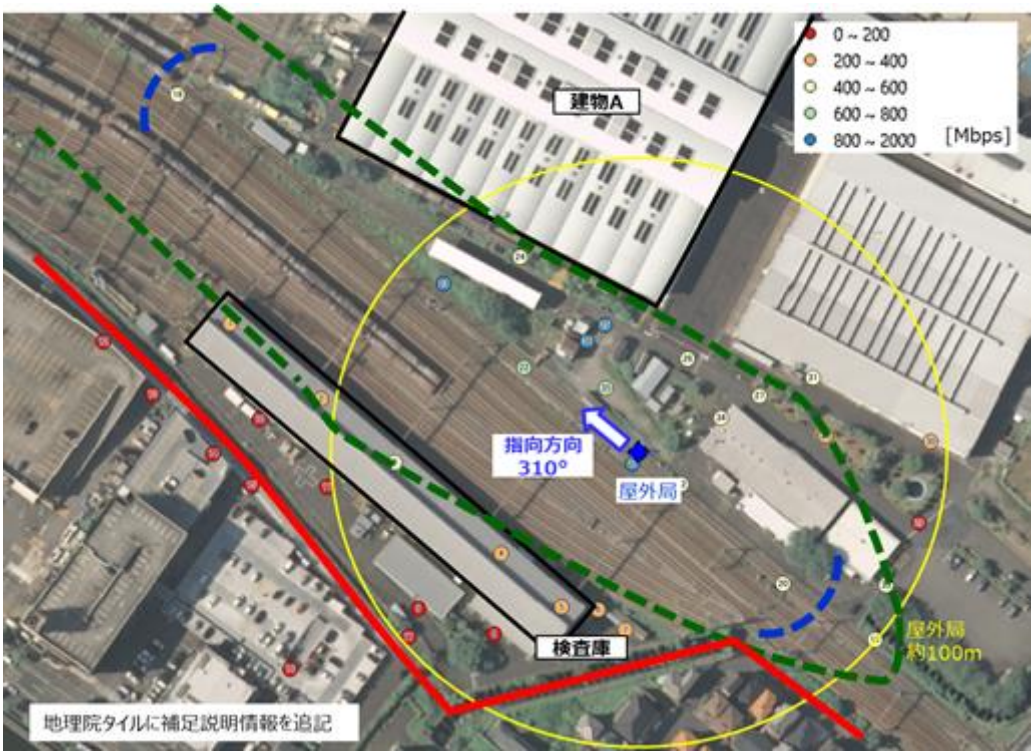


（a）屋外局周辺における DL 伝送スループット測定結果

（b）屋外局周辺における UL 伝送スループット測定結果

図 5.3.6-5 は､屋外基地局周辺において実測した伝送スループット(DL)を地図上に記載したものである（図中、青点線は、図 5.3.6-4 と同様に、下り受信電力（SS-RSRP）から描いた想定カバーエリア図を示す)。また、図 5.3.6-6 は、屋外基地局周辺における下り受信電力（SS-RSRP）と伝送スループット、RTT との関係をグラフ化したものである。

DL 伝送スループットについては、概ね下り受信電力（SS-RSRP）に比例していることがわかる。従って、DL 伝送スループットを向上させるためには、良好な下り受信電力を得られるエリアを構築する必要がある。UL 伝送スループットについても、想定カバーエリア内においては、ほぼ同様の特性のように見えるが、想定カバーエリア外などの環境が悪い場所では、著しく速度が劣化する結果となっている。RTT についても、想定カバーエリア内においては、全体的に、受信電力値によらず安定していることがわかる。



（a）屋外局周辺における DL 伝送スループット測定結果

（b）屋外局周辺における UL 伝送スループット測定結果

図 5.3.6-5　屋外局周辺における伝送スループット（DL）測定結果

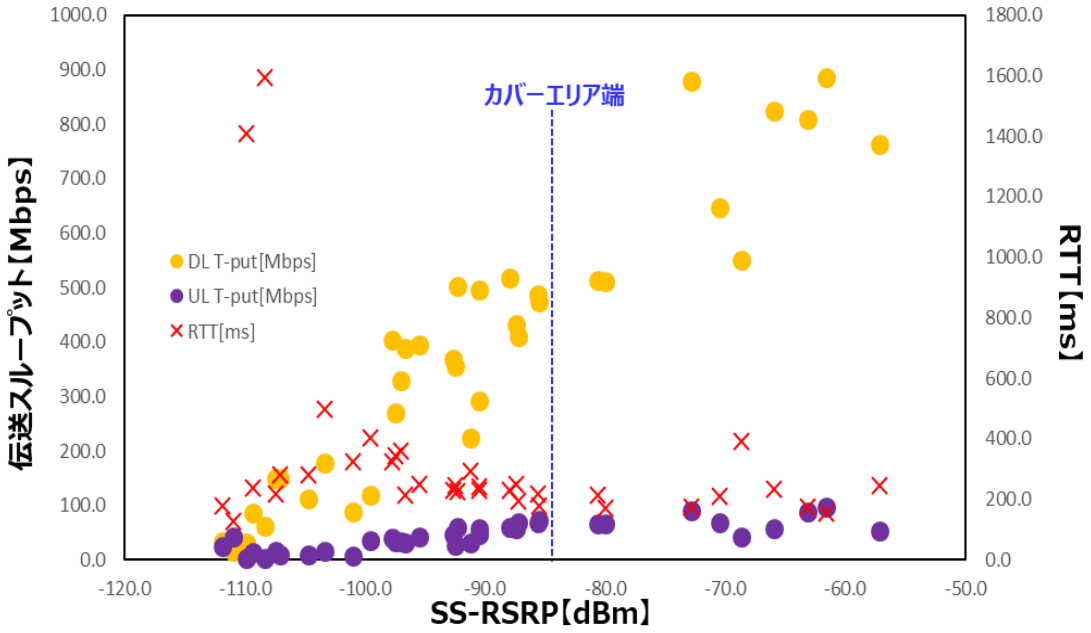


図 5.3.6-6　屋外局周辺における下り受信電力に対する伝送スループット、RTT

鉄道インフラ分野における課題実証では、“列車検査における鉄道車両の傷等の自動検知、線路巡視における線路の障害物等を遠隔かつリアルタイム自動検知に関する実証”を目的としている。課題実証では、上り回線において、高精細カメラ（4k 画質）からの映像を伝送することを前提としているため、ローカル 5G 性能としては、上り回線の伝送スループットが重要となる。

前述したように、課題実証においては、UL 伝送スループットの目標値として 30Mbps としており、技術実証においても、この目標値を基に評価を行う。

表 5.3.6-2 は、想定カバーエリア内の伝送スループットを抽出したものである。表からは、屋外基地局の想定カバーエリア内では、平均 UL 伝送スループットとして 70.1Mbps を達成しており、十分な性能が得られていることがわかる。

表 5.3.6-2　屋外基地局の想定カバーエリア内のローカル 5G 性能

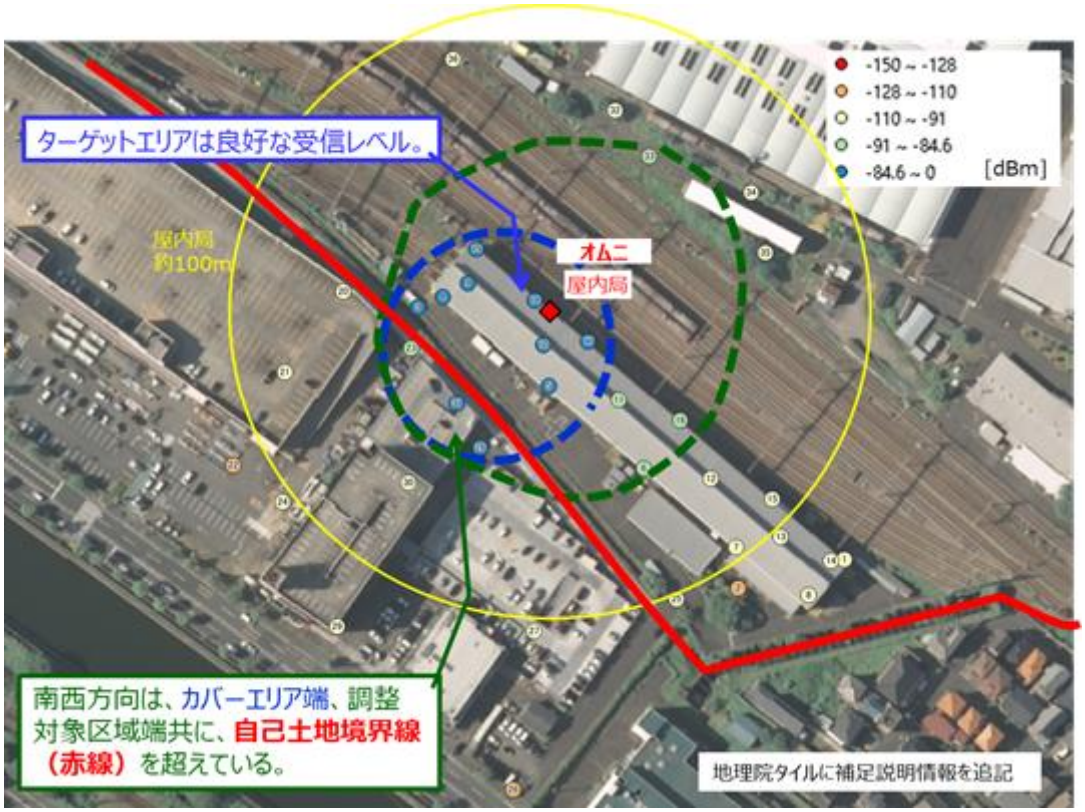
測定地点	DL T-put[Mbps]	UL T-put[Mbps]	総合 T-put[Mbps]
18	549.3	41.5	590.8
20	511.3	65.9	577.2
21	808.2	87.7	895.9
22	762.8	54.4	817.2
23	824.2	58.8	883.1
25	879.4	89.9	969.3
32	513.1	65.8	578.9
35	646.6	68.2	714.8
36	885.1	98.4	983.4
平均	708.9	70.1	778.9

（2）屋内環境におけるローカル 5G 性能評価について

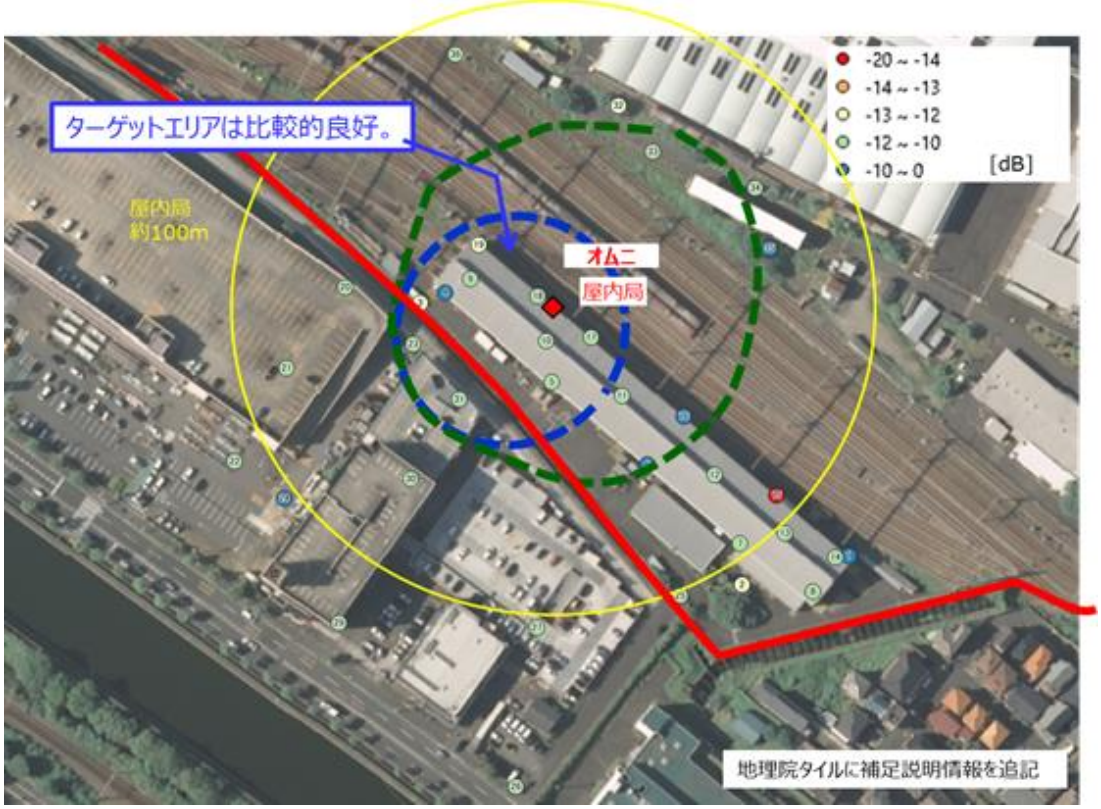
図 5.3.6-7 に屋内基地局のエリア形成状況を示す。図中、青点線、緑点線は、屋外局の場合（図 5.3.6-4）と同じ定義である。

実測した下り受信電力からは、検査庫内ターゲットエリア（基地局周辺 10m 以内）は、良好なレベルでエリア形成されていることがわかる。一方、検査庫南西方向においては、自己土地境界線（赤線）を超えて、高めの電波が漏洩していることがわかる。従って、検査庫内の屋内基地局については、基地局や ANT 設置位置の調整により、ターゲットエリア内のレベルを維持したまま、南西方向の他者土地への漏洩を抑えることが課題であることがわかる。一方、想定カバーエリア内における SS-RSRQ 値は、比較的良好であると考えられる[13]。

[13] 今回の技術実証試験では、同一、隣接周波数帯で運用する他の 5G 基地局が存在しない状況で実測を行ったため、干渉により変化する SS-RSRQ を用いて精密な評価を行うことは難しいと考える。



(a)下り受信電力（SS-RSRP）から評価した想定エリア



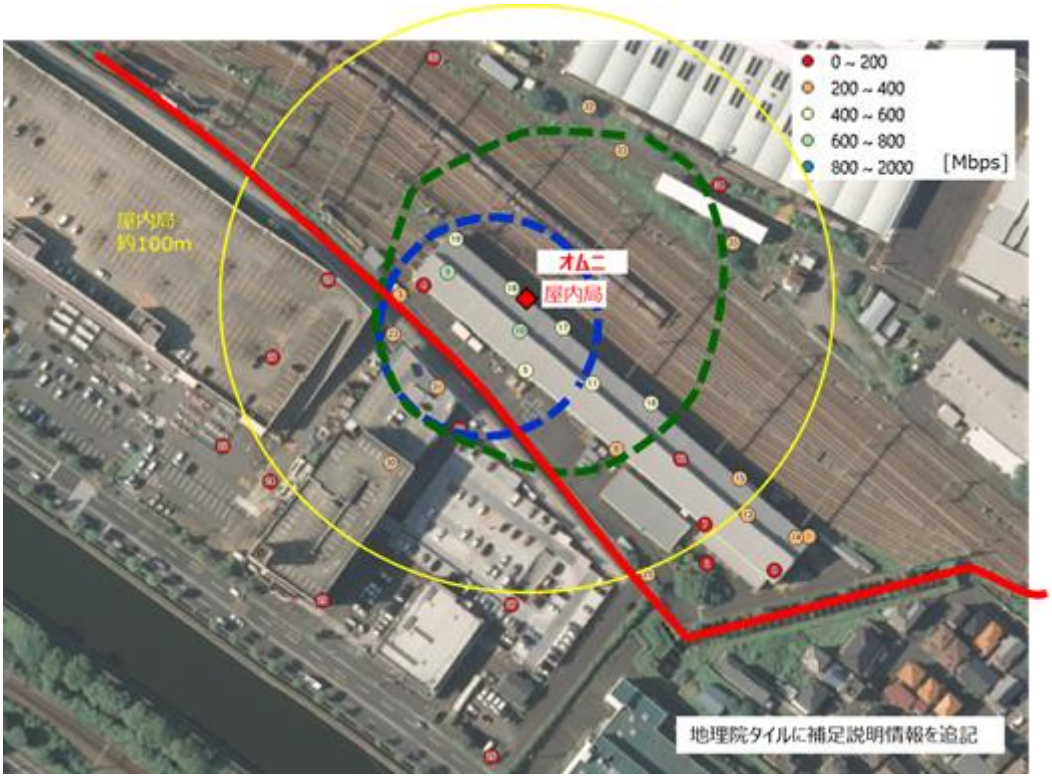
(b)想定カバーエリア内における SS-RSRQ の測定結果

図 5.3.6-7　屋内局におけるエリア形成に対する評価

次に、伝送スループット、RTT の測定結果から、ユーザへのサービス提供品質の観点での評価を行う。

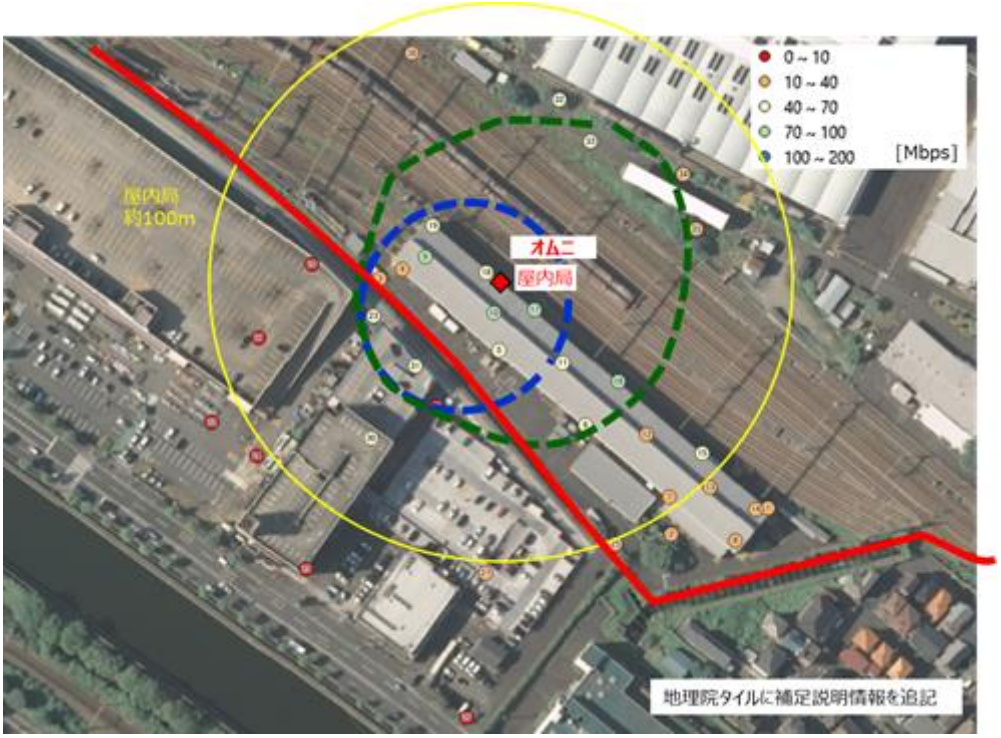
図 5.3.6-8 は、屋内基地局周辺において実測した伝送スループット(DL)を地図上に記載したものである（図中、青点線は、図 5.3.6-4 と同様に、下り受信電力（SS-RSRP）から描いた想定カバーエリア図を示す)。また、図 5.3.6-9 は、屋内基地局周辺における下り受信電力（SS-RSRP）と伝送スループット、RTT との関係をグラフ化したものである。

伝送スループットについては、想定カバーエリア内では、概ね下り受信電力（SS-RSRP）に比例しているが、受信電力が高くても、伝送スループットが低い測定点が 2 か所存在している[14]ことが、前述した屋外環境との違いである。これらの測定点については、SS-RSRQ 値も良好であり、干渉影響とは思えないが、今回の測定データ内では、伝送スループットの劣化要因の特定は困難である。一方、RTT については、比較的安定しているように見える。



(a) 屋内局周辺における DL 伝送スループット測定結果

[14] 測定地点＃4（検査庫内）、28（自己土地外）



(b) 屋内局周辺における UL 伝送スループット測定結果

図 5.3.6-8　屋内局周辺における DL 伝送スループット(DL)測定結果

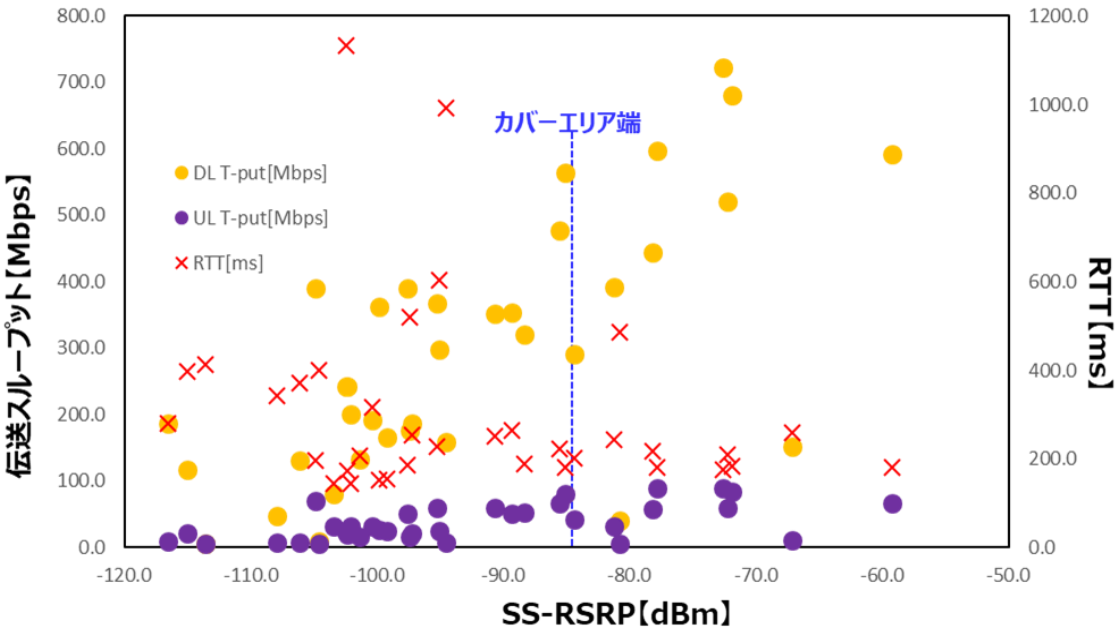


図 5.3.6-9　屋内局周辺における下り受信電力に対する伝送スループット、RTT

鉄道インフラ分野における課題実証では、“列車検査における鉄道車両の傷等の自動検知、線路巡視における線路の障害物等を遠隔かつリアルタイム自動検知に関する実証”を目的としている。課題実証では、上り回線において、高精細カメラ（4k 画質）からの映像を伝送することを前提としているため、ローカル 5G 性能としては、上り回線の伝送スループッ

トが重要となる。

前述したように、課題実証においては、UL 伝送スループットの目標値として 30Mbps としており、技術実証においても、この目標値を基に評価を行う。

表 5.3.6-3 は、屋外基地局の想定カバーエリア内では、平均 UL 伝送スループットとして 65.5Mbps を達成しており、十分な性能が得られていることがわかる。

表 5.3.6-3　屋内基地局カバーエリア内のローカル 5G 性能

測定地点	DL T-put[Mbps]	UL T-put[Mbps]	総合 T-put[Mbps]
4	151.6	10.3	161.9
5	445.0	58.5	503.5
9	722.1	89.5	811.5
10	680.8	84.3	765.2
17	597.7	89.0	686.7
18	591.5	67.6	659.1
19	520.0	59.6	579.6
全平均	529.8	65.5	595.4
4 を除いた平均	592.9	74.8	667.6

（3）鉄道車両基地屋内外環境において、良好なローカル 5G 性能を得るための方策について

鉄道車両基地の屋内外環境において実測したデータ（下り受信電力、伝送スループット、RTT）を用いて、ローカル 5G の性能評価を、エリア形成の観点の観点と、ユーザへのサービス提供品質の観点から実施した。

屋外環境においては、ターゲットエリア全体にわたり、比較的良好な性能を得ることができていることがわかった。一般的に、鉄道車両基地の屋外環境は、遮蔽物が少なく、見通しが得やすい環境と想定される。従って、今回、実証試験を実施した京急久里浜工場のように、鉄道会社の協力のもと、線路脇等の安全性を十分に確保できる適切な基地局設置場所が確保できれば、良好なローカル 5G 性能を得ることは比較的容易であると考えられる。

屋内環境においては、ターゲットエリアである基地局近傍においては、良好なローカル 5G 性能を得ることができた。一方、ターゲットエリア外も含む、伝送スループットと下り

受信電力（SS-RSRP）の全体データからは、（屋外基地局と同様に、概ね下り受信電力に比例する傾向はあるものの）バラツキが大きい傾向が読み取れる。特に、カバーエリア端レベルを下回ると、この傾向は顕著になっているように見える。これは、検査庫内には、複数の電車車両が停車しているため、基地局近傍以外では、閉空間による乱反射等が要因となって伝送スループットが低下したものと考えられる（図 5.3.6-10 参照）

図 5.3.6-10　検査庫内の環境

5.3.7 更なる技術的課題等

今回の実証において、屋外環境においては、ターゲットエリア全体にわたり、比較的良好な性能を得ることができていることがわかった。しかし、過去の 5G 総合実証試験[15] においては、4.5GHz 帯において、基地局と垂直方向にエリアを形成するよりは、水平方向にエリア形成する方が、基地局の容量が大きくなるという結果が出ている。今回の検証では移動局 1 台での実証しかしていないため、エリア形成と基地局容量の関係については、更なる検討が必要だろう。

今回の実証において、屋内環境においては、基地局近傍エリアでは、比較的良好な性能が得られたが、屋内環境の隅々まで、安定して良好なローカル 5G 性能を得ることを想定した場合は、基地局の設置位置の最適化を図ることで、乱反射等の要因を軽減することが必要だろう。具体的な対策としては、例えば、1 つの基地局に複数のアンテナユニットを接続して、異なる方向から、電波を発射することにより、屋内での電波の届きにくい環境を減らしていくことが考えられる。あるいは、現時点では、制度的に認められてはいないため、将来的に制度改正がなされた場合の方策となるが、小電力レピータや陸上中継移動局のような、基地局からの電波を中継する装置を使う方策が考えられる。その他、現行の電波法施行規則や電波法関係審査基準で定義されている「無給電中継装置」に分別される、いわゆる反射板を適切に設置する等の方策も有効と考えられる。

[15] 2019 年度 5G 総合実証試験 G2 「移動時において複数基地局、複数端末の環境下で平均 1Gbps を超える高速通信を可能とする第 5 世代移動通信システムの技術的条件に関する調査検討」

5.4 ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等（課題イ）

5.4.1 評価・検証項目

最初に、総務省提供のエリア算定式を用いて、カバーエリア及び調整対象区域図を作成し、実測した下り受信電力値との比較検証を行う。次に、5.3 章のローカル 5G 性能評価の検討で得られた知見を活かしながら、ローカル 5G エリア構築、システム構成の検証を行うため、レイトレーシング法に基づくエリア設計値と、実測した下り受信電力値との比較検証を行う。

5.4.2 評価・検証方法

5.4.2.1 カバーエリア及び調整対象区域図の作成

総務省が提供するエリア算出法（表 5.3.6-1 ローカル 5G 審査基準）に基づき、設置する 2 つの基地局について、基地局毎にカバーエリア及び調整対象区域の図を作成する。

総務省から提供される計算式では、表 5.4.2-1 に示すように、送受信間距離 dxy が 100m 以上の場合には、計算対象地域の環境に応じて、移動局高に対して考慮する補正項 a(Hm)と、市街地、郊外地、開放地に対して考慮する補正値 S の選択が必要である。

表 5.4.2-1　総務省提供の電波伝搬式における補正項選択肢（dxy が 100m 以上の場合）

補正項	定義	選択肢
a(Hm)	移動局高に対して考慮する補正項	中小都市の場合 a(Hm)=0.057 市街地のうち、大都市に相当する地域以外のもの）
		大都市の場合 a(Hm)=-0.00092 市街地のうち特に大規模な都市の領域であって、おおむね 5 階建て以上の建物が密集した地域）
S	市街地、郊外地、開放地に対して考慮する補正値	市街地の場合 S=0.0 都市の中心部であって、2 階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など
		郊外地の場合 S=12.3 樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など移動局近傍に障害物はあるが密集していない地域
		開放地の場合 S=32.5 電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑地・田地・野原など

5.3.6.1 で考察したように、屋外局のアンテナ指向方向については自由空間伝搬と考えられるが、それ以外の方向と屋内局については、奥村・秦式の中小都市・郊外地モデルで模擬できると考えられる。従って、ここでは、補正項 a(Hm)については中小都市を、補正項 S については、S=12.3（郊外地）を選択してエリア図を作成した。

5.4.2.2 下り受信電力の測定

下り受信電力の測定方法は、5.3.3.1 と同じである。ただし、測定エリアは、前述した基地局カバーエリア端、調整対象区域端において実測した。さらに、当該エリア算出式のカバーエリア及び調整対象区域の閾値と異なっている場合は、それぞれの閾値が実測される基地局相当の無線局からの距離の確認を行った。

5.4.3 検証結果

5.4.3.1 カバーエリア及び調整対象区域図の作成

前述したように、今回の技術実証フィールドでは、屋外局のアンテナ指向性方向以外は、奥村・秦式の中小都市・郊外地モデルで模擬できると考えられるため、補正項 a(Hm)については中小都市を、補正項 S については、S=12.3（郊外地）を選択してエリア図を作成した。

（1）屋外基地局の場合

上記の前提で、カバーエリア端、調整対象区域端までの距離を計算すると、それぞれ、67m、80m となった。計算結果を真円として地図上に描いたものを図 5.4.3-1 に示す。

図 5.4.3-2 は、前述した実測値からのエリア推定図（図 5.3.6-4(a)）の再掲である。

アンテナ指向方向で比較すると、奥村・秦式の計算結果よりも、実測値から推定したレベル端の方が、距離が長いことがわかる。これは前述したように、アンテナ指向方向は、開放地となっており、自由空間伝搬と考えられるためである。屋外基地局の送信 EIRP=19dBm、人体吸収損 8dB 込みで計算する[16]と、エリア端レベル＝-84.6dBm になる距離は、317m、調整対象エリア端レベル=-91.0dBm になる距離は、660m となる[17]。この結果は、実測結果とも矛盾がないものと考える。

[16] 総務省が提供しているエリア計算式には、人体吸収損 8db が加味されている。

[17] カバーエリア端までの伝搬ロス=19dBm(EIRP)-{-84.6dBm(カバーエリア端レベル)+8dB(人体吸収損)}=95.6dB。調整対象区域端までの伝搬ロス=19dBm(EIRP)-{-91.0dBm(カバーエリア端レベル)+8dB(人体吸収損)}=102.0dB。

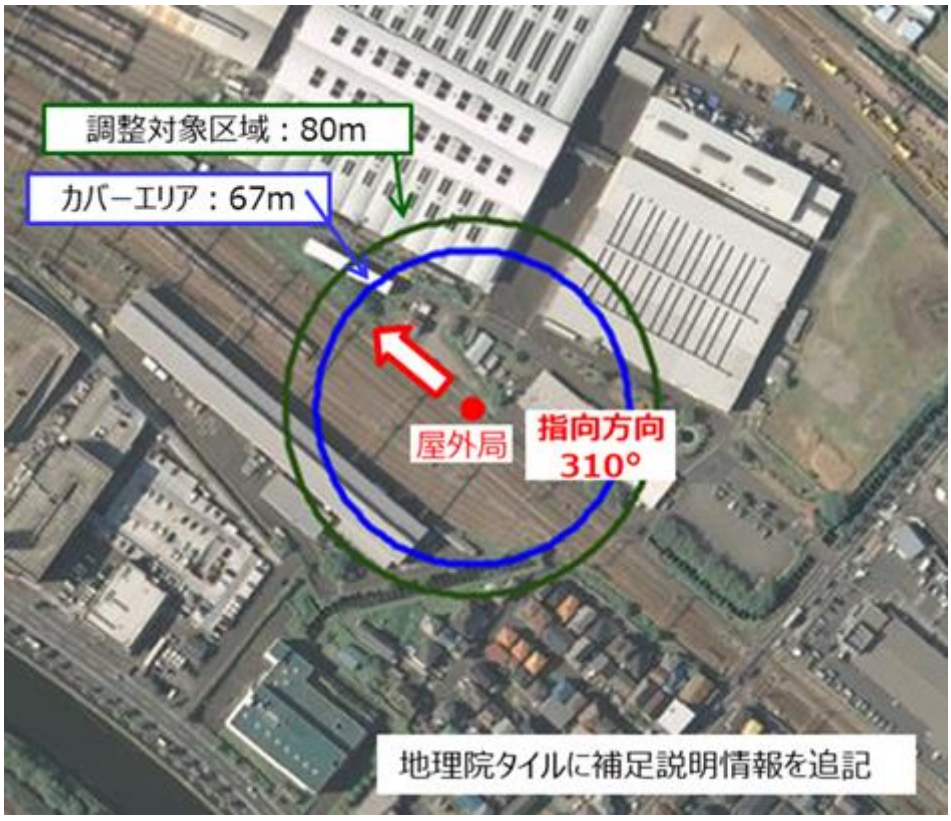


図 5.4.3-1 屋外基地局のカバーエリア、調整対象区域図（中小都市・郊外地モデルの場合）

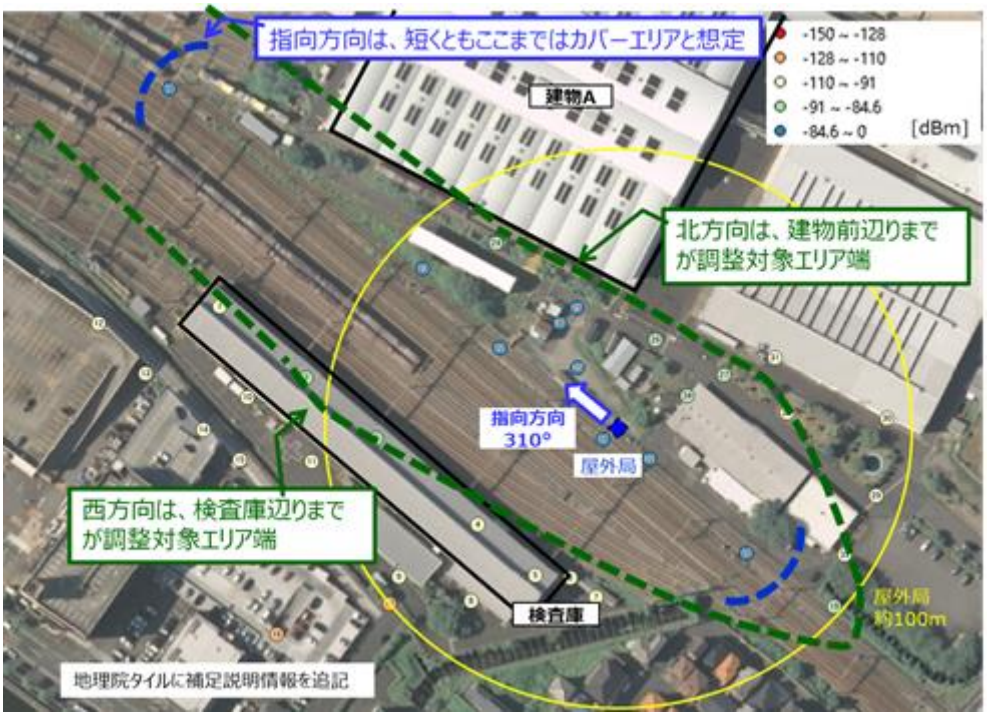


図 5.4.3-2　実測値から推定したエリア図（図 5.3.6-4(a)再掲）

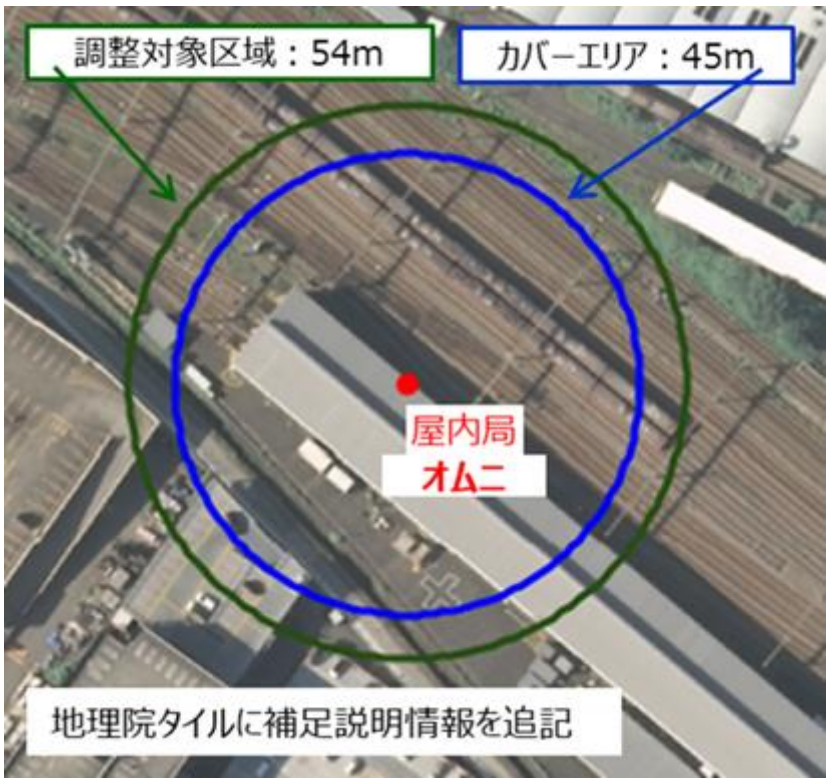
（2）屋内基地局の場合

前述したように、屋内基地局（無指向性）における電波伝搬は、奥村・秦式（中小都市・郊外地モデル）がよく一致していたので、補正項 a(Hm)については中小都市を、補正項 S については、S=12.3（郊外地）を選択した。次に、屋内基地局において、エリアが屋外へ到達している場合には建物侵入損[18]を見込む必要があるため、以下の考え方でエリア端を想定した。

まず、カバーエリア端、調整対象区域端までの距離を、建物侵入損無しの条件で計算した（図 5.4.3-3(a)）。図 5.4.3-3(a)より、エリア端は、いずれも検査庫の屋外まで到達していることがわかる。

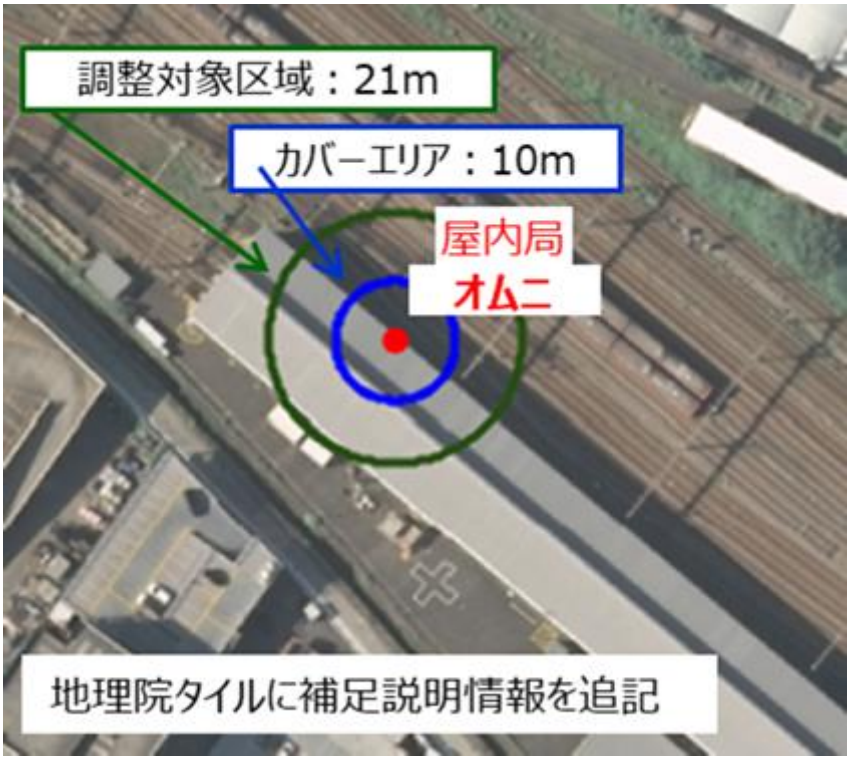
次に、屋内基地局送信電力値から建物侵入損 16.2dB 分を差し引いた電力値でエリア端までの距離を計算した（図 5.4.3-3(b)）。図 5.4.3-3(b)より、エリア端は、南方向は、検査庫内に収まっていることがわかる。従って、屋内基地局の建物侵入損込みのエリア端は、南方向は、検査庫内壁までの距離と同じであると推定できる（図 5.4.3-3 (c)）。

図 5.4.3-4 は、実測した下り受信電力値から推定したエリア図（図 5.3.6-7(a)再掲）である。実測値から推定したエリアと計算式によるエリアは、概ね一致しているが、実測値の方が、より広範囲のエリアとなっているように見える。これは、検査庫の建物侵入損失値が、エリア推定式で定義されている 16.2dB よりも小さい、というような要因が想定される。



(a) 建物侵入損無しの場合の各エリア端までの距離

[18] ここでは、総務省エリア推定式に記載されている 16.2dB を採用した。



(b) 屋内基地局送信電力値から建物侵入損 16.2dB を差し引いた場合のエリア端距離

(c)屋内基地局のエリア端距離

図 5.4.3-3　建物侵入損を考慮した屋内基地局のカバーエリア、調整対象区域図

図 5.4.3-4　測値から推定される屋内基地局のエリア図

5.4.3.2　鉄道車両基地における最適なエリア構築、システム構成に関する考察

鉄道車両基地における最適なローカル 5G のエリア構築やシステム構成について検証するため、受信電力の実測データを基に、設計値との差分を評価する。

特に、屋内基地局から屋外エリアへの漏洩の程度や、自己土地外への漏洩の程度を評価する。その際、5.3 章で示した 4.7GHz 帯電波伝搬特性に関する知見等を踏まえて分析を行う。

さらに、上記検証において、ローカル 5G のエリア構築やシステム構成に関する技術的課題を整理するとともに、それら課題の解決方策等についても考察を行う。

（1）エリア設計と実測値との差分の評価手法

今回の技術実証試験では、鉄道車両基地におけるエリア構築として、屋外基地局による屋外エリア形成と、屋内基地局による屋内エリア形成について、エリア設計値と下り受信電力の実測値との差分による評価を実施した。

屋外エリアについては、線路方向に指向性を持つアンテナを線路脇 4m 程度の高さに設置することで、線路上、約 150m を縦長にカバーするよう設計した。今回、エリア設計に

は、レイトレーシング法[19]を用いており、基地局設置場所の周囲の環境についても考慮している。

屋内エリアについては、無指向性アンテナの屋内基地局を検査庫内高さ 3.1m に設置し、アンテナ設置位置から半径 10m 内をターゲットエリアとした。今回、屋内エリア設計は、株式会社東陽テクニカ/iBwave Solutions,Inc.殿の協力の基、5G 対応 RF システム設計ソリューション「iBwave Design Enterprise[20]」を用いており、実際の検査庫の壁等の素材等も考慮したシミュレーションを実施した。

(2) 屋外エリアの評価

図 5.4.3-5 にエリア設計図を示す。エリア設計図において、青色のメッシュがカバーエリア（受信電力-84.6dBm 以上）、緑色のメッシュが調整対象区域（受信電力-84.6dBm~91.0dBm）を示す。また、図 5.4.3-6 には、屋外基地局周辺で測定した受信電力から判定した、想定カバーエリア（図中青線内い）と想定調整対象区域図（図中緑線内）を示す。

エリア設計図と測定結果は、よく一致しており、想定通りのエリアが構築できていることがわかる。

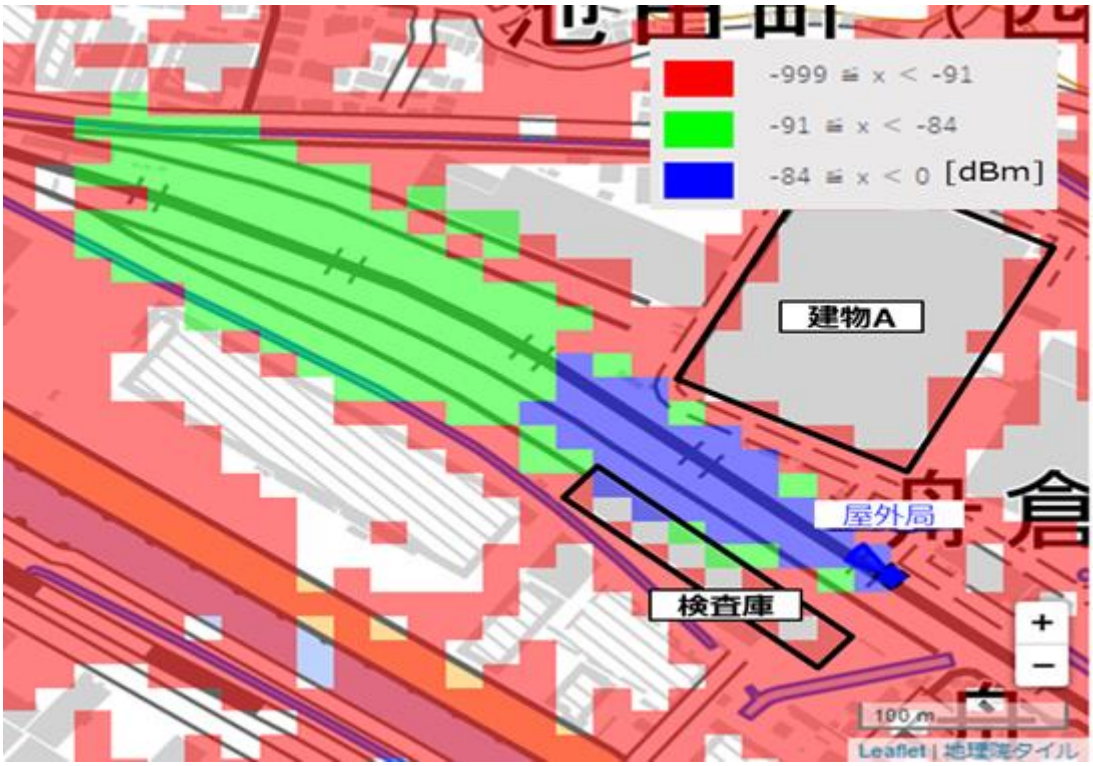


図 5.4.3-5　屋外基地局のエリア設計図

[19] レイトレーシング法は、送信点から出射された電波をレイ（光線）とみなしてトレース（追跡）し、受信点に到達したレイから受信電力などの伝搬特性を求めるものである。（今井哲郎：電波伝搬解析のためのレイトレーシング法,コロナ社(2016)）

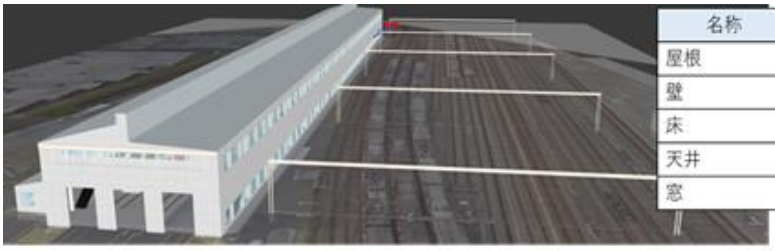
[20] https://www.toyo.co.jp/ict/products/detail/iBwave-DesignEnterprise.html

図 5.4.3-6　屋外基地局周辺の受信電力値から推定したエリア図

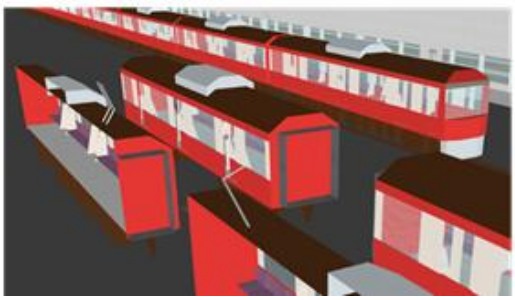
（3）屋内エリアの評価

屋内エリアの設計においては、iBwave を用いて、検査庫の建物素材や、検査庫内の什器類（今回は、電車車両のみを考慮した）を考慮した、レイトレーシング法によるエリアシミュレーションを実施している。

図 5.4.3-7 に、iBwave でシミュレーションを実施するにあたり作成した、検査庫建物および電車車両の 3D モデルを示す。



名称	材質
屋根	金属
壁	コンクリート(基礎)+金属
床	コンクリート
天井	金属
窓	ガラス



名称	材質
車両外装	金属
座席	ナイロン+ベークライト
床	金属
窓	ガラス

図 5.4.3-7　検査庫及び電車車両の 3D モデル

今回、検査庫内での下り受信電力値の測定は、電車車両が存在する状態で実施したものの、車両の出入りがある状態で実施せざるを得なかったため、車両数は常時同じだったわけではないことに留意が必要である。iBwave によるシミュレーションでは、電車車両数の違いによる影響度合いについても比較している。

図 5.4.3-9 にiBwaveによるエリア設計値と実測値の比較を示す。設計値、実測値共に、青色がカバーエリア（受信電力-84.6dBm 以上）、緑色が調整対象区域（受信電力-84.6dBm~-91.0dBm）を示している。エリア設計図と測定結果は、よく一致しており、想定通りのエリアが構築できていることがわかる。

図 5.4.3-9 には、iBwave において、電車車両数によるエリア変化をシミュレートした結果をを示す。シミュレーション結果より、電車車両数が増加するにつれて、青色のエリアが縮小していく様子が見える。従って、検査庫内を広くカバーするためには、電車車両の影響も踏まえて、屋内基地局の設置位置等の最適化が必要になると考えられる。

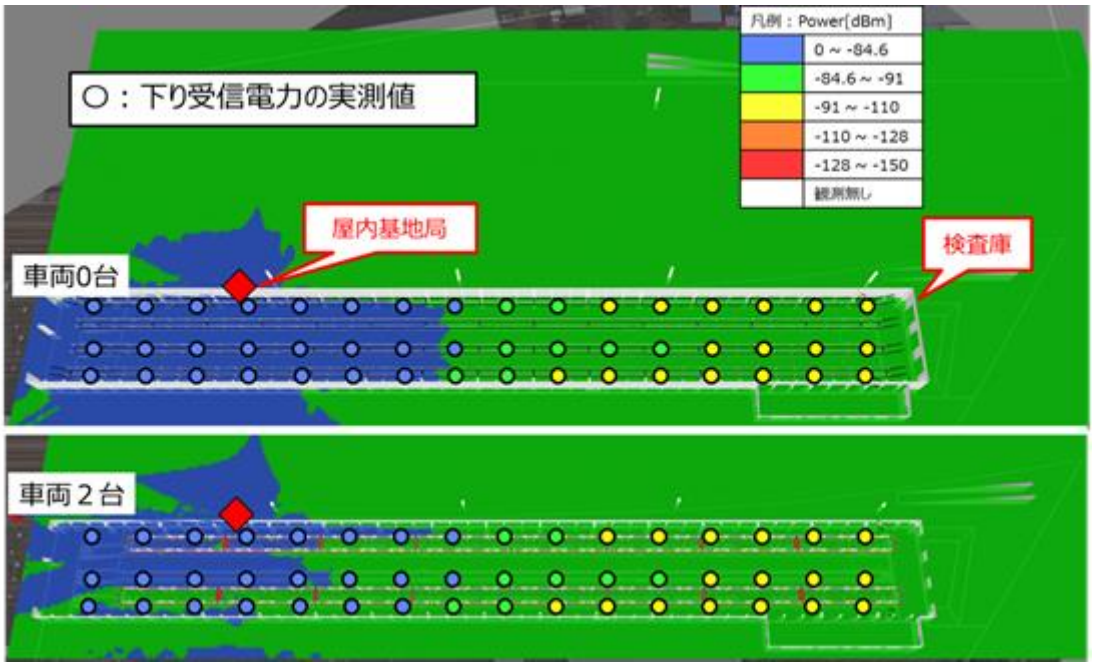


図 5.4.3-8　屋内基地局における設計値と実測値の比較

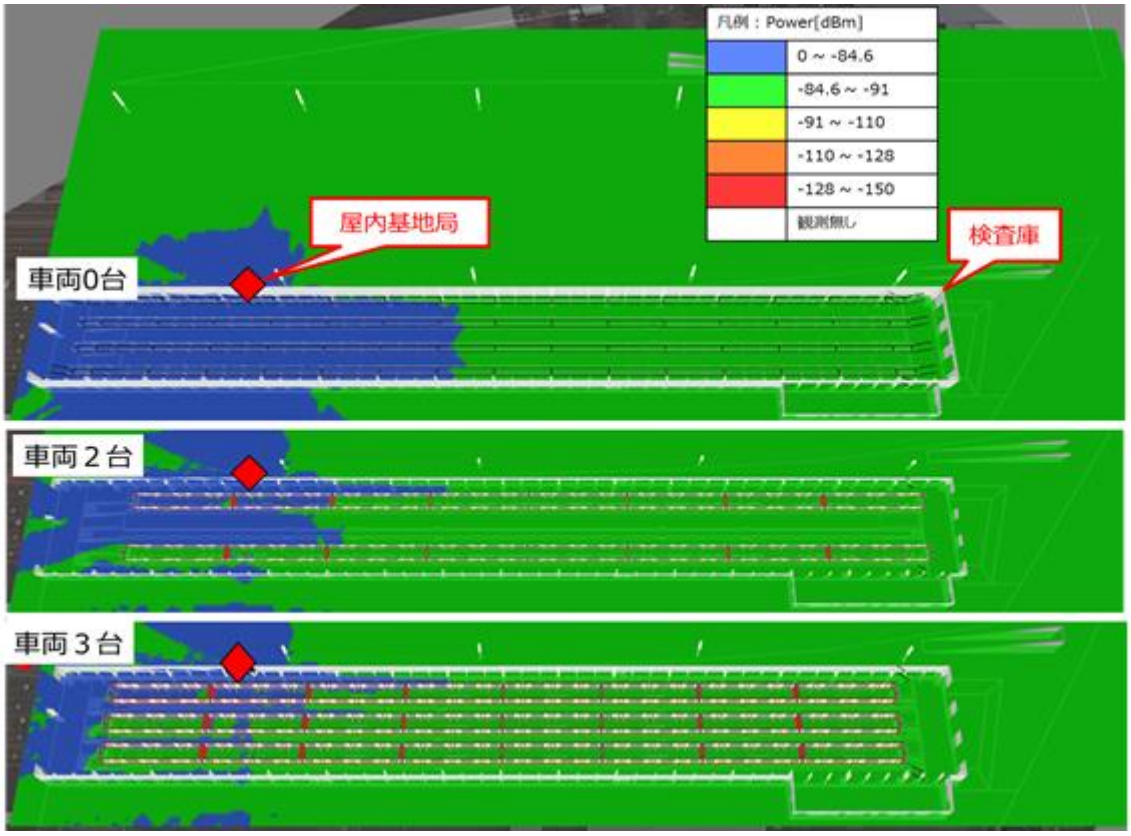


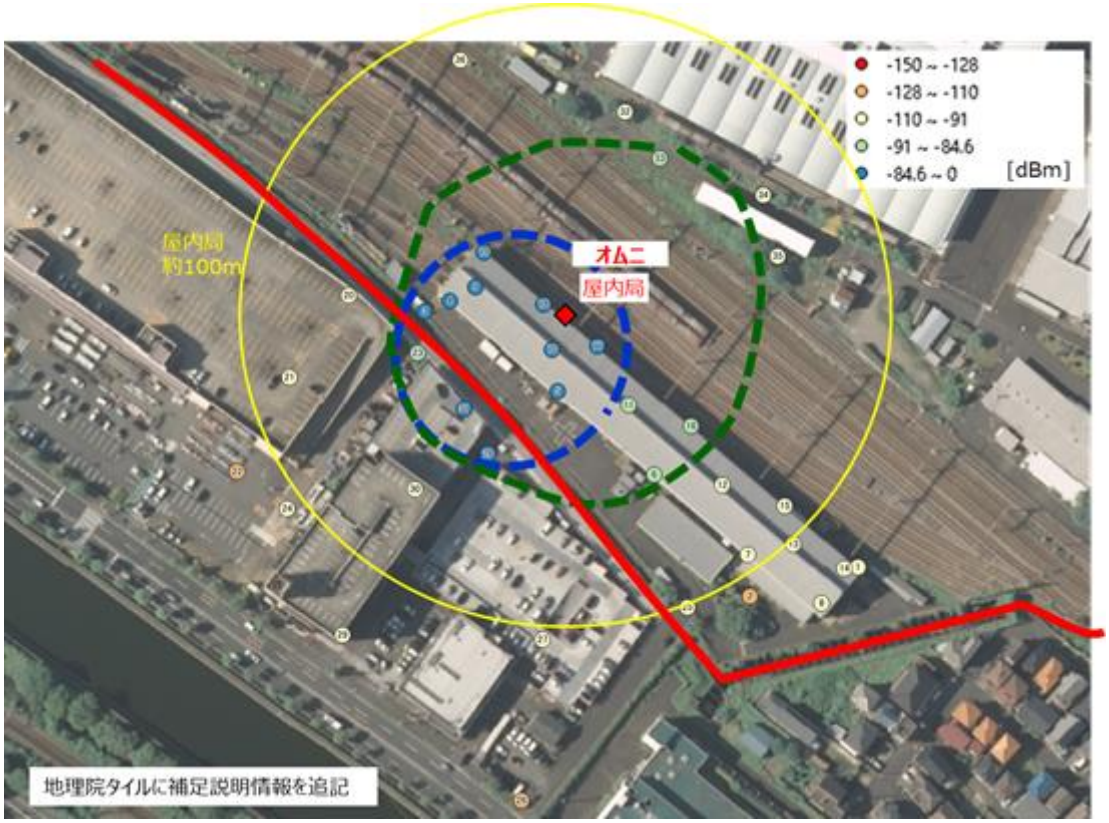
図 5.4.3-9　iBwave による電車車両数によるエリア影響度合いのシミュレーション結果

（4）屋内環境から屋外環境、自己土地外への漏洩電力について

屋内基地局からの受信電力を測定した結果を用いて、屋内から屋外へ、さらに、自己土地外への漏洩がどの程度であるかについて考察した。

図 5.4.3-10 に屋内基地局の下り受信電力測定結果を示す。検査庫南側のエリア（図中、赤線より南側）が自己土地外になるが、図からは、自己土地外の数十 m 程度のエリアへ、調整対象区域端端レベル（-91.0dBm）以上の電力が漏洩していることがわかる。

屋内基地局のある検査庫は、自己土地の南端に位置しているため、自己土地外・境界線外への漏洩電力を完全に抑え込むことは難しいが、検査庫の南側の壁（図 5.4.3-11）による損失を活かすことができれば、改善できる可能性がある。



(a)屋内基地局周辺の下り受信電力測定結果

(b)自己土地外における下り受信電力測定結果

図 5.4.3-10　屋内基地局の受信電力測定結果

図 5.4.3-11　屋内基地局から南方向の検査庫外の環境

そこで、検査庫の壁による減衰がどの程度あるかを推定するため、検査庫内の南側の測定点（#4 と#5）と、検査庫外近傍の測定点（#3、#28、#31）における下り受信電力から、当該測定地点までの自由空間伝搬損との差分を計算した結果を表 5.4.3-1 に示す。計算結果からは、検査庫の建物侵入損は、約 11.2dB と推定される。

情報通信審議会[21]での報告によると、今回の対象周波数である 4.7GHz 帯における建物侵入損は、表 5.4.3-2 の通りであり、壁の材質にもよるが、一般的な材質の壁であれば、4.2dB～16.2dB の減衰が期待できるとされている。今回の推定結果は、概ね、情報通信審議会の報告の範疇に入っていると考える。

従って、屋内基地局の場合は、壁の材質も含めて、適切に選択すれば、調整対象区域レベルである-91.0dBm 以下に漏洩電力値を抑えることが期待できる のではないか。

また、既設の建物については、壁の材質等を変更することはコスト的、構造的に困難な場合があると考えられるが、近年では、情報セキュリティの観点からも電磁波シールド施工が広まっているため、そのような対策を活用することも有効であると考えられる。

表 5.4.3-1　検査庫内外における下り受信電力値からの損失差分

	下り受信電力実測値[dBm]	備考
屋内平均	-69.8	#4,#5 の平均
屋外平均	-81.0	#3,#28 の平均
推定建物侵入損	11.2[dB]	=屋内平均-屋外平均

[21] 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（2020 年 7 月 14 日）

表 5.4.3-2　4.7GHz 帯おける建物侵入損

建物の種別※	建物侵入損の期待値			
	5%	10%	20%	50%
Traditional	4.2dB	6.0dB	8.8dB	16.2dB
Thermally-efficient	13.3dB	16.6dB	21.0dB	31.4dB

※Thermally-efficient : 金属化ガラス（断熱効果を高めるために使用する建築用の紫外線を遮断するガラス）、金属ホイルを裏打ちしたパネルを用いた建物。

Traditional：上記以外の建物

5.4.4 技術的課題の解決方策

今回の技術実証試験において、鉄道車両基地環境におけるローカル 5G のエリア構築に関して、以下の知見が得られた。

- ✧ 鉄道車両基地の屋外環境は見通し環境であるため、屋外エリアについては、安全性に配慮した上で、屋外基地局設置場所を線路脇に確保すれば、比較的容易に良好なエリア構築ができる。
- ✧ 検査庫内については、複数の電車車両が停車しているものの、屋内基地局 10m 以内の近傍エリアでは、良好な品質を得られた。屋内エリアを広くカバーするには、電車車両により電波が遮られた状態でも良好なエリア構築を可能とするための対策が必要である。
- ✧ 屋内エリアから自己土地外への電波漏洩については、自己土地外数十 m の範囲で強めの電力が漏洩していた。自己土地外への漏洩電力値を調整対象区域端レベル以下に抑えるには、基地局の設置位置などの最適化をする必要がある。

5.4.5 更なる技術的課題等

今回の技術実証試験は、限定的な環境において実施したものであり、より一般的な視点での鉄道インフラ分野におけるローカル 5G サービスエリア形成に関しては、以下のように、更なる課題があると考えられる。

- ✧ 比較的長い距離の線路上をカバーする場合

  今回のように、屋外見通し環境の鉄道線路上の 150m程度のエリアをターゲットとする場合は、大きな問題なく対応できるだろう。しかし、比較的長い距離の鉄道線路上を隙間なくカバーしたい場合は、いくつかの課題があると考えられる。一般的には、複数のローカル 5G 基地局を設置して、連続的なエリア形成を行うことが考えられるが、この方法には 2 つの課題がある。1 つは、他者土地への電波漏洩である。すなわち、サービスエリアの周囲に、広い自己土地内スペースを連続的に確保でき

なければ、他のローカル 5G 免許人との調整が発生し、所望する仕様でサービスを提供できない可能性があるということである。もう 1 つは、コストの問題である。ローカル 5G はコストを低く抑えつつ、高品質を確保することに価値があると考えられるため、単純に基地局数を増やすのであれば、ローカル 5G ではなく、携帯事業者の 5G を利用すればいいはずである。従って、比較的長い距離のエリアを、電波漏洩を抑えつつ、できるだけ低コストでカバーする手法を確立することが、今後の課題となる

✧ 電車車両が停車している環境でエリア構築する場合

今後、ローカル 5G を屋内エリアにおいて活用する事例が増えて来ると考えられる。今回の検査庫内でのエリア構築だけではなく、工場やオフィス等においてエリア構築をする際にも同じことが言える。屋内環境では、今回の電車車両に限らず、様々な什器等が遮蔽物となるうえ、それらの遮蔽物は、設置場所が頻繁に変わることが想定される。そのため、どのような環境においても適用可能な、万能な対策を確立することは難しいのではないか。従って、このような課題への対策としては、できるだけ柔軟に基地局の設置位置を変えたり、電波の到来方向を変えたりできる技術的方策や、制度的方策を確立することではないか。前者については、現時点では、制度的に認められてはいないため、将来的に制度改正がなされた場合の方策となるが、小電力レピータや陸上中継移動局のような、基地局からの電波を中継する装置を使う方策が考えられる。その他、現行の電波法施行規則や電波法関係審査基準で定義されている「無給電中継装置」に分別される、いわゆる反射板を適切に設置する等の方策も有効と考えられる。さらに、基地局の設置位置を変える場合、小電力レピータや陸上移動中継局を使用する場合、反射板を使用する場合このような手法を選択する場合に、毎回、免許変更手続きなどをしなくて済むような柔軟な制度を確立することが重要である。

5.5 その他、ローカル 5G に関する技術実証（課題ウ）

5.5.1 評価・検証項目

検討対象である 4.7GHz ローカル 5G バンドの隣接帯域には、携帯電話事業者のキャリア 5G バンドが存在する（図 5.5.1-1 参照）。従って、ローカル 5G 事業者が設置するローカル 5G 基地局の周辺には、隣接帯域で運用している携帯電話事業者によるキャリア 5G 基地局が存在する可能性がある。さらに、ローカル 5G 同士は、同一周波数もしくは隣接周波数において、近接した状況で運用される可能性もあるだろう。

4.7GHz 帯における 5G システムは TDD システムであるため、隣接周波数であれば、近接した状況においても、同期運用の場合には、有害な混信が発生することはないと考えられる。しかし、後述するように、準同期運用を行う場合には、一定の割合で干渉が発生すると考えられる。

従って、ローカル 5G 事業者が所望する性能を得るためには、隣接帯域のキャリア 5G、隣接及び同一帯域のローカル 5G との間で必要な離隔距離、ガードバンド等を事前に把握し

ておくことが望ましい。

ここでは、準同期運用における共存可能性検討を技術的課題として検討する。

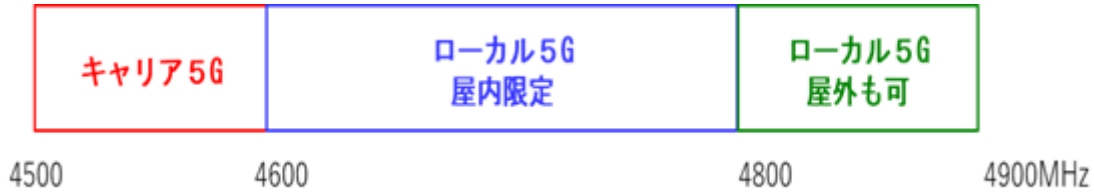


図 5.5.1-1　4.7GHz ローカル 5G バンド

5.5.2　評価・検証方法

ローカル 5G と隣接帯域におけるキャリア 5G の共存可能性の検討は、以下のステップで、机上検討により行う。

ステップ 1：共存可能性を検討するための前提条件（共用検討パラメータ等）の整理

ステップ 2：共用検討を実施する干渉シナリオの整理

ステップ 3：干渉計算の実施（机上検討）

ステップ 4：共存条件の策定及び技術的課題の解決方策等の考察

5.5.2.1 前提条件の整理（ステップ 1）

（1）共用検討に用いる基地局、移動局のパラメータ

共用検討における前提条件を表 5.5.2-1 に示す。

表 5.5.2-1　主な前提条件

項目	ローカル 5G	キャリア 5G
運用周波数 （中心周波数） (MHz)	4650	4550
送信帯域幅 (MHz)	100	100
運用場所	屋内のみ	屋外及び屋内
同期パターン （図 5.5.2-1）	準同期 （図 5.5.2-1 パターン 2）	準同期 （図 5.5.2-1 パターン 1）

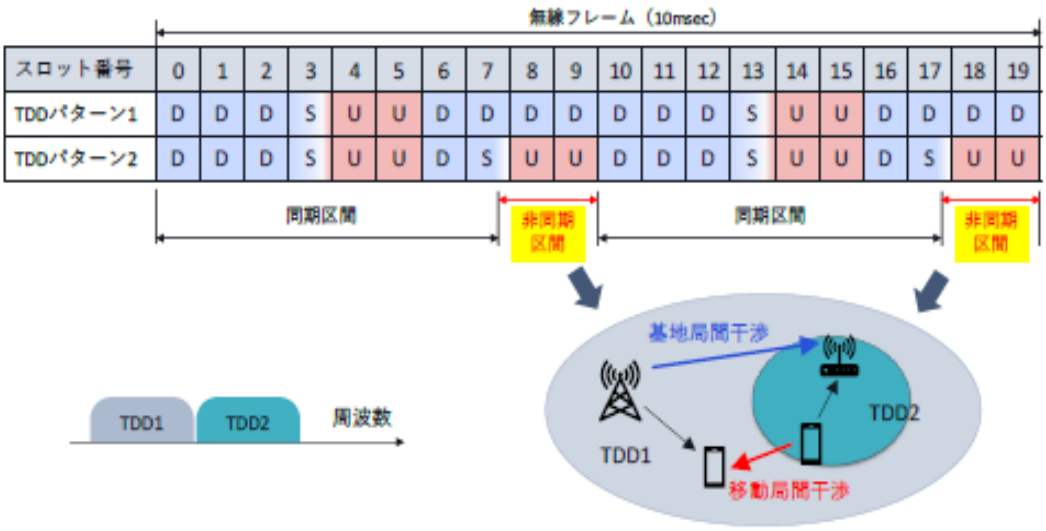


図 5.5.2-1　4.7GHz 帯における同期パターン

（2）共用検討に用いる基地局、移動局のパラメータ

共用検討に用いるパラメータを、表 5.5.2-2～表 5.5.2-3 及び図 5.5.2-2~図 5.5.2-5 に示す。キャリア 5G とローカル 5G の共用検討パラメータは、運用周波数を除いて同一とする。

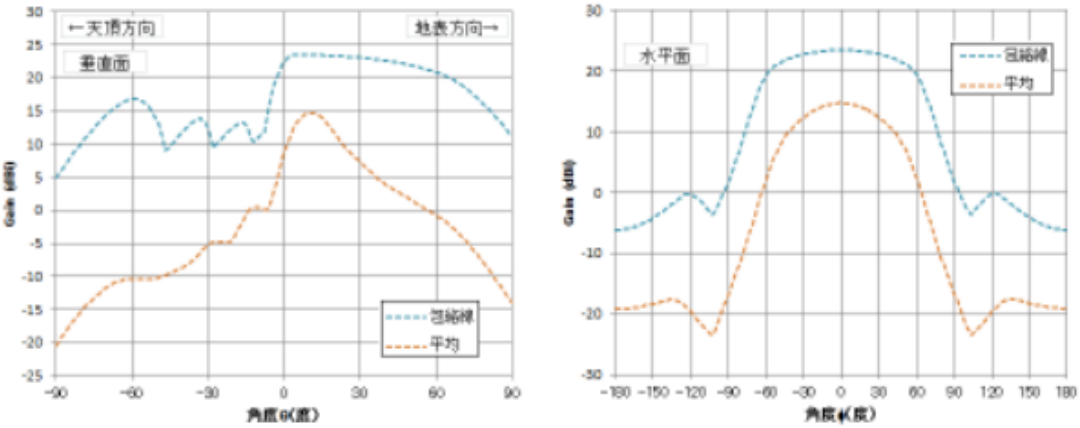
表 5.5.2-2　基地局の共用検討パラメータ等[22]

諸元	マクロセル	スモールセル/屋内
周波数（MHz）	キャリア 5G：4550 ローカル 5G：4650	
送信帯域幅（MHz）	100	
空中線電力（dBm/MHz）	28	5
空中線利得（dBi）	23	
給電線損失等（dB）	3	
EIRP (dBm/MHz)	48	25

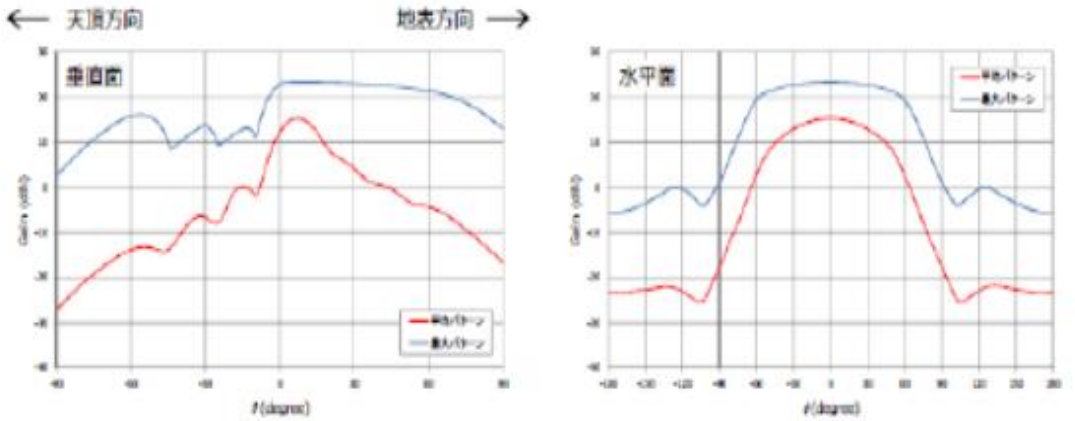
[22] 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（2020 年 7 月 14 日）第 4.4.2 章（P128-133）

空中線指向特性 (水平、垂直)		図 5.5.2-2	
機械チルト (°)		6	10
空中線高 (m)		40	10 5（屋内）
不要輻射[23]	隣接 CH 漏洩電力	[情通審のパラメータ] 下記又は-4dBm/MHz の高い値 -44.2dBc(CH 帯域幅 MHz 離調) -44.2dBc(2×CH 帯域幅 MHz 離調) ※参照帯域幅は当該 CH 帯域幅の最大実効帯域幅 [実測値] 図 5.5.2-3（マクロ、スモール）、図 5.5.2-4（屋内）	
	スプリアス領域 における不要 発射強度	[情通審のパラメータ] -4dBm/100kHz (30MHz-1GHz) -4dBm/MHz (1GHz 以上) (周波数帯の端から 40MHz 以上の範囲に適用) [実測値] 図 5.5.2-3（マクロ、スモール）、図 5.5.2-4（屋内）	
許容干渉 電力[24]	帯域内干渉 (dBm/MHz)	-115 (I/N=-6dB、NF=5dB)	-110 (I/N=-6dB、NF=10dB)
	帯域外干渉 (dBm)	-52d (隣接 20MHz 幅) -43 (上記以外)	-47 (隣接 20MHz 幅) -38 (上記以外)

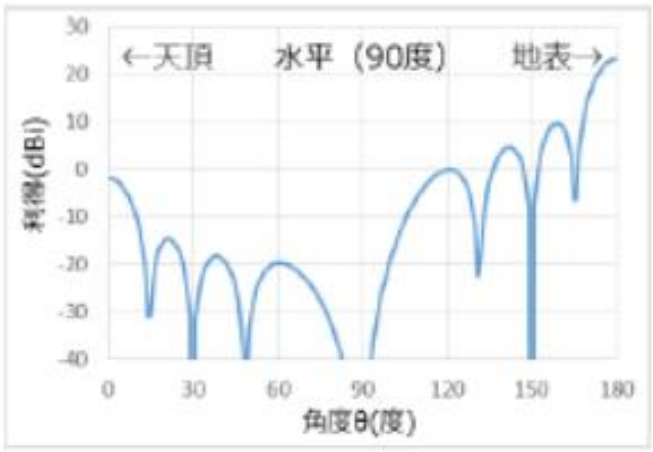
[23] 3GPP TS38.104
[24] 3GPP TS38.104



（a）マクロセル基地局の空中線指向性特性（チルト 6 度）



（b）スモールセル基地局の空中線指向性特性（チルト 10 度）



（c）屋内基地局の空中線指向性特性（チルト 90 度（下向き））

図 5.5.2-2　基地局の空中線指向性特性

表 5.5.2-3　移動局の共用検討パラメータ等[25]

諸元		移動局
周波数（MHz）		キャリア 5G：4550 ローカル 5G：4650
送信帯域幅（MHz）		100
空中線電力（dBm）		最大送信電力：23 確率計算においては、図 5.5.2-5 の累積分布を使用
空中線利得（dBi）		0
給電線損失等（dB）		0
空中線指向特性 (水平、垂直)		無指向性
空中線高（m）		1.5
不要輻射[26]	隣接 CH 漏洩電力	下記又は-50dBm/3.84MHz の高い値 -33dBc(CH 帯域幅/2+2.5MHz 離調) -36dBc(CH 帯域幅/2+7.5MHz 離調) 下記又は-50dBm/CH 帯域幅 MHz の高い値 -30dBc(CH 帯域幅 MHz 離調)
	スプリアス領域における不要	-36dBm/1kHz (9kHz-150kHz) -36dBm/10kHz (150kHz-30MHz)

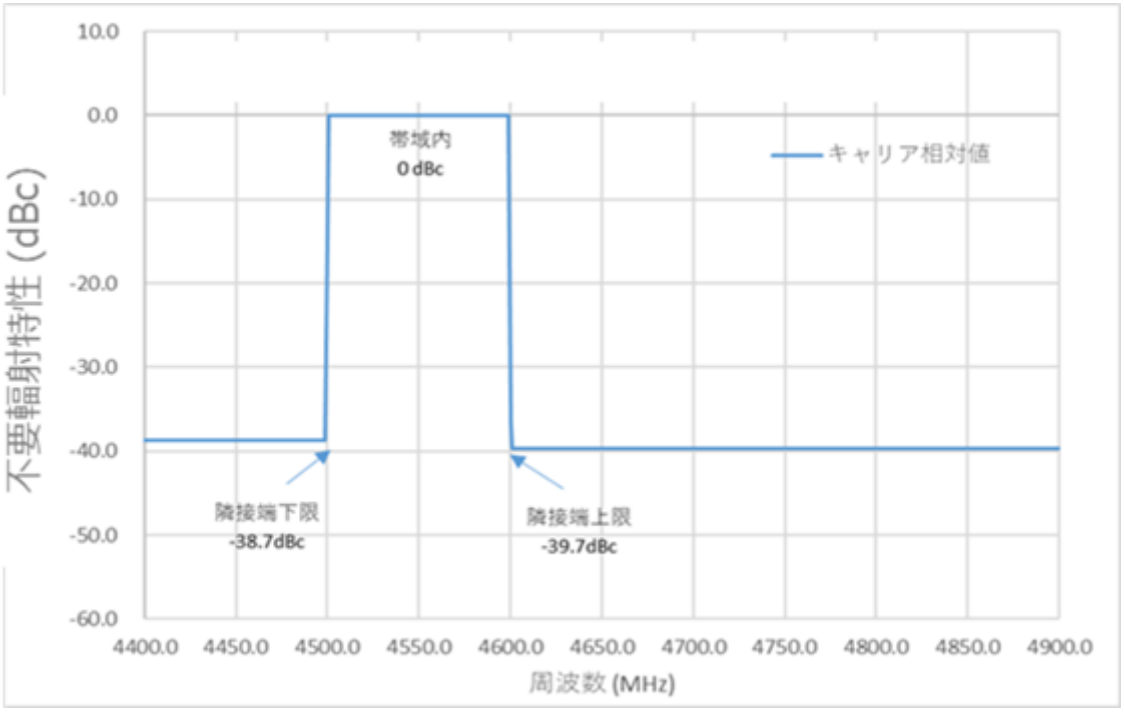
[25] 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（2020 年 7 月 14 日）第 4.4.2 章（P128-133）

[26] 3GPP TS38.101-1

	発射の強度	-36dBm/100kHz（30MHz-1GHz） -30dBm/MHz（1GHz-）
その他損失（dB）		8 （人体吸収損）
許容干渉電力[27]	帯域内干渉	-111dBm/MHz(I/N=-6dB、NF=9dB)
	帯域外干渉	-40dBm (CH 帯域幅と同一幅の隣接干渉波)

各パラメータは、基本的に情報通信審議会で用いられている値であるが、基地局の不要輻射値には、実測した基地局送信スペクトラム（図 5.5.2-3～図 5.5.2-4）、移動局の送信電力分布には、実測した移動局送信電力のデータ（図 5.5.2-6）を引用することで、より実フィールドに近い検討を行う。

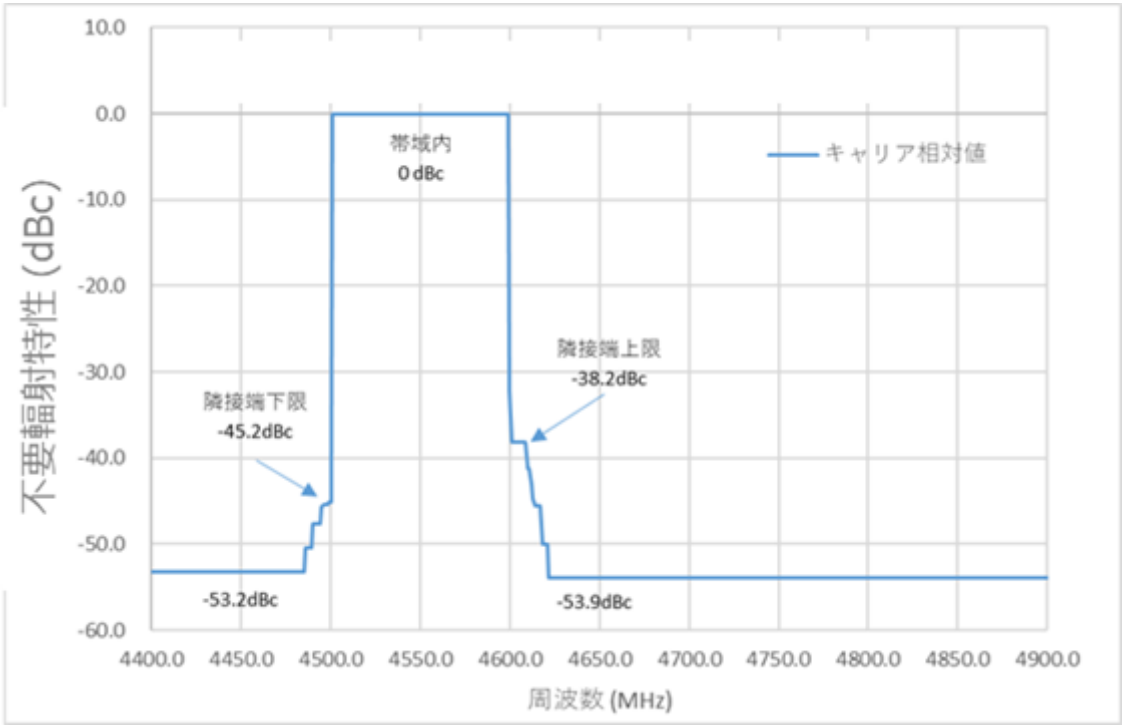
基地局送信スペクトラムについては、図 5.3.3-3 に示す Anritsu ハンドヘルドスペクトラムアナライザ MS2720T を用いて、基地局近傍において測定した。移動局送信電力値は、図 5.3.3-4 に示す Sigma-ML を用いて 3 回測定し、平均を採用した。



※キャリア 5G バンドによる測定値。共用検討では 100MHz 周波数を上側にシフトして使用した。

図 5.5.2-3 実測した屋外基地局送信スペクトラム

[27] 3GPP TS38.101-1



※キャリア 5G バンドによる測定値。共用検討では 100MHz 周波数を上側にシフトして使用した。

図 5.5.2-4　実測した屋内基地局送信スペクトラム

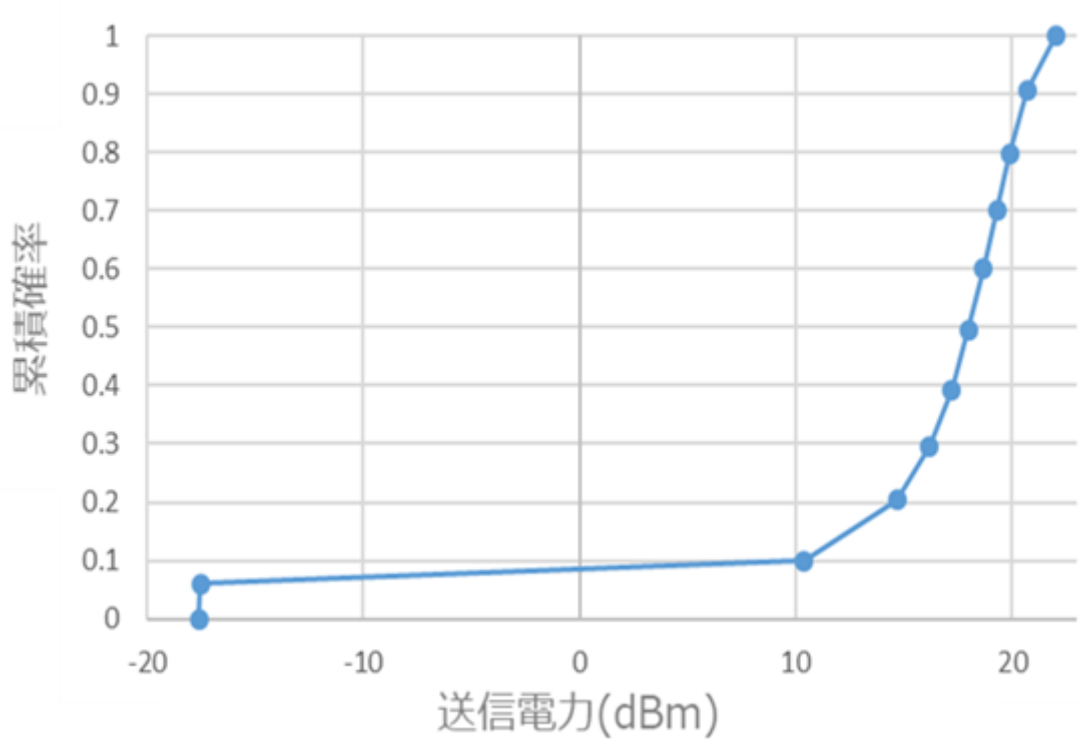


図 5.5.2-5　実測した屋内における移動局送信電力累積分布

5.5.2.2 検討する干渉シナリオ（ステップ 2）

情報通信審議会報告書[28]では、ローカル 5G が準同期運用する場合に生じうる干渉シナリオとその影響度合いについて、下表のように考察している。

表 5.5.2-4　情報通信審議会での準同期運用時の検討結果（抜粋）

想定される運用ケース	情報通信審議会報告書における考察
隣接周波数で 準同期運用する場合	【基地局間干渉】 準同期運用の基地局が、同期運用の基地局から干渉を受けることとなるが、準同期運用の基地局アンテナの向きや離隔の確保、遮蔽対策等を行うことで、干渉を低減することはできると考えられる。 【移動局間干渉】 確率統計的に共存可能と判断できるが、双方が近接したまま与干渉局が大きな送信電力で連続的に通信を行うような特殊な状況が起こると、被干渉局の性能が劣化する可能性もある。これを避けるためには、極端な近接を避けることや、与干渉局の送信電力を低く抑えるなどの方策が有効である。
同一周波数で 準同期運用する場合	【基地局間干渉】 屋外⇒屋外の場合、準同期運用の基地局が、同期運用の基地局から干渉を受けることとなるが、準同期運用の基地局アンテナの向きや離隔の確保、遮蔽対策等を行うことで、干渉を低減することはできると考えられる。 【移動局間干渉】 屋外⇒屋外の場合、見通し内では所要離隔距離は 400-600m 程度となるが、見通し外では、最大で 10m 程度。見通し外となるようなサイトエンジニアリングや通信環境を良好にすることで移動局の送信電力が大きくならないようなサイト構築、移動局の送信電力制御をすることで等の調整で、更なる離隔の短縮が期待される。

情報通信審議会での検討結果を踏まえ、ローカル 5G が準同期運用する場合の課題は、以下の 2 点と考えられる。

- ✧ 基地局間干渉において、同期運用基地局から準同期運用基地局へ与える干渉影響の程度を定量的に検討し、取りえる具体的な対策を検討すること
- ✧ 移動局間干渉において、移動局が連続的に高い送信電力で送信するかどうかの見極めと、対策を検討すること

[28] 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（2020 年 7 月 14 日）第 4.2.3、4.2.4 章

上記の検討課題を踏まえ、基地局間干渉については、図 5.5.2-6 に示す干渉シナリオを設定し、各シナリオにおける干渉影響度合いの定量的な検討と対策を検討する。

一方、移動局間干渉については、まずは、技術実証フィールドで実測した移動局送信電力データを分析し、過去の情報通信審議会における前提条件との比較を行う。そのうえで、必要に応じて、図 5.5.2-7 に示す干渉シナリオで干渉影響の定量的な検討を実施し、対策の検討を行う。

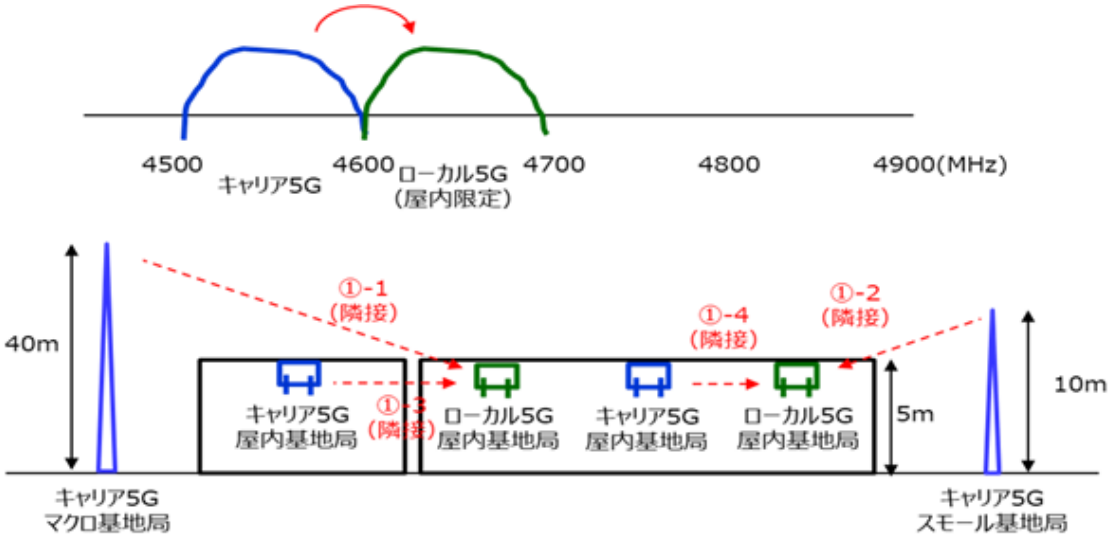


図 5.5.2-6　基地局間干渉シナリオにおける検討モデル

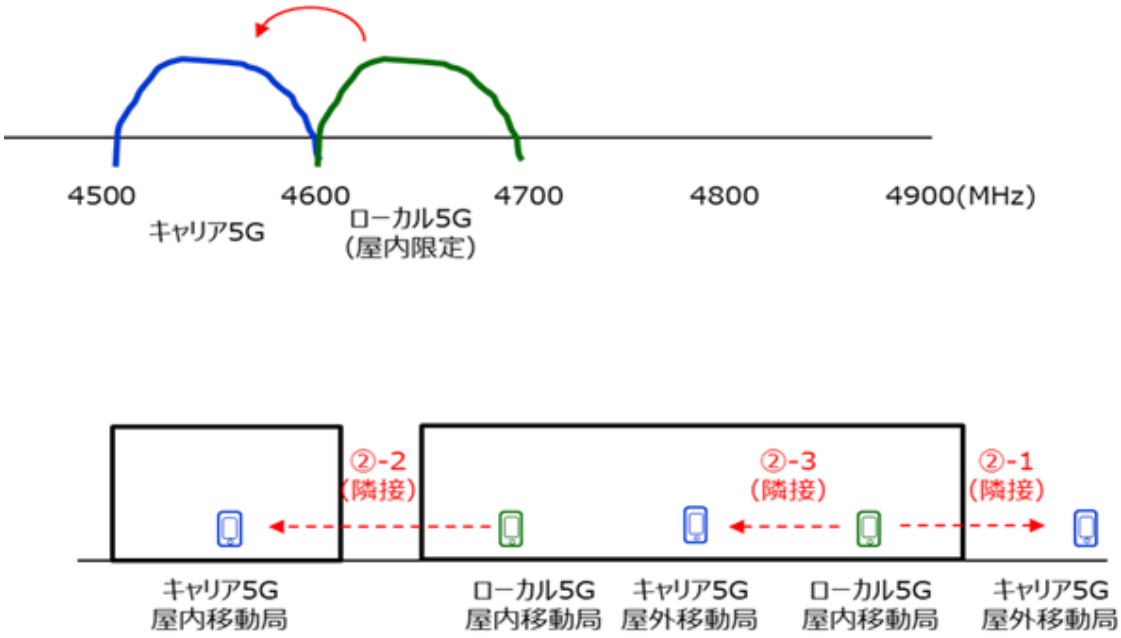


図 5.5.2-7　移動局間干渉シナリオにおける検討モデル

5.5.2.3 干渉検討（ステップ 3）

干渉検討においては、情報通信審議会報告書[29]と同様に、基地局間の干渉シナリオについては、1 対 1 対向モデル、移動間の干渉シナリオについては、1 対 1 対向モデル、及び、モンテカルロシミュレーションによる確率計算を実施する。

ここで、前述したように、技術実証フィールドで取得した実データを加味することにより、実際のフィールド環境に即した定量的な検討を行う。具体的には、基地局間の干渉シナリオにおいては、技術実証フィールドで実測した基地局送信スペクトラムを参考に隣接 CH 漏洩電力値を設定することで、現実のフィールドにおける干渉影響度合いの考察を行う。移動局間の干渉シナリオにおいては、技術実証フィールドで実測した移動局送信電力の累積分布を用いて、従前の情報通信審議会の検討結果との差分を考察する。その上で、必要に応じて、1 対 1 対向モデルでの検討や確率計算を行う。

表 5.5.2-5~表 5.5.2-6 及び図 5.5.2-7 に各手法における設定を示す。

表 5.5.2-5　1 対 1 対向モデルの設定

項目	基地局―基地局間干渉	移動局―移動局間干渉
電波伝搬式	自由空間伝搬	
検討モデル	正対モデル	
水平離隔距離	3m	1m

表 5.5.2-6　確率計算モデルの設定

項目	パラメータ
計算ソフトウェア	SEAMCAT 5.3.0
試行回数	2 万回
検討エリア半径	100m
保護エリア半径	-
移動局台数	可変値とした
移動局高度	1.5m
干渉確率	3%以下（累積 97%値で許容干渉レベル以下）
伝搬モデル	自由空間伝搬

[29] 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告（2020 年 7 月 14 日）第 4.2 章

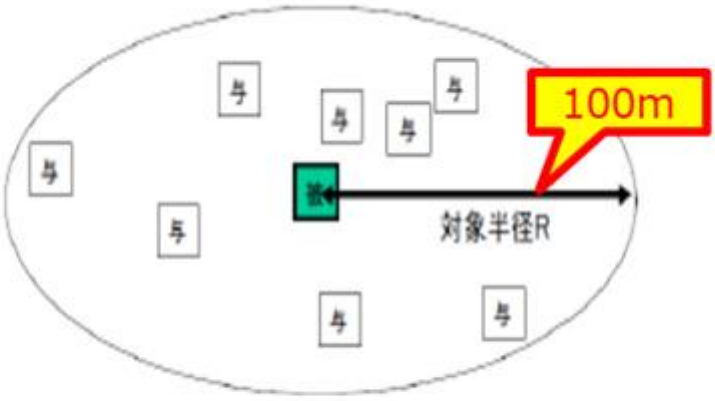


図 5.5.2-8　モンテカルロシミュレーションの計算モデル

5.5.2.4 共存条件の策定及び技術的課題の解決方策等の考察（ステップ 4）

干渉検討結果を基に、共存条件を検討し、技術的課題の整理、解決策の検討等を実施する。

5.5.3 検証結果

5.5.3.1 基地局間干渉シナリオ

基地局間干渉シナリオでは、4500-4600MHz 帯において、同期モード（図 5.5.2-1 のパターン 1）で運用されているキャリア 5G 基地局（屋外及び屋内）から、隣接周波数帯である 4600-4700MHz 帯において準同期モード（図 5.5.2-1 のパターン 2）で運用されているローカル 5G 基地局（屋内）への干渉影響を、1 対 1 対向モデルで計算した。互いのアンテナは水平離隔距離 3m で正対している前提とし、結合損が最小となる離隔距離で計算した。

キャリア 5G 基地局としては、マクロ局（屋外）とスモール局（屋外、屋内）を選択した。一方、ローカル 5G 基地局としては、4600-4700MHz 帯が屋内限定バンドであるため、スモール局（屋内）を選択した。

表 5.5.3-1 に、基地局間干渉シナリオにおける共用計算結果（1 対 1 対向モデル）を示す。計算結果からは、以下のことがわかる。

- ローカル 5G 基地局が、屋内において準同期で運用する場合、運用場所の屋外、周囲約 170m 以内に、キャリア 5G 基地局（マクロ局）が存在する場合、キャリア 5G 基地局のアンテナパターンによっては、ローカル 5G 基地局への干渉影響が発生する可能性がある（①-1）。
- さらに、周囲約 30m 以内に、キャリア 5G 基地局（スモール局）が存在する場合も、キャリア 5G 基地局のアンテナパターンによっては、ローカル 5G 基地局への干渉影

響が発生する可能性がある（①-2）。

・ 一方、キャリア 5G 屋内局については、たとえ、ローカル 5G 屋内局と同一屋内に設置されていたとしても、大きな問題は発生しないと考えられる（①-3&4）。

表 5.5.3-1　基地局間干渉シナリオにおける共用計算結果（1 対 1 対向モデル）

#	ANT パターン	不要輻射レベル	帯域内干渉			帯域外干渉		
			与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離[m]	与干渉量 [dBm]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離[m]
①-1	平均	情通審	-110.1	-0.1	-	-58.1	-11.3	-
		実測値	-117.8	-7.8	-	-58.1	-11.3	-
	最大	情通審	-94.0	16.0	173.0	-42.0	5.0	119.0
		実測値	-101.7	8.3	129.0	-42.0	5.0	119.0
①-2	平均	情通審	-110.7	-0.7	-	-69.6	-22.6	-
		実測値	-129.4	-19.4	-	-69.6	-22.6	-
	最大	情通審	-98.2	11.8	30.0	-57.2	-10.2	-
		実測値	-116.9	-6.9	-	-57.2	-10.2	-
①-3	無指向	情通審	-149.5	-39.5	-	-108.5	-61.5	-
		実測値	-166.7	-56.7	-	-108.5	-61.5	-
①-4	無指向	情通審	-117.5	-7.5	-	-76.5	-29.5	-
		実測値	-134.7	-24.8	-	-76.5	-29.5	-

5.5.3.2 移動局間干渉シナリオ

移動局間干渉シナリオでは、4600-4700MHz 帯において、準同期モード（図 5.5.2-1 のパターン 2）で運用されているローカル 5G 移動局（屋内）から、隣接周波数帯である 4500-4600MHz 帯において同期モード（図 5.5.2-1 のパターン 1）で運用されているキャリア 5G 基地局（屋外及び屋内）への干渉影響を検討する。

最初に、1 対 1 対向モデル（水平離隔距離 1m、正対モデル）で計算した結果を表 5.5.3-2 に示す。計算結果からは、以下のことがわかる。

- ローカル 5G 移動局が、屋内において準同期で運用する場合、ローカル 5G 移動局が運用している建物の屋外近隣においてキャリア 5G 移動局が運用している時には、1.5m の離隔距離が必要となる（②-1）。
- さらに、ローカル 5G 移動局が運用している場所と同一の屋内でキャリア 5G 移動局が運用している時には、約 9m の離隔距離が必要となる（②-3）。
- 一方、ローカル 5G 移動局が運用している建物とは異なる建物内においてキャリア 5G 移動局が運用している時には、全く問題がないと考えられる（②-2）。

表 5.5.3-2　移動局間干渉シナリオにおける共用計算結果（1 対 1 対向モデル）

#	帯域内干渉			帯域外干渉		
	与干渉量 [dBm/MHz]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離[m]	与干渉量 [dBm]	所要改善量 [dB]	所要離隔距離[m]
②-1	-107.8	3.2	1.5	-54.8	-14.8	-
②-2	-124.0	-13.0	-	-71.0	-31.0	-
②-3	-91.8	19.2	9.1	-38.8	1.2	1.2

1 対 1 対向モデルにおける計算では、特定の干渉シナリオにおいて、一定の離隔距離を確保することが必要という結果となっているが、ここでは、移動局の送信電力を最大値に設定して計算していることに留意する必要がある。さらに、②-1 のケースでは、互いの存在場所が屋内外になっている前提なので、離隔距離 1.5m の確保は、特に注意しなくても達成できる程度である。一方、②-3 のケースは、同じ空間に移動局同士が存在するという前提であるため、詳細な考察を実施する必要があるだろう。

ここでは、前述した、実際の送信電力分布を踏まえた確率検討を行うことで、現実的な干渉問題の発生可能性などについて考察する。

図 5.5.3-1 は、情報通信審議会で移動局与干渉の場合の確率計算に用いられた移動局送信電力の累積分布 であり、累積確率分布 50%値で約 8dBm の送信電力値となっている。

一方、今回技術実証フィールドで取得した移動局送信電力分布は、図 5.5.3-2 のようであり、累積確率分布 50%値で約 18dBm 程度であった。このデータは、電車車両が多数存在す

る検査庫内で取得したデータであり、一般的な屋内環境よりも送信電力値が高めに張り付いた可能性もあると考えられる。しかし、屋内環境においては、このようなケースも考えられるということを示す一例でもあるため、移動局台数をパラメータにモンテカルロシミュレーションを実施した。

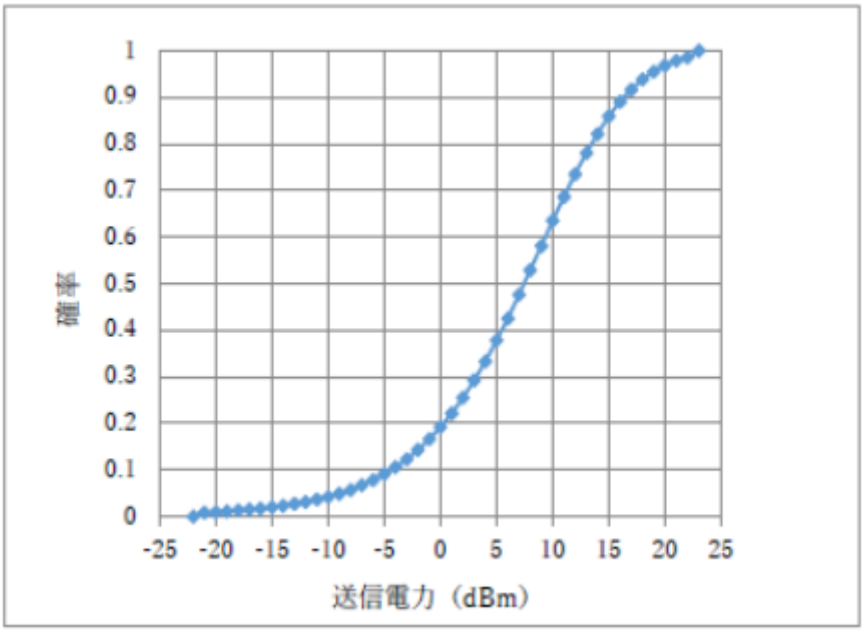


図 5.5.3-1　情報通信審議会において確率計算時に用いられた移動局送信電力累積分布

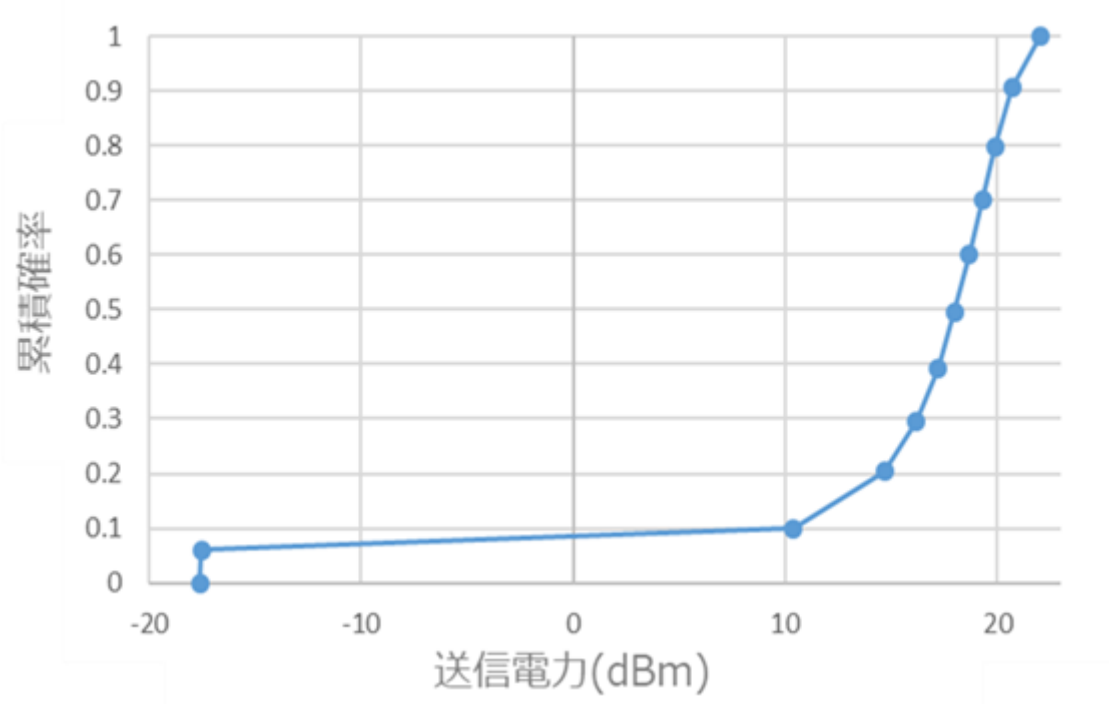


図 5.5.3-2　京急久里浜工場で取得した移動局送信電力分布

表 5.5.3-3 に、実測した移動局送信電力分布を用いて実施したモンテカルロシミュレーションの結果を示す。シミュレーションは、②-1～3 の全ての干渉シナリオについて実施した。

シミュレーション結果からは、移動局数が 1 台だけなら、全ての干渉シナリオにおいて全く問題がないことがわかる。モンテカルロシミュレーションでは、累積確率 97%値で評価を行っているため、1 対 1 対向モデルの計算で NG となった干渉シナリオ②-1 と 3 においても問題ないという結果になった。

表 5.5.3-3 には、ローカル 5G 移動局の台数を増やしていった場合に、所要改善量がプラスになる（つまりキャリア 5G 移動局に影響が出る）台数がどの程度かについても記載している。シミュレーション結果からは、干渉シナリオ②-1、2 のケースでは、現実的にはあり得ない移動局台数にならないと影響が出ないことがわかる。一方、干渉シナリオ②-3 のケースにおいては、ローカル 5G 移動局数が 10 台になると、干渉影響が出る可能性があるということがわかる。

表 5.5.3-3 は、ローカル 5G 移動局台数をパラメータにした、キャリア 5G 移動局の所要改善量の変化を示している。厳密に、所要所用改善量がプラスに転ずるのは、10 台以上ではあるが、図からは、概ね 5 台以上になると所要改善量との差分がかなり小さくなっているため、ローカル 5G 運用者としては、ある程度のマージンを見込んで、ローカル 5G 移動局運用台数の管理を行った方がいいと考えられる。

表 5.5.3-3　移動局間干渉シナリオにおけるモンテカルロシミュレーション結果

#	移動局 1 台の時の所要改善量 [dB](97%値)	所要改善量がプラスになる（影響が出る）移動局台数
②-1	-26.6	350
②-2	-43.1	15,000
②-3	-10.3	10

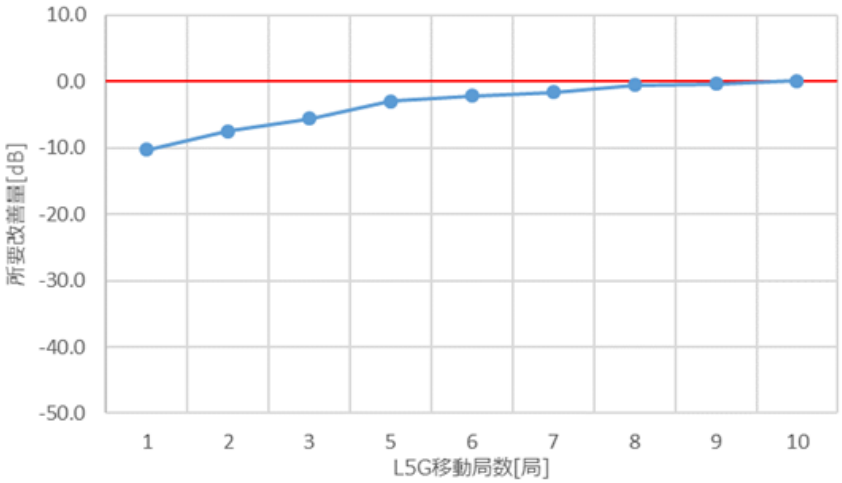


図 5.5.3-3　干渉シナリオ②-3 における移動局台数による所要改善量の変化

5.5.4 技術的課題の解決方策

4.5GHz 帯において同期運用するキャリア 5G と隣接 CH で準同期運用するローカル 5G との間で、生じうる干渉影響について考察した。その結果、以下の知見を得た。

✧　ローカル 5G 基地局の準同期運用について

基地局間干渉シナリオについて評価した結果、キャリア 5G 基地局が屋外近傍で運用されている場合は、その基地局タイプやアンテナパターンにもよるが、ワーストケースでは、周囲のキャリア 5G 基地局からの干渉影響を受ける可能性があることがわかった。

従って、ローカル 5G 運用者が準同期運用を行う場合は、ローカル 5G 基地局の周囲数百 m 以内の屋外に、キャリア 5G 基地局が存在するかどうかを目視で確認しておくことが有効だろう。準同期運用を行う場合には、キャリア 5G 免許人からの同意を得なければならないので、事前調整の困難性をできるだけ排除するという意味で、可能な限り、周囲のキャリア 5G 基地局との離隔距離を確保しておくことが有効である。

今回の検査庫のケースのように、他者土地との境界に近い場所でローカル 5G を運用せざるを得ない場合は、建物侵入損の大きい材質を積極的に利用する手もあるだろう。1 対 1 対向モデルでの計算結果からは、所要改善量は高々16dB 程度（干渉シナリオ①―1）なので、表 5.4.3-2 に示した建物侵入損の期待値からすると、Thermally-efficient に分類されるような材質を採用することで効果が見込めると考えられる。

以上のような対策においても、キャリア 5G 基地局からの影響を回避できない場合は、ローカル 5G 基地局の運用周波数をキャリア 5G の隣接である 4600-4700MHz から、4700MHz 以上に変更するということも考えられる。

✧　ローカル 5G 移動局の準同期運用について

移動局間干渉シナリオについて評価した結果、キャリア 5G 移動局が屋外近傍で運用されている状況（②―1）においては 1.5m の離隔距離を確保する必要があるという結果となった。しかし、屋内のローカル 5G 移動局と屋外のキャリア 5G 移動局は、何もしなくても 1.5m 程度の離隔距離は確保できると考えられる。また、確率計算上も、ローカル 5G 移動局数が 350 台を超えない限りは、キャリア 5G 移動局へ影響を与えないという結果であるため、このような干渉シナリオにおいては、大きな問題は生じないと考えられる。

一方、キャリア 5G 移動局とローカル 5G 移動局が同一空間で運用される状況（②―3）においては、1 対 1 対向では、約 9m の離隔距離が必要、確率計算上では、ローカル 5G 移動局の運用台数が 10 台を超えると、キャリア 5G 移動局に影響がでる、という結果となった。

検討対象としている 4600-4700MHz 帯においては、ローカル 5G は自己土地内の屋内でしか運用できないことを考慮すると、鉄道インフラ分野という限られた分野においては、キャリア 5G と同一空間内で同時運用する状況は生じないと考えられるため、大きな問題は生じないだろう。

しかし、仮に、鉄道会社が運用している屋内のローカル 5G エリア内に、一般人が立ち入れる環境があるとすれば、今回の検討結果からは、何らかの対策を施す必要があると言えるだろう。例えば、一般人の立ち入り可能エリアを制限して、離隔距離 9m 以上を確保

する、ローカル 5G 移動局の運用台数を 10 台以下に制限する等である。これらの対策が実施できないのであれば、運用周波数を 4700MHz 以上に変更するということも考えられる。

5.5.5 更なる技術的課題等

今回の検討では、ローカル 5G が屋内で運用されるという前提でキャリア 5G との共用検討を実施した。これは、現行制度上、ローカル 5G を屋外で運用する場合には、4800-4900MHz 帯を使わなければならないため、4500-4600MHz 帯で運用されているキャリア５G との間には、200MHz のガードバンドが確保され、干渉影響については、特段検討不要と考えられるからである。

鉄道インフラ分野において、ローカル 5G を活用する場合は、今回検討した検査庫内のように屋内エリアであれば、屋内ローカル 5G 基地局を用いてエリア形成するものと考えられる。一方で、屋外の線路上をカバーする場合には、屋外ローカル 5G 基地局を設置することになるだろう。

この場合には、上述したように、4800-4900MHz 帯で運用することになるため、キャリア 5G との共用検討は不要であるものの、他のローカル 5G との共存方策については、慎重に検討した方がいいだろう。特に、他のローカル 5G システムが、屋外で運用されている場合は、同一周波数で共存することになるため、どちらかが準同期モードで運用される場合は、今後、詳細に検討を行う必要があるだろう。

5.6 まとめ

鉄道インフラ分野におけるローカル 5G 等の性能評価等の技術実証において、課題ア（ユースケースに基づくローカル５G の性能評価等）として、各基地局の周囲 100m 内及びその周辺エリアにおいて、下り受信電力値、伝送スループット、RTT を実測し、実測結果より、技術実証フィールドにおける適切な電波伝搬式の選定と、ローカル 5G 性能評価等を行った。

課題イ（ローカル５Gのエリア構築やシステム構成の検証等）として、総務省提供のエリア算出法と基地局送信電力の実測値との比較検証を行い、総務省提供のエリア算定式から得られるエリア端までの距離の評価、実測値とレイトレーシング法によるエリア設計値との比較検証を通じて、エリア構築等の観点の課題抽出と解決策を検討した。

課題ウ（その他ローカル５Gに関する技術実証）として、隣接周波数帯において、同期運用するキャリア 5G と準同期運用するローカル 5G の共用検討（机上検討）を行い、互いに干渉なく運用可能となるために必要な所要改善量、所要離隔距離等を評価した。その結果、以下の知見を得ることができた。

課題ア（ユースケースに基づくローカル５G の性能評価等）

（1）鉄道車両基地等の環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性の評価

- ✧ 鉄道車両基地等の環境における 4.7GHz 帯の電波伝搬特性について、下り受信電力値の測定結果から評価したところ、屋外基地局、屋内基地局共に、概ね、奥村・秦

式（中小都市、郊外地モデル）で模擬できると考えられる。ただし、屋外の線路上等、見通しエリアについては、自由空間伝搬との一致がよいことがわかった。

(2) 鉄道車両基地屋内外環境におけるローカル 5G 性能評価

- ✧ 鉄道車両基地屋内外環境におけるローカル 5G 性能について、エリア形成の観点と、ユーザへのサービス提供品質の観点で評価を行った。前者は、4.6-4.9GHz 帯におけるローカル 5G 審査基準で定められている“カバーエリア端レベル（100MHz 幅の場合：-84.6dBm）”、“調整区域端レベル（100MHz 幅の場合：-91.0dBm）”を評価指標に下り受信電力実測値から評価した。後者については、今回の課題実証の目標地である UL 伝送スループット 30Mbps を評価指標に、伝送スループットの実測値から評価した。
- ✧ エリア形成の観点からは、屋外基地局、屋内基地局共に、想定していたターゲットエリアをきれいにカバーできていることが確認できた。一方で、調整対象区域については、屋外基地局については、自己土地内にうまく収めることができていたものの、屋内局については、実証フィールドが他者土地との境界線に近かったこともあり、電波漏洩が発生していることが確認できた。
- ✧ ユーザへのサービス提供品質の観点からは、屋外基地局、屋内基地局共に、ターゲットエリア内では、UL 伝送スループットの平均値が目標値である 30Mbps を上回っており、十分な性能を確保できていることを確認した。
- ✧ 屋外、屋内環境共に、伝送スループットと下り受信電力値は比例関係にあり、伝送スループット特性を向上するには、下り受信電力値の向上が必要であることがわかった。
- ✧ 特に、屋内環境において屋内の隅々まで、安定して良好なローカル 5G 性能を得るには、1 つの基地局に複数のアンテナユニットを接続して、異なる方向から、電波を発射することにより、屋内での電波の届きにくい環境を減らす方策、（現時点では、制度的に認められてはいないため、将来的に制度改正がなされた場合の方策となるが）小電力レピータや陸上中継移動局のような、基地局からの電波を中継する装置を使う方策、反射板を適切に設置する等の方策が有効と考えられる。

課題イ（ローカル 5G のエリア構築やシステム構成の検証等）

(1) カバーエリア及び調整対象区域図の作成

- ✧ 奥村・秦式に基づく計算式に、課題アで評価したモデル（中小都市、郊外地モデル）のパラメータを入力して計算したところ、屋外基地局については、計算式によるエリア端と下り受信電力実測結果から推定したエリア端がよく一致することが確認できた。
- ✧ 一方、屋内基地局については、計算式によるエリア端は、下り受信電力実測結果から推定したエリア端よりも短いことがわかった。屋内外における下り受信電力値からの考察により、この差は、計算式に用いている建物侵入損よりも実際の建物侵入損の方が小さいからと考えられる。

(2) 鉄道車両基地における最適なエリア構築、システム構成に関する考察

- ✧ レイトレーシング法によるエリア設計図と下り受信電力実測値から推定したエリア

図との比較により、鉄道車両基地におけるエリア構築について評価した結果、屋外エリア、屋内エリア共に、エリア設計図と測定結果による推定エリア図が、よく一致しており、想定通りのエリアが構築できていることを確認した。

- ✧ 鉄道車両基地の屋外環境は見通し環境であるため、屋外エリアについては、安全性に配慮した上で、屋外基地局設置場所を線路脇に確保すれば、比較的容易に良好なエリア構築ができる。
- ✧ 検査庫内については、複数の電車車両が停車しているものの、屋内基地局 10m 以内の近傍エリアでは、良好な品質を得られた。しかし、屋内エリアを広くカバーするには、電車車両により電波が遮られた状態でも良好なエリア構築を可能とするための対策が必要である。
- ✧ 屋内エリアから自己土地外への電波漏洩については、自己土地外数十 m の範囲で強めの電力が漏洩していた。自己土地外への漏洩電力値を調整対象区域端レベル以下に抑えるには、基地局の設置位置、壁の材質などの最適化をする必要がある。
- ✧ また、既設の建物については、壁の材質などを最適化することは困難であるため、漏洩電力の大きい箇所にはシールド施工等の対策が考えられるが、有効性については今後更なる検討が必要である。
- ✧ 今回とは異なり、比較的長い距離の鉄道線路上を隙間なくカバーしたい場合は、比較的長い距離のエリアを、電波漏洩を抑えつつ、できるだけ低コストでカバーする手法を確立することが、今後の課題となる。
- ✧ 様々な什器等が遮蔽物となる屋内環境に対応するため、柔軟に基地局の設置位置を変えたり、電波の到来方向を変えたりできる技術的方策や、制度的方策を確立することが必要である。具体的には、小電力レピータや陸上中継移動局のような、基地局からの電波を中継する装置を使う方策、反射板を適切に設置する等の方策、さらに、基地局の設置位置を変える場合、小電力レピータや陸上移動中継局を使用する場合、反射板を使用する場合に、毎回、免許変更手続きなどをしなくて済むような柔軟な制度を確立することが重要である。

課題ウ（その他、ローカル 5G に関する技術実証

- ✧ ローカル 5G 基地局の準同期運用については、キャリア 5G 基地局が屋外近傍で運用されている場合は、その基地局タイプやアンテナパターンにもよるが、ワーストケースでは、周囲のキャリア 5G 基地局からの干渉影響を受ける可能性があることがわかった。
- ✧ 従って、ローカル 5G 運用者が準同期運用を行う場合は、ローカル 5G 基地局の周囲数百 m 以内の屋外に、キャリア 5G 基地局が存在するかどうかを目視で確認しておくことが有効だろう。
- ✧ 他者土地との境界に近い場所でローカル 5G を運用せざるを得ない場合は、建物侵入損の大きい材質を積極的に利用する手もあるだろう。
- ✧ 上記のような対策においても、キャリア 5G 基地局からの影響を回避できない場合は、ローカル 5G 基地局の運用周波数をキャリア 5G の隣接である 4600-4700MHz から、4700MHz 以上に変更するということも考えられる。
- ✧ ローカル 5G 移動局の準同期運用については、キャリア 5G 移動局が屋外近傍で運用

されている状況においては 1.5m の離隔距離を確保する必要があるという結果となった。しかし、このような干渉シナリオにおいては、対策を行わなくても大きな問題は生じない程度の影響と考えられる。

- ✧ キャリア 5G 移動局とローカル 5G 移動局が同一空間で運用される状況においては、1 対 1 対向では、約 9m の離隔距離が必要、確率計算上では、ローカル 5G 移動局の運用台数が 10 台を超えると、キャリア 5G 移動局に影響がでる、という結果となった。
- ✧ 検討対象としている 4600-4700MHz 帯においては、ローカル 5G は自己土地内の屋内でしか運用できないことを考慮すると、鉄道インフラ分野という限られた分野においては、キャリア 5G と同一空間内で同時運用する状況は生じないと考えられるため、大きな問題は生じないだろう。
- ✧ しかし、仮に、鉄道会社が運用している屋内のローカル 5G エリア内に、一般人が立ち入れる環境があるとすれば、例えば、一般人の立ち入り可能エリアを制限して、離隔距離 9m 以上を確保する、ローカル 5G 移動局の運用台数を 10 台以下に制限する等の対策が考えられる。
- ✧ 上記の対策が実施できないのであれば、運用周波数を 4700MHz 以上に変更するということも考えられる。

6. 実装及び横展開に関する検討

実証地域における実装及び実証モデルの横展開に資する具体的な方策や計画等について検討し、本実証に参加しなかった者でも容易に理解できる表現で整理し、文書化されることに加え、ユーザー企業・団体や開発主体等が容易に利用できる「共同利用型プラットフォーム機能」に係る仕様案をとりまとめた。

6.1 前提条件

6.1.1 実装・横展開の視点

「５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会」の第 1 回協議会での意見交換内容を踏まえ、今回実証内容からの実装・横展開に向けた視点を以下のとおり設定した。

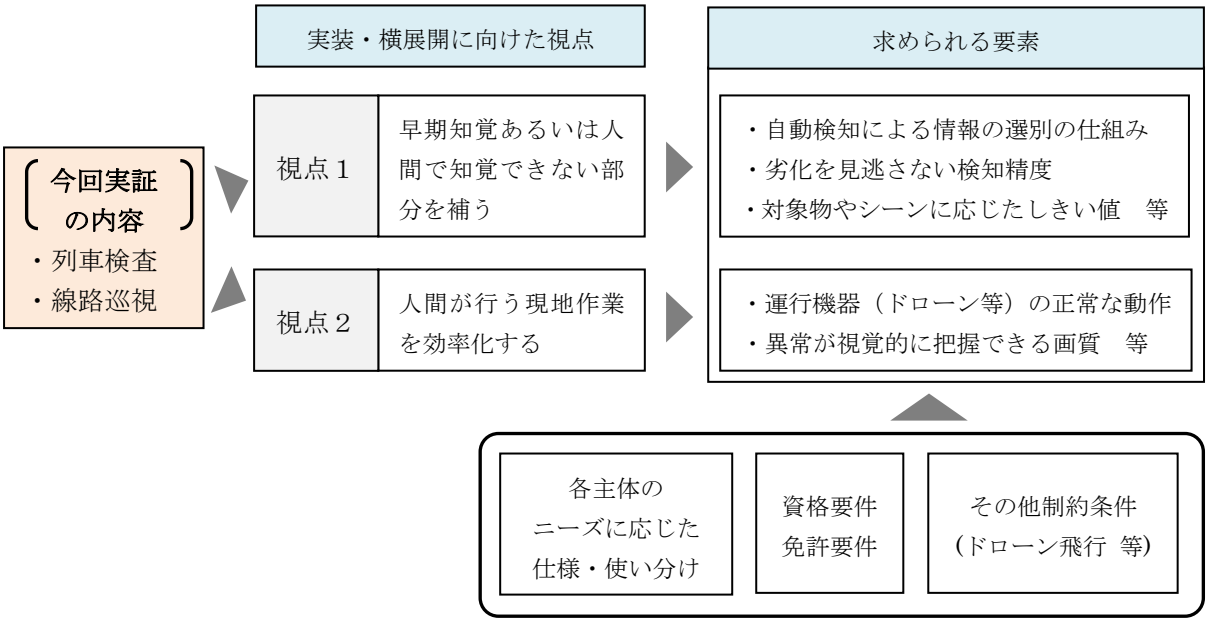


図 6.1.1-1　実装・横展開の視点

6.1.2 5G・ドローン導入にあたっての技術的制約

「５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会」の第 1 回協議会での意見交換内容を踏まえ、5G・ドローン導入にあたっての技術的制約を以下のとおり設定した。

表 6.1.2-1　持続可能な事業モデルの検討にあたっての前提条件

		結果
5G 関連	1 アンテナでのカバー範囲	指向性を持たせておおむね 100m から 200m 程度のエリア。技術革新・センター設備拡充等により、鉄塔等を建てれば 1km 程度のエリアをカバーすることも可能と想定。
	ローカル 5G とキャリア 5G の組み合わせ	屋内についてはローカル５Ｇを構築し、屋外はキャリア５Ｇを使うという選択肢もあり得る。(導入期間・ランニングコスト・利用エリアの範囲・セキュリティなどから総合的な判断が必要)
	上り/下りのトラフィック	実験では、30Mbps であるが、実用化を見据えた場合、上りは場所によって 100Mbps 程度、下りは 800Mbps 位までは確認済。現状では、5G でも LTE 等と同様、下りのトラフィックが多い仕様であるが、ローカル 5G では切り替え可能の余地あり。
ドローン関連	ドローン航行の自由度	比較的離れたところからでも上昇/下降の指令は可能。

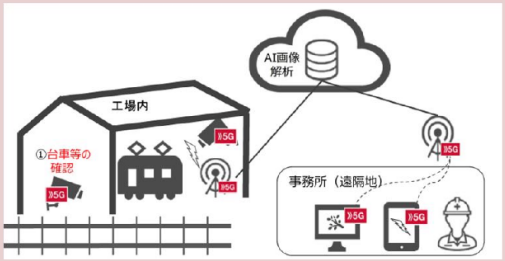
6.2 持続可能な事業モデル等の構築・計画策定

6.2.1 固定カメラによる車両の瑕疵検知

固定カメラによる駅での車両の瑕疵検知は、以下の STEP により実装を図っていくことが必要と考えられる。

STEP1	実証（本実証）
STEP2	実装システムの仕様検討
STEP3	モニタリング試験（一定期間の運用試験）と改良
STEP4	実装システムの仕様決定（事業モデルの構築）
STEP5	実装試験
STEP6	実装（本格運用）

STEP1：実証においては、本実証においては、主として AI を用いた画像診断による車両瑕疵検知の精度やローカル 5G 等の通信技術の基礎機能の評価・検証を行い、実装システムの仕様検討のための基礎情報を得た。

	車両監視システム
5Gインフラ	面をカバーする5Gインフラ 
実証結果 (課題実証)	○台車の亀裂（ダミーシールを検出） →1mm検出、0.1,0.2mmのクラックも検知できる可能性あり ○収容函のハンドル（傾き異常） ○ブレーキパッド（厚み） ○車軸温度 →網羅率はほぼ100%
課題	台車クラックの網羅率が低い →台車の色合いの違い、列車速度による横ぶれの影響など 照度の低下によるカメラ映像の低下 →確認箇所の照度の確保、カメラ性能の確保
	・条件が整えば、人の目以上に差を識別することが可能 **・検出項目の拡大と検出確認、実用化条件下での継続運用によるモニタリング**

固定カメラによる車両の瑕疵検知システムの実装に向けたSTEP2以降のプロセスは、次頁の流れをイメージしている。

STEP2：実装システムの仕様検討

・実装を図るためには、本実証で用いたシステムをベースとして、本格的な運用に耐えられるよう、検知精度の検討やシステムの耐久性、安定性の確認等が必要である。よって、まず実装システムのイメージを具体化するために仕様や運用方法の検討を行う。また、モニタリング試験を実施することを前提に、システム改良のための検証課題を抽出する。

1）実装システムの仕様、運用方法の検討

・本実証結果を踏まえ、改めて実装システムの機能・性能（検知内容や検知精度等）、機器構成といった仕様を検討する。

・また、鉄道事業者のニーズに応じた機器の設置場所（駅・車両基地等、設置箇所）、設置方法や、運用体制等について検討する。

2）実装システムの検証課題抽出

・1）の検討結果を踏まえ、実装のためのシステムの運用を確実なものとするため、モニタリング試験を実施することを前提に、本実証で用いたシステムの改良のための検証課題を抽出する。

・また、これらの検証課題に対する対応方策を検討するための、モニタリング試験計画を立案する。

【検証課題のイメージ】

システムの改良のための検証課題は、本実証の結果を踏まえ検討・抽出を行うこととなるが、具体には以下のような内容が想定される。

○AI による画像診断の精度・しきい値

・本実証より、網羅率や検知率に関する知見を得た。これらの知見を踏まえ、車両瑕疵の内容に応じて、検知精度の向上のための教師データの蓄積、最終的な検知精度を検討する。

○カメラの設置場所、設置環境

・効果的に検知が可能となり、かつメンテナンスのしやすさ等を踏まえた具体的な設置場所の検討（建築限界に支障せずかつ汚れの影響等が小さい箇所の選定）

・機器の具体的な取り付け方法

○カメラの設置方法と画像診断の精度との関係

・カメラの画角との関係、列車通過等による振動の影響、天候の影響（実証で明らかになった照度の影響に対する対策、雨の影響など）、レンズの汚れの影響　など

○機器のメンテナンスの方法

・現地の環境や検知精度への影響等を踏まえたメンテナンス頻度の考え方、メンテナンスの方法・体制の考え方　など

○導入コストの検討

・実装システムへの改良も含めた、導入コストの検討

STEP3：モニタリング試験（一定期間の運用試験）と改良

・STEP2 で抽出した検証課題について、モニタリング試験（一定期間の運用試験）を継続し、その中で２）で抽出した課題への対応を図り、本実証モデルを実装モ

デルに改良することを目的に、モニタリング試験の実施を計画する。
・モニタリング試験は、可能な限り実装のイメージに近い環境下での実施を想定する。
・モニタリング試験の実施期間は２）で示した検証課題の検証を行うために十分な期間を確保する。
・モニタリング期間中に、検証課題に対する検証データの確認や改良の方向性の検討、課題の解消の確認等行うため、関係者による協議を実施し、実装に向けて計画的に課題の解決等が図られるよう取り組む。

STEP4：実装システムの仕様決定（事業モデルの構築）
・STEP3 のモニタリング試験結果を踏まえ、実装システムの検証課題に対する最終的な対応方針を検討し、実装システムの仕様及び運用方法を決定することで、事業モデルの構築を図る。
・また、鉄道事業者において、本格運用のための体制整備を図る。

※この STEP4 における仕様決定にあたっては、横展開に資する普及モデルでの仕様との関係も考慮し、対象事業者特有の事情を考慮したカスタマイズ部分と、より多くの事業者への横展開を意識した普及仕様の両面からの検討を行うことが考えられる。

STEP5：実装試験
・実装システムについて、実地（設置対象となる駅）での稼働の最終確認試験を行う。
・設置対象とする駅のうち、1 駅を抽出し、機材の取り付け等を行い、実運用と同等の状態としたうえで、STEP3 のモニタリング試験において抽出された課題への対応が確実に図られ、システムが予定どおり機能しているかの最終確認を行う。

STEP6：実装（本格運用）
・実装システムを業務体系に組み込んだ運用を開始する。

6.2.1.1 事業モデルのイメージ

鉄道事業者への実装・横展開イメージを以下に示す。

<table>
<tr><th colspan="2">固定カメラによる車両の瑕疵検知（列車検車）</th></tr>
<tr><td>導入
イメージ</td><td>

車両基地、駅等
（図は車両基地のイメージ）
</td></tr>
<tr><td>事業モデル
概要</td><td>・複数のカメラで車両の外回りを一通り撮影し、列車状態（現在の列車検査項目）について目視確認を行えるシステム（列車検査への活用）
・高精細画像と AI により、状態監視を行うことによる安全性の向上、メンテナンス業務の効率化
・面（点）におけるローカル 5G インフラの構築</td></tr>
<tr><td>期待する
効果</td><td>・目視点検の代替の可能性（現地での人による列車検査の代替）
・高頻度点検（状態監視）による安全性の向上
・メンテナンス体系の見直しによるメンテナンス業務の変革、効率化の可能性（予防保全、ベテラン技術者の知恵・知識・経験の反映）</td></tr>
<tr><td>実施計画</td><td>
<table>
<tr><th>実装STEP</th><th>実施内容</th><th>期間（検討中）</th></tr>
<tr><td>STEP1</td><td>実証（本実証）</td><td></td></tr>
<tr><td>STEP2</td><td>実装システムの仕様検討
→検知精度の検討やシステムの耐久性、安定性の確認等</td><td rowspan="2">2年程度</td></tr>
<tr><td>STEP3</td><td>モニタリング試験（一定期間の運用試験）と改良
→実装のイメージに近い環境下での一定期間の運用試験
→検証課題に対する検証データの確認や改良の方向性の検討</td></tr>
<tr><td>STEP4</td><td>実装システムの仕様決定（事業モデルの構築）
→実装システムの仕様及び運用方法を決定
→鉄道事業者の体制構築</td><td rowspan="2">1年～
2年程度</td></tr>
<tr><td>STEP5</td><td>実装試験
→実地（設置対象となる駅）での稼働の最終確認試験
→システム、運用の最終チェック</td></tr>
<tr><td>STEP6</td><td>実装（本格運用）</td><td></td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

6.2.1.2 事業モデル構築に向けた課題

運用面とシステム面の観点から、課題を整理した。

（1）運用課題

今回実証においては、台車のき裂が AI で検知可能であることを確認できたものの、色合いの違いや列車速度による横ぶれなどによる検知率の低下や照度の確保・カメラ性能が課題として残っている。

加えて、第 2 回協議会では効率・効果の観点から台車き裂のみをターゲットとすると事業成立性が低いことが示唆された。

上記を踏まえ、運用課題として以下を設定した。

・検知内容、列車検査体系の見直し
　→現在の列車検査では、目視の検査以外に動作確認なども含まれていることから、列車検査の代替を行う場合には目視検査項目以外の項目をいつどのように実施するかなどの対応が必要となる。（AI による検知については、本実証による検知精度等の確認）
・メンテナンス（対策）業務との関係の整理
　→部品交換等の対策の流れ　など
・追加機能の検討
　→目視では発見が難しいものの、画像では確認可能な機能（温度など）などの追加による機能向上

（2）システム課題

今回実証においては、限定された期間・条件・試行回数の下で実施されたものであり、実装段階では実証とは異なる運用体制を構築したうえで多様なシーンに対応していくことが必要と考えられる。

加えて、状態監視を想定した場合、記録動画が非常に多くなり、これらを効率的・効果的に参照できることが必要となる。

上記を踏まえ、システム課題として以下を設定した。

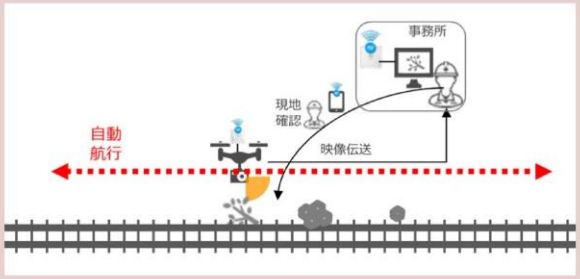
・機器の設置場所、機器のメンテナンス・検知精度の維持方法（定期的なカメラの清掃など）などの検討
・ソフトウェアの開発（UI の検討、事業者にニーズに合わせたカスタマイズなど）
・データの蓄積方法（大量・膨大なデータの効率的な保存や管理）
・導入規模

6.2.2 ドローン等を活用した巡視・検知

警戒時の係員徒歩巡視をドローン等により無人で実施するシステムについては、以下のSTEPにより実装を図っていくことが必要と考えられる。

STEP1	実証（本実証）
STEP2	実装システムの仕様検討と検証課題の抽出
STEP3	機能試験の実施とシステム・運用の改良検討（事業モデルの構築）
STEP4	試験運用
STEP5	実装（本格運用）

STEP1：実証においては、主として画像による検知範囲の検討や、AI による検知精度の確認及び向上、ドローンの飛行高度との関係等、本格運用に向けての課題等を把握するための基礎情報を得た。

	線路巡視システム
5Gインフラ	線状構造物をカバーする5Gインフラ 
実証結果 (課題実証)	木材（大、小の2種類） ペットボトル（大、中、小の3種類） その他（傘、ハンガー） →大きさの変化や距離の変化に対して、全て検出できた →最大検出距離：70m
課題	ドローンRTK位置補足不可、自動航行ができなかった →搭載機器の電磁波影響等を受けない構成の検討
	・支障物は高い精度で検知可能 **・様々な条件下での飛行における確実な自動航行、検出精度の確保**

なお、ドローンを活用した線路巡視システムの実装に向けた STEP2 以降のプロセスは、次頁の内容をイメージしている。

STEP2：実装システムの仕様検討と検証課題の抽出

・実証結果を踏まえ、実装のためのシステムの仕様及び運用を検討する。また、システムを用いた巡視を確実なものとするために、実際の運用を考慮した場合に必要となる検証課題を抽出する。
・検討結果を踏まえ、機能試験計画を立案する。

【検証課題のイメージ】

実装システムへの改良のための検証課題は、本実証の結果を踏まえ検討・抽出を行うこととなるが、具体には以下のような内容が想定される。

◯AI による画像診断の精度・しきい値
・支障物や障害物等の検知について、本実証において網羅率や検知率に関する知見を得た。これらの知見を踏まえ、最終的な検知精度を検討する。

◯画像による巡視の適正範囲
・線路巡視として、具体的にどの範囲を画像で確認するのが有効か（本実証においては、70m 程度までの検知可能性を確認）、その場合のドローンの飛行高度との関係性　など

◯ドローンの自立航行に関する課題
・飛行高度と電車線設備等との関係、実用航続距離、事故（衝突、墜落等）への対応、天候の影響　など実運用を想定した場合の課題への対応方法について検討する。

◯実運用の具体的な方法
・警戒時に、誰が、どこから、どのように飛ばして、どのように回収するのか　など

◯導入コストの検討
・実装システムへの改良も含めた、導入コストの検討

STEP3：機能試験の実施とシステム・運用の改良検討（事業モデルの構築）

・STEP2 で抽出した検証課題について、警戒時における実運用をイメージした環境下において、実際に軌道上でドローンを航行させ、課題への対応方策等の検討を行うための機能試験を計画する。
・計画にしたがって、機能試験を複数回実施し、その結果を踏まえ、課題への対応方策を決定する。
・これらの検討結果をシステム仕様及び運用方法に反映させ改良を行うことで、実装に資する事業モデルの構築を図る。

STEP4：試験運用

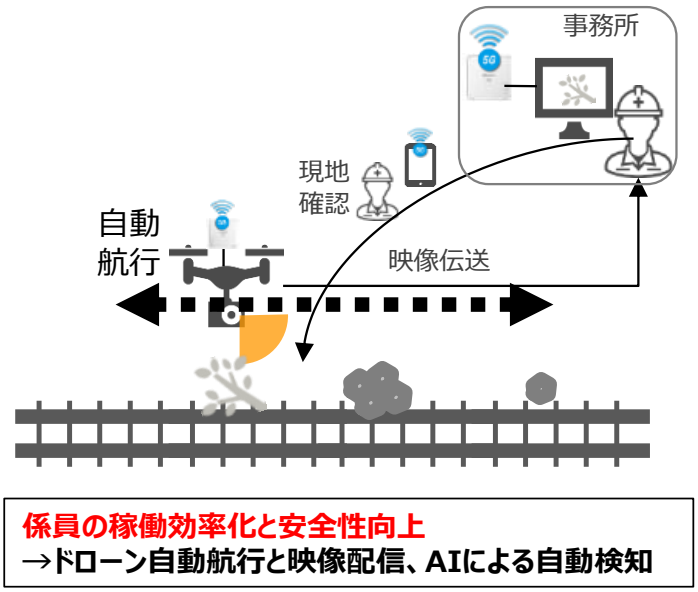
・STEP3 により構築した事業モデルを踏まえ、実際の警戒時における軌道巡視に際し、運用を試行する。
・試験運用の結果を評価し、必要に応じてさらなるシステムの改良や運用の改善等を図る。

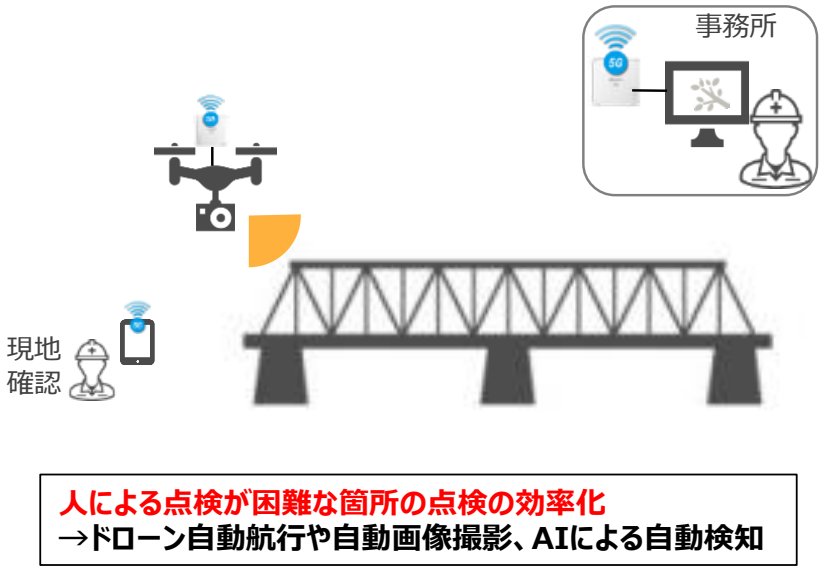
STEP5：実装（本格運用）

・実装システムを業務体系に組み込んだ運用を開始する。

6.2.2.1 事業モデルのイメージ

鉄道事業者への実装・横展開イメージを以下に示す。

ドローン等を活用した巡視・検知（線路巡視）　案①	
導入 イメージ	
事業モデル 概要	・軌道は線状構造物であり、保線も線的な活動である。線状の軌道を中心とした沿線の一定区間もしくは一部においてローカル 5G 等インフラを構築し、保線（他の土木インフラ含む）に有効活用する。 ・警戒時の係員徒歩巡視をドローン等により無人で実施
期待する 効果	・異常時の迅速な状況把握、係員の安全確保（二次災害リスクの回避） ・インフラ点検業務の効率化

ドローン等を活用した巡視・検知（線路巡視）　案②	
導入 イメージ	
事業モデル 概要	・作業員の安全の確保や効率性（省力化、迅速化等）を考慮してロボット技術（ドローン）を活用した点検等を行う。 ・人が近づくことが容易ではない橋梁等のインフラ点検にドローンを活用
期待する 効果	・異常時の迅速な状況把握、係員の安全確保（二次災害リスクの回避） ・インフラ点検業務の効率化

6.2.2.2 事業モデル構築に向けた課題

運用面とシステム面の観点から、鉄道事業者への実装・横展開に向けた課題を整理した。

（1）運用課題

今回実証においては、線路上の異常検知の精度が確認でき、70m の距離まで判別可能であることが確認できた。

他方、今回軌道巡視については目視検査にフォーカスしたものの、利用シーンに応じた視点を取り入れていくことが必要である。

上記を踏まえ、運用課題として以下を設定した。

・取得データの検討（目視検査のさらなる高度化：人の目では判別できない情報の取得も含めた検査内容）
　→高精細映像、サーモ、赤外線、座標（レーザースキャン）など

（2）システム課題

今回実証においては、人によるドローン操作であり、自動航行での運用を行うことができなかった。他方、第 2 回協議会では、操縦者の腕によって動画の信頼性が左右されることが課題として挙がっている。

また、「固定カメラによる車両の瑕疵検知」と同様に、広域を対象とすると記録動画が非常に多くなり、これらを効率的・効果的に参照できることが必要となる。

上記を踏まえ、システム課題として以下を設定した。

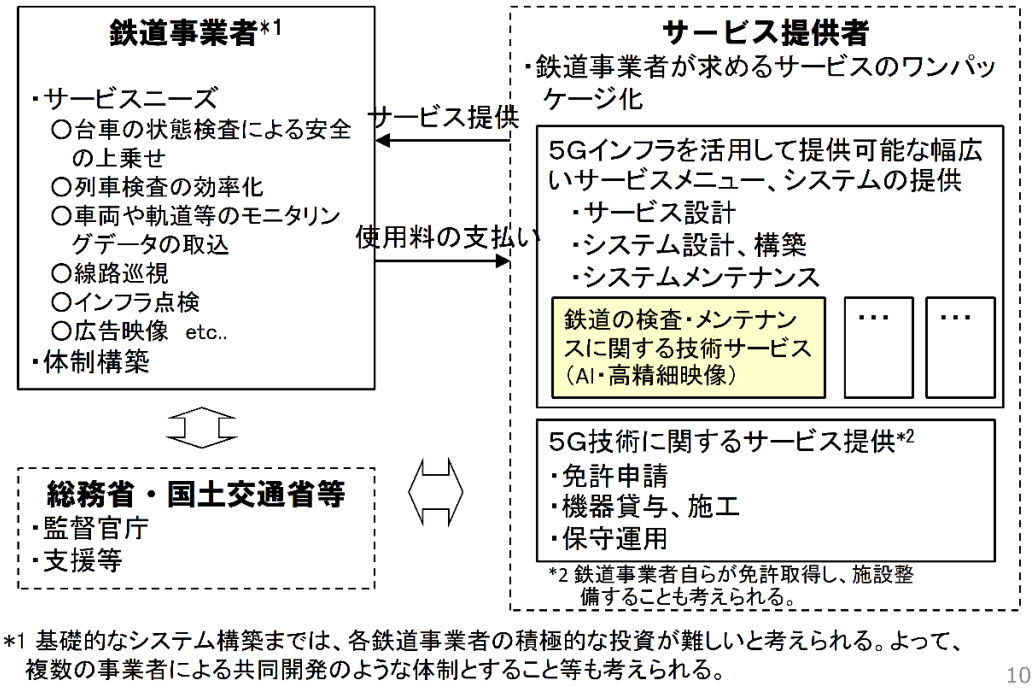
・線状構造物に対するインフラの構築
　→検査範囲をカバーするインフラ構築の方法
・ドローンの自律航行の方法（自律航行に対する AI(線路認識)の活用など）
・ドローンの自動飛行や検査箇所の画像・映像の自動取得など、点検業務の迅速化、効率化に資する機能の検討
・目的に応じた飛行高度や画像・映像取得範囲（軌道内のみか、軌道外まで含むなど）の検討
・ソフトウェアの開発（UI の検討、事業者にニーズに合わせたカスタマイズなど）
・データの蓄積方法（大量・膨大なデータの効率的な保存や管理）
導入規模

6.2.3 課題対応に向けた検討体制・役割分担

6.2.3.1 実装スキーム（案）

実装スキーム（案）を次頁の図に示す。

・サービス提供者は、5G インフラの構築及び 5G インフラを活用したサービスを一括して提供する。
・鉄道事業者は、サービス提供に対して、サービスの利用に対する対価を支払う。
・なお、実装の実現にあたっては、今後前述の STEP2 以降の段階的検討が必要になる。基礎的な実装システム構築までは、各鉄道事業者の積極的な投資が難しいと考えられる。よって、最終的な実装に至る間には、支援制度（5G を活用した鉄道事業の安全性の向上や効率化に資する技術開発に対する助成等）を活用しながら、複数の事業者による共同開発を行う体制を構築するなどの検討体制が考えられ、他鉄道事業者における横展開にあたっても効果的と考えられる。



*1 基礎的なシステム構築までは、各鉄道事業者の積極的な投資が難しいと考えられる。よって、複数の事業者による共同開発のような体制とすること等も考えられる。

10

図 6.2.3-1 実装スキーム（案）

【図 6.2.3-1 の補足説明】

※上図では、鉄道事業者は、5G インフラの構築に関するノウハウを有しないことから、サービスの一括購入の形態を想定している。よって、必要となる機器はサービス提供者が所有し、鉄道事業者に貸し付ける。

※サービス提供者はコンソーシアム企業等が代表企業となり、鉄道事業者にニーズに応じたパッケージサービスを提供する。代表企業はサービスを構成する要素技術（AI、ドローン等）を提供する関係者とそれぞれ契約を締結し、各契約内容を踏まえサービス提供に要する費用を設定し、サービス提供の対価として鉄道事業者から使用料を得る。

上記を踏まえ、京浜急行電鉄においては、業界動向も踏まえつつ、前述の段階的な検討の中で“課題解決システムの実装に向けた”課題の明確化とその解決策の検討を進める。

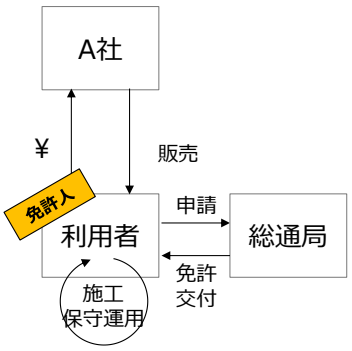
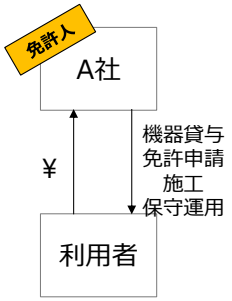
本コンソーシアムでは、京浜急行電鉄への実装と合わせて、他鉄道事業者や他の土木インフラへの横展開も見据えて、実装と横展開を両にらみで推進していく。

6.2.3.2 免許申請上の制約条件からみた運用方法

ローカル５G の運用方法として、「利用者が免許人」「免許人から貸与」の 2 パターンが存在する。前者の場合は　臨機応変・迅速なチューニングが可能であり、後者の場合は省稼働・安心できる保守サービスを利用可能というメリットがある。

実装・横展開の前段階においては、免許申請の形態も踏まえた運用方法の検討も必要となる。

表 6.2.3-1　免許申請の形態の違いによる長所・短所

	運用方法① 利用者が免許人となり使用	運用方法② 利用者が免許人となり使用
役割 分担		
長所	現場のニーズに応じた、 柔軟なエリア設計変更が可能	プロによる適切なエリア設計・ 免許申請プロによる安心の 保守・セキュリティ対応
短所	稼働の増加、施工の外注費 が発生	柔軟なエリア設計変更が困難 （利用者がアンテナ等を移動 させられない）

≪参考≫ローカル 5G の運用コストについて

日本電気株式会社（NEC）では、2020 年 11 月より、ローカル 5G に関する「コンサルティングサービス」、「インテグレーションサービス」、「マネージドサービス」の各種サービスを提供開始している。

このうち、運用開始・保守に当たる「マネージドサービス」では、「マネージドサービス」では、ローカル 5G ネットワークの機器(コア、基地局など)から運用保守サービスまで含めて、月額 100 万円から提供することを打ち出している。

なお、ローカル 5G は現在、技術開発のフェーズにあり、導入・運用コストについてはあくまで現時点の参考値であることに留意が必要である。

図 6.2.3-2　ワンストップでのサービス提供のメニュー

出所：NEC ホームページ（https://jpn.nec.com/press/202011/20201126_02.html）

6.3 横展開に資する普及モデルに関する検討

6.3.1 他の鉄道事業者への横展開

本項では、鉄道事業における保守管理を対象としたローカル 5G による課題解決システムの実証地域（京急久里浜工場）における実証結果を踏まえ、ローカル 5G を活用した課題解決システムの他の鉄道事業者への横展開について検討した。

6.3.1.1 協議会における意見

本業務にて開催した協議会（５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会）における他の鉄道事業者への横展開に関する意見を以下にまとめる。

＜他の鉄道事業者への横展開に関する主な意見＞

［ニーズに関する意見］

- 5G を活用した課題解決システムに対するニーズは、鉄道事業者毎に異なっている。
- 5G を活用した課題解決システムに対するニーズには、①人で足りない部分を助けたい（精度を上げたい）というニーズと、②人の作業を効率的にやりたい（効率を上げたい）という 2 つがある。

［精度の向上に関する意見］

- 人の目視では見つけられないものでも、カメラや赤外線等のセンサーで取得したデータであれば機械で見つけられる場合がある。
- 異物を検出するということであれば、RGB（可視画像）カメラではなく、奥行きが測れる深度カメラの方が得意。保線の異常検知でも目的に適した数種類のカメラで異常を検出する方策もある。
- 4K は空間解像度が大変高いが、時間軸の解像度はさほど高くない。フレームレートを上げたい場合はハイスピードカメラを使うとか、いろいろ可能性が 5G によって広がる。
- 列車無線で車内の画像や動画が伝送できれば、利用者サービスの高度化に活用できる。

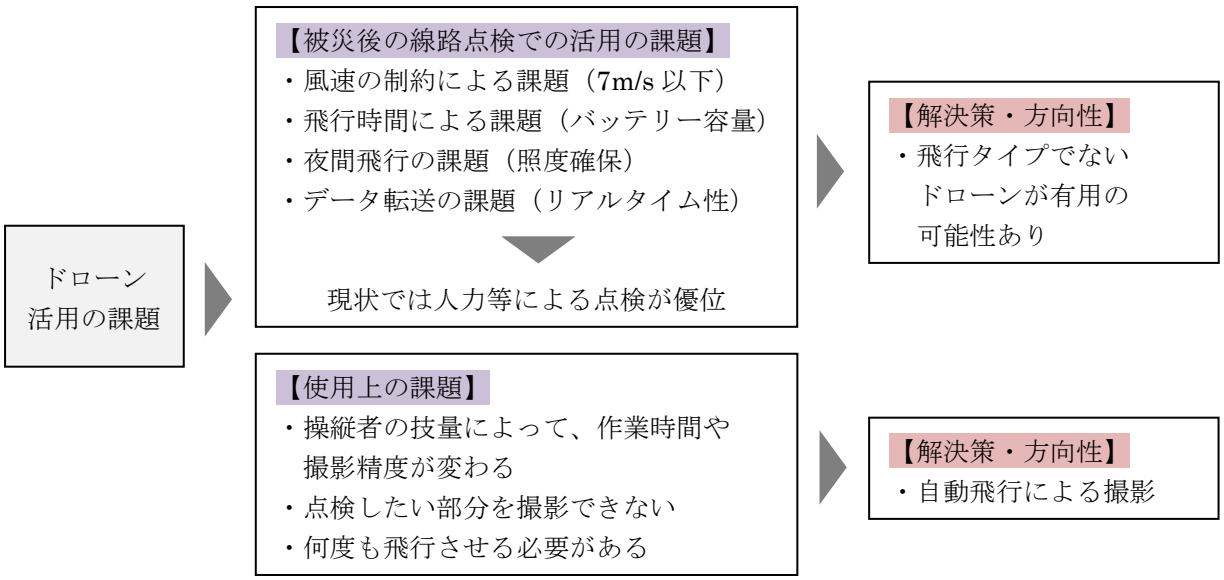
［効率の向上に関する意見］

- 車両には様々なモニターや記録装置が付いており、膨大なデータが蓄積されている。今は車両にパソコンをつないでデータを読み取っているが、ローカル 5G で事務所に車両からデータが転送できればかなり効率化を図れる。
- 異常だけでなくブレーキシューやパンタグラフなどの消耗品も含めて AI がポップアップを挙げてくれれば、検査の補助として検査員の省力化に役立つ。
- 線路に沿って 5G 環境があれば、約 40km ごとにある保線区からドローンを沿革で操作できれば、線路保守にすごく役立つ。
- 線路に沿って 5G 環境が構築できれば、将来的に列車の運行を無線で制御すること（CBTC）も考えられ、CBTC 導入のきっかけとして保全に 5G を導入して精度や課題を明らかにするという考え方もある。
- 5G で様々なデータを蓄積し、劣化の予測や対策のタイミングを分析して最適化できれば保全の効率化につながる。
- 営業列車でも保守用車でも、そこからレールをカメラで撮影することは十分可能。

［実現性の向上に関する意見］
- 鉄道のビジネス市場は大きくなく、JR 大手を除けば課題解決システムを 1 社で開発するのは困難。横展開するためには複数の鉄道会社と 5G 等の関連企業が協働して開発、運用する仕組みが必要。
- 空飛ぶドローンの制約が多いのであれば、地上を走るドローンのようなロボットを想定することで横展開がしやすくなる。
- 現場を 5G で置き換えるのではなく、5G を現場に有効に活用するという視点が重要。

＜課題解決システムの活用の方向性（まとめ）＞

	5G＋AI の活用ケース
今回実証との類似ニーズ	・カメラ画像を活用した列車検査、状態・機能検査 ・架線・軌道の常時監視による保守の省力化
別の視点からの活用ニーズ	・鋼索線の車両無人化 ・運転状況記録装置＆各種モニタのデータを地上側で遠隔監視 ・列車の自動運転化 ・列車無線のテレビカメラ化 ・改札機の顔認証決済化　等



6.3.1.2 **他鉄道事業者の差異等の反映**

本検討では、本業務における協議会に委員として参加していただいた京阪電気鉄道（京阪電鉄）における列車検査や線路巡視、ドローンの活用状況等の把握を行い、横展開を検討するため他鉄道事業者との差異等の把握を行った。

ローカル 5G による課題解決システムを実証した京浜急行電鉄と京阪電鉄はともに首都圏と関西圏における大手私鉄であり、規模も比較的近い。

表 6.3.1-1　路線図

京浜急行電鉄	京阪電気鉄道

＜営業キロ、走行キロ＞

事業者名		京浜急行電鉄					
路線		本線	空港線	大師線	逗子線	久里浜線	合計
営業キロ	ｷﾛﾒｰﾄﾙ	57	7	5	6	13	87
走行キロ	千ｷﾛﾒｰﾄﾙ	86,322	3,777	1,638	3,305	9,468	104,510

出典：鉄道統計年報［平成 30 年度］

事業者名		京阪電気鉄道			
路線		京阪線	大津線	鋼索線	合計
営業キロ	ｷﾛﾒｰﾄﾙ	69	22	0	91
走行キロ	千ｷﾛﾒｰﾄﾙ	82,588	3,622	13	86,223

出典：鉄道統計年報［平成 30 年度］

＜車両数、職員数＞

事業者名		京浜急行電鉄	京阪電気鉄道		
			鉄道	軌道	合計
車両数		796	706	62	765
職員数		2,637	1,238	114	1,352
役員		19	0	0	0
本社部門		370	220	0	220
	総務	126	12	0	12
	運輸	89	81	0	81
	工務	91	52	0	52
	電気	37	27	0	27
	車両	27	8	0	8
	建設	0	40	0	40
現業部門		2,267	1,018	114	1,132
	運輸	1,761	710	90	800
	工務	130	64	8	72
	電気	153	80	2	82
	車両	223	151	11	162
	建設	0	13	3	16

出典：鉄道統計年報［平成 30 年度］

（1）京阪電鉄の保全の概要（車両部門）

［車庫］

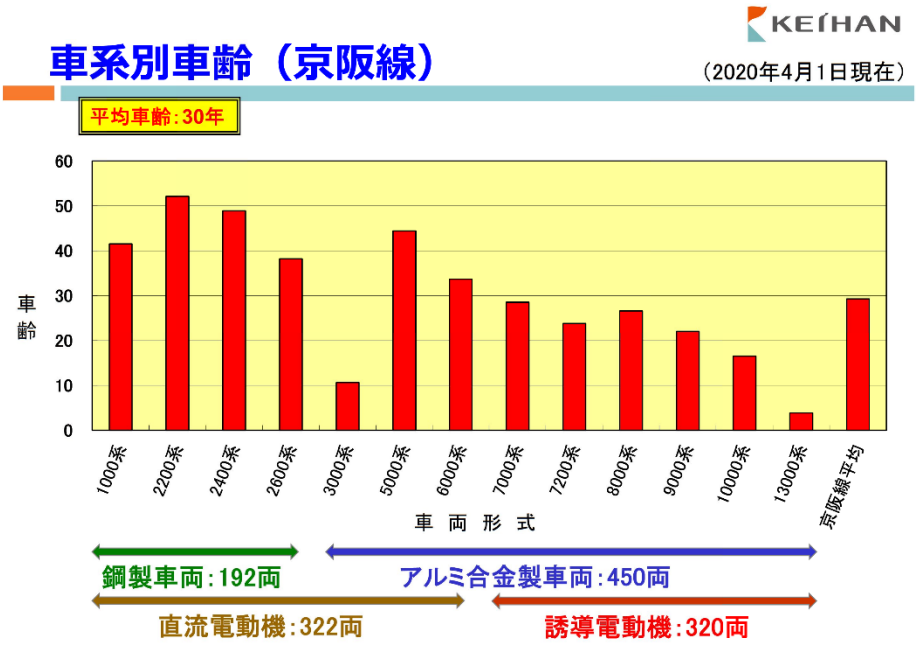
京阪電鉄には 4 つの車庫（車両基地）があり、このうち京阪本線には寝屋川と淀の 2 つの車庫がある。

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［車両］

京阪電鉄には様々な型式の車両を計 706 両保有しており、平均車齢は約 30 年に達しており、50 年以上使用している車両もある。

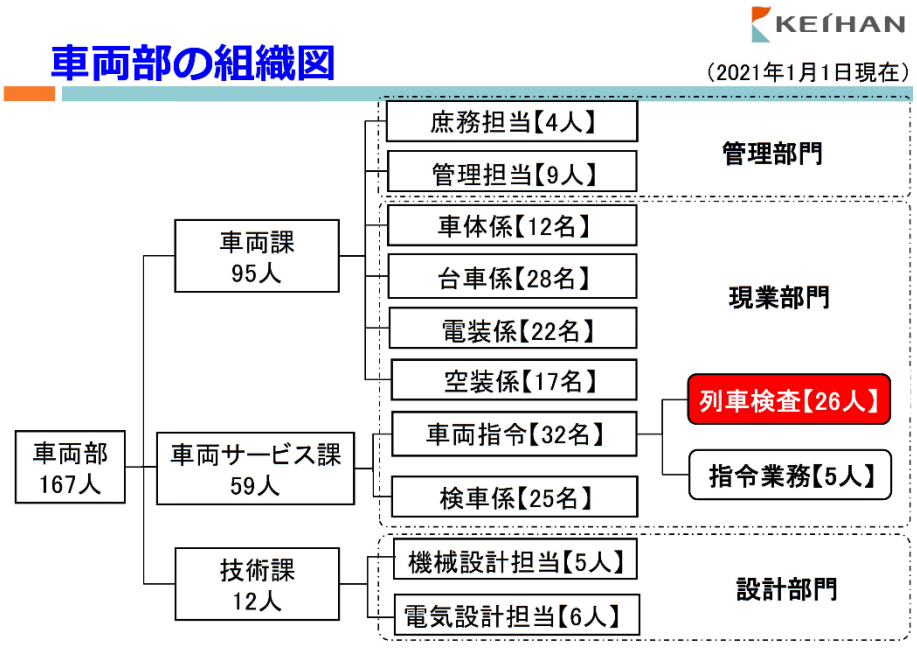
出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供



出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［体制］

京阪電鉄の車両部には計 167 名の職員がおり、このうち列車検査は車両サービス課の車両指令 32 名のうち、26 名の職員が従事している。



出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［列車検査］

京阪電鉄では、安全と体制を勘案して 10 日毎に列車検査を実施しており、6 日毎に列車検査を実施している京浜急行電鉄と検査周期が異なっている。検査項目は、京阪電鉄と京浜急行電鉄でほぼ同じであるが、鉄道事業者は民間であるため、列車検査の具体な手法は各社における過去の経験やノウハウに基づいており、異なる点もある。

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

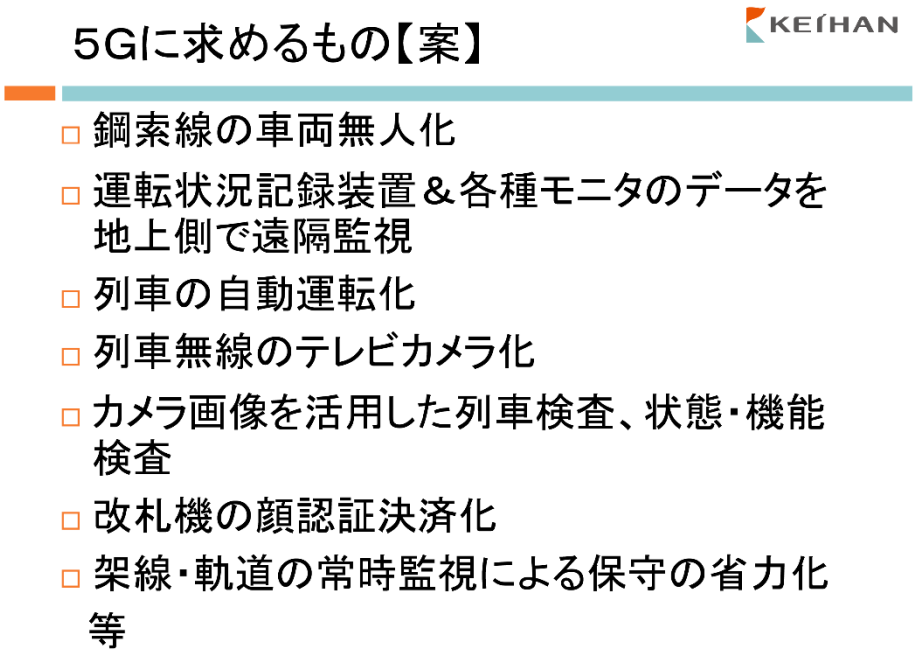
出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

（2）課題解決システムに対するニーズ（車両部門）

京阪電鉄の車両部門より示されたローカル 5G を活用した課題解決システムに求めるニーズを以下に示す。車両部門からはカメラ画像による列車検査、状態・機能検査などの検査の効率化の他、運転記録や各種モニタのデータ転送の効率化、鋼索線（ケーブルカー）や列車運行の効率化、料金徴収の効率化等のニーズが示された。

＜課題解決システムに対するニーズ（車両部門）＞

分類	内容
検査の効率化	・ カメラ画像を活用した列車検査、状態・機能、検査 ・ 架線・軌道の常時監視による保守の省力化
データ転送の効率化	・ 運転状況記録装置＆各種モニタのデータを地上側で遠隔監視
運行の効率化	・ 鋼索線の車両無人化 ・ 列車の自動運転化 ・ 列車無線のテレビカメラ化
料金徴収の効率化	・ 改札機の顔認証決済化



出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

（3）京阪電鉄の保全の概要（保線部門）

［体制］

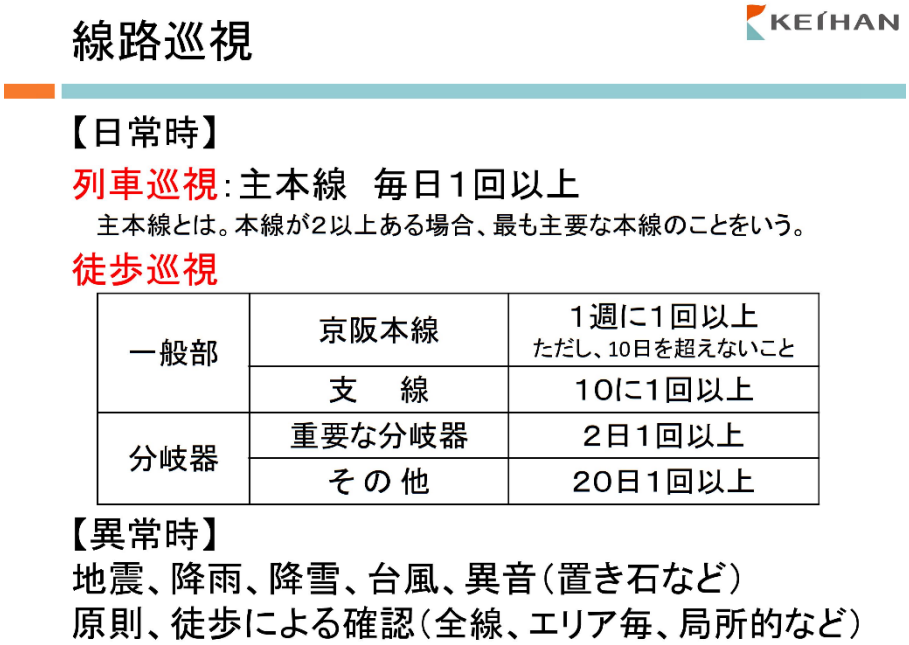
線路巡視は、京阪電鉄の保線課の職員 59 名が 7 班体制にて実施しており、年間の巡視延長（単線換算）は京阪本線で約 130km、全線で約 170km に達している。

京阪本線	129.848km
鴨　東　線	5.504km
中之島線	6.254km
交　野　線	14.067km
宇　治　線	15.879km
合　　計	171.552km

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［線路巡視］

京阪電鉄では、車上から目視にて線路の状態を確認する列車巡視を毎日実施しており、これに加えて徒歩にて線路の状態を確認する徒歩巡視を以下の頻度にて実施している。



一般部	京阪本線	1週に1回以上 ただし、10日を超えないこと
	支　線	10に1回以上
分岐器	重要な分岐器	2日1回以上
	その他	20日1回以上

【異常時】
地震、降雨、降雪、台風、異音（置き石など）
原則、徒歩による確認（全線、エリア毎、局所的など）

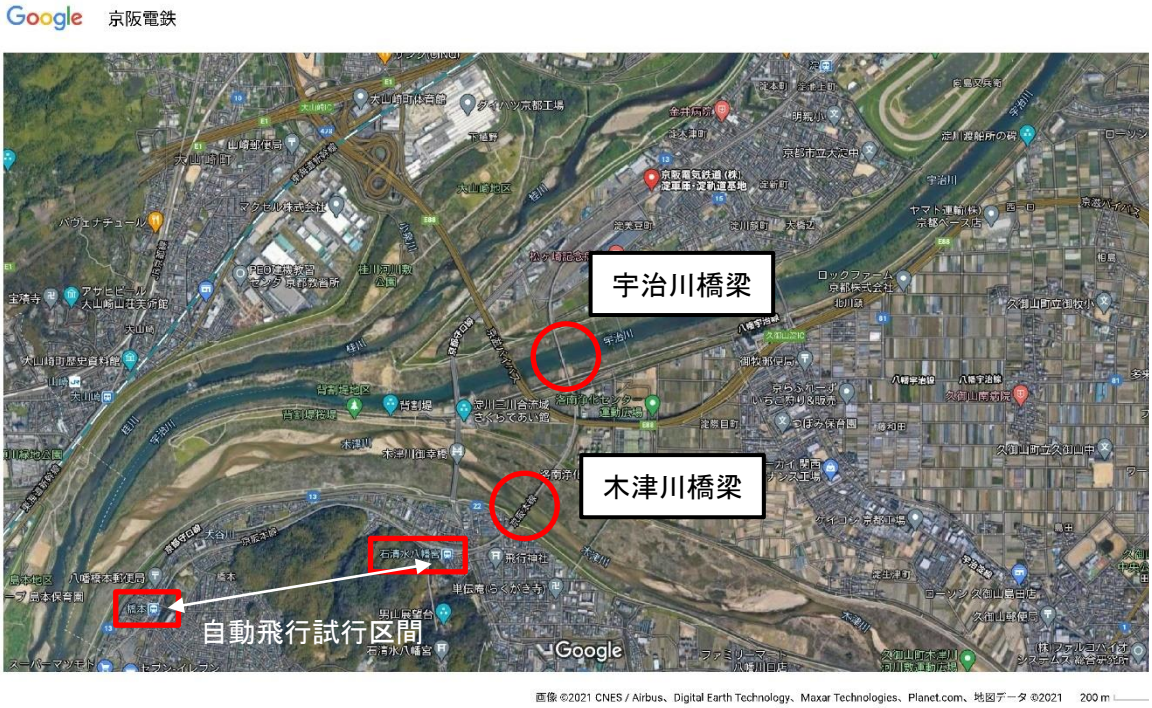
出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

（4） ドローンによる構造物検査の状況

京阪電鉄の保線部門では、ドローンを用いた構造物検査の効率化が検討されている。

［検討内容］

京阪電鉄には木津川と宇治川を越える橋梁（木津川橋梁と宇治川橋梁）があり、これらはともに昭和 2（1927）年に架設されたトラス橋（プラットトラス桁）である。すでに 90 年以上供用されている古いトラス橋であることから、京阪電鉄ではドローン（小型無人飛行機）を活用した構造物検査の効率化について検討された。また、橋本駅と岩清水八幡宮駅の間を対象にドローンの自動飛行も試行された。



＜木津川橋梁＞

出典：http://photozou.jp/photo/show/2165129/117245573

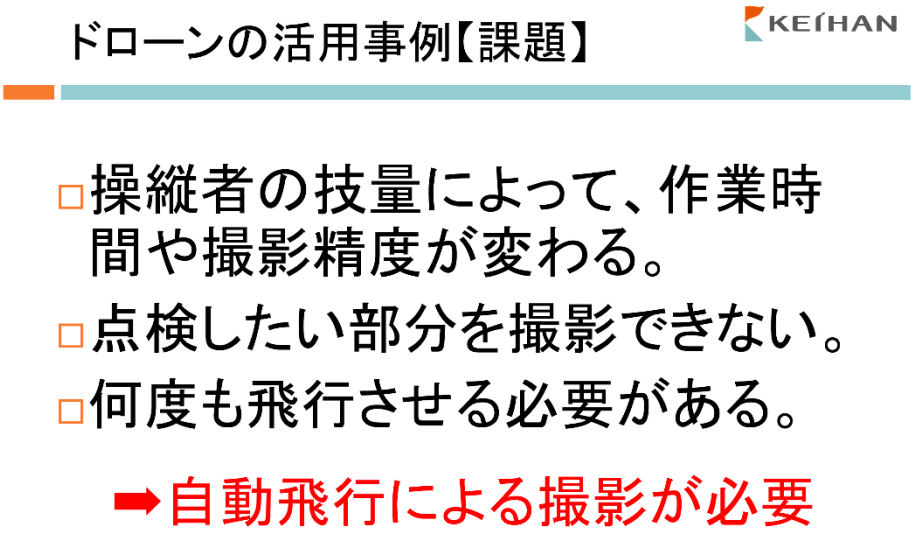
＜宇治川橋梁＞

出典：http://photozou.jp/photo/show/251552/260483436

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［ドローン活用における課題］

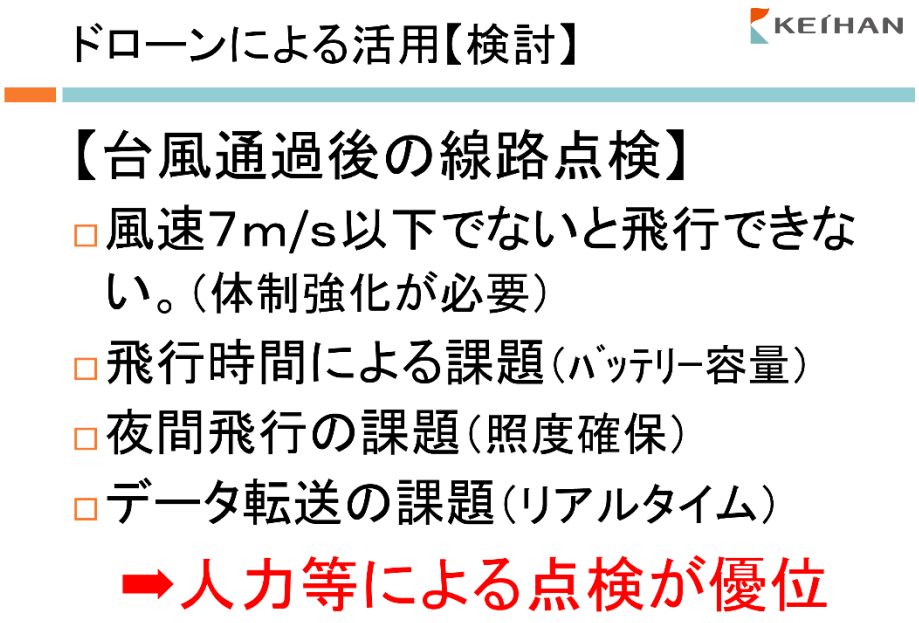
検討の結果、作業時間や撮影精度が操縦者の技量に大きく依存すること、点検したい部分でも撮影できない場合があること、バッテリーの充電容量から飛行時間が制限され、何度も飛行させる必要があることなどの理由から、ドローンを用いても構造物検査が必ずしも効率化する訳ではなく、ドローンにて構造物検査を効率化するためにはドローンの自動飛行が必要と考えられた。



出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

［線路巡視へのドローン活用に対する意見］

本業務ではローカル 5G による課題解決システムとして、台風等による災害後にドローンによる上空からの線路巡視にて線路上の異常を検知するシステムについて実証した。この異常検知システムについて京阪電鉄の職員にヒアリングしたところ、現時点ではまだドローン飛行に幾つかの課題があり、また京阪電鉄ではすでに保守車両を用いた異常確認により 2 時間強にて全線の点検を完了させることができるため、ドローンによる上空からの線路巡視より人力等による巡視点検の方が有効との判断であった。

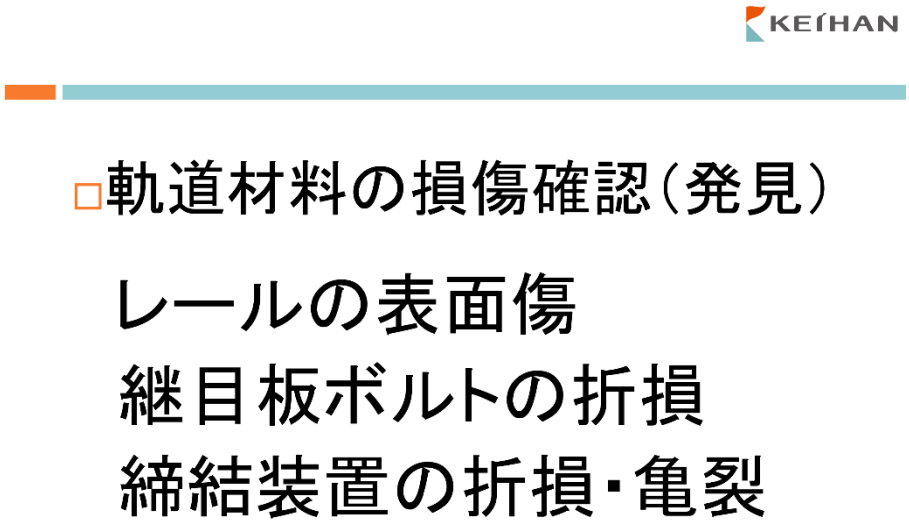


出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

（5）課題解決システムに対するニーズ（保線部門）

京阪電鉄の保線部門からは、ローカル 5G を活用した課題解決システムに求めるニーズとして、架線・軌道の常時監視による保守の省力化が挙げられた。特に、軌道に対しては、レールの表面傷、継目板ボルトの折損、締結装置の折損・き裂等の損傷の早期発見、早期対策とともに、このような異常に関するデータの蓄積と分析による異常傾向の把握に対するニーズが示された。



出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

＜軌道の異常例＞

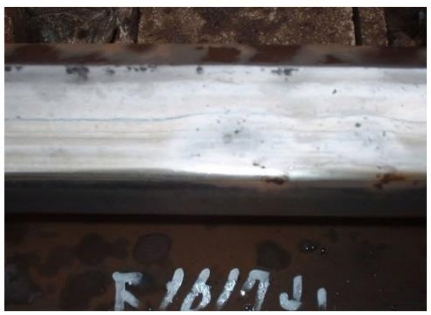
レールの表面傷（Aランク）

レールの表面傷（Bランク）

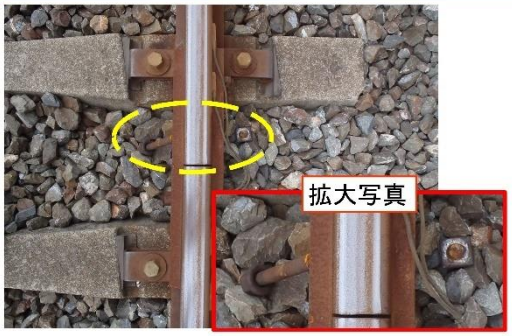
レールの表面傷（Cランク）

レールの表面傷（Dランク）

レールの表面傷（空転傷）



継目板ボルトの折損



締結装置の折損・亀裂①

締結装置の折損・亀裂②

出所：第 2 回協議会資料 2-4　※京阪電鉄提供

6.3.1.3 類似技術の技術開発動向

（1）列車検査、状態監視に係る類似技術の開発動向

鉄道の保守においては、時間基準保全から状態基準保全へ移行し、より効率的・効果的な検査、保守を実施する考え方があり、そのために、様々な方法によって列車の状態等を監視する技術の開発が進められている。

実証モデルも高精細画像及びAIによるセンサを活用した状態監視システムの一例であると言え、ローカル5G等を用いたインフラ構築と、4K画像及びAIを用いたリアルタイム状態監視システムにより、台車き裂の発見やさらには列車検査への活用を図るシステムについては、新規性があるといえる。

- ＴＭＢ（Time Based Maintenance：時間基準保全）からＣＢＭ（Condition Based Maintenance：状態基準保全）へ（JR東日本）
  - 車両機器の状態監視、営業車による軌道検測と画像データによる材料状態検査を毎日実施
- ゲート状の車両状態監視装置の導入（JR西日本 2019年）
  - パンタグラフスリ板摩耗、車輪踏面形状測定等、後藤総合車両所出雲支所
- 設備常態監視システムの導入（JR東海 2020年度末より順次共用）
  - 駅設備の状態監視→復旧作業の迅速化、定期検査の省力化

（2）線路巡視、インフラメンテナンス

ドローンを活用した線路検査システムや、画像による列車巡視支援、インフラ点検などは、複数の鉄道事業者で取り組みが行われている。

導入の目的は主には機械化や自動化等による効率化と言える。

実証モデルである高精細画像とATによるセンサ及び自律航行ドローンによる線路巡視やインフラ点検は、他社も類似の技術の実証などが行われているが、いずれも実証段階と考えられる。

- 列車巡視支援システム（JR九州 2021年度末の導入を目指す）
  - 在来線営業列車に前方カメラを搭載し、列車巡視（工務系社員が営業列車の運転席に添乗し線路状態等の確認を行う）を機械化、自動化
- ドローンを活用した線路検査（JR北海道 試行段階）
  - 建築限界支障物の有無、締結装置脱落の有無の認識、高温時の通り変位の有無とレール温度の確認（赤外線画像）、雪崩、マクラギ検査、道床検査
- 線路設備点検をドローンで実施（JR東日本 実証段階、2020年）
  - 線路設備上空の飛行ルートをドローンが自律飛行、ドローンに搭載したカメラやLEDライトを使って線路設備を撮影し、昼夜を問わず遠隔地の係員へ映像を伝送できることを実証
- 鉄道版インフラドクターによるトンネル検査（東急、伊豆急他 2020年６月）
  - レーザーや高解像度カメラによるトンネル内の寸法計測、建築限界確認、変状検出（近接目視点検の日数を15日程度から3日に削減し効率化、人手不足解消に貢献）

6.3.1.4 横展開に向けた計画

前項までの内容を踏まえて、京急久里浜工場にて実証した鉄道事業における保守管理を対象としたローカル 5G による課題解決システムを、他の鉄道事業者の横展開するための計画の案を以下に整理する。

（1）横展開に向けた方針

- 鉄道事業者によって課題解決システムに対するニーズが異なるため、特定の鉄道事業者に有効なシステムでも他の鉄道事業者に活用（横展開）できる訳ではない。
- 5G による課題解決システムを他の鉄道事業者に横展開するためには、鉄道事業者が課題解決システムを設計できるように、シーズ側より個々のシーズ（技術）で実現可能な性能を整理し、ニーズ側に提示する必要がある。

協議会の委員より、「5G を活用した課題解決システムに対するニーズは、鉄道事業者毎に異なる。」との意見があった。鉄道事業者によって課題解決システムに対するニーズが異なるということは、特定の鉄道事業者において有効に活用できるシステムであっても、必ずしも他の鉄道事業者に活用（横展開）できる訳ではないことを意味している。

そのため、5G を鉄道事業における課題解決に活用（横展開）するためには、ニーズ側（鉄道事業者）が自身の目的（課題解決）が達成できるシステムを設計して構築できるように、サービサー側から提供可能な個々のシーズ（技術）で実現可能な性能を整理し、ニーズ側に提示する必要がある。

（2）横展開に向けた手順

＜5G を鉄道保守管理の課題解決に活用（横展開）するための手順＞

1) 本業務における実証と実装・横展開に関する検討結果を踏まえ、鉄道事業者が保守管理の課題解決システムとして活用が期待できる 5G に係るシーズ（技術）を抽出する。
2) 抽出したシーズのうち、本業務で実証していないシーズは、実証の必要性が高いシーズと低いシーズに分け、実証の必要性が高いと評価したシーズは、鉄道事業者が課題解決システムの設計・構築に必要な性能や留意点を整理するための計画を立案する。

（3）シーズの抽出（分類）

＜鉄道保守管理の課題解決システムとして活用が期待できるシーズ（技術）の分類＞

① 異常を早期に検知するためのデータ観測技術（画像、温度、音、振動、測量等）
② 観測データを補助するための支援技術（ドローン、ロボット、ソフトウエア等）
③ 観測データを 5G で送信する通信技術
④ 観測データから異常を識別する検知技術（AI 等）
⑤ 検知した異常を人に知らせる通報技術（UI）
⑥ 観測、検知データを記録するためのデータ蓄積技術（DB）
⑦ 蓄積データを鉄道事業に活用するための分析技術（AI 等）

（4）横展開のための計画案

① 異常を早期に検知するためのデータ観測技術（画像、温度、音、振動、測量等）

- 本業務では異常検知技術として可視画像とサーマル（温度）画像を用いたが、これ以外の観測技術（音や振動等）は実証していない。
- 画像、温度、音、振動、測量の 5 つを対象に、これらを観測するための主要なデータ観測技術を選定し、現場での実証にて性能と留意点を整理する。

本業務では異常検知技術として画像（可視画像とサーマル画像）を用いたが、これ以外の観測技術（音や振動等）は実証していない。また、列車検査では台車のき裂、ブレーキパット、格納箱ハンドルの向き、線路巡視では線路上の飛散物を異常の検知対象としたが、これら以外の異常は実証による検知対象にしていない。そのため、画像、温度、音、振動、測量の 5 つを対象に、これらを観測するための主要なデータ観測技術を選定し、現場での実証にて性能と留意点を整理する。

＜主なデータ観測技術＞

1) 画像：動画（解像度、フレームレート）
2) 温度：赤外線カメラ
3) 音　：録音機
4) 振動：加速度計
5) 測量：レーザースキャナ

② 観測データを補助するための支援技術（ドローン、保守用車両等）

- 本業務ではデータを観測するための支援技術としてドローンを使用したが、協議会の委員から「営業列車でも保守用車でも、そこからレールをカメラで撮影することは十分可能。」との意見もあった。
- 営業列車でも保守用車等の車両を用いた場合の観測性能を実証し、データの観測性能と留意点を整理する。

本業務ではデータを観測するための支援技術としてドローンを使用したが、協議会の委員より「地上を走るドローンのようなロボットを想定することで横展開がしやすくなる。」との意見があった。鉄道では、営業車両の他、軌道を保守管理するための車両（動力の無い台車を含む）があり、協議会の委員から「営業列車でも保守用車でも、そこからレールをカメラで撮影することは十分可能。」との意見もあったことから、これらの車両を用いた場合の観測性能を実証し、データの観測性能と留意点を整理する。

③　観測データを 5G で送信する通信技術

- 鉄道では様々なデータを記録、蓄積しており、これらの記録データをまとめて送信できれば職員の労力を低減させることができる。
- 現在、職員が手作業で抜き取っている記録データを 5G 等の無線で自動送信した場合の精度や時間を実証し、データの送信性能と留意点を整理する。

本業務では、保守管理を効率化するために取得した画像等の観測データを 5G にて送信して通信性能を検証したが、鉄道の保守管理では画像等の観測データ以外にも様々なデータを記録、蓄積している。これらの記録データは人が手作業で抜き取っており、これらをまとめて送信できれば職員の労力を低減させることができる。そのため、現在、職員が手作業で抜き取っている記録データを 5G 等の無線で自動送信した場合の精度や時間を実証し、データの送信性能と留意点を整理する。

④　観測データから異常を識別する検知技術（AI 等）

- AI による車両や線路の異常検知では、対象の色彩や照度によって異常の検知精度が低下することが想定される。
- 本業務にて実証していない色彩と照度が異常の検知精度に与える影響を実証し、AI による異常の検知性能と留意点を整理する。

本業務では、AI にて車両や線路の異常を検知する性能を検証し、一定の精度にて異常を検知できることを確認した。一方、対象の色彩や照度によって異常の検知精度が低下することが想定される。そのため、本業務にて実証していない色彩と照度が異常の検知精度に与える影響を実証し、AI による異常の検知性能と留意点を整理する。

⑤　検知した異常を人に知らせる通報技術（UI）

- UI（ユーザーインターフェイス）は各事業者の要望に応じてカスタマイズする必要があり、また異常が検知できれば自由に設計することができる。
- そのため、異常を職員に知らせるための UI は実証の対象とせず、主な観測データ（画像、温度、音、振動、測量）毎に、どのような UI が望ましいのかを鉄道事業者にヒアリングし、UI アプリケーション作成に要する概算費用と留意点を整理する。

本業務では、AI にて検知した異常を職員に知らせるための UI（ユーザーインターフェイス）を構築した。UI は各事業者の要望に応じてカスタマイズする必要があり、また異常が検知できれば自由に設計することができる。そのため、異常を職員に知らせるための UI は実証の対象とせず、①に示した観測データ（画像、温度、音、振動、測量）毎に、どのような UI が望ましいのかを鉄道事業者にヒアリングし、その内容から UI アプリケーション作成に要する概算費用と留意点を整理する。

⑥　観測、検知データを記録するためのデータ蓄積技術（DB）

- 異常を観測、検知した記録データを分析して効率的な保守管理に活用するためには、これらの記録データを DB（データベース）に蓄積する必要がある。
- どのようなデータをどの程度蓄積するのかは各鉄道事業者の判断となる。
- データ蓄積技術（DB）では独自サーバとクラウドサーバの 2 つを対象に、データ容量に応じた概算費用と留意点を整理する。

本業務では、異常を観測、通信、検知、通報するシステムを構築した。しかし、これらは貴重な記録データであり、これらを分析して効率的な保守管理に活用するためには、これらの記録データを DB（データベース）に蓄積する必要がある。一方、このようなデータの蓄積方法には、独自サーバを用いる方法とウエブ上のクラウドサーバを用いる方法の 2 つがあり、それぞれ利点と欠点がある。どのようなデータをどの程度蓄積するのかは各鉄道事業者の判断となることから、データ蓄積技術（DB）については実証の対象とせず、独自サーバとクラウドサーバの 2 つを対象に、データ容量に応じた概算費用と留意点を整理する。

⑦　蓄積データを鉄道事業に活用するための分析技術（AI 等）

- 5G にて蓄積したデータから異常の発生傾向や劣化速度を分析し、人による判断を客観的なデータに基づく科学的判断に置き換えることは、鉄道の保守管理を最適化する上で非常に重要である。
- しかし、現時点では観測データや検知データの蓄積がなく、またどのデータをどのように分析し、何に活用するのかは鉄道事業者の判断となることから、分析技術は実証の対象としない。
- ①に示した観測データ（画像、温度、音、振動、測量）毎に分析と活用の案を整理し、これらの機能を備えるために必要な概算費用と留意点を整理する。

本業務では、AI にて異常を検知するシステムを構築して実証し、一定の精度で異常を検知できることを確認した。一方、協議会の委員より「5G で様々なデータを蓄積し、劣化の予測や対策のタイミングを分析して最適化できれば保全の効率化につながる。」との意見があり、5Gにて蓄積したデータから異常の発生傾向や劣化速度を分析し、人による判断を客観的なデータに基づく科学的判断に置き換えることは、鉄道の保守管理を最適化する上で非常に重要である。

しかし、現時点では観測データや検知データの蓄積がなく、またどのデータをどのように分析し、何に活用するのかは鉄道事業者の判断となることから、分析技術は実証の対象とせず、①に示した観測データ（画像、温度、音、振動、測量）毎に分析と活用の案を整理し、これらの機能を備えるために必要な概算費用と留意点を整理する。

6.3.1.5 横展開の実施計画

5G を鉄道事業における課題解決に活用（横展開）するためには、ニーズ側（鉄道事業者）が自身の目的（課題解決）が達成できるシステムを設計して構築できるように、サービサー側から提供可能な個々のシーズ（技術）で実現可能な性能を整理し、ニーズ側に提示する必要がある。

特に、鉄道インフラの維持・管理の効率化・高度化は、各社の抱える共通課題と考えられ、全国の鉄道事業者が導入ターゲットとなり得る。

このことから、横展開においても実装と同様の形で、横展開の対象となるニーズ側（相手先のニーズを汲み取りながら、適切な情報や要件を導入システムの仕様検討やモニタリング試験を行いながら仕様を決定していくプロセスが必要となる。

なお、ニーズによっては、安全性やメンテナンス等の技術上の課題や運用上の課題等が比較的早期に解決可能な場合も想定される。その場合には、STEP3 や STEP4 の期間を短縮し、積極的に実地での経験を積みながら本格運用につなげていくプロセスとすることも考えられる。

実装STEP	実施内容	期間（検討中）
STEP1	**実証（本実証）**	
STEP2	**実装システムの仕様検討** →検知精度の検討やシステムの耐久性、安定性の確認等	
STEP3	**モニタリング試験（一定期間の運用試験）と改良** →実装のイメージに近い環境下での一定期間の運用試験 →検証課題に対する検証データの確認や改良の方向性の検討	**2年程度**
STEP4	**実装システムの仕様決定（事業モデルの構築）** →実装システムの仕様及び運用方法を決定 →鉄道事業者の体制構築	**1年～2年程度**
STEP5	**実装試験** →実地（設置対象となる駅）での稼働の最終確認試験 →システム、運用の最終チェック	
STEP6	**実装（本格運用）**	

図 6.3.1-1　実施計画（例）（6.2 章の内容を再掲）

※STEP4 における仕様決定にあたっては、他の事業者における実装システムの仕様との関係も考慮しながら、事業者ごとの特有の事情を考慮するカスタマイズ可能な部分と、より多くの事業者への横展開を意識した普及仕様の両面からの検討を行うことが考えられる。

6.3.2 他のインフラ事業者への横展開

6.3.2.1 道路管理における課題の把握

他のインフラ事業者への横展開について検討するため、インフラの中で最もストック量の多い道路を対象に維持管理における課題をヒアリングした。なお、ヒアリングは最も多くの道路を管理している市町村（基礎自治体）のうち、本業務の協議会（５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会）に委員として参画していただいた横須賀市（土木部）に対して実施した。

［ヒアリング概要］

対象：横須賀市　※土木部土木計画課長　岩城氏

日時：2020 年 10 月 29 日

方法：ヒアリング内容の事前送付とウエブ会議形式によるヒアリング

［ヒアリング内容］

横須賀市における道路管理の内容と課題を把握するため、2020 年 10 月 29 日にヒアリングした内容（質問と回答）を以下に示す。

（管理体制）

Q1：横須賀市土木部の担当課の職員数は何名でしょうか？
A1： ［土木計画課］（技術職）3 名、 ［道路管理課］（技術職）8 名 ［道路建設課］（技術職）17 名 ［道路補修課］（技術職）23 名 ［道路維持課］（技術職）35 名 ［河川・傾斜地課］（技術職）13 名

（管理施設）

Q2：横須賀市土木部にて所管しているインフラは道路と河川でしょうか？
A2：他：駐輪場、船の発着場、道路の法面
Q3：横須賀市土木部が管理する道路延長、及び橋梁とトンネルの数はどの程度でしょうか？
A3：［1 級市道］76km、［2 級市道］79km、［その他道路］1,263km ［橋梁］362 橋、［トンネル］50 本、［横断歩道橋］6 橋

（日常点検）

Q4：日常点検はどの程度の頻度でおこなっていますか？
A4：4 台の巡回車両（パトロールカー）にて不定期に実施。過去に災害があった場所等はエリアごとに別途巡回。

Q5：日常点検はどのような方法でおこなっていますか？
A5：市民要望は 3000 件/年程度。この対応に合わせてルート上の道路（路面・路側街路樹など）を車上からの目視にて点検。
Q6：日常点検はどのような体制でおこなっていますか？
A6：1 台のパトロールカーに 2 人が乗車し、常時 4 台が稼働。
Q7：日常点検は直営でしょうか？委託でしょうか？
A7：直営
Q8：日常点検で発見する異常のうち、多いものは何ですか？
A8：路面の異常（陥没、き裂等）、付属物の異常（カーブミラーの鏡面、路側照明の破損等）、樹木の異常（枝等）、清掃、区画線の異常。
Q9：日常点検における課題にはどのようなものがありますか？
A9： ・ 住民対応に時間が取られ、十分な巡回ができていない。 ・ 昭和 40 年代から 50 年代に開発された住宅地の道路や街路樹が更新時期を迎えている。
Q9：日常点検における課題にはどのようなものがありますか？
A9： ・ 住民対応に時間が取られ、十分な巡回ができていない。 ・ 昭和 40 年代から 50 年代に開発された住宅地の道路や街路樹が更新時期を迎えている。 ・ 米軍が使用する道路や幹線道路等の大型車両が通る道路は劣化が早い。 ・ 平作川の周辺等、地盤が緩い箇所の道路も劣化が早い。 ・ 海岸付近では海風によるサビがあり、ペットの糞尿によるサビもある。 ・ 道路の不法占有（乗り上げブロック、植木等）や道路への枝の張り出し、道路への土砂等の流出等への対応。

（定期点検）

Q10：道路のうち 5 年毎の定期点検（※1）をおこなっている施設（トンネル等※2）は何ですか？ ※1 必要な知識及び技能を有する者が近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすることが省令（道路法施行規則第四条の五の二）で定められている点検。 ※2 トンネル、橋その他道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物のうち、損傷、腐食その他の劣化その他の異状が生じた場合に道路の構造又は交通に大きな支障を及ぼすおそれがあるもの。
A10：橋梁、トンネル、横断歩道橋
Q11：定期点検は直営でしょうか？委託でしょうか？
A11：委託。横須賀市では、都市整備技術センターを通じてエリアを分けて地域一括発注。経費は市で実施した場合の金額×X%。横須賀市、横須賀市・都市整備技術センター、請負者の 3 者の判定会議にて 4 段階の健全性を判定。
Q12：定期点検の主な財源（防災・安全交付金、単独費、その他）は何でしょうか？
A12：補助金（防災・安全交付金）
Q13：定期点検における課題にはどのようなものがありますか？
A13：費用がかかること。現在、2 巡目の定期点検を行っているが、市が管理する 362 橋のうち 250 橋程度は規模の小さな溝橋であるため、定期点検を簡易化したい。また、近接

が困難な橋梁も 100 橋程度あり、この中には他の管理者と協議が必要となる跨線橋や跨道橋もある。
Q14：A10 以外の道路施設はどのような頻度で定期点検されていますか？
A14： ［舗装］　路面性状：５年１回（主要路線） ［地下］　空洞化調査：5 年に１回（主要路線） ［法面］　点検していないが、民間の法面崩落事故を受けて注目されている。 ［付属物］道路照明灯　１０００基/年　案内標識７０基（今後１０年に１度） ［その他］
Q15：A10 以外の道路施設はどのような方法で定期点検されていますか？
A15：A10 と同様に都市整備技術センターを通じて地域一括委託、又は業者に個別委託。
Q16：定期点検にて確認される損傷において、特に留意すべき損傷要因はありますか？
A16： ［橋梁］　経年劣化（コンクリートの浮き、剥離） ［トンネル］経年劣化＋漏水 ［舗装］　ひびわれ、わだち掘れ ※長寿命化計画に則って点検の優先度を決定。 ※その他道路の舗装構成は路面舗装が 5cm、路盤が 10cm。 ※主要道路は CBR 検査に基づいて舗装構造を決定。 ［付属物］ボルトの緩み等、取付部のひび割れ

（異常時点検）

Q17：台風や地震等の異常時に行う点検は直営でしょうか？委託でしょうか？
A17：基本は直営にて対応。大規模な損傷などは別途委託。震度 4 以上の地震が発生した場合は、地域の建設会社にパトロールしてもらえる協定を結んでいる。
Q18：異常時点検はどのような体制でおこなっていますか？
A18：災害時の緊急体制にて対応。
Q19：異常時点検における課題にはどのようなものがありますか？
A19： ・　台風では、倒木や飛来物等による苦情が多数発生するが、倒木や落石等により現場に急行できない場合がある。 ・　県はトンネルの坑口付近に監視カメラを設置しているが、市は監視カメラを設置している箇所はない。 ・　異常があった場合の対策の要否判断は熟練者に委ねているのが実情。 ・　SNS 等を活用した個人からの情報提供について現在検討中。

（その他の道路管理）

Q20：点検以外の道路管理における課題にはどのようなものがありますか？
A20： ・　台帳で管理できている施設（照明、標識）とできていない施設（注意喚起看板、ガー

ドレール、車止め、区画線など）があり、台帳管理できていない施設は異常が適切に記録できていない。
・ メール・電話・市民の声、窓口、SNS など様々な情報収集ツールがあるが、国や県の管理道路に関する情報も市に通報される場合があり、通報された情報の内容確認に労力がかかっている。

Q21：道路に関する台帳（道路台帳）はどのように管理していますか？

A21：
[媒体] 電子ファイル
[管理] 委託
[調整頻度] 定期的（年間）
[管理上の課題]
・ 都市整備技術センターに点検情報が蓄積されており、職員にアクセス権限はあるが、さほど活用していない。

［ヒアリング結果］

道路管理者である横須賀市に対するヒアリング結果より、道路管理者である横須賀市が抱える道路管理の課題を以下にまとめる。

＜横須賀市の道路管理における課題＞
（日常点検）
・ 常時 4 台のパトロールカーが稼働しているものの、市民要望が年 3000 件程度あり、この対応に合わせてルート上の道路をパトロールしているのが実情。
・ 横須賀市は昭和 40 年代から 50 年代に開発された住宅地の道路が多く、舗装や街路樹が更新時期を迎えているが、**住民対応に時間が取られ十分な巡回ができていない**。
（定期点検）
・ **橋梁やトンネルの定期点検に多くの費用を要している**。
・ 横須賀市は規模の小さな橋梁が多いが、近接が困難な跨線橋や跨道橋もある。
・ 他の市町村と比べて古いトンネルも多い。
・ 逗子市の法面崩落事故を受け、**道路区域外の防災点検に対するニーズも高まっている**。
（異常時点検）
・ 台風では、倒木や落石等により現場に急行できない場合がある。
・ 異常があった場合の対策の要否判断は熟練者に委ねているのが実情。
（その他の道路管理）
・ 台帳管理できていない道路施設は異常が記録できていない。
・ 様々な情報収集ツールがあるが、通報された情報の内容確認に労力がかかるため、有効に機能していない。

6.3.2.2 5G を活用した課題解決に関する意見（第 1 回協議会）

道路管理における前項の課題を受けて、第 1 回協議会にて 5G を活用した課題解決について討議した。

＜5G を活用した道路管理の課題解決に関する主な意見＞

［道路管理における課題］

- 道路管理における課題はどの自治体でも共通して人手不足であり、代替として 5G 等によるデータ活用が非常に求められている。
- 人をデータで完全に置き換えるのはなく、データを維持や補修にどのように活用するのかが大きな課題である。

［日常点検に関する意見］

- 車のドライブレコーダーを日常点検に活用できないか。日常点検のパトロールで路面を見ることができない中で、バスに搭載されているカメラを使えば幹線道路だけでも路面の状態が把握できる。
- カメラの画像を全部見ることはできないが、AI で異常を感知して知らせてくれるシステムがあれば少人数でも対応できるようになる。
- バスの車庫にローカル５Ｇでデータのプロトコル、そういうアルゴリズムを組めて、ドラレコのデータが抜けるような５Ｇのインターフェースができれば実現性は高い。

［定期点検に関する意見］

- 定期点検で次に点検する 5 年後までは大丈夫と判断した損傷でも、実際に安全かどうかわからない。そのため、1 年毎に損傷の進行が確認できれば安心できる。
- 要は予兆がわかる仕組みになっているかどうかが重要。予兆の検知に使えるデータを観測することが重要である。

［防災点検に関する意見］

- 横須賀市は山が多く、土砂災害警戒区域（イエローゾーン）が 1,279 カ所、その中に崖地が 5,086 カ所あり、全て職員が 10 年かけて調査する予定。このような法面は民有地が多く手が出せないが、道路を守るためにはどうなっているのか把握し、道路区域内で対策しなければならないことが課題。
- 職員が一つずつ見るのは非常に大変。何かこのシステムを通じて効率化する必要がある。

［横展開に関する意見］

- データの抜き出しには 5G が使える。パターンマッチングや位置補正には AI が使える。このような技術を積み上げれば、普及（横展開）させることはできる。
- デジタルツインのように面的に見るという考えの方が横展開を考えやすい。

6.3.2.3 他のインフラ（道路）における 5G 活用案の検討

第 1 回協議会における意見を踏まえて、道路インフラの維持管理における課題に対する 5G の活用案を整理した。

（1）第 1 回協議会における意見

第 1 回協議会において挙げられた「ローカル 5G の性能と条件」及び「5G の活用案」を以下に示す。

（ローカル 5G の性能と条件）

- 1 アンテナの通信範囲 100m から 200m 程度。鉄塔等を建てれば 1km 程度まで拡大可能と想定。
- 導入期間、コスト、利用範囲、セキュリティ等の条件を踏まえて、ローカル 5G とキャリア 5G を組み合わせも可能。
- 通信速度は上り 100Mbps、下り 800Mbps 程度。キャリア 5G は下りのトラフィックが多いため上りと下りの割り当てを変更はできないものの、ローカル 5G なら目的に応じた設定が可能。
- ドローンは、自動航行を含めて遠隔指示による自由な飛行が可能。

（5G の活用案）

- 現状では住民の通報ベースで応急対応していることがほとんど。日常点検・定期点検に活用できれば有効。
- トンネルと橋梁は、５年に１度の点検が国で義務化されているものの、もうちょっと短いスパンでトンネル内のき裂や様子が把握できれば、安全確認に有効。
- 公共交通を活用した、映像・センサー等を用いた状況把握の高頻度化。
- バスの車庫にローカル５Ｇを設置し、データを抜き出し。
- 点検に制約（時間・場所）が生じる箇所でドローンを活用し、AI で異常検知して知らせてくれるシステムになれば、少人数でも対応できる。
- 要注意箇所（水が溜まりひび割れが発生しやすい箇所等）の事前段階での予測と重点的な観測への活用。
- 民有地の法面などの現状や危険度の把握。

（2）他のインフラ（道路）の維持管理への 5G 活用検討

第 1 回協議会の意見も踏まえ、5G 活用の方向性を検討した。

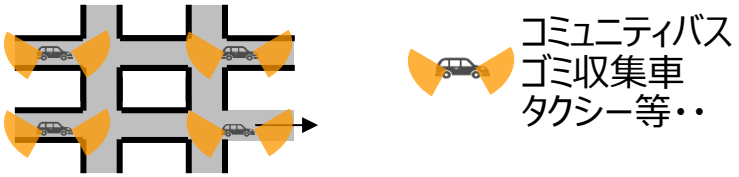
（検討項目）

1) 日常点検（道路パトロール）への活用
2) 舗装点検又は路面性状調査への活用
3) 道路施設への定期点検（近接目視点検）への活用
4) 道路区域外からの災害防止への活用
5) 工事の効率化の活用

各項目の具体の内容を次頁以降に示す。

（活用検討）

1)　日常点検（道路パトロール）への活用
概要
・　道路管理者は、道路法第四十二条にて道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もつて一般交通に支障を及ぼさないように努める責務を負っており、道路法施行令第三十五条の二第一項第一号にて適切な時期に道路の巡視（道路パトロール）を行うことが法令で定められている。 ・　道路管理者は、巡回車両によるパトロールによって道路を日常的に点検している。 ・　日常点検では、車上からの目視と体感によって道路上の異常の有無を点検しており、舗装の損傷や落下物等の異常が確認された場合は、異常の発生位置と内容を記録するとともに、利用者が安全に通行できるように補修や撤去等の措置を講じる。 ・　日常点検は、通常、道路管理者の職員 2 名 1 組にて実施される。 ・　日常点検の頻度（点検周期）は道路管理者に委ねられており、道路管理者ごとに異なっている。また、道路の種類や特性（交通量等）によっても異なっている。
維持管理における課題
・　国や地方公共団体の道路管理者は、道路管理担当職員数の制約によって、日常点検（道路パトロール）が十分な頻度で実施できていない。 ・　これによって道路の異常は住民や利用者からの通報が増加しており、住民からの通報対応のための出動に合わせて道路パトロールせざるを得ない状況になっている。 ・　そのため、定期的にパトロールできていない道路があり、道路の安全確保が課題になっている。
5G を活用した課題の解決案
・　バスやタクシー等に設置されているドライブレコーダーから道路の異常を検知することにより、異常検知の範囲と頻度を向上させ、通行の安全性を高める。 ・　具体には、バスやタクシーの車両基地に 5G 環境を構築し、ドライブレコーダーに記録された画像を自動的にクラウドサーバに送信する。送信された画像から AI（人工知能）によって異常を検知し、検知した異常を道路管理者に通報する。
5G を活用した解決案を導入するための課題
・　バスやタクシー等の民間事業者の協力。 ・　ドライブレコーダーに記録された画像の 5G による通信システムの構築。 ・　異常を検知するための AI と道路管理者に異常を知らせる UI の構築。 ・　バスやタクシーのドライブレコーダーによって記録された膨大な画像の保存・蓄積方法の構築。 ・　異常の検知範囲がバスやタクシーの通行道路に限定される。 ・　バスは一定の頻度で異常を検知できるものの、タクシーは異常の検知頻度をコントロールできない。
5G 導入によって期待される効果
・　道路異常の検知範囲の拡大と検知頻度の向上による安全性の大幅な向上。 ・　遠隔監視による延長が膨大な管理道路に対する日常点検（道路パトロール）の効率化。 ・　ドライブレコーダーにて記録された画像による異常発生傾向の把握・分析と効率的な道路異常の未然防止。



＜参考：道路管理に係る主な法令と要領の内容＞

道路法（昭和二十七年法律第百八十号）
（道路の維持又は修繕）
第四十二条　**道路管理者は、道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もつて一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない**。
２　道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、政令で定める。
３　前項の技術的基準は、道路の修繕を効率的に行うための点検に関する基準を含むものでなければならない。

道路法施行令（昭和二十七年政令第四百七十九号）
（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）
第三十五条の二　法第四十二条第二項の政令で定める道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、次のとおりとする。
一　道路の構造、交通状況又は維持若しくは修繕の状況、道路の存する地域の地形、地質又は気象の状況その他の状況（次号において「道路構造等」という。）を勘案して、**適切な時期に、道路の巡視を行い、及び清掃、除草、除雪その他の道路の機能を維持するために必要な措置を講ずること**。

2)　舗装点検又は路面性状調査への活用
概要
・　国土交通省は、地方自治法第二百四十五条の四に基づく地方公共団体への技術的助言として、道路法施行令第三十五条の二第一項第二号の規定に基づく舗装の点検要領として「舗装点検要領」（国土交通省 道路局、平成 28 年 10 月）を公開している。 ・　上記要領は、道路法施行令第三十五条の二第一項第一号の巡視（道路パトロール）とは別に、同条同項第二号に基づく舗装修繕の効率的な実施に向け、車道上の舗装の現状（状態）について必要な情報を得ることを目的としている。 ・　舗装路面の状態監視については、路面性状調査による路面の状態評価が以前から行われているものの、費用が高いため調査範囲は一部の車線に限定されている。
維持管理における課題
・　市区町村が管理する道路（市区町村道）は延長が膨大で、路面性状調査は調査費用が高価であるため、すべての車道の路面状態を路面性状調査で定期的に観測することは不可能。 ・　舗装の効率的に修繕するためには、路面の状態を定期的に観測する必要があるものの、一般的な車両に設置されているドライブレコーダーの記録画像から路面性状調査と同等の路面性状（ひび割れ率、わだち掘れ量、縦断凸凹量、IRI、MCI）を観測することは困難。 ・　膨大な市区町村道における車道の路面状態を定期的に観測するためには、路面性状調査に代わる安価な路面状態の観測手法を構築する必要がある。

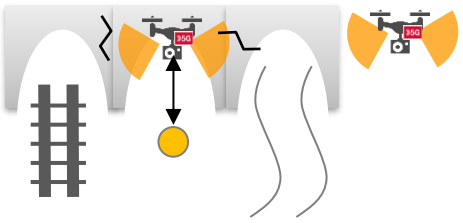
⇒　舗装路面や道路状況の安価な観測手法が主な開発対象であり、5G により解決する課題ではないため、5G の活用対象から除外する。

⇒　前項 1)のドライブレコーダーより舗装路面や道路状況の安価に観測することができれば、1)に包含されるため、1)に含める。

＜参考：道路管理に係る主な法令と要領の内容＞

道路法施行令（昭和二十七年政令第四百七十九号）
（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）
第三十五条の二　法第四十二条第二項の政令で定める道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、次のとおりとする。
一　※省略。
二　**道路の点検は**、トンネル、橋その他の道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物について、**道路構造等を勘案して、適切な時期に、目視その他適切な方法により行うこと**。
※以降、省略。

3)　道路施設への定期点検（近接目視点検）への活用
概要
・　平成 26 年 7 月の道路法改正によって、「トンネル、橋その他道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物のうち、損傷、腐食その他の劣化その他の異状が生じた場合に道路の構造又は交通に大きな支障を及ぼすおそれがあるもの（以下この条において「トンネル等」という。）の点検は、トンネル等の点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有する者が行うこととし、近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすること。」が定められた。（道路法施行規則第四条の五の二第一項） ・　上記法令に基づき、道路管理者は「トンネル等」に該当する道路施設等に対し、5 年毎の定期点検を行うとともに、「トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示」に基づき、健全性をⅠ～Ⅳの 4 段階に区分している。
維持管理における課題
・　トンネル等の定期点検ではトンネル等の健全性をⅠ～Ⅳの 4 段階に区分することが定められており、健全性Ⅲ（早期措置段階）に区分されたトンネル等は次回の定期点検までに措置することが一般的であるため、定期点検から措置まで最大で 4 年間空く可能性がある。また、健全性Ⅱ（予防保全段階）に区分されたトンネル等は経過観察が一般的であるため、次回の定期点検まで 5 年間は点検されない。そのため、急な損傷の進行によって道路利用者等の安全が脅かされる可能性がある。 ・　トンネル等の定期点検は近接目視を基本としているものの、跨線橋や跨道橋などは桁下等の道路規制の制約等によって十分な近接目視が行なえない場合がある。
5G を活用した課題の解決案
・　次回の定期点検や措置までに時間が空く場合は、当該トンネル等を含む範囲に 5G 環境を構築し、状態を監視するためのカメラを設置することにより、近接目視に代わって損傷の進行を常時監視することできる。 ・　また、5G によるドローン（小型無人飛行機）の自動走行や遠隔操作によって、人による近接困難箇所でも遠隔からの近接目視と画像診断が可能となる。
5G を活用した解決案を導入するための課題
・　5G 環境を構築する範囲及び費用。 ・　道路上又は近傍におけるドローン飛行の許認可と安全確保。 ・　遠隔からのドローン操作と近接目視及び画像診断の精度確保。
5G 導入によって期待される効果
・　カメラによる状態監視による安全の確保。 ・　ドローンによる近接範囲の拡大と目視点検の精度向上。



映像伝送ドローン
→橋桁等の点検

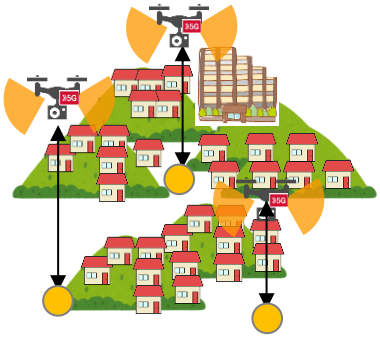
＜参考：道路管理に係る主な法令と要領の内容＞

道路法施行規則（昭和二十七年建設省令第二十五号）
（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）
第四条の五の六　令第三十五条の二第二項の国土交通省令で定める道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、次のとおりとする。
一　トンネル、橋その他道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物のうち、損傷、腐食その他の劣化その他の異状が生じた場合に道路の構造又は交通に大きな支障を及ぼすおそれがあるもの（以下この条において「トンネル等」という。）の点検は、トンネル等の点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有する者が行うこととし、近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすること。
二　前号の点検を行つたときは、当該トンネル等について健全性の診断を行い、その結果を国土交通大臣が定めるところにより分類すること。
三　第一号の点検及び前号の診断の結果並びにトンネル等について令第三十五条の二第一項第三号の措置を講じたときは、その内容を記録し、当該トンネル等が利用されている期間中は、これを保存すること。
※四、省略。

トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示（平成二十六年国土交通省告示第四百二十六号）
　トンネル等の健全性の診断結果については、次の表に掲げるトンネル等の状態に応じ、次の表に掲げる区分に分類すること。

区分		状態
Ⅰ	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。
Ⅱ	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
Ⅲ	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
Ⅳ	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

4)　道路区域外からの災害防止への活用
概要
・　近年、道路区域外に起因する道路の災害や事故が増加している。 ・　国土交通省では道路防災点検によって道路区域外の斜面や法面を点検しているが、国土交通省以外の道路管理者は道路区域外の斜面や法面に対する点検がほとんど実施されていない。
維持管理における課題
・　法的根拠がないため、道路区域外を点検するための予算が確保できない。 ・　道路に隣接する斜面や法面は範囲が膨大であるため、広範囲を効率的に点検しなければならない。 ・　点検範囲が広いため、国土交通省の道路防災点検では事前の絞り込み（スクリーニング）によって徒歩による現地調査を行う範囲（要点検、カルテ対応）を絞り込んでいるものの、対象範囲外からの災害が多く発生しておりスクリーニングの精度向上が課題となっている。
5G を活用した課題の解決案
・　ドローンによって道路に隣接する斜面や法面の状態を上空から点検することによって、道路区域外からの災害や事故の原因を効率的に把握することができる。 ・　ドローンによる上空からの点検によって、徒歩による現地調査が必要な範囲を精度よく絞り込むことができる。
5G を活用した解決案を導入するための課題
・　5G 環境の構築とドローンの飛行範囲の制限。 ・　道路区域外にドローンを飛行させるための許認可と安全確保。 ・　道路区域外の土地所有者との協議。
5G 導入によって期待される効果
・　道路区域外からの災害や事故原因の効率的な把握と未然防止。



映像伝送ドローン
→法面の変位を検出

5)　工事の効率化の活用
概要
・　インフラ事業者は工事を行う際、工事が適切に行われているかを確認するための様々な検査を、職員が現地立会にて実施している。 ・　工事では工事影響や安全性を確認するための様々な計測や監視を行っている。また、計測や監視以外も含め、工事の発注者と請負者は様々なデータを通信している。
維持管理における課題
・　職員数の減少によって現地立会による検査時間が確保できなくなっている。 ・　工事現場で行われる計測や監視等のデータは有線（ケーブル）にて通信しているため、様々な通信ケーブルが配線されており、ケーブルの切断等によりデータが取得できなくなる場合がある。
5G を活用した課題の解決案
・　工事の現場エリアに 5G 環境を構築することにより、工事に係わる様々なデータを無線で通信することができる。 ・　職員が事務所からの遠隔立会にて工事の検査を行うことにより、これまでに要していた職員の移動時間を削減できる。 ・　データ通信を無線化することにより、ケーブル配線に要する労力を削除するとともに、切断等による通信不良を抑制できる。
5G を活用した解決案を導入するための課題
・　無線によるデータの通信品質の確保。 ・　5G 環境の構築による費用対効果の確認。
5G 導入によって期待される効果
・　職員の移動時間の削減による工事検査の効率化。 ・　有線通信から無線通信への切り替えによるケーブル配線と通信に要する費用の削減。 ・　重機の遠隔操作や自動化施工による工事コストの削減。

(3) 第 2 回協議会における意見

第 2 回協議会で挙げられた意見を以降に示す。

(道路の維持管理における課題)

- 横須賀市は戦前から整備されたインフラが多く、住民からの道路要望はこの 10 年で 1,000 件くらい増えており、より効率的な維持管理が求められている。
- 土木技術職員が減っており、豊富な経験を有する職員がいなくなり、技術の継承が難しくなっている。

(課題に対するニーズ)

- 限られた職員で、効率的に安全・安心を確保するため、5G 等の通信技術や AI 等の解析技術を活用して、経験・技術の蓄積をデータで補助する仕組みづくりが必要。
- 通信技術の活用には期待があるが、実際に導入するとなると、具体的にどこまでできるのか、コストはどの程度かかるのかを明確にすることが必要。

(5G による課題解決策)

- 横須賀市は道路パトロールへの活用を優先的に挙げたが、国や県も含めて道路がつながっているため、全体的な面でパトロールに活用できたらコストの低減も期待できる。
- 5G はデータ（情報）を即時に上げて、早急に応急処置できるという面で非常に有効である。
- 鉄道ではセキュリティの面からクローズドのローカル 5G が必要かもしれないが、道路は面的な展開が必要なので 5G ならパブリックの公衆網を活用する方法もある。バスから撮影した路面のデータであれば、データのセキュリティはさほど重要ではない。

（4）道路の維持管理における 5G 活用案

第 2 回協議会での意見を踏まえ、5G 活用案について検討を行った。

- 他のインフラ分野への横展開として、道路管理者である横須賀市に道路の維持管理分野における L5G の活用についてヒアリングを実施。
- 道路の維持管理における課題とニーズから、道路の維持管理分野における L5G を活用した課題の解決案として 4 つの活用場面を想定。

【道路の維持管理分野における L5G を活用した課題解決案】

①公共交通（バス、タクシー等）を活用した道路パトロールの効率化
②ドローンによる道路施設（橋、トンネル等）定期点検の効率化
③ドローンによる道路区域外の災害危険箇所把握の効率化
④監督官員による遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化

<解決案①のイメージ>

カメラ搭載バス

バス路線の日常パトロールをバスやタクシーに搭載したカメラで代行。

<解決案②のイメージ>

映像伝送ドローン

道路施設の近接目視点検をドローンのカメラ映像で代行。

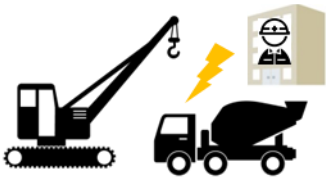
<解決案③のイメージ>

映像伝送ドローン

道路区域外の災害危険箇所をドローンで把握。

<解決案④のイメージ>

遠隔立会・監視



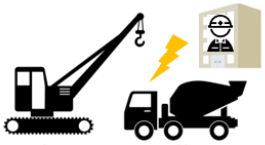
工事現場を映像にて遠隔立会、遠隔監視。

<table>
<tr><th colspan="2">①公共交通（バス、タクシー等）を活用した道路パトロールの効率化</th></tr>
<tr><td>イメージ</td><td>＜解決案①のイメージ＞
カメラ搭載バス

バス路線の日常パトロールをバスやタクシーに搭載したカメラで代行。</td></tr>
<tr><td>道路管理における課題</td><td>➢ 職員数の制約により、道路パトロール（日常点検）が十分な頻度で実施できていない。
・ 横須賀市では、住民からの通報対応の出動に合わせて道路パトロールせざるを得ない状況。
・ 公共交通のドライブレコーダーで撮影した画像データは道路管理に活用できていない。</td></tr>
<tr><td>5G を活用した課題の解決案</td><td>➢ バスやタクシーのドライブレコーダー画像などから道路の異常を検知。
・ 車両基地に L5G 環境を構築し、ドライブレコーダー画像などを自動送信。
・ 送信された画像などから AI で異常を検知し、道路管理者に通報。</td></tr>
<tr><td>期待される効果</td><td>➢ 道路の異常検知の範囲拡大と頻度向上による安全性の向上。
➢ AI による異常検知による道路パトロール（日常点検）の効率化。
➢ 客観的なデータに基づく異常の傾向分析と効率的な防止。</td></tr>
<tr><td>5G 導入に向けた課題</td><td>➢ 実装可能な異常検知システムの構築。（技術面）
・ L5G によるデータ通信環境の整備。
・ AI による異常の自動検知システムの開発と実装可能な UI の構築。
・ 膨大な記録データの保存。蓄積、分析方法の構築。
➢ バスやタクシーの民間事業者や他の道路管理者を含む事業スキームの構築。</td></tr>
</table>

②ドローンによる道路施設（橋、トンネル等）定期点検の効率化	
イメージ	＜解決案②のイメージ＞ 映像伝送ドローン 道路施設の近接目視点検をドローンのカメラ映像で代行。
道路管理における課題	➢ トンネル等の定期点検では健全性をⅠ～Ⅳの 4 段階に区分することが定められている。 ・ 健全性Ⅲ（早期措置段階）の施設は次回の定期点検までに措置することが一般的であるため、**定期点検から措置まで最大で 4 年間空く可能性有**。 ・ 健全性Ⅱ（予防保全段階）の施設は 5 年後の定期点検まで点検されないため、**損傷の急な進行によって道路利用者等の安全が脅かされる可能性有**。 ➢ 施設の定期点検は近接目視が基本であるものの、橋梁やトンネルでは**十分に近接目視できない場合がある**。
5G を活用した課題の解決案	➢ 対象施設を含む範囲に 5G 環境を構築して状態監視することにより、近接目視に代わって**損傷の進行を常時監視**する。 ➢ 5G によるドローンの自動走行や遠隔操作によって、人による**近接困難箇所でも遠隔からの近接目視と画像診断が可能**となる
期待される効果	➢ カメラによる状態監視による安全の確保。 ➢ ドローンによる近接範囲の拡大と目視点検の精度向上。
5G 導入に向けた課題	➢ 道路上または近傍におけるドローン飛行の許認可と安全確保。 ➢ 遠隔からのドローン操作と近接目視及び画像診断の精度確保。

③ドローンによる道路区域外の災害危険箇所把握の効率化	
イメージ	＜解決案③のイメージ＞ 映像伝送ドローン 道路区域外の災害危険箇所をドローンで把握。
道路管理における課題	➢ 近年、道路区域外に起因する道路の災害や事故が増加しているものの、法的根拠がなく、道路区域外を点検するための予算が確保できない。 ➢ 対象範囲が膨大であるため、**広範囲を効率的に点検**する必要がある。 ・ 国の道路防災点検では、現地調査を行う範囲を絞り込み（スクリーニング）しているものの、現地調査の対象外からも災害が多く発生しており、スクリーニングの精度向上が課題となっている。
5G を活用した課題の解決案	➢ ドローンによって道路に隣接する斜面や法面の状態を上空から点検することによって、**道路区域外の災害原因を効率的に把握**する。 ➢ ドローンによる上空からの点検によって、**徒歩による現地調査が必要な範囲を精度よく絞り込む**（スクリーニングする）ことができる。
期待される効果	➢ 道路区域外からの災害原因の効率的な把握。 ➢ 道路区域外からの災害の未然防止。
5G 導入に向けた課題	➢ 5G 環境の構築。 ➢ ドローンの飛行範囲（時間）の制限。 ➢ 道路区域外にドローンを飛行させるための許認可と安全確保。 ➢ 道路区域外の土地所有者との協議。

④監督員による遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化	
イメージ	＜解決案④のイメージ＞ 遠隔立会・監視  工事現場を映像にて遠隔立会、遠隔監視。
道路管理における課題	➢ インフラ事業者は、工事が適切に行われているか確認するため様々な検査を実施しているものの、職員数の減少によって**現地立会による検査時間が確保できなくなっている**。 ➢ 工事現場での計測や監視のデータは有線にて通信しているため、様々な通信ケーブルが配線されており、**ケーブルの切断等によりデータが取得できなくなる場合がある**。
5G を活用した課題の解決案	➢ 工事現場にL5G環境を構築することで、**工事に係わる様々なデータが無線通信できる**。 ➢ 職員が事務所からの**遠隔立会にて工事検査を行う**ことにより、職員の移動時間を削減できる。 ➢ ケーブル配線に要する労力を削除するとともに、切断等による通信不良を抑制できる。
期待される効果	➢ 移動時間の削減による工事検査職員の負担軽減。 ➢ 有線通信から無線通信への切り替えによるケーブル配線と通信費用の削減。 ➢ 重機の遠隔操作や自動化施工による工事コストの削減。
5G 導入に向けた課題	➢ 無線によるデータの通信品質の確保。

（5）道路の維持管理分野へのローカル 5G の適用性評価

- L5G の得失から道路の維持管理分野における L5G の適用性（実現可能性）を検討。
- 7 の着眼点から L5G の適用性を評価し、①から④の解決策の中から、適用性の高い L5G の活用パターンを選定。

【L5G の適用性評価項目】

L5G の得失		着眼点
–	–	1）事業者ニーズが高いか？
利点	・大容量通信	2）通信データ量が大きいか？
	・同時多点接続	3）多点同時接続の可能性が高いか？
	・低遅延	4）低遅延が求められるか？
	・高安定性	5）高い通信品質が求められるか？
欠点	・エリア限定	6）通信エリアが L5G と適合しているか？
	・高価格	7）コストに合った効果が得られるか？

＜解決案①のイメージ＞

カメラ搭載バス

バス路線の日常パトロールをバスやタクシーに搭載したカメラで代行。

＜解決案②のイメージ＞

映像伝送ドローン

道路施設の近接目視点検をドローンのカメラ映像で代行。

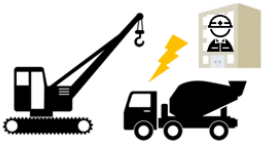
＜解決案③のイメージ＞

映像伝送ドローン

道路区域外の災害危険箇所をドローンで把握。

＜解決案④のイメージ＞

遠隔立会・監視



工事現場を映像にて遠隔立会、遠隔監視。

- L5G の適用性（実現可能性）を、高：2 点、中：1 点、低：0 点にて評価。
- 点数評価より、以下の 2 つの活用パターンの適用性が高いと評価。
  ① 公共交通を活用した道路パトロールの効率化
  ④ 監督員による遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化

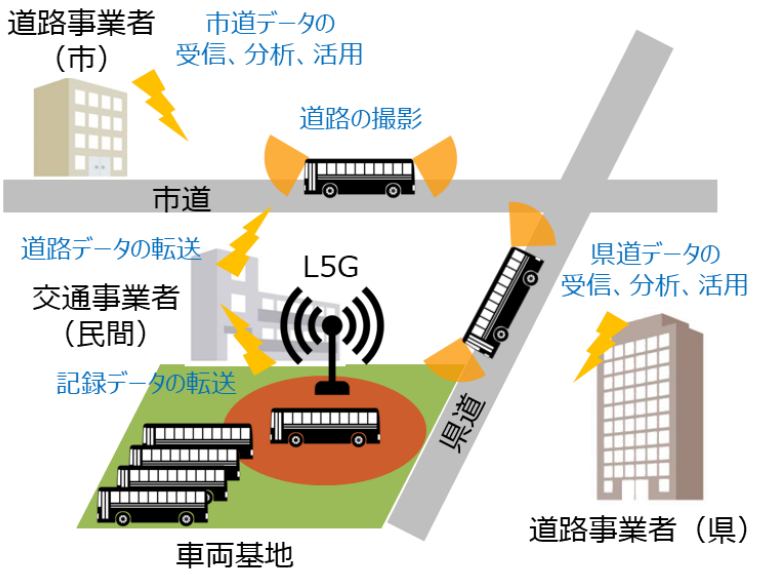
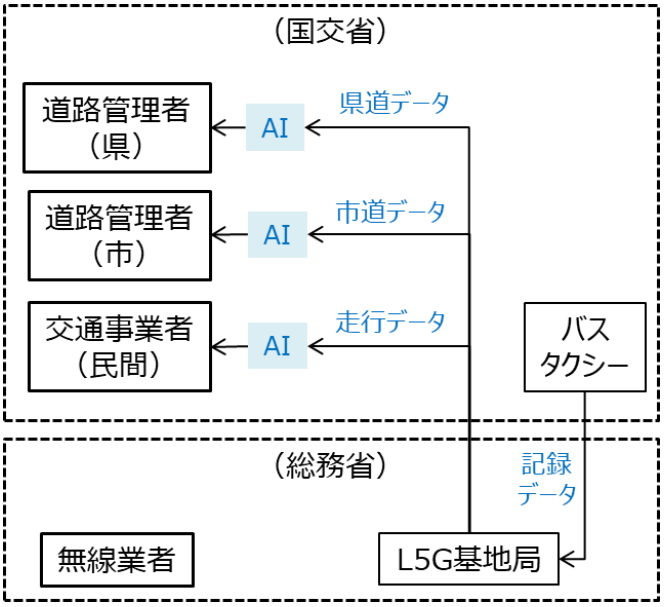
【L5G の適用性評価】

L5G を活用した課題解決案	1)	2)	3)	4)	5)	6)	7)	計
①公共交通を活用した道路パトロールの効率化	2	2	2	1	1	1	1	10
②ドローンによる道路施設定期点検の効率化	1	1	0	0	0	1	0	3
③ドローンによる災害危険箇所把握の効率化	1	2	0	0	0	1	0	4
④遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化	1	2	2	2	1	1	1	10

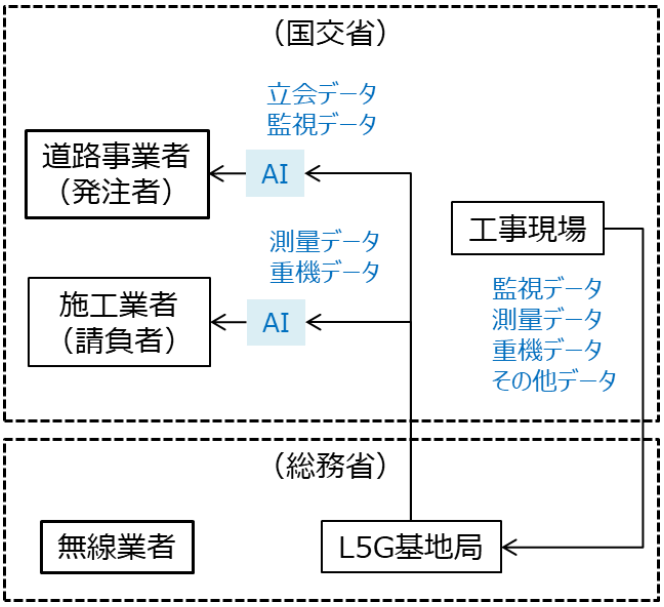
⇒ ①と④の活用パターンが L5G の適用性（実現可能性）が高い。

（6）横展開スキーム案

上記で抽出された「①公共交通を活用した道路パトロールの効率化のスキーム」及び「④遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化」について、次頁以降でスキーム案の具体化を行った。

<table>
<tr><th colspan="2">① 公共交通（バス、タクシー等）を活用した道路パトロールの効率化</th></tr>
<tr><td>イメージ</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>スキーム</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>L5G 導入上の課題</td><td>• 通信するデータの種類、容量。
• 利用者の負担を軽減するための AI 設計。
• 記録データの蓄積。
• 費用分担を含む事業スキームの構築。</td></tr>
<tr><td>L5G を導入するための対応案</td><td>• 道路データと走行データの容量等の確認（試行）
• AI による負担軽減効果の確認（試行＋ヒアリング）
• L5G によるデータの転送、蓄積（試行）
• 利害関係者への費用分担等の調整（ヒアリング）</td></tr>
</table>

④ 遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化

イメージ	
スキーム	
L5G 導入上の課題	• 通信するデータの種類、容量。 • 利用者の負担を軽減するための AI 設計。 • データの蓄積。 • 費用対効果の確認。
L5G を導入するための対応案	• 工事データの容量等の確認（試行） • AI による負担軽減効果の確認（試行＋ヒアリング） • L5G によるデータの転送、蓄積（試行） • 費用対効果の確認（ヒアリング）

6.4 共同利用型プラットフォームに関する検討

5G があらゆる分野や地域において浸透し、徹底的に使いこなされている「Beyond 5G ready」な環境の実現に向け、多様なステークホルダによるローカル 5G 等を活用したユースケースの横展開を促進する取組が期待されており、その実現方策の一つとして、「Beyond 5G 推進戦略－6 Gへのロードマップ－」では、図 25 に示すようなクラウド型の共通プラットフォーム（「5G ソリューション提供センター（仮称）」）が考えられている。

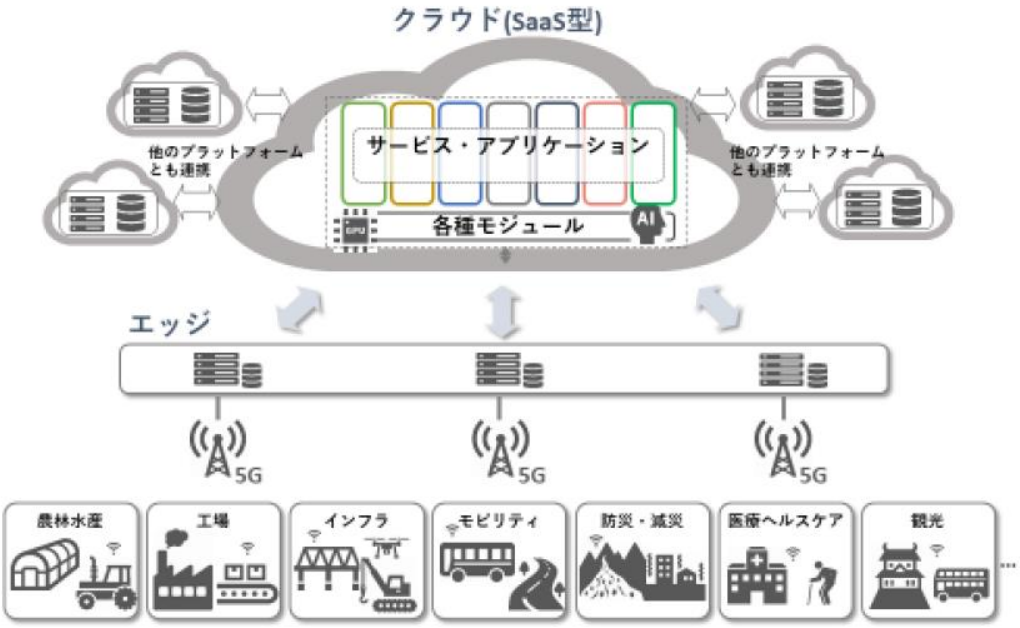


図 6.3.2-1　5G ソリューションセンター（仮称）のイメージ

本実証において構築したクラウド基盤を通じて、共同利用型プラットフォームの在り方について検討を行った。

具体的には、本実証において構築した、インターネットに出ない閉域の 5G クラウド基盤をユーザー企業・団体や開発主体等が容易に利用できるようにするために、当該クラウド基盤がどのようなモジュールや機能群、必要とされるインターフェース（API 等）、データ連携仕様(フォーマット等)を具備すべきかに関する検討を行い、仕様案を取りまとめた。

6.4.1 クラウド基盤の構築

3.2 の記述のとおり、本実証において、NTT ドコモが提供するインターネットに出ないクラウド基盤上に以下を構築した。

①映像受配信システム：映像を AI システムと遠隔監視室へ配信

②線路巡視 AI 解析システム：線路映像を AI 解析し、検知結果を配信

③列車検査 AI 解析システム：列車映像を AI 解析し、検知結果を配信

④録画共有システム：線路・列車配信映像を録画・蓄積
⑤映像配信システム：検知結果の蓄積・配信、振り返り録画映像を配信

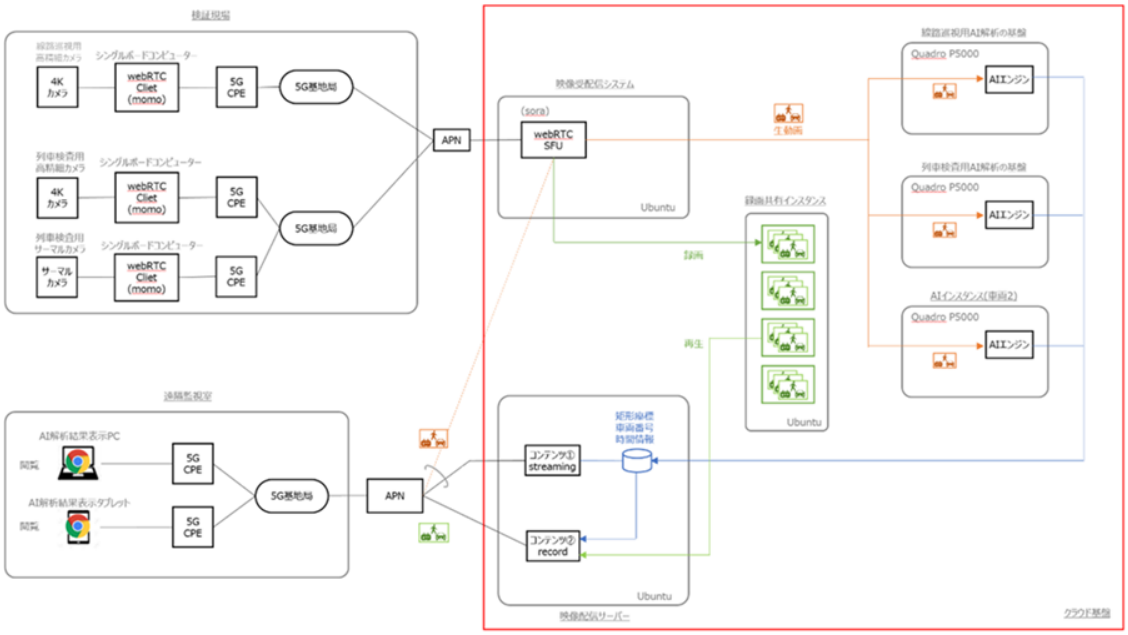


図 6.4.1-1　クラウド基盤上に構築された高精細映像 AI 解析システム

6.4.2　構築したクラウド基盤と共同利用型プラットフォームのコンセプトの親和性

本実証では、構築したクラウド基盤上に、5G で受信した高精細映像を AI 解析し、検知結果を 5G で配信するシステムを実装した。鉄道インフラの検査作業員は、4k カメラ等で撮影した映像をクラウド基盤のシステムに 5G 経由で送るだけで、当該高精細映像の AI 解析結果を 5G 経由で PC 等でリアルタイムに得ることが可能となっている。

この高精細映像 AI 解析の仕組みは、鉄道分野以外の社会インフラ分野における様々な課題解決システムにも活用可能であるし、また、高精細映像 AI 解析以外の様々なシステムをクラウド基盤上に実装することも可能である。

このように、本実証で構築したクラウド基盤は共同利用型プラットフォームのコンセプトと親和性のあるものであり、本実証において構築したクラウド基盤におけるモジュールや機能群、インターフェース（API 等）、データ連携仕様(フォーマット等)のうち、提示可能なものを取りまとめることが共同利用型プラットフォームの検討に有効であると考えた。

6.4.3 共同利用型プラットフォーム検討に向けて提示可能な仕様書案

本実証の成果物として本報告書に記載、あるいは付録４として添付するもののうち、以下の仕様案が共同利用型プラットフォーム検討に向けて提示可能である。

表 6.4.3-1　本実証の成果を踏まえ提示可能な仕様書案

報告物（成果報告書内）	内容
NW構成図（全体）	NW構成の全体像
NW構成図（詳細）	NWセグメント、インタフェース設計等の明記
参考１：リアルタイムデータフロー	リアルタイム配信される映像をAI解析し、ユーザ端末等で表示する際のデータフロー
参考２：振り返りデータフロー	振り返り・過去データ閲覧として、ユーザからのリクエストに応じて録画映像を配信し、AI解析結果と合わせてユーザ端末等に表示する際のデータフロー
クラウド環境設計書	クラウド上の構成される各インスタンスの説明、、機能要件・リソース割当等
現場環境設計書	センシングデバイス、インタフェース部分の設計内容等
インスタンス設計書１： WebRTCインスタンス	NW構成に基づくWebRTCインスタンスの機能・設計内容等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）
インスタンス設計書２： 線路巡視AIインスタンス	NW構成に基づく線路巡視AIインスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）
インスタンス設計書３： 列車検査AI（4K映像解析）インスタンス	NW構成に基づく列車検査（4K映像解析）AIインスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）
インスタンス設計書４： 列車検査AI（サーマル解析）インスタンス	NW構成に基づく列車検査AI（サーマル解析）AIインスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）
インスタンス設計書５： 録画共有インスタンス	NW構成に基づく録画共有インスタンスの機能・設計内容等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）
インスタンス設計書６： Webサーバインスタンス	NW構成に基づくWebサーバインスタンスの機能・設計内容（UI設計含む）等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）

6.5 まとめ

(1) 実装・横展開の際の視点

✧ 本実証では、AI 検知も含めたパッケージを検証対象としているものの、実装・横展開に向けては、「早期知覚あるいは人間で知覚できない部分を補う」という視点だけでなく、「人間が行う現地作業を効率化する」という視点も考えられる。

(2) 持続可能な事業モデル等

✧ 「固定カメラによる車両の瑕疵検知」については、高頻度点検（状態監視）による安全性の向上を目指し、将来的には目視点検の代替も見据えていくことが展開の方向性として考えられる。

⇒このためには、従来の検知内容・列車検査体系の見直しや効率的かつ効果的な追加機能の検討等をさらに深化していく必要がある

✧ 「ドローン等を活用した巡視・検知」については、線状の軌道を対象にとして係員徒歩巡視をドローン等により無人で実施する案や、人が近づくことが容易ではない橋梁等のインフラ点検にドローンを活用する案などが考えられる。

⇒このためには、操縦者の技量に左右されない自律航行の技術開発や目的に応じた飛行高度や画像・映像取得範囲などをさらに深化していく必要がある。

(3) 横展開に資する普及モデル

✧ 「他の鉄道事業者」に対しては、事業者ごとに問題認識や現状の課題等のバックグラウンドが異なることに配慮しながら、多様なニーズの掘り起こしとともに、サービサー側から提供可能な個々のシーズ（技術）で実現可能な性能を整理し、ニーズ側に提示するようなアプローチも必要と考えられる。

✧ 「他のインフラ事業者」については、市場の大きい道路インフラを対象とした場合、「公共交通を活用した道路パトロールの効率化」および「遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化」が、ローカル 5G の適用性が高いと考えられる。

✧ ただし、いずれの横展開においても、費用対効果を勘案しながら、効率的な記録データの蓄積方法や費用分担を含む事業スキームの構築が課題となる。他方で、ローカル 5G は技術開発段階にあり、コスト面で変動要因が多く存在することにも配慮しながら、事業性の検討をさらに深化することが必要である。

(4) 共同利用型プラットフォーム

✧ 複数の事業者が同様のシステムを開発するような競争環境は、社会における技術発展においては分割損となり得るため、共同利用型プラットフォームの展開に資する情報展開に寄与したいと考える。

✧ 本実証で構築したシステム構成やデータフロー等に関する設計書の情報展開を行うことで、同様の構成であれば開発コストを飛躍的に低廉化でき、短期間で社会ニーズに資するシステム開発が実現できると考えられる。

7. 会合等の開催（該当する活動がある場合）

実証地域における実装及び横展開に資する普及モデルの検討にあたっては、以下に示す目的を踏まえた協議・検討を行うために、関係者からなる協議会を組織した。

7.1 協議会の目的

協議会の目的として、以下の 2 点を設定した。

- 本実証における実証結果の評価・分析及び効果検証、機能検証、運用検証結果に関する協議
- 実証地域での実装や、横展開の方向性とそのための対応事項に対する対応方策や課題解決の検討

7.2 協議会の構成員

協議会の構成員と想定した役割について以下に示す。

表 6.4.3-1　構成員の選定の考え方

構成員	役割
有識者	
インフラの維持管理、アセットマネジメント	・インフラの維持管理やアセットマネジメントの観点より、本実証モデルや横展開に資する普及モデルが具備すべき機能や性能等に関して専門的見地から意見をいただく。
AI 技術	・AI 技術（映像解析）のインフラ維持管理事業における普及展開に向け、技術的な見地に基づく助言や事例共有等をいただく。
鉄道の技術基準（鉄道事業者の施設の維持管理の実態）	・鉄道の維持管理に係る実務内容や現在の省令に定められた維持管理に関する条項の内容及び各鉄道事業者が実施基準で定めるべき内容等、技術基準の観点から、本実証モデルや横展開に資する普及モデルが具備すべき機能や性能、鉄道事業者の体制等について意見をいただく。
横須賀市役所	・その他事業（土木インフラのモニタリングなど）への応用可能性を検討するにあたり、市が抱える課題の共有と実応用に向けた意見交換を実施する。
京急以外の鉄道事業者（鉄道車両保守、軌道保守の専門家）	・実証実験での仕様を他鉄道事業者に横展開する場合に、適用にあたっての課題や仕様変更等の意見をいただく。
その他委員	総務省、コンソーシアムメンバー

5G等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会　名簿

	委　嘱	氏　　名	所　　属
1	委 員	松島　格也	京都大学大学院 工学系研究科 都市社会工学専攻 准教授
2	委 員	林　和則	京都大学 国際高等教育院附属データ科学イノベーション教育研究センター／大学院情報学研究科 教授
3	委 員	押立　貴志	法政大学 大学院特任研究員
4	委 員	田中　一弘	株式会社カズレールウェイコンサルタント代表取締役社長
5	委 員	砂平　充人	京阪電気鉄道株式会社 工務部 保線課　課長
6	委 員	村上　裕紀	京阪電気鉄道株式会社 車両部 車両課長
7	委 員	岩城　光利	横須賀市 土木部 土木計画課長
8	オブザーバ	江原　真一郎	総務省 総合通信基盤局 電波部 移動通信課 新世代移動通信システム推進室 課長補佐
9	コンソーシアム	末次　光	株式会社NTTドコモ 法人ビジネス本部第一法人営業部 担当課長
10	コンソーシアム	髙橋　淳	京浜急行電鉄株式会社 グループ戦略室 MaaS推進担当課長
11	コンソーシアム	髙橋　信一郎	横須賀市 経済部創業・新産業支援課 YRP研究開発推進担当課長
12	コンソーシアム	松島　敏和	中央復建コンサルタンツ株式会社 計画系部門 事業創生グループ サブリーダー
13	コンソーシアム （事務局）	細川　寛	中央復建コンサルタンツ株式会社 鉄道系部門 東京鉄道グループ 統括リーダースタッフ
14	コンソーシアム （事務局）	秋山有香	中央復建コンサルタンツ株式会社 鉄道系部門 東京鉄道グループ

５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会
協議会運営規約

制定 2020 年 11 月 26 日

（設置の目的）
第１条 「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インフラ分野におけるローカル 5G 等の技術的条件及び利活用に関する調査検討（遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現）」における実証システムの実装及び横展開を検討するため、外部有識者等と調査の関係者で構成する「５Ｇ等を活用したインフラ点検システムの実装及び横展開に関する協議会」（以下、「協議会」という。）を設置する。

（取扱事項）
第２条 協議会は、実証システムの実装及び横展開のために必要となる以下の各号について、総合的に調査及び協議並びに評価することとする。
（１）実証システムに関する評価
（２）実証システムの実証地域における実装に関する調査・協議
（３）実証モデルの横展開に関する調査・協議
（４）その他必要と認められる事項

（組織）
第３条 協議会は座長、委員及び調査の関係者をもって組織する。
２ 協議会は別に定める名簿に記載する者で組織することとする。
３ 委員の任期は委嘱の日から当該年度末日とする。
４ 委員に欠員または変更が生じた場合における補欠の委員の任期は、前任者の残任期間とする。

（座長）
第４条 座長は、協議会を招集し、その会務を掌理する。
２ 座長は、委員の互選によって定める。
３ 座長に事故があるときは、あらかじめ座長の指定する委員がその職務を代理する。

（委員の定足数）
第５条 協議会は座長及び委員のうち、３分の２以上の出席をもって成立するものとし、第７条に規定する代理人の出席であってもこれを認める。

（代理出席）
第６条 委員が都合により協議会に出席できない場合、当該委員は代理人を指名し、座長がこれを認めたときは、当該委員の代理人として協議会に出席することができる。

（意見の聴取）
第７条 座長は必要があると認めたときは、委員でない者を協議会に出席させ、その説明または意見を聴くことができる。

（事務局）
第８条 協議会の事務局は、中央復建コンサルタンツ株式会社に設置し、以下の各号に関する事項を掌理する。
（１）協議会開催日時の調整
（２）協議会開催場所の選定
（３）協議会に必要な書類の作成
（４）その他必要と認められる事項

（秘密の保持）
第９条 第３条、第６条、第７条及び第８条に規定する協議会の活動に関与する者は、正当な理由なく協議会の活動で知り得た情報のうち、口頭または書類において秘密である旨を明示された内容については他人に知らせ、また、不正に使用してはならない。

（その他）
第１０条 本規約に定めるもののほか、協議会の運営に関して必要な事項及び本規約の改廃手続きは、座長が委員に諮って定める。

以 上

表 6.4.3-2　持続可能な事業モデルの検討にあたっての前提条件

	開催日	目的	次第
第 1 回	2020 年 11 月 25 日（水）	実施計画等の説明と実装・横展開に向けた課題抽出およびディスカッション	①協議会の組織について ②実施計画の説明 ③話題提供 （林委員、横須賀市） ④実装・横展開の方向性・課題について
第 2 回	2021 年 1 月 25 日（月）	実証実験の進捗と第 1 回の課題に対する検討内容説明およびディスカッション	①実証実験の進捗と結果報告（中間報告） ②実証実験結果の中間報告 ③実証を踏まえた実装の課題について ④横展開について ・話題提供：京阪電鉄
第 3 回	2021 年 3 月 3 日（水）	実証実験の実施結果の説明実装・横展開に向けたさらなる課題抽出課題解決に向けたディスカッション	①実証実験結果の報告 ②実証実験結果の評価 ③実装計画について ④横展開計画について

8. まとめ

(1) 課題解決システムの実証検証

- ✧ 台車の模擬き裂としては､幅 1mm までの疑似的なクラックが 5km/h および 10 km/h の走行状態でも検出可能であることを把握したことに加え、ブレーキパッドの摩耗や収容函ハンドルの位置ズレが高い精度で検出できていることを確認した。
- ✧ また、目視では確認できない車軸温度（サーマル）についても十分な結果が得られたことで､「実装・横展開の幅」を広げることができたといえる。
- ✧ システムを導入し、異常を取りこぼさない形で適切にアラートが発信される場合、事業者によって対応パターンのルールに違いはあると想定されるものの、一般性・汎用性及び拡張可能性の観点からは運用に資するシステムと考えられる。
- ✧ ただし、人員の増強なしに検査の高度化が期待できる（目視検査とのクロスチェックによる検査精度の向上が実現できる）一方、現時点で列車検査・線路巡視を即座に「代替」することは難しいとの意見も受けており､「客観性のあるデータの継続的な蓄積」と「さらなる応用可能性の検討」が必要と考えられる。

(2) ローカル 5G の性能評価の技術実証

【性能評価の観点】

- ✧ ローカル 5G 性能向上には､ターゲットエリア内で良好な下り受信電力を得られるようにエリア形成することが重要となる。

【ローカル５Ｇのエリア構築やシステム構成の検証等】

- ✧ 鉄道車両基地の屋外環境は、見通し環境であり、安全性に配慮した上で、線路脇等に基地局を設置できれば、比較的容易に良好なエリア構築ができる。
- ✧ しかし、検査庫内の様な、様々な什器等が遮蔽物となる屋内環境に対応するには、柔軟に基地局の設置位置を変えたり、電波の到来方向を変えたりできる技術的方策が必要である。
  - ・1 つの基地局に複数のアンテナユニットを接続して、屋内での電波の届きにくい環境を減らしていく方策
  - ・小電力レピータや陸上中継移動局のような、基地局からの電波を中継する装置を使う方策や反射板を使う方策　など
- ✧ このような手法を選択する場合、毎回免許変更手続きなどをしなくても済むような柔軟な制度を確立することが重要である。

【ローカル５Ｇのエリア構築やシステム構成の検証等】

- ✧ ローカル 5G を準同期モードで運用する場合は、キャリア 5G との間で以下に示す共存方策を実施することが必要である。
  - ・屋外キャリア 5G と共存する場合は、ローカル 5G 基地局の周囲数百 m 以内の屋外に、キャリア 5G 基地局が存在するかどうかを確認し、可能な限り周囲のキャリア 5G 基地局との離隔距離を確保しておくことが有効。一方、移動局に関しては特段の共存方策は不要。
  - ・屋内キャリア 5G と共存する場合は、基地局間干渉については、特段の共存方

策は不要であるが、移動局間干渉については、同一空間において共存する場合は、1 対 1 対向モデルでは、約 9m の離隔距離が必要となる他、確率計算モデルでは、ローカル 5G 移動局数の運用数の制限が必要である（10 台程度）。

・検討対象としている 4600-4700MHz 帯においては、ローカル 5G は自己土地内の屋内でしか運用できず、鉄道インフラ分野という限られた分野においては、キャリア 5G と同一空間内で同時運用する状況は生じないと考えられ、大きな問題とはならない。

・しかし、仮に、鉄道会社が運用している屋内のローカル 5G エリア内に、一般人が立ち入れる環境があるとすれば、例えば、一般人の立ち入り可能エリアを制限して、離隔距離 9m 以上を確保する、ローカル 5G 移動局の運用台数を 10 台以下に制限する　など

（3）実装及び横展開に関する検討

✧ 「固定カメラによる車両の瑕疵検知」や「ドローン等を活用した巡視・検知」について、高頻度点検（状態監視）による安全性の向上やドローンを活用した効率化・高度化の方策を検討した。

✧ 今後は、従来の検知内容・列車検査体系の見直しや効率的かつ効果的な追加機能の検討等、ドローン自律航行の技術開発等をさらに深化していく必要がある。

（4）横展開に資する普及モデル

✧ 「他の鉄道事業者」に対しては、事業者ごとに問題認識や現状の課題等のバックグラウンドが異なることに配慮しながら、多様なニーズの掘り起こしとともに、サービサー側から提供可能な個々のシーズ（技術）で実現可能な性能を整理し、ニーズ側に提示するようなアプローチも必要と考えられる。

✧ 「他のインフラ事業者」については、市場の大きい道路インフラを対象とした場合、「公共交通を活用した道路パトロールの効率化」および「遠隔立会や遠隔監視による道路工事の効率化」が、ローカル 5G の適用性が高いと考えられる。

✧ ただし、いずれの横展開においても、費用対効果を勘案しながら、効率的な記録データの蓄積方法や費用分担を含む事業スキームの構築が課題となる。他方で、ローカル 5G は技術開発段階にあり、コスト面で変動要因が多く存在することにも配慮が必要である。

✧ これらに留意しながら、実装・横展開のそれぞれのステップの検討をさらに深化するとともに、事業性の検討や本システムの応用可能性の向上を図っていくことが重要と考えられる。

9. 資料

6.4.3　共同利用型プラットフォーム検討に向けて提示可能な仕様書案における表 6.4.3-1　本実証の成果を踏まえ提示可能な仕様書案で列挙した資料を本章に格納する。資料名とファイル名の対照表を表 6.4.3-1 に示す。

表 6.4.3-1　資料名とファイル名の対照表

資料	内容	対象ファイル
NW構成図（全体）	NW構成の全体像	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx
NW構成図（詳細）	NWセグメント、インタフェース設計等の明記	
映像配信アプリケーション設計書	カメラ映像の蓄積、配信用アプリケーションの機能・設計内容（UI設計含む）等	・映像配信アプリケーション設計書(L5G横須賀).xlsx
参考1：リアルタイムデータフロー	リアルタイム配信される映像をAI解析し、ユーザー端末等で表示する際のデータフロー	
参考2：振り返りデータフロー	振り返り・過去データ閲覧として、ユーザからのリクエストに応じて録画映像を配信し、AI解析結果と合わせてユーザー端末等に表示する際のデータフロー	
クラウド環境設計書	クラウド上の構成される各インスタンスの説明、機能要件・リソース割当等	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx
現場環境設計書	センシングデバイス、インタフェース部分の設計内容等	・現場環境設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書1： WebRTCインスタンス	NW構成に基づくWebRTCインスタンスの機能・設計内容等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・WebRTCサーバ環境設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書2： 線路巡視AIインスタンス	NW構成に基づく線路巡視AIインスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・AIエンジン基盤設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書3： 列車検査AI（4K映像解析）インスタンス	NW構成に基づく列車検査AI（4K映像解析）インスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・AIエンジン基盤設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書4： 列車検査AI（サーマル解析）インスタンス	NW構成に基づく列車検査AI（サーマル解析）インスタンスの機能等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・AIエンジン基盤設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書5： 録画共有インスタンス	NW構成に基づく録画共有インスタンスの機能・設計内容等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・録画共有サーバ環境設計書(L5G横須賀).xlsx
インスタンス設計書6： Webサーバインスタンス	NW構成に基づくWebサーバインスタンスの機能・設計内容等 （ソースコード提供不可。NWデータフローに関する設計については共有可能）	・システム設計書(L5G横須賀).xlsx ・Webサーバ環境設計書(L5G横須賀).xlsx