

令和3年度 課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証

ローカル5GとAI技術を用いた鉄道駅における車両監視の
高度化

成果報告書

令和4年3月25日

京浜急行電鉄株式会社

目次

1. 実証概要	1
1.1 背景・目的	1
1.1.1 京浜急行電鉄における列車検査	1
1.1.2 令和2年度事業のレビュー及び残された課題	5
1.1.3 本事業の目的	8
1.2 実証の概要	9
1.2.1 実施事項及び実証目標	9
1.2.2 実施体制	11
2. 実証環境の構築	12
2.1 実施環境	12
2.2 ネットワーク・システム構成	14
2.2.1 基地局設置場所	14
2.2.2 エリアイメージ	17
2.2.3 ネットワーク構成	18
2.2.4 ローカル5G基地局装置	21
2.2.5 ローカル5Gコアネットワーク装置	24
2.2.6 その他付随する装置	25
2.2.7 ローカル5G端末	29
2.2.8 システム構成	31
2.3 システム機能・性能・要件	41
2.3.1 ローカル5Gネットワーク	41
2.3.2 車両検査の遠隔・自動監視システム	42
2.4 免許及び各種許認可	74
2.5 その他要件	75
2.5.1 サイバーセキュリティ対策	75
2.6 実証環境の運用	78
3. ローカル5Gの電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）	79
3.1 実証概要	79
3.2 実証環境	80
3.3 実証内容	86
3.3.1 ローカル5Gの電波伝搬特性等の測定	86
3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化	117
3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化	143
3.3.4 準同期TDDの追加パターンの開発	143
3.3.5 その他のテーマ	144
3.3.6 技術実証における追加提案	145

4. ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）	146
4.1 実証概要	146
4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標	146
4.3 実証環境	156
4.4 実証内容	158
4.4.1 ローカル5Gを用いたソリューションの有効性等に関する検証	158
4.4.2 ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証	262
4.4.3 ローカル5Gの実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討	269
4.4.4 継続利用の見通し・実装計画	275
5. 普及啓発活動の実施	277
5.1 映像制作への協力	277
5.2 実証視察会の実施	278
5.3 その他普及啓発活動	280
6. 実施体制	281
6.1.1 京浜急行電鉄株式会社	281
6.1.2 中央復建コンサルタンツ株式会社	281
6.1.3 株式会社NTTドコモ	282
6.1.4 再委託先及び再々委託先	282
7. スケジュール	284

1. 実証概要

1.1 背景・目的

本実証は、京浜急行電鉄久里浜工場で実施した、令和2年度総務省事業「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）」の継続検討として、遠隔・リアルタイムでの列車検査を鉄道駅にて実施し、実装するための課題の洗い出しを目的とした実証である。

取組の背景として、京浜急行電鉄の列車検査業務における課題を整理したうえで、令和2年度事業での残された課題を含めた課題整理を踏まえ、今年度事業の目的を示す。

1.1.1 京浜急行電鉄における列車検査

1.1.1.1 列車検査の種類と内容

車両を含む鉄道施設の安全は「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、鉄道事業者が法令で定められた範囲において独自に設定している。

例として、京浜急行電鉄株式会社（以下、「京浜急行電鉄」という。）における列車検査の種類と内容を以下に示す。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。

車両検査の種類（京浜急行電鉄）

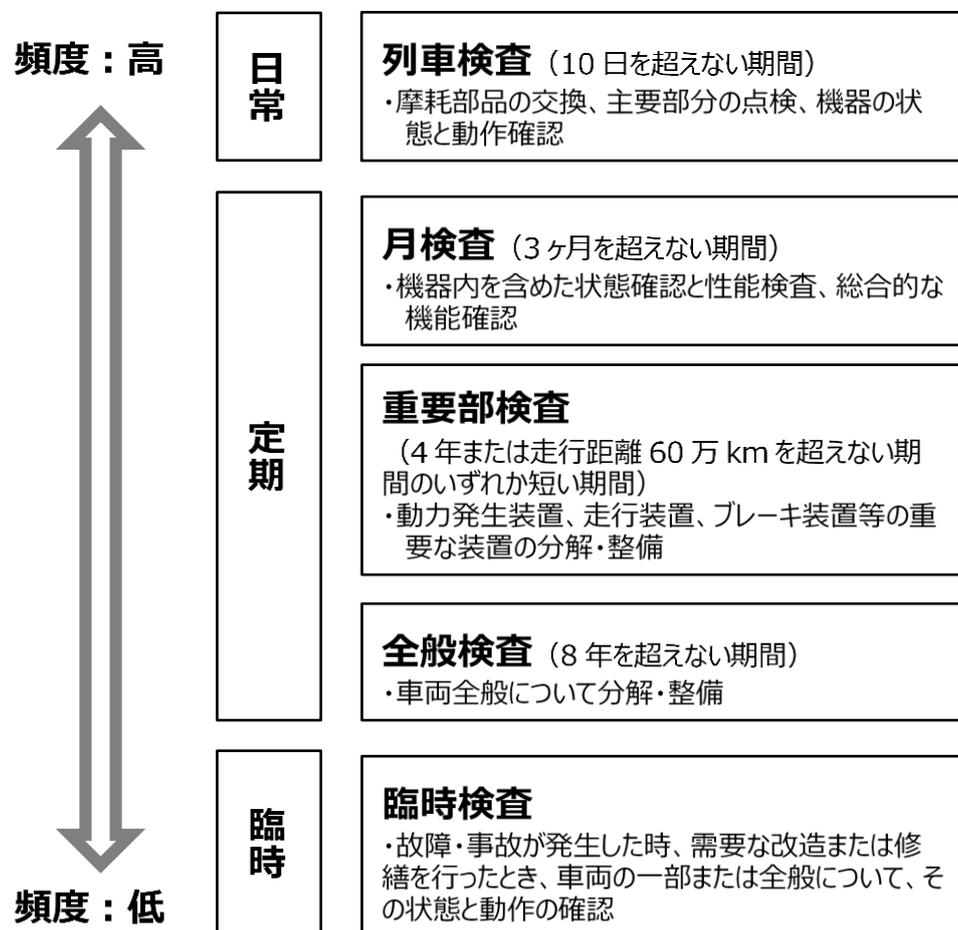


図 1.1-1 京浜急行電鉄における車両検査の種類

(1) 検査周期

法令で定められた列車検査の周期（頻度）は10日以内であるが、京浜急行電鉄では安全性をより高めるため6日に1度の頻度で検査しており、保有する約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しながら検査している。

(2) 検査内容

京浜急行電鉄では、人による近接目視によって日常的な列車検査を実施している。列車検査では保守作業員が車両の床下、車体、台車（車輪、車軸、モーター）、屋根上、客室の装置等に近接し、目視にて外観を確認することによって異常の有無を検査している。

(3) 検査時間

実際の検査は1編成を5人体制で検査しており、検査に要する時間は1編成あたり概ね30分程度である。

以上のように、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り、ローカル5Gを含む新技術を活用した、さらなる異常の早期発見と安全の向上が期待されている。

<p>列車検査</p> <p>☞実施頻度：6日に1度</p> <ul style="list-style-type: none">・京急電鉄保有の約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 <p>☞点検方法：近接目視</p> <ul style="list-style-type: none">・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） <p>☞点検時間：1編成あたり概ね30分</p> <ul style="list-style-type: none">・編成ごとに5人体制で点検	<p>安全のためには毎日でもやりたい！</p>
---	-------------------------

図 1.1-2 京浜急行電鉄の列車検査の実施状況

1.1.1.2 列車検査における課題

鉄道事業者は日常的な列車検査によって車両異常の早期発見と安全の確保に努めているものの、現在でも車両異常による輸送障害が発生している。列車の運行中に疲労き裂等の異常が発生すると重大事故につながる可能性があり、列車検査が6日に1度である場合、最大で5日間、状態が把握できない可能性がある。

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】

- ・日常検査の高頻度化が求められる

許容できない疲労き裂
（「のぞみ」のトラブル）



出典：鉄道の輸送トラブルに関する対策のあり方検討会

図 1.1-3 列車検査における現状と課題（現場の課題）

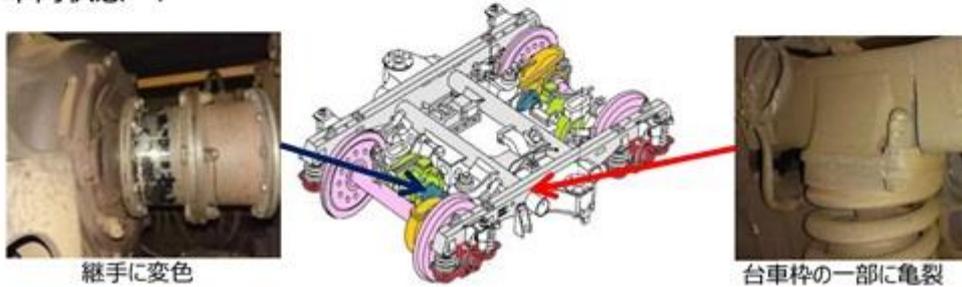
[疲労き裂による重大インシデント例]

新幹線 重大インシデント 概況

6

発生日時 : 2017年12月11日(月) 17時03分頃
発生場所 : 東海道新幹線 名古屋駅
関係列車 : 第34A列車「のぞみ34号」(博多発 東京行)
概況 : 博多駅13時33分発の東京行「のぞみ34号」(16両編成)において、走行中に異臭と床下からの異音が認められたため、17時03分頃、名古屋駅で床下点検を実施した。点検の結果、13号車歯車箱付近に油漏れを認めたため、同列車は前途運休となった。また、その後の点検において、13号車の台車にき裂および継手の変色が確認された。

車両状態 :



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

図 1.1-4 疲労き裂による重大インシデント例

1.1.2 令和2年度事業のレビュー及び残された課題

1.1.2.1 令和2年度事業のレビュー

令和2年度事業では、京浜急行電鉄久里浜工場をフィールドとして、鉄道分野へのローカル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員不足等の課題解決に寄与することを目的とした実証を行った。鉄道施設の検査のうち「鉄道車両検査」および「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に資す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出）を想定した実証を行った。

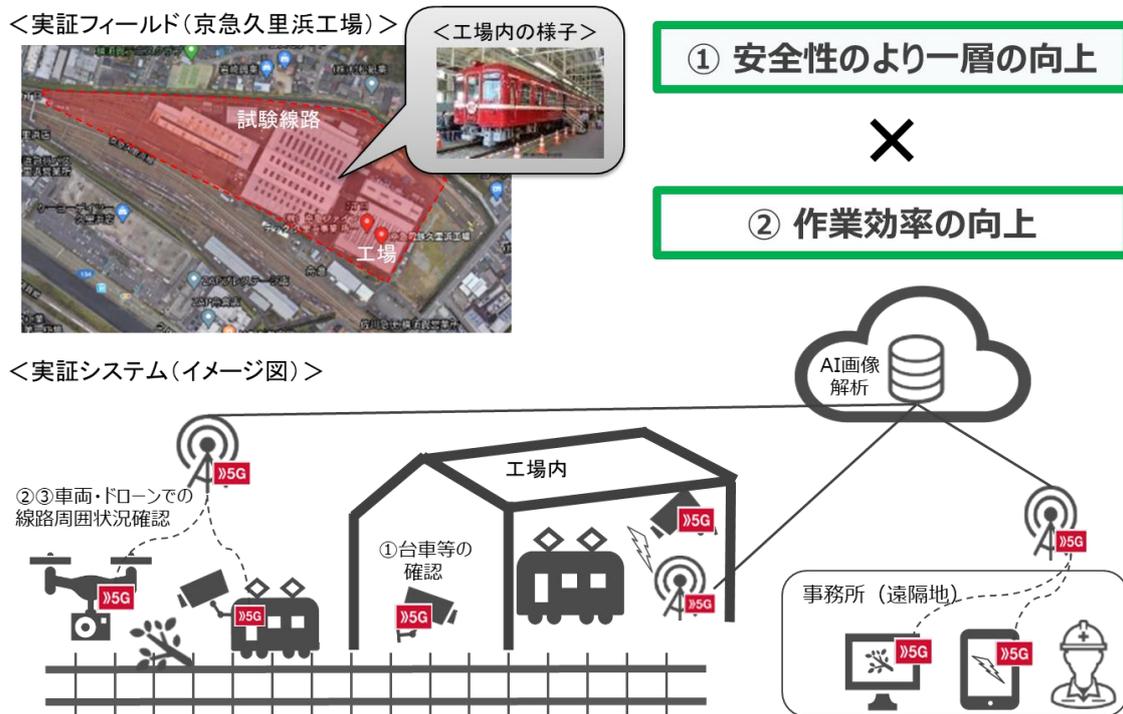
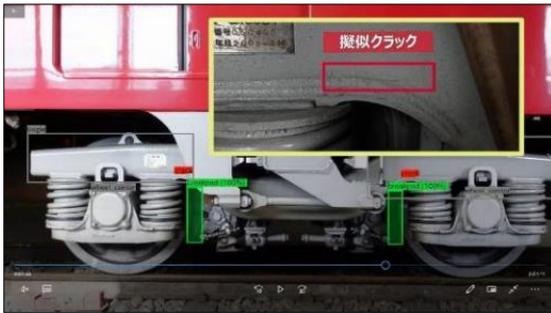


図 1.1-5 令和2年度事業の実施概要

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にて異常を検出することによって、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出能力を確認した。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。



★検出精度（速度とクラック進展方向 垂直/水平）

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	0	100%	39%
5	水平	19	0	17	0	100%	53%
5	集計	33	0	39	0	100%	46%
10	垂直	4	0	32	0	100%	11%
10	水平	20	0	16	0	100%	56%
10	集計	24	0	48	0	100%	33%
総計		57	0	87	0	100%	40%

対象物：ダミークラックシール

手法：対象物の識別

結果：

- ・上りスループット：最大 **98.06 Mbps**
- ・End-End遅延量：**940 ms**（解析込）

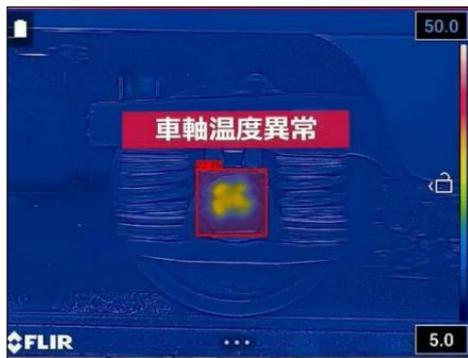
課題：

- ・照度によって検出精度にばらつき
- ・暴露機材が時折停止（長期安定）
- ・複数入力映像は未対応

★実装に向けた残課題

- ・照度に応じた検出精度のばらつき改善
→AI映像ソリューションの弱点を解決！
- ・機材の長期間安定運用を実現
→耐候性に優れた機材構成を開発！
- ・複数入力映像の解析を実現
→包括的な車両監視技術を開発！

図 1.1-6 令和2年度の課題実証の結果概要（4Kカメラ映像のAI異常検出）



★検出精度

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%

対象物：車軸の温度

手法：車軸識別、温度計算

結果：

- ・上りスループット：最大 **98.06 Mbps**
- ・End-End遅延量：**940 ms**（解析込）

課題：

- ・複数画角/別センサの異常検知も必要
- ・データ蓄積/活用基盤の整備
- ・データ活用手法の運用スキーム

★実装に向けた残課題

- ・センサ画角/種類の多様化
→より実用的なデータを効率的に取得！
- ・取得データの蓄積/活用基盤を整備
→人に依存しないナレッジを構築・運用！
- ・運用スキームの構築検討
→運用方法を事前に定義し、着実に利用！

図 1.1-7 令和2年度の課題実証の結果概要（サーマル映像のAI異常検出）

1.1.2.2 残された課題

ここでは、令和2年度の実証をとおして得られた、実装に向けた課題について述べる。技術面の課題として、AIの精度向上（照度に応じた検出精度のばらつき改善）、長期安定運用の実現、複数センサによる入力による包括的な異常検出（センサフュージョン）などが挙げられる。運用面の課題として、個別技術では、実運用に資するシステムが構築できたものの、現場技術者による運用スキームの実用化には至っていない。

当コンソーシアムでは、後者の運用上の課題が特に重要であると認識しており、（列車の運行も含む）オペレーションにおける継ぎ目のない実運用を目指していく必要がある。今年度事業は、実装に向けた“システムの共存・段階的運用”のフェイズであると考えます。

1.1.3 本事業の目的

上記の課題認識を踏まえて、今年度は“実装”を念頭に置いた列車検査の高度化の実証を行った。つまり、令和2年度の成果である課題解決のためのシステムをブラッシュアップし、(令和2年度は方向性の検討にとどまっていた)実運用につなげることを目指している。具体的には、次のような事項を目的とした。

令和3年度事業の目的

- 実業務の中でのオペレーションを見据え、(検車庫ではなく)鉄道駅での実証を行う
- 継続的な運用を見据え、翌年度まで実証を継続する

上記と合わせて、実運用に即したさらなる技術の高度化を図る。

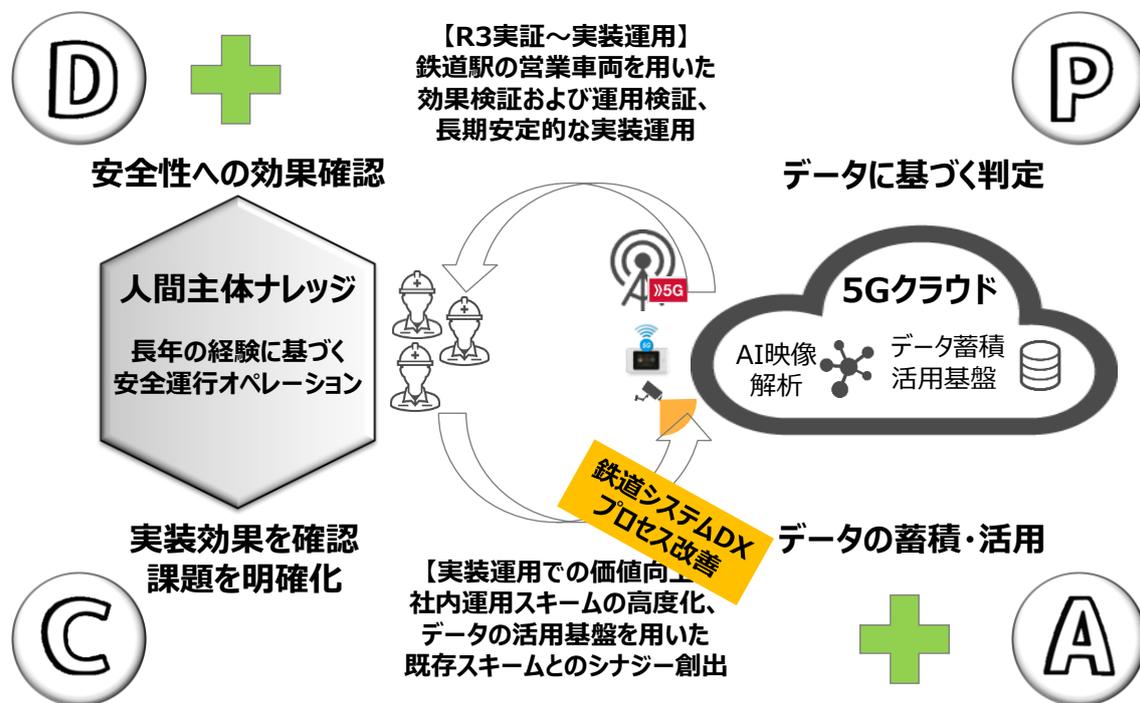


図 1.1-8 実装に向けた PDCA のイメージ

京浜急行電鉄はローカル 5G を自社専用の高速無線通信網として、以下が可能となることを将来像としている。

- 車両の台車や車内、駅ホーム、踏切などの映像を遠隔監視し、鉄道インフラ全体で安全性の向上につなげる。
- 運行情報や広告など駅構内および電車内に配信し、お客様の利便性向上につなげる。

将来像の実現に向けて、今年度の実証内容をベースに、さらなる課題の抽出や技術的・人的リソースに関する机上検討を実施するとともに、システムの汎用化等による費用削減、技術向上に向けた開発者との協業を実施した。

1.2 実証の概要

1.2.1 実施事項及び実証目標

1.1.3 章で記載した令和3年度事業の目的を達成するため、実運用の想定と同じ環境（鉄道駅）にて、ローカル5Gを活用したシステムを構築し、現場のオペレーションへの対応及び複数デバイスの長期安定運用を見据えた実証を実施した。

京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅において、ローカル5G(周波数:4.8-4.9GHz帯(100MHz)構成:SA方式)を構築し、地下駅のホームにおける建物侵入損を考慮した電波伝搬モデルの精緻化に関する技術実証を実施した。

5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討(課題実証)として、フルHD映像のAI解析による車両検査の遠隔・自動監視システムを構築し、上記で構築したローカル5Gを活用した車両台車の遠隔監視の高度化・実装を図る実証を実施した。



図 1.2-1 実証概要イメージ

システムを設置した京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の1番線には、平日104列車、休日103列車が発着する。

表 1.2-1 に京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の1番線の時刻表を示す。時刻表のうち、白色は京浜急行電鉄の8両編成、橙色は京浜急行電鉄の6両編成、灰色は他社車両が発着すること示している。このように、他社車両も多数入線する環境である。

表 1.2-1 京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の1番線時刻表

羽田空港第1・第2ターミナル駅（平日1番線発車時刻表）

5時	38 ⁽⁶⁾	55 ⁽⁶⁾							
6時	8 ⁽⁷⁾	22 ⁽⁹⁾	38 ⁽⁵⁾	45 ⁽⁵⁾	54 ⁽²⁾				
7時	0 ⁽⁴⁾	6 ⁽³⁾	16 ⁽²⁾	30 ⁽⁵⁾	36 ⁽³⁾	44 ⁽³⁾	57 ⁽⁶⁾		
8時	9 ⁽⁸⁾	20 ⁽⁴⁾	35 ⁽⁹⁾	42 ⁽⁴⁾	52 ⁽⁷⁾				
9時	3 ⁽⁵⁾	12 ⁽⁶⁾	24 ⁽⁹⁾	33 ⁽⁶⁾	39 ⁽³⁾	52 ⁽⁵⁾	58 ⁽²⁾		
10時	12 ⁽⁹⁾	22 ⁽⁷⁾	32 ⁽⁸⁾	44 ⁽⁹⁾	53 ⁽⁷⁾				
11時	3 ⁽⁶⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
12時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
13時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
14時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
15時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	51 ⁽¹⁴⁾	58 ⁽³⁾			
16時	11 ⁽⁶⁾	22 ⁽⁷⁾	34 ⁽¹⁰⁾	47 ⁽⁹⁾					
17時	0 ⁽¹¹⁾	6 ⁽²⁾	21 ⁽¹¹⁾	32 ⁽⁷⁾	42 ⁽⁷⁾	52 ⁽⁷⁾			
18時	2 ⁽⁵⁾	12 ⁽⁷⁾	22 ⁽⁷⁾	32 ⁽⁷⁾	42 ⁽⁷⁾	52 ⁽⁷⁾	59 ⁽²⁾		
19時	7 ⁽⁶⁾	17 ⁽⁷⁾	27 ⁽⁷⁾	38 ⁽⁸⁾	48 ⁽⁷⁾	57 ⁽⁷⁾			
20時	8 ⁽⁸⁾	19 ⁽³⁾	30 ⁽⁸⁾	39 ⁽²⁾	48 ⁽⁵⁾	56 ⁽³⁾			
21時	11 ⁽⁵⁾	19 ⁽²⁾	30 ⁽⁴⁾	39 ⁽⁵⁾	52 ⁽⁴⁾				
22時	3 ⁽⁵⁾	10 ⁽⁴⁾	42 ⁽⁴⁾	57 ⁽⁵⁾					
23時	17 ⁽¹¹⁾	34 ⁽¹⁰⁾	48 ⁽⁵⁾	59 ⁽⁵⁾					
24時	10 ⁽⁴⁾								

羽田空港第1・第2ターミナル駅（休日1番線発車時刻表）

5時	42 ⁽¹⁰⁾								
6時	3 ⁽¹⁴⁾	23 ⁽¹⁶⁾	45 ⁽¹⁴⁾	57 ⁽⁸⁾					
7時	10 ⁽¹⁰⁾	17 ⁽⁴⁾	27 ⁽⁶⁾	38 ⁽⁷⁾	48 ⁽⁷⁾	58 ⁽⁷⁾			
8時	8 ⁽⁷⁾	18 ⁽⁷⁾	28 ⁽⁷⁾	38 ⁽⁷⁾	48 ⁽⁷⁾	58 ⁽⁷⁾			
9時	8 ⁽⁷⁾	18 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁴⁾	36 ⁽⁴⁾	44 ⁽⁴⁾	54 ⁽⁸⁾			
10時	4 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
11時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
12時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
13時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
14時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
15時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
16時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
17時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
18時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
19時	3 ⁽⁸⁾	14 ⁽⁸⁾	25 ⁽⁸⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾			
20時	5 ⁽⁷⁾	15 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁷⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾			
21時	5 ⁽⁷⁾	15 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁷⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾				
22時	5 ⁽¹⁷⁾	18 ⁽⁹⁾	29 ⁽⁷⁾	39 ⁽⁵⁾	53 ⁽⁸⁾				
23時	1 ⁽⁴⁾	22 ⁽¹⁵⁾	31 ⁽⁵⁾	48 ⁽¹⁵⁾					
24時									

なお、評価・検証項目の具体的な内容に関しては、実業務の中でのオペレーション及び継続的な運用を見据え、コンソーシアム内で協議の上確定した。

1.2.2 実施体制

本実証コンソーシアムの実施体制は以下の通りである。

本事業の実証コンソーシアムは、京浜急行電鉄株式会社、中央復建コンサルタンツ株式会社、株式会社NTTドコモの3者により構成する。本事業のとりまとめ等を行う代表機関は、京浜急行電鉄株式会社であり、フィールドの提供、実証全体の管理、実証結果の評価、協議会の主催、報告書作成等を担った。

協力企業を含めた本事業の組織構成を図 1.2-2 に示す。

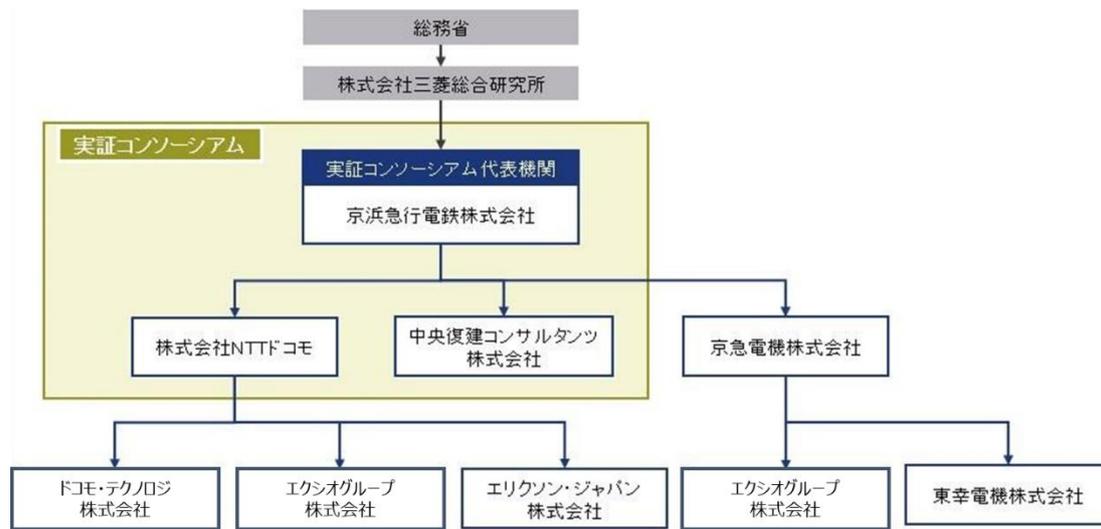


図 1.2-2 実施体制図

2. 実証環境の構築

2.1 実施環境

実証実施場所は、東京都大田区羽田空港三丁目 3-4 の 羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅（京急空港線）のホーム内線路とした。



図 2.1-1 実証実施場所周辺図

出所) 国土地理院のデータを加工し作成

羽田空港第1・第2ターミナル駅を本実証場所に選定した理由は以下のとおりである。

- ローカル 5G エリアを利用したシステム検証において、実際の鉄道駅における営業車両や運航状況下での効果や運用検証が可能であること
- 本事業は単年度実証だけでなく、次年度も継続使用することで長期的な実装運用を行うため、継続使用に適していること
- 今後多拠点への展開を見据えたユースケースとして適していること

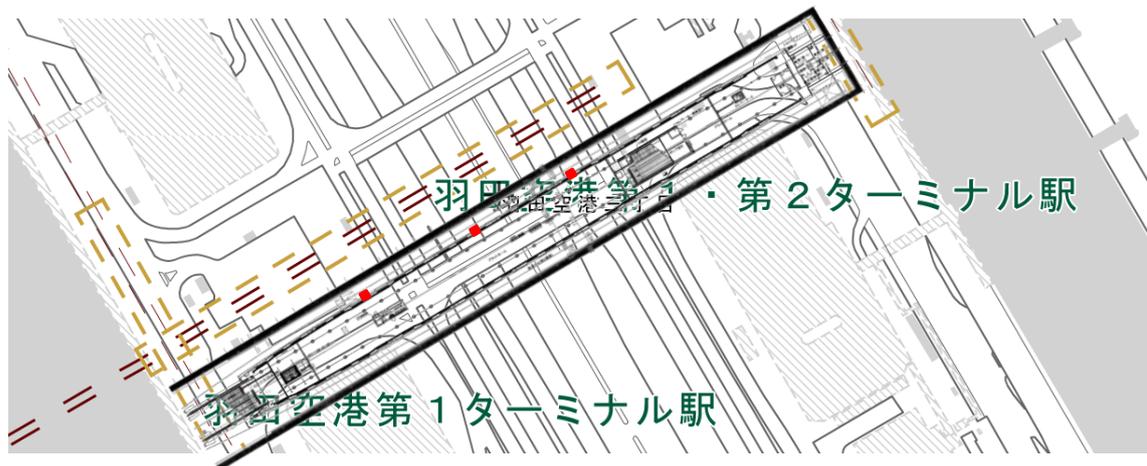


図 2.1-2 羽田空港第1・第2ターミナル駅図

出所) 国土地理院のデータを加工し作成

2.2 ネットワーク・システム構成

2.2.1 基地局設置場所

無線アンテナと課題実証用は実証場所の羽田空港第1・第2ターミナル駅の島式ホームに設置した。GNSS アンテナは屋外に設置する必要があるため、地上への配線が可能な羽田空港第3ターミナル駅に設置することとした。

GNSS アンテナは無線制御部と接続する必要があるため、ローカル 5G のコアネットワーク装置とともに羽田空港第3ターミナル駅通信機器室に構築した。図 2.2.1-1 に羽田空港第1・第2ターミナル駅と羽田空港第3ターミナル駅の位置関係を示す。



図 2.2.1-1 羽田空港第1・第2ターミナル駅、羽田空港第3ターミナル駅の位置関係
出所) 国土地理院のデータを加工し作成

課題実証用機器として、羽田空港第1・第2ターミナル駅の片側の線（1番線）の車両を片側（ホーム下側）から撮影するフル HD カメラ、照度補完用のライト、端末（ローカル 5G ルータ）を設置した。各機材の設置場所の写真を図 2.2.1-3 に、また各機材の設置状況を図 2.2.1-4 に示す。

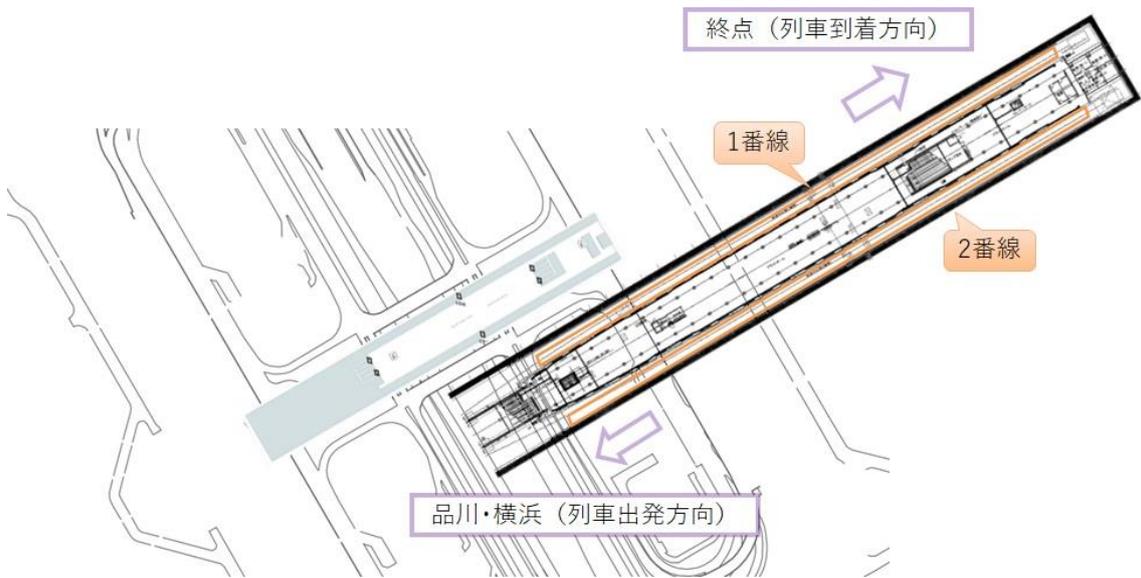


図 2.2.1-2 羽田空港第1・第2ターミナル駅の全体図

出所) 国土地理院のデータを加工し作成

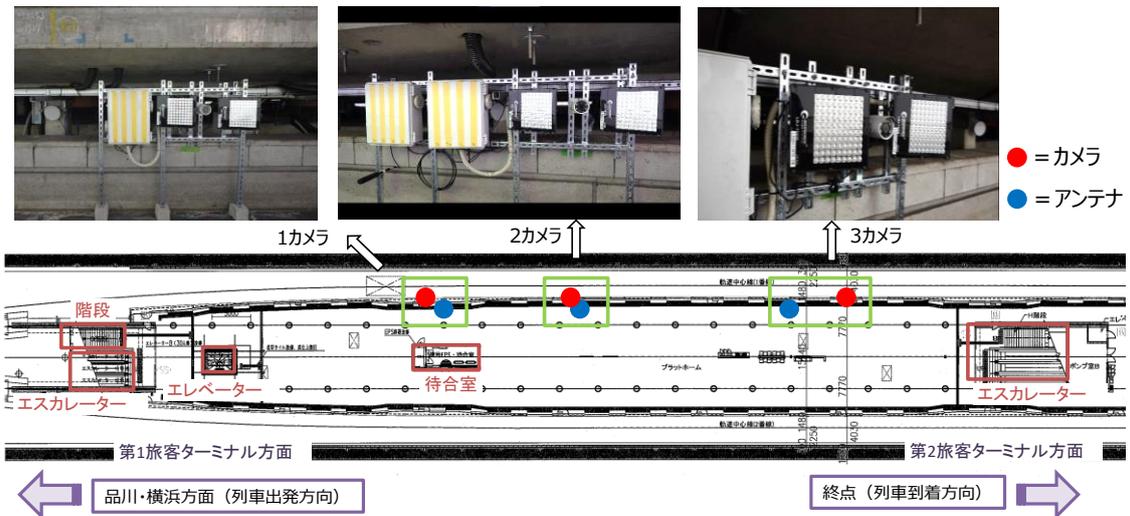


図 2.2.1-3 ホーム下への機材設置場所

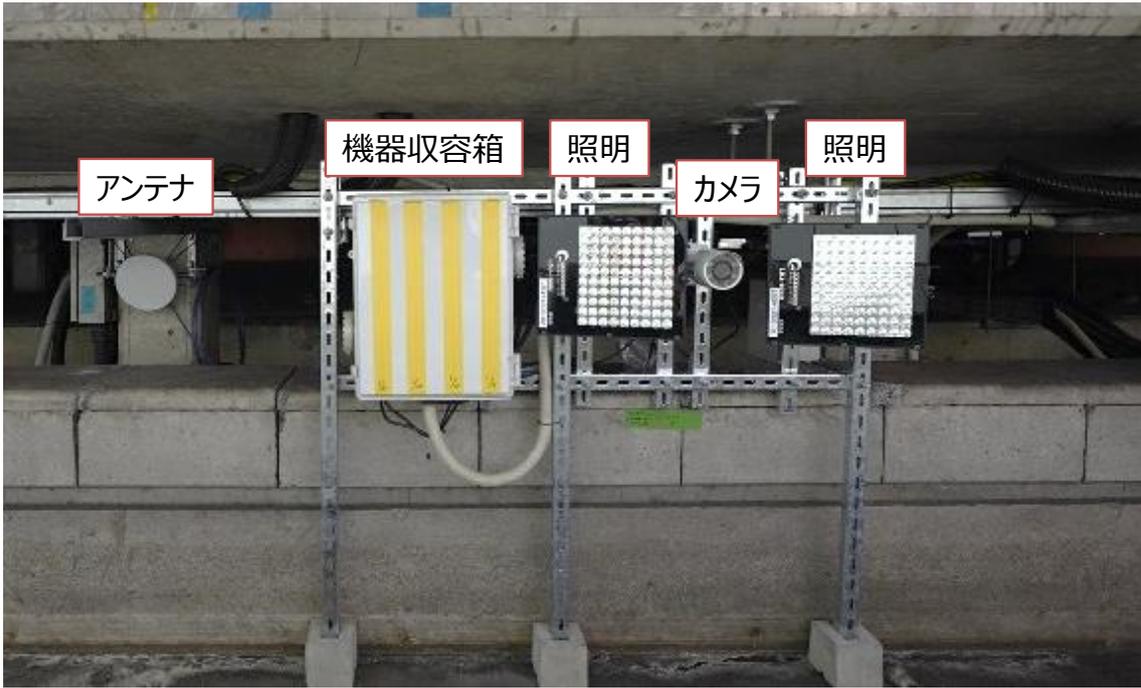


図 2.2.1-4 ホーム下への機材設置状況

2.2.2 エリアイメージ

本実証の基地局位置を起点としたエリアイメージを図 2.2.2-1 に示す。

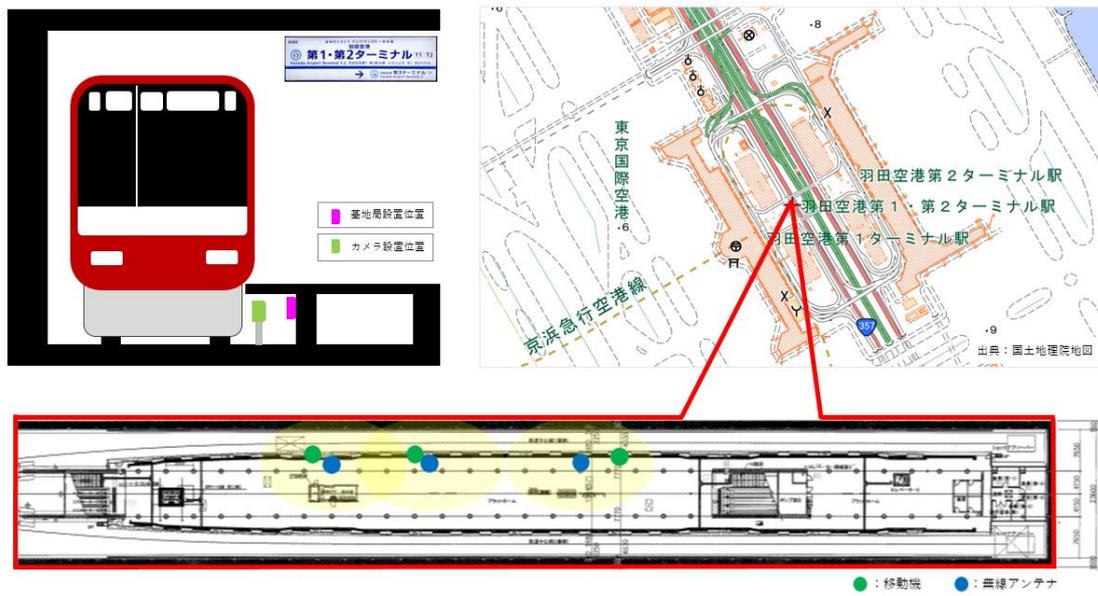


図 2.2.2-1 エリアイメージ

出所) 国土地理院のデータを加工し作成

2.2.3 ネットワーク構成

京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅に構築したローカル5Gネットワーク構成を図2.2.3-1に示す。

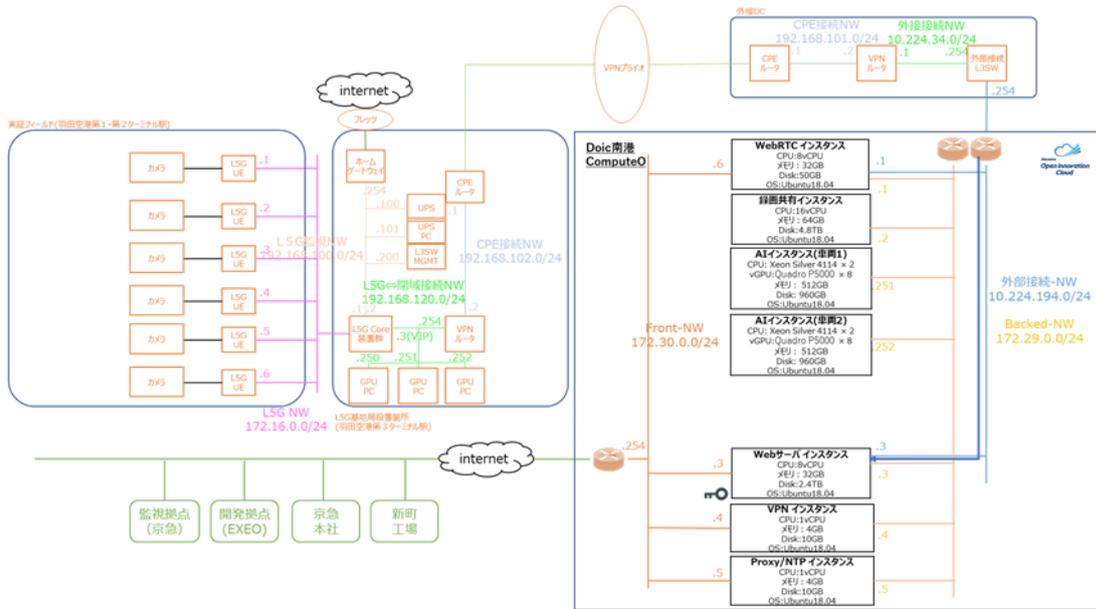


図 2.2.3-1 ローカル 5G ネットワーク構成図

2.2.3.1 ローカル 5G システム構成

本実証では、コアネットワークを含めたローカル 5G システム全てを実証実験敷地内に設置するオンプレミス構成をとった。システム製造ベンダはエリクソン・ジャパン株式会社とし、2022 年 1 月中旬に検証環境構築を完了した。構築したローカル 5G システムの論理構成を図 2.2.3-2 に示す。

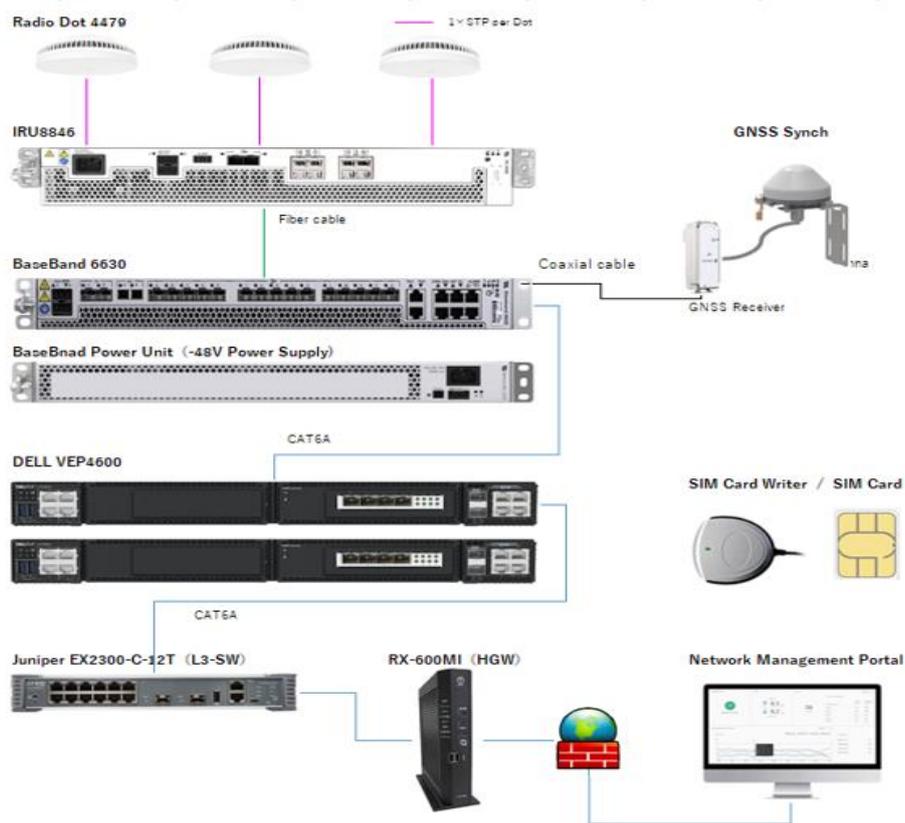


図 2.2.3-2 ローカル 5G システムの論理構成図

2.2.3.2 ローカル 5G システムラック構成

19 インチハーフラック内にはローカル 5G コアネットワークシステム及び基地局制御部及び時刻同期システム (GNSS)を収容した。また小型 19 インチラックには Dot アンテナと接続する IRU (Indoor Radio Unit)を収容した。Dot アンテナは IRU からイーサネットケーブルで接続し IRU から給電する。図 2.2.3-3 にローカル 5G システムのラック収容図を示す。図 2.2.3-4 に羽田空港第 3 ターミナル駅通信機器室の設置状況を示す。

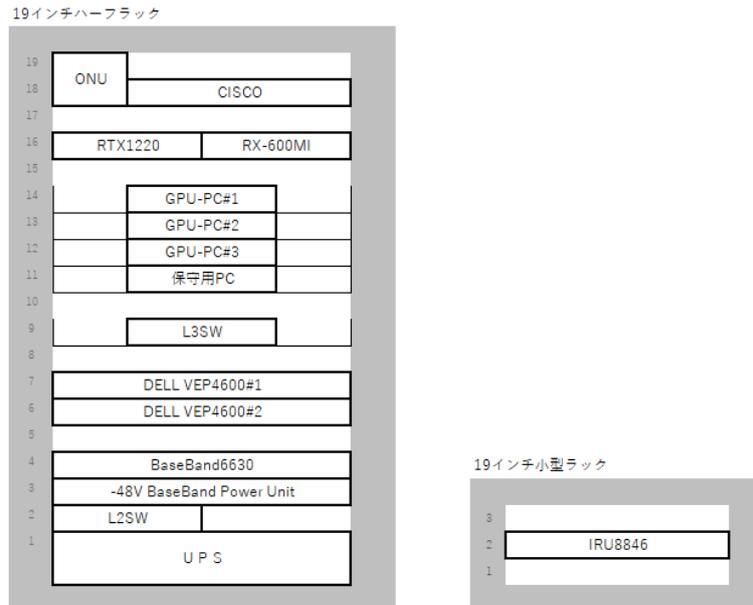


図 2.2.3-3 ローカル 5G システムのラック収容状況



図 2.2.3-4 羽田空港第 3 ターミナル駅通信機器室の設置状況

2.2.4 ローカル 5G 基地局装置

本実証において用いたローカル 5G 基地局装置は、コア装置、無線装置、SIM にカテゴリ分けされ、表 2.2.4-1 にそれぞれのカテゴリにおいて使用した機器の製品名及び数量を示す。

表 2.2.4-1 機器一覧

Domain	製品名	数量
コア装置	Network Controller (Dell VEP 4600)	2 台
無線装置	Radio DoT 4479 B79B	3 台
	IRU 8846	1 台
	Baseband 6630	1 台
	Baseband Power Unit (Remote IRU Enclosure)	1 台
	GNSS Receiver/Antenna	1 式
SIM	Nano-SIM Card	50 枚
	SIM Card Writer	1 台

本実証で使用したローカル 5G 基地局の諸元を表 2.2.4-2 に示す。

表 2.2.4-2 ローカル 5G 基地局システム諸元

項目	基地局
製造ベンダ	エリクソン・ジャパン株式会社
台数	1 台
設置場所 (屋内/屋外)	屋内
同期/準同期	同期
DL : UL 比率	7:2
周波数帯	4.7GHz 帯
SA/NSA	SA
同期方式	GNSS
UL 周波数	4.8~4.9GHz
DL 周波数	
UL 帯域幅	99.98MHz
DL 帯域幅	
UL 中心周波数	4849.98MHz
DL 中心周波数	
UL 変調方式	QPSK/16QAM/64QAM/256QAM
DL 変調方式	
MIMO	4×4MIMO
セルスループット (規格値)	DL : 1.5Gbps UL : 85Mbps
セクター数	1

2.2.4.1 Baseband6630

Baseband6630 は、変調前及び変調後の信号処理を行うユニットであり、本体装置部と電源部で構成される。

外観を図 2.3.4-1 及び図 2.3.4-2 に、また、諸元を表 2.3.4-3 に示す。



図 2.2.4-1 Baseband6630 外観 (エリクソン社)



図 2.2.4-2 BasebandPowerUnit 外観 (エリクソン社)

表 2.2.4-3 Baseband/BasebandPowerUnit 部諸元

バックホール	2 ポート × SFP+ 1G 又は 10Gbps イーサネット
フロントホール (CPRI ポート)	15 ポート × 2.5 / 4.9 / 9.8 / 10.1 Gbps
ラックマウント	19 インチラック 1U サイズ
最大 NR スループット	1Gbps/5Gbps
電源部 入力電圧	AC100V (Baseband Power Unit への入力)
電源部 出力電圧	DC-48V (Baseband 6630 へ入力)

2.2.4.2 IRU8846

5G Sub-6 無線機 Dot4479 と BB6630-5G(4.8GHz)間に挿入し CPRI インターフェースと Dot4479 間インターフェース(LAN ポート)を 8 個有します。又 DC 及び AC 電源両方に対応する。本実証で使用した IRU8846 の外観を図 2.2.4-3 に、また、その諸元を表 2.2.4-4 に示す。



図 2.2.4-3 IRU8846 外観 (エリクソン社)

表 2.2.4-4 IRU8846 諸元

Dot 向けポート数	8
フロントホール	2CPRI SFP+ (2.5/4.9/9.8/10.1Gbps)
大きさ	W445mm×D350mm×H67mm
重量	8.6Kg
消費電力	510W(AC)
電源種別	DC-48V AC100V
Dot 向け線種	STP(F/FTP)ケーブル
Dot 向け線長制限	100m

2.2.4.3 Dot4479 アンテナ

Dot4479 アンテナは、IRU8846 に最大 8 基まで接続でき、1 つのセルを構成できる。本実証において使用した Dot アンテナの外観を図 2.2.4-4 に、また、その諸元を表 2.2.4-5 に示す。



図 2.2.4-4 小型 RU ユニットの外観

表 2.2.4-5 ローカル 5G アンテナの諸元

周波数	4.8-4.9Gz (Sub6)
アンテナ本数	4 送信 / 4 受信
送信出力	4 × 125mW(4 × 21dBm)
サイズ	1.5L(W200mm*H53mm)
重量	1kg
冷却方式	自然空冷
最大スループット	2Gbps

2.2.5 ローカル 5G コアネットワーク装置

本実証において用いたローカル 5G コアネットワークシステムは、SA (Stand Alone) 構成に対応した 5G コア (5GC) ソフトウェアを実装した、IA サーバ (Dell 社製 VEP4600) 2 台で構成される。その外観を図 2.2.5-1 に、また、その主な諸元を表 2.2.5-1 に示す



図 2.2.5-1 5G コア装置外観 (DELL 社製 VEP4600)

表 2.2.5-1 5G コア装置の諸元

サイズ	W434*D381*H44mm
重量	7.43kg
電源	100~240 V AC, 50/60 Hz
電源ユニット	311W (MAX)
冗長性	active + hot-standby
サーバ機種	DELL/EMC VEP 4600
動作温度	0~+45°C

本実証では設置場所の制限があったため、複数のロケーションに分けて装置を設置した。使用したローカル 5G システム装置の配置図を図 2.2.5-1 に示す。

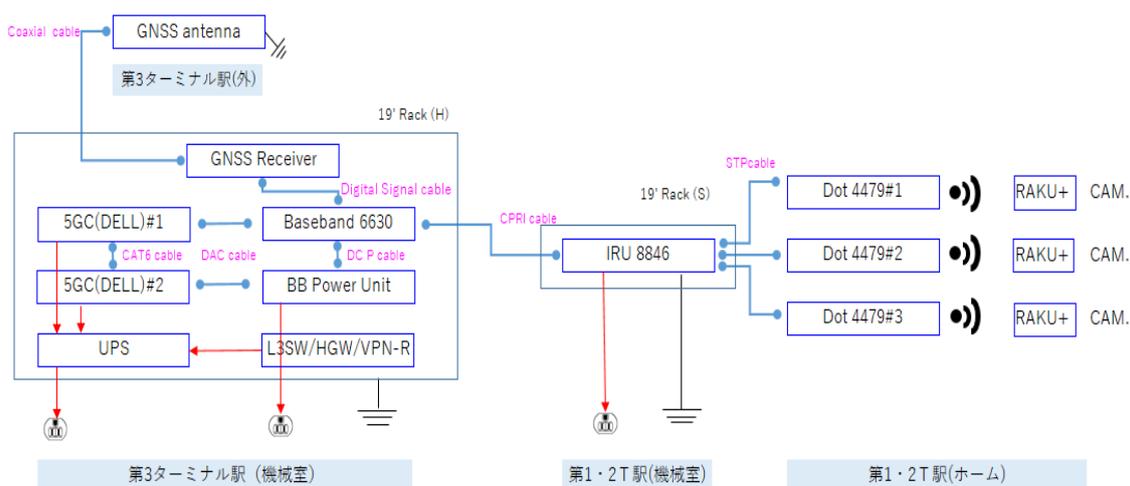


図 2.2.5-1 ローカル 5G 機器配置図

2.2.6 その他付随する装置

2.2.6.1 時刻同期用 GNSS ユニット

時刻同期用 GNSS は、3GPP で定められた 5G システムの時刻整合要件を満たすために、GNSS より受信する時刻情報を Baseband6630 に配信するシステムであり、GNSS アンテナと GNSS 受信機で構成される。屋内では衛星を補足できないため、屋外の南向き壁面に設置した。GNSS アンテナと接続する GNSS 受信機は、非常に小さな装置のため、機械室のラック内に収容した。

GNSS アンテナ及び GNSS 受信機の外観を図 2.2.6-1 及び図に、諸元を表 2.2.6-1 に示す。



図 2.2.6-1 GNSS Sync Kit (エリクソン社製)
※GNSS 受信機の画像は拡大したもの

表 2.2.6-1 GNSS アンテナ,レシーバの諸元

製品	サイズ	周波数帯	重量
GNSS アンテナ	Φ77*74mm	1559Mhzto1610.5MHz	0.3kg
GNSS レシーバ	H30*W36.4*L96	同上	113g



図 2.2.6-2 設置された GNSS Sync Kit (エリクソン社製)

2.2.6.2 無停電電源ユニット (UPS)

5GC は DELL サーバを使用しているため機器の保護を目的として無停電電源ユニット UPS を導入した。本実証で使用した無停電電源ユニットの (UPS) の外観を図 2.2.6-3 に、またその諸元を表 2.2.6-2 に示す。



図 2.2.6-3 無停電電源装置 (UPSS-15A3-010RM) の外観

表 2.2.6-2 UPS の諸元

運転方式	常時インバータ方式
筐体	ラックマウント方式
最大出力容量(W)	1200W
最大出力容量(VA)	1500VA
交流入力	単相 2 線 / 100V
入力形状	NEMA 5-15P
サイズ	W435*D488*H86mm(2U)
重量	29kg

2.2.6.3 JUNIPER NETWORKS EX2300-C (L3SW)

5GC サーバ側で VRRP (冗長化プロトコル) を使用するため、それに対応した製品を選定した。本実証で使用した EX2300-C (L3SW) の外観を図 2.2.6-4 に、またその諸元を表 2.2.6-3 に示す。



図 2.2.6-4 EX2300-C の外観

表 2.2.6-3 EX2300-C の諸元

電力(AC)	40W
10G SFP+対応有無	2 ポート
サイズ	W279×D239×H44(1U)
重量	2.48kg
動作時温度範囲	0~40℃

2.2.7 ローカル 5G 端末

本実証では、ローカル 5G 端末として Palcom 社製の Raku Plus を 3 台使用した。Raku Plus の外観を図 2.2.7-1 に、Raku Plus の設置状況を図 2.2.7-2 に、その諸元を表 2.2.7-1 に示す。



図 2.2.7-1 Palcom Raku Plus の外観



図 2.2.7-2 Raku Plus の設置状況

表 2.2.7-1 RAKU Plus の諸元

物理要件	
サイズ	119 x 72 x 23.5 mm
重さ	235g
SIM	
SIM card type	Nano SIM
対応周波数	
L5G Sub6	n79
Connectivity	
USB	USB 3.1 Gen2,
USB data rate(理論値)	10Gbps
USB Connector Type	USB-Type C
Ethernet	RJ45
Data rate	1000BASE-T
Wi-Fi	
Wi-Fi 規格	802.11 a/b/g/n/ac/ax
周波数	2.4/5.0GHz
最大同時接続数	32
環境条件	
動作温度	-10℃ to 45℃
動作湿度	5% to 95%

2.2.8 システム構成

羽田空港第1・第2ターミナル駅に無線アンテナを置局し、羽田空港第3ターミナル駅に、無線制御部とローカル5G制御部を設置し、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今回の課題実証システム用として構築した。構築した車両検査の遠隔・自動監視システムの全体イメージを図2.2.8-1に、システム構成を図2.2.8-2に、また、システム構築に使用した機器一覧を表2.2.8-1に示す。

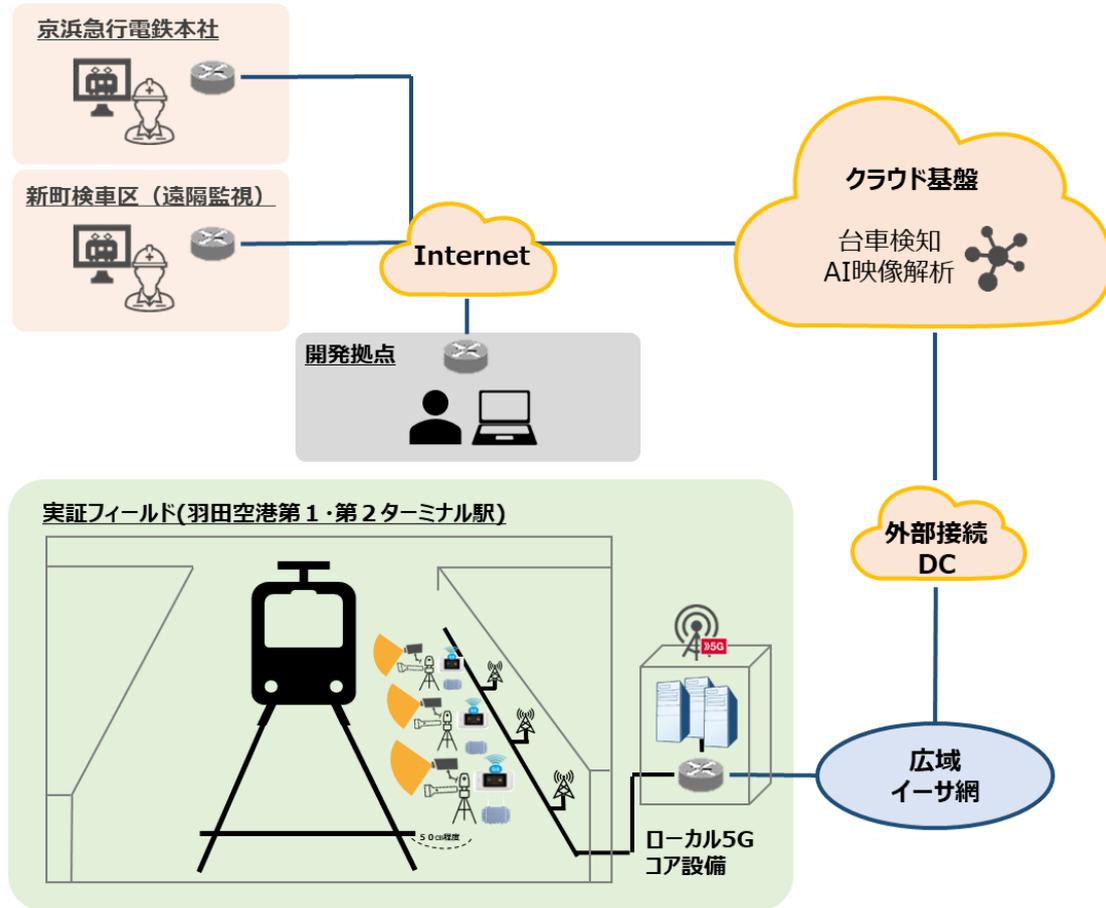


図 2.2.8-1 車両検査の遠隔・自動監視システムの全体イメージ図

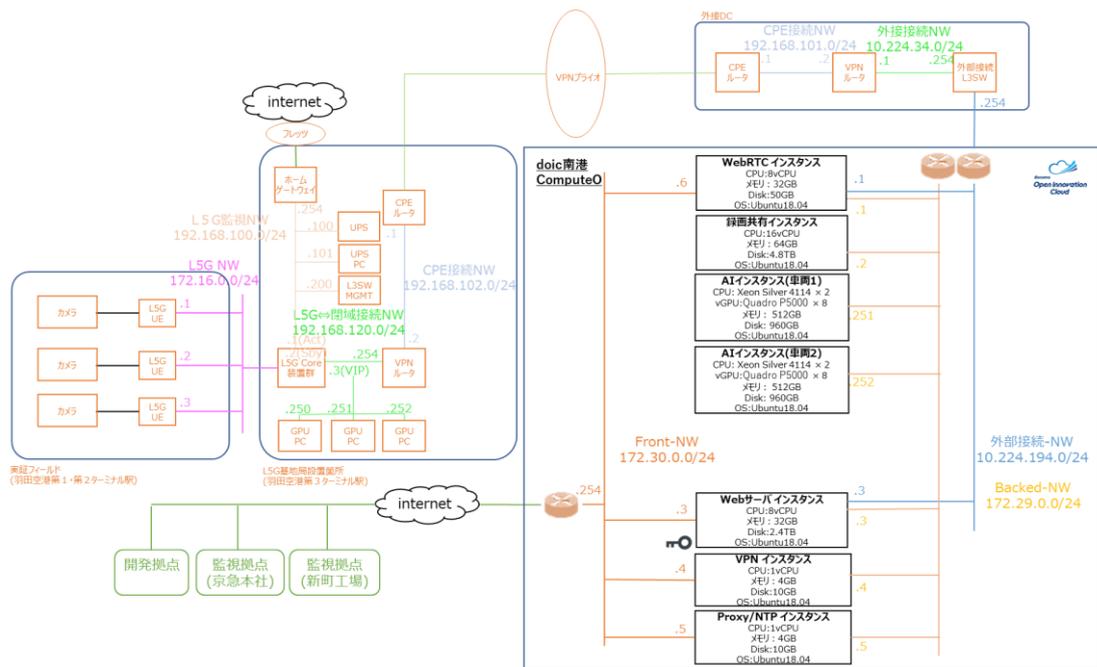


図 2.2.8-2 車両検査の遠隔・自動監視システム構成

表 2.2.8-1 車両検査の遠隔・自動監視システム構築に使用した機器及び数量

機器等名	機能・役割	数量
車両検査用フルHDカメラ	ホーム発着時、走行車両の台車状態をフル HD カメラで撮影	3
Poe インジェクタ	カメラに LAN ケーブルで給電する	3
照度補完用ライト	ホーム発着時、走行車両の台車状態をフル HD カメラで撮影する際に、照度の不足を補う	6
GPU 搭載ノート PC	上記カメラ映像を適切な映像フォーマットにエンコードし、AI 解析基盤へ配信	3
保守用ノート PC	ローカル 5G 機器及びローカル 5G 端末の保守用 PC	1
ローカル 5G 端末 (ルータ機材)	ローカル 5G を利用し、AI 解析基盤へ広帯域なアップロード通信を行う	3
防水防塵 BOX	機材の故障を防ぐ	3
ローカル 5G 基地局	ローカル 5G を利用可能なこと。4.7GHz 帯の 4.8-4.9GHz (100MHz) のローカル 5G 電波を射出	1
クラウド基盤	各システムを構成する IaaS クラウド基盤	1
VPN ルータ	実証拠点からクラウド基盤外部接続用 DC 間を VPN 接続するためのルータ機器	2
映像受配信システム	現地実証環境からの映像配信を受信し、遠隔監視室と想定する試験室の PC・検査作業員が持つタブレットへ映像をストリーミング配信	1
列車検査用映像 AI 解析エンジン	車両台車の状態を AI 解析し、異常等を検出	2
映像配信サーバ	検出座標データの配信、AI 解析結果録画データの配信	1
AI 結果表示 PC・タブレット	AI 解析結果をリアルタイム表示、解析結果録画の表示・確認するためのクライアント端末	1~3

▼車両検査用フル HD カメラ

上記の経緯のもと、車両検査用フル HD カメラ 3 台を京浜急行電鉄羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅のホーム下に設置した。



図 2.2.8-3 車両検査用フル HD カメラ

表 2.2.8-2 スペック・概要（車両検査用フルHDカメラ）

カテゴリー	スペック
メーカー	JVCKENWOOD
型式	VN-U178WPR
カメラ部	
撮像素子	1/2.3型裏面照射型CMOSセンサー
有効画素数	約1,240万画素、4072（水平）×3046（垂直）
撮像面積	水平6.3mm x 垂直4.7mm
カラー撮像方式	単板原色ローリングシャッター方式
走査方式	プログレッシブスキャン
最低被写体照度	カラー：1.5lx、白黒：0.8lx（50%出力、AGC HIGH、電子シャッター1/60、電子感度アップ2倍）
ホワイトバランス	ATW-WIDE、ATW-NARROW、AWC
AGC	HIGH、MID、OFF
電子シャッター	オート：最大・最小シャッター速度を設定、マニュアル：1/30～1/10000、フリッカレス
電子感度アップ	x2、x4、x8、x16、OFF
逆光補正（BLC）	エリア編集、OFF
ワイドダイナミックレンジ	アクティブガンマ方式（HIGH、MID、LOW、OFF）
映像レベル調整	カラー、ブラック、エンハンス
3次元ノイズリダクション	付（HIGH、MID、LOW、OFF）
デイ&ナイト機能	IRカットフィルター可動式/赤外LED照明（照射距離25m）
画質改善機能	コントラスト調整、白とび軽減
音声入出力	各1系統（入力時プラグインパワーマイク対応）
レンズ部	
焦点距離（倍率）	4.5～10mm（約2.2倍）
最大口径比	F1.6
包括角度（水平×垂直）	82°×44°（WIDE端）～35°×21°（TELE端）
撮像角度調整	パン：±175°、チルト：0°～90°、ローテーション：±95°
フォーカス/ズーム調整	電動（遠隔操作可）
ネットワーク部	
インターフェース	RJ-45、10BASE-T/100BASE-TX
通信プロトコル	IPv4、IPv6、HTTP、TCP、UDP、FTP、RTP、RTSP、RTCP、SMTP、DHCP、SNTP、SNMP v1/v2c/v3、ICMP、IGMP、DNS、DDNS、ARP
標準化プロトコル	ONVIF profile S
画像圧縮方式	H.264（Main/High profile）/JPEG
画像サイズ	3840×2160、1920×1080、1280×960、1280×720、640×480、640×360、320×240
画像圧縮設定	H.264：VBR/CBR（ビットレート設定128Kbps～12Mbps）、JPEG：VFS（クオリティ設定可）
フレームレート	最大30fps（3840×2160）
音声圧縮方式	G.711（μ-Law）
音声ファイル再生機能	WAVEファイル（リニアPCM、8kHz、16bit、モノラル）
配信方式	ユニキャスト/マルチキャスト
ビューワー	Webブラウザ（Internet Explorer 11）
接続クライアント数	最大10（エンコーダCHあたり最大8）
最大配信ビットレート	ビットレート合計40Mbps未満
ローカル記録機能	H.264（プリ7秒/ポスト60秒、アラーム、連続）、Webブラウザによる再生、ダウンロード可能
FTP映像送出機能	JPEG、640×360、毎秒1枚（ポスト記録60秒、アラーム記録、連続記録）
デジタルPTZ機能	エンコーダ2～4で切出しサイズを指定、エンコーダあたりプリセットポジション×10登録可
制御PC仕様	OS：Windows 10（64ビット/Pro）/8.1（32/64ビット）/7（SP1）、 CPU：Intel Core i5-3570 3.40GHz以上、 メモリー：4GB以上、HDD空き容量512MB以上、 画面解像度＊：1920×1080ピクセル以上、True Color（4K解像度対応）
総合部	
電源	DC12V、DC-48V（PoE：IEEE802.3af）
消費電流/電力	1050mA/12.6W（DC12V）、265mA/12.95W（PoE）
周囲温度	-40℃～50℃（PoE時）、-30℃～50℃（DC12V時）、-30℃～40℃（推奨）※起動時は-10℃以上
周囲湿度	10%RH～90%RH（結露なきこと）
防塵防水性能	IP66準拠（JIS C 0920）
外形寸法（W×H×D）	101×86×258mm（突起物含まず）
質量	約1.2kg

▼PoE インジェクタ

PoE インジェクタ 3 台を京浜急行電鉄羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅のホーム下に設置した。



図 2.2.8-4 PoE インジェクタ

表 2.2.8-3 スペック・概要 (PoE インジェクタ)

カテゴリー	スペック	
メーカー	APRESIA	
型式	APLIJ1GPOEPLUS	
仕様概要		
Interface	10BASE-T/100BASE-TX	-
	10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T	2
PoE	PoE給電ポート数	1
	15.4Wフル給電ポート数	-
	30Wフル給電ポート数	1
	給電電力	30.0W
ハードウェア	サイズW (mm)	80
	サイズD (mm)	165
	サイズH (mm)※	45.5
	概算質量	0.6kg以下
	消費電力(AC100V時)	最大1W/平均1W(PoE給電なし) 最大37W/平均34W(PoEフル給電)
	動作温度	0~50°C
	AC電源対応	100~120V ± 10% 200~240V ± 10% (50/60Hz)
	騒音特性	— (FANレス)
	FANレス対応	○
	MTBF(本体のみ)	414年

▼照度補完用ライト

ホーム発着時、走行車両の台車状態を車両検査用フル HD カメラで撮影する際に、照度の不足を補うため、カメラの左右に 2 か所、照度保管用ライトを設置した。



図 2.2.8-5 照度補完用ライト

表 2.2.8-4 スペック・概要（照度補完用ライト）

カテゴリー	スペック
メーカー	GOODGOODS
型式	LDJ-100M
仕様概要	
消費電力	100W
入力電圧	AC85V～265V
周波数	50/60Hz兼用
全光束	約14040lm(光源の値に準ずる)
ランプ効率	140.4lm/W
発光色	昼光色(6000K)
演色性	>Ra80
光源数	LEDチップ×90個
照射角度	40°
ステータ調整角度	前後約180° C
使用温度	-20° C～45° C
防水等級	IP66 (生活防水)
コード	全長約2m
サイズ	W268*H310*D44.5 mm
パッケージサイズ	W307*H357*D97mm
質量	約2.8kg
材質	アルミニウム合金 + 強化ガラス

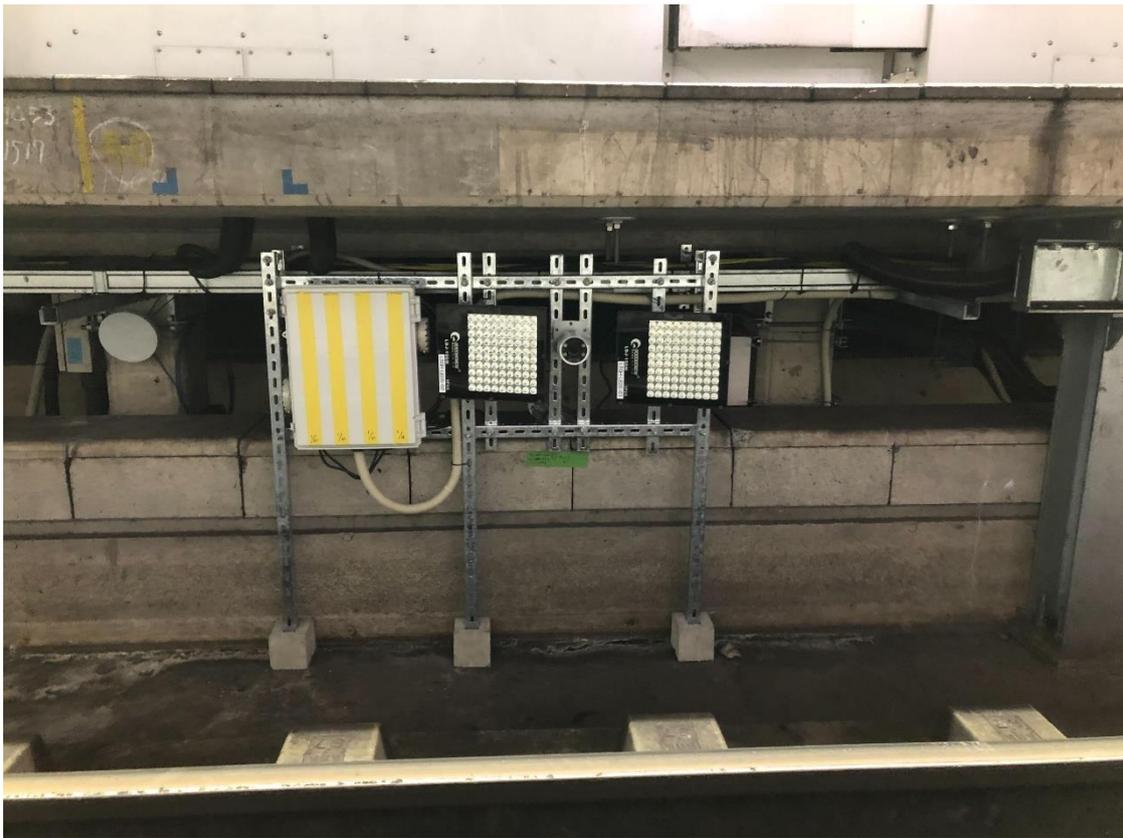


図 2.2.8-6 車両検査用フル HD カメラ、照度保管用ライトの設置した様子

▼GPU 搭載ノート PC

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 GPU 搭載ノート PC を、羽田空港第 3 ターミナル駅内の通信機械室に 3 台設置した。



図 2.2.8-7 GPU 搭載ノート PC

表 2.2.8-5 スペック・概要 (GPU 搭載ノート PC)

カテゴリー	スペック
メーカー	ASUS
型式	GA401QM-R9R3060GQ512
仕様概要	
カラー	エクリプスグレー
OS	Windows 10 Home 64ビット ※1
CPU	CPU名：AMD Ryzen™ 9 5900HS プロセッサ 動作周波数 (標準/最大)：3.0GHz/4.6GHz キャッシュメモリ：3次キャッシュ 16MB
メモリ容量	標準：16GB ※2 仕様：DDR4-3200
表示機能	ディスプレイ：14型ワイドTFTカラー液晶 表面仕様：ノングレア 解像度：2,560×1,440ドット (WQHD) (120Hz) タッチパネル：非搭載 グラフィックス機能：NVIDIA® GeForce RTX™ 3060 (NVIDIA® Optimus™ Technology対応) ビデオメモリ：6GB ※3 外部ディスプレイ出力：最大3,840x2,160ドット ※4
記憶装置	SSD：512GB (PCI Express 3.0 x4接続) ※5
サウンド	サウンド規格：ハイ・デフィニション・オーディオ準拠 スピーカー：クアッドスピーカー内蔵 (1W×2、0.7W×2) マイク：アレイマイク内蔵
センサー	指紋認証
通信	LAN：- 無線LAN：IEEE802.11a/b/g/n/ac/ax ※6 Bluetooth®機能：Bluetooth® 5.1
入力	キーボード：87キー日本語キーボード (イルミネートキーボード) ポインティングデバイス：マルチタッチ・タッチパッド
インターフェース	外部ディスプレイ出力：HDMI×1 USBポート：USB3.2 (Type-C/Gen2) ※7 ×1、USB3.2 (Type-C/Gen2) ※8 ×1、USB3.2 (Type-A/Gen1) ×2 カードリーダー：- オーディオ：マイクロホン/ヘッドホン・コンボジャック×1
電源	ACアダプターまたはリチウムポリマーバッテリー (4セル)
バッテリー駆動時間	約11.3時間 ※9
バッテリー充電時間	約1.9時間
消費電力	消費電力：最大約180W
電源	エネルギー消費効率：12区分 34.1kWh/年 (68%) ※10
サイズ	幅324mm×奥行き222mm×高さ17.9~18.9mm
質量	約1.65kg

▼防水防塵 BOX

京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅のホーム下にローカル5G端末を設置するにあたり、機材の故障を防ぐために防水防塵BOXを合計3個設置し、防水防塵BOX 1つにつき1つのローカル5G端末を設置した。



図 2.2.8-8 防水防塵 BOX

表 2.2.8-6 スペック・概要 (防水防塵 BOX)

カテゴリー	スペック
メーカー	河村電器産業
型式	HP 4535-16RP
仕様概要	
外形寸法	タテ：450mm
	ヨコ：350mm
	フカサ：160mm
基板寸法	タテ：395mm
	ヨコ：301mm
色彩	ライトグレー (マンセル5GY8.5/0.5近似) ※ルーバーはベージュ (マンセル5Y7/1近似)
取付基板	木製基板 12mm/方眼目盛付
材質	ボデー：PC樹脂 (GF入り)、ドア：PC樹脂
函体形式	屋内外兼用 露出形
構造	ルーバー付 換気ファン付 (100V)
保護構造	IP55
ドア形式	片扉
重量	3.6kg

▼VPN ルータ

実証拠点からクラウド基盤外部接続用 DC 間を VPN 接続するため、羽田空港第3ターミナル駅内の機械室、および外接 DC の2か所にVPNルータを設置した。



図 2.2.8-9 VPN ルータ

表 2.2.8-7 スペック・概要 (VPN ルータ)

カテゴリー	スペック
メーカー	YAMAHA
型式	RTX1220
インターフェース	
LANポート	3ポート (10BASE-T/100BASE-TX/1000BASE-T, ストレート/クロス自動判別) ※LAN1ポートは8ポートL2スイッチ
WANポート	任意のLANポートを利用可能
ISDN Uポート	-
ISDN S/Tポート	-
PRIポート	-
LINEポート	-
TELポート	-
microSDスロット	1スロット(SDHC対応)
USBポート	1ポート (USB 2.0 Type-A, 給電電流:最大500mA, USBメモリ/USBデータ通信端末に対応) (※2)
コンソールポート (設定用)	1ポート (RJ-45, 9,600/19,200/38,400/57,600/115,200 bit/s) (※3)
拡張スロット	-
メモリ	
Flash ROM	32MB (ファームウェア:2組, コンフィグ:5組/履歴機能あり)
RAM	256MB
性能	
内蔵L2スイッチ機能	ポート分離, LAN分割 (ポートベースVLAN), ポートミラーリング, リンクアグリゲーション (冗長化のみ)
閉域網サービス機能	タグVLAN, IPv6マルチキャスト (MLDv1, MLDv2, MLDプロキシ)
タグVLAN (IEEE 802.1Q)	LANごとに32ID, PPPoE over タグVLAN
PPPoEセッション数	40
対応回線およびサービス網 (※1)	
対応回線およびサービス網 (※1)	FTTH (光ファイバー), ADSL, CATV, ATM回線, IP-VPN網, 広域イーサネット網, 携帯電話網, フレッツ・サービス,
IPv6接続形式	
IPv6接続形式	ネイティブ, トンネル, デュアルスタック, RAプロキシ, DHCPv6-PD, IPv6 PPPoE
WANプロトコル	
WANプロトコル	PPPoE
ルーティング	
ルーティング対象プロトコル	IP, IPv6
IPルーティングプロトコル	RIP, RIP2, OSPF, BGP4(EBGP, IBGP)
IPv6ルーティングプロトコル	RIPng, OSPFv3
経路エントリ数	最大10,000 (※4)
OSPFネイバー数とその経路	30ネイバーの時:経路数8,000 (※4)
BGP4経路数	最大10,000 (※4)
データ圧縮	
データ圧縮	IPComp, CCP (Stac LZS), VJC
スループット	
スループット	最大2.0Gbit/s (※5)
IPsecスループット	最大1.5Gbit/s (※6)
VPN対地数	
VPN対地数 (PPTP)	4
VPN対地数 (IPsec)	100
VPN対地数 (L2TP/IPsec)	100
VPN対地数 (L2TPv3)	9
VPN対地数 (最大設定可能数)	100 (※7)
VPN機能	
VPN機能	IPsec (VPN機能: NATトラバース, XAUTH) + AES128/256, 3DES, DES(暗号機能: ハードウェア処理) + IKE/IKEv2(メインモード, アグレッシブモード), PPTP (VPN機能) + RC4 (暗号機能) (※8), L2TP/IPsec, L2TPv3, L2TPv3/IPsec, IPsecトンネル, マルチポイントトンネル (サーバー/クライアント)
NAT	
アドレス変換機能 (NATディスクリプター機能)	NAT, IPマスカレード, 静的NAT, 静的IPマスカレード, DMZホスト機能, PPTPパスマスルー (複数セッション) (※9), IPsecパスマスルー (1セッション), FTP対応, traceroute対応, ping対応, SIP-NAT対応 (※10), IPマスカレード変換セッション数制限機能, ポートセービングIPマスカレード
NATセッション数	65534
QoS	
QoS機能 (制御方式)	優先制御, 帯域制御 (Dynamic Traffic Control), Dynamic Class Control, VPN QoS (※11), 帯域検出機能, 負荷通知機能
QoS機能 (分類方式)	IPアドレス, プロトコル, ポート番号, ToSフィールド
QoS機能 (網側QoS機能との連携)	Diffserv, カラーリング (ToS), ToS->CoS変換
セキュリティ	
認証機能	RADIUS, PAP/CHAP, MS-CHAP/MS-CHAPv2
セキュリティ機能	URLフィルター (内部データベース参照型), DHCP端末認証機能, Winnyフィルター (Winny Version2 対応), Shareフィルター (Share バージョン1.0 EX2対応), MACアドレスフィルター
ファイアウォール機能 (IPV4/IPV6静的フィルタリング)	IPアドレス, ポート, プロトコル (Established, TCPフラグ有り), FQDN(IPV4のみ), ソース/デスティネーション, LAN側/WAN側のIN/OUTに適用
ファイアウォール機能 (IPV4/IPV6動的フィルタリング)	基本アプリケーション (TCP, UDP), 応用アプリケーション (FTP, TFTP, DNS, WWW, SMTP, POP3, TELNET),
動的フィルターセッション数	65534
ファイアウォール機能 (IDS: IPV4不正アクセス検知)	LAN側/WAN側のIN/OUTに適用, IPヘッダー, IPオプションヘッダー, ICMP/UDP/TCP/FTPなどのカテゴリで41種の不正アクセスを検出可能, 不正アクセス検知メール通知機能
ハードウェア	
状態表示ランプ	前面: 26 (POWER, ALARM, STATUS, LAN [LINK×10, SPEED×10], microSD, USB, DOWNLOAD), 背面: 0
動作環境条件	周囲温度0~45°C, 周囲湿度15~80%(結露しないこと)
電源	AC100~240V (50/60Hz), 電源内蔵, 電源インレット(3極コネクタ, C14タイプ), 電源スイッチ
最大消費電力(皮相電力)、最大消費電流、	14.5W(28VA), 0.28A, 52.2kJ/h
筐体内温度測定	温度計内蔵 (コマンドで確認, SNMPによる取得, 閾値設定によるSNMPトラップ, ALARM LEDによる警告)
筐体	金属筐体, ファンレス, セキュリティスロット(ケンジントンロック用)
電波障害規格、環境負荷物質管理	VCCIクラスA, RoHS対応
外形寸法	220 (W) × 42 (H) × 239 (D) mm (ケーブル, 端子類は含まず)
質量(付属品含まず)	1.5kg

2.3 システム機能・性能・要件

2.3.1 ローカル 5G ネットワーク

本実証において構築したローカル 5G ネットワークの性能を以下に記載する。

2.3.1.1 同時接続数

同時接続数は Baseband あたりの単位として定義され、RRC connected users として、最大 1000 ユーザが接続可能である。

2.3.1.2 最大スループット

ダウンリンク：1.5Gbps (Single user peak rate, 4 layers, 100MHz BW, 256QAM)

アップリンク：86Mbps (Single user peak rate, 1 layer, 64QAM)

2.3.1.3 無線局数

IRU=1 セクタ、最大 6 IRU まで接続可能 (1 セクタ = 8 Dots / IRU 構成) である。本実証においては、1 基地局 1 セクタとしてアンテナ 3 台を使用した。

2.3.1.4 品質

エリクソン・ジャパン株式会社では、Ericsson Private 5G の機器において、Business Area Technologies & New Businesses (BTEB)、Dedicated Networks 部 Technology and Development チームにて、製品開発に加え機能仕様確認試験、サービススペック試験を含めた、総合試験を一貫して行っている。この体制により、対象製品の性能、品質を担保し、安定、高品質のサービスを提供している。

また、実証に用いる測定機材については、校正証明書を添付の上、実証試験前に測定系の構築及び事前測定を実施する。

2.3.2 車両検査の遠隔・自動監視システム

2.3.2.1 使用した機器及びソフトウェア

本実証における車両検査の遠隔・自動監視システム構築に使用した各種機器及びソフトウェアの機能・性能・要件は表 2.3.2-1 に示すとおりである。

表 2.3.2-1 車両検査の遠隔・自動監視システム構築に使用した機材の機能・性能・要件
(1/2)

機器等名	使用機材	機能・性能・要件
車両検査用フルHDカメラ	VN-U178WPR	<ul style="list-style-type: none"> ・4K、FHDの解像度で撮影できる機能を有していること。 ・有線でUEと接続できるインターフェースを有していること。 ・防塵防水対応であること。 ・シャッター速度を任意に変更可能であること。
車両映像配信用PC	DELL ALIENWARE M15 R3 プレミアム	<ul style="list-style-type: none"> ・webRTCにエンコード変換可能な性能を有するGPUボードを搭載していること。 ・19インチラック内へ収容するために可能な限りコンパクトなサイズであること。
ローカル5G端末 (ルータ機材)	Compal RAKU Plus	<ul style="list-style-type: none"> ・アップロード時最大1.6Gbpsの機能を有している。 ・ダウンロード時最大7.53Gbpsの機能を有している。 ・有線LAN(1000BASE-T)を有しており車両検査用フルHDカメラとLANで接続が可能である。 ・Wi-Fi規格、IEEE802.11a,b,g,n,ac,axに対応している。
ローカル5G基地局	エリクソン・ジャパン	<ul style="list-style-type: none"> ・ローカル5Gを利用可能なこと。4.7GHz帯の4.8-4.9GHz(100MHz)のローカル5G電波を射出
クラウド基盤	NTTドコモ ドコモオープン イノベーション クラウド	<ul style="list-style-type: none"> ・必要コンピューティングリソースの提供が可能であること。 ・GPUインスタンスが多数準備可能であること。 ・ローカル5Gスポットと閉域網接続可能なクラウド基盤であること。 ・令和2年度実証において構築・動作実績のある基盤であること。
VPNルータ	VPNルータ	<ul style="list-style-type: none"> ・VPN機能を有すること。 ・VPNスループットが100Mbps以上確保できること。 ・GigabitEthernet対応のポートを具備していること。

表 2.3.2-1 車両検査の遠隔・自動監視システム構築に使用した機材の機能・性能・要件
(2/2)

機器等名	使用機材	機能・性能・要件
映像受配信システム	時雨堂 WebRTC SFU Sora	<ul style="list-style-type: none"> ・ GPU 搭載ノート PC へ搭載する WebRTC クライアントから AI 解析システムへ映像送信可能である。 ・ 映像を WebRTC SFU サーバ経由で配信元に代わってストリーミング配信が可能である。 ・ 多地点からの要求に対し、WebRTC SFU サーバ経由で配信元に代わって配信が可能なシステム構成である。 ・ 一般的な配信において高ビットレートでの配信時、映像の解像度が引き下げられてしまう場合があるが、株式会社時雨堂が提供する WebRTC SFU sora は、クライアントに対し上限値を引き上げるように通知することで解像度を担保した映像配信が可能である。
列車検査用映像 AI 解析エンジン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高精度映像異常検出エンジン ・ NVIDIA Quadro P5000*8 	<ul style="list-style-type: none"> ・ フル HD 映像を AI 解析し、異常箇所を特定した座標情報をリアルタイムに出力することで検出座標データ配信を行う。 ・ AI 解析結果映像をクラウド上の録画ストレージへ保存することで、後からでも映像再生可能とする。
映像配信サーバ	Web サーバ	<ul style="list-style-type: none"> ・ リアルタイム映像と 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可能な状態でクライアントに配信することで、低遅延で配信可能である。 ・ また、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のデータは、映像配信サーバに MQTT ブローカーを配置してクライアントに配信することで、高頻度で配信可能である。 ・ 映像配信サーバに録画映像のデータベースおよび Web サーバを配置し、Web サーバから AI 解析結果をファイル形式で配信することで映像配信可能である。
AI 結果表示 PC・タブレット	<ul style="list-style-type: none"> ・ ノート PC ・ タブレット 	<ul style="list-style-type: none"> ・ Chrome ブラウザが動作可能な端末であり、http アクセスにより Web サーバへ接続することで配信要求と解析結果の表示が可能である。 ・ 高性能グラフィック処理基盤を搭載していること。 ・ 有線 LAN を有しており、ルータ機材と LAN で接続可能であること。

2.3.2.2 車両検査用フルHDカメラ選定に至る経緯及び同カメラに関する機能・性能・要件

本実証において、京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の線路内に入線する列車の台車部分をカメラで撮影する構成となっている。

京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の線路内への設置にあたり、長期安定運用に耐え、建築限界を超えないカメラが必要となる。建築限界とは、線路の周辺に物体を設置する場合、安全のために線路から定められた範囲内には物体を設置してはいけないというものである。

また、速度のある対象物体を撮影するためには、シャッタースピードを上げて画像のブレを少なくする必要がある。一方で、シャッタースピードを上げると映像が暗くなるという現象が起きるため、ライトで照度を補う必要がある。

事前に机上及び実地検証を実施した上で、必要とされる機能・性能・要件に適合する機器を選定した。

(1) カメラ

車両検査用フルHDカメラの選定について、実装を踏まえ比較的安価に購入可能なこと、駅に設置するため防水防塵対応であることなどを前提に選定を行った。下記の3機種を候補として選定し、比較検証を行うことによりVN-U178WPRを使用することとした。

表 2.3.2-2 車両検査用フルHDカメラ候補の比較

カメラ (型番)	メーカー	利点	欠点	総評
VN-U178WPR	JVC	<ul style="list-style-type: none"> ・即納可 ・防水防塵対応 	筐体の奥行きが大きく、設置時に建築限界を超える可能性	○ 防水防塵対応、即納可のため
P3248-LVE	Axis	<ul style="list-style-type: none"> ・ドーム型のため筐体の奥行きが小さく、設置時の建築限界に左右されない ・防水防塵対応 	納期3か月・撮影画像が魚眼レンズのような映り方	× 納期3か月で検証時期に間に合わないため
α7sIII	SONY	<ul style="list-style-type: none"> ・シャッタースピードなど、パラメータを柔軟に調節可 	<ul style="list-style-type: none"> ・納期未定 ・防水防塵非対応 	× 防水防塵非対応、納期未定のため

夜間の終車後に羽田空港第1・第2ターミナル駅 1番線の線路内に立ち入り、カメラの設置に関する建築限界の確認を実施した。図面での確認は困難なことから、現地にてカメラを設置する場所の確認と併せて、設置するカメラ筐体の大きさが建築限界に干渉しないかどうかを確認した。

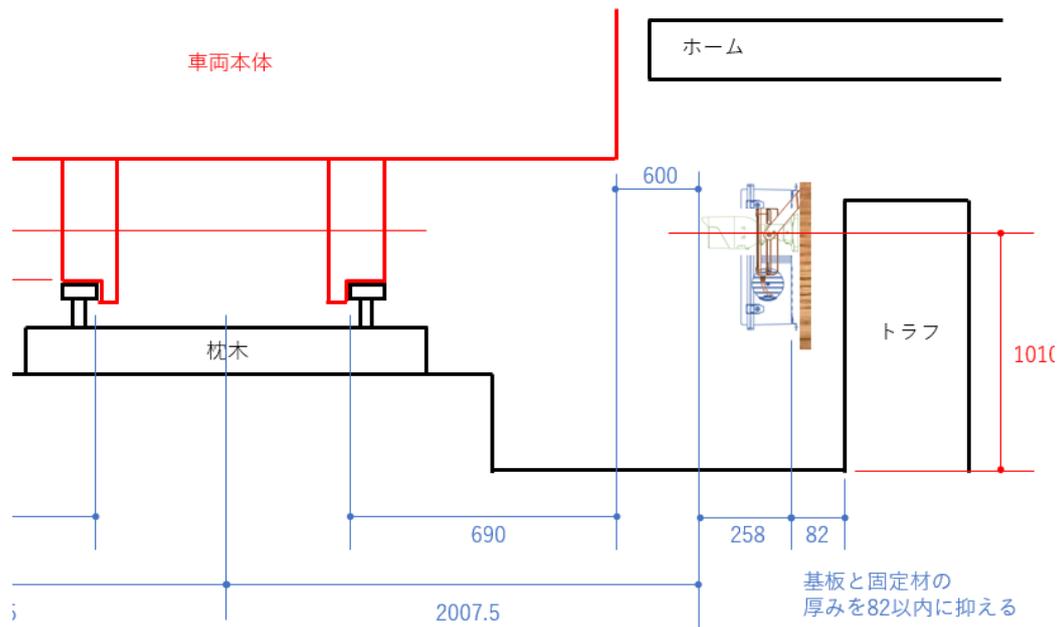


図 2.3.2-1 カメラ設置に関する建築限界確認の結果

羽田空港第1・第2ターミナル駅 1番線の線路内で確認した結果、筐体の大きさから建築限界との干渉が懸念されたVN-U178WPRでも問題なく設置可能なことが確認できたため、VN-U178WPRを使用することとした。

(2) 車両検査用フルHD映像撮影のためのパラメータ決定のための事前検証

どの程度シャッタースピードを上げ、どの程度の明るさのライトが必要となるか、実際に入線する速度で走行する列車を撮影し検証することが望ましいが、暗い環境において時速30km程度で列車を走行させ撮影可能な環境がなかったため、日没後に、NTTドコモの柏の葉テストフィールドで自動車を走行させ、撮影することで検証を行った。



図 2.3.2-2 シャッタースピードの比較

図 2.3.2-2 の左側がシャッタースピードを 1/1000 に設定した時の画像、右側が 1/4000 に設定した時の画像である。1/1000 の時はタイヤのホイールがぶれているが、1/4000 ではタイヤのホイールや、その周辺も比較的是っきりと映っていた。この結果により、シャッタースピードは 1/4000 とした。

またこの時、カメラからタイヤまで 1m、撮影対象の中心で照度は 2200lx 程度であったが、タイヤのホイール周辺部分は暗く映っており、電車の台車に置き換えたときにき裂を検出するためには照度が不足する恐れがある。

この結果を踏まえ、机上検討も行った結果、ライトの照度は 10,000lx 以上必要であることがわかった。

(3) ライト

柏の葉のテストコースにおける事前検証及び机上検討の結果から、ライトに必要な要件は下記のとおりであることが判明した。

- 設置場所となる羽田空港第1・第2ターミナル駅は定期的に夜間停電が起こるため、物理スイッチで点灯させる必要がなく、通電させることで点灯すること。
- 10,000lm以上あること。
- 屋外設置可能なものであること。

下記の2機種を候補として選定し、比較検証を行うことによりLDJ-100Mを使用することとした。

比較対象のLD-F60Wは、全光束が約10200lmで必要と想定した光量を満たしているが、検証を実施したところ、照射角度が120度と広いため、光量が分散され撮影対象範囲が暗く写ることがわかった。一方でLDJ-100Mは全光束が約14040lm、照射角度が40度で、検証にて撮影対象範囲の光量が十分であることが確認された。

表 2.3.2-3 照度補完のためのライト候補の比較

ライト型番	メーカー	特徴	総評
GoodGoods LD-F60W	グッド・グッズ	全光束 約 10200lm 照射角度 120度 防水等級 IP66	× 照射角度が広く、撮影対象範囲が暗い。
GoodGoods LDJ-100M	グッド・グッズ	全光束 約 14040lm 照射角度 40度 防水等級 IP66	○ 屋外設置可能。照射角度が広く、撮影対象範囲の光量十分。



図 2.3.2-3 LDJ-100M の検証風景

(事前検証における撮影条件)

- 4K15fps、FHD20fps。共に4000分の1シャッタースピード
- 光量としては画角中心部で14,000ルクス
- カメラ～被写体の距離：1300mm

一方で、図 2.3.2-3 のように、フリッカーが生じることが判明したが、AI 解析に影響があるかを確認し、選定することとした。

後述する令和 2 年度京浜急行電鉄久里浜工場における教師データ撮影時の映像を用いて、フリッカーが生じることで AI 解析に影響があるかを検証した結果、AI 解析に大きな影響がないことが確認されたため、LDJ-100M を選定することとした。

2.3.2.3 車両検査の遠隔・自動監視システムに関する機能・性能・要件

(1) システム要件

車両検査の遠隔・自動監視システム（以降、2.3.2.3 項では本システムと記載する）を構築するにあたり、運用コスト並びに既存業務への組み込み、言わば本システムと人による業務とのマッチングを考慮した実運用に資するシステム要件を京浜急行電鉄との協議に基づき定義し、システムを検討・構築した。

1) 運用コストを考慮したサーバスペックの選定

本システムはドコモオープンイノベーションクラウド「dOIC」（2.3.2.4 項に詳細記載）上に構築した。システム運用における dOIC のインシャルコスト及びランニングコストを長期利用を前提に鑑みて、利用するクラウド基盤やサーバスペックを選定した。dOIC の機能及び性能に関しては後述 2.3.2.4 にて詳細を記載する。

2) 運用に資するシステム処理時間の定義

羽田空港第1・第2ターミナル駅（以降、2.3.2.3 項では京急羽田 1T2T 駅と記載する）1番線ホームにて、運行中の列車車両の異常を検出する今回の実証環境においては、車両の入線完了～出線完了および出線完了～入線完了までの時間枠でシステムの処理を終えなければ処理が積み上がってしまい、システムが異常情報をアウトプットするまでの処理遅延が次々と蓄積されることとなる。そのため京急羽田 1T2T 駅 1 番線の運行スケジュールに則り、車両の入線～出線、および出線～入線までの、AI 解析の対象とならない時間の最短である 2 分間で、映像伝送、AI 解析、録画映像の配信処理などを含むシステム処理を完了させる必要がある。このため、時刻表上の列車発着時刻から本システムで車両の異常情報をアウトプットする（ユーザが確認可能な状態とする）までのシステム処理時間の目安を 2 分以内として設計した。なお、サーバ処理遅延の蓄積を回避することを目標としたため、ユーザが監視画面で映像を閲覧する下り通信の時間は 2 分間には含まない。

本実証では長期利用を前提にしたシステム設計であることから、インシャルコストおよびランニングコストを抑えるため、サーバスペックを抑えた設計としたが、机上計算では録画映像を配信する処理のために約 1 分間、AI 解析処理等に、約 1 分間要することが判明した。このため、ローカル 5G により短時間で安定した映像伝送を行えることを前提に、録画映像の配信処理、および AI 解析処理を短縮する工夫により、システム処理時間 2 分間を達成できるような設計を行った。AI 解析処理における工夫及び検討内容は後述 2.3.2.3(5)にて記載する。

ユーザの検出結果の確認手段は UI 画面（Web ページ）とし、AI 解析結果は異常種別及び箇所をバウンディングボックス表示し、録画映像に重畳させて表示した。リアルタイム映像に重畳させることも検討したが、机上計算において AI 解析処理等に約 1 分間要することが判明したことにより、その間カメラからの映像を AI 解析処理等が完了するまでディレイさせておく必要がある。しかしディレイする仕組みは映像を受信および配信する WebRTC

サーバにて実現可能だが WebRTC の制約として最大 40 秒しかディレイさせることができないことが判明したため、録画映像への重畳に至った。

(2) 全体構成図

京急羽田 1T2T 駅 1 番線ホーム下に固定設置された 3 台のフル HD カメラにより撮影した、入線/出線の走行車両台車のフル HD 映像をもとに、台車き裂等の異常をリアルタイムで AI 解析し、検出結果の座標データを配信した。UI コンテンツを内包する映像配信サーバ (Web サーバ) にて、取得した映像上に時刻同期した検出座標データを重畳させ、バウンディングボックスとして表示させた。

カメラ映像より車両の入線/出線及び車両の停止を判定するロジックを設け、車両の映っていない時間帯や車両停止時は台車異常検出の AI 解析処理を稼働させないこととした。

実証フィールド・拠点と本システムを図示した全体構成図を以下に記載する。

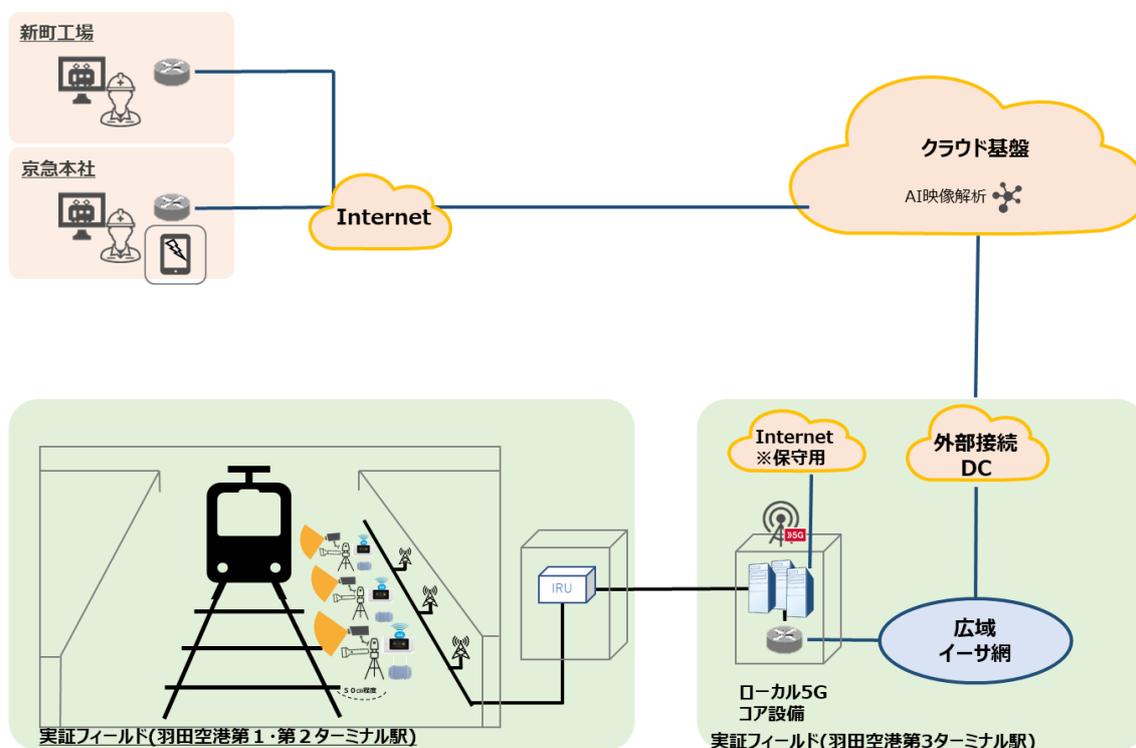


図 2.3.2-4 全体構成図

(3) ネットワーク構成図

実証フィールド・拠点と本システムを図示したネットワーク構成図を以下に記載する。

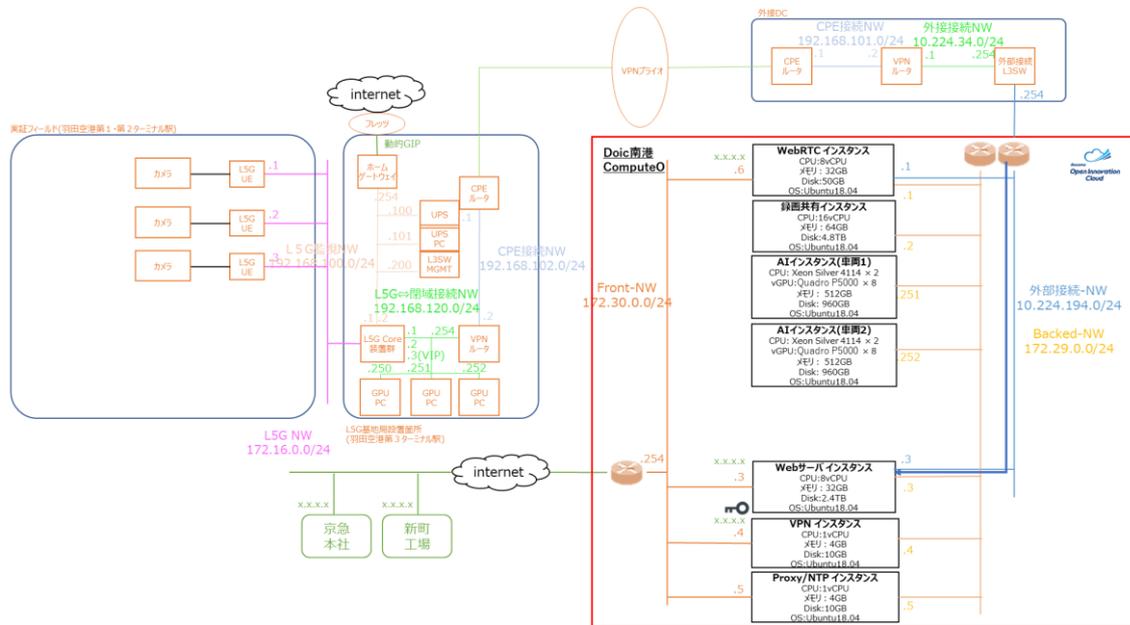


図 2.3.2-5 ネットワーク構成図

(4) 駅からのカメラ映像を受配信する機能

1) リアルタイム映像の配信

京急羽田 1T2T 駅 1 番線ホームに設置した 3 台のカメラ（ネットワークカメラ）のリアルタイム映像を L5G 通信により、それぞれ羽田空港第 3 ターミナル駅に配置した GPU 搭載ノート PC へ送信する。各 GPU 搭載ノート PC にて「WebRTC Native Client Momo」を用いて、映像にタイムスタンプを付与しクラウド側の WebRTC インスタンスに送信する。

WebRTC インスタンス上の「WebRTC SFU Sora」を用いて、受信したリアルタイム映像の配信を行う。2.3.2.3.(6)にて後述するが、映像を閲覧する UI 機能によりブラウザ経由で WebRTC インスタンスが配信するリアルタイム映像を閲覧する。

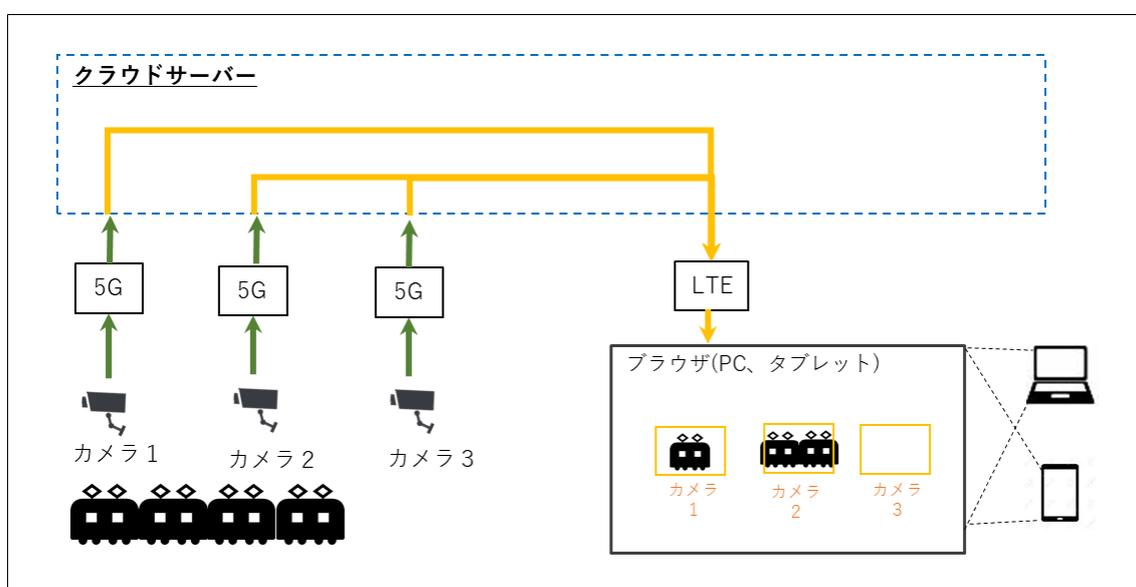


図 2.3.2-6 リアルタイム映像配信イメージ

2) 録画映像の配信

WebRTC インスタンスにて受信したリアルタイム映像を特定時間で分割して録画共有インスタンスに録画ファイルとして保存する。録画ファイルの生成が完了したタイミングで Web サーバインスタンスにファイルを取り込み、並行して実行する AI 解析処理の結果情報（検出対象物、異常検出箇所を示す矩形座標情報）と録画ファイルを紐づける。2.3.2.3.(6)にて後述するが、映像を閲覧する UI 機能によりブラウザ経由で AI 解析結果付きの録画映像にアクセスする。

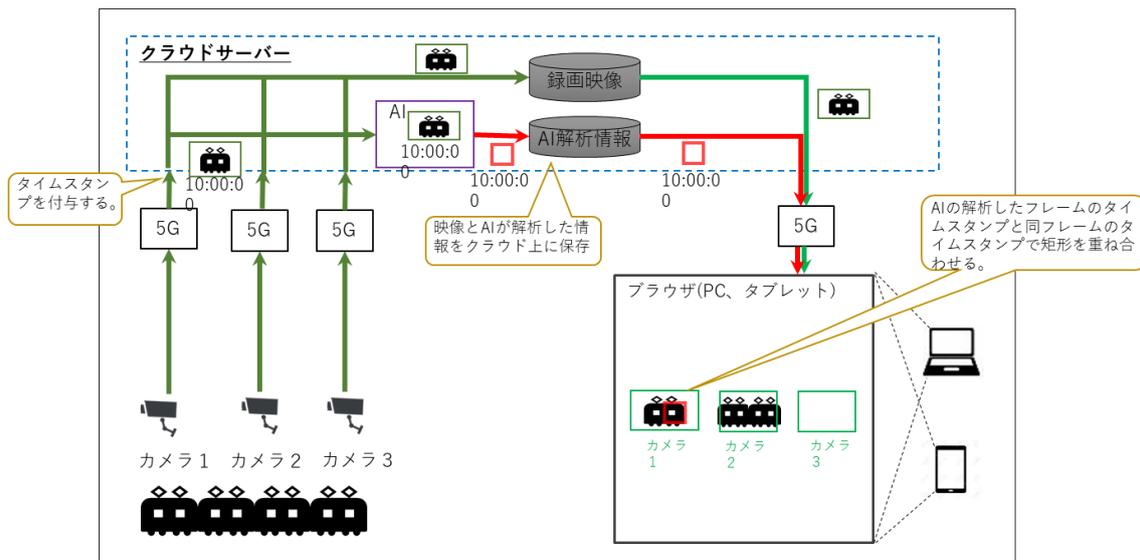


図 2.3.2-7 録画映像配信イメージ

録画は京急羽田 1T2T 駅 1 番線の列車運行スケジュールに則り算出した各列車の入線時刻と出線時刻を起点として、それぞれ前後 55 秒（計 1 分 50 秒）の長さとした。

運行スケジュールに則した録画開始/終了スケジュールをシステム側でセットしておき、それに沿って録画処理を実行させた。

ここで、配信するカメラ映像の品質やデータアップロード速度、それに付随する検討背景について以下に記載する。

表 2.3.2-4 配信する映像品質と検討背景

項目	実測・実施内容	検討背景
映像品質	FullHD 30FPS (L5G 通信区間)	運行中の列車車両に対して撮影及び解析を行うに当たり、設置カメラと車両との間隔が 50cm 程度かつ入線時は 30～40km/h の速度で過ぎ去る車両の台車部を捉えるためには、フレーム間の抜け漏れを防ぐためにフレームレートの高さを確保し、画質は FullHD とした。
データアップロード速度	36Mbps (FullHD 12Mbps × 3)	上記の「映像品質」項目で記載の FullHD 30FPS のデータ伝送に必要な帯域は約

(カメラクラウド)		<p>36Mbps となった。今後、列車を両側面から監視することや、カメラ設置制限のあるホームの場合にカメラ台数を増やしてカバーして工夫する等、総じてカメラ台数の少なさに起因する異常検出漏れを防ぐためのカメラ設置数の増大及び必要性の見込みは十分に考えられる。その場合、本システムへのインプットデータが増大することから、システム要件であった「システム処理時間 2 分以内」の達成を想定した場合に、アップロード帯域不足によるネットワークのボトルネックが発生する可能性を避けるため L5G に用いた帯域確保は必要となる。</p>
録画ファイル時間	1 回分の録画ファイルの長さは 1 分 50 秒	<p>録画ファイルは列車運行スケジュールから算出した入線時刻、出線時刻を起点として、それぞれの前後 55 秒（計 1 分 50 秒）の長さとした。これは列車運行の入線/出線の時刻を実測した結果、多少の時刻誤差を許容可能な間隔、かつ録画処理の終了から録画ファイルを UI 機能にて確認可能な状態にするまでのリードタイムを考慮した上で「システム処理時間 2 分以内」を満たすことができる設定値である。</p>

(5) 映像を AI 解析する機能

1) 全体概要図

AI 解析機能の全体概要図を以下に記載する。

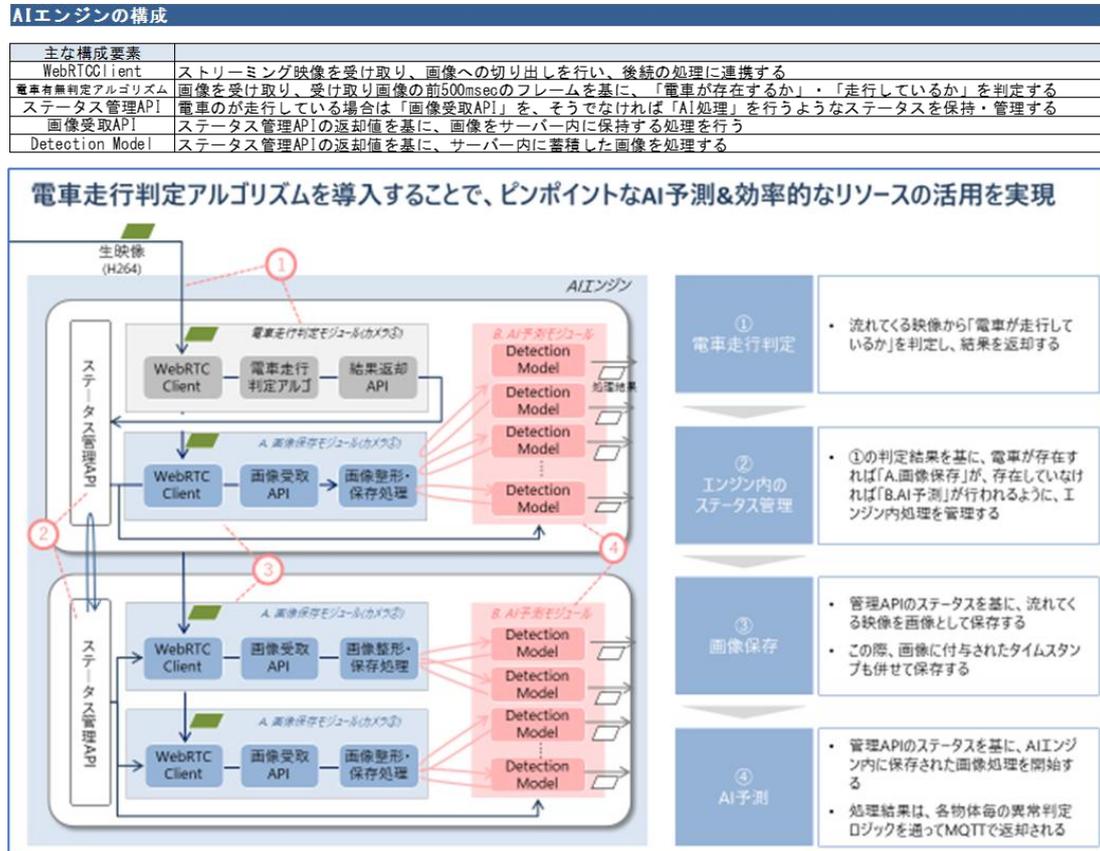


図 2.3.2-8 AI 解析機能 全体概要図

2) 車両有無の判定

流れてくる映像から「列車が走行している状態」を判定し、結果を返却するアルゴリズムを導入した。

当初、列車走行状態を加味せずに、受診映像を全て AI 解析したところ、AI 解析処理は追いつかず、処理遅延が蓄積し、「システム処理時間 2 分以内」という要件を満たすことができなかった。検討を重ね、「入線時”・”出線時”のみを判定・解析を可能にする本判定アルゴリズムを開発・導入することで、限られたリソースを有効に活用し、最終的にはシステムの処理遅延時間の要件を達成した。

本判定アルゴリズムの概要を以下に記載する。

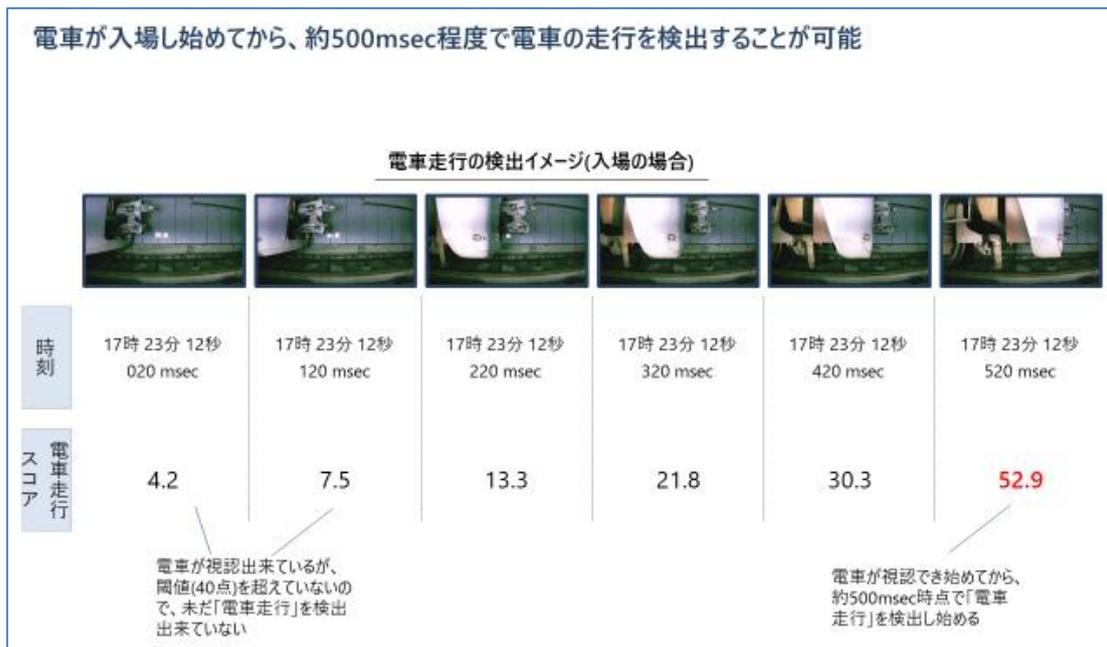


図 2.3.2-9 判定アルゴリズムの概要 (1/2)

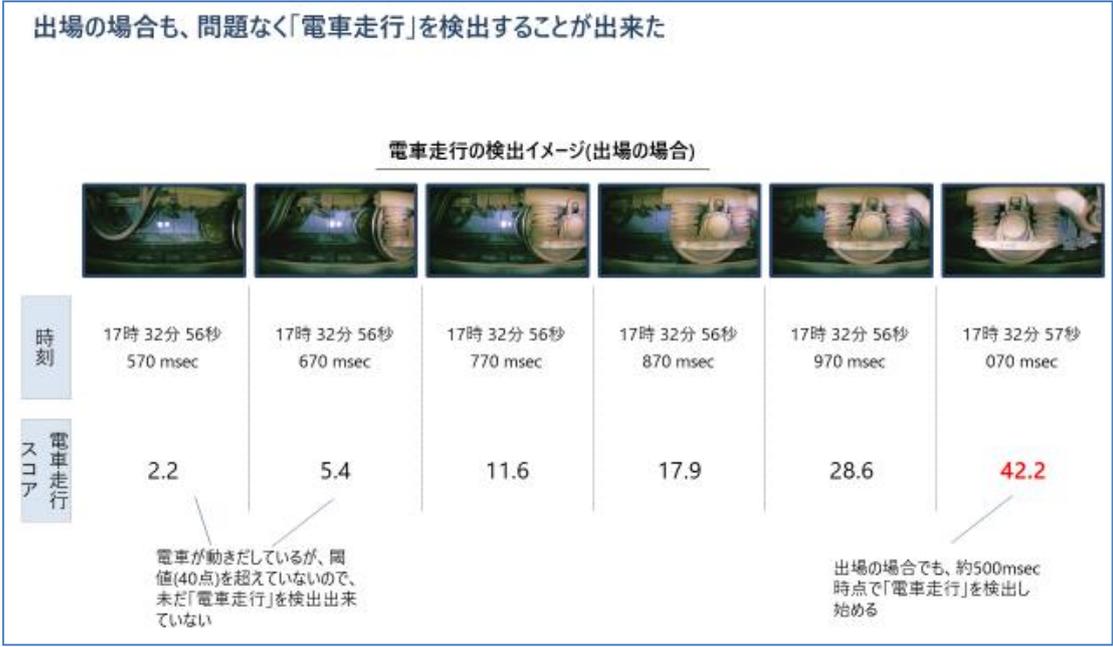


図 2.3.2-10 判定アルゴリズムの概要 (2/2)

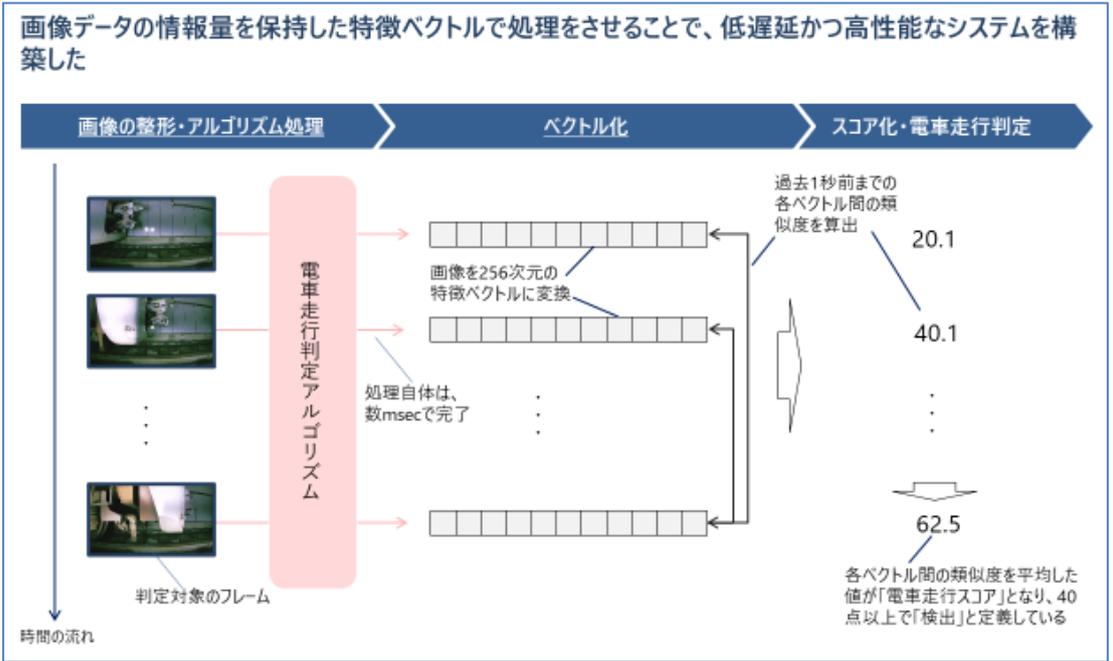


図 2.3.2-11 判定アルゴリズムの処理内容 (参考)

3) 車両異常の検出

列車走行状態の判定結果に基づき後続の処理が「画像保存処理」「AI解析処理」のいずれかに振り分けられる。「画像保存処理」とは、WebRTC インスタンスから受信する映像（画像）・タイムスタンプを画像として保存する処理である。電車が"入線中"もしくは"出線中"の際に、本処理が起動する。「AI解析処理」とは、AIエンジン内に保存された画像を解析・UI側へ結果を返却する処理のことである。車両の入線後・出線後に、本処理へと切り替わり、マシンリソースをAI解析に集中させて解析が行われる。

AIモデルの概要を以下に記載する。

昨年度構築したAIモデル・ロジックを一部チューニングしながら車両点検モデルを構築した

車両点検モデルの全体概要

AIモデル概要	In	活用データ	使用画像	計1,907枚		
		アノテーション対象	ブレーキパッド、車軸	クラック	ハンドル	
	学習概要	アノテーション方法	polygon	polygon	polygon	
		初期learning_rate		2×10^{-2}		
	Process	最適化アルゴリズム		Adam		
		正則化		l2-regularization		
		Input size		(1920, 1080, 3)		
		Back bone		101層のCNN		
		Head		FCM and the Convolution Network (cif, bbox)		
	loss	cif		focal loss		
bbox			Smooth L1 loss			
mask		average binary cross-entropy				
活性化関数			relu			
ロジック/AIモデル概要	Out		ブレーキパッド、車軸のpolygon情報	クラックのpolygon情報	ハンドル部分polygon情報	
	In		ブレーキパッド、車軸のpolygon情報	クラックのpolygon情報	ハンドル部分polygon情報	
	Process		<ul style="list-style-type: none"> 検出した「ブレーキパッド」の「長さ(pixel)」を算出 検出した「車軸」の「直径(pixel)」を算出 車軸直径の相対比から、「ブレーキパッドの長さ(cm)」を算出 XX cm以下であれば、「異常」として判定 	<ul style="list-style-type: none"> クラック部分のポリゴン情報を矩形情報へ変換 	<ul style="list-style-type: none"> 検出した「ハンドル部分」の傾きを算出 傾きが、「XX度以上」であれば、異常アラート 	
	Out		異常 or 正常	クラックの有無	異常 or 正常	

図 2.3.2-12 AIモデルの概要

ブレーキパッド・車軸のpolygon情報を基に、ブレーキパッドの「厚み」を推定するロジックを構築した

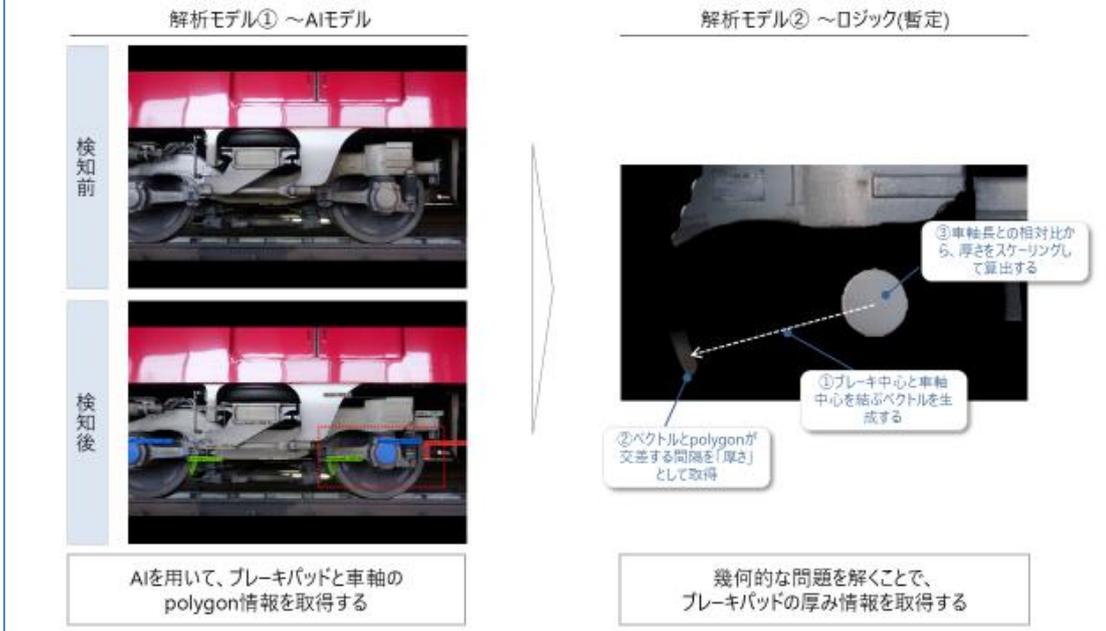


図 2.3.2-13 AI モデル・ロジック概要 (ブレーキパッド摩耗)

ハンドルのpolygon情報を基に、開いている「角度」を推定するロジックを構築した

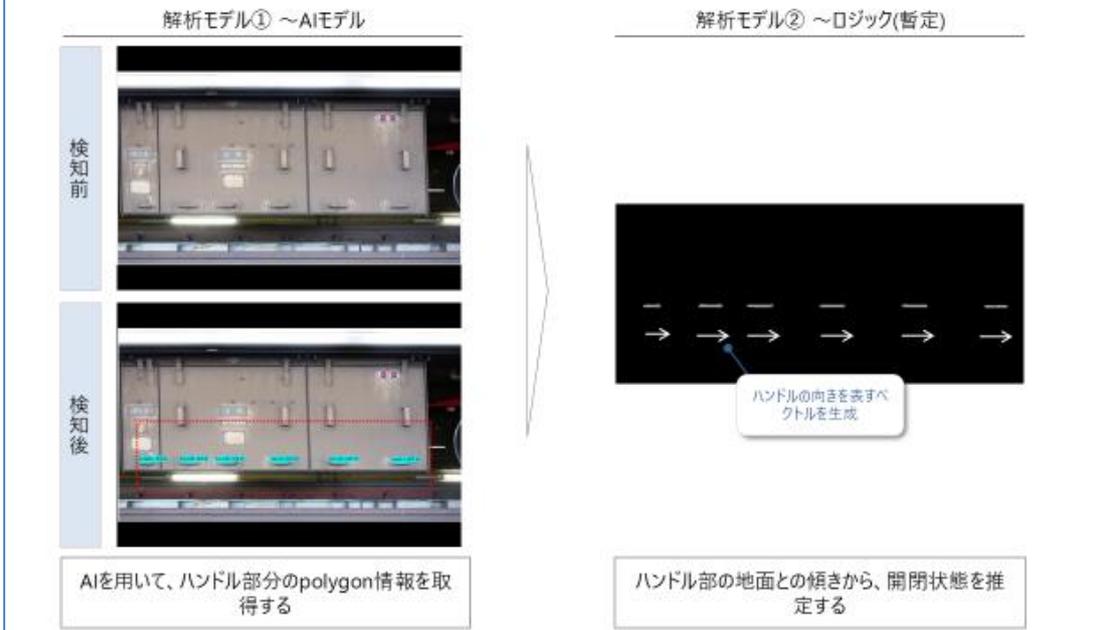


図 2.3.2-14 AI モデル・ロジック概要 (ハンドル開閉)

(6) 車両状況を監視する機能

車両状況や AI 検出結果の監視・確認する機能として UI 画面 (Web ページ) を実装した。UI 機能の活用イメージを以下に記載する。

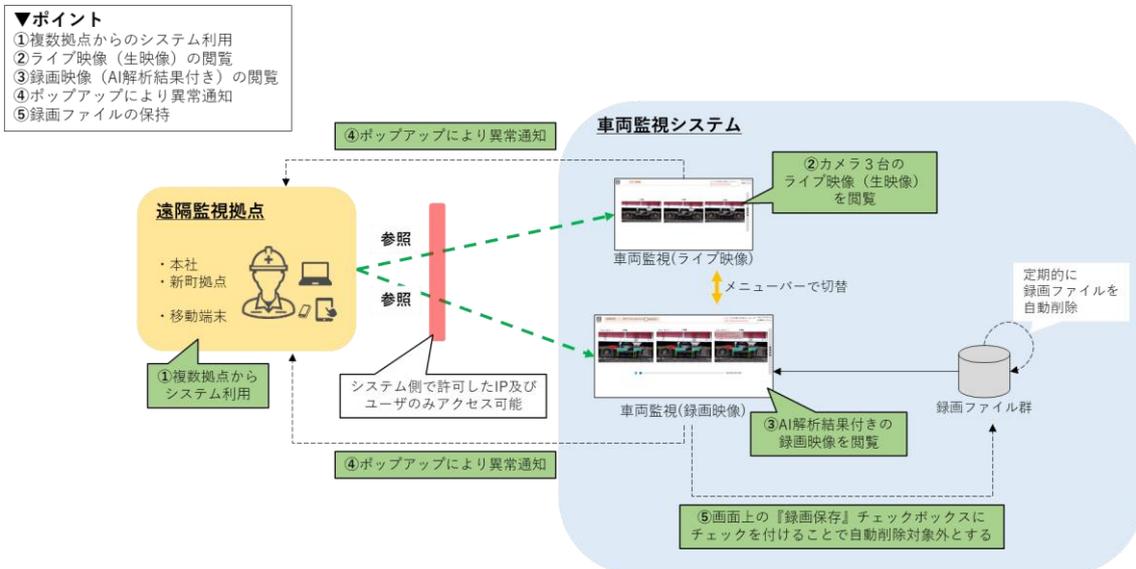


図 2.3.2-15 UI 機能利用イメージ

UI 画面へのアクセス経路として Internet 経由があるため、セキュリティ観点より Basic 認証によりアクセスを制限している。

ログイン

ユーザー名とパスワードを入力してください。

ユーザー名

パスワード

図 2.3.2-16 Basic 認証時のダイアログイメージ

1) 映像の閲覧

UI 画面の機能として 3 種類実装した。

- 車両監視（ライブ映像）画面
- 車両監視（録画映像）画面
- メニューバー

各画面の相関関係を図示した画面遷移図を以下に記載する。

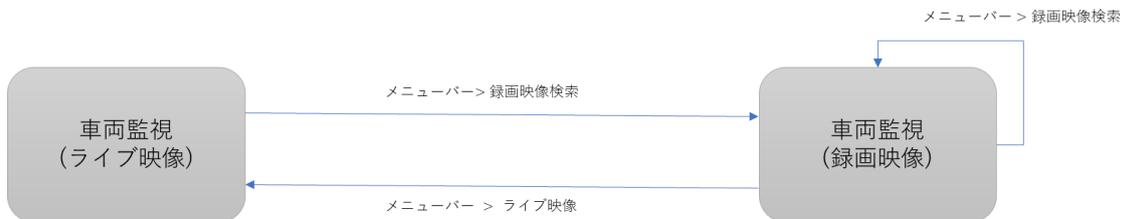


図 2.3.2-17 画面遷移図

a) 車両監視（ライブ映像）画面

駅に設置したカメラからのリアルタイム映像を閲覧する。

画面イメージを以下に記載する。



図 2.3.2-18 車両監視（ライブ映像）画面イメージ

▼異常検出お知らせ機能

AI が異常を検出した際、画面右上に対象のカメラと異常検出した日時情報について音を鳴らしポップアップ表示する。×ボタンでお知らせの表示を消した後は、次に異常検出なしから異常検出ありに変化した際にお知らせ表示する。異常検出情報受信時にすでにお知らせが表示されている場合は、今受信した最新の情報で表示しなおす。

▼全画面表示機能

全画面表示ボタンをクリック or タッチされた場合は、映像の全画面表示を行う。映像の全画面表示後に全画面表示解除ボタンをクリック or タッチすると、元の位置、サイズに戻る。

b) 車両監視（録画映像）画面

AI 解析結果付きの録画映像を閲覧する。

画面イメージを以下に記載する。

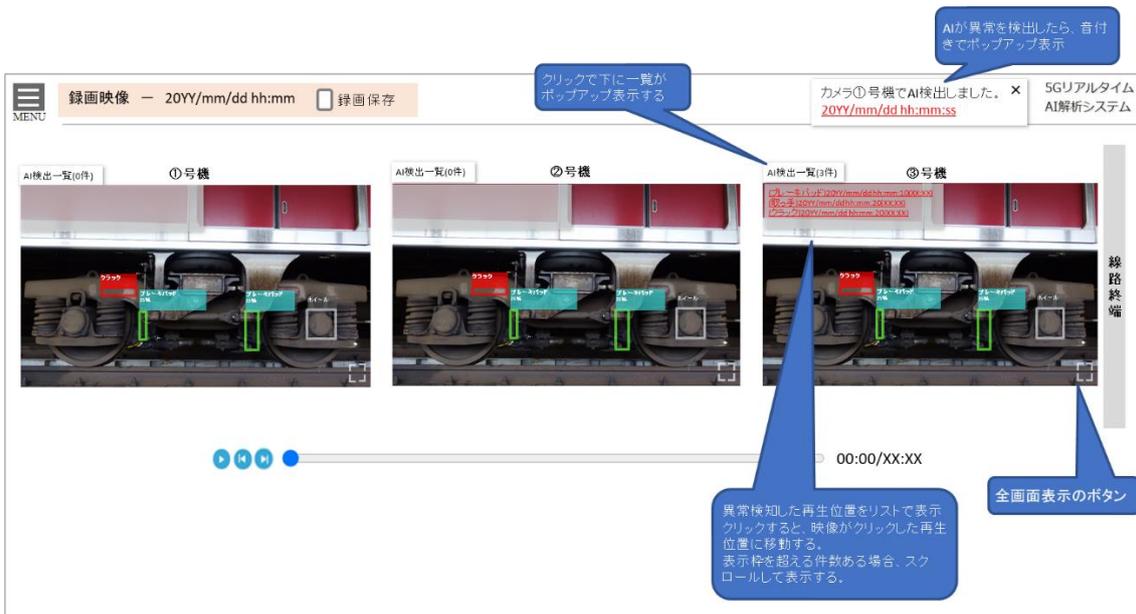


図 2.3.2-19 車両監視（録画映像）画面イメージ

▼異常検出お知らせ機能

AI が異常を検出した際、画面右上に対象のカメラと異常検出した日時情報について音を鳴らしポップアップ表示する。×ボタンでお知らせの表示を消した後は、次に異常検出なしから異常検出ありに変化した際にお知らせ表示する。異常検出情報受信時にすでにお知らせが表示されている場合は、今受信した最新の情報で表示しなおす。

▼全画面表示機能

全画面表示ボタンをクリック or タッチされた場合は、映像の全画面表示を行う。映像の全画面表示後に全画面表示解除ボタンをクリック or タッチすると、元の位置、サイズに戻る。

▼映像再生位置制御

シークバーにてユーザ操作で録画映像の再生位置の制御を行う。シークバーやコマ送りボタンを操作すると画面上に表示している全ての映像の再生位置が移動する。

▼コマ送り再生機能

コマ送り進む or 戻るボタンがクリック or タッチされた時、現在のカメラ 1 号機の再生位置を取得する。映像は 20fps であり、1 フレームの間隔は 50ms である。

▼永久保存機能

車両監視(録画映像)画面から永久に保存したい録画ファイルについて、永久保存設定可能なチェックボックス表示を行う。※サーバ上の録画ファイルは、サーバリソース確保の観点から、一定期間で過去ファイルを自動削除することとした。ただ、後日見返したい、何度もチェックする必要がある等ユーザの判断により永久的に保存したい録画ファイルについて本機能により、自動削除対象から外すことができる。

▼AI 検出一覧機能

各カメラ映像における異常検出情報の件数表示を行う。ユーザはAI 検出一覧タブをクリック or タッチすることで異常検出した再生位置のリストを表示させることができる。

c) メニューバー

車両監視(ライブ映像)画面と車両監視(録画映像)画面の切り替えを行うメニューバー。

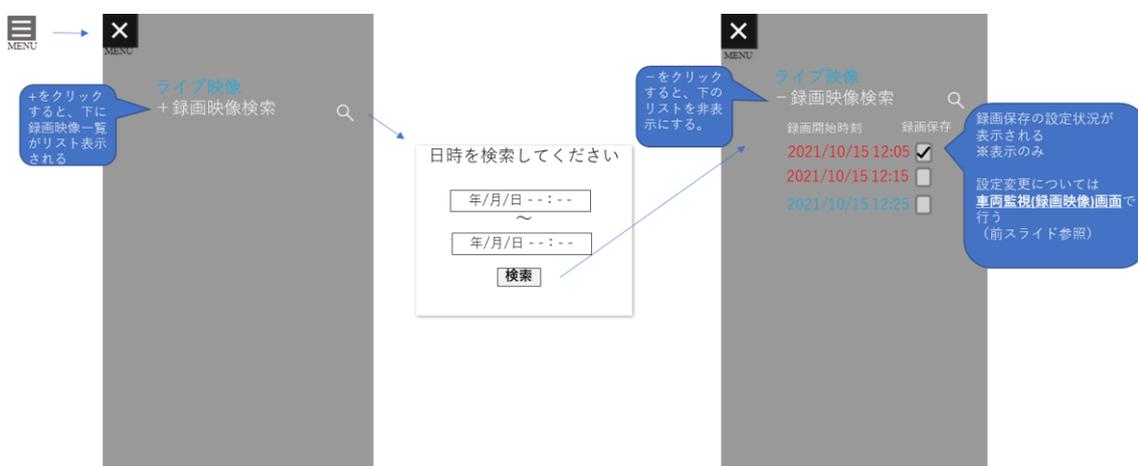


図 2.3.2-20 メニューバー イメージ

▼録画映像検索機能

メニューにて、録画映像を検索するフォームを表示する。

録画映像の日時を検索する検索フォームについて、日時の範囲(下限～上限の入力)を指定できる表示をする。

初期表示については、下限：当日の 00:00、上限：当日の現在時刻

検索ボタンを押下された際、下限、上限のうち1つでも入力されていれば、検索する。また、下限、上限ともに入力されていなければ、全件検索する。

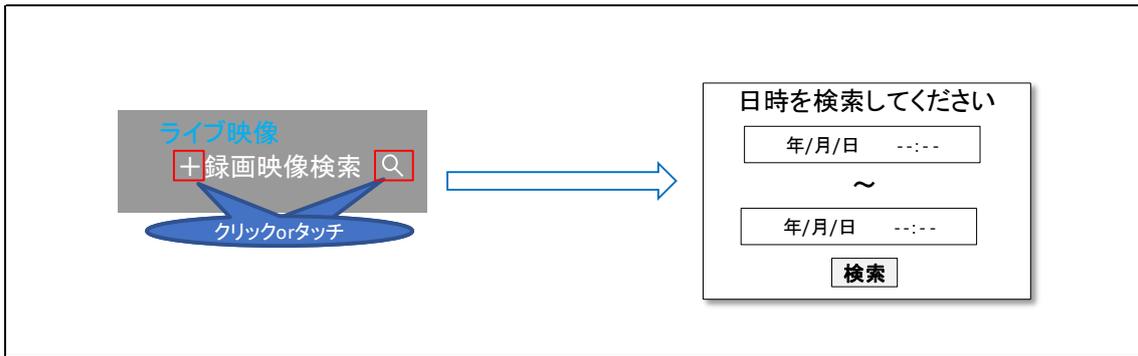


図 2.3.2-21 録画映像検索フォームイメージ

検索結果のリンクテキストの表示色によって、動画を以下の通りカテゴリ化する。

- 赤色：AI 検出し、異常ありの録画映像
- 緑色：AI 検出し、異常なしの録画映像
- 青色：AI 検出していない録画映像

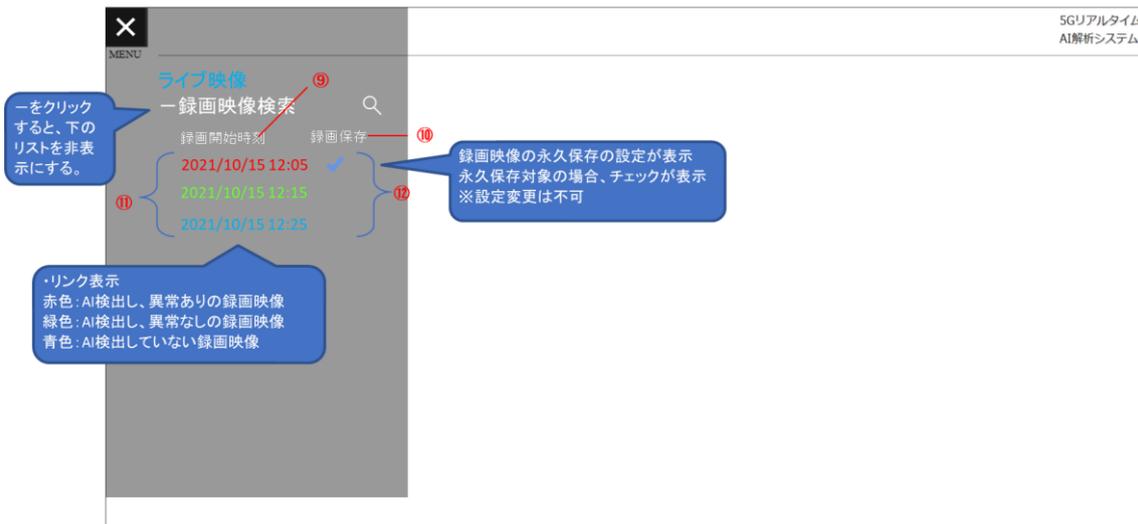


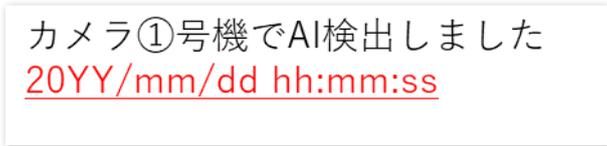
図 2.3.2-22 検索結果のリンクテキストの表示色イメージ

▼録画映像検索結果保持機能

メニューにて、録画映像検索結果表示をページ遷移しても遷移前の検索結果の表示を保持する。

2) 車両異常情報の通知

前述 2.3.2.3.(6).1)にて、車両監視（ライブ映像）画面及び車両監視（録画映像）画面の記載にもあった通り、AI 解析の結果、異常検出した場合、異常情報を画面上にポップアップ表示で通知する。どのカメラ映像で異常検出したかをユーザに通知する。



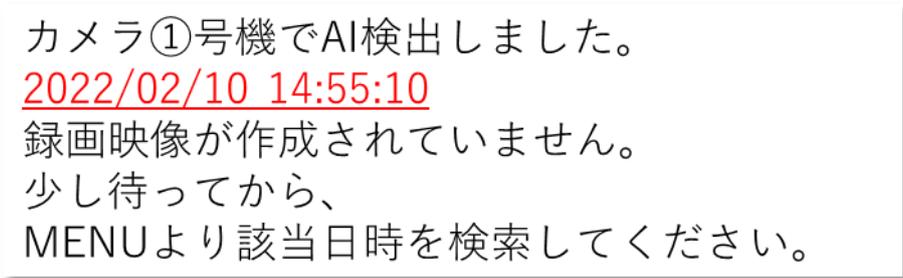
カメラ①号機でAI検出しました
[20YY/mm/dd hh:mm:ss](#)

図 2.3.2-23 異常通知ポップアップの表示イメージ

異常検出時刻も表示され、リンクを押下すると該当時点の録画映像へジャンプする

但し、異常通知のタイミングはリアルタイム AI 解析が異常検出したタイミングのため、録画映像の作成→完了より先行して通知されるケースが多く

通知後すぐに時刻リンクを押下した場合、ジャンプ先の録画映像が未だ作成されていないことが想定される。その際は以下のようなポップアップが表示される。



カメラ①号機でAI検出しました。
[2022/02/10 14:55:10](#)
録画映像が作成されていません。
少し待ってから、
MENUより該当日時を検索してください。

図 2.3.2-24 異常通知ポップアップの表示イメージ 2

(7) AI モデル構築における教師データの取得について

車両運行中である実環境（商用駅）での教師データ取得は困難であったことから、可能な限り実環境を模した状況下で車両工場にてデータ取得を行った。実施内容について以下に示す。

1) 久里浜工場での教師データ撮影

4両編成の列車の台車にシールに印刷した疑似き裂を張り付けて、久里浜工場内の屋外の線路を往復させて撮影した。この時取得した教師データの種類は、疑似き裂については幅 4 種類（0.1mm, 0.2mm, 1.0mm, 2.0mm）、長さ 3 種類（20mm, 60mm, 80mm）、向き 2 種類（水平方向、垂直方向）の合計 24 種類、ハンドルについては向き 3 種類（0 度、45 度、90 度）を取得した。ブレーキパッドについては、撮影用に走行可能な営業車両を使用したため、意図的に厚みのあるものやすり減っているものを指定するという事は行っていない。速度については時速 5km、10km でそれぞれ往復走行させて撮影した。なお、4両編成の列車にき裂を取り付け可能な位置は限られているため、疑似き裂のシールを貼り替えて走行させることで全パターンの疑似き裂の取得を実施した。

カメラ、およびライトの設置については、車両を走行させる線路の横 1 か所に図 2.3.2-5 のように設置した。カメラの設置位置については、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅のホーム下に実際に設置するときと同様の高さ・対象物との距離となるように設置した。



図 2.3.2-25 カメラ設置の様子

このとき、シールに疑似き裂を印刷し切り取ったものを列車の台車に張り付けて疑似き裂としたが、昨年度の実証に比べて照度補完のために光量の強いライトを使用したため、シール部分が反射して光ってしまう現象が確認された。実際にき裂が発生した場合にカメラに写るき裂の見え方と異なり、シールに印刷した疑似き裂で AI 学習すると、実際のき裂を検出できない AI になってしまう恐れがあった。

このため、疑似き裂の取り付け方法を変更し、油性黒ペンで疑似き裂を台車に書き込むことにし、より実際のき裂に近い形で AI 学習ができるように対策した。これにより、油性黒ペンで疑似き裂を書きこんだ状態での教師データの撮影が追加で必要となり、新町検車区での教師データ撮影を改めて実施した。

2) 新町検車区での教師データ撮影

新町検車区の屋内で点検中の 4 両編成の列車の台車に油性黒ペンで疑似き裂を書き込み、列車の横を荷物運搬用の台車に乗せたカメラを移動させ、疑似的に列車が走行していると模した映像を撮影した。新町検車区での撮影時には点検スケジュールの関係で列車の走行が困難であったため、このように列車が停止した状態でカメラを動かすことで撮影を行った。

この時取得した教師データの種類は、疑似き裂については久里浜工場と同様に幅 4 種類 (0.1mm, 0.2mm, 1.0mm, 2.0mm)、長さ 3 種類 (20mm, 60mm, 80mm)、向き 2 種類 (水平方向、垂直方向) の合計 24 種類、ハンドルについては点検中により安全のために操作せず、すべて正常な水平方向で撮影した。ブレーキパッドについては、点検スケジュール上撮影に使用可能な営業車両を使用したため、意図的に厚みのあるものやすり減っているものを指定するという事は行っていない。速度については検車区内を安全に移動できる可能な範囲での速度で、荷物運搬用の台車に乗せたカメラを移動させた。なお、4 両編成の列車に疑似き裂を取り付け可能な位置は限られているため、一度書き込んだ油性黒ペンの線をアルコールで除去し、再度書き込むことで全パターンの疑似き裂の取得を実施した。

カメラ、およびライトの設置については、点検中の列車の横に図 2.3.2-6 のように設置した。カメラの設置位置については、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅のホーム下に実際に設置するときと同様の高さ・対象物との距離となるように設置した。

油性黒ペンは太さごとに種類を分け、図に示す 4 種類の油性黒ペンを使用した。書き込む際には 20mm, 60mm, 80mm の長さに切り取った台紙に沿って、図のように書き込んだ。

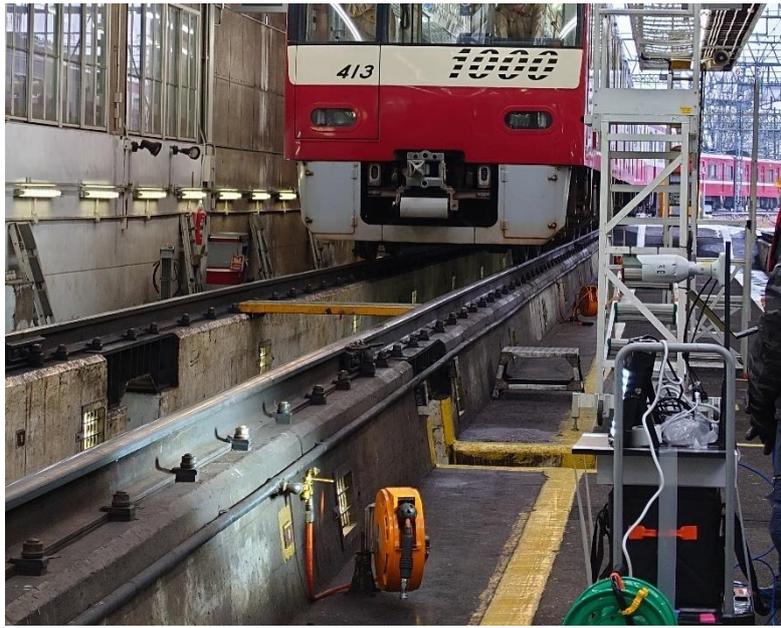


図 2.3.2-26 カメラ設置の様子

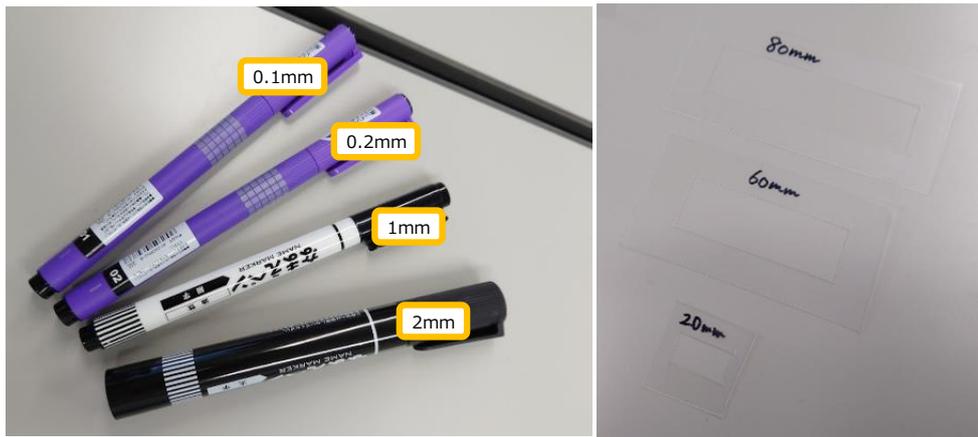


図 2.3.2-27 使用した油性黒ペンと台紙

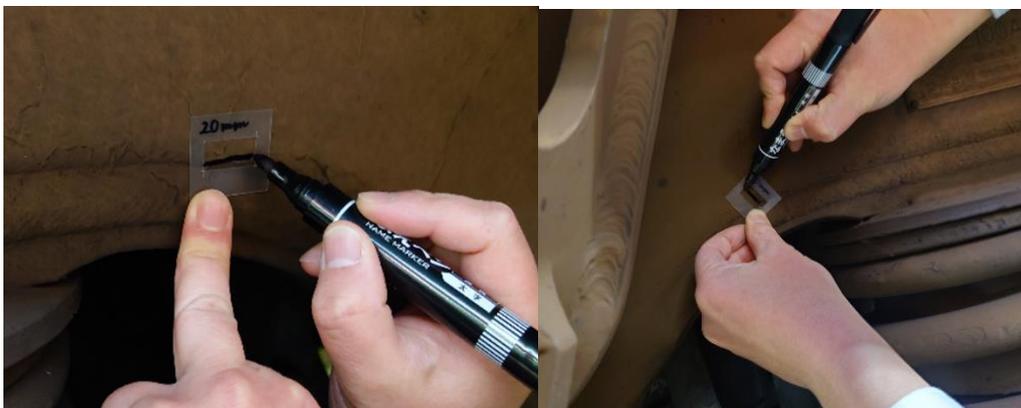


図 2.3.2-28 油性黒ペンで台車に書き込む様子（水平方向、垂直方向）



図 2.3.2-29 油性黒ペンで書き込んだ疑似き裂（水平方向、垂直方向）

2.3.2.4 クラウド（dOIC）に関する機能・性能・要件

ドコモオープンイノベーションクラウド（dOIC）は、株式会社 NTT ドコモが運用する IaaS 基盤で、仮想マシン、仮想ネットワークなどを提供する。NTT ドコモ網との直結および東西 4 拠点配置により MEC（Multi-access Edge Computing）の特徴を持つクラウドである。NTT ドコモの技術アセットを活用し、ソリューション構築が可能である。

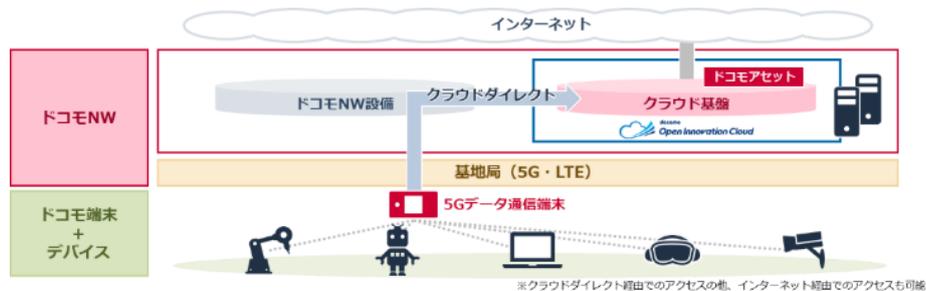


図 2.3.2-30 ドコモオープンイノベーションクラウド（dOIC）概要

ドコモオープンイノベーションクラウドのクラウド基盤は「OpenStack」と「VMware」から構成され、下記 6 拠点から利用する基盤を選択可能である。

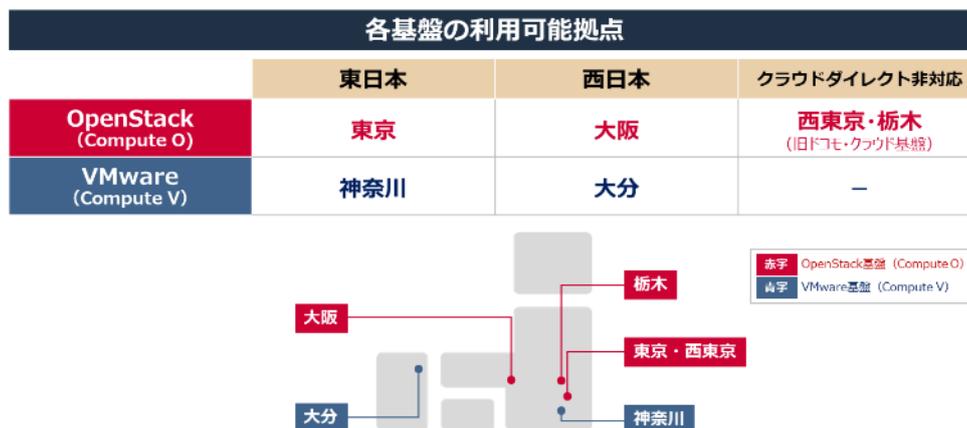


図 2.3.2-31 dOIC 提供の各基盤の利用可能拠点

「Compute O」と「Compute V」で提供する GPU 仕様が以下のように異なる。

Compute O

物理GPUサーバにて提供

※ GPUサーバは仮想化してありません。遠隔から操作不能になった場合電源OFF/ONに2営業日いただきます
 ※ また、故障修理が必要になった場合、代替機の使用に6営業日いただきます。
 アプリケーション再構築手帳の確立と、複数サーバによる冗長化をご検討ください

GPUサーバスペック表		
	T1 (Tesla V100サーバ)	Q1 (Quadro P5000サーバ)
CPU	Xeon Silver 4114 × 2	
メモリ	512GB	
ディスク	960GB × 2 (RAID1)	
GPU	Tesla V100	Quadro P5000
GPU数	4枚	8枚
コア数	20,480 (5,120 × 4)	20,480 (2,560 × 8)
最大クロック数 (MHz)	1,380	1,733
メモリ容量	16GB × 4	16GB × 8
単精度性能 (TFLOPS)	62.8 (15.7 × 4)	71.2 (8.9 × 8)

■ 弊社提供OS：Ubuntu
 ■ 提供拠点：東京・西東京・大阪

Compute V

仮想GPUサーバにて提供

※ 1枚の物理GPUを、仮想的に分割してご利用いただくことも可能です。

GPUサーバスペック表		
	T1V (Tesla V100サーバ)	Q1V (Quadro RTX8000サーバ)
vCPUコア数	10	10
メモリ	80GB	80GB
ディスク	500GB	500GB
vGPU	Tesla V100	Quadro RTX8000
GPU数	1枚	1枚
単精度性能 (TFLOPS)	15.7	16.3

■ 弊社提供OS：Windows,Ubuntu,CentOS
 ■ 提供拠点：神奈川・大分

Compute O 仮想インスタンス

仮想サーバの種類		仮想CPU	仮想メモリ	ルートディスク	一時ディスク	OS	
タイプ	サイズ		(MB)	(GB)	(GB)	Linux	Windows Server
標準 インスタンス (Standard)	tiny	1	3968	10	0	CentOS7 CentOS6 Ubuntu Server 18.04 Ubuntu Server 16.04	Windows Server 2016 Windows Server 2012 R2
	small	2	7936	10	20		
	medium	4	15872	30	0		
	large	8	31744	30	50		
	xlarge	16	63488	30	170		
	2xlarge	31	126976	30	400		
大容量 ストレージ インスタンス (LSVM)	tiny	1	3968	50	300		
	small	2	7936	50	600		
	medium	4	15872	50	1200		
	large	8	31744	50	2400		
	xlarge	16	63488	50	4800		
	2xlarge	31	126976	50	9300		

Compute O GPUインスタンス

項目名	型番	OS
GPU	T1 (Tesla V100)	Ubuntu Server 18.04
	Q1 (Quadro P5000)	Ubuntu Server 16.04

図 2.3.2-32 dOIC で提供される「Compute O」「Compute V」の仕様

本実証で導入した各インスタンスの機能性能を表 2.3.2-12 に示す。

表 2.3.2-5 インスタンス機能性能

インスタンス名	用途	CPU	GPU	メモリ [GB]	Disk [GB]	OS
WebRTC	映像の受信サーバ	8vCPU	-	32	50	Ubuntu18.04
録画共有	録画映像の保存サーバ	16vCPU	-	64	4,800	Ubuntu18.04
Webサーバ	UI提供サーバ	8vCPU	-	32	2,400	Ubuntu18.04
VPN	メンテナンス時のVPN接続サーバ	1vCPU	-	4	10	Ubuntu18.04
Proxy/NTP	インターネット接続時のproxy、及びNTPサーバ	1vCPU	-	4	10	Ubuntu18.04
AI(車両1)	AI解析サーバ	Xeon Silver 4114 × 2	Quadro P5000 × 8	512	960	Ubuntu18.04
AI(車両2)	AI解析サーバ	Xeon Silver 4114 × 2	Quadro P5000 × 8	512	960	Ubuntu18.04

各インスタンスの要件を表 2.3.2-13 に示す。

表 2.3.2-6 インスタンス要件

インスタンス名	用途
WebRTC	FHD20fpsの映像を、3セッション同時に受信可能なスペックを有すること
録画共有	始発から終電までのサイクルの中で、計算上で1週間以上の録画データを保存可能な容量を有すること
Webサーバ	WebUIを構築可能なスペックを有すること
VPN	VPNサーバを構築可能なスペックを有すること
Proxy/NTP	Proxy、及びNTPサーバを構築可能なスペックを有すること
AI(車両1)	計算上、3セッションのFHD20fpsストリーミング映像を受信可能なスペックを有し、AI解析の処理時間のKPI達成が可能なスペックを有すること
AI(車両2)	

2.4 免許及び各種許認可

実証においては、本実証実験の運用者であり実証コンソーシアムメンバーである京浜急行電鉄株式会社が免許人となった。その免許人から委託を受けたエクシオグループ株式会社が、コンソーシアムメンバーである株式会社 NTT ドコモの支援を受けて、ローカル 5G（商用局）免許の申請を行った。各関係者の主な役割を表 2.4-1 に示す。

表 2.4-1 各関係者の主な役割

関係者	社名	備考
土地又は建物の運用者	京浜急行電鉄株式会社	コンソーシアムメンバー
免許人	京浜急行電鉄株式会社	コンソーシアムメンバー
免許申請及び干渉調整	エクシオグループ株式会社	免許人より委任
免許申請支援	株式会社NTTドコモ	コンソーシアムメンバー
無線従事者	エクシオグループ株式会社	免許人より専任

2021年11月16日、総務省関東総合通信局から免許を受けた。

2.5 その他要件

2.5.1 サイバーセキュリティ対策

本実証で利用する装置はエリクソン・ジャパンが開発供給しているものであり、特定高度情報通信技術活用システムの開発供給及び導入の促進に関する法律(令和2年法律第37号)に基づく開発供給計画認定を受けた実績を有する事業者が開発供給した機器でないため、装置構成および各装置の製造ベンダを図 2.5.1-1 に示す。また、サプライチェーンリスク対応を含むサイバーセキュリティ対策については、機器提供元ベンダのエリクソン・ジャパンによる対策状況を表 2.5.1-1 に示す。

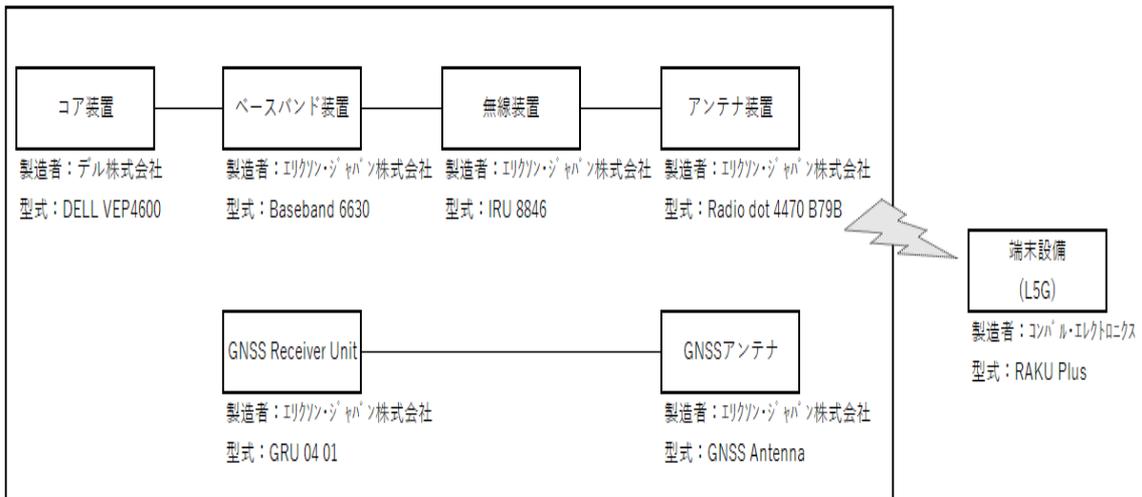


図 2.5.1-1 装置構成及び各装置の製造ベンダ

表 2.5.1-1 エリクソン・ジャパンのサイバーセキュリティ対策

Local5G 装置 サイバーセキュリティ対策について	
システム観点での施策	
OS カーネルとユーザスペースの堅牢化	メモリ管理を行い、ランダム化、スタックマッシング保護、実行不可能なヒープとスタックを対処
	OS を最小限に抑え、不要なサービスとコンポーネントを削除
プロセスの分離	システム設計において、なるべくプロセス間の関連性をなくしており、分離して動作
暗号化と鍵管理	すべての通信は暗号化されています。データの機密性、整合性、信頼性を確保し、キーを安全に管理するためのセキュリティプラクティスを適用
認証によるアクセス管理	ノードへのアクセスにおけるユーザ認証が可能であり、RBAC(ロールベースのアドミッションコントロール)が実装され、潜在的な攻撃のリスクを軽減し、セキュリティを強化します。ユーザは、権限に準拠したアクティビティのみを実行できます。
ログの記録	操作ログ、セキュリティログや監査証跡ログを記録しており、全ての操作履歴及びセキュリティイベントをログファイルとして記録しております。ログファイルがサイズ制限を超えた場合、ログは FTPES サーバの SFTP に手動または自動で転送され、バルクデータとして送信するよう設定可能
脆弱性試験	製品のリリースに際し、システムの堅牢性が適切に強化されているかどうかを評価するために、サードパーティの商用ツールを使用して脆弱性と侵入試験を実施し、システムの脆弱性を検出、対策
セキュリティのライフサイクルスキーム実装	エリクソンでは PSIRT (Product Security Incident Response Team) という組織を立ち上げており、2006 年より FIRST (Forum of Incident Response and Security Team) の一員として活動しております。PSIRT にて収集したグローバルでのセキュリティ情報に基づき、弊社 local5G 製品の定期リリースにおいて脆弱性の対処及びセキュリティ対策の改善及び強化を行っております。

データ、及びトラフィック観点での施策
3GPP で定義されたセキュリティ施策に準拠
すべての無線リソース制御シグナリングは、UE とコア装置の間で 128 ビットの AES および EEA2 128 暗号を使用し、エンドツーエンドの通信ルートにおいて保護されます。ユーザ/データプレーンは、128 ビット AES を使用して UE と eNodeB の間で暗号化されます。
UE と無線ベースバンド間のユーザプレーンとデータプレーンは、128 ビット AES を使用して暗号化されます。
登録された UE はそれぞれ独自の暗号鍵により NW 接続において認証されます。
システム間の通信には、SSH、SSL/TLS、SFTP、SNMPv3 などの安全なプロトコルが使用されます。
ユーザ証明書やクレデンシャル（パスワードなど）などのユーザ関連データは、ストレージ内とシステムコンポーネント間の転送中の両方で暗号的に保護されます。パスワードは、端末画面への表示、印刷物、ログレコードなど、どのメディアにもプレーンテキストとして表示されることはありません。

ローカル 5G コア装置と dOIC（クラウド）間には VPN 接続する回線を使用し、閉域網でクラウドまで接続することにより、セキュリティを担保する。また、なお、京浜急行電鉄の監視拠点からはインターネット接続でクラウドに接続するが、VPN 接続により、クラウド接続のセキュアな接続を担保している。

2.6 実証環境の運用

本実証においてはローカル 5G 主装置を含めネットワーク機器や IoT デバイス等の分析用機器を多く導入する必要があることから、機器の操作性や保守面での事前の検討が必要となる。対応策としては、導入時にエリクソン・ジャパンのエンジニアによる現地 OJT にて操作方法のレクチャーを受けるとともに、マニュアルを整備して運用に支障のないように配慮した。

機器の保守面に関しては、不具合発生時は NTT ドコモが故障の対応を実施した。またローカル 5G 機器ベンダであるエリクソン・ジャパンとは平日 9-18 時での保守契約を締結することで保守体制を強化した。

3. ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討（技術実証）

3.1 実証概要

鉄道インフラ分野における課題実証では、“令和 2 年度「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証に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の請負」における「遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現」において構築した車両検査の遠隔・自動監視システムに関する実用性（技術面・運用面）の向上・評価” を目的としており、実証環境としては、実際に運用されている鉄道駅（羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅 1 番線）の屋内ホーム・線路を活用する。技術実証としても、課題実証で実施するユースケースを前提とし、仕様書で規定されている“a.ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定”“b. I.電波伝搬モデルの精緻化”について検討を行う。その際、今回得られた知見が、他の似たような環境（鉄道駅の屋内ホーム・線路）においても適用できるよう、“遮へい、反射環境における電波伝搬特性”及び“屋内環境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においては、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う。

表 3-1 技術実証の概要

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

3.2 実証環境

東京都大田区羽田空港の京浜急行電鉄、羽田空港第1・第2ターミナル駅のホーム下に置局される4.7GHz帯(4.8-4.9GHz)のローカル5G基地局1局を用いて実証試験を行う。なお、ホーム下から広範囲のエリアをカバーするため、1つの基地局を分岐させ、3つのアンテナを張り出してエリア形成を行う。

図3.2-1に羽田空港第1・第2ターミナル駅における技術実証試験フィールド(図中、赤枠内)および基地局のアンテナ設置状況を示す。

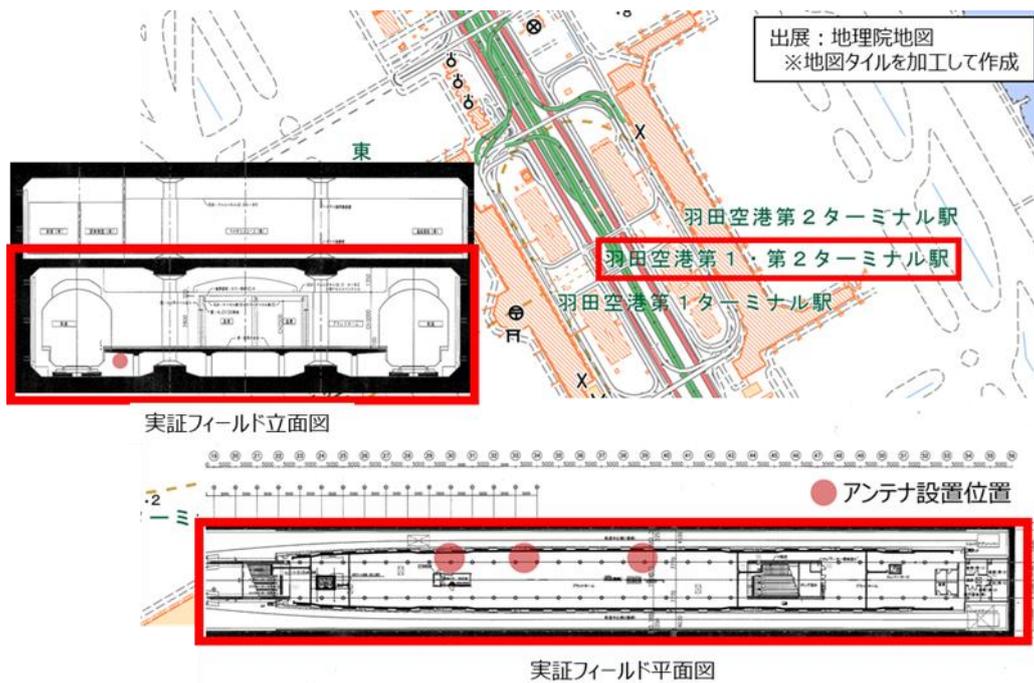


図 3.2-1 技術実証フィールド

課題実証では、鉄道車体の駆動部をカメラ、センサ等を用いて遠隔監視を行う事から基地局が設置される場所が、ホームより低い場所に置局される。図3.2-2の様に、技術実証を行う駅屋内エリアでは、鉄道車両及び、ホームの床面など、遮へいまたは反射による電波伝搬特性への影響が考えられるため、留意が必要である。



図 3.2-2 遮へい物・反射物の状況 (羽田空港第1・第2ターミナル駅)

実証時は、駅利用者への影響を除外する事と、線路上の測定等を実施する為、営業時間外での測定を実施しており、実証時の環境を図 3.2-3(a)～(c)で示す。



図 3.2-3(a) 実証時における羽田空港第1・第2ターミナル駅 基地局アンテナ設置状況



図 3.2-3(b) 実証時における羽田空港第1・第2ターミナル駅 線路上測定状況

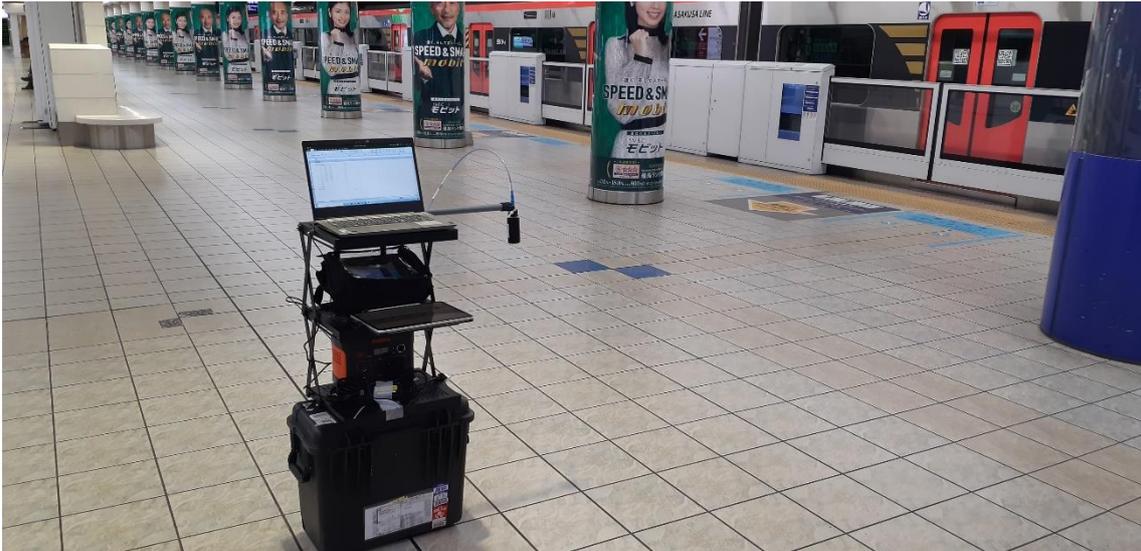


図 3.2-3(c) 実証時における羽田空港第1・第2ターミナル駅 ホーム上測定状況

各種データの実測に使用する測定機器を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 実測に使用する測定機器

測定機器名	測定項目	備考
Anritsu エリアテスタ ML8780A ¹	SS-RSRP SS-RSRQ	図 3.2-3 設定値：表 3.2-2
測定用 PC iPerf ² Packet Capture (Wireshark ³)	伝送スループット 遅延時間	図 3.2-4
Garmin eTrex30xJ ⁴	GPS 座標（屋外測定用）	図 3.2-5

¹ <https://dl.cdn-anritsu.com/ja-jp/test-measurement/files/Product-Introductions/Product-Introduction/ml8780a-81a-jl11400.pdf>

² <https://iperf.fr/>

³ <https://www.wireshark.org/>

⁴ <https://buy.garmin.com/en-US/US/p/518048/pn/010-01508-10#specs>



図 3.2-3 Anritsu エリアテストの外観



図 3.2-4 測定用 PC(iPerf,Wireshark)



図 3.2-5 Garmin eTrex30xJ の外観

本実証を通して、エリアテストの主な設定値は表 3.2-2 を用いることとする。

表 3.2-2 エリアテスト設定値

項目	設定値
測定周波数	4827.36MHz
帯域幅	100MHz
測定項目	SS-RSRP SS-RSRQ SS-SINR
測定周期	0.3[s]
アンテナパターン	オムニ

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 3.2-6 に示すような測定補助用の治具を作成して測定を実施する。



図 3.2-6 実測に用いる測定補助用治具

3.3 実証内容

3.3.1 ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定

鉄道インフラ分野における課題実証では、“令和2年度「地域課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証に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の請負」における「遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現」において構築した車両検査の遠隔・自動監視システムに関する実用性（技術面・運用面）の向上・評価”を目的としており、実証環境としては、実際に運用されている鉄道駅（羽田空港第1・第2ターミナル駅2番線）の屋内ホーム・線路を活用する。

課題実証において提案するローカル 5G を用いたユースケースで要求される性能を表 3.3.1.1-1 に示す。

課題実証では、上り回線において、映像、センサデータを送信する為、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。従って、技術実証においても、上り回線のスループットが表 3.3.1.1-1 に示す 60Mbps を満たすことを実証目標とする。その際、エリア形成の観点とユーザへのサービス提供の観点から評価を行う。

それらの評価結果から、類似の環境（鉄道駅の屋内ホーム・線路）においてローカル 5G サービスを提供する場合に適用可能なエリア形成やサービス提供品質の知見を取り纏めることも実証目標とする。また、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 の利活用に生かされることを想定している。

本項で取得する測定データについては、後述する技術実証項目において評価を行う際に活用する。

表 3.3.1.1-1 課題実証で要求される所要性能

項目	下り(DL)	上り(UL)
通信速度	60Mbps	60Mbps
遅延時間	400ms 以下	400msec 以下
利用条件	サイネージ表示 4 台、常時接続 (将来的なユースケースを想定)	同時通信カメラ 4 台、常時接続

3.3.1.1 実証目標

実証環境におけるローカル 5G の性能評価として、エリア形成の検証と、ユーザへのサービス提供品質の評価を行う。

まず、エリア形成の検証は、「電波法関係審査基準（平成 13 年総務省訓令第 67 号）が規定するエリア算出法」（以下、「エリア算出法」という。）に基づく、カバーエリア及び調整対象区域のエリア端閾値を基準に、実証環境において実測した下り受信電力値及びそこから導く伝搬ロス特性により行う。

次に、ユーザへのサービス提供品質は、カバーエリア端における伝送スループット、遅延時間が、表 3.3.1-1 にて示している課題実証側での所要性能を達成できているか評価する。

これらの評価・検証を通じて、ローカル 5G 性能向上のための課題抽出と解決策等についても考察を行う。

表 3.3.1.1-1 に、評価項目と測定項目との関係を示す。

表 3.3.1.1-1 技術実証試験における評価項目と測定項目との関係

評価・検証項目	評価項目の概要	主な測定項目
エリア形成の検証	エリア算出法に基づく、カバーエリア及び調整対象区域のエリア端において実測する下り受信電力値とエリア端閾値の比較。 測定地点における伝搬ロスと、いくつかの電波伝搬モデルとの比較。	下り受信電力 (SS-RSRP)
サービス提供品質 の評価	カバーエリア端における、伝送スループットと遅延時間が、課題実証で要求される基準を満たしているか評価。	伝送スループット 遅延時間

3.3.1.2 評価・検証項目

(1) 測定方法

測定については、仕様書の規定に従い、エリア算出法に基づく基地局ごとのカバーエリア及び調整対象区域（図 3.3.1.2-1）において行うこととし、以下の考え方で実施する。



図 3.3.1.2-1 エリア算出法に基づくカバーエリア及び調整対象区域図

1) 測定地点の考え方

屋内、屋外の測定地点に置いて下記考え方にに基づき測定地点を選定する。

測定地点番号は技術実証を通して同じであり連番となっていないことに注意されたい。

※なお、各測定地点において障害物等により測定困難な地点については、測定地点をずらす等の調整を行う。

- ホーム及び、線路上の測定地点

図面内において、仕様書上の20点以上の測定地点及び、分岐されたアンテナを考慮して、ホーム及び、線路上の測定地点を選定する。

なお、この時、ホーム天井面についても遮へい対象として留意を行う事から、階上の施設エリアにおいても、測定可能となるエリアを考慮して選定を実施する。

階上の施設エリアは、立ち入り可能となるエリアが限られており、測定員の安全性確保の観点も含め、該当エリアの測定点の粒度は、粗くなる。

測定地点の状況を、図 3.3.1.2-2 に示す。

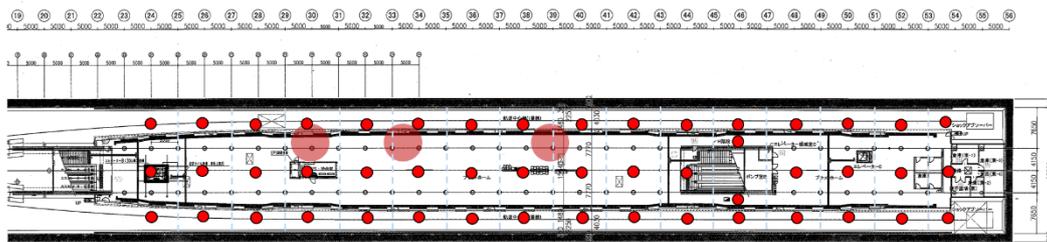


図 3.3.1.2-2 駅ホーム及び、線路上の測定地点 (B3F)

- 階上の施設エリアの測定地点

地下駅である事からホーム下に設置した基地局装置からの電界が、地上方向への漏れ出しを考慮して、階上の施設エリアにおいても測定を実施する。

なお、駅ホーム及び、線路上の測定地点でも記載した階上の施設エリアは、立ち入り可能となるエリアが限られている事から、立ち入りが可能となるエリアにおいて、網羅的に測定地点の選定を行った。

測定地点の状況を、図 3.3.1.2-3 に示す。

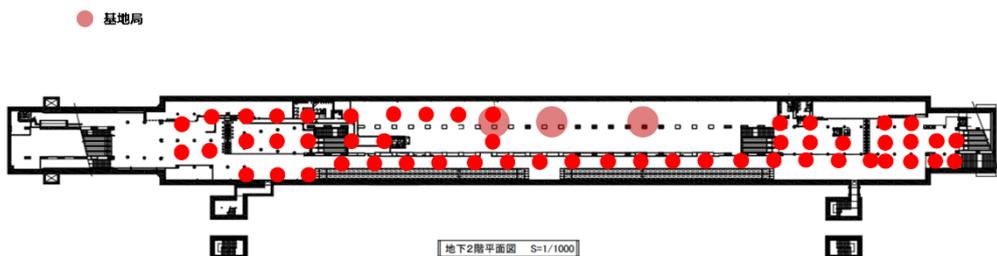


図 3.3.1.2-3 駅ホーム及び、線路上の測定地点 (B2F)

2) 測定項目

- 下り受信電力

一般的に 5 GNR のエリア指標として用いられている SS-RSRP (Synchronization Signal-Reference Signal Received Power)及び SS-RSRQ (Synchronization Signal-Reference Signal Received Quality)、SS-SINR (Synchronization Signal-Signal to Interference Reti)について実測する。

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。SS-SINR も RSRQ 同様に受信品質を評価するパラメータであり、RSRQ は分母に RSSI、つまり全体帯域の電力を用いるが、SINR では RS と同じリソースブロックの帯域内に存在する干渉電力を分母とする。干渉電力は、同じ帯域内の隣接セルからの信号に加えて雑音成分や、CP(Cyclic Prefic)時間を超えて遅延したマルチパスとなり、その干渉電力が増大すれば SINR が小さくなる。

- 伝送スループット及び遅延時間

伝送スループットについては、アップリンク (以下、UL) /ダウンリンク (以下、DL) を、端末側に接続したクライアント PC と基地局側コアネットワークに接続したサーバ PC との区間において測定する。遅延時間についても同じ区間において実測する。

3) 測定手法と実測模様

各種データは、上記の考え方にに基づき選定した測定地点に測定員が赴き、表 3.2-1 に示す測定器及び表 3.2-2 に示す設定値を用いて実測する。また、実証環境における電波伝搬環境をより詳細に分析するため、各測定地点においては測定員の目視により見通し環境もしくは見通し外環境であるかを併せて記録する。ただし、建物の構造や障害物の存在等により立ち入りが難しい場所については測定地点をずらすなどで対応する。

SS-RSRP 及び SS-RSRQ は、エリアテストを用いて、1000 サンプル/地点のログ取得を実施する。

なお、受信電力の測定においては、定在波の影響を避けるため、1 つの測定点において、 10λ (λ は波長)の範囲で測定位置を動かしながら測定を実施する。

伝送スループットや遅延時間の測定については、図 3.3.1.3-4 に示す通り UE と CN の End To End で測定を行うが、期待する測定値とは異なる結果や、そもそも測定値が取得できない等の場合を考慮し、無線装置と 5G Core 装置の間である場所に「パケットキャプチャ装置」(光信号分岐用装置 (TAP) 含む)を接続し、問題発生時の切り分けとして無線伝送部分の測定を行う。

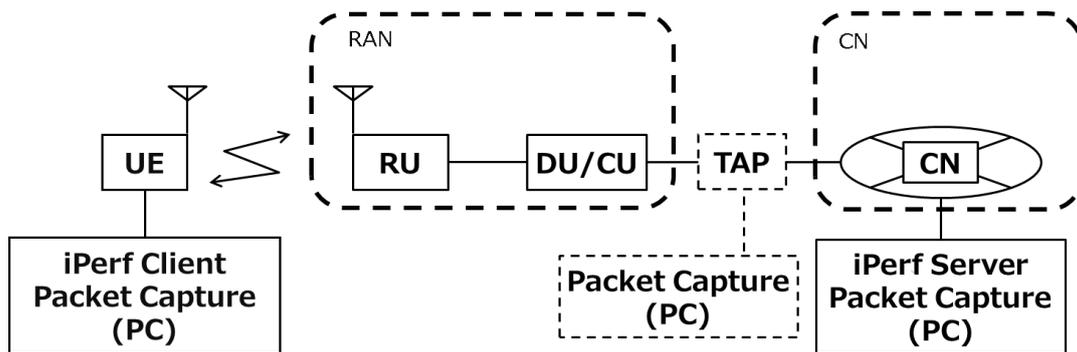


图 3.3.1.3-4 运送性能测定区間

3.3.1.3 評価・検証方法

ローカル 5G の電波伝搬特性等の測定に関しては下記に記載する流れで評価・検証を進めていくこととする。

(1) 実証環境におけるエリア形成の検証

エリア形成の検証としては、エリア算出法に基づく、カバーエリア及び調整対象区域のエリア端閾値を基準に、実証環境において実測した下り受信電力値及びそこから導く伝搬ロス特性により行う。

具体的には、実証環境におけるカバーエリア及び調整対象区域をエリア算出法により作図する（エリア算出法によるエリア図）。その後、それぞれのエリア端における実際の下り受信電力値とエリア端閾値との比較を行う。下り受信電力値とエリア端閾値が異なっている場合は、カバーエリア及び調整対象区域のエリア端閾値が実測される地点と基地局との距離の確認を行うことにより実測値による推定エリア図を作成する。最後に、エリア算出法によるエリア図と実測値による推定エリア図の差分を評価する。

加えて、20 か所の測定地点において実測した下り受信電力値と測定地点～基地局間距離から算出した伝搬ロス特性を、携帯電話システムの設計等に用いられている電波伝搬モデルと比較することで、実証環境における 4.7GHz 帯（4.8~4.9GHz）の電波伝搬特性の評価を行う。

(2) 実証環境におけるユーザへのサービス提供品質の評価

ユーザへのサービス提供品質の評価として、カバーエリア端における伝送スループット、遅延時間について、下り受信電力値との関係性で評価し、表 3.3.1.3-1 にて示している課題実証側での所要性能を達成できているか評価する。

表 3.3.1.3-1 課題実証で要求される所要性能（再掲）

項目	下り(DL)	上り(UL)
通信速度	60Mbps	60Mbps
遅延時間	400ms 以下	400msec 以下
利用条件	サイネージ表示 4 台、常時接続 (将来的なユースケースを想定)	同時通信カメラ 4 台、常時接続

3.3.1.4 実証結果及び考察

(1) 下り受信電力、受信品質測定結果

実証環境における下り受信電力及び受信品質の測定地点は、3.3.1.2 章にて示しており、駅ホーム及び線路上において 49 地点、階上の施設エリアにおいて 53 地点で測定を実施した。なお、実証環境においては、基地局アンテナが配置されている 1 番線と、その反対側となる 2 番線のどちらかに車両が停車している環境となる。そのため、測定は 1 番線、2 番線どちらかに車両が停車している環境においてそれぞれ実施している。

実測結果を図 3.3.1.4-1~2 及び、表 3.3.1.4-1~2 に示す。表中の基地局からの 3D 距離は、今回基地局アンテナを 3 基張り出しているため、各測定地点から最も近いアンテナまでの距離を記載している。

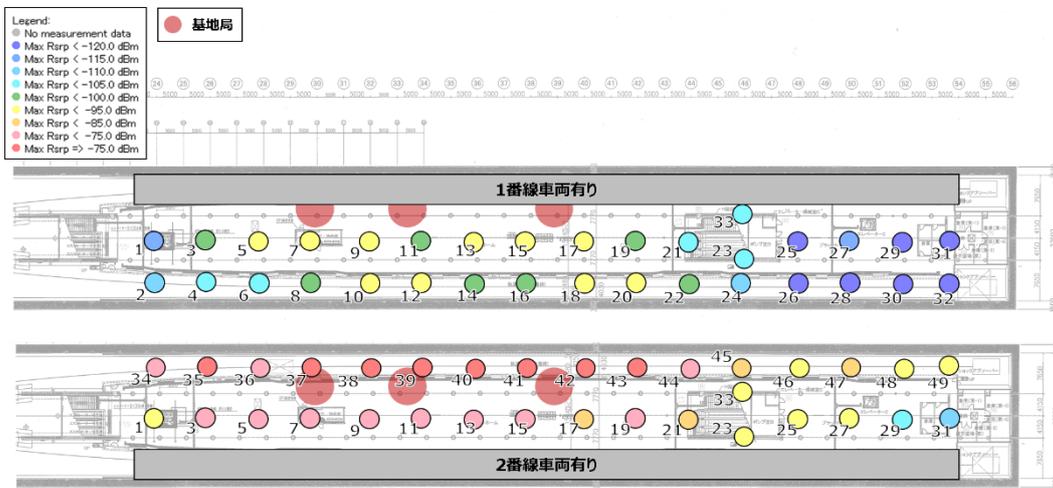


図 3.3.1.4-1(a) 駅ホーム及び線路上の SS-RSRP 測定結果 (B3F)

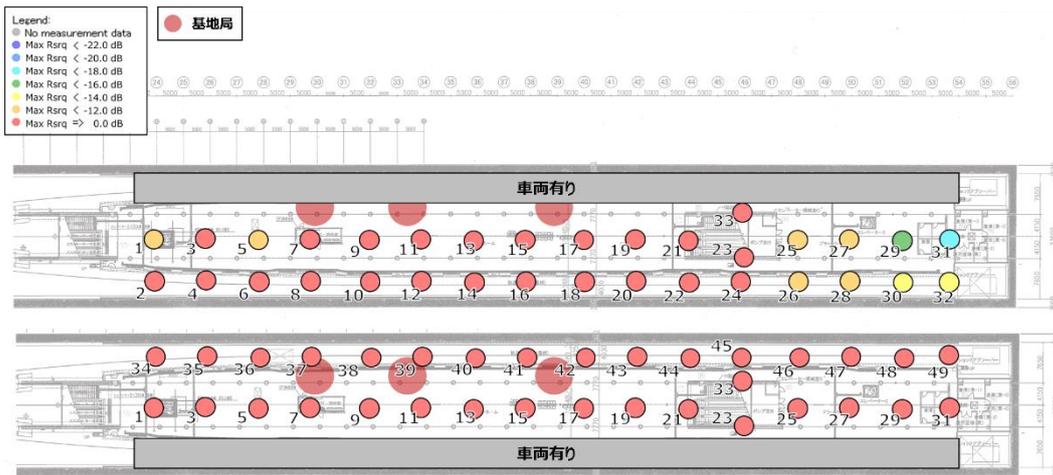


図 3.3.1.4-1(b) 駅ホーム及び線路上の SS-RSRQ 測定結果 (B3F)

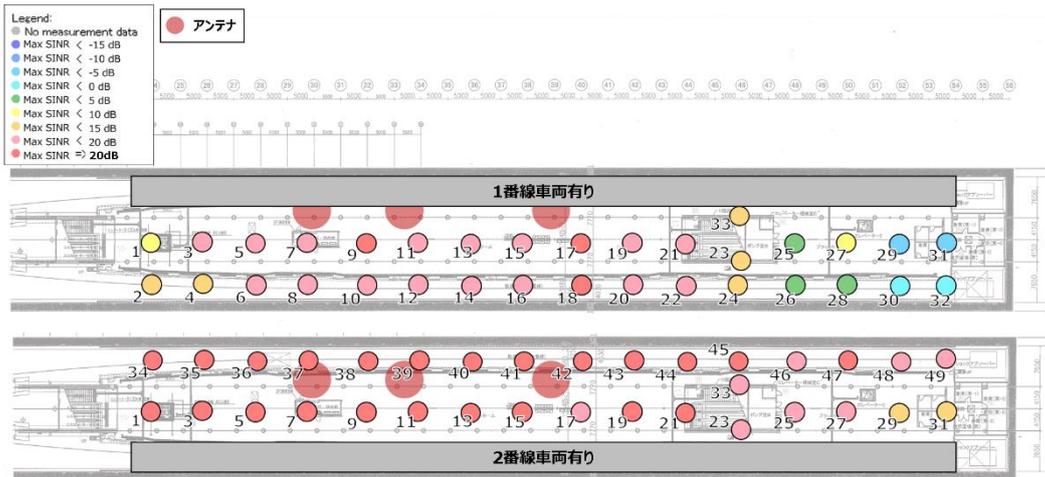


図 3.3.1.4-1(c) 駅ホーム及び線路上の SS-SINR 測定結果 (B3F)

表 3.3.1.4-1(a) 駅ホーム及び線路上を対象とした SS-RSRP、RSRQ、SINR 測定結果

測定点 ID	SS-RSRP (dBm)		SS-RSRQ (dB)		SS-SINR (dB)	
	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線
1	-115.29	-93.06	-12.88	-10.35	7.76	20.75
2	-112.42		-10.90		10.62	
3	-104.68	-83.82	-10.77	-10.20	16.58	20.89
4	-106.66		-10.32		14.76	
5	-99.69	-78.69	-12.92	-10.92	17.88	20.82
6	-105.04		-10.97		15.92	
7	-98.31	-82.34	-10.39	-10.10	16.20	20.42
8	-101.87		-10.69		17.13	
9	-90.47	-78.51	-10.26	-9.61	20.53	20.65
10	-94.63		-10.68		19.99	
11	-101.36	-77.65	-10.97	-10.12	17.43	20.77
12	-95.31		-11.14		19.34	
13	-96.58	-81.93	-10.26	-10.83	19.80	20.08
14	-102.17		-10.42		17.32	
15	-93.81	-79.58	-10.26	-10.55	19.01	20.06
16	-104.75		-11.12		15.97	
17	-96.34	-85.44	-10.42	-11.45	20.11	19.28
18	-96.39		-10.52		20.29	
19	-100.01	-78.44	-10.55	-10.30	18.46	20.61
20	-99.52		-10.14		18.79	
21	-106.48	-86.37	-10.91	-9.59	15.85	20.21
22	-102.43		-11.04		16.19	
23	-108.75	-97.28	-9.85	-10.97	14.44	18.82
24	-112.77		-11.41		10.05	
25	-121.90	-97.95	-13.72	-10.79	1.60	18.92
26	-120.75		-12.71		2.84	
27	-117.70	-97.21	-12.41	-10.25	6.34	19.44
28	-121.87		-13.32		1.80	
29	-128.57	-108.04	-17.95	-10.69	-5.74	14.24
30	-125.61		-15.13		-2.19	
31	-131.63	-111.50	-19.34	-10.90	-7.59	11.39
32	-124.76		-14.98		-2.06	

33	-108.50	-91.66	-11.25	-10.07	13.78	19.45
34		-79.62		-10.60		21.71
35		-73.37		-10.55		21.84
36		-78.41		-11.17		21.22
37		-66.93		-10.49		21.28
38		-68.76		-10.70		21.41
39		-67.03		-10.36		21.84
40		-69.38		-10.29		21.13
41		-71.18		-10.25		21.32
42		-62.27		-10.89		22.05
43		-69.81		-10.18		22.29
44		-81.54		-11.28		20.65
45		-86.02		-10.90		20.57
46		-90.84		-10.99		19.82
47		-88.88		-10.42		20.95
48		-92.86		-10.56		18.43
49		-93.27		-10.83		19.34

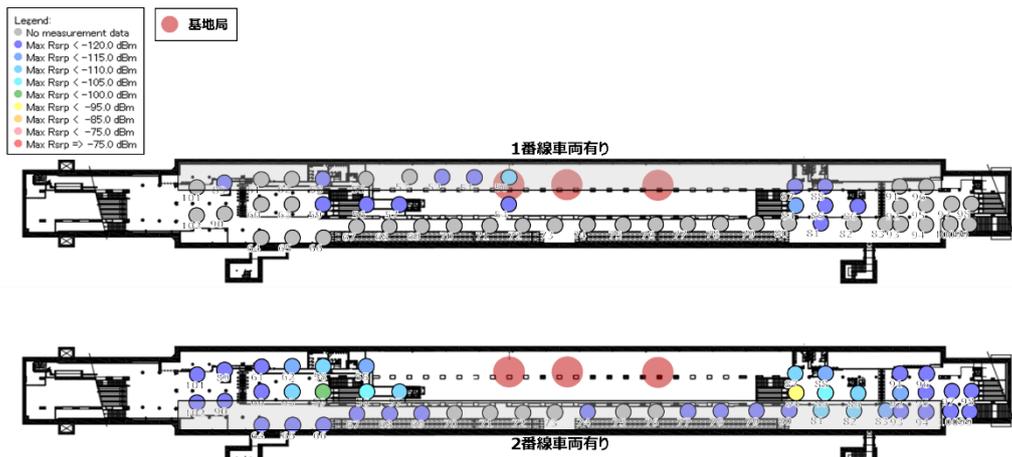


図 3.3.1.4-2(a) 階上の施設エリアの SS-RSRP 測定結果 (B2F)

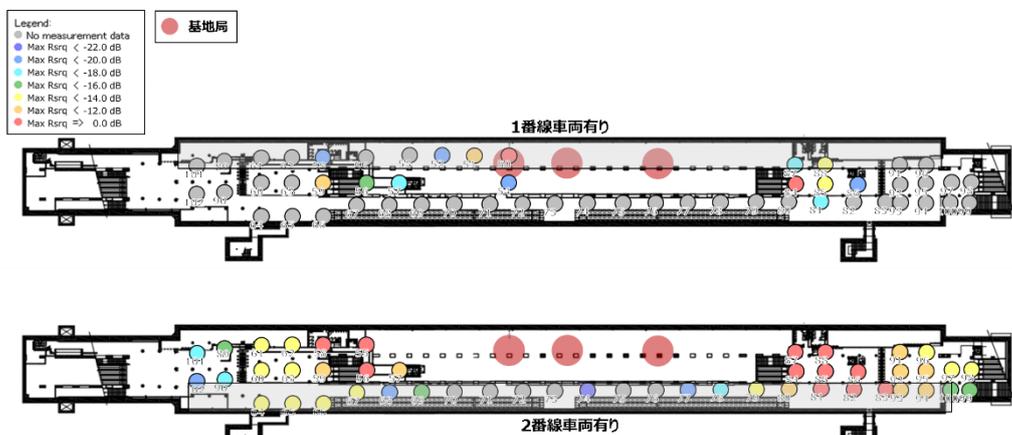


図 3.3.1.4-2(b) 階上の施設エリアの SS-RSRQ 測定結果 (B2F)

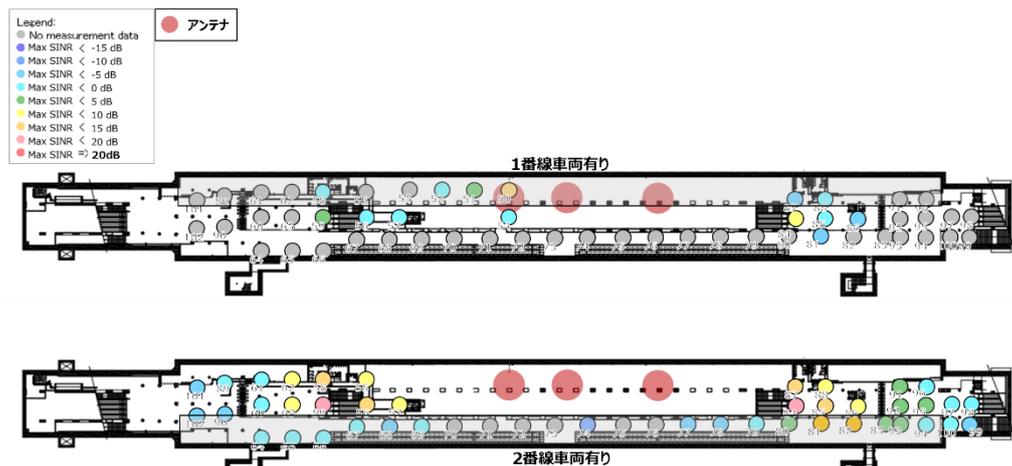


図 3.3.1.4-2(c) 階上の施設エリアの SS-SINR 測定結果 (B2F)

表 3.3.1.4-2(a) 階上の施設エリアを対象とした SS-RSRP、RSRQ、SINR 測定結果

測定点 ID	SS-RSRP (dBm)		SS-RSRQ (dB)		SS-SINR (dB)	
	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線
50	-112.56		-10.60		10.61	
51	-122.82		-13.73		0.71	
52	-134.06		-21.60		-9.48	
53						
54	-132.63		-20.31		-8.55	
55		-115.05		-11.47		8.55
56	-128.24	-109.26	-17.01	-11.03	-5.03	12.98
57	-130.23	-113.56	-18.40	-12.09	-6.64	9.11
58	-133.86	-111.69	-21.78	-11.62	-9.47	11.27
59	-122.35	-102.40	-13.30	-12.40	0.78	17.44
60		-124.61		-14.63		-1.41
61		-124.03		-14.25		-0.55
62		-116.99		-11.82		5.84
63		-114.83		-11.50		8.08
64		-125.21		-15.71		-2.73
65		-124.21		-14.70		-0.89
66		-124.53		-14.13		-1.07
67		-124.37		-14.32		-0.95
68		-132.01		-20.70		-8.40
69		-127.52		-16.30		-4.17
70						
71						
72						
73						
74		-135.64		-23.65		-10.65
75						
76						
77		-131.86		-20.08		-8.30
78		-129.95		-18.59		-6.76
79		-125.94		-14.96		-2.56
80		-120.22		-12.39		2.79
81	-130.61	-111.02	-19.45	-10.76	-7.47	10.89

82		-112.21		-10.30		10.13
83		-118.64		-11.97		4.60
84	-115.01	-99.29	-11.38	-10.69	7.97	18.34
85	-125.86	-109.87	-15.30	-11.29	-2.47	12.60
86	-133.42	-113.75	-21.41	-11.65	-9.25	8.75
87	-129.46	-111.73	-18.22	-11.03	-6.15	10.92
88	-125.66	-115.26	-14.94	-10.72	-2.22	7.78
89		-126.81		-16.48		-3.92
90		-130.04		-18.71		-6.64
91		-121.22		-12.86		1.68
92		-118.40		-12.21		4.77
93		-120.39		-13.12		2.56
94		-122.57		-13.88		-0.19
95		-120.44		-12.49		2.44
96		-124.94		-15.03		-1.72
97		-126.41		-15.94		-3.05
98		-125.78		-15.04		-2.37
99		-128.92		-17.32		-5.49
100		-126.37		-16.06		-3.49
101		-130.04		-18.39		-6.64
102		-132.75		-21.30		-8.93

(2) 伝送スループット、RTT 測定結果

実証環境における伝送スループット及び RTT 測定については図 3.3.1.4-3 に示す課題実証エリア周辺にて実施している。実測の結果を図 3.3.1.4-4 及び、表 3.3.1.4-3 に示す。

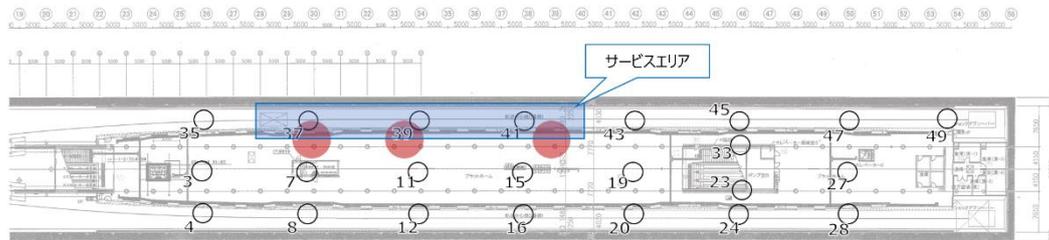


図 3.3.1.4-3 伝送スループット、RTT 測定範囲

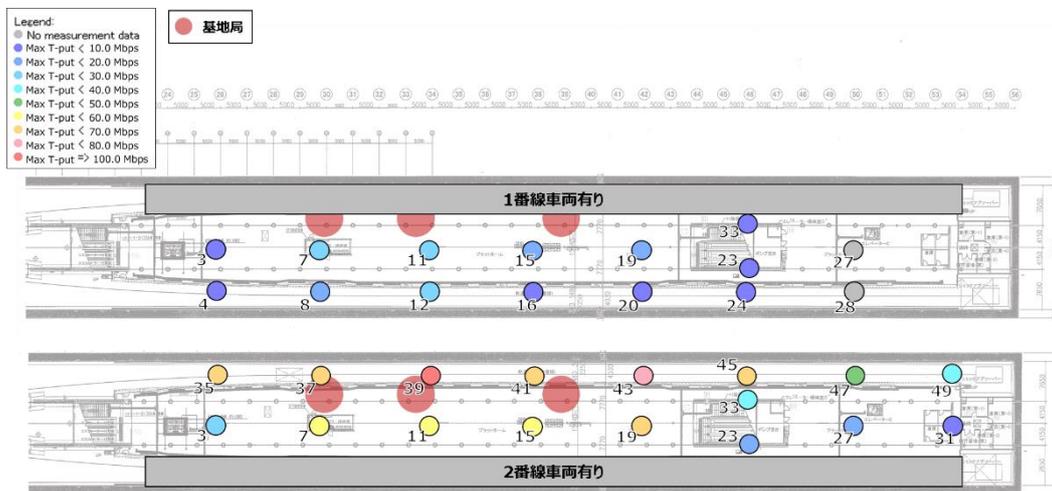


図 3.3.1.4-4 (a) 伝送スループット (UL) 測定結果

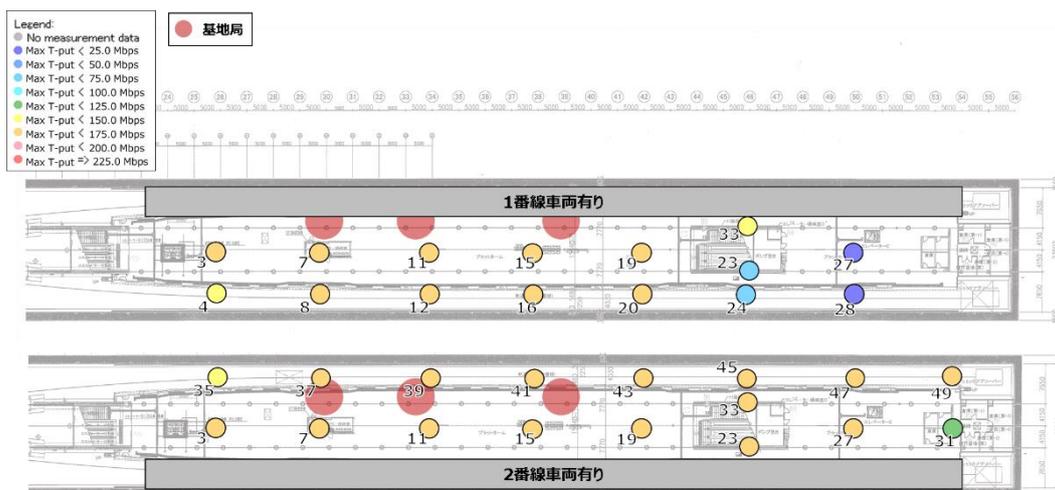


図 3.3.1.4-4 (b) 伝送スループット (DL) 測定結果

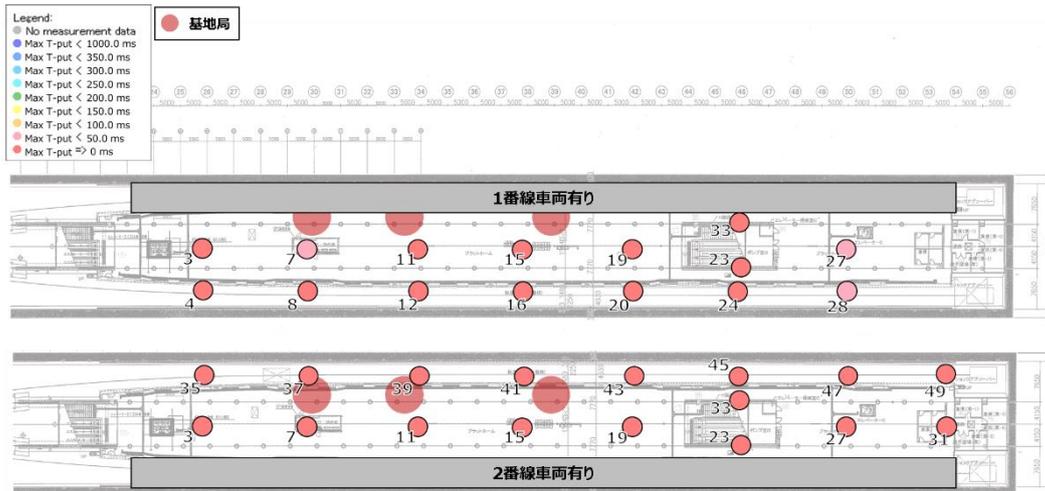


図 3.3.1.4-4 (c) 伝送遅延 (RTT) 測定結果

表 3.3.1.4-3 伝送スループット、RTT 測定結果

測定点 ID	DL T-Put (Mbps)		UL T-put (Mbps)		RTT (ms)	
	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線	車両 1 番線	車両 2 番線
3	150.53	162.73	8.25	29.26	35.63	32.33
4	136.53		3.95		32.63	
7	165.53	164.37	22.19	50.28	59.13	32.33
8	154.03		10.63		35.63	
11	169.17	165.93	26.25	56.70	28.80	31.60
12	161.97		20.48		31.73	
15	163.63	167.53	15.20	58.13	29.50	30.93
16	152.87		10.00		32.50	
19	163.97	171.67	14.00	67.34	38.67	32.77
20	154.70		9.99		28.77	
23	66.28	161.87	0.49	12.19	46.17	33.10
24	55.43		0.45		38.03	
27	18.85	165.43	0.00	15.10	52.00	31.83
28	5.76		0.00		57.57	
31		112.76		1.47		33.73
33	142.40	169.63	5.14	33.21	33.10	30.37
35		148.27		61.46		31.13
37		160.03		64.32		32.93
39		167.33		81.62		30.90
41		164.97		62.65		29.77
43		163.63		78.59		45.23
45		172.47		67.05		31.67
47		166.17		48.07		29.33
49		167.60		35.25		32.57

(3) 実証環境における電波伝搬特性の評価

今回の実証環境である羽田空港第1・第2ターミナル駅は、地下駅であることからソリューションを展開する上では、自己土地としてサービスエリアの構築が容易であるといえる。しかしながら、地下駅においては、階上の施設が別事業者の運用が為されることも想定され、3.2章で示した通り、駅天井の遮へいによる階上方向への電波漏洩が別事業者へ与える影響を考慮する必要がある。

このような環境においても、ローカル5Gを運用するには、階上への電波漏洩による干渉を抑えつつ、自己土地内で必要十分なサービスエリアを確保するサイトエンジニアリングが求められる。その為、まずは実証環境における4.8GHz帯の電波伝搬特性の評価を行う。

3.3.1.4章(1)にて示した下り受信電力の実測データ(SS-RSRP)を用いて、地下駅の環境における4.8GHz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うことで、地下駅等の環境における4.8GHz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3.3.1.4-4に示す。

表 3.3.1.4-4 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	<p>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。</p> $L = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 20 \log \left(\frac{4\pi f d}{c} \right) = 20 \log f + 20 \log d + 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right)$ $= 20 \log f + 20 \log d + 32.4 \text{ [dB]}$ <p>f: 周波数[MHz]、d: 距離[km]、c: 3.0×10^8[m/s]</p>
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	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> 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

駅ホーム下に置局した基地局と、駅ホーム及び、線路上について、実測した下り受信電力データから算出した電波伝搬特性を図3.3.1.4-10に示す。

図中、●はLOSデータ、×はNLOSのデータを示している（LOSかNLOSは、測定地点から基地局アンテナが目視できるかで判断している。）

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。結果からは、以下のことがわかる。

- 今回、環境では一番線のホームの下に、オムニ指向性のアンテナを地下駅の水平方向に設置している。この場合、「アンテナ設置の開口部に近い1番線」に車両がある環境では、LOS環境となる測定点が得られず、且つ、アンテナ直近に遮へいとなる鉄道車両が設置されたことになる。結果、NLOS環境では、奥村・秦式（市街地）モデルのカーブ傾向よりも低い結果となった事が確認できる。
- 一方、「アンテナ設置の開口部と反対側となる2番線」に車両がある場合、LOS環境となる1番の線路上は、自由空間損失モデルのカーブ傾向に近い事が出来る。また、ホーム上の地下3階(B3F)のNLOS環境では、奥村・秦式（開放地）のカーブ傾向に近いが、ホーム階上地下2階(B2F)のNLOS環境では、奥村・秦式（市街地）モデルのカーブ傾向よりも低い結果となった事が確認できる。

これらの結果から、鉄道等の駅ホーム下に設置した今回環境については、線路上で見通しが取れる場合は、自由空間損失モデルで概ね推定が出来るものと考えられる。

一方、同環境におけるホーム上については、アンテナ設置を行った側に車両がある場合は、奥村・秦式（市街地）モデルよりも低い傾向として、車両が無い場合は、奥村・秦式（開放地）モデルで、概ね推定が出来るものと考えられる。

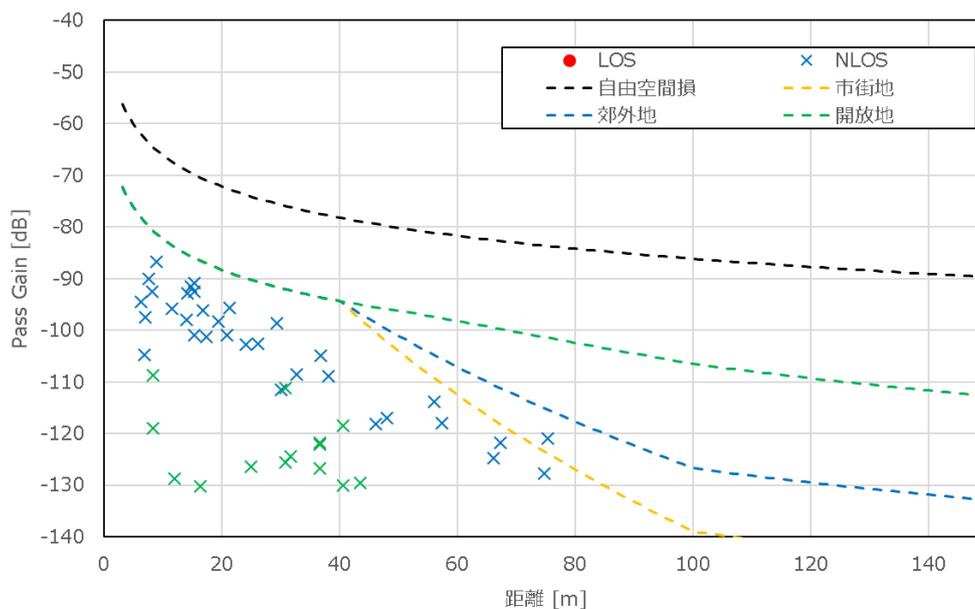


図 3.3.1.4-10(a) 地下駅ホーム下設置基地局からの伝搬ロスの距離特性
(1番線車両あり)

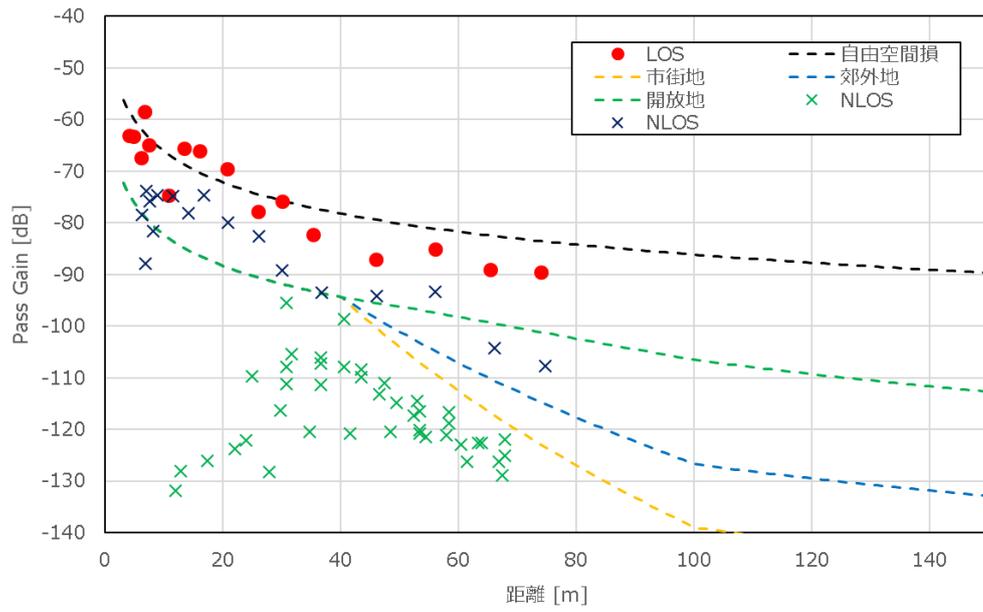


図 3.3.1.4-10(a) 地下駅ホーム下設置基地局からの伝搬ロスの距離特性
(2 番線車両あり)

(4) 実証環境におけるローカル 5G 性能評価

実際の鉄道等地下鉄の環境において、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、ラウンドトリップタイムにより評価する。

ローカル 5G の性能評価は、3.3.1.3 章に示す評価方法に基づき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で想定され、対策としてどのような方策が取りえるのかを考察する。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らる、伝送スループットとラウンドトリップタイムの実測結果を用いて考察する。

1) 実証環境におけるローカル 5G エリア形成について

ローカル 5G 性能評価の前提となる、実証環境のターゲットエリア（サービスを提供したいエリア）を図 3.3.1.4-11 に示す。実証環境においては、図中に示す線路上をターゲットエリアとするため、ホーム下にオムニ指向性のアンテナを 3 つ設置している。

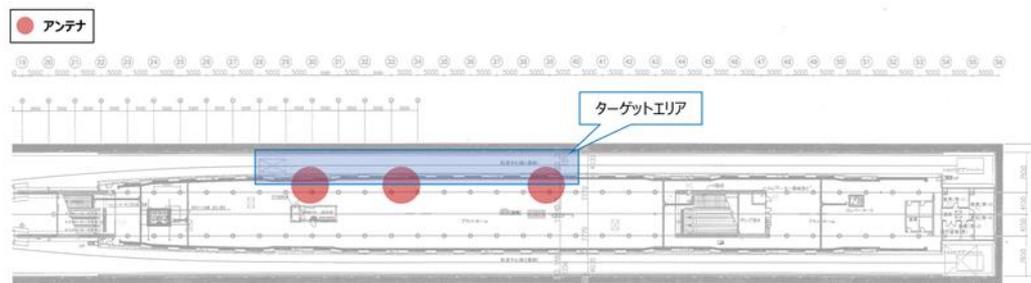


図 3.3.1.4-11 地下鉄線路上のターゲットエリア

ここでは、下り受信レベル（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 3.3.1.4-12~13 に実証を行うホーム、線路上（B3F）のエリア形成状況を示す。図中、赤線は 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である。一方、青線は、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端である。なお、本実証に用いる基地局装置の下り受信レベル（SS-RSRP）の測定帯域は 30kHz であるため、上述したエリア端閾値を 100MHz から、30kHz へ帯域換算した以下の値を用いている。

カバーエリア端レベル（SS-RSRP 帯域換算） : -119.8dBm

調整区域端レベル（SS-RSRP 帯域換算） : -126.2dBm

結果からは、以下のことがわかる。

- 鉄道駅ホーム下にアンテナ設置を行った今回環境では、アンテナ設置を行った側に車両がある場合、アンテナ設置位置に対して離れたホーム上に、カバーエリア端が形成

されている事が確認できる。車両が無い場合については、今回環境では、ホーム上は、カバーエリア内に収まる結果となる事が確認できる。

- SS-RSRP によるカバーエリア端として確認できた測定ポイント付近で、SS-RSRQ の劣化を確認しており、相関性があると考えられる。
- SS-SINR においては付近に干渉影響となる無線局は存在していない環境となる。そのため、SINR における"IN"は、環境雑音または CP (Cyclic Prefix) 時間を超えて遅延したマルチパスが支配的と考えられるが、屋内に設置した基地局と屋内各測定地点の距離から CP 時間を超えて遅延波が観測されることは考えにくく、"IN"に影響を与える要因は環境雑音が支配的と想定する。加えて、RSRP 同様に減衰傾向が見えることから、SINR が低い地点に置いては"S"となる主波及び CP 時間内の遅延波のレベルが減衰しているためと考えられる。

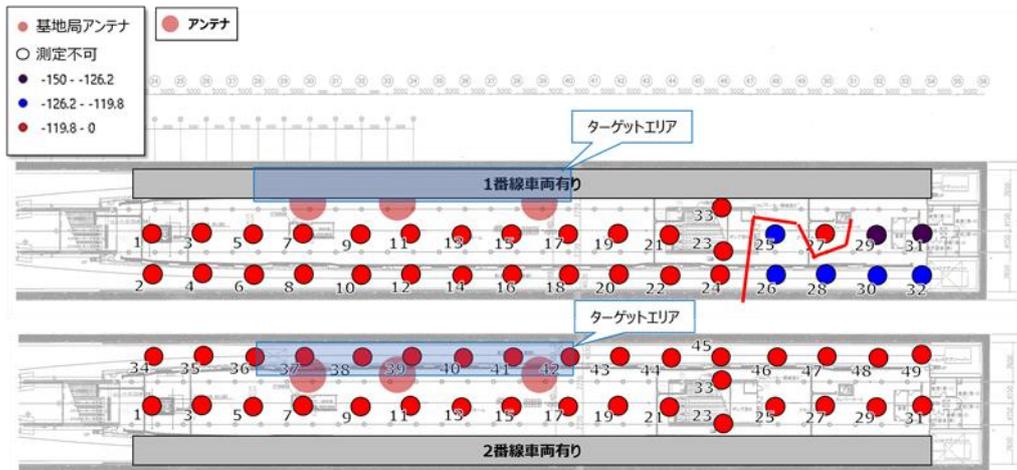


図 3.3.1.4-12 受信レベル SS-RSRP から評価した想定カバーエリア (B3F)

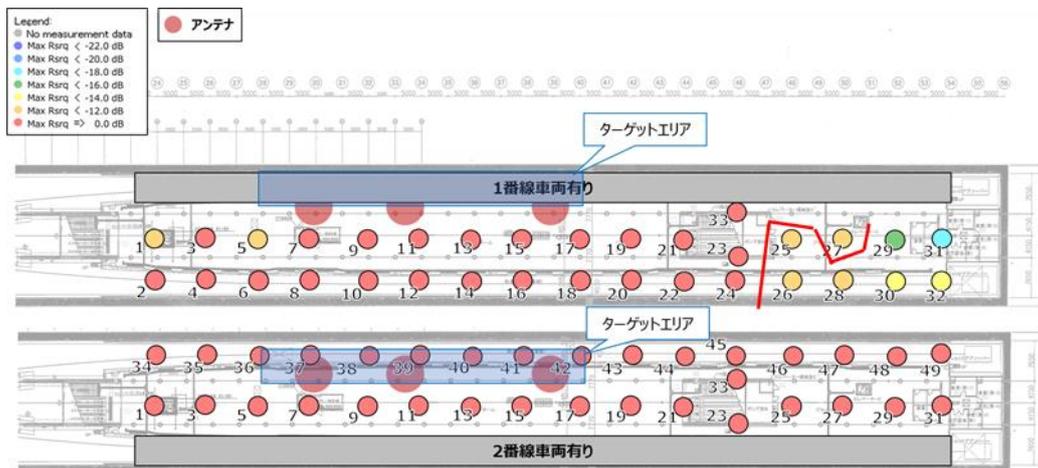


図 3.3.1.4-13(a) 受信品質 SS-RSRQ から評価した想定カバーエリア (B3F)

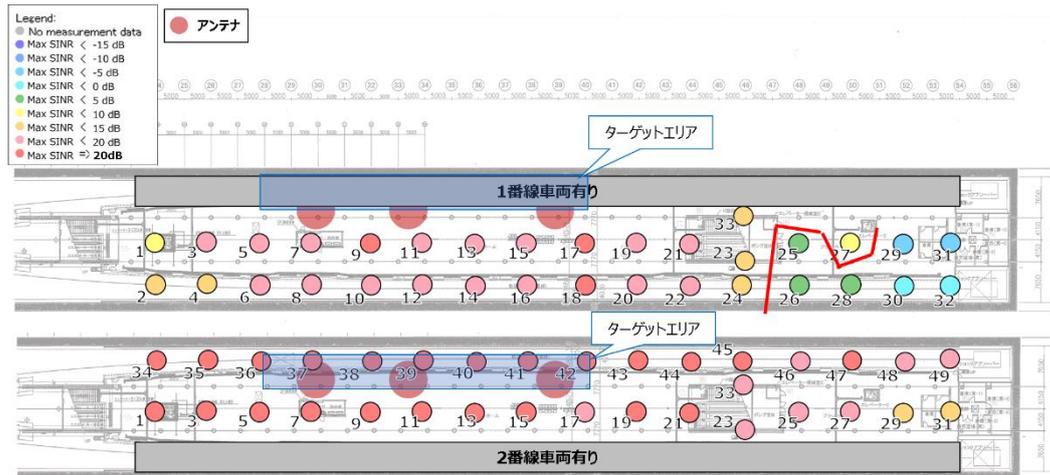


図 3.3.1.4-13(b) 受信品質 SS-SINR から評価した想定カバーエリア (B3F)

図 3.3.1.4-14~15 にホーム、線路上の階上となる (B2F) を示す。なお、本階層は実証対象区域ではないが、実証エリア (B3F) から階上 (B2F) への電波漏洩観点でエリア形成を評価する。図中、赤線は 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である。一方、青線は、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端である。なお、本実証に用いる基地局装置の下り受信レベル (SS-RSRP) の測定帯域は 30kHz であるため、上述したエリア端閾値を 100MHz から、30kHz へ帯域換算した以下の値を用いている。

カバーエリア端レベル (SS-RSRP 帯域換算) : -119.8dBm

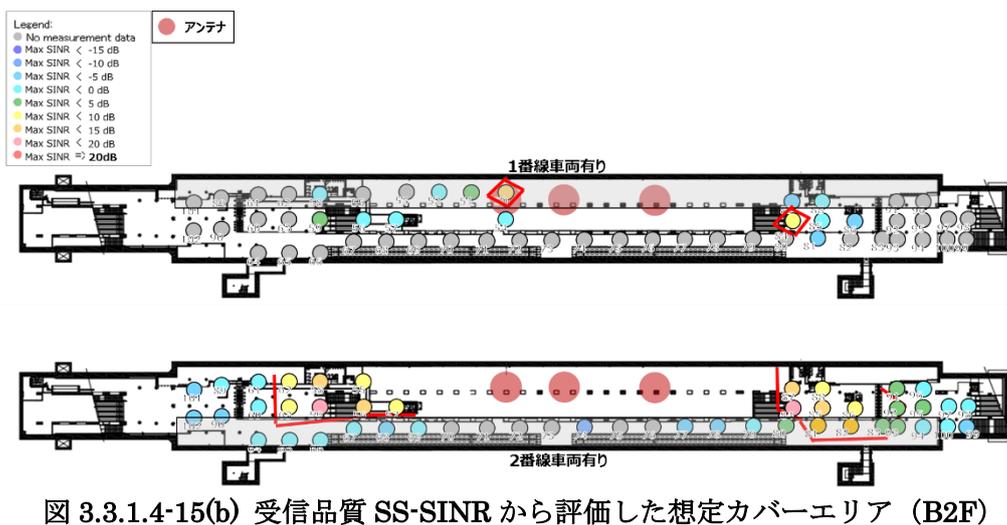
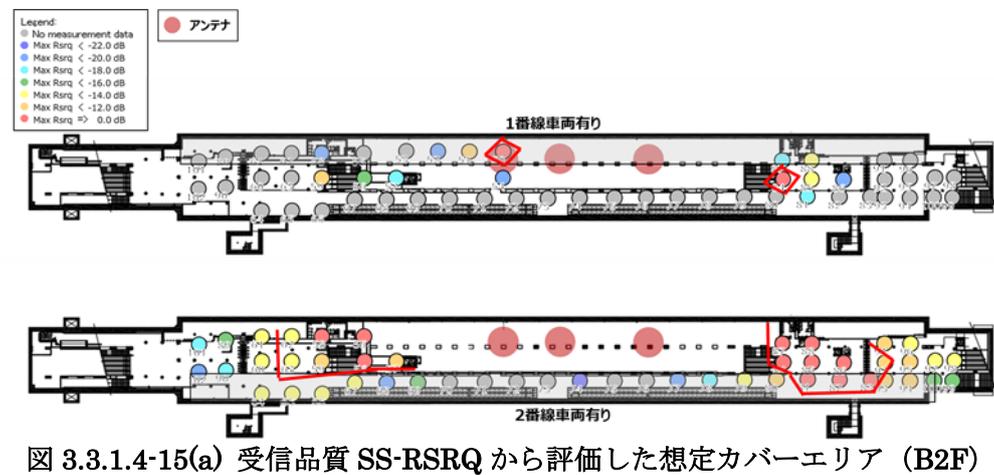
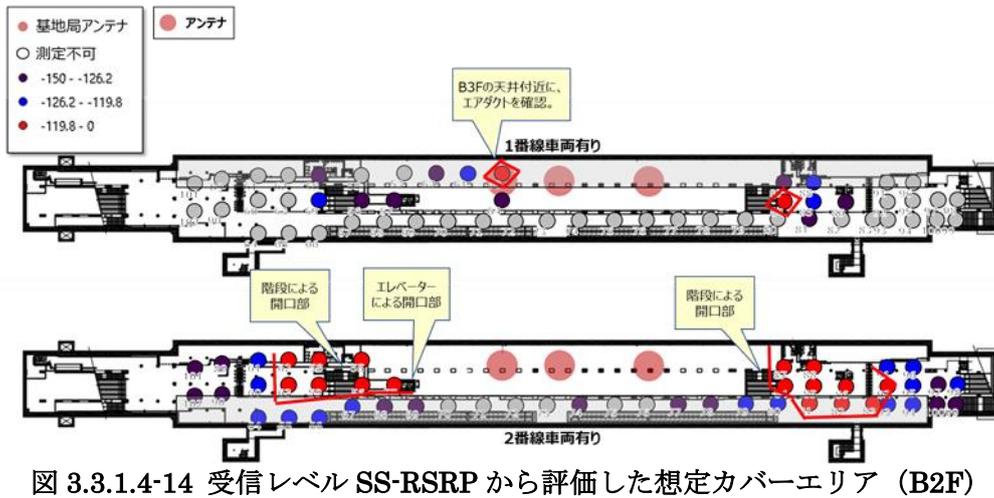
調整区域端レベル (SS-RSRP 帯域換算) : -126.2dBm

結果からは、以下のことがわかる。

- 鉄道駅ホーム下にアンテナ設置を行った今回環境の線路上の階上となる(B2F)では、アンテナ設置を行った側に車両がある場合、基地局の直上エリアと、階段及び、エレベータ付近による開口部で、電波の漏れ出しが発生している事が分かる。車両が無い場合においては、この傾向が強く確認する事が出来る。
- 基地局の直上となる場所で、電波の漏れ出しを確認しているが、B3F の実証フィールドの該当部付近において、天井にエアダクトが設置されている事を確認しており、その分の遮へい損失が低くなったと考えられる。
- SS-RSRQ の状況についても、上記の電波の漏れ出し傾向が良く表れる傾向が確認できる。

これらの結果より、鉄道等における地下駅の環境においては、ターゲットエリアの受信電力を維持したまま、天井面における開口部となる、エアダクト、エレベータ、階段等の駅内開口部によって発生する電波漏洩を防ぐ事が課題であると考ええる。

すなわち、階上方向の開口部付近での漏洩電力が観測されている事から、本実証で使用したオムニ指向性のアンテナではなく、セクタ指向性のアンテナ等を用いて、バックローブを漏洩電力が強く出てしまう方向に向ける等の置局設計が望ましいと考えられる。



2) 実証環境におけるローカル 5G サービス提供品質

ここでは、伝送スループット、ラウンドトリップタイムの測定結果から、ユーザへのサービス提供品質の観点で評価を行う。

図 3.3.1.4-16-18 は、図 3.3.1.4-11 のターゲットエリア内において実測した伝送スループット(DL/UL)とラウンドトリップタイムを地図上に記載したものである。また、図 3.3.1.4.19 はターゲットエリア内における下り受信電力 (SS-RSRP) と伝送スループット、ラウンドトリップタイムとの関係をそれぞれにおいてグラフ化したものである。

- UL スループットは、ターゲットエリア内に車両が無い場合において、概ね 70Mbps 以上となる事を確認出来ている。ターゲットエリア内に車両が有る場合においては、測定が出来ていないが、ホーム床面の遮へい影響を受ける、ホーム上において車両有無によって、20Mbps 以上の劣化が見えている事から、車両あり時のターゲットエリアにおいても、同様の劣化が発生するものと考えられる。
- DL スループットについては、ターゲットエリア内に車両が無い場合において、概ね、175Mbps 以上となる事が確認できる。ターゲットエリア内に車両が有る場合においては、UL スループットと同様に測定が出来ていないが、車両有無によるホーム上のスループット差分が、図 3.3.1.4-12 に示した、SS-RSRP が劣化する場合を除き、低い傾向にある事が確認できる。これは、DL 通信については各ビームにおいて直线性を持っており、誤りが少なくなることから、スループット劣化が抑えられたものと考えられる。
- ラウンドトリップタイムについては、車両の配置状況に影響せず、概ね 50ms 程度となる事が見えているが、UL と DL のスループットについては、電界エリアが良好となるにつれて、良好な結果が得られており、ターゲットエリアにおいて良好な電界の確保が必要である事が分かる。
- 設定した目標値に対して、ターゲットエリアに車両が無い場合において、目標品質をクリアする事が確認できたが、ターゲットエリアに車両が有る場合においては、測定を行う事が出来ず、確認は取れていない。考察上の推定では、UL スループットにおいて、目標となる 60Mbps を下回る可能性があると考えられる。

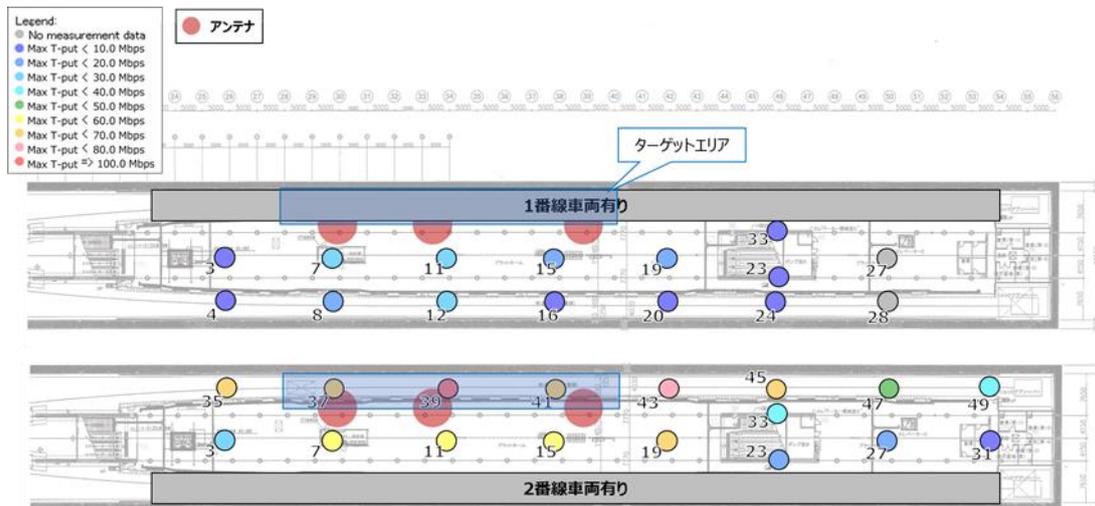


図 3.3.1.4-16 伝送スループット (UL) 測定結果

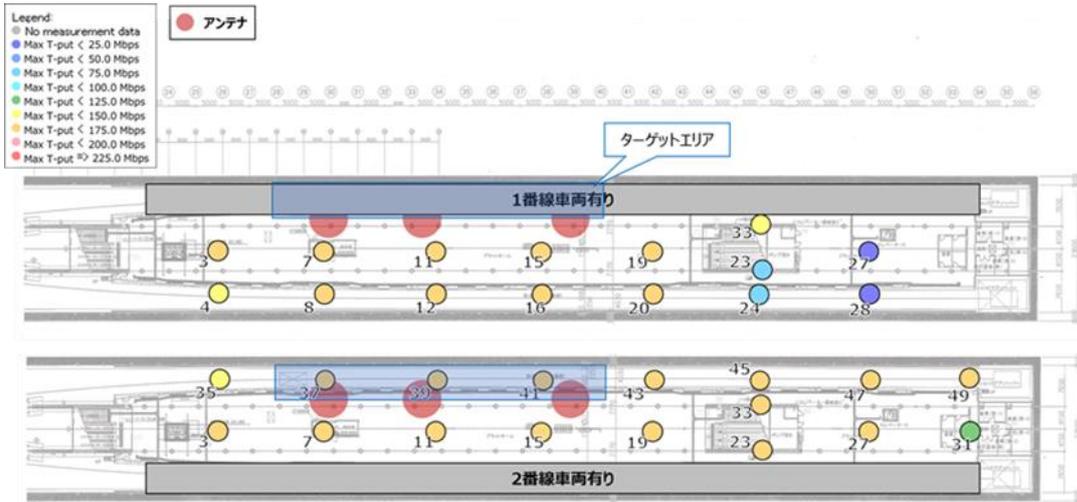


図 3.3.1.4-17 伝送スループット (DL) 測定結果

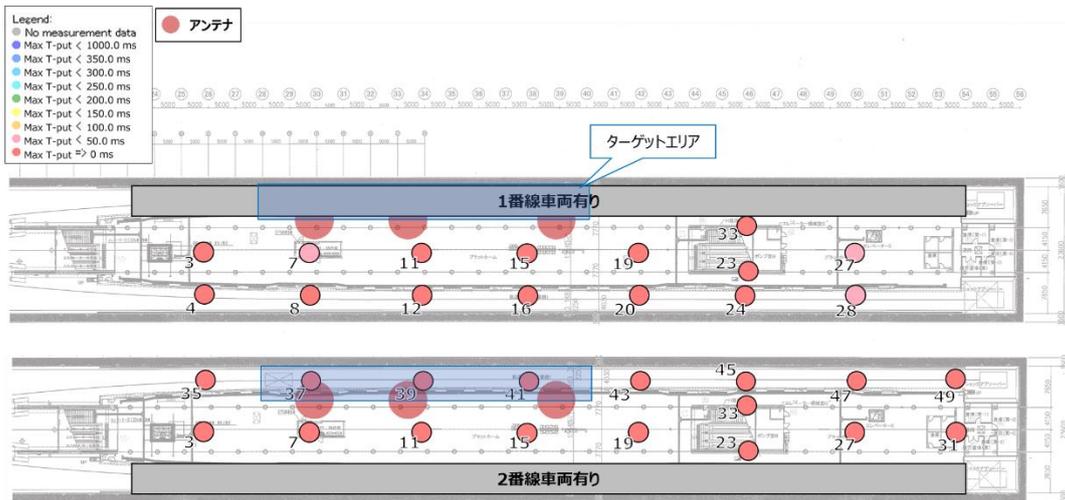


図 3.3.1.4-18 RTT 測定結果

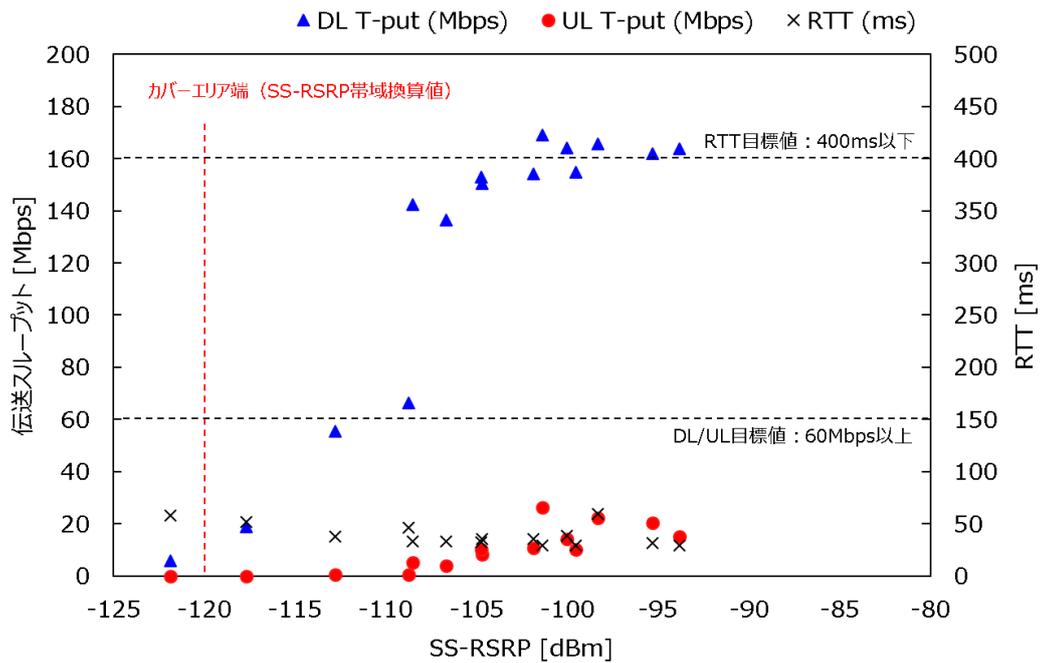


図 3.3.1.4-19(a) 伝送スループットと SS-RSRP の関係 (1 番線車両あり)

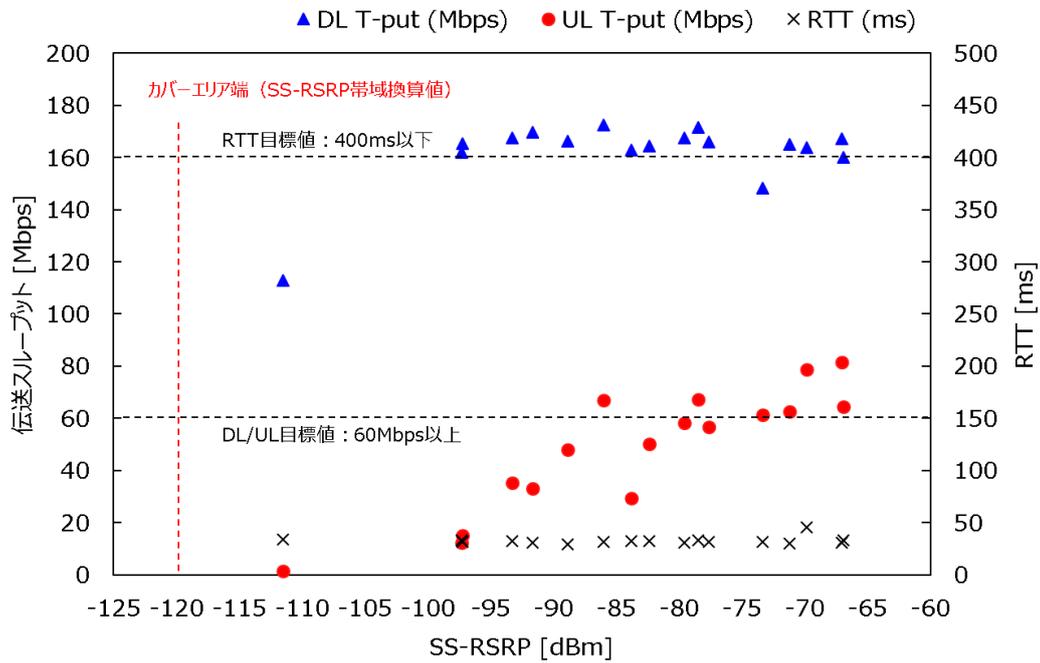


図 3.3.1.4-19(b) 伝送スループットと SS-RSRP の関係 (2 番線車両あり)

3.3.1 章に示しているように、鉄道インフラにおけるユースケースを想定した場合、表 3.3.1 に示す所要性能、特に上り回線の伝送スループットが重要となる。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 60Mbps 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 3.3.1 課題実証で要求される所要性能 (再掲)

項目	下り(DL)	上り(UL)
通信速度	60Mbps	60Mbps
遅延時間	400ms 以下	400msec 以下
利用条件	サイネージ表示 4 台、常時接続 (将来的なユースケースを想定)	同時通信カメラ 4 台、常時接続

図 3.3.1.4-20 は、ターゲットエリア内における伝送スループット、RTT の測定結果を累積確率分布としてグラフ化したものである。

- 今回環境において、見通しが取れる LOS 環境の方が、伝送スループット (UL/DL) 及び、ラウンドトリップタイムの何れにおいても良好な結果があり、よりスループット速度、低遅延を求めるのであれば、アンテナ設置位置に対して、見通しが取れるエリアにターゲットとなるソリューションを構築した方が良い事が確認できる。
- UL スループットと DL スループットの累積確率分布として、NLOS 環境では、UL スループットのばらつきが低く、DL スループットではバラつきが大きい。これは、受信品質によって、変調精度を変えて信号強度を変える処理テーブルが DL の方が多い事が要因と考えられる。
- 今回目標とした UL スループット目標は、60Mbps であり、LOS 環境でも、50%を下回る結果となっており、NLOS 環境では達成が厳しい事が確認できる。今回環境は、ホーム下にアンテナが設置されており、ターゲットエリアもホームより低いエリアであった事が要因と考えられる。
- 一方で、DL スループット目標の 60Mbps は、NLOS 環境でも 20%未満であり概ね良好な結果を確認できたと考えられる。ラウンドトリップタイム目標は 400ms であり、目標を達成している事を確認する事が出来たと考えられる。

これらの結果から、今回環境における実証フィールド全体で十分な所要性能を得る為には、カバーエリア閾値以上の電力を確保する事はもちろん、アンテナ設置位置に対して、ソリューションを実施するエリアに対し見通しを考慮した設計が必要となる。

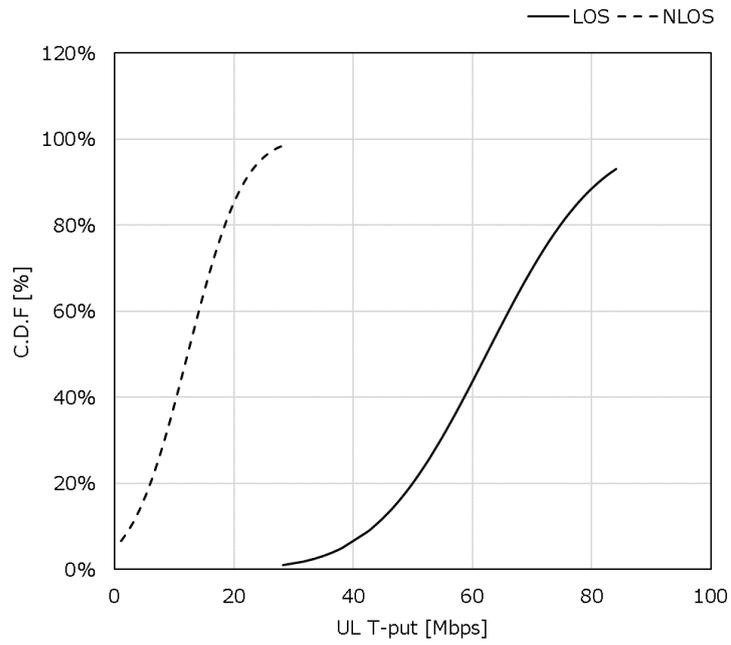


図 3.3.1.4-20(a) ターゲットエリア周辺における UL 伝送スループット累積分布

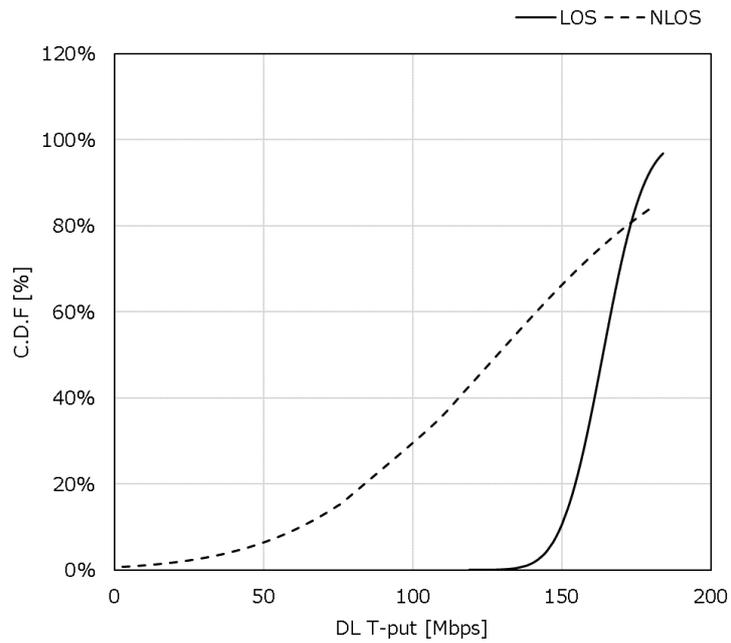


図 3.3.1.4-20(b) ターゲットエリア周辺における DL 伝送スループット累積分布

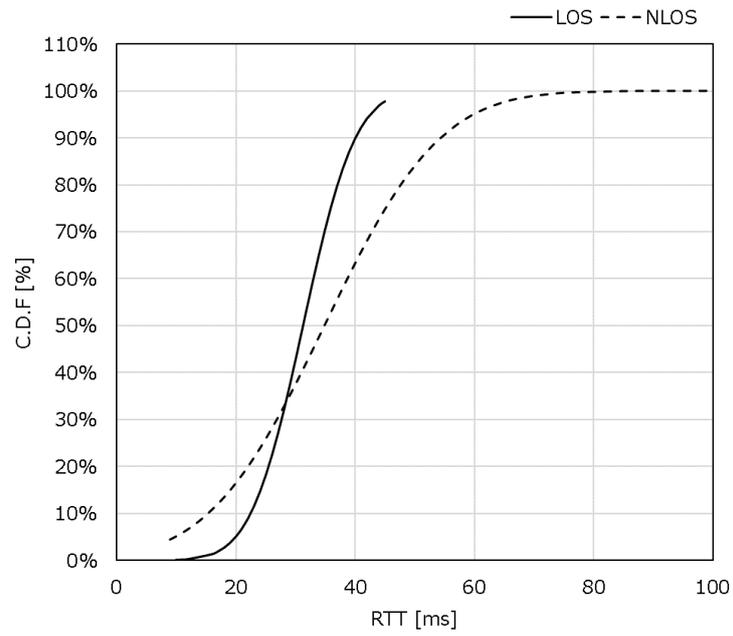


図 3.3.1.4-20(c) ターゲットエリア周辺における RTT 累積分布

(5) 技術的課題の解決方策

今回の実証では、鉄道等における地下駅環境において、基地局から、オムニ指向性のアンテナを3つに分岐する形でホーム下にローカル5Gの構築を行った。その結果、実測値から得られた伝搬特性は線路上で見通しが取れる場合は、自由空間損失モデルで、見通しが取れない場合は、奥村・秦式（市街地）モデルよりも低い傾向として、概ね推定が出来るものと考えられる。同環境におけるホーム上については、アンテナ設置を行った側に車両がある場合は、奥村・秦式（市街地）モデルよりも低い傾向として、車両が無い場合は、奥村・秦式（開放地）モデルで、概ね推定が出来るものと考えられる。ホーム下にアンテナを設置した事により、設置した側に車両があると、車両による遮へい影響が発生した事が要因と考えられる。

また、ホーム上においては車両への出入りに伴う人流が発生する事が想定され、ホーム上に移動局を置局するような場合においては、その分の損失マージンを見込む必要があると考えられる。本実証においては、人流による損失について詳細な検討を実施できていないが、その影響は否定できない為、ホーム上でのエリア設計が必要とされる場合、高所にアンテナを設置し、吹き降ろす様な形で設計を行う事が望ましいと考えられる。

3.3.2 電波伝搬モデルの精緻化

3.3.2.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

背景として、今回課題実証では、「遠隔・リアルタイムでの列車検査、線路巡視等の実現」において構築した車両検査の遠隔・自動監視システムに関する実用性（技術面・運用面）の向上・評価”を目的としており、図 3.3.2.1-1 に示すカメラ等を設置する線路内のエリアをカバーするため、ローカル 5G 基地局 1 局を活用して実証を行っている。なお、ホーム下から広範囲のエリアをカバーするため、1つのローカル 5G 基地局から 3つのアンテナを張り出してエリア化されており、こちらを活用して実証を行っている。

本実証環境においてローカル 5G 基地局のアンテナは、ホーム下への置局となる。そのため、本実証においては図 3.3.2.1-2 に示すような同じホーム内において、他のローカル 5G もしくはキャリア 5G 局が運用されるケースを想定し、ホーム下側からの電波がホーム床面（コンクリート）を通過して、ホーム上側へどれだけ漏洩するかに着目し、平面ではなく立体的な干渉調整を行うためのエリア算出法への精緻化について実施を行う事を目的とする。

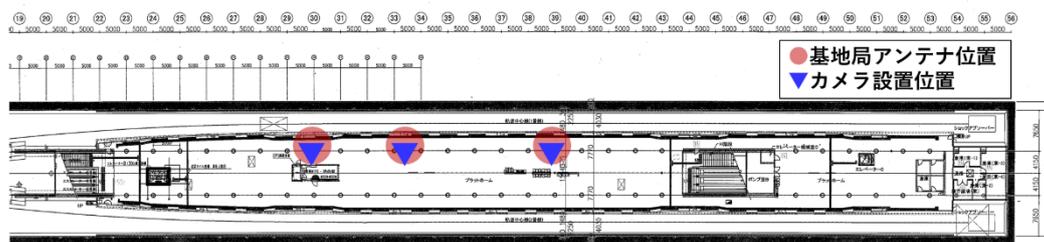


図 3.3.2.1-1 羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅内実証エリア

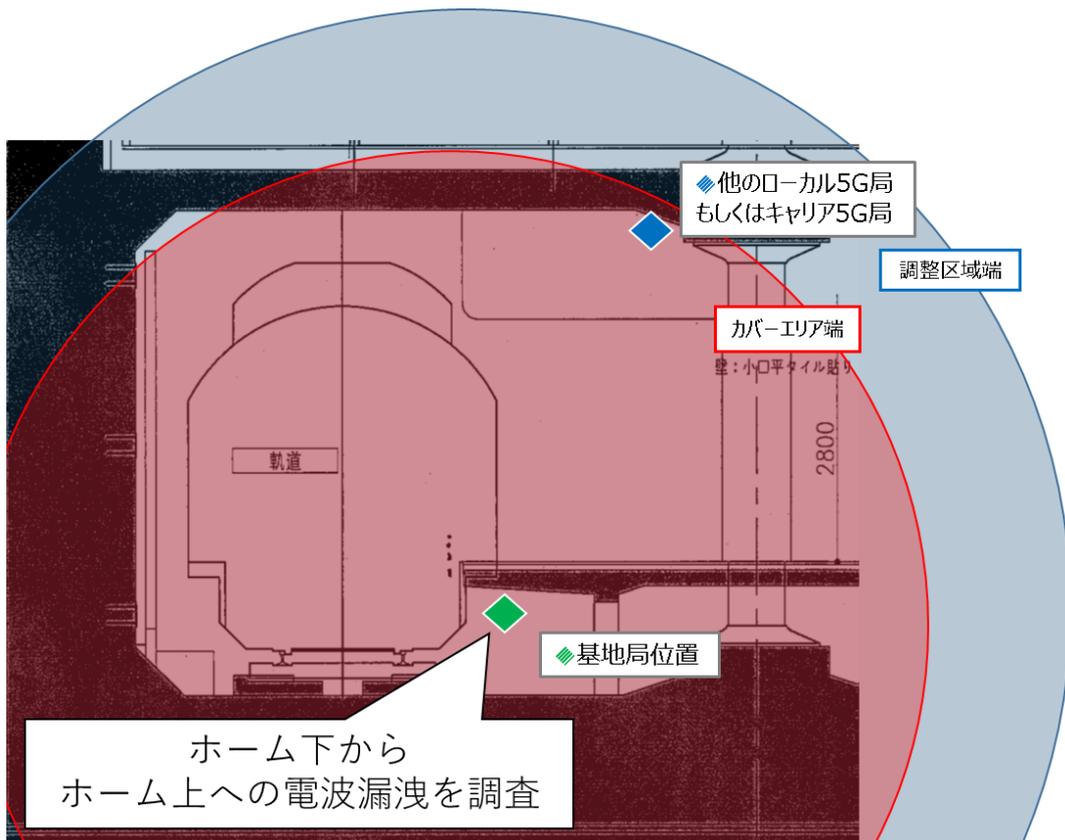


図 3.3.2.1-2 立体的な干渉調整イメージ

(2) 実証目標

はじめに、3.3.2 章においては柔軟なローカル 5G システムの設計・構築に資する検討として、仕様書要件⁵で規定されているエリア算出法に含まれるいくつかのパラメータ（表 3.3.2.1-1）を対象とし、その値を精緻化することが求められる。

本検討において得られる精緻化したパラメータ値により、ローカル 5G 運用エリアに合わせてエリア算出法を適正化する等の制度改正につながることを目標としている。また、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 の利活用に生かされることを想定している。

今回の実証環境においては、4.7GHz 帯の屋内局を活用するため精緻化の対象パラメータは表 3.3.2.1-1 から“R”とする。なお、“R”は建物内に基地局を配置する際に建物侵入損失の値に応じて修正するパラメータである。また、本実証環境においては(1)に記載している通り、ホーム下側への置局になる為、建物侵入損 R をホームの遮へいと置き換えた場合、地下ホーム以外で同様な環境を構築する際のモデルケースを示すにあたって適切なパラメータであると考ええる。

表.3.3.2.1-1 精緻化の対象パラメータと精緻化の方向性、実証環境の要件

利用する周波数帯	精緻化の対象パラメータ	精緻化の方向性	実施環境の要件
4.7GHz 帯	K ⁹	斜面や植生、水面の影響の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋外である ● 基地局と測定点の距離が 100m 以上確保できる ● 斜面や植生、水面等の地形情報データにより算入し難い地形の影響が存在する
	S ¹⁰	選択基準の詳細化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋外である ● 基地局と測定点の距離が 100m 以上確保できる
	R ¹¹	壁面の材質・厚さ別の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋内である
28GHz 帯	hr ¹²	選択基準の明確化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋外である ● 基地局が見通せない測定点を確保できる
	R ¹³	壁面の材質・厚さ別の定量化	<ul style="list-style-type: none"> ● 基地局設置場所が屋内である

⁵ 令和 3 年課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証（令和 3 年 6 月）P34 表 2 より引用

3.3.2.2 実証仮説

今回精緻化の対象とするパラメータ“*R*”については、4.7GHz帯のローカル5G技術的条件等を検討した情報通信審議会報告書⁶において、建物侵入損として詳しく記載されている(表3.3.2.2-1参照)。建物侵入損は、建物の外壁の材質によって想定される値が変化することが示されており、一般的な建物外壁(Traditional)では、50%の期待値において*R*=16.2dBとなっている。また、4.7GHz帯のローカル5G審査基準においては、*R*=16.2dBが規定値として定められてもいる。

本実証においては、ホーム下側にローカル5G局を置局するため、同じホーム内において、他のローカル5G局もしくはキャリア5G局が運用されるケースを想定し、ホームの遮へい損失を考慮した立体的なカバーエリア及び調整対象区域の作成も併せて行う為、ホームにおける遮へい損失も同様に建物侵入損と見込んで検討を進めることとする。今回、技術実証を行う場所は鉄道駅の地下ホームであり、ホームの材質はコンクリートと想定されるため、“*R*”値は、一般的なコンクリート壁面と想定し、Traditionalにおける期待値5%(=4.2dB)～期待値50%(=16.2dB)の間にあるものと仮定する。

表 3.3.2.2-1 4.7GHz帯における建物侵入損

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

なお、エリア算出法では、表3.3.2.2-2に示すように、送受信間距離*dxy*が40m以下の場合には、計算対象地域の環境に応じて、建物侵入損に対して考慮する補正值“*R*”の選択が必要である。本実証環境においては、ホームはコンクリートで構築されているものと仮定しており、*R*値は一般的な建物侵入損失の期待値50%である16.2dBとする。

表 3.3.2.2-2 電波関係審査基準の電波伝搬式における補正項選択肢(*dxy*が40m以下の場合)

補正項	定義	選択肢
R	建物侵入損に対して考慮する補正項	16.2[dB]
		実際の建物侵入損が明確な場合は明示の上、建物に応じた値を適用する。 <u>本実証環境においては16.2[dB]とする。</u>

上記仮説に基づき、パラメータ“*R*”の値を修正したカバーエリア及び調整対象区域を図

⁶ 情報通信審議会情報通信技術分科会新世代モバイル通信システム委員会報告(令和2年7月14日)P123表4.2.1.2-1より引用

3.3.2.2-1 に実線で示す。本実証に用いる無線機器はオムニパターンのアンテナを用いるため、水平/垂直面共に全ての方位で一律のアンテナ利得で補正をかける関係上、エリア図はカバーエリア、調整区域共に真円となる。なお、それぞれにエリア端までの距離は基地局アンテナからカバーエリアで 159m、調整区域で 241m となる。そのため、図 3.3.2.2-1(a)に示すように地下の壁面より先は土壌となり、それ以上の電波漏洩はないと仮定すると、閾値 > 壁面までの距離となることから、それぞれのエリア端は内壁までと推定する。

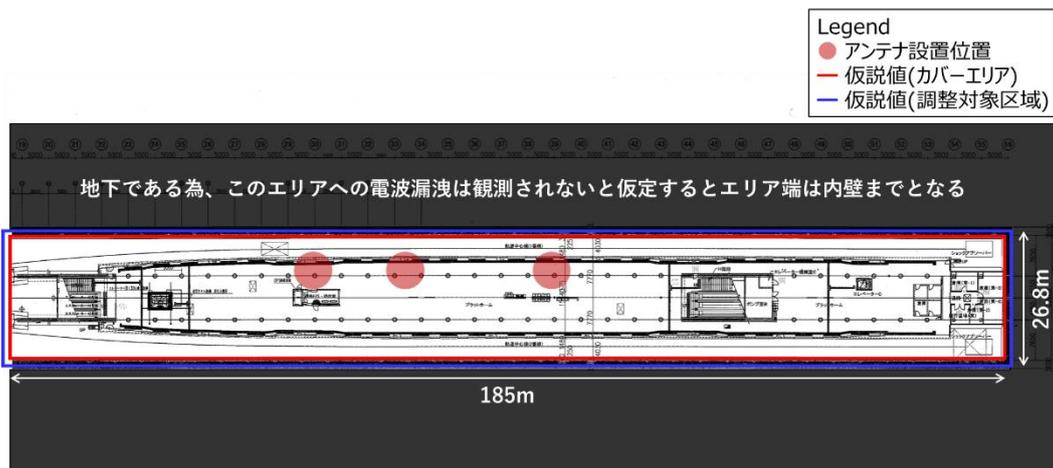


図 3.3.2.2-1(a) 仮説パラメータ R (=16.2dB) を用いて算出したカバーエリアおよび調整対象区域 (水平面)

つぎに、立体的な垂直面におけるエリア図作成手法として、図 3.3.2.2-1(b)に示す通り基地局アンテナが設置されるホーム下から、上階への損失として考慮すべき壁面(フロア)を、ホームと地下 2 階フロア、地下 1 階フロアとする。なお、それぞれの壁面(フロア)の損失は仮説値である 16.2dB をそれぞれ考慮する。上記考えに基づく地下 2 階におけるエリア算出では、ホーム (=16.2dB) + 地下 2 階フロア (=16.2dB) = 32.4dB の損失を R 値として見込むこととなり、基地局アンテナからのカバーエリア端は 63m、調整区域端は 88m となる。また、地下 1 階におけるエリア算出では、ホーム (=16.2dB) + 地下 2 階フロア (=16.2dB) + 地下 1 階フロア (16.2dB) = 48.6dB の損失を R 値として見込むこととなり、基地局アンテナからのカバーエリア端は 12m、調整対象区域は 25m となる。その場合、基地局からのカバーエリア端までの距離は地下 1 階フロア高よりも小さい値となるため、カバーエリア端は地下 1 階フロア高までとなる。また、基地局からの調整区域端までの距離は地下 1 階フロア高よりも大きい値となるため、地下 1 階のフロア高を超えたエリア図となる。

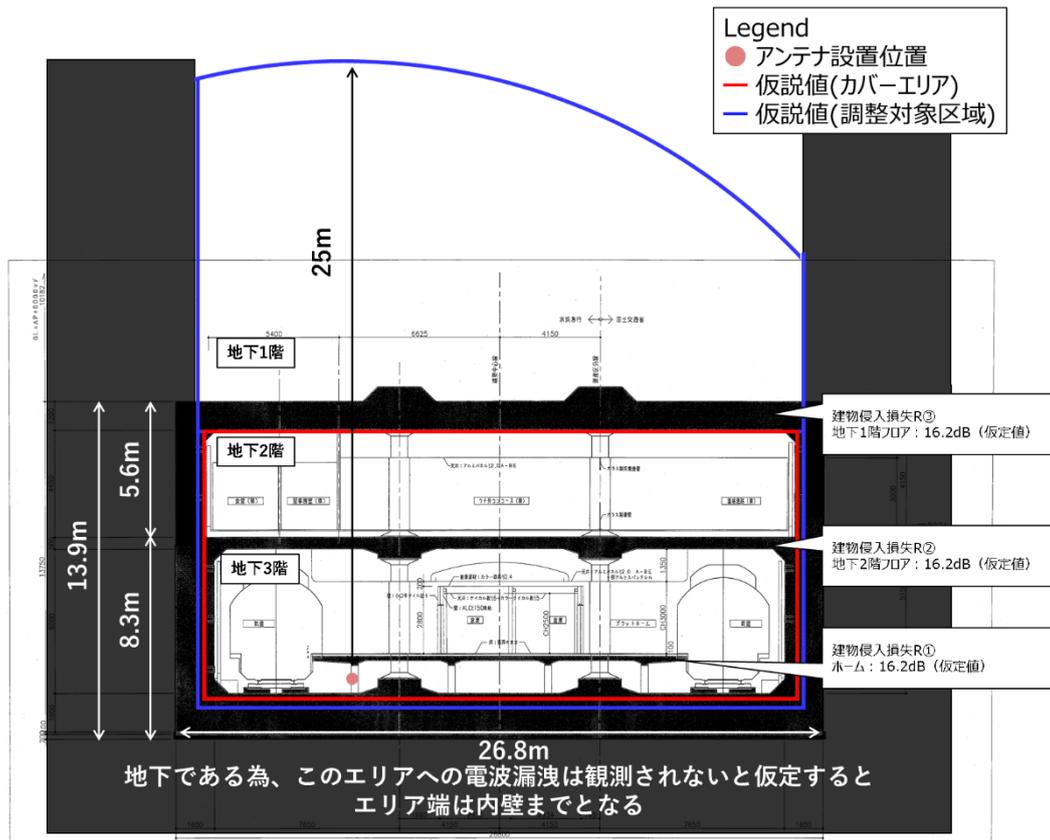


図 3.3.2.2-1(b) 仮説パラメータ R (=16.2dB) を用いて算出した
カバーエリアおよび調整対象区域 (1 アンテナあたりの垂直面)

3.3.2.3 評価・検証項目

精緻化の対象パラメータ“ R ”について、仮設と実測結果から得られる知見の両方を用いて評価・検証を行い、実証環境における適切な R 値を導く。

また、この評価・検証において、実証環境におけるローカル 5G の電波伝搬モデルの精緻化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。

3.3.2.4 評価・検証方法

(1) 測定方法

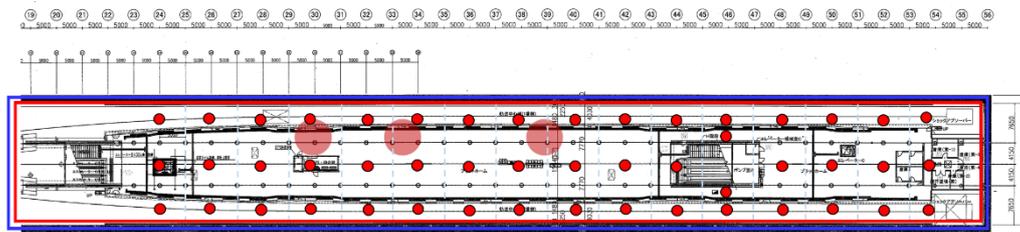
測定については、以下の考え方で実施する。測定機器に関しては技術実証全体を通して同じであり 3.2 章にて記載している。

1) 測定エリアの考え方

エリア算出法と比較を行うための下り受信電力値の実測は、設置した 3 つのアンテナ毎の $R=16.2\text{dB}$ という仮説に基づくカバーエリアおよび調整対象区域において実施する。各エリアは置局点に対し全方位で作図する必要があるため、精緻化後のエリア算出式の評価としては、ある一方向だけではなく、できるだけ全方位での実測を実施が望ましい。

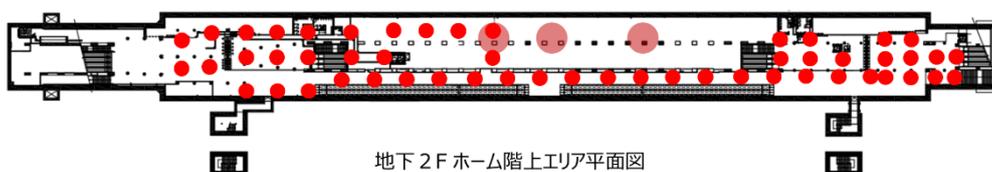
そのため、図 3.3.2.4-1 の実測エリア内において置局点となるエリアおよび、階上のエリアにおいて、比較可能な測定点を選出して測定を実施し、地下駅及び階上の測定点で比較が可能となる様にする（図中赤●）。なお、観測された下り受信電力値が、エリア算出法により導出されるカバーエリア端、調整対象区域端の閾値と異なる場合はそれぞれの閾値が観測される範囲まで測定エリアを広げることとする。

ただし、建物の構造や障害物の存在等により立ち入りが難しい場所については測定地点をずらすなどで対応する。



地下3F ホームエリア平面図

● アンテナ



地下2F ホーム階上エリア平面図

図 3.3.2.4-1(a) エリア算出法に基づく測定地点

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 SS-RSRP (Synchronization Signal-Reference Signal Received Power) 及び SS-RSRQ (Synchronization Signal-Reference Signal Received Quality) について実測する。

加えて、R 値に影響を与える実証環境のデータとして下記に示す情報を記録する。

- 壁面の材質/厚さ/面積率
- 対象の壁面と送信/受信点の位置関係

3) 測定手法と実測模様

各種データは、上記の考え方にに基づき選定した測定地点に測定員が赴き、表 3.2-1 に示す測定器及び表 3.2-2 に示す設定値を用いて実測する。また、実証環境における電波伝搬環境をより詳細に分析するため、各測定地点においては測定員の目視により見通し環境もしくは見通し外環境であるかを併せて記録する。ただし、建物の構造や障害物の存在等により立ち入りが難しい場所については測定地点をずらすなどで対応する。

SS-RSRP 及び SS-RSRQ は、エリアテスタを用いて、1000 サンプル/地点のログ取得を実施する。

なお、受信電力の測定においては、定在波の影響を避けるため、1つの測定点において、 10λ (λ は波長) の範囲で測定位置を動かしながら測定を実施する。

測定においては、歩行しながらの測定を効率的に実施するため、図 3.2-6 に示すような測定補助用の治具を作成して測定を実施する

(2) 評価・検証方法

電波伝搬モデルの精緻化については 3.3.1 章、3.3.2 章で実測した各種データを用いて下記に記載する流れで評価・検証を進めていくこととする。

1) 仮説 R 値に基づくカバーエリアおよび調整対象区域図の作成

実証環境内に設置する 1 つの基地局について、仮説 R 値に基づくカバーエリアおよび調整対象区域の図を作成する。詳細は 3.3.2.2 章の実証仮説を参照されたい。

2) 実測値から推定されるカバーエリア及び調整対象区域図の作成

1) で作成した仮説に基づくエリア図との比較を行う為、実測した各種データを図面上にプロットし、カバーエリア及び、調整対象区域の閾値から実測値による推定エリア図を作成する。

3) 仮説に基づくエリア算出法と、実測値から推定されるエリア図との比較

仮説 R 値に基づくエリア図の妥当性を評価するため、①、②で作図したエリア図の比較を行う。また、カバーエリア及び調整対象区域のエリア端が異なる箇所においてはその差分値を取り纏める。

4) 実測値から建物侵入損失を算出

R 値の精緻化のもう 1 つのアプローチとして、地下駅及び、階上エリアで実測した下り受信電力値から建物侵入損失を算出する。なお、建物侵入損失とは、厳密には、建物近傍路上における受信レベルと建物中央部における受信レベルとの差を意味するが⁷、今回はエリア設計上ホーム上側への漏洩電力を対象としているため、ホーム下側の受信レベルとホーム上側の受信レベルの差分を建物侵入損として検証する（図 3.3.2.4-3）。

$R = \text{地下駅階上エリア参照点の電界強度} - \text{地下駅ホームエリア測定点の電界強度}$

なお、安全上、ホーム下側での測定は困難であるため、アンテナ設置位置がホーム直下であることを考慮し、アンテナ設置位置の直上の測定地点を対象とし、測定地点方向における基地局からの空中線電力と観測される受信電力レベルの差から、ホームの遮へい損失を求めることとした。

また、今回の実証環境のみに有効な結論ではなく、他の環境でも有効な汎用的/一般的な成果を得るため、ホームの材質や、それに伴う面積率などを記録し、汎用的に利用可能な R 値の精緻化を実施する。

⁷ 進士「無線通信の電波伝搬」(P.241、1993 年)

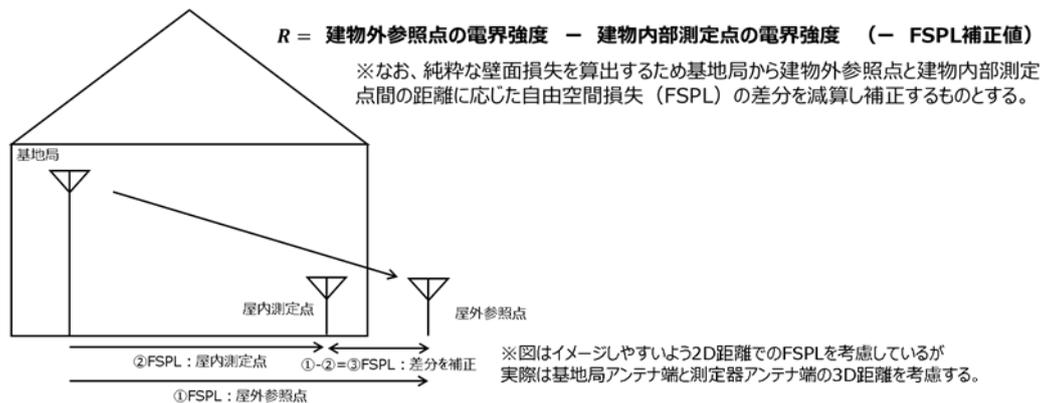


図 3.3.2.4-3 実測値からの R 値算出手法

① 対象パラメータの精緻化

仮説に基づき設定した対象パラメータ “R” の値について、③の結果から得られる①、②エリア図の差分、④から得られる建物侵入損失の値を活用し、対象パラメータ “R” の値について精緻化を行う。

精緻化を行った対象パラメータ “R” を用いて、再度カバーエリア及び調整対象区域図を作成し、図 3.3.2.4-2 に示す実測値から推定されるエリア図との比較を行うことでその妥当性を評価する。

5) 精緻化パラメータの妥当性評価

仮説に基づき設定した対象パラメータ “R” の値について、3)の結果から得られる 1)、2) エリア図の差分、4)から得られる建物侵入損失の値、5)から得られる建物占有面積率の値を活用し、対象パラメータ “R” の値について精緻化を行う。

精緻化を行った対象パラメータ “R” を用いて、再度カバーエリア及び調整対象区域図を作成し、実測値から推定されるエリア図との比較を行うことでその妥当性を評価する。

3.3.2.5 実証結果及び考察

実証環境における測定結果の取りまとめは、3.3.1.4 (1) で取り纏めており、本章においてもそのデータを活用する。

(1) 仮説 R 値に基づくカバーエリア及び調整対象区域図

図 3.3.2.2-1 にて、実証環境内に設置するそれぞれの基地局について、仮説 R 値に基づくカバーエリアおよび調整対象区域の図を示す。詳細は 3.3.2.2 章の実証仮説を参照されたい。

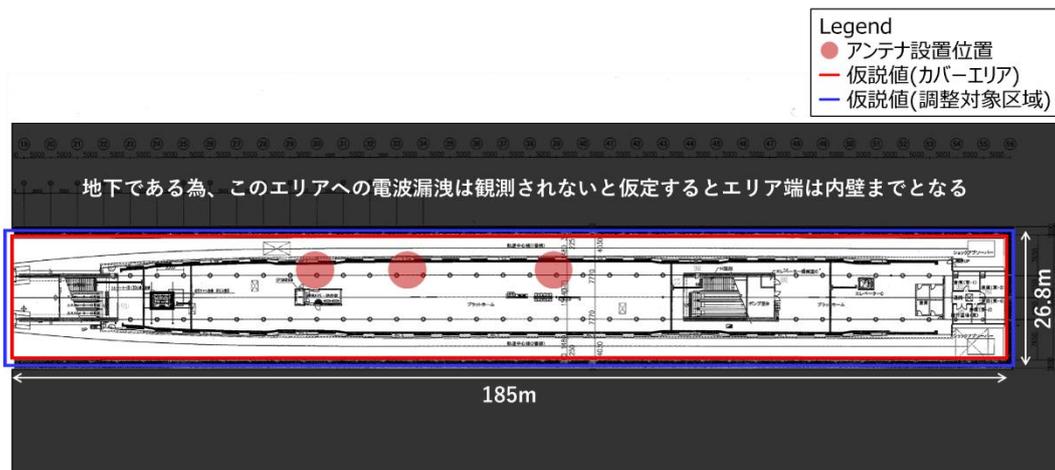


図 3.3.2.2-1(a) 仮説パラメータ R (=16.2dB) を用いて算出したカバーエリアおよび調整対象区域 (水平面) (再掲)

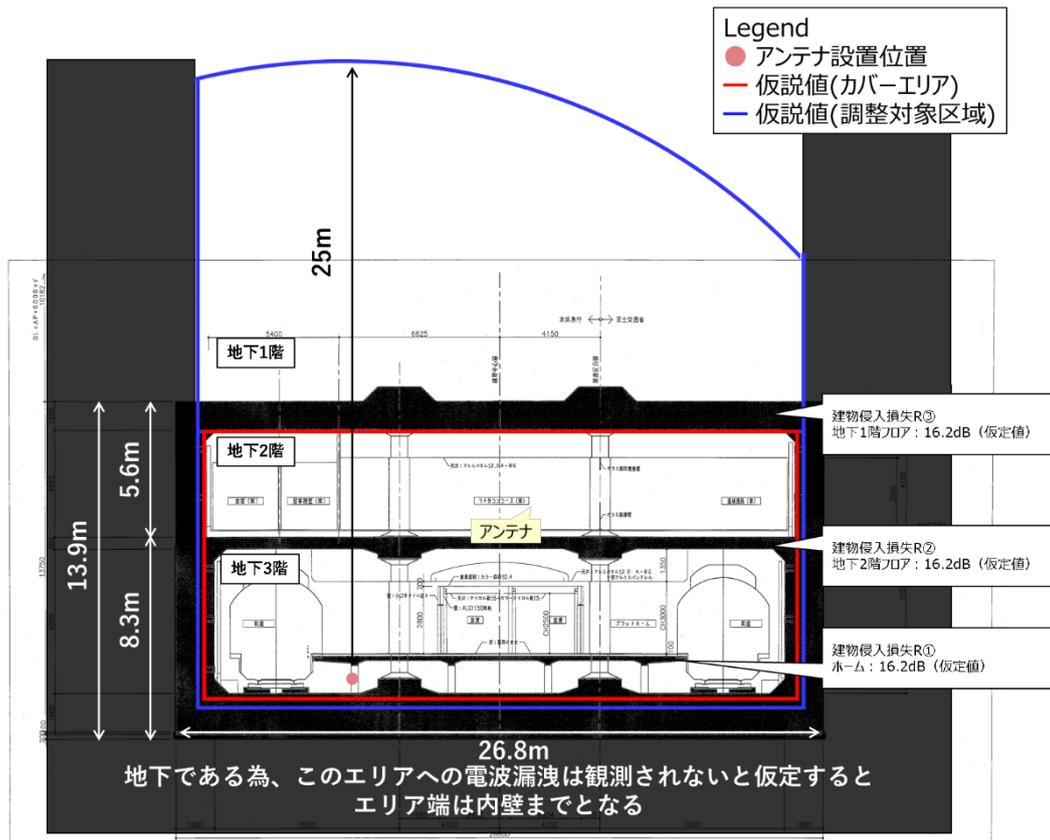


図 3.3.2.2-1(b) 仮説パラメータ R (=16.2dB) を用いて算出した
カバーエリアおよび調整対象区域 (1 アンテナあたりの垂直面) (再掲)

(2) 実測値から推定されるカバーエリア及び調整対象区域図

図 3.3.2.5-2(a)~(b)に実測値から推定されるカバーエリア及び調整対象区域図を示す。併せて、図 3.3.2.5-3(a)~(c)には、測定時の周辺環境を示す。なお、エリア図の推定においては、定点による測定結果のみでは詳細な推定が困難であるため、実証環境周辺において立ち入り可能な場所を面的に測定した結果も参考にしつつ評価を実施している。

図中、赤線は 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である。一方、青線は、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端である。なお、本実証に用いる基地局装置の下り受信レベル (SS-RSRP) の測定帯域は 30kHz であるため、上述したエリア端閾値を 100MHz から、30kHz へ帯域換算した以下の値を用いている。

カバーエリア端レベル (SS-RSRP 帯域換算) : -119.8dBm

調整区域端レベル (SS-RSRP 帯域換算) : -126.2dBm

結果からは、地下駅ホームエリアにおいては、アンテナを設置した 1 番線側に車両が配置される場合は、アンテナ設置位置から離れた測定点 ID25 以降において、調整対象区域が発生する事が判明した。これは、ホーム下にオムニ指向性アンテナを設置しているが、直前に車両がいる事による遮へい損失が発生したと考えられる。

一方で、地下駅階上エリアにおいては、地下駅からの出入り口となる階段の方向に沿って、強い漏洩電力が観測された。こちらは地下駅エリアでアンテナを設置しない 2 番線側に車両が配置された場合において強く観測されており、ホーム下にアンテナを設置した場合における車両位置によって、遮へい損失の差分が出たものと考えられる。

また、図 3.3.2.5-2(b)において、階上においてもアンテナ設置位置の直上でカバーエリア閾値以上となる電力値を観測している。これは、図 3.3.2.5-2(b)に黄色塗りでマスキングした箇所においてエアダクト及び階段等の開口部が存在しており、天井面の遮へい損失に差分が出たものと考えられる。

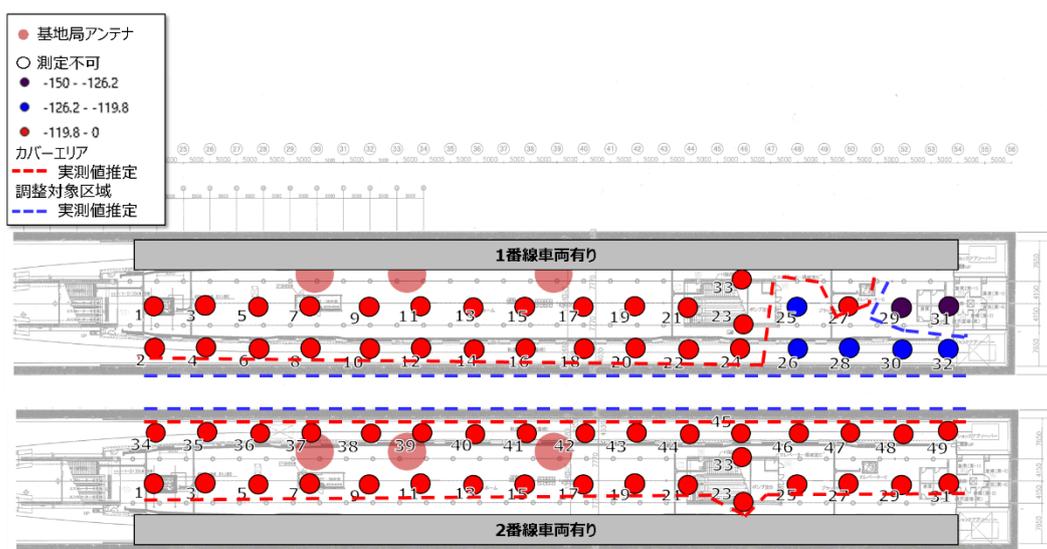


図 3.3.2.5-2(a) 実測値から推定した
カバーエリアおよび調整対象区域：地下駅ホームエリア

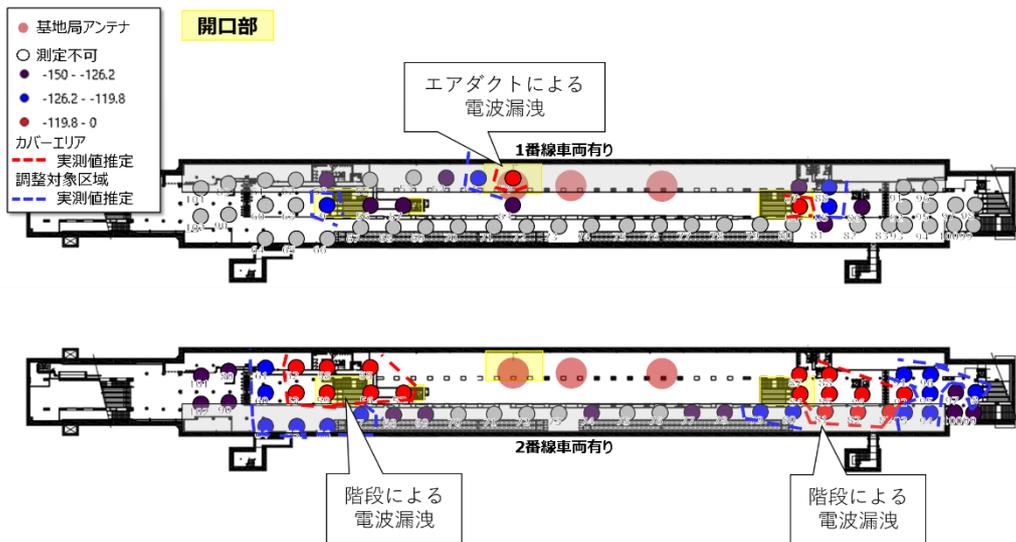


図 3.3.2.5-2(b) 実測値から推定したカバーエリアおよび調整対象区域：地下駅階上エリア



図 3.3.2.5-3(a) 地下駅における階層構造



図 3.3.2.5-3(b) 地下駅から階上に向かう階段の方向



図 3. 3. 2. 5-3(c) 地下駅から階上に向かうエレベータの状況

(3) 仮説に基づくエリア図と実測値から推定されるエリア図との比較

3.3.2.5 章 (1) にて仮説値から算出したエリア図と、3.3.2.5 章 (2) にて実測値から推定したエリア図の比較を行い、仮説値の妥当性を評価する。

図 3.3.2.5-4(a)~(b)に仮説値におけるエリア図と実測値から推定したエリア図を示す。

結果から、地下駅ホームエリアにおいては、ホーム床面による遮へい損失があったとしても、ホーム下に設置したアンテナ側に車両が配置されていない場合において、地下駅ホームエリア全体にカバーエリアが広がっている事が分かる。ホーム下に設置したアンテナ側に車両が配置される場合においては、駅ホームエリアのアンテナ設置点から離れた階段裏のエリアでカバーエリア端が見られ、調整対象区域となるエリアが見受けられる。これは、アンテナ開口部側に車両が配置される事により、車両による遮へい損失が増えたことが要因と考えられる。

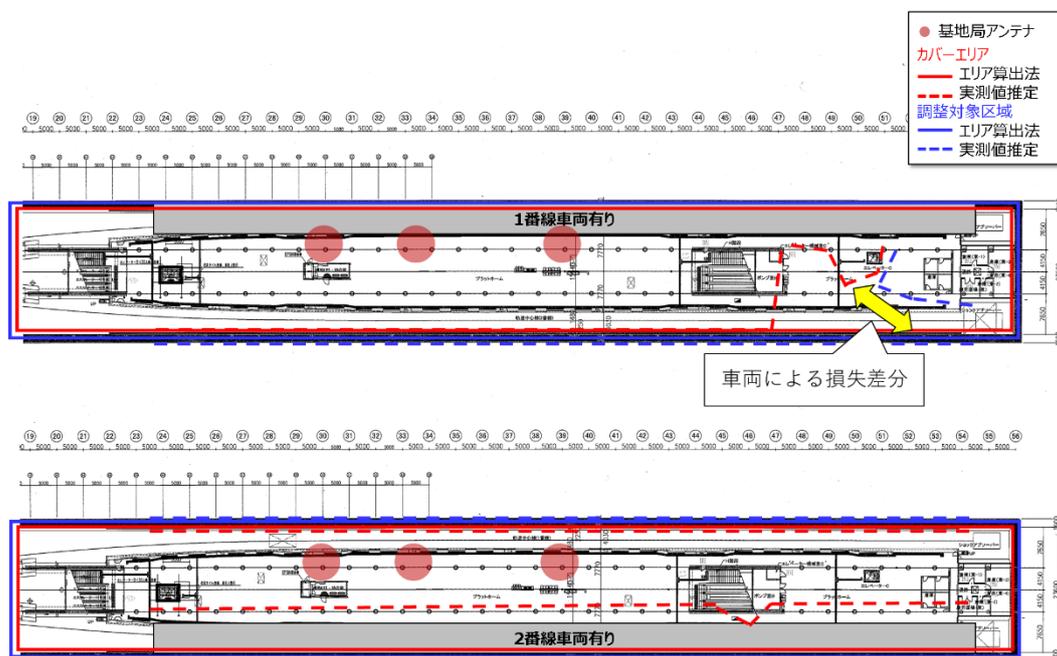


図 3.3.2.5-4(a) 仮説値エリア図と実測値推定エリア図との比較 (水平面)

ホーム階上エリアにおいては、垂直方向における測定地点数が少ないことから、電波漏洩観点でワーストケースとなる、アンテナ直上において、エリア算出法との比較を行う。図 3.3.2.5-3(b)に示す、ホーム上の測定点 7 においては仮説値としてホームの損失 (=16.2dB) を見込んだエリア算出法の受信電力値 (= -81dBm) と、実測値 (= -83dBm) の差分としては 2dB 程度となり、ホームによる損失 R 値は、概ね仮説通りの値となっていることが確認できる。一方で、階上の地下 2 階におけるアンテナ直上の測定点 55 においては仮説値としてホーム+地下 2 階フロアの損失 (=32.4dB) を見込んだエリア算出法受信電力値 (= -99dBm) と、実測値 (= -113dBm) の差分としては 14dB と大きく、地下 2 階フロアの損失 R 値は、仮説値よりも 14dB 程度大きい値と考えられる。

これらの結果から、地下駅のホーム下に設置されたアンテナに対して、車両の有無に依らずに設計を行う為には、ホーム上のエリアと地下駅階上エリアの両面にてそれぞれの損失 R 値を考慮する必要があると考えられる。その為、次節に示す実測値を用いた建物進入損失の

導出においては、構造が異なるホーム床面とホーム天井面のそれぞれにおいて、その値を算出する。

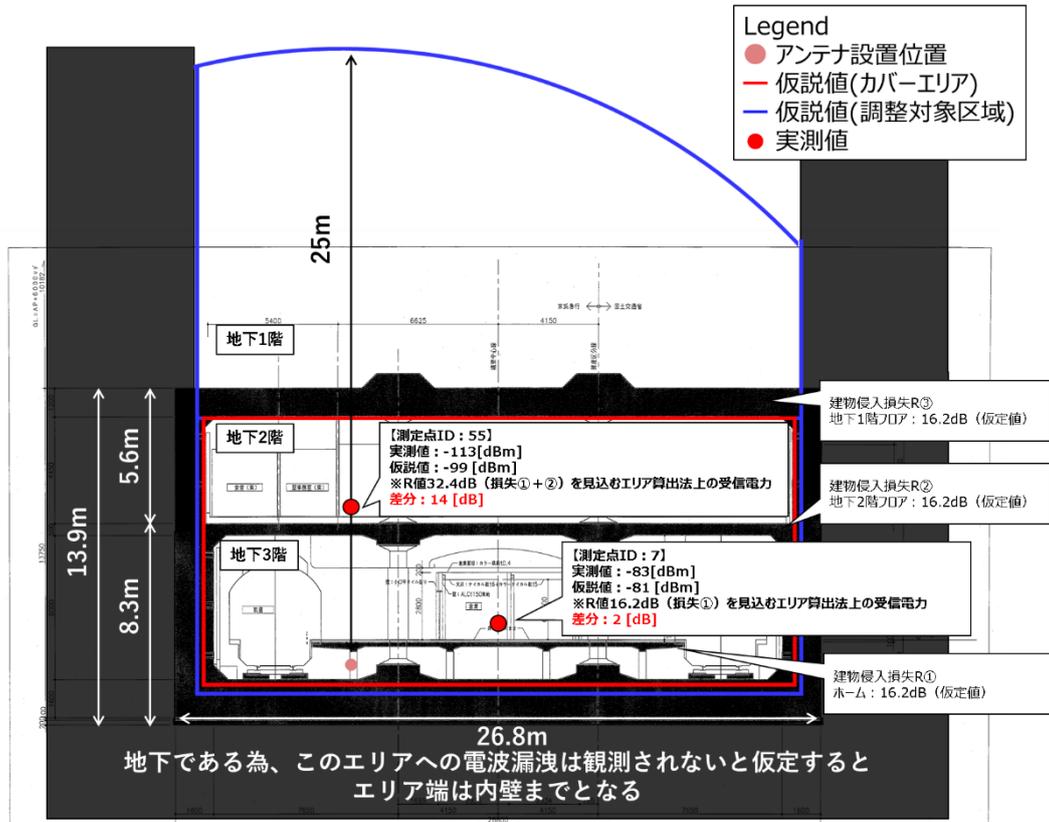


図 3. 3. 2. 5-4 (b) 仮説値エリア図と実測値との比較 (垂直面)

(4) 実測値を用いた建物侵入損失の算出

R 値の精緻化のもう 1 つのアプローチとして、建物内/外で実測した下り受信電力値から建物侵入損失を算出する。なお、建物侵入損失とは、厳密には、建物近傍路上における受信レベルと建物中央部における受信レベルとの差を意味するが、今回はエリア設計上建物外への漏洩電力を対象としているため、それぞれの基地局アンテナから、直線上となる建物内壁と建物外壁の電界強度差分を建物侵入損として検証する（図 3.3.2.4-3）。

$R = \text{建物外参照点の電界強度} - \text{建物内部測定点の電界強度} \quad (- \text{FSPL補正值})$

また、純粋な壁面損失を算出するため、基地局から建物外参照点と建物内部測定点間の距離に応じた自由空間損失(FSPL)の差分を減算し補正するものとする。

なお、今回の実証環境のみに有効な結論ではなく、他の環境でも有効な汎用的/一般的な成果を得るため、壁面の材質や、それに伴う面積率などを記録し、汎用的に利用可能な R 値の精緻化を実施する。

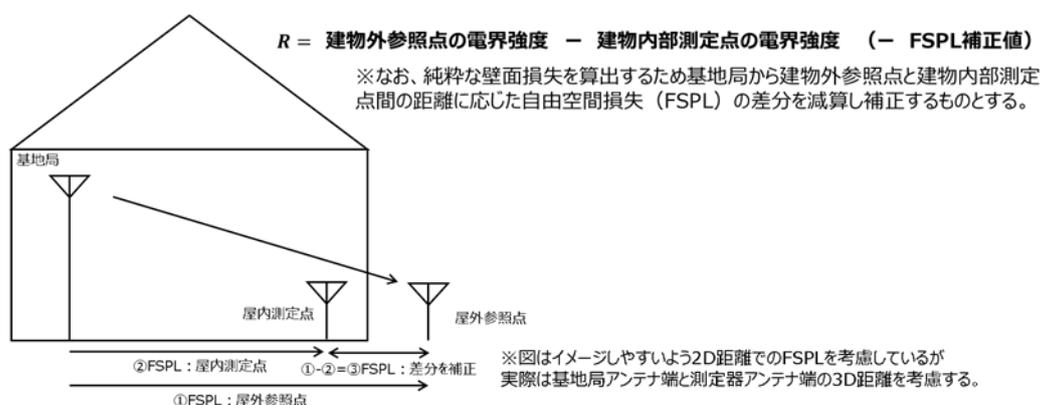


図 3.3.2.4-3 実測値からの R 値算出手法 (再掲)

図 3.3.2.5-5 及び表 3.3.2.5-1 に、実証環境における壁面損失算出対象の測定地点及び算出結果を示す。図中の黒矢印で結ばれる屋内測定点と屋外参照点において、壁面損失の導出を行う。なお、屋内測定点と屋外参照点の比較においては前述した手法により自由空間損失を補正しているが、その他損失は周辺環境要因にて異なり、建物外壁から遠方の屋外参照点はその他損失の影響が支配的になる。そのため、自由空間損失以外が含まれると判断した屋外参照点は精緻化対象から外している。

なお、図 3.3.2.5-5(a)に示す壁面 1 (ホーム床面) については、屋内測定点に相当するホーム下での測定が困難であり、実測できていない。そのため、基地局から屋外参照点までの距離から自由空間損失を算出し、ホーム上の実測値から算出される伝搬損失と比較を行うことで、ホーム床面における損失 R 値を算出することとした。

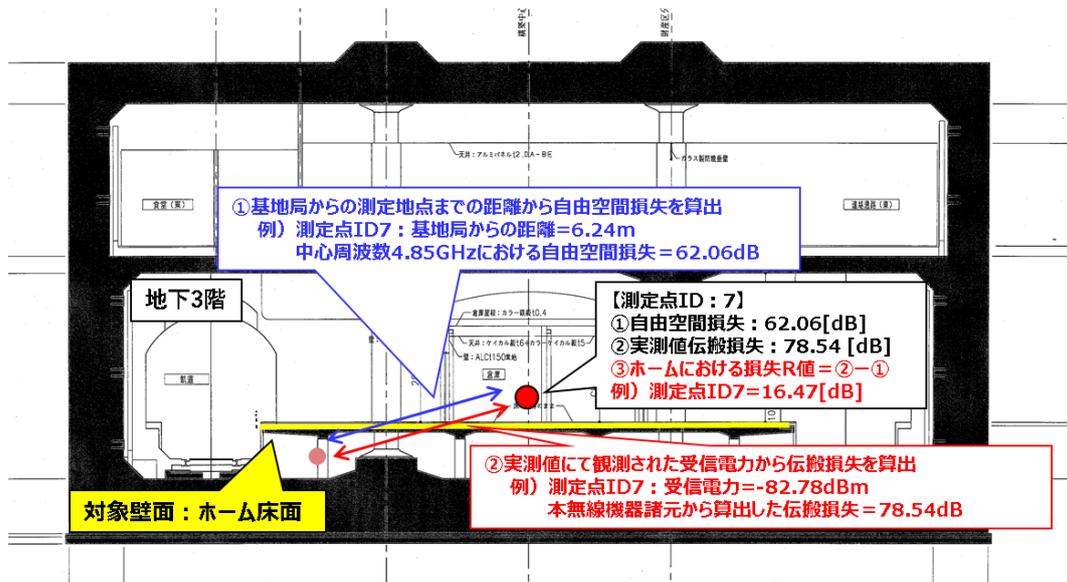


図 3. 3. 2. 5-5(a) 壁面 1 (ホーム床面) 精緻化対象測定地点

表 3. 3. 2. 5-1(a) 壁面 1 (ホーム床面) 精緻化結果

測定点 ID	基地局からの 3D 距離 (m)	自由空間損失 (dB)	実測値伝搬損失 (dB)	R 値 (dB)
1	30.05	75.71	89.26	13.54
3	20.77	72.51	80.02	7.51
5	11.43	67.32	74.89	7.57
7	6.24	62.06	78.54	16.47
9	8.87	65.11	74.71	9.60
11	6.92	62.96	73.85	10.89
13	14.11	69.14	78.13	8.98
15	7.50	63.66	75.78	12.12
17	8.18	64.42	81.64	17.22
19	16.79	70.66	74.64	3.99
21	26.06	74.48	82.57	8.10
23	36.74	77.46	93.48	16.02
25	46.03	79.42	94.15	14.74
27	56.03	81.12	93.41	12.29
29	66.02	82.55	104.24	21.69
31	74.72	83.63	107.70	24.07
33	6.82	62.83	87.86	25.03

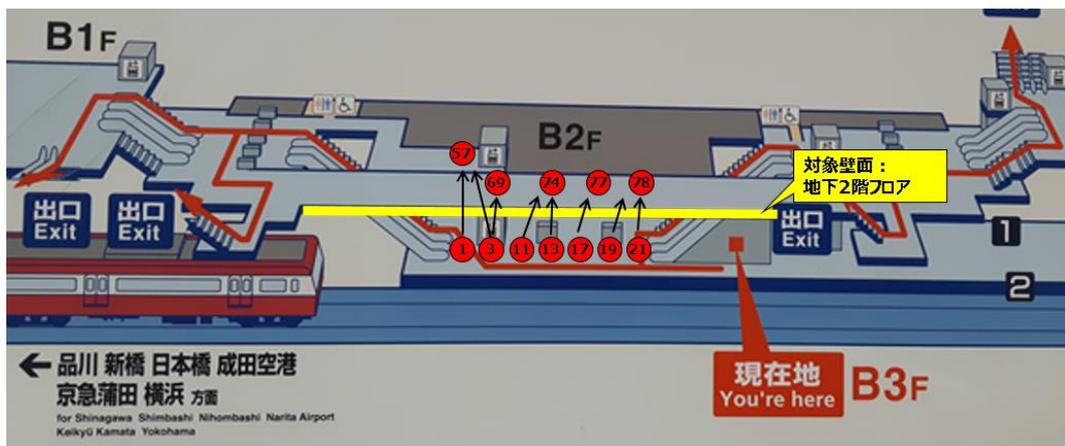


図 3. 3. 2. 5-5(b) 壁面 2 (ホーム天井面) 精緻化対象測定地点

表 3.3.2.5-1(b) 壁面 2 (ホーム天井面) 精緻化結果

比較対象		実測平均値 SS-RSRP (dBm)		自由空間 損失差分 (dB)	電界強度差分 (dB)	R 値 (dB)
屋内 ID	屋外 ID	屋内測定点	屋外参照点			
1	57	-94.59	-114.85	1.64	20.26	18.62
3	57	-84.27	-114.85	1.57	30.57	29.00
3	69	-84.27	-128.24	0.50	43.97	43.47
11	74	-78.16	-136.40	4.76	58.24	53.48
13	74	-82.84	-136.40	1.43	53.56	52.14
17	77	-86.29	-132.67	3.90	46.38	42.48
19	78	-78.97	-130.86	0.26	51.89	51.63
21	78	-87.22	-130.86	3.56	43.64	40.08

表 3.3.2.5-2 に表 3.3.2.5-1 にて算出した R の精緻化値と対象壁面の材質/厚さ/面積率を示す。なお、精緻化値については壁面ごとに算出した R 値の平均値を記載している。図 3.3.2.5-6 にフロアごとの測定状況を示す。

結果からは、以下のことがわかる。

壁面 1 においては、仮説値よりも精緻化値が 3dB 程度小さい値となる。これは、本実証環境の様な閉空間では反射波が多く、マルチパスの影響により測定地点では強い受信電力が観測され、実測値における伝搬損失が小さく算出されている。そのため、比較対象として自由空間損失は基地局からの一つの直接パスでしかないと考えられる。

壁面 2 においては、仮説値よりも精緻化値が 25dB 程度大きい値となる。これは、仮説値で用いている R 値は窓ガラス等の開口部が存在する壁面における損失であり、今回の実証環境の様な地下鉄駅構内におけるフロアは開口部がほとんど存在せず、厚さも 5cm 程度と堅牢であるため、その環境差分が影響していると考えられる。

表 3.3.2.5-2 4.7GHz 帯における実証環境 R 値

周波数	建物	材質	厚さ	面積率	仮説値 R(dB)	精緻化値 R [dB]
4.7GHz	代表値					16.2
	壁面 1 コンクリートで構成された、地下鉄駅の ホーム床面	コンクリート	100mm	100%	16.2	13.5
	壁面 2 コンクリートで構成された、地下鉄駅の 天井面	コンクリート	500mm	100%	16.2	41.4

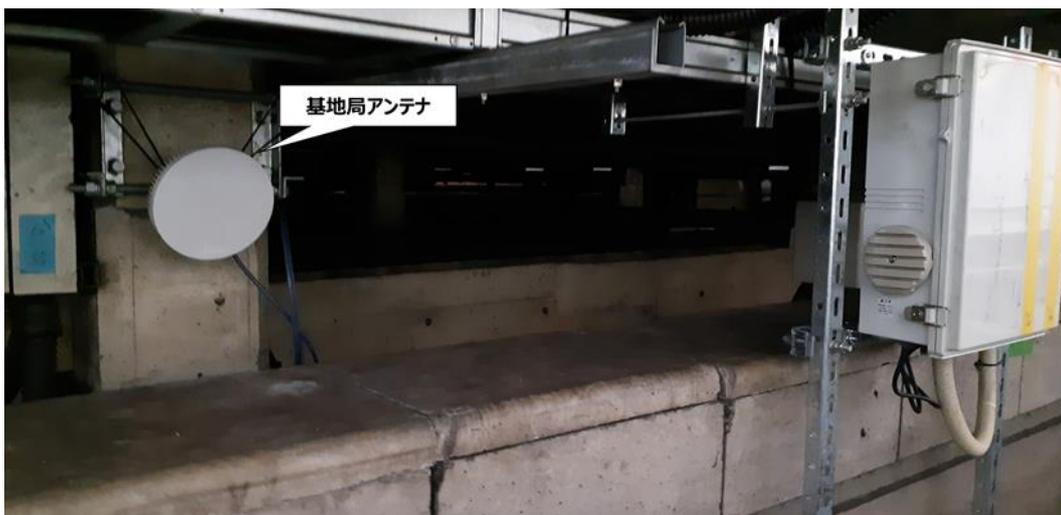


図 3.3.2.5-6(a) ホーム下 アンテナ設置位置の状況

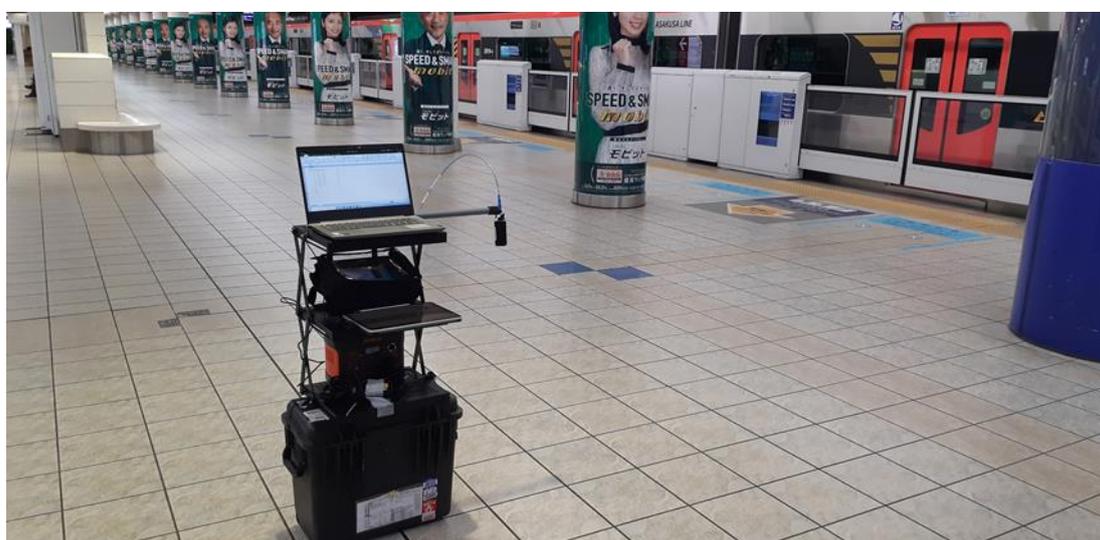


図 3.3.2.5-6(b) 壁面 1 : ホーム床面参照点の状況



図 3.3.2.5-6(c) 壁面 2 : ホーム階上の参照点の状況

(5) 精緻化パラメータの妥当性評価

3.3.2.5 章(4)及び、3.3.2.5 章(5)にて精緻化を行った対象パラメータ“R”を用いて、再度カバーエリア及び調整対象区域図を作成し、実測値から推定されるエリア図との比較を行うことでその妥当性を評価する。なお、今回精緻化対象としている、壁面はホーム床面及び地下2階フロアとなるため、垂直面におけるエリア図と実測値の比較を行い、その妥当性を評価する。

図 3.3.2.5-7 に精緻化後のパラメータを用いて算出したカバーエリア及び調整対象区域図を示す。図中破線は 3.3.2.2 章で示す仮説値 R (16.2dB) におけるエリア図であり、実線は壁面ごとに表 3.3.2.5-2 に示す精緻化値 R を考慮したエリア図である。垂直面におけるエリア図の作成手法については 3.3.2.2 章実証仮説を参照されたい。

結果から、精緻化値 R に基づくエリア図では、地下2階における損失 R 値が 41.4dB と仮説値よりも大きくなることで、地下1階フロアにおいても地下2階フロアよりも床面が厚くなることを考慮すると、同等に損失 R 値としては大きくなると考えられる。そのため、地下1階への電波漏洩は無いものとする、エリア図としてはカバーエリア及び調整対象区域が地下2階に収まる結果となった。

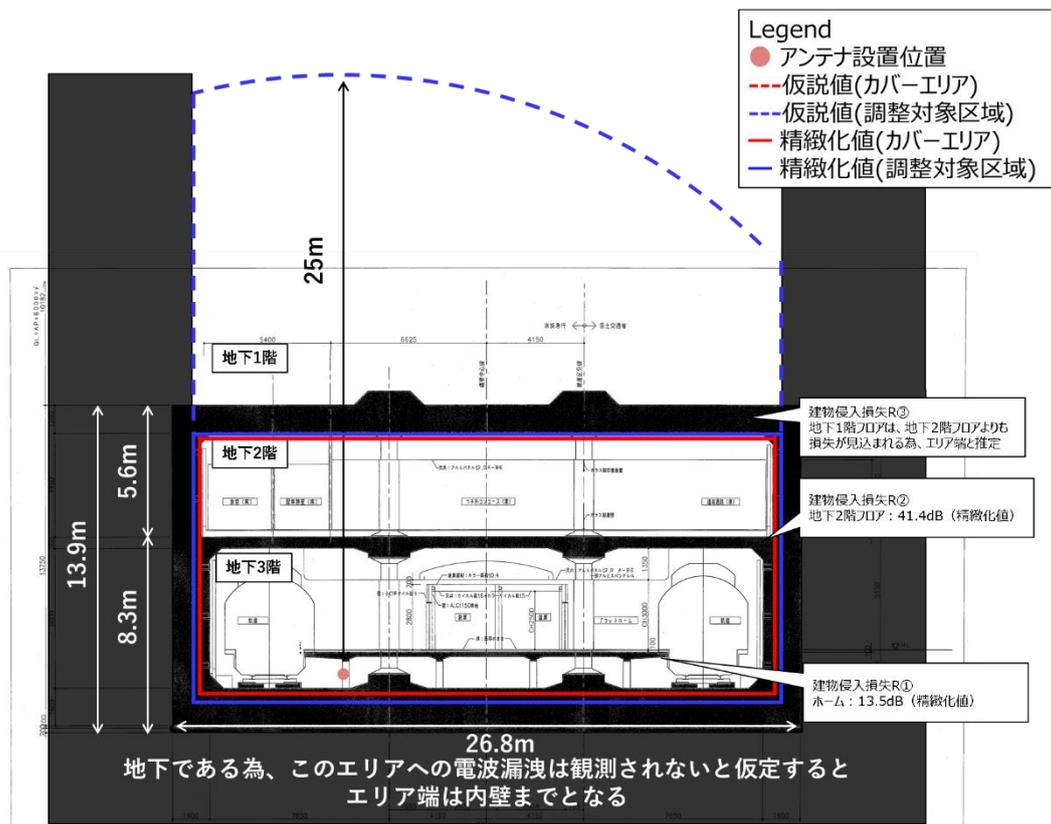


図 3.3.2.5-7(a) 精緻化パラメータを用いたカバーエリア及び調整対象区域図 (垂直面)

図 3.3.2.5-8 に精緻化後のパラメータを用いて算出したカバーエリア及び調整対象区域図と実測値から推定したカバーエリア及び調整対象区域図との比較結果を示す。

結果から、図 3.3.2.5-8 に示す、ホーム上の測定点 7 においては精緻化値であるホームの損失 (=13.5dB) を見込んだエリア算出法の受信電力値 (= -78dBm) と、実測値 (= -83dBm)

の差分としては 5dB 程度となり、階上の地下 2 階におけるアンテナ直上の測定点 55 においては精緻化値である地下 2 階フロアの損失 (=41.4dB) を見込んだエリア算出法受信電力値 (= -108dBm) と、実測値 (= -113dBm) の差分としては 5dB となる。これらの差分として、精緻化値の算出では複数の測定地点における損失差分の平均値を用いており、一部エアダクト等による開口部や車両配置等による反射影響などの特異的な環境差分が含まれていたためと考えられる。

これらの結果から、地下鉄駅における階層的なエリア図は、そのフロア毎の損失 R 値を見込むことで、概ね推定できることが確認できると考えられる。また、精緻化値から推定されるエリア図は地下 2 階で収まることから、地上への調整対象区域レベルでの電波漏洩はほぼないと考えられる。そのため、本実証環境の様な地下鉄にエリア構築を実施する場合は地上における干渉調整は不要であると想定されるが、同フロアもしくは階上において他の無線局が運用される場合は、間に存在する階層によってその調整可否が決まるものと考えられる。

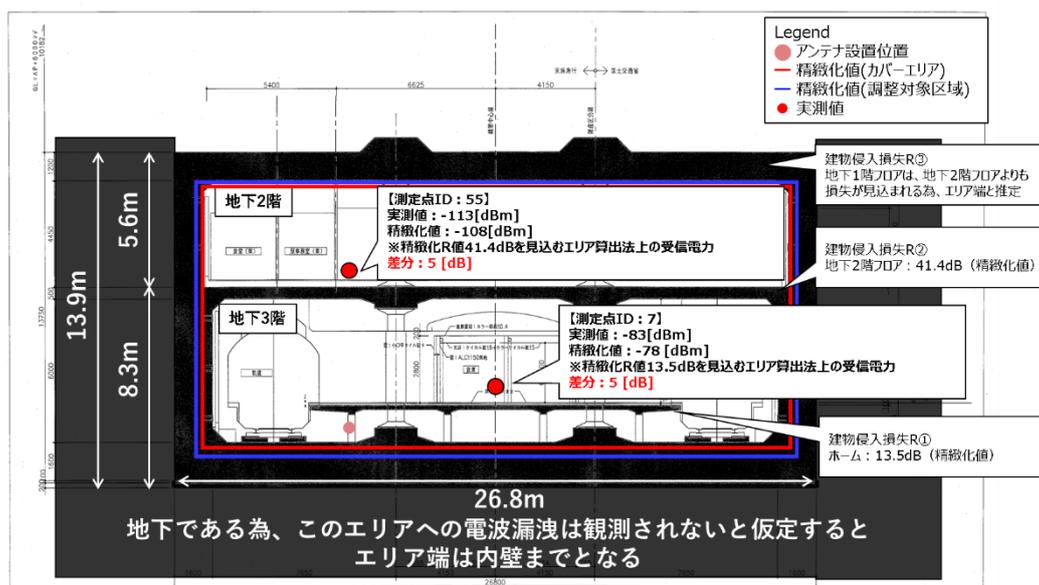


図 3.3.2.5-8 精緻化エリア図と実測値推定エリア図との比較 (垂直面)

(6) 技術的課題の解決方策

今回の実証では、地下駅環境に置局したローカル 5G 基地局 1 局に対し、ホーム下に 3 つのオムニ指向性のアンテナを張り出した環境を活用し、地下駅環境におけるエリア算出法パラメータ R 値の精緻化を実施した。その結果精緻化値から推定されるエリア図は地下 2 階で収まることから、地上への調整対象区域レベルでの電波漏洩はほぼないと考えられる。そのため、本実証環境の様な地下鉄にエリア構築を実施する場合は地上における干渉調整は不要であると想定されるが、同フロアもしくは階上において他の無線局が運用される場合は、間に存在する階層によってその調整可否が決まるものと考えられる。

これらの結果から、自己土地となる地下駅ホームエリア以外への電波漏洩の観点では、前述した通り、地下駅ホームエリアの開口部となるエアダクト、エレベータ、階段等が存在する箇所は精緻化値よりも強い傾向となる。その場合、他者土地にて他のローカル 5G システムが運用される場合は、互いに干渉調整が必要となる事から、サービスエリア内のカバレッジを十分にとりつつ、出来る限り調整対象区域を抑える置局設計が求められる。

本実証では、オムニ指向性のアンテナをホーム下に配置したが、階上に向かう開口部にて電波漏洩が強く出ているため、オムニ指向性アンテナを用いる場合は、できるだけ開口部から離れた場所での置局が望ましいと考えられる。

また、セクタ指向性のアンテナを用いて、天井面方向もしくは、他のローカル 5G システムが運用される方向は、バックローブとなるような置局設計も有効であると考えられる。

3.3.3 電波反射板によるエリア構築の柔軟化

「本テーマには取り組まない」

3.3.3.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

「本テーマには取り組まない」

(2) 実証目標

「本テーマには取り組まない」

3.3.3.2 実証仮説

「本テーマには取り組まない」

3.3.3.3 評価・検証項目

「本テーマには取り組まない」

3.3.3.4 評価・検証方法

「本テーマには取り組まない」

3.3.3.5 実証結果及び考察

「本テーマには取り組まない」

3.3.4 準同期 TDD の追加パターンの開発

「本テーマには取り組まない」

3.3.4.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

「本テーマには取り組まない」

(2) 実証目標

「本テーマには取り組まない」

3.3.4.2 実証仮説

「本テーマには取り組まない」

3.3.4.3 評価・検証項目

「本テーマには取り組まない」

3.3.4.4 評価・検証方法

「本テーマには取り組まない」

3.3.4.5 実証結果及び考察

「本テーマには取り組まない」

3.3.5 その他のテーマ

「本テーマには取り組まない」

3.3.5.1 実証の目的・目標

(1) 背景となる技術的課題と実証目的

「本テーマには取り組まない」

(2) 実証目標

「本テーマには取り組まない」

3.3.5.2 実証仮説

「本テーマには取り組まない」

3.3.5.3 評価・検証項目

「本テーマには取り組まない」

3.3.5.4 評価・検証方法

「本テーマには取り組まない」

3.3.5.5 実証結果及び考察

「本テーマには取り組まない」

3.3.6 技術実証における追加提案

「本テーマには取り組まない」

3.3.6.1 協力内容

「本テーマには取り組まない」

3.3.6.2 評価・検証項目

「本テーマには取り組まない」

3.3.6.3 評価・検証方法

「本テーマには取り組まない」

3.3.6.4 実証結果及び考察

「本テーマには取り組まない」

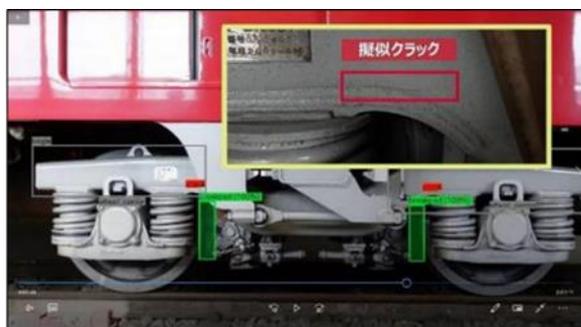
4. ローカル5G活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）

4.1 実証概要

1.2章で記載したとおり、京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅に構築したローカル5Gを活用し、フルHD映像のAI解析による車両検査の遠隔・自動監視システムを構築し、現場のオペレーションへの対応及び複数デバイスの長期安定運用を見据えて、車両台車の遠隔監視の高度化・実装を図る実証を実施した。

4.2 背景となる課題を踏まえた実装シナリオ・実証目標

1.1章で記載したとおり、「令和2年度 地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証に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）」の実証事業では、京浜急行電鉄久里浜工場で実装可能な車両検査の遠隔・自動監視技術を生み出した。具体的には、京浜急行電鉄久里浜工場に入車・出車する車両台車の4Kカメラ映像のAI解析により、微細なき裂を検出すると共に、ヒューマンエラーを抑止する目的で、ハンドルの開きやブレーキパッドのすり減りを検出し、1秒未滿で現地の運用担当者に伝送することに成功している。（図4.2-1参照）



★検出精度（速度とクラック進展方向 垂直/水平）

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%

対象物：ダミークラックシール

手法：対象物の識別

結果：

- ・上りスループット：最大 **98.06 Mbps**
- ・End-End遅延量：**940 ms**（解析込）

課題：

- ・照度によって検出精度にばらつき
- ・暴露機材が時折停止（長期安定）
- ・複数入力映像は未対応

★実装に向けた残課題

- ・照度に応じた検出精度のばらつき改善
→AI映像ソリューションの弱点を解決！
- ・機材の長期間安定運用を実現
→耐候性に優れた機材構成を開発！
- ・複数入力映像の解析を実現
→包括的な車両監視技術を開発！

図 4.2-1 令和2年度の車両検査の遠隔・自動監視システム実証の振り返り（再掲）

今年度は鉄道駅での実装に向けて、サーバやカメラなどの機材のコストを抑えつつ、スピードのある車両の監視ができることや、短い間隔で列車が発着する合間に処理遅延を蓄積することなく AI 解析処理を行う必要がある。処理遅延を蓄積させないためには、列車がホームに入線後に停止する時間、もしくは出線後、次の列車が入線するまでの時間は最短で2分間であることが時刻表からわかっており、その間に AI 解析を含むサーバ処理を完了させることが必須となる。

表 4.2-1 京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅の1番線時刻表（再掲）

羽田空港第1・第2ターミナル駅（平日1番線発車時刻表）

5時	38 ⁽⁶⁾	55 ⁽⁶⁾							
6時	8 ⁽⁷⁾	22 ⁽⁹⁾	38 ⁽⁵⁾	45 ⁽⁵⁾	54 ⁽²⁾				
7時	0 ⁽⁴⁾	6 ⁽³⁾	16 ⁽²⁾	30 ⁽⁵⁾	36 ⁽³⁾	44 ⁽³⁾	57 ⁽⁶⁾		
8時	9 ⁽⁸⁾	20 ⁽⁴⁾	35 ⁽⁹⁾	42 ⁽⁴⁾	52 ⁽⁷⁾				
9時	3 ⁽⁵⁾	12 ⁽⁶⁾	24 ⁽⁹⁾	33 ⁽⁶⁾	39 ⁽³⁾	52 ⁽⁵⁾	58 ⁽²⁾		
10時	12 ⁽⁹⁾	22 ⁽⁷⁾	32 ⁽⁸⁾	44 ⁽⁹⁾	53 ⁽⁷⁾				
11時	3 ⁽⁶⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
12時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
13時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
14時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
15時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	51 ⁽¹⁴⁾	58 ⁽³⁾			
16時	11 ⁽⁶⁾	22 ⁽⁷⁾	34 ⁽¹⁰⁾	47 ⁽⁹⁾					
17時	0 ⁽¹¹⁾	6 ⁽²⁾	21 ⁽¹¹⁾	32 ⁽⁷⁾	42 ⁽⁷⁾	52 ⁽⁷⁾			
18時	2 ⁽⁵⁾	12 ⁽⁷⁾	22 ⁽⁷⁾	32 ⁽⁷⁾	42 ⁽⁷⁾	52 ⁽⁷⁾	59 ⁽²⁾		
19時	7 ⁽⁶⁾	17 ⁽⁷⁾	27 ⁽⁷⁾	38 ⁽⁸⁾	48 ⁽⁷⁾	57 ⁽⁷⁾			
20時	8 ⁽⁸⁾	19 ⁽³⁾	30 ⁽⁸⁾	39 ⁽²⁾	48 ⁽⁵⁾	56 ⁽³⁾			
21時	11 ⁽⁵⁾	19 ⁽²⁾	30 ⁽⁴⁾	39 ⁽⁵⁾	52 ⁽⁴⁾				
22時	3 ⁽⁵⁾	10 ⁽⁴⁾	42 ⁽⁴⁾	57 ⁽⁵⁾					
23時	17 ⁽¹¹⁾	34 ⁽¹⁰⁾	48 ⁽⁵⁾	59 ⁽⁵⁾					
24時	10 ⁽⁴⁾								

羽田空港第1・第2ターミナル駅（休日1番線発車時刻表）

5時	42 ⁽¹⁰⁾								
6時	3 ⁽¹⁴⁾	23 ⁽¹⁶⁾	45 ⁽¹⁴⁾	57 ⁽⁸⁾					
7時	10 ⁽¹⁰⁾	17 ⁽⁴⁾	27 ⁽⁶⁾	38 ⁽⁷⁾	48 ⁽⁷⁾	58 ⁽⁷⁾			
8時	8 ⁽⁷⁾	18 ⁽⁷⁾	28 ⁽⁷⁾	38 ⁽⁷⁾	48 ⁽⁷⁾	58 ⁽⁷⁾			
9時	8 ⁽⁷⁾	18 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁴⁾	36 ⁽⁴⁾	44 ⁽⁴⁾	54 ⁽⁸⁾			
10時	4 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
11時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
12時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
13時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
14時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
15時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
16時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
17時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁷⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁸⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁷⁾			
18時	3 ⁽⁸⁾	13 ⁽⁸⁾	23 ⁽⁸⁾	33 ⁽⁷⁾	43 ⁽⁸⁾	53 ⁽⁸⁾			
19時	3 ⁽⁸⁾	14 ⁽⁸⁾	25 ⁽⁸⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾			
20時	5 ⁽⁷⁾	15 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁷⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾	55 ⁽⁷⁾			
21時	5 ⁽⁷⁾	15 ⁽⁷⁾	25 ⁽⁷⁾	35 ⁽⁷⁾	45 ⁽⁷⁾				
22時	5 ⁽¹⁷⁾	18 ⁽⁹⁾	29 ⁽⁷⁾	39 ⁽⁵⁾	53 ⁽⁸⁾				
23時	1 ⁽⁴⁾	22 ⁽¹⁵⁾	31 ⁽⁵⁾	48 ⁽¹⁵⁾					
24時									

上記の前提をふまえ、実装に向けて図 4.2-2 の 이슈ツリーに示す令和 2 年度の課題を解決するための検討を行うとともに、本実証における運用担当者の意見等を収集し、今後の実装について検討した。

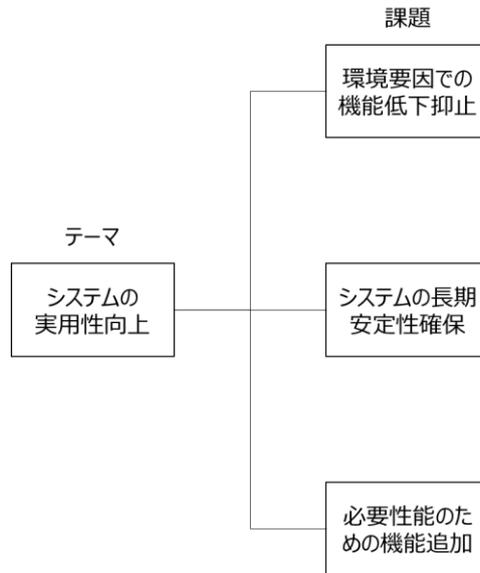


図 4.2-2 実証背景（令和 2 年度の残課題）

図 4.2-3~図 4.2-5 の 이슈ツリーに示すように実装に向けた課題が残り、それらの解決に向けた対策を検討する必要があることが判明した。

環境要因に関する分析を図 4.2-3 に、必要な対策に関する検討を表 4.2-2 に示す。

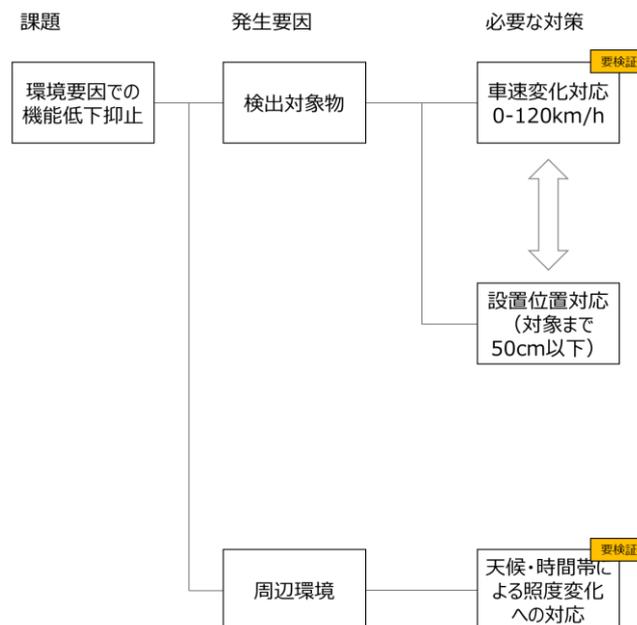


図 4.2-3 環境要因に関する 이슈ツリー

表 4.2-2 環境要因での機能低下防止に必要な対策に関する検討

発生要因	必要な対策に関する検討
検出対象物	<p>【車速変化対応 0-120km/h】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・時速 10km までは撮影可能だったが、10km 時点で垂直方向のき裂検出精度は低下した。 ・実装時を想定すると、より高速移動する車両の映像撮影・解析が必要となる可能性がある。(I) <p>【設置位置対応 (対象まで 50cm 以下)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は設置位制約がなく、撮影対象まで約 2m での検証を実施した。 ・実装を想定すると、駅ホーム下空間というより撮影対象の近傍への設置 (50cm 以下) が必要となる。このとき、事前の施工性の確認が必要である。(II) ・また、カメラの画角に収まる範囲がかなり限定されるため、より広角のレンズ導入など検討が必要である。(III)
周辺環境	<p>【天候・時間帯による照度変化への対応】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・天候や時間帯によって日照状況が変化し、カメラ機材の撮影性能に影響を及ぼし AI 検出性能が低下した。 ・実装時を想定すると、より暗い環境での映像撮影・解析が必要となり、照度の補完が必要となる。(IV)

長期安定性に関する 이슈ツリーを図 4.2-4 に、必要な対策に関する検討を表 4.2-3 に示す。



図 4.2-4 長期安定性に関する 이슈ツリー

表 4.2-3 システムの長期安定を確保するために必要な対策に関する検討 (1/2)

発生場所	必要な対策に関する検討
映像撮影機材	<p>【現地の防水防塵対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は比較的乾燥した広い環境に汎用カメラを設置することができたため、異常は発生しなかった。 ・駅のホーム下に設置される実装時を想定すると、より湿気が多く、かつ車両に近い金属粉も舞いやすいと想定される、防水防塵対応済みの機材の選択が必要である。
車両映像配信用デバイス	<p>【現地の防水防塵対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は映像配信用デバイスとしてシングルボードコンピュータを、比較的乾燥した広い環境で使用していたが、一度金属粉によるコンピュータのインターフェース故障（接触不良）が発生し、機材交換対応を行った。 ・駅のホーム下に映像配信用デバイスが設置される実装時を想定すると、駅のホーム下は、より湿気が多く、かつ車両に近い金属粉も舞いやすいと想定されるため、映像配信用デバイスが GPU 搭載ノート PC であれ、シングルボードコンピュータであれ、より入念な防水防塵対策が必要である。 <p>【熱暴走対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、運用時に機材が発熱し熱暴走の恐れがあったため、アルミ板・空冷ファンを用いて事前の予防策を講じた。結果として、映像配信用デバイスとしてのシングルボードコンピュータの熱暴走は発生しなかった。 ・駅のホーム下に映像配信用デバイスが設置される実装時を想定すると、設置位置の制約が大きいため、大がかりな冷却対策を講じることができないため、映像配信用デバイスが GPU 搭載ノート PC であれ、シングルボードコンピュータであれ、小型で冷却効率の高い構成を検討する必要があるとともに、発熱による影響がある機材の設置位置を工夫することで熱対策を講じる必要がある。
5G ルータ	<p>【現地の防水防塵対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は比較的乾燥した広い環境にであったため、異常は発生しなかった。 ・実装時を想定すると、より湿気が多く、かつ車両に近い金属粉も舞いやすいと想定される。そのため、5G ルータの防水防塵対策が必要である。 <p>【熱暴走対策】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、運用時に機材が発熱し熱暴走の恐れがあったため、アルミ板・空冷ファンを用いて事前の予防策を講じた。しかし、遠隔監視中に 5G ルータの電源が落ちてしまうことが度々あった。（電源が落ちた時点で充電自体は十分であり、筐体から機材の発熱を確認したため、熱暴走によるものと判断した。） ・実装時を想定すると、設置位置の制約が大きいため、大がかりな冷却対策を講じることができないため、小型で冷却効率の高い構成を検討する必要がある。

表 4.2-3 システムの長期安定を確保するために必要な対策に関する検討 (2/2)

発生場所	必要な対策に関する検討
映像伝送システム	<p>【故障頻度と故障時間の短縮】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、映像伝送システムの処理ができず、フリーズやダウンすることがあった。 ・実装時を想定すると、より安定性の高い映像伝送システムを構築する検討を行う必要がある。具体的には、エラーハンドリング（エラーを吐いても継続処理しつつトラブルシュートを検討）や効果的なロギング設定を行い、運用時の故障回数低減、故障時間短縮化を実現する必要がある。
AI 解析エンジン	<p>【故障頻度と故障時間の短縮】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、AI 解析エンジンが運用中にダウンすることはなかったが、時折、エラーが発生時に人の手でシステムを停止する必要があったり、システムの主系統・予備系統を切り替える際やエラーハンドリングに時間を要したりすることがあった。 ・実装時を想定すると、エラーハンドリング（エラーを吐いても継続処理しつつトラブルシュートを検討）や効果的なロギング設定を行い、運用時の故障回数低減、故障時間短縮化を実現する必要がある。

必要性能のための機能追加に関する 이슈ツリーを図 4.2-5 に、必要な対策に関する検討を表 4.2-4 に示す。

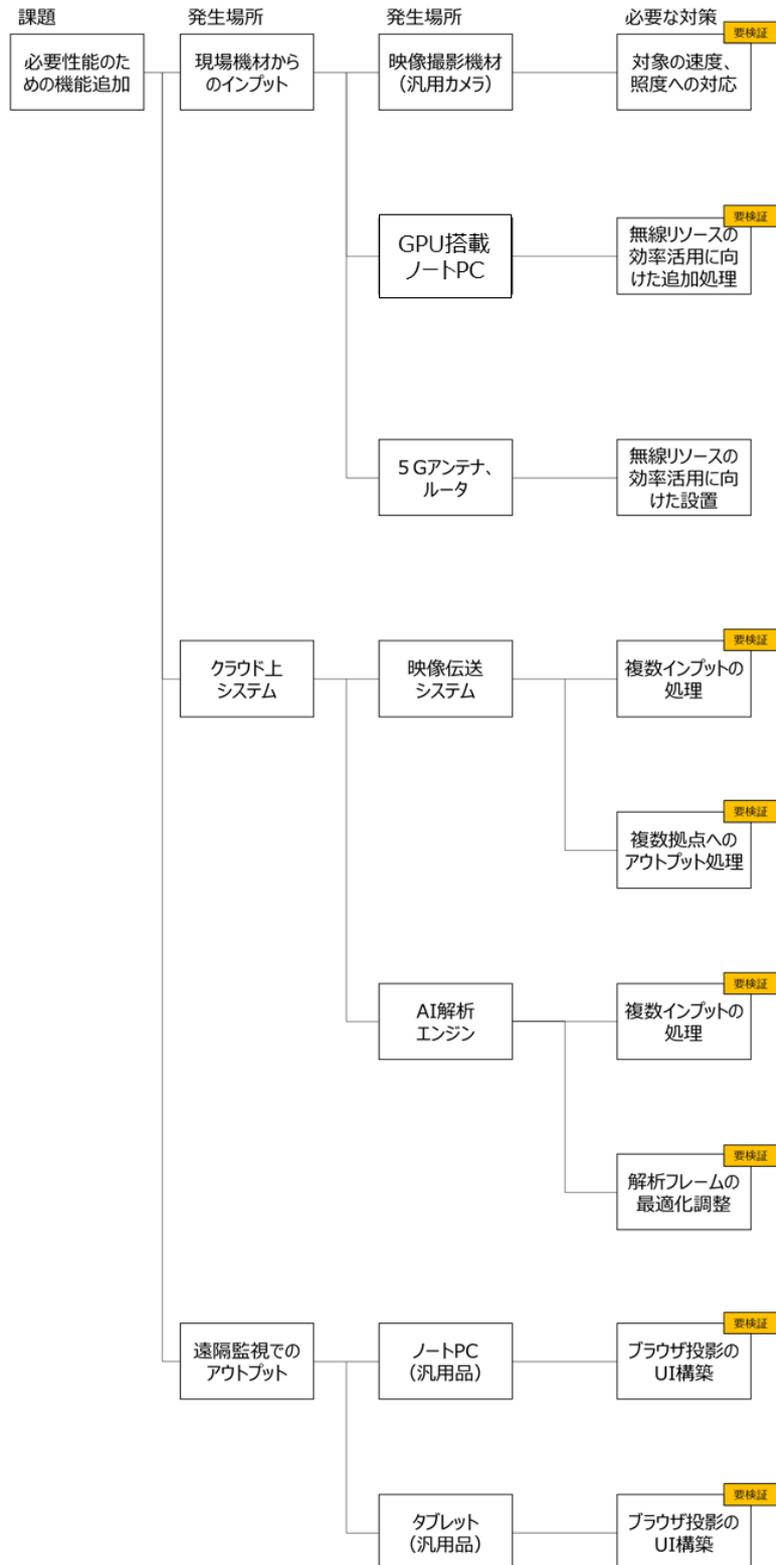


図 4.2-5 必要性能のための機能追加に関する 이슈ツリー

表 4.2-4 必要性能のための機能追加に必要な対策に関する検討 (1/2)

発生要因	必要な対策に関する検討
映像撮影機材	<p>【対象の速度、照度への対応】環境要因課題 (Ⅲ)、(Ⅳ) と共通</p> <ul style="list-style-type: none"> ・駅のホーム下に設置され、入線・停止・出線する車両を撮影するという実装を想定すると、車両の速度によってカメラの画角に収まる範囲がかなり限定されるため、より広角のレンズ導入など検討が必要である。 ・駅のホーム下に設置される実装時を想定すると、より暗い環境での映像撮影・解析が必要となり、照度の補完が必要となる。
車両映像配信用デバイス	<p>【無線リソースの効率活用に向けた追加処理】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、映像配信用デバイスとしてシングルボードコンピュータを使い、カメラ機材が撮影する映像を圧縮してストリーミング伝送し、問題なく伝送することができていた。 ・実装時を想定すると、車両の速度対応のため複数のカメラを設置し、複数系 (3 系) から同時にアップロードする必要がある。このとき、無線リソースの帯域がひっ迫することが想定されるため、無線帯域の効率活用に向けた前処理が必要となる。 ・複数台のフル HD カメラで撮影された映像をリアルタイムで適切な映像フォーマット (H.264) へリアルタイムに近い高速度でのコーデック変換し、WebRTC で AI 解析基盤へ配信可能な GPU を実装した GPU 搭載ノート PC での追加処理が必要になる。 ・カメラを複数台設置することから、1 台のカメラが捉えるべき車両を限定でき、中～低速域の車両が撮影できれば良くなり、フレームレート (fps) を下げることにより、対象車両を撮り逃すことなく捉えられるパラメータで構築する。
5G アンテナ、ルータ	<p>【無線リソースの効率活用に向けた設置】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は設置位置の制約がなく、5G 基地局のアンテナ直下に端末を設置できたため、クラウド環境との通信スループットは最大で約 90Mbps となった。1 系統の 4K 映像を通すには十分なスループットであり、検証するうえで重大な課題とはならなかった。
映像伝送システム	<p>【複数インプットの処理】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、4K 映像は 1 系統のみのインプットであった。このときは、WebRTC により問題なく伝送することができた。 ・実装時を想定すると、複数の機材からフル HD 映像をインプットし、同時並行的に伝送しなければならず、追加開発と検証が必要となる。 <p>【複数拠点へのアウトプット処理】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は 1 拠点の遠隔監視 PC への伝送を行った。このときは、WebRTC により問題なく伝送することができた。 ・実装時を想定すると、複数拠点で同時並行的に映像を確認し、実運用の対応にシームレスにつなげることが必要である。そのため、複数拠点からアウトプット映像の確認ができるよう追加開発と検証が必要となる。

表 4.2-4 必要性能のための機能追加に必要な対策に関する検討 (2/2)

発生要因	必要な対策に関する検討
AI 解析エンジン	<p>【複数インプットの処理】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、4K 映像は 1 系統のみのインプットであり、これをクラウドインスタンス上の複数 GPU に分散して処理を行った。このときは問題なく処理を遂行することができた。 ・実装時を想定すると、複数のフル HD 映像インプットを同時並行的に、インスタンス上の複数 GPU を用いて処理することが必要で、n:n の複雑な処理が求められる。そのため、これを実現する機能の追加開発と検証が必要となる。 <p>【解析フレームの最適化調整】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は、4K 映像は 1 系統のみのインプットであり、これをクラウドインスタンス上の複数 GPU に分散して処理を行った。このときは問題なく処理を遂行することができた。 ・実装時を想定すると、複数のフル HD 映像インプットを同時並行的に、インスタンス上の複数 GPU を用いて処理することが必要で、n:n の複雑な処理が求められる。そのため、これを実現する機能の追加開発と検証が必要となる。
ノート PC (汎用品)	<p>【ブラウザ投影の UI 構築】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・昨年度は 4K 映像インプットについては、1 系統のみの処理を行い、それに適した UI を構築した。このときは、WebRTC により問題なく Web サーバに伝送し、適切な表示ができていた。 ・実装時を想定すると、複数の機材からフル HD 映像をインプットし、Web サーバが複数のインプット映像を同時並行的に受け取った上で表示しなければならない。これに適した表示 UI と合わせて、追加開発と検証が必要となる。
タブレット (汎用品)	同上

今年度の実証においては、列車検査の遠隔・自動監視システムの実装のための環境要因、長期安定性、性能面の観点での課題分析・解決を行うことを目指しており、実装を見据えた場合、利用者の理解という環境要因の観点を盛り込みつつ、かつ目指す成果に影響が出ない実現可能な構成を取ることが必要である。

4.3 実証環境

実証環境に関する模式図を下記に示す。

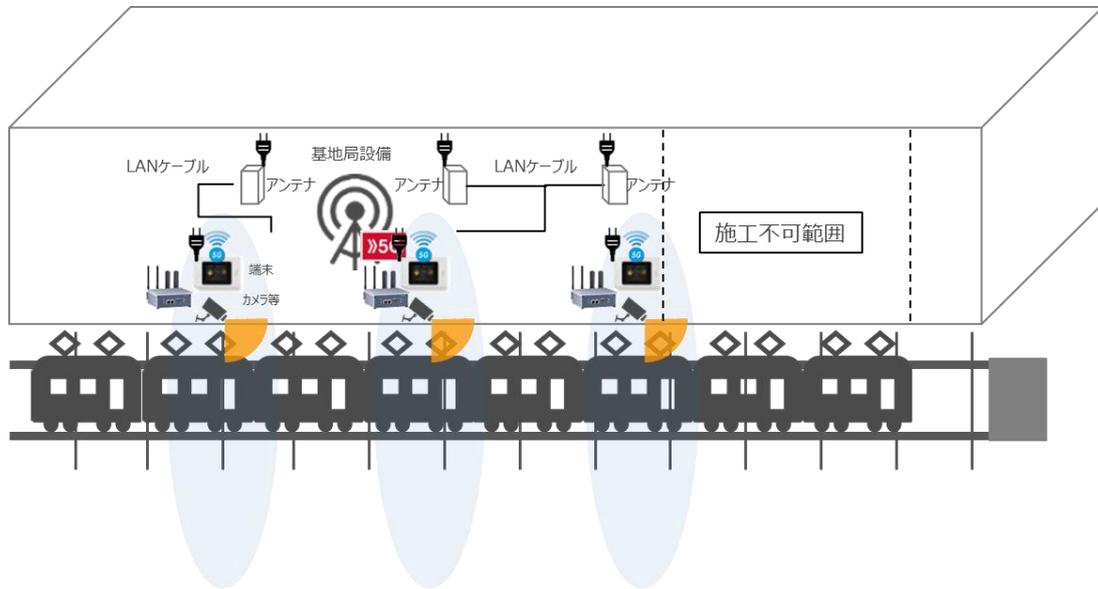


図 4.3-1 実証環境概要

第 2.2.8 章でも記載したとおり、ローカル 5G 活用モデルの創出・実装に関する調査検討（課題実証）のための、車両検査の遠隔・自動監視システムを構築した。その全体イメージを図 4.3-2 に、システム構成を図 4.3-3 に示す。

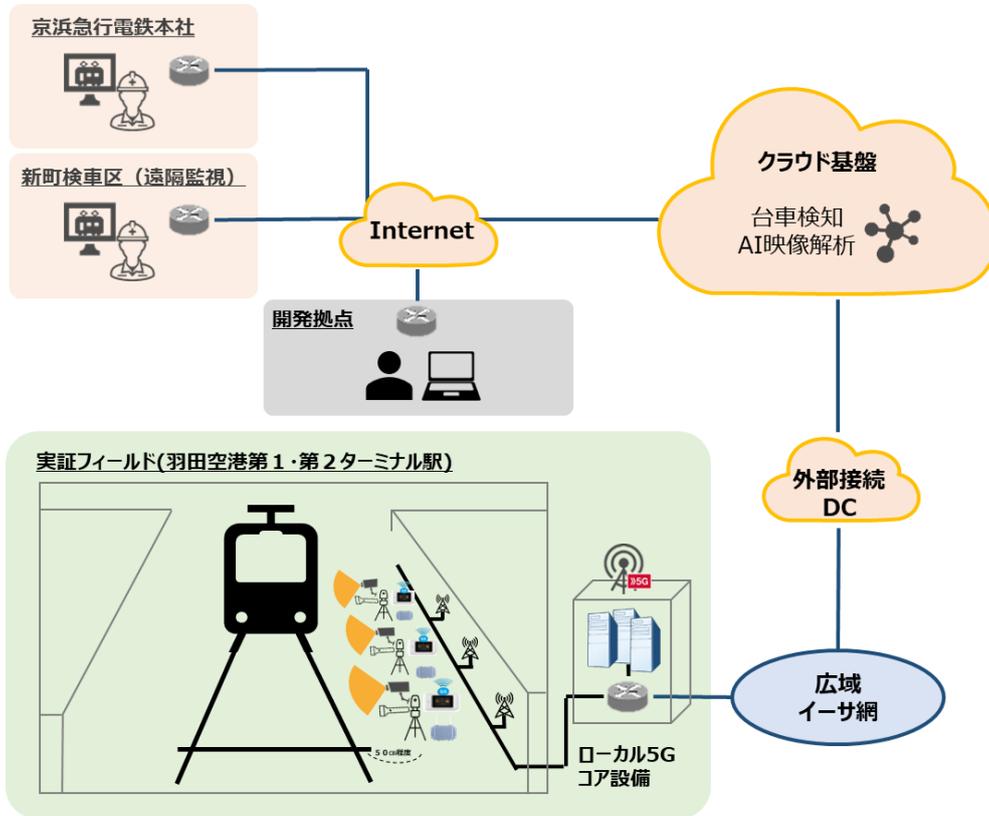


図 4.3-2 車両検査の遠隔・自動監視システムの全体イメージ図

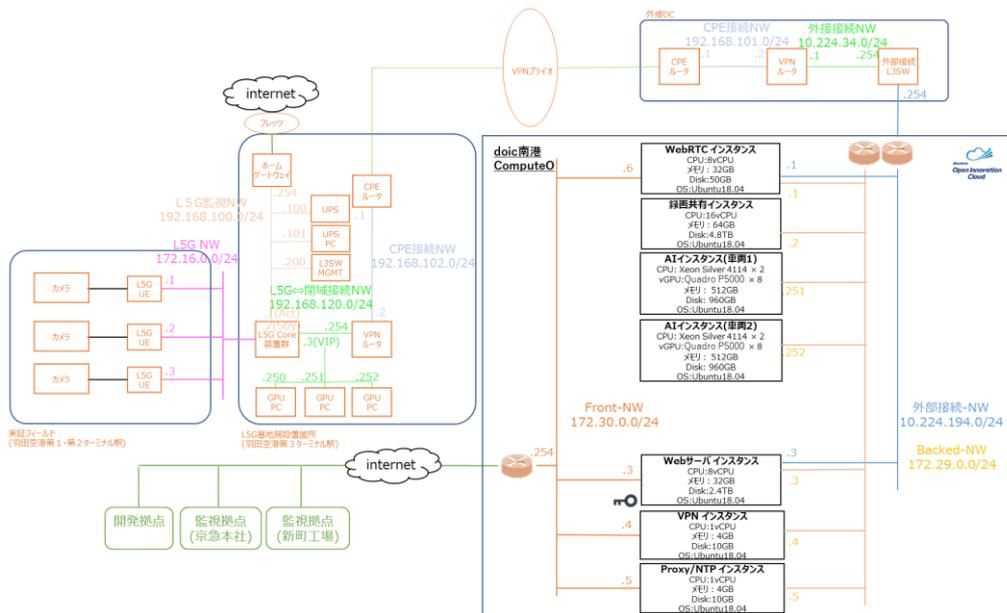


図 4.3-3 車両検査の遠隔・自動監視システム構成

4.4 実証内容

4.4.1 ローカル 5G を用いたソリューションの有効性等に関する検証

4.4.1.1 効果検証

(1) 評価・検証項目

1) 通信性能

通信性能に関する評価・検証項目を表 4.4.1.1-1 に示す。今年度は複数のカメラからのインプット及び複数拠点でのアウトプットに関する通信性能の効果検証をアジャイル的に実施した。システム構築を進めるなかで、システムを設置する現場環境の確認を実施し、実運用を見据えた機材選定や長期安定性を考慮した機材設置場所の見直しなどを踏まえ、システム構成変更に伴い検証項目の見直しも行った。

表 4.4.1.1-1 通信性能に関する評価・検証項目

No.	対象機能	評価項目	評価項目の詳細
1	ローカル 5G の通信機能	システム End-End 間及び各区間の通信性能 <ul style="list-style-type: none"> ・実証フィールド ～ ローカル 5G 基地局 ・ローカル 5G 基地局 ～ 専用線 (VPN 網) ～ クラウドサーバ (dOIC) ・開発拠点～ Internet ～ クラウドサーバ(dOIC) 	<ul style="list-style-type: none"> ・上りスループット (TCP,UDP) ・下りスループット (TCP,UDP) ・遅延量 ・ドロップ数/率
2		システム End-End 区間におけるネットワーク基本性能 (実証フィールド ～ dOIC ～ 開発環境)	<ul style="list-style-type: none"> ・映像インプットから画面表示までの End2End の遅延量 ・スループット ・測定間隔 ・解像度 ・フレーム ・各リソース量

2) UI・映像伝送システム

UI・映像伝送システムでは、録画映像にAI解析エンジンから取得した映像と時刻同期した検出座標データを映像上に重畳させ、バウンディングボックスとして表示させた。

UI・映像伝送システムに関する評価・検証項目を表4.4.1.1-2に示す。今年度は複数のカメラからのインプット及び複数拠点でのアウトプットに関するUI・映像伝送システムの効果検証をアジャイル的に実施した。実装を見据えたシステム構成としたため、サーバのコストを抑えたことで映像解析に1分程度かかることが机上検討で判明した。ライブ映像にAI解析結果の矩形を表示させるためにはライブ映像にAI処理時間の分だけ遅延処理を行う必要があるが、使用したソフトウェアの制約で遅延処理の上限を超えており、ライブ映像にAI解析結果の矩形を表示させることが困難となった。検査から検査までの間に台車の異常が発生するケースは極まれであり、リアルタイムで映像確認を行う監視員を常駐させることは非効率である。このため、実運用の際には異常通知を発出する機能を付加し、異常を確認する運用を想定するという結論に至り、AI解析結果は録画映像に表示させることで設計し、評価項目の見直しも行った。

羽田空港第1・第2ターミナル駅1番線ホームにて、運行中の列車車両の異常を検出する今回の実証環境においては、車両の入線完了～出線完了および出線完了～入線完了までの時間枠でシステムの処理を終えなければ処理が積み上がってしまい、システムが異常情報をアウトプットするまでの処理遅延が次々と蓄積されることとなる。そのため羽田空港第1・第2ターミナル駅1番線の運行スケジュールに則り、車両の入線～出線、および出線～入線までの、AI解析の対象とならない時間の最短である2分間で映像伝送、AI解析などを含むシステム処理を完了させる必要がある。このため、時刻表上の列車の発着時刻から本システムで車両の異常情報をアウトプットする（ユーザが確認可能な状態とする）までのシステム処理時間の目安を2分以内とした。なお、サーバ処理遅延の蓄積を回避することを目標としたため、ユーザが監視画面で映像を閲覧する下り通信の時間は2分間には含まない。

表 4.4.1.1-2 UI・映像伝送システムに関する評価・検証項目

No	対象機能	評価項目	評価対象
1	映像伝送	伝送・表示性能（遅延等）	単一拠点の遠隔監視席における映像の視認性
2			複数拠点の遠隔監視席における映像の視認性
3	AI解析結果表示	AI解析結果との連携性能（時刻同期等）	単一拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性
4			複数拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性
5	実用可能性	利用者の体感	複数拠点の遠隔監視席における映像の視認性
6			複数拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性

3) AI 解析エンジン

AI システム事前検証において AI の学習及び教師データの取得を行うとともに、実証期間中には、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅 1 番線に固定設置されたフル HD カメラで撮影した車両台車の状態のフル HD 映像をリアルタイムで AI 解析して、台車のき裂等の異常を検出した。

AI 解析エンジンについては、構成面（パフォーマンス）と検出性能面についてアジャイル的に検証した。AI 推論処理の精度の評価にあたり、昨年度は疑似き裂として透明なシールに細い線を印刷したものを使用した。が、長期間にわたり車両が走行するうちに剥がれ落ちる恐れがあった。このため、評価の方法について京浜急行電鉄車両部とディスカッションし、油性黒ペンで台車に線を描くことで疑似き裂とすることにした。

また、ディスカッションを通して、全体で約 800 両ある京浜急行電鉄の車両のうち、疑似き裂を記入した車両が、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅にいつ入線するかを事前に把握することは、運用上困難であるという制約が判明した。このため、疑似き裂を記入する車両を羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅に入線する 6 両編成の列車に限定し、6 両編成列車 39 編成のうち 24 編成に記入することで、疑似き裂を記入した車両が入線する確率を高めることとした。

AI 構成面に関する評価・検証項目を表 4.4.1.1-3 に示す。今年度は複数のインプット映像の処理に関する AI 解析エンジンの効果検証を実施した。

表 4.4.1.1-3 AI 構成面に関する評価・検証項目

No	対象機能	評価項目
1	計算リソースに応じた AI 解析速度	理論的に処理可能なフレーム数確認（机上検討）
2	複数インプット映像の処理	同時並行処理における処理フレーム数確認（実測値の統計評価）

続いて、AI 検出機能面に関する評価・検証項目を表 4.4.1.1-4 に示す。

表 4.4.1.1-4 AI 検出機能面に関する評価・検証項目

No	対象機能	評価項目
1	AI 推論処理の速度	処理時間
2	AI 推論処理の精度	検出精度
3	AI 推論処理の精度	検出限界速度
4	その他	その他：解析対象の汚れや周辺環境の影響
5	実用性（定性評価）	利用者体感等

その他（現場環境）

4) その他（現場環境）

その他（現場環境）に関する評価・検証項目を表 4.4.1.1-5 に示す。今年度は AI 検出性能の環境適応性やカメラ機材等の長期安定性に関する効果検証をアジャイル的に実施した。今年度実証は検車区ではなく実際の駅で検証を行うため、駅のホーム下に設置した機材に直接触れて調整するハードルが高いことを受け、照度の比較検証については夜間に線路に立ち入りが可能な環境を作り実施するなどの工夫が必要となった。

表 4.4.1.1-5 その他（現場環境）に関する評価・検証項目

No	対象機能	評価項目	評価内容
1	環境適応性 （照度）	照度変化に ともなう AI 検出性能	現場に設置した照明機材を調整し、異なる照度環境を構築した上で、照度の違いが取得映像の品質や AI 解析性能に及ぼす影響を評価し、改善する。
2	環境適応性 （対象物の 色合い）	対象物の色 合い変化に ともなう AI 検出性能	対象物（車両台車等）の色合い変化に応じた AI 検出性能を評価し、改善する。特に検出精度が低くなる色合いなどが見られる場合は、要因分析と重点的な追加学習を行い、改善を試みる。
3	長期安定性	カメラ機材 の連続稼働 時間	現場に設置したカメラ機材の連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。
4	長期安定性	GPU 搭載ノ ート PC の連 続稼働時間	現場に設置した GPU 搭載ノート PC の連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。
5	長期安定性	5G ルータの 連続稼働時 間	現場に設置した 5G ルータの連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。

(2) 評価・検証方法

1) 通信性能

a) ローカル 5G 区間の通信性能

実証フィールド～ ローカル 5G 基地局の区間において、通信プロトコル TCP 及び UDP を使った上りスループット値および下りスループット値、遅延量を計測し、本実証環境におけるネットワーク該当区間の通信性能を定量評価した。現時点では映像のアップロードで UDP 通信を使用しているが、将来的に TCP 通信が必要なユースケースを想定し、通信スペックを確認するため今回の検証内で測定を行った。

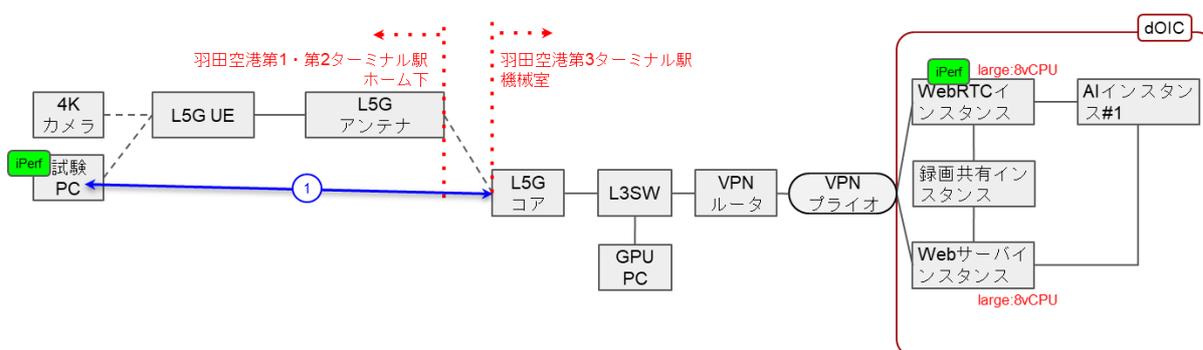


図 4.4.1.1-1 End-End 区間の通信性能試験

○測定区間

(L5GUE 配下) ホーム下 試験 PC～ローカル 5G 基地局

○測定項目：

1：上り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

2：下り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

▼パラメータ：bandwidth 800Mb、MTU：1460B、送信時間 60s、表示インターバル 1s、開始 8s を計測除外 計測値：bandwidth、jitter、lost/total パケット数、※3回の計測、またその平均

3：レイテンシ (RTT) ※ping

▼パラメータ：(フラグメントしない値)、送信時間 60s、表示インターバル 1s、計測値：min/avg/max/stddev ※3回の計測、またその平均

b) 専用線区間の通信性能

専用線区間 (ローカル 5G 基地局 ～ 専用線 (VPN 網) ～ クラウドサーバ(dOIC)) において、通信プロトコル TCP 及び UDP を使った上りスループット値および下りスループット値、遅延量を計測し、本実証環境におけるネットワーク該当区間の通信性能を定量評価した。現時点では映像のアップロードで UDP 通信を使用しているが、将来的に TCP 通信が必要なユースケースを想定し、通信スペックを確認するため今回の検証内で測定を行った。

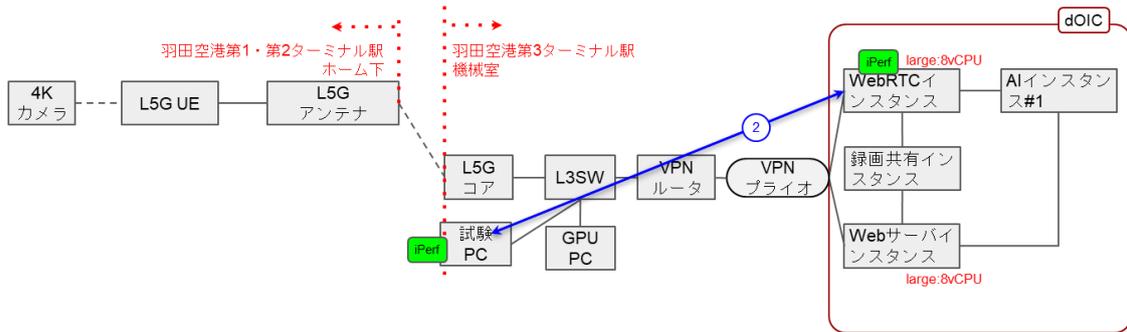


図 4.4.1.1-2 専用線区間の通信性能試験

○測定区間

(羽田空港第3ターミナル駅通信機器室 ラック内)試験 PC～VPN プライオ経由～dOIC WebRTC インスタンス

○測定項目：

1：上り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

2：下り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

▼パラメータ：bandwidth 800Mb、MTU：1460B、送信時間 60s、表示インターバル 1s、開始 8s を計測除外 計測値：bandwidth、jitter、lost/total パケット数、※3回の計測、またその平均

3：レイテンシ (RTT) ※ping

▼パラメータ：(フラグメントしない値)、送信時間 60s、表示インターバル 1s、計測値：min/avg/max/stddev ※3回の計測、またその平均

c) クライアント～dOIC 区間の通信性能

監視拠点クライアント～dOIC 区間において、通信プロトコル TCP 及び UDP を使った上りスループット値および下りスループット値、遅延量を計測し、実際にユーザが映像確認を実施する監視拠点における通信性能を定量評価した。なお、本実証では実装に向けて、多拠点で場所の制約なく映像を確認できることを前提とし、固定 IP アドレスを割り振り接続元の制限をかけたモバイル端末によるインターネット接続を使用した。このため、通信性能を評価した区間はインターネットの区間を含むものである。映像の再生に UDP,それ以外の操作には TCP を使用しているため、それぞれの項目を測定した。

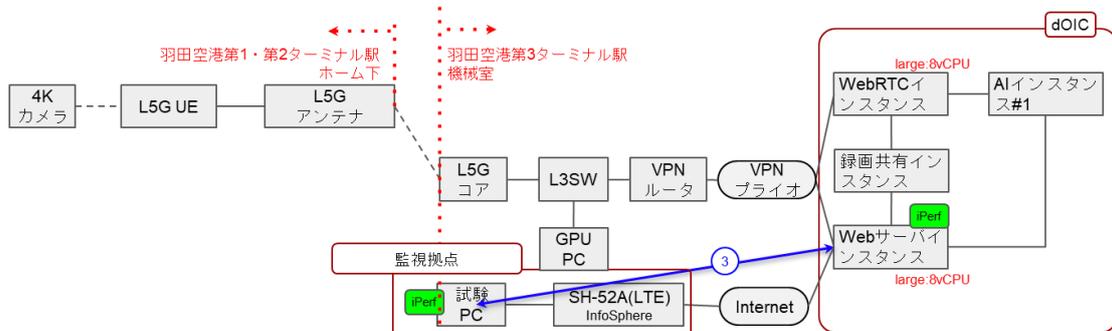


図 4.4.1.1-3 クライアント～dOIC 区間の通信性能試験

○測定区間

(監視拠点を想定) 試験 PC～インターネット経由～dOIC Web サーバ インスタンス

○測定項目：

1：上り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

2：下り方向スループット計測(TCP、UDP) ※iperf

▼パラメータ：bandwidth 800Mb、MTU：1460B、送信時間 60s、表示インターバル 1s、開始 8s を計測除外 計測値：bandwidth、jitter、lost/total パケット数、※3回の計測、またその平均

3：レイテンシ (RTT) ※ping

▼パラメータ：(フラグメントしない値)、送信時間 60s、表示インターバル 1s、計測値：min/avg/max/stddev ※3回の計測、またその平均

d) End-End 通信遅延確認

実証フィールド～ ローカル 5G 基地局 ～ 専用線 (VPN 網) ～ クラウドサーバ(dOIC) の End-End 区間において、ストリーミング配信する際の遅延時間を計測した。

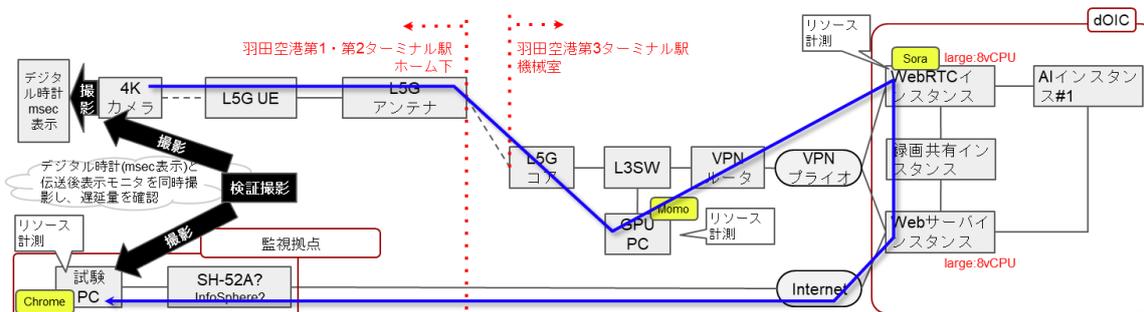


図 4.4.1.1-4 End-End 区間でストリーミング配信する際の遅延確認

○測定区間

(監視拠点を想定) GPU-PC(momo)～VPN プライオ経由～dOIC Web サーバ インスタンス～Web サーバインスタンス～監視拠点 PC

○測定項目：

WebRTC 設定確認 (フル HD カメラ時 送信パラメータ：12Mbps)、フレーム数：(20fps)

1：End-End 遅延時間計測：デジタル時計 (msec 表示) と伝送後表示モニタを同時撮影し、遅延量を確認

2：内容ア：ノート PC 上の Chrome WebRTC デバッグ (解像度、再生中フレーム数、受信フレーム数、デコードフレーム数、ドロップフレーム数)

3：内容イ：コンピュータのリソース確認：Xavier NX (Momo)、WebRTC インスタンス (Sora)、受信ノート PC (Chrome 動作機)、CPU、MEM、GPU のリソース

推移

なお、長期安定性の観点から onvif 対応・防水防塵対応のネットワークカメラを使用し、かつメンテナンスの容易さの観点からホーム下ではなく、羽田空港第 3 ターミナル駅の通信機器室内で onvif→WebRTC の変換を行なった。



図 4.4.1.1-5 End-End 区間でストリーミング配信する際の遅延確認の様子

2) UI・映像伝送システム

UI・映像伝送システムの評価・検証方法を表 4.4.1.1-6 に示す。ここでは、利用者のオペレーション観点で重要性の高いシステム機能について、具体的には、対象となる機能の特性に応じて、遅延量や解析結果の表示性能などを定量的に評価した。また、利用者の体感とオペレーション観点での実用性について、具体的には、視認性、使いやすさ、操作性、表示速度体感等について京浜急行電鉄の技術者等へのアンケートを通じて評価した。

表 4.4.1.1-6 UI・映像伝送システムの評価・検証方法

No	対象機能	評価項目	評価対象	評価方法
1	映像伝送	伝送・表示性能（遅延等）	単一拠点の遠隔監視席における映像の視認性	遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して ・表示性能を確認（遅延等） ・UI機能の動作確認について検証する。
2			複数拠点の遠隔監視席における映像の視認性	遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して、拠点数の増加にともなう ・表示性能を確認（遅延等） ・UI機能の動作確認について検証する。
3	AI解析結果表示	AI解析結果との連携性能（時刻同期等）	単一拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性	遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して、 ・検出結果に応じた分類表示について検証する。
4			複数拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性	遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して、拠点数の増加にともなう ・検出結果に応じた分類表示について検証する。
5	実用可能性	利用者の体感	複数拠点の遠隔監視席における映像の視認性	京浜急行電鉄の技術者による監視作業デモを実施し、拠点数の増加にともなう ・映像伝送遅延等の体感 ・UI画面の映像表示レイアウト ・UI画面の映像確認に関する操作性 ・実装への期待感 ・実装への懸念点
6			複数拠点の遠隔監視席におけるAI解析結果の視認性	京浜急行電鉄の技術者による監視作業デモを実施し、 ・AI解析結果の表示内容 ・実装への期待感 ・実装への懸念点

①遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関する表示性能（遅延等）
 遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して表示性能（遅延等）を確認した。

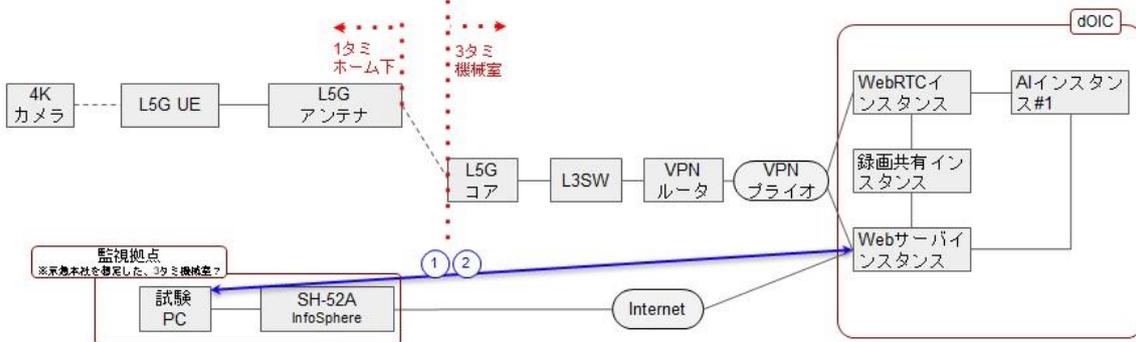


図 4.4.1.1-6 遠隔監視室内監視画面への映像等の表示に関する表示性能（遅延等）確認

○測定区間

Web サーバインスタンス～試験 PC（Chrome ブラウザ）

○測定項目：

1. 試験 PC 上のブラウザから該当 URL へアクセスした時に、UI が表示されるまでの時間を計る。
2. UI 上で該当リンクをクリックしてから、画面が遷移するまでの時間を計る。
3. 上記 1 及び 2 を 1 台の PC、複数台の PC でそれぞれ実施する。

②遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関する UI 機能の動作確認

遠隔監視室における監視画面への映像等の表示に関して表示性能を確認（遅延等）した。

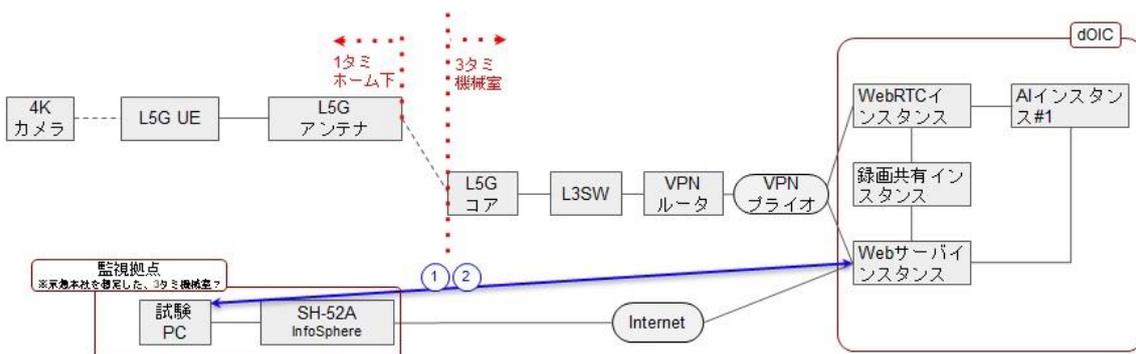


図 4.4.1.1-7 遠隔監視室内監視画面への映像等の表示に関する表示性能（機能）確認

表 4.4.1.1-7 表示性能に関する確認内容

機能名	確認内容
画面 UI	車両監視を選択する機能および録画映像を一覧表示し選択できる
－異常検出お知らせ機能	異常検出された際、画面右上に対象のカメラと日時がポップアップ表示される
－映像全画面表示機能	映像を全画面表示できる
－録画映像検索機能	メニューにて、録画映像を検索するフォームが表示される
－録画映像再生位置制御機能	シークバーにてユーザ操作で録画映像の再生位置の制御を行える
－永久保存機能	UI から永久に保存したい録画映像やその関連データを設定できる
－AI 検出一覧機能	表示している録画映像について異常検出情報の件数表示と再生リストを表示できる
リアルタイム映像配信機能	リアルタイム映像が配信される
録画映像選択機能	ブラウザから録画映像を検索できる
録画映像再生機能	録画映像を配信して AI 解析結果の異常検出が合成できている
異常検出データ保存機能	AI 解析結果の異常検出を保存できている
録画映像取り込み機能	録画映像の情報を異常検出情報に紐づけ、Web サーバに取り込める

○測定区間

Web サーバインスタンス～試験 PC (Chrome ブラウザ)

○測定項目：

1. 試験 PC 上のブラウザから該当 URL へアクセスし、各機能の動作確認を行う。
2. 上記を 1 台の PC、複数台の PC でそれぞれ実施する。

③遠隔監視室における監視画面での AI 解析結果の視認性の確認

遠隔監視室における監視画面での AI 解析結果の視認性を確認した。

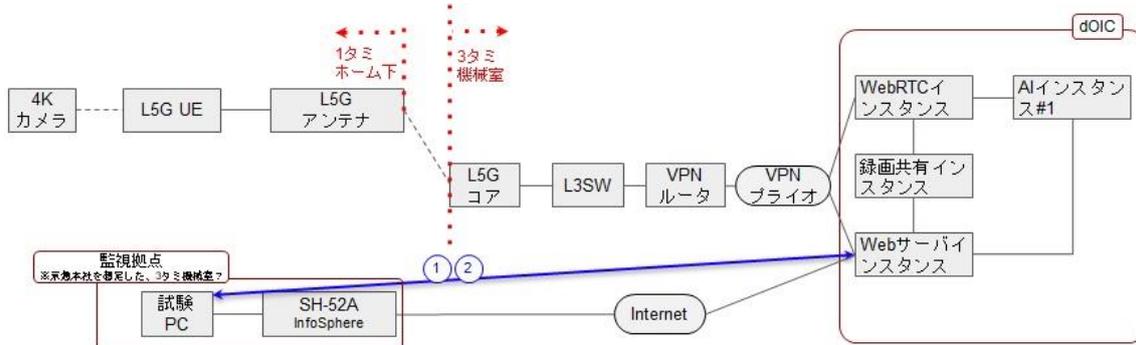


図 4.4.1.1-8 遠隔監視室内監視画面での AI 解析結果の視認性確認



図 4.4.1.1-9 遠隔監視室内監視画面での AI 解析結果の視認性確認イメージ

○測定区間

Web サーバインスタンス～試験 PC (Chrome ブラウザ)

○測定項目：

1. 試験 PC 上のブラウザから該当 URL へアクセスし、AI 検出結果に応じた分類表示について表示確認を行う。
2. 上記を 1 台の PC、複数台の PC でそれぞれ実施する。

3) AI 解析エンジン

AI 構成面に関する評価・検証方法を表 4.4.1.1-8 に示す。ここでは、クラウド上の AI 解析エンジンにおいて、実際のオペレーションに則した性能要件を付加し、処理性能（パフォーマンス）を評価した。

表 4.4.1.1-8 AI 構成面に関する評価・検証方法

No	対象機能	評価項目	評価方法
1	計算リソースに応じた AI 解析速度	理論的に処理可能なフレーム数確認 (机上検討)	クラウド上の AI 解析エンジンにおいて、複数の映像インプットを同時並行的に処理するため、内部アーキテクチャを考慮した上で、 <ul style="list-style-type: none"> ・クラウド上計算リソースの配分計画 ・映像のインプット数に応じた処理可能フレーム数 について机上検討する。
2	複数インプット映像の処理	同時並行処理における処理フレーム数確認（実測値の統計評価）	クラウド上の AI 解析エンジンにおいて、実際のオペレーションに則した数の映像インプットを同時並行的に処理するにあたり、クラウド上の計算リソースの制約に基づき <ul style="list-style-type: none"> ・クラウド上のリソース稼働率 ・解析可能なフレーム数（統計処理） について、実測値を用いて理論値との比較検証を行う。

AI 検出性能面に関する評価・検証方法を表 4.4.1.1-9 に示す。ここでは、クラウド上の AI 解析エンジンにおいて、実際の取得映像を解析する際の機能要件を評価した。具体的には処理時間、検出精度、検出限界速度（AI が解析可能な映像品質を実現できる車両速度）、その他の環境要因による検出精度等への影響を確認した。

表 4.4.1.1-9 AI 検出性能面に関する評価・検証方法

No	評価項目	評価方法
1	処理時間	一定のクラウド上の計算リソースおよび処理フレーム数の前提に基づき、AI 処理時間および End-End 区間での遅延時間を計測・評価する。
2	検出精度	検出対象物（台車き裂、ハンドル開閉、ブレーキパッド摩耗等）に応じて、検出率（試行ごとの適合率）および網羅率（試行ごとの再現率）を計測・評価する。
3	検出限界速度	検出対象物（台車き裂、ハンドル開閉、ブレーキパッド摩耗等）に応じて、どの程度の速度で移動する対象を検出可能か、計測・評価する。
4	その他	必要に応じて環境要因を評価する。具体的には解析実行時の照度、対象物の汚れ具合等を記録し、評価する。
5	実用可能性	利用者の体感とオペレーション観点での実用性について、京浜急行電鉄の技術者へのアンケートを通じて評価する。

a) AI 推論処理の速度（処理時間）

①車両 1 編成当たりの AI 解析にかかる処理時間

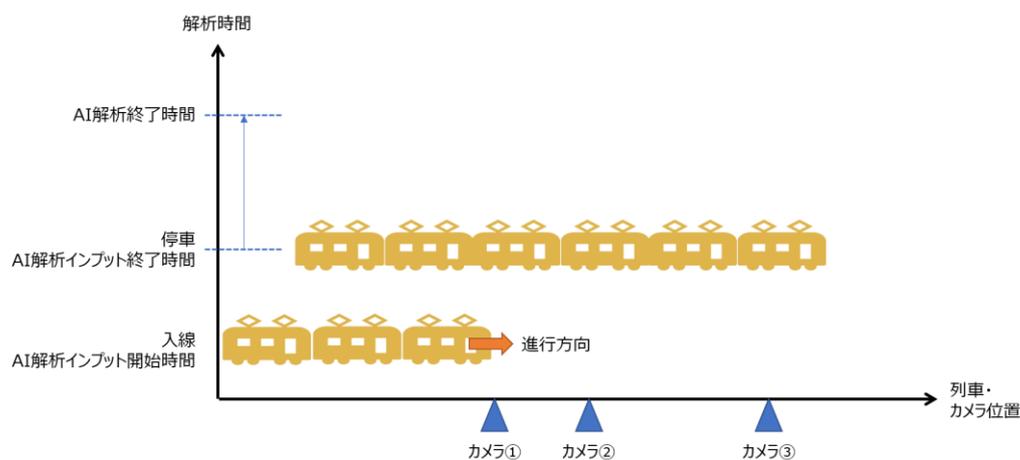


図 4.4.1.1-10 AI 処理時間確認イメージ
（車両 1 編成当たりの AI 解析にかかる処理時間）

○実施内容：

カメラ①～③の映像を並行して解析する中で、カメラ①において車両がホームへ入線しカメラに写り込んだ時間を AI エンジンへの入力開始時間とし、車両が停車した時間を入力終了時間とした。入力終了時間後、該当期間中の映像解析が完了するまでの時間を計測した。

○測定項目：

- 1：カメラ①における車両の入線時間（カメラに先頭車両が映り込んだ時間）
- 2：カメラ①における車両が停車した時間
- 3：車両停車時の最後の入力画像が AI エンジンにより解析処理が完了した時間

②1 日における車両の始発から終電まで通して AI 解析を行った場合の処理時間

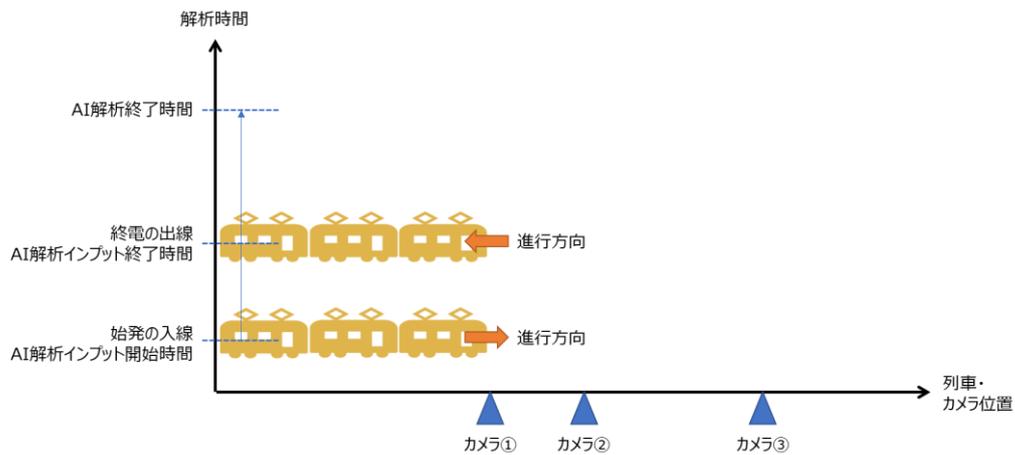


図 4.4.1.1-11 AI 処理時間確認イメージ

(1 日における車両の始発から終電まで通して AI 解析を行った場合の処理時間)

○実施内容：

始発電車がホームへ入選しカメラ①に写り込んだ時間を AI エンジンへの入力開始時間とし、終電がホームから出発しカメラ①の画角から消えた時間を入力終了時間とした。入力終了時間後、該当期間中の映像解析が完了するまでの時間を計測した。これにより、処理遅延が蓄積されているかどうか、蓄積される場合はどの程度蓄積されるのかを評価した。(①車両 1 編成当たりの AI 解析にかかる処理時間と比較して、②1 日における車両の始発から終電まで通して AI 解析を行った場合の処理時間が大きくなっている場合は、処理遅延が蓄積されたものとして評価する。)

○測定項目：

- 1：カメラ①における始発車両の入線時間（カメラに先頭車両が映り込んだ時間）
- 2：カメラ①における終電車両が出発した時間（カメラの画角から車両が消えた時間）
- 3：終電出発の最後の入力画像が AI エンジンにより解析処理が完了した時間

b) AI 推論処理の精度（検出精度）

検出対象物（台車き裂、ハンドル開閉、ブレーキパッド摩耗等）ごとに、Precision（適合率）及び Recall（再現率）を以下のように評価した。

・Precision（適合率）：システムが検出した結果のうち、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。（表 4.4.1.1-10 における $D/(B+D)$ ）

・Recall（再現率）：結果として検出されるべきもののうち、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、評価する。（表 4.4.1.1-10 における $D/(C+D)$ ）

表 4.4.1.1-10 検出結果の分類

		AI検出	
		検出なし	検出あり
実際の状態	正常	A	B (誤検出)
	異常	C (検出漏れ)	D (正常に検出)

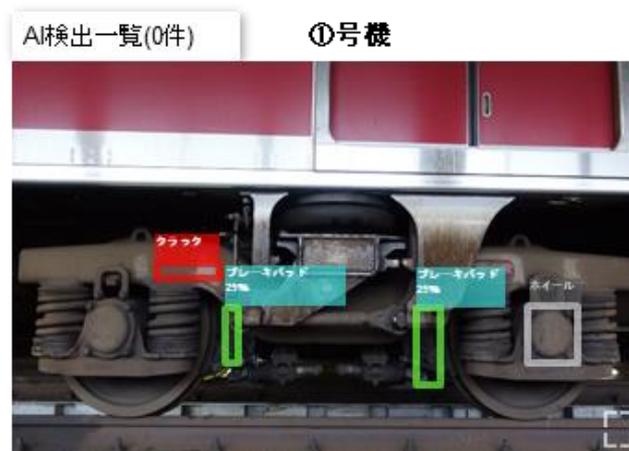


図 4.4.1.1-12 AI 検出性能確認イメージ

○台車き裂

幅：0.1mm、0.2mm、1.0mm、2.0mm、4.0mm、6.0mm

長さ：20mm、60mm、80mm

方向：縦横

油性黒ペンで擬似き裂のそれぞれのパターンを実証場所に入線する車両の台車に描き、擬似き裂の AI 検出ができるか確認した。なお、疑似き裂の記入は京浜急行電鉄車両部にて実施した。

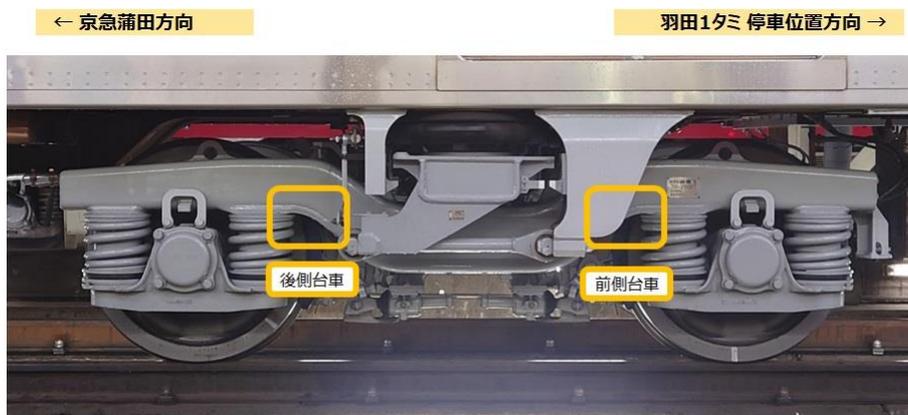


図 4.4.1.1-13 擬似き裂を描く台車



図 4.4.1.1-14 横方向の擬似き裂



図 4.4.1.1-15 縦方向の擬似き裂

No.	亀裂 長さ (mm)	クラック 方向	4両目				3両目				2両目				1両目				※5-1台 台車方向
			溶接部分		非溶接部分														
			亀裂 長さ	クラック 方向															
1	20mm	タテ	0.1	タテ	A														
2	0.1mm	ヨコ	0.1	ヨコ	B														
3	80mm	タテ	0.1	タテ	C														
4	20mm	タテ	0.2	タテ	D														
5	0.2mm	ヨコ	0.2	ヨコ	E														
6	80mm	タテ	0.2	タテ	F														
7	20mm	タテ	1	タテ	G														
8	1mm	ヨコ	1	ヨコ	H														
9	80mm	タテ	1	タテ	I														
10	20mm	タテ	2	タテ	J														
11	2mm	ヨコ	2	ヨコ	K														
12	80mm	タテ	2	タテ	L														
13	20mm	タテ	4	タテ	M														
14	40mm	タテ	4	タテ	N														
15	80mm	タテ	4	タテ	O														
16	20mm	タテ	6	タテ	P														
17	60mm	タテ	6	タテ	Q														
18	80mm	タテ	6	タテ	R														
19	20mm	タテ	1	タテ	S														
20	1mm	ヨコ	1	ヨコ	T														
21	80mm	タテ	1	タテ	U														
22	20mm	タテ	2	タテ	V														
23	2mm	ヨコ	2	ヨコ	W														
24	80mm	タテ	2	タテ	X														

図 4.4.1.1-16 台車に描く擬似き裂パターン



図 4.4.1.1-17 台車に疑似き裂を記入する様子



図 4.4.1.1-18 記入した疑似き裂の例

○ハンドル開閉

京浜急行電鉄羽田空港第1・第2ターミナル駅では、安全面の観点で検証のためにハンドルを意図的に開閉させて走行させることが不可能であったため、正しい位置（閉まっている）であることをAI検出できるか確認した。ハンドル開閉についてAIで異常を検出できるかどうかの確認として、京急久里浜工場でハンドルを意図的に開閉させて列車を走行させて撮影した映像を使用し、評価を行った。

○ブレーキパッド

擦り減った割合の適合率ではなく、異常（取り替え要）とAI検出されたブレーキパッドに対して実際に取り替えが必要なほど擦り減っているかを目視確認した。

c) AI 推論処理の精度（検出限界速度）

検出対象物（台車き裂、ハンドル開閉、ブレーキパッド摩耗等）に応じて、どの程度の速度で移動する対象を検出可能か、計測・評価した。

d) その他（解析対象の汚れや周辺環境の影響）

必要に応じて環境要因、具体的には解析実行時の照度、対象物の汚れ具合の解析に対する影響を評価した。



図 4.4.1.1-19 環境要因によるAI解析影響評価イメージ

e) 実用性に関する定性評価（利用者体感等）

利用者の体感とオペレーション観点での実用性について、京浜急行電鉄の技術者へのアンケートを通じて評価した。

4) その他（現場環境）

その他（現場環境）に関する評価・検証方法を表 4.4.1.1-11 に示す。ここでは、現場機材の運用にあたり、鉄道駅における監視システムの必要十分な環境への適応性、および長期安定性について評価・検証した。

表 4.4.1.1-11 その他（現場環境）に関する評価・検証方法

No	対象機能	評価項目	評価方法
1	環境適応性（照度）	照度変化にともなう AI 検出性能	現場に設置した照明機材を調整し、異なる照度環境を構築した上で、照度の違いが取得映像の品質や AI 解析性能に及ぼす影響を評価し、改善する。
2	環境適応性（対象物の色合い）	対象物の色合い変化にともなう AI 検出性能	対象物（車両台車等）の色合い変化に応じた AI 検出性能を評価し、改善する。特に検出精度が低くなる色合いなどが見られる場合は、要因分析と重点的な追加学習を行い、改善を試みる。
3	長期安定性	カメラ機材の連続稼働時間	現場に設置したカメラ機材の連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。
4	長期安定性	GPU 搭載ノート PC の連続稼働時間	現場に設置した GPU 搭載ノート PC の連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。
5	長期安定性	5G ルータの連続稼働時間	現場に設置した 5G ルータの連続稼働時間を評価する。機材停止を確認した時点で切り分けを行い、PDCA を通じて停止要因を改善し、再度検証を実施する。

(3) 実証結果及び考察

1) 通信性能

a) ローカル 5G 区間の通信性能

測定結果を表 4.4.1.1-12 に示す。なお、各測定における測定対象外の項目はグレーで塗りつぶしている。

表 4.4.1.1-12 ローカル 5G の通信性能評価

試験項目	測定端末#1	測定端末#2	試験	プロトコル	試験区分	パケットサイズ	送信時間	スループット	試験回数	bandwidth	jitter	lost/total	min/	avg/	max/	mdev/
ローカル5G区間の通信性能	L5GUE配下ノートPC	第3ターミナルL3SW配下ノートPC	iperf 100M	TCP	上り	1420	60	-	1	80.90	--	--	--	--	--	--
					上り	1420	60	-	2	81.40	--	--	--	--	--	--
					上り	1420	60	-	3	81.30	--	--	--	--	--	--
								※avg	81.2	--	--	--	--	--	--	--
					下り	1420	60	-	1	100.00	--	--	--	--	--	--
					下り	1420	60	-	2	100.00	--	--	--	--	--	--
				下り	1420	60	-	3	100.00	--	--	--	--	--	--	
							※avg	100.0	--	--	--	--	--	--	--	
				上り	1420	60	100	2	82.20	0.11	0.00	--	--	--	--	
				上り	1420	60	100	3	81.90	0.09	0.00	--	--	--	--	
							※avg	82.17	0.10	0.00	--	--	--	--	--	
				下り	1420	60	100	1	100.00	0.14	0.20	--	--	--	--	
			下り	1420	60	100	2	100.00	0.14	0.20	--	--	--	--		
			下り	1420	60	100	3	100.00	0.08	0.20	--	--	--	--		
						※avg	100.00	0.12	0.20	--	--	--	--	--		
			上り	1420	60	-	2	81.80	--	--	--	--	--			
			上り	1420	60	-	3	81.80	--	--	--	--	--			
						※avg	81.6	--	--	--	--	--	--			
			下り	1420	60	-	1	200.00	--	--	--	--	--			
			下り	1420	60	-	2	200.00	--	--	--	--	--			
			下り	1420	60	-	3	200.00	--	--	--	--	--			
						※avg	200.0	--	--	--	--	--	--			
			上り	1420	60	200	2	81.70	0.12	0.59	--	--	--			
			上り	1420	60	200	3	81.80	0.20	0.59	--	--	--			
						※avg	81.80	0.18	0.59	--	--	--	--			
			下り	1420	60	200	1	139.00	0.06	0.00	--	--	--			
			下り	1420	60	200	2	139.00	0.04	0.00	--	--	--			
			下り	1420	60	200	3	139.00	0.16	0.00	--	--	--			
						※avg	139.00	0.09	0.00	--	--	--	--			
			上り	1420	60	-	2	--	--	--	19.443	33.436	44.276	5.70458		
上り	1420	60	-	3	--	--	--	15.711	32.788	42.745	5.49294					
			※avg	--	--	--	--	15.052333	32.6067	47.5177	6.20885					

▼上り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 81.2Mbps、81.6Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 82.17Mbps、81.8Mbps となった。

▼下り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 100.0Mbps、200.0Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 100.0Mbps、139.0Mbps となった。

以上の結果より、本課題解決システムの上り通信の目標値である 60Mbps、および下り通信の目標値である 60Mbps で送信するために十分な帯域を確保できていることが分かる。

b) 専用線区間の通信性能

測定結果を表 4.4.1.1-13 に示す。なお、各測定における測定対象外の項目はグレーで塗りつぶしている。

表 4.4.1.1-13 専用線区間の通信性能評価

No.	試験項目	測定端末#1	測定端末#2	試験	プロトコル	試験区分	パケットサイズ	送信時間(sec)	スループット(Mbps)	試験回数	bandwidth	jitter	lost/total パケット数	min/ Microsec onds	avg/ Microsec onds	max/ Microsec onds	mdev/ Microsec onds		
1-2	専用線区間の通信性能	第3ターミナルL3SW配下ノートPC	dOIC WebRTC インスタンス	iperf 100M	TCP	上り	1420	60	-	1	92.13	--	--	--	--	--	--	--	
							1420	60	-	2	90.10	--	--	--	--	--	--	--	
							1420	60	-	3	90.10	--	--	--	--	--	--	--	
						※avg				90.8	--	--	--	--	--	--	--	--	
						下り	1420	60	-	1	122.04	--	--	--	--	--	--	--	--
							1420	60	-	2	120.91	--	--	--	--	--	--	--	--
					1420		60	-	3	120.91	--	--	--	--	--	--	--	--	
					※avg				121.3	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
					1420	60	100	2	101.67	0.02	0.00	--	--	--	--	--			
					1420	60	100	3	99.91	0.02	0.00	--	--	--	--	--			
					※avg				100.50	0.02	0.00	--	--	--	--	--	--		
					下り	1420	60	100	1	87.39	0.01	0.13	--	--	--	--	--		
				1420		60	100	2	87.01	0.02	0.13	--	--	--	--	--			
				1420		60	100	3	87.31	0.02	0.13	--	--	--	--	--			
				※avg				87.23	0.02	0.13	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	-	2	86.01	--	--	--	--	--	--	--				
				1420	60	-	3	89.83	--	--	--	--	--	--	--				
				※avg				88.6	--	--	--	--	--	--	--	--			
				下り	1420	60	-	1	119.67	--	--	--	--	--	--	--			
					1420	60	-	2	117.99333	--	--	--	--	--	--	--			
					1420	60	-	3	112.64	--	--	--	--	--	--	--			
				※avg				116.8	--	--	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	200	2	185.15	0.03	0.07	--	--	--	--					
				1420	60	200	3	185.82	0.03	0.07	--	--	--	--					
※avg				185.91	0.03	0.07	--	--	--	--	--								
下り	1420	60	200	1	144.35	0.01	0.28	--	--	--	--								
	1420	60	200	2	144.87	0.01	0.28	--	--	--	--								
	1420	60	200	3	144.83	0.01	0.28	--	--	--	--								
※avg				144.68	0.01	0.28	--	--	--	--	--								
1420	60	-	2	--	--	--	12	12	14	--									
1420	60	-	3	--	--	--	12	12	14	--									
※avg				--	--	--	12	12	14	--									

▼上り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 90.80Mbps、88.6Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 100.50Mbps、185.91Mbps となった。

▼下り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 121.30Mbps、116.80Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 87.23Mbps、114.68Mbps となった。

以上の結果より、本課題解決システムの上り通信の目標値である 60Mbps、および下り通信の目標値である 60Mbps で送信するために十分な帯域を確保できていることが分かる。

c) クライアント～dOIC 区間の通信性能

測定結果を表 4.4.1.1-14 に示す。なお、各測定における測定対象外の項目はグレーで塗りつぶしている。

表 4.4.1.1-14 クライアント～dOIC 区間の通信性能評価

No.	試験項目	測定端末#1	測定端末#2	試験	プロトコル	試験区分	パケット サイズ	送信時間 (sec)	スループット (Mbps)	試験回数	bandwidth	jitter	lost/total パケット数	min/ Microsec onds	avg/ Microsec onds	max/ Microsec onds	mdev/ Microsec onds		
1-3	監視拠点 クライアント ～dOIC区 間の通信 性能	京急本社 監視クライアント PC	dOIC WebRTC インスタンス	iperf 100M	TCP	上り	1420	60	-	1	9.9	--	--	--	--	--	--	--	
							1420	60	-	2	12.6	--	--	--	--	--	--	--	
							1420	60	-	3	12.6	--	--	--	--	--	--	--	
						※avg				11.7	--	--	--	--	--	--	--	--	
						下り	1420	60	-	1	6.4	--	--	--	--	--	--	--	--
							1420	60	-	2	3.7	--	--	--	--	--	--	--	--
					1420		60	-	3	6.2	--	--	--	--	--	--	--	--	
					※avg				5.4	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
					1420	60	100	2	6.5	2.4	0.9	--	--	--	--	--			
					1420	60	100	3	12.2	0.7	0.9	--	--	--	--	--			
					※avg				9.4	1.7	0.9	--	--	--	--	--	--		
					1420	60	100	2	15.8	1.6	0.8	--	--	--	--	--			
				1420	60	100	3	16.5	0.3	0.8	--	--	--	--	--				
				※avg				16.0	1.2	0.8	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	-	2	15.8	--	--	--	--	--	--	--				
				1420	60	-	3	14.5	--	--	--	--	--	--	--				
				※avg				15.6	--	--	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	-	2	6.2	--	--	--	--	--	--	--				
				1420	60	-	3	5.8	--	--	--	--	--	--	--				
				※avg				6.2	--	--	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	200	2	13.9	1.0	0.9	--	--	--	--	--				
				1420	60	200	3	17.8	1.2	0.9	--	--	--	--	--				
				※avg				16.0	2.2	0.9	--	--	--	--	--	--			
				1420	60	200	2	28.2	0.3	0.9	--	--	--	--	--				
1420	60	200	3	27.2	0.4	0.9	--	--	--	--	--								
※avg				27.7	0.4	0.9	--	--	--	--	--	--							
1420	60	-	2	--	--	--	45	73	285	--	--								
1420	60	-	3	--	--	--	46	63	209	--	--								
※avg				--	--	--	44.7	65.7	232.7	--	--								

▼上り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 11.7Mbps、15.6Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 9.4Mbps、16.0Mbps となった。

▼下り方向：

TCP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 5.4Mbps、6.2Mbps となった。また、UDP の場合、送信パケットを 100Mbps、200Mbps に設定すると、3 回の測定結果の平均でスループットがそれぞれ 16.0Mbps、27.7Mbps となった。

本実証で開発した監視画面では、フル HD の映像を 3 つ閲覧するため、通信品質としては 36Mbps 以上あることが望ましいが、結果から目標値は達成できていないことがわかる。

今回構築したシステムでは、監視拠点の通信回線として、構築期間の短縮のためモバイルルータを用いたインターネット回線を使用した。なお、セキュリティ強化のため、モバイルルータに固定 IP アドレスを付与し、その固定 IP アドレスからの通信のみ可能となるように設計した。このため、インターネット回線であることや、モバイル回線を使用することによる通信品質の揺らぎや時間帯による混雑具合の影響なども含まれた結果である。また、本通信性能試験を実施した、監視拠点の京浜急行電鉄の本社会議室内は LTE エリアであった。5G などの高速・大容量通信が可能な環境で閲覧することで、監視拠点の通信性能の改善は見込まれるものと結論づけた。

d) End-End 通信遅延確認

測定結果を表 4.4.1.1-15 に示す。なお、各測定における測定対象外の項目はグレーで塗りつぶしている。

表 4.4.1.1-15 End-End 通信遅延確認評価

試験項目	試験区分	試験回数	対象端末	CPU%	MEM%	GPU%	解像度	フレーム数	受信フレーム数	デコードフレーム数	ドロップフレーム数	遅延時間・量のチェック	備考 ※映像劣化、かつぎの有無など		
End-End 通信遅延確認	1回目 30分間	5分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	19.00	--	--	--	--	--	--	--		
			dOIC WebRTCインスタンス	3.70	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--		
			SH52A配下 GPUPC	4.00	16.00	13.00	1920×1080	20.00	5889.00	5880.00	6.00	0:00:01.41			
		※avg		3.57	12.67	16.00	--	--	--	--	--	--	--		
		10分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	18.00	--	--	--	--	--	--	--	--	
			dOIC WebRTCインスタンス	3.30	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
			SH52A配下 GPUPC	7.00	17.00	14.00	1920×1080	20.24	11899.00	11729.00	148.00	0:00:02.41			
		※avg		4.43	13.01	16.00	--	--	--	--	--	--	--		
		30分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	18.00	--	--	--	--	--	--	--	--	
	dOIC WebRTCインスタンス		3.60	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	SH52A配下 GPUPC		4.00	17.00	13.00	1920×1080	21.08	35889.00	35634.00	253.00	0:00:02.50				
	※avg		3.53	13.01	15.50	--	--	--	--	--	--	--			
	2回目 30分間	5分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	18.00	--	--	--	--	--	--	--		
			dOIC WebRTCインスタンス	3.00	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--		
			SH52A配下 GPUPC	4.00	17.00	13.00	1920×1080	19.90	5918.00	5915.00	12.00	0:00:02.55			
		※avg		3.33	13.01	15.50	--	--	--	--	--	--	--		
		10分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	18.00	--	--	--	--	--	--	--	--	
			dOIC WebRTCインスタンス	3.40	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
			SH52A配下 GPUPC	4.00	18.00	12.00	1920×1080	17.87	11916.00	11892.00	24.00	0:00:02.58			
		※avg		3.47	13.34	15.00	--	--	--	--	--	--	--		
		30分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	16.00	--	--	--	--	--	--	--	--	
	dOIC WebRTCインスタンス		2.80	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	SH52A配下 GPUPC		3.00	17.00	12.00	1920×1080	21.26	35938.00	35644.00	291.00	0:00:02.69				
	※avg		2.93	13.01	14.00	--	--	--	--	--	--	--			
	3回目 30分間	5分後	3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	16.00	--	--	--	--	--	--	--		
			dOIC WebRTCインスタンス	2.30	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--		
			SH52A配下 GPUPC	3.00	17.00	12.00	1920×1080	20.00	5896.00	5862.00	31.00	0:00:02.64			
※avg			2.77	13.01	14.00	--	--	--	--	--	--	--			
10分後		3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	16.00	--	--	--	--	--	--	--	--		
		dOIC WebRTCインスタンス	2.90	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
		SH52A配下 GPUPC	3.00	17.00	12.00	1920×1080	19.74	11895.00	11856.00	37.00	0:00:02.75				
※avg			2.97	13.01	14.00	--	--	--	--	--	--	--			
30分後		3T機械室 GPU-PC (momo)	3.00	22.00	18.00	--	--	--	--	--	--	--	--		
	dOIC WebRTCインスタンス	4.00	0.02	--	--	--	--	--	--	--	--	--			
	SH52A配下 GPUPC	4.00	17.00	12.00	1920×1080	19.08	35894.00	35701.00	192.00	0:00:03.35					
※avg		3.67	13.01	15.00	--	--	--	--	--	--	--				

測定時はホーム下 3 か所に設置したカメラのうち 1 つのカメラで映像伝送し、使用しない 2 台のカメラは通信を切断した状態で実施した。映像伝送のパラメータはフル HD、12Mbps、20fps で伝送した。結果として、遅延量は 1.41s~3.35s となった。

本課題実証システムでは、長期安定性の観点で onvif 対応・防水防塵対応のネットワークカメラを使用したため、onvif から WebRTC への変換が必要な構成となった。この変換のために遅延が発生することは机上検討でも把握しており、実運用上の観点で、長期安定性を優先して遅延が発生することは、運用上の業務フローに大きく影響しないことをコンソーシアム内で協議の上、ネットワークカメラを使用した。事前検証において、onvif から WebRTC への変換により数秒の遅延が生じることを確認しており、測定で確認された遅延と一致するため、試験結果にみられる遅延は onvif から WebRTC への変換により生じた遅延であると結論づけた。

以上のことから、onvif から WebRTC への変換により生じた遅延以外は生じていないものとみなすことができ、列車走行後 2 分以内にユーザが映像を閲覧できるという目標値に対して大きな影響を及ぼさないことから、目標値を達成したと結論付けた。

2) UI・映像伝送システム

a) UI・映像伝送システムの評価結果

UI・映像伝送システムの評価結果を表 4.4.1.1-16 に示す。

時刻表上の列車発着時刻からユーザが解析結果を確認可能な状態にするまでの時間を 2 分内という目標に対して、サーバ処理は時刻表上の列車発着時刻から平均 111 秒で完了し、ユーザがサーバにアクセスすれば映像を閲覧できる状態になっていることを確認し、システム処理時間の KPI は達成したことを確認した。一方で、実際の監視拠点となる、京浜急行電鉄本社内では映像閲覧までに平均 17 秒程度要しており、かつ試行によって大きくばらつきがあることから、列車の発着から 2 分以内にユーザが監視画面で映像を閲覧できることは確認できなかった。

映像閲覧の下り通信はインターネットを利用しているため、通信環境の影響を受け、画面表示、画面遷移に時間を要した結果となった。本実証では実装に向けて、多拠点で場所の制約なく映像を確認できることを前提とし、固定 IP アドレスを割り振り接続元の制限をかけたモバイル端末によるインターネット接続を使用した。このため、通信性能を評価した区間はインターネットの区間を含むものであり、インターネット接続による通信品質の揺らぎや時間帯による混雑具合の影響など受けたものと結論づけた。

表 4.4.1.1-16 UI・映像伝送システムの評価結果

機能名	確認内容	確認結果			
		単一拠点		複数拠点	
		試験結果	表示/遷移時間	拠点① 表示/遷移時間	拠点② 表示/遷移時間
画面UI	車両監視を選択する機能および録画映像を一覧表示し選択できる				
-異常検知お知らせ機能	異常検知された際、画面右上に対象のカメラと日時がポップアップ表示される	○	40sec以下	15sec以下	20sec以下
-映像全画面表示機能	映像を全画面表示できる	○	1sec以下	1sec以下	1sec以下
-録画映像検索機能	メニューにて、録画映像を検索するフォームが表示される	○	1sec以下	1sec以下	1sec以下
-録画映像再生位置制御機能	シークバーにてユーザー操作で録画映像の再生位置の制御を行える	○	-		
-永久保存機能	UIから永久に保存したい録画映像やその関連データを設定できる	○	1sec以下	1sec以下	1sec以下
-AI検出一覧機能	表示している録画映像について異常検知情報の件数表示と再生リストを表示できる	○	1sec以下	1sec以下	1sec以下
画面遷移	各画面間を設計通り遷移できる				
-ライブ画面 → 録画画面	ライブ画面にてメニューから録画画面へ遷移できる	○	20sec以下	30sec以下	1sec以下
-録画画面 → ライブ画面	録画画面にてメニューからライブ画面へ遷移できる	○	1sec以下	2sec以下	1sec以下
リアルタイム映像配信機能	リアルタイム映像が配信される	○			
録画映像選択機能	ブラウザから録画映像を検索できる	○		検索対象10分間 →1sec以下 検索対象1時間 →1sec以下 検索対象3時間 →5sec以下 検索対象12時間 →25sec以下 検索対象24時間 →1.5min以下	検索対象10分間 →1sec以下 検索対象1時間 →1sec以下 検索対象3時間 →5sec以下 検索対象12時間 →25sec以下 検索対象24時間 →1.5min以下
録画映像再生機能	録画映像を配信してAI解析結果の異常検知が合成できている	○			
異常検知データ保存機能	AI解析結果の異常検知を保存できている	○			
録画映像取り込み機能	録画映像の情報を異常検知情報に紐づけ、webサーバに取り込める	○			

各評価項目の画面を図 4.4.1.1-20～図 4.4.1.1-28 に示す。なお、画面内の対象となる機能の箇所には橙色の枠で示した。



図 4.4.1.1-20 異常検出お知らせ機能



図 4.4.1.1-21 全画面表示機能（上：全画面表示前、下：全画面表示後）

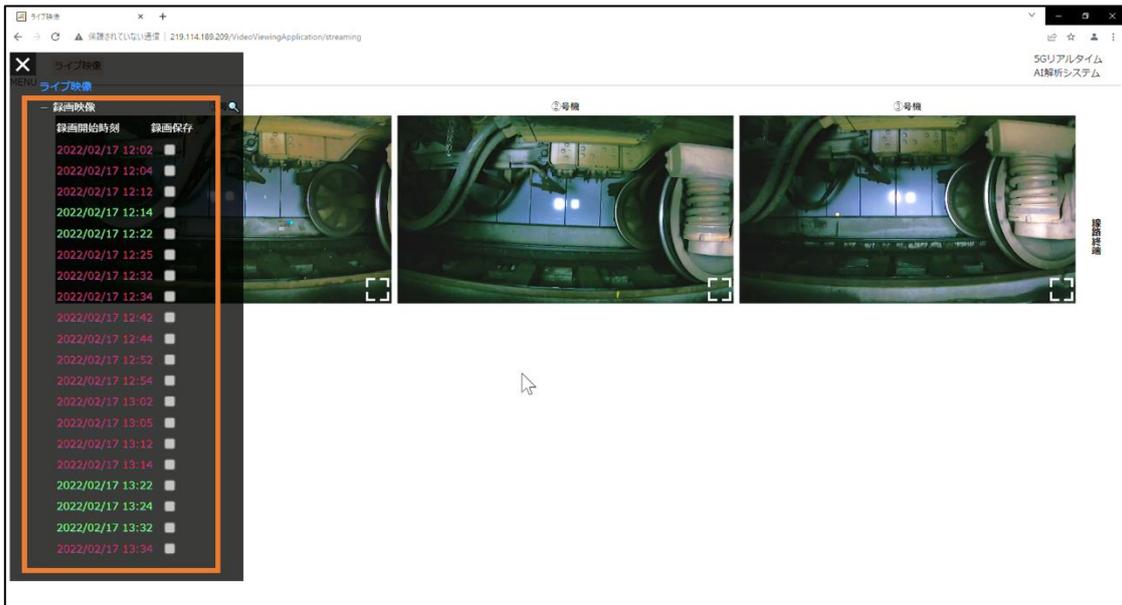
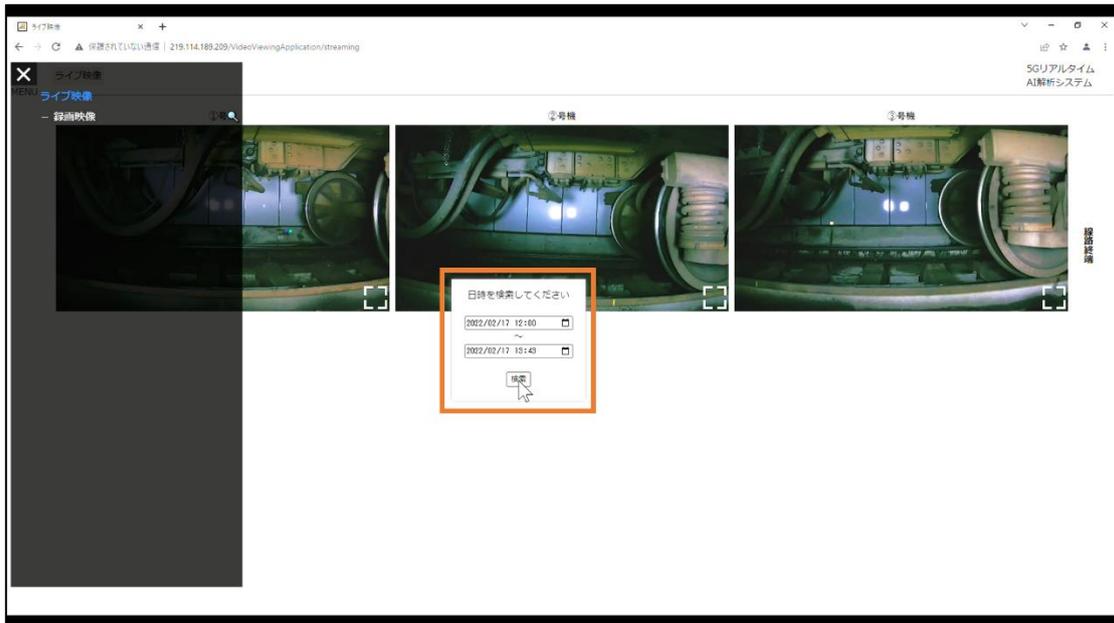


図 4.4.1.1-22 録画映像検索機能・録画映像選択機能（上：検索時、下：検索結果）



図 4.4.1.1-23 録画映像再生位置制御機能（上：操作前、下：操作後）



図 4.4.1.1-24 永久保存機能（上：操作前、下：操作後）

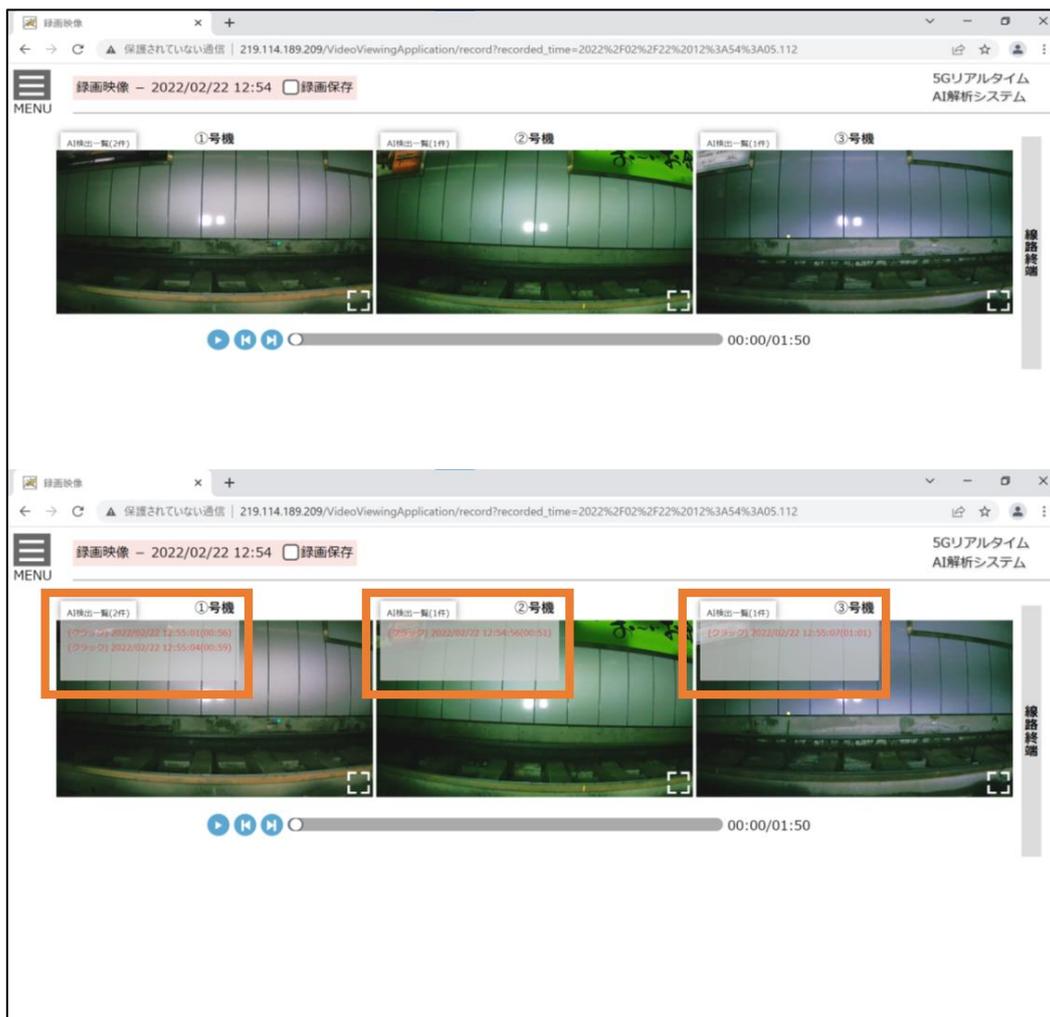


図 4.4.1.1-25 AI 検出一覧機能（上：操作前、下：操作後）

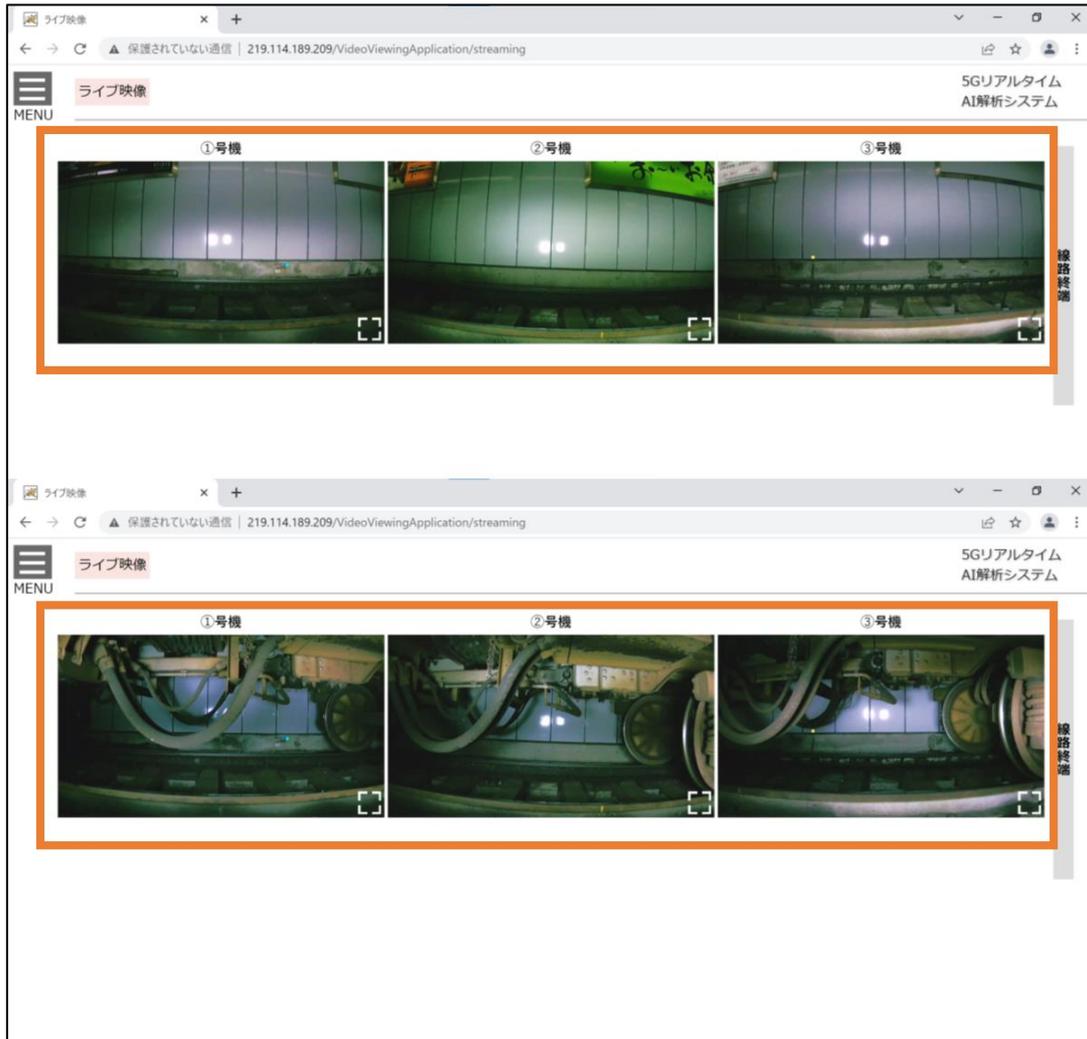


図 4.4.1.1-26 リアルタイム映像配信機能（上：接続時、下：一定時間経過後）



図 4.4.1.1-27 録画映像再生機能

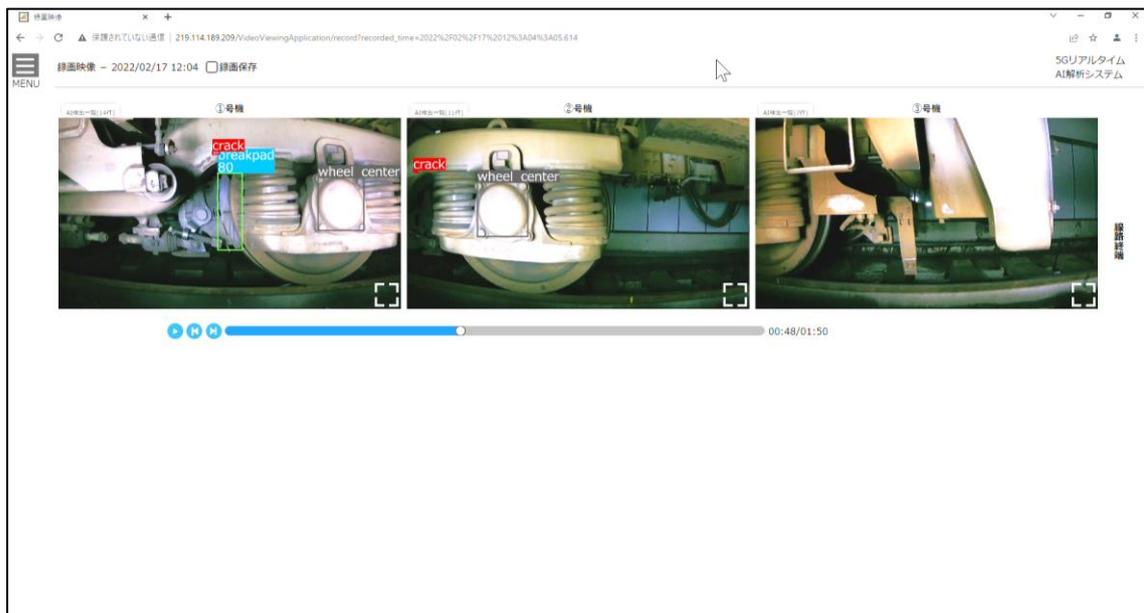


図 4.4.1.1-28 異常検出データ保存機能・録画映像取り込み機能

b) UI・映像伝送システムの利用者の体感

京浜急行電鉄の車両部に UI・映像伝送システムのデモンストレーション、および操作を体験していただき、アンケートと対面によるヒアリングを実施した。なお、アンケートは代表して2名に記入いただいた。アンケートの結果を図 4.4.1.1-26~図 4.4.1.1-27 に示す。

①ユーザインターフェースの利便性

提示する情報の配置や表示の仕方について、実運用の観点で改善すべき点のコメントをいただいた。具体的には、接続したときのトップ画面には、ライブ映像とともに直近の検出結果を表示させておき、時間で検索をかけなくても検出結果を常時表示させておくことや、異常検出お知らせ機能（ポップアップ通知）をより強調させて表示させるなどが挙げられた。また、リアルタイム性については、実装を見据えた第一歩としては、現状のシステムの約2分後に検出結果の映像が確認できる仕様（録画映像選択機能、およびライブ画面→録画面の画面遷移に該当）で問題ないが、将来的な実運用の際には異常を検出次第、すぐに映像・画像とともに通知し確認できるようにしてほしい、という意見を得た。

ユーザインターフェース上で提示する情報の種類としては、運用に必要な情報がある程度網羅できているが、提示の仕方やリアルタイム性に課題があることが浮き彫りになった。全体を通して、利用することを前提にした具体的な改善案等の意見を得ることができたことから、実装に向けたより詳細な検討のステップを踏むことができていると考えられる。

②使用した機材について

監視用端末としてノートパソコンで映像を確認していただき、表示される映像の品質については鮮明に見ることができている、というポジティブな意見を得ることができた。昨年度と比較してスピードのある車両を撮影するため、シャッタースピードを大きくしたことで照度補完のためにライトを設置したが、照度についても問題なく十分な明るさを確保できているという意見も得られた。一方で、現状では監視用端末のノートパソコンで映像を確認しているが、将来的には大画面に投影し、複数人で画像を確認する場面も想定されるという意見もあり、その場合にはより高画質な映像が必要となる可能性がある。

また、本システムでは車号の特定をシステム的に行うことができないが、実運用時には異常があった台車はどの編成のどの台車部分なのか、までシステムで特定されるとスムーズな運用が可能となるという意見を得られた。車号の特定には、列車側にビーコンなどの機材を設置する、カメラで列車の正面に記入されている番号を撮影する等、複数の案が考えられるが、各鉄道会社で導入可能な汎用的なシステムとするためには各社の異なる車体の仕様にも対応できるような仕組みが必要となり、詳細な検討が必要となる。

③5G・AI監視システムの機能と導入可能性について

デモンストレーションで確認いただいた AI 検出結果の画面については、検出ができているという意見を得られた。一方で、塗装のひび割れなど疑似き裂ではないものをき裂として検出する場合があることが確認されており、き裂の AI 判定をどのように学習させるか、精度の向上と追加学習が課題として浮き彫りになった。

④ローカル 5G の機能と導入可能性について

ローカル 5G の通信自体は問題ないが、周辺機器や処理環境、および映像閲覧環境の通信環境の影響で映像がスムーズに確認できず、課題があるという意見を得た。デモンストレーションでは通信環境により画面表示に時間がかかる（録画映像選択機能、およびライブ画面→録画面の画面遷移に該当）など、操作の体感に大きな影響を与えた。実運用の際には、下り通信においても 5G を使用できる環境での映像閲覧が望ましい。

表 4.4.1.1-17 アンケート結果

アンケート項目
<p>【1.UIの利便性について】</p> <p>Q1 Web画面のレイアウト・見たい目はいかがでしたか？ A1：1(悪い)：録画映像一覧及び検出結果を常時表示すべき。 A2：2(やや悪い)：ライブ映像より、録画映像を表示した一覧をトップ画面に表示してほしい。 AI解析によって異常があったものが、トップ画面で分かるようにしてほしい。 (せっかく録画映像を色分けしているのにもったいないと考えます。)</p> <p>Q2 実業務を想定すると、Web画面上どのような機能が良かったと思われましたか？ A1：①ライブ映像 ②ポップアップ A2：①トップ画面と一覧追加</p> <p>Q3 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われましたか？ A1：①リアルタイム性 ②強調 A2：①疑似き裂の画面をすぐ表示する ②疑似き裂画面の拡大化 ③ポップアップから映像確認できる機能</p>
<p>【2.使用した機材について】</p> <p>Q1 高精細カメラについて、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？ A1：5(良い)：ライブ映像をノートパソコンで確認する範囲では問題なし。 A2：2(やや悪い)：現状のAI解析精度との関係が不明なのでなんともいえない。 ただし、録画映像を拡大するという観点でいえば、もう少し高性能カメラが良いかと考える。</p> <p>Q2 照度の補完のためにライトを使用したが、実運用を想定したときに十分な性能だと感じましたか？ A1：5(良い)：問題なし。 A2：3(普通)：台車を検知するには明るいと考える。 ただし、電車を運転している運転手の目にどう映るか、眩しくないか、確認しなくてはならないと考える。</p> <p>Q3 検出対象物について、今回は台車亀裂(初期)、ハンドルの開閉、ブレーキパッドの摩耗を選定しましたが、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ください。 A1：台車の亀裂：5(良い) ハンドルの開閉：5(良い) ブレーキパッドの摩耗：5(良い) A2：台車の亀裂：2(やや悪い) ハンドルの開閉：4(やや良い) ブレーキパッドの摩耗：3(普通)</p> <p>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？ A1：①屋根上(理由：運用上外的な損傷を受ける部分であるため。) ②車体全体(理由：同上) A2：①車号(理由：どの車両が紐づけしてほしい。)</p>
<p>【3.5G-AI監視システムの機能と導入可能性について】</p> <p>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？ A1：5(良い)：対象物に対しては問題なし。 A2：3(普通)：まだ精度が確認できないため、現状なんともいえないが、画面を確認した限り、検知ができていた。</p> <p>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？ A1：3(普通)：安全性向上できるが、実務向上は望めないため。 A2：2(やや悪い)：塗装剥がれを検知しているため、追加学習が必要と考える。</p> <p>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ください。3つ以内でお答え下さい。 A1：正確性の向上 A2：クラックの判断をどのように学習させるか。</p>
<p>【4.ローカル5Gの機能と導入の可能性について】</p> <p>Q1 将来的に鉄道事業(車両部門)におけるローカル5Gの導入可能性(領域・用途)と課題について、ご意見下さい。 A1：5G通信自体は問題ない様子であるが、周辺機器や処理環境に必要な設置に課題が多くあると感じている。 A2：3(普通)：L5Gの通信速度は速いと考えられるが、カメラの性能と社内の通信速度の影響によりスムーズに映像が確認できなかった。</p>
<p>※回答は5段階数値 1：悪い ～ 5：良い にて評価を入力</p>

3) AI 解析エンジン

a) AI 構成面における評価結果

AI 構成面における評価結果を表 4.4.1.1-18 及び図 4.4.1.1-29 に示す。

表 4.4.1.1-18 AI 構成面における評価結果

計算リソースに応じたAI解析速度

分類	内容	
処理時間 (①×②÷③)	完了までにかかる時間(秒)	41
①処理枚数	合計処理画像枚数(枚)	1,800
	カメラの映像数	3
	FPS	20
	検出対象時間(秒)* ¹	30
②AI処理速度	画像1枚辺りの処理時間(秒/枚・AI数)	0.36
③AI並列稼働数	gpu数(AI数)	16

複数インプット映像の処理

分類	内容	
処理時間 (①×②÷③)	完了までにかかる時間(秒)	25
①処理枚数	合計処理画像枚数(枚)	1,260
	カメラの映像数	3
	FPS	20
	検出対象時間(秒)* ¹	21
②AI処理速度	画像1枚辺りの処理時間(秒/枚・AI数)	0.32
③AI並列稼働数	gpu数(AI数)	16

AI処理時間の分布

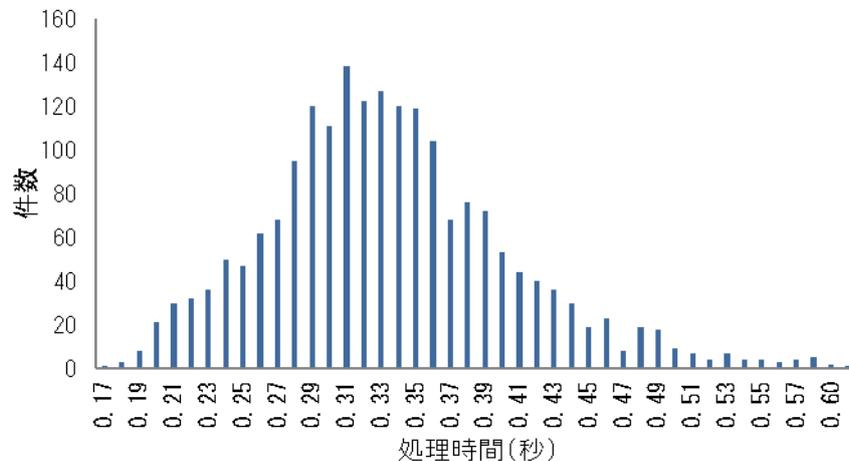


図 4.4.1.1-29 AI 処理時間の分布

AI 構成面での評価として、机上での見積もり解析速度と実績値を比較した。その結果、見積もりに対して検出対象時間が想定より短くなっており、机上検討の 41 秒よりも実際の処理時間は 25 秒と短くなったこと以外は机上検討に沿った内容の解析速度が出ていた。

なお、今回はカメラ 3 台でシステムを構築したが、将来的にカメラの台数を増やした場合の AI 処理時間を評価した。試験結果に基づいて、カメラ 6 台をインプットの映像数とした場合の AI 処理時間を机上計算により確認した。その結果、AI 処理時間は 50 秒となり、カメラ 3 台の場合と同等の処理時間に収めるためには、AI 処理を並列で行う GPU の数を現状の 16 から 32 に増やす必要があることが確認された。

b) AI 処理時間の評価結果

処理時間の評価結果を表 4.4.1.1-19~表 4.4.1.1-20 に示す。

表 4.4.1.1-19 車両 1 編成当たりの AI 解析にかかる処理時間

編成情報		実績			集計データ	
	日付	入線時刻	停車時刻	AI解析終了時刻	入線から停車まで(秒)	AI解析時間(秒)
編成 1	2月17日	16時04分50秒	16時05分11秒	16時05分38秒	21	27
編成 2	2月17日	19時29分50秒	19時30分12秒	19時30分38秒	22	26
編成 3	2月17日	19時19分42秒	19時20分01秒	19時20分22秒	19	21
編成 4	2月18日	16時04分45秒	16時05分07秒	16時05分31秒	22	24
編成 5	2月18日	15時24分49秒	15時25分08秒	15時25分31秒	19	23
平均					21	24

表 4.4.1.1-20 1 日における車両の始発から終電まで通して AI 解析を行った場合の処理時間

編成情報		実績			集計データ	
no	日付	始発入線時刻	終電出線時刻	AI解析終了時刻	始発から終電まで	残AI解析時間(秒)
1	2022/2/11	5時32分01秒	23時48分20秒	23時48分46秒	18時16分19秒	26
2	2022/2/14	5時32分19秒	0時11分04秒	0時11分27秒	18時38分45秒	23
3	2022/2/15	5時31分46秒	0時11分12秒	0時11分34秒	18時39分26秒	22
4	2022/2/16	5時31分50秒	0時11分03秒	0時11分26秒	18時39分13秒	23
5	2022/2/17	5時32分04秒	0時12分13秒	0時12分38秒	18時40分09秒	25
平均					46	24

車両 1 編成当たりの AI 解析にかかった処理時間と、1 日における車両の始発から終電までを通して AI 解析を行った場合の処理時間を測定した。その結果、いずれの測定においても車両が出線後 30 秒以内に AI 解析が完了しており、処理遅延の蓄積は生じていないことが見受けられた。処理遅延の蓄積を生じさせないためには、システム設計上、処理時間の全体で 2 分以内にする必要があったが、列車有無判定アルゴリズム・システムの導入により、走行する列車がカメラに写っている間だけを AI 解析の対象とすることができたことで、処理遅延の蓄積が生じないシステムを実現することができた。

c) AI 検出精度・検出限界速度の評価結果

疑似き裂を記入した 24 編成の列車について、10 日間かけて羽田空港第 1 第 2 ターミナル駅に入線する映像を 1 回ずつ評価した。

ただし、H (幅 1mm、長さ 60mm の 2 編成のうち 1 編成)、P (幅 6mm、長さ 20mm)、W (幅 2mm、長さ 60mm の 2 編成のうち 1 編成) については評価した 10 日間で 1 度も入線せず、評価の対象外とした。

評価の対象とした編成数は 22 編成、車両数は 132 両である。AI 検出性能評価としては、設置したカメラ 3 台にそれぞれ映った疑似き裂、ブレーキパッド、ハンドルのうち、映像の乱れ等により AI 解析不可能な画像を除いたものを有効サンプルとして評価を行った。有効サンプル数としては、疑似き裂は 1,109 個、ブレーキパッドは 690 個、ハンドルは 320 個である。

①疑似き裂の検出性能評価

- 疑似き裂の属性観点で評価

まず、疑似き裂の属性に着目し解析を行った。

疑似き裂の方向、疑似き裂の幅に着目し、適合率・再現率を評価した。

幅 4.0mm、6.0mm では、長さ 20mm、60mm、80mm のいずれの場合でもおおよそ検出できている。

幅 2mm では、長さ 60mm は適合率 100%、再現率 100%でおおよそ検出、長さ 80mm は適合率 99.06%、再現率 82.03%でおおよそ検出ができており、幅 1mm では、長さ 80mm で適合率 100%、再現率 55.65%でおおよそ検出ができています。幅 0.1mm では全体で適合率 96.67%、再現率 15.10%であった。幅 0.2mm では全体で適合率 100%、再現率 14.06%であった。疑似き裂幅 0.1mm、0.2mm では、1mm 以上のより太い幅の疑似き裂に比べて検出がよりできていないが、昨年度の結果と比較すると幅 0.1mm、長さ 20mm でも検出ができていたことから、システムの性能として向上しているといえる。

性能が向上した要因として、昨年度と比較し、列車の台車部分とカメラの距離が近くなったことから、映像がより鮮明になったことが考えられる。また、昨年度は照度に関して日照条件の影響を受けやすい環境であったが、今回は地下駅かつ照度補完のためにライトを設置したため、照度が一定かつ十分な明るさが確保された環境を構築できたことから、再現率が向上したものと考えられる。

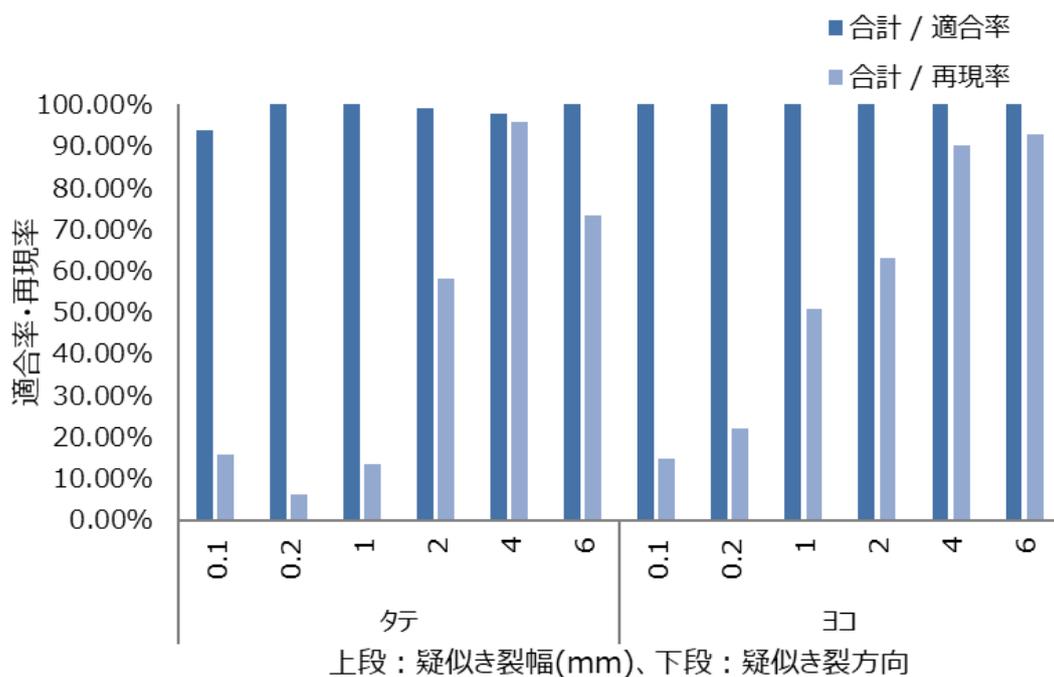


図 4.4.1.1-30 疑似き裂方向・疑似き裂幅観点での評価結果

表 4.4.1.1-21 疑似き裂方向・疑似き裂幅観点での評価結果

方向	幅[mm]	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
タテ	0.1	93.75%	15.63%	96
	0.2	100.00%	6.25%	96
	1	100.00%	13.49%	128
	2	98.94%	58.13%	160
	4	97.80%	95.70%	96
	6	100.00%	73.21%	64
ヨコ	0.1	100.00%	14.58%	96
	0.2	100.00%	21.88%	96
	1	100.00%	50.79%	128
	2	100.00%	63.13%	160
	4	100.00%	90.32%	96
	6	100.00%	92.86%	64
総計		99.33%	47.61%	1,280

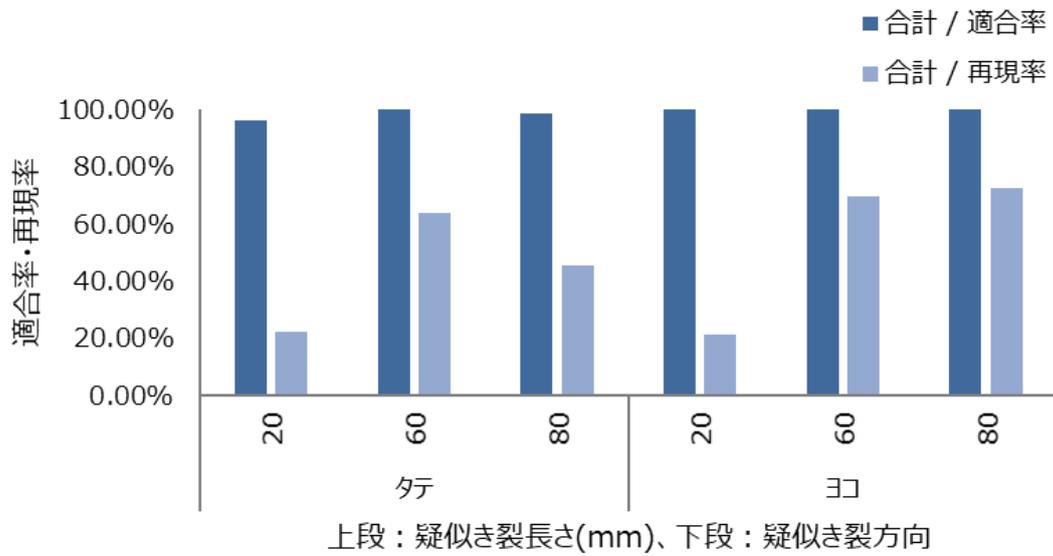


図 4.4.1.1-31 疑似き裂方向・疑似き裂長さ観点での評価結果

表 4.4.1.1-22 疑似き裂方向・疑似き裂長さ観点での評価結果

方向	長さ[mm]	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
タテ	20	96.15%	22.32%	224
	60	100.00%	63.82%	160
	80	98.28%	45.42%	256
ヨコ	20	100.00%	21.43%	224
	60	100.00%	69.74%	160
	80	100.00%	72.51%	256
総計		99.33%	47.61%	1,280

表 4.4.1.1-23 車両速度 (0-10km/h) ・疑似き裂幅・疑似き裂長さ観点での評価結果

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	値			
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
0-10	0.1	20	100.00%	25.00%	20	
		60	100.00%	35.00%	20	
		80	100.00%	10.00%	20	
	0.2	20	0.00%	0.00%	20	
		60	100.00%	15.00%	20	
		80	100.00%	40.00%	20	
	1	20	100.00%	15.00%	40	
		80	100.00%	72.50%	40	
	2	20	100.00%	22.50%	40	
		60	100.00%	100.00%	20	
	4	80	97.22%	87.50%	40	
		20	90.48%	95.00%	20	
		60	100.00%	100.00%	20	
	6	80	100.00%	100.00%	20	
		60	100.00%	100.00%	20	
		80	100.00%	85.00%	20	
	総計			98.62%	54.31%	400

表 4.4.1.1-24 車両速度 (10-20km/h) ・疑似き裂幅・疑似き裂長さ観点での評価結果

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	値			
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
10-20	0.1	20	100.00%	25.00%	4	
		60	100.00%	100.00%	4	
		80	100.00%	50.00%	4	
	0.2	20	100.00%	25.00%	4	
		60	100.00%	25.00%	4	
		80	100.00%	50.00%	4	
	1	20	0.00%	0.00%	8	
		80	100.00%	87.50%	8	
	2	20	100.00%	37.50%	8	
		60	100.00%	100.00%	4	
	4	80	100.00%	87.50%	8	
		20	100.00%	100.00%	4	
		60	100.00%	100.00%	4	
	6	80	100.00%	100.00%	4	
		60	100.00%	100.00%	4	
		80	100.00%	75.00%	4	
	総計			100.00%	63.75%	80

表 4.4.1.1-25 車両速度 (20-30km/h) ・疑似き裂幅・疑似き裂長さ観点での評価結果

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	値			
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
20-30	0.1	20	0.00%	0.00%	28	
		60	100.00%	17.86%	28	
		80	50.00%	3.57%	28	
	0.2	20	100.00%	3.57%	28	
		60	100.00%	14.29%	28	
		80	100.00%	10.71%	28	
	1	20	100.00%	5.36%	56	
		80	100.00%	41.07%	56	
	2	20	100.00%	10.71%	56	
		60	100.00%	100.00%	28	
	4	80	20	100.00%	76.79%	56
			60	100.00%	82.14%	28
		80	100.00%	100.00%	28	
	6	80	100.00%	96.43%	28	
		60	100.00%	100.00%	28	
	80	100.00%	60.71%	28		
総計			99.57%	42.03%	560	

表 4.4.1.1-26 車両速度 (30-km/h) ・疑似き裂幅・疑似き裂長さ観点での評価結果

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	値			
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
30-	0.1	20	0.00%	0.00%	12	
		60	100.00%	16.67%	12	
		80	0.00%	0.00%	12	
	0.2	20	0.00%	0.00%	12	
		60	100.00%	8.33%	12	
		80	100.00%	25.00%	12	
	1	20	100.00%	12.50%	24	
		80	100.00%	50.00%	24	
	2	20	100.00%	29.17%	24	
		60	100.00%	100.00%	12	
	4	80	20	100.00%	83.33%	24
			60	100.00%	58.33%	12
		80	100.00%	100.00%	12	
	6	80	100.00%	91.67%	12	
		60	100.00%	100.00%	12	
	80	100.00%	66.67%	12		
総計			100.00%	43.86%	240	

表 4.4.1.1-27 昨年度の模擬き裂の検出率・網羅率の一覧
(令和2年度 成果報告書報告書より引用)

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%

- 列車速度観点での評価

列車の速度については、目安として実測に基づきカメラと列車の台車の組み合わせごとに表 4.4.1.1-28 のように整理した。なお、表のうちカメラの撮影範囲外の車両はグレーで示している。

表 4.4.1.1-28 速度対応表

	←品川方面				→終点方面	
	カメラ①		カメラ②		カメラ③	
	入線時 (km/h)	出線時 (km/h)	入線時 (km/h)	出線時 (km/h)	入線時 (km/h)	出線時 (km/h)
6両目	-	-	-	-	-	-
5両目	-	-	-	-	-	-
4両目	0-10	10-20	-	-	-	-
3両目	20-30	20-30	0-10	0-10	-	-
2両目	30-	20-30	20-30	20-30	-	-
1両目	30-	30-	20-30	20-30	0-10	0-10

全体として、横方向よりも縦方向において、再現率が低い傾向が見られた。車両速度 0-10km/h のとき、縦方向は 50.25%、横方向は 58.38%であった。車両速度 10-20km/h のとき、縦方向は 55.00%、横方向は 72.50%であった。車両速度 20-30km/h のとき、縦方向は 35.87%、横方向は 48.19%であった。車両速度 30km/h 以上のとき、縦方向は 35.96%、横方向は 51.75%であった。これは昨年度の結果と同様の傾向であり、映像を確認したところ縦方向の疑似き裂のほうが目視確認が難しい傾向があるように見受けられた。

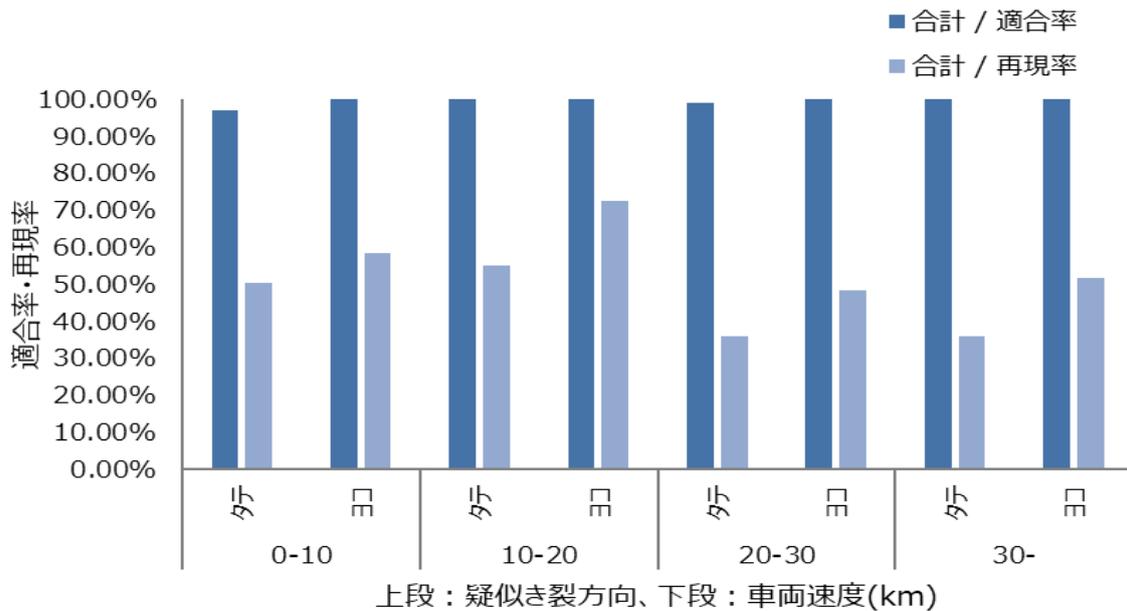


図 4.4.1.1-32 車両速度・疑似き裂方向観点での評価結果

表 4.4.1.1-29 車両速度・疑似き裂方向観点での評価結果

車両速度	方向	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	夕テ	97.06%	50.25%	200
	ヨコ	100.00%	58.38%	200
10-20	夕テ	100.00%	55.00%	40
	ヨコ	100.00%	72.50%	40
20-30	夕テ	99.00%	35.87%	280
	ヨコ	100.00%	48.19%	280
30-	夕テ	100.00%	35.96%	120
	ヨコ	100.00%	51.75%	120
総計		99.33%	47.61%	1,280

疑似き裂の幅に着目すると、30km/h 以上のときに幅 0.1mm の疑似き裂は 36 サンプルに対して 5.56%検出されており、AI システム性能としては 30km/h の場合に幅 0.1mm 相当の疑似き裂を検出可能なことを確認した。そのほか、車両速度が 30km/h 以上の場合に、幅 0.2mm 相当の疑似き裂の再現率は 11.11%、幅 1.0mm 相当の疑似き裂の再現率は 29.55%であった。幅 2.0mm 相当の疑似き裂の再現率は 65.00%、幅 4.0mm 相当の疑似き裂の再現率は 83.33%、幅 6.0mm 相当の疑似き裂の再現率は 75.00%と 7 割近くの検出性能となっており、速度のある対象物でも検出可能であることがいえる。

事前検証により、時速 30km で走行する乗用車を撮影して、画像が鮮明に写るシャッタースピードを調節し、さらに照度補完のためにライトを設置したことで、速度のある対象物でも画像のぶれやぼやけを軽減し、検出性能を向上させることができたと考えられる。

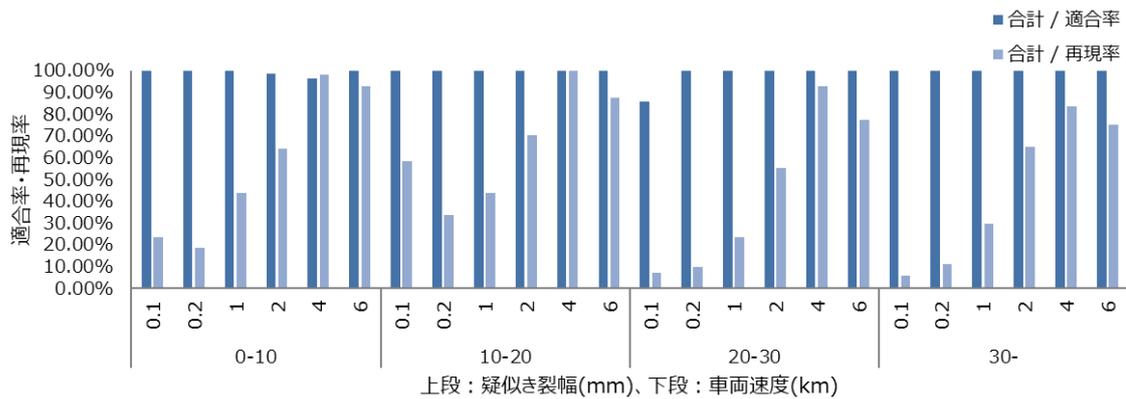


図 4.4.1.1-33 車両速度・疑似き裂幅観点での評価結果

表 4.4.1.1-30 車両速度・疑似き裂幅観点での評価結果

車両速度	幅[mm]	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	0.1	100.00%	23.33%	60
	0.2	100.00%	18.33%	60
	1	100.00%	43.75%	80
	2	98.46%	64.00%	100
	4	96.36%	98.15%	60
	6	100.00%	92.50%	40
10-20	0.1	100.00%	58.33%	12
	0.2	100.00%	33.33%	12
	1	100.00%	43.75%	16
	2	100.00%	70.00%	20
	4	100.00%	100.00%	12
	6	100.00%	87.50%	8
20-30	0.1	85.71%	7.14%	84
	0.2	100.00%	9.52%	84
	1	100.00%	23.21%	112
	2	100.00%	55.00%	140
	4	100.00%	92.86%	84
	6	100.00%	77.08%	56
30-	0.1	100.00%	5.56%	36
	0.2	100.00%	11.11%	36
	1	100.00%	29.55%	48
	2	100.00%	65.00%	60
	4	100.00%	83.33%	36
	6	100.00%	75.00%	24
総計		99.33%	47.61%	1,280

疑似き裂の長さに着目すると、全体として長さ 60mm、80mm では速度による検出性能の大きな差はないように見受けられた。長さ 20mm になると大きく検出性能が下がり、その中でも車両速度が大きくなるにつれて検出性能が下がる傾向にあることがわかった。

長さ 20mm の疑似き裂の画像を目視で確認したところ、目視でも記入されている個所の特定が難しいものが見受けられた。本実証では、一度疑似き裂を車両の台車に記入した後は再度記入しなかったため、日が経つにつれて雨風にさらされ、短い疑似き裂は汚れが上書きされる、もしくは記入した油性黒ペンの線が薄くなることが想定される。本検証で解析の対象とした車両は、疑似き裂を記入してから 1 週間～2 週間経過したものであり、長さ 20mm の疑似き裂は汚れが上書きされた、もしくは線が薄くなったものが多く含まれていたと考えられる。

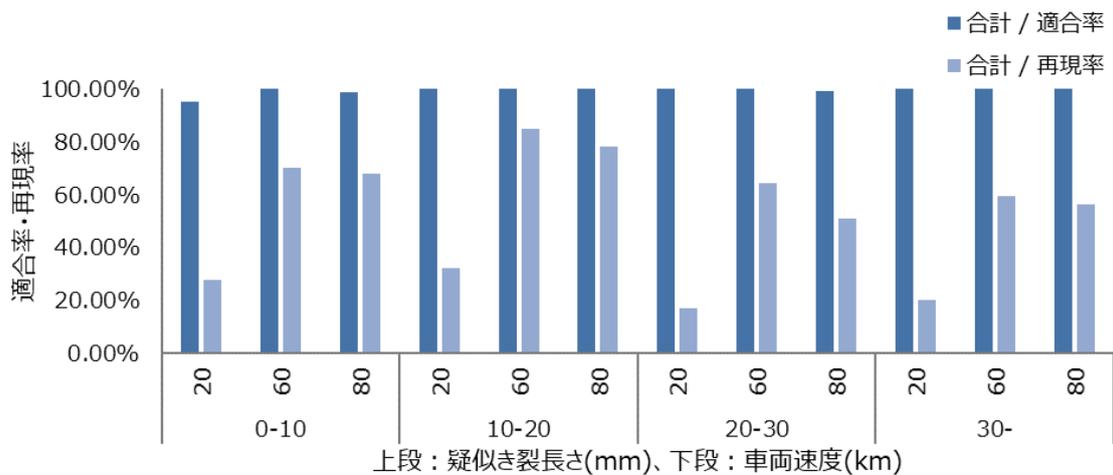


図 4.4.1.1-34 車両速度・疑似き裂長さ観点での評価結果

表 4.4.1.1-31 車両速度・疑似き裂長さ観点での評価結果

車両速度	長さ[mm]	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	20	95.12%	27.86%	140
	60	100.00%	70.00%	100
	80	99.06%	68.18%	160
10-20	20	100.00%	32.14%	28
	60	100.00%	85.00%	20
	80	100.00%	78.13%	32
20-30	20	100.00%	16.84%	196
	60	100.00%	64.39%	140
	80	99.13%	50.89%	224
30-	20	100.00%	20.24%	84
	60	100.00%	59.62%	60
	80	100.00%	56.52%	96
総計		99.33%	47.61%	1,280

検出した疑似き裂の例を図 4.4.1.1-35～図 4.4.1.1-47 に示す。図に示すように、台車の汚れ具合はさまざまであり、台車ごとに色が異なっている。このように色が異なる台車に記入された疑似き裂でも検出できていることがわかる。AI 学習の教師データにも、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅 1 番線で実際に撮影した映像を使用したことで、様々な汚れ具合の台車のデータが含まれた。これにより、台車の色の違いにも対応した AI 検出性能を持つシステムを構築することができた。

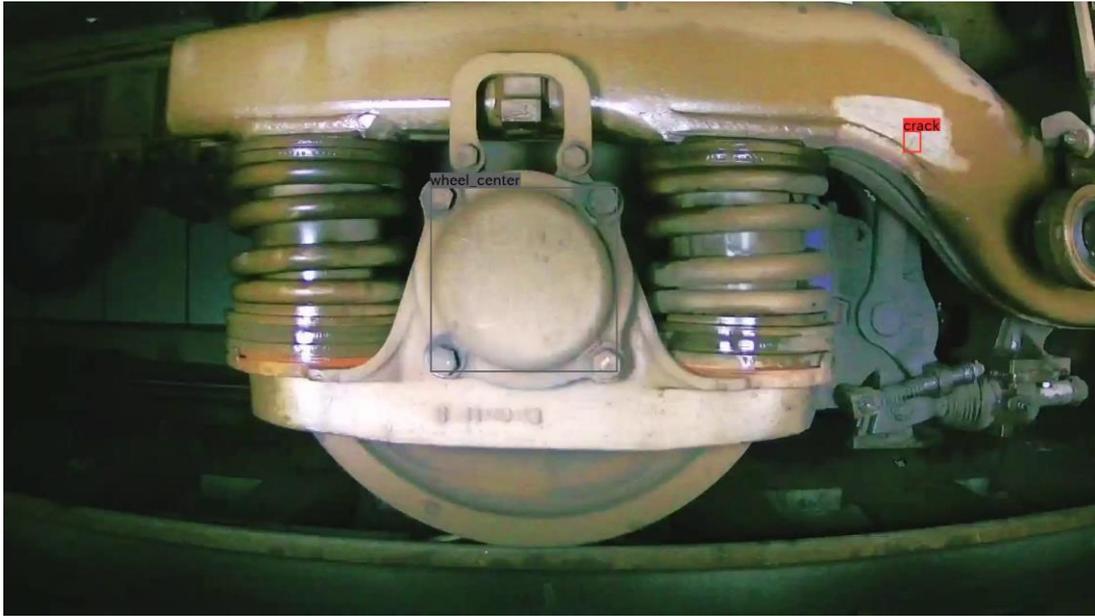


図 4.4.1.1-35 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 20mm、車両速度 0-10km/h）

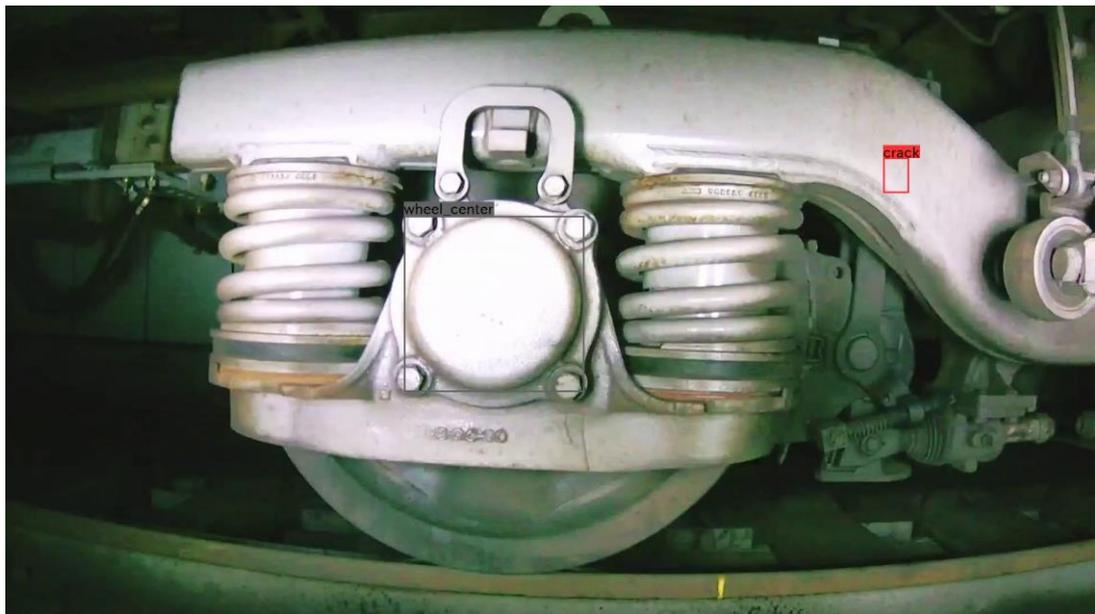


図 4.4.1.1-36 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 60mm、車両速度 0-10km/h）

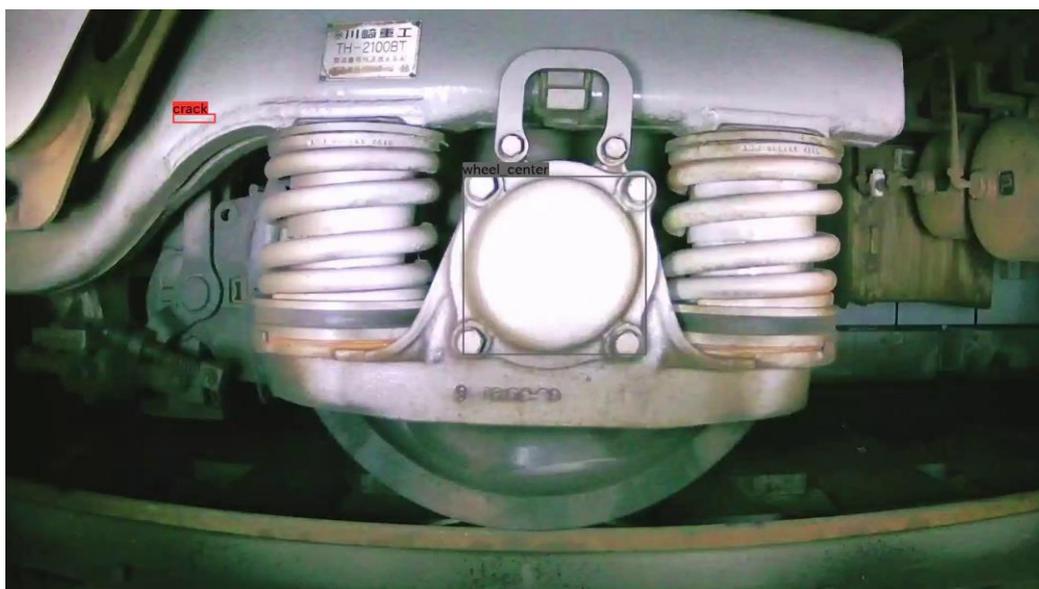


図 4.4.1.1-37 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 60mm、車両速度 10-20km/h）

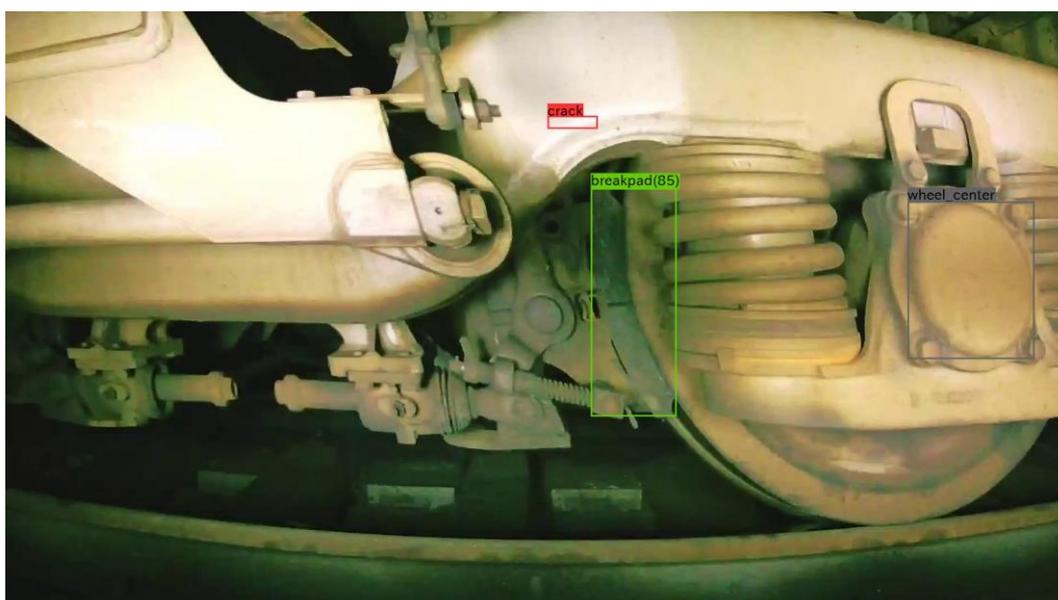


図 4.4.1.1-38 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 60mm、車両速度 20-30km/h）

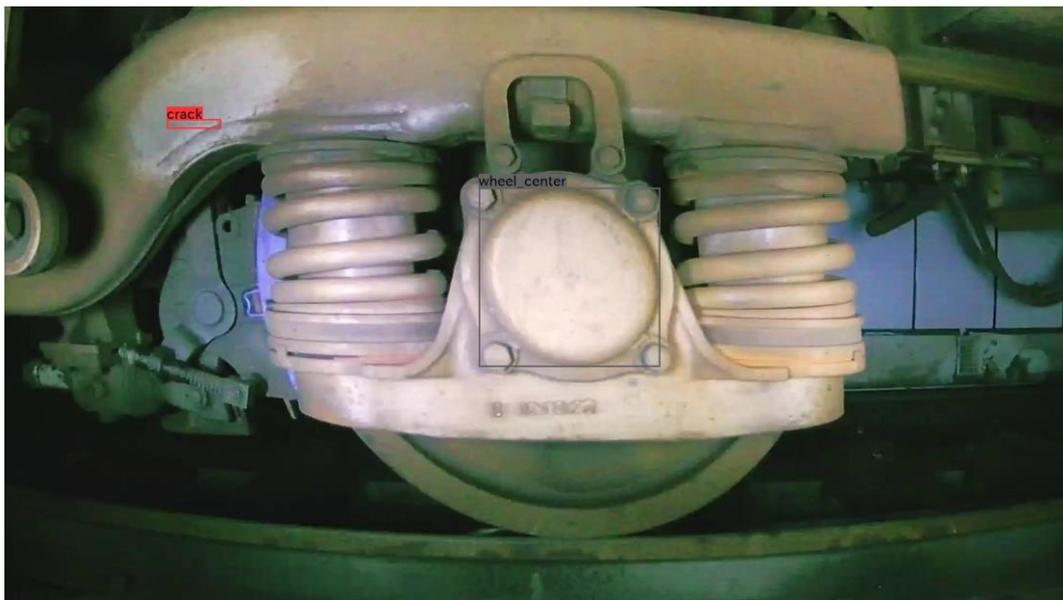


図 4.4.1.1-39 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 80mm、車両速度 0-10km/h）

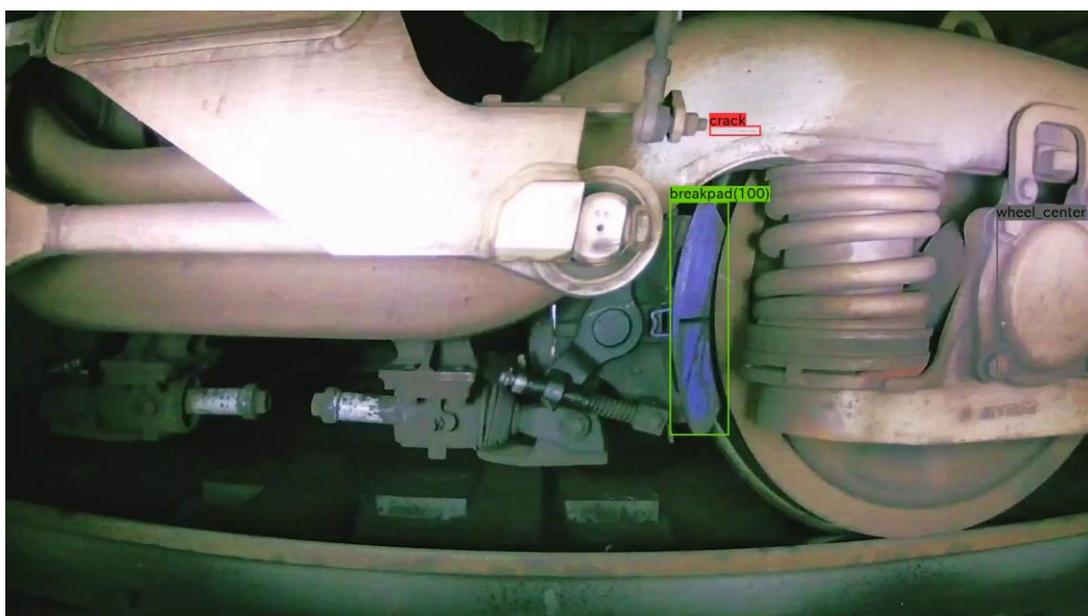


図 4.4.1.1-40 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 80mm、車両速度 10-20km/h）



図 4.4.1.1-41 AI が検出した疑似き裂例 (幅 0.1mm、長さ 80mm、車両速度 20-30km/h)

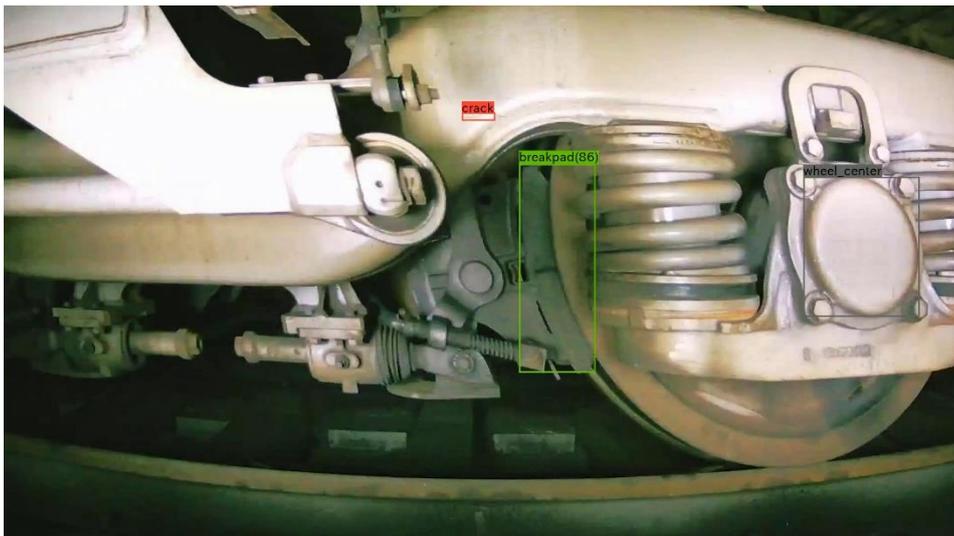


図 4.4.1.1-42 AI が検出した疑似き裂例 (幅 0.1mm、長さ 60mm、車両速度 30km/h 以上)



図 4.4.1.1-43 AI が検出した疑似き裂例（幅 0.1mm、長さ 80mm、車両速度 30km/h 以上）

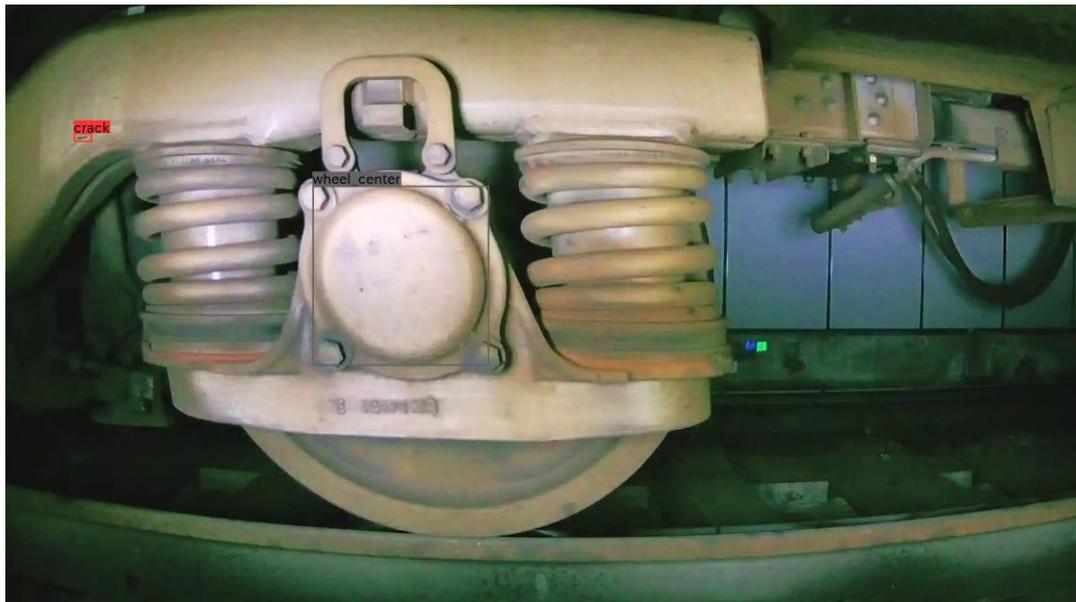


図 4.4.1.1-44 AI が検出した疑似き裂例（幅 2.0mm、長さ 20mm、車両速度 0-10km/h）



図 4.4.1.1-45 AI が検出した疑似き裂例（幅 2.0mm、長さ 20mm、車両速度 10-20km/h）



図 4.4.1.1-46 AI が検出した疑似き裂例（幅 2.0mm、長さ 20mm、車両速度 20-30km/h）

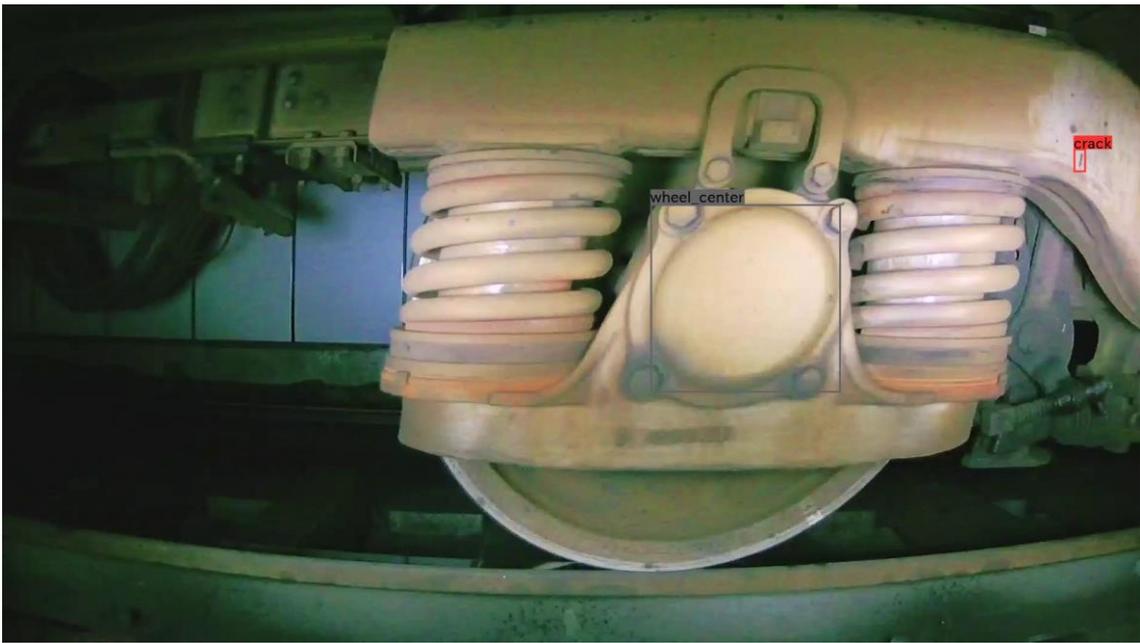


図 4.4.1.1-47 AI が検出した疑似き裂例（幅 2.0mm、長さ 20mm、車両速度 30km/h 以上）

②ブレーキパッドの検出性能評価

ブレーキパッドの検出性能について、おおよそ検出できているものの、車両速度が大きくなるにつれて、再現率が下がる傾向が見られた。検出しなかったブレーキパッドのうち、チューブのようなものがブレーキパッドに重なって映っていることで、検出がしなかったものがあつた。このような台車は教師データには存在しなかったため、今後追加学習を繰り返すことで性能が向上すると考えられる。

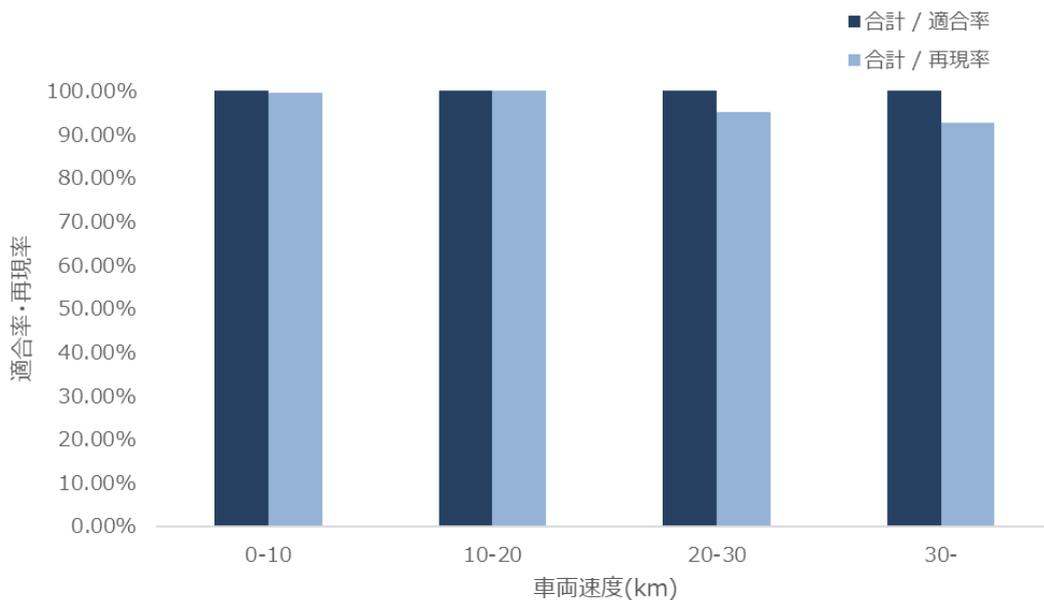


図 4.4.1.1-48 ブレーキパッドの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-32 ブレーキパッドの検出性能評価結果

行ラベル	合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	100.00%	99.58%	239
10-20	100.00%	100.00%	51
20-30	100.00%	95.21%	292
30-	100.00%	92.59%	108
総計	100.00%	96.67%	690

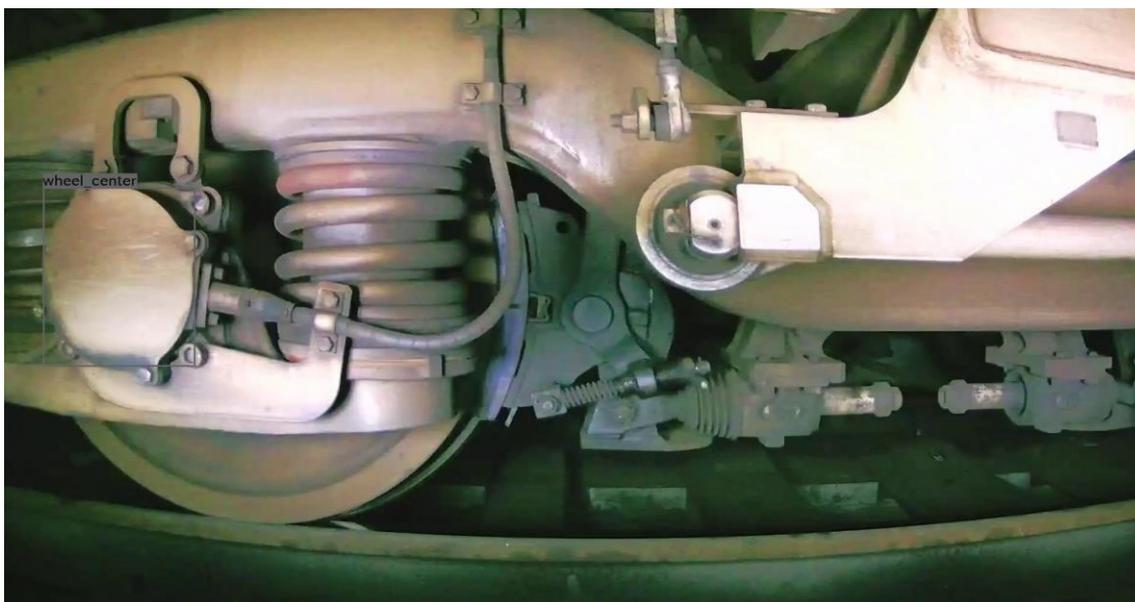


図 4.4.1.1-49 チューブのようなものが重なるブレーキパッドの例

ブレーキパッドの残存割合について、AI で検出された値の妥当性について評価した。

京浜急行電鉄では 10 日を超えない期間ごと（2022 年 3 月現在、6 日回帰）で列車検査を実施し、列車検査の際にブレーキパッド（制輪子）の残存割合を目視にて確認を行っている。ブレーキパッドの残存割合は、残厚表示線からの厚さを目視に確認、交換を行っている。



図 4.4.1.1-50 ブレーキパッドの一例

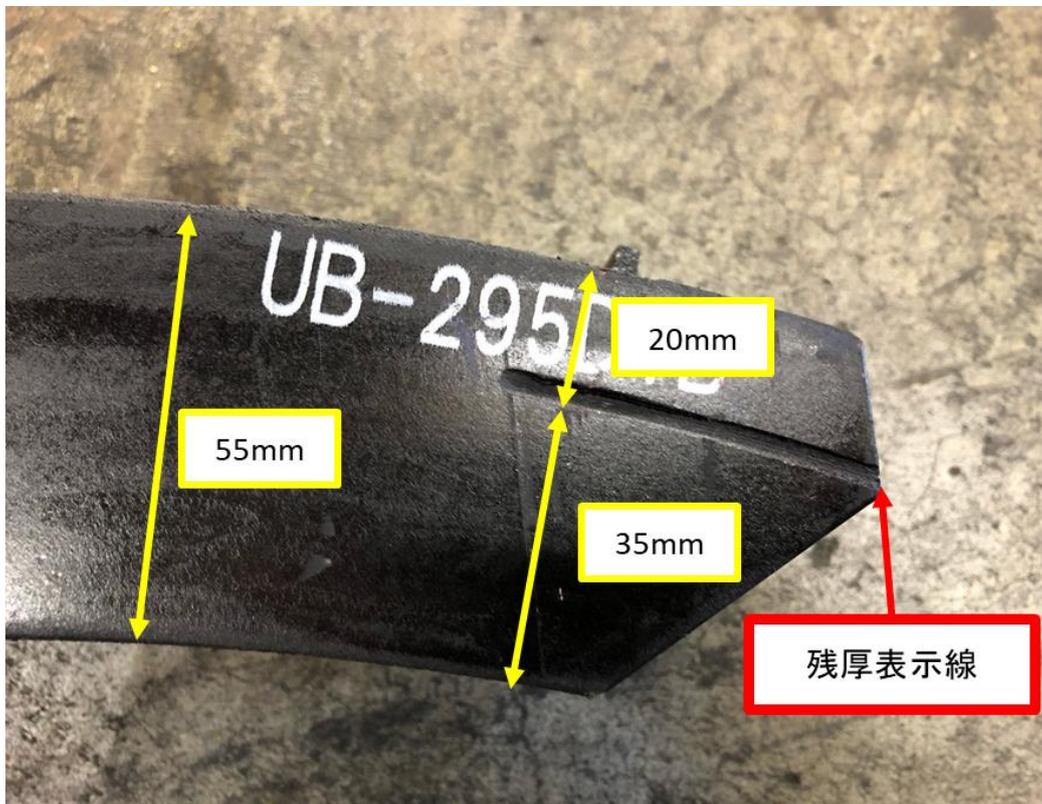


図 4.4.1.1-51 ブレーキパッドの残圧表示線と外側・内側までの距離

AIにより検出されたブレーキパッドの残存割合は、全体の厚みに対する残存する厚みをパーセンテージで表したものになっている。その妥当性について、実際の点検時における目視確認方法を参考に、カメラで撮影された映像の中から残厚表示線が目視で判別できる画像を使用し、残厚表示線からブレーキパッドの外側までの距離と、残厚表示線からブレーキパッドの内側までの距離を目視により測定し、残存するブレーキパッドのおおよその厚み、および残存割合を算出した。その結果、おおよそ誤差が5%未満に収まっていることを確認し、AIによるブレーキパッドの残存割合の検出性能は妥当であると結論づけた。

表 4.4.1.1-33 ブレーキパッドの残存割合検出の性能評価結果

サンプルNo.	画像から目視で算出した残存割合	AI検出による残存割合
1	55%	53%
2	67%	69%
3	91%	89%
4	100%	96%

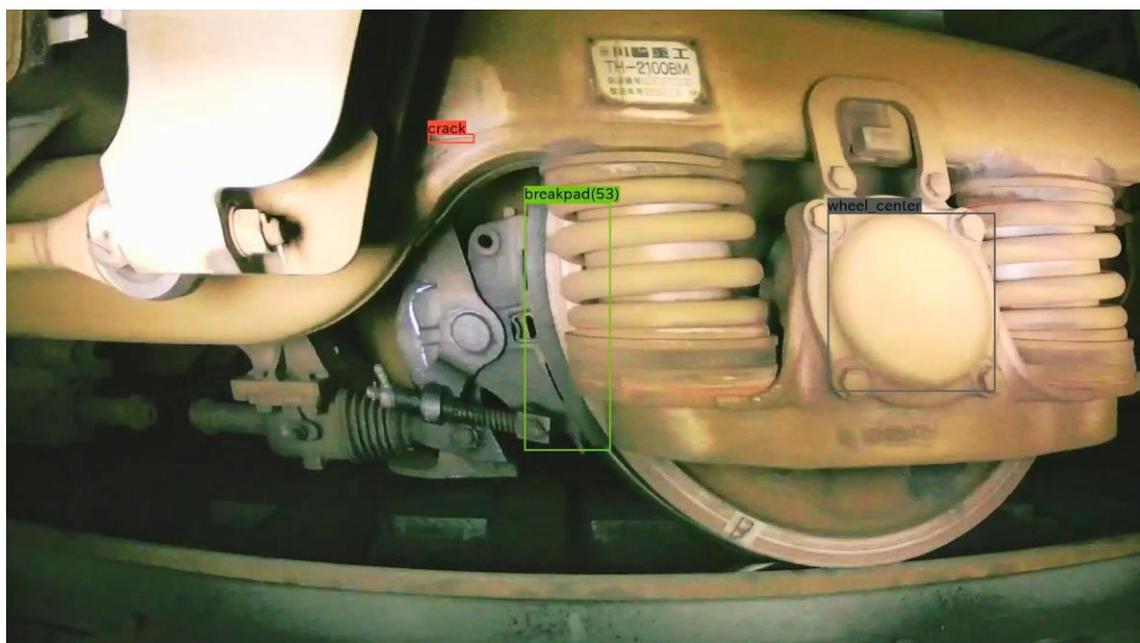


図 4.4.1.1-52 サンプル No.1 の検出結果



図 4.4.1.1-53 サンプル No.2 の検出結果

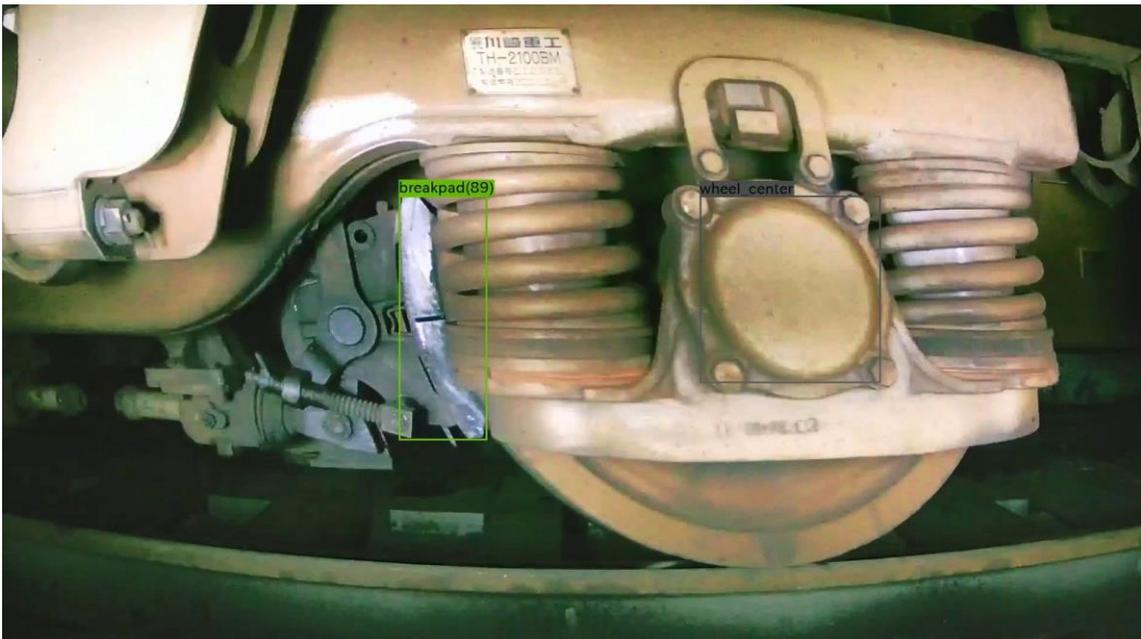


図 4.4.1.1-54 サンプル No.3 の検出結果

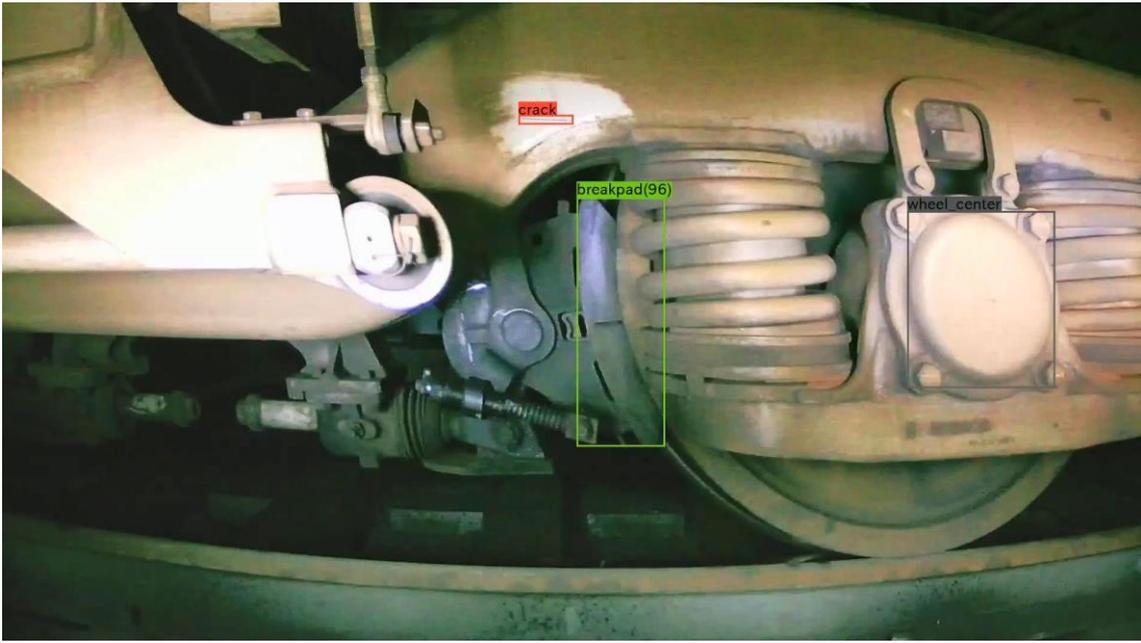


図 4.4.1.1-55 サンプル No.4 の検出結果

ブレーキパッドが検出されても、厚みが検出されなかった場合も見受けられた。ブレーキパッドの厚み検出は、まず車軸を検出し、その車軸の中心からブレーキパッドの外側までの距離により厚みを算出している。そのため、車軸がカメラの画角から見切れたために、厚みが検出されていないと考えられる。厚み検出の計算ロジックを見直すことで、車軸がカメラからある程度見切れていても厚み検出ができるように改善することは可能であると考えられる。

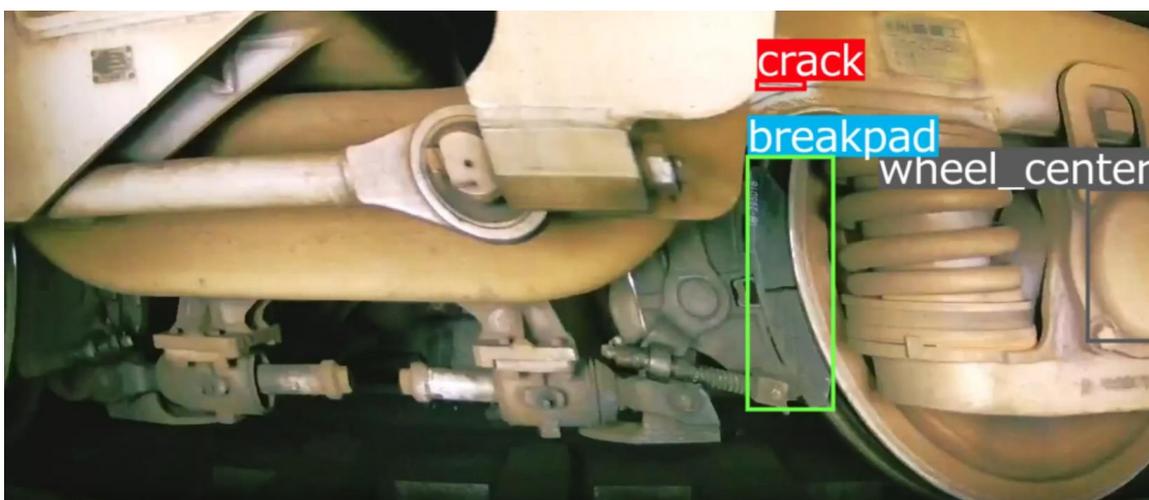


図 4.4.1.1-56 ブレーキパッドの厚みが検出されなかった例

③ハンドルの検出性能評価

ハンドルについては、おおよそ検出できていることを確認した。最大速度 20km/h までは適合率、再現率 100%で検出した。速度が 20km/h 以上になると、数件検出ができない場合が見受けられた。現状のシステムではハンドルを 100%検出可能なのは最大速度 20km/h が限界であると考えられる。なお、羽田空港第1・第2ターミナル駅に入線する列車のハンドルはすべて正常である前提であることから、久里浜検車区で撮影したハンドルの向きを正常である水平から変更し異常な状態を模した映像を用いて、ハンドルの異常状態の検出性能を確認した。その結果、異常と検出されたことを確認し、さらに検出の漏れはないことを確認した。

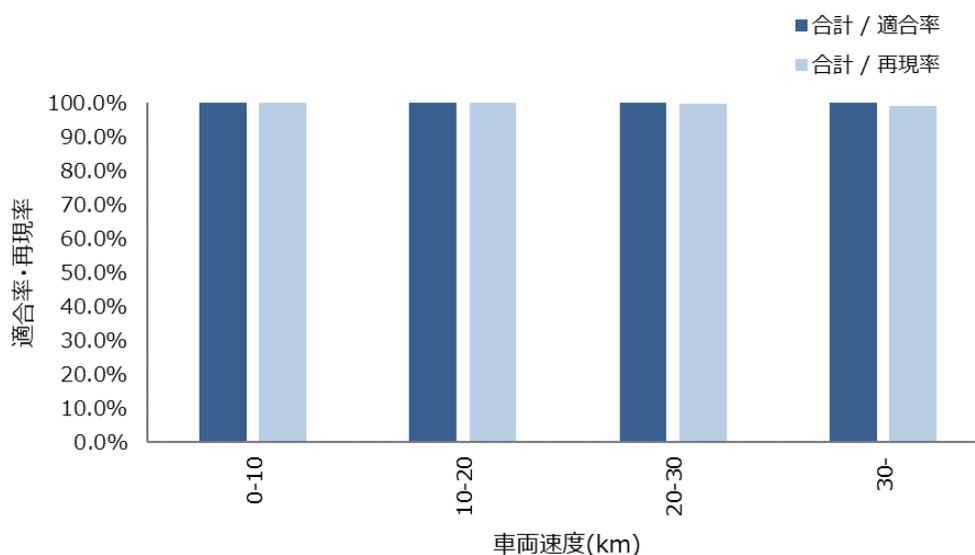


図 4.4.1.1-57 ハンドルの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-34 ハンドルの検出性能評価結果

行ラベル	合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	100.0%	100.0%	100
10-20	100.0%	100.0%	60
20-30	100.0%	99.5%	98
30-	100.0%	99.0%	62
総計	100.0%	99.5%	320



図 4.4.1.1-58 ハンドル検出結果の例



図 4.4.1.1-59 ハンドル異常検出結果の例

④追加学習後の AI 検出精度の評価結果

カメラを羽田空港第1・第2ターミナル駅の1番線に設置し、疑似き裂を記入した車両が入線するようになってからの約25日間においてカメラで撮影された、疑似き裂を記入した車両が発着する映像をAIの追加学習に使用し、再度AI検出精度について評価を行った。その結果、疑似き裂、ブレーキパッド、ハンドルの検出性能が向上したことが確認された。

まず疑似き裂について、追加学習前はあまり検出ができていなかった幅0.1mm、0.2mmの疑似き裂について、追加学習後は検出性能が向上したことが確認された。幅0.1mmについては、追加学習前後で適合率が96.67%から99.07%に、再現率が15.10%から55.21%に向上した。幅0.2mmについては、追加学習前後で再現率が14.06%から41.67%に向上した。疑似き裂の長さに着目すると、追加学習前はあまり検出ができていなかった長さ20mmの疑似き裂について追加学習前後で再現率が21.88%から69.42%に向上した。

一方で、幅0.2mmの適合率については、追加学習前後で100%から97.56%に減少したことが確認された。追加学習後のモデルでは、検出性能が向上したために、疑似き裂に似たものに対して反応しやすくなったものと考えられる。

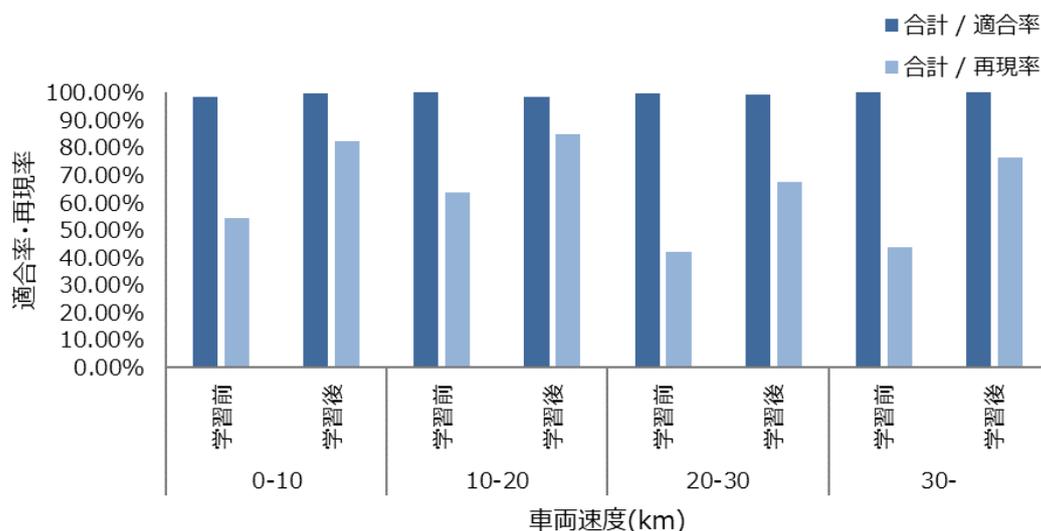


図 4.4.1.1-60 車両速度観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-35 車両速度観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	追加学習の前後	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	学習前	98.62%	54.31%	400
	学習後	99.69%	82.49%	400
10-20	学習前	100.00%	63.75%	80
	学習後	98.55%	85.00%	80
20-30	学習前	99.57%	42.03%	560
	学習後	99.47%	67.39%	560
30-	学習前	100.00%	43.86%	240
	学習後	100.00%	76.32%	240
総計		99.48%	61.24%	2,560

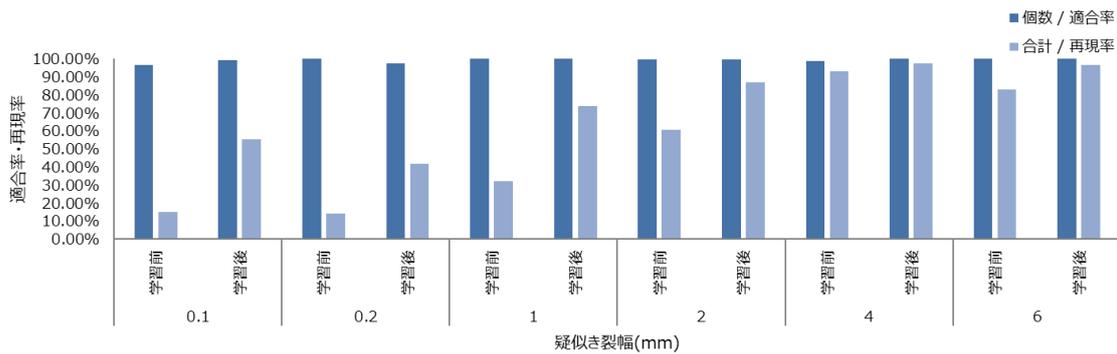


図 4.4.1.1-61 疑似き裂幅観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-36 疑似き裂幅観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

幅[mm]	追加学習の前後	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0.1	学習前	96.67%	15.10%	192
	学習後	99.07%	55.21%	192
0.2	学習前	100.00%	14.06%	192
	学習後	97.56%	41.67%	192
1	学習前	100.00%	32.14%	256
	学習後	100.00%	73.81%	256
2	学習前	99.49%	60.63%	320
	学習後	99.64%	86.88%	320
4	学習前	98.86%	93.01%	192
	学習後	100.00%	97.31%	192
6	学習前	100.00%	83.04%	128
	学習後	100.00%	96.43%	128
総計		99.48%	61.24%	2,560

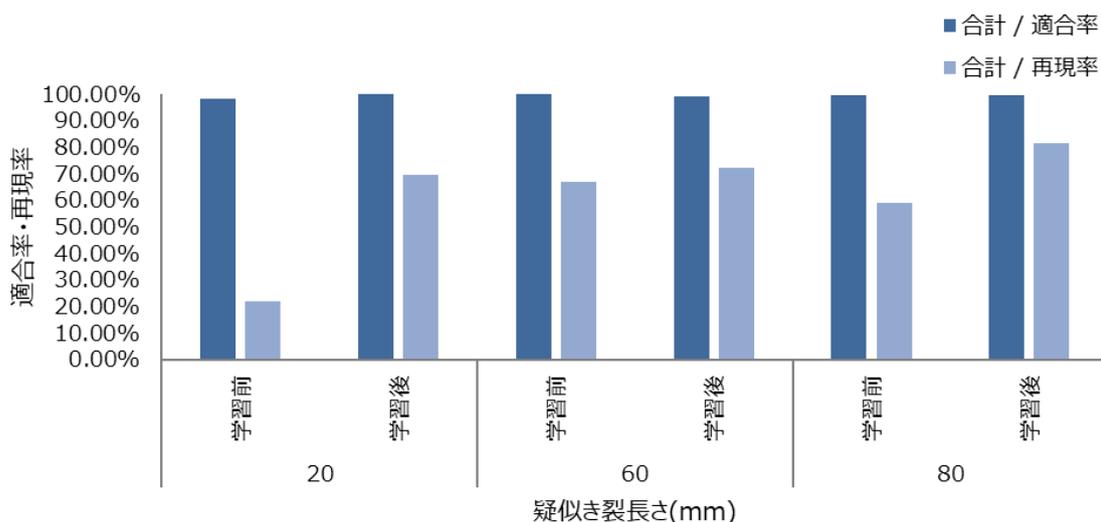


図 4.4.1.1-62 疑似き裂長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-37 疑似き裂長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

長さ[mm]	追加学習の前後	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
20	学習前	98.00%	21.88%	448
	学習後	100.00%	69.42%	448
60	学習前	100.00%	66.78%	320
	学習後	99.10%	72.04%	320
80	学習前	99.33%	58.96%	512
	学習後	99.51%	81.47%	512
総計		99.48%	61.24%	2,560

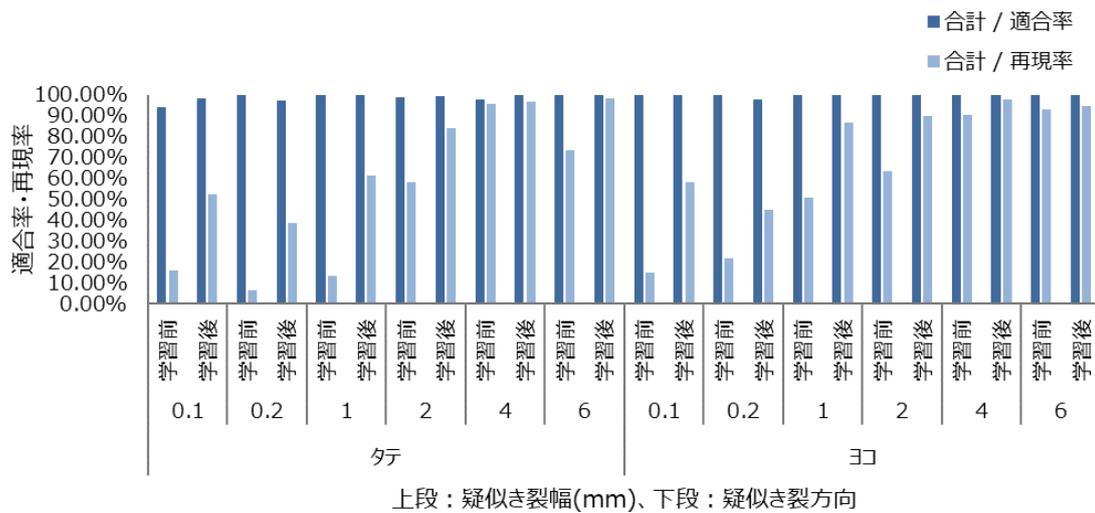


図 4.4.1.1-63 疑似き裂方向・幅観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-38 疑似き裂方向・幅観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

方向	幅[mm]	追加学習の前後	値		
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
タテ	0.1	学習前	93.75%	15.63%	96
		学習後	98.04%	52.08%	96
	0.2	学習前	100.00%	6.25%	96
		学習後	97.37%	38.54%	96
	1	学習前	100.00%	13.49%	128
		学習後	100.00%	61.11%	128
	2	学習前	98.94%	58.13%	160
		学習後	99.26%	83.75%	160
	4	学習前	97.80%	95.70%	96
		学習後	100.00%	96.77%	96
	6	学習前	100.00%	73.21%	64
		学習後	100.00%	98.21%	64
ヨコ	0.1	学習前	100.00%	14.58%	96
		学習後	100.00%	58.33%	96
	0.2	学習前	100.00%	21.88%	96
		学習後	97.73%	44.79%	96
	1	学習前	100.00%	50.79%	128
		学習後	100.00%	86.51%	128
	2	学習前	100.00%	63.13%	160
		学習後	100.00%	90.00%	160
	4	学習前	100.00%	90.32%	96
		学習後	100.00%	97.85%	96
	6	学習前	100.00%	92.86%	64
		学習後	100.00%	94.64%	64
総計			99.48%	61.24%	2,560

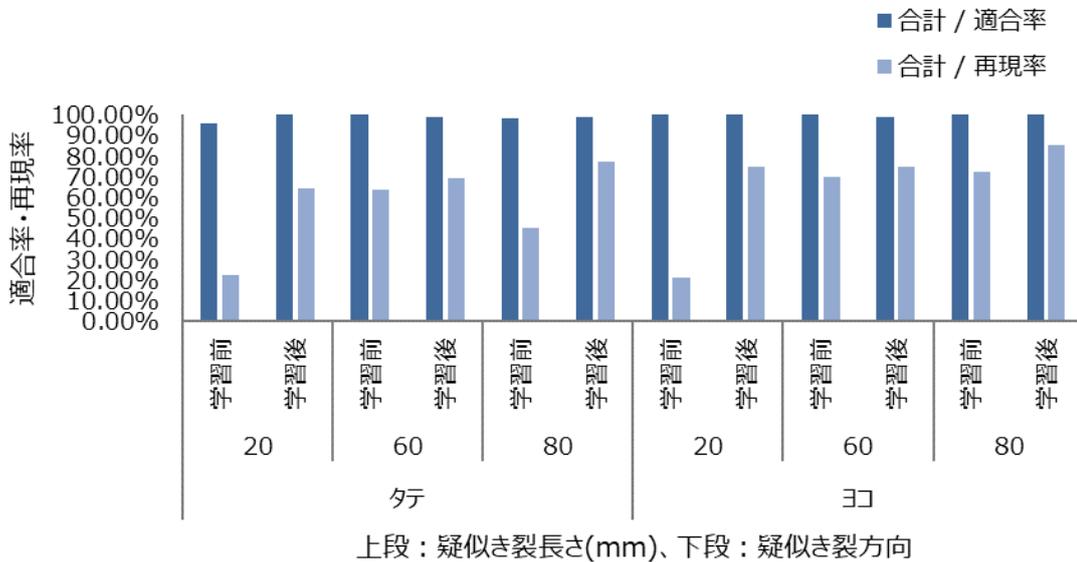


図 4.4.1.1-64 疑似き裂方向・長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-39 疑似き裂方向・長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

方向	長さ[mm]	追加学習の前後	値		
			合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
タテ	20	学習前	96.15%	22.32%	224
		学習後	100.00%	64.29%	224
	60	学習前	100.00%	63.82%	160
		学習後	99.06%	69.08%	160
	80	学習前	98.28%	45.42%	256
		学習後	98.98%	77.29%	256
ヨコ	20	学習前	100.00%	21.43%	224
		学習後	100.00%	74.55%	224
	60	学習前	100.00%	69.74%	160
		学習後	99.13%	75.00%	160
	80	学習前	100.00%	72.51%	256
		学習後	100.00%	85.66%	256
総計			99.48%	61.24%	2,560

表 4.4.1.1-40 車両速度 (0-10km/h)・疑似き裂幅・長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	追加学習の前後	値			
				合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
0-10	0.1	20	学習前	100.00%	25.00%	20	
			学習後	100.00%	80.00%	20	
		60	学習前	100.00%	35.00%	20	
			学習後	100.00%	45.00%	20	
		80	学習前	100.00%	10.00%	20	
			学習後	93.75%	75.00%	20	
	0.2	20	学習前	0.00%	0.00%	20	
			学習後	100.00%	80.00%	20	
		60	学習前	100.00%	15.00%	20	
			学習後	100.00%	25.00%	20	
		80	学習前	100.00%	40.00%	20	
			学習後	100.00%	50.00%	20	
	1	20	学習前	100.00%	15.00%	40	
			学習後	100.00%	80.00%	40	
		80	学習前	100.00%	72.50%	40	
			学習後	100.00%	95.00%	40	
		2	20	学習前	100.00%	22.50%	40
				学習後	100.00%	77.50%	40
	4	60	学習前	100.00%	100.00%	20	
			学習後	100.00%	100.00%	20	
		80	学習前	97.22%	87.50%	40	
			学習後	100.00%	97.50%	40	
		6	20	学習前	90.48%	95.00%	20
				学習後	100.00%	100.00%	20
	6	60	学習前	100.00%	100.00%	20	
			学習後	100.00%	100.00%	20	
		80	学習前	100.00%	100.00%	20	
			学習後	100.00%	100.00%	20	
		80	学習前	100.00%	85.00%	20	
			学習後	100.00%	100.00%	20	
総計				99.26%	68.40%	800	

表 4.4.1.1-41 車両速度（10-20km/h）・疑似き裂幅・長さ観点の追加学習前後のAI検出性能比較

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	追加学習の前後	値			
				合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
10-20	0.1	20	学習前	100.00%	25.00%	4	
			学習後	100.00%	75.00%	4	
		60	学習前	100.00%	100.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
		80	学習前	100.00%	50.00%	4	
			学習後	100.00%	75.00%	4	
		0.2	20	学習前	100.00%	25.00%	4
				学習後	100.00%	75.00%	4
	60		学習前	100.00%	25.00%	4	
			学習後	100.00%	50.00%	4	
	80		学習前	100.00%	50.00%	4	
			学習後	100.00%	75.00%	4	
	1		20	学習前	0.00%	0.00%	8
				学習後	100.00%	62.50%	8
		80	学習前	100.00%	87.50%	8	
			学習後	100.00%	87.50%	8	
		2	20	学習前	100.00%	37.50%	8
				学習後	100.00%	75.00%	8
			60	学習前	100.00%	100.00%	4
				学習後	100.00%	100.00%	4
	4	80	学習前	100.00%	87.50%	8	
			学習後	88.89%	100.00%	8	
		20	学習前	100.00%	100.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
		60	学習前	100.00%	100.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
		80	学習前	100.00%	100.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
	6	60	学習前	100.00%	100.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
		80	学習前	100.00%	75.00%	4	
			学習後	100.00%	100.00%	4	
総計				99.17%	74.38%	160	

表 4.4.1.1-42 車両速度 (20-30km/h) ・疑似き裂幅・長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	追加学習の前後	値			
				合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数	
20-30	0.1	20	学習前	0.00%	0.00%	28	
			学習後	100.00%	53.57%	28	
		60	学習前	100.00%	17.86%	28	
			学習後	100.00%	32.14%	28	
		80	学習前	50.00%	3.57%	28	
			学習後	100.00%	42.86%	28	
	0.2	20	学習前	100.00%	3.57%	28	
			学習後	100.00%	32.14%	28	
		60	学習前	100.00%	14.29%	28	
			学習後	77.78%	25.00%	28	
		80	学習前	100.00%	10.71%	28	
			学習後	100.00%	28.57%	28	
	1	20	学習前	100.00%	5.36%	56	
			学習後	100.00%	50.00%	56	
		80	学習前	100.00%	41.07%	56	
			学習後	100.00%	75.00%	56	
		2	20	学習前	100.00%	10.71%	56
			学習後	100.00%	60.71%	56	
	4	60	学習前	100.00%	100.00%	28	
			学習後	100.00%	100.00%	28	
		80	学習前	100.00%	76.79%	56	
			学習後	100.00%	92.86%	56	
		20	学習前	100.00%	82.14%	28	
			学習後	100.00%	96.43%	28	
	6	60	学習前	100.00%	100.00%	28	
			学習後	100.00%	100.00%	28	
		80	学習前	100.00%	96.43%	28	
			学習後	100.00%	100.00%	28	
60		学習前	100.00%	100.00%	28		
		学習後	100.00%	100.00%	28		
80	学習前	100.00%	60.71%	28			
	学習後	100.00%	89.29%	28			
総計				99.51%	54.71%	1,120	

表 4.4.1.1-43 車両速度 (30km/h 以上)・疑似き裂幅・長さ観点の追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	幅[mm]	長さ[mm]	追加学習の前後	値					
				合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数			
30-	0.1	20	学習前	0.00%	0.00%	12			
			学習後	100.00%	75.00%	12			
		60	学習前	100.00%	16.67%	12			
			学習後	100.00%	25.00%	12			
		80	学習前	0.00%	0.00%	12			
			学習後	100.00%	66.67%	12			
		0.2	20	学習前	0.00%	0.00%	12		
				学習後	100.00%	50.00%	12		
			60	学習前	100.00%	8.33%	12		
				学習後	100.00%	33.33%	12		
			80	学習前	100.00%	25.00%	12		
				学習後	100.00%	58.33%	12		
	1		20	学習前	100.00%	12.50%	24		
				学習後	100.00%	75.00%	24		
			80	学習前	100.00%	50.00%	24		
				学習後	100.00%	80.00%	24		
			2	20	学習前	100.00%	29.17%	24	
					学習後	100.00%	83.33%	24	
		60		学習前	100.00%	100.00%	12		
				学習後	100.00%	100.00%	12		
		80		学習前	100.00%	83.33%	24		
				学習後	100.00%	100.00%	24		
		4		20	学習前	100.00%	58.33%	12	
					学習後	100.00%	75.00%	12	
	60			学習前	100.00%	100.00%	12		
				学習後	100.00%	100.00%	12		
	80			学習前	100.00%	91.67%	12		
				学習後	100.00%	91.67%	12		
	6		60	学習前	100.00%	100.00%	12		
				学習後	100.00%	100.00%	12		
			80	学習前	100.00%	66.67%	12		
				学習後	100.00%	91.67%	12		
			総計				100.00%	60.09%	480

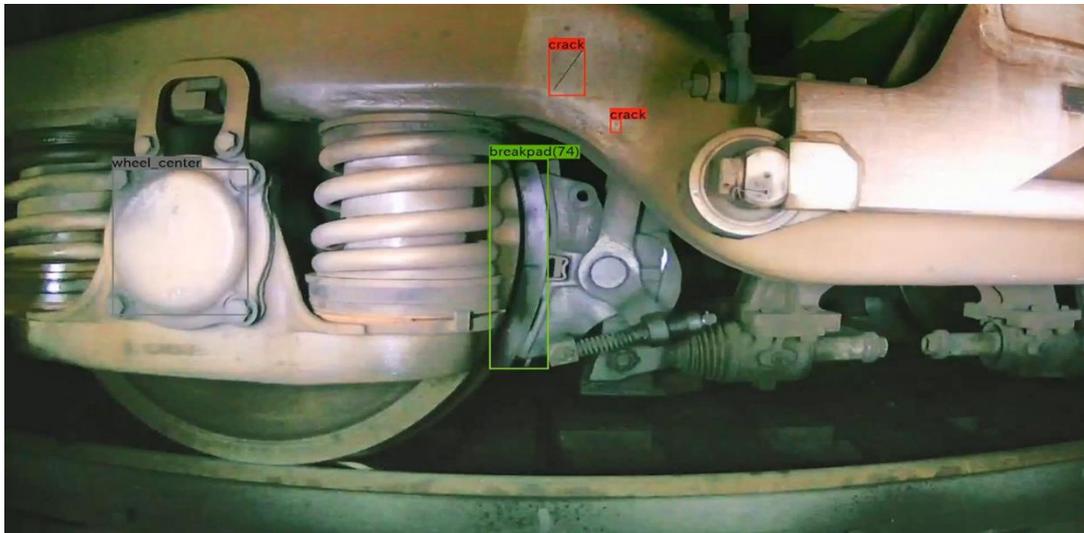


図 4.4.1.1-65 追加学習後のき裂誤検出の例

ブレーキパッドの AI 検出性能についても、追加学習により AI 検出性能が向上したことが確認できた。例えば、車両速度 30km/h 以上のときに、追加学習前後で再現率が 83.33% から 92.08%に向上した。また、追加学習前は検出ができていなかった、ブレーキパッドにチューブのようなものが重なっている場合にも、追加学習により検出できるようになったことを確認した。

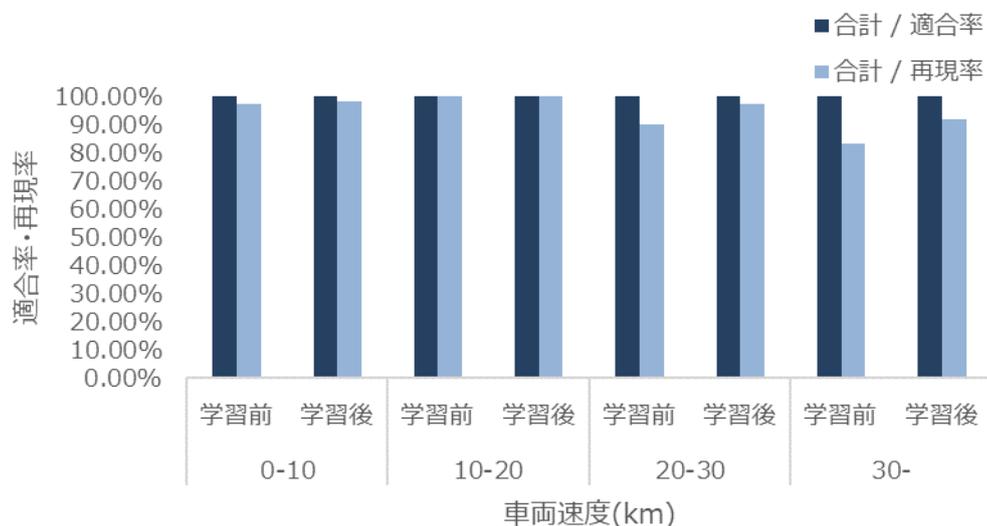


図 4.4.1.1-66 ブレーキパッドの追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-44 ブレーキパッドの追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	追加学習の前後	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	学習前	100.00%	97.50%	400
	学習後	100.00%	98.25%	400
10-20	学習前	100.00%	100.00%	80
	学習後	100.00%	100.00%	80
20-30	学習前	100.00%	90.36%	560
	学習後	100.00%	97.50%	560
30-	学習前	100.00%	83.33%	240
	学習後	100.00%	92.08%	240
総計		100.00%	94.38%	2,560

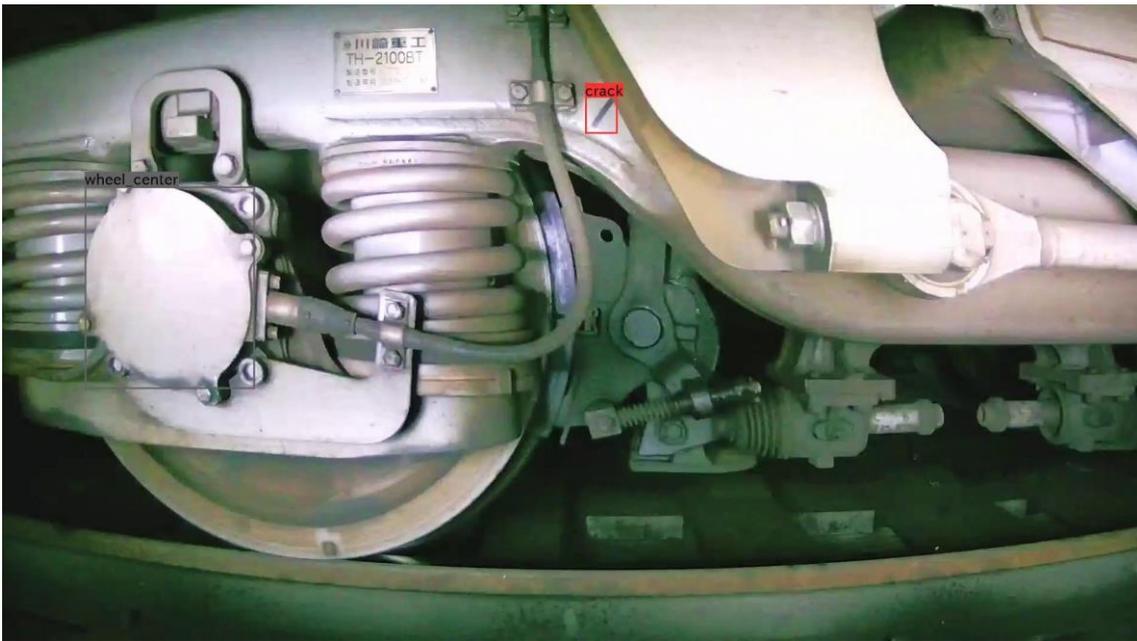


図 4.4.1.1-67 チューブのようなものが重なるブレーキパッドの例①（追加学習前）

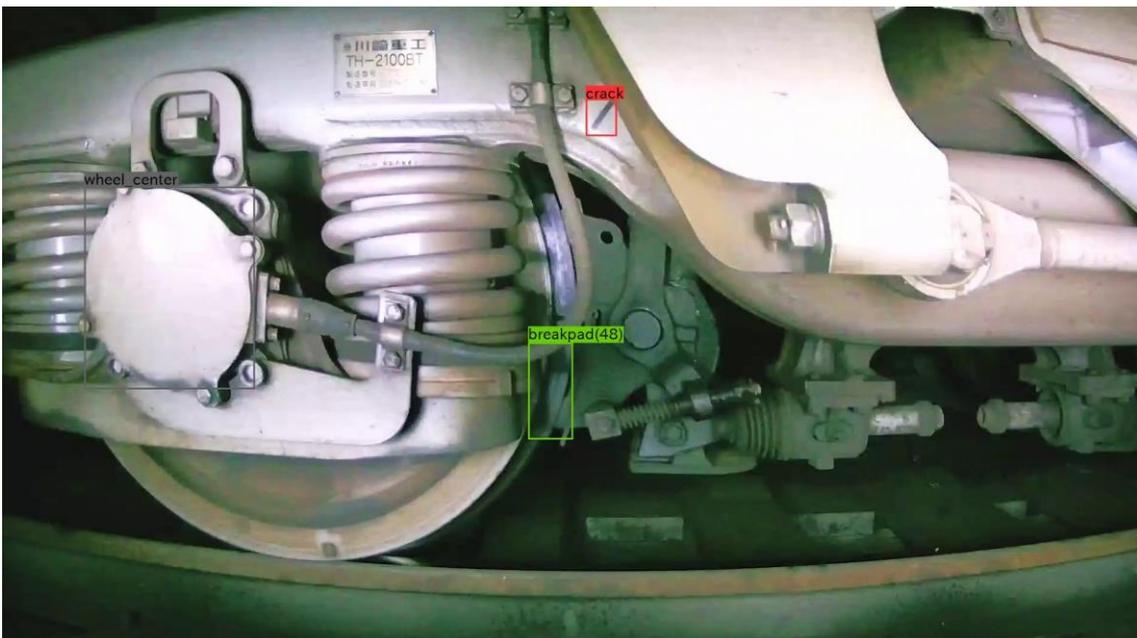


図 4.4.1.1-68 チューブのようなものが重なるブレーキパッドの例①（追加学習後）



図 4.4.1.1-69 チューブのようなものが重なるブレーキパッドの例②（追加学習前）



図 4.4.1.1-70 チューブのようなものが重なるブレーキパッドの例②（追加学習後）

ハンドルの AI 検出性能についても、追加学習により AI 検出性能が向上したことが確認できた。例えば、車両速度 30km/h 以上のときに、追加学習前後で再現率が 99.1%から 100%に向上した。

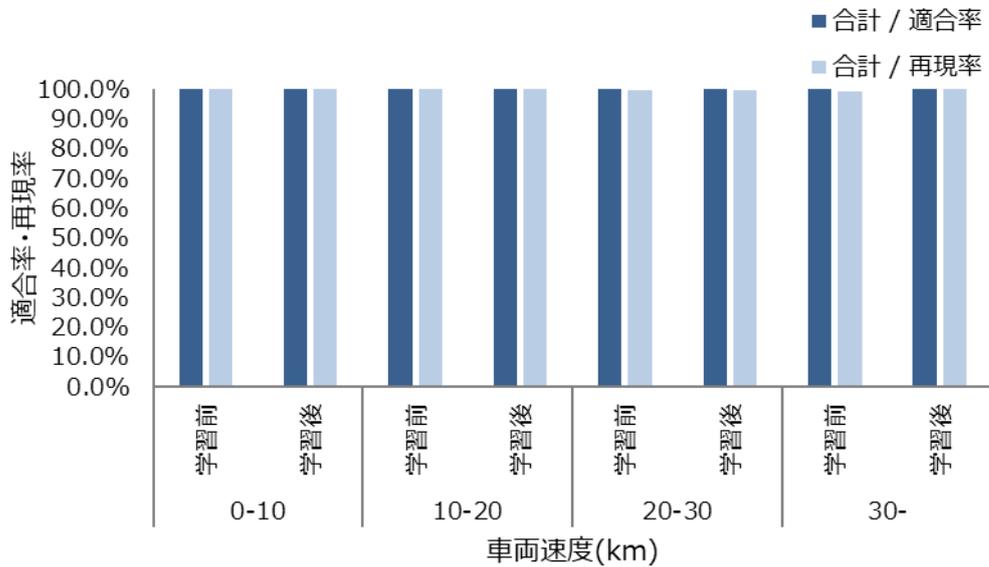


図 4.4.1.1-71 ハンドルの追加学習前後の AI 検出性能比較

表 4.4.1.1-45 ハンドルの追加学習前後の AI 検出性能比較

車両速度	追加学習の前後	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	学習前	100.0%	100.0%	100
	学習後	100.0%	100.0%	100
10-20	学習前	100.0%	100.0%	60
	学習後	100.0%	100.0%	60
20-30	学習前	100.0%	99.4%	100
	学習後	100.0%	99.7%	100
30-	学習前	100.0%	99.1%	60
	学習後	100.0%	100.0%	60
総計		100.0%	99.7%	640

⑤京浜急行電鉄 8 両編成車両、他社車両のブレーキパッド、ハンドルの AI 検出結果

京浜急行電鉄の 8 両編成の車両について、ブレーキパッド、ハンドルの検出性能を確認した。評価には追加学習したモデルを使用した。評価対象は 8 両編成車両の 3 編成、各 1 往復ずつ走行する、合計 6 回走行分の映像とした。

ブレーキパッドについては、6 両編成の評価結果と同様に、車両速度が大きくなるにつれて再現率が減少する傾向が見られた。適合率、再現率ともに、6 両編成の追加学習後の検出性能評価結果と比較して大きな差異は見られなかった。以上の結果から、京浜急行電鉄の 8 両編成の車両に対しても、ブレーキパッドを検出可能であると結論付けた。

ハンドルについては、おおよそ 6 両編成の追加学習後の検出性能評価結果と同等に検出ができており、適合率、再現率ともに、6 両編成の追加学習後の検出性能評価結果と比較して大きな差異は見られなかったことから、京浜急行電鉄の 8 両編成の車両に対しても、ハンドルを検出可能であると結論付けた。一部、誤検出されている箇所が見られ、誤検出された要因について、以下の 2 点が画像の分析により確認された。

- AI の学習に使用した 6 両編成車両と形状が異なること。
- ハンドルの形状に似た汚れが台車部分に見られたこと。

車両の台車部分の形状は型式により異なる形状となっており、学習データの対象とした 6 両編成の 24 編成の列車には含まれていなかったり、データの数が多くなかったりした形状の台車については検出性能が下がる可能性がある。今回の学習データの対象としなかった台車も含めて追加学習を行うことで、適合率の向上は可能であると考えられる。

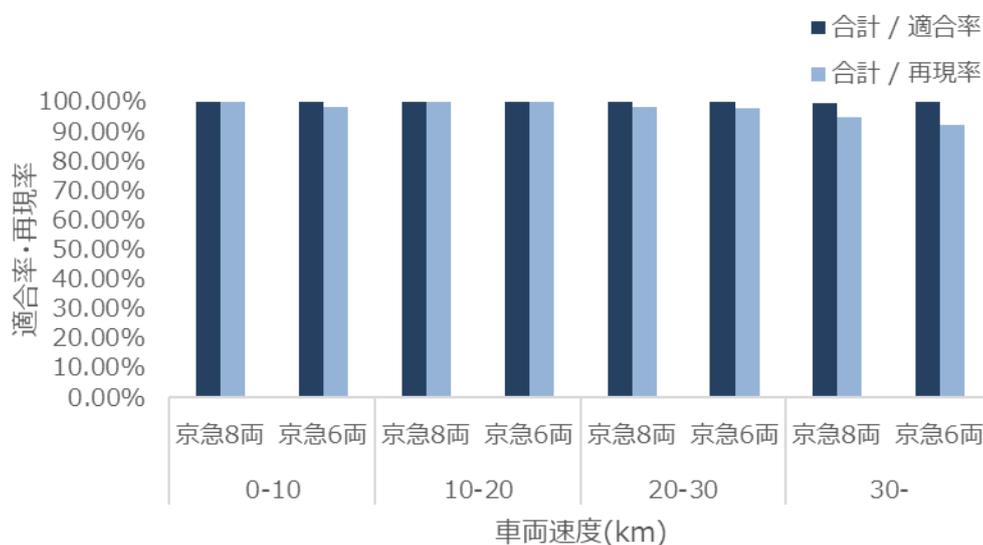


図 4.4.1.1-72 京浜急行電鉄 8 両編成車両ブレーキパッドの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-46 京浜急行電鉄 8 両編成車両ブレーキパッドの検出性能評価結果

車両速度	検出対象	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	京急8両	100.00%	100.00%	60
	京急6両	100.00%	98.25%	400
10-20	京急8両	100.00%	100.00%	48
	京急6両	100.00%	100.00%	80
20-30	京急8両	100.00%	97.92%	96
	京急6両	100.00%	97.50%	560
30-	京急8両	99.21%	94.70%	132
	京急6両	100.00%	92.08%	240
総計		99.94%	96.97%	1,616

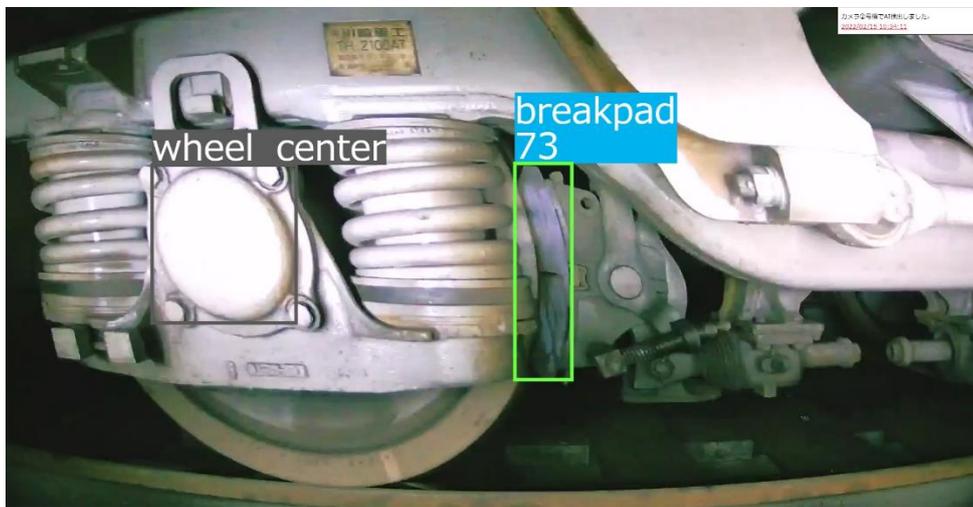


図 4.4.1.1-73 京浜急行電鉄 8 両編成車両ブレーキパッドの検出結果の例

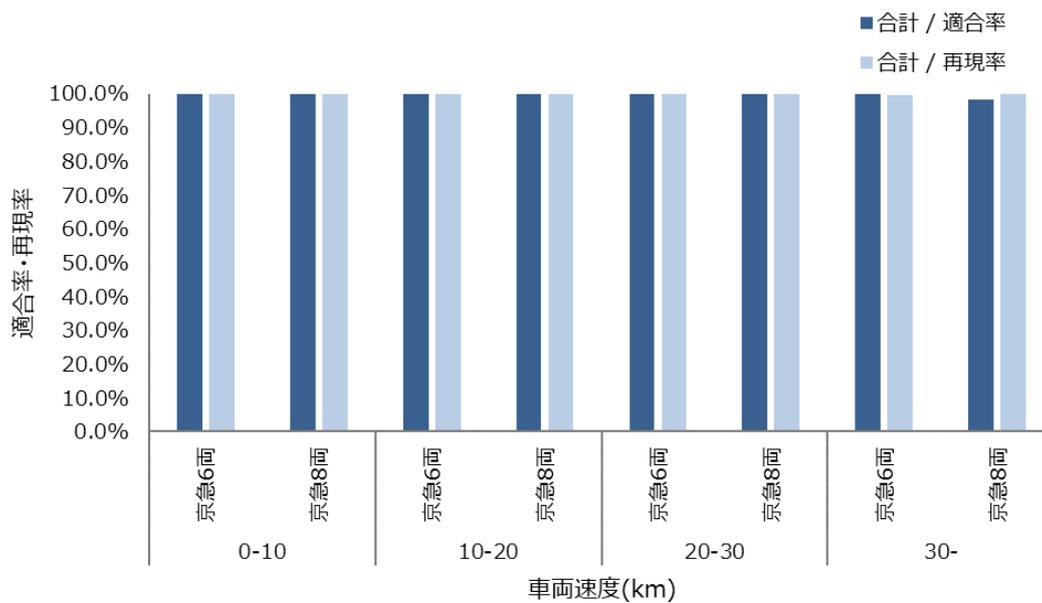


図 4.4.1.1-74 京浜急行電鉄 8 両編成車両ハンドルの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-47 京浜急行電鉄 8 両編成車両ハンドルの検出性能評価結果

車両速度	検出対象	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	京急6両	100.0%	100.0%	100
	京急8両	100.0%	100.0%	14
10-20	京急6両	100.0%	100.0%	60
	京急8両	100.0%	100.0%	12
20-30	京急6両	100.0%	100.0%	98
	京急8両	100.0%	100.0%	24
30-	京急6両	100.0%	99.7%	62
	京急8両	98.2%	100.0%	33
総計		99.9%	99.9%	403



図 4.4.1.1-75 京浜急行電鉄 8 両編成車両ハンドルの検出結果の例

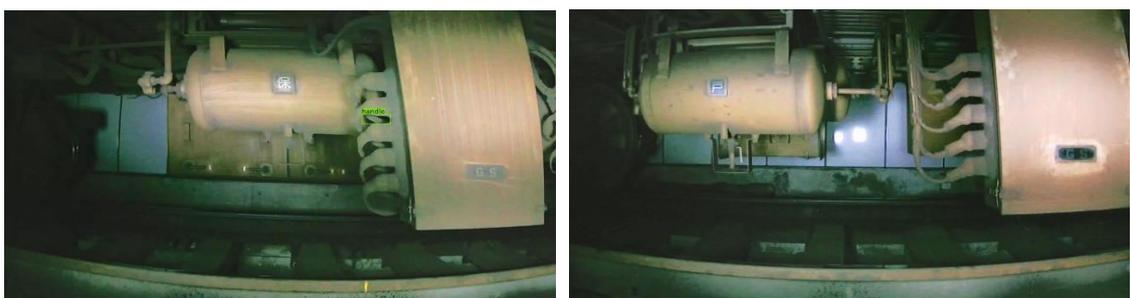


図 4.4.1.1-76 京浜急行電鉄 8 両編成車両ハンドルの誤検出の例①
(左：京急 8 両編成、右：京急)



図 4.4.1.1-77 京浜急行電鉄 8 両編成車両ハンドルの誤検出の例②（ハンドルの形状に似た汚れ）

羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅 1 番線に入線する他鉄道会社の車両について、ブレーキパッド、ハンドルの検出性能を確認した。評価には追加学習したモデルを使用した。評価対象は 8 両編成車両の 3 編成、各 1 往復ずつ走行する、合計 6 回走行分の映像とした。

ブレーキパッドについては、適合率・再現率ともに 80%以上の結果となっており、一定の検出性能が確認された。京浜急行電鉄 6 両編成車両と比較して、再現率が低く検出できていないサンプルが見られたが、追加学習に他社車両のデータを含むことで再現率は向上可能であると考えられる。

ハンドルについては、再現率については 100%となっており、他社車両であってもハンドルを検出可能であるとみられる。適合率については 100%に達しておらず、画像を分析したところ、京浜急行電鉄の車両には見られないパーツがハンドルとして検出されていた。ブレーキパッドと同様に、追加学習に他社車両のデータを含むことで再現率は向上可能であると考えられる。

羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅には、相互直通運行している異なる鉄道会社 4 社の車両が入線しており、他社の車両においても一定の検出性能が確認され、追加学習により検出性能の向上が見込めることから、本システムは汎用性があるシステムであると結論づけた。

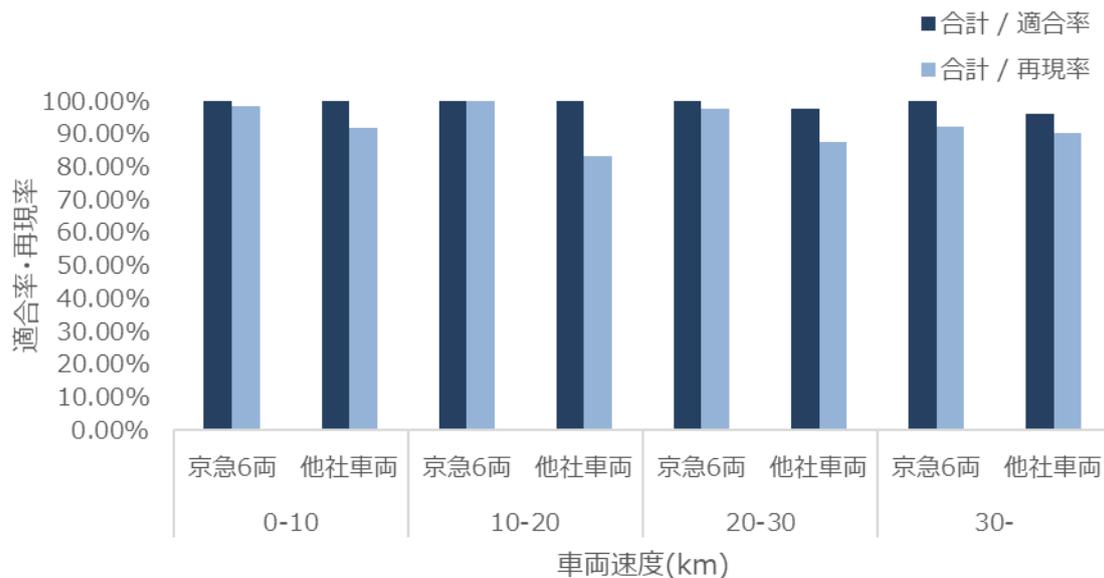


図 4.4.1.1-78 他社車両ブレーキパッドの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-48 他社車両ブレーキパッドの検出性能評価結果

車両速度	検出対象	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	京急6両	100.00%	98.25%	400
	他社車両	100.00%	91.67%	60
10-20	京急6両	100.00%	100.00%	80
	他社車両	100.00%	83.33%	48
20-30	京急6両	100.00%	97.50%	560
	他社車両	97.67%	87.50%	96
30-	京急6両	100.00%	92.08%	240
	他社車両	95.97%	90.15%	132
総計		99.55%	95.17%	1,616

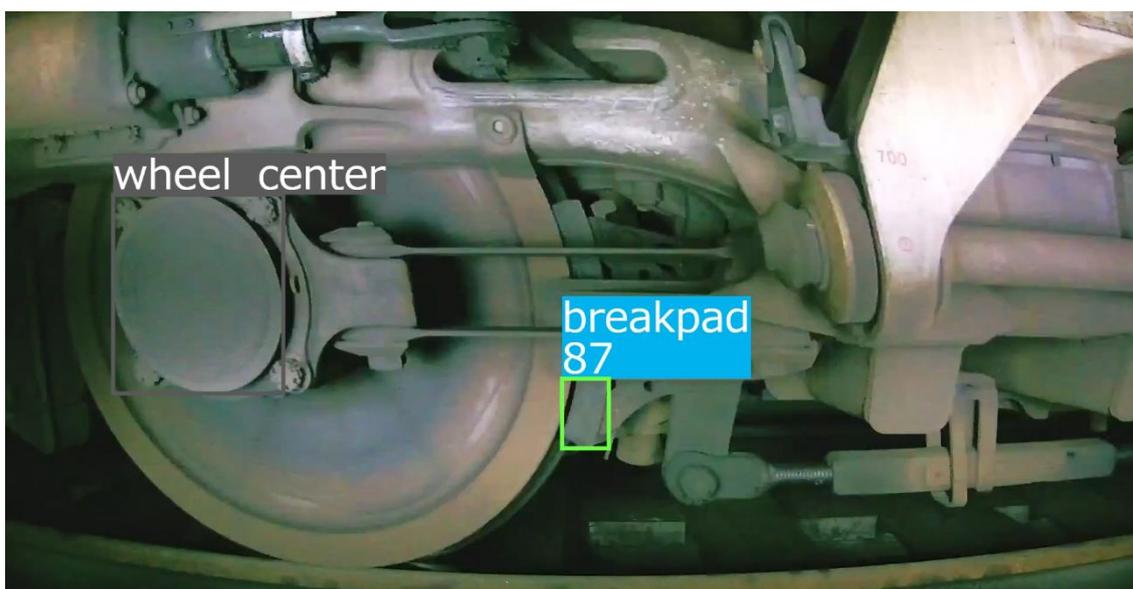


図 4.4.1.1-79 他社車両ブレーキパッドの検出結果の例

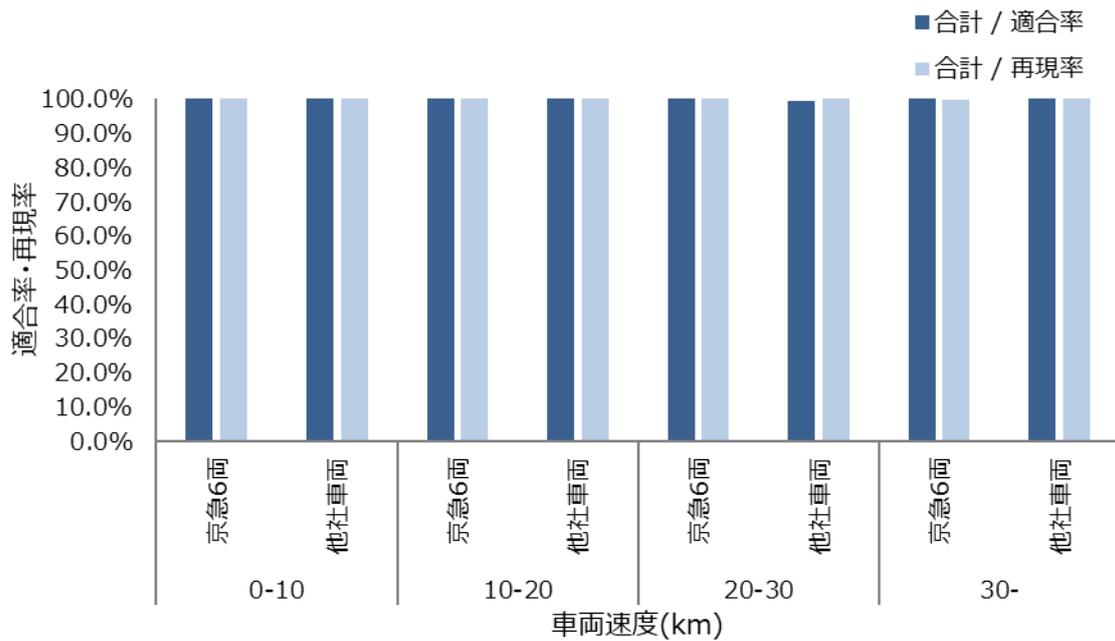


図 4.4.1.1-80 他社車両ハンドルの検出性能評価結果

表 4.4.1.1-49 他社車両ハンドルの検出性能評価結果

車両速度	検出対象	値		
		合計 / 適合率	合計 / 再現率	合計 / サンプル数
0-10	京急6両	100.0%	100.0%	100
	他社車両	100.0%	100.0%	15
10-20	京急6両	100.0%	100.0%	60
	他社車両	100.0%	100.0%	12
20-30	京急6両	100.0%	100.0%	98
	他社車両	99.3%	100.0%	24
30-	京急6両	100.0%	99.7%	62
	他社車両	100.0%	100.0%	33
総計		100.0%	99.9%	404



図 4.4.1.1-81 他社車両ハンドルの検出結果の例



図 4.4.1.1-82 他社車両ハンドルの誤検出の例

d) その他の評価結果

適合率と再現率が低かった疑似き裂について、要因を分析した。

・誤検出について

今回の実証において、疑似き裂として油性黒ペンで台車部分に書き込みを行った箇所以外にも、き裂として検出された箇所が見受けられた。誤検出されたき裂の例を図 4.4.1.1-83 に示す。

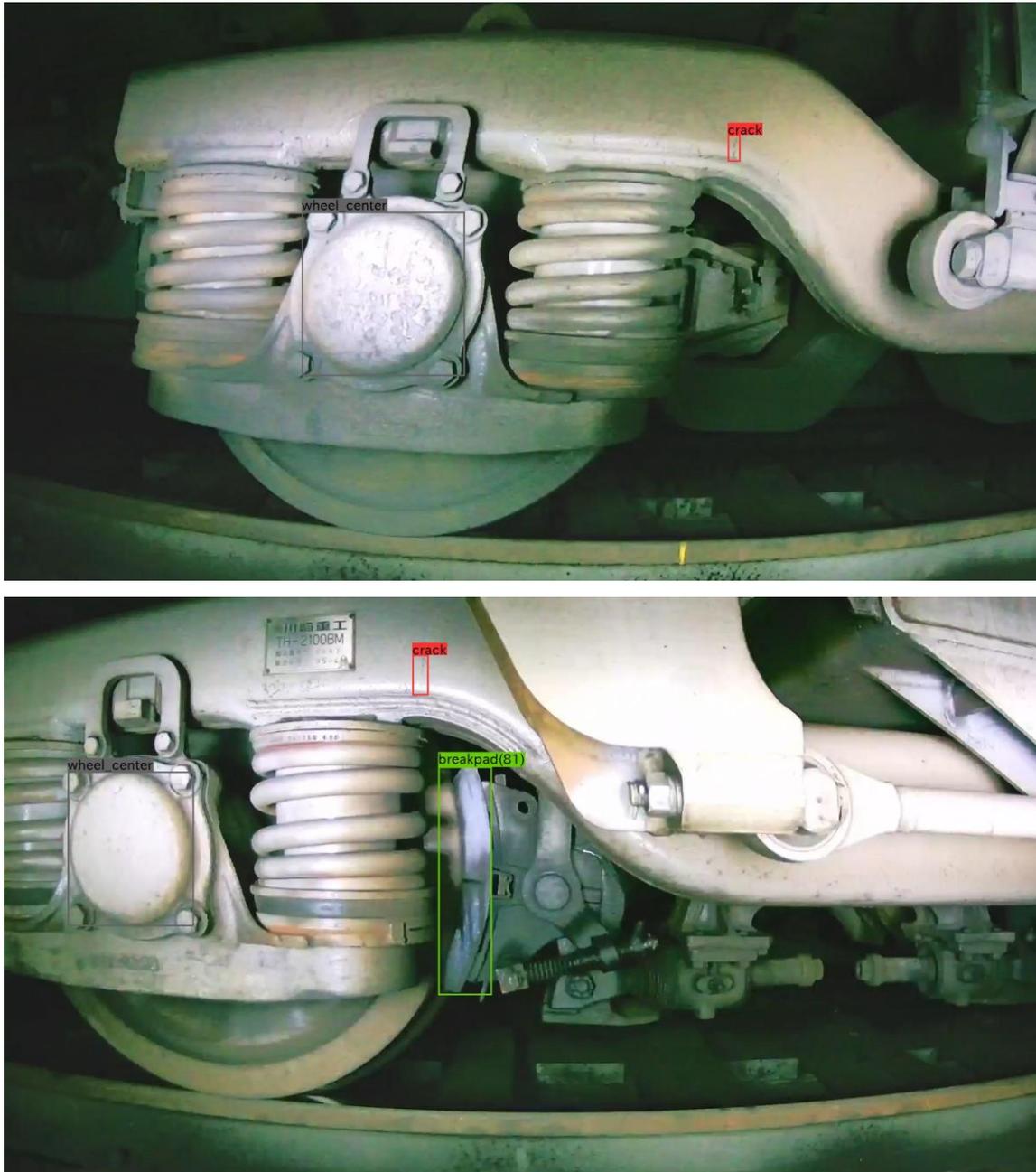


図 4.4.1.1-83 き裂の誤検出の例

き裂が誤検出された箇所の画像を確認したところ、汚れや塗装のひび割れをき裂として検出している可能性があることがわかった。

昨年度はこのように疑似き裂でない箇所をき裂として誤検出することは生じていなかった。昨年度は疑似き裂としてシールに線を印刷し台車に貼り付けて検証を行ったが、その際シールの反射を含めてAI学習をさせたことで、シールの反射があるものをき裂として一部検出していた可能性が考えられる。今年度の実証では、シールの反射を考慮し油性黒ペンで疑似き裂を記入したことにより、シールの反射等ではなく、き裂の形状を認識して検出することができていると考えられる。誤検出された箇所の汚れや塗装のひび割れは、疑似き裂として記入したものと、画像上で見る限り人の目で見ても類似しており、学習させた疑似き裂に類似したものを検出することができるAIであると考えられる。

一方で、誤検出を減らすためにはAIの追加学習が必要となるが、そのためには長期間にわたりデータを収集し、京浜急行電鉄の技術者の目線で画像を確認し、異常である・異常ではない、の判断を行う等、膨大な時間と作業量が必要となる。AIの追加学習については今後の課題とし、継続運用の中で協議のうえ対応を検討する。

- ・目視確認が不可能

対象の疑似き裂が目視困難であり、検出ができない場合が見受けられた。詳細については4)その他（現場環境）内の環境適応性（対象物の色合い）の項で述べる。

- ・映像の乱れ

撮影された映像のうち、映像が乱れたことにより解析不可能となった場合があった。このような乱れは切り分けを行った結果、カメラ起因により発生していることがわかった。

e) 実用可能性の評価結果

利用者の体感とオペレーション観点での実用性について、京浜急行電鉄の車両部へのアンケートを通じて評価した。デモンストレーションで確認したAI検出結果の画面については、検出ができているという意見を得られた。一方で、塗装のひび割れなど疑似き裂ではないものをき裂として検出する場面があることが確認されており、き裂のAI判定をどのように学習させるか、精度の向上と追加学習が課題として浮き彫りになった。

4) その他（現場環境）

a) 環境適応性（照度）照度変化にともなう AI 検出性能の評価結果

夜間に疑似き裂を記入した 4 両編成の車両を時速 5km/h で走行させ、ライトが 1 灯のときと 2 灯のときで検出性能の差を評価した。なお、疑似き裂は 80mm の長さのものを対象とした。

表 4.4.1.1-50 環境適応性（照度）の評価結果

ライト数	合計/AIが検出した	合計/AIが検出なかった	サンプル数	適合率	再現率
1	32	0	40	100.0%	80.0%
2	41	0	47	100.0%	87.0%

ライト 1 灯のときは網羅率が 80.0%であるのに対し、ライト 2 灯のときは 87.0%となっていることから、ライト数が多く明るい環境であるほうがより多くの疑似き裂を検出できているといえる。

b) 対象物の色合い変化にともなう AI 検出性能の評価結果

疑似き裂を記入した箇所のうち、AI が検出できなかった箇所について、カメラで撮影した映像（図 4.4.1.1-84）を確認したところ疑似き裂を目視確認が困難であり、かつ疑似き裂を記入した直後の画像（図 4.4.1.1-85）でも疑似き裂の目視確認が困難な箇所があった。

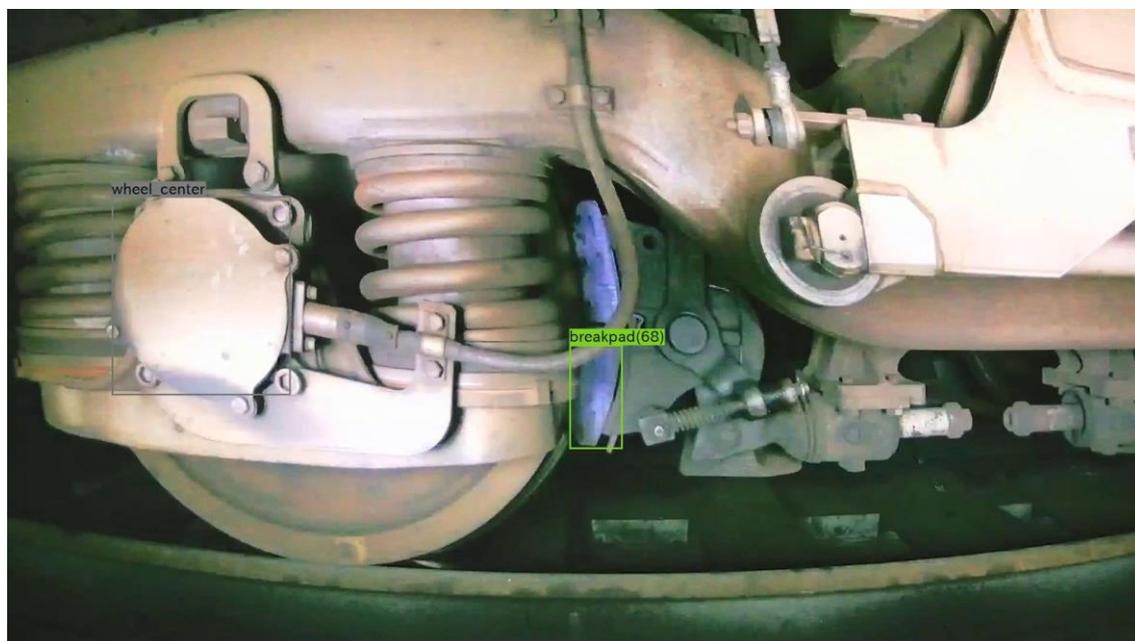


図 4.4.1.1-84 カメラで撮影した画像（AI が検出できなかった箇所）

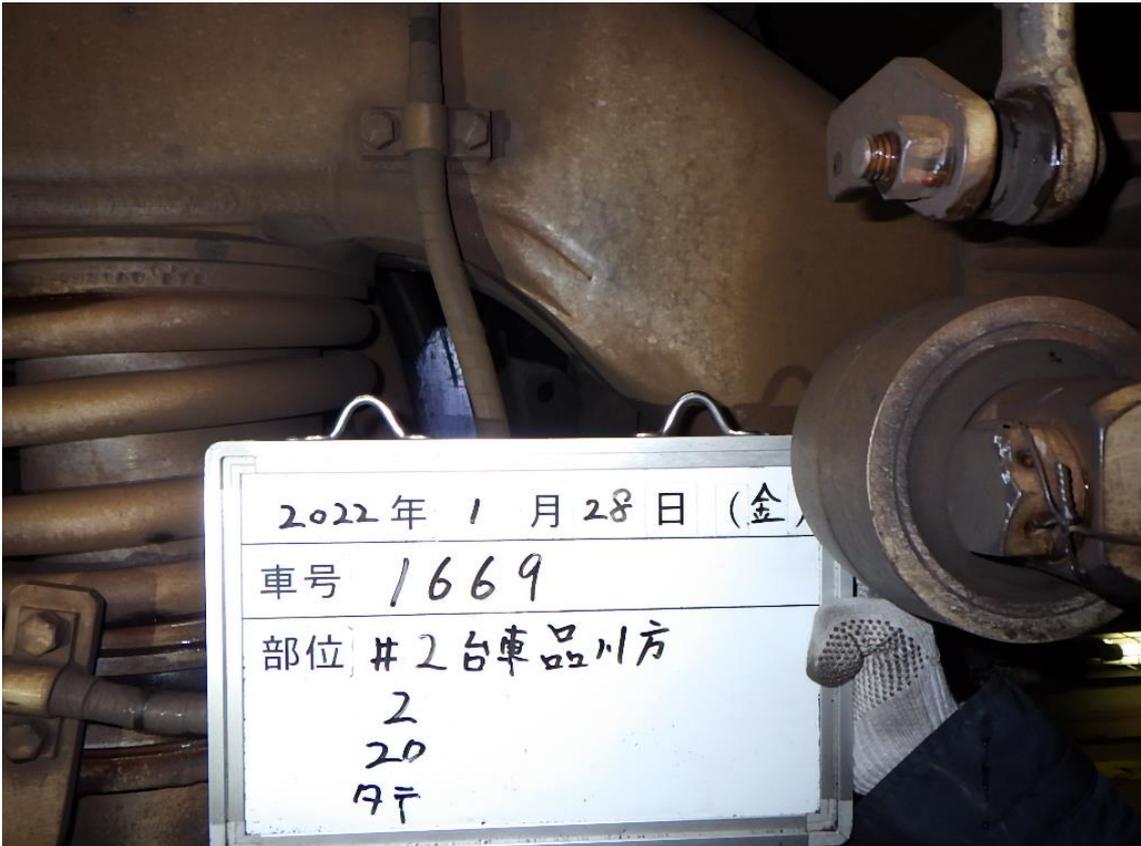


図 4.4.1.1-85 疑似き裂を記入した直後の画像 (AI が検出しなかった箇所)

今回、疑似き裂として油性黒ペンで台車に線を記入したが、台車の色と油性黒ペンの色がほぼ同色であり、目視確認ができないほど背景色と同化しており AI で検出されなかったものと考えられる。疑似き裂を油性黒ペンで記入したことにより検出されなかったものと考えられることもでき、より実際のき裂に近いものでき裂を再現し、検証を行う必要があることが示唆された。

c) 長期安定性 (カメラ機材の連続稼働時間) の評価結果

実証実験開始日から安定して動作していることを確認した。

d) 長期安定性 (GPU 搭載ノート PC の連続稼働時間) の評価結果

実証実験開始日から安定して動作していることを確認した。

e) 長期安定性 (5G ルータの連続稼働時間) の評価結果

実証期間中、3 台使用している 5G ルータのうち、2 台は通信断が各 1 回ずつ発生した。1 台は実証実験開始日から安定して動作していることを確認した。

事前にメーカーに確認した動作実績では、ビデオストリームを流した状態で 120 時間連続稼働、および 3 週間連続で ping 疎通試験を実施した動作実績を確認した。一方で本実証の設置環境はメーカーで動作実績のない、防水防塵 BOX に入れて使用し、24 時間 365 日電源が入った状態で稼働し、ホーム下のため現地に人が立ち入り定期的に電源 ON/OFF や再起動を行うことができない環境であった。このため、事前確認では確認しえなかった事象が発生したものと考えられる。5G ルータは OS を搭載した機器であり、定期的に電源を OFF したり再起動したりすることが一般的に必要なが、5G ルータを選定した当時、5G 基地局装置と接続し動作実績のある機種を選定したが、該当機種には遠隔から再起動をしたり、定期的に再起動をしたりする機能が備わっていなかった。5G 基地局装置と接続動作実績のある端末はこれから増えていく見込みであることから、将来的には遠隔再起動や定期的な再起動の機能が備わった機種を選定することが望ましい。

5) 効果検証のまとめ

• 通信性能

カメラ～クラウドの上り通信は、目標値である 60Mbps を達成しており、十分な性能があるといえる。一方でクラウド～監視用端末の下り通信は、本実証ではコスト、構築期間、セキュリティの関係で、固定 IP アドレスにより接続元制限をかけた、モバイル回線によるインターネット接続を使用したため、3つの映像を閲覧するためには不十分な性能であった。実運用の際には、下り通信においても 5G を使用できる環境での映像閲覧が望ましい。

本実証におけるローカル 5G アンテナの設置場所である駅ホーム下は、柱や既存設備など電波伝搬の観点での障害物が多いほか、列車がホームに停車する間は列車も障害物になるため、回折しやすい Sub6 帯を採用した。一方で、将来的には費用対効果の観点からもユースケースを拡大し、車内や駅ホーム上の安全監視、車内や駅ホーム上および駅構内への運行情報の配信や広告の掲示などでの利用を検討する見込みである。実現のためには、Sub6 では伝送容量が足りなくなることが想定されるため、エリア観定の課題を払拭することができれば、ミリ波は有効であると考えられる。

• UI 性能

通信環境により画面表示に時間がかかるなど、操作の体感に大きな影響を与えた。上記と同様に、実運用の際には、下り通信においても 5G を使用できる環境での映像閲覧が望ましい。実運用を考慮すると、画面表示の機能には改善の余地が見受けられた。画面上で提示する情報の順位を決め、分かりやすい表示が必要である。全体を通して、京浜急行電鉄車両部から、利用することを前提にした具体的な改善案等の意見を得ることができたことから、実装に向けたより詳細な検討のステップを踏むことができていると考えられる。

• AI 検出性能

昨年度よりも速いスピードでの検出が実現できたことから、システム性能を向上することができたといえる。昨年度と比較し、列車の台車部分とカメラの距離が近くなり映像がより鮮明になったこと、ライトを設置したため、照度が一定かつ十分な明るさが確保された環境を構築できたことから、再現率が向上したものと考えられる。長期間実証を行ったことにより、AI 学習に使用する教師データをより多く収集できたことで、追加学習により検出性能を向上できることを確認した。また、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅に相互接続している異なる 4 社の車両についても一定の検出性能を確認したことから、本システムは汎用性があると評価した。

一方で、実運用を踏まえると、AI 検出精度、リアルタイム性の 2 点が課題として浮き彫りになった。実運用の際にはき裂が走っている危険な状態の車両はすぐにでも停止し点検することが求められるため、カメラで異常を検出したらすぐに通知とともに対象の画像を確認できることが望ましい。AI 検出精度の向上のためには追加学習が必須となるが、そのためには長期間にわたりデータを収集し、京浜急行電鉄の技術者の目線で画像を確認し、異常である・異常ではない、の判断を行う等、膨大な時間と作業量が必要となる。リアルタイム性の向上のためには処理時間の短縮が必須であり、クラウドリソースの向上が必要となるが、長期運用を前提とするとコストが大きくなるため、クラウドリソースの低価格化が求められる。

4.4.1.2 機能検証

(1) 評価・検証項目

実証におけるローカル 5G を用いたソリューションのシステムを構成する伝送メディア、映像取得、映像蓄積、映像解析、映像配信、結果表示の各ジャンルにおいて、それぞれ以下の項目に関して機能検証を実施した。

1) 伝送メディア

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」を評価・検証の対象とした。

2) 映像取得

映像取得機材として、「8K カメラ」「4K カメラ」「フル HD カメラ」「ハイスピードカメラ」「サーマルカメラ」を評価・検証の対象とした。

3) 映像蓄積

映像蓄積用に使う基盤サービスとして、「dOIC」「AWS」「Azure」を評価・検証の対象とした。

4) 映像解析

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」を評価・検証の対象とした。

5) 映像配信

映像配信規格として、「WebRTC」「HLS」「RTSP」を評価・検証の対象とし、また、コーデック規格として「H.264」「VP8」「VP9」を評価・検証の対象とした。

6) 結果表示

UI 設計 (デバイス) として、「PC」「タブレット」「スマートフォン」評価・検証の対象とし、また、UI 設計 (媒体) として「ブラウザ」「アプリ」「専用デバイス」を評価・検証の対象とした。

(2) 評価・検証方法

実証におけるローカル 5G を用いたソリューションのシステムを構成する伝送メディア、映像取得、映像蓄積、映像解析、映像配信、結果表示の各ジャンルにおいて、それぞれ以下の方法を使って機能検証を実施した。

1) 伝送メディア

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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

2) 映像取得

映像取得機材として、「8K カメラ」「4K カメラ」「フル HD 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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

3) 映像蓄積

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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

4) 映像解析

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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

5) 映像配信

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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

6) 結果表示

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、5段階評価して、総合的な機能評価を行った。

(3) 実証結果及び考察

本実証におけるローカル 5G を用いたソリューションのシステムを構成する各ジャンル（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）の機能の評価・検証結果を以下に記載する。

1) 伝送メディア

以下の表に示すように、①伝送メディアでは「ローカル 5G」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-1 伝送メディアのジャンル別機能の評価・検証結果

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	14	5G のエリアがキャリア次第となってしまう使用場所には制約がある。下り通信としては優位性があるが、他の利用者による通信速度低下などの影響などは受けやすいといえる。
ローカル 5G	4	4	5	2	15	アンテナの設置場所などを含め、利用用途にあわせた柔軟なエリア設計が可能となる。コストが高いことが難点ではあるが、ほかの利用者による通信速度の低下などの影響を受けないなどの観点でも優位性がある。
光ケーブル	4	3	3	4	14	物理的な制約がなくケーブルの敷設に問題がないようであれば、上り、下りともに帯域は良好であるが、保守性に関しては他メディアに比べて劣る。
総合的な評価	<p>実証フィールドとなる羽田空港第 1 駅・第 2 ターミナル駅構内は地下 2 階部分ということもありキャリア 5G のエリア外であった。また、駅構内の工事状況等に応じ、システムの設置場所を柔軟に変更可能であることから、伝送メディアとしてはローカル 5G が適していたともいえる。</p> <p>ただ、前述のとおりローカル 5G のコアネットワーク装置群は、GNSS アンテナを屋外に設置する必要があるため、地上への配線が可能な隣駅となる羽田空港第 3 ターミナル駅に設置することになった。こちらについては、1 駅分の距離をおいてもローカル 5G 基地局と屋内無線装置、無線アンテナを離して設置することができるなど、設置環境の制約に応じた柔軟な機器設置ができたことは設計、構築段階においても特に有用であった。</p>					

2) 映像取得

以下の表に示すように、②映像取得では「フル HD カメラ」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-2 映像取得のジャンル別機能の評価・検証結果

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	4	3	3	3	13	映像品質が高い。エンコード・デコードの汎用技術を利用可能。クラウド上に実装可能。屋外設置可能な防水・防塵対応機種が限定される。フレーム数は機材次第で増減。
フル HD カメラ	3	4	5	4	16	映像品質が中程度。エンコード・デコードの汎用技術を利用可能。クラウド上に実装可能。屋外設置可能な防水・防塵対応機種が比較的多い。フレーム数は機材次第で増減。
サーマルカメラ	3	2	2	2	9	映像品質は低い温度情報を取得可能。フレーム数が少ない。屋外設置可能な防水・防塵対応かつ、移動体を撮影可能なスペックを有する機種が市場に存在しない。
総合的な評価	<p>今回の実証では、カメラの設置場所が地下駅のホーム下であり、汚れや湿度等の影響を受けることが想定され、長期安定性を考慮すると屋外設置可能な防水・防塵対応の機種を選定することが必須と考えた。防水・防塵対応でストリーミング映像配信可能、かつ開発可能な拡張性の高い機種は限定され、4K/フル HD の両方に対応した機種を選定した。ただし、選定した機種では 4K 映像のフレーム数は 15fps が上限であり、フル HD 映像では 30fps が上限であるなど、フレーム数は機材のスペック次第で増減する。今回の実証では速度のある対象物を撮影することが前提となっており、フレーム数が多いことが望ましいことから、選定した機種のうちフル HD 映像を採用した。</p>					

3) 映像蓄積

以下の表に示すように、③映像蓄積用基盤サービスでは「dOIC」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-3 映像蓄積のジャンル別機能の評価・検証結果

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	本実証では昨年度課題解決型実証システム環境の構成を踏襲することで社会実装実現性の向上を目指すこともあり昨年度同様dOICを選定とした。ただし、基盤としての性能比較の面では、拡張性などについては他社パブリッククラウドには劣る。
AWS	4	4	4	3	15	dOIC・AWSとの遅延比較では、AWSではインターネット経由での基盤接続構成をとる場合には遅延に対する対策の検討が必要である。例えば、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が活用可能であるため遅延に関する問題は改善されることが考えられる。
Azure	3	4	4	4	14	パブリッククラウドサービスとしては活用しやすい機能と構成が用意されている。しかし、5Gを利用して低遅延性を求める場合については、現時点で、5G環境と閉域接続する構成がない。このため低遅延性については、dOIC/AWSと比較すると見劣りする。
総合的な評価	<p>本課題実証では「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活用すること」を前提で評価した。本実証では、伝送を行う無線NW環境としてローカル5G環境を活用することとし、映像伝送基盤については、昨年度の課題実証システム構成を踏襲しドコモオープンイノベーションクラウド（以降、dOIC）を用いて昨年度に引き続き社会実装性を高めることに主眼を置くこととした。他基盤については、KDDI(au)5Gを利用する場合は、AWS Wavelengthが、遅延観点では優れた構成となることが考えられる。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。</p>					

4) 映像解析

以下の表に示すように、④映像解析では「ディープラーニング」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-4 映像解析のジャンル別機能の評価・検証結果

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、特定物体の検出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の物体の検出可否を判断可能。保守性が高く低コストに運用可能である。
人の目	3	5	3	2	13	精度が高いが移動体の検出が困難、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	車両検査の遠隔・自動監視システムの構築にあたっては、移動体に対する検出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、同様の映像を常時解析し続け、異常状態を検出した時のみ、専門の技術者が確認した上で、対処するのが理想である。					

5) 映像配信

以下の表に示すように、④映像配信では「WebRTC」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-5 映像配信（映像配信規格）のジャンル別機能の評価・検証結果

映像配信 （映像配 信規格）	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	4K30fps で映像伝送と配信が可能であり、拡張性として同時接続数を柔軟に増やせ、多拠点配信が可能な商用パッケージが存在する製品のため、問題発生時はベンダへ問い合わせ可能であり、運用・保守性に優れている。ただし、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	4K30fps で映像を配信可能ではあるが、他の方式と比較した場合に遅延量が大きく、リアルタイム性に欠けるものである。拡張性・汎用性は HTTP 利用端末であれば映像の受信が可能である。
RTSP	5	3	3	4	15	4K30fps で映像を低遅延で配信可能であるが、同時接続数の拡張性は WebRTC に劣る。また、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)が選択肢となってしまう。OSS では実装・テスト・運用の問題発生時において、提供団体・コミュニティへ問い合わせとなるため、解決が長期化する懸念が残る。
総合的な 評価	<p>本実証において車両の映像をより速やかに AI エンジンへ伝送し、異常の検出を行う必要があることを前提として評価した場合に、WebRTC は低ビットレート・低遅延での映像伝送が可能で、かつ複数拠点への配信機能に優れていることから、運用と保守性に優れていると判断した。</p> <p>HLS は拡張・汎用性はあるものの遅延量が大きいことから不採用とした。</p> <p>RTSP は低遅延なものの商用パッケージとしての扱いが少なく、OSS が選択肢となるため、問題発生時の対応解決方法を考慮し不採用とした。</p>					

表 4.4.1.2-6 映像配信（コーデック）のジャンル別機能の評価・検証結果

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
H.264	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可能である。HDTV クラスの高ビットレート用途に至るまでの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lowビットレートでも性能を発揮するが、エンコードが遅いうえ、同等の品質を持つ H.264 が広く普及していることと、後継の VP9 があるため VP8 を選択するメリットがあまり無い。
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である。動画の圧縮率が最も高い上、低ビットレートでも高い画質が実現できているが、甲圧縮することから VP8 よりも CPU の使用率が 20～30%ほど上がってしまうため、ハード面のコストにデメリットが発生する恐れがある。
総合的な 評価	汎用性を考えた場合に一般的な防犯カメラ仕様に多く適用されている H.264 コーデックが適切と考えた。性能面についても VP8、VP9 と今回実証内容で必要な条件においては大きな差も無いことから、H.264 を採用することとした。					

6) 結果表示

以下の表に示すように、⑥結果表示では「PC」を利用することが適切であると結論付けた。

表 4.4.1.2-7 結果表示 (デバイス) のジャンル別機能の評価・検証結果

結果表示 (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	フル HD 映像の画質を低下せず再生可能、かつ複数映像を同時に再生可能な GPU メモリ等、リソースの選択肢が最も柔軟なデバイスである。AI で解析された結果を画面上から確認する際の視認性も十分であり、遠隔点検には最も適したデバイスであると考えられる。ただし、持ち運びには難がある。デスクトップ型であれば常時給電が必要なため据え置きが前提となる。バッテリーを搭載したノート型であっても、高性能なもの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いうケースもある。
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ものが多く、現場で AI 解析結果映像と現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。一方で、リソースも低く異常検出箇所を確認するためには画面も小さいため、フル HD 映像で伝送するメリットが低いと考えられる。今回の実証においては複数のカメラの映像を同時に配信するため、再生するためのスペックや画面の大きさの点で不十分であると考えられる。業務用としても導入率が上昇しているため、AI 異常検出時の通知の受け取りや、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	今回の検証においては、フル HD 映像を高画質のまま、かつ複数の映像を同時に配信・再生することを前提としているため、性能が最も優れる PC を選定した。今後の導入時のオペレーションを考えた場合には、詳細な検出結果映像の確認には PC を用い、AI 異常検出時の通知の受け取りや、対象の検出結果画像を一次確認するために、可搬性に優れたタブレットやスマートフォンを用いる等、デバイスによって役割分担することで、デバイスの機能を発揮する形で運用することが望ましいと考えられる。					

4.4.1.3 運用検証

(1) 評価・検証項目

実際の鉄道駅でローカル 5G 活用モデル（5G と AI を活用した列車検査の遠隔化・自動化システム）の運用を試行する本実証では、今後継ぎ目なく実運用していく際の解決すべき課題を運用面から明確化し、解決していく必要がある。このため、運用検証として、実証結果を踏まえたローカル 5G 活用モデルの運用面における課題抽出・解決策の検討を実施。課題解決に向けたシステムが具備すべき要件と考える、①一般性・汎用性、②拡張可能性、③経済性の観点から運用検証を実施した。

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。

評価・検証は、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にもとづき評価した。実証実験の事前・事中・事後など多段階にて現場技術者にヒアリングを実施し、“継ぎ目のない実運用”を念頭に置いた現行のオペレーションにおける運用の課題を整理し、オペレーションの改善等への寄与度を検証した。

【ヒアリング項目】

- 従来の検査に課題解決システムの機能を追加するオペレーションの運用可能性
- 具体的な運用スキーム（人員配置や現場作業）の想定
- 実際の運用スキームを想定した際の懸念事項
- 過去に遡って画像を確認できるメリット、考えられる活用方法

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した。

実運用に関する作業項目は以下のとおりである。

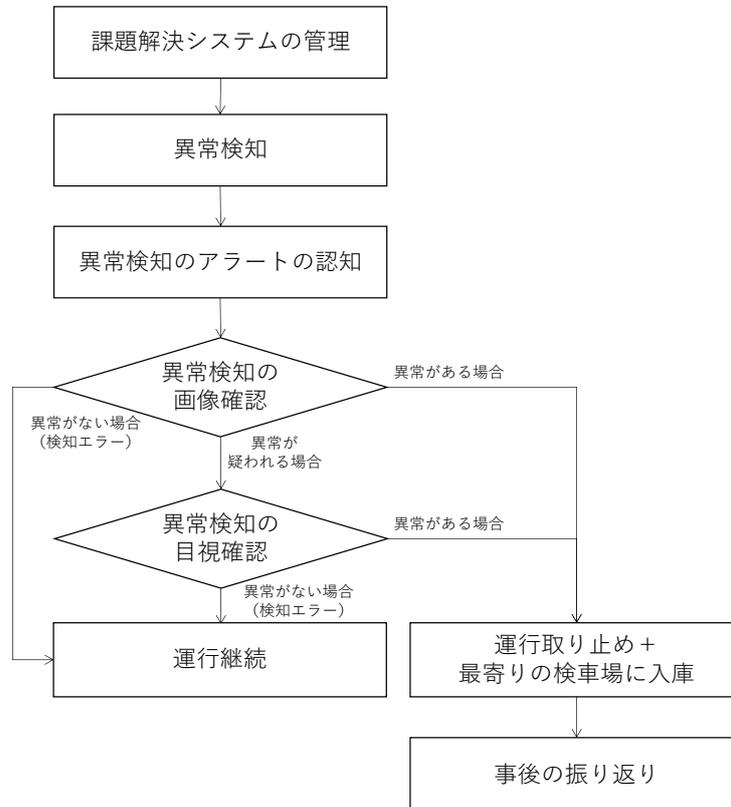


図 4.4.1.3-1 作業項目の検討 (実運用)

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した。

通常時のメンテナンスに関する作業項目は以下のとおりである。

表 4.4.1.3-1 作業項目の検討 (通常時のメンテナンス)

分類	項目	対応者
システム運用	5G エリアの保守 クラウド環境の保守	サービス提供者
現場における運用	機器の点検 振動 (映像のぶれ) 機器の清掃 カメラレンズの汚れ	サービス提供者

また、現場における運用のうち、「振動 (映像のぶれ)」および「カメラレンズの汚れ」が検出の正確さにどの程度影響を与えるか検証し、振動の許容範囲および清掃の必要な間隔を確認した。

(2) 実証結果及び考察

ローカル 5G 活用モデルの運用検証の結果を表 4.4.1.3-2 に示す。

本実証は、継続運用を見据えて実際の鉄道駅にて営業車両を対象に実施するもので、令和 2 年度とは異なり、運用作業は京浜急行電鉄における実オペレーションを踏まえ、評価・検証することを基本とした。結果として、課題は大きく人的負担（費用）の増加、オペレーションにおける改善の必要性の 2 つが挙げられる。解決策として、以下のとおり考えられる。

【人的負担（費用）の増加】

- ・作業内容のマニュアルを作成し、日常業務の一環とすること
- ・可能な限りシステム面で作業を補助し、対応者の負担を軽減すること

【オペレーションの改善の必要性】

- ・導入時の影響を抑制するようなオペレーションを検討すること
- ・検討したオペレーションを踏まえて、システムを構築すること

なお、導入にあたっては、上記の課題に対する解決策で負担の軽減や影響の抑制を図るものの、将来の効果発現に向けて順応するための期間が必要となると考える。

表 4.4.1.3-2 運用検証の結果 (1/2)

分類	運用作業	対応者	対応場所	課題と対応策		評価の観点		
				課題	対応策	①一般性・汎用性	②拡張可能性	③経済性
(1) 実運用に関する作業	課題解決システムの管理	車両部	—	・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	・マニュアル化により日常業務の一環とすることで、人的負担軽減を図る	・システムの管理に特別な技術が必要としないため、事業者を問わず運用可能	・観測点の追加などのシステム拡張は本作業の負荷を大きくするものではなく拡張可能性は高い ・また、相互乗り入れを実施している他社の車両についても追加の AI 学習の実施により対応が可能	・本作業の人的負担（費用）は純増となる
	異常検出のアラートの認知	車両部	事務所（本社、各検車区等）	・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	・人的リソースの割り当てだけでなく、異常検出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 ・伝達するシステムとしては以下が考えられる ・関係者（複数）に画像付きのメールを送付 ・監視用 PC のそばに回転灯を設置し、異常検出時に点灯	・特別な技術が必要としないため、事業者を問わず運用可能	・観測点の追加や他社の車両の対応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	・大きな費用増は伴わない

また、振動およびカメラレンズの汚れの検出率への影響検証を企画したものの、実証期間中は振動およびカメラレンズの汚れの影響による検出率の低下はみられなかった。これは実証に使用したカメラが防塵・防水に優れた機種であったことが理由として考えられる。一方、長期間の実装にあたっては、メンテナンスの視点での検討を実施する必要がある。

4.4.2 ローカル5Gを用いたソリューションの実装性に関する検証

今年度の実証は、実際の鉄道駅（羽田空港第1・第2ターミナル駅構内）にて実施するもので、京急久里浜工場で実施した令和2年度より、実装に近づいているといえる。

具体的には、「実装イメージに近い環境下での試験運用」を念頭に置き、令和2年度事業では車両基地で実施していた異常検出を、鉄道駅で実施することで“運行中の”車両を検査することで日々鉄道駅を通過する車両すべてを常時観測できる仕組みを構築した点である。また、本事業では、カメラを複数台設置し、検出精度を維持しながら一部の台車の異常を検出することが可能なシステムを構築した。

	R2年度実証	R3年度実証
	鉄道監視システム構築・効果検証（車庫） 机上検証	R2年度構築システムの高度化・効果検証（鉄道駅） 実運用検証
	成果	R2年度を踏まえたR3年度の取組み
実証観点① 鉄道業務への適用	> 実施したこと 『適用範囲やセンサーフュージョンによる異常検知の検討』 ・影響度/頻度の高い車両点検ポイントの明確化（台車き裂、ハンドル開閉、ブレーキパッド摩耗） ・センサーフュージョン（サーマルカメラ）による異常検知に挑戦 > 実装に向けた残課題 ・実装における課題抽出及び解決策の検討	『鉄道駅にシステム構築し、実運用に則した課題抽出・解決と更なる運用に向けた検討』 ・鉄道駅にて実証 ・実装に向けた課題（技術観点/運用観点）の解決及び実運用に資する検討
実証観点② 技術の向上	> 実施したこと 『日常点検＋異常検知システムの検討・構築及び効果検証』 ・5G/MECでのリアルタイム4K映像伝送、高速AI解析を実現 ・サーマルカメラ映像解析による不可視の台車の瑕疵確認 > 実装に向けた残課題（技術観点） ・環境への適応 ・長期安定性の確保 ・必要な追加機能開発	『実運用に則したシステム要件（機器構成やシステム性能の高度化等）の検討・構築及び効果検証』 ・システム性能の環境適応（検知精度のばらつきを抑制） ・機材性能の長期安定運用（熱暴走対策、防水、防塵） ・必要性能の追加（複数カメラによる同時並行撮影・伝送・AI解析・UI表示、およびデータ可視化基盤の追加等）
実証観点③ 実装/水平展開の検討	> 実施したこと 『実装に向けた机上検討及び水平展開の可能性確認』 ・本技術の実装性を高める机上検討 ・他鉄道事業者 / 他業種への適用・応用可能性の確認 > 実装に向けた残課題（運用観点） ・実装→実運用スキームの定義 ・有識者・他事業者と協調した技術開発・実装スキームの検討	『実装に向けた具体的な検討（実運用スキーム）及び運用サイクル実施』 ・京急社内各部を含めた実運用スキームの定義 ・鉄道業界のその他課題や他業種における課題への対応可否検討（机上検討）

図 4.4.2-1 令和2年度実証と令和3年度実証の比較

ローカル5Gを用いたソリューションの実装性については、前述の運用検証結果に基づき、抽出された課題に対する解決策の有無/解決策が実行可否を踏まえて、京浜急行電鉄でのPDCAによる意思決定を行うことで、実装を目指すものである。

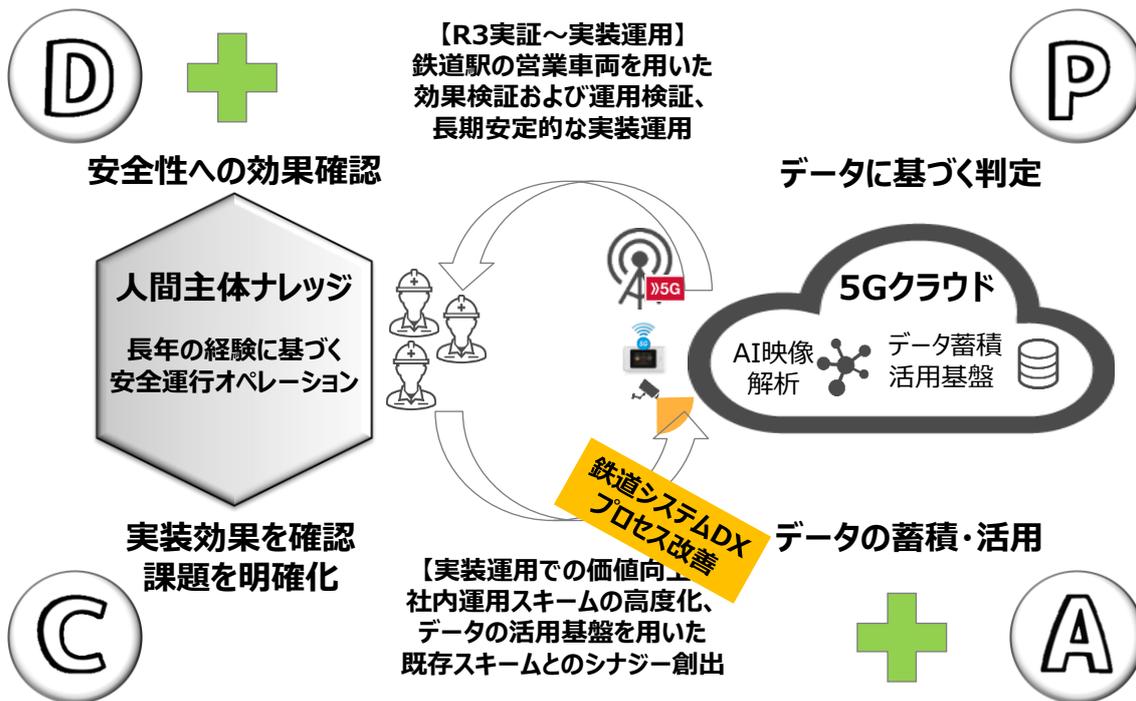


図 4.4.2-2 実装に向けた PDCA のイメージ

4.4.2.1 ローカル 5G 活用モデルの構築・検証

(1) 京浜急行電鉄におけるシステムの実装イメージ

京浜急行電鉄におけるシステム実装イメージを示す。

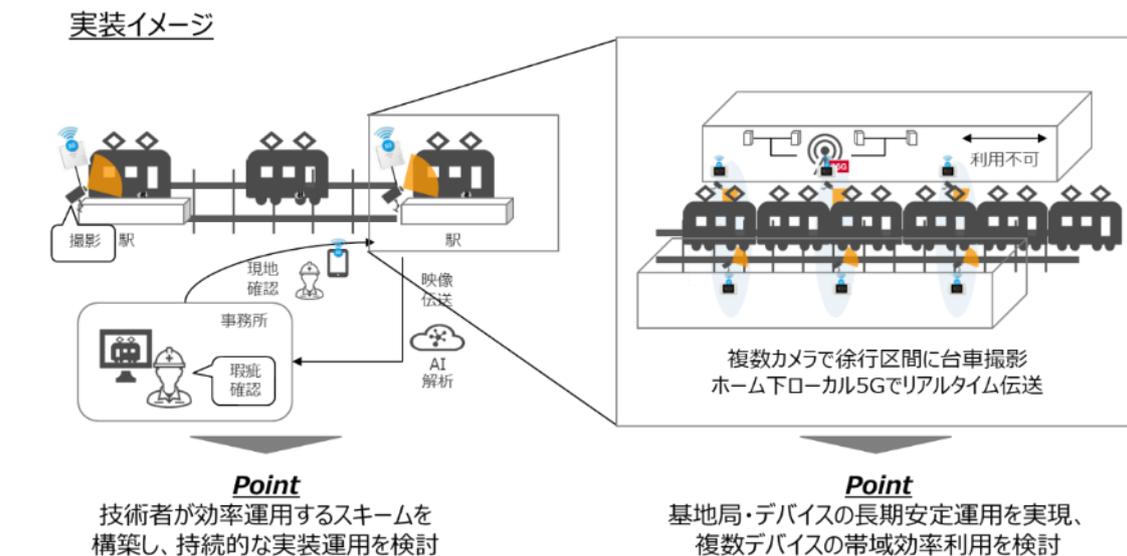


図 4.4.2-3 京浜急行電鉄におけるシステム実装イメージ

項目	実装イメージ
想定される具体的な主体	京浜急行電鉄株式会社
対象となるシステム	実証で用いたシステムを前提に、機材の長期運用観点およびAI検出精度の改善を行うために、鉄道事業者とシステム開発者で協力し継続運用する
詳細の前提条件	羽田空港第1・第2ターミナル駅で実証システムを継続運用する
標準モデル	実証システムをベースに、京浜急行内での運用方法や処理手順については継続して検討
体制・事業スキームのモデル	継続運用における免許人・ネットワーク・システム構築・運用等の役割分担の在り方については、システム開発者と協力し、今後調整を図る
導入効果	安全性の向上
課題と対応策	<p>■運用課題</p> <ul style="list-style-type: none"> AI検出精度の見極め、追加機能の検討、システムの設置場所に関する検証 等 <p>■システム課題</p> <ul style="list-style-type: none"> UIの改善、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） 等 <p>→現業部門との意見交換により改善を図る</p>

(2) 実証から見てきた実装に向けての課題

実証から以下の課題が見えてきたことから（詳細は 4.4.3 で記述）、実装モデルの更新の必要性について、今後検討を行う。

項目	見えてきた課題	実装モデルへの影響 (更新後の姿)
システムの運用場所に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ・乗客のプライバシーへの配慮 ・AIの検出精度の確保に関する課題 ・異常検出時の対応を踏まえた課題 	以下について今後検討 ○営業線内とするか営業線外（車両基地の入出庫線など）とするか ○駅とするか駅以外とするか ○地下空間とするか地上の空間とするか
システム全体の機能に関する課題	<ul style="list-style-type: none"> ・様々なセンサを用いた異常検出による機能向上 ・異常箇所の迅速な把握のための追加情報の取得 	以下について今後検討 ・センサフュージョンのあり方 ・列車識別のための追加情報として取得する情報

4.4.2.2 普及展開方策の検討

(1) プラットフォームの構築

1) システムのプラットフォーム化について

新型コロナの影響により、鉄道事業者の収益状況は悪化しており、その状況においてシステムに対する投資を行うためには、投資に見合った効果が求められる。

また、システムの開発や維持管理に向けて、それぞれの事業者が単独で取組むことは1社最適化の面では優れているが、費用負担の面では必ずしも優れているとは言えない面もある。鉄道事業者における共通のニーズを踏まえ、複数の事業者が共用できるようなシステムのプラットフォーム化を図ることも有用と考えられる。

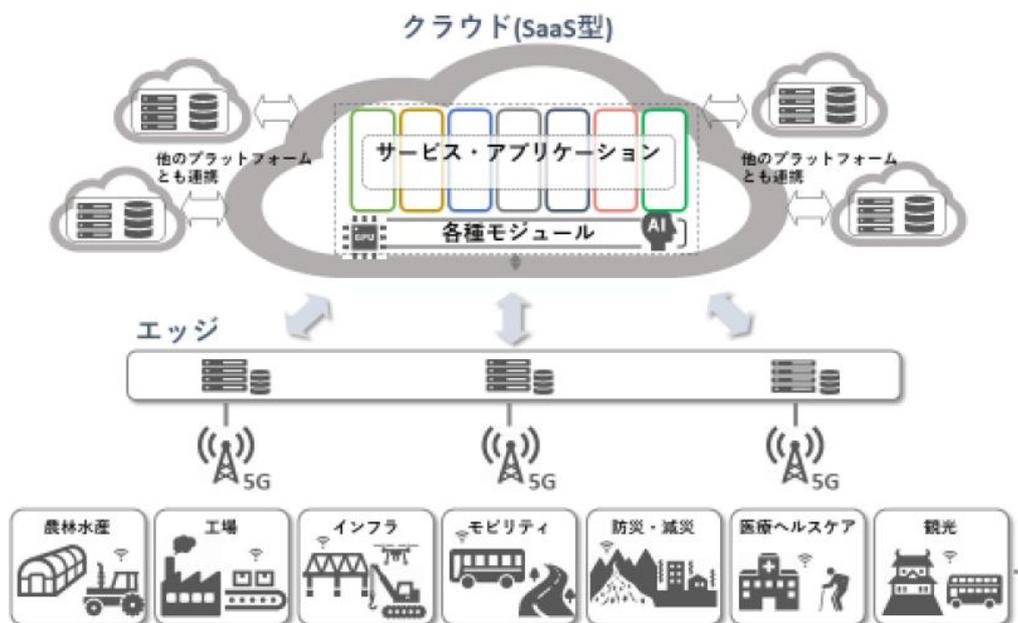


図 4.4.2-6 プラットフォームのイメージ

出所) 総務省「Beyond 5G 推進戦略-6G へのロードマップ」

2) 鉄道事業者の共通ニーズの把握

上記プラットフォーム化を意識しながら、普及展開方策として、京浜急行電鉄以外の鉄道事業者での実装を念頭に置き、以下の事業者に対してヒアリングを実施するとともに、各社のニーズから共通ニーズの抽出を実施した。

■各事業者へのヒアリングの視点

- ①鉄道 DX に係るニーズ
- ②本実証システムの発展形のイメージ
- ③横展開を可能とする取り組み方策

表 4.4.2-1 鉄道事業者の鉄道 DX に係るニーズ等

鉄道事業者	鉄道 DX に係るニーズ等
西日本鉄道	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道 DX は喫緊の課題である。 ・メンテナンスの省力化に向けて、車両に設置された各種センサにより車両の状態を逐次モニタリングする「状態監視システム」の運用について、実証試験を行っている。 ・扉の開閉に係る検査に時間がかかっている。何秒以内で閉まるか映像で自動確認できると良い。 ・今年度実証を行っている車両監視 AI システムについては、目視検査を AI に置き換えることによる検査の迅速化・省力化、作業者の負担軽減、目視では確認できない異常の発見による故障の未然防止などの期待がある。
京阪電鉄	<ul style="list-style-type: none"> ・京急システムの発展形として、一部を列車検査に代替していくという考え方については、精度が高くなれば可能性は考えられる。 ・装置関係のカバーの確認は検査時だけでなく故障時にも開いてしまうことがあるため、そのようなチェックができるのは有用である。 ・映像の活用という点では、鋼索線の車掌無人化や列車映像の送信、運転状況記録装置等データの取得（CBM への活用）なども期待できる。
南海電鉄	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄道 DX について、推進をする必要性はあるが、5G の活用によって何ができるかについては勉強中である。 ・IT 技術を活用した課題解決としては、ドローンによる目視困難箇所の点検や AI と高感度カメラによる踏切部の状況把握の迅速化などの取り組みを行っている。 ・営業列車及び機器による車両・設備点検実現（CBM の実現）に向けた要素技術について調査・研究を行っている。
東急電鉄	<ul style="list-style-type: none"> ・労働人口・熟練技術者の減少や収益の悪化等の課題に対して、高効率な鉄道オペレーションや人が行う作業の機械への置き換えなどの実現に向け、省人化の一環として、「線路巡視業務の高度化」、「車両ドア閉扉判断の高度化」について実証を行っている。 ・他の事業者も含めた共通ニーズでもありと考えられることから、普及展開の可能性についても検証を行っている予定である。

※鉄道 DX : AI や IoT を活用して、鉄道の業務プロセスの変革（省力化・コスト削減）や旅客サービスの変革（省人化新たな価値の創造など）を目指すもの。

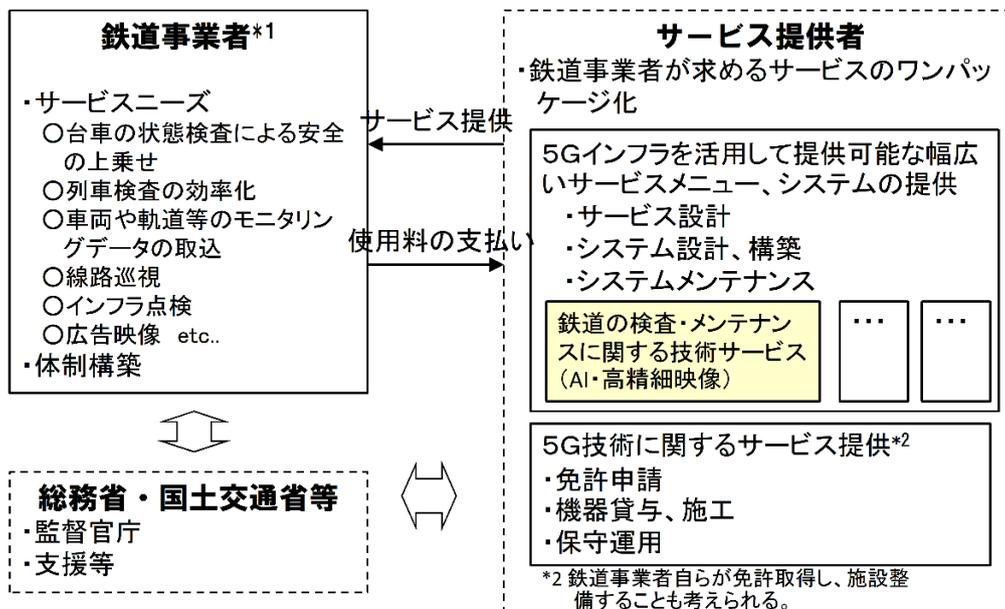
各鉄道事業者とともに、鉄道 DX への取り組みを進めており、AI や無線技術などの技術活用による効率化・省人化は共通ニーズであることを改めて確認した。

本実証のシステムである車両の検査の効率化についても、複数社がニーズを有しておりプラットフォーム化による横展開の可能性は十分に考えられる。そのためにも、4.4.2.1 で示した、本実証で明らかになった課題等について、関係する鉄道事業者の意見を反映させながら解決を図っていく取り組みが必要である。

課題解決システムとしては、上記のような共通課題を背景として、検査対象部品や検査対象項目といったシステムの機能の汎用化だけではなく、判断・意思決定スキームそのものを共通化する“運用方法の汎用化”が横展開には極めて重要であると考えられる。そのためには、各社の検査スキーム全体にわたる効率化を念頭に、複数事業者での段取りや評価方法などの共通部分の洗い出しといった一歩踏み込んだ連携が必要であろう。

(2) 横展開を可能とするサービス検討・提供スキーム（案）

- 鉄道事業者ごとのシステム開発ではなく、基本システムと個別カスタマイズを可能とするサービス提供の体制を構築することが必要
- 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。
- 鉄道事業者の共通ニーズを踏まえた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、横展開の実現に至る間には、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を構築することが他鉄道事業者における横展開にあたって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も考えられる。

図 4.4.2-5 横展開を可能とするサービス検討・提供スキーム（案）

4.4.3 ローカル 5G の実装に向けた課題の抽出及び解決策の検討

4.4.3.1 実装に向けた課題について

1) システムの運用場所に関する課題

今年度は、実運用を想定して京急羽田空港第1・第2ターミナル駅で実証を行い、18日間の連続運用にて、経時的な変化も確認することができた。

その中で、現実的な課題として、以下に示す課題も見えてきた。

a) 乗客のプライバシーへの配慮

昨年度の実証の結果を踏まえ、AIの検出精度向上のために、照度を確保するためのライトをプラットホーム下に設置した。ライトの設置により、AIの検出精度の向上効果は確認できたが、ライトがかなり明るいこと、また駅に設置されたホームドアは透明な部分があり、乗客に向く側にライトを設置すると、ホーム上の乗客にとってかなり眩しいだけでなく、プラットホームの高さより低い位置からライトを照らすことによるプライバシーへの配慮の問題も生じることが明らかになった。このため、実証では乗客に向かない側のライト（プラットホームの下に設置）のみ設置し、乗客に向く側のライトは設置できなかった。結果的に台車の片側側面のみを確認することとした。



図 4.4.2-4 ホームドアの透明部分より確認できるライトの明かり



図 4.4.2-5 ホーム下に設置されたライト
(乗客に向かない側 (プラットホーム下) のみに設置)

b) 設備設置に関する安全性の確保

今年度の実証では、カメラやライト、機器カバーなどの諸設備を駅のプラットホーム下に設置した。これらの設備は、列車への接触を回避するために「乗降場に対する建築限界」の外に設置することが基本となるが、プラットホームの下は狭隘な空間であり、設置空間には制約が生じるため、その空間の制約も踏まえつつシステム上望ましい位置に設置する必要がある。また、営業線での運用となることから、運用中に機器の落下等が生じないように、列車運行の安全性確保に十分に配慮した確実な設置が必要である。

c) AI の検出精度の確保に関する課題

今年度の実証では、台車とカメラとの距離が短くなったことや照度を確保できたことで、昨年度に比べると AI の検出精度は高まり、今年度のシステムは、実装への第一歩となった。

一方で、現時点のカメラの性能等を考慮すると、列車速度は 20km/h 以下が望ましい状況であり、この速度以下で長編成の車両のすべての台車を確認するためには複数台のカメラの設置が必須となる (列車の駅への進入速度は 40km/h 程度であり、駅の最も起点方に 1 台カメラを設置するだけでは、すべての台車を 20km/h で撮影することができない。20km/h 以下の速度ですべての台車を撮影するためには、複数のカメラが必要となる)。必要なカメラの台数の増加は、システムのコスト増やメンテナンス費用の増につながる。

この課題を解決する方法としては、

○高速の通過に対する撮影に耐えるハイスピードカメラの採用など、システムを構成する機材の高性能化で対応する方法

○低速で撮影可能な場所（車両基地の入出庫線など）に設置する方法

などが考えられる。システムの高性能化はコストに影響するため、現時点での技術レベルを前提に、低コストで実現可能な現実的な方法を模索する必要がある。

また、本実証では大きな課題とはならなかったが、長期的な運用を考えた場合、ホコリ等の付着が検出精度に影響を与えることも想定されるため、定期的なメンテナンスは必須である。AIの検出精度を維持するための周辺環境及びメンテナンスの容易さを考えた場合、地下空間への設置や駅への設置が最適であるかについても検証が必要と考えられる。

d) 異常検出時の対応を踏まえた課題

システムが異常を検出した（アラートが出た）場合、①係員による当該画像の確認 → ②該当車両の運行中止の判断 → ③乗客の降車等の対応 などの対応が必要となるが、駅での折返しの時間の中で、システム及び係員による一連の確認・判断を迅速に実施できるかどうかは、今後の課題の一つと考えられる。上記①→②の間には乗務している係員や検車係員等による目視確認などの作業が必要になる場合も考えられ、様々なパターンに対応しなければならない。システムの大きな目的である「安全の上乗せ」を確実に実行するためには、現時点でのAIによる検出の限界も踏まえれば、「当初はある程度の誤検出を許容しながら、データの蓄積により精度を高めていく」運用が現実的と考えられる。

このような考え方の運用を営業線内のオペレーションとして組み込んでいくことについては、具体的な実施体制も含めてさらに深化が必要と考えられる。

なお、アラートの有無の把握にあたって、係員が常にシステムのモニターを監視している状態は要員増となることから、現実的ではない。アラートが出た場合、関係する検車区員全員のスマートフォンに配信し、その場で異常を検知した画像を確認できるなど、要員増とならず、かつ迅速な対応が可能となるように、使いやすいシステムへの機能向上を図るとともに、それに応じた体制の検討を行うことが必要である。

今年度の実証では、異常を検知した後の様々なパターンに対する具体的な対応については再現できていない。今年度の実証において見えてきた上記の課題を考慮すると、実装さらには横展開に向けて、システムの運用場所として、

○営業線内とするか営業線外（車両基地の入出庫線など）とするか

○駅とするか駅以外とするか

○地下空間とするか地上の空間とするか

などについて、より現実的なシミュレーションによる検討も必要と考えられる。

2) システム全体の機能に関する課題

a) 様々なセンサを用いた異常検出による機能向上

今年度の実証では、「安全の上乗せ」として、台車き裂の発見に着目して検出精度の向上を図っているが、昨年度の実証ではその他に「温度」に着目したサーマルカメラによる車軸温度上昇の検出も行っている。

目視だけでは判別できない情報を、センサにより取得可能であれば、部分的には「目視以上」の検出が可能となり、異常の早期発見に効果的である。昨年度の実証では、車軸の温度

差については精度良く検出が可能な結果であった。

また、車両の異常は、走行時には運転士の五感により検出している部分もあり、温度だけでなく、例えば「音」に着目して異常を検出するなどの方法も考えられる。

なお、本実証では地上側へのカメラ設置による検知を行ったが、車両側に振動検知等のセンサを設置し、データを蓄積して適切なタイミングで地上側と交信することで、車両の状態をモニタリングするなど、車両側への端末の設置も考えられる。

将来的な車両メンテナンス業務の効率化を見据えた場合には、このようなセンサフュージョンによって、人間の五感による検出を機械に置き換えることの可能性についてさらに検討を深める必要がある。

b) 異常箇所の迅速な把握のための追加情報の取得

今年度の実証では、プラットホームの下にカメラを設置し、カメラと台車との距離が昨年度の実証よりも近くなった。これにより、検出精度の向上が図られる効果が確認できた。一方、昨年度の実証では、台車とともに車両番号も撮影し、車両と台車の紐付けができていたが、今年度の実証では、カメラと台車との距離の関係で車両番号の撮影が困難であった。どの台車で異常が発生しているかを迅速に把握するためには、車両もしくは編成の情報を同時に取得する必要がある。異常箇所の正しい情報を素早く係員等に伝えることができれば、迅速に対応が可能となる。

この方法としては、別途側面の車両番号を撮影する方法や、車両の正面からの情報を前後で取得する方法などが考え、具体的な情報の取得方法について検討が必要である。

3) 費用面に関する課題

本システムを採用すれば、日々の状態確認が可能となり、安全性の向上につながる事がわかった。一方、現状の車両点検・補修業務は廃止・軽減されないため、新たなシステムの導入・運用費用（人件費等）は純増となる。

この解決策として、作業内容のマニュアルを作成し日常業務の一環とすることや、可能な限りシステム面で作業を補助し、対応者の負担を軽減することが考えられる。

また、本システムの汎用性を高めることで需要が増加すれば、システムの価格が下がることが期待される。そこで、他の鉄道事業者への連携と横展開を検討する。

4.4.3.2 実装に向けた課題の抽出

(1) 運用課題

今回実証においては、台車のき裂が AI で検出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再現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。

上記を踏まえ、運用面の課題として以下を設定した。

- ・安全の上乗せとしての AI の検出精度の見極め
→実運用と現時点での AI の検出精度を踏まえた、実用時の AI の精度の見極め。(閾値を厳しくしすぎると検出漏れが増え、緩くすると誤検出が増える)
- ・検出内容、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、列車検査の一部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 による検出については、本実証による検出精度等の確認)
※本実証では、現時点での AI の性能等を踏まえ「安全の上乗せ」のシステムという位置づけで検討を行ったが、将来的には「安全の上乗せ」の役割だけでなく、「撮影された車両の画像を係員が確認することによる検査の可能性(現場での係員の労働環境の改善など)」や、「画像+AI による、現在係員が実施している検査の一部の代替の可能性」などを視野に入れ、省力化・コスト削減といった鉄道 DX の実現につながるシステムへの機能向上や、業務体制等の見直し検討が必要である。
- ・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(センサフュージョン)
- ・システムの設置場所に関する検証
→現実的なシミュレーションによるシステムの設置場所に関する検討
○営業線内とするか営業線外(車両基地の出入庫線など)とするか
○駅とするか駅以外とするか
○地下空間とするか地上の空間とするか

(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・検出精度の維持方法（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

4.4.4 継続利用の見通し・実装計画

今年度は、実運用を想定して羽田空港第1・第2ターミナル駅で実証を行い、現実的な課題が見えた。実装を見据えたシステムを構築するため、実運用環境でのAI検出性能の向上を目指したが、車両速度最大30km/h以上で幅0.1mm相当の疑似き裂検出率5.6%、幅0.1mm～6.0mm相当の全疑似き裂で平均47%の検出率、追加学習で車両速度最大30km/h以上で幅0.1mm相当の疑似き裂検出率5.6%が55.6%、全体の検出率47%が74%となり令和2年度の実証実験よりも向上したが、実運用させるためには更なる検出率の向上が必要だと判明した。

さらにお客様のプライバシーへの配慮、システムを最適に稼働させるための設置場所の改良等が実装には欠かせないものと判明した。

なお、本システムの導入にあたっては、コスト低減に向けた各鉄道事業者との連携・横展開の検討も不可欠であると認識した。

今年度の実証において判明した課題について、令和4年度は、今回構築した実証システムのモニタリングを1年間目途に継続し、教師データの収集および台車のキズ検知AIの追加学習を行う。その後、前述および4.4.3に記載した課題および解決策の検証を以下のステップを経て実施し、実運用できるシステムを構築し実装を目指す。

	課題および検証項目	解決策および検証内容
ステップ1	高精細カメラ撮影による車両台車部分のAI解析による異常検出率向上のため、本年度構築した実証システムのモニタリング継続	<p>今年度の実証実験を1年間目途に継続して行い、追加学習により全疑似き裂で平均90%以上の検出が可能となるよう、AI検出性能の向上を目指す。</p> <p>具体的には、異常として検出されたデータの確認を行い、通常点検業務の担当者による画像データの確認および必要に応じて実際の車両を目視確認することで、検出されたデータが真に異常であるかを人の目で判別する。これにより誤検出されたデータ、および真に異常として検出されたデータを蓄積し、追加学習を行う。</p> <p>なお、異常検出率の向上には、高速の通過に対する撮影に耐えられるハイスピードカメラの採用など、システムを構成する機材の高性能化も検討できるため、導入コストの検証もあわせて検討する。</p> <p>また、長期的な運用を考えた場合、ホコリ等の付着が検出精度に影響を与えることも想定されるため、定期的なメンテナンス費用も検証する。</p>
ステップ2	本システムの導入にあたって、コスト軽減に向けた各鉄道事業者との連携を検討	<p>本システムは、安全性の向上につながるものであり、各鉄道事業者において有効な検査システムになると考えられるが、コストを軽減しシステムを実装に導くために、各鉄道事業者との会合を開催して情報を発信する。その中で検査システムに関する共通ニーズを洗い出し、利用可能なシステムを見据えた継続検討を行い、汎用性を高め、横展開を目指す。</p>
ステップ3	お客様のプライバシー	高精細カメラによる車両台車の撮影は、ホームより

	保護や列車の進入速度に対応するための最適な設置環境の構築を検討	下側で現状ではお客様の視界に入る位置になり、お客様のプライバシーに影響を与えてしまう。また、カメラ等の設置にあたっては、既存の鉄道設備に配慮しているため、最適な場所に設置できておらず、今後は数回にわたり移設しなければならないことが想定されるため、カメラ・ライトおよび各センサ等が最適に設置できる場所を構築するよう検討する。
ステップ 4	ローカル 5G 基地局および高精細カメラ等の追加設置駅の検討	今年度の実証では、お客様のプライバシーに影響を与えないように、羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅のホーム下片側（山側）のみの設置となったため、反対側（海側）の確認を行うカメラ・ライトおよび各センサ等が設置できる駅を検討する。 また、当該駅においてローカル 5G 基地局の設置も検討する。
ステップ 5	各課題に対しての解決策をもとに検証を行い実運用できる実装システムの構築を検討	ステップ 4 までの実施内容を基に、実装できる異常検知システムの構築をめざした検証を実施する。 羽田空港第 1・第 2 ターミナル駅での実証と並行しステップ 4 で選定した駅へカメラ・ライト等の各機材を設置し異常検知システムの検証内容を検討する。 システムからのアラート等を確認するソフトウェアについてもユーザーインターフェース改善等を含めて検証内容を検討する。

上記内容については、今年度の実証で残された課題や新たに発生した課題であり、その解決策の内容検討は、上記のとおり段階的に検討を行っていくため、現時点で検証および実証時期の計画は未定である。

また、コストについても現時点では実証内容が明確ではないため、投資内容の試算はできていないが、今後実証内容等の検討を進めながらコストについても検証していく。

今年度の実証では、車両台車の異常検知を高精細カメラ映像による目視の補完に注力したが、最終段階では、走行中の異音や高熱による異常検知も重要であり、異音を検知する集音マイク、高熱を検知するサーマルカメラ等を組合せた「異常検知システム」として実装を目指す。

なお、ローカル 5G を幅広く活用するため今回の異常検知システム（車両監視）にとどまらず、車内や駅ホーム、踏切道等の安全監視、車内や駅への運行情報の配信によるお客様の利便性向上、車内や駅広告による広告収入等にもつなげ、効率的な利用を目指す。

5. 普及啓発活動の実施

仕様書に記載されている普及啓発活動について、以下のとおり実施した。

5.1 映像制作への協力

実証コンソーシアムの取組成果に係る動画を作成にあたって、映像制作に必要な実証事業の映像素材の提供や関係者へのインタビューの撮影等に協力した。

撮影内容については表のとおりである。

表 5.1-1 撮影内容

	撮影内容
1	駅・ホーム・列車の走る風景
2	ホームのカメラ
3	カメラが車両を撮影する様子
4	AIにより車両検査が行われている様子
5	AIによる車両検査を監視する様子
6	担当者による実証についてのコメント

5.2 実証視察会の実施

ローカル 5G 等の導入に関心のある企業や、地方公共団体、関係省庁等に対する周知啓発の一環として、オンラインでの実証視察会を主催した。

表 5.2-1 開催概要 (1/2)

日時	2022/02/24(木) 9:30~10:30
実施形態	オンライン
場所	Teams (コンソーシアムメンバーは京浜急行電鉄金沢検車区にて配信)
参加者	総務省 関東総合通信局 九州総合通信局 四国総合通信局 信越総合通信局 中国総合通信局 東北総合通信局 (株)国際電気通信基礎技術研究所 (株)スリーダブリュー 住友商事(株) (株)日立システムズ アイコム(株) (株)ベイ・コミュニケーションズ 富士通(株) KDDI エンジニアリング シャープ(株) 東芝インフラシステムズ(株) 日鉄ソリューションズ(株) (株)日立国際電気 電制コムテック(株) 日本電気通信システム(株) 富士通ネットワークソリューションズ(株) パナソニックシステムソリューションズジャパン(株) 日本電気(株) 日本無線(株) JRC モビリティ(株) 三菱総研 フロンティアインターナショナル 評価委員 専門会合委員

表 5.2-1 開催概要 (2/2)

資料	<ul style="list-style-type: none">・No13：ローカル 5G と AI 技術を用いた鉄道駅における車両監視の高度化 視察会資料・説明用動画
プログラム	<ol style="list-style-type: none">1. 資料説明2. 映像上映3. 質疑応答

5.3 その他普及啓発活動

実証成果その他の普及啓発活動として、プレスリリース、インタビュー対応、技術展への出展（イベントへの参加）、学会への報告等のアウトリーチその取り組み内容及び実施結果を以下に示す。

表 5.3-1 その他普及啓発活動

	報告月	取り組み内容	備考
1	11 月度	日本工業出版「検査技術」	2022 年 2 月刊行
2	1 月度	日本鉄道電気技術協会「鉄道と電気技術」	2022 年 3 月刊行

6. 実施体制

体制及び役割

本事業は、京浜急行電鉄株式会社、中央復建コンサルタンツ株式会社、株式会社 NTT ドコモの 3 者により実証コンソーシアムを構成して実施した。本事業のとりまとめ等を行う代表機関は、京浜急行電鉄株式会社であり、フィールドの提供、実証全体の管理、実証結果の評価、協議会の主催、報告書作成等を担った。

協力企業を含めた本事業の組織構成を図 6.1-1 に示す。課題実証の要素技術ごとに高度な知見を有する専門業者を擁し、円滑な事業遂行を目指した。

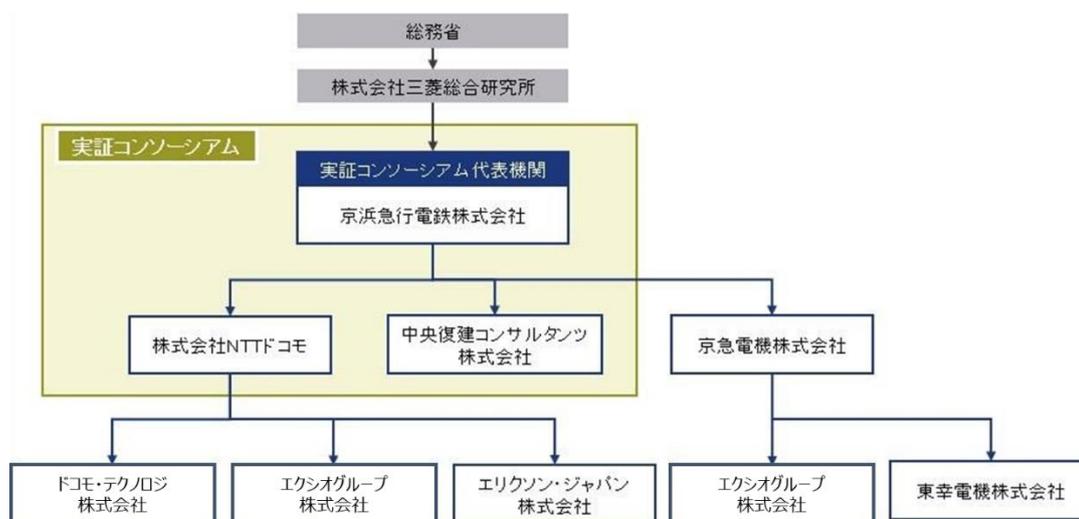


図 6.1-1 実施体制図

6.1.1 京浜急行電鉄株式会社

※本店住所 〒220-8625 神奈川県横浜市西区高島 1 丁目 2 番 8 号

※代表者名 取締役社長 原田 一之

「日常の列車検査の高頻度及び検査精度の向上による鉄道運行の更なる安全性向上」、
「自然災害後等の運行再開時の巡視作業の高効率化及び巡視作業員の安全性向上」の課題を有する鉄道事業者で、本調査検討事業における鉄道分野の実証フィールドを提供。

6.1.2 中央復建コンサルタンツ株式会社

本社住所：〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4 丁目 11 番 10 号

代表者名：代表取締役社長 兼塚 卓也

国内外の道路・橋梁・鉄道などの社会インフラの計画や設計、三次元化技術、社会インフラマネジメント、まちづくりコーディネートなどの総合的な分野で豊富な知見と実績を有する総合建設コンサルタント。

6.1.3 株式会社 NTT ドコモ

※本店住所：〒100-6150 東京都千代田区永田町 2 丁目 11 番 1 号山王パークタワー
代表者名：代表取締役社長 井伊 基之

キャリア 5G サービスを提供中であるとともに、ローカル 5G 等の通信と映像の AI 解析を統合した課題解決システムを使った実証、ローカル 5G の性能評価等の実証を実施可能な通信事業者。

6.1.4 再委託先及び再々委託先

6.1.4.1 再委託先

(1) 中央復建コンサルタンツ株式会社

※本社住所：〒533-0033 大阪市東淀川区東中島 4 丁目 11 番 10 号
※代表者名：代表取締役社長 兼塚 卓也
※再委託の業務範囲：

鉄道分野における課題解決システムの運用支援、実証実験の実施支援、運用スキームの検討支援、実装・横展開に関する協議会の運営、報告書作成支援

(2) 株式会社 NTT ドコモ

※本店住所：〒100-6150 東京都千代田区永田町 2 丁目 11 番 1 号 山王パークタワー
※代表者名：代表取締役社長 井伊 基之
※再委託の業務範囲：

鉄道インフラ分野における課題解決システムの構築及び課題解決システム実証実施、技術実証におけるローカル 5G システム(基地局及び移動局)環境構築支援、技術実証の実施

6.1.4.2 再々委託先

(1) ドコモ・テクノロジー株式会社

※本店住所：〒107-0052 東京都港区赤坂一丁目 8 番 1 号 赤坂インターシティ AIR
26 階
※代表者名：代表取締役社長 中村 寛
※再々委託範囲：
電波伝搬試験、干渉検討、試験結果取りまとめ

(2) エクシオグループ株式会社

※本店住所：〒150-0002 東京都渋谷区渋谷 3 丁目 29 番 20 号
※代表者名：代表取締役社長 船橋 哲也
※再々委託範囲：

IaaS・映像配信、UI 構築・検証支援

(3) エリクソン・ジャパン株式会社

※本店住所：〒105-0021 東京都港区東新橋 2-3-17 MOMENTO SHIODOME

※代表者名：代表取締役社長 野崎哲

※再々委託範囲：

ローカル 5G 基地局設定等

