

地域社会 DX 推進パッケージ事業(自動運転レベル 4 検証タイプ)

# 佐賀県佐賀市

トンネルを含む中山間地域・大規模イベント等条件不利地域におけるレベル 4 要件の  
遠隔監視に向けたデータ伝送の安定性確保、路側センサー連携車両制御の実証

## 実績報告書

2026年1月30日

楽天モバイル株式会社

佐賀市自動運転実証コンソーシアム



---

## 目次

---

0.	エグゼクティブサマリ.....	1
0.1	実証概要.....	1
0.2	KPI/KGI の内容と達成状況.....	3
0.3	考察.....	7
0.4	成果.....	8
0.5	課題.....	9
1.	実証の背景・目的.....	11
1.1	実証の背景.....	11
1.1.1	解決を目指す地域課題.....	11
1.1.2	課題設定の背景.....	11
1.2	レベル4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題.....	11
1.2.1	実証地域における課題.....	11
1.2.2	実証地域における通信課題.....	13
1.2.3	全国共通の通信課題.....	13
1.3	実証の目的.....	13
1.3.1	目的.....	13
1.3.2	課題と解決策.....	14
1.3.3	課題と通信システムによる解決策.....	14
1.3.4	目指す変容.....	15
1.4	最終目標・構想イメージ.....	15
1.4.1	最終目標.....	15
1.4.2	構想のイメージ.....	16
1.4.3	【社会実装に向けたステップアップ】.....	17
1.4.4	地域のコミットメント.....	17
1.5	「最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標.....	19
1.5.1	最終目標・構想イメージにおける本実証の位置づけ.....	19
1.5.2	2025 年度における取組内容と目標.....	20
1.5.3	本実証(2025 年度)における通信システムに関する取組内容と目標.....	21
2.	業務実施体制.....	22
2.1	実証機関.....	22
2.2	実施体制図.....	24
3.	自動運転の運行結果.....	25

3.1	運行場所 .....	25
3.2	運行期間 .....	26
3.3	運行時間帯・頻度・運行方式 .....	27
3.4	運行者 .....	27
3.5	運行体制 .....	27
3.6	自動運転車両の特徴 .....	29
3.7	自動運転に関する手続き .....	31
4.	実証の手法 .....	32
4.1	①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保 .....	32
4.1.1	山間部道路の通信環境の安定化に向けた LTE レピーターの活用による車両ネットワーク接続の確保 .....	32
1)	目的 .....	32
2)	実証内容の詳細 .....	32
3)	利用技術 .....	34
4)	必要性・緊急性・新規性 .....	38
5)	検証条件 .....	39
6)	開発・評価項目 .....	42
7)	KPI/KGI .....	52
4.2	②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保 .....	59
4.2.1	遠隔監視に最低限必要な画質を見極め、それを使用して通信輻輳・通信品質低下発生時も安定した遠隔監視を可能とする .....	59
1)	目的 .....	59
2)	実証内容の詳細 .....	59
3)	利用技術 .....	62
4)	必要性・緊急性・新規性 .....	64
5)	検証条件 .....	65
6)	開発・評価項目 .....	69
7)	KPI/KGI .....	88
4.3	③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証 .....	92
4.3.1	路側センサーで取得する周辺情報を活用した、見通しの悪い交差点での安全な走行/右折の制御の実現 .....	92
1)	目的 .....	92
2)	実証内容の詳細 .....	92
3)	利用技術 .....	95
4)	必要性・緊急性・新規性 .....	98
5)	検証条件 .....	99
6)	開発・評価項目 .....	101

	7)	KPI/KGI .....	108
4.4	④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装 .....		112
4.5	⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証 .....		112
4.6	レベル4の社会実装に向けた検討 .....		113
4.6.1	運用検証 .....		113
	1)	システムの操作性やユーザーインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等) .....	113
	2)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度 .....	119
	3)	データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策 .....	119
	4)	通信システム(路車協調システムや端末を含む)の維持管理・保守 .....	119
4.6.2	効果検証 .....		120
	1)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化 .....	120
	2)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度 .....	120
	3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果 .....	121
	4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策 .....	121
5.	通信システムに関する構築 .....		122
5.1	通信システムの全体像 .....		122
5.1.1	ユースケース① 遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル・中山間地)の通信の安定性確保 .....		122
5.1.2	ユースケース②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保 .....		123
5.1.3	ユースケース③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証 .....		124
	1)	路側センサー .....	126
5.1.4	自動運転車両 .....		127
5.1.5	遠隔監視システム .....		128
5.1.6	基地局 .....		129
5.1.7	データ種別 .....		130
5.1.8	フェールセーフについて .....		130
5.2	システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等 .....		130
5.2.1	4GLTE 網のみを使用する .....		130
5.2.2	路側センサー、自動運転車両側システムで固定グローバル IP オプション付き SIM カードを使用する .....		130
5.2.3	遠隔監視映像送信用ルーターの選定基準 .....		131

1)	対応回線.....	131
2)	耐熱性.....	131
3)	LAN ポート.....	131
4)	バンド固定機能.....	131
5)	DM(Diagnostic Monitor)ポート開放に対応している.....	131
5.2.4	通信輻輳度・通信品質 Web API.....	132
5.2.5	LTE レピーターの設置場所の選定.....	132
5.2.6	LTE レピーターの指向性アンテナ配置・角度の調整.....	133
6.	実証結果・考察.....	135
6.1	①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保.....	135
6.1.1	山間部道路の通信環境の安定化に向けた LTE レピーターの活用による車両ネットワーク接続の確保.....	135
1)	実証スケジュール.....	135
2)	開発・評価項目の結果.....	135
3)	KPI/KGI との比較結果.....	166
4)	成果・課題.....	182
6.2	②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保.....	185
6.2.1	遠隔監視に最低限必要な画質を見極め、それを使用して通信輻輳・通信品質低下発生時も安定した遠隔監視を可能とする.....	185
1)	実証スケジュール.....	185
2)	開発・評価項目の結果.....	185
3)	KPI/KGI との比較結果.....	212
4)	成果・課題.....	217
6.3	③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証.....	224
6.3.1	路側センサーで取得する周辺情報を活用した、見通しの悪い交差点での安全な走行/右折の制御の実現.....	224
1)	実証スケジュール.....	224
2)	開発・評価項目の結果.....	224
3)	KPI/KGI との比較結果.....	241
4)	成果・課題.....	249
6.4	④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装.....	251
6.5	⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証.....	251
6.6	レベル4の社会実装に向けた検討の結果.....	251
6.6.1	運用検証.....	251
1)	システムの操作性やユーザーインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等).....	251
2)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直	

	し等、地域交通の持続性への寄与度.....	261
3)	データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策 .....	262
4)	通信システム(路車協調システムや端末を含む。)の維持管理・保守..	263
6.6.2	効果検証 .....	263
1)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化 .....	263
2)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度	264
3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果.....	264
4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策.....	265
6.7	レベル 4 社会実装に向けた考察.....	267
7.	本実証の総括 .....	269
7.1	本実証の成果・課題.....	269
7.1.1	成果.....	269
7.1.2	課題.....	269
7.1.3	社会実装に向けた展望.....	270
7.2	社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性.....	271

## 0. エグゼクティブサマリ

---

### 0.1 実証概要

本実証は、佐賀市における「住民の身近な移動手段の維持」と「新たな移動ニーズへの対応」という喫緊の地域課題解決を目指した交通 DX 推進を目的としている。佐賀市では、バス運転士の高齢化や人材不足、長時間勤務による負担増に加え、バス路線の維持・効率化・採算性確保が困難な状況にある。また、高齢化に伴う免許返納者の増加や、SAGA アリーナ開業に伴う大規模な輸送需要への対応も課題となっている。

このような背景のもと、佐賀市は 2023 年から佐賀県と共同で自動運転バスの社会実装に取り組んできた。本実証では、混雑する市街地における歩行者・車両への配慮を要する無信号交差点での車両制御(右折)に係る課題と、市街地集客施設付近における輻輳および中山間地不感エリアにおける通信断という通信の安定接続に係る 3 つの課題に取り組む。

① 市街地における歩行者・車両への配慮を要する無信号交差点において、路側センサーを用い車載センサー検知範囲外の歩行者・車両等を検知し、迅速に自動運転バスに通知することで安全かつスムーズな右折を実現

② 大規模イベント等開催時の集客施設付近における通信の輻輳に対し、車載機器からの通信品質指標を踏まえた輻輳の度合いの定量的な評価に基づく映像品質制御により、輻輳下においても情報伝送を安定的に継続できる通信を実現

③ 不感エリアとなるトンネル区間を含む通信の条件不利地域の中山間地域において、LTE レピーターを用いた安価な通信環境整備により既存の通信環境を延伸することで、通信の安定的な接続ができる自動運転サービス提供エリアの拡大を実現

これらの課題を 3 つのユースケースで検証した。

ユースケース①:遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保による貢献

通信環境が劣悪なトンネル内部において通信システムおよび測位システムが途絶し、自動運転車両の遠隔監視が途絶する課題に対し、エリアカバレッジがある LTE の電波を増幅させる LTE レピーターを活用してトンネル内部に電波を吹き込むことで、トンネル内における自動運転車両の通信確保を実現する。また、トンネル内の不感エリアは全国で共通して発生するものであり、他地域における同様の課題解決にもつながるものと考えられる。

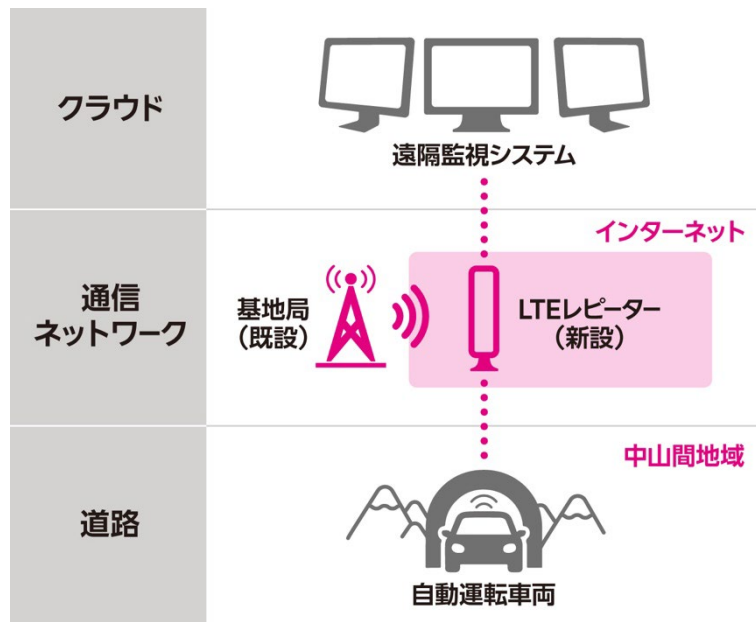


図 0.1-1 ユースケース① システム構成イメージ

ユースケース②:遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保による貢献

通信が輻輳している状況や通信品質が劣化している状況において、監視可能な最低限度の映像品質を保ったまま途絶することがない遠隔監視映像の伝送を可能とすべく、本実証では通信の輻輳状況や通信品質の把握を実証する。また、遠隔監視員へのヒアリングを実施し、遠隔監視で必要となる最低限度の映像品質の見極めも実施する。

本実証の結果は、SAGA サンライズパーク周辺のみならず、同様のスタジアム、イベント会場の周辺に加え、駅等の人や自動車の往来が多いエリアへの横展開が考えられる。

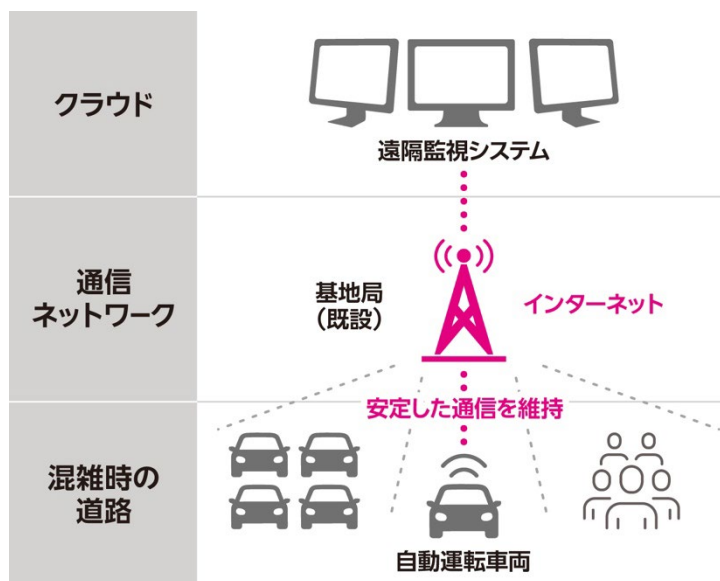


図 0.1-2 ユースケース② システム構成イメージ

ユースケース③:安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証による貢献

佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間において、無信号交差点での右折は本実証で検証する交差点(佐賀駅バスセンターへの右折)のみであり、当該箇所を自動走行可能とすることがレベル4自動運転の実装に向けた最重要課題である。当該箇所は駅至近で歩行者等も多く、右折制御の難しい環境である。駅前ロータリーやバスセンターへの右折の課題は他地域でも存在すると想定され、本実証の成果の横展開が考えられる。

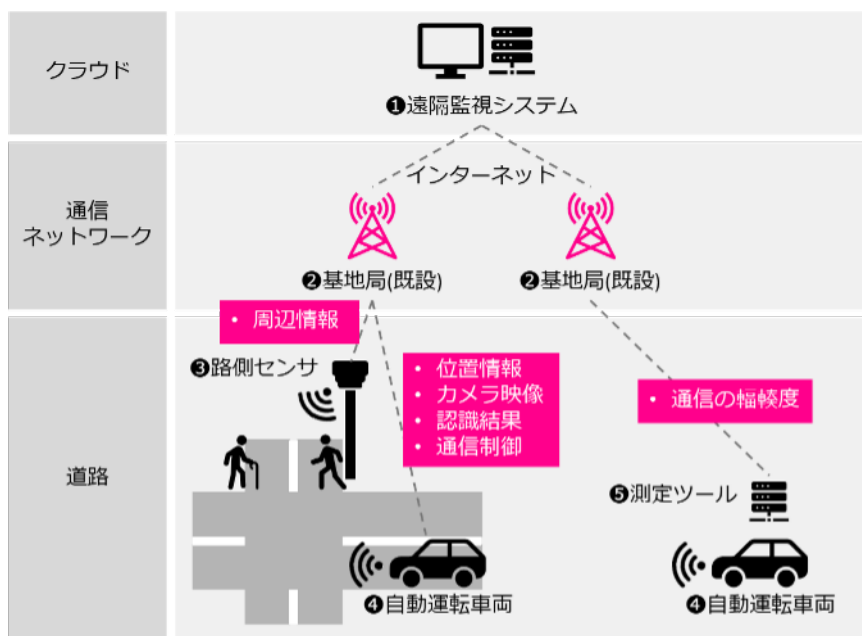


図 0.1-3 ユースケース③ システム構成イメージ

本実証を通じて、全国的な自動運転におけるトンネル区間まで含めた運行エリアの拡大、イベント時の通信輻輳への耐性強化、そして路側センサー連携による安全・円滑な右折制御の確立を図る。最終的には、遠隔監視型自動運転レベル4の要件である遠隔監視の常時接続を満たしつつ、市街地から中山間地まで一貫したサービス提供を達成する。

本実証で得られた知見は、佐賀市での実運行への適用に加え、同様の条件不利地域への横展開が可能である。

なお、レベル4(高度運転自動化)は、「一定の条件<sup>1</sup>のもとで、運転者の介入を前提とせず、自動運転システムが運転タスクおよび作動継続が困難となった場合の対応を担うもの」を指すが、本実証はこれを前提として行われたものではなく、あくまで将来的なレベル4への移行に資する各種検証をレベル2(部分的運転自動化)相当の環境において行ったものである。本稿ではレベル4への移行を見据えて行った各種検証を便宜上[レベル4相当]と記載する。

また、本稿における「遠隔監視」及び「遠隔監視員」は、特定自動運行主任者に係る対応業務並びに特定自動運行保安員等に係る保安上の監視・確認等の業務を包含するものとする。

## 0.2 KPI/KGI の内容と達成状況

<sup>1</sup> 走行ルート、時間帯、天候、場所、速度等の走行環境条件を指す

ユースケース①:トンネル内部の通信確保

通信の安定性と遠隔監視映像の品質を評価するために、以下の KPI と KGI を設定し、目標値に対する達成状況を評価した。

表 0.2-1 ユースケース① KPI/KGI 達成状況一覧

指標カテゴリ		KPI/KGI項目	目標値	達成状況	達成度	妥当性
定量評価	通信安定性	通信遅延値	500ms以下	入口：41.25ms 出口：41.5ms	100%	自動運転のリアルタイム制御に必要とされる許容遅延を考慮。
		通信速度	1Mbps以上	最小値：1.3Mbps	100%	自動運転車両からのデータ送信量や遠隔監視映像の伝送に必要な最低限の速度を考慮。
		必要RB数	3RB以上/秒	最小値：17.9RB	100%	安定した通信品質を維持するために必要なリソースブロック数を考慮。
		受信強度(RSRP)	-110dBm以上	最小値：-100.6dBm	100%	良好な電波受信状態を確保するために一般的な基準値を採用。
		受信品質(SINR)	3dBm以上	最小値：17.8dB	100%	ノイズの影響を受けにくい良好な通信品質を確保するために一般的な基準値を採用。
		電波延伸距離	352m以上/台	352m	100%	トンネル区間の長さやレピーター設置間隔を考慮し、効率的なカバレッジ拡大を目指す。
	遠隔監視映像品質	画質	480p (854x480)	車外映像：90% 車内映像：100%	95%	自動運転車両近傍から10m程の範囲内に存在する人、車両などを正しく認識できる画質の推奨値として設定。
		フレームレート	15fps	車外映像：100% 車内映像：100%	100%	自動運転車両近傍から10m程の範囲内に存在する人、車両などを正しく認識できる画質の推奨値として設定。
		最大許容遅延	1000ms未満	最大遅延値500ms	100%	遠隔監視者が車両周囲の状況確認、確認後の発車指示を行うシーンを想定した際のリアルタイム性を確保するための許容遅延。
		ビットレート	1Mbps以上	ターゲットビットレート 1Mbps×2ストリームで通信切断発生なし  実測値 車外映像：0.82Mbps 車内映像：0.85Mbps	1ストリーム 辺りの実測値では0%  2ストリーム 合計では100%  ターゲットビットレート では100%	自動運転車両近傍から10m程の範囲内に存在する人、車両などを正しく認識できる画質の推奨値として設定。
定性評価		自動運転車のカメラ映像の安定性	途切れやフリーズなし	途切れ発生率：3%	97%	遠隔監視による自動運転支援の信頼性を確保するための最重要項目。

・ 達成状況

適切な位置・角度で設置した LTE レピーター(携帯電話中継装置)によってトンネル内へカバレッジを延伸し、遠隔監視映像の送信に足りうる通信環境の構築に成功した。

・ 達成理由

トンネル内の電波伝搬特性を事前に詳細に調査し、LTE レピーターの最適な設置位置や角度・台数を綿密にシミュレーションしたことで、効率的な電波延伸が可能となった。

ユースケース②:通信輻輳時の安定通信

通常の通信環境ではなく、データトラフィックの集中により通信速度や安定性が低下している通信輻輳状況において、遠隔監視映像の品質と遠隔監視オペレーションの遂行可能性を評価するために、以

下の KPI/KGI を設定し、目標値に対する達成状況を評価した。

表 0.2-2 ユースケース② KPI/KGI 達成状況一覧

指標カテゴリ	KPI/KGI項目	目標値	達成状況	達成度	妥当性	
定量評価	遠隔監視 動画品質	遅延（映像送信ソフトウェア → 表示画面）	1000ms未満	輻輳時最大遅延値： 2550ms	71%	遠隔監視者が車両周囲の状況確認、確認後の発車指示を行うシーンを想定した際のリアルタイム性を確保するための許容遅延。
定性評価	遠隔監視オペレーションの遂行	異常事態発生時の適切な通報・対応要員派遣	95%以上の時間で肯定回答	5名中2名	55%	オペレーターが緊急時に適切に対応できるかを評価。
		車内乗客の異常把握	95%以上の時間で肯定回答	5名中3名	70%	オペレーターが乗客の安全状態を把握できるかを評価。
	遠隔監視映像の乱れの少なさ	映像の不安定性（ノイズ・カクツキ・コマ落ち）なし、または許容範囲	90%以上の時間で肯定回答	5名中3名	75%	映像監視の信頼性を評価。
	通信輻輳時の映像の乱れの改善	必要最低限な画質使用時の方が改善されたと回答	75%以上の時間で肯定回答	5名中3名	75%	輻輳下での画質調整による効果を評価。
緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答		全員	5名中3名	65%	オペレーターの負担軽減を評価。	

・ 達成状況

KPI の達成度は 100% ではないものの概ね達成することができ、実運用に向けた基礎性能を確認することができた。一方で、安定運用に向けては継続的な改善余地が見られた。

定性評価を行った評価者の属性やスキルは、表 4.2-11 および 表 4.2-20 に記載している。

ユースケース③: 路側センサーを活用した車両制御

無信号交差点の右折制御における路側センサー情報の活用について、路側センサー要件、自動運転車両の制御システム要件、モバイル通信要件および車両挙動の安全性、円滑性を評価するために、以下の KPI/KGI を設定し、目標値に対する達成状況を評価した。

表 0.2-3 ユースケース③ KPI/KGI 達成状況一覧

指標カテゴリ		KPI/KGI項目	目標値	達成状況	達成度	妥当性
定量評価	路側センサ要件	物標識別割合	90%	近距離LiDAR : 122% 長距離LiDAR : 130%	100%	オクルージョン発生時も考慮し、高精度な物体検知を目指す。
		物体検知位置の正確性	近距離LiDAR : ±2m 長距離LiDAR : ±1m	近距離LiDAR : 100% 長距離LiDAR : 15%	58%	自動運転バスの安全な制御に必要とされる高精度な位置情報。
		物体情報送信周期	100ms	近距離LiDAR : 102.5ms±2.5ms 長距離LiDAR : 100ms±4ms	100%	自動運転バスの発進判断時間（1秒）に間に合わせるためのリアルタイム性。
		同時物体検知数	5個	近距離LiDAR : 11個 長距離LiDAR : 12個	100%	複雑な交通状況下で複数の物体を同時に検知する能力。
		物体検知距離	近距離LiDAR : 6m以上 長距離LiDAR : 80m以上	近距離LiDAR : 6m以上 長距離LiDAR : 80m以上	100%	走行中の自動車が発差点を横断する 5 秒以上前に遠隔監視を可能にする物体認識距離
	自動運転車両の制御システム要件	路側センサからのデータ受信開始距離	近距離LiDAR : 6m以上手前 長距離LiDAR : 80m以上手前	近距離LiDAR : 8m手前 長距離LiDAR : 80m手前	100%	走行中の自動車が発差点を右折する 5 秒以上前に遠隔監視を可能にする場合の距離
		検知から物体情報通知までの時間	500ms以下	500ms以下を98.5%程度の時間率で達成	99%	自動運転バスの発進判断時間内に情報が通知されること。
		1秒当たり路側センサからのデータ受信成功割合	積算パケット到達率 : 99%以上	99%以上の時間率で、積算パケット到達率99%以上	99%	路側センサーからの安定したデータ連携を確保。
		移動している物体検知速度	実測度±10%	平均速度誤差 : 3.1%	100%	物体の正確な速度情報を自動運転車両に提供。
	モバイル通信要件	通信遅延値（路側センサ→基地局→自動車）	500ms以下	500ms以下を98.5%程度の時間率で達成	99%	自動運転車両のリアルタイム制御に必要とされる許容遅延。
		通信速度	1Mbps以上	近距離LiDAR設置場所 20.7Mbps 長距離LiDAR設置場所 45.8Mbps	100%	路側センサーからのデータ伝送に必要な最低限の速度。
		必要RB数	3RB以上/秒	6562秒(約1.9時間)の値、3RB以上/秒を下回ることはなかった	100%	安定した通信品質を維持するために必要なリソースブロック数。
	定性評価	路側センサによる認知情報を最適化し、自動運転車両の制御に活用できる	手動介入率が低減	路側センサー情報は活用できたがセンサー有無による介入数に差はなかった	50%	路側インフラ協調の目的である自動運転車両での情報は活用できたが、手動介入率の低減は見られなかった
		安全かつ円滑な右折ができる（歩行者・自転車・車の外乱時）	右折待機時間が低減	路側センサーありの場合はなしに比べて待機時間が若干低下 車両挙動には変化が見られなかった	100%	複雑な交通状況下での自動運転車両の安全な運行。
		路側インフラによる補完により遠隔監視員（セイフティドライバー）の負担軽減ができる道筋が見えている	手動介入（ブレーキ介入）率が低減	路側センサー情報は活用できたがセンサー有無による介入数に差はなかったが、前年度データとの比較では大幅にブレーキの手動介入が低減	50%	ブレーキの手動介入については路側センサーの有無による有意差なし 前年度の介入回数に対して路側センサーの効果は有意性あり（2024年度 56%→2025年度 22%に低減）

- ・ 達成状況  
適切な位置に設置した路側センサーによって、無信号交差点での自動運転車両の右折において、自動運転車両の死角を補完することを想定した路車協調システムを構築し、概ね良好かつ円滑な運用が実現できた。予め検討していた環境要件の項目および KPI/KGI は 100%ではないものの概ね達成することができ、その妥当性を確認することができた。
- ・ 達成理由  
2024 年度の実績に基づき、自動運転車両の運行の障壁となっている状況に着目して、路車協調システムによる改善支援を模索し、各要件項目の設定や目標値を検討することができたことが大きい。また、路側センサーの設置にあたっては、他の路側設備との併設を前提とすると強度や電源等の面で制約が大きいのが、独立した置き基礎を利用することで汎用性の高い敷設方法を確認することができた。

### 0.3 考察

レベル 4 自動運転の社会実装は、技術的進歩と社会受容性の両面からのアプローチを要する。

#### ユースケース①:

トンネル内における電波環境改善は、LTE レピーターの活用により低コストで達成され、遠隔監視オペレーションに必要な通信環境を構築し得た。これは、条件不利地域における自動運転の走行可能エリアを地理的に拡大する上で極めて有効な要素技術であり、全国的な展開に資する。

しかしながら、複雑な地形のトンネルにおいては、今回の設定がそのまま適用できるとは限らず、マルチホップ<sup>2</sup>導入や新技術による電波延伸手法の更なる検証が必要である。次世代通信技術の 5G においても同様のレピーターの存在は確認されるが、規制により商用展開に至らぬ現状に鑑み、早期の検証が喫緊の課題である。

#### ユースケース②:

通信輻輳下における遠隔監視オペレーションの安定化は、社会実装に向けた重要な課題である。佐賀市インターナショナルバルーンフェスタにおける実証では、輻輳時に映像送信が成功した試験結果を分析し、遠隔監視に資する最低限画質を導き出すことができた。

しかし、実際の輻輳環境下での通信事業者側での通信制御は極めて難易度が高く、帯域確保の手段検討が不可欠である。そのため、基地局側の制御手法を引き続き検討する必要がある、またアップリンクのデータ伝送路<sup>3</sup>の確保に向けた検証は有意義であると考えられる。

遠隔監視映像の遅延やオペレーターの定性評価において目標 KPI 未達成の項目が散見された。本実証では 5 名の結果を用いて画質を評価したが、遠隔監視映像の要件については、社会全体で定義し

<sup>2</sup> LTE レピーターのマルチホップとは、LTE の電波が届きにくい、または届かないエリア(山間部、トンネル、地下、広大な工場敷地等)において、複数の LTE レピーターを段階的に配置し、電波を中継していくことで通信エリアを拡大・強化する技術のこと

<sup>3</sup> アップリンクのデータ伝送路とは、端末(スマートフォン、IoT デバイス、センサー等)からネットワーク(基地局、サーバー等)へ向かう方向のデータ伝送路のこと

ていく必要があるとともに、それらの定量的・定性的な評価手法の確立、多様な状況下での検証が課題として浮上した。

これらの結果は通信事業者と遠隔監視ソフトウェア会社との連携強化の必要性を示唆している。また、実環境における輻輳状態での試験の困難性を鑑み、ラボ環境での事前検証の導入も視野に入れるべきである。

ユースケース③：

自動運転対象区間として検討中の佐賀駅バスセンター・SAGA サンライズパーク間における過去の実証では、佐賀駅バスセンターへの無信号交差点での右折において手動介入が頻発しており、自動運転の実用化にはこの課題の解決が求められている。

特に、自動運転車両から死角となる可能性のある領域における、路側センサー情報による支援が有効な対策と考えられる。

実証実験を通じて、路側センサーの捉える情報の捕捉率・精度ともに良好であることを確認することができた。

実用性のある路車協調型自動運転環境を実現するには、路側センサー情報内容の精査・フィルタリング設定の妥当性や影響の分析、路側センサー情報を活用した適切な車両制御ロジックの確立等、路車協調による自動運転システム全体を通じた連携・調整が不可欠である。

本実証を通じ、自動運転車両の社会実装における遠隔監視オペレーションの実現には、通信事業者と遠隔監視映像ソフトウェア開発企業との緊密な連携が不可欠であることが明確になった。自動運転車両走行中の映像伝送時において、両者が同一のタイミングでそれぞれ取得した通信データと映像データを照会し、統合的に分析することで、より実態に即した検証データの取得が可能となる。この統合されたデータを活用し、多角的に検証を進めることにより、いかなる環境下においても途切れることなく遠隔監視映像を送信し、安定した遠隔監視オペレーションを実施するための具体的な方策を確立し得る。したがって、自動運転の安全かつ確実な社会実装を加速させるためには、引き続き関係各主体が密に協力し、共同で検証を進めることが極めて重要であると結論する。

## 0.4 成果

本実証を通じ、レベル4自動運転の社会実装に資する複数の要素技術およびユースケースの有効性が確認された。

ユースケース①においては、電波の不感エリアであったトンネル内において、LTE レピーターの適切な配置により通信環境の改善が図られ、遠隔監視オペレーションに耐えうる電波環境の構築に成功した。これは、基地局建設に比して低コストであり、他の類似環境のトンネルへの横展開可能性も示唆された。条件不利地域における通信環境安定化手法の確立は、自動運転の走行可能エリアを地理的に拡大する上で極めて有効な成果である。

ユースケース②においては、通信輻輳という困難な状況下における情報伝送安定化に向けた運用知見を獲得した。通信の輻輳状況は、楽天モバイルのネットワーク管理システム OSS (Operation

Support System、以下 OSS)から取得できる情報によって判定する。具体的には、輻輳時における遠隔監視映像送信に資する「必要最低限の画質」を特定し、OSS の輻輳関連指標値の閾値を部分的に求めることに成功した。これにより、輻輳時においても画質変更等の対応により遠隔監視映像の送信を安定して継続できる可能性が示された。

また、映像の遅延がターゲットビットレートの影響を大きく受けることが判明した。本実証で採用した遠隔映像送信システムはビットレート固定方式であったため、2026 年度以降ではソフトウェアを改修し、輻輳度に応じたターゲットビットレートの可変制御を検証することで遅延の KPI 達成に寄与できると考えられる。

さらに、リアルタイムでの画質変更の必要性も明確になった。こちらでもソフトウェアを改修し、映像の暗転を伴わないスムーズな画質切り替えを達成することで、より堅牢なシステム構築に繋がることが期待される。

これらの成果は、将来の 5G ネットワークスライシング等の技術導入を見据え、通信事業者と遠隔監視ソフトウェア会社との連携を促進する上で重要な礎となる。

ユースケース③においては、佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間の路線における、佐賀駅バスセンターへの無信号交差点での右折において、路車協調型の自動運転の実証実験を通じて、路側センサーの良好な運用が確認できた。今後の路車協調型自動運転の実用化にあたっては、路側センサー情報の遅延要因の分析および対策、路側センサー情報を活用した適切な車両制御ロジックの確立等といった施策を通じて、路車協調型自動運転システム全体の連携・調整が求められる。

社会実装を見据えた場合、事業性の確保のため、自動運転車両の運用の自由度を高め、稼働率を向上させることが重要である。本実証で得られた成果は、自動運転で走行可能な範囲を時空間的に拡大することに資する技術であり、間接的に事業性の向上に寄与し、自動運転の社会実装を促進するものである。

## 0.5 課題

本実証全体を通じて、レベル 4 自動運転の社会実装に向けた技術的・運用上の課題が複数浮上した。

ユースケース①においては、複雑な地形のトンネルにおける電波延伸手法の更なる検証が不可欠である。特に、マルチホップ<sup>2</sup>の導入や国際的に標準化が進められている 5.9GHz 帯を活用した電波延伸手法について、今回の実証環境同様にカバレッジ拡張が可能か否かを検証する必要がある。

また、5G を電波延伸可能なレピーターについても、社会実装に寄与するために早期検証が喫緊の課題として挙げられる。今後通信システムは 5G 主体になるため、3GPP (3rd Generation Partnership Project)<sup>4</sup>で定義されている自動運転のための通信仕様をより積極的に実装する必要がある。

ユースケース②においては、通信輻輳下における遠隔監視オペレーションの安定性確保が最大の課題として認識された。具体的には、遠隔監視映像の遅延やオペレーターの定性評価において目標 KPI

<sup>4</sup> 3GPP(3rd Generation Partnership Project <https://www.3gpp.org/>):移動体通信システムの国際標準化プロジェクトであり、GSM、UMTS、LTE、5G 等の主要な携帯電話技術仕様を策定している

が未達成であり、画質に対する定量的・定性的な評価手法の確立が急務である。

停車時と走行時で大きく異なるデータ量を考慮し、走行時における最適な画質設定の追求、ならびに多様な天候条件やインシデント発生時を想定した実践的な検証が必要である。

また、実環境における輻輳状態での試験の困難性を鑑み、ラボ環境での試験の導入も検討すべきである。OSS の輻輳関連指標値の遅延問題への対応として、RIC アプリケーション(Radio Access Network Intelligent Controller Application)<sup>5</sup>によるリアルタイムでの指標値取得や、過去データを用いた予測ロジックの導入が求められる。

さらに、極度の輻輳状態においては、ネットワークスライシング、キャリアアグリゲーション等の技術を活用し、利用可能な帯域を確保する方策を具体的に検討する必要がある。これらの課題解決には、通信事業者と遠隔監視ソフトウェア会社との継続的な協力体制と、新たな技術導入への積極的な取り組みが不可欠である。

ユースケース③においては、頻度は低いものの路側センサー情報の自動運転車両への伝送遅延が、KPI で期待した値を満たせない場合があることが確認された。遅延に関しては、ネットワーク輻輳の影響を回避する優先制御の導入等による遅延要因の排除や、多少の遅延が生じることを前提とした車両制御システム側の対策も選択肢となる。また、路側センサーが捕捉した歩行者等の情報に起因して、歩行者が交差点に接近していないにもかかわらず自動運転車両が停止する挙動が時折見られた。路側センサー情報による自動運転車両の停止に関しては、車両挙動判断ロジックとドライバー意図との一致性が鍵となるため、今後は車両挙動判断ロジックの改善を通じてドライバー意図との一致性を高める取組を進める必要がある。

社会実装に向けては、技術的に成立させるのみならず、安全かつ持続可能なサービスとして実現する必要がある。技術面では多様な環境条件や異常時の対応等、実運用を想定した網羅的な検証を行う必要がある。また、異常時の対応については、技術実証のみならず、現場駆けつけ要員等の運行をサポートする体制についても検討を行う必要がある。社会受容性面では、技術実証と並行して利用者や周囲の交通参加者に対する広報・周知を行うことで社会受容性を醸成し、新技術の円滑な社会実装、ひいては自動運転サービスの利用者確保につなげていく。これらの取り組みを推進するためには、行政、自動運転ベンダー、通信事業者、遠隔監視ソフトウェア会社等の多様な関係者の継続的連携が必要である。

---

<sup>5</sup> RIC アプリケーション(Radio Access Network Intelligent Controller Application)は、Open RAN アーキテクチャにおける RIC 上で動作するソフトウェアであり、RAN のパフォーマンス最適化、リソース管理、エネルギー効率向上等の機能を提供する

# 1. 実証の背景・目的

---

## 1.1 実証の背景

### 1.1.1 解決を目指す地域課題

- 住民の身近な移動手段の維持
  - (1) 運転士の高齢化、若年層の人材不足、負担の大きさ(長時間勤務等)
  - (2) バス路線の維持、効率化、採算性確保
- 新たな移動ニーズへの対応
  - (1) 高齢化に伴う免許返納者等の移動困難者の増加
  - (2) SAGA アリーナ開業によるイベント時の大規模な輸送需要

### 1.1.2 課題設定の背景

- 佐賀市では、自動運転等の交通 DX を推進し、利用者の利便性および事業者の生産性や事業継続性の向上に繋げることで地域課題を解決し、こどもから高齢者まで様々な世代が安心して暮らせるまちづくりを目指している。
- そのような中、近年においては、人口減少や少子・高齢化、働き方改革等の影響によって、深刻なバス運転士不足となっており、「住民の身近な移動手段の維持」や「新たな移動ニーズへの対応」が困難な状況となっている。こうした課題を解決するため、これまで佐賀県と共同で自動運転バスの社会実装に向けた取組を行ってきた。
- 2024 年度には、佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパークまでの区間において、自動運転バス(自動運転レベル 2、一部区間でレベル 4 相当)の運行実証を行い、走行安全性および事業性の検証を中心に実施した(実際の運行を想定した運行スケジュールや乗降場の設定、バス事業者による運行体制構築に向けた説明会、研修会の実施等)。  
※レベル 4 相当の運行実証とは、将来的なレベル 4 実現に向けた安全走行戦略を整理し、これに基づいた車両制御を実装し、実証期間中に走行試験を行い、他車両への影響も含めて整理した戦略が妥当かどうかの判断を行うもの

## 1.2 レベル 4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題

### 1.2.1 実証地域における課題

- 佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパークまでの区間においてレベル 4 自動運転を社会実装する上での課題は以下の通りである。この内、通信課題は、「インフラ協調システムの構築」および「遠隔監視・支援システムの構築(自動運転システム、車内安全システム)」

である。

表 1.2-1 実証地域における課題

大項目	小項目	課題
1.安全面	(1)運行設計領域(ODD)の設定	1)運行設計領域(ODD)の設定
	(2)自動運転システムの構築	1)インフラ協調システムの構築
		2)遠隔監視・支援システムの構築(自動運転システム、車内安全システム)
(3)走行環境の整備	1)路上駐車対策の実施	
2.運行サービス面	(1)乗降場の設定	1)乗降場の設定
	(2)運行計画の設定	1)運行ダイヤの設定
		2)運賃收受方法の検討
		3)長期運用を見据えた需要の検討
(3)保管場所・充電設備の検討	1)保管場所・充電設備の検討	
3.技術面	(1)自動運転の高度化	1)無信号交差点における歩行者検知技術の高度化、検証
		2)交差点右折制御の高度化、検証
		3)交通渋滞対応の高度化、検証
		4)路上駐車車両回避技術の高度化、検証
4.体制面	(1)運行体制の構築	1)運行体制の構築
		2)緊急時の体制の構築
		3)維持・管理体制の構築
		4)市交通局との連携
5.経済面	(1)車両の調達	1)車両の調達
	(2)運営コストの整理	1)運営コストの整理
	(3)運賃以外の収入施策の検討	1)他予算を活用した対応の検討
6.レベル 4 自動運転の車両と運行に関する許認可の取得	(1)関係法令への対応	1)関係法令への対応 道路運送車両法への対応 道路交通法への対応 道路運送法への対応
7.社会受容性面	(1)社会受容性の向上	1)無人自動運転となった場合の遠隔監視による運行の社会受容

出典:実用化計画(2024年度佐賀県・佐賀市作成)より作成

## 1.2.2 実証地域における通信課題

- 通信課題である「インフラ協調システムの構築」および「遠隔監視・支援システムの構築(自動運転システム、車内安全システム)」の内、レベル 4 自動運転の実装に向けて検証・解決が必要な課題は以下の 2 つである。
  - 自動走行で佐賀駅バスセンターへの右折を可能にするための検証  
2024 年度実証結果において佐賀駅バスセンターへの右折において手動介入が頻発したため。
  - SAGA サンライズパークにおけるイベント開催時に通信が輻輳する環境下においても遠隔監視等に必要な通信を確保するための検証  
SAGA サンライズパークは九州最大級の多目的アリーナ(約 8,400 席)を有し、プロスポーツ(バスケットボール、バレーボール)の試合やアーティストのコンサート等多彩なイベントが開催されるため。

## 1.2.3 全国共通の通信課題

### 1) 劣悪な場所の通信環境

携帯電話事業者の基地局は基本的には高所から地上に向けて電波を発射することから、トンネル内部は不感エリアとなる。通信環境が劣悪なトンネル内部において、通信システムおよび測位システムが途絶することなく、自動運転車両が遠隔監視システムに接続できるようにするため、当該環境において通信環境を最適化し、自動運転車両の通信手段を確保するための対策を講じる必要がある。

### 2) トンネル内の通信確保

佐賀市における自動運転バスの現状の走行ルートにはトンネルは含まれていないものの、オーナーカーへの自動運転の普及を見据えた際には本課題の解決が必要であり、また、全国のトンネルにおいても解決が求められると考えられるため、対策の意義は大きいと思われる。そのため、本実証では佐賀市 須田トンネル内部における通信確保の実証に取り組む。

## 1.3 実証の目的

### 1.3.1 目的

- 1) 技術面:自動運転技術の安全性と信頼性の確認
- 2) 経営面:持続可能なビジネスモデルの構築

### 3) 社会受容性面:地域住民や利用者の理解と受容性の向上

## 1.3.2 課題と解決策

### 1) 技術面

- (1) 課題:自動運転バスの走行に際しての技術的リスク
- (2) 解決策:実地での走行経験の蓄積により技術開発を促進し、走行安全性を向上させる。

### 2) 経営面

- (1) 課題:自動運転バスの運行サービスの持続的な採算確保
- (2) 解決策:運行実証での検証を重ね、効率的な事業運営とサービス性の向上を図る。

### 3) 社会受容性面

- (1) 課題:地域住民や利用者からの自動運転バスの安全性への理解と協力
- (2) 解決策:継続的な運行実証と運転特性の周知によって、地域住民や利用者の安心感を形成する。

## 1.3.3 課題と通信システムによる解決策

### 1) 道路等の物理的形状の相違に起因するユースケースの検証

- (1) 課題:自動走行で佐賀駅バスセンターへの右折を可能にする
- (2) 解決策:自動運転バスの終点が佐賀駅バスセンターであるため、片側 2 車線道路で無信号交差点を右折する必要があるが、JR の高架等で自動運転バスのセンサー視野に死角が発生するため、自動運転バスのみでは極低速での右折となる。
- (3) これを解決するため、JR 高架下に接近する車両、および高架下を通行する自転車、歩行者をインフラセンサーにより検知し、当該区間に交通参加者がいないことを通知されてから自動運転バスが右折を開始し、右折先の横断歩道手前で減速し、自車からも交通参加者を確認して通行する。
- (4) 自動運転バスは、右折開始点では高架下の歩行者等は検知不可能であるため、インフラセンサーを用いることで、自動運転バスのみでは交差点通過に 30 秒程度かかるところを 10 秒以下でスムーズに通行することができる見込みである。

### 2) 通信が輻輳する地域における検証

- (1) 課題:SAGA サンライズパークにおける大規模イベント開催時に通信が輻輳する環境下や、通信品質が劣化する環境下における遠隔監視等に必要な通信の確保。
- (2) 解決策:大規模イベント開催時における通信の輻輳状況や通信品質の劣化状況を把握できるようにする。また、遠隔監視員が監視可能な映像品質(画質等)を把握することにより、通信の輻輳状況や品質劣化時において維持すべき通信品質を明確にすることも取り組む。

(3) これら検証を通じて、将来的には通信の混雑状況や品質に応じて必要最低限の映像品質を制御、担保することで通信の輻輳時や劣悪な品質環境においても遠隔監視の継続を可能とすることを目指す。

3) 遠隔監視用映像における通信の電波伝搬に関する検証

(1) 課題:トンネル内部における自動運転車両の通信確保。

(2) 解決策:基地局の電波を増幅する LTE レピーターを設置し、トンネル外部から内部に電波を吹き込むことで、従来は不感エリアであったトンネル内部において自動運転車両からの監視映像の伝送を可能とする。

### 1.3.4 目指す変容

- 1) 個人:自動運転への理解を深め、日常の移動手段としての受容性を向上させること。また移動手段の確保による外出機会の創出
- 2) 組織:持続可能な運行モデルを交通事業者・自治体・企業等が協働して構築
- 3) 社会:高齢者等の移動困難者の移動手段の確保と SAGA サンライズパークにおけるイベント開催時の大規模輸送需要への対応・公共交通の利用促進や交通渋滞の緩和

## 1.4 最終目標・構想イメージ

### 1.4.1 最終目標

自動運転バスの社会実装を含めた佐賀市全体の交通体系の見直しにより、以下の課題の解決を図る。

1) 住民の身近な移動手段の維持

- (1) 運転士の高齢化、若年層の人材不足、負担の大きさ(長時間勤務等)
- (2) バス路線の維持、効率化、採算性確保

2) 新たな移動ニーズへの対応

- (1) 高齢化に伴う免許返納者等の移動困難者の増加
- (2) SAGA アリーナ開業によるイベント時の大規模な輸送需要

本事業の対象区間である佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間については、以下の 2 段階の目標を設定している。(佐賀市の目標)

- 1) 2027 年度:佐賀駅北口～商業校門前間でレベル 4 運行を実現する。(自動運転バス 1 台、有償、運転手あり、保安員あり、遠隔監視無し、レベル 4 区間:佐賀駅北口～商業校門前)
- 2) 2029 年度:佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間でレベル 4 運行を実現する。

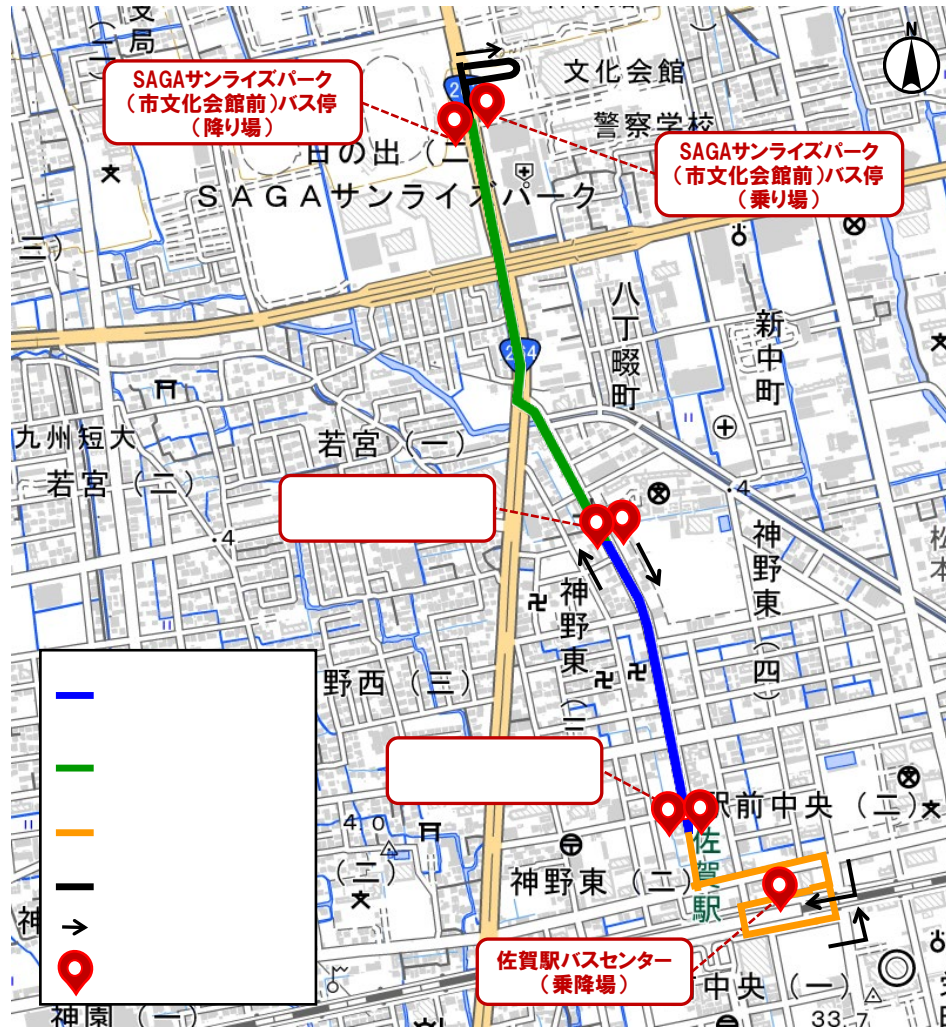


図 1.4-1 佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間におけるレベル 4 実装の目標

#### 1.4.2 構想のイメージ

これまでの実証事業の成果を基に 2024 年度に策定した、レベル 4 実装に向けた役割分担や具体的な取組内容を包括した実用化計画に沿って、実証を通じて段階的に体制構築、技術開発、インフラ整備等を行う。

##### 【技術面】

1) 実地での走行経験の蓄積による技術開発の促進 ⇒ 走行安全性の向上

##### 【経営面】

2) 継続的な運行実証によるオペレーションの改善 ⇒ 効率的な事業運営とサービス性の向上

3) 運用コストの整理および運賃以外の収入施策の検討・実証 ⇒ 事業性・事業継続性の向上

【社会受容面】

- 4) 継続的な運行実証による体験機会の提供・運転特性の周知 ⇒ 地域住民の社会的受容性の醸成

### 1.4.3 【社会実装に向けたステップアップ】

- 1) 2023 年度:レベル 2 運行実証(佐賀県・佐賀市)…社会的受容性の確認
- 2) 2024 年度:レベル 2 運行実証(佐賀県・佐賀市)…事業性の確認、信号連携
- 3) 2025 年度:レベル 2 運行実証(佐賀市・佐賀市交通局)…交通局による運行への移行準備、インフラ連携
- 4) 2026 年度:レベル 2 サービス運行(佐賀市・佐賀市交通局)…有償運行、走行環境条件付与申請および特定自動運行許可申請(佐賀駅北口～商業校門前)、旅客自動車運送事業許可申請
- 5) 2027 年度:旅客自動車運送事業許可申請(佐賀駅北口～商業校門前)  
レベル 2 サービス運行・レベル 4 運行実証(佐賀市交通局)…レベル 4 運行区間(佐賀駅北口～商業校門前)、走行環境条件付与申請および特定自動運行許可申請(商業校門前～SAGA サンライズパーク)
- 6) 2028 年度:旅客自動車運送事業許可申請(商業校門前～SAGA サンライズパーク)  
レベル 2 サービス運行・レベル 4 運行実証(佐賀市交通局)…レベル 4 運行区間(佐賀駅北口～SAGA サンライズパーク)、走行環境条件付与申請および特定自動運行許可申請(佐賀駅バスセンター～佐賀駅北口)
- 7) 2029 年度:旅客自動車運送事業許可申請(佐賀駅バスセンター～佐賀駅北口)  
レベル 4 サービス運行(佐賀市交通局)…レベル 4 運行区間(佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク)

### 1.4.4 地域のコミットメント

1) 市長および佐賀市交通局のコミットメント

第 3 次佐賀市総合計画<sup>6</sup>(2025 年度～2040 年度)およびその実施計画である「佐賀市未来共創プラン(市町村まち・ひと・しごと創生総合戦略)<sup>7</sup>」、「佐賀市地域公共交通計画<sup>8</sup>」にて、自動運転の社会実装に向けた取り組みを謳っている。また、毎年の新年度予算に関する記者会見においても、一貫して自動運転に関する取り組みの推進について表明している。

(1) 第 3 次佐賀市総合計画(2025 年 3 月策定)

<sup>6</sup> 佐賀市:第 3 次佐賀市総合計画, <https://www.city.saga.lg.jp/main/106183.html>, 令和 7 年 3 月策定

<sup>7</sup> 佐賀市:佐賀市未来共創プラン(市町村まち・ひと・しごと創生総合戦略), <https://www.city.saga.lg.jp/main/59234.html>, 令和 7 年 3 月策定

<sup>8</sup> 佐賀市:佐賀市地域公共交通計画, [https://www.city.saga.lg.jp/site\\_files/file/2025/202502/plik8m4qqc1p9iik1015r310mk11e54.pdf](https://www.city.saga.lg.jp/site_files/file/2025/202502/plik8m4qqc1p9iik1015r310mk11e54.pdf), 令和 7 年 2 月改正

・第4章 各分野の目指す姿(基本計画)

09 都市・交通

「2040年に目指す市民等の姿:3 多様な移動ニーズに応える地域公共交通の実現自動運転等の交通DXを推進し、利用者利便と事業者の生産性や事業継続性の向上につなげます。」

(2) 佐賀市未来共創プラン(2025年3月策定)

・政策09 都市・交通

多様な移動ニーズに応える地域公共交通

重点的に取り組む施策の方向性

「利用者の利便性と交通事業者の効率性や生産性を高めるため、最新技術等を活用した公共交通サービスの高度化を進めます。」

・重点的に取り組む事業

自動運転バス等の次世代交通の推進

(3) 佐賀市地域公共交通計画(2025年2月改正)

・4 将来像の実現に向けた課題、目標、施策

4-1 公共交通でスムーズに移動できるまち、4-1-3 施策

施策12:公共交通の担い手確保

「路線バスやタクシーの担い手の確保に向けて、自動運転の導入検討や、運転士の募集PR等に取り組む。」

・事業12-①:自動運転の社会実装に向けた導入検討

「国の自動運転の実証運行の動向を注視しつつ、自動運転の社会実装に向けて、交通事業者と協働して、実証実験等に取り組む。自動運転の社会実装に向けた、交通事業者および行政、関係者の検討体制等を整える。」

・実施主体:佐賀県、佐賀市、バス事業者

・実施時期:2023年度～

2) 地域コミッティの構築

2024年度は、レベル4実装に向け、車両認可に係る国土交通省や九州運輸局、特定自動運行許可や道路使用許可に係る佐賀県警察本部、運行事業者となる佐賀市交通局等を含む地域コミッティを構築した。

3) 運行者以降の準備

2025年度は、佐賀市交通局に技術移転を行い、佐賀市交通局による運行(運転士および遠隔監視員の確保)に移行する準備を開始した。

4) レベル4実現に向けた役割分担や具体的な推進計画の策定

(1) 2024年度に、2028年度のレベル4自動運転移動サービスの社会実装に向けた役割分担や具体的な取組内容を包括した実用化計画(巻末資料参照)を策定した。また、

2028年度までの5箇年にわたる中長期収支計画を作成した。

## 1.5 「最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標

### 1.5.1 最終目標・構想イメージにおける本実証の位置づけ

2029年度の佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間の、レベル4自動運転移動サービスの社会実装に向けた構想は下表の通りである。

本実証では、実装を見据え、佐賀市交通局(既存交通事業者)への技術移転および運行主体の移行を行い、オペレーションや運用コスト、遠隔監視システム等に関する検証を進めるとともに、走行ルート(佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間)の内、2027年度にレベル4運行を先行して実装する区間(佐賀駅北口～商業校門前間)でのレベル4相当での走行を検証する。

また、過年度の実証において、多くの手動介入が発生し、自動運転バス側の技術開発での解決が現状では困難な「自動走行での佐賀駅バスセンターへの安全な進入」に関する課題について、路側センサー等のインフラ協調システムによる解決の可能性を検証する。

佐賀市交通局のバス路線は、すべて佐賀駅バスセンターを起点としており、この課題の解決は、本実証の走行ルートのみならず、これをモデルケースとして市内他路線へ展開していくためにも、必要不可欠である。

表 1.5-1 レベル4社会実装に向けた導入構想

項目	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度
レベル4運行*1	—	—	○	○	◎
運行台数	1台	1台	1台	1台	1台
運行ルート	佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク	同左	同左 (レベル4区間:佐賀駅北口～商業校門前)	同左 (レベル4区間:佐賀駅北口～SAGA サンライズパーク)	同左 (レベル4区間:佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク)
運行方式	定路線 (定期)	定路線 (定期)	定路線 (定期)	定路線 (定期)	定路線 (定期)
運賃	無償	有償	有償	有償	有償
運転者	有	有	有	有	有
遠隔監視員	無	無	同乗	同乗	同乗
遠隔監視体制*2	無	無	無	無	1:1

\*1:◎:1系統内の全区間でレベル4運行、○:1系統内の一部区間でレベル4運行、

-:レベル4 以外の運行

\*<sup>2</sup>:1 拠点における遠隔監視員の人数:監視対象の車両台数の比率

## 1.5.2 2025 年度における取組内容と目標

### 1) 安全面

- (1) 佐賀駅北口～SAGA サンライズパークをレベル4とした時のODDを検証
- (2) 佐野常民像前交差点での信号連携
- (3) 遠隔監視・支援システムの検討および検証(乗務員乗車型)
- (4) 路上駐車対策の検討と実証実験の実施

### 2) 運行サービス面

- (1) 中間停留所や佐賀駅バスセンターおよびSAGA サンライズパークの乗降場の運用について検討
- (2) 運行実証におけるダイヤの設定、検証
- (3) 有償での運行実証の検討(現金、キャッシュレス両方に対応)
- (4) 支払方式への意向に関するアンケート
- (5) 利用実態の検証 ※平常時における有償・長期運行における需要把握
- (6) 車両保管場所、車庫、充電設備の検討

### 3) 技術面

- (1) 技術開発
- (2) 運行実証の実施(各無信号交差点での歩行者検知、右折時の対向車検知、1台駐車対応)
- (3) インフラ協調システムの検証(佐賀駅バスセンターへの右折時の対向車・横断歩行者検知)

### 4) 体制面

- (1) 運行体制の検討(乗務員乗車型)および実証
- (2) 緊急時体制の検討(車両、自動運転システム)
- (3) 点検体制の検討(車両、自動運転システム)
- (4) 佐賀市交通局による運行(運転士および遠隔監視員の確保)への移行準備
- (5) 運転士、遠隔監視員の訓練

### 5) 経済面

- (1) 車両の検討(EV/ディーゼルの中型バス)
- (2) 運営コストの整理(車両購入費、システム導入費、維持費、電気代、充電設備の整備コスト等)
- (3) 運賃以外の収入施策の検討

### 6) 運行に関する許認可取得については、2025年度は実施無し

### 1.5.3 本実証(2025年度)における通信システムに関する取組内容と目標

- 1) トンネル内部における自動運転車両の通信確保:
  - (1) トンネル外部から電波を吹き込むことにより、不感エリア内における電波を最大限延伸させる。
  - (2) これにより、通信環境が劣悪なトンネル内部においても、遠隔監視システムからの映像が遠隔監視可能な範囲で安定して伝送できることを検証する。
  
- 2) 輻輳時または通信品質劣化時における安定的な通信の確保:
  - (1) システムや計測ツールを活用して、大規模イベント開始時における通信の輻輳状況や通信品質の劣化状況を把握する。
  - (2) また、本実証では、遠隔監視員が遠隔監視映像の画質等の低下をどこまで許容可能かも検証する。

## 2. 業務実施体制

### 2.1 実証機関

表 2.1-1 実証機関

代表機関	法人名	楽天モバイル株式会社
	代表者氏名	矢澤 俊介
	所在地	〒158-0094 東京都世田谷区玉川 1-14-1 楽天クリムゾンハウス
	業務の概要	電気通信事業法に基づく電気通信事業その他通信に関する事業
構成員	法人名	佐賀市交通局
	代表者氏名	大串 賢一
	所在地	佐賀市愛敬町 4 番 23 号
	業務の概要	乗合バス事業
	構成員とする理由	実証地域において乗合バス事業の実績があり、今後、自動運転実証運行を担う予定の事業者であるため
構成員	法人名	株式会社建設技術研究所
	代表者氏名	西村 達也
	所在地	東京都中央区日本橋浜町 3 丁目 21 番 1 号
	業務の概要	検証結果のとりまとめ
	構成員とする理由	本事業の遂行において、同社は実証地域における課題を網羅的に把握しており、各種関係機関との調整や評価・検証、結果の取りまとめに十分な実績を有しているため
構成員	法人名	先進モビリティ株式会社
	代表者氏名	瀬川 雅也
	所在地	茨城県つくば市緑ヶ原 4 丁目 13
	業務の概要	自動運転システムの開発、販売
	構成員とする理由	自動運転バスの走行検証を行うために先進モビリティ社の自動運転技術が必要なため
構成員	法人名	沖電気工業株式会社
	代表者氏名	森 孝廣
	所在地	東京都港区虎ノ門 1-7-12
	業務の概要	路側センサー等のインフラ設置、データ分析

	構成員とする理由	路車協調型自動運転における路側センサーの運用等に十分な実績を有しているため
構成員	法人名	株式会社東海理化電機製作所
	代表者氏名	二之夕 裕美
	所在地	愛知県丹羽郡大口町豊田三丁目 260 番地
	業務の概要	遠隔監視システムの提供と実証実験の実施
	構成員とする理由	自動運転の遠隔監視システムの開発、提供等に十分な実績を有するため

## 2.2 実施体制図

本実証における実施体制は以下の通り。

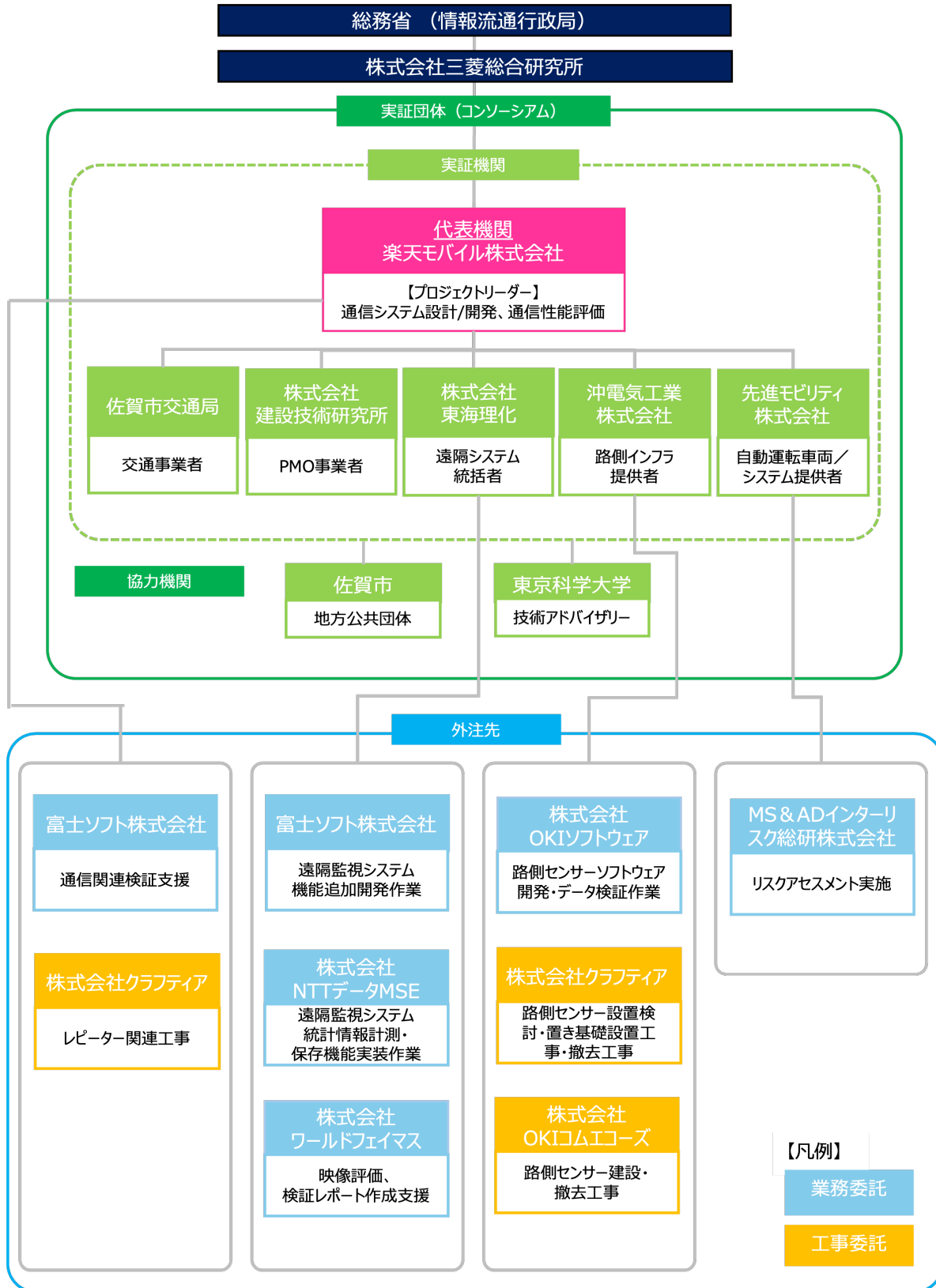


図 2.2-1 実施体制図

### 3. 自動運転の運行結果

#### 3.1 運行場所

本事業における走行ルート全体は、令和 6 年度の国土交通省地域公共交通確保維持改善補助金の交付を受けて実証実験を行ったルートであり、佐賀市において自動運転レベル 4 を最初の実装する予定である。

本ルートは佐賀市内の運行事業者が、運行経路の一部として路線バスを走行させている。(図 3.1-1)

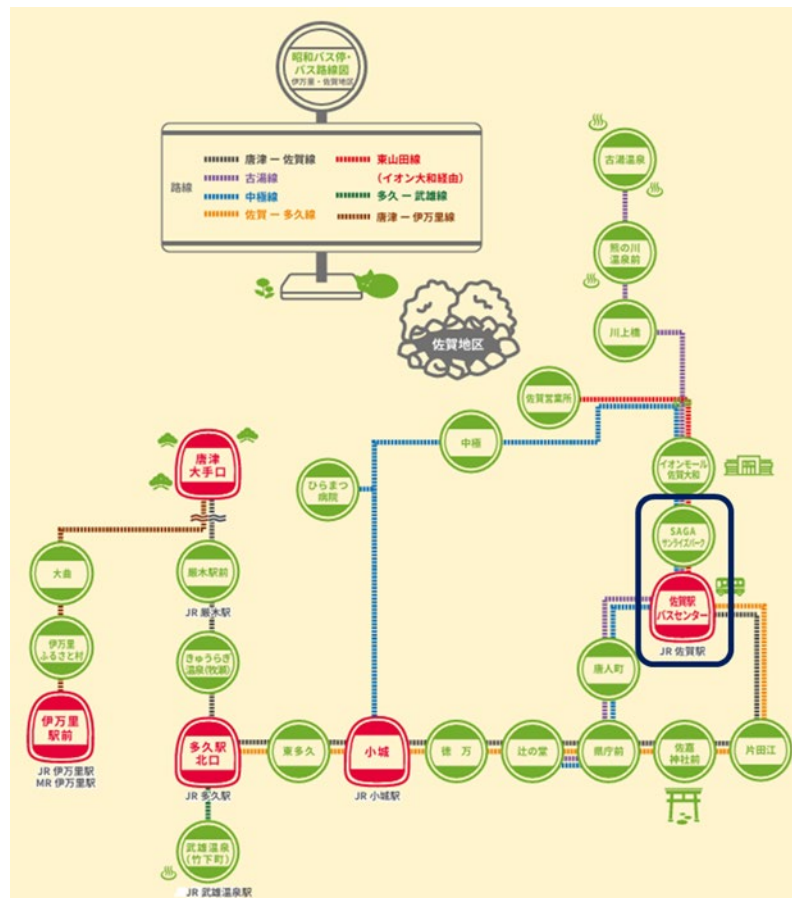


図 3.1-1 既存路線バス路線図(口内が本実証における走行ルート)

(出展:主要バス MAP - 昭和バス 昭和自動車株式会社)



図 3.1-2 走行ルート図と自動運転レベル<sup>9</sup>

図 3.1-2 に実証実験コースと自動運転レベルの区分を示す。佐賀駅バスセンターから SAGA サンライズパークまでの自動運転レベル 4 実装を目指しており、最初のステップとして、「早期レベル 4 実装区間」(サンライズストリートから SAGA サンライズパークまでの区間)のレベル 4 実装を行い、次のステップとして、「将来レベル 4 実装区間」(佐賀駅バスセンターからサンライズストリートの区間)を追加し、全体のレベル 4 実装を行う。

「将来レベル 4 実装区間」には[佐賀駅バスセンターへの右折]の行程が含まれているが、当該箇所を自動運転バス車両単独の制御で、かつレベル 4 相当のスムーズな動作で右折することは現状困難である。本実証ではインフラセンサーとの連携により、当該箇所において周囲交通への影響を最小限に走行できるか検証を行うことで、レベル 4 認証に向けたステップを加速させたい。

## 3.2 運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	ユースケース③: 2025年10月1日(水)～29日(水)、11月13日(木)～14日(金) ※平日22日間

<sup>9</sup> 以降、本書内の地図は「地理院地図」(国土地理院 <https://maps.gsi.go.jp>)のデータを加工して作成

関係者試乗運行	実証視察会:2025年12月1日(月)
一般運行等	ユースケース③: 2025年11月20日(木)~28日(金) ※平日6日間
その他運行	ユースケース①: 2025年12月15日(月)~19日(金)、22日(月) ※手動運行

### 3.3 運行時間帯・頻度・運行方式

- 自動運転バスの運行時間帯:午前9時~午後6時まで
- 運行形態:佐賀駅バスセンターからSAGAサンライズパークまでの直行便  
(※)経路は路線バスと同じコースを走行し、途中バス停(佐賀駅北口、商業校門前)に一時停止するが、ドア開閉はしない
- 運行頻度:1時間に1往復で1日あたり8往復

表 3.3-1 運行ダイヤ

SAGAサンライズパーク行(平日)			佐賀駅BC(バスセンター)行(平日)		
便名	佐賀駅BC 発	SAGAサンライズ パーク[着]	便名	SAGAサンラ イズパーク発	佐賀駅BC[ 着]
1便	9:05	[ 9:17 ]	2便	9:35	[ 9:47 ]
3便	10:05	[ 10:17 ]	4便	10:35	[ 10:47 ]
5便	11:05	[ 11:17 ]	6便	11:35	[ 11:47 ]
7便	13:05	[ 12:17 ]	8便	13:35	[ 12:47 ]
9便	14:05	[ 14:17 ]	10便	14:35	[ 14:47 ]
11便	15:05	[ 15:17 ]	12便	15:35	[ 15:47 ]
13便	16:05	[ 16:17 ]	14便	16:30	[ 16:42 ]
15便	16:50	[ 17:02 ]	16便	17:05	[ 17:17 ]

### 3.4 運行者

自動運転バスの運行は、運行に関する助言を佐賀市交通局から得た上で先進モビリティが実施した。

### 3.5 運行体制

表 3.5-1 運行体制

項目		内容
運行管理者の選任・人員体制		先進モビリティ株式会社より選定
遠隔監視設備	種類・特徴	・自動運転車両には複数台のカメラを搭載しており、遠隔監視員は死角なく車両周囲の状況を確認可能。

		<ul style="list-style-type: none"> <li>・複数台のカメラ映像を統合し一つのストリームとして送ることで通信容量を削減。</li> <li>・本実証では車外映像、車内映像の2ストリームを送信。webアプリで送信映像を確認可能。</li> <li>・自動運転車両からの通信はモバイルルーターを使用。</li> </ul>
	機能	自動運転車両から車載カメラ映像、位置情報を送信し、本実証では遠隔からの操作は実施しない。
	設置場所	佐賀市役所市民ホール(佐賀市栄町1-1)
遠隔監視員	事業者	東海理化
	人員体制	1名
	オペレーション	実施なし
	遠隔監視体制	12月1日の実証視察会において、市役所内に遠隔監視ブースを設置して車両の走行状態を監視。
	業務従事者教育	遠隔監視員は遠隔監視経験者より教育を受けた者が従事した。
テストドライバー	事業者	先進モビリティ株式会社
	人員体制	運転士の人数:1人 自動運転車両1台当たりの配置人数:1人
	オペレーション	自動運転システムの起動、自動走行の開始、終了を実施した。 必要に応じて手動介入を行い、安全な運行を確保した。
	テストドライバーの確保およびこれらに対する業務従事者教育・訓練の計画	<ul style="list-style-type: none"> <li>・相当の運転経験を有し、かつ、運転技術が優れていること</li> <li>・実験車両の自動走行システムの仕組みや特性を十分に理解していること</li> <li>・公道実証実験の実施前に、実験施設等において、自ら実験車両の自動走行システムを用いて運転し、緊急時の操作に習熟していること</li> </ul>
保安員 (※上記以外で運行の安全のために配置する人員)	事業者	先進モビリティ株式会社
	人員体制	保安員の人数:1人 自動運転車両1台当たりの配置人数:1人
	オペレーション	自動運転車両に同乗し、自動運転システムの監視を行うとともに、同システム上の不具合等が発生した際の対応を行った。 また手動介入の発生状況や要因の記録、自動運転走行データの収集を行った。
	業務従事者教育	保安員は、先進モビリティ株式会社によるトレーニングを受講し、これを修了した者が従事した。

### 3.6 自動運転車両の特徴

項目		内容		
台数		1台		
所有者		先進モビリティ株式会社		
車両 スペック	車両名	BYD J6		
	自動運転レベル	レベル 2		
	車両定員	32名		
	試乗枠の定員	23名(着座 20 立席 3)		
	最高速度	車両機能上限:70km		
		実証実験時上限:40km		
	センシングデバイス	LiDAR 8台、カメラ 10台		
	車両性能 (チェックを入れること)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・走行中に自動運転と手動運転を切り替えることが可能な遠隔型自動運転システムを備えた自動車として生産された車両である</li> <li>・自動運転レベル 2 以上での走行が可能であり、かつ将来的に車両調整等により自動運転レベル 4 での走行が可能であること</li> <li>・乗車定員は、実証地域で将来的に実装することを想定した適当な規模であること</li> </ul>		
		運行管理システム (チェックを入れること)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車両に搭載したカメラによる車両内外の遠隔監視</li> <li>・緊急時における車内との通話</li> <li>・速度や位置等の車両走行状態のリアルタイムでの取得</li> <li>・実験車両に車両周辺の状況や車両状態情報の記録を行うドライブレコーダーやイベントデータレコーダー等を搭載すること</li> <li>・公道実証実験中の実験車両に係るセンサー等により収集した車両状態情報を含む各種データ、センサーの作動状況等について、交通事故または交通違反が発生した場合の事後検証に利用することが可能な方法により、適切に記録・保存すること</li> </ul>	
			その他装備	なし

走行可能環境	天候		晴天、曇天、小雨		
	照度		130 ルクス以上		
保有機能	自転車操作	左折	走行可否	可	
		右折	走行可否	可	
		車線変更	走行可否	可	
		障害物回避	対応可否	可(停止による回避)	
	対象認識		可		
	白線認識		可(LiDAR による認識)		
	標識認識		不可		
	信号認識		可		
	MRM		否(自動運転レベル 2 で運行)		
	本実証のために実施する自動運転システム改修の内容			・インフラセンサーとの連携のためのインターフェース開発、実装、調整	
その他特徴等			なし		

### 3.7 自動運転に関する手続き

実施にあたって、下記の報告および許可申請を実施した。

申請先・調整先	申請内容・調整内容
佐賀市役所 建設部	道路占用許可申請(市役所前バス停付近感知器柱、バスセンター側新設柱) 道路使用許可申請(市役所前バス停付近感知器柱、バスセンター側新設柱) 工事竣工届(市役所前バス停付近感知器柱、バスセンター側新設柱)
佐賀市役所 都市戦略部	路側センサー等の設置に関する届出(バスセンター側新設柱) 建設リサイクル法届出(市役所前バス停付近新設柱、バスセンター側新設柱)
佐賀県警察本部 交通部 交通規制課	路側センサー等の設置に関する届出(市役所前バス停付近感知器柱)
佐賀北警察署	道路使用許可申請(市役所前バス停付近感知器柱、バスセンター側新設柱)
佐賀市交通局	実証実験内容と日程の報告
佐賀県警	実証実験内容と日程の連絡
佐賀駅バスセンター	自動運転バスダイヤと走行日程の連絡
須田トンネル周辺自治会	自動運転バス走行に関するルートと日程の通知
国土交通省九州 地方整備局 佐賀河川事務所 嘉瀬川ダム管理支所	嘉瀬川ダム堤頂道路区間の走行可否に関する確認 実証実験内容および日程の連絡
佐賀市役所建設部 北部建設事務所	実証日程と須田トンネル内工事との日程調整

## 4. 実証の手法

---

### 4.1 ①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保

#### 4.1.1 山間部道路の通信環境の安定化に向けた LTE レピーターの利用による車両ネットワーク接続の確保

##### 1) 目的

###### (1) 課題

遠隔監視および運行管理において、車両からの鮮明な映像・音声・車両状態・位置情報を常時かつ低遅延で送受信できる連続的な V2N(Vehicle-to-Network)接続は不可欠である。しかし、トンネル区間を含む山間部の不感エリア(圏外)では通信が途絶し、遠隔監視や遠隔介入の要件を満たすことができない。これはレベル 4 自動運転の安全性、信頼性、および事業継続性に直接影響を及ぼす。また、山間部における基地局建設は市街地に比べて時間とコストが大幅に増加するため、低コストかつ短期間で接続手段を確保する必要がある。

###### (2) 検証

前述の課題に対し、レピーターは有効な解決策と考えられる。レピーターは有線通信網を敷設する必要がなく、基地局建設と比較すると構成がシンプルで、低コストかつ短期間での実現が可能である。本ユースケースの実証では、トンネル区間を含む通信条件の不利な中山間地域において、レピーターを用いた安価な通信環境整備により既存の通信環境を延伸することで、自動運転システムにどれだけ安定的な通信接続を提供できるかを実フィールドで検証した。なお、本実証に選定した場所は LTE 通信エリアのため、LTE レピーターでの検証を行った。

##### 2) 実証内容の詳細

本実証は、基地局の電波が届く場所に LTE レピーターを設置し、これまで電波が届かなかったトンネル内の区間といった不感エリアに向けて電波を再放射することで、通信エリアを延伸するものである。レピーターの使用にあたっては、基地局直接波とレピーター増幅波の干渉が時間差条件内で発生しない運用を設計し、電波の非重畳エリアを選定する必要がある。また、見通し(Line of Sight、以降 LOS)が確保され、LTE レピーターの設定が可能である地点を選定条件とする。これらの条件を考慮し、本実証では佐賀県内の山間部道路である国道 323 号の須田トンネルを実証フィールドとして選定した。図 4.1-1 に実証フィールドのトンネル位置および通信環境を示す。

選定条件の詳細について、楽天モバイルの電波が最寄りの基地局との位置関係においてトンネル内

部に届きにくいエリアであり、かつトンネル入口周辺の電波状況は良好である場所であることが、電波測定によって明らかになった(トンネル内部と入口周辺の電波状況は「5」検証条件」を参照)。また、LTEレピーターは、基地局からの電波を捉える受信アンテナ(ドナーアンテナ)と、増幅された電波をサービスエリアに放射する送信アンテナ(サービスアンテナ)の二つのアンテナで構成される。互いのアンテナの放射方向と受信方向が重ならないようにし、かつ受信アンテナは基地局直接波を受信可能な方向に設置する必要がある。須田トンネルは上記の条件を満たしており、山間部のトンネル区間における LTE レピーターの検証に適した場所であると判断した。



図 4.1-1(左)本実証における須田トンネルと通信設備の位置<sup>10</sup>(右)新設した LTE レピーター

本実証の内容は、主にレピーター設置後の不感エリアの改善度合いとともに、自動運転車両を実証エリアで走行させ、改善された通信環境下で遠隔監視映像が安定的に提供できるかを検証するものである。図 4.1-2 は、本実証で使用する遠隔監視映像と通信環境の関連性を示す。主な実証項目は以下の通りである。

<sup>10</sup> 基地局の正確な位置は非公開であるため、表示されるのは概略位置に限られる。

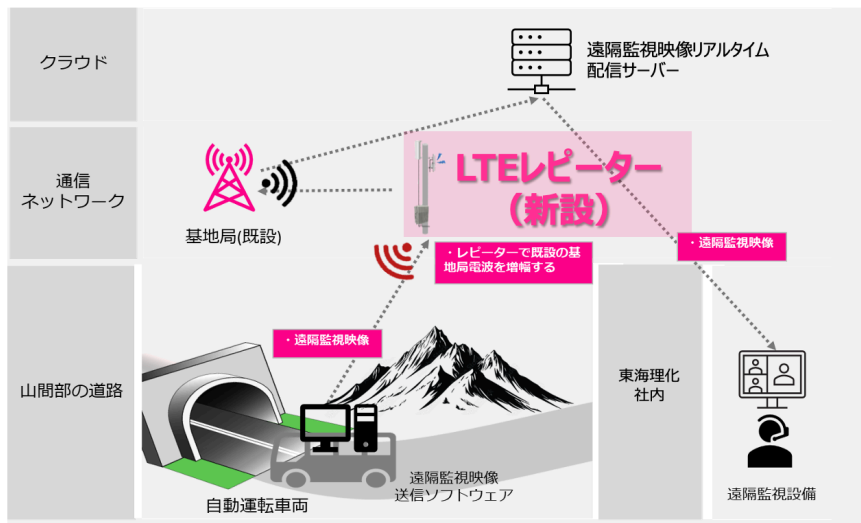


図 4.1-2 本実証全体のシステム構成

### (1) 実証の項目

#### 1. レピーター設置と環境測定:

基地局の電波を受信し、不感エリアである須田トンネルを効率的にカバーできる地点にLTEレピーターを設置する。レピーターのオン/オフ両状態について以下の各種測定を行う。

- a. 基地局電波測定車によるドライブテスト
- b. 複数定点での電波測定
- c. 自動運転車両による走行検証

これらの測定結果に基づき、レピーターオン/オフ両状態におけるRSRP(基準信号受信電力)、SINR(信号対干渉波雑音比)、スループットの変化を分析し、レピーターによる不感エリアの改善度合いを確認する。

#### 2. 送信する遠隔監視映像の品質計測:

上記1.で通信環境の安定性が確認できた後、自動運転車両を走行させる。遠隔監視システムは映像をリアルタイムに送信し、その映像品質が自動運転の遠隔監視運用に影響を与えないかを検証する。主な測定方法は以下の通りである。

- a. 遠隔監視システムに記録されたログデータ中の画質、遅延等の分析。
- b. 遠隔監視を行った者へのアンケート実施による、受信映像の途切れやフリーズの有無の評価。

### 3) 利用技術

#### (1) LTEレピーター

- 内容:

LTE レピーターは、受信アンテナ(ドナーアンテナ)と送信アンテナ(サービスアンテナ)の二つのアンテナで構成される中継増幅装置である。基地局からの LTE 電波を受信アンテナで受信し、その信号を増幅後、サービスアンテナから電波の不感エリアへ仕様上、最大+43dBm で再放射する。

本実証で使用するアンテナの仕様を、参考資料編から抜粋し表 4.1-1 に、アンテナパターンを図 4.1-3 に示す。

表 4.1-1 LTE レピーターアンテナ仕様

項目	詳細		
アンテナ分類	SISO Panel Antenna		
ポート	port 1		
周波数範囲[MHz]	1700~2200	2200~2400	2200~2400
帯域幅[MHz]	500	200	300
利得[dBi]	15	15.5	16
ビーム幅(水平)	65° ± 5°	65° ± 5°	55° ± 5°
ビーム幅(垂直)	12° ± 3°	11° ± 3°	10° ± 3°
F/B Ratio	≥ 25	≥ 25	≥ 25
VSWR	≤ 1.5 : 1		
偏波	Vertical(垂直)		
入力電力上限	200W		
入力インピーダンス	50Ω		
PIMD	-150dBc		
コネクタ	4.3-10 Female(Mini DIN Female)		
防水性	IP 66		
重量	アンテナ:3 kg / バケット:2 kg		
寸法	800 × 130 × 61mm		
ダウンチルト	0° - 30°		

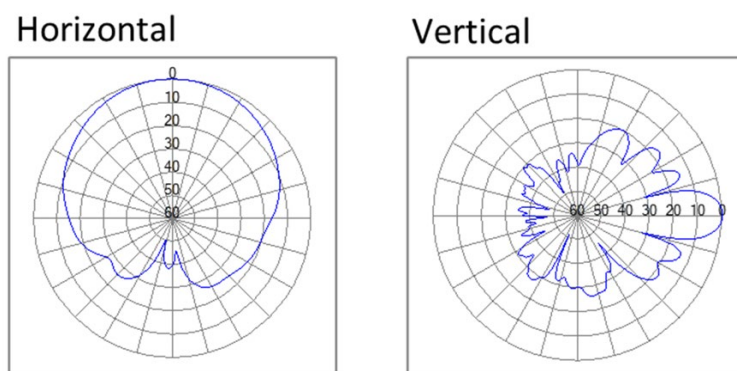


図 4.1-3 LTE レピーターのアンテナパターン

- 特徴：
  - 本実証に使用するアンテナは指向性アンテナであるため、特定の方向に電波を強く放射し、それ以外の方向への電波放射を抑制できる。特に本実証地点におけるトンネル内部には効率的に電波を集中させることが可能であり、無駄な電波の拡散を防ぐことに寄与する点が重要な特徴である。
  - 低コストかつ短期間で導入が可能である。新規基地局建設に必要な大規模な工事や、バックホール回線(光ファイバー等)の敷設が不要であるため、コストを抑制し、短期間で通信エリアを構築できる。
- 重要性：
 

本技術は、レベル4 自動運転の社会実装を阻害する「山間部の電波の不感エリア」という課題に対し、迅速かつ効率的な解決策であると判断される。この技術の有効性が確立されれば、自動運転サービスの提供可能エリアを、新規基地局建設に伴う大規模な投資や時間的制約を回避しつつ地方や過疎地域へ拡大させるための重要な選択肢となる。

## (2) 指向性アンテナ設計・配置

- 内容：
 

レピーターにおける指向性アンテナは、元基地局からの直接波とレピーターによる増幅波との干渉を回避し、かつレピーター自身の自己干渉を抑制した上で、トンネルの出入口に向けて高利得アンテナを用いて電波を効率的に再送信するために最適な形で設計・配置した。
- 特徴：
 

レピーターの送信電波が自らの受信部に回り込むと自己干渉が生じ、受信感度の低下<sup>11</sup>や発振(Oscillation)<sup>12</sup>を引き起こす場合がある。この自己干渉を抑制し、レピーターの安定した動作を確

<sup>11</sup> 受信感度の低下:受信アンテナに入り込んだ送信電波がノイズとなり、本来受信すべき微弱な信号が埋もれてしまい、レピーターの受信感度が著しく低下。[参考資料 - [wiki:感度](#)]

<sup>12</sup> 送信電波が受信部に回り込み、それが増幅されて再び送信されるという正帰還ループが形成されると、レピーターは制御不能な発振状態に陥る。[参考資料: [Wilson Connectivity](#)]

保するためには、送信アンテナから放射された電波が受信アンテナへの程度回り込まずに分離されているかを示す「アイソレーション」の確保が極めて重要となる。

設計上の主な留意点は以下の通り：

- 受信アンテナと送信アンテナの相互角度(方位角)およびチルト角は、規定の範囲内で調整し、十分なアイソレーションを確保する。
- 15m または 20m のポールを用い、ポール上の受信アンテナと送信アンテナ間で最低 5m の垂直方向のアイソレーションも確保する。
- 増幅した電波が不感エリアを可能な限り広範囲にカバーできるよう、出力レベル・指向性・設置位置を調整し、到達距離の最大化を図る。通常、レピーターのアンテナ配置においては、サービスアンテナをポールの頭頂部に、ドナーアンテナをその下部に設置することが一般的な構成であるが、本実証では須田トンネル開口部へ集中的に電波照射してトンネル内部への電波延伸効率を最大化することを目的としたため、サービスアンテナをドナーアンテナよりも低い位置に設置する配置することとした。
- 地形や周囲環境を確認し、見通し(Line Of Sight)の確保を考慮する。

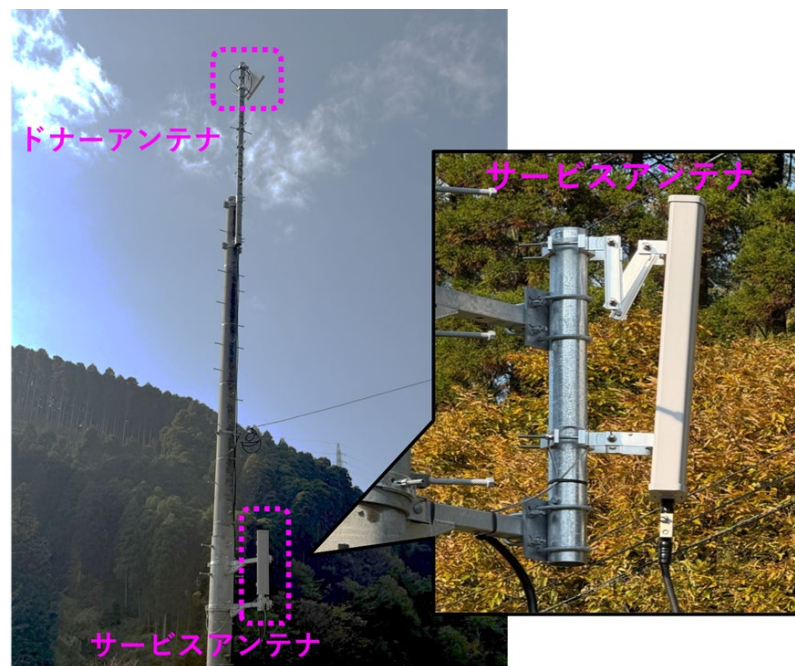


図 4.1-4 LTE レピーターのアンテナ配置

● 重要性：

上記の方針に基づいた指向性アンテナの設計・配置は、LTE レピーター導入時の最大リスクである干渉や品質劣化を回避し、増幅した電波を電波の不感エリアへ最大限に供給するために不可欠である。これにより、安定した通信環境の構築と、ひいては自動運転システムに必要な通信品質の確保に貢献する。また、本技術は他のレピーターの設置においても同様の設計・配置で適用可能であるため、レピーターをソリューションとして全国で横展開するための重要な要素の一つである。

### (3) 車載通信・遠隔監視システムの運用

- 内容：

車両に搭載したカメラで撮影した映像を、モバイル回線を使用して遠隔監視室に送信し、遠隔地から車両周囲の状況を確認可能とする。

- 特徴：

車両近傍を死角なく確認するためには複数台のカメラ映像が必要になる。本システムは複数台のカメラ映像を一つのストリームに統合して送信することで送信データ量の削減を行う。

本実証では車外カメラ 7 台、車内カメラ 2 台をそれぞれ統合し、車外映像ストリーム、車内映像ストリームの 2 ストリームを送信する。

- 重要性：

通信が不安定な環境においても自動運転車両の安全な運行を実現するため、可能な限り送信データ量を削減した上で状況確認可能な映像を低遅延で送信することが重要である。

### 4) 必要性・緊急性・新規性

#### (1) 必要性

基地局新設は山間部で工期・コスト・付帯回線(バックホール)確保の難易度が高い一方、地域交通の自動運転サービスでは即時性の高い通信安定化が必須である。レピーターは既存の通信網を活用し、短期間でトンネル区間を含む山間部の不感エリアを解消できる実効性が期待される手段である。レベル 4 自動運転における遠隔監視義務(映像・音声・状態監視)を現実的に満たすには、上り回線の継続性確保が要諦であり、本テーマはこれに対する直接的な対策となる。

#### (2) 緊急性

山間部の電波の不感地帯やトンネル区間における電波エリア延伸の検証実績は、現時点では十分とはいえない<sup>13</sup>。また、全国をカバーする通信事業者としては、不感エリア解消に高価な延伸機器へ依存しない解決策が求められている。一般的に、不感エリアは人口希薄地域であることや、割り当てられた周波数帯域の特性上、エリア設計の難易度が高いこと等複数の要因によって発生する。このような電波が届きにくい環境は全国各地に広く存在すると見込まれることから、本実証を早期に実施する必要があると思われる。さらに、自動運転の社会実装においては、実路運行やエリア拡張の計画に対し、基地局整備の長期スケジュールが追従できない場合がある。マクロセル基地局の設置には 1

<sup>13</sup> 参考資料「[携帯電話不感対策の現況と課題等](#)」

年から 2 年を要する可能性があり、山間部への建設は平地と比較してさらに設備・資材の調達に時間を要する。したがって、短時間で通信環境を整備できるソリューションが求められており、数ヶ月から 1 年で設置可能な LTE レピーターの有効性を検証することが喫緊の課題である。

### (3) 新規性

過去の多くの実証は、光ファイバー網を要する電波吹き込み用基地局<sup>14</sup>やローカル 5G/RSU<sup>15</sup>といった新規格の通信インフラを構築し、その性能を検証することに主眼を置いていた。これに対し、本実証は、バックホール不要で既存の LTE 網を簡易な技術であるレピーターで補完・拡張するという、より低コストで社会実装しやすいアプローチを検証する点に新規性がある。また、市街地や平地でのスポットカバー事例と比較し、本実証における LTE レピーターの運用は、山間部のトンネル出入口という強遮蔽条件下において、直接波との重畳・遅延条件を現地で検証し、干渉非発生の設計を提示した点に特徴がある。さらに、本実証は単に電波の到達可否だけでなく、実際に自動運転車両を走行させ、遠隔監視に必要な映像・音声伝送が KPI/KGI を満たすかという「動作品質」まで踏み込んで評価する点で、より社会実装に近い実証となっている。

## 5) 検証条件

本実証における不変の実証条件は以下の通りである。

---

<sup>14</sup> 令和 6 年度実証事業-北海道上士幌町: [トンネル内のレベル 4 自動運転実現に向けた電波環境整備の実証](#)

<sup>15</sup> 令和 6 年度実証事業-石川県小松市: [ローカル 5G を活用した高速大容量データ通信および高速走行車両検知技術の実証](#)

<sup>16</sup> 令和 6 年度実証事業-秋田県北秋田郡上小阿仁村: [ローカル 5G と地域イントラネット活用による地域移送サービスの効率化](#)

表 4.1-2 検証条件

検証条件	理由
地理的条件	<p>LTE レピーターの設置場所選定においては、電波干渉を避けるため基地局が密集する市街地のような地域は回避した。また、その内部が不感エリアとなっている点、見通し(Line of Sight)が確保できる点、および LTE レピーターの設置が可能である点を満たすことから、本実証場所として須田トンネルを選定した。トンネル内部および入口周辺の電波測定結果は図 4.1-6 と図 4.1-7 に示す。</p> <p>また、当該地域は中山間地域であり周辺の既設基地局は一つしかなく、須田トンネルを含めた周辺およそ 1~2km の範囲の通信網はほぼこの基地局のみでカバーしている状態である。</p>
時間的条件	<p>本実証の期間は 2025 年 12 月 15 日から 2025 年 12 月 22 日までの内、平日 6 日間とした。この期間は、須田トンネル内部への電波延伸を実現する上で必要な LTE レピーター設置位置の検討や、土地利用に関する各種申請を経て LTE レピーター設置工事を完了させ、安定した電波測定を行うことが可能になる最適な時期として設定したものである。</p> <p>なお、本実証エリアでの通行量は 1 日を通して一定であることから、時間帯による電波環境の変化は発生しないと判断した。</p>
その他条件	<p>参考として天候状況を記録（出典：気象庁<sup>17</sup>）</p> <p>2025 年 12 月 15 日(月) 曇り時々晴れ</p> <p>2025 年 12 月 16 日(火) 晴れ時々曇り 一時雨</p> <p>2025 年 12 月 17 日(水) 雨のち曇り 時々晴れ</p> <p>2025 年 12 月 18 日(木) 晴れ時々曇り</p> <p>2025 年 12 月 19 日(金) 晴れ時々曇り</p> <p>2025 年 12 月 22 日(月) 晴れ一時曇り</p>



図 4.1-5 須田トンネル

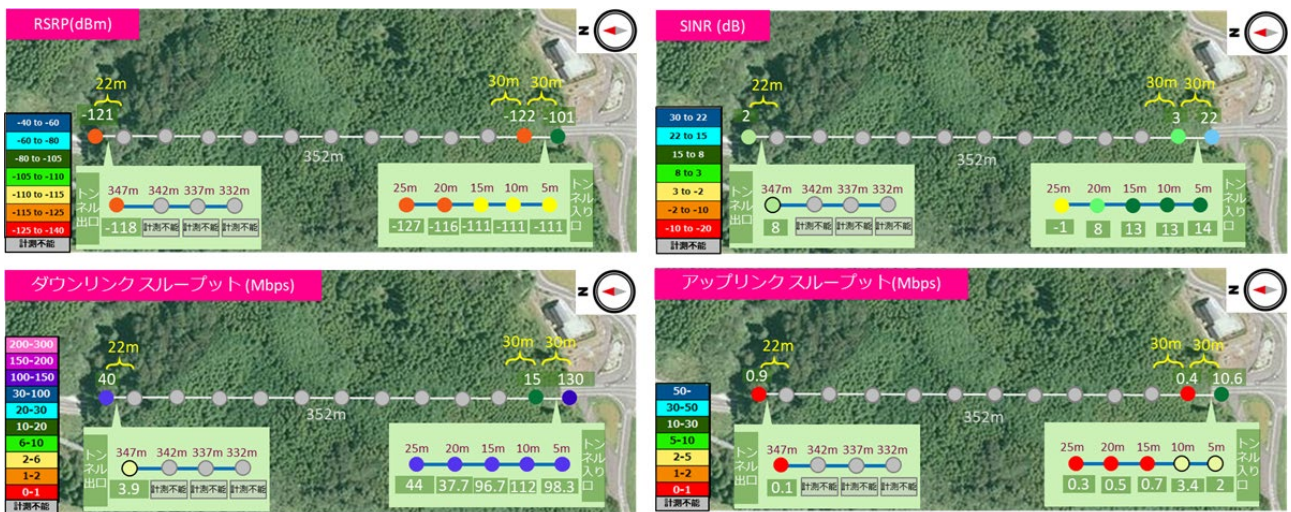


図 4.1-6 須田トンネル内部(不感エリア)におけるレピーター設置前の通信状況

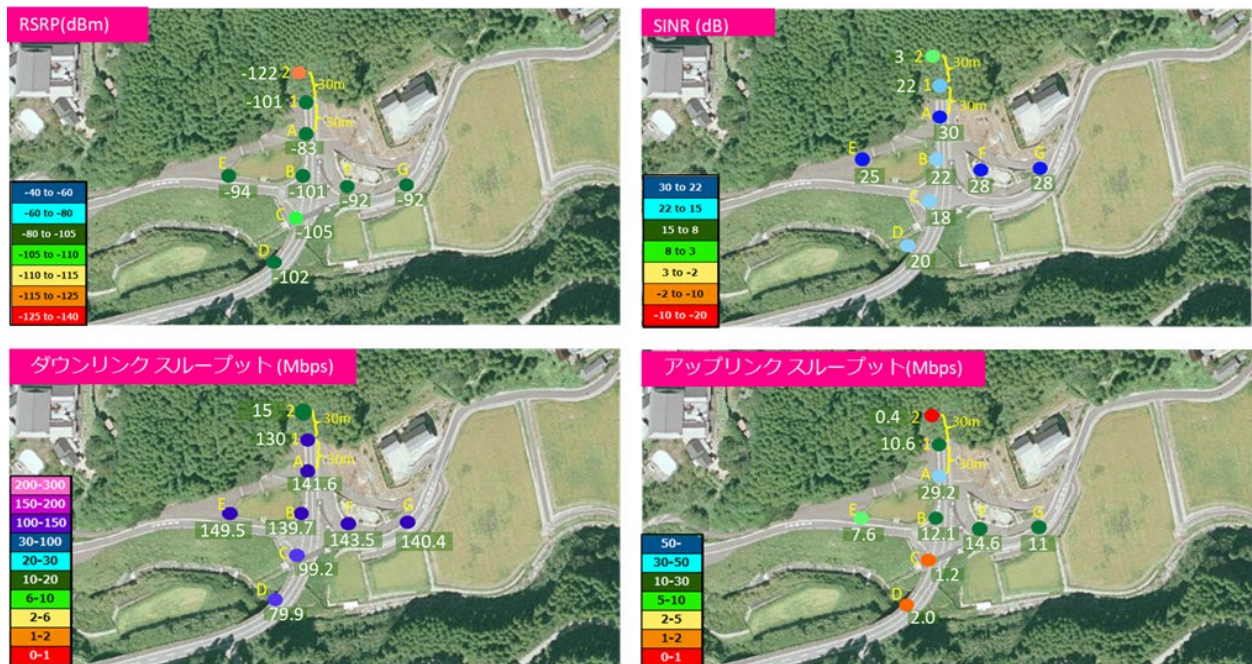


図 4.1-7 須田トンネル入口周辺におけるレピーター設置前の通信状況

LTE レピーター設置前は、トンネル入口から 30m を超過した地点で通信が圏外となる状況であった。また、アップリンク スループットはトンネル入口から 5m を超過した地点以降、1Mbps 未満に低下しており、遠隔監視システムからの映像を安定的に送信することは困難な状況であった。

なお、特にトンネル入口 0m~15m 程度の区間で RSRP が-111dBm 程度の電波強度であるにもかかわらず、100Mbps 前後のダウンリンク スループットが観測された区間があった。この現象は、RSRP が比較的低い状況下でも、当該測定タイミングにおいて他のユーザーによる帯域利用が極めて少なく、利用可能な無線リソースがほぼ測定端末に割り当てられたため、一時的に高いスループットが

17 以降、気象データは気象庁 HP を元に作成: [気象庁 Japan Meteorological Agency](http://www.jma.go.jp/jma/)

実現されたものと推測される。LTE レピーター設置後の実証においても、同様の条件が成立した場合にダウンリンク スループットが向上する可能性を考慮する必要がある。

## 6) 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
(1)	須田トンネル内部および周辺の通信品質の計測
(2)	遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証
(3)	遠隔監視映像品質の計測
(4)	遠隔監視映像の安定性の評価

### (1) 須田トンネル内部および周辺の通信品質の計測

通信品質について、本実証対象である須田トンネルとその周辺地域で以下の 4 つの手段をもって測定を実施した。本測定は、LTE レピーター設置による須田トンネル内部および周辺地域の通信カバレッジと品質の改善効果を定量的に評価することを目的としている。

#### a. レピーター設置による通信環境の変化の事前検証

目的:

LTE レピーターの設置が周辺地域の通信環境に与える影響、RSRP の変化を基にして通信品質がどのように変化するかを事前に把握する。検証は机上で行い、これにより LTE レピーター設置によって周辺地域の通信品質を損なうことなく、安定した通信環境を維持できることを確認する。

シミュレーション対象評価項目:

RSRP

測定手法:

既設基地局と LTE レピーター設置予定地を中心とした約半径 1km の周辺地域(トンネルの内部は除く)における通信状態を、LTE レピーター設置前と設置後について通信環境シミュレーションを行う。

#### b. 須田トンネル周辺の電波測定車による走行測定

目的:

LTE レピーター設置が須田トンネルおよび周辺地域の道路沿いの通信カバレッジと品質に与える影

響を広範囲で把握する。この測定は、自動運転車両に近い速度での走行時における通信品質を評価し、実証の前に LTE レピーターの配置位置の最適性を確認することを目的としている。

詳細な測定項目：

PCI、eNBID、RSRP、RSRQ<sup>18</sup>、SINR、アップリンク スループット、ダウンリンク スループット

測定手法：

須田トンネル内部を含む周辺地域約 1.5km 以内の道路を電波測定車両で移動しながら、GPS データとともに通信品質を計測する。計測範囲を図 4.1-8 に示す。走行速度は平均 30~50km で、1 秒間隔で上記計測項目を連続的に取得する。LTE レピーター設置前と設置後の両者のタイミングで同様の計測を行い、データ差分を把握する。

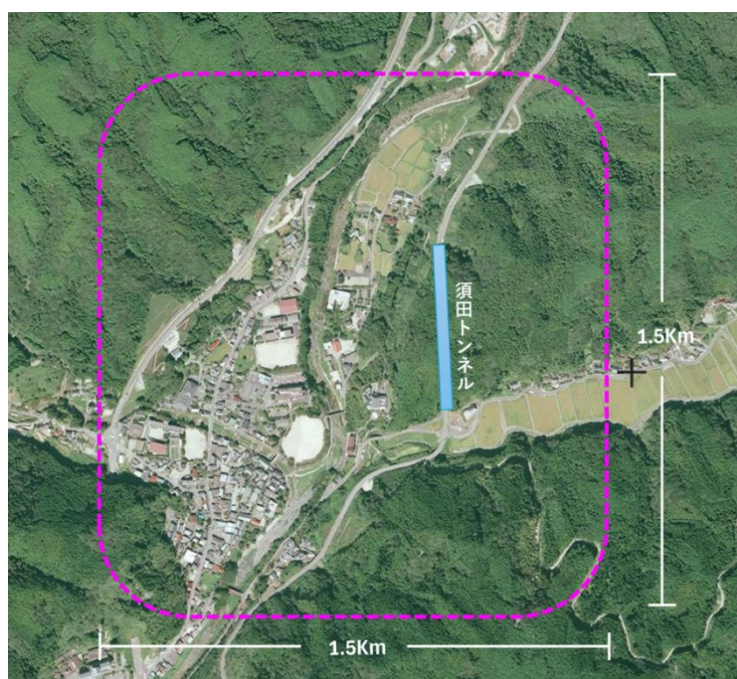


図 4.1-8 電波測定車による走行測定の計測範囲

### c. 須田トンネル内部・周辺の定点測定

目的：

須田トンネル内部とその周辺における LTE レピーターによる電波延伸の具体的な効果と、各地点での詳細な通信品質の変化をピンポイントで計測し把握する。この測定は、毎回同じ地点で計測することで LTE レピーターの設置前と設置後での通信品質の変化を明確かつ分かりやすく比較・評価することを目的としている。LTE レピーター設置前後の通信環境を把握することで、LTE レピーターが須田トンネル内部における電波延伸にどれだけ寄与しているかを確認する。

詳細な測定項目：

<sup>18</sup> RSRQ(Reference Signal Received Quality):基準信号受信品質

PCI、RSRP、RSRQ、SINR、レイテンシー、アップリンク スループット、ダウンリンク スループット

測定手法：

須田トンネル内部においては入口から出口まで30m間隔で、周辺においては必要な間隔をおいて測定地点を設定する。各測定地点では測定用端末(AQUOS zero 6)にインストールした通信品質測定ツール「NetPulse」を用い、3回の測定を行って結果の平均値を求める。LTEレピーター設置前と設置後の両者のタイミングで同様の計測を行い、データ差分を把握する。また、トンネル内部においては電波圏外箇所を詳細に把握するために、圏外を確認した地点から5m間隔で測定箇所を再設定して計測した。



図 4.1-9 NetPulse を使用した測定の様子

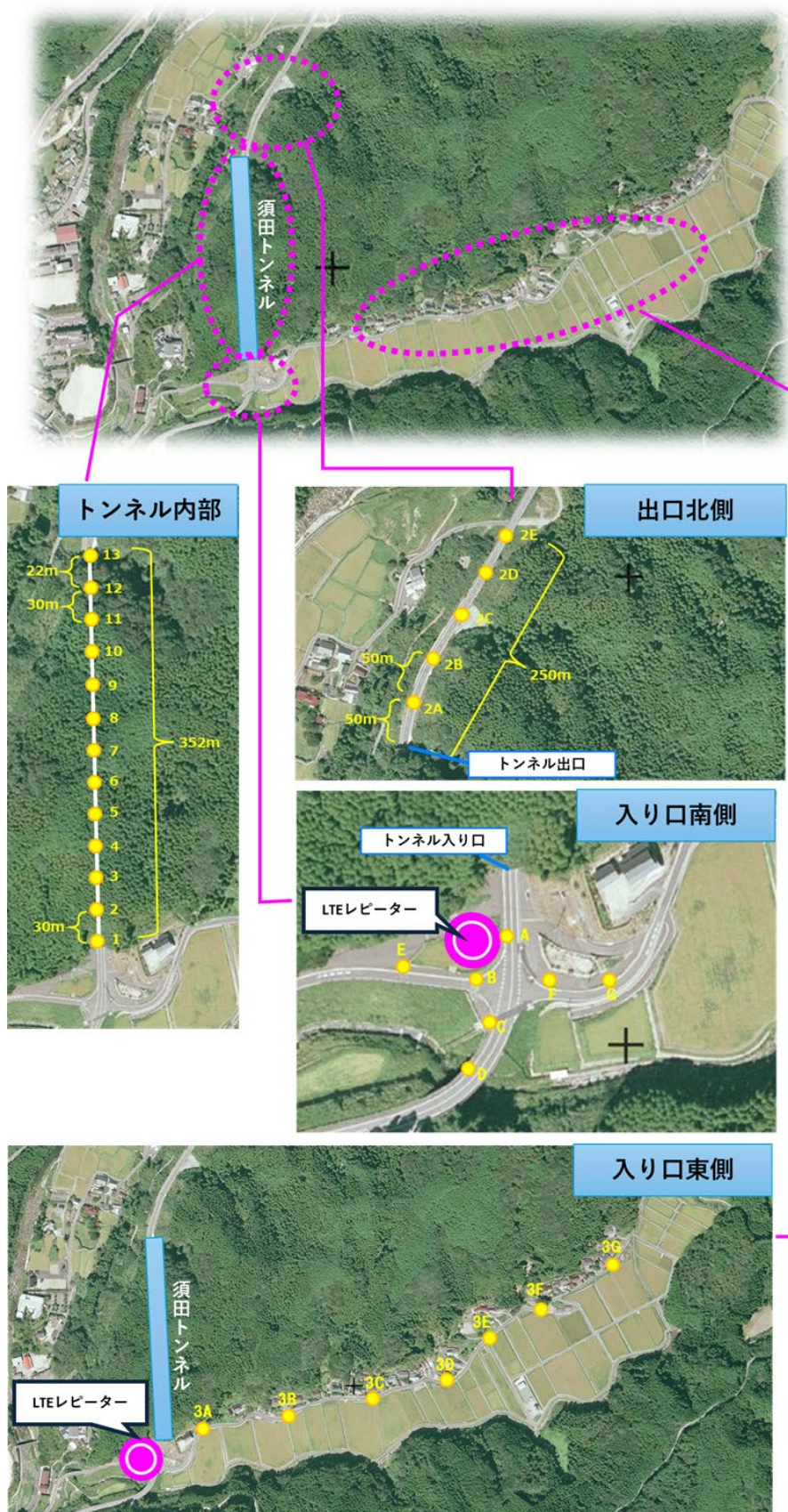


図 4.1-10 定点測定の見測箇所

#### d. 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定

目的：

須田トンネル内部を走行する際の自動運転車両内における通信品質を把握する。走行中の通信品質の連続的な変化を把握し、自動運転車両からの遠隔監視用の映像送信が安定的に行えるかを確認する。

詳細な測定項目：

PCI、RSRP、RSRQ、SINR、アップリンク スループット

測定手法：

自動運転車両に設置された遠隔監視映像送信機器に測定用端末（Windows PC）を接続、遠隔監視映像が送信されている間、測定用端末にインストールした無線ネットワーク測定ツール「XCAL」で通信品質を測定する。

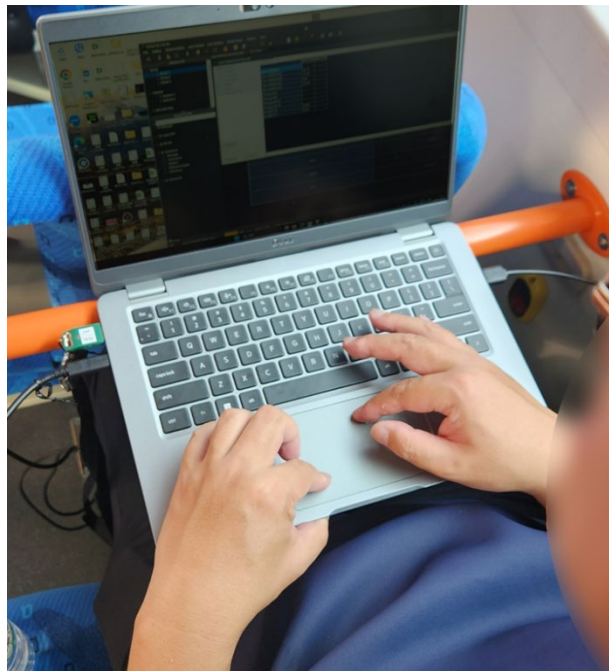


図 4.1-11 XCAL による測定の様子

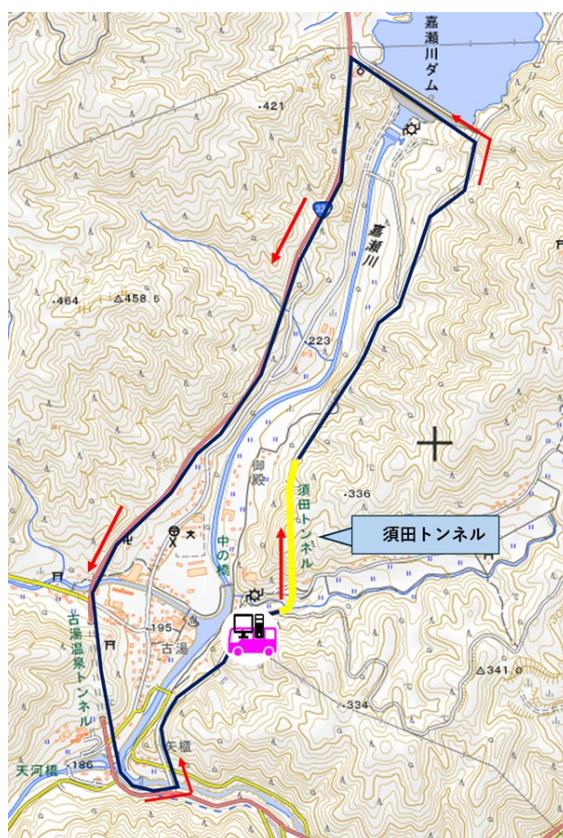


図 4.1-12 自動運転車両の走行ルート

## (2) 追加検証:遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証

本検証項目は、本実証にご協力いただいている東京科学大学の阪口啓副学長より、「トンネル内環境下では電波の反射や回折があるため、アンテナの向きが通信品質に大きく影響する。信頼性のある安定した映像送信のために、アンテナ設置向きを検証しておくべき」との貴重なご助言をいただいたことを受け、急遽追加実施したものである。

遠隔監視映像を送信する LTE ルーターが持つ 2 本のアンテナについて、トンネル内部で遠隔監視映像を安定的に送信するために、LTE レピーターに対する最適な設置向きを検証する。



図 4.1-13 映像送信用 LTE ルーターとアンテナ

目的:

トンネル環境において、LTE レピーターからの電波を受信・送信する遠隔監視映像送信機器の通信性能を最大化するための、アンテナ(2 本)の最適な設置向きを特定する。これにより、安定した映像送信を実現するための実践的な設置ガイドラインを確立する。本検証では、帯域幅性能測定ツールである「iPerf3」を用いて純粋な通信性能面の評価を行い、遠隔監視映像の送信に十分耐えうる通信環境が構築されているかを確認する。これは遠隔監視映像の送信に問題が発生した場合において、それが通信環境に起因する問題なのか、映像送信機器側の問題なのかを切り分けるための基礎データとすることを目的としている。

詳細な計測項目:

RSRP、SINR、RSRQ、アップリンク スループット

測定手法:

須田トンネル内部の複数地点(入口 0m 地点、中央約 200m 地点、出口 352m 地点)を計測地点に設定。遠隔監視映像送信機器とそれに繋いだ 2 本のアンテナを各計測地点に運搬し、以下図 4.1-14 に示す 4 種のパターンで設置向きを変化させ、通信環境品質の計測を行う。

「XCAL」をインストールした測定用端末と、帯域幅性能測定ツールである「iPerf3」をインストールした端末を遠隔監視映像送信機器に接続し、「iPerf3」にて遠隔監視映像と同等の通信量をアップリンク方向に送信しながら「XCAL」で 1 分間の計測を行いその平均値を求める。

なお、「iPerf3」は安定したデータ量を継続的に生成するため計測条件を均一に保つことができることから、本測定では映像送信中の測定ではなく「iPerf3」を用いて映像と同等量のデータを送信する測定を行うこととした。「iPerf3」のコマンドは以下とする。

```
「iperf3 -u -b 3M -t 9999 -i 1 -P 1」
```

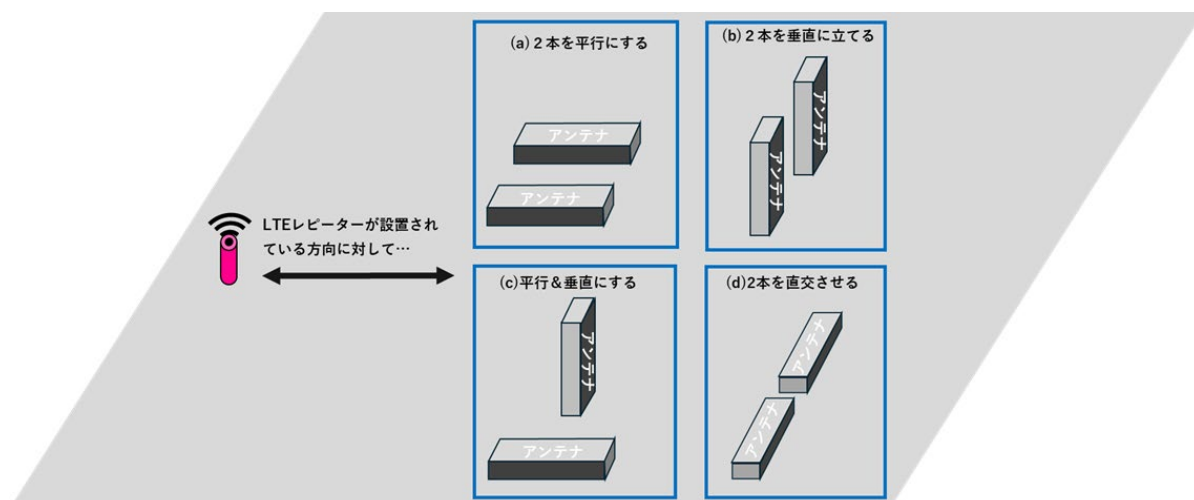


図 4.1-14 遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証パターン

計測地点は「①トンネル入口(0m 地点)」「②トンネル中央(約 200m 地点)」「③トンネル出口(352m 地点)」の 3 つとし、LTE レピーターからの距離とトンネル内位置による変化も計測の考慮に入れた。計測地点を図 4.1-15 に示す。



図 4.1-15 アンテナ設置向きの計測地点

### (3) 遠隔監視映像品質の計測

#### a. 遠隔監視映像通信統計情報取得機能の開発

目的:

トンネル走行時の遠隔監視映像の品質確認を行うため、送信映像の統計情報を取得可能とする。

統計情報取得対象項目:

解像度、フレームレート、ビットレート、ラウンドトリップタイム(Round Trip Time、以降 RTT)、ジッター

開発機能詳細:

車両から送信された映像はクラウド上のサーバーを経由して遠隔監視室に送られる。車両からのアップロード、遠隔監視室へのダウンロードそれぞれの経路で映像品質を確認可能とするため、通信統計情

報は車両-クラウド間、クラウド-遠隔監視室間を分けて取得可能な形式とする。

取得した通信統計情報は映像ストリームに紐づく時系列データとして 5s 間隔でクラウド上に保存される。

## b. 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定

目的：

条件不利地域においても安定した遠隔監視の遂行が可能か確認するため、須田トンネル内部を走行する際の遠隔監視映像の品質を確認する。

詳細な計測項目：

解像度、フレームレート、ビットレート、RTT、ジッター、通信遅延値

測定手法：

自動運転車両に搭載した映像送信 ECU より車外映像、車内映像の 2 ストリームを送信する。

トンネル走行中に送信された映像の統計情報を確認する。

また、走行中に送信された映像を遠隔監視室で録画し、End-to-End の通信遅延値を計測する。

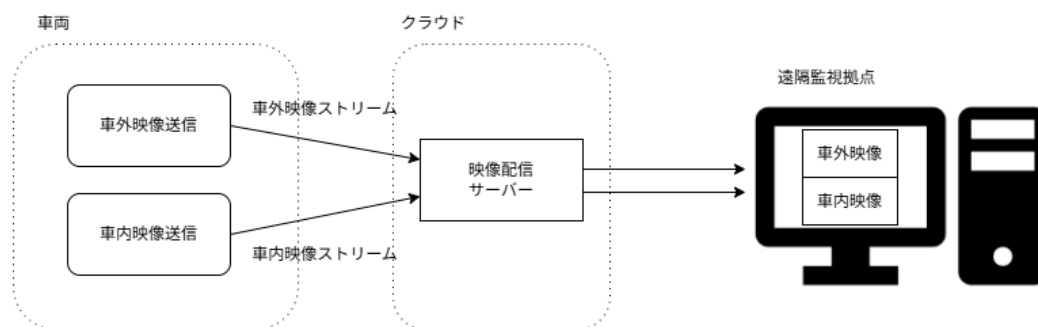


図 4.1-16 ストリーム構成

測定条件：

各試験において録画した動画を 1 フレーム毎コマ送りで再生し、録画した遠隔監視映像のシステム時刻表示と車内遠隔監視映像に映る車内時計の時刻表示の差を確認することで通信遅延値を求める。

通信遅延値の測定ポイントはトンネル進入直後、トンネル中間地点、トンネル出口の 3 点とする。

計測対象区間：

通信統計情報の計測対象区間を示す。

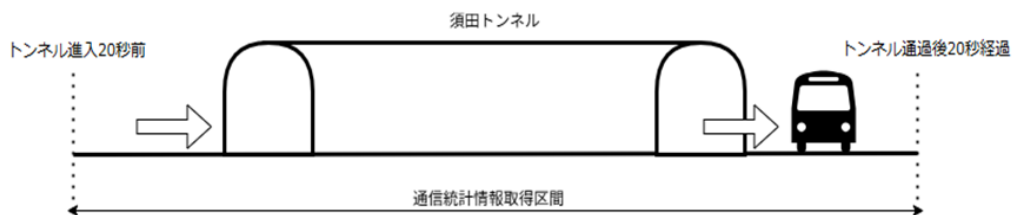


図 4.1-17 通信統計情報取得区間

通信統計情報はトンネル進入 20 秒前の時点～トンネル通過後 20 秒経過した時点までを取得範囲とする。

通信遅延値の測定ポイントはトンネル進入直後、トンネル中間地点、トンネル出口の 3 点とする。

#### (4) 遠隔監視映像の安定性の評価

目的：

遠隔監視システムが受信した映像に途切れやフリーズが発生していないかを把握する。

詳細な計測項目：

須田トンネル通過時の遠隔監視映像のノイズ、カクツキ、コマ落ちが発生した時間。

測定手法：

録画された遠隔監視映像をアンケート対象者に提示し、映像評価を実施する。各遠隔監視映像につき、アンケート対象者 5 名(遠隔監視者 1 名と映像評価者 4 名)が回答する。アンケート対象者の映像評価経験の有無(過去に映像(動画、静止問わず)の品質や特性を評価した経験があるか)、評価指標に関する知識の有無(評価指標(例:解像度、フレームレート、圧縮ノイズ、動きの滑らかさ等)や評価手法に関する専門知識があるか)を、表 4.1-3 に示す。

表 4.1-3 アンケート対象者の属性

アンケート対象者	映像評価の経験の有無	評価指標に関する知識の有無
遠隔監視者	なし	あり
映像評価者 1	なし	なし
映像評価者 2	なし	なし
映像評価者 3	あり	なし
映像評価者 4	あり	なし
映像評価者 5	なし	あり
映像評価者 6	あり	あり

なお、本実証における「遠隔監視者」とは、下記の知見を有する映像評価者のことを指す。

・遠隔監視経験者から知見の共有を受け、遠隔監視の実施方法を十分に理解している

- ・遠隔監視映像と車両に搭載されているカメラの画角の関係を正確に理解している
- ・遠隔監視室で表示される映像には通信遅延が含まれることを理解している

## 7) KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	自動運転車両のカメラ映像の安定性:遠隔監視システムが受信した映像に途切れやフリーズが発生しないこと。
定量評価	(2)	基地局 → LTEレピーター → 基地局電波測定車までの通信遅延値:500ms以下
	(3)	トンネル入口から出口までのモバイル通信要件 通信速度:1Mbps 以上 受信強度(RSRP):-110dBm 以上 受信品質(SINR):3dB 以上 必要 RB 数:1 秒当たり平均で 3RB 以上
	(4)	電波延伸距離:352m
	(5)	遠隔監視システムが受信する映像品質の要件: 画質:480p (854 x 480) フレームレート : 15fps 最大許容遅延 : 1000ms 未満 ビットレート:1Mbps 以上

(1) 自動運転車両のカメラ映像の安定性:遠隔監視システムが受信した映像に途切れやフリーズが発生しないこと。【定性評価】

目標値の詳細:

本実証では不感エリアであるトンネル内部で遠隔監視システムが求める映像品質の要件を満たし、遠隔監視が途絶えることなく実施でき、有事の際には遠隔から消防機関等に通報ができることを目標とする。本項目においては、トンネル通過時に、遠隔監視映像にノイズ、カクツキ、コマ落ちが発生していない、または許容範囲であることをもって目標達成とする。

目標値の設定の妥当性・設定理由:

既に自動運転車両の遠隔監視で利用している遠隔監視システムが求める最低限の映像品質の要件以上を満たすよう、通信の目標を設定することが妥当と考えられる。遠隔監視員からの遠隔監視映像に対する要望は「何か起きて車が止まった時に状況を確認できる」ことであり、遠隔監視映像にノイズ、カクツキ、コマ落ちが発生していなければ、状況を確認可能であると考えられる。

(2) 基地局 → LTE レピーター → 基地局電波測定車までの通信遅延値:500ms 以下【定量評価】

目標値の詳細:

LTE レピーターを経由した通信における基地局と車両間の通信遅延値を計測、評価する。遅延値の算出は RRC 接続シーケンスに注目した。具体的には、「LTE RRCConnectionRequest」メッセージの送信時刻と「LTE RRCConnectionSetup」メッセージの受信時刻の差分を算出することで、初期接続確立にかかる遅延時間を評価した。RRC 接続シーケンスは、端末が基地局との間で直接行う制御処理の一つであり、基地局との通信における遅延を判断するために有効な指標であると考えられる。RRC 接続確立シーケンスの参考図を図 4.1-18 に示す。

目標値の設定の妥当性・設定理由:

本実証で使用する遠隔監視システムで許容される最大遅延時間は、モバイル通信網を経由することを想定した Glass to Glass で 1000ms 未満である。映像の遅延は監視者の判断速度に直結するため、基地局との通信経路における遅延を 500ms 以下とすることで、映像処理や表示にかかる時間等を考慮してもシステム全体の遅延要件を満たせることを目指す。また、LTE レピーターはその特性上、信号の中継処理による遅延が発生するため、このレピーターによる追加遅延を含めても、遠隔監視映像の送信に必要な通信品質を維持できることを確認する。

### 5.3.3 RRC connection establishment

#### 5.3.3.1 General

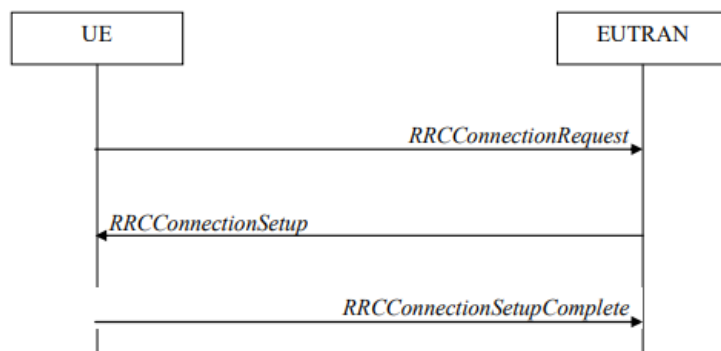


Figure 5.3.3.1-1: RRC connection establishment, successful

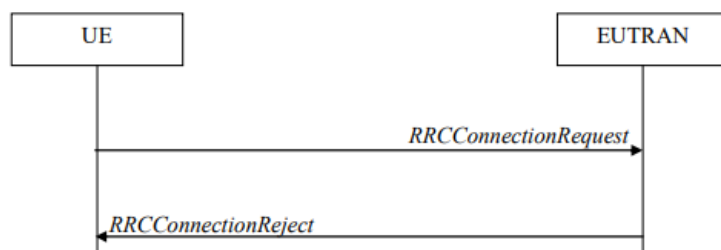


Figure 5.3.3.1-2: RRC connection establishment, network reject

図 4.1-18 RRC 接続確立のシーケンス(3GPP TS 36.331)

目標値の測定手法:

無線ネットワーク測定ツール「XCAL」をインストールした測定用端末にスマートフォンを接続し、スマートフォンの機内モードを ON/OFF することで、LTE 通信の RRC 接続シーケンスを意図的に起動させる。このシーケンスにおいて、端末から基地局への「LTE RRCConnectionRequest」メッセージ送信時刻と、基地局からの「LTE RRCConnectionSetup」メッセージ受信時刻を「XCAL」を用いて記録する。これらのメッセージの送受信間隔は、RRC 接続確立における往復の遅延時間に相当する。本計測では、これを二分の一とすることで、基地局から端末への片方向の遅延時間として算出する。

測定場所を須田トンネル内部の入口(0m 地点)と出口(352m 地点)の 2 箇所に設定し、場所ごとに 10 回の計測を行い、その平均値を求める。

本計測では、測定ポイントを固定し、同一地点での繰り返し測定によりデータの精度を確保することを主眼としたため、車両の移動による測定誤差を排除する観点から、基地局電波測定車は使用せずに徒歩での定点計測を実施する。

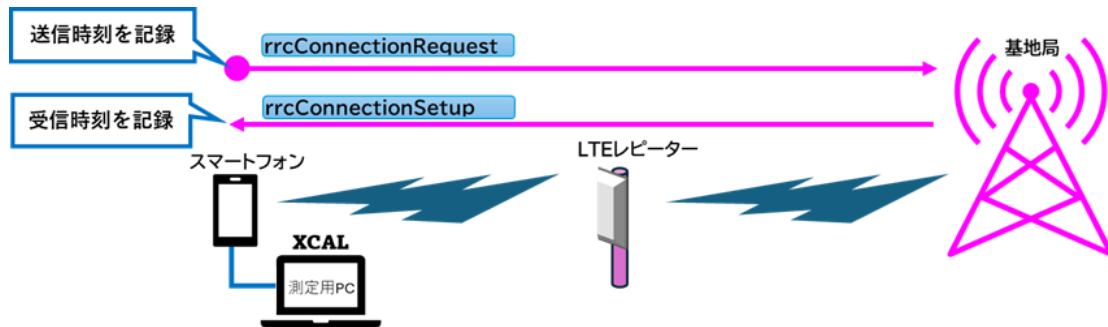


図 4.1-19 計測方法の模式図

(3) トンネル入口から出口までの通信モバイル通信要件【定量評価】

- 通信速度:1Mbps 以上
- 受信強度(RSRP):-110dBm 以上
- 受信品質(SINR):3dB 以上
- 必要 RB 数:1 秒当たり平均で 3RB 以上

目標値の詳細:

自動運転車両からの遠隔監視映像をトンネルという不感エリアにおいて安定して送信するためには、高信頼な通信環境の構築が不可欠である。トンネル入口から出口までの全区間において、自動運転車両からの遠隔監視映像の安定した送信に必要な通信性能を網羅的に評価することで、安全かつ円滑な自動運転の運行の実現に繋げる。

目標値の設定の妥当性・設定理由:

・通信速度:1Mbps 以上について

1Mbps という通信速度は、一般的な SD 画質(約 480p)程度の映像であれば、遠隔監視員がリアルタイムに近い形で確認することが可能な水準であり、これ以下では映像のコマ落ちや解像度の低下、あるいは大幅な遅延が発生し得る。遠隔監視映像の監視においては、車両の状況を正確に把握し、迅速な判断を下すことが重要であり、特に事故発生時等の緊急時に状況を把握するための映像伝送は極めて重要である。1Mbps という通信速度はその最低限の映像品質とリアルタイム性を確保するために必要である。

・受信強度(RSRP):-110dBm 以上について

RSRP は端末が基地局から受信する参照信号の平均電力を示し、電波の良好さを示す主要な指標の一つである。この KPI は、安定した通信リンクを確立し維持するための電波強度を保証するために設定した。-110dBm という基準は、一般的にモバイル通信サービスが安定して提供されるための最低限の電波強度として広く認識されている。RSRP が低いと、たとえ通信速度の要件を満たしていても通信が不安定になったり途切れたりするリスクが高まる。特にトンネル内は電波が減衰しやすく、反射や回折によるマルチパスの影響も受けやすい特殊な環境であるため、安定した通信品質を維持するためにはこの電波強度の確保が極めて重要となる。十分な RSRP があれば、通信の切断を防止でき、遠隔監視映

像の安定的な伝送を実現することができる。

また、本実証場所のような干渉源が限定的で他の通信端末も比較的少ない環境下においては、RSRP-110dBm 以上が確保されていれば、遠隔監視映像の伝送に要求される SINR やスループットを維持できる可能性が高いと推測される。そのため、映像伝送の実現可否を評価する実用的なしきい値として RSRP-110dBm 以上と設定する。

・受信品質(SINR):3dB 以上について

SINR は信号電力と干渉電力およびノイズ電力の比率を示し、通信の品質、特にデータの誤り率に直結する重要な指標である。この KPI は、データ伝送の信頼性と効率性を確保するために設定した。SINR が低いと遠隔監視映像の伝送において、映像データの誤りが発生しやすくなり、映像の乱れやブロックノイズの発生、再送処理の増加による遅延を招くこととなる。3dB という基準は、安定した映像ストリームを確保するために必要な最低限の通信品質レベルである。この SINR を確保することで、前述の通信速度 1Mbps 以上という要件を安定して達成し、遠隔監視映像の送信においても高い信頼性とリアルタイム性を維持することができる。

・必要 RB 数:1 秒当たり平均で 3RB 以上について

RB(Resource Block)は、LTE における無線リソースの最小単位であり、データ伝送に割り当てられる物理的な帯域幅を示す指標である。本 KPI は、遠隔監視映像の送信に必要な帯域が、安定的に確保されているかを副次的に確認するために設定した。一般的に無線通信におけるスループットは RSRP や SINR といった無線品質指標によって大きく変動し、RB 数のみで直接的に映像伝送の品質を判断することは困難である。しかし、本実証ではリソースの割り当て状況を把握する参考情報として、1 秒当たり平均 3RB 以上という目標値を設けた。これは、1Mbps 程度のアップリンク スループットを安定的に維持するために必要となる最小限の無線リソース量を考慮したものである。

#### (4) 電波延伸距離:352m 【定量評価】

目標値の詳細:

設置した LTE レピーターによって電波がどれだけの距離にわたって延伸されるかを評価するものである。LTE レピーターの設置地点からトンネルの終端まで安定した通信が可能な電波が途切れることなく到達することを確認する。352m という距離は須田トンネルの全長に合わせて設定しており、トンネル全域での通信カバレッジ確保を目的としている。

目標値の設定の妥当性・設定理由:

トンネル内において、自動運転車両から遠隔監視映像を安定して送信するためには、トンネルの入口から出口まで途切れることのない安定した通信環境が必要である。須田トンネルの全長 352m に渡って電波が確実に到達することを確認することで、遠隔監視映像の送信に必要な通信カバレッジが確保されることを実証する。また、LTE レピーターが、トンネル内という電波が減衰しやすい特殊な環境において、効果的に電波を延伸できるソリューションであることを実証し、技術的に有効かつ適用可能な手

段であることを確認する。

(5) 遠隔監視システムが受信する映像品質の要件:

画質 : 480p (854 x 480)

フレームレート : 15 fps

最大許容遅延 : 1000ms 未満

ビットレート: 1 Mbps (を下回らない)

【定量評価】

#### a. 映像品質

車両周囲の状況確認として自動運転車両の近傍から 10m ほどの範囲内に存在する人、車両等が正しく認識できる画質の推奨値として、これまでの実証での動作実績をもとに設定。

#### b. 通信遅延値

通信遅延値はカメラ撮像から遠隔監視室での映像表示までを計測区間とする。

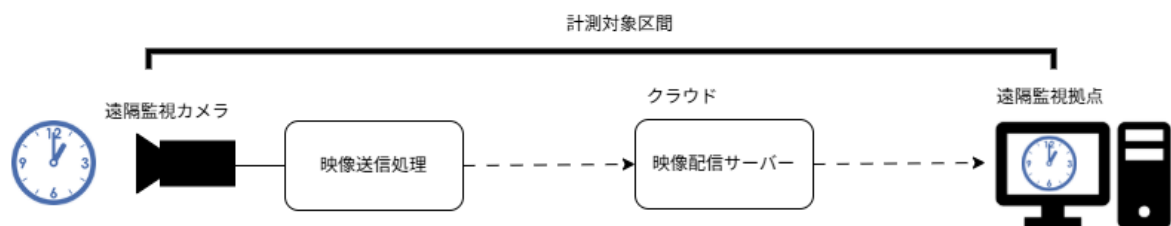


図 4.1-20 通信遅延計測区間

通信遅延値は下図の車内遠隔監視映像に映る車内時計の時刻と、遠隔監視室の PC で表示した GUI 上の時刻との差分を測ることで求める。



図 4.1-21 遅延値計測のための時刻比較

レベル4の自動運転車両走行時における遠隔監視は、車両停止後の状況確認を担うことが想定される。車両停止後の状況確認、停止状態からの発車指示を安全に行える遅延値として許容範囲と考えられる1000msを目標値として設定し、通信条件不利地域における検証を行う。

## 4.2 ②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保

### 4.2.1 遠隔監視に最低限必要な画質を見極め、それを使用して通信輻輳・通信品質低下発生時も安定した遠隔監視を可能とする

#### 1) 目的

##### (1) 課題

遠隔監視において、車両からの鮮明な映像・音声等を常時かつ低遅延で送受信できる連続的なV2N(Vehicle-to-Network)接続は不可欠である。

佐賀市では SAGA アリーナ開業によるイベント時の大規模な輸送需要が見込まれているが、大規模イベント会場付近等の通信輻輳環境下では、通信の途絶や大幅な通信速度の低下が発生するため、遠隔監視の要件を満たすことができない。これはレベル 4 自動運転の安全性、信頼性、および事業継続性に直接影響を及ぼす。

##### (2) 検証

本実証では、車載機器から取得した通信品質指標値と基地局から取得した通信輻輳指標値に基づき、通信輻輳の度合いを定量的に評価する。この評価結果に応じて遠隔監視映像の画質を変更する機能を実装することで、通信輻輳環境下における安定した遠隔監視オペレーションの継続を目指す。

遠隔監視オペレーションの継続が困難となる場合の通信品質指標値や通信輻輳指標値の判定条件に関する、一般的な公開基準は存在しない。このため、本実証を通じて、通信輻輳判定に用いるべき指標値、その判定条件、および閾値を見極めることを目的とする。

さらに、遠隔監視オペレーション遂行のための必要最低限の画質についても、一般的に公開された基準は存在しない。よって、本実証を通じてその基準を見出すことを目指す。

実際の通信輻輳環境下で遠隔監視映像を送信し、同環境下でも安定的な遠隔監視映像の送受信が継続可能であること、および遠隔監視オペレーションが正常に実行可能であることを、遅延値の測定と遠隔監視を行った者による映像評価結果の分析を通じて、定量的・定性的に検証する。

#### 2) 実証内容の詳細

自動運転車両の遠隔監視に必要な最低限画質、および通信輻輳環境下で画質をシステム最大画質<sup>19</sup>から最低限画質に切り替えるための閾値を決定する検証(事前検証)を実施する。

事前検証の結果から得られた最低限画質および、システム最大画質から最低限画質へ切り替える閾値を適用し、2025年10月30日(木)～11月3日(月・祝)に佐賀県佐賀市で開催される大規模イベント「佐賀インターナショナルバルーンフェスタ 2025」(以下、バルーンフェスタ)において、通信輻輳時、または通信品質低下時に遠隔監視オペレーションが正常に実行できることを検証(本検証)する。

<sup>19</sup> システム最大画質: 1920×1080 ピクセル 30fps(遠隔監視システムで設定可能な最大解像度、最大フレームレート設定)

バルーンフェスタ会場では、多数の来場者による通信トラフィックの大幅な増加が予測され、特に来場者による画像や動画の頻繁なアップロードが想定される。

このような混雑が予想される会場周辺において、自動運転車両の遠隔監視映像の画質を切り替えて送信し、遠隔監視を行った者による映像評価を実施する。

評価結果に基づき、通信輻輳時や通信品質低下時等の混雑状況下でも、映像の画質変更によって安定した遠隔監視オペレーションが実施可能であることを確認する。

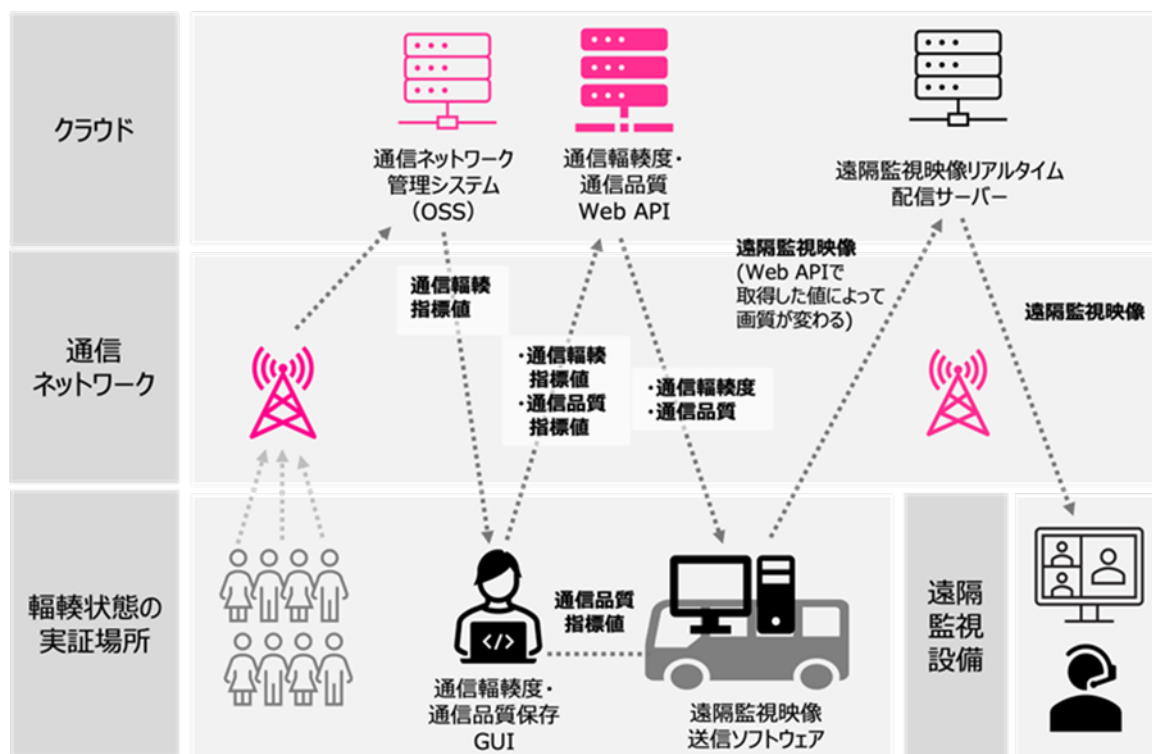


図 4.2-1 本実証のシステム構成

事前検証および本検証で実施する項目を以下に示す。

表 4.2-1 検証項目一覧

No	検証項目	事前検証	本検証
1	遠隔監視における必要最低限画質の決定	○	—
2	通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定	○	—
3	通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定	○	—
4	輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証	—	○

○:実施、—:実施せず

通信輻輳および通信品質低下が予想されるエリアや時間帯において、車両走行中では輻輳発生エリアに留まり続けることが困難である点を考慮し、事前検証および本検証は車両を停止させた状態で実施する。

## (1) 事前検証

自動運転車両の遠隔監視に必要な最低限画質、およびシステム最大画質から最低限画質に切り替える閾値を決定する検証を実施する。

表 4.2-2 事前検証の検証内容

検証項目 No	検証項目	検証内容
1	遠隔監視における必要最低限画質の決定	①複数の画質パターンを使用して、遠隔監視システムから映像伝送を実施する ②映像伝送時のビットレート・フレームレートを測定し、安定性を確認する ③遠隔監視映像に関するアンケートを実施する ④ビットレート・フレームレートの安定性とアンケート結果から最低限画質を決定する
2	通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定	①通信の輻輳が見込まれる場所で、遠隔監視システムのシステム最大画質と最低限画質を切り替え、映像伝送を実施する ②映像伝送時の通信輻輳指標値を確認する ③遠隔監視映像に関するアンケートを実施する ④通信輻輳状況とアンケート結果を分析し、通信輻輳判定の閾値を決定する
3	通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定	①通信の輻輳が見込まれる場所で、遠隔監視システムのシステム最大画質と最低限画質を切り替え、映像伝送を実施する ②映像伝送時の通信品質指標値を測定する ③遠隔監視映像に関するアンケートを実施する ④通信品質の測定結果とアンケート結果を分析し、通信品質低下判定の閾値を決定する

## (2) 本検証

通信の輻輳が予想されるバルーンフェスタ会場付近において、映像の画質変更によって安定した遠隔監視オペレーションが実施可能かどうかを確認する。

表 4.2-3 本検証の検証内容

検証項目 No	検証項目	検証内容
4	輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証	①通信の輻輳が発生する環境下において、遠隔監視システムのシステム最大画質と最低限画質を切り替え、映像伝送を実施する ②映像伝送時の遅延量を計測する ③映像伝送時の通信輻輳指標値を確認する ④映像伝送時の通信品質指標値を測定する ⑤遠隔監視映像に関するアンケートを実施する ⑥輻輳発生時のアンケート結果を分析し、映像の画質変更によって安定した遠隔監視オペレーションが可能かどうかを確認する

### 3) 利用技術

#### (1) 通信網

本実証では LTE 通信網を用いる。本実証で用いる遠隔監視システムは、車両停車時の原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度が確認可能な程度であれば、1Mbps 以上のアップリンク スループットで映像伝送が可能である。

また通信遅延においても、監視カメラから遠隔監視室までの通信遅延が 1000ms であり、5G 網ではなく LTE 網でシステム要件を満たしていると判断している。さらに、自動運転サービスが求められる地方都市や中山間部においては、通信環境としては LTE での環境整備が進み、普及されていることが多い現状においては、LTE を用いた実証が望ましいと判断している。

#### (2) 通信輻輳指標値の取得方法

本実証では、ネットワーク管理システム OSS から API 経由で基地局セルの通信輻輳指標値(端末収容利用率<sup>20</sup>、アップリンク リソースブロック使用率等)を取得した。OSS から取得されるデータはリアルタイムではなく、若干の遅延が存在するものの、将来的には RAN 側での準リアルタイムデータ取得が実現され、より現状に近い輻輳状況を取得できるようになる見込みである。

#### (3) 通信指標値の取得方法

楽天モバイル SIM を挿入した遠隔監視映像送信用の LTE ルーターと PC を USB Type-C ケーブルで接続し、無線ネットワーク測定ツールである XCAL を使用して LTE ルーターから RSRQ、SINR

<sup>20</sup> 端末収容利用率：基地局が接続可能な最大ユーザー機器(User Equipment)数に対する、接続ユーザー機器数の割合

等の通信品質指標を取得する。

この方法では LTE ルーターから直接値を取得できるため、LTE ルーターの近くで楽天モバイル SIM を挿入したスマートフォンを使用して計測する方法と比較し、より実態に即した値を取得できる。

XCAL を使用して通信品質を取得する構成により、1 秒間隔で定期的に、基本的な通信品質 (RSSI<sup>21</sup>、RSRQ、SINR)に加え PDCP スループット(実際に転送されたデータ量)等の重要な指標を取得できるようになり、試験結果の高度な分析が可能となった。

#### (4) 遠隔監視映像送信ソフトウェア

遠隔監視システムには、通信状況に応じて動画の解像度・フレームレートを動的に変更する機能は備わっているが、本実証では、通信輻輳時・通信品質低下時に、遠隔監視映像送信ソフトウェアの「最大」解像度・「最大」フレームレートを「遠隔監視に必要最低限」な値に設定する方式を採用する。本実証においてはターゲットビットレートの指定とともに送信映像の最大解像度、最大フレームレート設定を切り替える。解像度、フレームレートを落とした方がネットワーク状況の変化やパケットロスに対する耐性が高まり、フレームドロップによる影響も下げられるという仮定のもと、遠隔監視映像への影響を確認する。

遠隔監視映像送信ソフトウェアにおいて、映像送信中に最大解像度・最大フレームレートの組み合わせを変更するには動的な映像処理パイプライン構築の実現が必要となる。しかし、開発中の遠隔監視システムでは実現出来ていないため、本検証では映像送信開始時に、通信輻輳度・通信品質取得 Web API から取得した通信輻輳度・通信品質に応じて最大解像度・最大フレームレートの組み合わせを変更する形式とする。また、送信中には、最大解像度・最大フレームレートは変更されない。

輻輳環境下での検証においては『システム最大画質』と『必要最低限画質』の 2 つの組み合わせでの比較を行う。『システム最大画質』とは解像度、フレームレートを遠隔監視システムで送信可能な上限値に設定した状態を示し、『必要最低限画質』とは後述する事前検証結果から定めた遠隔監視オペレーション遂行に必要な最低限の値と考えられる解像度、フレームレートを設定した状態を示す。

#### (5) 通信輻輳度・通信品質 Web API

当機能は、Web API として Azure VM 上に構築される。

遠隔監視映像送信ソフトウェアは、当 API から取得した通信輻輳度・通信品質に応じて遠隔監視映像の画質を変更することにより、ネットワーク状況に応じたデータ送信量の最適化を行うことが可能である。

また Web GUI からは、通信品質指標値、通信輻輳指標値を Web API に保存できる。通信輻輳指標値については、OSS から API 経由で取得した値が、GUI に自動設定される。

API は、GUI で保存された通信輻輳指標値・通信品質指標値を、通信輻輳度・通信品質(0/1 の整数値)に変換して返す。

<sup>21</sup> RSSI(received signal strength indicator): 受信信号の強度

## (6) WebRTC

遠隔監視映像の通信プロトコルは WebRTC を採用している。

WebRTC は下記の特徴を持ち、遠隔監視映像の通信に適している。

- 低遅延な映像、音声通信が可能である
- 通信経路上のデータが暗号化されている

## 4) 必要性・緊急性・新規性

### (1) 必要性

通信輻輳は、レベル 4 自動運転の要件である遠隔監視映像送信に非常に深刻な影響を及ぼす。

通信輻輳は映像の遅延・品質低下・途絶を引き起こし、遠隔監視員はリアルタイムで現場の状況を正確に把握することが困難になり、遠隔監視オペレーションの実施に支障が出る。例えば、最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせる等の適切な対応を取ることができなくなる、等の悪影響が想定される。

通信輻輳は、都市部での通勤時間帯、ターミナル駅周辺での通勤電車停車・通過時、大規模イベント会場周辺等の状況において、全国的に起こりうる課題である。そのため、通信輻輳時での遠隔監視映像送信の継続を目指す本実証には必要性があると言える。

### (2) 緊急性

佐賀市の自動運転導入ルートである SAGA サンライズパークはアリーナを設置しており、コンサートやスポーツ試合等の大規模イベントが開催された際に、モバイル通信が輻輳し繋がりにくい状況や通信品質が劣化する状況が生じることで、レベル 4 要件である自動運転車両からの遠隔監視映像等のデータ送信に影響が及ぶ可能性がある。社会実装に向け、輻輳時の遠隔監視映像送信継続は喫緊の課題であり、緊急性があると言える。

### (3) 新規性

本検証では、ネットワーク管理システム OSS から API で取得した基地局セルの通信輻輳指標値(端末収容利用率、アップリンク リソースブロック使用率等)も輻輳判定に使用していることが特色である。適応映像制御技術(AV-QoS)を使用して遠隔監視映像送信の安定化を目指す実証<sup>22</sup>は存在するが、AV-QoS では、アプリケーションレイヤーにおいてスループット等の通信状況に応じて映像の解像度や圧縮率等を調整しており、基地局セルの通信輻輳指標値は使用しない。

また通信混雑状況下において、ネットワークスタイシング<sup>23</sup>・Mobile-QoS<sup>24</sup>等の 5G 技術を活用して通信の安定性確保を目指す実証や、将来の通信速度を予測する AI と監視カメラ映像中の重要領域

<sup>22</sup> 令和 6 年度横浜市 [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/001001867.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/001001867.pdf)

<sup>23</sup> 令和 7 年度仙台市 [https://pubjit.mri.co.jp/pjit\\_related/rcsad-info/eggghpc000000030i-att/2025072910rcsad-info\\_gaiyou\\_miyagi\\_sendai.pdf](https://pubjit.mri.co.jp/pjit_related/rcsad-info/eggghpc000000030i-att/2025072910rcsad-info_gaiyou_miyagi_sendai.pdf)

<sup>24</sup> 令和 6 年度横浜市 [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/001001867.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/001001867.pdf)

を判別する AI を用いて、映像の重点領域のみを高精細化して通信量削減を目指す実証<sup>25</sup>は存在するが、これらはすべて本実証とは異なり基地局セルの通信輻輳指標値は利用しておらず、また遠隔監視映像の画質(解像度・フレームレート等)は動的に変更されない。

## 5) 検証条件

事前検証、本検証それぞれの実施条件は下記の通りである。

### (1) 事前検証

#### a. 遠隔監視における必要最低限画質の決定

通信輻輳や通信品質低下時においても、遠隔監視オペレーションに支障をきたさない必要最低限の画質を決定することを目的とし、検証を実施する。

表 4.2-4 事前検証条件 1

検証条件	理由	選定結果
通信条件	輻輳条件下で実施する必要がないため、通信品質が良好であり、通信の混雑がないこと。	多摩川河川敷 東京都大田区西六郷
地理的条件	車両の駐車が可能で、検証のための広さを確保できること。	
時間的条件	事前調査に基づき、通信の混雑が発生していない日中時間帯であること。	2025年10月10日(金) 9:00~17:30
その他条件	参考として天候状況を記録	晴  (出典:気象庁)

#### b. 通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定

遠隔監視映像をシステム最大画質から最低限画質へ切り替える際の通信輻輳指標値と、その閾値を決定することを目的とし、検証を実施する。

本項目の検証条件は、次項の表 4.2-5 に「c 通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定」の検証条件と合わせて記載する。

#### c. 通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定

遠隔監視映像をシステム最大画質から最低限画質へ切り替える際の通信品質指標値と、その閾値を決定することを目的とし、検証を実施する。

<sup>25</sup> 令和6年度日立市 [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/001001867.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/001001867.pdf)

表 4.2-5 事前検証条件 2

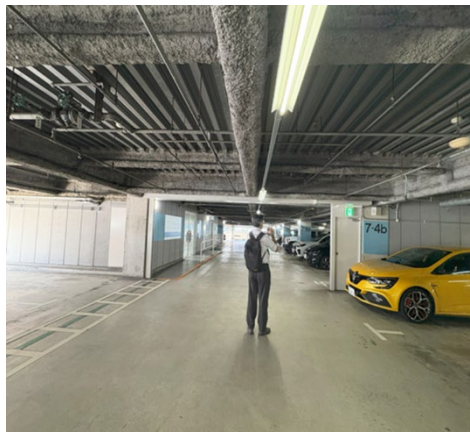
検証条件	理由	選定結果
通信条件	通信の輻輳が発生している状況下で検証する必要があるため、ネットワーク管理システム OSS による事前調査で、通信輻輳度(アップリンク リソースブロック使用率、ダウンリンク リソースブロック使用率、端末収容利用率)が高く、通信品質 (RSRQ、SINR)の低下が見込まれること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JR・小田急登戸駅近辺 神奈川県川崎市多摩区登戸</li> <li>・JR 新横浜駅近辺 神奈川県横浜市港北区新横浜</li> </ul>
地理的条件	車両の駐車が可能で、検証のための広さを確保できること。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・東京メトロ新宿三丁目駅近辺 東京都新宿区新宿 3 丁目</li> </ul>
時間的条件	事前調査に基づき、検証場所ごとに事前に通信の混雑が発生しやすい時間帯であること。	2025 年 10 月 14 日(火)～ 10 月 17 日(金) 各日 8:30～18:00
その他条件	参考として天候状況を記録	2025 年 10 月 14 日(火)曇 2025 年 10 月 15 日(水)曇 2025 年 10 月 16 日(木)雨 2025 年 10 月 17 日(金)晴 (出典:気象庁)



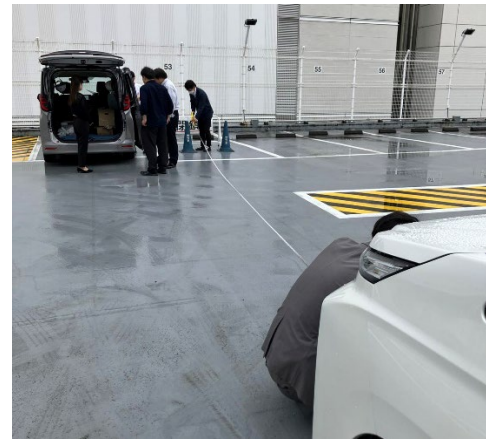
多摩川河川敷



JR・小田急登戸駅近辺



JR 新横浜駅近辺



東京メトロ新宿三丁目駅近辺

図 4.2-2 事前検証 実施場所

## (2) 本検証

通信輻輳の発生可能性が高い場所および時間帯において、安定した遠隔監視オペレーションが実施可能であるかを検証する。本検証では、事前検証で決定した閾値に基づき輻輳状態と判断された際、システム最大画質から最低限画質へ映像を切り替えて送信する。この送信された映像を映像評価者が評価することで、その有効性を確認する。

表 4.2-6 本検証条件

検証条件	理由	選定結果
通信条件	多数の来場者(※)が写真や動画をアップロードするため、通信トラフィックが増加し通信輻輳の発生が見込まれること	

地理的条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>佐賀市内で最も通信輻輳の発生が見込まれる、バルーンフェスタのメイン会場をカバーする基地局に接続可能であること</li> <li>自動運転車両を駐車できるスペースが確保されていること</li> <li>駐車した車両の周囲を歩行者が安全に通行できる十分なスペースがあること</li> </ul>	佐賀西部広域水道企業団敷地内 佐賀県佐賀市久保田町大字徳万
時間的条件	多数の来場者(※)が写真や動画をアップロードするため、通信トラフィックが増加し通信輻輳の発生がイベントや競技開催時間帯であること	2025年11月01日(土)～ 11月3日(月・祝) 6:00～17:00
その他条件	参考として天候状況を記録	2025年11月01日(土)晴 2025年11月02日(日)曇 2025年11月03日(月・祝)晴  (出典:気象庁)

(※)公式発表では、来場者数は2025年10月30日からの5日間で延べ80万人<sup>26</sup>



図 4.2-3 本検証 実施風景

<sup>26</sup> 2025 佐賀インターナショナルバルーンフェスタ 公式サイト [佐賀インターナショナルバルーンフェスタ](#)

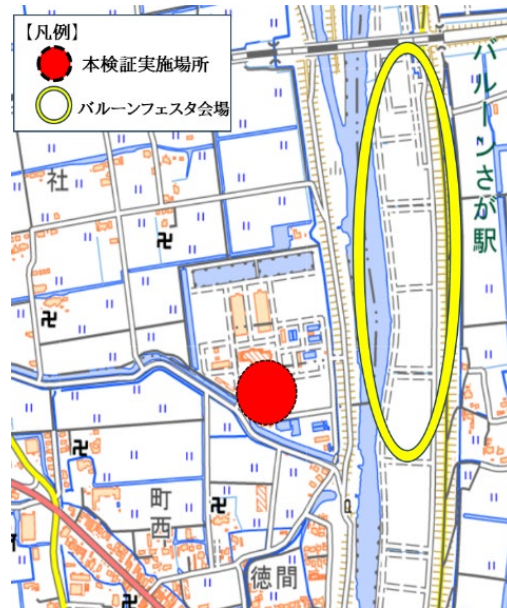


図 4.2-4 本検証実施場所とバルーンフェスタ会場

## 6) 開発・評価項目

開発・評価項目を表 4.2-7 に示す。

表 4.2-7 開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
(1)	通信輻輳度・通信品質 Web API の開発
(2)	遠隔監視映像送信ソフトウェアの開発
(3)	事前検証:必要最低限の画質および画質切替閾値の決定
(4)	本検証:輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証
(5)	遠隔監視動画品質要件
(6)	遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件
(7)	遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件
(8)	通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件

### (1) 通信輻輳度・通信品質 Web API の開発

背景:

遠隔監視システムが伝送する映像の画質を適切に切り替えるためには、ネットワークの輻輳状況や通信品質を正確に把握し、その情報に基づいて判断を行う必要がある。しかしながら、楽天モバイルの通信網における混雑状況を外部から取得する手段は公開されておらず、また自動運転車両から遠隔監視

システムへ通信品質を通知する既存の仕組みも確立されていない。

目的:

遠隔監視システムが映像の画質切り替えを判断するために必要な情報を提供することを目的とする。これを達成するため、ネットワークの輻輳状況を取得する機能を実装し、検証場所の通信品質を判定し、通信輻輳の発生状況を取得できる Web API を開発する。加えて、検証場所の通信品質指標値を入力できる Web GUI 画面も実装する。

開発機能詳細:

上記目的を達成するため、ネットワークの輻輳状況を取得する機能を実装し、実証実施場所の通信品質を判定し、通信輻輳の発生状況を取得できる Web API を開発する。加えて、実証実施場所の通信品質指標値を入力できる Web GUI 画面も実装する。通信輻輳判定結果および通信品質低下判定結果を遠隔監視システムに通知するための機能を Azure VM 上に構築する。

通信輻輳の判定機能は、ネットワーク管理システム(OSS)から通信輻輳指標値を取得する Web API を開発し、取得指標を閾値と比較して判定する仕組みを実装した。なお、OSS からの通信輻輳指標値の取得は、社内システム間の内部接続によって行われるため、外部には非公開の接続方式を採用している。

通信品質低下の判定機能は、Web GUI から通信品質指標値を入力し、入力した指標を閾値と比較して判定する仕組みを実装する。

システム構成およびインターフェース:

本システムの全体構成を図 4.2-5 に、主要な処理シーケンスを図 4.2-6 に示す。

また、開発した Web GUI の画面例を図 4.2-7 に示す。

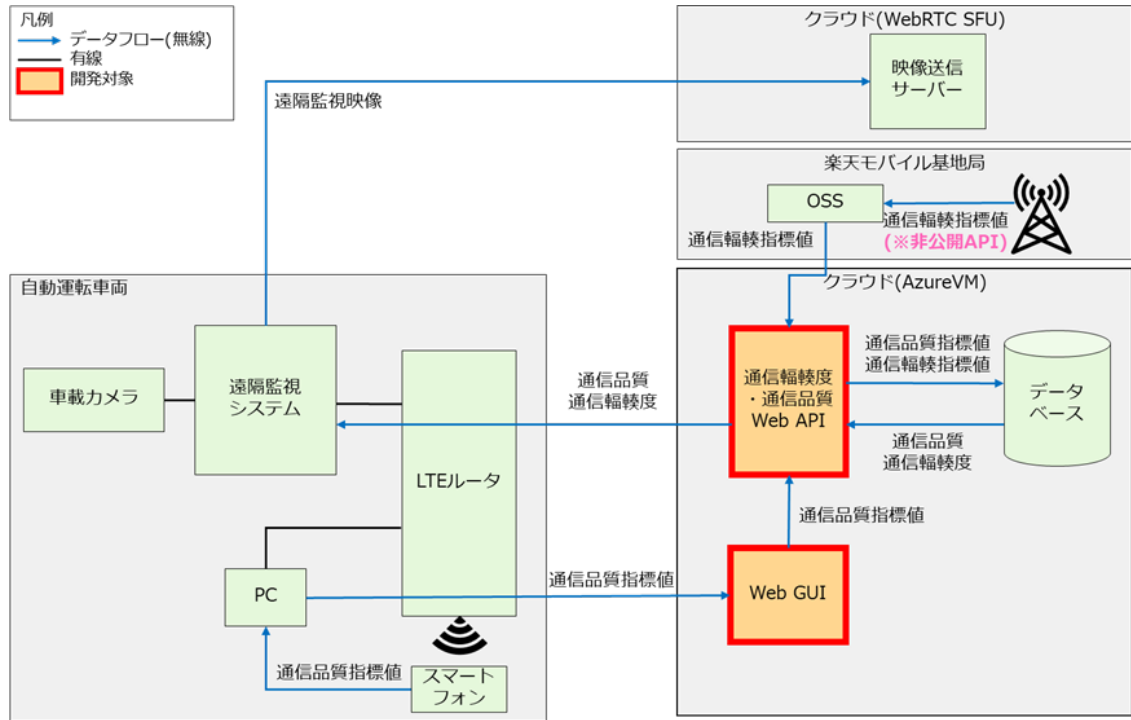


図 4.2-5 通信輻輳判定・通信品質低下判定のシステム構成図

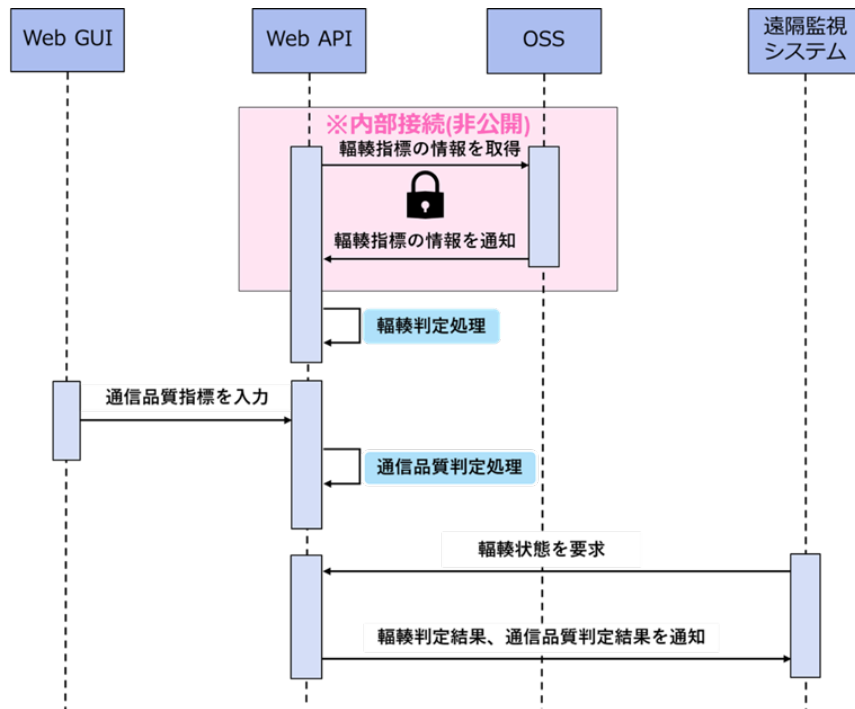


図 4.2-6 処理シーケンス

**通信輻輳度/通信品質保存UI**

**OSSデータ取得**

基地局ID:

セル番号:

**OSSデータを取得**

**データ入力**

基地局ID (セル番号):

UL\_Throughput:

RSRQ:

SINR:

UL\_RB:

DL\_RB:

UL\_Sector\_Throughput:

DL\_Sector\_Throughput:

NumUsers:

**データを送信して保存**

図 4.2-7 Web GUI 画面

## (2) 遠隔監視映像送信ソフトウェアの開発

### a. 遠隔監視映像画質変更機能の開発

目的:

遠隔監視映像の伝送が困難な通信輻輳環境においても遠隔監視を継続するため、通信環境に応じて必要最低限な画質の送信が可能であることが求められる。そのため本実証では最大解像度、最大フレームレートが固定値となっていた既存システムに対し、任意の解像度、フレームレートを指定可能なソフトウェアを開発する。

開発機能詳細:

複数台のカメラ映像を統合する映像処理パイプラインの改良を行う。

解像度 1920×1080、フレームレート 30fps となっていた既存の映像処理固定パイプラインを、本実証で開発したパイプライン生成プログラムにより指定したパラメータに応じたパイプライン生成に対応させる。映像処理パイプラインの詳細は 6.2 章に記載する。

## b. 通信輻輳度、通信品質に連動した映像送信ソフトウェアの開発

目的:

通信状況に応じて送信映像の画質を指定可能とする。

開発機能詳細:

通信輻輳度、通信品質を Web API で取得し、値に応じて送信映像の最大解像度、最大フレームレートを指定可能とする。

本実証においては通信輻輳が発生している場合に『必要最低限画質』が選択され、発生していない場合は『システム最大画質』が選択される。

## (3) 事前検証:必要最低限の画質および画質切替閾値の決定

背景:

遠隔監視員が車両の周囲の状況を正確に把握し、正常にオペレーションを行うために必要な最低限の映像品質を特定する必要がある。併せて、通信輻輳や通信品質の低下が発生した際に、最低限の画質へ切り替える条件を特定する必要がある。

### a. 遠隔監視における必要最低限画質の決定

目的:

通信輻輳や通信品質低下時においても、遠隔監視オペレーションに支障をきたさない必要最低限の画質を決定することを目的とする。

評価手法:

遠隔監視システムで推奨される映像ターゲットビットレートが 1Mbps であることを前提に、このビットレートで送信可能な 5 種類の画質を選定した。これらの画質が遠隔監視オペレーションに十分な品質を有するかを評価するため、画質の低いものから順に検証を実施し、必要最低限の画質を特定する。

表 4.2-8 映像ターゲットビットレート 1Mbps で送信可能な画質

No	解像度(ピクセル)	フレームレート(fps)
1	960×540	15
2	960×540	30
3	1280×720	15
4	1280×720	30
5	1920×1080	15
参考(※)	1920×1080	30

※ システム最大画質



解像度 1920×1080 ピクセル(システム最大画質)



解像度 1280×720 ピクセル



解像度 960×540 ピクセル(最小解像度)

図 4.2-8 各解像度の画像

表 4.2-9 最低限画質決定の検証手順

No	説明	検証項目
1	車両運転中の映像監視状況を模擬するために、常時 2 名以上の人間が車両の前方カメラから 10m 先の距離上を往復歩行する。	-
2	車両内に搭載した遠隔監視システムから表 4.2-8 に示す画質設定で映像を 20 分間送信する。	-
3	映像評価者計 5 名 1 グループとして録画した映像を閲覧し、アンケートに回答する。	遠隔監視オペレーションの遂行が可能であることを確認

検証実施後、5 名 1 グループとなり、表 4.2-10 のアンケートを用いて映像評価を実施する。

表 4.2-10 に示す KPI をすべて満たす中で、最も低い画質を「最低限画質」として決定する。各 KPI の詳細は 7)KPI/KGI で詳述するが、本評価の目的は、通信輻輳や通信品質低下時においても遠隔監視オペレーションに支障をきたさない、必要最低限の画質を特定することにある。そのため、遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件に焦点を当てて映像評価を実施する。

表 4.2-10 最低限画質決定のための KPI 項目

No	KPI
1	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答する。
2	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)があるか把握できる」と回答する。
3	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答する。
4	アンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。

多様な意見を反映させた定性的評価を行うため、性別、年齢、映像評価経験、映像に関する技術的知識が異なる評価者を選定する。映像評価者の属性を表 4.2-11 に示す。映像評価を行う 5 名の内訳は、遠隔監視者が 1 名、映像評価者が 4 名(映像評価者 5 名が試験ごとに交代で担当)である。

表 4.2-11 映像評価者一覧

評価者	性別	年齢	映像評価経験の有無	映像の技術的知識(※)
遠隔監視者	女性	30代	あり	あり
映像評価者 1	男性	40代	あり	あり

映像評価者 2	男性	50 代	あり	あり
映像評価者 3	男性	20 代	なし	なし
映像評価者 4	女性	30 代	なし	なし
映像評価者 5	男性	20 代	なし	なし

※ 解像度、フレームレート、圧縮ノイズ等の知識

また、必要最低限の画質で遠隔監視映像を行う際、安全な遠隔監視オペレーションの実現のためには映像の見え方に加え、安定した映像伝送が行えることも重要である。そのため表 4.2-12 最低限画質の映像伝送条件を最低限画質の選定条件に加える。

表 4.2-12 最低限画質の映像伝送条件

No	条件
1	解像度およびフレームレートが、指定した値の 90%以上の時間で維持されていること。
2	送信した映像ターゲットビットレートの平均値が 1Mbps に最も近いこと。

KPI の達成、および最低限画質の映像伝送条件の双方を総合的に判断し、最低限画質を決定する。

#### b. 通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定

目的:

遠隔監視映像をシステム最大画質から最低限画質へ切り替える際の通信輻輳指標値と、各指標値の閾値を決定することを目的とする。

評価手法:

通信の輻輳が見込まれる場所で、遠隔監視システムのシステム最大画質と最低限画質を切り替えながら映像伝送を行い、その際の通信輻輳度を測る指標(表 4.2-13 通信輻輳度を測る指標)を通信ネットワーク管理システム(OSS)から確認する。また、遠隔監視映像に関するアンケートを実施し、得られた通信輻輳状況とアンケート結果を分析することで、通信輻輳度判定の条件を決定する。

表 4.2-13 通信輻輳度を測る指標

No	通信輻輳度を測る指標名	選定理由
1	アップリンク リソースブロック使用率	アップリンクの無線リソースが逼迫すると、システム最大画質で映像を伝送するために必要な帯域を確保することが困難になるため。
2	ダウンリンク リソースブロック使用率	ダウンリンクの無線リソース逼迫時に、映像伝送への影響がないことを確認するため。
3	端末収容利用率	基地局に接続する端末数が増加し利用率が上がることで、1 台あたりの通信速度が低下し、シ

		システム最大画質の映像を安定して伝送できなくなるため。
--	--	-----------------------------

表 4.2-14 通信輻輳条件の検証手順

No	説明	検証項目
1	車両運転中の映像監視状況を模擬するために、常時2名以上の人間が車両の前方カメラから10m先の距離上を往復歩行する。	-
2	車両内に搭載した遠隔監視システムから最低限画質設定で映像を20分間送信する。	遠隔監視オペレーションの遂行が可能であることを確認
3	車両内に搭載した遠隔監視システムから2分間隔でシステム最大画質映像と最低限画質映像を交互に送信する。これを計20分間(各画質設定で10回ずつ)繰り返す。	-
4	検証場所の通信輻輳指標値をネットワーク管理システム(OSS)から取得する。	検証実施時の通信輻輳条件の確認
5	映像評価者計5名1グループとして映像を閲覧し、アンケートに回答する。	システム最大画質と最低限画質のどちらがより安定していたかを確認

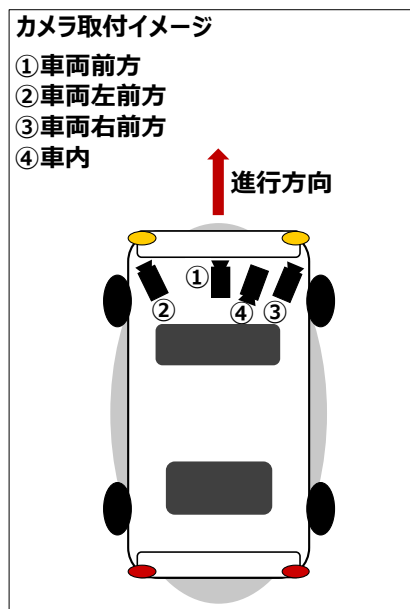


図 4.2-9 事前検証 カメラ取付位置

事前検証中の人間の歩行のパターンと、カメラから人間までの距離を図 4.2-10 に示す。

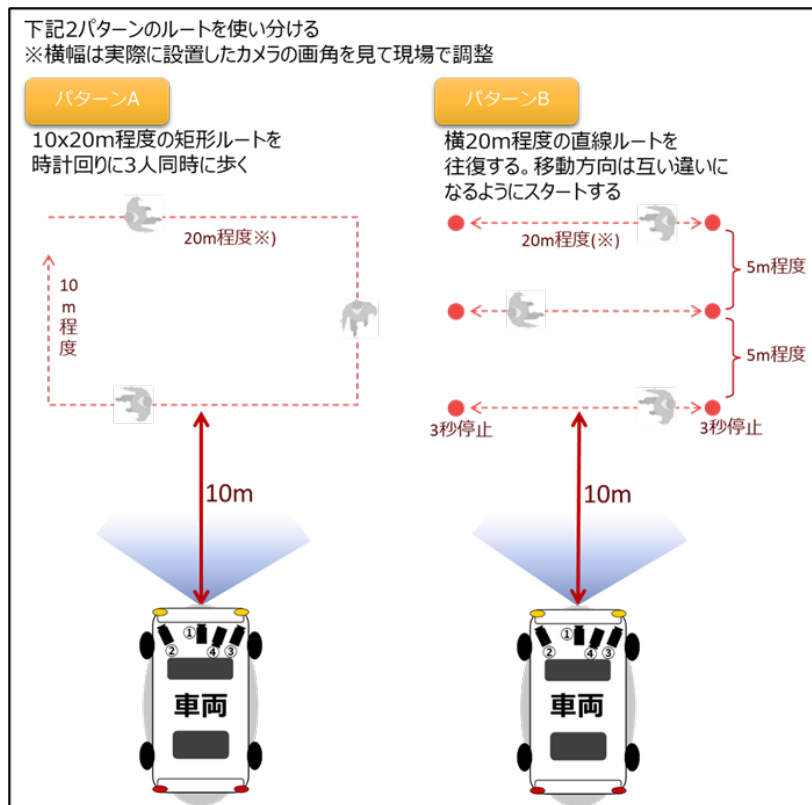


図 4.2-10 歩行パターンとカメラとの距離

検証実施後、5名1グループとなり、表 4.2-21 のアンケートを用いて映像評価を実施する。なお、映像評価を実施した評価者は表 4.2-11 映像評価者一覧 と同一である。通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定と、通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定

表 4.2-15 事前検証での KPI 項目

No	KPI
1	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答。
2	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)があるか把握できる」と回答。
3	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答。
4	アンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。

5	最低限画質モード時の 90%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答。
6	75%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が最低限画質時の方が、システム最大画質(30fps、FullHD)使用時よりも、軽減されている」と回答。

### c. 通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定

目的:

遠隔監視映像をシステム最大画質から最低限画質へ切り替える際の通信品質指標値と、各指標値の閾値を決定することを目的とする。

評価手法:

通信の輻輳が見込まれる場所で、遠隔監視システムのシステム最大画質と最低限画質を切り替えながら映像伝送を行い、その際の通信品質指標を確認する。また、遠隔監視映像に関するアンケートを実施し、得られた通信品質指標値とアンケート結果を分析することで、通信品質低下判定の条件を決定する。

表 4.2-16 通信品質指標

No	通信品質指標	選定理由
1	RSRQ	ダウンリンクの通信品質を示す指標だが、アップリンクの映像伝送との関連性を確認するため。
2	SINR	

表 4.2-17 通信品質低下判定条件の検証手順

No	説明	検証項目
1	車両運転中の映像監視状況を模擬するために、常時 2 名以上の人間が車両の前方カメラから 10m 先の距離上を往復歩行する。	-
2	車両内に搭載した遠隔監視システムから最低限画質設定で映像を 20 分間送信する。	遠隔監視オペレーションの遂行が可能であることの確認
3	車両内に搭載した遠隔監視システムから 2 分間隔で、システム最大画質映像と最低限画質映像を交互に送信する。これを計 20 分間(各画質設定で 10 回ずつ)繰り返す。	-
4	2、3 の実施中、車両内の LTE ルーターに接続した通信品質取得 PC から無線ネットワーク測定ツール XCAL を用いて通信品質指標値を取得する。	検証実施時の通信品質指標値の確認

5	映像評価者計 5 名 1 グループとして録画した映像を閲覧し、アンケートに回答する。	システム最大画質と最低限画質のどちらがより安定していたかを確認
---	--	---------------------------------

映像評価を実施した評価者は 表 4.2-11 映像評価者一覧 の通り。

カメラの設置位置や、歩行者役の歩行パターン、アンケート内容は、「通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定」と同一である。

#### (4) 本検証:輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証

##### 背景:

通信輻輳や通信品質の低下により、遠隔監視映像をシステム最大画質で伝送するための帯域確保が困難な場合においても、安定的な遠隔監視映像の送受信を可能とする必要がある。

##### 目的:

事前検証で決定した必要最低限の画質を用いて遠隔監視映像を送信し、映像評価者によるアンケートでの評価と遠隔監視動画の品質を測定する。

通信輻輳の発生可能性の高い場所・時間において、事前検証で決定した表 4.2-18 映像の切り替え判定指標に基づき輻輳状態と判断された場合、システム最大画質から最低限画質に切り替えて送信し、その映像を映像評価者が評価することで、安定した遠隔監視オペレーションが実施可能であるかどうかを検証することを目的とする。

##### 評価手法:

本検証の手順を表 4.2-19、タイムスケジュールを図 4.2-11 に示す。

事前検証で決定した表 4.2-18 映像の切り替え判定指標に基づき、遠隔監視システムから、通信輻輳度・通信品質 Web API から取得した通信輻輳度および通信品質判定結果に応じて選択された画質設定で遠隔監視映像を送信する。また、遠隔監視映像に関するアンケートを用いて映像評価と遠隔監視映像の品質を確認する。

表 4.2-18 映像の切り替え判定指標

No	カテゴリ	指標	選定理由
1	通信輻輳判定	アップリンク リソース ブロック使用率	アップリンクの無線リソースが逼迫すると、システム最大画質で映像を伝送するために必要な帯域を確保することが困難になるため。
2		ダウンリンク リソース ブロック使用率	ダウンリンクの無線リソース逼迫時に、映像伝送への影響がないことを確認するため。
3		端末収容利用率	基地局に接続する端末数が増加し利用率が上がることで、1 台あたりの通信速度が低下し、システム最大画質の映像を安定して伝送できなくなるため。
4	通信品質低下判定	RSRQ	ダウンリンクの通信品質を示す指標だが、アップリンクの映像伝送との関連性を確認するため。
5		SINR	

表 4.2-19 本検証手順

No	説明	検証項目
1	車両運転中の映像監視状況を模擬するために、常時 3 名以上の歩行者が車両から半径 10m の距離を保ちながら周回する。	-
2	通信輻輳度・通信品質 Web API から取得した通信輻輳度および通信品質判定結果に応じてシステム最大画質または最低限画質を 20 分間送信する。	最低限画質が選択されること 定性評価 KPI の達成を確認
3	遠隔監視システムから、システム最大画質と、Web API で取得した通信輻輳度および通信品質に基づいて設定される画質を 2 分ごとに交互に送信し、この動作を合計 20 分間(各画質設定で 10 回ずつ)繰り返す。	最低限画質が選択されること 定性評価 KPI の達成を確認
4	2,3 の実施中、車両内の LTE ルーターに接続した通信品質取得 PC から無線ネットワーク測定ツール XCAL を用いて通信品質指標値を取得する。	-
5	検証場所の通信輻輳指標値を取得する。	-
6	映像評価者計 5 名が 1 グループで映像を閲覧し、アンケートに回答する。	定性評価 KPI の達成を確認
7	映像内の時刻表記から、映像送信時刻と受信時刻の差分時間を測定し、評価する。	輻輳環境下での安定した遠隔監視が実施できることを確認

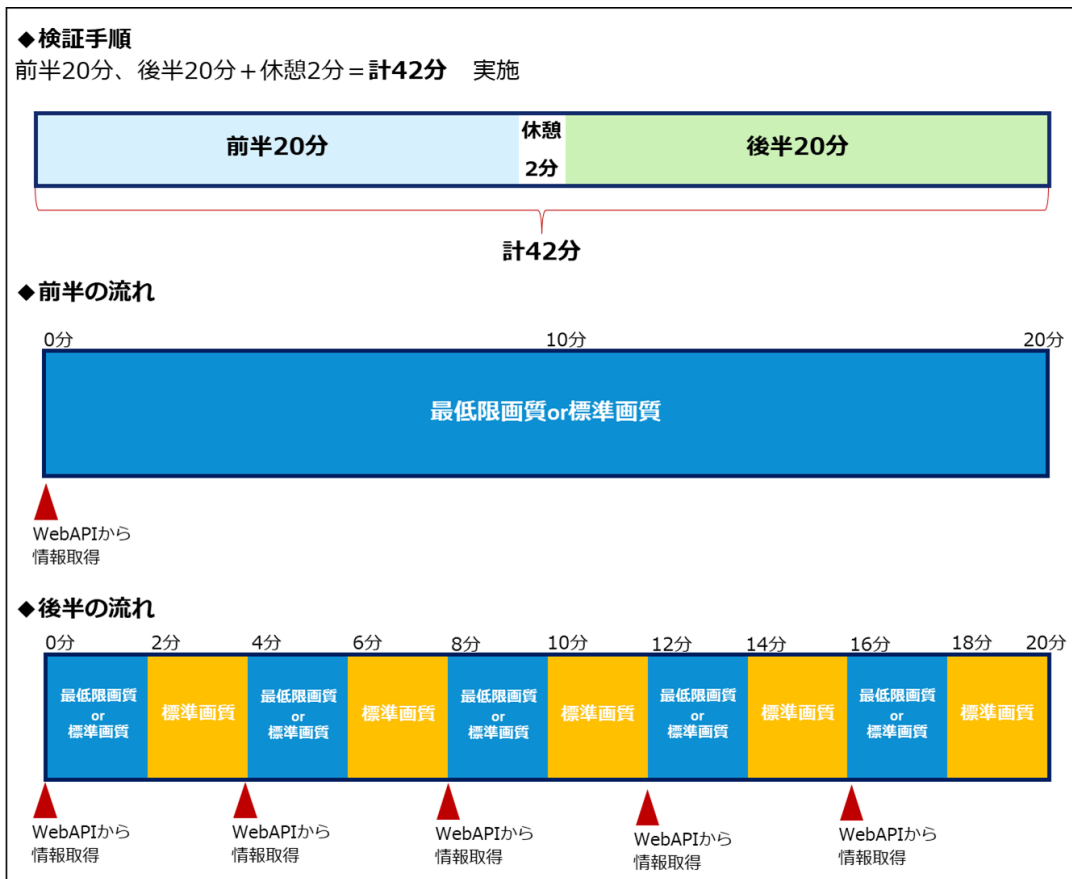


図 4.2-11 本検証のタイムスケジュール

本検証中の人間の歩行のパターンと、カメラから人間までの距離を図 4.2-12 に示す。

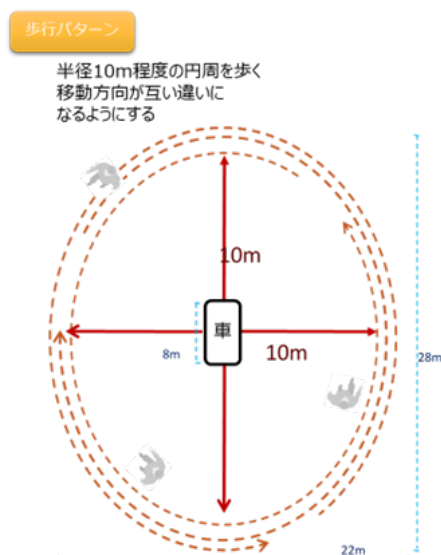


図 4.2-12 本検証での歩行パターンとカメラとの距離

遠隔監視用カメラの設置位置を図 4.2-13 に、本実証実施場所の俯瞰図を図 4.2-14 に示す。

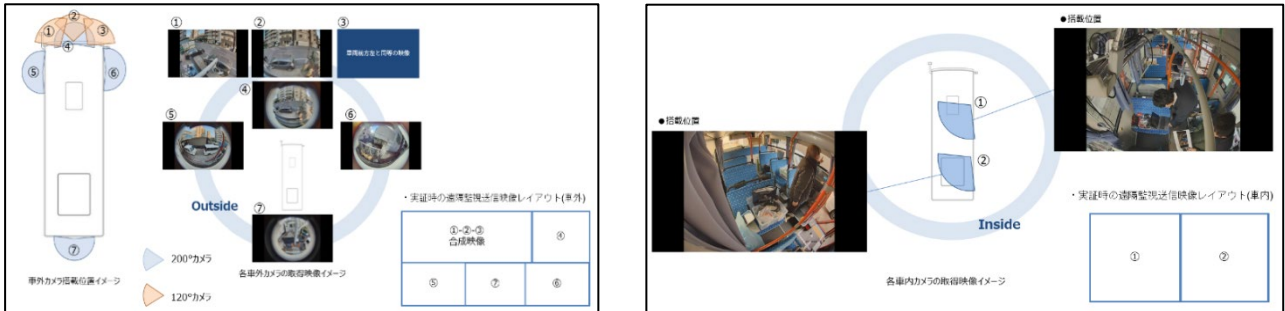


図 4.2-13 遠隔監視用カメラの設置位置

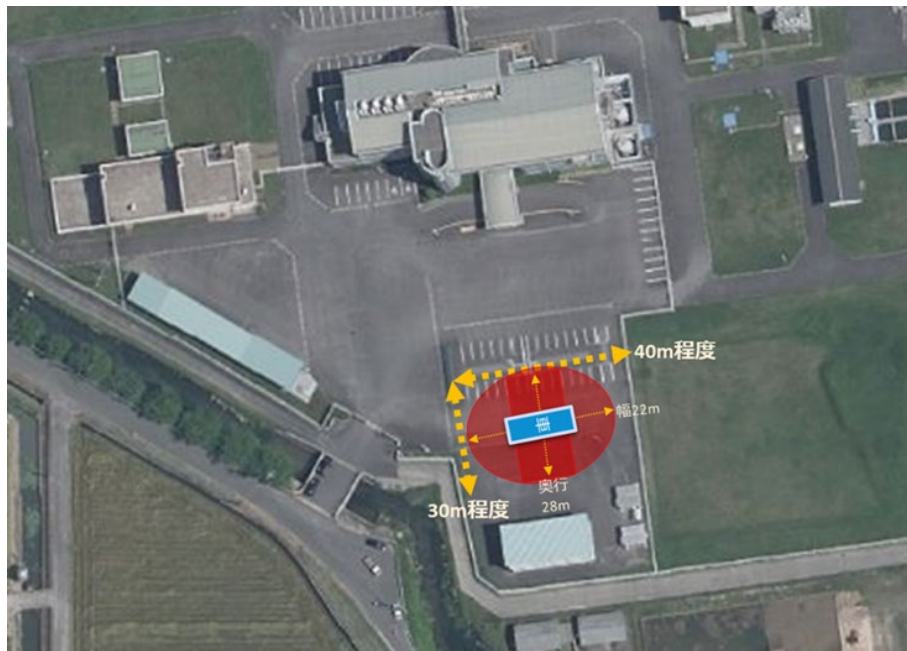


図 4.2-14 本実証実施場所の俯瞰

映像評価を実施した評価者は、事前検証とは一部異なり、表 4.2-20 映像評価者一覧(本検証)の通りである。映像評価を行う 5 名の内訳は、遠隔監視者が 1 名、映像評価者が 4 名(映像評価者 6 名が試験ごとに交代で担当)である。

表 4.2-20 映像評価者一覧(本検証)

アンケート対象者	映像評価の経験の有無	評価指標に関する知識の有無
遠隔監視者	なし	なし
映像評価者 1	なし	なし
映像評価者 2	なし	なし
映像評価者 3	あり	なし

映像評価者 4	あり	なし
映像評価者 5	なし	あり
映像評価者 6	あり	あり

なお、遠隔監視は上述した映像評価経験、評価指標に関する知識は有していないが、下記の知見を有する者が実施している。

- ・ 遠隔監視経験者から知見の共有を受け、遠隔監視の実施方法を十分に理解している
- ・ 遠隔監視映像と車両に搭載されているカメラの画角の関係を正確に理解している
- ・ 遠隔監視室で表示される映像には通信遅延が含まれることを理解している

アンケート内容は、表 4.2-21 と同一である。

#### (5) 遠隔監視動画品質要件

目的：

車両周囲の状況確認を行う際にカメラで撮像した映像が遠隔監視室で表示されるまでの遅延値の変動は、遠隔監視員の判断に影響を与える。あらゆる通信環境下でも安定した遠隔監視の遂行が可能か確認するため、通信輻輳環境において遠隔監視映像の通信遅延値を検証する。

詳細な計測項目：

通信遅延値

測定手法：

自動運転車両に搭載した映像送信 ECU より車外映像、車内映像の 2 ストリームを送信する。

図 4.2-11 本検証のタイムスケジュールに示す通り、前半の 20 分間では『Web API で取得した通信輻輳度および通信品質に基づいて設定される画質』にて映像送信を行い(前半試験)、後半の 20 分間では 2 分ごとに『システム最大画質』と『Web API で取得した通信輻輳度および通信品質に基づいて設定される画質』を交互に送信した(後半試験)。

送信された映像を遠隔監視室で録画し、End-to-End の通信遅延値を計測する。

計測時は図 4.1-21 遅延値計測のための時刻比較と同様に動画を 1 フレーム毎コマ送りで再生し、録画した遠隔監視映像のシステム時刻表示と車内遠隔監視映像に映る車内時計の時刻表示の差を確認する。

遠隔監視室にて遠隔監視映像を表示する PC は事前に日本標準時刻への同期を行う。

測定条件：

通信遅延値を計測する際の測定ポイントについて記載する。

測定ポイントの定義：

映像送信開始から 1 分後を測定基準ポイントとする。

なお、下記条件にあてはまる場合は 10 秒ずらした点を測定ポイントとする。

- ・映像送信開始直後、映像復帰直後
- ・車外映像、車内映像のいずれかで通信の切断が発生している場合

測定ポイント数：

輻輳時：計 13 回（前半試験 3 回、後半試験 10 回）

非輻輳時：計 3 回（前半試験 1 回、後半試験 2 回）

## (6) 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件

背景：

遠隔監視員の遠隔監視映像に対する要望は、「何か起きて車が止まった時に状況を確認できる」ことである。

目的：

車両周囲 10m-20m 程度の範囲で停止要因となり得る対象物(歩行者)を明確に確認できるかどうか検証する。

評価手法：

録画された遠隔監視映像をアンケート対象者に提示し、自動運転車両の停車原因や周辺状況が適切に把握できるかを確認する。具体的には、車両近傍 10m-20m 程度に何があるか把握できない時間(※)、車内の乗客に異常がないか確認できない時間をストップウォッチで計測し、評価を行う。各試験の遠隔監視映像につき、アンケート対象者 5 名が回答する。

※車両近傍 10m-20m 程度に何があるか把握できない時間

- ・映像全体の著しい乱れ、ノイズ、フリーズ、またはブラックアウトにより、監視対象エリアの状況把握が困難な時間。
- ・カメラの向きの著しいずれ、またはレンズの汚れにより、監視目的が達成できない時間。

## (7) 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件

背景：

遠隔監視員が遠隔監視映像を閲覧する際、ブロックノイズ・カクツキ・コマオチ・暗転等の映像の乱れが発生すると、車両内外の状況の正確な把握が困難になる可能性がある。

目的：

本検証によって、映像の乱れが発生している時間を把握する。

評価手法:

録画された遠隔監視映像をアンケート対象者に提示し、自動運転車両の停車原因や周辺状況が適切に把握できるかを確認する。具体的には、映像が不安定で許容できない時間(※)をストップウォッチで計測する。各遠隔監視映像につき、アンケート対象者 5 名が回答する。

※映像が不安定で許容できない時間

- ・ 映像が頻繁に途切れる、またはコマ落ちが連続して発生した時間。
- ・ 意図しない、または不自然な映像の点滅や色調の変化が継続した時間。

#### (8) 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件

背景:

通信輻輳、または通信品質低下発生時には映像の乱れが発生し、車両内外の状況の正確な把握が困難になる可能性がある。

目的:

本検証によって、システム最大画質よりも最低限画質の方がより映像の乱れが改善されていることを確認する。

評価手法:

録画された遠隔監視映像をアンケート対象者に提示し、自動運転車両の停車原因や周辺状況が適切に把握できるかを確認する。具体的には、最低限画質とシステム最大画質の映像を交互に閲覧し、それぞれ映像が乱れた時間をストップウォッチで計測する。各遠隔監視映像につき、アンケート対象者 5 名が回答する。

### 7) KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と

		回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 遠隔監視オペレーター含むアンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。
	(2)	遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件 最低限画質モード時の 90%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答。
	(3)	通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件 75%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が最低限画質時の方が、システム最大画質(30fps, FullHD)使用時よりも、軽減されている」と回答。
定量評価	(4)	遠隔監視動画品質要件 遅延：1000ms 未満 (遠隔監視映像送信ソフトウェア → 遠隔監視映像表示画面)

#### (1) 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件【定性評価】

目標値の設定理由：

遠隔監視員からの遠隔監視映像に対する要望は「何か起きて車が止まった時に状況を確認できる」ことであり、10-20m 程度先が見えれば、自動運転車両周囲に存在する車両、歩行者、障害物等、車両停止の要因になるものの確認が可能であると考えられる。基本的には、常時遠隔監視オペレーションを遂行できることが望ましいため、95%以上の時間について、オペレーションが可能であることを KPI として設定する。

本要件における、アンケート調査内容は、表 4.2-21 遠隔監視映像に関するアンケート調査内容の No.1、2、3、6 である。

#### (2) 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件 【定性評価】

目標値の設定理由：

遠隔監視員が遠隔監視映像を監視する際、ブロックノイズ・カクツキ・コマ落ち・暗転等の映像の乱れが発生すると、車両内外の状況の正確な把握が困難になる可能性がある。基本的には、常時遠隔監視オペレーションを遂行できることが望ましいが、わずかな映像な乱れであれば、オペレーション遂行でき

ると考えられるため、90%以上の時間において、映像が安定していることを KPIとして設定する。

本要件における、アンケート調査内容は、表 4.2-21 遠隔監視映像に関するアンケート調査内容の No.4 である。

### (3) 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件【定性評価】

目標値の設定理由:

通信輻輳環境または通信品質低下発生時に、遠隔監視映像の画質を低下させることによって、画質を低下させていない時よりも、映像の乱れが軽減されることを確認するためである。軽減される時間については75%以上を目標値とする。

本要件における、アンケート調査内容は表 4.2-21 遠隔監視映像に関するアンケート調査内容の No.5 である。

表 4.2-21 遠隔監視映像に関するアンケート調査内容

No.	KPI/KGI	評価方法	データ収集方法
1	アンケート対象者が、最低限画質モード時の95%以上の時間について、「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答する。	No.2のKPIが満たされる「かつ」No.3のKPIが満たされるかどうかで評価	収集不要 →No.1のKPIにおける、遠隔監視画面がどのような状態が不明確なため、No.2とNo.3の結果から判定
2	アンケート対象者が、最低限画質モード時の95%以上の時間について、「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるか把握できる」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	前半20分(最低限画質モード)で実施 「車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるか把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
3	最低限画質モード時の95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	前半20分(最低限画質モード)で実施 「車内の乗客に異常がないか把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
4	アンケート対象者が、最低限画質モード時の90%以上の時間について、「映像の不安定性(ノイズ・カクつき・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答する。	「映像不安定発生なしまたは許容範囲」の時間 最低限画質モードの時間(10分)	後半20分(最低限画質モードとシステム最大画質モード)で実施 「映像の不安定性が発生または許容範囲でない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
5	{「短い間隔で2回、「必要最低限画質」使用機能をそれぞれオン・オフして自動運転バスから遠隔監視映像を送信し、}アンケート対象者が、75%以上の時間について、「映像の不安定性(ノイズ・カクつき・コマ落ち)が、「必要最低限画質」使用時の方が、システム最大画質(30fps, Full HD)使用時よりも、軽減されている」と回答する。	システム最大画質モードの映像不安定時間 - 最低限画質モードの映像不安定時間 システム最大画質モードの映像不安定時間	2分ごとに画質モードを切り替えることを想定 →輻輳状態は時間変化するため、短い間隔で切り替えることにより、条件を極力統一する。
6	アンケート対象者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答する。	「最低限画質モード」視聴時について回答・集計	前半20分の実験が終わり次第回答

### (4) 遅延: 1000ms 未満(遠隔監視映像送信ソフトウェア → 遠隔監視映像表示画面)【定量評価】

目標値の設定理由:

レベル 4 の自動運転車両走行時における遠隔監視では車両停止後の状況確認を担うことが想定される。車両停止後の状況確認、停止状態からの発車指示を安全に行える遅延値として許容範囲と考えられる 1000ms を目標値として設定する。

通信遅延値はカメラ撮像から遠隔監視室での映像表示までを計測区間とする。

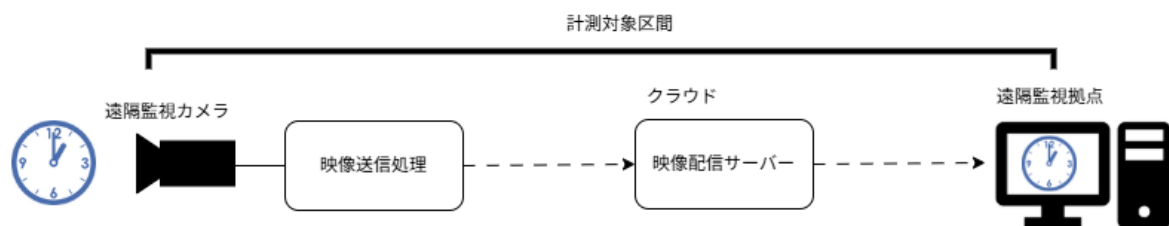


図 4.2-15 通信遅延計測区間

車内遠隔監視映像に映る車内時計表示と遠隔監視室 PC のシステム表示時刻との差分を測ることで通信遅延値を求める。

なお、車内時計と遠隔監視室 PC は時刻同期を行った上で本検証を実施する。

本実証では 2 箇所の遠隔監視室で録画した映像から通信遅延値を計測し、遅延値の低い方を採用する。これは遠隔監視室毎の通信状況(クラウド-遠隔監視室間)に起因するばらつきを排除し、最も良好な通信状態での性能を評価するためである。

本実証で使用している遠隔監視カメラは 30fps で動作しているため、遅延値計測時の時間分解能の最良値は 33ms となるが、通信状況に連動して遠隔監視映像のフレームレートが変動するため、実動作時の分解能は可変となる。30fps で映像送信を行う際は時間分解能が最良値の 33ms となるが、ワーストケース時は時間分解能が 100ms を超える場合もある。ただし、通信遅延値を測定する際は (5)遠隔監視動画品質要件 に記載した測定条件に則り、著しいフレームレート低下の影響が含まれないようにしている。そのため測定時の時間分解能は 30fps 送信時の 33ms、もしくは 15fps 送信時の 66ms に近い値となり、KPI 評価値である 1000ms に対しては十分な値であると考える。

### 4.3 ③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証

#### 4.3.1 路側センサーで取得する周辺情報を活用した、見通しの悪い交差点での安全な走行/右折の制御の実現

##### 1) 目的

###### a. 課題

佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間において、無信号交差点での右折は本実証で検証する交差点(佐賀駅バスセンターへの右折)のみであり、当該箇所を自動走行可能とすることが当該路線全線においてレベル 4 実装に向けた最重要課題である。また下図に示すように、2024 年度(2024 年 10 月 21 日～27 日走行)の自動運転関連の実証実験においてバスセンターへの右折時の手動介入回数が他の箇所比べて多かった(ブレーキ介入 34 回【全 60 便】)ことから、実運用において手動介入要因を確認し、対策を施す必要がある。

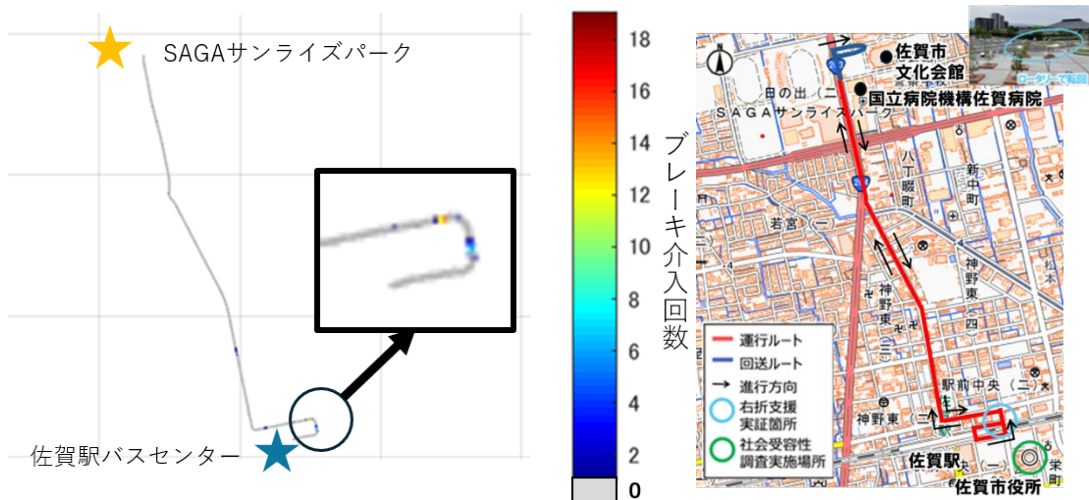


図 4.3-1 2024 年度自動運転バス走行時の手動介入箇所分布(ブレーキ)

###### b. 検証内容

交通量の多い市街地において、歩行者や車両等で混雑が生じる無信号交差点での車両制御(右折)の際、車載センサー検知範囲外の歩行者・車両等を路側センサーにより検知し、自動運転バスに通知することで、安全かつスムーズな右折を実現する。本事業においては図 4.3-1 に示す手動介入発生箇所の内、自動運転バスに搭載したセンサーのみでは検知できない可能性がある、佐賀駅バスセンターへの右折交差点を検証箇所を選定する。

##### 2) 実証内容の詳細

自動運転バスは、図 4.3-2 に示す通り、佐賀駅バスセンターを出発し SAGA サンライズパークに到

着するまでのルートと、SAGA サンライズパークを出発し佐賀駅バスセンターに到着するまでのルートを実証走行する。

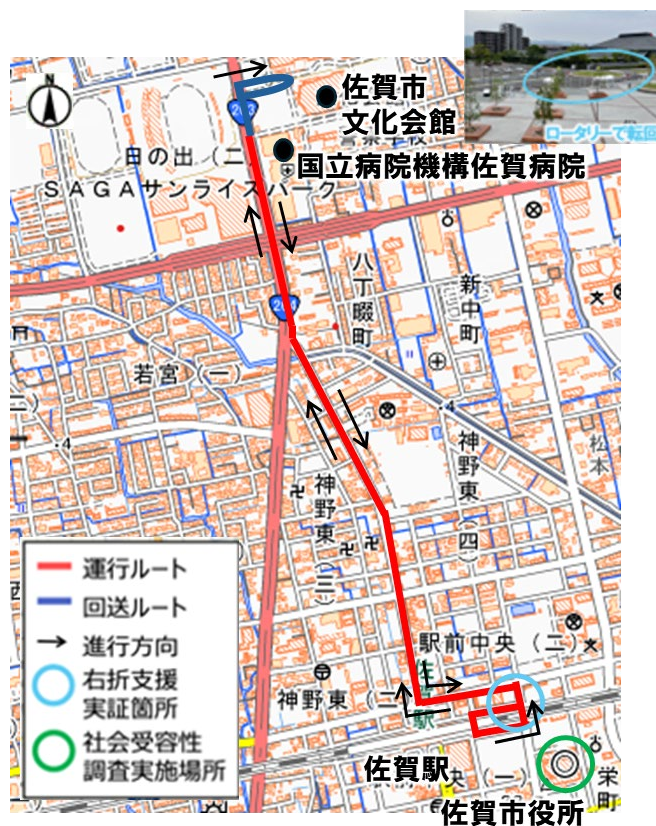


図 4.3-2 自動運転バス走行ルート

佐賀駅バスセンターに到着する際に右折する無信号交差点において、車載センサーだけでは検知困難な「対向車線を走行する車両や横断歩道上の歩行者・自転車等」を検知するために、図 4.3-3 に示した地点に設置した路側センサーを用いる。路側センサーで検知した情報は、通信システムを介して自動運転車両に伝達され、スムーズな右折が実現できることを実証する。

高架下には近距離 LiDAR のみ、市役所前には長距離 LiDAR のみを設置する。高架下に長距離 LiDAR を設置しない理由は、右折する交差点における対向車に関する情報は市役所前に設置されている長距離 LiDAR で収集可能であるため、また高架下の設置対象となる信号柱の強度不足が判明したためである。

さらに、市役所前に近距離 LiDAR を設置しない理由は、市役所前に近距離 LiDAR を置いても対象交差点の右折支援に寄与する情報が得られないためである。

長距離 LiDAR の検出範囲は 2～200m、近距離 LiDAR の検出範囲は 0.8～40m である。伝送遅延の影響も踏まえると、長距離 LiDAR は 60km/h 以下、近距離 LiDAR は 20km/h 以下の検知に十分である。

近距離 LiDAR で 20km/h 以下で接近する物体の検知が可能であるため、速度の速い自転車も捉えることが可能であり、自動運転バスの右折に際して横断歩道への接近間際の車両センサーによる検知タイミングよりも先に検知可能であるため、右折途中で自動運転バスが自転車等の検知により停止することなく通過できることが期待される。

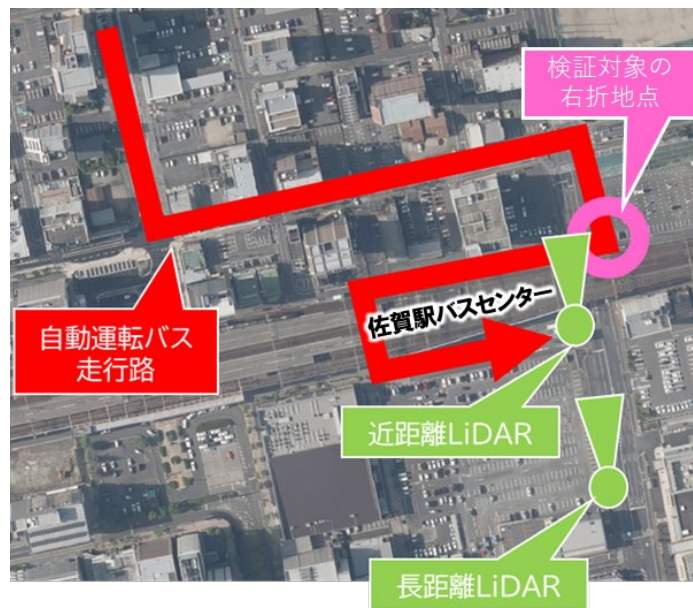


図 4.3-3 路側センサー設置箇所

車載センサーのみでは高架下の柱の陰から出てくる人等の検知が困難であり、自動運転バスが当該地点で右折動作開始後に横断歩道付近まで接近しなければ、高架下の柱の陰にいる人等を検知できないため、急ブレーキに繋がる可能性があり、安全、かつスムーズに走行することが困難である。

路側センサーを用いることで、対向車が大型車両の場合等に対向車に隠れた領域で、自動運転バスの車載センサーの死角となった自転車や歩行者等の動きを捕捉できることが期待される。

LiDAR 検知状況を示すシステムの画面イメージを図 4.3-4 に示す。本画面は、路側センサーからの提供情報に基づいて、検知物ごとに、先頭位置(矢印の始点)、方位(矢印の方向)および、基準線からの距離(m)と速度(km/h)を表したものである。

なお、検知物の先頭位置は、国土地理院データ(地理院タイル)にマッピングするために、提供情報の座標系を緯度・経度に変換して表示している。



図 4.3-4 LiDAR 検知状況を示すシステム画面イメージ

### 3) 利用技術

#### (1) 路側センサー

- ・ 路側センサーを使用し自動運転車両のセンサー類では検知できない死角や広範囲の視認性を確保する。
- ・ 路側センサーが必要な情報を適切に取得可能な場所を検討し、複数の路側センサーによって自動車、自転車、歩行者等の交差点における複数の移動物体を検知した情報を合成することで、自動運転車両センサーの死角を補完する。

レベル 4 自動運転移動サービスの実現にあたって、自動運転車両に搭載されているセンサー類では把握が困難な領域に対して、路側センサーにより道路状況等を自動運転車両へ情報提供することが求められている。本事業において路側センサーとして活用する LiDAR は、レーザー光を使用して物体の距離と形状をリアルタイムに検出可能であり、高精度な 3D 観測と広範な応用領域を持つため、近年の自動運転に係るセンサーとしても広く活用されている技術である。これにより自動運転車両のセンサー範囲を超える領域および自動運転車両の死角となる領域の道路状況(車・歩行者・自転車等)を検出し、安全かつ円滑な自動運転を運行するために必要となる情報を提供できることを検証する。

#### (2) 路車連携

- ・ 路側センサーで取得した情報を基に、従来の周辺検知ロジックに路側センサー情報を取り込むための車両挙動制御判断ロジックを構築する。

路側センサーから自動運転車両に提供する情報を表 4.3-1 に示す。路側センサーからの提供情報は、路側センサーごとに情報送信時刻を付与し、検知車両台数分の検知情報(位置や速度等)が100ms 間隔で一括して送信される。なお、路側センサーからの提供情報は、図 4.3-4 に示すような共通の原点を基準とするローカル座標系上で計算される。さらに、自動運転車両側の利便性を考慮するため、支援を期待する各交差点付近に基準線を設け、接近する車両の先頭から基準線までの道路に沿った距離(表 4.3-1 の No.13)を通知するような仕様としている。図 4.3-5 に本実証実験で設定した原点と各エリアの基準線の位置(緯度、経度)を示す。

自動運転バス側においては提供される路側センサー情報を自動運転バスの制御に取り入れるロジックを開発し、実環境での実験検証により自動運転バスの安全性等の向上に寄与するかを評価する。

表 4.3-1 路側センサーからの提供情報

NO.	要素	項目	解説	備考
1	id	合流支援システムID	・本システムの設置箇所とセンサー種別毎に振るID 設置地点情報・・・A地点:0、B地点:1、C地点:2、D地点:3... センサー種別・・・LiDAR:1000、Radar:2000 ID=センサー情報+地点情報	例) 内容が1001の場合、地点BのLiDARから提供された情報と判断する
2	st	システム状態	・本システム全体が正常であるか、異常であるかを自動判定した結果を登録	0=正常、1=異常
3	n	対象車両台数	・本情報で情報を算出・提供している車両の台数 0~255	
4	t	情報送信時刻	・本情報を路側が車両側に送信しようとする時刻 YYYYMMDDhhmmss000000 形式 (20バイト) ※000000はマイクロ秒が設定される	
	deb1~ deb8		デバッグ情報	
5	o		車両の台数分繰り返す 対象車両台数が0の場合、これ以下の項目はXMLファイルに設定されない	
6	oid	物体id	・物体ごとに振るID 1~1023	連続して存在する同一物体には、同一IDを付与
7	l0	歩道	・算出対象車両が走行している車線 (歩道) 0=非走行、1=走行	歩道を走行している場合: 1 第1車線を走行している場合: 0 第2車線を走行している場合: 0 ※跨ぎはなし
8	l1	走行車線①	・算出対象車両が走行している車線 (第1車線) 0=非走行、1=走行	歩道を走行している場合: 0 第1車線を走行している場合: 1 第2車線を走行している場合: 0 ※跨ぎはなし
9	l2	走行車線②	・算出対象車両が走行している車線 (第2車線) 0=非走行、1=走行	歩道を走行している場合: 0 第1車線を走行している場合: 0 第2車線を走行している場合: 1 ※跨ぎはなし
10	v	速度	・センサで計測した速度を登録 0~2046=速度 (0.1km/h単位) により可変値、2047=情報なし (不明) ※0.1km/h単位	例) 内容が472の場合、時速47.2km/hと判断する
11	vx	速度(方位)x成分	・センサで計測した速度のx成分を登録 -2046~2046=速度 (0.1km/h単位) により可変値、2047=情報なし (不明) ※0.1km/h単位	例) 内容が123の場合、x方向に時速12.3km/hで走行と判断する
12	vy	速度(方位)y成分	・センサで計測した速度のy成分を登録 -2046~2046=速度 (0.1km/h単位) により可変値、2047=情報なし (不明) ※0.1km/h単位	例) 内容が-456の場合、-y方向に時速-45.6km/hで走行と判断する
13	d	基準線からの距離	・本線を走行する車両 (先頭) から基準線までの距離 0~32766=距離単位により可変値、32767=情報なし (不明) ※0.1m単位	例) 内容が1422の場合、基準点 (レーンごとに基準線上に設けた地点) から144.2m離れた位置を車両が走行していると判断する
14	x	原点 (0,0) から見た物体横位置 (X)	・センサで計測した、センサの測定方向に対する先頭座標x (東西成分) を登録 ※0.1m単位	例) 内容が186の場合、LiDARの設置位置から見て横に18.6mの位置を車両が走行していると判断する
15	y	原点 (0,0) から見た物体縦位置 (Y)	・センサで計測した、センサの測定方向に対する先頭座標y (南北成分) を登録 ※0.1m単位	例) 内容が424の場合、LiDARの設置位置から見て縦に42.4mの位置を車両が走行していると判断する
16	sw	物体サイズ (車幅)	・センサで計測した物体枠の幅を登録 ※0.1m単位	例) 内容が17の場合、車幅1.7mと判断する
17	sd	物体サイズ (車長)	・センサで計測した物体枠の長さを登録 ※0.1m単位	例) 46の場合車長4.6mと判断する
	deb9~ deb16		デバッグ情報	

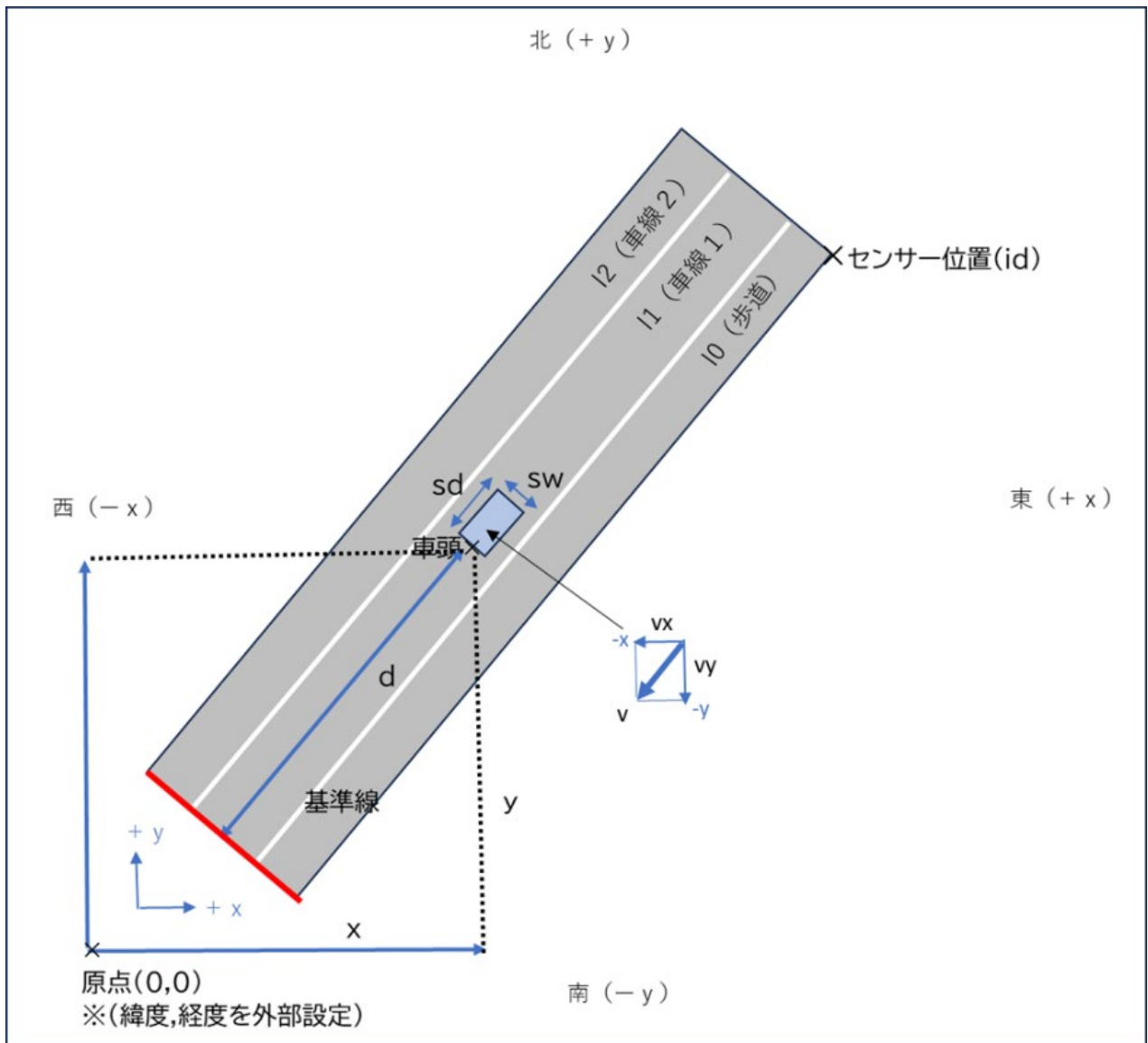


図 4.3-5 提供情報の座標系

(3) 通信

- 通信の安定性を確保するため DHCP の利用を避けるとともに、自動運転車両と路側センサーとの双方向の通信を行う必要があることから、LTE ルーターに搭載する SIM として、固定グローバル IP を持つ SIM を採用することとする。

4) 必要性・緊急性・新規性

必要性:

佐賀市におけるレベル 4 自動運転の社会実装に向けた活動として、佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間での自動運転バス実証においては、立体交差に隣接する交差点での右折の際、片側 2 車線道路で無信号交差点を右折する必要があるが、JR の高架や対向車等で自動運転バスのセンサー

視野に死角が発生するため、自動運転バスのみでは極低速での右折となるという課題が残ることから手動介入をせざるを得ない場合がある。極低速の運行では、混雑した道路環境では周辺の交通に悪影響を及ぼし、先を急ごうとする対向車や近接する自転車・歩行者の予期せぬ強引な割り込み等を回避するのが困難となるリスクがある。

また、対向車が大型車両の場合等に、対向車に隠れた領域が自動運転バスの車載センサーの死角となり、当該領域に存在する自転車や歩行者の動きを捕捉することが困難となるリスクもある。

#### 緊急性：

少子高齢化により、公共交通の重要性が高まっている一方で、過疎化による労働力不足の社会問題は佐賀県佐賀市の路線バスにおいても顕著であり、運転士不足により一部路線廃止や減便等が実施されている。

この課題を自動運転システムで早期に解決する必要があるとの認識から、佐賀駅バスセンターとSAGA サンライズパーク間を対象として選定する。

#### 新規性：

JR 高架下に接近する車両、および高架下を通行する自転車、歩行者を路側センサーにより検知し、当該区間に交通参加者がいないことの通知を受けて自動運転バスは右折を開始し、右折先の横断歩道手前で減速し、自車からも交通参加者を確認して通行することでスムーズな右折を実現する。上記課題の解決が進むことで、実証地域における社会実証や実証を通じた社会的受容性の確認が進み、レベル 4 自動運転の社会実装に寄与し、佐賀市としても自動運転レベル 4 の取り組みや社会実証を高度化・拡大し、社会実装が大きく前進するものと考えている。

自動運転バスの観点では、自動運転バスに搭載したセンサーでは検出できない箇所(死角、センサー検知距離より遠方)への路側センサーによる検知支援は有効である。このため、自動運転レベル 4 の認証過程において、車両技術だけでは解決できない場面に対する路側センサーの有効性を類型化して評価することで、成功事例を通じた他地域への展開も可能となる。

## 5) 検証条件

路側センサー情報を取り込んだロジックを搭載した自動運転車両を用いて、佐賀駅バスセンターへの右折時に安全に走行できるかを検証する。

#### 地理的条件：

対象の交差点は、自動運転車両が右折する際に、対向車線の自動車や右折先の横断歩道の歩行者・自転車等の状況を、自動運転車両に搭載されたセンサーだけでは把握することが困難な場所であるため、車載センサーを補完するために、2箇所に路側センサーを設置する。図 4.3-6 に路側センサー(1)長距離 LiDAR と(2)近距離 LiDAR)と検証用カメラの設置位置の概要を示す。図 4.3-7 に示すように、長距離 LiDAR およびカメラを設置高約 5.3m で右折交差点に向けて水平に設置する。柱 1 に設置された本路側センサーは、センサーから片側 2 車線の道路約 85m までを検知区間(エリア a)とし、

自動車を検知することを想定して開発した。なお、路側センサーから約 15m の範囲は死角となるため、検知区間対象外である。また、本検知区間には路側センサーから 80m 付近に自動車用信号機が設置されているため、検知区間で車両が停止することもある。一方、図 4.3-8 に示すように、近距離 LiDAR(水平面角 360°LiDAR)は設置高約 4.7m で下向きに設置し、カメラは右折交差点に向けて設置する。近距離 LiDAR は、センサー直下から高架下の歩道約 25m を検知区間(エリア b)とし、通行する歩行者や自転車を検知することを想定している。

LiDARを使った路車協調システムの導入が初であることもあり、事故が生じるリスクを極力避けるため、検証を行う時間帯は、交通量が比較的少ない時間帯を選定し、警察および佐賀市への説明を行い、了承を得て実施する。

自動運転車両は、右折する際に必要な情報を、車載センサーからだけでなく、路側センサーから収集し、安全で円滑な自動運転の支援として活用できるか、検知状況や通信遅延等の観点から検証する。

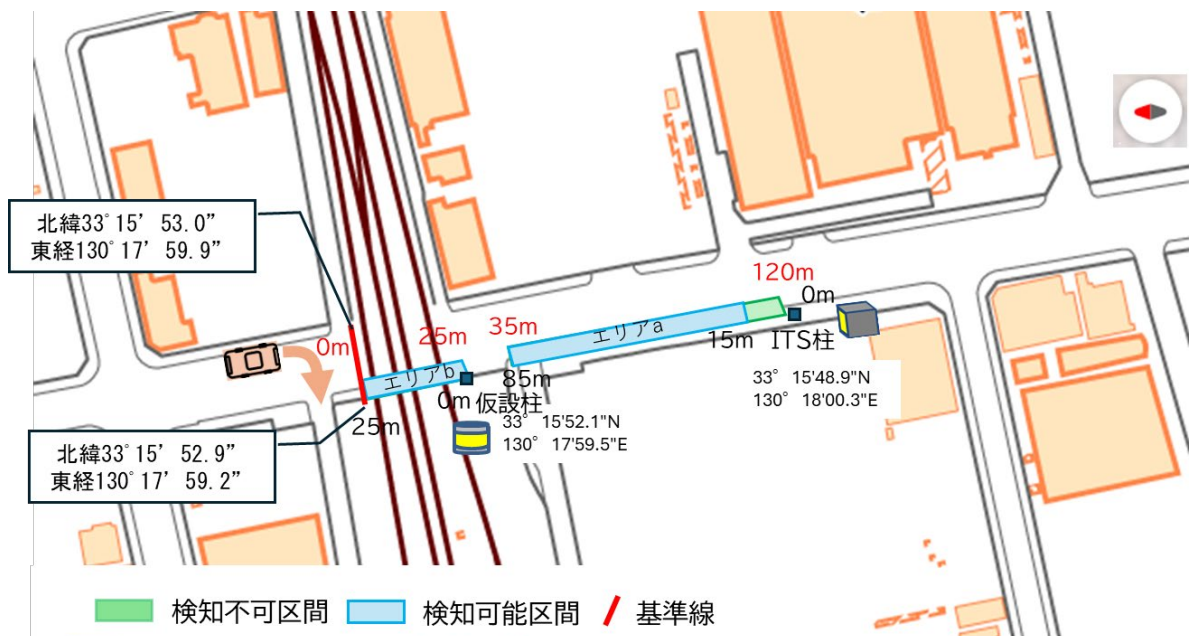


図 4.3-6 対象交差点・LiDAR 設置位置



図 4.3-7 市役所前バス停側:長距離 LiDAR、カメラ



図 4.3-8 バスターミナル前:近距離 LiDAR、カメラ

時間的条件:

実証実験の日程は 11 月 20、21、25、26、27、28 日(すべて平日)に実施する。

検証を行う時間帯は、前述のダイヤ通り日中時間帯 9 時から 17 時に実施する。

## 6) 開発・評価項目

番号	開発・評価項目
(1)	路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度
(2)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・右折待機時間等の変化
(3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果
(4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策
(5)	路側センサー要件
(6)	路側センサー情報を用いた車両挙動判断ロジックの開発
(7)	自動運転車両の制御システム要件
(8)	モバイル通信要件
(9)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度
(10)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

#### (1) 路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度

背景：本実証では、路側センサーの有効性を確認するため、運転支援における負担軽減の効果を評価する。

目的：

路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度を把握するため。

評価手法：

路側センサーあり・なしでの条件で手動介入回数を比較し、テストドライバーに負担軽減(車両制御)に関するアンケートを実施する。

手動介入回数については、アクセル介入とブレーキ介入に分けて整理する。

路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケートについては、4.6.1 1)を参照。

## (2) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数

背景：本実証では、路側センサー等の通信システムを介した外部からの情報の有無による効果測定  
の観点から、手動介入回数を指標として検討を行う。

通信システムとの連携による効果として、自動運転バスに搭載したセンサーでは建物の陰等から出現  
する歩行者等に対して検知が遅れる可能性があり、このような場合は手動介入対象となる。

目的：

車外からの情報がない場合と比較してどの程度介入率が減少し得るかを計算すること

評価手法：

路側センサーあり・なしの交差点で手動介入が発生した便数を計測項目として、  
手動介入率(OR 率) = (交差点で手動介入が発生した便数/対象便数) × 100  
を算出して評価する。

## (3) 通信システム等の支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

背景：本実証では、選定した路線バスルート(佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク)におけ  
る時間短縮効果を確認するため、自動運転バスの導入による交通利便性の向上の観点から、平均停止  
時間を指標として検討を行う。

通信システム等の支援により、自動運転バスが安全かつスムーズに走行できることが期待される。オン  
通信システムはバスの運行においては環境認識時間の短縮に、ルートが固定されていない車両(オン  
デマンド)においてはルート設定にも使用可能と考えられる。

目的：

実証結果に基づき、実証地域内における路線バスルートにおける時間短縮効果(右折信号等の数×  
平均停止時間の差)を計算し、交通利便性の向上効果を評価することを目的とする。

評価手法：

路側センサーあり・なしの右折待機時間の差を計測項目として、実証ルート上における  
右折交差点の数×手動介入率×右折待機時間  
の差を算出して評価する。

## (4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラ シェアリング等によるコスト低減化方策

背景：本実証では、経済的な持続性の観点から、コスト面での負担の考え方および既存インフラの活  
用等によるコスト低減のための方策について検討を行う。

目的：基盤共通化による、自動運転バスや手動運転車両と路側センサーシステムとのインターフェー

スを詳細設計した上で、自動運転バスに限定した場合のコスト負担と、オーナーカー手動運転車両も含めた場合のコスト負担を算出し比較することを目的とする。また、既存インフラである既設柱等への設置により、どの程度コストが低減可能かについては、現地調査・道路管理者との討議の上、新規設置と既設柱への設置の差分を算出し比較することも目的とする。

評価手法：

インフラ設置コスト、年間維持費用、メンテナンス費用、走行台数(年間の自動運転バスと全路線バスを比較する)を計測項目とし、

$(\text{インフラ設置コスト} + \text{年間維持} + \text{メンテナンス費用}) / \text{走行台数}$

を算出して評価する。

また、既存インフラの活用によるコスト低減手段については、新規設置費用、既設柱への設置費用を計測項目として、前記費用をそれぞれ算出し比較することで評価する。

詳細は 4.6.2 4)を参照。

#### (5) 路側センサー要件

背景：

本実証では、路側センサーが自動運転車両に情報を提供する際に求められる、検知範囲・位置精度・測定周期等の要件に関する検討を行う。

目的：

LiDAR による検知率の評価および検知した物体の位置の正確性の検証、物体情報の配信頻度、同時に検知する物体検知数、センサー検知想定範囲での検知可否の確認等を目的とする。

評価手法：

路側センサーは、右折対象交差点の対向車を検知するための長距離 LiDAR と、右折対象交差点近傍で自転車や歩行者を検知するための近距離 LiDAR の 2 種類を用いる。評価項目および具体的な評価手法を以下の表 4.3-2 に示す。

表 4.3-2 LiDAR を使用した計測項目および評価手法

項目名	計測項目	評価手法
検知率	物体を検知する割合	$(\text{LiDAR で検出した車両および自転車・歩行者の数}) / (\text{検知区間を通る車両および自転車・歩行者の数})$
物体検知位置の正確性	物体検知位置の正確性	長距離 LiDAR: $ \text{車両緯度経度と基準線の距離} - \text{物標と基準線の距離}  \leq 1m$ 近距離 LiDAR: $ \text{歩行者位置と基準線の距離} - \text{物標と基準線の距離}  \leq 2m$
物標情報送信周期	物標情報送信周期	路側センサーが 100ms 周期で情報送信しているか統計的に評価する。

同時物体検知数	同時物体検知数	路側センサーログ「対象車両台数」にて同時に検出された物体検知数を確認する。
路側センサーから物体の検知距離	路側センサーから物体の検知距離	長距離 LiDAR:被測定車両が路側センサーから 80m 以上離れた距離に存在する時刻において、路側センサーが車両を検知しているかを確認する。 近距離 LiDAR:路側センサーから 6m 以上の歩行者検知可否を、距離計測と路側センサーログで確認する。

## (6) 路側センサー情報を用いた車両挙動判断ロジックの開発

### 背景:

路側センサー情報を自動運転バスの制御に活用する上で、情報の接続インターフェースが標準化されていないため、車両制御に活用するためには車両制御ロジックの開発が必要となる。

### 目的:

路側センサー情報を車両制御に反映させるための車両制御ロジックの開発を行う。

### 評価手法:

開発した路側センサー情報連携部を車両制御ロジックに接続することで、路側センサー情報を受信し、車両制御に反映できているかを評価手法とする。

## (7) 自動運転車両の制御システム要件

### 背景:

本実証では、路側センサーが検知した情報を用いて自動運転車両を制御することを前提とする環境において、制御システムに求められる要件について検討を行う。

### 目的:

路側センサーの検知する物標の位置・移動速度の正確性、および路側センサーの検知した物標情報の自動運転バスへの伝送時間、積算パケット到達率を評価することにより、制御システム側に求められる要件を明確化することを目的とする。

### 評価手法:

- ・自動運転バスが路側センサーからのデータ受信を開始する時点における、路側センサーから車両までの距離を評価することを目的に、路側センサーからのデータ受信までの開始距離を計測項目として、自動運転バスが物標情報を受信した時刻において、基準線から物標までの距離が 80m 以上かどうかを、カメラ録画映像から手動で確認する。

- ・路側センサーの物体検知時刻と自動運転バスが受信した時刻のデータを比較し、その時間差を導

出して評価することを目的に、検知から物標情報通知までの時間を計測項目として、自動運転バスが受信した時刻－路側センサー物体検知時刻 $\leq 500\text{ms}$ となっているか評価する。

・路側センサーが送信した物標情報の内自動運転車両が受信できた割合(成功率)を検証することを目的に、路側センサーからの積算パケット到達率を計測項目として、積算パケット到達率が99%以上か検証する。

・路側センサーが検知した物体の移動速度の正確性を検証することを目的に、車両の速度(車両に設置したRTK-GNSSから算出)を計測項目として、

$$|(\text{車両の速度} - \text{路側センサーが検知した速度}) / \text{車両の速度} \times 100| \leq 10$$

となっているか、評価する。

## (8) モバイル通信要件

背景:

本実証では、路車協調システムで利用するモバイル通信環境における、モバイル通信システムの要件の検討を行う。

目的:

路車協調システムで利用することを前提としたモバイル通信システム側に求められる要件を明確化する。

評価手法:

路車協調システムにおけるモバイル通信要件を明確化するため、路側センサー→基地局→自動運転車両までの通信遅延値、および通信速度を計測項目として、(自動運転バスが受信した時刻－路側センサー物体検知時刻) $\leq 500\text{ms}$ 、路側センサー設置位置での通信速度 $\geq 1\text{Mbps}$ 、および1秒当たりの平均RB数 $\geq 3\text{RB}$ を満たしているか否かを評価する。

500msの目標値は、過去の同様の実証実験における情報の伝送遅延を参考としたものであり、時速60kmの車両が秒速約16.7m、情報の送信頻度が100msであることを前提として、自動運転車両の受信時に数m実際の対向車が進んでいたとしても、十分追従可能なことが期待できるためである。

路側センサー設置位置での通信速度の目標値を1Mbps以上とするのは、100ms周期の路側センサーの情報伝達に最低限12.5KBの情報量が必要となることを前提としているためである。

1秒当たりの平均RB数を3RB以上とするのは、リソースの割り当て状況を把握する参考情報として、1Mbps程度のアップリンクスループットを安定して維持するために必要な最小限の無線リソース量を考慮したためである。

## (9) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

背景:

路側センサーの有無が自動運転バスの走行安全性に与える影響についての評価はこれまでに多数行われているが、周囲交通に与える影響についての検証は少ない。

目的:

路側センサーの有無が周囲交通に与える影響を検証する。

評価手法:

路側センサーから取得する情報の有無により、右折待機時間がどの程度変化するかを検証することを目的に、右折待機時間を計測項目として、

(路側センサーなしの場合の右折待機時間－路側センサーありの場合の右折待機時間)

を算出して評価する。

車両データ(ブレーキ等)からヒヤリハットの変化を捉え、事故削減インパクト等を試算することを目的に、右折時の安全性の向上を計測項目として、(手動介入回数の変化 × 実証ルート上の全右折の数)を評価手法とする。

テストドライバーにヒヤリハットの有無についてアンケートを行い、路側センサーの有無で結果を比較する。路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケートについては 4.6.1 1) を参照。

#### (10) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

背景:

自動運転バスの運行に通信システム等を導入することにより、これまでバス運行事業者がおこなってきた業務内容に変化が出てくる可能性がある。

目的:

自動運転バスの運行に通信システム等を導入した場合に、通信システムの維持管理等、運行に関してバス運行事業者がこれまで行ってきた業務フローに変化が生じる可能性があるため、その内容とそれらが与える影響について評価する。

評価手法:

同時介入が発生する確率を計算し、理論上必要な遠隔監視員を比較することを目的に、平均介入時間、手動介入率を計測項目として、手動介入率は(2)で検証した内容を、平均介入時間は手動介入率の評価結果で評価する。

路側センサーの有無による右折待機時間の差を検証することを目的に、右折待機時間を評価項目として、(9)と同様の評価手法で評価する。

地域交通への寄与度が高い通信システムの特長を目的として、各ユースケースにおける KPI の達成状況を計測する。すべての KPI が満たされた場合、その通信システムの寄与度が高いと判定する。

7) KPI/KGI

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度 ・運転支援の負担が軽減される
	(2)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化 ・路側センサーからの認知情報を最適化し、外乱があっても自動運転車両が安全かつ円滑に右折できる
	(3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果 ・短縮時間
	(4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策
定量評価	(5)	路側センサー要件 (目標値が複数ある場合、長距離 LiDAR / 近距離 LiDAR として記載) ・路側センサー検知範囲内において正確に物体を検知する割合: 90% ・路側センサー検知範囲内における物体検知位置の正確性: 誤差 ±1m / ±2m ・物体情報送信周期: 100ms ・同時物体検知数: 5 個以上 ・基準線から物体の検知距離: 80m 以上 / 6m 以上
	(6)	自動運転車両の制御システム要件 ・路側センサーからのデータ受信までの開始距離: 基準線から 80m 以上手前 / 6m 以上手前 ※走行中の自動車が交差点を右折する 5 秒以上前に遠隔監視員を可能にする場合の距離  ・検知から物体情報通知までの時間(自動運転バス発車判断時間): 500ms 以下 ・路側センサーからの積算パケット到達率: 99% 以上 ・車両の速度(LiDAR 検知結果): 実測度 ±10%
	(7)	モバイル通信要件 ・路側センサー→基地局→自動車両までの通信遅延値: 500ms 以下 ・通信速度: 1Mbps 以上 ・必要 RB 数: 1 秒当たり平均で 3RB 以上

	(8)	<b>【追加検証】</b> 自動運転車両を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度 ・瞬間的な G の変位量の軽減 ・交差点通過時間(右折待機時間×右折回数)の短縮
	(9)	<b>【追加検証】</b> 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等の地域交通の持続性への寄与度 ・平均介入時間の減少 ・手動介入率の減少 ・交差点通過時間(右折待機時間×右折回数) ・地域交通への寄与度が高い通信システムの特定

(1) 路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度 【定性評価】

通信システム等による支援の効果として、運転支援の負担軽減や、将来的な人件費削減 手動介入回数、運行停止時間の低減、ルート設定の柔軟化等が考えられるため。

右折のために停止してから右折でバスセンター入口の横断歩道を越えるまでの間で手動介入の有無を計測する。

(2) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化 【定性評価】

通信システム等による支援の効果として、運転支援の負担軽減や手動介入回数、運行停止時間の低減、ルート設定の柔軟化等が考えられるため。

(3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果【定性評価】

通信システム等による支援の効果として、運転支援の負担軽減や手動介入回数、運行停止時間の低減、ルート設定の柔軟化等が考えられるため。



図 4.3-9 実証ルートにおける右折箇所

(4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策【定性評価】

オーナーカー連携を視野に、商用網を活用したシンプルな共通基盤を構築し、地域、ルートへの横展開とランニングコスト低減を図る。

無電柱化エリアでのスマートポール新設は高コストのため、前回の実証では街路灯を活用して設置し、初期費用を抑えることを企図した。今回の実証もそれに倣い街路灯を活用してのスマートポール設置を想定している。

(5) 路側センサー要件【定量評価】

走行ルートとセンサーの設置位置の関係上、人や車両等の検知対象にオクルージョンが生じる可能性があり、この場合は路側センサーを用いた検知の対象外となる。そのような場合も含め 90%を KPI としつつ、検知漏れが生じた場合は、その要因を分析する。

一般道路は高速道路よりも低速であるため、高速道路で検討されているセンシング周期 100ms 間隔であれば技術的に妥当であると考えられる。一般道路では 100ms に 1m 前後しか移動できないため、測定周期としては十分である。

発車判断から右折が完全に完了するまでに要する時間を 6 秒と想定し、車両の走行速度が時速 60km 程度であることを考慮すると、路側センサーの検知範囲として 100m 程度を確保すれば十分であると考えられる。

LiDAR については、車両の走行速度を時速 40km、検知範囲を 100m とした場合、検知範囲内に存在する車両を一車線あたり 2~3 台として、該当道路は 2 車線であることから、同時物体検知数 5 台を想定すれば妥当であると判断する。

近距離 LiDAR については、対象を歩行者・自転車となることを前提として、長距離 LiDAR と同等の考え方で設定する。

#### (6) 自動運転車両の制御システム要件【定量評価】

「自動走行車両の速度」と「目標物と遭遇するまでの到達時間」から KPI を設定している。

交差点右折時の判断においては対向車両の接近時間の考慮が必要となるが、本実証ではその時間を 1s と設定している(当該地点では一時停止後に右折を行う為、1s で妥当として KPI を設定)。このため、インフラ連携による物体検知から自動運転バスへの通知遅延を 500ms 以下とすれば十分である。

路車間通信における所要通信品質の指標として、「積算パケット到達率 99%以上」が用いられているため、同様の指標とする。

#### (7) モバイル通信要件【定量評価】

物標情報に必要なデータレートは、1 秒あたり 38KB が最大であるため、1Mbps の通信速度であれば十分である。なお、最大 30 個の物標と想定した際の LiDAR の物標データの情報量を根拠とする。

#### (8) 自動運転車両を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度【定量評価】

本検証項目は、レベル 4 社会実装に向けて路側センサー連携による効果を検証するために追加したものである。

通信システム等による支援の効果として、自動運転車両を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上が考えられるため。

#### (9) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等の地域交通の持続性への寄与度【定量評価】

本検証項目は、レベル 4 社会実装に向けて路側センサー連携による効果を検証するために追加した

ものである。

1:N 遠隔監視を見据え、介入時間・率の減少を算出し、通信による監視コスト低減効果を試算するため。

右折待機時間の減少により、後続車の円滑な走行が可能になるため(本実証の交差点ではバスのみ右折可能)。

各ユースケースの通信システムが、自動運転車両の ODD や運行範囲・路線を拡大し、地域交通の持続性の向上につながるか検証するため。

#### 4.4 ④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装

実施なし

#### 4.5 ⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証

実施なし

## 4.6 レベル 4 の社会実装に向けた検討

### 4.6.1 運用検証

- 1) システムの操作性やユーザーインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等)

#### (1) 路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度(アンケート調査)

目的:

路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度を把握するため

調査項目:

調査票(図 4.6-2)を参照

- ①車両制御は実感と一致したか
- ②一致しなかった理由(①で一致しなかった場合に回答)
- ③手動介入を行ったか
- ④ヒヤリハットは発生したか

調査対象:

テストドライバー

調査方法:

路側センサーあり・なしで、テストドライバー(1名)に負担軽減に関するアンケートを実施する。  
各便の運行終了後、運転士がアンケート調査票に回答する。

調査期間:

路側センサーなし:2025年10月1日~10月29日、内 平日6日間(準備運行期間中)  
路側センサーあり:2025年11月20、21、25、26、27、28日(一般運行期間中)

評価手法:

路側センサーの有無で各設問の結果(各事象が発生した回数)を比較する

記録者	日付	便情報	①車両制御は実感と一致しましたか 1. 一致した 2. 一致しなかった	②一致しなかった理由は何ですか ※①で「2. 一致しなかった」を選択した場合に回答 1. 進行可能時に停止 2. 進行不可能時に進行	③手動介入を行いましたか 1. はい 2. いいえ	④ヒヤリハットは発生しましたか 1. はい 2. いいえ	備考
	11月20日(木)	第2便					
	11月20日(木)	第4便					
	11月20日(木)	第6便					
	11月20日(木)	第8便					
	11月20日(木)	第10便					
	11月20日(木)	第12便					
	11月20日(木)	第14便					
	11月20日(木)	第16便					

図 4.6-1 路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケート調査票(抜粋)

## (2) 遠隔監視システムに必要な機能に関するアンケート

### 目的:

遠隔監視業務を担う現場目線で遠隔監視システムに必要な機能やユーザーインターフェースを把握するため。

### 調査対象:

将来的に遠隔監視業務を担うことを想定し以下を対象に設定

バス運転士(二種免許保有者)、運行管理者、佐賀市および佐賀市交通局職員、テストドライバー

### 調査方法:

聞き取り式アンケート調査

※調査時は、遠隔監視画面・機能・遠隔監視員の役割の説明をしたのち、アンケート調査を実施

### 調査場所:

佐賀市役所市民ホール

### 調査日時:

佐賀市交通局職員:2025年11月27日(木) 13:00~13:15

佐賀市企画政策課職員:2025年11月28日(金) 13:00~13:15

テストドライバー:2025年12月1日(月) 11:15~11:30

### 調査内容:

調査票(図 4.6-2)を参照

### 評価手法:

アンケート結果、調査時の議事録から遠隔監視システムに必要な機能を把握



### (3) 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケート

目的:

「遠隔監視システムによるレベル 4 実装」(無人自動運転)を想定した乗客の受容性の変化を把握するため

調査対象:

遠隔監視モニター見学者(佐賀市役所市民ホールにお越しの地域住民等)

調査方法:

聞き取り式アンケート調査

※調査時は、将来的に遠隔監視システムによる無人自動運転が想定されることを説明したのち、アンケート調査を実施

調査場所:

佐賀市役所市民ホール

調査日時:

2025年11月27日(木)、28日(金) 各日13:00-17:00

調査内容:

調査票(図 4.6-3、図 4.6-4)を参照

評価手法:

アンケート結果、調査時のメモから社会受容性やその回答に至る背景を把握

## 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケートのお願い

本アンケートは、遠隔監視システムによるレベル4実装（無人自動運転）を想定した乗客の受容性を把握することを目的としています。

本アンケートを通じて得た情報は、個人を識別できない形式に加工した統計データとして利用します。

- 本調査票回答の目安は3分程度です。
- アンケートは、右のQRコードを読み取り、webでご回答ください。
- ご回答は2025年11月28日（金）までをお願いします。

実施代表機関－楽天モバイル株式会社

実施機関（問合せ先）－株式会社建設技術研究所

web 回答

### 1. あなたご自身について

1-1	あなたの年齢を教えてください。	<input type="checkbox"/> 20歳未満	<input type="checkbox"/> 20歳代	<input type="checkbox"/> 30歳代
		<input type="checkbox"/> 40歳代	<input type="checkbox"/> 50歳代	<input type="checkbox"/> 60～64歳
		<input type="checkbox"/> 65～69歳	<input type="checkbox"/> 70～74歳	<input type="checkbox"/> 75歳以上
1-2	普段のバスの利用頻度を教えてください。	<input type="checkbox"/> 週5回以上	<input type="checkbox"/> 週3～4回	<input type="checkbox"/> 週1～2回
		<input type="checkbox"/> 月1～3回	<input type="checkbox"/> 年に数回以下	<input type="checkbox"/> 全く使わない
1-3	自動運転バスに乗りしたことがありますか。	<input type="checkbox"/> ある	<input type="checkbox"/> ない	

### 2. 自動運転バスの印象について

2-2	自動運転バスに対する印象を教えてください。	<input type="checkbox"/> 自動運転バスに対し、全く不安はない
		<input type="checkbox"/> 自動運転バスに対し、それほど不安はない
		<input type="checkbox"/> 自動運転バスに対し、やや不安がある
		<input type="checkbox"/> 自動運転バスに対し、不安がある

— 裏面へお進みください —

図 4.6-3 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケート調査票(1/2)

**3. 遠隔監視型自動運転（バス車内の無人化）について**

3-1 自動運転バスが次に示すような無人（運転士や車掌のような【乗務員】が一切いない状態）で運行する場合を想定して、①～⑧の問いにお答えください。

- ・ 運賃は従来どおり支払う（案内は無い）
- ・ 遠隔で係員が車内を常に監視している
- ・ 車内の様子は車内カメラで録画されている
- ・ 緊急時はご自身で停止ボタンにより車両を停止させ、車外に脱出することができる（エレベーターに近い状況）

このような無人運行の状況にご自身や同乗者が置かれたら、どのような対応であれば受け入れられると思いますか？ (①～⑧に対しそれぞれ1つ選択)	「自分で解決する・調べること」を受け入れられる	「乗り合わせた乗客に助けを求めらるること」を受け入れられる	「係員に通信で対応してもらうこと」を受け入れられる	「必要な時に車内に駆けつける乗務員に対応してもらうこと」を受け入れられる	「常に係員が車内に乗務し、対応してもらうこと」を求めらる
①運賃について知りたい時 ・ 運賃の支払い方法が分からない場合 ・ 運賃の支払いに問題が発生した場合など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
②運行情報が知りたい時 ・ 降りるべき停留所や乗り換え方法が分からない場合 ・ バスのルートや運行状況に関する最新情報をリアルタイムで知りたい場合など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
③個別の案内・対応をしてほしい時 ・ 聴覚障がい者や外国人観光客がバスに乗る場合など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
④バスの利用に当たって物理的なサポートをしてほしい時 ・ ベビーカーや車椅子などの利用者がバスに乗る場合 ・ 荷物が多い場合や重い荷物を持っている場合など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> (事前予約※)	<input type="checkbox"/>
⑤車内でのご自身や同乗者のトラブルを解決、サポートしてほしい時 ・ 体調不良や急病など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
⑥車内での対人トラブルを解決、サポートして欲しい時 ・ 他の乗客からの暴力や嫌がらせを受けた場合など	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> (許容待ち時間: 分)	<input type="checkbox"/>
⑦技術的なトラブルの解決や対応をしてほしい時 ・ システムエラーや技術的なトラブルで停車した場合、トラブル解消と安全な運行再開に向けた対応をとるなど	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> (許容待ち時間: 分)	<input type="checkbox"/>
⑧運行トラブルの解決や対応をしてほしい時 ・ 交通渋滞や事故による遅延が発生した場合、状況を確認し、代替ルートや対応策を案内するなど	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> (許容待ち時間: 分)	<input type="checkbox"/>

※想定する状況④「バスの利用にあたって物理的なサポートをしてほしい時」では、『事前予約で車内に駆けつける乗務員に対応してもらうこと』を受け入れられる』

— ご協力ありがとうございました —

図 4.6-4 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケート調査票(2/2)

## 2) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

路側センサーや遠隔監視システムの導入により、将来的に自動運転バスの乗務員は必ずしも必要とならなくなり、他の路線も含めた柔軟な人員配置ができ、地域交通の維持に貢献できると考えられる。しかしながら、1路線、1台の車両では、コスト効果は見込むことができない。したがって複数の車両を1人で管理することで、事業として持続可能性を増すこととなるため、他路線での効果検証も有効であると考えられる。

## 3) データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策

本実証では路側センサー情報を用いており、車両制御に影響がないよう、車両近傍の情報については車両センサー情報と複合することにより、路側センサー情報に不備があった場合でも意図しない挙動が発生しない設計としている。

- 自動運転システム・遠隔監視システムに係るセキュリティ対策
  - ・ 自動運転車両においては外部との間にファイアウォールを設置することでセキュリティを確保するとともに、タイムスタンプ等により情報の鮮度について評価している。
  - ・ 遠隔監視システムで車両から送信される映像は遠隔監視画面に到達するまでの経路において暗号化されている。
- 路側インフラに係るセキュリティ対策
  - ・ 通信相手を識別するために設定した IP アドレス以外との通信を遮断する
  - ・ ファイアウォールを有効にして不正アクセスを防ぐ
- 通信網に係るセキュリティ対策
  - ・ 通信相手を識別するために設定した IP アドレス以外との通信を遮断する
  - ・ 通信内容は暗号化して送受信する

## 4) 通信システム(路車協調システムや端末を含む)の維持管理・保守

- 自動運転システム、遠隔監視システムに係る維持管理、保守
  - ・ 自動運転システム、遠隔監視システムは定期的(おおよそ月 1 回)にメンテナンスを行い、各機能についてチェックを行うとともに、車両自体については、3 ヶ月点検により運行に支障を来さないようしている。
- 路側センサーに係る維持管理、保守
  - ・ 自動運転車両のセンサー範囲を超える領域の移動体の情報が自動運転車両へ通知できているかを定期的に確認し、路側センサーが原因で正常に情報が通知できていないことを確認した場合は、原因に沿った対策を速やかに講じる。
  - ・ 既設柱に設置した路側センサーを含む筐体にゆるみ等が発生することで安全性を損ねていないか、定期的に設置状況の点検を行う。設置状況に問題が発覚した場合は、安全を確保する

ための適切な措置を速やかに講じる。

- 通信網に係る維持管理・保守

(維持管理)

- ・ 楽天モバイルでの商用ネットワークにおいては、いくつかの無線機を運用しており、いずれも周波数や空中線電力、および温度に関する設備的な異常、環境の変化等を検知した場合、監視所へ通報する機能を有しており、その無線設備の通報を受ける場所である NOC(ネットワークオペレーションセンター)については、以下の方針に基づき、東京都に東京 NOC(世田谷区に所在)および、大阪府に大阪 NOC(大阪市北区に所在)を設置している。
- ・ 同時に災害の影響を受けない地域(同一活断層上にない地域)
- ・ 大規模災害により1箇所のNOCで機能障害が発生した場合でも、もう一方のNOCにおいて24時間365日監視可能な体制を整えていること。  
※これらのNOCにおいて24時間365日体制で無線局の監視を行っている。  
また、無線機に搭載されているOSSやCUIを用いることで、始動・停止等の遠隔操作が可能である。

(保守)

- ・ 楽天モバイルの保守運用体制は自社社員および楽天モバイルエンジニアリング社、加えて他の保守委託会社にて構築されており、24時間365日にわたる保守運用体制をシフト制にて行っている。また、予備品等の保守部材保管や無線設備故障時の駆けつけ作業班が常駐する保守運用拠点は全国に設置され、障害発生時には速やかに対応できるような体制を整えている。

#### 4.6.2 効果検証

##### 1) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化

通信システム等の運用の有無による手動介入回数、運行停止時間等の変化について、本事業では通信システムで自動運転システムに影響を与えるものは、遠隔監視システムと路側センサー情報であり、遠隔監視システムは無人運転車両に用いられることとなり、手動介入は発生しない。このため、運行停止時間の変化が評価軸となるため、遠隔監視システムを用いて、運行停止から運行再開までの時間を計測し、通信が与える影響を評価する。

路側センサー情報を用いた通信システムの評価は自動運転車両がシステムのみで運行を行うことを支援するシステムであり、路側センサー情報を活用した場面における手動介入回数の変化により効果検証を行う。

##### 2) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

通信システム等を用いた自動運転走行車を含む道路全体の安全性、円滑性については、遠隔監視システムの評価軸となる運行停止時間の短縮が円滑性に、路側センサー情報を用いた車両制御における手動介入回数が安全性に寄与していると考えており、それぞれにおいて評価を行い、総合的に判断する。

### 3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

本実証では通信システムによるルート設定を行っていないが、車載センサー検知外の情報を用いることで、より広範囲の情報を得ることができるため、自動運転バスの走行に貢献すると考えられ、これらの情報がルート変更等に活用することで利便性向上に繋がると考えられる。

### 4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

基盤共通化により、どの程度コストが低減可能かについてはシステムを詳細設計した上で、自動運転バスに限定した場合のコスト負担と、オーナーカー手動運転車両も含めた場合のコスト負担を算出し比較することを目的に、インフラ設置コスト、年間維持費用、メンテナンス費用、走行台数(年間の自動運転バスと全路線バスを比較する)を計測項目とし、(インフラ設置コスト+年間維持+メンテナンス費用)／走行台数を算出して評価とする。

また、既設柱等への設置により、どの程度コストが低減可能かについては現地調査・道路管理者との討議の上、新規スマートポール等設置と既設柱への設置の差分を算出し比較することを目的に、新規スマートポール等設置費用、既設柱への設置費用を計測項目として、前記費用をそれぞれ算出し比較することで評価する。

## 5. 通信システムに関する構築

### 5.1 通信システムの全体像

#### 5.1.1 ユースケース① 遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル・中山間地)の通信の安定性確保

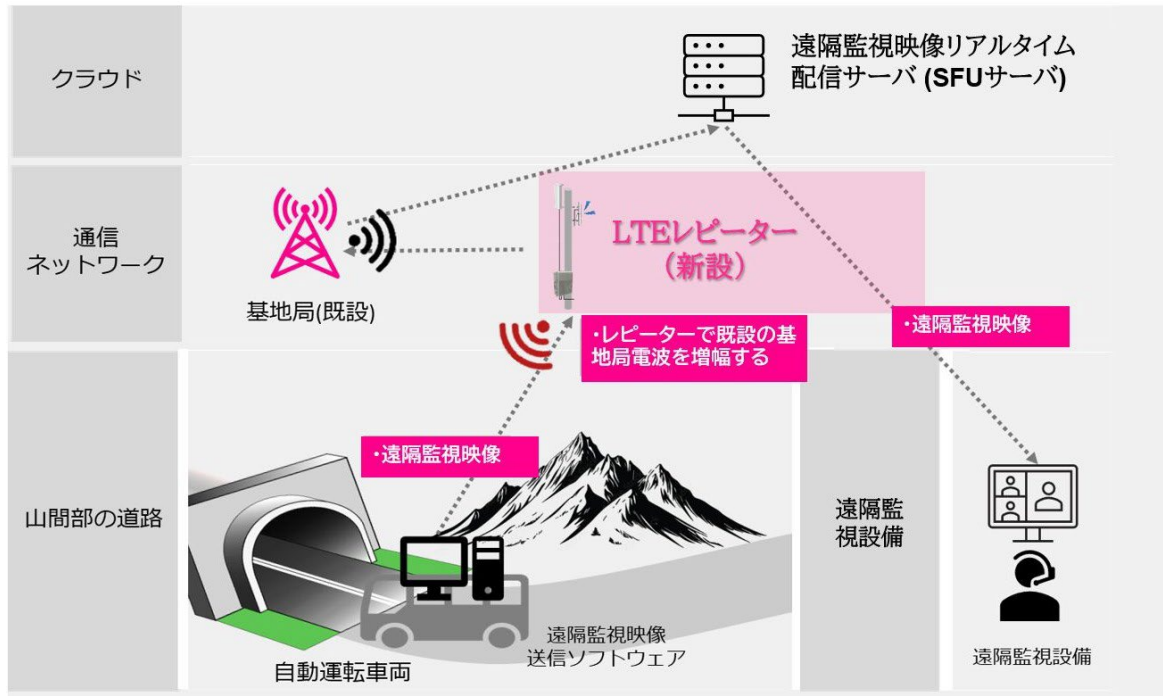


図 5.1-1 ユースケース①システム・ネットワーク構成概要図

LTE レピーターをトンネル入口近辺に設置することで既存基地局の電波を増幅し、トンネルとその周辺の不感エリアをカバーする。レピーターは指向性アンテナを採用し、トンネル内部へ効率的に電波が届くようトンネル入口に向け位置・角度を調整する。

詳細なシステム・ネットワーク構成図については参考資料編「図 8.1-2 遠隔監視システム」参照。

5.1.2 ユースケース②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保

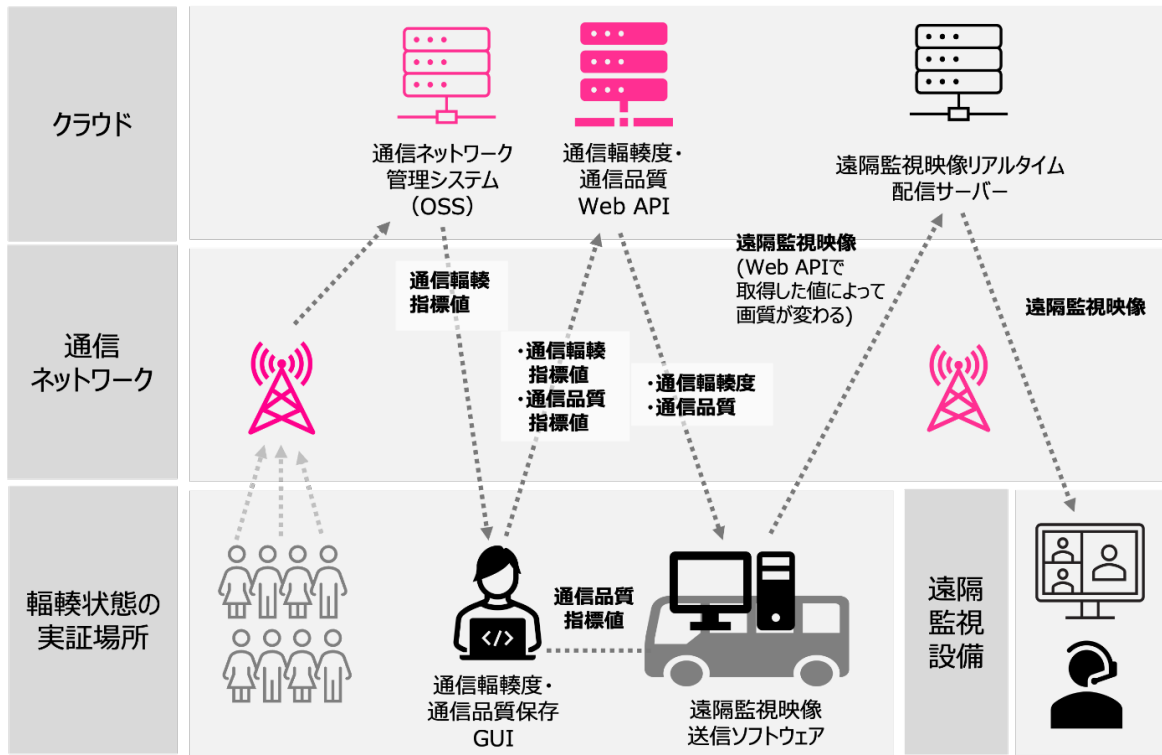


図 5.1-2 ユースケース②システム・ネットワーク構成概要図

通信輻輳度・通信品質保存 GUI からは、遠隔監視映像送信ソフトウェア用 LTE ルーターから取得した通信品質指標値と、ネットワーク管理システム OSS から取得した通信輻輳指標値を、通信輻輳度・通信品質 Web API に保存できる。通信輻輳指標値は、OSS から API 経由で取得した値が、GUI に自動設定される。

通信輻輳度・通信品質 Web API は、GUI から保存された通信輻輳指標値・通信品質指標値を、通信輻輳度・通信品質(0/1の整数値)に変換して返す。

自動運転車両の遠隔監視映像送信ソフトウェアは、映像送信開始前に API から通信輻輳度・通信品質を取得し、いずれかが1(通信輻輳 / 通信品質悪化)の場合、輻輳に適した画質を自動的に選択し映像を送信する。

5.1.3 ユースケース③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証

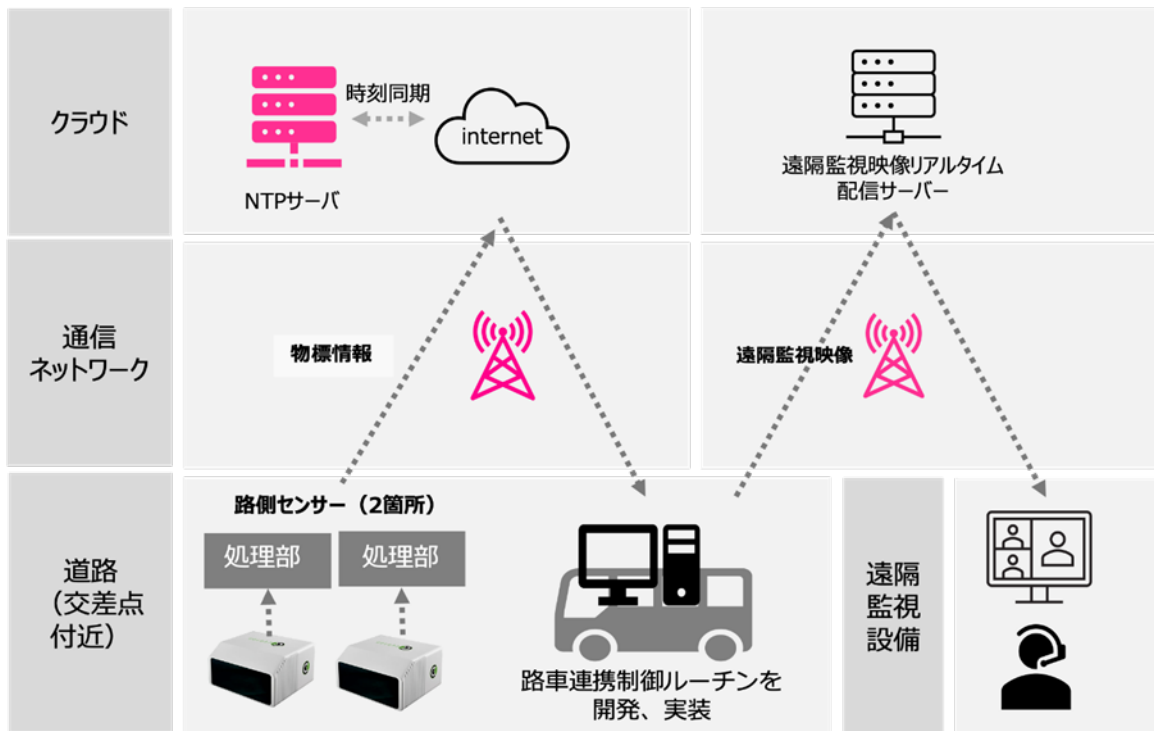


図 5.1-3 ユースケース③システム・ネットワーク構成概要図 1

バスセンター付近にある高架下の見通しの悪い交差点に路側センサーを 2 台設置し、自動運転車両の右折走行制御を実現する。

路側センサーは 360 度検知する近距離 LiDAR(右折先の横断歩道の「歩行者・自転車」検知)と 80m の距離で物体を検知する長距離 LiDAR(対向車線の「車」検知)を使用する。

2 台の路側センサーは、検知した物標情報をモバイル通信網経由で自動運転車両へ送信し、自動運転車両側システムは路側センサーからの物標情報を加味した車両発進判断ロジックにより、安全な右折制御を行う。

また路側センサー→自動運転車両側システムまでの物標情報送信にかかる時間を正確に測定するために、路側センサーと自動運転車両側システムは、同一 NTP サーバーを使用して時刻同期を行う。

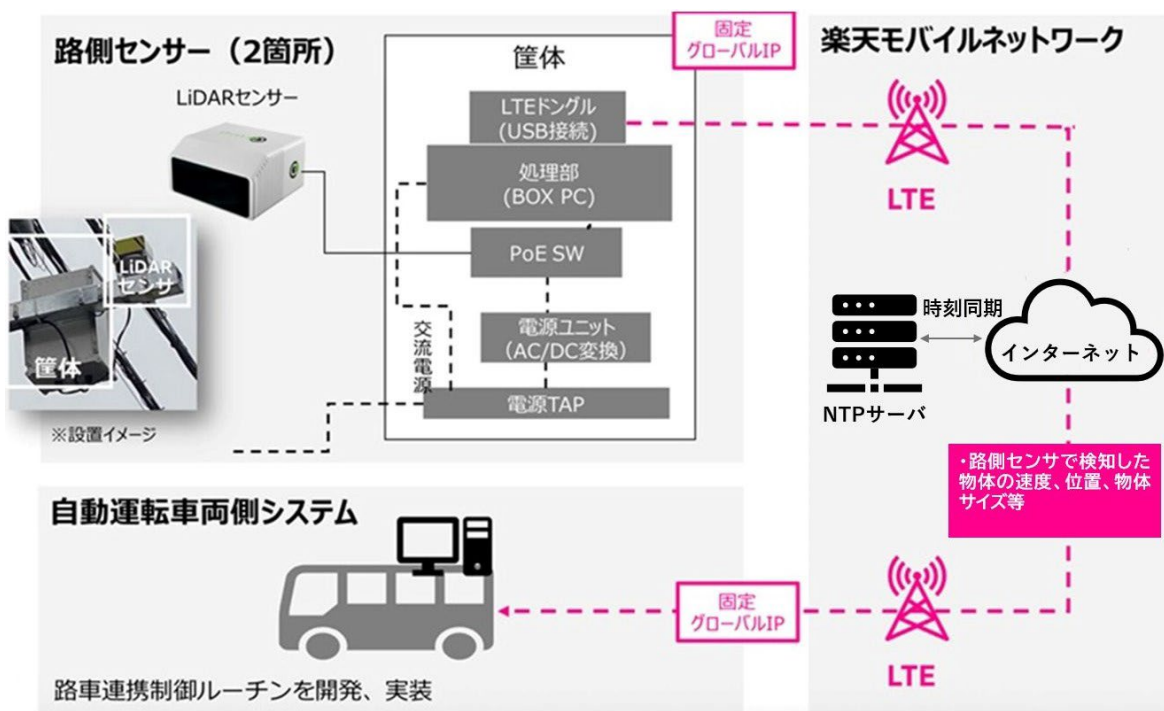


図 5.1-4 ユースケース③システム・ネットワーク構成概要図 2

路側センサーと自動運転車両側システムは、ともに固定グローバル IP オプション付きの楽天コミュニケーションズ SIM カードを使用してインターネットへアクセスする。これは、閉域網では NTP サーバーにアクセスできないためである。また路側センサーは自動運転車両側システムに、自動運転車両側システム側の SIM のグローバル IP アドレスを指定して直接アクセスし、物標情報を送信する。

## 1) 路側センサー

路側センサーは自動運転車両のセンサー類では把握が困難な①対向車線の車両と②右折先の歩道を検知して、その情報を自動運転車両へ通知する。なお、物標の捕捉対象は一つではなく複数で、それらの情報を周期的(100ms)に通知し、その都度接続されたネットワーク(LTE)を介して直接自動運転車両へ通知する。物標の情報は、路側センサー内で必要な情報処理が行われデータ量を最適化した上で自動運転車両へ通知される。また遅延を最小限に抑える為、路側センサー側でデータサイズを最小化し、自動運転車両に通知することで送信データのサイズは1回の送信あたり1KB程度を目指す。本プロジェクトにおいては今回の物体情報数、周期、必要最小限のデータサイズの妥当性も検証する。

路側センサーは既設柱(電柱、照明柱、信号柱等)への設置を想定し、設置する際には当該既設柱の管理者との調整が必要となる。また路側センサーを稼働させるためには100V電源が必要となり、電源工事や電気代に関しては当該既設柱の管理者と調整する。

【路側センサー設置箇所:佐賀駅バスセンター周辺へ2箇所】

佐賀駅バスセンターへの右折支援として路側センサーを設置する。自動運転車両が佐賀駅バスセンターへ右折で進入する際に、自動運転車両のセンサー類では把握が困難な対向車線の車両(100m程度)と右折先の歩道の状況を路側センサーで検知することで、自動運転車両の安全運転を支援する。



図 5.1-5 路側センサー設置箇所

- ① 長距離 LiDAR : 高架下が遮蔽となる可能性があるため、市役所前バス停付近の既設柱に設置して後方から当該交差点に進入する対向車両を検知することで、自動運転車両の安全運転を

支援する。

長距離 LiDAR は高架に向かう 2 車線上の車両を検知するために、図 5.1-6 に示すように設置した。設置箇所周辺は無電柱エリアであり、電源は架空配線で近隣の JA 施設より供給した。架空配線を行うため、置き基礎の上に金属柱を設置した。

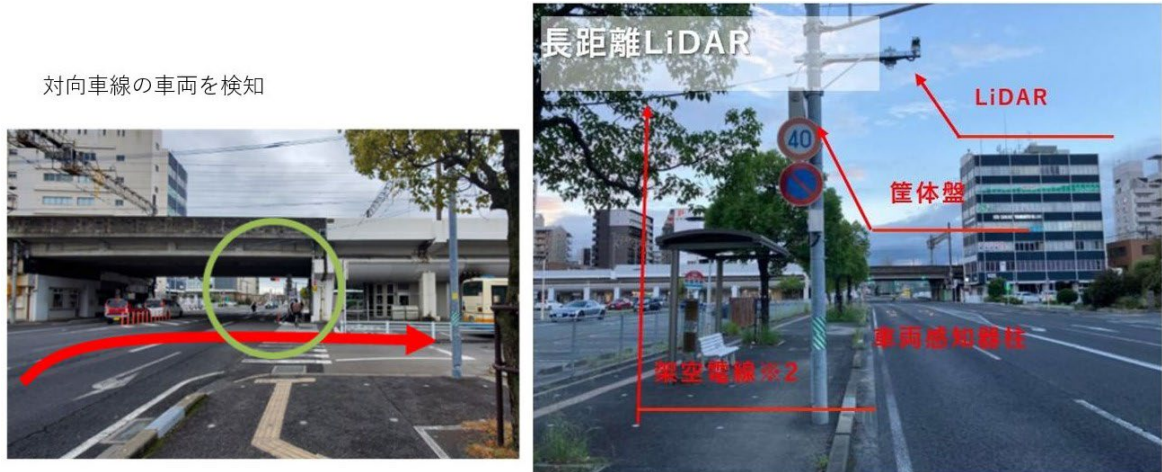


図 5.1-6 長距離 LiDAR

- ② 近距離 LiDAR : 高架下の歩道上の歩行者・自転車を検知するため、図 5.1-7 に示すように右折先の横断歩道側に路側センサーを設置した。その際対向車線の車両によって人や自転車が遮蔽されない配置となるよう留意した。当初は高架脇の信号柱に設置することを想定していたが強度に問題があったため、置き基礎の上に設置した金属柱で代替した。

高架下の人や自転車を検知



図 5.1-7 近距離 LiDAR

#### 5.1.4 自動運転車両

BYD J6 をベースに自動運転用にセンサーや通信機器を取り付けた自動運転車両。車両に取り付けたセンサー、カメラで検知した情報を遠隔監視システムへ送信する。車両の前方・後方に取り付けられたセンサー、カメラで道路上の障害物等を検出し、それらの距離や

方向を測定できる。また、通信機能を追加することができ、他自動車の情報や路側センサーから得られた危険予測情報をネットワーク経由で受信し、車両制御システムに送信することが可能である。

### 5.1.5 遠隔監視システム

遠隔監視システムは、車両で撮影された映像を、モバイル回線を介して、インターネット上のパブリッククラウド上に配置された管制センター経由で遠隔監視設備に送信する仕組みである。映像送信技術はWebRTC SFUが使用される。

伝送の際に課題となる回線速度の遅延やデータ圧縮による画像の劣化に対し、撮影された映像を画像処理技術によって統合化することで、高画質で遅延のない伝送を実現している。

本実証では自動運転走行に使用する車室外カメラ 7 台を共用、車室内に 2 台のカメラを追加し、計 9 台で遠隔監視システムを構築している。車室外カメラ 7 台、車室内カメラ 2 台の映像は画像処理技術により車外映像ストリーム、車内映像ストリームにそれぞれ統合された上で送信される。

レベル 4 認証での遠隔監視要件を満たすため、映像伝送に加え、音声通話や車内外音の伝送も実施している。また自動運転バスの車速やアクセル・ブレーキレベル等の制御信号も伝送し、監視に適した情報を提供することで、自動運転バスの安心・安全な遠隔監視を支援している。ただし、本実証ユースケース①、ユースケース②では制御信号の送信は行っていない。

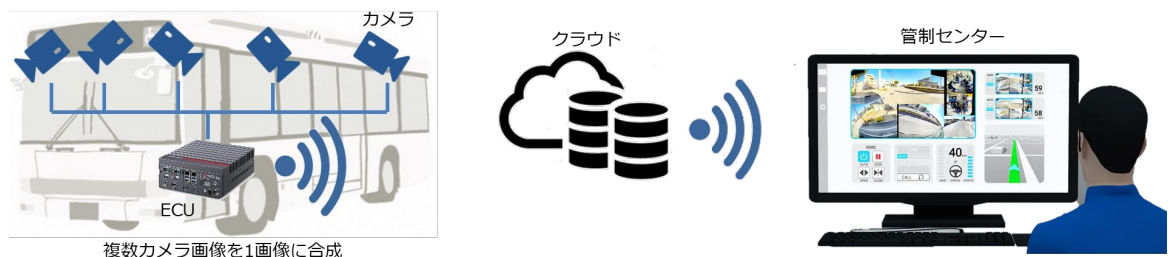


図 5.1-8 遠隔監視システム概要図

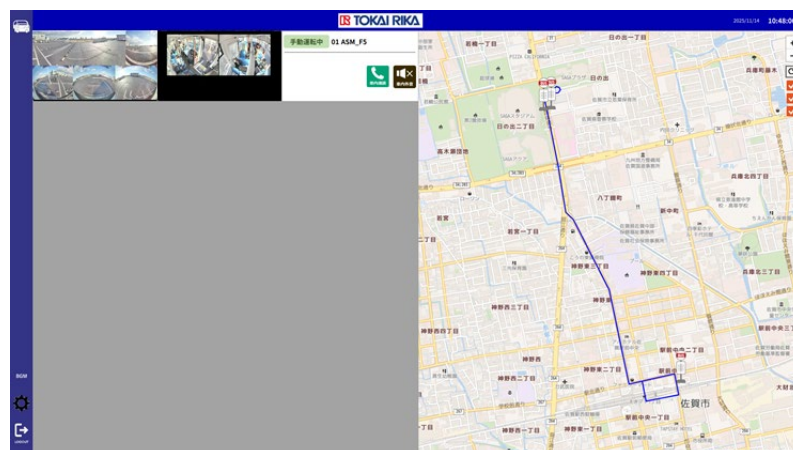




図 5.1-9 遠隔監視画面(Web ブラウザ)

遠隔監視システムで車両から常時送信を行うデータの概要を示す。

映像に加え、車内外に搭載されたマイクから入力される音声データもそれぞれ送信している。

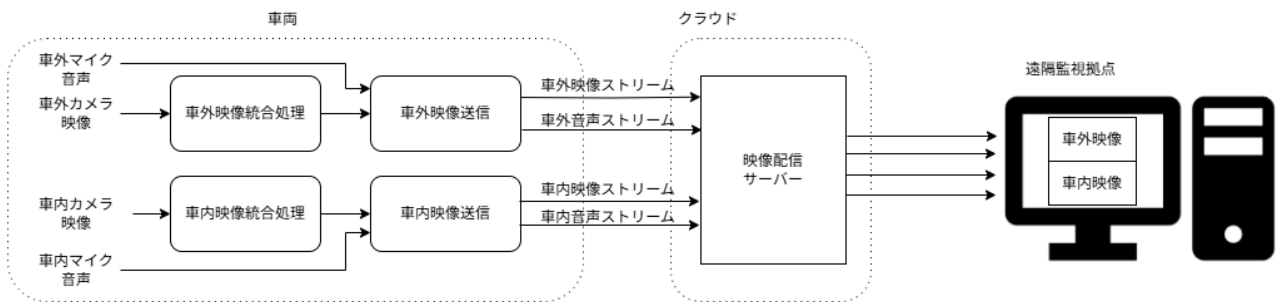


図 5.1-10 遠隔監視システム 送信データのストリーム構成

送信処理にはデータを圧縮するエンコード処理が含まれる。映像ストリーム送信にあたっては車内外それぞれターゲットとなるビットレートを送信開始前に指定し、送信中はターゲットビットレートに近い値になるようデータ圧縮と映像送信が行われる。ビットレート値は 1Mbps を基本設定としているが、走行環境に合わせて調整を行う。ターゲットビットレートを 1Mbps に設定した場合、車外映像、車内映像の 2 ストリーム分となる 2Mbps と車内外音声データ分のデータ通信を行うことになる。

本実証においてはターゲットビットレートの指定とともに送信映像の最大解像度、最大フレームレート設定を切り替える。解像度、フレームレートを落とした方がネットワーク状況の変化やパケットロスに対する耐性が高まり、フレームドロップによる影響も下げられるという仮定のもと、遠隔監視映像への影響を確認する。

## 5.1.6 基地局

自動運転車両、路側センサーからの情報を送信する際に利用されるネットワークである。実証実験を行うエリアで稼働中の基地局(LTE)を利用する。

エリア毎の基地局セルの混雑状況等の指標値は、ネットワーク管理システム OSS に定期的に集約さ

れ、OSS 画面での確認や、API での取得が可能である。

市街地(佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間のルート、佐賀インターナショナルバルーンフェスタ会場周辺)については楽天モバイルの LTE サービスエリア内で実施した。

他方で、トンネルを含む山間部のルートについては楽天モバイルの LTE/5G エリアカバレッジ外のため、山間部周辺のエリアカバレッジを LTE レピーターで延伸して実証を実施した。

※商用基地局の設置場所は非公開。

### 5.1.7 データ種別

以下にモバイル網で用いるデータの種別の概要を記載する。

- 自動運転車両から取得する位置情報、速度やハンドル角度の情報、遠隔監視システムとの接続性、遠隔監視映像、遠隔監視音声、危険アラーム、路側センサーから得られた物標の位置・速度情報、タイムスタンプ等

### 5.1.8 フェールセーフについて

本システムにおいて、モバイル通信網における U-Plane データについては、HARQ 等の 3GPP に基づいた L1/L2/L3 レイヤーにおける再送制御、システムとしてのデータの送信/受信が適切な周期で正常に行われているかどうかは、車両通信システム側および路側センサー側からのリクエスト/応答のメッセージをやり取りすることでも判断を行う。

本システムにおいて周期データの欠落が発生したり、データの正常性が認められない場合には、その状態を自動車両に通知し、緊急停止するまたは手動運転に切り替える等のアクションを行うことを検討する。

## 5.2 システム構築・ネットワーク構築にあたっての留意事項等

### 5.2.1 4GLTE 網のみを使用する

本実証ではアップリンク スループット KPI はユースケース①、②、③で 1Mbps 以上、遅延 KPI は最も厳しいユースケース③において路側センサーから自動運転車両への片道で 500ms であり、4G 網でシステム要件を満たしている。5G の特徴である超高速大容量、超低遅延は必要としていない。

自動運転サービスが求められる地方都市や中山間部では、通信環境としては 4G での環境整備が進み、普及されていることが多い現状においては、4GLTE を用いた実証が望ましい。

なお本実証の実施地点(ユースケース①：須田トンネル、ユースケース②：佐賀西部広域水道企業団駐車場、ユースケース③：佐賀駅周辺)はすべて 5G のカバーエリア外である。

### 5.2.2 路側センサー、自動運転車両側システムで固定グローバル IP オプション付き SIM カードを使用する

路側センサーと自動運転車両側システムは、ともに固定グローバル IP オプション付きの楽天コミュニケーションズ SIM カードを使用してインターネットへアクセスする。これにより、路側センサーと自動運転車両側システムは、閉域網ではアクセスできないインターネット上の NTP サーバーにアクセスし、時刻同期を実施し、路側センサーから自動運転車両側システムへの物標情報送信にかかる時間を正確に算出することができる。

また路側センサーは自動運転車両側システムに、自動運転車両側システム側の SIM の固定グローバル IP アドレスを指定して直接アクセスし、物標情報を送信することが可能である。

### 5.2.3 遠隔監視映像送信用ルーターの選定基準

#### 1) 対応回線

本実証では 5G の特徴である超低遅延、超高速大容量は必要としないため、ルーターは LTE に対応していればよい。

#### 2) 耐熱性

長時間稼働が想定されるため、熱対策がされたものが必要である。

#### 3) LAN ポート

ルーター - 映像送信 ECU 間は有線接続が望ましいため、LAN ポートが必要である。

#### 4) バンド固定機能

ユースケース①が行われるエリアは山間地であり、楽天モバイル圏内と、楽天モバイル圏外かつ KDDI 圏内(KDDI ローミングエリア)のエリアが混在している。

ここで問題になるのは、ルーターのキャリア間ハンドオーバーに関する挙動である。端末の機種にもよるが、基本的には、端末が楽天モバイル圏外かつ KDDI 圏内(KDDI ローミングエリア)に入ると速やかに KDDI にハンドオーバーされるが、逆に KDDI ローミングエリアから楽天モバイル圏内に戻っても、ハンドオーバーが即座に行われず、KDDI 圏外になって初めて楽天モバイルにハンドオーバーされる、という挙動になる。

この場合ユースケース①では、自動運転車両が一度 KDDI ローミングエリアに入った場合、トンネルに戻る前に KDDI 圏外かつ楽天モバイル圏内の地点を通り、その後トンネルに戻るまでに一度も KDDI ローミングエリアに入らないようにする必要がある。もしくは、ルーターの再起動等が必要となる。

ルーターにバンド固定機能があれば、楽天モバイルの Band3 に固定することにより、KDDI ローミングエリアでの KDDI へのハンドオーバーを回避し、端末が楽天モバイル圏内に戻った時点で、速やかに楽天モバイル回線に復帰できる。

#### 5) DM(Diagnostic Monitor)ポート開放に対応している

AC15 は DM ポート開放に対応しているため、XCAL 等のツールを使用して詳細なデータを自動で

取得できる。例えば、遠隔監視映像送信時の PDCP スループット(実際に転送されたデータ量)の値等を使用して、詳細な試験結果の分析ができる。

ただしメーカーとしては、DM ポートを開放すると内部制御フローが丸裸となり、技術漏洩につながるリスクがある。そのため、メーカーにはルーターの用途と実証実験の意義を詳細に説明し、許諾を得た上でポート開放作業をしてもらう必要がある。

以下に、各社モバイルルーター製品の、上記選定基準についての比較表を記載する。

表 5.2-1 ルーター比較表

ベンダー 製品名	楽天モバイル対応	LANポート	耐熱性	バンド固定機能	DMポート開放	備考
Rakuten Turbo 5G	○	○	×	-	-	
IO-DATA UD-LT2	○	○	○	×	-	
IDY iR730B	×	○	○	-	-	東海理化が保有していた
Amnimo AC15	○	○	○	○	○ ※	

※Amnimo 社には、実証内容について説明し、当実証における測定以外に使用しない条件で特別に DM ポート開放にご協力いただいた。

#### 5.2.4 通信輻輳度・通信品質 Web API

楽天モバイル開発の通信輻輳度・通信品質 Web API は、クラウド上の Web API として Azure VM 上に実装する。東海理化開発の遠隔監視映像送信ソフトウェアは、単純な HTTP 通信で通信輻輳度・通信品質 API から通信輻輳度・通信品質を取得できるため、システム間連携が容易である。

またそれぞれのシステムは疎結合なので、独立に動作・変更・試験が可能である。東海理化は、通信輻輳度・通信品質 API のインターフェースのみを知っていれば、API の内部構造を知らずとも、API から取得した値に応じて画質を変更する機能の実装が可能である。また開発段階では、楽天モバイルは、引数に応じて返す値を変えるスタブ API を提供し、東海理化は、これを使用して実装を進めることができる。

クラウド上 Web API の場合、インターネットアクセスがない環境では使用できないデメリットはあるが、そもそも遠隔監視映像送信にはインターネットアクセスが必要なので、そのことは問題とならない。

使用する Azure VM については、Web API にはレスポンス速度の厳しい要件はなく、また呼び出される頻度も低いため、高スペックな VM は不要だが、低すぎるスペックの VM(例：B1s、vCPU 数：1、RAM:1GiB)の場合、時折何らかのタイミングで CPU 使用率・メモリ使用率が 100% 近くになり、API が全く呼び出せなくなる場合があるため、最低でも B2s(vCPU 数：2、RAM:4GiB)程度のスペックは必要である。

#### 5.2.5 LTE レピーターの設置場所の選定

レピーターには様々な制約があり、設置地点は以下の項目をすべてクリアする必要がある。

- 周辺基地局の直接波とレピーター増幅波の干渉が時間差条件内で発生しない運用を設計し、電波の非重畳エリアを選定する必要がある。
- 遠隔監視に必要とされる品質の映像を安定して送信できる程度の通信品質を実現するには、レピーターから電波延伸先までは完全な LOS が必要であり、途中にそれをさえぎる地形があってはならない。複数台のレピーターのマルチホップによりこれを回避できる可能性があるが、今回の実証で使用したレピーターはマルチホップに対応していない。
- 市街地でのハイパワーレピーターの使用は推奨されない。今回の実証で使用したレピーターは、ドナーサイトを選択できない(フィルターがない)ため、周囲のすべてのドナーサイトをブーストしてしまい、スマートフォン端末はどの電波を使用すればよいか判断できなくなり、電波品質が大幅に低下する。
- レピーターのドナーアンテナとサービスアンテナがなす角度は最低 90°が必要である(180°が理想)。さらに、角度が鋭角だと、ドナーサイトの方向に電波を跳ね返してしまい、ピンポン(電波を増幅し続ける)が発生する。
- レピーターで電波を増幅する際に受信側が弱すぎると十分に電波を増幅出来ない為、設置位置の地上 1.5m におけるドナーサイトからの信号強度(RSRP)が基準値を満たす必要がある。
- その他、ドナーサイトからの距離(近すぎない)、ドナーサイトの混雑度等様々な条件を満たす必要がある。
- なお、社会実装として全国的な展開を検討した場合の留意事項を補足する。今回のレピーター設置場所は民地であったが、道路沿いに設置する場合、様々な制約が存在する。例えば当初の設置予定場所であった雄渕トンネルは国道 323 号にあるが、国道 323 号は新規の電柱設置が原則禁止される「緊急輸送道路」に指定されている。設置場所や条件によっては、設置期間 2 年未満の一時的なものであれば許可される可能性があるが、1 ヶ月半程前に申請が必要となる(通常の一時占有許可は審査期間 2 週間)ため、今回の検証のように短期間でレピーターを建設する必要がある場合は大きな障害となる。

## 5.2.6 LTE レピーターの指向性アンテナ配置・角度の調整

レピーターにおける指向性アンテナ設計・配置は、元基地局からの直接波とレピーターによる増幅波との干渉を回避し、かつレピーター自身の自己干渉を抑制した上で、トンネルの出入口に向けて高利得アンテナを用いて電波を効率的に再送信するため最適化されている。

レピーターの送信電波が自らの受信部に回り込むと自己干渉が生じ、受信感度の低下等を引き起こす場合がある。この自己干渉を抑制し、レピーターの安定した動作を確保するためには、送信アンテナ(サービスアンテナ)から放射された電波が受信アンテナ(ドナーアンテナ)へどの程度回り込まずに分離されているかを示す「アイソレーション」の確保が極めて重要となる。

設計上の主な留意点は以下の通りである。

- 受信アンテナと送信アンテナの相互角度(方位角)およびチルト角は、規定の範囲内で調整し、十分なアイソレーションを確保する。
- 増幅した電波が不感エリアを可能な限り広範囲にカバーできるよう、出力レベル・指向性・設置

位置を調整し、到達距離の最大化を図る。

- 地形や周囲環境を確認し、見通し(LOS)の確保を考慮する。

また位置と角度は、トンネルの開口部を狙うようにも設計されている。通常サービスアンテナはコンクリート柱の頂部に取り付け、ドナー側のアンテナはサービスアンテナの下部に取り付けられるが、今回はトンネル内を狙うために、サービスアンテナを下げている(一般的なサービスアンテナ取付位置の高さは14.5m だが、今回は 7m 程度である)。またドナー側のアンテナチルトは、ドナーサイトからの電波の最適な受信環境になるように調整されている。

なお、トンネル内への電波のリーチはシミュレーションができないため、机上検討を行い、トンネルに対して浸透しやすい角度や位置を決めた。

## 6. 実証結果・考察

### 6.1 ①遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:条件不利地域(トンネル、中山間地)の通信の安定性確保

#### 6.1.1 山間部道路の通信環境の安定化に向けた LTE レピーターの利用による車両ネットワーク接続の確保

##### 1) 実証スケジュール

フェーズ	2025年							2026年	
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
実証準備 (建設方法検討、 工事実施)		LTE レピーター建設候補地の決定と設置位置の検討				LTE レピーター建設に係る 渉外・申請・設計と 建設工事の実施			
		LTE レピーター建設に係る 渉外・申請・設計と 建設工事の実施遠隔監視 設備の手配・調達と 遠隔監視員の手配・教育							
実証							実証		
実証評価							データ 検証		

##### 2) 開発・評価項目の結果

番号	開発・評価項目
(1)	須田トンネル内部および周辺の通信環境品質の計測
(2)	追加検証:遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証
(3)	遠隔監視映像品質の計測
(4)	遠隔監視映像の安定性の評価

## (1) 須田トンネル内部および周辺の通信環境品質の計測

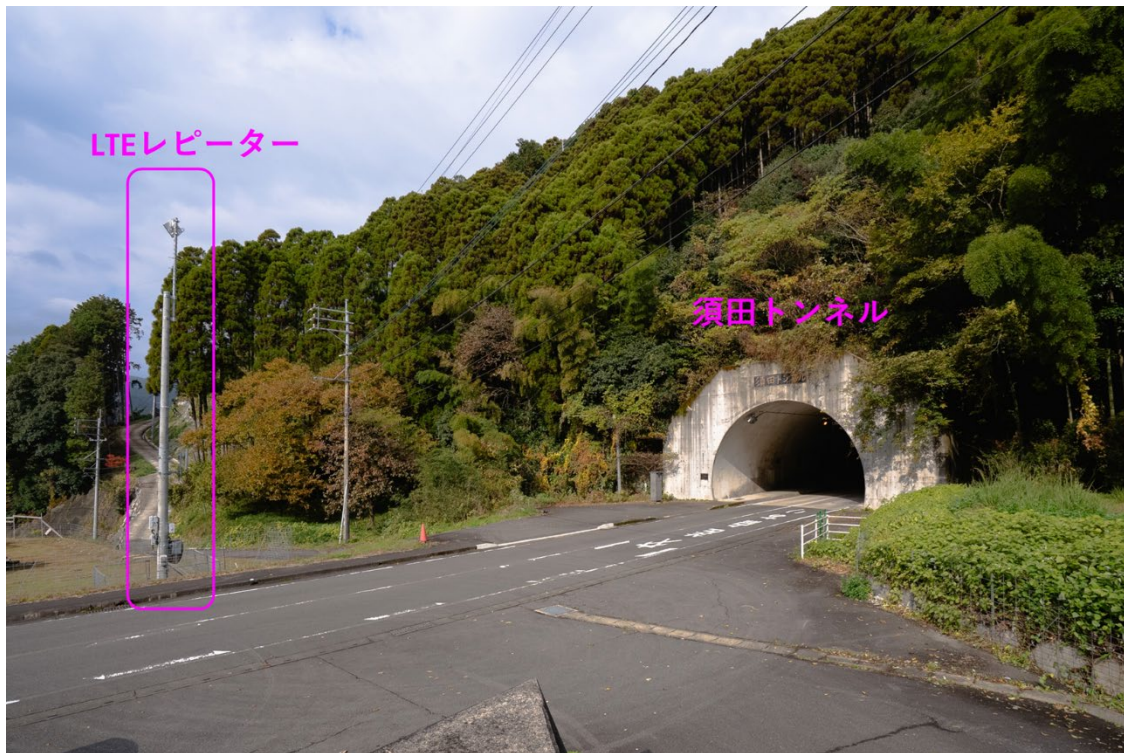


図 6.1-1 須田トンネルと LTE レピーター

### a. レピーター設置による通信環境の変化の事前検証

本節では、既設基地局および LTE レピーター設置予定地を中心とした約 2km 四方の周辺地域における通信状態について、LTE レピーター設置前後の通信環境シミュレーションを実施した結果を報告する。なお、本シミュレーションはトンネル内部を含めた計算を行う処理を技術的に持ち合わせていないため、トンネル周囲地域のシミュレーション結果を基にトンネル内部への影響を推察することを目的としている。

#### ア) シミュレーション結果

シミュレーション結果には基地局の配置や電波出力等に関する機密性の高い情報を含むため、詳細な数値データをそのまま公開することは困難である。そのため、厳密なシミュレーション結果に基づきつつ、電力強度のグラデーションを意図的に粗くして作成した模式図を図 6.1-2 に示す。

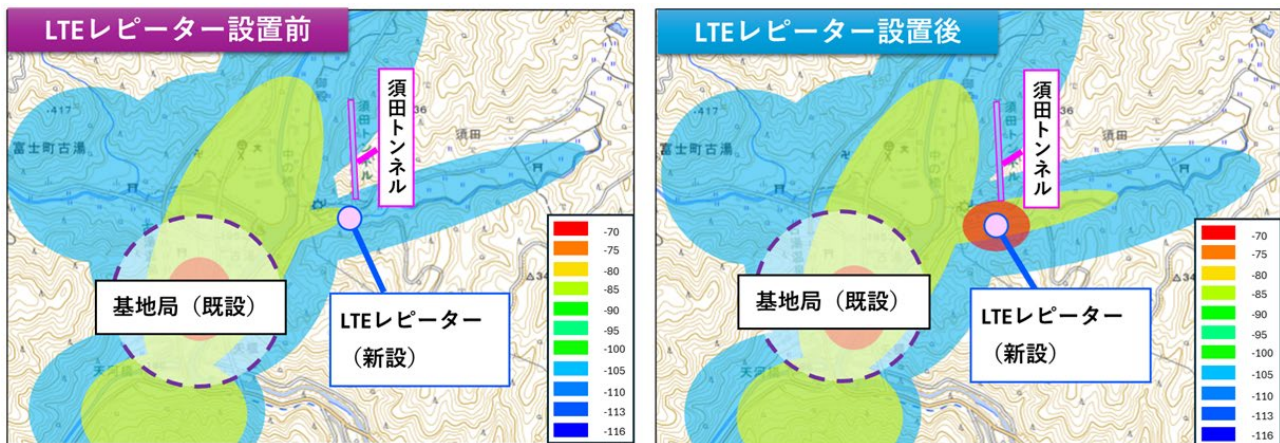


図 6.1-2 LTEレピーター設置前後シミュレーション結果

シミュレーション結果の詳細は以下の通りである。

・設置前における通信環境

実証地域全体において、RSRP が $-100\text{dBm}$  以下のエリアが広範囲に分布していた。特に、LTE レピーター設置箇所である須田トンネル東側の谷筋や道路周辺においては、RSRP が $-110\text{dBm}$  を下回るエリアが大半を占める状態であった。

・設置後における通信環境の予測

LTE レピーター設置後のシミュレーションでは通信環境の改善が確認された。特に須田トンネル東側において、設置前に RSRP  $-110\text{dBm}$  以下であった箇所が $-95\text{dBm}$  から $-85\text{dBm}$  近辺の値へと推移することが予測された。

・KPI および伝送品質への影響

本結果は、LTE レピーターの設置により、特に須田トンネル東側の弱電界地域における RSRP が平均で  $15\text{dB}$  から  $25\text{dB}$  程度改善することを示唆している。これにより、本実証の KPI である「RSRP  $-110\text{dBm}$  以上」を十分に満たす可能性が高い。また、RSRP の改善は SINR の向上に直結するため、自動運転車両からの遠隔監視映像送信時においても、より安定した映像伝送に寄与すると考えられる。

イ) 考察

LTE レピーターの導入は、須田トンネル周辺の通信環境を大幅に改善する可能性が高い。周辺地域への電波延伸効果が確認されたことから、トンネル内部に対しても同様に電波が延伸されることが期待できる。したがって、本実証の主目的である「須田トンネル内部への電波延伸」の実現可能性について、肯定的な事前評価が得られたと言える。

一方で、本検証には以下の留意点が存在する。

・検証範囲の限定

本シミュレーションではトンネル内部の計算は対象外としており、カバレッジ範囲の変化は周辺地域に限定した予測である。

・パラメータの制限

電波干渉の影響については計算に含まれていない。

以上のことから、本結果はあくまで机上の予測に留まるものであり、正確に評価するためには次節以降で詳述する実測結果が不可欠である。

## b. 須田トンネル周辺の電波測定車による走行測定

本節では、LTE レピーター設置が須田トンネルおよび周辺地域の道路沿いにおける通信カバレッジと品質に与える影響を広く把握するため、電波測定車による走行測定を実施した結果について報告する。測定は、須田トンネル内部を含む周辺地域半径約 1km 以内の道路を対象とし、GPS データとともに通信品質を計測した。

なお、本検証は実証本番に先立って実施されたものであり、LTE レピーターの配置位置の最適性を事前に確認することを目的としている。

### ア) RSRP の改善状況

通信カバレッジの広がり判断の上で重要となる RSRP について分布状況を図 6.1-3 に示す。

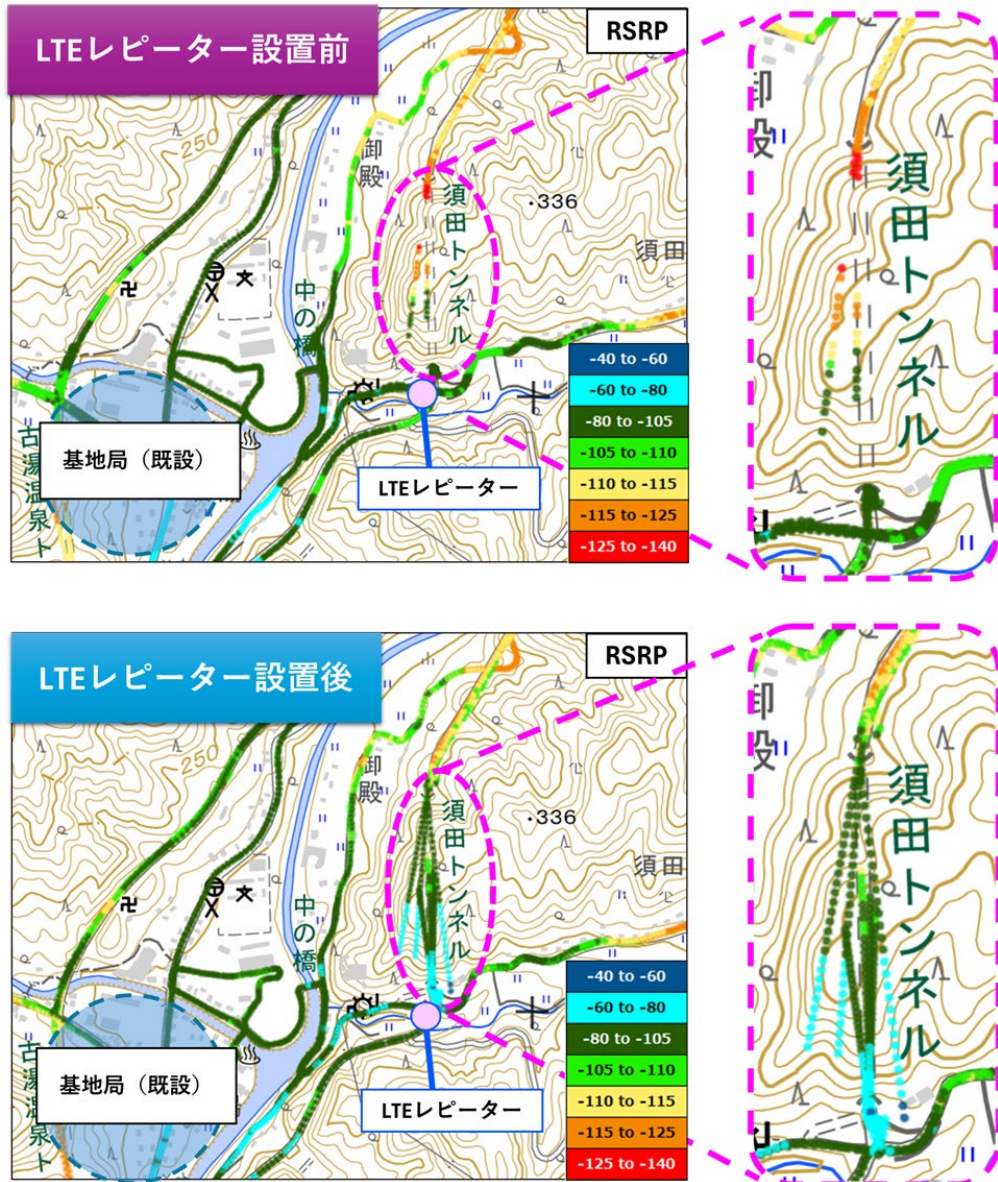


図 6.1-3 須田トンネル内部と周辺における RSRP 測定結果

トンネル内部においては GPS 信号の受信が不能となるため、測定ポイントの緯度経度データは、トンネル進入時の車両の角度と速度を基に補完された座標である。したがって、図 6.1-3 におけるトンネル内部の測定位置は、実際の測定箇所と厳密に一致しない可能性がある点に留意されたい。

特に須田トンネル内部に限定し、RSRP の計測結果を詳細に分析したものを表 6.1-1 に示す。

表 6.1-1 須田トンネル内部における RSRP 分布の比較

RSRP(dBm)	LTEレピーター設置前	LTEレピーター設置後
$-60 > \text{RSRP} \geq -80$	0.00%	26.77%
$-80 > \text{RSRP} \geq -105$	16.95%	71.65%
$-105 > \text{RSRP} \geq -110$	1.69%	0.79%

-110>RSRP≥-115	8.47%	0.79%
-115>RSRP≥-125	16.95%	0.00%
-125>RSRP≥-140	13.56%	0.00%
計測不可	42.37%	0.00%

測定結果の詳細は以下の通りである。

・設置前の状況

須田トンネル内部において、RSRP が-115dBm 未満となる通信が極めて困難または不可能な弱電界エリアと、計測不可であった箇所が合計で 72.88%の範囲にわたっており、通信が極めて困難または不可能な状態であった。

・設置後の状況

LTE レピーター設置後、99.21%の範囲で RSRP は-110dBm 以上となり、残り 0.79%の範囲においても-115dBm 以上となった。これにより、トンネル内部全体において安定した通信基盤が確保されたことが確認された。

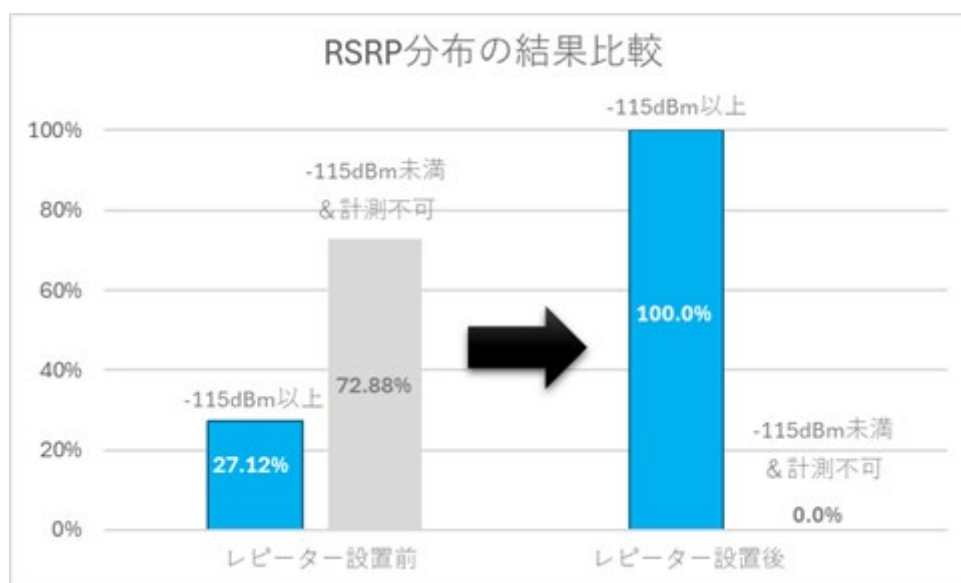


図 6.1-4 RSRP 計測結果の比較

イ) SINR の改善状況

通信品質の改善を判断する指標となる SINR について、須田トンネル内部での計測結果を図 6.1-5 と表 6.1-2 に示す。

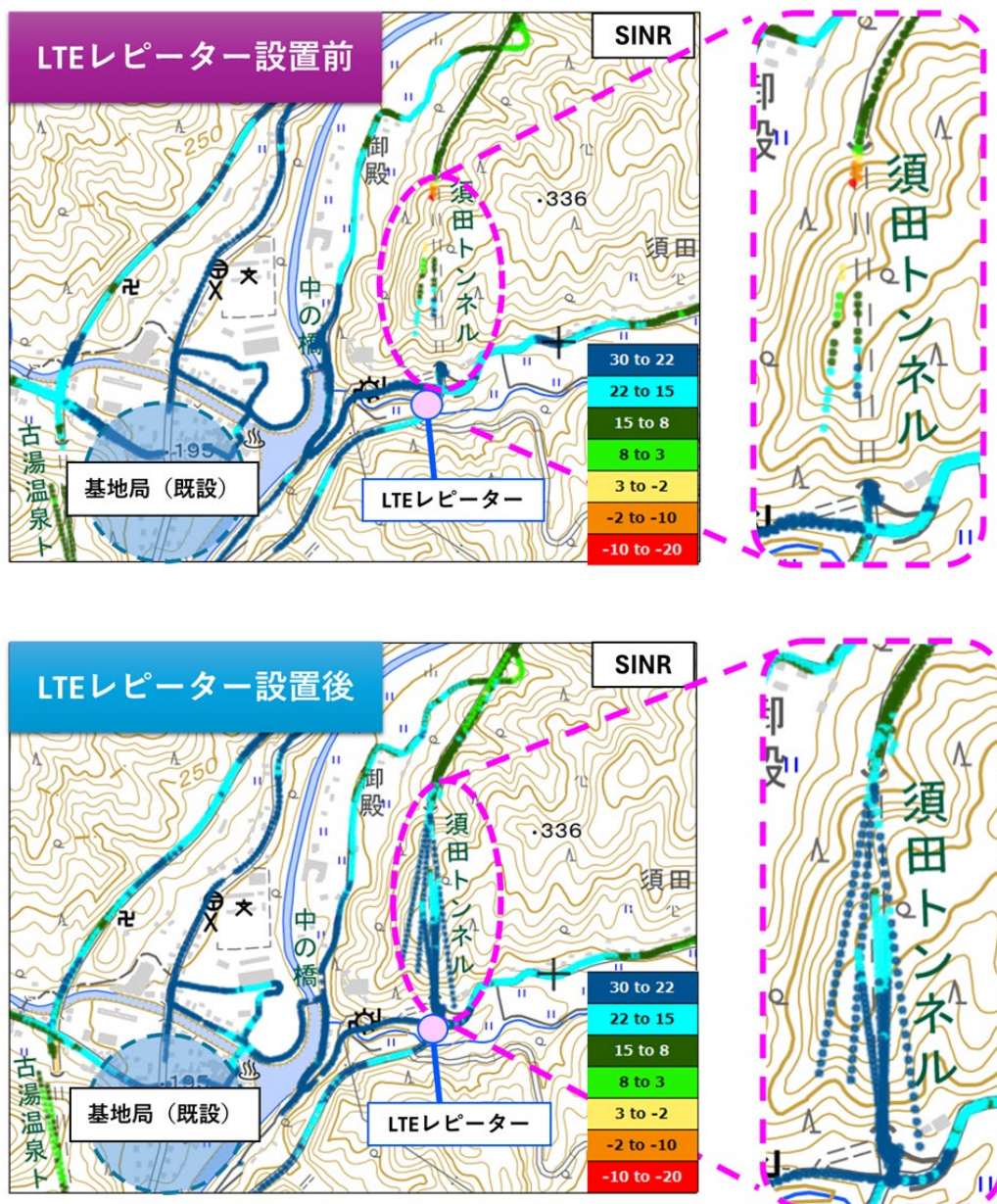


図 6.1-5 須田トンネル内部と周辺における SINR 測定結果

表 6.1-2 須田トンネル内部における SINR 分布の比較

SINR(dB)	LTEレピーター設置前(%)	LTEレピーター設置後(%)
$30 > \text{SINR} \geq 22$	5.08%	76.38%
$22 > \text{SINR} \geq 15$	11.86%	22.83%
$15 > \text{SINR} \geq 8$	15.25%	0.79%
$8 > \text{SINR} \geq 3$	10.17%	0.00%
$3 > \text{SINR} \geq -2$	6.78%	0.00%
$-2 > \text{SINR} \geq -10$	6.78%	0.00%
$-10 > \text{SINR} \geq -20$	1.69%	0.00%
計測不可	42.37%	0.00%

測定結果の詳細は以下の通りである。

・設置前の状況

SINR が 8dB を下回る通信品質が劣悪な箇所が全体の 25.42%を占めており、特に負の値を示す箇所も存在していた。加えて、計測不可が 42.37%と広範囲にわたり、合計で約 67.8%の範囲で通信が極めて困難または不可能な状態であった。

・設置後の状況

すべての測定箇所において SINR が 8dB 以上となり、通信品質が劣悪な箇所は完全に解消された。さらに、良好な通信品質とされる 15dB 以上の範囲が、設置前の 16.95%から設置後には 99.21%へと大幅に拡大し、トンネル内部全体で極めて安定した通信品質が確保されたことが示された。

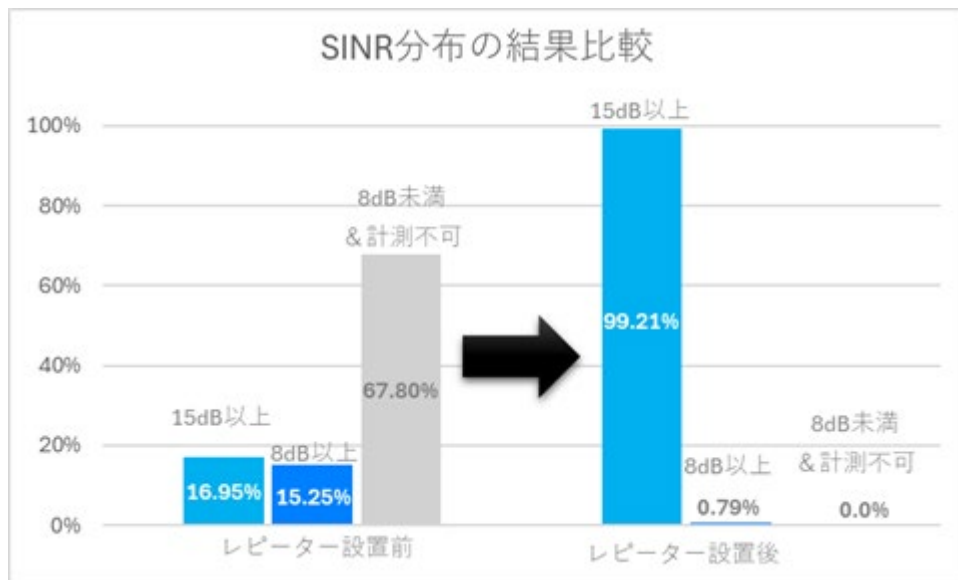


図 6.1-6 SINR 計測結果の比較

ウ) アップリンク スループットの改善状況

自動運転車両からの遠隔監視映像の送信において重要な指標となるアップリンク スループットについて、須田トンネル内部での計測結果を図 6.1-7と表 6.1-3 に示す。

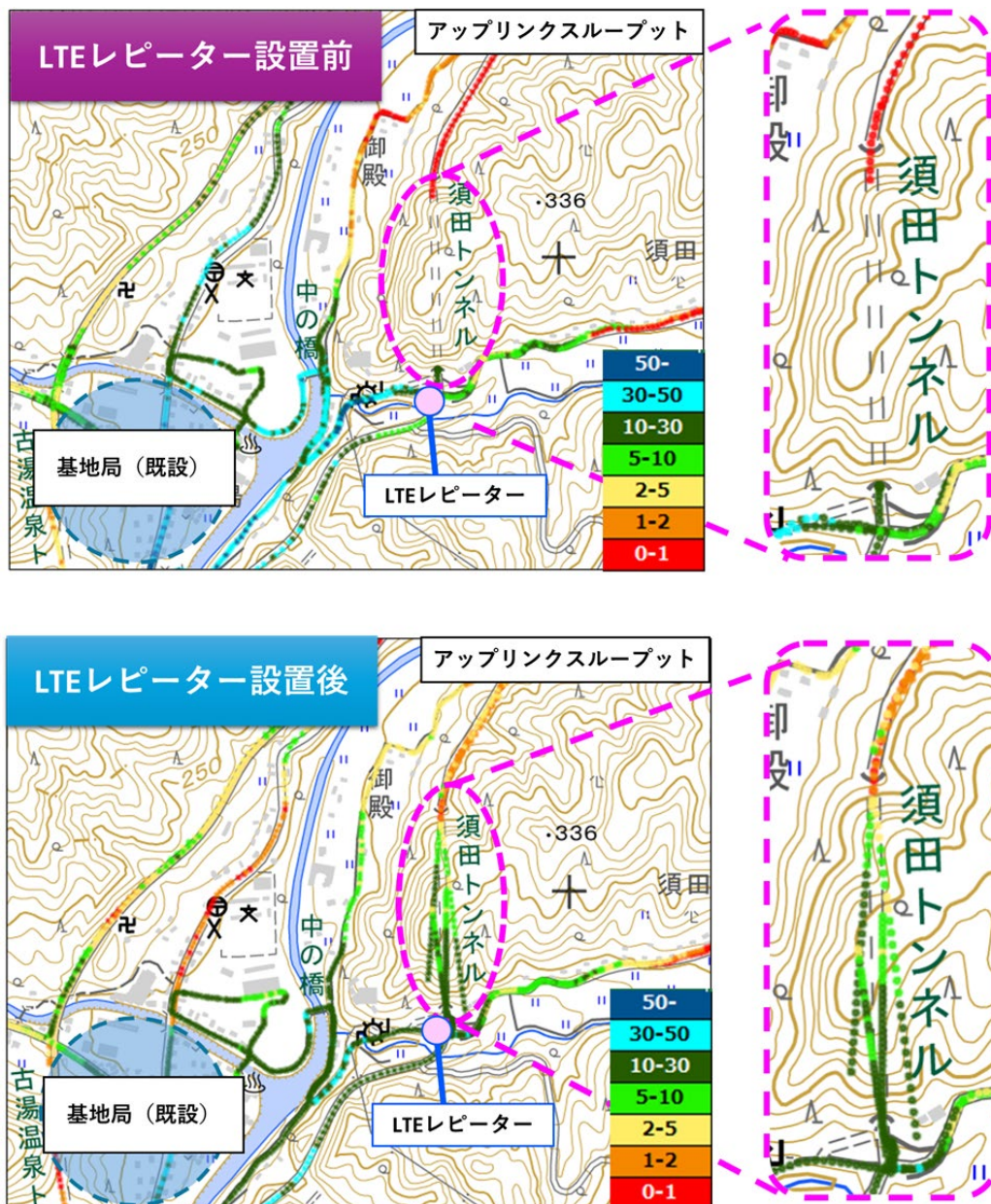


図 6.1-7 須田トンネル内部と周辺におけるアップリンク スループットの測定結果

表 6.1-3 須田トンネル内部におけるアップリンク スループット分布の比較

UL 速度(Mbps)	LTEレピーター設置前	LTEレピーター設置後
30>UL≥10	0.00%	56.10%
10>UL≥5	0.00%	32.52%
5>UL≥2	0.00%	8.13%
2>UL≥1	0.00%	1.63%
1>UL≥0	6.78%	1.63%
計測不可	93.22%	0.00%

測定結果の詳細は以下の通りである。

・設置前の状況

93.22%とほぼ全域にわたり計測不可であり、残り6.78%の範囲においても通信速度は1Mbps未満にとどまった。この結果は、トンネル全体において映像伝送に支障をきたす通信環境であったことを示している。

・設置後の状況

アップリンク スループットが1Mbps以上の範囲が、LTE レピーター設置前の0.0%から98.37%へと大幅に拡大した。特に5Mbps以上を達成した箇所の割合は、設置前の0.0%から88.62%へと大幅に拡大した。

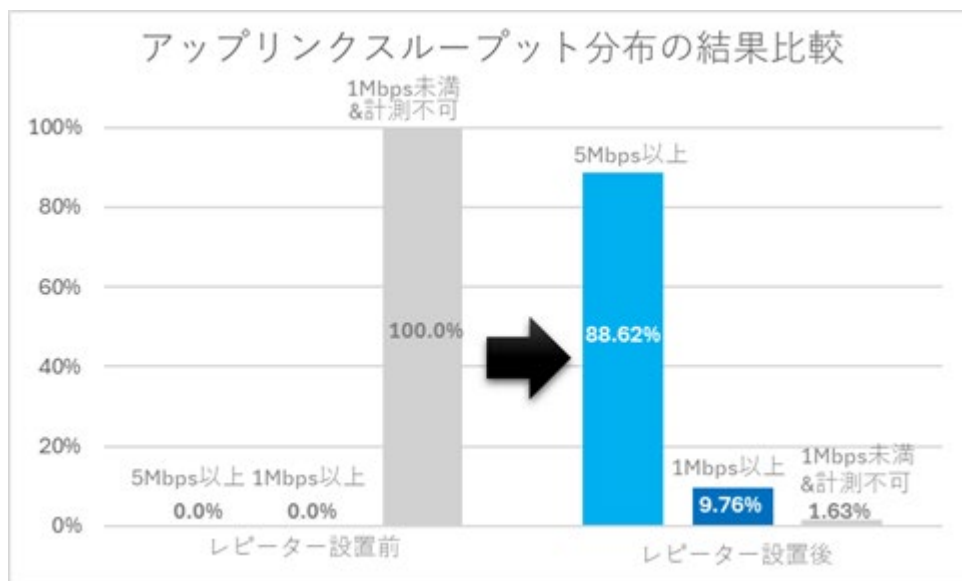


図 6.1-8 アップリンク スループット計測結果の比較

工) 考察

以上の測定結果より、須田トンネル内部における LTE レピーターの設置効果および配置の妥当性について、以下の考察を得た。

・弱電界、圏外エリアの解消

RSRP の測定結果から、設置前にトンネル内部へ広範囲に存在した弱電界および圏外エリアが完全に解消されたことが確認された。これは、山間部のトンネルという電波伝搬が極めて困難な環境において、LTE レピーターが効果的に電波を延伸し、通信カバレッジを抜本的に改善したことを示している。

・通信品質の大幅な向上

SINR の測定結果は、LTE レピーター設置後にすべての測定箇所で通信品質が大幅に向上し、極めて良好な状態を達成したことを示している。RSRP の改善による電波強度の向上に加え、SINR の改善により干渉が少なく高品質なデータ伝送が可能であることが裏付けられた。

#### ・安定した映像送信の実現

アップリンク スループットの顕著な改善により、自動運転車両からの遠隔監視映像の安定送信が可能となることが実証された。これにより、遠隔監視員が車両周囲の状況を正確に把握できるようになり、運行の安全性向上に寄与すると期待される。

結論として、これらの包括的な改善効果は、LTE レピーターの配置位置が須田トンネル内部の通信環境改善に対し、極めて適切であったことを明確に示している。この事前検証結果により、実証本番においても LTE レピーターがトンネル内での自動運転車両に対し、安定した通信基盤を提供し得るという確証が得られた。

### c. 須田トンネル内部・周辺の定点測定

本節では、須田トンネル内部および周辺地域における LTE レピーターによる電波延伸の具体的な効果と、各地点での詳細な通信品質の変化をピンポイントで計測し把握するため、複数地点で条件を変えて定点測定した結果を報告する。

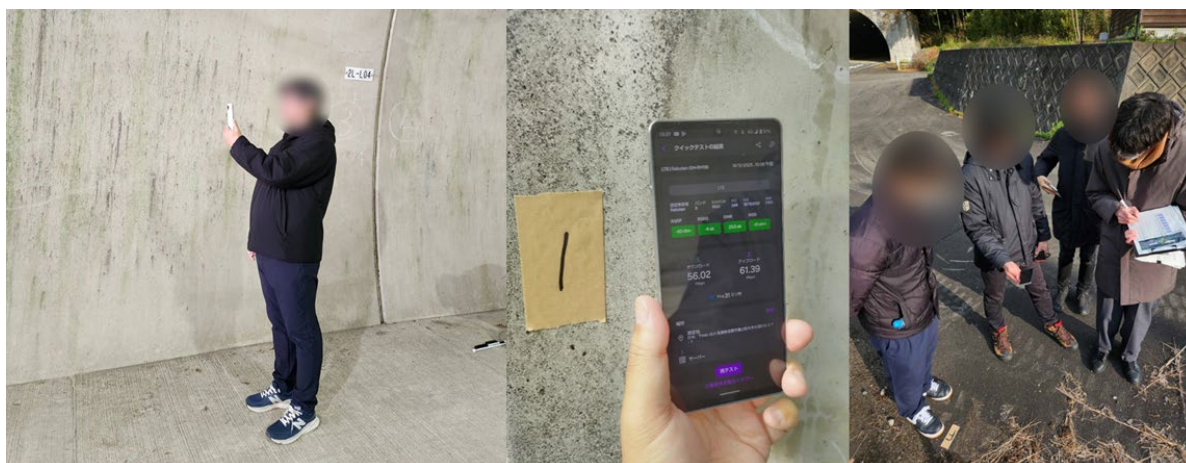


図 6.1-9 定点測定の様子

#### ア) 計測手法

##### ・計測地点

トンネル内部における電波延伸効果を多角的に評価するため、計測エリアを「トンネル内部」「トンネル入口(南側)」「トンネル出口(北側)」の3つに区分した。それぞれのエリアにおいて一定間隔で測定箇所を設定した。具体的な計測箇所を図 6.1-10 に示す。

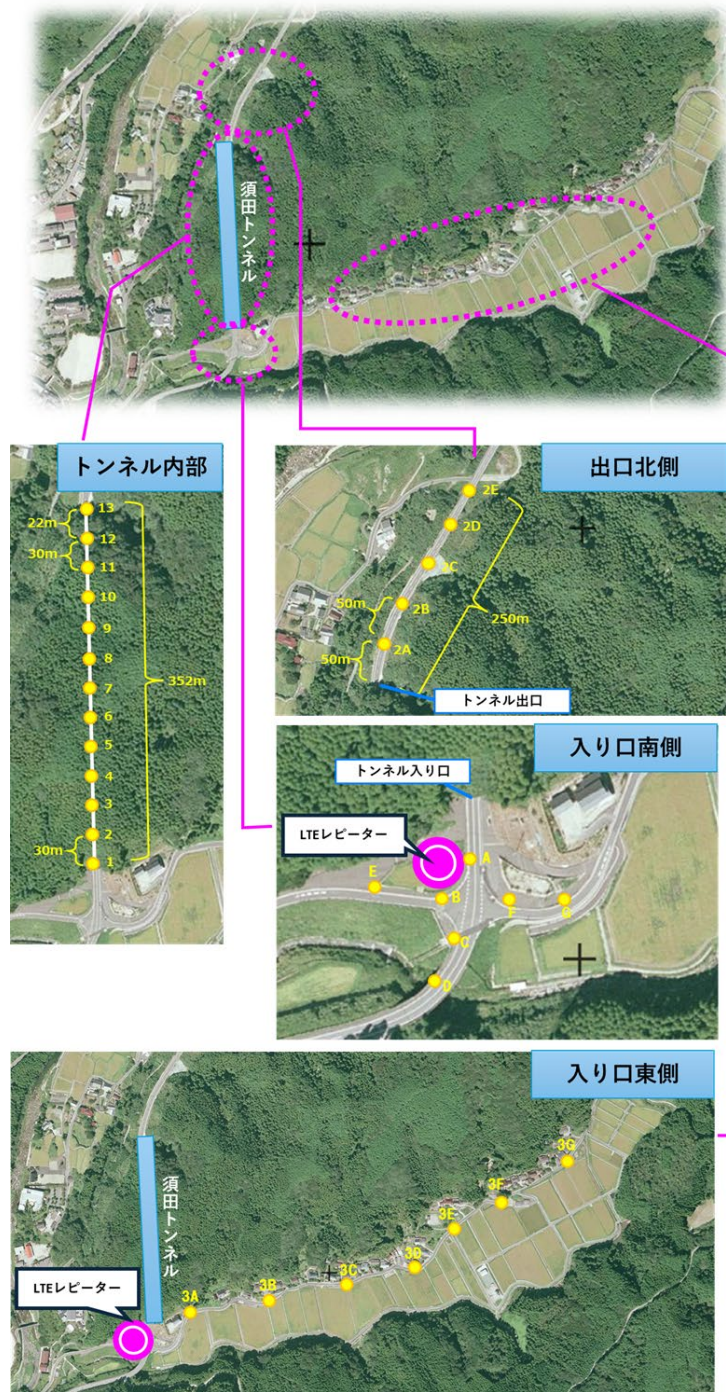


図 6.1-10 定点測定の見測箇所

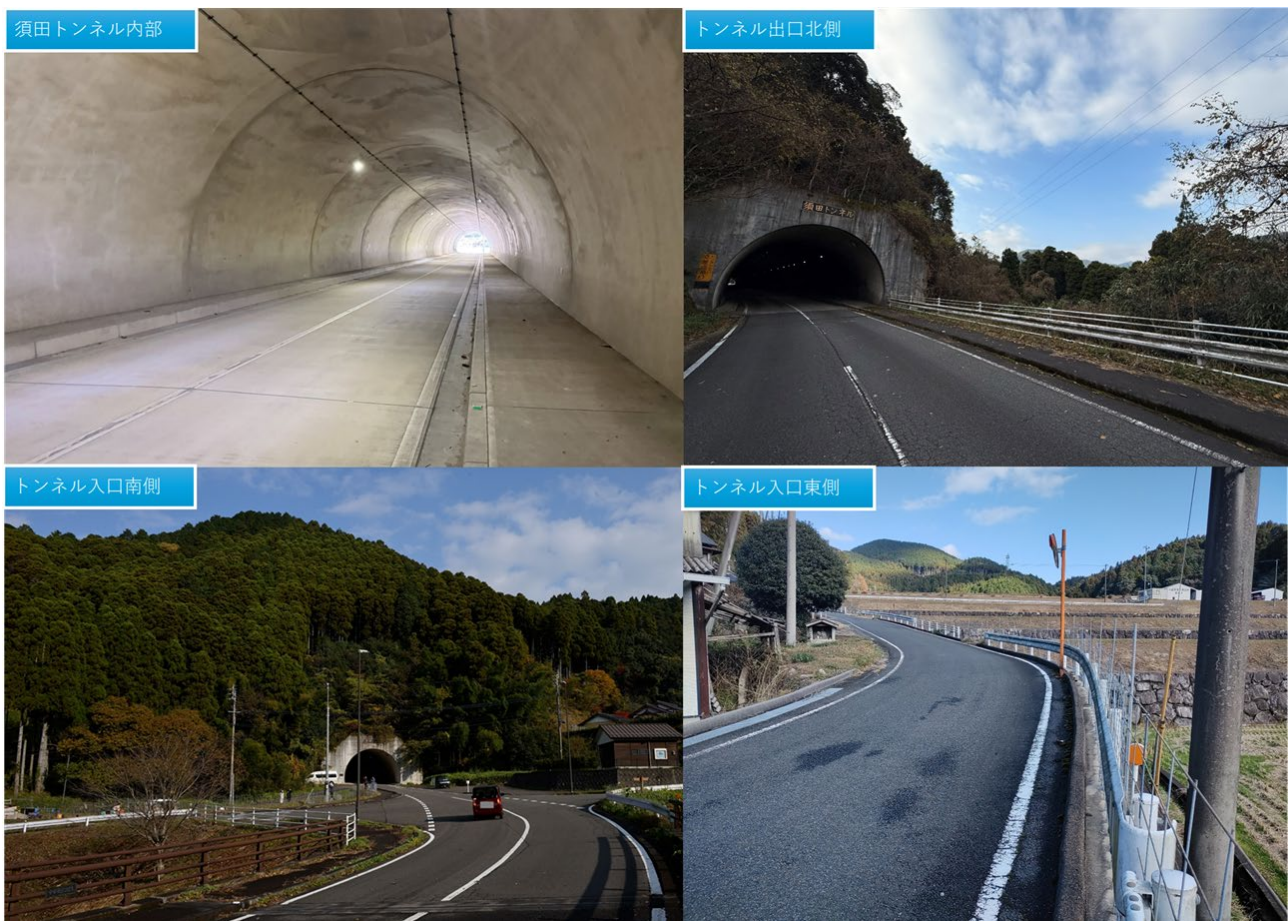


図 6.1-11 入口南側周辺

・計測手法

測定地点で測定用端末(AQUOS zero 6)にインストールした通信品質測定ツール「NetPulse」を用い、3回の測定を行って結果の平均値を求めた。また、トンネル内部においては電波圏外箇所を詳細に把握するために、圏外を確認した地点から5m間隔で測定箇所を再設定して計測した。

・計測条件

LTEレピーター設置による通信環境への影響を明確にするため、「LTEレピーター電源ON」および「LTEレピーター電源OFF」の2条件下で計測を行った。各測定箇所において測定端末で3回ずつ測定し、その平均値を採用した。

イ) 計測結果と考察

各計測箇所におけるRSRP、SINR、ダウンリンクスループット、アップリンクスループットの計測結果を図6.1-12(トンネル内部)、図6.1-13(トンネル出口北側)、図6.1-14(トンネル入口南側)、図6.1-15(トンネル入口東側)に示す。

・トンネル内部における劇的なカバレッジ改善

図 6.1-12 に示す通り、LTE レピーターOFF 時にはほぼ全域で圏外または RSRP が-120dBm 程度の極めて微弱な電波強度であり、通信が不可能な状態であった。一方、ON 時にはトンネル内部全域で RSRP が平均-80dBm 台まで改善された。また、SINR は 20dB 以上、ダウンリンク スループットは 80Mbps 以上、アップリンク スループットは 40Mbps 以上を安定して記録した。

これは、トンネル内であっても高画質の動画ストリーミングや大容量ファイルの伝送が可能なレベルであり、極めて快適で安定した通信環境が構築されたことを意味する。本結果は、LTE レピーターがこれまで不感エリアであったトンネル内部に対し、極めて高い電波延伸効果を発揮し、安定した通信環境を構築できることを明確に示している。

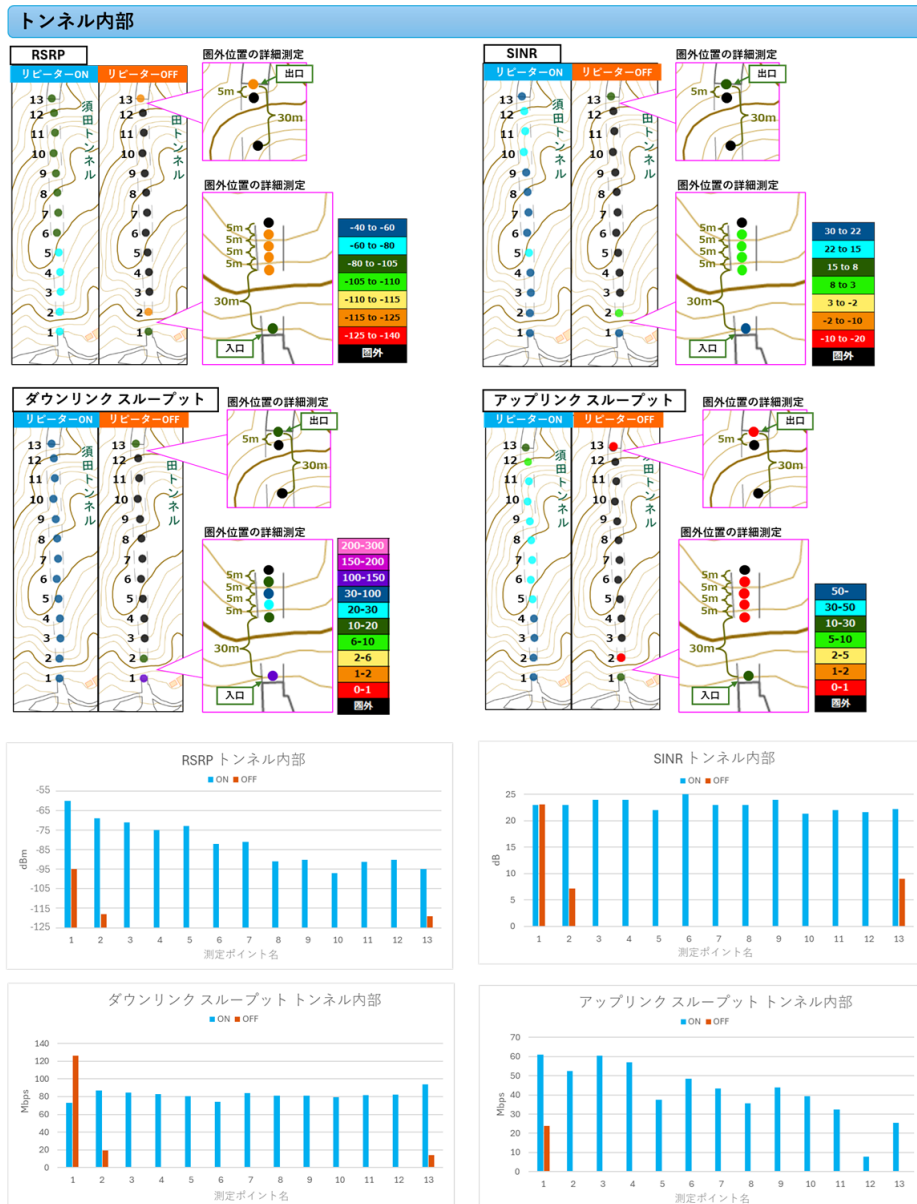


図 6.1-12 トンネル内部の計測結果

・トンネル出口北側における影響

図 6.1-13 に示す通り、トンネル出口北側では LTE レピーターの ON/OFF による受信精度の大きな差異は認められなかった。これは、トンネル出口北側が LTE レピーター設置箇所(須田トンネル南側)の反対方向に位置するため、延伸効果が限定的であったことに起因すると思われる。

なお、出口付近(ポイント 2A)においては一定の電力増強が予測されたが、実測では顕著な差異は見られなかった。これは、トンネル内部では導波管効果により電力が維持されるものの、トンネル開口部において電力の広範囲への分散が生じ、十分な伝搬に至らなかったためと推測される。

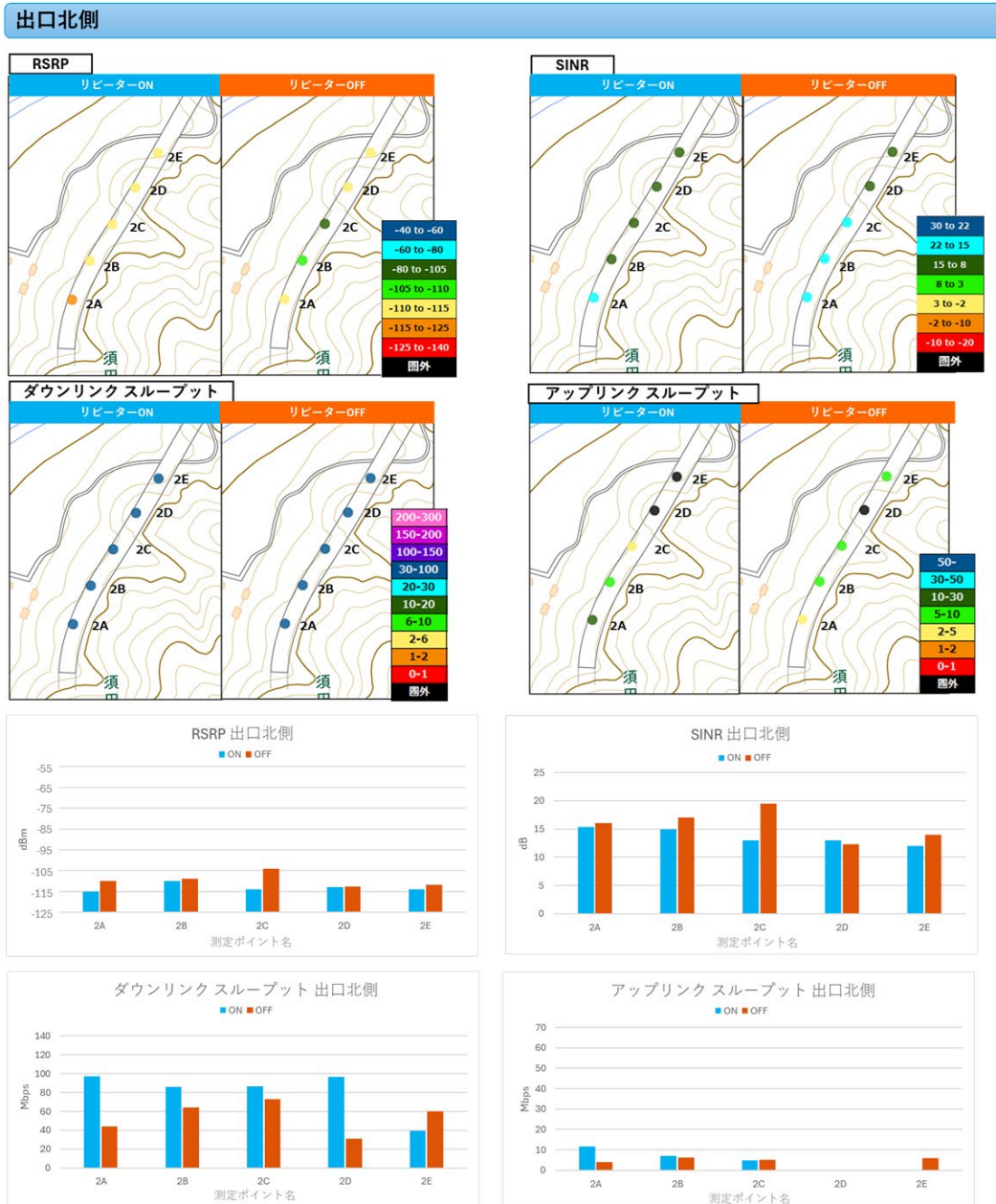


図 6.1-13 トンネル出口北側の計測結果

・トンネル入口南側における電波伝搬特性

図 6.1-14 に示す通り、トンネル入口南側においては、LTEレピーターON 時のRSRP および SINR が、OFF 時と比較して全体的に向上する結果となった。

本実証の事前検討段階においては、LTE レピーター設置箇所近傍(トンネル入口南側)において、ドナーアンテナとサービスアンテナ間の回り込みや、既存基地局波との干渉による通信品質の低下が懸念されていた。しかし、実測結果では顕著な SINR の低下は見られず、むしろ概ね改善傾向を示したことから、干渉による悪影響は確認されず、事前の懸念は完全に払拭された。

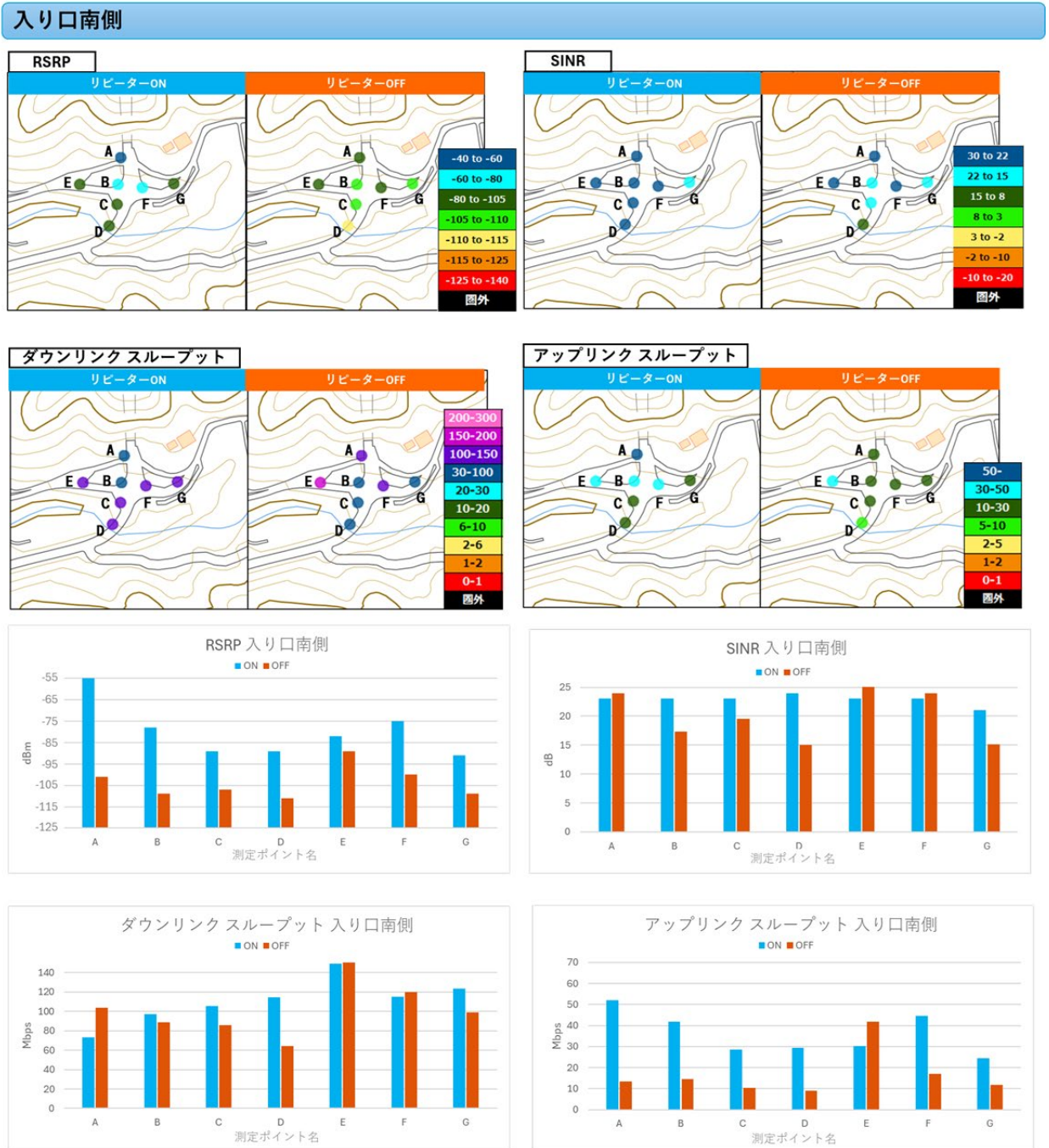


図 6.1-14 トンネル入口南側の計測結果

・トンネル入口東側における影響

図 6.1-15 に示す通り、トンネル入口東側の測定地点においては、通信品質は LTE レピーターの ON/OFF によっても全体として大きく変化しなかった。前節「a. LTE レピーター設置による通信環境の変化の事前検証」において、トンネル東側での RSRP の大きな変化が予測されていたにもかかわらず、実測結果はそれと異なる傾向を示した。

この要因として、LTE レピーターが須田トンネルのある北側を向いており、かつ、電波放射方向に指向性を持つアンテナを使用していることから、放射範囲外であるトンネル東側への影響が、予測よりも限定的であった可能性が考えられる。

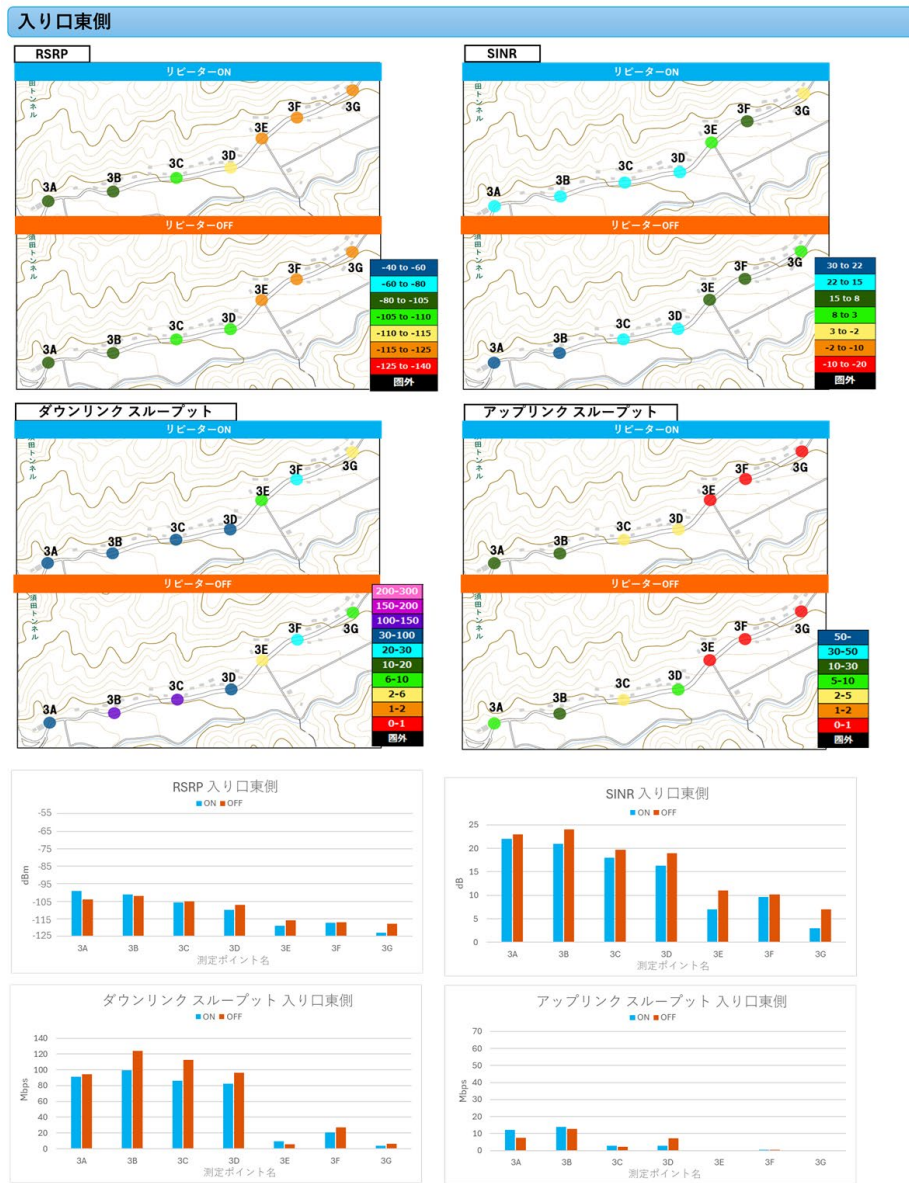


図 6.1-15 トンネル入口東側の測定結果

以上の結果より、LTE レピーターの導入がトンネル内部の通信環境を劇的に改善する有効な手段であることが確認された。

一方で、レピーターの設置設計においては、単に電波強度を向上させるだけでなく、その放射パターンや指向性が周辺環境に与える影響を適切に評価し、最適な配置を検討する必要がある。特に指向性アンテナを使用する場合、その放射範囲外の近傍エリアにおける通信品質への影響についても慎重な評価が重要となる。

#### d. 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定

本節では、須田トンネル内部を走行する際の自動運転車両内における通信品質の連続的な変化を把握し、遠隔監視用の映像送信が安定的に行えるかを確認するため、走行する自動運転車両内での測定を実施した結果について報告する。



図 6.1-16 車両内計測の風景と須田トンネルを走行する自動運転車両

#### ア) 測定手法

自動運転車両に設置された遠隔監視映像送信機器に測定用端末（Windows PC）を接続、遠隔監視映像が送信されている間、測定用端末にインストールした無線ネットワーク測定ツール「XCAL」で通信品質を測定した。

測定は実証期間全日に渡って行い、計 36 回の走行で計測を行った。計測日によって LTE レピーターの電源 ON と電源 OFF を切り替えて計測を行い、両者における通信品質の違いを比較できるようにした。

自動運転車両は、須田トンネルを通過する周囲の道路を周回し、約 6.5km の道のりを走行した。走行中は途切れることなく常に計測を行っており、須田トンネル通過時のデータを抽出することで必要なデータとした。自動運転車両の走行ルートを図 6.1-17 に、走行日時を表 6.1-4 に示す。

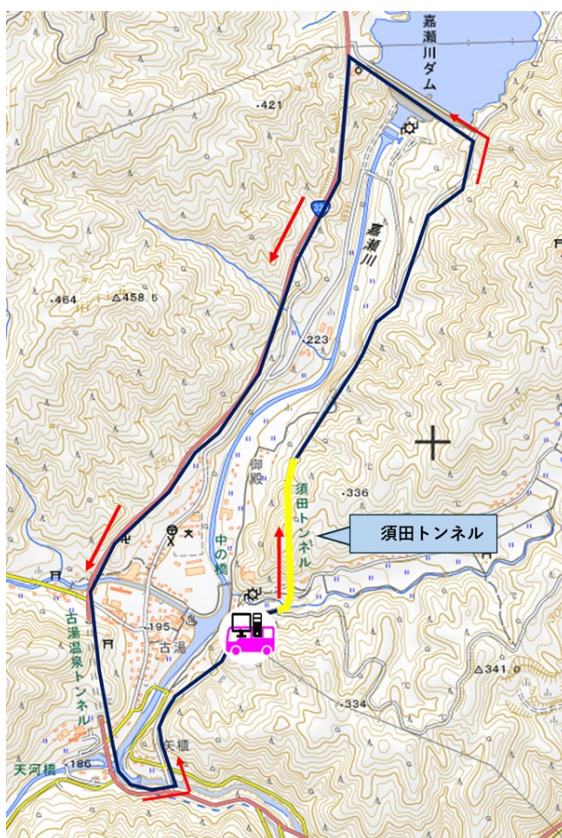


図 6.1-17 自動運転車両の走行ルート

表 6.1-4 自動運転車両の走行日時

試験番号	日付	出発時間	LTEレピーターの電源状態	気温	天気
1	12/15	11:30	ON	9.8℃	曇り
2	12/15	13:15	ON	11.5℃	曇り
3	12/15	13:35	ON	11.5℃	曇り
4	12/15	14:15	ON	10.9℃	曇り
5	12/15	14:35	ON	10.9℃	曇り
6	12/16	15:15	ON	13.1℃	晴れ
7	12/16	15:35	ON	13.1℃	晴れ
8	12/17	15:15	OFF	15.4℃	晴れ
9	12/17	15:35	OFF	15.4℃	晴れ
10	12/18	10:30	ON	8.4℃	晴れ
11	12/18	10:50	ON	8.4℃	晴れ
12	12/18	11:30	ON	10.7℃	晴れ
13	12/18	13:15	ON	12.7℃	曇り
14	12/18	13:35	ON	12.7℃	曇り
15	12/18	14:15	ON	14.4℃	晴れ
16	12/18	14:35	ON	14.4℃	晴れ

17	12/18	15:15	ON	14.2℃	晴れ
18	12/18	15:35	ON	14.2℃	晴れ
19	12/19	10:30	OFF	10.6℃	晴れ
20	12/19	10:50	OFF	10.6℃	晴れ
21	12/19	11:30	OFF	12.6℃	曇り
22	12/19	13:15	OFF	17.3℃	晴れ
23	12/19	13:35	OFF	17.3℃	晴れ
24	12/19	14:15	OFF	18.2℃	晴れ
25	12/19	14:35	OFF	18.2℃	晴れ
26	12/19	15:15	OFF	18.5℃	晴れ
27	12/19	15:35	OFF	18.5℃	晴れ
28	12/19	16:15	OFF	18.4℃	晴れ
29	12/19	16:35	OFF	18.4℃	晴れ
30	12/22	10:30	ON	9.6℃	晴れ
31	12/22	10:50	ON	9.6℃	晴れ
32	12/22	11:30	ON	12.6℃	晴れ
33	12/22	13:15	ON	14.0℃	晴れ
34	12/22	13:35	ON	14.0℃	晴れ
35	12/22	14:15	ON	13.6℃	晴れ
36	12/22	14:35	ON	13.6℃	晴れ

(天候・気温出典:気象庁)

#### イ) 遠隔監視映像の送信と受信

自動運転車両の走行中は常に遠隔監視映像を送信し、遠隔地にてその映像を受信・録画した。受信および録画は、株式会社東海理化(愛知県)および楽天モバイル株式会社(東京都)の各拠点にて実施した。

録画した映像データは、後述する「遠隔監視映像の安定性評価」および KPI「自動運転車両のカメラ映像の安定性(途切れやフリーズが発生しないこと)」の判定に用いた。

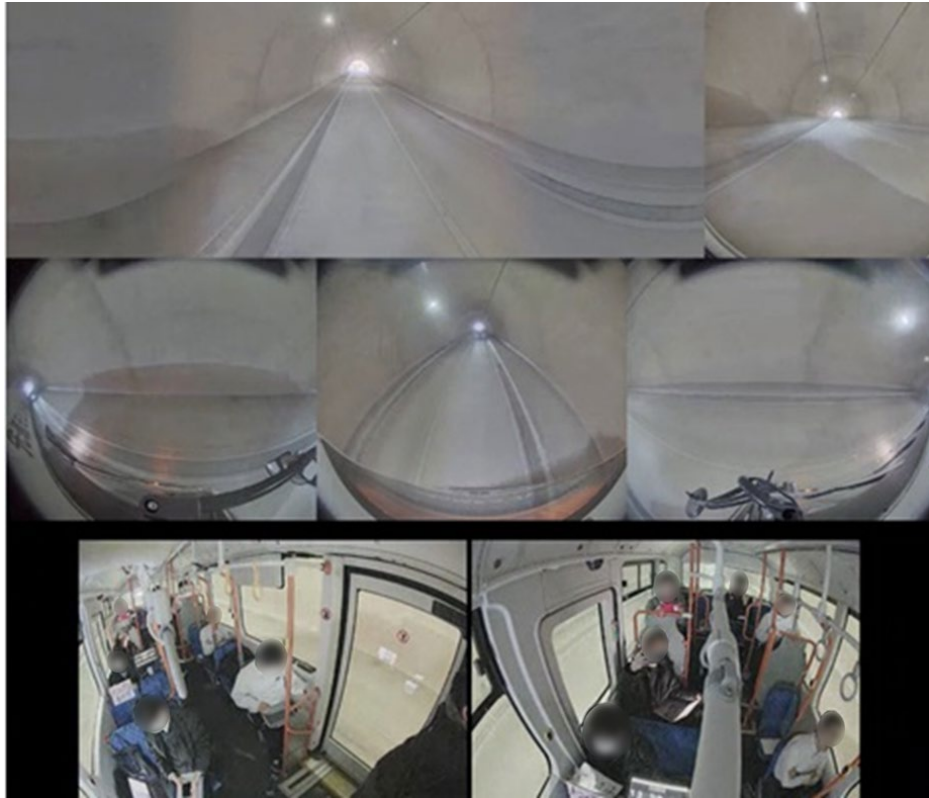


図 6.1-18 受信した遠隔監視映像

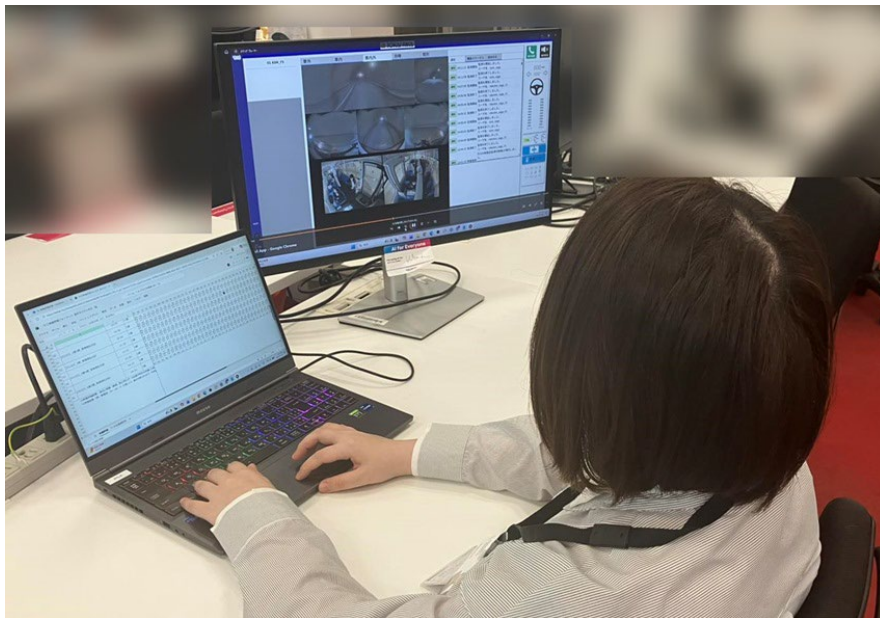


図 6.1-19 遠隔監視映像を受信している様子(楽天モバイル社内)

#### ウ) 測定結果

須田トンネル通過時の自動運転車両内における通信品質の計測結果について、LTE レピーターの ON/OFF 条件ごとに、全 36 回の走行データを集計したものを以下の表と図に示す。

表 6.1-5 須田トンネル通過時の測定結果(LTE レピーターOFF 時)

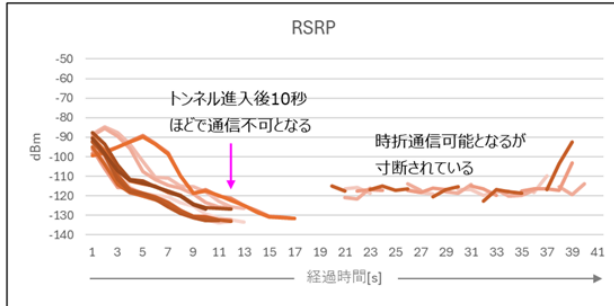
	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
最大値	-84.6	26.0	0.4	2.6
最小値	-133.9	-9.0	0.0	0.0
平均値	-114.8	4.8	0.1	0.6
中央値	-117.1	3.0	0.0	0.0

表 6.1-6 須田トンネル通過時の測定結果(LTE レピーターON 時)

	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
最大値	-56.0	30.0	0.5	3.3
最小値	-100.6	17.8	0.1	1.3
平均値	-80.1	27.9	0.2	2.3
中央値	-82.2	29.1	0.2	2.3

全36回の走行結果を重ねて表示したグラフ

LTEレピーター-OFF



LTEレピーターON

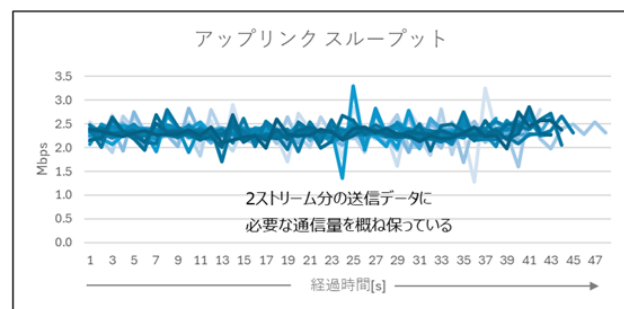
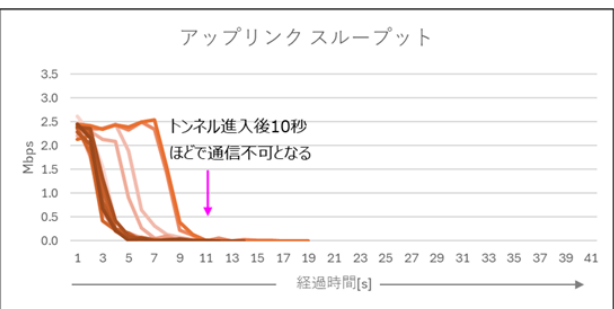
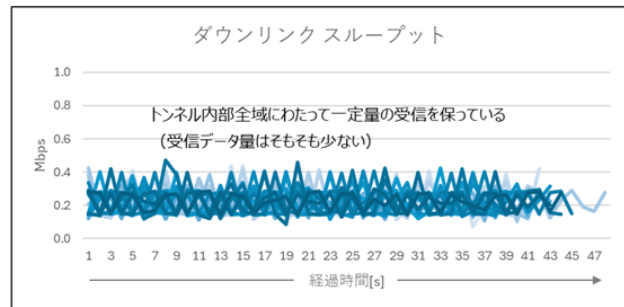
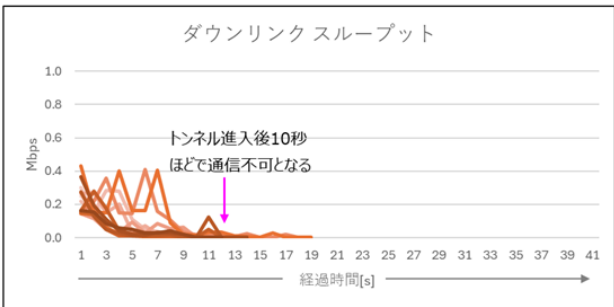
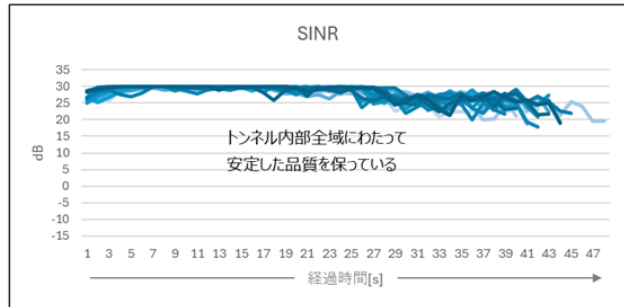
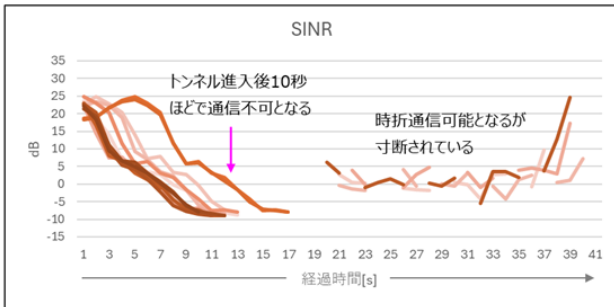
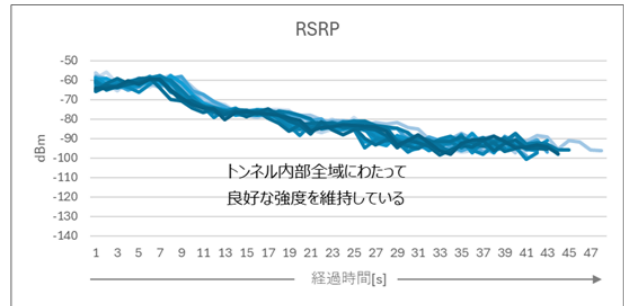


図 6.1-20 須田トンネル通過時の測定結果のグラフ

測定結果の詳細は以下の通りである。

・LTEレピーター-OFF時

RSRPの平均値は-114.8dBmと全体的に受信強度が低く、SINRの平均値も4.8dBに留まり、通信品質が著しく低下していた。また、圏外箇所も多くトンネル内は概ね通信不可能な状態であり、遠隔監視映像の送信は極めて困難であった。

#### ・LTE レピーターON 時

RSRP は最小値でも-100.6dBm、平均値は-80.1dBm であり、良好な電界強度を維持していることが確認された。SINR についても最小値 17.8dB、平均値 27.9dB を記録し、安定した通信品質が確保された。

アップリンク スループットの平均値は 2.3Mbps であった。この数値は、遠隔監視映像の ECU が送信する車外映像と車内映像の 2 ストリーム分のデータ量(車外 1Mbps+車内 1Mbps+付加データ)と概ね合致しており、必要な帯域が確保されていることを示している。なお、ダウンリンク スループットは平均 0.2Mbps と低い値であるが、これは本システムにおいては映像送信(アップリンク)が主目的であり、受信データ量が少ないことに起因するものであり問題ではない。

以上の結果より、LTE レピーターOFF 時には困難であった走行中の遠隔監視映像送信が、LTE レピーターON 時には RSRP、SINR、アップリンク スループットの各指標が高い水準で安定し、通信環境が劇的に改善されることが確認された。

## 工) 考察

計測結果より、以下の考察を得た。

#### ・自動運転車両走行時の通信品質の改善

LTE レピーターOFF 時には通信が極めて困難な状態であったが、ON 時には RSRP 平均値-80.1dBm、SINR 平均値 27.9dB へと劇的に改善された。アップリンク スループットも映像送信に必要な数値を維持しており、安定した映像伝送が可能であることが示された。この結果は、LTE レピーターが移動する自動運転車両に対しても、トンネル全域にわたり安定した通信環境を提供できることを実証している。

#### ・ソリューションとしての有効性の確認

トンネルという電波伝搬が困難な環境においても、LTE レピーターを適切に導入することでトンネル内部への電波延伸を実現し、自動運転車両の通信環境を抜本的に改善できることが実測データによって確認された。これにより、LTE レピーターが本課題に対する最適なソリューションの一つとなり得ることが示された。

## (2) 追加検証:遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証

本節では、遠隔監視映像を送信する LTE ルーターが持つ 2 本のアンテナについて最適な設置向きを検証した結果を報告する。なお、本検証項目は、本実証にご協力いただいている東京科学大学の阪口啓副学長よりご助言をいただき、追加実施したものである。



図 6.1-21 LTE ルーターのアンテナ(左)と測定の様子(右)

a. 計測結果

検証にあたり、図 6.1-22 に示す 4 つのアンテナ設置パターン(a~d)を設定し、トンネル内の「出口」「中間」「入口」の 3 地点(図 6.1-23 参照)において通信品質を計測した。計測結果を表 6.1-7 に示す。各測定項目において最も良好な数値を示した箇所を赤枠で強調している。

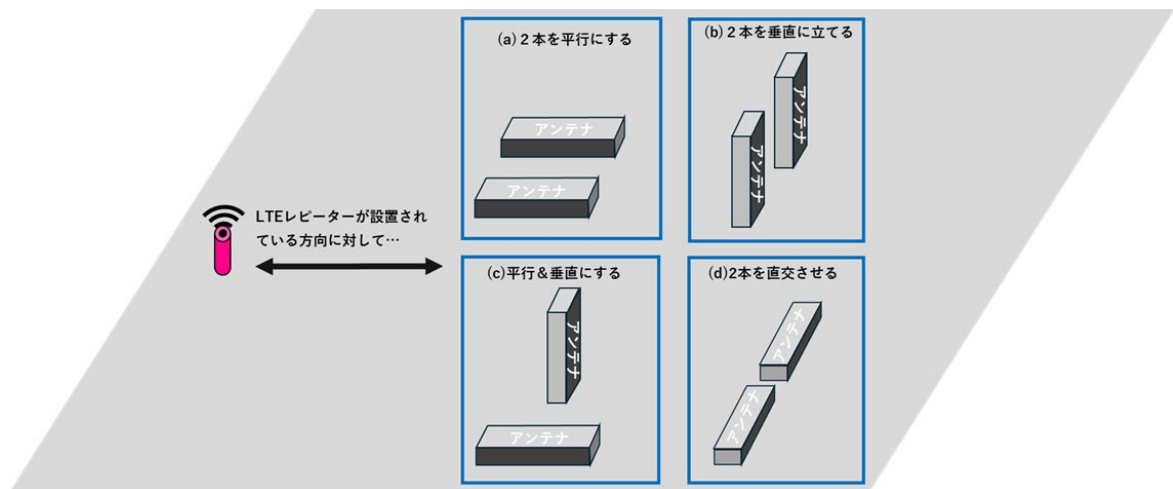


図 6.1-22 遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きを検証パターン



図 6.1-23 アンテナ設置向きへの計測地点

表 6.1-7 アンテナ設置向き検証の計測結果

RSRP(dBm)	①入口	②中央	③出口
向き(a)	-65.71	-88.55	-92.38
向き(b)	-43.18	-68.49	-73.08
向き(c)	-46.34	-78.55	-77.29
向き(d)	-59.64	-83.25	-90.71

RSRQ(dB)	①入口	②中央	③出口
向き(a)	-7.92	-8.43	-8.79
向き(b)	-8.95	-8.82	-8.81
向き(c)	-9.05	-8.40	-8.47
向き(d)	-8.36	-9.38	-8.18

SINR(dB)	①入口	②中央	③出口
向き(a)	29.91	27.11	25.92
向き(b)	29.84	29.56	29.89
向き(c)	29.66	29.59	26.51
向き(d)	29.79	29.71	26.27

アップリンクスループット (Mbps)	①入口	②中間	③出口
向き(a)	2.60	2.58	2.47
向き(b)	2.55	3.05	2.31
向き(c)	2.56	2.81	2.54
向き(d)	2.73	2.89	2.55

## b. 考察および結論

計測結果および通信理論に基づき、以下の考察および結論を得た。

### ・アンテナ設置向きによる通信特性の変化

通信安定性を判断する上で最も重要な指標である RSRP に着目すると、本実証における須田トンネル内の環境においては、アンテナの設置向きによって RSRP 値に差異が見られ、特に「向き(b) 2 本を垂直に立てる」において出口・中間・入口の全地点で他の向きと比較して高い数値が計測された。特にトンネル入口地点では RSRP が -43.18dBm と極めて良好な電界強度を示しており、LTE レピーターからの電波を効率的に受信できていることが確認された。

本実証で使用している LTE レピーターのサービスアンテナは、垂直偏波にて電波を送信する仕様で

ある(参考資料編 表 8.3-15「GAPPL-S1727-16MDF ハードウェア仕様」参照)。電波通信において、送信側と受信側のアンテナ偏波面が一致する場合(偏波マッチング)、アンテナは最も効率的に電波エネルギーを受信する特性を持つため、本検証結果は、トンネル内のように電波伝搬経路が比較的限定的な環境下において、受信アンテナを垂直方向(向き b)に設置することが電波の受信効率向上に寄与した可能性、あるいは複数のアンテナによるダイバーシティ効果が特定の向きでより有効に機能した可能性を示唆している。

#### ・結論

本検証により、須田トンネルのような限定された環境下においては、遠隔監視映像送信機器のアンテナ設置向きが通信品質に影響を与えることが確認された。本結果は、今後山間部のトンネル環境下で運行する自動運転車両へのアンテナ敷設の際の重要な設計指針となるが、一般的な屋外環境等、より多様な電波伝搬特性を持つ環境においては、ダイバーシティ効果を考慮したアンテナの配置や向きの検討が引き続き重要である。垂直方向のアンテナ設置はその検討項目の一つとして有効であると位置づけられる。

なお、本実証で使用する自動運転車両に搭載された既存の通信アンテナについては、アンテナケーブル長の制約等の構造上の理由から物理的な設置調整が困難であり、実証中のアンテナ再設置は行なわないものとした。本検証結果は、将来的な車両設計における通信アンテナの配置検討の際のガイドラインとして活用することを主眼とする。

自動運転車両に設置した既存のアンテナの配置状態を図 6.1-24 に示す。



図 6.1-24 自動運転車両に設置済みの LTE ルーターの通信アンテナ

### (3) 遠隔監視映像品質の計測

### a. 通信統計情報取得機能の開発

目的：トンネル走行時の遠隔監視映像の品質確認を行うため、送信映像の統計情報を取得可能なソフトウェアを開発する。

開発結果詳細：

ECU - 映像配信サーバー間、および映像配信サーバー - 遠隔監視室間の通信統計情報を通信プロトコルに含まれるデータから 5 秒間隔で取得する機能、取得したデータをクラウド上に保存し、データ出力を可能とする機能を開発した。

下図で通信統計情報取得機能のシステム構成を示す。

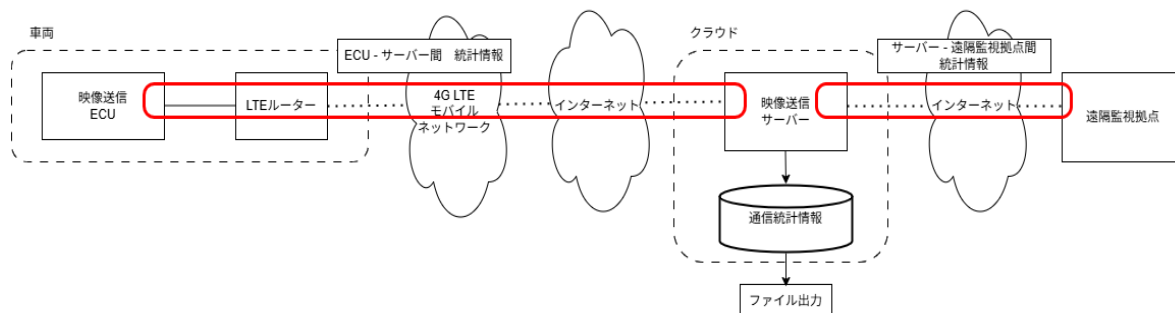


図 6.1-25 通信統計情報機能システム構成

クラウド上に保存された通信統計情報から車外映像/車内映像ストリームの情報、データ取得対象期間を指定し、対象のデータを出力する。出力ファイル形式は csv である。

クラウド上での通信統計情報データ保存期間は 2 週間とした。

### a. 遠隔監視映像品質計測結果

#### ● 通信遅延値計測結果

LTE レピーターON で須田トンネルを走行した際の遠隔監視映像通信遅延値計測結果を示す。

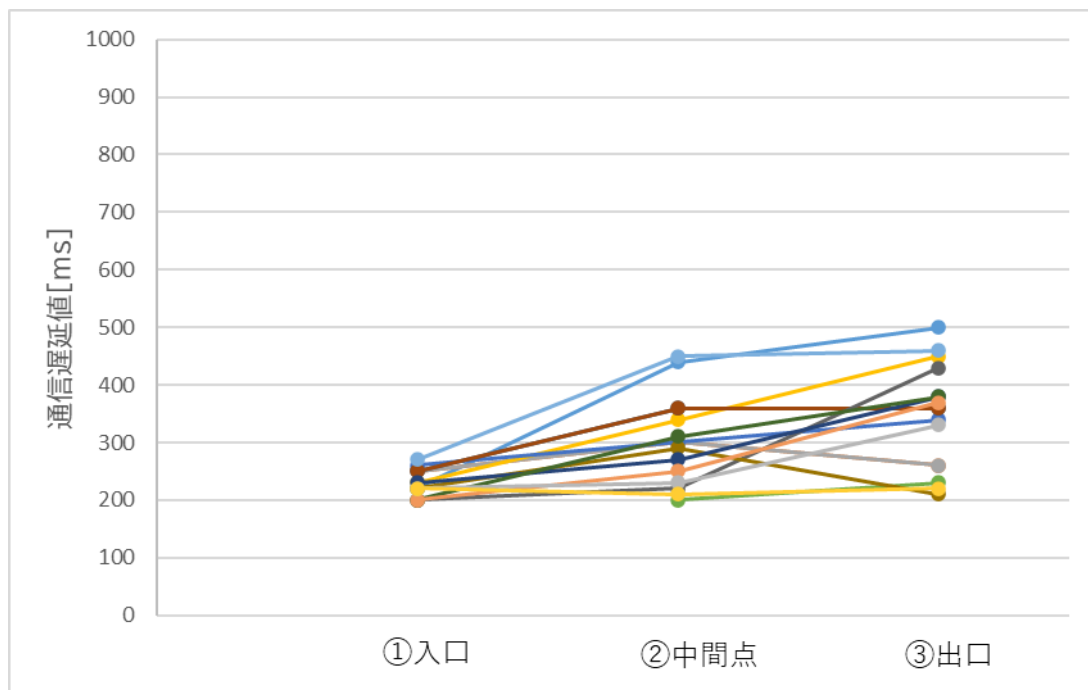


図 6.1-26 レピーターON 時の通信遅延値計測結果

通信遅延値は①トンネル入口、②トンネル中間点、③トンネル出口の 3 ポイントで測定を行っており、計測の結果、通信遅延値の最大値は 500ms となった。測定対象となった走行 16 便分すべてで通信遅延値 1000ms 未満となっている。

- 画質計測結果

レピーターON で須田トンネルを走行した際の遠隔監視映像について解像度、フレームレート、ビットレートの結果を示す。

表 6.1-8 通信統計情報計測結果

検証日	試験番号	車外映像ストリーム KPI達成率[%]		車内映像ストリーム 達成率[%]		車外映像 ビットレート実測値	車内映像 ビットレート実測値
		解像度	フレームレート	解像度	フレームレート	平均[Mbps]	平均[Mbps]
2025/12/15	1	87.5	100	100	100	0.85	0.85
	2	66.7	100	100	100	0.82	0.85
	3	87.5	100	100	100	0.81	0.84
	4	100	100	100	100	0.8	0.85
	5	75	100	100	100	0.82	0.84
2025/12/16	6	100	100	100	100	0.82	0.85
	7	87.5	100	100	100	0.8	0.84
2025/12/18	10	100	100	100	100	0.81	0.86
	11	100	100	100	100	0.81	0.86
	12	87.5	100	100	100	0.81	0.85
	13	100	100	100	100	0.85	0.85
	14	100	100	100	100	0.82	0.85
	15	100	100	100	100	0.84	0.85
	16	100	100	100	100	0.84	0.85
	17	87.5	100	100	100	0.82	0.85
2025/12/22	18	77.8	100	100	100	0.83	0.85
	30	100	100	100	100	0.84	0.85
	31	87.5	100	100	100	0.81	0.85
	32	100	100	100	100	0.84	0.84
	33	77.8	100	100	100	0.82	0.84
	34	87.5	100	100	100	0.82	0.85
	35	75	100	100	100	0.82	0.84
	36	88.9	100	100	100	0.81	0.85
平均		90.2	100	100	100	0.82	0.85

KPI:解像度 480p、フレームレート 15fps、1Mbps

KPI:解像度

車外映像ストリームにおいて KPI である 480p を下回る結果が確認された。

車内映像ストリームはすべて 480p 以上の解像度で映像送信が実施された。

KPI:フレームレート

すべての検証において車外映像ストリーム、車内映像ストリームともに KPI である 15fps 以上で映像送信が実施された。

KPI:ビットレート

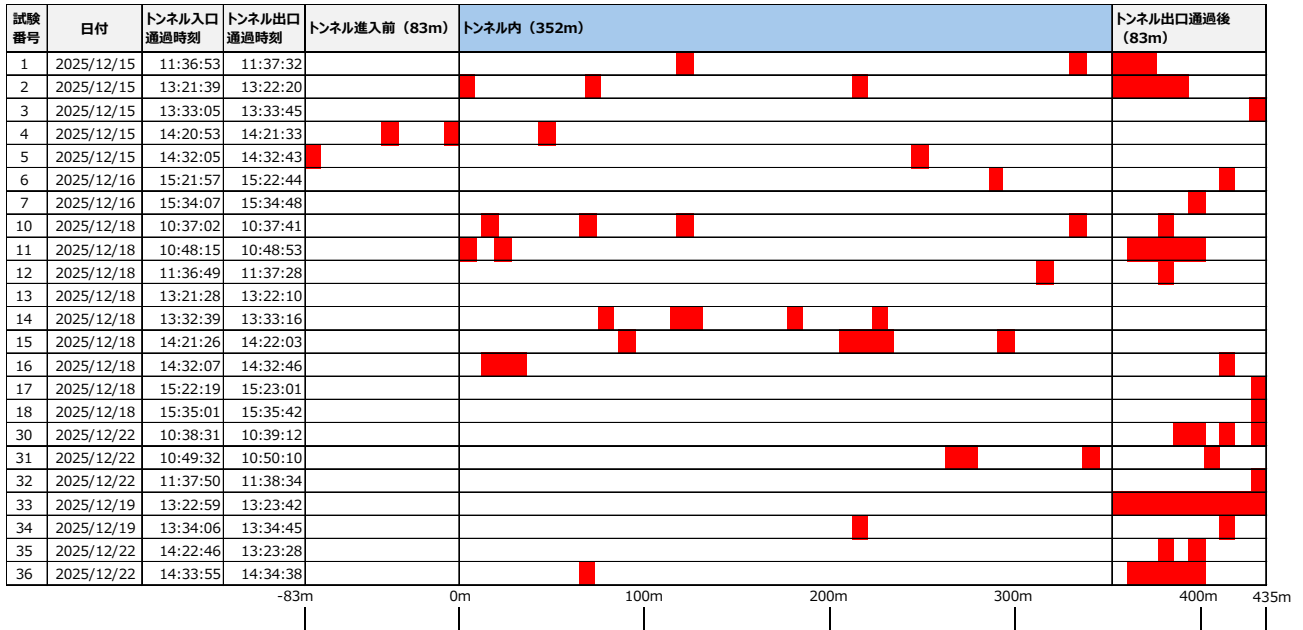
検証時は車外映像、車内映像を同時に送信している。ビットレート実測値の平均は車外映像ストリームで 0.82Mbps、車内映像ストリームで 0.85Mbps という結果になった。

(4) 遠隔監視映像の安定性の評価

5 名のアンケート対象者(遠隔監視者 1 名、映像評価者 4 名)が、須田トンネル通過時の遠隔監視映像のノイズ、カクツキ、コマ落ちが発生した時間を回答した結果について整理した。5 名のアンケート対象者の内、1 名でも映像が乱れていると回答した時間を、映像が乱れている時間として整理を行った。LTE レピーターの電源が ON の状態の試験における、遠隔監視映像が乱れた場所を表 6.1-9 遠隔

監視映像が乱れた場所(LTE レピーターの電源 ON)に示す。この結果から、すべての試験において、トンネル進入前とトンネル内では、映像の乱れは散見されるものの、連続的な映像の乱れは少なくなっていることが明らかになった。試験ごとに映像が乱れた箇所は異なるものの、大きな傾向としては映像の乱れをトンネル入口側と出口側に分けることができ、トンネル中央付近では映像の乱れが少ないことが分かった。また、トンネル出口通過後では連続した映像の乱れが発生した試験がいくつか存在していた。

表 6.1-9 遠隔監視映像が乱れた場所(LTE レピーターの電源 ON)



■映像が乱れた箇所

1マスは1秒程度で進んだ距離(約8m)

LTEレピーターの電源がOFFの状態の試験における、遠隔監視映像が乱れた場所を表 6.1-10 遠隔監視映像が乱れた場所(LTE レピーターの電源 OFF)に示す。この結果から、トンネル進入前では映像は安定しているが、トンネル進入後、数十 m の地点から映像の乱れが発生し、それ以降は復旧していないことが明らかとなった。また、すべての試験でトンネルを出た後でも映像が安定していないことが明らかになった。

表 6.1-10 遠隔監視映像が乱れた場所(LTE レピーターの電源 OFF)

試験番号	日付	トンネル入口通過時刻	トンネル出口通過時刻	トンネル進入前 (83m)	トンネル内 (352m)	トンネル出口通過後 (83m)
8	2025/12/17	15:21:58	15:22:42			
9	2025/12/17	15:33:22	15:34:00			
19	2025/12/19	10:38:06	10:38:49			
20	2025/12/19	10:50:47	10:51:26			
21	2025/12/19	11:37:34	11:38:14			
22	2025/12/19	13:22:29	13:23:15			
23	2025/12/19	13:34:17	13:35:00			
24	2025/12/19	14:22:45	14:23:27			
25	2025/12/19	14:34:27	14:35:04			
26	2025/12/19	15:22:17	15:22:55			
27	2025/12/19	15:33:13	15:33:53			
28	2025/12/19	16:22:38	16:23:20			
29	2025/12/19	16:34:41	16:35:22			

■映像が乱れた箇所

1 マスは 1 秒程度で進んだ距離(約 8m)

・結果

LTE レピーターの電源 OFF 時では、トンネル内で遠隔監視映像が乱れることは必然的であることが明らかとなったが、LTE レピーターの電源 ON 時では 1 秒程度の乱れであるため、遠隔監視に問題があるほどではなく、安定的な通信環境を構築できたとと言える。LTE レピーターを設置することによって、トンネル内で発生していた映像の乱れを改善でき、かつトンネルを出た後の映像の乱れも改善できることが明らかとなった。

・考察

本実証の対象となるトンネルは 352m の直線である。その環境下では、LTE レピーターによってトンネル内全域で映像が安定することが確認された。しかし、トンネルの長さが増したり、カーブした形状になったりすると通信環境が悪くなり、本実証と同じような仕組みではトンネル内で通信を確保できない可能性があると考えられる。そのため、今後は LTE レピーター1 台が、トンネル内部の通信環境を確保できる距離や、カーブした時の影響等を考慮した検証が必要であると考えられる。

3) KPI/KGI との比較結果

定性評価 / 定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	自動運転車両のカメラ映像の安定性:遠隔監視システムが受信した映像は途切れやフリーズが発生しないこと
定量評価	(2)	基地局 → LTE レピーター → 基地局電波測定車までの通信遅延値 : 500ms 以下
	(3)	トンネル入口から出口までの通信モバイル通信要件 通信速度:1Mbps 以上 受信強度(RSRP):-110dBm 以上 受信品質(SINR):3dB 以上 必要 RB 数:1 秒当たり平均で 3RB 以上

	(4)	電波延伸距離:352m
	(5)	遠隔監視システムが受信する映像品質の要件: 画質:480p (854 x 480) フレームレート : 15 fps 最大許容遅延 : 1000ms 未満 ビットレート:1 Mbps (を下回らない)

(1) 自動運転車両のカメラ映像の安定性:遠隔監視システムが受信した映像は途切れやフリーズが発生しないこと

本 KPI では、各便についてアンケート対象者 5 名(遠隔監視者 1 名と映像評価者 4 名)の内、1 名でも映像が乱れていると回答した場合、その瞬間の映像は乱れていると判定した。

a. トンネル全体の映像の安定性について

トンネル全体における映像が安定していた時間の割合を算出した。LTE レピーターの電源が ON の時の、トンネル通過中の映像が安定していた時間の割合を表 6.1-11 トンネル全体における映像が安定していた時間の割合(LTEレピーターの電源 ON)に示す。LTEレピーターの電源がONの状態では、すべての試験で、トンネル内で映像が安定している時間の割合が 87%以上となっている。また半分近くの試験において安定していた時間が 95%以上となった。

表 6.1-11 トンネル全体における映像が安定していた時間の割合(LTE レピーターの電源 ON)

試験番号	日付	トンネル入口通過時刻	トンネル出口通過時刻	トンネル内で映像が安定していた時間の割合
1	2025/12/15	11:36:53	11:37:32	95%
2	2025/12/15	13:21:39	13:22:20	93%
3	2025/12/15	13:33:05	13:33:45	100%
4	2025/12/15	14:20:53	14:21:33	98%
5	2025/12/15	14:32:05	14:32:43	97%
6	2025/12/16	15:21:57	15:22:44	98%
7	2025/12/16	15:34:07	15:34:48	100%
10	2025/12/18	10:37:02	10:37:41	90%
11	2025/12/18	10:48:15	10:48:53	95%
12	2025/12/18	11:36:49	11:37:28	98%
13	2025/12/18	13:21:28	13:22:10	100%
14	2025/12/18	13:32:39	13:33:16	87%
15	2025/12/18	14:21:26	14:22:03	87%
16	2025/12/18	14:32:07	14:32:46	93%
17	2025/12/18	15:22:19	15:23:01	100%
18	2025/12/18	15:35:01	15:35:42	100%
30	2025/12/22	10:38:31	10:39:12	100%
31	2025/12/22	10:49:32	10:50:10	92%
32	2025/12/22	11:37:50	11:38:34	100%
33	2025/12/19	13:22:59	13:23:42	100%
34	2025/12/19	13:34:06	13:34:45	98%
35	2025/12/22	14:22:46	13:23:28	100%
36	2025/12/22	14:33:55	14:34:38	98%

LTE レピーターの電源が OFF の時のトンネル通過中の映像が安定していた時間の割合を表 6.1-12 に示す。LTE レピーターの電源が OFF の状態では、すべての試験で、トンネル内で映像が安定している時間の割合が7%未満となっている。

表 6.1-12 トンネル全体における映像が安定していた時間の割合(LTE レピーターの電源 OFF)

試験番号	日付	トンネル入口通過時刻	トンネル出口通過時刻	トンネル内で映像が安定していた時間の割合
8	2025/12/17	15:21:58	15:22:42	4%
9	2025/12/17	15:33:22	15:34:00	3%
19	2025/12/19	10:38:06	10:38:49	5%
20	2025/12/19	10:50:47	10:51:26	5%
21	2025/12/19	11:37:34	11:38:14	5%
22	2025/12/19	13:22:29	13:23:15	4%
23	2025/12/19	13:34:17	13:35:00	5%
24	2025/12/19	14:22:45	14:23:27	5%
25	2025/12/19	14:34:27	14:35:04	5%
26	2025/12/19	15:22:17	15:22:55	5%
27	2025/12/19	15:33:13	15:33:53	5%
28	2025/12/19	16:22:38	16:23:20	7%
29	2025/12/19	16:34:41	16:35:22	5%

以上の結果から、LTE レピーターを設置することによって、自動運転バスがトンネル通過中でも安定した遠隔監視映像を確認できることが明らかになった。KPI「自動運転車両のカメラ映像の安定性：遠隔監視システムが受信した映像は途切れやフリーズが発生しないこと」については、概ね達成したと考えられる。

#### b. トンネルを 3 分割した時の映像の安定性について

トンネル内のどの区間で映像が不安定になりやすいのかを把握するため、トンネルを入口付近・中央付近・出口付近の 3 区間に分割し、それぞれにおける映像が安定していた時間の割合を算出した。LTE レピーターの電源が ON の時の、トンネルの入口付近・中央付近・出口付近の映像が安定した時間の割合を表 6.1-13 に示す。3 つの区間について、ほとんど試験で 95～100%の時間で映像が安定している結果となった。試験番号 14、15 では、トンネル中央付近で 75%となっている。試験番号 16、31 では、トンネル入口付近・出口付近で 77%となっている。以上から全体としては、映像が安定していた時間の割合が高いが、試験によっては安定していた時間の割合が比較的低くなる区間があることが明らかとなった。

表 6.1-13 トンネルの入口付近・中央付近・出口付近における映像が安定していた時間の割合  
(LTE レピーターの電源 ON)

試験 番号	日付	トンネル入口 通過時刻	トンネル出口 通過時刻	トンネル 入口付近	トンネル 中央付近	トンネル 出口付近
1	2025/12/15	11:36:53	11:37:32	100%	93%	92%
2	2025/12/15	13:21:39	13:22:20	86%	93%	100%
3	2025/12/15	13:33:05	13:33:45	100%	100%	100%
4	2025/12/15	14:20:53	14:21:33	93%	100%	100%
5	2025/12/15	14:32:05	14:32:43	100%	100%	92%
6	2025/12/16	15:21:57	15:22:44	100%	100%	94%
7	2025/12/16	15:34:07	15:34:48	100%	100%	100%
10	2025/12/18	10:37:02	10:37:41	85%	93%	92%
11	2025/12/18	10:48:15	10:48:53	85%	100%	100%
12	2025/12/18	11:36:49	11:37:28	100%	100%	92%
13	2025/12/18	13:21:28	13:22:10	100%	100%	100%
14	2025/12/18	13:32:39	13:33:16	85%	75%	100%
15	2025/12/18	14:21:26	14:22:03	92%	75%	92%
16	2025/12/18	14:32:07	14:32:46	77%	100%	100%
17	2025/12/18	15:22:19	15:23:01	100%	100%	100%
18	2025/12/18	15:35:01	15:35:42	100%	100%	100%
30	2025/12/22	10:38:31	10:39:12	100%	100%	100%
31	2025/12/22	10:49:32	10:50:10	100%	100%	77%
32	2025/12/22	11:37:50	11:38:34	100%	100%	100%
33	2025/12/19	13:22:59	13:23:42	100%	100%	100%
34	2025/12/19	13:34:06	13:34:45	100%	93%	100%
35	2025/12/22	14:22:46	13:23:28	100%	100%	100%
36	2025/12/22	14:33:55	14:34:38	93%	100%	100%

LTE レピーターの電源が OFF の時の、トンネルの入口付近・中央付近・出口付近の映像が安定していた時間の割合を表 6.1-14 に示す。トンネル入口付近では映像が安定していた時間の割合が最大 21%であり、さらにトンネル中央・出口付近では映像が安定していた時間の割合が 0%であることが明らかになった。

表 6.1-14 トンネルの入口付近・中央付近・出口付近における映像が安定していた時間の割合  
(LTE レピーターの電源 OFF)

試験 番号	日付	トンネル入口 通過時刻	トンネル出口 通過時刻	トンネル 入口付近	トンネル 中央付近	トンネル 出口付近
8	2025/12/17	15:21:58	15:22:42	13%	0%	0%
9	2025/12/17	15:33:22	15:34:00	8%	0%	0%
19	2025/12/19	10:38:06	10:38:49	13%	0%	0%
20	2025/12/19	10:50:47	10:51:26	15%	0%	0%
21	2025/12/19	11:37:34	11:38:14	14%	0%	0%
22	2025/12/19	13:22:29	13:23:15	13%	0%	0%
23	2025/12/19	13:34:17	13:35:00	13%	0%	0%
24	2025/12/19	14:22:45	14:23:27	14%	0%	0%
25	2025/12/19	14:34:27	14:35:04	15%	0%	0%
26	2025/12/19	15:22:17	15:22:55	15%	0%	0%
27	2025/12/19	15:33:13	15:33:53	14%	0%	0%
28	2025/12/19	16:22:38	16:23:20	21%	0%	0%
29	2025/12/19	16:34:41	16:35:22	14%	0%	0%

以上の結果から、LTE レピーターを設置することで、トンネル全域において高い割合で映像の安定性を確保できる一方、LTE レピーターがない場合は映像の安定性が著しく低下し、特にトンネル中央～出口にかけては映像が完全に不安定となることが明らかになった。つまりトンネル内部において、遠隔監視映像を安定して送信するためには、LTE レピーター設置等による安定した通信環境の確保が必要不可欠であることが明らかとなった。中山間地域において自動運転バスを運行するためには、現状のままではトンネル内部における運行が困難となる。そのため、トンネル内部で安定した通信環境の確保が不可欠であり、その整備が中山間地域での自動運転バスの実装や運行範囲拡大につながることを示唆された。

## (2) 基地局 → LTE レピーター → 基地局電波測定車までの通信遅延値 :500ms 以下

LTE レピーターを経由した通信における、基地局と車両間の通信遅延値を評価するため、計測を以下の手順で実施した。

### a. 計測手法

無線ネットワーク測定ツールである「XCAL」をインストールした測定用端末にスマートフォンを接続し、スマートフォンの機内モードを ON/OFF することで、LTE 通信の RRC 接続シーケンスを意図的に起動させた。

このシーケンスにおいて、端末から基地局への「LTE RRCConnectionRequest」メッセージ送信時刻と、基地局からの「LTE RRCConnectionSetup」メッセージ受信時刻を「XCAL」を用いて記録

した。これらのメッセージの送受信間隔は、RRC 接続確立における往復の遅延時間に相当する。本計測では、これを二分の一とすることで、基地局から端末への片方向の遅延時間として算出した。

計測は測定場所ごとに 10 回行い、その平均値を求めた。

本計測では、測定ポイントを固定し、同一地点での繰り返し測定によりデータの精度を確保することを主眼としたため、車両の移動による測定誤差を排除する観点から、基地局電波測定車は使用せずに徒歩での定点計測を実施した。

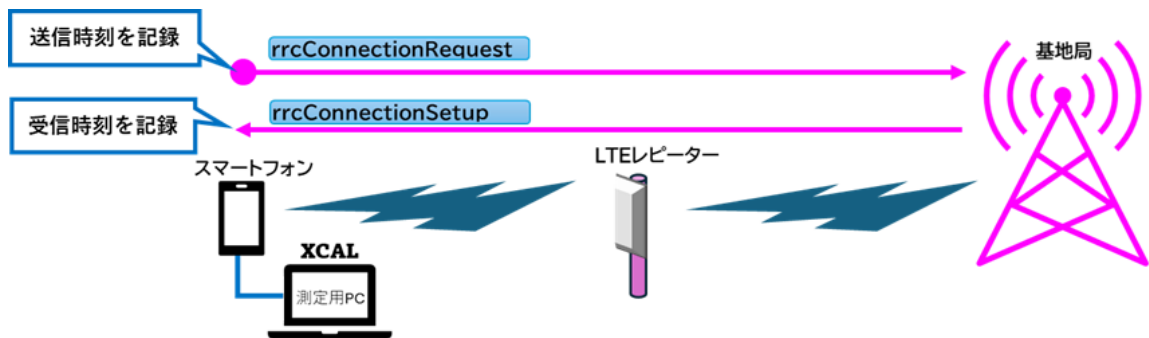


図 6.1-27 計測方法の模式図

### 5.3.3 RRC connection establishment

#### 5.3.3.1 General

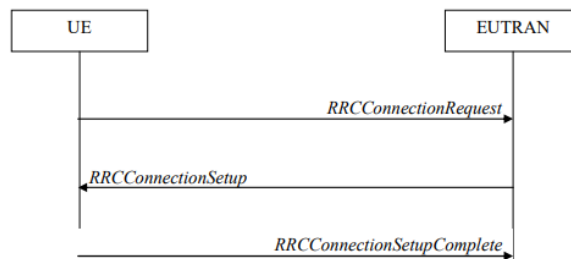


Figure 5.3.3.1-1: RRC connection establishment, successful

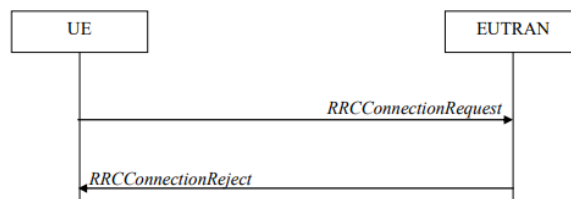


Figure 5.3.3.1-2: RRC connection establishment, network reject

図 6.1-28 RRC 接続確立のシーケンス(3GPP TS 36.331)

#### ・測定場所

須田トンネル内部の入口(0m 地点)と出口(352m 地点)の 2 箇所を設定し、各地点で計測を実施した。

#### ・測定条件

LTE レピーターを経由しない通信における遅延値を参考として比較するため、以下の 2 つの条件下でそれぞれ計測を行った。

LTE レピーターの電源が ON の状態

LTE レピーターの電源が OFF の状態

## b. 計測結果

LTE レピーターの動作状態および測定場所ごとの通信遅延値の計測結果を表 6.1-15 と表 6.1-16 に示す。

表 6.1-15 RRC 接続確立における通信遅延値計測の試行毎の結果

レピーター	ON		OFF(参考値)	
	入口	出口	入口	出口
測定場所				
試行 1(ms)	41.50	41.00	34.00	42.50
試行 2(ms)	42.00	41.50	36.50	892.00
試行 3(ms)	41.50	41.00	41.50	37.50
試行 4(ms)	41.00	44.00	38.50	957.50
試行 5(ms)	37.50	42.00	40.00	42.00
試行 6(ms)	42.00	41.00	39.50	42.00
試行 7(ms)	41.00	40.50	39.50	42.00
試行 8(ms)	42.00	42.00	36.00	552.50
試行 9(ms)	42.00	40.50	39.50	292.50
試行 10(ms)	42.00	41.50	39.50	42.50

表 6.1-16 RRC 接続確立における通信遅延値計測のまとめ

レピーター	ON		OFF(参考値)	
	入口	出口	入口	出口
測定場所				
最低値(ms)	37.50	40.50	34.00	37.50
最高値(ms)	42.00	44.00	41.50	957.50
平均値(ms)	41.25	41.50	38.45	294.30
中央値(ms)	41.75	41.25	39.50	42.50

本実証における目標値「通信遅延値 500ms 以下」に対し、得られた結果は以下の通りである。

・LTE レピーターON 時(評価対象)

表 6.1-15 に示す通り、入口地点での平均遅延値は 41.25ms、出口地点では 41.5ms であった。いずれの地点においても、目標値である 500ms を大幅に下回っており、本 KPI は達成された。

・LTE レピーターOFF 時(参考値)

入口地点では平均 38.45ms と安定していたものの、出口地点では平均 294.3ms となり、最大値では 957.5ms や 892ms といった極めて大きな遅延が記録された。これは、須田トンネル出口付近が既存基地局から遠く、見通し(LOS)が確保できない微弱な電波環境下にあったため、RRC 接続確立に時間を要した結果であると推測される。

・LTE レピーターON 時と OFF 時の比較

LTE レピーターが中継することによる追加遅延を評価するため、ON 時と OFF 時の中央値を比較した。

入口地点においては、レピーターON 時の中央値が 41.75ms であるのに対し、OFF 時の中央値は 39.5ms であり、ON 時に 2.25ms の追加遅延が認められた。この追加遅延は極めて軽微であり、遠隔監視映像の送信に与える影響は小さいと判断される。

一方、出口地点においては、レピーターON 時の中央値が 41.25ms であったのに対し、OFF 時の中央値は 42.5ms と、OFF 時の方が 1.25ms 多く遅延していることが確認された。これは、レピーターOFF 時の不安定な通信環境下における測定値のばらつきが、中央値に影響を与えたものと考えられる。全体として、レピーターを介することによる追加遅延は軽微な範囲に留まると判断できる。

### c. 考察

本計測結果に基づき、LTE レピーターの導入効果について以下の考察を得た。

・安定した低遅延通信の実現

LTE レピーター稼働下では、トンネル入口から出口に至るまで、通信遅延値が平均 41ms 前後に収束した。これは、既存基地局の電波が良好に届くエリアと同等レベルの低遅延通信環境が、トンネル内部全体に構築されたことを示している。自動運転車両から送信される遠隔監視映像には一定のリアルタイム性が求められるが、目標値 500ms を大幅にクリアする本結果は、レピーターを介した通信がその要求に十分対応可能であることを実証している。

・通信環境変動に対する信頼性の向上

参考値として計測したレピーターOFF 時のデータ(特に出口付近)では、通信環境の悪化にともない遅延値が 0.5 秒を超える不安定な挙動が確認されたが、レピーターON 時には安定した挙動となることが確認できた。

本実証で測定した通信遅延値は、車両が通信途絶後に再接続を試みる際や、ハンドオーバー時等に要する時間を測る重要な指標である。

LTE レピーターは、こうした電波環境が不安定になりがちな山間部トンネル内において、常に安定した低遅延接続を提供できる。したがって、LTE レピーターの導入は、自動運転車両のネットワーク接続の信頼性を大幅に向上させ、安全な運行を支援する基盤技術として極めて有効であると結論付けられる。

### (3) トンネル入口から出口までの通信モバイル通信要件

通信速度:1Mbps 以上

受信強度(RSRP):-110dBm 以上

受信品質(SINR):3dB 以上

必要 RB 数:1 秒当たり平均で 3RB 以上

トンネルという不感エリアにおいて、自動運転車両からの遠隔監視映像を安定して送信するために必要な通信環境の最低要件として設定した KPI に対し、その達成状況を定量的に評価した結果を報告する。

#### a. 計測結果

前項の「d. 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定」より得られた測定結果に基づき、KPI に対する評価を行った。表 6.1-17 に須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定の結果を示す。

表 6.1-17 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定の結果

測定項目	最大	最小	平均
通信速度:アップリンク スループット(Mbps)	3.3	1.3	2.3
受信強度:RSRP(dBm)	-56.0	-100.6	-80.1
受信品質:SINR(dB)	30.0	17.8	27.9
必要 RB 数(RB)	50.8	17.9	32.7

#### b. 結果の評価

##### ・通信速度(アップリンク スループット)

最小値が 1.3Mbps であり、KPI 目標値の 1Mbps 以上を達成した。平均値は 2.3Mbps と遠隔監視映像の送信 ECU が必要とするアップリンク送信量を維持することができた。

##### ・受信強度(RSRP)

最小値が-100.6dBm であり、KPI 目標値の-110dBm 以上を達成した。平均値は-80.1dBm と十分な電界強度が確認された。

##### ・受信品質(SINR)

最小値が 17.8dB であり、KPI 目標値の 3dB 以上を達成した。平均値は 27.9dB と非常に良好な受信品質が確認された。

##### ・必要 RB 数

最小値が 17.9RB であり、KPI 目標値の 3RB 以上を達成した。平均値は 32.7RB であり、遠隔監視映像の送信に必要な無線リソースが適切に割り当てられていることが確認された。

結論として、通信速度、RSRP、SINR、必要 RB 数のいずれの項目においても、目標値を大幅に上回る結果が得られ、KPI は達成された。

### c. 考察

本結果から得られた知見は、LTE レピーターの設置が須田トンネル内部における車両ネットワーク接続の確保に対し、以下の重要な効果をもたらすことを示している。

#### ・不感エリアにおける通信環境の抜本的改善

前節「d. 須田トンネル内部の自動運転車両による走行測定」で示した通り、LTE レピーター OFF 時にはほぼ全域で圏外であったトンネル内部が、レピーター ON 時にはすべての KPI 目標値を大幅に上回る通信環境へと改善された。これは、山間部トンネルという電波伝搬が極めて困難な不感エリアにおいて、LTE レピーターが安定した通信カバレッジを構築できることを明確に実証している。

#### ・自動運転車両の要求する通信要件の確保

RSRP(最小値-100.6dBm)および SINR(最小値 17.8dB)という良好な数値は、通信の安定性と信頼性を担保するものであり、自動運転車両の運行において高信頼な通信基盤が確立されたと言える。これらの結果は、自動運転車両に求められる厳格な通信要件を、LTE レピーターがトンネル内部においても十分に満たし得ることを証明している。

## (4) 電波延伸距離:352m 【定量評価】

須田トンネル内部において安定した通信環境を構築するため、設置した LTE レピーターによって電波が延伸された距離を測定し、その達成状況を定量的に評価した結果を報告する。

### a. 評価手法

電波延伸距離の評価は、前節「c. 須田トンネル内部・周辺の定点測定」において取得された LTE レピーターの電源 ON 時および OFF 時の測定結果を用いて実施した。具体的には電源 OFF 時と比較して電源 ON 時に安定した通信品質を確保できるようになった範囲を「電波延伸距離」と定義し、これが KPI 目標であるトンネル全長 352m を網羅しているかを検証した。

### b. 計測結果

トンネル内部の定点測定結果について、LTE レピーター電源 OFF 時について表 6.1-18 に、電源 ON 時について表 6.1-19 に示す。また、これら結果をグラフ化し、測定箇所の位置関係を示したマップ

を図 6.1-29 に示す。

また、トンネル出口を超えても電波延伸がされているかを把握するため、須田トンネル北側の定点測定結果も同様に表 6.1-20、表 6.1-21 および図 6.1-30 に示す。

表 6.1-18 須田トンネル内部の LTE レピーターOFF 時の測定結果

計測ポイント	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
1	-95.0	23.1	126.3	24.0
2	-118.0	7.2	19.4	0.0
3	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
4	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
5	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
6	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
7	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
8	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
9	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
10	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
11	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
12	(圏外)	(圏外)	(圏外)	(圏外)
13	-119.0	9.0	14.0	0.0

表 6.1-19 須田トンネル内部の LTE レピーターON 時の測定結果

計測ポイント	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
1	-60.0	23.0	72.8	61.1
2	-69.0	23.0	86.7	52.5
3	-71.0	24.0	84.4	60.5
4	-75.0	24.0	83.1	57.1
5	-73.0	22.0	80.6	37.6
6	-82.0	25.0	74.0	48.4
7	-81.0	23.0	84.0	43.4
8	-91.0	23.0	81.3	35.6
9	-90.3	24.0	81.3	44.0
10	-97.0	21.3	79.2	39.4
11	-91.3	22.0	81.7	32.4

12	-90.3	21.7	82.6	7.8
13	-95.0	22.2	94.0	25.4

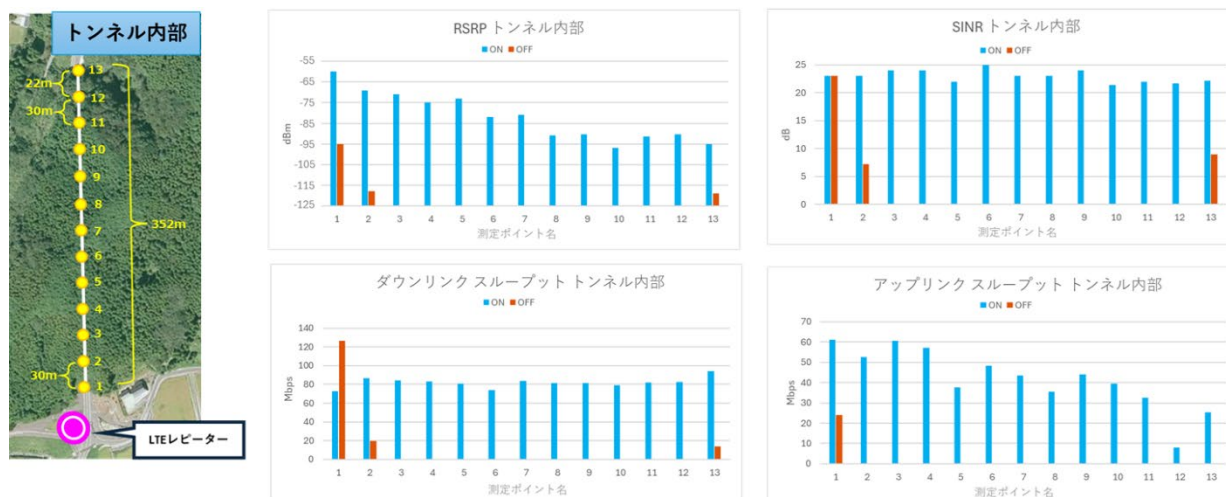


図 6.1-29 須田トンネル内部の計測結果のグラフと計測箇所マップ

表 6.1-20 須田トンネル出口北側の LTE レピーターOFF 時の測定結果

計測ポイント	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
2A	-110.0	16.0	44.0	4.0
2B	-109.0	17.0	64.3	6.3
2C	-104.0	19.5	73.2	5.2
2D	-112.7	12.3	30.9	0.0
2E	-112.0	14.0	60.0	6.0

表 6.1-21 須田トンネル出口北側の LTE レピーターON 時の測定結果

計測ポイント	RSRP(dBm)	SINR(dB)	ダウンリンク スループット (Mbps)	アップリンク スループット (Mbps)
2A	-115.0	15.3	96.9	11.7
2B	-110.0	15.0	85.8	7.0
2C	-114.0	13.0	86.5	4.8
2D	-113.0	13.0	96.6	0.0
2E	-114.0	12.0	39.6	0.0

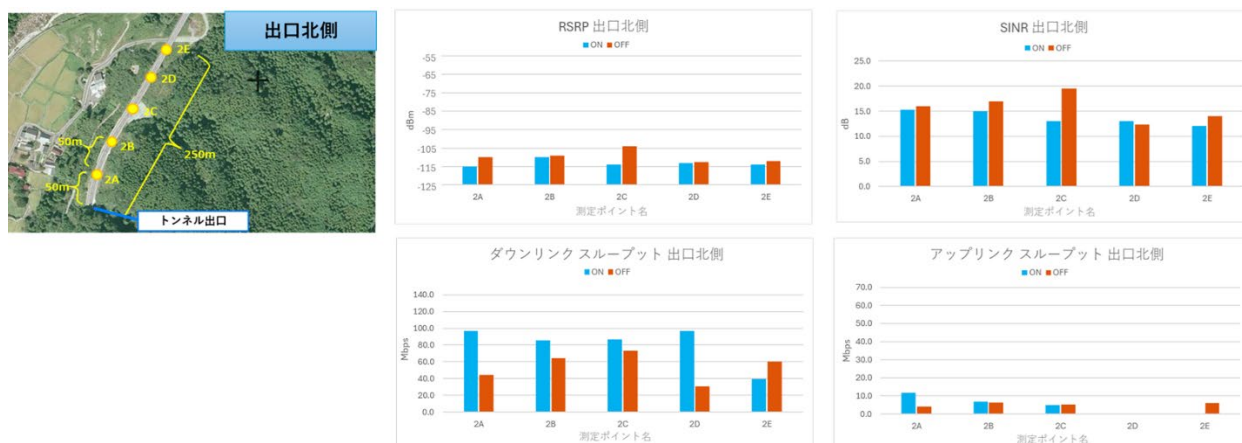


図 6.1-30 須田トンネル出口北側の計測結果のグラフと計測箇所マップ

### c. 結果の評価

表 6.1-18 (LTE レピーターOFF 時) に示す通り、LTE レピーター設置前はトンネル内部の大部分が圏外、または極めて劣悪な通信環境であった。しかし、表 6.1-19 および図 6.1-29 に示す通り、LTE レピーターON 時には、トンネル内部の測定ポイント 1 からポイント 13 までの全区間において、RSRP、SINR、およびスループットのすべての通信品質指標が、KPI 目標値を十分に満たしていることが確認された。

一方、トンネル出口北側においては、表 6.1-20、表 6.1-21 および図 6.1-30 に示す通り、いずれの箇所でも顕著な差異は見られなかった。これは、トンネル内部では導波管効果により電力が維持されるものの、トンネル開口部において電力の広範囲への分散が生じ、十分な伝搬に至らなかったためと推測される。したがって、本実証における有効な電波延伸範囲はトンネル内部区間に留まるものと判断した。

以上の結果より、LTE レピーターの設置によって須田トンネル全長 352m の全区間にわたり、途切れることのない安定した通信環境が構築されたことが実証され、本 KPI は達成された。

### d. 考察

本計測結果に基づき、LTE レピーターの電波延伸効果について以下の考察を得た。

#### ・トンネルに対する LTE レピーターの有用性

本結果は、トンネルという特殊な形状や環境下においても、LTE レピーターを適切に設置することで、自動運転車両が要求する一定水準以上の通信品質を維持できることを示している。したがって、トンネル内部を対象に LTE レピーターを配置する本アプローチは、通信環境確保のための有効かつ適切なソリューションであると結論付けられる。

#### ・トンネル形状の影響と今後の課題

今回実証を行った須田トンネルはカーブのない直線的な形状であり、入口と出口の間で見通し(LOS)が確保されている。須田トンネルの内部を図 6.1-31 に示す。この物理的特性も電波延伸効率を高めたと一因であると考えられる。曲線トンネルや全長がさらに長いトンネル等、形状や条件が異なる環境において LTE レピーターがどの程度の延伸効果を発揮するかについては、次年度以降の検討課題とする。



図 6.1-31 須田トンネル内部の写真

(5) 遠隔監視システムが受信する映像品質の要件:

KPI:通信遅延値 1000ms 未満

図 6.1-32 レピーターON 時の通信遅延値計測結果より通信遅延の最大値は 500ms であり、レピーターON の状態であれば KPI に設定した 1000ms に対して余裕を持っていることがわかる。

計測を行った 3 ポイントにおいては①入口→②中間点→③出口とレピーターから離れるにつれ遅延値が増加する傾向が確認された。

また、各ポイントで計測された遅延値はトンネル入口では 200ms~270ms の範囲、トンネル出口では 210ms~500ms の範囲となっており、レピーターからの距離によって遅延値のばらつきも大きくなる結果が確認された。

KPI:解像度 480p、フレームレート 15fps

KPI を満たしていた試験 32 と KPI を下回った解像度が確認された試験 36 の計測結果の比較を下図に示す。

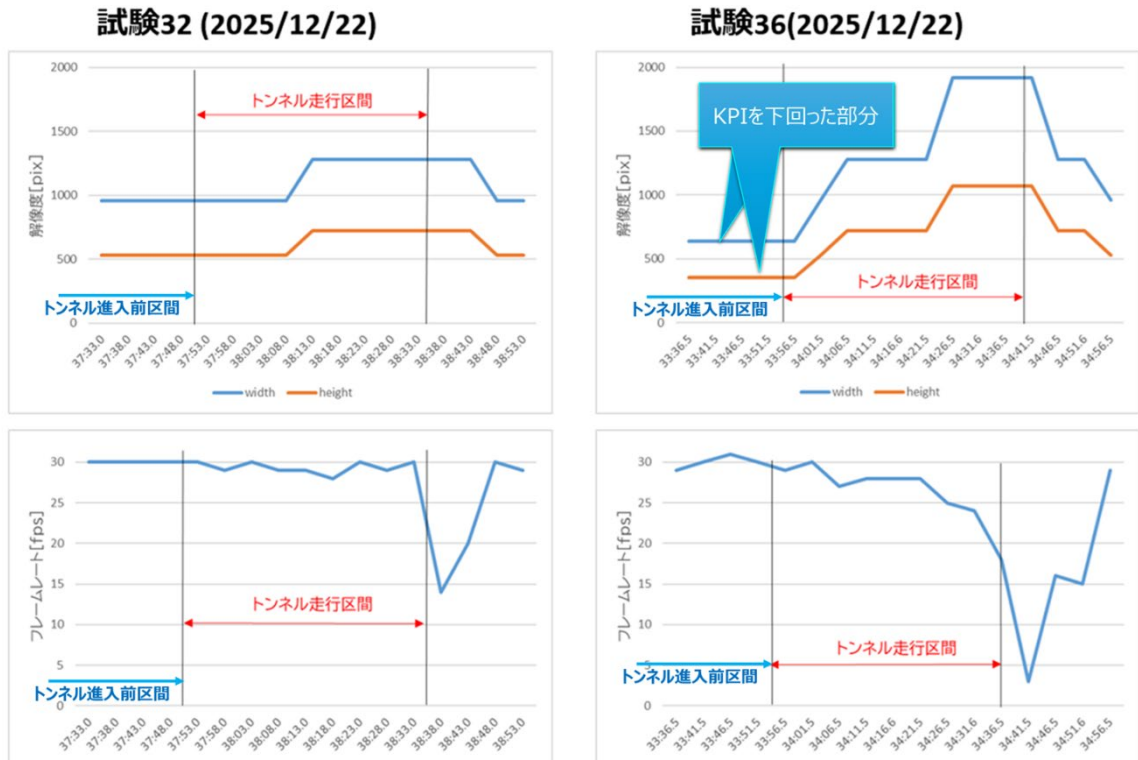


図 6.1-33 試験 32、試験 36 の比較

試験 36 において、検証対象であるトンネル走行区間で解像度が KPI の値を下回っているのはトンネル進入直後のタイミングである。また、通信統計情報の解析開始タイミングであるトンネル進入 20 秒前の時点から解像度が KPI の 480p を下回っていることがわかる。

下図で解析開始ポイントとなるトンネル進入 20 秒前の地点をプロットしたものを示す。



図 6.1-34 通信統計情報解析開始ポイント

本実証で使用した遠隔監視システムは、ネットワーク状況に応じて送信映像の解像度およびフレームレートを段階的に制御する機能を有している。しかし、通信統計情報の解析開始ポイントを含む周辺の通信計測結果は良好であったことから、KPI を下回る解像度で通信が行われた要因については、シス

テムの解像度・フレームレート制御処理に起因する可能性が考えられる。したがって、今後は制御要因を詳細に把握するための仕組みを整え、さらなる調査を実施する必要がある。

KPI:ビットレート 1Mbps

本実証で使用している遠隔監視システムはターゲットとなるビットレートを予め指定し、映像送信を行う形式となっている。本検証においてはターゲットビットレートを 1Mbps に設定し、1Mbps×2 ストリーム(車外映像、車内映像)の構成で遠隔監視映像の送信を行った。

レピーターON の状態で走行した場合は、遠隔監視映像の通信切断が発生することなくトンネルの出口まで走行可能なことを確認した。

表 6.1-8 通信統計情報計測結果で示した通り、映像送信時のビットレート実測値の平均は車外映像ストリーム 0.82Mbps、車内映像ストリーム 0.85Mbps となった。

試験 1 走行時のビットレート測定値を示す。

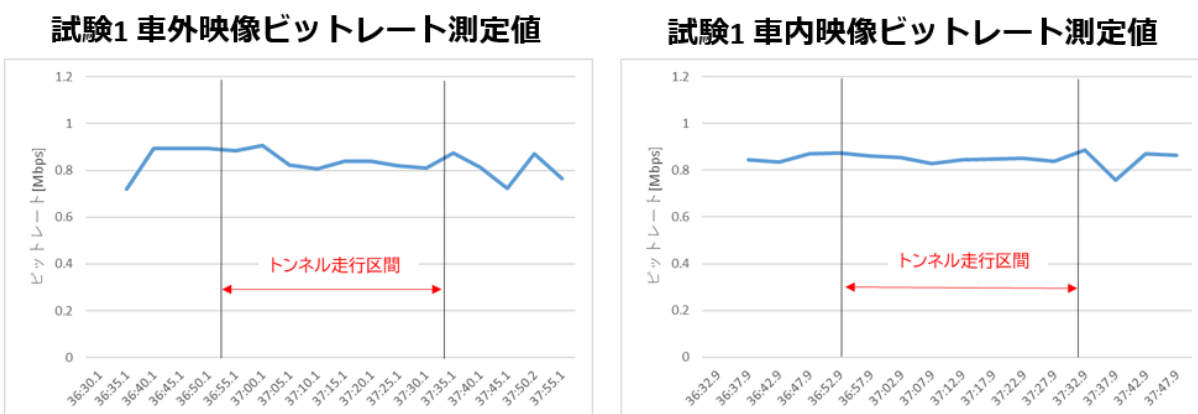


図 6.1-35 試験 1 ビットレート測定値

走行中でもターゲットビットレートである 1Mbps から大きく変動することなく推移していることがわかり、かつ測定結果は検証全体を通してターゲットビットレートよりもやや低い値となっている。これはトンネル走行時に遠隔監視カメラに映る映像の変化が少なくなることも影響していると考えられる。

なお LTE レピーターOFF 時は、すべての検証でトンネル進入後 3 秒ほど経過した地点で遠隔監視映像の通信が切断される結果となった。切断発生ポイントはレピーター設置前の通信状況確認結果と一致している。

#### 4) 成果・課題

本ユースケースは、これまで電波が届かなかったトンネル内の区間といった不感エリアにおいて、LTE レピーターが有効な解決策となり得るかを検証することを目的として実施された。本実証の結果を踏まえ、レベル 4 自動運転の社会実装における成果と今後の課題を以下にまとめる。

- a. 成果 :トンネル内部における通信カバレッジの改善と弱電界、圏外エリアの解消

LTE レピーターを設置することで須田トンネル内部の弱電界、および圏外のエリアが完全に解消されることが確認された。LTE レピーター稼働時には RSRP、SINR、アップリンク スループットの各指標が安定して高い水準を維持し、自動運転車両からの遠隔監視映像送信に最低限必要な通信基盤を構築できた。

#### b. 成果 :安定した遠隔監視映像を送信する環境の構築

前述の LTE レピーター設置による通信基盤整備により、安定した遠隔監視映像の送信が可能であることが実証された。これにより映像を確認する遠隔監視員に対し、安定して途切れることのない映像を提供できる環境が実現したことで、自動運転の安全な運行、および緊急時における迅速な現場状況の把握が可能となった。

#### c. 成果 : トンネル環境下におけるアンテナ設置の有効な指針の提示

遠隔監視映像送信機器の適切なアンテナ設置向きに関する検証により、須田トンネルのような限定的な電波伝搬環境下においては、アンテナの設置向きが通信品質に影響を与えることが確認された。この知見は、今後山間部のトンネル環境下で運行する自動運転車両へのアンテナ敷設の際に、アンテナの偏波特性やダイバーシティ効果を考慮した設置向きの重要性を示すものとなる。

今回の検証は限定的な条件下での定点測定であり、その詳細なメカニズムや真の最適解を見出すためにはさらなる分析が必要とされるが、アンテナ配置の最適化が通信品質向上に寄与する可能性を示した点で、将来的な車両設計における通信アンテナの配置検討のガイドラインに資する成果である。

一方で、「遠隔監視映像の安定性の評価」において、LTE レピーター ON 時においてもトンネル内で部分的に映像品質が低下する事象が観測された。この変動の発生メカニズムについては詳細な分析が必要とされるが、本成果(アンテナ設置向きの最適化)がその解消に寄与する可能性を含めて、今後さらなる検証と考察が必要である。

#### d. 成果 : コスト効率と迅速な導入による通信環境整備の実現

山間部における基地局建設は、市街地に比べて多大な時間とコストを要するという課題が存在する。本実証では、LTE レピーターを活用することで既存の通信エリアを延伸し、トンネル内部の不感エリアを通信可能とすることができた。これは当初の目的であった「低コストかつ短期間で接続手段を確保する」という課題に対し、LTE レピーターが有効な解決策となり得ることを明確に示したものであり、自動運転の社会実装における経済性と導入スピードの向上に大きく貢献する成果である。

#### e. 課題 : 多様なトンネル形状・環境への適用性検証

今回実証を行った須田トンネルは直線的な形状であり、入口と出口の間で見通し(LOS)が確保されている。しかし、カーブを有するトンネルや長距離トンネル、あるいは内部構造が複雑なトンネル等、形状や条件が異なる環境における LTE レピーターの電波延伸効果については、さらなる検証が必要である。多様な環境下における最適なレピーター配置や設計手法の確立が、LTE レピーターの適用範囲を広げる上での課題と考える。

#### f. 課題：電波干渉の影響評価と対策

本実証においては、LTE レピーターの設置による顕著な電波干渉は確認されなかった。特に、LTE レピーター設置箇所近傍(トンネル入口南側)における事前懸念であったドナーアンテナとサービスアンテナ間の回り込みや、周辺基地局波との干渉による通信品質の低下は払拭された。しかしながら、周辺基地局からの電波や他の無線システムとの間で干渉が発生する可能性は依然として存在する。特に、複数レピーターを協調動作させる場合や、5G システムとの共存を考慮する場合において、詳細な電波干渉の評価手法と、それを抑制するための対策技術の確立が重要となる。レピーターの最適な配置設計においては、単なる電波強度だけでなく、SINR やスループットといった通信品質指標の総合的な評価、および周辺環境との電波干渉影響を詳細に検討する必要がある。

#### g. 課題：通信統計情報の機能改善

本検証では検証対象となる区間が須田トンネルのみに限られており、トンネルを通過するのに必要な時間も 40 秒程度と短いことから、クラウド上に通信統計情報を保存した上で検証対象のデータを後から抽出する機能とした。本機能は遠隔監視映像の通信状態の把握に役立つことが確認できたが、走行コース全域の状況把握を行うことを考えると通信統計情報を時系列データとして保存するだけでなく、それを可視化する機能も必要になると考えられる。

可視化にあたっては、通信統計情報を車両の位置情報に紐づける等して、走行コース位置に対応した値を確認可能とする必要があると考えられる。

また、今回は走行後にデータを抽出する形式としたが、社会実装を見据えた際には走行後すぐにデータを確認できるようにリアルタイム性を向上させる必要があると考えられる。

## 6.2 ②遠隔監視:自動運転システムの常時通信接続確保:通信の安定性確保

6.2.1 遠隔監視に最低限必要な画質を見極め、それを使用して通信輻輳・通信品質低下発生時も安定した遠隔監視を可能とする

### 1) 実証スケジュール

本実証における実証スケジュールを図 6.2-1 に示す。

フェーズ	2025年							2026年	
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
実証準備	検証方法検討				事前検証				
実証						本検証			
実証評価							データ検証	報告書作成	

図 6.2-1 実証スケジュール

### 2) 開発・評価項目の結果

番号	開発・評価項目
(1)	通信輻輳度・通信品質 Web API の開発
(2)	遠隔監視映像送信ソフトウェアの開発
(3)	事前検証:必要最低限の画質および画質切替閾値の決定
(4)	本検証:輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証
(5)	遠隔監視動画品質要件
(6)	遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件
(7)	遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件
(8)	通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件

#### (1) 通信輻輳度・通信品質 Web API の開発

目的:

Web API を用いてネットワーク管理システム(OSS)から通信輻輳指標値を取得し、取得結果に基づき通信輻輳状態の判定、ならびにその判定結果の遠隔監視システムへの通知が可能であることを確

認する。

また、Web GUI に通信品質指標値を入力し、入力結果に基づき通信品質低下状態の判定、ならびにその判定結果の遠隔監視システムへの通知が可能であることを確認する。

開発結果詳細：

Web API を用いた通信輻輳指標値の取得、および取得結果に基づく通信輻輳状態の判定、ならびにその判定結果の遠隔監視システムへの通知が可能であることを確認した。

同様に、Web GUI を用いた通信品質指標値の入力、および入力結果に基づく通信品質状態の判定、ならびにその判定結果の遠隔監視システムへの通知が可能であることを確認した。

Web API/Web GUI で取得する判定指標を表 6.2-1 に、通信輻輳判定・通信品質低下判定の内容を表 6.2-2 に示す。

後述する(3)事前検証の結果から、遠隔監視映像の伝送に必要なスループットを確保できる条件を確認するため、Web GUI で入力する通信品質指標値にアップリンク スループットを追加採用した。

アップリンク スループットの具体的な取得方法については、(4)本検証：輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証にて詳述する。

本検証の実施前に遠隔監視システムとの動作連携確認を行い、すべての通知パターンにおいて正常に動作していることを確認した。

表 6.2-1 Web API/Web GUI で取得する判定指標

No	カテゴリ	指標
1	Web API	アップリンク リソースブロック使用率
2		ダウンリンク リソースブロック使用率
3		端末収容利用率
4	Web GUI	RSRQ
5		SINR
6		アップリンク スループット

表 6.2-2 通信輻輳判定・通信品質低下判定

判定内容	判定条件	遠隔監視システムへの通知内容
通信輻輳判定	<p>下記条件を満たした場合、「通信輻輳状態」と判定する。</p> <p>アップリンク リソースブロック使用率 &gt; 閾値 かつ 端末収容利用率 &gt; 閾値</p>	<p>「通信輻輳状態」と判定した場合は TRUE(1)、「通信輻輳状態」と判定しなかった場合は FALSE(0)を通知する。</p>
通信品質低下判定	<p>下記条件を満たした場合、「通信品質低下」と判定する。</p> <p>RSRQ &lt; 閾値 または SINR &lt; 閾値 または アップリンク スループット &lt; 閾値</p>	<p>「通信品質低下」と判定した場合は TRUE(1)、「通信品質低下」と判定しなかった場合は FALSE(0)を通知する。</p>

## (2) 遠隔監視映像送信ソフトウェアの開発

### a. 遠隔監視映像画質変更機能の開発

目的:

最大解像度、最大フレームレートが固定値となっていた既存システムに対し、任意の解像度、フレームレートを指定可能なソフトウェアを開発する。

開発結果詳細:

複数台のカメラ映像を統合する映像処理パイプラインの改良を行い、指定した解像度、フレームレートで映像出力を行うパイプラインを構成するソフトウェアを実現した。また、パイプライン生成とともにパイプライン処理自体の最適化を行い、統合した映像データ生成の処理時間の短縮を実現した。

新旧映像パイプラインの処理フローを示す。

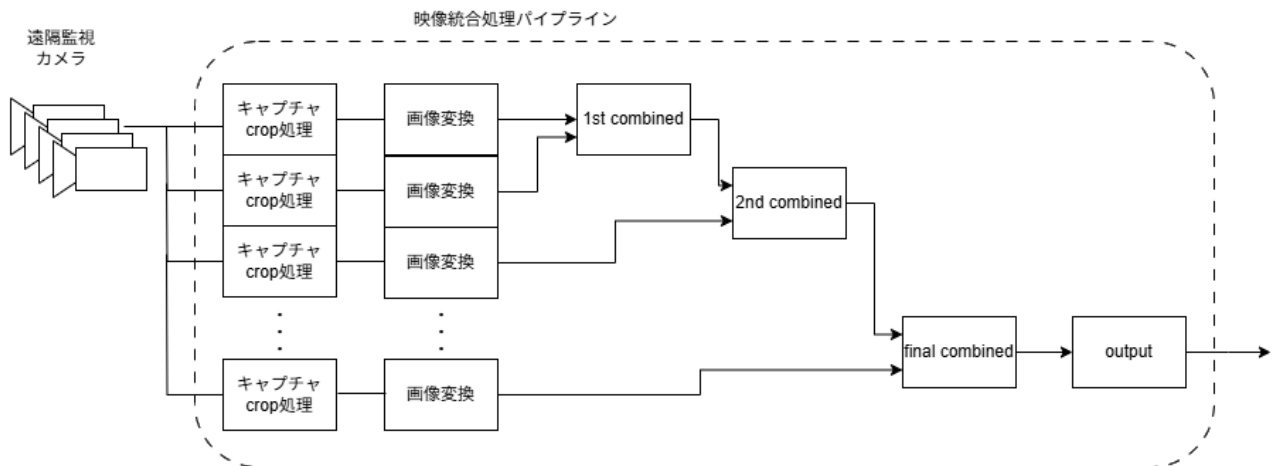


図 6.2-2 旧映像処理パイプライン

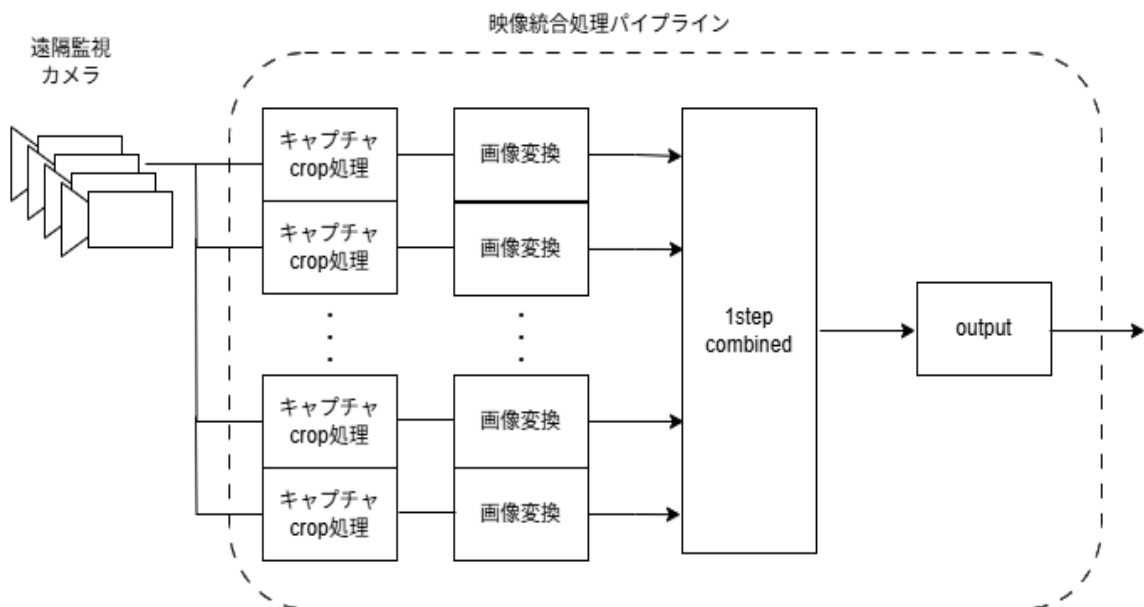


図 6.2-3 新映像処理パイプライン

旧パイプラインでは映像を統合する処理をシリアルに行っていたが、新パイプラインでは 1step で統合する処理に改良を行った。この結果、映像データを統合する処理において約 150ms の処理時間削減を実現した。カメラ撮像から統合した映像データ生成までの処理時間は旧パイプライン時の約 270ms から約 120ms に短縮されている。このパイプライン最適化はカメラ撮像から遠隔監視室での映像表示までの End-to-End の遅延値削減にも寄与している。

今回開発した新映像処理パイプラインには、画像変換処理ブロック内のデータコピー処理に関して、さらなる最適化の余地がある。ただし最適化を実現した際の処理時間削減見込みは 10ms 未満であり、KPI の検証に影響を及ぼす値ではなかったため、今後の課題とした。

## b. 通信輻輳度、通信品質に連動した映像送信ソフトウェアの開発

目的:

通信状況に応じて送信映像の画質を指定可能とする。

開発結果詳細:

遠隔監視映像送信処理の前段に Web API で通信輻輳度、通信品質の値を取得する処理を追加し、通信状況に応じて送信映像の画質を指定可能であることを確認した。通信の輻輳もしくは通信品質の低下どちらかが発生した場合に(3)事前検証:必要最低限の画質および画質切替閾値の決定により定められた「最低限画質」である「960×540 15fps」の設定で遠隔監視映像の送信を行い、通信が輻輳しておらず、通信品質も問題ない場合は「システム最大画質」である 1920×1080 30fps の設定で映像送信を行った。

表 6.2-3 送信映像画質選択

	通信輻輳度:輻輳なし	通信輻輳度:輻輳あり
通信品質:低下なし	1920×1080 30fps	960×540 15fps
通信品質:低下あり	960×540 15fps	960×540 15fps

システム起動から遠隔監視映像送信までの処理フローを示す。

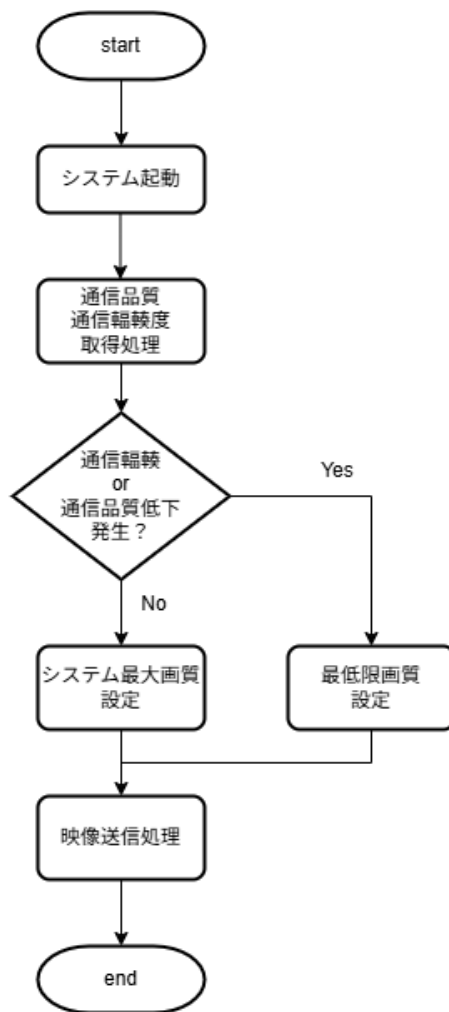


図 6.2-4 遠隔監視映像画質設定処理フロー

「システム起動処理」と「映像送信処理」の間に本実証で開発を行った通信品質、通信輻雑度の情報を取得する処理を実施している。

### (3) 事前検証:必要最低限の画質および画質切替閾値の決定

#### a. 遠隔監視における必要最低限画質の決定

##### ア) 検証内容

映像ターゲットビットレートを 1Mbps に設定し、送信可能な 5 種類の画質(表 6.2-4 参照)について、遠隔監視オペレーションを正常に実施できる画質であるかを評価した。

評価は映像伝送の安定性および映像評価者によるアンケート結果を総合的に分析し、最低限必要な画質を決定する手順で行った。評価は画質が低いものから順に実施した。

表 6.2-4 映像ターゲットビットレート 1Mbps で送信可能な画質

No	解像度(ピクセル)	フレームレート(fps)
1	960×540	15
2	960×540	30
3	1280×720	15
4	1280×720	30
5	1920×1080	15
参考(※)	1920×1080	30

※ システム最大画質

### イ) 検証結果

まず、画質の低い 3 パターンで評価を行った。その結果、表 6.2-5 に示す通り「1280×720 15fps」および「960×540 15fps」の 2 パターンで条件を満たすことが分かった。したがって最も画質の低い「960×540 15fps」を「必要最低限の画質」として採用可能と判断した。

表 6.2-5 映像伝送条件評価結果

項目	目標値	設定(解像度×フレームレート)		
		1280×720 15fps	960×540 30fps	960×540 15fps
解像度	90%以上の時間で 指定値以上であること	100%	100%	100%
	目標達成可否(○×)	○	○	○
フレームレート	90%以上の時間で 指定値以上であること	94.51%	65.25%	94.56%
	目標達成可否(○×)	○	×	○
平均映像送信 ビットレート	上限である約 1Mbps に最も近いこと	0.915 Mbps	0.920 Mbps	0.931 Mbps
	1Mbps との差	-0.085 Mbps	-0.080 Mbps	-0.069 Mbps

### ウ) 考察

ビットレートが同程度の場合、画質やフレームレートが低い方が、パケットロス発生時でも映像が不安定になりにくいという傾向がある。このため、「960×540 15fps」設定でのアンケートを実施した。その結果は表 6.2-6 に示す通り、全評価者の評価結果が KPI を達成したため、この条件を最低限画質と

して決定した。

表 6.2-6 画質 960×540 15fps でのアンケート結果

No	KPI	達成率
1	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答。	100%
2	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と回答。	100%
3	最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答。	100%
4	アンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。	100%

なお、最も画質の低いパターンが最低限画質として選定されたため、画質が良い 2 パターンについては評価を実施しなかった。

## b. 通信輻輳度に応じた画質切替閾値の決定

### ア) 検証内容

各検証場所における通信輻輳条件の指標値(ダウンリンク リソースブロック使用率、アップリンク リソースブロック使用率、端末収容利用率)を合計 14 回計測(1 試験あたりの試験時間は 40 分)した。

加えて、映像評価者計 5 名 1 グループを対象に遠隔監視映像に関するアンケートを実施し、システム最大画質と最低限画質の映像のどちらがより安定していたかを確認した。

### イ) 検証結果

結果は下記の通りである。なお各指標値は試験時間 40 分間の平均値を記載した。

表 6.2-7 事前検証 通信輻輳条件検証結果

検証場所	No	ダウンリンク リソースブロッ ク使用率 (%)	アップリンク リソースブロッ ク使用率 (%)	端末収容 利用率 (%)	アンケート結果で最 低限画質の方が安定 していると答えた人 数の割合(%)
JR・小田急 登戸駅近辺	1	79.74	40.04	23.07	20
	2	78.05	44.71	24.86	20
	3	81.23	46.26	27.29	20
JR 新横浜駅近辺	4	74.67	44.13	25.64	20
	5	69.75	50.37	25.71	20
東京メトロ 新宿三丁目駅近辺	6	24.33	6.03	4.89	40
	7	35.75	9.57	7.57	20
	8	67.47	30.91	11.57	40
	9	69.03	29.59	12.36	20
	10	76.96	52.03	13.28	60
	11	37.14	20.22	8.82	20
	12	63.61	26.82	11.43	60
	13	68.13	45.49	11.93	60
	14	77.55	29.04	13.82	80

## ウ) 考察

測定した通信輻輳条件の指標値ごとに考察を述べる。

- ・ ダウンリンク リソースブロック使用率

試験 1～3 の結果に示す通り、JR・小田急登戸駅近辺では、ダウンリンク リソースブロック使用率が約 80%と高い値を記録したため、ネットワーク リソースがひっ迫し、「最低限画質の映像の方が安定している」と回答する映像評価者の割合が高くなることが予想された。しかし、結果としては「最低限画質の映像の方が安定している」と回答した人数は少数であった。その他の試験 4～14 の測定結果でも、ダウンリンク リソースブロック使用率と、端末収容利用率およびアンケート結果における最低限画質の方が安定したという回答との関連性が見られなかった。このため、通信輻輳の判定指標として有効ではないことが判明した。

- ・ アップリンク リソースブロック使用率

事前検証において、アップリンク リソースブロック使用率が最も高かった地点でも JR 新横浜駅近辺の約 50%にとどまり、いずれの検証場所においても高負荷な状況とは言えなかった。実施場所の選定時、アップリンク リソースブロック使用率が高い値を示していた場所を選定したが、事前検証の実施時は安定していなかった。したがって、通信輻輳の判定指標としての有効性を

事前検証から判断することができず、追加検証が必要であると結論付けた。

- ・ 端末収容利用率

JR・小田急登戸近辺やJR 新横浜駅近辺では端末収容利用率が20%を超えたが、最低限画質が安定すると回答した結果は少数であった。これに対し、端末収容利用率が約10%の東京メトロ新宿三丁目駅近辺では、最低限画質が安定するという結果が多く得られた。

よって、単純な端末収容利用率の増加、すなわちユーザー数の増加のみから通信輻輳の判定指標として有効と判断することはできない。このことから、ユーザー数の増減とは別の観点からの追加検証が必要であると結論付けた。

### c. 通信品質低下判定に基づく画質切替閾値の決定

#### ア) 検証内容

各検証場所で通信品質指標値を、合計14回計測した。(1試験あたりの試験時間は40分)

加えて、映像評価者計5名1グループを対象に遠隔監視映像に関するアンケートを実施し、システム最大画質と最低限画質の映像のどちらがより安定していたかを確認した。

#### イ) 検証結果

結果は下記の通りである。

各指標値は試験時間40分間の平均値を記載している。

表 6.2-8 事前検証 通信品質低下条件検証結果

検証場所	No	RSRQ(dB)	SINR(dB)	アンケート結果で最低限画質の方が安定していると答えた人数の割合(%)
JR・小田急登戸駅 近辺	1	-12.80	6.73	20
	2	-11.76	11.93	20
	3	-11.72	12.41	20
JR 新横浜駅近辺	4	-13.38	5.71	20
	5	-14.41	2.65	20
東京メトロ新宿三 丁目駅近辺	6	-14.63	0.00	40
	7	-14.30	9.57	20
	8	-18.76	-4.80	40
	9	-18.78	-5.05	20
	10	-19.10	-5.34	60
	11	-15.91	-1.49	20
	12	-17.08	-2.96	60
	13	-19.69	-5.93	60
	14	-16.40	-0.96	80

#### ウ) 考察

RSRQ および SINR が低く、通信品質が悪い東京メトロ新宿三丁目駅周辺において、およそ半数のアンケートでシステム最大画質の方が安定しているという結果が得られたため、RSRQ および SINR 通信品質低下の判定指標として有効ではないと判断した。

RSRQ、SINR 以外の通信品質指標値の採用を検討する必要があると結論づけた。

#### (4) 本検証:輻輳環境下での遠隔監視の安定性検証

##### a. 現地環境での追加検証

事前検証で通信輻輳および通信品質低下の閾値を決定することができなかったため、本検証に先立ち、本検証と同一環境において追加検証を実施した。

#### ア) 検証内容

追加検証は佐賀インターナショナルバルーンフェスタ 2025(以降、バルーンフェスタ)の開催初日である 10 月 30 日(木)に 5 回、いずれも通信の輻輳が見込まれるバルーンフェスタの競技中に実施し

た。検証方法は事前検証時の「表 4.2-14 通信輻輳条件の検証手順」および「表 4.2-17 通信品質低下判定条件の検証手順」と同一であるが、加えて通信品質低下判定条件の指標として、アップリンク スループットを計測対象として追加した。



図 6.2-5 追加検証 検証風景

#### イ) 検証結果

追加検証の日程を表 6.2-9 に、検証を実施した際のアップリンク リソースブロック使用率と端末収容利用率を図 6.2-6 に示す。

バルーンフェスタの大会タイムスケジュールは、後述の図 6.2-7 の通りである。

表 6.2-9 追加検証日程 一覧

試験番号	日付	開始	バルーン競技 イベント	天気	気温(℃)
1	10/30	7:05	競技飛行	曇り	10.8
2	10/30	7:50	競技飛行	晴れ	12.0
3	10/30	9:15	バルーンファンタジア	晴れ	15.1
4	10/30	10:00	バルーンファンタジア	晴れ	17.4
5	10/30	12:00	なし	晴れ	21.9

(天候・気温出典:気象庁)

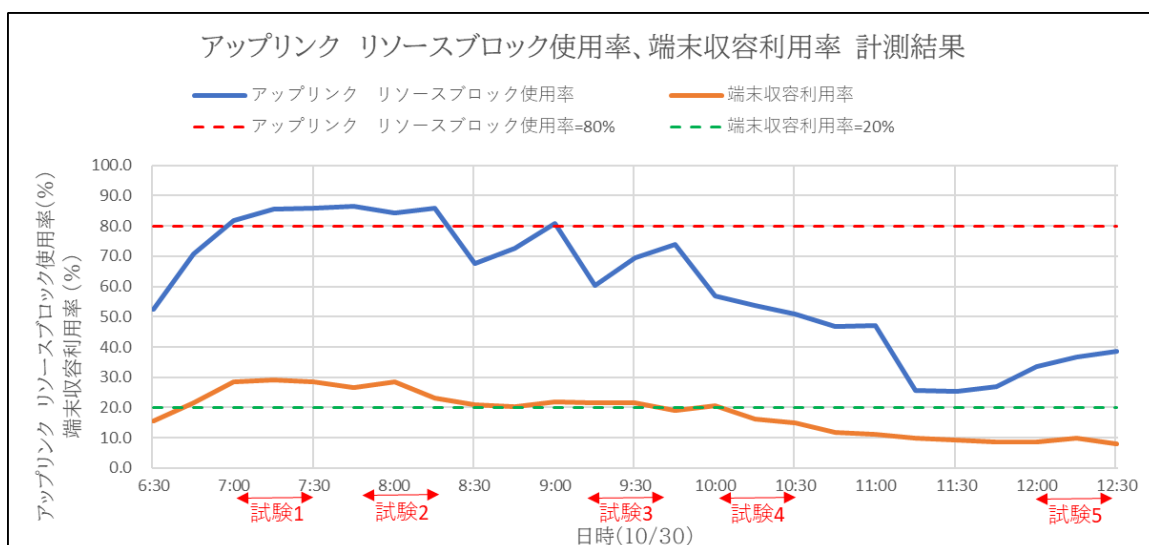


図 6.2-6 追加検証 アップリンク リソースブロック使用率、端末収容利用率 計測結果

追加検証では、映像評価者によるアンケートは実施せず、遠隔監視映像をリアルタイムで閲覧した映像録画者が必要最低限の画質とシステム最大画質の映像を比較して、どちらの映像が安定していたかを報告する、という簡易的な方法で評価を得た。

その結果、試験 1～4 では最低限画質の方が安定しているという結果を得た。

表 6.2-10 追加検証 評価結果

試験番号	簡易評価結果 どちらの画質が安定していたか
1	最低限画質
2	最低限画質
3	最低限画質
4	最低限画質
5	最低限画質、システム最大画質で差はなかった

## ウ) 考察

### ・通信輻輳判定条件の決定

図 6.2-6、表 6.2-10 に示す結果より、アップリンク リソースブロック使用率が 80%を超える場合、かつ端末収容利用率が 20%を超える場合には、最低限画質の方が安定する傾向が確認された。

この結果に基づき、バルーンフェスタ開催時のメイン会場付近という条件下において、以下の通信輻輳条件を両方満たした場合に、通信輻輳状態であると判定することとした。

・通信輻輳判定条件

アップリンク リソースブロック使用率 > 80%

かつ

端末収容利用率 > 20%

本検証で接続対象とした基地局は大規模イベントを考慮して設計された基地局ではない。基地局の設計上の最大収容数を考慮しつつ、20MHzという限られた帯域幅の中で、各端末が十分なスループットと低い遅延を享受できる安定したサービス提供を両立させる最適なバランス点として、端末収容利用率の閾値を 20%に設定した。これはバルーンフェスタ開催時の本検証にのみ適用される閾値であり、一般的な運用に適用できるものではない。

・通信品質判定条件の決定

通信品質低下判定に用いる指標については、事前検証でダウンリンクの通信品質指標は有効ではないと判断したため、端末側で取得可能なアップリンクの通信品質指標としてアップリンク スループットを採用することとした。

本実証で採用した東海理化社製の遠隔監視システムが推奨する映像ターゲットビットレートは1Mbps、アップリンク スループットは3Mbpsである。このことから、アップリンク スループット3Mbpsを下回る環境ではシステム最大画質での映像送信が不安定になり、必要最低限の画質に切り替えることで安定し、かつ継続的に映像送信ができるという仮説を立てた。

このため、本検証ではシステム最大画質の映像を安定して伝送可能な動作保証値である 3Mbps を閾値として設定した。

なお、アップリンク スループットは、スマートフォン端末で動作する通信品質測定ツールである「NetPulse」で測定された、ネットワークレイヤーにおけるスループット値を採用した。

・通信品質判定条件

アップリンク スループット < 3Mbps

b. 本検証の結果

ア) 検証内容

本検証は、多くの来場者が集まり通信の輻輳発生が見込まれるバルーンフェスタのイベントや競技実施時間に合わせて実施した。

本検証は表 6.2-11 の通り実施し、追加検証で採用した指標と閾値を用いて評価した。

表 6.2-11 本検証手順

No	説明	検証項目
1	車両運転中の映像監視状況を模擬するために、常時 3 名以上の歩行者が車両から半径 10m の距離を保ちながら周回する。	-
2	通信輻雑度・通信品質 Web API から取得した通信輻雑度および通信品質判定結果に応じてシステム最大画質または最低限画質を 20 分間送信する。	最低限画質が選択されること 定性評価 KPI の達成を確認
3	遠隔監視システムから、システム最大画質と、Web API で取得した通信輻雑度および通信品質に基づいて設定される画質を 2 分ごとに交互に送信し、この動作を合計 20 分間(各画質設定で 10 回ずつ)繰り返す。	最低限画質が選択されること 定性評価 KPI の達成を確認
4	2、3 の実施中、車両内の LTE ルーターに接続した通信品質取得 PC から無線ネットワーク測定ツール XCAL を用いて通信品質指標値を取得する。	-
5	検証場所の通信輻雑指標値を取得する。	-
6	映像評価者計 5 名が 1 グループで映像を閲覧し、アンケートに回答する。	定性評価 KPI の達成を確認
7	映像内の時刻表記から、映像送信時刻と受信時刻の差分時間を測定し、評価する。	輻雑環境下での安定した遠隔監視が実施できることを確認

#### イ) 検証結果

検証期間の 3 日間で合計 19 回の試験を実施した。実施結果を表 6.2-12 に示す。

赤枠は、期待する輻雑条件下で実施できた試験であることを示す。

表中の「通信輻雑状態」列は、a 現地環境での追加検証で定めた輻雑判定条件と通信品質判定条件が成立し、通信の輻雑が発生していたかどうかを示している。

表 6.2-12 本検証 結果一覧

試験 番号	日付	開始	バルーン競技 イベント	天気	ターゲット ビットレート	通信輻輳 状態	検証実施 (可能/不可能)
1	11/1	7:00	-	曇り	333kbps	発生せず	可能
2	11/1	8:15	競技飛行	晴れ	333kbps	発生	可能
3	11/1	9:40	バルーンファンタジア	晴れ	333kbps	発生せず	可能
4	11/1	14:15	競技飛行	晴れ	333kbps	発生せず	可能
5	11/1	15:40		晴れ	333kbps	発生せず	可能
6	11/2	7:00	競技飛行	曇り	200kbps	発生	不可能
7	11/2	9:00		曇り	200kbps	発生	不可能
8	11/2	10:00	バルーンファンタジア	曇り	200kbps	発生	不可能
9	11/2	12:00	-	曇り	200kbps	発生	可能
10	11/2	12:40	-	曇り	200kbps	発生せず	可能
11	11/2	13:30	気球教室	雨	1Mbps	発生	可能
12	11/2	14:35	競技飛行	曇り	1Mbps	発生	不可能
13	11/3	6:50	競技飛行	晴れ	200kbps	発生	不可能
14	11/3	12:00	-	晴れ	1Mbps	発生せず	可能
15	11/3	12:40	-	晴れ	1Mbps	発生せず	可能
16	11/3	13:20	気球教室	晴れ	200kbps	発生せず	可能
17	11/3	14:20	バイクショー	曇り	1Mbps	発生せず	可能
18	11/3	15:00	キー・クラブ・レース	晴れ	1Mbps	発生せず	可能
19	11/3	16:00	-	晴れ	1Mbps	発生	可能

(天候出典:気象庁)



図 6.2-7 (参考)2025 佐賀国際バルーンフェスタ タイムスケジュール  
(出典:2025 佐賀国際バルーンフェスタ 公式パンフレット<sup>27)</sup>)

本試験における主要な計測結果を以下の図 6.2-8、図 6.2-9、図 6.2-10 に示す。

各図では、検証が実施可能であった時間帯を赤帯で、検証が実施不可であった時間帯を灰帯で示している。

- アップリンク リソースブロック使用率について

検証が実施可能であった赤帯の時間帯では、概ねアップリンク リソースブロック使用率が 70～80%と高い値を示した。

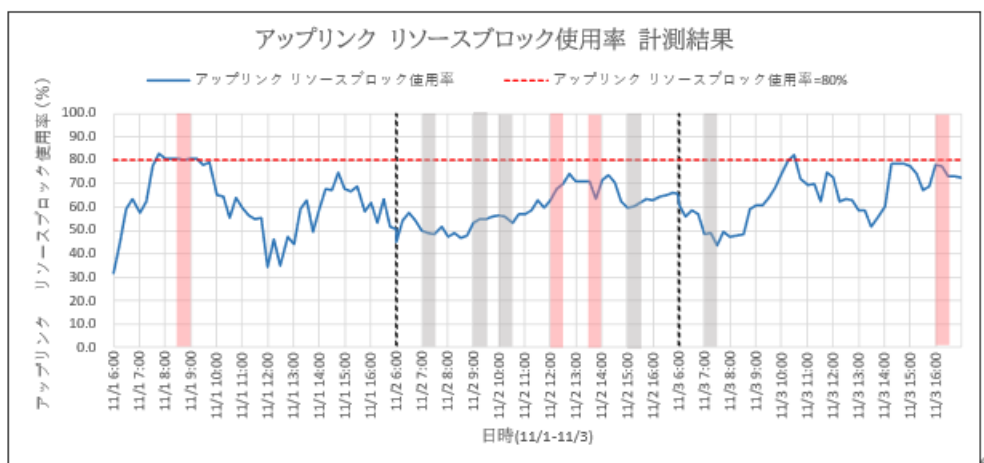


図 6.2-8 アップリンク リソースブロック使用率 計測結果

- 端末収容利用率について

検証が実施可能であった赤帯の時間帯では、端末収容利用率は 30～40%を計測した。事前に定めた閾値である 20%を上回る輻輳状態と判定できる。

一方で、検証が実施不可であった灰帯の時間帯では、90%を超える高い値を示しており、輻輳の判定指標として端末収容利用率は有効であると考えられる。

<sup>27</sup> 2025 佐賀国際バルーンフェスタ 公式パンフレット 2025SIBF\_pamphlet.pdf  
[https://www.sibf.jp/news/2025/images/2025SIBF\\_pamphlet.pdf](https://www.sibf.jp/news/2025/images/2025SIBF_pamphlet.pdf)

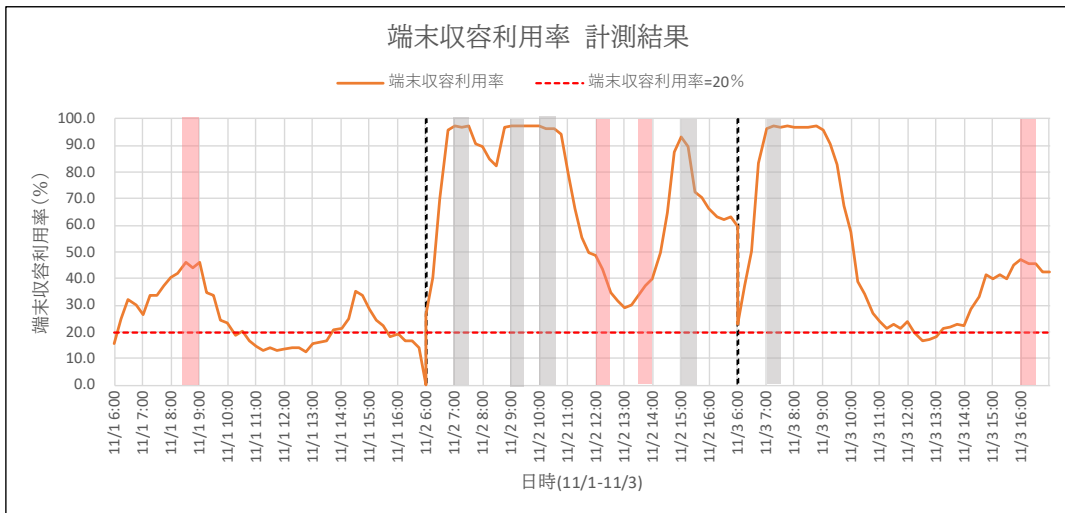


図 6.2-9 端末収容利用率 計測結果

- アップリンク スループットについて

アップリンク スループットの測定は、遠隔監視映像の通信に影響を与えるため、試験の開始直前に実施した。

検証が実施可能であった赤帯の時間帯では、アップリンク スループットは 0.5~1.75Mbps であり事前に定めた閾値である 3Mbps 以下の条件を満たす結果となった。

検証が実施不可であった灰帯の時間帯では、0.08~0.37Mbps 程度であり、閾値は満たすものの、安定した遠隔監視映像の送信ができる通信環境ではなかった。

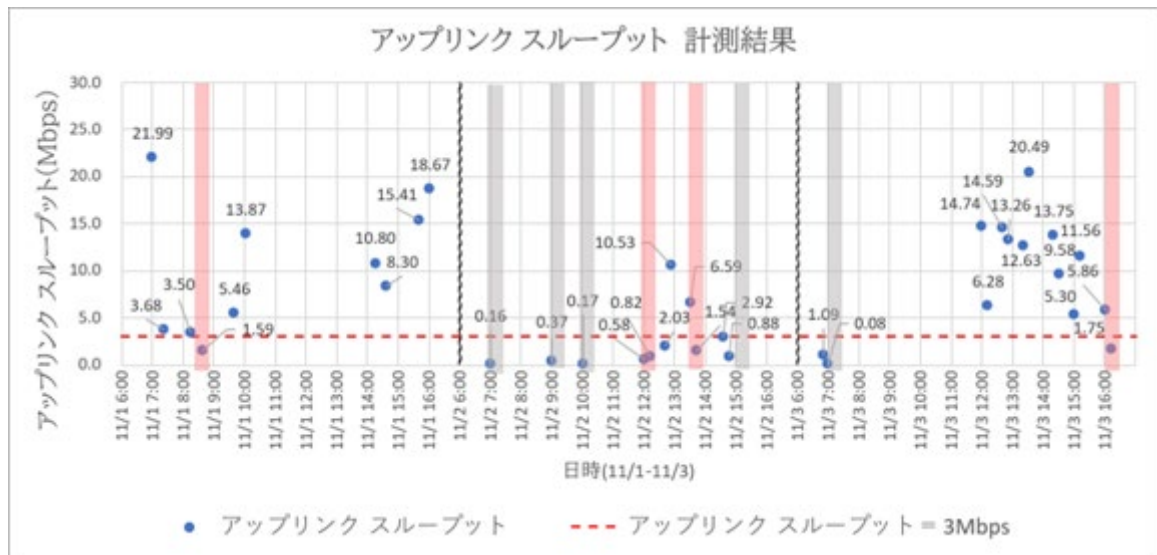


図 6.2-10 アップリンク スループット計測結果

## ウ) 考察

### ① 輻輳環境下での試験

通信輻輳または通信品質の低下条件を満たす映像伝送試験は全 19 試験の内 9 回であり、その内 4 回は想定通りの通信環境が得られ、試験実施可能であったため、評価対象とした。

評価結果の内容と本検証までに定めた各指標の閾値の妥当性については、6.2.1 4) (1)にて詳細に解説する。

なお、9 回の内残りの 5 回については、過度な輻輳によりアップリンクのデータ伝送が不可能となる事象が発生した。そのため、本検証で使用した遠隔監視システムの画質制御技術適用範囲外の状況であると判断した。

データ伝送が不可能となった試験時の基地局輻輳状況を確認した結果、アップリンク リソースブロック使用率は閾値を満たさない状態であったものの、端末収容利用率が 90%を超える状況であったため、通信品質低下の指標となるアップリンク スループットが極端に低い値を記録していることを確認した。



図 6.2-11 極端に低いアップリンク スループット(NetPulse 画面)

## ② 非輻輳下での試験

通信輻輳および通信品質の低下が認められない環境下における映像伝送試験は全 19 試験の内 10 回であった。

当該試験におけるアンケート結果の分析により、本実証環境下では、通信の輻輳が発生していない状況では問題なく映像伝送が行えることを確認した。



図 6.2-12 本検証 検証風景

## 工) 輻輳環境下におけるデータ伝送の安定性確認

本試験は、ネットワークの観点から、遠隔監視システムが映像を送信するために必要なアップリンク帯域が輻輳環境下においても確保されているかを確認することを目的とし、本検証と同時に実施した。

なお、本検証で実施した 19 回の試験の内、7 回の試験時に実施した。

### ① 検証内容

遠隔監視システムからの映像送信と並行して、遠隔監視システムが接続する基地局と同一の基地局に接続されたスマートフォン端末から、帯域幅性能測定ツールである iPerf3 を用いて、遠隔監視システムの映像送信と同等量のアップリンクデータ伝送を実施した。

(コマンド: iperf3 -u -b 2.6M -t 2520 -i 1 -P 1)

iPerf3によるデータ伝送が、遠隔監視システムの映像送信と同等のデータ伝送量を安定的に維持できることを確認することで、通信品質の観点から遠隔監視システムが安定稼働するために必要な帯域が確保されているかを検証した。

詳細なシステムおよびネットワーク構成図については、「8. システム・ネットワーク構成図」を参照のこと。

### ② 検証結果

想定した輻輳環境下であった試験番号 19 の実施時に計測した結果を図 6.2-13 データ伝送 安定性試験 計測結果(11/3 16:00 試験番号 19)に示す。

遠隔監視システムの映像データ伝送量は、時間の経過に従いばらつきが見られたが、iPerf3 のデータ伝送量は試験時間中概ね安定していた。

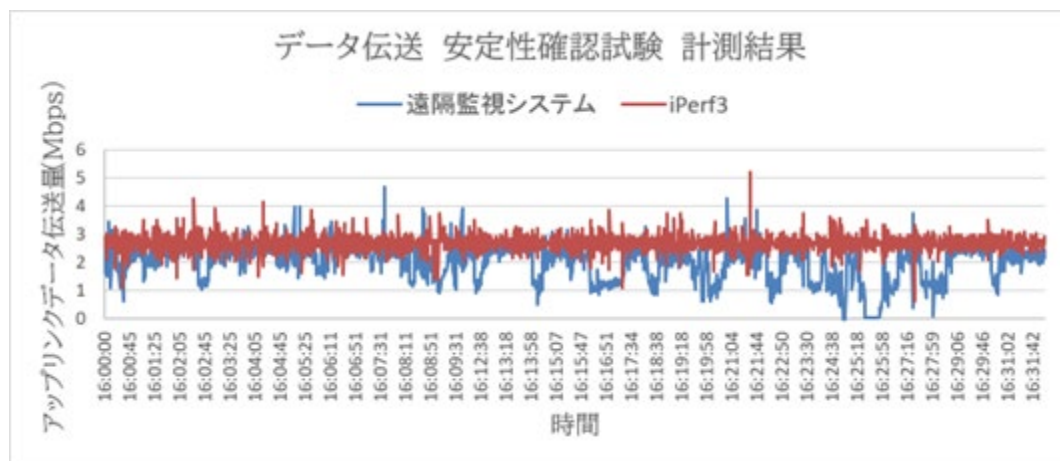


図 6.2-13 データ伝送 安定性試験 計測結果(11/3 16:00 試験番号 19)

### ③ 考察

図 6.2-13 データ伝送 安定性試験 計測結果(11/3 16:00 試験番号 19)に示す通り、輻輳発生状態であった試験番号 19 で、遠隔監視映像と同等の帯域幅で安定した iPerf3 によるアップリンクデー

タ送信が行われていることを確認できた。

この結果は、輻輳環境下においても通信インフラ自体に問題はなく、遠隔監視システムが必要とする帯域が安定して確保可能であることを示唆している。

### (5) 遠隔監視動画品質要件

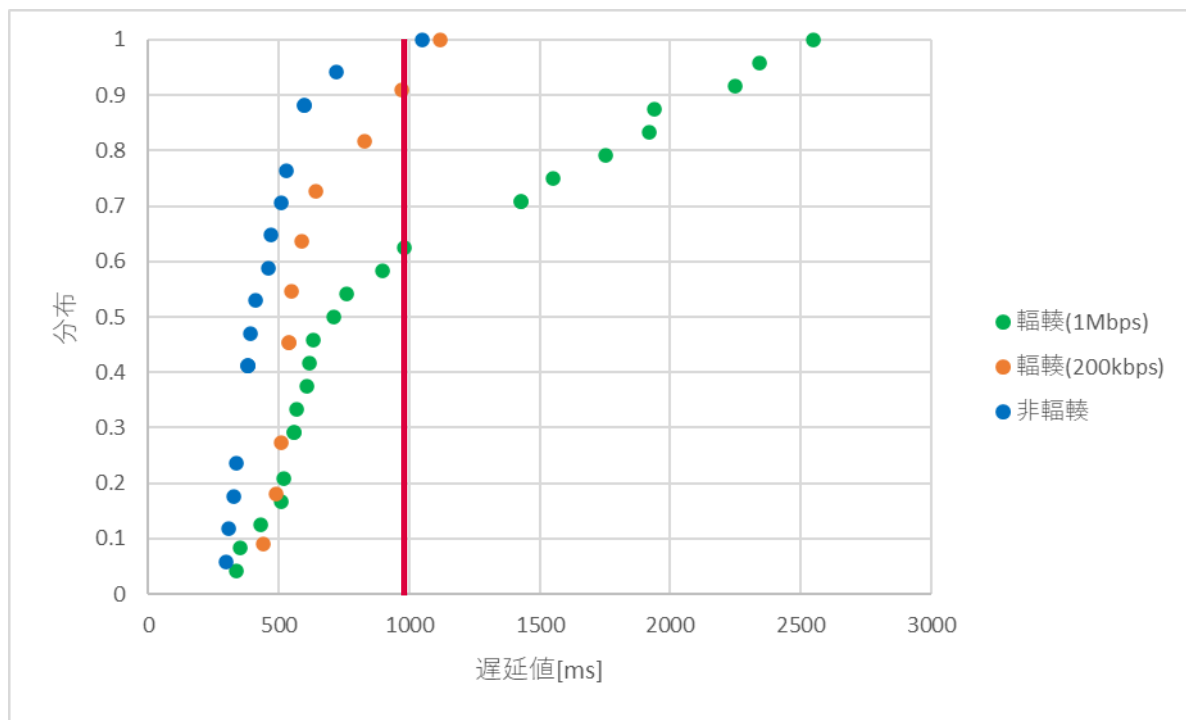


図 6.2-14 通信遅延値計測結果と分布

#### ① 検証内容

自動運転車両に搭載した映像送信 ECU より車外映像、車内映像の 2 ストリームを送信する。送信された映像を遠隔監視室で録画し、End-to-End の通信遅延値を計測する。

また、輻輳環境下における遠隔監視送信映像のターゲットビットレート値による通信遅延値の影響を確認するため、1Mbps 設定時、200kbps 設定時の比較を実施する。

#### ② 検証結果

図 6.2-14 は輻輳(1Mbps)、輻輳(200Kbps)、非輻輳での遅延値計測結果を CDF でグラフ化したものである。

非輻輳時、輻輳環境、ビットレート 200Kbps 設定時は 90% 以上で通信遅延値 1000ms 未満を満たしていることがわかる。また、ボリューム層は 500ms 付近となり、KPI の 1000ms に対しては余裕があることがわかる。

#### ③ 考察

輻輳環境、ビットレート 1Mbps 設定時は 40%ほどが 1000ms を超える結果となっている。

また、50%以上で遅延値が急激に増大していることから、本実証で検証を行った環境においては通信輻輳時も常に通信遅延値が大きくなるわけではなく、比較的安定している状態と極めて悪い状態の両方が発生していたことが考えられる。

計測の結果、輻輳時の最大遅延値は 2550ms となった。輻輳環境、ビットレート 1Mbps 設定時は測定ポイント数 36 の内 1000ms を超えたのは 9 ポイントであった。輻輳環境、ビットレート 200Kbps 設定時は測定ポイント数 11 の内、1000ms を超えたのは 1 ポイントであった。非輻輳時の最大遅延値は 1050ms であり、1 ポイントを除き 1000ms 未満の遅延値となった。

## (6) 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件

### ① 評価内容

遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件の KPI は表 6.2-13 の赤枠部分に示す。

本要件の KPI は以下の通りである。

- KPI No.1:  
最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答する。  
本 KPI については、KPI No.2 と KPI No.3 が達成された場合に、KPI を満たすこととした。
- KPI No.2:  
最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と回答する。
- KPI No.3:  
最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答する。
- KPI No.6:  
遠隔監視オペレーター含むアンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答する。

表 6.2-13 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件の KPI(赤枠)

No.	KPI/KGI	評価方法	データ収集方法
1	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について、「(異常事態が発生した時に) <b>最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる</b> 」と回答する。	No.2のKPIが満たされる「かつ」No.3のKPIが満たされるかどうかで評価	収集不要 →No.1のKPIにおける、遠隔監視画面がどのような状態が不明確なため、No.2とNo.3の結果から判定
2	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について、「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、 <b>車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるか把握できる</b> 」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるかを把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
3	<b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について「 <b>車内の乗客に異常がないか把握できる</b> 」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車内の乗客に異常がないか把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
4	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の90%以上の時間</b> について、「 <b>映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である</b> 」と回答する。	「映像不安定発生なしまたは許容範囲」の時間 最低限画質モードの時間(10分)	<b>後半20分(最低限画質モードとシステム最大画質モード)で実施</b> 「映像の不安定性が発生または許容範囲でない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
5	(「短い間隔で2回、「必要最低限画像」使用機能をそれぞれオン・オフにして自動運転バスから遠隔監視映像を送信し、)アンケート対象者が、75%以上の時間について、「 <b>映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が、『必要最低限画質』使用時の方が、システム最大画質(30fps, Full HD)使用時よりも、軽減されている</b> 」と回答する。	システム最大画質モードの映像不安定時間 - 最低限画質モードの映像不安定時間 システム最大画質モードの映像不安定時間	2分ごとに画質モードを切り替えることを想定 →輻輳状態は時間変化するため、短い間隔で切り替えることにより、条件を極力統一する。
6	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じない</b> と回答する。	「最低限画質モード」視聴時について回答・集計	<b>前半20分</b> の実験が終わり次第回答

## ② 評価結果

全 19 回の検証の内輻輳環境かつ映像評価が可能であった 4 回の検証において、遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件の KPI 算出結果を表 6.2-14 に示す。各 KPI について、試験ごとの傾向はみられず、ある人は 100%でも、ある人は 83%であるといったように、同じ遠隔監視映像を見ていたとしても、人によって遠隔監視オペレーションの可否が異なる結果となった。

一方、映像評価の経験の有無、および評価指標の知識の有無は KPI の算出結果に影響を与えなかった。

表 6.2-14 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件の KPI 算出結果  
(輻輳環境かつ映像評価可能な検証を抜粋)

		遠隔監視者	映像評価者1	映像評価者2	映像評価者3	映像評価者4	映像評価者5	映像評価者6	
アンケート対象者の属性	映像評価経験の有無	なし	なし	なし	あり	あり	なし	あり	
	評価指標の知識の有無	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり	
試験番号	2	KPI1	○		×	×		○	○
		KPI2(%)	100		83	100		100	98
		KPI3(%)	100		100	87		100	100
		KPI6	○		×	○		×	○
	9	KPI1	○	○		○		○	○
		KPI2(%)	100	98		100		100	94
		KPI3(%)	100	97		98		100	95
		KPI6	○	○		○		×	×
	11	KPI1	×	○		○		○	○
		KPI2(%)	97	96		94		100	92
		KPI3(%)	89	96		100		100	96
		KPI6	○	○		○		×	×
	19	KPI1	×		×	○	○		×
		KPI2(%)	90		100	97	100		88
		KPI3(%)	91		84	98	100		96
		KPI6	○		○	○	○		×

○:KPI 達成、×:KPI 非達成、表中の数字の単位は%(各評価者の KPI 達成率)、灰色は評価担当外

### ③ 考察

遠隔監視オペレーションの可否については、遠隔監視映像を見ている人の主観的な意見となる。そのため、特定の人が遠隔監視オペレーション可能と判断してとしても、他の人では不可能と判断される懸念がある。以上のことから、不特定多数の誰もが 100%の時間で遠隔監視オペレーションを遂行できる遠隔監視映像の品質を確保することは難しいと考えられる。そのため、遠隔監視オペレーションは 100%の時間で実施できるべきなのかを再考し、一時的に遠隔監視映像の閲覧ができなかったり、低品質の遠隔監視映像が表示されることになっても問題ないような仕組みの検討、構築が必要になると思われる。

## (7) 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件

### ① 評価内容

遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件の KPI は表 6.2-15 の赤枠部分に示す。

本要件の KPI は以下の通りである。

- KPI No.4:  
最低限画質モード時の 90%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答する。

表 6.2-15 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件の KPI(赤枠)

No.	KPI/KGI	評価方法	データ収集方法
1	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間について、「(異常事態が発生した時に) 最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答する。</b>	No.2のKPIが満たされる「かつ」No.3のKPIが満たされるかどうかで評価	収集不要 →No.1のKPIにおける、遠隔監視画面がどのような状態が不明確なため、No.2とNo.3の結果から判定
2	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間について、「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるか把握できる」と回答する。</b>	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるかを把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
3	<b>最低限画質モード時の95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答する。</b>	「把握できる」時間 最低限画質モード時間(10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車内の乗客に異常がないか把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
4	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の90%以上の時間について、「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答する。</b>	「映像不安定発生なしまたは許容範囲」の時間 最低限画質モードの時間(10分)	<b>後半20分(最低限画質モードとシステム最大画質モード)で実施</b> 「映像の不安定性が発生または許容範囲でない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
5	(「短い間隔で2回、「必要最低限画像」使用機能をそれぞれオン・オフにして自動運転バスから遠隔監視映像を送信し、)アンケート対象者が、75%以上の時間について、「 <b>映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が、『必要最低限画質』使用時の方が、システム最大画質(30fps, Full HD)使用時よりも、軽減されている</b> 」と回答する。	システム最大画質モードの映像不安定時間 - 最低限画質モードの映像不安定時間 システム最大画質モードの映像不安定時間	2分ごとに画質モードを切り替えることを想定 →輻輳状態は時間変化するため、短い間隔で切り替えることにより、条件を極力統一する。
6	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答する。</b>	「最低限画質モード」視聴時について回答・集計	<b>前半20分</b> の実験が終わり次第回答

② 評価結果

全 19 回の検証の内の、輻輳環境かつ映像評価が可能であった 4 回の検証において、遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件の KPI 算出結果を表 6.2-16 に示す。

試験 11、19 において、映像評価者 3 は映像が 99%の時間で安定していたと判断したが、遠隔監視者は、80%未満の時間でしか映像が安定していなかったと判断した。このように、同様の遠隔監視映像でも、アンケート回答者によって、KPI の算出結果に大きな差がみられた。さらに、映像評価経験の有無と評価指標に関する知識の有無によって、映像が乱れた時間の長さには傾向はみられなかった。

表 6.2-16 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件の KPI 算出結果  
(輻輳環境かつ映像評価可能な検証を抜粋)

		遠隔監視者	映像評価者1	映像評価者2	映像評価者3	映像評価者4	映像評価者5	映像評価者6
アンケート対象者の属性	映像評価経験の有無	なし	なし	なし	あり	あり	なし	あり
	評価指標の知識の有無	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり
試験番号	2 KPI4(%)	94		97	97		97	97
	9 KPI4(%)	78	92		98		98	90
	11 KPI4(%)	66	94		99		99	73
	19 KPI4(%)	78		89	99	95		93

表中の数字の単位は%(各評価者の KPI 達成率)、灰色は評価担当外

③ 考察

アンケート対象者によって、KPI 算出結果に大きく差がみられるのは、「遠隔監視映像の乱れを許容できるかどうか」が主観的な判断となるためだと考えられる。そのため乱れの少なさについては、定性的

な評価だけでなく、定量的な評価が求められると考えられる。

## (8) 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件

### ① 評価内容

録画された遠隔監視映像をアンケート対象者に提示し、自動運転車両の停車原因や周辺状況を適切に把握できるかを確認する。具体的には、車両近傍 10m-20m 程度に何があるか把握できない時間、車内の乗客に異常がないか確認できない時間をストップウォッチで計測し、評価を行う。各試験の遠隔監視映像につき、アンケート対象者 5 名が回答する。

通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件の KPI を表 6.2-17 の赤枠部分に示す。

本要件における KPI は以下の通りである。

- KPI No.5:  
75%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が最低限画質の方が、システム最大画質(30fps、FullHD)使用時よりも、軽減されている」と回答する。

表 6.2-17 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件の KPI((赤枠))

No.	KPI/KGI	評価方法	データ収集方法
1	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について、「(異常事態が発生した時に) <b>最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる</b> 」と回答する。	No.2のKPIが満たされる「かつ」No.3のKPIが満たされるかどうかで評価	収集不要 →No.1のKPIにおける、遠隔監視画面がどのような状態が不明確なため、No.2とNo.3の結果から判定
2	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について、「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、 <b>車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるか把握できる</b> 」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間 (10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車両近傍10-20m程度に何(車両・歩行者など)があるかを把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
3	<b>最低限画質モード時の95%以上の時間</b> について「 <b>車内の乗客に異常がないか把握できる</b> 」と回答する。	「把握できる」時間 最低限画質モード時間 (10分または5分)	<b>前半20分(最低限画質モード)で実施</b> 「車内の乗客に異常がないか把握できない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
4	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時の90%以上の時間</b> について、「 <b>映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である</b> 」と回答する。	「映像不安定発生なしまたは許容範囲」の時間 最低限画質モードの時間 (10分)	<b>後半20分(最低限画質モードとシステム最大画質モード)で実施</b> 「映像の不安定性が発生または許容範囲でない」時間を計測する。 ※PCやスマホのストップウォッチなどで時間計測を想定
5	(「短い間隔で2回、「必要最低限画像」使用機能をそれぞれオン・オフにして自動運転バスから遠隔監視映像を送信し、) アンケート対象者が、75%以上の時間について、「 <b>映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が、必要最低限画質使用時の方が、システム最大画質(30fps、Full HD)使用時よりも、軽減されている</b> 」と回答する。	システム最大画質モードの映像不安定時間 - 最低限画質モードの映像不安定時間 システム最大画質モードの映像不安定時間	2分ごとに画質モードを切り替えることを想定 →輻輳状態は時間変化するため、短い間隔で切り替えることにより、条件を極力統一する。
6	アンケート対象者が、 <b>最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じない</b> と回答する。	「最低限画質モード」視聴時について回答・集計	<b>前半20分</b> の実験が終わり次第回答

### ② 評価結果

全 19 回の検証の内、輻輳環境かつ映像評価が可能であった 4 回の検証において、「通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件」の KPI 算出結果を表 6.2-18 に示す。

本要件に関しては、遠隔監視者は 4 つの試験において、最低限画質とシステム最大画質ともに、映像が乱れた時間があると回答し、最低限画質の方がシステム最大画質よりも多少は映像の乱れが改善し

ているという結果となった。

一方で、映像評価者はシステム最大画質の乱れた時間が 0 秒であると回答している検証が多くなった。また最低限画質の方がシステム最大画質よりも乱れた時間が長いという結果となった検証もある。さらに、システム最大画質での乱れが、最低限画質では 100%改善されたという結果となった検証もある。

以上から、映像評価経験の有無や評価指標の知識の有無によって、KPI 算出結果に傾向が見られたわけではない。ただし、遠隔監視の教育を受けた遠隔監視者は、教育を受けていない映像評価者に比べて、わずかな映像の乱れに対しても敏感に反応し、映像が乱れたと判断する傾向が明らかになった。

表 6.2-18 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件の KPI 算出結果

(輻輳環境かつ映像評価可能な検証を抜粋)

		遠隔監視者	映像評価者1	映像評価者2	映像評価者3	映像評価者4	映像評価者5	映像評価者6
アンケート対象者の属性	映像評価経験の有無	なし	なし	なし	あり	あり	なし	あり
	評価指標の知識の有無	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり
試験番号	2 KPI5(%)	8		100	※		※	67
	9 KPI5(%)	19	-1800		※		※	-1200
	11 KPI5(%)	19	-1900		※		※	19
	19 KPI5(%)	21		-725	100	0		-58

表中の数字の単位は%(各評価者の KPI 達成率)、灰色は評価担当外 ※はシステム最大画質で送信した映像が乱れた時間が 0 の場合である。

### ③ 考察

乱れの改善について、同様の試験でもアンケート回答者によって KPI 算出結果に大きな差があるのは、本試験が KPI4 と同様に主観的な判断に依存するものであったことが原因と考えられる。システム最大画質より最低限画質の方が映像の乱れが軽減されているかどうかについては、定性的な評価と同時に定量的な評価が必要になると考えられる。

### 3) KPI/KGI との比較結果

定性評価 / 定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車

		原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答。
		遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件 遠隔監視オペレーター含むアンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。
	(2)	遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件 最低限画質モード時の 90%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答。
	(3)	通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件 75%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が『必要最低限な画質』使用時の方が、システム最大画質(30fps, FullHD)使用時よりも、軽減されている」と回答。
定量評価	(4)	遠隔監視動画品質要件 遅延：1000ms 未満 (遠隔監視映像送信ソフトウェア → 遠隔監視映像表示画面)

#### (1) 遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件を満たすこと

遠隔監視オペレーションの遂行に関する要件の KPI の達成状況は、以下の通りである。

全 19 回の試験の内、輻輳環境下で実施可能であった 4 回の試験の評価結果を以下に示す。

- ① 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と回答する。

⇒4 試験すべてで映像評価者 5 名中 2 名以上が、95%以上の時間について「(異常事態が発生した時に)最寄りの消防機関への通報や対応要員を現場に向かわせることが適切にできる」と評価した。

最低限画質モード時の 95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と回答する。

⇒4 試験すべてで映像評価者 5 名中 3 名以上が、95%以上の時間について「自動運転車両停車時に停車原因や周辺状況の把握を目的とした遠隔監視映像の確認において、車両近傍 10-20m 程度に何(車両・歩行者等)」があるか把握できる」と評価した。

- ② 最低限画質モード時の 95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と回答する。

⇒4 試験すべてで映像評価者 5 名中 3 名以上が、95%以上の時間について「車内の乗客に異常がないか把握できる」と評価した。

③ アンケート回答者が、最低限画質モード時に緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと回答。

⇒4 試験すべてで映像評価者 5 名中 3 名以上が、緊張・フラストレーション・精神疲労・注意力低下を感じないと評価した。

これらの結果から最低限画質の場合でも、輻輳環境下の 4 試験のうち半数の試験で、4 つのすべての KPI を 5 名中 3 名以上が満たすという結果が得られ、遠隔監視オペレーションを遂行できる可能性が示唆された。

将来的な「遠隔監視による自動運転」の実装を見据えた場合、限りなく 100%に近い時間で遠隔監視オペレーションを遂行することが必要となるため、遠隔監視を確実に実施できる最低限画質と遅延の許容限界を運行管理者と協議して再定義し、被験者のサンプルや通信環境の幅を広げて検証する等、引き続き検証する必要があると考えられる。

表 6.2-19 各試験の各 KPI の達成率(5 人中何人が KPI を達成したか)

No	日付	開始	終了	試験名	ビットレート	KPI達成率 (%)			
						①	②	③	④
2	2025/11/1	8:15	8:57	試験2	333kbps	60	80	80	60
9	2025/11/2	12:00	12:32	試験4	200kbps	80	80	80	60
11	2025/11/2	13:30	14:02	試験6	1Mbps	40	60	80	60
19	2025/11/3	16:00	16:32	試験7	1Mbps	40	60	60	80

## (2) 遠隔監視映像の乱れの少なさに関する要件を満たすこと

全 19 回の試験の内、輻輳環境下で実施可能であった 4 回の試験の評価結果を以下に示す。

① 最低限画質モード時の 90%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が発生していない、または許容範囲である」と回答する。

⇒すべての試験で映像評価者 5 名中 3 名が KPI を達成した。

以上の結果から最低限画質時、輻輳環境下においても映像は安定する傾向にあることがわかった。

将来的な「遠隔監視による自動運転の実装」を見据えた場合、遠隔監視オペレーション遂行の際に必要な遠隔監視映像の要件について、再考する必要がある。1:Nの遠隔監視体制においては、常時鮮明な映像・明瞭な音声・位置情報を常時かつ即時に受信できることが、必要不可欠ではなく、異常が発生した際に、適切な対応ができることが重要と考えられる。そのため、平常時には一定の映像の乱れを許容しつつ、異常時や重要な判断が必要なタイミングでは、通信状態を優先的に確保し、映像品質を担保する等、状況に応じた柔軟な運用設計が求められると考えられる。

表 6.2-20 各試験の各 KPI の達成率(5 人中何人が KPI を達成したか)

No	日付	開始	終了	試験名	ビットレート	KPI達成率 (%)
						④
2	2025/11/1	8:15	8:57	試験2	333kbps	100
9	2025/11/2	12:00	12:32	試験4	200kbps	60
11	2025/11/2	13:30	14:02	試験6	1Mbps	80
19	2025/11/3	16:00	16:32	試験7	1Mbps	60

(3) 通信輻輳・または通信品質低下発生時の映像の乱れの改善に関する要件を満たすこと

全 19 回の試験の内、輻輳環境下で実施可能であった 4 回の試験の評価結果を以下に示す。

KPI5:75%以上の時間について「映像の不安定性(ノイズ・カクツキ・コマ落ち)が『最低限画質』時の方が、システム最大画質(30fps、FullHD)使用時よりも、軽減されている」と回答する。

⇒No.2、No.19 の試験では、映像評価者 5 名中 1 名のみ、評価内容が KPI を達成した。また、No.9、No.11 の試験では全員の評価が KPI を達成できなかった。

最低限画質設定(960×540 15fps)を適用しても、映像の不安定性(乱れ)は軽減されなかった。

画像の質(データ量)とノイズ・カクツキ・コマ落ちとの間に相関関係があると仮定すると、最低限画質のデータ量をより小さくする必要があり、その上で遠隔監視が遂行可能か検証する必要がある。またデータ量はピクセル数とフレームレートで決まるため、例えばフレームレートを 1 秒とした場合に映像の不安定性が改善するかどうか、等の追加検証も必要となると考えられる。

表 6.2-21 各試験の各 KPI の達成率(5 人中何人が KPI を達成したか)

検証番号	日付	開始	終了	KPI5 達成率 (%)
2	2025/11/1	8:15	8:57	20
5	2025/11/2	12:00	12:32	0
7	2025/11/2	13:30	14:02	0
13	2025/11/3	16:00	16:32	20

(4) 遠隔監視動画品質要件を満たすこと

遠隔監視映像品質要件 通信遅延値 1000ms 未満:

図 6.2-15 より輻輳環境において通信遅延値 1000ms を満たしたのは 35 の測定ポイントの内 25 ポイントであり、KPI 達成率は 71%となった。輻輳時における通信遅延値は送信映像のビットレートによる影響が大きいことが分かったが、現在の遠隔監視システムで設定可能なビットレート下限値 200kbps に設定しても 1000ms を超える遅延値が計測されている。

下図に輻輳時(2025/11/3 試験 19)と非輻輳時(2025/11/3 試験 14)の車内映像通信プロトコ

ルから取得した RTT、ジッター値を示す。

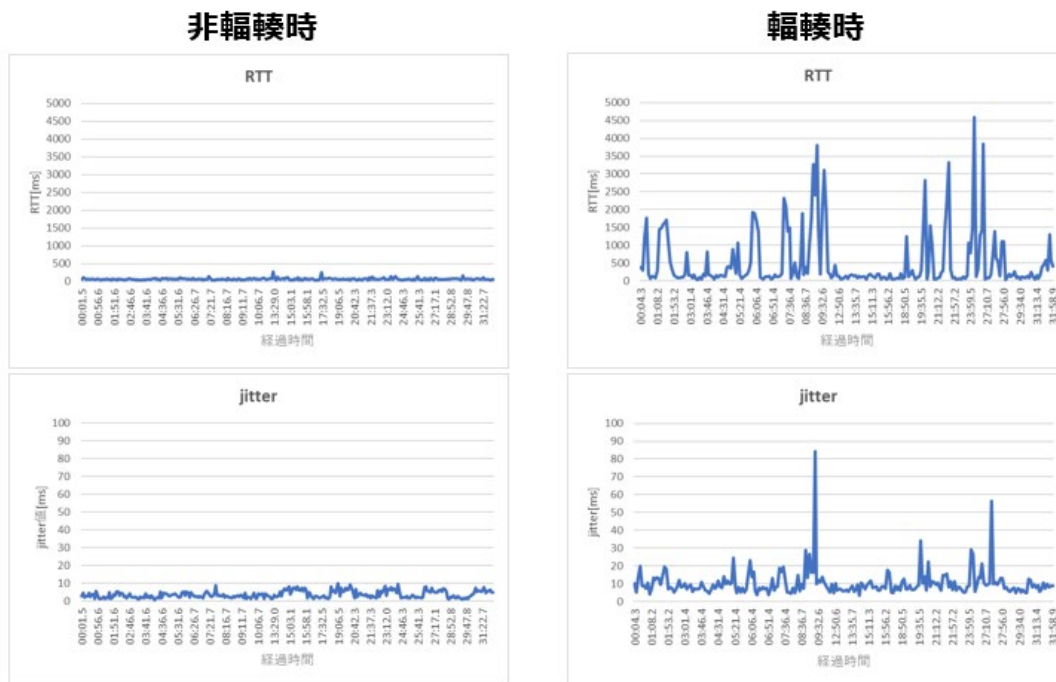


図 6.2-15 輻轉、非輻轉環境での RTT、ジッターの比較

この通信統計情報の対象区間は映像送信 ECU - クラウド上の映像送信サーバー間であり、下図の赤枠部分に該当する。

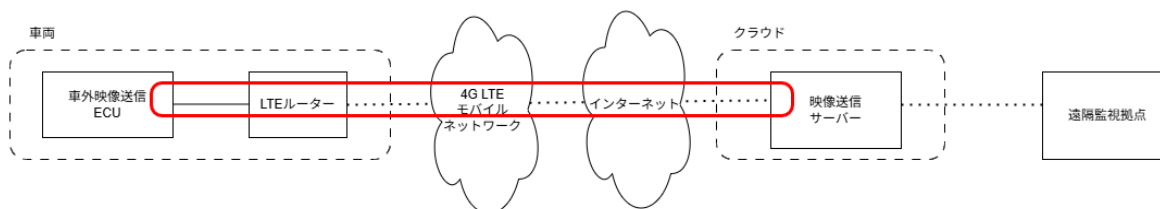


図 6.2-16 通信統計情報の取得対象区間ネットワーク図

輻轉時の RTT は最大で約 4000ms、ジッター値は約 80ms を示しており、通信輻轉時において通信遅延値 1000ms 未満を実現するためには、これらの指標を改善できるような通信環境を構築する必要がある。具体的にはアップリンク スループットの確保、パケットロスが起きにくい無線環境の実現が必要になると考えられる。また遠隔監視システムとしては、カメラ撮像から映像送信までの処理時間のさらなる短縮、最適なビットレートの指定を可能とする仕組みの実現も必要である。

非輻轉時で 1000ms を超えた 1 ポイントでは通信の RTT が 1000ms 以上、ジッターが 80ms の値を示しており、一時的に通信状況が悪化していたことが影響していたと考えられる。

#### 4) 成果・課題

本項では、まず前段で本実証を通じて得られた知見を整理・考察し、後段でそれらの考察から導かれる、本年度の成果と次年度以降の課題について記す。

##### (1) 本年度実証で得られた知見とその考察

- 安定した映像送信の実現のための輻輳判定を含む通信状況の把握

本検証では、アップリンク リソースブロック使用率と端末収容利用率の間には相関関係があるという当初の想定に基づき、事前検証および現地での試験における輻輳判定条件を設定した。しかし、本検証の結果からは両者の明確な相関性が確認できなかった。

当初想定していた輻輳条件:

- ・通信輻輳判定条件

アップリンク リソースブロック使用率 > 70%

または

ダウンリンク リソースブロック使用率 > 70%

- ・通信品質低下判定条件

$RSRQ < -19.5\text{dB}$  or  $SINR < 0\text{dB}$

本検証実施前に決定した輻輳条件:

- ・通信輻輳判定条件

アップリンク リソースブロック使用率 > 80%

かつ

端末収容利用率 > 20%

- ・通信品質低下判定条件

アップリンク スループット < 3Mbps

本検証での輻輳判定閾値の推移を図 6.2-17 に表す。

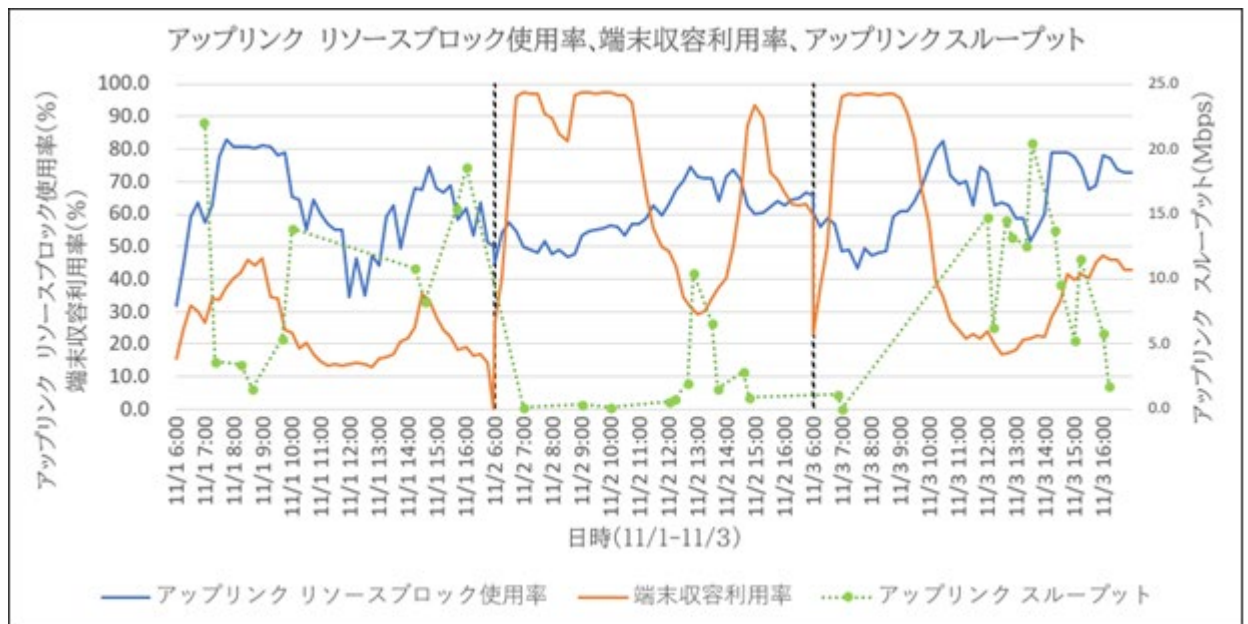


図 6.2-17 本検証 計測結果一覧

当初想定していたアップリンクのリソースブロック使用率と端末収容利用率の間には、正の相関が見られる時間帯と負の相関が見られる時間帯が混在しており、一貫した相関関係は確認できなかった。

ただし、このグラフからは端末収容利用率とアップリンク スループットには負の相関が認められた。

端末収容利用率とアップリンク スループットが輻輳発生の判定条件として有効である可能性があるが、輻輳の発生条件には様々な要素が考えられ、本実証で得られた指標、閾値が、本実証の環境下以外でも有用であるかについては、引き続き検証と検討が必要である。

輻輳判定の定量化を図るためには、端末収容利用率に加えて端末ごとのアップリンクデータ利用量の推移等、時間的変動に合わせたトラフィック状況を反映した閾値設定が必要であると考えられる。

さらに、場所によってトラフィックモデルが異なることから、輻輳判定条件を一律に設定することは困難であることが判明した。したがって、各地域のトラフィック特性に応じた輻輳判定条件を設定する必要がある。

安定した遠隔監視映像伝送を実現するためには、上記の観点を踏まえた輻輳判定条件の設定や、環境に応じて映像伝送に必要な帯域を確保する仕組みづくりをはじめ、映像伝送の安定性向上に向けた改善策を検討する必要がある。

- アップリンク スループットの変動と自動運転車両遠隔監視オペレーションへの影響

アップリンク スループットの推移を分析した結果、通信輻輳時には遠隔監視システムの動作保証値である 3Mbps を著しく下回る試験があった。このようなスループットの変動は、安定した映像伝送を困難にする主要因であると考えられる。自動運転車両から遠隔監視室へのリアルタイムデータ伝送や、ひいては遠隔監視オペレーションにとって、運用上の課題となることが示唆される。

今回の検証は車両が停止した状態で行ったが、スループットの大きな変動は、移動中の車両が経験

する通信状況の変化に近い特性を有している可能性があり、今後の検証計画において有用な示唆を与えるものとする。

- 輻輳状況下での継続映像送信

本実証で使用した遠隔監視システムは、映像品質の切り替えを行う際、一度映像送信を切断し、その後再接続して送信を再開する方式であった。

そのため、通信輻輳が発生し通信状況が悪化している環境下では、映像送信のための再接続に時間を要し、結果として映像の暗転時間が増加するという事象が確認された。これは、遠隔監視オペレーションにおいて許容できない遅延を生じさせる要因となるため、映像を切断することなく連続して送信できるようにシステムを改修する必要がある。

別の観点では、映像をリアルタイムで高圧縮できるシステムの導入は有効な改善策であると考えられる。データ量を削減することで、通信環境が悪化している状況下でも、必要帯域が減少し安定した映像伝送の可能性が高まるためである。

輻輳環境下でのスムーズな映像送信には、ソフトウェアの追加改修や、停止中だけでなく走行中を含む様々な環境下によって異なる必要最低限画質を特定する等、さらなる検証とシステムの改修が必要である。

- 必要最低限の画質

本実証では、事前検証において遠隔監視オペレーションを実施するための「必要最低限の画質」を定めることができた。

しかし、上記で述べた通り輻輳が発生したと思われる通信状況も一律ではなく、本実証の実施環境においての必要最低限の画質であり、自動運転車両の実運用のすべての環境で適用できるかどうか確認するためには、さらなる検証が必要である。

- 安全な遠隔監視オペレーションの実現に向けて

自動運転システムにおける安全かつ円滑な遠隔オペレーションを実現するためには、通信事業者と遠隔監視ソフトウェアメーカーによる緊密な協業が不可欠である。

両者が連携し、継続的なデータ収集と詳細なデータ解析を実施する必要がある。追加検証で実施したiPerf3 測定結果からも、通信状況と実際の映像送信状況が必ずしも一致しないケースが確認されており、この乖離の原因究明と対策検討には継続的な共同解析が不可欠である。

以上の考察から得られた、本年度の実証の成果・課題を以下に示す。

## (2) 本年度得られた成果と次年度以降に向けた課題

### a. 成果：通信輻輳指標値の閾値を部分的に求めることができた

SINR、RSRQ等の通信品質指標値の閾値については、今回の実証環境においては輻輳時も安定し

ていたため、求めることはできなかった。しかし、「顕著にアップリンク スループットが減少するが通信は可能な状態」になる場合の、ネットワーク管理システム(OSS)の通信輻輳指標値の閾値を求めることはできた。

よって、これらの閾値に応じて適切に遠隔監視映像の画質を変更することにより、輻輳時でもレベル4の要件である遠隔監視映像の送信を安定して継続できる可能性を示せた。

また、遠隔監視映像の送信が全くできないほど極端に低下する、つまり極度の輻輳状態となる場合の端末収容利用率・アップリンク スループットの閾値も求めることができた。

レベル4 自動運転走行ルートにおいて、このような状況を検出した場合、遠隔監視映像の送信ができなくなるため、早期にルートの5G化を目指し、5G SAによるネットワークスライシングにより通信安定化を図る等の対応が考えられる。

#### b. 成果：映像の遅延はターゲットビットレートの影響が大きいことが分かった

映像の遅延はターゲットビットレートの影響が大きいことが判明した。

本年度の実証では、輻輳度に応じて変更される画質は最大解像度と最大フレームレートのみであったが、今後の実証ではそれに加えてターゲットビットレートも変更できるよう、遠隔監視映像送信ソフトウェアを再改修することが必要と考えられる。これにより、輻輳度に応じてターゲットビットレートを適切に変更できるようになり、RTT等のWebRTC指標が改善し、結果として映像遅延KPIを達成できる可能性がある。

また本年度の実証では、最低限画質を使用することによる映像の乱れの顕著な改善は確認できなかった。正確な原因は不明であるが、ターゲットビットレートが等しい場合、例え低い最大解像度と低い最大フレームレートを設定しても、大きな違いは出ないことが一因と推察される。ターゲットビットレートも可変にすることにより、システム最大画質からの明確な改善を示せるようになる可能性がある。

#### c. 成果・課題：遠隔監視映像送信中は、リアルタイムで画質を変更できるようにする必要があることが分かった

本年度は、通信輻輳度に応じた画質の変更は、遠隔監視映像送信ソフトウェアの送信開始時のみ行われ、送信開始後は行われなかった。イベント開催時は短時間で大きく輻輳度が変化するため、単に映像が乱れるだけでなく、映像送信が途絶え画面が暗転する事象が頻発した。よって、輻輳状況下では、リアルタイムで輻輳度に応じて画質を切り替えることが望ましいことが判明した。

また本年度は、画質切り替え時に映像停止・再送信に伴う数十秒の暗転が発生した。

今後は映像送信開始後も通信輻輳度に応じてリアルタイムで、かつ映像の暗転なしに画質を変更できるよう遠隔監視映像送信ソフトウェアを改修する必要がある。

#### d. 課題：実環境における輻輳状態での試験が困難であることが分かったため、ラボ環境での試験を検討する

本年度実証では、実環境での検証のための理想的な通信輻輳状態を作ることは非常に困難であることが判明した。全19回の試験の内、理想的な輻輳環境下で実施できたのは4回のみであった。社会実

装に向けた有用なデータの取得を容易にするためには、ラボ環境で適度な輻輳状態を再現して事前検証や実証実験を実施することも検討せねばならない。

e. 課題：雨天等の様々な気象条件を網羅する

本年度の実証は、佐賀インターナショナルバルーンフェスタのみで実施し、バルーンフェスタ期間中は常に好天であったが、レベル4自動運転を見据える場合、様々な気象条件、日照条件(夜間、西日等)に対応できるようにするべきである。

今後は、実証地点を佐賀インターナショナルバルーンフェスタに限定せず、様々な気象条件、日照条件を網羅する形で実証を実施する必要がある。

f. 課題：自動運転車両走行状態での映像送信を検討する

本年度の実証では、遠隔監視映像に求められる監視者からの要望は「何か起きて車が止まった時に周囲の状況を確認できる」ことであるとの前提のもと、停車状態で映像の送信を実施したが、停車状態の場合、例え車の周囲で人が動いていても、映像の各フレーム間の差分は非常に小さくなり、結果として映像の圧縮率も非常に高くなるため、「最低限の画質」と「システム最大画質」の映像の差分を見出しにくかった。

今後は、人が自動運転車両の周囲を歩き回る代わりに、円を描くように自動運転車両を走行させ(回転中は直進中よりも映像フレーム間の差分が大きくなる)、映像が乱れやすい状況で試験を実施することが考えられる。

ただし、本年度の実証で求めたターゲットビットレートごとのアップリンクスループットの閾値は、停車状態で求めた値であるため、走行状態での閾値については算出しない必要があることに注意が必要である。

g. 課題：OSSの通信輻輳指標値の遅延に、RICアプリケーション(rApp)による指標値予測、RICアプリケーション(xApp)によるリアルタイム指標値取得、過去データを使用した予測ロジック等で対応する

基地局セルの通信輻輳指標値は、OSSから取得する際に数十分程度遅延するため、佐賀インターナショナルバルーンフェスタのような短時間で混雑度が大きく変化する条件下では、現状を正しく反映した通信輻輳指標値を取得できない。

この対応策として、RICがソリューションの一つになり得る。楽天モバイルは、2025年5月に国内で初めてRICを大規模Open RAN商用ネットワークへ導入<sup>28</sup>し、ネットワーク消費電力の削減を実現している。導入したRICにおいては、rApp(非リアルタイムRICアプリケーション)に機械学習アルゴリズムを搭載することで、トラフィックのパターン解析から、需要予測、基地局の使用率調整までの自動化を実現し、ネットワークの最適化を図っている。楽天モバイルは、既に数千セルにRICを導入済みであり、数万セルへの全国展開が進行中である。

RICを使用して、現状に近い通信輻輳指標値を取得する方法としては、rAppに搭載した機械学習

<sup>28</sup> [楽天モバイルと楽天シンフォニー、大規模Open RAN商用ネットワークへのAIを活用したRIC導入を国内初で実現](#)

アルゴリズムにより、過去の通信輻輳指標値からリアルタイムの通信輻輳指標値の予測を行う方法や、xApp(準リアルタイム RIC アプリケーション)により準リアルタイムでのネットワークの通信輻輳指標値を取得する方法等が候補として考えられる。そして、それらの RIC アプリケーションと本システムを連携させることで、OSS の遅延問題に対応できる可能性がある。

RIC の使用が難しい場合の代替案としては、もし 2026 年度以降も佐賀インターナショナルバルーンフェスタ会場周辺で実証を行うなら、本年度取得した OSS データを使用して、現在の輻輳度を予測するロジックを実装することが考えられる。

ただしこれにはいくつか課題が存在する。

- 翌年も同じスケジュールで同じイベントが開催されるとは限らない。
- 本年は開催されたイベントが翌年中止になった場合、予想するほどの輻輳が発生しない可能性が高い。
- 逆に本年は中止になったイベントが翌年開催された場合は、予想をはるかに上回る輻輳が発生しうる。
- 「イベントの時間が近づいているが、風がやや強く、開催される(バルーンが飛行できる)可能性が半々である」等の複雑な状況の予想が難しい。

これらの課題に対応するためには、単純に時間帯だけで予測するのではなく、次のイベントが開催される可能性、イベントの予想される集客数レベル等のパラメータを予想ロジックに追加し、様々な状況に対応できるようにする必要がある。

#### h. 課題：輻輳下の帯域確保のため、ネットワークスライシングやキャリアアグリゲーション、Mobile QoS、QoS(Quality of Service)制御等の技術を活用する

端末収容利用率が 90%を超え、遠隔監視映像の送信が全くできないほどの輻輳状態になった場合は、5G ネットワークスライシング<sup>29</sup>やキャリアアグリゲーション<sup>30</sup>、Mobile QoS<sup>31</sup>、QoS 制御<sup>32</sup>等の技術を活用し、利用可能な帯域を確保することが考えられる。

具体的には、WebRTC SFU サーバーの IP アドレス範囲に QCI(QoS Class Identifier) 3 を提供する Dedicated Bearer<sup>33</sup>を用意する、等の方法が考えられる。

#### i. 課題：映像品質のネットワーク状況に応じた動的調整のため、AV-QoS、アダプティブビットレート等の技術を活用する

本年度の実証では、「Web API から取得した通信輻輳度、通信品質の値が『通信輻輳発生』または『通信品質低下』と判断された場合、遠隔監視映像ソフトウェアは最低限の画質を使用して映像送信を開始する」というシンプルな実装方法を採用した。しかし、ネットワーク状況に応じた映像品質の調整方法として、AV-QoS、アダプティブビットレート等の既存の技術を活用することが考えられる。

<sup>29</sup> 物理的な 5G ネットワークインフラを論理的に複数の仮想ネットワーク(スライス)に分割し、それぞれのスライスに異なるサービス要件(帯域幅、遅延、信頼性など)を割り当てる技術

<sup>30</sup> 携帯電話通信において、複数のキャリア(周波数帯域)を組み合わせ、帯域幅を拡張し、通信速度を向上させる仕組み

<sup>31</sup> 特定の SIM カードを具備した通信端末に対して、無線リソースを優先的に割り当て、通信品質を向上させる仕組み

<sup>32</sup> ネットワーク通信の品質を安定させるために、通信を優先順位ごとに制御する技術

<sup>33</sup> Dedicated Bearer: 専用ベアラ、特定の QoS を提供するために、Default Bearer(デフォルトベアラ)とは別に一時的または永続的に確立される、個別最適化されたデータ通信経路

AV-QoS は、アプリケーション側でスループット等の通信状況をモニタリングし、映像の解像度や圧縮率等を動的に調整することで、通信量を管理・最適化し、映像や音声通信の安定性を確保する仕組みである。

アダプティブビットレートは、視聴者のインターネット通信状況に合わせて動画の品質を自動的に変更する仕組みである。ただし、この仕組みは既に WebRTC に組み込まれている。

6.3 ③安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報を自動運転車両の制御に活用する技術の頑健性検証

6.3.1 路側センサーで取得する周辺情報を活用した、見通しの悪い交差点での安全な走行/右折の制御の実現

1) 実証スケジュール

ユースケース	フェーズ	2025年						2026年		
		6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
③	実証準備 (申請、工事等)	システム設計～開発			設置 工事	事前 運行				
	実証				11/20-11/28 うち6日		現地 実証	視察会 12/1		
	実証評価					中間報告 11/13		データ検証	最終報告	
共通					中間報告書 作成		最終報告書 作成			

2) 開発・評価項目の結果

番号	開発・評価項目
(1)	路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度
(2)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数
(3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果
(4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策
(5)	路側センサー要件
(6)	路側センサー情報を用いた車両挙動判断ロジックの開発
(7)	自動運転車両の制御システム要件

(8)	モバイル通信要件
(9)	自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度
(10)	通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

#### (1) 路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度

路車協調システムの有無による運転負担の評価について、当該箇所における手動介入の評価を実施した。

手動介入は表 6.3-1 に示されているように、路側センサーなしの場合はブレーキ介入が多いため、ドライバーは安全を確保するために注意しながら運行しているとみられる。一方で路側センサーありの場合はアクセル介入が主となっており、ドライバーが事故等への配慮を必要とする場面は少ない一方、後続車両に対する焦りが発生していることが考えられる。

表 6.3-1 手動介入まとめ

	全走行回数(回)	ブレーキ介入(回)	アクセル介入(回)
路側センサーなし	48	16	0
路側センサーあり	45	5	30

路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケートについては、6.6.1 1)を参照。

#### (2) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数

本実証では通信システム等の運用による手動介入回数等の変化について検証は未実施であったが、遠隔監視システムによって自動運転バスの運行状況を遠隔地から確認することができ、今後の遠隔監視型自動運転車両の検討に有効と考えられる。

#### (3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

本実証では通信システムによるルート設定等の取組を実施しなかったが、車載センサー以外の情報を用いることができたため、今後それらの情報を活用することが自動運転バス等の利便性向上に繋がると考えられる。

#### (4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

本実証で利用した、路車協調システムの構築の際に要した費用に基づくイニシャルコストおよび1年間の運用を想定したランニングコストの内訳を表 6.3-2 に示す。

表 6.3-2 ユースケース③路車協調システムを構築するための必要経費

費目・品名・数量			金額 ※
路側センサーシステムの製作・設置(イニシャルコスト)	設備・機器費	LTE ドングル通信機/1局	2.1 万円
		カメラセンサー/1台	1.5 万円
		LiDAR/1台	—
	改修費		16.2 万円
	支持柱・基礎新設工事費/1箇所		117.3 万円
	設置工事費/1箇所		172.8 万円
システムの運用	カメラレンタル・クラウド利用料	Safie クラウド/1年・1台	42.6 万円
	保守 PC レンタル利用料	保守 PC/1年・1台	11 万円
合計			363.5 万円

※これは今回の実証における金額であり、条件の違いにより大きく変動する可能性がある

#### (5) 路側センサー要件

路側センサー要件の KPI を表 6.3-3 に示す。

表 6.3-3 路側センサー要件の KPI

項番	項目名	評価内容	評価手法
5-1-1	物体検知率 (市役所前・長距離 LiDAR)	検知区間を撮影したカメラ録画映像を用いて、LiDAR で検出した物体の検知率を算出	LiDAR で検出した車両・歩行者の数/検知区間を通る車両の数
5-1-2	物体検知率 (バスセンター前・近距離 LiDAR)		LiDAR で検出した車両・歩行者の数/検知区間を通る歩行者の数
5-2-1	物体位置精度 (市役所前・長距離 LiDAR)	路側センサーが検知した物体の位置の正確性を検証	車両緯度経度と基準線の距離 - 物標と基準線の距離 $\leq 1m$
5-2-2	物体位置精度 (バスセンター前・近距離 LiDAR)		歩行者緯度経度と基準線の距離 - 物標と基準線の距離 $\leq 2m$
5-3-1	物標情報送信周期 (市役所前・長距離)	路側センサーが 100ms 周期で情報送信しているか統計的に評価	路側センサーログ「情報送信時刻」にて、前後の時刻情報から物

	LiDAR)		体情報が 100ms 周期で配信されているか算出し、統計的に確認
5-3-2	物標情報送信周期 (バスセンター前・近距離 LiDAR)		
5-4-1	同時物体検知数 (市役所前・長距離 LiDAR)	路側センサーログにて同時に検出された物体検知数を確認	路側センサーログの情報から物体検知数を取得
5-4-2	同時物体検知数 (バスセンター前・近距離 LiDAR)		
5-5-1	物体の検知距離 (市役所前・長距離 LiDAR)	路側センサーが物体を検知した時点における、物体と基準線の距離を確認	車両が基準線から 80m 以上の時刻において、路側センサーが車両を検知しているかを確認
5-5-2	物体の検知距離 (バスセンター前・近距離 LiDAR)		基準線から 6m 以上の歩行者検知可否を、距離計測と路側センサーログで確認

(5-1-1) 車両検知率(市役所前・長距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

・検知区間:基準線から 80m~105m(長距離 LiDAR から 20m~45m)区間、第 1 および第 2 レーン

・評価対象物:当該レーンを走行し基準線に接近する一般車両(自動車、バス、トラック等)

本項目では、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)で検知した車両数と、検知区間を撮影したカメラ録画映像により取得した車両数から検知率を算出した。本検証では集計対象日時の内、自動運転車両の運行時間帯で1時間ごとに10分間ずつ抽出して集計した。なお、路側センサーが、当該車両を検知区間内で1回以上検出できた場合、検知できたと判定する。当該車両を検知区間内で一度も検出できなかった場合、検知できなかったと判定する。集計結果を表 6.3-4 に示す。

表 6.3-4 カメラ映像を用いた車両検出精度の結果(長距離 LiDAR)

実施日	検知区間	映像での カウント数 (台)	センサー 検知数 (台)	センサー 未検知数 (台)	検知率	KPI
2025/11/25 9:00~17:00 10分間/各1時間	基準線から 80m~ 105m	381	380	1(並走)	99.7%	90%

(5-1-2) 歩行者検知率(バスセンター前・近距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域
- ・評価対象物:一般の歩行者および自転車

本項目では、バスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)で検知した歩行者数と、検知区間を撮影したカメラ録画映像により取得した歩行者数から検知率を算出した。本検証では集計対象日時の内、自動運転車両の運行時間帯で 1 時間ごとに 10 分間ずつ抽出して集計した。なお、路側センサーが、当該歩行者を検知区間内で 1 回以上検出できた場合、検知できたと判定する。当該歩行者を検知区間内で一度も検出できなかった場合、検出できなかったと判定する。今回の検証条件下においては、オクルージョンの影響なく、良好に歩行者を検知することが確認できた。また評価区間において、歩行者以外を検知する事象は発生しなかったが、複数の歩行者が並んで歩行するケースを 1 人と誤計測したことによる未検出が発生した。自動運転車両に通知する情報としては、歩行者の接近検知に影響を与えるものではない。集計結果を表 6.3-5 に示す。

表 6.3-5 カメラ映像を用いた歩行者検出精度の結果(近距離 LiDAR)

実施日	検知区間	映像での カウント数 (人)	センサー 検知数 (人)	センサー 未検知数 (人)	検知率	KPI
2025/11/25 9:00~17:00 10 分間/各 1 時間	基準線から 8m~12m	426	421	5 (近接)	98.8%	90%

(5-2-1) 車両位置精度(市役所前・長距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 27 日 10:00-15:00、11 月 28 日 9:00-15:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 50m~100m(長距離 LiDAR から 25m~75m)区間
- ・走行速度:交通流に合わせる

本項目では、被験車両に設置した RTK-GNSS 測位装置で取得した車両先頭位置(緯度・経度)から基準位置(例えば、右折交差点の緯度・経度)までの距離  $D_1(t)$  と、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)の路側センサーログ「基準線からの距離」 $D_2(t)$  から誤差((1)式)を算出して検証した。被験車両として、乗用車タイプのレンタカー(図 6.3-1)を利用した。

$$|D_1(t) - D_2(t)| \quad (1)$$

誤差評価は、RTK-GNSS 測位装置と路側センサーを時刻同期させた上で、フレーム単位(10fps)で算出し、集計した。基準データ取得のため試験車両の中央に RTK-GPS 測位アンテナを設置し、走行車両の位置(緯度、経度)を計測した。車両位置(緯度、経度)を車両の先頭に調整した後、基準線までの距離を算出した。集計結果を表 6.3-6 に示す。



図 6.3-1 試験車両(GNSS 測位アンテナ付き)

表 6.3-6 RTK-GNSS 装置を用いた物体検知位置精度(長距離 LiDAR)

実施日	母数	誤差[m]	KPI
2025/11/27 10:00~ 15:00	5316 (53 走行)	1.6±1.3(2σ)	±1m 以内
2025/11/28 9:00~ 15:00			

(5-2-2) 歩行者位置精度(バスセンター前・近距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 26 日 9:00-12:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域
- ・被験者 3 名

本項目では、被験者の保持する RTK-GNSS 測位装置で取得した被験者位置(緯度・経度)から基準位置までの距離  $D_1(t)$ (被験者を歩道に立たせ、基準位置までの距離を計測する)と、路側センサーログ「基準線からの距離」 $D_2(t)$  から誤差((1)式)を算出して検証した。被験者は、センサー設置位置から基準線に向かって、図 6.3-2 に示すように歩行し、指定位置(1、2、...10)に 10 秒停止→移動を繰り返す。誤差評価は、RTK-GNSS 測位装置と路側センサーを時刻同期させた上で、停止時の路側センサーログを用いてフレーム単位(10fps)で算出し、集計した。基準データは、被験者の保持する RTK-GPS 測位アンテナの位置(緯度、経度)データを使用した。被験者位置(緯度、経度)を被験者の足下に調整した後、基準線までの距離を算出した。集計結果を表 6.3-7 に示す。

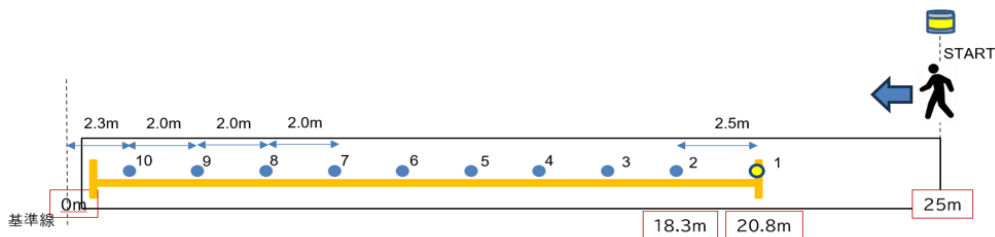


図 6.3-2 歩行実験の停止位置

表 6.3-7 RTK-GNSS 装置を用いた物体検知位置精度(近距離 LiDAR)

実施日	母数	誤差[m]	KPI
2025/11/26 9:00~ 12:00	43388 (29 歩行)	0.34±0.24 (2σ)	±2m 以内

(5-3-1) 物標情報送信周期(市役所前・長距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 20、21、25、26、27、28 日、合計 6 日間の 9:00-17:00

本項目では、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)の路側センサーログにおいて、ある時刻の「情報送信時刻」とその一つ前の時刻を比較して、その差が 100ms であることを確認した。確認にあたっては、集計対象日時のログの内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻のログを対象とした。自動運転車両が右折地点に到達した時刻は、カメラ映像から、右折地点にて一時停止した時刻を読み取り、基準とした。確認した実測結果を表 6.3-8 に示す。

表 6.3-8 市役所前・長距離センサーにおける物標情報送信周期の実測値 [ms]

日付	平均	最大	最小
11 月 20 日	102.513	105	100
11 月 21 日	102.4706	105	100
11 月 25 日	102.4934	105	100
11 月 26 日	102.5256	106	99
11 月 27 日	102.5321	105	100
11 月 28 日	102.5154	107	97
全体	102.5082	107	97

長距離 LiDAR では、平均 102.5ms 周期であり、平均値からの誤差は±6ms 以内となっている。

(5-3-2) 物標情報送信周期(バスセンター前・近距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 20、21、25、26、27、28 日、合計 6 日間の 9:00-17:00

本項目では、バスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)の路側センサーログにおいて、ある時刻の「情報送信時刻」とその一つ前の時刻を比較して、その差が 100ms であることを確認した。確認にあたっては、集計対象日時のログの内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻のログを対象とした。自動運転車両が右折地点に到達した時刻は、カメラ映像から、右折地点にて一時停止した時刻を読み取り、基準とした。確認した実測結果を表 6.3-9 に示す。

表 6.3-9 バスセンター前・近距離センサーにおける物標情報送信周期の実測値 [ms]

日付	平均	最大	最小
11月20日	99.99912	103	97
11月21日	100.0016	103	97
11月25日	100.0002	103	97
11月26日	100.0011	103	96
11月27日	100.0006	103	97
11月28日	100.0008	103	97
全体	100.0007	103	96

近距離 LiDAR では、平均 100.0ms 周期であり、平均値からの誤差は±4ms 以内となっている。

(5-4-1) 同時物体検知数(市役所前・長距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

・検知区間:基準線から 80m~105m(長距離 LiDAR から 20m~45m)区間、第 1 および第 2 レーン

・評価対象物:当該レーンを走行し基準線に接近する一般車両(自動車、バス、トラック等)

本項目では、集計対象日時の内、市役所前に設置した路側センサー(長距離 LiDAR)の検知対象車両数が最大となっている時点のデータをセンサーログから抽出し、カメラ録画映像における同時点の実態と比較した。集計結果を表 6.3-10 に示す。

表 6.3-10 路側センサー(長距離 LiDAR)による最大同時検知車両台数

実施日	最大同時検知 車両台数	検知時の映像による 対象車両台数	KPI
2025/11/25 9:00~17:00	12 台	11 台	5 台以上

(5-4-2) 同時物体検知数(バスセンター前・近距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域
- ・評価対象物:一般の歩行者および自転車

本項目では、集計対象日時の内、バスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)の路側センサーログから検知対象歩行者数の最大となっている時点を抽出し、カメラ録画映像により検出時点の実態と比較した。集計結果を表 6.3-11 に示す。

表 6.3-11 路側センサー(近距離 LiDAR)による最大同時検知歩行者数

実施日	最大同時検知 歩行者数	検知時の映像による 対象歩行者数	KPI
2025/11/25 9:00~17:00	11 名	11 名	5 名以上

(5-5-1) 路側センサーから物体の検知距離(市役所前・長距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 27 日 10:00-15:00、11 月 28 日 9:00-15:00

[検証条件]

- ・評価区間:基準線から 38m~45m(長距離 LiDAR から 80m~87m)の第 1、2 レーン

本項目では、長距離 LiDAR の路側センサーログ(「車両横位置(X)」と「車両縦位置(Y)」)と、被験車両に設置した RTK-GNSS 測位装置で取得した車両位置(緯度・経度)とを比較し、基準線から 80m 以上先の物標(車両)を検知できているか確認した。検知可否は、長距離 LiDAR による『路側センサー検知範囲内における物体検知位置の正確性』の精度内に収まっているかどうかで判定した。被験車両として、乗用車タイプのレンタカー(図 6.3-1)を利用した。確認した実測結果を表 6.3-12 に示す。

表 6.3-12 路側センサー(長距離 LiDAR)による 80m~87m 区間での試験車両検知数

実施日	母数(走行)	検知数	KPI
2025/11/27 10:00~ 15:00	53	51	検知距離 80m 以上
2025/11/28 9:00~ 15:00			

(5-5-2) 路側センサーから物体の検知距離(バスセンター前・近距離 LiDAR)

集計対象日時:2025 年 11 月 26 日 9:00-12:00

[検証条件]

- ・評価区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域
- ・被験者 3 名

本項目では、近距離 LiDAR の路側センサーログ(「物体横位置(X)」と「物体縦位置(Y)」)と、予め基準線からの距離を計測し被験者を歩道に立たせ、基準線から 6m 以上先の物標(歩行者)を検知できているか確認した。検知可否は、「路側センサー検知範囲内における物体検知位置の正確性」(近距離 LiDAR)の精度内に収まっていることで判定した。確認した実測結果を表 6.3-13 に示す。

表 6.3-13 路側センサー(近距離 LiDAR)による 6m~22m 区間での歩行者検知数

実施日	母数(走行)	検知数	KPI
2025/11/26 9:00~ 12:00	29	29	検知距離 6m 以上

### (6) 路側センサー情報を用いた車両挙動判断ロジックの開発

路側センサーを用いた車両挙動判断ロジックは従来の単独で周囲環境を判断する周囲情報判断部に路側センサー情報を追加して構築した。制御ブロックを下図に示す。

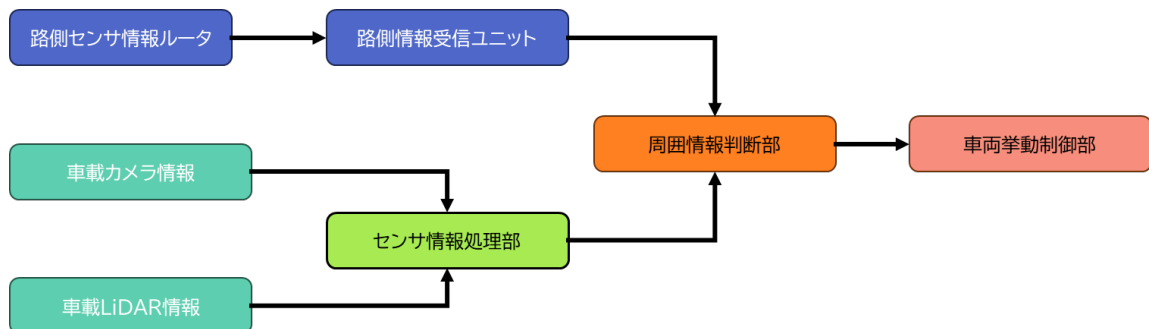


図 6.3-3 開発した車両挙動判断ロジックの情報のながれ

各部の機能を以下に示す。

- ・ 路側センサー情報ルーター:路側センサー情報を受信する機器
- ・ 路側情報受信ユニット:受信した路側センサー情報を車載プログラムで利用できるよう変換するブロック
- ・ 車載カメラ情報:車載カメラ情報を受信するブロック
- ・ 車載 LiDAR 情報:車載 LiDAR 情報を受信するブロック
- ・ センサー情報処理部:カメラ情報と LiDAR 情報を統合するブロック
- ・ 周囲情報判断部:路側センサー情報と車載センサー情報を統合し、自動運転車両周囲の障害物等を特定するブロック
- ・ 車両挙動制御部:自動運転車両周囲の障害物等の情報によって車両の動き(進行/停止等)を判断、制御するブロック

開発したロジックの評価については、車両情報と連携する前に通信の疎通確認をした後、周囲情報判断部と接続し、車両挙動制御部に路側センサー情報が伝達されることを確認した。

車両の挙動として、路側センサー情報を車両挙動判断ロジックに取り込んだ自動運転バスにおいて対象区間を通過した際の車両情報表示画面は下図のようになり、右折交差点接近時に路側センサーで車両を検知しているとダイアログが表示され、停止判断となる。その後、路側センサー・車載センサーの両方からの情報により周囲に物体がないと判断されると、車両が再発進する。

自動運転バスは、接近する対向車や歩行者と接触することなく右折を完了できる時間があると判断した場合に、右折を開始する。

路側センサー情報を用いた際の通行についてはアンケート結果から、ドライバーの意図と一致する場合と一致しない場合があることが分かっており、一致する場合は手動介入なしでの走行、一致しない場合は手動介入が発生することとなる。

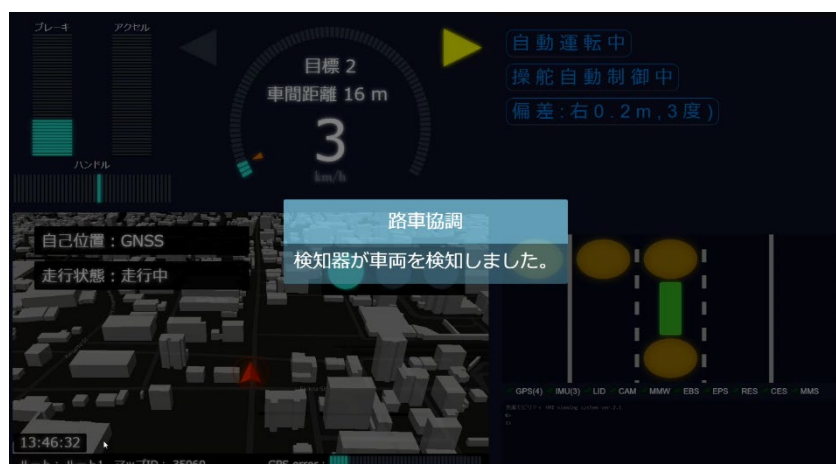


図 6.3-4 車両制御判断ロジックと路側センサー情報の連携情報

(7) 自動運転車両の制御システム要件

自動運転バスに伝達される情報を用いて高架下の歩行者等に対して制御ロジックが作動していることを確認した。

自動運転車両の制御システム要件の KPI を表 6.3-14 に示す。

表 6.3-14 自動運転車両の制御システム要件の KPI

項番	項目名	評価内容	評価手法
7-1-1	路側センサーからのデータ受信までの開始距離(市役所前・長距離 LiDAR)	路側センサーが物体を検知した時点における、物体と路側センサーの距離を確認	車両が基準線から 80m 以上の時刻において、路側センサーが車両を検知しているかを確認
7-1-2	路側センサーからのデータ受信までの開始距離(バスセンター前・近距離 LiDAR)	路側センサーが物体を検知した時点における、物体と路側センサーの距離を確認	基準線から 6m 以上の歩行者検知可否を、距離計測と路側センサーログで確認
7-2	検知から物標情報通知までの所要時間	路側センサーの物体検知時刻と自動運転バスが受信した時刻のデータを比較し、その時間差を算出して評価	自動運転バスが受信した時刻 - 路側センサー物体検知時刻 ≤ 500ms
7-3	路側センサーからの積算パケット到達率	路側センサーが送信した物標情報を、自動運転車両が受信した成功率を検証	積算パケット到達率が 99%以上か検証
7-4	車両の速度	車両に設置した RTK-GNSS から算出	$ ( \text{車両の速度} - \text{路側センサーが検知した速度} ) / \text{車両の速度} \times 100  \leq 10$

(7-1-1) 路側センサー(市役所前・長距離 LiDAR)からのデータ受信までの開始距離

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

・検知区間:基準線から 80m~105m(長距離 LiDAR から 20m~45m)区間、第 1 および第 2 レーン

・評価対象物:当該レーンを走行し基準線に接近する一般車両(自動車、バス、トラック等)

本項目では、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)で検知した車両数と、検知区間を撮影したカメラ録画映像により取得した車両数から検知率を算出した(5-1-1)の結果に基づき、検討を行った。

(7-1-2) 路側センサー(バスセンター前・近距離 LiDAR)からのデータ受信までの開始距離

集計対象日時:2025 年 11 月 25 日 9:00-17:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域
- ・評価対象物:一般の歩行者および自転車

本項目では、バスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)で検知した車両数と、検知区間を撮影したカメラ録画映像により取得した車両数から検知率を算出した(5-1-2)の結果に基づき、検討を行った。

(7-2-1) 検知から物標情報通知までの所要時間

集計対象日時:2025 年 11 月 20、21、25 日の合計 3 日間の 9:00-17:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 80m~105m(長距離 LiDAR から 20m~45m)区間、第 1 および第 2 レーン
- ・評価対象物:当該レーンを走行し基準線に接近する一般車両(自動車、バス、トラック等)

本項目では、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)で物標を検知した時刻と自動運転車両が受信した時刻のデータを比較し、その時間差が 500ms 以内かどうか評価した。本検証では集計対象日時の内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻を対象として集計した。自動運転車両が右折地点に到達した時刻は、右折地点にて一時停止した時刻をカメラ映像から読み取った。集計結果を表 6.3-15 に示す。

表 6.3-15 市役所前・長距離センサーから自動運転車両への物標情報受信遅延

日付	平均 (ms)	最大 (ms)	最小 (ms)	母数	500ms 以上 の遅延が生じ た件数	500ms 以上の遅 延件数の割合	500ms 以上の遅延事象が生 じた回数(連続した遅延事象 を 1 回としてカウント)
11/20	79.96326	951	21	2096	28	0.013358779	10
11/21	88.55006	1260	19	4505	65	0.014428413	24
11/25	60.6792	1148	17	5932	20	0.003371544	5
全体	73.92244	1260	17	12533	113	0.009016197	39

(7-2-2) 検知から物標情報通知までの所要時間

集計対象日時:2025 年 11 月 20、21、25 日の合計 3 日間の 9:00-17:00

[検証条件]

- ・検知区間:基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)、歩道領域

・評価対象物：一般の歩行者および自転車

本項目では、バスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)で物標を検知した時刻と自動運転車両が受信した時刻のデータを比較し、その時間差が500ms以内であるかについて評価した。本検証にあたっては、集計対象日時の内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻を対象として集計した。自動運転車両が右折地点に到達した時刻は、カメラ映像から、右折地点にて一時停止した時刻を読み取った。集計結果を表 6.3-16 に示す。

表 6.3-16 バスセンター前・近距離センサーから自動運転車両への物標情報受信遅延

日付	平均 (ms)	最大 (ms)	最小 (ms)	母数	500ms 以上の遅延が生じた件数	500ms 以上の遅延件数の割合	500ms 以上の遅延事象が生じた回数(連続した遅延事象を1回としてカウント)
11/20	83.44543	1484	25	2144	27	0.012593284	10
11/21	181.8088	3122	31	4682	157	0.033532678	51
11/25	61.39678	905	14	6152	5	0.000812744	1
全体	108.4797	3122	14	12978	189	0.014563107	62

### (7-3) 路側センサーからの積算パケット到達率

集計対象日時:2025 年 11 月 20、21、25 日、合計 3 日間の 9:00-17:00

本項目では、市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)およびバスセンター前に設置された路側センサー(近距離 LiDAR)が送信した物標情報について、自動運転車両が受信に成功した比率を算出するため、積算パケット到達率を指標として検証を行った。積算パケット到達率は、車間/路車間通信における所要通信品質の指標であり、「所定の移動区間における複数の通信機会の内、一回でも通信が成功すれば当該地点から 1 秒程度は車両位置と挙動を予測可能」との認識に基づいている。

許容可能な通信遅延が 500ms、情報送信周期が 100ms の時、自動運転車両が右折地点に到達してから右折判断まで 1 秒間の猶予があり、その間に 5 回の通信機会があることから、本項目の検証方法は次の通りとした。

路側センサーログと自動運転車両の物標情報受信ログを比較して、送信した物標情報ごとに受信有無を確認し、対象の区間におけるパケット到達率を求め、その値を元に積算パケット到達率を算出した。対象とするログは、集計対象日時の内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻のログとした。自動運転車両が右折地点に到達した時刻は、カメラ映像から、右折地点にて一時停止した時刻を読み取り、基準とした。積算パケット到達率の分析結果を表 6.3-17 に示す。

なお、このパケット到達率は対象区間の単純平均であるため、対象区間全体において目標 KPI を達成しているか否かを別途次の通り解析した。

受信機会ごとに 5 回の通信機会の内 5 回連続で受信できていない通信機会を抽出する。単純なパケット到達率が 90%とすると、積算パケット到達率が 99%以上となるためには、通信機会が 2 回以上あればよいことになる。先に述べたように、許容可能な通信遅延が 500ms であることを前提に通信機会を 5 回と想定していることから、連続 5 回の受信失敗の有無の比率を積算パケット到達率の指標とし

て集計を行った。対象としたログから算出した単純なパケット到達率の分析結果は、表 6.3-17 に示した通り、90%以上であるため解析の都合上、このような検証方法とした。結果を表 6.3-18 に示す。集計対象の内、長距離 LiDAR については 16 件/0.14%で、近距離 LiDAR については 21 件/0.17%で、目標 KPI を達成できない瞬間があったことが分かった。

積算パケット到達率は、99%以上の時間率で KPI を達成した。

表 6.3-17 積算パケット到達率の分析結果

日付	市役所前 長距離 LiDAR 送信件数	バスセンター前 近距離 LiDAR 送信件数	自動運転バス 受信件数	パケット 到達率	積算パケット 到達率
11月20日	2224	—	2096	94.2%	99.99994%
	—	2280	2144	94.0%	99.99992%
11月21日	4207	—	3964	94.2%	99.99994%
	—	4309	4106	95.3%	99.99998%
11月25日	5446	—	5108	93.8%	99.99991%
	—	5580	5210	93.4%	99.99987%

表 6.3-18 KPI 未達事象の発生頻度

日付	市役所前長距離 LiDAR 送信情報が 5 回連続で受信できなかった件数/割合	バスセンター前近距離 LiDAR 送信情 報が 5 回連続で受信できなかった件数 /割合
11月20日	0/0.00%	0/0.00%
11月21日	16/0.38%	16/0.37%
11月25日	0/0.00%	5/0.09%
全体	16/0.14%	21/0.17%

#### (7-4) 車両の速度

集計対象日時:2025 年 11 月 27 日 10:00-15:00、11 月 28 日 9:00-15:00

[検証条件]

- ・評価区間:基準線から 50m~80m(長距離 LiDAR から 45m~75m)の第 1、2 レーン
- ・評価対象:評価区間を停止せず直進して通過した走行データ

本項目では、被験車両の中央に設置した RTK-GNSS 測位装置から出力された速度

$v_1$  [km/h]と市役所前に設置された路側センサー(長距離 LiDAR)から出力された速度  $v_2$  [km/h]の誤差率((2)式)を算出して評価する。被験車両として、乗用車タイプのレンタカー(図 6.3-1)を利用した。

$$\left| \frac{v_1 - v_2}{v_1} \right| \times 100 \leq 10 \text{ [%]} \quad (2)$$

誤差率は、RTK-GNSS 測位装置と路側センサーを時刻同期させた上で、フレーム単位(10fps)で算出し、集計した。

検証した被験車両の走行数、評価対象とした出力情報の総数と検知速度の平均誤差を表 6.3-19 に示す。

表 6.3-19 路側センサー(長距離 LiDAR)の走行車両の平均速度誤差

実施日	母数	平均速度誤差[%]	KPI
2025/11/27 10:00 ~15:00 2025/11/28 9:00~ 15:00	1105 (38 走行)	3.1%(※1)	±10[%]以内

(※1)平均速度 36km/h

#### (8) モバイル通信要件

モバイル通信要件の KPI を表 6.3-20 に示す。

表 6.3-20 モバイル通信要件の KPI

項番	項目名	評価内容	評価手法
8-1	伝送遅延	路側センサーの物体検知時刻と自動運転バスが受信した時刻のデータを比較し、その時間差を算出して評価	自動運転バスが受信した時刻 - 路側センサー物体検知時刻 ≤ 500ms
8-2	通信速度	路側センサーの利用するモバイル通信回線の通信速度を計測して評価	路側センサーの利用するモバイル通信回線の通信速度 ≥ 1Mbps
8-3	必要 RB 数	路側センサーと自動運転バスが通信している時刻のリソースブロック数を、楽天モバイルのネットワーク管理システム(OSS)から取得して評価	必要 RB 数: 1 秒当たり平均で 3RB 以上

##### (8-1) 伝送遅延

集計対象日時: 2025 年 11 月 20、21、25 日の合計 3 日間の 9:00-17:00

本項目では、路側センサーで物標を検知した時刻と自動運転車両が受信した時刻のデータを比較し、その時間差が 500ms 以内かどうか評価した。本検証では集計対象日時の内、自動運転車両が右折地点に到達する 30 秒前から右折が完了するまでの時刻を対象として集計した。集計結果については、(7-2-1)、(7-2-2)を参照。

### (8-2) 通信速度

集計対象日時:

・【市役所前・長距離 LiDAR】 2025 年 7 月 29 日 18:20-18:30

・【バスセンター前・近距離 LiDAR】 2025 年 7 月 29 日 18:00-18:10

本項目では、路側センサーで利用するモバイル通信回線に対して実際の通信速度を計測した。計測結果を表 6.3-21 に示す。

表 6.3-21 路側センサーの利用するモバイル通信回線の通信速度

対象モバイル通信回線設置場所・用途	実測通信速度
市役所前・長距離 LiDAR	45.8Mbps
バスセンター前・近距離 LiDAR	20.7Mbps

### (8-3) 必要 RB 数

集計対象日時:2025 年 11 月 26 日 13:00-15:00、11 月 27 日 9:00-12:00

本項目では、路側センサーと連携する自動運転車両が運行している間の通信状態を計測し、1 秒ごとの RB 数を評価した。計測結果を表 6.3-22 に示す。

表 6.3-22 自動運転車両運行中の RB 数

集計値	1 秒当たりの RB 数
最大	55.2RB
最小	7.1RB
平均	24.9RB

### (9) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

自動運転バスの走行に関して、本実証で検証した路側センサーの活用では、当該箇所における停止時間が長くなる傾向がみられた。これは安全性の向上に資する一方で、当該箇所における単位時間当たりの車両通過台数の低下につながる可能性がある。そのため、今後は円滑性の向上につながる施策を講じる必要がある。

### (10) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

通信システム(遠隔監視システム、路側センサー)の導入により、将来の遠隔監視型自動運転バスの導入に資する検討が行えると考えられる。

### 3) KPI/KGI との比較結果

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	(1)	路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度 ・運転支援の負担が軽減
	(2)	通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化 ・路側センサーからの認知情報を最適化し、外乱があっても自動運転車両が安全かつ円滑に右折できる
	(3)	通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果 ・短縮時間
	(4)	初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策
定量評価	(5)	路側センサー要件 (目標値が複数ある場合、長距離 LiDAR / 近距離 LiDAR として記載) ・路側センサー検知範囲内において正確に物体を検知する割合: 90% ・路側センサー検知範囲内における物体検知位置の正確性: 誤差 ±1m / ±2m ・物体情報送信周期: 100ms ・同時物体検知数: 5 個以上 ・基準線から物体の検知距離: 80m 以上 / 6m 以上
	(6)	自動運転車両の制御システム要件 ・路側センサーからのデータ受信までの開始距離: 基準線から 80m 以上手前 / 6m 以上手前 ・検知から物体情報通知までの時間(自動運転バス発車判断時間): 500ms 以下 ・路側センサーからの積算パケット到達率: 99% 以上 ・車両の速度(LiDAR 検知結果): 実測度 ±10%
	(7)	モバイル通信要件 ・路側センサー→基地局→自動車両までの通信遅延値: 500ms 以下 ・通信速度: 1Mbps 以上 ・必要 RB 数: 1 秒当たり平均で 3RB 以上
	(8)	自動運転車両を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度 ・瞬間的な G の変位量の軽減 ・交差点通過時間(右折待機時間×右折回数)の短縮

(9)	<p>通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等の地域交通の持続性への寄与度</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・平均介入時間の減少</li> <li>・手動介入率の減少</li> <li>・交差点通過時間(右折待機時間×右折回数)</li> <li>・地域交通への寄与度が高い通信システムの特定</li> </ul>
-----	--

### (1) 路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減の程度

路車協調システムによる運転負担の軽減については、路側センサーを設置した佐賀駅バスセンターへの右折箇所での手動介入の有無による評価を行ったところ、設置なしに比べて設置ありの方が手動介入回数が増える傾向にあり、当初仮定と相違があった。

手動介入の要因について分析したところ、設置なしの場合はブレーキ介入、設置ありの場合はアクセル介入がメインとなっており、車両動作の傾向が異なっていることが分かる。これに基づくと、設置ありの場合は安全方向(車両が停止する傾向)にあり、路車協調システムの存在が安全に寄与していると考えられるが、ドライバー意図と車両制御が一致しない場合は停止時間が長くなるために、円滑性が損なわれると判断されアクセル介入が起こったと考えられる。今後はドライバー意図との一致を図るとともにセンサー設置箇所等の検討も必要である。

### (2) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化

通信システム利用の有無による手動介入回数・運行停止時間を、それぞれ以下のように算出した。

- ・手動介入回数:当該箇所における挙動についてのアンケートから抽出
- ・運行停止時間:当該箇所に自動運転バスが到着した後、車両挙動制御により、車両が発車してからバスセンターへ進入するまでの時間(下図、停止位置での停止時間+黄線部走行時間)を計測した。



図 6.3-5 運行停止時間(右折通過時間)計測箇所

通信システムの有無による停止時間の差異は以下の通りとなっており、通信システム(路側センサーとの連携)がある場合、かつドライバーが手動走行を想定した場合の運転操作の判断と一致する場合、異なる場合で比較した。

表 6.3-23 右折通過平均時間

	路側センサーなし (手動運転時の判断と一致)	路側センサーあり		
		手動運転時の判断と一致	手動運転時の判断と異なる	
			アクセル介入	ブレーキ介入
右折通過時間平均	31.4 秒	30.7 秒	37.8 秒	60.7 秒

路側センサー連携がある場合とない場合の時間比較において、ドライバーが手動走行を想定した場合の運転操作の判断と一致する場合は、通過に要する時間はほぼ変わらない結果が得られた。

### (3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

本実証では当該箇所において路側センサー情報を用いて自動運転バスの右折支援を行ったが、ドライバー意図と路側センサー情報を用いた制御が一致している場合は当該箇所で行に要する時間に大きな差は見られなかったが、下図に示すように、当該箇所到着前(24 秒前)に路側センサー情報を受信可能であったため、効果が期待できる。

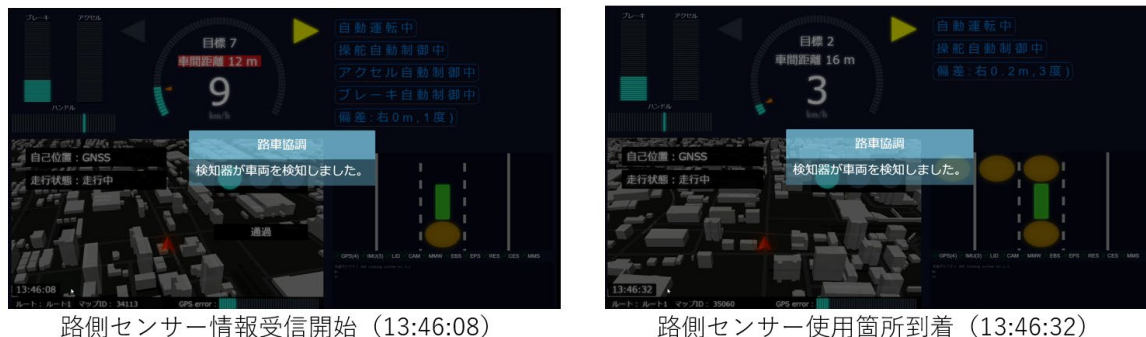


図 6.3-6 路側センサー情報受信時間確認結果

### (4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

本事業では自動運転バスのみが路側センサー情報を使用するため、初期コスト・ランニングコストともに自動運転バスの導入者・保守管理者が負担することになる。当該箇所は無信号交差点であり、横断歩道が設置されているが、歩行者用信号が設置されておらず、不注意による歩行者・自転車との接触の可能性もある。そのため、これらの事象を未然に防ぐことも目的として、歩行者を検知した際に警告灯を点灯させる等により、自動運転バス以外のバスにも歩行者・自転車の存在を認識できるようにすることで、佐賀駅バスセンターを使用するバス全体にコスト負担の分散を図ることも選択肢となる。

## (5) 路側センサー要件

### (5-1-1) 車両検知率(市役所前・長距離 LiDAR)

表 6.3-4 から、長距離 LiDAR では、路側センサーを進行方向とは逆の上流に設置することにより、検知区間においては大型車両等によるオクルージョンの影響が発生せず、良好に走行車両を検知することが確認できた。さらに、車両以外を検知するような事象も発生しなかった。評価区間において、第一レーンと第二レーンを並走するケースで一時的に 1 台と計測したため未検出となった事例が発生したが、評価区間を通過後、分離されており、自動運転車両に通知する情報としては、問題ないと考えている。また、長い大型車両(バス・トラック等)を検知した際に、車両が前後に分離されて検知される事象が発生し、検知数が本来の車両台数を上回る場合もあった。この事象を避けるためには、より高い位置に長距離 LiDAR を設置することにより、長い大型車両全体が長距離 LiDAR から捉えやすくする等の対策が有効だと思われる。

### (5-1-2) 歩行者検知率(バスセンター前・近距離 LiDAR)

表 6.3-5 から、近距離 LiDAR を用いた歩行者検知率は KPI の 90%以上を満たした。本検証条件下においては、オクルージョンの影響なく、良好に歩行者を検知することが確認できた。また、評価区間において、歩行者以外を検知するような事象は発生しなかった。さらに、評価区間において、複数の歩行者が並んで歩行するようなケースを 1 人と計測したため未検出が発生した。自動運転車両に通知する情報としては、問題ないと考えている。

### (5-2-1) 車両位置精度(市役所前・長距離 LiDAR)

表 6.3-6 から、本検証条件下において、長距離 LiDAR では被験車の位置誤差が KPI で 3m 以内に収まるものの KPI である 1m 以内という条件を満たしているものは全体の 15%であることが確認できた。センサーを上流に設置する場合、車尾位置から車頭位置を推定する必要があるが、本実証実験では、長距離 LiDAR を車道脇の柱に設置したため、車全体が長距離 LiDAR で捉えにくかったことが KPI 未達の主な要因と考えられる。上流設置を実施する場合は、長距離 LiDAR を道路から離れた位置に設置する等の対策が必要である。他方、長距離 LiDAR を下流設置すると、長距離 LiDAR で車頭を直接計測できるため、位置精度が向上する可能性は高い。

### (5-2-2) 歩行者位置精度(バスセンター前・近距離 LiDAR)

表 6.3-7 から、本検証条件下において、近距離 LiDAR では被験者の位置誤差が KPI で 2m 以内に 100%の比率で収まることを確認できた。本項目については、特に課題は無い。

### (5-3-1) 物標情報送信周期(市役所前・長距離 LiDAR)

表 6.3-8 から、長距離 LiDAR では物標情報送信周期が平均 102.5ms であり、平均値からの誤差は±6ms 以内となっており、目標 KPI である 100ms を誤差 10%以内の精度で満たしていた。この LiDAR では、送信周期の設定値である 100ms に対して約 2.5ms ほど平均値との差があるが、採用した LiDAR の機種仕様の違いによるものと思われる。

対向車両が 40km/h で走行している場合、100ms の間に移動する距離は 1.1m 程度であり、80m 以内における対向車両の検知が可能であることを前提として、500ms の遅延を見込んだとしても接近する対向車の位置の追跡が可能であるものと判断できる。

#### (5-3-2) 物標情報送信周期(バスセンター前・近距離 LiDAR)

表 6.3-9 から、近距離 LiDAR では、平均 100.0ms 周期であり、平均値からの誤差は±4ms 以内となっており、目標 KPI である 100ms を誤差 10%以内の精度で満たしていた。この LiDAR では、送信周期の設定値である 100ms に対して平均値との差がほとんど見られず、相対的に正確な送信周期となっていることが確認できた。

歩行者が 20km/h で移動している場合、100ms の間に移動する距離は 0.5m 程度であり、6m 以内における歩行者の検知が可能であることを前提として、500ms の遅延を見込んだとしても接近する歩行者の位置の追従が可能であるものと判断できる。

#### (5-4-1) 同時物体検知数(市役所前・長距離 LiDAR)

表 6.3-10 から、長距離 LiDAR では、最大同時検知車両台数として 12 台まで追従可能であることが確認された。検知数 12 台のところ、録画映像では 11 台しか確認できないが、これは大型車両が 2 台存在するため、どちらかが分裂して認識されている可能性がある。

#### (5-4-2) 同時物体検知数(バスセンター前・近距離 LiDAR)

表 6.3-11 から、近距離 LiDAR では、最大同時検知歩行者数として 11 名まで追従可能であることが確認された。本検証において、特に課題はない。

#### (5-5-1) 路側センサーから物体の検知距離(市役所前・長距離 LiDAR)

表 6.3-12 から、今回の検証条件下において、路側センサー(長距離 LiDAR)にて 80m 以上離れた車両を概ね検知することが可能であることを確認した。遠方の車両においては、LiDAR の分解能が低下し、さらに、オクルージョンの影響等影響を受けやすいため、検知性能が低下する傾向にある。期待される性能に合わせて、路側センサーの設置位置等を検討する必要がある。

#### (5-5-2) 路側センサーから物体の検知距離(バスセンター前・近距離 LiDAR)

表 6.3-13 から、今回の検証条件下において、路側センサー(近距離 LiDAR)にて 6m 以上離れた歩行者を良好に検知することが可能であることを確認した。本検証において、特に課題はない。

### (6) 自動運転車両の制御システム要件

#### (6-1-1) 路側センサー(市役所前・長距離 LiDAR)からのデータ受信までの開始距離

表 6.3-4 から、今回の検証条件下において、路側センサー(長距離 LiDAR)にて基準線から 80m 以上離れた車両を概ね検知できることを確認した。検知範囲が基準線から 50m~80m(長距離 LiDAR から 45m~75m)の第 1, 2 レーンと設定されているため、(5-1-1)で示された検出精度で KPI を満たしており、特に課題は無い。

#### (6-1-2) 路側センサー(バスセンター前・近距離 LiDAR)からのデータ受信までの開始距離

表 6.3-5 から、今回の検証条件下において、路側センサー(近距離 LiDAR)にて基準線から 6m 以上離れた歩行者を概ね検知できることを確認した。検知範囲が基準線から 8m~12m(近距離 LiDAR から 13m~17m)の歩道領域と設定されているため、(5-1-2)で示された検出精度で KPI を満たしており、特に課題は無い。

#### (6-2-1) 検知から物標情報通知までの所要時間(長距離 LiDAR)

表 6.3-15 から、0.3~1.4%と事象発生 of 比率は非常に小さいながらも 500ms を超過する遅延が発生する場合があることが確認された。最大遅延は 1.26 秒程度であるが、根本的な原因は分析できず、ネットワークも含めたシステム全体の複合的な要因によるものである可能性が高い。遅延発生原因の分析、および 500ms を超過する遅延の発生を回避するための対策の検討が今後の課題である。

#### (6-2-2) 検知から物標情報通知までの所要時間(近距離 LiDAR)

表 6.3-16 から、0.08~3.4%と事象発生 of 比率は小さいながらも 500ms を超過する遅延が発生する場合があることが確認された。最大遅延は 3.12 秒程度と長距離 LiDAR と比較して大きいため、送信システム側に問題がある可能性が高い。しかしながら根本的な原因は分析できず、ネットワークも含めたシステム全体の複合的な要因によるものである可能性もある。遅延発生原因の分析、および 500ms を超過する遅延の発生を回避するための対策の検討が今後の課題である。

#### (6-3) 路側センサーからの積算パケット到達率

表 6.3-17 から、市役所前長距離 LiDAR による路側センサー情報は、20/21 便(=95.2%)で積算パケット到達率 99%を満たしており、バスセンター前近距離 LiDAR による路側センサー情報は、18/21 便(=85.7%)で積算パケット到達率 99%を満たしていることが確認できた。

路側センサーによる送信メッセージが未達となる要因としては、路側センサーの送信処理不具合・通信経路上での損失・自動運転車両での受信不具合の 3 つに大きく分けられる。

今回の実証実験では、路車間通信のプロトコルとして、UDP ベースの CoAP (Constrained Application Protocol) 通信を利用しており、確認応答や再送がないため、輻輳等による一時的なネットワーク品質の低下により損失が発生したと考えられる。5 回連続で未達となっている時間帯は 16:40 頃が多く、下校・退勤等による駅周辺の混雑が路側センサーの利用するモバイル通信環境の品質を低下させた可能性が高い。

#### (6-4) 車両の速度

表 6.3-19 から、今回の検証条件下において、路側センサー(長距離 LiDAR)にて平均誤差率が 3.1%であり、KPI である速度誤差±10%以内という条件を満たすことが確認できた。本検証において、特に課題はない。

### (7) モバイル通信要件

#### (7-1) 伝送遅延

表 6.3-15、表 6.3-16 から、0.08~3.4%と事象発生 of 比率は小さいながらも KPI である 500ms を超過する遅延が発生する場合があることが確認された。最大遅延は 3.12 秒程度であり、送信システム側に問題がある可能性は高い。しかしながら根本的な原因は分析できず、ネットワークも含めたシステム全体の複合的な要因によるものである可能性もある。遅延発生原因の分析、および 500ms を超過する遅延の発生を回避するための対策の検討が今後の課題である。

#### (7-2) 通信速度

表 6.3-21 から、路側センサーの利用するモバイル通信回線において、KPI である 1Mbps 以上の

十分な通信速度が確保できていることが確認できた。本検証において路側センサーの良好な運用が確認できているため、特に課題はない。

(7-3) 必要 RB 数

表 6.3-22 から、自動運転車両運行中のデータ送信において常に KPI 目標値である 1 秒当たり平均 3RB 以上を上回っており、データ送信に必要な無線リソースが安定して確保されていることが確認できた。本検証において、特に課題はない。

(8) 自動運転車両を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

自動運転バスの走行に関して、本実証で検証した路側センサーの活用においては、自動運転バスに搭載したセンサーの検知外の情報を活用しており、当該領域では自動運転バスと接触する可能性がある速度で走行している車両等に対して自動運転バスの発進を抑制しているため、当該箇所での停止時間が長くなる傾向にあり、安全方向にあるものの、当該箇所における単位時間あたりの車両通過台数が低下することが考えられるため、路側センサーの設置場所の変更や別の路線に導入する検討も討も実施する必要があると考えられる。

併せて円滑性に関する評価を行った。円滑性については路側センサー情報を活用する箇所における通過時間と、速度等の車両走行情報を指標に用いた。

通過時間については、路側センサー情報を用いる佐賀駅バスセンター手前の右折箇所到着後から、自動運転バスが右折先横断歩道にかかる時間を調査した。

通過時間は下表の通りとなり、当該地点における自動運転バスの車両挙動判断とドライバー意図が一致している場合は、路側センサーの有無により大きな差は見られなかったが、ドライバー意図と異なる場合は、待機時間が長くなる傾向にあった。しかしながら、当該コースにおける対向車がある交差点での右折回数は SAGA サンライズパーク行きで 1 回、佐賀駅バスセンター行きで 2 回の計 3 回の右折の交差点が存在するため、本検証で得られた成果の展開により、運行時間短縮の可能性が伺える。

表 6.3-24 路側センサー情報を用いた交差点における通過時間の比較

	路側センサーなし (意図と一致)	路側センサーあり		
		意図と一致	意図と異なる	
			アクセル介入	ブレーキ介入
右折通過時間平均	31.4 秒	30.7 秒	37.8 秒	60.7 秒
		平均:43.1 秒		

ドライバー意図と異なる場合は手動介入が行われており、アクセル介入に対して、ブレーキ介入の方が右折通過時間は長くなる傾向にある。これは、路側センサー情報により、遠方の物体情報が送られているために自動運転車両が停止の判断、ドライバーは車両の周囲に交通参加者がなく、遠方の車両が来ても安全に走行できると判断したために生じた差異と考えられる。ブレーキ介入の場合は、車両の他に歩行者、自転車、もしくは側道から進入する車両の影響も考えられる。

路側センサー情報を用いた際の車両挙動を下図に示す。

上図がドライバー意図と一致した場合の挙動、下図がドライバー意図と一致しなかった場合の挙動である。この走行においてはドライバーがアクセルペダルを踏んで加速する介入を行っている。これらを比較すると、右折開始箇所での加速度変化が自動運転バスの制御時に加速度のピークは大きいものの、変化量は介入ありの方が急峻になっており、ドライバーの運転に比べて緩やかな速度変化になっており、車内転倒等の安全性については問題ないと考えられる。

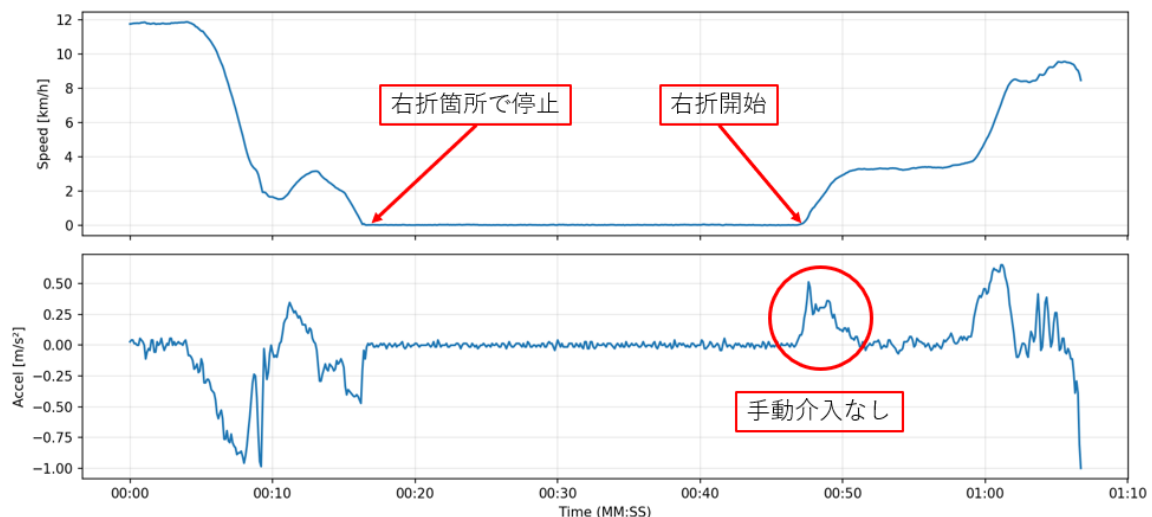


図 6.3-7 路側センサー情報活用地点における車両挙動データ、ドライバー意図と一致する場合

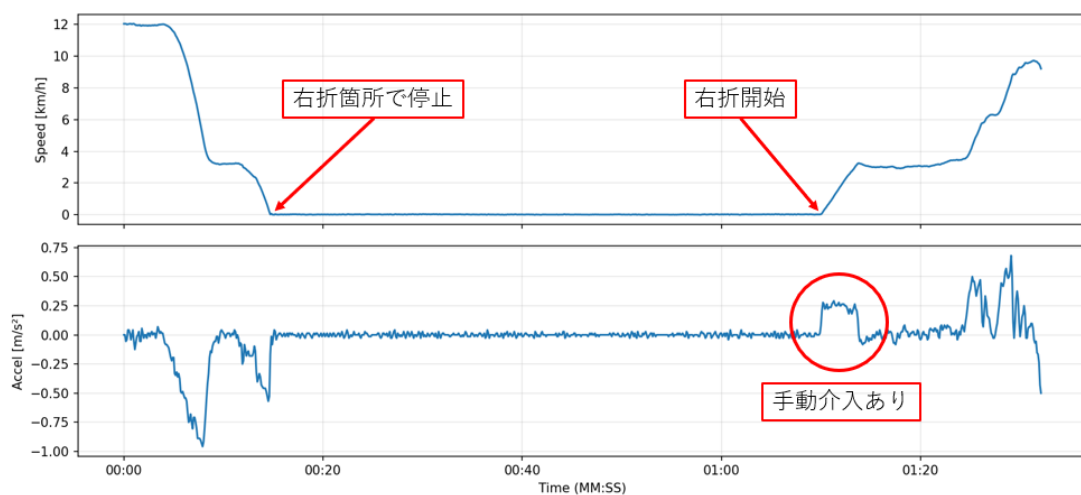


図 6.3-8 路側センサー情報活用地点における車両挙動データ、ドライバー意図と一致しない場合

### (9) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等の地域交通の持続性への寄与度

通信システム(遠隔監視システム、路側センサー)の導入により、将来の遠隔監視型自動運転バスの導入に資する検討が行えると考えられるが、今後の車両台数や投入路線等も含めて検討する必要があると考えられる。また、前項でも述べたが、本事業の成果展開により、対向車がある交差点での右折時

間短縮に効果が見られるため、本事業で走行したルート全体への適用により、時間短縮を図ることが可能と考えられる。

#### 4) 成果・課題

本ユースケースは、自動運転における手動介入の頻度が高い懸念のある無信号交差点での右折において、路側センサーを用いた路車協調システムの有効性を検証することを目的として実施された。本実証の結果を踏まえ、レベル4自動運転の社会実装に向けた成果と今後の課題を以下にまとめる。

##### a. 成果：路車協調システムの有無による運転支援の負担軽減効果の確認

本実証では、路車協調システムの介在により、手動介入の回数自体は増えているものの、大半はアクセル介入であり、事故の発生に直結するようなブレーキ介入の頻度は1/3程度に削減できた。事故を避けることを意識することにより緊張感が少なくなることで精神的な負担軽減効果が期待される一方、自動的なブレーキ制御の多発による後続車両のあおり運転の誘発や緊張感の欠落による負の影響も今後懸念される。

##### b. 成果：路車協調システムによるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

路側センサー情報の有無により車両挙動(走行方法)に違いは出ないため、本事業では、ドライバー意図と車両挙動制御ロジックの判断の差異が与える影響について評価を行い、ドライバー意図と車両挙動判断ロジックに差異がない場合は当該箇所の通過時間はほぼ同じであったが、差異が見られる場合は通過時間が増加する傾向にあったが、より広範囲のリスク可能性に対して停止している傾向にあるため、将来的にドライバーが不在の車両を考慮した場合は適切に稼働していると考えられる。自動運転車両が周囲交通に与える影響を最小化し、円滑に運行するためには安全性と円滑性の両立が必要となる。

本実証で円滑性に影響を与えると考えられる車両挙動判断ロジックとドライバー意図との一致性が当該区間での通過時間に大きな影響を与えることが明らかになった。

##### c. 成果：想定した路側センサー要件を前提とした良好な路車協調システムの運用

本実証では、市役所前に対向車両の検知を目的とした長距離LiDAR、バスセンター前に歩行者や自転車の検知を目的とした近距離LiDARを設置することで、自動運転車両の死角を補完することを目的とした路車協調システムを構築・運用した。また、路側センサー情報を用いた自動運転バスの走行支援について、遠方の車両や横断可能性のある歩行者データの受信に基づく制御ロジックを開発し、実路にて通信データの確認、および、車両挙動制御へ反映されていることを確認した。概ね良好かつ円滑な運用が実現できたため、予め検討していた路側センサー要件の項目および目標値の妥当性を確認することができたことから、今後、路車協調システムの運用を無信号交差点の右折と同様の課題のある交通環境に一般化して適用可能と思われる。

#### d. 成果：路側センサーの迅速な導入による路車協調システム環境整備の実現

本実証では、電柱や信号柱への共架の際の強度計算を実施し、強度不足となった場合の置き基礎による路側センサーの新設が可能であることが確認できた。常設・継続的な運用のためには、電源確保や設置設備の安定性・過酷な屋外環境での適切な保守運用等の課題も多いが、路側センサーの新設に際して物理的な制約がある場合の代替手段の実用性・有効性が確認できたことは、路車協調システムの実用化に向けた大きな成果と言える。

#### e. 課題：路車協調システムによるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

右折時の通過時間は自動運転車両が周囲交通に与える影響を最小化し、円滑に運行するための大きな要素となっており、これを改善することにより運行時間の短縮、および先読み情報として路側センサー情報を使用することでルートの柔軟な選定が可能となると考えられ、その効果が交通利便性の向上として現れると考えられるため、その活用方法については今後の課題とする。

#### f. 課題：許容範囲を逸脱した伝送遅延の発生

本実証では、路側センサーから自動運転車両への検知情報の伝達において、頻度は低いものの、時折許容範囲を超える遅延が確認された。路側センサーにより頻度や生じる遅延の程度に大きな差が見られるため、送信システムである路側センサー側に問題がある可能性も高いものの、根本的な原因は分析できておらず、ネットワークも含めたシステム全体の複合的な要因によるものである可能性も高い。遅延発生原因の分析および目標値である 500ms を超過する遅延の発生を回避するための対策の検討が今後の課題である。ネットワークの輻輳が遅延の主要因となる場合は、公的なトラフィックを識別して伝送処理を行うトラフィックの優先制御も選択肢となり得る。また、遅延が不可避の場合は、多少の遅延が生じることを前提とした車両制御システム側の対策等も選択肢となると思われる。

6.4 ④安定かつ円滑な周辺環境情報の伝送:周辺環境情報等のデータ連携や車両側の危険回避行動の連携・実装

実施なし。

6.5 ⑤経済性確保:1人複数車両の同時運行を成立させる通信要件の検証

実施なし。

6.6 レベル4の社会実装に向けた検討の結果

6.6.1 運用検証

1) システムの操作性やユーザーインターフェースに関する評価(特に遠隔監視員の軽減負担等)

(1) 実施結果

a. 路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケート

表 6.6-1 より、路側センサー無しの場合、全 48 回中、車両制御と実感が一致したのは 31 回、一致しなかったのは 17 回であった。一致しなかった 17 回の内、進行可能時に停止したのが 14 回、進行不可能時に進行したのが 3 回であった。手動介入回数は合計 16 回であり、ヒヤリハットは発生しなかった。

表 6.6-2 より、路側センサー有りの場合、全 45 回中、車両制御と実感が一致したのは 10 回、一致しなかったのは 35 回であった。一致しなかった 35 回の内、進行可能時に停止したのが 30 回、進行不可能時に進行したのが 10 回であった。手動介入回数は合計 35 回であり、ヒヤリハットは発生しなかった。

表 6.6-1 路側センサー無しの場合の結果(全 48 回の内訳)

①車両制御は実感と一致したか	一致した	一致しなかった		
	31	17		
②一致しなかった理由		進行可能時に停止	進行不可能時に進行	
		14	3	
③手動介入を行ったか	手動介入なし	手動介入あり	手動介入なし	手動介入あり
	31	13	1	3
④ヒヤリハットは発生したか	ヒヤリハットなし			
	48			

表 6.6-2 路側センサー有りの場合の結果(全 45 回の内訳)

①車両制御は実感と一致したか	一致した	一致しなかった
	10	35

②一致しなかつた理由*		進行可能時に停止	進行不可能時に進行
		30	10
③手動介入を行ったか	手動介入なし	手動介入あり	
	10	35	
④ヒヤリハットは発生したか	ヒヤリハットなし		
	45		

※②一致しなかつた理由については、「進行可能時に停止」と「進行不可能時に進行」の両方が起きたのが 5 回あったため、合計は 35 にならない。

#### b. 遠隔監視システムに必要な機能に関するアンケート

佐賀市交通局職員 5 名、佐賀市企画政策課職員 3 名、テストドライバー 1 名を対象に遠隔監視システムに必要な機能に関する調査を行った。調査の様子と遠隔監視画面を図 6.6-1、図 6.6-2 に、結果を表 6.6-6 に示す。回答者 9 名中 8 名が、現状の遠隔監視システムによる運行監視業務は不可と回答した(表 6.6-3)。運行不可の理由として、8 名が「機能の不足」、3 名が「画面がわかりにくい」、2 名がその他与回答した(表 6.6-4)。「機能の不足」と回答した 8 名全員がバス車両操作機能に不足があると回答した(表 6.6-5)。画面がわかりにくい理由としては、複数台監視時には巨大モニターが必要なことや、画面の途切れ、車両真横の映像の見にくさが指摘された。



図 6.6-1 調査の様子

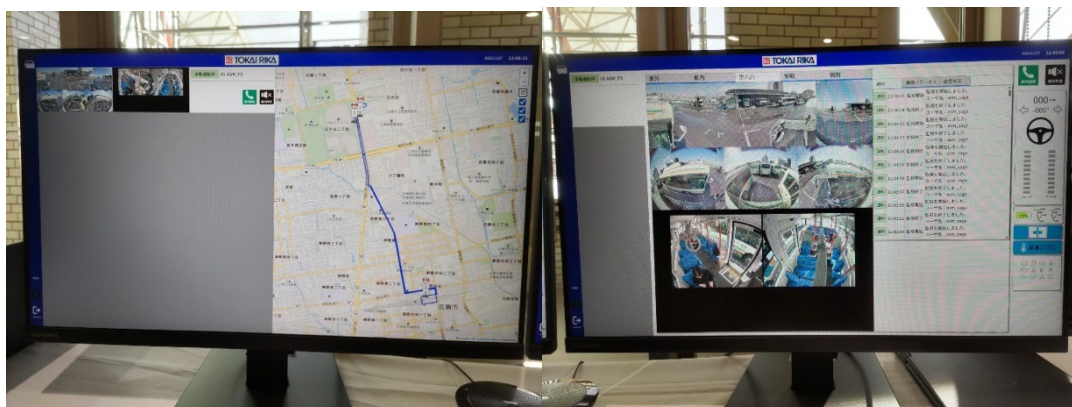


図 6.6-2 遠隔監視画面  
 (左(ディスプレイ1):複数車両画面/位置情報、  
 右(ディスプレイ2):選択車両の車外/車内映像画面)

表 6.6-3 現状の遠隔監視システムで運行監視業務は可能か(n=9、単一回答)

回答	運行可	運行不可(要改善)
人数	1名	8名

表 6.6-4 運行不可(要改善)の理由(n=8、複数回答)

回答	機能の不足	画面がわかりにくい	その他
人数	8名	3名	2名

表 6.6-5 不足している機能(n=8、複数回答)

回答	車内発話放送	車外通話	バス車両操作	その他
人数	1名	3名	8名	1名

表 6.6-6 遠隔監視システムに必要な機能に関するアンケート結果

N o.	属性	年齢	二種免許 保有有無	職業	自動運転バ ス乗車経験 有無	運行監視 業務は可能 か	運行不可の 理由	不足機能	画面がわかりに くい理由 ディスプレイ1	画面がわかり にくい理由 ディスプレイ2
1	交通局 職員A	50 歳代	保有して いない	一般職員	乗客として ある	運行不可	機能の不足	バス車両操 作		
2	交通局 職員B	50 歳代	保有して いる	運行管理者	乗客として ある	運行不可	機能の不足	車外通話、 バス車両操 作		
3	交通局 職員C	50 歳代	保有して いる	一般職員	乗客として ある	運行不可	機能の不足	車内発話放 送、バス車 両操作		
4	交通局 職員D	40 歳代	保有して いる	一般職員	乗客として ある	運行可				
5	交通局 職員E	50 歳代	保有して いる	運行管理者	ない	運行不可	機能の不足、その他 (安全に不安がある)	バス車両操 作		
6	企画政 策課職 員A	40 歳代	保有して いない	一般職員	乗客として ある	運行不可	機能の不足	車外通話、 バス車両操 作		

7	企画政策課職員B	50歳代	保有していない	一般職員	乗客としてある	運行不可	機能の不足、画面がわかりにくい、その他(通信の安定)	バス車両操作	画面の大きさ(複数台見るには巨大モニターがないと見られない印象 5台同時監視は難しそう、2~3台かな?と感覚的に思いました)	-
8	企画政策課職員C	30歳代	保有していない	一般職員	乗客としてある	運行不可	機能の不足、画面がわかりにくい	バス車両操作、その他(運賃確認、自動でドア動く時、乗客確認の精度が気になる)	その他(画面がよくとぎれるので安定化させてほしい)	その他(真横の映像が少しみにくい、慣れの問題かもしれない)
9	テストドライバー	50歳代	保有している	テストドライバー	テストドライバー・保安員としてある、乗客としてある	運行不可	機能の不足、画面がわかりにくい	車外通話、バス車両操作	-	-

※灰色は回答対象外、-は回答無し

また、アンケート結果には現れない質疑応答から遠隔監視システムに必要な機能を把握するため、①佐賀市交通局職員、②佐賀市企画政策課職員、③テストドライバーのそれぞれについて議事録を作成した。主な結果は以下の通り。

①佐賀市交通局職員対象

- 日時:2025年11月27日 13:00-13:30
  - アンケート対象者:佐賀市交通局職員5名
  - 運営側参加者:株式会社東海理化(TR)、株式会社建設技術研究所
- 議事録(主な意見のみ抽出。全文は8.4.1参照。)

● 車両操作

- ・ 将来的な車両制御とは何ができるのか。(交通局)
  - ⇒ ドア開閉、非常停止が可能である。アクセルやステアリングの遠隔操作は想定していない。(TR)
- ・ 災害等で通行止めの場合はどうするのか、横付け等は何ができるのか。(交通局)
  - ⇒ 停止することしかできない。(TR)
- ・ 車内外で何かあった際、複数台監視していると気づかないのではないか。(交通局)
  - ⇒ AIで遠隔監視映像を確認して、異常を検知した際に通知が来るようなシステムを開発中である。(TR)

● 遠隔監視画面、カメラの画角等

- ・ カメラの映像は広角ではないようにできるのか。注視したい画角のみを、モニター全体に表示させることは可能か。(交通局)
  - ⇒ 死角がないように広角にしている。現状では一つのカメラ画角のみを、遠隔監視モニター全体に表示することはできない。(TR)

## ②佐賀市企画政策課職員対象

- 日時:2025年11月28日 13:00-13:30
- アンケート対象者:佐賀市企画政策課職員3名
- 運営側参加者:株式会社東海理化(TR)、株式会社建設技術研究所  
議事録(主な意見のみ抽出。全文は8.4.1参照。)
- 車両操作
  - ・ 遠隔監視側からできる車両制御はどのようなものがあるのか。(佐賀市)  
⇒ 現行では車両制御は不可能である。レベル4では発進・停止・ドア開閉が可能となる。アクセル・ブレーキ・ハンドル操作は想定していない。(TR)
- 車両操作以外の機能
  - ・ バス車内から、遠隔監視側への呼び出しボタンを増やすことは可能か。(佐賀市)  
⇒ 増設は可能である。現状は運転席後方に1箇所設置されている。今後は車内だけでなく車外にも設置する必要があると考えている。(TR)
  - ・ 降車ボタンが押された際に、どのように遠隔監視側に知らされるのか。(佐賀市)  
⇒ 将来的には、遠隔監視画面に通知を表示することを想定している。ドア開閉の制御については、複数台を監視する際に、遠隔監視側からのドア開閉操作は現実的ではないため、自動での制御を想定している。(TR)
  - ・ 降車ボタンによるバス停の停車・通過判断は自動で可能なのか(佐賀市)  
⇒ 降車ボタンが押された際の停車は可能。ただし押されなかった場合、バス停の乗客有無を確認して通過判断するのは困難である。(TR)
  - ・ 運賃を払ったかどうかを、遠隔監視側で把握可能か。(佐賀市)  
⇒ 現状では確認不可。乗車口で個人認証するシステム等を構築すれば確認可能と考えられる。(TR)
- 遠隔監視画面、カメラの画角等
  - ・ 複数台を監視する場合に、一つ一つの映像が小さくて見づらい。(佐賀市)  
⇒ 複数台を監視する際は、映像を凝視することを想定していない。何らかの異常が発生した時に通知を表示させ、拡大したい映像を選択できるようにすることを想定している。(TR)

## ③テストドライバー対象

- 日時:2025年12月1日 11:15-11:30
- アンケート対象者:先進モビリティテストドライバー1名
- 運営側参加者:株式会社東海理化(TR)、株式会社建設技術研究所  
議事録(主な意見のみ抽出。全文は8.4.1参照。)
- 車両操作
  - ・ バス運行中に異常が発生し、停止後の発進は誰が判断するのか、(テストドライバー)  
⇒ 基本的には自動運転システム側で判断する。(TR)
- 車両操作以外の機能
  - ・ 車椅子の方をどのように対応するのか。(テストドライバー)

⇒事前に予約を受け付け、該当時間に人員を派遣する、またはスロープを展開する等の方法が考えられる。(TR)

- 遠隔監視画面、カメラの画角等

- ・ 遠隔監視画面は特殊であるため、遠隔監視を実施するには画面構成やカメラ映像の見え方等に慣れる必要がある。(テストドライバー)

⇒遠隔監視オペレーターは、数日間の講習を受けた者が担当する。(TR)

### c. 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケート

2日間で合計29件の回答を得た。回答者の年齢については、65歳以上が12名、20歳代～64歳以下が17名であった(図 6.6-4 年齢)。

普段のバス利用頻度について、全く使わないと回答したのは29名中10名であり、それ以外の19名は、多少はバスを利用している(図 6.6-5 普段のバス利用頻度)と回答した。自動運転バスの乗車経験があると回答したのは2名であった(図 6.6-6 自動運転バスの乗車経験有無)。自動運転バスに対する印象について、「全く不安はない」または「それほど不安はない」と回答したのが13名、「やや不安がある」または「不安がある」と回答したのが16名であり概ね半々に分かれた(図 6.6-7 自動運転バスに対する印象)。



図 6.6-3 調査の様子

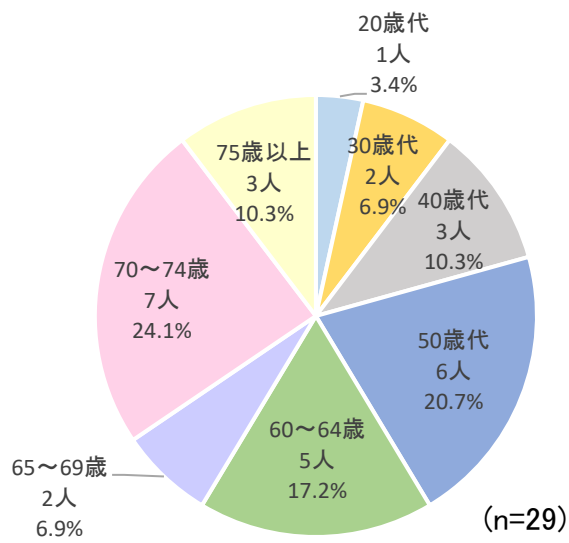


図 6.6-4 年齢

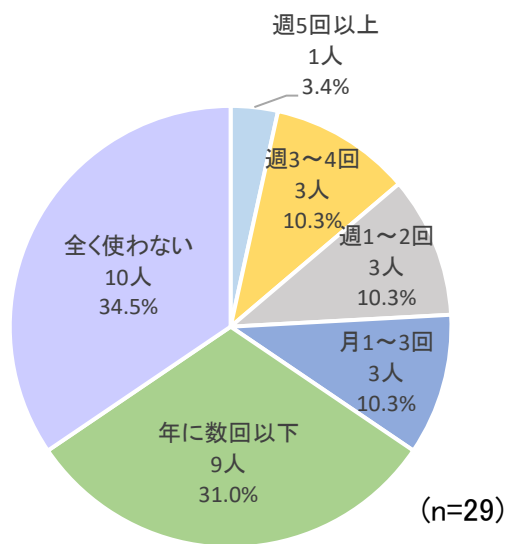


図 6.6-5 普段のバス利用頻度

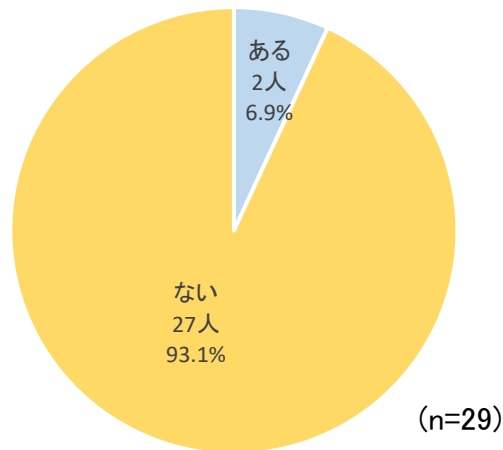


図 6.6-6 自動運転バスの乗車経験有無

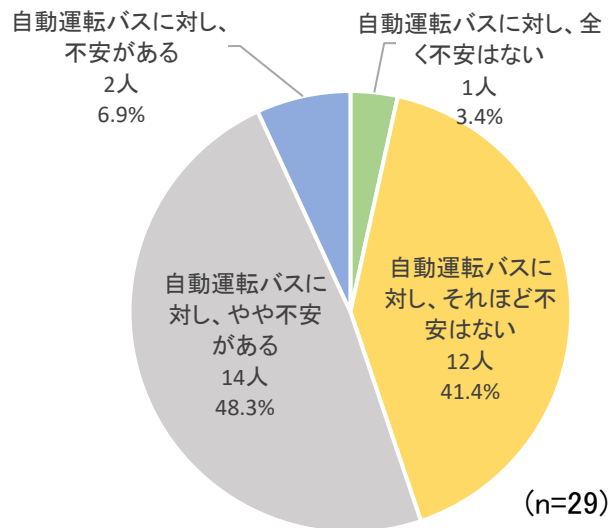
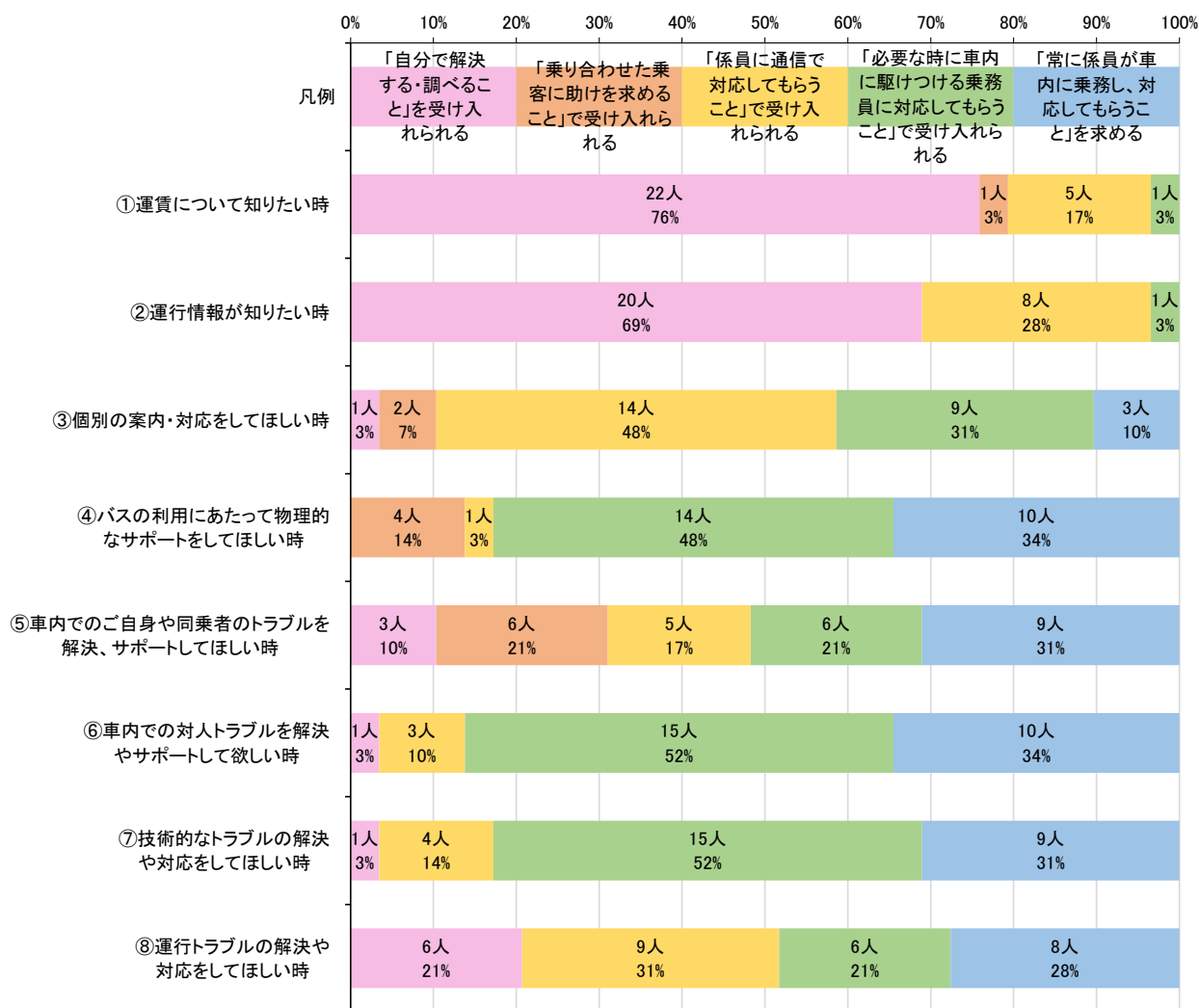


図 6.6-7 自動運転バスに対する印象

無人自動運行時の対応に関する受容度を図 6.6-8 無人自動運行時の対応に対する受容度に示す。「①運賃について知りたい時」や「②運行情報が知りたい時」、「③個別の案内・対応をしてほしい時」については、自分で解決したり、乗り合わせた乗客に助けを求めたり、係員に通信で対応してもらうことで受け入れられる割合が高い。「④物理的サポートをしてほしい時」や「⑥車内での対人トラブルを解決してほしい時」、「⑦技術的なトラブルを解決してほしい時」では、必要な時に駆けつける乗務員に対応してもらうことで受け入れられると回答した人が最も多い。④～⑦の各ケースについて、それぞれ10名程度は、常に係員が車内に乗務し、対応してもらうことを求める結果となった。

また、「必要な時に車内に駆けつける乗務員に対応してもらうことで受け入れられる」を選択した方の許容待ち時間を表 6.6-7 に示す。⑥～⑧のすべてのケースで、10分以内が許容待ち時間と回答した人が過半数であった。



※「④バスの利用にあたって物理的なサポートをして欲しい時」では、「事前予約で車内に駆けつける乗務員に対応してもらうこと」を受け入れられる (n=29)

図 6.6-8 無人自動運行時の対応に対する受容度

表 6.6-7 許容待ち時間

(「必要な時に車内に駆けつける乗務員に対応してもらうことで受け入れられる」を選択した方のみ回答)

許容待ち時間	⑥車内での対人トラブルを解決やサポートしてほしい時	⑦技術的なトラブルの解決や対応してほしい時	⑧運行トラブルの解決や対応してほしい時
5分	4人	4人	1人
10分	6人	5人	4人
15分	2人	2人	-
20分	1人	2人	-
30分	1人	2人	-

※上記の他、各ケースで1人が無回答

調査は調査員による聞き取り式で行い、アンケート結果だけでは分からない、回答に至る背景等を聴取することができた。調査員が聞き取った内容は以下の通り。

- 日時:2025年11月27日、28日 各日13:00-17:00
- 場所:佐賀市役所市民ホール
- アンケート対象者:佐賀市役所市民ホールにお越しの方
- 調査員:株式会社建設技術研究所
- メモ
  - ・医療従事者として働いている。急病の際は一刻を争うものであり、応急救護の訓練を受けた者が常時車内にいるべき。
  - ・本当は常に車内に係員がいてほしいが、それでは人を減らせない。人を減らすために、多少の不便を受け入れるのは仕方ないとする。
  - ・車椅子利用の際に予約が必要なのは面倒なので、常に係員が車内にいてほしい。
  - ・体調不良の際はすぐに対応してほしいので、乗り合わせた乗客に助けを求める。
  - ・トラブル時の待っている時間はすごく長く感じられるはず。5分程度が限度ではないか。
  - ・スマホは持っていないが、運賃や降車停留所は事前に調べておくので問題ない(自分で解決できる)。イレギュラーな時には案内してほしい。
  - ・知り合いに車いす利用者がいる。乗り降りする際に支援が必要であり、他の乗客に手伝ってもらうのは申し訳ないと感じるらしい。そういう方のためにも、常に係員が車内にいてほしい。

## (2) 考察

### a. 路車協調システムの有無による負担軽減に関するアンケート

路側センサーありの場合は、路側センサーなしの場合と比較して、車両制御とテストドライバーの実感が一致しない回数が増え、手動介入回数も増えており、手動介入回数の観点では負担軽減とはならなかった。しかし、手動介入の内容を分析した結果(表 6.3-1 手動介入まとめ(再掲))、路側センサーなしの場合はブレーキ介入が多いため、ドライバーは安全を確保するための緊張感をもって運行していたとみられる。一方で路側センサーありの場合はアクセル介入が主となっており、ドライバーが事故に繋がるような緊張感は少ない一方、後続車両に対する焦りが発生していることが考えられ、緊張感については軽減された可能性が考えられる。

表 6.3-1 手動介入まとめ(再掲)

	全走行回数(回)	ブレーキ介入(回)	アクセル介入(回)
路側センサーなし	48	16	0
路側センサーあり	45	5	30

ヒヤリハットは発生しておらず、自動運転車両を含む安全性向上に寄与すると考えられる。

今後は路側センサーの設置位置の検討や路側センサー情報を用いた車両挙動判断ロジックにおいて、安全性と円滑性を満足する調整を行い、ブレーキ介入、アクセル介入とも低減していくことが必要である。

## b. 遠隔監視システムに必要な機能に関するアンケート

遠隔監視型自動運転レベル 4 に向けてはバス車両操作の実装が必要であり、その内容については、交通局職員や企画政策課職員、テストドライバーいずれからも質問があり、特に関心が高いことが伺えた。

車両操作以外にも、今後は実運用を想定し、様々な状況への対応方法の検討が必要である。例えば以下のことが挙げられる。

- ・車内外で異常があった際の検知方法、遠隔監視側への通知方法
- ・降車ボタンが押された際の遠隔監視側への通知方法
- ・降車ボタンによるバス停の停車・通過判断
- ・運賃支払いの確認方法
- ・車椅子の方への対応

また、遠隔監視画面の分かりやすさについては、複数台を遠隔監視することを想定し、画面を固定するのではなく、走行している車両からの情報を認識して遠隔監視員にアラートする、参照したい車両や監視箇所を指定して拡大表示する等、遠隔監視員と協議してさらなる機能拡充が必要である。

## c. 遠隔監視型自動運転の社会受容性に関するアンケート

物理的なサポートをしてほしい時や車内でのトラブル時の対応については、常に係員がいることを求める人が 29 名中 10 名程度いることが確認された。無人運行の実現のためには、必要な時に係員が駆けつける対応で受け入れてもらう必要があり、受容性の向上が課題である。本実証では遠隔監視室を佐賀市役所市民ホールに設置し、市民等に実際に遠隔監視の様子を見てもらうことにより、遠隔監視による運行への理解醸成を図った。引き続き、自動運転バスおよび遠隔監視の実証実験を市民の目に触れる場所で行い、受容性を向上していく必要がある。

また、必要な時に駆けつける対応で受け入れられると回答した人の中にも、許容待ち時間は 5 分等短い時間の回答もあった。今後は、実運用を想定した遠隔監視・サポート体制や遠隔監視室の設置場所、および駆けつけ要員の待機場所を検討し、実際にどれだけの時間で駆けつけられるか、検証が必要である。

最後に本調査の課題を示す。今回の調査は佐賀市役所市民ホールに来所した市民等を対象に行い、普段バスを利用している人からも回答を得ることができた。運賃や運行情報を知りたい時等は誰もが想像できる状況であるが、物理的なサポートをしてほしい時(車椅子、障がい者)や個別の案内をしてほしい時(外国人、障がい者)等は想像して回答するのが難しいと考えられる。今後は車椅子利用者、障がい者、外国人等実際にバス利用時に困りごとが生じている人にヒアリングを行い、無人運行時の対応を検討する必要がある。

## 2) 通信システム等の導入による業務フローや運行経路、人員配置等の見直し等、地域交通の持続性への寄与度

## (1) 実施結果

本実証では遠隔監視システムのアンケートを実施したものの、継続した監視は行わなかったため、遠隔監視型のレベル 4 車両の導入に向けた検討を今後行う必要がある。

## (2) 考察

遠隔監視システムの導入に向けての検討を取り上げたが、自動運転バスの車内に乗務員(運転手以外も含む)がない場合の駆けつけ要員等の運行をサポートする人員、体制についても検討を行う必要がある。

## 3) データの処理・管理に係る運用等のセキュリティ対策

### (1) 実施結果

- 自動運転システム・遠隔監視システムに係るセキュリティ対策
  - ・ 自動運転車両においては、外部との間にファイアウォールを設置しセキュリティを確保するとともに、タイムスタンプ等により情報の鮮度について評価した。
  - ・ 遠隔監視システムに存在する通信経路はすべて暗号化されている状態で検証を実施した。
- 路側インフラに係るセキュリティ対策
  - ・ 4.6.1 3)にて記載した下記 2 点の対策を実施した。
    - ① 通信相手を識別するために設定した IP アドレス以外との通信を遮断する
    - ② ファイアウォールを有効にして不正アクセスを防ぐ
- 通信網に係るセキュリティ対策
  - ・ 今回の実証実験用に定めた IP アドレス以外とは通信しない設定にて検証を行なった。
- 通信内容は暗号化して送受信する
  - ・ モバイル通信そのものが暗号通信であることから、本実証実験では通信プロトコルにおける暗号化は実施していない。ただし、セキュリティ要件から、通信プロトコルにおける暗号化が必要な場合、DTLS を使用した CoAP 通信の暗号化は可能である。
- 遠隔監視関連
  - ・ 遠隔監視映像には乗客、自動運転車両の周囲に存在する車のナンバー等個人情報に該当する情報が含まれる。映像評価者等本実証で必要な最低限の人数のみ遠隔監視 GUI のアカウントを発行し、検証終了後は直ちにアカウント削除する対応を行った。

### (2) 考察

レベル 4 自動運転では、車両・路側インフラ・遠隔監視システム・通信網が一体となって運行を支えるため、統合的なセキュリティ確保が必要となる。本実証で実施された対策は、基礎的な安全性を確認する上で有効であったが、実装に向けては更なる拡張・継続的運用を検証する必要がある。

遠隔監視関連:アカウント作成～アカウント削除までの遠隔監視 GUI アカウント管理フローを社会実装時の運用を見据えて整備する必要があると考えられる。

#### 4) 通信システム(路車協調システムや端末を含む。)の維持管理・保守

##### (1) 実施結果

- 自動運転システム、遠隔監視システムに係る維持管理、保守
  - ・ 車両は3ヶ月点検を実施している
  - ・ ユースケース②開始前、ユースケース①期間中にHW担当者が遠隔監視機器一式の確認を実施。システム動作が問題無いことを確認した。
- 路側センサーに係る維持管理、保守
  - ・ 一般運行期間中(11/20、21、25、26、27、28)において、路側センサーが原因で正常に情報が通知できないケースは発生しなかった。
  - ・ 4.6.1 4)にて記載した維持管理・保守の通り、定期的な点検を実施した。なお、設置完了～撤去までの期間中、路側センサーの設置状況に問題は発生しなかった。
- 通信網に係る維持管理・保守
  - ・ 4.6.1 4)にて記載した維持管理・保守の環境下で通信を行なった。なお実証実験中に障害等は発生しなかった。

##### (2) 考察

今回の実証では、車両・路側インフラ・遠隔監視システム・通信網のいずれにも重大な障害は確認されず、現行の維持管理・保守手法により短期的な運用が可能であることが示された。しかし、レベル4の社会実装においては長期・常時・大規模運用が想定されるため、現状の点検中心の保守から、常時監視、予兆検知を中心とした維持管理へと高度化する必要がある。

## 6.6.2 効果検証

### 1) 通信システム等の運用の有無による手動介入回数・運行停止時間等の変化

#### (1) 実施結果

通信システムを用いて当該箇所における一般運行期間中と準備運行期間中の走行中の手動介入の有無を計測した。

その結果、

準備運行中:16回(48走行中) ブレーキ介入:16回、アクセル介入0回  
一般運行中:35回(45走行中) ブレーキ介入:5回、アクセル介入30回

となっており、路側センサーとの連携により停止傾向となり、右折待ち時間が増える傾向にある結果となった。これは車載センサー検知範囲外の情報や高架下にいる人等の検知により自動運転バスが停止しており、ドライバーの発進判断との相違があり、アクセルへの手動介入が発生していると考えられる。

## (2) 考察

レベル 4 実装に向けて路側センサーの活用が有効となると考えられるが、設置位置・検知する対象によって安全性と円滑性が必ずしも両立できないと判明した。このため、レベル 4 対象路線における課題点を洗い出し、自動運転バス単体では解決できない課題について通信システムを導入した場合の効果推定を行い、実際の導入に向けて評価することが必要である。

本実証においては路側センサー情報を車両制御に反映させた場合、設置なしの場合に比べて、ブレーキ介入の回数が減ったため、ドライバーの精神的負担は軽減されていると考えられる一方、アクセル介入が増えているため、路側センサー設置箇所における通過時間が増大している。このため円滑性に関する検討が必要となる。

## 2) 自動運転走行車を含む道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度

### (1) 実施結果

前項の結果より、自動運転バスへのブレーキ介入が減少(16回→5回)することで安全傾向にあるものの、アクセル介入が増えており、右折時の待機時間は増える傾向となっていることが分かる。このため後続車両が多い通常の交差点では時間あたりの車両通過台数が減少することとなり、道路交通全体の円滑性が低下する。

### (2) 考察

安全性と円滑性は裏表の関係にあるものの、通信システムの種類・使用方法によって両立できるポイント・手法があると推定されるため、継続検討が必要と考えられる。

## 3) 通信システム等による支援によるルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果

### (1) 実施結果

本実証では通信システム等を用いてルート設定等を行わなかったため、ルート変更や時間短縮の効果検証を行うことができなかったが、外部からの通信を用いた検証を行うことができたため、今後の検討に資するベースができたと考える。

### (2) 考察

外部情報を用いたルート、運行時間、利便性に関する取組について、対象とするサービス、路線等を

洗い出し、今後のレベル4導入において事業性を向上させる取組に繋げる。

4) 初期コスト・ランニングコスト負担の在り方、自動運転システムと他サービスの連携、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

(1) 実施結果

a. 実施結果

【初期コスト・ランニングコストの現時点での概算】

実証終了時点での初期コスト・ランニングコストの概算を以下に示す。

表 6.6-8 ユースケース①、②、③を構築するための必要経費

※金額は税抜

LTE レピーターの設置 (イニシャルコスト)	設備・機器費	レピーター/1局	※非公開※
	設置工事費	調査・建設・撤去費含む	395万円
UC2 通信輻輳度・通信品質 Web API 運用	クラウド利用料	Azure クラウド/3か月	1万円
遠隔監視システムの運用	通信費	楽天モバイル SIM/2枚/6か月	2万円
路側センサー・自動運転車両システムの運用	通信費	楽天コミュニケーションズ 固定グローバルIPアドレス SIM/4枚/6か月	10万円
路側センサーシステムの製作・設置(イニシャルコスト)	設備・機器費	LTE ドングル通信機/1局	2.1万円
		カメラセンサー/1台	1.5万円
		LiDAR/1台	※非公開※
	改修費		16.2万円
	支持柱・基礎新設工事費/1箇所		117.3万円
	設置工事費/1箇所		172.8万円
システムの運用	カメラレンタル・クラウド利用料	Safie クラウド/1年・1台	42.6万円
	保守PCレンタル利用料	保守PC/1年・1台	11万円
遠隔監視システム機能開発(イニシャルコスト)	ソフト開発費	システム一式	700万円
通信システムその他設備機器(自動運転車両含む)	自動運転バス車両(EV) V2N/N2V 各種端末車載用部品製造		※非公開※
合計			1,471.5万円

※記載の金額は実証中における参考価格であり、実装時は諸条件に応じて大きく変動する可能性が

ある。

※設計・設置・運用に係る人件費等は別途必要。

車両、メンテナンス施設、インフラ等機器の導入においては、コスト面でハードルが高くなる傾向がある。その要因として下記が考えられる。

- ・機器の導入は、実証実験や初期導入に対する補助金による支援が主（運用に伴う保守、バージョンアップ等の更新は、議論が不十分）
- ・設置方法、運用方法等が地域の特性に依存されることもあり、個別対応を要する
- ・路車協調による設置場所が制約され、数量に限られる為、個別の需要に応じて機器調達が必要となる

また、自治体の所管する道路に関しては自治体を中心となって機器を調達する必要があることもあり、財政力、企画力、牽引力のある自治体以外は導入が困難になりかねないという行政上の課題も想定される。

・遠隔監視システム機能開発費については、開発した機能は本検証を行った環境固有のものではなく横展開が可能である。社会実装の広がりによらない実装 1 件あたりの費用を抑えることが可能になる。

## (2) 考察

現況を踏まえ、今回設置したインフラ機器に関するコスト低減策、コスト負担の在り方については、以下の部分を加味することで、導入ハードルを抑制させることが可能と思われる。

### ◇コスト低減策について

機器自体の価格低減と運用面・調達面で工夫することで、コスト低減が可能となる。

#### ① 機器自体の価格低減

- ・市場規模確保を前提とした機器の統一化
- ・ボリュームディスカウントによる価格低減
- ・車両側、路側機側のインターフェースの標準化

（自治体、車両メーカーごとに都度準備するのではなく仕様等の共通化を図る）

- ・設置性の向上

簡易設置/工事短縮設計(オートキャリブレーション機能等)による人的作業の手間の削減

#### ② 運用費用の削減

リモートメンテナンス機能および保守部材の長寿命化による保守頻度の低減等の人的費用の削減と、バリューエンジニアリング(VE)・リサイクル化等による保守部材価格の低減

#### ③ 調達・契約面での工夫

自治体個別に導入するのではなく、プラットフォームを貸与できる仕組の構築の検討、サブスクリプションモデル等で、小規模な自治体でも導入ハードルを下げる工夫も必要

#### ④ 他用途での活用

公共自動運転バス以外にも安全運転支援等の他車両への活用や他の交通事業者での活用といった多用途での展開

#### ◇コスト負担の在り方について

自動運転バスを運用する交通事業者 1 社では、導入時の初期費用以外の運用面も考えると賄うことが難しくなるため、様々な方法を今後検討していく必要がある。例えば、受益者負担方式を重要視するのであれば、自動運転車両を使用する交通事業者以外でも複数の事業者で利用できるようにすることで、シェアリング等による負担の分散を図る施策が求められる。またそれを活用した新サービス、ビジネスモデルについても今後検討していく必要がある。一般車両にも有用な新サービスを開発できれば、さらに負担の分散を図ることが可能になる。以上のような対策を講じない限り、自動運転バスの導入が補助金頼りとなってしまうため、たとえ導入時の初期費用が賄えたとしても、安定的なインフラ設備の維持管理を行うことが困難となり、先細りが懸念される。

## 6.7 レベル 4 社会実装に向けた考察

レベル 4 自動運転移動サービスの社会実装に向けては、通常の移動サービスに比して高額なインシヤルコストに加え、インフラ設備維持や通信費等様々なコストが生じることとなる。これらのコストを一つの自動運転サービスで負担することはサービス継続性の観点から課題があると考えられ、この負担を複数の事業者、地域、もしくは自動運転サービス以外のサービスで使用し利益享受者を増やすことにより、1 サービスあたりのコスト減に取り組む必要があると考えられる。

本実証では路側センサー情報を用いて安全性、円滑性の向上を図ったが、これらについても、走行ルート上のあらゆる交差点に取り付け、維持することは困難であり、設置箇所のガイドライン等の整備が望まれる。

車両においても現時点では既存車両に自動運転システムを搭載したものがほとんどであり、今後大量生産によるコスト効果に加えて、技術革新によるシステムコストダウンに向けた取組がより一層必要となると考えられる。

技術面については、路側センサーとの連携により安全性は向上したと考えられる一方で、円滑性については必ずしも改善しなかった。これは、路側センサー情報と連携した車両挙動判断ロジックが安全側に寄った判断を提示している可能性を示唆している。路側センサーの設置位置や検知範囲、車両挙動判断ロジックのチューニングにより、安全性と円滑性を両立する取り組みが必要である。

運行サービス面については、自動運転サービスの社会実装に向けて走行技術を高めるだけでは不十分であり、バスという公共交通サービスとして必要な機能の自動化、遠隔対応化が欠かせない。異常検知と通知、運賃収受の自動化、車椅子利用者や障がい者への対応等は、公共交通サービスを支えるために不可欠な機能であり、実際の利用者に対するヒアリング等に基づいて対応を検討する必要がある。また、検討や技術実証のみならず、技術の広報・周知、体験乗車、遠隔監視室の公開等により、社会受容性を向上させていくことも重要である。

体制面については、遠隔監視型レベル 4 自動運転においては、車内の保安員に代わり、遠隔監視により異常事態に対応するため、従来とは異なる遠隔監視システムと体制が必要となる。複数台を効率的に見られるインターフェースや重要イベントの自動アラート化等遠隔監視システム、画面の改良に加えて、現場駆けつけ要員の配置等遠隔監視体制を含めた検証が必要である。

事業性面については、機器自体の価格低減（標準化によるスケールメリット等）、運用費用の削減、調

達・契約面での工夫(自治体個別での導入ではなく、プラットフォームの貸与等)、多用途での活用(公共自動運転バス以外の車両への活用等)によるコスト低減策が考えられる。現在のインフラコストは交通事業者 1 社が単独で負担するモデルでは成立せず、自動運転車両の交通事業者以外でも利用できるようにしたり、一般車両にも有用なサービスを提供したりすること等により、負担の分散を図る必要がある。

以上の取り組みの推進のためには、行政、自動運転ベンダー、通信事業者、遠隔監視ソフトウェア会社等の多様な関係者の継続的連携が必要である。

## 7. 本実証の総括

---

### 7.1 本実証の成果・課題

#### 7.1.1 成果

##### ユースケース①:

電波不感エリアであったトンネル内部において、LTE レピーターの適切な配置により通信環境の改善が図られ、遠隔監視オペレーションに耐えうる電波環境の構築に成功した。これは、基地局が建設できない地域への電波延伸として LTE レピーターが効果的である可能性を示した。

##### ユースケース②:

通信輻輳という困難な状況下における情報伝送安定化に向けた運用知見を獲得した。具体的には、輻輳時における遠隔監視映像送信に必要な「最低限画質」を特定し、OSS の輻輳関連指標値の閾値を部分的に求めることに成功した。これにより、輻輳時においても画質変更等の対応により遠隔監視映像の送信を安定して継続できる可能性を示した。

##### ユースケース③:

路側センサーの捉える情報の捕捉率・精度ともに良好であることを確認できた。路側センサーからのデータは自動運転バス側で安定して受信できており、通信遅延値も許容値内であった。これにより、自動運転車両から死角となる領域において路側センサー情報による支援が有効な対策になる可能性を示した。

#### 7.1.2 課題

##### ユースケース①:

複雑な地形のトンネルにおける電波延伸手法の更なる検証が不可欠である。マルチホップの導入や新しい技術を活用した電波延伸手法について検証する必要がある。また、社会実装に寄与するために次世代通信技術である 5G を電波延伸可能なレピーターの早期検証が喫緊の課題として挙げられる。

##### ユースケース②:

極度の輻輳状態においては、ネットワークスライシング、キャリアアグリゲーション等の技術を活用し、利用可能な帯域を確保する方策を具体的に検討する必要がある。また、走行時における最適な画質の追求や、動画ではなく静止画の高頻度な送信の検討等、社会実装を見据えたより実践的な検証も必要である。

##### ユースケース③:

路側センサー連携により安全性が向上したと考えられる一方で円滑性が損なわれる結果となった。今後の路車協調型自動運転の実用化にあたっては、路側センサー情報の遅延要因の分析および対策、路

側センサー情報を活用した適切な車両制御ロジックの確立等といった施策を通じて、路車協調型自動運転システム全体の連携・調整が求められる。

### 7.1.3 社会実装に向けた展望

通信条件不利地域においても、LTE レピーターの設置等通信環境の対策を行うことで安定した遠隔監視映像の通信が可能になることが確認できた。通信輻輳環境においては、通信遅延値の最小化を行うためには通信状況に合った映像送信ビットレートを採用するシステムが必要になることがわかった。ビットレートの最適化は通信データ量の最適化にもつながり、ひいては運用時のコストに影響を及ぼす部分であるため、安全な遠隔監視の遂行に必要な安定した映像送信を最適なコストで実現できるよう、自治体・交通事業者・通信事業者と連携して社会実装に向けた確認を行っていく必要がある。

また遠隔監視に必要な機能に関するアンケート結果で得られた、運行時に必要となる機能の開発を進め、社会実装を見据えた実運行フローでのシステム動作確認と改善を実施していく必要があると考えられる。

さらに、本実証では、自動運転における手動介入の頻度が高い懸念のある無信号交差点での右折において、路側センサーを用いた路車協調システムの有効性を確認することができた。路側センサー情報の活用による運行時間の短縮や運行経路の柔軟な選定等については、活用方法も含めて今後の課題である。

社会実装を見据えた場合、事業性の確保のため、自動運転車両の運用の自由度を高め、稼働率を向上させることが重要である。本実証で得られた成果は、自動運転で走行可能な範囲の時空間的な拡大に資する技術であり、間接的に事業性の向上に寄与し、自動運転の社会実装を促進するものである。

また、安全性は交通にとって重要なファクターであり、路側センサー情報を用いた自動運転車両の車両挙動判断において安全性が向上する傾向が得られるとともに、円滑性について自動運転車両の挙動判断とドライバー意図との一致性という観点から右折に要する時間についての新たな検証課題があると判断でき、今後も継続した調査を行う必要がある。

これらの成果と課題解決を技術的に成立させるのみならず、安全かつ持続可能なサービスとして実現する必要がある。技術面では多様な環境条件や異常時の対応等、実運用を想定した網羅的な検証を行う必要がある。また、異常時の対応については、技術実証のみならず、現場駆けつけ要員等の運行をサポートする体制についても検討を行う必要がある。社会受容性面では、技術実証と並行して利用者や周囲の交通参加者に対する広報・周知を行うことで社会受容性を醸成し、新技術の円滑な社会実装、ひいては自動運転サービスの利用者確保につなげていく。これらの取り組みを推進するためには、行政、自動運転ベンダー、通信事業者、遠隔監視ソフトウェア会社等の多様な関係者の継続的連携が必要である。

## 7.2 社会実装に向けたロードマップ・取り組みの発展性

佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク間におけるレベル4実装に向けた取組内容は下表の通りである。2028年度までの実証を通じて段階的に体制構築、技術開発、インフラ整備等を行う。

表 7.2-1 安全面に関する取組とスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1) 運行設計領域(ODD)の設定	1) 運行設計領域(ODD)の設定	・許認可申請に向けたODDの整理(レベル4区間:佐賀駅北口～商業校門前)⇒走行環境条件付与申請等の許認可申請	・ODD 拡張申請に向けた実証(レベル4区間:佐賀駅北口～SAGA サンライズパーク)⇒走行環境条件付与申請等の許認可申請	・ODD 拡張申請に向けた実証(佐賀駅バスセンター～SAGA サンライズパーク)⇒走行環境条件付与申請等の許認可申請	・実装(乗務員乗車型)
(2) 自動運転システムの構築	1) インフラ協調システムの構築	・運行実証の実施(アパホテル前交差点での信号連携) ・警察・関係機関協議	・信号連携システムの構築(ソフト・ハード整備)	—	・実装(乗務員乗車型)
	2) 遠隔監視・支援システムの構築(自動運転システム、車内安全システム)	【遠隔監視型に向けて】 ・遠隔監視・支援システムの検討	【遠隔監視型に向けて】 ・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	【遠隔監視型に向けて】 ・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
(3) 走行環境の整備	1) 路上駐車対策の実施	・対策の実施に向けた警察・関係機関協議等	・路上駐車対策の実施(看板の設置等)	—	—

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

表 7.2-2 運行サービス面に関する取組とスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1) 乗降場の設定	1) 乗降場の設定	・運行実証の実施 (乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装 (乗務員乗車型)
(2) 運行計画の設定	1) 運行ダイヤの設定	・運行実証におけるダイヤの設定、検証	・2029年の実装を見据えたダイヤを設定 ・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装 (乗務員乗車型)
	2) 運賃收受方法の検討	・運賃收受方法の検討(決定)	【遠隔監視型に向けて】 ・完全キャッシュレス時の運用方法検討	—	・実装 (乗務員乗車型)
	3) 長期運用を見据えた需要の検討	・利用実態の検証 ※平常時における有償・長期運行における需要把握 ・長期運行需要の取りまとめ	・試運転・慣熟走行(乗務員乗車型)における利用実態の整理	・試運転・慣熟走行(乗務員乗車型)における利用実態の整理	—
(3) 保管場所・充電設備の検討	1) 保管場所・充電設備の検討	★交通局建替工事 ※運行実証時の保管場所等については別途検討	★交通局建替完成 ※試運転・慣熟走行時の保管場所等については別途検討	★交通局建替後 供用開始予定(EV充電設備使用可能)	・実装 (乗務員乗車型)

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

表 7.2-3 技術面に関する取組とスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1)自動運転の高度化	1) 無信号交差点における歩行者検知技術の高度化、検証	・技術開発 ・運行実証の実施(各無信号交差点での自転車検知)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
	2) 交差点右折制御の高度化、検証	・技術開発 ・運行実証の実施(右折先横断歩道歩行者検知)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
	3) 交通渋滞対応の高度化、検証	・技術開発 ・運行実証の実施(アパホテル付近無信号交差点对応)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
	4) 路上駐車車両回避技術の高度化、検証	・技術開発 ・運行実証の実施(複数台駐車車両対応)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行におけるデータ取得(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

表 7.2-4 体制面に関する取組とスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1)運行体制の構築	1) 運行体制の構築	・運行実証の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
	2) 緊急時の体制の構築(車両・自動運転システムのトラブル等)	・運行実証の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)

	3)維持・管理体制の構築(車両・自動運転システムのメンテナンス等)	・運行実証の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)
	4)市交通局との連携	・運行実証における運転手、遠隔監視員の確保(佐賀市交通局) ・運転手、遠隔監視員の訓練	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型)	・実装(乗務員乗車型)

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

表 7.2-5 経済面に関する取組とスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1)車両の調達	1)車両の調達	★交通局建替工事実施	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型) ★交通局建替完成	・試運転・慣熟走行の実施(乗務員乗車型) ★交通局建替後供用開始予定	・実装(乗務員乗車型)
(2)運営コストの整理	1)運営コストの整理	—	—	—	—
(3)運賃以外の収入施策の検討	1)他予算を活用した対応の検討	・実証実験の実施(施策の検証) ※要調整	・実証実験の実施(施策の検証) ※要調整	—	—

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

表 7.2-6 運行に関する許認可取得のスケジュール

小項目	取組内容	2026(R8)年度	2027(R9)年度	2028(R10)年度	2029(R11)年度 【乗務員乗車型】
(1)関係法令への対応	1) 関係法令への対応 道路運送車両法への対応	・2026年12月頃： レベル4許認可申請の相談 ・2027年3月頃： 一部レベル4として許認可の申請手続きを開始(書類提出・審査)	—	—	・実装 (乗務員乗車型)
	1) 関係法令への対応 道路交通法への対応	—	・許認可の申請手続き (書類提出・審査)	—	
	1) 関係法令への対応 道路運送法への対応	—	・許認可の申請手続き (書類提出・審査)	—	

出典:実用化計画(2024年度作成)より作成

- LTE は、欧州電気通信標準協会(ETSI)の商標または登録商標である。
- その他、本書に掲載の商品名称やサービス名称等は、一般に各社の商標または登録商標である。
- 本書における各社の商標記載においては™や®等の商標表示を省略する場合がある。



地域社会 DX 推進パッケージ事業(自動運転レベル 4 検証タイプ)

安全な自動運転に資する通信システム等の検証に関する調査研究(実証地域:佐賀県佐賀市)

実績報告書

トンネルを含む中山間地域・大規模イベント等条件不利地域におけるレベル 4 要件の遠隔監視に向けたデータ伝送の安定性確保、路側センサー連携車両制御の実証

---

2026 年 1 月

楽天モバイル株式会社・佐賀市自動運転実証コンソーシアム

---