

地域デジタル基盤活用推進事業(自動運転レベル 4 検証タイプ)

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

実績報告書

2025年1月30日

BOLDLY 株式会社

ぬかびらトンネル自動走行実証機関(コンソーシアム)

目次

1.	実証の背景・目的	1
1.1	実証の背景	1
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
1.3	実証の目的	2
1.4	最終目標・構想イメージ	3
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	5
2.	業務実施体制	6
2.1	実証機関	6
2.2	実施体制図	6
3.	自動運転の運行結果	7
3.1	運行場所	7
3.1.1	走行ルート	7
3.1.2	トンネル周辺の電波環境	8
3.2	運行期間	8
3.3	運行時間帯・頻度・運行方式	8
3.4	運行管理者	9
3.5	運行体制	10
3.6	自動運転車両の特徴	11
4.	実証の手法	13
4.1	自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証	13
4.1.1	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	13
4.2	交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証	21
4.3	見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携	21
4.4	明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証	21
4.5	高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上	21
4.6	経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証 ..	21

4.7	レベル4の社会実装に向けた検討	21
4.7.1	運用検証	21
4.7.2	効果検証	23
5.	通信システムに関する構築	25
5.1	通信システムの全体像	25
5.2	遠隔監視システムの全体像	27
5.3	使用機器・ソフトウェア一覧	28
5.4	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	30
6.	実証結果・考察	31
6.1	自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証	31
6.1.1	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	31
6.2	交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証	66
6.3	見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携	66
6.4	明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証	66
6.5	高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上	67
6.6	経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証 ..	67
6.7	レベル4の社会実装に向けた検討	67
6.7.1	運用検証	67
6.7.2	効果検証	68
7.	本実証の総括	69
7.1	本実証の成果・課題	69
8.	参考資料	72
8.1	トンネル内自動走行(自己位置認識)における調査報告	72
8.2	糠平湖エリア内トンネルの電波対策報告(基地局固定化)	74
8.3	通信環境に応じた遠隔監視システムの最適化プログラムの検討	79
8.4	実証環境と取得データ詳細	81

1. 実証の背景・目的

1.1 実証の背景

北海道上士幌町では、広大な行政面積をカバーするため、農村地域福祉バスのデマンド化や市街地での自動運転バスの活用など、利便性が高く持続可能な交通網の構築に向けた取り組みを進めている。特に自動運転バスについては、2017 年より実証実験を開始し、段階的な検証を経て、2022 年から定期運行を開始している。さらに、2024 年度中には市街地での一部区間におけるレベル 4 の運行実現を目指し、各種申請手続きを進めている。

上士幌町市街地周辺の農村地域については、これまで乗車数が少なかった定時定路線型の福祉バスをオンデマンド運行¹に移行する実証実験を行い、令和 4 年度からオンデマンド運行を本格的に導入している。その結果、自動運転バス 1 便当たりの乗車数を向上させながら、定時定路線型の運行と比較して便数を減少させ、運行を最適化させている。利用率が向上するとともに、運行回数も定時定路線型と比較して減少している。上士幌町では、市街地周辺の農村地域での取り組みを踏まえて、自動運転サービスの提供エリアの拡大を検討している。

一方で、市街地から約 23km 離れたぬかびら源泉郷は、キャンプ場やスキー場、源泉かけ流しの温泉などを有する上士幌町の主要な観光地であり、多くの町民が居住し観光客も訪れる地域である。現在、この地域への移動手段は十勝地域のバス会社が運行する路線バス(1 日 4 便)のみである。しかし、運転手不足や時間外労働の上限規制といった課題から、近い将来、減便や路線廃止の可能性が検討されている。そのため、「上士幌町市街地-ぬかびら源泉郷間」の交通の在り方について、早急に検討を進める必要があり、自動運転バスは課題解決策として考えられている。

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

今回レベル 4 自動運転の社会実装に取り組む上士幌町市街地からぬかびら源泉郷までの走行ルートについては、これまで市街地で進めているレベル 4 自動運転より技術的に高度な要件が求められると想定される。具体的には、山間部の通信不感エリアにおける常時遠隔監視に向けた通信接続確保の要件である。また、想定されている走行路は 20km を超えており、これは上士幌町市街地で運用されている自動運転バスの走行距離の 5 倍に相当する。そのため、利便性向上のために現状の 20km/h の運行速度を向上させる必要があり、既存の自動運転運行よりも技術的に高度な要件が求められる。

このように、上士幌町市街地-ぬかびら源泉郷間で自動走行を実現するためには市街地以上に技術的に高度な要件が存在する。そのため計画段階の調査として、通信環境整備方法の検討や、走行ルートの 3D 点群データを活用したシミュレーションを実施した。調査の結果、ほぼすべての区間において、一般的な基地局配置による通信環境整備が有効であり、自己位置推定ができることを確認した。しかし、トンネルに関しては、以下の 2 つの課題が明らかとなった。

¹ 乗客の予約に基づいて、自動運転バスを走行させる運行形式。

(ア) 周辺一帯が5G／4Gのサービスエリアであっても、トンネル区画においては、基地局からの電波が漸減し電波が微弱となるため、安定的に基地局に接続し遠隔監視することができない可能性が高い。

(イ) トンネル区画内での自動走行は衛星からの GPS 信号を補足できないため、予め車両にインプットされた 3D マップと車載センサが測定する 3 次元点群データ(測定データ)を比較分析して、自己位置推定を行う必要があるが、トンネル内は起伏に変化がなく同じ形状が続くことで 3D マップと測定データの比較分析で推定する自己位置にズレが生じ、長距離トンネルであるほど途中で自動走行ができなくなる可能性が高い。

(イ)の課題については、通信システムの信頼性確保を検証するという事業の目的にそぐわないことから、本実証の車両走行にあわせて、実験を行った。その結果は、参考資料(8 章)に示すこととする。

また、レベル 4 自動運転を社会実装するうえでは、事業性の検証は不可欠である。具体的には、市街地や市街地から離れた地域への移動需要を踏まえ、適正な車両台数を算出したうえで、レベル 4 自動運転の導入による費用対効果を試算していく必要がある。自動運転サービスでは、運行台数が増えることで遠隔監視やインフラ連携に係る機器の一台当たりの固定費が縮減されるため、運行費用の低減度合いを考慮しつつ、費用対効果の最適なバランス点を模索することが求められる。一方で、本町のような人口密度が低い地域では、運賃収入だけで費用を賄うのは難しいと想定される。このため、運賃以外の収入や外部経済効果を含めたレベル 4 無人自動運転移動サービスの事業性に関する指針を確立する必要がある。

さらに、レベル 4 自動運転実現による無人走行を進めるにあたっては、社会受容性の観点から町民の理解を深める取り組みが重要となる。上士幌町では、自動運転車両(ARMA)を用いたレベル 2 自動運転の運行を継続しており、歩車混在空間での低速走行に対する町民の理解が徐々に醸成されている。この市街地での取り組みに加え、中長距離の実証走行を実施することで、ぬかびら源泉郷の住民にも無人自動運転サービスの受容性を高めていく必要がある。

1.3 実証の目的

本実証では、上士幌町市街地-ぬかびら源泉郷間のレベル 4 自動運転の社会実装に向け、技術要件を明らかにし、事業性及び社会受容性の課題に取り組む事でレベル4自動運転が実現可能であると考えている。

その上で交通コストを削減しながら利便性を高め、少子高齢化が進む中山間地域においても持続可能な交通網の構築を目指していく。

1.4 最終目標・構想イメージ

上士幌町「地域公共交通計画」においては、以下のような将来像の構想と施策の方向性を策定している。

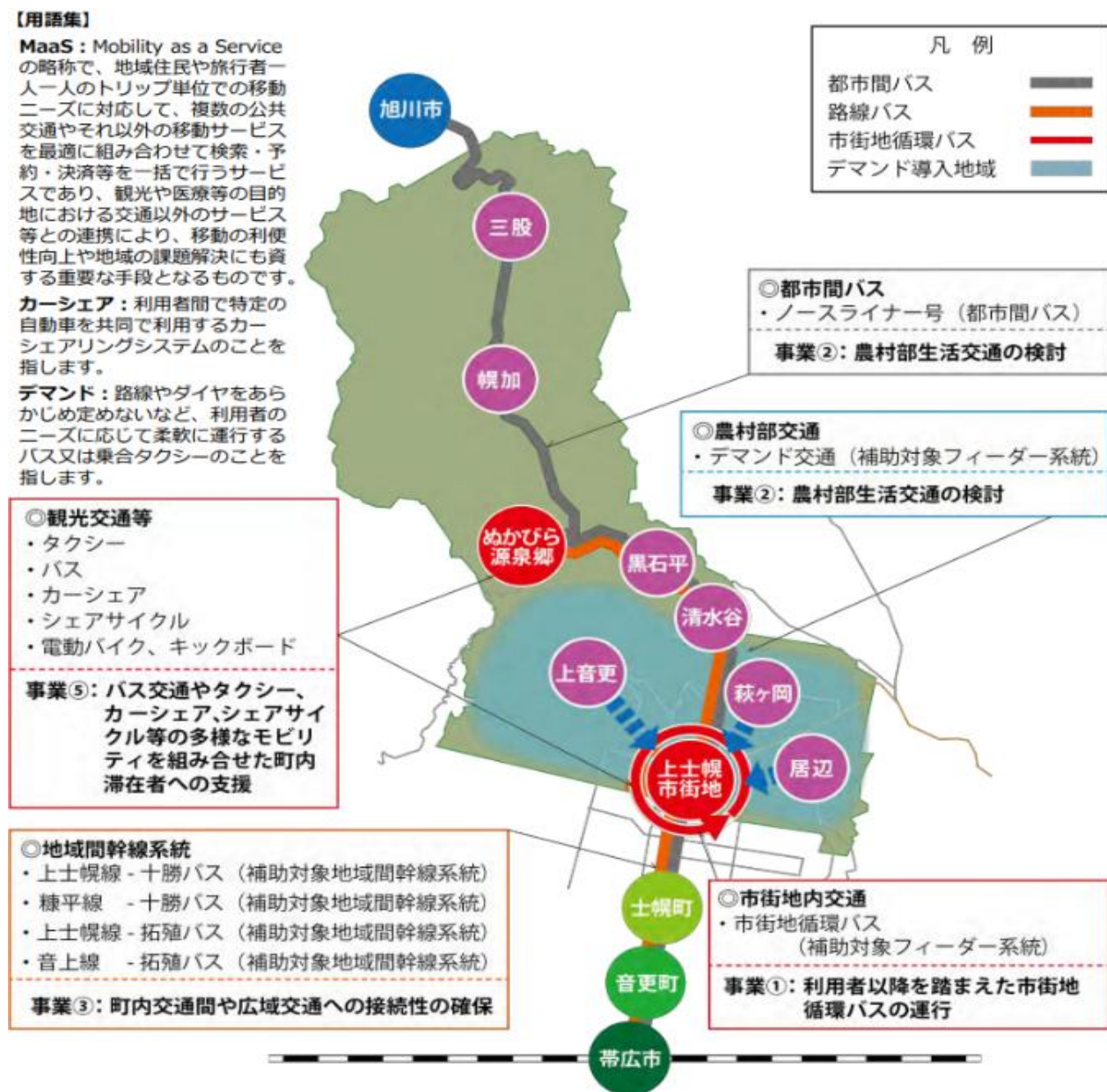


図 1-1 「上士幌町内公共交通網の将来像」

出所：北海道上士幌町「上士幌町地域公共交通計画」2より株式会社 BOLDLY 作成

その実現に向けて、自動運転バス事業は、「市街地内の課題：事業①利用者意向を踏まえた市街地循環バスの運行」「農村地区の課題：事業②農村部生活交通の検討」「ぬかびら源泉郷の課題：事業⑤バス交通やタクシー、カーシェア、シェアサイクル等の多様なモビリティを組み合わせた町内滞在者への支

² https://www.kamishihoro.jp/dl.php?up_code=7200

援」の 3 つの課題にかかる事業として進められている。市街地の課題については、既存交通の市街地循環バス(コミュニティバス)の運行しない曜日・時間帯に町内を自動運転バスが循環することで、町民ニーズや来訪者ニーズを踏まえた運行を行ってきた。今回の実証により、「事業③:町内交通間や広域交通への接続性の確保」にて挙げられている点について、市街地だけではなく、農村地区やぬかびら源泉郷での自動運転の活用にもまで範囲を広げて実装していくことで、町民及び上士幌町滞在者が安全で快適に生活・移動できるまちの実現を目指す。

レベル 4 自動運転実現に向け、レベル 2 自動運転による定期運行が開始されており、自動運転の運行体制も既に構築されている。運行については、地域の交通事業者が自動運転バスオペレーターとして運行に携わっており、遠隔監視についても、町の交通拠点である「上士幌町交通ターミナル」内に遠隔監視室が整備されている。レベル 4 自動運転実現までの定期運行の事業費については、ふるさと納税指定寄付により数年分は確保されており、レベル 4 自動運転実現後の費用については、上士幌町が現在の公共交通に振り分けている予算を自動運転に振り分けることを想定している。また、上士幌町はゼロカーボンシティ宣言を表明しており、これまでバイオマス発電やスマート農業など様々な取り組みを実施し、2022 年 4 月 26 日に発表された全国 26 か所の「脱炭素先行モデル地域」に選出されている。自動運転バスを活用し、「ゼロカーボン上士幌の実現」と「スマートタウンの構築」を目指す。



図 1-2 「上士幌町脱炭素先行地域提案概要」

出所：北海道上士幌町「上士幌町脱炭素先行地域計画書」より株式会社 BOLDLY が作成

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

本実証実験は、上士幌町地域交通計画「事業③：町内交通間や広域交通への接続性の確保」にて位置付けられている上士幌町市街地-ぬかびら源泉郷間の移動について、現在負担しているコストの削減を図るだけでなく、少子高齢化による担い手不足や、時間外規制による減便・廃線といった将来的に懸念される移動手段の確保問題に対応するための検証を行う。

表 1-1 ぬかびら源泉郷への自動運転バス適応性について

地域の特徴	ぬかびら源泉郷は温泉施設だけでなく、糠平湖、タウンユベツその他橋梁、スキー場等、上士幌町の観光資源が集約されたエリアとなっている。町内市街地の次に大きい集落となっているが、高齢化も進行しており運転者不足などの理由によって民間バスの走行が途絶えてしまうと居住者にとっては死活問題である。
事業面	観光資源が集約されたエリアへの走行は居住者の足としてだけでなく、観光事業への活用なども将来においては可能と考えている。市街地から観光地までの輸送ルートを自動運転車両で実現し、民間バス会社とも連携することで、交通ターミナルを中心に効率的な運用を行う事が可能である。
技術面	本ルートは市街地から山間部に抜ける国道であり峠を越えて旭川に抜ける北海道の主要幹線路となっている。そのため交差点を人や車が行き来する市街地とは異なり、国道を一直線に抜ける山間ルートとなっている。不感地帯が存在するエリアであり、橋梁やトンネルを走行するという市街地にはない環境での実証を通して自動走行のための交通インフラの技術検証を進める事ができる。
社会受容	ぬかびら源泉郷に自動運転バスを走らせる事で、より広く町民に対して自動運転への理解を深めるとともに、十勝エリア及び他の自治体にも波及できるようなモデルケースを作っていく。

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

表 2-1 実証機関

代表機関	法人名	BOLDLY 株式会社
	代表者氏名	代表取締役社長 兼 CEO 佐治 友基
	所在地	東京都港区海岸1丁目7番1号
	業務の概要	自動運転システムの提供
構成員	法人名	ソフトバンク株式会社
	代表者氏名	代表取締役社長 宮川潤一
	所在地	東京都港区海岸1丁目7番1号
	業務の概要	通信サービス事業者
	構成員とする理由	国内の第一種電気通信事業者

2.2 実施体制図

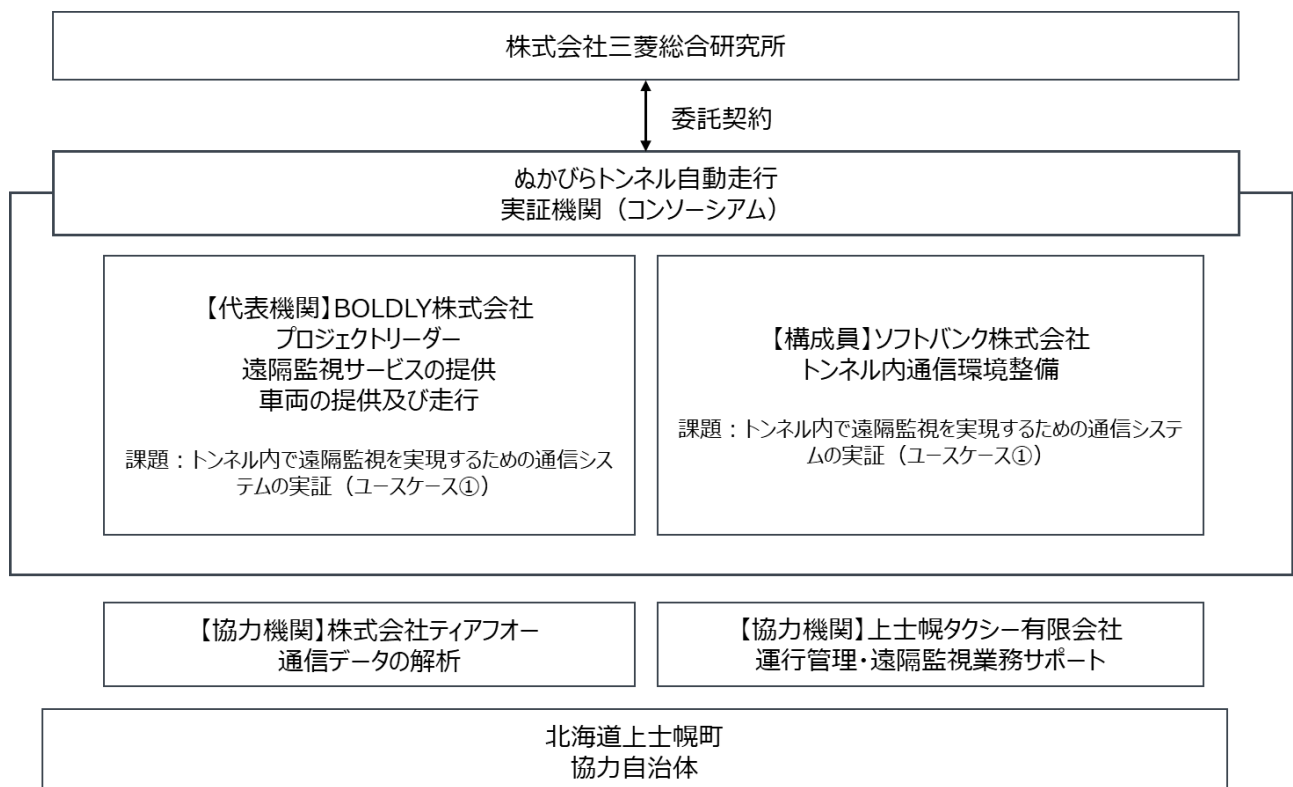


図 2-1 実証実施体制

3. 自動運転の運行結果

3.1 運行場所

3.1.1 走行ルート

ぬかびら源泉郷までの道のりにおいて複数のトンネルと覆道があり、その区画にはLTE(5G/4G)の不感地帯が存在する。本実証では、トンネルによる不感地帯を対象エリアとして検証を行う。図 3-1 は走行ルートの全体を示している。走行ルート内の以下の3地点をバス停車位置として設定した。

- バス停 A: 上士幌交通ターミナル 北海道河東郡上士幌町上士幌東3線
- バス停 B: 東大雪自然館 北海道河東郡上士幌町ぬかびら源泉郷48-2
- バス停 C: ぬかびら発電所前 北海道河東郡上士幌町黒石平

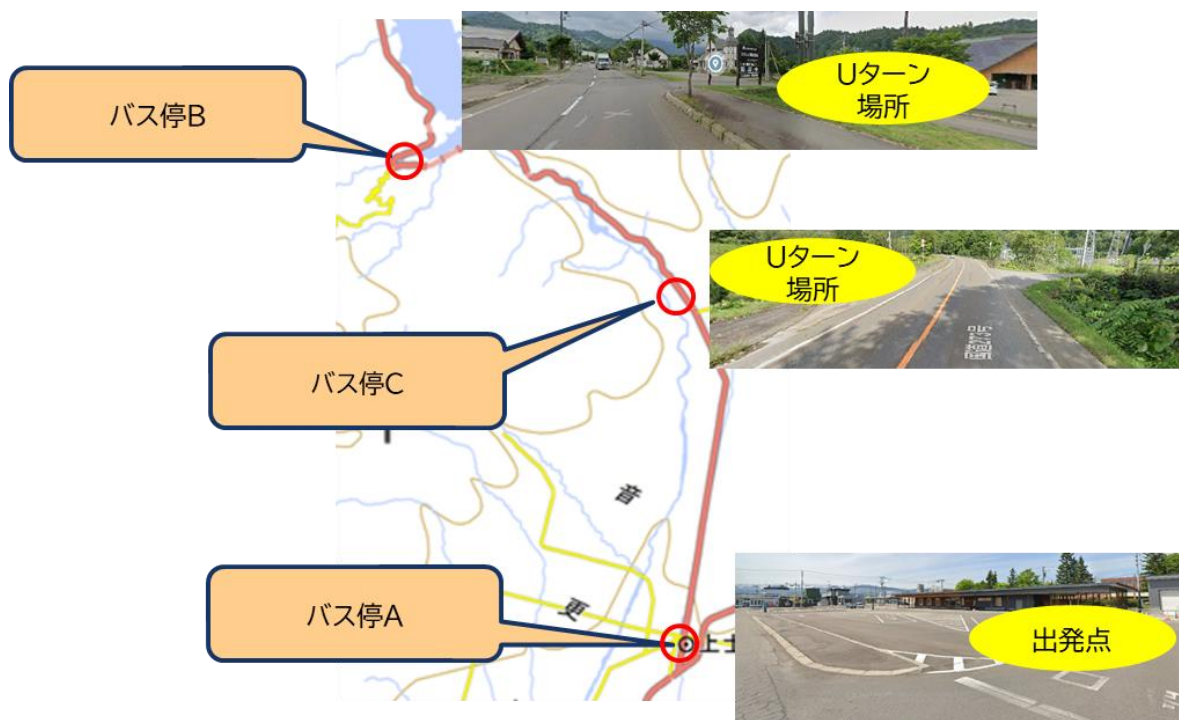


図 3-1 走行ルート全体図(出典:国土地理院)

3.1.2 トンネル周辺の電波環境

走行ルートの事前調査として、本実証で利用するソフトバンクの通信サービスエリアを調査した。道路上の水色の部分がサービスエリアを示しているが、通信品質が低く、携帯電話のアイコン表示では1本の状態であった。また、トンネル内部は不感エリアとなっており、一切の通信ができなかった。

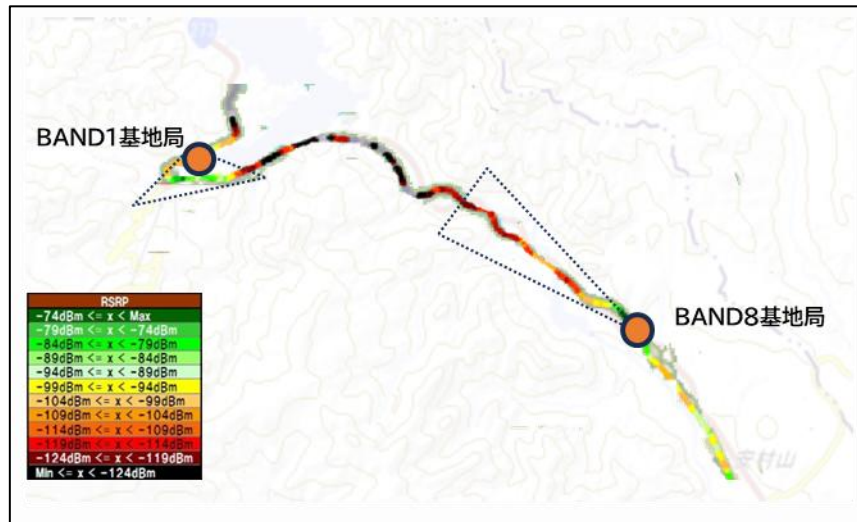


図 3-2 トンネル周辺の電波環境(出典:国土地理院)

3.2 運行期間

表 3-1 運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	6月24日(月)～7月5日(金)
関係者試乗運行	7月8日(月)メディア試乗会 7月 11 日(木) 関係者視察会
一般運行等	7月8日(月)～7月19日(金)までの平日 8 日間
その他運行	なし

3.3 運行時間帯・頻度・運行方式

1. 経路① 出発と帰還

自動運転バスは朝バス停 A を出発し、バス停 C まで手動走行する。バス停 C に到着後、バス停 BC 間で実証走行を実施する。実証終了後はバス停 C からバス停 A に手動走行で帰還する。この間の走行速度は法定速度(60km/h 以下)とする。出発及び帰還時にも遠隔監視を行うが、電波測定はバス停 BC 間のみで実施する。

2. 経路② 実証走行

バス停 C からバス停 B までの約 6km を実証区画とし、複数回に分けて自動走行にて往復する。本区画は自動走行により速度：30Km/h 以下で走行する。バス停 C から出発し、バス停 B まで自動走行（下り）した後、インターバルを設けバス停 B からバス停 C まで自動走行（上り）、これを繰り返す。



図 3-3 データ測定区間(出典:国土地理院)

3. 運行ダイヤ

実証はバス停 A を午前9:30に出発し、午前に3往復の実証を行い、バス停 A に戻る。昼休み時間帯に追加充電を行い、午後13:30よりバス停 A を出発し午後3往復の実証を行い、バス停 A に帰還して1日の実証を終了する。経路①と経路②における運行時刻は以下の通りとなる。

表 3-2 運行ダイヤ

	系統名	午前便		午後便		走行距離
上士幌交通ターミナル	自動運転バス 体験乗車運行 (経路①)	9:00 (発)	手動 走行	13:30 (発)	手動 走行	片道 16km
ぬかびら発電所前		9:20		13:40		片道 6km
ぬかびら東大雪自然館	自動運転バス 実証運行 (経路②)	9:35 (着)	自動 走行	13:55 (着)	自動 走行	12km・3往復
ぬかびら東大雪自然館・ ぬかびら発電所間の往復		- 乗客なし -		- 乗客なし -		
ぬかびら東大雪自然館	自動運転バス 体験乗車運行 (経路①)	11:00 (発)		15:55 (発)		片道6km
ぬかびら発電所前		11:15		16:10		
上士幌交通ターミナル		11:35 (着)	手動 走行	16:30 (着)	手動 走行	片道 16km

3.4 運行管理者

現地の交通事業者である上士幌タクシーが運行管理を担当する。テストドライバーは、トレーニングセンターでの訓練および実証ルートでの試験走行を経て、実証運行に参加する。遠隔監視者についても、定期運行で実際に遠隔監視を担当しているメンバーが参加した。さらに、遠隔監視室と移動衛星基地局車、テストドライバーとの連携を行う添乗員を配備し、適宜トランシーバーを使用して連絡を取れる体制を整えた。

3.5 運行体制

表 3-3 運行体制の詳細

項目		内容
運行管理者の選任・人員体制		上士幌タクシー(有) 運行者4名 遠隔監視者3名
遠隔監視設備	種類・特徴	<システム> ・遠隔監視システムは株式会社ティアフォー社標準の Autoware Drive を利用する。 個々の車両の走行および運行を支援する遠隔監視者向けのウェブアプリケーションであり、自動運転車の運行の監視対応だけでなく、乗客とコミュニケーションを取ることができる。
	機能	■機能 <遠隔監視> 自動運転車の走行環境を、車両に搭載されているカメラやマイクから得られた映像と音声を用いて、遠隔オペレーターの手元でリアルタイムに再現。映像・音声通信には WebRTC (Web Real-Time Communication) 技術を採用しているため、通信回線に応じて超低遅延で車両の走行を監視することが可能。 <緊急停止> 万が一、遠隔監視中に事故に繋がる危険を感じた場合は、自動運転車の走行を直ちに緊急停止できる。また車両からのデータ通信に問題が生じた場合など、遠隔オペレーターが遠隔監視を継続できなくなった時は、自動的にこの機能が働き、車両を安全に停車することができる。 <遠隔通話> 遠隔オペレーターと、自動運転車に搭乗している乗客との間で、音声通話を行うことができる。
	配置場所	〒080-1408 北海道河東郡上士幌町上士幌東3線上士幌交通ターミナル内遠隔監視室 ※令和6年3月より新設
遠隔監視員	事業者	上士幌タクシー(有)
	人員体制	遠隔監視員総数:3名
	オペレーション	・運行中、常時1名以上が遠隔監視を実施。 ・アラートが上がった場合、対応マニュアルに沿った確認を行う。 ・必要に応じて車内オペレーターと連絡を取り、必要な処置を実施する。(警察・消防等への連絡や現場駆けつけ等)
	遠隔監視体制	<メイン> 上士幌町交通ターミナル内遠隔監視室で1:1の遠隔監視を実施。 <バックアップ> 一時休憩や現場の緊急対応等でメインでの遠隔監視ができない場合、茨城県境町で遠隔監視の引き継ぎ。
	業務従事者教育	茨城県境町で BOODLY 社の遠隔監視資格を持つ遠隔監視要員を派遣し業務トレーニングを実施。体制においても境町がバックアップ。
テストドライバー	事業者	上士幌タクシー(有)
	人員体制	運行者人数:4名 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	・走行前後に車両の安全確認を行い、遠隔監視員と走行状況の連絡を取り合う。 ・運行ダイヤを基にバスの発進・停止指示を行い、乗客の乗降対応。 ・自動走行では困難なケース(交差点や走行ルートの障害物)において手動走行での対応。

		・緊急時の対応を遠隔監視員と連携して行う。
	テストドライバーの確保及びこれらに対する業務従事者教育・訓練の計画	テストドライバーは全員中型以上の免許を取得しており、実業務においてもぬかびらまでの実証試験ルートにおいてスクールバス(大型バス)の運行を行っている。また自動運転バス(ARMA)の教育と訓練を行い、定期運行を1年以上にわたり行っている。 実車両導入後、試験走行にて訓練走行を実施。
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	なし
	人員体制	なし
	オペレーション	なし
	業務従事者教育	なし

3.6 自動運転車両の特徴

表 3-4 走行車両の詳細

項目		内容
台数		1台
所有者		BOLDLY 株式会社
車両 スペック	車両名	TIRE IV Minibus (車両本体 BYD J6 Ver1.0)
	自動運転レベル	レベル 2(将来的にレベル 4 を取得する)
	車両定員	23 名(運転席 1 名+乗客 15 名+立席 7 名)
	試乗枠の定員	14 名(1 席はオペレーターが使用)
	最高速度	車両機能上限:手動 70Km 自動 35Km/h
		実証実験時上限:30Km/h
	センシングデバイス	LiDAR、RADAR、物体認識用/遠隔監視用カメラ、IMU、路面温度センサ、GNSS アンテナ
	車両性能 (チェックを入れること)	☒ 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 ☒ 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 ☒ 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走行可能であること
	運行管理システム (チェックを入れること)	☒ 車両に搭載したカメラによる車両内外の遠隔監視

	と)		☒緊急時における車内との通話	
			☒速度や位置等の車両走行状態のリアルタイムでの取得	
			☒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	
			☒公道実証実験中の実験車両に係るセンサ等により収集した車両状態情報を含む各種データ、センサの作動状況等について、交通事故又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	
	その他装備		計算機ボックス、HMI 機器(乗客向けディスプレイ表示)	
走行可能環境	天候		晴れ、曇り、雨 15mm 以下	
	照度		1～10,000lux	
保有機能	自車操作	左折	走行可否	可能
		右折	走行可否	可能
		車線変更	走行可否	可能
		障害物回避	対応可否	可能
	対象認識		20cm 立方体以上	
	白線認識		行わない	
	標識認識		行わない	
	信号認識		カメラおよび信号連携(V2I) ※実証での使用無し。	
	MRM		あり	
本実証のために実施する自動運転システム改修の内容			●世界 20 か国以上で活用実績のあるオープンソース自動運転ソフトウェアである Autoware※を搭載 ●自己位置推定は高精度 3 次元地図を活用 ●合流可能 ●交差点右左折(専用信号有、無) ●トンネル走行可能 ●バス停/路側帯からの発車/駐車可能 ●運行管理システムからの配車指示による出発可能 ●車内緊急停止ボタンによる停止可能 ※Autoware は Linux と ROS をベースとした自動運転システム用オープンソースソフトウェアです。	
その他特徴等			・BYD 社より購入した車両を日本国内で改造しています。 ・業務委託契約の別添 1 の 6 条 1(1)に記載のある、基準緩和認定について、当案件で使用する車両は今回の走行においては「特別装置型自動運転車」に該当しないため、基準緩和認定は不要です。	

4. 実証の手法

4.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証

4.1.1 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

(1) 目的

自動運転システムの安定した稼働を実現するためには、自動運転車両がネットワークに常時接続できる安定した通信環境の確保が必要不可欠である。特に、トンネルなどの通信が不安定な環境では、自動運転システムの安定稼働の実現が困難となる。本実証では、トンネルにおける通信環境整備・自動運転システムの運用に注目し、現行の通信システム(自動運転システム)において「できること」「できないこと」を定量的なエビデンスに基づいて明確化し、レベル 4 自動運転の社会実装に求められる信頼性のある通信システムの整備のための要件を解明する事を目的とした。

また、不安定な通信環境の改善手法として固定基地局の配置が挙げられるが、配置条件などに関する課題が多い。本実証では、移動衛星基地局車を活用し、短期間の実証の中で多様な基地局配置条件のもと、多面的に検証を行った。自動運転技術の発展に向けて、研究開発は重要と考えており、本実証でも多面的な検証を通して、将来の自動運転システムにおける安全性と信頼性の向上に向けて、有益な知見を獲得することを目的とした。

(2) 実施内容の詳細

表 4-1 実証準備から実施までの手続き

実証手順	説明	達成条件
1	道路管理局への説明と承諾	道路管理局の承諾
2	エリア電波調査	データ取得と結果出力
3	道路占有許可申請の提出	移動基地局車 占有承認
4	道路使用許可申請の提出	自動運転バス 走行承認
5	実証試験	データ取得と結果出力
6	実証報告	データ解析、KPI 達成
7	エリア電波調査と実証データを基に固定化の検討を行う。	固定化費用の算出

トンネル内部への電波浸透(吹込み式)を実現するため、トンネル区間の片側入口付近に移動衛星基地局車と電源車を配置した。移動衛星基地局車は、配置場所で通信衛星を補足し、簡易基地局としてモバイル通信網を構築する役割を担った。

配置に際しては、事前に電波調査を実施し、配置スペースと衛星補足環境を現地で確認したうえで、正確な配置場所を決定した。その後、管轄する道路管理事務所や警察署などの関係機関と協議し、道

路使用に係る許可を得た。

(3) 利用技術

トンネル内への電波の吹込みには移動衛星基地局を使用した。固定基地局と比較して短期間で環境構築が可能であり、配置場所を移動・調整できるため、複数の基地局配置条件を検証することができた。なお、固定基地局の配置には、申請手続きを含め 10 か月～1 年以上の期間を要する。申請手続きに要する期間については、参考資料に含める。

(4) 必要性・緊急性・新規性

トンネル内の通信環境改善手法は、一般的なサービスエリア対策とは異なり、トンネルの立地や形状によって、コストや作業負担が大幅に増加する。また、トンネル内の電波不感エリア対策は、一般のユーザー(車両に乗る人)にとって、許容できる軽微な通信断を解消する程度の効果しかないため、投資対効果の観点から優先度が低くなる傾向がある(都心部や主要幹線のトンネルを除く)。

しかし、レベル4自動走行車両にとっては、一時的な通信断による遠隔監視の途切れが、重大な車両トラブルに直結し、走行停止を余儀なくされる可能性がある。さらに、トンネル内で車両が停止した場合、後続車両を巻き込む大規模な渋滞や、緊急車両の通行妨害などの二次被害も懸念される。そのため、本課題は対応の必要性・緊急性の高い課題だと考える。

また、自動運転車両の安定的な通信接続に向けたトンネル内への電波吹き込みによる通信環境の改善手法はこれまで十分に検証されておらず、本ユースケースの新規性は極めて高い。本実証ではトンネル内へ吹き込まれた電波の伝搬メカニズムを検証し、レベル 4 自動運転車両がトンネルの入口から出口まで、遠隔監視サービスを途切れることなく維持できるための必要条件を明らかにし、電波対策における重要なポイントを洗い出す。

(5) 検証条件

トンネル内での自動運転車両の通信に特化した実証はこれまでに例がないため、トンネルにおける自動運转向けの通信環境整備の初期検討として位置付けられ、直線的かつ電波伝搬の検証に十分な全長のトンネルを選定した。本実証では、上土幌町市街地からぬかびら源泉郷までの走行ルートにある複数のトンネルのうち、直線的に伸びた約 450m の 2 つのトンネルが高架橋(屋外)を介して直線的に接続された全長約 1km の区画を検証対象のトンネル区間と定めた。このトンネル区間は吹き込まれた電波の伝搬特性を測定しやすいため、電波吹き込み条件(基地局の配置位置、使用する周波数帯 など)による伝搬特性の変化や、自動走行車両の遠隔監視に与える影響を検証するのに適している。

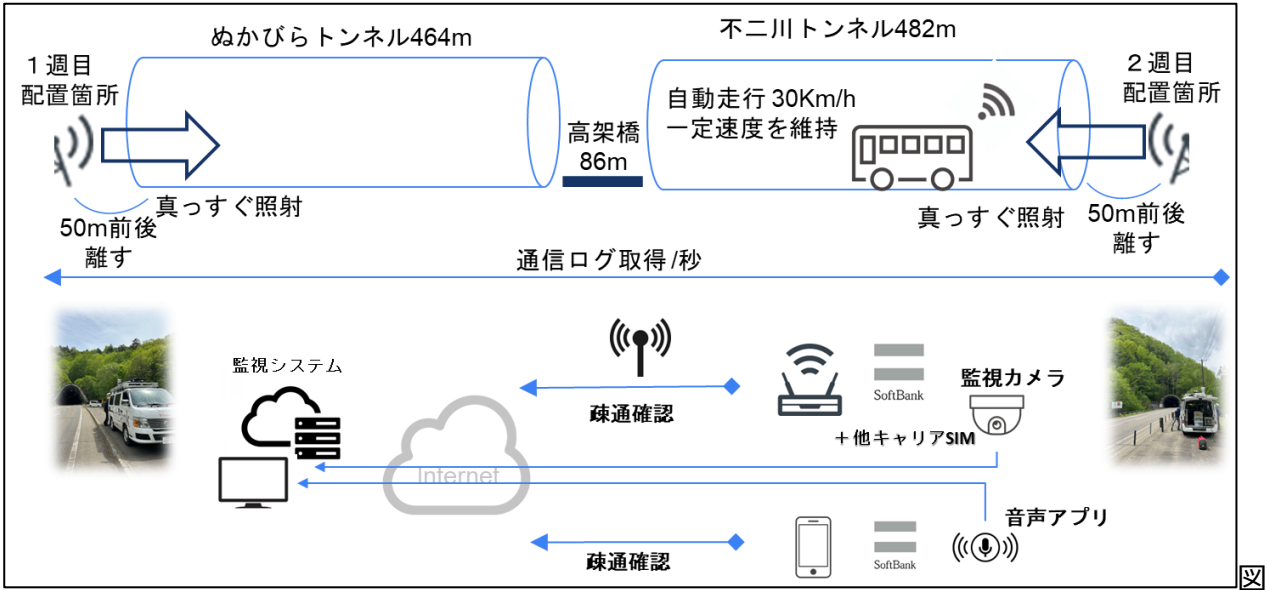
1) 基地局の配置

移動衛星基地局車の配置箇所は、2 つのトンネル区間の両端、すなわち不二川トンネル東側と糠平トンネル西側の 2 箇所とする。それぞれ別日に配置し、その他の条件を同一にして測定を実施する。な

お、両トンネルを接続する高架橋区間については配置スペースが存在しないため、配置箇所からは除外している。

- 配置箇所1:ぬかびらトンネル西側出口
- 配置箇所2:不二川トンネル東側出口

なお、ぬかびらトンネル西側出口の先にはぬかびら源泉郷があり、サービスエリア圏内となっている。一方で、不二川トンネルの東側出口以降、上士幌町市街地へ向かう山間部は、不感地帯が続くエリアとなっている。



4-1 基地局の配備と走行データの取得

2) 検証パターン

移動衛星基地局や遠隔監視システムのパラメータを網羅的に検証するため、表 4-2 の検証パターンを検証した。なお、検証したパラメータは以下の通りである。

- 帯域幅:2つの周波数帯で実証する。
- 電波強度:移動衛星基地局一般に適用される最大値と電波強度を下げた2つの強度
- 監視カメラ台数:7台(通常時)と4台の稼働にて実証する。
- 利用 SIM

表 4-2 検証パターン一覧

BAND 域	電波強度	監視カメラ台数	利用 SIM
Band1(2.1GHz)	通常値	7台	Softbank 5G(NSA)
Band1(2.1GHz)	通常値	7台	Softbank 5G(NSA)

Band8(900MHz)	通常値	7台		Softbank 5G(NSA)
Band8(900MHz)	通常値	4台		Softbank 5G(NSA)
Band1(2.1GHz)	調整値	7台 x1 往復	4台 x2往復	Softbank 5G(NSA)
Band8(900MHz)	調整値	7台 x1 往復	4台 x2往復	Softbank 5G(NSA)
Band1(2.1GHz)	通常値	4台		Softbank 5G(NSA)
Band1(2.1GHz)	通常値	7台		Softbank 5G(NSA)
Band8(900MHz)	通常値	7台		Softbank 5G(NSA)

※5G(NSA Non-Stand Alone):4G ネットワーク基地局に対応した5G データカード,5G エリア外では4G で通信を行う。

※BAND:ソフトバンクが利用している周波数帯域を()記載しています。

※各測定日とも条件のパターンを変えて検証経路を複数回往復して検証を行う。

※制限をかけるカメラは車内、前方、後方以外の映像箇所とする。

3) 車輛の走行報告

実証時はバスが走行する方向を以下の通り、上り・下りとして明示する。

上り:ぬかびら源泉郷から市街地に向けての走行

下り:市街地からぬかびら源泉郷に向けての走行

(6) 開発・評価項目

下表にて開発・評価項目を説明する。測定項目の詳細は表 4-4 で整理する

表 4-3 定性・定量評価一覧表

番号	開発・評価項目
1	●接続する基地局についての評価(定量) 車載の監視システムより、秒単位で接続する基地局 ID と周波数帯域、信号強度(RSRP/ RSRQ)を測定する。
2	●通信回線の評価(定量) 車載監視カメラが送出するデータ量をスループットとして測定した。また、車載の IoT ルータからのネットワークの遅延時間(RTT)を合わせて測定した
3	●監視カメラ映像品質(定量) 車載の各カメラが送信する秒間フレーム数と解像度、稼働カメラ台数を秒単位で測定した。
4	●映像品質・音声品質(定性)

	映像品質の評価として遠隔監視室内の遠隔監視端末画面の 1 名の遠隔監視者がリアルタイムに評価を行い、その後に録画映像を 3 名の評価者(遠隔監視者)が確認する評価を行った。また、走行中のインターネット通話(LINE 通話)により音声品質を評価した。
--	--

上表の 1～3 の評価項目は車載の監視システムにて測定した。各測定項目の詳細な定義や測定方法を下表に示す。

表 4-4 測定項目の定義と測定方法

測定項目	本実証における定義や測定方法
RSRP(dBm) (基準信号受信電力)	遠隔監視システムが通信を行う信号基地局から受信する信号強度(パワーレベル)を取得する。情報は 1 秒おきに取得する。 情報は遠隔監視システムから取得するため、基地局と車載 IoT ルーターが接続できていても、遠隔監視システムがカメラ監視映像を伝送する通信ができないと、情報取得できない。そのため、遠隔監視システムが通信できないことと、車両と基地局の接続が切断されたことの判断には RTT(ラウンドトリップタイム)のタイムアウト判定を用いた。
RSRQ(dBm) (基準信号受信品質)	RSRP と同様の手法で測定した。 RSRP と RSRQ の連動性を見る事で信号変動以外の別の要素で信号品質が劣化していないことを確認する。 ※RSRP と RSRQ の遷移に乖離が発生する場合、他の基地局との電波干渉や違法電波等他の要因による品質の劣化が発生しているものと判断できる。
基地局 ID	RSRP と同様の手法で測定する。
スループット	監視システムは、1 秒おきに接続された監視カメラごとに送出された映像データ量を記録するため、同時刻の各カメラの送出データ量を合算してスループット(キロバイト/秒)とした。
解像度 (pixel)	画面解像度は縦(ピクセル)、横(ピクセル)で取得している。解像度は帯域に合わせ可変的に制御され、640x426、480x320 最小値 360x240 で推移する。縦横比率は決まっているため、本件では横軸(ピクセル)を解像度とする。
フレームレート (fps)	映像やビデオにおいて 1 秒間に表示されるフレーム(静止画)の数。 スループットと同様の手法で測定する。
稼働カメラ台数(台)	監視カメラのうち実際に映像を表示(フレームを送信している)カメラ台数。 スループットと同様の手法で測定する
ジッタ値(ms)	各カメラ単位でミリ秒で取得し、映像のフリーズや乱れがスループットや画面解像度では説明が付かない事象において解析用に利用する。

	スループットと同様の手法で測定する。
RTT(msec/s)	データは PIN コマンド(64 バイト/秒)で取得する。 車載の IoT ルーターと通話用スマートフォンの両方で取得する。
位置情報	車載の GPS システムによる位置情報(緯度・経度)を遠隔監視システムにより1秒おきに取得しデータを記録する。位置情報を捕捉できていても、監視システム上のカメラ全ての通信データが得られないときは、取得できない点は信号情報と同じ。 トンネル内では GPS システムは機能しないため、トンネル進入からの経過時間と走行速度から車輦位置を判断する。位置情報は屋外走行時の既存基地局とのハンドオーバーや通信が途切れる位置を正確に把握するために部分的に利用する。 データは十進法 (Decimal Degrees, DD)で格納する。

また、映像品質の定量評価では、実証走行中に遠隔監視者 3 名のうち 1 名がリアルタイムで評価を行い、加えて後日、3 名の遠隔監視者にて監視映像の録画データを確認・評価することで、評価の平準化を図った。音声通話については、自動運転車両内の連絡用のスマートフォンを使用したインターネット通話を用い、トンネル走行中に遠隔監視者とのインターネット通話(LINE 通話)が常時継続するかを検証した。映像品質および音声品質の評価方法は(7)にて説明する。

(7) KGI/KPI

表 4-5 定性評価/定量評価に対する目標値一覧

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定性評価	1	監視カメラ映像によって監視者が車両の外部、内部の状況を把握できること。 監視画面の映像が遠隔監視として機能しているかどうか目視によって確認する。
	2	車内通話により遠隔監視者と運行者の間で意思の疎通が取れること。 連絡用端末(LTE)での発信・着信と通話品質の確認
定量評価	3	トンネル内でも最適な通信状態を維持し遠隔監視システムの安定運用が図られていること(KGI)。
	4	車両が遠隔監視システムに要求する通信品質(最低値)を維持できること(KPI)。 (TIRE IV minibus 推奨値:上り 10Mbps, 下り 5Mbps。最低値上り 3.5Mbps, 下り 0.5Mbps)
	5	カメラ映像が遠隔監視の業務に耐えうる品質を維持すること。

	6	車両と遠隔監視者で通話が取れること。
--	---	--------------------

1) 監視画面目視評価(監視画面映像を目視で確認する)

a. リアルタイム評価

監視室内の端末を使って監視画面を表示し、1 人の遠隔監視者がトンネルを通過する間の各カメラ映像を以下の観点から総合評価する。評価項目とその指標を下表に示す。遠隔監視者は、自動運転車両がトンネル を通過する際に、これらの項目について評価を実施した。さらに、1 走行ごとに総合的な所見を記録した。

表 4-6 監視画面目視評価の項目と指標

評価項目	評価の観点	評価指標
映像の遷移	映像の遅延や各カメラ同士の映像のずれ	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが監視に支障はなかった ×:監視に支障が出た
映像のクリア性	映像のぼやけ、車外や車内内の視認性	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが監視に支障はなかった ×:監視に支障が出た
映像の継続性	画面フリーズの発生とその後の映像の再開までの時間を踏まえた継続性	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが監視に支障はなかった ×:監視に支障が出た
システム環境	システム上でエラーやアラート表示	○:表示があった ×:表示がなかった

b. オンデマンド評価

実証走行中の遠隔監視映像はすべて録画し、走行後にリアルタイム評価に参加した遠隔監視者 3 名が、録画映像に基づいて映像評価を実施した。評価は表 4-6 の評価項目・指標を用い、ディスカッションを通して評価結果の平準化を図った。

2) 車内通話の音声評価(連絡用スマートフォンでの発信・着信と通話品質の確認)

連絡用スマートフォンの通話用アプリを使用し、インターネット電話による発信・着信の確認および通話品質の評価を実施する。トンネル進入前に通話を開始し、トンネル走行中は通話を継続しながら、走行状況の実況を遠隔監視者と乗務員間でやり取りする。トンネル通過後に通話を終了し、評価項目について○×△で総合評価する。

表 4-7 音声評価の項目と指標

評価項目	評価の観点	評価指標
着信	着信と受話の可否	○:トンネル前で受話できた。 △:トンネル進入後に受話できた。 ×:受話できなかった。
遅延	音声に遅延がないか	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが会話に支障はなかった ×:会話に支障が出た
音質	音声クリアに聞こえるか、途切れ・切・ノイズ・エコーがないか	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが会話に支障はなかった ×:会話に支障が出た
双方向通話	双方向通話: 通話の内容が相方向で正確に届いているかを確認する。	○:特段の違和感がなかった △:違和感あるが会話に支障はなかった ×:会話に支障が出た
システム環境	システム上でエラーやアラート表示	○:表示があった ×:表示がなかった

3) 車両が遠隔監視システムに要求する通信品質(最低値)を維持できること(KPI)

トンネル内で遠隔監視ができる事を定量的に示すため、表 4-4 のスループットで、本実証で用いる自動運転システムが要求する最低帯域(上り 3.5Mbps, 下り 0.5Mbps)を堅持できているか確認する。

(TIRE IV minibus 推奨値:上り 10Mbps, 下り 5Mbps。最低値上り 3.5Mbps, 下り 0.5Mbps)

4) 車載カメラの映像が遠隔監視の業務に耐えうる品質を維持すること(KGI)。

・トンネル内でも遠隔監視ができる事を実証する観点から KPI を設定し、評価する。

5) 車両と遠隔監視者で通話が取れること(KGI)。

・トンネル内でも遠隔監視者と通話ができる事を実証する観点から KPI を設定し、評価する。

上記、いずれもトンネル内の通信状況をリアルタイムな測定と評価を通じて、通信の品質や信号強度を的確に把握し、実走行への影響を確認する。

4.2 交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証

・実施なし

4.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携

・実施なし

4.4 明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証

・実施なし

4.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上

・実施なし

4.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証

・実施なし

4.7 レベル 4 の社会実装に向けた検討

4.7.1 運用検証

(1) システムの操作性やユーザ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)

上土幌町では、令和 5 年度の事業において遠隔監視体制を構築し、令和 6 年 4 月より町内で遠隔監視業務を実施している。今回の実証にも、3名の遠隔監視要員が参加することとなった。市街地自動運転バスでは、遠隔監視システム DISPATCHER を使用した運行管理を行っているが、本実証では、TIRE IVMinibus で標準提供されている遠隔監視システム Autoware Drive を使用し、ユーザインターフェースに関する評価を実施することとなった。

(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など、地域交通の持続性への寄与度

本実証は、山間部のトンネルにおける自動運転走行に必要な通信環境の検証を目的としており、これに伴う通信システムの導入は行わないため本実証の対象外である。一方、上士幌町では既に通信システムを導入しており、自動運転バスの遠隔監視業務における運行の効率化や運行情報の可視化を推進している。今後は、コミュニティバスやスクールバスを含むシステムの共通化を進める予定である。上士幌に導入済みの通信システムは以下の通り。

1. 運行情報の可視化

上士幌町では、交通ターミナルに民間バス会社 2 社の時刻表表示モニターとは別に、町専用のサイネージモニターを配置し、自動運転バスとコミュニティバスのリアルタイム位置情報を表示するシステムを立ち上げた。これにより、交通ターミナルで利用者はバスの運行状況をリアルタイムで確認できる。

2. 乗客情報の電子化

町民は原則として「かみしほろスマートパス」で乗車し、現在紙で行っている乗客数の管理を電子化する。ペーパーレス化を基盤に業務フローを見直すことで、作業効率を向上させる。

3. オンデマンドサービスの拡充

コミュニティバスではオンデマンドサービスをいち早く導入しており、将来的には自動運転バスもコミュニティバスと同様にオンデマンド運行を取り入れ、利用を共通化することで、町民の利便性を向上させる予定である。

4. 運行管理人材の育成と共通化

自動運転バスおよびコミュニティバスの運行業務は、遠隔監視業務も含めて地域交通事業者(上士幌タクシー)に委託しており、運行管理業務を共通化することで業務負担を軽減する。また通年で運行管理者の育成を行い、運行事業を担う若手人材の育成を進めている。

(3) データの処理・管理に係る運用などのセキュリティ対策

自動運転走行に伴う遠隔監視を行う際のデータの処理・管理については既に行っているものを踏襲するため、本実証の対象外である。以下に既存のセキュリティ対策を整理する。

1. システムへのアクセス管理

また監視システムは2段階認証を導入しており、権限のない者がデータにアクセスするのを防ぐ。定期的にセキュリティアップデートと棚卸を実施し、適切なアカウント管理を行っている。

2. データ暗号化とバックアップ

遠隔監視室内の業務端末本体はデータも含め持ち出しが禁止されている。データは暗号化されており万が一にデータが盗まれた場合でも不正利用を防ぐ。また待機系の監視端末によってデータはバックアップされている。

3. セキュリティ教育

遠隔監視担当者は定期的にセキュリティトレーニングを実施している。また引継後も継続的にセキュリティ監査を実施している。

4. 設備管理

遠隔監視室は物理的に隔離された部屋で施錠管理されており、関係者以外は入室できない。

(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

この実証において利用する通信システム機材は暫定的であり、実証終了後は現状復帰することを想定しているため、維持管理という視点については対象外である。

尚、市街地における自動運転バス定期運行での遠隔監視システム及び信号連携・路車協調システムの維持管理・保守は以下の通りとなっている。

1. 遠隔監視システム

障害やメンテナンス頻度は今後測定していくが、現時点でサービスが提供できなくなる事象は発生していない。また2台の監視端末でシステムを冗長化し、更に境町で遠隔監視をバックアップする体制となっている。引き続き障害が発生した際の対応が遅れた際のリスクや影響を分析し、適切な対策を行う。

2. 信号協調システム

上士幌町では4つの信号交差点(今年度+押しボタン信号2式追加)で信号協調システムを導入している。警察署からも行政資産の利用について許可を得ており、信号機本体の責任(警察署)と通信システムの保守(上士幌町)は分離されている。車両システム保守は車両メンテナンスに含まれている。現時点で障害は発生していない。

4.7.2 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

前述の通り本実証の対象外となる。自動運転車両では、通信システムを通じて走行場所、走行速度、走行距離、バッテリー情報、自動/手動の有無等の運行情報を常時取得している。また車両アラート、ソフトウェアメッセージもイベントログとして取得している。さらに、車内・車外のドライブレコーダーを配備し、常時映像を取得するとともに、遠隔監視システムを通じて車内映像をリアルタイムで確認できる

ようになっている。

本実証において、上記データは補足的なものではあるが、万が一実証走行中に運行停止が発生した場合には、上記のデータを活用することで原因を特定する予定である。

1. 実証時期と時間の選定

本実証での走行ルートは、山間部の国道であり、渋滞等の発生は想定されない。一方で、走行時期については、休日・祝日や周辺エリアでのイベントの影響を考慮し、走行を避ける方向で検討する。

本実証での走行区間は整備された市街地ではなく、自然環境が厳しい区間を含む。そのため早い段階から準備を進め、ハイシーズン(観光)や雨季・冬季を避けた 6 月～7 月の比較的冷涼で日照時間の長い時期に実施することとした。

2. 交通情報の確認

渋滞の発生はないが、事故や道路工事などによる交通規制については警察とも連携し、適時情報を確認する。また、状況に応じて走行時間の変更や、手動走行によるルートを迂回するなど適切に対策を講じる。

3. 一時停留所の配置

市街地から山間部に向かう区間は見晴らしが良く、追越しも可能なため、他の車両の走行に影響は及ぼすことはないと考えられる。しかし、山間部に入ると追い越し禁止車線が続くため、自動運転の時速 30km では後続車両の渋滞を引き起こす可能性が考えられる。

そのため安全性が確保できる場所に一時停留所を設置し、後続車両を先行させることで、渋滞の発生を回避する。

(2) 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

実施無し。

(3) 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

実施無し。

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

新設する通信システムは災害対策やイベントに使用する移動衛星基地局車を配備して実施する。
当基地局に関する通信システム設備とその配置箇所は以下の通りとなる。

- ・移動衛星基地局、電源車配置場所
配置箇所1:糠平トンネル(西側口)
配置箇所2:不二川トンネル(東側口)



図 5-1 移動衛星基地局の配置図(出典:国土地理院)

- ・配置台数
移動無線車:1台 電源車:1台 作業員常駐車:1台



図 5-2 移動衛星基地局車

- ・電波塔カバレッジ
机上マニュアル値:1.8km
糠平トンネル(464m)と不二川トンネル(482m)内への全体浸透を想定

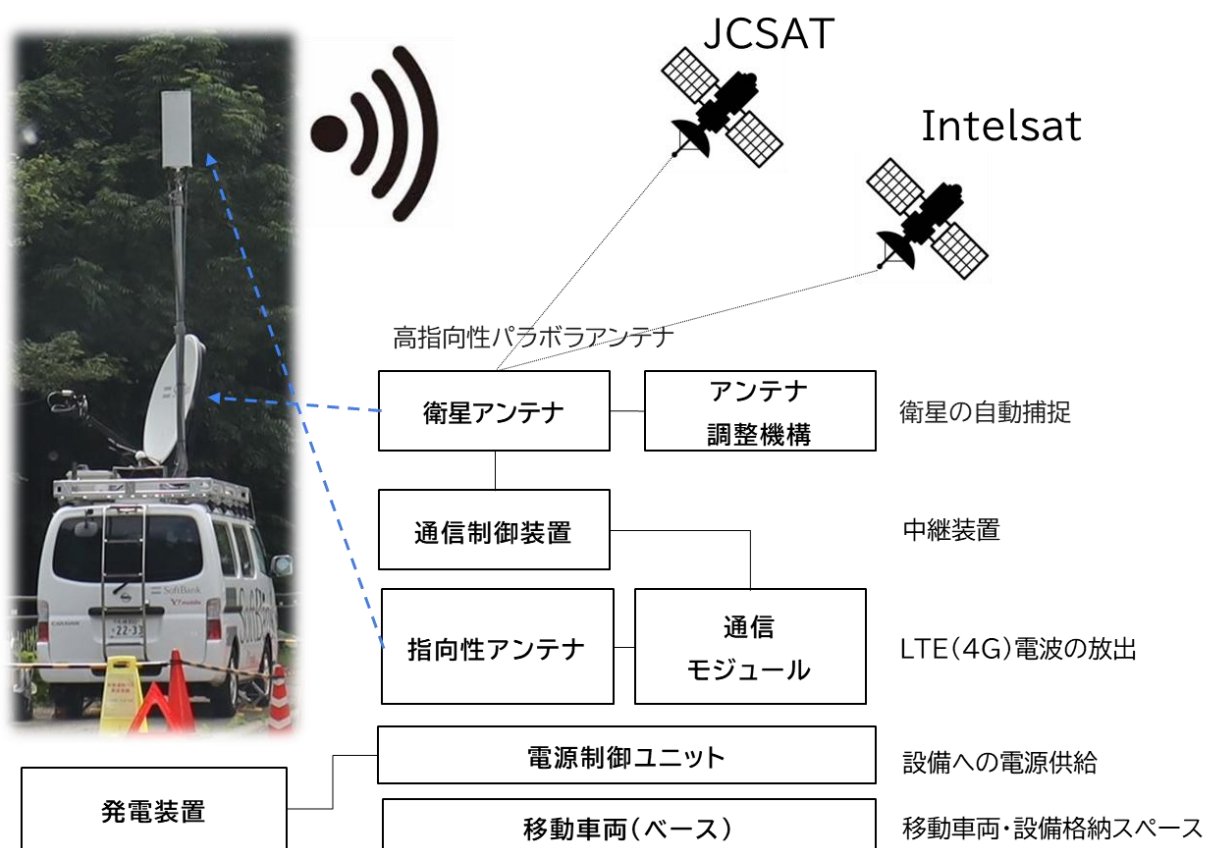
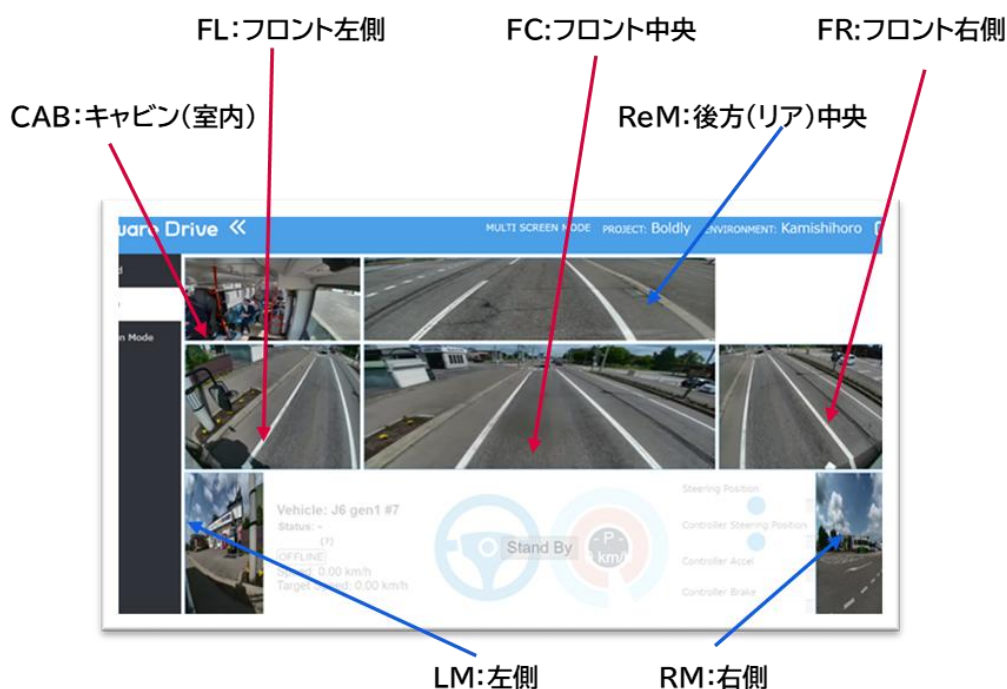


図 5-3 ネットワーク構成図 (JCSAT/Intelsat 衛星通信ネットワーク)

5.2 遠隔監視システムの全体像

遠隔監視には、TIRE IVMinibus 標準搭載されている監視システム Autoware Drive を採用し、監視端末には上土幌交通ターミナル内の監視室に配置されたデスクトップ PC を使用する。監視画面はアサインされた全カメラが1画面に配列された画面モード(グリッドモード)にて表示する。監視端末のネットワークは、高速ブロードバンドによる有線接続とし、施設内でのネットワーク輻輳は発生しない前提で構築されている。

アサインされた各カメラの名称(略称)は以下の通りとなっている。



※UB:車両下で監視画面ではアサインしていない。

※LM/RM/ReM:4画面実証では停止させる。

図 5-2 遠隔監視画面のカメラ映像配置と略称

5.3 使用機器・ソフトウェア一覧

表 5-1 基地局詳細表

機器名	区分	型番		
衛星補足用パラボラ	基地局	iNetVu system	Satellite	
特定高度情報通信技術活用システムの該非	☐	開発供給認定実績の有無	☐	
調達予定機器の製造企業等に関する情報				
名称	企業名称	本店又は主たる事務所の所在地(国)	設立準拠法 (日本/米国/中国/その他)	製造国
製造企業	C-COMSatellite Systems Inc.	アメリカ	その他	アメリカ
販売企業	-	-	-	-
技術提供企業	-	-	-	-
備 考				
VSAT/JSAT 衛星を受信して衛星通信を行う装置 モバイル医療、災害管理、緊急時対応などの重要な帯域幅の衛星通信アプリケーションを処理できる車載アンテナで全世界で流通している機器となります。 システムも iNetVu 純正のものを使用しています。				

表 5-2 通信回線装置詳細表

機器名	区分		型番	
4G 無線配信用機器	通信回線装置		備考欄に記載	
特定高度情報通信技術活用システムの該非	☐	開発供給認定実績の有無		☐
名称	企業名称	本店又は主たる事務所の所在地(国)	設立準拠法 (日本/米国/中国/その他)	製造国
製造企業	Nokia, COMMScope	アメリカ	その他	アメリカ
販売企業	-	-	-	-
技術提供企業	-	-	-	-
4G 無線電波を発信する装置 ◆900MHz 帯無線機 製品名:FXDB 製造元:Nokia ◆2.1GHz 帯 無線機 製品名:FRGS 製造元:Nokia ◆空中線(900MHz 帯/2.1GHz 帯 同一) 製品名:DBXLH-6565S-TOM 製造元:COMMScope				

表 5-3 ソフトウェア詳細表

機器名	区分		型番	
自動運転システム	ソフトウェア		なし	
特定高度情報通信 技術活用システムの 該非	☐	開発供給認定実績の有無		☐
名称	企業名称	本店又は主たる事 務所の所在地(国)	設立準拠法 (日本/米国/中国/ その他)	製造国
製造企業	TIRE IV	日本	日本法	日本
販売企業	-	-	-	-
技術提供企業	-	-	-	-
ROS(Robot Operating System)をベースとした自動運転システム用オープンソース「ソフトウェア」 Autoware をベースに開発された独自アプリケーション				

表 5-4 ルーター端末詳細表

機器名	区分		型番	
IoT ルーター	端末		HW5G-3200-V2	
特定高度情報通信 技術活用システムの 該非	☐	開発供給認定実績の有無		☐
名称	企業名称	本店又は主たる事 務所の所在地(国)	設立準拠法 (日本/米国/中国/ その他)	製造国
製造企業	HITEC INTER Co.LTD.	日本	日本法	日本
販売企業	-	-	-	-
技術提供企業	-	-	-	-
キャリア提供の IoT SIM を実装し、LTE データ通信を行う装置 工事設計認証番号:003-210239 技術基準適合認定番号:D200139003				

表 5-5 ソフトウェア詳細表

機器名	区分		型番	
遠隔監視システム AutowareDrive	ソフトウェア		なし	
特定高度情報通信 技術活用システムの 該非	☐	開発供給認定実績の有無		☐
名称	企業名称	本店又は主たる事 務所の所在地(国)	設立準拠法 (日本/米国/中国/ その他)	製造国
製造企業	株式会社 TIRE IV	日本	日本法	日本
販売企業	-	-	-	-

技術提供企業	-	-	-	-
TIRE IV社で開発した自動運転の走行をサポートする遠隔監視システム				

5.4 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

自動運転サービスを提供予定の地域が携帯電話サービスエリア内であっても、通常の基地局アンテナでは、当該地域内のトンネル内部に電波が届きにくい。事前調査では、ぬかびら源泉郷 BAND1 基地局からの RSRP 信号がトンネル入口で-100dBm 前後であったものの、進入後は徐々に低減し、約 100m 内部で-120dBm 以下となり音声・映像配信ともに困難な状態となった。環境によって異なるが、電波環境整備の一つの目安とする。

移動衛星基地局を活用した検証方法は、電波吹込み基地局の配置に関する通信環境整備において、期間やコストの面で利点のある手法といえる。一方で、車両配置のための用地確保や、衛星通信の安定接続を確保するための見晴らしの条件が求められるため、検証候補地については事前の現地調査および確認が必要となる。

衛星通信は天候などの影響を受けることがあるため、余裕を持った日程の確保が必要である。

6. 実証結果・考察

6.1 自動運転システムのセキュアな常時接続を実現する通信システムの実証

6.1.1 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

(1) 実証スケジュール

表 6-1 実証スケジュール表

実施内容	ユース ケース	2024年											
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月			
調整 総務省採択	①		▲ 4/23										
調整 実証仕様再提出・委託契約	①												
調整 道路管理局・警察説明	①		▲▲	足寄事務局									
準備 実験申請&道路使用許可申請	①												
準備 EV充電器設置	①												
準備 DISPATCHER/LINE実装	①												
準備 セキュリティアセスメント	①												
準備 運行トレーニング	①												
準備 電波調査・配備箇所サーベイ	①												
導入 車両搬送	①												
導入 車両配備（1.5 箇月）	①												
導入 コミッシュニング&走行調整	①												
導入 警察試乗・運行承認	①												
導入 走行訓練	①												
実証 衛星移動基地局配備	①												
実証 走行会開催（メディア含）	①						▲日時調整中（7/8仮置）						
実証 実証試験	①												
実証 撤収・原状復帰	①												
報告 データ抽出	①												
報告 データ解析	①												
報告 中間報告	①								▲				
報告 最終報告	①											▲	
報告 進捗報告	①		▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	▲▲	
報告 定例会（MRI様）	①			▲		▲		▲		▲		▲	

(2) 開発・評価項目の結果

下表の評価項目の結果は、(3)にて KGI/KPI との比較結果と合わせて示す。

表 6-2 開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
1	●電波強度(定量) 車載の監視システムより、秒単位で接続する基地局 ID と周波数帯域、信号強度(RSRP/RSRQ)を測定する。
2	●スループット(定量)

	車載の IoT ルーターからのネットワーク疎通(RTT)を秒単位で観測すると同時に車載の監視カメラからのデータ転送速度(スループット)を測定する。
3	●画面解像度(定量) 車載の各カメラ映像のフレームレートと解像度、稼働カメラ台数を秒単位で測定する。
4	●映像品質・音声品質(定性) 監視室内の遠隔監視端末画面の遠隔監視者による評価(リアルタイム・事後ビデオ確認)及び走行中のインターネット通話による音声評価

(3) KGI/KPI との比較結果

表 6-2 KGI/KPI との比較結果表

評価項目	番号	目標値と結果
定性評価	1	監視画面の映像が遠隔監視として機能していること。 実証パターンにより異なる評価を得られたが、概ね車内や外部の状況を十分に把握できた。
	2	連絡用端末(LTE)で監視室との通話が取れること。 全ての走行においてトンネル内総区間にて双方向で意思の疎通が取れた。
定量評価	3	トンネル内でも最適な通信状態を維持し遠隔監視システムの安定運用が図られていること(KGI)。 以下条件を満たすことで遠隔監視システムの安定運用が図れることを確認した。 1. 基地局の配置箇所及び設計を適切に実施すること。 2. レベル4車両における監視システムの適切な設定と運用を行うこと。
	4	車両が遠隔監視システムに要求する通信品質(最低値)を維持できること(KPI)。 (TIRE IV minibus 推奨値: 上り 10Mbps, 下り 5Mbps。最低値上り 3.5Mbps, 下り 0.5Mbps) 基地局を固定化することで、遠隔監視システムに求められる通信品質を維持できることを確認した。
	5	カメラ映像が遠隔監視の業務に耐えうる品質を維持すること。 測定データと監視者の定性評価から本実証で課題点を見出すことができ、固定化によって遠隔監視の業務に耐えうる品質を維持できることを確認した。
	6	車両と遠隔監視者でインターネット通話が取れること。 トンネル実証の全区画・走行で通話が可能であることを確認した。

1) 監視画面目視評価(監視画面の映像が遠隔監視として機能しているかどうか目視によって確認)

解像度は最大で 640x426、最小で 360x240 の範囲で推移した。圏内からトンネルに進入すると、解像度は速やかに最大値から最小値へと変化し、圏外から進入した場合は、すべて最小解像度での映像となった。しかし、最小解像度でも車内や外部の状況を十分に把握できたと、監視者から報告されている。

➡ 参照先: 考察 2-a. 監視カメラ解像度と送信数の変動 (P46)

また、圏外での走行が長時間続くと、通信が復帰しても一部のカメラが起動しないケースがあった。本試験では、ネットワーク復帰後 5 秒でカメラシステムが復旧するように監視システムをチューニングした状態で実施した。しかし、実際には一斉に映像が再開する場合もあれば、カメラによってランダムに再開するケースが多かった。この結果、カメラ稼働台数の制限を設けた方が、システム全体の安定性が向上することが確認された。

➡ 参照先: 考察 2-c. 不感地帯からのカメラの復帰について(P56)

どのカメラが停止するかはランダムであるが、すべてカメラシステムの再ロードによって復旧する。そのため、2 週目以降は、上り走行前にカメラの稼働状況を確認し、意図的にカメラシステムを再ロードする運用に変更した。

次に、カメラの稼働台数を意図的に制限し(7 台から 4 台)、走行を実施した。その結果、少ない台数での映像の方が安定しており、オペレーターからの評価も高いことが確認された。

➡ 参照先: 考察 2-b. 監視カメラ台数絞り込みによる効果 (P52)

2) 車内通話の音声評価(連絡用端末(LTE)での発信・着信と通話品質の確認)

音声通話試験では、IoT ルーター(M2M)との稼働比較を行うため、スマートフォン内のインターネット通話アプリを使用し、監視カメラとは別にテストを実施した。

音声通話は、トンネルの入口手前で車両から発信または着信し、トンネルを通過後に終了する手順で行ったが、すべての区画において安定した通話が確認された。

3) トンネル内でも最適な通信状態を維持し遠隔監視システムの安定運用が図られていること(KGI)。

以下の条件を満たすことで遠隔監視システムの安定運用が図れることを確認した。

1. 本実証の結果を基に、基地局の配置箇所及び設計を実施すること。
2. レベル4車両における監視システムの適切な設定と運用を行うこと。

4) 車両が遠隔監視システムに要求する通信品質(最低値)を維持できること(KPI)。

(TIRE IV minibus 推奨値:上り 10Mbps, 下り 5Mbps。最低値上り 3.5Mbps, 下り 0.5Mbps)

基地局を固定化することで、遠隔監視システムに求められる通信品質を維持できることが確認された。

補足として、ぬかびら源泉郷市街地における固定基地局環境(上り 3.5Kbps)を KPI の基準値としている。また、移動衛星基地局によるトンネル内の電波強度の推移は、固定基地局を上回る結果が得られているため、固定化することで同程度以上のスループットを確保できると考えられる。

➡ 参照先: 考察 1-4. トンネル内の通信(移動衛星基地局)のスループットについて(P41)

5) 車載カメラの映像が遠隔監視の業務に耐えうる品質を維持すること(KPI)。

遠隔監視者の報告および測定データをもとに、本実証での課題点を見出すことができ、基地局の固定化により、遠隔監視業務に耐えうる通信品質を維持できることが確認された。

➡ 参照先: 考察 2-a. 監視カメラ解像度と送信数の変動(P46)

6) 車両と遠隔監視者で通話が取れること(KPI)。

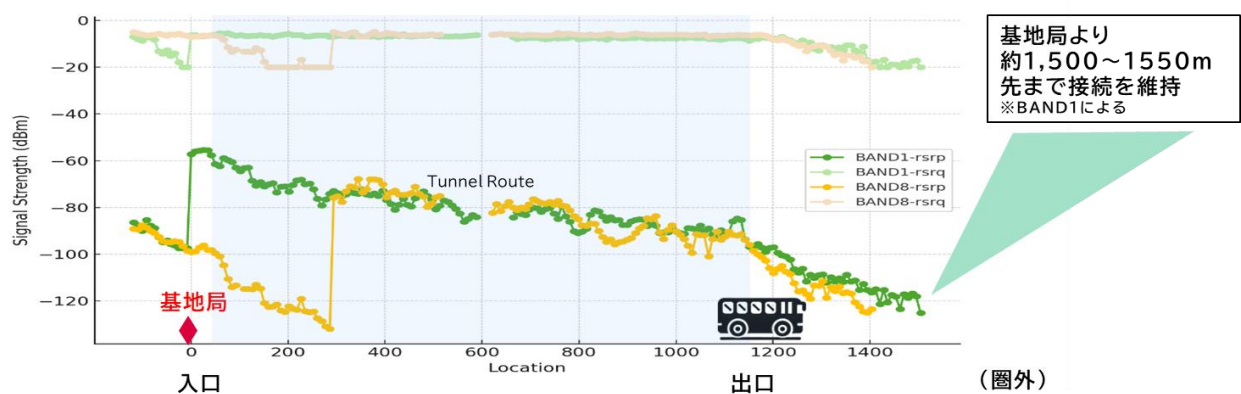
トンネル実証の全区画・走行において、通話が可能であることを確認した。

(4) 考察1 ネットワーク KPI/KGI 項目3)4)について

a. 基地局電波の伝搬遷移と到達距離

図 6-1-a1 は、配置箇所1の移動衛星基地局から 20W の出力で信号を送信した時のトンネル内の電波強度 RSRP である。約 1km の直線的なトンネル区画の先まで電波は届いており、トンネル区間を抜けた基地局より 1200m 地点の RSRP は約-100dBm であった。これは 音声通話では良好、データ通信では中程度の電波環境といえる。従って、トンネル区画約1km 内の電波伝搬は遜色がないことが分かる。これは直線的なトンネルに対して指向性アンテナで吹込みを実施したことで、トンネルの壁面による反射が少なかった事を示している。

RSRP と RSRQ の推移を確認すると、その推移が連動していることが確認できる。これは、主な信号劣化の要因が基地局からの距離であることを示している。なお、以降の経過においても同様の傾向が認められ、トンネル内部において基地局からの距離が信号劣化の主因であることが確認された。



緑色: BAND1-RSRP(dBm) 黄色: BAND8-RSRP(dBm) ※薄色は RSRQ(dBm)

図 6-1-a1 配置箇所1に基地局を配置した場合の RSRP・RSRQ(上り)

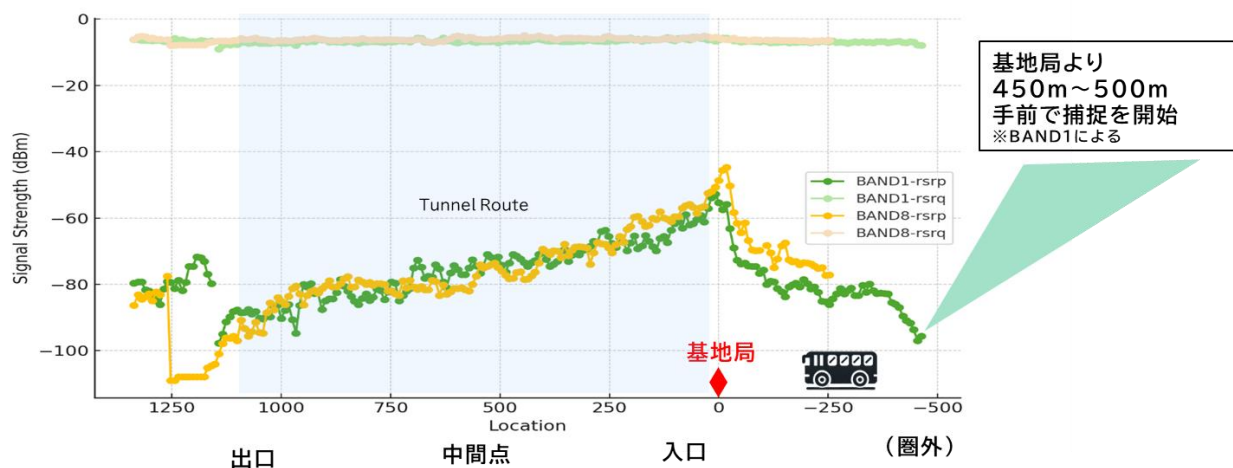
BAND1/BAND8 の電波強度はトンネル内ではほぼ同等であるが、トンネルを抜けると BAND1 が比較的強く遷移する。最終到達点も BAND1 が約 100m 長くなっている。

結果、ぬかびらトンネル入り口前の配置箇所1での指向性アンテナの電波の最長到達位置は、不二川トンネルを越え、ぬかびら国道記念まで達しており、実際にこの地点まで監視映像も継続している。おそらく、本エリアが不感地帯であるため、他の電波干渉を受けにくく、当初の想定距離を超えて到達していると考えられる。

b. 基地局から周辺エリアへの電波伝搬

図 6-1-b1 の配置箇所2は、サービス圏外の不感地帯であり、指向性アンテナをトンネル方向に向けているため、基地局を通過した後に電波の捕捉を開始すると想定していた。しかし、実際には、基地

局に接近するタイミングで電波の捕捉が開始されている。つまり、指向性アンテナの方向に関係なく、基地局の電波は半径最大 450～500m まで広範囲に拡散していることが確認された。また、BAND1 の方が捕捉の開始が早く、BAND8 と比較して 200m～250m の差が出る結果となった。このことから、指向性アンテナであっても周波数及び強度に応じて全方位的に電波が拡散されることが示唆される。※後述の電波補足のタイミング比較参照



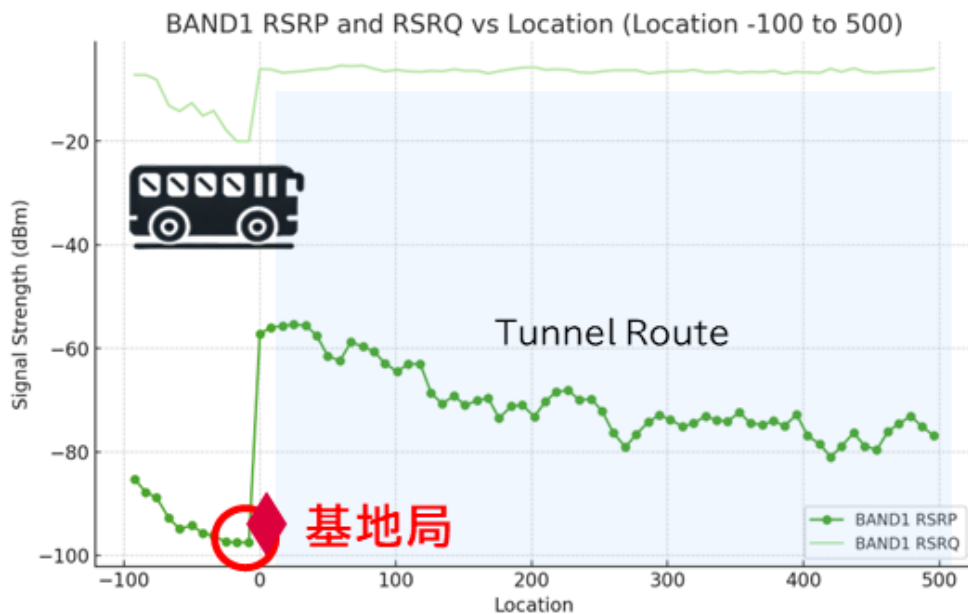
緑色:BAND1-RSRP(dBm) 黄色:BAND8-RSRP(dBm) ※薄色は SRRQ(dBm)

図 6-1-b1 配置箇所 2 に基地局を配置した場合の RSRP・RSRQ(下り)

c. 圏内基地局とのハンドオーバー位置と通信の継続性について

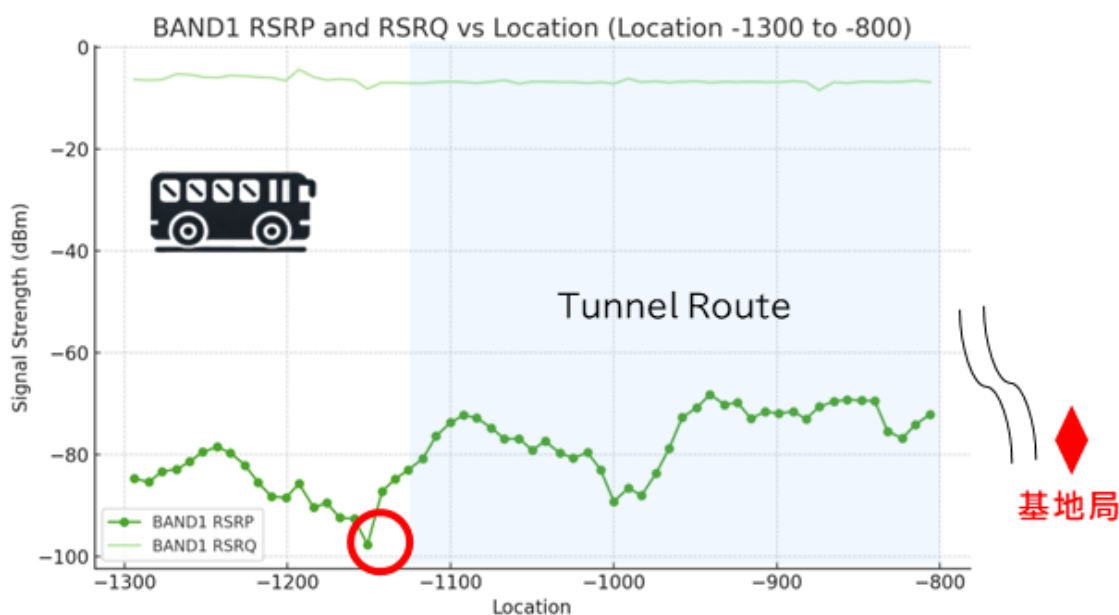
ぬかびら源泉郷には BAND1 の基地局があり、市街地エリアをカバーしている。当該基地局と移動衛星基地局との切り替え(ハンドオーバー)が行われる位置や、監視カメラの安定性については、基地局の配置箇所、出力帯域、および車両の走行方向によって異なる結果が得られた。

まずは、各走行パターンにおけるハンドオーバー位置の関係を確認する。



緑色: BAND1-RSRP(dBm) ※薄色は SRRQ(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-c1 配置箇所 1 に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(上り)



緑色: BAND1-RSRP(dBm) ※薄色は SRRQ(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-c2 配置箇所2に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(上り)

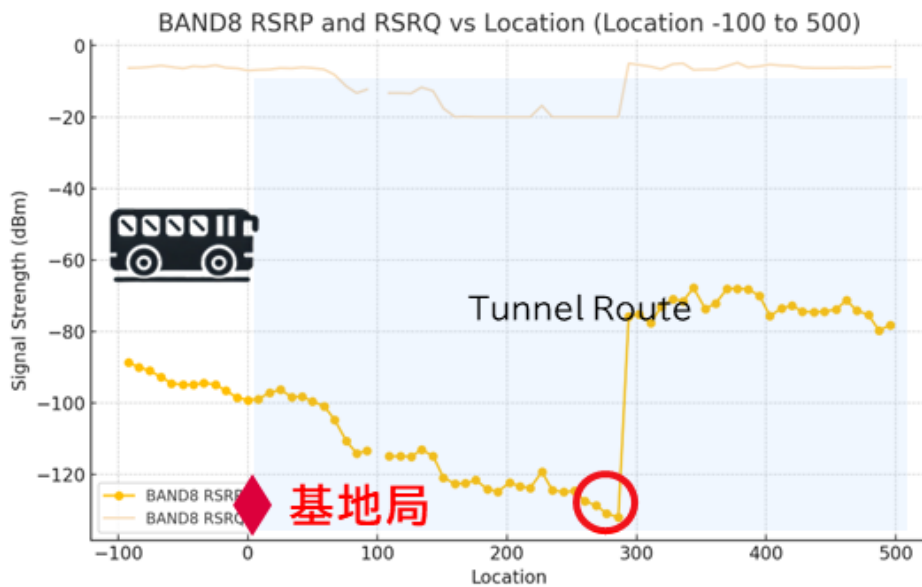
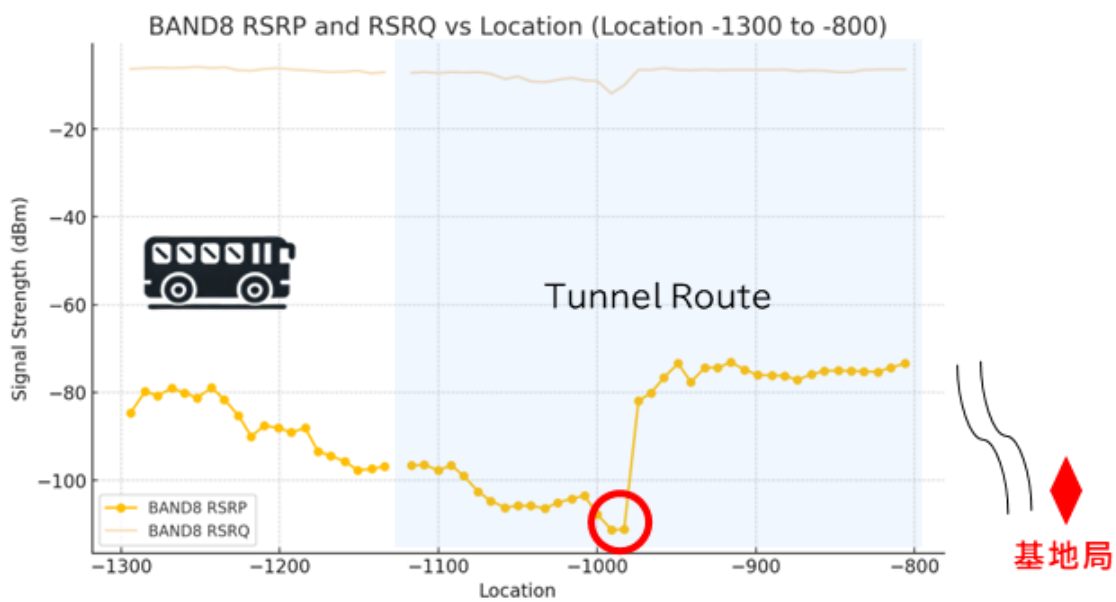


図 6-1-c3 配置箇所 1 に BAND8基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(上り)
 黄色:BAND8-RSRP(dBm) ※薄色は SRRQ(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)



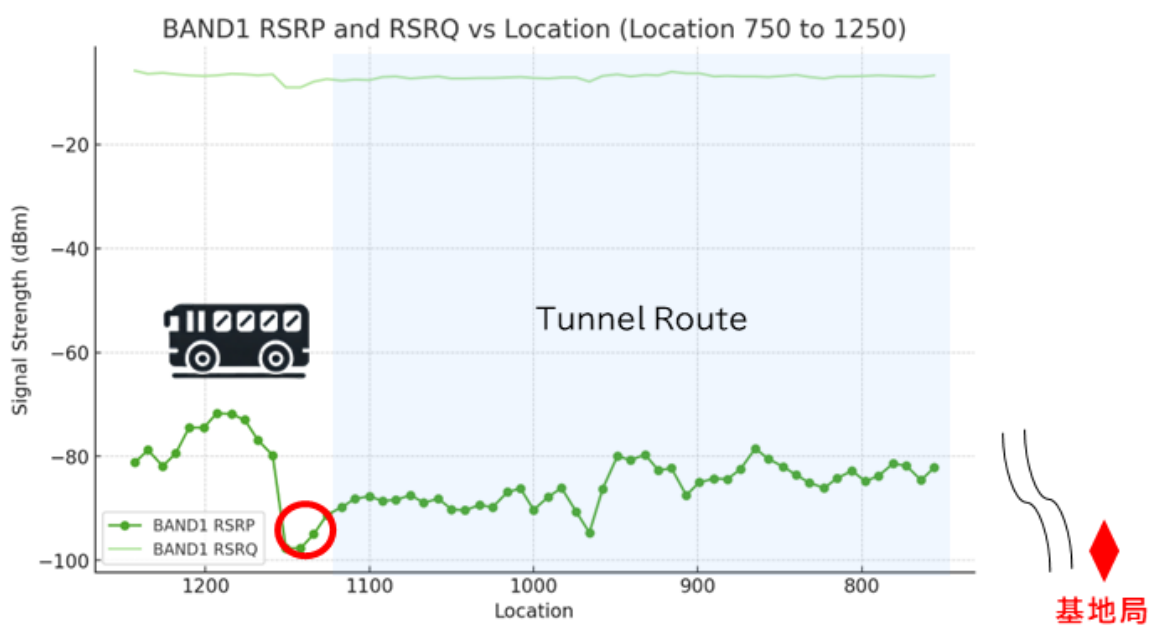
黄色:BAND8-RSRP ※薄色は SRRQ(dBm) は基地局からの距離(m)

図 6-1-c4 配置箇所 2 に BAND8基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(上り)



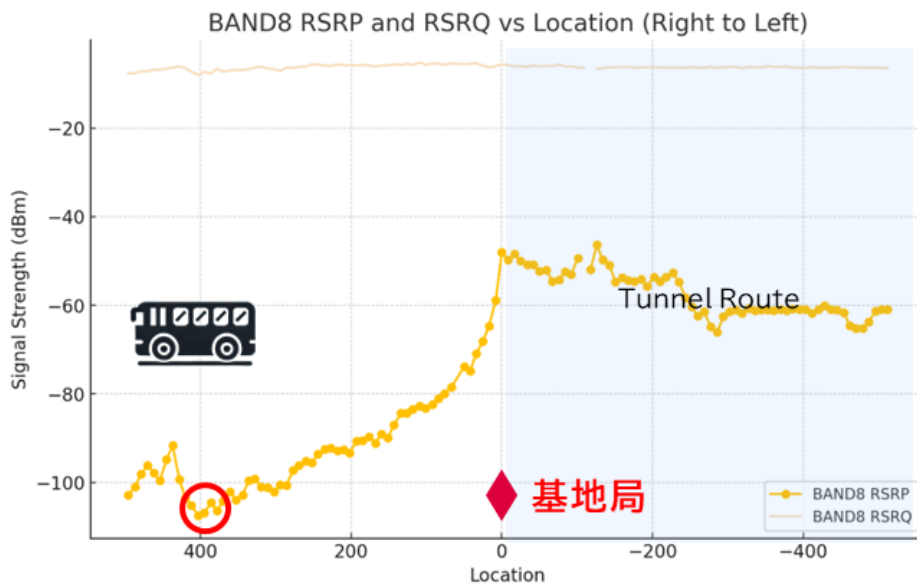
緑色:BAND1-RSRP(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-c5 配置箇所 1 に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(下り)



緑色:BAND1-RSRP(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

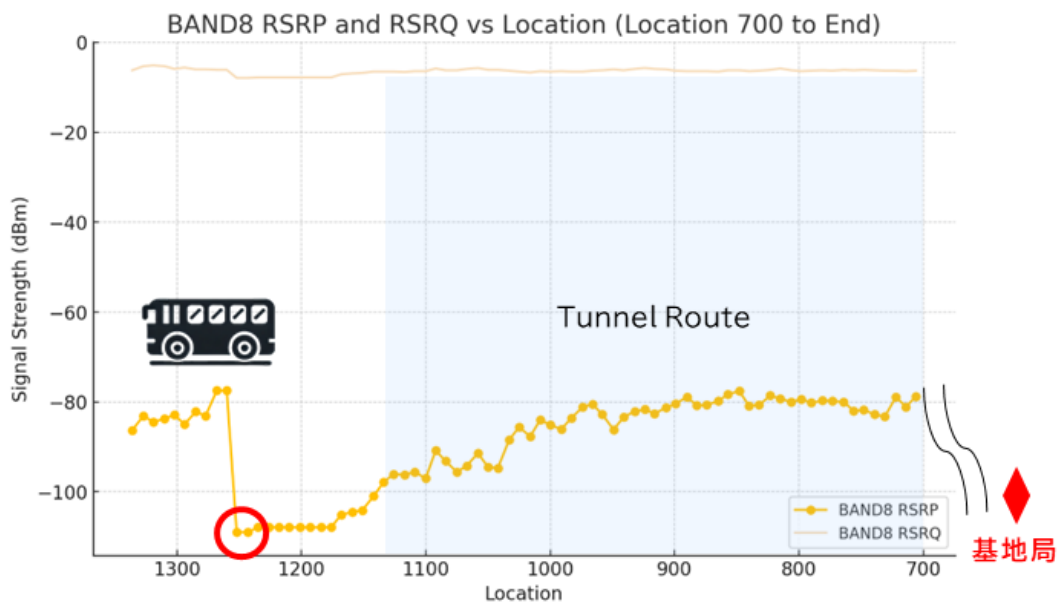
図 6-1-c6 配置箇所 2 に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(下り)



黄色: BAND8-RSRP 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-c7 配置箇所 1 に BAND8基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(下り)

黄色: BAND8-RSRP



黄色: BAND8-RSRP 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-c8 配置箇所2に BAND8基地局を配置した場合の RSRP とハンドオーバー位置(下り)

ハンドオーバーの位置関係設置係を見ると、BAND1 と BAND8 で大きな違いがある。BAND1 においては設置箇所1、2のいずれの場合でも、トンネル入口直前(下りは出口)、つまりトンネル直下で比較的スムーズに既存基地局との切り替えが行われる。

一方で、バンド8では、上りはトンネル内部、下りはトンネル出口先まで切り替えが行われない。特に設置箇所1では、上りでトンネル内最大 300m、下りでトンネル外部 400mとなり、その間の映像も不安定である。

これはぬかびら源泉郷に配備されている基地局が BAND1 であることが影響していると考えられるが、BAND8 の場合、電波強度が-100dBm 以下にならないと切り替えが行われず、そのため切り替え前の一定時間、監視画面が安定しない。

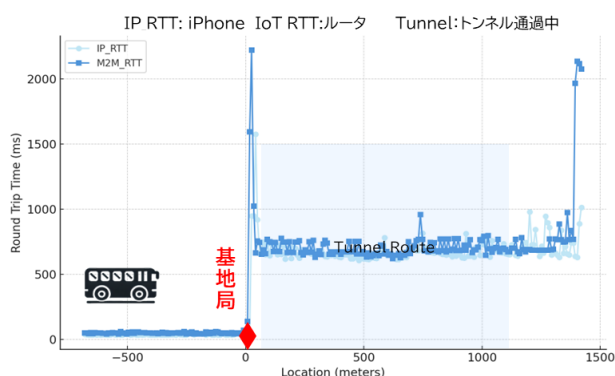
表 6-1-c1 既存基地局とのハンドオーバー位置と切替状況

移動基地局	走行方向	ハンドオーバー位置と監視映像の状況
設置箇所1 (ぬかびらトンネル 西口)	移動基地局>既存基地局 (下り) 	BAND1:不二川トンネル出口手前で通信を開始、ぬかびらトンネルを抜けて基地局通過後速やかに既存基地局にハンドオーバーされる。映像は比較的安定。 BAND8:ぬかびらトンネル進入後に通信を開始、トンネルを抜けても長時間基地局を捕捉し続け自然館手前で既存基地局にハンドオーバーされる。その時点で気 RSRPは-100dBm以下となっており映像は不安定。
	既存基地局>移動基地局 (上り) 	BAND1:基地局通過時にハンドオーバー、映像は比較的安定して推移。 BAND8:トンネル内、既存基地局(B1)がRSRP-100dBm以下のほぼ圏外域になった時点でハンドオーバー。トンネル直下で監視映像のフリーズが発生
設置箇所2 (不二川トンネル 東口)	移動基地局>既存基地局 (下り) 	BAND1:ぬかびらトンネル出口より約40～50m切替。切替時のRSRPは-90dBm前後で映像は安定。 BAND8:上記出口より約120～130mで切替。切替時のRSRPは-100dBm以下となっており、監視映像は一時的にフリーズが発生した。
	既存基地局>移動基地局 (上り) 	BAND1:ぬかびらトンネル入口手前80m前後で切替。RSRPは-80～90dBmで映像は比較的安定している。 BAND8:ぬかびらトンネル進入後約120～130m付近で切替。既存基地局電波の RSRPは-100dBm以下でありトンネル進入時から一定時間映像はフリーズする。

d. トンネル内の通信(移動衛星基地局)のスループットについて

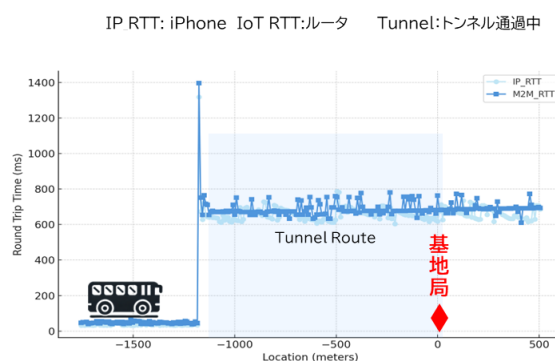
図 6-1-d1 と図 6-1-d2 は、監視カメラ映像配信用に使用している IoT ルーターと、インターネット通話で利用しているスマートフォンから、遠隔監視システムで使用する DNS サーバへ 64bit の PING のデータ値(RTT:ラウンドトリップタイム)の遷移を示している。IoT ルーターもスマートフォンも RTT 値の遷移は、ほぼ一致している。

ハンドオーバー時に移動衛星基地局を補足すると、RTT 値が大きく変動することが確認されたが、これは移動衛星基地局が衛星通信を使用しているためである。ぬかびら源泉郷内の固定基地局では、RTT 値は 50ms～100ms 前後で推移しているが、移動衛星基地局では 500ms～600ms まで低下する。通常であれば、この遅延により TCP/IP 通信におけるスループットは最大 10 分の 1 程度に低下すると考えられる。



青色:IoT ルーターでの RTT(msec)
 薄青色:スマートフォンでの RTT(msec)
 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-d1 配置箇所 1 での RTT 値(下り)
 (下り)

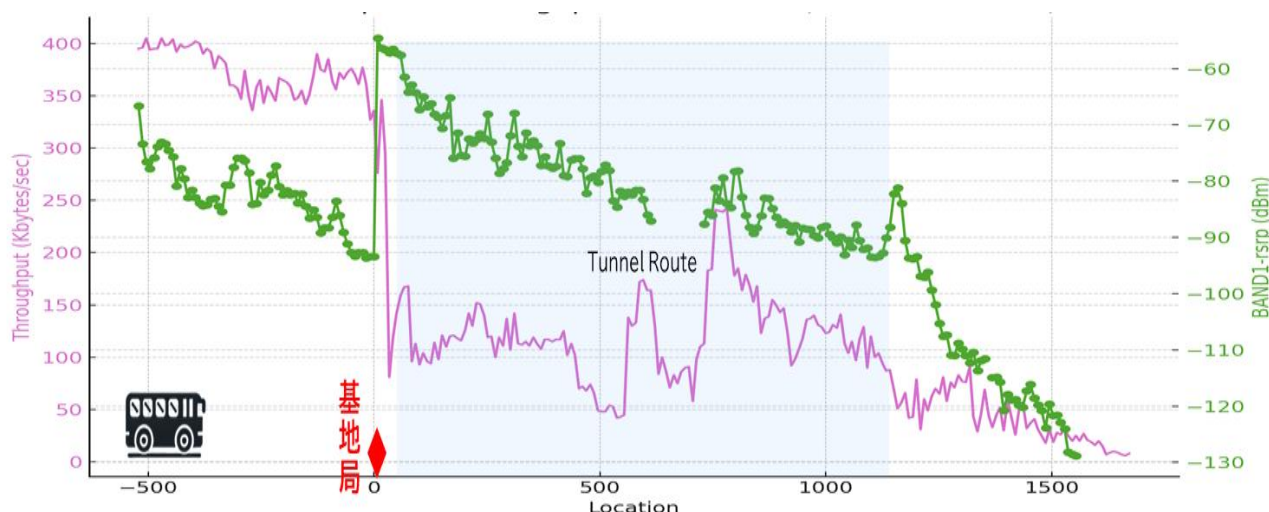


青色:IoT ルーターでの RTT(msec)
 薄青色:スマートフォンでの
 RTT(msec)
 横軸は基地局からの距離(m)

図6-1-d2 配置箇所2での RTT 値

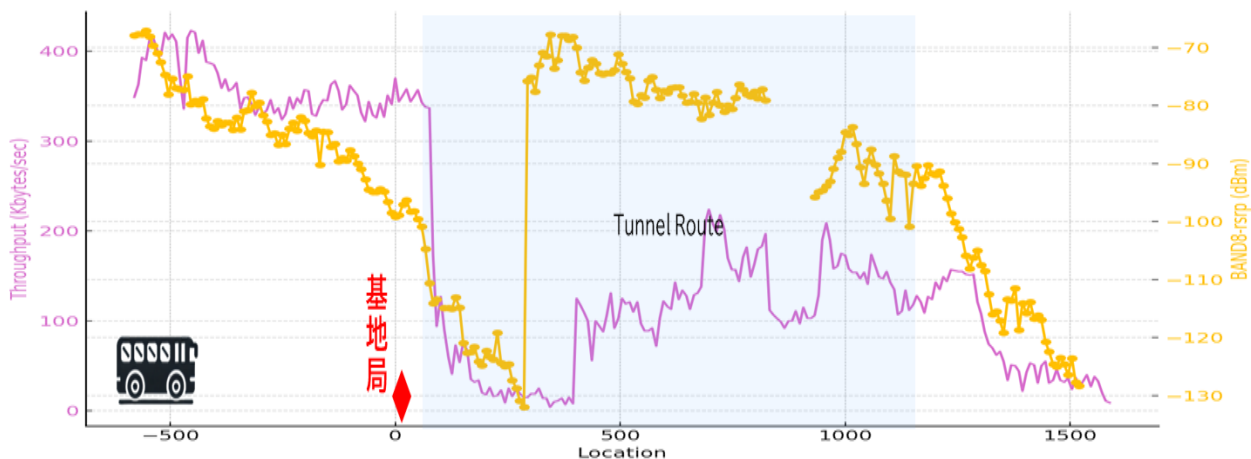
UDP 通信が主となるが、映像配信に使われるストリーミングプロトコル(RTSP)も間接的に RTT の影響を受ける。そのため、衛星基地局へ切り替わるタイミングでスループットの低下は避けられない。

では実際にどの程度の影響が生じているのか、次の図 6-1-d3 と図 6-1-d4 にて確認してみよう。



紫色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) 緑色:BAND1-RSRP(右縦軸 dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-d3 配置箇所 1 に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とスループット(上り)



紫色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) 黄色:BAND8-RSRP(右縦軸 dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-d4 配置箇所 1 に BAND8 基地局を配置した場合の RSRP とスループット(上り)

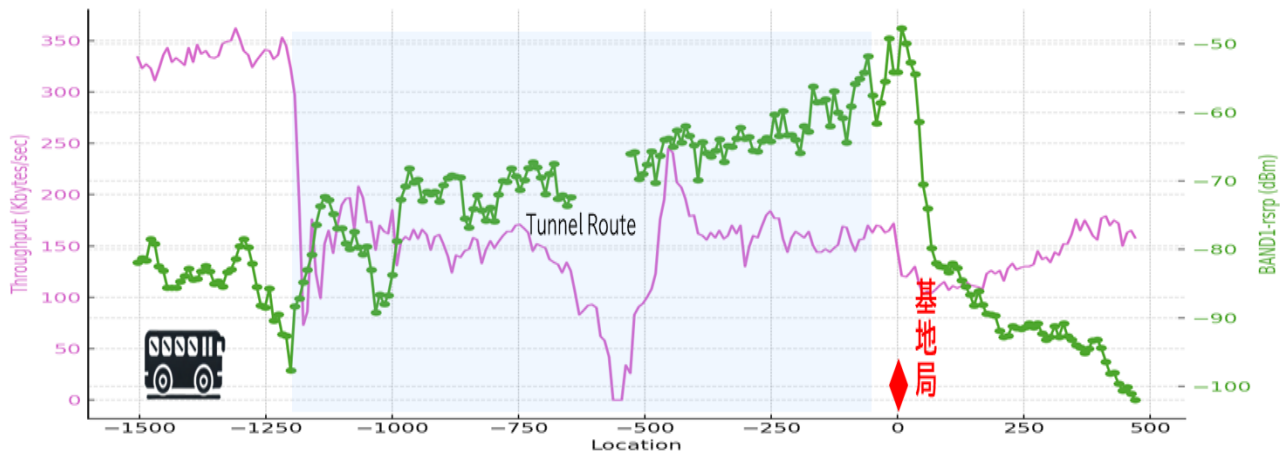
固定基地局の平均スループット(2.8Mbps のライン)から移動衛星基地局の衛星通信に切り替わることで、スループットが約 40%低下し、1.2Mbps 程度になっていることが確認された。山間部であることを考慮してもスループット低下は想定内の結果に収まったと考えられる。ぬかびらトンネル西口に配置された移動衛星基地局のスループットの推移に関しては、BAND1 および BAND8 の双方で安定するまでに時間がかかることが確認された。

次に配置箇所 2 にした場合の結果を、図 6-1-d5 および図 6-1-d6 にて示す。

BAND1、BAND8 共にハンドオーバー後スループットは徐々に安定し、トンネル後半部分では 1.2Mbps のラインで安定している。

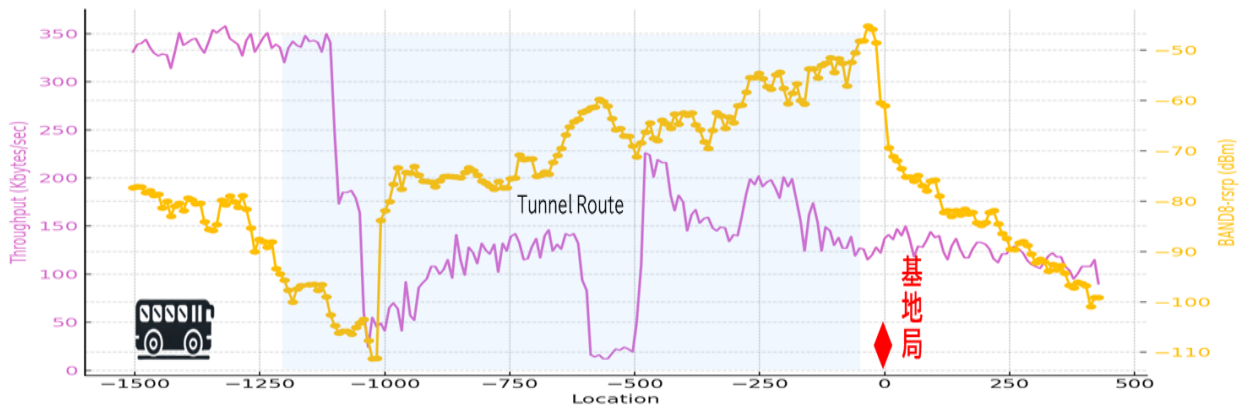
これによると RSRP が-80dBm 以上であれば、スループットは安定して推移する一方で、RSRP が-100dBm 以下になるとスループットは急激に低下し、映像が途絶する。

また、不二川トンネル東口以降は不感地帯となっており、基地局からの距離が延びるに従い信号強度が低下し、スループットも低下するが、遠隔監視システムが監視カメラの解像度およびフレームレートを下げることで、低下したスループットに適応し、映像伝送を継続しようとしていることが確認されている。(後述)



紫色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) 緑色:BAND1-RSRP(右縦軸 dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-d5 配置箇所2に BAND1 基地局を配置した場合の RSRP とスループット(上り)



紫色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) 黄色:BAND8-RSRP(右縦軸 dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

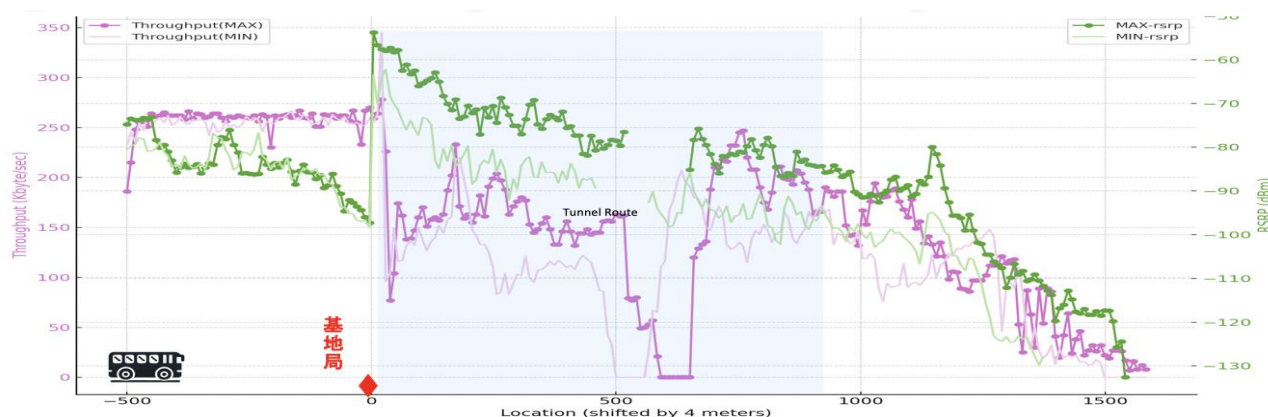
図6-1-d6 配置箇所2に BAND8 基地局を配置した場合の RSRP とスループット(上り)

e. 電波強度におけるスループットの違い

基地局アンテナの出力を 20W(43dBm)から 5W(37dBm)に低下させて比較走行した結果は図 6-1-e1 の通りである。出力が低下すると、伝搬された電波強度もそれに応じて低下していることが確認された。また、到達距離にも約 200m の差が生じている。

ハンドオーバーの位置も含め、トンネル内での電波遷移に大きな変化はなく、監視者の視点では見た

目の違いは確認できなかったが、スループットは明らかに低下した値を示していた。吹込み基地局の出力の違いがスループットに直接影響を与えることが確認された。

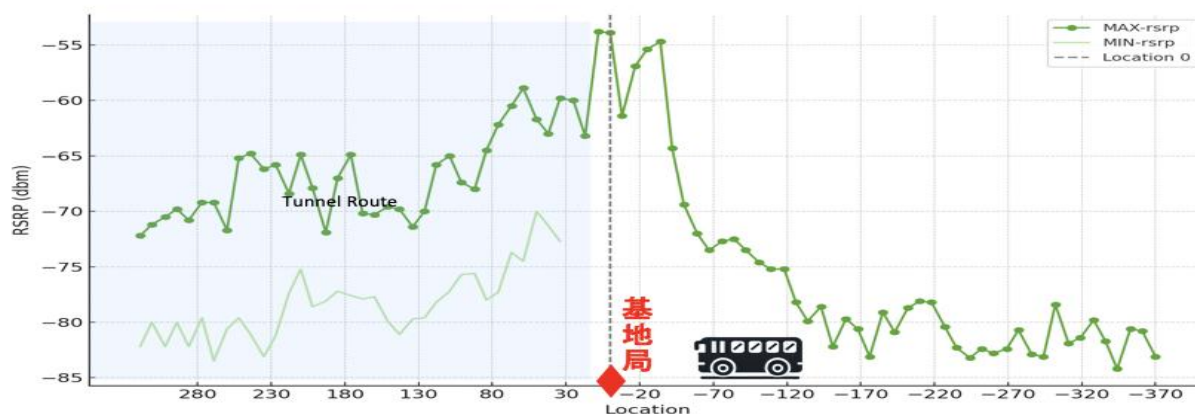


紫色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) 緑色:BAND1-RSRP(右縦軸) 薄色は 5W 値で走行した場合

横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-e1 配置箇所1に基地局を配置した場合のスループット比較(上り)

次に図 6-1-e2 にて基地局の電波を捕捉するタイミングがどうなるか下り走行で確認する。



緑色:BAND1-RSRP(dBm) 薄色は 5W 値で走行した場合(dBm) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-1-e2 配置箇所2に基地局を配置した場合の電波補足距離の比較(下り)

5W の出力(調整値)の場合、基地局を超えないと電波を捕捉できなくなった。20W の出力(通常値)では、基地局の半径 450～500m に伝播していた電波の影響が、5W に低下させることで大幅に小さくなったと言える。出力調整により、指向性アンテナを使用して指定方向以外への電波の伝播を抑制できることが確認された。

※補足:基地局の配置にあたっては、電波干渉などの影響を測定によって事前に確認しますが、一般的に電波強度は最大値(推奨値)で出力を行う設計となっています。本件はあくまで実証のために出力値を変動させています。

(5) 考察2 遠隔監視システム KPI/KGI 項目1)2)及び5)6)について

a. 監視カメラ解像度と送信数の変動

各走行パターン別に遠隔監視者の定性評価、フレームレートとカメラ映像枚数、データ送信量について記載する。

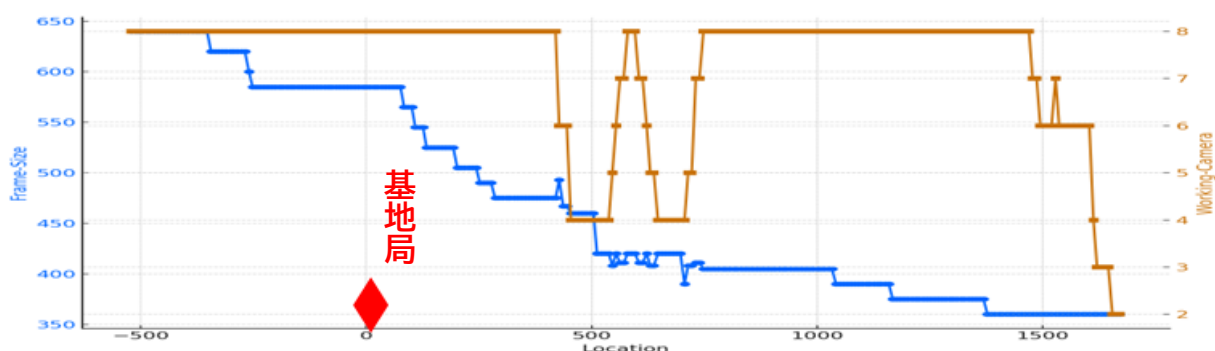
※補足:走行前の監視システム通信状態の公平性を図るため、ぬかびら源泉郷(サービス圏内)にて監視システムのリセットを行い、7 台の監視カメラ全台数の稼働を確認した後、実証走行とデータ比較を行います。

配置箇所1:BAND1 基地局での7画面監視映像(上り)

表 6-2-a1 監視者・ビデオによる定性評価

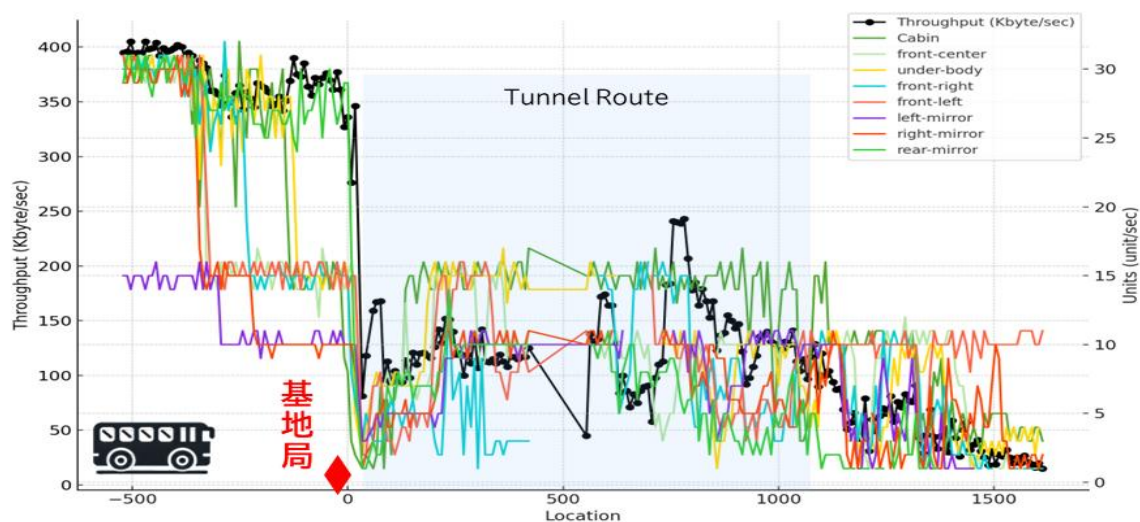
	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	7	○	○	○	○	△	○	○	○	安定
トンネル前半	0		▲	▲	▲	△	▲	▲	▲	中央手間で停止
トンネル後半	0	▲	▲	▲	▲	△	▲	▲	▲	トンネル入って復活、安定
出口奥	7	○	○	○	○	△	○	○	○	安定
監視者意見	ぬかびら西口から中間点までは5画面。中間付近で一度カメラが途切れる。									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方面面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5-1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a1.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸 fps) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a1.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

トンネル進入後スループット低下の影響で解像度は徐々に低下するが、7 台のカメラが継続して稼働している。(図 6-1-a1.1)

基地局から 400m にかけてスループットは安定しているが、映像のフレームレートは毎秒 15～10 枚、10枚～5 枚とで各カメラで異なっている。(図 6-2-a1.2)

【走行中】

基地局から 400m を超えて中間点においてスループットが急激に低下し、稼働カメラ数が4台まで減少、中間点を超えて 550m 以降、次のトンネル内に入るタイミングで 7 台全てのカメラの映像が復活している。(図 6-2-a1.1)。

復活後の映像のフレームレートは全てのカメラ毎秒 10 枚以下で推移。(図 6-2-a1.2)

【トンネル出口】

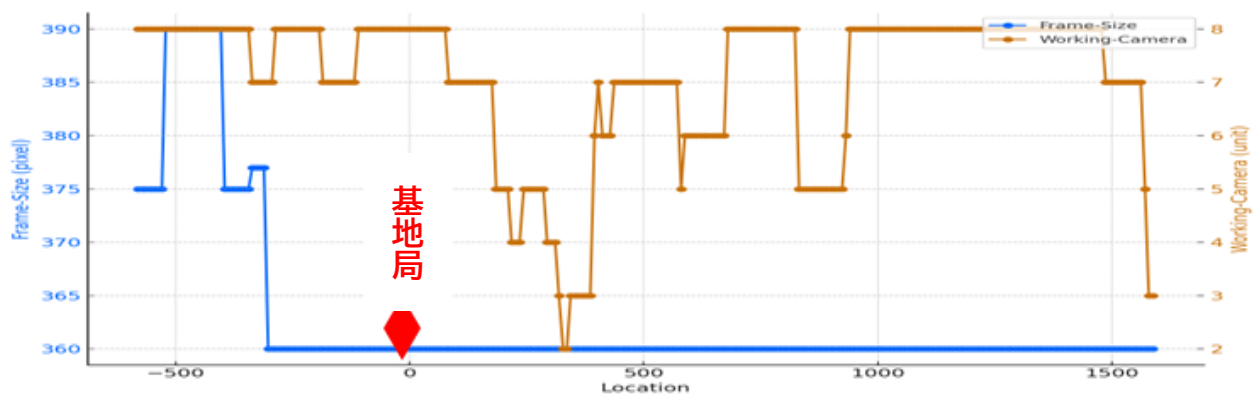
基地局から遠ざかるにつれてスループットが徐々に低下し、各カメラの送信フレーム数も徐々に減少している(図 6-2-a1.2)が、出口から 500m 先(基地局から 1500m 先)までカメラの稼働は維持されている。(図 6-2-a1.1)

配置箇所1:BAND8基地局での7画面監視映像(上り)

表 6-2-a2 監視者・ビデオによる定性評価

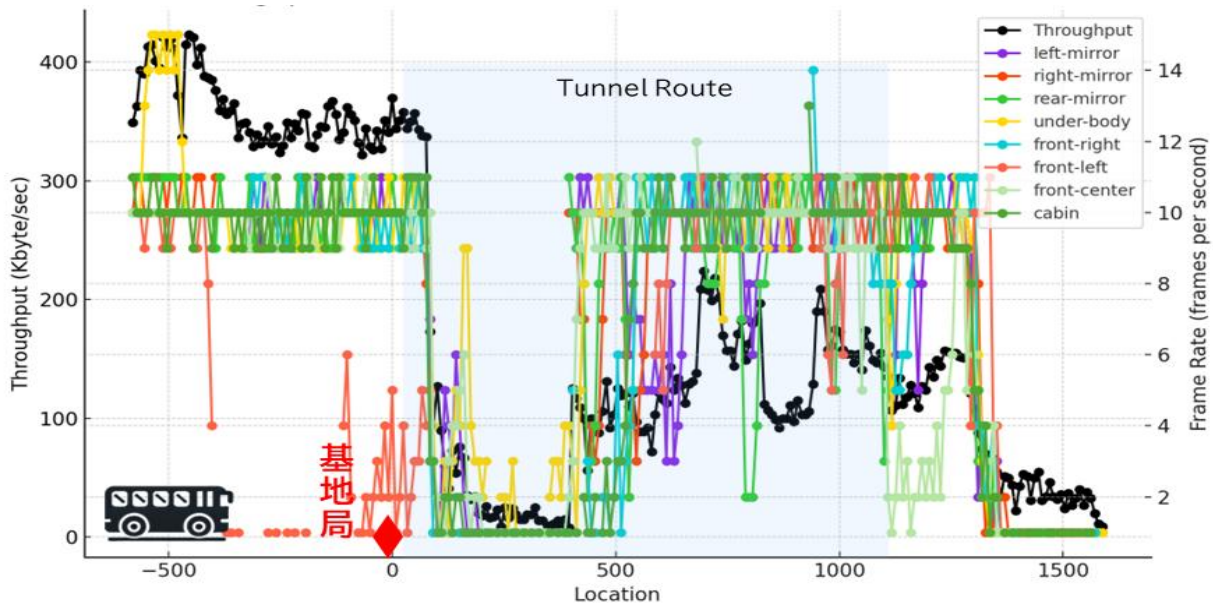
	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	7	○	○	○	○	△	○	○	○	
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲	△				停止を繰り返す安定しない
トンネル後半	1	▲	▲	○	▲	△				徐々に復活
出口奥	4	○	○	○	○	△				
監視者意見	途切れつつ確認									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方正面、FL:車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a2.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸 fps) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a2.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

トンネル進入後 7 台のカメラは基地局から400m 先にかけて徐々に稼働を停止している。(図 6-2-a2.1)

実際はトンネル進入後からスループットは急激に低下していて 100m 先で既に殆ど映像は止まった状態となっている。これはフレームレートを見て確認できる。(図 6-2-a2.2)

【走行中】

中間点を超えたところで7台カメラ全ての稼働が復活した(図 6-2-a2.1)。

基地局から 400m 以降でスループットが徐々に回復し、各カメラのフレームレートが順次每秒9枚～11 枚に回復していることがわかる。(図 6-2-a2.2)

【トンネル出口】

トンネルを抜け、基地局から約1100m 以降スループットが徐々に低下し、各カメラの送信フレーム数も徐々に減少している(図 6-2-a2.2)が、カメラの稼働台数は7台を維持し、基地局から 1500m 付近で全てのカメラの稼働が停止。(図 6-2-a2.1)

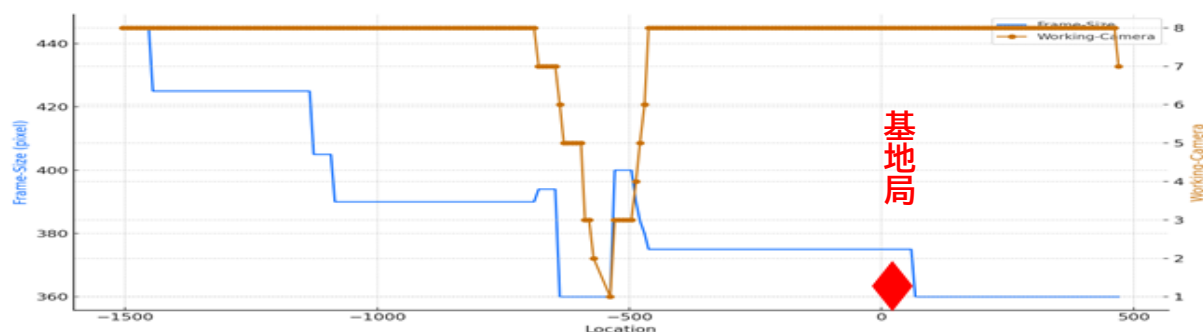
配置箇所2: BAND1基地局での7画面監視映像(上り)

表 6-2-a3 監視者・ビデオによる定性評価

	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	7	○	○	○	○	／	○	○	○	入口手前カクカク感あり
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲	／	▲	▲	▲	中央手間で全て停止
トンネル後半	0	▲	▲	▲	▲	／	▲	▲	▲	トンネル入って復活
出口奥	7	○	○	○	○	／	○	○	○	安定
監視者意見	途切れつつ7画面確認。									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方正面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。

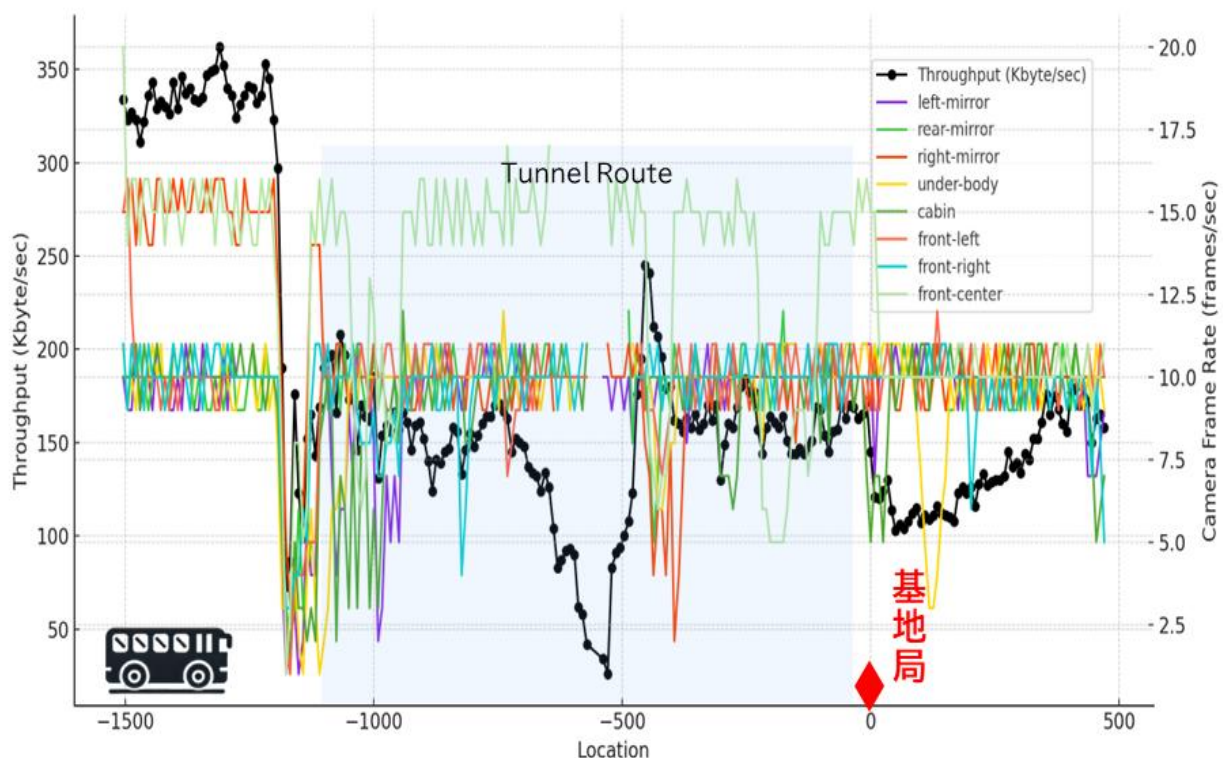
【稼働カメラ台数と解像度の変化】



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a3.1 稼働カメラ台数と解像度の変化

【スループットと送信フレーム数の変化】



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a3.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

基地局から 1100mとなるトンネル進入時より稼働カメラは 7 台を維持(図 6-2-a3.1) 、一方でフレームレートは進入時に全てのカメラで毎秒10枚以下に低下し、その後スループットの回復とともにフレームレートも数が毎秒 10 枚前後に戻り安定している。(図 6-2-a3.2)

【走行中】

基地局から700m～中間点においてスループットが急激に低下し稼働カメラ数も1台まで減少、中間点を過ぎて直ぐに7台のカメラの稼働が復活(図 6-2-a3.1)。

中間点以降はスループットも安定し、基地局を超えるまで 7 台全てのカメラのフレームレートも毎秒 10枚前後で推移。(図 6-2-a3.2)

【トンネル出口】

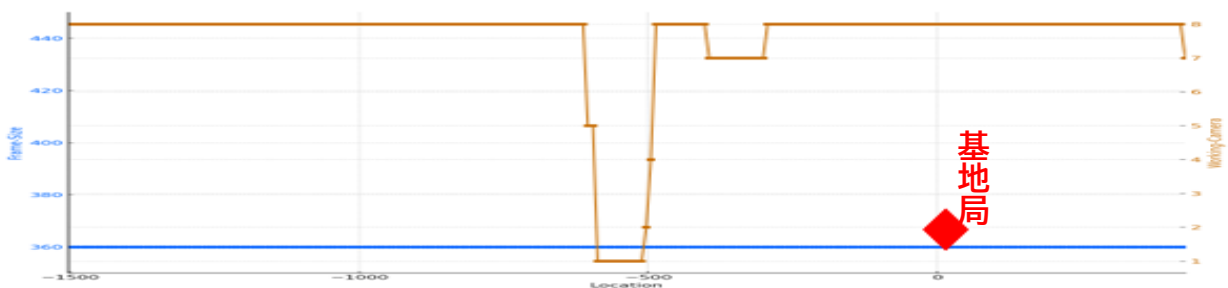
基地局を超えて 500m先まで画面解像度は下がったが、7台の稼働は維持された。(図 6-2-a3.1) スループットは基地局を超えた時点で若干の上昇見せその後に徐々に低下した。(図 6-2-a3.2)

配置箇所1:BAND8基地局での7画面監視映像(上り)

表 6-2-a4 監視者・ビデオによる定性評価

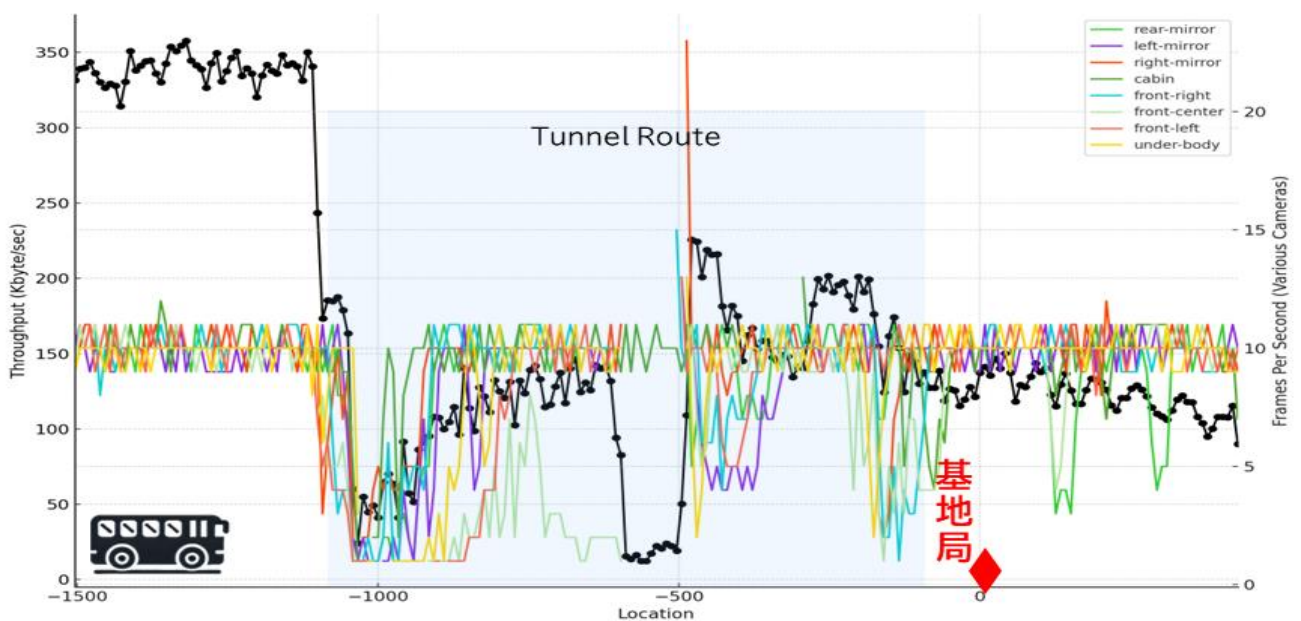
	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	7	○	○	○	○	◊	○	○	○	
トンネル前半	1	○	▲	▲	▲	◊	▲	▲	▲	中央吹抜手間で停止
トンネル後半	6	▲	○	○	○	◊	○	○	○	トンネル入って即復活
出口奥	7	○	○	○	○	◊	○	○	○	安定
監視者意見	ぬかびら東口～不二川中央で途切れ、車内のみ全区間確認									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方正面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a4.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸 fps) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-a4.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

7台のカメラの解像度はトンネル進入時から低い状態で進入したが、稼働カメラ台数は 7 台を維持している(図 6-2-a4.1)。

トンネル進入時にスループットの急激な低下が見られたがすぐに回復、各カメラのフレームレートも毎秒 10 枚前後で安定的に推移した。(図 6-2-a4.2)

【走行中】

解像度は最低の状態だが7台のカメラの稼働は継続して推移。(図 6-2-a4.1)

基地局に近づくに従い、徐々にスループットが上昇し、監視カメラのフレームレートもレートの低いものも基地局から 500m の中間点以降に回復し、毎秒10枚前後で安定的に推移した。(図 6-2-a4.2)

【トンネル出口】

トンネルを抜け基地局を通過してもスループットは基地局から 500m先まで安定、フレームレートも毎秒 10 枚前後で推移している。(図 6-2-a4.2)

b. 監視カメラ台数絞り込みによる効果

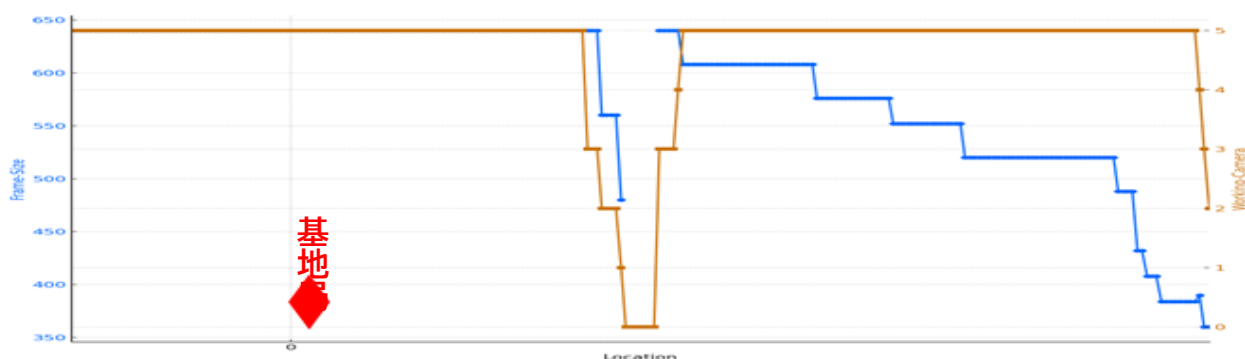
監視カメラの台数を 4 台(非監視用の 1 台を除く)に減らして監視を実施したところ、7 台での監視カメラ設定よりも映像が確認しやすくなり、監視者からも車両外部および内部の映像を安定して確認できたとの報告があった。走行経路において 7 台のカメラ映像を伝送するための十分な帯域幅が確保できていなかったため、台数を減らすことでその状況が改善されたものと考えられる。(以下、BAND1 の上り走行で比較を行う)

配置箇所1:BAND1基地局での4画面監視映像(上り)

表 6-2-b1 監視者・ビデオによる定性評価

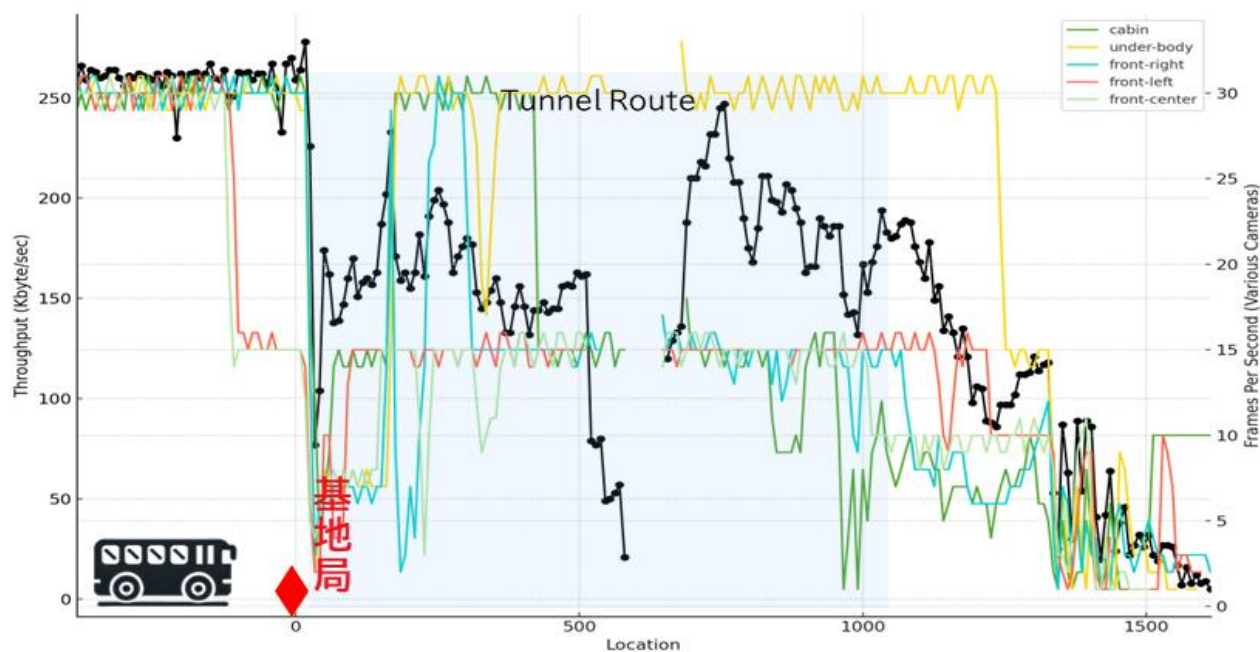
	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	4	○	○	○	○	△	△	△	△	
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲	△	△	△	△	不安定、入って停止
トンネル後半	0	▲	▲	▲	▲	△	△	△	△	途中から復帰し安定
出口奥	4	○	○	○	○	△	△	△	△	安定
監視者意見	ぬかびら中央から不二川東口までは見えない									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方面面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台)

図 6-2-b1.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸 fps) 横軸は基地

局からの距離(m)

図 6-2-b1.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

7画面走行と同条件で比較:解像度は既存基地局から 640 ピクセルで一定の状態を保ち、稼働数も4台で堅持している(図 6-1-a1.1 を図 6-2-b1.1 と比較)。

ハンドオーバー時のスループット低下から徐々スループットが回復するという推移は変わらないが、稼働カメラのフレームレートはより早く戻している(図 6-1-a1.2 を図 6-2-b1.2 と比較)。

【走行中】

7画面走行と同条件で比較:中間点付近で稼働カメラ数が急激に減少して直ぐに復旧する点は同じだが、解像度が平均で 600 ピクセルまで戻り、その後徐々に低下していく(図 6-2-b1.1 を図 6-2-a1.2 と比較)。

各カメラのフレームレートも中間点を除くトンネル区間全てにおいて毎秒 30 枚、15 枚前後で推移している。(図 6-2-b1.2 を図 6-2-a1.2 と比較)

【トンネル出口】

7画面走行と同条件で比較:トンネルを抜けて基地局から1100m超えてもスループットは徐々に低下しているが、解像度を落としながらカメラの稼働は継続(図 6-2-b1.1 を図 6-2-a1.1 と比較)。

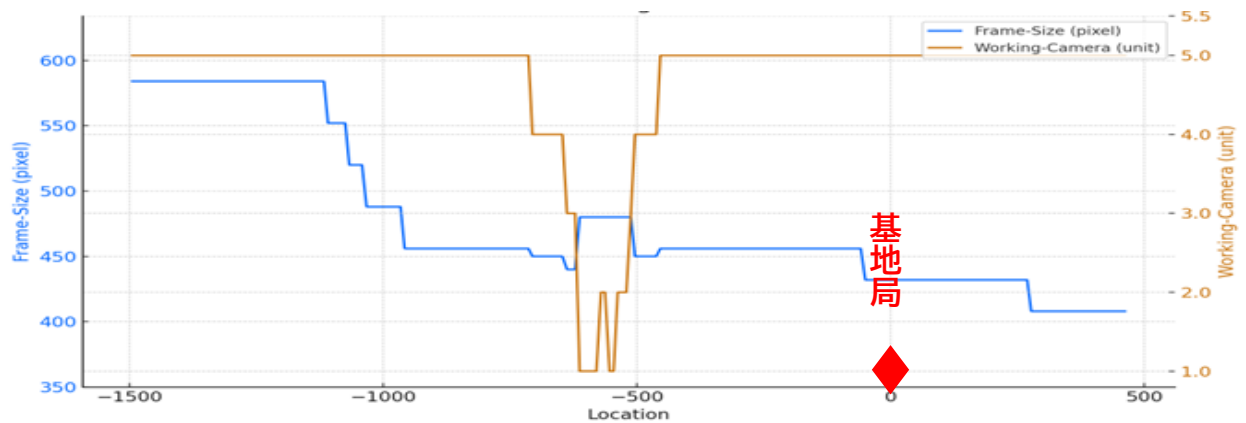
スループットの低下に合わせてフレームレートも徐々に減少、基地局から 1500mまでカメラの稼働を確認できた。(図 6-2-b1.2 を図 6-2-a1.2 と比較)

配置箇所2: BAND1基地局での4画面監視映像(上り)

表 6-2-b2 監視者・ビデオによる定性評価

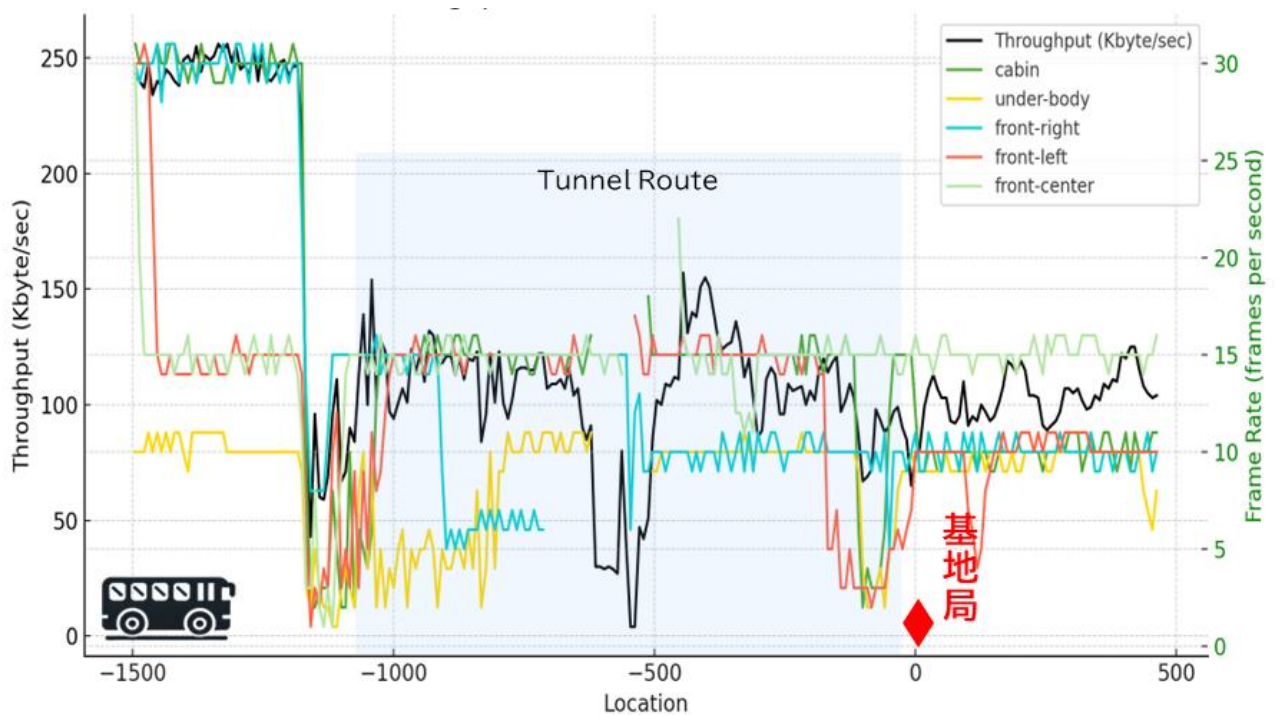
	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	4	○	○	○	○					
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲					中央近づくと同次停止
トンネル後半	0	▲	▲	▲	▲					トンネル入ると同次回復
出口奥	4	○	○	○	○					安定
監視者意見	途切れつつ4画面確認									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方正面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸 pixel) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸 台) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-b2.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸 fps) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-b2.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

【トンネル入口】

7画面走行と同条件で比較:トンネル進入後でも稼働カメラは4台を維持、解像度は徐々に低下し、平均450ピクセルで安定(図6-2-b2.1を図6-2-a3.1と比較)。

進入直後は一部のカメラのフレームレートの低下が見られたが徐々に回復(図6-2-b2.2を図6-2-a3.2と比較)

【走行中】

7画面走行と同条件で比較:スループットの遷移はほぼ変わらないが、各カメラの解像度は平均450ピクセルのまま一定(図6-2-b2.1を図6-2-a3.1と比較)。

各稼働カメラのフレームレートは毎秒15枚、10枚前後でトンネル区間を安定的に推移している(図6-2-b2.2を図6-2-a3.2と比較)。

【トンネル出口】

7画面走行と同条件で比較:出口を過ぎても基地局から500m先までカメラは解像度を維持したまま稼働している(図6-2-b2.1を図6-2-a3.1と比較)。スループットも各カメラのフレームレートも安定して推移した(図6-2-b2.2を図6-2-a3.2と比較)。

c. 不感地帯からのカメラの復帰について

下り走行において不感地帯から基地局の電波を捕捉しネットワークが復旧すると、その後監視カメラの映像が戻ってくるが、一部の監視カメラが復旧できない事象が発生している。これは台数を絞り込んでも大きな効果はなく、またフリーズするカメラもランダムに発生する。おそらく一部のカメラが復旧すると一気に帯域を消費してしまい、そのため他のカメラが帯域を確保できない状態になっているものと考えられる。

表 6-2-c1 不感地帯から走行(下り)した際に映像が復旧した監視カメラ台数

基地局	設定画面	復帰画面枚数 ※有効走行のみ	復帰枚数確率
配置1(下り)	7画面	5,7,5,7,2,7 / 6走行	78%
	4画面	1,3,4 / 3走行	60%
配置2(下り)	7画面	4,2,1,7,4,4,5 / 7走行	55%
	4画面	1,2,3,2 / 4走行	50%

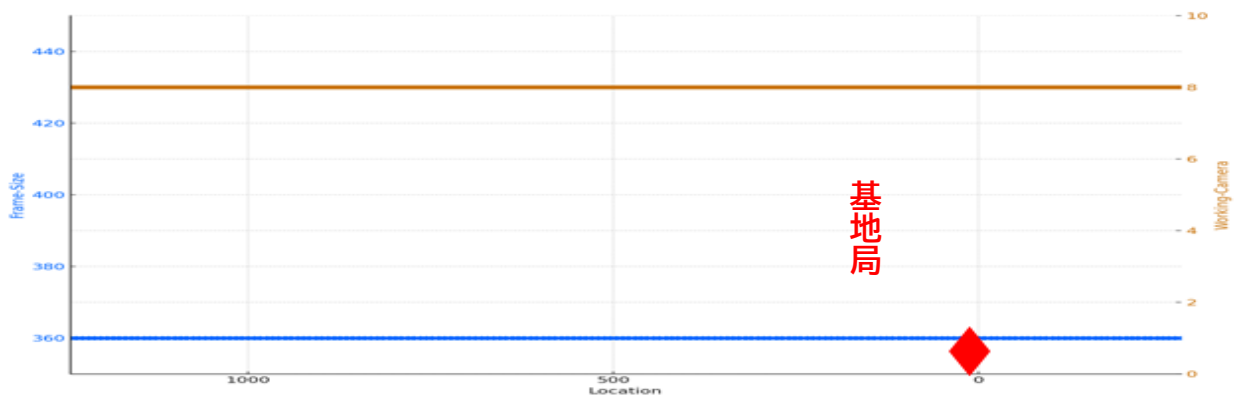
次に不感地帯から基地局を捉えて通信が回復し、映像が回復する過程の中でこういった状況が発生しているかを確認するため、配置箇所2での下り方向で全ての映像復旧が確認できた走行のケースを検証する。

配置箇所2：BAND8基地局での7画面監視映像(下り)

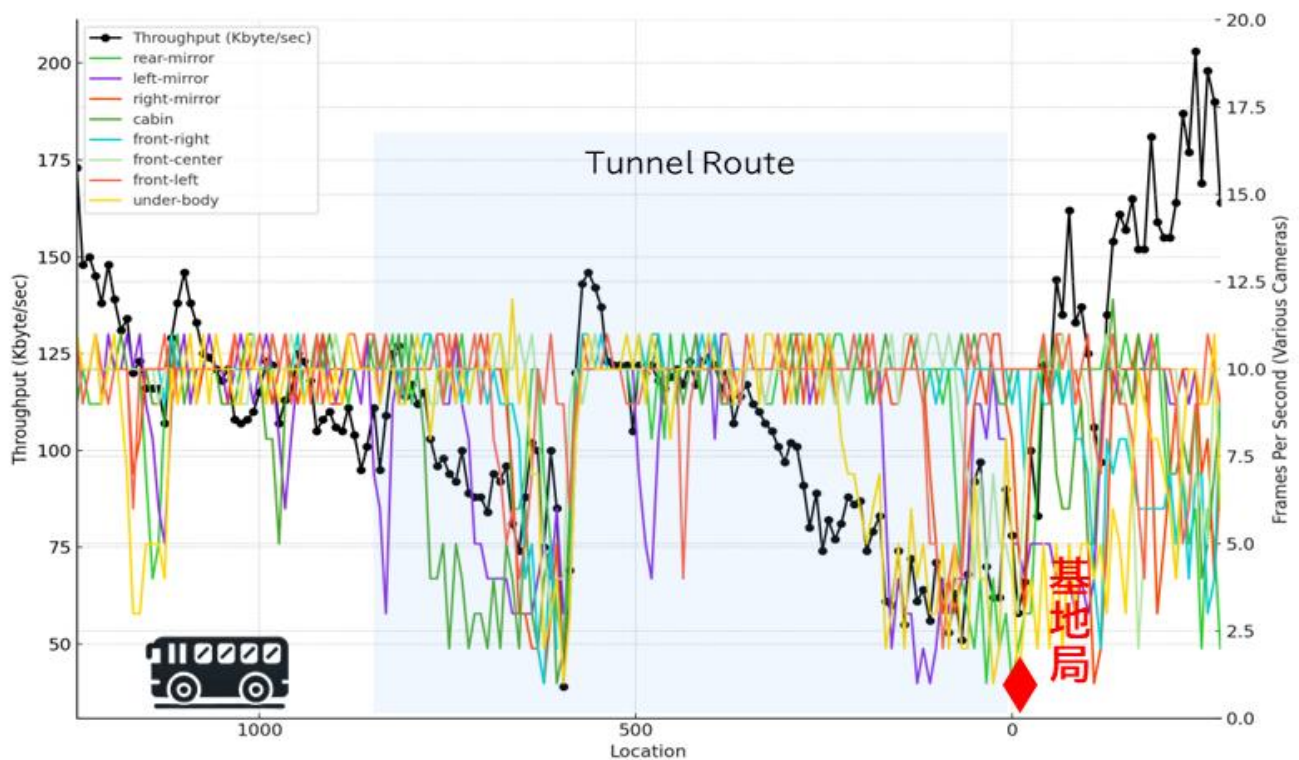
表 6-2-c2 監視者・ビデオによる定性評価

	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	7	○	○	○	○	△	○	○	○	安定
トンネル前半	7	○	○	○	○	△	○	○	○	多少ぼやけ、安定
トンネル後半	7	○	○	○	○	△	○	○	○	多少ぼやけ、安定
出口奥	7	○	○	○	○	△	○	○	○	安定
監視者意見	概ね良好									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方面面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



青色:平均フレームサイズ(左縦軸) 茶色:稼働カメラ数(右縦軸) 横軸は基地局からの距離(m)
図 6-2-c2.1 稼働カメラ台数と解像度の変化



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-c2.2 スループットと各カメラのフレームレート遷移

図 6-c2.2 によると基地局に到達する200m 手前で急激にスループットが上昇するも、その後急激に低下し、基地局通過後徐々にスループットが回復している。その際各稼働カメラのスループットは大きく変動、基地局通過後徐々に回復して毎秒 10 枚前後に回復している。通信の回復と同時に、全てのカメラが帯域を奪い合った結果、生じたものだと考えられる。

全てのカメラの解像度は 360 ピクセルという低い値で推移し続けた(図 6-2-c2.1)が、フレームレートはトンネル区間で維持され、下り走行においては中間点の吹抜箇所におけるスループットの低下もほとんど発生しない(後述)ことから、結果、定性評価は軒並み安定的と評価されたと判断できる。(表 6-2-c2)

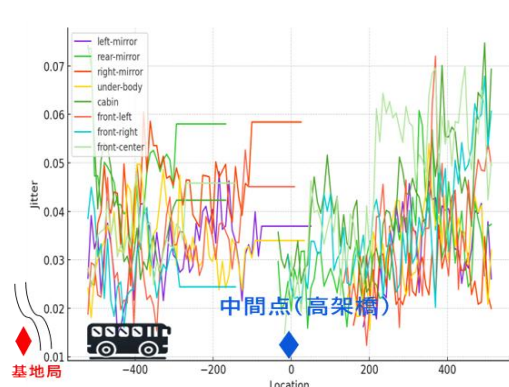
d. 中間点(吹抜区間)でのスループット低下の原因と監視映像への影響

ぬかびら源泉郷(圏内)から圏外に向かっての上り走行において、ぬかびらトンネルと不二川トンネルを結ぶ中間点(吹抜区間)で、監視画面がフリーズする現象が確認された。この現象は、基地局の位置や周波数に関係なく発生し、中間点を通過後に、順次監視画面が復旧することが確認された。

一方、不二川トンネル側からぬかびらトンネルに向かう下り走行では、この現象は発生しなかった(前項の図 6-2-c2.2 を参照)

中間点においては、ネットワーク通信(RTT)上で見ても通信断は発生しないが、各監視カメラに約 10 秒～15 秒間データ送信が停止する現象が確認された。各監視カメラのフレームレートにおいても中間点手前から急激に低下し、中間点を超えると徐々に回復することが確認された。

事前調査により、ぬかびら源泉郷内の既存基地局の微弱な電波が高架橋に回り込んでいることが確認されており、当初は何らかの電波干渉が発生していると考えていたが、最終的に屋外の基地局(ぬかびら源泉郷内の既存基地局)から山間部を回り込んできた電波に対してハンドオーバーしていることが原因であると結論付けられた。



各カメラのジッタ値(色別 sec) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-d2.1 配置箇所1・BAND1 のジッタ値遷移(上り)

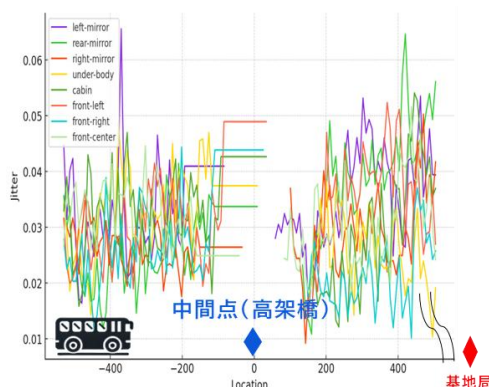


図 6-2-d2.2 配置箇所2・BAND1 のジッタ値遷移(上り)

グラフが示す通り、移動中の通信環境において、単に揺らぎのみでこの事象を説明するのは困難である。またこの間、遠隔監視で使用している IoT ルーターのネットワーク通信(RTT)は維持されており電波干渉では説明がつかない。

つまり、ハンドオーバーによって通信自体が途絶しなかったものの、屋外基地局の微弱な電波により急激なスループットの低下が発生し、映像配信がほぼ不可能な状態になったと考えられる。吹き抜け箇所を通過後、スループットが向上したのは、再び移動無線車の電波を捕捉し、カメラシステムが通信を再開し、徐々にスループットが安定してきたことをデータが示しているためである。

結論として、トンネルが伝搬距離の範囲内であっても、途中に吹抜空間が存在すると、他から回り込んでくる電波の干渉を受ける可能性があることや、車両の走行方向によっても結果が異なるため、一般的な電波調査では検出が難しいことが示唆される。

e. 電波出力の違いによる映像の変化

ネットワーク評価では、電波出力が弱くなると、伝播する電波強度が低下し、それに伴ってスループットも低下することが確認された。ここでは、その影響が監視者の定性評価にどのように及ぶかを確認する。

表6-2-e1 および 図 6-2-e1 は調整された出力電波による遠隔監視者の定性評価と稼働カメラのスループット定量データである。電波出力以外同条件での表 6-2-b1 及び図 6-2-b1.2 のデータと比較したが、スループットの遷移に大きな違いは見られず、監視者による定性的な評価にも大きな差はなかった。

配置箇所1: BAND1基地局出力調整での4画面監視映像(上り)

表6-2-e1 監視者・ビデオによる定性評価

	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	補足
入口手前	4	○	○	○	○	△	△	△	△	安定
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲	△	△	△	△	入口出口、中央部で停止
トンネル後半	4	○	○	○	○	△	△	△	△	安定
出口奥	4	○	○	○	○	△	△	△	△	安定
監視者意見	ぬかびら東口まで確認、以降は中央画面以外クリックで回復									
音声通信	全区間で通話									

※CAB:車内、FR:車両前方右側、FC:車両前方面面、FL 車両前方左側、RM:車両右方、ReM:車両後方、LM:車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



黒色:スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他:各カメラのフレームレート(右縦軸) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-e1 スループットと各カメラのフレームレート遷移

今度は、配置箇所 2 において、不感地帯から下り方向に走行した際の定性評価(表 6-2-e2)と定量データ(図 6-2-e2)について、配置箇所2で下り方向で通常出力での走行(表 6-2-c2 と、図 6-2-c2.1 および c2.2)を使って、実際にトンネル区画に入る前後を比較する。

通常出力(図 6-2-c2.2)では、基地局に到達する 500m 手前から基地局電波を捕捉し、トンネル進入前に映像が回復する。それに対し調整された電波では、基地局直前で電波を捕捉し、通信を開始するため、結果的に映像の回復がトンネル内部に入ってからとなった。

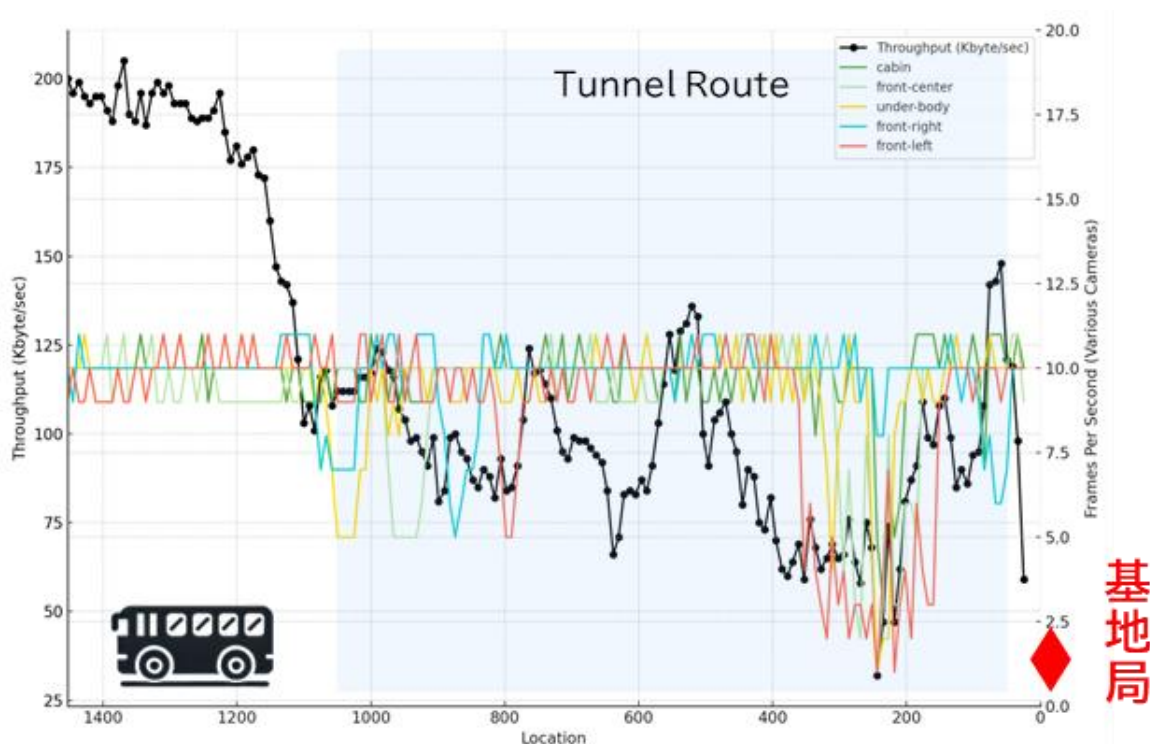
トンネル内部での映像は安定していたものの、トンネル全体を通して映像を確認することができず、定性的な評価に影響が出た。(表 6-2-e2 と表 6-2-c2 の比較)

配置箇所2：BAND1基地局出力調整での4画面監視映像(下り)

表 6-2-e2 監視者・ビデオによる定性評価

	稼働枚数	CAB	FR	FC	FL	UB	LM	ReM	RM	映像確認結果
入口手前	0									
トンネル前半	0	▲	▲	▲	▲					映像回復
トンネル後半	4	○	○	○	○					安定
出口奥	4	○	○	○	○					安定
監視者意見	途切れつつも全て確認									
音声通信	全区間で通話									

※CAB：車内、FR：車両前方右側、FC：車両前方面面、FL：車両前方左側、RM：車両右方、ReM：車両後方、LM：車両左方。監視映像の例は図 5 1 を参照。



黒色：スループット(左縦軸 Kbyte/s) その他：各カメラのフレームレート(右縦軸) 横軸は基地局からの距離(m)

図 6-2-e2.1 スループットと各カメラのフレームレート遷移

※補足：遠隔監視者との事後ヒアリングにおいても、電波出力以外同条件での監視画面映像を比較してもらいましたがその違いを判別できませんでした。定性評価上あまり影響はないということになります。

f. 遠隔監視者の評価傾向について

実証後、3名の監視者を全員集めて報告書で抽出した走行データの遠隔監視ビデオを視聴してもらい、再評価を行っていただいた。

その結果、監視者は稼働する画面の数が多少少なくても前方や車内といった主要カメラが見えていれば監視が可能であったと述べる傾向があることがわかった。特に、車内映像と屋外前方カメラが見えていれば、他の映像が見えない状態であっても、概ね肯定的な評価が得られる。また、多少映像が乱れていても、継続的に映像が確認できる方が、監視者からの評価は高い。これは実証時でも事後のヒアリングでも結果でも同じである。

以上の結果から、監視カメラは、スループットが変動しても解像度やフレームレートを調整しながら稼働を維持し、さらにスループットが低下した際には、カメラ単位で優先的に映像を配信する方が、監視評価としてより良い結果が得られると考えられる。

g. 不感地帯対策の効果について

実証前走行および実証期間中に行った監視システムおよび車載装置の不感地域対策は、大きな効果を発揮した。

1. 監視システムチューニング

監視システムはネットワークの監視を行っておらず、単純に接続が切断されると再試行される仕組みとなっている。この再試行の待機時間をできる限り短縮するとともに、稼働解像度も最小で稼働できるように調整を行うことで、下り走行での実証においても、トンネル全区画で遠隔監視とデータの取得が可能となった。

2. IoT ルーターのダウングレード

配置箇所 1 の実証にて使用した新バージョンのルーターについて、不感地域からのリンクアップ感度が悪かったため、配置箇所 2 では 1 世代前のルーター(ダウングレード)に変更した。これにより、不感地域からのリンクアップが安定するようになった。

3. 監視カメラオペレーションの追加対応

1 週目では、監視カメラは自然復旧するという前提で実証走行を連続的に行ったが、その結果、映像枚数が少ない状況での実証走行が何度か発生した。そのため、2 週目からは上り走行において、画面復旧を確認した後に実証を開始し、さらに遠隔監視者が監視画面から画面を復旧させるオペレーションを加えることで、大きな改善が見られた。

h. SIM 冗長化における効果について

当 IoT ルーターに実装されている 2 つの SIM を使用し、フェールオーバーによる冗長機能を用いて、他キャリアの SIM をバックアップとして設定したが、不感地帯でのフェールオーバーは成功しなかった。

次に、他キャリアを優先して走行したが、配置された移動衛星基地局への切り替えは発生しなかった。IP レイヤで通信が断絶しても、微弱な電波が残っている場合にはフェールオーバーが実行されず、また、移動する車両では常に電波状況が変動するため、どのような設定をしてもフラッピングのリスクがあり、通信の継続性に悪影響を与える可能性がある。

結論として、移動する車両において、アクティブスタンバイ型の冗長化は効果が薄く、SIM による冗長化はキャリアアグリゲーションなど、別の方法を検討する必要がある。

表 6-2-h1:(参考)HW5G-3200-V2 の SIM 転換ポリシー

転換ポリシー	閾値
接続失敗	1~10回
RSSI監視	有効: -90~-113dbm
LTE監視	有効: 1~30分
ローミング監視	有効: 1~30分

6.2 交差点における車両の認知機能の補助機能(自動車の死角にいる交通参加者/交通弱者の情報を車両に通知する機能)の検証

・実施なし

6.3 見通し外や路上駐車など複雑な交通環境下における物標情報のリアルタイム映像分析及び車側の危険回避行動の連携

・実施なし

6.4 明瞭な映像・音声による常時遠隔監視を実現する自動運転用軽量映像伝送システムの実証

・実施なし

6.5 高度な安全配慮が必要な踏切道や緊急車両行き違い等ボトルネックケースにおける他者とのシステム連携による安全性向上

・実施なし

6.6 経済性・実装性向上のための路側インフラ技術の標準化・量産化・共通化の実証

・実施なし

6.7 レベル 4 の社会実装に向けた検討

6.7.1 運用検証

(1) システムの操作性やユーザ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 監視用ツールとしての Autoware Drive の操作性について遠隔監視者を集めてのヒアリングを実施している。遠隔監視という観点からカメラ映像の配置とサイズに関して意見徴収を行っており、1つの管理画面上に映像が網羅されている点、その配置についても視覚的にわかりやすい点などが評価された。
- 2) 考察 走行状態が視覚的に網羅できるよう、カメラ映像の配置は非常に重要であるという点について認識を深める事になった。

(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など、地域交通の持続性への寄与度

・実施なし

(3) データの処理・管理に係る運用などのセキュリティ対策

・実施なし

(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

・実施なし

6.7.2 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

・実施なし

(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

・実施なし

(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

・実施なし

(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

・実施なし

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

本実証の結果から吹込み式基地局の配置により、山間部トンネル内でも最適な通信状態を維持し遠隔監視システムの遠隔監視システムの安定運用が図れることを確認した。

一方で課題も山積しており、レベル4の遠隔監視において安定運用を実現するためには以下の条件が必要であることがわかった。

- ・本実証の結果を基に、基地局の配置箇所及び設計を実施すること。
- ・本実証の結果を基に監視システムの適切な設定と運用を行うこと。

(1) 移動衛星基地局(仮設)による電波調査の有効性

仮設の基地局を配置し、実際に車両を走行させることで、通常の電波調査では判明しない事象も含め、詳細にデータを取得することができた。したがって、トンネル内の電波環境整備に向けた基地局の仮設設置による検証は極めて有効である。

(2) トンネル電波対策基地局配置(固定化)における考慮点

本実証から吹込み式基地局設置において設置箇所及び設備設計において以下の点について考慮する必要がある。

- 高速通信 BAND(5G)の選定

トンネル内部は空洞で障害物もなく、広帯域向け周波数(BAND8)のメリットはあまり享受できないことが分かった。一方、遠隔監視システムで使われるストリーミング映像配信はできる限り伝送速度の速い帯域が求められる事は明らかである。 ※BAND1/8 の比較検証結果より。

- 吹抜区間の電波干渉対策

吹抜区間では既存基地局から回り込んだ電波によって通信の継続性を阻害するケースがあることが本実証で分かった。電波の回り込みを防ぐための障壁(天井等)を設けるという対策も考えられるが、電波塔を吹抜区画に配置することで山間部から回り込んでくる電波を拾わないようにする方法が有効であると考えている。 ※吹き抜け区画における調査結果より

- 指向性アンテナの双方向への配置

今回の実証では指向性アンテナをトンネル内に向けて吹込みを行っている。その際、基地局へのハン

ドオーバーがトンネル内部で行われそれによって通信の継続性が損なわれるケースが散見された。将来的には自動走行の速度は 30Km/h より早くなり、一方向だけだと電波を捉えるタイミングがよりトンネル内部に入り込んでしまう可能性が高い。そのため本対策としてトンネルとは反対側にも吹込みを行い、トンネルの内部でハンドオーバーされないようにする必要がある。※ハンドオーバー地点の検証結果より

- その他の留意事項

衛星通信や基地局間の増幅装置を足回り回線として利用した基地局は吹込電波の強度に関わらず、足回り回線のボトルネックによりスループットに限界が生じる。一方で山間部トンネルでも河川・道路管理用光ファイバーや受電設備も引き込まれているケースがあるためできるだけ活用していく事が重要である。※本実証によるスループットの結果、現地サーベイの結果より

(3) 遠隔監視システムが備えるべき機能とシステム要件

現在利用されている遠隔監視システムは高度化により通信環境のハードルも高くなっており、山間部走行ではその特有の環境に応じた最適化が必要である。

表 7-1 遠隔システムの要件及び条件

	機能概要とシステム要件(標準)	本実証箇所における条件(特有)
監視カメラ	カメラの機能及び性能は日々向上し、より多機能で高精細な映像を送ることができる機材が導入されている。	カメラの解像度や性能よりも稼働の安定性、映像配信の継続性が求められる。
通信機材	耐久性の高い産業用 IoT ルーターを採用、高度なセキュリティ、多様な通信プロトコルをサポートしている。更に遠隔地からのシステムのリアルタイムの状態を把握することが可能。	車両に実装する観点で耐久性の面については同様のスペックが求められる。基地局の少ない山間部走行で大きく変化する 4G/5G 通信環境で求められる安定性。マルチキャリアでの安定した通信を実現できる機能の実装
遠隔監視システム	車両の各箇所に監視カメラを取り付けることで、走行時の死角の排除する対策を取るため、より多くのカメラの制御とデータ取得を可能とするシステムとなっている。	オフライン時でも監視データをローカルに格納する仕組み、スループットの変動合わせカメラの優先制御を行う仕組みが求められる。

要求される設備	常時 5G 通信による高帯域通信ができる前提でシステムが構築され、推奨スペック、最低スペックが定義されている。	4G 通信を前提とした低帯域通信、トンネル内に限らず通信断が断続的に発生する環境でも最低限の監視ができる事が求められる。
---------	---	--

8. 参考資料

8.1 トンネル内自動走行(自己位置認識)における調査報告(自由調査)

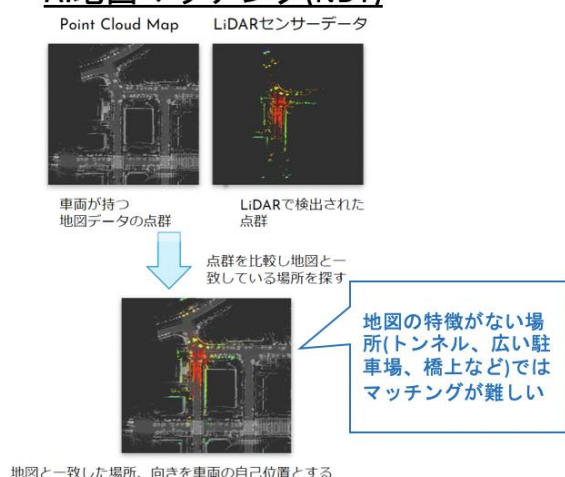
●自己位置推定の方法とトンネルや橋の影響について

・自己位置推定は主に A:事前に作成した地図データと走行中のセンサーの検知情報をマッチングして行う。

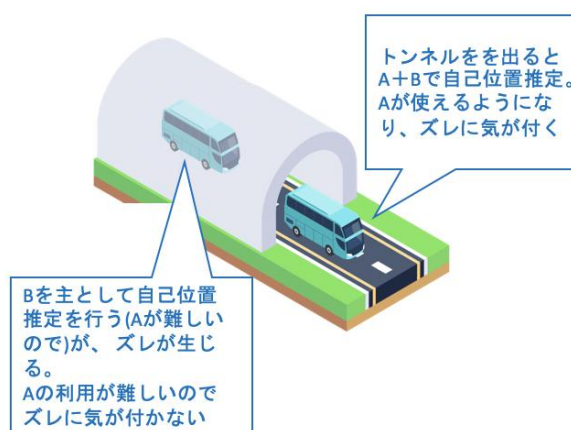
これに B:加速度センサーや車輪の回転数などのデータも合わせて最終的な自己位置を判断する。

・トンネル内は特徴がなく、A が困難なため、B を主として自己位置を判断するが、ズレが生じる。トンネルを抜けたタイミングで A が使えるようになり、そこで自己位置がズレている事に気が付きエラーが出る

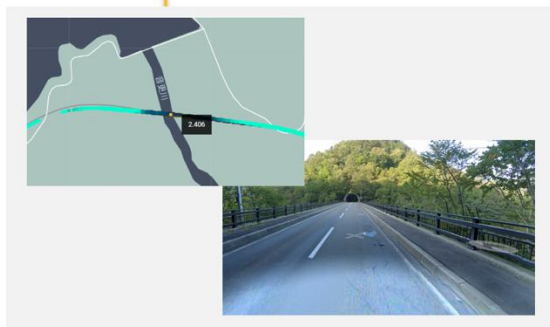
A:地図マッチング(NDT)



トンネルにおける自己位置推定



●自己位置推定のスコアを確認すると主に前後にトンネルのある橋付近の2か所で自己位置推定が難しい事が分かる。



●7/8-19 の期間で経度(東西の座標)と自己位置スコアの散布図でもトンネル、橋が多くなると自己位置が安定しない事が確認できる。



●補足: スキャンマッチングの値がいくつなら走行出来るか

1. 明確に定義するのは難しい。

Scan match score は、LiDAR のセンサー点群と PCD 地図をマッチングした際に算出される信頼度である。ただし、両方の値には測定時に誤差があるため、信頼度が 100% のスコアを示すことはできない。

2. Scan match score の依存性

Scan match score は環境に大きく依存する。例えば、お台場ではスコア 3.0 でも自己位置が外れている場合があり、海沿いのルートではスコア 2.0 でも実際には自己位置が取れていることがある。このため、スコアは一定の参考値として認識する必要がある。

3. 基準となるスコア

Scan match score が「2.3」を目安にしており、それを下回っている場合は、LiDAR の scan matching による自己位置推定結果を無視する。その場合、タイヤの回転量などの情報を基に自己位置を推定する。

4. 不安定エリアの定義

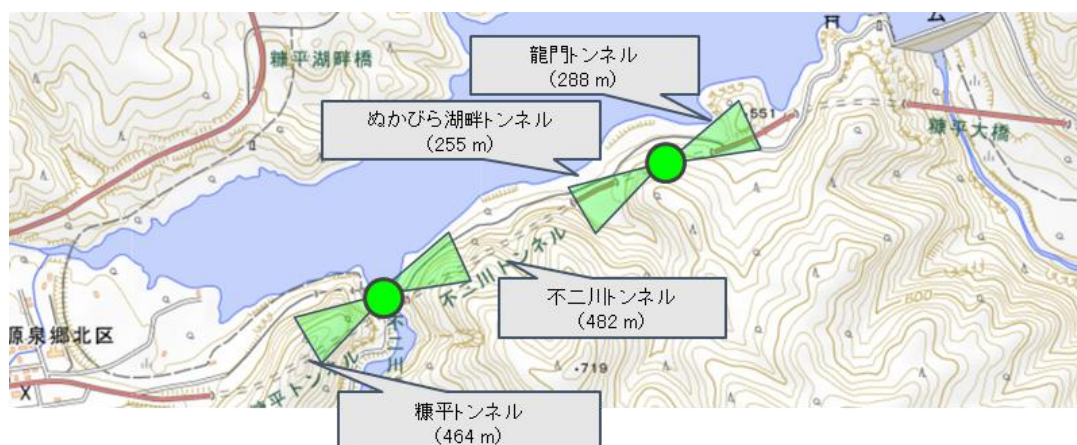
Scan match score が 2.5 以下の場合、そのエリアは不安定なエリアとして表現される。

※参考資料 8.1 は本実証の範囲外ですが有益な内容となりますので掲載しています。

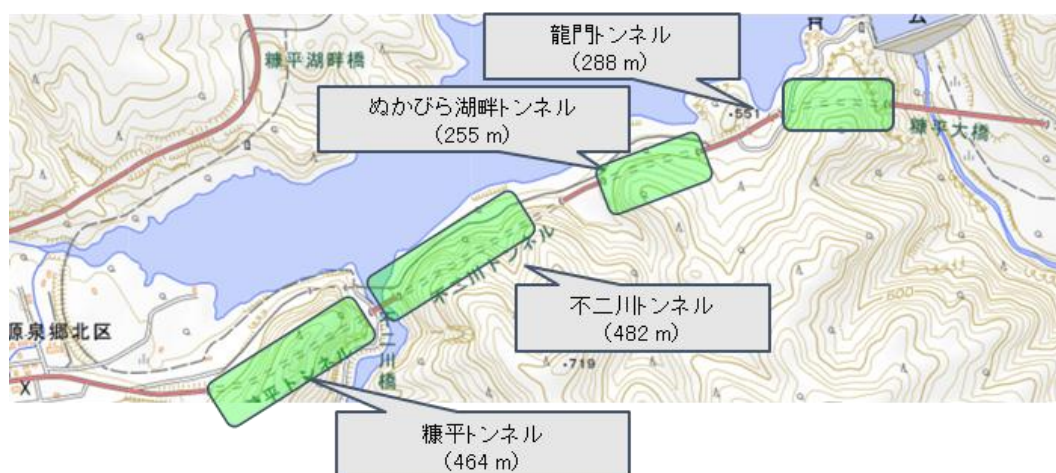
8.2 糠平湖エリア内トンネルの電波対策報告(基地局固定化)

本実証による結果から、吹込み方式(LTE)での電波対策は直線のトンネルにおいて有効であることが分かった。トンネル電波対策基地局配置(固定化)における考慮点(総括)をベースにトンネル電波対策基地局の固定化を検討した。

【吹込み方式による電波塔配置案】 出典:国土地理院



参考:LCX によるトンネル対策 出典:国土地理院



参考:近隣ダム(ぬかびらダム)への配置検討 出典:国土地理院



【積算コスト】

内容	概算(付帯)	概算(無線機)	費用
吹込み 2箇所	①コン柱建設 2,500,000×2 電気無し出迎え 100,000,000～	RP6339 ¥1,679,400 GRU0402 ¥61,400	①¥ 109,260,800 ～
参考:LCX 対 策	②LCX 100,000,000～ 電気無し出迎え 100,000,000～	Radio2212(B8) x1~2 ¥1,260,000×2	②¥204,260,800～
参考:ダムに配 置	2,000,000～ (電気は借用できる想定。 借用できない場合は増 額)	RP6339 ¥1,679,400 GRU0402 ¥61,400 Radio2212(B8) x1 ¥1,260,000	¥ 5,000,800～

【導入工程・スケジュール】

総期間として早くも 9～12 ヶ月、立地や環境条件、協議状況によっては 1 年以上かかるため、実証目的による配置などは暫定的かつ短期的な方法で行う必要がある。

1. 計画・企画(3 ヶ月)

電波調査※移動衛星基地局を用いた調査を含みます。

地元自治体協議・管轄の道路局との協議

無線局設置計画書作成(電波塔の規模、構造、配置目的等)

2. 許認可取得(3～6 ヶ月以上)

総合通信局への無線局免許申請・無線局設置許可申請

管轄道路局への道占有許可申請

自然公園法・その他特別法に基づく許可申請(環境影響評価等)

※国立公園の場合

3. 設計・準備作業(2～4 ヶ月)

電波塔設計

設備・資材調達

施工業者の選定

4. 建設工事(3～6 ヶ月)

基礎工事・電波塔施工

通信設備配置工事

5. 試験運用・検査(1～2 ヶ月)

主に電波法に定めるところの法定検査の実施

- ・技術基準適合性確認
- ・アンテナ設置状況確認・周辺電波調査
- ・安全性確認(災害対策、環境保全含む)

6. 運用開始

設備が正常に稼働することを確認後、本運用を開始。

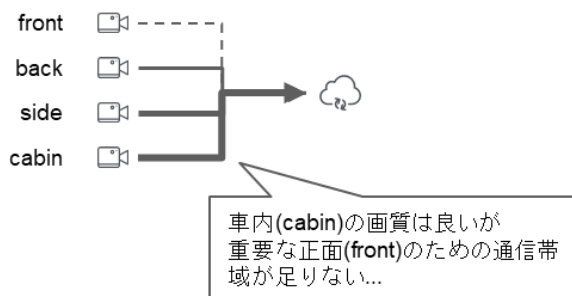
8.3 通信環境に応じた遠隔監視システムの最適化プログラムの検討

●監視カメラの優先制御

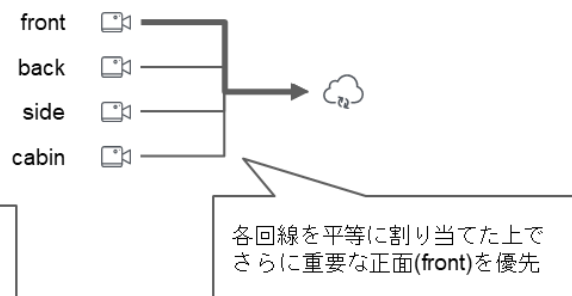
監視カメラ同士で取り合いになっている通信リソースを平準化する仕組みを組み込み、カメラの通信帯域の増減がランダムになるのを防止する。

例えば通信帯域が細くなった場合前方など重要なカメラに優先的に通信帯域を割り当てるなどして、全体として緩やかにスループットが増減しつつ、一部のカメラが止まる問題をできるだけ回避する。

従来



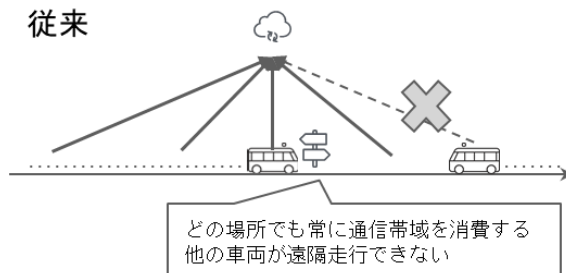
提案



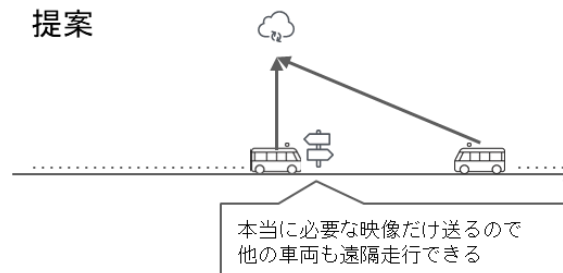
●オンデマンド映像配信その1

レベル 4 走行において、遠隔監視者は 1 人で複数の車両を監視することになる。その際、常に映像を送信するのではなく、遠隔監視者が映像を参照するタイミングで映像を配信する仕組みを採用する。映像が誰にも見られていない間は、通信回線を維持するために必要最小限のデータのみを送信する。

従来

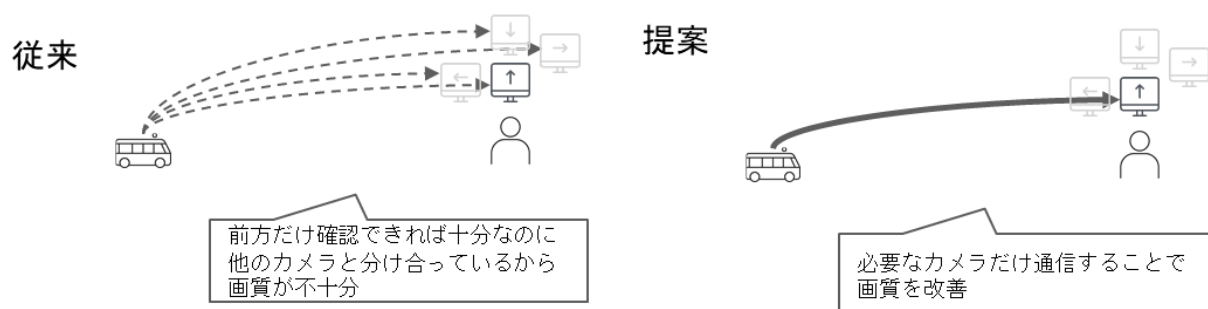


提案



●オンデマンド映像配信その2

限られた通信リソースの中で、遠隔監視者が特に注目したいカメラの映像を選択して配信できるようにする。これにより、経路上の通信資源の濫用を防ぎ、通信性能の低い場所でも、本当に必要な映像に通信資源を集中させることが可能となる。



※参考資料 8.3 は本実証の範囲外ですが有益な内容となりますので掲載しています。

8.4 実証環境と取得データ詳細

●走行ルートと実証期間

折返点1:東大雪自然館 折返点2:ぬかびら発電所前

対象トンネル:ぬかびらトンネル 全長 464m

対象トンネル:不二川トンネル 全長 482m

実証期間:7月8日(月)～7月19日(金) 総計96走行 ※上り・下り各 48 走行



【出展】国土地理院

●期間中の走行コンディション

天候

期間中は、天候は晴れか曇りの穏やかな状態で、路面は乾いていました。トンネル内では渋滞がなく、1回の走行中に前後や横を通過する車両も10台以下だったため、実証走行に支障はありませんでした。

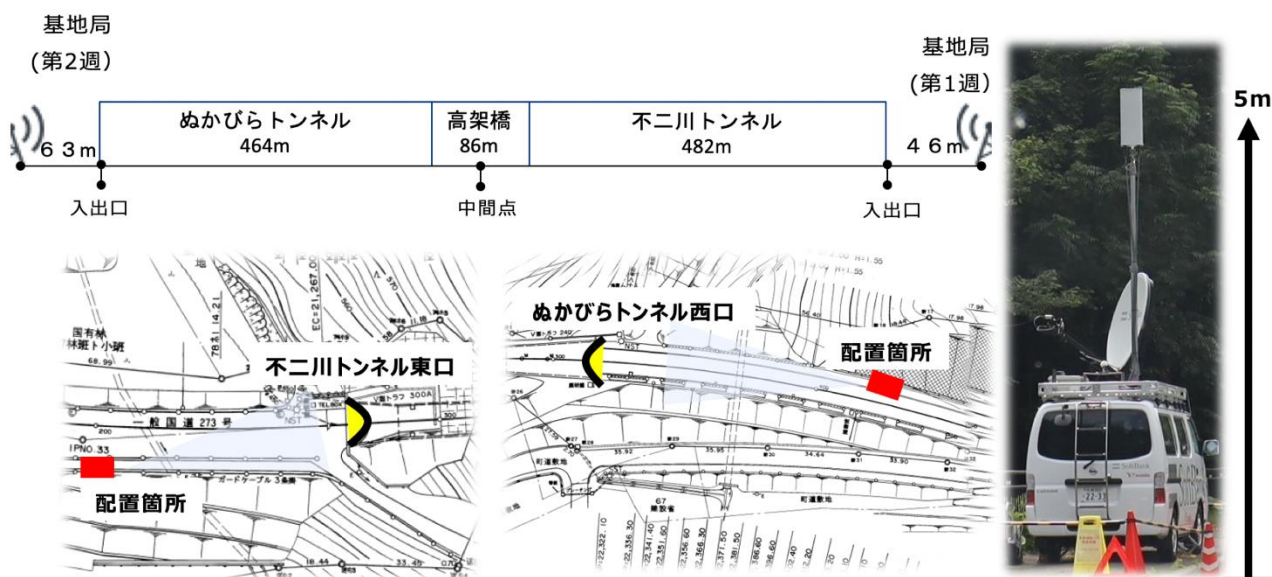
機材

移動衛星基地局において長時間の通信障害はなく、衛星の補足も全般的に良好だったと報告されています。また車両や車載の監視カメラ・通信装置にトラブルは発生していません。しかし、配置箇所1の後半に、車載ルーターが原因と思われる通信不具合が数回発生したため、配置箇所2の開始前にルーターを旧モデル(HW5G-3200-V2N から HW5G-3200-V2)に交換しました。

●自動運転車両及び通信システム実装図



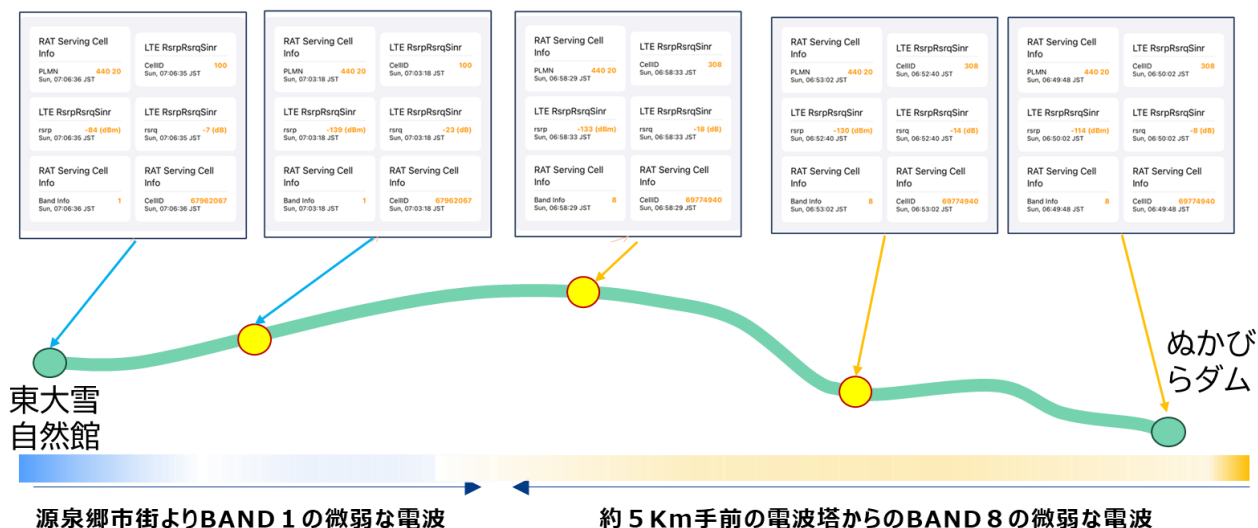
●基地局配地図



●機材詳細

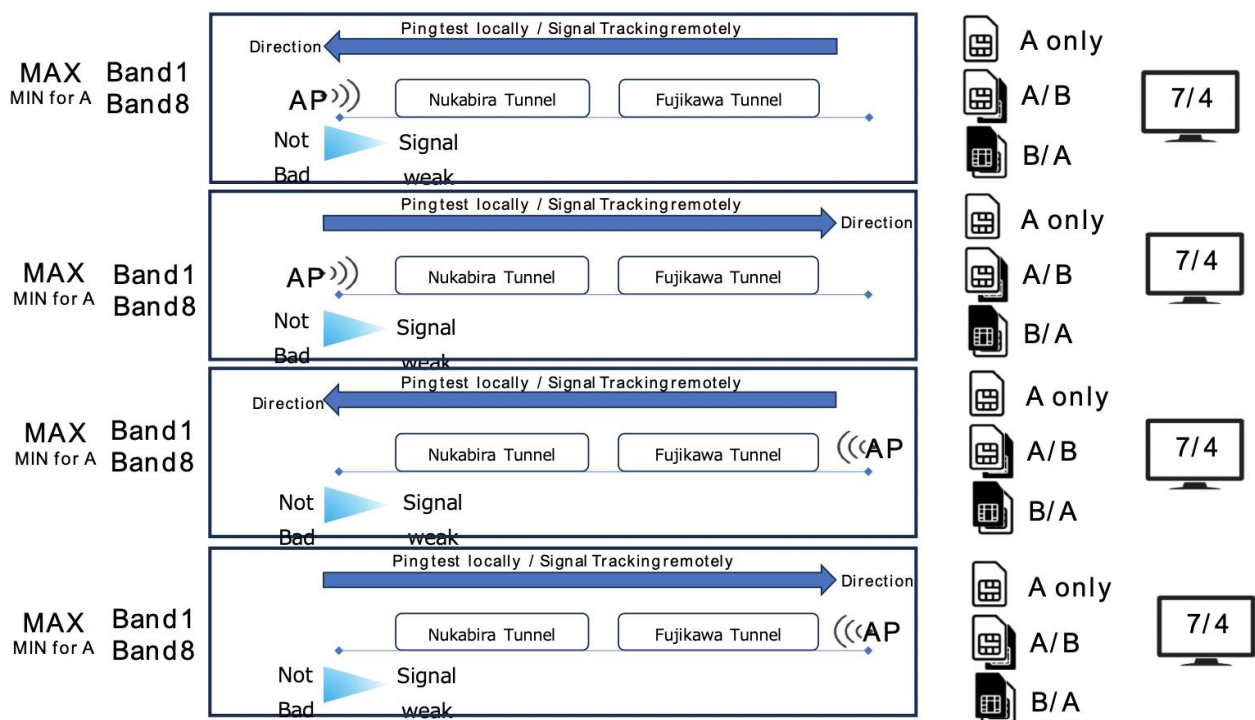
移動基地局	機材	衛星装置	iNetVu
		B1無線機	FRGS(Nokia)
		B8無線機	FXDB(Nokia)
		空中線(B1/B8共通)	DBXLH-6565S-TOM :COMMSCOPE
	設置箇所	エリア内設置	ぬかびらトンネル西側出口
		エリア外設置	不二川トンネル東側出口
	強度	MAX	20W
		MIN	5W
車載装置	NW機材	IoTルータ1	HW5G-3200-V2/HW5G-3200-V2N HITEC INTER社 (一週目)
		IoTルータ2	HW5G-3200-V2/HW5G-3200-V2 HITEC INTER社 (二週目)
		スマートフォン	IPHONE14 (音声通信用)
		カメラシステム	Autoware GMSL2 IP69K TIER IV C1 120度
	SIM	SB SIM	NSA方式 データ通信専用
		AU SIM ※冗長用	NSA方式 データ通信専用
		SB SIM	NSA方式 音声含む
監視システム	監視	遠隔監視モニター	Autoware Drive
	通話	インターネット通話	LINE通話

●実証前電波状況 (スマートフォンによる測定)



●走行パターン

以下走行パターンを図解する。



●取得データ

走行時に取得したデータ一覧

通信データ		データ総数	説明
NW疎通_RAWDATA		スマートフォン x 16ファイル、IoTルータ x 16ファイル	ICMP疎通確認データ (1 Sec単位)
監視システム_RAWDATA		監視カメラ 8 枚 x 10 日分	カメラ通信情報 (フレームサイズ、送信数、データ通信量) 電波環境情報 (セル・バンド情報、RSRP/RSRQ)
定性評価データ		1 シート分	監視担当者入力データ
監視画面遷移ビデオ		走行単位分	監視画面遷移ビデオ
基礎データ	日別NWデータ	16 ファイル	NW疎通 & 監視システム/各走行単位
	日別通信量データ	16 ファイル	監視カメラ稼働 & 基地局切替時刻/各走行単位
	監視画面データ	16 パタン x 基地局設置場所別	監視画面定性変動データ/日別
結果報告用データ		報告用データ	報告用に取り纏めた表及びグラフ
衛星基地局稼働データ			参照用 (エラー等発生していないか等)
自動走行データ			参照用、自動走行率に関する結果報告用に使用します。

●取得データ数

	便数	対象機材と無効の理由
有効データ	85 件	圏外からトンネルを抜けるまでIoTルータのLINKが上がらず、カメラシステムから通信データが取得できなかった。(10件) 移動基地局側の問題と思われる通信不安定な状態(1件)
無効データ	11 件	

圏外から圏内に移動する際に、IoT ルータの LINKUP(接続)が遅れ、監視システムがデータを取得できなかったものについては無効データとして解析の対象外とする。

●サンプリングデータ

有効データ内から以下の走行パターン別にサンプルを抽出する。

図表番号	名称	データ名	サンプリングポリシー	BAND
抽出2-1	圏内基地局：復路走行	W1B1MXRE	伝搬距離良好	B1
	圏内基地局：復路走行	W1B8MXRE	伝搬距離良好	B8
抽出2-2	圏外基地局：往路走行	W2B1MXOU	伝搬距離良好	B1
	圏外基地局：往路走行	W2B8MXOU	伝搬距離良好	B8
抽出2-3	圏内基地局：往路走行	W1B1MXOU	伝搬距離良好	B1
	圏内基地局：往路走行	W1B8MXOU	伝搬距離良好	B8
抽出2-4	圏外基地局：復路走行	W2B1MXRE	伝搬距離良好	B1
	圏外基地局：復路走行	W2B8MXRE	伝搬距離良好	B8
抽出2-9	圏内基地局：復路走行	W1B1MIRE	伝搬距離良好	B1
	圏内基地局：復路走行	W1B8MIRE	伝搬距離良好	B8
抽出2-5-1	圏内基地局：復路走行	W1B1MX7RE	7画面表示(欠落なし)	B1
抽出2-5-2	圏内基地局：復路走行	W1B8MX7RE	7画面表示(欠落なし)	B8
抽出2-6-1	圏外基地局：復路走行	W2B1MX7RE	7画面表示(欠落なし)	B1
抽出2-6-2	圏外基地局：復路走行	W2B8MX7RE	7画面表示(欠落なし)	B8
抽出2-7-1	圏内基地局：復路走行	W1B1MX4RE	4画面表示	(B1)
抽出2-7-2	圏外基地局：復路走行	W2B1MX4RE	4画面表示	(B1)
抽出2-8	圏外基地局：往路走行	W2B8MXOU	7画面表示(欠落なし)	(B8)
抽出2-9-1	圏内基地局：復路走行	W1B1MI4RE	4画面表示、出力電波調整	(B1)
抽出2-9-2	圏外基地局：往路走行	W2B1MI4RE	4画面表示、出力電波調整	(B1)
抽出2-9-3	圏外基地局：往路走行	W2B1MX4RE	4画面表示	(B1)

データ名略称

W1	第1週基地局配備
W2	第2週基地局配備
B1	BAND1
B8	BAND8
MX	20W出力
MIN	5W出力
7	画面数
4	画面数
OU	圏外>圏内
RE	圏内>圏外

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
実績報告書
地域デジタル基盤活用推進事業(自動運転レベル 4 検証タイプ)

2025 年 1 月

BOLDLY 株式会社・ぬかびらトンネル自動走行実証機関(コンソーシアム)
