

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)

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及び高速走行車両検知技術の実証

実績報告書

2025年1月31日

代表機関: 日本電気株式会社
小松市自動運転通信領域コンソーシアム

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	2
1.3	実証の目的	3
1.4	最終目標・構想イメージ	4
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	4
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
3.2	運行期間	7
3.3	運行時間帯・頻度・運行方式	8
3.4	運行者	8
3.5	運行体制	8
3.6	自動運転車両の特徴	10
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	停車場における通信環境の高度化	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	27
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周辺環境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	27
4.3.1	丁字路右折時における高速走行車両情報配信	27
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	45
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	45
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 ..	45
4.7	レベル 4 の社会実装に向けた検討	45

4.7.1	運用検証	45
4.7.2	効果検証	48
5.	通信システムに関する構築	53
5.1	通信システムの全体像	53
5.1.1	通信システムの概要・設置場所	53
5.1.2	電波シミュレーション・測定結果	58
5.2	使用機器・ソフトウェア一覧	61
5.3	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	63
5.3.1	手続き面	63
5.3.2	手配面	65
5.3.3	施工・システム環境構築面	66
6.	実証結果・考察	68
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	68
6.1.1	停車場における通信環境の高度化	68
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	74
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周辺環境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	74
6.3.1	丁字路右折時における高速走行車両情報配信	74
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	95
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	95
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 ..	95
6.7	レベル4の社会実装に向けた検討	95
6.7.1	運用検証	95
6.7.2	効果検証	98
7.	本実証の総括	105
7.1	本実証の成果・課題	105
8.	参考資料	108

1. 実証の背景・目的

1.1 実証の背景

石川県小松市は、市域に「小松空港」を有するほか、北陸新幹線小松駅が 2024 年 3 月に開業し、全国的にも数少ない空港と新幹線駅という 2 大交通拠点を擁する都市となった。

特に駅と空港を併用した広域エリアへの乗り継ぎ利便性向上に向けた都市機能強化や、それに伴う空港からまちなかへの人の流れの創出と地域経済への波及効果をもたらすことを重要政策と位置付け、小松駅～小松空港間の輸送の自動運転化を進めている¹。この輸送の自動運転化を進める中、運用面で以下の問題が生じてきている。

問題 1-1：現在の運行ダイヤでセキュリティアップデートや ADK²の更新等、大きめの通信回線を利用した遠隔アップデートやダウンロード（以下、本報告書上は OTA³と記載する）が必要になった場合、20GB⁴程度のデータをアップデートするために、現時点で使用している通信回線では、120 分程度⁵の時間が必要になる。運行ダイヤに影響を与えず、日々の運行の中で必要な OTA データのダウンロードを完了させるには、30 分以内⁶で実施する必要があるが、既存通信回線では、OTA 実施車両の運用中断と、代替車両への切替えが必要となり、運行ダイヤに影響を与えてしまう。

問題 1-2：自動運転に対する社会受容性向上の観点から、システム障害やトラブル発生時に、地元住民を含めた関係各所（自治体や関係省庁等を想定）に、丁寧かつ迅速な説明を行う必要がある。トラブル原因の早急な特定を行うためにも、運行ルート内で迅速に当該トラブル発生時の走行ログデータを、遠隔地にいるエンジニアに展開することが必要になるが、現時点でそういった対応ができる環境がなく、初動対応に制約が生まれる可能性がある。

問題 2：小松市内の無信号丁字路で非優先道路側からの自動運転バスの右折時に、現時点では自動運転バスの車載センサのみで右折を試みている。その際、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性に対して、安全性の確保が難しい状況が発生する可能性がある。

¹ 小松市では、2024 年 3 月 9 日より自動運転バスの路線バスとしての通年運行を開始している。

<https://www.city.komatsu.lg.jp/soshiki/1985/rosenbasu/16580.html> 2024 年 11 月 27 日アクセス

² Autonomous Driving Kit の略。自動運転のソフトウェアを組み込んだコンピューターおよび LiDAR などの各種センサで構成される自動運転システムの総称

³ Over The Air の略。無線通信を経由してデータを送受信すること

⁴ 理論値ワースト(ほぼ全ファイル更新)が 100GB・大きめの更新 20GB・小さめの更新で数 G ある（ティアフォー調べ）

⁵ ベストエフォート方式の商用回線利用時の体感値（ティアフォー調べ）

⁶ 提案時、小松空港～小松駅間の自動運転バス運行間隔が 30 分あったため、30 分以内での OTA 実施を目指した

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

小松市では、1.1 で述べた通り自動運転バスの通年運行を 2024 年 3 月から開始しているが、自動運転レベル 4 を社会実装していくためには、以下の課題があると考ええる。

一般的に自動運転レベル 4 を社会実装していくためには、政治的・経済的・社会的・技術的に多くの課題がある。具体的には、自動運転車両・システム等の購入・維持に対するコスト負担や、社会受容性の観点で自動運転システムへの信頼性・安心感の醸成であったり、技術的観点で、悪天候（大雨、濃霧、降雪等）でのセンサ等の認識精度、サイバーセキュリティ対策、通信インフラ整備等である。これらの課題は相互に関連しているため、包括的に解決していくことが期待される。

そのため、まずは地域限定で実証実験を行い、段階的に展開範囲を広げる等、慎重かつ着実なアプローチを行う必要がある。小松市においては、すでに運用していく中で見えてきた問題に対する課題として、以下 2 点がある。まずは、2025 年度以降早期のレベル 4 自動運転を目指していくためにも、⁷本実証実験でこれらの課題を解決するための技術検証を行うこととした。

課題 1-1：自動運転バスの運用に影響を及ぼす自動運転システムのセキュリティ更新等を短時間で遂行すること

運行ダイヤに影響を与えない運用をするためには、上記 1.1 問題 1-1 で示したように運行ダイヤに影響を与えるという問題を解決し、現状よりも短時間でセキュリティ更新等を遂行することが期待される。

課題 1-2：トラブル発生時、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保すること

上述 1.1 問題 1-2 で示した、トラブル時の初動対応に制約が生まれる可能性がある問題を解決するためには、現行のログデータアップロード手段に加え、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保することが期待される。

（ユースケース①・停車場における通信環境の高度化）

課題 2：無信号丁字路の非優先道路側からの右折の際に、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性があるため、この接近車両の存在を自動運転バスに通知すること

具体的には、接近車両の存在を自動運転バスに通知するためには、上記課題は以下の 2 つに細分化される。

1) 路側システムが遠方の自動車を検知できること

⁷ <https://www.city.komatsu.lg.jp/soshiki/1985/rosenbasu/4/16328.html> 2024 年 11 月 27 日アクセス

2) 検知された情報を車載センサの検知前に、自動運転システムに配信できること

無信号丁字路の非優先道路側からの右折時の安全性を確保するためには、上述 1.1 問題 2 で示したように、車載センサのみにより、より安全な自動運転を実現する観点から、遠方から接近する自動車が交差点に突入する前までに、自動運転システムが右折可否を判断できる情報を受信できる仕組みを構築する。

無信号丁字路といった道路状況は地方路線であればあるほど、運行ルート上にも存在しうる環境と思料する。そのため、他地域が自動運転バス導入を検討する際には、本実証実験結果（無信号丁字路での右折）が、自動運転バスを走行させる際の参考にもなると考えている。

（ユースケース③・丁字路右折時における高速走行車両情報配信）。

1.3 実証の目的

本実証実験の具体的な目的は、ユースケース①停車場における通信環境の高度化では、周囲の回線の混雑に依存しない専用無線網を使うことで、運行ダイヤに影響を与えず、自動運転バスの運行ダイヤの間の時間を用いて OTA データ（20GB）のダウンロードを完了させることが可能かを明らかにする。また、運行ダイヤの間でどの程度のサイズのログデータをアップロードすることが可能かも明らかにする。

ユースケース③丁字路右折時における高速走行車両情報配信では、路側システムで遠方の接近車両を検知し、車両センサの検知前にクラウドから物体の種別、位置、速度等が含まれたテキスト情報（以下周辺環境情報周辺環境情報と呼ぶ）を送信することによって自動運転バスに当該接近車両情報を配信することが可能かを明らかにする。なお、本実証実験では、路側システムとして選定したカメラ（4K カメラ）と AI システムを使って設計した仕組みが遠方の自動車をどの程度検知できるかを明らかにする。また、検知された情報をクラウド経由で自動運転システムに配信する際、どれくらいのデータ転送遅延が発生するかを把握し、遅延時間を加味した配信システムが設計可能かも明らかにする。

これらの実証実験を通じ、小松市は、2020 年度からの継続的な取り組みである駅・空港・自動運転バスの一体的な利用確立を実現させ、持続可能な公共交通への転換を図りつつ、「レール&フライト」の拡大や交流人口の増大につなげ、小松市の目指す将来像である「北陸エリアにおける広域移動の拠点都市」および「新幹線と国際空港とが織りなす全国随一の交流エリアの形成」の実現を目指していく。

1.4 最終目標・構想イメージ

小松市は、2024 年 3 月の北陸新幹線延伸⁸を機に、全国的にも数少ない市域に空港と新幹線駅という 2 大交通拠点を擁する都市となった。そのため、小松市は、小松駅と小松空港間を自動運転バスレベル 4 社会実装の主な展開場所として設定し、自動運転バスによる「レール&フライト」の拡大を目指すことで、北陸エリアの広域移動の拠点都市としての発展を加速させ、地域の強みを活かした地方創生の実現を目標としている。

また、小松市における自動運転バスレベル 4 の社会実装に向けた取組は、政府のデジタル全総の目標（2025 年に 50 箇所、2027 年に 100 箇所）を踏まえ、以下のようなスケジュールで進められている。

展開スケジュール⁹

① 2024 年 3 月：

自動運転バスの通年運行を開始。この段階では、レベル 2 自動運転技術が導入されており、運行の安全性と安定性を確保するための基盤が整えられている。

② 2024 年 10 月下旬から 11 月下旬：（本実証実験）

ローカル 5G を活用した通信システムの検証事業を実施。この実証では、高速大容量データ通信や走行車両検知技術についての検証が実施され、自動運転レベル 4 への技術的な準備が進められます。

③ 2025 年度以降：

自動運転レベル 4 の導入を予定している。これに向けて、小松市は地方公共団体や関係機関と連携しながら、必要な許認可手続きや地域住民の受容性向上に努めている。

④ 2027 年度以降：

自動運転技術のさらなる普及とサービスエリアの拡大を目指し、地域全体での自動運転移動サービスを確立することを目指している。

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

小松市では、上述 1.1 で述べた通り自動運転バスの通年運行を 2024 年 3 月から開始している。本実証実験は、この輸送の自動運転化を進める中で見えてきた問題・課題に対して、解決策を検討し検証していくことで、2025 年度以降に自動運転レベル 4 の導入を目指すことである。

具体的には、上述 1.2 で述べている課題に対して、それぞれ以下の目標を設定する。

課題 1-1：自動運転バスの運用に影響を及ぼす自動運転システムのセキュリティ更新等を短時間で遂行すること

目標：OTA の所要時間を、運行ダイヤ上の停車時間中に完了できるまでに短縮する

⁸ [北陸新幹線 - Wikipedia](#)

⁹ <https://www.city.komatsu.lg.jp/soshiki/1985/rosenbasu/4/16328.html> 2024 年 11 月 27 日アクセス

具体的には、OTA データのダウンロードまたは、ログデータのアップロードを 30 分以内 で実施する（既存回線：約 2 時間）

課題 1-2 : トラブル発生時、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保すること

目標 : ログデータのアップロードを、運行ダイヤ上の停車時間中に完了させる。
自走不能になるほどの大きなトラブルは例外とし、運行ルート上の設備を使用し、トラブル発生時のログデータをアップロードしつつ、次の運行に備えることを想定する。

課題 2 : 無信号丁字路の非優先道路側からの右折の際に、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性があるため、この接近車両の存在を自動運転バスに通知すること

具体的には、接近車両の存在を自動運転バスに通知するためには、上記課題は以下の 2 つに細分化される。

1) 路側システムが遠方の自動車を検知できること

2) 検知された情報を車載センサの検知前に、自動運転システムに配信できること

目標 : 1) 路側システムで遠方の接近車両を検知する検知率を把握すること、2) 新規に開発したシステムで、検知された情報をクラウド経由で自動運転バスに転送する際の転送遅延時間を 5 秒以下とすることとした

なお、走行技術に関する検討は、各種国家プロジェクトや、OEM¹⁰、自動運転車両ベンダー等によって取組が深化しており、既に ODD¹¹の設定によっては、自動運転レベル 4 の国内実現例もある¹²ため、本実証の対象外としている。

¹⁰ Original Equipment Manufacturing の略。メーカーが納入先である依頼主の注文により、依頼主のブランドの製品を製造すること、またはある企業がメーカーに対して自社ブランド製品の製造を委託すること

¹¹ Operational Design Domain の略。「運行設計領域」を表す。自動運転を行なう走行環境のことで、高速など道路の条件や周囲の理知的条件、環境（天候や日中・夜間など）条件、速度条件などを指す。つまり、設計で決められた“どの道を、どんな状況で走るのか”の範囲内での安全となる。

¹² <https://www.meti.go.jp/press/2023/05/20230512002/20230512002.html> 2024 年 11 月 28 日アクセス

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

実証機関について表 2-1 に示す。

表 2-1 実証機関

代表機関	法人名	日本電気株式会社
	代表者氏名	森田隆之
	所在地	〒108-8801 東京都港区芝五丁目7番1号
	業務の概要	IT サービス事業、社会インフラ事業
構成員	法人名	BOLDLY 株式会社
	代表者氏名	佐治友基
	所在地	〒105-7510 東京都港区海岸1丁目7番1号
	業務の概要	自動運転車の導入・運用に係る調査・コンサルティング事業の企画
	構成員とする理由	小松市に関する実証には、同社の遠隔監視・通信システムの技術が不可欠であるため
構成員	法人名	株式会社ティアフォー
	代表者氏名	加藤真平
	所在地	〒450-0002 愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番3号名古屋大学オープンイノベーション拠点
	業務の概要	自動運転関連ソフトウェアの開発・サービス提供
	構成員とする理由	小松市に関する実証には同社の自動運転システムが不可欠であるため

2.2 実施体制図

実施体制図について図 2-1 に示す。

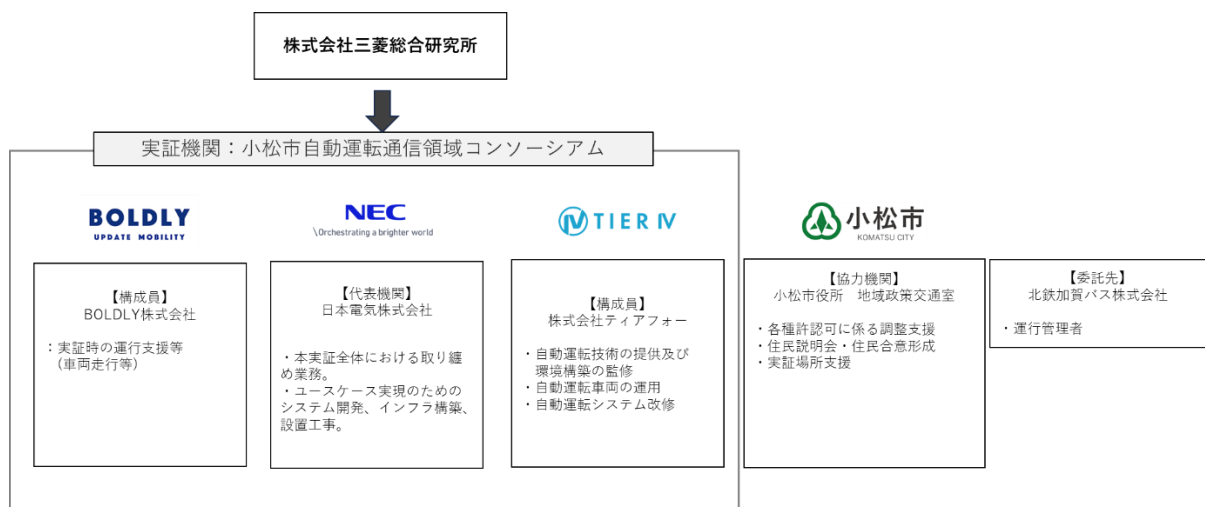


図 2-1 実施体制図

3. 自動運転の運行結果

3.1 運行場所

丁字路右折時における高速走行車両情報配信においては走行ルートを対象に実施した。なお自動運転レベル 2 で全区間運行し、距離は約 3.5km であった。

停車場における通信環境の高度化においては運行を行っていないので記載は割愛する。

実証における運行ルートを図 3-1 に示す。



図 3-1 実証における運行ルート

3.2 運行期間

運行期間について表 3-1 に示す。

表 3-1 運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	停車場における通信環境の高度化 ：令和 6 年 10 月 21 日～11 月 1 日(運行は無し) 丁字路右折時における高速走行車両情報配信 ：令和 6 年 11 月 11 日～29 日
関係者試乗運行	令和 6 年 12 月 18 日

一般運行等	通年運行を実施中
その他運行	特に無し

3.3 運行時間帯・頻度・運行方式

今回の下牧町交差点における実証実験は、図 3-2 のように開始時刻を 9:00、終了時刻を 16:20 とし、14 回前後数／日の検証を行った。



図 3-2 実証タイムスケジュール

3.4 運行者

BOLDLY 株式会社

3.5 運行体制

運行体制を表 3-2 に示す。

表 3-2 運行体制

項目	内容
運行管理者の選任・人員体制	北鉄加賀バス（株） 自動運転車両 1 台当たりの配置人数：1 人
遠隔監視装置	種類・特徴 BOLDLY（株）が提供する遠隔監視システム Dispatcher を使用する。 特徴①：多車種接続 バス、カート、トラクター等、30 種類と接続済み。国内外の様々な車両を同じ UI で監視・操作が可能 特徴②：点呼機能 運行前後の点呼、ODD チェック、車両点検をスマートフォンから実施可能 【車載カメラ】 車両には周辺状況確認用のカメラ 7 台及び車内監視用カメラ 1 台を設置し、これらの映像を遠隔監視システムに送信し、モニタ上に表示する 【通信網】 4G LTE 【ディスプレイ】 北鉄加賀バス（株）に設置する遠隔監視機器で、複数台の大型ディスプレイを活用し、1 車両 1 画面で情報を表示する。冗長化のため、PC

		は2 台体制で運用する。
	機能	【遠隔からの指示内容】 運行ダイヤの設定 ※GTFS フォーマットで運行ダイヤを登録することでダイヤ通りに自動発車が可能 ※遠隔から停車、発車指示も可能であるが、レベル 2 運行の段階では、車内の運転手が同操作を行う。 【受信するデータ】 自動手動の別、速度、車両位置、アラート発生箇所（急ブレーキ等）、バッテリー残量等 【アラート機能】 急ブレーキ等の異常発生時にアラートを発出する。
	設置場所	石川県小松市鶴ヶ島町 8 番地 〒923-0992 北鉄加賀バス（株）社内
監視員	事業者	北鉄加賀バス（株）
	人員体制	遠隔監視員の人数：5 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	遠隔監視装置の作動状況を監視し、異常が認められたとき又はシステムからアラートが発せられたときには、対応マニュアルに沿った確認を行う。 必要に応じ、適切な措置を講じるよう運転手や保安員に指示を行うとともに、緊急時には、警察・消防等への連絡のほか、現場駆け付けも実施する。
	遠隔監視体制	最大で1：2 とし、運用状況を今後検証する
	業務従事者教育	本事業における緊急時対応スタッフの配置及び役割は次のとおり。なお、本実証調査事業においては、現場に多くのスタッフを配置するため、警察・消防等の通報は現場から行うことを第一とし、現場での対応が困難な場合は、遠隔監視員から通報を行うこととする。 【運行スタッフ（自動運転バス）】2 名以上配置 現場での負傷者の救護や道路における危険を防止する等の必要な措置を実施警察・消防への通報・小松市地域交通政策室への連絡 【遠隔監視員】1 名配置 状況の確認・運行スタッフとの連絡警察・消防への通報（※運行スタッフからの通報が困難な場合）小松市地域交通政策室への連絡（※運行スタッフからの通報が困難な場合） 【コンソーシアム（本社待機スタッフ）】3 名配置
テストドライバー	事業者	(株)ティアフォー・BOLDLY（株）・北鉄加賀バス（株）
	人員体制	運転手の人数：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	テスト走行を実施し、プログラミング通りに走行が行われているか確認する。
	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	関係法令等による規制、安全管理並びに緊急時対応、使用する自動運転システム等の技術、旅客等対応時の接遇等について、日常的に小松市のテストドライバーを務め、十分に理解しているテストドライバーを配置した。

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	保安員は採用しないため無し
	人員体制	無し
	オペレーション	無し
	業務従事者 教育	無し

3.6 自動運転車両の特徴

自動運転車両の特徴を表 3-3 に示す。

表 3-3 自動運転車両の特徴

項目		内容
台数		1 台
所有者		小松市所有 ※路線バスとしての安定した運行を確保するため 2 台所有し、2 台目の車両を予備及び試験用車両として運用
車両 スペック	車両名	Minibus（ティアフォー製自動運転 EV バス） ※ベース車両：BYD J6（ビーワイディー ジェーシックス）
	自動運転 レベル	レベル 4 相当
	車両定員	25 人（客席 15 席＋運転席 1 席＋立ち席 9 人＝定員 25 人） ※自動運転時：16 人（客席 15 席＋運転席 1 席）
	試乗枠の定員	16 人（客席 15 席＋運転席 1 席）
	最高速度	車両機能上限：70km/h（自動運転時は 35km/h）
		実証実験時上限：70km/h（自動運転時は 35km/h）
	センシング デバイス	※センシングデバイスの種類別の個数 （2D・3DLiDAR ミリ波レーダー、物体検知カメラ等） LiDAR：8 基（長：4 基、短：4 基） RADAR：6 基（長：6 基） 物体認識用カメラ：7 基 遠隔監視用カメラ：8 基 IMU：1 基 GNSS アンテナ：1 基 路面温度センサ：1 基
	車両性能 （チェック	☑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

	を入れること)		☑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	
			☑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		
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		カメラ及び信号連携	

	MRM※	有り
本実証のために実施する自動運転システム改修の内容		自動運転システムに改修は発生しない
その他特徴等		・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三次元地図を活用 ・合流可能 ・交差点右左折可能（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

※MRM(ミニマム・リスク・マヌーバ)：システムから運転を引き継がない時、安全に車両を停止させる機能

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 停車場における通信環境の高度化

(1) 目的

現在の運行ダイヤでセキュリティアップデートや ADK の更新等、大きめの通信回線を利用した遠隔アップデートやダウンロードが必要になった場合、20GB のデータをアップデートするために、現時点で使用している通信回線では、データダウンロードに 120 分程度の時間が必要になる。そのため、既存通信回線で OTA を実施する場合は、OTA 実施車両の運用中断と、代替車両への切替えが必要となり、運行ダイヤに影響を与えてしまう（問題 1-1）。この問題に対する本通信システムの課題は、自動運転バスの運用に影響を及ぼす自動運転システムのセキュリティ更新等を短時間で遂行すること（課題 1-1）である。運行ダイヤに影響を与えない運用をするためには、現状よりも短時間でセキュリティ更新等を遂行する必要がある。

また、自動運転に対する社会受容性向上の観点から、システム障害やトラブル発生時に、地元住民を含めた関係各所（自治体や関係省庁等を想定）に、丁寧かつ迅速な説明を行う必要がある。トラブル原因の早急な特定を行うためにも、運行ルート内で迅速に当該トラブル発生時の走行ログデータを、遠隔地にいるエンジニアに展開することが必要になるが、現時点ではそういった対応ができる環境がなく、初動対応に制約が生まれる可能性がある（問題 1-2）。現在のログデータのアップロードは、1 日の運行が終了した後、TB¹³単位の大きなサイズのログデータを営業所に持ち帰り、営業所の固定通信回線を用いて行っている。この問題に対する本通信システムの課題は、トラブル発生時、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保すること（課題 1-2）である。

これらの課題を解決するために、本実証実験では、携帯電話事業者による全国向け 5G サービス（以下、キャリア 5G と記載する）ではなく、ローカル 5G を活用する。キャリア 5G においては、多数の一般ユーザが一時的に大量のトラフィックを発生させると輻輳が起こり、通信速度の低下、サービスへの接続が不可能になるといった事態が発生し得る。¹⁴キャリア 5G を使用して実施している既存の OTA の通信速度低下の原因が輻輳であると仮定すると、専用無線網であるローカル 5G を用いることで、より高速な OTA データのダウンロード、ログデータのアップロードが実施できる可能性があると考ええる。

本実証実験の目的は、周囲の回線の混雑に依存しない専用無線網を使うことで、運行ダイヤに影響を与えず、自動運転バスの運行ダイヤの間の時間を用いて OTA データ（20GB）のダウンロードを完了させることが可能かを明らかにすること、及び運行ダイヤの間でどの程度のサイズ

¹³ Terabyte の略 コンピューターやスマートフォンなどの機器で扱うデータの容量を表す単位

¹⁴ <https://www.ntt.com/bizon/glossary/j-h/fukuso.html?msockid=3c7e695bb2d36bb339557a18b3216a28> 2024 年 12 月 2 日アクセス

のログデータをアップロードすることが可能かを明らかにすることである。

(2) 実施内容の詳細

本実証実験では、図 4-1 に示す通り、小松駅ロータリー内にローカル 5G 環境を構築し、通信一体型エッジ基盤¹⁵と 5G 端末である UE¹⁶間で 20GB のデータダウンロード、アップロードを 30 分以内で完了させることが可能であるか検証する。この検証を行うために、以下の①から③を実施した。

なお、今回用いる機器は令和 5 年度国土交通省実証実験において、路車間の通信を目的として用いた実績があるものを選択した。

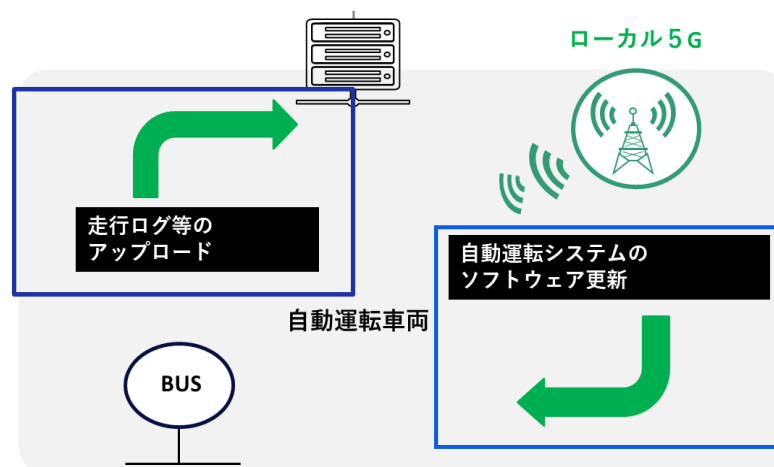


図 4-1 停車場における通信環境高度化実証イメージ

実証実験準備：

①検証環境検討

OTA 検証環境を検討するにあたりキャリア 5G、ローカル 5G、Wi-Fi、LPWA の無線に関する特徴等を机上で比較検討（検討結果は 4.1.1（3）1）で説明）し、本実証実験の課題解決方法として、ローカル 5G を新たに敷設することが望ましいと判断した。

②環境構築

ローカル 5G は小松駅ロータリー内の自動運転バス停車場エリアに新たに敷設した。その際、電波シミュレーションソフトを活用し、指定された箇所すべてがカバーできるように無線端末やアンテナ等の機器設置場所を確定させた。なお、機器設置後は歩行等により電波伝播測定を行い、設置した機器がシミュレーション結果通りのパフォーマンスをだせているかを確認し、必要に応じてアンテナ等の角度調整を実施した。

実証内容：

¹⁵ ローカル 5G 基地局と MEC が一体となった機器を指す

¹⁶ User Equipment の略

③転送速度測定

実際に自動運転バスに乗車し、指定された複数個所でデータ転送速度測定を複数回実施した。これにより、小松駅ロータリー内の測定場所の違いによるデータ転送速度差異を検証した。測定方法は、通信一体型エッジ基盤と自動運転バスに搭載した 5G 端末である UE+車載 PC 間のデータ転送に要した時間を計測した。

なお、実際に OTA データのダウンロード、ログデータのアップロードを実施する場合は、路側システムと自動運転ベンダーのシステムとの連携が必要となる。具体的には、実際にシステム全体を構築する際には、更新データを持つサーバから MEC¹⁷へ更新データを届ける経路や、MEC からエンジニアの元にログデータを届ける経路についても構築が必要である。本実証実験では、本格的なシステム間連携の前段階として、技術的な実現性の確認を優先することとし、自動運転バスを小松駅ロータリー内に一定時間留める要素となる無線区間の検証を行った。自動運転バスへのデータダウンロード、自動運転バスからのログデータ等のアップロードが現状よりも短時間でできることで、運用上の課題についても本実証実験で検証可能と考える。

(3) 利用技術

本実証実験は、専用無線網を比較検討した上で、ローカル 5G を用いることとした。

1) 専用無線網の比較検討

専用無線網としてローカル 5G を選定する前に、他の無線通信網との比較検討を行った。なお、経済性の観点から、本ユースケース専用の通信システムを敷設することは望ましくなく、敷設する通信システムをこのユースケースのみならず、他ユースケースにも活用できることを前提に検討した。既に、小松駅ロータリー内で歩行者を検知し、その存在を自動運転バスに通知するユースケースも他実証実験で検討されている。この前提に立って、初めに設置する設備の通信要件を検討し、その後、各要件に合致する通信方式について検討した。

a. 通信要件の検討

通信システムのユースケースから、表 4-1 の通信要件について検討した。

表 4-1 ユースケースにおける通信要件

通信要件	要件内容
スループット	キャリア 5G を超えるスループットを実現可能であること
通信の安定性	数十分の間、接続が切れないこと スループットが大きく変動しないこと

¹⁷ Multi-access Edge Computing の略 主にスマートフォンなどのモバイル端末や IoT 機器などからのアクセスを考慮して、ETSI（欧州電気通信標準化機構）が標準化を進めるエッジコンピューティングに関する規格

セキュリティ	データの盗聴/改ざん等の脅威に対して、高い耐性を持つこと
通信距離	小松駅ロータリー内（最遠方 60m）で高スループットにて通信可能なこと 他のユースケースも考慮し、小松駅ロータリー入口（最遠方 100m）を通信エリア化できること

一つ目は、OTA というユースケース上、大容量のデータを継続して転送することが求められる点である。本ユースケースの発端として、キャリア網経由の OTA では転送時間がかかることから始まっているため、机上論としてもキャリア 5G よりも高いスループットが発揮できる可能性がある通信手段を選択する必要がある。

二つ目は、継続してデータを転送し続けることが必要であるため、通信の安定性が求められる点である。OTA では数十分の間、大容量のデータ転送を実施するため、途中でスループットが低下してしまったり、途切れてしまったりすると、仮に一時的に高いスループットが発揮できていても、結果的にデータの転送完了まで時間がかかってしまうことが想定される。さらに、上述のように自動運転バスの判断・操作に直ちに影響を与えるようなケースではさらに通信の安定性は重要である。判断の基となるセンサデータが通信できないようなことがあると、最悪の場合、事故につながる可能性も否定できない。

三つ目は、クリティカルなデータを扱う都合上、高いセキュリティが求められる点である。OTA・ログデータのアップロードでは、自動運転システムの情報がやり取りされる可能性もあり、データの盗聴/改ざんが行われると、システムを構成するデータを盗まれて悪用されるリスクや、誤った更新データを自動運転システムに流入させられるリスクもある。また、DDoS¹⁸等の攻撃にさらされると、システム停止に追い込まれる可能性も否定できない。この場合、OTA が実施できないのみならず、別のユースケースへの影響も考えられる。

四つ目は、小松駅ロータリー内をカバーできる通信距離を持つ通信エリア設計が求められる点である。小松駅ロータリー内使用状況によりバスの停車位置が異なるため、OTA 実施時のロータリー内での自動運転バス停車位置は不定になることが想定される。停車位置の候補の中で、最も通信システムの設置位置から離れるポイントで 60m 程度の直線距離があるため、この場所で十分に通信速度が出る通信エリア設計をする必要がある。また、通信インフラを設置する経済的合理性を考慮すると、インフラを一つのユースケースのために設置するのではなく、複数のユースケースで共用化していくことが好ましい。例えば、路側の情報を自動運転バスに配信するユースケースを想定した場合、小松駅ロータリー内に入る前に情報を受け取りたいというニーズに対して、自動運転バスがロータリー内に進入する前に通信システムと接続できるよう、通信エリアを設計する必要がある。この前提に立つと、北方からバスが小松駅ロータリーに進入することを想定して、ロータリー入口の交差点において、北方の停止線近辺までは通信エリアを設計することが望ましい。この場合、通信インフラ設置位置から北方の停止線近辺までの直線距離は 100m 程度となる。

¹⁸ Distributed Denial of Service（分散型サービス拒否攻撃）の略



図 4-2 機器設置位置と停止線の位置関係

これらの要件を前提に、通信方式を選定する。

b. 通信方式の比較

通信方式の選定にあたり、検討した通信方式の比較を表 4-2、各通信方式のスループットと通信距離の関係を図 4-3 に示す。次項から本比較を踏まえ、ユースケースにおける通信要件に対する考察を実施する。

表 4-2 通信方式比較

	キャリア 5G	ローカル 5G	Wi-Fi6/6E/7	Wi-Fi Halow	LPWA
免許の取扱	免許申請不要 (通信キャリア管理)	免許申請必要	免許申請不要	免許申請不要	免許申請不要
利用周波数	3.7/4.5/28GHz 帯	4.7/28GHz 帯	2.4/5GHz 帯 (6/6E) 2.4/5/6GHz 帯 (7)	920MHz 帯	200/400/800/900MHz 帯
スループット (理論値)	20Gbps	20Gbps	9.6Gbps(6/6E) 46Gbps(7)	150kbps ~ 数 Mbps	250bps ~ 50kbps
無線区間遅延 (規格値)	数 ms	数 ms	数十 ms(6/6E) 5~10ms(7)	—	—
同時接続数 (規格値)	100 万デバイス/ k m ²	100 万デバイス/ k m ²	数十台(6/6E) 数百台(7)	100 台~	100 台~
セキュリティ	APN/SIM 認証	APN/SIM 認証	SSID/パスワード	SSID/パスワード	—

伝送距離	3.7/4.5GHz : 200m ~ 1km 28GHz : 50m	4.7GHz : 200m ~ 1km 28GHz : 50m	数十~100m	約 1km~	約 2~15km
------	---	---------------------------------------	---------	--------	----------

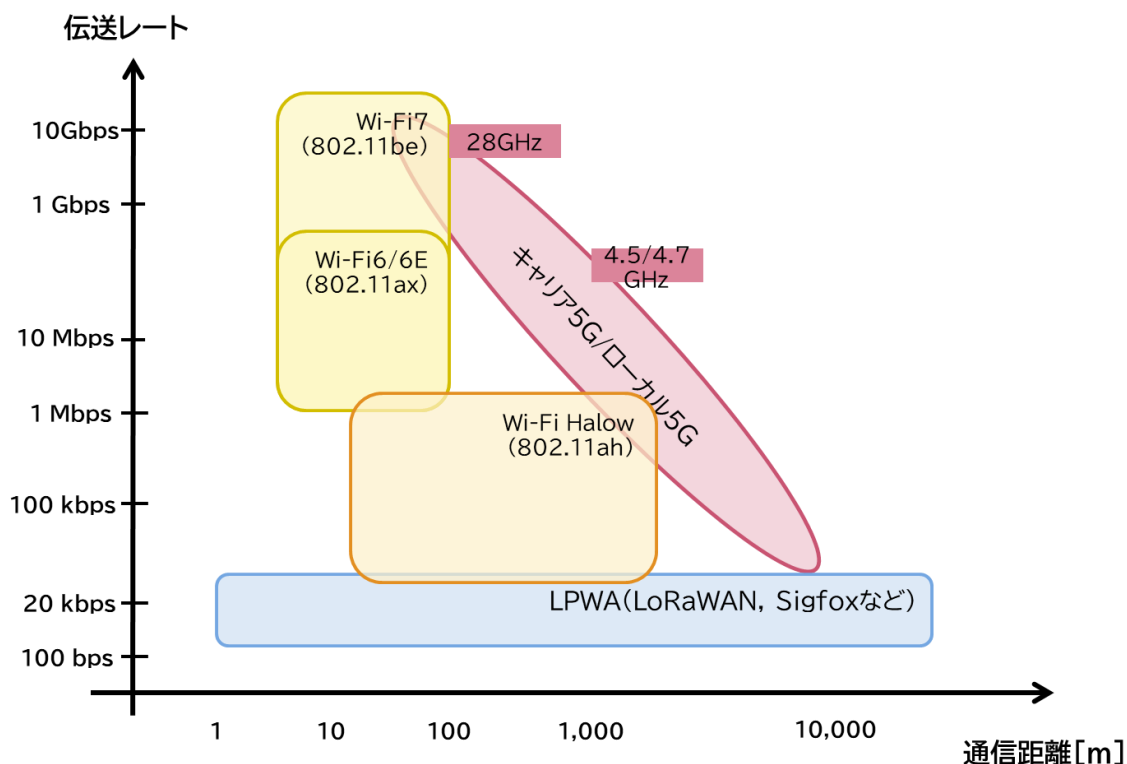


図 4-3 スループットと通信距離の関係

c. スループット

LPWA (LoRaWAN、Sigfox、Wi-San 等) は一般的に IoT¹⁹向けの通信規格であり、低スループットとなるため、今回のユースケースには不適と判断した。LPWA の中でも最もスループットが大きいのは Wi-Fi HaLow (802.11ah) であるが、規格上の最大スループットは数 Mbps²⁰である。

キャリア 5G と同等、またはそれ以上のスループットを発揮できる可能性があるのは、ローカル 5G、Wi-Fi (6/6e/7) と考え、これらを採用候補として考えた。なお、Wi-Fi の 5/6GHz 帯には屋外利用に制限²¹が設けられているため、今回のように屋外で利用するケースについては、最大スループットに近いスループットでの通信は実測値としては難しいと考える。

ローカル 5G については、スループットの理論値としてはキャリア 5G と同等であるが、準同

¹⁹ Internet of Things;の略 ささまざまな「モノ」がインターネットにつながることで、相互に情報をやり取りする仕組みのこと

²⁰ [000758531.pdf](#) 2024 年 12 月 12 日アクセス

²¹ [総務省 電波利用ホームページ | その他 | 無線 LAN の屋外利用について](#) 2024 年 12 月 12 日アクセス

期方式²²に対応しており TDD 比率²³の設定変更により、ユースケースに合わせた上り/下りスループットの比率を変更することができるメリットもある。なお、ローカル 5G の最大スループットは Sub6²⁴と比較してミリ波の方が大きいですが、本実証実験では Sub6 のみ考慮することとする。理由は大きく 2 点ある。1 点目は、ミリ波²⁵には伝搬距離が短いため、通信エリアの距離が不足するリスクがある点、2 点目は、端末を自動運転バス車内に設置した場合に十分な受信電界を得られないリスクがある点である。1 点目の通信エリアの距離が不足するリスクについて補足する。基地局から 200m の距離でもある程度スループットが得られたとする実験結果²⁶があるが、これはビルの上（GL²⁷20m 以上と推定）から電波を発射した場合の結果と想定されるため、小松駅ロータリー内の設置条件（GL6m 程度）を考慮すると、通信距離は短くなると考える。

d. 通信の安定性

通信の安定性について、キャリア 5G、Wi-Fi、ローカル 5G のそれぞれについて検討する。

最初に既存の方式であるキャリア 5G について検討する。電波干渉の観点では、キャリア 5G（SA、Sub6）の周波数帯（3.7GHz 帯・4.5GHz 帯）はライセンスバンドであるため、干渉は発生しづらい環境と考える。他方、キャリア 5G は多くのユーザに対してサービスを提供するため、基地局の混雑時はスループットが低下する等、キャリア 5G を利用する場合、常に同じ品質のサービスが得られない可能性がある。実証実験環境が小松駅ロータリー内であり、在来線・新幹線の到着タイミングや通勤・通学時間帯、近隣に大学や企業オフィスも存在する環境であることから、昼休み時間帯等は回線混雑が発生しやすい状況になると考える。

次に Wi-Fi について検討する。Wi-Fi の場合、使用する 2.4GHz 帯、5GHz 帯、6GHz 帯はライセンスバンドではないため、誰でも気軽に使用することができる一方で、複数の Wi-Fi ネットワークが近いエリアに存在すると電波干渉が発生する。電波干渉が発生すると、スループットが低下したり、通信が途切れたりする可能性も考えられる。一般利用者のスマートフォンも、自宅等で Wi-Fi を使用したまま、切らずに持ち歩いているケースも少なくないと想定され、この場合も電波干渉が発生し得ると考える。一方、アクセスポイントの混雑については、パスワードの流出等で想定外の接続が発生した場合を除き、回線混雑によるサービス品質低下に対するリスクは小さいと考える。

最後にローカル 5G について検討する。電波干渉の観点では、ローカル 5G（SA、Sub6）の周波数帯（4.7GHz 帯）はライセンスバンドであるため、干渉は発生しづらい環境と考える。また、ローカル 5G はキャリア 5G と異なり、限定された通信相手にサービスを提供するため、基地局の混雑のリスクも低いと考える。

²² [000676472.pdf](#) 2025 年 1 月 6 日 アクセス

²³ [000676455.pdf](#) 2025 年 1 月 6 日 アクセス

²⁴ 4.6GHz から 4.9GHz までの周波数帯を使用

²⁵ [ミリ波 - Wikipedia](#) 2025 年 1 月 6 日 アクセス

²⁶ <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/SRG-Japan-5G-mmWave-Whitepaper.pdf> 2025 年 1 月 6 日 アクセス

²⁷ Ground Level の略 建物などの地盤面の高さを示す。

e. セキュリティ

セキュリティの強度について、キャリア 5G、ローカル 5G、Wi-Fi のそれぞれについて検討する。なお、前提としてインターネットに抜けた後のセキュリティについては、どの通信方式を採用しても差異はないため、この場では純粋に無線通信部分のセキュリティについて検討する。

最初に既存の方式であるキャリア 5G について検討する。キャリア 5G は通信キャリアによって登録された SIM を挿入した機器のみを接続可能とする SIM 認証を行うことで、不正な機器が接続されることを防いでいる。また、基地局からインターネットに抜けるまでの通信区間は、通信キャリアによって管理されたネットワークによって通信が行われるため、悪意のあるユーザによる通信内容に対する干渉は困難と考える。

ローカル 5G についても、キャリア 5G と同様で、SIM 認証により不正な機器を接続することは困難と考える。ローカル 5G においては、キャリア 5G における通信キャリアに相当する役割をローカル 5G 基地局の管理者が担っており、管理者によって登録された SIM を挿入した機器のみが接続可能である。また、基地局からインターネットに抜けるまでの通信区間は、ローカル 5G の設置者によって管理されたネットワークによって通信が行われるため、同様に悪意のあるユーザによる通信内容に対する干渉は困難と考える。

Wi-Fi については、キャリア 5G/ローカル 5G と異なり、SSID²⁸/パスワードによる認証によって接続端末を制限する。また、認証方法として SSID/パスワードに加えて証明書による認証も設定することができる。証明書による認証まで実施した場合、接続可能な機器を制限することが可能となり、この場合はローカル 5G と同程度のセキュリティが確保できると考える。ただし、機器の盗難まで考慮する場合、秘密鍵が漏洩するリスクはある。SIM 認証でも SIM の盗難は起こり得るものの、ネットワークインフラ側の機能で接続を制御可能であるため、盗難への耐性はローカル 5G が優位であると考ええる。

f. 通信距離

通信距離について、Wi-Fi、ローカル 5G のそれぞれについて検討する。キャリア 5G については、通信キャリアのサービスエリア内にて基地局の存在を意識せず利用するため、本項の議論の対象外とする。

Wi-Fi については、一般的にアクセスポイントからの通信距離は理想的な条件で数十 m から 100m 程度とされている²⁹³⁰が、実効距離は 30m から 40m ともされている³¹。一方、ローカル 5G の場合はアンテナ設置箇所から 100m を超えて、最大 1km であれば通信距離を確保できる。

³² 小松駅前での停車位置で最も遠い位置は約 60m であるため、Wi-Fi でも電波自体は届く可能性

²⁸ Service Set Identifier の略 無線 LAN(Wi-Fi)におけるアクセスポイント(AP)の識別名

²⁹ <https://www.wlan-business.org/customer/foundation/wifi-02> 2025年1月28日アクセス

³⁰ <https://www2.nict.go.jp/wireless/wliot-seminar.html> 2025 年 1 月 28 日アクセス

³¹ https://www.soumu.go.jp/main_content/000976221.pdf 2025 年 1 月 28 日アクセス

³² <https://go5g.go.jp/site-manager/wp-content/uploads/2023/11/%E3%83%AD%E3%83%BC%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%83%9F%E3%83%A7%E7%AD%89%E5%85%A5%E9%96%80%E7%94%A8%E8%B3%87%E6%96%99%E5%85%AC%E9%96%8B%E7%89%88.pdf> 2024年12月16日アクセス

が高い。ただし、物理的な条件（障害物、距離）による電波減衰を考慮すると、実効スループットとして希望する性能が確保できるか否かは定かではない。中継器によって通信距離を延ばす方法も考えられるが、その場合は屋外で条件の整った設置場所の確保や維持管理コスト増加の問題がある。

また、他ユースケースも考慮して 100m をカバーすべき範囲として考える場合、ローカル 5G では十分にカバーすることが可能であるが、Wi-Fi では通信距離自体が不足する懸念がある。

g. 結論

上記のポイントについてまとめると、表 4-3 のようになる。

表 4-3 通信方式ごとの要件項目比較

項目	キャリア 5G	ローカル 5G	Wi-Fi6/6e/7	LPWA
スループット	△ 要件を満たすが 基地局の制御に 依存する	○ 要件を満たす ライセンスバン ドかつ準同期に よる高スルー プットを実現	○ 要件を満たす 屋外利用に制限あ り	× スループット不 足で不適
通信の安定性	× 輻輳リスクあり	○ 混雑・干渉とも なし	△ 干渉による途絶・ 速度低下の懸念あ り	—
セキュリティ	○ SIM 認証により 強固	○ SIM 認証により 強固	○ SSID/PW による 認証に加えて 証明書による認証 も設定可能	—
通信距離	○ カバーエリアは 十分も通信キャ リアのエリアに 依存	○ ロータリー内カ バーに加えて入 口交差点のカ バーにも十分	△ 60m 地点でスルー プットが確保でき るか不明確 ※他 UC を考慮す る場合は通信距離 不足の懸念あり	—

この比較結果から、今回の比較観点において懸念のない通信方式である、ローカル 5G を選定した。

(4) 必要性・緊急性・新規性

本実証実験を選定した背景にある問題点の一つは、自動運転バスのセキュリティアップデートや ADK の更新等の遠隔アップデートが必要になった場合、OTA 実施車両の運用中断と、代替車両への切替えが必要となり、運行ダイヤに影響を与えてしまうこと（問題 1-1）である。

自動運転システムは、ソフトウェアや地図データのアップデートを繰り返すことで走行の安全性や快適性を向上するため、OTA 自体の重要度は高いと考える。また、セキュリティアップデートを実施し、サイバー攻撃に対する耐性を維持するためにも、OTA は必要である。しかしながら、それにより OTA 実施車両の運用中断と、代替車両への切替えが必要となることは、車両の運用において調整コストが増加することにより、バスの自動運転化によって得られる価値を損ねてしまう可能性も考えられる。よって、OTA を高速化することは自動運転バスの運用面において有効であると考ええる。

また、もう一つの問題点は、システム障害やトラブル発生時に、トラブル原因の早急な特定を行うためにも、迅速に当該トラブル発生時の走行ログデータを、遠隔地にいるエンジニアへ迅速に展開することが必要になるが、現時点ではそういった対応ができる環境がなく、初動対応に制約が生まれる可能性があること（問題 1-2）である。

トラブルの発生時に迅速な原因究明を行うことは、関係各所に対する丁寧かつ迅速な説明、透明性の高い情報発信に繋がる。昨今は自動運転技術に対する社会的な関心も高まっており、民間による情報発信も盛んであることから、自動運転バスの社会受容性を維持するためにもこれらの取り組みは重要であると考ええる。そのために、当該トラブル発生時の走行ログデータを、遠隔地にいるエンジニアへ迅速に展開する環境を整えることは、自動運転バスの社会受容性維持の面において有効であると考ええる。

これらのデータを迅速にやり取りするためには、高速で安定した通信環境が必要であり、ローカル 5G などの先進的な通信技術を活用することで、更新データのダウンロードやログデータアップロード等をスムーズに行うことが可能になると考える。しかしながら、無線網の通信速度は物理的な条件にも影響されることから、想定している箇所で想定通りの通信速度が発揮できるか検証する必要がある。

なお、駅や空港など公共空間でローカル 5G 環境を構築し、自動運転システムの OTA やログデータのアップロードを実現させることは、従来の通信手段では実現できなかった大容量データの高速伝送や低遅延通信を可能にする実証事例として今回が初めてであると思われる³³。

(5) 検証条件

本実証では、図 4-4 に示す通り小松駅ロータリー内の小松空港行きバスが停車している周辺で OTA 検証を行った。データ転送中はローカル 5G 通信エリア内（図中に示す①～③の位置）に自動運転バスを停車させ、実証実験を実施した。停車場所の選定基準は、通常の自動運転バス運用において停車し得る位置としてロータリー内から 3 か所選定した。

³³ 当社（NEC）調べ



図 4-4 小松駅での OTA 検証エリア

小松駅周辺は多くの人が行き来するため、キャリア回線の混雑度も高いと考えられ、通信速度が低下したり、つながりにくかったりする場所である。したがって、ローカル 5G での通信高速化効果は相対的に大きいものと考えられる。また、使用するローカル 5G の周波数は Sub6 のため、悪天候（雨、風、雪、霧など）の影響もしにくいと言われている³⁴。

上記を踏まえ、本実証の検証条件を以下に記す。

【環境構築】

○MEC 機能・ローカル 5G 基地局機能を併せ持つ通信一体型エッジ基盤（NEC 製）を小松駅ロータリー内に設置し、バスの停車場に向けてローカル 5G の電波を発射し、通信エリアを構築する。

【ダウンロード（OTA）の検証】

- ①MEC に更新ファイルを模したダミーファイル（20GB）を事前に配置する。
- ②小松駅ローカル 5G 通信エリア内（図中の場所）に自動運転バスを 1 台停車させる。
- ③MEC から当該自動運転バス内に設置した PC に対しデータ転送を実行する。

【ログデータアップロードの検証】

- ①自動運転バス車内に設置した PC にログデータを模したダミーファイル（5GB,10GB,20GB の 3 種類）を事前に配置する。
- ②小松駅ロータリー内のローカル 5G 通信エリア内（図中の場所）に自動運転バスを 1 台

³⁴ ローカル 5g とは？ローカル 5g 周波数の発展について分析 <https://www.ruijie.co.jp/faq/local-5g-frequency-1753319094467342337.html> 2024 年 12 月 4 日 アクセス

停車させる。

③当該自動運転バス内に設置した PC から MEC に対しデータ転送を実行する。

(6) 開発・評価項目

停車場における通信環境の高度化における開発・評価項目一覧を表 4-4 に示す。

表 4-4 開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
1	ローカル 5G を使用した場合のファイルダウンロード時間の計測
2	ローカル 5G を使用した場合のファイルアップロード時間の計測

1) ローカル 5G を使用した場合のファイルダウンロード時間の計測

ローカル 5G 導入による OTA データのダウンロード高速化の効果検証を目的として、実際に小松駅ロータリー内に構築したローカル 5G 通信エリア内で、路側システムから車載 PC へのデータダウンロードに要した時間を計測した。本実証実験はローカル 5G を用いた OTA システムを構築する前段階での効果検証という位置づけのため、実際の OTA データを模したランダムなテキストによって生成されたダミーデータを転送対象データとして用いた。

データ転送にあたっては、OSS³⁵である mscp³⁶を用いた。これは、SSH³⁷を用いてファイル転送を行う SFTP³⁸ コマンドをマルチスレッド³⁹で実行するものである。マルチスレッドで実行することで、より高速なファイル転送が期待できる。

事前準備として、MEC 上に 20GB のダミーデータを予め配置した。実証実験時には、車載機材を積載した自動運転バスをロータリー内の定位置に駐車し、ローカル 5G 端末が基地局に接続されたことを確認してから、車載 PC 上で mscp のダウンロードコマンドを実行した。mscp にて並行実行するスレッド数は 20 とした。バスを停車したロータリー内の定位置については、図 4-4 に示した通りである。試行回数は、各定位置につき 5 回とし、合計で 15 回の計測を行った。30 分以内に送信を完了しなかった場合においても、ダウンロードに掛かった時間を測定した。

mscp コマンド実行時には開始時刻を記録し、ファイル転送に要した時間は実行完了後に UI⁴⁰上に表示されるため、これを記録した。

³⁵ Open Source Software の略 ソースコードが公開されており、無償で誰でも自由に改変、再配布が可能なソフトウェアのこと

³⁶ <https://github.com/upa/mscp> 2024 年 12 月 3 日アクセス

³⁷ Secure Shell の略

³⁸ SSH File Transfer Protocol の略

³⁹ 一つのコンピュータプログラムを実行する際に、複数の処理の流れを並行して進めること。また、そのような複数の処理の流れ。

⁴⁰ User Interface の略

2) ローカル 5G を使用した場合のファイルアップロード時間の計測

ローカル 5G によるログデータのアップロードについて、実効速度の検証を通じて今後の運用について検討する材料とすることを目的として、車載 PC から路側システムへのデータのアップロードに要した時間を計測した。mscp を用いた点、並行実行するスレッド数を 20 とした点、転送対象をダミーデータとした点は 4.1.1 (6) 1) と同様である。

事前準備として、車載 PC 上に 5GB、10GB、20GB のダミーデータを予め配置した。実証実験時には、車載機材を積載した自動運転バスを小松駅ロータリー内の定位置に駐車し、ローカル 5G 端末が基地局に接続されたことを確認してから車載 PC 上で mscp のアップロードコマンドを実行した。自動運転バスを停車したロータリー内の定位置も 4.1.1 (6) 1) と同様である。試行回数は 5GB、10GB、20GB それぞれ、各定位置につき 2 回とし、合計 18 回の計測を行った。30 分以内にアップロードを完了しなかった場合においても、送信に掛かった時間を測定した。

(7) KGI/KPI

停車場における通信環境の高度化における KPI 一覧を表 4-5 に示す。

表 4-5 停車場における通信環境の高度化における KPI 一覧

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	30 分以内に、20GB のデータを車両側に設置する PC に送信完了すること。
	2	30 分以内に、5-20GB のデータを MEC に送信完了すること。

1) 30 分以内に、20GB のデータを車両側に設置する PC に送信完了すること

ダウンロード (OTA) の検証については、KPI として、30 分以内に 20GB のデータを自動運転バス側に設置する PC に送信完了すること、とした。対象とするファイル転送測定区間を図 4-5 に示す。

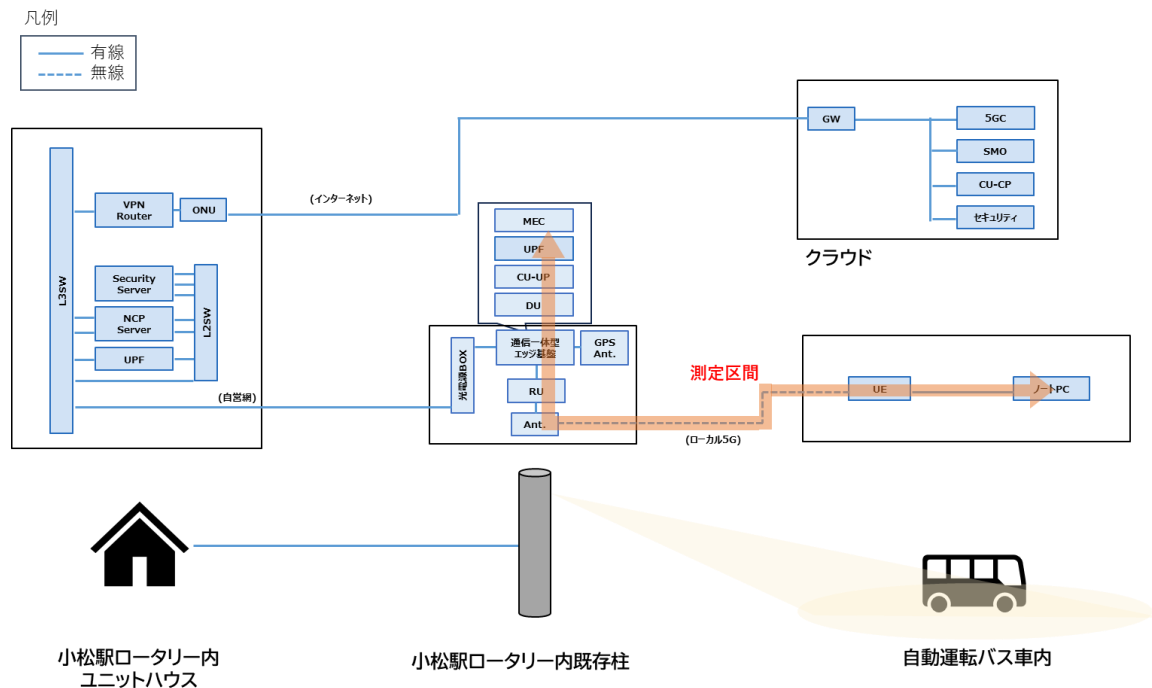


図 4-5 測定区間

自動運転システムの更新データサイズは、その更新規模によって数 GB～100GB 程度であるが、100GB クラスのデータを必要とするアップデートは大規模アップデートに限られ、恒常的に実施されるアップデートは概ね 20GB 以下である。そのため、本実証実験では恒常的に実施される 20GB 以下のアップデートを運行ダイヤの合間で実施可能かを検証し、大規模アップデートは運行ダイヤ外で実施されるものと想定し、対象外とした。

KPI とする転送時間は、提案時、小松空港～小松駅間の自動運転バス運行間隔が 30 分あったため、30 分以内での OTA 実施を目指した。

2) 30 分以内に、5-20GB のデータを MEC に送信完了すること

アップロードの検証については、KPI として、30 分以内に 5GB/10GB/20GB のログデータを MEC に送信完了すること、とした。対象とするファイル転送区間は図 4-5 の通りで、4.1.1 (6) 1) と同様である。

トラブル発生時の解析を実施する目的で走行ログデータをアップロードする場合、当該トラブル前後の走行ログデータに限定しても差し支えないと考えられる。

アップロードするデータサイズ（ログファイルに記録する対象の時間の長さ）と転送にかかる時間はトレードオフの関係にあるうえ、トラブルの特性によって必要なログの量が異なるため、一概に特定のデータサイズのログデータを特定の時間でアップロードすることができれば問題ないと断じることは難しい。また、ログデータについても、時間当たりのデータサイズが固定されている仕様ではないが、一例として 1 日の運行時間を 8 時間とし、その分のログデータサイズを 1TB とすると、10 分間分のログデータサイズが 21.3GB ということになる。

トラブルの発生という背景を考えると、可能な限り早くログデータをエンジニアに届ける必要

があるため、ある程度短時間でデータを転送することが求められると考える。本実証実験においては 30 分という目標時間は固定し、5GB、10GB、20GB と複数のデータサイズのログデータを想定し、これらが目標時間内にアップロードできるか否かを検証することで、将来的に無線網経由でログデータをアップロードする場合の適切な運用について考察するものとする。

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

当該ユースケースは実施していない。

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周辺環境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

4.3.1 丁字路右折時における高速走行車両情報配信

(1) 目的

小松市内の無信号丁字路で非優先道路側からの自動運転バスの右折時に、現時点では自動運転バスの車載センサのみで右折を試みている。その際、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性に対して、安全性の確保が難しい状況が発生する可能性がある。（問題 2）。

この問題に対する本通信システムの課題は、無信号丁字路の非優先道路側からの右折の際に、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性があるため、この接近車両の存在を自動運転バスに通知すること（課題 2）である。無信号丁字路の非優先道路側からの右折時の安全性を確保するためには、遠方から接近する自動車が交差点に突入する前までに、自動運転システムが右折可否を判断できる情報を受信できる仕組みが必要である。

これらの課題を解決するために、本実証実験では、路側に設置したセンサの情報を自動運転バスに配信する通信システムを新規に構築する。構築にあたり、技術的な課題が 2 点ある。1 点目は、路側システムが遠方の自動車を検知できること、2 点目は、検知された情報を車載センサの検知前に、自動運転システムに配信できること、である。

(2) 実施内容の詳細

実証実験のイメージについて図 4-6 に示す。路側システムで遠方の接近車両を検知し、車両センサの検知前にクラウドからの周辺環境情報配信によって自動運転バスに当該接近車両情報を通知することが可能かを明らかにするという目的に対し、以下の①から④を実施した。



図 4-6 丁字路右折時における高速走行車両情報配信

実証実験準備：

① 検証環境検討

V2N⁴¹検証環境を検討するにあたり、路側に設置する機器の構成及びデータ配信の手法について検討し、システム設計を行った。その結果、決定したシステム構成については 5.1.1 (2)、採用した技術については 4.3.1 (3) に記載する。

② 環境構築

自動運転バスのルート（無信号丁字路）上に、遠方からの接近車両を検知するカメラ、交差点付近での通信回線としてローカル 5G 基地局、計算リソースとして MEC を設置した。接近車両をとらえたカメラ映像は、ローカル 5G 経由で MEC に伝送され、MEC で AI 分析され、周辺環境情報に変換された上で、インターネット経由でクラウド上に送信される。自動運転バスに搭載されている車載 PC 側は、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT⁴² サーバに周辺環境情報を要求し、クラウド上に送信された周辺環境情報を受信できる仕組みを構築する。なお、クラウドからの配信機能については本実証実験で新たに開発した。

実証内容：

周辺環境情報をクラウド経由で配信する機能を開発し、走行ルートを複数回走行する中で、以下の評価を実施した。

③ 遅延時間測定

クラウド上の MQTT サーバによる、車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの時間、及び路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信にかかる時間を計測する。

⁴¹ Vehicle to Network の略 自動車とネットワークを接続する技術

⁴² Message Queuing Telemetry Transport の略 軽量なメッセージングプロトコルであり、特に IoT (Internet of Things) 環境でのデータ通信に適しています

④ 検知精度検証

路側システムの検知結果を目視にて照合し、路側システムの検知精度を検証する。

(3) 利用技術

本実証実験を選定した目的は、V2N による路車協調支援システムとして、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車の存在を、クラウドからの周辺環境情報送信によって自動運転バスに通知することが可能かを検証するためである。この目的を達成するため、5.1.1 (2) に示したように、下牧町丁字路の通信システムを構築した。システムの設計における特筆すべき点を以下に示す。

1) データ解析におけるエッジコンピューティング (MEC) の活用

センサデータの解析には計算リソースが必要である。特に、高い精度のセンサデータを得るために AI によって解析する場合、大きな計算リソースを必要とする。この計算リソースを準備するため、本実証実験では、ローカル 5G 環境に MEC を配置した。本実証実験における MEC の役割は、カメラから送信される映像データを解析し、テキストデータに変換してクラウドに送信することである。これにより、データサイズが削減され、クラウドへのデータ転送を低遅延化できる効果がある。

MEC を活用しない場合、クラウド等、交差点外の場所に計算リソースを準備することになるが、その場合は公衆網経由で映像データを伝送する必要がある。公衆網はベストエフォートであり、通常下りが優位になるよう調整されているため、データサイズの大きな映像データをアップロードしようとする大きな遅延が生じる懸念がある。

2) センサ-MEC 間の映像伝送におけるローカル 5G の活用

本実証実験では、インフラセンサとしてカメラを採用した。カメラ映像のデータ量は大きく、センサ自体と解析機能を持つ計算リソースが別の場所に配置されている場合、十分なスループットを持つ通信手段で接続する必要がある。そのため本実証実験では、ローカル 5G を活用してカメラから MEC への映像伝送を実施した。他の構成案には自営網（有線）で接続するパターン、Wi-Fi 等の他の無線網で接続するパターンが考えられるが、以下のメリットを考慮してローカル 5G を採用した。

- 有線で接続する場合と比較して、道路を横断する架空線等の敷設調整が不要であり、短期間で構築することが可能
- 複数のセンサと計算リソースである MEC 間を十分な帯域を持ち、低遅延で通信することが可能
- 100m を超える位置に配置されている端末とも通信が可能

3) AIを使用した映像解析アプリケーションの活用

MEC 上では AI を使用した映像解析アプリケーションを動作させた。このアプリケーションはカメラから映像を取り込み、画像中から自動車を検知するものである。また、検知した自動車の画像中の位置から緯度・経度座標への変換により、位置情報を分析することができる。さらに、前のフレームのデータも参照することで、速度の分析も可能である。これらの情報を検知対象の情報（周辺環境情報）として、自動運転バスに配信する。

4) 自動運転バスへの情報配信におけるクラウド・キャリア回線の活用

既存の路車協調の取組は、時々刻々と変化する交通状況に対応するため、低遅延で配信が可能な閉域無線網を道路上に敷設し、解析した情報をその場で直ちに配信する方法が良くとられてきた。本実証実験では、一度クラウドにデータを集約し、これをキャリア網経由で配信する方法によって自動運転バスへの情報配信を行う。この方法を取るメリットは大きく 2 点あると考えており、以下にて詳述する。一方、デメリットは、解析した情報をその場で直ちに配信する方法と比べて遅延時間が一般的に大きくなることである。この遅延時間が許容可能かを検討するために、本実証実験を行った。

メリット 1：自動運転バスの走行経路を加味した専用網の設計を省略することが可能

閉域無線網を道路上に敷設する方法は、低遅延で情報を配信することが可能であるが、自動運転バスの走行経路を加味した専用網の設計が必要となる。具体的には、閉域無線網に接続される自動運転バスの走行経路や速度等を加味したうえで、接続条件となる電波強度を確保できるポイントをシミュレーションし、接続処理の時間が確保できるように通信エリアを設計するなどの調整が必要となる。また、構築完了後には想定通りの場所でデータを受信することができるかを十分にテストする必要もある。

一方、配信機能をクラウドに持ち、キャリア網経由で情報配信する場合は、上記の調整を省略することができる。通信キャリアのサービス提供エリアであれば常時データ配信が可能であるため、通信システムの調整コストは最低限に抑えることができると考える。

メリット 2：周辺環境情報の配信を一元的に管理することが可能

将来的に、インフラセンサの情報活用が拡大することを想定すると、情報の発信元となるインフラセンサ、情報の配信先となる自動運転バスは、ともに時間経過につれて数や種類が増加していくことが予想される。そのため、情報の配信機能を路側に持つ場合、路側のそれぞれの地点で分散配置された機器に自動運転バス側が都度、アクセスする必要があるため、処理が複雑になる。

一方、各地点の路側システム情報を周辺環境情報としてクラウド上にアップロードし一元的に管理することで、自動運転バス側は、いつでもどこからでも、いずれの地点の情報も取得可能になるだけでなく、シンプルな処理で情報にアクセスすることが可能になる。

さらに、副次的な効果として、情報の配信先は自動運転バスに限る必要はなく、同じ路側システムを共用した新たなユースケースの創出も期待することができる。

5) データ配信機能における MQTT の活用

データ配信機能の実装として、MQTT を採用した。MQTT は、軽量なメッセージングプロトコルであり、通信回線のスループットが高水準で安定していなくても、安定してデータの送受信ができるため、ベストエフォートのキャリア回線での活用も容易である。MQTT のプロトコルは、パブリッシュ/サブスクライブモデルを採用しており、メッセージの送信者；パブリッシャー (Publisher) と受信者；サブスクライバー (Subscriber) の間にブローカー (Broker) を介すことで独立に送受信する。つまり、インフラセンサと車両を多対多で接続することが可能であり、これにより、受信者が欲しいタイミングで、欲しい情報を受信することができる。また、送信者と受信者が独立していることにより、新たに送信者 (インフラセンサ) や受信者 (自動運転バス) を追加することも比較的容易であり、クラウドと組み合わせてスケーラビリティの高いシステムを構築することができる。

MQTT は、以下の要素から構成されている。

- MQTT クライアント

MQTT クライアントは、メッセージを送受信するデバイスやアプリケーションを指す。クライアントは次の 2 種類に分類できる。

- ・ パブリッシャー (Publisher)

メッセージを送信する役割を持つクライアント。本実証実験の構成では MEC が該当する。

- ・ サブスクライバー (Subscriber)

メッセージを受信する役割を持つクライアント。本実証実験の構成では車載 PC が該当する。

- MQTT ブローカー

MQTT ブローカーは、メッセージの仲介役として機能する。具体的には以下のような役割がある。本実証実験の構成ではクラウド上のシステムが該当する。

- ・ メッセージの受信と配信:

パブリッシャーから受け取ったメッセージをフィルタリングし、適切なサブスクライバーに配信する。

- ・ トピック管理

各メッセージには情報の種類を識別する「トピック」が付与されており、ブローカーはこのトピックに基づいてメッセージの配信先を決定する。

なお、欧州の 5G-CARMEN⁴³ の活動でも路車間の情報共有に MQTT と同じくパブリッシュ/サブスクライブモデルの通信プロトコル (AMQP⁴⁴) を採用した事例がある。

MQTT を利用することで、自動運転車両とインフラ間のリアルタイムかつ効率的な情報交換の実現が可能になると考える。

⁴³ 5G for Connected and Automated Road Mobility in the European Union の略
<https://cordis.europa.eu/project/id/825012> 2024 年 12 月 5 日 アクセス

⁴⁴ Advanced Message Queuing Protocol の略

6) 実験用車載アプリケーション

MQTT のサブスクライバーの役割を持つアプリケーションとして、車載 PC 上に実験用アプリケーションを実装した。

車載 PC 上の実験用アプリケーションは、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT サーバに周辺環境情報を要求し、MQTT サーバがその要求に応じて配信した周辺環境情報を受信する。また、受信した周辺環境情報を基に KPI 計測に必要な情報をログに出力し、地図上にマッピングして可視化する。この可視化するイメージ画像を図 4-7 に示す。

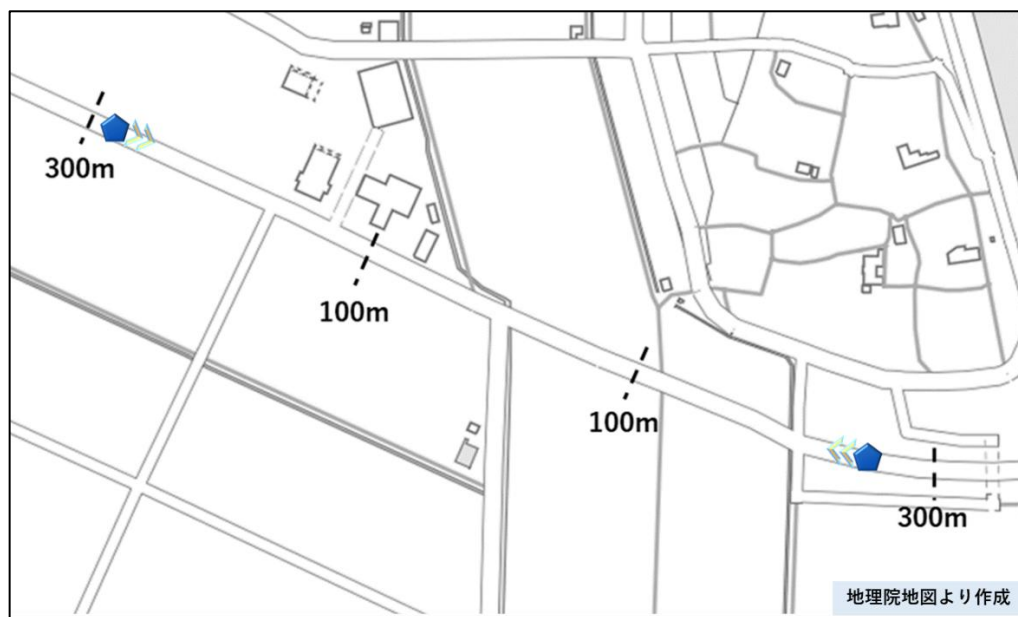


図 4-7 実験用車載アプリケーションのイメージ画像

(4) 必要性・緊急性・新規性

本実証実験を選定した背景にある問題点は、小松市内の無信号丁字路で非優先道路側からの自動運転バスの右折時に、現時点では自動運転バスの車載センサのみで右折を試みる際、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性に対して、安全性の確保が難しいこと（問題 2）である。

当該交差点において、正確に右折タイミングの判断を行うためには、現状の車載センサの検知距離を超える範囲の情報が必要である。自動運転バスの車載センサのみで右折を試みている現状では、右折開始後に接近車両が車載センサの検知範囲に入った結果、一度開始した右折が自動ブレーキにより中断されたり、そのまま交差点に突入するのは危険と判断したドライバーの手動介入によって停止されたりするケースがある。よって、車両センサの見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車の存在を自動運転バスに通知することは、自動運転バスの安全確保の面で有効であると考ええる。

この課題を解決するためには、遠方から接近する自動車の存在を検知し、その情報を配信するシステム構築が必要と考える。その際、車両の検知精度および情報配信の遅延時間の観点におい

て、期待するパフォーマンスを発揮することが可能か検証する必要がある。

(5) 検証条件

本実証実験では、以下図 4-8 に示す通り、自動運転バスの走行ルート（無信号丁字路）である下牧町丁字路周辺で V2N 検証を行った。

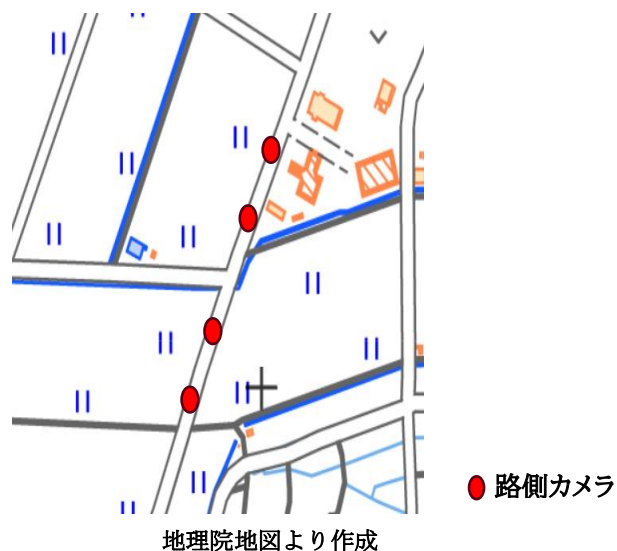


図 4-8 下牧町丁字路周辺での V2N 検証エリア

自動運転バス走行ルート（無信号丁字路）である下牧町丁字路は、優先道路（南北方向）側の交通量が終日多く、かつ見通しの良い道路でもあるため、走行車両のスピードも一定程度出ている状況である。自動運転バスは、この交差点を西側から東側に向かって非優先側から丁字路に突入し、南側に向けて右折するが、非優先側からの右折タイミングが測りづらい状況である。

また、遠方からの接近車両の存在を、クラウドからの周辺環境情報送信によって自動運転バスに通知する際、データ遅延時間を考慮した配信タイミングを机上でシミュレーションした上で、実際の試走で検証した。

なお、検知精度の検証は、日中・夜間、晴れ・曇り・雨といった時間帯・天候条件の異なるパターンで検証することにより、情報の信頼性の評価を実施した。

上記を踏まえ、本実証実験の検証条件を以下に記す。

【環境構築】

○無信号丁字路の停止線位置を 0 m とし、南北それぞれ 90m、190m の路側に交差点に向かって接近する自動車を撮影するカメラを設置する。当該カメラで遠方からの接近車両を検知し、車両センサの検知前にクラウドからの周辺環境情報送信によってこの接近車両の存在を自動運転バスに通知できる仕組みを構築する。

【データ遅延検証】

①自動運転バスが交差点に接近したタイミングで実験用車載 PC からクラウド上の MQTT

- サーバに対し、周辺環境情報を要求する。
- ②実験用車載 PC は、クラウド上の MQTT サーバから周辺環境情報を受信する。
- ③上記の周辺環境情報要求から受信までの時間を計測する。
- ④路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信にかかる時間を計測する。

【検知精度検証】

- 路側システムの検知結果を目視にて照合し、検知の有無を確認する。

(6) 開発・評価項目

丁字路右折時における高速走行車両情報配信における、開発・評価項目一覧を表 4-6 に示す。

表 4-6 開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
1	クラウド上からの周辺環境情報配信機能の開発
2	車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間の計測
3	路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間の計測
4	路側システムの検知精度の検証

1) クラウド上からの周辺環境情報配信機能の開発

今回、新たな取組としてクラウド経由の周辺環境情報配信を実証するため、本実証実験でクラウドからの周辺環境情報配信機能を開発した。

本実証実験のシステム構成と新規開発を行った範囲を図 4-9 に示す。

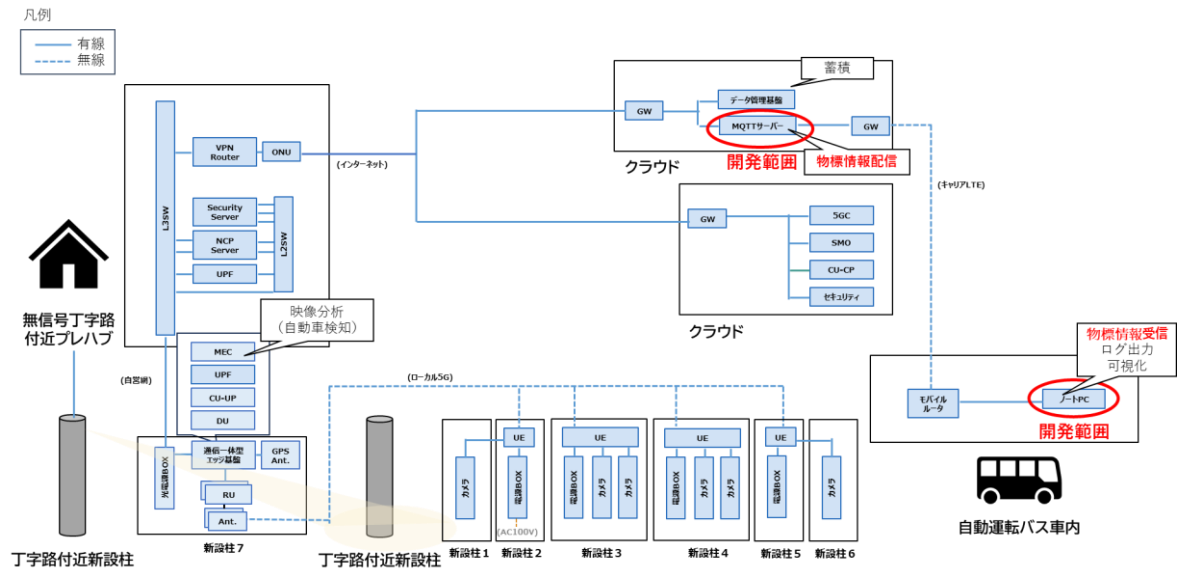


図 4-9 システム構成と開発範囲

クラウド上にアップロードされたデータを蓄積するデータ管理基盤は既存機能を用いたが、周辺環境情報配信機能を持つ MQTT サーバを本実証実験で新たに実装した。また、車載 PC 上の実験用アプリケーションについて、既存の周辺環境情報受信機能を MQTT に対応させ、MQTT クライアントとして機能するよう開発を行った。

2) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間の計測

クラウド上のシステムの応答性を確認するために、車載 PC が周辺環境情報を要求してから周辺環境情報を受信するまでの遅延時間を計測した。

車載 PC から見て、車載 PC が周辺環境情報を受信するまでの処理の流れは表 4-7 となる。

表 4-7 車載 PC が周辺環境情報を受信するまでの処理の流れ

番号	処理
1	車載 PC 上の MQTT クライアントが周辺環境情報の要求 (Subscribe) をクラウド上の MQTT ブローカー (サーバ) に送信する
2	クラウド上の MQTT ブローカー (サーバ) が周辺環境情報の要求 (Subscribe) を受信する
3	要求 (Subscribe) を受信以降、アップロードされた周辺環境情報を車載 PC に送信 (Publish) する
4	車載 PC はクラウドから送信された周辺環境情報を受信する

このうち、車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間 (1 から 2 の時間)、クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの

[illegible]

本実証実験では、受信した周辺環境情報に基づく自動運転システムの判断・操作は実施しないものの、将来的に判断・操作を実施する際の動きを想定し、自動運転バスが当該丁字路に差し掛かる直前に車載 PC を操作し、MQTT クライアントが周辺環境情報の要求 (Subscribe) をクラウド上の MQTT ブローカー (サーバ) に送信するようにした。将来的には自動運転システムが周辺環境情報の要求をクラウド上の MQTT ブローカー (サーバ) に送信することを想定しているため、本項目の実験結果を踏まえ、送信判断が必要なタイミングから逆算して、周辺環境情報要求を行うタイミングを設計しておく必要がある。



図 4-11 走行経路

最終的に、以下の a. b. c. で測定した時間を足し合わせることで、車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間を計測し、クラウド上のシステムの応答性を確認した。

a. 車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間の計測

車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間を計測するにあたり、車載 PC 上の MQTT クライアントが周辺環境情報の要求を送信した時点の時刻を車載 PC 上に出力されるログファイルに出力した。また、クラウド上の MQTT ブローカー（サーバ）が周辺環境情報の要求（Subscribe）を受信した時刻をクラウド上のシステムログに出力した。

車載 PC に出力された MQTT クライアントのログファイルとクラウド上のシステムログを収集し、それぞれのログにて同一メッセージについて記録された時刻を照合し、両者の差を取ることで通信時間を計測した。

b. クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの処理時間の計測

クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの処理時間を計測するにあたり、クラウド上の MQTT ブローカー（サーバ）が周辺環境情報の要求（Subscribe）を受信した時刻と最初にアップロードされた周辺環境情報を車載 PC に送信（Publish）した時刻をクラウド上のシステムログに出力した。留意点として、Subscribe を受信して以降、最初の送信以降も周辺環境情報がアップロードされるたびに車載 PC に送信されるが、今回の測定では応答性を確認するため、Subscribe を受信して以降、最初の送信までの時間を測定した。

クラウド上のシステムログを収集し、同一メッセージについて記録された時刻を照合し、両者の差を取ることで処理時間を計測した。

c. クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間の計測

クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間を計測するにあたり、周辺環境情報を車載 PC に送信 (Publish) した時刻をクラウド上のシステムログに出力した。また、車載 PC 上の MQTT クライアントが周辺環境情報を受信した時刻を車載 PC 上に出力されるログファイルに出力した。

車載 PC に出力された MQTT クライアントのログファイルとクラウド上のシステムログを収集し、それぞれのログにて同一メッセージについて記録された時刻を照合し、両者の差を取ることで通信時間を計測した。

d. システム間の時刻同期に関する補足

MQTT クライアントのログファイルは車載 PC のシステム時刻、クラウド上のシステムログはクラウド環境のシステム時刻を参照して出力されるため、データ取得前に同じ NTP⁴⁵サーバへの時刻同期を行った。NTP サーバは AWS が公開している Amazon Time Sync Service⁴⁶ (time.aws.com) を使用した。

3) 路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間の計測

車載 PC が受信する周辺環境情報と現実世界の物標のずれを測定するため、路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間を計測した。

検知完了から周辺環境情報が配信されるまでの遅延時間が大きいと、その遅延時間の間にも対象車両は走行し続けるため、受け取った周辺環境情報に含まれる位置情報と実際に対象車両が存在する位置が大きくずれることになる。

本実証実験で用いるシステム構成の前提として、クラウドを経由することで遅延時間が大きくなるため、常に対象車両の精緻な状況をリアルタイムで把握することは目的とせず、自動運転バスのセンサ範囲外の遠方の車両の存在と大まかな位置情報を把握することを目的としている。

実証実験対象の交差点近辺は比較的単純な道路形状をしており、多くの車両はほぼ等速で走行している。途中、農道への右左折を除いては、急加速・急減速は発生しづらい環境下にある。上記より、仮に検知完了のタイミングから配信までに遅延時間が発生したとしても、対象車両が同じ速度で走行し続けることを前提に、周辺環境情報中に含まれる位置情報と速度情報から、情報を受け取ったタイミングの対象車両の位置情報を推定できると想定する。したがって、比較的大きな遅延時間が発生したとしても本ユースケースは成立すると考える。

⁴⁵ Network Time Protocol の略 コンピュータネットワーク内で時刻同期をおこなうためのプロトコル

⁴⁶ <https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/set-time.html> 2024 年 12 月 5 日アクセス

上記の前提に立った場合に、本測定を実施する目的の一つは、将来的に路側システム構成を最適化するため、設計の根拠を収集することである。本実証実験では、丁字路交差点から約 100m 先の地点に対象車両が到来する前に、時間的余裕を持ってその存在を自動運転バス側に通知するため、交差点の遠方を検知することを目標に路側システムを設置している。

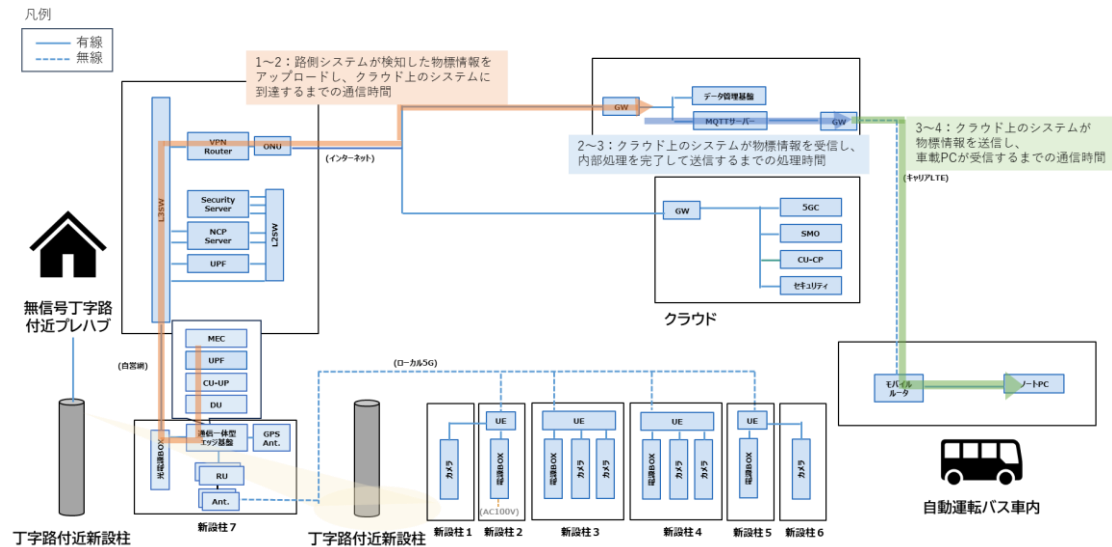
本実証実験の測定結果によっては、目標設定よりも小さい遅延時間である可能性もある。その場合は、路側システムの検知を必要とする範囲を、最適化できる可能性がある。これは、将来的にセンサを設置・維持するために必要なコストを削減し、導入しやすいシステムを構築することにつながると考える。

路側システムから見て、カメラの映像から自動車を検知した後、車載 PC が周辺環境情報を受信するまでの処理の流れは表 4-8 となる。なお、クラウド上のシステムが Subscribe を受信していることが前提である。

表 4-8 車載 PC が周辺環境情報を受信するまでの処理の流れ

番号	処理
1	路側システムが検知完了した周辺環境情報をクラウドにアップロードする
2	クラウド上のシステムがアップロードされた周辺環境情報を受信する
3	受信した周辺環境情報を車載 PC に送信 (Publish) する
4	車載 PC はクラウドから送信された周辺環境情報を受信する

このうち、路側システムが検知した周辺環境情報をアップロードし、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間 (1 から 2 の時間)、クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信し、内部処理を完了して送信するまでの処理時間 (2 から 3 の時間)、クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間 (3 から 4 の時間) に分割して測定した。それぞれの区間を図 4-12 に図示する。



なお、このうちクラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間（3 から 4 の時間）については、2) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間の計測と同様の測定項目である。

a. 路側システムが検知した周辺環境情報のクラウドへのアップロードを完了するまでの通信時間の計測

路側システムが検知した周辺環境情報のクラウドへのアップロードを完了するまでの通信時間を計測するにあたり、路側システムが周辺環境情報のアップロードを開始した時刻・アップロードを完了した時刻を路側システム上に出力されるアップローダのログファイルに出力した。

アップローダのログファイルを収集し、ログ上のアップロード開始時刻・アップロード完了時刻を照合し、両者の差を取ることで通信時間を計測した。

b. クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信し、内部処理を完了して送信するまでの処理時間の測定

クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信し、内部処理を完了して送信するまでの処理時間を測定するにあたり、クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信した時点の時刻と周辺環境情報を送信した時刻をクラウドのシステムログに出力した。

クラウド上のシステムログを収集し、同一メッセージについて記録された時刻を照合し、両者の差を取ることで処理時間を計測した。

c. クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間の測定

クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間の計測と

同一のため、割愛する。

4) 路側システムの検知精度の検証

路側システムが配信する周辺環境情報の信頼性を確認するため、路側システムの検知精度を検証した。検知精度の検証を目的として、カメラで捉えた映像と路側システムで検知した周辺環境情報をクラウド上にアップロードし、クラウド上のシステムはアップロードされた映像と周辺環境情報を蓄積するよう構成した。

クラウド上のシステムに蓄積された映像と周辺環境情報を重畳するアプリケーションを実装し、これを目視確認することで検知精度を確認した。

本実証実験の構成では、最も検知が難しいと想定される以下の4つのポイント（写真上の黄色いポイント表示部分）を検証対象とした。このポイントは、カメラから検知対象の距離が最も離れるポイントであるため、検知精度が落ちやすいことが想定された。

検証対象のポイントを図 4-13 に示す。

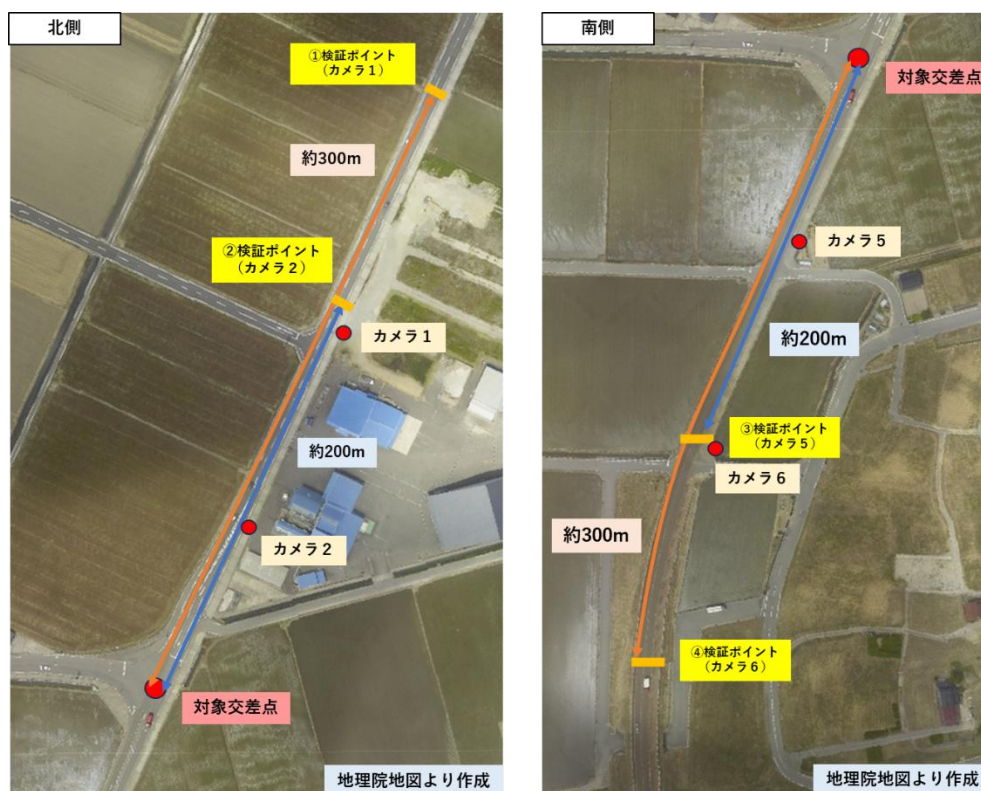


図 4-13 検知精度の検証ポイント

蓄積された映像の中から、自動車が検討対象のポイントを通過するタイミングを目視で抽出した。なお、抽出する自動車は無作為に選択した。抽出した映像の中で、周辺環境情報が検知枠として重畳されていれば、正検知（TP⁴⁷）、重畳されていなければ未検知（FN⁴⁸）、同一フレー

⁴⁷ True Positive の略

⁴⁸ False Negative の略

ムの中で自動車とは別の場所が検知されていた場合は誤検知（FP⁴⁹）として集計した。
 上記集計結果を用いて、以下計算式にて、評価基準となる再現率・適合率を算出した。

$$\text{再現率} = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{適合率} = \frac{TP}{TP + FP}$$

日中・晴天という理想環境ではある程度高い精度が期待できるが、本実証実験ではそれ以外の状況での検知精度がどの程度確保できるか確認するため、時間を日中・日没前・日没後の3区分、天候を晴天・曇天・雨天の3区分に分け、この組み合わせにて評価を行った。

(7) KGI/KPI

KGI/KPIを表4-9に示す。

表4-9 丁字路右折時における高速走行車両情報配信におけるKPI一覧

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	車載PCの周辺環境情報要求から受信までの遅延時間が5秒以下であること
	2	路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間が5秒以下であること
定性評価	3	検知の有無を確認した日時とその際の天候について記録し、検知の失敗例における天候・時間帯の傾向について分析すること

1) 車載PCの周辺環境情報要求から受信までの遅延時間が5秒以下であること

前述の通り、本測定はクラウド上のシステムの応答性を確認することを目的として実施する。将来的に自動運転バスがサービス提供対象の交差点に接近したタイミングで自動運転システムが周辺環境情報を要求し、受信した周辺環境情報を基に右折の判断を実施することを想定すると、周辺環境情報を受信するまでの遅延時間を考慮して十分手前で周辺環境情報を要求しておく必要がある。つまり、本評価項目は情報要求のタイミング設計に関わる項目である。

本実証実験では、行われる処理に対して概算の所要時間を見積もることにより目標値を設定した。前段で述べた通り、本計測は、車載PCが周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間、クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの処理時間、クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載PCが受信するまでの通信時間の3区間に分割して測定した。それぞれの区間の所要時間について、表4-10のように見積もった。

⁴⁹ False Positive の略

表 4-10 処理の区分と所要時間

番号	処理	所要時間
1	車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間	1 秒以下
2	クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの処理時間	3 秒以下
3	クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間	1 秒以下

上記の所要時間の合計から、車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間の目標値を 5 秒以下と設定した。

走行上、停止線で停止し、安全確認を行うタイミングには路側からの情報を受信できることが望ましいと考えられる。したがって、5 秒の遅延時間であれば、停止線で停止する 5 秒前には情報を要求しておくことになる。本実証実験の実施場所である下牧町丁字路においては、停止線の手前は十分に長い直線路であり、停止線で停止する 5 秒前に情報を要求することについて特段の問題は発生しないと考える。

2) 路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間が 5 秒以下であること

前述の通り、本測定は車載 PC が受信する周辺環境情報と現実世界の物標のずれを測定することを目的として実施する。

車両センサの見通し（100m 程度）を超える範囲から高速で接近する遠方の自動車の存在を、車両センサの見通し範囲に入る前に自動運転バスに通知することを目標としている。ただし、車載センサの検知直前に通知されてもあまり意味をなさない。自動運転バスが、受信した情報を基に、正しく右折の判断を行える程度前から通知される必要がある。本実証実験では、“受信した情報を基に、正しく右折の判断を行える程度前の時点”を“接近する自動車が 200m 以上先に存在する時点”と設定した。

一度開始した右折を、優先道路側の接近車両の通行を妨げずに完了させるためには、交差点から（自動運転バスの右折の所要時間）×（接近車両の速度）の距離分の接近車両の存在を正しく把握している必要がある。一例として、自動運転バスの右折所要時間を 10 秒、接近車両の速度を 60km/h とすると、その距離は 167m となるため、200m 以上先に存在する時点で通知できれば十分となる。

遅延時間が 5 秒以下であることと接近する自動車が 200m 以上先に存在する時点で通知することは、路側システムの検知範囲の設計と密接に関連するため、考え方を以下に述べる。

今回のシステム設計上、路側システムが最初に交差点に接近する車両を検知するタイミングは

対象車両が交差点から 300m の地点を通過するタイミングを目標としており、そこからは 100ms 毎に最新の周辺環境情報を配信する設計としている。ただし、遅延時間の間にも接近車両は走行するため、自動車が交差点から 300m の地点を通過するタイミングで検知されたとしても、その周辺環境情報を自動運転バスが受け取る時には、さらに交差点に近い位置に対象車両が存在することになる。対象車両が等速で接近すると仮定すると、遅延時間の間に進む距離は（遅延時間）×（対象の車両の速度）となる。超低遅延で周辺環境情報を配信できる場合、遅延時間の間に進む距離も小さくなり、自動運転バス（受信者）側ではほぼリアルタイムに現実世界の状況を反映できるが、遅延時間が大きくなる場合は現実世界とのズレを意識しておく必要がある。

これを考慮して、遅延時間を 5 秒とした場合の、接近車両の速度と 300m 地点で検知した周辺環境情報を自動運転バスが受け取る時の対象車両の存在位置の関係を表 4-11 に示す。

表 4-11 伝送遅延中の進行距離と受信時の対象車両存在位置

接近車両の速度	伝送遅延時間中の 進行距離 (x) (遅延時間 5 秒の場合)	300m 地点の周辺環境情報受信時の 対象車両の存在位置 (300m - (x))
50km/h	69m	231m
60km/h	83m	217m
70km/h	97m	203m
80km/h	111m	189m

当該丁字路の優先道路側の制限速度は 50km/h であるが、本実証実験ではこれを多少超過する車両（60-70km/h 程度）が存在していたとしても、接近する自動車が 200m 以上先に存在する時点で通知を開始することが可能な設計とした。遅延時間が小さく抑えられれば検知距離を小さくする余地が生まれるため、本実証実験の検知距離 300m、遅延時間の目標値 5 秒という設計が絶対の正解ということではなく、将来的に本実証実験の結果と路側の周辺環境情報が加わった場合の自動運転バスの右折ロジックをすり合わせ、路側システムの設計を最適化していくべきと考える。

3) 検知の有無を確認した日時とその際の天候について記録し、検知の失敗例における天候・時間帯の傾向について分析すること

本実証実験では自動車の検知について具体的な数値目標を定めず、検知の傾向を分析することとした。これは、現時点で周辺環境情報の精度がどの程度であれば自動運転バスの判断・制御に活用できるか明確に規定されていないためである。4.3.1 (6) 4) で述べた通り、再現率、適合率の算出は行うが、検知の傾向を分析することを目的として算出する。

本実証実験では、インフラセンサとして可視光カメラ⁵⁰を用いている。日中と日没後では明ら

⁵⁰ 人間の目で見える光（可視光）を利用して画像や映像を記録するカメラのこと

かに照度が異なるため、映像の映り方が異なり、検知率に差が出ることが予想された。また、日没前の時間帯を加えた理由は、日中とは太陽の高度が異なるため、西日で日中とは異なる映像となる可能性があると考えたためである。

さらに、天候によっても多少映像に差が出る可能性も考えられたため、晴天・曇天・雨天のパターンを取得して検証した。

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

当該ユースケースは実施していない。

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

当該ユースケースは実施していない。

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

当該ユースケースは実施していない。

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）

本実証における、ユースケース①：停車場における通信環境の高度化では、ローカル 5 G を使用し、設定した KPI 時間内に大容量の OTA データ（20GB）のダウンロード・アップロードが可能であるかを検証することが目的のため、上記ユーザインターフェースに関する評価は実施していない。

また、ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信も、車両センサ（約 100m 先まで）の検知範囲を超える、遠方（約 300m 先）の接近車両情報を車両センサ検知前までにクラウドからキャリア網を経由して自動運転バスに配信可能であるか、及び遅延時間が実用に耐えうるものかを検証することが目的のため、上記ユーザインターフェースに関する評価は実施していない。

(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

本実証では、定量的な KPI の達成状況が地域交通の持続性向上につながる寄与度であると考え、以下の目的、実施内容、実施方法を設定した。

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化の実証

○検証目的：

30 分以内で大容量の OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、地域交通の運行ダイヤに影響を与えず、持続可能な運用に寄与することが可能か検討した。

○実施内容：

小松駅ロータリー内の指定された場所で転送速度測定を複数回（DL 合計 15 回以上/UL 合計 15 回以上）実施し、測定場所による転送速度時間の差異を確認した。

○実施方法：

ローカル 5G 環境を構築し、バスの停車場に向けてローカル 5G の電波を発射し、通信エリアを構築する。当該通信エリア内に自動運転バスを 1 台停車させ、自動運転バス内に設置した車載 PC に対して、予め用意した OTA データ（20GB）転送を実行した。また、車載 PC からログデータ（5GB/10GB/20GB）の転送を実行した。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

○検証目的：

遠方（約 300m 先）の接近車両の存在を検知し、この接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって右折を試みる自動運転バスに通知することが可能か、またクラウド経由でのデータ配信のため、遅延時間や路側センサによる遠方の接近車両検知精度が運用に耐えうるものかを検証することで、一般車両との右折時の衝突事故を防ぎ、地域交通の持続可能な運用に寄与することが可能か検討した。

○実施内容：

実際に自動運転バスに車載 PC を搭載し、無信号丁字路がある走行ルートを自動運転バスで複数回（50 回以上）走行し、クラウドからの周辺環境情報送信における遅延時間測定及び、路側センサによる遠方（約 200m 先、300m 先）の接近車両検知精度を評価した。

○実施方法：

自動運転バスの走行ルート（無信号丁字路）上に、遠方からの接近車両（100m から 300m 先）を検知する路側カメラを設置し、カメラ映像を MEC で AI 分析し周辺環境情報に変換した上で、インターネット網経由でクラウド上に送信した。車載側は、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT サーバに周辺環境情報を要求し、クラウド上に送信された周辺環境情報を受信できる仕組みを構築した。

(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

○対策目的：

自動運転の支援に資する通信システムの構築・検証時のセキュリティ対策に関して、データ処理・管理等に関するガイドラインが未整備のため、本実証実験において通信システムの構築を担当する日本電気株式会社の標準ガイドラインを参考に、不正アクセスによる通信障害やデータ漏洩等のリスクを低減させるために、予防と検知を実施した。

基本の方針として、多層防御の考え方により、一つが突破されても複数の防御を組み合わせた。万が一不正アクセスがあった場合には、検知により何が起こったのか記録を追うことを可能にした。

○実施内容：

予防：

アクセス認証、外部通信の暗号化(VPN⁵¹等)、アクセス制限(ホワイトリスト⁵²)、ファイアウォール⁵³／フィルタリング⁵⁴、IPS⁵⁵や WAF⁵⁶、要塞化による不正侵入防御を実施した。

検知：

ログ監視、証跡記録を実施することにより、不正アクセスによる通信障害やデータ漏洩等が発生したか確認した。

○実施方法：

システム内の各装置にアクセスするときは、認証を行ったアカウントで、必ず中継サーバを経由してアクセスを行った。当該中継サーバでは、万が一の不正アクセスを見つけるために証跡記録を残した。ローカル 5G 端末からの接続には、必要な IP/port のみ利用可能とするアクセス制御を実施し、不正アクセスを防止した。また、収集データの漏洩リスク低減のため、MEC 等で収集・作成したデータは、即時上位に転送し、クラウド上に一か所にまとめて保管することで、物理的な脅威に対してもリスク低減の措置を実施した。なお、システム構成要素の脆弱性を適宜確認し、PSIRT⁵⁷と連携し組織的・継続的な対応を行った。脆弱性レポートおよびセキュリティインシデントの検出時には、速やかな対処と対策の検討および実施を行った。

⁵¹ Virtual Private Network の略 仮想の専用線

⁵² 許可するアプリケーションやアクセス元のリストを予め登録しておき、それ以外の通信を遮断するセキュリティ対策手法のこと <https://cybersecurity-jp.com/column/103890> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

⁵³ 標的型攻撃など外部のネットワーク経由の悪意ある攻撃から、社内や組織内のネットワークやネットワークに接続するパソコンやサーバーなどの端末を守る情報セキュリティ対策のこと <https://www.microsoft.com/ja-jp/biz/smb/column-firewall> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

⁵⁴ 許可すべき通信とそうでない通信を分類し、後者を遮断する仕組み <https://it-trend.jp/filtering/article/matome> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

⁵⁵ Intrusion Prevention System の略 日本語では「不正侵入防御システム」と呼ばれます。通信パターンによって不正侵入や攻撃を検知し、自動的に遮断する役割を担うセキュリティ製品のこと <https://securityhub.biz/network-security/ips/> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

⁵⁶ Web Application Firewall の略 Web アプリケーションへの不正な Web 攻撃を防ぐために開発された専用防御ツールのこと <https://it-trend.jp/waf/article/162-0008#chapter-1> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

⁵⁷ Product Security Incident Response Team の略 製品に関するセキュリティインシデントの管理や対応を専門に行うチームのこと <https://cybersecurity-jp.com/security-words/100452> 2024 年 12 月 9 日 アクセス

(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

○実施目的：

通信システム構築時及び、実証実験期間中の運用性向上のために、システム内に存在する様々な機器、アプリを一元管理する運用管理システムを配置し、システムが問題なく稼働しているか、不具合時にはリモート保守等が可能か検証するために、以下を実施した。

○実施内容：

システム配置：

システム内に存在する様々な機器、アプリ等を一元管理する運用管理システムを配置した。

システム監視：

各機器、OS、アプリが出すアラートを集約し、個々の監視対象にアクセスすることなく障害状況を把握できるようにした。

システム制御：

セキュアなリモート保守機能を構築し、問題検出時の調査・修正において開発者が現地に行くことなくシステム保守作業を行えるようにした。

○実施方法：

システム監視：

各機器、OS、アプリが出すアラートを集約し、個々の監視対象にアクセスすることなく障害状況を把握できるようにした。またリアルタイム及び過去のパフォーマンスデータ参照機能を構築し、予期しないダウンタイムの抑制、問題の検出の迅速化を実施した。なお、監視機能を WebGUI で提供することで、運用者に直感的な操作性、アクセスの容易性、視覚的な監視・分析結果を提供できるようにした。

システム制御：

セキュアなリモート保守機能を構築し、問題検出時の調査・修正において開発者が現地に行くことなくシステム保守作業を行えるようにした。

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

本実証では、定量的な KPI の達成状況が通信システム等の運用の有無による運行停止時間等の変化につながると考え、以下の目的、実施内容、実施方法を設定した。

ユースケース①： 駐車場における通信環境の高度化の実証

○検証目的：

30 分以内で大容量の OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、運行停止時間等の変化の有無を検討した。

○実施内容：

小松駅ロータリー内の指定された場所で転送速度測定を複数回（DL 合計 15 回以上/UL 合計 15 回以上）実施し、測定場所による転送速度時間の差異を確認した。

○実施方法：

ローカル 5G 環境を構築し、バスの停車場に向けてローカル 5G の電波を発射し、通信エリアを構築する。当該通信エリア内に自動運転バスを 1 台停車させ、自動運転バス内に設置した車載 PC に対して、予め用意した OTA データ（20GB）転送を実行した。また、車載 PC からログデータ（5GB/10GB/20GB）の転送を実行した。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

○検証目的：

自動運転システムと路側センサ連携は今年度のスコープ範囲外のため、手動介入回数は変化ないが、遠方からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、将来的に手動介入回数を削減できるか検討した。

○実施内容：

実際に自動運転バスに車載 PC を搭載し、無信号丁字路がある走行ルートを自動運転バスで複数回（50 回以上）走行し、クラウドからの周辺環境情報送信における遅延時間測定及び、路側センサによる遠方（約 200m 先、300m 先）の接近車両検知精度を評価した。

○実施方法：

自動運転バスの走行ルート（無信号丁字路）上に、遠方からの接近車両（100m から 300m 先）を検知する路側カメラを設置し、カメラ映像を MEC で AI 分析し周辺環境情報に変換した上で、インターネット網経由でクラウド上に送信した。車載側は、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT サーバに周辺環境情報を要求し、クラウド上に送信された周辺環境情報を受信できる仕組みを構築した。

(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

本実証では、定量的な KPI の達成状況が道路交通全体の安全性・円滑性向上につながる寄与度であると考え、以下の目的、実施内容、実施方法を検討した。

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

○検証目的：

30 分以内で大容量の OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、セキュリティホールや脆弱性が発見された際に、車両ディーラー等に行かず、運行ルート内の小松駅でセキュリティパッチや、バグ修正、新機能追加等を行うことで、道路交通全体の安全性向上に寄与できるか検討した。

○実施内容：

小松駅ロータリー内の指定された場所で転送速度測定を複数回（DL 合計 15 回以上/UL 合計 15 回以上）実施し、測定場所による転送速度時間の差異を確認した。

○実施方法：

ローカル 5G 環境を構築し、バスの停車場に向けてローカル 5G の電波を発射し、通信エリ

アを構築する。当該通信エリア内に自動運転バスを1台停車させ、自動運転バス内に設置した車載PCに対して、予め用意したOTAデータ(20GB)転送を実行した。また、車載PCからログデータ(5GB/10GB/20GB)の転送を実行した。

ユースケース③・丁字路右折時における高速走行車両情報配信

○検証目的：

本実証実験が、道路交通全体の安全性・円滑性向上に直ちに寄与することはないが、遠方(約300m先)からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、自動運転バスの挙動の改善を行うことにより将来的に道路交通全体の安全性・円滑性向上に寄与できるか検討した。

○実施内容：

実際に自動運転バスに車載PCを搭載し、無信号丁字路がある走行ルートを自動運転バスで複数回(50回以上)走行し、クラウドからの周辺環境情報送信における遅延時間測定及び、路側センサによる遠方(約200m先、300m先)の接近車両検知精度を評価した。

○実施方法：

自動運転バスの走行ルート(無信号丁字路)上に、遠方からの接近車両(100mから300m先)を検知する路側カメラを設置し、カメラ映像をMECでAI分析し周辺環境情報に変換した上で、インターネット網経由でクラウド上に送信した。車載側は、キャリア網を経由してクラウド上のMQTTサーバに周辺環境情報を要求し、クラウド上に送信された周辺環境情報を受信できる仕組みを構築した。

(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、定量的なKPIの達成状況が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・交通利便性の向上につながると考え、以下の目的、実施内容、実施方法を設定した。

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化の実証

○検証目的：

30分以内で大容量のOTAデータ(20GB)のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、システムアップデート等により交通利便性の向上につながるか検討した。

○実施内容：

小松駅ロータリー内の指定された場所で転送速度測定を複数回(DL合計15回以上/UL合計15回以上)実施し、測定場所による転送速度時間の差異を確認した。

○実施方法：

ローカル5G環境を構築し、バスの停車場に向けてローカル5Gの電波を発射し、通信エリ

アを構築する。当該通信エリア内に自動運転バスを1台停車させ、自動運転バス内に設置した車載PCに対して、予め用意したOTAデータ（20GB）転送を実行した。また、車載PCからログデータ（5GB/10GB/20GB）の転送を実行した。

ユースケース③・丁字路右折時における高速走行車両情報配信

○検証目的：

自動運転システムと路側センサ連携は今年度のスコープ範囲外のため、ルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果は直ちに検証されるものではないが、遠方（約 300m）からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、将来的にルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上につながるか検討した。

○実施内容：

実際に自動運転バスに車載PCを搭載し、無信号丁字路がある走行ルートを自動運転バスで複数回（50 回以上）走行し、クラウドからの周辺環境情報送信における遅延時間測定及び、路側センサによる遠方（約 200m 先、300m 先）の接近車両検知精度を評価した。

○実施方法：

自動運転バスの走行ルート（無信号丁字路）上に、遠方からの接近車両（100m から 300m 先）を検知する路側カメラを設置し、カメラ映像を MEC で AI 分析し周辺環境情報に変換した上で、インターネット網経由でクラウド上に送信した。車載側は、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT サーバに周辺環境情報を要求し、クラウド上に送信された周辺環境情報を受信できる仕組みを構築した。

(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

○初期コスト・ランニングコスト負担の在り方

ユースケース①及び、ユースケース③のインフラ整備に必要な主な初期コスト・ランニングコスト及び、当該コスト負担の在り方を以下表 4-12 に示す。

表 4-12 主な初期コスト・ランニングコスト

主な初期コスト	主なランニングコスト
①通信システム設計、構築費 （ローカル 5G、LTE 等）	①機器・システム監視・維持・保守費
②機器選定、調達、キッティング費	②機器減価償却費
③通信システム事前評価費	③各種サービス利用料 （LTE やデータストレージサービス等）
④現地環境構築費	④電気利用料
⑤データ計測、評価費	⑤その他
⑥工事関連での各種工事手続き費	

⑦設置工事費 ⑧その他	
<負担の在り方> 技術実証における初期コストは、先進システムでもあるため、国等の検証事業、補助金事業を利活用することが望ましいと考える。 一方、技術実証で得られた知見を活かし、検証機器等の製品化やコスト低減策を検討していく必要がある。	<負担の在り方> 技術実証を次年度以降も続ける場合のランニングコストは、まだ製品化されていない機器等を継続利用することも想定し、国等の検証事業、補助金事業を利活用することが望ましいと考える。 一方、技術実証で得られた知見を活かし、サービス設計を検討していく必要がある。

○自動運転システムと他サービスの連携

本実証で検証したユースケース①・③は、単独検証であったため、今後はユースケース①及び、ユースケース③とも、他サービスと連携することで、地域課題解決に活用できる「共有化」を検討していく必要がある。なお、「共有化」を見据える上では、各実証や課題解決毎に個別性の高いアーキテクチャ・機器構成を採用せず、必要な機能・性能を具備した上で汎用性のある標準アーキテクチャ・構成デザインが必要であると考ええる。

○インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

本実証で検証したユースケースは、単独検証であったため、今後はユースケース①：停車場における通信環境の高度化及び、ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信で構築するインフラを複数事業者で共同利用することで、個々の事業者が負担するインフラ整備コストやメンテナンスコストの低減化を検討することが望ましい。また、インフラセンサ情報を他の自動車等にも伝える仕組みを検討することで、一つのプラットフォームで複数のサービス提供等が検討できると考えられる。

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 通信システムの概要・設置場所

本実証実験において通信システムを設置する箇所を図 5-1 中 A・B に示す。



図 5-1 機器設置箇所

A・Bそれぞれのシステム概要について以下に示す。

(1) A：小松駅

小松駅では、ユースケース①駐車場における通信環境の高度化を実施するために通信システムを設置した。図 5-2 に設置した機器の位置と設置写真を示す。

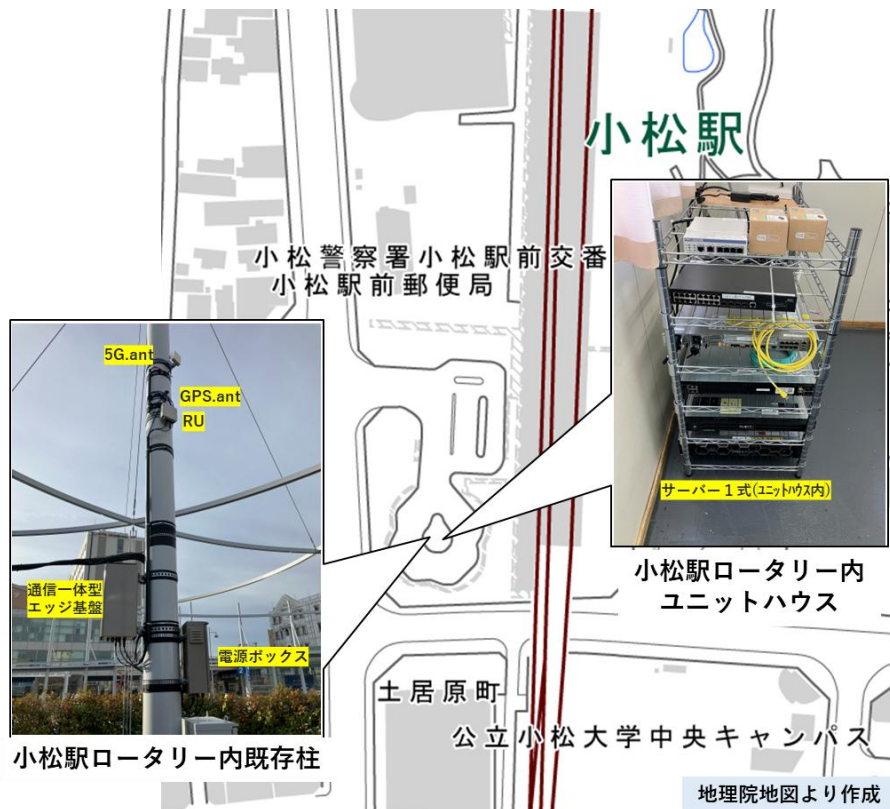


図 5-2 小松駅の機器設置場所および設置写真

小松駅ロータリー内の既存柱を借用し、ローカル 5G の基地局機能および MEC 機能を持った機器（通信一体型エッジ基盤）、ローカル 5G 環境の構築に必要なアンテナ、RU、GPS アンテナや電源供給に必要な電源ボックスを設置し、自動運転バスが OTA を実施するために停車する箇所に向けてローカル 5G の電波を発射し、通信環境を構築した。ローカル 5G の選定意図については、4.1.1 (3) 1) で示した。

小松駅ロータリー内にユニットハウスを設置し、ローカル 5G の運用・セキュリティ保護を目的としたサーバ類（NCP⁵⁸サーバ、セキュリティサーバ）およびネットワーク機器類（L3SW、L2SW、VPN ルータ）をその中に設置した。

自動運転バス内にはローカル 5G の通信端末を設置し、データ送受信検証用のノート PC を準備した。自動運転バス車内の機器写真を図 5-3 に示す。



図 5-3 自動運転バス車内の機器写真

⁵⁸ NEC Cloud Platform の略

ネットワーク構成の概要を図 5-4 に示す。

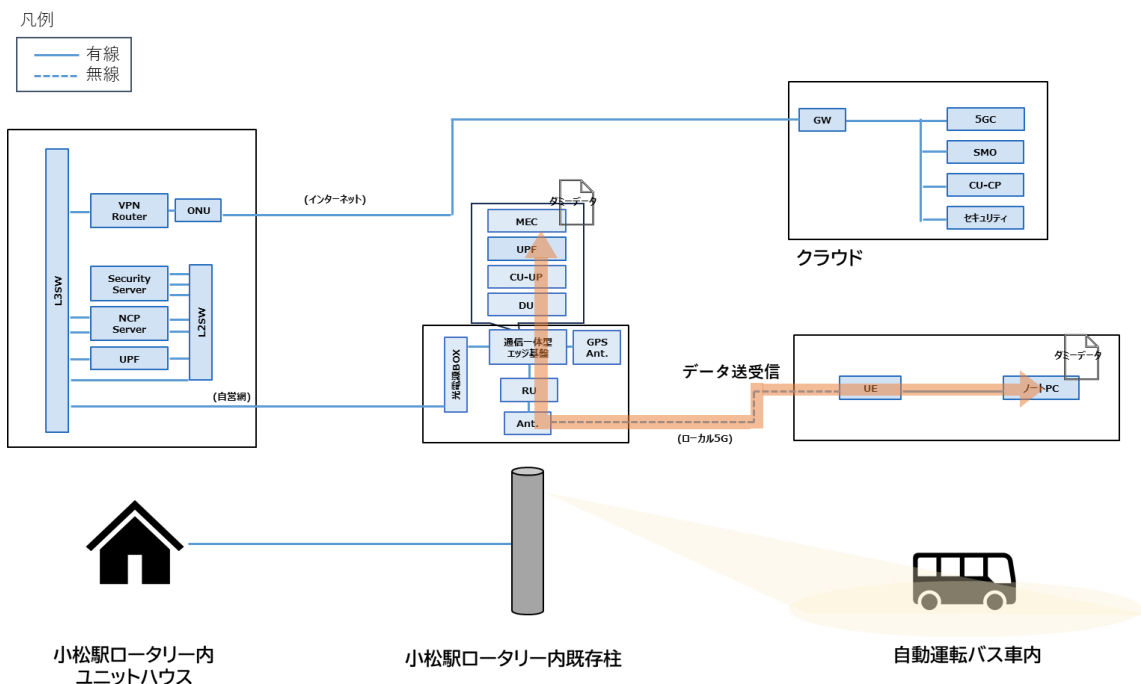


図 5-4 小松駅前 ネットワーク構成

小松駅ロータリー内の既存柱と自動運転バス間はローカル 5G、小松駅ロータリー内の既存柱とユニットハウス間は自営の光ケーブルによって接続した。

ユニットハウスからはインターネットに接続されており、そこからクラウド環境に接続する構成とした。クラウド上には、5G ネットワークを構成する 5GC（コアネットワーク）、CU-CP とセキュリティ・ログ収集の機能を持つコンポーネントを配置した⁵⁹。

本実証実験に関連するデータフローは、柱に設置した通信一体型エッジ基盤内の MEC と、自動運転バス車内のノート PC 間でローカル 5G を介したデータ転送のみである。将来的には、更新データを持つサーバから MEC へ更新データを届ける経路や、MEC からエンジニアのもとにログデータを届ける経路についても構築することを想定して実証実験環境を構築した。

なお、本実証実験では準備期間との兼ね合いにより簡易的にユニットハウス内にサーバ類を設置したが、将来的にはデータセンター等、設備の整った場所に設置することが望ましいと考える。

(2) B：下牧町無信号丁字路

下牧町無信号丁字路では、ユースケース③丁字路右折時における高速走行車両情報配信を実施するために通信システムを設置した。図 5-5、図 5-6 に設置した機器の位置と設置写真を示す。

⁵⁹ <https://cittec.ctc-g.co.jp/blog/post004> 2025 年 1 月 30 日アクセス

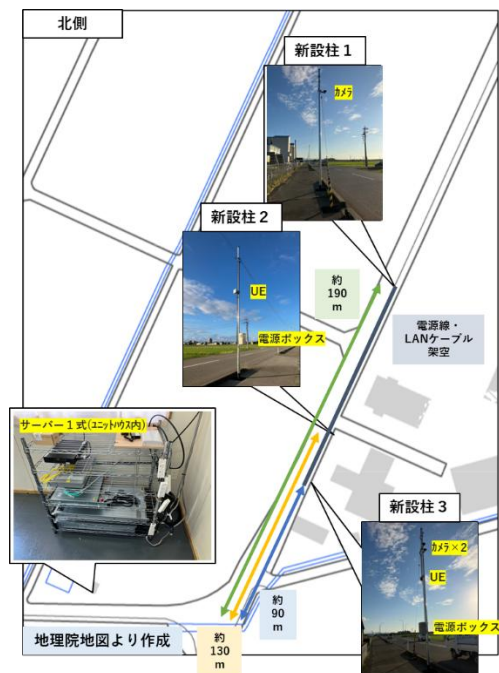


図 5-5 下牧町丁字路(北側)の機器設置場所および設置写真

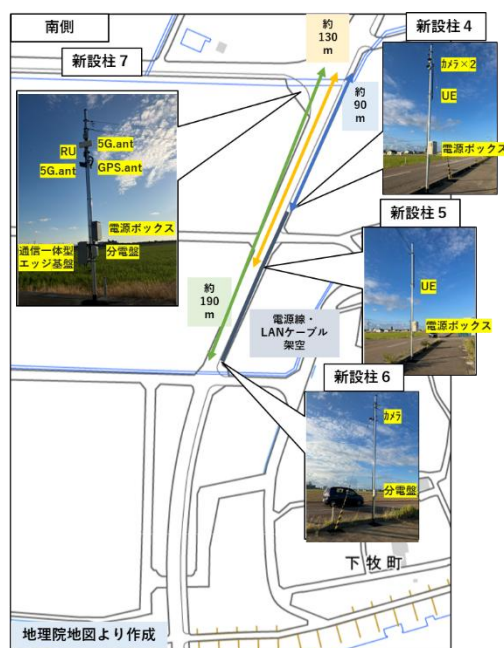


図 5-6 下牧町丁字路(南側)の機器設置場所および設置写真

ローカル 5G の基地局機能および MEC 機能を持った機器を丁字路隅切りに設置し、インフラセンサとして分散設置する 6 台のカメラ映像を MEC に伝送した。UE は南北それぞれ 2 か所の設置とし、交差点から約 90m、130m の地点に設置した。カメラは南北それぞれ 2 か所、合計 3 台の設置とし、90m 地点に 2 台、190m 地点に 1 台の構成とした。カメラの検知範囲については、望遠の画角設計をした場合に設置地点から 100m 程度と想定した。また望遠での画角設計とした場合は設置位置の最近傍は画角に入らなくなるため、これを補うために 90m

地点のカメラは2台目を設置した。センサとしてのカメラ選定にあたっては、限られた実証期間で結果を出す必要があることから、昨年度以前に使用実績があり評価を実施しているカメラを選択した。カメラの検知範囲のイメージを図5-7に示す。

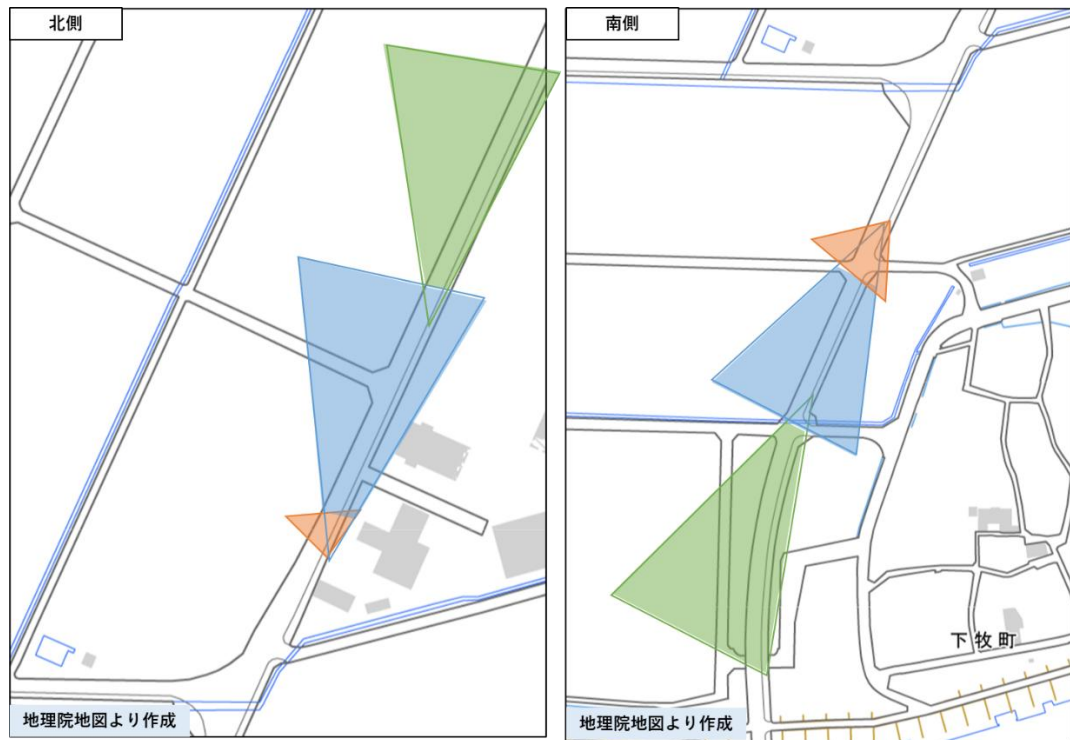


図 5-7 カメラの検知範囲

ネットワーク構成の概要を図 5-8 に示す。

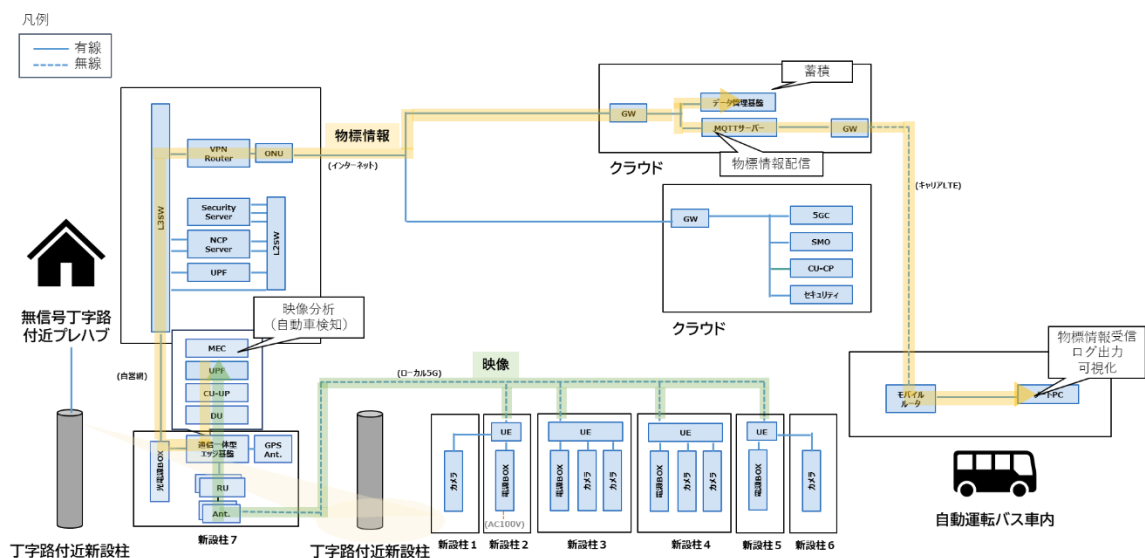


図 5-8 下牧町丁字路 ネットワーク構成

ローカル 5G により伝送された映像を、MEC に搭載した AI により分析することで自動車を検知し、位置情報と速度情報を分析する。これらの情報をまとめて周辺環境情報として、イ

ンターネット網を通じてクラウドに伝送する。

自動運転バスに設置する車載 PC は、キャリア網を経由してクラウド上の MQTT サーバに周辺環境情報を要求し、MQTT サーバはその要求に応じてクラウドにアップロードされた周辺環境情報を仲介し、車載 PC へと配信する。車載 PC は本実証実験においては自動運転システムとは連携せず、実験用アプリケーションを実装した。車載 PC 上の実験用アプリケーションは、受信した周辺環境情報を基に KPI 計測に必要な情報をログに出力し、地図上にマッピングして可視化する。個々の技術の特筆すべき点については、利用技術 4.3.1 (3) に記載している。

5.1.2 電波シミュレーション・測定結果

ローカル 5G の環境構築にあたり、事前に電波伝搬シミュレーションを実施した。小松駅ロータリー内の結果を図 5-9 に示す。RSRP⁶⁰は基準信号受信電力を指し、その地点での電波強度を表している。絶対値が小さいほど電波が強いことを示す。

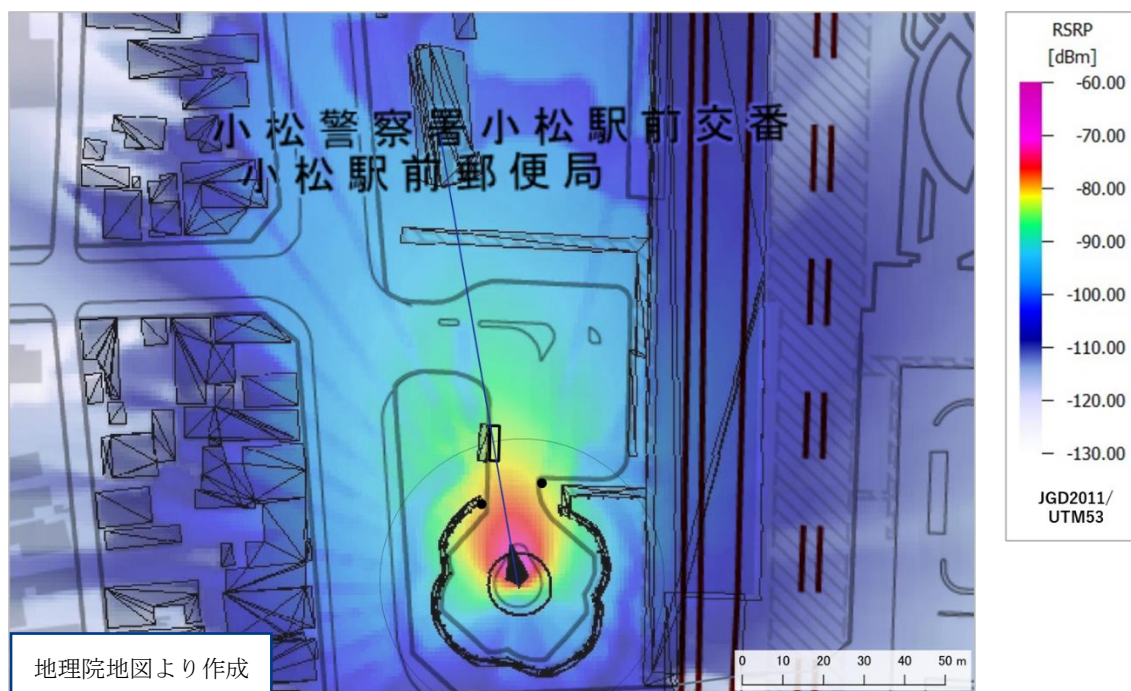


図 5-9 小松駅の電波伝搬シミュレーション

下牧町丁字路の結果を図 5-10 に示す。

⁶⁰ Reference Signal Received Power の略 基地局の電波の強度

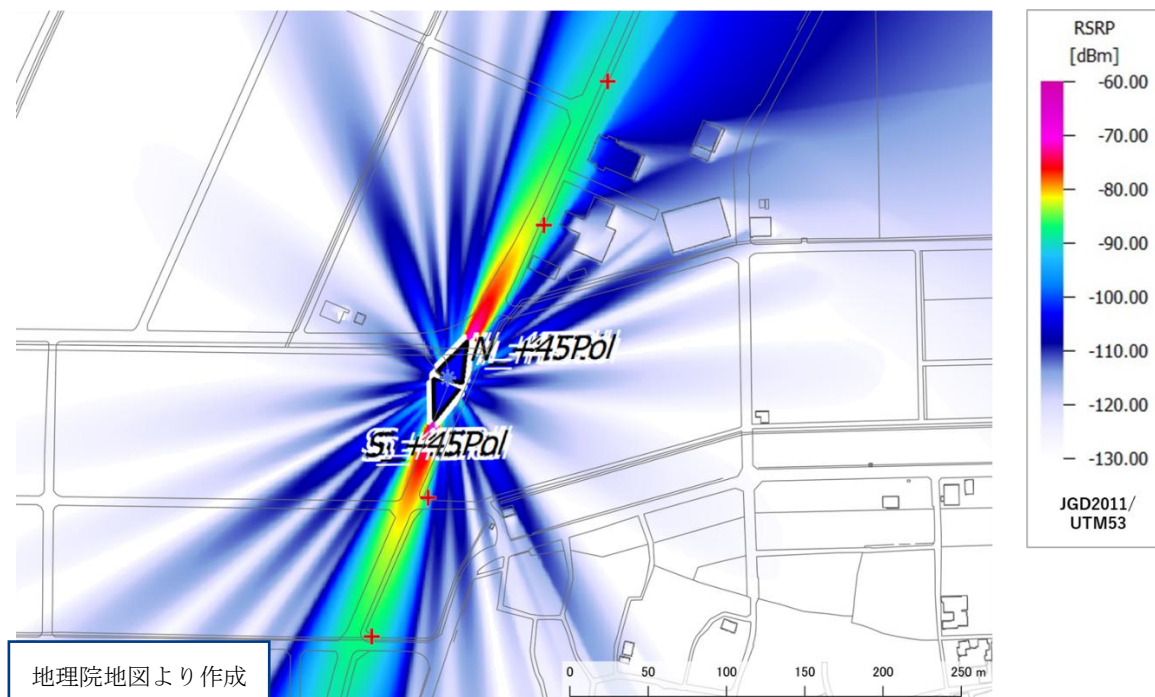


図 5-10 下牧町丁字路の電波伝搬シミュレーション

ローカル 5G 環境構築後、電波測定を実施した。小松駅ロータリー内の結果を図 5-11 に示す。背景にシミュレーション結果を重畳している。

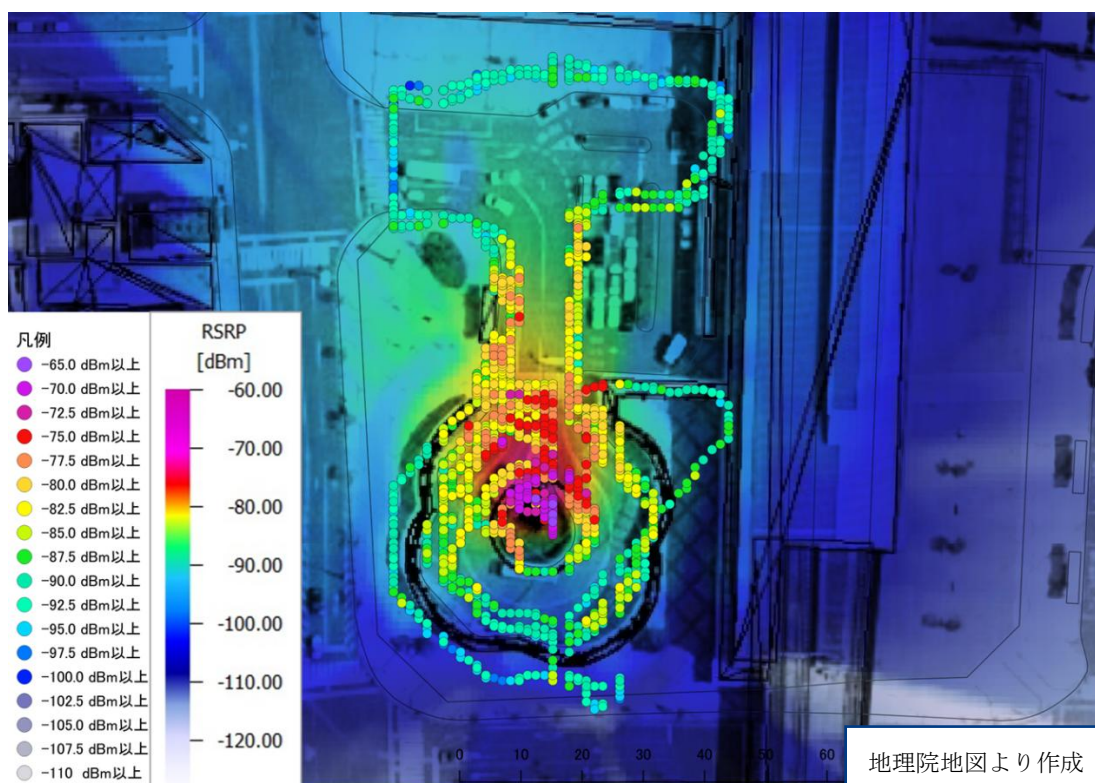


図 5-11 小松駅の電波測定結果

下牧町丁字路の北側の結果を図 5-12 に示す。下牧町丁字路は北側向きの RU と南向きの

RU が存在するため、こちらは北側向き RU のみの測定結果である。

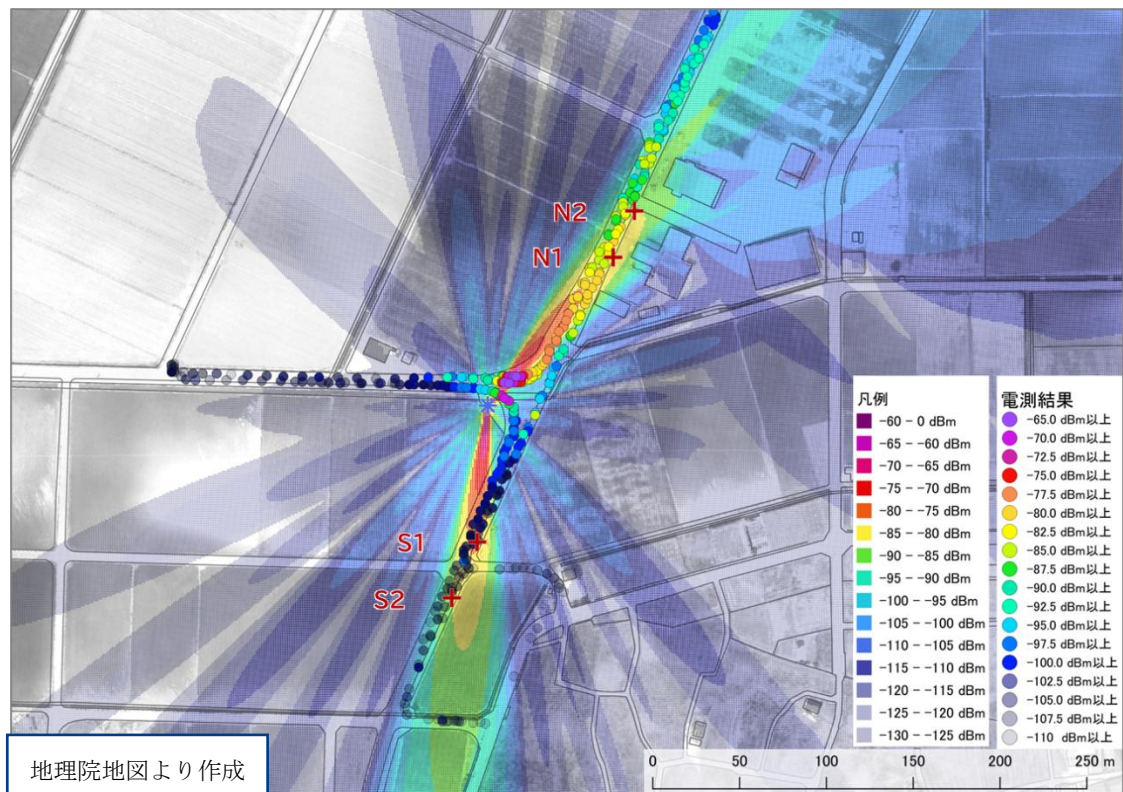


図 5-12 下牧町丁字路北側の電波測定結果

続いて、南側の測定結果を図 5-13 に示す。

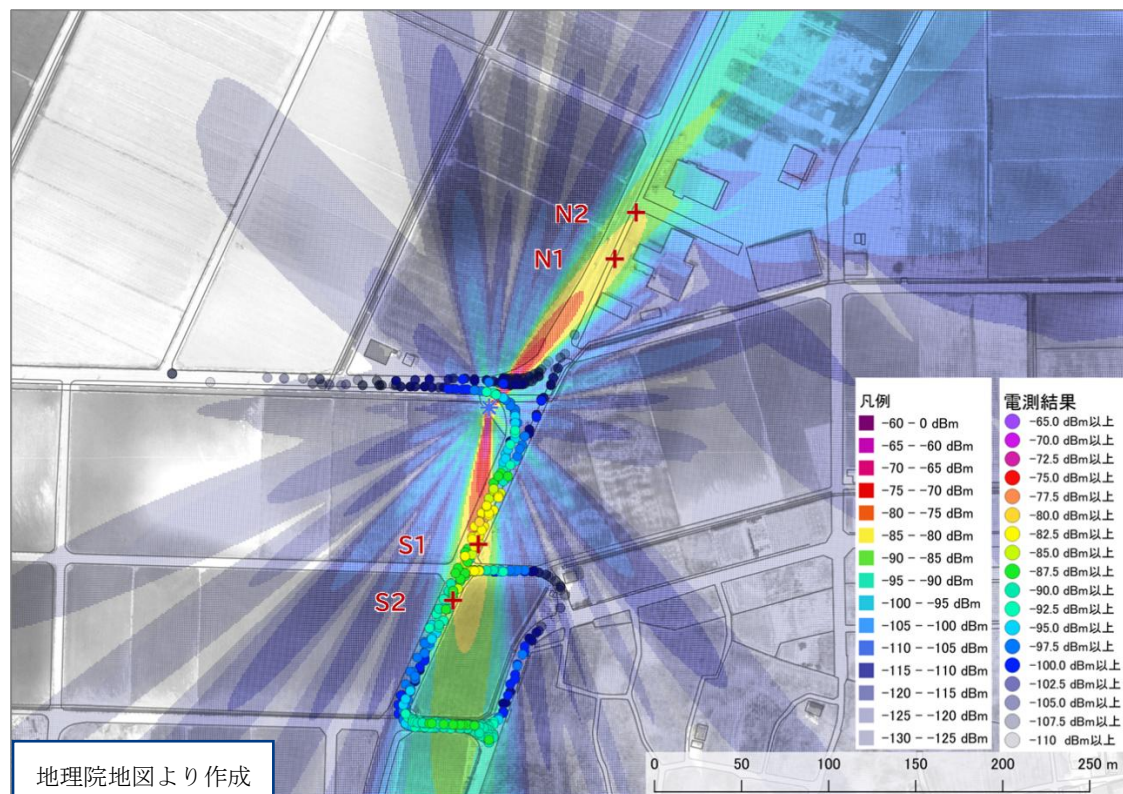


図 5-13 下牧町丁字路南側の電波測定結果

いずれもシミュレーション時の想定と大きくは異なる環境が構築できたと考える。

5.2 使用機器・ソフトウェア一覧

屋外への機器設置数を表 5-1 に示す。

表 5-1 屋外機器設置台数

機器	概要	台数	
		小松駅	下牧町丁字路
RU (Radio Unit)	無線基地局装置の 無線子局	1	2
指向性アンテナ 10°	電波を発射するアンテナ 放射角違いで 2 種類採用	0	2
指向性アンテナ 60°		1	0
GPS アンテナ	5G 基地局に GPS 情報を供給するためのアンテナ	1	1
通信一体型 エッジ基盤	無線通信機の基地局機能と MEC 機能を一体化した装置	1	1
UE (User Equipment)	ローカル 5G の通信端末装置	1 (車載機)	4
モバイルルータ	キャリア回線の通信端末装置	0	1 (車載機)
カメラ	4K 映像が撮影可能なカメラ	0	6
光電源 BOX	・ 一体型基地局/RU への AC,DC 電源供給 ・ 光回線クロージャ	1	1
電源 BOX	UE ユニットへの電源供給	0	6

設置した基地局の無線部特性について、表 5-2 に示す。

表 5-2 基地局の無線特性

項目	特性
中心周波数帯	4.85 GHz 帯
通信方式	ローカル 5G (Sub6-SA)
帯域幅	100MHz 幅 (小松駅) 40MHz 幅 (下牧町丁字路)
変調方式	256QAM
同期パターン	準同期 TDD (DDDSUUDSUU)
最大通信速度	約 400MHz (理論値/2T2R)

設置したカメラの代表的なスペックについて、表 5-3 に示す。今回は、市販品の AXIS Communications 製 Q3538-LVE を採用した。

表 5-3 カメラのスペック

項目	カタログスペック ⁶¹	実効スペック
解像度	最大 3840x2160 (4K)	3840x2160 (4K)
フレームレート	最大 25fps(電源 50Hz 時) 最大 30fps(電源 60Hz 時) ※WDR オン時	約 10fps ※MEC での処理レート
ビデオ圧縮	H.264 H.265 Motion JPEG	H.264
焦点距離	6.2 - 12.9 mm	-
水平視野	103 - 48 °	-
垂直視野	56.4 - 27.4 °	-

ユニットハウスへの機器設置数を表 5-4 に示す。

表 5-4 ユニットハウス内機器設置台数

機器	概要	台数	
		小松駅	下牧町丁字路
ONU	インターネット回線の終端装置。 NTT 支給品。	1	1
L3SW	ネットワーク層のデータ転送処理を担う ネットワーク機器。	1	1
L2SW	データリンク層のデータ転送処理を担う ネットワーク機器。	1	1
VPN ルータ	VPN ⁶² 機能を搭載したルータ。	1	1
UPF	5G ネットワークでユーザデータの転送 等を担う機能を持つサーバ。	1	1
NCP サーバ	5G 基地局のファームウェア等を管理する 機能を持つサーバ。	1	1
セキュリティサーバ	システムのセキュリティ・ログ収集を担 う機能を持つサーバ。	1	1

表 5-5 中のネットワーク機器について、以下に採用した機器を示す。

表 5-5 ネットワーク機器一覧

機器	メーカー	機器名
L3SW	Cisco	ASR920-12SZ-IM ⁶³
L2SW	NEC	UNIVERGE QX-S1116GT-4G ⁶⁴
VPN ルータ	NEC	UNIVERGE IX2106 ⁶⁵

⁶¹ <https://www.axis.com/ja-jp/products/axis-q3538-lve#technical-specifications> 2024 年 12 月 25 日
アクセス

⁶² Virtual Private Network

⁶³ <https://www.cisco.com/c/ja.jp/td/docs/routers/asr920/hardware/installation/guide-12sz-im/b-asr-920-12-SZ-IM-qsg.html> 2024 年 12 月 25 日アクセス

⁶⁴ <https://jpn.nec.com/qxseries/qx-s1100g/index.html> 2024 年 12 月 25 日アクセス

⁶⁵ <https://jpn.nec.com/univerge/ix/Info/ix2106.html> 2024 年 12 月 25 日アクセス

車載機器のモバイルルータについては、クラウド環境とのVPNを構築するため、VPN機能を備えている NEC 製 UNIVERGE WA2611E-AP⁶⁶ を採用した。

5.3 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

本項では、これから自動運転システムに必要な OTA や V2N の実証実験を検討されている自治体様や関係企業様向けに、実証時の留意点を手続き面、手配面、施工・システム環境構築面の3つの観点で記載する。

5.3.1 手続き面

OTA や V2N の検証をするためには、検証場所にセンサ類（本実証ではカメラ）や無線機器類などを設置する必要がある。ここでは、実証地域であった小松市内で機器類等の設置許可に必要な手続きと申請期間（申請してから許可が下りるまでの目安期間）について以下に記す。

なお、設置許可が下りなければ、検証に必要な機器類を設置することも、ローカル 5G 環境を構築することもできないため、期限が決まっている実証実験では、まずこの手続き面を確認することを推奨する。

(1) 小松駅前ロータリー内及び、下牧町丁字路に無線機器等を設置するために必要な行政手続きについて

小松駅前ロータリー内及び、下牧町丁字路に無線機器等を設置する際に必要な行政手続きは表 5-6、表 5-7 の通りである。

表 5-6 小松駅前ロータリー内に無線機器等を設置する際に必要な行政手続き書類一覧と期間

1 行政手続きと必要な書類	2 留意事項等
行政財産使用許可申請 行政財産使用許可申請書、機器設置希望場所（カメラ・プレハブ等）、受電／光ルート、機材関連資料	申請方法：小松市まちデザイン課窓口へ提出 期間：約1週間（申請～許可） その他： ・申請書類に使用する図面の電子データ有無やデータ提供可否が申請書類作成リードタイムに影響するため、あらかじめ担当窓口を確認しておくことが望ましい。

表 5-7 下牧町丁字路に無線機器等を設置するために必要な行政手続き書類一覧と期間

⁶⁶ <https://jpn.nec.com/univerge/wa/spec3.html> 2024 年 12 月 25 日アクセス

1 行政手続きと必要な書類	2 留意事項等
道路工事施工承認申請 (道路法第24条) 道路工事施工承認申請書、位置図(5万分の1程度の平面図)、現況図(現況の平面図(1千分の1程度)及び縦横断面図)、計画図(完成後の平面図(1千分の1程度)及び縦横断面図)、構造図、交通規制図、工事仕様図、公図(写)、求積表、誓約書(施工後に施工箇所を道路管理者に引き継ぐ旨を約した書面)、同意書(水路管理者、隣地所有者等の関係者の同意を証する書面)、現況写真	申請方法：小松市道路課窓口にて提出 リードタイム：約2週間(申請～許可) ※窓口担当者との書類確認期間は除く その他： ・申請前に事前協議が必要となるため、リードタイムに加え、十分な余裕を持って申請することが望ましい。 ・
道路占用許可申請 (道路法第32条) 道路占用許可申請書、位置図、物件の構造等を明らかにした図面、写真	申請方法：小松市道路課窓口または郵送にて提出 リードタイム：約2週間(申請～許可) ※事前協議期間は除く その他： ・申請前に事前協議が必要となるため、リードタイムに加え、十分な余裕を持って申請することが望ましい。
道路使用許可申請 (道路交通法第78条第1項) 道路使用許可申請書、位置図、物件の構造等を明らかにした図面、写真	申請方法：小松警察署窓口にて提出 リードタイム：2～3営業日程度(申請～許可) その他： ・道路占用許可申請と同時期に提出。

(2) 小松駅前ロータリー内及び、下牧町丁字路にローカル 5G 環境を構築するための行政手続き⁶⁷について

小松駅前ロータリー内および下牧町丁字路にローカル 5G 環境を構築するための行政手続きは表 5-8 の通りである。

総務省北陸総合通信局⁶⁸に対して実験試験局の免許申請を行い、免許状の交付を受けた。

なお、実験試験局の免許申請に必要な書類は、総務省 電波利用ホームページの以下に記載されている。

<https://www.tele.soumu.go.jp/index.htm>

HOME > 免許関係 > 免許等に関するその他の制度 > 実験試験局関係：

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/exp/index.htm>

(4)実験試験局の免許申請書類等

- ①無線局免許申請書
- ②無線局事項書
- ③工事設計書
- ④実験計画書

また、①～③の各書類の様式は以下から入手して作成した。

HOME > 申請書等のダウンロード > 無線局免許手続様式

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/download/proc/index.htm>

⁶⁷ <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/ml/mobile/local5g/index.htm> 5.ローカル 5 G を利用するには 2024 年 12 月 26 日アクセス

⁶⁸ <https://www.soumu.go.jp/soutsu/hokuriku/> 2024 年 12 月 26 日アクセス

表 5-8 ローカル 5G 環境を構築する際に必要な行政手続き書類一覧と留意事項等

項番	対応内容	留意事項等
1	実験計画書作成	総務省 電波利用ホームページに掲載されている実験計画書の記載例(*)を参考に、 (*) https://www.tele.soumu.go.jp/resource/i/exp/keikakusyo_ex.pdf 1. 目的 2. 実験内容 3. 実験試験局の構成 (1) システム構成 (2) 実験試験局の諸元 (3) 周波数の選定理由 (4) 占有周波数帯幅 (5) 空中線電力（回線設計） (6) 空中線の特性 (7) 無線設備系統図 4. 実験場所 5. 実験スケジュール 6. その他(干渉調整の状況)等を記載。
2	総務省北陸総合通信局相談	6/24：実験計画書を総務省北陸総合通信局へメール送付し、事前相談を開始。 7/8：総務省北陸総合通信局を訪問し、実験計画書の説明および質疑応答を実施。指摘事項を実験計画書および免許申請書類に反映。
3	干渉調整	6/20：NTTドコモ実験試験局干渉調整窓口（ローカル5Gの実験試験局を全国移動で使用しているため）に対して干渉調整を依頼。 6/26：NTTドコモより問題無しとの回答。回答内容を実験計画書に反映。 7/8：干渉調整の状況を総務省北陸総合通信局へ説明。新たな干渉調整先の指示なし。
4	免許申請書類作成	総務省 電波利用ホームページに掲載されている様式を使用して、 1. 無線局免許申請書 2. 無線局事項書 3. 工事設計書を作成。 7/9：免許申請書類一式を北陸総合通信局へメール送付し、事前確認を依頼。 7/19：免許申請書類一式を提出
5	免許状受領	9/10：総務省北陸総合通信局より免許となった旨の連絡を受領

項番 1 の実験計画書作成、および項番 4 の免許申請書類作成において、各実験試験局の諸元のみならず設置場所、電波発射する方位角、地上高（基地局相当の場合）等も記載している。これらを変更する場合は、あらかじめ総務省北陸総合通信局に対して変更申請を提出して変更許可を得る必要があり、実証スケジュール全体へ与える影響が大きい。免許状が交付された後で変更自由が発生しないよう、事前に関係者間で十分に検討すること、また、余裕をもった早め早めの免許申請手続きを行うこと、が望ましい。

HOME > 免許関係 > 無線局開局の手続き・検査 > 無線局の免許手続き > 変更
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/proc/type/opestart/index.htm>

また、実証を進める際に実験試験局を運用するにあたって、無線従事者⁶⁹を選任し、総務省北陸総合通信局に対して無線従事者選(解)任届を提出した。

5.3.2 手配面

行政手続きと並行して、OTA や V2N の検証をするために手配したセンサ類や無線機器類、ケーブル類、当該機器等を柱に設置する工事会社手配、及び本実証ではローカル 5G 環境を構築するために利用した通信サービス手配等について留意点を以下に記す。

⁶⁹ 第三級陸上特殊無線技士以上の資格保持者が必要

(1) センサ類や無線機器類、ケーブル類等の手配について

機器等を手配する場合、以下の点について留意する必要がある。

- ・ 実証ユースケースの内容が確定しないと、センサ、機器類等の員数が確定しない。
- ・ 実証場所が確定しないと、手配ケーブル長がわからないため、特殊ケーブルがある場合は、特に設置場所や納期に注意が必要である。
- ・ 基地局ーローカル 5G 端末の位置関係を考慮し無線伝送に適切なアンテナを選定する。

(2) 当該機器を柱などに設置する工事会社手配について

設置工事を請負う元請の場合、以下の点について留意する必要がある。

- ・ 見積依頼書には、契約形態や元請と下請けの SOW⁷⁰を明確化する。
- ・ 下請法適用企業か確認する。
- ・ 工事部材は細部に至るまで SOW 整理を行う。
- ・ ケーブル接続箇所、接続方法、ケーブル仕様の明確化を行う。
- ・ 特定建設業；電気通信工事を持っている会社を選定する。
- ・ 適切な安全管理体制、労務管理体制をとれる会社を選定する。
- ・ 付帯工事として建柱工事など発生する可能性があるため、建柱が可能な業者を施工体制に組み込めるか事前確認する。

(3) ローカル 5G 環境を構築するために利用した通信サービス手配について

通信サービスを手配する場合、以下の点について留意する必要がある。

- ・ フレッツ回線は場所により手配リードタイムが異なるため、回線開通したい日付からバックキャストし 3 ヶ月程度前から NTT 手配担当との協議を開始する。
- ・ 回線開通のためには柱番号や建物、フロア、室の明示が必要になるため、予め表記方法を明文化、ルール化させる。
- ・ 回線開通場所確定後、NTT と申請企業（代理 OK）で現場下見が必要な場合があるため、余裕を持った日程を検討する。
- ・ 回線開通工事実施の際にも申請企業（代理 OK）が立ち会う必要があるため、リソース確保を事前にしておく必要がある。

5.3.3 施工・システム環境構築面

本実証では OTA や V2N の検証をするために、検証場所にセンサ類、無線機器類等を設置する設置工事中及び、設置工事終了後に以下の対応を実施した。それぞれの対応において、留意点を以下に記す。

⁷⁰ Statement Of Work の略

(1) 設置工事中に V2N で利用するセンサ（本実証はカメラ）の画角調整作業時の留意点

- ・ 使用するセンサ種類や機種により検知できる範囲が異なるため、ユースケースを満たすことができるセンサの選定が必要になる。
- ・ カメラ等の光学センサは光源が無いと検知精度が低下するため、光源がどこから取れるのか設置個所、角度調整時に調整する必要がある。
- ・ カメラの画角調整は設置場所の制約上、高所作業車が必要になるため、予め画角調整日程を工事会社と調整する必要がある。
- ・ カメラ等のセンサをどこに取り付けるかによって、行政財産使用許可申請、道路占有許可申請、道路使用許可申請などの申請が必要になるため、画角調整実施日までに必要な許可申請が承認されている必要がある。
- ・ 使用センサの取扱説明を読み込み、設定漏れや作業抜けによる手戻りに留意する必要がある。
- ・ 雨天時の調整はカメラ内部に湿気が流入する可能性があり、後々レンズの曇りなどトラブルの元になるため、極力別日程で調整することを推奨する。

(2) 設置工事終了後にローカル 5G 機器がシミュレーション通りに設置されているかを検証する電波伝播測定時の留意点

- ・ 電波発出エリアを満遍なく歩行測定し、発出電波の向きや電波強度がシミュレーション通りか、面で確認を行う必要がある。

(3) 電波伝播測定後、ローカル 5G でのネットワーク構築時の留意点

- ・ 実際の工事前にエリアシミュレーション結果より UE 設置位置の調整を行う。
- ・ （当該 UE で必要なスループットと電界のレベルを元に設置位置を調整）
- ・ 丁字路は道路に沿って南北にエリアを形成する必要があるため、1 つの RU でカバーせず（できず）、2 つの RU 構成に道路に沿った電波放射を検討する。
- ・ 2RU のため上り干渉によるスループット低下を避けるため周波数帯域を 40MHz 幅でそれぞれ異なる周波数帯域を使って構成している。
- ・ FG910SO⁷¹は指向性があるため、設置後に UE のスループットを測定しつつ RU 及び UE の方位角、チルト角が最適になるように調整する必要がある。

⁷¹ <https://www.necmagnus.com/products/5g/fg900cs.html> 2025 年 1 月 30 日アクセス

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 停車場における通信環境の高度化

(1) 実証スケジュール

停車場における通信環境の高度化に関する実証スケジュールを図 6-1 に示す。

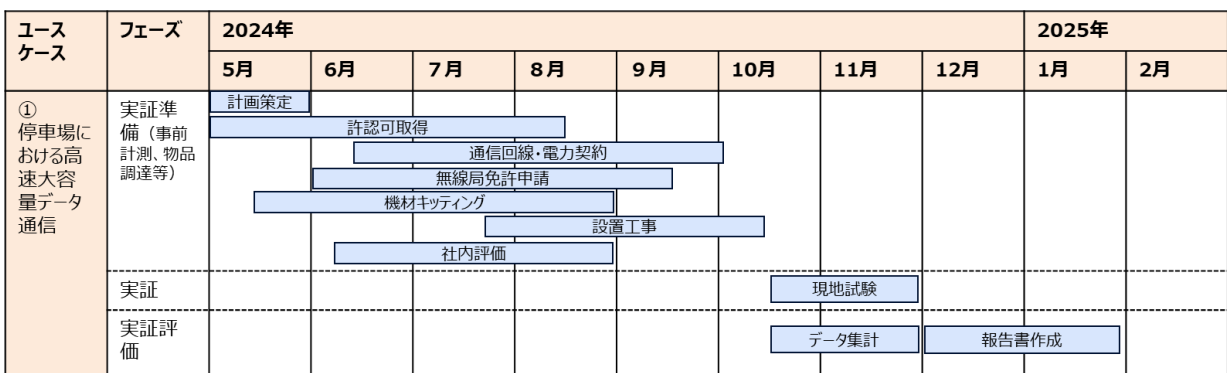


図 6-1 実証スケジュール

(2) 開発・評価項目の結果

停車場における通信環境の高度化に関する開発・評価項目を表 6-1 に示す。

表 6-1 停車場における通信環境の高度化における開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
1	ローカル 5G を使用した場合のファイルダウンロード時間の計測
2	ローカル 5G を使用した場合のファイルアップロード時間の計測

1) ローカル 5G を使用した場合のファイルダウンロード時間の計測

測定結果のサマリを表 6-2 に示す。

参考値として、ドコモスピードテストアプリ⁷² によるドコモ 5G の小松駅周辺でのダウンロード平均通信速度（2024 年 12 月 17 日参照）は、31.2Mbps である。

⁷² <https://www.docomo.ne.jp/area/speed test/> 2024 年 12 月 19 日 アクセス

表 6-2 ダウンロード時間 結果サマリ

位置		平均値	中央値
①	所要時間[MM:SS]	13:50	13:23
	通信速度[Mbps]	207.7	213.6
②	所要時間[MM:SS]	13:48	13:54
	通信速度[Mbps]	207.7	205.6
③	所要時間[MM:SS]	14:07	14:05
	通信速度[Mbps]	203.0	203.2
全体	所要時間[MM:SS]	13:54	13:54
	通信速度[Mbps]	206.1	205.6

測定結果の詳細を表 6-3 に示す。

表 6-3 ダウンロード時間 測定結果詳細

位置		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目
①	開始時刻	2024/10/21 9:11	2024/10/21 11:24	2024/10/30 9:37	2024/10/30 9:51	2024/10/30 10:06
	所要時間 [MM:SS]	13:11	15:23	13:23	13:49	13:23
	通信速度 [Mbps]	216.8	186.4	213.6	207.2	214.4
②	開始時刻	2024/10/21 9:57	2024/10/21 13:02	2024/10/21 13:17	2024/10/21 13:32	2024/10/30 9:09
	所要時間 [MM:SS]	12:51	13:54	14:00	13:47	14:29
	通信速度 [Mbps]	222.4	205.6	204.8	208.0	197.6
③	開始時刻	2024/10/21 10:30	2024/10/21 14:09	2024/10/21 14:24	2024/10/21 14:40	2024/10/21 14:55
	所要時間 [MM:SS]	14:05	13:58	14:41	13:44	14:05
	通信速度 [Mbps]	203.2	204.8	195.2	208.8	203.2

2) ローカル 5G を使用した場合のファイルアップロード時間の計測

測定結果（通信速度）のサマリを表 6-4 に示す。

参考値として、ドコモスピードテストアプリ によるドコモ 5G の小松駅周辺でのアップロード
平均通信速度（2024 年 12 月 17 日参照）は、9.6Mbps である。

表 6-4 アップロード時間 測定結果サマリ

位置	通信速度[Mbps]	
	平均値	中央値
①	104.1	106.4
②	124.7	110.0
③	122.3	118.0
全体	116.4	110.4

測定結果（所要時間）のサマリを表 6-5 に示す。

表 6-5 アップロード所要時間 測定結果サマリ

位置	データサイズ	平均値
①	5GB	6:49
	10GB	14:02
	20GB	27:28
②	5GB	6:41
	10GB	13:51
	20GB	19:13
③	5GB	6:20
	10GB	11:56
	20GB	21:47
全体	5GB	6:36
	10GB	13:16
	20GB	23:29

測定結果の詳細を以下に示す。

始めに、サイズが 5GB のファイル転送について、測定結果を表 6-6 に示す。

表 6-6 5GB アップロード時間 測定結果詳細

位置		1 回目	2 回目
----	--	------	------

①	開始時刻	2024/10/30 15:05	2024/10/30 15:13
	所要時間[MM:SS]	07:09	06:29
	通信速度[Mbps]	100.0	110.4
②	開始時刻	2024/10/30 14:31	2024/10/30 14:39
	所要時間[MM:SS]	06:48	06:35
	通信速度[Mbps]	104.8	108.8
③	開始時刻	2024/10/30 15:41	2024/10/30 15:49
	所要時間[MM:SS]	06:31	06:09
	通信速度[Mbps]	109.6	116.8

次に、サイズが 10GB のファイル転送について、測定結果を表 6-7 に示す。

表 6-7 10GB アップロード時間 測定結果詳細

位置		1 回目	2 回目
①	開始時刻	2024/10/30 15:22	2024/10/31 9:08
	所要時間[MM:SS]	13:03	15:02
	通信速度[Mbps]	109.6	95.2
②	開始時刻	2024/10/30 14:01	2024/10/30 14:18
	所要時間[MM:SS]	14:50	12:52
	通信速度[Mbps]	96.8	111.2
③	開始時刻	2024/10/30 15:56	2024/10/30 16:35
	所要時間[MM:SS]	11:59	11:54
	通信速度[Mbps]	119.2	120.0

最後に、サイズが 20GB のファイル転送について、測定結果を表 6-8 に示す

表 6-8 20GB アップロード時間 測定結果詳細

位置		1 回目	2 回目	3 回目
①	開始時刻	2024/10/21 9:26	2024/10/31 9:44	2024/10/31 10:20
	所要時間 [MM:SS]	25:29	30:06	26:51
	通信速度 [Mbps]	112.0	95.2	106.4
②	開始時刻	2024/10/21 10:11	2024/10/31 10:56	-
	所要時間 [MM:SS]	13:30	24:57	-
	通信速度 [Mbps]	212.0	114.4	-
③	開始時刻	2024/10/21 10:46	2024/10/30 16:10	-

	所要時間 [MM:SS]	18:43	24:51	-
	通信速度 [Mbps]	152.8	115.2	-

(3) KGI/KPI との比較結果

停車場における通信環境の高度化に関する KPI/KGI を表 6-9 に示す。

表 6-9 停車場における通信環境の高度化における KPI 一覧

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	30 分以内に、20GB のデータを車両側に設置する PC に送信完了すること。
	2	30 分以内に、5-20GB のデータを MEC に送信完了すること。

1) 30 分以内に、20GB のデータを車両側に設置する PC に送信完了すること

表 6-3 に示した所要時間から、本実証実験で実施したすべての測定で本 KPI を達成した。達成度としても、KPI 設定が 30 分以内であるところ、最も長い所要時間で 15 分 23 秒と、概ね KPI の半分程度の時間での転送に成功した。現時点で使用している通信回線では、20GB のデータをアップデートするために、データダウンロードに 120 分程度の時間を要しているところ、ローカル 5G を使用するとおよそ 1/8 の時間でダウンロードが可能であることを示している。

表 6-2 に示した所要時間の平均値から、測定位置による通信速度の差異はほぼなかったと考える。この結果は、本実証実験を実施した小松駅ロータリー内においては、ローカル 5G のダウンロード通信速度が電波強度に依存しない可能性を示している。この要因としては、SINR⁷³がほぼ同一の値になっていることにより、同一の MCS⁷⁴が選択されたものと推察する。車内に設置した UE にて取得した SINR 値は表 6-10 の通りである。考察のための参考値として追加で測定した値であるため、実験中の全期間にわたっては取得していない。測定した数値を参照すると、いずれの場所においても 29-30dB とほぼ変動しておらず、どの場所もほぼ同じ SINR 値であったことがわかる。

表 6-10 位置ごとの SINR

⁷³ Signal-to-Interference plus Noise power Ratio の略

⁷⁴ Modulation and Coding Scheme の略

位置	測定日	測定回	SINR[dB]
①	2024/10/30	1	29
		2	30
	2024/10/31	1	30
②	2024/10/30	1	30
		2	30
	2024/10/31	1	30
③	2024/10/31	1	30

また、表 6-3 に示した通信速度の中で、最も小さな値が 186.4Mbps（全体の中央値比 90.7%）、最も大きな値が 222.4Mbps（全体の中央値比 108.2%）である。周囲の状況により物理的条件が変動するため、通信速度の変動も多少は発生したものの、使用感に大きな影響を及ぼすような通信速度の変動はなく、安定した通信速度を発揮できたと考える。

2) 30 分以内に、5-20GB のデータを MEC に送信完了すること

表 6-8 に示した所要時間から、20GB のファイルを転送対象とした 1 回（30 分 06 秒）以外の測定では本 KPI を達成した。KPI を達成できなかった 1 回分は再測定（3 回目の測定）を実施し、再測定では KPI を達成したことを確認した。この結果から、20GB のファイルの転送に関して、KPI である 30 分前後を要することが分かった。5GB、10GB についても、転送時間はファイルサイズにほぼ比例する形で、KPI を達成した。したがって、20GB 程度のログデータであれば、ローカル 5G を用いることで運行ダイヤの間の時間でアップロードすることができると考える。1 日中運行した際のログデータが

20GB のファイル転送（表 6-8 20GB アップロード時間 測定結果詳細）における位置②③の 1 回目を除き、通信速度は 95.2Mbps（全体の中央値比 86.2%）から 120.0Mbps（全体の中央値比 108.7%）の変動幅に収まった。20GB のファイル転送における位置②、③の 1 回目については、全体の中央値比がそれぞれ 192.0%、138.4%と相対的に高速であり、明らかに他の測定値とは異なる傾向と考える。この原因としては、何等かの物理的条件により、より伝送速度が大きい MCS が選択されたものと推察する。例えば、周囲のバスの動きにより反射波の位相が変化した可能性等が考えられるが、決定的な要因は不明である。つまり、何等かのごく限られた条件下で、定常的な通信速度と比較して高速な通信速度を発揮することができると解釈できる。

(4) 考察

(3) KGI/KPI との比較結果で示したように、本実証実験でダウンロード/アップロードともに KPI を達成したことから、ローカル 5G を使用することで、自動運転バスの運行ダイヤの合間で 20GB 程度のデータをダウンロード/アップロードすることの技術的実現性を示すことができ

た。特にダウンロードについては、30分を大きく下回る15分程度でのダウンロードに成功したため、KPI設定にあたって想定していた30分より短い運行ダイヤの間でのデータダウンロードもしくは、想定と同じ運行ダイヤの間でも、より大きなデータのダウンロードが可能と考える。

また、自動運転バスの運用に影響を及ぼす自動運転システムのセキュリティ更新等を短時間で遂行できることで、OTA実施車両の運用中断や代替車両への切り替え作業が不要になる可能性が高いと考える。また、トラブル発生時、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保できることで、自動運転バスのシステム障害やトラブル発生時に、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保できる可能性が高いと考える。

今後、自動運転レベル4を社会実装していく上で、ローカル5Gを使用した新たなOTAシステムや、エンジニアとのログデータ共有システムを構築することで、自動運転バスの運行ダイヤを維持したまま常に高い状態の走行の安全性、安定性等を確保することが可能になり、より効率的な車両運用に繋がる結果が得られたと考える。また、地元住民を含めた関係各所（自治体や関係省庁等を想定）に、丁寧かつ迅速な説明を行うことも可能になり、自動運転に対する社会受容性を維持することにも繋がると考える。

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

当該ユースケースは実施していない。

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周辺環境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

6.3.1 丁字路右折時における高速走行車両情報配信

(1) 実証スケジュール

丁字路右折時における高速走行車両情報配信に関する実証スケジュールを図6-2に示す。

ユースケース	フェーズ	2024年								2025年	
		5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月
② 丁字路右折時における高速走行車両検知	実証準備（事前計測、物品調達等）	計画策定	許可取得	通信回線・電力契約	無線局免許申請	機材キッティング	設置工事	開発・社内評価			
	実証							現地試験			
	実証評価							データ集計	報告書作成		

図 6-2 実証スケジュール

(2) 開発・評価項目の結果

丁字路右折時における高速走行車両情報配信に関する開発・評価項目を表 6-11 に示す。

表 6-11 開発・評価項目一覧

番号	開発・評価項目
1	クラウド上からの周辺環境情報配信機能の開発
2	車載 PC の周辺環境情報要求～受信までの遅延時間の計測
3	路側システムでの検知完了～クラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間の計測
4	路側システムの検知精度の検証

1) クラウド上からの周辺環境情報配信機能の開発

クラウドを経由する周辺環境情報の配信を実証するため、本実証実験でクラウドからの周辺環境情報配信機能を開発した。開発項目の詳細は 4.3.1 (6) 1) に示した。

2024 年 10 月に開発を完了し、成果物は 2024 年 11 月の実証にて活用した。

2) 車載 PC の周辺環境情報要求～受信までの遅延時間の計測

測定結果のサマリを表 6-12 に示す。また、今回は全部で 59 回の測定を実施したが、すべての測定値のヒストグラムを図 6-3 に示す。

表 6-12 車載 PC の周辺環境情報要求～受信までの遅延時間測定結果のサマリ

	車載 PC の周辺環境情報要求～受信までの遅延時間 [ms]
平均値	158
中央値	159
最大値	265
最小値	117

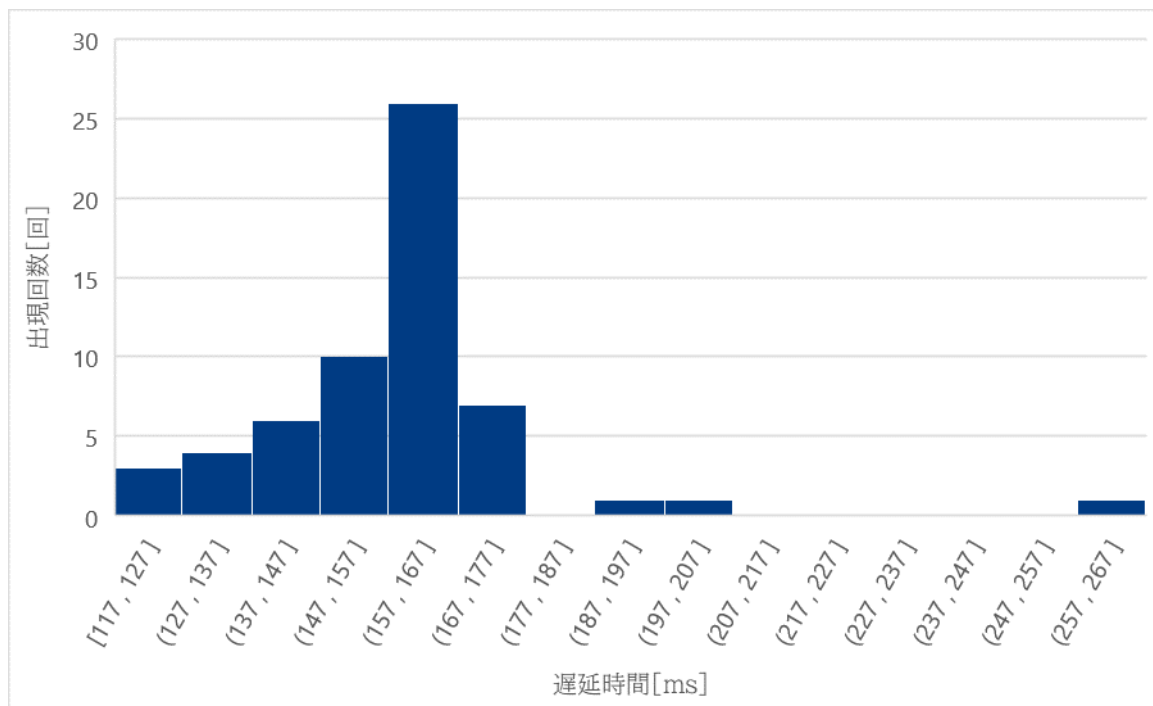


図 6-3 測定結果のヒストグラム

以下に測定区間ごとの測定結果を示す。

a. 車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間

測定結果のサマリを表 6-13 に示す。また、すべての測定値のヒストグラムを図 6-4 に示す。

表 6-13 測定結果のサマリ

	車載 PC が周辺環境情報を要求し、クラウド上のシステムに到達するまでの通信時間[ms]
平均値	41
中央値	36
最大値	144
最小値	1

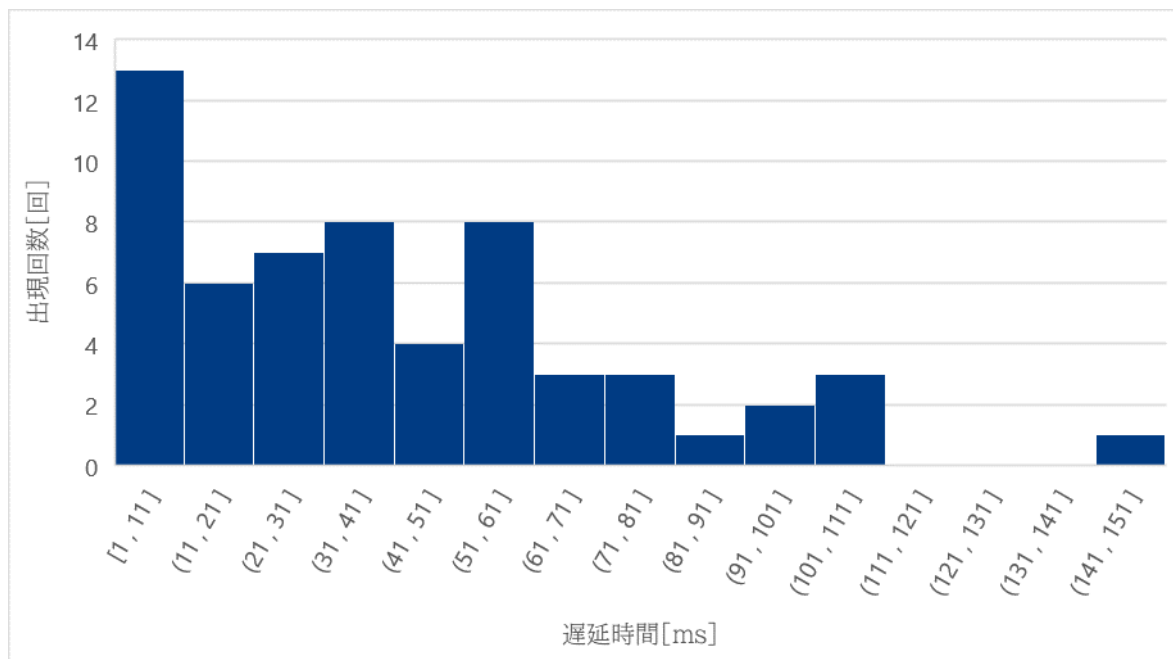


図 6-4 測定結果のヒストグラム

b. クラウド上のシステムが要求を受信し、周辺環境情報を送信するまでの処理時間

測定結果のサマリを表 6-14 に示す。また、すべての測定値のヒストグラムを図 6-5 に示す。

表 6-14 測定結果のサマリ	
	クラウド上のシステムが要求を受信し、 周辺環境情報を送信するまでの処理時間 [ms]
平均値	47
中央値	41
最大値	95
最小値	1

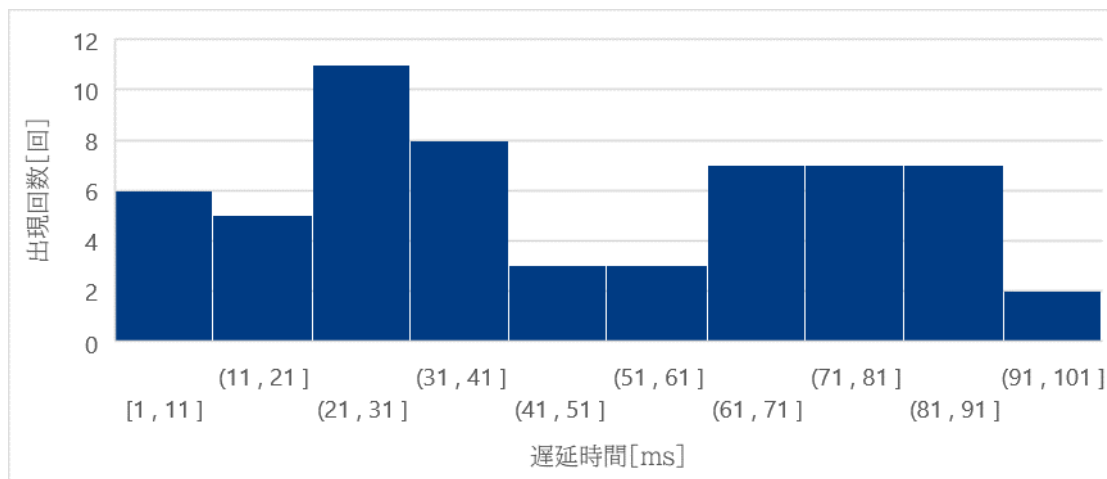


図 6-5 測定結果のヒストグラム

c. クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間

測定結果のサマリを表 6-15 に示す。また、すべての測定値のヒストグラムを図 6-6 に示す。

表 6-15 測定結果のサマリ

	クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、 車載 PC が受信するまでの通信時間[ms]
平均値	71
中央値	66
最大値	157
最小値	6

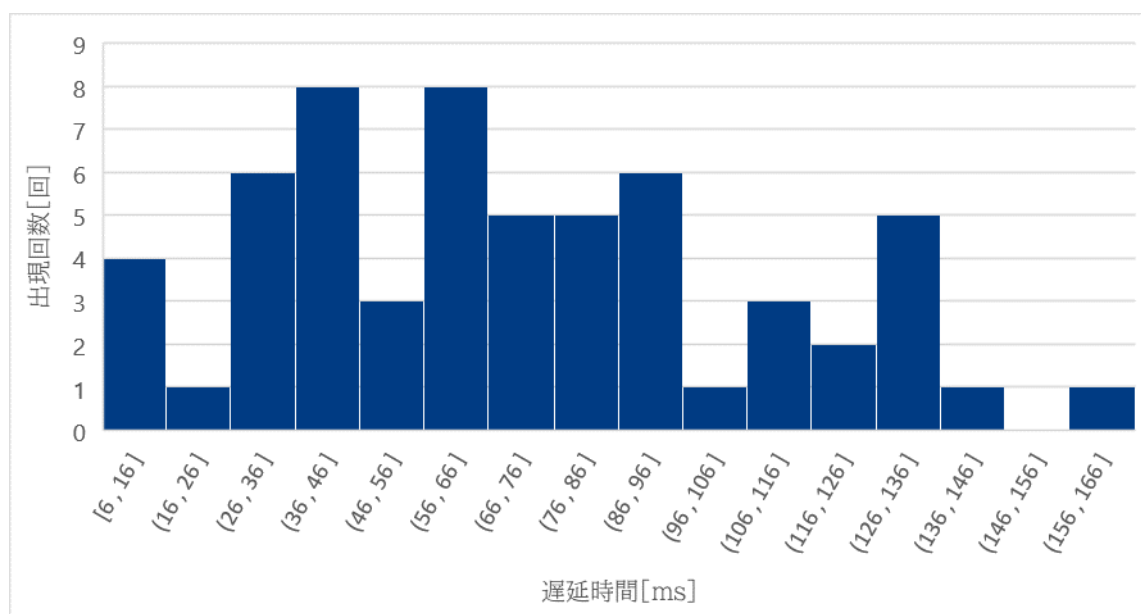


図 6-6 測定結果のヒストグラム

3) 路側システムでの検知完了～クラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間の計測

測定結果のサマリを表 6-16 に示す。また、今回は全部で 59 回の測定を実施したが、すべての測定値のヒストグラムを図 6-7 に示す。

表 6-16 測定結果のサマリ

	路側システムでの検知完了～クラウド経由での 周辺環境情報配信までの遅延時間[ms]
平均値	2,691
中央値	2,684
最大値	2,845
最小値	2,464

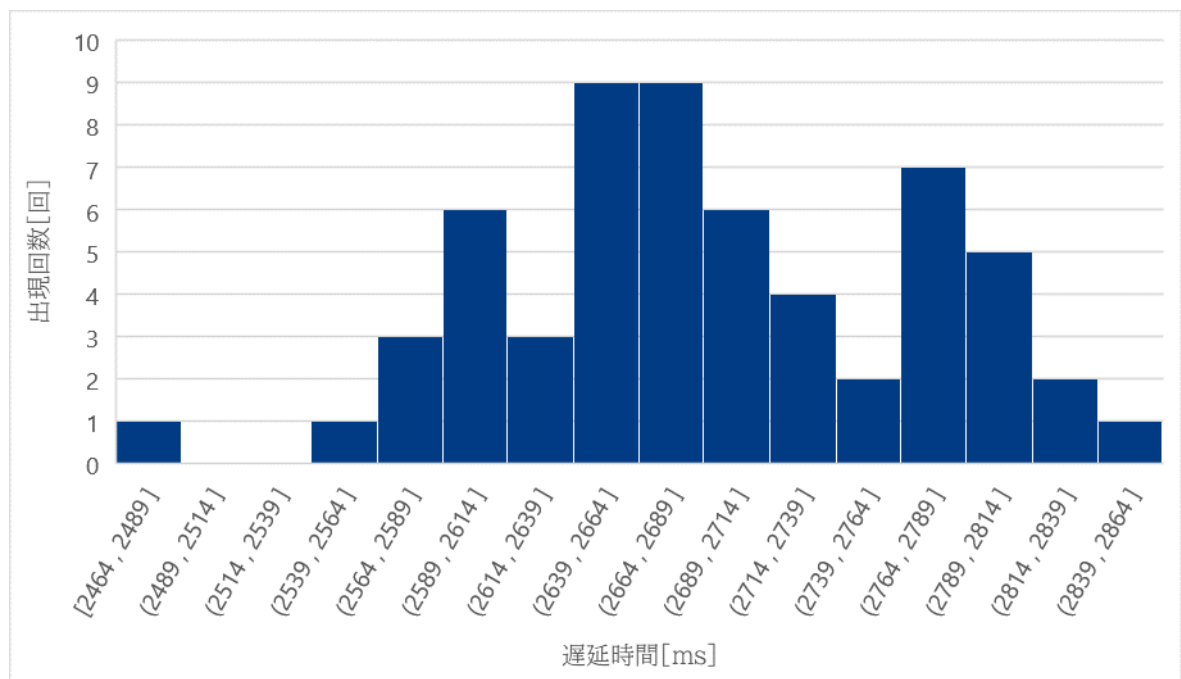


図 6-7 測定結果のヒストグラム

以下に測定区間ごとの測定結果を示す。

a. 路側システムが検知した周辺環境情報のクラウドへのアップロードを完了するまでの通信時間

測定結果のサマリを表 6-17 に示す。また、すべての測定値のヒストグラムを図 6-8 に示す。

表 6-17 測定結果のサマリ

	路側システムが検知した周辺環境情報のクラウドへのアップロードを完了するまでの通信時間[ms]
平均値	89
中央値	77
最大値	248
最小値	68

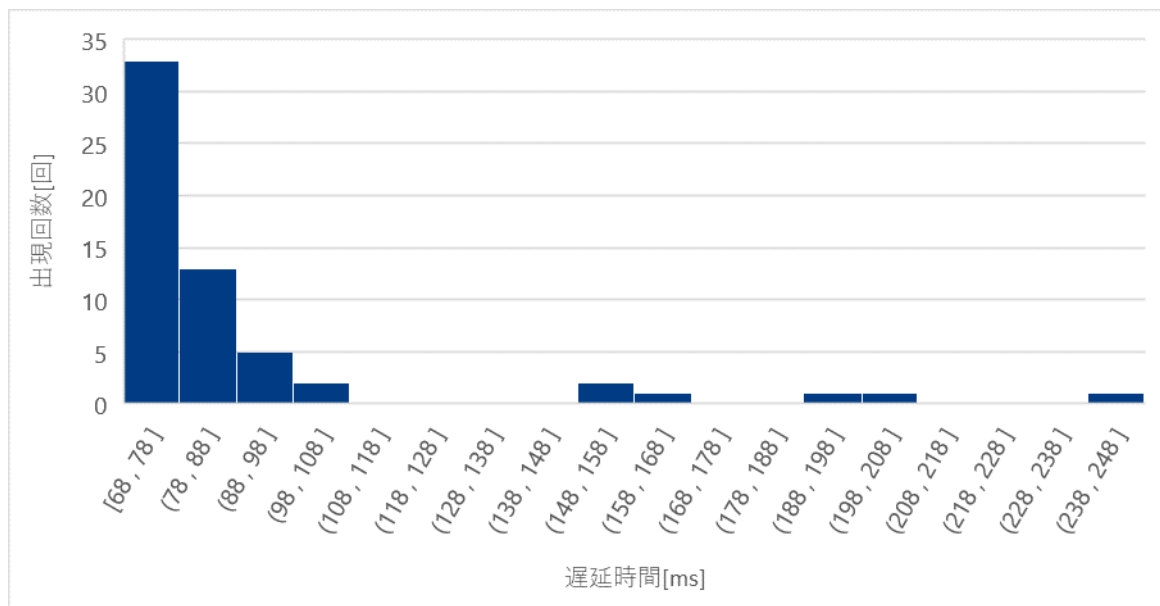


図 6-8 測定結果のヒストグラム

b. クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信し、内部処理を完了して送信するまでの処理時間

測定結果のサマリを表 6-18 に示す。また、すべての測定値のヒストグラムを図 6-9 に示す。

表 6-18 測定結果のサマリ

	クラウド上のシステムが周辺環境情報を受信し、内部処理を完了して送信するまでの処理時間[ms]
平均値	2532
中央値	2538
最大値	2714
最小値	2339

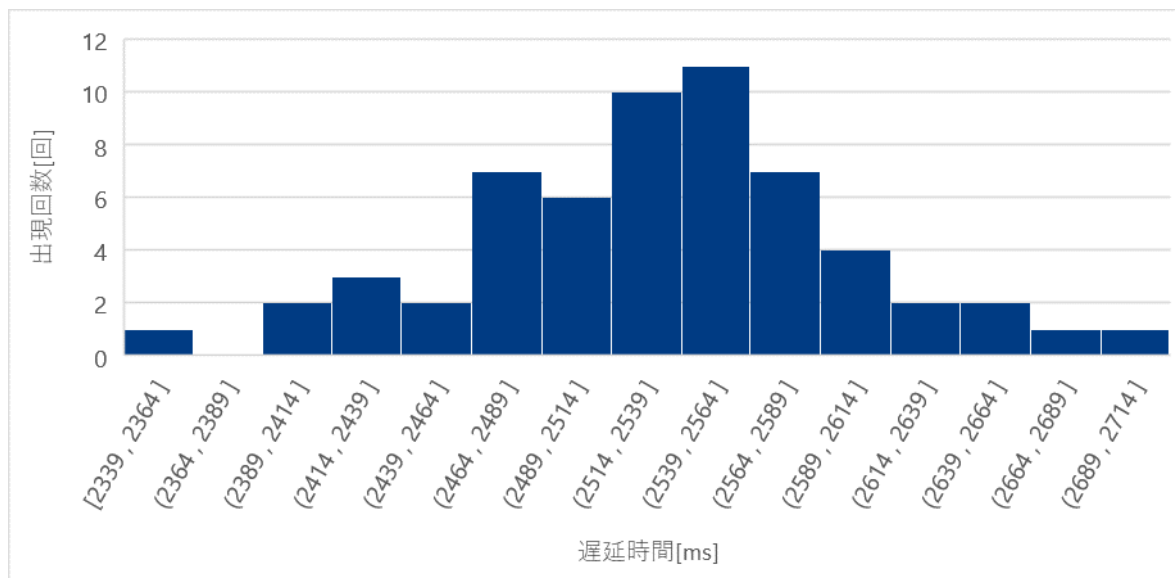


図 6-9 測定結果のヒストグラム

c. クラウド上のシステムが周辺環境情報を送信し、車載 PC が受信するまでの通信時間

6.3.1 (2) 2) c とまったく同様の測定であるため、同測定の結果を流用することとし、本章での記載は省略する。

4) 路側システムの検知精度の検証

結果のサマリを表 6-19 に示す。

表 6-19 時間帯・天候ごとの再現率・適合率

時間帯	天候	Recall (再現率)	Precision (適合率)
日中	晴天	99.0%	99.0%
	曇天	99.0%	96.1%
	雨天	99.0%	99.0%
日没 1 時間前~ 日没	晴天	99.1%	87.9%
	曇天	96.3%	89.0%
	雨天	77.0%	88.5%
日没後	晴天	54.5%	84.6%
	曇天	64.6%	86.5%
	雨天	49.0%	75.4%

表 6-19 の結果をさらにカメラごとに細分化し、正検出、未検出、誤検出の数を記載した表を表 6-20 に示す。

表 6-20 カメラごとの正検出、未検出、誤検出数

時間 帯	天候	日時	カメラ	TP (正検出)	FN (未検出)	FP (誤検出)	Recall (再現率)	Precision (適合率)
日中	晴天	11/13 13:00- 14:00	カメラ 1(北 側 300m)	26	0	0	100.0%	100.0%
		11/13 13:00- 14:00	カメラ 2(北 側 200m)	28	0	1	100.0%	96.6%
		11/13 13:00- 14:00	カメラ 5(南 側 200m)	23	1	0	95.8%	100.0%
		11/13 13:00- 14:00	カメラ 6(南 側 300m)	25	0	0	100.0%	100.0%
	曇天	11/18 10:00- 11:00	カメラ 1(北 側 300m)	25	0	0	100.0%	100.0%
		11/18 10:00- 11:00	カメラ 2(北 側 200m)	24	1	1	96.0%	96.0%
		11/18 10:00- 11:00	カメラ 5(南 側 200m)	25	0	0	100.0%	100.0%
		11/18 10:00- 11:00	カメラ 6(南 側 300m)	25	0	3	100.0%	89.3%
	雨天	11/22 8:00- 9:00	カメラ 1(北 側 300m)	26	0	0	100.0%	100.0%
		11/22 8:00- 9:00	カメラ 2(北 側 200m)	25	0	0	100.0%	100.0%
		11/22 8:00- 9:00	カメラ 5(南 側 200m)	24	1	0	96.0%	100.0%

		11/22 8:00- 9:00	カメラ 6(南 側 300m)	25	0	1	100.0%	96.2%
日没 1時間前 ~ 日没	晴天	11/13 16:00- 16:45	カメラ 1(北 側 300m)	27	0	2	100.0%	93.1%
		11/13 16:00- 16:45	カメラ 2(北 側 200m)	30	1	5	96.8%	85.7%
		11/13 16:00- 16:45	カメラ 5(南 側 200m)	27	0	2	100.0%	93.1%
		11/13 16:00- 16:45	カメラ 6(南 側 300m)	25	0	6	100.0%	80.6%
	曇天	11/18 16:00- 16:45	カメラ 1(北 側 300m)	30	1	1	96.8%	96.8%
		11/18 16:00- 16:45	カメラ 2(北 側 200m)	26	3	6	89.7%	81.3%
		11/18 16:00- 16:45	カメラ 5(南 側 200m)	25	0	1	100.0%	96.2%
		11/18 16:00- 16:45	カメラ 6(南 側 300m)	24	0	5	100.0%	82.8%
	雨天	11/22 16:30- 16:40	カメラ 1(北 側 300m)	20	5	0	80.0%	100.0%
		11/22 16:30- 16:40	カメラ 2(北 側 200m)	18	7	6	72.0%	75.0%
		11/22 16:30- 16:40	カメラ 5(南 側 200m)	14	11	1	56.0%	93.3%

		11/22 16:30- 16:40	カメラ 6(南 側 300m)	25	0	3	100.0%	89.3%
日没 後	晴天	11/12 17:30- 18:30	カメラ 1(北 側 300m)	11	14	0	44.0%	100.0%
		11/12 17:30- 18:30	カメラ 2(北 側 200m)	18	7	8	72.0%	69.2%
		11/12 17:30- 18:30	カメラ 5(南 側 200m)	6	19	0	24.0%	100.0%
		11/12 17:30- 18:30	カメラ 6(南 側 300m)	20	6	2	76.9%	90.9%
	曇天	11/26 17:30- 18:30	カメラ 1(北 側 300m)	17	8	2	68.0%	89.5%
		11/13 17:30- 18:30	カメラ 2(北 側 200m)	17	7	4	70.8%	81.0%
		11/13 17:30- 18:30	カメラ 5(南 側 200m)	10	15	0	40.0%	100.0%
		11/13 17:30- 18:30	カメラ 6(南 側 300m)	20	5	4	80.0%	83.3%
	雨天	11/22 17:40- 17:50	カメラ 1(北 側 300m)	6	19	1	24.0%	85.7%
		11/22 17:40- 17:50	カメラ 2(北 側 200m)	14	11	5	56.0%	73.7%
		11/22 17:40- 17:50	カメラ 5(南 側 200m)	7	18	0	28.0%	100.0%

		11/22 17:40- 17:50	カメラ 6(南 側 300m)	22	3	10	88.0%	68.8%
--	--	--------------------------	--------------------	----	---	----	-------	-------

(3) KGI/KPI との比較結果

丁字路右折時における高速走行車両情報配信に関する KPI/KGI を表 6-21 に示す。

表 6-21 丁字路右折時における高速走行車両情報配信における KPI 一覧

定性評価 /定量評価	番号	目標値
定量評価	1	車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間が 5 秒以下であること
	2	路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間が 5 秒以下であること
定性評価	3	検知の有無を確認した日時とその際の天候について記録し、検知の失敗例における天候・時間帯の傾向について分析すること

1) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間が 5 秒以下であること

車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間は表 6-12 に示した結果より、平均で 158ms、最大でも 265ms と、目標としていた 5 秒を大きく下回る結果となった。これは、当初の想定よりも即座にデータを入手することが可能であることを示している。

各区間の測定結果と当初想定していた目標値を表 6-22 に一覧として示す。

表 6-22 測定結果と目標値の比較

	車載 PC が周辺環境 情報を要求し、クラ ウド上のシステムに 到達するまでの通信 時間	クラウド上のシステ ムが要求を受信し、 周辺環境情報を送信 するまでの処理時間	クラウド上のシステ ムが周辺環境情報を 送信し、車載 PC が 受信するまでの通信 時間	合計
目標値	1,000ms	3,000ms	1,000s	5,000ms
平均値 (実績)	41ms	47ms	71ms	158ms
最大値 (実績)	144ms	95ms	157ms	265ms

今回データを取得した範囲では、当初想定した目標値ほどの遅延時間は生じなかった。KPI 設定時に想定したように、停止線で停止し、安全確認を行うタイミングには路側からの情報を受信できることを想定すると、停止線で停止する 265ms 前に周辺環境情報の要求を送信しておけば問題ないことになる。（なお、実際にはバッファを持ってより速いタイミングとすることも考えられる。）仮に、遅延時間が当初想定した 5 秒であった場合、交差点に差し掛かる手前から要求をしておくよう、設計の際に考慮する必要があるが、今回実測で得られた 265ms 程度の遅延時間であれば、交差点に差し掛かり、停止線で停止するのとほぼ同時に情報を要求すれば良いことになるため、当初想定よりも実際に児童運転システムと連携する場合の設計が容易なシステムになったと考える。

2) 路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間が 5 秒以下であること

路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間は、表 6-16 から平均で 2,691ms、最大で 2,845ms と、目標の 5 秒を下回る結果となった。目標としていた 5 秒の根拠としては、4.3.1 (7) 2) にて示した通り、遠方から接近する車両の存在をその車両が交差点から 200m 先に存在するタイミングで通知することを念頭に置いている。今回得られた結果としては、60km/h の自動車を 300m 先から検知できたことを前提として、当該自動車が 250m 程度先に存在する時点から通知を開始できる可能性を示している。⁷⁵

上記の結論について裏取りを行う目的で、目視による簡易的な確認を行った。

手順を以下に示す。

1. 当該交差点付近にて車載 PC を動作させ、周辺環境情報を受信させた。
2. 300m 以上先から対象の交差点に接近する自動車の存在が、車載 PC に通知されたことを目視にて確認した。
3. 最初に通知されたタイミングで対象車両をカメラにて写真撮影した。

なお、この手法は人手を介していること、撮影に用いたカメラの内部遅延時間なども含んでおり、多分に誤差を含む可能性があるため、あくまで簡易で定性的な確認であることに留意が必要である。

結果として、図 6-10 に示す“通知が開始された区間”の近辺で対象車両の通知が開始され、以降は交差点から 100m 地点近辺まで通知が継続されていることを確認した。

⁷⁵ 60km/h の自動車は 2.845 秒の間に 47.4m 程度進むため

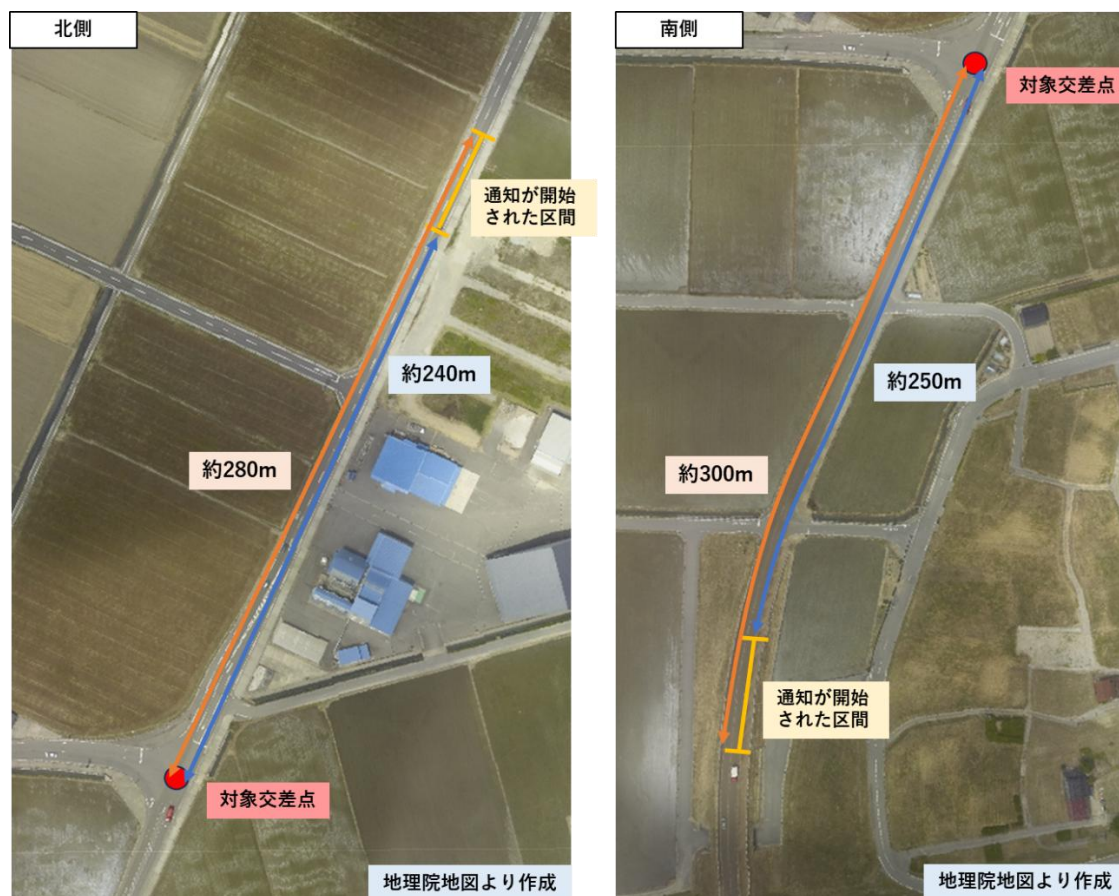


図 6-10 南北の通知開始箇所

北側で約 240m～280m、南側で約 250m～300m 程度の地点で通知が開始されていることから、概ね定量測定で得られた遅延時間の結果と一致していることが確認できた。また、南側の通知が北側の通知より若干早く（遠方から）開始されていることについては、カメラによる自動車の検知がより遠方から開始されていたためと考える。南側は 200m 地点以降に河川に架かる橋が存在しており、何もない北側と比較して高低差があることから、遠方に存在する自動車もカメラで捉えやすくなったためと考える。

この結果により、当該自動車が 250m 程度先に存在する時点から通知が開始されていることについて、定量的のみならず定性的にも確認することができた。

区間ごとの平均値について、円グラフとして図 6-11 に示す。

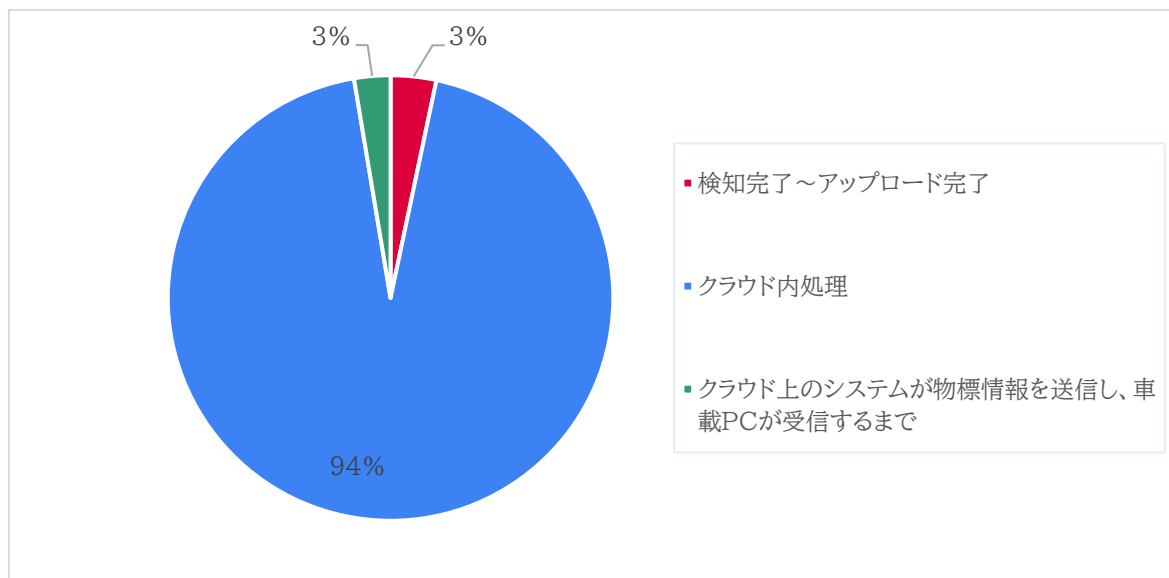


図 6-11 区間ごとの遅延時間に占める割合

遅延時間の 94%はクラウド内の処理が占めており、この区間が支配的であることが分かる。したがって、更なる高速化を目指す場合は、クラウド上の処理を高速化する必要がある。詳細な考察のため、クラウド（AWS）内のサービス構成の概要を図 6-12 に示す。

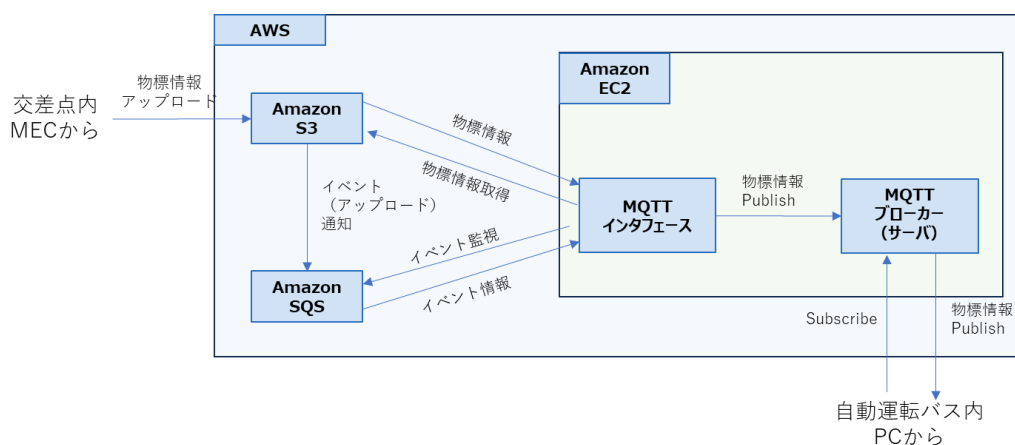


図 6-12 AWS 内サービス構成

各サービスについて、表 6-23 で簡潔に説明する。

表 6-23 AWS コンポーネントの説明

サービス	説明
Amazon S3 ⁷⁶	オブジェクトストレージサービス。 本実証実験では周辺環境情報を保存するストレージとして使用。
Amazon SQS ⁷⁷	コンポーネント間のメッセージキュー。 本実証実験では S3 から EC2 へ周辺環境情報のアップロードを伝達

⁷⁶ <https://aws.amazon.com/jp/s3/> 2024 年 12 月 25 日アクセス

⁷⁷ <https://aws.amazon.com/jp/sqs/> 2024 年 12 月 25 日アクセス

		するために使用。
Amazon EC2 ⁷⁸		コンピューティングリソース提供サービス。
	MQTT インタフェース	SQS のイベントを監視し、周辺環境情報のアップロードがあると S3 からデータを引き上げて MQTT ブローカーに引き渡す。 本実証実験で新規に開発したソフトウェア。
	MQTT ブローカー (サーバ)	MQTT プロトコルに従ってデータを仲介する機能を持つソフトウェア。本実証実験では軽量な OSS である Mosquitto ⁷⁹ を採用。

構築を進める中で、S3 にデータがアップロードされ、SQS にイベント配信を行う際、不安定な遅延が発生することが判明した。これは 6.3.1 (2) 3) b で示した測定値中に含まれる遅延時間である。S3 から SQS へのイベント配信の遅延時間のみを抽出した測定結果のサマリを表 6-24 に示す。また、ヒストグラムを図 6-13 に示す。

表 6-24 S3 から SQS へのイベント配信の遅延時間

	S3 から SQS へのイベント配信の 遅延時間[ms]
平均値	919
中央値	866
最大値	1626
最小値	348

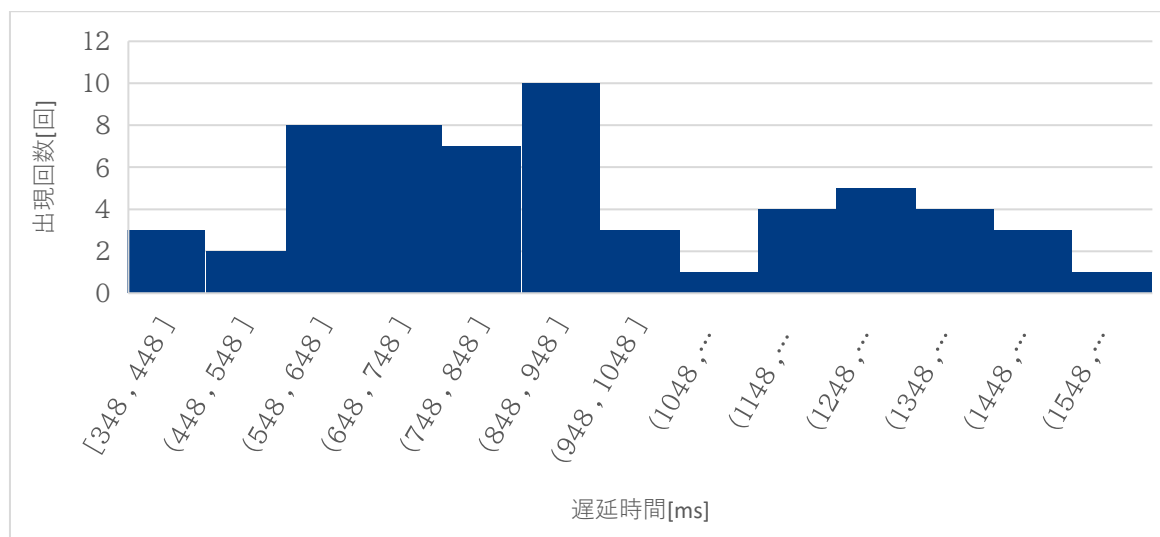


図 6-13 測定結果のヒストグラム

上記に示したデータから、348ms～1626ms の間で遅延時間が万遍なく分布しており、外れ値による影響ではなく遅延時間の変動幅自体が非常に大きくなっていることが分かる。これにより発生した事象が、データ順の逆転である。この事象について以下で詳述する。

⁷⁸ <https://aws.amazon.com/jp/ec2/> 2024 年 12 月 25 日アクセス

⁷⁹ <https://mosquitto.org/> 2024 年 12 月 25 日アクセス

本実証実験のシステムでは、カメラからの AI 検知処理を 1 秒間におよそ 10 回、つまり約 100ms 間隔で実施している。したがって、周辺環境情報も約 100ms 毎に一度生成され、AWS に送られる。ところが、S3 から SQS 間の遅延時間で 100ms 以上の変動幅が発生していることにより、先に生成された周辺環境情報が後に取得されてしまう（後に生成された周辺環境情報が先に取得されてしまう）事象が発生した。この問題の対策として、後段の処理を行う MQTT インタフェース内でバッファとして 1000ms の待ち時間を設け、データの待ち合わせ処理と、周辺環境情報に含まれるタイムスタンプを参照しての並べ替え処理を実装し、周辺環境情報の生成順と車両への送信順が逆転しないような実装とした。これがクラウド内で発生している大きな遅延時間の一因と考える。つまり、MQTT ではなく、その前段の処理が主要因となって大きな遅延が発生していると考えられる。

変動幅の大きな遅延は AWS の仕様であるが、今後クラウド内の構成や処理内容を見直すことで遅延時間は改善可能と考える。更なる高速化を望む場合は、データ順の逆転を許容する、一度送信したデータより古いデータは送信せず捨てる仕様とするなど、仕様自体を変更することも考えられる。

3) 検知の有無を確認した日時とその際の天候について記録し、検知の失敗例における天候・時間帯の傾向について分析すること

検知精度全体の総括として、表 6-19 の日中の再現率、適合率から、日中の検知については大きな問題はないと考える。日没前から徐々に再現率、適合率が低下し、日没後には天候を問わず十分な検知率が得られなくなっていることが確認できる。特に雨天時は、日没前の再現率の低下も大きくなっている。

先に正検知された例について、カメラごとの画像を図 6-14 に示す。いずれも画面内の他の車両も検知しているが、接近側の車線で最も遠方の車両を集計対象としている。黄色の枠が付いていることが AI によって検知されたことを示している。

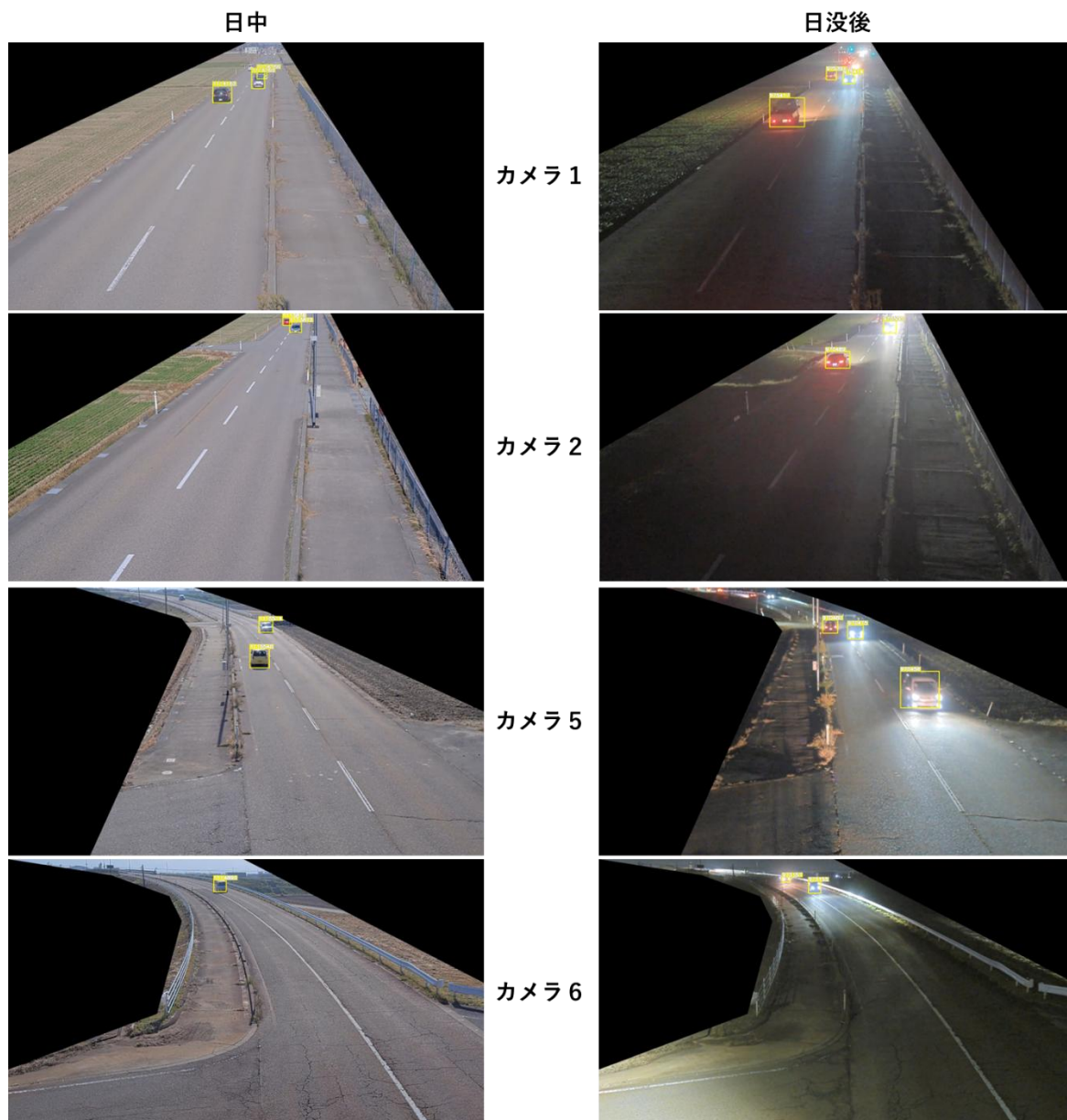


図 6-14 正検知の例

続けて、誤検知または未検知について、表 6-25 で今回の検証で得られた特筆すべき事象と今後の対策案について記載する。

表 6-25 検知における特筆すべき事象と今後の対策案

No.	特筆すべき事象	想定される原因	今後の対策案
1	対向車や後続車のライトがない場合に未検知が多い	AI 学習が不足している (街灯もないレベルの暗さの状況に対して学習データが不足している)	街灯がないような暗さの映像も学習させる
		カメラがヘッドライトと背景の明暗差に対応できていない →HDR で補うことが可能な範	LiDAR、夜用に特化した露出設定のカメラ等、複数センサによって補完す

		囲を超えている	る
2	雨天時に水滴・水しぶき・水たまり等にヘッドライトの光が乱反射したケースで未検知・誤検知が多い	自動車の形状が正しく捉えられていない	背景との差分を使って検知を補完する
3	画角によっては画像全体を大きく1つの物体として誤検知してしまうフレームがある。さらに、誤検知された枠内の検知対象が未検知となる。	画角全体として自動車と類似した特徴を持っていることで自動車と誤認識する	画面内の一定以上の割合を占める物体は除外する処理を追加する 類似した画角の画像を AI の学習データに追加する ※画像を物体と背景に分けて学習させることで、検知の際にも物体と背景が区別しやすくなる
4	自動車同士の重なりにより、正しい数の自動車を検知できない。	単一カメラでは奥行きの認識がしづらいため、別々の物体として認識することが難しい。	LiDAR 等、奥行きを把握できるセンサを追加する
5	前後のフレームで検知していた物体が数フレームの間のみ未検知となる	人間と比較して、時間的な連続性を参照する機能がない	前のフレームの検知結果により補完する

続けて、No.1～5 について、誤検知または未検知の一例を示す。

No.1 のパターンについて、一例を図 6-15 に示す。いずれも、遠方の夜間で他車のライトが届いていないことが見て取れる。このケースが未検知となる原因は2点考えられる。1点目はAI学習が不足していることである。夜間の画像を学習はさせているものの、本交差点は街灯もほぼ存在しないことから幹線道路と比較して暗い。AI 学習に用いた画像にこのような暗さの画像は少なく、今後、本交差点と同等の暗さの画像を学習することで検知精度が改善する可能性はある。2点目は、今回設置したカメラが HDR で対応できる範囲の明暗差を超えている可能性が考えられる。今回は1つの画角について単一カメラで実証を行ったため、HDR により自動的にカメラの露出が調整されるよう設定している。ところが、ヘッドライトと背景で明暗差がありすぎると、適切に調整しきれない可能性がある。したがって、今後は夜間に対応できるよう設定を調整したカメラをもう1台設置したり、周囲の明るさに影響されない LiDAR 等のセンサを設置したりしてこれらを併用することが有効な対策になり得ると考える。



図 6-15 No.1 の弱点事例

No.2 のパターンについて、一例を図 6-16 に示す。いずれも、雨天による水しぶきや水たまりにヘッドライトの光が当たっていることが見て取れる。このケースが未検知となる原因は、自動車の形状が捉えづらくなることと考える。水しぶきの場合、ヘッドライトの光が当たると見た目上霧のようになり、自動車の形状をぼやかしてしまう。また、水たまりの場合、ヘッドライトが強く反射することで、見た目上反射した光が自動車の像と一体化して見えることで、自動車として認識しづらい。この対策として、背景画像との差分によって何らかの物体が存在することを検知する機能を追加することが考えられる。現状の機能は AI によって画像中の自動車の特徴を捉えることで検知を行っているが、それが難しい照度の場合、ヘッドライトの光を頼りに何らかの物体が接近していることを検知できれば、自動運転バスの右折支援の観点では活用可能なものと考えられる。



図 6-16 No.2 の弱点事例

No.3 のパターンについて、一例を図 6-17 に示す。いずれも画面全体が検知されてしまっており、その中の自動車が検知されていないことが見て取れる。この現象が発生する原因は、この画角全体として自動車と類似した特徴を持っていることで自動車と誤認識されている可能性が考えられる。本実証実験ではプライバシーに配慮して目的の道路以外にプライバシーフィルタ（黒塗り）を施して AI に入力したため、その影響も可能性として考えられる。また、アプリケーションの仕様として、一定条件で枠内に存在する検知物を棄却する処理があるため、画面全体が誤検知されることで本来の自動車が棄却されてしまうことがある。この対策としては、類似した画角の画像を学習に用いることが考えられる。背景の部分は背景として学習されるため、正検知を増やすだけでなく、誤検知を防止するためにも有効と考える。

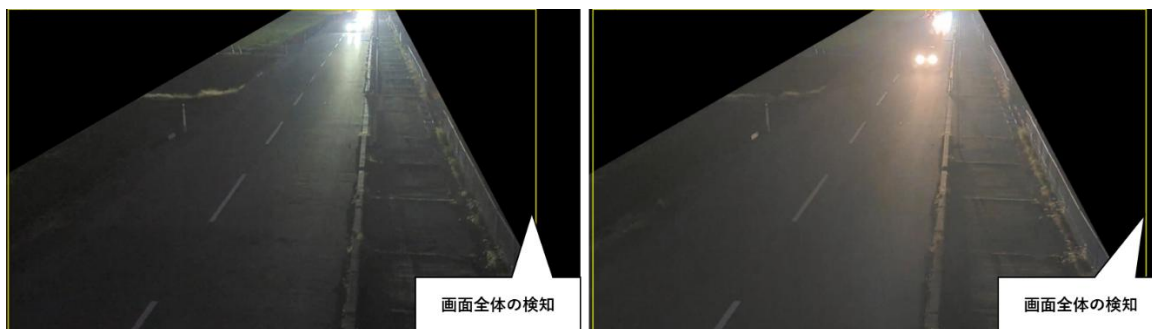


図 6-17 No.3 の弱点事例

No.4 のパターンについて、図 6-18 に示す。この例では、自動車同士が重なることにより、2 台の自動車が 3 台以上として多重検知されている。このように、前の車両により後続車の一部が隠れることにより、後続車が未検知となったり、逆に多重検知となったりするケースがある。また、ヘッドライトと組み合わせさせた場合はより正しく検知することが難しく、図のケースもヘッドライトの光により自動車の像がぼやけてしまい、正しく台数が認識しづらい状況となっている。この対策としては、より距離の認識がしやすい LiDAR 等のセンサを追加する方法が考えられる。

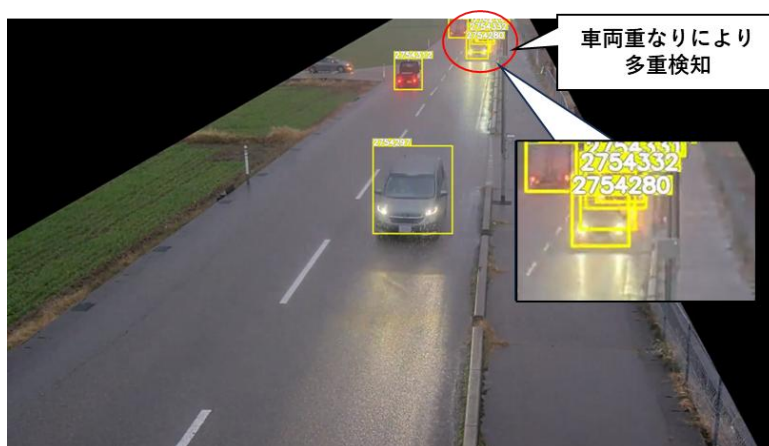


図 6-18 No.4 の弱点事例

また、No.5 のパターンについては、対象のフレームでは未検知となっても数フレーム前後のフレームでは正検知されている、つまり、その車両の存在は前後のフレームの検知結果まで確認すれば把握することができるというケースも存在している。このケースは現状のアプリケーションに時間的な前後関係を参照する機能が無いため、今後は前のフレームの検知結果から現フレームでの物体の物体検知を補完することで補うことができる可能性があると考えられる。

(4) 考察

(3) KGI/KPI との比較結果で示したように、当該接近車両情報を自動運転バスに通知するためには、①路側システムが遠方の自動車を検知できることに対し、日中の検知結果は、全天候で再現率 99.0%、適合率 96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証の路側システ

ム構成である程度の検知精度を確保できることが確認できた。一方、日没直前の雨天、日没後の全天候の検知精度については改善の余地があり、新たな技術課題と考える。②検知された情報を車載センサの検知前に、自動運転システムに配信できることに対し、1) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間について、平均で 158ms、最大でも 265ms と目標 KPI の 5 秒を大きく下回った。また、2) 路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間についても平均で 2,691ms、最大で 2,845ms と目標 KPI の 5 秒を下回る結果が確認できた。これにより、3 秒程度の遅延が許容できるケースでは、クラウド経由の路車協調の活用可能性を示唆できたと考える。

本実証実験の成果として、自動運転レベル 4 を社会実装していく上で、下牧町無信号丁字路を自動運転バスが右折する際、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する（約 300m 先）自動車が自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性に対し、クラウドを介した路車協調システムによる自動運転バスへの接近車両通知の実現性を示すことができた。

今後、①インフラ側からの周辺環境情報を受信した自動運転システムが、どう当該情報を判断、操作につなげていくことで安全性の向上が図れるかを検証することも重要である。具体的には、インフラ側から受信する周辺環境情報に遅延があることを前提として、現実世界の自動車の位置を推定する方法を検討する等が考えられる。また、②インフラシステムの高度化の検討として、夜間・悪天候時にも活用可能な仕組みの検討として、カメラと LiDAR を併用する方法等が考えられる。

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

当該ユースケースは実施していない。

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

当該ユースケースは実施していない。

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

当該ユースケースは実施していない。

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）

ユースケース①及び、ユースケース③について、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は実施していない。

(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

1) 実施結果

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

30 分以内で大容量の OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、地域交通の運行ダイヤに影響を与えず、持続可能な運用が可能か評価した。

結果として、ローカル 5 G 環境下であれば、ダイヤ間を想定して設定した KPI である 30 分以内で OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータ（20GB）のアップロードが可能であることが、本実証を通して検証できた。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

遠方（約 300m 先）の接近車両の存在を検知し、この接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって右折を試みる自動運転バスに配信することが可能か、またクラウド経由でのデータ配信のため、遅延時間や路側センサによる遠方（約 200m 先、300m 先）の接近車両検知精度が運用に耐えうるものかを検証することで、一般車両との右折時の衝突事故を防ぎ、地域交通の持続可能な運用に寄与することが可能か検証した。

結果として、日中の検知結果は、全天候で再現率 99.0%、適合率 96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証のインフラセンサ構成である程度の検知精度を確保できることが確認できた。1) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間について、平均で 158ms、最大でも 265ms と目標 KPI の 5 秒を大きく下回った。また、2) インフラセンサでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間についても平均で 2,691ms、最大で 2,845ms と目標 KPI の 5 秒を下回る結果が確認できた。これにより、接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって車載センサの検知前に、右折を試みる自動運転バスに配信することは可能であることを示した。

2) 考察

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

上記の結果より、運行ダイヤに影響を与えず、持続可能な運用が可能になると考える。具体的には、①運行ルート上にある小松駅で運行ダイヤの間にセキュリティパッチ等の更新データのダウンロードが可能になることで、バス運行ルート以外の事務所や車両ディーラー

等への立ち寄りが不要となり、定時運行が可能となると思われる。②事務所や車両ディーラーも、対応者を配置する必要がなくなると想定されるため、最適な人員配置による整備時間の削減も可能になると思われる。③トラブル発生時には、30 分以内にログデータ（20GB 程度）をエンジニアに提供できるため、エンジニアを現地に派遣したり、常駐させたりする必要がなくなる。これにより、トラブル対応が迅速にできるだけでなく、エンジニアの派遣費用や移動コストなどの削減も可能になると思われる。

このようなことから、本実証で検討した通信システム等を導入することにより、運行ダイヤに影響を与えず、業務フローや運行経路、人員配置等の見直しが可能になるとともに、自動運転バスの関係者にとっては、貴重な人的リソースを、「レール&フライト」の拡大・促進に注力させるなど、最適な人材配置による持続可能なサービスとして成長させることができると考える。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

上記の結果により、当該情報配信システムを導入することで、自動運転バスと一般車両との右折時の衝突事故を防ぎ、地域交通の持続可能な運用が可能になると考えられる。

自動運転の社会実装を鑑みた場合、本実証の成果は、無信号丁字路における自動運転バスの右折時に一般車両との衝突事故を防ぐために必要な通信システムの手段の1つとして、商用サービスの利活用も検討に値することを示せたことである。これにより、V2N による路側情報提供の可能性があることも確認できた。

(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

自動運転の支援に資する通信システムの構築・検証時のセキュリティ対策として、データ処理・管理等に関するガイドラインが未整備のため、日本電気株式会社の標準ガイドラインを参考 to 実施した。今後、自動運転に関する通信システムのセキュリティ対策についてガイドライン等を定めていくことが望まれる。

以下が実施した内容である。①システム内の各装置にアクセスするときは、認証を行ったアカウントで、必ず中継サーバを経由してアクセスを行った。②当該中継サーバでは、万が一の不正アクセスを見つけるために証跡記録を残した。③ローカル 5G 端末からの接続には、必要な IP/port のみ利用可能とするアクセス制御を実施し、不正アクセスを防止した。④収集データの漏洩リスク低減のため、MEC 等で収集・作成したデータは、即時クラウドに転送し、クラウド上に一か所にまとめて保管することで、物理的な脅威に対してもリスク低減の措置を実施した。⑤システム構成要素の脆弱性を適宜確認し、PSIRT と連携し組織的・継続的な対応を行った。⑥脆弱性レポートおよびセキュリティインシデントの検出時には、速やかな対処と対策の検討案構築および実施ができる体制を取っていた。

結果、本実証期間中に不正アクセスによる通信障害やデータ漏洩等のトラブルはなかったことを報告する。

(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

検証通信システムの維持・保守対応として、リモート運用管理システムを配置し、システムが問題なく稼働しているか、不具合時にはリモート保守等が可能か検証した。今後、自動運転に関する通信システムの維持管理・保守に関するサービスレベルを定めていくことが望まれる。

以下が実施した内容である。①不具合発生時のアラートは24時間365日、自動発報するように構築したが、アラート対応はシステム構築メンバーが監視体制を作って対応した。②常時画面を人が見ている状況ではなく、発報されたアラートを発見した時点からの対応を実施した。③監視体制を作ったことで、アラート発生後24時間以内には初動対応が可能だった。

結果、本実証実験で構築した通信システムはリモート保守が可能だったため、不具合発生時の初動対応を迅速に実施したことで、実証事業を終日中断するようなことはなかったことを報告する。

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

1) 実施結果

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

30分以内で大容量のOTAデータ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、運行停止時間等の変化の有無を検証した。

結果として、ローカル5G環境下であれば、ダイヤ間を想定して設定したKPIである30分以内でOTAデータ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータ（20GB）のアップロードが可能であることが、本実証を通して検証できた。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

自動運転システムと路側センサ連携は今年度のスコープ範囲外のため、手動介入回数は変化ないが、遠方（約300m先）からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、将来的な手動介入回数の削減に寄与することが可能か検証した。

結果として、日中の検知結果は、全天候で再現率99.0%、適合率96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証のインフラセンサ構成である程度の検知精度を確保できることが確認できた。1) 車載PCの周辺環境情報要求から受信までの遅延時間について、平均で158ms、最大でも265msと目標KPIの5秒を大きく下回った。また、2) インフラセンサでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間についても平均で2,691ms、最大で2,845msと目標KPIの5秒を下回る結果が確認できた。これにより、接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって車載センサの検知前に、右折を試みる自動運転バスに配信することは可能であることを示した。

2) 考察

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

上記の結果により、運行ダイヤ間でのデータダウンロード、アップロードが可能になることで、運行ダイヤ変更や運行停止等を低減し、自動運転バス利用者に定時運行による高い利便性の提供が可能になると考える。また、定期点検時の手動更新作業の削減や、整備スケジュールの柔軟化等も可能になると考える。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

上記の結果により、将来的に自動運転バスの右折判断はより正確なものになることが想定できる。手動介入の原因は不正確な右折判断（接近車両があるにも関わらず、右折してしまう）であることを考慮すると、上記の結果より手動介入回数が削減できる可能性があることを示唆できた。今後は、インフラ側からの周辺環境情報を受信した自動運転システムが、当該情報を判断、操作につなげていくことで手動介入回数を削減することが可能になると考える。

(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

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

30 分以内で大容量の OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、セキュリティホールや脆弱性が発見された際に、車両ディーラー等に行かず、運行ルート内の小松駅でセキュリティパッチや、バグ修正、新機能追加等を行うことで、道路交通全体の安全性に貢献可能か検証した。

結果として、ローカル 5G 環境下であれば、ダイヤ間を想定して設定した KPI である 30 分以内で OTA データ（20GB）のダウンロードまたは、ログデータ（20GB）のアップロードが可能であることが、本実証を通して検証できた。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

路側センサ情報を、道路交通全体の安全性・円滑性向上の寄与度として検証することは今年度のスコープ範囲外であるが、遠方（約 300m 先）からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、将来的に道路交通全体の安全性・円滑性向上に寄与することが可能か検証した。

結果として、日中の検知結果は、全天候で再現率 99.0%、適合率 96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証のインフラセンサ構成である程度の検知精度を確保できることが確認できた。1) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間について、平均で 158ms、最大でも 265ms と目標 KPI の 5 秒を大きく下回った。また、2) インフラセンサでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間についても平均で

2,691ms、最大で 2,845ms と目標 KPI の 5 秒を下回る結果が確認できた。これにより、接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって車載センサの検知前に、右折を試みる自動運転バスに配信することは可能であることを示した。

2) 考察

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

上記の結果により、セキュリティホールや脆弱性が発見された際に、車両ディーラー等に行かず、運行ルート内の小松駅で、30 分以内にセキュリティパッチや、バグ修正、新機能追加等を行うことで、自動運転バス利用者に安心・安全なサービス提供が可能になると考える。

また、季節・気象等、道路状況の変化に応じた制御パラメータの最適化にも 30 分以内に対応できることで、走行性能の継続的な維持・向上や道路状況の変化による突発的な運行停止リスクの低減等、自動運転バスを含む道路交通全体の安全性・円滑性向上に貢献できると考える。さらに、事故発生時、ログデータが現場で解析できるため、現場検証が短時間できることで道路交通全体の円滑性にも貢献できると考える。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

上記の結果により、将来的に自動運転バスの右折判断がより正確なものになると想定される。その結果、当該交差点を通行する交通参加者全体の安全性向上に寄与できるものと考えられる。また、自動運転バスの右折判断が正確になった結果として、自動運転バスの右折が他車の通行を妨げずに行えるようになることも想定され、これは当該交差点の交通全体に関して円滑性向上に寄与出来ると考える。

(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

ユースケース①・停車場における通信環境の高度化の実証

30 分以内で大容量の OTA データ (20GB) のダウンロードまたは、ログデータのアップロードが可能か検証することで、交通利便性の向上につながるかを検証した。

結果として、ローカル 5G 環境下であれば、ダイヤ間を想定して設定した KPI である 30 分以内で OTA データ (20GB) のダウンロードまたは、ログデータ (20GB) のアップロードが可能であることが、本実証を通して検証できた。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

自動運転システムと路側センサ連携は今年度のスコープ範囲外のため、ルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上効果は直ちに検証されるものではないが、遠方 (約 300m) からの接近車両情報を車載センサ検知前までに自動運転バスに通知可能か検証することで、将来的にルート設定の柔軟化・時間短縮・交通利便性の向上に繋がるか検証した。

結果として、日中の検知結果は、全天候で再現率99.0%、適合率96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証のインフラセンサ構成である程度の検知精度を確保できることが確認できた。1) 車載PCの周辺環境情報要求から受信までの遅延時間について、平均で158ms、最大でも265msと目標KPIの5秒を大きく下回った。また、2) インフラセンサでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間についても平均で2,691ms、最大で2,845msと目標KPIの5秒を下回る結果が確認できた。これにより、接近車両の存在をクラウドからの周辺環境情報送信によって車載センサの検知前に、右折を試みる自動運転バスに配信することは可能であることを示した

2) 考察

ユースケース①・停車場における通信環境の高度化の実証

上記の結果により、高精細地図データ等を短時間で更新できることで、ルート設定を柔軟に変更することが可能になり、交通利便性が向上すると考える。また、データダウンロードまたは、アップロード作業時間の短縮化、駅ロータリー内での停車時間を利用したシステム更新の実施等が可能になると考える。

結果、定時運行の実現やサービス提供時間の拡大可能性等による自動運転バス利用者への利便性提供が可能になると考える。さらに、交通利便性が向上することで、乗り継ぎ時の接続性向上、マルチモーダルな移動の円滑化、地域全体の交通ネットワークの最適化等が促進され、公共交通の利用促進、自動運転バスの運行における信頼性確保が可能になると考える。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

上記の結果により、V2Nによる自動運転車へのインフラ情報提供が可能と考える。これは、現行では自動運転レベル4で通行することが難しい箇所の課題を解決する手段の1つである。将来的に自動運転バスのルートを柔軟に設計すること、つまり自動運転バスが走行できない箇所を減らすことの一助となる技術と考える。ひいては、自動運転バスのルートを拡充することで、交通利便性が向上することも期待できる。

(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

ユースケース①・停車場における通信環境の高度化、ユースケース③・丁字路右折時における高速走行車両情報配信に関する初期コスト・ランニングコスト項目については、「4.7.2 効果検証 (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：4.7.2 (4)」で述べている内容が主なも

のである。

2) 考察

○インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

ユースケース①、ユースケース③のインフラ構築におけるコスト構造において、インフラシェアリング等によるコスト低減化方策を検討した。

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化

ローカル 5 G と Wi-Fi 通信環境におけるコスト構造、およびインフラシェアリング可否を検証した。

○コスト構造検討

小松駅ロータリー内でローカル 5 G による通信環境を構築する場合、1 か所で小松駅ロータリー内をカバーすることができた。一方、Wi-Fi 通信環境を構築する場合、机上論ではあるが、アクセスポイントを複数個所設置しないと当該ローカル 5 G と同じ通信エリアをカバーできない、ということが確認できた。また、Wi-Fi 通信環境を構築する場合、機器設置個所が増えると機器費だけでなく、設置施工費、保守費、不具合対応費が機器分増加すると考えられる。ダウンロードまたは、アップロード時間の短縮が図れることで、当該インフラを自動運転バス以外にも共有していく検討が今後必要だと考える。

○インフラシェアリング検討

OTA や V2N インフラを他の公共サービスや民間事業者と共同で運用することで、通信設備の維持コストを削減できると考える。具体的には、スマートシティ関連サービスや地域の観光情報提供システムなどと通信インフラを共有する。これにより、当該通信インフラ利用事業者から、インフラ利用料を収集する等で、持続可能な運用モデルを構築していく必要がある。

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信

路側センサと車載センサによる通信環境構築コスト構造、インフラシェアリング可否を検証した

○コスト構造検討

既存の車載センサでは検知できない遠方情報を、1) 路側センサで収集する場合、2) 自動運転バスそのものに高精細な LiDAR 等を組み込む、2つの方法について検討を実施した。結果、自動運転バスそのものを高機能化させる場合、自動運転バスの台数が増えれば増えるほどコスト負担が大きくなると想定される。一方、路側センサは自動運転バスの数に依存せず、収集したい地点の情報を自動運転バスや他の車等にも伝えることができると考える。

○インフラシェアリング検討

既存の車両感知器等を路側センサに置き換えることで、1つの装置で様々なサービス提供が可能になると思われる。これにより、当該インフラ利用事業者から、インフラ利用料

を収集する等で、持続可能な運用モデルを構築していく必要がある。

なお今後、自動運転レベル4の社会実装に向けて、以下も議論していく必要がある。

○初期コスト負担の在り方

現時点で、自動運転システムの社会実装を実現するためには、高額な初期投資が必要となり、民間企業のみでは大きな経済的リスクを伴うため、国による戦略的な財政支援が重要であると考えられる。具体的には、通信インフラの整備、技術開発への補助金、税制優遇措置などが考えられる。実証事業の結果を踏まえ、国が主導的な役割を果たすことで、自動車メーカー、通信事業者、システム開発事業者、道路管理者などの関係者が協力しやすい環境を創出できると思料する。また、このような初期投資は単なる補助ではなく、将来的な交通安全の向上、渋滞緩和、環境負荷の低減といった社会的メリットを生み出す重要な初期投資であるため、PFI 事業⁸⁰やDB 方式⁸¹等、官民連携によるスキームも検討する必要があると考える。

○ランニングコスト負担の在り方

自動運転システムが社会実装され、受益者負担でシステム維持できる目途がたつまでは、国による継続的な投資と支援が必要であると考えられる。具体的には、①機器・システム監視・維持・保守費、②機器減価償却費、③各種サービス利用料、(LTE やデータストレージサービス等)、④電気利用料等である。これらの費用は、設置した機器を取り外さない限り、または利用するサービスを停止しない限り、永続的に発生する費用となる。そのため、財源確保が重要になるが、初期段階においては国の支援が普及促進には不可欠であると考えられる。

○自動運転システムと他サービスの連携

自動運転システムの社会実装を実現するためには、他サービスとの連携による普及促進も視野に入れる必要がある。具体的には、以下のような連携が検討できる。

①スマートシティサービスとの連携

V2N (Vehicle to Network) システムを地域に構築することで、自治体のスマートシティ計画と高度に連携が可能になると思われる。具体的には、道路状況、公共施設の混雑状況、イベント情報などをネットワーク経由でリアルタイムに住民と共有することで、地域全体の移動効率と情報アクセスを最適化するスマートな公共サービスの実現が期待できる。

②観光・地域活性化サービスとの連携

V2N システムを活用することで、地域の混雑状況、駐車場情報、地域イベント、季節限定情報などを車載システムに直接配信することも可能になるため、観光客の周遊体験を最適化し、地域の魅力を効果的に伝えることで、地域経済の活性化と観光産業の発展が期待

⁸⁰ Private-Finance-Initiative の略 民間の資金と経営能力・技術力（ノウハウ）を活用し、公共施設等の設計・建設・改修・更新や維持管理・運営を行う公共事業の手法

⁸¹ Design build の略 設計と建設のサービスが設計 - 建築業者または設計 - 建築請負業者など、単一のエンティティによって契約プロジェクトをもって提供する方法。

できる。

○インフラシェアリング等によるコスト低減化方策

V2N インフラを他の公共サービスや民間事業者と共同で運用することで、通信設備の維持コストを削減できると思われる。具体的には、需要の高いエリアから優先的に整備を進め、利用実績に応じて段階的に拡大することで、初期投資を抑制していくことが考えられる。

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

本実証を通して、小松市が輸送の自動運転化を進める中で見えてきた問題・課題に対して、ユースケース①：停車場における通信環境の高度化、ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信、を検証することで、2025 年度以降に自動運転レベル 4 の導入を目指すための技術検証をすることができたと考える。具体的な成果は以下の通りである。

ユースケース①：停車場における通信環境の高度化では、運行ダイヤに影響を与えず、自動運転バスの運行ダイヤの間の時間（30 分間）を用いて OTA データ（20GB）のダウンロードを完了させることが可能か明らかにするという検証目的に対し、すべての測定で本 KPI（30 分以内）を達成し、最も長い所要時間で 15 分 23 秒と、概ね KPI の半分程度の時間での転送に成功した。

この結果、自動運転バスの運用に影響を及ぼす自動運転システムのセキュリティ更新等を短時間で遂行することという課題に対し、短時間で OTA データのダウンロードが可能な通信手段を確立することができ、さらには 30 分という当初の想定に対し、15 分程度のダイヤ間においてもダウンロードの遂行可能性があることを示すことができた。

今後、自動運転ベンダーとの連携を含めた OTA システムの構築を行うことで、問題としていた 120 分程度かかる OTA データダウンロードによる自動運転バスの運用中断や、代替車両への切替えが解消することに繋がると考える。その結果として、自動運転バスの運行ダイヤを維持したまま常に高い状態の走行の安全性、安定性等を確保することが可能になり、より効率的な車両運用に繋がる結果と考える。

また、ログデータとして、運行ダイヤの間でどの程度のサイズのログデータをアップロードすることが可能か明らかにするという検証目的に対し、20GB 程度のログデータであれば、30 分間のダイヤ間でアップロードするという KPI を達成できることを確認した。

この結果、トラブル発生時、迅速にログデータをエンジニアに展開する新たな手段を確保することという課題に対し、運行ルート上の小松駅でトラブル発生前後のログデータを迅速にアップロードする通信回線の仕組みを確立することができたと考える。

OTA と同様に、今後、自動運転ベンダーとの連携を含めたログデータ共有システムの構築を行うことで、システム障害やトラブル発生時に、迅速にログデータをエンジニアに展開し、トラブル原因の早急な特定を行う新たな手段を確保することができると考える。その結果、地元住民を含めた関係各所（自治体や関係省庁等を想定）に、丁寧かつ迅速な説明を行うことも可能になり、自動運転に対する社会受容性を維持することに繋がる結果と考える。

（詳細は、6.1.1 停車場における通信環境の高度化 参照）

ユースケース③：丁字路右折時における高速走行車両情報配信においては、路側システムで遠方の接近車両を検知し、車両センサの検知前にクラウドからの周辺環境情報送信によって自動運転バスに当該接近車両情報を配信することが可能かを明らかにするという大きな目的に対し、路側システムとして選定したカメラと AI システムを使って設計した仕組みが遠方の自動車をどの程度検知できるかを明らかにすること、検知された情報をクラウド経由で自動運転システムに配信する際、どれくらいのデータ転送遅延が発生するかを把握し、遅延時間を加味した配信システムが設計可能かも明らかにすることと、2つの目的を設定して実証実験を行った。

路側システムで遠方の接近車両を検知可能かという目的に対し、日中に関しては、全天候で再現率 99.0%、適合率 96.1%と、高い水準の検知精度を示すことができ、本実証のセンサ構成によりある程度の検知精度を確保できることが確認できた。一方、日没直前の雨天、日没後の全天候の検知精度については改善の余地があり、新たな技術課題と考える。この課題について、例えば、カメラだけでなく、LiDAR との併用により、夜間も活用可能なシステムを構築する等の対策が有力であると考えられ、その効果については今後実証により確認していく必要があると考える。

また、当該検知情報を車両センサの検知前にクラウドからの周辺環境情報送信によって自動運転バスに配信する際、どれくらいのデータ転送遅延が発生するかを把握し、遅延時間を加味した配信システムが設計可能かという検証の目的に対し、1) 車載 PC の周辺環境情報要求から受信までの遅延時間については、平均で 158ms、最大でも 265ms と目標 KPI の 5 秒を大きく下回り、2) 路側システムでの検知完了からクラウド経由での周辺環境情報配信までの遅延時間については、平均で 2,691ms、最大で 2,845ms と目標 KPI の 5 秒を下回る結果が確認できた。

これらの結果から、路側システムで遠方の接近車両を検知し、車両センサの検知前にクラウドからの周辺環境情報送信によって自動運転バスに接近車両の情報を配信することが本実証の構成で可能であることを示した。ただし、悪天候時や日没後の精度については、改善の余地がある。

今後は、本実証実験で構築したシステムと自動運転システムとの連携を行い、自動運転バスの判断、操作につなげていくことで、無信号丁字路の非優先道路側からの右折の際に、車両センサ（一般的に 100m 程度）の見通しを超える範囲から高速で接近する遠方の自動車が、自動運転バスの右折完了より先に交差点に突入する可能性に対して、より安全性を高めた運行ができると考える。ただし、自動運転バスの判断、操作につなげる段階においては、より詳細に路側システムの情報の使い方について検討し、仕様を決定していく必要がある。

（詳細は、6.3.1 丁字路右折時における高速走行車両情報配信 参照）

上記は技術的な課題について、本実証実験で実証した項目に関連する内容を記載したが、自動運転レベル 4 を社会実装していくための課題には政治的・経済的・社会的な観点も存在する。

特に通信システムと自動運転システムの連携の観点においては、両者の責任分界を決定していくことは特に重要な課題と考える。これは、通信システムに求める技術水準にも影響する可能性がある課題である。

また、通信システムの導入に当たっては、路側システムや通信設備などのインフラ整備に関する初期投資、そしてシステムの維持管理やアップデートに係る継続的な運用コスト負担をだれが継続的に拠出していくのか等は、今後も検討が必要な課題と考える。

これらの課題に対しては、自動運転に関わる関係各所が連携して段階的に解決を図る必要があると考える。

8. 参考資料

文中の脚注に示している。

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

ローカル 5 G を活用した高速大容量データ通信及び高速走行車両検知技術の実証

2025 年 1 月

代表機関：日本電気株式会社
小松市自動運転通信領域コンソーシアム
