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）

茨城県猿島郡境町

変化する通信環境における安定した運行管理の実証

実績報告書

2025年1月31日

ＢＯＬＤＬＹ株式会社

茨城県境町コンソーシアム

目次

1. 実証の背景・目的 1

1.1 実証の背景 1
1.2 レベル 4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題 1
1.3 実証の目的 2
1.4 最終目標・構想イメージ 3
1.5 「最終目標・構想イメージ」における本実証の位置づけ・目標 5

2. 業務実施体制 6

2.1 実証機関 6
2.2 実施体制図 6

3. 自動運転の運行結果 7

3.1 運行場所 7
3.2 運行期間 9
3.3 運行時間帯・頻度・運行方式 9
3.4 運行者 10
3.5 運行体制 10
3.6 自動運転車両の特徴 12

4. 実証の手法 14

4.1 自動運転用軽量映像伝送システムの実証 14

5. 実証システムの構成と構築 35

5.1 通信システムの構成 35
5.1.1 システム構成図 35
5.1.2 ネットワーク構成 38
5.2 使用機器およびソフトウェア 39
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 46

6. 実証結果・考察 48

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 48

7. 本実証の総括 65
7.1 本実証の成果・課題 65
8. 付録：自動運転サービス提供事業者が独自に導入可能な通信環境の改善手法 67
8.1 通信品質改善のための通信技術・設定 67
8.2 使用機器 69
8.3 通信環境の評価方法 72
8.4 通信品質改善手法の導入 81
8.4.1 各種通信技術・設定の効果検証 81
8.4.2 各種通信技術・設定の最適パラメータ選定における注目点 83
8.5 導入・運用に係る留意点 85

1. 実証の背景・目的

1.1 実証の背景

茨城県境町は、茨城県と千葉県とを隔てる利根川の流域にある人口約 2 万 4 千人の自治体である。本町は河岸の町として発展した一方で鉄道の誘致が進まず、町内に鉄道駅がない等、公共交通網の脆弱性が課題となっている。

町民の主な交通手段は自家用車であるが、高齢単身世帯の増加、高齢化に伴う免許返納を希望する声も多く、バスのニーズが拡大している。

一方、路線バスやタクシーは今後も通勤・通学者や高齢者などの交通弱者にとって欠くことのできない重要な交通手段であるが、地元バス事業者（朝日バス）の担い手の高齢化、二種免許取得者の採用難が続いており、公共交通事業の継続性に課題がある。

上記課題を解決するために境町では BOLDLY が運行管理する自動運転バスを導入し、2020 年 11 月から 3 年以上、レベル 2 運行を実施している。レベル 2 運行では車内にオペレーターが乗車し、路上駐車等のシステムが対応できない事象については手動運転で対応している。また、遠隔監視室を設け、監視員によるモニタリングを常時実施している。

将来的に、人手不足に対応するためのドライバーレス、レベル 4 運行の実現を予定しているが、レベル 4 運行を実現するためにはモニタリング業務・運行管理を常時・安定的に行うための通信システムが必要であり、下記の目的から現在の通信システムの改善が必須である。

①安全性の確保

緊急時に、迅速な対応が必要となるが、遠隔監視室との通信が途絶えるとその対応ができなくなる（現場の状況がわからない、車内と連絡がつかなくなる）。

②信頼性の向上

緊急時に上記安全確保ができていることは、乗客や一般の交通参加者が自動運転バスの安全性と信頼性を感じるために重要であり、これができなければ社会的に受け入れられない。

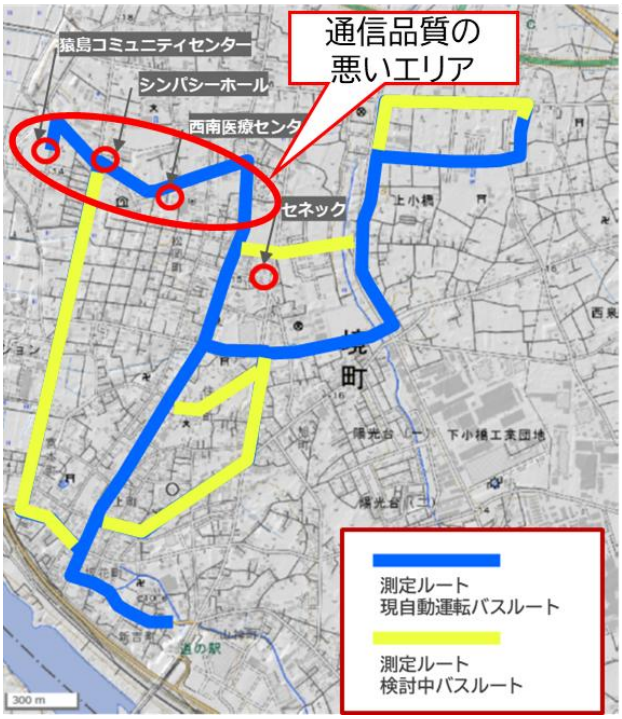
1.2 レベル 4 自動運転を社会実装する上での実証地域における課題

当該地域において、自動運転レベル 4 を社会実装する上での通信上の課題は以下 3 点があげられる。

① 電波が弱く通信が不安定な場所がある

取巻く環境として、日本各地における地方部・山間部等では、比較的アンテナ高の高い少数の基地局を用い、1 つの基地局で広いエリアをカバーする考え方の下で、基地局が配置されている。そのような地域では、中低層の建築物などによる電波遮蔽等の影響により、局所的に通信が困難となる地点が生じることが予測される。このような現象は、自動運転走行におけるモニタリング実施上の課題となる。

現在、4G LTE での通信を行っているが、図 1-1 の左上（北西側）は通信品質が悪く、通信が切断されてしまう場合があるエリアがある。



出所）国土地理院地図

図 1-1 通信品質が悪く通信の切断が生じる場合があるエリア

② イベント時にモニタリングができなくなる

例年、境町で実施される利根川花火大会の当日の観覧者数は約 25 万人（境町の人口は 2.4 万人）であり、想定以上のたくさんのユーザーが同時にネットワークを使おうとして通信トラフィックがネットワークの処理能力を超えて輻輳が発生する。通信の輻輳が発生すると通信途絶してしまうことがあり、車両のモニタリングができなくなる。

③ 緊急車両の検知

境町には、地域最大の茨城西南医療センターがあり、自動運転ルート上に救急車が出入りする。

路側インフラで自動運転ルート上に緊急車両が入った際に遠隔監視装置に通知して、車両に停止指示を出し車両が自動で停止するシステムを実装しているが、そもそも通信途絶してしまうと遠隔監視装置から通知することができない。特に走行ルート上に隣接している西南医療センター付近は現在運行で使用している通信キャリアの通信が安定しないため、課題となっている。

また、車両に緊急車両接近検知の設備も実装可能であるが（東京　羽田イノベーションシティでは先行して実装済）、緊急車両の接近検知後、遠隔監視装置経由で車両を停車させるため通信途絶していると同機能が使えない。

1.3 実証の目的

本実証では、1.2 で挙げた 3 つの課題のうち、郊外部における通信環境整備に起因する①の電波環境が悪い地点が生じる課題を取り扱う。この課題に対して、本実証では以下の 2 つを明らか

にすることを目的とする。

- 郊外部における通信環境の評価手法の確立
- 自動運転サービス提供事業者が独自に導入可能な通信技術・設定を用いた通信品質改善手法の提案とその定量的な検証

郊外部の通信環境の評価手法については、通信機器を具備した一般車両を用いて通信品質を測定し、走行経路上の特定の地点ごとの通信状況を可視化する方法を整理する。これにより、自動運転車両の実装前に通信上の課題と対策の計画を可能とする。

さらに、上記の方法で明らかとなった通信品質が局所的に悪化する課題を解決するため、自動運転サービス提供事業者が独自に車両と自動運転システムに特定の通信機器・通信設定を導入する。本実証では導入する手法の有効性を同機器の設置前後の通信データの比較及び監視員へのヒアリングにより検証する。これにより、電波が弱く通信が不安定な場所におけるレベル４運行の課題を解決する。

1.4　最終目標・構想イメージ

本事業によって、通信インフラの課題を解決し、通信が常時・安定的に繋がることで、レベル４自動運転の社会実装を行い、住民等が安心・信頼して自動運転バスを利用できる他、一般の交通参加者とうまく共存していくことも可能になり、「誰もが安心してすみ続けられる社会」にする。

＜境町の理念「誰もが安心してすみ続けられる社会」の実現＞

〇高齢者へのビジョン

高齢者の増加により免許返納者は毎年 100 名前後いる。町内の各エリアの高齢者が、そのまま自分の家に安心して住み続けられるよう、自動運転、オンデマンドバス等の施策を組み合わせ町内全域から中心部まで 20-30 分程度でのアクセスを確保する。住民の移動のハードルを下げ、お出かけ頻度を上げることで健康・文化的な生活を維持する。お出かけの目的地となる拠点については、町が主体的に各生活拠点(医療、飲食、スポーツ、文化拠点等)を急速に整備しており、町民からの利用意向が強い。茨城県内で最大規模の人数と活動頻度を誇る高齢者団体「境町いきいきクラブ連合会」により、自動運転バスサービスの利用浸透をすすめ、より多くの方に町の生活拠点にアクセスしてもらい、自らの足で出かけて社会参加する習慣を保ち続け、フレイル予防を図る。

〇子育て世代へのビジョン

子育て世代には、移住促進施策や英語教育強化などなどの多種多様なサポートを提供しており、人口は転入超過となり今後の人口ピラミッドの世代分布は良化傾向が予測される。子供が小さい時は親子での子育て支援センターや買い物でのモビリティ利用が多く、子供が成長したら子供だけでの塾や習い事へのアクセスに使われている。子供達が早朝から深夜まで安全な移動手段を使えることは、親の送り迎え負担軽減につながる。

＜地域公共交通計画遂行における自動運転の活用＞

境町では、高齢化の進展により、自動車を運転しない（できない）住民が、どのように生活交通手段を確保するかが大きな課題となっており、「境町まち・ひと・しごと創生総合戦略」における重点目標として「地域公共交通ネットワークの充実」を掲げている。地域公共交通ネットワークの充実を図るための KPI として自動運転バスの導入を定めており、以下の点で自動運転を活用している。

・免許返納などを行った高齢者や障がい者といった交通弱者の生活交通手段の確保を図るための循環バスなどの新たな交通網

・他自治体に先駆けた「超スマート社会」の実現（Society 5.0）に向けて民間事業者と連携することによる AI、IoT、ビッグデータなどの近未来技術を積極的に活用した地域公共交通網の整備

＜将来的に自動運転レベル 4 の社会実装が可能な理由と予定実装時期＞

〇自動運転レベル 4 の導入に向けた町長のコミットメント

誰もが生活の足に困らない町を実現するため、自動運転レベル 4 の導入に向けて町長の強いコミットメントがある。

〇実証後の事業費の確保

実証後の事業費の確保が可能である。運行経費には「ふるさと納税」及び「企業版ふるさと納税」を活用していく予定である。

前述のとおり、「ふるさと納税」については、令和 4 年度寄付申込額 59 億円、「企業版ふるさと納税」についても、毎年 3 億円程度ある。

また、民間資金の活用も可能であり、具体的には、自動運転バス等の広告費収入などを予定している。自動運転バス運行事業の知名度が向上していることから相応の資金獲得が可能である。仮に広告収入費等の相応の資金獲得が見込まれなかった場合には、町の一般財源で経費負担することで持続が可能である。

〇協議体の構築

町長の諮問機関として、DX 推進委員会を設置しており、委員会は、公共交通等の有識者で構成されている。また、境町には、地域商社である「株式会社さかいまちづくり公社」があり、自動運転ルート拡大やバス停設置に際し、地域の商店との取次に関するサポート・自動運転運行のビジネスモデル構築等の役割を担っている。町議会やまちづくり公社等の関係機関の協力を得ながら自動運転事業を順次拡大している。また、路線バスを運行する地元交通事業者のバス停の中に自動運転バスのバス停を設置させてもらう等、地元交通事業者と連携体制を構築することで交通網の接続を実現している。

〇地域のレベル 4 自動運転の必要性

境町は、鉄道駅がなく、移動手段として自家用車が必須の地域である。しかし、町民の高齢化が進んでおり、境町の高齢者は免許証を返納し公共交通手段に切り替えたいが切り替えることができない現状がある。また、地元交通事業者についても高齢化が進み、路線バスの継続が困難であり、公共交通の継続性に大きな課題があるため、解決手段としてレベル 4 自動運転が必須である。

◯予定実装時期

2025 年度中の申請を目標としている。申請ルートは第 1 期ルートを予定。

＜レベル 4 実装スケジュール＞

2025 年度：第 1 期ルートのレベル 4 運行開始（有人 1：1 運行）

2026 年度：第 2 期ルートのレベル 4 運行開始（有人 1：1 運行）

2027 年度：第 1 期及び第 2 期ルートにおける無人レベル 4 運行開始（無人 1：3 運行）

その後、境町町内の拡張ルートにおいても順次レベル 4 運行を開始する。

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

本実証の位置づけは、「安全性の確保」及び「信頼性の向上」のための安定・信頼できる通信システムの構築である。

課題に記載のとおり、4G LTE の通信が途切れてしまうことがあり、車内のオペレーターが補完している現状がある。レベル 4 運行の際に通信が途切れてしまうとオペレーターによる補完ができないため、現場の状況が確認できず、車内との連絡がつかなくなる事態が生じる。また、車両やインフラの性能の向上も重要だが、乗客や一般の交通参加者に自動運転バスを受け入れてもらうためには、緊急時に上記のような安全確保ができていることが必要不可欠である。これらの「安全性の確保」及び「信頼性の向上」を満たしたレベル 4 実現のために常時・安定的に機能する通信システム構築が必要である。

上記システムが構築されることで、以下の効果が期待される。

・広域かつ複数台による安定的な自動運転バスにより、住民のきめ細やかなニーズに対応することで、初めて住民にとって信頼される交通手段になる。

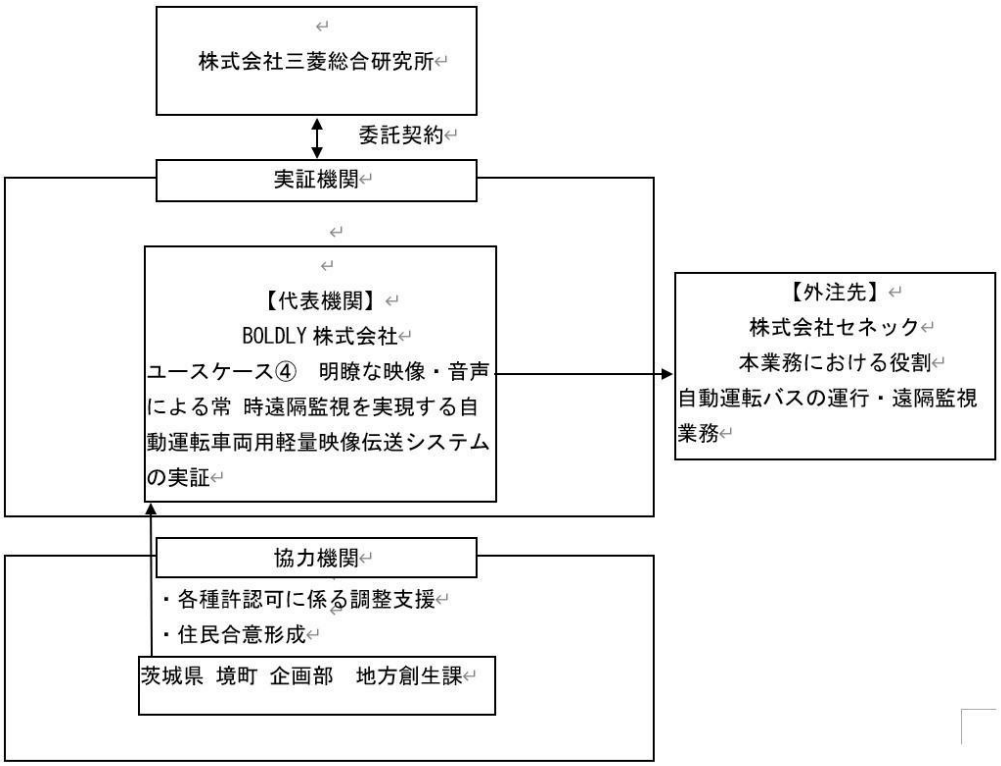
・すでに行政や当社に届いている「数年後には免許返納する予定の 80～90 歳の年代」や「小学生高学年からバスで塾に通う予定の年代」などの将来顕在化する世代の潜在ニーズに対して現時点から安心できるモビリティのイメージをもってもらうことで地域の持続化につながる。

2. 業務実施体制

2.1 実証機関

代表機関	法人名	BOLDLY 株式会社
	代表者氏名	代表取締役社長兼 CEO 佐治　友基
	所在地	東京都港区海岸 1 丁目 7 番 1 号
	業務の概要	・自動運転車の導入・運用に係る調査・コンサルティング事業の企画 ・旅客物流・貨物に関する情報サービスの提供、開発・運営事業の企画 ・物体検出技術を利用したシステム構築・研究開発および調査

2.2 実施体制図



3. 自動運転の運行結果

3.1 運行場所

出所）茨城県境町[1]

図 3-1 境町第 1 期ルート

・「道の駅さかい」～「猿島コミュニティセンター」
・走行距離：片道約 4.25km
・運行時間：1 周約 30 分
・自動運転レベル：レベル 2 ※原則、自動運転（必要に応じて手動走行）

[1] 茨城県境町 https://www.town.ibaraki-sakai.lg.jp/page/page002440.html

＜第 2 期ルート＞

出所）茨城県境町

図 3-2 境町第 2 期ルート

・「道の駅さかい」～「高速バスターミナル」
・走行距離：片道約 4.60km
・運行時間：1 周約 30 分
・自動運転レベル：レベル 2 ※原則、自動運転（必要に応じて手動走行）

3.2　運行期間

運行内容	運行期間・運行日数
準備運行	１１月６日（水）～１１月８日（金）、１２月３日（火）～１２月４日（水）
関係者試乗運行	１２月１１日（水）
一般運行等	通年運行実施中
その他運行	１２月１７日（火）～１２月１９日（木）※実証走行

3.3　運行時間帯・頻度・運行方式

・運行時間帯

毎日 7:40～16:19

・頻度

第１期ルート：１日あたり１０便、第２期ルート：１日あたり８便

猿島コミュニティセンター ⇄ 道の駅さかい

猿島コミュニティセンター 行き

道の駅さかい	8:20	10:20	12:30	14:20	15:50
干し芋カフェ	8:22	10:22	12:32	14:22	15:52
河岸の駅さかい	8:24	10:24	12:34	14:24	15:54
常陽銀行	8:26	10:26	12:36	14:26	15:56
境町役場入口	8:28	10:28	12:38	14:28	15:58
境小学校入口	8:30	10:30	12:40	14:30	16:00
エコス		10:35	12:45	14:35	16:05
郵便局	8:32	10:38	12:48	14:38	16:08
キッズハウス	8:35	10:41	12:50	14:40	16:10
西南医療センター	8:37	10:43	12:52	14:42	16:12
シンパシーホール	8:39	10:45	12:54	14:44	16:14
コミュニティセンター		10:48	12:57	14:47	

道の駅さかい 行き

コミュニティセンター			10:56	13:03	14:57
シンパシーホール	7:40	9:29	11:01	13:08	15:02
西南医療センター	7:42	9:31	11:03	13:10	15:04
キッズハウス	7:44	9:33	11:05	13:12	15:06
郵便局	7:46	9:35	11:07	13:14	15:08
エコス		9:41	11:13	13:20	15:14
境小学校入口	7:49	9:44	11:16	13:23	15:17
境町役場入口	7:51	9:46	11:18	13:25	15:19
常陽銀行	7:53	9:48	11:20	13:27	15:21
河岸の駅さかい	7:56	9:51	11:23	13:30	15:24
干し芋カフェ	7:58	9:53	11:25	13:32	15:26
道の駅さかい	8:00	9:55	11:27	13:34	15:28

高速バスターミナル ⇄ 道の駅さかい

高速バスターミナル 行き

道の駅さかい	9:25	10:57	13:04	14:58
干し芋カフェ	9:27	10:59	13:06	15:00
河岸の駅さかい	9:29	11:01	13:08	15:02
常陽銀行	9:31	11:03	13:10	15:04
境町役場入口	9:33	11:05	13:12	15:06
境小学校入口	9:35	11:07	13:14	15:08
エコス	9:41	11:13	13:20	15:14
境高校	9:44	11:16	13:23	15:17
かごや	9:50	11:22	13:29	15:23
ニコニコパーク	9:52	11:24	13:31	15:25
葵カフェ	9:55	11:27	13:34	15:28
高速バスターミナル	9:56	11:28	13:35	15:29
高速バス発車（東京駅・王子駅行き）	10:10	11:40	13:40	15:40

高速バス到着（境町高速バスタ行き）	10:13	12:23	14:13	15:43
高速バスターミナル	10:18	12:28	14:18	15:48
葵カフェ	10:19	12:29	14:19	15:49
ニコニコパーク	10:21	12:31	14:21	15:51
かごや	10:24	12:34	14:24	15:54
境高校	10:30	12:40	14:30	16:00
エコス	10:35	12:45	14:35	16:05
境小学校入口	10:38	12:48	14:38	16:08
境町役場入口	10:40	12:50	14:40	16:10
常陽銀行	10:42	12:52	14:42	16:12
河岸の駅さかい	10:44	12:54	14:44	16:14
干し芋カフェ	10:46	12:56	14:46	16:16
道の駅さかい	10:49	12:59	14:49	16:19

道の駅さかい 行き

出所）茨城県境町（ウェブサイト情報より BOLDLY 株式会社が作成）

図 3-3　境町自動運転バス時刻表

3.4　運行者

セネック株式会社から、オペレータ及び監視員を選任する。

メーカーからのライセンス契約等を保有するＢＯＬＤＬＹ株式会社がトレーニング・指導、管理監督を行う。

各運行体制の役割は以下の通り。

＜オペレータ＞ ※車両ごとに１名ずつ

車内にて自動運転車両の稼働状況を見守るとともに、周囲の交通状況を監視し、自動運転車両の機能では対処できない問題が予見される場合、手動介入もしくは緊急停止ボタンの押下を行う。

また、車両の運行前後には電子機器を用いた点呼・車両点検を実施する。

＜監視員＞

監視員は、運行ルート上に所在する遠隔監視センターにおいて、ＢＯＬＤＬＹ社が開発する遠隔監視システム Dispatcher を用いて、各車両の監視を行う。

車両の稼働情報（速度・車内温度・残バッテリー、各自動運転機能の稼働情報）をシステム上に表示させ、急停止・急制動等があった場合には、システムから自動的にアラートが発出する。監視員はアラートに応じて、車内外のカメラから状況を確認し、必要に応じて車内通話機能を使い安全を確保する。

3.5　運行体制

項目		内容
運行管理者の選任・人員体制		・茨城県境町から BOLDLY 株式会社に自動運転バスの運行業務を委託。 ・BOLDLY 株式会社から株式会社セネックにモニタリング業務及び自動運転バスのオペレーター業務を再委託。
遠隔監視装置	種類・特徴	＜システム＞ 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＞ 車外の前後、車内の前後を監視するカメラを設置 ＜通信網＞ 4G LTE ＜ディスプレイ＞ 茨城県境町の遠隔監視室で、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。
	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、安全性を考慮し、当面は車内添乗員が同操作を行う。 ＜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	茨城県猿島郡境町 78-11（〒306-0433）※既設 株式会社セネック社屋内
監視員	事業者	株式会社セネック
	人員体制	監視員の人数：常時 1 人 自動運転車両 1 台当たりの配置人数：0.125 人（境町運行車両 8 台）
	オペレーション	・遠隔監視センターで常時 1 名以上がモニタリングを行う。（シフト制で交代勤務） ・車両からアラートが上がった場合、対応マニュアルに沿った確認を行う。 ・必要に応じて車内オペレーターと連絡を取り、必要な処置を実施する。（警察・消防等への連絡や現場駆けつけ等）
	モニタリング体制	本町に設置した遠隔監視室で 1：８のモニタリングを行う。
	業務従事者教育	■実施者 BOLDLY 株式会社の社員が教育を実施する。 ■教育方法 座学及び実施訓練 ■時期、期間及び頻度 1. 新人研修 (1) 公道前トレーニング (23 時間) ①座学 3 時間 テキストは、オペレータートレーニングマニュアルを活用 ②横乗 15 時間 (熟練メンバーに同乗し、運行方法を学習) ③構内実技 5 時間 (2) 公道トレーニング (30 時間) 熟練メンバー同乗の上、実施訓練 2. 定期訓練 半年に一度、全オペレーターに以下の訓練を実施する 緊急時の緊急停止ボタン押下訓練、緊急時の連絡体制確認 上記の他、関係法令等の法改正があった際は都度教育を実施。
テストドライバー	事業者	株式会社セネック
	人員体制	運転手の人数：15 人 自動運転車両 1 台当たりの配置人数：1 人
	オペレーション	・自動運転バスの運転操作 手動運転を行う主な場面：路上駐車車両の回避 ・乗客の乗車案内
	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	■実施者 BOLDLY 株式会社の社員が教育を実施する。 ■教育方法 座学及び実施訓練 ■時期、期間及び頻度 1. 新人研修 (1) 公道前トレーニング (23 時間) ①座学 3 時間 テキストは、オペレータートレーニングマニュアルを活用 ②横乗 15 時間 (熟練メンバーに同乗し、運行方法を学習) ③構内実技 5 時間 (2) 公道トレーニング (30 時間) 熟練メンバー同乗の上、実施訓練

		2.定期訓練 半年に一度、全オペレーターに以下の訓練を実施する 緊急時の緊急停止ボタン押下訓練、緊急時の連絡体制確認 上記の他、関係法令等の法改正があった際は都度教育を実施。
保安員（※上記以外で運行の安全のために配置する人員）	事業者	配置しない
	人員体制	-
	オペレーション	-
	業務従事者教育	-

3.6 自動運転車両の特徴

項目		内容
台数		５台
所有者		茨城県境町
車両スペック	車両名	NAVYA　ARMA
	自動運転レベル	レベル２
	車両定員	１１名（車内オペレーター含む）
	試乗枠の定員	１１名（車内オペレーター含む）
	最高速度	車両機能上限：25 km
		実証実験時上限：20 km未満
	センシングデバイス	3DLiDAR×2、2DLiDAR×6、RTK-GPS、慣性計測装置及びオドメーター
	車両性能（チェックを入れること）	☑走行中に自動運転と手動運転を切り替えることが可能な遠隔型自動運転システムを備えた自動車として生産された車両である
		☑自動運転レベル２以上での走行が可能であり、かつ将来的に車両調整等により自動運転レベル４での走行が可能であること
		☑乗車定員は、実証地域で将来的に実装することを想定した適当な規模であること走行可能であること
	運行管理システム（チェックを入れる	☑車両に搭載したカメラによる車両内外のモニタリング

	こと）		☑緊急時における車内との通話	
			☑速度や位置等の車両走行状態のリアルタイムでの取得	
			☑実験車両に車両周辺の状況や車両状態情報の記録を行うドライブレコーダーやイベントデータレコーダー等を搭載すること	
			☑公道実証実験中の実験車両に係るセンサ等により収集した車両状態情報を含む各種データ、センサの作動状況等について、交通事故又は交通違反が発生した場合の事後検証に利用することが可能な方法により、適切に記録・保存すること	
	その他装備		エアコン、ヒーター、スピーカー及びホーン	
走行可能環境	天候		暴風雨や吹雪を除く、全天候に対応可能である。	
	照度		特に制限はなし。	
保有機能	自車操作	左折	走行可否	可
		右折	走行可否	可
		車線変更	走行可否	可（事前に設定した場合に限る。）
		障害物回避	対応可否	可
	対象認識		LiDAR により障害物（対象）を検知する。	
	白線認識		LiDAR により検知する。	
	標識認識		物体として検知する。指示内容は検知しない。（事前に標識に応じた設定を入れる）	
	信号認識		V2N 通信により認識する。	
	MRM		障害物検知により停止する。	
本実証のために実施する自動運転システム改修の内容			自動運転システム自体の改修の必要はない。	
その他特徴等			ハンドルやアクセル・ブレーキペダルが存在しない特別装置自動車として、国土交通省から保安基準の緩和を受けている。 車内はラウンジ（コの字型）のような座席となっており、乗客同士の会話が可能である。 外観は左右対称のゴンドラ型であり、エレベータのようにスイッチバック走行が可能である。	

4. 実証の手法

4.1 自動運転用軽量映像伝送システムの実証

（1） 目的

日本各地における地方部・山間部等では、比較的アンテナ高の高い少数の基地局を用い、1 つの基地局で広いエリアをカバーする考え方の下で、基地局が配置されている。そのような地域では、中低層の建築物などによる電波遮蔽等の影響により、局所的に通信が困難となる地点が生じることが予測される。このような現象は、映像の乱れ・停止を引き起こし自動運転走行における課題となる。

本実証では、これらの課題を解決すべく、実際の現場で発生している現象を把握し、また、今後自動運転サービスを全国各地に実装する上で必要と考えられる ODD 上の通信環境における測定・評価プロセスから対策に至るまでの運用面についても整理する。そのため、自動運転バスが走行しているルートおよび今後拡張が予定されているルートを含め、限られた時間、人的リソースおよび自動運転バスのリソースも十分考慮した対応することが必要となる。現地での測定および効果評価は、運行中の自動運転サービスに影響を与えることなく、あらかじめレンタカーに測定機器を搭載して行い、その後、実際運行している自動運転バスに切り替え、実際の遠隔監視員を含めた評価を行うこととする。

これらの事前調査により、周囲は通信サービスのカバーエリア内でありながら、局所的に通信品質が悪化し、通信が困難となる地点を確認する。尚、今回の実証では複数の通信事業者（国内大手通信会社 3 社）の回線を網羅的に検証し、同様の現象を確認し、本課題の発生の再現性についても可能な限り調査する。

さらに本実証では、通信事業者による新規基地局の設置・既設基地局の調整などによる通信環境改善の対策ではなく、既設の通信ネットワーク環境の利用を前提として自動運転サービス事業者主導の通信機器・設定の導入による通信品質の改善手法※の併用を解決策として提案する。通信機器・設定の動作パラメータの調整方法も含めて解決策を整理することを目的とする。

※マルチ回線（複数 SIM 同時接続)、キャリアアグリゲーション、周波数固定、QoS 制御

（2） 実施内容の詳細

本実証では、既存の通信環境の測定評価や、解決策の通信機器・設定の動作パラメータの調整のための事前測定を行う検証（検証①）と検証①で整理された通信機器・設定を導入した自動運転車両による常時モニタリングの品質検証（検証②）の大きく 2 つに分けて行った。検証①では、通信機器や測定器を設置したレンタカーを用い、検証②では自動運転バス ARMA を用いた。

図 4-1 に検証の概要を示す。検証①では、マルチ回線、キャリアアグリゲーション、周波数固定による測定検証を全レンタカーで実施し、検証②では、検証①で得られた結果と既存の通信設定との比較、具体的には SIM1 枚（既存の構成）と SIM3 枚（検証②で得られた最適解の設

定）の条件で、運行している自動運転バス（ARMA）を使用し、監視員による業務上の主観比較を実施した。

検証①の測定ルートは、図 4-2 で示した現自動運転バスルートおよび検討中バスルート（青色・灰色）、検証②では、現自動運転バスルート（青色）で検証した。

また、図 4-3 に示す構成で、Wi-Fi 無線と LTE（キャリア無線）とのアグリゲーションも実施した。自動運転バスが許可された公道と Wi-Fi 無線機設置場所との制約により、自動運転バスの走行しながらの測定は限られたルートとなった。そのため、Wi-Fi 無線の接続可能な見通し距離の確認は、車両を使用せず測定者がスマホ端末（iPhone 端末）を使い測定した。

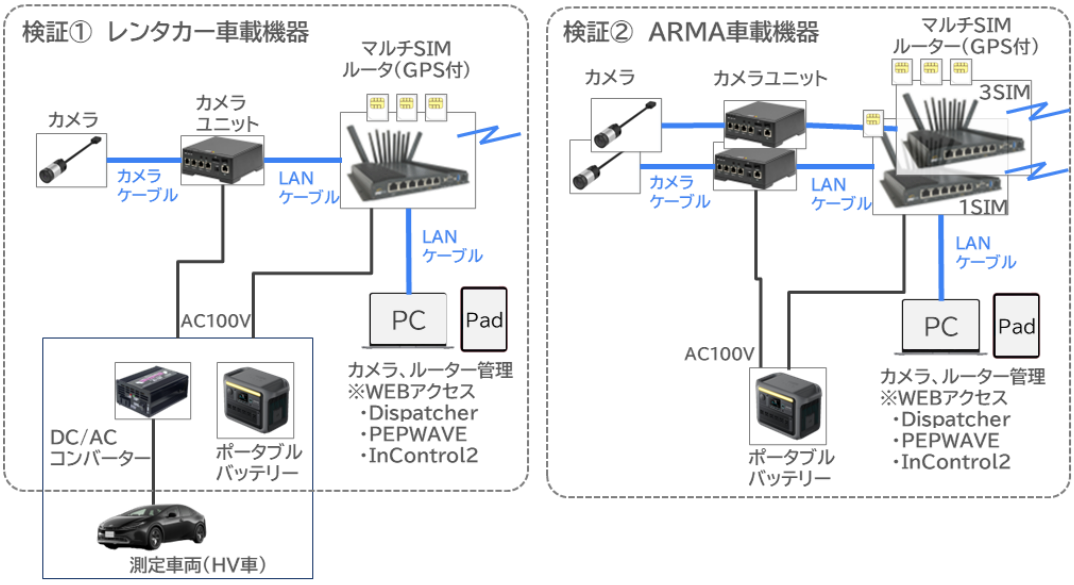
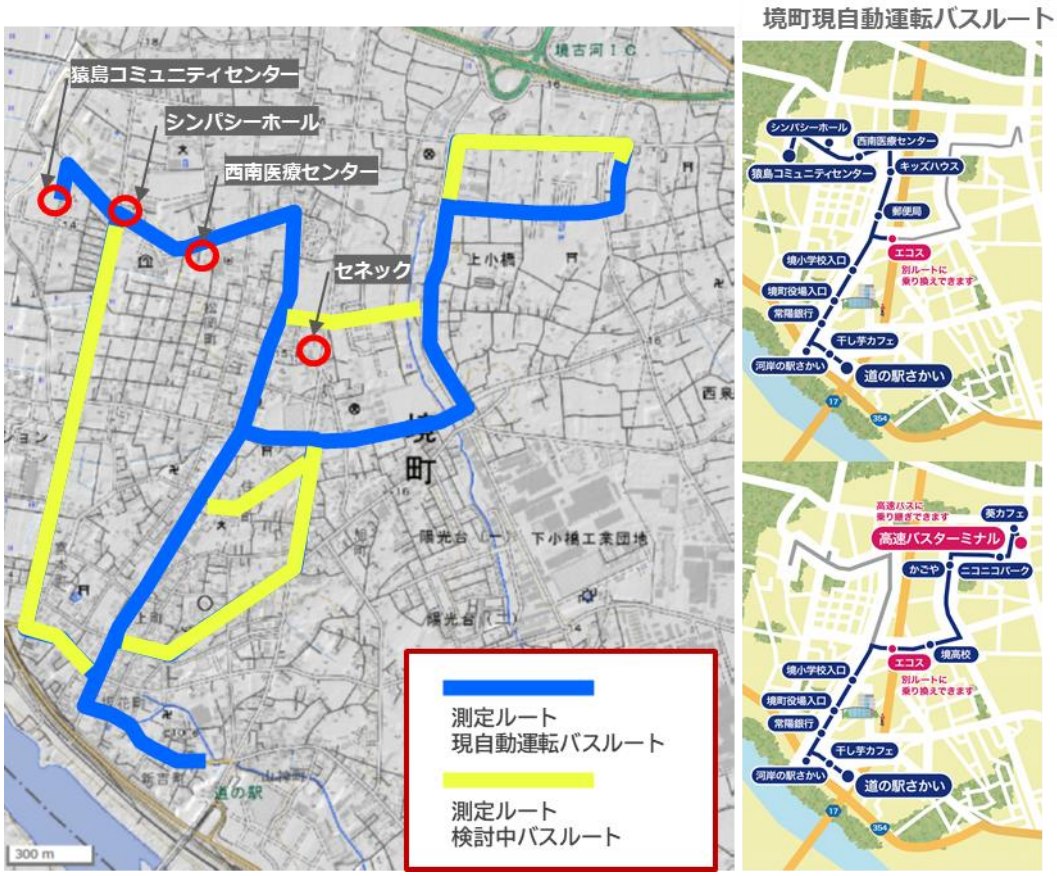


図 4-1 実証構成の概要



出所）国土地理院地図、茨城県境町

図 4-2　検証①および検証②の走行ルート

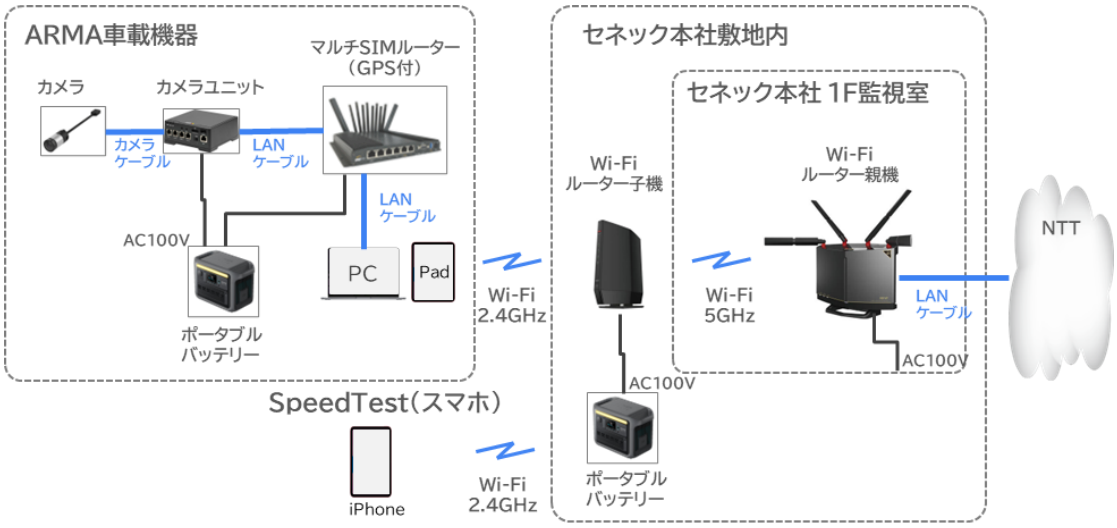
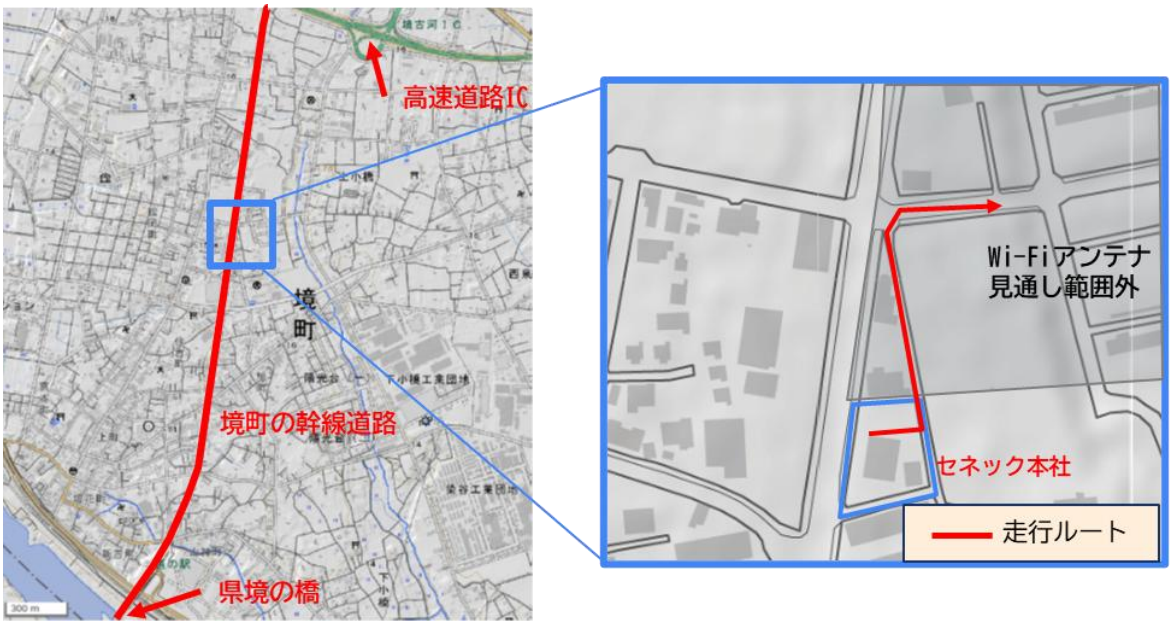


図 4-3　Wi-Fi と LTE とのアグリゲーション検証の構成



出所）国土地理院地図

図 4-4　Wi-Fi と LTE のアグリゲーション検証の走行ルート

（3） 利用技術（通信評価にかかわる技術・機能）

1） マルチ回線（複数 SIM 同時接続）

複数 SIM の電波を束ね１つの通信回線としてデータの送受信を行う機能。

2） キャリアアグリゲーション

複数の異なる周波数帯の電波を束ねて、1 つの通信回線としてデータの送受信を行う技術。

今回、キャリアアグリゲーションの技術に、マルチ回線、周波数固定も併用して検証を行った。例えば、マルチ回線の機能を加え使用することで、キャリアアグリゲーション単体より更に通信帯域の確保できるメリットが期待できる。また、複数の通信事業者の通信回線を使用するとことで冗長性が向上し、更に通信品質の安定性向上が期待できる。

3） 周波数固定

通信事業者の一つの基地局がカバーする通信エリアはセルと呼ばれ、複数のセルを組合せ、またセル間は基地置局主導（携帯端末は、周囲の基地局の電波強度を監視し、最も強い信号を発信している基地局を選択する）のハンドオーバーが行われ途切れない無線通信を実現する様、構築されている。通常は、エリアの特性（地形・建物の高さなど）をふまえかつ通信品質を維持するため、無線品質の差によりハンドオーバーが行われている（端末では一番電波の強い基地局（周波数帯）に接続しようとする）。隣接セルは異なるバンド（周波数帯）を用いる設計のため、ハンドオーバーとは使用する周波数の変更を伴うものである。

基地局カバーエリアの境界付近では、隣接する複数基地局との通信品質の差が小さく、またその差が変動しやすい傾向にある。そのため、このような場所においてはハンドオーバーが頻発する。ハンドオーバーが頻発すると、通信速度が低下し、遅延が増大する。（ハンドオーバーはネットワーク容量の最適化と電波干渉の低減の効果も期待されており、ネットワーク容量を分散することで、特定のセルが過負荷になるのを防ぎ、安定したデータ転送を可能にする目的で考えられております。また、ハンドオーバーは電波干渉を軽減し、ネットワーク全体の信号品質を向上させる目的とで活用されますが、ハンドオーバーが頻発する状況においては、この期待された効果が十分活かされないことが考えられます）

基地局カバーエリア境界付近のハンドオーバーの頻発を抑制するために、端末が使用するバンド（周波数帯）を固定することで、異なるバンドを用いる隣接セルへハンドオーバーさせないようにする。これを周波数固定と呼ぶ。

4） QoS 制御

送信データに優先順位付けし、ネットワーク上で優先順位に応じた処理をすることで遅延の低減などする機能である。IP パケットのヘッダ内に存在する ToS(Type of Service)フィールドのうち上位 6 ビットを DSCP(Differentiated Services Code Point)と呼び、DSCP はネットワーク層(レイヤ-３)におけるパケットの優先度をつけることができる。IP ルーター上で、高優先度のパケットは先行して処理されること、加えてネットワークが過負荷状態になった場合には優先度の低いパケットから順に廃棄されることによって、通信帯域が狭い状況においても高優先度のトラフィックは遅延や損失がなく伝送される。

5） マルチ回線ルーター・ソフト HUB

複数 SIM 同時接続、キャリアアグリゲーションおよび周波数固定との併用を実現するにあたり、Peplink 社製産業用マルチ回線ルーターを使用する。

また、回線を束ね一つの通信回線として使用するため、Peplink 社が提供する SpeedFusion 機能（複数回線を一つに束ねる機能のサービス名称）を組合せ利用する。マルチ回線ルーターとクラウド上に存在するソフト機能（通信 HUB 機能）と対向して使用することでキャリアアグリゲーションが可能となる。

尚、本検証で利用するデータ(電波特性や帯域データ)の取得にあたっては同じく Peplink 社が提供するルーター管理用サービスである InControl2 およびマルチ回線ルーターから直接 API 接続して取得する 2 通りがある。InControl2 を利用する場合、WEB 経由接続または直接マルチ回線ルーターと PC 間を LAN ケーブルで接続し、API でデータを取得する場合、直接マルチ回線ルーターと PC 間を LAN ケーブルで接続して 利用する。

6） Wi-Fi

通信事業者通信（キャリア無線）との冗長回線として Wi-Fi 通信も利用する。

（4） 必要性・緊急性・新規性

自動運転サービスの実装拡大、自動運転レベル４の実現・社会実装に向けた取組が求められる中、建造物の遮蔽または電波干渉により、局所的に電波が途切れたり、通信が不安定となるスポットが存在し、通信速度が低下することで映像が乱れる等の通信課題（自動運転事業視点）が発生している。自動運転サービスを早期に横展開するためには、通信事業者による基地局設置等の通信設備追加による対策だけでなく、既存技術・機能を活用した自動運転事業者でも実施可能な迅速かつ低コストで実施出来る対策が必要である。また、解決策となる技術だけなく、その技術を導入・運用するルールの構築・整備も求められるため、自動運転事業および自動運転レベル４の早期社会実装に向けて、本実証事業では効果的な手法を整理する必要がある。

従来の移動通信の品質改善は、移動通信事業者によって、新たな基地局の設置や、既存基地局の調整により行われてきた。これは、経済性の観点から、携帯ユーザーの使用頻度の高い場所で優先的に行われることが多く、人口カバー率という KPI に代表される、主にヒトの通信を確実に行う施策であった。一方、自動運転の通信においては、携帯ユーザーが密集する場所の地点、面カバーというよりも、自動運転車が走行する路線(ルート)の線的カバーおよび幹線道路だけでなく、生活道路においても車両が移動して途切れることなく安定した通信を確保することということが重要あると考えられる。しかし、通信事業者側で全てを対応するにはコストと時間を要してしまうため、それを待たずに自動運転事業者で対応可能な施策を考える。

自動運転レベル４の実現・社会実装が直近に差し迫っていることを考慮すると、自動運転事業者側で早急に通信品質を改善する手法の確立が急務であると考えられる。本実証実験は、通信事業者の移動通信ネットワーク環境に依存せず、自動運転事業者側で既存技術を複数組み合わせることで必要な通信品質の実現を目指す検証である。尚、本実証の手法は初の試みであり、手法、アプローチも整理し、今後の社会実装に向けた実用的な取組とし活用出来る内容としたい。

（5） 検証条件

以下の条件を満たす場所として、現在、自動運転バスが走行し、通信課題が存在しかつ実証可能な場所として境町を選定した

・自動運転事業を実施している箇所かつ通信課題が存在しているエリアであること

・上記エリアで自動運転バス事業への影響、効果を検証できること開発・評価項目

・自動運転事業者側での通信品質改善対策のため、複数の通信事業者の通信回線（基地局の設置場所が異なること）が利用できるエリアであること

（6） 開発・評価項目

・利用技術の技術検証（通信測定と効果検証）

　・ソフトウェア HUB の調整、設定（回線を束ねる処理、設定に関する調整）

　・API 接続でマルチ回線ルーターからデータ分析可能な形式に出力するプログラム

　・データ結合させ評価、分析するためのツール作成

・利用技術の組み合わせの最適解を導き出す手法・プロセス KGI/KPI

表 4-1 開発･評価項目一覧

項目	開発・評価項目
1	現状の通信環境の測定評価 自動運転サービスのルート上における各通信事業者(国内大通信会社 3 社)の品質を測定評価した。評価結果よりルート上における通信の特性を検討し、以降の検討に役立てた。 測定においては、各通信事業者において接続可能な周波数帯を網羅的に調査した。
2	周波数固定の検証 項目1で得られた各通信事業者で使用される周波数帯を元に周波数固定の検証を行った。
3	キャリアアグリゲーションの検証 キャリアアグリゲーション有無による効果検証を行う。同一通信事業者の SIM を2枚利用し、キャリアアグリゲーションの効果について評価する。ここでは、周波数固定は行わず、マルチ回線ルーターの仕様に則った評価となる。
4	マルチ回線とキャリアアグリゲーションの併用による検証 国内通信大手3社、3SIM を利用した通信品質の特性、効果について検証する
5	マルチ回線･キャリアアグリゲーション･周波数固定の併用による検証 項目 2,3,4 の検証を踏まえ、最適となる組合せを調査および確認し、通信品質の特性、効果について検証する。また、これまでのプロセスについても検討する
6	監視員視点(業務視点)での監視画面の評価、検証 境町で走行している、自動運転車両(ARMA)に今回の NW 機器一式を搭載し、番号5で導き出した NW 設定および監視映像のカメラ解像度、フレームレートを上げた環境で(カメラユニットの最大･最高値)、監視員による評価、検証を行う(現通信環境では4Mbps を維持するのが困難であり、それを概ね満たす通信環境が今回搭載した環境となる) 評価、検証は連続した3日間サービス車両として運行およびモニタリングを実施する。その環境において、監視員全員から個別ヒアリングによる評価、検証(今後想定されるレベル4での運用を各自想定してもらい、監視員自身による主観的な評価)
7	QoS 制御の検証(机上検討) 十分な帯域が確保できない状況において、QoS 機能を利用することで車両ステータスなど優先送信したいトラフィックが遅延、損失なく送信ができるかを検証する
8	Wi-Fi とキャリアアグリゲーションの併用による検証 通信事業者の通信と Wi-Fi 通信とのアグリゲーションの技術確認および使用可能な範囲(距離、条件)を確認し、通信事業者無線の輻輳時または弱電界エリアの対策としてどの程度有効な手段となるか検証する

1) 現状の通信環境の測定

自動運転サービスのルート上における各キャリアの通信状態、特性を把握することで通信環境の課題を明らかにする。そのため、以下の測定構成、測定内容および評価・分析を行う。

自動運転サービスのルート上における各通信事業者（国内大通信会社 3 社）の品質を測定評価した。評価結果よりルート上における通信の特性を把握し、以降の項目検討に役立てた。

尚、測定においては、各通信事業者において接続可能な周波数帯を網羅的に調査した。

a. 測定構成

測定に利用した機材（ハードウェア）を下表に示す。通信機器については、5.2 にて仕様等の詳細を示す。

表 4-2 測定に利用した機材(ハードウェア)一覧

機材	概要
ハイブリッドカー（レンタル）	NW 機器を搭載し、測定しながらルート（公道）を走行する。NW 機器の動作電源としても利用し、車両のシガーライターから DC/AC コンバーター経由で電力を確保した。必要に応じ市販の可搬型電源（ポータブルバッテリー）も使用。なお、安定的な電力確保ためハイブリッドカーを用いた。
マルチ回線ルーター	MAX-HD4-MBX-LTE。詳細は 5.2 にて説明する。
M2M 通信 SIM	大手通信事業社 3 社より購入（契約）し、マルチ回線ルーターに挿入して使用した。
カメラユニット	Axis Communications 社製 AXIS F44 Dual Audio Input Main Unit。詳細は 5.2 にて説明する。
カメラ	Axis Communication 社製 AXIS F1004 Sensor Unit 映像撮影カメラ。カメラユニットと接続して用いた。詳細は 5.2 にて説明する。
PC	Apple 社 13inch Macbook Air。マルチ回線ルーター、カメラユニットの制御およびデータ収集用。データ処理として WindowsOS 版のエクセルソフトが必要であったため、MacOS 上の仮想環境で WindowsOS を起動し使用した。詳細は 5.2 にて説明する。尚、PC は市販の WindowsPC でも対応可能。
タブレット端末	Apple 社 iPad。PC と同様の機能を有する。InControl2 アプリ経由で取得されるマルチ回線ルーター測定データのリアルタイムモニタ、保存データのダウンロードをするため使用した。尚、市販のタブレット端末でも対応可能。
DC/AC コンバーター	Meltec/大自工業 KI-150。車両のシガーソケットから 100V の AC 電源供給した。150W 以上であれば別な DC/AC コンバーターでも対応可能。

図 4-5 は表 4-2 の機器接続図である。マルチ回線ルーター、カメラユニット、カメラは LAN ケーブルにより接続し、マルチ回線ルーターとカメラユニットは車両から電源を確保した。

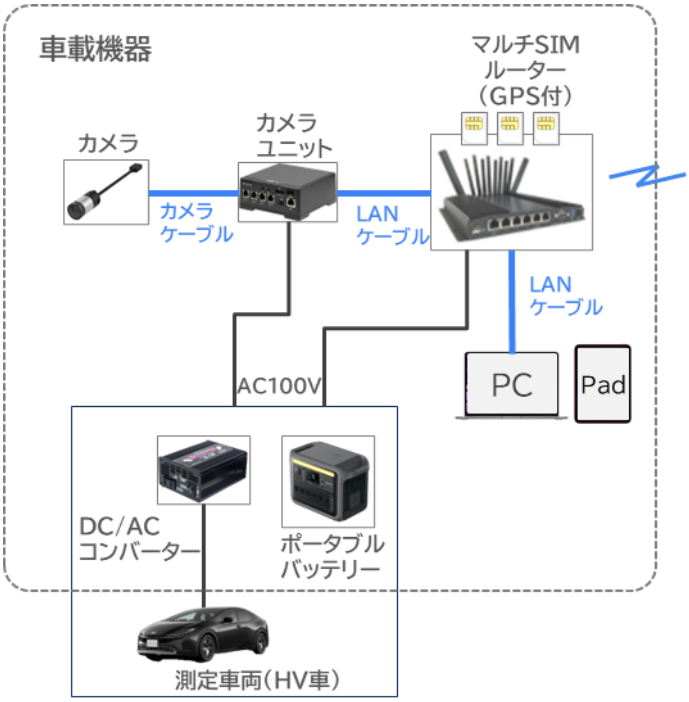


図 4-5 測定車両の機器配線図

測定に利用したソフトウェアを下表に示す。

表 4-3 測定に利用したソフトウェア一覧

ソフトウェア	概要
InControl2 (Peplink 社)	マルチ回線ルーターの設定、測定時のリアルタイムモニタおよび測定データの確認と CSV または PNG 形式でのデータダウンロード（WEB ブラウザーで操作)。
FusionHub (Peplink 社)	AWS 上の仮想サーバ上で動作するソフトウェア HUB 機能（WEB ブラウザーで操作)。
MicrosoftExcell (Microsoft 社)	データ分析用として、WindowsOS 版（MacOS 版非搭載の 3D マップ機能使用のため) ※ダウンロードしたデータは GoogleDrive で共有しデータ処理

（２）測定に利用した機能（S/W)

①FusionHub（Peplink 社製 ソフトウェア HUB　AWS 上の仮想サーバ上に構築)

②InControl2（クラウド経由の遠隔管理画面（WebAdmin 画面）で設定、データモニタおよびデータダウンロード（CSV または画面出力）が可能

※ソフトウェアはログイン ID＋PWD でアクセスして利用

※マルチ回線ルーター、ソフトウェア HUB の遠隔管理機能で設定確認、管理が可能

※CSV データは 10 秒単位のデータ、画面出力はリアルタイムモニタ出力される帯域データグラフの画面ファイルとして png 出力

（3）測定データ分析ツール

①Windows 版 Microsoft Excell ソフト（MacOS 版非搭載　3D マップ機能使用のため）

※データ分析・評価のために使用するグラフ、マップ表示のために使用

②API 接続によるデータ収集

※出力された CSV データは①エクセル形式に変換して処理

※API 接続して取得したデータと（2）-②で取得したデータは（2）-①のソフトで処理

※収集したデータは社内 GoogleDrive 上に格納

b. 測定条件

測定機器はマルチ回線ルーターのみ、マルチ回線ルーターが保持するデータを InControl2 経由および API 接続して収集した[2]。

表 4-4 測定条件

	測定条件
測定車両の車速	・レンタカー（HV 車）を用い手動運転 ・時速 20km/h～30km/h（手動運転のため、また道路事情により同一ルートであっても常に同じ速度とは限らない）
上り回線データ設定	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ①固定ビットレート（5Mbps のアップロードを維持するため、5Mbps でビットレートが固定するように加工した映像を PC からルーターに送信して使用。カメラからの映像は未使用） ②可変ビットレート（車載カメラ（車外映像）からの映像入力を使用。映像の変化量に応じ上りデータの速度が可変する。また、以下「カメラの設定」の値により、上りデータの速度（帯域）は可変する
カメラ	・PC 経由でカメラユニットの管理ソフトから設定 ①解像度 480x270、フレームレート 5fps（現行の設定） ②解像度 480x270、フレームレート 30fps（①の解像度でフレームレートは設定可能な最大値 30fps） ③解像度 1280x720、フレームレート 30fps（4Mbps 以上の通信速度となる設定。解像度、フレームレート共、設定可能な最大値）
マルチ回線ルーター	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ・SIM スロット毎に有効/無効の設定（使用/未使用）、周波数固定の設定 ①アグリゲーション無し ②アグリゲーション有り（SIM 選択の組み合わせ含む）

[2] 本実証で用いたマルチ SIM ルータ（MAX-HD4-MBX-LTE）起動後、SIM の回線接続、GPS 信号受信が開始し、測定できるようになるまで 10 分ほどを要する。そのため、測定前に確認が必要。

	③周波数固定無し ④周波数固定有り（各 SIM 毎、BAND 番号で指定）

（1）キャリアの電波受信状態を測定

①測定開始前に以下を確認しておく

・マルチ回線ルーターに測定する通信会社の SIM をセットし開通（InControl2 で SIM の設定状態がアクティブになっていること）していることを確認

・マルチ回線ルーターを起動して約 10 分後、下表の測定項目が全て取得出来ていること（測定系に不備が無いか確認。通信および GPS の緯度経度情報取得が安定するまで１０分程度要するため。SIM の帯域幅確認でデータ送受信の確認を行う）

②①で確認出来たら、ルートをレンタカーで走行し、InControl２の帯域幅画面または WAN 品質画面でリアルタイムにデータが測定出来ているか確認しながら測定する

③測定は測定ルート毎、ルート内容、測定開始終了時刻をメモしておく（データダウンロード時のデータ評価、分析しやすい様に記録しておく）

④固定ビットレート（５Mbps ）でルート上の伝送速度（帯域）を測定する

⑤取得したデータはその日のうちに CSV 出力し保存する（まとめてダウンロードすることで問題ない。尚、ping データは評価、分析に必要と思われる場合、リアルタイムにダウンロードして使用）

注意）今回、SIM の納入時期の都合により、早く入手出来た通信事業者 2 社の SIM を先行して実施し、3 社揃った段階で 3SIM での評価を実施した。

表 4-5 通信事業者3社での SIM スロット位置

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
３社 /3SIM	A 社	-	B 社	C 社

c. 測定データ

下表に測定項目を示す。InControl2 経由でマルチ回線ルーターで測定されたデータは CSV データ形式でルーターの時刻データと紐づき 10 秒単位の値で出力される。

ただし、上り・下りの伝送速度（帯域）は InControl2 経由では、時刻情報に紐づいた 1 分単位のスナップショット値が CSV 出力となるため、伝送速度のデータは API 接続して取得した。なぜならば、API 接続で取得出来るデータは時刻情報と紐づき、秒単位で出力可能であるため（ただし、その情報には位置情報は付与されない）。故に InControl2 で取得した位置情報と紐づいて表示させる場合は、10 秒単位の時刻情報とリンクさせて使用した（そのため、3D マップ表示する様な、位置情報とリンクさせた速度データは 10 秒毎の値のみ使用し表示させている）。

尚、位置情報との紐づけが不要な場合、例えば、アグリゲーション時の各 SIM の帯域使用の割合を時間軸上で確認する場合は API 経由で取得した 1 秒単位のデータを用いて表示し、特性の確認、評価を行った。

表 4-6 測定項目(今回使用する測定項目のみ表示 InControl2 経由)

測定項目	測定の方法、定義、単位等
時刻情報	yyyy/mm/dd/hh:mm:ss
位置情報	緯度経度（表示例：36.113888,139.802250）
Carrier	通信事業者名（表示例：SoftBank (JP)、NTT docomo (JP)、au (JP)）
Band	捕捉した周波数帯（表示例：LTE Band 28 (700 MHz)）
RSRP	単位：dBm ※ルーター（無線受信機）で測定された無線の受信レベル
Latency	単位：ms ※TCP 通信プロトコルにおける転送要求から応答を受信するまでの応答時間
通信速度	単位：kbps（表示例:2024-12-18 0:26,1,2 ; Minute,Download,Upload） ※測定された　上り、下りの 1 分毎のデータ速度（スナップショット値） 注）1 分単位でのスナップショット値であるため、本事象実験の評価ではこのデータは使用せず、API 接続して得られた速度データを利用した

※測定の時間粒度が 10 秒のため、それよりも短時間で生じる通信品質の変化は観測できない。

表 4-7(今回使用する測定項目 API 接続経由)

測定項目	測定の方法、定義、単位等
時刻情報	yyyy/mm/dd/hh:mm:ss
通信速度	単位：bps（各 SIM スロット毎およびアグリゲーション時は合計値） （表示例：2024/09/18,17:29:57,107.52,82.8,5276.952,5467.272 ; ;Date,Time,Cellular1,Cellular3,Cellular4,SUM）

①キャリア毎、以下の変化を時間軸で変化を確認し特性を把握する。また、RSRP の低下、Latency の悪化時、各値との関連性を確認

②上記①に緯度経度情報加え、ルート上の RSRP、Latency の変化を 3D マップで確認

※RSRP は-80dBm 以上、-100dBm 以下の 2 段階でルートの電波伝搬特性（面グラフ）を評価する（ルート上の RSRP の受信レベル変化の特性を把握）

※Latency は捕捉周波数と遅延量を見紐づけかつ変化（棒グラフ）の特性を評価する

③上記①、②に帯域データとの連携処理（時刻で値を連携させる）を行い、ルート上の帯域変化（上り映像の速度変化）を確認

④キャリア毎、ルート上の RSRP の特性、使用周波数帯、Latency 変化の特性、通信速度の特性を確認

⑤それぞれの特性を確認した上で、通信品質の低い状態、場所を確認した上で、通信品質改善につながる策を考える。また、再現性についても評価するため、複数回同じルートを測定して評価する。

d. 測定データの可視化方法

測定データの時間変化や地図に対応した変化を確認するために、時間を横軸としたグラフ表示と、地図上に測定データを表現するマップ表示の 2 つの可視化を行い、評価した。図 9-7 はグラフ表示、図 9-8 はマップ表示の例である。なお、マップ表示では、見やすさの観点から、一部の測定点のデータを抜粋して表示している。

■グラフ表示およびマップ表示の説明

グラフ表示、マップ表示の使用目的は、ルート上の通信品質の特徴を時間的および俯瞰的に把握し、マルチ SIM、キャリアアグリゲーション、周波数固定の効果評価・分析につなげるために用いる。また、データが正しく取得（測定）出来ているかの確認ツールとしても有効なデータ（表示方法）となる

グラフ表示は、時間的変化を把握するのに有効であり、マップ表示は時間的変化に加え、どのポイントでどの様な状況変化が発生しているか俯瞰的に確認するのに有効である。

マップ表示は位置情報が正しく取得出来ているかの確認、およびどの位置でどの様な状態となったかを把握するために使用する。そのため、通信の状況変化を地図上で全体俯瞰し、次の測定、評価・分析に繋ぐために有効なデータ、ツール、という意味で捉えていただきたい。

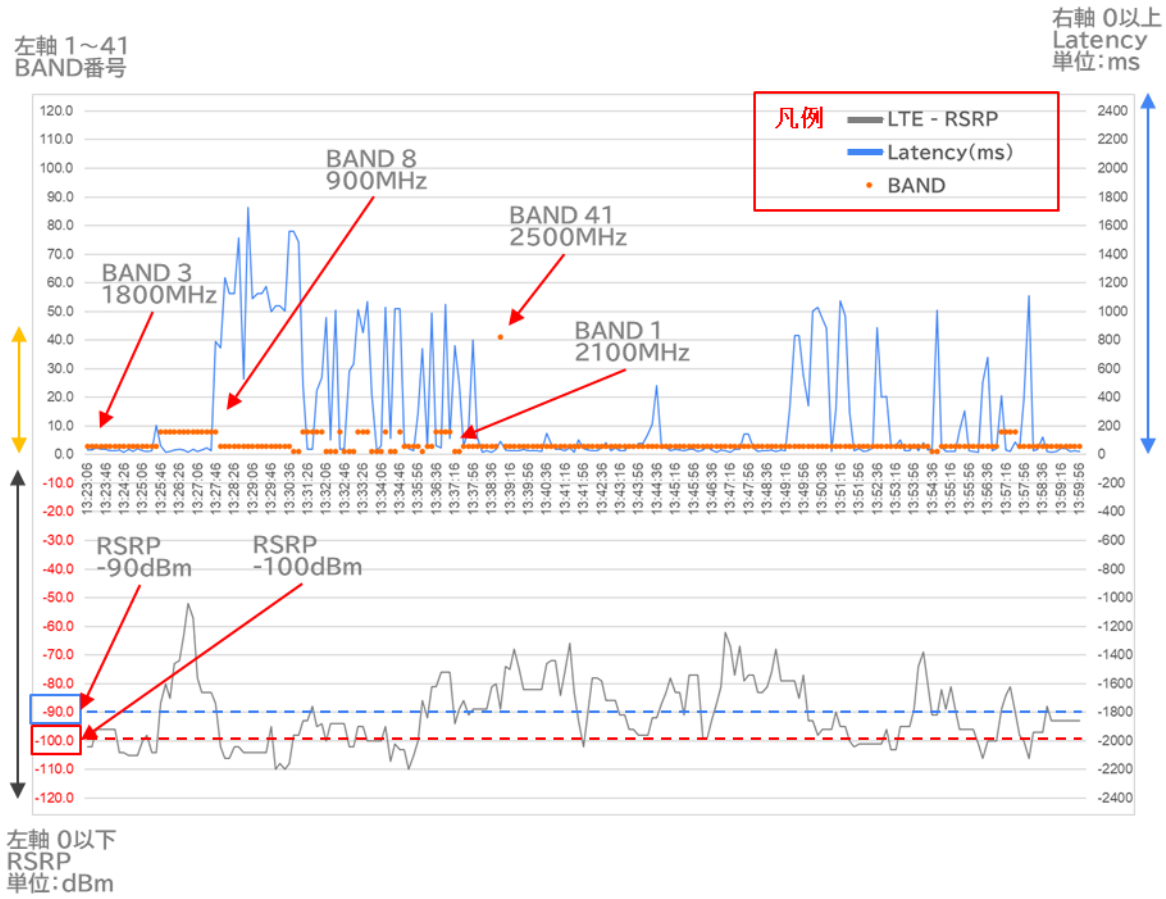


図 4-6 2 次元グラフ表示(例1)

マップ表示（例１）の円のサイズは通信速度を示している。Band ごと又は通信事業者ごとに配色することで、測定点における通信速度（実績）の割合を可視化できる。なお、この割合は当該地点の Band または通信事業者の通信品質の程度を厳密に比較するものではなく、マルチ SIM ルータの動作結果として得られる実績値であることに留意が必要である。

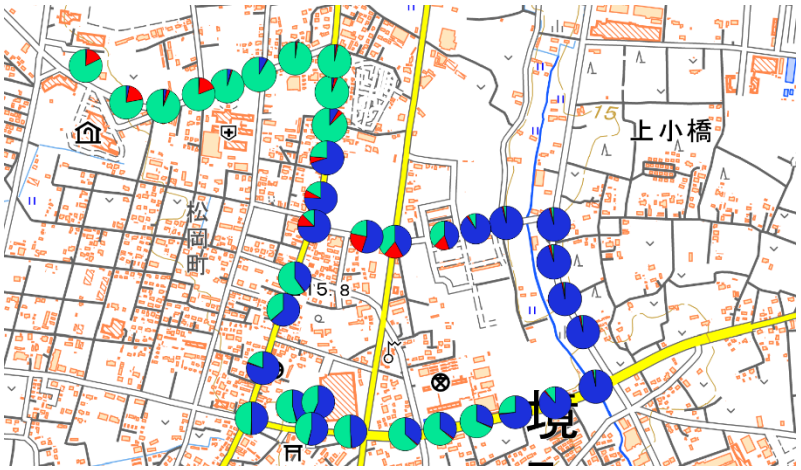


図 4-7 マップ表示(例1)

e. 現状の通信環境の測定評価

a～d で説明した手法を用いて走行ルート上の現状の通信環境を測定評価した。測定では、このエリアで通信事業者が使用している周波数帯の確認、各周波数帯の固定可否について、通信事業者、周波数帯などのパラメータを変化させ測定した。

この測定結果として以下を確認した。

①各通信事業者の通信品質

②周波数固定可能な周波数帯（BAND 番号）

2） 周波数固定の検証

周波数固定可能な周波数帯において、走行ルート上の通信環境を測定評価した。測定では、通信事業者、周波数帯などのパラメータを変化させ、「周波数固定無し」と「周波数固定有り」の組合せ、周波数固定同士の組合せ等、複数の組合せによる通信品質を測定した。

通信事業者ごとに境町の ODD において自動運転に適する周波数帯、組合せを確認した。

（１） 周波数固定の組み合わせにおける電波特性、通信品質の測定

（２） 通信事業者ごとに電波特性・通信品質の良いバンドを精査

表 4-8 周波数固定の組み合わせ検証

測定構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B1/2100MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B28/700MHz 固定
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B1/2100MHz 固定
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B18/850MHz 固定

注）SIM 調達時期の遅れにより、初めに既存の SIM を用い 2 社 4 SIM で検証し、3 社 SIM が揃った段階で 3 社検証を実施した。周波数固定の検証を進める中で、通信品質の効果がみられた周波数帯を主に組合せの検証を進めた（B 社　B3/1800MHz、C 社 B28/700MHz がその周波数帯）。

3)　キャリアアグリゲーションの検証

同一通信事業者の SIM を 2 枚使用し、2 回線を 1 回線に束ねた通信回線を構築し、走行ルート上の通信環境を測定評価した。

今回使用するマルチ回線ルーターは 4 つの SIM スロットがあり、SIM1 および SIM2 のスロットを使用して測定し、SIM1 枚と SIM2 枚のアグリゲーション有り、無しの効果、差異について比較、評価した。

表 4-9 キャリアアグリゲーションの検証（ルーターの SIM 挿入位置）

測定構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
1 社 /2SIM	A 社	A 社		

4)　マルチ回線とキャリアアグリゲーションの併用による検証

複数通信事業者の SIM を計 3 枚使用して 3 社 3 回線を 1 回線に束ねた通信回線を構築し、走行ルート上の通信環境を測定評価した。

今回使用するマルチ回線ルーターは 4 つの SIM スロットがあり、SIM1、SIM3、SIM4 のスロットを使用して測定し、マルチ回線でのアグリゲーションの効果について測定評価した。

表 4-10　マルチ回線とキャリアアグリゲーションの検証（ルーターの SIM 挿入位置）

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社	C 社

5)　マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の併用による検証

上記 4）「マルチ回線とキャリアアグリゲーションの併用による検証」と同じく、複数通信事業者の SIM を計 3 枚使用して 3 社 3 回線を 1 回線に束ねた通信回線を構築し、走行ルート上の通信環境を測定評価した。 4）との違いは、周波数固定の回線を束ねた構成での測定評価となる。

周波数固定の組み合わせパタンについては、各通信事業者単体での周波数固定の通信品質結果を鑑み、表 4-10 に示す組合せに絞り測定評価した。通信事業者ごとに境町の ODD において自動運転に適する周波数帯、組合せを確認した。

表 4-11　マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の検証

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B1/2100MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B28/700MHz 固定

3社 /3SIM	A社	-	B社 B3/1800MHz 固定	C社 B1/2100MHz 固定
3社 /3SIM	A社	-	B社 B3/1800MHz 固定	C社 B18/850MHz 固定

注）B社　B3/1800MHz 固定、C社 B28/700MHz 固定とし、周波数固定の有効性を確認する（B 社は B3/1800MHz 固定が、RSRP、Latency で auto より効果があると考えられたため、C社の固定周波数を可変して評価測定）

6）　監視員視点（業務視点）での監視画面の評価、検証

NW 機器一式を現在サービス運行している自動運転車両（ARMA）に搭載し、現行の通信環境と今回の実証で得られた最適な通信環境との比較を、現在業務で使用しているモニタリング画面（BOLDLY 社 Dispatcher）を介し、監視員の業務視点で実施した。評価は、監視員に通常通り業務を実施してもらい、業務終了時点に個別ヒアリングし、監視員による主観的評価を行った。

尚、NW 機器（ルーター）および車載カメラについては、機器の性能差を無くすため、実証実験で使用しているマルチ回線ルーターを同じ型番２台使用し（１台は現行の B 社 SIM,もう一台は３社３SIM での最適通信環境設定)、カメラおよびカメラユニットも同じ型番の機器を使い評価した。カメラの取付位置もほぼ２台同じ画角で比較できる様調整した上で実施した。

カメラ映像の設定は現行の設定①で確認し、次に②の設定に変えて監視業務を実施してもらい評価を行った。

①解像度 480x270、フレームレート 5fps（現行の設定）

②解像度 1280x720、フレームレート 30fps（4Mbps 以上の通信速度となる設定）

7）　QoS 制御の検証（机上検討）

自動運転車両の監視用映像と車両情報通信を同時に送信するにあたって。帯域が確保できない環境下にあった時に車両情報通信を優先送信する必要がある。優先送信のための仕組みとして QoS(Quality of Service)を利用できると考え、本検証を行なった。

■実験概要

検証用 PC(MacBook Air)上に

1.車両通信クライアント(車両通信を模した TCP 通信クライアント)

2.映像送信クライアント

の 2 つのデータ送信用クライアントを構築し、Peplink マルチ回線ルーターと有線 LAN で接続する。車両通信クライアントからは 500kbps の固定ビットレートで、映像送信クライアントからは 3.5Mbps の固定ビットレートでそれぞれの受信用サーバーにデータ送信を行う。それぞれのクライアントから送信されるパケットのヘッダには DSCP 値を設定する。ルーター上で上限 1.5Mbps の帯域制限をかけることで両方の送信用合計よりも低い帯域の環境を構築し、

その環境下でルーターの QoS 制御の有無による車両通信の使用帯域変化を計測する。QoS 制御が無効時には車両通信において必要な帯域が確保されておらず、有効時には確保されているかを確認することで、QoS が機能有効かを確認する。

■実験構成

1.ネットワーク環境:

それぞれのクライアントは Peplink ルーターに接続する。ルーター側で上限 1.5Mbps の帯域制限を設ける。

2.車両通信クライアント

・役割:

車両通信を模倣する TCP 通信を送信

・使用ツール:

iperf3 (https://iperf.fr/iperf-download.php)

・ツール説明:

ランダムな文字列バイナリを生成送信し、スループットを計測するソフトウェア

・データ送信:

iperf3 を使用して 500kbps の TCP 通信を送信。DSCP 値に EF(0xb8)を設定。

(コマンド: iperf3 -c <車両通信サーバーの IP アドレス> -p 23122 -b 0.5M -t 10 --tos 0xb8 -O 1)

以下の図 4-8 はネットワークパケットツールである tcpdump による本クライアントからの通信の一部を表示したものである。赤枠で囲まれた tos フィールドが DSCP の値を示しており、0xb8(EF)に設定されていることを示す。

図 4-8 車両通信クライアントからの送信パケットの tcpdump 結果

3.映像送信クライアント

・役割:

監視用映像配信を模倣する RTMP ストリームを送信

・使用ツール:

ffmpeg (https://www.ffmpeg.org/)

・ツール説明:

動画のストリーミングを行うソフトウェア。今回 RTMP ストリーミングを行う。

・データ送信:

ffmpeg を使用して 3.5Mbps の RTMP 配信を送信。DSCP 値に Default(0x00)を設定。

以下の図 4-9 は本クライアントからの通信を tcpdump によって一部表示したものである。tos フィールドが 0x00 になっており、DSCP 値が 0x00(Default)になっていることを示す。

```
17:03:45.715562 IP (tos 0x0, ttl 64, id 38403, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 2636)
    192.168.50.99.52426 > ec2-13-230-235-119.ap-northeast-1.compute.amazonaws.com.1935: Flags [P.], cksum 0xf6a7 (incorrect
k 16, win 492, options [nop,nop,TS val 620029910 ecr 571847513], length 2584
17:03:45.715571 IP (tos 0x0, ttl 252, id 28778, offset 0, flags [DF], proto TCP (6), length 52)
    ec2-13-230-235-119.ap-northeast-1.compute.amazonaws.com.1935 > 192.168.50.99.52426: Flags [.], cksum 0x3921 (correct),
,nop,TS val 571847537 ecr 620029416], length 0
```

図 4-9 映像送信クライアントからの送信パケットの tcpdump の結果

■実験条件

下記条件 A,B を設定した上で映像送信クライアントが映像送信を行なっていると同時に車両通信クライアントから TCP データ送信を 10 秒間行う。10 秒間のビットレートを iperf3 の通信受信側で計測する。

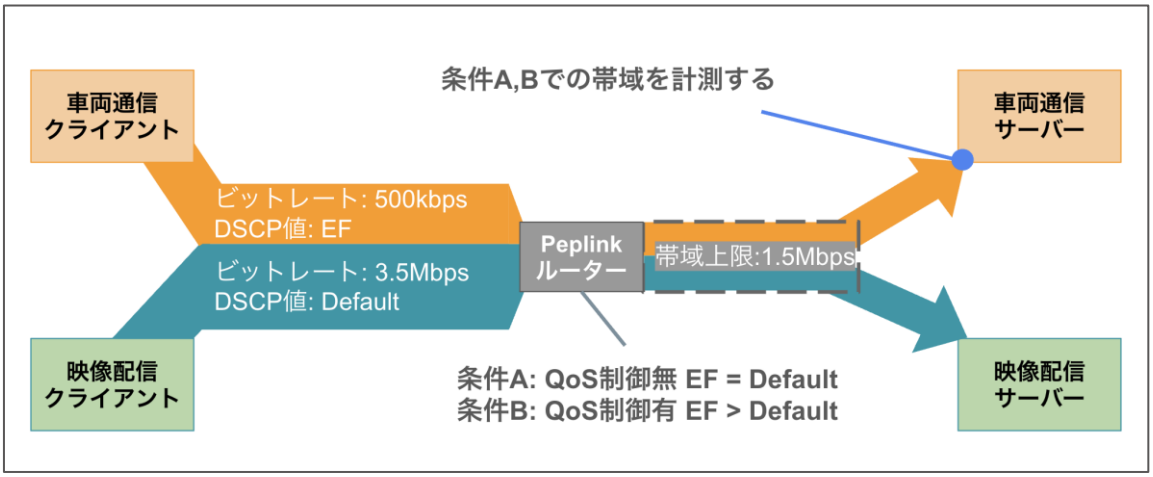


図 4-10 本実験の概要図

条件 A:

Peplink ルーター上で QoS 設定を適用せず、優先度をつけずにそれぞれが帯域を使用。

条件 B:

Peplink ルーター上で DSCP 値に基づいた QoS 設定を適用

車両通信 (TCP 通信) の DSCP 値を EF (Expedited Forwarding)に設定して優先度を高く設定

映像通信 (RTMP 送信) の DSCP 値は Default のまま設定。

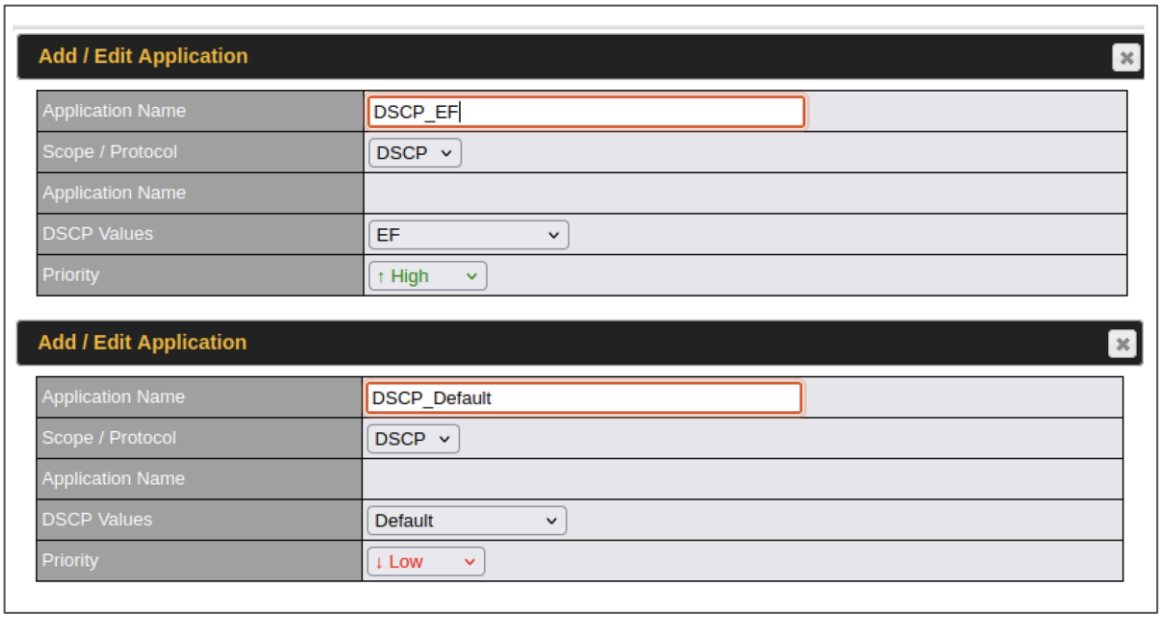


図 4-11 Peplink ルーターの QoS 設定

8） Wi-Fi とキャリアアグリゲーションの併用による検証

ARMA に搭載したマルチ回線ルーターで通信事業者無線（LTE）と Wi-Fi 無線とのアグリゲーション可能なことの確認および Wi-Fi 無線の使用可能な範囲（見通しで 4 Mbps 以上の通信が確保できる距離）を測定評価した。

Wi-Fi 通信の確認場所は Wi-Fi 用の有線回線が確保できるセネック本社とし、セネック本社敷地内および隣接する道路で測定した。

アグリゲーションの確認は、自動運転車両（ARMA）を用い、LTE 通信しているルート上（Wi-Fi 通信出来ないエリア）のエリアからセネック本社敷地に向け走行し、移動中 Wi-Fi 無線 LTE のアグリゲーションが出来ることを確認する。

Wi-Fi 無線の使用可能な見通し距離を確認する場合、現在の自動運転車両（ARMA）の走行許可範囲外のエリア（公道）となるため、Wi-Fi 無線の使用可能な範囲にの測定については、iPhone 端末のスピードテストアプリを用いて使用可能な見通し距離を求めた。測定ポイントは道路わきの歩道とし、測定ポイントに立ち、地面から約 1800mm の高さで 3 回連続でスピードテストによる測定を実施した。測定距離を伸ばしながら、Wi-Fi が途切れるまたは 4Mbps 未満となったポイントの手前の距離までを通信可能距離として計測した。

表 4-12 Wi-Fi アグリゲーション評価の機器･ソフト一覧

項目	型番・品名	備考
Wi-Fi ルーター親機	Buffalo WXR-11000XE12/N	屋内（セネック本社監視室）に設置し、セネック社有線 LAN に接続して使用
Wi-Fi ルーター子機	Buffalo WEX-5400AX6	屋外（セネック本社敷地内）に子

		機を設置し、親機と接続した子機から屋外端末向けに使用
Wi-Fi ルーター子機用電源	可搬型バッテリー	屋外に設置する子機用の電源として使用
測定端末	iPhone14	
測定アプリ	Internet Speed Test-5G 4G デベロッパ：VeeApps	

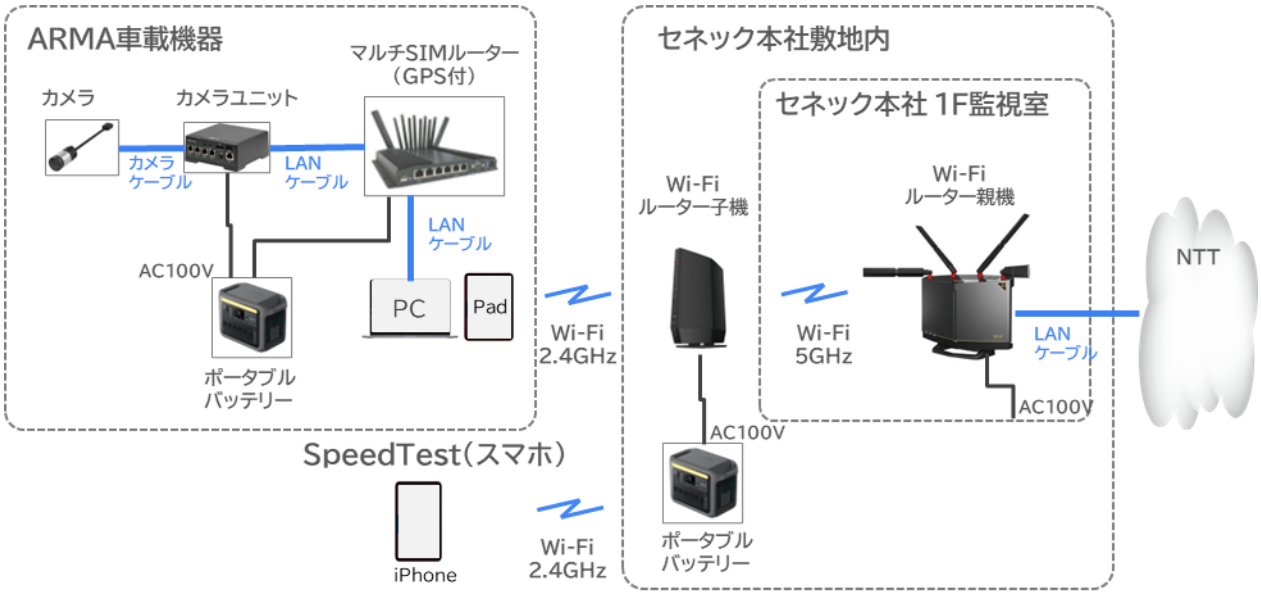


図 4-12　Wi-Fi 接続試験構成

（7） KGI/KPI

自動運転ルートにおいて、上り映像 4Mbps が維持出来ていること

表 4-13　KGI/KPI

定性評価/定量評価	番号	目標値
定性評価	1	変化する通信環境でも最適な通信状態を維持し自動運転システムの安定運用が図られていること
定量評価	2	自動運転ルートにおいて、上り映像 4Mbps が維持出来ていること

5. 実証システムの構成と構築

5.1 通信システムの構成

5.1.1 システム構成図

検証①における測定車両（レンタカー）における接続構成を下図に示す。赤枠で示した通信機器（マルチ回線ルーター）、カメラ等は本実証の検証機器である。車両に設置する検証機器は、車両から電源を確保し、それぞれ LAN ケーブルで接続する。また、機器の制御やデータ取得のために、PC も LAN ケーブルで優先接続した。一方、自動運転システム側ではクラウド（AWS）上にソフトウェア HUB を設置した。これにより、車両と自動運転システムの間で、キャリアアグリゲーション等の通信の設定が適応できる。

マルチ SIM やキャリアアグリゲーション等の通信の機能設定は、クラウドアプリによるソフトウェア HUB の設定で行う。通信機器の設定等は〇〇※を参照されたい。

※ソフトウェア HUB の設定方法についてウェブサイトなどを引用

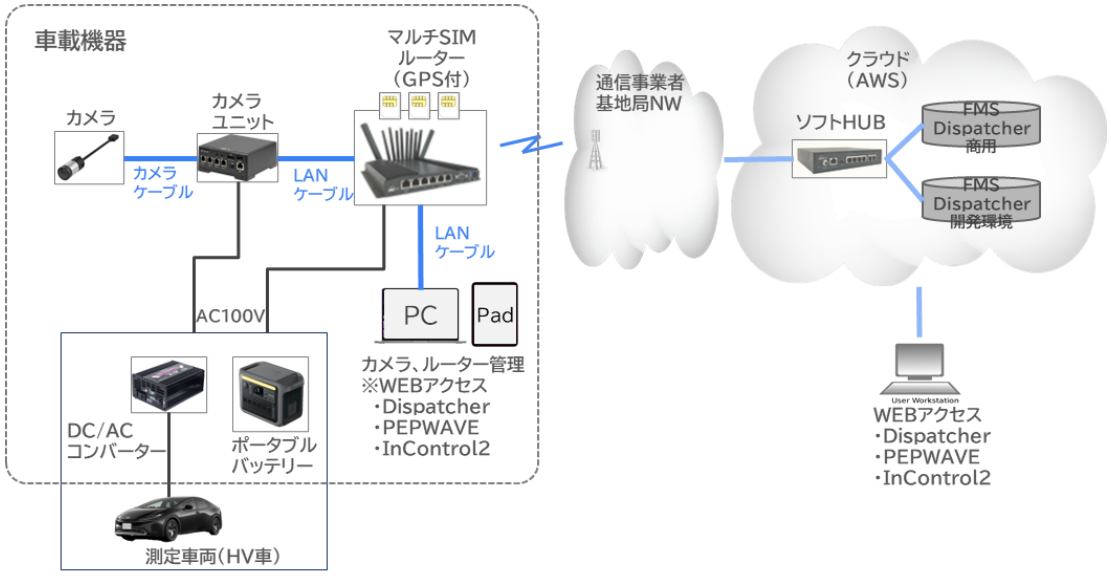


図 5-1 測定車両(レンタカー)における接続構成図

また、自動運転バス（NAVYA 社 ARMA）でのシステム構成図を下図に示す。基本的な構成は図 5-1 と同様であるが、測定車両（レンタカー）との違いは、1 SIM（現行想定）と 3 SIM の通信評価を行うため、同一ルーター（今回使用するマルチ回線ルーター）かつ同一カメラユニットを各 2 セット設置した点、および機器の電源を主にポータブルバッテリーとした点である。

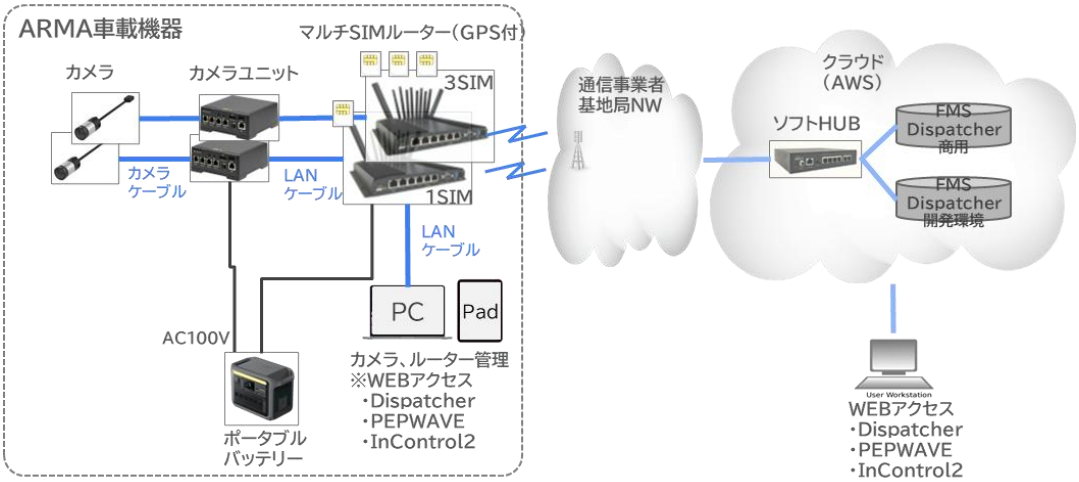


図 5-2　自動運転バス(ARMA)における接続構成図

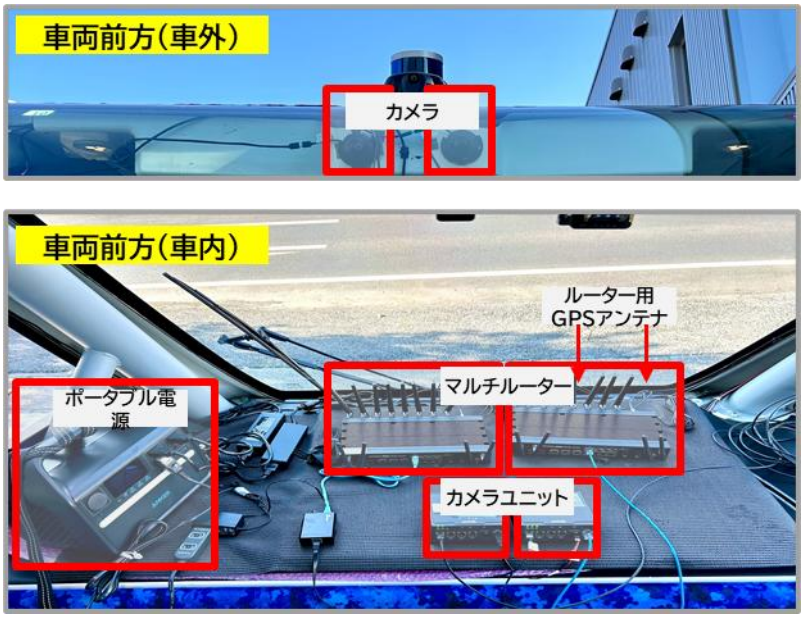


図 5-3　自動運転バス(ARM)の機器設置写真

新規車載機器

（1）マルチ回線ルーター（4 SIM 対応　MAX-HD4-MBX）※SIM は 3 キャリア

（2）カメラユニット（既存使用機器と同等の製品）

（3）カメラ（既存使用機器と同等の製品）

新規ネットワーク

ソフトウェア HUB　※クラウド上に構成（既存と同等の HUB）

測定車両

レンタカー（電源は車両電源を利用し、車両の電圧変動の影響を受けにくい HEV 車両選択）

既存の自動運転バス（NAVYA 社製 ARMA　電源は車両電源およびポータブル電源）

接続構成

接続構成図に示す通り、車内にカメラ、カメラユニットおよびマルチ回線ルーターを設置し、機器間を各々通信ケーブで接続する。カメラとカメラユニット間はカメラ付属の専用ケーブルでカメラユニットと接続し、カメラユニットとマルチ回線ルーター間は LAN ケーブル（RJ45 端子）で接続する。また、マルチ回線ルーターと PC との接続は直接マルチ回線ルーターと LAN ケーブル（RJ45 端子）で接続し使用する。測定に影響しない場合は、マルチ回線ルーターの Wi-Fi を介し WEB アクセス（マルチ回線ルーター専用の管理サイト）し、実証実験で使用する機器の設定、管理およびモニタも可能となる

LTE 送受信アンテナおよび Wi-Fi 送受信アンテナは機器付属の棒状アンテナを直接本体に取り付け、GPS はマルチ回線ルーター付属の GPS アンテナ（ケーブル付）を接続し、車内に固定して使用する。

機器の電源については、カメラユニット付属の 100V 電源アダプター経由で供給し、カメラおよびカメラユニット一式で作動する構成となる。マルチ回線ルーターは付属の 100V 電源アダプター経由で供給する。車内の 100V 電源については、

①車内のシガーライターから DC/AC コンバーターを介して 100V を供給する方法、

②直接車内の 100V 電源端子から供給する方法（HV 車）、

③ポータブル電源から供給する方法

があり、レンタカーでは主に①、②で供給し、自動運転車両（ARMA）は③で電源供給する。

車内に設置される機器については、車両走行時に機器の落下、ケーブル接続不良が発生しない様、滑り止めマット、固定バンドおよび養生テープを用い固定する。尚、車両内部に傷等の跡を残さぬ様、注意を払いながら設置および撤去（機器撤去する場合）を行う。

走行しながらの測定時、測定状況をリアルタイムに確認する場合は、同乗者の PC、Pad 端末より安全な状態を維持した上で実施する。

5.1.2　　ネットワーク構成

ネットワーク構成図を以下に示す

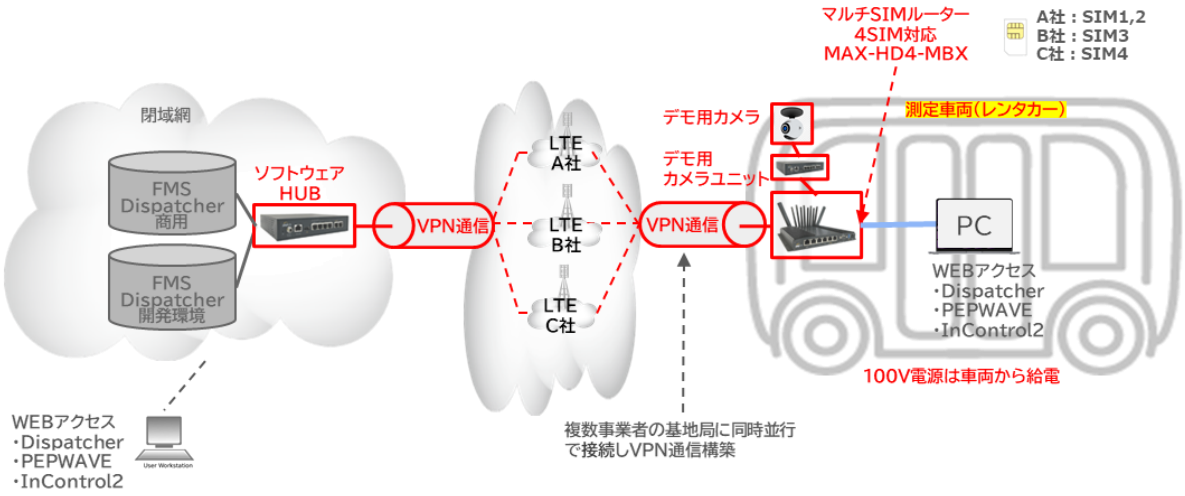


図 5-4　ネットワーク構成図

・マルチ回線ルーターはクラウド上のソフトウェアＨＵＢと接続（対向）され、通信路（ＶＰＮ）を確保

・ソフトウェアＨＵＢはＦＭＳ（ＢＯＬＤＬＹ社製Ｄｉｓｐａｔｃｈｅｒ）に接続され、車両から配信される映像をＦＭＳを介して確認することが可能

・測定車両を利用する場合は開発環境の FMS を介してカメラ映像を確認、商用自動運転バスを利用する場合は商用の FMS を介してカメラ映像を確認

ネットワーク接続構成

車内外部映像データは車載カメラからカメラユニット経由でマルチ回線ルーターに接続・送信され、各通信事業者の電波（LTE/各社と契約しているデータ SIM）を介してクラウド上のソフトウェア HUB に送信されます（クラウドは AWS 利用）。

マルチ回線ルーターとソフトウェア HUB 間は VPN 接続され、パケット単位で束ねられ（SpeedFusion：回線ボンディング機能）FMS※1 へ送信されます。尚、無線通信路となる各通信事業者の電波（周波数帯）およびアグリゲーション時の帯域割当といった電波の選択・切替アルゴリズムについてはマルチ回線ルーターの機能に依存します。

映像は、カメラユニットから出力されるリアルタイム映像、Dispatcher（FMS）へ配信されたリアルタイム映像および PC で録画された映像で確認出来る構成です。また、マルチ回線ルーターで測定された通信データ※2 はルーターアプリで出力される 10 秒単位のデータおよび API 接続して出力される 1 秒単位のデータがあり、それらのデータを用い評価※3 します。

使用する FMS については、レンタカーでの事前測定は BOLDLY 社 Dispatcher（開発環境））を使用し、現行自動運転バス走行時は Dispatcher（商用環境）を使用します。

※1：Fleet Management System：車両管理システム、今回は BOLDLY 社 Dispatcher を使用

※2：測定地点の緯度経度情報、測定時刻、受信レベル（RSRP)、キャリア毎の補足周波数帯

※3：API 出力データには緯度経度情報が含まれていないため、ルーターアプリ出力データとのデータの紐づけは時刻でマッチングして処理

5.2 使用機器およびソフトウェア

使用機器

（1） マルチ回線ルーター

製品仕様は下表の通り

製品型番	MAX-HD4-MBX-LTE
SpeedFusion	対応
Celluar WAN インターフェース	Quad LTE 通信モジュール
WAN インターフェース	RJ45 1G ×3 SIM スロット ×4(対応 SIM サイズ:標準 SIM) USB ×2
LAN インターフェース	RJ45 1G ×9
アンテナコネクタ	SMA Cellular ×8 SMA GPS ×1 RP-SMA ×4
通信方式	LTE-Advanced
キャリア領域	docomo / KDDI / SoftBank
4G 周波数/4G 対応バンド	B1/B2/B3/B4/B5/B7/B8/B9/B12/B13/B18/B19/B20/B26/B28/B29/B30/B41/B42/B43/B46/B48/B66
3G 周波数/3G 対応バンド	B1/B2/B4/B5/B6/B8/B9/B19
ルータースループット	2.5Gbps
SpeedFusion ルータースループット ※暗号化なし	600Mbps
SpeedFusion ルータースループット ※256bit AES	500Mbps
LTE-A データ通信速度	Downlink/Uplink Datarate: 600Mbps/150Mbps
Wi-Fi 規格	MIMO 2×2 802.11ac/a/b/g/n
フェイルオーバー	対応
ロードバランス	対応
利用推奨ユーザー数	50-500
入力電圧	12-56V DC
AC アダプタ	標準添付 100-240V AC
出力電力	802.3at ×8(PoE 出力) ※オプション対応
消費電力	最大 55W(PoE 未出力時)
寸法	292(W) × 177(D) × 50(H)mm
重量	2.2(kg)

温度	-40 ~ 65℃ ※添付 AC アダプタを除く
湿度	15 ~ 95% (結露なきこと)
保証期間	1 年間
認証規格	CE / FCC / RoHS / eMark / PTCRB EN61373: 1999 / IEC61373: 1999 EN61000 EN50155 JATE / TELEC
SpeedFusion Peers	2/20(ライセンス) ※エンド側の製品(Peplink 製デバイス)と接続できる数を示します
標準付属品	LTEA アンテナ ×8 Wifi アンテナ ×4 GPS アンテナ ×1 AC アダプター ×1

製品外観図

製品前面パネル（上）と背面パネル

図 5-5 マルチ回線ルーター MAX-HD4-MBX-LTE

（2）カメラユニット（AXIS）

製品型番	AXIS F44 Dual Audio Input Main Unit
製造会社	Axis Communication
ビデオ圧縮	H.264 (MPEG-4 Part 10/AVC)、Baseline、Main、High ProfileMotion JPEG
解像度	1920×1080 (1080p)a～480×270 1280×720～480×270
ワイドダイナミックレンジ	(WDR)WDR – Forensic Capture
フレームレート	1080p、WDR オフ時 : 最大12.5/15 フレーム/秒 (電源周波数 50/60Hz) 720p、WDR オン時 : 最大25/30 フレーム/秒 (電源周波数 50/60Hz) 720p、WDR オン時 : 最大12.5/15 フレーム/秒 (電源周波数 50/60Hz)
ネットワークプロトコル	IPv4、IPv6 USGv6、HTTP、HTTP/2、HTTPSb、SSL/TLSb、 QoS Layer 3 DiffServ、FTP、SFTP、CIFS/SMB、SMTP、 Bonjour、UPnPTM、SNMPv1/v2c/v3 (MIB-II)、DNS、 DynDNS、NTP、RTSP、RTP、TCP、UDP、IGMPv1/v2/v3、 RTCP、ICMP、DHCPv4/v6、ARP、SOCKS、SSH、LLDP、 MQTT、Syslog

図 5-6　AXIS カメラユニット F44 Dual Audio Input Main Unit 外観

（3）カメラ（AXIS）

製品型番	AXIS F1004 Sensor Unit
製造会社	Axis Communication
撮像素子	1/4”（有効）プログレッシブスキャン RGB CMOS
レンズ	固定アイリス 2.1 mm、F2.2 水平画角: 102° 垂直画角: 56°
解像度	最大1280×720
ワイドダイナミックレンジ	(WDR)WDR – Forensic Capture
最低照度	カラー: 0.4 ルクス
シャッタースピード	1/24500 秒～1/6 秒
フレームレート	最大25/30 フレーム/秒（50/60 Hz）

図 5-7 カメラ F1004 Sensor Unit 外観

（4）ネットワーク機能

製品型番	FusionHub
製造会社	Peplink
デプロイメント	AWS 上の仮想サーバー(EC2)として構築
インスタンスタイプ	t3.nano
AMI 名	Peplink FusionHub 8.0.2s127 build 1682-4ac7607f-749d-41a9-b524-a7db53f77112-ami-0098c6e7b556afbc2.4
CPU	vCPU2 コア

OS	AmazonLinux

（5）Wi-Fi ルーター

BUFFALO 製　WXR-11000XE12/N（親機）の仕様は以下の通り

製品名	WXR-11000XE12	
無線 LAN インターフェース	伝送方式	CCK、DSSS、OFDM、OFDMA、MIMO
	周波数範囲（チャンネル）	6GHz： 191～283ch（5955～6415MHz） 5GHz： W52　36/40/44/48ch（5180～5240MHz） W53　52/56/60/64ch（5260～5320MHz） W56　100/104/108/112/116/120/124/128/132/136/140ch（5500～5700MHz） W56（新電波法対応）　144ch（5720MHz） 2.4GHz： 1～13ch（2412～2472MHz） ※電波法により 6GHz/W52/53 は屋外使用禁止です。（法令により許可された場合を除く）
	準拠規格（最大転送速度）	6GHz： IEEE 802.11ax:4803Mbps（160MHz 4x4） IEEE 802.11a:54Mbps 5GHz： IEEE 802.11ax:4803Mbps（160MHz 4x4） IEEE 802.11ac:3466Mbps（160MHz 4x4） IEEE 802.11n: 600Mbps（40MHz 4x4） IEEE 802.11a: 54Mbps 2.4GHz： IEEE 802.11ax: 1147Mbps（40MHz 4x4） IEEE 802.11n : 600Mbps（40MHz 4x4） IEEE 802.11g : 54Mbps IEEE 802.11b : 11Mbps ※表示の数値は理論上の最大値であり、実際の転送速度を示すものではありません。
	セキュリティー	WPA3 Personal WPA2 Personal WPA/WPA2 Personal WPA2/WPA3 Personal WEP（128-bit / 64-bit） Any 接続拒否 プライバシーセパレーター MAC アクセス制限（最大登録許可台数：64 台）
	アンテナ	外部アンテナ： 6GHz：4 本 5GHz：4 本 2.4GHz：4 本 （うち、5GHz/2.4GHz 共通：4 本、6GHz 専用：4 本）
	アクセスモード	インフラストラクチャーモード、中継機能

有線 LAN インターフェース	伝送速度	LAN ポート: 10G/5G/2.5G/1G/100Mbps×1(AUTO-MDIX) 1G/100M/10Mbps×3(AUTO-MDIX) INTERNET ポート: 10G/5G/2.5G/1G/100Mbps×1(AUTO-MDIX) ※半二重通信(Half-Duplex)には対応しておりません。
	端子形状	RJ-45 型 8 極
	WAN 側 IP 取得方法	手動 / DHCP / PPPoE / DHCPv6-PD / IPv6(IPoE/IPv4 over IPv6)※
	セキュリティー	ステートフルパケットインスペクション(SPI)、パケットフィルタリング、VPN マルチパススルー(PPTP)
	その他機能	回線自動判別切替機能
USB インターフェース	インターフェース	USB 3.2 (Gen1)
	端子形状	USB Type-A×1 ※初期設定は USB 2.0(Web 設定画面より USB 3.2(Gen1)に切り替え可能)
ネット脅威ブロッカー	ネット脅威ブロッカー2 プレミアム	
電源	AC100V 50/60Hz	
消費電力	43.0W(最大)	
外形寸法(幅×高さ×奥行)	300×195×75mm　※本体のみ(アンテナおよび突起部除く)	
質量	約 1515g　※本体のみ	
動作保証環境	温度　0～40℃　湿度　10～85%	
保証期間	1 年間	
RoHS 基準値	準拠	
VCCI 適合	VCCI Class B	

BUFFALO 製　WEX-5400AX6（子機）の仕様は以下の通り

製品名	WEX-5400AX6	
無線 LAN インターフェース	伝送方式	CCK、DSSS、OFDM、OFDMA、MIMO
	周波数範囲(チャンネル)	5GHz: W52　36/40/44/48ch(5180～5240MHz) W53　52/56/60/64ch(5260～5320MHz) W56　100/104/108/112/116/120/124/128/132/136/140ch(5500～5700MHz) W56(新電波法対応)　144ch(5720MHz) 2.4GHz: 1～13ch(2412～2472MHz) ※電波法により W52/53 は屋外使用禁止です。

	準拠規格(最大転送速度)	5GHz: IEEE 802.11ax:4803Mbps (160MHz 4x4) IEEE 802.11ac:3466Mbps (160MHz 4x4) IEEE 802.11n:600Mbps (40MHz 4x4) IEEE 802.11a:54Mbps 2.4GHz: IEEE 802.11ax:573Mbps (40MHz 2x2) IEEE 802.11n:300Mbps (40MHz 2x2) IEEE 802.11g:54Mbps IEEE 802.11b:11Mbps
	セキュリティー	OPEN WPA WPA/WPA2-mixed WPA2 WPA2/WPA3 WPA3 Any 接続拒否 プライバシーセパレーター MAC アクセス制限 (最大登録許可台数:64 台)
	アンテナ	内蔵アンテナ 5GHz:4 本 2.4GHz:2 本
	アクセスモード	インフラストラクチャーモード、中継機能
有線 LAN インターフェース	規格	IEEE802.3ab(1000BASE-T)、IEEE802.3u(100BASE-TX)、IEEE802.3(10BASE-T)
	対応プロトコル	TCP/IP
	伝送路符号化方式	8B1Q4/PAM5(1000BASE-T)、4B5B/MLT-3(100BASE-TX)、マンチェスターコーディング(10BASE-T)
	アクセス方式	CSMA/CD
	端子数	5(AUTO-MDIX 対応)
	データ転送速度	1000/100/10Mbps×5(自動認識)
	端子形状	RJ-45
電源	AC100V 50/60Hz	
最大消費電力	14.6W	
外形寸法(幅×高さ×奥行)	59×177×175mm　※本体のみ(突起部除く)	
質量	約 650g　※本体のみ	
動作保証環境	温度　0～40℃ 湿度　10～85%	
保証期間	1 年間	
VCCI 適合	VCCI Class B	

WXR-11000XE12/N（親機）　　WEX-5400AX6（子機）

図 5-8　BUFFALO 製　Wi-Fi ルーター

(7)データ取得・QoS 検証用ラップトップ

モデル	MacBook Air 13inch M2 2022
CPU	Apple M2 チップ 8 コア CPU
メモリ	16GB ユニファイドメモリ
ストレージ	1TB SSD
GPU	Apple M2 チップ 8 コア GPU
OS	MacOS 13.4

図 5-9 MacBook Air 13inch M2 2022 の外観

(8)ソフトウェア

(1)映像配信用ソフトウェア

ソフトウェア名	ffmpeg
配信元	https://www.ffmpeg.org/
用途	固定ビットレートでの映像配信、また QoS 検証での映像配信のため利用
使用場所	QoS 検証用ラップトップ

(2)TCP 通信計測ソフトウェア

ソフトウェア名	Iperf3
配信元	https://iperf.fr/iperf-download.php
用途	QoS 検証において、TCP 通信のスループットの計測のため利用
使用場所	QoS 検証用ラップトップ

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

（1）レンタカーを用いた測定について

・夏場、エアコン作動しながら車両から電源を確保する場合、セルモーター作動時に電圧降下が発生し、通信機器の電源断が発生する

対策：HEV 車両は安定して電源確保できる

・夏場、車両ダッシュボード付近に測定デバイス（Pad 等）を設置すると、「高温注意」アラート※が表示され使えなくなる。※デバイス内部の温度が正常値を越えた場合

対策：ダッシュボード付近には測定端末を設置しない。ルーターはダッシュボードに設置しているため、アルミホイル等で直射日光が当たらない様工夫

・緯度経度情報が取得されているか、測定毎　データたチェックをする必要がある（レンタカー利用の場合、都度、機器の設置を行うため、コネクタの接続不良等、不具合が無いか確認した上で次の測定項目に移る必要がある

・レンタカーを入れ替えながら測定する場合、機器の設置、取り外しが必要となり、また車両を同じ車種で確保出来なかったため、設置位置、NW 機器・カメラの固定方法、ケーブルの引き回しを工夫する必要があった。また、入替によるアンテナ接続部のねじゆるみが発生するため、ねじのゆるみ、ケーブルコネクタ部の損傷有無について確認しながら対応が必要となる。

・自動運転バスの速度が最大 20km/h であり、20km/h 以下で一般車両を公道で走行するには他車交通の妨げにならぬ様、途中路肩に停車しながら車両通行の流れに注意を払う必要がある（生活道路でも 30km/h 以上で走行する車両が殆ど)。また生活道路は人、自転車の通行もあり、予期せぬ通行が発生することから、運転者と測定車は人を分け２人以上で十分注意しながら測定する必要がある。

例 1)日よけシェード使用(車内)

例 2)アルミ箔使用(車内)

例 2)アルミ箔使用(車外から)

図 5-10 真夏の日よけ対策(対策例)

図 5-11 レンタカーでの測定環境(昼間、夜間)

（２） ARMA（自動運転バス）を用いた測定について

・測用車両は存在せず、現用車両を用いて測定する必要がある。そのため、予備車両を使用する場合であっても、実運用車の突発的な不具合による入替、別案件でのデモ対応等で測定用として車両および運用者の稼働を予定通り確保するのが難しい場合がある（サービス優先した対応が必要なため）

・測定時、測定用カメラおよび NW 機器の入替え・設置、システムの接続変更が必要となるため、サービス車両に影響が無いよう、測定用機器の設置、撤去時およびシステム変更には十分注意して対応する必要がある。

・警察より、公道走行承認が得られているルートしか走行出来ないという制約があり、その範囲内でした測定が出来ない点は注意が必要。

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

(1) 開発・評価項目の結果

表 6-1 に示した項目について評価結果を項目ごと示す。

表 6-1 開発･評価項目一覧

項目	開発・評価項目
1	現状の通信環境の測定評価。
2	周波数固定の検証
3	キャリアアグリゲーションの検証
4	マルチ回線とキャリアアグリゲーションの併用による検証
5	マルチ回線･キャリアアグリゲーション･周波数固定の併用による検証
6	監視員視点(業務視点)での監視画面の評価、検証
7	QoS 制御の検証(机上検討)
8	Wi-Fi とキャリアアグリゲーションの併用による検証

1) 現状の通信環境の測定

現状の通信環境の表かとして、走行ルート上の通信品質を時系列データで示す。図 6-1 は通信事業者 A（以下、A 社）測定結果を示しており、グラフの上半分が Latency と接続するバンド（周波数帯)、下半分が RSRP の測定結果を示している。当該地域はハンドオーバ（H/O）の発生頻度も高く、Latency はルート上測定プロットの 12.3%が 1000ms 以上の遅延、最大遅延 1729ms となっている。

※1 ：ルート上捕捉された周波数帯とその割合

B3/1800MHz : 76.5%、B8/900MHz : 14.7%、B1/2100MHz : 8.3%、B412500MHz:0.5%

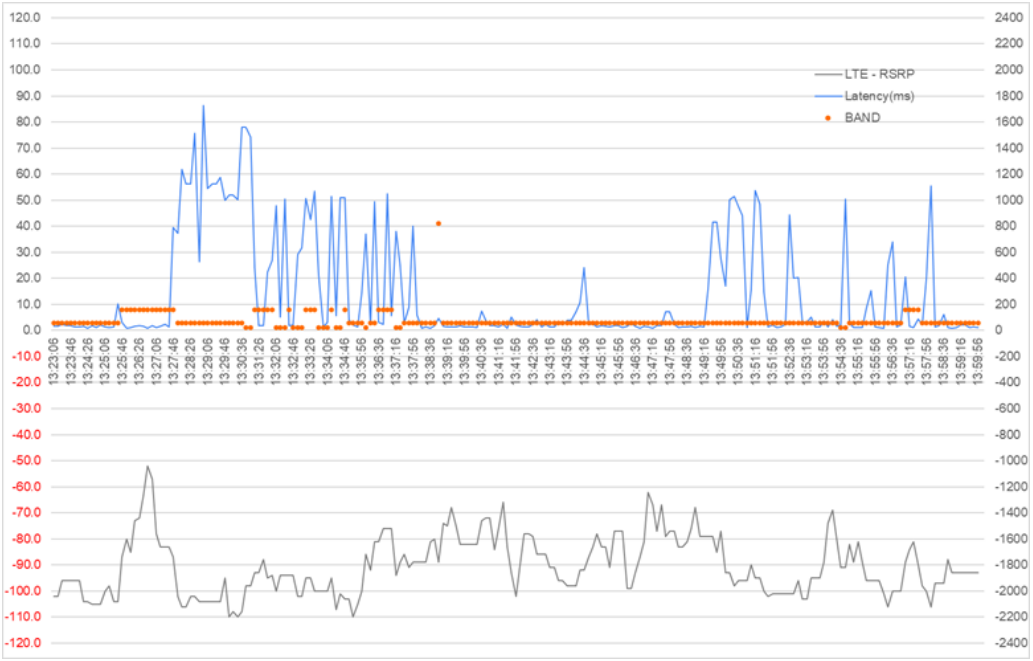


図 6-1　A 社 SIM　ルート上の電波伝搬特性グラフ

図 6-2 は通信事業者 B（以下、B 社）の測定結果を示している。おおむね 2 つの周波数帯※2 が当該地域をカバーしており、RSRP はおおむね-90dBm 以上であることが確認‘’出来る。Latency はルート上測定ポイントの 2.3%が 1000ms 以上の遅延、最大遅延 1814ms となっている。B 社はプラチナバンド B19（850MHz）をより多く捕捉し、H/O が少ないことが通信品質が維持できている要因と考えられる。

※2：ルート上捕捉された周波数帯とその割合

B3/1800MHz： 39.6%、B19/850MHz : 60.4%

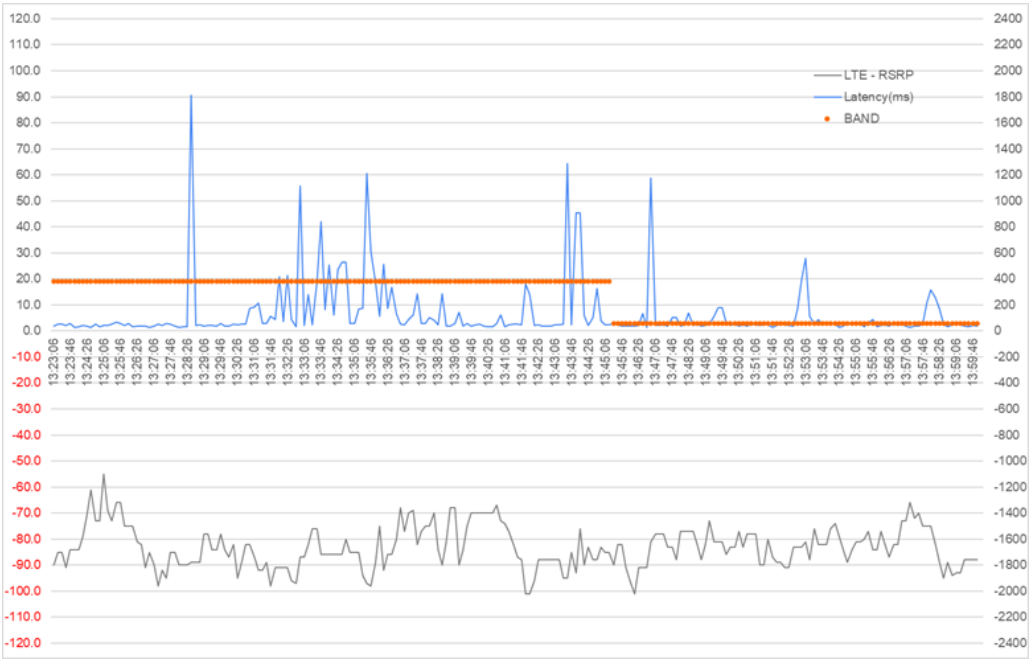


図 6-2　B 社 SIM　ルート上の電波伝搬特性グラフ

図 6-3 は通信事業者 C（以下、C 社）の測定結果を示している。C 社は 5 つの周波数帯※3 が当該地域をカバーしている。Latency はルート上測定ポイントの 3.6%が 1000ms 以上の遅延、最大遅延 1952ms となっている。C 社はプラチナバンド B28（700MHz）、B18(850MHz)を捕捉した場合は通信通信品質が高く維持出来ているが、B41（2.5GHz）の高い周波数帯を捕捉する場合は通信品質が低下する傾向がある。また H/O も頻繁に行われている（B 社との比較）のも特徴の一つ。

※3：ルート上捕捉された周波数帯とその割合

B1/2100MHz：39.4%、B41/2500MHz：30.8%、B18/850MHz：23.1%、B3/1800MHz：4.1%、B28/700MHz：2.7%

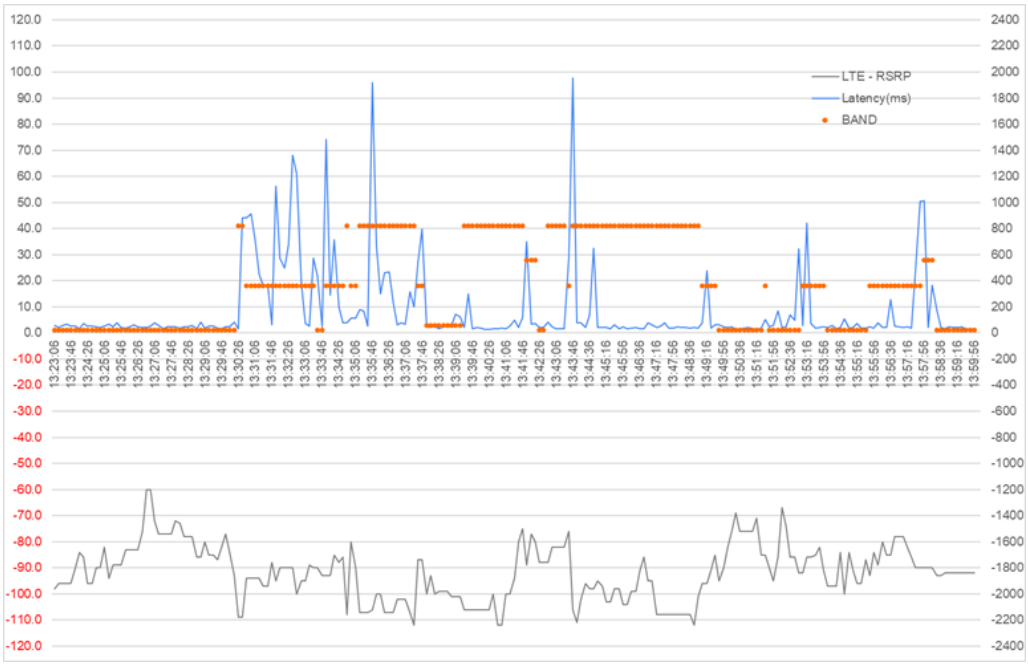


図 6-3　C 社 SIM　ルート上の電波伝搬特性グラフ

2）　周波数固定の検証

a.　評価・分析の概要

下表の内容で日時を分散しながら実施した。SIM の納期が異なったため、準備出来た A 社および B 社の 2 社の SIM で測定検証を実施し、その結果を踏まえ、3 社 SIM での測定を行った。

周波数固定可能な周波数帯において、走行ルート上の通信環境を測定評価した。測定では、通信事業者、周波数帯などのパラメータを変化させ、周波数固定無しと周波数固定の組合せ、周波数固定同士の組合せ等、複数の組合せによる通信品質測定を実施した。

通信事業者ごとに境町の ODD において自動運転に適する周波数帯、組合せを確認した。

（1）　周波数固定の組み合わせにおける電波特性、通信品質の測定

（2） 通信事業者ごとに電波特性・通信品質の良いバンドを精査

表 6-2 確認試験内容

番号	測定構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット	特記事項
1	2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 auto	ルート上補足しやすい電波を中心に周波数を固定し測定。A 社と B 社で発射している B3/1800MHz 固定にすると、Latency の量、発生頻度が1より増加。2 社間同士影響があると考えられる（電波干渉の可能性あり）
2	2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社2SIM とも B3/1800MHz 固定しても Latency 量、発生頻度は増加せず
3	2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	C 社の SIM4 のみ固定周波数を変更すると、SIM1,2 の Latency 量、発生頻度が増加し、他社への影響があると思われる（電波干渉の可能性あり）
4	2 社 /4SIM	A 社 auto	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B1/2100MHz 固定	Latency の量、発生頻度が増加かつ SIM3,4 は捕捉周波数が 3～4 と増加し H/O 切替も増加している（原因不明）
5	2 社 /4SIM	A 社 auto	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	1 と比較し、Latency の量、発生頻度が増加かつ SIM3,4 は捕捉周波数が 3～4 と増加し H/O 切替も増加している（原因不明）
6	3 社 /3SIM	A 社 auto	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 auto	B 社 auto の電波特性が他 2 社より良く、かつ B 社 B3/1800MHz 固定が auto より改善したことから、この設定で他社への影響について確認
7	3 社 /3SIM	A 社 auto	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B28/700MHz 固定	番号6との比較、C 社 B28/700MHz 固定で C 社の電波特性が非常に向上
8	3 社 /3SIM	A 社 auto	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B1/2100MHz 固定	番号 6 との比較、C 社の電波特性は番号 7 より悪化
9	3 社 /3SIM	A 社 auto	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B18/850MHz 固定	番号8との比較、C 社の電波特性は改善されたが、番号6の特性には及ばず

注）B 社 B3/1800MHz 固定、C 社 B28/700MHz 固定とし、周波数固定の有効性を確認する（B 社は B3/1800MHz 固定が、RSRP、Latency で auto より効果があると考えられたため、C 社の固定周波数を可変して評価測定）

表 6-3 周波数固定を検証したバンド

通信事業者	周波数固定を検証したバンド
A 社	B1(2100MHz)、B31800MHz)、B8(900MHz)
B 社	B1(2100MHz)、B3(1800MHz)、B28(700MHz)
C 社	B1(2100MHz)、B18(850MHz)、B28(700MHz)

注)A 社 B41(2.5GHz)、B 社 B8(900MHz)、B 社 B42(3.5GHz)は固定出来ず

b. 結果概要

周波数固定を実施することで受信レベル（RSRP）、遅延時間（Latency）が大幅に改善され、ルート上安定した通信環境を確保することが出来きる場合と、逆に組合せにより電波干渉と思わ

れる影響（遅延時間の悪化）が発生する場合を確認した。

特に B 社 Band3/1800MHz 固定、C 社 Band28/700MHz 固定が受信レベル（RSRP）の改善、遅延時間（Latency）の改善につながることが確認出来た。5Mbps 固定ビットレートにおける測定においても、C 社 Band28/700MHz 固定により安定した通信速度も確認された。

今回走行した自動運転バスルートの様に、周波数固定が通信環境改善に向けた一つの技術要素となりえると考えられる場合もあれば、周波数固定の組み合わせにおいて悪影響を及ぼす場合もあることから、十分調査をした上で周波数固定を活用する必要がある。また、全国社会実装する上では、エリア設計等の周波数利用の観点から、通信事業者含め協議しながら実装する必要性があると考えられる。

一般的に電波伝搬の性質が良好と知られるプラチナバンド（700MHz～900MHz）に固定することで局所的に電波強度や通信速度が低下する地点を減らすことができると考えられる。ただし、全国各地で同様な効果が得られるか否かは、各通信事業者の置局、エリアの電波特性を鑑み判断する必要があり、自動運転車の走行ルート上の環境を十分調査、比較した上で判断することが必要である。

c. 結果（一例）

図 6-4 と図 6-5 は A 社において Band８、Band３にて周波数固定した時の測定結果である。Band８のレイテンシが Band３と比較して小さく、遅延の少ない接続が維持できることが確認できた。

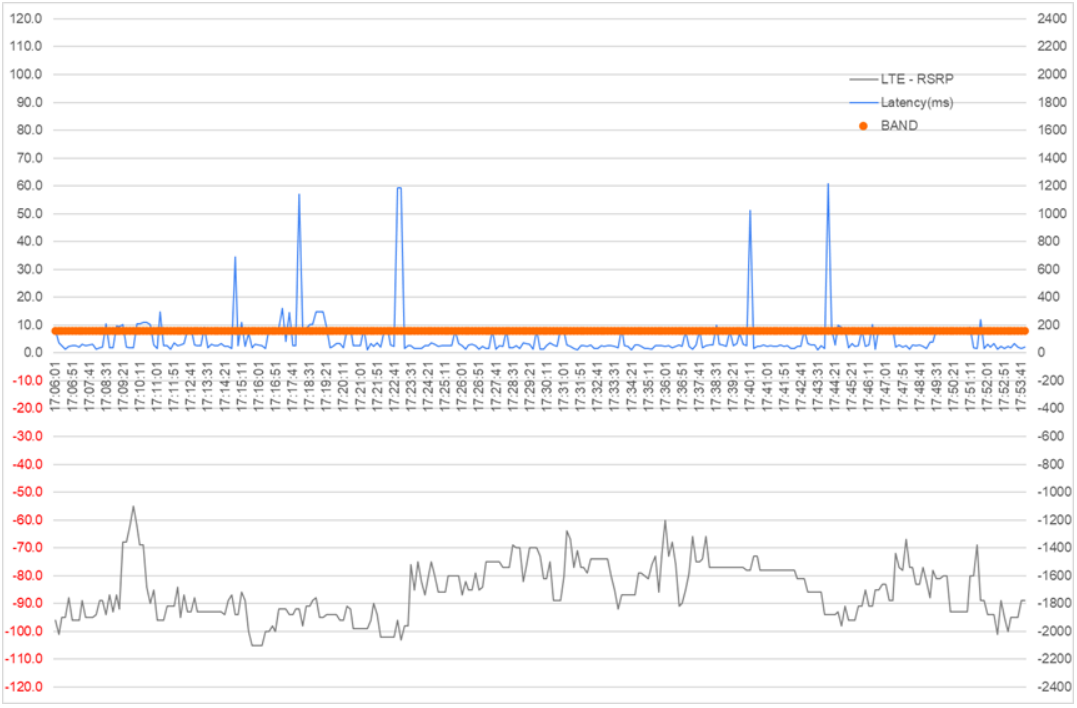


図 6-4　A 社 Band 8 (900 MHz)固定

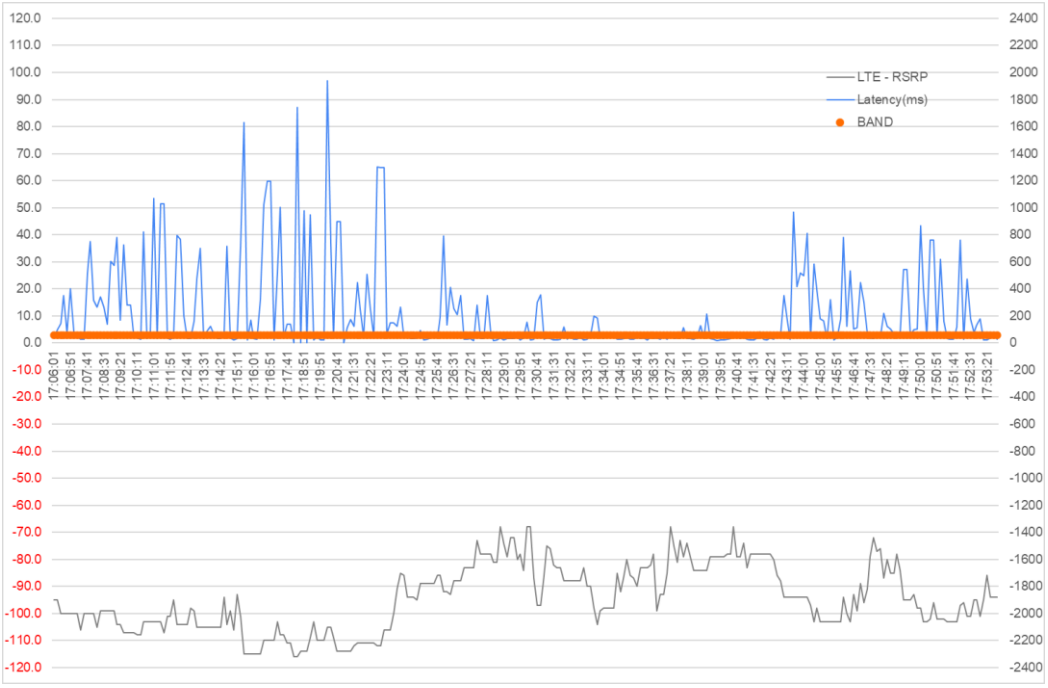


図 6-5　A 社 Band 3 (1800 MHz)固定

図 6-6 と図 6-7 は B 社の回線において、Band 3 に周波数固定した場合と周波数固定しなかった場合の測定結果である。RSRP において、平均して 5dB ほど周波数固定による改善効果がある一方で、Latency は悪化しており、周波数固定が悪影響を生じさせる場合があることが分かった。

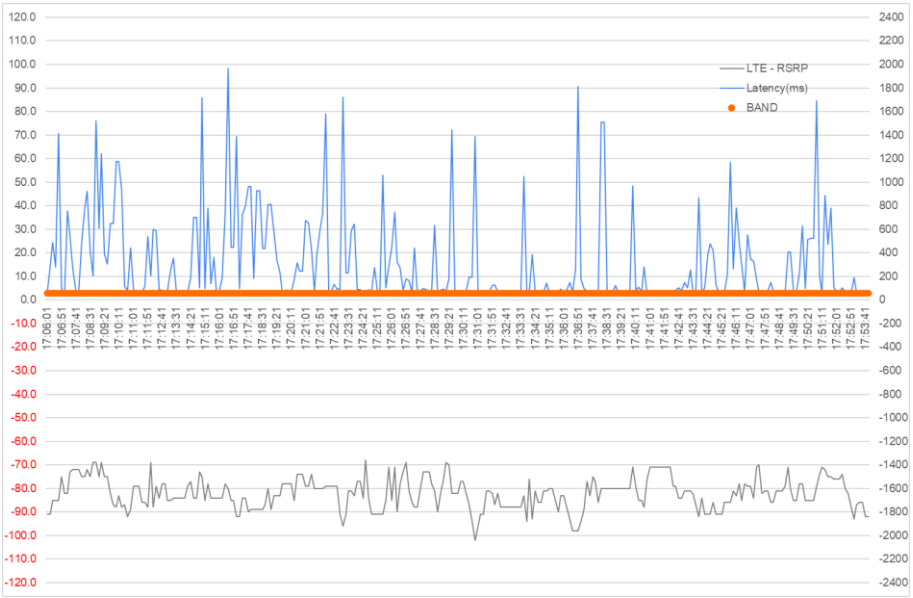


図 6-6　B 社 Band 3 (1800 MHz)固定

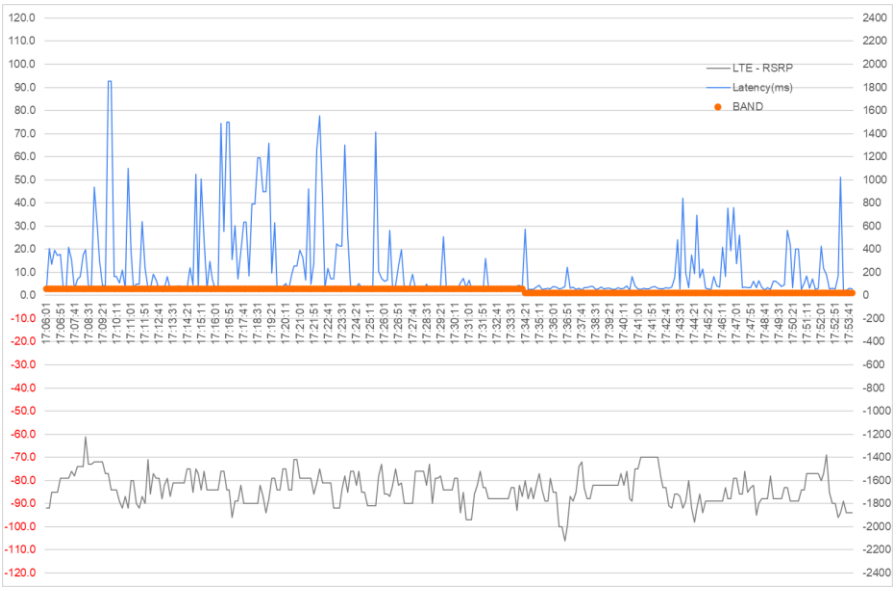


図 6-7　B 社 auto（Band 固定無し）

3)　キャリアアグリゲーションの検証

A 社の SIM カードを 2 枚用い、Band 3 と Band8 に固定した時の通信速度をそれぞれ図に示す。図中の円のサイズが測定地点における通信速度である。周波数ごとの電波の伝搬特性の違いに起因して、通信速度の分布には差異が生じることが分かる。

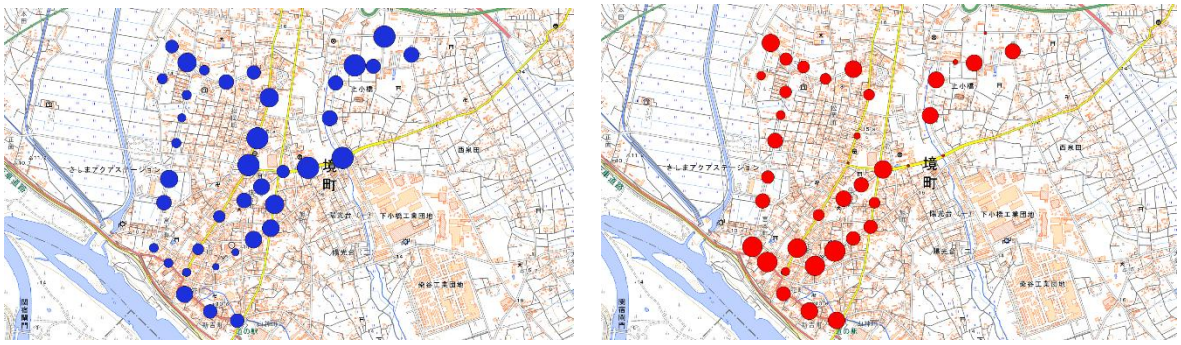
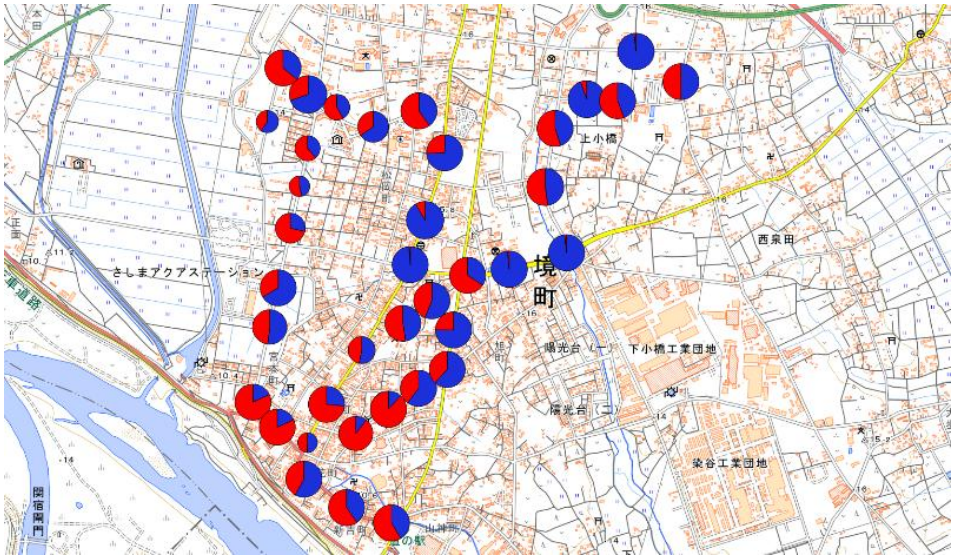


図 6-8　A 社の回線を用いた場合の通信速度
左：Band3、右：Band8

図は、キャリアアグリゲーションにより Band 3 と Band 8 の通信回線を併用した場合の通信速度である。同様に円のサイズが通信速度で、円グラフは Band 3 の回線と Band 8 の回線のそれぞれの通信速度の割合を示している。それぞれの周波数帯が補い合う働きをすることで、走行ルートの広い範囲で通信品質を改善できていることが分かる。



出所）国土地理院地図

図 6-9　キャリアアグリゲーションにより Band3（青）と Band8（赤）の通信回線を併用した場合の通信速度

4）　マルチ回線とキャリアアグリゲーションの併用による検証

マルチ回線＋キャリアアグリゲーションでの測定結果を以下に示す。可変ビットレートで 4Mbps 以上の帯域を確認するために、以下の解像度とフレームレートに設定し 1SIM との比較を行った

・解像度　1280x720

・フレームレート　30fps

※今回測定で使用したカメラの最高値となる

映像の変化量（画像の変化量）に応じ、必要帯域が変動するため、停車時等、外部映像に変化が少ない場合は 4 Mbps を下回る（グラフ右　赤丸部分）が、変化量の多い走行環境では 10Mbps を上回るトラフィックが発生する。故に、通信帯域が広く確保出来る方がより高画質で滑らかな映像を送信することが可能となるが、現時点、自動運転バスのモニタリング業務として HD の映像を見続けることは必要ないため、通信帯域の上限を設ける等の設定を利用して実際の運用に即した条件で利用することが現実的であると考えられる

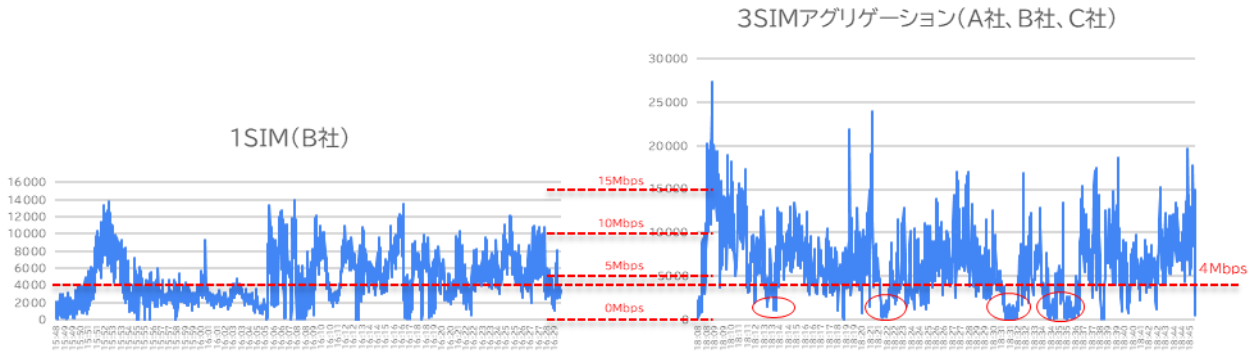


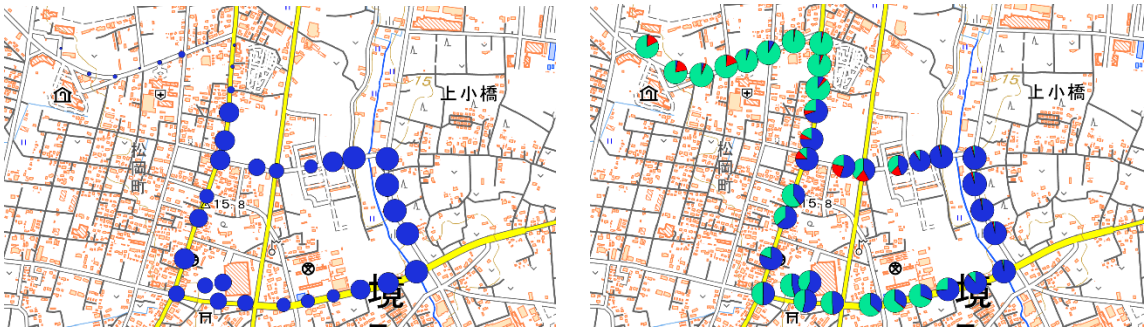
図 6-10　1SIM と3SIM アグリゲーションの速度比較

以上のことから、マルチ SIM とキャリアアグリゲーションを活用し、複数通信事業者の回線を併用することで、局所的な通信速度の低下を防ぐことができる。

キャリアアグリゲーションを効果的に利用するには、単一キャリアでのアグリゲーションではなく、複数キャリアでアグリゲーション技術を利用することが、各通信事業者のエリア的な強み、弱みを補完でき、安定した通信環境構築（通信帯域および通信の冗長性）の観点から非常に有効であると考えられる。特に物理的に通信事業者基地局が建物の影となる局所的な弱電界ポイント（基地局とルーターのアンテナの見通しがきかない）も発生することから、今回の自動運転ルート上においても、複数通信事業者の回線を併用することでその影響を低減でき、より安定した通信環境を構築出来ると考えられる。また、オーバースペックとならぬ様、社会実装で必要となる要件を鑑み、経済面も十分考慮した設定、設計が必要である。

以下、注意点で記載したとおり、自動運転車（境町で走行している自動運転バス）で無線通信を活用する場合、20km/h 前後で移動しながら通信する状況で如何に安定した通信品質を維持できるかがポイントの一つとなる。そのため、一時的、スポット的に発生する H/O に伴う Latency 増、RSRP の低下を少なくすることが今回設定した KPI 維持する上では重要となる。また境町の自動運転バスルートは 1 周（往復）約 2～3km 程度であり、このエリアで出来る限り H/O を少なくすることがその解決の一つとして考えられる。

図は参考としてマルチ回線のキャリアアグリゲーションによる通信品質の改善効果が顕著だった地点の結果を示している。図中の左上の地点は A 社の通信品質が極端に悪化することが分かっていたが、３社の回線を併用して改善している。逆に図中の右下の地点は A 社の回線が他の回線を補う働きをしていることが分かる。



※３社の通信速度の割合が、当該地点の通信品質の比較を厳密に示すものではない。
出所）国土地理院地図

図 6-11 マルチ SIM･キャリアアグリゲーションの併用による3社の回線の併用による通信品質の改善効果(一例)

5） マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の併用による検証

マルチ回線とキャリアアグリゲーションを活用し、複数通信事業者の回線を併用することで、局所的な通信速度の低下を防ぐことができることが分かった。

更にこの通信の品質を高める手法として、通信事業者の電波品質がより良い（受信レベル安定して高く、バースト的な遅延が発生しにくく、映像遅延、映像詰りの発生しにくい品質）状態を保持させることが望ましい。その手段として、物理的に送受信アンテナの位置を工夫したりすることも考えられるが、今回検証した周波数固定が有効である。

図 6-97～図 6-100 に今回の組み合わせで最適と思わる組合せでのトラフィックデータと各社（各 SIM）での RSRP および Latency の状況（3D マップ表示）について示す。図 6-97 で分かる通り、概ね 4Mbps 以上を達成した。詳細データは以下の通り。

・平均速度 5.0Mbps（最低速度 2.41Mbps）

・4Mbps 達成率 99.6%（測定データ 2583 ポイント中 2573 ポイント達成））

瞬間的な速度低下はグラフ上で確認できるが、実際の映像の遅延、乱れは殆ど気にならないレベルと考えられる。周波数固定により今回のルート全域に渡り遅延時間低く抑えられかつその発生頻度も抑えられている。また、受信レベルも非周波数固定と比較して高く安定していること、複数事業者とのアグリゲーションでも互いに影響を与えにくいことから、より安定した通信環境を構築することが出来ていると考えられる。

３D マップ表示からもわかる通り、当初受信レベルが弱いポイント、西南医療センターからシンパシーホールに区間についても B 社、C 社の RSRP が-90dBm 以上を示していることから、その課題も解決されたと考えられる（電波の通信環境は、時間、通信トラフィック（使われ方）、木々・建物等の障害物による電波反射等、外部変化により電波環境は変化し続けており、常に変動しているという点、無線通信を利用する上で注意が必要である）

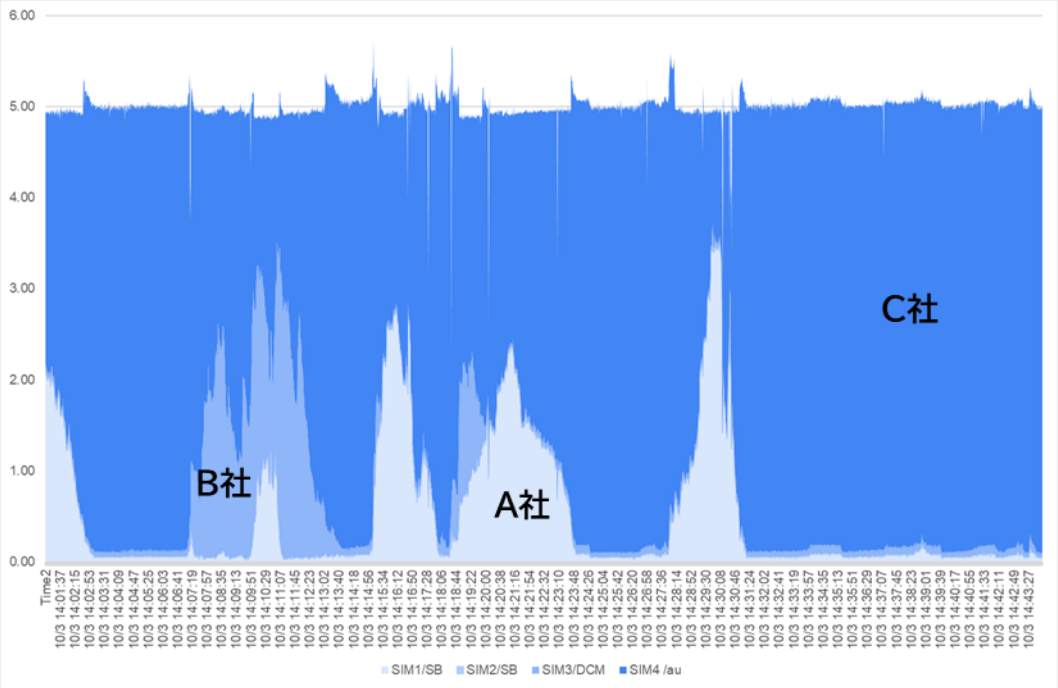


図 6-12 マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の併用（3SIM トラフィック）
※A 社周波数固定無し、B 社 Band3（1800MHz）固定、C 社のみ Band28（700MHz）固定

6） 監視員視点（業務視点）での監視画面の評価、検証

１２月１７日から１２月１９日の３日間で実施した実証走行にて、画質とフレームレートを下記内容に変更した監視映像を実際に監視員に見てもらい、現行の動画品質と比較してもらった。

【設定内容】
①解像度 480x270、フレームレート 5fps（現行の設定）
②解像度 1280x720、フレームレート 30fps（4Mbps 以上の通信速度となる設定）

アンケートの項目は下記の通りとし、対象者は実証走行期間に出勤していた 9 名とした。
【アンケート項目】
1. いつ Dispatcher 監視画面の映像を見るか？
2. 監視映像ではどんな内容がわかったほうが良いか？
3. これまでの監視業務にて、映像品質が原因で困ったことはあったか？
4. 実証走行の映像を見て、良いと思った点はあるか？
5. 監視業務中、車内映像と車外映像ならどちらを優先的に見ているか？

・アンケート結果

アンケート結果を下表に示す

表 6-4 監視員のアンケート結果

	Q1 いつDispatcher監視画面の映像を見ますか？	Q2 監視映像ではどんな内容がわかったほうが良いか？	Q3 これまでの監視業務にて、映像品質が原因で困ったことはあっ	Q4 実証走行の映像を見て、良いと思った点はあるか？	Q5 監視業務中、車内映像と車外映像ならどちらを優先的に見てい
1	・アラート発生時とお客様の乗降時(人数確認のため)。	・表情はわかった方が良い(子供が転んだ時とか、泣いているのとかわかった方が良い)。	・特に無し。	・オペレーターの手元の動きがわかりやすい(どんな操作してるかがわかりやすい)。	・車内映像
2	・アラート発生時。 ・車両の調子が悪い時は比較的見るようにしている。	・表情はわかった方が良い(オペレーターの健康チェックのため※気を失っていないか、病気で辛い状態じゃないかなど)。	・映像が途切れてしまってどんな状態なのか不安になることがある。	・運行前の点呼時に、免許証確認・アルコール有無・体温計などをディスパッチャー経由して見てるので、鮮明な方が良い。→画質を上げる必要あり、フレームレートについては特に意見なし。	・車内映像(人員カウント・健康管理) ・車外は走ってるとこの確認だけ。
3	・運行中はなるべく見るようにしている。	・表情までは気にしていない。 ・コントローラーの操作をしているかは気になる。	・車内映像で乗車人数をカウントしているが、乗車人数がわからない時がある(お母さんが子供をおんぶしているのか、していないのかわからない時がある)。	・現状では特に困っていないため、良いと思った点も無し(今後、要求される監視項目が変われば必要になってくるかもしれない)。 ・車外映像を監視中、歩行者の動向がわかりやすいと思った。	・車内映像(乗車人数をカウント)
4	・視察時はちゃんと乗れたか確認してる。 ・エコスについた時は乗り換えがあるので、よく見るようにしてる。 ・終点到着時は見るようにしてる。 ・起点にて車両を停車したままオペレーターが休憩する時は、車両にいたずらされないか、お客さんが入ってこないかを監視している。	・表情までは見ていない、カクカクでも支障なし。 ・コントローラーの操作を見たい(今後オペレーターをやる時に、他の人がどんな操作しているか見たい)。	・特に今までの映像でも困らない。車内の人間がどうゆう動きをしているか、ちゃんと運行しているか、ちゃんとみんな席についているか程度で良い。	・カクカクしていない方が、ずっと見ていて疲れない。	・車内映像(乗車人数をカウント)
5	・他にやることなければ割と見ている。	・表情見えた方が良い(オペレーターと乗客の表情を見て、健康状態を把握したい)。	・カクカクだと少し気分が悪くなる(乗り物酔いみたいな現象)。	・ずっと映像を見ていても気持ち悪くならなかった。	車内映像
6	・割と常に見ている。	・事故時には表情が見えた方が良いと思う。(怪我の有無などの判断をするため) ・オペレーターが女性の場合、乗客に変な人がいないか確認したい。	・乗車人数がわからない時がある(お母さんが子供をおんぶしているのか、していないのかわからない時がある)。	・アラート発生時は大画面に写すようなシステムになっているが、今までは画質が悪いため映像が潰れていた。今回の映像はクリアに見えるため、状況が把握しやすいと思った。	・車内映像(車内環境は変化があるので、監視しておきたい)。
7	・割と常に見ている。	・表情が見えた方が良い(オペレーターがエラー起きて困っていないか確認できる、乗客の喜んでくれている表情が見えると嬉しいから)。	・特に無し	・なめらかな方が疲れない。 ・車外映像もどこを走っているかわかりやすい。 ・オペレーターの表情が見えるので良い。 ・周辺の歩行者がわかって良い。	・満遍なく見てる(6割車内)
8	・だいたい見ている(他にやることなければ)。	・表情が見えた方がいい(ドライバーの眠気がわかる、特に夜間運行時は気をつけている)。	・乗車人数カウント(特におんぶしてる子供)が難しい。 ・アラート発生時、大画面に切り替わっても映像が潰れてしまい、よくわからない。	・クリアかつなめらかな方が見ていて疲れない。 ・オペレーターの表情や周辺の歩行者がわかって良い。 ・しっかり確認できるので、鮮明な映像の方が良い。	・車内映像
9	・毎便ごと実施する体調チェック時に、監視映像を見ながら電話している。	・乗ってきた人がどんな人なのかわかった方が良い。	・複数ディスプレイで多地域監視する時は、カクカクだと映像が止まっていることに気がつきにくい。	・これまでは既存の映像品質で困ったと思うことはなかったが(当たり前だと思っていた)、比較するとクリアでなめらかな方が見えやすくて良い。 ・緊急時に相手の車のナンバーも見えて良い。 ・急停止した時の状況(ブレーキの強さ、原因)がわかりやすい。 ・映像がクリアな方が疲れづらい、画質が悪いと凝視してしまうから疲れる。	・車内映像(特にアラート発生時は車内をすぐ確認する)

・アンケート結果の考察

ヒアリングをした監視員全員が、自動運転バスからのアラート発生時以外も監視映像を見ていることがわかった。また、ヒアリングをした９人中７人が監視映像でオペレーターや乗客の表情が見えたほうが良いと回答している。その理由としては、オペレーターや乗客の健康状態の確認をするためや、オペレーターが女性の際に乗客がどんな人かを確認するためであった。モニタリング業務では Q5 の回答結果からも分かる通り、基本的には車内環境の確認が主となる。そのため、車内映像だけでも高画質、高フレームレートが求められている。

一方で、現行の動画品質で困っているという声は少ない。あくまで、高画質、高フレームレートが求められている意見が多かったのは、監視員がモニタリング実務をしている上で必要である監視内容を検討した結果である。そのため、監視員に要求されるモニタリング内容によって必要な動画品質が決まってくることから、モニタリング内容に関するガイドラインの作成も検討する必要がある。

また、40 代以上の監視員からは現状のフレームレートだと乗り物酔いのような症状が出たり、疲れやすいという意見もあった。幅広い年齢層に業務を実施してもらう上で、映像品質の向上は、状況判断のしやすさであったり、業務の快適さにつながることがわかった。

7） QoS 制御の検証（机上検討）

・条件 A(QoS 制御なし)

条件 A の iperf3 のスループット結果は以下

```
-----------------------------------------------------------
Accepted connection from 13.113.232.202, port 45638
[  5] local 172.32.2.229 port 23122 connected to 13.113.232.202 port 50560
[ ID] Interval           Transfer     Bitrate
[  5]   0.00-1.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec                  (omitted)
[  5]   0.00-1.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   1.00-2.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   2.00-3.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   3.00-4.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   4.00-5.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   5.00-6.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   6.00-7.00   sec   128 KBytes  1.05 Mbits/sec
[  5]   7.00-8.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   8.00-9.00   sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]   9.00-10.00  sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]  10.00-11.00  sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
[  5]  11.00-11.11  sec  0.00 Bytes  0.00 bits/sec
- - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
[ ID] Interval           Transfer     Bitrate
[  5]   0.00-11.11  sec   128 KBytes  94.4 Kbits/sec                  receiver
-----------------------------------------------------------
```

図 6-102 条件 A での iperf3 の結果

帯域制限下において、車両通信は 500kbps から 94kbps にビットレートが減少した。

・条件 B(QoS 制御あり)

条件 B の iperf3 のスループット結果は以下

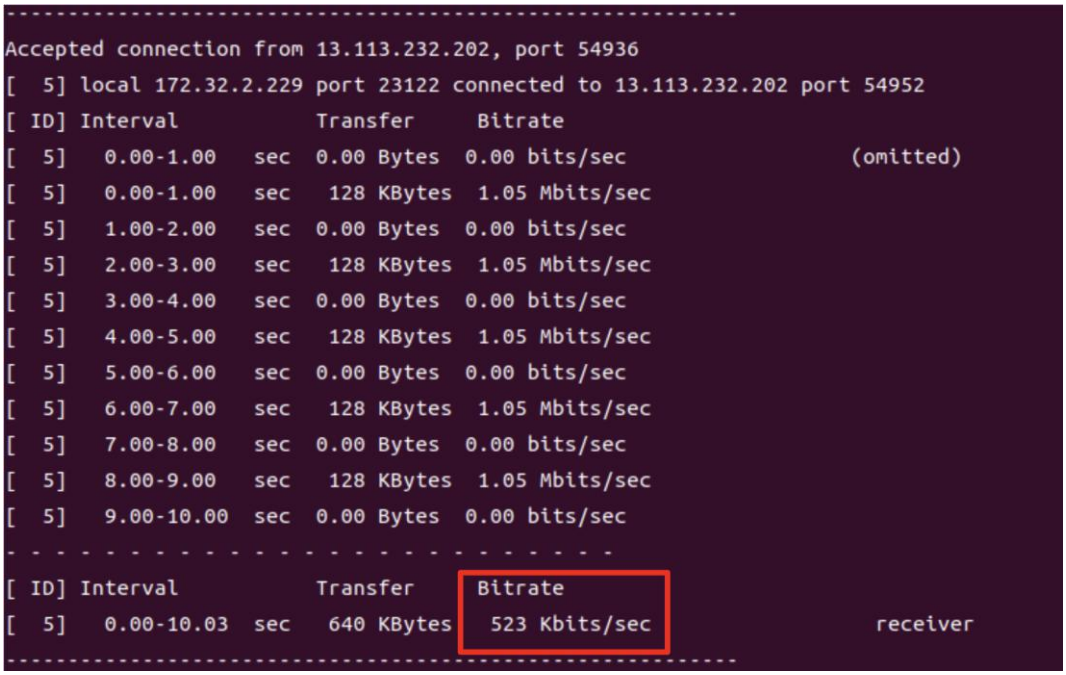


図 6-103 条件 B での iperf3 の結果

帯域制限下でも、車両通信は 500kbps のビットレートが維持されている。

QoS の機能を利用することで帯域制限下での優先制御が可能なことが検証できた。

今回用いた Peplink ルーターは物理的に帯域が確保できない環境下ではなく、「ユーザー側で設定した帯域上限を超えた帯域を使用した際」に QoS 制御を行うサービスとなっていたため、本検証の本来の目的とは異なる条件下での検証になってしまった。しかし、QoS が適用される条件が異なるだけであり、QoS の仕組み自体は有効だと考えられる。

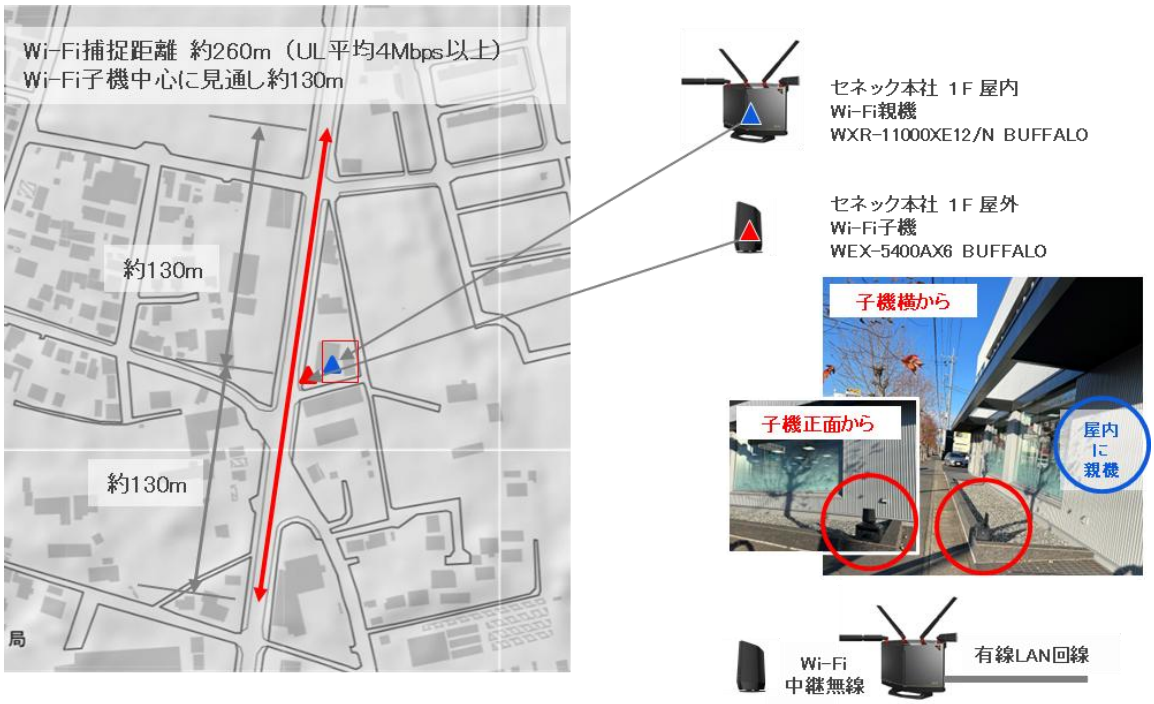
また、ビジネス用途では無制限に帯域を利用するのではなく、ある程度の使用帯域制限をかけた上での運用が考えられる。そのような環境で車両通信を優先する場合は本検証での QoS 適用が有効であると考えられる。

8) Wi-Fi とキャリアアグリゲーションの併用による検証

Wi-Fi 無線機と受信機(車両)との見通しがある場所(LOS)であれば、半径約 130m で4Mbps の通信が可能であることおよびキャリア SIM とのアグリゲーションも可能であることが確認できたことから、距離(半径100m程度)および見通しがあるという限定的な使い方とはなるが、通信事業者の弱電界エリアの補完、輻輳対策として利用できると考えられる。

今回の実証実験では、通信事業者無線(LTE)と Wi-Fi 無線とのアグリゲーション確認と Wi-Fi 無線の伝搬距離測定のみであり、幹線道路を走行しながら Wi-Fi 電波の実用的評価(走行速度とアグリゲーション可能な有効距離)まで十分な評価が出来なかった。

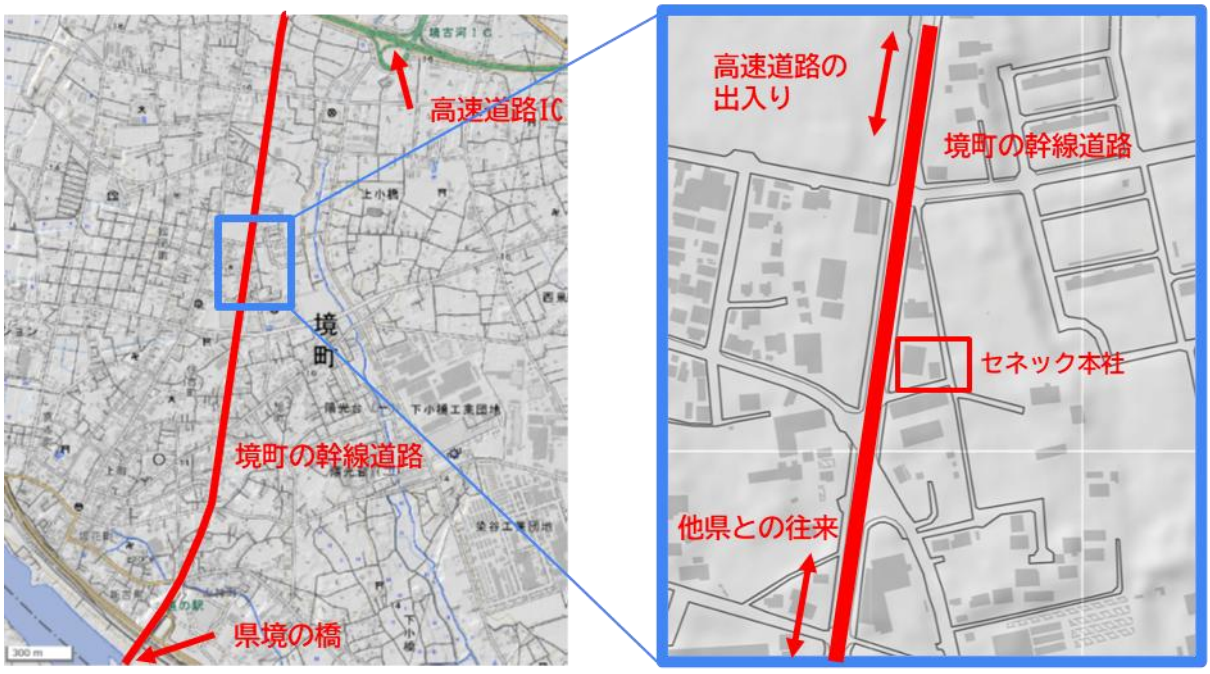
下図の構成で Wi-Fi ルーター親機＋子機構成での電波伝搬測定。



出所）国土地理院地図

図 6-13 Wi-Fi の電波伝搬測定

測定した箇所（道路）は境町の幹線道路であり、特に平日朝夕の通勤ラッシュが発生しやすく、日常的に渋滞しやすい道路の一つとなっている。今後自動運転ルートとして使われる場合、万が一に備え Wi-Fi 無線通信も有効な手段となりうる可能性があると考えられる。



出所）国土地理院地図

図 6-14 測定した道路の位置づけ（境町の幹線道路）

セネック本社駐車場にて、キャリア通信と Wi-Fi ルーターとのアグリゲーションを実施

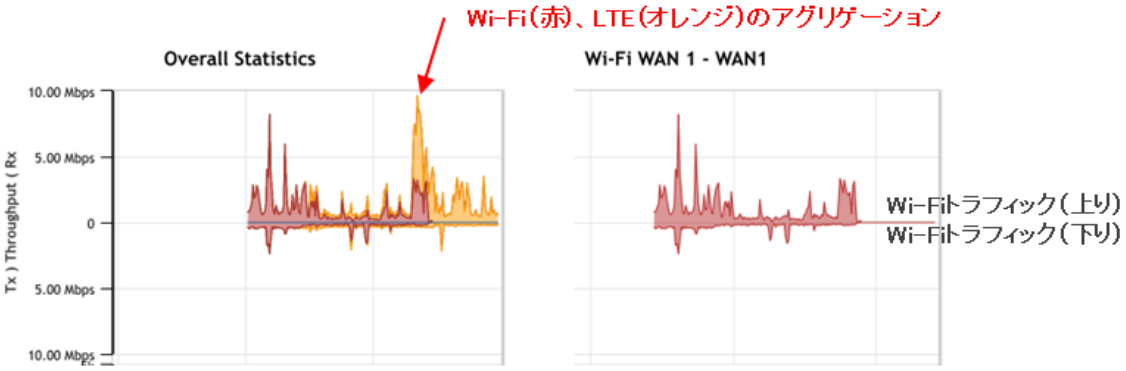
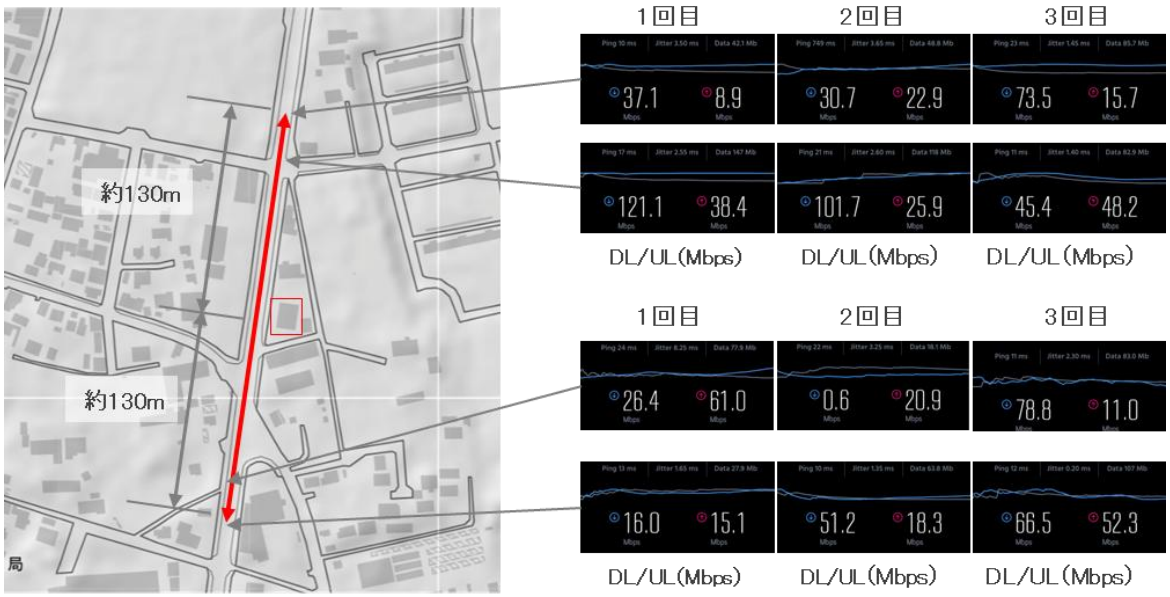


図 6-15　LTE 回線と Wi-Fi 回線のアグリゲーション検証
※InControl2 の画面キャプチャーより

出所）国土地理院地図
図 6-16　LTE 回線と Wi-Fi 回線のアグリゲーション時の走行ルート
※最大時速 10km/h 以下



出所）国土地理院地図

図 6-17　Wi-Fi 回線の見通し有効距離について

7. 本実証の総括

7.1 本実証の成果・課題

7.1.1 本実証の成果

今回実証した境町エリアにおいて以下の成果が得られた。

(1)マルチ回線とキャリアアグリゲーションの組み合わせ

同一通信事業者によるキャリアアグリゲーションは、1SIM の場合より、通信帯域確保および SIM 冗長という観点では向上する。しかし、弱電界エリア対策および 4Mbps の通信を維持する手段としては十分な効果は得られなかった

複数通信事業者によるキャリアアグリゲーションは、各通信事業者の通信状況次第で、各通信事業者の通信エリアの強み、弱みを相互に補完でき、また、複数事業者による通信路の冗長性の観点から、弱電界エリアの対策および 4Mbps の通信を維持する手段としては非常に有効であったと考えられる。ただし、今回利用した通信事業者 3 社の電波が届きにくいスポット、ハンドオーバーによる周波数切替え時での瞬間的な通信遅延時間の増加が発生する点については別な対策も必要であると考えられる。また、日時、道路事情等 取巻く環境によりそれらの発生の有無、発生個所、頻度も変わることも考慮して利用する必要がある。

(2)周波数固定の効果

結果として、電波干渉が発生しにくく、H/O が少ない周波数帯を利用することで通信品質が向上することが分かった。特にビルなどの障害物があっても回り込んで電波が届きやすいという特徴を持つ 700MHz～900MHz の周波数帯域(プラチナバンド)を捕捉し続けられることで受信レベル(RSRP)が高く、通信遅延(Latency)は低く抑えられることが確認出来た。ただし、周波数固定でどの程度効果が得られるからは、各通信事業者の置局設計に依存すると考えられるため、効果の度合いについては当該エリアの通信状況を確認した上で実施することが望ましい。

(3)マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の組み合わせ

(1)および(2)の最適な組合せを見つけることで、更に効果を向上させることが出来ると考えられる。

今回の測定では、下表の通り効果が得られた

表 7-1 マルチ回線・キャリアアグリゲーション・周波数固定の組み合わせの効果

	周波数固定	ルート上4Mbps の割合
既存1SIM(B 社)	無し	75.0%
マルチ回線 3SIM ＋キャリアアグリゲーション	無し	96.7%
マルチ回線3SIM ＋キャリアアグリゲーション ＋周波数固定	A 社無し B 社 Band3 C 社 Band28	99. 6%

(4)Wi-Fi とキャリア SIM との組み合わせ

Wi-Fi 無線機と受信機(車両)との見通しがある場所(LOS)であれば、半径約 130m で4Mbps の通信が可能であることおよびキャリア SIM とのアグリゲーションも可能であることが確認できたことから、距離(半径100m程度)および見通しがあるという限定的な使い方とはなるが、通信事業者の弱電界エリアの補完、輻輳対策として利用できると考えられる。

以上を踏まえると、取巻く通信環境(複数事業者の通信エリア状況)を確認した上で、既存の NW 機器およびそれらの調整により最適な組み合わせを見つけることが出来れば、通信事業者による基地局増設することなく、通信環境を向上(途切れ難い通信回線、RSRP と通信速度の向上)させることを確認した。

7.1.2 本実証の課題

今回の実証における課題について

(1)モニタリングに適した周波数帯の固定利用は、電波の公平な利用の観点から、通信事業者を中心に理解を得られない懸念がある。レベル 4 自動運転の実現に向け、常時モニタリングのための電波利用と、その他の電波利用のバランスについて、ルールメイキングが必要である。

(2)マルチ回線の利用は、通信費を増大させるため、自動運転サービス提供における大きなコストになる。自動運転のモニタリングで生じる通信トラヒックの実態に即し、複数の通信事業者が連携した料金プランの展開が必要である。

(3)既存の通信環境に対応する形の通信品質改善手法のため、通信についての高度な理解が必要となり、導入障壁が高い。そのため、ODD における通信環境・品質の評価手法、評価結果に基づく通信品質改善手法の導入手順を手引きとして、本実証でとりまとめるが、横展開が加速するように通信事業者と自動運転サービス事業者の連携の深化が必要である。

られた。

8. 付録：自動運転サービス提供事業者が独自に導入可能な通信環境の改善手法

茨城県猿島郡境町における実証の取組から、既存の通信環境に対応しながら、自動運転サービス事業者が独自に通信品質を改善する手法を整理する。なお、本手法は特定の機器を用いた 1 事例であることに留意すること。

8.1 通信品質改善のための通信技術・設定

既存 NW 機器で無線最適化を図るための実装プロセスとして、以下の①～⑤を考えた。

① 自動運転車に搭載する通信機器の選定
自動運転車両に既に通信モジュールが搭載済、車両購入者で準備する等、通信機器（通信モジュール）は使用する車両側の条件に左右される可能性があるので、車両側の仕様条件に加え、経済性、機器性能・品質およびメーカーサポート体制も考慮した上で選定する。

② 走行ルート上の　各携帯会社の電波受信レベルおよび GPS 電波の受信状況を確認
当該エリアにおいて以下を確認し、課題の把握と対策について検討
・どの通信事業者の無線通信が使えるのか（切れにくいのか)、通信品質を確認
・GPS による位置情報が走行ルートを正しくトレース出来ているかを確認
・走行ルート上、必要な通信帯域（速度）が確保出来ているかを確認

③ 走行ルート上、メインで使える通信事業者を選択する
上記の結果を踏まえ、選択する

④ 走行ルート上、周波数固定が有効否かを確認
H/O 低減により、通信品質の向上（低遅延、受信レベルが-100dBm 以上で安定）が期待できるか、その有効性について確認する

⑤ 走行車両（自動運転車両）に実装した上で、必要な調整（最適な組みあわせ）を行う
・比較後、実装する通信機器を選定することでも OK
・現状を確認した上で、通信会社、同一通信会社複数 SIM　または　複数通信会社 SIM を活用したマルチ回線構成、キャリアアグリゲーション、周波数固定の組合せについて、経済性、冗長性も踏まえ、自動運転事業者側で最適な組合せを選択する
・更に通信の内容（パケット種別）を意識し、同じ通信回線であっても、優先して確保したい通信種別（パケット種別、例えば制御情報の通信、上り映像の通信、音声通信といった種別を意味する）を設定できる QoS 機能を活用するのも効果的である。

以下、技術要素と注意点について説明する。

（1） マルチ回線

複数 SIM の電波を束ね１つの通信回線としてデータの送受信を行う機能。

マルチ回線対応の車載ルーターを準備する必要がある。１SIM のみのルーターと比較すると、搭載可能な SIM と同数の通信モジュール（無線送受信機）が内蔵されるため、機器費は対応可能な SIM 数（通信モジュール数）が増加する分高価となり、機器の寸法もそれに応じて大きくなるため、導入時の初期費用と設置位置を考慮する必要がある。また、以下（２）キャリアアグリゲーション等の機能追加、対向する NW 機器（または機能）の仕様も十分注意が必要であり、事前に設定方法、機器仕様、使用上の注意をよく確認・理解した上で選定、使用する必要がある。

（2） キャリアアグリゲーション

複数 SIM の電波を束ね１つの通信回線としてデータの送受信を行う機能。

（１）のルーターを選定する段階でキャリアアグリゲーション設定方法を確認する必要がある。複数の通信回線を一つの通信回線として束ねて使用する場合、ルーターと対向する機器（機能）間での設定が必要となるので、構築時十分注意する必要がある。

（3） 周波数固定

通信事業者の一つの基地局がカバーする通信エリアはセルと呼ばれ、複数のセルを組合せ、またセル間は基地置局主導のハンドオーバーが行われ途切れない無線通信を実現する様、構築されている。通常は、エリアの特性（地形・建物の高さなど）をふまえかつ通信品質を維持するため、無線品質の差により基地局主導のハンドオーバーが行われている。隣接セルは異なるバンド（周波数帯）を用いる設計のため、ハンドオーバーとは使用する周波数の変更を伴うものである。

基地局カバーエリアの境界付近では、隣接する複数基地局との通信品質の差が小さく、またその差が変動しやすい傾向にある。そのため、基地局主導の制御ではハンドオーバーが頻発する。ハンドオーバーが頻発すると、通信速度が低下し、遅延が増大する。

基地局カバーエリア境界付近のハンドオーバーの頻発を抑制するために、端末が使用するバンド（周波数帯）を固定することで、異なるバンドを用いる隣接セルへハンドオーバーさせないようにする。これを周波数固定と呼ぶ。

周波数固定を行う場合、周波数固定可能な機器（ルーター）であるかを確認した上で機器選定する必要がある。

（4） QoS 設定

送信データに優先順位付けし、ネットワーク上で優先順位に応じた処理をすることで遅延の低減などする機能である。IP パケットのヘッダ内に存在する ToS(Type of Service)フィールドのうち上位 6 ビットを DSCP(Differentiated Services Code Point)と呼び、DSCP はネットワーク層(レイヤ−３)におけるパケットの優先度をつけることができる。ルーター上で、高優先度のパケットは IP ネットワーク上の待ち行列の先頭に配置すること、加えてネットワークが過負荷状

態になった場合には意図的に低優先度のパケットが廃棄することによって、通信帯域が狭い状況においても高優先度のトラフィックは遅延や損失がなく伝送される。

QoS の機能は機器により設定の考え方、仕様が異なるため、言葉だけで判断するのではなく、具体的にどの様な状況でどの様に使用出来るか、また具体的な設定方法まで確認した上で機能の確認と機器選定する必要がある。今回、期待している QoS の機能を図も交えて機器ベンダーに説明、確認したにもかかわらず、結果、認識齟齬があり、当初想定していた QoS の設定が出来ないことが分かった。過去実績がなく初めて使用する機器（型番）については、その点注意が必要である。

8.2 使用機器

（1） マルチ回線ルーター

製品仕様は下表の通り

製品型番	MAX-HD4-MBX-LTE
SpeedFusion	対応
Celluar WAN インターフェース	Quad LTE 通信モジュール
WAN インターフェース	RJ45 1G ×3 SIM スロット ×4(対応 SIM サイズ:標準 SIM) USB ×2
LAN インターフェース	RJ45 1G ×9
アンテナコネクタ	SMA Cellular ×8 SMA GPS ×1 RP-SMA ×4
通信方式	LTE-Advanced
キャリア領域	docomo / KDDI / SoftBank
4G 周波数/4G 対応バンド	B1/B2/B3/B4/B5/B7/B8/B9/B12/B13/B18/B19/B20/B26/B28/B29/B30/B41/B42/B43/B46/B48/B66
3G 周波数/3G 対応バンド	B1/B2/B4/B5/B6/B8/B9/B19
ルータースループット	2.5Gbps
SpeedFusion ルータースループット ※暗号化なし	600Mbps
SpeedFusion ルータースループット ※256bit AES	500Mbps
LTE-A データ通信速度	Downlink/Uplink Datarate: 600Mbps/150Mbps
Wi-Fi 規格	MIMO 2×2 802.11ac/a/b/g/n
フェイルオーバー	対応
ロードバランス	対応
利用推奨ユーザー数	50-500
入力電圧	12-56V DC
AC アダプタ	標準添付 100-240V AC
出力電力	802.3at ×8(PoE 出力) ※オプション対応

消費電力	最大 55W(PoE 未出力時)
寸法	292(W) × 177(D) × 50(H)mm
重量	2.2(kg)
温度	-40 ~ 65℃ ※添付 AC アダプタを除く
湿度	15 ~ 95% (結露なきこと)
保証期間	1 年間
認証規格	CE / FCC / RoHS / eMark / PTCRB EN61373: 1999 / IEC61373: 1999 EN61000 EN50155 JATE / TELEC
SpeedFusion Peers	2/20(ライセンス) ※エンド側の製品(Peplink 製デバイス)と接続できる数を示します
標準付属品	LTEA アンテナ ×8 Wifi アンテナ ×4 GPS アンテナ ×1 AC アダプター ×1

製品外観図

製品前面パネル（上）と背面パネル

図 8-1 マルチ回線ルーター　MAX-HD4-MBX-LTE

（2）カメラユニット（AXIS）

製品型番	AXIS F44 Dual Audio Input Main Unit
製造会社	Axis Communication
ビデオ圧縮	H.264 (MPEG-4 Part 10/AVC)、Baseline、Main、High ProfileMotion JPEG
解像度	1920×1080 (1080p)a~480×270 1280×720~480×270
ワイドダイナミックレンジ	(WDR)WDR – Forensic Capture
フレームレート	1080p、WDR オフ時：最大12.5/15 フレーム/秒（電源周波数 50/60Hz） 720p、WDR オン時：最大25/30 フレーム/秒（電源周波数 50/60Hz） 720p、WDR オン時：最大12.5/15 フレーム/秒（電源周波数 50/60Hz）
ネットワークプロトコル	IPv4、IPv6 USGv6、HTTP、HTTP/2、HTTPSb、SSL/TLSb、QoS Layer 3 DiffServ、FTP、SFTP、CIFS/SMB、SMTP、Bonjour、UPnPTM、SNMPv1/v2c/v3 (MIB-II)、DNS、DynDNS、NTP、RTSP、RTP、TCP、UDP、IGMPv1/v2/v3、RTCP、ICMP、DHCPv4/v6、ARP、SOCKS、SSH、LLDP、MQTT、Syslog

図 8-2　AXIS カメラユニット F44 Dual Audio Input Main Unit 外観

（3）カメラ（AXIS）

製品型番	AXIS F1004 Sensor Unit
製造会社	Axis Communication
撮像素子	1/4”（有効）プログレッシブスキャン RGB CMOS
レンズ	固定アイリス 2.1 mm、F2.2 水平画角: 102° 垂直画角: 56°
解像度	最大1280×720
ワイドダイナミックレンジ	(WDR)WDR – Forensic Capture
最低照度	カラー: 0.4 ルクス
シャッタースピード	1/24500 秒～1/6 秒
フレームレート	最大25/30 フレーム/秒（50/60 Hz）

図 8-3 カメラ F1004 Sensor Unit 外観

（4）ネットワーク機能

製品型番	FusionHub
製造会社	Peplink
デプロイメント	AWS 上の仮想サーバー(EC2)として構築
インスタンスタイプ	t3.nano
AMI 名	Peplink FusionHub 8.0.2s127 build 1682-4ac7607f-749d-41a9-b524-a7db53f77112-ami-0098c6e7b556afbc2.4
CPU	vCPU2 コア

OS	AmazonLinux

(5)データ取得・QoS 検証用ラップトップ

モデル	MacBook Air 13inch M2 2022
CPU	Apple M2 チップ 8 コア CPU
メモリ	16GB ユニファイドメモリ
ストレージ	1TB SSD
GPU	Apple M2 チップ 8 コア GPU
OS	MacOS 13.4

図 8-4 MacBook Air 13inch M2 2022 の外観

(6)ソフトウェア

(1)映像配信用ソフトウェア

ソフトウェア名	ffmpeg
配信元	https://www.ffmpeg.org/
用途	固定ビットレートでの映像配信、また QoS 検証での映像配信のため利用
使用場所	QoS 検証用ラップトップ

(2)TCP 通信計測ソフトウェア

ソフトウェア名	Iperf3
配信元	https://iperf.fr/iperf-download.php
用途	QoS 検証において、TCP 通信のスループットの計測のため利用
使用場所	QoS 検証用ラップトップ

8.3 通信環境の評価方法

自動運転サービスのルート上における各キャリアの通信状態、特性を把握することで通信環境の課題を明らかにする。そのため、以下の測定構成、測定内容および評価・分析を行う。

自動運転サービスのルート上における各通信事業者（国内大通信会社 3 社）の品質を測定評価した。評価結果よりルート上における通信の特性を検討し、以降の検討に役立てた。

測定においては、各通信事業者において接続可能な周波数帯を網羅的に調査した。

a. 測定構成

測定に利用した機材（ハードウェア）を下表に示す。通信機器については、5.2 にて仕様等の詳細を示す。

表 8-1 測定に利用した機材(ハードウェア)一覧

機材	概要
ハイブリッドカー（レンタル）	NW 機器を搭載し、測定しながらルート（公道）を走行する。NW 機器の動作電源としても利用し、車両のシガーライターから DC/AC コンバーター経由で電力を確保した。必要に応じ市販の可搬型電源（ポータブルバッテリー）も使用。なお、安定的な電力確保ためハイブリッドカーを用いた。
マルチ回線ルーター	MAX-HD4-MBX-LTE。詳細は 5.2 にて説明する。
M2M 通信 SIM	大手通信事業社 3 社より購入（契約）し、マルチ回線ルーターに挿入して使用した。
カメラユニット	Axis Communications 社製 AXIS F44 Dual Audio Input Main Unit。詳細は 5.2 にて説明する。
カメラ	Axis Communication 社製 AXIS F1004 Sensor Unit　映像撮影カメラ。カメラユニットと接続して用いた。詳細は 5.2 にて説明する。
PC	Apple 社 13inch Macbook Air。マルチ回線ルーター、カメラユニットの制御およびデータ収集用。データ処理として WindowsOS 版のエクセルソフトが必要であったため、MacOS 上の仮想環境で WindowsOS を起動し使用した。詳細は 5.2 にて説明する。尚、PC は市販の WindowsPC でも対応可能。
タブレット端末	Apple 社 iPad。PC と同様の機能を有する。InControl2 アプリ経由で取得されるマルチ回線ルーター測定データのリアルタイムモニタ、保存データのダウンロードをするため使用した。尚、市販のタブレット端末でも対応可能。
DC/AC コンバーター	Meltec/大自工業　KI-150。車両のシガーソケットから 100V の AC 電源供給した。150W 以上であれば別な DC/AC コンバーターでも対応可能。

図 9-6 は上表の機器の配線図である。マルチ回線ルーター、カメラユニット、カメラは LAN ケーブルにより接続し、マルチ回線ルーターとカメラユニットは車両から電源を確保した。

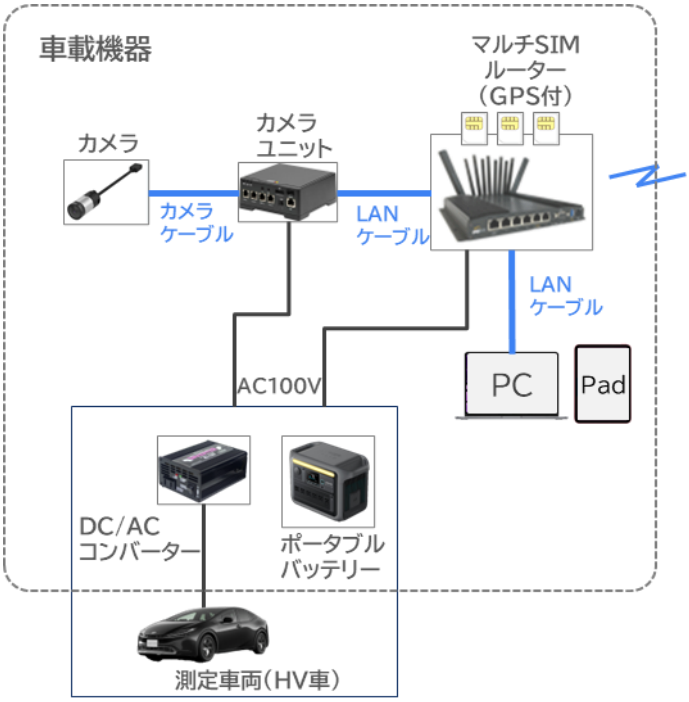


図 8-5 測定車両の機器配線図

測定に利用したソフトウェアを下表に示す。

表 8-2 測定に利用したソフトウェアー覧

ソフトウェア	概要
InControl2 (Peplink 社)	マルチ回線ルーターの設定、測定時のリアルタイムモニタおよび測定データの確認と CSV または PNG 形式でのデータダウンロード（WEB ブラウザーで操作)。
FusionHub (Peplink 社)	AWS 上の仮想サーバ上で動作するソフトウェア HUB 機能（WEB ブラウザーで操作)。
MicrosoftExcell (Microsoft 社)	データ分析用として、WindowsOS 版（MacOS 版非搭載の 3D マップ機能使用のため) ※ダウンロードしたデータは GoogleDrive で共有しデータ処理
ソフトウェア	概要

（２）測定に利用した機能（S/W）

①FusionHub（Peplink 社製 ソフトウェア HUB　AWS 上の仮想サーバ上に構築）

②InControl2（クラウド経由の遠隔管理画面（WebAdmin 画面）で設定、データモニタおよびデータダウンロード（CSV または画面出力）が可能

※ソフトウェアはログイン ID＋PWD でアクセスして利用

※マルチ回線ルーター、ソフトウェア HUB の遠隔管理機能で設定確認、管理が可能

※CSV データは 10 秒単位のデータ、画面出力はリアルタイムモニタ出力される帯域データ

グラフの画面ファイルとして png 出力

（3）測定データ分析ツール

①Windows 版 Microsoft Excell ソフト（MacOS 版非搭載　3D マップ機能使用のため）

※データ分析・評価のために使用するグラフ、マップ表示のために使用

②API 接続によるデータ収集

※出力された CSV データは①エクセル形式に変換して処理

※API 接続して取得したデータと（2）-②で取得したデータは（2）-①のソフトで処理

※収集したデータは社内 GoogleDrive 上に格納

b. 測定条件

測定機器はマルチ回線ルーターのみ、マルチ回線ルーターが保持するデータを InControl2 経由および API 接続して収集した[3]。

表 8-3 測定条件

	測定条件
測定車両の車速	・レンタカー（HV 車）を用い手動運転 ・時速 20km/h～30km/h（手動運転のため、また道路事情により同一ルートであっても常に同じ速度とは限らない）
上り回線データ設定	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ①固定ビットレート（5Mbps のアップロードを維持するため、5Mbps でビットレートが固定するように加工した映像を PC からルーターに送信して使用。カメラからの映像は未使用） ②可変ビットレート（車載カメラ（車外映像）からの映像入力を使用。映像の変化量に応じ上りデータの速度が可変する。また、以下「カメラの設定」の値により、上りデータの速度（帯域）は可変する
カメラ	・PC 経由でカメラユニットの管理ソフトから設定 ①解像度 480x270、フレームレート 5fps（現行の設定） ②解像度 480x270、フレームレート 30fps（①の解像度でフレームレートは設定可能な最大値 30fps） ③解像度 1280x720、フレームレート 30fps（4Mbps 以上の通信速度となる設定。解像度、フレームレート共、設定可能な最大値）
マルチ回線ルーター	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ・SIM スロット毎に有効/無効の設定（使用/未使用）、周波数固定の設定

[3] 本実証で用いたマルチ SIM ルータ（MAX-HD4-MBX-LTE）起動後、SIM の回線接続、GPS 信号受信が開始し、測定できるようになるまで 10 分ほどを要する。そのため、測定前に確認が必要。

	①アグリゲーション無し ②アグリゲーション有り（SIM 選択の組み合わせ含む） ③周波数固定無し ④周波数固定有り（各 SIM 毎、BAND 番号で指定）

（1）キャリアの電波受信状態を測定

①測定開始前に以下を確認しておく

・マルチ回線ルーターに測定する通信会社の SIM をセットし開通（InControl2 で SIM の設定状態がアクティブになっていること）していることを確認

・マルチ回線ルーターを起動して約 10 分後、下表の測定項目が全て取得出来ていること（測定系に不備が無いか確認。通信および GPS の緯度経度情報取得が安定するまで１０分程度要するため。SIM の帯域幅確認でデータ送受信の確認を行う）

②①で確認出来たら、ルートをレンタカーで走行し、InControl 2 の帯域幅画面または WAN 品質画面でリアルタイムにデータが測定出来ているか確認しながら測定する

③測定は測定ルート毎、ルート内容、測定開始終了時刻をメモしておく（データダウンロード時のデータ評価、分析しやすい様に記録しておく）

④固定ビットレート（５Mbps ）でルート上の伝送速度（帯域）を測定する

⑤取得したデータはその日のうちに CSV 出力し保存する（まとめてダウンロードすることで問題ない。尚、png データは評価、分析に必要と思われる場合、リアルタイムにダウンロードして使用）

注意）今回、SIM の納入時期の都合により、早く入手出来た通信事業者 2 社の SIM を先行して実施し、3 社揃った段階で 3SIM での評価を実施した。

表 9-4 に測定条件を示す。

表 8-4 測定条件

	測定条件
測定車両の車速	・レンタカー（HV 車）を用い手動運転 ・時速 20km/h～30km/h（手動運転のため、また道路事情により同一ルートであっても常に同じ速度とは限らない）
上り回線データ設定	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ①固定ビットレート（連続して 5Mbps の上りデータを送信するため、それに相当する映像を PC からルーターに送信して使用。カメラからの映像は未使用） ②可変ビットレート（車載カメラ（車外映像）からの映像入力を使用。映像の変化量に応じ上りデータの速度が可変する。また、以下「カメラの設定」の値により、上りデータの速度（帯域）は可変する
カメラ	・PC 経由でカメラユニットの管理ソフトから設定

	①解像度 480x270、フレームレート 5fps（現行の設定） ②解像度 480x270、フレームレート 30fps（①の解像度でフレームレートは設定可能な最大値 30fps） ③解像度 1280x720、フレームレート 30fps（4Mbps 以上の通信速度となる設定。解像度、フレームレート共、設定可能な最大値）
マルチ回線ルーター	・PC 経由で InControl2 ソフトから設定 ・SIM スロット毎に有効/無効の設定（使用/未使用）、周波数固定の設定 ①アグリゲーション無し ②アグリゲーション有り（SIM 選択の組み合わせ含む） ③周波数固定無し ④周波数固定有り（各 SIM 毎、BAND 番号で指定）

（1）キャリアの電波受信状態を測定

①測定開始前に以下を確認しておく

・マルチ回線ルーターに測定する通信会社の SIM をセットし開通（InControl2 で SIM の設定状態がアクティブになっていること）していることを確認

・マルチ回線ルーターを起動して約 10 分後、下表の測定項目が全て取得出来ていること（測定系に不備が無いか確認。通信および GPS の緯度経度情報取得が安定するまで１０分程度要するため。SIM の帯域幅確認でデータ送受信の確認を行う）

②①で確認出来たら、ルートをレンタカーで走行し、InControl 2 の帯域幅画面または WAN 品質画面でリアルタイムにデータが測定出来ているか確認しながら測定する

③測定は測定ルート毎、ルート内容、測定開始終了時刻をメモしておく（データダウンロード時のデータ評価、分析しやすい様に記録しておく）

④固定ビットレート（５Mbps ）でルート上の伝送速度（帯域）を測定する

⑤取得したデータはその日のうちに CSV 出力し保存する（まとめてダウンロードすることで問題ない。尚、png データは評価、分析に必要と思われる場合、リアルタイムにダウンロードして使用）

注意）今回、SIM の納入時期の都合により、早く入手出来た通信事業者 2 社の SIM を先行して実施し、3 社揃った段階で 3SIM での評価を実施した。

表 8-5 通信事業者3社での SIM スロット位置

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社	C 社

c. 測定データ

下表に測定項目を示す。InControl2 経由でマルチ回線ルーターで測定されたデータは CSV データ形式で全てルーターの時刻データと紐づき 10 秒単位の値で出力される。

ただし、上り・下りの伝送速度は InControl2 経由では、時刻情報に紐づいた 1 分単位のスナップショット値の CSV 出力となるため、伝送速度のデータは API 接続して取得した。なぜならば、API 接続で取得出来るデータは時刻情報と紐づき、秒単位で出力可能であるため（ただし、その情報には位置情報は付与されない)。故に InControl2 で取得した位置情報と紐づいて表示させる場合は、10 秒単位の時刻情報とリンクさせて使用した（そのため、位置情報とリンクした速度データは 10 秒毎の値のみ使用し、表示させている)。

尚、位置情報との紐づけが不要な場合、例えば、アグリゲーション時の各 SIM の帯域使用の割合を時間軸上で確認する場合は API 経由で取得した 1 秒単位のデータを用いて表示し、特性の確認、評価を行った。

表 8-6 測定項目(今回使用する測定項目のみ表示 InControl2 経由)

測定項目	測定の方法、定義、単位等
時刻情報	yyyy/mm/dd/hh:mm:ss
位置情報	緯度経度（表示例：36.113888,139.802250）
Carrier	通信事業者名（表示例：SoftBank (JP)、NTT docomo (JP)、au (JP)）
Band	捕捉した周波数帯（表示例：LTE Band 28 (700 MHz)）
RSRP	単位：dBm ※ルーター（無線受信機）で測定された無線の受信レベル
Latency	単位：ms ※TCP 通信プロトコルにおける転送要求から応答を受信するまでの応答時間
通信速度	単位：kbps（表示例:2024-12-18 0:26,1,2 ; Minute,Download,Upload） ※測定された　上り、下りの 1 分毎のデータ速度（スナップショット値） 注）1 分単位でのスナップショット値であるため、本事象実験の評価ではこのデータは使用せず、API 接続して得られた速度データを利用した

※測定の時間粒度が 10 秒のため、それよりも短時間で生じる通信品質の変化は観測できない。

表 8-7(今回使用する測定項目 API 接続経由)

測定項目	測定の方法、定義、単位等
時刻情報	yyyy/mm/dd/hh:mm:ss
通信速度	単位：bps（各 SIM スロット毎およびアグリゲーション時は合計値） （表示例：2024/09/18,17:29:57,107.52,82.8,5276.952,5467.272 ; ;Date,Time,Cellular1,Cellular3,Cellular4,SUM）

①キャリア毎、以下の変化を時間軸で変化を確認し特性を把握する。また、RSRP の低下、Latency の悪化時、各値との関連性を確認

②上記①に緯度経度情報加え、ルート上の RSRP、Latency の変化を 3D マップで確認

※RSRP は-80dBm 以上、-100dBm 以下の 2 段階でルートの電波伝搬特性（面グラフ）

を評価する（ルート上の RSRP の受信レベル変化の特性を把握）

※Latency は捕捉周波数と遅延量を見紐づけかつ変化（棒グラフ）の特性を評価する

③上記①、②に帯域データとの連携処理（時刻で値を連携させる）を行い、ルート上の帯域変化（上り映像の速度変化）を確認

④キャリア毎、ルート上の RSRP の特性、使用周波数帯、Latency 変化の特性、通信速度の特性を確認

⑤それぞれの特性を確認した上で、通信品質の低い状態、場所を確認した上で、通信品質改善につながる策を考える。また、再現性についても評価するため、複数回同じルートを測定して評価する。

d. 測定データの可視化方法

測定データの時間変化や地図に対応した変化を確認するために、時間を横軸としたグラフ表示と、地図上に測定データを表現するマップ表示の 2 つの可視化を行い、評価した。図 9-7 はグラフ表示、図 9-8 はマップ表示の例である。なお、マップ表示では、見やすさの観点から、一部の測定点のデータを抜粋して表示している。

■グラフ表示およびマップ表示の説明

グラフ表示、マップ表示の使用目的は、ルート上の通信品質の特徴を時間的および俯瞰的に把握し、マルチ SIM、キャリアアグリゲーション、周波数固定の効果評価・分析につなげるために用いる。また、データが正しく取得（測定）出来ているかの確認ツールとしても有効なデータ（表示方法）となる

グラフ表示は、時間的変化を把握するのに有効であり、マップ表示は時間的変化に加え、どのポイントでどの様な状況変化が発生しているか俯瞰的に確認するのに有効である。

マップ表示は位置情報が正しく取得出来ているかの確認、およびどの位置でどの様な状態となったかを把握するために使用する。そのため、通信の状況変化を地図上で全体俯瞰し、次の測定、評価・分析に繋ぐために有効なデータ、ツール、という意味で捉えていただきたい。

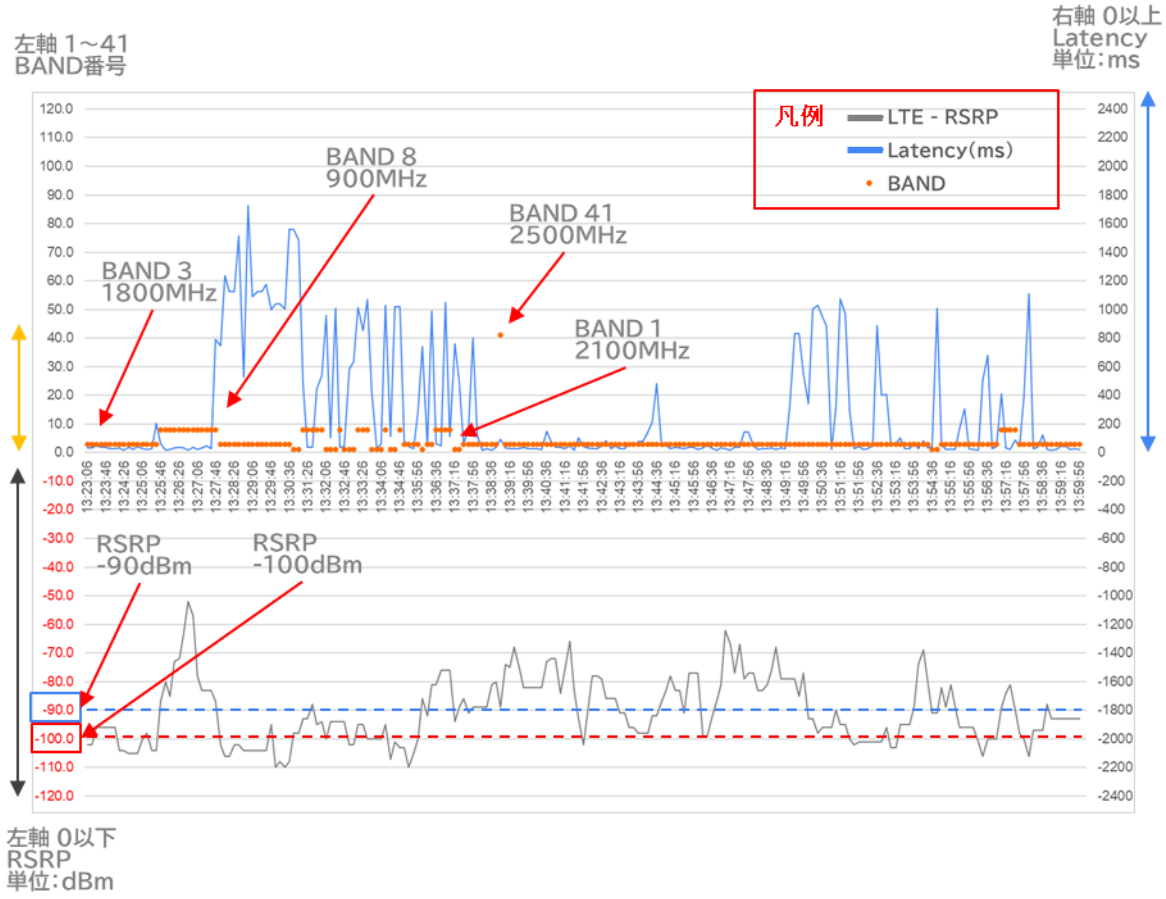
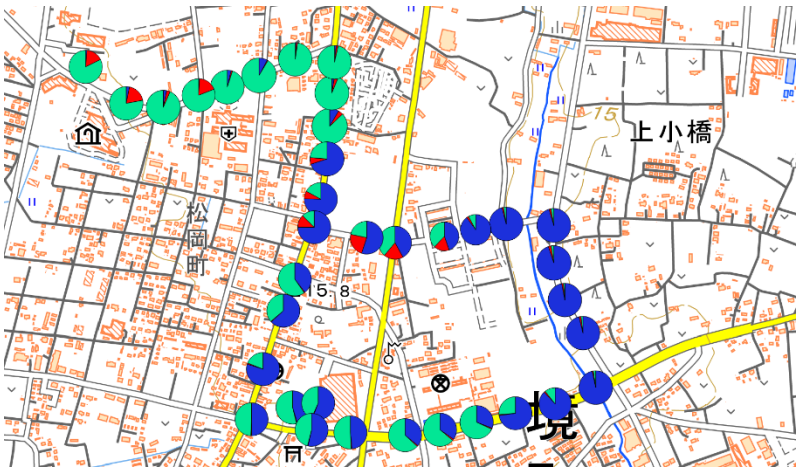


図 8-6 2 次元グラフ表示(例1)

マップ表示（例１）の円のサイズは通信速度を示している。Band ごと又は通信事業者ごとに配色することで、測定点における通信速度（実績）の割合を可視化できる。なお、この割合は当該地点の Band または通信事業者の通信品質の程度を厳密に比較するものではなく、マルチ SIM ルータの動作結果として得られる実績値であることに留意が必要である。



出所）国土地理院地図

図 8-7 マップ表示(例1)

e. 現状の通信環境の測定評価

a～d で説明した手法を用いて走行ルート上の現状の通信環境を測定評価した。測定では、このエリアで通信事業者が使用している周波数帯の確認、各周波数帯の固定可否について、通信事業者、周波数帯などのパラメータを変化させ測定した。

この測定結果として以下を確認した。

①各通信事業者の通信品質

②周波数固定可能な周波数帯（BAND 番号）

8.4 通信品質改善手法の導入

8.4.1 各種通信技術・設定の効果検証

（1） マルチ回線

複数通信事業者の SIM を計 3 枚使用して 3 社 3 回線を 1 回線に束ねた通信回線を構築し、走行ルート上の通信環境を測定評価した。今回使用したマルチ回線ルーターは 4 つの SIM スロットがあり、SIM1、SIM3、SIM4 のスロットを使用して測定し、マルチ回線構成での測定評価した。

表 8-8 マルチ回線(キャリアアグリゲーション含む)の検証(ルーターの SIM 挿入位置)

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社	C 社

（2） キャリアアグリゲーション

同一通信事業者の SIM を 2 枚使用し、2 回線を 1 回線に束ねた通信回線を構築し、走行ルート上の通信環境を測定評価した。

今回使用するマルチ回線ルーターは 4 つの SIM スロットがあり、SIM1 および SIM2 のスロットを使用して測定し、SIM1 枚と SIM2 枚のアグリゲーション有り、無しの効果、差異について比較、評価した。

表 8-9 キャリアアグリゲーションの検証(ルーターの SIM 挿入位置)

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
1 社 /2SIM	A 社	A 社		

(3) 周波数固定

周波数固定可能な周波数帯において、走行ルート上の通信環境を測定評価した。測定では、通信事業者、周波数帯などのパラメータを変化させ、周波数固定無しと周波数固定の組合せ、周波数固定同士の組合せ等、複数の組合せによる通信品質を測定した。

通信事業者ごと ODD において自動運転に適する周波数帯、組合せを確認した。

（1） 周波数固定の組み合わせにおける電波特性、通信品質の測定

（2） 通信事業者ごとに電波特性・通信品質の良いバンドを精査

表 8-10 周波数固定の組み合わせ検証(例)

測定 構成	SIM1 スロット	SIM2 スロット	SIM3 スロット	SIM4 スロット
2 社 /4SIM	A 社 B8/900MHz 固定	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B3/1800MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定
2 社 /4SIM	A 社	A 社 B1/2100MHz 固定	B 社 B28/700MHz 固定	B 社 B1/2100MHz 固定
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社
3 社 /3SIM	A 社	-	B 社 B3/1800MHz 固定	C 社 B28/700MHz 固定

注）周波数固定の検証を進める中で、通信品質の効果がみられた周波数帯を主に組合せの検証を進めた（B 社　B3/1800MHz、C 社 B28/700MHz がその周波数帯)。

表 8-11　例)周波数固定が可能なバンドの測定

通信事業者	周波数固定を検証したバンド
A 社	B1(2100MHz)、B31800MHz)、B8(900MHz)
B 社	B1(2100MHz)、B3(1800MHz)、B28(700MHz)
C 社	B1(2100MHz)、B18(850MHz)、B28(700MHz)

注)A 社 B41(2.5GHz)、B 社 B8(900MHz)、B 社 B42(3.5GHz)は固定出来ず

(4) QoS 設定

自動運転車両の監視用映像と車両情報通信を同時に送信するにあたって。帯域が確保できない

環境下にあった時に車両情報通信を優先送信する必要がある。優先送信のための仕組みとしてQoS(Quality of Service)を利用できると考え、本検証を行なった。

検証用 PC(MacBook Air)上に

1.車両通信クライアント(車両通信を模した TCP 通信クライアント)

2.映像送信クライアント

の 2 つのデータ送信用クライアントを構築し、Peplink マルチ回線ルーターと有線 LAN で接続する。車両通信クライアントからは 500kbps の固定ビットレートで、映像送信クライアントからは 3.5Mbps の固定ビットレートでそれぞれの受信用サーバーにデータ送信を行う。それぞれのクライアントから送信されるパケットのヘッダには DSCP 値を設定する。上限 3Mbps の帯域制限をかけることで両方の送信用合計よりも低い帯域の環境を構築し、その環境下でルーターの QoS 制御の有無による車両通信の使用帯域変化を計測する。QoS 制御が無効時には車両通信において必要な帯域が確保されておらず、有効時には確保されているかを確認することで、QoS が機能有効かを確認する。

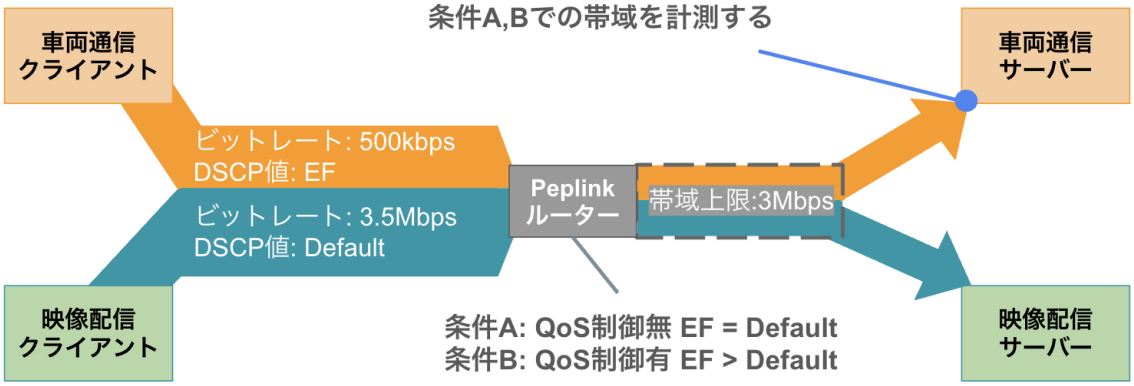


図 8-8 QoS の仕組み(例)

8.4.2 各種通信技術・設定の最適パラメータ選定における注目点

全ての測定に共通する注意点として

① 設定した内容で正しく測定出来ているか、必ず測定データの全項目において抜けが無い確認する。全て確認し、予定している測定を継続すること。例えば、設定済の思い込み・勘違い、想定通りの設定になっていなかった、設定したが更新処理(設定のアクティベート)が未実施、ケーブル・コネクタの接続不良等が発生していた(途中からデータ取得出来なかったケースも考慮)ということが発生する場合もあるので、確認が必要。

② 測定結果データを確認し、想定していた結果と大きな乖離があれば設定内容、接続、測定環境を再チェックするプロセスを加えておくこと(思い込みの確認含め、疑問を感じないか複数人で確認し、次の測定に進む。また測定内容、測定方法自体に修正を加える、といった必要性も出てくる場合があるので、臨機応変に対応することが大事である)

③ 出来る限り、移動測定に合わせ、リアルタイムで測定結果(値、グラフ表示等)を確認し、

何が発生しているのか（RSRP、速度の急激な変化等）も確認しながら測定を継続することが望ましい。途中で再測定が必要な場合、予期せぬ事象の発見がある場合がある（次の測定に向けたヒントになる場合もある）

（1） マルチ回線

データ SIM を開通するにあたり、以下の情報が必要であるので各社に確認し、ルーターに挿入・設定して使用する必要がある。また、ルーターで使用可能な SIM 形状、契約可能な SIM 形状を確認し、ルーター側で対応可能な SIM を選択・契約する必要がある（ルーターが標準 SIM 対応の場合、契約した SIM が標準 SIM 非対応の場合、別途 SIM アダプターが必要となる）

① APN 名
② ID
③ パスワード
④ IP V4/V6 設定
⑤ 認証方式
⑥ SIM PIN (Optional)番号

（2） キャリアアグリゲーション

キャリアアグリゲーションの設定が正しく行われているか、あらかじめ確認する必要がある。そのため、キャリアアグリゲーションにより、複数の周波数帯が束ねられているか測定データを確認する。（今回の測定構成では、InControl2 または API 接続した PC から確認可能）

（3） 周波数固定

現地で測定された周波数帯を確認した上で、周波数固定を行う必要がある。また、各通信事業者毎、周波数固定可能な周波数があり、またルーター上は周波数固定出来ても、単独周波数帯のみで通信出来ない場合があるので、周波数固定により通信出来ているか否か測定データより確認する必要がある。尚、今回使用したマルチ回線ルーターでは、InControl２で帯域確認した（上り下りのトラフィックが発生しているかの確認）。

（4） QoS 設定

QoS の仕様（機能させるための条件）を確認した上で検証する必要がある。また、どの様な目的でそれを使うことを想定しているか明確にし、QoS 機能を使用する必要がある。

今回用いた Peplink ルーターは物理的に帯域が確保できない環境下ではなく、「ユーザー側で設定した帯域上限を超えた帯域を使用した際」に QoS 制御を行うサービスとなっていたため、本検証の本来の目的とは異なる条件下での検証になってしまった。

また、ビジネス用途では無制限に帯域を利用するのではなく、ある程度の使用帯域制限をかけ

た上での運用が考えられる。そのような環境で車両通信を優先する場合は本検証での QoS 適用が有効であると考えられる。

8.5 導入・運用に係る留意点

NW 機器の高機能、SIM 数の増加に伴い、初期費用および維持費用も増加する。そのため、そのエリアで自動運転サービスを提供する上で必要な機能、最適な通信事業者の選択と組合せ、どこまで信頼性を維持するかといった条件を明確にした上で、導入する機器、構成を決定する必要がある。また、技術を正しく理解し運用するこも必要である点も注意していただきたい。

自動運転サービスにおいて重要事項は、自動運転車の性能、安全性、堅牢性といった車両側の機能、品質となり、通信はそのサービスを維持、運用をサポートするインフラでしかない。しかし、自動運転バスにおいては、乗客の安心、安全を遠隔で見守ることが必須であると考えられ、それを支える通信、通信技術も重要な役割を果たすことになる。そのため、自動運転サービスを支える必要最低限の通信品質、切れない通信は非常に重要な事項となる。また、レベル４の自動運転サービスを見据えた場合、必要最低限の通信品質の基準も設定し、安全安心なサービス提供、そしてそれらを支える技術、制度、ルール整備も重要となるため、本実証で得られた成果がそれらの助け、気付きになれば幸いである。