地域課題解決型ローカル5G等の実現に向けた開発実証に係るモビリティ分野におけるローカル5G等の技術的条件等に関する調査検討の請負（自動運転車両の安全確保支援の仕組みの実現）

報告書

概要版

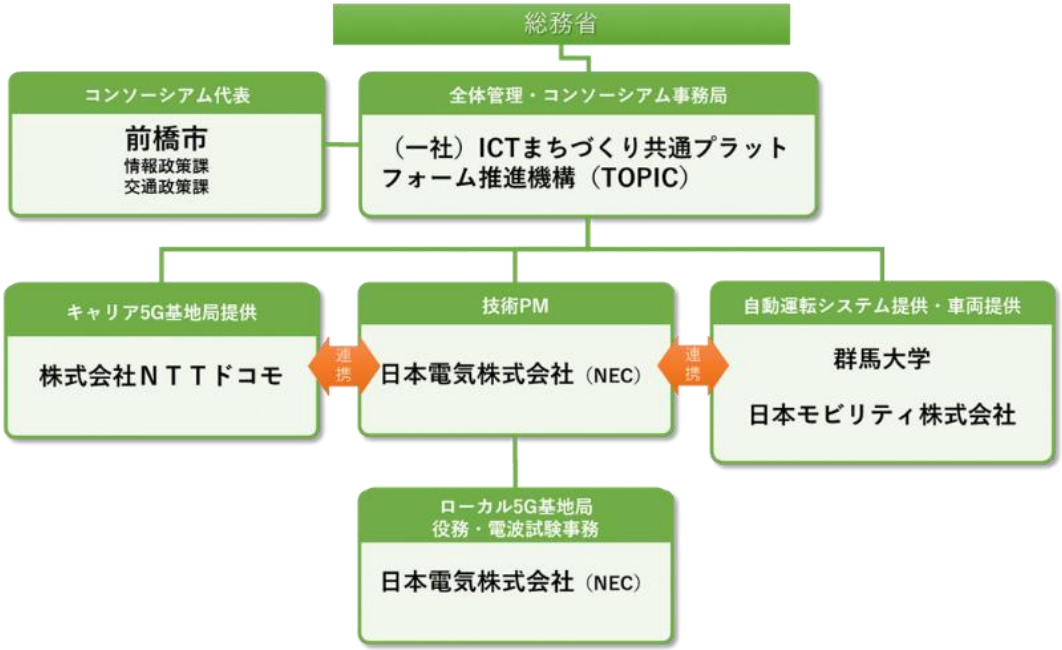
令和3年3月25日

一般社団法人ICTまちづくり共通プラットフォーム推進機構
（前橋5G社会実装プロジェクト）

実証概要

実証体制

本調査検討の実証体制は以下のとおり。



前橋市	コンソーシアム代表、実証フィールド
TOPIC	全体PM
日本電気株式会社	技術PM、ローカル５G基地局の提供、電波伝搬試験事務の実施、５G対応型車両制御直結ソリューション開発、学習型通信品質予測技術・学習型メディア送信制御技術の提供、他地域実証推進(沼津市)
群馬大学	自動運転連携に関する研究実施場所及び設備の提供、技術分析評価、実装と横展開に関する検討
日本モビリティ株式会社	５G環境に対応した自動運転ソリューションの開発
株式会社NTTドコモ	可搬型キャリア５G基地局の提供

免許申請概要

- 開設理由
  ① 道路インフラ(路側カメラ、路側センサ等)と５G無線が連携した実証フィールドを群馬大学CRANTS敷地内（屋外）に構築し、５G無線と道路インフラの協調による自動運転課題解決モデルの検証を行うことが目的である。

  ② ５G無線は、ローカル５G Sub6の屋外利用として4.8～4.9GHzの共用条件が整理されたことから、4.7GHz帯(中心周波数4849.86MHz)を希望し、この周波数帯において屋外伝搬・無線性能評価を行い、道路インフラでの5G無線利用の有効性を検証することが目的である。

- 4.7GHz帯　干渉対策について
  2020/10/18　NTTドコモと調整

- 申請スケジュール
  免許申請　：10/27
  予備免許取得　：11/10
  本免許取得　：12/18

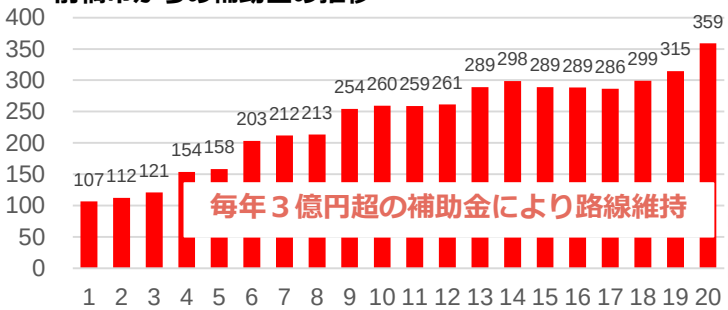
対象とした地域等課題及び本実証の課題解決システムとの関係性

群馬県前橋市では、公共交通インフラにおいて、バス路線の「運行収支の悪化」、及びバス事業者の「運転手不足」といった課題を抱えていた。少子高齢化の進行によって、将来バス路線の維持が困難であることから、自動運転技術導入による課題解決を目指した。

群馬県前橋市の公共交通インフラの課題

運行収支の悪化

前橋市からの補助金の推移

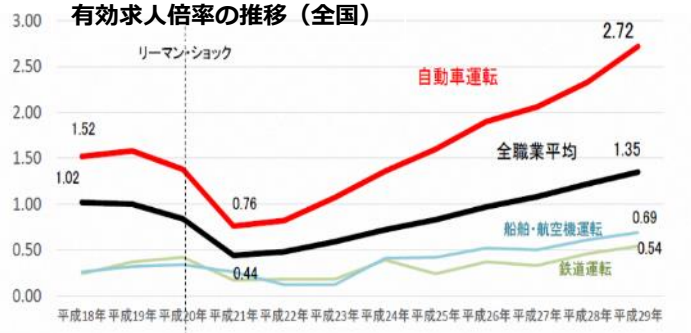


前橋市地域公共交通網形成計画より

人口減による市税収入の減少が見込まれる中、将来にわたって維持困難

運転手不足

有効求人倍率の推移（全国）



未来投資会議（第24回）モビリティに関する参考資料より

将来的に運転手不足が理由で廃線、減便の恐れ

市網形成計画に基づく利便増進策を順次実施（ダイヤ調整、路線見直し、MaaSの取組み）

自動運転技術の導入により運行コストの減少、運転手不足の補完

- **平成30年度　全国初の営業路線での実証実験を実施**
- **平成31年度　２台同時運行による遠隔管制実験の実施**

遠隔型自動運転※バスの実装に向けて生じた課題を５Gを活用して解消する。

※当該車両から遠隔に存在する遠隔監視・操作者が電気通信技術を利用して監視し必要に応じ、その運転操作を行うことが出来るバス

課題解決システム

課題①

4G/LTEでは車両から遠隔管制室に送信できるデータ量が少なく、**遠くの対向車や周辺の交通状況の確認が困難だった。**

- ５Gの**超高速**の特性を活かして、**多数のカメラの情報を遠隔管制室に対し、高画質で伝送する。**

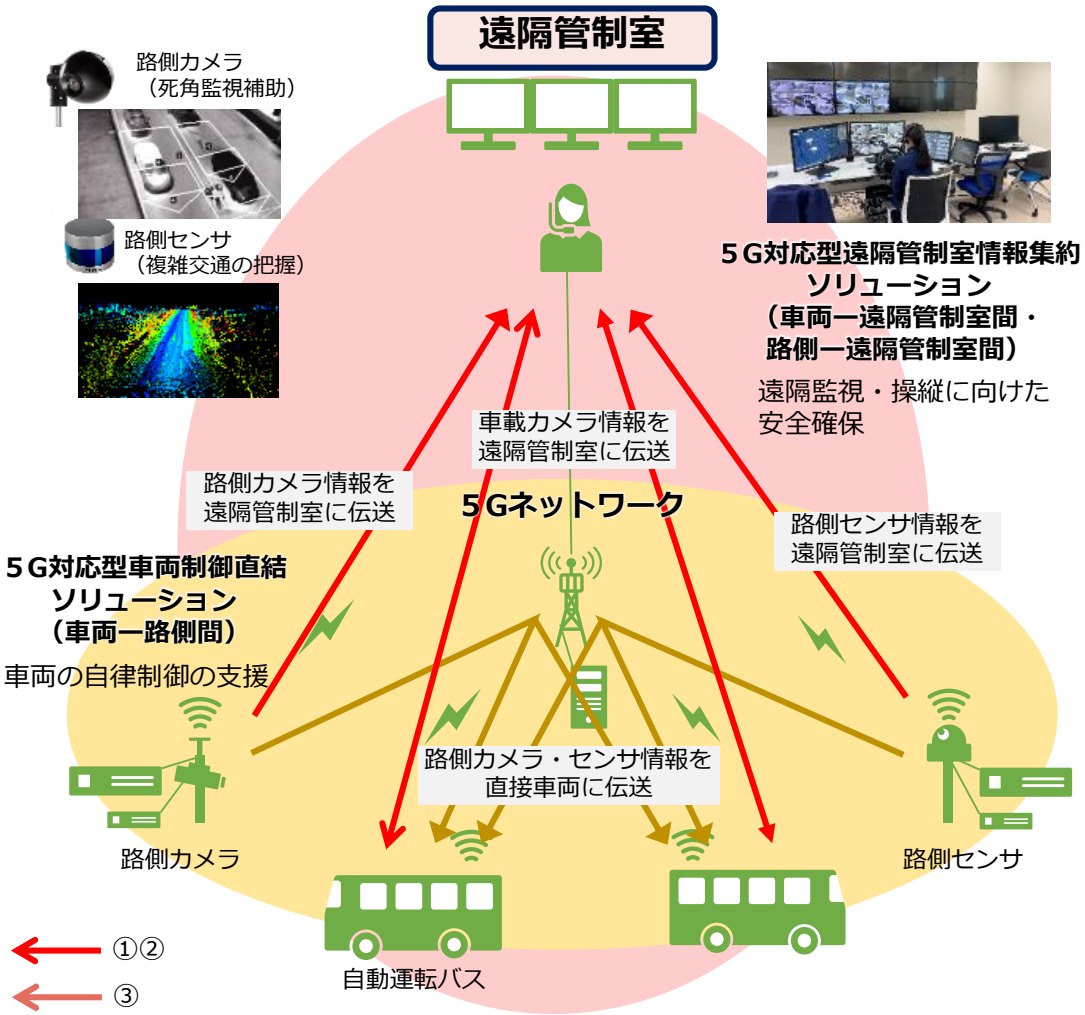
課題②

死角となる道路やバスターミナル内等の歩車混雑地点が遠隔管制室から確認できず、**周辺状況確認に時間がかかる。**

- ５Gの**超高速**の特性を活かし、**路側センサやカメラを設置してAI処理し、遠隔管制室に伝送する。**
- ５G及びエッジコンピューティングによる**超低遅延**の特性を活かし、**路側情報を車両制御に直接伝達する。**

課題解決システムの全体像

遠隔型自動運転の実現に向け、「５G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション（車両－遠隔管制室間）」、「5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション（路側－遠隔管制室間）」と、「５G対応型車両制御直結ソリューション（車両－路側間）」の３つの課題解決システムを検証した。



①5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション（車両－遠隔管制室間）

①フルHD画質の車載カメラを自動運転車両に設置した。
②車載カメラの情報を**遠隔管制室に発信した。**
③車載カメラの映像を遠隔監視・操作者のモニタに表示した。
④遠隔監視・操作者が映像をもとに、**遠方の他車両の挙動を識別し、安全確認を行った。**

センターに情報を上げ人が判断

②5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション（路側－遠隔管制室間）

①路側カメラとセンサを死角地点に設置した。
②路側カメラとセンサの情報を**遠隔管制室に発信した。**
③路側カメラの映像やセンサ情報を遠隔監視・操作者のモニタに表示した。
④**遠隔監視・操作者が情報をもとに**、死角にある他車両や、右折時の対向車接近といった挙動を確認し、**安全確認を行った。**

センターに情報を上げ人が判断

③5G対応型車両制御直結ソリューション（車両－路側間）

①路側カメラを死角地点に設置した。
②路側カメラの映像から周辺の交通状況を解析して、車両システムに伝達した。
③自車両と他車両の**衝突を予測し、事前に危険を検知**した際に緊急停止を実施した。

エッジで危険を検知、車両に通知
（危険時に、E2Eでリアルタイムな情報必要）

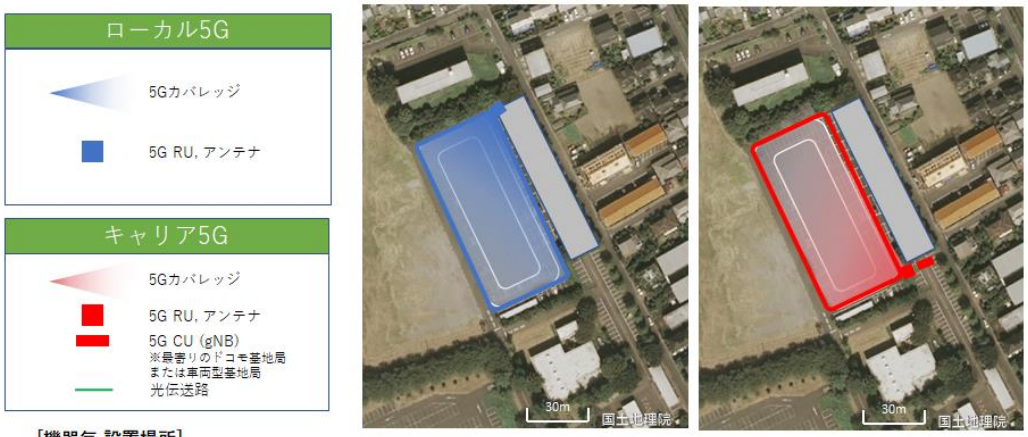
実証環境

本調査検討では、群馬大学試験路にローカル５G及びキャリア５Gを設置し、ローカル５G⇔キャリア５G切替えの評価を行うと共に、公道（上毛電鉄中央前橋駅）でキャリア５G基地局を設置することによって公道での検証を行った。

（１）エリアカバレッジ（群馬大学試験路・上毛電鉄中央前橋駅）

エリアカバレッジ（群馬大学試験路）

[実証フィールド]
群馬大学CRANTSセンター
（荒牧キャンパス内）
〒371-0044
群馬県前橋市荒牧町４丁目２



[機器毎 設置場所]
テストフィールド施設
・5G RU、アンテナ
※現地サーベイ後確定予定

エリアカバレッジ（上毛電鉄中央前橋駅）

[実証フィールド]
中央前橋駅ロータリー
〒371-0015
群馬県前橋市三河町1丁目3

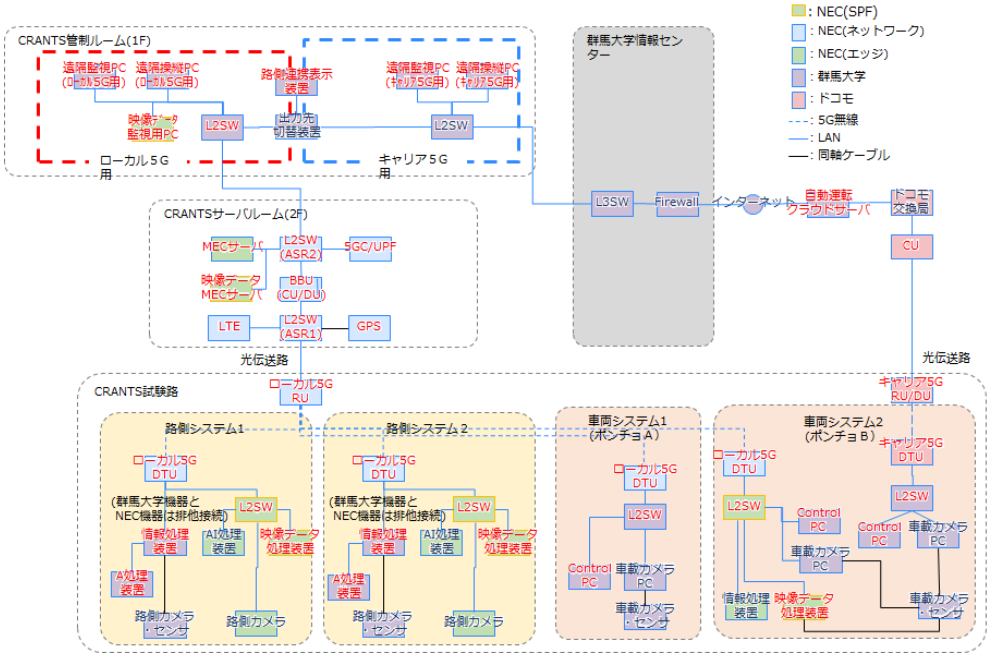
[機器毎 設置場所]
中央前橋駅（上毛電鉄様）
※現地サーベイ後確定予定

群馬大学試験路において、ローカル５G⇔キャリア５G切替えの検証を行った。

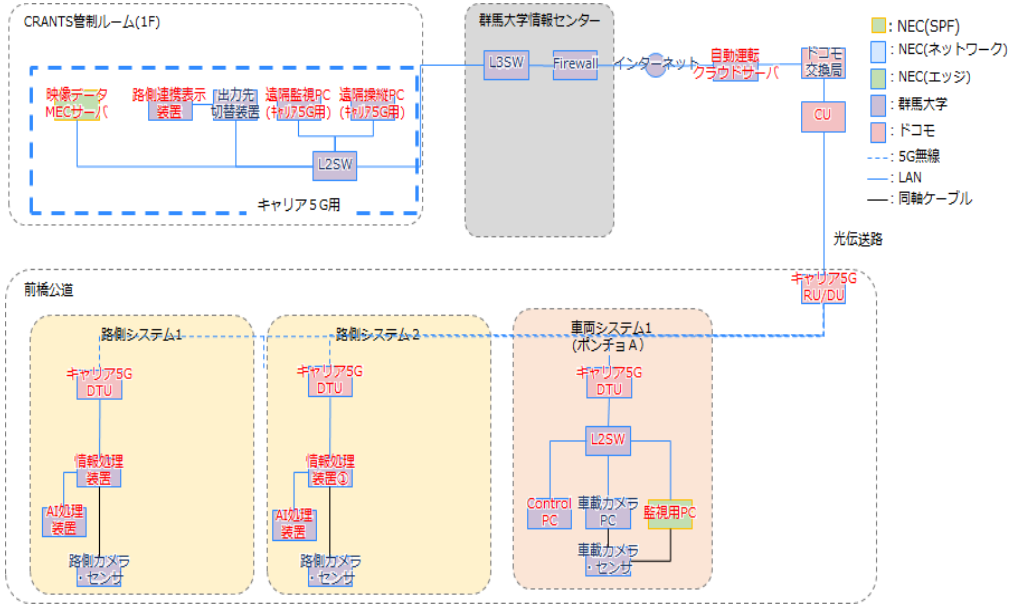
実証環境②

（2）ネットワーク構成図（群馬大学試験路・上毛電鉄中央前橋駅）

ネットワーク構成図（群馬大学試験路）



ネットワーク構成図（上毛電鉄中央前橋駅）



ローカル５Gシステムに関する技術諸元

ローカル5G及びキャリア5G基地局の装置諸元は以下のとおり。

ローカル5G（群馬大学）

項目	実験局（基地局相当）諸元
変調方式（一次変調）	QRSK,16QAM,64QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.72MHz (100MHz×1CC)
中心周波数	4849.86MHz
送信電力	40mW (+16dBm) ×4(1局合計160mW (+22dBm))
最大EIRP	+24.5dBm (1局合計+30.5dBm)
アンテナ構成	指向性アンテナ×4
アンテナ利得	12dBi
アンテナ高	10m
申請希望局数	２局

キャリア5G（群馬大学）

項目	実験局（基地局相当）諸元
変調方式（一次変調）	QRSK,16QAM,64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	4500MHz~4600MHz
中心周波数	4500MHz
送信電力	36.61dBm
最大EIRP	49.11dBm
アンテナ構成	指向性アンテナ (送信２アンテナ，受信２アンテナ)
アンテナ利得	12.5dBi
アンテナ高	11.1/11.3m (実証の内容による)
申請希望局数	１局
システム構成	NSA構成

キャリア5G（上毛電鉄中央前橋駅）

項目	実験局（基地局相当）諸元
変調方式（一次変調）	QRSK,16QAM,64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	4500MHz~4600MHz
中心周波数	4500MHz
送信電力	（アンテナー体型のためEIRPの概念のみ）
最大EIRP	45.11dBm
アンテナ構成	指向性アンテナ (アンテナー体型)
アンテナ利得	（アンテナー体型のためEIRPの概念のみ）
アンテナ高	6m (実証の内容による)
申請希望局数	1局
システム構成	NSA構成

課題解決システムの実証

実証目標①

自動運転車両の社会実装の実現に向けて、ローカル5G通信を活用することによる自動運転車両の安全確保支援の仕組み実現のため、３つのソリューションに対して、それぞれ下記の表のとおり目標を設定した。

	５G対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（車両－遠隔管制室間）	５G対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（路側－遠隔管制室間）	５G対応型車両制御直結 ソリューション（路側－車両間）
実現目標	• 車両走行中に車載カメラ(フルHDx2)および車載センサ相当のデータが遠隔管制室まで転送を２台同時に伝送されることを達成する事を目標とする。	• 車両運行中に路側カメラおよびセンサ相当のデータが遠隔管制室まで伝送されることを２セット同時に達成する事を目標とする。	• 路側センサ情報取得から車両の停止指示までの時間が平均0.4秒以内を実現できる事を目標とする。 • 運転手が危険を察知後、ブレーキを踏むまでの時間は、一般的に平均0.7秒から１秒であることから設定とした。他車両が死角から接近するユースケースにおいて、事前に事象を察知することで、安全確保支援につながる。
効果目標	• ローカル5Gにより車両からの映像伝送(フルHD)により75m以上の障害物識別限界距離の実現を目標とする。	• ローカル5Gにより道路側デバイスからの情報伝送により75m以上の死角障害物視認距離の実現を目標とする。	• 課題解決システムにより路側センサ情報取得から車両の停止指示までの時間が平均0.4秒以内を実現を目標とする。根拠は同上。 • 交差点停止線から手前6m以内の停止を実現を目標とする。
機能目標	• ローカル5Gにより車両からの映像(フルHD 30p)x2を映像伝送する機能の実現を目標とする。 • ローカル5Gにより車載センサ情報についても同時伝送する機能の実現を目標とする。 • ローカル5Gにより上記情報を車両2台分同時伝送可能な機能の実現を目標とする。	• ローカル5Gにより道路側デバイス（レーザーセンサとカメラ）情報を伝送可能な機能の実現を目標とする。 • 道路側デバイスのカメラにAI処理を加え、管制室の監視作業における認識補助機能を実現できる事を目標とする。 • 上記道路側デバイスを2台分同時伝送可能な機能の実現を目標とする。	• ローカル5G通信の通信時間と安定性(通信時間の振幅、パケット損失率)の観点で実現を目標とする。

実証目標②

実績目標（運用目標）

	５Ｇ対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（車両－遠隔管制室間）	５Ｇ対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（路側－遠隔管制室間）	５Ｇ対応型車両制御直結 ソリューション（路側－車両間）
運用目標	• 公道での自動運転実証実験による、本ソリューションの運用ができる事を目標とする。	• 公道での自動運転実証実験による、本ソリューションの運用ができる事を目標とする。	—

課題解決システムに関する検証及び評価・分析

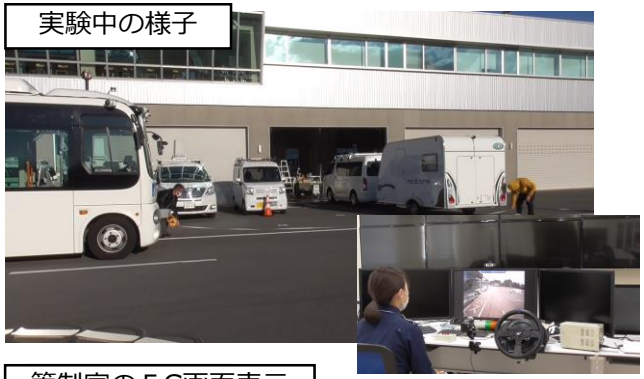
下記３つのソリューションに対して、検証及び評価・分析を下記に定めた。

	５Ｇ対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（車両－遠隔管制室間）	５Ｇ対応型遠隔管制室情報集約 ソリューション（路側－遠隔管制室間）	５Ｇ対応型車両制御直結 ソリューション（車両－路側間）
効果評価	• 試験路による自動運転車両と遠隔管制室の通信をローカル5Gを用いた効果を評価する。	• 試験路による路側センサと遠隔管制室の通信をローカル5Gを用いた効果を評価する。	• 試験路による自動運転車両とローカル5Gのエッジコピューティングを用いた効果を評価する。
機能評価	• 試験路による自動運転車両と遠隔管制室の通信をローカル5Gを用いた機能を評価する。	• 試験路による路側センサと遠隔管制室の通信をローカル5Gを用いた機能を評価する。	• 試験路による自動運転車両とローカル5Gのエッジコピューティングを用いた機能を評価する。
運用評価	• 公道での自動運転実証実験による、本ソリューションの運用を関係者のアンケートなどにより評価する。	• 公道での自動運転実証実験による、本ソリューションの運用を関係者のアンケートなどにより評価する。	–

課題解決システムに関する効果検証

車両－管制間の５G評価

実験中の様子



管制室の５G画面表示

自動運転車両を静止させ
正面に人を配置、人の向きを
認識できる距離を計測

実験結果概要

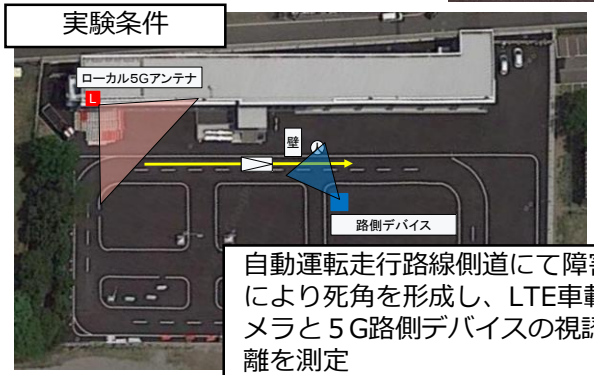
- 従来のLTEでの伝送解像度（XGA）による識別限界は45mであった。ローカル５Gでの伝送解像度（フルHD）の場合、75m以上の目標に対して、識別限界は100m(試験路の敷地の限界値)で目標を達成できた。

道路側－管制間の５G評価

管制室の５G画面表示

道路側デバイス

実験条件



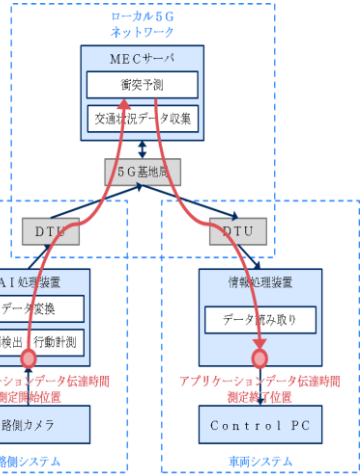
自動運転走行路線側道にて障害物により死角を形成し、LTE車載カメラと５G路側デバイスの視認距離を測定

実験結果概要

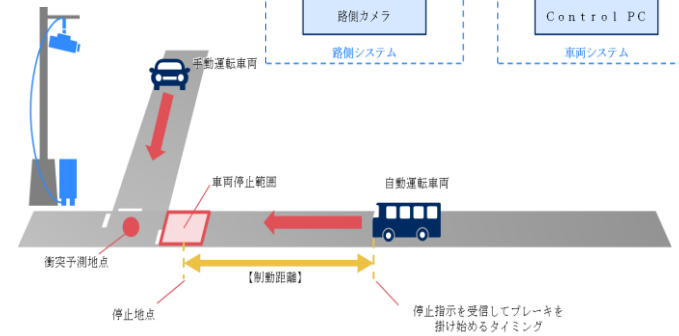
- 従来LTEでの車両映像からでは、死角人物視認距離が10.6mであった。ローカル5Gでの死角人物視認距離75m以上の目標に対して、死角人物視認距離は100m以上可能であり、目標を達成できた。

路側－車両間の５G評価

衝突回避に関するデータの流れ



衝突予測地点と
車両停止範囲



実験結果概要

- 路側システムー車両システム間の路側センサ情報取得から車指示するまでの時間が平均0.4秒以内（アプリケーション処理：約247ミリ秒、無線通信処理：約41ミリ秒）の目標を達成することができた。
- 群馬大学試験路にて車両衝突の模擬を20回実施し、 20回が6m以内で停止し、交差点停止線から手前6m以内の停止する目標を達成できた。

課題解決システムに関する機能検証

車両－管制間の５G評価

実験中の様子

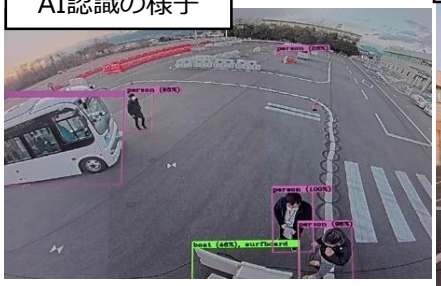
管制室の５G画面表示

実験結果概要

- ローカル5Gにより車両からの映像(フルHD 30p)x2映像伝送を実現できる事を目標に対し実現できた。
- ローカル5Gにより、車載センサ情報について、同時伝送する機能が実現できる事を目標に対し実現できた。
- ローカル5Gにより上記情報を車両2台分の同時伝送可能な機能の実現できる事を目標に対し実現できた。

道路側－管制間の５G評価

AI認識の様子



道路側デバイス

管制室の５G画面表示

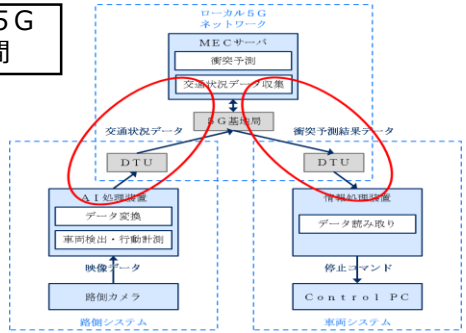
実験結果概要

- ローカル5Gにより道路側デバイスの情報を管制室に伝送できる事の目標に対し伝送可能なことを確認できた。
- 道路側デバイスのカメラにAI処理を加え、管制室の監視作業における認識補助機能を実現できる事を目標に対し実現できる事を確認できた。
- 上記道路側デバイスを2台分同時伝送可能機能を実現できる事を目標に対し実現できることを確認できた。

路側－車両間の５G評価

実験中の様子

ローカル５G
通信区間



実験結果概要

- 車両システム(移動局)との通信では、車両が移動しながらの測定であるため、稀に通信時間の遅延が大きく発生する場合あったが、パケット損失は０％であった。

課題解決システムに関する運用検証

JR前橋駅から上毛電鉄中央前橋駅のシャトルバス区間において、約２週間の公道実証実験を実施した。実証期間中は上毛電鉄中央前橋駅の5G環境において周辺の歩道橋等に設置した路側カメラ・センサのデータが遠隔管制室へ伝送されることを確認し、その有用性を確認した。自動運転バスのロータリー進入時、路側カメラ及びセンサが車両の死角を映すことで、右折時の死角路線から接近する車両を事前に確認することができ、遠隔管制室での右折タイミングの判断に寄与することが確認された。しかし、時間帯・歩行者の被服の色など遠隔監視が困難となる要因も確認された。

取り付けの様子

設置場所

準備期間の様子

本番期間（車両）の様子

本番期間（管制）の様子

実験実施概要

日程

- 準備期間
  2021年1月25日-2月13日
- 出発式
  2021年2月15日
- 本番期間
  2021年2月15日-2月28日
  （水、木曜日除く）

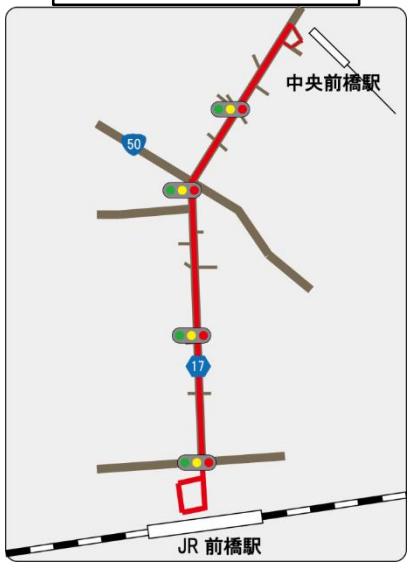
走行路線

JR前橋駅から
上毛電鉄中央前橋駅の
シャトルバスを置き換え運用
（営業運行）

通信環境

LTEとキャリア5G
（中央前橋駅周辺にキャリア5Gのアンテナを設置）

実施ルート



実験結果概要

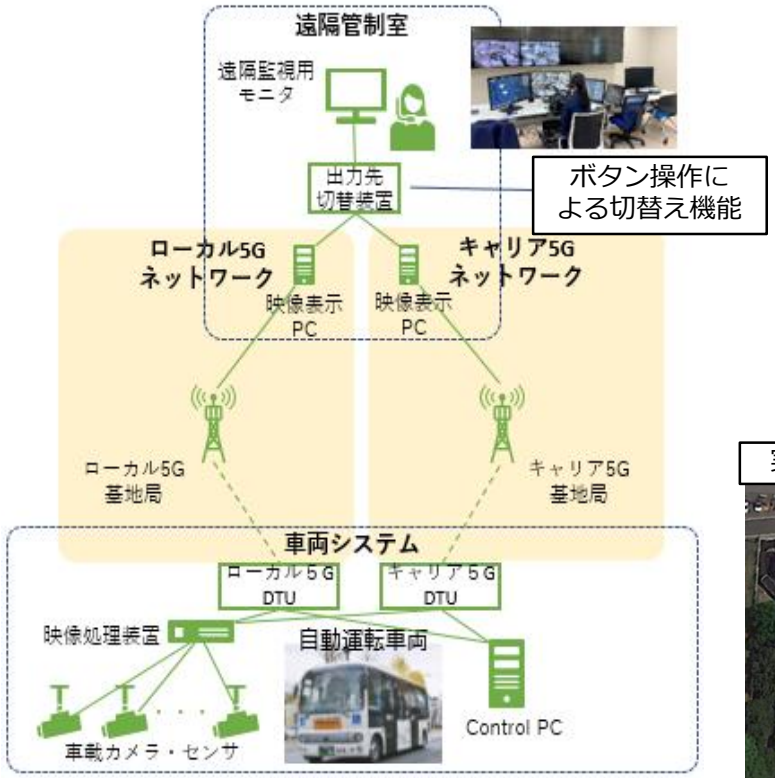
- キャリア5Gにより車両からの映像、道路側デバイスのデータ/映像を管制室に伝送できることを確認。
- 実証期間中の運用を完了した。
- オペレータからのヒアリングによりは4Gよりキャリア5Gの方が、他車両挙動距離が延長し安全確認が確実に行えることが示された。
- 実環境においても5Gの有用性が示された。

ローカル５Gとキャリア５Gの切替え検証

5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション（車両-管制室）の付加機能の検証として、ローカル5Gとキャリア5Gの切替え検証を行った。実装実験では自動運転車両を、試験路外周路を周回させ、ローカル5Gの電波強度が良好でない場所において被験者であるオペレーターが画面切替え用ボタンを操作することで、任意にローカル5Gとキャリア5Gの映像を切替を行った。切替は4回行い、機能が有効であるか確認できた。

検証内容	① ローカル5Gとキャリア5Gのネットワークを同じ場所に構築し、車載データの受信品質に応じてシームレスに切替えることで遠隔監視業務が継続できるか確認する ② 切り替え機能の出力先切替装置を使用する事によりシームレスな切替えが出来る確認する

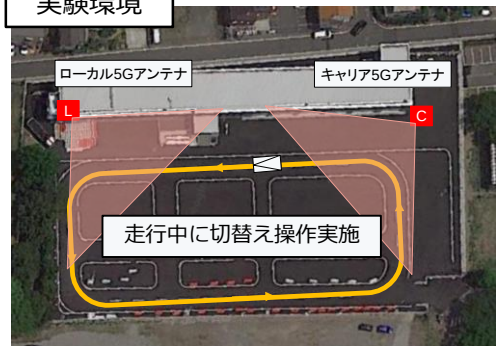
システム概要



実験の様子（車両）

実験の様子（管制）

実験環境



実験結果概要

- キャリア5G/ローカル5Gにより車両からの映像(フルHD 30p)を同時に映像伝送することに成功できた。
- 試験路の自動運転バスを周回走行させ、通信状況を考慮してキャリア5G/ローカル5Gを操作により即時切替えを実現できた。
- キャリア5G/ローカル5Gの組み合わせによる利用法の可能性が示された。

ローカル5Gの性能評価等の技術実証

実証目標＜ローカル５Gの性能評価等の技術実証＞

技術実証の実証目標や、技術的課題、そして課題に対するアプローチ、検証仮説等は以下のとおり。

実証目標	技術的課題	課題に対するアプローチ、検証仮説等
4.7GHz帯のフィールド測定により、ユースケースに基づくローカル５Gの性能評価、ローカル５Gのエリア構築やシステム構成の検証、その他ローカル５Gに関する技術実証を目標とする。具体的には、以下のようにフィールド測定を行い、交通インフラ環境におけるエリア構築 ◆ ユースケースに基づくローカル５Gの性能評価等 CRANTS試験路に構築するローカル５G実証環境において、受信電力や映像伝送等を想定した伝送スループットの測定・分析を実施する ◆ ローカル５Gのエリア構築やシステム構成の検証等 自動運転を行う交通インフラ環境に適した電波伝搬モデルを導出する。 ◆ その他ローカル５Gに関する技術実証 交通インフラ環境において、4.7GHz帯を用いたローカル５Gの端末の設置自由度を高めるため、端末のアンテナ高が低い場合における車両等による遮蔽損失を定量的に明らかにする。	モビリティ分野においてローカル５Gを利用するには、交通インフラ環境におけるローカル５Gエリア構築にて所望エリアで所望通信品質が確保できる必要がある。 そして、その利用拡大のためには、エリア構築コスト、作業負荷などの面において、より効率的なエリア構築手法を確立することが課題である。 また、ローカル５Gの無線局免許審査において、申請者が審査基準に従って算出するカバーエリアが実際よりも広くなる場合には、申請者が希望する基地局設置条件での免許取得が難しくなる可能性がある。このため免許取得が必要以上に難しくなることがないように、カバーエリア計算をより精緻に行えるようにすることが課題である。 特にモビリティ分野においてローカル５Gの普及を促進するためには、交通インフラ環境におけるカバーエリア算出法の精緻化が課題となる。	交通インフラ環境におけるローカル５Gのより効率的なエリア構築手法の確立に向けて、以下を実施した。 ◆ 交通インフラ環境に構築したローカル５Gの実証環境において、様々な条件（路側高所、車両内部、隣接する他の車両の有無）で、電波伝搬特性の測定を行う。 ◆ 取得した電波伝搬特性データを用いて、交通インフラ環境に適した電波伝搬モデルを導出する。その際、様々な条件（路側高所、車両内部、隣接する他の車両の有無）の違いによる電波伝搬損失への影響を定量化する。 ◆ 通信品質と受信電力の関係（受信電力対伝送スループット特性）を求める。 ◆ 様々な条件（路側高所、車両内部、隣接する他の車両の有無）の電波伝搬損失への影響を踏まえて、より効率的なエリア構築手法を提示する。 ◆ さらに、路側において車両による遮蔽の影響が異なる複数の条件で、電波伝搬特性の測定を行い、端末のアンテナ高が低い場合における車両による遮蔽の影響を定量化する。 ◆ 端末のアンテナを低い場所（路側）に設置する場合にエリアを予測する手法を含め、より効率的なエリア構築手法を提示する。 また、カバーエリア算出法の精緻化に向けて、以下を実施した。 ◆ 既存の電波伝搬モデルにおける遮蔽損等を踏まえた新たな係数・補正項に関して、カバーエリア算出法への反映に向けた方向性・課題を整理する。

ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等①

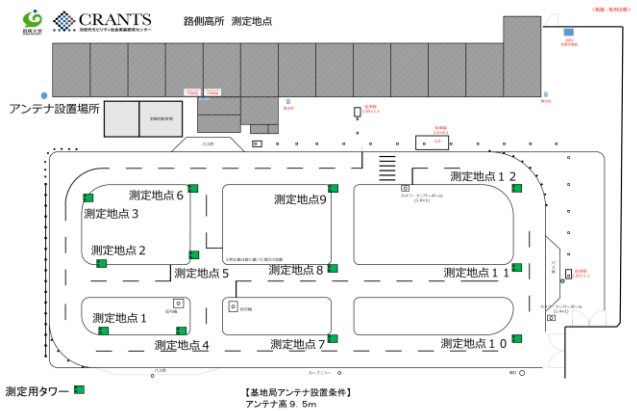
1）概要

CRANTS試験路に構築するローカル５G実証環境において、受信電力や映像伝送等を想定した伝送スループットの測定・分析を実施

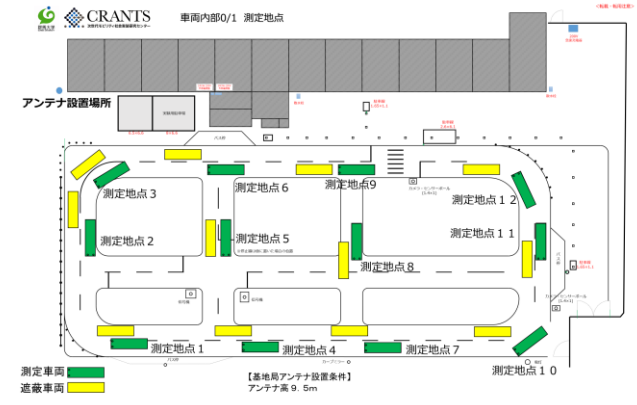
2）検証方法

ローカル５G基地局を設置したCRANTS試験路のエリアにおいて、基地局から半径200m以内で、屋外及び車両内部の20カ所程度の測定地点を選定した。
選定した測定地点において、エリアテスタなどの測定機材を使用して、受信電力（RSRP）の測定を行った。また、端末（DTU）（又は端末を模擬した試験装置）に接続したパソコンの測定アプリ等を用いて、伝送スループットの測定を行った。

①路側高所測定地点

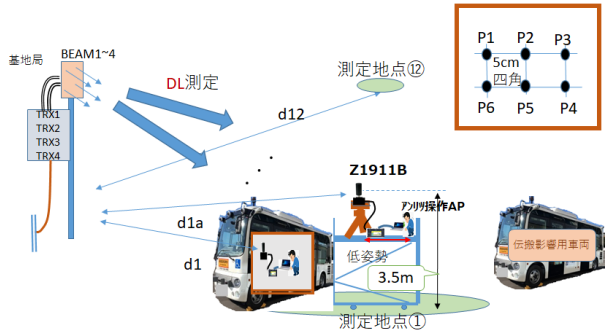


②車両内部０／１測定地点



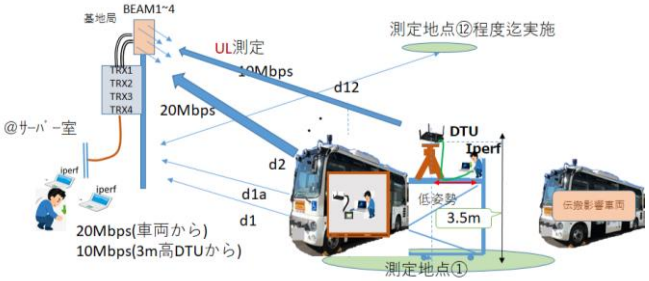
③RSRP・伝搬損失測定方法

測定機	モデル	
アンリツ	ML8780A＋MU878070A	ｱﾝﾃﾅZ1911B



④スループット・遅延測定方法

測定機	測定内容　課題実証要求値（UL）
DTU1とIPERFでTP測定 PING1遅延測定	自動運転を想定したスループット UL20Mbps x1=20MHzのUL
DTU2とIPERFでTP測定 PING2遅延測定	路側システム想定したスループット UL10Mbps x1=10MHzのUL

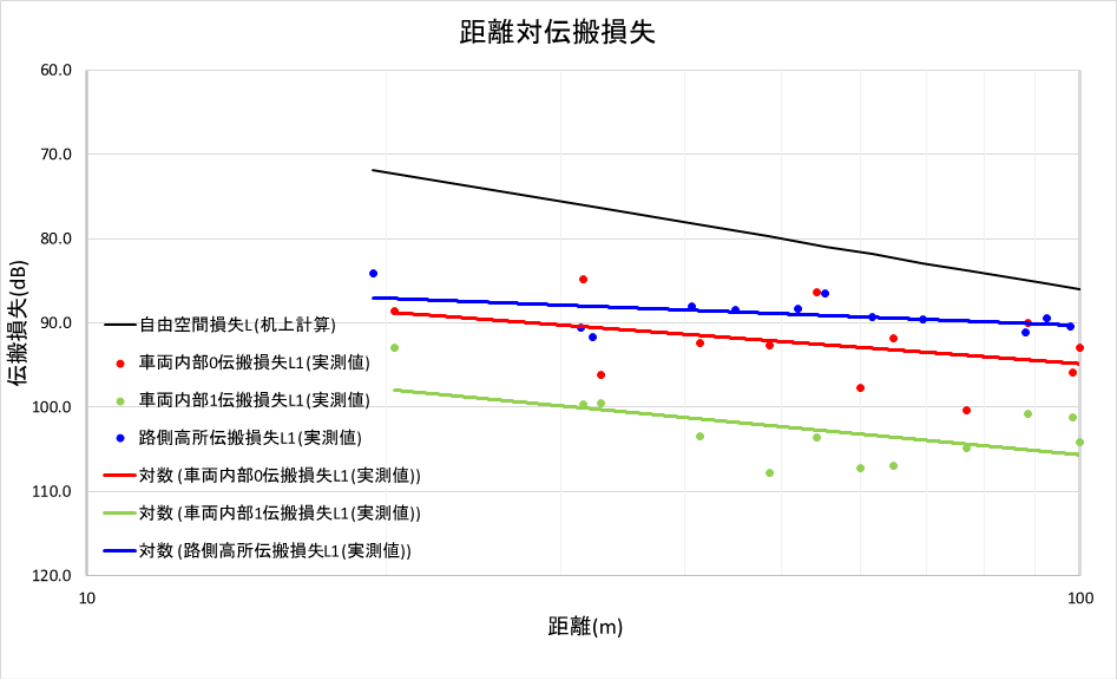


ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等②

３）検証結果

◆受信電力（RSRP）測定の結果

測定の条件の違いによる伝搬損失と距離特性を示す。



測定結果（課題）

路側高所、車両内部０及び車両内部１のそれぞれの条件の違いにより、伝搬損失の距離特性が以下のように異なる。

- 路側高所（青）と車両内部０（赤）を比較すると、車両内部０の方が、伝搬損失が平均値で３dB程度大きく、また測定地点によるばらつき（RMSE）が大きい傾向がある。この差は、車両内部への侵入損失があり、その侵入損失が車両の向きによって異なることによるものと考えられる。

- 車両内部０（赤）と車両内部１（緑）を比較すると、隣接する車両による遮蔽損失が10dB程度あることが分かる。測定地点によるばらつきの大きさには、有意な差が認められない。

方策

条件の違いにより伝搬距離対受信電力特性が異なるため、その条件の違いを反映したエリア設計を行えるようにすることが、技術的課題となると考えられる。
（この課題解決方策を後項、２．ローカル５Gのエリア構築やシステム構成の検証等において、検討した。）

ユースケースに基づくローカル5Gの性能評価等③

◆伝送スループットと遅延の測定結果

伝送スループットと遅延の測定結果を受信電力対スループットのグラフで分析し、
以下の結果を得た。

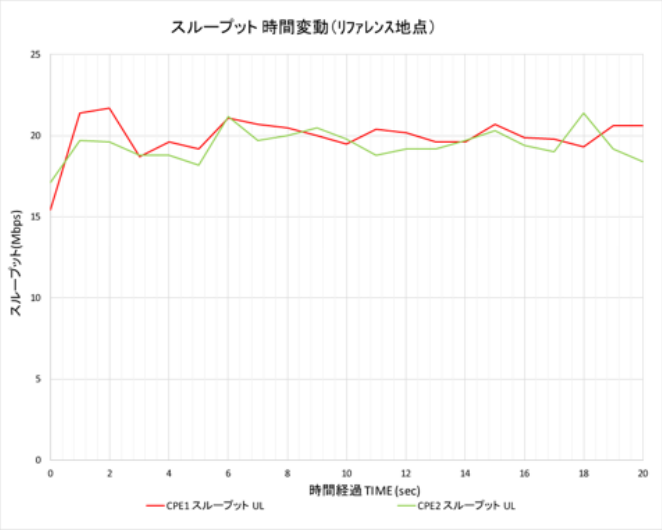
測定結果

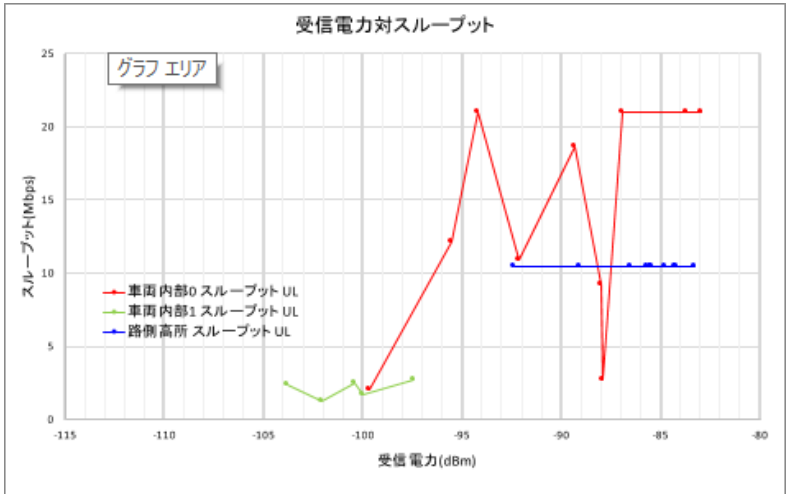
- 基地局アンテナから見通し内の場所（リファレンス地点）では、受信電力が -87dBmより大きい場所で、安定した伝送スループットが得られる。
- 基地局アンテナから見通し外となる車両内部では、受信電力が -83dBmであっても、1台あたり20Mbpsの伝送スループットが得られない。

方策

車両から遠隔管制室への伝送スループットの要求値を実現するためには、以下の方策が考えられる。

- 車両内部では、受信電力が大きい場所でも要求値を満足できないことから、車両に設置する端末のアンテナを車両の屋根等の屋外に設置し、基地局アンテナの見通し内になるようにする。
  その上で、受信定レベル（構築したローカル5Gの実証環境では、-87 dBm）以上となるよう電力が一に基地局アンテナの水平面及び垂直面の指向性の調整を行う。１つの基地局アンテナで所望のエリアをカバーできない場合には、複数の基地局アンテナを設置することも要求値を実現するための方策となる。





◆更なる技術課題等

車両から遠隔管制室への伝送スループットの要求値を達成する方策の検討より、車両内部において安定した伝送スループットを得ることが、更なる技術的課題して残った。同等の受信電力であっても、車両内部では、路側高所と同様の安定した伝送スループットが得られなかったことから、車両への侵入損失が伝送スループットを不安定にする要因を分析し、改善策を得ることが望まれる。

ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等

１）概要

自動運転を行う交通インフラ環境に適した電波伝搬モデルを導出

2）検証方法

選定した基本モデルにより計算した受信電力と測定データとの比較を、屋外及び車両内部並びに他の車両の配置の有無のそれぞれの条件に分けて行った。そして、その誤差の分析より、車両内部における追加の伝搬損失や他の車両による遮蔽損失を求め、端末の設置場所に応じて補正を行う電波伝搬モデルを導出した。

３）検証結果

取得した電波伝搬特性データを用いて、交通インフラ環境に適した電波伝搬モデルを以下のとおり導きだした。自由空間損失モデルを基本モデルとして、以下のように、路側高所、車両内部０及び車両内部１の各々の電波伝搬モデルの伝搬損失計算式を導き出した。

L=L_fs + Drsh　　:路側高所
=　L_fs + Dv0　　:車両内部０
=　L_fs + Dv1　　:車両内部１

電波伝搬モデルの補正項とRMSE

	補正値[dB]	RMSE[dB]
路側高所	Drsh：8.6	3.5
車両内部０	Dv0：11.6	4.6
車両内部１	Dv1：21.8	3.8

路側高所、車両内部０及び車両内部１のRMSE[dB]

	導入した電波伝搬モデル(再掲)	自由空間損失モデル	審査基準モデル	直線近似モデル
路側高所	3.5	9.3	9.2	1.6
車両内部０	4.6	12.5	12.4	4.0
車両内部１	3.8	22.1	22.0	3.3

- 導出した電波伝搬モデルのRMSEは、取得した伝搬損失のデータに比べて最小二乗法で求めた直線近似モデルのRMSEに比べれば大きいが、自由空間損失モデルや審査基準モデルのRMSEに比べて大幅に小さくなった。
- 様々な条件（路側高所、車両内部、隣接する他の車両の有無）の電波伝搬損失への影響を踏まえて、より効率的なエリア構築手法を提示した。提示した手法は以下の項目内容である。
  （１）エリア構築の要件整理を行う　（２）エリア構築の制約条件を整理する　（３）エリア判定の基準値等を求める
  （４）所望エリアのエリア品質評価を行う　（５）所望エリアのエリア品質を最適化する

◆更なる技術的課題等

本技術実証では１つの基地局のみの測定データを取得したが、電波伝搬モデルの精緻化のためには、周囲の建物などの電波伝搬環境が異なる、より多くの基地局の測定データを取得して電波伝搬モデルを導くことが残課題となる。さらに、電波伝搬モデルでは、渋滞（多数の車）、バス内の人、街路樹などの遮蔽損への影響を反映することも残課題となる。

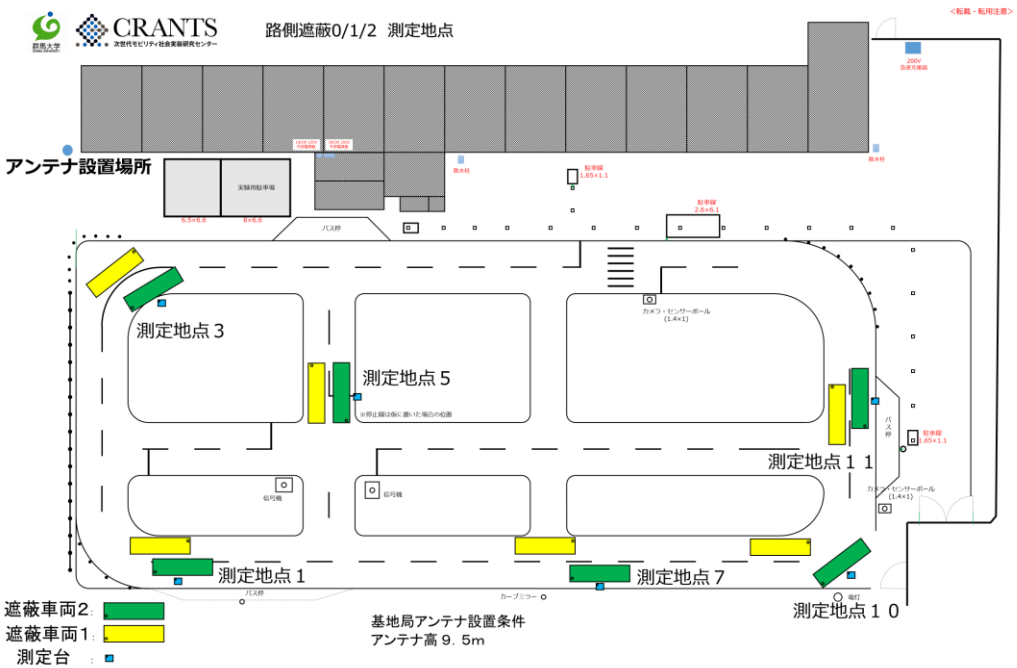
その他ローカル5Gに関する技術実証①

1）概要

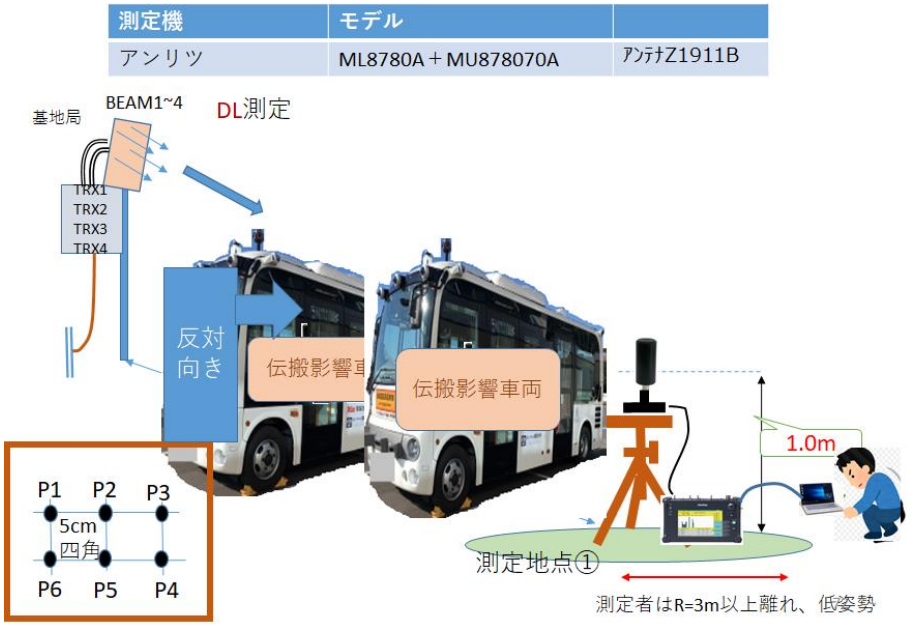
交通インフラ環境において、4.7GHz帯を用いたローカル5Gの端末の設置自由度を高めるため、端末のアンテナ高が想定遮蔽物（車両等）と比べて低い場合における車両等による遮蔽損失を定量的に明らかにする 。

2）検証方法

ローカル5G基地局を設置したCRANTS試験路のエリアにおいて、屋外の測定地点を５カ所程度選定し、測定地点は、路側システムの端末用アンテナを想定遮蔽物（車両等）と比べて低い場所に設置する場合を想定して選び、その高さは約１ｍとした。



①路側遮蔽　測定地点



②路側遮蔽　RSRP測定方法

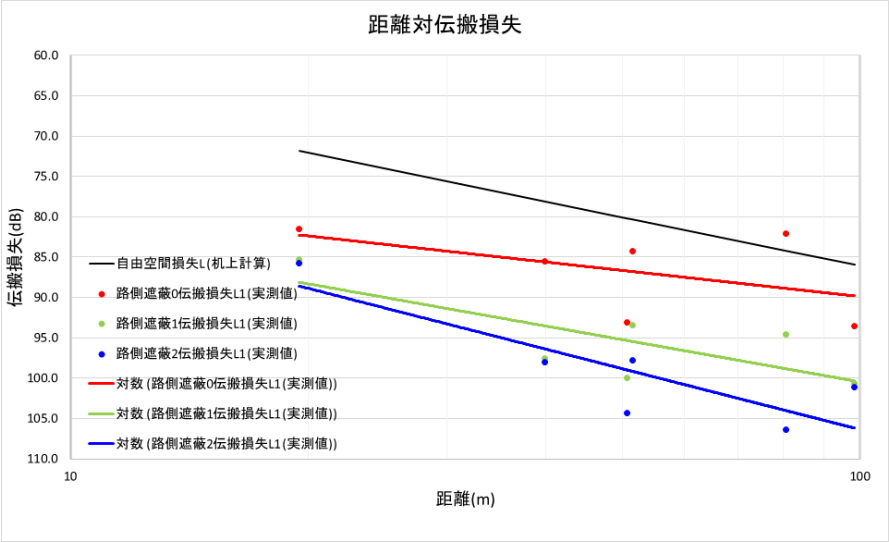
その他ローカル5Gに関する技術実証②

◆ 検証結果

- 路側において車両による遮蔽の影響が異なる複数の条件で、電波伝搬特性の測定を行い、端末のアンテナ高が低い場合における車両による遮蔽の影響を右図の通り定量化した。
- ２項ローカル5Gのエリア構築やシステム構成の検証等で導出した交通インフラ環境向け電波伝搬モデルを以下のように、路側遮蔽０・１・２とを追加し拡張した。

L=L_fs + Drsh　：路側高所
=L_fs + Dv0　：車両内部０
=L_fs + Dv1　：車両内部１
=L_fs + Drs0　：路側遮蔽０
=L_fs + Drs1　：路側遮蔽１
=L_fs + Drs2　：路側遮蔽２

- 導出した電波伝搬モデルのRMSEは、自由空間損失モデルや審査基準モデルのRMSEに比べて大幅に小さくなった。



電波伝搬モデルの補正項とRMSE

	補正値[dB]	RMSE[dB]
路側遮蔽０	Drsh：6.2	4.3
路側遮蔽１	Dv0：14.8	3.7
路側遮蔽２	Dv1：18.4	4.3

路側遮蔽０、路側遮蔽１及び路側遮蔽２のRMSE[dB]

	導入した電波伝搬モデル(再掲)	自由空間損失モデル	審査基準モデル
路側遮蔽０	4.3	7.6	7.4
路側遮蔽１	3.7	15.2	11.2
路側遮蔽２	4.3	18.9	13.0

◆更なる技術的課題解決方法

この補正項については、一つの実証環境で取得したデータにより算出されたものであるため、無線局免許審査基準において用いる電波伝搬モデルに採用するためには、さらに多くの交通インフラ環境においてデータを取得して、統計的信頼度（精度）を高めることが課題になると考えられる。

まとめ

ローカル５Ｇの検証全体を通した結果について記載する。

項目	結果及び今後の課題
ユースケースに基づくローカル５Ｇの性能評価等	路側高所、車両内部で隣接する他の車両の有無（有: 1　無: 0 で表記）での条件で22か所の測定地点で以下の測定結果を得た。 ◆ 受信電力測定：路側高所と車両内部０では伝搬損失は３dB程度の差、また、車両内部０と車両内部１では10dB程度の差がある。 伝搬距離対受信電力特性が異なり、これら条件の違いを反映したエリア設計を行えるようにすることが、技術的課題となる。 ◆ 伝送スループット・遅延測定：DTU２台で同時送信試験では　路側高所で全測定地点で20Mbps(10Mbps/台)を達成し、また、測定地点⑥付近（リファレンス地点）において40Mbps(20Mbps/台)の伝送スループットとなった。 この伝送速度達成には見通し内で-87dBm基準値以上の電界値を必要とした。
ローカル５Ｇのエリア構築やシステム構成の検証等	◆ 取得したデータを用い、路側高所、車両内部で隣接する他の車両の有無の違いによる電波伝搬損失への影響を定量化し、それぞれに対応する伝搬モデルを導出した。 また、様々な条件での電波伝搬損失への影響を踏まえて、より効率的なエリア構築手法を提示した。
その他ローカル５Ｇに関する技術実証	◆ 路側において車両による遮蔽の影響が異なる複数の条件で、電波伝搬特性の測定を行い、端末のアンテナ高が低い場合における車両による遮蔽の影響を定量化し、先に導出した伝搬モデルを拡張し、対応するエリア構築手法も追加した。
まとめ	◆ 交通インフラ環境に適した電波伝搬モデルを導出した。 条件の違いによる電波伝搬損失への影響を定量化し、補正項の値として、路側高所で3.5dB、車両内部で隣接車両の有無により11.6～21.8dB、車両よりも低い位置の路側で遮蔽物となる車両の台数により6.2～18.4dBなどの値を得た。 また、シャドーイングの標準偏差は、条件により異なり3.5dB～4.6dBの値を得た。 ◆ 導出した電波伝搬モデルを用いて、より効率的なエリア構築手法を整理した。 ◆ 残された課題としては、自由空間損失に対する補正項やシャドーイングの標準偏差に関して、より多くの交通インフラ環境でデータ収集を行い、統計的信頼度を高めることが挙げられる。 また、今回の電波伝搬特性の測定では、渋滞時の多数の車両、バス内の乗客、街路樹などの遮蔽損失の影響までは評価できなかったため、これらの影響を定量的に評価することが残された課題になると考えられる。

実装・横展開に関する検討

前提条件

実装に向けたプレーヤの意向・制約は以下のとおり。

	自治体	システム開発者	地域交通事業者
意向	令和４年度における「遠隔型自動運転」の実装に向けて、引き続き検証を続けていく。前橋市におけるJR前橋駅から上毛電鉄中央前橋駅の限定領域に自動運転が実装されることによって、前橋モデルとして構築することが出来る。	実装に向けて、自治体や地域交通事業者の指摘を参考にしながら技術開発を継続的に推進するとともに、無人移動バスサービスとしてのサービスプラットフォームを確立していきたい。	前橋市、及び群馬大学との協定を結び、自動運転の実装に向けて検証を続けてきた。誰かがファーストペンギンになることが必要であり、これからも実導入に向けて検証を続けていきたい。
制約	自動運転の実装に向けては、前橋市が取り組む上毛電鉄中央前橋駅のロータリー整備や、公共交通網の再編といった政策と足並みを揃えて推進されていく。また、自動運転に関する技術課題の他、運用上の課題解決も合わせて実施していく必要がある。	随時アップデートされる関連法規やガイドライン等をキャッチアップしながら進める必要がある。 また、課題解決システムの利用に向けては、走行区間における5G環境の設置計画の影響を受ける。	走行区間の課題が未だ多くあり、前橋市が取り組む路上駐車対策やロータリー整備の他、走行中の旅客安全管理の問題などは交通事業者として必ず対応しなければならない。また、費用面の課題はあり、過渡期的なコスト増の先に、バス路線の採算性の改善、バス運転手の担い手不足といった課題解決を図ることが出来る必要がある。

自動運転レベル３の遠隔型自動運転バスの実装に向けて以下のとおり規制に対応する必要がある。
（システムが全ての動的運転タスクを限定領域において実行し、作動継続困難な場合に、システムの介入要求等に運転者が対応する）

規制	道路交通法	国土交通省ガイドライン	その他準拠すべき基準
対応状況	令和２年４月に運転自動化レベル３の自動運転車両が道路を走行することが可能となった。 遠隔型自動運転による移動サービスの提供に向けては、比較的単純な走行環境において、一人で１台又は複数台の車両を遠隔監視・操縦管制ができ、緊急時又は作動継続が困難な場合に速やかに遠隔監視・操作者又は車両内のサービス提供者が必要な対応を実施できる必要がある。	旅客自動車運送事業者は、運転者が車内にいる場合と同等の安全性を確保する必要があり、遠隔監視・操作者も同様に運転者としての義務を負う。交通ルールの順守した運行の安全確保の他、旅客の安全確保が求められ、乗降口の扉の開閉や、旅客の運行中の安全措置、福祉対応等について、運転者が車内にいる場合と同様の安全性を確保するよう、検討する必要がある。	「自動運転の公道実証に係る道路使用許可基準」より、遠隔監視・操縦管制の実施に向けては、道路交通法第77条の道路使用許可を受ける必要があるとともに、5G通信等を活用した大容量のデータ通信、及び低遅延による指令信号の伝達のため、走行区間の通信の安定的な供給が求められる。

持続可能な事業モデルの構築・計画①

本調査検討で活用した課題解決システムの継続利用計画を以下のとおり示す。令和2年度の成果を踏まえ、課題解決システム、及びローカル5G、通信品質の補完技術等について継続検証を行うことで、前橋市における遠隔型自動運転実装において活用できることを目指す。

課題解決システムの継続利用

	令和２年度	令和３年度	令和４年度
5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション (車両－遠隔管制室間)	• 技術的実現可能性の検証（車両―遠隔管制室間の車載カメラのフルHDおよびセンサ情報の伝送機能の実現）	• システムとしての最適化検討（システム構成部品の再検討、設計見直し等） • AI等による監視支援機能の開発	• 前橋市実装に合わせた導入の最適化検討（取り付け位置や部品の再検討、設計見直し等） • 採用する映像圧縮技術の再検討
5G対応型遠隔管制室情報集約ソリューション(路側－遠隔管制室間)	• 技術的実現可能性の検証（路側―遠隔管制室間のカメラのフルHDおよびセンサ情報の伝送機能、AIによる情報強調機能の実現）	• システムとしての最適化検討（システム構成部品の再検討、設計見直し等） • AI等による監視支援機能のさらなる開発	• 前橋市実装に合わせた導入の最適化検討（取り付け位置や部品の再検討、設計見直し等） • 採用する映像圧縮技術の再検討
5G対応型車両制御直結ソリューション (車両－路側間)	• 技術的実現可能性の検証（車両―路側間の直接通信による緊急停止等の機能の実現）	• システムとしての最適化検討（前橋市実装の走行ルートのAI学習、IF設計見直し等）前橋市実装に向けた検討項目整理	• 前橋市実装に合わせた導入の最適化検討（アプリケーション、IF開発） • AI等設置、組込みの最適化検討

ローカル5Gの運用

自動運転の実施主体者が５G通信の利用コストや自動運転ソリューションなど、必要な事業費の支出を見込みつつ、自立可能な事業計画を持っていること。
その他、走行区間において、遠隔型自動運転による無人移動サービスを提供するにあたり、対象となる路線が自動運転を導入可能な環境であるかも重要となる。

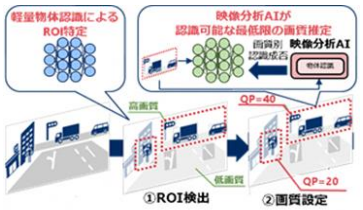
また「ローカル５G導入に関するガイドライン（令和元年12月）」では、他者土地利用におけるローカル５Gの移動局利用を認めておらず、上毛電鉄中央前橋駅周辺におけるローカル５Gの導入に向け課題が生じている。ローカル５Gの構築・運用・維持を行って行くには、実施主体者、土地所有者との協議が必要となってくる。

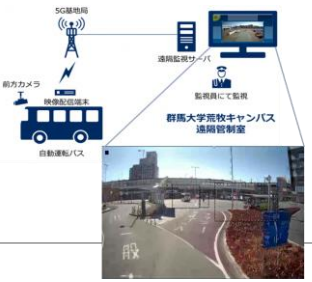
今後のローカル5Gの運用に向けては、引き続き自動運転の試験路環境において、ローカル5Gの通信環境を準備、活用することによって、課題解決システムの最適化検討等の検証、さらには、将来の前橋市の遠隔型自動運転の実装に向けた検証を続けていくことを検討する。

学習型通信品質予測技術、学習型メディア送信制御技術

将来的に同時接続車両・路側センサ数が増加した際、通信品質が不安定になる恐れがあり、①遅延等の通信品質の変動について可視化と予測をする通信品質予測、②通信品質の変動とカメラ撮影状況に応じて、通信するカメラ毎の優先度や送信画質を自動調整するメディア送信制御、を開発検討。

また、重要領域の特定に向け軽量な映像分析技術で物体認識を行う。これに加え、高画質領域についてどれだけの画質で伝送すれば認識が可能であるかを映像分析AIによって分析することで、できるだけ少ないデータ量で映像を伝送する。





持続可能な事業モデルの構築・計画②

事業モデルの検討

地域交通事業者がかかえるバス運転手不足や、自治体のバス路線維持を目的として遠隔型自動運転の実装を目指し事業モデルを構築した。

＜提供するソリューションとサービス＞

・本調査検討で活用した３つの課題解決システムを含む、自動運転サービスの提供を行う。

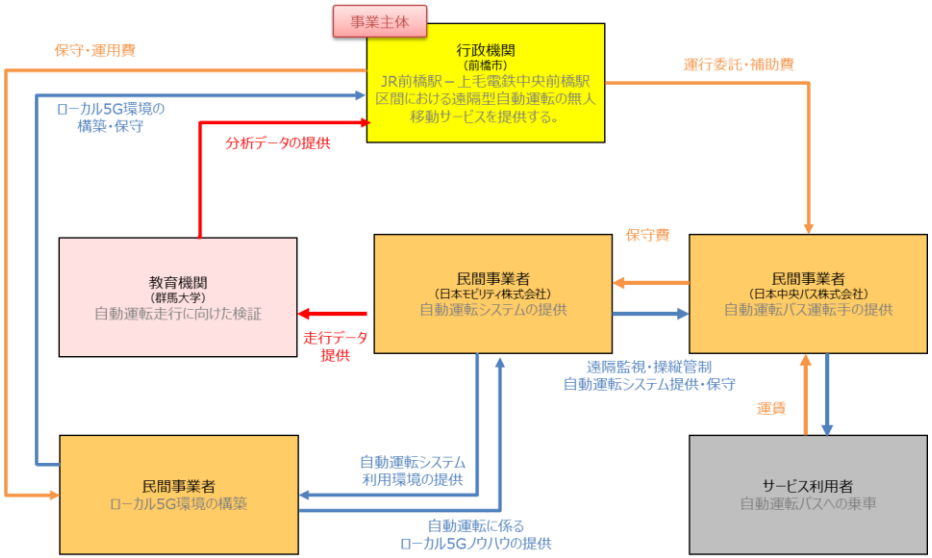
＜マネタイズ＞

・自治体の実施するMaaS施策や公共交通促進施策によるバス路線の運賃収入の増加や、5G利活用等の補助金の活用等含め、自治体、地域交通事業者にとって自立運用可能な施策を検討する。

＜前提条件＞

・5Gや自動運転の利用コストが自立可能な事業計画の策定

・自動運転に適した走行環境の整備、また地域住民の社会受容性



実装に向けた計画

	令和２年度	令和３年度	令和４年度（実装目標）
自動運転技術	実験	GPS不感場所対策（白線読取り等） 課題解決システムの継続利用	実験 実装目標
駅・道路等の走行環境の改善	ロータリー内機能整理	課題、対応策整理 路側センサー等設置 一般車両等への案内周知看板等設置	実験
法律・ガイドラインの準拠	実験	実験	実験 実装目標
警察との協議	実験	駐車車両対策協議 駐停車禁止措置 遠隔型自動運転実証実験に向けた協議	車両検査 遠隔型 テスト 道路使用許可 実験 実装目標
5G環境の見込み	実験	５Ｇ整備（可搬型）	上毛電鉄中央前橋駅、前橋駅の５Ｇ化 実験 実装目標
市民への周知・理解	市民ダイアログ 実験	案内周知看板等設置による周知	実験 実装目標
交通事業者調整	実験	車両改造（自動運転化）・遠隔管制室整備	実験 実装目標

横展開に資する普及展開モデルに関する検討

普及モデル

遠隔型自動運転バスの普及モデルを、以下のとおり検討する。

＜遠隔型自動運転システム＞

自動走行システムは既存車両に対して後付け可能であり、「操舵」「制動」「駆動」「周辺機器を自動で操作」を行う、自動走行に必要な**【標準装備】**がある。遠隔監視・操縦管制の実施に向けては5G環境に対応した**【遠隔監視装備】**を追加することで、遠隔監視・操縦管制を可能とする。

【標準装備】（位置測定等）レーザーセンサ・GNSS受信機、（信号認識等）全方位カメラ、（障害物認識等）レーザーセンサ　を搭載

【遠隔監視装備】（車両側）遠隔監視カメラ、（路側側）遠隔監視用カメラ・センサ、（遠隔管制室側）遠隔監視用モニター、マイク、スピーカー、遠隔監視・操作用システム

＜想定されるターゲット＞

本調査検討でターゲットとした、比較的走行距離の短いシャトルバス等の限定領域

＜運営体制＞

（実施主体）自治体　（課題解決システムの構築・ローカル5Gの提供）システム開発事業者
（自動運転システムの構築）自動運転システムの開発事業者　（バスの運営）地域交通事業者

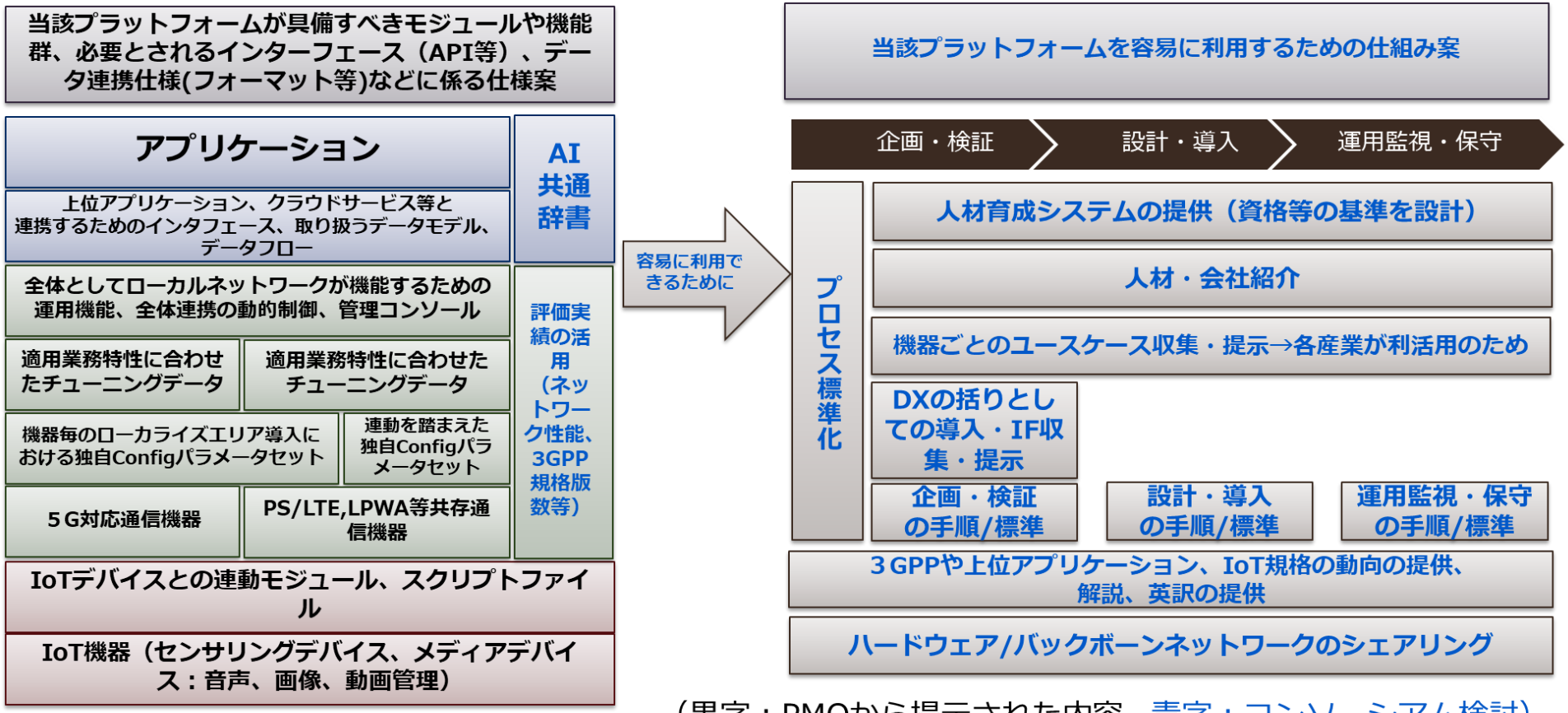
横展開に関する検討

横展開に向けては以下の計画にて検討される。

横展開の主体	実施体制	普及展開の取組み	事業展開のステップ
自動運転システム開発事業者、及び、課題解決システム開発事業者	横展開にあたっては、導入検討地域において。実施主体である「自治体」と、「課題解決システム事業者」、「自動運転システム開発事業者」「地域交通事業者」によるコンソーシアムが組まれることが望ましい。	導入検討地域における自治体や、地域交通事業者といったステークホルダー間の関係構築後、シャトルバス区間等限定領域における、実証走行を継続する。 前橋市における複数路線での遠隔監視・操縦管制が実装できたタイミングで実装の検討ができる。	令和４年度の前橋市における遠隔型自動運転の社会実装後、実導入における更なる課題の整理を実施する。 その後、導入検討地域において、課題解決システムを含む自動運転システムの導入が求められた場合に、導入検討地域におけるコンソーシアムを構築し、導入にあたる。なお、横展開にあたっては、複数路線での遠隔監視・操縦管制を実現することによって、コストメリットが生じることを確認する必要がある。

共同利用型プラットフォームに関する検討

共同利用型プラットフォーム機能をユーザー企業・団体や開発主体等が容易に利用できるよう、当該プラットフォームが具備すべきモジュールや機能群、必要とされるインターフェース（API等）、データ連携仕様(フォーマット等)などに係る仕様案をとりまとめること。が活動として想定されている。以下の図に取りまとめる仕様案と、ローカル５Gを活用するプロセスから想定するから考えられる必要事項をあげた。



（黒字：PMOから提示された内容　青字：コンソーシアム検討）

まとめ

まとめ

課題実証・技術実証

- ２台分の走行中車載カメラ（フルHD）やセンサー情報を用いることで、遠隔管制室からの識別距離が100mまで伸張（４G/LTEの場合45m、キャリア５Gの場合は90m）。路側に敷設されたカメラやセンサー情報を用いることで、車載カメラの死角についても遠隔監視室から100m以上（４G/LTEでの車輌映像の場合9.4m）識別可能となり、更なる安全確保を支援。
- 路側センサーからの情報による衝突検知予測から自動運転車両への停止指示までのエンドツーエンドの遅延は平均0.4秒以内（運転手が運転中に危険察知・ブレーキを踏むまでの時間は平均0.7秒から１秒以内）。
- エンドツーエンドの遅延内訳は、アプリケーション処理（約247ミリ秒）、無線通信処理（約41ミリ秒）であった。本実証で使用した装置では約41ミリ秒の遅延が発生していた。更にリアルタイム性が要求される社会実装に向けては無線区間の短縮を目指す。
- 伝送スループット（UL）は、車両⇒遠隔管制室は40Mbps、路側⇒遠隔管制室は20Mbps、伝送遅延時間は路側⇒車両は0.4秒以内の要求性能に対して、車両では端末アンテナを車両の屋根等の屋外設置する等見通し内となる対策が必要。路側では、路側から遠隔管制室への伝送スループットの要求値を達成。
- 交通インフラ環境において、路側や車両内部など遮蔽の影響を受ける様々な条件で電波伝搬特性を評価し、自由空間損失モデルに対して補正項を加える形で、電波伝搬モデルを導出した。同モデルを用いて、端末設置場所における電波伝搬損失への影響を踏まえより効率的なエリア構築手法を整理。

自動運転の実装に向けて

- 自動運転の実装に向けては自治体・地域交通事業者・地域住民によって大きな期待が寄せられており、今後、前橋市においては、本調査検討で対象としたJR前橋駅－上毛電鉄中央前橋駅のシャトルバス区間における遠隔型自動運転の実装に向けて、検証を続けていく。
- ３つの課題解決システムの利用については、期待の効果を得ることが確認できたが、今後、自動運転における利用においては、今後ローカル5Gの他者土地利用の制限等の課題により、公道における整備方法に検討課題が残る。
- サービス提供主体において、5G通信や自動運転ソリューションなどの事業費が支出可能である等の自立可能な事業計画の検討が重要となる。