

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職	
	日下部 貴彦 (くさかべたかひこ)		東京大学 空間情報科学研究センター		准教授	
②研究 テーマ	名称	マルチスケールな交通連携を想定した拠点配置と交通マネジメントについての技術研究開発				
	政策 テーマ	[主テーマ] (※政策テーマが複数の場合、主及び副テーマを記入)	公募	タイプIV		
		[副テーマ] 新たな情報サービスと利用者満足度向上	タイプ			
③研究経費 (単位: 万円)	平成31 (R1) 年	令和2年度	令和3年度	総合計		
	4,999	3,499	2,210	10,708		
※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと						
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)						
氏名		所属・役職 (※令和4年3月31日現在)				
柳沼秀樹		東京理科大学理工学部・准教授				
山口裕通		金沢大学理工研究域 地球社会基盤学系・助教				
福田大輔		東京大学大学院工学系研究科・教授				
内田賢悦		北海道大学大学院工学研究院・教授				
瀬尾亨		東京工業大学環境・社会理工学院・准教授				
川崎洋輔		日本大学工学部土木工学科・専任講師				
三谷卓摩		東京大学空間情報科学研究センター・客員研究員 (愛媛大学社会連携推進機構防災情報研究センター・特定講師)				

⑤研究の目的・目標

ラストワンマイルから都市間の様々な移動に対応するために必要なマルチスケールでの交通機関連携でのキーとなる交通結節点を対象とし、多様な交通関連ビッグデータおよび、ETC2.0などのセンシング技術を活用して、

「i. 道の駅等のマネジメント施策の検討を想定した拠点利用状況のモニタリング手法の開発」
を行い、拠点を利用する利用者の特性を捉える。

上記の特性を踏まえたうえで、交通結節点からのラストワンマイル、拠点内及び拠点間の移動を想定し、

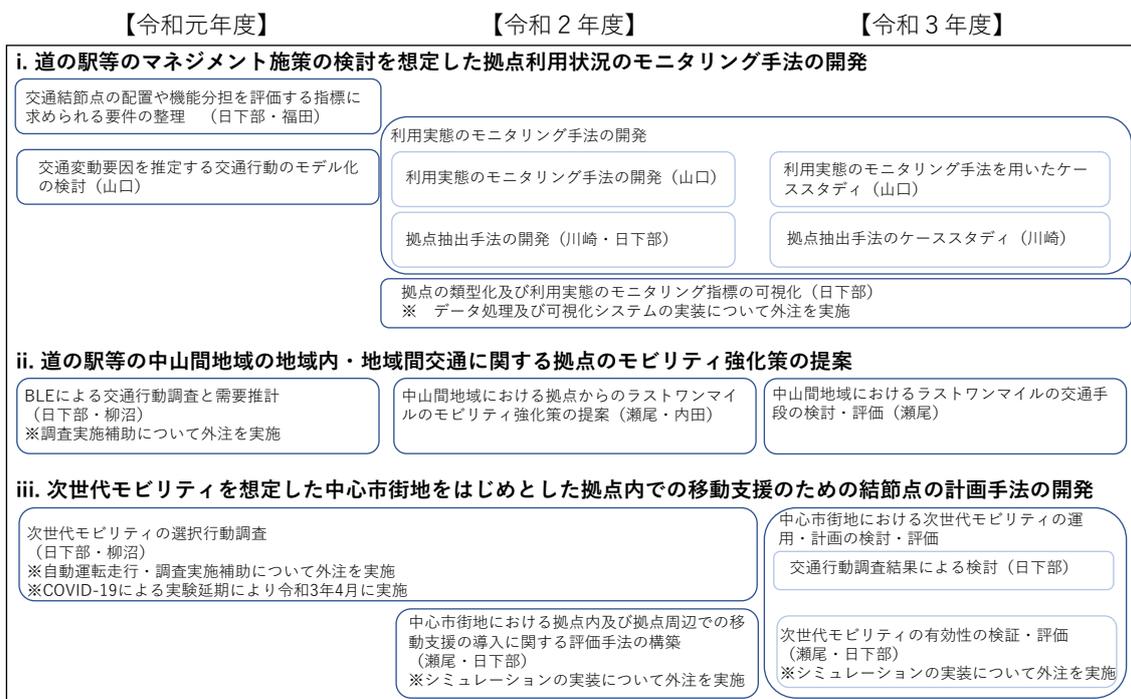
「ii. 道の駅等の中山間地域の地域内・地域間交通に関する拠点のモビリティ強化策の提案」

「iii. 次世代モビリティを想定した中心市街地をはじめとした拠点内での移動支援のための結節点の計画手法の開発」

を実施することで、ラストワンマイルを考慮した拠点間から拠点内に至るマルチスケールな交通網のシームレスな機能評価を可能とし、次世代モビリティが導入された社会における総合的な施策検討のための技術開発を行うことを目的とする。

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

「⑤研究の目的・目標」に示した i~iii の実施内容に対応し、交通工学分野に関連した、データ収集、データ解析、モデリングに関する専門家による体制をとっている。なお、可視化システム及びシミュレータの実装、実験の現場とりまとめ等については、関連業務で実務実績のある民間企業の補助のもと実施した。



各年度、以下 i~iii の各内容を実施し、最終年度は、ビッグデータを利用した交通結節点及び拠点の配置検討・評価方法としての位置づけ及び、各実施内容の道路行政への反映方法に関する検討を行った。

i. 道の駅等のマネジメント施策の検討を想定した拠点利用状況のモニタリング手法の開発

令和元年度は、「交通結節点の配置や機能分担を評価する指標に求められる要件の整理」、「交通変動要因を推定する交通行動のモデル化の検討」を実施した。また、人流に関するビッグデータのひとつであるモバイル空間統計データを用いて、道の駅の開業を対象として、拠点での需要変化をとらえ、モデル化を行うことが可能かを検討するため、非負値行列因子分解を用いたモデルを構築した。

令和2年度は、「拠点利用状況のモニタリング手法の開発」を実施し、ETC2.0等のプローブデータを用いた拠点候補地点の自動抽出手法に必要なアルゴリズムを開発、令和元年度に検討した非負値行列因子分解の手法を改良、可視化ツールの開発のための仕様整理を実施した。

令和3年度は、「拠点の類型化及び利用実態のモニタリング指標の可視化」では、令和2年度に開発した拠点抽出手法の特性の把握と精度評価、交通行動パターンの抽出及び拠点の類型化の精緻化を進め、これらの手法で得られた指標の可視化環境を開発した。

ii. 道の駅等の中山間地域の地域内・地域間交通に関する拠点のモビリティ強化策の提案

令和元年度は、「交通需要の解析手法の検討」として、中山間地域での次世代モビリティの導入検討に必要な交通需要把握を目的として、BLE (Bluetooth Low Energy) タグを用いたデータ収集手法を実装し実施した。

令和2年度の「中山間地域における拠点からのラストワンマイルのモビリティ強化策の提案」では、提案に必要なモデルのフレームワークを示すとともに、令和元年度に実施した BLE タグを用いて収集した交通行動データを用いた交通需要推定手法及び、ラストワンマイルの交通手段の設計・運用方法の検討に必要な数理計画問題と評価指標を検討し、試算を実施した。

令和3年度の「中山間地域におけるラストワンマイルの交通手段の検討・評価」では、中山間地域での次世代モビリティを含む交通手段の検討を実施し、バス及び乗合交通が混在する場合の交通手段の設計・運用方法の検討に必要な数理計画問題と評価指標を検討し、評価を実施した。

iii. 次世代モビリティを想定した中心市街地をはじめとした拠点内での移動支援のための結節点の計画手法の開発

令和元年度は、都市部での次世代モビリティ導入による交通需要把握のためのデータ収集のため、自動運転車両の走行実験を実施し、試乗モニタへの Stated Preference (SP) 調査を実施した (COVID-19 の影響による実験延期のため調査は令和3年度に令和元年度の研究開発として実施)。これにより、次世代モビリティの乗車選択に関する交通行動データを取得した。

令和2年度の「中心市街地における拠点内及び拠点周辺での移動支援の導入に関する評価手法の構築」では、結節点で利用可能となるモビリティの検討を実施し、評価に必要なマルチエージェントシミュレーションの実装を検討した。特にシミュレーションではラストワンマイルのモビリティ評価に必要な空間解像度の高い交通需要データの生成及び交通流モデルの実装を実施している。

令和3年度の「中心市街地における次世代モビリティの運用・計画の検討・評価」では、令和元年度の交通行動調査の結果を用いて、次世代モビリティ利用の特性を分析した。BRT 及び SAV (Shared Autonomous Vehicle) を対象とした次世代モビリティの運用・計画手法を構築し、この結果より運用シナリオを策定したうえで、マルチエージェントシミュレーションによる評価を実施した。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

1年目の指摘事項および対応

指摘事項：「1. 研究成果目標の明確化」・「2. 研究全体の見通しをクリアにし、研究内容を絞った研究計画とすること」・「3. 外注の割合が大きすぎるので再考すること」・「4. 国際ジャーナル掲載を必須目標とすること。」の指摘事項を踏まえ、下記の対応を実施した。

対応：

- 当初提案していた各パートの内容を精査したうえで、1年目に災害等が理由で実施できなくなった項目やレビューの結果を勘案し、ビッグデータ等を用いた次世代モビリティと拠点のための分析であることが明確化でき、国際ジャーナルのスコープとなり得る構成とした。
- 特に、異常検知に関するテーマは関連性が低いため実施しない方針としたほか、COVID-19による影響も踏まえ、実験の実施計画等を改めたことで外注割合を縮小した。

2年目の指摘事項および対応

指摘事項：「研究期間全体を通じて、3つの研究項目がまだ独立性が高く項目間の関係を明確にすること、研究成果目標を明確にすることに留意して研究を進めていただきたい。」・「開発された手法の到達点と適用限界を明確にしてまとめていただきたい」

対応：

- 後述する、令和元年終了課題である「対流型地域圏における自動走行システム普及に向けた新たな道路ストック評価手法」の研究成果である「自動走行対応型道路ネットワーク整備計画検討ガイドライン」、「自動走行対応型道路ネットワーク整備計画評価・認証ガイドライン」の枠組みのもと、成果を整理し、成果の位置づけ、適用範囲を明確にしました。

指摘事項：「昨年度終了課題である『対流型地域圏における自動走行システム普及に向けた新たな道路ストック評価手法』などは密接に関連する研究であることが想定されることから、研究の相乗効果が生まれるよう、研究成果の取り入れも検討いただきたい。」・「サブテーマ ii：計画手法の開発について他の地域での類似の実験が行われており、それらの意向調査等の活用の可能性を検討いただきたい。」

対応：

- 「対流型地域圏における自動走行システム普及に向けた新たな道路ストック評価手法」の研究成果のレビュー及び、関係者へのヒアリングを実施、互いの関連性を明確化しました。
- 令和元年終了課題「自動運転と道の駅を活用した生産空間を支える新たな道路交通施策に関する研究開発」を類似の実験ととらえ、ヒアリングを実施しました。

指摘事項：「サブテーマ i：レーダーチャートで可視化について、目的に応じて適切な見せ方を検討いただきたい。」

対応：

- 可視化システムの操作性や表示方法について改良を実施しました。

指摘事項：「今年度に公表できなかったものを含め、研究成果を着実に発表いただきたい。」

対応：

- 「研究成果の発表状況」に記載の通り発表している。また報告書提出時点で掲載決定には至っていないものの国際ジャーナルへの投稿を行っている。

指摘事項：「コロナウイルス感染拡大等により、自動運転実証実験が実施できなかった点が研究の進捗に影響している。次年度は最終年度であり、コロナウイルスの感染状況も勘案しながら実験実施の可否を早期に見極めた上で、必要に応じて代替手段の実施を行うなど、着実に研究を進めていただきたい。」

対応：

- 2021年4月25～28日に実施し、実験結果をもとにした解析を実施している。

⑧研究成果

本研究では、ラストワンマイルを考慮した拠点間から拠点内に至る交通網の計画・設計の検討、評価、モニタリングに際して、次世代モビリティを考慮した総合的な施策検討に必要な技術開発を進め、**図1**に示す各プロセスに必要な手法を開発した。これにより、各プロセスでのビッグデータやセンシングデータに基づく検討が可能となるとともに、数理計画問題を活用した合理的な施策案作成、シミュレーションによるベンチマーク・評価の枠組みを構築することができた。

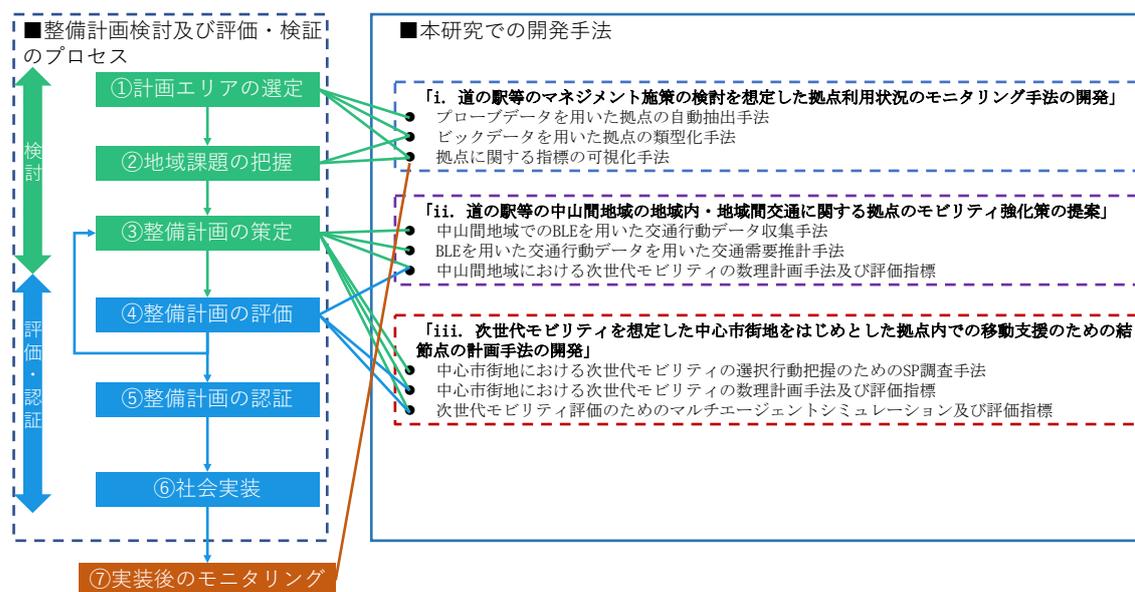


図1 成果の概要

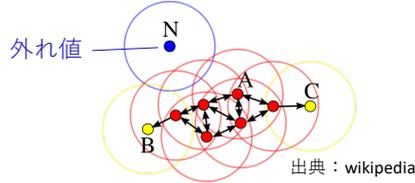
i. 道の駅等のマネジメント施策の検討を想定した拠点利用状況のモニタリング手法の開発

(1) プローブデータを用いた拠点の自動抽出手法

既存手法（DBSCAN、k-means）よりもデータの分散が高い状態において精度が高い抽出手法を開発（**図2**）できた。特に、人口規模が異なる地域のデータを一括で取り扱い、大小様々な拠点の検出が可能であることが検証され、人口規模等を考慮した複雑なチューニングが不要な手法が構築できた。これにより、交通結節点や自動運転サービスの基地となりうる拠点について、データに基づく抽出が可能となった（**図3**）。

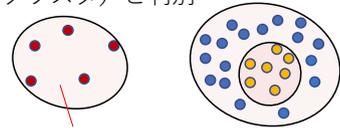
DBSCAN

- ✓ 一定の半径r(閾値)以内に存在する点(=到達可能)を同じクラスタとして検出
- ✓ 半径r以内でない点 (低密度箇所) は外れ値として処理 (クラスタリングされない)



提案手法

- ✓ 点密度(点の数÷半径²)が一定の場所を検出
- ✓ あるクラスタに近接の点を追加した際に密度が変化する場合をクラスタ境界面 (別のクラスタ) と判別



郊外部のようなドット数が少なく、比較的、低密度の場所もクラスタリング可能

図 2 拠点抽出手法の概要

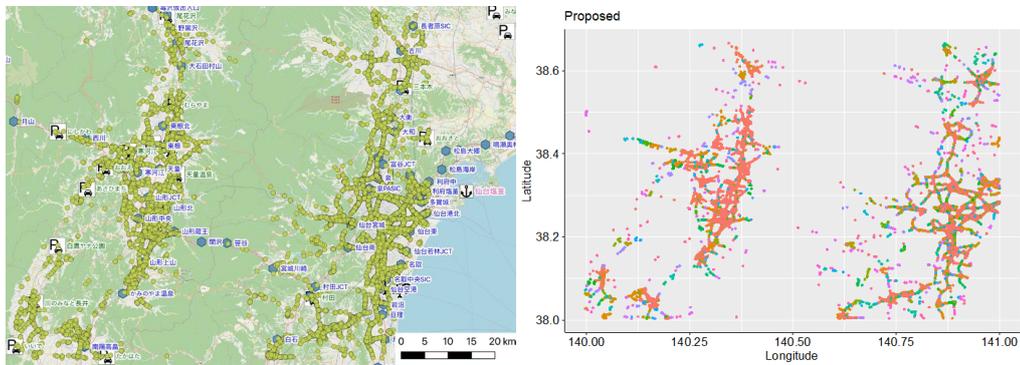
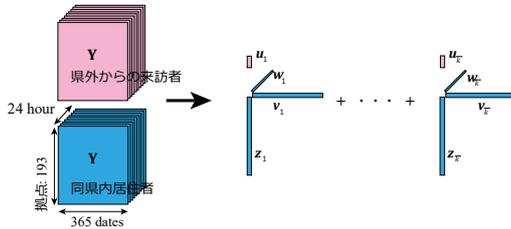


図 3 データの一例と抽出結果 (仙台市・山形市)

(2) ビックデータを用いた拠点の類型化手法

人流ビッグデータを用いて、NTF (非負値テンソル分解) により拠点を類型化する手法を構築した (図 4)。これによりビッグデータを用いたモニタリング時に変動等の解釈を深めることが可能であることを確認した (図 5)。また、解析結果より、需要の偏りが少ない道の駅は 10%程度であり、多くの道の駅では時間的な偏在に留意した拠点の利用が必要であることなど、今後の拠点の計画時などのモニタリングで留意すべき視点を得ることができた。

Step 1: 非負値テンソル因子分解によるパターン抽出



Step 2: 分解パターンに基づく拠点のモニタリング

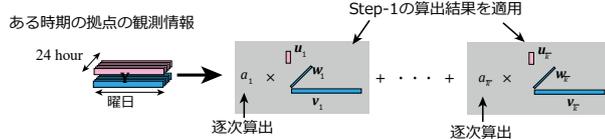


図 4 NTF と利用実態のモニタリングの手順

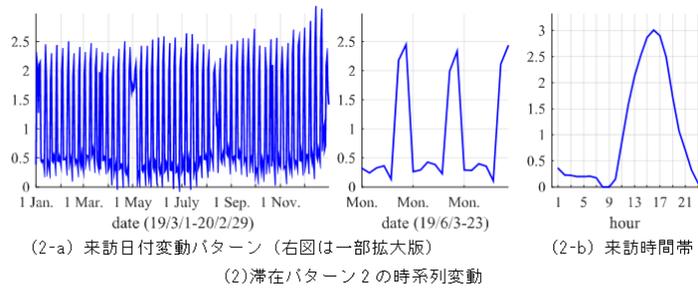


図5 類型化パターンの一例（土日昼間の来訪パターン）

(3) 拠点に関する指標の可視化手法

ETC2.0 や人流ビッグデータを用いて生成した全国の拠点に関する分析結果を一括して、専門の研究者以外でも理解でき、操作できる Web 上のダッシュボードを用いた可視化手法を開発（図6）した。

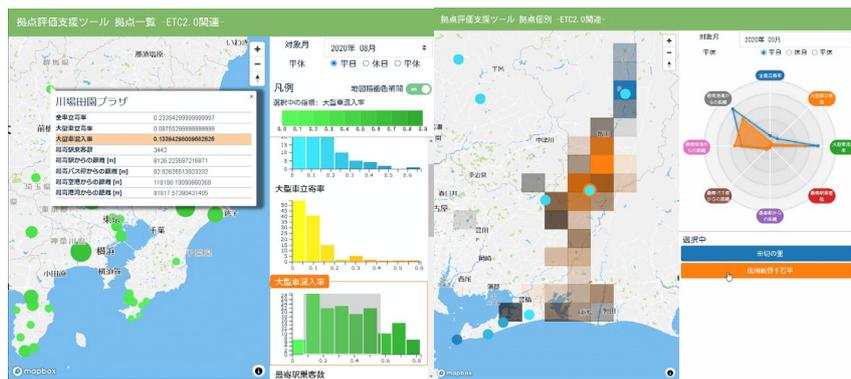


図6 可視化システムの画面例

ii. 道の駅等の中山間地域の地域内・地域間交通に関する拠点のモビリティ強化策の提案

(1) 中山間地域での BLE を用いた交通行動データ収集手法・需要推計手法

パーソントリップ調査等の既往の交通需要データが存在しない中山間地域での交通需要把握のための調査手法及び解析手法を構築（図7）することができた。本研究では、茨城県常陸太田市高倉地区の規模の集落（65歳以上の人口は135名）を対象とした調査を実施し、施策評価に必要な需要推計を実施した。

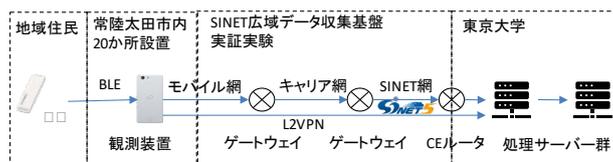


図7 BLE-PP 調査のシステム構成

(2) 中山間地域における次世代モビリティの数理計画手法及び評価指標 SAV や基幹交通等を前提としたネットワーク計画や運用計画の前提条件に必要な数理計画問題を定式化し、検討を行った(図8)。上記需要推計値を用いた検討により、本研究で当初想定していたよりも大きな規模の集落でも車両の必要台数の観点から基幹バス輸送が効率的とならないという結果(表1)をはじめ、集落の規模、交通需要の規模に応じた自動運転や次世代モビリティのサービス範囲及び連携すべき交通手段を選定する必要があるなど、今後の施策検討に必要な重要な示唆を得ることができた。

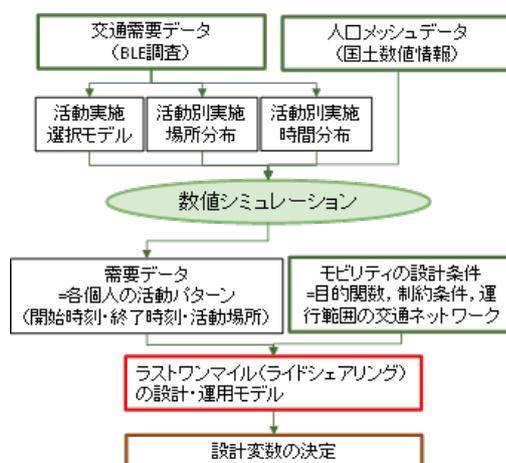


図8 検討のためのモデル構成

表1 解析結果の一例

シナリオ	拠点間輸送(基幹バス等)あり			拠点間輸送(基幹バス等)なし		
	車両台数 (台)	総走行距離 (台 km)	総乗車時間 (人時間)	車両台数 (台)	総走行距離 (台 km)	総乗車時間 (人時間)
旅行時間優先	24	269	254	17	375	364
走行距離優先	25	262	272	20	368	384
台数優先	4	405	337	5	510	429
台数優先+ ライドシェア	2	199	299	3	251	407

iii. 次世代モビリティを想定した中心市街地をはじめとした拠点内での移動支援のための結節点の計画手法の開発

(1) 中心市街地における次世代モビリティの選択行動把握のための SP(Stated Preference)調査手法

自動運転バスやパーソナルモビリティ等の次世代の交通手段を想定した、都市部でのラストワンマイルの交通手段選択モデルに関するパラメータを得るための SP 調査を開発した。

- ▶ 次世代交通手段への試乗前後でパラメータ取得することを特徴としており、試乗体験により、より確からしいパラメータを取得できたと示唆される結果を得た。次世代モビリティのように乗車経験者が少ないモビリティについては、完全な仮想状態で収集されたモデルパラメータの精度には留意が必要であることが示唆された（図 8・図 9）。
- ▶ また、ラストワンマイルのモビリティの導入には、乗車に際して数百メートルの徒歩に相当する抵抗があることを勘案する必要があるなど、次世代交通手段の導入検討において留意すべき視点を獲得することができた。

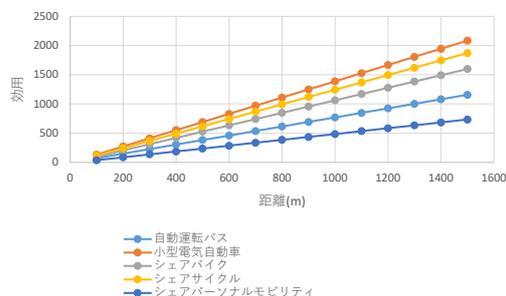
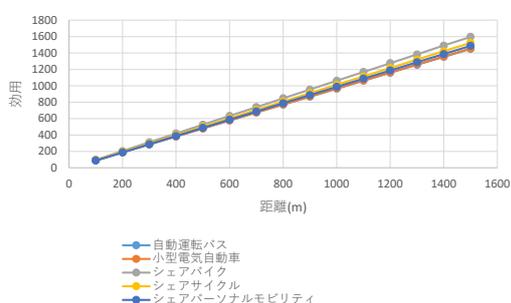


図 8 試乗前調査での徒歩を基準とした効用差 図 9 試乗後調査での徒歩を基準とした効用差

(2) 中心市街地における次世代モビリティの数理計画手法及び評価指標

SAV 等を前提としたネットワーク計画や運用計画の前提条件に必要な数理計画問題を定式化した。都市部では、地域間を移動する BRT (Bus Rapid Transit) などの大量輸送機関とフィーダー部やラストワンマイルを担う SAV システムを組み合わせることが SAV の効率的運用、BRT の利用が渋滞発生の抑制にも貢献 (図 10) することが確認された。このことは、SAV や乗合タクシー等の共有型サービスが普及する都市では、路上・路外に SAV と BRT が結節する停車スペース・待合スペースなどの施設整備が必要となることを示唆する結果を得た。

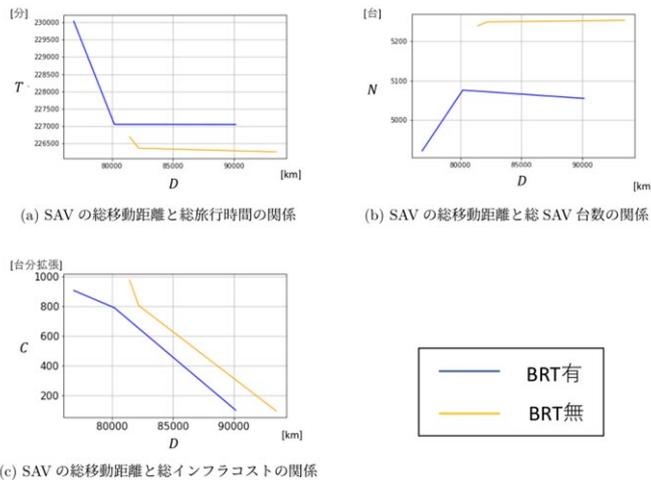


図 10 BRT の導入有無でのパレートフロンティアの比較

(3) 次世代モビリティ評価のためのマルチエージェントシミュレーション及び評価指標

オープンソースのマルチエージェント交通シミュレータである MATSim の改良版 (図 11) を作成し、次世代交通手段の評価を行った。上記計画手法の検討結果に基づくシナリオによるマルチエージェントシミュレーションによる評価を用いることで、上記検討に基づく BRT 経路の妥当性や BRT/SAV の所要時間短縮効果についてより現実的な交通環境を仮定したモデルでの検証ができるとともに、現況に対するラストワンマイルの交通手段のシフトや乗り換えが発生する結節点の空間分布 (図 12) を評価できることを確認した。

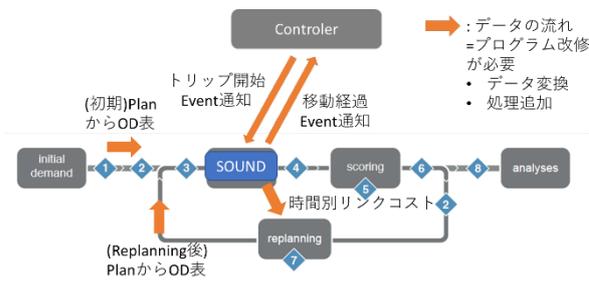


図 11 SOUND 連携 MATSim によるシミュレーション

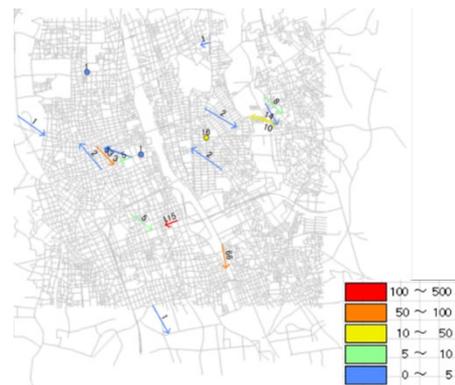


図 12 乗り換えが発生する結節点

⑨研究成果の発表状況

【発表リスト】

1. 日下部貴彦, 三谷卓摩, 湊裕一, 川田蒼葉, 柳沼秀樹: BLE (Bluetooth Low Energy) タグを用いた中山間地域での交通需要データ収集, CSIS DAYS 2019, 東京大学空間情報科学研究センター, 2019.
2. 湊裕一, 川田蒼葉, 三谷卓摩, 菅芳樹, 増田精, 柳沼秀樹, 日下部貴彦: BLE (Bluetooth Low Energy) タグを用いた中山間地域での交通需要データ収集, 第60回土木計画学研究発表会・秋大会, 富山大学, 2019.
3. 鈴木新, 山口裕通, 福田大輔: OPTIMIZING INTERCITY TRANSPORTATION NETWORK CONSIDERING PASSENGERS' TOUR BEHAVIOR, 2019 INFORMS Annual Meeting, Washington State Convention Center, Seattle, USA, 2019.
4. 川崎洋輔, 梅田祥吾, 桑原雅夫: プローブ軌跡データを用いた抜け道の検出, ITS シンポジウム 2019, 石川県地場産業振興センター, 2019.
5. 浅井隆之介, 山口裕通, 中山晶一郎: 非負値行列因子分解を用いた複数情報の融合による道の駅開業効果の分析, 土木学会中部支部研究発表会, 長野工業高等専門学校, 2020.
6. 瀬尾亨, 朝倉康夫: Multi-Objective Linear Optimization Problem for Strategic Planning of Shared Autonomous Vehicle Operation and Infrastructure Design, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.23, 4, 2022. (<http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2021.3071512>)
7. 峪龍一, 中内智也, 内田賢悦: Ridesharing Traffic Flow Model based on Link-based Kinematic Wave Theory, The 14th EASTS conference, PP2945, 2021.

⑩研究成果の社会への情報発信

ウェブ

さいたま新都心駅周辺自動運転サービス実証実験：

<https://www.youtube.com/watch?v=ftS4FmLIw20>

公開イベント等による研究成果の情報発信

日下部貴彦：マルチスケールな交通連携を想定した拠点配置と交通マネジメントについての技術研究開発. 新道路シンポジウム 2022「次世代 ETC が切り拓くデータプラットフォームと xROAD の展望」, 日本, 2022.3.11 開催

⑪研究の今後の課題・展望等

1. 交通需要調査・計画案作成・シミュレーションのよる評価の一貫性がある実施

本研究では、交通需要推定のための中山間地域でのデータ収集や、次世代交通手段の選択行動をシミュレーションに必要なパラメータ収集のための SP 調査などを実施している。これらは計画策定時のデータ収集から計画代替案評価、実施後のモニタリング等を一貫したデータやその収集方法で行うことを志向した枠組みとなっている。しかし、本研究の研究開発期間内で実施できている内容は、中山間地域の事例では実験実施に至らず、調査のみの実施になり、施策の導入後評価が行えていない状況である。また、都市部での SP 調査による交通行動モデルの推定結果は、COVID-19 の影響により調査・実験実施が遅れたため、シミュレーションでのパラメータ適用には至っていない。今後の研究開発や、実務での適用に至るプロセスでは、収集データによるパラメータの評価シミュレーションへの適用やモニタリング実施に関するケーススタディや知見を重ねる必要があると考えている。

2. 継続的なデータ収集と仕様の管理

本研究で用いた ETC2.0 では、途中期間での仕様変更等が含まれており、時系列での分析に適さない期間が含まれていた。本研究で開発した手法を、施策の事後評価やモニタリングに適用するには、データセットのメタデータや仕様等が継続的に公開されるプラットフォームの整備、一貫した仕様での継続的なデータ蓄積が進むことが必要と考える。

⑫研究成果の道路行政への反映

本研究は、「⑤研究の目的・目標」に示した i～iii の実施により、令和元年度終了課題である「対流型地域圏における自動走行システム普及に向けた新たな道路ストック評価手法」で示された「自動走行対応型道路ネットワーク整備計画検討ガイドライン」、「自動走行対応型道路ネットワーク整備計画評価・認証ガイドライン」の枠組みを、新たな国土形成計画に示されている「コンパクト+ネットワーク」の考え方による集積とネットワーク化に向けたモビリティシステムの設計や導入検討に必要な技術開発という共通の思想のもと、次世代交通手段に拡張させたものと位置づけることができる。

具体的には、上記ガイドラインで示された手順に対し、より多くのデータソースやデータ収集方法への対応、分析手法の高度化・精緻化、対応する交通手段の多様化に資する内容となっており、次世代モビリティのネットワーク整備に向けての計画・設計・評価プロセスでの活用を期待している。

本研究で開発したモニタリング及び可視化手法は、ETC2.0 データに適用可能なデータ駆動を志向した手法となっており、xROAD（道路データプラットフォーム）等との親和性が高いと考えている。例えば、整備対象拠点の列挙支援、利用パターン等の利用者行動をもとにした類似の整備例の検索等に活用でき、今後、モニタリングや整備計画の検討への活用を期待している。

⑬自己評価

(1) 研究目的の達成度と研究成果

対象地域の被災や COVID-19 による大幅な計画変更があるなか、参画する研究者や実務者の多大な協力を得て、多岐に渡る研究内容を実施でき研究目的を達成することができたと考えている。特にプローブデータの提供を受けたこと、常陸太田市高倉地区、さいたま新都心の 2 か所をフィールドとして調査・実験の実施に至る協力を得られたことは、研究進捗に重要な要素となっている。計画変更の影響により、学術成果の公表は遅れているが、水準的には高い成果が得られていると自己評価しており、公表が完了時の状況に期待している。

(2) 今後の展望と道路政策への寄与

一連の研究開発により、過年度課題で自動走行ネットワークの整備に向けて作成されたガイドラインの適用範囲の拡張や関連する手法の精緻化を実施できたと考えており、今後の自動運転車両を含む次世代交通手段導入に向けた拠点及びネットワーク整備計画の検討に役立てられることを期待する。

(3) 研究の投資価値

過年度課題と共通する思想による研究開発が行えたことでより、自動走行ネットワークをはじめとした次世代交通手段に関連する整備に必要な学術的知見を高い水準で積み上げることができ、十分な投資価値があったと考えている。また、本研究課題の研究メンバーが、若手研究者を中心に構成されているだけでなく、調査・実験実施時に国土交通省関東地方整備局をはじめとした若手実務者や、関連する民間企業の若手実務者など、多くの若手の方に参画いただいたことで、次世代交通手段や拠点整備、データ活用などの新しい実務分野に関する若手研究者・実務者への浸透など間接的な投資価値もあったと評価している。