

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
N o . 31-2

研究テーマ

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

研究代表者：	東京大学准教授	日下部 貴彦
共同研究者：	東京理科大学准教授	柳沼 秀樹
	金沢大学助教	山口 裕通
	東京大学教授	福田 大輔
	北海道大学教授	内田 賢悦
	東京工業大学准教授	瀬尾 亨
	日本大学専任講師	川崎 洋輔
	愛媛大学特定講師	三谷 卓摩

令和 4 年 5 月

新道路技術会議

目次

研究概要	1
第1章 研究の背景と目的	3
1. 1 背景	3
1. 2 目的	3
1. 3 研究内容	4
第2章 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	6
2. 1 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	6
2. 2 拠点エリアの自動抽出手法	7
2. 3 利用実態のモニタリング手法	10
2. 4 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	14
第3章 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	16
3. 1 分析の構成と対象地域	16
3. 2 BLE による交通行動調査と需要推計	16
3. 3 モビリティの種類と運行管理の方針検討	19
3. 4 拠点間、及び、拠点への移動を対象とした次世代モビリティの有効性の検証・評価	20
第4章 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	25
4. 1 はじめに	25
4. 2 次世代モビリティの選択行動調査	25
4. 3 次世代モビリティの有効性の検証・評価	29
4. 4 拠点間及び拠点への移動を対象とした次世代モビリティの有効性の検証・評価	36
第5章 研究成果のとりまとめ	43
5. 1 成果の一覧	43
5. 2 道路政策での活用	44

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（令和元年度採択）
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.31-2	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	東京大学 准教授 日下部貴彦

本研究は、ETC2.0をはじめとした最新のセンシング技術やビッグデータを活用し、都市内から都市間に至る交通ネットワークにおける、次世代モビリティの交通結節点機能を担うべき拠点を検討するための方法論を構築し、交通結節点の配置や機能分担等の評価手法を提案するものである。

1. 研究の背景・目的（研究開始当初の背景・動機、目標等）

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。

2. 研究内容（研究の方法・項目等）

i～iiiの実施内容に対応した手法の開発、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では、「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」を行ったうえで、ETC2.0をはじめとしたプローブデータを対象とした「拠点エリアの自動抽出手法」、プローブデータや人流ビッグデータ等を用いた「拠点の利用実態のモニタリング手法」を構築した。さらに、実務者等も念頭に「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システム」を構築した。iiでは、中山間地域を対象として、「BLE(Bluetooth Low Energy)タグを用いた交通行動調査と需要推計手法」を開発した。茨城県常陸太田市を対象とした調査実施を行ったうえで、ケーススタディを実施した。次世代モビリティとして、共有型自動運転サービス(SAV: Shared Autonomous Vehicle)の導入を想定し、SAVと旅行者の動的交通量、総 SAV 台数、交通容量、車両待機容量を決定する数理計画問題を定式化し検討を行った。iiiでは、都市部を対象とした自動運転車両の走行実験を伴った「次世代モビリティの選択行動調査」を実施し、ユーザーによる利用特性を把握するとともに、数理計画問題を用いた次世代モビリティの運用シナリオの検討を行った。マルチエージェントシミュレーションを実装し、評価を実施した。

3. 研究成果（図表・写真等を活用し分かりやすく記述）

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。また、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、

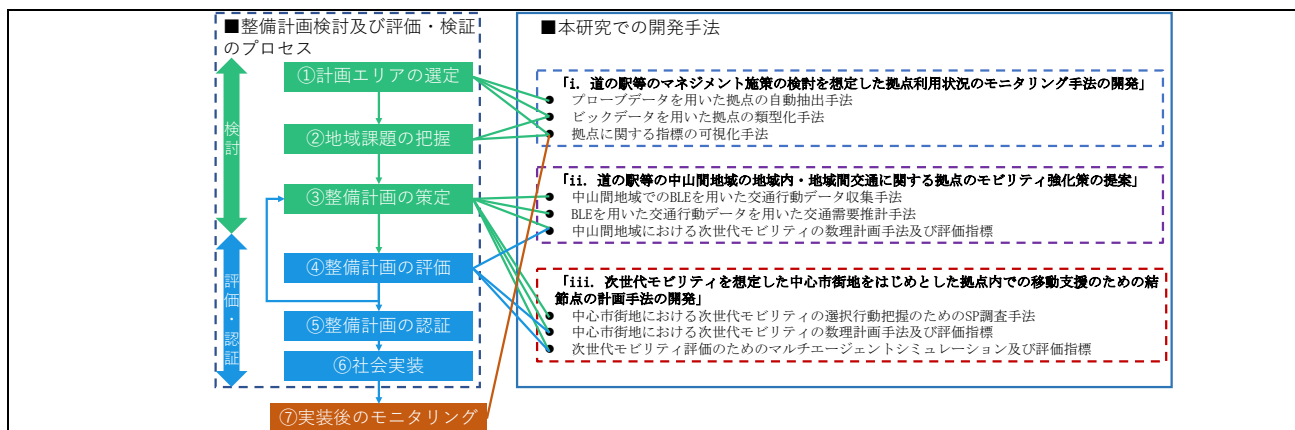


図1 成果の概要

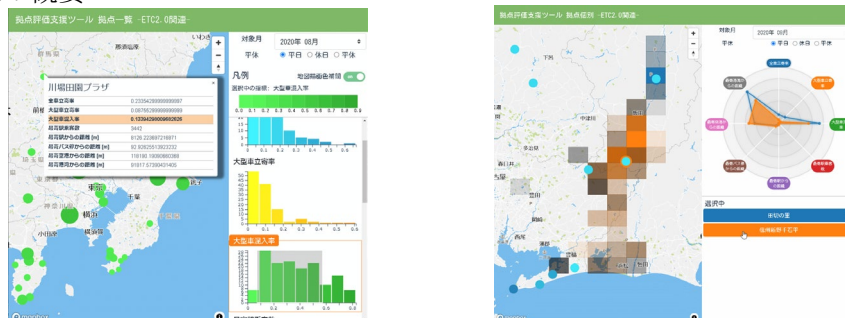


図2 可視化システムの画面例

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2）することにより、ビックデータや解析結果を用いたモニタリングを支援する環境を構築できた。

4. 主な発表論文（研究代表者はゴシツク、研究分担者は下線）

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.
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.

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>)

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

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」の枠組みを様々な次世代モビリティに拡張し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。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。

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

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。

7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

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>

第1章 研究の背景と目的

1.1 背景

自動運転技術の発展や、MaaS (Mobility as a Service)に関連する技術開発の発展を背景として、自家用車やバス、鉄道など従来の交通手段にとらわれない交通システムの構築が求められている。このような交通システムでは、都市間を結ぶ長距離移動や都市内・地域内を結ぶ短距離移動など、様々なスケールの交通手段をスムーズに結節するための拠点（交通結節点）が重要な役割を果たすと考えられる。例えば、平成31年3月に国土交通省関東地方整備局東京国道事務所より事業計画が発表された品川駅西口基盤整備事業¹⁾では、次世代型交通ターミナルの整備が示され、既存の鉄道・バス・タクシーなどの交通手段に限定されない交通結節点の整備に向けた方向性が示されている。こうした次世代の交通手段を結節する交通結節点の整備は、既往の交通手段によって形成された拠点が都市部に限定されるものではなく、中山間地域でも必要とされている。2017年度より国土交通省による実験が開始され、本格導入に向けた取組が実施されている「中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス」²⁾においても、結節点となる拠点を中心としたネットワークの整備が重要な要素になっている。上記の例に示したように、これまでの道路整備重要であった道路ネットワーク上のリンクに加え、次世代交通手段への対応に向けては、ノードである拠点及び交通結節点も今後の道路ネットワーク整備では重要な役割を果たすと考えられる。道路ネットワーク上のリンクの整備では、旅行時間短縮やネットワーク信頼性向上など集計的な計測で整備効果を算出する

ことができ、マニュアル・ガイドライン等の評価体系も整備されている³⁾。一方で、拠点の整備については、既往のリンクを結ぶノードに整備されることが多く、リンクと同様の評価は難しい。また、交通結節点では、交通利用者の目線で出発地から目的まで、一貫した交通システムを提供する観点も必要であり、整備にあたっては、

- ・ラストワンマイル
- ・マルチモーダル
- ・利用者の行動

の観点を含んだ、計画・設計・評価の枠組みが必要である。そこで本研究は、ETC2.0をはじめとした最新のセンシング技術やビッグデータを活用し、都市内から都市間に至る交通ネットワークにおける、交通結節点の機能を担うべき拠点を検討するための方法論を構築し、交通結節点の配置や機能分担等の評価手法を提案するものである。

1.2 目的

本研究は、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。

1.3 研究内容

1.2に示したi～iiiの目的に対応して以下の内容を実施した（図-1.1）。各実施内容の詳細は2～4章に記載する。5章では、これらの実施内容と成果のとりまとめ、道路政策での活用に向けた検討について記述する。

(1) 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。上記要件の整理では、道の駅以外の拠点として、小さな拠点の事例や、都市・地域総合交通戦略での拠点の位置づけや事例をレビューした。各地で様々な施設が地域の拠点となっている事例を確認でき、結節点となる施設、結節する交通手段についてまとめた。上記モデル化の検討では、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した。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し、非負値テンソル因子分解による交通行動パターン抽出及び拠点の類型化を試行した。さらに、解析結果の実務への応用を円滑にすることを意図した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

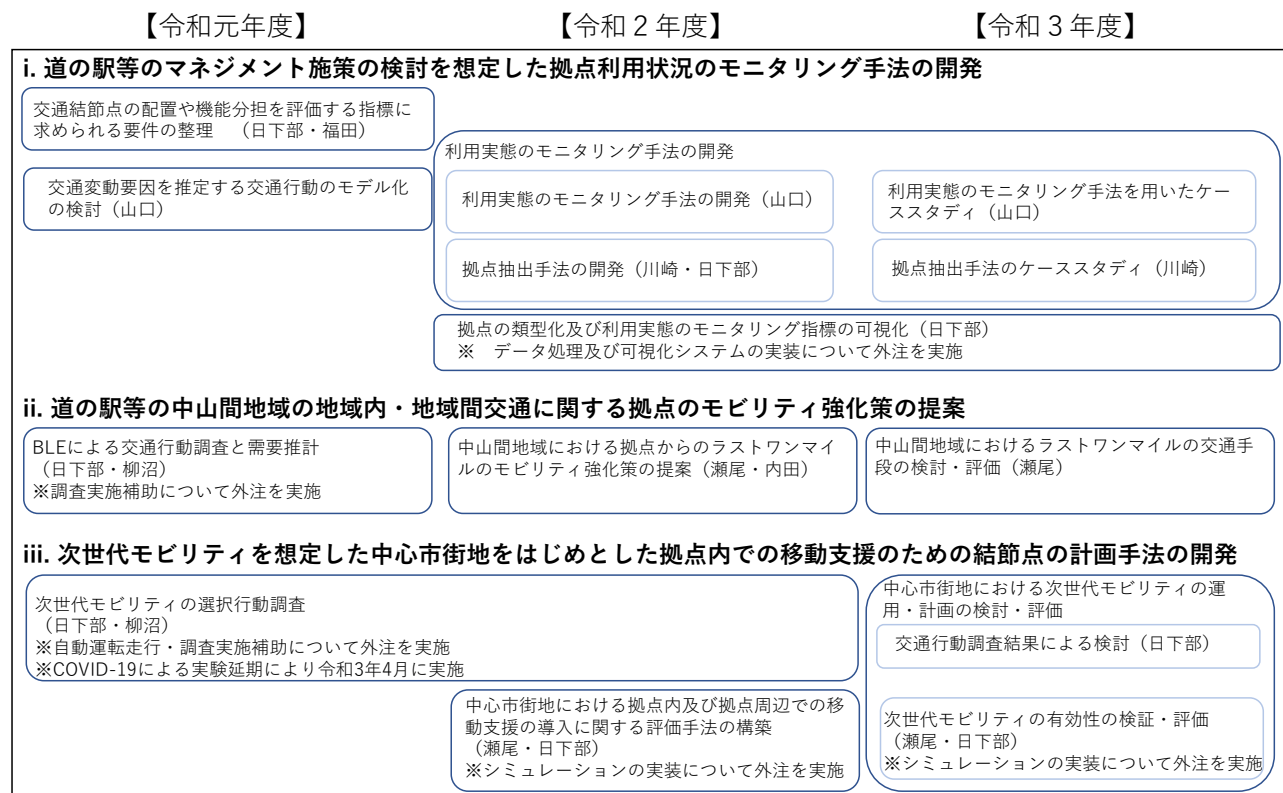


図-1.1 研究の実施体制と内容

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。

(2) 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構築し、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構築し、評価を実施した。

(3) 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。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局東京国道事務所：品川駅西口 基盤整備事業，
https://www.ktr.mlit.go.jp/toukoku/toukoku_index021.html
(2022/5/7 アクセス)
- 2) 国土交通省：中山間地域における道の駅等を拠点とした自動運転サービス，
<https://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/automated-driving-FOT/index.html> (2022/5/7 アクセス)
- 3) 国土交通省：個別道路事業の評価
<https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-hyouka/ir-hyouka.html>
(2022/5/7 アクセス)

第2章 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

2.1 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

本節では、国土交通省道路局・総合政策局・国土政策局・都市局等の事業に関する公表資料を収集し、交通結節に関連する拠点の整備事業を整理した結果を示す。具体的には、

- ① 都市・地域総合交通戦略のすすめ～総合交通戦略策定の手引き～（都市局）¹⁾²⁾
- ② 地域のモビリティ確保の知恵袋2018～「人の集まり」と「人の流れ」の分析に基づいた交通拠点とネットワークに関する検討～（総合政策局）³⁾
- ③ 「小さな拠点」づくりガイドブック（国土政策局）⁴⁾⁵⁾
- ④ 道の駅（道路局）⁶⁾
- ⑤ 立体道路制度（道路局）⁷⁾

の資料にある事例を整理し、拠点に求められる機能、交通手段、配置等に関わる要素についてまとめ、整備にかかる要件を示すことで指標に対する要求を示唆する内容としている。

地方都市や大都市圏周辺の都市部では、モータリゼーションによって広がった都市圏に対し、人口減少に見合った集約化とこれと整合する交通戦略という文脈で、公共交通網の再編などと同時に既存施設の交通結節点化や再整備を行う事例が多くあることがわかった。既存施設の結節点化が行われる事例では、市街地では既存商業施設や病院、郊外では道の駅、JA農産物直売所、特産品直売所、宿泊施設などの集客施設が用いられることが多い。結節点の機能の改善内容としては、案内所・バス待合所の新設や環境改善、バス車両接近情報の提供などが実

施されている。市街地での拠点を中心に広場・歩行空間の整備やシェアサイクルなどの新しいモビリティの導入など拠点内・周辺への結節も実施されていることがわかった。また、特に過密な大都市部では、立体道路制度等を活用して、道路空間を活用した整備方法も実施されている。

公共交通の頻度が低い中山間地域では、商店や病院、公共施設などの生活の維持に必要な施設に訪問するための交通手段が不可欠である。このことから都市部での大量輸送機関の結節だけでなく、乗合タクシーやコミュニティバスなども結節することが多い。地方部や中山間地域では、「小さな拠点」の事例に見られるように生活の拠点施設が交通結節点としても機能している。このような拠点では、診療所、高齢者福祉、交流機能（図書館やサロンを含む）、行政窓口、金融窓口（ATM等を含む）などが集約されるべき施設（あるいは結節すべき施設）の候補となることがわかった。また、拠点の配置については、既往施設跡地を利用し、地域で運営する形式のものが多く、道の駅等の新規施設を活用して拠点を整備している事例もある。

図-2.1は、上記を、都市部、地方部、中山間地域のそれぞれで、現在、交通結節をしている施設と交通手段の観点でまとめたものである。都市部では、鉄道駅や中心市街地が拠点として整備され、自転車・バス・タクシー等がアクセス手段として想定されており、イグレスに用いられる交通機関も、近年ではバス・タクシーだけでなくカーシェアやサイクルシェアなどの導入が進められている。地方都市では、商業施設、病院などをバスの結節施設として整備される

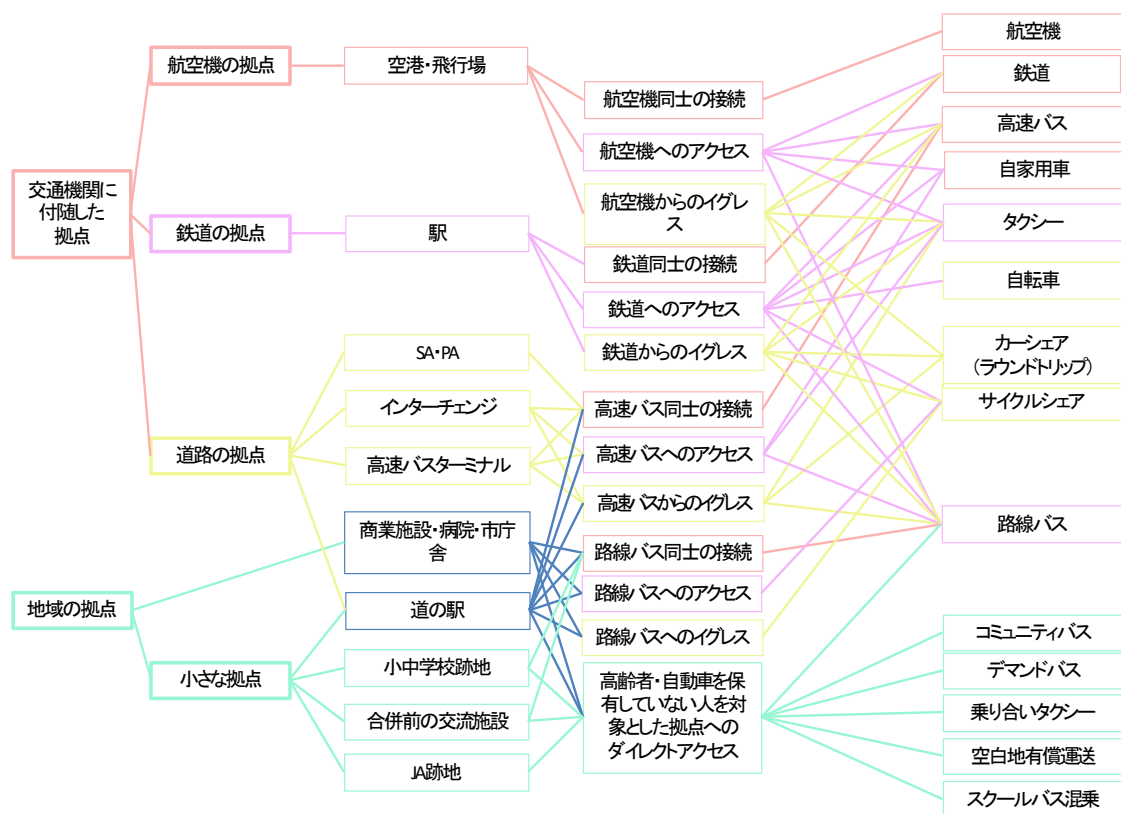


図-2.1 交通結節点と結節する交通手段（事例より作成）

事例が多い。今後高齢化が加速するなかで、高齢化にともなう歩行可能距離の短縮などの運動機能の低下等を要因として、これまで想定していた徒歩や自転車でのアクセス・イグレスの交通手段を用いることが難しい交通利用者が増加することが懸念され、ラストワンマイル交通手段の維持は重要な課題になると考えられる。こうした、高齢者への、ラストワンマイル交通手段としてのパーソナルモビリティやグリーンスローモビリティ等が重要な役割を果たすと同時に、公共交通網と連携した整備が必要となると想定される。

中山間地域では、小さな拠点や道の駅などの地域の施設へ機能を集約し、デマンド型交通によるドアトゥドアのサービス提供が進んでいる。しかし、今後、運転免許返納の促進や高齢人口のさらなる増加が見込まれる中で、ドアトゥドアのサービスの需要が増える一方でドライバーの不足等の問題が生じてくるため、効率的な交通システムの計画と運用によって需要に対応することが求められるであろう。こうした状況に対応するためには、機能集約やデマンド交通だけでなく、コミュニティバス等の容量が大きい公共交通手段とラストワンマイルの交通手段を組み合わせた対応も必要となると想定される。

以上より、都市部と地方部・中山間地域では、拠点となる施設の種類や規模は異なるものの、適切な拠点への機能の集約のほか、拠点及び結節点へのラストワンマイルの交通手段やドアトゥドアで移動可能な交通手段の必要性が高まっているという点では共通していると考えられる。また、道の駅などの施設では、生活の拠点としての機能だけでなく観光交通を中心とした地域のゲートウェイとしての役割を担っているものもあり、双方の拠点機能を兼ねるためには、短距離・長距離の移動者を視野に入れた整備が必要である。

2.2 拠点エリアの自動抽出手法

(1) 開発したアルゴリズムの概要

本節では、位置情報の相対密度に基づき、拠点となっている地点・エリアを自動抽出する方法を提案する。

近年のICT(情報通信技術)の進歩により、LBS(Location Based Service)、AFC(自動料金収受システム)、AVL(車両自動位置情報)など、位置情報に基づく様々な人の移動データを取得することができるようになった。このような自動化されたシステムから得られる多くのデータを移動解析や位置情報サービス(LBS)に活

用するために、POI (Point of Interest) の検出やエリアの分類は重要なプロセスの一つとされている。例えば、鉄道駅の検出や利用者の居住地の分類などである。位置情報データからクラスタを決定する代表的な手法として DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise)⁸⁾があり、この手法を用いることで、位置情報データからクラスタを決定することができる。DBSCANは、あらかじめ定義された一定半径内の近傍にある点からグループを作成し、低密度領域の外れ点を決定することができる。この手法の利点は、事前にクラスタ数を指定することなく、高密度の位置の系列を見つけることができ、ノイズに対してロバストであることである。しかし、ETC2.0のようなプローブデータから日本全国を対象として拠点を探する場合、都市部と地方では人口や交通量に対応して密度が異なるため、DBSCANをそのまま適用することができない。例えば、地方の主要観光地の人出は、都市部のスーパーマーケットの人出より少ないこともある。このことから、地域によって密度が異なる場合、相対密度も拠点をを見つけるための重要な要因となり得る。

本研究で提案した手法は、拠点となっている地点・エリアを自動抽出するために、相対密度に基づく空間クラスタリング手法である。本手法は、LBS、プローブ車、GPSを利用した旅行調査から得られた位置データセットから、拠点を自動的に発見することを目的としている。これらのデータセットには、周辺地域と比較して密度の高い訪問スポットのクラスタが含まれていると予想され、提案手法は密度の差分に基づいてこれらのクラスタを特定する。

(2) 検証データの作成

本研究で用いたデータ内容を述べる。本研究では、2019年6月に収集されたETC2.0プローブデータ⁹⁾を用いる。ETC2.0車載器からは、走行履歴データと車両挙動データの2種類が観測される。走行履歴データとは、個々の車両が一定距離もしくは、進行方向(角度)が 45° 以上変化した場合にGPSより計測される車両軌跡データである。車両挙動データは、急な加減速や急ハンドルが発生した場合の加速度やハンドル角を記録したデータである。本研究では、走行履歴データを用いる。ETC2.0では、エンジンのON/OFFの箇所を起終点と判定し、GPSの点列データをトリップ単位に分割して記

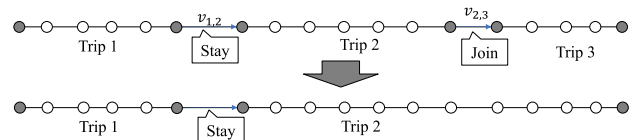


図-2.2 トリップ分割および滞在判定

録する。なお、個人の自宅や会社の場所といった個人情報を保護するため、起終点近傍の点列データは削除され、記録されない仕様となっている。このプローブデータを前処理して、提案手法を適用した。

本研究で用いたプローブデータの前処理方法を述べる。データの前処理は、トリップの「結合」と「滞在」判定を行う。図-2.2に示すトリップデータのサンプルを用いて前処理の内容を述べる。図のように3つのトリップデータが得られた場合を考えよう。各点では、時刻と位置(緯度経度)が記録されている。灰色ハッチの点は、トリップの起終点である。トリップ1の終点とトリップ2の起点間を移動する平均速度を $v_{1,2}$ 、トリップ2の終点とトリップ3の起点間を移動する平均速度を $v_{2,3}$ とする。このトリップ間の移動速度 $v_{1,2}$ 、 $v_{2,3}$ が、閾値速度 v_{th} 以上の場合は、「結合」、 v_{th} 未満であれば「滞在」と判断する。図では、トリップ1、2の間が「滞在」、トリップ2、3の間が「結合」と判定された例である。「結合」と判断された場合は、図の下段のようにトリップを結合する。このようなトリップの「結合」の判定及び結合処理を行う理由を述べる。前述したようにETC2.0の仕様では、エンジンのON/OFF箇所を起終点とし、トリップを分割する。よって、トリップ途中において、交差点等で一時停止して、エンジンを切った場合、誤ってトリップを分割してしまう場合がある。そのため、上記の「結合」処理を行なっている。

(3) ケーススタディによる検証

本節では、日本全国から取得したETC2.0プローブデータに対して、提案手法を適用し、下記を検証する：

- ① モデルパラメータの感度分析
- ② 検出したクラスタ内のデータの集中度合いの分析
- ③ 拠点検出の可能性（エリアごとにパラメータを変更することなく(1つのパラメータのみで)、日本全国の拠点を検出できるか)
- ④ 提案手法の性質（都市間のクラス

タステータスの比較分析)

なお、本項では②～④について検証結果を記載する。

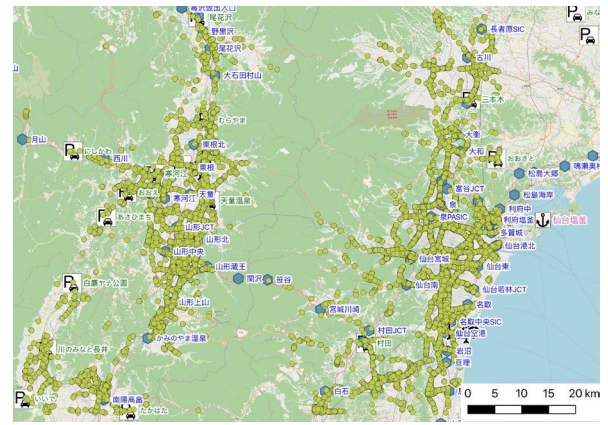
②③では、ローレンツ曲線¹⁰⁾により、クラスタ規模とクラスタ内の点の数の偏りを分析する。ローレンツ曲線は、クラスタ内のデータ数の集中度合いを評価するために用いることができる。各クラスタのデータ数に偏りがない場合、ローレンツ曲線は45度の直線に近い形状になる。

既往手法との比較例として、仙台市、山形市を対象にしたクラスタリング結果を図-2.3に示す。k-meansは小規模のクラスタは検出されているものの、都市部大規模なクラスタは検出できていない。DBSCANは、郊外部で外れ値(図中の赤点線の丸)が発生しており、クラスタリングされていない。一方、提案手法は、外れ値も含めて広域の拠点を検出している。

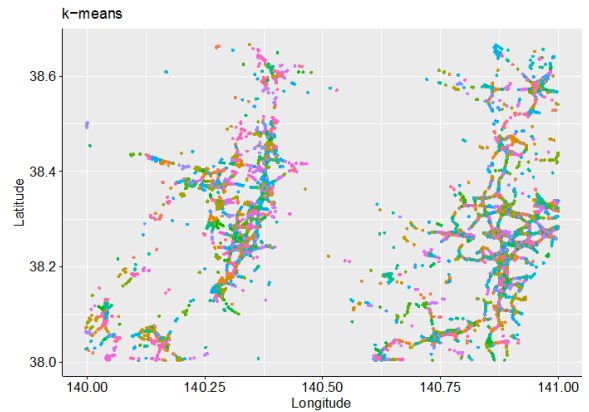
次に、ローレンツ曲線により、クラスタのデータの偏りを定量的に分析する。図-2.4に提案手法、DBSCAN、k-meansのローレンツ曲線を示す。図の横軸は、クラスタの累積構成比率、縦軸は、クラスタ内の点の数の累積構成比率を示す。同図を見ると、提案手法が最も45度ラインに近く、クラスタ内の点の数の偏りが小さいことがわかる。このことから提案手法が多様な密度(点の数)のクラスタを検出できていると解釈される。

以下では、④の分析結果について述べる。前述のように、拠点のパターンは場所や交通特性(e.g. 交通量)に応じて多様である。そこで、提案手法の性質を分析するために、データ密度が大きく異なるとされる人口規模の異なる4都市で拠点検出結果の比較分析を行った。都市部の大都市、地方にある大都市、地方にある小都市という観点から、東京23区、大阪市、仙台市、宇和島市の4都市を選定した。

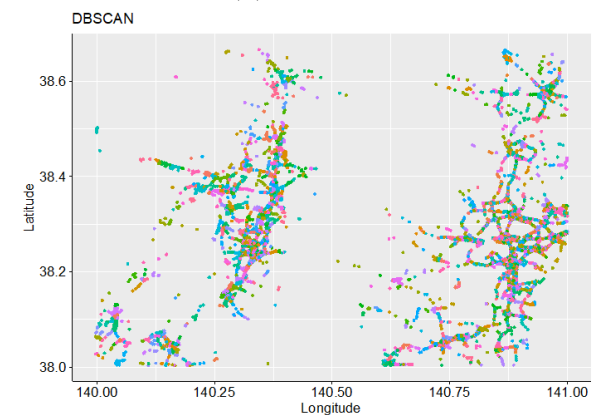
図-2.5に各都市の人口密度とプローブデータの密度の関係を示す。横軸は人口密度[人/km²]であり、人口を市町村の面積で除した値である。縦軸は、データ密度[ドット数/km²・月]であり、GPSデータ数を市町村の面積で除した値である。同図より、人口密度の高い大都市の方がデータの密度も高い傾向がみられる。図-2.6に各都市のクラスタ内のドットの数と半径の関係を示す。横軸がクラスタに含まれるドット数[ドット/月]、縦軸は半径[km]を示している。同図のドット数に着目すると、人口規模の大きい大都市の方が比較的、クラスタに含まれるドット数が大



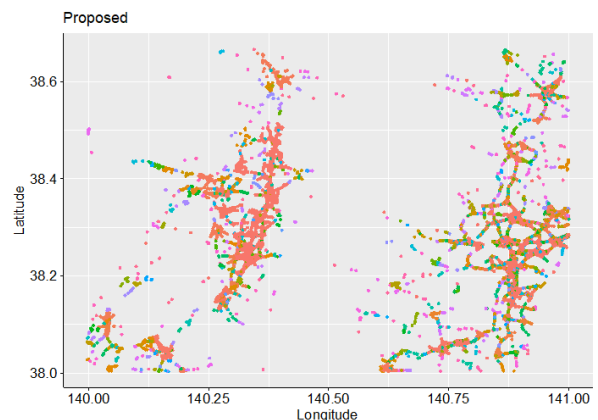
(a) データ



(b) k-means



(c) DBSCAN



(d) 提案手法

図-2.3 各手法によるクラスタリング結果(仙台市・山形市、1次メッシュ:5740)

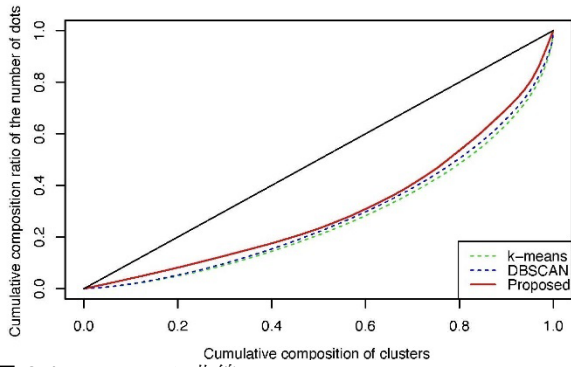


図-2.4 ローレンツ曲線

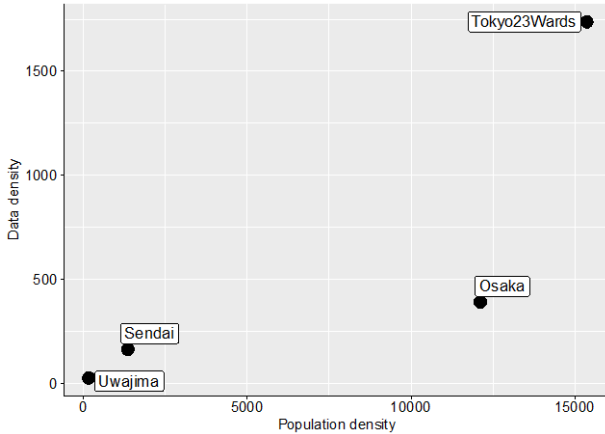


図-2.5 人口密度とプローブデータの密度の関係

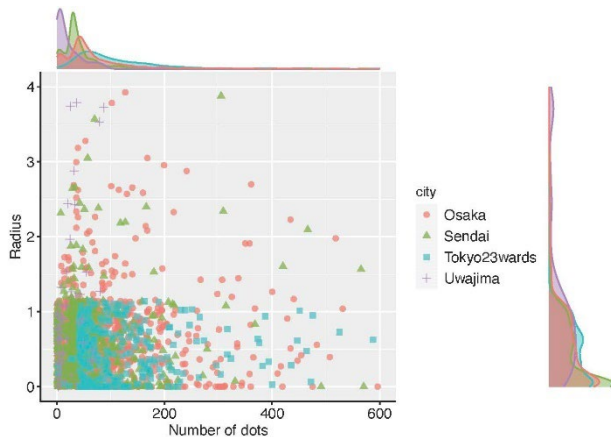


図-2.6 クラスタ内のドット数と半径の関係

きい傾向が見られる。クラスタ半径に着目すると、大都市では半径が小さいクラスタが多い傾向が見られる。一方、宇和島市のような小規模な都市では、比較的半径の大きいクラスタの形成割合が高い。これの原因として、宇和島市は、山間部が多く、道路網がスパースなこと、データ点が比較的少ないために、半径の大きなクラスタが形成されるものと推察される。

(4) 提案手法のまとめ

本研究では、プローブデータを使った新たな交通拠点を検出する手法を提案した。

日本全国のETC2.0プローブデータを用いてクラスタリングを行った結果、既往手法よりもジニ係数が小さいことから、マルチスケールな（大小様々な密度の）クラスタが検出されていることがわかった。日本の都市を対象にしたケーススタディ結果によると、提案手法は、人口規模の異なる都市でも、同じパラメータで拠点検出できていることがわかった。以上より提案手法は、マルチスケールな拠点検出が可能であると解釈される結果となった。

2.3 利用実態のモニタリング手法

(1) 非負値テンソル因子分解による代表パターンの抽出と利用実態モニタリングの手法

Step 1として、複数の拠点の多時点における滞在数情報の非負値テンソル因子分解¹⁾を実施する。ここでは、空間（施設）・日付・時間・居住地の4種類の情報ごとの滞在人数情報である、4階テンソルのデータを前提に説明していく。本研究では、最も基本的なテンソル分解モデルである、CPモデルを適用して、拠点の利用実態を簡潔に示すための代表的な滞在パターンを抽出する。Step 2として、新たな時点のデータが追加されたケースにおける、利用実態モニタリングを実施する。ここでは、新たに入手されたデータを、Step 1で導出した基本的な滞在パターンの特徴を示すベクトルに重み係数ベクトル $\mathbf{a}_{i,m}$ をかけ合わせた形で表現することを試みる。このようなアプローチをとることで、非負値テンソル因子分解によって導出した拠点利用パターンを用いつつ、リアルタイムな情報も含めたより長期間の利用実態モニタリングが可能となる。(図-2.7)

Step 1の非負値テンソル因子分解は、下記のように数式で書くことができる。元となる4階テンソルは、拠点 i における居住地 j の人々による d 日・ h 時間帯の滞在人数 $y_{i,j,d,h}$ である。このテンソルを4種類の非負行列に分解する。具体的には、パターン k の空間分布($\mathbf{z}_{k,i}$)、居住地構成($\mathbf{u}_{k,j}$)、day-to-dayの変動($\mathbf{v}_{k,d}$)、時間帯構成比($\mathbf{w}_{k,h}$)である。それぞれの場所ごとの滞在パターンは、 $\bar{k}$ 個のパターンの組み合わせによって表現される。

$$y_{i,j,d,h} = \sum_{k=1,\dots,\bar{k}} z_{k,i} u_{k,j} v_{k,d} w_{k,h} + e_{i,j,d,h}$$

$$\begin{aligned}
& z_{k,i} \geq 0, u_{k,j} \geq 0, v_{k,d} \geq 0, w_{k,h} \geq 0, \\
& \forall k \in [1, \dots, \bar{k}], \forall i \in I, \forall j \in J, \forall d \in D, \forall h \in H \\
& \frac{\sum_{j \in J} u_{k,j}}{N(J)} = 1, \quad \forall k \in [1, \dots, \bar{k}] \\
& \frac{\sum_{d \in D} v_{k,d}}{N(D)} = 1, \quad \forall k \in [1, \dots, \bar{k}] \\
& \frac{\sum_{h \in H} w_{k,h}}{N(H)} = 1, \quad \forall k \in [1, \dots, \bar{k}]
\end{aligned}$$

ここで、 I は拠点集合、 J は居住地分類の集合、 D は日付集合、 H は時間帯集合を示しており、 $N(S)$ は集合 S の要素数を示す。なお、 $z_{k,i}$ は拠点 i における、パターン k の平均滞在人数（人/時間）を示し、パターン k の各テンソルを解析することで、居住地・日変動・時間変動を解釈することができるモデルとなっている。

Step 2で新たな時点のデータ $\tilde{y}_{i,j,m,n,h}$ が入手されたとき、拠点 i におけるある時点 m ・パターン k の滞在量 $a_{i,m,k}$ は下記の式のように算出することができる。

$$\begin{aligned}
a_{i,m} = \operatorname{argmin} & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} \left(\tilde{y}_{i,j,m,n,h} \right. \\
& \left. - \sum_{k=1, \dots, \bar{k}} a_{i,m,k} u_{k,j} \tilde{v}_{k,n} w_{k,h} \right)^2 \\
& a_{i,m} = [a_{i,m,k=1}, \dots, a_{i,m,\bar{k}}]
\end{aligned}$$

なお、 $\tilde{v}_{k,n}$ は曜日 n ごとの $v_{k,d}$ の平均値である。 $\tilde{v}_{k,n}$ を用いることにより、最小期間を1週間とした $a_{i,m}$ （各パターンの利用推計値）を算出することができる。

(2) データ

本節では、ETC2.0の利用者に限らない、道の駅や鉄道駅など種別の異なる拠点の利用実態

を把握することを目的として、携帯電話位置情報データを用いる。ここでは、NTTドコモの基地局情報から作成された人口統計情報である、「モバイル空間統計」¹²⁾を用いて、交通拠点（道の駅・鉄道駅・空港）の滞在パターンを解析する。

4階テンソル $y_{i,j,d,h}$ を構成する情報は、以下のとおりである。

- 空間情報（交通拠点）：合計193か所
 - ◇ 3種類の交通サービスの主要拠点として下記を選定
 - 空港：利用者数の多いトップ10空港
 - 鉄道駅：各都道府県の利用者数最大の駅（47か所）
 - 道の駅：国土交通省によって選定された重点「道の駅」（136か所）
- 居住地情報：合計2グループ
 - ◇ 拠点と同一都道府県の居住者 / 県外からの来訪者（長距離旅行者）
- 日付：365日
 - ◇ 2019年1月1日～2019年12月31日
- 時間帯：1時間ごとの24時間
 - ◇ 0時台～23時台

このすべての組み合わせ数は、338万個であり1施設ごとに17,520個の推計人口情報がある。Step 2向けの、付加情報 $\tilde{y}_{i,j,m,n,h}$ として、Step 1の項目に加えて下記のデータを用いる。

- 分析対象期間：月ごと2年間（24カ月）
 - ◇ 2019年1月～2020年12月
- 曜日：月曜日～日曜日 ※ 祝日・休日・年末年始・お盆期間は除外

(3) Step1による抽出パターンとその解釈

本研究では、 $k=6$ と設定したときに算出されたパターン（図-2.8）について解析を行う。これらの情報は、以下のように解釈できる。

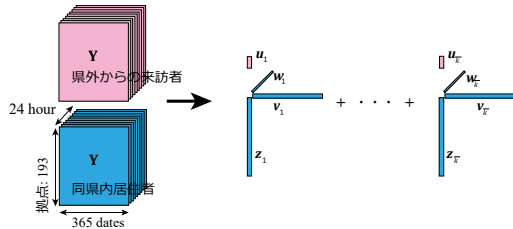
パターン1 [平日昼間の来訪パターン]

- ・ 施設立地と同じ県の居住者が大半を占める
- ・ 土日と比較して平日に人数が多い
- ・ 昼間の9時から19時ごろに来訪する
 - ◇ 想定される主な来訪目的： 通勤・通学

パターン2 [土日昼間の来訪パターン]

- ・ 施設立地と同じ県の居住者が80%以上を占める
- ・ 土日に人数が多い

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

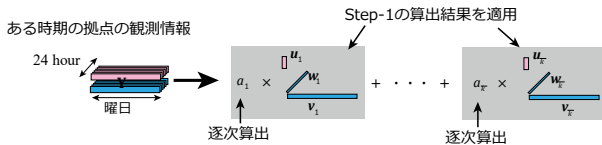


図-2.7 長期間の利用実態モニタリングのための非負値テンソル因子分解アプローチ

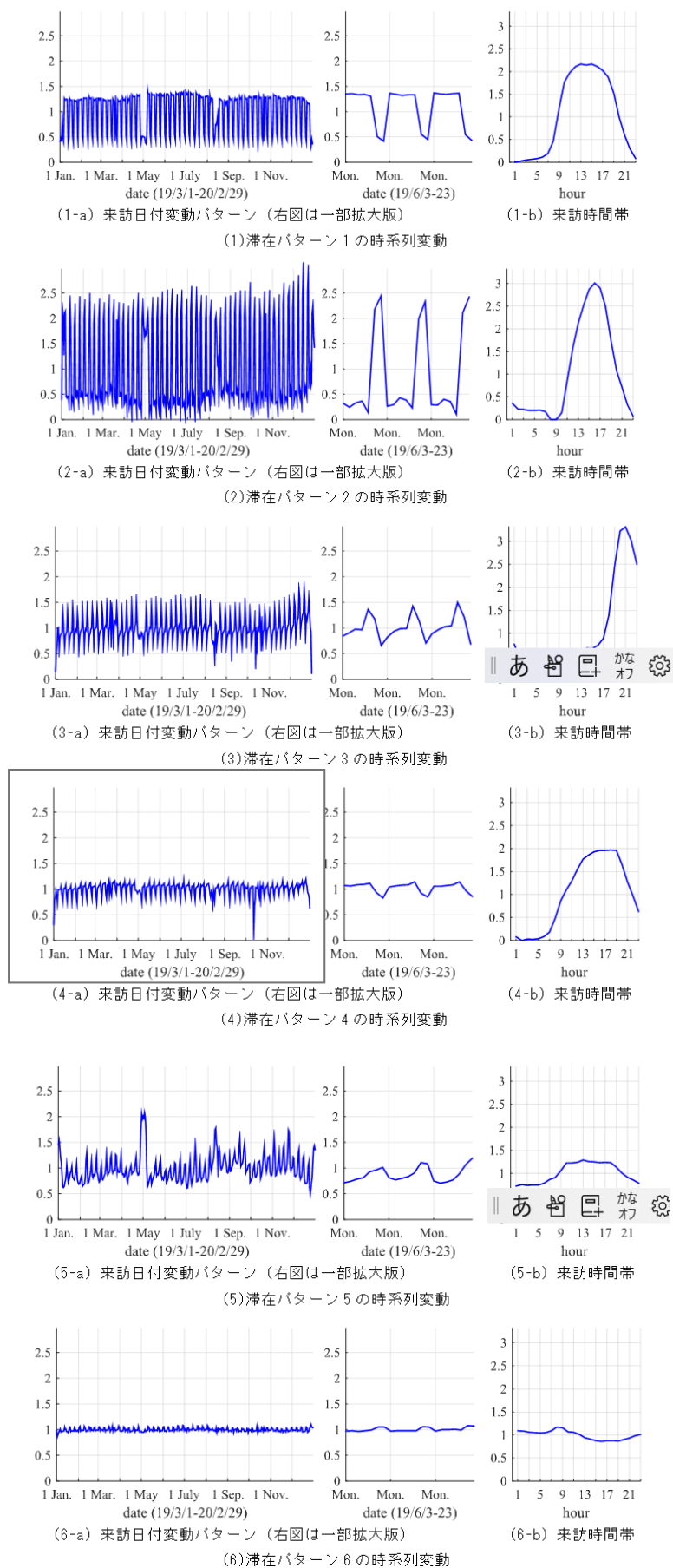


図-2.8 導出された滞在パターンの時間構成

- 午後（13時から19時ごろ）に来訪する
 ☆ 想定される主な来訪目的： 休日の余暇活動

パターン3 [週末夜間の来訪パターン]

- 施設立地と同じ県の居住者が約90%を占める（図 2.14）
- 金曜日と土曜日がほかの日と比較して多い。日曜日は少ない。
- 夜間（19時から23時ごろ）に滞在
 ☆ 想定される主な来訪目的： 飲食・懇親会等

パターン4 [長距離・平日の来訪パターン]

- 県外からの来訪者60%以上を占める
- 土日と比較して平日に人数が多い
- 午後（13時から19時ごろ）に来訪し、夜間の構成比は非常に小さい
 ☆ 想定される主な来訪目的： ビジネス出張等

パターン5 [長距離・土日の来訪パターン]

- 県外からの来訪者80%以上を占める
- 平日と比較して土日に人数が多い
- 昼間の10時から18時ごろの来訪が多いが、深夜の滞在も観測される。つまり、拠点近辺での宿泊行動もある
 ☆ 想定される主な来訪目的： 観光旅行・訪問旅行等

パターン6 [常在パターン]

- 施設立地と同じ県の居住者が占める
- 時間情報はほぼ継続して一定
 ☆ 想定される主な来訪目的： 周辺の居住者による安定的な滞在行动

図-2.9 は、交通拠点タイプごとに、パターン別の来訪人数 $z_{k,i}$ の構成比を算出したものである。この図から、以下の3点が読み取れる：

- 空港では、パターン4（長距離・平日）が多くを占める
- 鉄道駅では、ほかと比較してパターン3（週末夜）が大きい特徴がある
- 道の駅は「常在」が大半を占め、パターン4（長距離・平日）の構成比は小さい

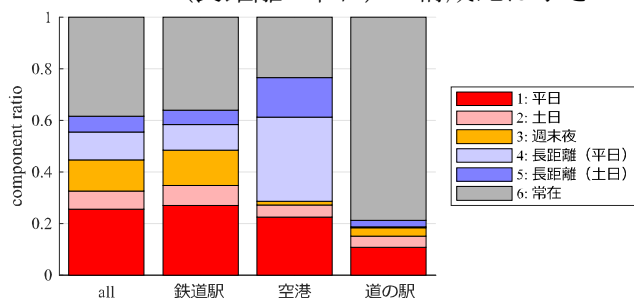


図-2.9 拠点タイプごとの平均的な滞在パターン構成

(4) Step2による全拠点を集計したパターン別のモニタリング結果

Step 2の結果から、一例として新型コロナウイルス感染症の影響があった期間の拠点及びその周辺部の利用実態をモニタリングする。まず、図-2.10は以下式から算出される残差率の月ごとの推移を示したものである。

$$\frac{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} |\hat{y}_{i,j,m,n,h} - \sum_{k=[1, \dots, \bar{k}]} a_{i,m,k} u_{k,j} \hat{v}_{k,n} w_{k,h}|}{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sum_{h \in H} \hat{y}_{i,j,m,n,h}}$$

図によると、残差率はパターン抽出に用いた2019年と、新しく追加した期間である2020年の間で、ほとんど変わらないことが確認できる。つまり、新型コロナウイルスによる大きな行動変化があったと思われる2020年においても、本研究で得られた滞在パターンは共通であったことがわかる。

図-2.11は、 $a_{i,m}$ についての2019年との比をとったものを示している。この図から、滞在パターンごとの量の推移は以下の通りにまとめることができる。

- パターン1（平日昼間の来訪）は、1回目の緊急事態宣言があった5月とその直前の4月で最大で70%程度まで減少した。その一方で、6月には90%程度まで回復しており、その後も同程度の水準を継続している。
- つぎに、パターン2（休日昼間の来訪）は、4月・5月には2019年の25%以下まで減少した。6月には70%程度まで回復し、12月までに徐々に回復し続ける推移をとる。
- パターン3（週末夜）とパターン4（平日・長距離）は非常に類似の傾向をとり、4月・5月に2019年の30%程度の水準まで減少し、6月以降は60%程度のままである。
- パターン5（休日・長距離）が最も減少率が高く、5月には10%程度の水準まで減少し、その後の回復もほかのパターンより遅かった。

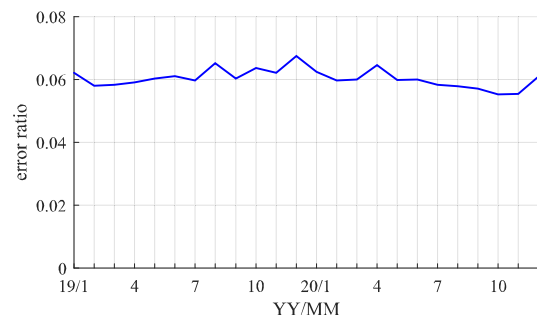


図-2.10 月ごとの残差率の推移

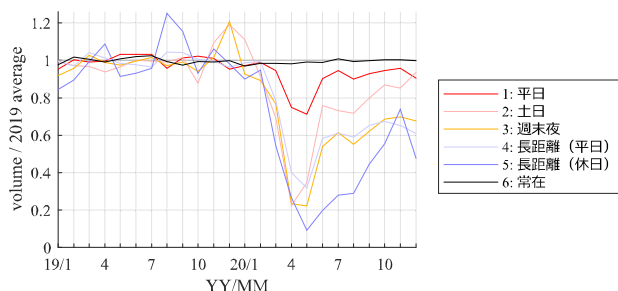


図-2.11 全拠点における滞在パターンの時系列変化

(5) 次世代モビリティの導入時に地域内の拠点となるために有すべき特徴

本研究で得られた基本となる滞在パターンの内訳により、次世代モビリティ導入時に必要となる要件を整理する。ここでは、次世代モビリティが有効になりうる拠点機能として、交通密度が比較的低く、速度帯も小さいと想定される「道の駅」を対象とする。なお、図-2.8にみられるように「道の駅」の滞在パターンは、常在（パターン6）を除くと、パターン1,2,5が大半を占めることから、この3つの構成比の特徴を整理する。

3種類の滞在パターンの構成比に着目すると、136か所の道の駅は、下記のように分類することができる：

パターン1（県内・平日来訪）が80%以上：

33か所 / 136

パターン2と5（休日来訪）が80%以上：

38か所 / 136

上記計 71か所 / 136 （52.2%）

3パターンがそれぞれ20%以上：

13か所

ほか

52か所

この分類の結果から、現状における道路上の拠点では、過半数がかなり来訪パターンに偏りがあることが明らかとなった。これは、過半数の拠点において来訪需要が特定の日付・時間帯に偏る傾向があることを示している。その一方で、道の駅で見られる代表的な3パターンの来訪がバランスよくある道の駅は、わずか10%程度にすぎない。

このような特徴から、次世代モビリティが地域内の拠点を形成するためには、この時間的な偏在に対応できるようなサービス面での特徴が求められるであろう。例えば、異なる特徴をもった複数の拠点に対して同時にサービスを提供することによって、効率的なビークルの運用を実現するといった設計が考えうる。

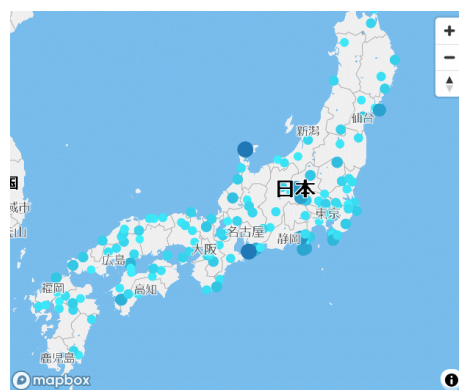


図-2.12 マップの表示例

2.4 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

本研究で実施した、ビッグデータやETC2.0データを用いて算出した拠点抽出結果や、モニタリング指標集計結果、および類型化手法の分析結果などを可視化し、専門家以外の分析者が本研究の分析成果を利用しやすくすることを意図したWebで動作する可視化ツールおよびダッシュボードを構築する。

なお、後述するヒストグラムやレーダーチャートに表示される指標は、2.4の結果の場合、各パターンの構成人数 $a_{i,m}$ を表示することを想定している。

(1) 機能

ダッシュボードで表示するデータの単位は、月単位、曜日（平日、休日、平休）で指定可能とし、画面上に表示データを指定する機能を有する。表示画面では、マップを画面の中央に表示し、以下の機能を実装した。なお、Webアプリケーションにおける地図表示には、Mapbox¹³⁾が提供するライブラリおよび地図タイルを利用した（図-2.12）。

- マップ上に拠点を示すアイコン（マーカー）を表示
- マップの移動、拡大、縮小など基本的な操作がマウスで可能
- 「拠点一覧」と「個別拠点比較」の機能を搭載

(2) 拠点一覧

拠点一覧では、各拠点を地図上に表示し拠点を選択できる。各拠点は選択した指標により異なる大きさ・色で表示される。また、表示対象とする拠点は、各指標のヒストグラム上で範囲を指定することで、インタラクティブに変更できる（図-2.13）。

(3) 個別拠点比較

個別拠点比較画面では、拠点別に集計したパフォーマンス指標を、レーダーチャートで表示することができる。複数の拠点を指定することで、拠点ごとの指標値を比較することが可能である。また、拠点ごとの勢力圏（2次メッシュ集計された出発地分布）をマップ上に表示することもできる（図-2.14）。異なる時点での比較のためのレーダーチャートも別途表示可能である（図-2.15）。

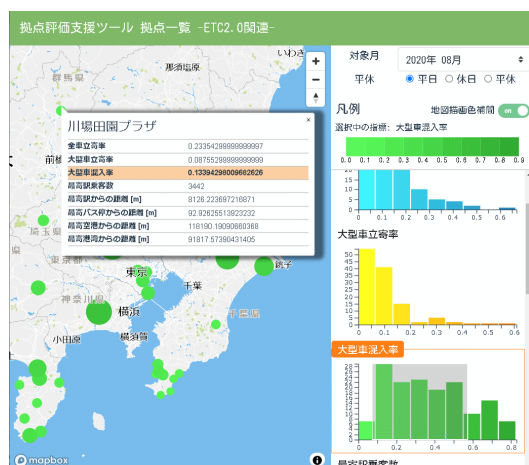


図-2.13 拠点一覧画面

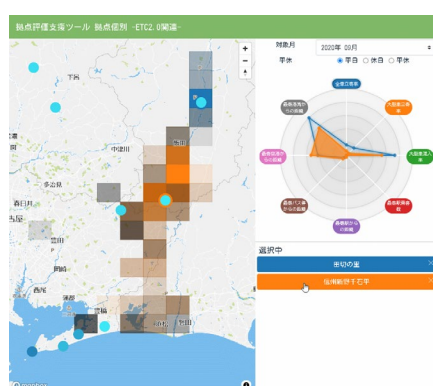


図-2.14 個別拠点比較

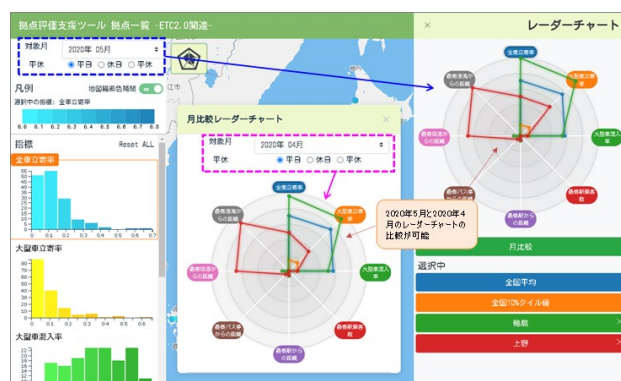


図-2.15 個別拠点の時点比較

参考文献

- 1) 国土交通省都市局：都市・地域総合交通戦略のすすめ～総合交通戦略策定の手引き～，<https://www.mlit.go.jp/common/001050418.pdf>，2014．(2020/6/29 アクセス)
- 2) 国土交通省都市局：都市・地域総合交通戦略のすすめ～総合交通戦略策定の手引き～（改訂版），<https://www.mlit.go.jp/toshi/content/001338473.pdf>，2019．(2020/6/29 アクセス)
- 3) 国土交通省総合政策局総務課政策企画官（総合交通体系担当）：地域のモビリティ確保の知恵袋2018～「人の集まり」と「人の流れ」の分析に基づいた交通拠点とネットワークに関する検討～，<https://www.mlit.go.jp/common/001278513.pdf>，2019．(2020/6/29 アクセス)
- 4) 国土交通省国土政策局：集落地域の大きな安心と希望をつなぐ「小さな拠点」づくりガイドブック，<https://www.mlit.go.jp/common/000992103.pdf>，2013．(2020/6/29 アクセス)
- 5) 国土交通省国土政策局：【実践編】「小さな拠点」づくりガイドブック，<https://www.mlit.go.jp/common/001086372.pdf>，2015．(2020/6/29 アクセス)
- 6) 国土交通省道路局：道の駅案内，<https://www.mlit.go.jp/road/Michi-no-Eki/outline.html> (2020/6/29 アクセス)
- 7) 国土交通省道路局：立体道路制度について，<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/utilization/pdf/3d-road.pdf>，2019．(2020/6/29 アクセス)
- 8) Ester, M., Kriegel, H.P., Sander, J. and Xu, X.: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, KDD1996, 1996.
- 9) 一般財団法人 ITS サービス高度化機構：ETC 総合情報ポータルサイト，<https://www.go-etc.jp/etc2/index.html>.
- 10) Lorenz, M. O.: Methods of measuring the concentration of wealth, Publications of the American Statistical Association, Vol.9(70), pp.209-219, 1905.
- 11) Cichocki, A., Zdunek, R., Phan, A. H., Amari, S. I.: Nonnegative matrix and tensor factorizations: applications to exploratory multi-way data analysis and blind source separation. John Wiley & Sons, 2009.
- 12) NTT ドコモ：モバイル空間統計に関するの情報，https://www.nttdocomo.co.jp/corporate/disclosure/mobile_spatial_statistics/ (2022/2/21 アクセス)
- 13) マップボックス・ジャパン合同会社：mapbox，<https://www.mapbox.jp/> (2022/5/7 アクセス)

第3章 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

3.1 分析の構成と対象地域

中山間地域でのラストワンマイルの次世代交通手段として共有型自動運転車両（Shared autonomous vehicles: SAV）を加味した中山間地域での交通システムを対象とした検討を行う。分析の構成は、BLE (Bluetooth Low Energy)により交通需要調査を実施したうえで、交通需要データを作成し、設計・運用モデルでの設計と代替案の評価を行う構成となっている。（図-3.1）

ケーススタディの対象地域である高倉地区は、茨城県北部の常陸太田市の北西部に位置する地区であり、地区を構成する上高倉と下高倉の人口は常陸太田市によると2018年8月時点で465人、208世帯である。高倉地区の高齢化率は、2019年4月時点で約56%である。市街地（太田地区）へ向かう路線バスは、茨城交通が平日1日7便を運行しており、1便あたりの利用者数は数人程度である。2017年より公共交通空白地有償運送制度による自家用有償旅客運送を高倉地域づくりの会が実施しており、地域住民のボランティアが運転手となり、週1日運行を行っている。しかし、高倉地域づくりの会に行った聞き込みによるとドライバー平均年齢が約67歳と高齢であるにも関わらず、1日の走行距離が60～100kmに達することもあり、今後、ドライバーのさらなる高齢化と利用者の増加が見込まれることから持続可能性に懸念がある状況である。

3.2 BLEによる交通行動調査と需要推計

交通需要の構築では、令和元年度に常陸太田市高倉地区で実施したBLE (Bluetooth Low Energy) タグを用いた交通行動調査の結果を用いる。

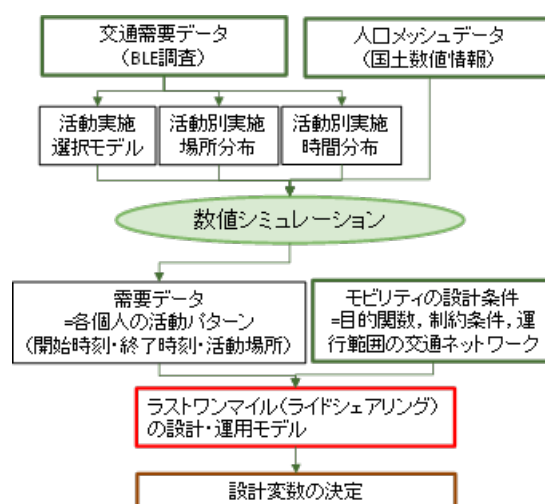


図-3.1 分析のフロー

(1) BLE-PP調査

本研究で提案するBLE-PP調査は、調査対象者が携帯するキーホルダー型BLEタグ、施設等でBLEタグの近接を検知しサーバーに送信する受信機、受信機から送信された情報を蓄積するサーバーから構成される。本調査では、調査対象者は、キーホルダー型BLEタグを外出時に携帯することを求められるほかは、特に操作等の必要はない。

本研究で使用するキーホルダー型BLE（（株）インタープロ Hibeacon slim）タグは、ビーコンID (UUID) と送信強度(TXpower)などの情報を定期的に送信する機器である。ビーコンの送信強度は、BLE Class1であり、ビーコンの受信可能範囲は、遮蔽物がない環境では、100～200m以内である。なお、本研究で確認した受信率は、受信機から100mで約40%、160mで10%程度であった。ビーコンのバッテリー寿命は、1秒間隔のビーコン送信時で1年程度の仕様である。

受信機は、電源が確保できれば室内外で設置可能な仕様である。ビーコン受信時に、受信時刻、ビーコンID、送信強度、受信強度、受信機器IDをサーバーに送信する。なお、受信機からサーバー間は、NII（国立情報学研究所）が提供するSINET広域データ収集基盤を活用したL2VPN環境（図-3.2）を用いて、研究室の中継器にダイレクトに接続したのちに、分析・蓄積用サーバーに接続している。

サーバーでは、受信したビーコンを蓄積するとともに、後述の滞在場所判定ロジックにより、ビーコン付近の通過などを取り除くことや、再訪問を検知することで、調査対象者ごとの滞在場所、滞在時間を判定する。

受信機の設置個所は、表 3.1に示す通り常陸太田市内のスーパー、商店、病院、役場、郵便局などの19か所（2019年8月末現在）である。これらの設置個所は、地域で運行している公共交通空白地有償運送や乗合タクシーの目的地などを中心に地域住民及び高倉地域づくりの会への聞き取りを通じて決定した。

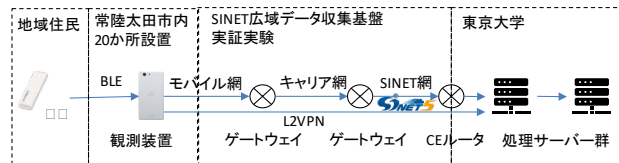


図-3.2 BLE-PP調査のネットワーク構成

表-3.1 受信機の設置個所

場所名	役割	地域
A:上坪バス停付近	バス停	高倉地域
B:井上商店	個人商店	高倉地域
C:高倉郵便局	郵便局	高倉地域
D:高倉地域交流センター	地域拠点	高倉地域
E:久保田橋バス停	バス停	高倉地域
F:天下野診療所	病院	天下野地区
G:天下野郵便局	病院	天下野地区
H:セイコーマート水府中染店	コンビニエンスストア	中染地区
I:常陸太田市水府支所	役所	町田地区
J:小林医院	病院	町田地区
K:富永歯科医院	病院	国安地区
L:ホームセンター山新常陸太田	ホームセンター	常陸太田市街地
M:かわねやフェスタ店	スーパーマーケット	常陸太田市街地
N:大山病院	病院	常陸太田市街地
O:藤井病院	病院	常陸太田市街地
P:かわねや木崎本店	スーパーマーケット	常陸太田市街地
Q:西山堂病院	病院	常陸太田市街地
R:空白地有償運送	乗合タクシー	その他
S:カスミ常陸太田店	スーパーマーケット	常陸太田市街地

(2) BLE-PP調査の結果概要

取得データの概要は以下の通りである。

対象者： 高倉地区在住の52名

期間： 2020年7月29日～2021年2月29日

常陸太田市内19カ所に設置された受信機で対象者の来訪を検知

※期間内に観測された来訪は延べ9649人日であり、買い物が2869人日、病院が1510人日、生活（役所・郵便局等）が2590人日。

本章の推定データとしては、2020年7月29日からの58日間及び実験参加への再啓発を行った後の12月16日からの58日間を対象期間とした。各期間において28日以降に最後の滞在が観測され、平均週0.5回以上の活動がある延べ59名分のデータを用いた。

(3) 活動生成モデル

交通行動モデルでは、日毎に、各行動主体が、活動毎に活動を実施するかしないかを2項選択するモデルとして構築した。高齢者の活動では、個人ごとの差が大きいことや観測されていない属性（身体的不自由さ、運転等に対するわずらわしさ、家族構成等）による行動の格差が大きいことが想定されるため、観測されていない個人差、属性の違いを考慮するために、Latent class mixed logit model（潜在クラス・ミックスロジットモデル）を構築し、BLE 調査の結果を用いてパラメータを推定する。なお、活動は、目的地の施設より買物（地区内・地区外）、病院（地区内・地区外）、生活（郵便局・役所・地域センター）に分類した。なお、高倉地区の郵便局は ATM が設置されており、地区内唯一の金融機関としての役割もある。

「活動を実施しない」の選択確率は、 C をあらかじめ設定した潜在クラス数としたとき、

$$P_i^{no} = \sum_{c=1}^C \frac{\exp(\pi_c)}{\sum_{c'=1}^C \exp(\pi_{c'})} P_{ci}^{no}$$

であり、「活動を実施する」の選択確率は、

$$P_i^{ex} = \sum_{c=1}^C \frac{\exp(\pi_c)}{\sum_{c'=1}^C \exp(\pi_{c'})} P_{ci}^{ex}$$

である。ただし、 $P_{ci}^{ex} = \frac{1}{1+\exp(V_{ic}^{ex}-V_{ic}^{no})}$ であり、

$P_{ci}^{ex} = \frac{1}{1+\exp(V_{ic}^{no}-V_{ic}^{ex})}$ である。効用関数は以下のように定義する。個人 i が潜在クラス c に所属しているとした場合の「活動を実施しない」の効用関数は、

$$V_{ic}^{no} = \alpha_c + \alpha_{cs}\epsilon_{ci}$$

とし、「活動を実施する」の効用関数は、

$$V_{ic}^{ex} = \beta_{cs}(1 - \delta_i)x_s \\ + (\beta_{cd} + \beta_{cd65}\delta_{65} \\ + \beta_{cd75}\delta_{75})\delta_d x_d + \beta_{ch}x_h$$

ただし、

ϵ_i :個人毎のランダム変数（正規分布）

x_s :exp(調査開始日からの日数/調査日数)

x_d :exp(前回活動を行ってからの日数/調査日数)

x_h :土日祝ダミー

δ_d :1回以上の活動を実施ダミー

δ_{d65} :65歳以上75歳未満ダミー

δ_{d75} :75歳以上ダミー

※調査日数は調査開始後56日間とした。
とする。また、 $\beta_{cs} \geq 0$ 及び、 $\beta_{cd} \geq 0$ とする。

表-3.2 買物（地区内）の推定結果

観測数	4008
個人数	58
初期対数尤度	-827
対数尤度	-512
修正済 ρ^2	0.353
AIC	1070

変数	推定値	t値	p値
α_{1s}	0.00	0.00	1.00
α_{2s}	0.85	1.40	0.16
α_{3s}	0.00	0.00	1.00
α_1	5.39	2.13	0.03
α_2	1.97	1.68	0.09
α_3	3.81	6.32	0.00
β_{1s}	1.46	0.67	0.51
β_{2s}	0.76	0.50	0.62
β_{3s}	0.06	0.15	0.88
β_{1d}	0.00	0.00	1.00
β_{2d}	0.00	0.00	1.00
β_{3d}	0.00	0.00	1.00
β_{1d65}	3.12	2.87	0.00
β_{2d65}	-1.14	-1.10	0.27
β_{3d65}	-0.40	-1.11	0.27
β_{1d75}	-0.45	-0.22	0.83
β_{2d75}	0.70	0.83	0.41
β_{3d75}	-0.30	-0.83	0.41
β_{1h}	2.83	3.74	0.00
β_{2h}	0.54	1.63	0.10
β_{3h}	-0.75	-1.32	0.19
π_1	1.00	※固定値	
π_2	1.22	1.37	0.17
π_3	2.86	3.47	0.00

各クラスの所属割合

クラス1	0.115
クラス2	0.144
クラス3	0.741

本モデルでは、 β_{cs} 、 β_{cd} の項が正の場合、前の活動実施からの日数が経過するほどその活動が実施されやすくなることを表す項であり、 β_{cd65} 、 β_{cd75} の項は年齢属性による β_{cd} の差を示している。 β_{ch} の項は、土日祝日での活動のしやすさを示している。

推定結果の一例として、買物（地区内）の結果を表-3.2に掲載する。

(4) 交通需要シナリオの生成

交通需要シナリオの生成では、2020年、2030年における、高倉地区からの買物（地区内・地区外）、病院（地区内・地区外）、生活（郵便局・役所・地域センター）の活動の発生量について、時間帯別、目的地別、曜日別に推計した。

原典資料として、総務省「平成27年国勢調査」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口（平成29年1月推計）」の推計値、「日本の地域別将来推計人口（平成30年3月推計）」の推計値及び仮定値（生残率、子ども女性比、純移動率）によって作成された国土数値情報による1kmメッシュ別将来推計人口（H30国政局推計）を用いて、2020年と2030年の地区の65歳以上及び75歳以上の人口を算出している。なお、高倉地区として対象としたメッシュは、「55400396、55400386、55400376、55400375、55400374、55400367、55400366、55400365、55400357、55400356、55400355、55400347、55400346、55400337、55400336、55400327、55400328」の3次メッシュの区画である。

推計の方法の概要は以下である。

- これらの地区の人口の一人ひとりに対して、(3)で構築した行動モデルを用いることで、各日の各活動を割り付ける。なお、一日の最大活動数は2と仮定し、病院（地区外）、病院（地区内）、買物（地区外）、買物（地区内）、生活（役所）、生活（地域センター）、生活（郵便局）の優先順位で割り当てる。
- BLEデータから活動毎に得られた一日の中での1時間ごとの活動の発生割合を用いて活動開始時刻を割り当てる。ただし、より優先順位の高い活動を実施することになっている時間帯と移動時間等にかかると想定されるその前後1時間には活動を割り当てない。
- 各活動の活動時間について、買物（地区内）は20分、買物（地区外）は60分、病院（地区内）は60分、病院（地区外）は90分、生

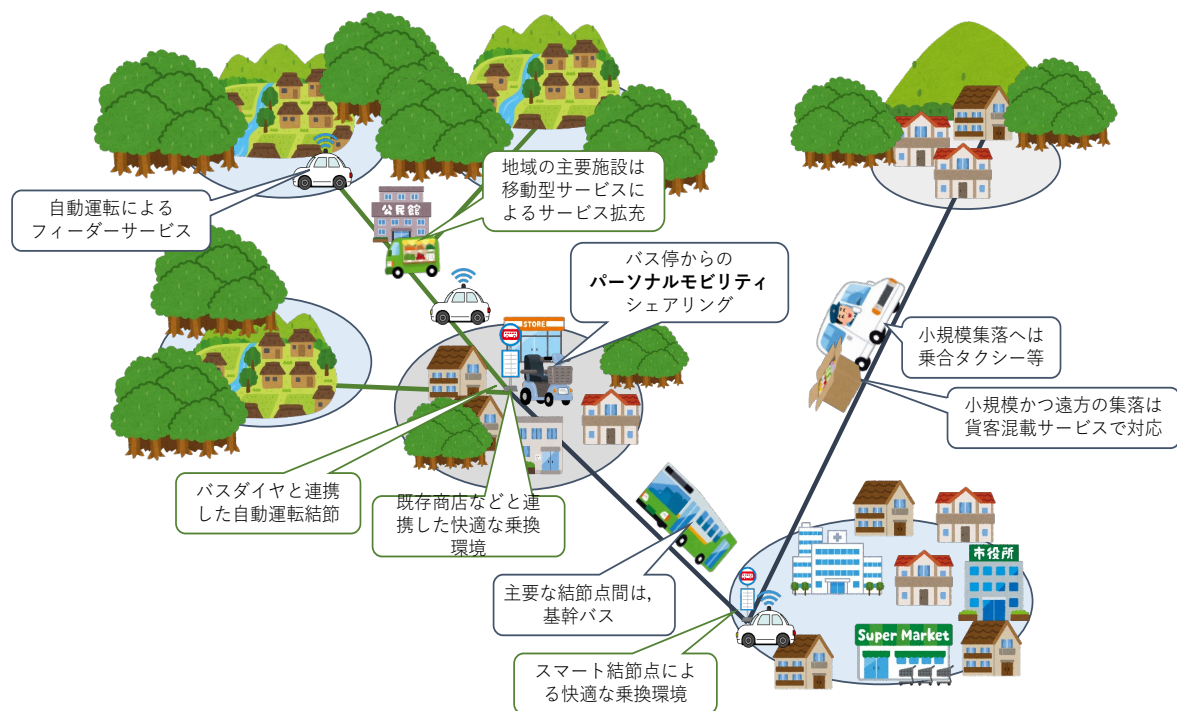


図-3.3 次世代モビリティサービスの想定

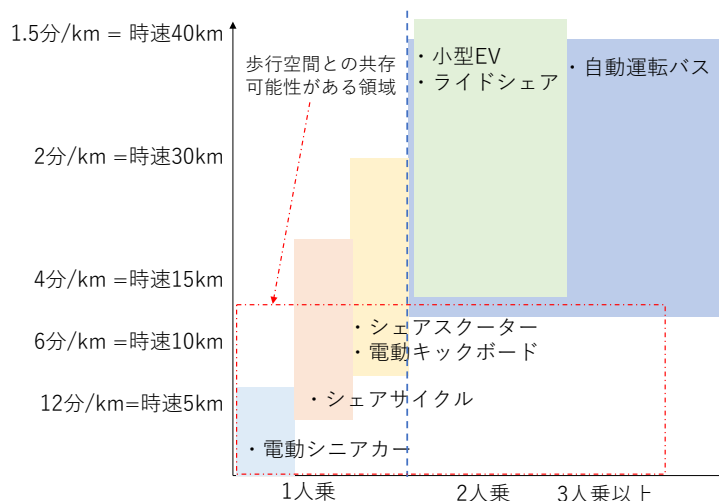


図-3.4 次世代モビリティサービスの特性

活（郵便局）は60分、生活（役所）は20分、生活（地域センター）は60分として仮定して、活動開始時刻を起点として活動終了時刻を計算して割り当てる。

4. 目的地については、BLEデータを用いて各活動での現況の選択分布に従って割り付ける。
5. 一日の起点、終点は、自宅のあるメッシュの重心とし、活動と活動の間が移動時間を含め150分以上ある場合には、活動前後の移動時間がそれぞれ1時間以上となるように自宅での滞在を付加する。

上記の方法でのシミュレーションにより、4:50～24:30の10分ごとの活動内容を推定したシナリオを連続する56日間分生成した。なお、本シナリオ生成の対象となる2020年度の65歳以上の人口は135名、2030年度は105名であった。

3.3 モビリティの種類と運行管理の方針検討

中山間地域で想定されるラストワンマイルの移動も考慮した交通手段の検討を行う。図-3.3に示すように、中山間地域での生活に必要な移動需要を満たすための交通手段等として、拠

点間をつなぐ基幹バスと、都市内の循環やフィーダー輸送、小規模集落間の移動を担う乗合バス・タクシー（自動運転を含む）、狭域でのフィーダー輸送のためのパーソナルモビリティを想定している。基幹バスとフィーダー輸送の接続や各交通機関の待合に用いる地点を、交通結節点としてユーザーが快適に用いることができる環境を整備することで乗り換えに対する抵抗を軽減することを想定している。また、今回の検討の対象ではないが、販売や医療等のサービス側が結節点等に移動することで必要な移動を縮減することを将来的には視野にしている。

対象となる茨城県常陸太田市高倉地区のような小規模集落への移動は乗合タクシーが想定されるほか、主要な結節点間は基幹バスを走行させ、ラストワンマイルは、基幹バスに結節するフィーダー輸送を担う乗合タクシーを用いることが想定される。

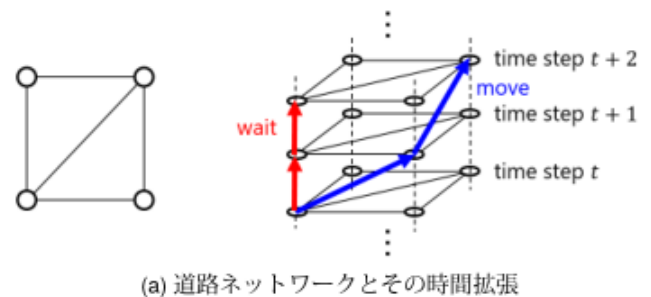
集落の規模が比較的小さくバス停からも近い場合はパーソナルモビリティの利用も想定できるが、対象の高倉地区は、主要な幹線から数キロ程度離れた地点も多いことから、低速なパーソナルモビリティの移動は難しく、乗合タクシーを想定する（図-3.4）。

乗合タクシーについては、現状の運転手が不足する現状を踏まえ、完全自動化されたSAVの導入を想定する。一方で、中山間地域の数キロ単位での拠点間をレベル4で運行するSAVの導入を想定することは現段階での自動運転技術では難しいことから、現状運行されている主要なバス路線を基幹バスとして想定し、これらのモビリティの組み合わせによる交通システムの設計と評価を行う。評価に際しては、SAVのみを運行する状況での適用が可能であった過年度構築したモデルを、バスとの組み合わせで用いることが可能なように改良したうえで適用する。運行管理においては、昨年度のモデルと同様、旅行時間優先、台数優先、走行距離優先のケースを想定する。

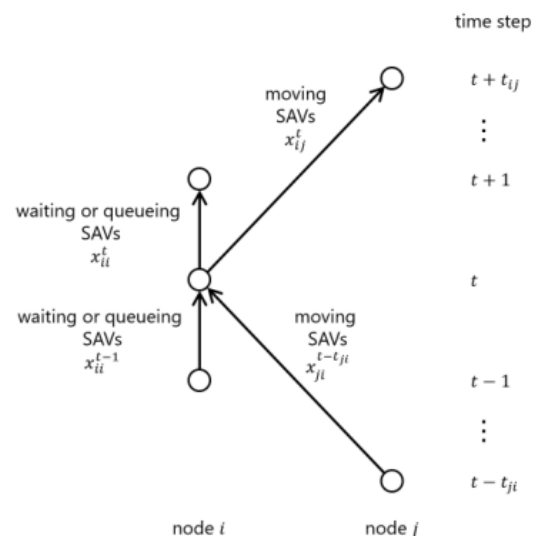
3.4 拠点間、及び、拠点への移動を対象とした次世代モビリティの有効性の検証・評価

(1) モデル

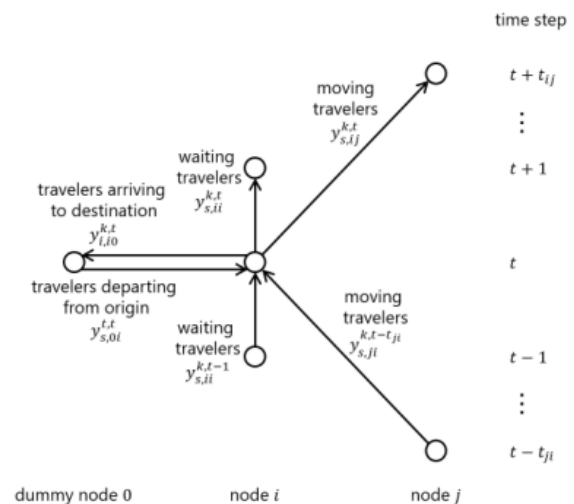
基本的な仮定を以下に述べる。社会によって共有される（個人所有ではなく公共団体等が運営する）SAVが存在し、任意の旅行者によって利用可能であるとする。



(a) 道路ネットワークとその時間拡張



(b) タイムステップ t 、ノード i における SAV 流保存則



(c) タイムステップ t 、ノード i における旅行者流保存則

図-3.5 時間拡張ネットワークを用いたSAVと旅行者のフローのモデル化

SAV の交通は動的交通流モデルによって記述される。この動的交通流モデルは、ノード上で車両が待ち行列を形成するポイントキューモデルである。ノード上での待ち行列長はそのノードの車両待機容量（駐車、停車、道路上の停止を合計したもの）によって制約される。

ライドシェアとは、一台の SAV に同時に複数の旅行者が搭乗する形態であり、SAV はライドシェア・非ライドシェアいずれの形態でも用いられうる。旅行者は特定の出発地、目的地、出発時刻、許容最大旅行時間を持つ。旅行者は SAV に乗らなければ移動できず、それ以外の場合はノードにて待機する。

以上の仮定のもと、旅行者の総旅行時間、SAV の総移動距離、総 SAV 台数、総インフラ整備費用を同時に最小化する多目的最適化問題を定式化する。本問題は、旅行者の時間帯別 OD 表が所与のもとで、SAV と旅行者の動的交通量、総 SAV 台数、交通容量、車両待機容量を決定するものである。

本問題の基本的な考え方を述べる。まず、道路ネットワークを図-3.5 のように時間拡張ネットワークとし、旅行者と SAV の動的な移動を時間拡張ネットワーク上のフローとしてモデル化する。具体的には、 x_{ij}^t をリンク ij をタイムステップ t に移動する SAV の交通量、 $y_{s,ij}^{k,t}$ をリンク ij をタイムステップ t に移動するクラス s, k (s は出発地、 k は出発タイムステップ) の旅行者の交通量とする。旅行者は SAV に乗らないと移動できないため、 ρ を SAV 一台当たりの乗客容量として条件 $\sum_{s,k} y_{s,ij}^{k,t} \leq \rho x_{ij}^t$ を満たす必要がある。さらに、図-3.5 に示すようにノードでの保存則を満たす必要がある。本社会最適 SAV 計画問題の目的は、以上のような制約のもとで社会的に最適な $y_{s,ij}^{k,t}$ や x_{ij}^t などの値を求めることである。

まとめると、本モデルは以下のように言い表せる。本モデルは、SAV システム利用者のアクティビティ制約を必ず満たすように SAV の配車と乗客のピックアップ・ドロップオフを決定する。ただし、アクティビティ制約を満たすような配車・ピックアップ・ドロップオフのパターンは無数にあるため、その中から何らかの評価基準を最適化するようなものを選んで出力する。この評価基準としては様々なものが考えられるが、今回は旅行者の総旅行時間の最小化、車両の総移動距離の最小化、必要な車両台数の最小化を考えるものとする。

前節で述べたモデルは以下の数理最適化問題として記述できる。

$$\min \alpha_T T + \alpha_D D + \alpha_N N + \alpha_C C$$

$$\begin{aligned} & \sum_{ij} c_{ij} (\mu_{ij} - \mu_{ij}^{\min}) \\ & + \sum_i c_i (\kappa_i - \kappa_i^{\min}) = C \\ & \sum_j x_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j x_{ij}^t = 0 \quad \forall i, t \in (0, t_{\max}) \\ & \sum_j y_{s,ji}^{k,t-t_{ji}} - \sum_j y_{s,ij}^{k,t} \\ & + y_{s,0i}^{k,t} - y_{s,i0}^{k,t} = 0 \quad \forall i, s, k, t \in T_k \\ & \sum_{s,k} y_{s,ij}^{k,t} \leq \rho x_{ij}^t \quad \forall i, j, i \neq j, t \\ & x_{ij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall i, j, i \neq j, t \\ & x_{ii}^t \leq \kappa_i \quad \forall i, t \\ & y_{s,0r}^{k,k} = M_{rs}^k \quad \forall r, s, k \\ & \sum_{t \in T_k} y_{s,0i}^{k,t} = \sum_r M_{rs}^k \quad \forall s, k \\ & x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall i, j, t \\ & y_{s,ij}^{k,t} \geq 0 \quad \forall i, j, s, k, t \in T_k \\ & x_{0i}^0 \geq 0 \quad \forall i \\ & y_{s,0i}^{k,t} \geq 0 \quad \forall s, t, k \in T_k \\ & \mu_{ij}^{\min} \leq \mu_{ij} \leq \mu_{ij}^{\max} \quad \forall i, j \\ & \kappa_i^{\min} \leq \kappa_i \leq \kappa_i^{\max} \quad \forall i \end{aligned}$$

ここで、主な数学記法を表-3.3 に示す。

SAV システムの設計上最も重要な変数は $T, D, N, C, \alpha_T, \alpha_D, \alpha_N, \alpha_C$ である。本問題は、 T, D, N, C のいずれかを優先して最小化するように解くものであり、その優先度合いはパラメータ $\alpha_T, \alpha_D, \alpha_N, \alpha_C$ を調整することで設定する。仮に α_T の値が $\alpha_D, \alpha_N, \alpha_C$ よりも十分に大きな場合、SAV システムは旅行者の総旅行時間を最小化ようになる。これは利用者の利便性を最優先した設計といえる。また、仮に α_N の値が他よりも十分に大きな場合、SAV システムは車両台数を最小化ようになる。これは運行コストの低減を最優先した設計といえる。

表-3.3 数学記法

x_{ij}^t	リンク ij をタイムステップ t に移動開始する SAV の交通量
$y_{s,ij}^{k,t}$	リンク ij をタイムステップ t に移動開始する出発地 s 、出発タイムステップ k の旅行者の交通量
T	旅行者の総旅行時間 (ノード上の待ち時間を含む)
D	SAV の総移動距離
N	総 SAV 台数
C	総インフラ整備費用
t_{ij}	$i \neq j$ のとき、リンク ij の自由旅行時間
t_{ii}	ノード i で 1 タイムステップ分待つ待ち時間 (=タイムステップ幅)
d_{ij}	リンク ij の長さ
c_{ij}	リンク ij の交通容量拡張コスト
c_i	ノード i の車両待機容量拡張コスト
ρ	SAV 一台当たりの乗客容量
μ_{ij}	リンク ij の交通容量
κ_i	ノード i の車両待機容量
$\mu_{ij}^{\max}$	リンク ij の交通容量の取りうる最大値
$\kappa_i^{\max}$	ノード i の車両待機容量の取りうる最大値
$\mu_{ij}^{\min}$	リンク ij の交通容量の取りうる最小値
$\kappa_i^{\min}$	ノード i の車両待機容量の取りうる最小値
M_{rs}^k	出発地 r 、目的地 s 、出発タイムステップ k の時間帯別 OD 表
T_k	出発タイムステップ k の旅行者が移動できるタイムステップ集合
$t_{\max}$	最終タイムステップ



図-3.6 道路ネットワーク（背景：地理院タイル）

(2) 検証・評価方法

中山間地域でミニバスなどによる拠点間の効率的な移動がなされているときに、ラストワンマイル交通を SAV が担う状況の検討・評価を行う。

対象地区は、高倉地区から常陸太田中心市街にかけてとし、道路ネットワークデータを図-3.6 に示す。本地区は概ね常陸太田中心市街、水府、高倉の3つの地域からなっている。そこで、それぞれの地域に交通結節点となる拠点を設け、その拠点間はミニバスなどによる拠点間の効率的な移動がなされているものとする。拠点の位置は、地域における役割や交通需要の傾向に基づき、常陸太田中心市街は大山病院、水府は常陸太田市水府支所、高倉は高倉郵便局とした。これらの拠点は図-3.6 では赤色で示されている。

交通需要データは 3.2 をベースに、地域間トリップはミニバスなどによる拠点間の効率的な移動がなされていると想定して発地→発地地域拠点トリップと、着地地域拠点→着地トリップに分割する。その結果、ある一日（6 日目）のトリップ数について、分割前は 71 であったのが、36 トリップが地域間異動であったため分割後は 107 となった。以後はこの日のデータについて分析するものとする。

分析の方針は以下の通りとする。まず、拠点間輸送無しの場合と有りの場合の効率性を比較するものとする。その際、本手法は多目的最適化問題であるので、目的関数の優先度合いを以下の3ケースを分析し、比較する：

- 旅行時間優先：旅行時間最小化を優先する場合
- 台数優先：車両台数最小化を優先する場合
- 走行距離優先：走行距離最小化を優先する場合

分析結果の評価指標には以下を用いる：

- 車両台数
- SAV の総走行距離
- 旅行者の SAV への総乗車時間
- 車両と旅行者の移動軌跡

ここで、拠点間輸送の車両走行距離や旅行者乗車時間は考慮に入っていない点に注意されたい。また、基本的にライドシェアは導入しない場合を分析対象とし、一部のみ二人乗りライドシェアを分析対象とする。

(3) 結果

拠点間輸送有りの場合のシナリオ毎の評価指標値を表-3.4に示す。同様に、拠点間輸送無しの場合のものを表-3.5に示す。これらの結果からは以下のことが読み取れる。まず、拠点間輸送の有無にかかわらず、目的関数の優先度合いによって必要となる車両数は大きく変わる。特に、台数の最小化を優先した場合の必要台数は他の場合と比較して非常に小さい一方で乗車時間・走行距離はそこまで大きくならないため、おそらく最も効率が良いと考えられる。また、ライドシェアも車両台数を小さくするのに有用である。

次に、拠点間輸送が有りの場合と無しの場合を比較する。これはシナリオに応じて異なった挙動を示している。まず、旅行時間・走行距離を優先した場合、拠点間輸送有りの場合の方が必要な車両台数が大きくなる。これは一見直感に反する結果と感じられるかもしれないが、実は合理的な結果と考えられる。すなわち、拠点間輸送を行う場合はもともと一つのトリップだったものが二つに分割されることとなる。よって頻繁にトリップが発生するため、旅行者の利便性を最大限優先するには大量の SAV でファースト・ラストワンマイルを速やかに捌く必要が生じる。そのため、必要な SAV 台数はかえって大きくなる。なお、SAV の総走行距離は拠点間輸送有りの場合の方が小さくなった。そのため、消費燃料・エネルギーの観点からは効率的な可能性がある。一方、台数を優先した場合、SAV の台数は拠点間輸送有りの場合の方がわずかに小さいものとなった。これは、SAV が拠点間輸送に従事する必要が低減されたためである。しかし、必要台数は1台減少したに過ぎない。拠点間輸送有りの場合は拠点間の輸送に専従する車両が少なくとも1台必要となるので、全体的にみるとシステムの効率性は低下している恐れが高い。

表-3.4 拠点間輸送有りの場合

シナリオ	車両台数	総走行距離	総乗車時間
旅行時間優先	24	269	254
走行距離優先	25	262	272
台数優先	4	405	337
台数優先+ライドシェア	2	199	299

表-3.5 拠点間輸送無しの場合

シナリオ	車両台数	総走行距離	総乗車時間
旅行時間優先	17	375	364
走行距離優先	20	368	384
台数優先	5	510	429
台数優先+ライドシェア	3	251	407

さらに、一部のシナリオの車両軌跡を分析する。図-3.7は走行距離優先の場合の車両軌跡を比較したものである。この図は、横軸は南北座標、縦軸は時刻を意味している。おおむね位置座標 80000m 以上が高倉、70000m 以下が常陸太田中心市街、その間が水府に相当する。図中の実線が車両・旅行者の軌跡を意味しており、軌跡のうち垂直になっている部分は同じ位置にとどまっている状態、斜めになっている部分は移動中の状態を意味している。拠点間輸送無しの場合、SAV が地域間輸送にも従事しており、走行距離が大きくなっていることがわかる。拠点間輸送有りの場合、SAV は各地域にとどまって内々トリップやファースト・ラストワンマイル交通を担っており、狙い通りの挙動を示していることがわかる。

図-3.8は台数優先の場合の車両軌跡を比較したものである。拠点間輸送無しの場合、SAV は頻繁に地域間輸送を行っていたが、拠点間輸送有りの場合はその頻度が低下していることがわかる。しかし、図-3.7では地域間輸送がゼロになったのに対し、こちらではまだ SAV が多少の地域間輸送を担うという結果になった。これは、中心街や水府に SAV を専属で常駐させてもそれに見合う交通需要がないため、SAV は基本的に高倉地域内を走行し、必要に応じて中心街や水府に派遣されるという運行形態が車両台数最小化の観点から最適であることを意味している。

以上をまとめると、本分析の結論は以下の通りとなる。少なくとも本地区の場合、地域間交通を拠点間交通としてまとめて輸送し、ファースト・ラストワンマイル交通を自動運転車両で担う形態の交通システムは有効とは言い難い。その理由は、他の地域への交通需要が非常に小さく散発的であるため、その地域でのファースト・ラストワンマイル交通のためだけに専用の自動運転車両を配備することが非効率であるためである。よって、地区の場合は、地区全体を一体としてとらえるオンデマンド型の共有型自動運転システムが有効と考えられる。拠点間輸送とファースト・ラストワンマイル交通の役割分担を持たせるような交通システムは、より拠点間の移動需要が大きい地区を対象とすべきである。

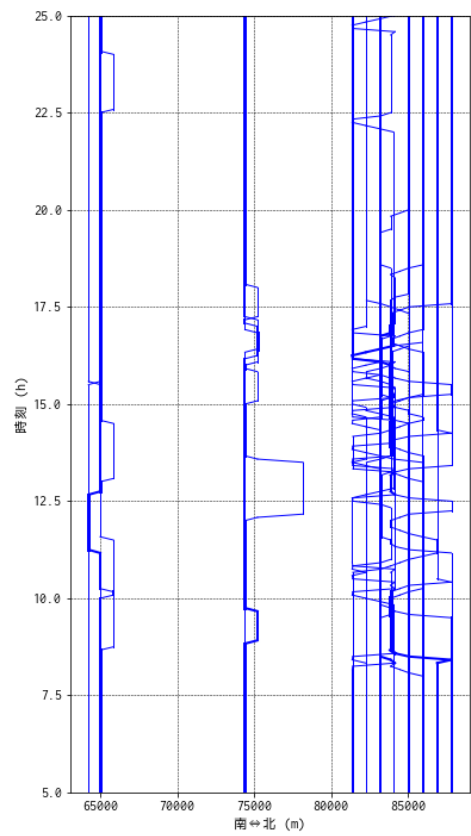
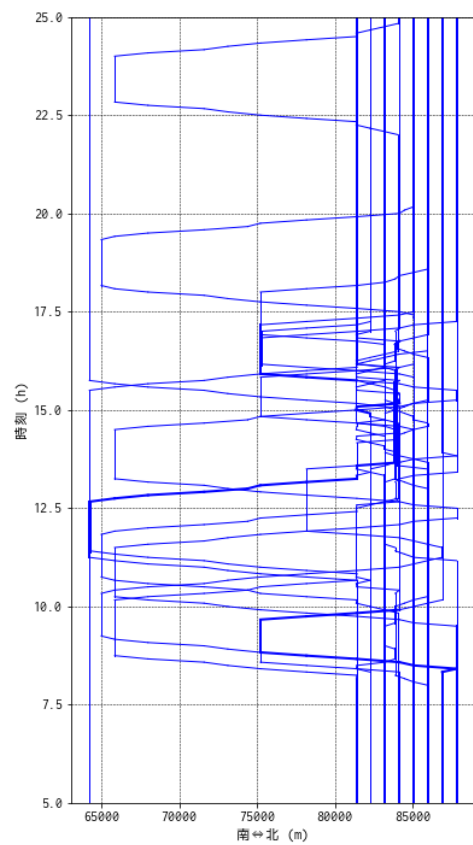


図-3.7 走行距離優先の場合の車両軌跡。左は拠点間輸送無し、右は拠点間輸送有りの場合。

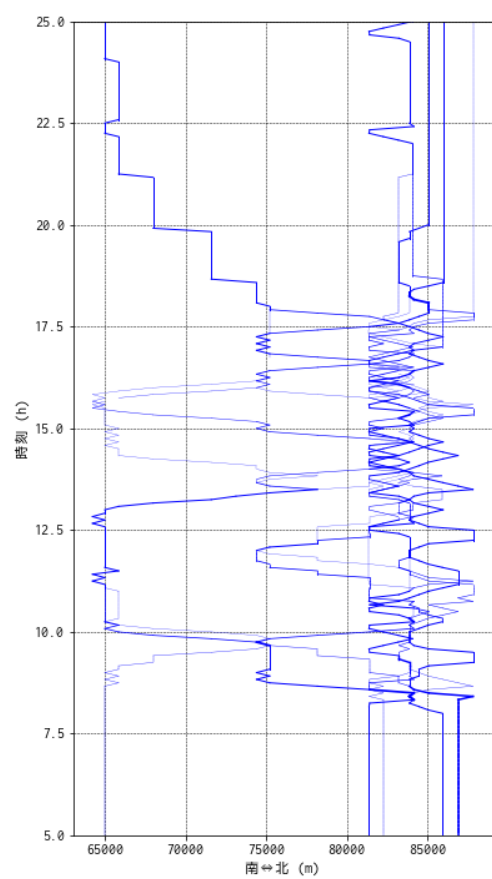
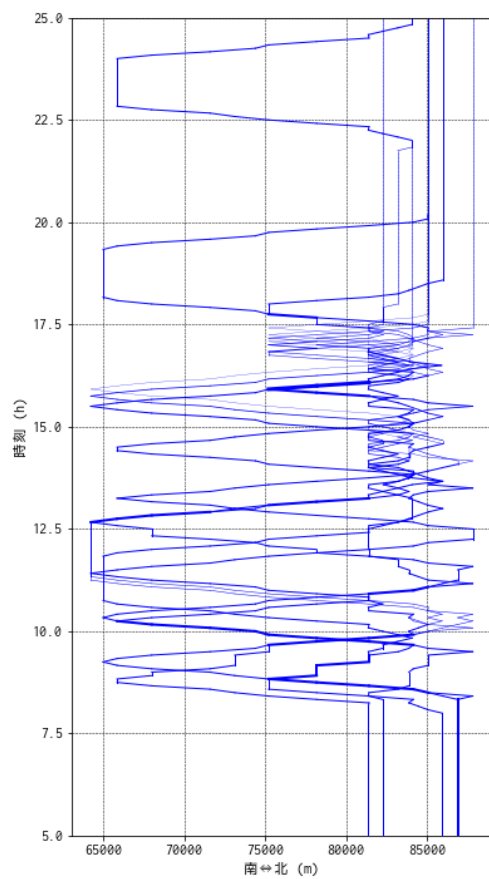


図-3.8 台数優先の場合の車両軌跡。左は拠点間輸送無し、右は拠点間輸送有りの場合。

第4章 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

4.1 はじめに

既往の交通手段及び候補となりうる次世代の交通手段ともに多様な交通手段がある都市部では交通機関利用者の交通手段選択・経路選択により、交通手段毎の需要が大きく変わることが想定される。このことから、交通手段選択モデルにおけるパラメータ取得は交通需要予測の精度を向上させるうえで欠かせない。本研究では、次世代の交通手段に対するより精緻なパラメータ取得や都市部への実装可能性を目的に自動運転車両の走行実験を実施しており、4.2に実験結果をまとめる。

4.3では、次世代モビリティの導入に関する設計・評価モデルの構築を行っている。4.4では、4.3で用いる端末交通の需要推計及び4.3で導出された施策案評価に用いるシミュレーションモデルを構築する。

4.2 次世代モビリティの選択行動調査

(1) 走行実験と SP調査の概要

本研究の対象地域であるさいたま新都心や大宮駅周辺など都市内の拠点は、市街地の中心部など半径 1km 以上の範囲に商業施設・公共施設・病院などが立地していることも多い。このような拠点では、拠点からのラストワンマイル移動だけでなくこうした拠点内の移動支援への次世代モビリティの活用が期待されている。

本研究では、ラストワンマイルのモビリティとして、自動運転車両の NAVYA 社 ARMA の走行実験を行うほか、さいたま市スマートシティ推進コンソーシアムが行う社会実験¹⁾とも連携²⁾することにより、シェアサイクル、シェアスクーター、小型 EV などの次世代モビリティへの乗車体験を伴った、Stated Preference 調査によるモビリティの利用意向調査を実施した。実験期間は、2021 年 4 月 25 日から 28 日の 4 日間である。実験の実施体制は表-4.1 に示すとおりである。

(2) SP調査の内容

次世代の交通手段に関するユーザーの受容性の把握及び需要推計等に必要な交通手段選択モデルにおけるパラメータ取得のために、SP(Stated Preference)調査を実施した。SP調査は、乗車モニタ20名とした。乗車の前後で合計2回、同一のモニタに調査を実施することで、次世代のモビリティへの乗車経験の有無によるバイアスも計測する。

SP調査のシナリオ提示を行うサンプル画面

表-4.1 自動運転走行実験の概要

組織名	役割
(実験主体) ・ 東京大学空間情報科学研究センター	・ 実験全体統括
(実験運営) ・ 日本工営 (株)	・ 実験準備、運営
(実験データ取得) ・ (株) 地域未来研究所 ・ (株) サーベイリサーチセンター	・ SP 調査 (選好意識調査)
(実験車両協力) ・ BOLDLY (株)	・ 自動運転バス等の手配、点検保守 ・ 走行に必要なデータ取得、セットアップ ・ 実験車両の運行、現場管理 ・ 技術的資料、取得データの提供 等
(実験協力) ・ さいたま市	・ 実験協議会の運営 ・ 関係機関協議 ・ 実験の周知、調整 等
(実験協力) ・ 国土交通省関東地方整備局	・ 実験協議会の運営 ・ 関係機関協議 ・ 車両保管場所、運営拠点の確保 ・ 実験の周知、調整 等

を、図-4.1に示す。設問内容は、性別等の個人属性、普段利用する交通手段とその頻度、小児・高齢者をとめた公共交通利用、これまでの次世代モビリティの利用有無の設問の後、仮想的な状況でのラストワンマイルでの利用交通手段を設問するものである。仮想的な状況のシナリオは、鉄道駅を起点とした買い物、通院、お見舞い、通勤、映画鑑賞を目的とした往復のトリップを想定し、小児または高齢者の同伴者の有無、荷物の有無、目的地での滞在時間などが異なるシナリオを提示する。選択肢は、徒歩、自動運転バス、電動スクーター、パーソナルモビリティ、目的地施設内を含むパーソナルモビリティ利用、小型EVがあり、徒歩時間、乗車時間、料金を変数として提示する。なお、3問については往路・復路それぞれについてモビリティを選択する設問とし、4問については往復及び施設内を含むモビリティの利用を想定した設問とした。

次世代モビリティを用いた都市交通調査

これ以降の設問では、「ある状況」を提示した上で、
・往路と復路でそれぞれ別の交通手段が選べる質問が3問
・往復セットで1つの交通手段が選べる質問が4問
の合計7問が繰り返り表示されます。

質問毎に「ある状況」と「各交通手段の所要時間と料金」が変化しますので、内容をよく確認して、あなたならどのような行動をとるかを選択してください。

「ある状況」の一例 ※本文の内容が質問毎に変化します

- あなたは、ある目的地を車で送るために、目的の商業施設まで車で移動しました。
- その目的地は、徒歩で徒歩10分程度です。
- 最寄り駅（現在地）から目的地までは1,000m離れています。
- 同行者は小学生が一人います。
- 行先は必ずとる目的地の施設があり、帰りは徒歩が予定されています。
- 行先で4つの交通手段が選択可能です。
- 天候は晴れています。

移動手段	所要時間（分）	料金（円）
徒歩	20分	—
自動運転バス	10分（徒歩2分+乗車8分） ※運行時間：5分	480円
超小型EV	5分（徒歩1分+乗車4分）	500円
電動アシスト付自転車	10分（徒歩1分+乗車9分）	400円
パーソナルモビリティ	15分（徒歩4分+乗車11分）	300円

※電動アシスト付自転車とパーソナルモビリティは、2人乗り不可で、それぞれ自分で運転する必要があります

交通手段利用イメージ

移動手段	最寄り駅	目的地
徒歩		
自動運転バス		
超小型EV		
電動アシスト付自転車		
パーソナルモビリティ		

「質問」の例

上記の交通手段が利用可能な場合、あなたは行きと帰りでどの交通手段を利用したいとしますか？

行きの交通手段	帰りの交通手段
☐ 徒歩	☐ 徒歩
☐ 自動運転バス	☐ 自動運転バス
☐ 超小型EV	☐ 超小型EV
☐ 電動アシスト付自転車	☐ 電動アシスト付自転車
☐ パーソナルモビリティ	☐ パーソナルモビリティ

上記はあくまでも一例です。
繰り返し説明になりますが、
・往路と復路でそれぞれ別の交通手段が選べる質問が3問
・往復セットで1つの交通手段が選べる質問が4問
あり、質問毎に「ある状況」と「各交通手段の所要時間と料金」が変化しますので、内容をよく確認して、あなたならどのような行動をとるかを選択してください。

なお、回答するにあたって、新型コロナウイルスの影響は考慮しないで下さい。

次へ

※ブラウザの「戻る」はクリックしないでください

Copyright (C) 東京大学全領域科学研究センター. All Rights Reserved.

図-4.1 SP調査の説明画面

(3) 調査結果概要

乗車モニタは、男性9名、女性11名であった。年齢は、20代3名、30代6名、40代3名、50代4名、60歳以上4名であった。各モニタは乗車の事前にSP調査での回答を行ったのち、4月26日もしくは27日に自走運転車両及びその他のモビリティに乗車を行い、乗車後に同じSP調査に回答を行った。各SP調査で、1人あたり10回のモビリティの選択を実施することで、400サンプルを収集した。今後の研究では、このサンプルデータより、ロジットモデルのパラメータを推定することにより、シミュレーション等でのモビリティ選択に必要なパラメータの推定を行う。

(4) 次世代モビリティ選択モデル

本研究では、SP/RP モデル³⁾を援用したMixed Logit モデルを構築することにより、次世代モビリティの乗車経験や個人の嗜好によって生じるバイアスを加味したモデリングを行う。このために、乗車前後で異なるスケールパラメータを設定するとともに、乗車前の乗車時間に対する一般化費用に個人ごとに異なるランダム係数を設定する。前者は、乗車経験後には、回答者が想定するそれぞれのモビリティに対する効用の確度が増し、スケールパラメータが縮小することを想定している。後者は、乗車前にそれぞれのモビリティに対する乗り心地等の期待は回答者によって異なることが想定したものである。

SP 調査の設問は、①片道毎に行っているパート3問と、②往復を一括で行っているパート3問がある。このことから、それぞれで効用関数を定義する必要がある。

①の効用関数を定義する。徒歩、自動運転バス、小型電気自動車、シェアバイク、シェアサイクル、シェアパーソナルモビリティ、シェアパーソナルモビリティ（施設内を含む）の各モードを $M = \{walk, ab, ec, mb, bc, pm, pma\}$ とする。徒歩 ($m = walk$) については、

$$V_{walk} = \beta_{i,walk}^{time} x_{walk}$$

徒歩以外のモード m については、

$$V_m = (\beta_{i,m}^{time} + \delta_{exp,m} \beta_m^{exp}) x_m + \beta_{i,walk}^{time} x_{walk,m} + \beta_{fare} x_{fare,m} + \delta_{outband} \alpha_m^{outbound} + (1 - \delta_{outband}) \alpha_m^{inbound}$$

となる。ただし、

$\beta_{i,m}^{time}$: 個人 i のモード m の乗車時間にかかる係数

β_m^{exp} : そのモードの利用経験がある場合にモード m の乗車時間にかかる係数

β_m^{freq} : モード m の平均運行間隔にかかる係数 (バスの場合のみ有効)

β_{fare} : 料金にかかる係数

$\alpha_m^{outbound}$: 往路のモード m の定数項

$\alpha_m^{inbound}$: 復路のモード m の定数項

$\delta_{exp,m}$: モード m を利用したことがある場合 1 となり、それ以外の場合 0 となる利用経験を表すダミー変数

$\delta_{outband}$: 往路の場合 1 となり、それ以外の場合 0 となる往復を表すダミー変数

x_m : モード m の乗車時間 (単位: 1/100 分) (片道)

$x_{freq,m}$: モード m の平均運行間隔 (単位: 1/100 分) (片道)

$x_{walk,m}$: モード m に乗車した場合での徒歩時間 (単位: 1/100 分) (片道)

$x_{fare,m}$: モード m の料金 (単位: 1/1000 円) (片道)

となる。また、 $\beta_{i,m}^{time} \sim N(\mu_m^{time}, \sigma_m^{time})$ である。

②の往復の場合には、徒歩については、

$$V_{walk}^r = 2\beta_{walk}^{time}x_{walk}$$

徒歩以外のモード m については、

$$V_m^r = 2(\beta_m^{time} + \delta_{exp,m}\beta_m^{exp})x_m + 2\beta_{walk}^{time}x_{walk,m} + \beta_{fare}x_{returnfare,m} + \alpha_m^{outbound} + \alpha_m^{inbound} + \delta_{stay}\alpha_m^{stay}$$

となる。

α_m^{stay} : モード m に乗車のまま施設を利用した場合の定数項 (パーソナルモビリティの施設内利用の場合のみ有効)

$\delta_{stay,m}$: モード m に乗車のまま施設を利用する場合 1 となり、それ以外の場合 0 となるダミー変数

$x_{returnfare,m}$: モード m の往復料金 (単位: 1/1000 円)

上記のとき、各モードの選択確率は、

$$p_m = \frac{\exp \theta_{ride} V_m}{\sum_{m' \in M} \exp \theta_{ride} V_{m'}}$$

となり、 θ_{ride} について、試乗前は 1 であり、試乗後は 1 未満の値が推定されることを想定している。

表-4.2 パラメータの推定結果の概要

対象者数	21
初期尤度	-663.0201
尤度	-362.1615
ρ^2	0.454
$\bar{\rho}^2$	0.407
AIC	786.323

(5) 推定結果

モデルの推定結果の概要を表-4.2 に示す。

$\bar{\rho}^2 = 0.407$ となっており、適合度は十分な推定結果が得られていることがわかる。表-4.3 に推定されたパラメータを示す。表より、費用や運行間隔に関するパラメータ及びスケールパラメータの符号条件は満たされており、有効なパラメータが得られている。定数項については、施設内での使用に対する定数項である α_{pm}^{stay} を除き有意に推定されている。乗車経験の有による所要時間に係るパラメータの変化 β_m^{exp} は有意なものではなかったが、自動運転バス、パーソナルモビリティについては乗車体験により効用が下がる傾向がみられた一方、小型電気自動車及びシェアサイクルは効用が上がる傾向がみられた。特に、小型電気自動車は乗車前と比べ

表-4.3 パラメータの推定結果の概要

	Value	Std err	t-test (>0)	p-value (>0)
$\alpha_{ab}^{outbound}$	-5.75	1.59	-3.62	0.00
$\alpha_{ec}^{outbound}$	-5.99	1.44	-4.16	0.00
$\alpha_{mb}^{outbound}$	-9.54	3.32	-2.87	0.00
$\alpha_{bc}^{outbound}$	-9.34	2.26	-4.13	0.00
$\alpha_{pm}^{outbound}$	-12.30	3.58	-3.44	0.00
$\alpha_{ab}^{inbound}$	-5.65	1.59	-3.54	0.00
$\alpha_{ec}^{inbound}$	-5.96	1.44	-4.14	0.00
$\alpha_{mb}^{inbound}$	-9.42	3.33	-2.83	0.00
$\alpha_{bc}^{inbound}$	-9.37	2.26	-4.14	0.00
$\alpha_{pm}^{inbound}$	-12.30	3.58	-3.43	0.00
α_{pm}^{stay}	3.11	1.85	1.68	0.09
β_{fare}	-2.32	0.98	-2.37	0.02
β_{ab}^{exp}	-16.30	13.50	-1.21	0.23
β_{ec}^{exp}	105.00	42.20	2.49	0.01
β_{mb}^{exp}	0.26	37.60	0.01	1.00
β_{bc}^{exp}	38.50	20.90	1.84	0.07
β_{pm}^{exp}	-29.30	15.10	-1.94	0.05
μ_{walk}^{time}	-69.10	16.00	-4.31	0.00
μ_{ab}^{time}	-17.80	15.10	-1.18	0.24
μ_{ec}^{time}	-52.80	28.70	-1.84	0.07
μ_{mb}^{time}	-28.40	65.90	-0.43	0.67
μ_{bc}^{time}	-27.10	27.00	-1.00	0.32
μ_{pm}^{time}	-10.80	15.30	-0.71	0.48
σ_{walk}^{time}	30.70	7.14	4.30	0.00
σ_{ab}^{time}	-44.50	13.70	-3.25	0.00
σ_{ec}^{time}	43.40	17.10	2.54	0.01
σ_{mb}^{time}	83.70	28.30	2.96	0.00
σ_{bc}^{time}	21.30	15.00	1.42	0.16
σ_{pm}^{time}	25.70	12.60	2.04	0.04
β_{ab}^{freq}	-8.21	4.36	-1.89	0.06
	Value	Std err	t-test (<1.0)	p-value (<1.0)
θ_{ride}	0.23	0.07	11.80	0.00

199%の時間当たりの効用の増加、パーソナルモビリティは 270%の時間当たりの効用の減少が確認されており、乗車体験の有無が選択行動に与える影響は大きいという示唆が得られた。スケールパラメータ θ_{ride} は有意に観測されており、0.23 となっている。このことは、今回の乗車体験を通して、回答者間での次世代モビリティの特性の理解に対するばらつきが減少し、各モビリティの特性に即した選択が行えることができたことに起因すると推察できる。

図-4.2 と図-4.3 は、徒歩、自動運転バス、小型電気自動車、シェアバイク、シェアサイクル、シェアパーソナルモビリティについて、それぞれ速度を 3.5km/h、15km/h、15km/h、10km/h、10km/h と仮定し、すべての区間で選択したモードのモビリティに乗車可能なときの徒歩との効用差を示したものである。試乗前は、シェアバイク、シェアサイクル、パーソナルモビリティ、小型電気自

動車、自動運転バスの順で効用差が大きい。試乗後の効用は、大きいものから小型電気自動車、シェアサイクル、シェアバイク、自動運転バス、パーソナルモビリティとなり、試乗前と比べて効用差のばらつきも大きくなっている。これらの結果より、試乗前の回答者はモビリティ特有の差異が明確に区別できていなかった一方で、試乗後には、モビリティの特徴を加味して回答を行っている」と推察される。

推定結果より得られた知見をまとめたものが以下である。

- ① 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
- ② 自動運転バス、パーソナルモビリティは、乗車体験後に効用が低くなる傾向がある（試乗前は過大評価）

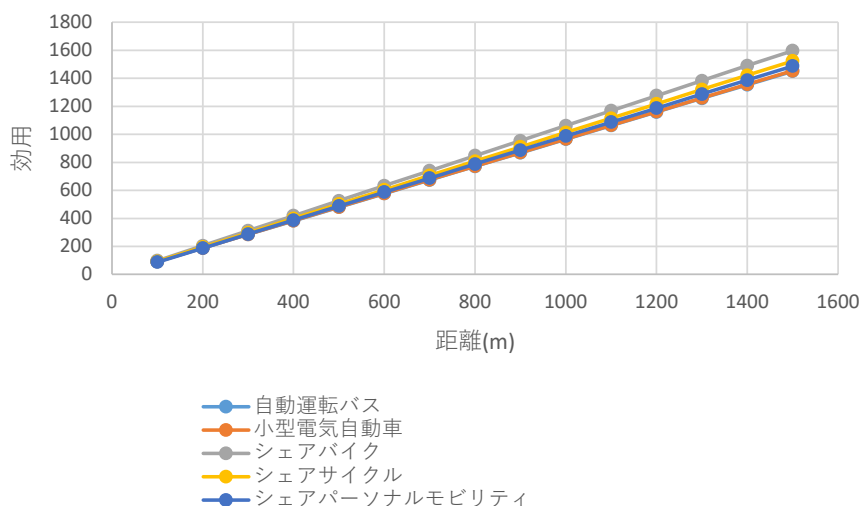


図-4.2 試乗前の徒歩との効用差

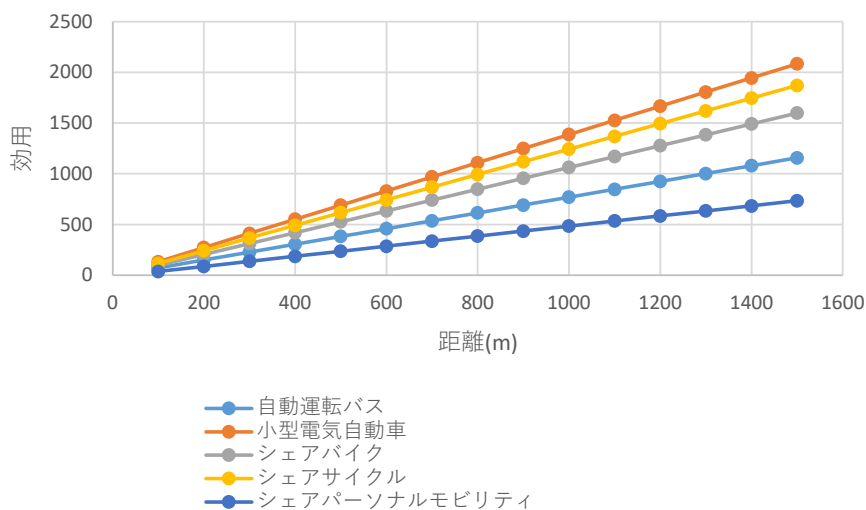


図-4.3 試乗後の徒歩との効用差

- ③ 小型電動自動車、シェアサイクルは、乗車体験後に効用が大きくなる傾向がある（試乗前は過小評価）
- ④ シェアスクーターの利用に対する効用は個人差が特に大きい
- ⑤ シェアサイクル、パーソナルモビリティは比較的効用の個人差が小さい
- ⑥ 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
- ⑦ 単位時間当たりの一般化費用は、小型電気自動車、シェアサイクル、シェアバイク、自動運転バス、パーソナルモビリティの順に大きくなる
- ⑧ 定数項の費用換算値は、自動運転バス、小型電気自動車、シェアサイクル、シェアバイク、シェアパーソナルモビリティの順に大きくなる
- ⑨ 試乗前後で、効用が大きいと想定する交通手段が変化するとともに、それぞれの交通手段間でも、より大きな効用差となる。

4.3 次世代モビリティの有効性の検証・評価

(1) 施策シナリオで対象とする次世代交通手段

自動運転技術の進展により、共有型自動運転（SAV）システムが将来実現しうると言われている。これは、社会で共有されている自動運転車両が最適な経路やライドシェアマッチングで旅行者の輸送を担う新たな公共交通の総称である。具体的には、旅行者はトリップ開始前にSAVを手配し、ライドシェアを行いながら目的地に移動する。また、SAVは旅行者を輸送後、他の旅行者を輸送するために移動開始するか、駐車場へ向かう。SAVシステムは車両を効率的に運用するため、旅行者は自動車を私有している状況と比較し自動車数や交通量を減少でき、効率的な交通の実現につながると期待されている。

SAVシステムは将来の公共交通手段として重要である。理由は、SAVをシステム全体の最適化で配分することは、各利用者の利己的な選択に則った配分よりも効率的だからである。例えば、各旅行者が最短経路で移動しようとして渋滞しやすい道路が生じたとする。SAVシステムで、システム全体を見渡し統制する中央管理センターのようなものが可能であれば、そういつ

た道路で渋滞が発生する前に効率的な配分で渋滞発生を回避できる。中央統制下での運用によってシステム最適配分がしやすいことはSAVの大きな強みである。

SAVシステムを交通手段として利活用する方策を検討する数理的研究では、SAVシステムを唯一の交通手段として想定して分析する例がほとんどである。しかし、SAVシステムは結局のところ小型～中型自動車を用いた交通手段であり、電車やバスのような固定経路の大量公共輸送機関と比較し、輸送力の面では優れているとはいいがたい。そこで、固定経路の大量公共輸送機関と、柔軟なSAVシステムを統合的に運用する次世代モビリティが有効な可能性がある。すなわち、自動車は個人の旅行に合わせた柔軟な配車が可能な一方、バス、BRT（Bus Rapid Transit）、電車などの大量公共輸送機関は、経路は一定であるが大容量輸送が可能である。そこで、両者を組み合わせた統合型公共交通システムにより、柔軟さと大容量輸送を併せ持った効率的な交通を実現できると考えられる。このようなシステムは地域に限らず有効で、既存の公共交通が発達した都市部ではSAVシステムがラストワンマイル交通手段として導入され、既存の交通手段が不足している過疎地域ではSAVシステムが比較的安価で迅速な交通手段になると期待される。

(2) SAVとBRTを統合した交通システムの戦略的計画手法

本手法はネットワーク、SAV、BRT、旅行者の要素から成り立っている。本節ではそれらの概要を述べ、次節にて手法の定式化を述べる。

ネットワークはノードとリンクによって構成され、SAVと旅行者はネットワーク上を自由に移動するものとする。各リンクはリンク交通容量を持ち、その値を超える分のSAVはリンクに進入できない。また、各ノードもノード待機車両容量を持ち、その値を超える分のSAVはノードで待機できない。なお、リンク交通容量とノード待機車両容量はいずれも最大値と最小値を持ち、インフラ整備費用を投入することで最小値から最大値まで値を増加できる。増加量は総インフラ整備費用の最適化によって決まる。BRTはネットワーク上に専用レーンを設置し、レーンに沿って運行する。BRT専用レーンの設置は道路の一部を占有するため、モデルではBRT専用レーンの占有交通容量がリンク交通容量を制限する。

$$\begin{aligned}
& \min\{T, D, \bar{D}, N, \bar{N}, C, G\} \\
& \text{s.t.} \\
& \sum_{ij,s,t,k} t_{ij} y_{s,ij}^{k,t} + \sum_{ij,s,t,k} \hat{t}_{ij} \hat{y}_{s,ij}^{k,t} + \sum_{i,s,t,k} y_{s,i}^{k,t,t'} + \sum_{i,s,t,k} \hat{y}_{s,i}^{k,t,t'} = T \\
& \sum_{ij,i \neq j,t} d_{ij} x_{ij}^t = D \\
& \sum_{ij,i \neq j,m,t} d_{ij} z_{ij}^{m,t} = \hat{D} \\
& \sum_i x_{0i}^0 = N \\
& \sum_{i,t,m} z_{0i}^{m,t} = \hat{N} \\
& \sum_{ij} c_{ij} (\mu_{ij} - \mu_{ij}^{\min}) + \sum_i c_i (\kappa_i - \kappa_i^{\min}) = C \\
& \sum_{ij,m} g_{ij}^m = G \quad \forall m \\
& \sum_j x_{ji}^{t-t_{ji}} - \sum_j x_{ij}^t = 0 \quad \forall i, t \in (0, t_{\min}) \\
& \sum_j y_{s,ji}^{k,t-t_{ji}} - \sum_j y_{s,ij}^{k,t} + y_{s,0i}^{k,t} - y_{s,i0}^{k,t} + y_{s,i}^{k,t-t'} - \hat{y}_{s,i}^{k,t} = 0 \quad \forall i, s, k, t \in T_k \\
& \sum_j \hat{y}_{s,ji}^{k,t-t_{ji}} - \sum_j \hat{y}_{s,ij}^{k,t} + \hat{y}_{s,0i}^{k,t} - y_{s,i0}^{k,t} + \hat{y}_{s,i}^{k,t-t'} - y_{s,i}^{k,t} = 0 \quad \forall i, s, k, t \in T_k \\
& \sum_{s,k} y_{s,ij}^{k,t} \leq \rho x_{ij}^t \quad \forall ij, i \neq j, t \\
& \sum_{s,k} \hat{y}_{s,ij}^{k,t} \leq \sum_m \hat{\rho} z_{ij}^{m,t} \quad \forall ij, i \neq j, t \\
& x_{ij}^t \leq \mu_{ij} - \hat{\mu}_{ij} g_{ij}^m \quad \forall ij, i \neq j, t, m \\
& x_{ii} \leq \kappa_i \quad \forall i, t \\
& y_{s,0r}^{k,k} + y_{s,0r}^{k,k} = M_{rs}^k \quad \forall rs, k \\
& \sum_{t \in T_k} y_{s,s0}^{k,t} + \sum_{t \in T_k} \hat{y}_{s,s0}^{k,t} = \sum_r M_{rs}^k \quad \forall s, k \\
& \mu_{ij}^{\min} \leq \mu_{ij} \leq \mu_{ij}^{\max} \quad \forall ij \\
& \kappa_i^{\min} \leq \kappa_i \leq \kappa_i^{\max} \quad \forall i \\
& \sum_i a_i^m = \sum_i b_i^m \quad \forall m \\
& \sum_i a_i^m \in \{0, 1\} \quad \forall m \\
& a_i^m + b_i^m \in \{0, 1\} \quad \forall i, m \\
& a_i^m \leq \sum_{j, i \neq j} g_{ij}^m \leq 1 - b_i^m \quad \forall i, m \\
& b_i^m \leq \sum_{j, i \neq j} g_{ij}^m \leq 1 - a_i^m \quad \forall i, m \\
& a_i^m + \sum_{j, i \neq j} g_{ji}^m - \sum_{j, i \neq j} g_{ij}^m - b_i^m = 0 \quad \forall i, m \\
& z_{0i}^{m,t} - z_{i0}^{m,t} + \sum_{j, i \neq j} z_{ji}^{m,t-t_{ji}} - \sum_{j, i \neq j} z_{ji}^{m,t} = 0 \quad \forall i, t, m \\
& 0 \leq z_{ij}^{m,t} \leq g_{ij}^m \quad \forall ij, i \neq j, t, m \\
& 0 \leq z_{0i}^{m,t} \leq a_i^m \quad \forall i, t, m \\
& 0 \leq z_{i0}^{m,t} \leq b_i^m \quad \forall i, t, m \\
& z_{ij}^{m,0} = 0 \quad \forall ij, i \neq j, m \\
& x_{ij} \geq 0 \quad \forall ij, t \\
& y_{s,ij}^{k,t} \geq 0 \quad \forall ij, s, k, t \in T_k \\
& \hat{y}_{s,ij}^{k,t} \geq 0 \quad \forall ij, i \neq j, s, k, t \in T_k \\
& x_{0i}^0 \geq 0 \quad \forall i \\
& y_{s,s0}^{k,t} \geq 0 \quad \forall s, t, k \in T_k \\
& \hat{y}_{s,s0}^{k,t} \geq 0 \quad \forall s, t, k \in T_k \\
& g_{ij}^m \in \{0, 1\} \quad \forall ij, i \neq j, m \\
& z_{0i}^{m,t} \in \{0, 1\} \quad \forall i, m, t
\end{aligned}$$

図-4.4 SAV と BRT を統合した交通システムの多目的最適化問題

表-4.4 数学記法

	メー	パラメ
SAV に関わる	T	旅行者の総旅行時間（ノード上の待ち時間を含む）
目的関数	D	SAV の総移動距離
	N	総 SAV 台数
	C	総インフラ整備費用
SAV に関わる	x_{ij}^t	リンク ij をタイムステップ t に移動開始する SAV の交通量
決定変数	$y_{s,ij}^{k,t}$	リンク ij をタイムステップ t に SAV で移動開始する目的地 s , 出発タイムステップ k の旅行者の交通量
	μ_{ij}	リンク ij の交通容量
	κ_i	ノード i の待機車両容量
SAV に関わる	t_{ij}	$i \neq j$ のとき、リンク ij の自由旅行時間
定数	t_{ii}	ノード i で 1 タイムステップ分待つ待ち時間（= タイムステップ幅）
	d_{ij}	リンク ij の長さ
	c_{ij}	リンク ij の交通容量拡張コスト
	c_i	ノード i の待機車両容量拡張コスト
	ρ	SAV 1 台当たりの乗客容量
	$\mu_{ij}^{\max}$	リンク ij の交通容量の取りうる最大値
	$\kappa_i^{\max}$	ノード i の待機車両容量の取りうる最大値
	$\mu_{ij}^{\min}$	リンク ij の交通容量の取りうる最小値
	$\kappa_i^{\min}$	ノード i の待機車両容量の取りうる最小値
	M_{rs}^k	出発地 r , 目的地 s , 出発タイムステップ k の時間帯別 OD 表
	T_k	出発タイムステップ k の旅行者が移動できるタイムステップ集合
	$t_{\max}$	最終タイムステップ
BRT に関わる	$\hat{D}$	BRT の総移動距離
目的関数	$\hat{N}$	総 BRT 台数
	G	部分巡回路除去のための目的関数、BRT 経路の合計リンク数を表す。
BRT に関する	$\hat{y}_{s,ij}^{k,t}$	リンク ij をタイムステップ t に BRT で移動開始する目的地 s , 出発タイムステップ k の旅行者の交通量
決定変数	$\hat{y}_{s,i}^{rk,t}$	タイムステップ t にノード i で SAV に乗り換える目的地 s , 出発タイムステップ k の旅行者の交通量
	$\hat{y}_{s,i}^{rk,t}$	タイムステップ t にノード i で BRT に乗り換える目的地 s , 出発タイムステップ k の旅行者の交通量
	a_i^m	BRT のルートにおいてノード i を起点とする場合 1, しない場合 0 ($m = 1, 2, \dots, n$)
	b_i^m	BRT のルートにおいてノード i を終点とする場合 1, しない場合 0 ($m = 1, 2, \dots, n$)
	g_{ij}^m	リンク ij についての BRT ルート決定変数。リンク ij を通る場合は 1, 通らない場合は 0 ($m = 1, 2, \dots, n$)
	$z_{ij}^{m,t}$	タイムステップ t にリンク ij を通る BRT 台数 ($m = 1, 2, \dots, n$)
BRT に関する	n	ネットワーク上に走らせる BRT ルートの最大数
定数	$\hat{\rho}$	BRT1 台当たりの乗客人数
	$\hat{\mu}_{ij}$	BRT 専用レーン設置時の占有交通容量
	$\hat{t}_{ij}$	BRT のリンク移動時間
	t'	乗り換えコスト

SAV は旅行者の輸送や駐車のために移動する。また、SAV が停車するのはノード上で駐車するとき、または、渋滞が発生してリンクに進入できずにノードに止まるときである。移動や停車といった SAV の経路選択は SAV の総移動距離や旅行者の総旅行時間を最適化して決定される。

SAV の渋滞は point queue モデルで表される。SAV はリンク上を常に自由流で走行し、SAV のリンク交通量がリンク交通容量に達するとそのリンクには進入不可能となる。リンクに進入できなかった SAV は直前のノードで待機する。そのノードでも SAV の待機車両台数が最大値に

達すると、そのノードには進入できなくなり、渋滞が拡大する。

SAV は乗客容量が設定されていて、旅行者を一人または二人以上のライドシェアリングで輸送する。

BRT はネットワーク上に BRT 専用レーンを設置して、そのレーンに沿って走行する。BRT 専用レーンでの走行を想定するため、BRT に渋滞はなく、定められた運行計画通りに運行する。BRT の経路選定と運行計画は、BRT の総移動距離と総台数、旅行者の総旅行時間とともに最適化問題を解いて決定される。

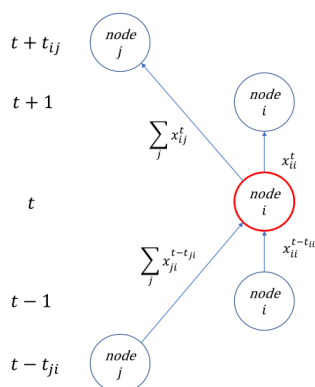


図-4.5 SAV のフロー

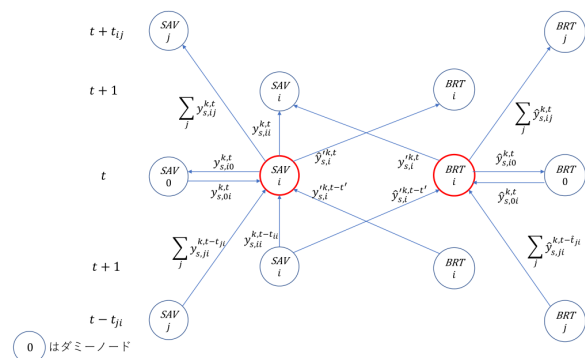


図-4.6 旅行者のフローと SAV-BRT 間の乗り換え

BRTの経路となったリンクには専用レーンを設置するためにリンク交通容量が減少するので、旅行者の総旅行時間を最適化するには SAVの配車との連携が重要である。BRT専用レーンの設置によってリンク交通容量が制限されるようになり、BRTは定時運行が可能であるが、SAVは渋滞しやすくなるモデルになる。

従来型の公共交通はバス停ごとに停車することを考えて、BRTはSAVと比べて大容量輸送が可能であるが平均速度が低くなるように、乗客容量とリンク移動時間をSAVと別で設定する。旅行者のODデータは出発地/目的地、出発時刻、許容最大移動時間を持ち、その時間内で移動を完了させる。

旅行者はSAVまたはBRTのみで移動し、徒歩での移動は考えない。よって、SAVまたはBRTが来ない、または、SAVとBRTの乗客容量が満杯の際は移動せずにノード上で待機する。旅行者はSAVとBRTの相互乗り換えが可能で、双方向の乗り換え時には乗り換えコストとして時間消費があるものとする。

本手法は図-4.4の多目的最適化問題として定式化される。数学記法は表-4.4の通りである。本手法は時間拡張ネットワーク上の最適輸送問

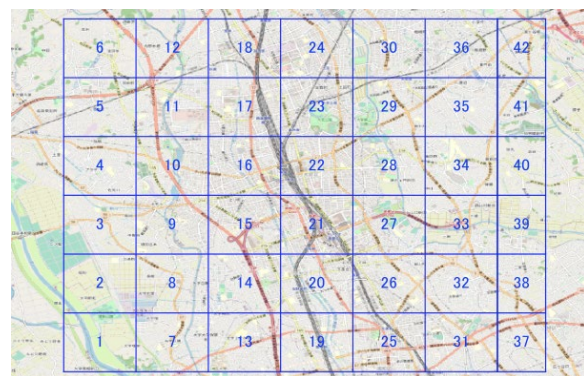


図-4.7 対象地域のメッシュ (地図出典: OSMcontributors)

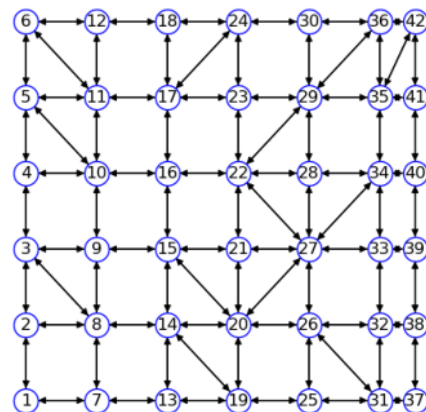


図-4.8 集計道路ネットワーク

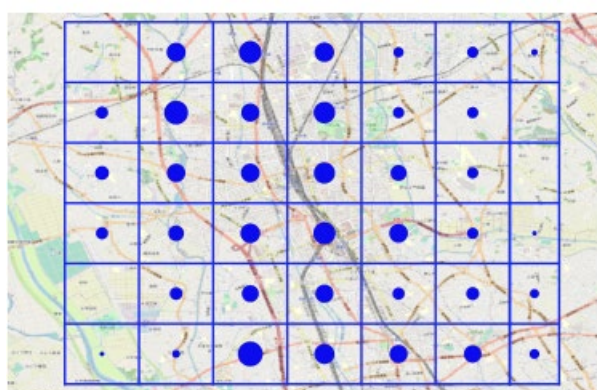
題として定式化されている。SAVのフローは図-4.5のようにモデル化される。旅行者のフローはSAVとBRTの乗り換えを考慮して図-4.6のようにモデル化される。本手法は多目的混合整数線形計画問題というクラスに属する数学的問題である。本手法の解は、 $(T, D, \hat{D}, N, \hat{N}, C, G)$ をいずれの変数も最小化する方向のパレートフロンティアであり、その求解は目的関数ベクトルの重み付け和を目的関数とした単一目的最適化問題を解くことで一つのパレート最適点を求め、それに対して重みを変更して繰り返すことでパレートフロンティアの概形を求めることによってなされる。

(3) 大宮・さいたま新都心周辺を対象としたケーススタディ

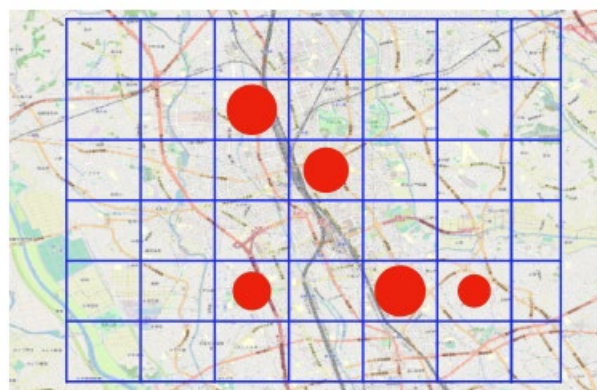
本節のモデルは、4.4 で構築するシミュレーションの範囲である大宮・さいたま新都心周辺とする。本モデル適用のインプットとなる需要データは、4.4 のベースケースでの対象地域内の内内トリップ及び主要駅からのアクセス・イグレスである。

具体的な範囲は大宮駅を中心とした縦横9kmで、メッシュごとにそれぞれのデータが与

えられている。メッシュは長方形で、42 メッシュで区分されており、その形状を図-4.7 に示す。ネットワークデータにはメッシュ間につながっているリンクが定義されており、また、つながっているメッシュ間を結ぶ道路本数が定義されている。ネットワーク形状は図-4.8 で示す。リンク移動時間は、SAV と BRT のそれぞれの速度とネットワークデータから得られるメッシュ間の距離によって定義される。リンク交通容量の最小値はネットワークデータから得られるメッシュ間の道路本数に応じて定義し、ノード待機車両容量の最小値は全メッシュで均一に設定した。また、それぞれの最大値については最小値から同一の値を足した値で定義し



(a) 出発地分布



(b) 目的地分布

図-4.9 OD 需要分布

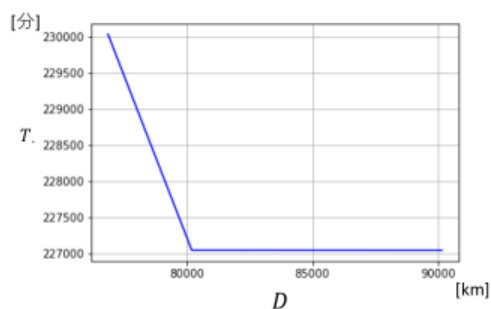
表-4.5 パラメータ値

定数	値
SAV1 台当たりの乗客容量 (ρ)	2 人/台
BRT1 台当たりの乗客容量 ($\hat{\rho}$)	50 人/台
SAV の速度	30 km/h
BRT の速度	20 km/h
ネットワークにできる BRT ルートの最大本数 (n)	1 本
BRT 専用レーン設置時の占有車両容量 ($\hat{\mu}$)	15 台/min
メッシュ間道路本数 1 本当たりのリンク交通容量	15 台/min

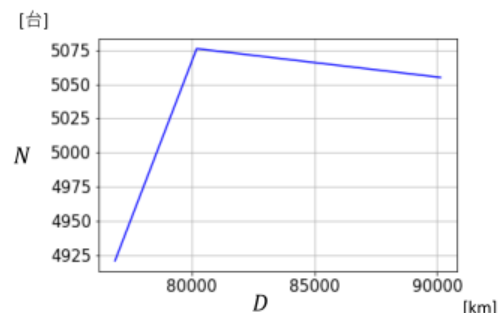
た。また、OD データはトリップごとの出発地/目的地と出発時刻が定義されている。検証では通勤通学時間帯の OD フローに応じた DSO 配分を想定するために、午前 7 時 30 分～午前 8 時の OD データを使用した。計算コストの関係で全 OD を使用せずに、需要の比較的小さい目的地に関する少数の OD を削除してから目的地を集約した。検証で使用する OD の分布を図-4.9 に示す。移動人数の合計は 27540 人である。また、各種変数の設定値を表-4.5 に示す。

本章での検証では計算時間の短縮を図るため多目的最適化問題の厳密解ではなく、暫定解での結果を用いた。暫定解とは、整数計画法における求解過程において双対ギャップが 1.79%以下のものとした。

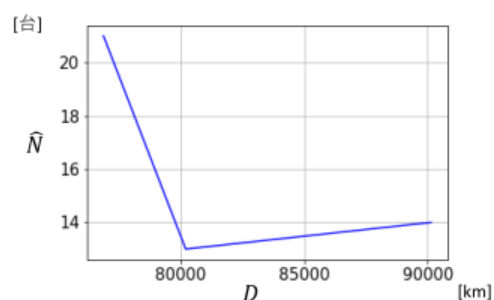
まず、目的関数 D の重みを変化させた際のパレートフロンティアを示す。結果は図-4.10 で示す。図 a は D と T の関係を示しており、SAV の総移動距離が大きくなるほど旅行者の総旅行時間が小さくなることがわかる。また、図 b と図 c はそれぞれ D と $N, \hat{N}$ との関係を示しているが、極値を持つグラフになった。それぞれの図の総 SAV 台数と総 BRT 台数はいずれも範囲が小さいため、暫定解の影響が生じて下に凸なグラフにならなかったと考えられる。ただし、SAV と BRT が配分されて運用していることが確認できた。SAV の総移動距離が短いときは代替交通手段の活用が活発化して総 SAV 台数が少なくなり、総 BRT 台数が多くなる。SAV の総移動距離がある程度大きくなると総旅行時間の減少が小さくなることが図 a からわかるが、その状態で SAV を増加させても渋滞が発生しやすくなるため、SAV と BRT の間で調整がされていると考えられる。図 d では、BRT の総台数は SAV の総移動距離が大きくなると増加するが、BRT の総移動距離は図 d から減少することがわかる。つまり、SAV がより多く移動して旅行者を輸送すれば、BRT の移動距離は小さくなると言える。図 e の縦軸の単位は総インフラ整備費用を、その値によって拡張可能なリンク交通容量またはノード待機車両容量の SAV 台数で換算した値である。SAV の総移動距離が増加すると、インフラ整備費用が減少することがわかる。なお、グラフが下に凸な概形になっていないのは暫定解による誤差の影響と考えられる。SAV の移動距離を小さくするために SAV が最短距離の経路で最適化され、渋滞が発生しやすくなり、渋滞しやすい道路にインフラ投資をしたためと考えられる。



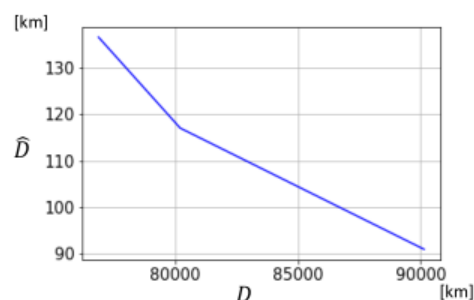
(a) SAV の総移動距離と総旅行時間の関係



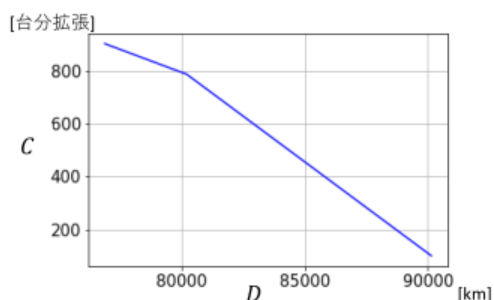
(b) SAV の総移動距離と総台数の関係



(c) SAV の総移動距離と BRT の総台数の関係



(d) SAV の総移動距離と BRT の総移動距離の関係



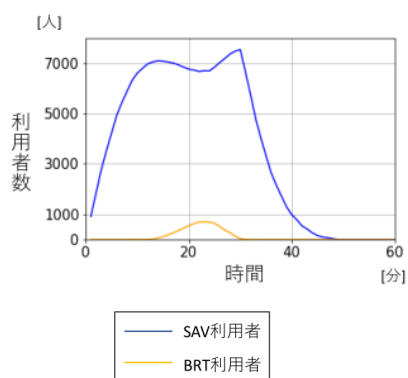
(e) SAV の総移動距離と総インフラ整備費用の関係

図-4.10 目的関数 D の重みを変化させた際のパレートフロンティア

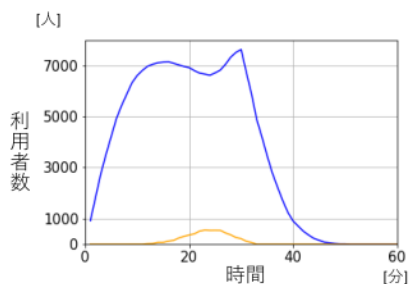
時間ごとの SAV 利用者数と BRT 利用者数を比較した結果を図-4.11 に示す。今回の検証では BRT のルート本数の最大値を 1 本で最適化したため、BRT の利用者数が SAV の利用者数と比較して 7 分の 1 から 8 分の 1 程度になっている。目的関数 D の重みを変化させた 3 つの結果のうち、最も BRT の運行本数が多かった場合で最も BRT の利用者数が多くなっていることがわかる。SAV と BRT の利用者数で比較すると、旅行者がネットワーク上に現れる時間帯 (0~30 分) のうちの初めの 0~15 分あたりの時間帯は総旅行者数が少ないため、SAV のみが利用されているが、その時間帯を過ぎると BRT が運行し始めて徐々に BRT 利用者数が増加する。BRT 利用者数の増

加に伴って SAV 利用者数の増加が緩やかになり、SAV 利用者数は減少に転じるが、BRT の利用者がいなくなる時間帯で SAV 利用者数は再び増加する。

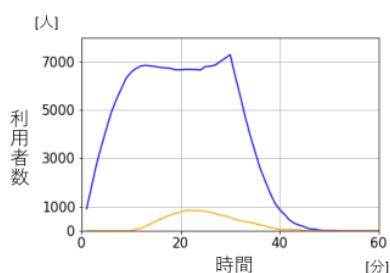
さらに、時間ごとの乗り換え人数に注目する。図-4.12 は SAV と BRT の相互乗り換え人数を示している。青色が BRT から SAV へ乗り換えた旅行者の人数で、橙色が SAV から BRT へ乗り換えた旅行者の人数を表している。BRT の利用が始まる時間帯 (0~15 分あたり) では SAV から BRT への乗り換えが多く、BRT の利用が終わる時間帯 (30~40 分あたり) では BRT から SAV への乗り換えが多いことがわかる。このことから、BRT 利用がなくなる時間帯で BRT を



(a)D の重みが小さい場合

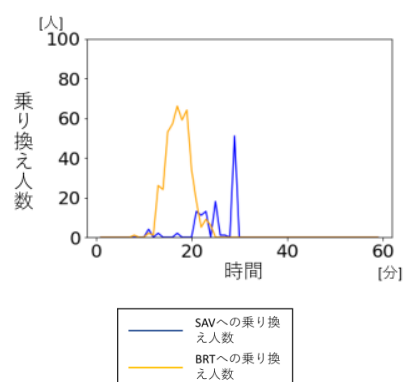


(b)D の重みが標準的な場合

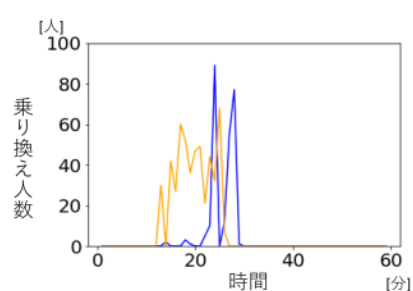


(c)D の重みが大きい場合

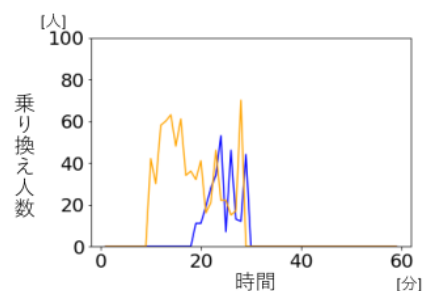
図-4.11 BRT と SAV の利用者数の推移



(a)D の重みが小さい場合



(b)D の重みが標準的な場合



(c)D の重みが大きい場合

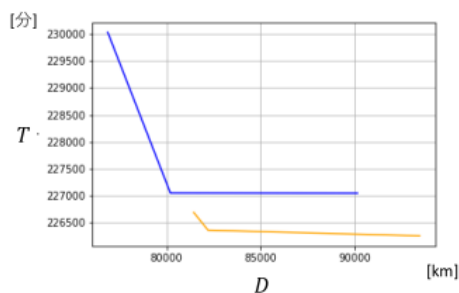
図-4.12 BRT と SAV の乗り換え人数の推移

利用していた旅行者は SAV に乗り換えることがわかる。よって、SAV 利用者は BRT 利用の増加に伴って減少した後、BRT 利用の減少に伴って増加することが確かめられた。

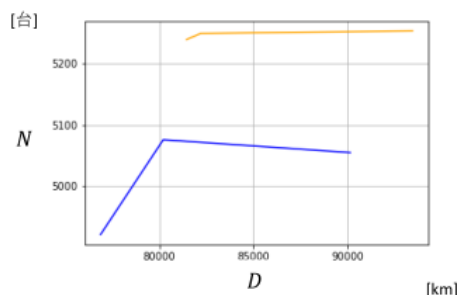
最後に、同様の状況下で BRT を無くして SAV のみの交通システムを最適化した場合（以下、SD と呼ぶ）を計算し、BRT 有の場合（以下、BD と呼ぶ）と比較する。図-4.13 (a)は SAV の総移動距離と旅行者の総旅行時間の関係を示しており、BRT を用いない SD の方が BRT を用いる BD よりも総旅行時間が小さくなっていることがわかる。SAV の総移動距離が小さくなると BD では BRT の利用が活発になるため、総旅行時間が増大しやすい。しかし、BD は SD とは違って、BRT が SAV の代替交通手段として機能するため、SAV の総移動距離を減少させやすいと考えられる。図(b)は SAV の総移動距離と総 SAV 台数の関係を表している。BD は

SD と比較して交通手段が多いため、総 SAV 台数は小さくなっていると言える。図(c)は SAV の総移動距離と総インフラ整備費用の関係を示しており、SAV の総移動距離が同一の場合で比較したとき、BD の方が SD よりも総インフラ整備費用が小さくなっていることがわかる。BD は BRT の利用によって総 SAV 台数が減少するため、BRT がない場合と比較すると渋滞が発生しにくくなり、総インフラ整備費用も減少すると考えられる。

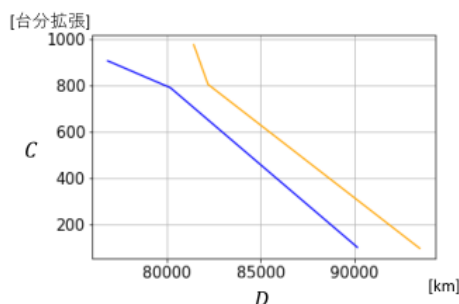
全旅行者の平均速度の推移を比較すると図-4.14 のようになる。平均速度はほぼ同じ傾向にあることがわかる。SAV の速度が時速 30km で BRT の速度が時速 20km で設定されているので、BRT の利用は平均速度を低下させる傾向にあるはずだが、それを相殺するほどの交通渋滞緩和効果があると考えられる。



(a) SAV の総移動距離と総旅行時間の関係



(b) SAV の総移動距離と総 SAV 台数の関係



(c) SAV の総移動距離と総インフラコストの関係

図-4.13 BD と SD のパレートフロンティアの比較

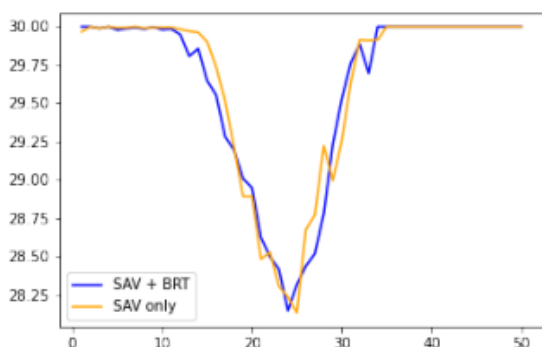


図-4.14 BRT の有無での旅行者平均速度の比較

(4) まとめ

本節では、BRT と SAV を統合して最適に運用する次世代モビリティシステムの最適計画手法を述べた。実データにもとづくケーススタディの結果、本手法は合理的な挙動を示すことが確認された。すなわち、SAV システムに BRT を導入することによって総 SAV 台数と SAV の総移動距離を減少させることが可能であることがわかった。また、BRT の利用が渋滞発生の抑制にも貢献することも確かめられた。

4.4 拠点間及び拠点への移動を対象とした次世代モビリティの有効性の検証・評価

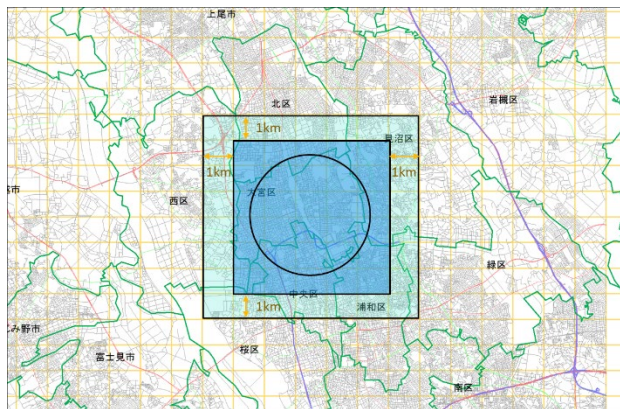
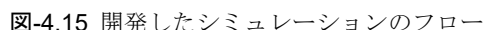
(1) シミュレータの要件

本研究では、次世代モビリティの有効性評価

に必要な機能要件を満たすために、適用するアクティビティシミュレータは MATSim⁴⁾とし、自動車交通流を再現するための連携モデルを SOUND⁵⁾とした。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関わるシミュレーション評価を行う場合、その機能要件としては以下の事項が挙げられる。

- 人単位で1日の交通行動を定義・模擬できること。
- 自動車だけでなく、バス、電車など複数の交通モードが扱えること。
- 各個人、各交通機関が逐次処理で時々刻々と変化する交通状況が再現できる動的モデルであること。
- 1日の行動を改善しながら最適条件下での結果を出力する day-to-day のシミュレーションモデルであること。
- 道路交通については、信号制御など各種交通規制が設定でき、かつ渋滞時の延伸など実態に近い交通流が再現可能であること。
- 経路選択行動モデルを内包しており、その場の交通状況に応じて経路選択を行う仕組みを有すること。

機能要件	MATSim	SOUND
人単位で1日の交通行動を定義・模擬できること。	○	×
自動車だけでなく、バス、電車など複数の交通モードが扱えること。	○	自動車、バスは定義可
各個人、各交通機関が逐次処理で時々刻々と変化する交通状況が再現できる動的モデルであること。	○	○
1日の行動を改善しながら最適条件下での結果を出力する day-to-day のシミュレーションモデルであること。	○	×
道路交通については、信号制御など各種交通規制が設定でき、かつ渋滞時の延伸など実態に近い交通流が再現可能であること。	×	○
経路選択行動モデルを内包しており、その場の交通状況に応じて経路選択を行う仕組みを有すること。	×	○



機能要件に対して、MATSim と SOUND がお互いの適用性課題について補完しあうことができると考えられる(表-4.6)。したがって、本研究においては、MATSim と SOUND の接続を前提に、連携フレームワークのプロトタイプ開発を行った(図-4.15)。

評価の基準となるベースケースは、埼玉県さいたま市の大宮駅とさいたま新都心駅を中心とする市街地を対象としたシミュレーションデータを適用した。図-4.16 に作成対象範囲を示す。ベースケース作成に要したデータ及び作成したベースケースの概要はそれぞれ、表-4.7、表-4.8 に示す。

項目	データ内容、作成方法等
ネットワークデータ	ノード、リンク（有効リンク）で構成される各モビリティの移動ネットワーク。道路交通ネットワーク、鉄道ネットワークは市販のデータを基に作成した。
施設データ	商店や学校など、各個人のトリップ起終点の施設情報。市販のデータを基に作成した。
公共交通データ	鉄道およびバスの運行に関するデータ（出発時刻、運行頻度、鉄道駅、バス停など）。鉄道の運行データは市販のデータを基に作成。バスの運行データは国土交通省の国土数値地図情報で公開されているバスルートデータ、およびバス停留所データから作成した。
交通規制、信号データ	主な交通規制は市販の地図データに収録されている情報（規制速度、方向規制など）を入力。信号データは、国土地理院の数値地図（国土基本情報）に収録されている信号位置情報を基に信号交差点を特定し、サイクル長 120 秒、各方向青時間スプリット、赤時間スプリットをそれぞれ 50% で設定した。
エージェントプランデータ	各エージェントの 1 日の行動プランをトリップチェーンで定義するデータ。移動開始目標時刻、発生場所と集中場所、移動手段、車の所持等を定義する。三谷ら ⁶⁾ の研究成果で作成された手法を用いて作成し、その後シミュレーション結果と実測結果を比較しながらシミュレーション対象地域の状況に合うようにパラメータを調整した。

表-4.8 ベースケース概要

項目	内容
対象範囲	さいたま市の大宮駅とさいたま新都心駅を中心とする市街地。再現エリアの全域を内包する 5km×6km 四方のエリアを検討エリア、その周囲 1km のメッシュ領域をバッファエリア。
時間帯	午前 4:00～翌午前 4:00 (24 時間)
総エージェント数 (プラン数)	940530
主要交通モード	電車、バス、自動車、徒歩
ネットワーク規模	ノード数：54671 リンク数：116367

表-4.9 シナリオケース概要

項目	内容
入力データ	大宮エリアベースケース (大宮駅を中心とする東西約 4km 四方)
シミュレーション時間	4:00～12:00 (8 時間)
BRT、SAV の設定	4.3 における大宮を対象としたケーススタディから求めた解 (SAV 経路と便数) を適用。適用時間帯：ピーク時の 7:30～8:30 に車両が出発するスケジュール。運行頻度：BRT (乗車定員 60 台とした) は 8 分に 1 台、SAV (乗車定員は 10 人とした) は 2 分に 1 台の頻度で出発。乗降場所：BRT は 500-1000m に 1 か所、SAV は 250-500m に 1 か所を目安に設定。
評価方法	主要駅 (大宮駅、さいたま新都心駅、北与野駅) を利用するトリップ (PT 利用者) の比較 ・距離分布 (ヒストグラム) ・旅行時間分布 (ヒートマップ) ・乗降場所・乗り換え場所 分析対象：7:00～9:00 の乗降者 比較：ベースケース vs SAV 導入ケース

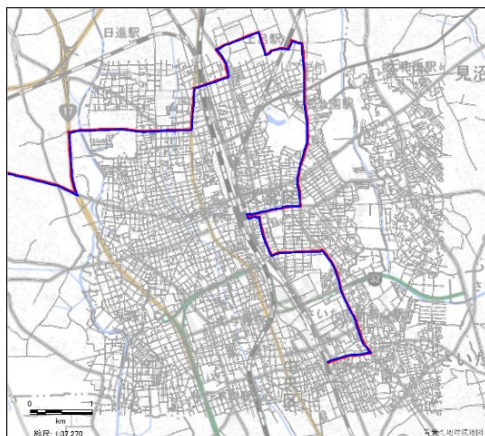


図-4.17 BRT の走行経路

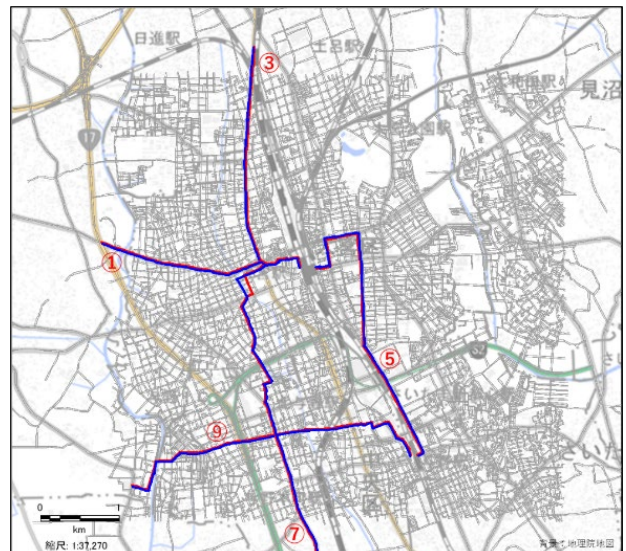


図-4.18 SAV の走行経路 (1)

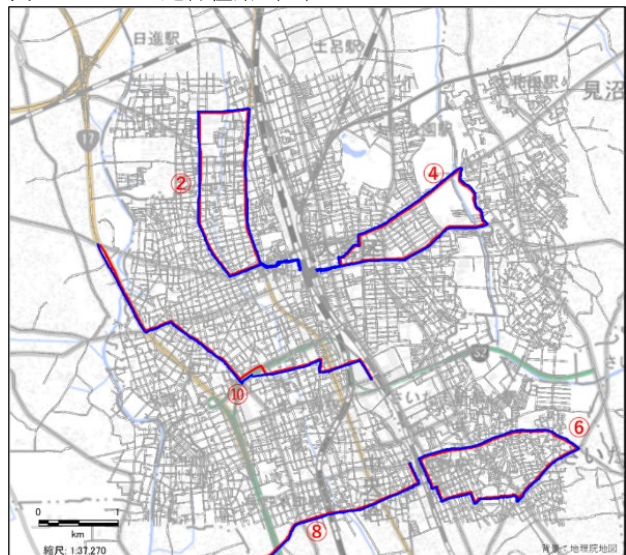


図-4.19 SAV の走行経路 (2)

(3) シナリオケース

表-4.9 にシナリオケースの設定を示す。本研究では、ラストワンマイルの移動を支援するための共有型自動運転システムとして、4.3 に示した BRT(Bus Rapid Transit)と SAV (Shared Autonomous Vehicle) を導入するケースを設定した。

BRT および SAV の設定については、4.3 の分析結果を参考に走行ルートと運行頻度を設定した。作成したシナリオは、主に大宮駅、北与野駅、さいたま新都心駅を朝ピークに利用する個人の行動を対象としており、各駅から対象地域内への移動、もしくは、対象地域内の拠点から各駅への移動に対して利便性向上のためのモビリティサービスを導入するという前提とした。図-4.17 に BRT の運行ルートを示す。図-4.18、図-4.19 に SAV の移動ルートを示す。

(4) シナリオケースの評価

BRT/SAV 導入ケースはベースケースに対して対象エージェント数(図-4.20)が57.1%増加したのに対して、総移動距離(図-4.21)は53.3%の増加となっており、1トリップ当たりの平均移動距離(図-4.22)は2.4%減少する結果となった。1トリップ当たりの平均旅行時間(図-4.23)は25.4%の減少となった。平均旅行時間が減少しており、BRT 及び SAV の導入効果が得られていると考えられる。

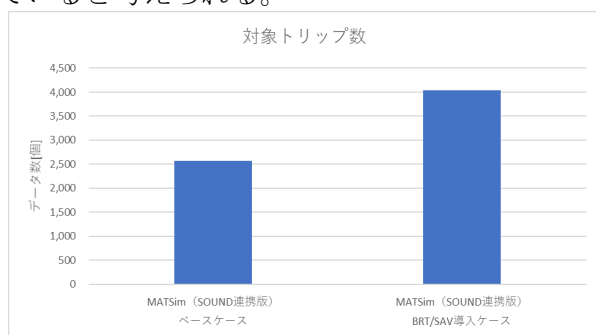


図-4.20 対象トリップ数

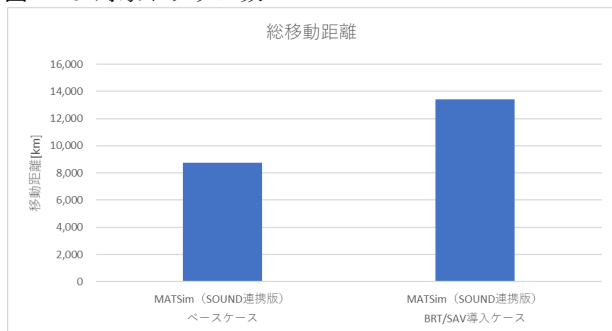


図-4.21 総移動距離

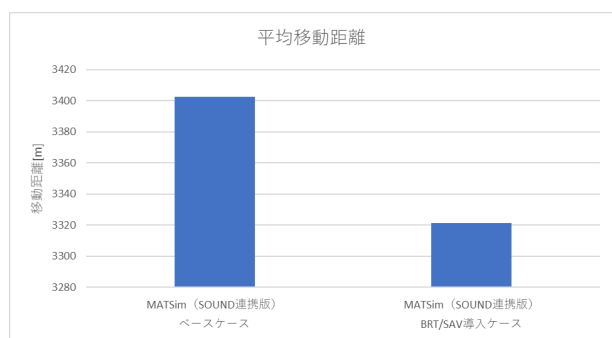


図-4.22 1トリップ当たり平均移動距離

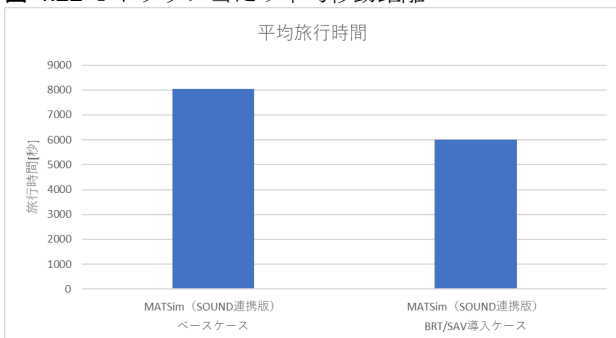


図-4.23 1トリップあたり平均旅行時間

主な移動手段別での旅行距離を分析した。各エージェントの移動手段(バス、SAB、BRT、電車、徒歩)の中で、徒歩を除く最も移動距離の長い移動手段を代表移動手段として集計をした。移動手段が徒歩のみである場合には代表移動手段を徒歩として集計した。

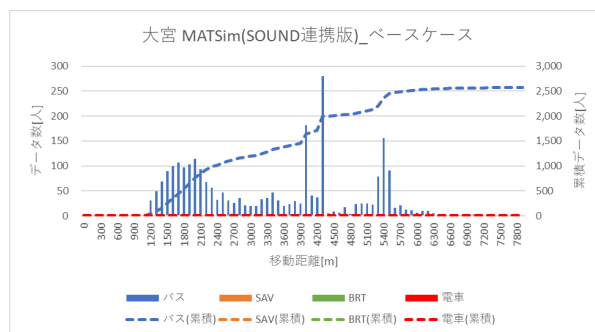


図-4.24 移動距離の構成 (大宮駅): ベースケース

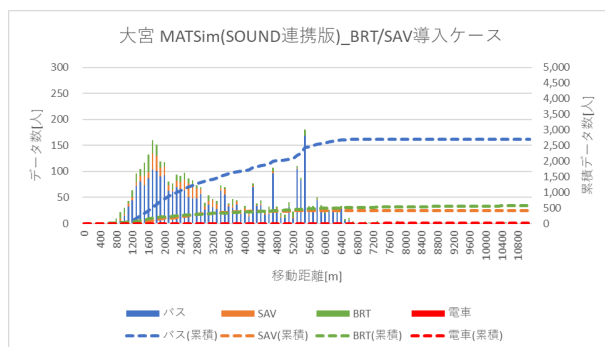


図-4.25 移動距離の構成 (大宮駅): BRT/SAV導入ケース

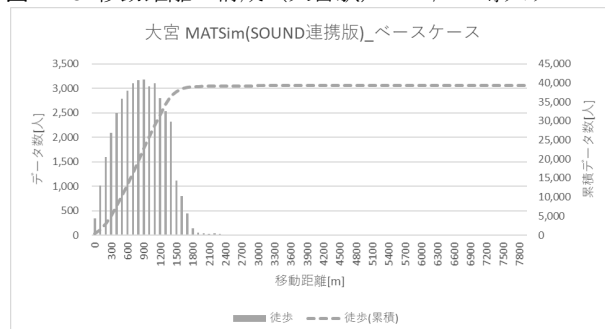


図-4.26 移動距離の構成 (大宮駅・徒歩): ベースケース

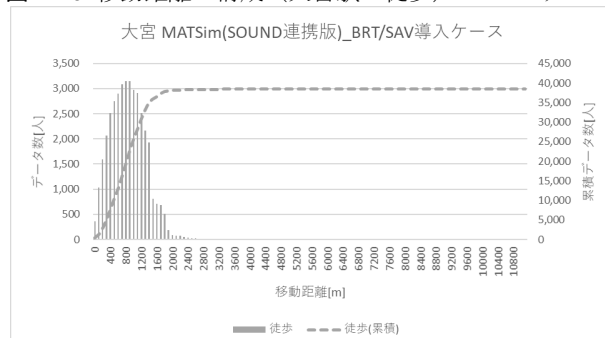


図-4.27 移動距離の構成 (大宮駅・徒歩): BRT/SAV導入ケース

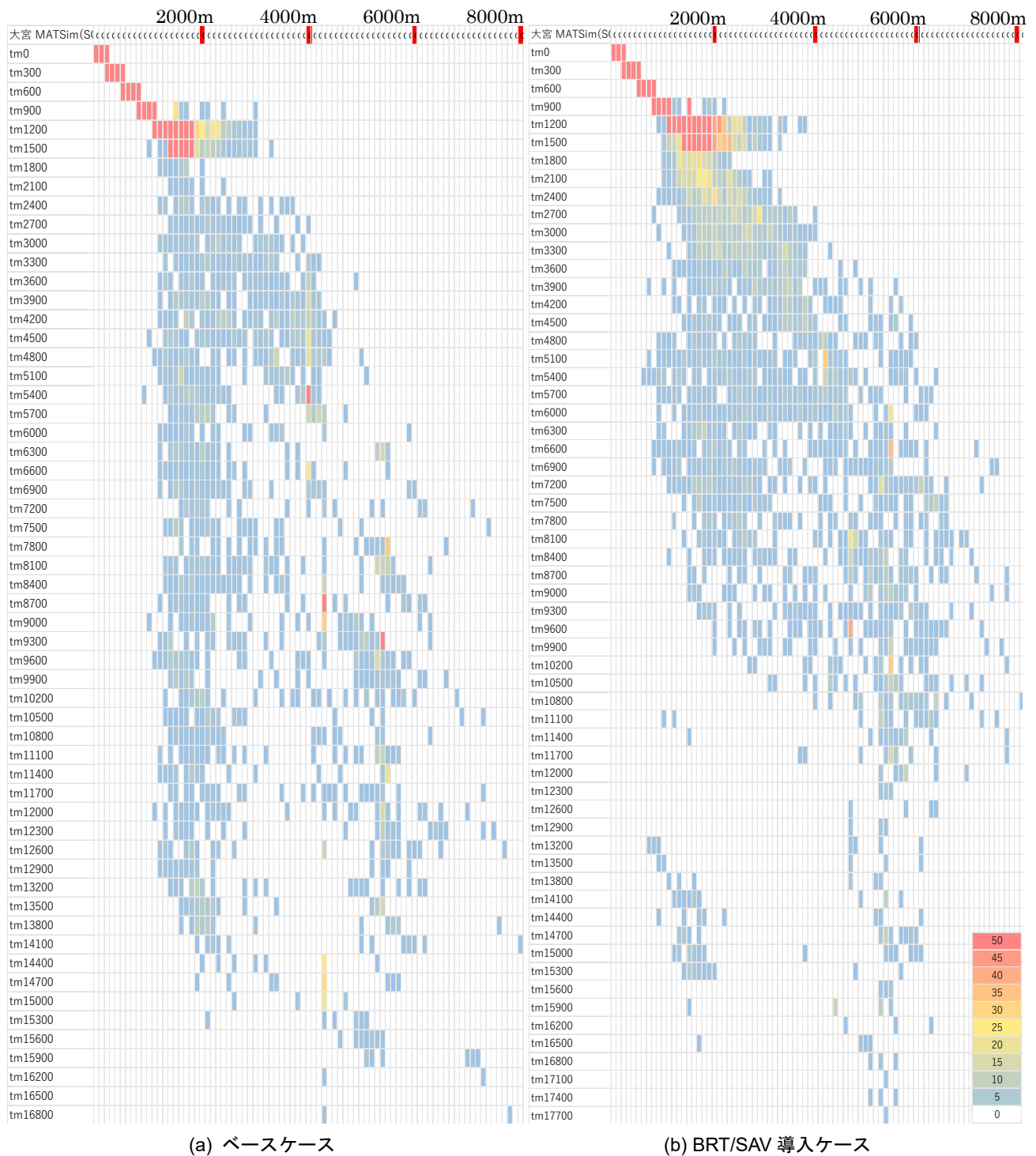


図-4.28 旅行時間ヒートマップ（横軸距離帯別[100m]、縦軸旅行時間帯別[300s]、大宮駅利用）

代表移動手段が徒歩以外での各主要駅でのケース別移動距離分布を図-4.24・図-4.25に示す。代表移動手段が徒歩のエージェントは対象者数が他の移動手段と比較してスケールが大きく異なっていたために図-4.26・図-4.27に分けて記載した。

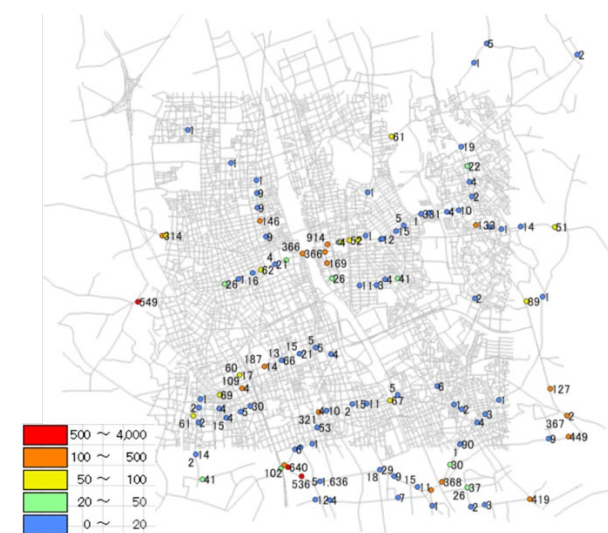
ベースケースにおけるバスによる移動は1000m程度の移動からとなっており、BRT及びSAVを導入することでバス利用の一部が

SAV、BRTに代替する結果となった。ここで、BRTは600mの短距離から12000mの長距離にかけて利用されているのに対して、SAVは1000mから7000mのバスで利用されていた距離をカバーする結果となった。徒歩による移動の分布では徒歩移動がネットワーク構造の影響を受けないのでいずれのケースにおいても800m辺りでピークとなっており大きな変化は見られなかった。

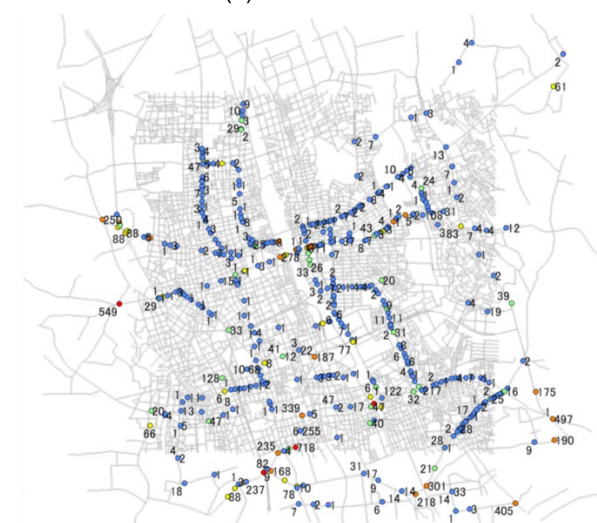
発生点での出発時刻から主要駅に到着するまでにかかる旅行時間と、主要駅を降車してから目的地に到着するまでにかかる旅行時間を移動距離帯別のヒートマップで分析した（図-4.28）。徒歩移動が多い1000m以下では、ベースケースと導入ケースとの間で差がない。一方で、20分から30分で移動できる距離帯が増えていることがわかり、1時間以内に到達できる人数も増加していることが読み取れる。

表-4.10 路線バス、BRTSAV 利用者数総計（7：00～9：00）

	路線バス	BRT	SAV	合計
ベースケース	11,236	0	0	11,236
BRT/SAV 導入ケース	11,778	1797	2,604	16,179



(a) ベースケース



(b) BRT/SAV 導入ケース

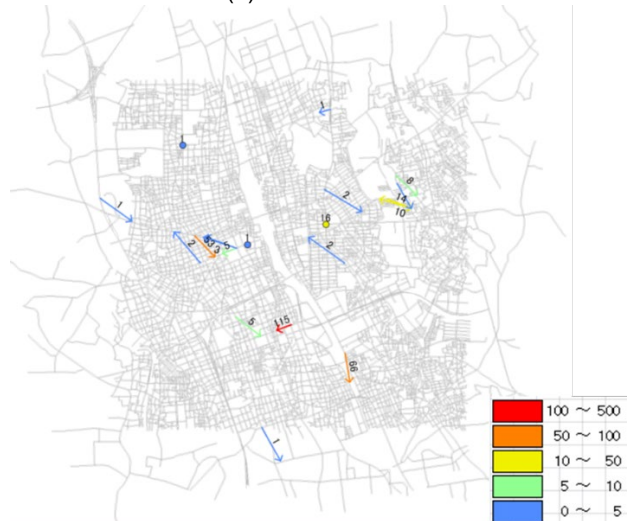
図-4.29 乗降場所別利用者数の比較

乗降場所利用者数では、分析対象の7時～9時の時間帯に駅を利用する全エージェントを対象にして、各路線及びバス停での利用状況を分析し、BRT および SAV の導入による行動の変化について分析を行った。表-4.10 に BRT、SAV の利用者数の総計を示す。BRT/SAV が導入されるケースにおいて利用者数の増加（4943人）が確認された。また、図-4.29 では、ベースケースでバスの運行がない地域でも BRT/SAV 導入ケースで多数の利用者を確認できる地域があり、次世代の交通手段を用いた公共交通利用に関して潜在的な需要があることが示唆される。

乗り換え場所の分析では、各エージェントの移動履歴から、路線バス、BRT、SAV について複数の路線を乗り継いで移動する箇所と回数をカウントし、地図上に可視化した。図-4.30 に



(a) ベースケース



(b) BRT/SAV 導入ケース

図-4.30 乗降場所別乗り換え回数の比較

乗り換え回数を比較した結果を示す。両モデルともに BRT/SAV 導入ケースは乗り換え回数が広い範囲で行われていることが確認できた。ベースケースにおいては路線バスのみの運行ではあるが、BRT/SAV 導入によってより公共交通の選択肢が広がり、利便性が向上して目的地までの旅行時間短縮につながり、各エージェントの行動に路線バス、BRT、SAV の積極的利用のインセンティブが働いていると考えられる。

(5) まとめ

以上の分析から、BRT/SAV 導入による効果について得られた成果を以下にまとめた。なお、シナリオケースの評価基準となるベースケースは、評価エリア全体で渋滞・混雑しており、速度低下が起こっている交通状況であることに留意すると、移動時間の観点で、比較的短距離（1～2km 程度）のトリップを行うエージェントはバスや BRT/SAV が利用しにくい環境下でのシミュレーション実験であることを前提に結果を評価する必要がある。

- マクロ指標分析において、分析対象時間帯における駅利用者の総トリップ数は、BRT/SAV を追加導入した結果、増加していることが確認された。また、総トリップ数の増加に伴って総移動距離、総旅行時間も増加する結果となった。1 トリップ当たりの旅行時間に換算すると、BRT/SAV の追加導入ケースの方が短くなることがわかった。したがって、BRT/SAV の追加導入によって駅利用に関わるアクティビティが増加し、かつ旅行時間短縮によって目的地あるいは駅へのアクセスの質が向上していることが確認された。
- 移動距離分布による分析においては、BRT/SAV の追加導入によって比較的短距離のトリップを行うエージェントを SAV が担当し、一方、BRT は長距離から短距離トリップまで幅広く輸送を担当している状況が確認された。このことから、BRT および SAV それぞれが対象とする各個人の移動に対して適切に運用されたと考えられる。
- 旅行時間分布による分析においては、移動距離分布と同様に BRT/SAV の追加導入によって比較的短時間で移動するエージェントを SAV が担当し、長距離から短距離トリップまで幅広く BRT が担当していることが確認された。さらに、BRT/SAV を追加導入することによって全体の旅行時間分布も

短くなる傾向にあり、予定通りに目的地へ到着するという視点での利便性向上がみられた。

- 乗降場所利用分布による分析においては、BRT/SAV の追加導入によって市内の公共交通（路線バス）の利用者数が増加するバス停も確認され、市内の公共交通の促進にも寄与している状況が確認された。路線バスの利用者数に対して SAV/BRT の利用者数は少ないものの、路線バスの運行路線とは異なる路線をカバーしていることや、運行頻度もピーク時にあわせて路線バスよりも高い設定となっており、既存の主要な路線の効率的な利用に寄与しているものと考えられる。また、動的に変化する交通状況下において、混雑が少なく目的地付近にある程度予定通りに到着できるような路線は SAV の運用に有利であると考えられる。あるいは、SAV が交通状況に応じて経路選択するような運用方法によってより利便性を高められる可能性があることがわかった。
- 乗り換え場所分析においては、BRT/SAV を追加導入したシナリオケースで現況ケースに比べて乗り換え回数と場所が増加している状況が確認された。この分析においても、乗降場所利用分布による分析と同様、BRT/SAV の導入が公共交通の効率的利用に寄与していると考えられる。

参考文献

- 1) さいたま市：シェア型マルチモビリティの実証実験、<https://www.city.saitama.jp/001/010/018/003/p084263.html> (2022/5/7 アクセス)
- 2) 国土交通省関東地方整備局：記者発表資料「さいたま新都心駅周辺の公道において「自動運転サービス」の実証実験を実施します」、https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000802903.pdf (2022/5/7 アクセス)
- 3) 森川高行，山田菊子：系列相関を持つ RP データと SP データを同時に用いた離散型選択モデルの推定法，土木学会論文集，476(IV-21)，pp.11-18，1993.
- 4) Horni, A et al. (eds.): The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. London: Ubiquity Press. DOI: <https://doi.org/10.5334/baw>, 2016.
- 5) 株式会社アイ・トランスポート・ラボ：SOUND 製品情報，<https://www.i-transportlab.jp/products/sound/> (2022/5/7 アクセス)
- 6) 三谷卓摩，PhathinanTHAITHATKUL，日下部貴彦：アクティビティベースドシミュレーションのための社会経済属性データ作成手法の提案．土木計画学研究発表会・講演集，富山，2019.

第5章 研究成果のとりまとめ

5.1 成果の一覧

本研究開発での開発手法及び手法を用いた分析による知見をまとめる。開発手法の一覧は以下である。

- 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
 - ・ プローブデータを用いた拠点の自動抽出手法
 - ・ ビックデータを用いた拠点の類型化手法
 - ・ 拠点に関する指標の可視化手法
- 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
 - ・ 中山間地域での BLE を用いた交通行動データ収集手法
 - ・ BLE を用いた交通行動データを用いた交通需要推計手法
 - ・ 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
- 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
 - ・ 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 調査手法
 - ・ 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
 - ・ 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

これらの一連の手法を用いて得られた知見を、以下にまとめる。

(1) 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

プローブデータを用いた拠点の自動抽出手法では、提案手法は、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ことがわかり、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、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現状を踏まえたデータ駆動での拠点候補抽出の方法が構築できた。

ビックデータを用いた拠点の類型化手法では、道の駅等の道路上の拠点は、来訪需要が特定の日付・時間帯に偏る傾向があることが明らかになった。このような特徴から、次世代モビリティの地域内の拠点を形成するためには、時間的な偏在に対応できるようなサービスとする、もしくは偏りが少ないターゲットに対してのみサービスを提供するなどの対応が必要となりうる。逆に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。

(2) 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

本研究で対象とした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)では、地域間交通を拠点間交通としてまとめて輸送し、ファースト・ラストワンマイル交通を自動運転車両で担う形態の交通システムは有効ではないことが確認できた。これは、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バス輸送が効率的とならないという結果

であり、今後の施策検討では、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ことを示唆した。バス等の地域間の交通よりも乗合タクシーやSAV(Shared Autonomous Vehicle)が有効となることもあり、既往の交通手段にとらわれず、地域の交通計画の将来像を描くことの重要性が示唆される結果となった。一方で、このことにより、計画の実施に当たっては、既存の事業者を含めた地域公共交通のあり方やその担い手について課題があることが想定される。

(3) 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

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 調査手法では、次世代モビリティに対する利用者の行動及び調査について下記の知見が得られた。

- ① 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ことで、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。具体的には、
 - ・ 自動運転バス、パーソナルモビリティは、乗車体験後に効用が低くなる傾向がある（試乗前は過大評価）
 - ・ 小型電動自動車、シェアサイクルは、乗車体験後に効用が大きくなる傾向がある（試乗前は過小評価）
 - ・ シェアスクーターの利用に対する効用は個人差が特に大きい
 - ・ シェアサイクル、パーソナルモビリティは比較的効用の個人差が小さい
- ② 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
- ③ 単位時間当たりの一般化費用は、小型電気自動車、シェアサイクル、シェアバイク、自動運転バス、パーソナルモビリティの順に大きくなる
- ④ 定数項の費用換算値は、自動運転バス、小

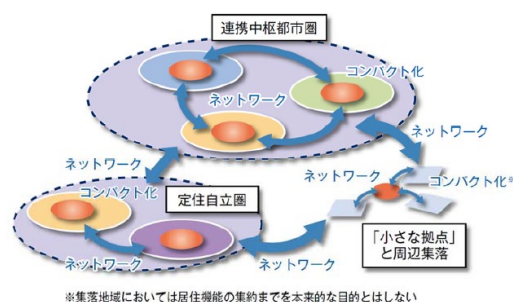
型電気自動車、シェアサイクル、シェアバイク、シェアパーソナルモビリティの順に大きくなる

都市部を対象とした結節点の計画手法検討では、都市部では、地域間を移動するBRT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。

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を評価できることを確認した。

5.2 道路政策での活用

本研究では、地域の拠点等を結節点とした次世代モビリティのネットワーク化を視野にいれ、結節点整備に必要な要素技術を構築してきた。これは、新たな国土形成計画¹⁾に示されている「コンパクト+ネットワーク」(図-5.1)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である。このことは、対象とする交通手段は異なるものの、過年度課題の「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」²⁾にも共通する思想であり、当該研究課題で示された、「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



出典：新たな国土形成計画（全国計画）
図-5.1 「コンパクト+ネットワーク」のイメージ

び⑦での活用が想定される。プローブデータを用いた拠点の自動抽出手法は、近年蓄積が加速しているETC2.0データを活用し、各地域の拠点となりうる候補施設を網羅的に列挙することに活用でき、①の過程でデータをエビデンスとした候補群の抽出に寄与する。「ビックデータを用いた拠点の類型化手法」は、①の過程で、全国統一の基準で拠点の特性を把握したうえで、現状の拠点の利用状況や人流などの需要の特徴を俯瞰することに役立つ。また、②で地域の状況把握を行う際にも、本手法での需要パターンを用いることで全国での類似の拠点を検索することが容易となることから、このような拠点での調査内容等の先行事例を参考にすることで、課題の把握等がより精緻に行えることが期待できる。「拠点に関する指標の可視化手法」は、①②の過程で分析者、実務者が上記解析結果を直観的に把握することや、⑦の過程で時系列での変動をとらえるのに用いることが想定される。

「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」で開発した方法論は、③④での活用が想定される。「中山間地域でのBLEを用いた交通行動データ収集手法」・「BLEを用いた交通行動データを用いた交通需要推計手法」は、③での整備計画を策定する際に、中山間地域でのより精緻な需要把握を行うことにより計画策定や評価の前提となる条件を整備することに寄与する。特にパーソントリップ調査や大都市交通センサスが実施されない中山間地域では、マルチモードの交通需要を把握する手法に乏しく、また、大都市のような大量の需要が発生しないため、ある程度のサンプル数の対象者を継続的に観測する技術が必要となり、そのための一手法を構築できている。「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」は、整備計画に必要な評価指標を示したうえで、基幹バス等の整備の必要の有無や必要な自動運転車両やそれらの待機場所等の交通機関のサービス設計及び拠点の計画、施策評価に必要な数理計画手法を開発しており、③④での活用を想定している。

「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」で開発した方法論に関しても、iiと同様に③④での活用が想定される。「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調査手法」は、③④

での評価シミュレーションでの交通機関選択のパラメータに用いることが想定できるほか、対象地域での調査及びパラメータ推定結果の分析により受容されやすい交通手段やその状況について明らかにでき、整備計画に盛り込むべき次世代モビリティの選定に役立つ。「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」・「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」については、iiの中山間地域と同様に、基幹バス等の整備の必要の有無や必要な自動運転車両やそれらの待機場所等の交通機関のサービス設計及び拠点の計画、施策評価に用いることが見込まれる。

参考文献

- 1) 国土交通省：第二次国土形成計画（全国計画）（平成 27 年 8 月 14 日 閣 議 決 定 ） , https://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudokeikaku_fr3_000003.html (2022/5/7 アクセス)
- 2) 原田昇、他 13 名：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、道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート、No.29-2, 2020.

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 成果報告レポート No.31-2 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 2022.5