

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. 31-4

研究テーマ

自動運転とシェアリングが融合した
新しいモビリティサービスと
社会・都市・生活の未来についての研究開発

研究代表者：	熊本学園大学	教授	溝上	章志
共同研究者：	宮崎大学	准教授	嶋本	寛
	名古屋大学	特任准教授	金森	亮
	京都大学	准教授	藤見	俊夫
	熊本大学	助教	安藤	宏恵

令和5年5月26日

新道路技術会議

目次

研究概要（様式 3 を挿入）	1
第 1 章 はじめに	3
第 2 章 ライドシェアリングサービス導入実証実験や地域 MaaS 実証実験、実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析	4
2. 1 はじめに	4
2. 2 中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果の分析	6
2. 3 都市圏周辺部におけるライドシェアタクシーサービスによる MaaS の導入効果の分析	13
2. 4 地方都市におけるライドシェアリングサービスの導入効果の分析の成立可能性	21
2. 5 おわりに	27
第 3 章 MaaS や新たなモビリティ導入による需要予測と政策評価を支援する外部プログラムとの連携によるマルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用	29
3. 1 はじめに	29
3. 2 MAUMS の開発とその性能/妥当性検証	30
3. 3 MAUMS&SAVS 連携シミュレータによる荒尾おもやいタクシーの需要と運用の評価	32
3. 4 観測データを用いた MAUMS 内の転換モデルの同化	34
3. 5 おわりに	37
第 4 章 マクロシミュレーションモデルと数理モデルによる都心部駐車場やレベル 4 における自動運転車優先走行区間などの都市施設や道路空間の設計	39
4. 1 はじめに	39
4. 2 SAVs 運用による都心部駐車需要の予測と適正駐車容量の設定	40
4. 3 手動運転車と SAVs 混在下における SAV 走行区間設計モデルの構築	49
4. 4 連続的な自動運転車専用レーン整備モデルの構築と熊本都市圏への適用例	60
4. 5 MAUMS による自動運転車専用レーンの整備効果の詳細検討	66
4. 6 国内外の自動運転サービスの取組み状況	66
4. 7 おわりに	72
第 5 章 まとめ	75

5. 1	研究の総括	75
5. 2	道路政策の質の向上への貢献	75
5. 3	今後の展開	76

研究概要

【様式3】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」（平成31年度採択） 研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.31-4	自動運転とシェアリングが融合した新しいモビリティサービスと社会・都市・生活の未来についての研究開発	熊本学園大学 教授 溝上 章志

「自動運転」と「シェアリング」はSociety5.0を支える主要技術・経済概念である中、両者を統合した自動運転シェアリング（AVS: Autonomous Vehicle Sharing）サービスの導入を実現するため、AVSサービスが実装された場合のモビリティサービスと社会・都市・生活の変容についての検討を行うことを目的として、AVSサービスの導入に伴う都市中心部の適正駐車スペースの試算、AVSサービスの利用需要と効果を事前評価可能なシミュレーションモデルの開発、MaaS実証実験の実施とその効果分析、自動運転優先走行区間の設計方法の提案などを実施する研究開発

1. 研究の背景・目的

「自動運転」と「シェアリング」はSociety5.0を支える主要技術であり、経済概念である。両者が統合した自動運転シェアリング（AVS: Autonomous Vehicle Sharing）は究極のモビリティサービスを提供するであろう。本研究では、AVSサービスに対する市民の要望や社会的受容性、既存公共交通事業との関係、駐車場需要や都市構造・社会生活への影響など、AVSサービスが実装された後の総合的モビリティサービスのあり方と社会・都市・生活の変化・変容について、技術的・社会的側面から検討を行うことを目的とした。

2. 研究内容

図-1が研究の全体像であり、課題は以下である。

課題1: ライドシェアリングサービス導入実証実験や地域MaaS実証実験、実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析を行う。

課題2: MaaSや新たなモビリティ導入の需要予測と政策評価を支援する外部プログラムとの連携によるマルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用を行う。

課題3: マクロシミュレーションモデルや数理モデルを駆使して都心部の駐車場容量やレベル4における自動運転車優先走行区間・優先レーンを設計する。

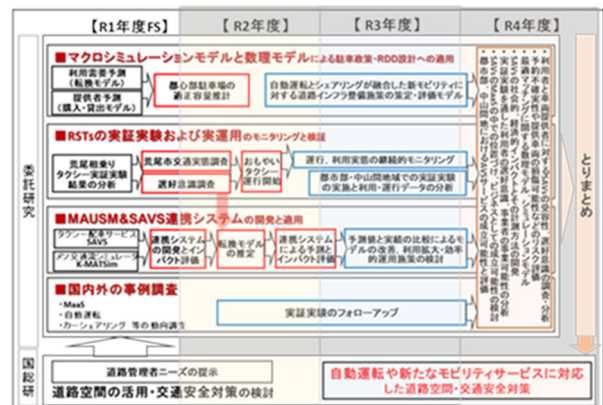


図-1 研究の全体像

3. 研究成果

課題1: 地域MaaS実証実験や実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析

中山間地、都市部乗換拠点、地方都市全域という、オンデマンド型モビリティサービスの活用場面について、実証実験や実装運行から得られた予約ログデータやアンケート調査データを用いて利用特性や導入効果を分析し、得られた知見から実装の際の要件などについて提言を行った。

課題2: マルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用

リアルタイム・オンデマンド・区域運行型の乗合いタクシーサービスの導入時の需要予測と評価を目的として、おもやいたクシー利用意向調査データから推定された手段転換モデルを組み込んだマルチエージェント交通シミュレーションモデル MAUMS (Multi-Agent Urban Mobility Simulator) と実際の最適配車システム SAVS (Smart Access Vehicle System) と連携させた MAUMS&SAVS シミュレータの利用可能性を検証した。さらに、MAUMS&SAVS から得られる予測値と実測値の誤差を改善するために、実測データを用いた MAUMS に内装される手段転換モデルのパラメータのデータ同化的手法を開発し、適用した。

課題3: 都心部の駐車場容量やレベル4における自動運転車優先走行区間・専用レーンの設計

自動運転車優先走行区間・専用レーンなどの走行設計領域を計画するための数理モデルの構築を行った。それらを熊本市圏道路ネットワークに適用して解の妥当性を確認することによって、計算可能性や適用可能性を検証した。ここでは、シェアリングと自動運転が統合したサービスが実現した場合の利用率の予測と優先走行区間を設定する時空間配分モデル、自動運転車両と手動運転車両の分担率が所与のもとで自動運転車の最適な専用走行レーンの設計モデルの2種類のモデルを構築した。また、後者については自動運転車の専用走行レーンを MAUMS のネットワークに設定して道路交通流への影響を分析した。

4. 主な発表論文

- 1) 上野優太, 八戸龍馬, 溝上章志: シェアモビリティによるモーダルコネクタが公共交通の選好に与える影響, 土木学会論文集D3, Vol.76, No.5, pp.I_869-I_878, 2021.
- 2) 八戸龍馬, 古賀逸人, 溝上章志: クルマの移動と駐車の実態, および都心部の適正駐車容量の試算, 土木学会論文集D3, Vol.77, No.1, pp.12-22, 2021.
- 3) 森 俊勝, 溝上章志, 金森 亮, 松館 渉: 交通シミュレーションモデルを用いた都市部への相乗りタクシー導入の評価, 土木学会論文集D3, Vol.76, No.5, pp.I-1321-I_1330, 2021.
- 4) 八戸龍馬, 森 俊勝, 溝上章志, 金森 亮, 松館 渉: オンデマンド・ライドシェア型荒尾「おもやいたクシー」の需要と運用に関するモデル, および実態分析, 土木学会論文集D3, Vol.77, No.5, pp.I_1023-I_1035, 2022.
- 5) Hayato Koga, Shoshi Mizokami, Ryoma Yae: Estimation of appropriate parking capacity based on actual conditions of moving and parking of vehicles, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.14, pp.2456-2469, 2022.
- 6) Toshikatsu Mori, Shoshi Mizokami, Ryo Kanamori, Qiang Liu: Developing an Agent-based Simulator Combining Mesoscopic Traffic Simulator with Dynamic Vehicle Allocation System to Evaluate a Ride-Sharing Service in Urban Area, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, pp.1-14, 2023.
- 7) 嶋本 寛, 松尾優輝: ライドシェアを考慮した時空間ネットワーク配分モデルの構築—トリップベースモデルとアクティビティベースモデルの比較—, 交通工学論文集, 9(2), pp.A_44-A_53, 2023.

5. 今後の展望

ライドシェアと自動運転が統合した新たなモビリティが実現した際の需要や効果の予測, およびその都市構造や生活行動への影響を明らかにするという当初の目的を達成するために, 今後取り組むべき研究課題としては下記のようなものが考えられよう。

- 1) 各地で実施されているシェアリングサービスやMaaSの実証実験情報の収集, および導入効果についてのメタ分析の実施
- 2) 実運行しているシェアリングサービスへの適用によるMAUMSの実用可能性の確認
- 3) 自動運転車両の性能や走行環境条件の中の道路条件を精緻に考慮した自動運転車優先走行区間や専用走行レーンの設定モデルの開発と適用
- 4) 自動運転シェアリング (AVS: Autonomous Vehicle Sharing) の普及によって変容すると思われる都市や社会や生活行動についての市民の意見収集と社会的受容性の把握

6. 道路政策の質の向上への寄与

自主開催のMaaSの実装に向けた政策・技術検討シンポジウムだけでなく, 公的組織が主催する委員会やシンポジウム, 学会での企画セッションなどで, 研究成果に基づくMaaS実装に向けた課題や方策に対する発信を行ってきた。これらの成果が評価され, 研究代表者の溝上は, 九州地域における民間企業や自治体の求めるMaaSや自動運転技術に関するニーズと学術シーズとをマッチングすることを目的として社団法人EMoBIAが組織した「九州アカデミーITSモビリティ研究会」の座長に指名され, 活動を開始している。そこでは, 地域における移動課題の解決や経済活性化を目指すスマートモビリティチャレンジやSIPの目指すスマートモビリティプラットフォームの構築の趣旨に沿って, 理論研究や実証研究を行うと同時に, 実装に向けたビジネ化に取り組んでいくことになるなど, 本研究で得られた研究成果は実務へ反映され, 道路政策の質の向上へ貢献している。

7. ホームページ等

現在のところ, 専用のホームページ等は開設していない。今後, MAUMS の性能や機能, 適用事例について公開し, 交通流動解析や交通政策評価に広く適用してもらう計画である。

第1章 はじめに

「自動運転」と「シェアリング」はSociety5.0を支える主要技術であり、経済概念である。両者が統合した自動運転シェアリング（AVS: Autonomous Vehicle Sharing）は究極のモビリティサービスを提供するであろう。本研究では、AVSサービスに対する市民の要望や社会的受容性、既存公共交通事業との関係、駐車場需要や都市構造・社会生活への影響など、AVSサービスが実装された後の総合的モビリティサービスのあり方と社会・都市・生活の変化・変容について、技術的・社会的側面から検討を行うことを目的とした。

研究の全体像を図-1.1に示し、本研究の具体

的課題を以下に示す。

課題1：ライドシェアリングサービス導入実証実験や地域MaaS実証実験、実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析を行う。

課題2：MaaSや新たなモビリティ導入の需要予測と政策評価を支援する外部プログラムとの連携によるマルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用を行う。

課題3：マクロシミュレーションモデルや数理モデルを駆使して都心部の駐車場容量やレベル4における自動運転車優先走行区間・優先レーン进行を設計する。

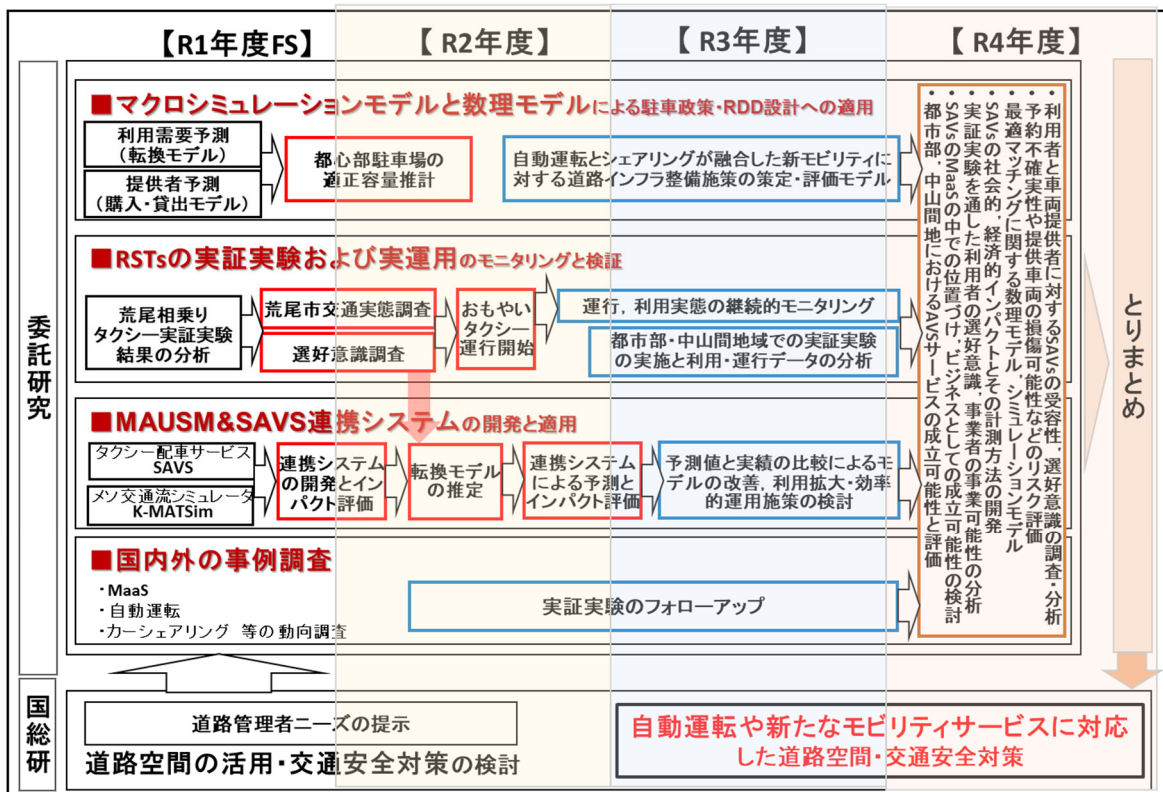


図-1.1 研究の全体像

第2章 ライドシェアリングサービス導入実証実験や地域MaaS実証実験, 実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析

2.1 はじめに

新たなモビリティサービスは既存のサービスや将来的に導入可能なサービスを含め、タイプや貸・借主体の組み合わせ、何をシェアするかなどの組み合わせによって、図-2.1.1のように分類できる¹⁾。同図中の日本の現状・課題にも示されている通り、いずれのモビリティサービスにおいても、海外では既に実装されているにもかかわらず、我が国ではビジネス実体面でも

制度上の面でも多くの解決すべき課題が残っている。

本章で対象としているのはデマンド交通であり、図-2.1.2に示すように、これらには1) 中山間地域のように公共交通空白地域における自家用有償旅客運送のようなサービス、2) 幹線公共交通サービスへの乗り換え拠点から1マイルのエリアにおけるフィーダーサービス、3) 面的な公共交通サービスが不足している一般市町村の公共交通不便地域における幹線公

日本において課題が見られるモビリティサービス			海外事例	日本の現状・課題	▲: ビジネス実体面の課題あり ▲: 制度上の課題あり	
カーシェア	B2C ウェイフン型	ラウンドトリップ型	Switzerland Mobility(スイス)	-		
		ステーション型	Zipcar(米)	▲▲	①車両再配置コストの低減、 ②乗換専用駐車場の維持コストの低減 (P32)	
		フリーフロート型	car2go(独)	▲▲	①車両再配置コストの低減、 ②乗換専用駐車場の維持コストの低減 (P32)	
	C2C	Getaround(米)	▲▲	①サービスの制度上の位置付け、 ②安全性の確保・担保 (P33)		
デマンド交通	定路線型		-	-		
	準自由経路型(マイクロランジット)		Chariot(米)	▲▲	①運行事業者の採算性確保、 ②既存交通網との調整 (P34)	
	自由経路型	B2C	タクシー配車	mytaxi(独)	-	
		B2C	相乗りタクシー	mytaxi match(独)	▲▲	①マッチング効率の向上、②法的な位置づけの整理と本格制度化、 ③ルート・料金の算定手法の在り方の整理 (P35)
		C2C	ライドヘイリング	Uber X(米)	▲▲	①自家用有償旅客運送制度の精査 (P37)
		C2C	カープーリング	BlaBlaCar(仏)	-	
マルチモーダルサービス		Whim(フィンランド)	▲	①マルチモーダルサービス事業の参入障壁の軽減、 ②中小規模の交通事業者の基礎的情報のデジタル化 (P39)		
物流	物流P2Pマッチング		cargomatic(米)	-		
	貨客混載		Amazon(米)	▲▲	①物流車両による混載運送の担い手の登場 (P41) ②旅客・貨物運送事業兼業(掛け持ち)の促進に向けたルール整備	
	ラストマイル配送無人化		Starship Technologies(米)	▲▲	①無人配送ビークル等の公道走行に向けたルール整備 (配送専用車両の安全性確保など) (P42)	
駐車場シェアリング		ParkNow(独)	-			
移動サービスと周辺サービスの連携		Uber Eats(米)	▲▲	①移動・非移動事業者間のデータ流通の促進、 ②移動サービスコストを賄うビジネスモデルの構築 (P43)		
コネクテッドカーサービス		Bosch(独)	▲▲	①データの取得・通信・利活用ルール確立、 ②遠隔車両診断結果の車検への活用 (P44)		

図-2.1.1 新たなモビリティサービス

(出展：第 660 回建設技術講習会での石田東生資料より転写)

公共交通路線の補完サービスなどの役割があるであろう。

これらに関連する熊本県下での実証実験や本格運行の事例から、それぞれのモビリティサービスに対する1)導入に至る地域の準備、検討のあり方、2)実証実験時の利用と運行の実態、3)利用者の評価・意向を明らかにする。その一方で、地域の特性や解決したい課題に即したモビリティサービスがあると考えられる。その中でも、第2節では自由経路型/C2Cのひとつである自家用有償旅客運送サービス、第3節では既存公共交通とB2C相乗りサービスとを連携させたマルチモーダルサービス、第4節では自由経路型/B2Cのひとつである相乗りタクシーサービスについて、これらの導入時に検討しておくべき事項について整理を行うことを目的としている。

本章では、第2節で中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果の分析を行っている。ここでは、熊本県上天草市教良木・内野河内地区で実施された自家用旅客運送「のれな号」実証実験時に行った移動実態と評価に関する調査から、ライドシェアサービスの成立可能性を明らかにした。それと同時に、時空間ネットワーク上におけるマッチングモデルを用いて、総効用を最大にするような運転者と同乗者との最適なマッチングパターンを求め、自家用有償旅客サービスへのライドシェアサー

ビスの成立可能性・有用性を検証している。

第3節では、2020年秋に実施した『商店街と連携したピアクレスMaaS実証実験』から得られた知見と実装に向けた課題」を副題として開催した「くまもと産MaaSの実装に向けた政策・技術検討シンポジウム」での講演と討議の内容をもとに、都市圏周辺部におけるライドシェアタクシーサービスと連携した地域MaaSの導入可能性とその課題について整理した。

第4節では、2020年10月に本格運行を開始した荒尾市おもやいタクシーの2年間の予約ログデータを用いて、利用と運行の実態を継続的に分析している。その結果、利用需要と投入台数によって決まる迎車待ち時間が利用需要を決める重要な要因となっていることや、利用距離が短距離化したために収入の増加率は利用需要の増加率ほど増加しないことなどを実証的に明らかにしており、これらの知見から得られる新たなモビリティサービス実装のための課題を整理している。

参考文献

- 1) 経済産業省:「IoTやAIが可能とする新しいモビリティサービスに関する研究会」中間整理,平成30年10月17日.
- 2) 藤岡健裕:ネクスト・モビリティ社のAI活用型オンデマンドバスの取組みについて.モビリティピッチ第3回,2021.

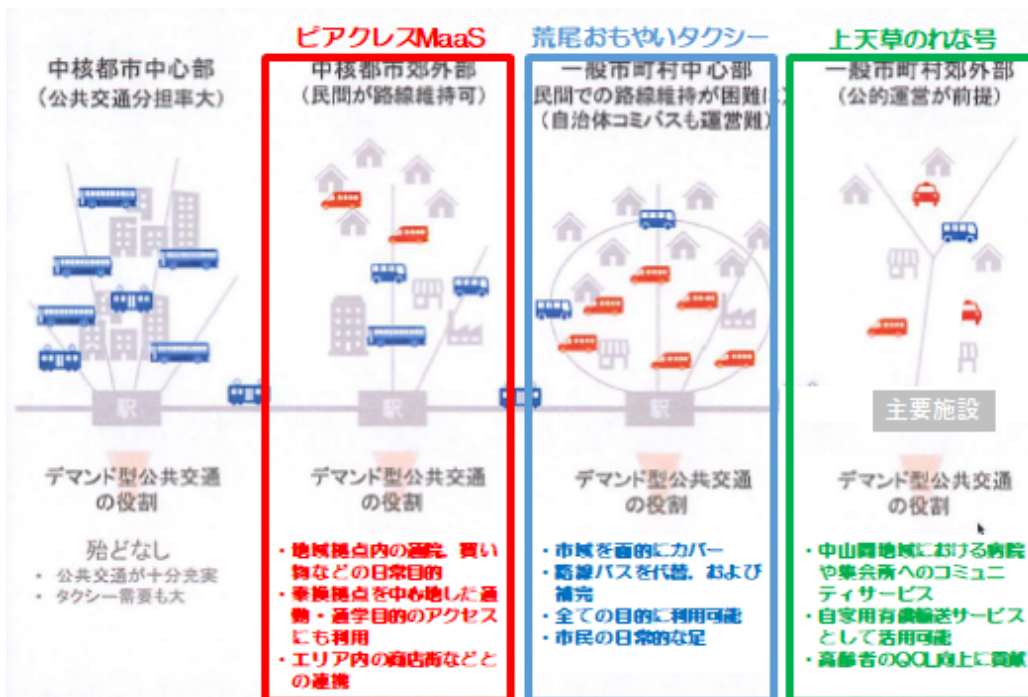


図-2.1.2 地域の特性や課題に即したデマンド交通の役割

(出展: 藤岡健裕 (Next Mobility Co. Ltd.):モビリティピッチ第3回の講演「ネクスト・モビリティ社のAI活用型オンデマンドバスの取組みについて」資料²⁾に溝上が一部加筆)

2.2 中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果の分析

本節では、熊本県上天草市において昨年度した移動・活動実態調査とライドシェアを対象としたマッチングモデルを用いて、中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果を分析する。

(1) 調査概要

本節では、熊本県上天草市において行われた自家用旅客運送実証実験にあわせて実施されたアンケート調査データをもとに、中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果を検証する。分析対象地域における実証実験とアンケート調査の概要は昨年度の報告書に記載しているので、ここでは分析対象地域と本節の分析で用いた移動・活動実態調査についてのみ説明する。

分析対象地域は、図-2.2.1に示す上天草市の教良木地区および内野河内地区であり、教良木地区から上天草総合病院への路線バス廃止の代替手段として、2021年8月2日から10月29日にかけて自家用旅客運送実証実験が行われた。

移動・活動実態調査は、自家用旅客運送実証実験終了後の2021年11月上旬から下旬にかけて実施された。その調査概要および移動・活動調査票はそれぞれ表-2.2.1、図-2.2.2に示す通りである。なお、移動・活動調査票において、活

動時刻調整の可能性を考慮するために、実際の移動・活動時刻だけでなく出発到着時刻の調整可能性と希望する出発・到着時刻との乖離もあわせて尋ねている。調査票の配布および回収は上天草市および教良木河内地区活性化協議会が実施し、回収率は63.4%と非常に多くの方に回答いただいた。

(2) マッチングモデルの概要

本節では、Shimamoto¹⁾が提案したライドシェアを対象としたマッチングモデルを用いて分析対象とする中山間地での相乗りサービスの成立可能性と導入効果を評価するが、ここではその概要を説明する。

a) モデルの前提条件

本節で用いるモデルの前提条件は以下の通りである。

まず、「ドライバー」と「ライダー」の2種類の主体を想定する。ドライバーは車両を保有しており、自由に移動できるものとする。ライダーは車両を保有しておらず、ドライバーの運転する自動車に同乗することにより目的地に移動するものとする。ただし、ドライバー自身を除いた車両容量以上のライダーは同乗できないものとする。

ドライバーおよびライダーは希望する活動場所および時間帯ごとの活動の効用を有しており、それらは活動前日に既知であるものとする。ただし、ドライバーおよびライダーは希



図-2.2.1 実証実験対象地区の公共交通路線網 (2021年4月版)

表-2.2.1 調査概要

項目	実施方法・内容等
調査対象	自家用旅客運送実証実験利用者
調査時期	2021年11月上旬～11月末
調査方法	調査票に記入（上天草市および教良木河内地区活性化協議会が配布・回収を実施）
調査票の内容	世帯票 ・ 世帯属性（居住地，家族構成，自動車保有状況など） 個人票（最大で2名の方が回答） ・ 個人属性（性別，年齢，運転免許の保有の有無，等） ・ 送迎に対する意識 ・ 実証実験中および実証実験後の平日の移動・活動状況，等
回収世帯数（回収率）	349世帯（63.4%）

図-2.2.2 地区住民を対象とした移動・活動実態調査票

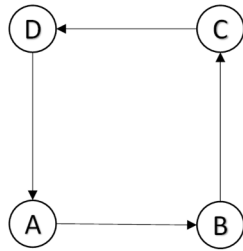
望するすべての活動を行わなくてもよいものとする。移動に際しては移動時間に比例する負の効用が，希望する活動場所以外での滞在に際しては滞在時間に比例した負の効用がそれぞれ生じるとする。また，簡単のため道路混雑は生じず移動時間は一定であるとする。さらに，利用者の乗降時間も簡単のため無視する。

以上の前提条件のもと，本研究では社会的なメリットが最大となるライドシェアサービスによる影響を評価することを念頭に置き，総効用が最大となるドライバーおよびライダーの移動・活動パターンを求めるモデルを構築する。

b) 時空間ネットワークの構築

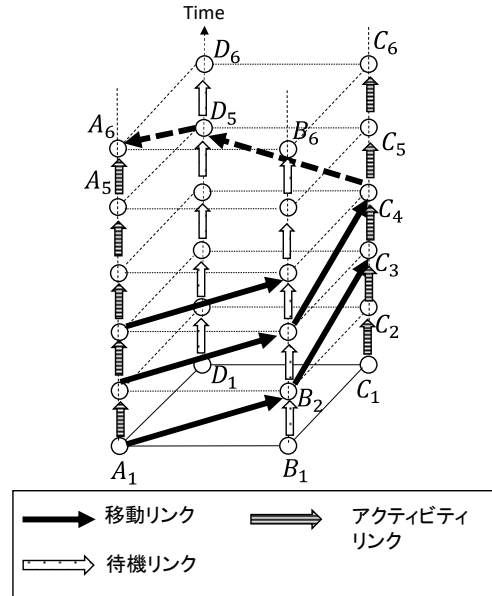
ライドシェアのサービスが成立するためには，ドライバーとライダーの移動が時空間的にマッチングされる必要がある。そこで，本研究では一般的な2次元ネットワークに時間軸を加えた時空間ネットワークにおいて，ドライバーおよびライダーの行動を記述する。図-2.2.3(a)に一般的な2次元ネットワークの例を示し，このネットワークを本研究で定義する時空間ネットワークに変換したものを図-2.2.3 (b)に示す。

時空間ネットワークにおけるノードは2次元ネットワークに存在するノードを時間帯ごとに定義したものであり， (i, t) （ただし i は2次元ネットワークにおけるノード番号， t はノードの時間帯）のように表記できる。リンクに関しては，効用を別々に付与するために「移動リンク」と「アクティビティリンク」，「待機リンク」の3種類のリンクを定義する。「移動リンク」は車両による移動を表すリンクであり，移動リンクの流出ノード，流入ノードをそれぞれ (i, t_1) ， (j, t_2) とすると $t_2 = t_1 + c_{ij}$ が成り立つ。なお， c_{ij} は2次元ネットワークにおける ij 間の移動時間であり，本研究では2次元ネットワーク上におけるノード間移動時間は時間帯幅 Δt の整数倍であるとする。「アクティビティリンク」は各ドライバーあるいはライダーの活動希望場所 i において隣接するノード (i, t) および $(i, t + \Delta t)$ を結ぶリンクであり，時刻 t から $t + \Delta t$ までの間に活動を行うことを表している。また，「待機リンク」は各ドライバーあるいはライダーの活動を希望しない場所 i において隣接するノード (i, t) および $(i, t + \Delta t)$ を結ぶリンクであり，時刻 t から $t + \Delta t$ までの間に待機することを表している。



※ノードAおよびCが活動希望場所であるとする

(a) 2次元ネットワークの例



(b) 時空間ネットワーク

図-2.2.3 時空間ネットワークへの変換

したがって、図-2.2.3(b)における $A_1 \rightarrow B_2 \rightarrow C_3 \rightarrow C_4 \rightarrow D_5 \rightarrow A_6$ は、時刻 1 にノード A を出発し、ノード B を経由して時刻 3 にノード C に到着し、そこで時刻 4 まで活動した後に、ノード D を経由して時刻 6 にノード A に戻るといふ行動を表している。

なお、希望する活動場所はドライバーあるいはライダーごとに異なるため、本研究で構築する時空間ネットワークはドライバーあるいはライダーごとに定義されることになる。ただし、時空間ネットワークにおけるノードリンクの接続関係はすべてのドライバー、ライダーで共通であり、後述する各リンクに負荷する効用のみがドライバー、ライダーごとに異なる。また、本研究で構築する時空間ネットワークでは、利用者が活動希望場所で活動を行うか待機するかの区別ができない。ただし、活動に対する効用が非負であれば活動を希望するノードにおける活動の効用は待機のそれよりも大きくなるため、本研究の枠組みでは活動を希望するノードにおいて利用者は待機することはない。なお、活動に対する効用が負値をとりうる場合は、2次元ネットワークのノードとは別に活動場所を表すダミーノードを設定し、ダミーノード間を結ぶリンクを活動リンクと定義すれば、利用者の活動希望場所での活動と潜在が明示的に区別可能となる。しかし、時空間ネットワークを構成するノード数およびリンク数が増加するという問題点を有している。

c) 記号表記

本節で用いる記号表記は、以下の通りである。

主体に関する集合

- D : ドライバーの集合
- R : ライダーの集合
- P : ドライバーとライダーの集合 ($D \cup R$)

時空間ネットワークに関する記号表記

- A_1 : 移動リンクの集合
- A_2^p : 利用者 $p \in P$ のアクティビティリンクの集合
- A_3^p : 利用者 $p \in P$ の待機リンクの集合
- A : 全リンク集合 ($A = A_1 \cup A_2^p \cup A_3^p, \forall p \in P$)
- I : ノードの集合
- $t(a)$: リンク $a \in A$ の流出ノード
- $h(a)$: リンク $a \in A$ の流入ノード
- $OUT(i)$: ノード $i \in I$ から流出するリンクの集合
- $IN(i)$: ノード $i \in I$ に流入するリンクの集合
- $k(a)$: リンク $a \in A_2$ に割り当てられた活動
- T : 時間帯数

状態量に関する記号表記

- τ_i : ノード i の時刻
- s_p : 利用者 $p \in P$ の活動開始ノード
- e_p : 利用者 $p \in P$ の活動終了ノード
- u_a^p : 利用者 $p \in P$ のリンク a の効用

- $mu_p^k(t)$: 利用者 $p \in P$ の活動 k に対する限界効用
 q_d : ドライバー $d \in D$ が保有する車両の自身を除いた乗車定員
 c_a : リンク $a \in A_1$ の所要時間
 Δt : STEN における単位時間幅
 θ_1 : 移動時間の活動に対する重み
 θ_2 : 待ち時間の活動に対する重み

決定変数に関する記号表記

- x_a^d : ドライバー $d \in D$ がリンク $a \in A$ を利用すれば 1, そうでなければ 0
 y_a^r : ライダー $r \in R$ がリンク $a \in A$ を利用すれば 1, そうでなければ 0

d) 定式化

本研究で構築するモデルは、ドライバーとライダーの総効用を最大にする整数線形計画問題として以下のように定式化できる。

$$\min_{x,y} Z = \sum_{d \in D} \sum_{a \in A} u_a^d x_a^d + \sum_{r \in R} \sum_{a \in A} u_a^r y_a^r \quad (1.2.1)$$

s.t.

$$\sum_{r \in R} y_a^r \leq \sum_{d \in D} q_d x_a^d, \forall a \in A_2 \quad (1.2.2)$$

$$\sum_{a \in OUT(s_d)} x_a^d = 1, \forall d \in D \# \quad (1.2.3)$$

$$\sum_{a \in IN(e_d)} x_a^d = 1, \forall d \in D \quad (1.2.4)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} x_a^d = \sum_{a \in IN(i)} x_a^d, \forall d \in D, \forall i \in \{l - s_d - e_d\} \quad (1.2.5)$$

$$\sum_{a \in OUT(s_r)} y_a^r = 1, \forall r \in R \quad (1.2.6)$$

$$\sum_{a \in IN(e_r)} y_a^r = 1, \forall r \in R \quad (1.2.7)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} y_a^r = \sum_{a \in IN(i)} y_a^r, \forall r \in R, \forall i \in \{l - s_r - e_r\} \quad (1.2.8)$$

$$x_a^d \in \{0,1\}, \forall a \in A, \forall d \in D \quad (1.2.9)$$

$$y_a^r \in \{0,1\}, \forall a \in A, \forall r \in R \quad (1.2.10)$$

制約条件の式(1.2.2)は、移動リンクにおけるライダーの利用人数はドライバーが運転する車両の空き容量以下であることを示しており、ライドシェアの成立条件を表している。式(1.2.3)および(1.2.4)はドライバーは所与の活動開始ノードから活動を開始し、活動終了ノードで活動を終わることを表している。式(1.2.5)はドライバーは活動開始ノード、終了ノード以外から発生・集中が行われないことを表している。したがって、式(1.2.3)から(1.2.5)により、ドライバーの保存則を表している。同様に、式(1.2.6)から(1.2.8)によりライダーの保存則を表している。最後に、式(1.2.9)および式(1.2.10)は決定変数 x_a^d および y_a^r は 0 または 1 の値をとることを示している。

e) リンク効用の設定

b) で構築した STEN における各リンクに対する効用関数の設定方法を述べる。まず、移動リンク、および滞在リンクには時間に比例した(負)効用が発生するととして、それぞれの効用を以下のように設定する。

$$u_a^p = -\theta_1 c_a, \forall a \in A_1, \forall p \in P \quad (1.2.11)$$

$$u_a^p = -\theta_2 \Delta t, \forall a \in A_1^p, \forall p \in P \quad (1.2.12)$$

活動リンクの効用の設定に際して、実際の出発・到着時刻および実際の時刻からの乖離時間の回答を用いて、図-2.2.4 のように設定した。すなわち、希望する時間帯に外出先、あるいは自宅で活動する場合、それぞれ一定の効用 U_{max}^1 , U_{max}^2 が発生すると仮定する(図-2.2.4(a))。なお、アンケート調査では実際の出発・到着時刻に加えて自動車を運転して移動した人には早く(遅く)出発することが可能であったか、それ以外の手段で移動した人には実際の出発(到着)時刻と希望時刻との乖離を尋ねている。これらの項目に対して、目的地への到着を遅らせることが可能と回答した場合、あるいは目的地を出発する時刻を早めることが可能と回答した場合には、その時間分の効用を差し引いて設定した(図-2.2.4(b))。

(3) 分析条件

a) 計算対象ネットワークおよび分析条件

本節で用いるモデルは、時空間ネットワークにおける整数計画問題として定式化されるため、一般に計算負荷が大きい。したがって、分析対象地域を図-2.2.5(a)に示す9つのゾーンにわけ、図-2.2.5(b)に示すようなネットワークを用いて分析する。なお、1時間帯幅を $\Delta t = 5$ (分) とし、図中のリンクに付与された数字は移動時

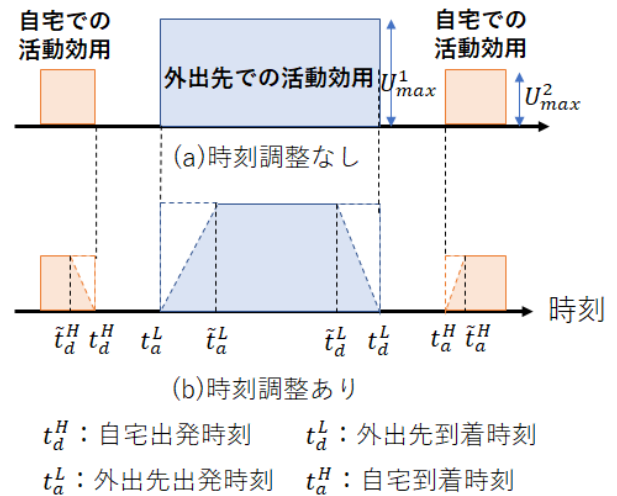
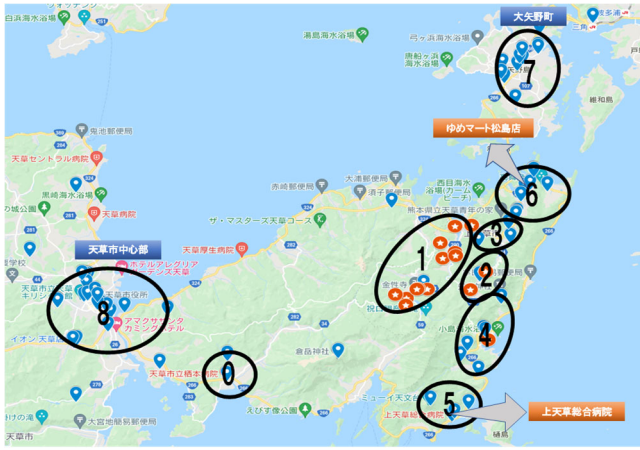
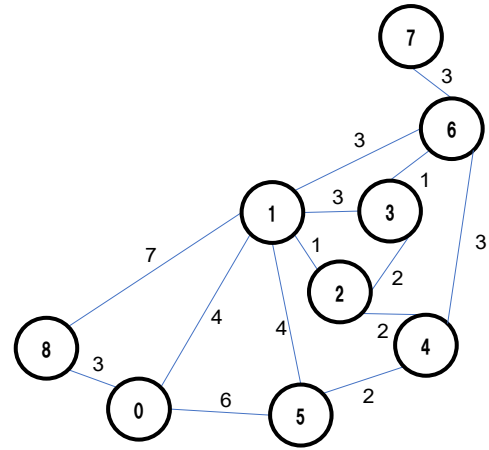


図-2.2.4 活動に対する効用関数の設定



(a) 分析対象地域のゾーンニング



(b) 計算対象ネットワーク

図-2.2.5 分析対象地域のゾーンニングと計算ネットワーク

間帯数を表している。その他の条件は以下の通りである。

- ・ 移動者は 6 時以前および 21 時以降は自宅に滞在するものとし、6 時から 21 時の間に自宅あるいは自宅外で活動を行う
- ・ 自宅から最初に出発する交通手段が自動車（運転）である回答者をドライバー、それ以外の回答者をライダーとする。
- ・ ドライバーを除く車両容量を、 $q_d = 3, d \in D$ とする。

以下では、自家用旅客運送実証実験中に相当する 10 月 25 日～29 日のうちもっとも外出した日の移動・活動について回答されたデータを用いる。回答されたサンプルのうち、すべての活動場所が記入されていたおり、かつ出発・到着時刻等に矛盾がないデータのみを抽出したところ、ドライバーが 45 人、ライダーが 23 人となり、以後の分析対象とする。

b) 効用関数のパラメータ設定

分析で用いるモデルにおける効用関数のパラメータは、 $U_{max}^1, U_{max}^2, \theta_1, \theta_2$ であり、それぞれ外出活動、自宅活動、移動時間、待機時間に対する時間価値を表している。

福田ら²⁾は、平日の時間利用に対する評価が休日における時間配分、活動時間評価の形成に及ぼす影響を実証的に評価し、その中で休日の活動に対する時間価値を推計している。その結果、必需活動（睡眠、食事）、扶養活動（学業、家事、買い物、通院）、定期的余暇活動（趣味、運動）の時間価値の平均値をそれぞれ 39.62（円/分）、123.59（円/分）、67.14（円/分）と推計している。さらに、移動時間、待機時間に対する時間価値をそれぞれ 2,000（円/時）、4,000（円/時）と仮定し、自宅での時間価値で基準化して

効用関数のパラメータを表-2.2.2のように設定した。

なお、以下の分析結果は設定したパラメータに依存する可能性もあるため、今後は感度分析を行う余地があるといえる。

c) 評価指標

本節では、i) 効用関数、ii) 自宅外活動箇所数、iii) 出発・到着時刻の乖離、iv) 相乗り率、により相乗りサービスの成立可能性を評価する。このうち、ドライバー、ライダーの相乗り率は、自身の総移動時間に対する同一経路の全同乗者の総移動時間として、それぞれ以下に示すように定義した。

$$RS_d = \frac{\sum_{a \in A_1} \sum_{r \in R} c_a y_a^r}{\sum_{a \in A_1} c_a x_a^d} \quad (1.2.13)$$

$$RS_r = \frac{\sum_{a \in A_1} \sum_{r \in R} c_a y_a^r}{\sum_{a \in A_1} c_a y_a^r} \quad (1.2.14)$$

(4) 相乗りサービス成立可能性検討

a) 実証実験中の移動・活動に対する相乗りサービスの成立可能性の検討

ここでは、自家用旅客運送実証実験中の移動・活動実態に対する回答をモデルの入力データとして、分析対象地域における相乗りサービ

表-2.2.2 時間価値のパラメータの設定値

パラメータ	設定値
U_{max}^1	$\begin{cases} 1.69 & (\text{習い事, 娯楽}) \\ 3.12 & (\text{通勤・通学, 通院等}) \end{cases}$
U_{max}^2	1.0 (ベースライン)
θ_1	0.76
θ_2	1.56

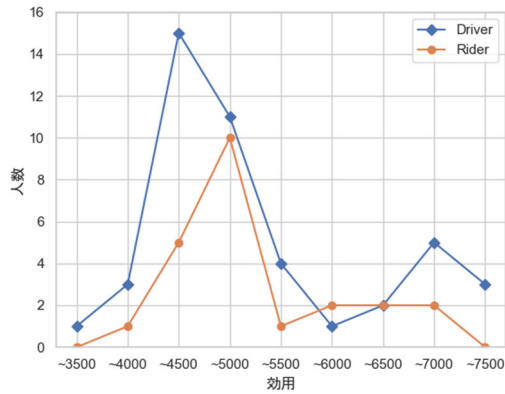


図-2.2.6 効用関数の分布

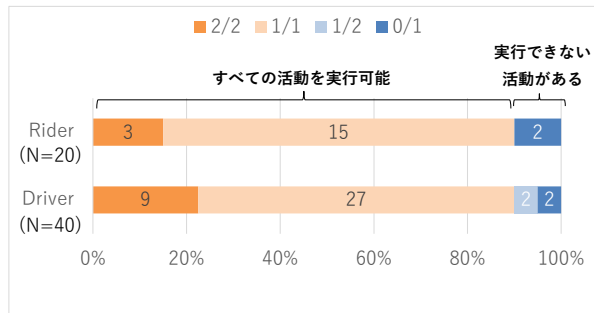


図-2.2.7 自宅外活動箇所数の比較

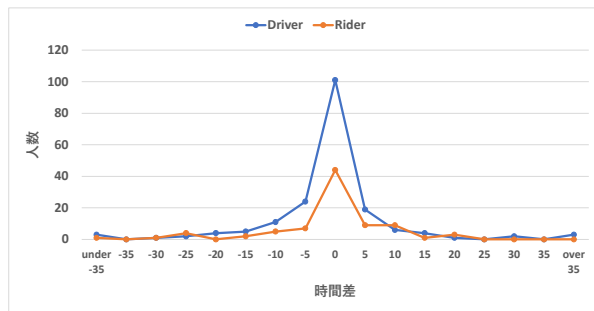
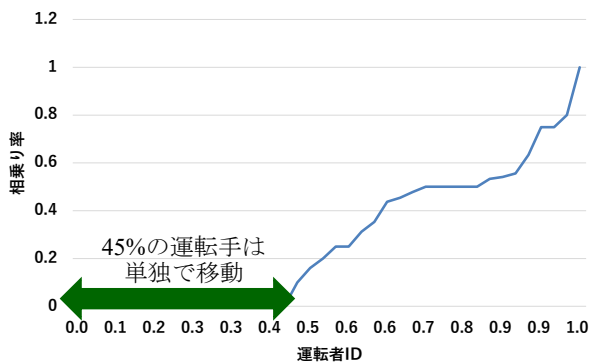
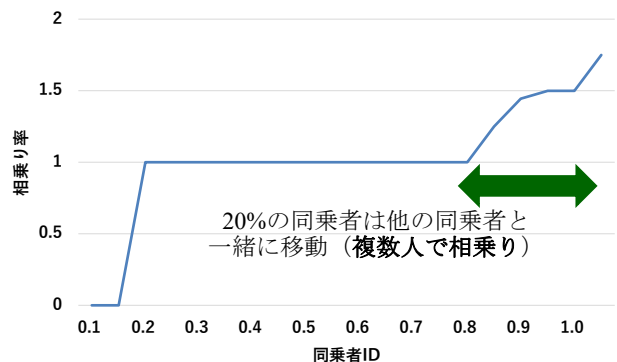


図-2.2.8 ドライバー、ライダーの出発時刻の乖離



(a) ドライバー



(b) ライダー

図-2.2.9 ドライバー、ライダーの相乗り率の分布

スの成立可能性を評価する。

図-2.2.6 にドライバーおよびライダーの効用関数の分布を示す。これを見ると、運転手の方が人数が最多のときの効用値はやや小さいものの、両者の分布は類似しているといえる。図-2.2.7 に実際に自宅外で行った活動箇所数と総効用最大化の解における自宅外活動箇所数の比較を示す。図中における凡例は「モデルにより算出された活動箇所数/実際の活動箇所数」を表している。これを見ると、ドライバー、ライダーとも80%以上がモデルにより算出された活動箇所数と実際の活動箇所数は一致していることがわかる。なお、ドライバーの2名の活動箇所数が0であるが、彼らの自宅外での活動時間は5~10分と短時間であった。図-2.2.8 にドライバーとライダーの出発・到着時刻の実際とモデルによる算出結果の乖離を示す。図中におけるマイナスは、モデルにより算出された出発・到着時刻が実際の出発・到着時刻よりも早いことを示している。これを見ると、モデルにより算出された出発・到着時刻と実際の時刻と一致しているドライバーおよびライダーが多く、大部分のドライバーおよびライダーの出発・到着時刻差は10分以内に収まっていることがわかる。以上より、対象地域においてドライバーに過度の負担をかけることなく、ライドシェアによって大部分の移動需要を賄える可能性があることを示唆している。最後に、図-2.2.9 にドライバー、ライダーの相乗り率の分布を示す。ドライバーに関しては、およそ45%がライダーを相乗りさせずに単独で移動しており、最大の相乗り率は1.0程度であるため、1台の車両に複数のライダーが相乗りする状況は起こりづらいといえる。ライダーに関しては、およそ20%程度の相乗り率が1.0を超えているものの、60%程度は1人でドライバーの車両に

同乗しているといえる。

b) 動時刻調整による成立可能性の検討

前節で用いたアンケートにおいて、活動時刻の調整幅に関して無記入の回答が多かった。そこで、本節では図-2.2.10に示すように全回答者の活動開始可能時刻を一律に早めた場合を想定し、相乗りサービスの成立可能性を検討する。

表-2.2.3、表-2.2.4にそれぞれ活動開始時刻の調整幅と訪問箇所数、総旅行時間の関係を示す。活動開始時刻の調整幅を増やしても運転者の訪問箇所数は増加しなかったものの、同乗者の訪問箇所数は調整幅を20分増やしたときに1カ所増えていることがわかる。また、活動開始時刻の調整幅を増やすにつれて、運転者の総旅行時間が減少する傾向にあることがいえる。また、同乗者の総旅行時間は調整幅を20分増やしたときに増加しているが、これは前述した通り同

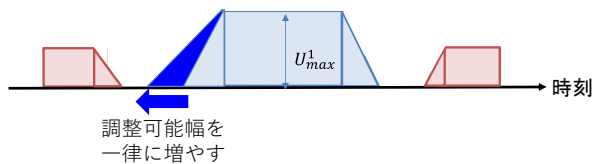


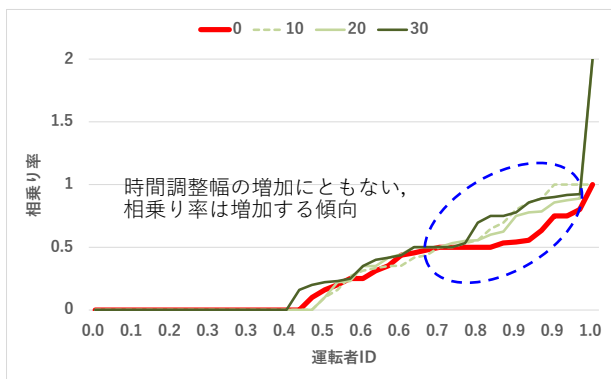
図-2.2.10 分析のイメージ

表-2.2.3 活動開始時刻調整幅と訪問箇所数の関係

	0	10	20	30
ドライバー	47	47	47	47
ライダー	21	21	22	22

表-2.2.4 活動開始時刻調整幅と総旅行時間の関係

	0	10	20	30
ドライバー	488	471	470	459
ライダー	151	151	161	163



(a) ドライバー

乗者の訪問箇所数が1カ所増加したためである。図-2.2.11に活動開始時刻の調整幅とドライバー、ライダーの相乗り率の関係を示す。ドライバー、ライダーともに活動開始時刻の調整幅が増加するにしたがって、特に相乗り率が高かった者において増加していることがわかる。

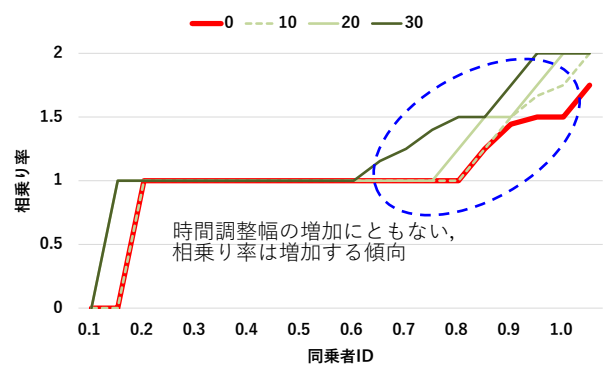
以上から、ドライバー、ライダー双方の活動開始時刻の調整幅を増やすことにより、相乗り率が向上し、ドライバーの総旅行時間が減少したため、マッチングの効率性が向上し車両の総走行時間が減少する効果が見込める可能性が示唆されたといえる。さらに、ライダーの訪問箇所数が1カ所増加することも確認されたため、活動開始時刻の調整によりライダーの移動機会の創出に繋がる可能性も示唆されたといえる。

d) 結語

本節では、昨年度上天草市において実施した移動・活動実態調査データとライドシェアを対象としたマッチングモデルを用いて、中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果を検討した。分析の結果、以下の点を明らかにした。

- ・マッチングモデルを適用した結果と実際の訪問箇所数、出発時刻と比較したところ両者に大きな乖離はなく、分析対象地域において相乗りサービスにより大部分の移動を分担できる可能性がある。
- ・全回答者の活動開始可能時刻を一律に早めた場合、マッチングの効率性が向上し車両の総走行時間が減少する効果が見込める可能性があり、さらにライダーの移動機会の創出に繋がる可能性もある。

したがって、特に需要が限られている中山間地においては、移動・活動パターンがある程度集約することができれば、相乗りサービスの導



(b) ライダー

図-2.2.11 活動開始時刻の調整幅と相乗り率の関係

入可能性が高まるといえる。また、例えば午前中に行っている買い物を午後にはずらすなど、特に時刻制約の緩い活動時刻の調整可能性を事前に把握し、時刻調整を呼びかけることが必要であると思われる。

なお、本節の分析に用いたサンプル数はアンケートの回収数に比べて低かった。これは、アンケートにおいて時刻や場所が無回答なサンプルが多かったことが一因である。今後の課題として、アンケート調査票の工夫や、プローブパーソン調査の併用などアンケート手法を工夫する必要があるといえる。

参考文献

- 1) Shimamoto, H.: Optimal Matching Problem for Ride-Sharing Considering Users' Schedule Rearrangement, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, 18(3), 391-399, 2019. (<https://doi.org/10.1007/s13177-019-00213-1>)
- 2) 福田大輔, 渡部数樹, ネパール・カリ・プレサッド, 屋井鉄雄: 平日の時間利用価値が休日の時間配分及び活動時間価値形成に及ぼす影響, 土木計画学研究・論文集, 22(3), 421-429, 2005.

2.3 都市圏周辺部におけるライドシェアタクシーサービスによるMaaSの導入効果の分析

熊本市東区の健軍地区は都市マスや立地適正化計画で指定された15の地域拠点のうち、健軍商店街を中心とした地域拠点の一つであると共に、熊本市電の終点電停がある乗換拠点でもある。しかし、市電や幹線バス路線とフィーダーサービスとの連携が良くないため、その役割を十分に果たしていない。そこで、ライドシェアリングタクシーを新たな移動手段とし、健軍商店街で買い物をするとAIデマンドタクシーの半額クーポンが付与されるといった「商店街

と連携したAIデマンドタクシーによるMaaS実証実験」を2021年10月から1ヶ月間、実施した。本研究では、このMaaS実証実験の概要、MaaSアプリの開発プロセス、商店街との連携方法、実証実験の結果とその評価などから得られたMaaS実装への知見を報告する。

(1) はじめに

新たなモビリティサービスは既存のサービスや将来的に導入可能なサービスを含め、タイプや貸・借主体の組み合わせ・何をシェアするかなどの組み合わせによって、図-2.3.1のように分類できる注1)。このうち、本章で対象としているのはデマンド交通の中の自由経路型/B2Cのひとつである区域運行型リアルタイムオンデマンドタクシーサービスについて行った実証実験の報告を行う。同図中の日本の現状・課題にも示されている通り、いずれのサービスも、ビジネス実体面でも制度上の面でも幾つかの課題が残るものの、実装の可能性は高いと言われている。

本論では、それぞれのモビリティサービスに対する1)導入に至る地域の準備、検討のあり方、2)実証実験時の利用と運行の実態、3)利用者の評価・意向を明らかにする。その一方で、地域の特性や解決したい課題に即したモビリティサービスがあると考えられる。ここでは、図-2に示すように、主として1)幹線公共交通サービスへの乗り換え拠点から1マイルのエリアにおけるフィーダーサービス、2)面的な公共交通サービスが不足している一般市町村の公共交通不便地域における幹線公共交通路線の補完サービス、3)中山間地域のように公共交通空白地

日本において課題が見られるモビリティサービス		海外事例	日本の現状・課題
カーシェア	B2C	ラウンドトリップ型 Zipcar(米)	①車両再配置コストの低減、 ②乗換専用駐車場の維持コストの低減 (P32)
	B2C	フリーフロート型 car2go(独)	①サービスの制度上の位置付け、 ②安全性の確保・担保 (P33)
都市圏周辺部	C2C	Getaround(米)	①車両再配置コストの低減、 ②乗換専用駐車場の維持コストの低減 (P32)
	定額課金	—	—
	単自由経路型(マイクロトランジット)	Chariot(米)	①運行事業者の採算性確保、 ②既存交通網との調整 (P34)
	B2C	タクシー配車 mytaxi(独)	—
	B2C	相乗りタクシー mytaxi match(独)	①マッチング効率の向上、②法的措置の整理と本格制度化、 ③ルート・料金の算定手法の在り方の整理 (P35)
	C2C	ライドシェアリング Uber X(米)	①自家用有償旅客運送制度の整備 (P37)
	C2C	カープーリング BlaBlaCar(仏)	—
	マルチモーダルサービス	Whim(フィンランド)	①マルチモーダルサービス事業の参入障壁の軽減、 ②中小規模の交通事業者の継続的参入の促進 (P39)
	物流P2Pマッチング	cargomatic(米)	—
	貨物宅配	Amazon(米)	①物流車両による運送運送の担い手の確保 (P41) ②貨物・積荷運送事業者(担い手)の促進に向けたルール整備
ラストマイル配達無人化	Starship Technologies(米)	①無人配送ロボット等の公道走行に向けたルール整備 ②配送車両の安全確保等(注2)) (P42)	
駐車場シェアリング	ParkNow(独)	—	
移動サービスと周辺サービスの連携	Uber Eats(米)	①移動・非移動事業者間のデータ連携の促進、 ②移動サービスと周辺サービスを統合したサービスの構築 (P43)	
コネクテッドカーサービス	Bosch(独)	①遠隔監視・制御・診断の導入 (P44)	

図-2.3.1 新たなモビリティサービス
(出展：第 660 回建設技術講習会での石田東生資料)

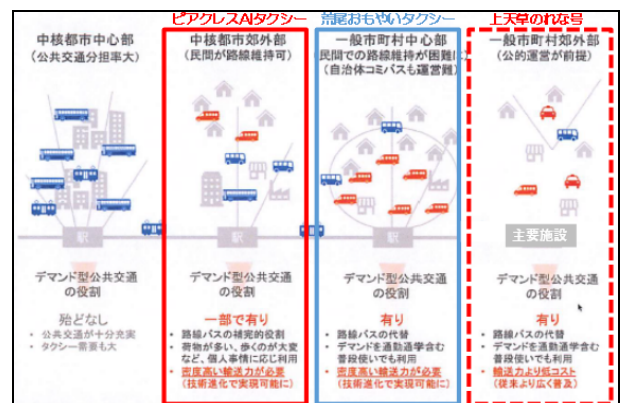


図-2.3.2 地域特性や課題に即したデマンド交通の役割
(出展：藤岡健裕 (Next Mobility Co. Ltd.)：モビリティピッチ第3回の講演「ネクスト・モビリティ社のAI活用型オンデマンドバスの取組みについて」資料注2)に溝上が一部加筆)

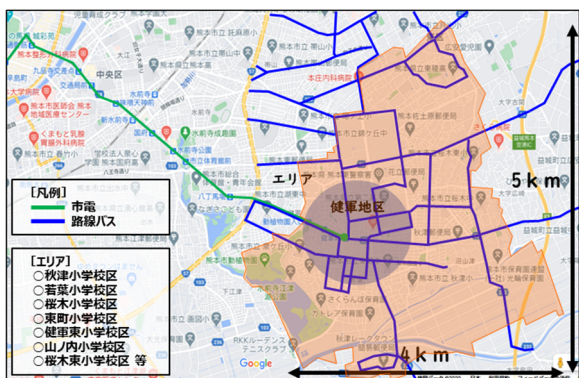


図-2.3.3 実証実験のエリア



図-2.3.4 ピアクレスAI タクシーの広報用チラシ

域における自家用有償旅客運送のようなサービスという役割があるであろう。荒尾市「おもやいタクシー」は上記2)の役割を担っている。ここで報告する健軍地区「ピアクレスAIタクシー」は上記1)の役割を担っている。

(2) 健軍商店街と連携したライドシェアリングタクシーサービス

a) 健軍地区におけるAIデマンドタクシーの実証実験

熊本市東区の健軍地区は、熊本市都市マスタープランや立地適正化計画で全 15 地域拠点のうちのひとつであると同時に、熊本地域公共交通計画では熊本市中心部と地域拠点等を結ぶ 8 基幹公共交通軸の一つである健軍・益城方面の乗換拠点に位置づけられている。

導入の可能性を検討するために実証実験を行った「健軍地区における AI デマンドタクシー」は、熊本市電 A 系統の東側の終点電停である「健軍町」、バス停「健軍四つ角」と「健軍町電停前」を乗換電停・バス停とし、その東側の市内エリアから都心向き（その逆も可）の既存のタクシーによるリアルタイム・オンデマンド乗合サービスである。

図-2.3.3 に示すように、実証実験の対象地域は熊本市電健軍町電停から東へ約 3 経路、北・南へそれぞれ 2~3km の範囲であり、AI タクシーはこのエリア内だけで利用可能な道路運送法第 4 条の一般乗合旅客自動車運送事業を法的根拠とした非定時区域運行型乗合タクシーである。

対象エリアは 7 つの小学校区から成り、世帯数は 30,271 世帯、人口は 65,538 人（男=30,924 人、女=34,514 人）である。地域拠点の健軍地域には「健軍町」電停のすぐ南側全蓋アーチ型アーケードが設置された健軍商店街ピアクレ

スがあり、中核食品スーパーであるサンリブ健軍店を中心に、生鮮食料品、アーケード両側には 48 店舗が営業を行っている。

実証実験は 2021 年 10 月 11 日（月）から 11 月 22 日（月）の平日に実施され、ピアクレス AI タクシーは 8:00~20:00（予約受付時間 7:30~19:30）に対象エリア内だけの移動に利用可能である。しかし、後述するように、独自に開発したピアクレス MaaS アプリにより、対象エリア内から出発して対象エリアより都心側の目的地へのトリップ、その逆のトリップ、たとえばエリア内からピアクレス AI タクシーを利用して健軍町まで行き、そこで市電に乗り換えて都心の通町筋まで行くようなトリップにも、エリア内でのピアクレス AI タクシーの利用は可能である。これによって、端末手段のピアクレス AI タクシーと幹線公共交通手段の市電とを一体とした公共交通サービスを提供する、いわゆる狭義 MaaS となっている。

b) ピアクレス AI タクシー実証実験の特徴

本実証実験は、単に乗換拠点から（へ）のラスト1マイルのフィーダーサービスを提供するリアルオンデマンド乗合サービスの導入可能性を検証するだけではなく、幹線公共交通サービスと一体的な公共交通サービスを提供する。さらに、ピアクレスMaaSアプリに登録した人が本実験への健軍商店街ピアクレスの協賛店舗 32店舗で買い物をすると、ピアクレスAIタクシーの半額乗車クーポンが発行されるという、商店街の活性化とピアクレスAIタクシーの利用促進を同時に志向した広義のMaaSとなっている点が特徴である。図-2.3.4にピアクレスAIタクシー運行開始の広報のためのチラシを示す。

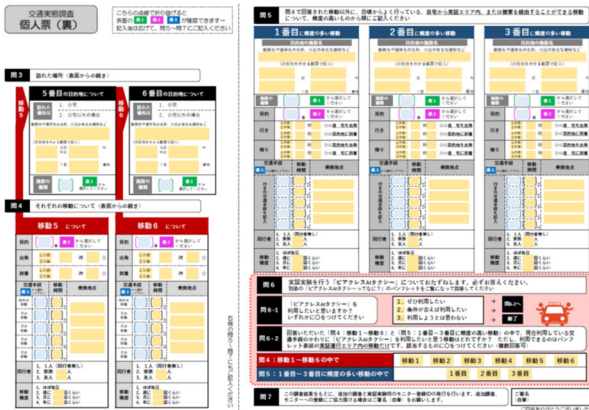


図-2.3.5 交通実態調査の調査票



図-2.3.6 ピアクレス AI タクシー利用意向調査

(3) 交通実態調査と利用意向調査の実施

実証実験を実施する前に、対象エリア内で 1)交通実態調査、2)AI タクシーに対する選好意識調査を実施した。

a) 交通実態調査

実証実験エリアにおける交通実態を知ることができるデータには 2012 年に実施された第 4 回熊本都市圏パー

ソントリップ調査 (PT 調査) データがある。サンプル数が少ないこと、その後のトリップにはかなりの変化があったと思われることから、今回は改めて調査を行った。調査内容と形式は PT 調査と同様である。さらに、同封したパンフレット「ピアクレス AI たくしーってなに？」を参照してもらいながら、そのようなサービスの「ピアクレス AI タクシーを利用したいと思いますか?」、利用したいと思った場合、先に回答した一日のトリップの中で「ピアクレス AI タクシーを利用したいと思う」トリップを聞いている。これは、次に行く「ピアクレス AI タクシー利用意向調査」で聞く AI タクシーを利用した場合の LOS (Level of Service であり、所要時

表-2.3.1 SP 調査の要因と水準

要因	高水準	中水準	低水準
迎車予定時刻からの遅れ時間 (分)	なし	10	20
料金 (円/人)	200	300	500
同乗者の性別	同性のみ	選べない	
到着予定時刻からの遅れ時間 (分)	なし	10	20

間など) の値を、全くの仮定の値ではなく、より現実味のある値に設定するためである。最後に、回答者には「ピアクレス AI タクシー利用意向調査」への継続的協力を求め、継続調査とモニターへの登録に協力をいただける場合には署名 (自筆) を求めた。調査票を図-2.3.5 に示す。

これらの資料は、町ごとの世帯数に比例させて抽出した 1,998 世帯 (抽出率 6.6%) に郵送配布し、郵送で回収した。調査票は世帯票と個人票から成り、個人票は 1 世帯あたり 3 票を同封した。その結果、165 世帯から 246 人分の回収を得た。回収率は世帯ベースでわずか 8.3%に過ぎず、同様の方法、ほぼ同様の内容で行われた第 4 回熊本都市圏 PT 調査での 39.8%と比較するとその 2 割に過ぎない。また、継続調査への協力を承諾してくれたのはわずか 61 名であった。

b) AI タクシーに対する選好意識調査

現利用手段から AI タクシーへの転換モデルを推定するために、選好意識 (SP: Stated Preference) データを収集したい。しかし、交通実態調査の回答者にとっては新規の AI タクシーは未経験のであるため、それがどのようなサービスなのかは分からない。

ここでは、AI タクシーに代えても良いとしたトリップに対して、表-2.3.1 に示す 4 要因 3 (一要因について 2) 水準から成る $3 \times 3 \times 2 \times 3 = 54$ のサービスプロファイルから、直交表を用いて 9 つのプロファイルを作成し、その中からランダムに抽出した 4 つのサービスプロファイルを被験者に提示した。この「ピアクレス AI タクシー利用意向調査」票の書き方を説明したチラシを図-2.3.6 に示す。

前述したように継続調査への協力を承諾してくれたのは 61 名であったものの、対象が AI タクシーサービス域内のトリップであること、現利用手段の LOS データが完備されているといった条件を満足するサービスプロファイルを設定可能なトリップ数は、24 人分の計 35 トリップであった。この 24 人に対して、個人のト

リップごとにオーダーメイドで設定した「ピアクレス AI タクシー使用以降調査」を郵送で送付した。しかし、回収できたのはわずか 6 名、8 トリップ分だけであった。

(4) 健軍地区におけるAIデマンドタクシーの実証実験の準備と実施

a) ピアクレスMaaSアプリの開発

本実証実験を実施するに当たり、1)ピアクレス AI タクシーの利用可能性の検索と予約だけでなく、2)対象エリア外からエリア内（逆に、内から外）への公共交通機関による移動のための経路検索を可能にすること、3)健軍商店街の協賛店舗についての情報発信だけでなく、協賛店舗での買い物によってピアクレス AI タクシーの半額クーポンの発行までも、スマホのアプリで一括して行うことができるスマートフォンアプリを準備することにした。

これらの機能を全て持つ MaaS アプリには MyRoute などがある。しかし、短期間の実証実験であること、今回の実証実験で必要とされる機能は限定されること、ライセンス契約料が高額であることなどの理由で、独自に開発することにした。

1)については、利用者から出発・目的地の要求（オンデマンド）の予約が入った瞬間に、AI

が各車両にどのような順番で誰を載せて誰を降ろすかという経路を計算するオンデマンド・リアルタイム最適配車アルゴリズム「SAVS」(株式会社未来シェア)を用いることにした。このシステムは、荒尾市「おもやいタクシー」他、国内の多くのオンデマンドモビリティサービスや実証実験でも配車アルゴリズムとして実装されており、信頼性は高い。3)については、誘客や PR を目的として来街者に店舗やイベント情報を配信するためのプラットフォームを提供する情報配信サービスアプリ「ぷらり」(株式会社リサーチアンドソリューション)を採用した。このアプリではスポット情報やパンフレット配信、クーポン配信などの機能を備えており、今回の実証実験で行う健軍商店街との連携に有用である。

狭義の MaaS を実現するためには、少なくとも 1)と 2)の機能が必要である。ここでは既存の経路探索アプリを活用することを想定した。このとき、1)と 2)のアプリを API で連携して経路探索アプリに情報を取り込み可能な既存の経路探索アプリを調査し、それらの特徴や課題などを検討した。その結果を表-2.3.2 に示す。これらを比較した結果、市電から目的地への乗換探索には RR API を、エリア内の端末交通手段としてのタクシーと徒歩については GMD API

表-2.3.2 経路探索 API の比較（価格の表示は省略する）

サービス名	企業名	価格	複合経路検索	公共交通	概要	コメント
GMD API	G 社		○	△	オンラインでは路線バスを含めた複合的な検索は可能だが、日本のみ API での公共交通を含めた検索結果が取得不可	公共交通を含めた複合経路検索ができない。価格が安価なため、タクシー経路検索用として自動車経路 API を利用
N API	J 社			△ 路線バスなし	鉄道・高速バス・空港連絡バス・飛行機・フェリーを利用した経路検索結果を返却	路線バスの結果なし。任意の地点間ではなく、駅・停留所ベースの乗り換え情報のみ検索可能
NB API	J 社			△ 電鉄バスなし	空路・バス・フェリー	熊本電鉄バスがない。同時アクセス数の制限あり。任意の地点間ではなく、駅・停留所ベースの乗り換え情報のみ検索可能
m	V 社		○	△ 電鉄バス・市電なし	公共交通・シェアサイクル・デマンド交通・徒歩などに対応したマルチモーダルな経路検索が可能	熊本電鉄バスと市電が検索対象に入っていないこと、料金体系が不明確であったことから候補外
IN API	ZDC 社		○	△ 電鉄バスなし	複合ルート検索 API であり、徒歩や車だけではなく、電車や飛行機、バスなどの公共交通機関も組み合わせたルート検索が可能 (J 社の情報)	熊本電鉄バスがないこと、料金体系が不明確であったことから候補外
N API	N 社		○	○	道路交通も公共交通も検索する自社技術があるため、公共交通・徒歩・車・自転車・バイクなど、様々な移動手段のルート検索、地図や住所検索といった機能をワンストップで提供可能 (N 社の情報)	料金が高額なため対象外
RR API (N API)	N 社		○	△ 路線バスなし	公共交通手段+徒歩で、ドア to ドアの最適な移動経路・料金を算出。駅の出入り口情報なども合わせて提供可能 (N 社の情報)	複合経路探索ができ、価格が予算の範囲内で納まることから選択

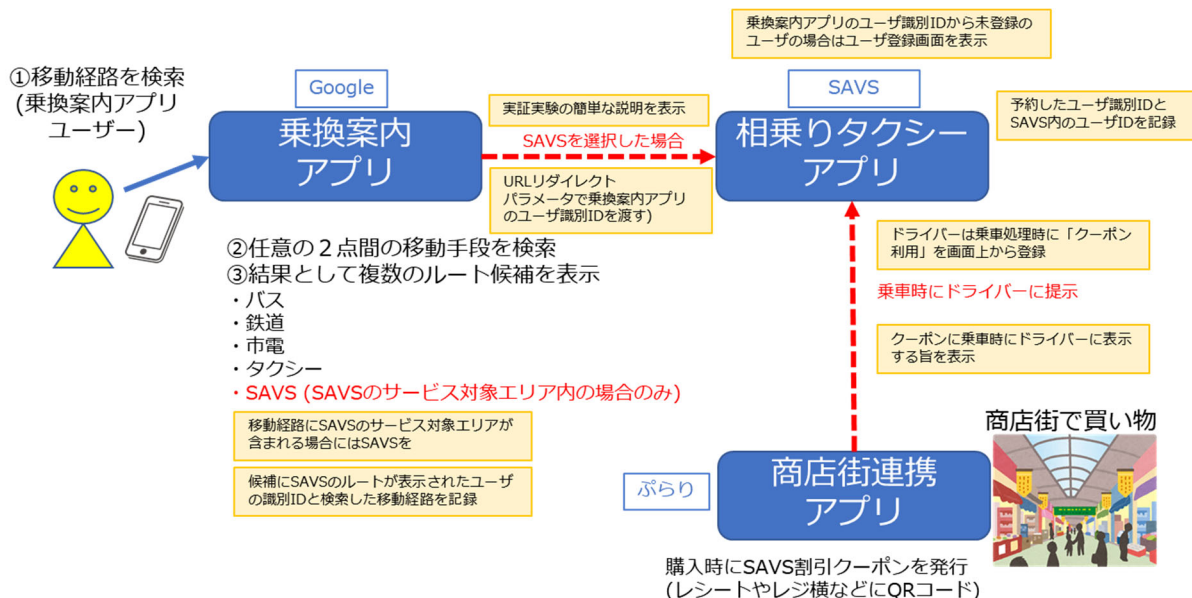


図-2.3.7 ピアクレス MaaS アプリの構成と機能

表-2.3.3 健軍地区AI デマンドタクシー実証実験の概要

内容	概要
期間	2021年10月11日(月)～11月22日(月)
運行日・時間	平日の8:00～20:00(予約受付:当日7:30～19:20で、予約日が平日なら前日でも可)
運送事業者	TaKuRoo
運行車両	4人乗りタクシー2台 ※繁忙時間帯は別途応援
運行形式	非定時・区域運行型・オンデマンド
システム	<ul style="list-style-type: none"> ■配車システム: Web・電話, リアルタイム・直前予約も可能 ■決済方法: クレジットカード, 電子マネー, 現金での支払いが可能
料金	バス・市電とタクシーの中間の料金で、通常タクシー運賃の約半額であり、次式で設定。 相乗り運賃 = [初乗運賃 + {(検索最短距離 - 初乗距離) ÷ 距離制加算基準距離} × 距離制加算運賃] × 0.5
付加的サービス	健軍商店街の協賛店舗で買い物をすると半額クーポンを発行

を用いることにした。その上で、経路探索の始点・終点を地図上で指定、および各経路探索APIを使って得られた経路探索結果を画面上に表示するインターフェースであり、ユーザーの操作履歴の記録の役割を担う乗換案内アプリ「道案内」を独自に開発した。このとき、同一の人を識別して経時的な行動を追跡し、そのログを取得するために、これらの独立した3つのアプリ間で個人識別ID情報の受け渡しが可能となるようにしている。開発したMaaSアプリ「ピアクレスMaaSアプリ」の構成と機能を図-2.3.7に示す。

b) モニターの依頼とID/PWの発給

実証実験に参加してもらう最小限の数のモ

ニターを確保するために、交通実態調査への回答者のうち、追加のAIタクシーの利用意向調査への協力を承諾した個人61名に対して、調査票と曾於回収用返信用封筒と一緒に、モニターIDとパスワードを送付し、実験期間中の利用を依頼した。さらに、ピアクレスAIタクシー実証実験の内容の説明パンフレット、ピアクレスMaaSアプリの使い方を説明したパンフレットを送付した。

さらに、実証実験実行委員会関係者にIDとパスワードを発給した。また、ニュースや人伝に実証実験実施の情報を得た人は熊本市に電話でIDとパスワードの発行を依頼できるようにした。最終的には、交通実態調査を配布したものの、継続的な利用意向調査への協力を得られなかった全ての世帯に対して、実証実験へのモニター依頼文書と共にIDとパスワードを葉書で提供した。

c) 実証実験の実施

健軍地区におけるAIデマンドタクシーの実証実験は表-2.3.3の要領で実施された。一般乗用旅客自動車運送事業者であるTaKuRoo(タクシー事業者)が有償のオンデマンド乗合タクシーサービスであるピアクレスAIタクシーの実証実験で運送を可能にする法的根拠は、道路運送法第21条2である。この場合でも、運輸局への21条申請と地域公共交通会議での事前承認が必要となるため、実施主体として、熊本市を事務局とした「健軍地区AIデマンドタクシー実証実験実行委員会」を組織した。

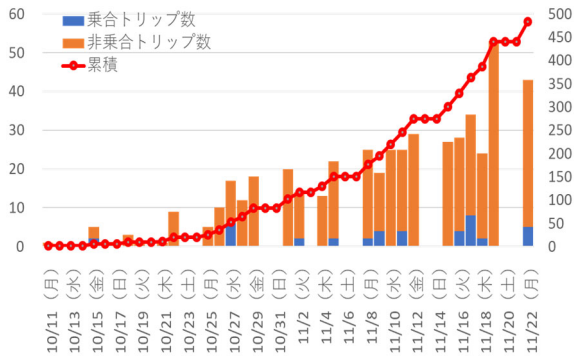


図-2.3.8 日別利用者数の推移

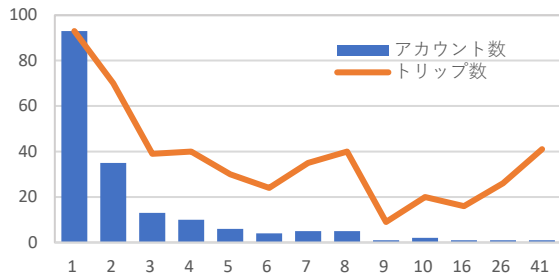


図-2.3.9 利用回数別アカウント数とトリップ数

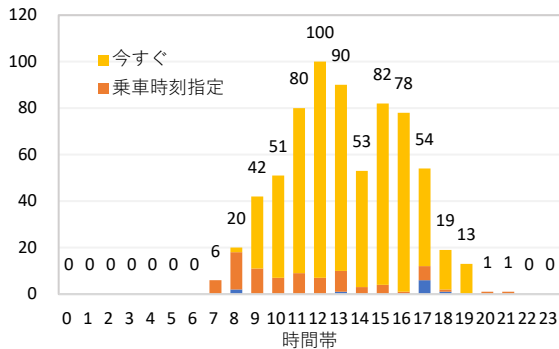


図-2.3.10 時間帯別配車依頼数

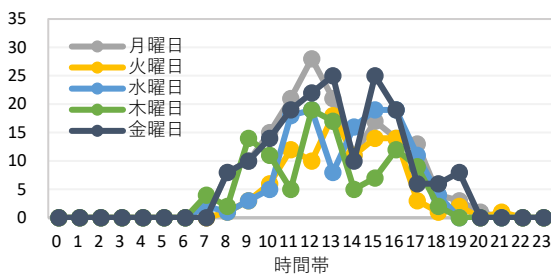


図-2.3.11 時間帯別配車依頼数 (アクセス数)

(5) 実証実験の結果

a) ピアクレス AI デマンドタクシーの利用の実態

図-2.3.8 に実証実験期間中の日々の利用トリップ数（配車依頼に対して配車が確定した後、実際に乗降が完了したトリップ）数を乗合利用と非乗合利用に区分して示す。期間中の利用者（＝アカウント）数は 177 人で、延べ利用トリ

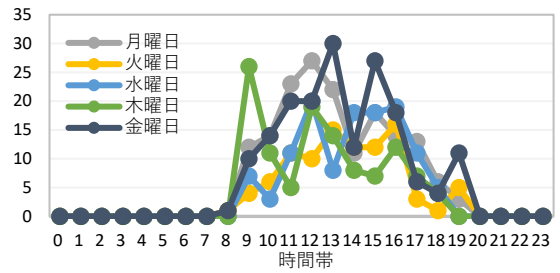


図-2.3.12 時間帯別配車依頼数 (デマンド数)

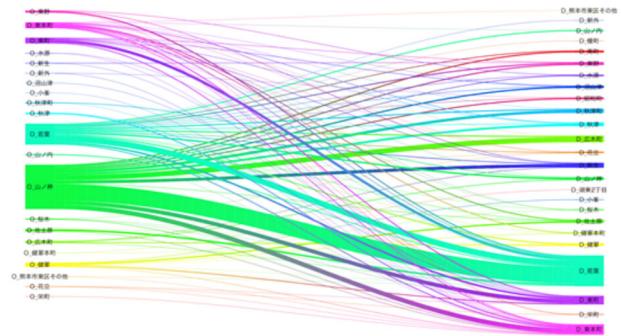


図-2.3.13 発地・着地間トリップ

ップ数は 484 であった。開始から 1 週間はほとんど利用がなかったが、2 週間後の 11 月 25 日（月）以降、次第に利用トリップ数は増加していき、11 月 19 日（金）には 53 の最大利用トリップ数となった。乗合が生じたのは 41 トリップであり、相乗り率は 8.5% であった。相乗り率が最大となったのは 11 月 17 日（水）で、34 トリップ中 8 トリップの 23.5% であった。

図-2.3.9 は利用回数別の利用者数（アカウント数）である。1 回だけの利用者が 177 人中 93 人で 52.5% であるが、10 回以上も利用している人が 5 人、最大 41 回も利用しているヘビーユーザーがいる。

図-2.3.10 はデマンドが発生した時刻を基準に集計した全 690 件の配車依頼数（アクセス数）を、予約時の「今すぐ」、「乗車時刻指定」、「降車時刻指定」の指定の仕方別に区分して示す。配車依頼が多いのは 11 時～13 時の昼前後と 15、16 時である。予約時の時刻指定については 86.7% が「今すぐ」である。乗車時刻と降車時刻の指定はそれぞれ 82 件 (11.9%)、10 件 (1.4%) であり、前者の方が多い。乗車時刻指定は運行開始の 8 時台が 20 件中 16 件の 80% で、最多である。17 時台は降車時刻指定が 6/54 = 11.1% で、他の時間帯より多い。

図-2.3.11 に時間帯別の配車依頼アクセス数を曜日別に示す。月曜日の 12 時、金曜日の 13 時と 15 時に大きなピークが見られる。これに対して図-2.3.12 に示す配車依頼デマンド数は、

木曜日の9時台に大きなピークがあり、アクセス数の分布と大きく異なっている。

空間的な移動を把握するために、町単位で集計した発地・着地間トリップ数をサンキーダイアグラムにして示したのが図-2.3.13である。発地としては山の神からが突出して多く、次いで若葉（市電健軍町周辺）、東町、東本町の順である。着地としては若葉（市電健軍町周辺）が最大で、東本町、東町の順である。ODとしては隊長地域の北東端にある山の神から、東本町（東区役所）、山東町、広木町、新生や、若葉（市電健軍町周辺）-若葉、東町-若葉（市電健軍町周辺）が多い。

b) ピアクレス健軍商店街での買い物によるAIタクシー半額クーポンの発行とその使用実績

ピアクレス MaaS アプリは、モニターが健軍商店街ピアクレス沿線の協賛 32 店舗で買い物をすると情報配信アプリ「ぷらり」からAIタクシーの半額クーポンが発行される。そのログを解析したところ、13件のクーポンが発行されており、うち6件が食料品店、3件が食品スーパー、2件がカフェであった。

AI タクシー半額クーポンはピアクレス健軍商店街での買い物によるもの以外に、ピアクレス MaaS アプリをインストールしたモニターには全員、1枚を提供している。これらの半額クーポンを実証実験期間中に延べで33枚の半額クーポンが使用されており、そのうち、インストール時に提供されたクーポンの利用が22件、買い物によって発行されたクーポンの利用が11件であった。クーポンを利用した人の最大件数は7回で1人、次いで6回が1人、2回が1人、他は18人が1回ずつであった。

c) 実証実験に対する評価

実証実験が終了後に、AIタクシー利用者と非利用者に「健軍地区 AI デマンドタクシー実証実験に関する事後調査」実施した。前者は、実証実験終了と同時に、ピアクレス MaaS アプリのログから得られるAIタクシー利用者177人に、後者は交通実態調査に対して回答がなかったものの、実証実験への参加依頼とIDとパスワードを送付した世帯からランダムに選出した200世帯に対して郵送で送付し、誘導で回収した。前者からは71、後者からは24の回答があった。

図-2.3.14～図-2.3.16に利用者の年齢階層、利用目的、今回AIデマンドタクシーを使った移動の日頃の移動手段を示す。利用者は80歳以上が約3割で最も多く、70歳代と60歳代も含

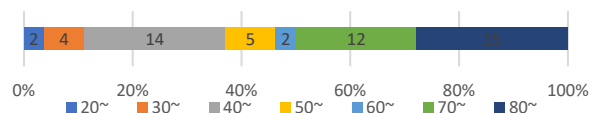


図-2.3.14 利用者の年齢階層

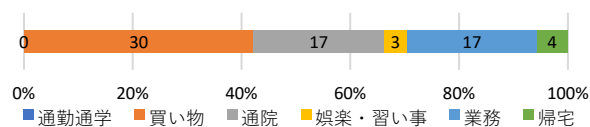


図-2.3.15 利用目的

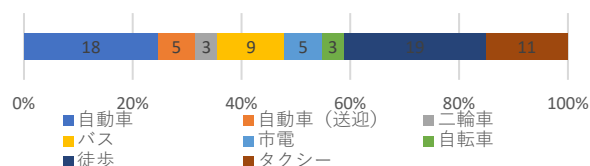


図-2.3.16 日頃の移動手段

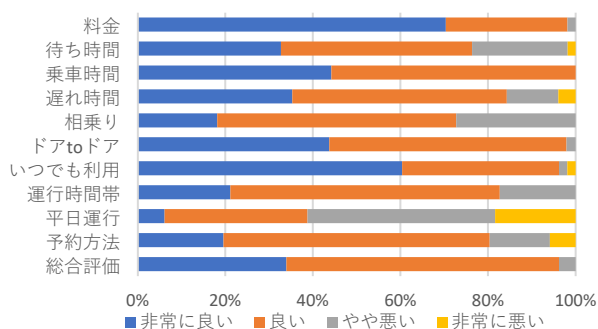


図-2.3.17 AIデマンドタクシーに対する項目別評価

めると半数以上となる。一方、40歳代の利用も19.7%あった。利用目的では通勤通学はなく、買い物が42.3%で最も多く、通院と業務目的の利用が23.9%ある。日頃の手段としては徒歩による移動が26.7%で最多である。自動車も25.4%もあり、自動車による送迎も加えると32.4%となり、自動車利用からの転換も多い。

図-2.3.17は評価項目別の評価である。非常に良いが最多の評価項目は、「料金」と「いつでも利用可」である。「乗車時間」や「ドアtoドア」に対しても非常に良いの評価は4割以上もある。これに対して、悪いとやや悪いの評価の合計が多いのは「平日運行」である。また、「相乗り」、「待ち時間」、「待ち時間低い」、「予約方法」の順に評価が低かった。しかし、総合的な評価では非常に良いと良いの合計が95%を超えており、今回のAIデマンドタクシーに対する総合的な評価は高いといえる。

一方、図-2.3.18～図-2.3.22には、非利用者に対して、今回の実証実験実施を知っていたか、

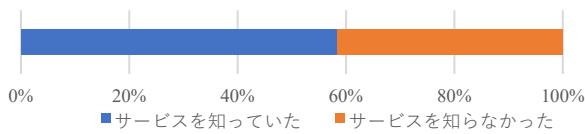


図-2.3.18 実証実験実施の周知

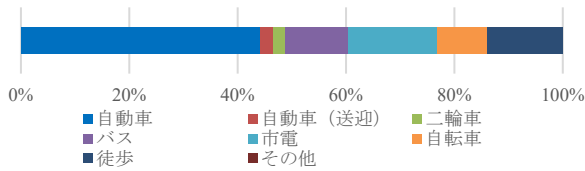


図-2.3.19 日頃の代表的移動手段

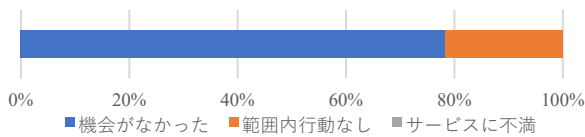


図-2.3.20 AI デマンドタクシーを利用しなかった理由

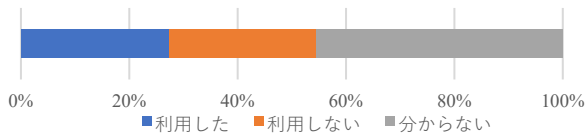


図-2.3.21 AI デマンドタクシーの利用可能性

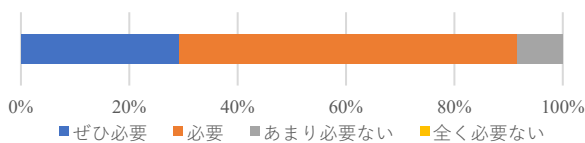


図-2.3.22 AI デマンドタクシーの必要性

日頃の代表的な移動手段、AI デマンドタクシーを利用しなかった理由、今後の利用可能性、このような移動サービスの必要性について質問した回答を示す。幾つかの方法で実証実験の実施とその内容、AI デマンドタクシーのサービスの概要の周知を図ったが、4 割以上は「知らなかった」と回答している。一方で、約 6 割はサービス内容を知っていたものの、利用はしていない。代表的な移動手段については、熊本都市圏全域のバス・市電の分担率と比較して健軍地区はバスや市電といった公共交通手段の利便性が高いためにバスと市電は 27.9%もあるが、自動車利用者も 46.5%もある。AI デマンドタクシーを利用しなかった理由としては、「機会が無かった」が 8 割、サービス提供圏内での移動そのものがなかったが 2 割で、「サービスに不満があった」はゼロであった。条件が合えば AI デマンドタクシーを利用したかどうかに対する回答は、条件が揃っても「利用しない」が

2 割、「分からない」が 45%、「利用した」は 25%程度である。しかし、AI タクシーのようなサービスの必要性は認識されており、9 割が「ぜひ必要」、「必要」とした。

(6) おわりに

以下に、狭義、広義の MaaS の視点から、健軍地区 AI デマンドタクシー実証実験から得られた幾つかの知見をまとめる。

1) リアルタイムオンデマンドタクシーのようなモビリティサービスの利便性の高さ、今後の必要性は、実証実験への参加者だけでなく、非参加者からも認知されている。

2) 今回のように、連携した商店街の店舗で買い物をした利用者に AI デマンドタクシーの半額利用クーポンを提供することによって、商店街の価値を高めると同時に、公共交通手段の利用促進を図る広義の MaaS の導入可能性を検証する実証実験を試みる価値は高い。ただし、今回は半額利用クーポンの原資はタクシー事業者側で払っている。実際に運用された場合の費用負担などについての議論が必要である。

3) ラストワンマイルサービスを担うモビリティの導入可能性に関する実証実験であっても、エリア、運行時間、料金などを、実装時に近い設定で実施することが肝要である。また、このような狭義の MaaS であっても、新しいモビリティだけでなく、既存の公共交通機関も含めた統合サービスの検索・予約・決済（一部、レベル 2）が可能な MaaS アプリの準備が必要である。

4) その際は、必ずしもフルセットの機能を備えた MaaS アプリは必要なく、対象地域の環境や解決したい課題に応じたミニマムの MaaS アプリで十分である。今回は、既存のリアルタイムオンデマンドタクシー配車と商店街情報発信アプリを、共通の個人 ID によって連携させることを可能にするプラットフォームを開発した。その結果、乗換検索と移動と買い物といった一貫した行動ログが取得できた。しかし、ID 共有の可能性、システム改良など、相当面倒な調整が必要となった。

5) 現在の移動の実態を知る交通実態調査を 2,000 世帯に行ったが、回収率は極めて低かったため、回答者に依頼した本実証実験へのモニター登録、SP 質問による利用意向調査の回答データの数は、分析に供するのに十分な数を得ることができなかった。交通実態調査の実施方法、調査内容、SP 質問の方法などに改善が必要である。

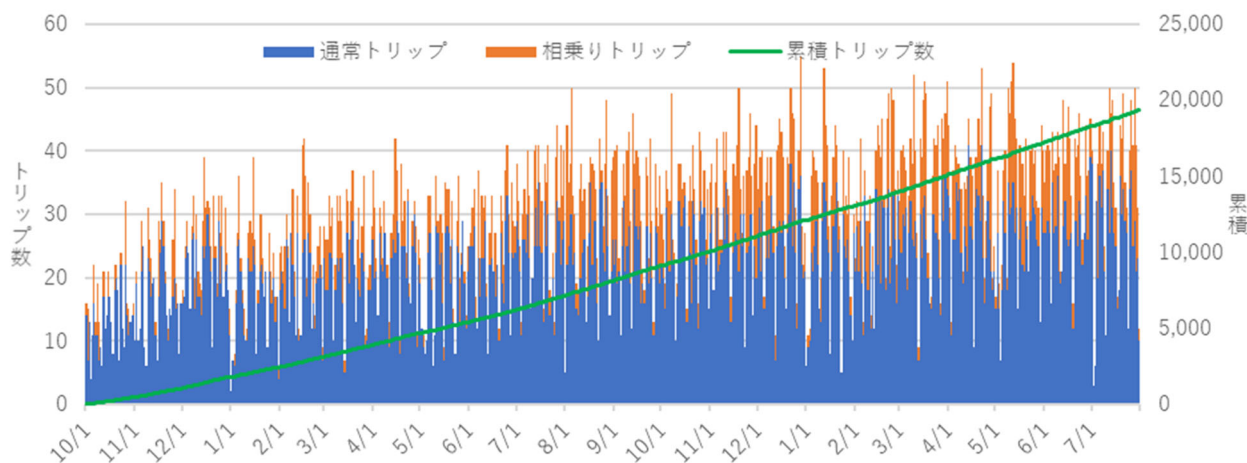


図-2.3.23 荒尾おもやいたクシーの利用者数の時系列推移

6) 実質 1 ヶ月間の実証実験期間中に延べで約 500 トリップの利用があったものの、実質的な利用者数は 177 人であり、その半数が 1 回だけの利用であった。実験の意義や導入するモビリティのサービスを周知する方法、モニター登録依頼の方法、ID の登録の方法など、潜在的利用者の数をいかに増やすかが課題である。

7) そのためには、期間は 2 ヶ月でも短かく、短期間では実装に向けた利用需要の見積もりや評価に関する情報は得られない。図-2.3.23 に示すように、運行開始から 1 年経過した時点の利用需要が導入当初の 2 倍以上になり、相乗り率も 15% から 30% にまで増加した荒尾市のおもやいたクシーでは、半年間の運行で将来の利用需要のトレンドが予測できている。できるだけ長期の実証実験が求められる。

参考文献

- 1) 経済産業省：IoT や AI が可能とする新しいモビリティサービスに関する研究会」中間整理，平成 30 年 10 月 17 日。
- 2) 藤岡健裕：ネクスト・モビリティ社の AI 活用型オンデマンドバスの取組みについて。モビリティピッチ第 3 回，2021。

2.4 地方都市におけるライドシェアリングサービスの導入効果の分析の成立可能性¹⁾

本節では、荒尾市のおもやいたクシーの経時的な利用と運行の実態、収支構造などの分析により、荒尾市のような地方都市においてバスサービスを補完するリアルタイムオンデマンドモビリティの導入可能性についての検討を行う。なお、以後の分析は 2 年間にわたるデータを用いており、運行開始の 2020 年 10 月から 1

年後の 2021 年 9 月までを第 1 期，2021 年 10 月から 2022 年 9 月までを第 2 期とする。また、各期の 10 月～12 月，翌年 1 月～3 月，4 月～6 月，7 月～9 月の 3 ヶ月間をそれぞれ，第 1，第 2，第 3，第 4 四半期とし，以後，例えば 2022 年 7 月～9 月である第 2 期第 4 四半期を第 2-4 期と記す。

(1) 荒尾市おもやいたクシーの概要

荒尾市は、熊本県の西北端に位置し、北は福岡県大牟田市，東は小岱山頂を境として玉名郡南関町，玉名市，南は玉名市，玉名郡長洲町に接し，西は有明海を隔てて長崎県，佐賀県に面している。市域は東西 10km，南北 7.5km で面積は 57.37km² である。2023.1.31 現在の世帯数は 24,018 世帯，人口は 50,325 人である。高齢化率は 36.2% であり，全国平均 28.6% を大きく上回っている。人口は主に市の北西部（四ツ山地区）や中央部（緑が丘地区），市営住宅などがある特定箇所（桜山地区）に集積している。

市内の路線バスの乗車人数は 2006 年度の年間約 38 万人から年々減少し，2021 年度にはコロナ感染症の拡大のせいもあって約 15.8 万人となり，約 6 割も減少している。バス交通事業者への補助額は，2005 年に市営バスを民間移譲が完了して以降，一旦は減少したが，その後増加し，2013 年度には 6,100 万円になった。2013 年のバス路線再編によって 2014 年には 4,100 万円まで低下したが，その後は増加傾向にあり，2019 年には 5,700 万円に，コロナ感染症拡大直前の 2020 年には 6,400 万円にまで増加した。2021 年度の路線バス補助額は 5,400 万円である。

このような中，2014 年の「地域公共交通の活性化及び再生に関する法律」の改正に合わせて，2018 年に「荒尾市立地適正化計画」と連携させ

表-2.4.1 おもやいたクシーの概要

対象エリア	荒尾市全域
実施時期	2020年10月1日～
運行台数	EV車2台(荒尾市が供与)
運行時間	8:00～17:00(土日祝日を含む)
予約受付時間	7:30～16:30
予約方法	電話・スマホ
運賃	事前確定運賃(小学生半額, 未就学児無料)スマホ予約割引: 50円/人
事業主体	荒尾市
運行主体	荒尾タクシー協会

表-2.4.2 料金(円/人)

	おもやいたクシー	路線バス	タクシー
2km未満	300	約160	660-790
2-3km	400	約180	790-1,040
3-4km	500	約210	1,040-1,290
4-5km	600	約250	1,290-1,540
5km以上	700	約280～	1,540～

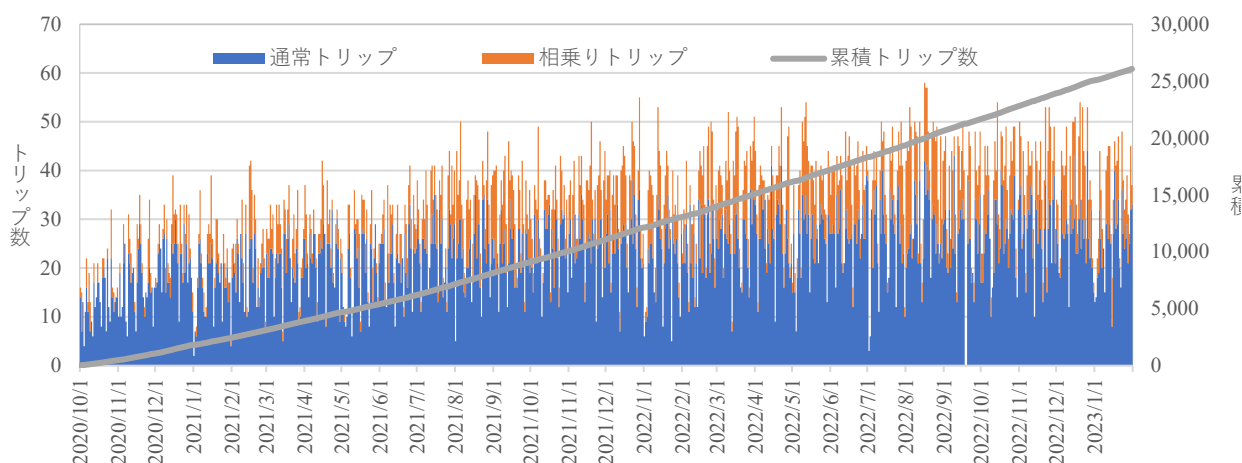


図-2.4.1 日別トリップ数とその累積

た「荒尾市地域公共交通網形成計画」が策定された。さらに、荒尾市地域公共交通活性化協議会を経て、路線バスの補完的な役割を担うオンデマンド・区域運行型「おもやいたクシー」の導入が決定された。台数や料金などの設計は、2028年度、2019年度の2回の実証実験から得られた成果を受けて最終決定された。

2020年10月1日から運行を開始したおもやいたクシーの概要を表-2.4.1に、他の公共交通機関の料金と比較した料金を表-2.4.2に示す。リアルタイム・オンデマンド最適配車システムにはSAVS (Smart Access Vehicle Service)を用いているため、乗車直前でも予約が可能である。利用希望者は、出発地と目的地、必要な場合は乗車または降車希望時刻、乗車人数を入力し、配車

をリクエストすると、SAVSがリアルタイムでルートや乗車/降車予定時刻を予測・決定し、その情報を利用希望者に送信する。利用希望者はこの情報を受け、予約を確定、またはキャンセルする。予約が完了したと同時に、配車する車両の運転手用デバイスに予約者の乗降地点と予定時刻、到着希望時刻、運送ルートなどの情報が送信される。

(2) 荒尾市おもやいたクシーの利用と運行の実態、および評価

a) 利用と運行の実態

図-2.4.1に運行開始の2020年10月1日から2022年9月30日までの日別のトリップ数とその累積を、表-2.4.3に月別のトリップ数、相乗

表-2.4.3 月別のトリップ数と相乗り率

	第1期											
	2020			2021								
	第1四半期			第2四半期			第3四半期			第4四半期		
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
総トリップ数	467	575	768	610	669	792	799	709	794	962	980	963
通常トリップ数	401	489	645	502	532	613	664	581	634	740	709	678
相乗りトリップ数	66	86	123	108	137	179	135	128	160	222	271	285
乗合率 (%)	14.1	15.0	16.0	17.7	20.5	22.6	16.9	18.1	20.2	23.1	27.7	29.6

	第2期											
	2021			2022								
	第1四半期			第2四半期			第3四半期			第4四半期		
	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
総トリップ数	943	1,021	1,078	912	915	1,125	1,048	1,065	1,100	1,041	1,269	1,049
通常トリップ数	743	742	786	673	677	802	793	784	807	799	862	752
相乗りトリップ数	200	279	292	239	238	323	255	281	293	242	407	297
乗合率 (%)	21.2	27.3	27.1	26.2	26.0	28.7	24.3	26.4	26.6	23.2	32.1	28.3

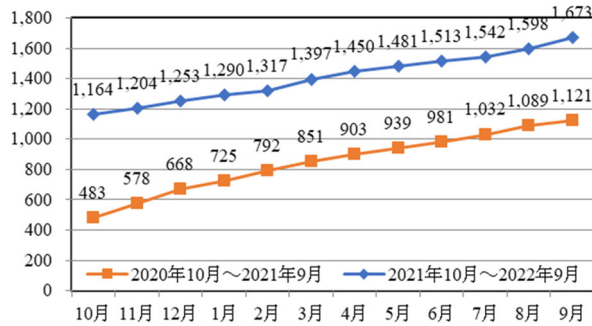


図-2.4.2 登録者数

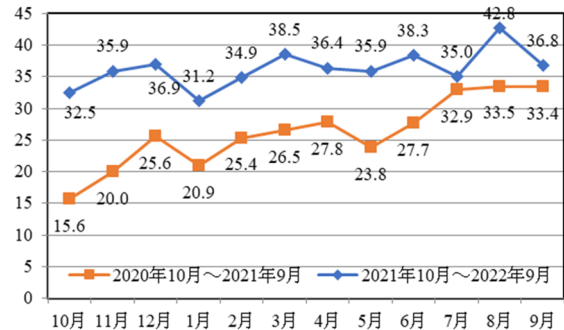


図-2.4.3 1日あたりの平均利用者数

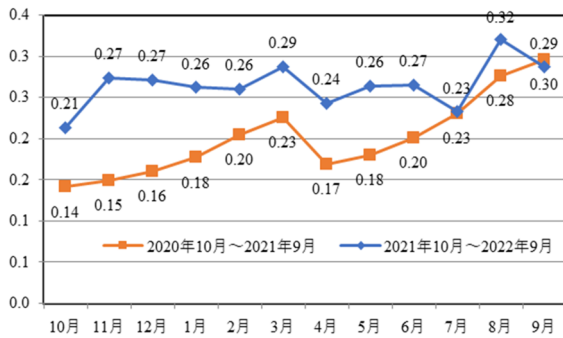


図-2.4.4 乗合率

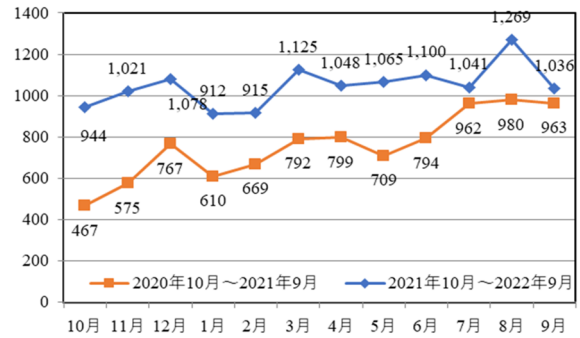


図-2.4.5 運行回数

り率、新規登録者数などを示す。トリップ数と相乗り率は日を経るごとに増加しており、月別トリップ数は運行開始の2020年10月の467から、コロナ感染症が拡大した2021年4月以降も増加率は衰えず、1年後の2021年9月には963の2.06倍に、2年後の2022年9月には1,049と2.25倍にまで増加している。トリップ数が最大となっているのは2022年8月であり1,269である。これに伴って乗合率も運行開始時の14.1%から1年後には29.6%に、2022年8月には最大の32.1%までに増加している。

図-2.4.2～図-2.4.5には、それぞれ月別の登録者数、1日あたりの平均利用者数、乗合率、運行回数を、期別に分けて示す。

図-2.4.2に示すように、運行開始当初に483人であった登録者数は、毎月、約3%ずつ増加しており、1年後に2.32倍の1,121人、2年後には3.46倍の1,673人になっている。図-2.4.3に示す一日当たりの平均利用者数は、運行開始当初は15.6人/日であったが、1年後に2.14倍の33.4人/日となり、第2期には全ての月で30人/月以上となっており、8月の42.8人/月のよ

うに、40人/月を超えた月もでていて、運行距離は1383.3kmから1年後には1.94倍の2681.2km、2年年後には2.08倍の2879.5kmまで増加した。これに合わせて、図-2.4.4に示す乗合率は14.1%から1年目に29.6%へ2.09倍、2期は期間中、大半の月で25%を超えており、8月には32.0%となった。ただし、コロナ感染症が拡大した第2期の乗合率の増加率1.38は第1期の2.14と比較して小さく、乗合率はほぼ定常状態になったものと思われる。

利用者の増加に対応して、運行回数は図-2.4.5に示すように、運行開始当初の467回から第1期末には2.06倍の963回に、第2期の8月には2.71倍の1,269回という最大値となったが、第2期はほぼ1,050回前後で推移している

ことから、現在の2台での運行体制ではこれが限界と思われる。さらに、運行距離は第1期末には運行開始当初の1,383.3の1.93倍の2,681.2kmに、第2期末に2.08倍の2,879.5kmまで増加したが、1便あたりの運行距離は3.0kmから概ね2.8kmへ減少し、短距離利用化している。そのため、料金収入は216千円から第1、2期末がそれぞれ1.97倍の427千円、2.09倍の453千円にしかなくなっておらず、年間の総料金収入はそれぞれ4,104千円、5,532千円である。

収支率については、表-2.4.4に示すおもやいたクシーの月別評価指標、タクシーの借り上げ費用の総額は日単価×運行日数の年間12,410千円であり、オペレーター費用の3,285千円とAIシステム費用の2,706千円を加えた総費用は

表-2.4.4 おもやいたクシーの月別評価指標

2020年10月～2021年9月	第1期												
	2020年10月	11月	12月	2021年1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合計
延べ利用者数(人)	484	599	793	648	710	822	833	739	830	1021	1037	1003	9519
利用アカウント数	123	139	166	163	176	201	591	518	582	243	236	236	968
1日当たりの平均利用者数(人/日)	15.6	20.0	25.6	20.9	25.4	26.5	27.8	23.8	27.7	32.9	33.5	33.4	
運行距離(km)	1383.3	1713	2305.8	1867.6	1958.1	2277.9	2185.1	2018.5	2273.8	2706.4	2751.8	2681.2	26122.5
1便当たりの運行距離(km/便)	2.962099	2.97913	3.006258	3.061639	2.926906	2.876136	2.734793	2.846968	2.863728	2.813306	2.807959	2.784216	
運行回数(回)	467	575	767	610	669	792	799	709	794	962	980	963	9087
乗合運行回数(回)	66	86	123	108	137	179	135	128	160	222	271	285	1900
乗合率(%)	0.141	0.150	0.160	0.177	0.205	0.226	0.169	0.181	0.202	0.231	0.277	0.296	
利用料金(円)	216450	262450	353450	293200	305350	351450	343550	318100	360100	431400	442400	426750	4104650
運行経費(タクシー借り上げ)(円)	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,054,000	952,000	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,054,000	1,020,000	12,410,000
オペレーター費用(円)	279,000	270,000	279,000	279,000	252,000	279,000	270,000	279,000	270,000	279,000	279,000	270,000	3,285,000
運行補助金(円)	1,116,550	1,027,550	979,550	1,039,800	898,650	981,550	946,450	1,014,900	929,900	901,600	890,600	890,600	11,617,700
AIシステム費用	660,000	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	286,000	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	2,706,000
収支率(車両購入除く収入/経費)(%)	0.109	0.179	0.234	0.194	0.221	0.233	0.218	0.211	0.246	0.286	0.293	0.291	0.223
車両購入費用補助(円)	413,360	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	1,073,160
電話予約件数(件)	433	540	712	563	610	733	737	668	749	894	908	919	8,466
2021年10月～2022年9月	第2期												
	2021年10月	11月	12月	2022年1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	合計
延べ利用者数(人)	1,009	1,077	1,145	967	976	1,193	1,092	1,113	1,150	1,086	1,326	1,103	13,237
利用アカウント数	245	258	258	239	239	264	265	285	266	272	289	283	3,163
1日当たりの平均利用者数(人/日)	32.55	35.90	36.94	31.19	34.86	38.48	36.40	35.90	38.33	35.03	42.77	36.77	
運行距離(km)	2565.7	2937.0	3022.6	2502.4	2588.1	3215.3	2824.7	2997.2	3091.0	2859.4	3463.3	2879.5	34,946
1便当たりの運行距離(km/便)	2.7	2.9	2.8	2.7	2.8	2.9	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.8	
運行回数(回)	944	1,021	1,078	912	915	1,125	1,048	1,065	1,100	1,041	1,269	1,036	12,554
乗合運行回数(回)	201	279	292	239	238	323	255	281	292	242	406	297	3,345
乗合率(%)	0.213	0.273	0.271	0.262	0.260	0.287	0.243	0.264	0.265	0.232	0.320	0.287	
利用料金(円)	419,050	460,050	477,400	400,400	404,900	508,450	449,550	468,800	488,400	451,450	551,750	452,550	5,532,750
運行経費(タクシー借り上げ)(円)	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,054,000	952,000	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,020,000	1,054,000	1,054,000	1,125,600	12,515,600
オペレーター費用(円)	279,000	270,000	279,000	279,000	252,000	279,000	270,000	279,000	270,000	279,000	279,000	270,000	3,285,000
運行補助金(円)	913,950	829,950	855,600	932,600	799,100	824,550	840,450	864,200	801,600	881,550	781,250	943,050	10,267,850
AIシステム費用	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	286,000	176,000	176,000	176,000	176,000	176,000	2,222,000
収支率(車両購入除く収入/経費)(%)	0.278	0.314	0.316	0.265	0.293	0.337	0.285	0.311	0.333	0.299	0.366	0.288	0.307
車両購入費用補助(円)	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	131,960	1,583,520
電話予約件数(件)	897	957	1,007	848	846	1,052	993	1,004	1,044	961	1,188	961	11,758

18,401千円となる。総収入に対する総費用である収支率は、運行開始当初の10.9%から第1期末の29.14%へ2.67倍、第1期全体では22.3%であったものが、第2期は大半の月で30%を超え、最大が8月の36.6%、第2期全体では30.7%に達した。しかし、第1期、第2期それぞれ、11,617千円、10,267千円の運行補助が必要となったが、その間に11.6%ほどは減少させることに成功している。

b) おもやいタクシーの予約成立割合

図-2.4.6には期別の時間帯別デマンド比率を示す。運行開始から利用需要が増加しているのに伴って各時間帯のデマンド数も増加し、情報にシフトしている。その時間帯別デマンド数の分布に大きな差は無いが、1年目には11時台であったピークが2年目以降は10時台にシフトしている。また、14時台のデマンドのピークが顕著になるなど、時間の経過にしたがって利用される時間帯が変わってきている。図-2.4.7には期別の時間帯別デマンド内訳と予約成立割合を示す。各時間帯の予約成立割合は、8時台と16時台を除いて第2期で第1期よりかき低い低下している。特に9、10、12、13、15時台での低下が著しい。その原因は、2期目にはどの時間帯も予約確定前キャンセルデマンドが1期目より増加しているためである。特にデマンドのピークがある10時台、および運転手の休憩時間である12時台で顕著である。また、デマンド数が多い時間帯には配車不可も発生している。

c) 他の公共交通手段との関係と評価

公共交通協議会でもその導入の際の要件となってきたように、おもやいタクシーの導入は、既存交通に過度な影響を与えず、補完的な役割を担う必要がある。ここではおもやいタクシー導入が路線バスとタクシーに与えた影響について整理する。以下では、おもやいタクシー利用者に対して、代替手段である路線バスとタクシーを利用した場合の所要時間や料金などを比較する。

なお、路線バスについては、おもやいタクシーと同じ乗車/降車地点、曜日、乗車時刻の所要時間と料金をGoogle Mapの経路探索機能を用いて求めた。最寄りの乗(降)車バス停まで(から)の徒歩時間を含めた発・着地点間の所要時間である。検索で路線バスの経路がないものはデータから省いた。また、タクシーについては乗車距離から料金を求めた。

おもやいタクシーに対する路線バスの所要時間の比率の分布を図-2.4.8に示す。路線バス

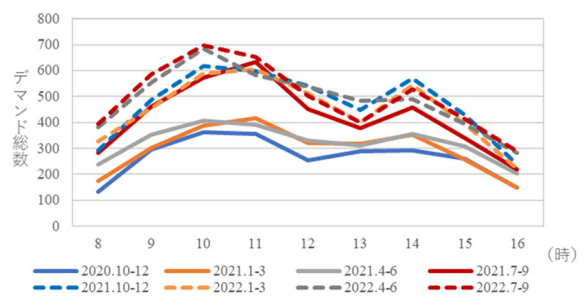


図-2.4.6 期別の時間帯別デマンド数

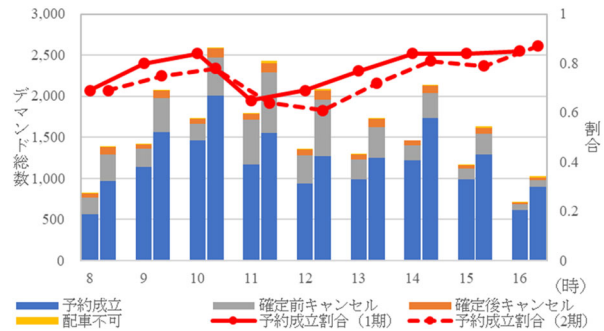


図-2.4.7 期別の時間帯別デマンド内訳と予約成立割合

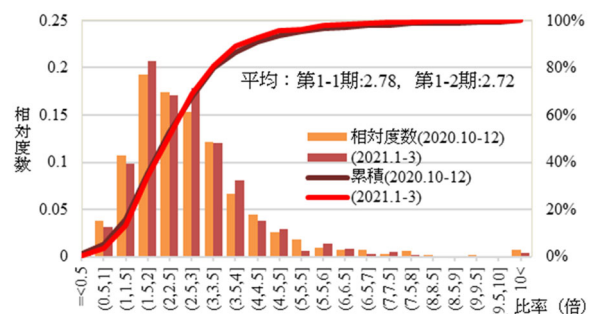


図-2.4.8 おもやいタクシーに対する路線バスの所要時間の比率の分布

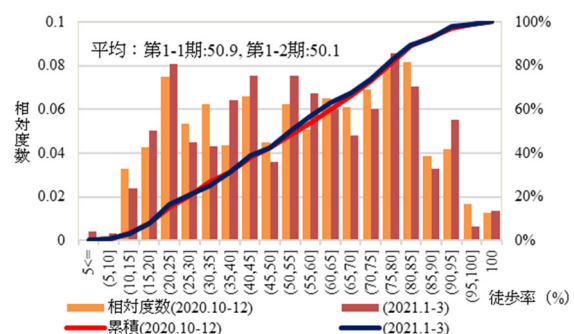


図-2.4.9 所要時間に占める徒歩時間の比率の分布

とおもやいタクシーの所要時間の差の平均値は第1-1期で2.78倍、第1-2期では2.72倍である。図-2.4.9には横軸に路線バスの所要時間のうちの徒歩時間の比率の分布を示す。第1-1期で50.9%、第1-2期では50.1%と所要時間中の

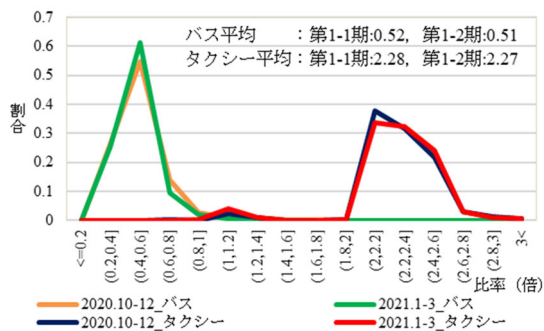


図-2.4.10 おもやいタクシーと路線バス，通常タクシーの料金の倍率の分布

半分が徒歩時間である。中には所要時間のうち大半が徒歩時間であるトリップもみられる。

図-2.4.10には、おもやいタクシーに対する路線バスとタクシーの料金の比率の分布を示す。路線バスの料金の比率は第1-1期で0.52，第1-2期では0.51と約半額，タクシーは第1-1期で2.28，第1-2期で2.27と約2倍の料金である。

このように、おもやいタクシーは路線バスによる所要時間の半分よなっていること、路線バスによる所要時間のうちの最寄りバス停までの不便を解消している一方で、料金は路線バスの2倍である。これより、おもやいタクシーは路線バスの補完的役割を担っているといえよう。また、料金は通常タクシーの約半額で優位であるものの、おもやいタクシーの事業者が荒尾市内のタクシー会社であり、欠損分は補填されることから、競合関係にはないといえる。

d) おもやいタクシーに対する評価

おもやいタクシーへの評価を図-2.4.11(a)～(e)に示す。運賃や待ち時間については高い評価を得ており、第1-1期よりも第1-2期はより好意的な意見が増えている。特に、運賃や待ち時間に対する満足度は高い。利用した感想も「とても良い」が両期とも96%を超えている。今後の利用意向についても全員が「是非また利用したい」か「機会があれば利用したい」であり、是非また利用したいの比率は1-2期が78.7%であったのが第1-2期には90.9%にまで増加した。以上の結果から、おもやいタクシーは利用者から高い評価を得ているとあって良いであろう。

一方で、コロナ禍での相乗りの不安に対しては、第1-1期には不安を感じるとした比率は16%であったが第1-2期になると48%にまで上昇している。パーテーションや消毒液の設置、車内の換気といった感染対策を行っているものの、利用者であっても感染リスクへの不安は

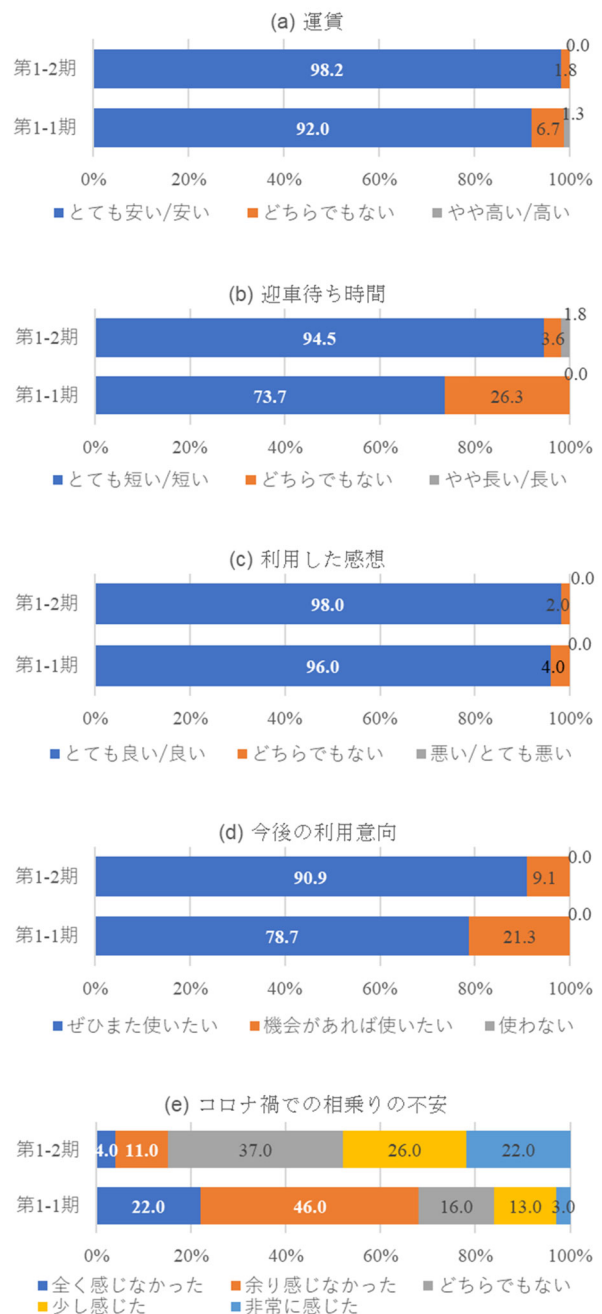


図-2.4.11 おもやいタクシーにより利用者の評価

小さくないと考えられる。

(3) 荒尾市おもやいタクシーの導入効果の分析

我が国の地方都市では路線バス利用者が急激に減少しており、サービス維持のための自治体からの補助額は増加している。荒尾市でも例外ではなく、2004年に市営バス事業を民間に移譲したことから財政負担は一旦は軽減したが、その後も利用者数は減少し続け、2006年の38万人から2020年には19万人と半減した。その間、荒尾市では地域公共交通活性化協議会での協議のもと、幹線系バス路線網への集中再編や

路線廃止エリアへの定時定路線型デマンドタクシーの導入などを行ってきた。しかし、公共交通利用者の減少とサービス維持のための補助額の増加は止まらず、2020年度には7,000万円を超えた。そのため、2018年には荒尾市地域公共交通網形成計画の中で、廃止されたり再編されたりしたバス路線を補完するためのモビリティとして区域運行型オンデマンドタクシーの導入を決め、2018年度、2019年度の仮説検証型の実証実験を経て、2020年10月からリアルタイムオンデマンド・区域運行・事前確定運賃の荒尾「おもやいたクシー」として実装運行を開始した。

運行開始から、予約ログデータ、運行軌跡データ、利用者アンケート調査を実施し、予約ログデータから得られる乗車地点と降車地点の地緯度/経度と乗車時刻と、利用者アンケートに記入してもらった乗降ポイントの住所か施設、および利用した時刻によってこれらのデータを紐付けた統合データを作成し、利用と運行の実態、利用者の評価などを、現在まで2年5ヶ月にわたって分析してきている。これらより得られた結果と知見、課題を整理する。

- 1) 利用トリップ数と相乗り率は順調に増加していること、トリップ長がやや短距離化していること、ODペア数は増加し、その分布は広域で多様になっていることなどが明らかになった。おもやいたクシーの利用は拡大し、その利便性や利用の仕方の多様性が市民に広く周知されてきており、これらの傾向は今後も続くと考えられる。さらに登録者を増やし、利用者を増やすための工夫が求められる。
- 2) おもやいたクシーは、路線バスでの所要時間、その中でも最寄りバス停への徒歩時間比率が大きい移動に用いられていること、料金は路線バスでの移動の際の料金の2倍ほどとなっていることから、路線バスとの競合はないと考えられる。おもやいたクシーはバスサービス空白地域の代替、不便地域の補完的な役割を担っている。この役割の維持、向上を目指す必要がある。
- 3) 従来タクシー利用の場合に対して、おもやいたクシー利用時に支払った料金は半分程度であるため、タクシー利用者は減っている可能性はある。事実、おもやいたクシーを利用しなかった場合の移動手段は従来タクシーが約4割を占めている。しかし、おもやいたクシーの運行委託先は荒尾市タクシー協会であり、欠損は荒尾市から補填される契約としているため、運営上のリスクは回避できる。ただし、欠損補助のために事業者利用者拡大や経費縮減のイン

センティブが働きにくい。何らかのインセンティブ補助方式を導入することも考える必要がある。

- 4) おもやいたクシー利用者に対するアンケート調査から、運賃や迎車待ち時間に対する評価は年々高まってきている。また、利用した感想も今後の利用意向も増加してきている。一方で、コロナ禍で相乗りに対する不安感はかなり高まった。現利用者にはさらに利用頻度を高めてもらうこと、乗合に対する不安軽減のためにはタクシー車両ではなく、乗車定員が大きい車両への変更も必要である。

- 5) 投入車両台数は2台のみであることから、利用者の増加に伴い、時間帯によっては迎車待ち時間が増加しており、予約確定前キャンセル数が増加し、デマンドに対する予約成立割合が低下するようなケースが見られるようになった。投入台数を増加させると迎車待ち時間は短縮され、利便性は向上するが、相乗り比率は低下して運行効率性は低下する。利用需要に応じて適正な投入台数を設定する必要がある。

参考文献

- 1) 村上麻紀, 森利勝, 溝上章志: リアルタイムオンデマンド配車型乗合タクシー「おもやいたクシー」の利用と運行の継続的実態分析, 土木学会論文集D3, 2023 (掲載決定)

2.5 おわりに

利便性の向上や提供して欲しいサービスの多様化などの利用者の側面からだけでなく、運行効率性向上による経営改善やドライバーの高齢化や不足への対応などのサービス提供者の側面、および市民へのモビリティサービスの提供や適正な補助などの行政の側面からも、既存の公共交通手段だけで市民に移動サービスを提供することはできなくなっている。そのような中、地域が置かれた環境の違い、特に人口の規模や密度、他の公共交通手段の整備状況、利用者の主要な目的の違いによって車両や運行形態を柔軟に変更できるオンデマンドサービスは有用である。その典型は、C2Cによるオンデマンド型のライドヘイリングサービスであろう。しかし、我が国では、道路運送法によって、1種免許保有者による乗合サービスしか認められていないため、今後実現が可能で最も合理的なモビリティサービスは、公共交通空白地域における自家用旅客有償運送を除くと、B2Cによるライドシェアリングサービスであろう。

本章では、オンデマンド型モビリティサービスの3つの活用場面について、それぞれの実証実験や実装運行から得られた知見とこれらの導入可能性について検討を行った。第2節では、自家用旅客郵送輸送を想定した中山間地におけるオンデマンド型の相乗りサービスの成立可能性と導入効果の分析を行った。そこでは、熊本県上天草市教良木・内野河内地区で実施された自家用旅客運送「のれな号」実証実験時に行った移動実態と評価に関する調査とライドシェアを対象としたマッチングモデルを用いて、中山間地における相乗りサービスの成立可能性と導入効果を検討した。その結果、

- 1) マッチングモデルを適用した結果と実際の訪問箇所数、出発時刻と比較したところ、両者に大きな乖離はなく、分析対象地域において相乗りサービスにより大部分の移動を分担できる可能性がある。
- 2) 全回答者の活動開始可能時刻を一律に早めた場合、マッチングの効率性が向上し車両の総走行時間が減少する効果が見込める可能性があり、さらにライダーの移動機会の創出に繋がる可能性もある。
- 3) これらの知見より、特に需要が限られている中山間地においては、移動・活動パターンをある程度、集約することができれば、相乗りサービスの導入可能性は高まるといえる。
- 4) また、例えば、午前中に行っている買い物を午後にはずらすなど、実施時刻の制約が緩い活動については、その活動時間帯の変更を呼びかけることによって、より効率的な運用が可能になることを明らかにした。

第3節では、2020年秋に実施した『商店街と連携したピアクレスMaaS実証実験』から得られた知見と実装に向けた課題』を副題として開催した「くまもと産MaaSの実装に向けた政策・技術検討シンポジウム」での議論をもとに、都市圏周辺部におけるライドシェアタクシーサービスと連携した地域MaaSの導入可能性とその課題について整理した。その結果、

- 1) AIタクシーのような新たなモビリティサービスは、実証実験への参加者だけでなく、非参加者にも利便性の高さと必要性は認知されている
- 2) 商店街と連携した広義のMaaS事業は商店街の価値を高めると同時に、公共交通の利用を促進する可能性があることを明らかにした。
- 3) 一方で、連携主体である健軍商店街に対してはモビリティと連携した活性化の施策が必要であること、アプリ開発に関しては既存の公共

交通手段も含めた統合サービスの検索・予約・決済が可能な狭義のMaaSの機能を備えた上で、対象地域の環境や解決したい課題に応じたMaaSアプリを低価格で効率的に開発する必要があること、オンデマンドタクシー運行事業者に対しては導入する未知のモビリティサービスを市民に周知して潜在的利用者を発掘することや配車台数や運転手のシフトなど、効率的で適正な運行計画を行う必要があること、

- 4) 新たなモビリティサービスがバス路線の廃止や減便の代替的、既存公共交通手段の補完的サービスとなった場合の公共交通サービスとしての位置づけ、財政的支援を含む支援のあり方などについて、早急に議論を開始する必要がある。

第4節では、2020年10月に本格運行を開始した荒尾市おもやいタクシーの2年半の予約ログデータ、運行軌跡データ、利用者アンケート調査の紐付けを行った統合データを用いて、利用と運行の実態、利用者の評価を継続的に分析した。その結果、以下が明らかになった。

- 1) おもやいタクシー利用者に対するアンケート調査から、運賃や迎車待ち時間に対する評価は年々高まってきている。また、利用した感想も今後の利用意向も増加してきていることが明らかになった。
- 2) おもやいタクシーはバス輸送サービス空白地域での代替、不便地域での補完的役割を担っており、この役割を維持した上でサービスの向上を目指す必要がある。
- 3) 新たなモビリティサービス導入の試みの多くが実証実験だけに終わって、実装、および運営の自治体への移管ができない中、運行を地元のタクシー協会に委託し、赤字分の補填を行うなど、荒尾市はおもやいタクシーを公的交通サービスとして位置づけている。一方で、事業者利用者拡大や経費削減の動機が働きにくい契約となっている。何らかのインセンティブ補助方式を導入することも考える必要がある。
- 4) 利用需要と投入台数によって決まる迎車待ち時間が利用需要を決める重要な要因となっていることや、利用距離が短距離化したために収入の増加率は利用需要の増加率ほど増加しないことなどが明らかになったことから、利用需要に応じて適正な投入台数や車両サイズを設定していく必要がある。

第3章 MaaSや新たなモビリティ導入による需要予測と政策評価を支援する外部プログラムとの連携によるマルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用

3.1 はじめに

地方部では、急速な人口減少と高齢化に伴う公共交通に対する需要の減少とドライバー不足により、採算性の低いバス路線の減便や廃止が進み、交通不便地域や空白地域が拡大している¹⁾。しかし、地域公共交通は、自動車を持たない高齢者や学生等の交通弱者にとって暮らしを支えるインフラであることから、地域のニーズに即した従来の公共交通に代わる低コストの移動サービスの提供が急務となっている。そこで、デマンド応答型交通（DRT：Demand Responsive Transport）が注目されている。DRTは、複数の利用者が乗り合って利用するという路線バスの性質と、予約に応じて利用者の希望する地点間を運行するというタクシーの性質を併せ持っており、複数の利用者を一度に運ぶことで運行費用を抑えつつ、個々の利用者の異なる移動ニーズにも応えることができる。そのため、中山間地など公共交通空白地域におけるコミュニティ交通として運行されている場合が多い。一方で、都市部においても交通不便地域は存在し、既存の鉄道や路線バスを補完する移動手段としてDRT導入が有効な場合がある。しかし、需要の少ない過疎部とは異なり、大量の需要に対して適切な配車計画・経路計画を人手で行うことは現実的に不可能である。そこで、近年の位置情報を用いたICT関連の技術進歩により、予約配車機能を持つオンデマンド交通のシステムが開発されている。その一つであるSAVS（Smart Mobility Vehicle System）は、大量

の需要に対してリアルタイムに最適配車を行うオンデマンド型相乗りタクシー配車システムである²⁾。利用者がスマートフォンなどのアプリ上で乗車地と目的地を指定すると、同じ方向へ移動したい人同士が自動でマッチングされ、マッチングされたユーザー同士が同じ車両に乗車することで効率的に輸送できる。熊本県荒尾市では、2018年度と2019年度の2度のSAVSを導入した実証実験を経て、2020年10月より「おもやいタクシー」として本格導入している³⁾。

このような交通サービスを都市に社会実装する場合、地域の道路状況や交通利用者の行動パターンに基づく利用状況を想定しながら、地域のニーズと事業の継続性を考慮して適切なサービスの内容を事前に評価・検討することが重要である。しかし、相乗りタクシーサービスのような新しい交通サービスでは、過去に知見がなく導入時の想定が困難な場合もある。一般的に本格導入前に実証実験が行われるが、多大な労力と費用がかかり、検証できる内容も限定されることから十分な検証が困難である。

そこで、我々は対象地域の交通利用者の行動および交通状況をコンピュータ上に再現し新たな交通サービス導入時の利用状況を計測・評価することを目的とした、交通利用者一人ごとの交通行動を表現可能なエージェントベースのメソ交通シミュレータ MAUMS (Multi-Agent-based Urban Mobility Simulator：旧称 K-MATSim)を開発し、都市部に相乗りタクシーが導入された場合の評価を行った⁴⁾。この研究では、

MAUMS と SAVS を連携した運用シミュレーションを構築し、現状のタクシー需要を前提とした相乗りタクシーの導入効果を検証した。しかし、相乗りタクシーの需要については単純に従来のタクシー利用者を置き換えたものとしており、サービス導入時に利用者の従来交通手段から相乗りタクシーへの転換の意思決定は考慮していない。本研究では、熊本県荒尾市で運用されている相乗りタクシーサービス「おもやいタクシー」を対象として、利用者の相乗りタクシーへの転換モデルを組み込んだ運用シミュレーションを行い、オンデマンド型相乗りタクシーの導入効果を評価した。

シミュレーションによる評価の結果、シミュレーションでの推計値と実績値との乖離が課題となった。そこで、シミュレーション結果と利用実績データを合わせるために、サブモデルである相乗りタクシーへの転換モデルのパラメータの修正を試みることにした。シミュレーション結果と実績値データを同化させる試みとしては、重中らの研究がある⁵⁾。大規模イベントにおける人の流れを再現するために、GPS やカメラなどから得られた局所的な実績データをもとに、人流シミュレーションのパラメータを、遺伝的アルゴリズムを用いて更新することで、イベント会場からの複数の経路の人の流れを再現した。福田ら⁶⁾は、交通流シミュレーションにおいて大規模ネットワークを対象として実際の交通状況を再現する際のキャリブレーションにかかる計算コストの大きさを解決するために、交通流ダイナミクスをエリア単位に縮約したキャリブレーション手法を構築した。これは、数値解析モデルで最適化した交通需要を交通流シミュレーションに入力し、シミュレーション結果と解析結果との乖離をさらに数値解析モデルにフィードバックすることで、データの同化を試みるものである。しかし、いずれの研究もキャリブレーションの対象はシミュレーションのサブモデルである対象とする人々の行動特性パラメータではなく、行動結果となる行動自体を制御する歩行者の誘導や需要自体である。従って、サービス水準の異なるシナリオ下においては、人々の行動自体が変化することから、その状況再現には用いることができない。

そこで、本研究では実績データを用いて、運用シミュレーションのサブモデルである相乗りタクシーへの転換モデルのパラメータのキャリブレーションを行うシミュレーションベースの最適化手法を開発し、適用した。

3.2 MAUMSの開発とその性能/妥当性検証

(1) MAUMSの解析フロー

MAUMSは、我々が独自に開発したエージェントベースのメソ交通流シミュレータである。入力された道路ネットワークや初期交通需要などのシナリオデータに基づいて対象地域の交通環境を生成し、個々の交通利用者の交通行動と、それによって生じる動的な交通流をシミュレートする。

図-3.1.1を参照しながら、以下にその概略を概説する。個々の目的地に向けて時々刻々に発生するトリップごとに1エージェントとして生成され、内挿された交通手段選択モデル、経路選択モデルに基づいて手段と経路の選択を行う。交通手段選択モデルでは、徒歩や自転車、二輪車、自動車、バス、鉄道、タクシーなど、複数の交通手段の中から効用が最大の交通手段が選択可能である。経路選択モデルでは、当該エージェントの目的地までの複数経路のうち、最小コストの経路が選択される。経路コストは、経路を構成する各リンクの期待所要時間とする。

次に、個々のエージェントが選択した交通行動を交通ネットワーク上で集計化した交通流シミュレーションを行う。メソタイプの交通流シミュレーションモデルにより車両は一台単位で表現され、各車両の道路リンク上での挙動は交通密度、交通量、平均速度の関係式 (FD : Fundamental Diagram) に基づいて決定される。

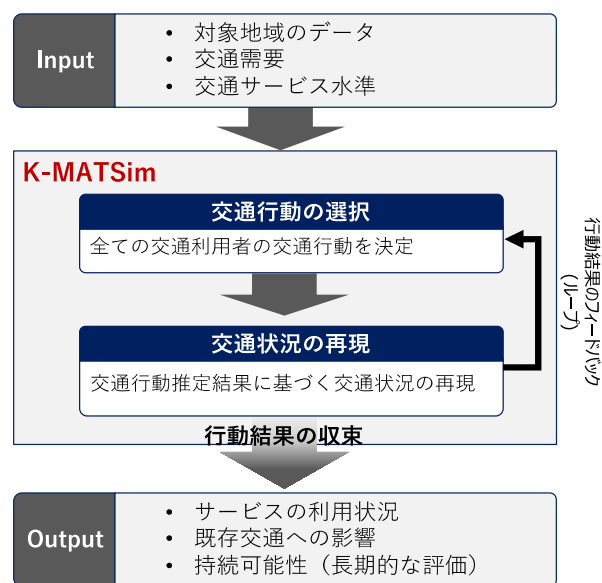


図-3.1.1 MAUMS の解析フロー

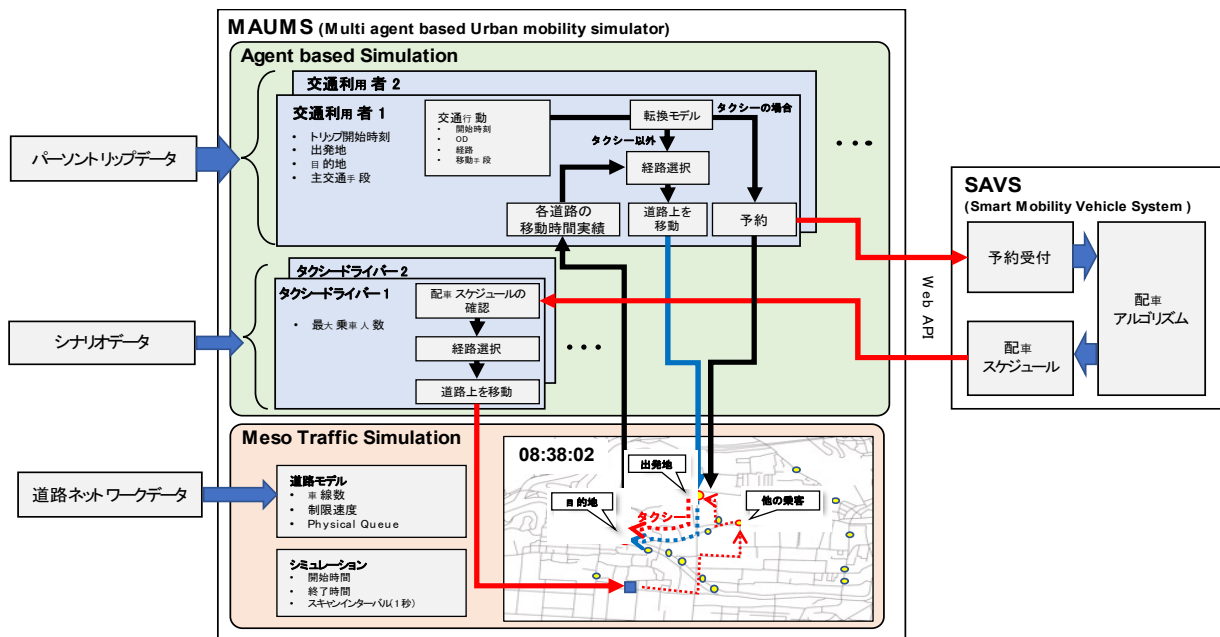


図-3.1.2 MAUMS と SAVS の連携処理フロー

交通渋滞現象の取り扱い方法には、渋滞の延伸・縮小を考慮可能なPhysical Queueモデルを採用している。交通行動のシミュレート後、エージェント単位で当日の交通ネットワーク上での移動実績が道路リンク単位の移動時間の実績情報として記録され、翌日の交通行動選択時の期待所要時間として反映される。

このように、MAUMSはエージェントベースシミュレーションとメソ交通流シミュレーションのマクロ・ミクロのループ構造となっており、これらを繰り返すことによってエージェントの交通行動の変化およびネットワーク上の交通状況の変化を表現する。ある程度反復回数を重ねて、全エージェントの行動が収束した時点の結果を、該当ケースに対する定常状態として各種評価指標を算出する。なお、MAUMSは、交通工学研究会が策定した交通流シミュレーションの標準検証プロセスVerificationマニュアル7)に基づく標準性能に準ずることを検証済である。

(2) MAUMSとSAVSとの連携

相乗りタクシーの導入効果を事前に評価するために、図-3.1.2に示すように、相乗りタクシーへの転換モデルを組み込んだMAUMSとリアルタイム最適配車アルゴリズム SAVS を連携させた運用シミュレーションを行った。SAVSは、公立はこだて未来大学、名古屋大学、産業技術総合研究所と株式会社未来シェアにより開発されたリアルタイムなオンデマンド型相乗りタクシー配車システムである。大量の需要に対

する最適配車・経路探索が可能で、特に、事前予約を必要とせずに乗車したいときに配車依頼を行うことができることや、相乗りが許容されるために車両運用の効率化が図れること、コンピュータ制御により自動かつリアルタイムに配車を行えることなどを特徴とした配車システムである。

本研究では、オンデマンド型相乗りタクシー（以後、AIタクシーと記す）サービスが導入された状況のシミュレーションを行うために、MAUMSとSAVSを連携させ、全ての車両および利用者の挙動をMAUMS上でシミュレートしながら、AIタクシー利用者の予約に対してはSAVSの配車アルゴリズムを用いて最適配車を行う。SAVSは実運用と同等のクラウドシステムを用いている。実際にAIタクシー利用者やタクシー車両とSAVSがやり取りをする通信部分を、MAUMS上でシミュレートされる交通利用者エージェントやタクシー車両エージェントとの通信に置き換えている。これにより、SAVS側は実運用時と同等の処理を行うことができる。MAUMSとSAVSとの連携はWebAPIを介して行う。SAVSでは、利用者のスマートフォンやPC、タクシー内の車載器とクラウドシステムとの通信は基本的にWebAPIを用いて行われる。これらのWebAPIを用いた通信部分をMAUMS上のエージェントが模擬することで、あたかも人間や車載器がアクセスしているようにみなすことができる。これにより、実証実験では実現が困難な数万人規模の利用者および数百台の車両が導入された状況での検証を可能とした。

(3) 交通利用者の現利用手段からの手段転換モデル

MAUMSのエージェントベースシミュレーションモデルには、出発時刻や目的地、手段、経路といった選択行動を記述する行動モデルが必要である。ここでは、AIタクシーの導入により、現利用手段からAIタクシーへの手段転換行動だけに変更が起こることを想定し、交通利用者が現在の利用交通手段からAIタクシーへ転換を予測するAIタクシーへの手段転換モデルを推定した。手段転換モデルを推定するのに、荒尾市において、交通実態調査とおもやいたクシーへの選好意識調査（SP 調査）を実施した。おもやいたクシーへの転換モデルには非集計型2項ロジットモデルを用いている。

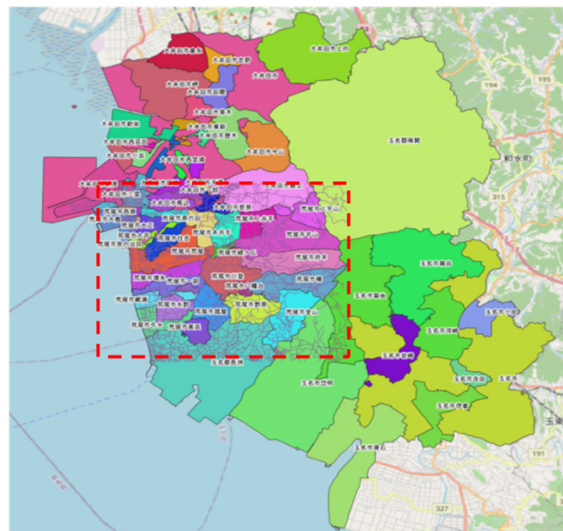


図-3.3.1 シミュレーションの対象エリア（破線の枠内）

3.3 MAUMS&SAVS連携シミュレータによる荒尾おもやいたクシーの需要と運用の評価

(1) 評価対象エリア

MAUMSを適用してAIタクシーの利用者を予測し、導入効果を計測する。対象エリアは熊本県荒尾市の「おもやいたクシー」のサービスエリアと同じ図-3.3.1の赤枠で示す範囲とした。図中の各ゾーンは、荒尾市交通実態調査におけるゾーンを示す。

(2) おもやいたクシーへの転換モデル

MAUMS上で交通利用者が現在の交通手段からおもやいたクシーへの転換行動を予測する手段転換モデルを推定する。ここでは、荒尾市交通実態調査とおもやいたクシーへの選好意識調査（SP調査）を実施し、非集計型の2項選択ロジットモデルを推定した結果⁸⁾を用いる。転換モデルの推定結果を表-3.3.1に示す。

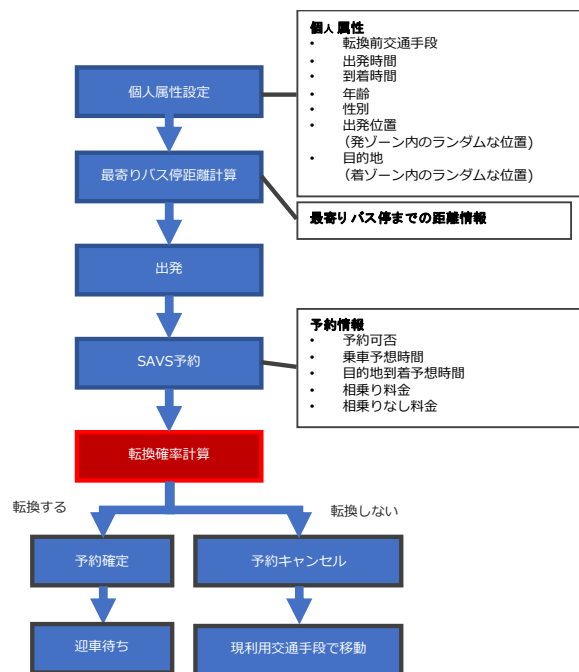


図-3.3.2 おもやいたクシーへの転換決定フロー

表-3.3.1 おもやいたクシーへの転換モデル

	説明変数	推定値	t値
利用する	料金 (円)	-0.008	-7.46
	同乗者の選択可能性ダミー (1:同性,0:選べない)	0.643	2.26
	遅れ時間 (分)	-0.091	-2.75
	年齢	0.066	3.81
	現利用手段による所要時間 (分)	0.034	2.96
	性別ダミー (1:男性,0 女性)	1.107	3.20
	現利用交通手段ダミー (1:車,0:公共交通)	2.264	2.96
	現利用交通手段ダミー (0:車,1:公共交通)	2.615	3.20
	自宅から最寄りのバス停までの距離 (km)	0.537	1.77
利用しない	定数項	3.246	2.03
サンプル数		312	
尤度比		0.218	
的中率		0.724	

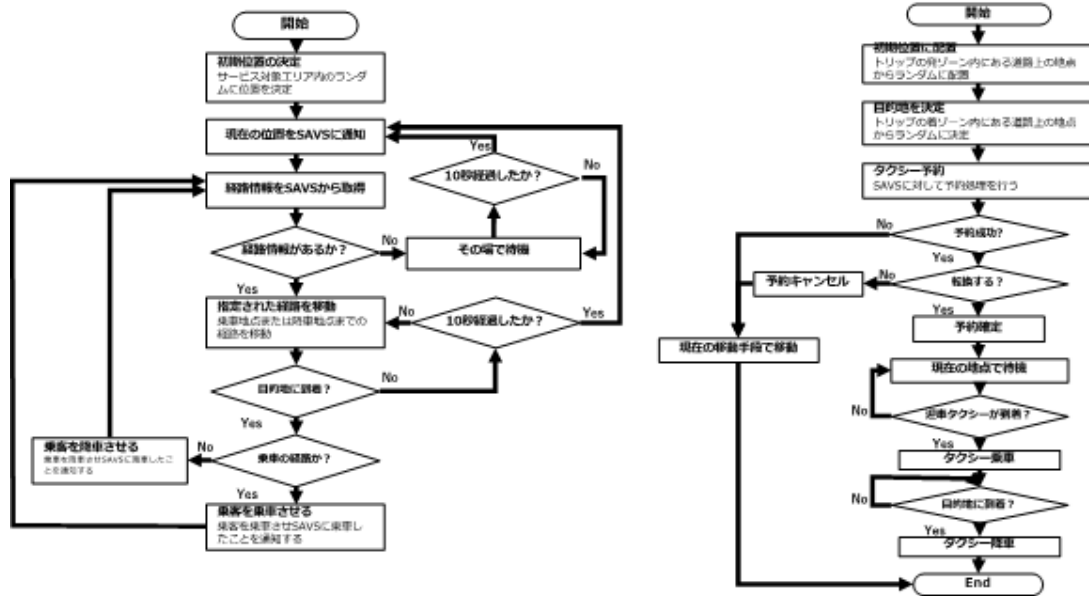


図-3.3.3 ドライバーと交通利用者の行動ルール

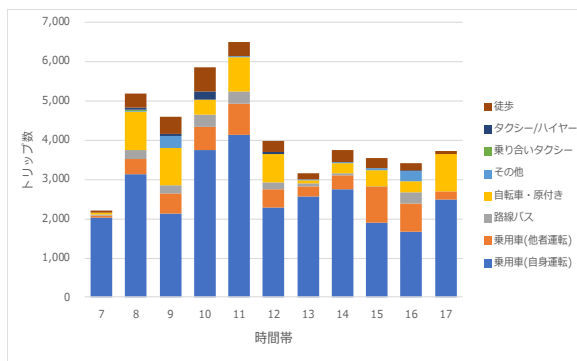


図-3.3.4 対象トリップの時間帯ごとのトリップ数と交通手段の内訳

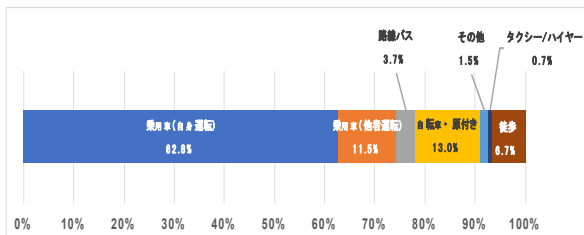


図-3.3.5 対象トリップの現利用交通手段の分担率

MAUMSでは、図-3.3.2に示すように、おもやいタクシーを利用可能な全ての交通利用者に対して仮予約処理を行い、そこで得られた利用の可否、料金、到着予想時刻などの情報に基づいて転換確率を算出する。この値が発生させ0から1の一樣乱数以下のエージェントに対して仮予約を確定し、現在の交通手段からおもやいタクシーに転換するものとする。

図-3.3.3には上記のおもやいタクシーへの手段転換決定プロセスを含む交通利用者エー

ジェントと、SAVSから指示されるタクシーエージェントの行動フローを示す。

(3) 対象トリップ

シミュレーションの対象トリップは、以下の条件に合致する45,869トリップである。

- ・ 荒尾市交通実態調査結果データのうち、シミュレーション対象エリア内のゾーン間を移動する内々トリップ
- ・ 出発時間、到着時間、性別、年齢および発着ゾーンが無効なトリップは除外
- ・ 自動車の平均乗車人数は1.331人
- ・ シミュレーション対象時間である7:30～17:30に出発するトリップ

対象となるトリップの時間帯ごとのトリップ数と交通手段の内訳および現利用交通手段の分担率をそれぞれ図-3.3.4、および図-3.3.5に示す。これらのトリップのうち荒尾市交通実態調査の相乗りタクシーの利用意向に関する項目で「ぜひ利用したい」、「条件が合えば利用したい」、「利用しようとは思わない」の選択肢において、「利用しようとは思わない」と回答したトリップについては、相乗りタクシーの仮予約を行わないものとした。また、荒尾市交通実態調査には、同行者人数データが含まれることから、これを同行者人数として相乗りタクシーを仮予約するものとした。

(4) おもやいタクシーのサービス内容

運用シミュレーションにおけるおもやいタクシーのサービス内容は、現行のおもやいタクシーのサービス内容に合わせて、表-3.3.2に示

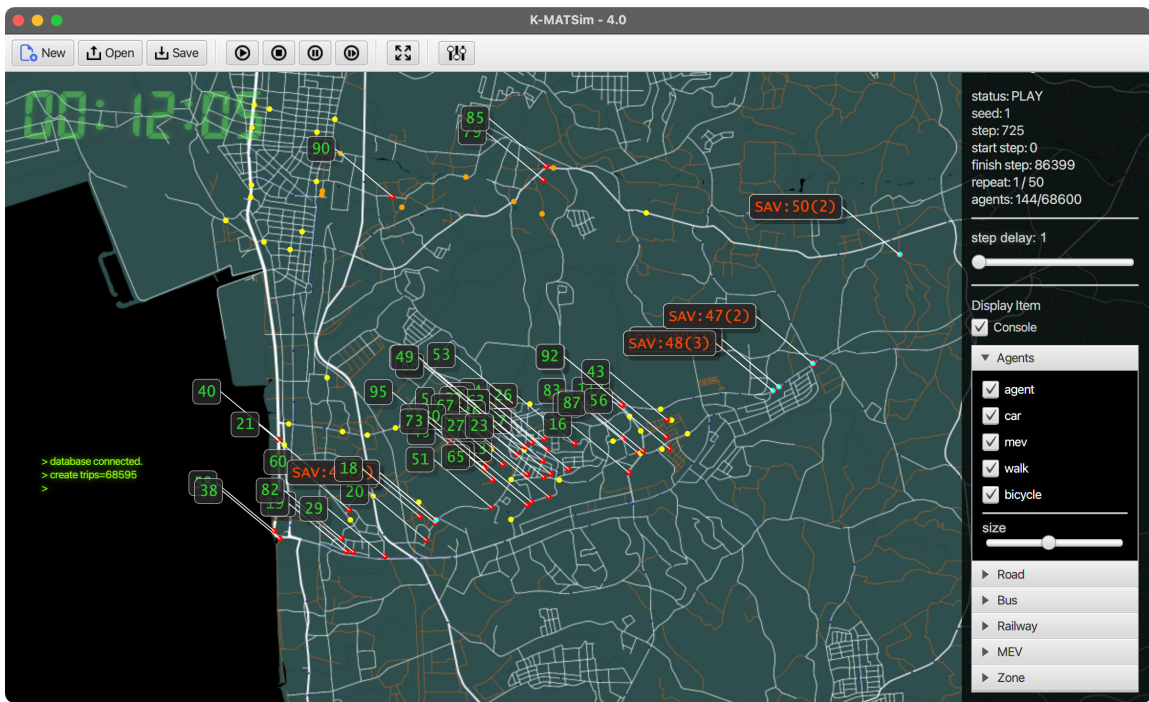


図-3.3.6 シミュレーション実行時画面イメージ

す通りとした。MAUMSを実行している際のモニター画面のキャプチャを図-3.3.6に示す。

(5) シミュレーション結果

図-3.3.7 に時間帯ごとの利用トリップ数の実績値(土日祝日を除く 2021 年 4~6 月の平均値)と MAUSM によるシミュレーション結果を示す。日平均トリップ数の実績値は 30 であるのに対して、シミュレーション結果は 152 となり、全時間帯において実績値よりもかなり過大になっていることが分かる。

過大な推計となった理由として、転換モデルの推定の用いたデータが、実在しない選択肢や仮想のサービスに対する選好の表明データであり、種々の回答バイアスが存在することが実証されている SP 調査データであったためと考えられる。

3.4 観測データを用いたMAUMS内の転換モデルの同化⁹⁾

(1) 転換モデルのパラメータの補正

MAUMS&SAVSによるシミュレーション結果と実績値とをできるだけ一致させるために、運用シミュレーションのサブモデル、ここでは、過大推計の原因となっているMAUMSのマルチエージェントシミュレーションモデル中のおもやタクシーへの転換モデルのパラメータ

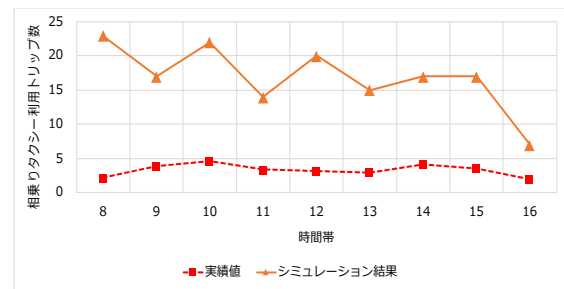


図-3.3.7 利用トリップ数の実績値とシミュレーション結果

対象エリア	荒尾市全域	
運行台数	2台	
休憩時間	1台目	11:30~12:30
	2台目	12:45~13:45
	※休憩時間内の予約は受けけない	
乗車可能人数	全て3名(セダントイプ)	
運行時間	8:00~17:00	
	※降車予定時間が17:00を過ぎる場合は予約不可	
配車条件	・乗車希望時刻から120分以内に乗車可能	
	・乗降場所間の距離が100メートル以上	
	※条件を満たさない場合は予約不成立	
料金	~2km	300円
	2km~3km	400円
	3km~4km	500円
	4km~5km	600円
	5km~	700円

表-3.3.2 運用シミュレーションの相乗りタクシーサービス

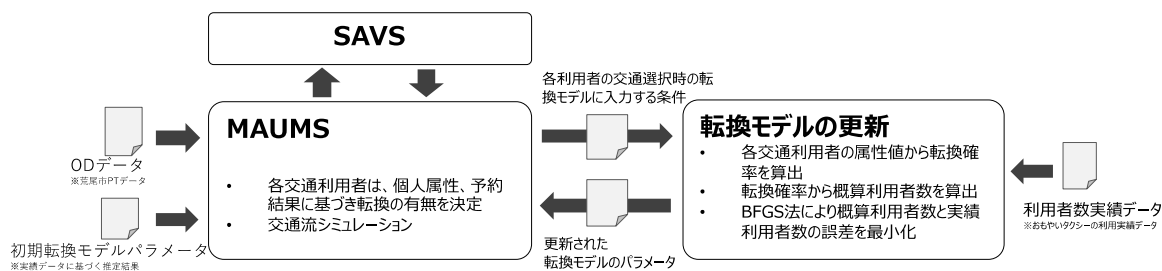


図-3.4.1 転換モデルの更新フロー

を補正することを試みる。その方法の一つとして、実績値とシミュレーション結果の誤差を表す何らかの評価関数を定義し、それが小さくなるように、少しずつパラメータを変化させていくヒューリスティックな更新方法がある。しかし、パラメータの更新によって変化する転換率の変化によっておもやいたクシーの利用者数が増えるので、迎車待ち時間や移動時間などの属性自体も変化するという、いわゆるマクロ・ミクロループが発生する。また、迎車待ち時間や移動時間は、MAUMSの実行結果から得られるものであるため、上記のようなヒューリスティックな方法によるパラメータ更新には膨大な回数の実行が必要となる。特に、SAVSと連携したMAUMS&SAVSの実行には1回の実行に10時間以上の計算時間を要することから、現実的ではない。

そこで、パラメータ値が更新される度にMAUMSの中の交通流シミュレーションから得られる個人属性や料金、待ち時間、最寄りバス停までの距離などの特性値は固定しておき、これらを入力して得られる転換確率の平均値を用いたときに実績トリップ数が生起する同時生起確率が最大になるようにパラメータを更新する方法を試みる。以下にパラメータの更新方法と手順を説明する。

- Step-1: 初期 $n=0$ の効用関数のパラメータを θ_n とする
- Step-2: n 回目の更新によるパラメータ θ_n による転換モデルを内装したMAUMSから得られる全てのトリップの属性 k ($k \in K$, たとえば、利用時間帯や現利用手段など) を持つ総数が T_k のトリップの転換確率の平均値を p_k を算出する。
- Step-3: 属性 k を持つ総トリップ数 T_k のうち、実際におもやいたクシーに転換したトリップ数が x_k であるとき、その事象が生起する同時生起確率 L は次式で表すことができる。

$$L = \prod_{k=1}^K p_k^{x_k} \cdot (1 - p_k)^{T_k - x_k}$$

- Step-4: L を最大にするように、転換モデルのパラメータを θ_n に更新する。
- Step-5: 更新されたパラメータ θ_n を用いてシミュレーションを実行する。
- Step-6: $n = n + 1$ としてStep-2に戻り、 θ_n が収束するまで繰り返す。

ここでは、トリップの属性 k を出発時間帯とし、時間帯別利用トリップ数について、MAUMS & SAVSシミュレーションから得られる時間帯別の個人の転換確率の平均値を用いた場合の実績時間帯別利用トリップ数が生起する同時生起確率を最大にするように、パラメータを更新していく。前述の通り、得られた最適なパラメータに基づいてMAMUS&SAVSシミュレーションを行った場合、個々の利用者の行動が変化し、特性値も変化することから、実績データとは必ずしも一致しない。そのため、図-3.4.1に示すように、更新パラメータの変動が収束するまで、運用シミュレーションとパラメータの更新を繰り返し実施する。

(2) 転換モデルの全パラメータを更新した場合

まず、2021年と2022年のそれぞれ土日祝日を除く4~6月のおもやいたクシーの時間帯別利用トリップ数の平均値を実績値とし、上記の方法で転換モデルの効用関数を構成する全ての変数のパラメータ θ を更新した。パラメータの更新ごとのMAUMS&SAVS実行結果から得られたおもやいたクシーの1日の利用トリップ数を図-3.4.2に示す。更新を繰り返すごとにおもやいたクシーの1日の利用トリップ数の実績値である40.92トリップ/日との乖離は小さくなり、13回の更新でほぼ実績値に一致している。このときの時間帯別利用トリップ数の実績値とMAUMS&SAVSシミュレーション結果を比較したものを図-3.4.3に示す。パラメータ更新によって時間帯ごとの利用者数の乖離も小さくなっている。

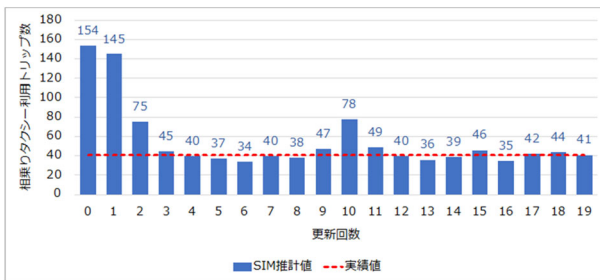


図-3.4.2 全パラメータの更新によるおもやいタクシー利用者数の推計値と実績値

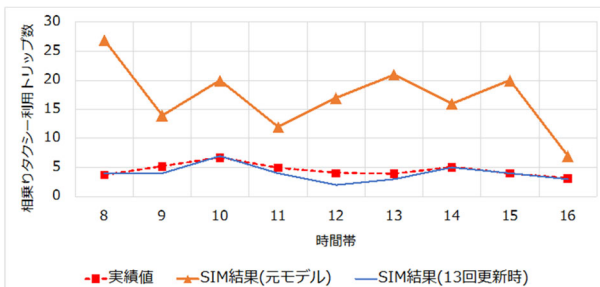


図-3.4.3 時間帯ごとの実績値と MAUSM&SAVS による推計値

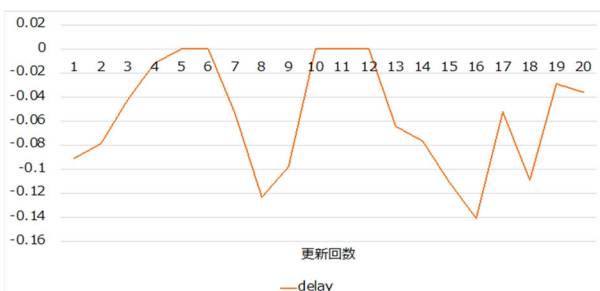


図-3.4.4 迎車待ち時間のパラメータの収束状況

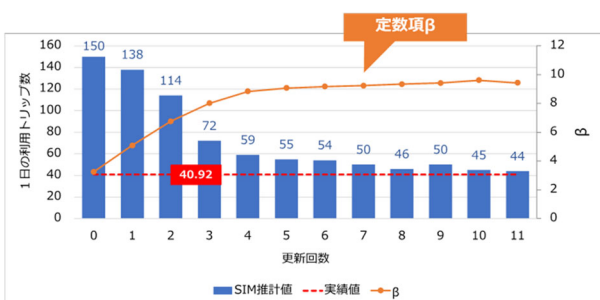


図-3.4.5 更新回数ごとのおもやいタクシー利用者数の推計値と実績値

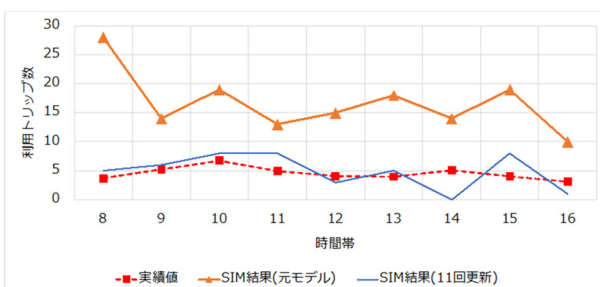


図-3.4.6 閾値 β だけを更新したときの時間帯別利用者数の実績値と推計値

個々の変数のパラメータについても、更新を繰り返すごとに最適値に漸近的に収束していくと期待していたが、結果はかなりばらつく結果となった。その例として、到着予定時刻からの到着遅れ時間についてのパラメータの更新ごとの推移を図-3.4.4に示す。更新ごとにパラメータ値はかなり変動していることがわかる。これは、推定すべきパラメータの数が多い場合、パラメータ同士が相互に調整しあうことが可能なために、解が一つに定まらないためと考えられる。このような場合は、たとえば符号条件を与えるなど、パラメータごとに何らかの制約を設けるなどの工夫が必要であろう。

(3) 転換モデルの閾値パラメータ β のみ更新した場合

以下では、転換モデルの効用関数の全ての変数のパラメータではなく、その他のパラメータは固定し、効用関数の定数項 β 、つまり転換するための効用の閾値だけを実績値によって更新する。実績値としては、全パラメータ更新時と同様に、土日祝日を除く2021年と2022年のそれぞれ4~6月のおもやいタクシーの利用トリップ数の時間帯別平均値を用いた。

図-3.4.5は、それぞれ2022年4~6月の実績値を用いて更新した収束計算ごとの β との推定値、およびその際の利用トリップ数の推計値と実績値、および、図-3.4.6は時間帯別の推計値と実績値を示す。閾値 β についても更新回数を繰り返すことによって収束しており、11回の更新でほぼ収束した。これに伴って1日の利用トリップ数の実績値である40.92トリップ/日と、時間帯別利用トリップ数との乖離も小さくなっている。

以上より、転換閾値パラメータ β だけであっても、MAUSMのマルチエージェントシミュレーションモデル内のパラメータの更新により、MAMUS&SAVSシミュレーションによる推定結果を実績値に近づけることが可能となることが確認された。ただし、全ての変数のパラメータを更新する場合と比較すると、時間帯によっては誤差が若干大きくなっていることが分かる。

(4) 将来の転換閾値の予測可能性

おもやいタクシーのような新たなオンデマンドサービスを導入する際、実証実験を行うことなく、利用需要の将来予測や導入効果の評価を行うことを可能にするために、Cyber である MAUSUM と Real である SAVS とを連携させた

Digital Twin モデルの MAUSM&SAVS シミュレーションモデルの開発を行ってきた。しかし、Cyber の MAUMS の中のパラメータ、特にマルチエージェントシミュレーションモデル内の手段転換モデルのパラメータの値によって、利用需要の推計値には誤差が生じる。そこで、実績値を用いて手段選択モデルのパラメータを更新する手法を開発し、その有用性を検証した。そこで用いた実績値は、2022 年 4～6 月の時間帯別利用トリップ数の平均値という 1 時点のものであった。しかし、前述したように 2022 年 9 月現在のおもやいたクシーの利用者数は運行開始当初から 2 倍以上に増加している。これは、時間の経過とともに交通需要者のおもやいたクシーに対する選好意識が変化してきているためと考えられる。そこで、複数時点においてパラメータの更新を行い、得られた更新パラメータの推移を予測できれば、実績値が得られない将来時点のパラメータを予測することは可能と考えられる。そこで、2021 年 4～6 月から 2022 年 4～6 月の間の 5 四半期の実績値を用いて手段選択モデルのパラメータ、ここでは転換閾値 β の更新を行った。

図-3.4.7 に、四半期ごとの更新パラメータの推移を示す。SP 調査から得られたデータを用いて推定した手段選択モデルの転換閾値は 3.246 (t 値 2.03) でかなり小さかったために、MAUMS&SAVS は利用トリップ数を 5 倍ほど過大に推計していた。そのため、2021 年 4～6 月の実績値を用いて推定した転換閾値パラメータ値は 10.034 とかなり大きな値に更新された。しかし、時間が経過して利用需要が増加していくに従って、更新された転換閾値は徐々に小さくなって行き、次第に収束して行く傾向が見られる。その推移から転換閾値の予測も可能であることが示唆される。

3.5 おわりに

本章では、熊本県荒尾市の「おもやいたクシー」を対象に、リアルタイム・オンデマンド・区域運行型の乗合いタクシーサービスの導入時の需要予測と評価を目的として、おもやいたクシー利用意向調査データから推定された手段転換モデルを組み込んだマルチエージェント交通シミュレーションモデル MAUMS (Multi-Agent Urban Mobility Simulator) と実際のリアルタイム・オンデマンド最適配車システム SAVS (Smart Access Vehicle System) と連携させた

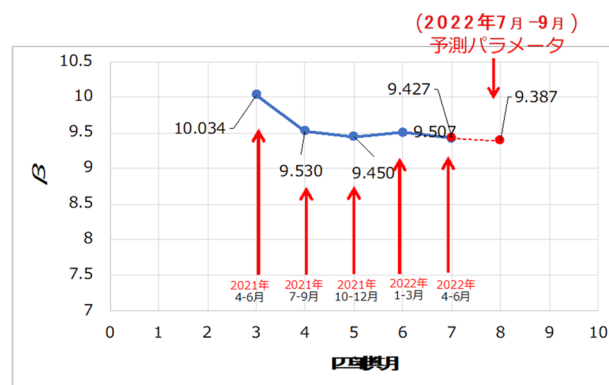


図-3.4.7 四半期ごとの更新パラメータの推移

MAUMS&SAVS シミュレータの利用可能性を検証した。また、MAUMS&SAVS から得られる予測値と実測値の誤差を改善するために、実測データを用いた MAUMS に内装される手段転換モデルのパラメータのデータ同化的手法を開発し、適用した。その結果、以下の成果を得ることができた。

1) マルチエージェント交通シミュレーションモデル MAUMS と実際のリアルタイム・オンデマンド最適配車システム SAVS とを連携させたデジタルツイン型の MAUMS&SAVS シミュレータは、MAUSM で予測されるおもやいたクシーのデマンドに基づいて SAVS で配車されるおもやいたクシーの迎車や輸送の状況、および道路交通流を、コンピュータ上で再現することができた。

2) おもやいたクシーへの転換に対する選好意識 (SP : Stated Preference) 調査データから推定された手段転換モデルを MAUMS の手段転換モデルにそのまま内装すると、MAUMS&SAVS はおもやいたクシーの利用者数の実績値より過大推計する結果となった。

3) 観測可能な時間帯別利用者数による同時生起確率が最大になるような MAUMS 内の手段転換モデルのパラメータを更新するデータ同化手法を開発した。ある 1 時点の観測データに適用した結果、比較的少ない更新回数で、推計値と実績値との乖離を大幅に改善するパラメータを推定することができることを確認した。

4) このデータ同化手法を多時点で適用することにより、時間の経過に伴う転換モデルのパラメータの推移を予測できる可能性がある。これによって将来の定常的な利用需要を予測することが可能になり、新たなモビリティ導入による定常的な将来需要を予測することはできる。

少子高齢化の進行により、今後さらに効率的なモビリティサービスを導入し運用していく

ことが求められる。個人の移動形態や提供されるモビリティの多様化に伴い、人々の交通行動や交通手段間の相互関係の不確実性は高まっているが、これらに起因する変動に適切かつ柔軟に対応した施策を講じていくことが必要である。施策の有効性を判断するツールとして、MAUMS&SAVSなどのシミュレーションモデルを活用することは有用である。シミュレーションモデルは、現況を再現するものであることが望ましいが、その精度は内装されたサブモデルの信頼性に依存する。観測可能なデータを継続的にモニタリングし、シミュレーションモデルに同化させて内装するサブモデルの信頼性を向上させることができれば、再現性の高いシミュレーションモデルに更新できるであろう。

参考文献

- 1) 人口減少下の持続可能なコミュニティ交通ーライドシェアとモビリティの自治による交通体系の再構築, JRIレビュー, Vol.6, No.67, 2019.
- 2) 中島 秀之, 松原 仁, 平田 圭二, 鈴木 恵二, 田柳 恵美子, 金森 亮, 野田 五十樹, 佐野 渉二, 落合 純一, 松館 渉: 地域交通の未来像としてのスマートアクセスビークルサービス, 人工知能学会全国大会論文集, No.18, 4F2-OS-11d-04, 2018.
- 3) 熊本県荒尾市: 平成 30 年度あらお相乗りタクシー実証実験結果報告, https://www.city. arao.lg.jp/pdf/dlPq=57461_filelib_7a914935b306ec40acffe5509053351a.pdf, 閲覧日 2022 年 9 月 25 日.
- 4) 森俊勝, 溝上章志, 金森亮, 松館渉: 交通シミュレーションモデルを用いた都市部への相乗りタクシー導入の評価, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5 (土木計画学研究・論文集第 38 巻), pp.I_1321-I_1330, 2021.
- 5) 重中秀介, 大西正輝, 山下倫央, 野田五十樹: データ同化を用いた大規模人流推定手法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J101-D, No. 9, pp.1286-1294, 2018.
- 6) 福田大輔, 壇辻貴生: 近未来交通システム導入時の道路空間再配分に関する数理モデル研究, 第 22 回 JICE 研究開発助成成果報告会, 助成受付番号 第 20006 号 研究課題番号(7), https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/review/assistances/results/2022/20006_7-1_Gaiyo.pdf, 閲覧日 2022 年 9 月 25 日.
- 7) (社) 交通工学研究会交通シミュレーション自主研究委員会: 交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル (案), <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/VfyMan.pdf>, 閲覧日 2022 年 9 月 25 日.
- 8) 八戸龍馬, 古賀逸人, 森俊勝, 溝上章志, 金森亮, 松館渉: 荒尾市における相乗りタクシー実装運行実現の経緯と準備, 土木計画学研究・講演集, Vol.62, No.20-08, 2020.1
- 9) 森俊勝, 溝上章志: 観測データを用いたシミュレーションモデル中の交通手段転換モデルの更新, 土木計画学研究発表会・講演集, No.66, pp.1-8, 2022.

第4章 マクロシミュレーションモデルと数理モデルによる都心部駐車場やレベル4における自動運転車優先走行区間などの都市施設や道路空間の設計

4.1 はじめに

(1) 背景と目的

近年の自動運転技術の発展により、数年以内に自動運転車両による移動が一般化されることが予想される。完全自動運転車の普及は、移動時間に対する時間価値の変化や駐車場需要の低下、ライドシェアシステムの実現、過疎地域の公共交通サービス充実など既存の交通状況、さらには日常生活の行動を大きく変える可能性が高い。そのため、システム整備の観点においても、完全自動運転車に合わせた管制システムの構築やインフラ設備が急務である。

都心部では増加する駐車需要をカバーするために、公共、民間それぞれの取り組みによる駐車場の整備が行われてきた。近年は自動車の保有台数は横ばいで推移し、駐車需要も減少しているにもかかわらず、駐車容量は年々増加傾向にある。その結果、駐車場は過剰供給となっていると言われている。このような状況に対応して、「クルマ」と「人」だけでなく、「まち」との接点ともいわれる都心部の駐車場は、その量だけでなく、場所や配置といった質の再検討の必要性が提言されるなど、駐車場施策は大きな転換期を迎えている。自動運転技術の完成により、個人間CSサービスを完全自動運転車両で行う自動運転シェアリングサービス（以後、SAVs: Shared Autonomous Vehicles service と記す）は、デマンドに応じて連続的にシェアリングサービスを提供できるようになる。したがって、ある利用者を目的地まで送り届けたとしても、

次のデマンドがあれば駐車時間は短くて良く、同じ駐車スペースを複数の車両が交代で効率的に利用することも可能になる。このように、SAVsはモビリティの水準だけでなく、駐車需要やその形態にも大きな影響を与えることが予想される。

今後の駐車場施策を考えるためには、まずは都市内におけるクルマの移動と駐車の実態、駐車特性を知った上で、現状の駐車スペースと駐車需要とのバランスについて検証を行う必要がある。さらに、SAVsが普及した後の自家用車による需要に加えて、SAVs利用による追加的な駐車需要に対応するような新たな駐車施策を検討する必要がある。

本節の始めでは、熊本都市圏全域での車の移動と駐車の間時間構成やその経年変化を分析する。次に、ゾーン別の車の流入・流出分析により、熊本市都心部2ゾーンに実際に必要な駐車場の適正容量を算出し、現況の駐車スペース数との比較を行う。さらに、SAVsへの転換と車両提供に関する選択モデルを組み込んだSAVs運用シミュレータを用いて、SAVs普及後のゾーン別駐車回数や駐車時間を予測した後、適正な駐車容量（以下では適正容量と記す）を試算した成果を述べる¹⁾。

自動運転車の普及率はいくつかの段階をもって向上するため、これまでの普通車との共存も考える必要がある。自動運転車と普通車が混在する状況のもと、自動運転車の導入効果を高めるための運行方法の検討は非常に重要であるといえる。自動運転車のための道路サービス

の高度化として、自動運転車専用レーンの導入は米国や中国で建設が予定されるなど、世界的にも大きな効果が期待されている²⁾。自動運転車専用レーン設置は安全性の確保とともに高密度での走行を可能とし、より円滑な交通流を実現する。さらに、給電可能なシステムを専用レーンに組み込むことで、走行中に充電が可能となるなど、より効率的な交通運用に貢献することができる。さらに、自動運転車の普及とともに MaaS (Mobility as a Service) などの新たなサービスによるモビリティの確保が期待されている中で、諸外国では Uber や Lift などの配車サービス (ride-hailing) が広く展開されている。したがって、シェアリングと自動運転が融合した社会において、自動運転車優先レーンの設置位置の検討は非常に重要な課題であるといえる。

シェアリングに関する研究としては、Xu et al.³⁾は i) 単独で移動する運転手である「Solo Driver (SD)」, ii) 相乗りを許容する運転手である「Ridesharing Driver (RD)」, iii) RD の車両に同乗して移動する「Passenger」(ただし、本研究では「Rider (R)」とする) という 3 つの移動手段の均衡問題である Ridershring user equilibrium (RUE) を相補性問題として定式化している。彼らは、定式化した問題の解が存在することと、パラメータがある条件を満たせば唯一のリンクフロー解が得られることを示している。しかし、彼らのモデルは、i) RD の運賃収入を計算する際に、平均同乗人数を定数として与えているため、運賃収入を正確に評価できない、ii) リンクフローを表す変数を OD ごとに設定しているため、変数の数が多くなる、という問題を抱えている。Di et al.⁴⁾は、R と RD の比率である乗客占有率 (passenger occupancy ratio) が満たすべき条件を相補性条件として追加し、かつリンクフローを表す変数を目的地ごとに設定した上で RUE モデルの再定式化を行い、上記の問題点を解決している。さらに、改良した RUE モデルを下位問題として、HOT レーンに関するネットワークデザイン問題を構築している。Ma et al.⁵⁾は、RS の需要に対しドライバー数が不足しているときにおける、OD ベースでの料金急騰戦略 (Surge Pricing Strategy) を考慮した RUE モデルを変分不等式問題として定式化している。彼らは、パラメータに緩やかな仮定を設定することで唯一の均衡解が得られることを示している。Li et al.⁶⁾は、RD と R のマッチングに関する意思決定を明示的に考慮したリンクベースの均衡問題を提案している。

より一般的な枠組みとして、Ban et al.⁷⁾は配車サービスの供給量、移手段の選択、道路混雑の 3 つの相互作用を記述した均衡問題を提案している。さらに、Di et al.⁴⁾は移動者は SD, RD, R に加えて、配車サービスの 4 種類の交通手段が利用可能であるとし、移動者の交通手段選択と配車サービスプラットフォームの供給量選択に関する均衡と、道路混雑に関する均衡を統合したモデルを提案している。

効果的な自動運転車専用レーンの整備計画に関する研究は増加しており、数理モデルによるアプローチも多く実施されている。Chen et al.⁷⁾は社会的コストを最小化することで自動運転車専用レーンの最適配置を行うネットワーク均衡問題を提案している。また、Lin et al.⁹⁾はネットワーク均衡問題を下位モデルとし、上位レベルにおいて移動時間コスト、建設コスト、環境コストなどの総コストを最小化する bi-level モデルにより最適な自動運転車専用レーンを算出している。bi-level 最適化問題では、動的な利用者均衡配分を下位問題として、自動運転シェアリングサービスの車両数、最適配置、初期分布を求めるモデル¹⁰⁾などが提案されている。

(2) 本章の構成

本章では、まず第2節で「SAVs運用による都心部駐車需要の予測と適正駐車容量の設定」について紹介する。次に、完全自動運転に至る際の技術的ブレイクスルー、つまり、特定条件下でシステムが全運転操作を実施する Level4 で必要とされる運行設計領域、ここでは完全自動運転専用走行レーンに焦点を当て、その設計方法について紹介する。第3節で「ライドシェアリングを考慮した時空間配分モデル」、第4節で「自動運転車専用レーンの最適配置モデル」の 2 種類の数理モデルを構築する。なお、後者では自動運転車と手動運転車の分担率を所与としているが、分担率を予め前者から算出することも可能である。次に、第4節で求められた自動運転車専用走行レーンの設置が道路交通流に及ぼす影響を評価するために、第5節で MAUMS による詳細分析を行う。最後に、第6節で「国内外の自動運転サービスの取組み状況」について紹介する。

4.2 SAVs運用による都心部駐車需要の予測と適正駐車容量の設定

(1) 熊本都市圏の車両の移動と駐車の実状

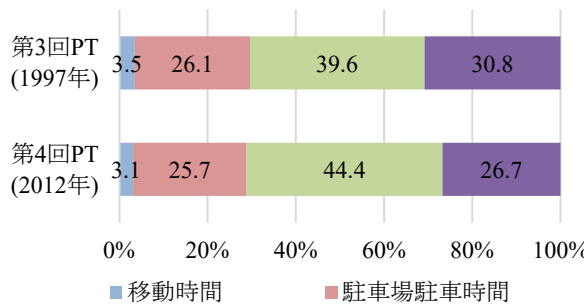


図-4.2.1 自家用車の移動と駐車時間の構成

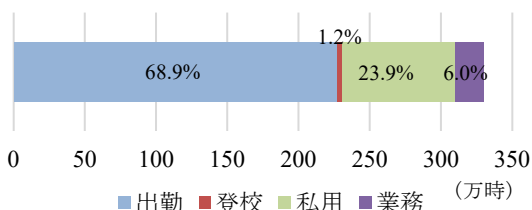


図-4.2.2 駐車場駐車時間の目的別構成

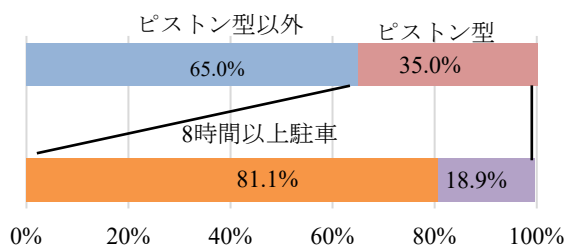


図-4.2.3 トリップパターンとその駐車時間



図-4.2.4 熊本都市圏と分析対象の29ゾーン

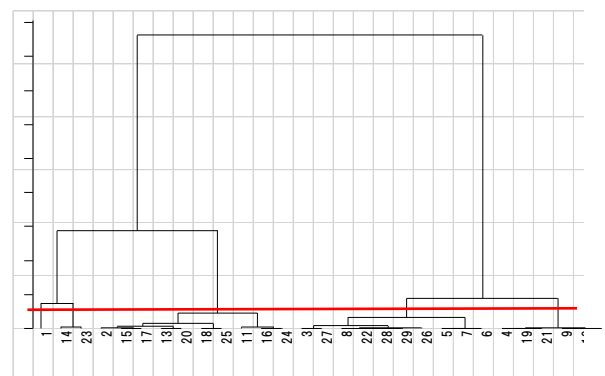


図-4.2.5 クラスタ分析のデンドログラム

a) 熊本都市圏のクルマの移動と駐車時間

1997年実施の第3回熊本都市圏PT調査と2012年実施の第4回熊本都市圏PT調査の15年間で熊本市の自家用車の移動と駐車時間がどのように変化しているかを把握する。ただし、PT調査は平日に実施されるため、以後の分析結果は平日のものであることに注意を要する。

まず、PT調査のマスターデータから自家用車利用トリップを抽出した。そこから1日の実際に走行している時間（移動時間）、移動先で駐車した時間（駐車場駐車時間）、1日に少なくとも1度は使用するが帰宅後は自宅に駐車している時間（自宅駐車時間）、1度も利用されずに1日中自宅に保管されている時間（自宅保管時間）、それぞれの総時間を算出した。

両年のこれらの構成比率を図-4.2.1に示す。1日の自家用車の移動時間はわずか3%程度であり、残りは駐車、または自宅に保管されている。駐車場駐車時間は約25%で、自宅駐車時間と自宅保管時間の和は全体の約70%となっている。両年ともそれぞれの構成比に大きな差はないものの、1997年に比べて2012年には自宅保管の比率が4.1%減少し、自宅駐車時間の比率は4.8%

増加している。これは、2012年は1日のうち1度は自家用車を使用したトリップが1997年よりも増加したことを示している。

第4回PT調査の自動車利用トリップについてより詳細な分析を行う。駐車場駐車時間の目的別構成を図-4.2.2に示す。出勤目的の駐車場駐車時間が全体の68.9%を占めている。また、図-4.2.3に示すように、自動車トリップを行う人のうちの35.0%が出勤と帰宅時にのみ車両を利用するピストン型である。そのうち、勤務先で8.0時間以上駐車する割合は81.1%もあり、勤務先で長時間駐車したままになっている車両が多いことがわかる。

b) 熊本都心部を発着とする車両の流入流出分析

図-4.2.4に示す熊本都心部の29のCゾーンから発生、またはそこへ集中する自動車利用トリップを抽出し、ゾーンごとに1日の時間帯別の累積流入・流出台数を求め、それらの時間変動パターンによってゾーンを類型化した。ここではゾーンごとの30分毎の累積流入台数と累積流出台数を変数とし、同一時間帯毎の台数デ

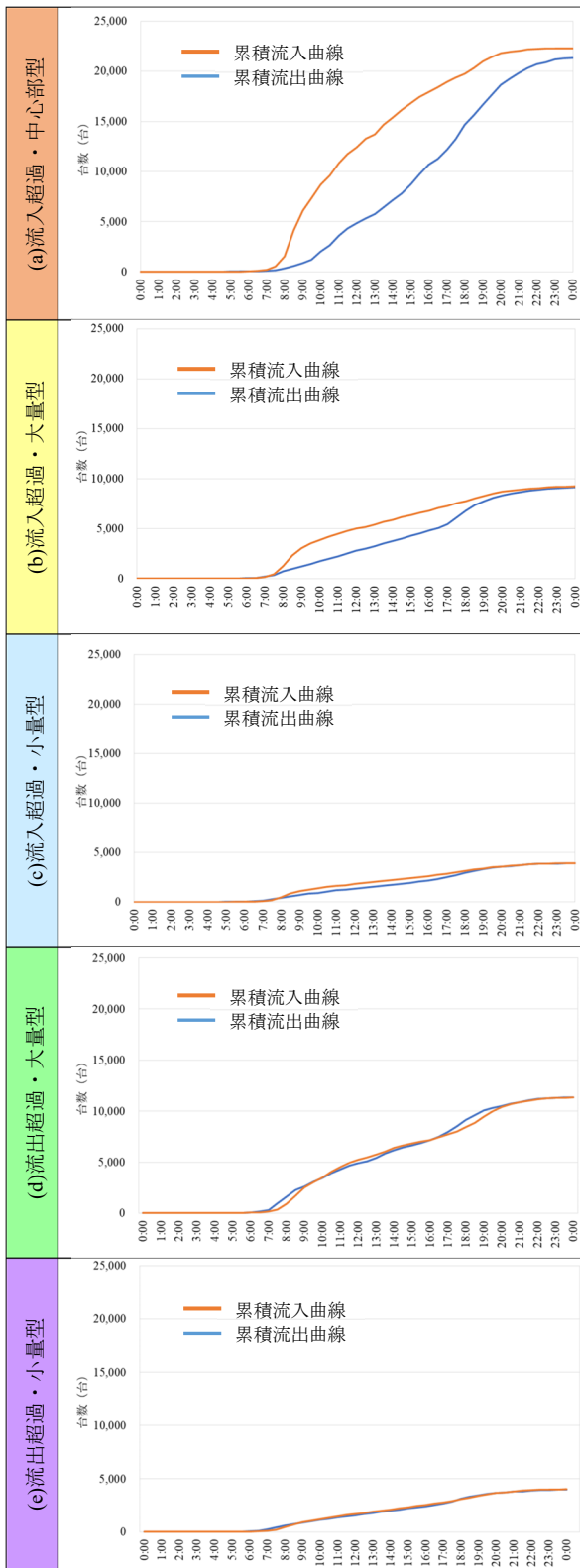


図-4.2.6 クラスターごとの累積流入出パターン

ータに対してユークリッド距離を用いたウォード法による階層クラスター分析を行った。

第4回PT調査データに適用したときのデンドログラムを図-4.2.5に示す。その結果、29のゾーンを以下の5つのクラスターに分類することができた。クラスターごとの代表的なゾーン

表-4.2.1 流出入台数の時間変動パターンの分類

型名	特徴
(a)流入超過・中心部型	発着するトリップが約20,000台で非常に多く、累積流入台数と流出台数が同数近くになるのが深夜となるゾーン
(b)流入超過・大量型	累積流出台数は7時前後に、流出台数は17時前後に急増し、20時頃に同数となる累積車両台数が8,000~10,000台のゾーン
(c)流入超過・小量型	累積流出台数は7時前後に、流出台数は17時前後に急増し、20時頃に同数となる累積車両台数が2,000~5,000台のゾーン
(d)流出超過・大量型	7~8時、17~18時に累積流出台数が流入台数を上回り、その他の時間帯はほぼ同数である累積車両台数が10,000台のゾーン
(e)流出超過・小量型	7~8時、17~18時に累積流出台数が流入台数を上回り、その他の時間帯はほぼ同数である累積車両台数が4,000台のゾーン

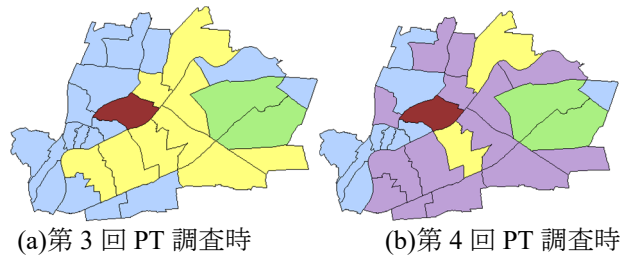


図-4.2.7 第3回と第4回PT調査時のクラスター

の累積流入出パターンを図-4.2.6に、各パターンの特徴を表-4.2.1に示す。なお、累積流入・流出曲線の差がその時点で当該ゾーン内に滞留、つまり駐車している自動車の台数となり、以後、これを駐車台数曲線とよぶ。

図-4.2.7に第3回と第4回PT調査時のゾーンごとのクラスターを表-4.2.2の分類の色で示す。第3回PT調査時には大半のゾーンが流入超過型のクラスター(a)~(c)であった。その中でも都市圏都心部(図-4.2.7のクラスター(a)の赤色のゾーン)の東側と西側のゾーンは、それぞれ流入超過・大量型のクラスター(b)と流入超過・小量型のクラスター(c)に分類されていたのに対し、第4回調査時にはこれらのゾーンの大半が流出超過・小量型のクラスター(e)に変化している。このように、都心部に隣接するゾーンでは駐車車両数は減少しているため、駐車場は過剰になっていると考えられる。これに対して流入超過・都心部型のクラスター(a)と流出超過・大量型のクラスター(d)に分類されたゾーンには変化がない。

図-4.2.8は、流出・流入分析を行った際、中心部型に分類された下通・新市街・桜町・辛島町エリア(ゾーン1)と、その北に隣接し、ゾーン1と共に熊本中心市街地を構成する上通・水道町エリア(ゾーン2)の駐車台数曲線である。第3回PT調査時(実線)と比較して第4回PT調査時(破線)はいずれの時間帯も明らかに駐

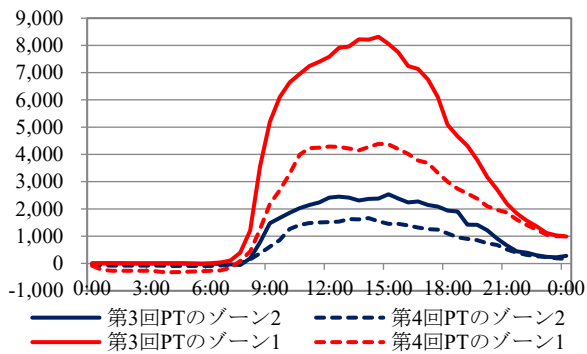


図-4.2.8 都心部の2ゾーンの駐車台数曲線

車台数が小さくなっている。以上より、近年は流入超過型のゾーンが流出超過型に変わっている中で、都心部ゾーンだけは未だに大きな流入超過型を示すものの、累積流入・流出曲線の差である駐車台数はいずれの時間帯でも減少している。

(2) 駐車場の適正容量の算出

a) 分析対象エリアとデータ

駐車場の適正容量の試算を行うのは、ゾーン1と2である。前述したように、ゾーン1では2012年の駐車台数曲線のピーク値は1997年のそれに比較して減少したのに対して、駐車収容台数は増加しており、駐車スペースは供給過剰になっていると考えられる。図-4.2.9は対象エリアのゾーンと駐車場の位置(赤)を示す。現在、ゾーン1には143か所に9,076台、ゾーン2には58か所に3,172台分の駐車スペースが供給されている。

以節で示す適正容量の算出に必要な駐車需要に関するデータはPT調査から得られる分析対象エリアに駐車している自動車トリップである。このトリップは現況の駐車供給量の下で顕在化しているトリップであるため、本来ならエリア別駐車需要を予測すると同時に、適正な駐車供給量を求めるのが妥当である¹⁰⁾。そのためには、エリア別駐車需要を、たとえば駐車を必要とする自動車需要と駐車エリアの選択確率との積で求める場合、これらを予測するモデルが必要となる。しかし、ここでは現況のエリア別駐車需要は駐車容量に依存しないと仮定し、PT調査から得られるゾーン別駐車トリップを適正容量の算出のための需要として用いた。

b) 適正容量の算出方法

適正容量の算出には独自に開発した駐車シミュレーションモデルと待ち行列理論の呼損率(損失率)による2つの方法を用いた。それぞれの方法について以下に説明する。

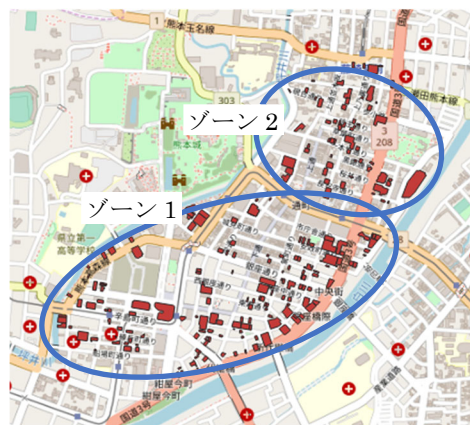


図-4.2.9 分析対象ゾーンの駐車場の現況

1) 駐車シミュレーションモデル

駐車シミュレーションモデルでは、PT調査のマスターデータから得られた各ゾーンに到着する車両の到着時刻を1秒ごとに再現していく。ここではPT調査から得られるサンプルトリップを拡大する際に発時刻と着時刻、それぞれに $N(0, 300)$ の乱数で変動を与え、以下の手順で到着から駐車、出発のシミュレーションを行う。分散値を300とするのが適正かは検討の余地がある。

Step-1 (初期値入力) : サンプル車両を拡大する際、サンプル車両の発、着時刻に $N(0, 300)$ を加えた時刻を各車両の発時刻、着時刻とする。必要駐車スペース数 cap の初期値 $cap=0$ とする。

Step-2 (車両流出) : 車両の発時刻が現在時刻と一致したとき、空きスペース $s=s+1$ とする。

Step-3 (車両流入) : 車両の着時刻が現在時刻と一致したとき、空きスペース s が0より大きいかを確認する。

Step-4 (必要駐車スペース数の更新) : Step-3で空きスペース s が0のとき、 $cap=cap+1$ として必要駐車スペース数を1台分、増やす。

Step-5 (駐車) : Step-3で $s>0$ のとき、空きスペース $s=s-1$ とする。

Step-6 (出力) : 全車両についてStep-2からStep-5を行い、各時刻(ここでは1秒きざみ)における必要駐車スペース数 cap を出力する。

この試行を10回実行し、各時刻における cap の平均値を当該時刻における必要駐車容量と定義する。

2) 待ち行列理論

待ち行列理論は一般的に飲食店での行列のような身近にある待ち行列を数理的に表現するものである。待ち行列をいくつかの指標で評価することにより、その待ち行列の混雑具合がわかる。ここではその1つである呼損率を用いる。呼損率とは、顧客が到着した際に、窓口が

すべてサービス中であると、サービスを受けずに顧客が直ちに退去する確率のことである。駐車に置き換えると、駐車しようとした車両がゾーンに到着した際に、駐車スペースが満杯であると、駐車することなくその場を退去する確率のことである。例えば、ある駐車場に車両が100台到着し、そのうちの1台が駐車できずに退去したときの呼損率は0.01（1%）となる。

呼損率 $B(c, a)$ は、到着率 λ （ここでは単位時間当たりのゾーン到着台数）と平均サービス時間 $1/\mu$ （ここでは平均駐車時間）を掛け合わせて表現される呼量 a と窓口数 c （ここでは駐車容量）によって以下で導出できる。

$$B(c, a) = \frac{a^c / c!}{\sum_{j=0}^c a^j / j!} \quad (1)$$

なお、 a^c や a^j はそれぞれ、呼量 a の c 乗、 j 乗である。

たとえ a が分かっているとしても、呼損率 $B(c, a)$ から直接的に c を解くことはできないが、以下の漸化式から求めることができる。

$$B(0, a) = 1 \quad (2)$$

$$B(c, a) = \frac{aB(c-1, a)}{c + aB(c-1, a)} \quad (3)$$

ここでは、各ゾーンを1つの駐車場と考え、そこに到着する車両すべてが駐車できる、つまり呼損率 B が0となるような駐車容量 c を求める。呼損率 B は漸化式を順次、解いていくと0に収束していくものの、計算打ち切りのための基準値として、0以外の正の小さな値を設ける必要がある。そこで B が各シナリオの総到着台数の逆数の値、つまり到着する車両のうち1台が駐車できない確率よりも小さくなる時の c を適正容量とする。

c) 現況に対する適正容量の試算

先に定義した駐車シミュレーションによる両ゾーンの時点ごとの必要駐車容量を SAVs 普及前として図-4.2.10 に青とオレンジの濃線で示す。これらの曲線の最大値が駐車シミュレーションモデルによる適正容量である。適正容量はゾーン1で7,313台、ゾーン2では3,075台となり、現在の容量と比較してゾーン1で約1,700台分、ゾーン2では97台分、それぞれ19%、3%、少なくともよいという結果となった。このように、現在供給されている駐車容量は過剰であることが分かる。特にゾーン1でその傾向が大きい。必要駐車容量の時間的変化をみると、ゾーン1では15時、ゾーン2では14時半にピークとなり、それ以降は減少していく。な

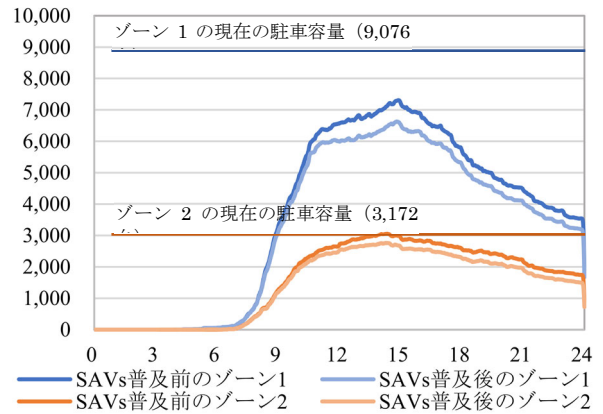


図-4.2.10 駐車シミュレーションによる適正容量

表-4.2.2 到着車両に関する指標と呼量

ゾーン	SAVs普及	車両	総到着台数 (台)	到着率 λ (台/h)	平均駐車時間 $1/\mu$ (h)	呼量 a
1	普及前	一般	15,505	646.04	5.52	3,566.14
		SAV	2,862	119.25	5.83	3,275.75
	普及後	全車両	16,277	678.21	4.83	
		一般	13,415	558.95	0.14	
2	普及前	一般	6,657	261.08	5.99	1,563.87
		SAV	1,213	50.54	6.10	1,411.77
	普及後	全車両	6,736	280.67	5.03	
		一般	5,523	230.13	0.18	

お、両ゾーンとも、必要駐車スペース数が最大値をとるのは10回の試行とも同一時点であり、その時点の分散値によって得られる変動係数値は1%以下であった。

次に、待ち行列理論の呼損率から適正容量を算出する。図-4.2.8でも示したように、駐車需要は1日のうちでも時間的に変化するので、待ち行列理論を用いて適正容量を試算する場合、どのくらいの時間単位の呼量 a を用いるかによって得られる値は異なる。そこで、まず1日単位の呼量を用いた試算を行い、より信頼性が高いと思われる駐車シミュレーションモデルによる試算値との比較を行う。その後、時間帯ごとに当該時間帯の呼量が1日間継続した場合の適正容量を算出する。その結果から、駐車シミュレーションモデルによる試算値に近い値を得るのに必要な呼量が得られる時間帯を見出すという手順をとることにする。そのためには、まず呼量 a を導出する。PT調査のマスターデータより、総到着台数の24時間平均を到着率 λ 、SAVs普及前の場合是一般車両の各ゾーンの駐車時間の平均値、SAVs普及後はAV車両と一般車両それぞれの駐車時間の平均値 $1/\mu$ を算出した。その結果と、到着率 λ と平均駐車時間 $1/\mu$ を掛け合わせることで得られる呼量 a を表-4.2.2に示す。SAVs普及前の呼量はゾーン1

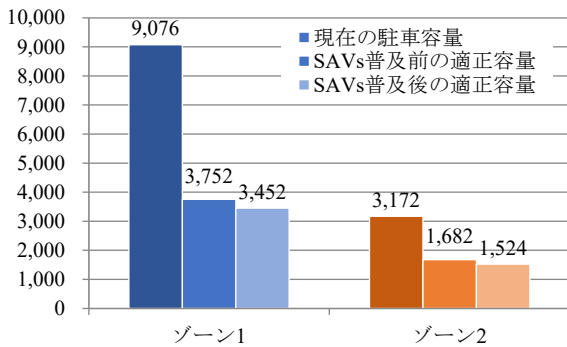


図 4.2.11 待ち行列理論による適正容量

が 3,566.14, ゾーン 2 が 1,563.87 となった。これをもとに、式(2), (3)を用いて算出した適正容量を SAVs 普及前の適正容量とし、現在の駐車容量と並べて図-4.2.11 に示す。ゾーン 1 では 3,752 台、ゾーン 2 では 1,682 台であり、現在の容量と比較すると、ゾーン 1 では約 6,500 台、ゾーン 2 では約 1,500 台、それぞれ 6 割、5 割も容量を削減できる。これらの結果は、駐車シミュレーションによる適正容量の試算値 7,313 台、3,075 台よりもさらに小さい。これは、1 日単位の到着率と平均駐車時間から得られる呼量を用いて算出されたためである。待ち行列理論による適正容量の試算値は到着率 λ と平均駐車時間 $1/\mu$ から算出される呼量 a に依存する。車両の到着が多い 8 時から 20 時までの 12 時間平均値や時間帯ごとの値を用いて呼量を算出すると、今回の結果よりも適正容量は大きくなる。

(3) 自動運転カーシェアリング導入による影響

a) SAVs 運用シミュレーションモデル

SAVs とは、保有する完全自動運転車両を自らが使用していない間は他者にシェアリング用の車両として貸し出すサービスである。SAVs 普及後の駐車施策を検討するためには、現在の自家用車保有者のうちどれほどが SAVs のために車両を提供し、どれほどが現利用手段から SAVs に転換するかを予測する必要がある。SAVs 運用シミュレータは、組み込まれた SAVs 転換モデルと SAVs 車両購入・貸出モデルによって、SAVs 車両の供給台数と SAVs 需要を予測するだけでなく、時々刻々の SAVs 車両の状態を追跡するシミュレーションモデルである。古澤ら¹¹⁾はこのシミュレーションモデルを用いて、SAVs 普及後の利用需要の予測、車両価格や貸出価格が予約受付率やサービス提供者の収益に与えるインパクトの評価などの分析を行っている。

このシミュレーションの概要は以下である。まず、対象地域内の居住者、または対象地域外

に居住していても対象地域内に着地をもつトリップを行う人に対して、SAVs 車両購入・貸出モデルを適用し、貸出可能車両とその初期配置を決定する。一方、対象地域内々の各トリップに対して SAVs 転換モデルを適用し、SAVs 予約者を決定する。予約者に対して、現在の全 SAVs 車両の位置から 3 分以内に迎車可能な車両がない場合は予約不成立、ある場合は予約成立とし、その中で最短の時間で到達できる車両が予約成立者を迎車し、目的地まで搬送する。搬送後はそこに停車し、その位置から次の予約者成立者を迎車・搬送するサービスを継続的に行う。ただし、SAVs 車両提供者が自らトリップを行う場合は、彼の保有車両はトリップ開始の 1 分前までに彼の元に帰還するようにしている。これらのプロセスを時々刻々と発生する全てのトリップに対して実行する。SAVs 予約者を決定する SAVs 転換モデルは、予約の可否の経験を表す変数が次の日の SAVs の効用に反映される。また、自身の SAVs に対する効用が他者の行動結果に影響される（自身の行動結果が他者の SAVs の効用に影響する）構造になっているのが特徴である。シミュレーションモデルの詳細とインパクト分析の結果については文献 11) を参照されたい。

SAVs 普及後にゾーン 1, 2 それぞれに駐車する自動車類トリップは、SAVs 運用シミュレーションモデルによって予測される自家用車と SAVs を利用して流入・流出するトリップとの和となる。

b) SAVs 普及による自動車類の移動と駐車

1) 移動時間と駐車時間

1 日の大半の時間が自宅駐車や駐車場駐車になっていた自家用車を利用するトリップが SAVs に転換すれば、目的地での駐車場駐車時間は大幅に減少するであろう。逆に、徒歩や自転車などから SAVs に転換した場合はサービスを提供する SAVs 車両の移動時間や駐車場駐車時間は増加する。このように、SAVs の普及は SAVs 車両と自家用車（以後、両者を合わせたものを自動車類と記す）の移動時間と駐車時間に大きな影響を与えることになる。そこで、SAVs 普及後の自動車類の総移動時間と総駐車時間（駐車場駐車、自宅駐車、自宅保管時間の総和）を予測し、普及前のそれらの推計値（SAVs 運用シミュレータによって SAVs 普及前を推計した値）と比較した。その結果を図-4.2.12 に示す。移動と駐車との和が SAVs 普及前の 30.15 万時間から普及後の 25.79 万時間に減少する一方で、移動時間の比率は 3.9%から 5.0%に増加する。

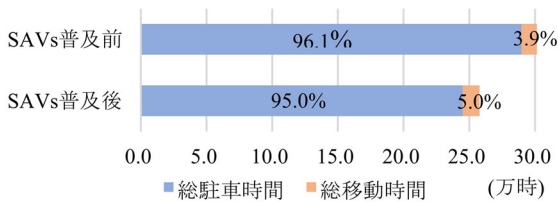


図-4.2.12 SAVs 普及前後のクルマの移動と駐車時間

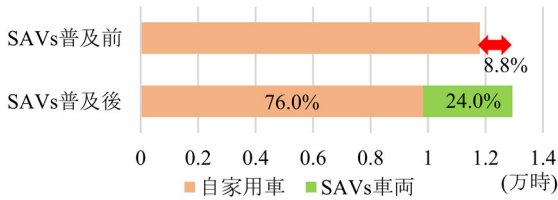


図-4.2.13 SAVs 普及前後の総移動時間

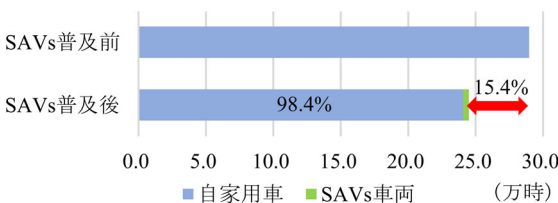


図-4.2.14 SAVs 普及前後の総駐車時間

図-4.2.13 に示すように、自家用車による総移動時間は 1.18 万時間から 0.98 万時間に減少するが、他の交通手段から SAVs への転換により自動車類の総移動時間は SAVs 普及前より 8.8% 増の 1.29 万時間に増加してしまう。そのうちの 24.0% は SAVs 車両によるものである。一方、総駐車時間については、図-4.2.14 に示すように、28.97 万時間から 15.4% 減少して 24.50 万時間になる。そのうち、SAVs 車両による総駐車時間は 0.41 万時間であり、わずか 1.6% に過ぎない。

2) ゾーン別発着回数と駐車台数

SAVs 普及後の自動車類の総発着回数は全てのゾーンで増加する。特にゾーン 1 では普及前の約 2 倍にまで増加する。ゾーン 1 の SAVs 普及前と普及後の流入・流出曲線を図-4.2.15 と図-4.2.16 に示す。普及後は自家用車と SAVs 車両を区別している。図-4.2.15 に示すように、午前 8 時以降、自家用車は流入が流出よりも大きくなっており、昼間はゾーン内に駐車している車両が多い。24 時にも累積流入の方が累積流出よりも大きいのは、自動車類を置いて帰宅するなどの理由でゾーン内に車両が留まっているためであり、都心部に特有的な現象とあって良い。

図-4.2.16 に示すように、SAVs 導入後は自家用車から SAVs に転換した分、自家用車の累積流入・流出数は減少している。これに対して、

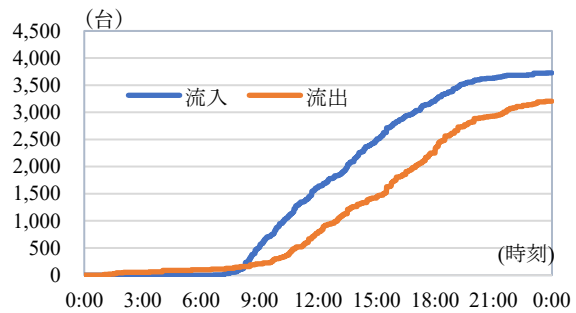


図-4.2.15 ゾーン 1 の SAVs 普及前の流入・流出曲線

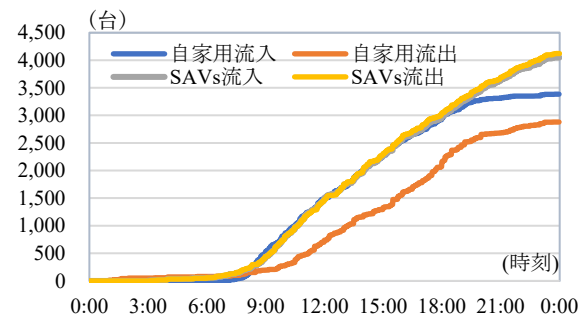


図-4.2.16 ゾーン 1 の SAVs 普及後の流入・流出曲線

SAVs 車両は通勤時の午前 8 時から、終日、流入が流出が続く。しかし、累積流入・流出曲線にほとんど差がない。これは流入出量は多いものの、ほとんど駐車することなく、次のデマンドに向かって流出していることを示している。

3) 駐車時間

SAVs はデマンドがあれば連続的にサービスを提供できるため、目的地での長時間の駐車が必要としなくなる。SAVs 普及後のゾーン別の SAVs 車両の総駐車時間を図-4.2.17 に、SAVs 車両 1 台当たりの平均駐車時間を図-4.2.18 に示す。都心部では総駐車時間は 600 時間以上となるが、SAVs 車両 1 台当たりの駐車時間の平均値は 9.0 分と短い。逆に、周辺の上熊本地域や二の丸地域では総駐車時間は約 100 時間と短い。SAVs 車両 1 台当たりの平均駐車時間は 14 分程度となる。このように、都心部ではそこが目的地となっている SAVs によるトリップ数は多いものの、回転率が大きく、SAVs 車両 1 台当たりの駐車時間は短い。駐車時間が最長のゾーンにおいても平均値は 14~15 分であり、対象地域全体の平均駐車時間は 8~15 分になるなど、SAVs 車両の 1 回当たりの駐車時間は極めて短くなる。

次に、SAVs の普及が駐車特性に与える影響を分析した結果について述べる。SAVs 車両を含む自動車類のゾーン別の駐車車両数とそれらの駐車時間を算出し、普及前・後の駐車特性の変

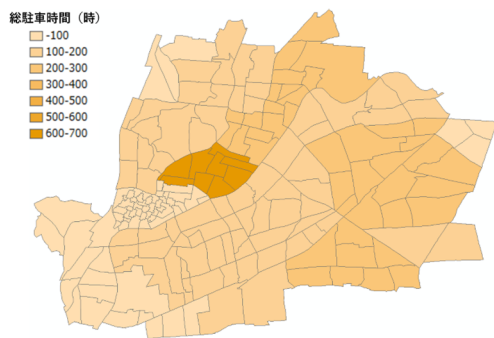


図-4.2.17 SAVs 総駐車時間

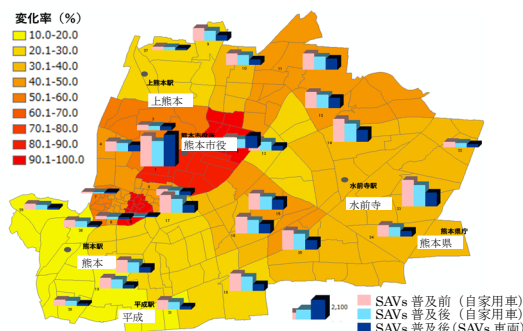


図-4.2.19 総駐車回数の変化率

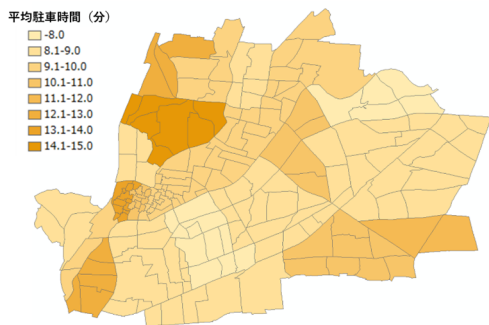


図-4.2.18 SAVs 車両 1 台当たりの平均駐車時間

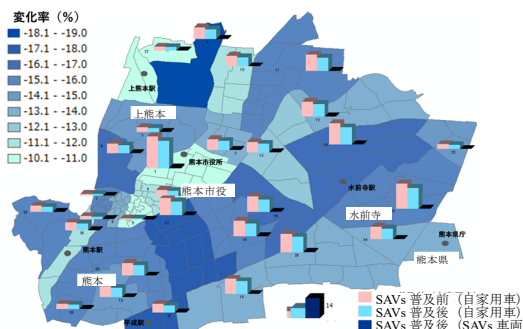


図-4.2.20 総駐車時間の変化率

化を求めた。図-4.2.19 に総駐車回数の変化率を示す。徒歩なども SAVs に転換するため、総駐車回数は全てのゾーンで増加する。特に都心部で増加率が高く、駐車回数は約 2 倍に増加する。一方、図-4.2.20 に示す総駐車時間の変化率は、SAVs 車両の流入数が増加する都心部でも約 12%も減少する。

図-4.2.21 に SAVs 車両 1 台当たりの平均駐車時間の変化率を示す。SAVs への転換が多いゾーン 1 とゾーン 2 で変化率は大きく、50%以上も減少している。総駐車回数の増加率が低いゾーンにおいても、約 30%減少している。これらの結果より、SAVs の普及によって現在の駐車容量はさらに供給過剰になると予想される。

4) SAVs 普及後の適正容量

駐車シミュレーションによる SAVs 普及後の適正容量の試算結果を SAVs 普及後として図-4.2.10 の中の青とオレンジの薄線で示す。ゾーン 1 で 6,632 台、ゾーン 2 では 2,765 台となった。これは提供されている容量よりもゾーン 1 で約 2,500 台、ゾーン 2 では約 400 台分、それぞれ 27%、約 13%も小さい。また、普及前・後でもゾーン 1 で約 1,700 台分、ゾーン 2 では 97 台分、それぞれ 19%、3%、少なくともよいという結果となった。

適正容量の時間的变化をみると、SAVs 普及前と同様、ゾーン 1 では 15 時、ゾーン 2 では 14

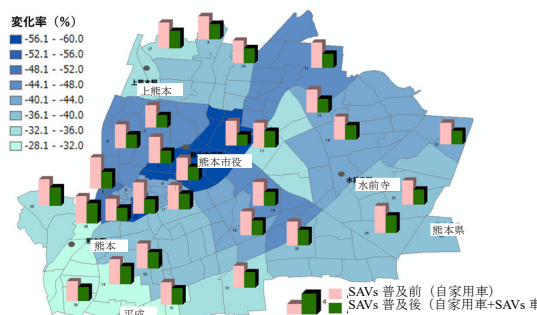


図-4.2.21 平均駐車時間の変化率

時半のピークを境に駐車必要台数は減少していく。普及前と比較すると、両ゾーンとも 10 時頃までは同じ軌跡をたどっていくが、そこから両者に差が出始め、ピークの 15 時以降に再び、同じような形で減少していく。この結果から 15 時までは駐車需要は増え続けるが、15 時を境に徐々に到着する車両よりも帰宅する車両が増加し、空いた駐車スペースが出てくるのが分かる。

次に、SAVs 普及後にはゾーン 1 とゾーン 2 でそれぞれ 3,275.75、1,411.77 となる呼量 a を用いた待ち行列理論による SAVs 普及後の適正容量の試算結果を図-4.2.11 に示す。ゾーン 1 では 3,452 台、ゾーン 2 では 1,524 台となる。SAVs 普及前・後で比較すると、総到着台数はゾーン 1 で 15,505 台から 16,277 台に、ゾーン 2 で

6,266 台から 6,736 台に増加するにもかかわらず、両ゾーンとも適正容量は SAVs 普及後の方が少なくなった。これは SAVs の平均駐車時間が短く、平均駐車時間 $1/\mu$ がゾーン 1 では 5.52h から 4.83h に、ゾーン 2 でも 5.99h から 5.03h に減少するためである。

次に、SAVs 普及後にはゾーン 1 とゾーン 2 でそれぞれ 3,275.75, 1,411.77 となる呼量 a を用いた待ち行列理論による SAVs 普及後の適正容量の試算結果を図-4.2.11 に示す。ゾーン 1 では 3,452 台、ゾーン 2 では 1,524 台となる。SAVs 普及前・後で比較すると、総到着台数はゾーン 1 で 15,505 台から 16,277 台に、ゾーン 2 で 6,266 台から 6,736 台に増加するにもかかわらず、両ゾーンとも適正容量は SAVs 普及後の方が少なくなった。これは SAVs の平均駐車時間が短く、平均駐車時間 $1/\mu$ がゾーン 1 では 5.52h から 4.83h に、ゾーン 2 でも 5.99h から 5.03h に減少するためである。

5) 待ち行列理論による簡便な適正容量の試算

適正容量としては、駐車シミュレーションによって試算された値が真に近いと考えられる。待ち行列理論による試算値は、SAVs 普及前も普及後もこの試算値より過少となった。これは、一日単位の到着率と平均駐車時間から得られる一日単位の呼量の値を用いているためである。しかし、これらの値を1時間単位で求めて図示した図-4.2.22からも分かるように、両者の値は自動車種の到着時間帯によって異なる。そこで、時間帯ごとの到着率と平均駐車時間から得られる呼量が1日間継続すると仮定したときの適正容量を算出した。その結果を図-4.2.23に時間帯ごとに示す。ピークを示す時間帯は両ゾーンとも8時台であるが、ゾーン1のピーク率26.4%はゾーン2の19.8%と比べて極めて高い。

これは平均駐車時間には差がないにもかかわらず、到着台数がゾーン2の948台に比してゾーン1では2,559台と非常に多く、呼量の値が大きくなったためである。このように、時間帯ごとの呼量はゾーンごとに差があるために、駐車シミュレーションから得られた適正容量と待ち行列理論から得られる時間帯ごとの適正容量にもゾーンごとに大きな差が生じている。8時～12時台までの時間帯ごとの容量は過大となるが、いずれのゾーンでも10時～11時台の時間帯の適正容量が駐車シミュレーションによる適正容量とほぼ等しくなるのは興味深い。この時間帯になると分析対象エリアへのトリップのピークが過ぎ、到着率が小さくなって、容量シミュレーションから得られる適正容量の値

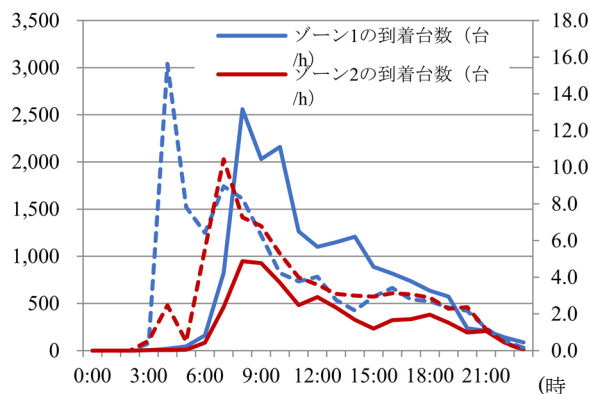


図-4.2.22 時間帯別到着台数(左軸)と平均駐車時間(右軸)

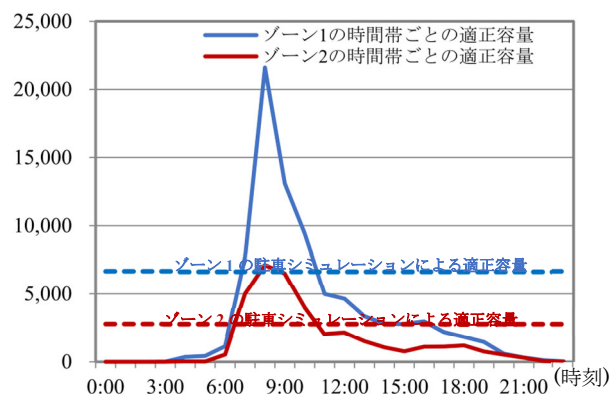


図-4.2.23 時間帯別ごとの適正容量

を与える呼量となるためである。待ち行列理論からは適正容量を解析的に試算できることから、この時間帯の到着台数と平均駐車時間の観測値を用いることによって、適正容量を合理的に試算できる可能性がある。ただし、他のゾーンや都市圏でこれと同様の結果が得られるとは必ずしも言えない。

(4) おわりに

ここでは、クルマの移動と駐車時間、およびゾーン別の流入・流出台数の実態を明らかにすることによって、熊本市都心部における適正容量を算出すること、駐車時間が大幅に減少することが期待される自動運転車両によるカーシェアリングサービス SAVs が普及した後の適正容量を試算することを目的とした。

得られた主要な知見を以下に簡潔に示す。

1) 第3回と第4回の熊本都市圏 PT 調査のマスターデータより、熊本都市圏にある自家用車の移動時間はわずか 3%程度であり、大半の時間は駐車していること、この傾向は経時的に大きな変化はないこと、自宅での駐車は約 75%であり、その4割は1日中、自宅に保管されていることなどが明らかになった。

2) 都心部を除いて、1997年には流入超過型であったゾーンの大半が2012年には流出超過型に変化している。都心部は流入超過のまま駐車需要は依然として多いものの、1997年に比較して、その数は減少している。

3) 駐車シミュレーションと待ち行列理論によって現在の駐車需要に対応した適正容量を試算したところ、現在供給されている駐車スペース数は過大であることが明らかになった。

4) SAVs への転換モデルと SAVs 車両購入・貸出モデルを内挿した SAVs 運用シミュレーションにより、ゾーン別に AVS サービス導入前後の総駐車回数、総駐車時間を算出したところ、総駐車回数は都心部で約2倍まで増加するが、総駐車時間は1割程減少する。そのため、1台当たりの平均駐車時間は約半分になる。そのため、SAVs の普及によって都心部の適正容量は上記の試算値よりもさらに少なくとも良くなることが明らかになった。

本分析のベースとなる交通動態データは熊本都市圏 PT 調査である。PT 調査は通常の平日の交通動態を把握するものであるため、本研究で得られた知見、特に都心部の適正容量の試算値は平日だけに対するものである。休日には都心部への買物目的の自動車利用が多い上、ピーク率も高いため、実際の必要量はここで得られた試算値よりも多めになると思われる。今後は何らかの方法で休日の都心部を発着ゾーンとするトリップの動態を知る必要がある。また、SAVs の需要を決める転換モデルと車両の購入・貸出モデル、車両の時々刻々の車両の位置を記述する SAVs 運用シミュレーションモデルについても精緻化を図る必要がある。

今回は駐車場の量的供給量の適正化のために需給状況を把握し、適正容量を試算したが、今後は位置・場所などの質の適正化を図るための分析、計画方法の開発と政策が求められる。

4.3 手動運転とSAVs混在下におけるSAVs横行区間設計モデルの構造

本節では、自動運転技術が未熟であるため自動運転車両は指定された区間のみ走行可能である社会を想定する。すべての移動者は手動運転車か共有型自動運転車（以下、SAVs）のいずれかの交通手段で移動するとき、システム最適状態を満たすSAVs走行区間とSAVs投入台数を決定する問題を、昨年度構築したライドシェアリングを考慮した時空間配分モデルを拡張す

る形で構築する。モデル構築にあたり、HDVsを運転して移動する者を「HDVs運転者」、SAVsで移動する者を「SAVs乗客」とよび、「HDVs運転者」と「SAVs乗客」をあわせて「移動者」とよぶ。

(1) モデルの構築

a) モデルの前提条件

移動者および SAVs のフローの記述に関して、以下の前提条件を仮定する。

- ・ 移動者は HDVs, SAVs のいずれかの手段を利用する。HDVs では、相乗りは行わない。
- ・ HDVs 運転者と SAVs 乗客は、移動途中に入れ替わることはできない。
- ・ すべての移動者の需要（出発地・到着地および出発・到着時刻制約）は既知であるとする。
- ・ すべての移動者は、到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着できることが望ましいと考えている。
- ・ 各リンクには容量が存在し、HDVs と SAVs の合計は容量を超過することができない。
- ・ 各ノードにも容量が存在し、HDVs と SAVs の待機台数も容量以下である。

次に、HDVs 運転者、SAVs 乗客および SAVs 車両にかかるコストに関して、以下の前提条件を仮定する。

- ・ HDVs 運転者は、貨幣換算された移動時間コストと走行距離に比例する車両走行コスト（ガソリン代など）のコストがかかる。
 - ・ SAVs 乗客は、移動時間コストのみがかかる。
 - ・ SAVs 車両は、車両走行コストのみがかかる。
- 次に、SAVs 走行区間の指定に関して以下の前提条件を仮定する。

- ・ SAVs 車両は指定された区間のみを走行可能である。
- ・ HDVs は、SAVs の指定走行区間も含めてすべての区間を走行可能である。
- ・ 意思決定者は、SAVs の走行区間および投入する SAVs 台数を決定する。
- ・ SAVs の走行区間の指定には、リンク長に比例したコストがかかる。また、SAVs の走行区間コストに関する予算制約が存在する。

最後に、SAVs 車両のデポに関して、以下の前提条件を仮定する。

- ・ SAVs 車両のデポを1箇所のみとし、その位置を外生的に与える。
- ・ （一方通行でない限り）隣接するノード間の両方向を同時に SAVs 走行区間として指定する。

なお、上記の2つ目の前提条件は、SAVs 車

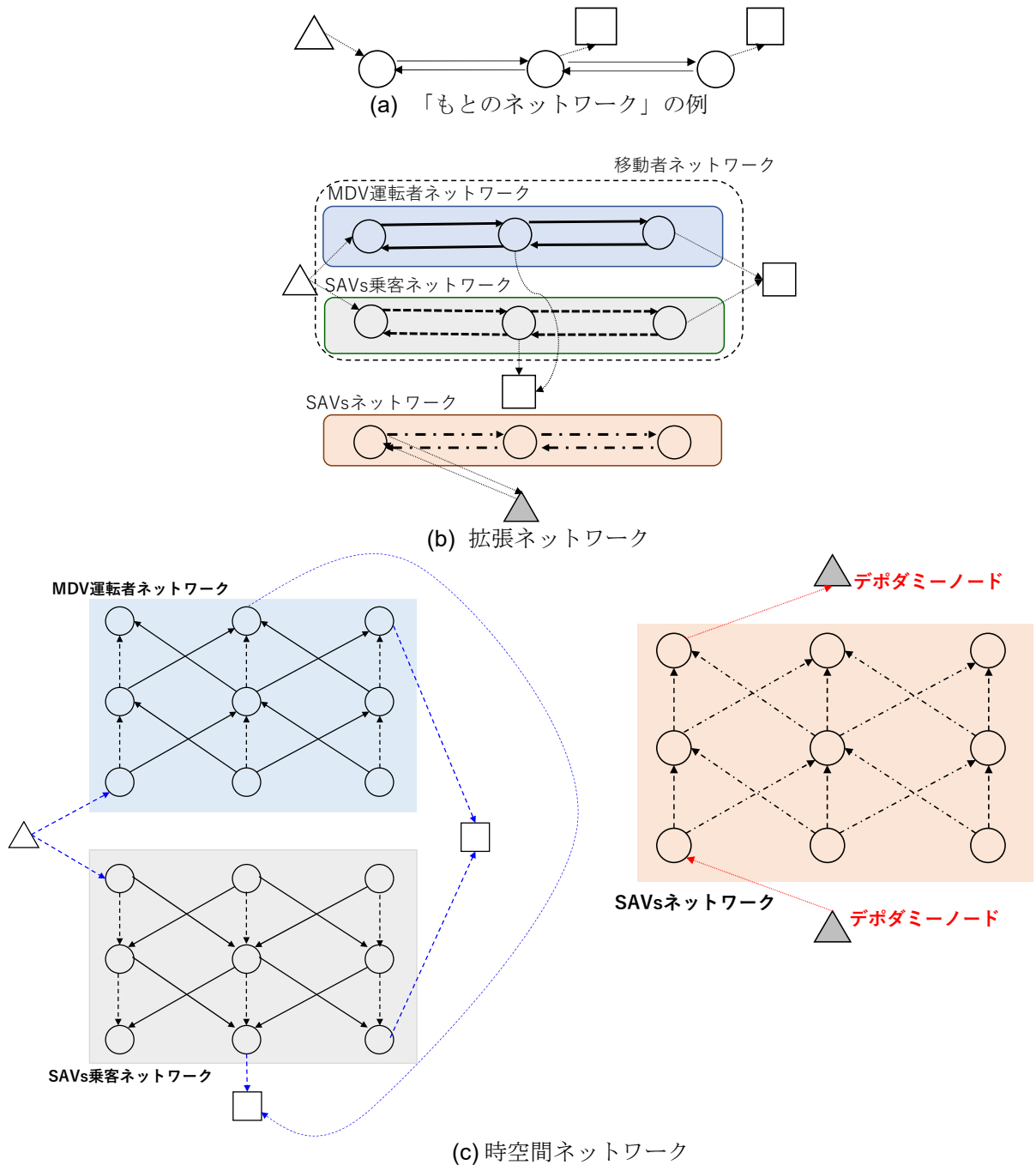


図-4.3.1 ネットワーク変換

両がデポから走行区間のみを自走してデポにたどり着けるような制約条件を簡便な式で表すために設定している。

b) 時空間ネットワークの構築

移動者のフロート SAVs のフローをそれぞれ記述するため、図-4.3.1(a)に示す「もとのネットワーク」を図-4.3.1(b)に示すように「移動者ネットワーク」と「SAVs ネットワーク」の2種類のネットワークとして記述する。ただし、前節で述べたように、「HDVs 運転者」と「SAVs 乗客」は移動途中で入れ替わることができない

ため、「移動者ネットワーク」をさらに「HDVs 運転車ネットワーク」と「SAVs 乗客ネットワーク」の2種類のネットワークとして記述する。「SAVs ネットワーク」におけるセントロイドは、デポを表すダミーノード (SAVs デポノード) として表し、「回送なしモデル」では SAVs デポノードから「もとのネットワーク」におけるすべてのノードをつなぐアクセス・イグレスリンクを作成するが、「回送ありモデル」では SAVs デポノードから「もとのネットワーク」におけるデポが位置するノードのみをつなぐア

クセス・イグレスリンクを作成する。そして、**図-4.3.1(b)**のネットワークを**図-4.3.1(c)**に示す時空間ネットワーク（STEN; Space-Time Extended Network）に拡張する。

時空間ネットワークにおけるノードは、2次元ネットワークに存在するノードを時間帯ごとに定義したものであり、 (i, t) （ただし i は2次元ネットワークにおけるノード番号、 t はノードの時間帯）のように表記できる。

本研究では、需要が発生、集中する「起点ノード」、「終点ノード」とそれ以外のノードである「途中ノード」の3種類のノードを設定する。リンクに関しては、「移動リンク」と「アクセスリンク」、「待機リンク」の3種類のリンクを定義する。「移動リンク」は車両による移動を表すリンクであり、移動リンクの流出ノード、流入ノードをそれぞれ (i, t_1) 、 (j, t_2) とすると $t_2 = t_1 + c_{ij}$ が成り立つ。なお、 c_{ij} は2次元ネットワークにおける ij 間の移動時間であり、本研究では2次元ネットワーク上におけるノード間移動時間は時間帯幅 Δt の整数倍であるとする。「待機リンク」は各ドライバーあるいはライダーの活動を希望しない場所 i において隣接するノード (i, t) および $(i, t + \Delta t)$ を結ぶリンクであり、時刻 t から $t + \Delta t$ までの間に待機することを表している。「アクセスリンク」は、移動者およびSAVsの起点ノードあるいはデポノードからのアクセスを表すリンクである。「移動者ネットワーク」では、各ノードの希望出発時刻にのみアクセスリンクを作成し、「SAVsネットワーク」では**図-4.3.1(b)**で作成したアクセスリンクに対応するリンクを時刻 $t = 1$ においてのみ作成する。「イグレスリンク」は、移動者およびSAVsの終点ノードあるいはデポノードへのイグレスを表すリンクである。「移動者ネットワーク」では、各ノードの到着出発時刻にのみイグレスリンクを作成し、「SAVsネットワーク」では**図-4.3.1(b)**で作成したイグレスリンクに対応するリンクを時刻 $t = NT$ （分析対象の最終時間帯）においてのみ作成する。

c) 記号表記

本研究で用いる記号表記は、以下の通りである。

STENに関する変数

- X : 主体の種類 ($D \cup P \cup SAV$)
- D : HDVs 運転者
- P : SAVs 乗客
- T : 移動者 ($D \cup P$)
- SAV : SAV
- Δt : 時間帯幅

- NT : 計算対象時間帯数
- A_1^X : 種類 X のSTENにおける移動リンク集合
- A_2^X : 種類 X のSTENにおける待機リンク集合
- A_3^X : 種類 X のSTENにおけるアクセスリンク集合
- A_4^X : 種類 X のSTENにおけるイグレスリンク集合
- A : STENにおける全リンク集合
- I^X : 種類 X のSTENにおけるノード集合
- R : STENにおける起点集合
- S : STENにおける終点ノード集合
- i_a : リンク a の流入ノード
- j_a : リンク a の流出ノード
- q_{rs} : STENにおける rs 間の需要
- d_1, d_2 : SAVsの起点、終点デポを表すノード

STENと「もとのネットワーク」の対応を表す変数

- L : 「もとのネットワーク」におけるリンク集合
- $n(i)$: $i \in I$ の「もとのネットワーク」におけるノード番号
- $a_{1,lt}^X$: 「もとのネットワーク」におけるリンク l 、時間帯 t に流出する、種類 X のSTENに対応する移動リンク
- $a_{2,lt}^X$: 「もとのネットワーク」におけるリンク l 、時間帯 t に流出する、種類 X のSTENに対応する待機リンク

フロー、SAVs走行区間に関する決定変数

- x_a^s : 目的地を s とするリンク $a \in A$ の旅客 (HDVs 運転者・SAVs 乗客) フロー
- y_a : リンク $a \in A$ のSAVsフロー
- z : 投入するSAVs台数
- ϕ_l : リンク $l \in L$ がSAVs走行区間として指定されれば1、そうでなければ0をとるバイナリー変数

パラメータ

- α_1 : 移動時間の時間価値
- α_2 : 待ち時間の時間価値
- t_a, t_l : リンク $a \in A$ およびリンク $l \in L$ の旅行時間
- β^{TC} : 単位距離あたりの移動コスト (ガソリン代)
- θ_{MND} : HDVsの保有コスト (円/台・日)
- θ_{SAV} : SAVsの保有コスト (円/台・日)
- BGT : SAVs走行区間を指定するための上限予算
- κ : SAVsの乗車定員

- CR_l : もとのネットワーク」における移動リンク l の容量
 CP_l : もとのネットワーク」における待機リンク l の容量

d) STENリンクコスト

以上で述べた仮定および STEN の設定により、STEN における移動リンク、待機リンク、アクセスリンク、イグレスリンクのコストは、それぞれ以下のように設定できる。

移動リンク

式(3.2.1)に示すように、HDVs 運転者の移動には移動時間コスト ($\alpha_1 t_a$) と車両走行コスト ($\beta^{TC} t_a$) が負荷され、SAVs 乗客および SAVs の移動リンクには、それぞれ移動時間コスト、車両走行コストのみが負荷される。

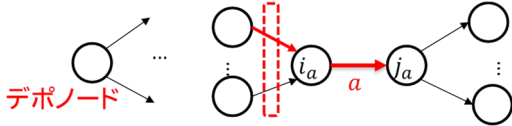
$$c_a^s = \begin{cases} \alpha_1 t_a + \beta^{TC} t_a & (\forall a \in A_1^D) \\ \alpha_1 t_a & (\forall a \in A_1^P) \\ \beta^{TC} t_a & (\forall a \in A_1^{SAV}) \end{cases} \quad (4.3.1)$$

待機リンク

移動者は、到着時刻制約に関わらず目的地になるべく早く到着することが望ましいと仮定しているため、待機リンクコストは式(4.3.2)および式(4.3.3)のように表される。

$$c_a^s = \begin{cases} w_a^s & (\forall a \in A_2^D \cup A_2^P) \\ 0 & (\forall a \in A_2^{SAV}) \end{cases} \quad (4.3.2)$$

ただし、



あるリンクが走行区間として指定されるためには、上流に位置するいずれかのリンクが走行区間である必要がある

図-4.2.2 走行区間の連続性に関する制約条件

$$w_a^s = \begin{cases} \alpha_2 \Delta t & (n(s) \neq n(j_a)) \\ 0 & (n(s) = n(j_a)) \end{cases} \quad (4.3.3)$$

アクセスリンク・イグレスリンク

本研究では、HDVs の保有コスト (日単位の購入費および維持費) を式(4.3.4)に示すようにアクセスリンクに負荷する。また、イグレスリンクのコストは式(5)に示すようにすべて 0 である。

$$c_a^s = \begin{cases} \theta_{MND} & (\forall a \in A_3^D) \\ 0 & (\forall a \in A_3^P \cup A_3^{SAV}) \end{cases} \quad (4.3.4)$$

$$c_a^s = 0 \quad (\forall a \in A_4^D \cup A_4^P \cup A_4^{SAV}) \quad (4.3.5)$$

なお、次節で示すように SAVs の導入コストを目的関数に明示的に含めるため、SAVs の保有コストはアクセスリンクには含めない。

e) SAVs 走行レーンが満たすべき制約条件

SAVs 車両がデポからデポまでの移動を完了するためには、STEN 上のデポを表す起点ノードから終点ノードまでの間が走行区間で接続されている必要があるが、本節では SAVs が自走によりすべての移動を行えるような走行区間の連結条件を、制約条件として表すことを考える。

道路ネットワークにおいて、一方通行でない限り隣接するノード間には方向別の 2 本のリンクが存在するが、2.(1)で仮定したように隣接するノード間の両方向を同時に SAVs 走行区間として指定するため、ノード間のリンクの方向を区別する必要はない。そこで、下記に示す手順によりデポノードから遠ざかる方向のリンクである「順方向リンク」のみの集合を作成する。

Step 1 : 最短経路探索

デポノードを起点とし、道路ネットワーク上のすべてのノードまでの最短経路探索を行い、ノード i における最小コストを ω_i とする。

Step 2 : 「順方向リンク集合」の生成

$\omega_{i(l)} > \omega_{j(l)}, \forall l \in L$ であればリンク l を「逆方向リンク」、 $\omega_{i(l)} < \omega_{j(l)}, \forall l \in L$ であればリンク l を「順方向リンク」とよぶことにする。道路ネットワーク上から逆方向リンクを除去したリンク集合 L' を生成する。

そして、「順方向リンク集合 L' 」に含まれるリンクを対象に、下記の制約条件により SAVs 走行区間の連結条件を表す。

$$\varphi_m \leq \sum_{n \in IN(i_m)} \varphi_n, \forall m \in L', i_m \neq n_{depo} \quad (4.3.6)$$

$$\varphi_m = \{0,1\}, \forall m \in L' \quad (4.3.7)$$

$$\phi_l = \Delta_m^l \varphi_m, \forall l \in L \quad (4.3.8)$$

式(3.2.6)は、ある順方向リンクが走行区間として指定されるには、そのリンクの直上流に位置する順方向リンクのうち少なくとも 1 本が走行区間として指定されている必要がある、という制約条件である。この制約条件により、デポノードを起点とし連続した SAVs 走行区間を記述することが可能である (図-4.3.2 参照)。式(4.3.7)はデザイン変数がバイナリー変数であるという条件を表している。式(4.3.8)における Δ_m^l は道路ネットワーク上のリンク l と「順方向リンク」 m の関係を表すダミー変数であり、式(4.3.8)より「順方向リンク」における走行区間の有無

を、道路ネットワークのリンクにおける走行区間の有無に変換している。

なお、本節では隣接するノード間の両方向のリンクを同時に走行区間として指定するため、一方通行が存在しない道路ネットワーク上では上記の制約条件を満たす走行区間のみを走行して、デポからデポにたどり着くことが可能である。一方通行が存在する場合は、上記の制約条件のみを満たす（一部の）走行区間からデポにたどり着かないことがありうる。しかし、一般的な道路ネットワークにおいて一方通行の区間はごくわずかであるため、一方通行の影響は限定的であると考えられる。

f) 定式化

SAVs 車両導入台数および走行区間を決定するシステム最適問題は、以下に示す総コスト最小化問題として定式化できる。

$$\min_{x,y,z,\phi} Z = \sum_{s \in S} \sum_{a \in A^T} c_a^s x_a^s + \sum_{a \in A^{SAV}} c_a y_a + \theta_{SAV} z \quad (4.3.9)$$

s.t.

$$\sum_{a \in OUT(r)} x_a^s - \sum_{a \in IN(r)} x_a^s = q_{rs}, \forall r \in R, s \in S \quad (4.3.10)$$

$$\sum_{a \in OUT(s)} x_a^s - \sum_{a \in IN(s)} x_a^s = -\sum_{r \in R} q_{rs}, \forall s \in S \quad (4.3.11)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} x_a^s - \sum_{a \in IN(i)} x_a^s = 0, \forall i \in \{I^T - R - S\} \quad (4.3.12)$$

$$\sum_{a \in OUT(d_1)} y_a - \sum_{a \in IN(d_1)} y_a = z \quad (4.3.13)$$

$$\sum_{a \in OUT(d_2)} y_a - \sum_{a \in IN(d_2)} y_a = -z \quad (4.3.14)$$

$$\sum_{a \in OUT(i)} y_a - \sum_{a \in IN(i)} y_a = 0, \forall i \in \{I^{SAV} - d_1 - d_2\} \quad (4.3.15)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_1,lt}^s + y_{a_1,lt}^{SAV} \leq CR_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (4.3.16)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_2,lt}^s + y_{a_2,lt}^{SAV} \leq CP_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (4.3.17)$$

$$\sum_{s \in S} x_{a_1,lt}^s \leq ky_{a_1,lt}^{SAV}, \forall l \in L, t \in NT \quad (4.3.18)$$

$$y_{a_1,lt}^{SAV} \leq CR_l \cdot \phi_l, \forall l \in L, t \in NT \quad (4.3.19)$$

$$\sum_{l \in L} t_l \phi_l \leq BGT \quad (4.3.20)$$

$$x_a^s \geq 0, \forall a \in A^T, s \in S \quad (4.3.21)$$

$$y_a \geq 0, \forall a \in A^{SAV} \quad (4.3.22)$$

$$z \geq 0 \quad (4.3.23)$$

$$\phi_l = \{0,1\}, \forall l \in L \quad (4.3.24)$$

$$\varphi_m \leq \sum_{n \in IN(l_m)} \varphi_n, \forall m \in L', l_m \neq n_{depo} \quad (4.3.6)$$

$$\varphi_m = \{0,1\}, \forall m \in L' \quad (4.3.7)$$

$$\phi_l = \Delta_m^l \varphi_m, \forall l \in L \quad (4.3.8)$$

式(4.3.9)の第1項、第2項、第3項はそれぞれ移動者の総走行時間と総走行コストの和、SAVsの総走行コスト、SAVs導入コストを表している。なお、前節で述べたリンクコストにおいてSAVsの走行時間を0としているため、式(4.3.9)の目的関数にSAVsの走行時間を含めていない。


式(4.3.10)から式(4.3.12)および式(4.3.13)から式(4.3.15)はそれぞれ、時空間ネットワーク上における移動者、SAVsのフロー保存則を表している。式(4.3.16)から式(4.3.18)は容量制約条件を表している。式(4.3.16)はHDVsとSAVsの交通量がリンク容量以下であるという条件である。式(4.3.17)はHDVsとSAVsの待機台数が駐車場容量以下であるという条件である。式(4.3.18)はSAVsの移動者数は車両容量以下であるという条件である。式(4.3.19)は、SAVs走行区間として指定されてもSAVsフローはリンク容量以下であることを意味しており、SAVsは走行区間しか通行できないという制約条件である。なお、HDVsの通行区間に関する制約条件を課していないため、HDVsはすべての区間を通行可能である。式(4.3.20)は走行区間の指定コストが予算制約以下であるという予算制約条件である。式(4.3.21)から式(4.3.23)はそれぞれ移動者フロー、SAVsフローおよびSAVs台数の非負条件を表している。式(4.3.24)は走行区間のデザイン変数がバイナリー変数であるという条件である。最後に、式(4.3.6)から式(4.3.8)は、前節で説明したSAVs走行レーンが満たすべき条件である。

以下では、構築した混合整数計画問題をMATLAB 2022aから汎用ソルバーであるGurobi Optimizer 9.5.0を呼び出して求解する。

(2) 仮想ネットワークにおける適用例

a) 計算条件

計算対象ネットワーク

計算対象ネットワークとして、 示す仮想ネットワーク（Sioux Falls ネットワーク）を採用した。リンク長等の情報も公開されており、リンク旅行時間は $[d_a/2] \times \Delta t$ （分）（ただし、 d_a はリンク a のリンク長（km）、 $[x]$ は x を切り上げて整数にした値）として与えた。また、

$\Delta t = 15$ とし、リンク容量は公開されている値の0.5倍と設定した。

構築したモデルにおいてデポの位置を指定する必要があるが、郊外部を想定したノード1と中心部を想定したノード10の2ケースを想定する。

パラメータ設定

構築したモデルにおけるパラメータは時間価値 (α_1 および α_2)、SAVs 車両定員 (κ)、車両走行コスト (β^{TC}) および SAVs, HDVs の保有コスト (θ_{SAV} , θ_{MNV}) である。このうち、時間価値は $\alpha_1 = 2000$ 円/時、 $\alpha_2 = 4000$ 円/時と設定し、車両容量は $\kappa = 3$ と設定した。また、 β^{TC} は表-4.3.1 に示す属性値を用いて車両走行コストを時間単位に変換して $\beta^{TC} = 2.92$ 円/分と設定した。なお、車両走行コストとしてガソリン代のみを考慮した。SAVs の保有コストは、表-4.3.2 に示す属性値を用いて算出された1日あたりの保有コスト (4406.4 円/日) を参考に、 $\theta_{SAV} = 5,000$ 円/日と設定した。HDVs の保有コストは、表-4.3.2 に示す属性値を用いて算出された維持費 (1666.7 円/日) および購入費と維持費の合計 (2488.5 円/日) を参考に、 $\theta_{MND} = 1,500$ 円/日と2,500円/日の2種類の値を設定した。なお、 $\theta_{MND} = 1,500$ 円/日は HDVs の保有に際して維持費のみを考慮しているケースに相当し、 $\theta_{MND} = 2,500$ 円/日は購入費と維持費を考慮しているケースに相当する。

需要設定

Sioux Falls ネットワークでは静的な OD 需要しか公開されていないが、嶋本ら¹⁾と同様の方法でこれを時間帯ごとに割り振る。図-4.3.4 に

示すように、基準時刻から出発時刻の間には、ある「ばらつき」が存在するものとする。そして、許容到着時刻は、「出発時刻+OD間の最小旅行時間+Time Window」により設定する。以下では、出発時刻の「ばらつき」をポアソン分布で表現し、その平均値を $\lambda = 1$ とし、Time Window は全 OD ペアで一律で $4\Delta t$ (1時間) とした。

評価指標

本研究における評価指標として、SAVs 台数、SAVs 分担率、目的関数値改善度の3つを採用する。SAVs 台数および SAVs 乗客比率は、SAVs

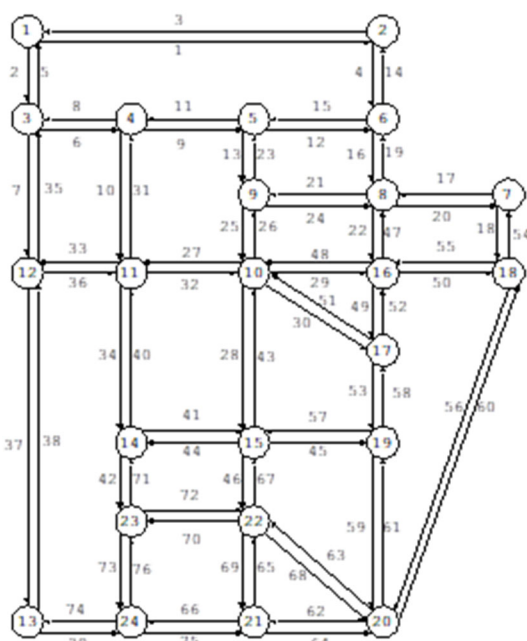


図-4.3.3 計算対象ネットワーク

表-4.3.1 パラメータ設定に用いた属性値

時間帯幅	燃料費	車両燃費	平均速度
15 min	140 円/l	12km/l	30km/h

表-4.3.2 SAVs および HDVs の属性値

SAVs の属性値			HDVs の属性値		
車両価格	耐用年数	維持費 (月あたり)	車両価格	耐用年数	維持費 (月あたり)
500 万円	5 年	50,000 円	300 万円	10 年	50,000 円

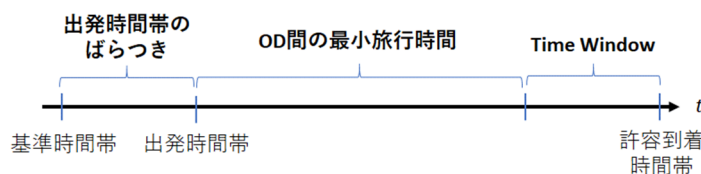


図-4.3.4 出発・到着時刻制約の設定

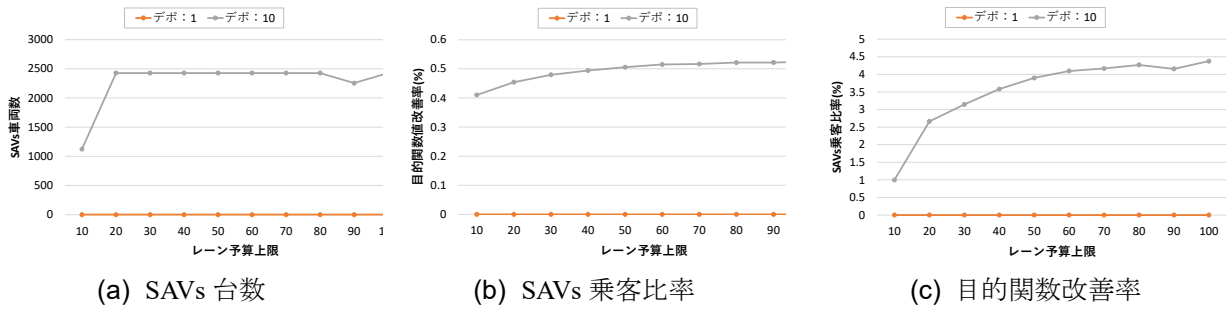


図-4.3.5 HDVs を保有コストを考慮しないときの評価指標

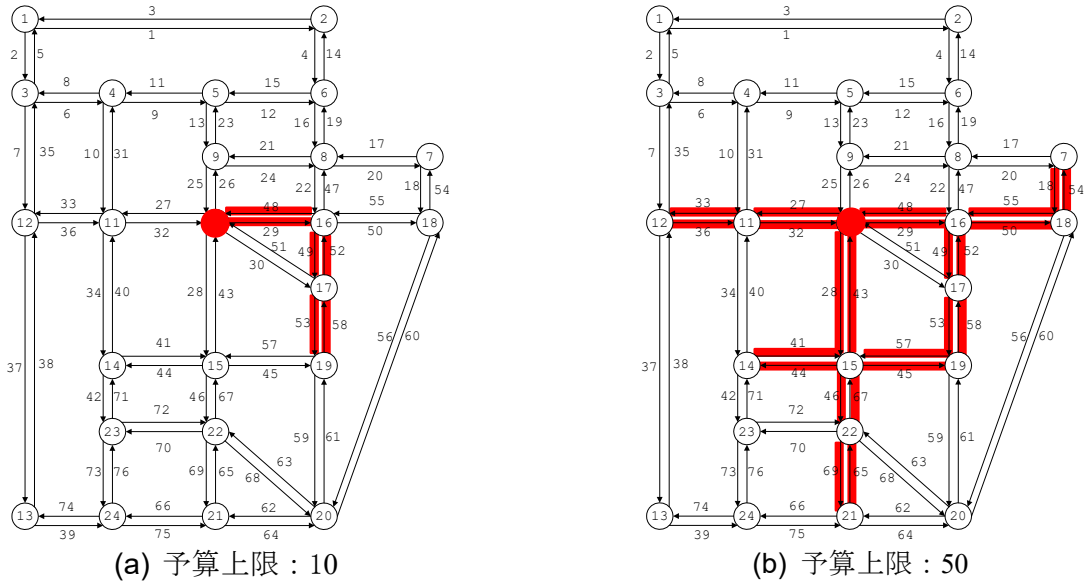


図-4.3.6 SAVs 走行区間

の普及の程度を見る指標であり, SAVs 乗客比率は以下のように移動リンクを通過する HDVs 運転手の総走行距離と SAVs 乗客の総走行距離に対する SAVs 乗客の総走行距離として定義する.

$$r_{SAV} = \frac{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_1^p} t_a x_a^s}{\sum_{s \in S} \sum_{a \in A_1^{pUA_1^p}} t_a x_a^s} \quad (4.3.25)$$

一方, 目的関数値改善度は以下に示すように SAVs が普及していないときと比較したときの目的関数値の改善度を表す指標である

$$IR = 1 - \frac{Z_{OPT}}{Z_{MND}} \quad (4.3.26)$$

ここに, Z_{OPT} , Z_{MND} はそれぞれ構築したモデルの目的関数値, SAVs が導入されていないとき (i.e. 手動運転車のみの場合) の目的関数値である.

b) HDVs の保有コストを考慮しないケース

本節では, HDVs の保有コスト θ_{MND} を 0 としてモデル間の解の比較を行う. 図-4.3.5(a), (b),

(c) にそれぞれ走行予算制約と SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数値改善率を表す. デポの位置がノード 1 のとき, SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善率がすべて 0 であり, SAVs および SAVs 走行区間を導入しない解が最適となった. それに対し, デポの位置がノード 10 のときは, SAVs が導入される解が最適となったが, 予算上限が 20 以降は SAVs 台数が頭打ち傾向にあることがわかる.

図-4.3.6 (a), (b) に, それぞれ予算上限が 10, 50 のときにおけるデポがノード 10 に存在するときの SAVs 走行区間を示す. 予算上限が上昇するに従い指定区間が延びており, また走行区間の制約条件を満たす解が得られていることが確認できる.

c) HDVs の保有コストの影響分析

本節では, HDVs の保有コストを負荷して計算し, HDVs の保有コストの影響を分析する. 前述したように HDVs の保有コストとして, HDVs の保有に際して維持費のみを考慮してい

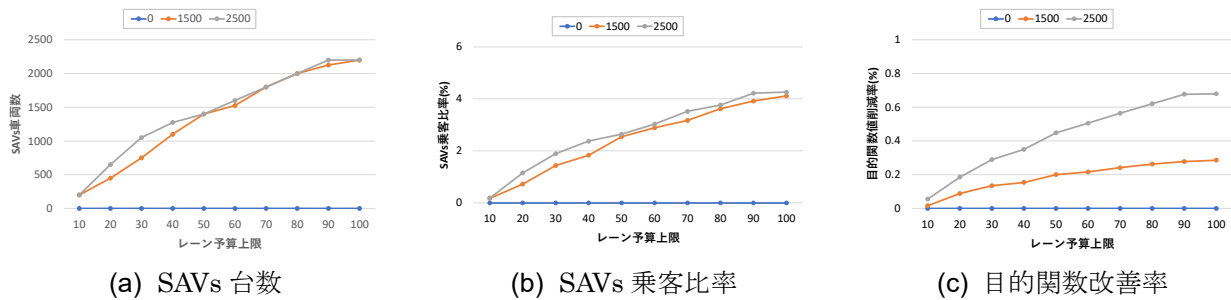


図-4.3.7 デポの位置が1のときの評価指標

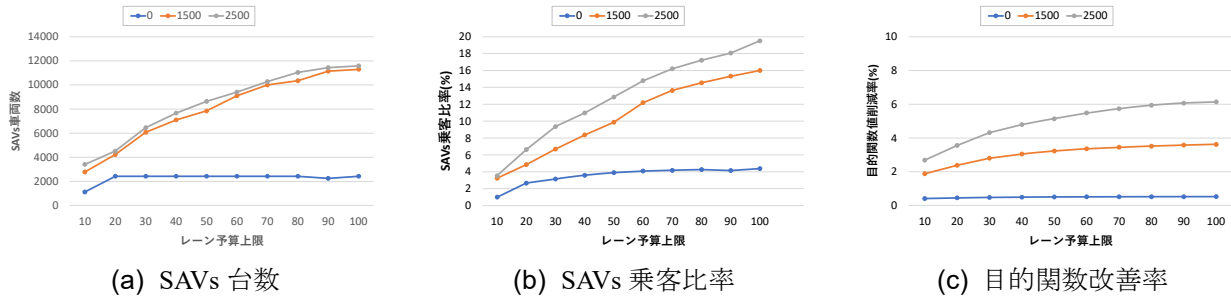


図-4.3.8 デポの位置が10のときの評価指標

るケース ($\theta_{MND} = 1,500$) と購入費と維持費を考慮しているケース ($\theta_{MND} = 2,500$) の2ケースを想定する。

図-4.3.7 (a), (b), (c)にデポの位置がノード1であるときのそれぞれ SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善率を示す。前述したように、保有コストが0のときはSAVsを導入しない解が最適となった。保有コストが1,500および2,000のときで、予算上限に対するSAVs台数およびSAVs乗客比率は大きな差異はないものの、両指標ともに保有コストが2,000のときの方が1,500のときよりも両指標は常に大きいといえる。一方、目的関数改善率に関しては、保有コストが1,500のときと2,000のときの差が大きい。これは、1台あたりの保有コストが大きくなると、SAVs導入にともなうHDVs台数削減効果が大きく計上されるためであると考えられる。

図-4.3.8 (a), (b), (c)にデポの位置がノード10であるときのそれぞれ SAVs 台数, SAVs 乗客比率, 目的関数改善率を示す。SAVs台数に関しては、デポの位置がノード1のときと同様に保有コストが1,500のときと2,000のときで大きな差異はない。SAVs台数も保有コストが1,500のときよりも2,000のときの方が常に大きな値となっているが、両者の差はデポの位置がノード1のときよりも大きくなっている。目的関数

改善率に関しても、保有コストが大きくなるにつれ大きくなる傾向にあることが読み取れる。

最後に、デポの位置がノード1とノード10のときの結果を比較すると、すべての指標においてデポがノード10のときの方が大きく、SAVs走行区間を導入する効果が大いことがわかる。

(3) 熊本都市圏ネットワークにおける適用例

本項では、構築したモデルを熊本都市圏ネットワークに適用し、最適な走行区間とSAVsおよび走行区間の導入効果を考察する。

a) 計算条件

計算対象ネットワークおよび需要設定

本節では、熊本都市圏の中心部に位置する主要道路を模した図-4.3.9に示すネットワークを対象に計算を行った。計算対象ネットワークにおけるセントロイド、非セントロイドノード数はそれぞれ24, 25であり、リンク数は162である。なお、計算を行うにあたり、図-4.3.1に示すように3種類のネットワークに拡張した上で時空間ネットワークに変換するため、もとのネットワークよりもノード数、リンク数ともに大幅に増大する。そのため、次節以降の検討で用いる計算ネットワークよりも範囲を絞り、また道路構造も大幅に簡略化している点に注意が必要である。

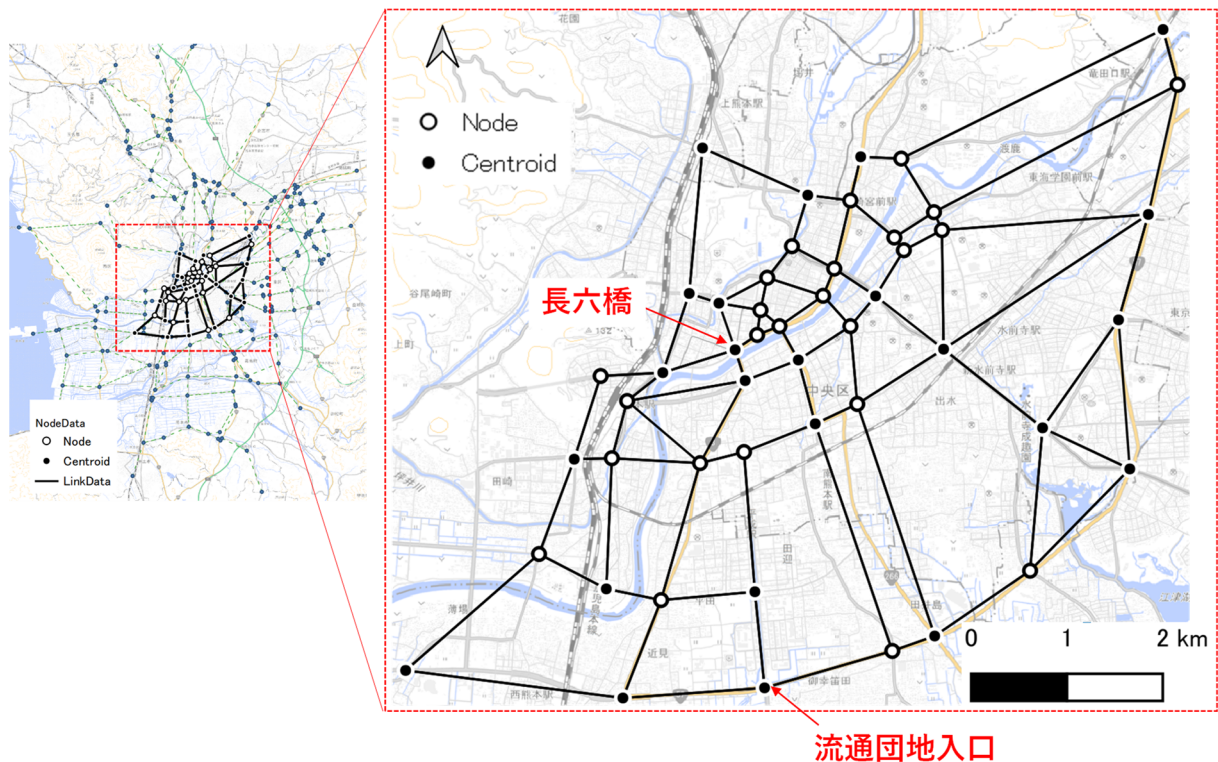


図-4.3.9 計算対象ネットワーク

計算時間帯幅を $\Delta t = 1$ として、計算時間帯数は混雑の影響も加味するため、すべてのODペア間の最小旅行時間の1.5倍と設定した。また、リンク容量は次節における検討で用いたデータと同様のものを用いるが、集約されたリンク容量は合算する等の処理を行った。交通需要は、次節における検討で用いたデータと同様のものを用いる。ただし、内外あるいは外内トリップに関しては計算対象ネットワークにおける最寄りのセントロイドノードに集約し、外外トリップは計算対象から除外した。また、計算負荷を考慮して出発時刻制約、到着時刻制約は計算開始時間帯、計算終了時間帯に統一する。

パラメータ設定

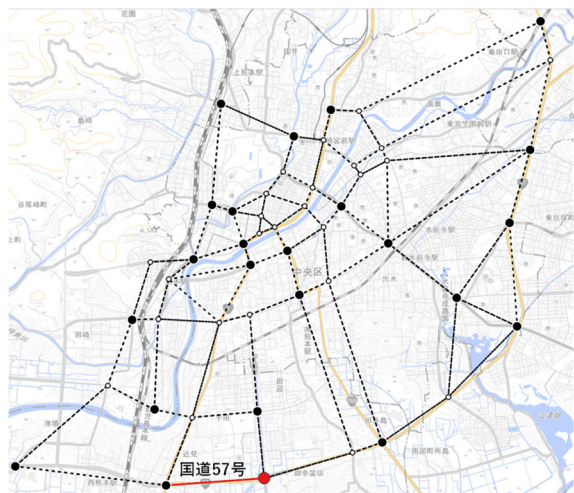
前項の仮想ネットワークにおける検討で、手動運転車の保有コストを考慮しない場合、SAVsおよび走行区間の導入効果がわずかであった。したがって、手動運転車の保有コストとして、維持費のみを考慮しているケースに相当する $\theta_{MND} = 1,500$ 円/日とする。それ以外のパラメータは、前項の検討で用いた表-4.3.1および表-4.3.2の属性値を用いて算出した。

また、デポは郊外部に設置した場合を想定した「流通団地入口交差点」と、中心部に設置した場合を想定した「長六橋交差点」の2ケースの検討を行う。なお、それぞれの交差点の位置は、図-4.3.9に記している。

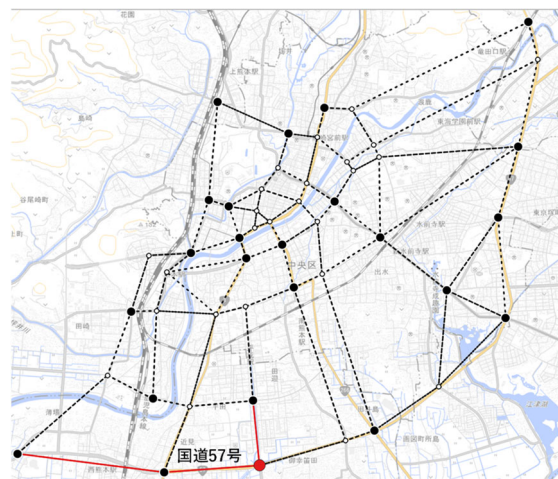
b) 走行区間の最適解

図-4.3.10および図-4.3.11に、それぞれデポを郊外部（流通団地入口交差点）および中心部（長六橋交差点）に設置した場合における、SAVs走行区間の最適解を示す。なお、デポを中心部に設置した場合の方が郊外部に設置した場合よりも計算時間がかかる傾向にあった。例えば、予算上限が50のときデポを郊外部、中心部に設置した場合の計算時間はそれぞれ3.2時間、1週間程度であった。これは、中心部の方が距離の短いリンクが集まっており、走行区間の候補となるリンクの組み合わせが膨大となるためであると考えられる。また、デポを中心部に設置した場合において、予算上限が100のときは3週間経過しても解が得られなかったため、結果は割愛する。

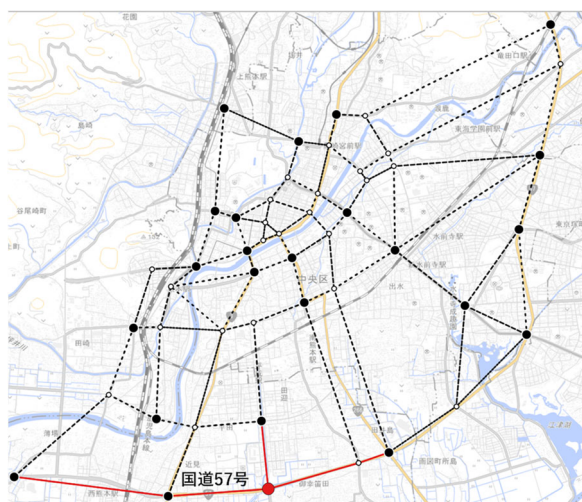
デポを郊外部に設置した場合、予算制約が30までのときは、概ね郊外部に位置する国道57号に沿ってSAVs走行区間が指定されている。その後、予算上限が50のときに中心部に向けて走行区間が延伸されている。そして、予算上限が100のときは、再び国道57号に沿って走行区間が延伸されている。また、予算上限が大きいときの走行区間の解は、予算上限が小さいときの走行区間の解をほぼ内包しているため、今回分析した範囲内においては逐次的に走行区間を延伸しても最適に近い解を実現できると



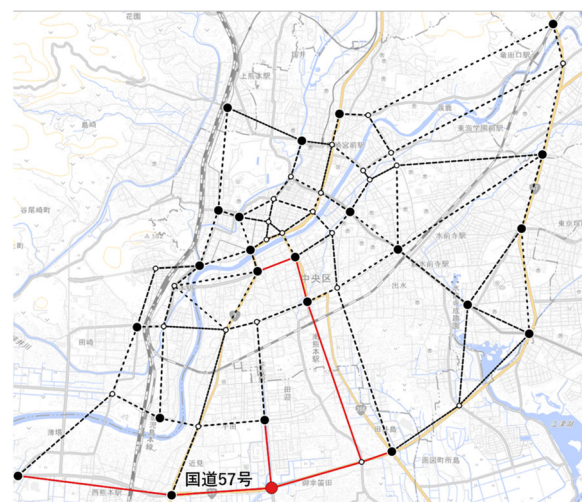
(a) 予算上限 : 10



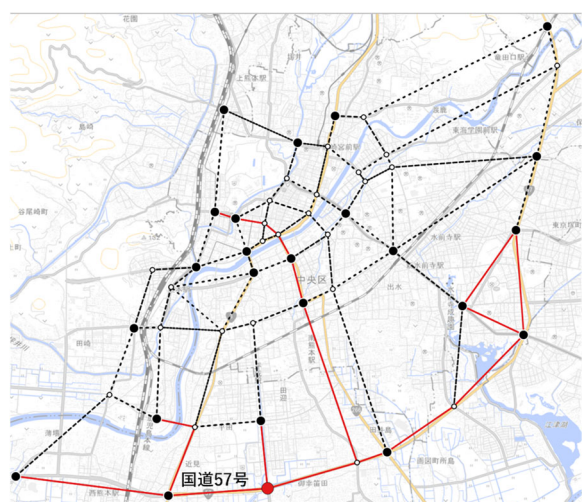
(b) 予算上限 : 20



(c) 予算上限 : 30



(d) 予算上限 : 50



(e) 予算上限 : 100

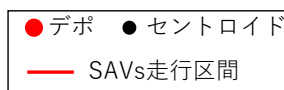
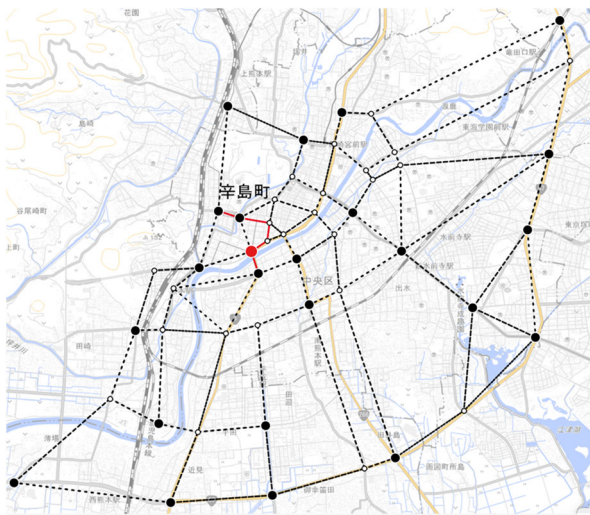


図-4.3.10 郊外部（流通団地入口交差点）にデポを設置した場合の走行区間

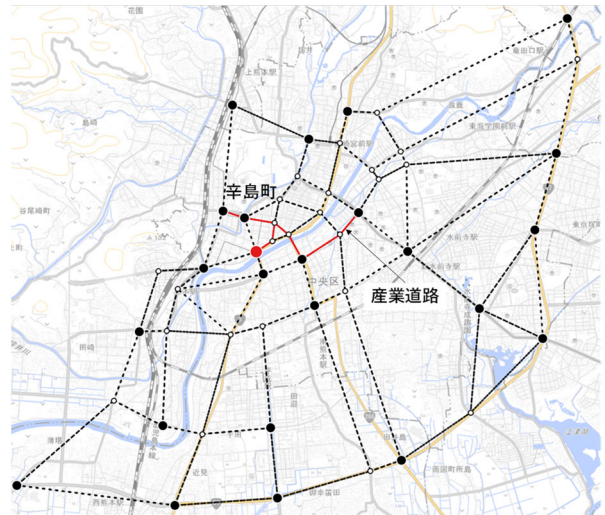
いえる。

一方、デポを中心部に設置した場合、予算上限が 10 のときは辛島町方面に走行区間が指定

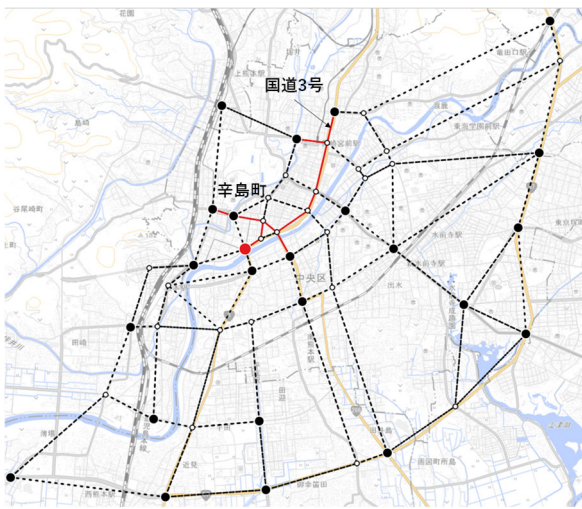
されている。その後、予算上限が 20 のときは産業道路方面に走行区間が延伸されている。しかし、予算上限が 30 のときは産業道路は走行区



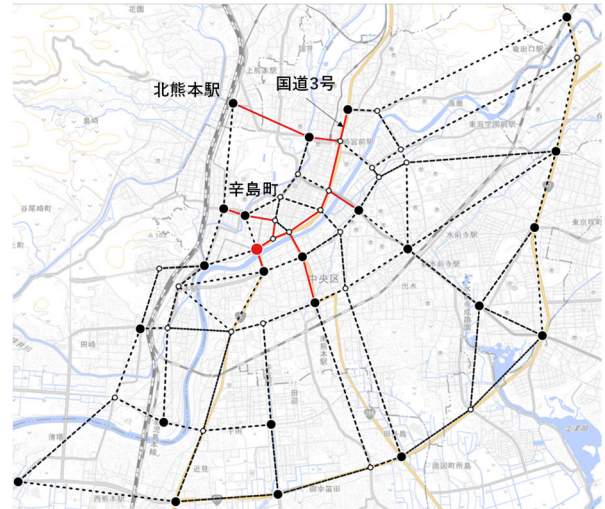
(a) 予算上限 : 10



(b) 予算上限 : 20



(c) 予算上限 : 30



(d) 予算上限 : 50

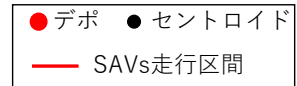


図-4.3.11 中心部（長六橋交差点）にデポを設置した場合の走行区間

間として指定されず、かわりに国道3号を北上する方向に走行区間が指定されている。その後、予算上限が50のときは上熊本駅方面および国道266号を南下する方向に走行区間が延伸されている。デポを郊外部に設置した場合と異なり、予算上限が20のときに走行区間として指定されていた道路の一部は、予算上限30のときに走行区間として指定されなくなった。したがって、デポを中心部に設置したときは、逐次的に走行区間を延伸したときは最適な解が実現されないといえる。

c) 各種指標の比較

最後に、各種指標の比較を表-4.3.3に示す。デポが郊外、中心部の両方に共通して、予算上

限が大きくなるにつれ各種指標が改善しており、デポを郊外に設置したときのSAVsのシェアは最大で20%程度となった。また、デポが郊外にある方が中心部にあるときよりも指標がよい傾向にあるが、予算上限が大きくなるにつれ両者の指標の差が小さくなっているといえる。ただし、前述したように本節では域外を起終点とする需要の起点あるいは終点を分析対象ネットワークの境界にあるセントロイドに集約している。したがって、分析対象ネットワークの域外を起終点とするSAVs利用者は、実際には境界のセントロイドで乗り換えが必要である点に注意が必要である。また、本研究ではデポおよび走行区間を設置するコストを目

表-4.3.3 各種指標の比較

予算上限	目的関数削減率(%)		SAVs 投入台数		SAVs 乗客比率(%)		SAVs 比率(%)	
	郊外部	中心部	郊外部	中心部	郊外部	中心部	郊外部	中心部
10	7.53	7.27	427.6	176.2	0.27	0.11	0.07	0.04
20	10.20	7.68	2850.0	762.4	2.84	0.69	0.93	0.24
30	11.80	8.49	5570.0	2177.5	5.73	2.60	1.91	0.86
50	12.53	9.96	7864.6	6020.7	8.41	7.78	3.20	2.75
100	15.19	-	13383.0	-	19.49	-	7.85	-

的関数に含めていないが、一般にデポを中心部に設置する方がコストが大きい点に注意が必要である。

(4) 結語

本節では、すべての移動者は手動運転車か共有型自動運転車（以下、SAVs）のいずれかの交通手段で移動するとき、システム最適状態を満たす SAVs 走行区間と SAVs 投入台数を決定する問題を構築し、仮想ネットワークを用いてモデルの挙動を確認した。そして、熊本都市圏を模したネットワークにおいて、SAVs のデポを郊外部と中心部に設置した場合を想定した適用計算を行い、以下の点を確認した。

- 1) SAVs のデポを郊外部に設置した場合、予算上限が小さいときは国道 57 号に沿って SAVs の走行区間が指定され、その後、予算上限が大きくなるにつれ中心部に向けて走行区間が延伸される。また、予算上限が大きいつきの走行区間の解は、予算上限が小さいときの走行区間の解をほぼ内包している。
- 2) SAVs のデポを中心部に設置した場合、予算上限が小さいときは辛島町方面に走行区間が指定される。その後、予算上限が大きくなるといったんは産業道路方面に走行区間は延伸されるものの、さらに大きくなると産業道路は走行区間に指定されず、かわりに国道 3 号を北上する方向に走行区間は延伸される。
- 3) SAVs のデポを郊外部に設置した方が、中心部に設置したときよりも同じ予算上限に対する各種指標はよい結果となった。

ただし、上記の結果はデポや走行区間の設置コストを考慮しておらず、またネットワーク作成の都合上、分析対象ネットワークの域外を起終点とする SAVs 利用者は、実際には境界のセントロイドで乗り換えが必要である点に注意が必要である。

本節で構築したモデルは、2 値変数と実数変数からなる混合整数計画問題として定式化されており、計算負荷が大きい。そのため、特にデポを中心部に設置した場合における計算時

間が多く、予算上限を大きくしたときに実用的な時間内に求解出来なかった。したがって、今後の課題として定式化した問題を 2 値変数と実数変数への分解など、計算アルゴリズムの効率化が必要である。その上で、熊本都市圏ネットワークにおいて様々なケースを想定した適用計算を行い、知見の一般化を図る必要があるといえる。

4.4 連続的な自動運転車専用レーン整備モデルの構築と熊本都市圏への適用例

本節では、自動運転車両（AVs）の導入効果を高めるための運行方法として大きな役割が期待されている AVs 専用レーンについて、より実用的かつ効率的な施行を見据え、連続性を担保した最適な AVs 専用レーンを考える。不連続な AVs 専用レーンがいたるところに出現することを避け、一定の連続性を有する AVs 専用レーンの配置計画とするため専用レーン配置が必ず木構造となる制約を与えることで連続性を保証する。また、AVs の普及率はいくつかの段階をもって向上するため、手動運転車（HV）との共存も考慮する必要がある。提案する最適 AVs 専用レーン決定問題はリンク容量制約に基づく総走行距離最小化モデルであり、AVs 専用レーンの設置が及ぼす HVs への影響に関しても同時に組み込むことで、専用レーン設置による AVs が享受するメリットと HVs のデメリットの両方を表現する。道路の新設や増強は行わない効果的な運用方法を明示するため、既存の交通容量を AVs 専用レーンと混在レーンに割り当てる問題とした。

(1) 最適 AVs 専用レーンデザインモデル

a) モデルの前提条件

本モデルの前提条件を述べる。AVs と HVs それぞれの需要 OD データは既知であり、デザイン路線の本数は政策変数としてあらかじめ与

えられる。デザイン路線とは、AVs 専用レーンが設置されるリンクが連続して構成されるものであり、連続リンク数の下限値が制約条件として設定される。AVs 専用レーンが設置されたリンクのうち、専用レーンはAVsのみが利用可能であり、残りの通常レーンはAVsとHVsの両車種が利用可能である。AVs専用レーンが設置されないリンクは全てのレーンを両車種が利用する。前節のモデルは、AVsは指定された区間のみ走行可能とする前提であったのに対し、本節で扱うモデルではAVsはどの区間も走行可能であるがHVsは専用レーンを走行できない設定となっていることに注意が必要である。既存レーン数のうち何レーンを専用とするのかは、パラメータによってリンクごとに設定する。本パラメータを調節することにより、既存の全車線を専用レーン化の対象としてAVsのみ通行可能なリンクとすることも可能である。

b) 定式化

リンク容量制約のもと総走行距離を最小化するAVs専用レーンの配置を求める最適AVs専用レーンデザインモデルを以下のように構築する。

$$\min_{y, x^A, x^H, \theta, \mu} \sum_{e \in E} \sum_{o \in O} \gamma_e x_{oe}^H + \sum_{e \in E} \sum_{o \in O} \gamma_e x_{oe}^A \quad (4.4.1)$$

s.t.

$$\begin{cases} \sum_{e \in In(n)} x_{oe}^A - \sum_{e \in Out(n)} x_{oe}^A = \\ \begin{cases} -\sum_{d \in D} v_{od}^A & \text{if } n = o \\ v_{od}^A & \text{if } n \in D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \forall n \in N, o \in O \quad (4.4.2)$$

$$\begin{cases} \sum_{e \in In(n)} x_{oe}^H - \sum_{e \in Out(n)} x_{oe}^H = \\ \begin{cases} -\sum_{d \in D} v_{od}^H & \text{if } n = o \\ v_{od}^H & \text{if } n \in D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \forall n \in N, o \in O \quad (4.4.3)$$

$$x_{oe}^H, x_{oe}^A \geq 0 \quad \forall e \in E, o \in O \quad (4.4.4)$$

ただし、

- E : フローネットワークのリンク集合. その要素は $e \in E$
- N : ノードの集合
- O : 出発地ノードの集合. ただし, $o \in O \subseteq N$
- D : 到着地ノードの集合. ただし, $d \in D \subseteq N$
- x_{oe}^A : o を起点とする AVs のリンク e における交通量
- x_{oe}^H : o を起点とする HVs のリンク e に

おける交通量

- γ_e : リンク e の長さ
- v_{od}^A : ノードペア (o, d) の AVs における OD 交通量. $o \in O, d \in D$
- v_{od}^H : ノードペア (o, d) の HVs における OD 交通量. $o \in O, d \in D$
- $In(n)$: ノード n に流入するリンクの集合
- $Out(n)$: ノード n から流出するリンクの集合

である。式(4.4.1)はAVsとHVsの総走行距離の和で定義される目的関数である。この目的関数はAVsとHVsの交通量 x_{oe}^A, x_{oe}^H 、AV専用レーン設置の二値変数 y 、 y のサブツアー回避のための制約に用いる θ, μ を決定変数とする。サブツアー回避の制約については後述する。式(4.4.2)、(4.4.3)はそれぞれAVsとHVsの出発地別フロー保存制約である。式(4.4.4)は交通量の非負条件である。

AVs専用レーンはデザインネットワーク上の経路として特定される。提案するモデルでは複数のデザイン路線(経路)を同時に構成することで、ネットワーク上の任意の連続したリンクにAVs専用レーンを配置することを可能とする。デザインネットワークは図-4.4.1に示されるように、仮想の出発点であるSourceおよび仮想の到着点であるSinkと道路ネットワーク上のノードを接続するリンク、通常の道路ネットワークに含まれるリンクで構成される。通常のフローネットワーク E は図-4.4.1中の太線で示されるリンクで構成され、 x_{oe}^A, x_{oe}^H はフローネットワーク上のみを、 y はデザインネットワーク上を流れる。

デザインネットワークにおいて、AVs専用レーンの二値デザイン変数 y は以下の式(4.4.5)に示すデザインフロー保存則の制約を満たす。また、一定の距離以上のAVs専用レーンとなるよう設置されるリンク本数の下限値制約を式(4.4.6)とする。下限値 λ は任意の値を設定することができ、0とすることも可能である。

$$\sum_{b \in In(n)} y_{kb} - \sum_{b \in Out(n)} y_{kb} = \begin{cases} -1 & \text{if } n = s \\ 1 & \text{if } n = t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \forall n \in N, k \in K \quad (4.4.5)$$

$$\sum_{b \in B} y_{kb} \geq \lambda \quad \forall k \in K \quad (4.4.6)$$

$$y_{kb} = \{0, 1\} \quad \forall b \in B, k \in K \quad (4.4.7)$$

ただし、

- B : デザインネットワークリンク集合. その要素は $b \in B$. ただし, $b(e)$ と示すときには、フローネットワークのリンク $e = (i, j)$ と同一のノードペアを接続するデ

ザインリンクを指すものとする.

- K : AVs 専用レーンの路線集合
- y_{kb} : 専用レーン路線 k , リンク b のデザイン変数
- λ : AVs 専用レーンの持続距離下限値
- s : デザインネットワークの仮想出発地ノード
- t : デザインネットワークの仮想目的地ノード

式(4.4.5)のデザインフロー保存則の制約のみでは、最適解においてサブツアーが含まれることがある。例えば、図-4.4.2 においてリンク集合 $\{ \cup_{b \in B} y_{kb} \mid y_{kb} = 1 \} = \{(s, 3), (3, 4), (4, t), (1, 2), (2, 1)\}$ が最適解となる場合、リンク(1,2), (2,1)は (s, t) を經由してないが式(4.4.5)を満たしており、これがサブツアーである。そのため Colombo¹⁾で採用されているデザインネットワークに補助フローを導入した制約を加えることでサブツアーを除去する。補助フローは任意の起点から到達するノード数 $(\sum_{n \in N-s} \theta_{kn})$ と等しい重みのフローを流下させ、ノードを1つ經由するごとに1ずつ重みが減少する。図-4.3.2 では AVs 専用レーンを持つリンクを太線で示し、リンクに与えられた数字は補助フロー μ を示す。 s からは重み3の補助フローが流出し、ノードを經由するごとに1ずつ小さな重みが与えられる。經由するノード{3,4}に該当する到達ノード二値変数 θ_{kn} は1となる。これにより、起終点間における AVs 専用レーンのデザイン路線は通過する到達ノードと補助フローの制約により必ず木構造となる。木構造を保証することによりサブツアーの構成は不可能となる。以上の条件は式(4.4.8)から(4.4.14)の通りに定式化される。

$$\mu_{kb} \leq |N| \mu_{kb}, \forall b \in B, k \in K \quad (4.4.8)$$

$$\sum_{b \in \text{In}(n)} \mu_{kb} - \theta_{kn} = 0, \forall n \in N-s \quad (4.4.9)$$

$$\sum_{b \in \text{Out}(s)} \mu_{kb} - \sum_{n \in N-s} \theta_{kn} = 0 \forall k \in K \quad (4.4.10)$$

$$\sum_{b \in \text{In}(n)} \mu_{kb} - \sum_{b \in \text{Out}(n)} \mu_{kb} = \theta_{kn}, \forall n \in N-s, k \in K \quad (4.4.11)$$

$$\theta_{ks} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.4.12)$$

$$\theta_{kn} = \{0,1\} \quad \forall n \in N, k \in K \quad (4.4.13)$$

$$\mu_{kb} = \{0,1,2, \dots\} \forall k \in K, b \in B \quad (4.4.14)$$

ただし、

- θ_{kn} : 専用レーン路線 k がノード n を經由するならば1, そうでなければ0をとる到達ノード変数
- μ_{kb} : 補助フローを示す変数

式(4.4.8)は補助フロー μ_{kb} と y_{kb} の関係を示す。 $y_{kb} = 1$ のときにのみ、補助フローはリンク b を利用できる。式(4.4.9)は任意のノードが AVs 専用レーンを持つリンクのデザイン路線 k に含まれるとき、 $\theta_{kn} = 1$ となることを制約する。式(4.4.10)は各デザイン路線において通過するノード数と Source から流出する補助フロー数が等しいことを示す。式(4.4.11)ではノードにおいて補助フローが流入する値と流出する値の差が θ_{kn} と等しいことを示す。式(4.4.12)は補助フローが Source を必ず通過することを制約する。つぎに、各リンクが持つ既存のレーン数から一部を AVs 専用レーンとする際の運用変更条件について、式(4.4.15)から(4.4.17)に示す。

$$\sum_{o \in O} x_{oe}^H + \sum_{o \in O} x_{oe}^A \leq \left(1 - \frac{1}{l_e \sum_{k \in K} y_{kb(e)}}\right) c_e + \beta \sum_{k \in K} y_{kb(e)} c_e \quad \forall e \in E \quad (4.4.15)$$

$$\sum_{o \in O} x_{oe}^H \leq (1 - 1/l_e \sum_{k \in K} y_{kb(e)}) c_e \quad \forall e \in E \quad (4.4.16)$$

$$\sum_{k \in K} y_{kb(e)} \leq l_e \quad (4.4.17)$$

ただし、

- l_e : リンク e の車線数
- c_e : リンク e の交通容量
- β : AVs 専用指定による専用レーン容量増加パラメータ

式(4.4.15)は混在レーンにおける交通容量制約を示す。混在レーンは AVs 専用レーンを持つリンクのデザイン路線に含まれた数を $p = \sum_{k \in K} y_{kb(e)}$ としたとき、容量が $(1 + (\beta - 1/l_e)p)c_e$ となる。これは AVs 専用レーンの設置によりスループットがリンク全体で向上することを表現し、 $\beta - 1/l_e > 0$ であるときにリンク容量が増大する。ただし、混在レーンの容量は AVs 専用レーンの設置により減少するため、式(4.4.16)により HVs の交通量の上限が $(1 - p/l_e)c_e$ となることを表現する。式(4.4.15), (4.4.16)により、AVs 専用レーンは $\beta p c_e$ の容量をもち、AVs のみが通過できることが示される。式(4.4.17)は任意のリンクにおいて設置される AVs 専用レーン数が既存のレーン数以下となることを制約する。

以上の式(4.4.1)から(4.4.17)により、リンク容量制約付き総走行距離を最小化する連続的な AVs 専用レーンの配置を求める問題として定式化された。

(2) 仮想ネットワークにおける適用例

提案したモデルの挙動を検証するため、図-4.4.3に示す Nguyen-Dupuin ネットワーク²⁾によって試算をおこなう。OD データは表-4.4.1に示し、AVs は 35 台、HVs は 20 台の合計 55 台が総需要である。出発地はノード 1,4、目的地はノード 2,3,8 とする。また、リンク容量は一律とし、リンク長は図-4.4.3 に準拠する。表-4.4.2 に 5 つの試算ケースのパラメータ設定をそれぞれ示す。図-4.4.3、図-4.4.4 より専用レーン設置による AVs の容量増加率パラメータを変更した Case1 と Case2 の比較を行う。専用レーン設置により AVs の容量が 2 倍になる Case1 に対し、Case2 では AVs の容量は 1.5 倍にとどまる。それぞれの交通量を比較すると、Case1 では専用

レーンを持つデザイン路線に AVs の交通量が集中しているが、Case2 ではデザイン路線内のリンクを使用する AVs が減少し、他のリンクが使用されている。それに伴い、HVs の交通量も変化していることが確認できる。各ケースにおける目的関数の変化を図-4.4.5 に示す。AVs の容量増加率が大きい Case1 の方が目的関数の値は小さくなっており、増加率パラメータ設定が総走行距離に影響を与えていることがわかる。Case2 と Case3 の比較では、AVs の容量増加率は固定とし AVs 専用レーンとなるレーン数を 1/3 から 1/2 に増加している。専用レーン設置によって HVs の容量がより大きく削減されることを意味するが、本ネットワーク条件においては HVs の容量減少が増加することにより総走

表-4.4.1 Nguyen-Dupuin ネットワークにおける OD 設定

		D				
		AVs		HVs		
		2	3	2	3	8
O	1	0	25	4	3	3
	4	10	0	5	5	0

表-4.4.2 補助フロー変数 μ_{kb} と到達ノード変数 θ_{kn}

Case	1	2	3	4	5
AVs専用レーン化するレーンの割合	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2
自動運転車容量増加率 β	2	1.5	1.5	1.5	1.5
デザイン路線本数 k	1	1	1	2	3

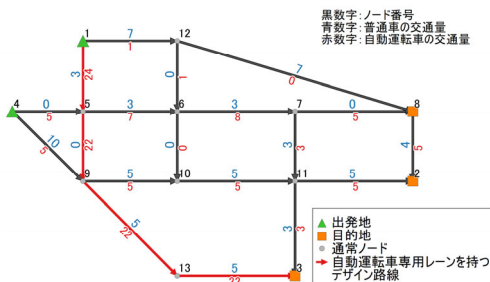


図-4.4.3 Case1 のデザイン路線と交通量

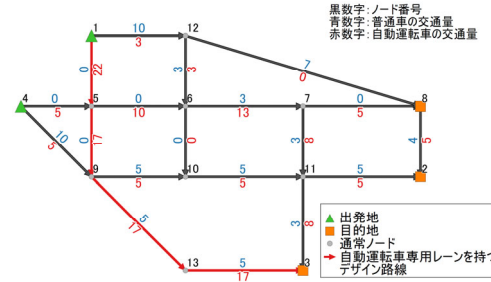


図-4.4.4 Case2 のデザイン路線と交通量

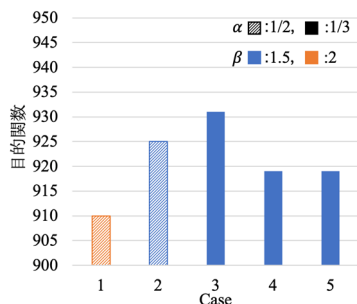


図-4.4.5 各 Case 試算時の目的関数の値

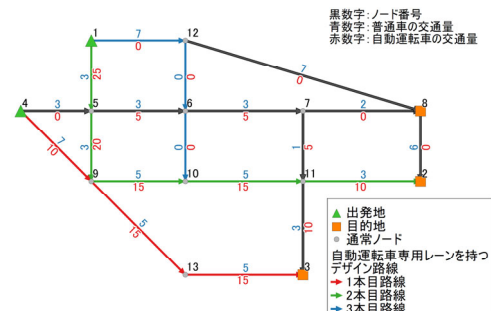


図-4.4.6 Case5 のデザイン路線と交通量

行距離は増加する傾向となった。専用レーン設置により通行不可能となった HVs が迂回したことの影響が表現できている。

次に、AVs専用レーン化するレーンの割合とAVs容量増加率 β のパラメータ設定を変更せず、デザイン路線数を1本ずつ増加させた場合をCase3,4,5とする。路線数を2本としたCase4と3本としたCase5の目的関数に変化していないことがわかる。このことから、本条件においては専用レーンを持つデザイン路線は2本で十分であり、3本以上の設置は効果がないといえる。図-4.4.6は路線数を3本としたCase5のときの結果であり、1,2,3本目のデザイン路線を図中リンクの赤、緑、青で示す。そのため、赤、緑で示すリンクに専用レーンを設置することが、最も効果的といえる。リンク上に示すAVsとHVsの交通量に着目すると、Case5の場合にはAVs 35台のうち25台が専用レーンを持つリンクのみを走行して目的地まで到着している。

テストネットワークを用いたモデルの挙動確認では、AVs専用レーン化するレーンの割合とAVs容量増加率のパラメータ設定が総走行距離最小化に影響を及ぼすこと、デザイン路線本数の変化によって専用レーン設置の効果の限界を把握可能であることがわかった。これにより、専用レーン設置によるAVsの利点とHVsの欠点の相互関係を考慮に入れたモデルとなっていることが確認できた。

(3) 熊本都市圏ネットワークにおける適用例

テストネットワークにおける試算によって挙動が確認された提案モデルについて、実都市の道路ネットワークへの適用と分析をおこなう。

a) 使用する道路ネットワークと交通需要データ

実道路ネットワーク適用の対象地域は熊本都市圏とする。道路ネットワークは熊本市内の主要道路以上の道路とし、ODデータは熊本都市圏PT調査の手段別トリップ(タクシー、ハイヤー、乗用車、軽乗用車、貨物自動車、軽貨物車)を使用する。図-4.4.7にPT調査エリアと使用する道路ネットワークを示す。熊本市外のODについては、近隣のセントロイドに集約することで道路ネットワーク上に反映している。リンク数は858(双方向)、ノード数は291、セントロイド数は68、ODペア数は4,361となっており、各リンクは0.5(両方向合わせて1)、1,2,3のレーン数を持つ。AVsレーンを設置する対象リンクとなる車線数、AVs普及率、AVs容量増加率を変更

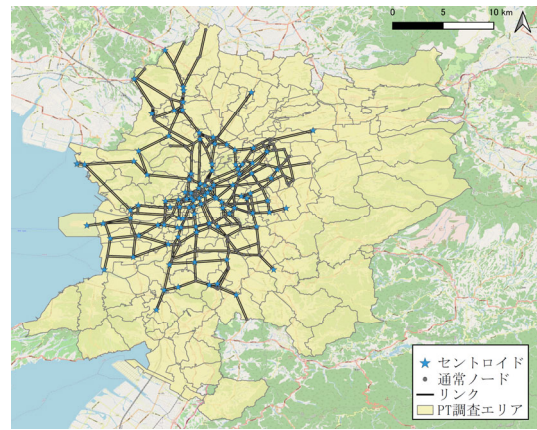


図-4.4.7 対象地域と道路ネットワーク

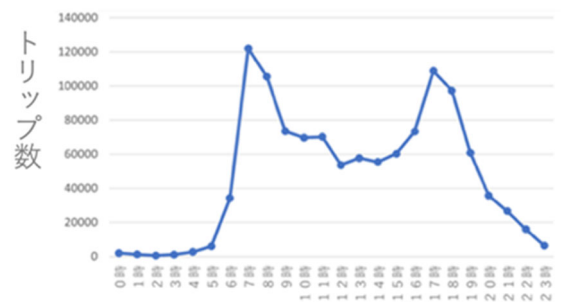


図-4.4.8 時間帯別トリップ数

したシナリオについて試算をおこなった。図-4.4.8に時間帯ごとのトリップ数を示す。

b) AVs普及率や専用レーン設置対象リンクの影響

AVs専用レーンを設置する対象リンクの属性を片側2車線道路以上とし、AVs普及率を変更させたときのデザイン路線数 k ごとの目的関数を図-4.4.9に示す。AVs容量増加率は1.5と固定し、全てのリンクにおいて設置されるAVs専用レーンは既存車線数のうち1車線とする。斜線つき棒グラフが各条件において最適解が最小となるデザイン路線を示す。25%、50%、75%の普及率においてそれぞれ $k = 2, 3, 2$ となった。この値以上のデザイン路線の導入は各条件において過剰となる。これ以降の各シナリオにおける最適AVs専用レーンデザインの結果は、最小最適解をとるデザイン路線数に基づく結果を用いて考察する。また、AVs普及率が増加するにつれて目的関数である総走行距離は減少していることがわかる。

表-4.4.3に対象リンク別のAVs普及率による総走行距離の現況に対する変化率を示す。現況とはAVs専用レーンが全く設置されていない状況を指す。片側2車線以上の道路を対象とした施策が最も高く、AVs普及率が高くなるほど

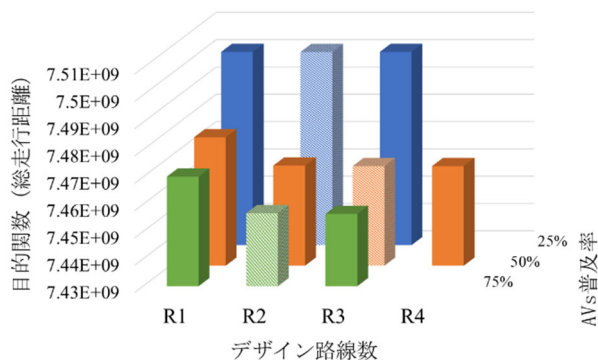


図-4.4.9 デザイン路線数ごとの目的関数

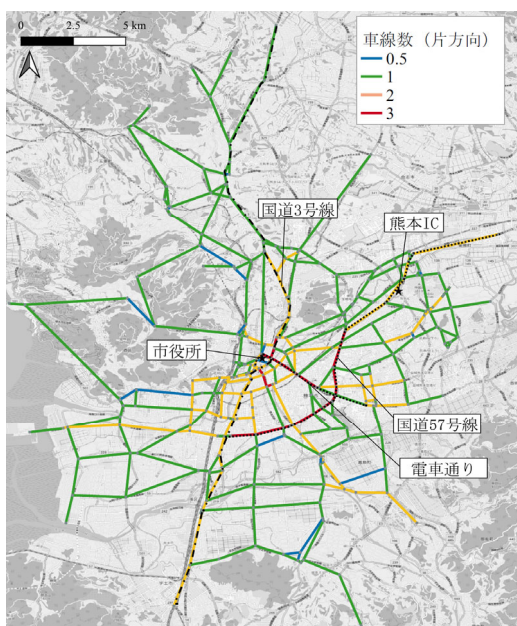


図-4.4.10 対象地域と道路ネットワーク

総走行距離も減少する。片側3車線以上の道路を対象とした場合も同様に、普及率向上による総走行距離は減少するがその効果は小さい。大規模道路だけに限った施策よりも片側2車線以上の道路を対象に含めた場合の方がAVs専用レーン設置の効果が高いことがわかった。特にAVs普及率が25%の場合は、片側3車線以上の道路に限定した際にはAVs専用レーンなしの現況と比べて目的関数が増加しており、専用レーンは設置しない方が効率的であるという結果となった。普及率や施策対象によってはAVs専用レーンの設置がネットワーク全体にとって悪影響となる可能性を示している。片側1車線のみ限定する場合、AVs専用レーンが設置されるリンクはHVが利用不可能となり、完全にAVs専用リンクとなる。しかしながら、片側1車線のリンクのみを対象にする施策ではいずれのAVs普及率においても総走行距離の改善はみられなかった。AVs専用レーン設置リンク

表-4.4.3 現況と比較した目的関数の変化率

対象リンク	AVs 25%	AVs 50%	AVs 75%
2車線以上	0.0000%	-0.4567%	-0.5939%
3車線以上	0.0094%	-0.0071%	-0.0071%
1車線のみ	0.0000%	0.0000%	0.0000%

を利用不可能となり迂回する必要があるHVの走行距離が増加する影響があったと考えられる。

ここまで1.5に固定してきたAVs容量増加率パラメータを2.0に変化した場合の結果を検証する。AVs普及率は75%に固定、対象リンクは片側2車線以上とした。AVs容量増加率が1.5から2.0に増加することで、総走行距離は微小に減少した。AVsとHVの内訳を確認すると、AVsの総走行距離は容量増加率が上がることによって増加し、その増加分以上にHVの総走行距離が減少していた。AVs容量増加率が上がることにより必ずしもAVsに好影響があるわけではなく、専用レーンを走行するAVsが増加することでHVが走行可能な容量に余裕が生じ、HVの総走行距離の方が減少するケースが生じることがわかった。

既存の車線数と道路ネットワーク周辺の状況を図-4.4.10に、最も効果的であった片側2車線以上の道路を対象に各AVs普及率に対する最適なAVs専用レーンの空間的配置を図-4.4.11に示す。普及率25%の場合は、両方向にAVs専用レーンが設置されるリンクはない。中心市街地とその周辺の道路に設置されており、バイパス道路を長距離にわたって専用レーン化する区間はなかった。普及率が50%または75%まで増加すると中心市街地、住宅街から熊本ICまで接続する国道57号線、北方向へ延びる国道3号線において比較的長くAVs専用レーンが設置されている。特に普及率50%では両方向にAVs専用レーンが設置されているリンクが多くみられる。普及率50%と75%では、国道57号線、国道3号線、市電が走る電車通り、JR線と並走する白山通りが共通してAVs専用レーンが設置されている主な道路であった。一方、普及率25%と50%で共通していた中心市街地内の市役所や熊本城に面する電車通り部分のAVs専用レーン設置は普及率75%では実施されておらず、普及率によって最適な専用レーンデザインの空間的分布が異なることがわかった。

c) 効果的な専用レーン設置時間帯

シェア率75%において時間帯別の専用レー

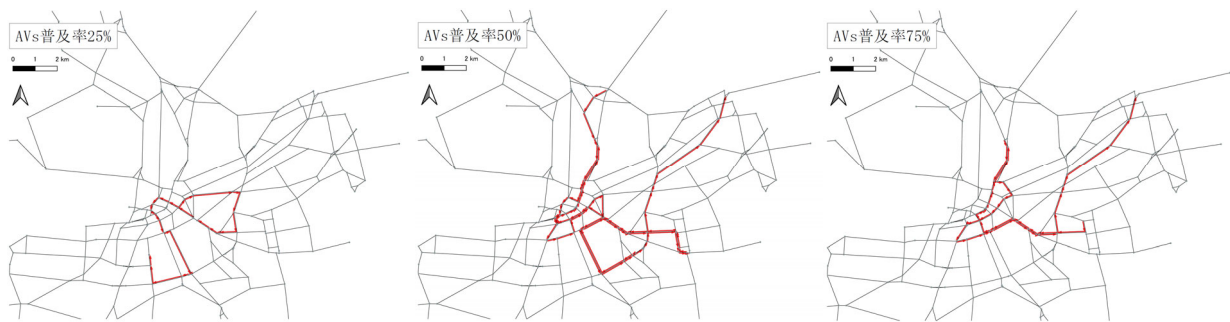


図-4.4.11 AVs 専用レーン設置リンク (左から AVs 普及率が 25, 50, 75%)

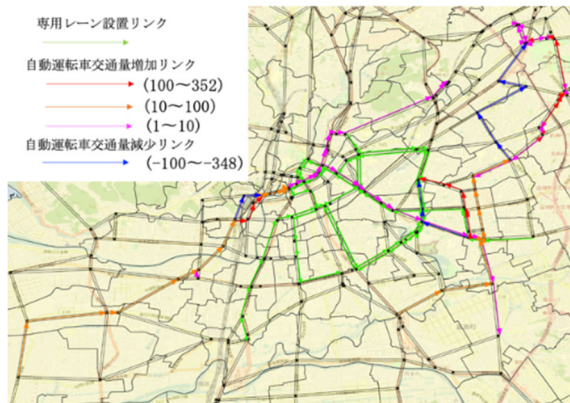


図-4.4.12 7-9 時の専用レーン設置リンクと AVs 交通量の変化

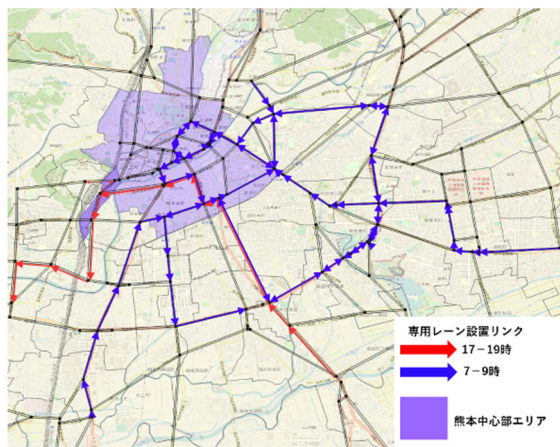


図-4.4.13 7-9 時及び 17-19 時の専用レーン設置リンク

ンの設置を検証するため、図-4.4.8の時間帯別トリップ数から特に交通量の多い7-9時、17-19時の時間帯別に専用レーンを設置し交通量の変化を分析する。パラメータ設定は、AVs容量増加率2.0、設置されるAVs専用レーンは既存車線数のうち1車線とする。数値計算の結果、専用レーン設置前後における目的関数の変化は、17-19時の時間帯においては変化しなかったが、7-9時においては $1.21 \times 10^{-4}\%$ 減少し、1日を通して専用レーンを設置した時の減少率 $4.24 \times 10^{-5}\%$ よりも高い減少率となった。

図-4.4.12にシェア率75%、専用レーンの設置リンク及び設置後AVsの交通量が著しく変化したリンクを示す。専用レーン設置リンクにおいてもAVsの交通量は増加しているが、それ以上に専用レーン以外のリンクで増加が著しい。特に南西部の宇土方面から熊本の中心市街地、及び南東部の嘉島町方面から菊陽町及び益城町方面へより短い走行距離で向かうことができるAVsが増加したため、目的関数の値が専用レーンの設置前後で減少したと考えられる。

また、17-19時の時間帯においては、現況と比較して目的関数の値は変化しなかった。図-4.4.13に7-9時及び17-19時の最適解での専用レーン設置リンク及び熊本中心部エリアを示す。17-19時の最適専用レーンは熊本市南区方面から熊本中心部エリアに向かって設置されているが、7-9時には熊本中心部エリア上で設置される専用レーンの距離が長いことがわかる。2つの時間帯のODデータを比較すると、熊本中心部エリアを目的地とする割合は、7-9時の時間帯で11%、17-19時の時間帯で6.3%であったため、熊本中心部エリアへの需要が高い時間帯において専用レーンの設置が効果的であると考えられる。

4.5 MAUMSによる自動運転車専用レーンの整備効果の詳細検討

前節で示したように、AVs専用レーンを設置した際のHVsが受ける影響を加味し、全利用者を考慮に含めた施策とするため、AVsとHVsの総走行距離最小化を実現するAVs専用レーンの配置デザインを数理問題により求めた。本節では、得られた最適AVs専用レーン配置の条件のもと交通流シミュレーションを実施し、AVs専用レーン設置時の交通状況を分析する。

(1) 交通流シミュレーションMAUMS

MAUMSは熊本大学で独自に開発したエージ

表-4.5.1 7-9時での総走行距離及び総移動時間

専用レーン	総走行距離(km)	総移動時間(分)
設置前	161580	177726
設置後	161540	177807
変化率	$-2.47 \times 10^{-2}\%$	$+4.56 \times 10^{-2}\%$

エージェントベースのメソ交通流シミュレータである。入力された道路ネットワーク、初期交通需要などのデータに基づいて対象地域の交通環境を生成し、個々の交通利用者の交通行動とそれによって生じる動的な交通流をシミュレートする。エージェントベースシミュレーションとメソ交通流シミュレーションのループ構造となっており、各交通利用者エージェントは一度走行した道路状況を学習し、次の走行時にはその結果を経路選択時に反映する。そのため、試行ごとに走行経路が異なる場合があるが、学習が進むことで、選択する走行経路が収束する。AVs専用レーン導入前および導入後の道路状況を評価するため、導入後交通利用者の探索行動（経路選択の変動）が収束するまで交通シミュレーションを繰り返し実行した。その結果、いずれも20試行時には経路を変更する交通利用者の割合が0.01%程度で収束したため、今回は20試行目の結果を用いることとした。本シミュレーションを用いて、シェア率が75%で7-9時及び17-19時の時間帯における最適解を熊本都市圏道路ネットワークに適用した際の交通状況の変化を検証する。なお、メソ交通流シミュレーションMAUMSは、交通工学研究会が策定した交通流シミュレーションの標準検証プロセスVerificationマニュアル²⁾に基づく標準性能を持つことを検証済みである。

対象エリアは前節の図-4.4.1に示す2012年熊本都市圏PT調査エリアとし、2016年製住友電工製全国デジタル道路地図データベース(DRM)のシミュレーション対象エリア内に含まれる主要道路を対象とする。PT調査結果データの道路上の交通トリップのうち、熊本市中心エリアの内内、外内、内外トリップを対象に、シミュレーション上で発生する道路上を移動する交通トリップは全てAVsまたはHVsとした。前節で示す最適AVs専用レーン決定問題において効果が高いAVsシェア率75%の条件のもと、時間帯別に専用レーンを設置するシナリオについてシミュレーションを実施した。

(2) 朝夕ピークタイム最適解の適用

表-4.5.1に7-9時での総走行距離及びOD間の総移動時間のシミュレーション結果を示す。7-



図-4.5.1 7-9時のAVs交通量変化

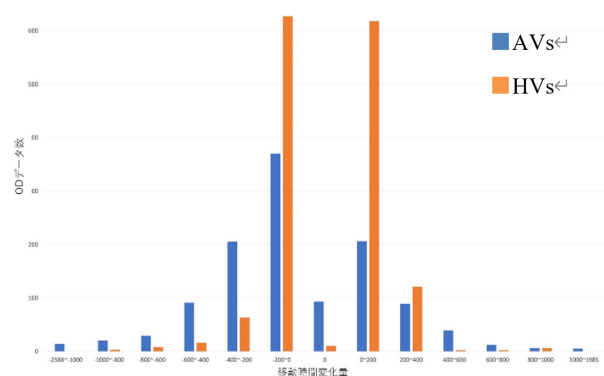


図-4.5.2 7-9時の移動時間(秒)の変化量OD分布

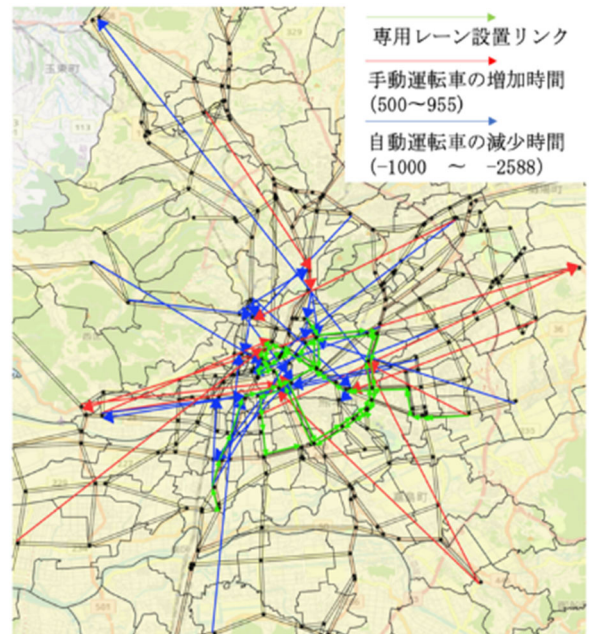


図-4.5.3 7-9時の総移動時間(秒)の変化量が著しいOD

9時の専用レーン設置前後における総走行距離の減少率は、 $2.47 \times 10^{-2}\%$ であり、数値計算の結果と同様に減少したのに対し総移動時間は増加するという結果になった。図-4.5.1にAVs交通量

が30台以上著しく変化したリンクを示す。専用レーン設置リンクの分布と比較して、著しく交通量が変化したリンクは中心市街地集中していることがわかる。システム最適状態におけるAVs交通量では広範囲に変化がみられた一方、シミュレーションによる分析では中心市街地の限定的なリンクで交通量の変化が生じている。総走行距離を最小化する車両の動きとは異なり、所要時間を学習し最短旅行時間の経路を選択するプロセスでは中心市街地エリアを走行する傾向が強いため、専用レーン設置の影響も中心市街地エリアに集中していると考えられる。

ODペアごとの移動時間変化量分布と変化量が著しいODを図-4.5.2と図-4.5.3に示す。車種別の移動時間変化量分布からAVsでは移動時間が減少しているODが多く、反対にHVsでは微小に移動時間が減少しているODと増加しているODが多いことがわかる。このことからAVs専用レーン設置の効果はAVsの方に現れており、HVsは負の影響を受けているといえる。AVsは郊外部から中心市街地へ向かう方向に著しく移動時間が減少しており、専用レーンが設置されている方向と大まかに一致している。反対に、HVsでは郊外部から中心市街地を通過して目的地まで向かうODの移動時間が増加しているため、中心市街地を走行するODにおいて特にAVs専用レーン設置による迂回の影響が出ていると考えられる。ODペアごとの平均移動時間では専用レーン設置によってAVsの平均移動時間がHVsよりも2分以上減少している割合は43%、2分以上増加している割合は26%であった。これより、専用レーンの設置効果によってHVsよりも目的地までの移動時間が短くなったAVsが存在するものの、反対にAVsの方が移動時間が増加するODも存在する結果となった。これは専用レーン設置により迂回したHVsの影響を受け移動時間が増加したと考えられる。

また、総走行距離に基づく最適専用レーン決定問題では目的関数に変化しなかった17-19時の時間帯における最適解を適用しシミュレーション分析を行った結果、表-4.5.2に示すように総走行距離、総移動時間ともに増加する結果となった。これによりシェア率75%における17-19時に限定したAVs専用レーンの設置に関しては、HVsが受けるデメリットの影響をAVsが受けるメリットが上回ることはなく、熊本都市圏道路ネットワークの本適用条件ではタピーク時のAVs専用レーン設置はしない方が良いという結果が得られた。

表-4.5.2 17-19時での総走行距離及び総移動時間

専用レーン	総走行距離(km)	総移動時間(分)
設置前	129,506	169,004
設置後	129,723	169,380
変化率	+1.67×10 ⁻³ %	+2.22×10 ⁻³ %

参考文献

- 1) Colombo, F.: Mathematical programming algorithm for network optimization problems. Ph.D thesis, University of Milano, 2014.
- 2) (社)交通工学研究会 交通シミュレーション自主研究委員会：交通流シミュレーションの標準検証プロセス Verification マニュアル(案), <http://www.jstc.or.jp/sim/manuals/VfyMan.pdf>, 2004.
- 3) Fontaine, P. & Minner, S.: Benders Decomposition for Discrete-Continuous Linear Bilevel Problems with application to traffic network design. *Transportation Research Part B*, 70, pp.163-172, 2014.

4.6 国内外の自動運転サービスの取組み状況

(1) 国の自動運転に関する政策動向

ITS・自動運転に係る政府全体の戦略であった「官民ITS構想・ロードマップ」では、2020年を自動運転の実現の目標として掲げ、図-4.6.1のような取り組みがなされてきた。次の2030年の実現目標は「国民の豊かな暮らしを支える安全で利便性の高いデジタル交通社会を世界に先駆け実現する」であり、「官民ITS構想・ロードマップ」では図-4.6.2が示されている。ここで、デジタル交通社会とは、AIやIoT技術等を駆使した情報連携により生み出される様々なモビリティサービス（交通サービス含む）と自動運転等のモビリティによる革新的移動社会と定義されている。

「官民ITS構想・ロードマップ」を発展的に継承し、デジタルを活用した交通社会の未来を描いた「デジタルを活用した交通社会の未来2022」がデジタル庁から公開された。ここでは、今後は“実証実験から本格的な社会実装”に向けて、暮らし目線からのサービス設計が求められている。

また、自動走行分野において世界をリードし、社会課題の解決に貢献することを目指し、産学官オールジャパン体制で自動走行のビジネス化を推進する自動走行ビジネス検討会が経済産業省と国土交通省の主催により実施されている。こちらは2022年4月に「自動走行ビジネス検討会報告書 version 6.0」を公開しており、

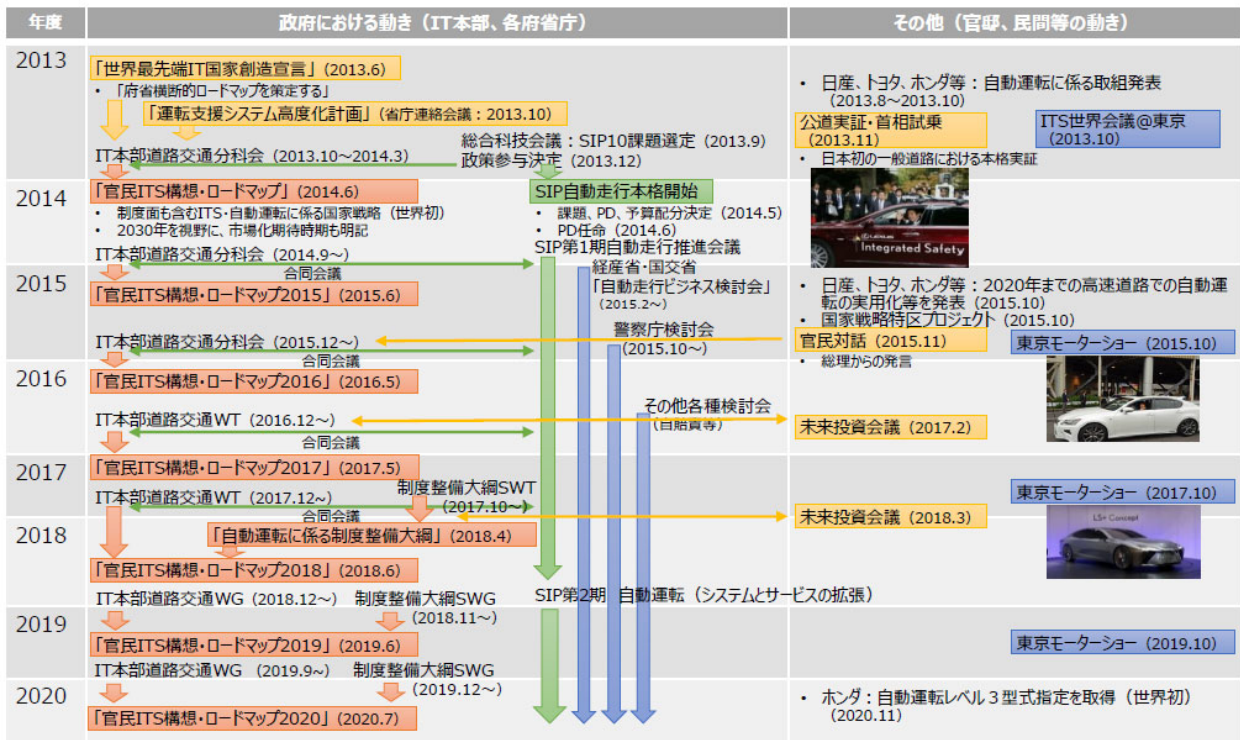


図-4.6.1 官民 ITS 構想・ロードマップの策定経緯

(出展: https://www.sip-adus.go.jp/cvt/workshop2021/file/jg/JGov_2J_Takahiro_Suzuki.pdf)

「無人自動運転移動サービス」, 「高度幹線物流システム」, 「オーナーカーAD/ADAS」の3つの軸で取り組みの方向性を整理している。特に自動走行/運転で解決が期待される社会課題を図-4.6.3の様に整理し、経済産業省のRoAD to the L4プロジェクト(自動運転レベル4等先進モビリティサービス研究開発・社会実装プロジェクト)にて、2025年頃までに無人自動運転サービスを40カ所で実現を目指している。

RoAD to the L4プロジェクトは、図-4.6.4の通り、レベル4移動サービスの実現限定空間(テーマ1)、エリア・車両の拡大への対応(テーマ2)、高度物流システムの実用化高速道路(テーマ3)、混在空間でのサービス確立(テーマ4)がテーマ設定されている。テーマ1では、遠隔監視のみで自動運転サービス(レベル4)の実現に向けた実証事業の推進として、福井県永平寺町における低速自動運転車両を限定空間で走行させる社会実装を目指している。同様にテーマ2では、対象エリア、車両を拡大するとともに、事業性を向上するための取組として、限定空間・中速の類型として日立BRTの実証実験が進められている。さらに、テーマ4では、混在空間でレベル4を展開するためのインフラ協調や車車間・歩車間の連携などの取組として、千葉県柏市(柏の葉キャンパス駅⇄東京大学柏キャンパスの路線バス)にて信号情報連

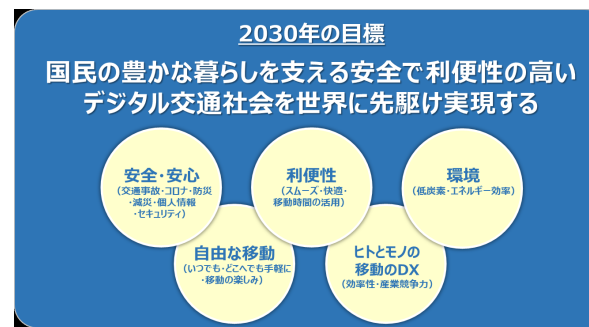
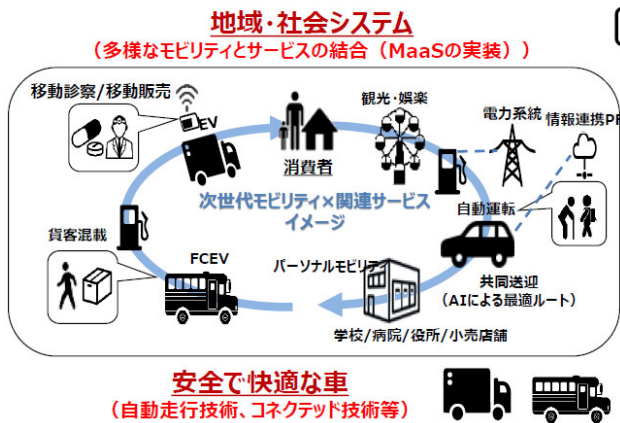


図-4.6.2 2030年の実現目標

(出展: https://cio.go.jp/sites/default/files/uploads/documents/its_roadmap_20210615.pdf)

携などインフラ協調型システムの実証実験が進められている。

なお、各地域における効率的かつ経済性・実行性を確保した支援策の検討に繋げていくため、テーマ1, 2, 4で個別に行われている「事業モデル検討」の精緻化や、代表的事業モデルの共有を行う場の設置について検討されている。具体的には図-4.6.5の通り、車両や運営に係る費用などを含む収支が不明確であること、官民の分担範囲など、法制度面も含めた横断的な解決すべき課題の特定が困難な状況であること、を解決していく事業モデル検討が想定されている。



自動運転等の社会実装を通じて解決が期待される社会課題

- 人口減少・少子高齢化の中での移動手段の確保
- 人手不足下での円滑な物流機能の維持・高度化
- 事故・渋滞の解消
- カーボンニュートラルへの貢献
- 新しいビジネスモデルや付加価値の創出

これらの社会課題の解決に向けて、
RoAD to the L4の取組を加速し、協調領域を深化

図-4.6.3 将来のモビリティ社会像と自動走行の果たす役割

(出展： https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20220428_1.pdf)

レベル4 移動サービスの実現@限定空間

遠隔監視のみで自動運転サービス(レベル4)の実現に向けた実証事業の推進

- ・2022年度末に限定エリア・車両での、遠隔監視のみでの自動運転サービス(レベル4)の実現を目指す。
- ・さらに、事業性向上に向けて、4台の車両を1人が同時監視するシステムの確立等を図る。

(イメージ) 永平寺町：遠隔自動運転システム

エリア・車両拡大

エリア・車両の拡大への対応

さらに、対象エリア、車両を拡大するとともに、事業性を向上するための取組

- ・2025年度頃までに無人自動運転サービスを40カ所以上実現するため、走行環境拡大や事業性向上に向けた検討を実施。
- ・具体的には、中型バス等に自動運行装置を搭載するための実証や、ユースケースの類型化等を行う。

(イメージ) 自動運転バス

高度物流システムの実用化@高速道路

高速道路における隊列走行を含む高性能トラックの実用化に向けた取組

- ・2025年度頃に高速道路でのレベル4自動運転トラックやそれらを活用した隊列走行の実現を目指す。
- ・足元では、ユースケースや優先的に確立すべきエリアを特定し、それらに基づき車両を含む新たな幹線物流システムの在り方を検討中。

(イメージ) 高速道路での自動運転

混在空間対応

混在空間でのサービス確立

混在空間でレベル4を展開するためのインフラ協調や車車間・歩車間の連携などの取組

- ・2025年以降に、より複雑な走行環境(混在空間)でのレベル4自動運転サービスを展開すべく、車両がインフラや他の車両等と協調するシステムの確立を目指す。
- ・まずは、インフラ等との連携を必要とするユースケースの整理、車両・インフラが保有するデータ(ダイナミックな周辺状況)の連携スキームを検討等を行い、実証へとつなげる。

(イメージ) インフラからの走行支援

図-4.6.4 RoAD to the L4 プロジェクトの概要

(出展： https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20220428_1.pdf)

新規参入者における事業モデル検討において想定される課題

- ・車両や運営に係る費用などを含む、収支が不明確。
- ・官民の分担範囲など、法制度面も含めた横断的に解決すべき課題の特定が困難。

対応方針

- ・テーマ1,2,4をモデルとして、事業費等の精査を通じた事業モデル構築。
- ・スマートモビリティチャレンジ推進協議会と連携し、コーディネート機関の主導による事業モデル共有の場の設置。

図-4.6.5 事業モデル検討

(出展： https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jido_soko/pdf/20220428_1.pdf)

(2) 愛知県春日井市高蔵寺ニュータウンにおける地区内自動運転サービスの社会実装
RoAD to the L4プロジェクトの他にも、経済産業省と国土交通省が協働で立ち上げた「スマ

ートモビリティチャレンジ」の活動がある。MaaS や自動運転サービスの取組みも多く、A)他の移動との重ね掛けによる効率化、B)モビリティでのサービス提供、C)需要側の変容を促す

仕掛け、D)異業種との連携による収益活用・付加価値創出、E)モビリティ関連データの取得、交通・都市政策との連携、に位置付けて、数地



図-4.6.5 石尾台地区での自動運転サービス実証実験の経緯①



図-4.6.6 石尾台地区での自動運転サービス実証実験の経緯②



図-4.6.7 石尾台地区での自動運転サービス実証実験の経緯③

域の実証実験・検討を支援している。

愛知県春日井市高蔵寺ニュータウンの石尾台地区では、街びらきから50年程度が経ち、戸建て住宅が多くため、高齢者が多くなっている地区である(2021年4月時点で、2,050世帯、人口4,614人、65歳以上の高齢化率47.3%)。

そのため、自発的に住民ボランティア輸送が企画・検討され、2018年から春日井市と名古屋大学が共同研究の枠組みで、住民ボランティア輸送などの活動の支援・助言を行っていた。基本的に高蔵寺ニュータウンは路線バスやタクシーなど既存公共交通がしっかりと運行されている状況であったが、駅の往来を中心とした通勤・通学向けのサービス設計であり、高齢者の日常の買い物や通院の目的地に行くには乗換が生じたりして不便、バス停まで坂道が多く行きづらい、タクシーでは運賃が高いため頻度高く利用はできない、などの声があった。そこで、地区(ほぼ小学校区)内の徒歩・自転車の代替交通手段としてボランティア輸送を位置づけ、さらに高齢者ドライバーによる担い手の不足解消など活動継続性を考え、2018年3月から2022年1月までオンデマンド型自動運転サービスの実証実験を繰り返し実施してきた。最終的には、2023年2月より、住民NPOが運行する自家用有償旅客運送の枠組みで、オンデマンド型自動運転サービスを開始し、国内初の社会実装事例となった(NPO運行の自家用有償旅客運送で、定時定路線型自動運転サービスは永平寺町での事例がある)。

NPO石尾台おでかけサービス協議会は、石尾台地区の住民の有志が理事・監事を務め、ボランティアのドライバーと電話受付を行い、自動運転サービスを有償で提供する。地区内の移動に限定することで、交通事業者の理解と調整ができ、交通空白地での自家用有償旅客運送の許可を受け、100円/回でサービス提供をしている(図-4.6.7を参照)。なお会員制の運賃体系を設定し、利用者だけでなく、非利用者も含まれるが地域としてサービスを支える町内会単位での加入も勧めている。

業モデルとしては、NPOが全ての費用を負担して運行することはできなかったため、行政は自動運転車両や車庫設置の導入費用と自動運転システムや保険の費用を補助し、NPOはドライバーと電話受付、利用促進費、通信費など運用費を負担する形式となった。

自動運転サービスはまだ始まったばかりであり、NPO、春日井市、名古屋大学、KDDI(配車・遠隔監視システムを提供)、エクセイド(自動運転システムを提供)の5者協定書を締結し、継続的にサービス改善、システム改修を行うこととなっている。

(3) 無人自動運転タクシーの実証実験

国内でも東京都西新宿で自動運転タクシー

の実証実験がなされているが、海外ではより自由度の高い実証実験がなされている。

クルーズは、2022年6月、サンフランシスコ市内で有償で無人自動運転サービス提供の許可をカリフォルニア州公益事業委員会（CPUC）から取得した。

	内容
運行台数	カート1台（乗車定員5名）
運行日時	月火水・金土の9:00～16:00
運行方式	Door to Doorのオンデマンド型
予約条件	前日まで電話受付
運賃	会員：100円/回 ※保護者同伴の小学生以下は無料 年会費： 個人 2,000円/人 世帯 3,000円/世帯 任意団体 1,500円/世帯 町内会全体 300円/世帯 非会員：300円/回

て、昼夜を問わず走行が認められる
 ・ウェイモは同地域内において、一般市民向けに配車サービスを提供するが、実証事業の実施期間中、乗車料金は発生しない
 とのことである。

一方で、2023年2月、サンフランシスコ市営

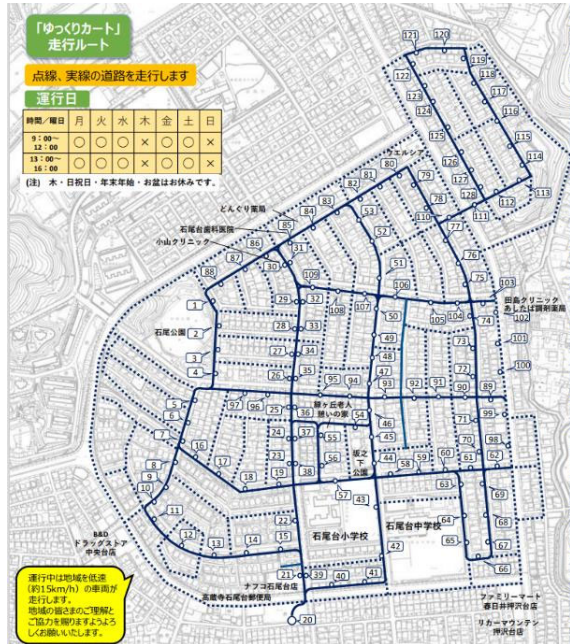


図-4.6.7 石尾台地区のオンデマンド型自動運転サービスの内容

参照：

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/06/5999353360945f70.html>

- JETRO 記事では、
- ・現時点の走行範囲はサンフランシスコ市内の特定の道路で、午後 10 時から午前 6 時までの間、電気自動車（EV）最大 30 台を用いてロボタクシー・サービスを提供
 - ・制限速度は時速 30 マイル（約 48 キロメートル）で、濃霧や豪雨など悪天候下での走行はせず、同伴者でない客同士の相乗りサービスは提供しないとのことである。

同様に、ウェイモも 2022 年 12 月、CPUC から無人自動運転車による配車サービスの実証事業実施の許可を得た。

参照：

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2022/12/181614a2ec218535.html>

- JETRO 記事では、
- ・対象地域は、サンフランシスコ市内全域のほか、サンフランシスコ市に隣接するデイリーシティの一部、シリコンバレーの複数都市（ロスアルトス、ロスアルトスヒルズ、マウンテンビュー、パロアルト、サニーバール）の一部
 - ・無人自動運転車の走行は、同地域内の速度制限時速 65 マイル（約 105 キロ）までの公道におい

交通局や障害者オフィスなどが、交通混雑の誘発や緊急車両に対するまづい対応などの事例から、クルーズとウェイモのサービス拡大に反対している。

参照：

<https://www.jetro.go.jp/biznews/2023/02/02a1473c419a511c.html>

(4) 自動運転サービスの社会実装に向けて

国外（中国・百度の事例は今回は対象外とした）では、アメリカ・カルフォルニア州をはじめとして、民間主導で無人自動運転タクシーの実証実験が実施されるなど、技術的検証を行いながら、安全性向上と社会受容性醸成を平行して行っている。国内の取組みは、安全に資する技術と法律的解釈を含む社会受容性に加えて、事業モデルの確立の見通しが必要となり、国外と比較するとより社会実装のハードルが高い印象である。自動運転サービスをより安全に提供するためには、多様な環境での検討と事例収集、インフラ協調システムとの連携が必須であるが、交通問題が顕在化する前に技術・法律の検討がある程度終了していることが望まれる。

4.7 おわりに

本章では、自動運転車優先走行レーン・運行設計領域を計画するための数理モデルの構築を行い、熊本都市圏道路ネットワークに適用して解の妥当性を検討することによって、その計算可能性と適用可能性を検証した。ここでは、数理モデルとして、シェアリングと自動運転が融合した状況を想定したときに、各交通手段の分担率の算出に資する時空間配分モデル（第2節）と、自動運転車両と手動運転車両の分担率が所与のもと、自動運転車（AVs）の最適な優先走行レーン設計モデル（第3節）の2種類のモデルを構築した。さらに、4節では、後者のモデルについて、自動運転車の優先走行レーンを交通シミュレーションモデルMAUMSのネットワークに反映させ、道路交通流への影響を分析した。

第2節では、ゾーン別の流入・流出台数の実態を明らかにすることによって、熊本市都心部における適正容量を算出すること、駐車時間が大幅に減少することが期待される自動運転車両によるカーシェアリングサービス SAVs が普及した後の適正容量を試算した。その結果、以下が確認された。

- 1) 熊本都市圏にある自家用車の移動時間はわずか3%程度であり、大半の時間は駐車していること、この傾向は経時的に大きな変化はないこと、自宅での駐車は約75%であり、その4割は1日中、自宅に保管されていることなどが明らかになった。
- 2) 駐車シミュレーションと待ち行列理論によって現在の駐車需要に対応した適正容量を試算したところ、現在供給されている駐車スペース数は過大であることが明らかになった。
- 3) SAVs への転換モデルと SAVs 車両購入・貸出モデルを内挿した SAVs 運用シミュレーションにより、ゾーン別に AVS サービス導入前後の総駐車回数、総駐車時間を算出したところ、総駐車回数は都心部で約2倍まで増加するが、総駐車時間は1割程減少する。そのため、1台当たりの平均駐車時間は約半分になる。そのため、SAVs の普及によって都心部の適正容量は上記の試算値よりもさらに少なくとも良くなることが明らかになった。

第3節では、すべての移動者は手動運転車か共有型自動運転車（以下、SAVs）のいずれかの交通手段で移動するとき、システム最適状態を満たすSAVs走行区間とSAVs投入台数を決定する問題を構築し、仮想ネットワークを用いてモ

デルの挙動を確認した。そして、熊本都市圏を模したネットワークにおいて、SAVsのデポを郊外部と中心部に設置した場合を想定した適用計算を行い、以下の点を確認した。

- 1) SAVs のデポを郊外部に設置した場合、予算上限が小さいときは国道57号に沿ってSAVsの走行区間が指定され、その後、予算上限が大きくなるにつれ中心部に向けて走行区間が延伸される。また、予算上限が大きいつきの走行区間の解は、予算上限が小さいときの走行区間の解をほぼ内包している。
- 2) SAVs のデポを中心部に設置した場合、予算上限が小さいときは辛島町方面に走行区間が指定される。その後、予算上限が大きくなるといったんは産業道路方面に走行区間は延伸されるものの、さらに大きくなると産業道路は走行区間に指定されず、かわりに国道3号を北上する方向に走行区間は延伸される。
- 3) SAVs のデポを郊外部に設置した方が、中心部に設置したときよりも同じ予算上限に対する各種指標はよい結果となった。
- 4) ただし、上記の結果はデポや走行区間の設置コストを考慮しておらず、またネットワーク作成の都合上、分析対象ネットワークの域外を起終点とする SAVs 利用者は、実際には境界のセントロイドで乗り換えが必要である点に注意が必要である。

第4節では、自動運転車専用レーンの最適配置問題をリンク容量制約に基づく総走行距離最小化モデルとして定式化し、仮想ネットワークを用いてモデルの挙動を確認した。さらに、第3節で適用したのと同様の熊本都市圏道路ネットワークにおいて適用計算を行い、以下のような知見と課題を整理した。

- 1) 道路ネットワーク上の各リンクが持つ既存の交通容量をAVs専用レーンまたは混在レーンに割り当てることにより、AVsとHVsの総走行距離最小化を実現する連続的なAVs専用レーンの最適デザイン問題を構築した。AVs専用レーンのデザインフローには木構造を用いることで連続性を担保し、実用性の高いデザイン問題とした。
- 2) 熊本都市圏の実道路ネットワークを用いて構築したモデルを検証し、AVs専用レーンの配置はAVs普及率によって特徴が異なること、大規模道路のみを設置対象に限定すると設置効果が小さくなることがわかった。
- 3) 時間帯別の最適専用レーンでは7-9時の時間帯で1日を通して設置した場合より効果があることがわかった。7-9時の最適専用レーンの設置

距離は、17-19時と比較して熊本中心部エリア上で特に設置距離が長く、熊本中心部エリアへの需要が高い時間帯において専用レーンの設置が効果的である結果を示した。

4) AVsシェア率が75%で7-9時及び17-19時の時間帯における最適解を適用したシミュレーションモデルによる交通状況分析では、7-9時の時間帯では熊本市中心市街地エリアに向かう方向のODにおいてAVsの移動時間短縮効果が大きいこと、17-19時の時間帯では専用レーン設置によるHVsへの悪影響が大きいこと効果が見込めないことがわかった。

5) 最適AVs専用レーン決定問題は総走行距離最小化モデルを活用しているが、建設コストを導入するなど目的関数の工夫により、さらに現実的なAVs専用レーンの運行設計につながると考えられる。

6) 今回の試算では全てのリンクにおいて専用レーン化される車線数は1車線に限定したが、道路ランクによって適用車線数または容量増加率を変更することで、詳細な運用計画の検討につながる。また、地域の特性に合わせた普及率の偏りなども考慮可能である。

7) 既往研究において多く用いられるネットワーク均衡に基づく研究への拡張として、区分線形化を用いた混合整数線形計画問題により、利用者均衡を取り入れたモデルとして定式化することが可能である。

第5節では、AVs専用レーンを設置した際のHVsが受ける影響を加味し、全利用者を考慮に含めた施策とするため、AVsとHVsの総走行距離最小化を実現するAVs専用レーンの配置デザインを数理問題により求めた。本節では、得られた最適AVs専用レーン配置の条件のもと交通流シミュレーションを実施し、AVs専用レーン設置時の交通状況を分析した。その結果、以下の知見が得られた。

1) 数理モデルから得られた最適解を MAUSM

のネットワークに設定して交通流シミュレーションを行う場合には、個々の車両の速度変化やHVsの迂回状況について詳細に検証し、AVs専用レーン設置の効果をえられる車両の特徴を整理する必要がある。

参考文献

- 1) 八戸龍馬, 古賀逸人, 溝上章志: クルマの移動と駐車の実態, および都心部の適正駐車容量の試算, 土木学会論文集D3, Vol.77, No.1, pp.12-22, 2021.
- 2) 国土交通省, 自動運転に対応した道路空間のあり方「中間とりまとめ」~政府目標達成のために道路インフラが早急に取り組むべき事項を提言~, 自動運転に対応した道路空間に関する検討会, 2019.
- 3) Xu, H., Pang, J-S., Ordonez, F., and Dessouky, M.: Complementarity models for traffic equilibrium with ridesharing, *Transportation Research B* 81, 161-182, 2015
- 4) Di, X., Ma, R., Liu, H. X., and Ban, X: A link-node reformulation of ridesharing user equilibrium with network design, *Transportation Research B* 112, 230-255, 2018
- 5) Ma J., Xu, M., Meng, Q., and Cheng, L.: Ridesharing user equilibrium problem under OD-based surge pricing strategy, *Transportation Research B* 134, 1-24, 2020
- 6) Li, Y., Liu, Y., and Xie, J: A path-based equilibrium model for ridesharing matching, *Transportation Research B* 138, 373-405, 2020
- 7) Ban, X. J., Dessouky, M., Pang, J-S., and Fan, R.: A general equilibrium model for transportation systems with e-hailing services and flow congestion, *Transportation Research B* 129, 273-304, 2019
- 8) Chen, Z., He, F., Zhang, L. & Yin, Y., 2016. Optimal deployment of autonomous vehicle lanes with endogenous market penetration. *Transportation Research Part C*, 72, pp.143-156.
- 9) Lin, Y., Jia, H., Zou, Bo., Miao, H., Wu, R., Tian, J. & Wang, G, 2021. Multiobjective environmentally sustainable optimal design of dedicated connected autonomous vehicle lanes, *Sustainability*, 13, 3454.
- 10) 嶋本寛, 松尾優輝: ライドシェアを考慮した時空間ネットワーク配分モデルの構築-トリップベースモデルとアクティビティベースモデルの比較-, 交通工学論文集, 登載決定, 2023

第5章 まとめ

5.1 研究の総括

下記に本研究の成果と今後の展開についてまとめる。

■課題1：地域MaaS実証実験や実運用サービスのモニタリングから得られた知見や効果の分析

中山間地，都市部乗換拠点，地方都市全域という，オンデマンド型モビリティサービスの活用場面について，実証実験や実装運行から得られた予約ログデータやアンケート調査データを用いて利用特性や導入効果を分析し，得られた知見から実装の際の要件などについて提言を行った。

■課題2：マルチエージェント型モビリティシミュレータの開発と適用

リアルタイム・オンデマンド・区域運行型の乗合いタクシーサービスの導入時の需要予測と評価を目的として，おもやいタクシー利用意向調査データから推定された手段転換モデルを組み込んだマルチエージェント交通シミュレーションモデルMAUMS (Multi-Agent Urban Mobility Simulator) と実際の最適配車システムSAVS (Smart Access Vehicle System) と連携させたMAUMS&SAVSシミュレータの利用可能性を検証した。さらに，MAUMS&SAVSから得られる予測値と実測値の誤差を改善するために，実測データを用いたMAUMSに内装される手段転換モデルのパラメータのデータ同化的手法を開発し，適用した。

■課題3：都心部の駐車場容量やレベル4における自動運転車優先走行区間・専用レーンの設計自動運転車優先走行区間・専用レーンなどの走行設計領域を計画するための数理モデルの構

築を行った。それらを熊本都市圏道路ネットワークに適用して解の妥当性を確認することによって，計算可能性や適用可能性を検証した。ここでは，シェアリングと自動運転が統合したサービスが実現した場合の利用率の予測と優先走行区間を設定する時空間配分モデル，自動運転車両と手動運転車両の分担率が所与のもとで自動運転車の最適な専用走行レーンの設計モデルの2種類のモデルを構築した。また，後者については自動運転車の専用走行レーンをMAUMSのネットワークに設定して道路交通流への影響を分析した。

5.2 道路政策の質の向上への貢献

本補助で実施した自主開催の「MaaSの実装に向けた政策・技術検討シンポジウム」だけでなく，公的組織が主催する委員会（熊本市「MaaS勉強会」，および「MaaS準備会」など）やシンポジウム（九州経済連合会他「九州MaaS交流会オープニングイベント」，中核都市における新・交通システム研究会「第52回研究会」，経産省「スマートモビリティチャレンジ地域シンポジウム」など），学会での企画セッション（度奥計画学研究発表会「MaaSの実践・実証と理論」）などで，研究成果に基づくMaaS実装に向けた課題や今後の方略に対する情報発信を行ってきた。これらの成果が評価され，研究代表者の溝上は，社団法人EMoBIAが組織した「九州アカデミーITSモビリティ研究会」の座長に指名され，活動を開始している。そこでは，九州地域における民間企業や自治体の求めるMaaSや自動運転技術に関するニーズと学術シーズとをマッチングを行う。さらに，地域における移動課題の解決や経済活性化を目指すスマートモビリティチャレンジやSIPの目指すスマートモビリ

ティプラットフォームの構築の趣旨に沿って、理論研究や実証研究を行うと同時に、実装に向けたビジネス化に取り組んでいくことになるなど、本研究で得られた研究成果は実務へ反映され、道路政策の質の向上へ貢献している。

5.3 今後の展開

ライドシェアと自動運転が統合した新たなモビリティが実現した際の需要や効果の予測、およびその都市構造や生活行動への影響を明らかにするという当初の目的を達成するために、今後取り組むべき研究課題としては下記のようなものが考えられよう。

- 1) 各地で実施されているシェアリングサービスやMaaSの実証実験情報の収集、および導入効果についてのメタ分析の実施
- 2) 実運行しているシェアリングサービスへの適用によるMAUMSの実用可能性の確認
- 3) 自動運転車両の性能や走行環境条件の中の道路条件を精緻に考慮した自動運転車優先走行区間や専用走行レーンの設定モデルの開発と適用
- 4) 自動運転シェアリング（AVS: Autonomous Vehicle Sharing）の普及によって変容すると思われる都市や社会や生活行動についての市民の意見収集と社会的受容性の把握

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.31-4
自動運転とシェアリングが融合した新しいモビリティサービスと社会都市・生活の未来についての研究開発〇〇

2023.5