

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

1G-2001 モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件  
(JPMERF20201G01)

令和2年度～令和4年度

英文課題名

Requirements for the Mobility Revolution toward a Decarbonized Society

〈研究代表機関〉

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

〈研究分担機関〉

学校法人 早稲田大学

国立大学法人 岡山大学

国立研究開発法人 国立環境研究所

令和5年5月

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

## 目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発 (国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学)	・・・・・・・・・・	16
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価 (学校法人 早稲田大学)	・・・・・・・・・・	33
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価 (国立大学法人 岡山大学)	・・・・・・・・・・	48
要旨		

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

II-4 地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価 (国立研究開発法人 国立環境研究所)	・・・・・・・・・・	63
--	------------	----

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

III. 研究成果の発表状況の詳細	・・・・・・・・・・	72
-------------------	------------	----

IV. 英文Abstract	・・・・・・・・・・	78
----------------	------------	----

## I. 成果の概要

課題名 1G-2001 モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件

課題代表者名 加藤 博和（国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学大学院環境学研究科 教授）

重点課題 主：【重点課題②】ビジョン・理念の実現に向けた研究・技術開発

副：【重点課題④】環境問題の解決に資する新たな技術シーズの発掘・活用

行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：

(1-1)「地域循環共生圏」の創造に向けた理論の構築と地域での実証

(1-4)地域循環共生圏・Society5.0を踏まえた新たな長期シナリオによる脱炭素社会への道筋の研究

研究実施期間：令和2年度～令和4年度

研究経費：77,498千円（合計額）

（各年度の内訳：令和2年度：27,967千円、令和3年度25,170千円、令和4年度：24,361千円）

研究体制

(サブテーマ1) 交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発

（国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学）

(サブテーマ2) 交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価

（学校法人 早稲田大学）

(サブテーマ3) IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価

（国立大学法人 岡山大学）

(サブテーマ4) 地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価

（国立研究開発法人 国立環境研究所）

研究協力機関

研究協力機関はない。

本研究のキーワード 交通システム、LCA、Well to Wheel、次世代モビリティツール、MaaS、CASE、シナリオ分析

## 1. はじめに（研究背景等）

Society5.0時代を迎え、「モビリティ革命」と言われる、ITやエネルギー等に関する技術進展を取り入れた100年に1度の交通サービス大変革が起きようとしている。自動車はCASE（Connected, Automated, Shared, Electrification）と呼ばれる根本的な変化が見込まれる。公共交通も、シェアリング・オンデマンドサービスのビジネスモデルや、MaaS（Mobility as a Service）を実現するためのIT活用や交通モード間連携、そして新しいモビリティツールの導入が注目を浴びており、関連研究は膨大な数に上る。

ところが、モビリティ革命をもたらす新たな技術・サービスが脱炭素化進展に及ぼす影響を及ぼすかについての学術的・客観的な評価や検討はほとんどなかった。運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量は人間活動全体の約2割を占める。技術・車両・運行形態の革新を図るだけでは大幅削減の達成は不可能であり、交通行動の変容も伴う交通システム全体の改善が必要不可欠である。その上で、モビリティ革命のスピードとインパクトを考えると、それが交通システムのCO<sub>2</sub>排出量に与える影響を評価する方法論を開発し、それを用いてモビリティ革命が脱炭素化に資するための条件を示すことが喫緊の課題である。

## 2. 研究開発目的

本研究では、都市・地域圏スケールの旅客交通サービスを対象に、研究代表者らがこれまで開発してきた自動車や鉄道・バスといった既存交通モードを対象とするLCA(Life Cycle Assessment)やWtoW(Well to Wheel) 評価の手法を援用・拡張し、モビリティ革命に伴って導入・普及が見込まれる次世代モビリティツール、新技術・サービスが交通システムのCO<sub>2</sub>排出量変化に与える影響を包括的・定量的に把握し、さらに交通の需要・供給状況（COVID-19禍の影響も含めて）やインフラ整備・エネルギー技術等の要因による変化も網羅的に考慮できる評価手法へ発展させる。この手法を用いることで、旅客交通システムへの新技術・サービス導入が「低炭素性を発揮できる条件」を明確化でき、それを満たす導入シナリオを策定することができる。加えて、社会経済やエネルギーの将来動向を考慮しながら、モビリティ革命が利便性・効率性向上のみならず脱炭素を実現する旅客交通システムが各地域で実現されるために必要な配慮や施策を明らかにする。この成果をもって、国の低炭素技術の導入支援事業における評価手法への適用や、地方自治体におけるEBPM（Evidence Based Policy Making）の活用にも貢献する。

## 3. 研究目標

全体目標	「モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件を明らかにする手法の確立」が目標である。そのために、モビリティ革命の原動力となるITや新エネルギー技術を用いた新たなサービスやその組み合わせに関して、そのCO <sub>2</sub> 排出量をライフサイクルで評価する手法を構築し、評価を実施する。さらにこの手法を実際の都市へ適用し、その状況や特性に応じて様々な新モビリティサービスをいかなる形で導入すれば、QOL（生活の質）向上と脱炭素化を両立できるかを検討し、具体的な交通システムとして示す。そして以上の成果をもとに、地域における交通活動の脱炭素化を担保するための施策を国・自治体等が立案する際に活用できるような検討手法を提供することを最終目的とする。
サブテーマ1	交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発
サブテーマリーダー/所属機関	加藤博和/国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学
目標	モビリティ革命が交通活動の脱炭素化に資する方向に進むために必要な施策や技術を見出すために、様々な新技術・サービス導入によって様変わりする交通システムの低炭素性を定量評価する手法を開発する。これは、国・自治体や企業等がその施策や企画を検討するために活用できるものとする。

サブテーマ2	交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価
サブテーマリーダー /所属機関	紙屋雄史/学校法人早稲田大学
目標	今後の電源構成の変化を踏まえた排出原単位を導入し、WtoW評価を行うことを通して、電動車両および新モビリティの低炭素性評価手法を整備する。

サブテーマ3	IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価
サブテーマリーダー /所属機関	氏原岳人/国立大学法人岡山大学
目標	ITによってシームレスにつながった交通サービスを提供するMaaSや、オンデマンド・シェアリングなど、モビリティ革命の核となる新たな交通具利用形態に着目し、それらの低炭素性を評価する手法を開発し、各事例を評価する。あわせて、このようなモビリティ革命が利用者の生活の質にどのような影響を及ぼすのかを分析し、低炭素でかつ生活の質を高める交通システム実現の方向性を明らかにする。

サブテーマ4	地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価
サブテーマリーダー /所属機関	松橋啓介/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化をシナリオ化し、炭素排出量の長期的推移の予測を行う。さらにサブテーマ1~3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示す。

#### 4. 研究開発内容

##### 【サブテーマ1】交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発（実施機関：名古屋大学）

モビリティ革命によって大きく変化していく旅客交通システムの低炭素性を定量評価する手法を開発するため、まず、次世代モビリティ技術・サービス導入によるCO<sub>2</sub>排出量変動要因を整理し、それを組み込んだLife Cycle (LC) プロセスツリーを作成し、そのプロセスを踏まえた推計に必要な交通具およびインフラ・施設のLC-CO<sub>2</sub>原単位を整備する。原単位はWtoW (Well to Wheel) 評価を取り入れるとともに、乗車人数・エネルギー源等による違いも考慮できるものとする。さらに、CO<sub>2</sub>排出量の中長期的に大幅削減するための必要かつ有効な中大量乗合輸送システムへのシフトを評価できるフレームとする。これに各サブテーマの研究成果を取り入れることで、旅客交通システムの包括的な脱炭素性評価が可能なパッケージへ発展させる。これは、車両の電動化や軽量化（サブテーマ1・2）や再生可能エネルギーの普及などといった技術施策群と、車の所有形態・保有率や交通行動変容（サブテーマ1・3・4）、将来の都市人口・構造の変化（サブテーマ1・4）などに働きかける交通施策群に関するCO<sub>2</sub>削減効果の評価手法（低炭素化施策検討手法）を取りまとめ、これを用いて都市規模・類型別にCO<sub>2</sub>排出量が最小となる交通システムを提示し、都市・地域圏スケールでの旅客交通サービスの2050年カーボンニュートラル実現に必要なモビリティ革命の条件と必要な施策について検討する。

**【サブテーマ2】 交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価（実施機関：早稲田大学）**

電動バスおよび新モビリティ（グリーンスローモビリティ、超小型モビリティ、パーソナルモビリティ）の実走行時の電費情報の収集を行う。また、各種電動車両に対して充電する際の、地域・時間ごとの電源構成について把握する。実走行時電費の情報収集に加えて、勾配（回生）、走行パターン（車速、距離）等の走行条件が与える影響についてシミュレーションにより明らかにする。また、定時定路線運行を行う車両について、電動化した際の充電可能時間を把握する。把握された実電費および電源構成、走行パターンの影響を加味したWtoW評価を行うことで、電動車両の低炭素性を定量化する。さらに、従来と同等の利便性を確保しつつ、低炭素効果を最大化するための最適な充電スケジュールを構築するとともにそれに関わるコストを把握する。

**【サブテーマ3】 IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価（実施機関：岡山大学）**

次世代型モビリティとして超小型EVとグリーンスローモビリティを対象に、利用者の視点からの低炭素性を評価する簡便な手法を提案するとともに、具体的な事例を対象にそれらの低炭素性を評価する。また、地方圏（岡山市）と首都圏（東京都区部）を対象に、IT等を活用したMaaS（Mobility as a Service）の利用実態ならびに将来のMaaSのサービスレベルが向上した場合の利用可能性を明らかにする。さらに、都市構造や公共交通サービスと（生活の質に影響を及ぼす）移動制約との関連性を把握するとともに、それらとCO<sub>2</sub>排出量との関連性を統計的に明らかにする。以上の結果にもとづき、利用者の視点からみた低炭素・脱炭素に向けたIT等交通マネジメントの方向性を提示する。

**【サブテーマ4】 地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価（実施機関：国立環境研究所）**

将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化をシナリオ化し、炭素排出量の長期的推移の予測を行うため、人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、年齢構成を考慮した将来免許保有者数と運転者数の推移を分析・推計する。また、サブテーマ1～3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示すため、車検証データを用いて全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能にし、サブテーマ1の統合的な分析に提供する。さらに、望ましい社会・空間構造の方向性について考察を行い、徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークの近隣に居住する人口の割合を評価する。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

「モビリティ革命」と呼ばれる、ITやエネルギー等に関する技術進展を取り入れた交通サービス大変革が起きようとしている。ところが、モビリティ革命が脱炭素化進展にいかなる影響を及ぼすかについての学術的・客観的な評価や検討はほとんどなかった。

本研究では、LCA (Life Cycle Assessment) や WtoW (Well to Wheel) 評価の手法を応用し、モビリティ革命が交通システムのCO<sub>2</sub>排出量変化に与える影響を包括的・定量的に把握し、さらに交通の需要・供給状況やインフラ整備・エネルギー技術等の要因による変化も考慮できる評価の方法論へ発展させる。これを用いることで、将来動向をシナリオ分析によって考慮しながら、交通システムへの新技術・サービス導入が「低炭素性を発揮できる条件」を明確化し、それを満たす導入シナリオを策定できるようにした。

本研究では、化石燃料への依存が高い都市・地域圏スケールの旅客交通サービスを対象として、(1)交通システム、(2)交通具・エネルギー・新技術、(3)IT等交通マネジメント、(4)人口・空間構造の4つの観点から、モビリティ革命に伴うCO<sub>2</sub>排出量変化のメカニズムを分析した。まず、モビリティ革命の推進力となる新たなモビリティツール・技術・サービスの主なものを抽出し、それらのCO<sub>2</sub>排出量変動要因を整理してプロセスツリーを作成した。(図-0.1) これを定式化するために、各交通具・インフラのライフサイクルCO<sub>2</sub>原単位を整備するとともに、(2)で分析される車両特性(電動化・回生、再生可能エネルギー・充電パターン、軽量化等)、(3)で分析される交通特性(新モビリティツール、交通行動変化、MaaS等ITソリューション、乗用車保有/共有等)、(4)で分析される地域特性(人口・空間分布・運転免許保有等)に関するパラメータを導入する。以上により、各特性を変化させる諸施策を低炭素化の面から検討できる評価パッケージを構築できた。

これを用いて、2050年カーボンニュートラルの目標達成に向け、バックキャスティングアプローチによって諸施策の実施必要性を明らかにする。そのため、社会経済フレームや再生可能エネルギー普及動向をシナリオとして与え、各地域で技術および交通に関する施策を選択し組み合わせることで目標達成にどれだけ迫れるかを検討し、モビリティ革命が脱炭素化を実現する条件を提示できるようにした。以上の成果は、国・自治体の低炭素技術の導入支援事業における評価手法への適用や、自治体における交通部門の脱炭素化施策のEBPMにも貢献する。各サブテーマ別の成果概要を以下に示す。

#### 【サブテーマ1】交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発(実施機関:名古屋大学)

都市・地域圏スケールの旅客交通サービスのCO<sub>2</sub>排出量がモビリティ革命によってどう変化し、各種施策によってどの程度削減できるかを定量的に評価する方法論を構築するため、下記(1)~(3)の手順を経て分析・評価を行った。

#### (1) 次世代モビリティ技術・サービスのライフサイクル(LC-)CO<sub>2</sub>排出量変動要因の整理およびプロセスツリー作成

モビリティ革命の推進要因となる各種のモビリティツール(交通具)、新技術・サービスについて整理が行われていなかったことから、開発・実証に関する様々な文献・報道等を俯瞰し網羅的整理を行った。さらに各要因について、その製造から使用・維持管理・廃棄までのライフサイクルにわたるCO<sub>2</sub>排出量の決定構造をLCプロセスツリーとして示し、排出量変化のメカニズムを明確化した。

#### (2) 交通具の低炭素性評価手法の開発とシナリオ評価・感度分析

(1)のプロセスツリーに基づいて、様々な交通具・インフラに適用できるライフサイクル低炭素性



図-0.1 研究課題のプロセス



評価手法を構築した。そのため、既存の交通具、次世代モビリティツールおよびインフラについて、LC-CO<sub>2</sub>排出原単位データを調査・収集・整備し、これを用いて各交通具の使用距離、乗車人数、エネルギー源などによるCO<sub>2</sub>排出量の違いを推計できる手法を構築した。特に、次世代モビリティツールの原単位については公表されているものが皆無なことから、サブテーマ2と協働で実車両の電費計測試験を通じてWtoW原単位を整備した。本手法ではさらに、地域・車両・需要特性によるCO<sub>2</sub>排出量の変化を推計でき、それらの条件に関してシナリオ分析・感度分析を行うことで環境・交通施策への示唆を得られるようにした。

### (3) 2050年カーボンニュートラル達成の評価・検証

構築した低炭素性評価手法を用いて、モビリティ革命進展を考慮した脱炭素化社会達成への道筋を検討し示唆を得られる段階に至った。サブテーマ2・3・4と協力し、プロセスツリーに組み込まれている車両の電動化や軽量化、再生可能エネルギー発電比率の増加といった技術施策群の評価、および乗用車の所有／共有や交通行動変容に影響を与える交通施策群を検討でき、将来の人口・都市構造の変化に伴う影響も考慮できる手法として取りまとめパッケージ化した。都市規模・類型別にCO<sub>2</sub>排出量が最小となる幹線交通システムが提示でき、さらに転換増加施策をも検討できる。以上によって、中長期の2030年目標・2050年カーボンニュートラル達成のためのモビリティ革命の条件および交通および環境施策をバックキャストで検討できる手法が構築できた。

### (4) その他（研究計画以上の成果）

#### ① 次世代交通システム導入・検討のためのCO<sub>2</sub>排出量評価手法の開発

上記手法を行政や事業者が活用できるように、新しい交通具・技術・サービス導入が低炭素化に貢献するかどうかを簡便かつ客観的に評価できるツールを開発した。基本的な交通情報データを入力することで低炭素化効果を定量的に把握・比較できるようになり、目標を上回る成果を上げた。

#### ② 「脱炭素交通サービス」認証制度の構築

本研究で構築した手法を用いて各種モビリティ技術・サービスの低炭素性を客観的・包括的に評価できるようになったことから、これを用いて評価した結果として低炭素化効果が認められる場合に「脱炭素交通サービス」認証を与える制度を運営の仕組みも含め提案した。さらに普及・実装のためケーススタディを行い、目標を上回る成果を上げた。

### 【サブテーマ2】交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価（実施機関：早稲田大学）

#### (1) 電源構成の変化を踏まえたCO<sub>2</sub>排出原単位の把握

電動車両については、供給される電力の発電構成がCO<sub>2</sub>排出量を大きく左右することから、時間帯別CO<sub>2</sub>排出係数を地域（一般送配電事業者）ごとに把握した。地域により排出係数は異なるが、再生可能エネルギーによる発電が多い昼間に減少する傾向があった。特に、太陽光発電の割合が高い九州電力ではその傾向が顕著であり、昼間における減少率が最大51%となることが分かった。一方で、原子力発電が稼働しており夜間の排出係数も低い関西電力では、減少率が20%程度と小さく、発電構成による差異が大きいことが示唆された。

#### (2) 走行パターンを踏まえた電動車両および新モビリティの電費の把握

電動車両の電費に与える要素として車両総重量に着目し、電動バス（22車種）、GSM（6車種）、超小型モビリティ（8車種）、電動キックボード（6車種）に加え、研究期間内に急速に販売の進んだ乗用車タイプの148車種を加えて、合計190車種を対象に電費と車両総重量の相関を調査したところ、 $R^2=0.893$ の高い相関式が得られた。

また、走行パターンが電費に与える影響として車速と勾配に着目し、自治体や交通事業者のデータ入手難易度ごとに、3種類の予測手法を導出した。

- 低精度予測：平坦路における定速走行と仮定し、運行ダイヤおよび運行ルート走行距離から、平均速度を算出して予測を行う。（平均誤差43%）
- 中精度予測：平坦路における三角波走行と仮定し、低精度予測に加え、運行ルート上のバス停発停車回数と停車時間から、加速・減速・停車を考慮して予測を行う。（平均誤差9%）
- 高精度予測：勾配路における三角波走行と仮定し、中精度予測に加え、運行ルート上の獲得標

高から、道路勾配情報を考慮して予測を行う。(平均誤差3%)

### (3) WtoW評価による最適充電パターンの構築

定時定路線で運用される車両において、低炭素性が最大となる充電パターンを構築し、さらにそれに掛かる電力コストの分析を行った。充電パターンは、1日の作業終了後の夜間に充電する「夜間充電」と、昼間に営業所に帰庫するごとに充電する「成行充電」の2種類を構築した。成行充電は夜間充電と比較し、昼間の充電において再生可能エネルギーを有効に利用することが可能となるため、4.6%(435[kg-CO<sub>2</sub>/日])のCO<sub>2</sub>削減効果が得られることを把握した。

一方で、成行充電はCO<sub>2</sub>削減効果としては優れるが、安価な夜間料金の電力が使用できなくなる。そこで、業務用季時別料金を用いた際のエネルギーコストについて各充電パターンを比較したところ、夜間充電と成行充電では12,800[円/日]の差異があることが分かった。これは、CO<sub>2</sub>削減に掛かるコストに換算すると29,400[円/t-CO<sub>2</sub>]となることから、現状の電源構成や契約形態では、既存のJ-クレジットなどの制度との乖離があるため、今後の一層の再生可能エネルギーの導入促進やそれらを積極的に利用することに対するインセンティブ等の導入が必要であることが示唆された。

### (4) その他(研究計画以上の成果)

#### ① 電費把握の対象車種の拡大

研究当初の電動バス、GSM、超小型EV、パーソナルモビリティに加えて、乗用車タイプの148車種まで調査対象を拡大した。計画当初42車種であったのに対し190車種を調査した結果、車両総重量と電費について高い相関を得ることで、目標を上回る成果をあげた。

#### ② CO<sub>2</sub>削減コストの把握

低炭素性が最大となる充電パターンを構築に加え、研究当初は想定していなかったエネルギーコストにも着目し、時間帯別の契約電力量や電力量料金の変化に加え、CO<sub>2</sub>削減効果にかかるコストまで把握し、目標を上回る成果を上げた。

### 【サブテーマ3】IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価(実施機関:岡山大学)

#### (1) 超小型EV(MEV)・グリーンスローモビリティ(GSM)導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価

MEVはガソリン車と比較して移動に伴うCO<sub>2</sub>排出量を削減できる可能性が高いものの、MEV導入に伴う行動変化を考慮した場合、新規移動の発生や徒歩・自転車からの転換、利用頻度の増加など、MEVの高い利便性、機動性がもたらす移動パターンの変化によって、CO<sub>2</sub>排出量が増加する可能性がある(モニターの18%)。GSMについては、三重県東員町(デマンド型)と広島県福山市鞆町(路線定期型)での実証実験データを用いて分析した。それぞれ、従来の移動手段と比較してGSMからのCO<sub>2</sub>排出量は少なく、導入によるCO<sub>2</sub>排出量削減の効果を確認できた。また、GSMの利用者1人あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、東員町と鞆町でそれぞれ0.022[kg-CO<sub>2</sub>/人]、0.060[kg-CO<sub>2</sub>/人]と推計された。鞆町が東員町より高くなった要因として、車両電費や車両定員に対する運行効率性等が考えられる。

以上をふまえ、行政などが低炭素性を簡便に評価できる「利用者視点の低炭素性評価のための収集すべきデータリスト」を作成した。

#### (2) MaaS利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性及び生活の質に関わる移動制約と都市構造の関連性

MaaSの利用経験は、「利用なし」の回答割合が非常に高い(どの属性においても概ね8割以上)。若年層や自動車依存度の低い人がMaaSを利用する傾向にあり、首都圏よりも地方圏で強い関係が確認できた。将来のMaaSの利用可能性は、公共交通の利便性が現状と変わらない場合、サービスレベルが向上しても、半数以上の人は利用意向がないことが示された。加えて、年齢や自動車依存度、公共交通機関のサービスレベルは将来的なMaaSの利用可能性に影響を及ぼし、例えば、公共交通のサービスレベルが相対的に高い地域の居住者のMaaSの利用可能性は高く、この傾向は地方圏において明確に読み取れた。以上より、地方圏と首都圏ともに、MaaSは現状としては限定的な利用である

とともに、利用者に偏りが見られた。また、首都圏よりも地方圏において、公共交通利便性と自動車依存度がMaaSの利用可能性に強く影響しており、MaaSの導入・普及には、地方圏において、これらの改善が前提となると言える。

生活の質にかかわる移動制約については、地方圏では日常生活で自由に移動ができていると回答した人は全体の84.5%であり、首都圏では89.7%であった。地方圏では、移動制約要因として「公共交通の利用が不便である」が最も高く、次いで「交通渋滞等で移動するのに長時間かかる」が高い。首都圏では、移動制約要因として「自家用車を保有していない」が最も高い。都市構造や公共交通の整備レベルが異なることで、生活の質に影響を及ぼす移動制約の要因にも差異が生じていることが確認できた。

### (3) 都市構造及び公共交通サービスとCO<sub>2</sub>排出量の関連性

1人あたりの私的交通手段での移動に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量の平均値は、地方圏で825 [kg-CO<sub>2</sub>/（人年）]、首都圏で186 [kg-CO<sub>2</sub>/（人年）]となった。また、地方圏では、人口密度が4,000 [人/km<sup>2</sup>]以上の居住地、用途が商業系、都心までの距離が10 km未満の居住地ではCO<sub>2</sub>排出量が相対的に低かった。また、居住地の最寄りの鉄道駅の運行間隔が15分未満であればCO<sub>2</sub>排出量が低い傾向にあった。首都圏では、地方圏と比較して、有意な変数が少なく、都市構造とCO<sub>2</sub>排出量との関連性が相対的に弱かった。地方圏では鉄道とバスともに総合的な満足度が上がることにより利用頻度の増加に寄与し、利用頻度が高いほど結果的にCO<sub>2</sub>排出量が低くなることが示された。一方、首都圏では、公共交通サービスに対する総合的な満足度と利用頻度の間に関連性があったものの、利用頻度とCO<sub>2</sub>排出量との関連性はみられなかった。

以上の分析結果に基づいて、低炭素・脱炭素化に向けたIT等交通マネジメントの方向性を示した。具体的には、地方圏と首都圏ごとに既存の公共交通（鉄道とバス）の優先的な施策について明示するとともに、次世代型モビリティの導入にあつての留意すべき点などについて整理した。

### (4) その他（研究計画以上の成果：COVID-19流行における人々の交通行動変化）

当初予定していなかったが、研究期間中のコロナ禍における交通行動の変化を統計的に捉え、直近の公共交通や自家用車等の利用の動向を把握するための基礎データとした。COVID-19流行前とコロナ禍の代表交通手段から転換パターンを把握するとともに、流行前に公共交通機関を利用していた人に着目し、公共交通機関の利用を継続していた人と変更した人の特性を明らかにした。

## 【サブテーマ4】地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価（実施機関：国立環境研究所）

地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価を行うため、以下の4点の研究開発内容に関する成果を得た。

### (1) 人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計

数パターンのメッシュ人口分布シナリオに、メッシュ規模別の乗用車CO<sub>2</sub>排出係数を掛け合わせることで、乗用車CO<sub>2</sub>排出量の将来推計を行い、コンパクト化による抑制効果を示した。その際に、メッシュ規模別の排出係数の設定方法について、区分値、モデル式による補間値を用いる場合について比較検討を行った。

結果、人口密度が3,000人/km<sup>2</sup>を境に、高密度側にコンパクト化の効果が大きく見られた。2010年の階級値を用いた試算例では、現況0.82 [t-CO<sub>2</sub>/人]に対して、居住誘導0.78 [t-CO<sub>2</sub>/人]、里山0.88 [t-CO<sub>2</sub>/人]と、コンパクト化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の将来抑制効果は約13%あることが分かった。

### (2) 性別5歳階級別の免許保有者数と運転者数の推移の分析と推計

1995年から2015年の5時点間の性別5歳階級別の運転免許保有者数と平日運転者数の推移を対象に、それぞれの変化の要因を年齢、時代、コーホート効果に分けて評価可能なベイズ型APC（Age-Period-Cohort）分析を適用するとともに、2020年から2050年までの将来推計と高齢者の動向について考察を行った。免許保有者数は、女性の若い世代で新しい取得が進み、男女ともに高い免許保有率となることを見込まれた。一方、運転者数は、免許保有者数以上に高齢化が進み、推計の信頼性に幅があるものの、2050年までに女性の運転者数が約7%減少する一方、男性は約56%の大幅減となる結果となった。高齢者への代替交通手段の重要性は引き続き高いと考えられる。

(3) 車検証データを用いた全国市区町村別の乗用車走行距離およびCO<sub>2</sub>排出量の現況推計

自動車の車検時に取得されている車両の走行距離等のデータを利用し、全国市区町村別の自家用乗用車走行距離の実態を明らかにした。さらに、軽乗用車の走行距離等のデータを入手し、より空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能とした。また、可住地人口密度および暖房度日等の地域特性と走行量との関係进行分析するとともに、CO<sub>2</sub>排出量の推計を行うとともに、人口密度別のCO<sub>2</sub>排出量を更新した。

全国の24%、3,100万人が居住する10,000人/km<sup>2</sup>以上の地域では、一人あたり排出量が全国平均より約70%少なく、排出量の割合は7%と少ないことが分かった。反対に、2,200万人が居住する100-1,000人/km<sup>2</sup>の地域では、一人あたり排出量が全国平均より約70%多く、面積と排出量の割合が高いことが分かった。

## (4) その他（研究計画以上の成果：徒歩や電動車いす等が使いやすい地域の評価）

望ましい社会・空間構造を考察し、東京都区部と川崎市と横浜市の各区を対象に、徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークや自治体が指定するウォーキングコースから200mバッファに含まれる人口の割合を評価した。震災、戦災復興に伴う都市基盤整備が行われた都心北東部、港北ニュータウン等の新都市基盤整備がされた横浜市北西部等にウォーキングに適した人口割合が高い区があることを明らかにした。また、散歩、徒歩、車椅子、ベビーカー、子どもの安全、シニアカーの通行のため、都市部局と福祉部局との連携が今後有効になると考えられた。

## 5-2. 環境政策等への貢献

## &lt;行政等が既に活用した成果&gt;

## 【サブテーマ1】

国土交通省自動車局「ラストワンマイル・モビリティ／自動車DX・GXに関する検討会」（第1回）（2023.2.20）において、話題提供「地域公共交通再起動のためにファースト・クォーターマイル交通が果たしうる役割～コロナを乗り越え！おでかけウェルカム社会を切り開こう！」を行い、本研究で開発した旅客交通サービスの低炭素性評価パッケージと「脱炭素交通サービス」認証制度の導入必要性を提言し、6月のとりまとめでの盛り込みに向けて検討を進めていただいている。

## 【サブテーマ2】

本研究の成果である電費予測モデルを用いた充電パターンの構築は、XXXXXXXXXX <非公開>における電動バス導入検討において採用されている。

## 【サブテーマ4】

中央環境審議会地球環境部会・総合政策部会「炭素中立型経済社会変革小委員会」（第8回）（2022.10.8）において、話題提供「炭素中立と国土・土地利用」を行い、とりまとめ「GXを支える地域・くらしの脱炭素～今後10年を見据えた取組の方向性について～」の「国土・土地利用について」の取り組みの方向性において、「【効率的な国土・土地利用】」が示された。

## &lt;行政等が活用することが見込まれる成果&gt;

## 【サブテーマ1】

- CO<sub>2</sub>大幅削減に有効な、乗用車から「幹線（鉄道・バス）＋端末（パーソナルモビリティツール）」への転換施策の削減効果をライフサイクルで把握できる手法を提案した（政策サマリー1）
- 各都市・地域圏において新たな旅客交通サービス導入を実施もしくは検討の際、その低炭素性を簡便に評価し対策を検討できる手法を開発した。基本的な交通情報データを入力することで、既存および新しい交通機関導入による低炭素化効果を把握・比較できる（政策サマリー2）。
- モビリティサービスを対象とした「脱炭素交通サービス」認証制度の仕組みを提案した。この認証が公的に認められ信頼を得ることによって、交通分野における脱炭素化の取組が急速に進

展することが期待できる（政策サマリー3）。

#### 【サブテーマ2】

- 電動車両導入を行う際は地域の需要に合わせて車格を選定するため、電費と車格（車両総重量）との相関を明らかにし、CO<sub>2</sub>削減量の定量的把握手法を提案・整理した（政策サマリー4）。
- 自治体や交通事業者が簡易に入手可能な情報のみで、電動バスの電費を予測する手法を確立し、導入時のCO<sub>2</sub>削減量をあらかじめ把握する手法を提案・整理した（政策サマリー5）。

#### 【サブテーマ3】

- 国や地方自治体、まちづくり団体などが、次世代型モビリティを導入した際の低炭素性を簡便に評価するために収集すべきデータ群をリスト化する（政策サマリー6）とともに、定量的な分析結果に基づき、低炭素・脱炭素に向けた環境政策を検討するためのIT等交通マネジメントの方向性を示した（政策サマリー7）。

#### 【サブテーマ4】

- 自家用乗用車の台数やCO<sub>2</sub>排出量に関する全国市区町村及びメッシュ単位でのデータを整備し、低炭素化施策検討に活用できるようにした（政策サマリー8・9）。
- 川崎市(2021)、武蔵野市(2022)と所沢市(2022)で開催された気候市民会議において、運輸部門の情報提供をする際に、該当市の乗用車CO<sub>2</sub>排出量推計結果を全国や周辺市と比較して提示し、検討の材料として用いた。各気候市民会議からの提言は、各市の地球温暖化対策地方実行計画の立案において参考にされることが期待される。

### 5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>「モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件を明らかにする手法の確立」が目標である。そのために、モビリティ革命の原動力となるITや新エネルギー技術を用いた新たなサービスやその組み合わせに関して、そのCO<sub>2</sub>排出量をライフサイクルで評価する手法を構築し、評価を実施する。さらにこの手法を実際の都市へ適用し、その状況や特性に応じて様々な新モビリティサービスをいかなる形で導入すれば、QOL（生活の質）向上と脱炭素化を両立できるかを検討し、具体的な交通システムとして示す。そして以上の成果をもとに、地域における交通活動の脱炭素化を担保するための施策を国・自治体等が立案する際に活用できるような検討手法を提供することを最終目的とする。</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。</p> <p>全体目標達成に向けテーマ1を中心にサブテーマ間で連携を図り、下記の手順で研究を遂行した。</p> <p>(A) モビリティ革命の推進力となる要素の抽出            (B) 各要素のLC-CO<sub>2</sub>プロセスツリーの作成            (C) LC-CO<sub>2</sub>排出原単位の整備（モード別）、原単位の影響要因の詳細分析と定式化            (D) 将来シナリオ設定（トレンド/施策群）            (E) 低炭素性評価(LC-CO<sub>2</sub>推計/シナリオ評価/感度分析) および簡便な検討手法の提案            (F) 脱炭素目標達成に必要な施策群のバックキャストニング</p> <p>以上の結果、主に次の成果が得られた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・モビリティ革命に伴うCO<sub>2</sub>排出量変化の全体構造が明確になり、定式化することができた。</li> <li>・排出量推計・分析に必要な排出量原単位について、既存値の更新や新規の算定が進み、影響要因の考慮ができる余地も広がって、推計の幅が大きくなった。</li> <li>・電動化や新モビリティ普及、MaaSといった交通部門の新たなトレンドについて、実施方法や地</li> </ul>

	<p>域特性によって左右されるCO<sub>2</sub>削減の可否をかなり明確にすることができた。</p> <p>・モビリティ革命と人口等長期トレンドとを合わせてシナリオ分析することで、2050年カーボンニュートラル実現のための必要施策を導出することが可能となった。</p> <p>以上のことから、脱炭素社会実現に向けた「モビリティ革命の条件」を提示するという主目標を達成することができた。さらに、当初計画にあった、モビリティ革命に貢献する新技術・モビリティツール等導入の評価はもちろんのこと、それを行政や事業者が自主的に行うツール開発や、低炭索性評価手法を活用して脱炭素の取組みを客観的に評価し認証する制度の提案にも至り、当初目標を上回る成果を得ることができた。</p>
--	---

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
<p>モビリティ革命が交通活動の脱炭素化に資する方向に進むために必要な施策や技術を見出すために、様々な新技術・サービス導入によって様変わりする交通システムの低炭索性を定量評価する手法を開発する。これは、国・自治体や企業等がその施策や企画を検討するために活用できるものとする。</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。</p> <p>モビリティ革命の推進力となる主な新技術・サービス・モビリティツールを14項目抽出し、それらのCO<sub>2</sub>排出構造を整理の上、諸条件や施策による排出量変動要因を組み込んで定式化した。また、既存交通機関と新モビリティツール合わせて16の交通工具についてLC-CO<sub>2</sub>排出原単位を整備し、前述の各項目のCO<sub>2</sub>排出量推計式に組み込んで各項目の脱炭索性評価を可能とした。これによって、モビリティ革命進展に伴う各項目に関わるCO<sub>2</sub>排出量を影響要因も考慮しながら評価できるようになり、交通システムの低炭索性評価パッケージを目標どおり構築できた。これについては、国・自治体のEBPMに基づく施策検討や、交通事業者による自己評価・改善活動などに活用できる簡便な手法も提案できた。</p> <p>施策として、乗用車から中大量乗合輸送システム（+新たなパーソナルモビリティツールを端末手段とする）への転換によるCO<sub>2</sub>大幅削減効果を詳細に分析するとともに、都市類型別にCO<sub>2</sub>排出量最小となる輸送機関を特定できる手法を開発し全国に適用した。最後は各サブテーマの研究成果を取りまとめ、モビリティ革命進展下で様々な技術施策や交通施策を合わせて実施することで2050年カーボンニュートラル達成にかな</p>

	<p>り近づけるものの、さらにライフスタイル見直しや都市・地域空間構造変化といった策が必要であることも示し、計画通り目標達成できた。</p> <p>さらに、計画以上の成果として、自治体・交通事業者が新しい交通システムを導入するときにCO<sub>2</sub>排出量を簡便に評価できるツール（エクセルシート）を開発した。また、開発した方法論を用いて交通事業者等の取組を評価し、「脱炭素交通サービス」認証を与える制度を考案し、ケーススタディを実施することができた。また、コロナ禍で普及した地方部でのテレワークについて低炭素性の観点から分析を行い、出張等のCO<sub>2</sub>増加要因に留意する必要性も明らかにできた。</p>
--	---

サブテーマ2目標	目標の達成状況
<p>今後の電源構成の変化を踏まえた排出原単位を導入し、WtoW評価を行うことを通して、電動車両および新モビリティの低炭素性評価手法を整備する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>車両の評価については、電気バス、GSM、超小型EV、パーソナルモビリティ合計42車種を対象に、車両総重量と電費の相関について整理した。また、車速および勾配等の走行パターンの電費に与える影響を分析し、交通事業者が入手可能な情報を用いた簡易予測モデルを構築し、目標通りの成果をあげた。さらに、急速に市販の進んだ乗用車タイプの148車種まで調査対象を拡大し、より信頼度の高い相関式を導出することで、目標を上回る成果をあげた。</p> <p>電力の評価については、発電事業者ごとの時間帯別の電源構成を把握し、地域ごとのWtoW評価を行うためのCO<sub>2</sub>排出原係数を整理した。また、定時定路線で運行する車両を対象に時間帯別の発電構成を踏まえた、低炭素性が最大となる充電パターンを構築し、目標通りの成果を上げた。さらに、充電パターンの構築において、時間帯別の電力量料金に着目し、CO<sub>2</sub>削減効果にかかるコストを把握し、目標を上回る成果をあげた。</p>

サブテーマ3目標	目標の達成状況
<p>ITによってシームレスにつながった交通サービスを提供するMaaSや、オンデマンド・シェアリングなど、モビリティ革命の核となる新たな交通具利用形態に着目し、それらの低炭素性を評価する手法を開発し、各事例を評価する。あわせて、このようなモ</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>次世代型モビリティ（超小型EV及びグリーンスローモビリティ）に着目し、それらの低炭素性を評価する手法を開発するとともに、具体の導入事例を対象に評価することで、低炭素・脱炭素化</p>

<p>ビリティ革命が利用者の生活の質にどのような影響を及ぼすのかを分析し、低炭素でかつ生活の質を高める交通システム実現の方向性を明らかにする。</p>	<p>に向けて留意すべき点を把握した。そして、国や地方自治体、まちづくり団体などが、次世代型モビリティを導入した際の低炭素性を簡便に評価するために収集すべきデータ群をリスト化した。さらに、MaaSの利用実態や将来の利用可能性、生活の質に関する各種調査に基づき、それらと都市構造や公共交通サービス、移動に伴うCO<sub>2</sub>排出量との関連性を統計的に把握した。以上の成果に基づき、低炭素・脱炭素化に向けたIT等交通マネジメントの方向性を示しており、計画通りの目標を達成できた。そのほか、計画以上の成果として、研究期間中のコロナ禍における交通行動の変化を統計的に捉え、直近の公共交通や自家用車等の利用の動向を把握するための基礎データとした。</p>
---	--

サブテーマ4 目標	目標の達成状況
<p>将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化をシナリオ化し、炭素排出量の長期的推移の予測を行う。さらにサブテーマ1～3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示す。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、年齢構成を考慮した将来運転者数の推移を分析・推計を行い、地域の社会・空間構造の長期変化を踏まえた炭素排出量の予測を可能とした。また、全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計をサブテーマ1の統合的な分析に提供し、新技術・サービスの導入の組み合わせによる低炭素性評価を可能とした。さらに、徒歩や電動車椅子の利用に適した歩道ネットワーク近隣の居住割合を評価し、望ましい社会・空間構造とモビリティ低炭素化の方向性を示した。</p> <p>その他、人口密度別の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の係数を更新するとともに、軽乗用車についても空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を行う方法を確立するなど、計画以上の成果をあげた。</p>

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

11件

<主な査読付き論文>

- 1) 西本祐司、朴秀日、加藤博和、山本祐吾：日本環境共生学会第24回(2021年度)学術大会発表論文



- 集、38巻、1号、56-66（2022）、テレワークを活用した地方移住の低炭素性評価
- 2) 朴秀日、加藤博和、大石直毅：土木学会論文集 D3（土木計画学）、78巻、5号（2023）、中大量輸送機関の端末交通としてのパーソナルモビリティツール導入に関する低炭素性評価
  - 3) 岡田将範、Shreyas PRADHAN、氏原岳人：土木学会論文集 D3（土木計画学）、77巻、5号、I\_565-I\_572（2022）、超小型モビリティ導入前後の利用パターンの変化に基づく低炭素性評価
  - 4) 岡田将範、氏原岳人、堀裕典：都市計画論文集、57巻、1号、106-113（2022）、COVID-19流行における交通手段の転換パターンと公共交通機関の利用継続・停止の特性把握 東京都特別区及び岡山県の居住者を対象
  - 5) 大畑友紀、氏原岳人：都市計画論文集、57巻、1号、151-156（2022）、COVID-19の流行におけるネットショッピング等の利用変化の実態把握
  - 6) Shreyas PRADHAN、氏原岳人、岡田将範、堀裕典：都市計画論文集、56巻、3号、1381-1388（2021）、グリーンスローモビリティの利用者に着目した低炭素性評価に関する研究
  - 7) 金昺敏、松橋啓介、石河正寛、有賀敏典：土木学会論文集 G（環境）、77巻、6号、II\_227-II\_234（2021）、運転免許保有者数と運転者数の推移における年齢・時代・コーホート効果の分析と将来推計
  - 8) 崔文竹、松橋啓介、石河正寛、金昺敏、有賀敏典：都市計画論文集、57巻、3号、887-894（2022）、ウォーキング空間へアクセスしやすい人口の地域差
  - 9) 石河正寛、加藤秀樹、有賀敏典、金森有子、金昺敏、崔文竹、松橋啓介：交通工学論文集、8巻、5号、1-10（2022）、自動車検査証の個別統計を用いた全国地域別乗用車 CO2 排出量の試算
  - 10) Keisuke MATSUHASHI, Toshinori ARIGA and Masahiro ISHIKAWA: IATSS Research, (2023), Estimation of Passenger Car CO2 Emissions by Population Density Class Based on Japanese Vehicle Inspection Certificate Data. (in press) (h-index : 31)

## 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

## 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	1件
その他誌上発表（査読なし）	16件
口頭発表（学会等）	30件
「国民との科学・技術対話」の実施	9件
マスコミ等への公表・報道等	2件
本研究費の研究成果による受賞	2件
その他の成果発表	9件

## 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 8. 研究者略歴

研究代表者：加藤 博和

名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士(工学)

現在、名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター教授

サブテーマ2リーダー：紙屋 雄史

早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻修了、博士(工学)

現在、早稲田大学理工学術院教授

サブテーマ3リーダー：氏原 岳人

岡山大学大学院環境学研究科博士後期課程修了、博士(環境学)

現在、岡山大学学術研究院環境生命科学学域准教授

サブテーマ4リーダー：松橋 啓介

東京大学大学院工学系研究科修士課程修了、博士(工学)

現在、国立環境研究所 社会システム領域 地域計画研究室長

### 研究分担者

1) 朴 秀日

大阪府立大学生命環境研究科博士後期課程修了、博士(緑地環境科学)

現在、名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター研究員

2) 井原 雄人

早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科修了、博士(学術)

現在、早稲田大学スマート社会技術融合研究機構研究院客員准教授

3) 楊 イ翔

早稲田大学大学院環境・エネルギー研究科修了、博士(工学)

現在、早稲田大学理工学術院講師

## II. 成果の詳細

### II-1 交通システムの低炭素性評価の包括的方法論の開発

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター 加藤博和

大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター 朴秀日

(研究協力者) 大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター 森田紘圭

#### [要旨]

旅客交通サービスの脱炭素化実現（2050年カーボンニュートラル）の目標に向け、現在進展しつつあるモビリティ革命がどのような形で進むべきか、各事業者の旅客交通・モビリティサービスや各地域の交通計画がどのように配慮されるべきか（あるいは何をすべきか）を明確にすることを目的とする。そのため、研究代表者らがこれまで構築してきた旅客交通サービスの低炭素性評価の方法論をベースに、モビリティ革命の推進力となる新たなモビリティツール・技術・サービスのCO<sub>2</sub>排出量を評価できる手法に発展させ、それを用いて社会経済トレンドや各種施策実施に関する評価分析を行い、さらに中長期的に脱炭素化を達成できる条件および必要な施策を検討し提示することを可能とした。

具体的には、まず、モビリティ革命の実現に寄与する新たな交通具・技術・サービスの主なものとして14項目を抽出し、それぞれについてライフサイクルを考慮したCO<sub>2</sub>排出量変動要因を整理しプロセスツリーを作成した。これに基づいてCO<sub>2</sub>排出量決定構造を定式化し、既存の中大量乗合輸送システムおよびインフラ・施設、また新たなパーソナルモビリティツール等を対象にLC-CO<sub>2</sub>原単位を収集・整備した。これらを用いて走行条件・乗車人数・電力構成を考慮したシナリオ評価や感度分析を行った。さらに、乗用車から鉄道・バス等の中大量乗合輸送システムへの転換によるCO<sub>2</sub>大幅削減の検討を行った。そのため、多様な中大量乗合輸送システムそれぞれについてLC-CO<sub>2</sub>原単位を整備するとともに、端末交通手段として次世代パーソナルモビリティを想定し、導入前後のCO<sub>2</sub>排出量を利用距離・乗車人数・車種別に推計できるようにした。その際、地域特性、車両特性、交通特性（輸送量、車両乗車人数等）の様々な条件を考慮したCO<sub>2</sub>排出量を推計し、それらの条件に関するシナリオ評価・感度分析を通じて得られた成果を踏まえ、環境・交通施策への検討手法等を整理した。その上で、サブテーマ2・3・4の成果を活用し、全国の都市・地域を対象に中長期の脱炭素社会実現（2050年カーボンニュートラル）可能性を評価し、必要な施策をバックキャスティングによって得た。また、国・自治体が目標達成のための施策を検討しEBPM (Evidence Based Policy Making) に活用できるように、脱炭素化施策検討手法パッケージを構築した。以上によって、計画どおりの成果を得ることができた。

その他、当初計画には挙げていなかった、自治体・交通事業者が新しい交通システムを導入する際に自身でCO<sub>2</sub>排出量を簡便に評価できるツールを開発した。また、評価手法を用いて交通事業者等に「脱炭素交通サービス」認証を与える制度を構築しケーススタディを実施したことで、計画以上の成果をあげた。

#### 1. 研究開発目的

モビリティ革命によって旅客交通サービスに様々な変化が生じ、それがCO<sub>2</sub>排出量に与える影響を包括的に評価できる方法論を構築する。そのために交通具・技術・サービスを導入した場合のCO<sub>2</sub>排出量の変化をLCA (Life Cycle Assessment) に基づいて把握し、需要・供給状況やインフラ整備・エネルギー技術等の要因による変化も考慮できる評価手法を開発する。これを用いて、交通システムや実際の都市に当てはめ、低炭素性を評価し、将来の脱炭素化（2050年カーボンニュートラル）のための環境・交通施策の検討手法を提示する。

#### 2. 研究目標

モビリティ革命が交通活動の脱炭素化に資する方向に進むために必要な施策や技術を見出すために、

様々な新技術・サービス導入によって様変わりする交通システムの低炭素性を定量評価する手法を開発する。これは、国・自治体や企業等がその施策や企画を検討するために活用できるものとする。

### 3. 研究開発内容

旅客交通サービスの低炭素性評価手法を開発するため、①モビリティ革命に伴い普及が見込まれる新モビリティツールや技術・サービスを抽出し、それぞれのCO<sub>2</sub>排出量への影響要因を調査する、②その結果に基づきライフサイクルを考慮したプロセスツリーを構築してCO<sub>2</sub>排出構造を定式化する、③各交通システムに関するCO<sub>2</sub>排出原単位を整備する、④各交通システムをCO<sub>2</sub>排出構造式に組み込んでCO<sub>2</sub>排出量推計モデルとする手順で研究を進め、得られた推計モデル群をまとめることで低炭素性評価パッケージとした。

この評価パッケージを用いて、走行条件・利用人数・電力構成といった影響要因を考慮するためにシナリオ評価や感度分析を実施し、それらの組み合わせによる削減効果を比較・分析した。さらに、地域特性・車両特性・需要特性（輸送量、車両乗車人数等）の様々な条件によって各交通システムの利用状況の変化することを考慮したCO<sub>2</sub>排出量推計を可能とした。この手法を用いたケーススタディとして、大幅なCO<sub>2</sub>排出削減が見込める、乗用車から中大量乗合輸送システム（鉄道・バス）への転換、および新しい交通手段の導入を想定した時のCO<sub>2</sub>排出削減量を把握できるようにした。

最後に、2050年カーボンニュートラルを実現するために、車両の電動化や軽量化（サブテーマ1・2）、再生可能エネルギーの普及などといった車両・エネルギー技術の向上施策に加え、車の所有形態・保有率・利用者の行動変容（サブテーマ1・3・4）、また現在および将来の人口や都市構造の変化（サブテーマ1・4）にはたらきかける施策を組み合わせることで実施することによる効果も考慮した低炭素性評価手法を取りまとめパッケージ化し、都市規模・類型別にCO<sub>2</sub>排出量が最小となる交通システムを提示し、最後に中長期の2030年CO<sub>2</sub>削減目標および2050年カーボンニュートラル達成のためのモビリティ革命の条件、およびEBPMとして活用できる施策検討手法を提示した。

### 4. 結果及び考察

#### (1)モビリティ革命に伴うCO<sub>2</sub>排出量変動要因の整理

モビリティ革命と旅客交通サービスのCO<sub>2</sub>排出量との関係について、モビリティ革命の推進力となる次世代モビリティ・技術・サービスの主要項目でのCO<sub>2</sub>排出量変動要因が以下のとおり抽出できた。

#### ①交通需要及び電力原単位の社会経路による感度

- 将来交通需要は、人口減少により減少する可能性があり（COVID-19が拍車をかけた）、特に公共交通関連サービスでは、それを前提とした評価を行う必要がある。
- 電力原単位についても将来の社会経路によって大きく変化する。特に、車両電動化の速度と再生可能エネルギー普及の速度のトレードオフは電力原単位に大きく影響するため、どのような社会像の中で長期的な達成を目指すのかの検討を行う必要がある。

#### ②運行管理によるCO<sub>2</sub>排出量の増加

- これまで公共交通における運行管理側のCO<sub>2</sub>排出量は、路線間やサービス間であまり変動がないために注目されてこなかった側面がある。
- 車両の電動化は新たな充電／充填拠点の設置を伴っており、その設置密度と車両の普及率、回送時間は常にトレードオフが生じるため、その点に着目した分析も重要となる。
- ライドシェアやサイクルシェアなどは、そのサービス提供形態によってバックグラウンドで生じる環境負荷が大きく異なるため、利用時には直接関係しない運行側の評価も今後重要となる。

#### ③都市構造と交通行動の大幅な転換による感度の分析

- シェアリングの普及は、自動車保有や目的地選択、つまりライフスタイルに大きな影響を及ぼす。
- 交通行動は都市構造によって規定される部分も大きいいため、都市構造に応じた感度分析が重要である。

④リモートサービスが交通需要と低炭素化に与える影響

- ・リモートサービスは交通需要に大きく影響を与える（主に減少させる）一方で、交通行動以外の環境負荷を増加させる可能性が高い。

以上の整理を踏まえ、各サブテーマにおいてこれらを考慮する必要性について情報を共有し、LC-CO<sub>2</sub>排出量推計・評価手法の開発を進めることとした。

(2)LC-CO<sub>2</sub>排出量のプロセスツリーの作成

モビリティ革命を推進する主要因となる次世代モビリティ技術・サービスとして図-1.1 に示す 14 項目を取り上げた。これらの概要、普及・実装の現状と将来見込みを整理し、その組み合わせによる LC-CO<sub>2</sub>排出量変動要因を把握できるようにした。また、製造から使用・維持管理、廃棄までのライフサイクルにわたる CO<sub>2</sub>排出量決定の構造を示すプロセスツリーを構築し(図-1.2)、それに基づき LC-CO<sub>2</sub>排出量を定式化した。その上で、外生要因として交通需要や燃料源調達、さらにこれらを規定する社会経済トレンドを含め、技術要因・地域要因・外的要因・行動変容要因などを想定し、各技術・サービスを使用する際に交通起源 CO<sub>2</sub>排出量、または CO<sub>2</sub>排出原単位が変動する要因を整理した。その例として、電動バスのライフサイクルプロセスツリーを具体的に描いた例を図-1.3 に示す。

モード:M (交通具)	M1 電気自動車 水素自動車	M2 超小型 EV	M3 GSM	M4 電動 バス	M5 自律走行 バス
サービス:S (交通路)	S1 カーシェア リング	S2 ライドシェア リング	S3 バイク/サイク ルシェアリング	S4 モード連携 サービス (MaaS)	S5 貨客混載 サービス
ライフ スタイル:L (交通主体)	L1 リモートワーク	L2 フレキシブル オフィス	L3 EC- テラワー	L4 オンライン 診療	

図-1.1 モビリティ革命を構成する主要因となる次世代モビリティ技術・サービス

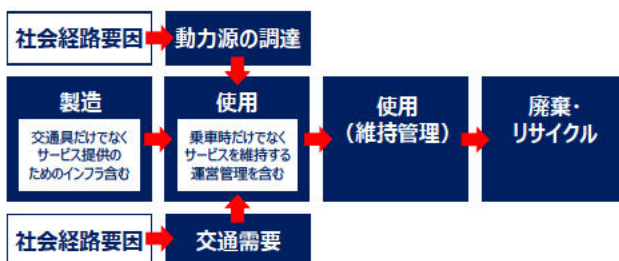


図-1.2 LC-CO<sub>2</sub>排出量推計のプロセスツリー

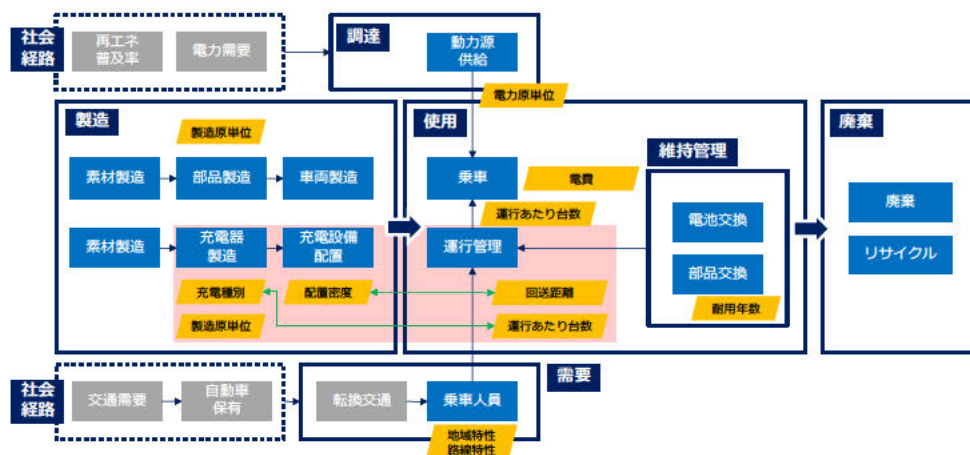


図-1.3 交通具のライフサイクルプロセスツリーおよび変動要因 (M4：電動バスの例、各項目について各サブテーマで検討し全体で確認の上作成)

(3) 交通具・インフラの低炭素性評価モデルの構築  
 ① LC-CO<sub>2</sub>排出量算出フローおよび低炭素性評価手法

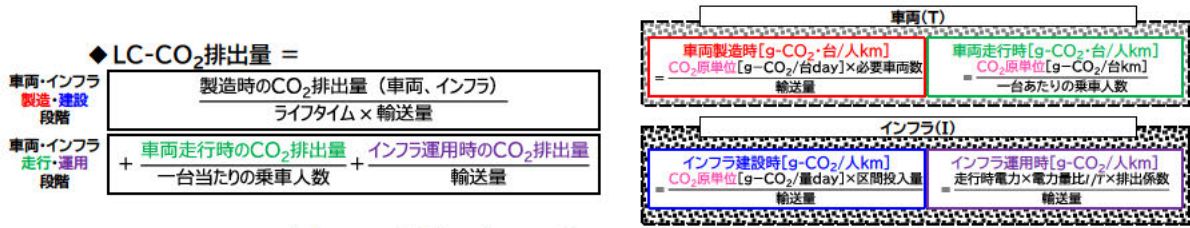


図-1.4 車両・インフラのLC-CO<sub>2</sub>排出量算出の考え方

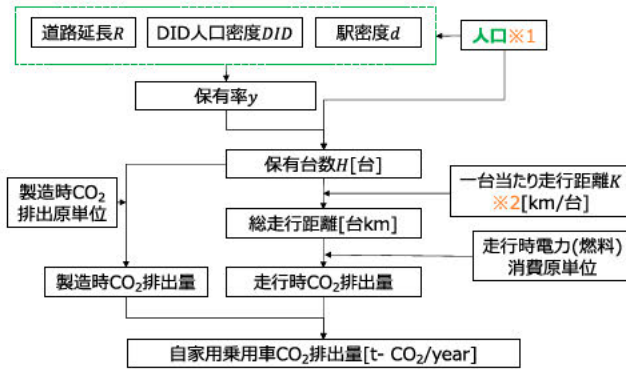


図-1.5 自家用乗用車およびパーソナルモビリティツールのLC-CO<sub>2</sub>推計 (予測) フロー

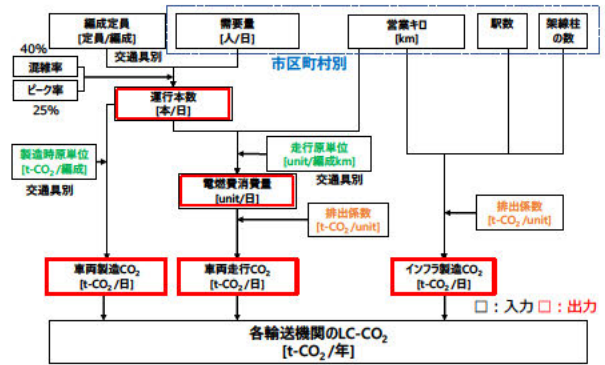


図-1.6 中大量乗合輸送システムのLC-CO<sub>2</sub>推計 (予測) フロー

交通具とインフラ・施設のLC-CO<sub>2</sub>排出量を標準的に算出する考え方を図-1.4のように整理した。これは、既存の交通具はもとより、モビリティ革命によって普及が見込まれる新しい交通具にも適用可能である。具体的に「乗用車およびパーソナルモビリティツール」と「中大量乗合輸送システム (インフラ・施設分を含む)」についてのLC-CO<sub>2</sub>推計フローを図-1.5と図-1.6に示す。これを用いると、交通具およびインフラ・施設の消費電力やライフタイム、インフラ・施設の素材などのデータがあればLC-CO<sub>2</sub>排出量を算出できる。

② LC-CO<sub>2</sub>排出原単位整備と排出量算出式

モビリティ革命によって、普及が見込まれるパーソナルモビリティに関するCO<sub>2</sub>排出原単位はもともと皆無であり、既存の交通具に関する原単位は存在するものもあるが古いため、本研究ではすべての交通具について新たに原単位を整備した。

個人が所有もしくは共有 (シェア) して利用する私的輸送機関としては、乗用車 (ガソリン車「GV」・ハイブリッド車「HV」・電気自動車「EV」)、パーソナルモビリティツールである超小型EV、自動二輪車、原付、電動キックボード、電動アシスト自転車、自転車である。中大量乗合輸送システム (公共交通) としては、鉄道 (地下鉄・電車)、一般路線バスおよびGWB (Guideway Bus)、LRT (Light Rail Transit)、BRT (Bus Rapid Transit)、AGT (Automated Guideway Transit)、モノレール (懸垂式・跨座式) であ

表-1.1 乗用車・パーソナルモビリティツールのLC-CO<sub>2</sub>排出原単位

交通具	ライフタイム [年]	製造時のCO <sub>2</sub> [t-CO <sub>2</sub> /台]	走行時のCO <sub>2</sub> [g-CO <sub>2</sub> /台km]	走行時の電力 [Wh/台km]
GV	10	3.2	※表-1.2参照→	
HV	10	3.7		
EV	10	6.0		
自動二輪車 (400cc)	5	0.62	116	-
超小型EV	7	1.75	-	103
原付 (50cc)	5	0.20	85.5	-
電動キックボード	5	0.149	-	19.3
電動自転車	3	0.0747	※16.0	10.2
自転車	3	0.0465	※22.2	-

表-1.2 乗用車 (GV/HV/EV車) の乗車人数別の走行時のCO<sub>2</sub>排出量と電力消費量

乗車人数 [人]	乗車人数 [人]					
	1	2	3	4	5	
総質量 [kg]	GV	1,055	1,110	1,165	1,220	1,275
	HV	1,115	1,170	1,225	1,280	1,335
	EV	1,335	1,390	1,445	1,500	1,555
走行時のCO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /台km]	GV	106	112	118	123	129
	HV	50.7	53.2	55.7	58.2	60.7
走行時の電力消費量 [Wh/台km]	EV	107	111	115	120	124

表-1.3 中大量乗合輸送システムのCO<sub>2</sub>排出原単位

輸送機関	編成定員 [人/編成]	表定速度 [km/h]	編成車両数 [台/編成]	a) 車両製造		車両走行時	
				素材: ステンレス		電力消費量 [kWh/編成km]	燃料消費量 [L/編成km]
				[kg-CO <sub>2</sub> /台]	ライフタイム [年]		
LRT	155	22	3	5.06	30	2.66	-
懸垂式	224	28	3	6.94	20	4.00	-
跨座式	410	25	4	1.14	20	7.96	-
地下鉄	516	34	4	1.09	30	1.00	-
BRT	70	20	1	3.16	15	-	3.24
GWB	70	25	1	3.16	15	-	3.60
AGT	264	30	6	4.18	30	5.85	-

表-1.4 中大量乗合輸送システムのインフラ建設時のCO<sub>2</sub>排出原単位

輸送機関	インフラ建設						インフラ運用	
	軌道(単線)		支柱/架線柱			駅		車両走行時に対する比率
	[t-CO <sub>2</sub> /m]	ライフタイム [年]	[t-CO <sub>2</sub> /本]	ライフタイム [年]	間隔 [m]	[t-CO <sub>2</sub> /駅]	ライフタイム [年]	
LRT	5.48	20	2.85	45	3.0	1.47	45	0.05
懸垂式	2.34	40	2.52	45	3.0	3.81	45	0.66
跨座式	6.63	30	1.00	45	2.6	3.81	45	0.61
地下鉄	4.26	20	3.12	20	6.0×10 <sup>-1</sup>	3.12	20	0.73
BRT	4.81	45	-	-	-	3.85	-	※1
GWB	8.69	30	8.82	45	4.0	3.81	45	※2
AGT	1.02	30	8.82	45	4.0	3.81	45	0.79

る。これらの交通具を対象に、各事業者へのヒアリング調査および税法上の耐用年数表を参考に車両とインフラ構造物のライフタイムを設定し、走行実験や文献、LCIデータベースIDEAなどを用いて、車両とインフラ構造物の製造・建設・使用時におけるCO<sub>2</sub>排出原単位を整備した。

乗用車およびパーソナルモビリティツール、中大量乗合輸送システムのライフタイム、製造時・建設時・使用時におけるCO<sub>2</sub>排出原単位を表-1.1～表-1.4に示す。また、乗用車の乗車人数の違いを考慮するため、GV/HV/EVについて燃費および電費は総重量に比例すると仮定し、車両重量をGV1,000kg、HV1,060kg、EV1,280kgと設定し、乗員体重は55kgと仮定した。乗用車 (GV/HV/EV車) の乗車人数別の走行時のCO<sub>2</sub>排出量と電力消費量を表-1.2に示す。なお、インフラ運用段階については各事業者の駅電力消費量および走行時電力消費量より算出した。

上記の各段階のCO<sub>2</sub>排出原単位より、中大量乗合輸送システム $m$ のLC-CO<sub>2</sub>排出量 $E_{SyLC}^m$  [t-CO<sub>2</sub>/year]を推計可能である。推計式を式(1.1)～式(1.3)に示す。

$$E_{SyLC}^m = \left( \frac{e_{v,c}^m \times x^m}{T_v^m} \right) + \left( \frac{e_{l,c}^m \times y^m}{T_l^m} \right) + E_{v,r}^m + E_{l,r}^m \quad \text{式(1.1)}$$

$$E_{v,r}^m = e_{v,r}^m \times P \quad \text{式(1.2)}$$

$$E_{I,r}^m = E_{v,r}^m \times b^m \quad \text{式(1.3)}$$

$v$ : 車両,  $I$ : インフラ,  $e_{v,c}$ : 車両製造時 CO<sub>2</sub> 排出原単位 [t-CO<sub>2</sub>/台],  $x$ : 想定区間での必要車両台数 [台],  $e_{I,c}$ : インフラ建設時 CO<sub>2</sub> 排出原単位 [t-CO<sub>2</sub>/m, 本, 駅],  $y$ : 想定区間でのインフラ構造物投入量 [m, 本, 駅],  $T$ : ライフタイム [year],  $E_{v,r}$ : 車両走行時 CO<sub>2</sub> 排出量 [t-CO<sub>2</sub>/year],  $E_{I,r}$ : インフラ運用時 CO<sub>2</sub> 排出量 [t-CO<sub>2</sub>/year],  $e_{v,r}$ : 車両走行時 CO<sub>2</sub> 排出原単位 [t-CO<sub>2</sub>/台 km],  $P$ : 輸送量 [人 km/year],  $b$ : 車両走行時に対する比率

乗用車およびパーソナルモビリティツール $m$ の走行時CO<sub>2</sub>排出原単位(電力消費起源)の推計式を式(1.4)に示す。

$$D_{LC}^m = \left( \frac{D_c^m \times x^m}{T^m} \right) + (D_r^m \times x^m \times K_r^m) \quad \text{式(1.4)}$$

$e_r^m$ : 電力消費量 [Wh/km],  $\gamma^e$ : 電力のCO<sub>2</sub>排出係数 [t-CO<sub>2</sub>/Wh]

乗用車およびパーソナルモビリティツール $m$ の LC-CO<sub>2</sub> 排出量 $D_{LC}$ の推計式を式(1.5)に示す。

$$D_{LC}^m = \left( \frac{D_c^m \times x^m}{T^m} \right) + (D_r^m \times x^m \times K_r^m) \quad \text{式(1.5)}$$

$D_c$ : 製造時CO<sub>2</sub>排出原単位 [t-CO<sub>2</sub>/台],  $x$ : 必要台数 [台],  $T$ : ライフタイム,  $D_r$ : 走行時CO<sub>2</sub>排出原単位 [t-CO<sub>2</sub>/km],  $K_r$ : 走行距離 [km/台]

なお、車両の維持管理や廃棄・リサイクルに起因するCO<sub>2</sub>排出量は、総量と比べて微量であることが長田ら<sup>1)</sup>や渡辺ら<sup>2)</sup>、森本ら<sup>3)</sup>により示されており、本研究においても、同様に推計に含めないものとする。

#### (4) LC-CO<sub>2</sub>排出量の推計および分析結果

前章で整備した旅客交通サービスの低炭素性評価モデルを用いて、各交通具を単独で1日平均移動距離を10kmおよび30km区間を1日および1年間使用した場合のLC-CO<sub>2</sub>を計算した。乗用車とパーソナルモビリティツールは、個人で所有・共有(シェア)し、定期的な移動を行う状況を想定した。また、発電方式によってCO<sub>2</sub>排出係数(電力当たりCO<sub>2</sub>)が異なるため、表-1.5に示す「現在(2017年値)」「震災前(2010年以前値)」「目標値(2030年値)」「再エネ(電気事業連合会による2019年値)」の4つの発電ケースを設定した。なお、電動アシスト自転車および自転車の走行時CO<sub>2</sub>排出量は人力による誘発量、すなわち自転車をこぐ際に消費されるカロリー分の食料生産時に発生するCO<sub>2</sub>排出量を示している。本研究ではこの人力によるCO<sub>2</sub>排出量を含む場合と含まない場合の2パターンでの推計を行う。

表-1.5 電力のCO<sub>2</sub>排出係数の設定

設定ケース	現在(2017)	震災前(2010)	目標値(2030)	再エネ
電力のCO <sub>2</sub> 排出係数 [kg-CO <sub>2</sub> /kWh]	0.61	0.51	0.44	0.02

#### ①乗用車とパーソナルモビリティツール単独利用によるCO<sub>2</sub>排出量評価

各交通具を単独で利用した場合(1人乗車)でのCO<sub>2</sub>排出量推計結果、発電ケース:「現在」と「再エネ」を図-1.7に示す。「現在」の場合、人力を含まない自転車を除き、ほぼすべての移動距離にわたって電動キックボードが最もCO<sub>2</sub>排出量が少ない結果となった。一方、各交通具の線の交点があくつか生じている。例えば、発電ケースが「現在」の場合(図-1.7a)移動距離が18.4[km/日]、「再エネ」の場合



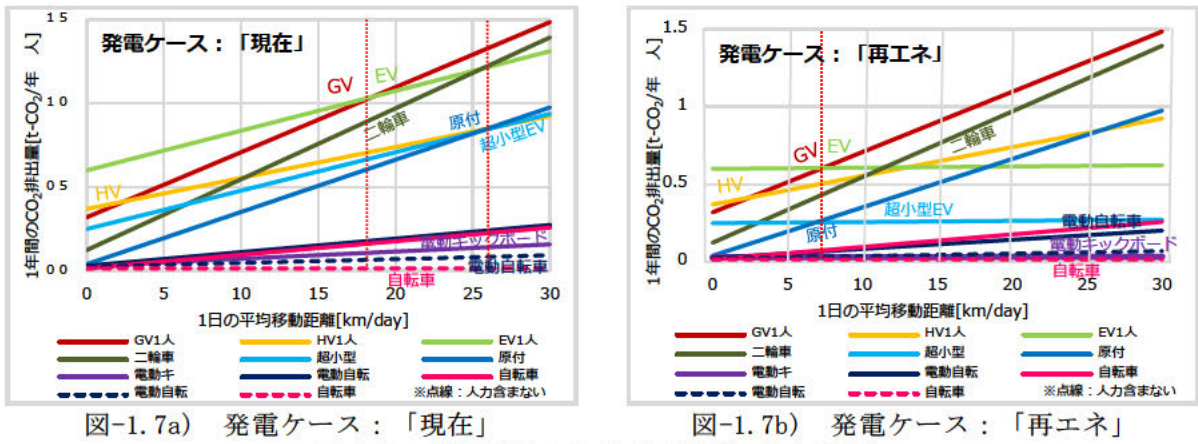


図-1.7a) 発電ケース：「現在」

図-1.7b) 発電ケース：「再エネ」

図-1.7 交通具間のCO<sub>2</sub>排出量比較（1人乗車）

(図-1.7b))は7[km/日]を超えるとGVよりEVのCO<sub>2</sub>排出量が少なくなっている。また、「現在」の場合(図-1.7a))25.4[km/日]、「再エネ」の場合(図-1.7b))は7[km/日]を超えると原付より超小型EVのCO<sub>2</sub>排出量が少なくなっている。以上より、発電ケースの違いによりCO<sub>2</sub>排出量の大小が入れ替わる距離に大きな差がみられた。また、「現在」1人乗車のEVは、毎日約18[km/日]以上の距離を移動しないとGVよりCO<sub>2</sub>排出量が大きくなるものの、「再エネ」の場合は約7[km/日]以上を移動すると電動モードの交通具(EV・超小型EV)の方がCO<sub>2</sub>排出量を削減できることがわかった。

このように、パーソナルモビリティツール導入によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果を、各地域の利用状況(距離)や条件、発電ケース(エネルギー源)を考慮して定量評価することが可能となった。

## ②乗用車から中大量乗合輸送システムへの転換によるCO<sub>2</sub>排出量の変化

鉄道・バスの端末交通手段としてパーソナルモビリティツールを利用する場合を想定し、片道で公共交通10kmと端末2kmを移動し1日で往復するものとする。公共交通の10kmは、バスの平均乗車キロ7.8km(H29)(国土交通省『数字で見る自動車2019』)と民鉄の平均乗車11.3km(H29)(国土交通省『鉄道統計年報平成29年度』)を参考に設定した。パーソナルモビリティツールの2kmは、財団法人日本自転車普及協会(2010)によるシェアサイクルの利用距離などを参考に設定した。

推定式を式(1.6)に示す。

$$D_a^{p,m} = D^p \times T_1 \times 2 + \frac{D_c^m}{L^m \times 365} + (D_r^m \times T_2 \times 2) + (E_r^m \times \gamma^e \times T_2 \times 2) \quad \text{式(1.6)}$$

$D_a^{p,m}$ : CO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>]、 $m$ : パーソナルモビリティツール、 $D^p$ : 公共交通の製造時・走行時の1人kmあたりCO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/人km]、 $D_c^m$ : 製造時のCO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/台]、 $D_r^m$ : 走行時のCO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/km]、 $E_r^m$ : 走行時の電力消費量[kWh/km]、 $L^m$ : ライフタイム[年]、 $\gamma^e$ : 電力のCO<sub>2</sub>排出係数[t-CO<sub>2</sub>/kWh]、 $T_1$ : 公共交通の距離[km]、 $T_2$ : パーソナルモビリティツールの距離[km]

比較対象である転換前の乗用車について、乗用車単独で片道12kmを1日で往復する場合を想定する。また、乗用車の種類はGV/HV/EVの3種を、また乗車人員は1, 2, 3, 4, 5人の場合を考える。

乗用車から転換する公共交通として「鉄道」と「バス」を対象とする。車両製造時CO<sub>2</sub>排出量およびライフタイムは伊藤ら<sup>4)</sup>より引用する。国内年間輸送人kmと国内車両台数の値は鉄道の場合、国土交通省の『鉄道統計年報平成29年度版』<sup>5)</sup>より、バスの場合は国土交通省の『数字でみる自動車2019』<sup>6)</sup>より用いる。そして、国内年間輸送人kmとライフタイム、国内車両台数より車両1台が担う輸送人kmを計算し、車両製造時CO<sub>2</sub>排出量をその値で除することで、1人kmあたりの車両製造時CO<sub>2</sub>排出量を求める。走行時CO<sub>2</sub>排出量は、国土交通省『運輸部門における二酸化炭素排出量』より用いる。これら2つの値を加えて1人kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量とする。推計式を式(1.7)に示す。

$$D_p = \frac{D_c^p}{\frac{V_y^p}{n^p} \times L^p} + D_r^p \tag{1.7}$$

$p$  : 公共交通[鉄道・バス],  $D_p$  : 1人kmあたりCO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/人km],  $D_c^p$  : 車両製造時CO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/台],  $V_y^p$  : 国内年間輸送人km[人km],  $n^p$  : 国内車両台数[台],  $L^p$  : ライフタイム[年],  $D_r^p$  : 走行時CO<sub>2</sub>排出量[t-CO<sub>2</sub>/人km].

表-1.6 公共交通（鉄道・バス）の設定

	鉄道	バス
車両製造時CO <sub>2</sub> 排出量 [t-CO <sub>2</sub> /台]	70.6	15.5
ライフタイム [年]	20	15
国内年間輸送人km [億人km] H29	4,375	343
国内車両台数[台] H29	52,625	51,109
1人kmあたりの車両製造時CO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /人km]	0.424	1.15
走行時CO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /人km]	18	54
1人kmあたりのCO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /人km]	18.4	55.1

表-1.7 電力のCO<sub>2</sub>排出係数を考慮した鉄道の設定

電力のCO <sub>2</sub> 排出係数 [kg-CO <sub>2</sub> /kWh]	走行時CO <sub>2</sub> 排出量 [g-CO <sub>2</sub> /人km]	1人kmあたりCO <sub>2</sub> 排出量合計 [g-CO <sub>2</sub> /人km]
「現在」0.61	18.0	18.4
「震災前」0.51	15.2	15.6
「2030」0.44	13.3	13.7
「再エネ」0.02	1.62	2.04

以上を踏まえた各種の値の設定を表-1.6に示す。これらは日本全国の平均値を示しており、実際には1人kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量は利用状況によって異なる。特定の地域を対象に評価を行う場合は、この違いを考慮すべきである。鉄道については、事業者ごとの国内年間輸送km、車両数などのデータが国土交通省の『鉄道統計年報平成29年度版』に記載されており、それらと全国の値との比によって補正することが可能である。さらに、国内の多くの鉄道は電気を使って運行されている。そのため、電力CO<sub>2</sub>排出係数によって走行時CO<sub>2</sub>排出量が変化する。鉄道の走行時CO<sub>2</sub>排出量のうち、鉄道旅客車両の中の電車の割合である94.1%（国土交通省『鉄道統計年報平成29年度版』）が電力CO<sub>2</sub>排出係数に比例すると仮定して設定する。以上に基づき、設定・推計した結果を表-1.7に示す。また、GVから鉄道またはバスへ転換する場合（図-1.10）、乗用車（GV/HV/EV）から鉄道へ転換する場合（図-1.11）、発電ケースによる違い（図-1.12）のそれぞれのCO<sub>2</sub>排出量推計結果を図-1.10から図-1.12に示す。

a) 鉄道とバスの違いによるCO<sub>2</sub>排出量評価(GV→鉄道/バス+パーソナルモビリティツール)

鉄道とバスの違いについては図-1.10に示すように、GVでは3人以上乗車する場合にバスへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が増加する。一方、GVの1~2人乗車から鉄道・バスへ転換する場合はCO<sub>2</sub>排出量が減少することがわかった。以上より、乗用車の種類に関係なく1~2人乗車する場合、鉄道やバスへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が削減できることが明らかになった。本稿ではバスがディーゼルエンジンで走行すると想定しているため、乗用車に3人以上が乗車する場合、乗用車と端末の種類に関係なく、バス+パーソナルモビリティツールでCO<sub>2</sub>排出量が増加してしまう結果となる。ただしバスの電動化によってCO<sub>2</sub>排出量削減効果が大きくなると見込まれる。

b) 乗用車の種類別のCO<sub>2</sub>排出量評価(GV/HV/EV→鉄道/バス+パーソナルモビリティツール)

乗用車の種類別に、鉄道・バス+パーソナルモビリティツールに転換した時のCO<sub>2</sub>排出量変化を図-1.11に示す。CO<sub>2</sub>排出の減少量はGV>EV>HVの順で多く、乗用車の種類によらず、乗車人数が3人以上の場合、図-1.11a)に示すように、鉄道+超小型EVへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が増加することがわかる。また、鉄道+電動キックボード・電動アシスト自転車・自転車に転換する場合は、ほぼすべての場合においてCO<sub>2</sub>排出量が減少する。一方、図-1.11b)に示すように、

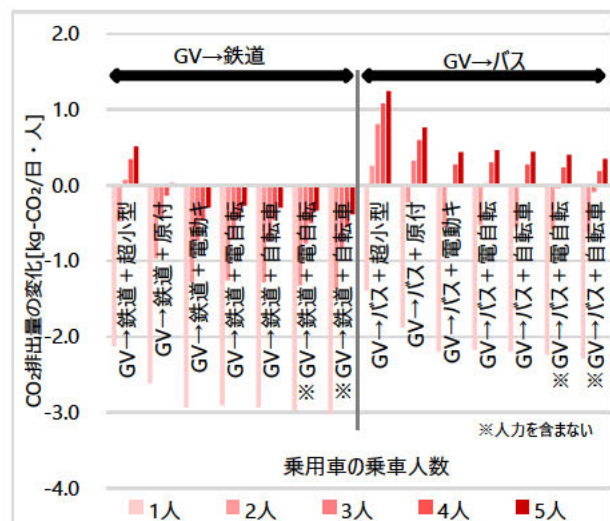


図-1.10 GVから鉄道・バス+パーソナルモビリティツールへの転換によるCO<sub>2</sub>排出量の違い

乗用車の種類に関係なく乗車人数が2~3人以上の場合、バス+パーソナルモビリティツールへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が増加することがわかった。以上のように一般的な乗車利用人数(1.31人)の場合は、鉄道・バス+パーソナルモビリティツールへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が減少することが明らかになった。一方、乗用車の種類に関係なく乗車人数が2人以上の場合、バス+パーソナルモビリティツールへ転換するとCO<sub>2</sub>排出量が増加する。

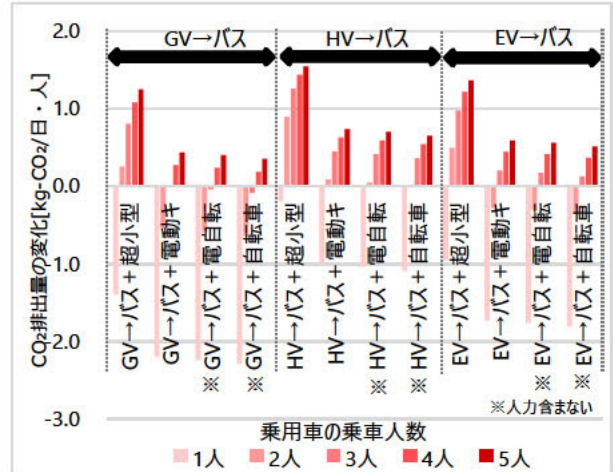
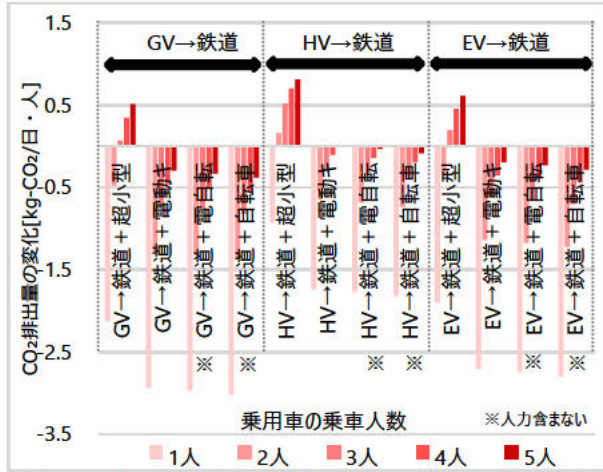


図-1.11a) GV/HV/EV→鉄道+パーソナルモビリティ

図-1.11b) GV/HV/EV→バス+パーソナルモビリティ

図-1.11 乗用車の種類によるCO<sub>2</sub>排出量の違い

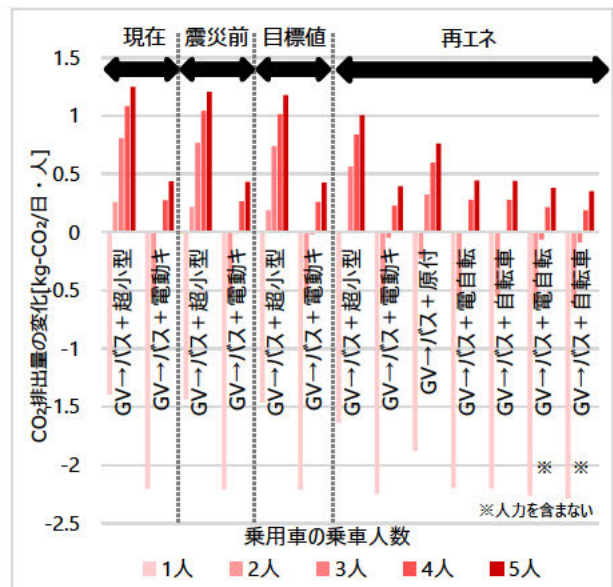
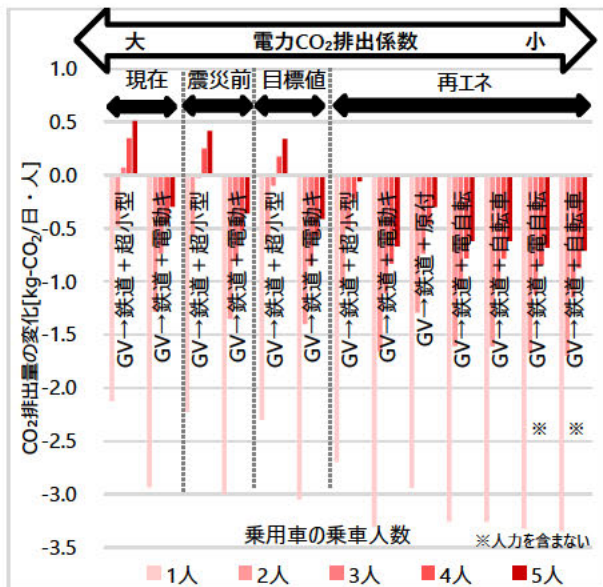


図-1.12a) GV→鉄道+パーソナルモビリティ

図-1.12b) GV→バス+パーソナルモビリティ

図-1.12 発電ケースによるCO<sub>2</sub>排出量の違い

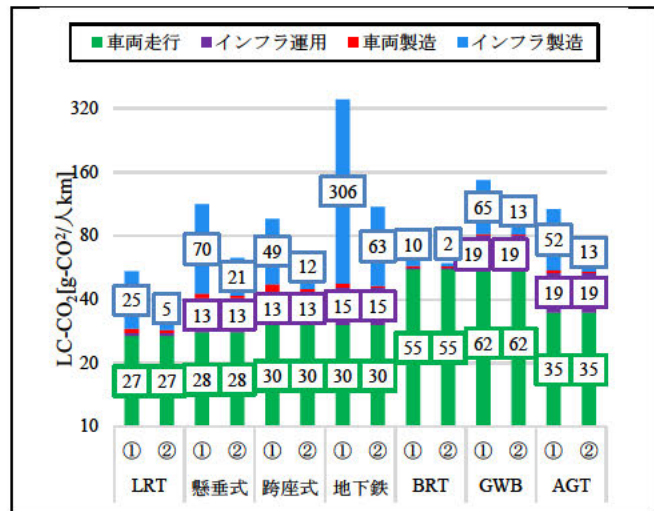
c) 発電ケースの違いによるCO<sub>2</sub>排出量評価(GV→鉄道/バス+パーソナルモビリティツール)

GVから鉄道+端末(パーソナルモビリティツール)へ転換した際の発電ケースによる違いの推計結果を図-1.12に示す。図-1.12a)に示すように、「震災前」と「目標値」の場合は乗車人数3人以下で、「再エネ」の場合にはすべてのケースで、鉄道+パーソナルモビリティツールに転換するとCO<sub>2</sub>排出量が減少することがわかる。また、HVおよびEVから鉄道+パーソナルモビリティツールに転換する場合も同様の結果がみられた。しかし、図-1.12b)に示すように、GVからバス+パーソナルモビリティツールへ転換した場合、発電ケースによるCO<sub>2</sub>排出量減少の違いは見られない。また、HV・EVからバス+パーソナルモビリティツールへ転換する場合も同様に発電ケースによるCO<sub>2</sub>排出量減少の違いは見られなかった。以上のように、発電ケースの違いによるCO<sub>2</sub>排出量削減は鉄道+パーソナルモビリティツールへ転換した場合のみ可能であることが明らかになった。乗用車から公共交通+端末へ転換する場合のCO<sub>2</sub>排出量削減効果は、

公共交通・バスの電動化や再エネなどによって高めることができる。

### ⑤中大量乗合輸送システムのCO<sub>2</sub>排出量評価

旅客輸送システムのLC-CO<sub>2</sub>排出量推計時の設定条件として、各インフラ構造物投入量は事業者へのヒアリング調査より、駅・付帯構造物などの建設間隔を取得し、10km区間での資源投入量を算出した。本研究では輸送量の少ない範囲では単線とし、輸送量の増加に伴う1[h]あたり運行間隔の減少によって、朝ラッシュ時の運行間隔が基準値以下になった場合は複線とした。運転間隔の基準値は、国内の単線の運行間隔が6～10[ $\text{min}/\text{本}$ ]程度であること考慮して10[ $\text{min}/\text{本}$ ]と設定した。混雑率においては、1日の需要量の分布を朝ラッシュ時(1h)、タラッシュ時(2h)、平常時(15h)とする。輸送量は6,000[人/day]と30,000[人/day]とした時のLC-CO<sub>2</sub>排出量結果を図-1.13に示す。輸送量が少ない場合、車両走行時およびインフラ建設時CO<sub>2</sub>排出量がLC-CO<sub>2</sub>全体において大きな割合を占めるが、輸送量が多い場合、インフラ建設時CO<sub>2</sub>排出量の占める割合は減少し、LC-CO<sub>2</sub>の大半をインフラ運用時および車両走行時CO<sub>2</sub>排出量が占める。これはインフラ投入量の増加を考慮しなければ、輸送量の増加に伴い人kmあたりインフラ建設時CO<sub>2</sub>排出量が単調減少する一方で、人kmあたりインフラ運用時及び車両走行時CO<sub>2</sub>排出量はほとんど変化しないためである。このように、各地域に乗用車からの転換による中大量乗合輸送システムの輸送量の変化(増減)を考慮した脱炭素化戦略を検討することができる。



① 輸送量：6,000[人/day]，②輸送量：30,000[人/day]

図-1.13 旅客輸送機関のLC-CO<sub>2</sub>排出量推計結果

### ⑥地域特性・車両特性を考慮したCO<sub>2</sub>排出量評価

中大量乗合輸送システムの輸送量増加に伴い、LC-CO<sub>2</sub>排出量における車両走行時CO<sub>2</sub>排出量の占める割合は増加した。そこで、車両走行時CO<sub>2</sub>排出量に影響する気候条件や勾配などの地域特性と回生や電動化などの車両特性がLC-CO<sub>2</sub>に与える影響は無視できないと考える。そこで、本章では地域特性(気温・勾配・積雪など)および車両特性(回生機能・電動化など)、発電ケース(電力CO<sub>2</sub>排出係数)の違いなどによる影響を分析する。ヒアリング調査より取得したデータを用いて各特性の影響を明らかにし、それらを考慮した場合にLC-CO<sub>2</sub>排出量の変化を分析した。うち本稿では車両特性についての結果を述べる。

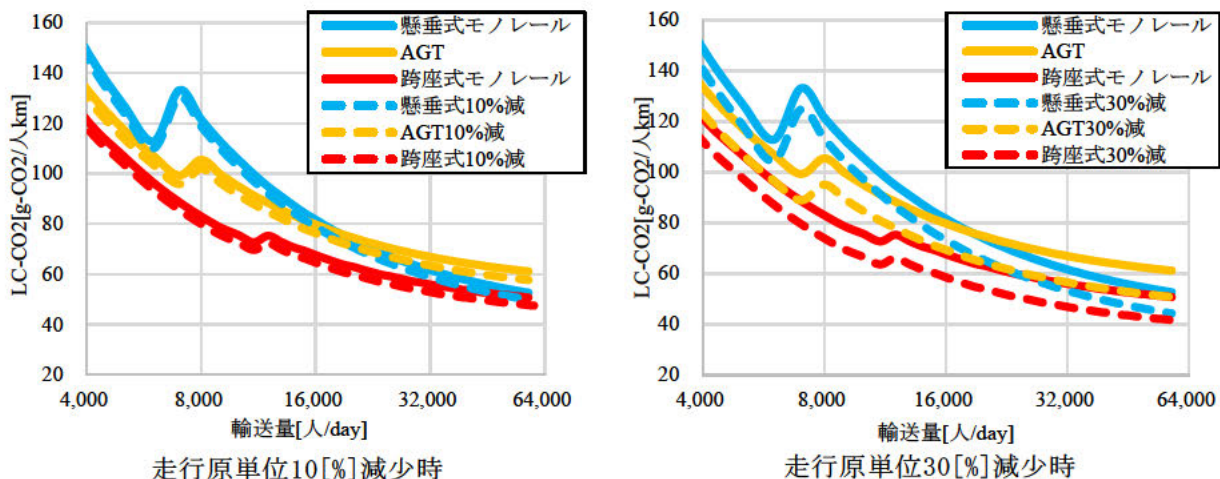
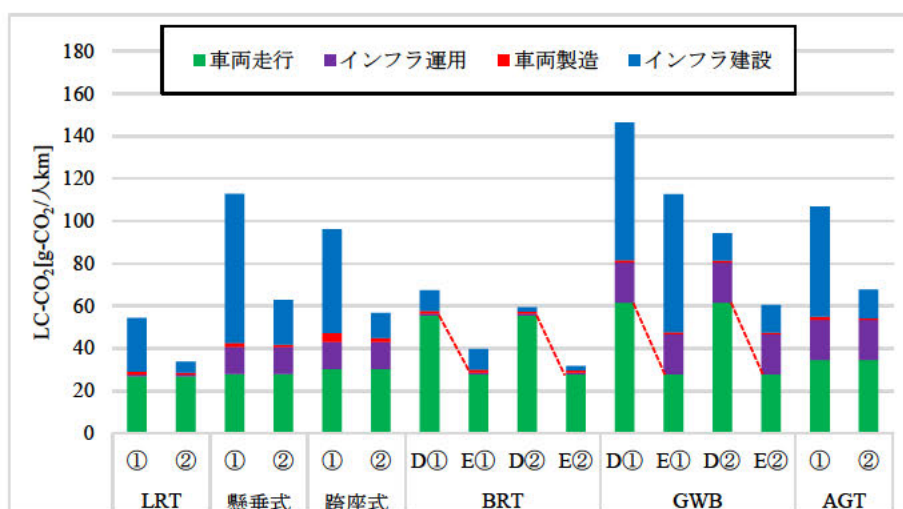


図-1.15 電車の回生機能によるLC-CO<sub>2</sub>排出量の変化



① : 輸送量 6,000 [人/day], ② : 輸送量 30,000 [人/day], D: 軽油 (Diesel), E: 電気 (Electricity)

図-1.16 動力・輸送量別のLC-CO<sub>2</sub>排出量の比較

電車の回生機能は、車両停車時のブレーキモーターの回転運動により得られた電気エネルギーを他の車両の出発時や駅照明などの電力として利用する機能である。この機能により電力消費量の抑制や走行時 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果が期待される。事業者より取得した回生率及び電力消費量データを参考に、各輸送機関の走行原単位 [kWh/台 km] が回生により 10 [%] 及び 30 [%] 減少した時の LC-CO<sub>2</sub> 排出量の変化を推計した。その結果をそれぞれ図-1.15 に示す。輸送量 6,000~60,000 [人/day] の範囲で、回生の影響により各輸送機関の走行原単位 [kWh/km] が 10 [%] 減少した場合は、導入前と比較して各輸送システムの LC-CO<sub>2</sub> 排出量が 3~9 [%] 減少した。一方、走行原単位が 30 [%] 減少した場合は、LC-CO<sub>2</sub> 排出量が 7~25 [%] 減少した。加えて、回生の有無や回生率の向上によって各輸送システムどうしの LC-CO<sub>2</sub> 排出量の大小が逆転しうることが分かった。

次いで、バス車両の電動化による LC-CO<sub>2</sub> 排出量への影響を分析する。BRT および GWB の動力が軽油 (Diesel) から電気 (Electricity) になった場合における各輸送量 (① 6,000 [人/day], ② 30,000 [人/day]) での LC-CO<sub>2</sub> 排出量を推計し、動力が軽油の場合と比較を行った。バス車両の電動化による LC-CO<sub>2</sub> 排出量の変化及び他の輸送システムと比較した結果を図-1.16 に示す。動力が軽油の場合と比較して、バス車両の電動化により輸送量が少ない場合 (6,000 [人/day]) と輸送量が多い場合 (30,000 [人/day]) において、ともに BRT・GWB の走行時 CO<sub>2</sub> 排出量は大きく減少した。電動化した場合の BRT・GWB の LC-CO<sub>2</sub> 排出量推計結果を他の輸送システムと比較すると、BRT は LRT 以下、GWB もまた AGT やモノレールとほぼ同程度か下回る

まで減少している。この結果から、バス車両の電動化は走行時CO<sub>2</sub>排出量の削減だけでなくLC-CO<sub>2</sub>排出量にも高い削減効果を及ぼすと考えられる。

#### (5) 中長期の脱炭素化（2050カーボンニュートラル）に必要な施策の方向性の検討

サブテーマ1～3で検討した「交通システム」「交通具・エネルギー・電源構成」「交通マネジメント」に関する成果を、本サブテーマで開発した、LCAに基づく交通具・インフラの低炭素性評価パッケージに組み込み、さらに「人口・都市構造」「自動車・運転免許普及状況」の中長期トレンドを踏まえ旅客輸送起源CO<sub>2</sub>排出量を都市類型別および市区町村単位で将来予測した結果も活用し、必要となる脱炭素化施策を評価する。

具体的には、2013年を基準として2030年（目標は2013年比35%削減）・2050年（目標はカーボンニュートラル）におけるなりゆきのCO<sub>2</sub>排出量を予測し、目標値との比較から算出される必要削減量を達成するために実施すべき施策をバックキャスティング(Backcasting)アプローチによって推計する。このため、全国である程度一律に普及すると考えられる、車両性能やエネルギー効率向上、電動化・再生可能エネルギー使用等によるCO<sub>2</sub>排出係数低減などに寄与する技術向上施策（本研究ではEST1<Environmentally Sustainable Transport 1>と呼ぶ）シナリオをまず検討し、さらにそれで達成できない部分について、地域別の交通施策（EST2と呼ぶ）シナリオを都市類型・市区町村ごとに検討する。ここでは特に、大きな削減効果が期待できる乗用車から中大量乗合輸送システムへの転換について、地域特性別に最もCO<sub>2</sub>削減効果の高いモードを選定し、さらに転換促進効果の高い都市域コンパクト化や端末交通手段普及を想定し、削減効果を予測し各施策の必要量を算出する。それにより、2050年カーボンニュートラルの実現可能性を検討できるようにし、自治体の交通・環境施策検討への貢献を目指す。

##### ① 地域の特性に応じた類型化

将来の旅客交通起源のCO<sub>2</sub>排出量を算出するため、本研究において乗用車の走行距離および保有台数を予測できるモデル式を構築した。その際、乗用車1台当たり走行距離と可住地人口密度との関係などについては石河ら<sup>7)</sup>を参考とした。このモデル式は都市の人口規模や地域特性に応じて値が変化する。また、市区町村の分類方法を表-1.8に示す。

表-1.8 将来予測に用いる各市区町村の分類方法

大分類	人口規模	昼間人口と夜間人口の比	小分類
大都市	70万人～	-	a.大都市
中核都市	20万人～	1.0～	b.中心都市
		～1.0	c.周辺都市
中小都市	～20万人	1.0～	d.中心都市
		～1.0	e.周辺都市
農山漁村	～1万人	-	f.農山漁村

##### ② 技術向上施策（EST1）シナリオ適用による中長期CO<sub>2</sub>排出量予測手法

旅客輸送部門における車両性能やエネルギー効率の向上を考慮するために、経済産業省の「カーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会」<sup>8)</sup>における「次世代自動車の普及目標」に従って、乗用車におけるHV・EVの普及を想定する。各年での次世代自動車の普及率の設定値を表-1.9に示す。

表-1.9 EST1 シナリオにおける次世代自動車の普及率の設定

	2030年	2050年
GV	50%	0%
HV	30%	0%
EV	20%	100%

また、経済産業省の「エネルギー基本計画の概要」<sup>9)</sup>の「2030年におけるエネルギー需給の野心的見通し」に従って、電力の電源構成の変化に伴うライフサイクルCO<sub>2</sub>排出係数（2030・2050年設定値）改善を考慮する。2050年については再エネ普及率が100[%]に到達することを想定する。また、環境省の「次世代自動車普及戦略」に従って、乗用車のライフタイムの向上（2030年：12.5年、2050年：13年）を想定する。

### ③交通施策（EST2）シナリオ適用による中長期CO<sub>2</sub>排出量予測手法

2050年のカーボンニュートラルの実現には車両やエネルギー源・電力のCO<sub>2</sub>排出係数などの技術向上に加えて、CO<sub>2</sub>排出量の削減を実現できる交通施策を適用することが有効である。本研究では、旅客輸送起源のCO<sub>2</sub>排出量の削減を実現する交通施策の導入を想定する。想定する交通施策を表-1.10に示す。

表-1.10 交通施策（EST2）シナリオの設定

施策名	施策内容
①LC-CO <sub>2</sub> が最小となる中大量乗合輸送システムへの転換	都市の幹線部を走る公共交通において、LC-CO <sub>2</sub> 排出量が最小となる中大量乗合輸送システムを導入
②「乗用車」から「中大量乗合輸送システム」+「端末（パーソナルモビリティツール）」への転換	端末交通手段の普及に伴う駅勢圏の拡大を想定した上で、圏内の乗用車保有者が「中大量乗合輸送システム+端末」へ転換
③鉄道がない都市での超小型EVの導入	鉄道がない都市において、乗用車から超小型EVへ転換

低炭素性評価モデルを用いて各輸送機関のLC-CO<sub>2</sub>排出量を算出し、その結果を比較することでLC-CO<sub>2</sub>排出量が最小となる輸送機関の選定が可能である。また、中長期において、端末交通手段（超小型EV・電動キックボードなど）の普及による駅勢圏の拡大とそれに起因する乗用車から公共交通への転換を挙げられる。そこで本研究では、駅勢圏に住む人口（以降、駅勢圏人口）の全員が乗用車から「公共交通」+「端末（パーソナルモビリティツール）」へ転換することを想定する。なお、公共交通については、施策①の適用によって選定された中大量乗合輸送システムへの転換を想定する。また、市区町村別の駅勢圏人口は、市域平均での人口密度に駅数と駅勢圏面積を乗じることで算出する。駅勢圏は駅勢圏半径Rの正円を仮定し、圏内の乗用車の保有者が公共交通へ転換することを想定する。本研究では、Rを2km範囲で分析する。施策③では、鉄道駅が存在していない地域は中長期において乗用車から一人乗りの超小型EVへ転換することを想定した上で、転換時のCO<sub>2</sub>排出量変化を分析する。以上の①～③の施策を適用するシナリオを交通施策（EST2）シナリオとし公共交通需要量の予測を行い、全国の都市類型別CO<sub>2</sub>排出量の評価を行った。

### ④LC-CO<sub>2</sub>最小となる輸送機関選定結果

2050年において、表-1.8(小分類)でLC-CO<sub>2</sub>排出量が最小となる中大量乗合輸送システムを選定した。その結果を表-1.11に示す。

表-1.11 交通施策（EST2）シナリオの設定 ※個数

小分類	都市数				
	鉄道駅の有無		LRT	BRT	その他
a. 大都市	有	23	23	0	1
b. 中核・中心都市	有	53	53	0	4
c. 中核・周辺都市	有	55	55	0	1
d. 中小・中心都市	有	242	239	3	—
	無	54	—	—	—
e. 中小・周辺都市	有	672	669	3	—
	無	120	—	—	—
f. 農産漁村	有	224	203	21	—
	無	295	—	—	—

分類ごとにLC-CO<sub>2</sub>排出量が最小となる中大量乗合輸送システムを選定したところ、大都市や中核都市ではLRTが最小だが、一部の中小都市や農山漁村ではBRTが最小となることが分かる。そのため、CO<sub>2</sub>排出量削減には都市規模・類型別（小分類）で選定された輸送機関の導入が有効である。

① 各シナリオ適用による中長期CO<sub>2</sub>排出量予測と、目標値との比較

表-1.12 EST1 シナリオ適用時の旅客交通 CO<sub>2</sub> 排出量の算出結果

年	シナリオ	乗用車	鉄道	バス	合計	2013 年比
		[t-CO <sub>2</sub> /年]				
2019	-	9.51×10 <sup>7</sup>	8.80×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	1.08×10 <sup>8</sup>	88.4%
2030	EST1	6.15×10 <sup>7</sup>	5.22×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	7.12×10 <sup>7</sup>	58.1%
2050	EST1	2.35×10 <sup>7</sup>	8.84×10 <sup>5</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	2.88×10 <sup>7</sup>	23.5%

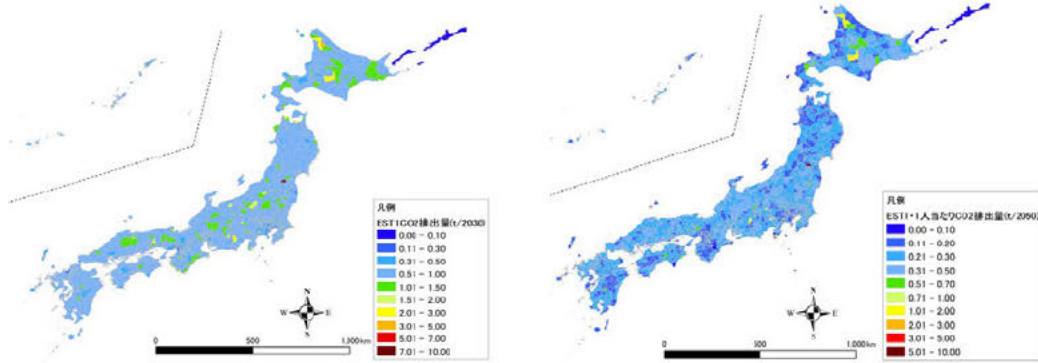


図-1.17 一人当たり旅客輸送起源の CO<sub>2</sub> 排出量予測結果 (EST1) (左 2030 年, 右 2050 年)

表-1.13 EST1+EST2 施策シナリオ適用後 (EST3) の旅客交通 CO<sub>2</sub> 排出量の算出結果

年	シナリオ	駅勢圏半径 [m]	乗用車	鉄道	バス	合計	2013 年比
			[t-CO <sub>2</sub> /年]				
2030	EST3	500	5.19×10 <sup>7</sup>	7.00×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	6.34×10 <sup>8</sup>	51.7%
		1000	4.13×10 <sup>7</sup>	1.29×10 <sup>7</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	5.87×10 <sup>7</sup>	47.9%
		1500	3.15×10 <sup>7</sup>	1.67×10 <sup>7</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	5.26×10 <sup>7</sup>	42.9%
		2000	2.43×10 <sup>7</sup>	1.89×10 <sup>7</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	4.76×10 <sup>7</sup>	38.9%
2050	EST3	500	2.10×10 <sup>7</sup>	9.42×10 <sup>5</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	2.64×10 <sup>8</sup>	21.5%
		1000	1.71×10 <sup>7</sup>	1.74×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	2.32×10 <sup>7</sup>	19.0%
		1500	1.35×10 <sup>7</sup>	2.21×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	2.02×10 <sup>7</sup>	16.5%
		2000	1.10×10 <sup>7</sup>	2.50×10 <sup>6</sup>	4.43×10 <sup>6</sup>	1.80×10 <sup>7</sup>	14.7%

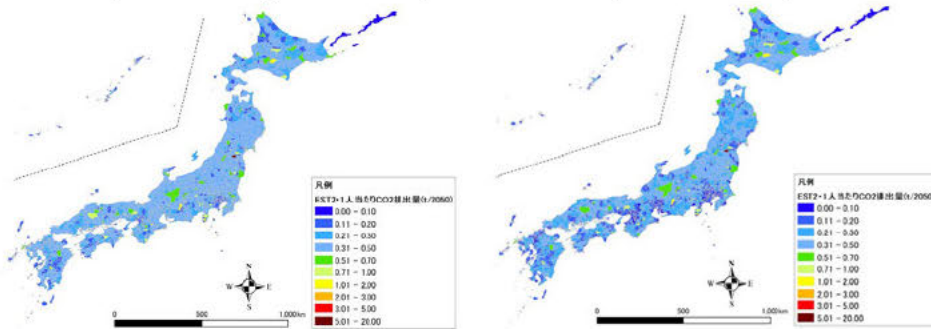


図-1.18 一人当たり旅客交通 CO<sub>2</sub> 排出量 (2050 年 EST3) (左 R500m, 右 R2000m)

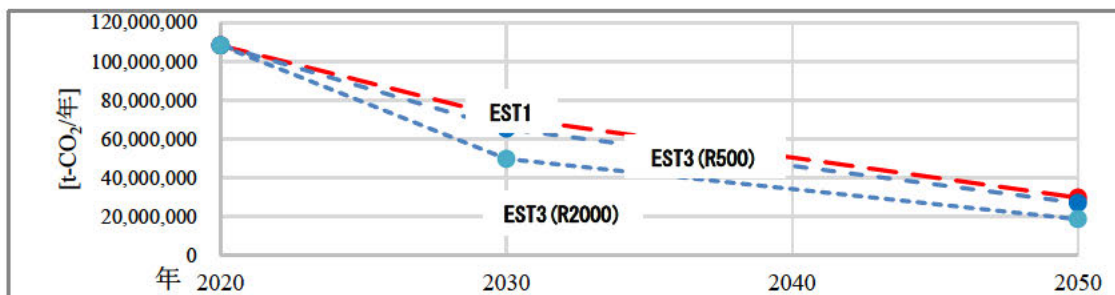


図-1.19 シナリオごとの中長期 CO<sub>2</sub> 排出量の算出結果



EST1 と EST2 シナリオに基づいて、中長期の旅客輸送起源の CO<sub>2</sub> 排出量を予測した。まず、EST1 シナリオ適用後の結果を表-1.12 と図-1.17 に示す。EST1 シナリオの適用により、2030 年・2050 年における旅客輸送起源の CO<sub>2</sub> 排出量は 2013 年比でそれぞれ 41.9%、76.5%削減することが示される。つまり HV・EV の普及および電力の CO<sub>2</sub> 排出係数の改善により 2030 年の CO<sub>2</sub> 排出量削減目標値を達成できることを示している。次に、EST2 シナリオの適用時の 2050 年の結果を図-1.18 に、駅勢圏半径の違いによる CO<sub>2</sub> 排出量の変化を表-1.13 に示す。また、シナリオごとの CO<sub>2</sub> 排出量の算出結果を図-1.19 に示す。EST1 に加え EST2 も適用した場合（これを EST3 とする）、2050 年の旅客交通起源の CO<sub>2</sub> 排出量は 2013 年比で最大で 85.3%削減できることがわかる。

#### (6) 2050 年カーボンニュートラルを実現するための環境・交通施策の検討

本研究の環境・交通施策の検討手法を用いることで、幹線（中大量乗合輸送システム）・端末交通（新しいパーソナルモビリティツール）導入による旅客交通 CO<sub>2</sub> 排出量削減効果を、交通需要（輸送量）や人口・都市構造などを考慮して評価できる。これは、新しいモビリティツールの開発者や、それを導入する自治体の環境・交通施策検討の際の活用、国などによる交通システムの低炭素性評価に関する情報公開や審査への活用を念頭に置いている。

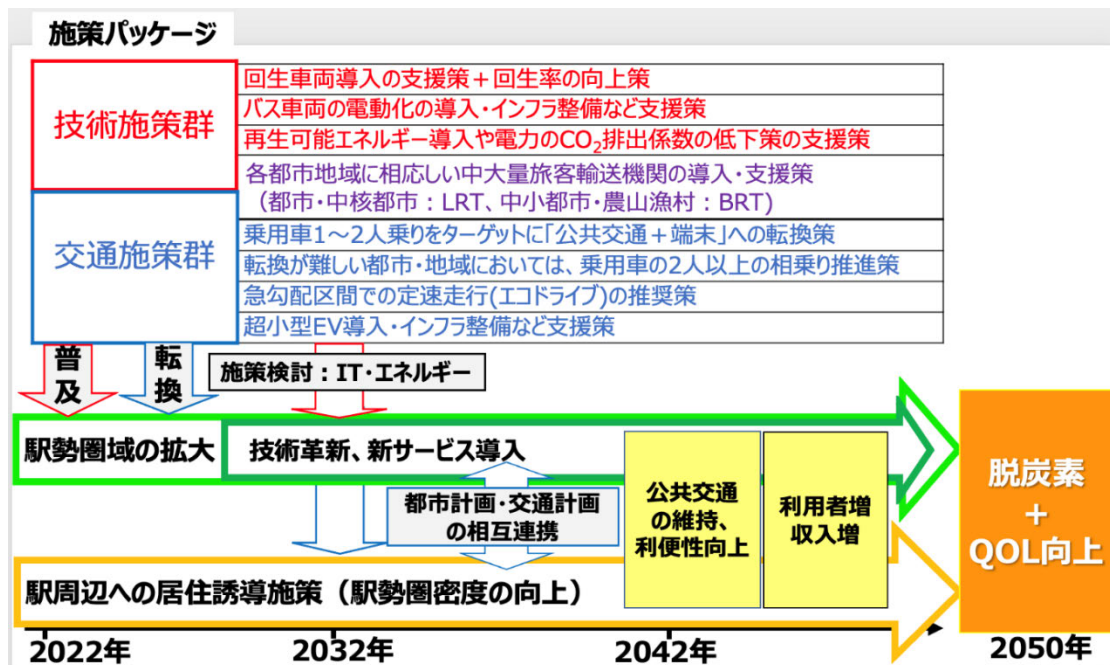


図-1.20 旅客交通サービスの脱炭素化を実現するための施策パッケージ例

本研究では、図-1.20 に示すように、交通部門の脱炭素化実現に向けて、車両技術の向上（EST1）と交通施策（端末交通の整備による駅勢圏の拡大）の実施（EST2）による脱炭素効果を示した。これらは、特に鉄道などの幹線が十分に整備されている都市において有効である。

一方で、幹線が十分に発達しておらず不便な地域では、端末交通の整備が駅勢圏の拡大につながらない場合もある。そこで、幹線交通の利便性の向上や、立地適正化計画等に基づく駅徒歩圏内の居住密度を増加させるといった施策により幹線利用を促進すべきである。著者らは、これらの利用者コストや利便性の変化、都市構造の変化による利用者数の変化も同時に試算可能な手法も合わせて提供しており、本研究での低炭素性評価との併用が可能である。

ただし、これら都市計画に関する施策の実施は、20~30年と長期間を要する。その間、公共交通のプレゼンスを高め、利用者数を維持・増加させていく必要がある。本研究で扱った端末交通普及策は、短期間での実施が可能であり、公共交通利用増加によって駅周辺の魅力を高めることで都市計画の実現に寄与するという意味で、中長期的な施策につながっていく非常に有用な施策と言える。加えて、短期的

に幹線の利用者の増加につながることで、利用者数及び事業者収入の維持につながり、幹線交通を維持することにも寄与する。

実際に都市計画策定の際には、本研究で構築した評価手法を用いて、端末交通整備などの交通施策やエネルギー・ITに関する新技術導入施策の中でより効果的なものを実施していきながら、並行して都市計画からのアプローチを進めることが重要である。これにより、少子高齢化などの長期的な社会変化により駅圏内の人口減少が見込まれる中でも、公共交通の利用を増加させ、移動に関する脱炭素と QOL 向上を同時に実現する交通システムを構築できる。

## (7) その他

その他、テレワーク普及による交通需要の変化を考慮した評価手法の構築に加え、各都市・地域の中長期的なCO<sub>2</sub>排出量削減目標を達成していくための支援ツールおよび脱炭素性認証制度を提案した。

### a) テレワーク普及による交通需要の変化を考慮したCO<sub>2</sub>排出量評価手法

COVID-19禍でのテレワーク普及により、通勤・通学でのCO<sub>2</sub>排出量減少と同時に、家庭部門からの排出増加が見込まれるなど、人々の生活におけるCO<sub>2</sub>排出構造の変化が考えられる。このような近年のライフスタイルの変容に起因するCO<sub>2</sub>排出量の変化を評価可能な手法を構築した。本手法は、在宅勤務だけでなく、テレワークを活用した地方移住前後でのCO<sub>2</sub>排出量の変化も評価可能である。これにより、居住誘導による中長期的なCO<sub>2</sub>削減効果を、近年のライフスタイルの変化を踏まえて評価できる。

### b) 次世代交通システム導入・検討のためのCO<sub>2</sub>排出量簡易評価手法の構築および実装

各都市・地域的特性を考慮しつつ新モビリティツールを導入する際には、低炭素化するといえるかどうかを客観的・定量的に判断し簡便に評価できる手法を構築し、政策サマリー1に提案した。ここでは、地域特性・交通需要や公共交通の転換などを考慮でき、導入によって変化する要因を「確実に生じるもの」と「不確実なもの」に分け、交通システムのライフサイクルの各段階でのCO<sub>2</sub>排出量の変化を把握できるものとしている。これを用いると利用者数（需要）などの地域交通特性に応じて低炭素化効果を把握・比較できる。

### c) 「脱炭素交通サービス」認証制度の提案

モビリティサービス導入・改良に関して様々なステークホルダーが得ることができる「脱炭素交通サービス」認証制度を構築した。

そのため、日本の様々な都市で展開されているあらゆるモビリティサービス（鉄道やバスなどの公共交通から、シェアリングやオンデマンドサービスまで）を対象に、毎年のCO<sub>2</sub>排出量を、事業者が有しているデータから算出する手法を開発した（図-1.21）。これにより、これまで努力指標に依存していた評価から、客観的にサービス間や事業者間の環境面での優劣を評価することが可能となる。補助要件や投資家へのPRにも活用でき、国際展開も可能である。

具体的な手法としては、認証を希望するサービス（サービス別、都市別）ごとに、製造（車体インフラ）、運行（走行・運用）、維持管理ごとにバウンダリを設定し、事業者の有する資産台帳、営業データ、費用から、その年のCO<sub>2</sub>排出原単位及び削減量を算出する。都市ごとに算出することが可能であり、また経年的な変化もとらえることができる（図-1.22）。

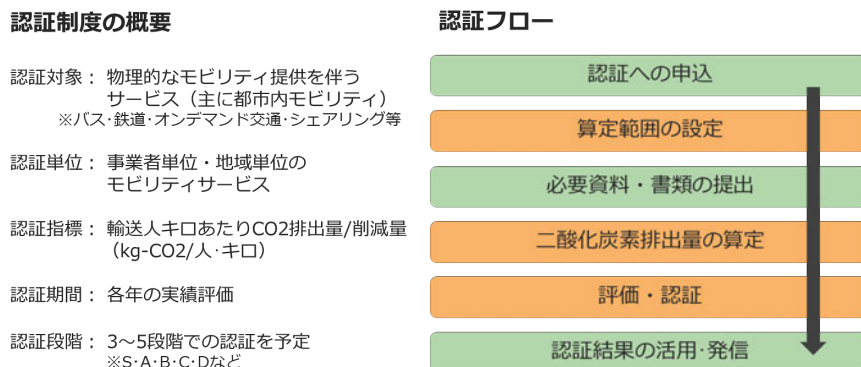


図-1.21 認証制度の仕組みの概要

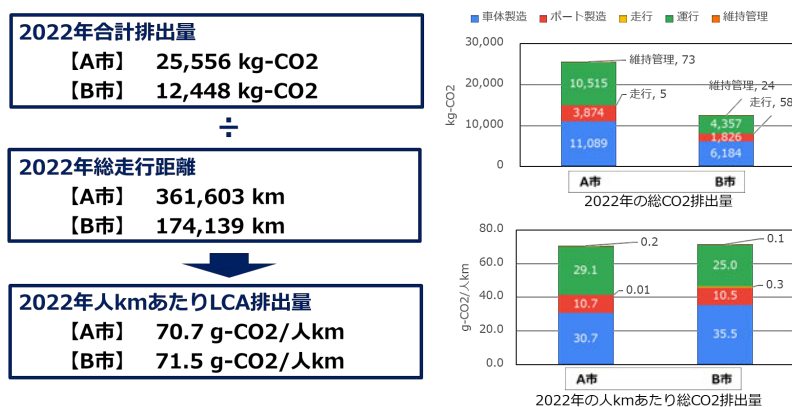


図-1.22 実際のシェアサイクル事業を対象とした適用事例

## 5. 研究目標の達成状況

モビリティ革命における次世代モビリティ技術・サービスの主要項目を抽出して内容を整理し、その上、プロセスツリーを構築してCO<sub>2</sub>排出構造を定式化するとともに、CO<sub>2</sub>排出量変動要因を明確化することで、目標どおり交通システムの低炭素性評価手法を構築できた。これを用いて、国・自治体や企業等が環境や交通部門の各施策に活用できるように、乗用車から公共交通+端末（パーソナルモビリティツール）への転換および地域特性および車両特性を考慮した中量輸送機関の輸送量変化によるCO<sub>2</sub>排出量を推計・分析し、CO<sub>2</sub>大幅削減のための乗用車から公共交通+端末（パーソナルモビリティツール）への転換を誘導できる施策を提案した（政策サマリー1）。さらに、都市類型別にCO<sub>2</sub>排出量が最小となる中大量乗合輸送システムの選定を行い、最後には各サブテーマの研究成果などを取りまとめ、日本全国都市の市区町村別にカーボンニュートラル達成に必要な技術・交通施策を提案（脱炭素化施策パッケージ）することを可能とした。

その他、計画以上の成果として、上記の4(7)に示すように、自治体・交通事業者が新しい交通システムを導入するときにCO<sub>2</sub>排出量を簡便に評価できるツール（エクセルシート）を開発した（政策サマリー2）。また、ライフサイクルの各段階において交通事業者等が活用できる「脱炭素交通サービス」認証制度の構築・提案を行った（政策サマリー3）。

## 6. 引用文献

- 1) 長田基広, 渡辺由紀子, 柴原尚希, 加藤博和: 土木計画学研究・論文集、23巻, pp. 355-363(2006), LCAを適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価
- 2) 渡辺由紀子, 長田基広, 加藤博和: 第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, pp. 90-91(2006), 波及効果を考慮したLRTシステム導入の環境負荷評価
- 3) 森本涼子, 伊藤圭, 山本充洋, 加藤博和, 柴原尚希: 土木学会論文集D3、68巻, 5号, pp. I\_285-I\_290(2012), 都市内旅客交通手段のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量比較
- 4) 伊藤圭, 加藤博和, 柴原尚希: 地球環境研究論文集、18巻, pp. 37-43(2010), 乗車人数を考慮した地域内旅客輸送機関のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量比較
- 5) 国土交通省: 鉄道統計年報平成29年度版, [https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk2\\_000050.html](https://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000050.html) (最終閲覧日2023年5月10日)
- 6) 国土交通省: 数字でみる自動車(2019), [https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha\\_fr1\\_000045.html](https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000045.html) (最終閲覧日2023年5月10日)
- 7) カーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会, <https://www.meti.go.jp/press/2020/03/20210309005/20210309005-1.pdf> (最終閲覧日2023年5月10日)
- 8) 経済産業省: エネルギー基本計画の概要(2021), [https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20211022\\_02.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_02.pdf) (最終閲覧日2023年5月10日)

## II-2 交通具・エネルギーに関する新技術の低炭素性評価

早稲田大学

理工学術院 教授 紙屋雄史

理工学術院 講師 楊イ翔

スマート社会技術融合研究機構 研究院客員准教授 井原雄人

### 【要旨】

これまでの車両電動化による低炭素性の評価は、車両単体の性能評価が中心となっていたため、需要に合わせた車格や走行パターンといった特性が考慮されておらず、自治体や交通事業者が導入を検討する際の阻害要因となっていた。また、電動化した際の低炭素性を評価する上では、供給される電力の発電構成を踏まえたCO<sub>2</sub>排出係数を考慮することも重要となる。

これに対して本研究では、最初に電動車両に対して供給される電力の発電構成を地域および時間帯別に分析することで、一般送配電事業者ごとの時間帯別CO<sub>2</sub>排出係数の把握を行った。地域により排出係数は異なるが、再生可能エネルギーでの発電が多くなる昼間に減少する傾向があった。特に、太陽光発電の割合が高い九州電力ではその傾向が顕著であり、昼間における減少率が最大51%となることが分かった。一方で、原子力発電が稼働しており夜間の排出係数も低い関西電力では、減少率が20%程度と小さく、発電構成による差異が大きいことが把握された。

次に、電動車両の電費に与える要素として車両総重量に着目し、電動バス（22車種）、GSM（6車種）、超小型モビリティ（8車種）、電動キックボード（6車種）に加え、研究期間内に急速に販売の進んだ乗用車タイプの148車種を加えて、合計190車種を対象に電費と車両総重量の相関を調査したところ、 $R^2=0.893$ の高い相関式が得られた。

また、走行パターンが電費に与える影響として車速と勾配に着目し、自治体や交通事業者の入手難易度ごとに、3種類の予測手法を導出した。

- 低精度予測：平坦路における定速走行と仮定し、運行ダイヤおよび運行ルート走行距離から、平均速度を算出して予測を行う。（平均誤差 43%）
- 中精度予測：平坦路における三角波走行と仮定し、低精度予測に加え、運行ルート上のバス停発停車回数と停車時間から、加速・減速・停車を考慮して予測を行う。（平均誤差 9%）
- 高精度予測：勾配路における三角波走行と仮定し、中精度予測に加え、運行ルート上の獲得標高から、道路勾配情報を考慮して予測を行う。（平均誤差 3%）

最後に、これらの分析結果を組み合わせ、定時定路線で運用される車両において、低炭素性が最大となる充電パターンを構築し、さらにそれに掛かる電力コストの分析を行った。

稼働状況の把握には、オープンデータとして公開されているGTFS-JP/RT<sup>1)</sup>を活用し、車両の稼働状況を実車、回送、営業所での停車、停留所での停車に分類し、昼間を含め営業所での停車時間を充電に活用可能な時間とした。

充電パターンは1日の仕業終了後の夜間に充電する「夜間充電」と昼間に営業所に帰庫するごとに充電する「成行充電」の2種類を構築した。成行充電は夜間充電と比較し、昼間の充電において再生可能エネルギーを有効に利用することが可能となるため、4.6% (435[kg-CO<sub>2</sub>/日])のCO<sub>2</sub>削減効果が得られることを把握した。

一方で、成行充電はCO<sub>2</sub>削減効果としては優れるが、安価な夜間料金の電力が使用できなくなる。そこで、業務用季時別料金を用いた際のエネルギーコストについて各充電パターンを比較したところ、夜間充電と成行充電では12,800[円/日]の差異があることが分かった。これは、CO<sub>2</sub>削減に掛かるコストに換算すると29,400[円/t-CO<sub>2</sub>]となることから、現状の電源構成や契約形態では、既存のJ-クレジットなどの制度との乖離があるため、今後の一層の再生可能エネルギーの導入促進やそれらを積極的に利用することに対するインセンティブ等の導入が必要であることが示唆された。

## 1. 研究開発目的

運輸部門における脱炭素を進めるために車両の電動化は有効な手段であるが、その評価においては車格（車両総重量）や走行パターン（車速や勾配）といった、実際の需要に合わせた評価がなされていなかった。また、従来の内燃機関自動車に投入されるガソリンや軽油等のCO<sub>2</sub>排出係数は利用する地域や時間に限らず一定であるのに対し、電動車両に投入される電気は地域ごとの発電手段や発電時間帯によってCO<sub>2</sub>排出係数が変化する。これらにより、実際に電動車両の導入を行う自治体や交通事業者は、導入効果を適切に把握することができず、導入に向けての補助や投資の意思決定が困難となっていることが、電動車両の普及促進に対する阻害要因となっているという背景がある。これに対して本研究では、地域の需要に合わせた車格、走行パターンおよび充電パターン等を考慮した評価手法を構築し、それらの評価結果を活用することで、電動車両の導入促進に資することを目的とする。

## 2. 研究目標

今後の電源構成の変化を踏まえた排出原単位を導入し、WtoW 評価を行うことを通して、電動車両および新モビリティの低炭素性評価手法を整備する。

## 3. 研究開発内容

### (1) 電源構成の変化を踏まえたCO<sub>2</sub>排出原単位の把握

一般送配電事業者（北海道電力ネットワーク株式会社／東北電力ネットワーク株式会社／東京電力パワーグリッド株式会社／中部電力パワーグリッド株式会社／北陸電力送配電株式会社／関西電力送配電株式会社／中国電力ネットワーク株式会社／四国電力送配電株式会社／九州電力送配電株式会社／沖縄電力株式会社）の電源構成を把握するため電力広域的運営推進機関により公表されている電力需給実績を取得した。

電力需給実績は、原子力／火力／水力／地熱／バイオマス／太陽光／風力／揚水／連系線の9種類の発電量を1時間ごとに取得し、この時間帯ごとの発電量に対して、電力中央研究所により算出されている、ライフサイクルCO<sub>2</sub>による発電手法ごとの排出係数の値<sup>1)</sup>を適用することで、分析を行った。なお、火力発電に関しては発電に用いる燃料（石炭、石油、LNG）によりライフサイクルCO<sub>2</sub>の値が異なるため、一般送配電事業者ごとに発電割合を考慮した値とした。

以上を踏まえて、本研究の分析において用いるCO<sub>2</sub>排出係数を表-2.1に示す。

表-2.1 分析に用いるCO<sub>2</sub>排出係数

発電手段	CO <sub>2</sub> 排出係数[kg-CO <sub>2</sub> /kWh]
原子力	0.019
火力	北海道 0.851；東北 0.782；東京 0.686；中部 0.686；北陸 0.876； 関西 0.701；中国 0.816；四国 0.851；九州 0.848；沖縄 0.853
水力	0.011
地熱	0.013
バイオマス	0.023
太陽光	0.055
風力	0.026
揚水	0.474
連系線	0.463

なお、揚水発電においては、電力供給が行われる需給実績が正の値（発電量＞揚水動力量）の場合、揚水動力と発電のそれぞれに伴うCO<sub>2</sub>排出量を、各発電技術の平均排出係数と水力発電の排出係数の和よりそれぞれ換算する。連系線からの供給は発電手段が特定できないため、隣接する一般送配電事業者の該当時間におけるCO<sub>2</sub>排出係数の平均値を、CO<sub>2</sub>排出量に換算することとした。

この値を一般送配電事業者ごとの時間帯別発電構成に乗ずることで、時間帯別CO<sub>2</sub>排出係数を推計し

たものを図-2.1 に示す。

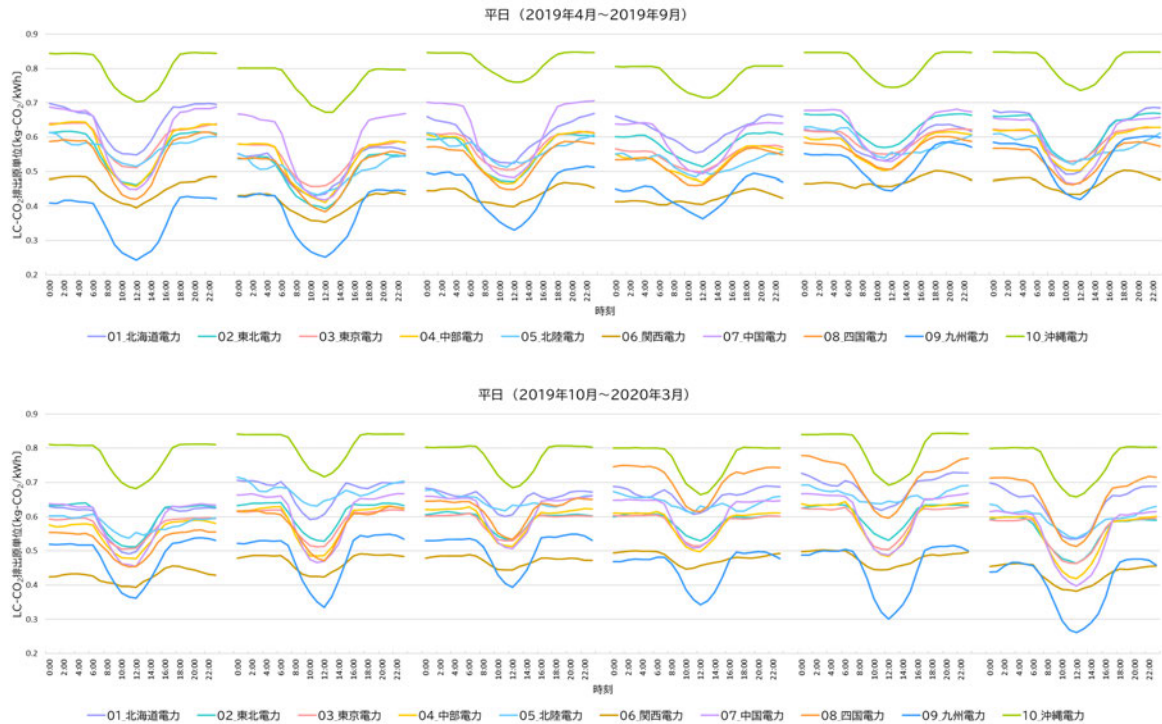


図-2.1 月別・事業者別の時間帯別 CO<sub>2</sub> 排出係数

地域によって発電構成の差異により排出係数そのものは異なるが、時間帯別ではいずれの地域においても、再生可能エネルギーによる発電が多くなる昼間において CO<sub>2</sub> 排出係数は減少する傾向がある。特に、太陽光発電の割合が多い九州電力ではその傾向が顕著であり、昼間における減少率が最大 51% となることが分かった。一方で、原子力発電が稼働しており、夜間の排出係数も低い関西電力では、減少率は 20% 程度と小さくなることが分かった。

また、九州電力のような太陽光発電の出力抑制が行われた地域において、出力抑制が行われた場合と、出力抑制対象となった発電量が有効に活用された場合の排出係数の比較を図-2.2 に示す。

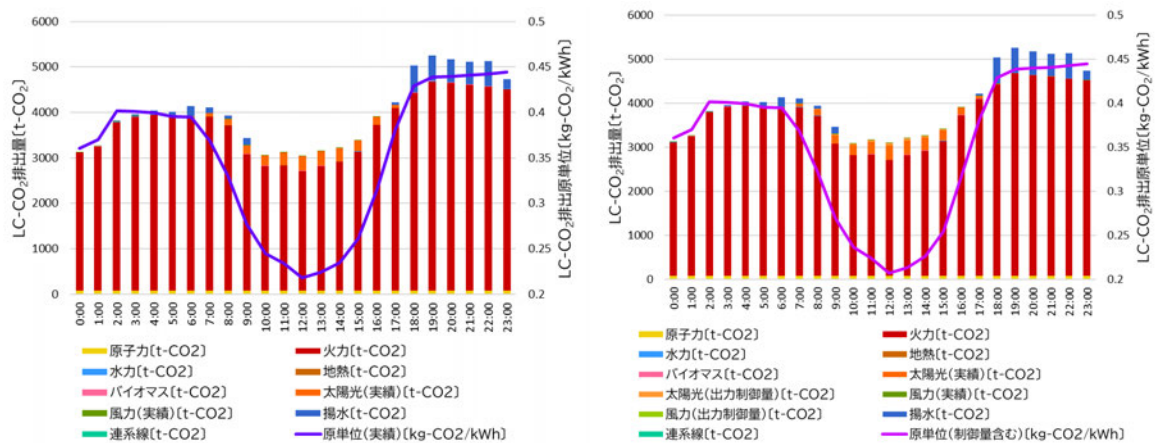


図-2.2 出力抑制に伴う CO<sub>2</sub> 排出係数の変化 (左: 抑制なし、右: 抑制あり)

太陽光発電の出力抑制によって、昼間と夜間の CO<sub>2</sub> 排出係数の差異は 51% から 54% に拡大することが分かった。出力抑制は九州電力から始まったが、2022 年度には他の地域でも同様の措置が取られるようになっており、今後の再生可能エネルギーの導入が進む段階では、考慮すべき項目となり得る。

以上を踏まえて、地域ごとの電力需要の変動パターンの類似性を図-2.3 に整理した。

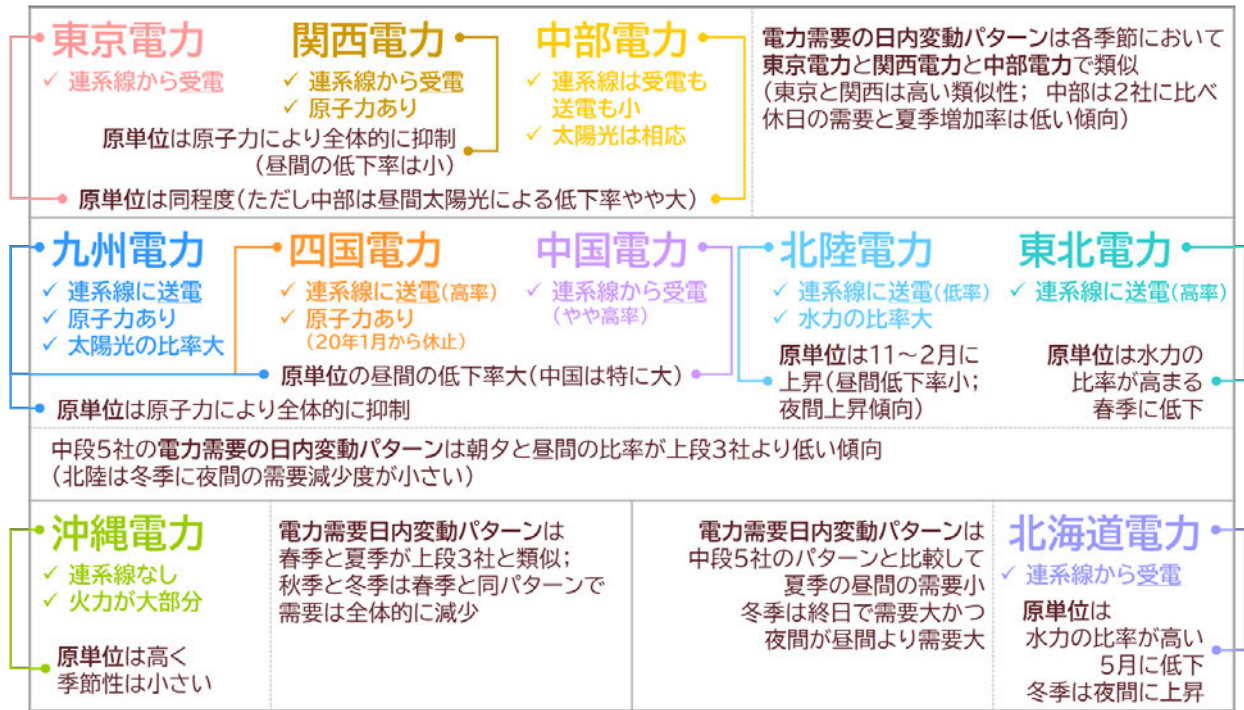


図-2.3 電力需要の変動パターンの類似性

電力需要の日内変動パターンから、東京電力・関西電力・中部電力の3社には各季節において類似性が確認できる。また、九州電力・四国電力・中国電力・東北電力・北陸電力の5社にも一定の類似性が確認され、この記載順に段階的な差異が示唆される。北海道電力には北陸電力や東北電力との共通性が確認される一方で独自の特徴が存在する。沖縄電力には東京電力・関西電力・中部電力との類似性が確認される一方で独自の特徴が存在する。

#### A. 東京電力・関西電力・中部電力

- 夏季に電力需要が大きく増加する。日内変動では午前中の増加率が大きく昼間に最大となる。
- 春季と秋季は電力需要とその日内変動が同程度である。
- 冬季にも電力需要が増加する。日内変動では朝と夕に最大となる。

#### B. 九州電力・四国電力・中国電力・東北電力・北陸電力

- Aグループ3社と比較すると、日内変動において未明～早朝にも一定の電力需要が存在する。
- 夏季に電力需要が増加する。日内変動では昼間に最大となる。(Aと類似)
- 冬季に電力需要が増加する。日内変動では朝と夕に最大となる。(Aと類似)
- 冬季において東北電力と北陸電力(特に北陸電力)は夜間も需要が大きい。

#### C. 北海道電力

- 日内変動において未明～早朝にも一定の電力需要が存在する。(Bと類似)。
- 夏季に電力需要が増加する。日内変動では昼間に最大となる。(ABと類似するが、昼間の需要は低い)
- 冬季に電力需要が増加する。日内変動では朝と夕に最大となり、夜間も需要が大きい。(Bと類似するが、夜間需要が大きい)

#### D. 沖縄電力

- 夏季に電力需要が大きく増加する。日内変動では午前中の増加率が大きく昼間に最大となる。(Aと類似)
- 春季と秋季は電力需要とその日内変動が同程度である。(Aと類似)
- 冬季も電力需要とその日内変動が春季・秋季と同程度である。

### (2) 走行パターンを踏まえた電動車両および新モビリティの電費の把握

これまで電動車両の低炭素性の評価は、バスや超小型モビリティといった大まかな車両区分ごとに一律のエネルギー消費率(電費)を用いて推計するものが多かった。そのため、例えば電動バスでは、小型のコミュニティバスと大型の路線バスで同じ値が使用されてしまい、実態と異なる評価となっていた。

そこで本研究では、電動バス(22車種30路線)、GSM(6車種21路線)、超小型モビリティ(8車種11地区)、電動キックボード(6車種12地区)を網羅的に調査することで、車格の異なる電動車両の低炭素性評価を行うための電費データの収集を行った。

## (2) - 1 車両総重量と電費の相関の把握

まず、車両走行時の電費に影響を与える要素として考えられるのは重量である。車両重量の大きい車両を走行させる場合、必要となる運動エネルギーが大きくなるため電費は悪化する。また、多くの人が乗り合う可能性のある車両では、車両重量の他に乗客の重量を含め、車両総重量(車両重量+乗車定員一人当たり55kg)を考慮する必要がある。そのため、取得された車両の電費と車両総重量の相関について分析を行うこととした。

図-2.4に示すのは車種ごとの電費と車両総重量の相関である。何れの車種においても車両総重量が増加するほど電費が悪化する形で相関が得られた。車格が小さくなるほど車両重量が減少するため、車両総重量に占める乗客の重量が占める割合が大きくなる。特に一人乗りが想定される電動キックボードでは、車両重量が10-20kg程度のあるのに対して、乗車定員1名分の55kgの重量が加算される。そのため、実電費の取得時に乗客が異なった場合、電費のバラツキが大きくなる傾向がみられた。

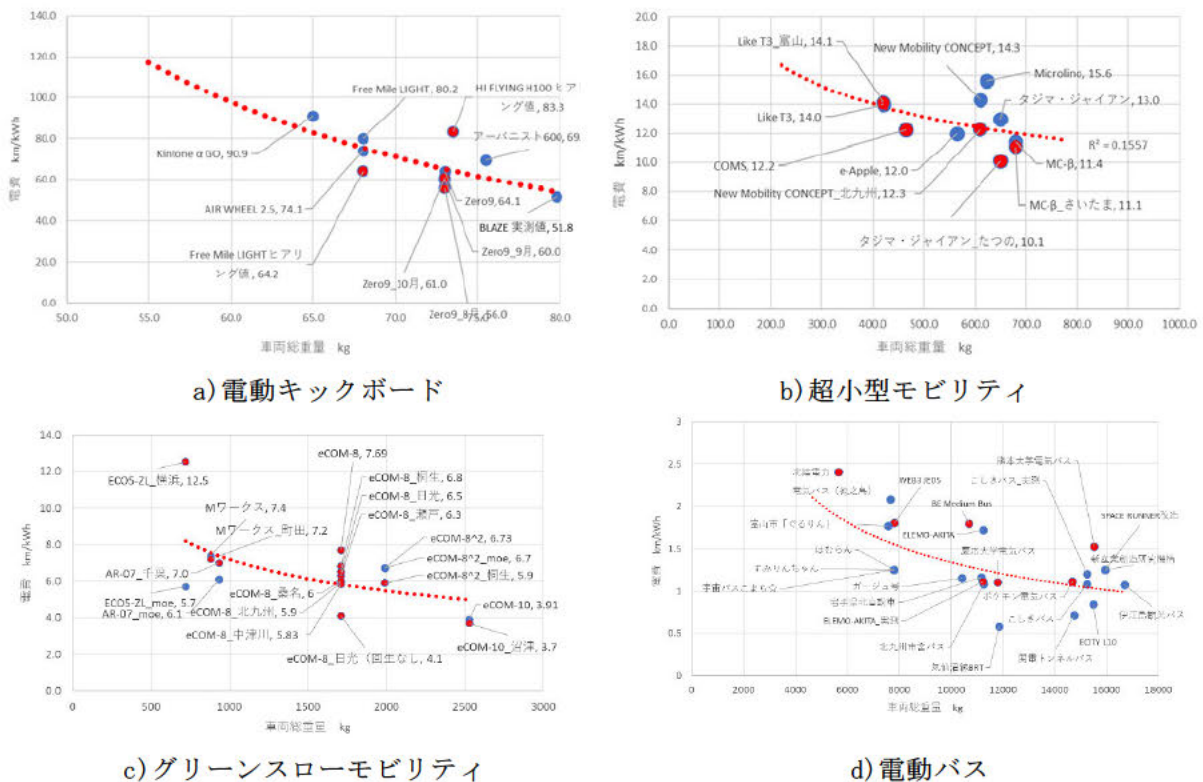


図-2.4 車種ごとの電費と車両総重量の相関

また研究期間中において、世界的な脱炭素への関心の高まりに呼応し、各自動車メーカーでは乗用車タイプの電動車両の販売が急速に進んだ。そこで、研究当初に想定した上記の車種だけでなく、市販された乗用車タイプの電動車両の電費についても調査することとした。なお、乗用車タイプの調査では、対象車両が膨大となるため実電費の追加取得が困難であることから、実電費に類似すると考えられているWLTCモードでの測定値が公開されている車両を対象に調査した。対象となった乗用車148車種の電費と車両総重量の相関を図-2.5に、本研究で対象とした全190車種の相関を図-2.6に示す。



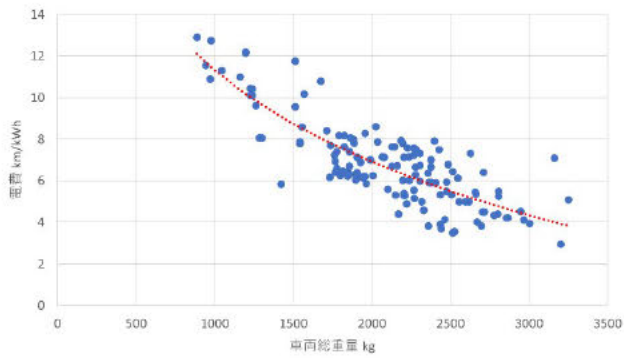


図-2.5 乗用車の電費と車両総重量の相関

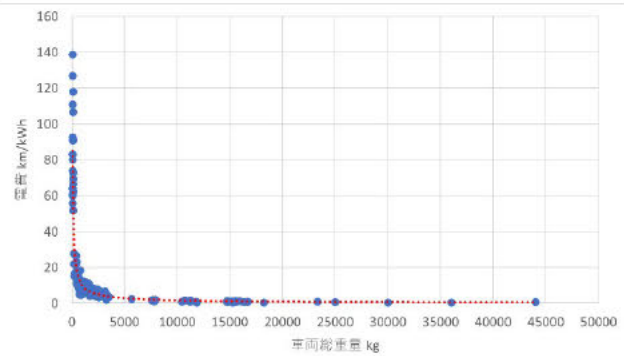


図-2.6 全車種の電費と車両総重量の相関

取得された全車種の車両総重量と電費について分析した結果、電費=y、車両総重量=xとした場合において、 $y=2076.5x^{-0.773}$ の式で表され、取得された全車種に対して $R^2=0.893$ の高い相関が得られた。

## (2) - 2 走行パターンを踏まえた簡易電費予測手法の構築

次に、車両走行時の電費に影響を与える要素としては、車両の走行パターンが考えられる。そこで走行パターンの中で車速および勾配に着目し、簡易電費予測手法の構築を行った。

車両走行時のエネルギー消費は、空気抵抗+転がり抵抗+ブレーキ消費+補機類消費によって推計することができる。しかし、これらのデータは難解であり、導入しようとする自治体や交通事業者が独自に推計することは困難である。そこで自治体や交通事業者の入手難易度ごとに、以下の図-2.7に示す3種類の予測手法を構築した。

- 低精度予測：平坦路における定速走行と仮定し、運行ダイヤおよび運行ルート走行距離から、平均速度を算出して予測を行う。
- 中精度予測：平坦路における三角波走行と仮定し、低精度予測に加え、運行ルート上のバス停発停車回数と停車時間から、加速・減速・停車を考慮して予測を行う。
- 高精度予測：勾配路における三角波走行と仮定し、中精度予測に加え、運行ルート上の獲得標高から、道路勾配情報を考慮して予測を行う。

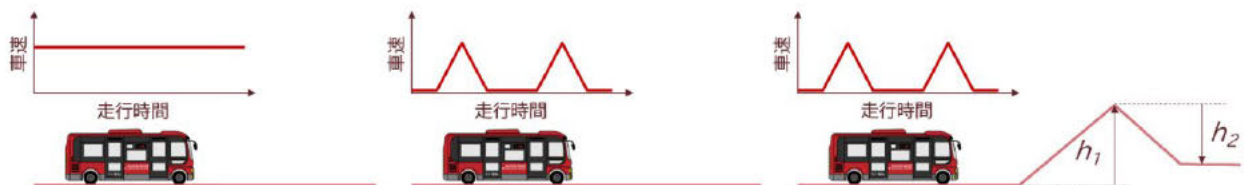


図-2.7 車速変化のイメージ（左：低精度予測、中：中精度予測、右：高精度予測）

低精度予測式は、平坦なルートを一定の速度で走行すると仮定した場合の予測式である。そのため、定時定路線の運行であればダイヤと走行ルートの距離が把握できれば推計可能である。

車両走行消費エネルギーの理論式を以下とした時に、

$$E = E_{Air} + E_{Roll} + E_{Aux}$$

空気抵抗・転がり抵抗消費エネルギーは

$$E_{Air} = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \int F_{Air} V dt = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \int_0^T \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 \cdot V dt = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 X$$

$$E_{Roll} = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} F_{Roll} \cdot X = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g X$$

補器類消費エネルギーは

$$E_{Aux} = P_{Aux} \cdot T$$

である。したがって低精度電費予測式は

$$EC = f(V) = \frac{E}{X} = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \cdot \left[ \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 + C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g \right] + \frac{P_{Aux}}{V}$$

と導出された。

なお、各種のパラメータは以下の通りである。

$X$ : 全ルート走行距離 [m]、 $\rho$ : 空気密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]、 $P_{Aux}$ : 補器類消費パワー [W]、 $C_d$ : 空気抵抗係数、 $EC$ : 電費 [kWh/km]、 $A$ : 投影面積 [ $\text{m}^2$ ]、 $g$ : 重力加速度 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]、 $T$ : 全ルート走行時間 [s]、 $C_r$ : 転がり抵抗係数、 $V$ : ルート平均速度 [ $\text{m}/\text{s}$ ]、 $\eta_G$ : ギア効率、 $\eta_{Mot}$ : モータ効率、 $m_{Pas}$ : 乗客質量 [kg]、 $m_{Car}$ : 車両質量 [kg]、 $F_{Air}$ : 空気抵抗 [N]、 $F_{Roll}$ : 転がり抵抗 [N]

中精度予測式では、低精度予測式に加えて、加速/減速/停車の状況を停車時間割合、発進停止回数から把握する。

全ルートの発進停止回数 $N$ を用い、基本トリップの走行時間 $T_0$ を算出する。

$$T_0 = \frac{T}{N} = \frac{T}{n \cdot \frac{X}{1000}} = \frac{1000}{n \cdot V}$$

次に $T_0$ 、停車時間割合 $\alpha$ を用い、トリップの加速区間・減速区間・停車区間を算出する。

$$T_{AS} = T_{DS} = \frac{(1-\alpha)}{2} T_0 \quad T_{SS} = \alpha \cdot T_0$$

そして $T_{AS}$ より最大速度と加速度を導出する。

$$V_{Max} = \frac{2V}{(1-\alpha)} \quad a = \frac{V_{Max}}{T_{AS}} = \frac{nV^2}{250(1-\alpha)^2}$$

また、減速走行の回生状況を運動エネルギー利用率から把握する。運動エネルギー利用率は下記のように定義され、同指標を用いて減速回生状況を考慮する。

$$\eta_K = \frac{E_{Air\_DS} + E_{Roll\_DS} + E_{Reg\_K}}{E_K}$$

以上を踏まえて、中精度電費予測式は

$$EC = f(V, \alpha, n) = \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \cdot \left[ \rho A C_d \frac{V^2}{(1-\alpha)^2} + C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g \right] + \left( \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} - \eta_K \right) (m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) \frac{nV^2}{500(1-\alpha)^2} + \frac{P_{Aux}}{V}$$

と導出された。

なお、新たに追加されたパラメータは以下の通りである。

$T_0$ : トリップ全区間 [s]、 $T_{AS}$ : トリップの加速区間 [s]、 $T_{DS}$ : トリップの減速区間 [s]、 $T_{SS}$ : トリップの停車区間 [s]、 $n$ : 発進停止回数 [回/km] (基礎情報)、 $\alpha$ : 停車時間割合、 $E_{Air\_DS}$ : 空気抵抗消費分エネルギー (減速区間) [J]、 $E_{Roll\_DS}$ : 転がり抵抗消費分エネルギー (減速区間) [J]、 $E_{Reg\_K}$ : 回生エネルギー (減速分) [J]、 $E_K$ : 運動エネルギー (加速で蓄積) [J]

高精度予測式では、中精度予測式に加えて走行ルートの勾配状況から獲得標高を把握する。ルートを登坂区間と降坂区間と平坦区間に分類し、全ての登坂区間の登り標高を足し合わせたものを全獲得登り標高 (正値)、全ての降坂区間の下り標高を足し合わせたものを全獲得下り標高 (負値) とする。

また、位置エネルギー利用率は降坂回生状況を考慮し、下記のように定義する。

$$\eta_P = \frac{E_{Reg\_P} + E_{Air\_DS} + E_{Roll\_DS}}{E_P}$$

以上を踏まえて高精度電費予測式は

$$EC = f\left(V, \alpha, n, \frac{\sum h}{X}\right)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} \cdot [\rho A C_d \frac{V^2}{(1-\alpha)^2} + C_r(m_{Car} + m_{Pas})g] \\
&\quad + (\frac{1}{\eta_G \cdot \eta_{Mot}} - \eta_K)(m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) \frac{nV^2}{500(1-\alpha)^2} \\
&\quad + \frac{P_{Aux}}{V} + (m_{Car} + m_{Pas})g(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \frac{\sum h^+}{X} + \eta_P \frac{\sum h^-}{X})
\end{aligned}$$

と導出された。

なお、新たに追加されたパラメータは以下の通りである。

$E_{Regp}$ : 降坂による回生エネルギー [J]、 $E_{AirDS}$ : 減速区間空気抵抗エネルギー [J]、 $E_{RollDS}$ : 減速区間転がり抵抗エネルギー [J]、 $E_p$ : 放出位置エネルギー [J]

導出した予測式の精度を、これまで早稲田大学らにより実施されてきた電動バスの実証走行のデータを用いて検証した結果を表-2.2に示す。

表-2.2 各路線の基礎情報および電費予測結果

	平均速度 [km/h]	発進停止 回数 [回/km]	停車時間 割合 %	獲得登り 標高 [m/km]	獲得下り 標高 [m/km]	実測 電費 [kWh/km]	低精度予測 電費 (誤差) [kWh/km]	中精度予測 電費 (誤差) [kWh/km]	高精度予測 電費 (誤差) [kWh/km]
長野ぐるりん	10.3	4.91	41%	6.5	-6.5	0.83	0.41 (50%)	0.75 (10%)	0.84 (1%)
長野平林下り	15.0	2.43	30%	1.4	-3.8	0.64	0.41 (37%)	0.66 (2%)	0.65 (1%)
長野平林登り	15.6	1.92	36%	3.9	-1.4	0.72	0.40 (44%)	0.68 (6%)	0.76 (5%)
埼玉本庄	18.4	1.88	17%	4.2	-4.3	0.68	0.41 (41%)	0.61 (10%)	0.67 (2%)
埼玉熊谷	15.9	3.17	17%	2.4	-2.4	0.70	0.40 (42%)	0.65 (7%)	0.68 (2%)
佐賀唐津	10.1	3.90	32%	5.4	-5.4	0.72	0.42 (42%)	0.59 (19%)	0.66 (8%)
平均誤差							43%	9%	3%

低・中・高精度予測の平均誤差はそれぞれ43%・9%・3%であることが分かった。低精度予測では43%と誤差が大きいため、発進停止が多く、停車時間の割合も高い路線バスの適用には限界がある。一方で中・高精度予測はいずれも誤差が一桁台であり、初期検討レベルとして充分許容できる精度を達成したと考えられる。

この予測式を利用するために必要な情報は、既存のダイヤ情報や公開されている地図情報から入手可能なものである。しかし、IT化の遅れていると言われる交通事業者においてはさらに簡易に利用可能なものとする必要があると考えたため、入手した情報を入力するだけで電費が予測できる算出ツールを構築した(図-2.8)。

低	中	高		項目	値	単位			
○	○	○	$\eta_G$	ギア効率	80	%			
○	○	○	$\eta_{Mot}$	モータ効率	80	%			事業者によって入力が必要な項目
	○	○	$\eta_K$	運動エネルギー効率		%			
		○	$\eta_P$	位置エネルギー効率		%			
○	○	○	A	投影面積	5.92	m <sup>3</sup>			車両情報等より入力される値
○	○	○	g	重力加速度	9.807	m/s <sup>2</sup>			
○	○	○	$C_r$	転がり抵抗係数	0.02				
○	○	○	$C_d$	空気抵抗係数	0.33				
○	○	○	V	ルート平均速度	3.3	m/s			
○	○	○	$P_{Aux}$	補器類消費電力	0.6	kW			
○	○	○	$\rho$	空気密度	1.293	kg/m <sup>3</sup>			
○	○	○	mPas	乗客人数	1110	kg			
○	○	○	mCar	車両質量	5990	kg			
	○	○	mRot	等価慣性質量		kg			
	○	○	$\alpha$	停車時間割合		%			EC(電費)
	○	○	n	発停車回数		回/km	<input checked="" type="checkbox"/>	低精度	0.402 kWh/km
		○	$\Sigma h^+/X$	獲得標高上り		m/m	<input type="checkbox"/>	中精度	0 kWh/km
		○	$\Sigma h^-/X$	獲得標高下り		m/m	<input type="checkbox"/>	高精度	0 kWh/km

図-2.8 算出ツールの入力例

(3) W to W評価による最適充電パターンの構築

把握された電力の時間帯別CO<sub>2</sub>排出係数および電動車両導入時の電費予測式を用いて、定時定路線で運行するバス事業の車両を対象とした最適充電パターンの構築を行った。

(3) - 1 GTFSを用いた仕業の把握

バス事業に対して電動バスを導入するにあたり、現在の仕業を満たす稼働時間・航続距離の確保ができないのであれば、現状より多い台数の車両を確保する必要がある。しかし、これは導入コストが増加するだけでなく、近年運転手不足がいわゆる業界において対応が困難である。そのため、本研究では、現状の仕業を維持しつつ、電動バスの導入を行うことを前提とする。

仕業とは、運転手および車両が1日の運行の中で、どの系統やダイヤを担当するかを示したもので、これにより車両の1日の中での稼働状況を把握することができる。仕業は、多くのバス事業においては仕業表によって管理されているが、それを作成するダイヤ編成システムからのデータ出力が困難である場合が多い。そこで本研究ではオープンデータとして公開されているGTFS-JPおよびGTFS-RTを用いて仕業を把握することとした。

GTFS-JP/RT (標準的なバス情報フォーマット) とは、バス事業者と経路検索等の情報利用者との情報の受け渡しのための共通フォーマットであり、時刻表等の静的データGTFS-JPと遅延等の動的データGTFS-RTを包含する。図-2.9にGTFS-JPのデータ構造<sup>2)</sup>を示す。

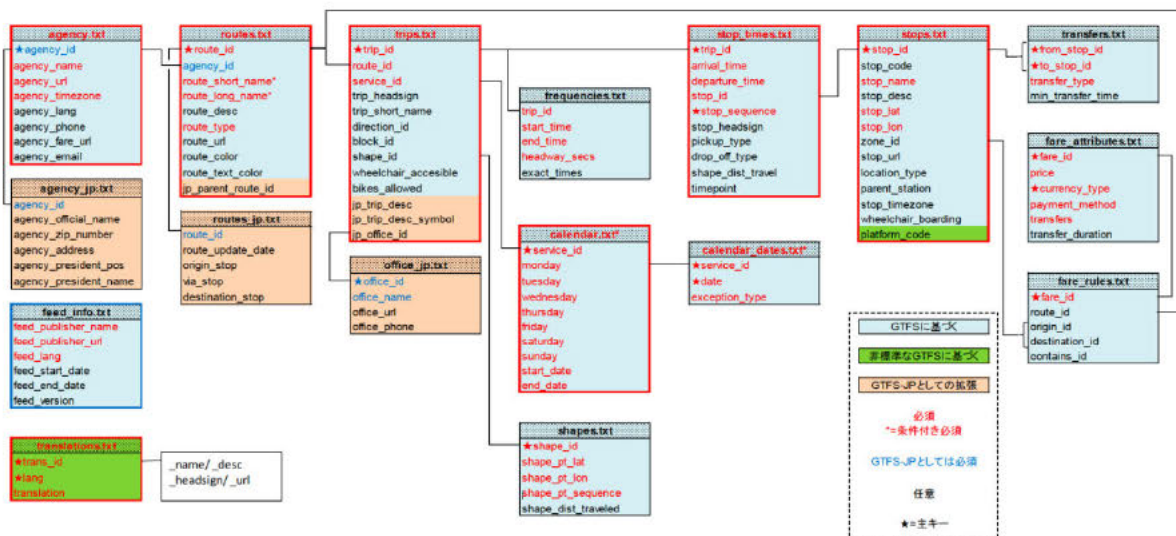


図-2.9 GTFS-JP のデータ構造

本研究ではこのデータの中から表-2.3に示すファイルに内包される属性値をstop\_idで紐づけ、さらにGTFS-RTに内包されるTripupdateから車両ごとの稼働状況を把握した。

表-2.3 分析に使用する属性値

ファイル名	属性値	内容
stop_times.txt	trip_id	系統ID
	arrival_time	出発時間
	depaerture_time	到着時間
	stop_id	バス停ID
stops.txt	stop_id	バス停ID
	stop_name	バス停名
	stop_lat、stop_lon	バス停位置情報
Tripupdate	stop_id	バス停ID
	Vehicle_id	車両番号

これらのデータを活用し、A営業所（96台）の車両稼働状況を走行（実車）・回送・営業車で停車・停留所で停車に分類し、時間単位（横軸5分ごと）、台数単位（縦軸1台ごと）で表したものを図-2.10に示す。

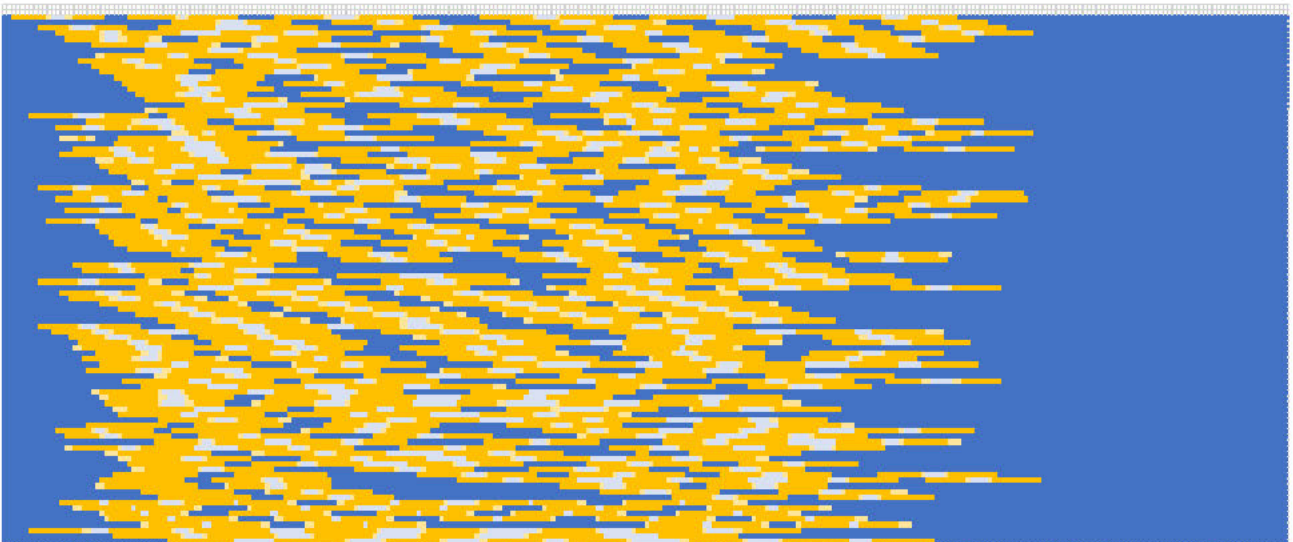


図-2.10 車両稼働状況の例

上記車両稼働状況より、車両は始発・終着停留所からの回送を含め、5時台から23時台まで運行しており、1日の仕業が終了し夜間に営業所で停車している時間帯以外にも、昼間の需要が少ない時間帯や運転手の交代などにより営業所に回送された後の時間帯に営業所で停車している時間が、25%ほど存在することが分かった。そのため、充電パターンの構築では、把握された営業所での停車時間を充電可能時間として活用し検討することとした。

### (3) - 2 電動バス導入時の充電パターンの構築

充電パターンは以下の2種類を検討した。

- 夜間充電：車両単位で1日の仕業が終了し、営業所に帰庫後に充電をする。1日の充電回数が1回で済み、従来の仕業通りの運行が可能のため運転手の負担が少ない。また、電力量料金の安価な夜間に充電を行うことが可能である。一方で、夜間に集中して充電を行うため充電時間が重複し、高圧の電力設備が必要となるため基本料金が增加する。
- 成行充電：昼間の営業所への帰庫時に充電をし、不足分を夜間に充電する。1日の充電回数は増加するが、空き時間を利用して充電を行うため、仕業の維持は可能である。また、再生可能

エネルギー発電量の多さから、CO<sub>2</sub>排出係数が小さくなる昼間に充電するため、CO<sub>2</sub>排出量を低減することが可能である。一方で、昼間の比較的高価な電力量料金で充電するためコストは増加する。

これらの充電パターンを用いて、図-2.10 で示した営業所に対し電動バスを導入することを検討する。導入を想定する電動バスの車両性能は、既存で運行している車両総重量と図-2.6 の相関式を用いて 0.72[km/kWh]と推定した。また、充電出力は現状国内で最も普及している CHAdeMO 方式の 50kW での充電を想定した。

また、実際のバスの運行では渋滞等により遅延が発生する場合がある。特に、成行充電では昼間に営業所に帰庫した際に充電することを想定しているため、遅延の影響を受けて帰庫が遅れた場合には充電ができなくなることが想定される。そこで、本検討での成行充電では昼間の営業所の停車時間が連続 20 分以上である場合のみ充電することとした。

以上を踏まえて、図-2.11 に夜間充電時の車両稼働状況、図-2.12 に成行充電時の車両稼働状況を示す。

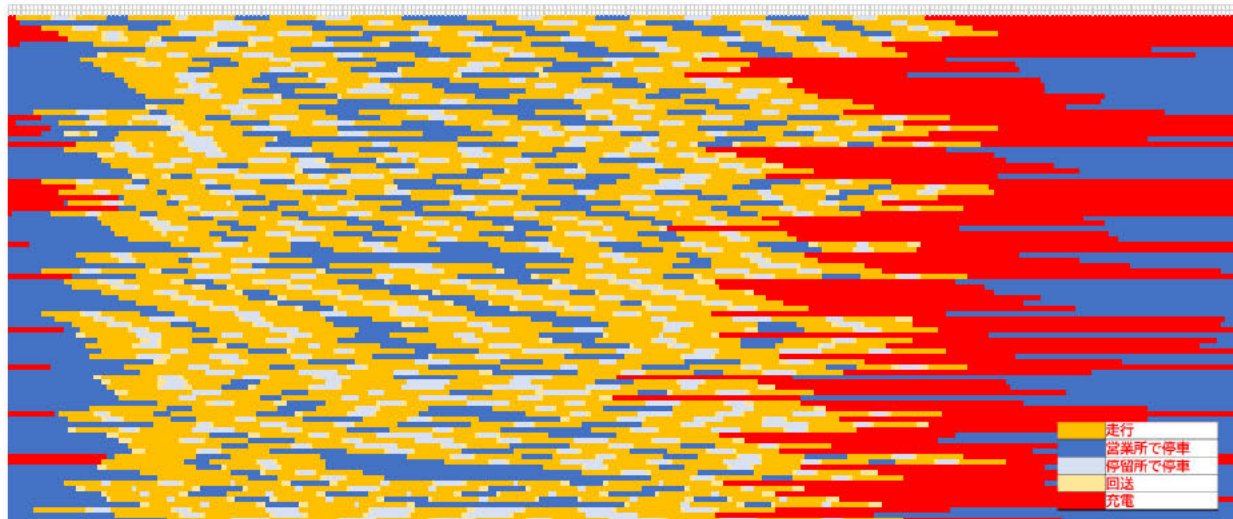


図-2.11 夜間充電時の車両稼働状況

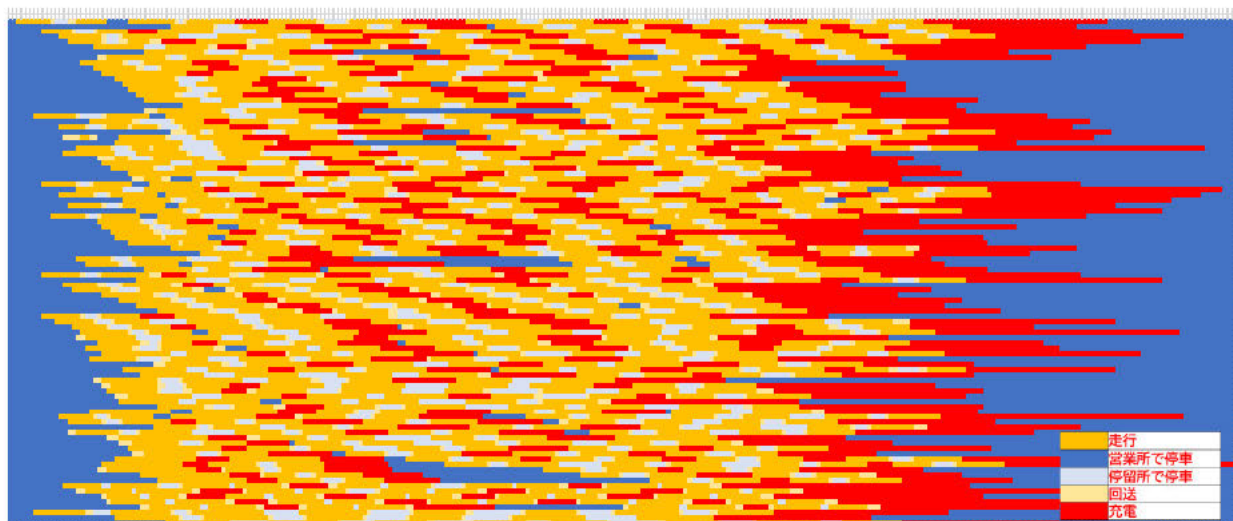


図-2.12 成行充電時の車両稼働状況

夜間充電においては、帰庫の早い車両では15時台から充電が始まり、最も充電が集中する23時台では96台中78台の車両を同時に充電する必要がある。また、帰庫の遅い車両では0時台から充電が始ま

り、翌朝に他の車両の仕業の始まっている8時台まで充電する車両が存在する。充電コストを低減させるには、電力量料金が安価となる23時以降に充電することが有効であるが、充電時間の重複を避けるため帰庫後から時間をおいて充電を開始した場合に、翌日の仕業開始時までの充電が完了しない可能性がある。

成行充電においては、昼間の営業所での停車時間に充電を行うが、停車時間前の走行距離が短い際に停車時間より充電時間が短い場合があり、全ての時間を充電時間に利用することはできない。一方、昼間の充電量の分だけ夜間の充電量は少なくなるため、夜間充電に比べて充電時間の重複を避けることができた結果、最も充電が集中する22時台でも53台の充電に抑制することが可能となる。

次に、充電パターンごとの時間帯別の充電量とA営業所に対して電力供給を行う一般送配電事業者のCO<sub>2</sub>排出係数を図-2.13に、1日あたりの営業所全体のCO<sub>2</sub>排出量を図-2.14に示す。

なお、比較対象に用いたディーゼル車（軽油）のCO<sub>2</sub>排出量については、A営業所におけるディーゼル車両の平均燃費2.9[km/l]と軽油のCO<sub>2</sub>排出係数2.58[kg-CO<sub>2</sub>/l]<sup>3)</sup>より推計した。

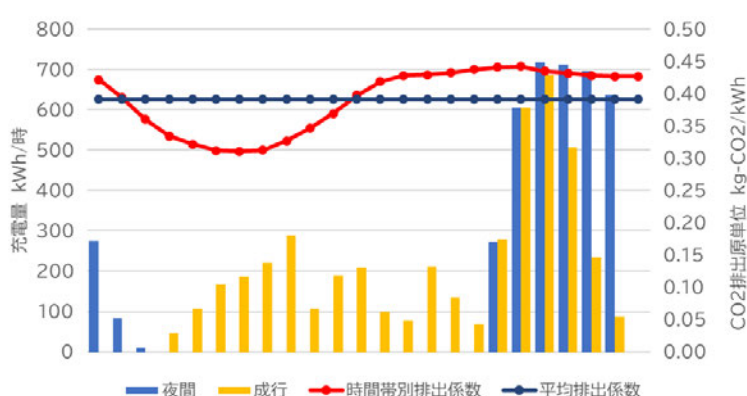


図-2.13 時間帯別排出係数と充電量

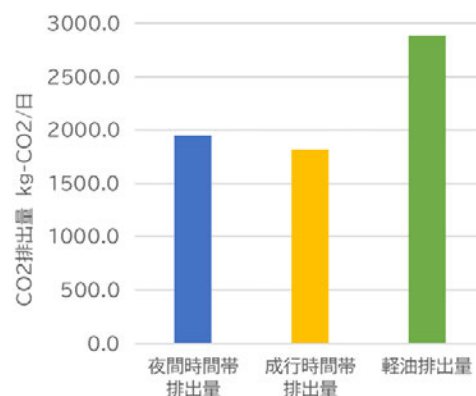


図-2.14 CO<sub>2</sub>排出量の比較

夜間充電では従来のディーゼル車両からの転換により32.6%のCO<sub>2</sub>削減効果が得られることが分かった。また、成行充電では、現状の仕業を維持しながら昼間の再生可能エネルギーを有効に活用することで、さらに4.6%(435[kg-CO<sub>2</sub>/日])のCO<sub>2</sub>削減効果が得られることが分かった。この削減効果は全体の削減量に占める割合は少ないが、同一の車両および仕業を維持しながら充電する時間帯を変化させるだけで得られる効果としては大きいものであると考える。

また、成行充電は夜間充電に比べて充電時間の重複が少ないため、基本料金については減少することが利点として挙げられる一方で、安価な夜間料金での充電量が少なくなるため、電力量料金が増加するという欠点も存在する。そこで、充電パターンごとのエネルギーコストの差異を分析し、CO<sub>2</sub>削減効果を得るために必要となるコストをそれぞれ把握した。

分析を行うにあたって、電力料金は九州電力における業務用高圧契約の季時別料金<sup>4)</sup>を用いた。高圧契約は一般的な家庭向けの低圧契約と異なり、契約電力量(kW)に応じて基本料金が発生し、使用した電力量(kWh)に応じて電力量料金が発生する。本研究での分析に用いる電力料金を表-2.4に示す。

表-2.4 業務用高圧契約の電力料金

種別		業務用季時別電力A	業務用季時別電力A-1
基本料金		1,739.1円/kW	1,122.0円/kW
電力量料金	ピーク	16.95円/kWh	26.46円/kWh
	夏季昼間	14.48円/kWh	22.36円/kWh
	その他昼間	13.53円/kWh	21.33円/kWh
	夜間	9.06円/kWh	9.06円/kWh

なお、電力量料金については季節および時間帯に応じて以下の条件で料金が変動する。

- 夏季：7月1日から9月30日。その他：夏季以外の期間
- ピーク：夏季の13時から16時
- 昼間：8時から22時までのピーク以外の時間
- 夜間：ピークおよび昼間以外の時間

また、季時別料金の中でも基本料金の異なるAおよびA-1の契約形態があり、A-1は基本料金が安価である代わりに、電力量料金が高くなる。但し、夜間料金のみ同一の契約形態である。

これらの電力料金を踏まえて、充電パターンごとに掛かる1日あたりのエネルギーコストを推計したものを図-2.15に示す。

なお、比較対象に用いたディーゼル車（軽油）のエネルギーコストについては、2022年8月の実勢値である132円/リットルより推計した。

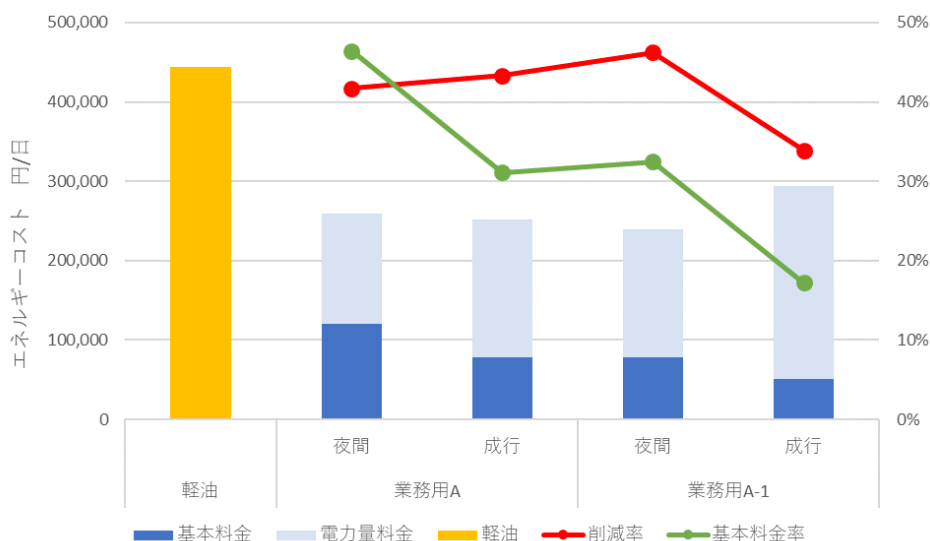


図-2.15 エネルギーコストの比較

前述したように、同じ契約形態においては、夜間充電では電力量料金が減少し、成行充電では基本料金が減少している。特に、夜間Aでは基本料金の占める割合は46.4%となり、成行A-1では17.2%まで減少した。

エネルギーコスト全体では、いずれの充電パターン・契約形態でも削減効果が得られるが、夜間充電ではA-1が、成行充電ではAの契約形態の方が安価となり、1日あたりのエネルギーコストでは12800円/日の差異があることが分かった。

このことから、現状の電源構成による時間帯別CO<sub>2</sub>排出係数を用いると、成行充電によりCO<sub>2</sub>削減効果を増加させるためには2,9400[円/t-CO<sub>2</sub>]のコストがかかることとなる。これは、2022年のJ-クレジットにおける平均販売価格<sup>5)</sup>が3,278[円/t-CO<sub>2</sub>]であるのと比較すると、コストを1/9にする必要がある。このことから、現状の発電構成や契約形態では得られる効果とそれに掛かるコストには乖離があり、今後の一層の再生可能エネルギーの導入促進やそれらを積極的に利用することに対するインセンティブ等の導入が必要であることが示唆された。



#### 4. 結果及び考察

一般送配電事業者ごとの時間帯別発電構成を分析した結果、地域によって発電構成の差異により排出係数そのものは異なるが、時間帯別ではいずれの地域においても、再生可能エネルギーによる発電が多くなる昼間において CO<sub>2</sub> 排出係数は減少する傾向があることを把握した。特に、太陽光発電の割合が多い九州電力では昼間における減少率が最大 51% になり、原子力発電が稼働しており、夜間の排出係数も低い関西電力では、減少率は小さくなるものの 20% 程度は減少することが分かった。

我が国全体の脱炭素を達成するためには、今後も再生可能エネルギーの導入促進が求められており、今後さらに時間帯別の差異は拡大していくと考えられる。一方で、すでに昼間の太陽光発電に関しては、出力抑制が行われている実態がある。今後の電動車両に対する充電においては、出力抑制が行われている太陽光発電の吸収までを考慮した充電を行うことが必要になると考えられる。本研究では利用した電力データは、過去の発電実績を基に公開されたデータであり、日々の電力需要や出力抑制量をリアルタイムに公開しているものではない。特に太陽光発電の発電量は天候等により変動するものであり、これを充電パターンに組み込むためには発電予測とともにそのデータをリアルタイムにオープンデータとして活用する仕組みづくりが重要となると考える。

これに対して、電力供給を受ける電動車両の電費に与える要因について分析し、車格（車両総重量）と電費の関係について高い相関性を確認した。また、同一の車格において車速および勾配が電費に与える影響を分析し、自治体や交通事業者が入手可能な情報だけで予測可能な簡易予測モデルを構築した。このモデルを用いて実際に電動バスが導入された路線で検証し、高精度の予測が可能であることが確認された。さらに、予測モデルを自治体や交通事業者が自身で利用可能にするための算出ツールも構築した。

この予測モデルを用いることで、電動車両の導入を検討する際に、あらかじめ CO<sub>2</sub> 削減効果を予測することが可能となり、自治体内での予算獲得や事業者の投資の意思決定が促進されることが期待される。

時間帯別 CO<sub>2</sub> 排出係数および電費予測モデルを活用し、電動車両導入時に CO<sub>2</sub> 削減効果が最大となる充電パターンおよびそれに掛かるコストについて把握した。その結果、現状の仕業を維持しつつ、昼間の再生可能エネルギーを有効に活用し充電することで、仕業後にのみ充電するパターンに比べ 4.6% の削減効果が得られることが分かった。しかし、同時にこの削減効果を得るためには 29,400 [円/t-CO<sub>2</sub>] のコストがかかり、現状の J-クレジット等の価格と比較すると大きな乖離があることが分かった。

このコストを削減するために今後の一層の再生可能エネルギーの導入促進が求められるが、設備投資を含めて短期的には困難である。そこで、前述した出力抑制される太陽光発電を積極的に吸収するというような方法で、電力系統全体でなく電動車両に供給される電力の再エネ比率を高めるといったような取り組みが有効であると考えられる。また、昼間の太陽光発電の吸収は電力事業者においても需要の負荷平準化に繋がるメリットがあり、これまで需要の少ない夜間の電力量料金を安価にするというインセンティブと同様に、昼間に太陽光発電を吸収することに対するインセンティブのある契約形態を創出することも求められる。

#### 5. 研究目標の達成状況

電動車両の評価については、研究当初の電動バス、GSM、超小型EV、パーソナルモビリティツールに加えて、乗用車タイプの148車種まで調査対象を拡大した。計画当初42車種であったのに対し190車種を調査した結果、車両総重量と電費について高い相関を得ることで目標を上回る成果をあげた。また、走行パターン（車速・勾配）の電費に与える影響を分析し、高精度での電費予測式を導出した。これは実際に交通事業者による電動バスの導入検討に使用され、実装フェーズでの活用まで至ったという点において目標を上回る成果である。

電力の評価については、発電事業者ごとの時間帯別の電源構成を把握し、地域別・時間帯別のWtoW評価を行うための排出係数を整理した。また、定時定路線の車両を対象に時間帯別の発電構成を踏まえた、低炭素性が最大となる充電パターンを構築し、目標通りの成果を上げた。さらに、研究当初は想定して

いなかったエネルギーコストにも着目し、時間帯別の契約電力量や電力量料金の変化に加え、CO<sub>2</sub>削減効果にかかるコストまで把握し、目標を上回る成果を上げた。

## 6. 引用文献

- 1) 日本における発電技術のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量総合評価、電力中央研究所、(2016)
- 2) 静的バス情報フォーマット (GTFS-JP) の仕様書、国土交通省、(2021)
- 3) 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度 算定方法・排出係数一覧、環境省、(2022)
- 4) 料金メニューの概要および料金単価表/業務用季時別電力A/A-I、九州電力、(2021)
- 5) J-クレジット制度について (データ集)、J-クレジット精度事務局、(2023)

## Ⅱ－3 IT等交通マネジメントに関する新技術の低炭素性評価

国立大学法人岡山大学

学術研究院環境生命科学学域 氏原岳人

### 〔要旨〕

本研究では、居住者の利用パターンに着目して、新たな交通手段の導入による低炭素性を評価するための手法を開発するとともに、具体的な事例を対象にその低炭素性を評価した。また、MaaSなどの交通サービスを導入する際に重要な要素となる都市構造や公共交通サービス（首都圏と地方圏を対象）に着目して、その影響を把握した。令和2年度は、次世代型モビリティ（超小型EV及びグリーンズローモビリティ）を対象にその低炭素性を評価するための手法を提案するとともに、具体事例を対象にその評価を実施した。令和3年度は、都市特性の異なる地方圏（岡山市）と首都圏（東京都区部）を対象に、IT等を活用したMaaS（Mobility as a Service）の利用実態ならびに将来のMaaSのサービスレベルが向上した場合の利用可能性を明らかにするとともに、都市構造や公共交通サービスと（生活の質に影響を及ぼす）「移動制約」との関連性を把握した。令和4年度は、都市構造や公共交通サービスとCO<sub>2</sub>排出量との関連性を統計的に明らかにした。以上の結果にもとづき、利用者の視点からみた低炭素・脱炭素に向けたIT等交通マネジメントの方向性を提示しており、計画通りの成果を達成した。そのほか、当初予定していなかったが、研究期間中のコロナ禍における交通行動の変化を統計的に捉え、直近の公共交通や自家用車等の利用の動向を把握するための基礎データとしており、計画以上の成果をあげた。

### 1. 研究開発目的

超小型モビリティやグリーンズローモビリティなどの新たな交通手段、そして近年ではITなどを活用することによって、鉄道やバス、そのほかの交通手段をシームレスにつなげるMaaS（Mobility as a Service）等、さまざまな交通サービスがモビリティ革命の名の下に提供され始めている。それら新たな交通手段や交通サービスが導入されることによって、移動の脱炭素・低炭素化への期待が高まっている一方で、実際に導入された場合に、脱炭素化にどの程度貢献できるのか、あるいは導入される都市構造などの地域特性によって差異は生じるのか等、明らかになっていない点が多い。加えて、居住者の利用パターンによっては、CO<sub>2</sub>排出量が増加することも懸念され、新たな交通手段の導入に際しても留意すべき点を把握する必要がある。そこで本研究では、居住者の利用パターンに着目して、新たな交通手段の導入による低炭素性を評価するための手法を開発するとともに、具体的な事例を対象にその低炭素性を評価する。また、MaaSなどの交通サービスを導入する際に重要な要素となる都市構造（首都圏と地方圏を対象）及び公共交通サービスに着目して、その影響を把握する。最後に、移動制約などの生活の質を考慮し、低炭素な交通システムを実現するための方向性を提示する。

### 2. 研究目標

ITによってシームレスにつながった交通サービスを提供するMaaSや、オンデマンド・シェアリングなど、モビリティ革命の核となる新たな交通手段の利用形態に着目し、それらの低炭素性を評価する手法を開発し、各事例を評価する。あわせて、このようなモビリティ革命が利用者の生活の質にどのような影響を及ぼすのかを分析し、低炭素でかつ生活の質を高める交通システム実現の方向性を明らかにする。

### 3. 研究開発内容

#### （1）超小型EV・グリーンズローモビリティ（GSM）導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価（令和2年度）

超小型EV及びGSMを対象として、次世代モビリティの導入における利用者の視点からの低炭素性を評価する。なお、2020年3月以降のCOVID-19の感染拡大による交通行動への影響を鑑みて、以下のデータはいずれも2020年3月以前のものを用いている。

##### ① 超小型EV導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価

超小型EVを導入した場合の手段選択の変更及び行動変化を考慮した低炭素性（WtoW）を評価す

る。分析データは、岡山県美作市及び赤磐市の計 34 名のモニター（2016～18 年）に超小型 EV を 1 か月間貸し出した際のものを使用する。はじめに、超小型 EV とガソリン車が同じ距離を走行したと仮定し、超小型 EV 貸出し期間中の総移動距離による CO<sub>2</sub> 排出量を WtoW の評価範囲で推計する。次に、超小型 EV 導入前後のモニターの利用パターンを整理することで、CO<sub>2</sub> 排出量の増減可能性を検証する。例えば、超小型 EV の導入によって新規行動が発生したモニターや徒歩や自転車から転換したモニターは CO<sub>2</sub> 排出量の増加タイプに該当し、自家用車や軽トラック等から超小型 EV に転換したモニターは減少タイプに該当する。それらタイプの構成割合を算出し、超小型 EV 導入によって CO<sub>2</sub> 排出量が増加する、あるいは減少するモニターの割合を推計する。なお、導入前後のトリップ毎の移動距離や頻度を特定できていないため、具体的な CO<sub>2</sub> 排出量の推計には至っていない。

## ② グリーンスローモビリティ（GSM）導入がもたらす行動変化と CO<sub>2</sub> 排出量への影響評価

はじめに GSM の導入による低炭素性評価の既存手法（環境省・国交省）について課題を整理し、GSM 導入前後（With-Without）の交通行動の変化を考慮した低炭素性の簡便な評価手法を提案する。運行形態の異なる 2 地区（①三重県東員町、②広島県福山市鞆町：2018 年実施）の運行データ及び利用者アンケートデータに基づき、その手法を適用する。

- 1) 東員町の GSM は、「デマンド型」、鞆町は「定時・定路線型」にて運行された。本研究では、GSM が導入されている場合（With）、されていない場合（Without）の 2 つのシナリオを想定した CO<sub>2</sub> 排出量の減少量を削減効果とする。With のシナリオでは GSM の走行時に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を、Without では With と同じ目的で移動する場合の従来の移動手段を利用したときの CO<sub>2</sub> 排出量（WtoW）を図-3.1 と図-3.2 に示すように試算する。
- 2) 次に、GSM の導入によって CO<sub>2</sub> 排出量が削減される条件（利用者の自家用車から GSM への転換率）を感度分析によって算出するとともに、利用者 1 人あたりの CO<sub>2</sub> 排出量を求めることで GSM の環境効率性を評価する。

## （2） MaaS 利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性及び生活の質にかかわる移動制約と都市構造の関連性（令和 3 年度）

都市特性が異なる 2 地域として、地方圏（岡山市）と首都圏（東京都区部）を対象に、Mobility as a Service (MaaS) の利用経験と将来的に MaaS のサービスレベルが向上した場合の利用可能性を把握する。また、日常生活における生活の質にかかわる移動制約と自由な移動の可否との関連性を確認するとともに、それらの要因と都市構造との関連性を検証する。

### ① MaaS の利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性

はじめに、岡山市と東京都区部の居住者を対象に実施したアンケート調査（実施期間：2021年2月24日～

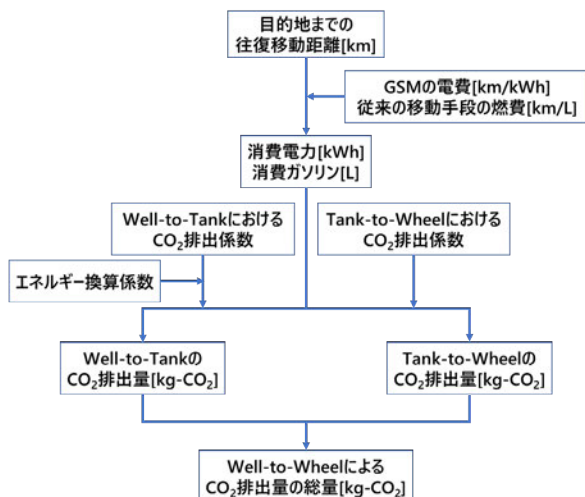


図-3.1 WtoWによるCO<sub>2</sub>の試算方法

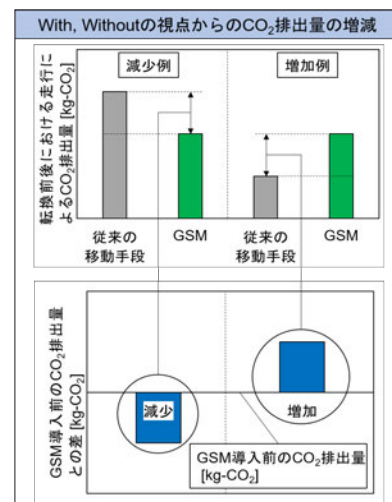


図-3.2 GSMを想定した導入前後（With-Without）の低炭素性評価の概略

3月1日)のデータを用いて、現時点のMaaSの利用実態を把握し、移動目的別に表-3.1の各属性による利用者特性を分析する。アンケート調査の概要を表-3.2に示す。具体的には、「通勤・通学」、「趣味や娯楽」のそれぞれの移動目的において、MaaSの利用経験と各属性とのクロス集計の独立性の検定を行う。対象としたMaaSのサービスレベルを表-3.3に示す。さらに、MaaSの利用経験の有無(1:MaaSのサービスレベルに関わらずMaaSの利用経験あり、0:MaaSを利用したことがない)を目的変数とし、表-3.1の属性項目を説明変数としたステップワイズ法による二項ロジスティック回帰分析を行う。次に、SP調査に基づくデータを用いて、将来、MaaSが現時点よりサービスレベルが向上する場合を想定し、その利用可能性を捉えるとともに、それらの利用可能性と公共交通機関のサービスレベルや利用頻度との関係性を把握する。具体的には、「日常生活(買い物や食事など)」と「非日常生活(観光やレジャーなど)」のそれぞれの移動目的において、利用可能性をサービスレベルに関わらず「利用意向あり」と「利用意向なし」の2パターンに分類し、表-3.1の各属性とのクロス集計の独立性の検定を行う。また、MaaSの利用可能性の有無を目的変数(1:利用意向あり、0:利用意向なし)とし、表-3.1の属性項目を説明変数としたステップワイズ法による二項ロジスティック回帰分析を行う。

## ② 生活の質にかかわる移動制約と都市構造との関連性

居住者の生活の質(Quality Of Life:QOL)を維持、向上させるためには、自由に移動ができることが不可欠である。岡山市と東京都区部の居住者を対象に実施したアンケート調査(実施期間:2021年12月9日~12月13日)のデータを主に用いて、生活の質にかかわる移動の可否に影響する移動制約要因を明確化し、それらの要因と都市構造等との関連性を把握する。アンケート調査の概要を表-3.4、分析の概念図を図-3.3に示す。まず、日常生活における移動制約要因が自由な移動の可否に与える影響を、順序ロジスティック回帰分析により明らかにする。自由な移動の可否を目的変数、各種の移動制約要因を説明変数(ある:1、ない:0)とする。次に、有意となった移動制約要因と個人属性、都市構造の間に関連性があるかを、独立性の検定により確認する。

表-3.1 MaaSの利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性の分析に用いた変数

分類		変数
個人属性	性別	男性, 女性
	年齢	20代, 30代, 40代, 50代, 60代以上
	自由に使える自動車の所有	持っている, 持っていない
公共交通機関のサービスレベル	鉄道駅・バス停までの徒歩での所要時間	10分未満, 10分以上20分未満, 20分以上, わからない
	鉄道・バスの運行間隔	
自家用車・公共交通機関の利用頻度	自家用車・鉄道・バスの利用頻度(アンケート回答時点)	ほぼ毎日, 1~3週間に数回程度, 1~3か月に数回程度, 1年に数回程度, 利用なし

表-3.3 対象としたMaaSのサービスレベル

段階	概要
レベル1	複数の交通手段において移動のルート・運行時間・所要時間の情報が一括で検索できる
レベル2	レベル1に加え、複数の交通手段の予約・手配・支払いが1つのアプリの中でできる
レベル3	レベル2に加え、利用方法に沿った定額料金で、複数の交通手段を契約期間内に自由に利用できる

### (3) 都市構造及び公共交通サービスと CO<sub>2</sub> 排出量の関連性 (令和4年度)

一般に首都圏では都市が高密度であり、公共交通の利便性が高い一方で、地方圏では都心部と郊外部の間で都市構造に格差があることが考えられる。前年度に引き続き、岡山市と東京都都区部を対象に、居住地の都市構造の差異により、私的交通手段での移動に伴うCO<sub>2</sub>排出量に関連があるのかを把握するとともに、公共交通に焦点を当て、鉄道及びバスのサービスレベルやそれらの評価とCO<sub>2</sub>排出量の関連性を把握する。なお、公共交通サービスについては、ハード面とソフト面に着目し、既存のサービスレベルの改善だけでなく、MaaSをはじめとするIT等の交通マネジメントの導入可能性についても検討する。1回の移動に伴う私的交通手段からのCO<sub>2</sub>排出量(WtoW)の推計方法を図-3.4に示す。なお、移動の対象は日常的な生活の範囲であり、非日常的な長距離移動(片道100km以上)は対象外である。

#### ① 都市構造等と CO<sub>2</sub> 排出量の関連性

表-3.3 に示したアンケート調査のデータを主に用いて、個人属性や都市構造と CO<sub>2</sub> 排出量に関連性があるかを検証する。分析の概念図を図-3.5 に示す。具体的には、2 カテゴリーの変数についてはマン・ホイットニーの U 検定、3 カテゴリー以上の変数についてはクラスカル・ウォリス検定及び Steel-Dwass 法による多重比較を行う。

#### ② 公共交通サービスに対する満足度、利用頻度と CO<sub>2</sub> 排出量との関連性

表-3.3 に示されたアンケート調査のデータを主に用いて、公共交通サービスに対する満足度と公共交通の利用頻度との関連性を把握し、それらと私的交通手段の移動に起因する CO<sub>2</sub> 排出量との関連性を明らかにする。分析の概念図を図-3.6 に示す。まず、公共交通サービスのハード面、ソフト面に対する満足度が総合的な満足度に与える影響を順序ロジスティック回帰分析により検証する。その際、鉄道とバスのそれぞれのサービスに対する総合的な満足度を目的変数、ハード面及びソフト面の内容に対する満足度を説明変数(満足・やや満足:1、不満・やや不満・普通:0)とする。

次に、公共交通サービスに対する総合的な満足度が鉄道とバスのそれぞれの利用頻度に関連があるのかを、独立性の検定により把握する。これを踏まえ、公共交通の利用頻度と私的交通手段での移動に伴う年間 CO<sub>2</sub> 排出量の関連性を、クラスカル・ウォリス検定及び Steel-Dwass 法による多重比較により明らかにする。加えて、鉄道とバスのそれぞれのハード面、ソフト面のサービス内容に対する満足度を得点化し、私的交通手段の移動に起因する CO<sub>2</sub> の非排出者(0 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)] )、低排出者(0 超 500 未満 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)] )、中排出者(500 以上 1,500 未満 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)] )、高排出者(1,500 以上 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)] )の間の平均満足度の差の有無を確認する。ここでも、クラスカル・ウォリス検定及び Steel-Dwass 法による多重比較を行う。

表-3.2 2021年2月24日～3月1日のアンケート調査の概要

調査名	全国を対象とした交通行動調査
実施方法	インターネットアンケート調査
調査機関	楽天インサイト株式会社
回収期間	2021年2月24日～3月1日
サンプル数	2,000
対象地域	【地方圏】岡山市 (n = 1,000) 【首都圏】東京都都区部 (n = 1,000)
主な調査項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>・個人属性</li> <li>・自由に使える自動車の所有</li> <li>・最寄りの公共交通機関のサービスレベル(徒歩での所要時間、運行間隔)</li> <li>・自家用車・公共交通機関の利用頻度</li> <li>・MaaSの利用経験</li> <li>・将来のMaaSの利用可能性</li> </ul>

表-3.4 2021年12月9日～12月13日のアンケート調査の概要

調査対象	20歳以上の岡山市、東京都都区部の居住者
調査方法	Webアンケート調査
調査会社	(株)楽天インサイト
調査期間	2021年12月9日～12月13日
集計サンプル数	岡山市: 1,381 東京都都区部: 1,308
調査項目	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 個人属性</li> <li>2) 日常生活での移動状況</li> <li>3) 公共交通の利用実態</li> <li>4) 公共交通サービスに対する評価</li> </ol>

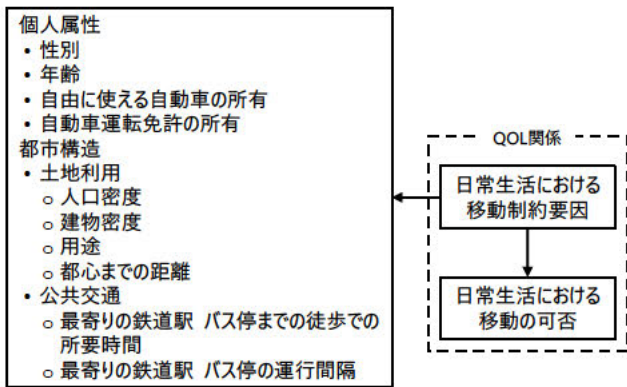


図-3.3 日常生活での移動制約と都市構造の関連性の分析の概念図

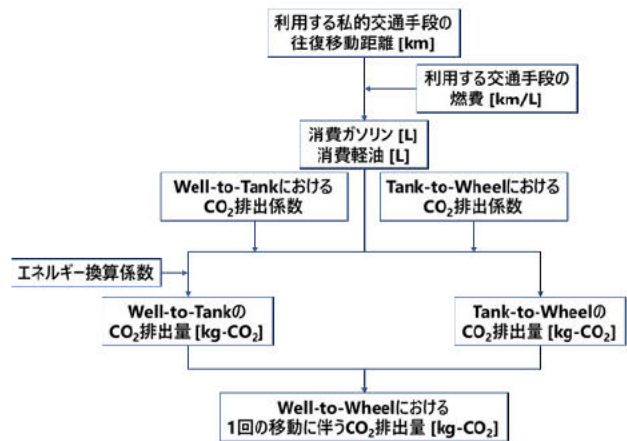


図-3.4 WtoWによる1回の移動に伴う私的交通手段からのCO<sub>2</sub>の推計方法

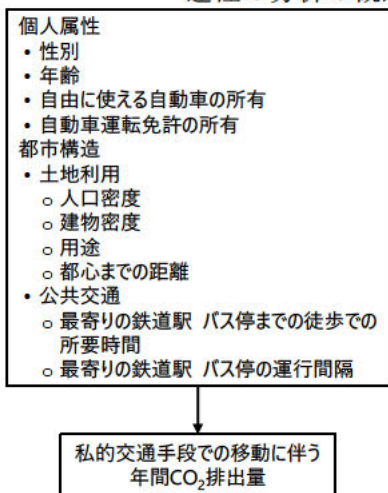


図-3.5 都市構造等とCO<sub>2</sub>排出量の関連性の分析の概念図

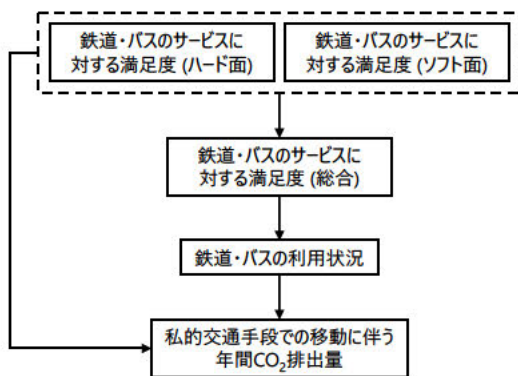


図-3.6 公共交通サービスに対する満足度、移動頻度とCO<sub>2</sub>排出量の関連性の分析の概念図

(4) そのほか (COVID-19 流行における人々の交通行動変化)

当初予定していなかったが、研究期間中のコロナ禍における交通行動への影響は甚大である判断し、アンケート調査において、それらの変化を捉える。具体的には、COVID-19流行前(2020年3月以前)とコロナ禍(2021年2月時点)の代表交通手段から転換パターンを把握するとともに、流行前に公共交通機関を利用していた人に着目し、公共交通機関の利用を継続していた人(利用継続者)と変更した人(利用停止者)の特性を明らかにする。

4. 結果及び考察

(1) 超小型EV・グリーンスローモビリティ(GSM)導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価(令和2年度)

① 超小型EV導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価

超小型EVの1台kmあたりのCO<sub>2</sub>排出量(Well-to-Wheel)は0.036[kg-CO<sub>2</sub>/台km]、ガソリン車の1[台km]あたりのCO<sub>2</sub>排出量は0.272[kg-CO<sub>2</sub>/台km]となった。つまり、ガソリン車と比較して、超小型EVを利用した場合にCO<sub>2</sub>排出量を削減できる可能性が高い。一方で、超小型EV導入に伴う行動変化を考慮した場合、CO<sub>2</sub>排出量が増加する、または増加する可能性があるモニターが18%存在することが明らかとなった(図-3.7)。それらモニターの行動変化としては、荷物が置け、屋根があるという理由から徒歩や自転車から超小型EVに転換したケースや気軽に利用できるという特性から導入前にはなかった新規の行動が発生したケース等があった(図-3.8)。このように、超小型EVはガソリン車よりCO<sub>2</sub>排出量が低くなる傾向にあるものの、利用パターンによってはCO<sub>2</sub>排出量を増加させる可能性があることが確認できた。

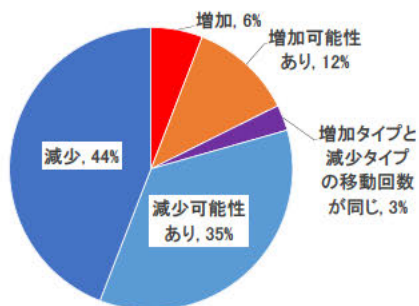


図-3.7 超小型EVの利用パターンによるCO<sub>2</sub>増減タイプの割合

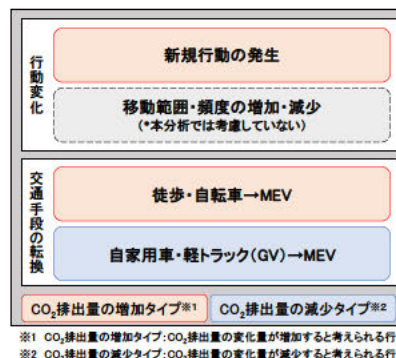


図-3.8 超小型EV導入による利用行動の変化 ※MEV:超小型EV

## ② グリーンスローモビリティ (GSM) 導入がもたらす行動変化とCO<sub>2</sub>排出量への影響評価

国土交通省のGSM社会実験の報告書(2018年度、2019年度)のCO<sub>2</sub>排出量の推計は、GSMが走行時に電力消費によるCO<sub>2</sub>を発生しないと仮定するとともに、平均旅行速度20[km/h]で210[kg-CO<sub>2</sub>/台km]を排出する小型のガソリン車が、GSMと同じ台数分で同じ距離を走ったときのCO<sub>2</sub>排出量を計測し、その値を削減効果としている。GSMは電気自動車であることから、走行中にCO<sub>2</sub>を排出しないものの、化石燃料発電由来の電力で充電することを考慮した場合に、実質的には排出すると判断できる。そのため、GSMからのCO<sub>2</sub>排出量をゼロと設定することは望ましくない。また、GSM導入前と比べてときのCO<sub>2</sub>排出量の増減も考慮されていない。一方、環境省の社会実験の報告書(2020年度)でも、GSMの導入によるCO<sub>2</sub>排出量の削減効果が示されている。この報告書では、GSMがCO<sub>2</sub>を排出すると設定されており、実証事業で行われたアンケート調査等の結果に基づき、従来の移動手段からの転換等が考慮されている。しかし、調査地域によっては、例えば自家用車等のガソリン車からGSMへの転換率をアンケート調査の結果をもとに求めた割合でなく、100%と仮定によるものであり、また、削減効果を試算するためのガソリン車のCO<sub>2</sub>排出係数が異なっているなど、事例ごとの試算方法に相違がある。

本研究では、GSMが導入されている場合(With)とされていない場合(Without)の2つのシナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出量の減少分を削減効果とした。Withのシナリオでは、GSMの走行に伴うCO<sub>2</sub>排出量を算定する一方で、WithoutではWithと同じ目的で移動する場合の従来の移動手段を利用したときのCO<sub>2</sub>排出量を試算する。また、いずれのシナリオにおいても、GSMの運行パターンを可能な限り考慮してCO<sub>2</sub>排出量を求められるように試算方法を設定した。三重県東員町(デマンド型)と広島県福山市鞆町(路線定期型)での実証実験データを用いて分析を行った。それぞれ、GSMからのCO<sub>2</sub>排出減少量が従来の移動手段より23.034[kg-CO<sub>2</sub>]、44.785[kg-CO<sub>2</sub>]と少なく(図-3.9)、導入によるCO<sub>2</sub>排出量削減効果は得られたと判断できた。また、GSMの導入がCO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与するための条件は、東員町と鞆町でのそれぞれの利用者のうち、従来の移動手段が自家用車であった方が6.2%、11.7%より多いことが必要となる(図-3.10)。さらに、GSMの利用者1人あたりのCO<sub>2</sub>排出量は、東員町と鞆町でそれぞれ0.022[kg-CO<sub>2</sub>/人]、0.060[kg-CO<sub>2</sub>/人]と試算された(図-3.11)。鞆町が東員町より高くなった要因として、車両の電費や車両定員に対して相対的に非効率な運行がなされていたこと、鞆町では利用者の有無に関わらず路線定期型で運行されていたことに対し、東員町では利用者の必要に応じたデマンド型にて運行されていたこと等が考えられる。



③ 利用者視点からみた低炭素性評価のために収集すべきデータ群

以上をまとめると、1) 既存の低炭素性評価の方法論に課題があることを確認した。2) 「環境にやさしい」と一般に評される移動手段であっても、利用パターンを考慮すると、CO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与しない場合があることを実データに基づき把握した。

そこで、利用者視点からみた新たな交通手段の低炭素性を評価する際に収集すべきデータ群（表-3.5）をリスト化した。なお、調査実施主体の負担を考慮して、低炭素性を評価するために「必ず取得すべき」「取得すべき」「可能ならば取得すべき」の3段階に区分した。

(2) MaaS 利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性及び、生活の質にかかわる移動制約と都市構造の関連性（令和3年度）

① MaaS の利用経験とサービス向上がもたらす利用可能性

現状のMaaSの利用経験は、すべての属性において「利用なし」の回答割合が非常に高い（概ね8割以上）。加えて、利用経験と個人属性との間に統計的な有意差があることも確認された。また、「通勤・通学」と「趣味や娯楽」とともに「自家用車の利用頻度」において、「1年に数回程度」の自動車依存度の低い被験者のレベル3の利用割合（10.4%）が有意に高かった（表-3.6）。さらに、MaaSの利用経験は、若年層・中年層、自動車依存度の低い人が該当する傾向にあり、これらは首都圏よりも地方圏において強い関係が確認できた（表-3.7）。

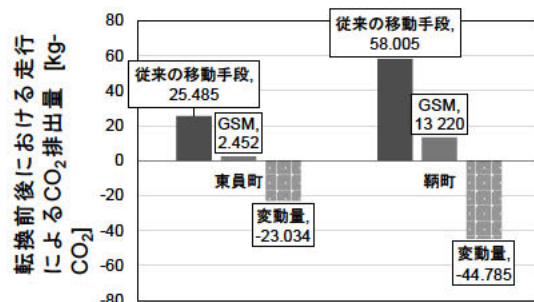


図-3.9 GSM導入前後の走行によるCO<sub>2</sub>排出量の変動量

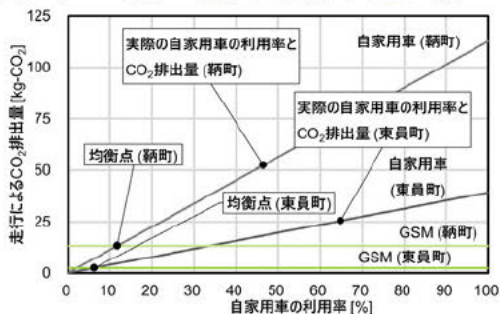


図-3.10 従来の自家用車利用率とGSMのCO<sub>2</sub>排出量との関係

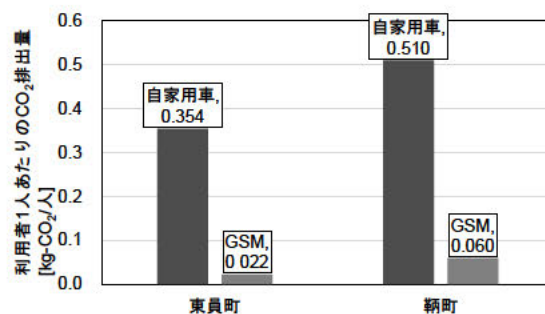


図-3.11 自家用車とGSMの利用者1人あたりのCO<sub>2</sub>排出量

表-3.5 利用者視点の低炭素性評価のために収集すべきデータ群（対象者：次世代型モビリティの利用者）

取得方法	調査項目	優先度	備考
利用者アンケート	新たな交通手段	① 移動目的	● 通勤・通学、業務、買物、食事、観光、送迎、通院、その他利用
		② 出発地・目的地	● 町丁目あるいは施設名
		③ 移動のしやすさ	● 5～7件法(利用しない場合の交通手段⑧との比較)
		④ 利用区間	○ 公共交通の場合、停留所等の乗降地点が設定されている交通手段のみ対象。
		⑤ 利用頻度	○ 毎日、ほぼ毎日(週4～5回)、週2～3日程度、週1回程度、月2回程度、月1回程度、月1回未満
		⑥ 新規移動	○ 新たな交通手段の利用によって新しくできるようになった移動かどうか。中心部の奥客室に行けるようになった(目的の増加)、気軽に買えるようになった(頻度の増加)等
		⑦ 同伴者の有無	△ 移動人数
		⑧ 交通手段	● 交通手段
		⑨ 移動頻度	○ 毎日、ほぼ毎日(週4～5回)、週2～3日程度、週1回程度、月2回程度、月1回程度、月1回未満
		⑩ 移動のしやすさ	○ 5～7件法
		⑪ 同伴者の有無	△ 移動人数
	個人・世帯属性	⑫ 居住地	● 町丁目あるいは郵便番号
		⑬ 年齢	○ 20歳未満、20代、30代、40代、50代、60代、70代、80代以上
		⑭ 性別	△
		⑮ 世帯構成	△ 国勢調査の項目と同じ
		⑯ 職業	△ 国勢調査の項目と同じ
実測	新たな交通手段(車両)	⑰ 実燃費・電費	○

●:必ず取得べき、○:取得すべき、△:可能ならば取得すべき

表-3.6 「通勤・通学」、「趣味や娯楽」のMaaSの利用経験（両地域のサンプルの合計）

	通勤・通学					趣味や娯楽					
	性別	利用なし	レベル1	レベル2	レベル3	性別	利用なし	レベル1	レベル2	レベル3	
個人属性	男性 (n=1,077)	83.1%	11.9%	1.9%	3.1%	男性 (n=1,077)	81.2%	13.0%	2.3%	3.4%	
	女性 (n=923)	85.5%	12.4%	1.3%	0.9%	女性 (n=923)	80.5%	15.3%	2.6%	1.6%	
	20代 (n=400)	77.3%	19.8%	3.3%	3.3%	20代 (n=400)	77.3%	20.3%	4.5%	5.0%	
	30代 (n=400)	81.3%	16.0%	1.0%	1.8%	30代 (n=400)	78.8%	17.0%	2.3%	2.0%	
	40代 (n=400)	85.0%	11.0%	2.3%	1.8%	40代 (n=400)	82.0%	13.5%	2.5%	2.0%	
公共交通機関のサービスレベル	自由に使える自動車の所有	持っている (n=1,154)	87.4%	9.5%	1.5%	1.6%	持っている (n=1,154)	84.1%	11.6%	1.9%	2.4%
	持っていない (n=846)	79.9%	15.6%	1.9%	2.7%	持っていない (n=846)	76.6%	17.4%	3.2%	2.8%	
	鉄道駅までの徒歩の所要時間	10分未満 (n=821)	79.0%	15.6%	2.6%	2.8%	10分未満 (n=821)	77.3%	16.2%	3.7%	2.8%
	10分以上20分未満 (n=656)	84.1%	13.4%	1.7%	0.6%	10分以上20分未満 (n=656)	79.4%	16.3%	2.4%	1.8%	
	20分以上 (n=438)	92.7%	5.3%	0.2%	1.8%	20分以上 (n=438)	88.8%	8.7%	0.2%	2.3%	
自家用車・公共交通機関の利用頻度	バス停までの徒歩の所要時間	わからない (n=85)	90.6%	3.5%	0.0%	5.9%	わからない (n=85)	85.9%	3.5%	2.4%	8.2%
	10分未満 (n=1,462)	84.4%	12.4%	1.4%	1.8%	10分未満 (n=1,462)	81.3%	14.5%	2.2%	2.1%	
	10分以上20分未満 (n=328)	83.5%	12.5%	2.4%	1.5%	10分以上20分未満 (n=328)	78.7%	16.5%	2.7%	2.1%	
	20分以上 (n=74)	81.1%	10.8%	2.7%	5.4%	20分以上 (n=74)	81.1%	5.4%	2.7%	10.8%	
	わからない (n=136)	85.3%	8.8%	2.2%	3.7%	わからない (n=136)	82.4%	8.1%	4.4%	5.1%	

赤字: 有意に高い 青字: 有意に低い : 1%有意 : 5%有意

表-3.7 首都圏、地方圏別のMaaSの利用経験の二項ロジスティックモデル

居住地域	目的 (1: 利用あり, 0: 利用したことがない)	採択された説明変数と有意性					モデルの評価		
		説明変数 (1: 該当, 0: 非該当)	偏回帰係数	p値	判定	オッズ比	p値	的中率	
地方圏 (岡山市) (n=1,000)	通勤・通学	性別 (0: 男性, 1: 女性)	-0.6091	0.0230	*	0.5438	p<0.001	91.60%	
		年齢	20代	1.0654	p<0.001	**			2.9020
		バス停までの徒歩の所要時間	10分未満	-0.5881	0.0180	*			0.5554
		自家用車の利用頻度	利用なし	0.7533	0.0118	*			2.1240
		1年に数回程度	1.7795	0.0031	**	5.9268			
		鉄道の利用頻度	利用なし	-0.8193	p<0.001	**			0.4407
		定数項	-1.8196	p<0.001	**	0.1621			
	趣味や娯楽	年齢	20代	0.6585	0.0022	**	1.9319	p<0.001	87.00%
		バス停までの徒歩の所要時間	10分未満	-0.4582	0.0226	*	0.6324		
		自家用車の利用頻度	利用なし	0.5376	0.0355	*	1.7118		
1年に数回程度		1.6889	0.0024	**	5.4134				
鉄道の利用頻度		利用なし	-0.6173	0.0021	**	0.5394			
バスの利用頻度		1~3週間に数回程度	0.8625	0.0256	*	2.3692			
首都圏 (東京都区部) (n=1,000)	通勤・通学	性別 (0: 男性, 1: 女性)	-0.5018	0.0035	**	0.6055	p<0.001	76.90%	
		年齢	20代	1.4847	p<0.001	**			4.4135
		30代	1.1107	p<0.001	**	3.0366			
		40代	0.7406	0.0012	**	2.0971			
		自家用車の利用頻度	1年に数回程度	0.8222	0.0279	*			2.2754
		1~3か月に数回程度	0.8832	0.0014	**	2.4185			
		鉄道の利用頻度	利用なし	-0.9167	p<0.001	**			0.3998
	定数項	-1.7202	p<0.001	**	0.1790				
	趣味や娯楽	年齢	20代	0.9504	p<0.001	**	2.5867	p<0.001	74.40%
		30代	0.6895	p<0.001	**	1.9927			
鉄道の運行間隔		10分以上20分未満	0.4646	0.0465	*	1.5914			
自家用車の利用頻度		1~3か月に数回程度	0.6640	0.0134	*	1.9426			
鉄道の利用頻度	利用なし	-0.8867	p<0.001	**	0.4120				
定数項	-1.4455	p<0.001	**	0.2356					

\*\* : 1%有意, \* : 5%有意

次に、将来のMaaSの利用可能性については、「日常生活」と「非日常生活」とともに、公共交通機関の利便性が現状と変わらない場合には、サービスレベルが向上しても、半数以上の人は利用意向がないことが明らかになった（表-3.8）。また、年齢や自動車依存度、公共交通機関のサービスレベルはMaaSの利用可能性に影響を及ぼしていた。公共交通のサービスレベルが相対的に高い地域の居住者の利用可能性が高い傾向にあり、この関係性は首都圏より地方圏において強かった（表-3.9）。

以上より、地方圏と首都圏ともに、MaaSは新たな交通サービスとして期待されているものの、現状としては限定的な利用にとどまり、利用者の属性にも偏りがあった。また、首都圏よりも地方圏において、公共交通の利便性（駅までの所要時間や運行間隔など）と自動車依存度がMaaSの利用可能性に影響しており、MaaSの導入・普及は、これら要因の改善が前提となることが示唆される。

表-3.8 「日常生活」、「非日常生活」のMaaSの利用可能性（両地域のサンプルの合計）

	日常生活			非日常生活		
	性別 p値=0.8856	男性(n=1,077) 71.9%	28.1%	性別 p値=0.0200	男性(n=1,077) 63.7%	36.3%
個人属性	年齢 p値=0.0000	女性(n=923) 72.2%	27.8%	女性(n=923) 58.6%	41.4%	
		20代(n=400) 62.0%	38.0%	20代(n=400) 58.0%	50.0%	
		30代(n=400) 68.0%	32.0%	30代(n=400) 58.5%	41.5%	
		40代(n=400) 74.0%	26.0%	40代(n=400) 63.3%	36.8%	
		50代(n=400) 76.0%	24.0%	50代(n=400) 67.8%	32.3%	
		60代以上(n=400) 80.0%	20.0%	60代以上(n=400) 67.3%	32.8%	
公共交通機関のサービスレベル	自由に使える自動車の所有 p値=0.0000	持っている(n=1,154) 65.8%	34.2%	持っている(n=1,154) 65.4%	34.6%	
		持っていない(n=846) 76.5%	23.5%	持っていない(n=846) 55.8%	44.2%	
		鉄道駅までの徒歩の所要時間 p値=0.0000	10分未満(n=821) 66.1%	33.9%	10分未満(n=821) 56.8%	43.2%
		10分以上20分未満(n=656) 69.8%	30.2%	10分以上20分未満(n=656) 58.7%	41.3%	
		20分以上(n=438) 83.6%	16.4%	20分以上(n=438) 69.6%	30.4%	
		わからない(n=85) 85.9%	14.1%	わからない(n=85) 83.5%	16.5%	
公共交通機関のサービスレベル	バス停までの徒歩の所要時間 p値=0.4069	10分未満(n=1,462) 71.9%	28.1%	10分未満(n=1,462) 60.9%	39.1%	
		10分以上20分未満(n=328) 70.4%	29.6%	10分以上20分未満(n=328) 59.8%	40.2%	
		20分以上(n=74) 70.3%	29.7%	20分以上(n=74) 58.1%	41.9%	
		わからない(n=136) 77.9%	22.1%	わからない(n=136) 71.3%	28.7%	
		鉄道の運行間隔 p値=0.0000	10分未満(n=939) 65.6%	34.4%	10分未満(n=939) 56.3%	43.7%
		10分以上20分未満(n=331) 69.8%	30.2%	10分以上20分未満(n=331) 59.5%	40.5%	
公共交通機関のサービスレベル	鉄道の運行間隔 p値=0.0000	20分以上(n=397) 76.3%	23.7%	20分以上(n=397) 61.7%	38.3%	
		わからない(n=333) 87.1%	12.9%	わからない(n=333) 76.9%	23.1%	
		10分未満(n=471) 69.6%	30.4%	10分未満(n=471) 61.8%	38.2%	
		10分以上20分未満(n=600) 64.7%	35.3%	10分以上20分未満(n=600) 54.7%	45.3%	
		20分以上(n=416) 76.7%	23.3%	20分以上(n=416) 61.5%	38.5%	
		わからない(n=513) 78.9%	21.1%	わからない(n=513) 68.6%	31.4%	
利用頻度	自家用車の利用頻度 p値=0.0000	ほぼ毎日(n=561) 81.6%	18.4%	ほぼ毎日(n=561) 71.5%	28.5%	
		1~3週間に数回程度(n=515) 75.9%	24.1%	1~3週間に数回程度(n=515) 61.6%	38.4%	
		1~3か月に数回程度(n=106) 55.7%	44.3%	1~3か月に数回程度(n=106) 46.2%	53.8%	
		1年に数回程度(n=48) 50.0%	50.0%	1年に数回程度(n=48) 41.7%	58.3%	
		利用なし(n=770) 66.0%	34.0%	利用なし(n=770) 57.1%	42.9%	
		鉄道の利用頻度 p値=0.0000	ほぼ毎日(n=301) 62.8%	37.2%	ほぼ毎日(n=301) 52.2%	47.8%
利用頻度	鉄道の利用頻度 p値=0.0000	1~3週間に数回程度(n=423) 58.9%	41.1%	1~3週間に数回程度(n=423) 49.2%	50.8%	
		1~3か月に数回程度(n=290) 67.9%	32.1%	1~3か月に数回程度(n=290) 56.9%	43.1%	
		1年に数回程度(n=221) 76.0%	24.0%	1年に数回程度(n=221) 60.2%	39.8%	
		利用なし(n=765) 83.3%	16.7%	利用なし(n=765) 73.7%	26.3%	
		バスの利用頻度 p値=0.0000	ほぼ毎日(n=51) 74.5%	25.5%	ほぼ毎日(n=51) 62.7%	37.3%
		1~3週間に数回程度(n=188) 62.8%	37.2%	1~3週間に数回程度(n=188) 51.1%	48.9%	
利用頻度	バスの利用頻度 p値=0.0000	1~3か月に数回程度(n=357) 62.2%	37.8%	1~3か月に数回程度(n=357) 52.9%	47.1%	
		1年に数回程度(n=282) 68.4%	31.6%	1年に数回程度(n=282) 54.6%	45.4%	
		利用なし(n=1,122) 77.5%	22.5%	利用なし(n=1,122) 67.4%	32.6%	

赤字: 有意に高い, 青字: 有意に低い, 1%有意, 5%有意

表-3.9 首都圏、地方圏別のMaaSの利用可能性の二項ロジスティックモデル

居住地域	目的 (1: 利用意向あり, 0: 利用意向なし)	採択された説明変数と有意性				モデルの評価		
		説明変数 (1: 該当, 0: 非該当)	偏回帰係数	p値	判定オッズ比	p値	的中率	
地方圏 (岡山市) (n=1,000)	日常生活	鉄道駅までの徒歩での所要時間	20分以上	-0.5044	0.0043	**	0.6039	p<0.001 79.90%
		10分以上20分未満	0.6013	0.0051	**	1.8244		
		鉄道の運行間隔	20分以上	0.5528	0.0043	**	1.7381	
		自家用車の利用頻度	1~3か月に数回程度	1.0562	0.0035	**	2.8754	
		バスの利用頻度	利用なし	-0.4392	0.0114	*	0.6445	
	非日常生活	1~3週間に数回程度	0.7855	0.0293	*	2.1934		
		定数項	-1.3750	p<0.001	**	0.2528		
		年齢	20代	0.8739	p<0.001	**	2.3962	
		30代	0.5756	0.0035	**	1.7782		
		40代	0.4408	0.0233	*	1.5539		
首都圏 (東京都区部) (n=1,000)	日常生活	バスの運行間隔	10分以上20分未満	0.7659	p<0.001	**	2.1509	p<0.001 67.80%
		0.4983	0.0022	**	1.6459			
		自家用車の利用頻度	1~3か月に数回程度	0.9111	0.0117	*	2.4870	
		1~3週間に数回程度	0.3142	0.0424	*	1.3691		
		鉄道の利用頻度	利用なし	-0.5571	p<0.001	**	0.5729	
非日常生活	鉄道の利用頻度	1~3週間に数回程度	0.7282	0.0414	*	2.0713		
	定数項	-1.2889	p<0.001	**	0.2756			
	年齢	20代	0.8934	p<0.001	**	2.4435		
	30代	0.6184	p<0.001	**	1.8559			
	バスの運行間隔	10分以上20分未満	0.3512	0.0118	*	1.4208		
首都圏 (東京都区部) (n=1,000)	日常生活	鉄道の利用頻度	利用なし	-0.9791	p<0.001	**	0.3757	p<0.001 65.10%
		定数項	-0.9212	p<0.001	**	0.3981		
		年齢	20代	0.6494	p<0.001	**	1.9144	
		30代	0.3503	0.0357	*	1.4195		
		鉄道の利用頻度	利用なし	-1.0549	p<0.001	**	0.3482	
非日常生活	定数項	-0.2877	0.0012	**	0.7500	p<0.001 60.40%		

\*\* : 1%有意, \* : 5%有意

② QOL（日常生活での移動制約）と都市構造の関連性

まず、地方圏では日常生活で自由に移動が「できている」、「おおむねできている」の選択率がそれぞれ29.4%、55.1%を占めており、84.5%が移動できていると回答した（図-3.12）。首都圏では、自由に移動が「できている」回答者は41.0%、「おおむねできている」回答者は48.7%であり、89.7%が移動できていると回答した（図-3.13）。また、地方圏では、移動制約要因として「公共交通の利用が不便である」の選択率が37.0%で最も高く、次いで「交通渋滞等で移動するのに長時間かかる」

表-3.10 地方圏，首都圏別の移動制約要因と移動の可否の関連性を検証した順序ロジスティック回帰分析

分析対象都市	地方圏(岡山市)				首都圏(東京都区部)				
	変数	偏回帰係数	標準誤差	p値	判定	偏回帰係数	標準誤差	p値	判定
<b>移動制約要因</b>									
自動車運転免許を持っていない	-0.898	0.331	0.007	**	-0.057	0.179	0.751		
自家用車を保有していない	-1.034	0.233	0.000	**	-0.023	0.125	0.854		
公共交通の利用が不便である	-0.447	0.122	0.000	**	-0.379	0.210	0.071		
交通渋滞等で移動するのに長時間かかる	0.001	0.123	0.996		-0.345	0.173	0.047	*	
身体的な負担がある	-0.732	0.233	0.002	**	-0.732	0.269	0.006	**	
単独での行動が難しい・不可能である	-0.828	0.439	0.059		-0.934	0.410	0.023	*	
定数項(移動の可否: できていない)	-3.282	0.154	0.000	**	-3.820	0.202	0.000	**	
定数項(移動の可否: あまりできていない)	-2.100	0.111	0.000	**	-2.387	0.121	0.000	**	
定数項(移動の可否: おおむねできていない)	0.590	0.088	0.000	**	0.209	0.084	0.013	*	
モデルのp値		0.000				0.000			
Cox-SnellのR <sup>2</sup>		0.053				0.027			
NagelkerkeのR <sup>2</sup>		0.060				0.031			
McFaddenのR <sup>2</sup>		0.025				0.013			
判別中率		55.3%				48.7%			
サンプル数		1,142				1,082			

\*\*: 1%有意, \*: 5%有意

表-3.11 地方圏，首都圏別の個人属性，都市構造と移動制約要因の間の独立性の検定

分類項目	変数(単位)	地方圏(岡山市)				分類項目	変数(単位)	東京都区部(首都圏)			
		移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ			移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ	移動制約要因のあるカテゴリ
個人属性	性別	女性	女性			性別	女性				
	年齢	20歳代	20歳代			年齢	20歳代				
	自由に使える自家用車の所有	持っていない	持っていない	持っている		自由に使える自家用車の所有	持っている				
	自動車運転免許の所有	持っていない/持っていたが返納した	持っていない/持っていたが返納した	持っている		自動車運転免許の所有	持っている				
土地利用	人口密度 [人/km <sup>2</sup> ]		6,000以上8,000未満	2,000未満		人口密度 [人/km <sup>2</sup> ]					
	建物密度 [件/km <sup>2</sup> ]		2,000以上	500未満, 500以上1,000未満		建物密度 [件/km <sup>2</sup> ]					
	用途		商業系	工業系, 農業系, 林野系		用途					
公共交通	駅心までの距離 [km]		5未満	5以上10未満, 15以上	5未満	駅心までの距離 [km]					
	最寄りの駅までの徒歩での所要時間			15分以上		最寄りの駅までの徒歩での所要時間	15分以上	15分以上	15分以上	15分以上	
	最寄りの駅までの運行間隔			15分以上		最寄りの駅までの運行間隔					
	最寄りのバス停までの徒歩での所要時間	5分以上		5分以上		最寄りのバス停までの徒歩での所要時間	5分以上		5分以上		
				15分以上	15分未満			15分未満	15分以上		

<独立性の検定> : 1%有意 : 5%有意

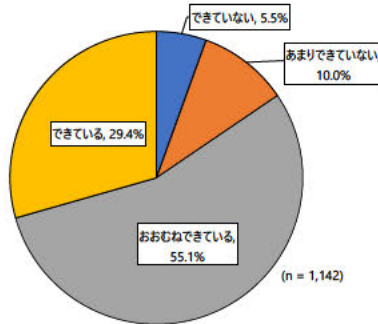


図-3.12 地方圏における移動の可否の基礎集計

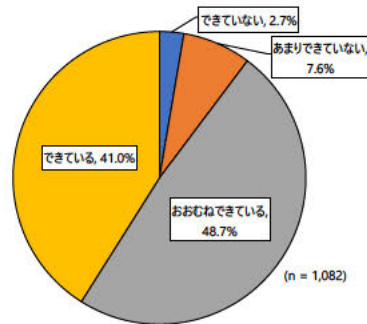


図-3.13 首都圏における移動の可否の基礎集計

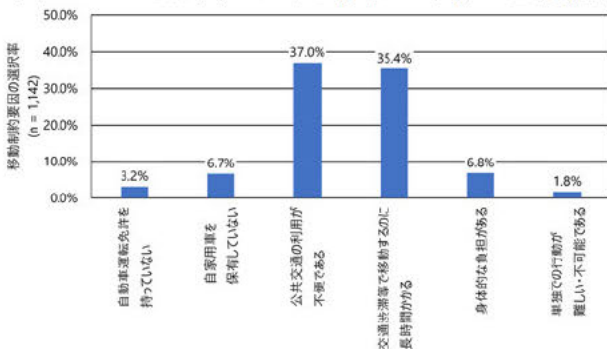


図-3.14 地方圏における移動制約要因の基礎集計

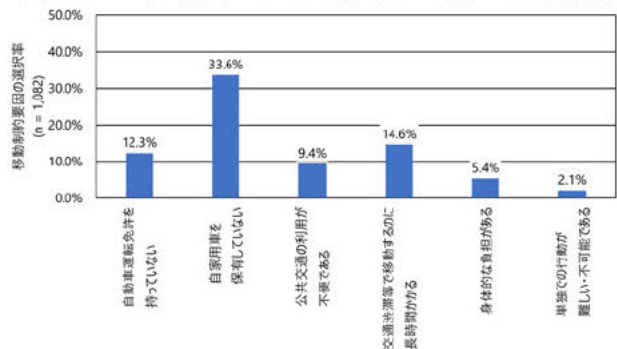


図-3.15 首都圏における移動制約要因の基礎集計

図-3.14 地方圏における移動制約要因の基礎集計 図-3.15 首都圏における移動制約要因の基礎集計が高い (35.4%) (図-3.14)。首都圏については、移動制約要因として「自家用車を保有していない」の選択率が33.6%で最も高かった (図-3.15)。その一方で、移動の可否に影響を及ぼす移動制約要因としては、地方圏では「自家用車を保有していない」が、首都圏では「単独での行動が難しい・不可能である」が最も強く影響しており、都市構造や公共交通の状況によって移動の可否に影響を与える要因が異なることが確認できた (表-3.10)。さらに、各種移動制約の要因と都市構造等との関連性も把握できた (表-3.11)。

### (3) 都市構造及び公共交通サービスと CO<sub>2</sub> 排出量の関連性（令和 4 年度）

#### ① 都市構造等と CO<sub>2</sub> 排出量の関連性

地方圏と首都圏のそれぞれにおいて、1人あたりの私的交通手段での移動に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量の平均値は、825 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)]、186 [kg-CO<sub>2</sub>/(人年)]となった。（本分析は日常的な移動のみを対象としている）また、地方圏では、人口密度が4,000 人/km<sup>2</sup>以上の居住地、用途が商業系、都心までの距離が10 km未満の居住地ではCO<sub>2</sub>排出量が相対的に低いことが明らかになった。また、居住地の最寄りの鉄道駅の運行間隔が15分未満であればCO<sub>2</sub>排出量が低い傾向にあることも確認できた（表-3.12）。その一方で、首都圏では、地方圏と比較して、統計的に有意な変数が少なく、都市構造とCO<sub>2</sub>排出量との関連性が相対的に弱いことが示された。（表-3.13）。

#### ② 公共交通サービスに対する満足度、利用頻度と CO<sub>2</sub> 排出量との関連性

地方圏と首都圏ともに、公共交通のソフト面よりハード面の個別評価が、鉄道とバスの総合的な満足度に影響を与える傾向にあった（表-3.14）。そして、地方圏では鉄道とバスの両方で総合的な満足度が上がることにより利用頻度の増加に寄与し（表-3.15）、利用頻度が高いほどCO<sub>2</sub>排出量が低くなることが定量的に示された（表-3.16）。その一方で、首都圏では、公共交通サービスに対する総合的な満足度と利用頻度の間に関連性があつたものの（表-3.15）、利用頻度とCO<sub>2</sub>排出量との関連性はみられなかった（表-3.16）。なお、紙数の関係上、分析結果は割愛するが、地方圏では、鉄道とバスともにハード面のサービス内容（鉄道は、乗り継ぎのしやすさを除く）において、平均満足度が高くなるほどCO<sub>2</sub>排出量が低くなる傾向にあった。これに対して首都圏では、鉄道とバスのハード面、ソフト面のサービス内容に対する満足度とCO<sub>2</sub>排出量との関連性は確認できなかった。

#### ③ 利用者視点からみた低炭素・脱炭素に向けた IT 等交通マネジメントの方向性

令和 2 年度から 4 年度までの分析結果に基づいて、IT 等交通マネジメントの低炭素・脱炭素化に向けた方向性を示す。（表-3.17）

- 鉄道・バスなどの既存の公共交通を対象とした場合の施策の優先順位は、まず「都市構造」、そして「公共交通（ハード施策）」、最後に「公共（ソフト施策）」である。具体的には、地方圏においては、現状の低密度な都市構造を、ある程度の密度（40 人/ha 以上）を持たせてコンパクトに再編させることによって公共交通の成立可能性を高めるとともに、鉄道駅やバス停の位置、そして運行頻度（15 分未満）を充実させることが、IT 等の交通マネジメントを効果的に機能させるための条件となる。言い換えれば、それら条件を満たさない場合は、MaaS などの IT による利便性を向上させたとしてもその効果は限定的になるとみられる。なお、公共交通の利便性の低いエリアでは、それ自体が移動制約となっており、公共交通の利便性を高めることによって、生活の質を高めることも期待できる。一方で、首都圏においては、地方圏と比較して、都市構造や公共交通の利便性と CO<sub>2</sub> 排出量との関係性が弱いことが確認された。これは、高密度な都市構造と高利便な公共交通が既に実現していることや自家用車を持たない方が多数であること等が要因と考えられる。首都圏では MaaS 等を積極的に導入していく段階にあるが、公共交通利用者を増やしても CO<sub>2</sub> 排出量の削減に直結しない可能性があることに留意すべきであり、車両燃費の改善や利用量削減などの（公共交通ではなく）自家用車利用そのものに焦点を当てた施策が必要になる。

表-3.12 地方圏における個人属性、都市構造による私的交通手段での移動に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量の差の検定

	変数	n	平均値	標準偏差	検定結果
個人属性	性別 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	男性	547	1 052	1 203	p値 = 0.000
	女性	595	616	744	
	年齢 (p値 = 0.001)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	20歳代	146	696	877	p値 = 0.022
	30歳代	249	976	1 106	
	40歳代	255	942	1 159	
	50歳代	266	835	954	
	60歳代以上	226	598	822	p値 = 0.001
	自由に使える自家用車の所有 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
持っている	945	968	1 047	p値 = 0.000	
持っていない	197	140	368		
自動車運転免許の所持 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
持っている	1 069	874	1 027	p値 = 0.000	
持っていない/持っていたが返納した	73	105	276		
土地利用	人口密度 [人/km <sup>2</sup> ] (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	2 000未満	289	1 104	1 157	p値 = 0.005
	2 000以上4 000未満	194	907	1 093	
	4 000以上6 000未満	252	761	911	
	6 000以上8 000未満	211	575	796	
	8 000以上	196	683	944	
	建物密度 [棟/km <sup>2</sup> ] (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	500未満	165	1 191	1 211	p値 = 0.003
	500以上1 000未満	181	948	985	
	1 000以上1 500未満	205	855	1 161	
	1 500以上2 000未満	248	791	971	
	2 000以上	343	591	775	
	用途 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	住居系	630	754	980	p値 = 0.004
	商業系	111	484	683	
	工業系	92	783	805	
農業系	171	1 064	1 136		
林野系	138	1 157	1 203		
都心までの距離 [km] (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
5未満	515	621	855	p値 = 0.000	
5以上10未満	464	899	1 046		
10以上15未満	99	1 224	1 236		
15以上	64	1 309	1 171		
公共交通	最寄りの鉄道駅までの徒歩での所要時間 (p値 = 0.038)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	15分未満	433	795	1 013	p値 = 0.008
	15分以上	586	869	1 037	
	分からない	123	718	894	
	最寄りの鉄道駅の運行間隔 (p値 = 0.006)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	15分未満	310	768	1 046	p値 = 0.008
	15分以上	522	903	1 039	
	分からない	310	751	928	
	最寄りのバス停までの徒歩での所要時間 (p値 = 0.352)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	5分未満	358	783	1 045	p値 = 0.000
5分以上	645	834	994		
分からない	139	888	1 027		
最寄りのバス停の運行間隔 (p値 = 0.171)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
15分未満	383	792	1 088	p値 = 0.003	
15分以上	442	828	960		
分からない	317	861	996		

1%有意 5%有意

表-3.13 首都圏における個人属性、都市構造による私的交通手段での移動に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量の差の検定

	変数	n	平均値	標準偏差	検定結果
個人属性	性別 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	男性	537	279	798	p値 = 0.000
	女性	545	95	352	
	年齢 (p値 = 0.125)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	20歳代	212	154	586	p値 = 0.006
	30歳代	216	229	718	
	40歳代	218	202	604	
	50歳代	211	212	652	
	60歳代以上	225	136	536	
	自由に使える自家用車の所有 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
持っている	320	539	991	p値 = 0.000	
持っていない	762	38	251		
自動車運転免許の所持 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
持っている	852	232	689	p値 = 0.000	
持っていない/持っていたが返納した	230	17	146		
人口密度 [人/km <sup>2</sup> ] (p値 = 0.025)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
4 000未満	25	231	688	p値 = 0.006	
4 000以上8 000未満	33	272	637		
8 000以上12 000未満	92	173	586		
12 000以上16 000未満	189	226	632		
16 000以上	743	173	621		
建物密度 [棟/km <sup>2</sup> ] (p値 = 0.003)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
1 000未満	74	156	560	p値 = 0.003	
1 000以上2 000未満	103	181	575		
2 000以上3 000未満	216	332	975		
3 000以上4 000未満	350	165	500		
4 000以上	339	123	431		
用途 (p値 = 0.447)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
住居系	750	172	578	p値 = 0.010	
商業系	129	237	798		
工業系	203	205	651		
公共交通	都心までの距離 [km]				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	最寄りの鉄道駅までの徒歩での所要時間 (p値 = 0.082)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	15分未満	887	178	622	p値 = 0.011
	15分以上	171	240	645	
	分からない	24	120	367	
	最寄りの鉄道駅の運行間隔 (p値 = 0.655)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
	15分未満	950	192	640	p値 = 0.011
	15分以上	58	202	606	
	分からない	74	99	323	
	最寄りのバス停までの徒歩での所要時間 (p値 = 0.010)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)
5分未満	516	200	639	p値 = 0.010	
5分以上	412	198	645		
分からない	154	108	477		
最寄りのバス停の運行間隔 (p値 = 0.000)				カテゴリ間のp値 (≤0.05)	
15分未満	639	203	655	p値 = 0.003	
15分以上	139	241	665		
分からない	304	125	519		

1%有意 5%有意

表-3.14 公共交通サービスへの総合的な満足度を目的変数とした順序ロジスティック回帰分析

	公共交通サービス		鉄道		バス					
	変数	偏回帰係数	標準誤差	p値	判定	偏回帰係数	標準誤差	p値	判定	
地方圏 (岡山市)	公共交通サービスに対する満足度(ハード面)									
	運行本数	1.344	0.222	0.000	**	1.694	0.264	0.000	**	
	駅や停留所の位置	1.109	0.231	0.000	**	0.708	0.207	0.001	**	
	駅や停留所での居心地の良さ	0.272	0.258	0.291		1.142	0.332	0.001	**	
	乗り継ぎのしやすさ	0.521	0.246	0.035	*	0.660	0.292	0.024	*	
	車両内の快適性	0.586	0.235	0.013	*	0.143	0.280	0.609		
	公共交通サービスに対する満足度(ソフト面)									
	運行の情報や案内の分かりやすさ	0.508	0.296	0.086		0.148	0.339	0.662		
	運行の情報や案内の検索のしやすさ	0.202	0.289	0.483		0.866	0.327	0.008	**	
	利用料金	1.086	0.246	0.000	**	1.818	0.287	0.000	**	
	料金の支払い方法	1.227	0.228	0.000	**	0.464	0.259	0.073		
	定数項									
	定数項(総合的な満足度: 不満)	-2.473	0.139	0.000	**	-1.951	0.105	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: やや不満)	-1.051	0.084	0.000	**	-0.528	0.071	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: 普通)	3.330	0.160	0.000	**	3.631	0.175	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: やや満足)	6.541	0.307	0.000	**	7.323	0.407	0.000	**	
	モデルのp値		0.000				0.000			
	Cox-SnellのR <sup>2</sup>		0.463				0.413			
	NagelkerkeのR <sup>2</sup>		0.514				0.453			
	McFaddenのR <sup>2</sup>		0.269				0.220			
判別率		69.6%				62.3%				
サンプル数		1,142				1,142				
首都圏 (東京都区部)	公共交通サービスに対する満足度(ハード面)									
	運行本数	1.624	0.215	0.000	**	1.103	0.236	0.000	**	
	駅や停留所の位置	0.363	0.211	0.085		0.788	0.240	0.001	**	
	駅や停留所での居心地の良さ	0.299	0.193	0.122		0.508	0.287	0.077		
	乗り継ぎのしやすさ	0.755	0.189	0.000	**	1.284	0.285	0.000	**	
	車両内の快適性	1.230	0.197	0.000	**	0.935	0.265	0.000	**	
	公共交通サービスに対する満足度(ソフト面)									
	運行の情報や案内の分かりやすさ	0.143	0.256	0.577		0.525	0.315	0.096		
	運行の情報や案内の検索のしやすさ	0.472	0.254	0.064		0.302	0.322	0.348		
	利用料金	0.975	0.189	0.000	**	0.734	0.244	0.003	**	
	料金の支払い方法	1.751	0.195	0.000	**	0.765	0.225	0.001	**	
	定数項									
	定数項(総合的な満足度: 不満)	-3.253	0.318	0.000	**	-3.024	0.186	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: やや不満)	-1.347	0.147	0.000	**	-1.201	0.092	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: 普通)	3.188	0.194	0.000	**	3.368	0.171	0.000	**	
	定数項(総合的な満足度: やや満足)	6.820	0.306	0.000	**	6.363	0.314	0.000	**	
	モデルのp値		0.000				0.000			
	Cox-SnellのR <sup>2</sup>		0.631				0.521			
	NagelkerkeのR <sup>2</sup>		0.687				0.578			
	McFaddenのR <sup>2</sup>		0.398				0.319			
判別率		71.9%				73.8%				
サンプル数		1,082				1,082				

\*\*: 1%有意, \*: 5%有意

表-3.15 公共交通サービスに対する総合的な満足度と利用頻度の間の独立性の検定

	鉄道・バスの利用頻度		利用しない	1年に1回程度～半年に1回程度		2,3か月に1回程度～1か月に1回程度		2週間に1回程度～1週間に2,3回程度		ほぼ毎日
	鉄道	バス								
地方圏 (岡山市)	鉄道のサービスに対する満足度(総合) (p値 = 0.000)	不満 (n = 56)	64.3%	14.3%	8.9%	7.1%	5.4%			
		やや不満 (n = 137)	37.2%	36.5%	13.9%	6.6%	5.8%			
		普通 (n = 706)	46.7%	28.6%	16.7%	5.0%	3.0%			
		やや満足 (n = 176)	17.6%	32.4%	35.2%	8.0%	6.8%			
		満足 (n = 67)	23.9%	35.8%	19.4%	16.4%	4.5%			
	バスのサービスに対する満足度(総合) (p値 = 0.000)	不満 (n = 105)	64.8%	18.1%	8.6%	6.7%	1.9%			
		やや不満 (n = 217)	47.0%	31.8%	14.3%	4.6%	2.3%			
		普通 (n = 655)	54.5%	26.6%	12.7%	4.4%	1.8%			
		やや満足 (n = 125)	19.2%	28.0%	41.6%	8.8%	2.4%			
		満足 (n = 40)	30.0%	27.5%	30.0%	10.0%	2.5%			
首都圏 (東京都区部)	鉄道のサービスに対する満足度(総合) (p値 = 0.011)	不満 (n = 10)	20.0%	0.0%	30.0%	30.0%	20.0%			
		やや不満 (n = 50)	8.0%	6.0%	16.0%	38.0%	32.0%			
		普通 (n = 425)	6.6%	6.8%	20.5%	34.8%	31.3%			
		やや満足 (n = 353)	1.1%	6.2%	19.0%	41.1%	32.6%			
		満足 (n = 244)	2.5%	5.7%	15.6%	42.2%	34.0%			
	バスのサービスに対する満足度(総合) (p値 = 0.000)	不満 (n = 30)	43.3%	23.3%	16.7%	10.0%	6.7%			
		やや不満 (n = 127)	20.5%	24.4%	30.7%	17.3%	7.1%			
		普通 (n = 665)	38.9%	18.6%	24.8%	14.9%	2.7%			
		やや満足 (n = 156)	10.3%	23.1%	28.2%	34.6%	3.8%			
		満足 (n = 104)	17.3%	12.5%	33.7%	29.8%	6.7%			

<独立性の検定> : 1%有意 : 5%有意

<残差分析> 太字: 1%有意, 細字: 5%有意, 赤字: 有意に高い, 青字: 有意に低い

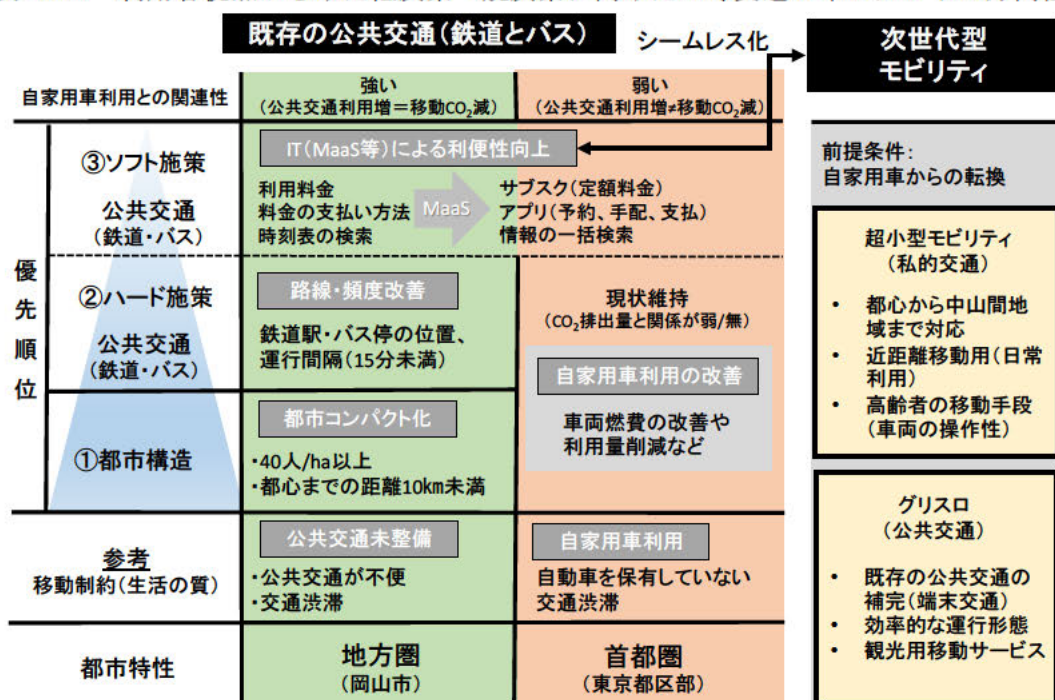
- 超小型 EV やグリーンスローモビリティ等の次世代型モビリティを対象とした場合の低炭素・脱炭素化には、自家用車からの転換が前提となる。一般的に環境にやさしいとされる交通手段であっても、徒歩や自転車からの転換、新規移動の発生などによって、必ずしも低炭素・脱炭素につながらない場合があることが明示されており、自家用車からの転換を促すための導入方法を検討しなければならない。また、超小型モビリティについては、都心から中山間地域までの幅広いエリアでの導入が期待できる。比較的近距離の移動に限定されるものの、車両の操作性の高さから高齢者による自家用車から超小型モビリティへの乗り替えも想定される。また、首都圏では、自家用車を保有していないことが移動制約として挙げられているが、超小型モビリティのもつコンパクト性（駐車省スペース化）との相性もよいと考えられる。グリーンスローモビリティについては、中大量乗合輸送システムの端末交通としての役割が期待できる。運行パターンによっては、CO<sub>2</sub>削減の効果も異なることが示されており、地域特性を十分に考慮した上での効率的な運行形態が求められる。

表-3.16 公共交通の利用頻度による私的交通手段での移動に伴う年間CO<sub>2</sub>排出量の差の検定

	鉄道の利用頻度 (p = 0.000)			n	平均値	標準偏差	カテゴリ間のp値 (≤0.05)			
	利用しない	1年に1回程度~半年に1回程度	2,3か月に1回程度~1か月に1回程度				2週間に1回程度~1週間に2,3回程度	ほぼ毎日	p値 = 0.022	p値 = 0.001
地方圏 (岡山市)	利用しない	464	862	1,026	p値 = 0.001	p値 = 0.001	p値 = 0.001	p値 = 0.000	p値 = 0.016	
	1年に1回程度~半年に1回程度	341	923	1,025						
	2,3か月に1回程度~1か月に1回程度	217	715	954						
	2週間に1回程度~1週間に2,3回程度	73	566	965						
	ほぼ毎日	47	657	1,060						
	バス利用頻度 (p = 0.000)	n	平均値	標準偏差						カテゴリ間のp値 (≤0.05)
利用しない	563	899	1,004	p値 = 0.001	p値 = 0.001	p値 = 0.018	p値 = 0.005			
1年に1回程度~半年に1回程度	308	824	953							
2,3か月に1回程度~1か月に1回程度	187	734	1,154							
2週間に1回程度~1週間に2,3回程度	61	547	963							
ほぼ毎日	23	505	733							
鉄道利用頻度 (p = 0.662)	n	平均値	標準偏差					カテゴリ間のp値 (≤0.05)		
利用しない	44	215	494	p値 = 0.341	p値 = 0.001	p値 = 0.018	p値 = 0.005			
1年に1回程度~半年に1回程度	68	231	591							
2,3か月に1回程度~1か月に1回程度	203	215	804							
2週間に1回程度~1週間に2,3回程度	418	157	502							
ほぼ毎日	349	192	651							
バス利用頻度 (p = 0.341)	n	平均値	標準偏差					カテゴリ間のp値 (≤0.05)		
利用しない	332	150	566	p値 = 0.341	p値 = 0.001	p値 = 0.018	p値 = 0.005			
1年に1回程度~半年に1回程度	211	258	838							
2,3か月に1回程度~1か月に1回程度	288	188	611							
2週間に1回程度~1週間に2,3回程度	209	180	500							
ほぼ毎日	42	124	276							

■ : 1%有意 ■ : 5%有意

表-3.17 利用者視点からみた低炭素・脱炭素に向けたIT等交通マネジメントの方向性





(4) そのほか (COVID-19 流行における人々の交通行動変化)

COVID-19 流行前とコロナ禍の代表交通手段から転換パターンを分析し、公共交通機関の利用継続者・停止者の特性を把握した。表-3.18 に首都圏、地方中心都市、地方小都市のコロナ前後の代表交通手段の転換パターン割合を示す。首都圏大都市では、「通勤・通学」と「趣味や娯楽」ともに、公共交通機関からオンラインへの活動へ変化した割合が高い一方で、地方中心都市や小都市では、他の転換パターンと比較して公共交通機関から乗用車へ転換した割合が高くなっていた。そのほか、紙数の関係上、図表は省略するが、移動目的や居住地域に関わらず公共交通機関の利用は有意に減少していた(ただし「通勤・通学」の地方小都市を除く)。乗用車利用は、首都圏及び地方中心都市の「通勤・通学」においては有意に増加していたが、「趣味や娯楽」においては、いずれの地域においても乗用車の利用に有意差は見られなかった。公共交通の利用継続・停止においては、首都圏は駅への近接性が影響していたが、地方圏では運行間隔が影響していた。

5. 研究目標の達成状況

令和2年度は、グリーンスローモビリティや超小型モビリティの低炭素性を評価するための手法を提案するとともに、具体の事業を対象に評価した。そして、行政やまちづくり団体などが今後、これら次世代型モビリティを導入した際の低炭素性を簡便に評価できるように、利用者視点の低炭素性評価のために収集すべきデータ群を整理し、リスト化(サマリー1)した。令和3年度は、都市特性の異なる地方圏(岡山市)と首都圏(東京都区部)を対象に、MaaSの利用実態や将来の利用可能性、生活の質に影響を及ぼす移動制約に関する調査を実施し、それらと低炭素性との関連性を把握した。令和4年度は、令和3年度と同様の都市を対象に、都市レベルの構造(人口密度や土地利用など)や公共交通サービスと、移動に伴うCO<sub>2</sub>排出量との関連性を定量的に明らかにした。以上の結果に基づき、低炭素・脱炭素化に向けたIT等交通マネジメントの方向性(サマリー2)を示しており、目標どおりの成果をあげたと判断した。そのほか、研究期間中のコロナ禍における交通行動の変化を統計的に捉え、直近の公共交通や自家用車等の利用の動向を把握するための基礎データを構築したことは、計画以上の成果である。

6. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

表-3.18 首都圏、地方圏中心都市、小都市のコロナ前後の代表交通手段の転換パターン割合

	コロナ禍					合計
	公共交通機関	乗用車	二輪車	徒歩	オンライン	
首都圏大都市 (東京都特別区)(n=808)	63.1% (n=510)	2.8% (n=23)	2.2% (n=18)	1.9% (n=15)	10.4% (n=84)	80.4% (n=650)
流行前	公共交通機関	0.4% (n=3)	2.7% (n=22)	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	3.3% (n=27)
	乗用車	0.2% (n=2)	0.1% (n=1)	8.0% (n=65)	0.4% (n=3)	9.0% (n=73)
	二輪車	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	5.4% (n=44)	6.2% (n=50)
	徒歩	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)	0.1% (n=1)	0.2% (n=2)
	オンライン	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)	0.1% (n=1)	0.2% (n=2)
合計	63.9% (n=516)	5.7% (n=46)	10.5% (n=85)	7.8% (n=63)	12.1% (n=98)	100.0% (n=808)
地方中心都市 (岡山県岡山市)(n=804)	10.2% (n=82)	2.2% (n=18)	1.5% (n=12)	1.1% (n=9)	1.2% (n=10)	16.3% (n=131)
流行前	公共交通機関	0.2% (n=2)	57.2% (n=460)	0.3% (n=4)	0.0% (n=0)	58.3% (n=469)
	乗用車	0.0% (n=0)	0.6% (n=5)	17.5% (n=141)	0.5% (n=4)	19.0% (n=153)
	二輪車	0.1% (n=1)	0.1% (n=1)	0.1% (n=1)	5.3% (n=44)	6.0% (n=47)
	徒歩	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.4% (n=3)	0.5% (n=4)
	オンライン	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)
合計	10.6% (n=85)	60.3% (n=485)	19.7% (n=158)	7.1% (n=57)	2.4% (n=19)	100.0% (n=804)
地方小都市 (岡山県津山市+12町村) (n=441)	3.9% (n=17)	1.8% (n=8)	0.2% (n=1)	0.0% (n=0)	0.2% (n=1)	6.1% (n=27)
流行前	公共交通機関	0.7% (n=3)	83.0% (n=366)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	84.1% (n=371)
	乗用車	0.2% (n=1)	0.0% (n=0)	3.4% (n=15)	0.0% (n=0)	3.9% (n=17)
	二輪車	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	5.2% (n=23)	5.2% (n=23)
	徒歩	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
	オンライン	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
合計	4.8% (n=21)	84.8% (n=374)	3.6% (n=16)	5.2% (n=23)	1.6% (n=7)	100.0% (n=441)

※割合の上位5項目までを太字にする

	コロナ禍					合計
	公共交通機関	乗用車	二輪車	徒歩	オンライン	
首都圏大都市 (東京都特別区)(n=789)	32.1% (n=253)	10.4% (n=83)	4.2% (n=33)	2.7% (n=21)	7.1% (n=56)	55.8% (n=440)
流行前	公共交通機関	1.4% (n=11)	12.9% (n=102)	0.8% (n=6)	1.3% (n=9)	14% (n=111)
	乗用車	0.3% (n=2)	0.4% (n=3)	7.9% (n=62)	0.4% (n=3)	9.0% (n=71)
	二輪車	0.4% (n=3)	0.3% (n=2)	0.8% (n=6)	11.4% (n=90)	13.7% (n=108)
	徒歩	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
	オンライン	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
合計	34.1% (n=269)	17.7% (n=140)	12.0% (n=95)	20.0% (n=158)	16.1% (n=127)	100.0% (n=789)
地方中心都市 (岡山県岡山市)(n=858)	4.2% (n=36)	3.7% (n=32)	1.0% (n=8)	0.5% (n=4)	1.6% (n=16)	11.3% (n=97)
流行前	公共交通機関	0.3% (n=3)	70.0% (n=601)	0.9% (n=8)	0.7% (n=6)	73.7% (n=632)
	乗用車	0.2% (n=2)	0.3% (n=3)	9.1% (n=78)	0.2% (n=2)	10.1% (n=87)
	二輪車	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)	2.1% (n=18)	2.6% (n=22)
	徒歩	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)
	オンライン	0.1% (n=1)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.1% (n=1)
合計	5.0% (n=43)	74.2% (n=637)	11.2% (n=96)	3.5% (n=30)	6.1% (n=52)	100.0% (n=858)
地方小都市 (岡山県津山市+12町村) (n=473)	1.5% (n=7)	2.7% (n=13)	0.0% (n=0)	0.2% (n=1)	1.1% (n=5)	5.5% (n=26)
流行前	公共交通機関	0.4% (n=2)	84.8% (n=401)	0.2% (n=1)	0.2% (n=1)	88.2% (n=417)
	乗用車	0.0% (n=0)	0.4% (n=2)	3.6% (n=17)	0.0% (n=0)	4.0% (n=19)
	二輪車	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.8% (n=4)	0.8% (n=4)
	徒歩	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
	オンライン	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)	0.0% (n=0)
合計	1.9% (n=9)	88.2% (n=417)	3.8% (n=18)	1.3% (n=6)	4.9% (n=23)	100.0% (n=473)

※割合の上位5項目までを太字にする

## Ⅱ－４ 地域の社会・空間構造の長期変化に関する低炭素性評価

国立研究開発法人国立環境研究所

社会システム領域 松橋啓介

### 〔要旨〕

本サブテーマでは、将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化をシナリオ化し、CO<sub>2</sub>排出量の長期的推移の予測を行う。さらに、サブテーマ1～3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示す。

そのため、(1)人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、(2)年齢構成を考慮した将来免許保有者数と運転者数の推移を分析・推計する。また、(3)車検証データを用いて全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能にし、サブテーマ1の統合的な分析に提供する。さらに、(4)徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークの近隣に居住する人口の割合を評価する。

その結果、(1)岡山市を例とした2050年のコンパクト化実施の効果を明らかにし、一人あたりの乗用車CO<sub>2</sub>排出量の抑制効果が約13%あることを示した。また、(2)運転者数は免許保有者数以上に高齢化が進み、男性高齢者の運転者数が2050年までに約56%の減となる可能性があること、免許返納タイミングが後ろ倒しになる傾向があること、運転取りやめが可能な地域づくりがますます重要となることを示した。さらに、(3)全国市区町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量推計のための、人口密度と一台あたり走行距離の関係式をサブテーマ1に提供するとともに、人口密度階級別の一人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量が全国平均の±約70%の幅を持つことを示した。軽乗用車についても車検証データを用いた推計を行い、島しょ部や西日本の内陸部で利用が多く、自宅充電による電気自動車の普及が比較的行きやすいことを指摘した。加えて、(4)ウォーキングに適した居住者割合が高い地域は震災や戦災の復興整備や面的な新都市整備がされた地域に多いことを示し、徒歩や電動車椅子の利用しやすい幅の広い歩道の整備と自治体によるウォーキングコースの指定の連携を進めることが望ましいことを指摘した。

これにより、目標どおりの成果をあげた。具体的には、人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、年齢構成を考慮した将来運転者数の推移を分析・推計の推計を行い、地域の社会・空間構造の長期変化を踏まえたCO<sub>2</sub>排出量の予測を可能とした。また、全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計をサブテーマ1に提供し、新技術・サービスの導入の組み合わせによる低炭素性評価を可能とした。さらに、徒歩や電動車椅子の利用に適した歩道ネットワーク近隣の居住割合を評価し、望ましい社会・空間構造とモビリティ低炭素化の方向性を示した。その他、人口密度別の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の係数を更新するとともに、軽乗用車についても空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を行う方法を確立するなど、計画以上の成果をあげた。

### 1. 研究開発目的

課題の全体目標「モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件を明らかにする手法の確立」を達成するためには、モビリティ革命の原動力となるIT・新エネルギー技術を用いた新たなサービスやその組み合わせに関するCO<sub>2</sub>排出量をライフサイクルで評価する手法を構築し、評価を実施するだけでなく、サービスの適用対象となる地域の社会・空間構造の長期変化やライフスタイルの変容を踏まえた交通需要の想定が必要であるため、本サブテーマを設定した。サービスがカバーする人口分布や年齢構成、走行距離帯を把握することで、日本全体の脱炭素化への寄与を評価することが可能となり、望ましい社会・空間構造の将来変化やモビリティ脱炭素化の方向性を示すことに資する。

### 2. 研究目標

将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化

をシナリオ化し、炭素排出量の長期的推移の予測を行う。さらに、サブテーマ1～3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示す。

### 3. 研究開発内容

将来の地域の社会・空間構造の長期変化とそれに伴うライフスタイルの変容を踏まえた交通需要変化をシナリオ化し、炭素排出量の長期的推移の予測を行うため、人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、年齢構成を考慮した将来免許保有者数と運転者数の推移を分析・推計する。

また、サブテーマ1～3の成果による新技術・サービス導入やそれらの組み合わせを考慮した場合の低炭素性を評価し、各地域の将来変化に合わせたモビリティ低炭素化の方向性を示すため、車検証データを用いて全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能にし、サブテーマ1の統合的な分析に提供する。

さらに、望ましい社会・空間構造の方向性について考察を行い、徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークの近隣に居住する人口の割合を評価する。

#### (1) 人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計

長期的な交通システムの脱炭素化を検討する際、人々の時間的・空間的变化がカギとなる。特にコンパクト化は、脱炭素化に寄与する乗合・相乗りを促進する効果があり、その効果を計測することが重要である。本研究ではそのための手法を開発する。

数パターンのメッシュ人口分布シナリオに、メッシュ規模別の乗用車CO<sub>2</sub>排出係数を掛け合わせることで、乗用車CO<sub>2</sub>排出量の将来推計を行い、コンパクト化による抑制効果を示す。その際に、メッシュ規模別の排出係数の設定方法について、区分値、モデル式による補間値を用いる場合について比較検討を行う。

#### (2) 性別5歳階級別の免許保有者数と運転者数の推移の分析と推計<sup>1)</sup>

今後の自動車運転者数動向を知ることは、交通部門のCO<sub>2</sub>削減を検討するために重要な情報となる。そこで、統計から得られる運転免許保有者数と道路交通センサス自動車起終点調査から集計した年齢別運転者について、国勢調査の性別5歳階級別人口に占める割合の変化要因を年齢・時代・コーホートの各効果に識別するベイズ型APC分析を適用する。

1995年から2015年の5時点間の性別5歳階級別の運転免許保有者数と平日運転者数の推移を対象に、それぞれの変化の要因を年齢、時代、コーホート効果に分けて評価可能なベイズ型APC (Age-Period-Cohort)分析を適用するとともに、2020年から2050年までの将来推計と高齢者の動向について考察する。

#### (3) 車検証データを用いた全国市区町村別の乗用車走行距離およびCO<sub>2</sub>排出量の現況推計<sup>2)</sup>

道路交通センサス自動車起終点調査データを用いて推計された1980～2005年の全国市区町村別乗用車／貨物車CO<sub>2</sub>排出量が、地方公共団体の地球温暖化対策の計画の基礎資料として提供されてきた。しかし、道路交通センサスの調査サンプル数は2%程度であり、走行距離を把握できる調査数が2010年から約6分の1に削減されたことにより、空間的に詳細な乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計が近年は困難な状況となっていた。今回、自動車の車検時に取得されている車両の走行距離等のデータを利用し、全国市区町村別の自家用乗用車走行距離の実態を明らかにする。また、可住地人口密度および暖房度日等の地域特性と走行量との関係を分析するとともに、CO<sub>2</sub>排出量の推計を行う。

さらに、人口密度別のCO<sub>2</sub>排出量を更新<sup>3)</sup>する。加えて、軽乗用車の走行距離等のデータを入手し、より空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能とする。

#### (4) 徒歩や電動車いす等が使いやすい地域の評価<sup>4)</sup>

脱炭素化に望ましい社会・空間構造の方向性には、公共交通の分担率が高い、一台あたりの自動車歩

行距離が短い、脱炭素交通手段を導入しやすいの他、徒歩等が使いやすいことが考えられる。そのため、歩きやすい地域を評価する手法を開発する。具体的には、東京都区部と川崎市と横浜市の各区を対象に、徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークや自治体が指定するウォーキングコースから200mバッファに含まれる人口の割合を評価するとともに、徒歩やベビーカーやシニアカーの安全な移動を促進する方法を考察する。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計

長期的な交通システムの脱炭素化を検討する際、人々の時間的・空間的变化がカギとなる。特にコンパクト化は、脱炭素化に寄与する乗合・相乗りを促進する効果があり、その効果を計測することが重要である。本研究ではそのための手法を開発した。

ここでは、岡山市を例に2050年に向けたコンパクト化実施の効果検討を行った。メッシュ人口シナリオとして、「人口分布ジニ係数が偏在化/均一化した事例から取得したパラメータを市町村内の第三次メッシュに適用して推計したシナリオ」と、「生活圏内の第三次メッシュ人口の上位（居住誘導）または下位（里山）20-40%を年率+1%追加したシナリオ」の2組を用いた。メッシュ規模別の乗用車CO<sub>2</sub>排出係数として、2010年および2015年のメッシュ人口規模100、1,000、3,000、5,000、10,000、20,000[人/km<sup>2</sup>]を境とする区分別に求めた1人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量を用いた。なお、各階級値について線形、指数、対数の各関数による補間計算を試行し、比較検討した。

3,000[人/km<sup>2</sup>]を境に、高密度側にコンパクト化の効果が大きく見られた。2010年の階級値を用いた試算例（図-4.1）では、現況0.82[t-CO<sub>2</sub>/人]に対して、居住誘導0.78[t-CO<sub>2</sub>/人]、里山0.88[t-CO<sub>2</sub>/人]人と、コンパクト化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の将来抑制効果は約13%あることが分かる。

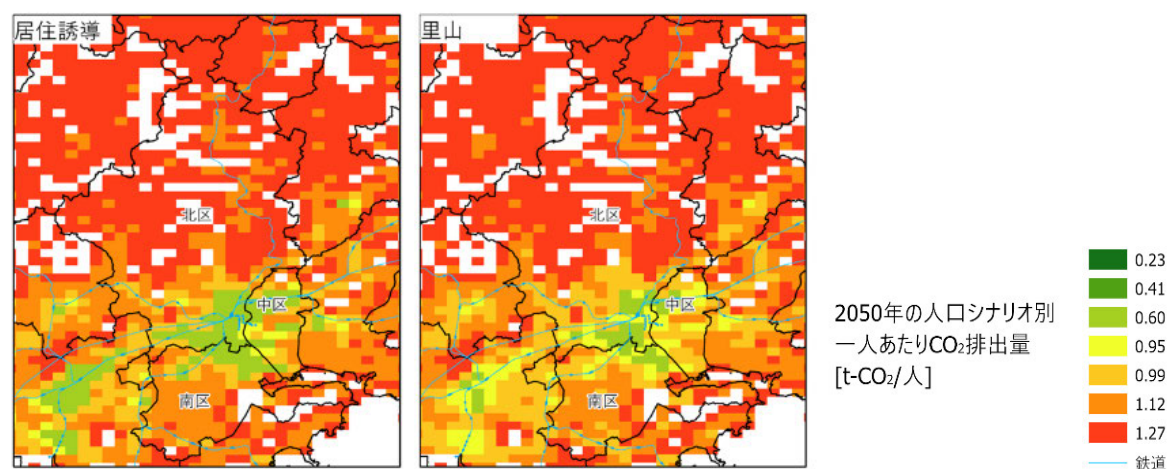


図-4.1 コンパクト化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の分布の違い（岡山市の例）

##### (2) 性別5歳階級別の免許保有者数と運転者数の推移の分析と推計

今後の自動車運転者数動向を知ることは、交通部門のCO<sub>2</sub>削減を検討するために重要な情報となる。そこで、統計から得られる運転免許保有者数と道路交通センサス自動車起終点調査から集計した年齢別運転者について、国勢調査の性別5歳階級別人口に占める割合の変化要因を年齢・時代・コーホートの各効果に識別するベイズ型APC分析を適用した。具体的には、1995年から2015年の5時点間の性別5歳階級別の運転免許保有者数と平日運転者数の推移を対象に、それぞれの変化の要因を年齢、時代、コーホート効果に分けて評価可能なベイズ型APC（Age-Period-Cohort）分析を適用するとともに、2020年から2050年までの将来推計と高齢者の動向について考察を行った。

図-4.2と図-4.3に示す通り、免許保有者数は、女性の若い世代で新しい取得が進み、男女ともに高い免許保有率となることが見込まれる。一方、男性の団塊ジュニア世代以降に免許離れが観察される。運転者数は、免許保有者数以上に高齢化が進み、推計の信頼性に幅があるものの、2050年までに女性の運転者数が約7%減少する一方、男性は約56%の大幅減となる結果となった。高齢者への代替交通手段の重要性は引き続き高いと考えられる。

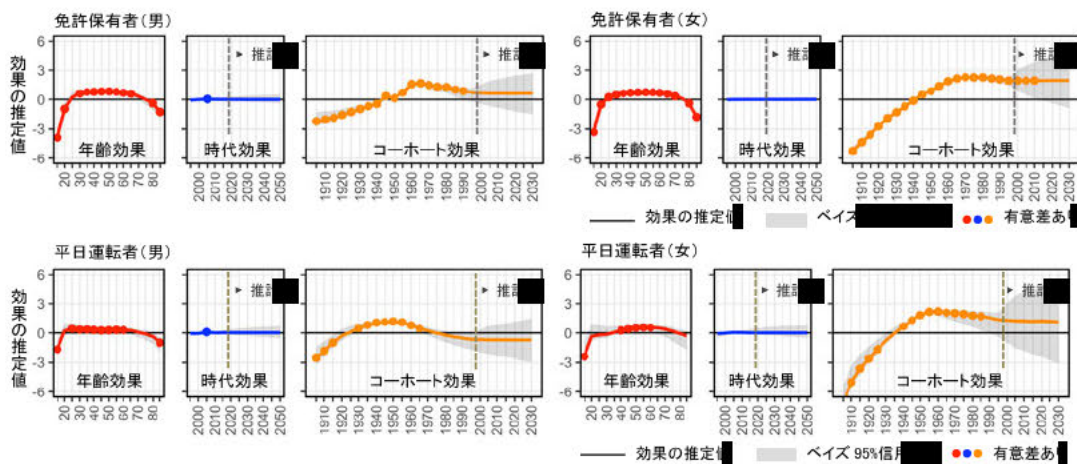


図-4.2 免許保有者数と平日の運転者数の年齢・時代・コホート効果

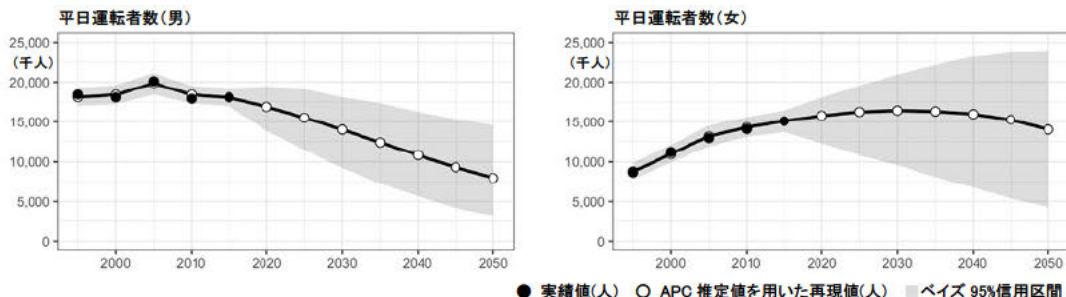


図-4.3 平日運転者数の推移と推定値と信頼区間

2010→2015年および2045→2050年について、男女別の70-74歳→75-79歳、75-79歳→80-84歳における人口の生残率、運転者数の変化率、免許保有者数の変化率のそれぞれを表-4.1にまとめた。運転者数変化率と生残率の差分を、死亡によらない運転取りやめ率とし、免許保有者数変化率と生残率の差分を死亡によらない免許返納率とする。なお、表-4.1の2045→2050年の推計値には括弧内にベイズ95%予測区間を示す。まず、2010→2015年と2045→2050年免許返納率をみると、男性の70-74歳→75-79歳の

免許返納率は10.2ポイントから1.1ポイントに大幅に低下し、75-79歳→80-84歳でも11.7ポイントから1.1ポイントへ大幅に低下する。女性の70-74歳→75-79歳の免許返納率は、23.4ポイントから3.0ポイントへ大幅に低下し、75-79歳→80-84歳でも27.2ポイントから7.6ポイントへと大きく低下する。免許保有者と免許保有率の高齢化が著しく進行しているため、免許返納のタイミングも後ろ倒しになる推計結果が反映していると考えられる。

次に、2010→2015年と2045→2050年の運転取りやめ率をみると、男性の70-74歳→75-79歳の運転取りやめ率は6.8ポイントから11.5ポイントへとやや上がるが、75-79歳→80-84歳では17.6ポイントから16.4ポイントへわずかに下がる。女性の70-74歳→75-79歳の運転取りやめ率は、15.5ポイントから11.3ポイントへやや下がるが、75-79歳→80-84歳では32.5ポイントから14.6ポイントへと大きく下がる。高齢女性の運転者数が急速に増加しつつあるため、運転取りやめのペースが鈍化する傾向が反映していることが考えられる。一方で、免許返納率に比較して運転取りやめ率の予測区間には非常に大きな幅があり、運転取りやめ率が男女共に2010→2015年より大きく上がる可能性もある。その場合、免許返納によらない運転取りやめを促す対策がより重要になることが示唆される。今後、2020年の運転免許保有者数や運転者数を分析に加えるなど、免許返納と運転取りやめに関する最新の動向を把握・分析し、年齢に応じた適正な免許保有や運転の状況を長期的に達成可能な道筋にあるか否かを確認しながら、大胆かつ着実

な取り組みを実施し、脱炭素社会に対応しかつ安全安心に暮らせる地域づくりを目指す必要があると考えられる。

表-4.1 男女別運転取りやめ率および免許返納率の変化

(単位：ポイント、括弧内範囲はベイズ95%予測区間)

性別	年次(年) 年齢階級(歳)	2010 → 2015		2045 → 2050	
		70-74→75-79	75-79→80-84	70-74→75-79	75-79→80-84
男性	生残率 (S)	87.3	78.0	90.6	84.6
	免許保有者数変化率 (L)	77.1	66.3	89.5 (87.4 - 90.0)	83.5 (81.5 - 84.0)
	運転者数変化率 (D)	80.6	60.5	79.1 (69.8 - 84.7)	68.2 (61.0 - 74.0)
	免許返納率 (S-L)	10.2	11.7	1.1 (0.6 - 3.1)	1.1 (0.6 - 3.1)
	運転取りやめ率 (S-D)	6.8	17.6	11.5 (5.9 - 20.8)	16.4 (10.6 - 23.6)
女性	生残率 (S)	94.6	89.7	96.0	92.9
	免許保有者数変化率 (L)	71.2	62.5	93.0 (91.7 - 94.0)	85.3 (81.9 - 87.4)
	運転者数変化率 (D)	79.2	57.2	84.7 (64.9 - 87.9)	78.3 (54.3 - 86.6)
	免許返納率 (S-L)	23.4	27.2	3.0 (2.0 - 4.3)	7.6 (5.5 - 11.0)
	運転取りやめ率 (S-D)	15.5	32.5	11.3 (8.1 - 31.1)	14.6 (6.3 - 38.6)

### (3) 車検証データを用いた全国市区町村別の乗用車走行距離およびCO<sub>2</sub>排出量の現況推計

自動車の車検時に取得されている車両の走行距離等のデータを利用し、全国市区町村別の自家用乗用車走行距離の実態を明らかにする。また、可住地人口密度および暖房度日等の地域特性と走行量との関係を分析するとともに、CO<sub>2</sub>排出量を推計し、人口密度別のCO<sub>2</sub>排出量を更新する。さらに、軽乗用車の走行距離等のデータを入手し、より空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を可能とする。

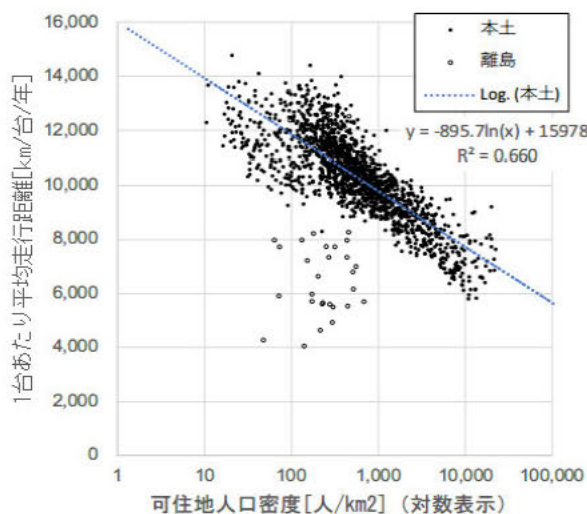


図-4.4 人口密度と一台あたり平均走行距離

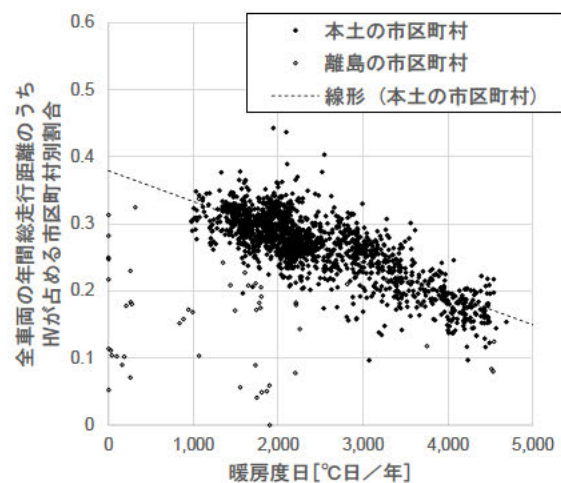


図-4.5 HVが占める走行距離割合と暖房度日

本研究において、車検証データを活用し、走行距離帯別に自家用乗用車の台数を車種別市区町村別に集計したデータを用いることで、これまでよりも空間的に詳細な全国市区町村別乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計を可能とした。そのデータを用いて、可住地人口密度と走行量との関係を分析した結果を図-4.4に示す。離島の市町村と、人口密度の高い市区町村において、一台あたり走行量が小さいことが分かる。人口密度と一人あたり距離の関係は指摘されていたが、今回、一台あたり距離にも人口密度と相関があることが分かった。すなわち、人口密度はモダリティだけでなく距離にも影響していることが考えられる。図-4.5に暖房度日等の地域特性とハイブリッド車が走行距離に占める割合を示す。寒冷地では、温暖な

地域よりもハイブリッド車が占める比率が半分程度であることが分かる。ハイブリッド車に四輪駆動車の設定が少なく、寒冷地の選択肢になりにくい背景があるとされるが、新たな交通サービスの普及に際しては、こうした地域特性による差異を考慮することも課題になると考えられる。

今回、さらに、軽乗用車についても車検証データを入手し、軽乗用車の地域別の走行特性を反映した全国市区町村別自家用乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計を行った。図-4.6に、乗用車に対する軽乗用車の総走行量の比を示す。中央値は0.52である。比較的割合の高い市区町村は、島しょ部の他、瀬戸内を除く中国・四国・九州、和歌山等に見られ、割合の低い市区町村は、北海道、三大都市圏、茨城・福島に見られる。

2021年度のデータを用いた一人あたりCO<sub>2</sub>排出量の推計結果を図-4.7に示す。中央値は0.84[t-CO<sub>2</sub>/人]で、排出量が多い市区町村は、北海道の東部、茨城・福島、奈良南部の他、全国各地の内陸部を中心に多く見られる。排出量が少ない市区町村は、関東1都3県、京阪神・奈良、島しょ部等に見られる他、札幌、熱海、名古屋、大津・草津、広島、松山、福岡、長崎等である。町村部の基礎資料としても活用可能な空間解像度を有している。

大都市中心部や地方中心都市は、一人あたりCO<sub>2</sub>排出量は少ないものの、人口規模が大きいため市区町村別のCO<sub>2</sub>排出量は少なくない。こうした市区町村では、徒歩・自転車等の動力によらない移動とバス・鉄道等の公共交通、公共交通への徒歩・自転車・バスの利用が困難な場合はシェアリングを組み合わせた移動サービスを提供・利用することがまず重要である。

自家用乗用車の走行量の削減が難しい場合については、電気自動車等への転換が重要になる。年間走行量が比較的短い市区町村や、比較的小型である軽乗用車の走行量の割合が高い市区町村では、一日に必要な充電量が比較的小さく、自宅での充電による電気自動車の利用が比較的容易であることから、電気自動車への転換を早期に行いやすいと考えられる。島しょ部や西日本の内陸部にこうした市区町村がみられる。

一方、走行量が長く、軽乗用車の割合が小さく、一人あたりCO<sub>2</sub>排出量が多い北海道東部や茨城・福島においては、電気自動車への転換は容易ではない可能性がある。安価なバッテリーの確保と大容量急速充電器の広範な整備あるいは安価な代替の燃料や乗用車の開発・供給が必要となる。対応されない場合、脱炭素化が困難となり、生活にかかる費用が高騰する可能性が高くなると考えられる。

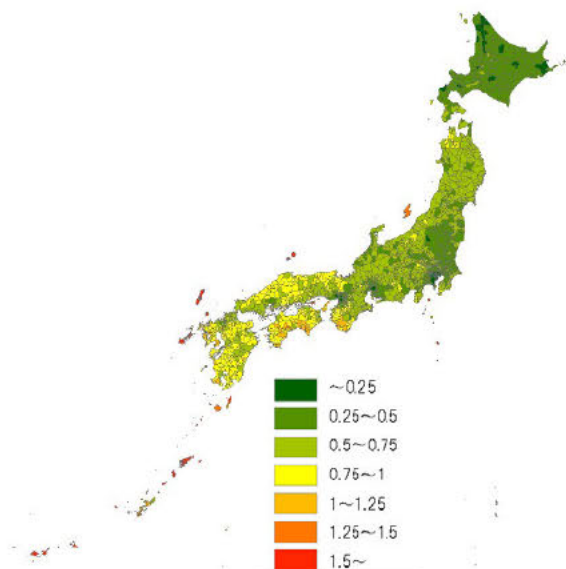


図-4.6 軽乗用車／乗用車の走行量の比

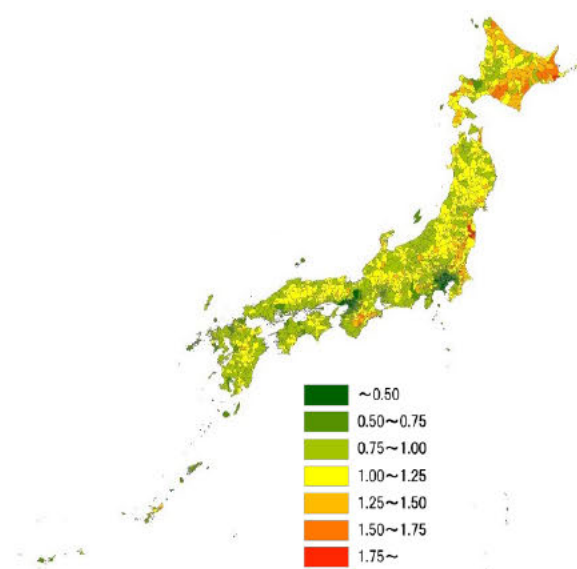


図-4.7 軽+乗用車 1人あたり CO<sub>2</sub> 排出量[t-CO<sub>2</sub>/人]

また、車検証データを利用した全国市区町村別の一人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量と各市区町村を構成する人口密度階級別メッシュ数の関係から、人口密度階級別の一人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量を算出した。

表-4.2と図-4.8に示す通り、全国の24%、3,100万人が居住する10,000[人/km<sup>2</sup>]以上の地域では、一人あたり排出量が全国平均より約70%少なく、排出量の割合は7%と少ないことが分かる。反対に、2,200万人が居住する100-1,000人の地域では、一人あたり排出量が全国平均より約70%多く、面積と排出量の割合が高いことが分かる。

表-4.2 人口密度階級別の面積、人口、CO<sub>2</sub>排出量

人口密度階級 [人/km <sup>2</sup> ]	面積 [km <sup>2</sup> ]	人口 [人]	一人あたり乗用車 CO <sub>2</sub> 排出量[t-CO <sub>2</sub> /人]	乗用車 CO <sub>2</sub> 排出量[t-CO <sub>2</sub> ]
- 100	95,287	2,822,232	0.76	2,148,711
100 - 1,000	57,982	19,522,552	1.38	26,960,496
1,000 - 3,000	13,647	23,958,328	1.07	25,748,522
3,000 - 5,000	4,950	19,222,478	0.84	16,179,484
5,000 - 10,000	4,385	30,466,785	0.85	25,793,495
10,000 - 20,000	1,905	25,487,518	0.23	5,889,246
>20,000	241	5,614,852	0.26	1,487,308
合計	178,397	127,094,745	0.82	104,207,261

(4) 徒歩や電動車いす等が使いやすい地域の評価

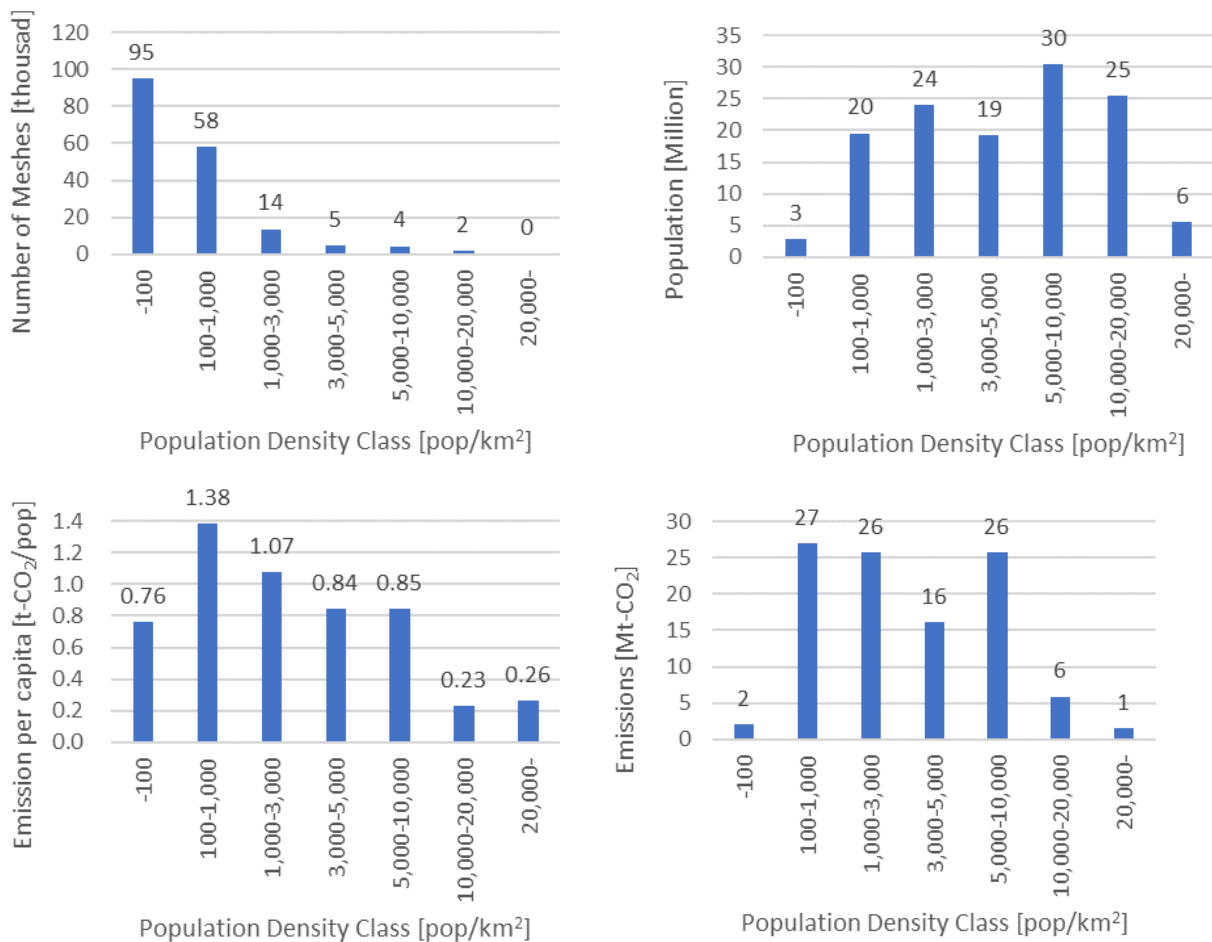


図-4.8 人口密度階級別の面積、人口、CO<sub>2</sub>排出量



望ましい社会・空間構造を考察し、東京都区部と川崎市と横浜市の各区を対象に、徒歩や電動車いすの利用に適した幅の広い歩道ネットワークや自治体が指定するウォーキングコースから200mバッファに含まれる人口の割合を評価するとともに、徒歩やベビーカーやシニアカーの安全な移動を促進する方法を考察する。

脱炭素化に望ましい社会・空間構造の方向性には、公共交通の分担率が高い、一台あたりの自動車歩行距離が短い、脱炭素交通手段を導入しやすいの他、徒歩等が使いやすいことが考えられる。そのため、徒歩等が使いやすい地方公共団体を評価する手法を開発した。

図-4.9に示す通り、幅の広い歩道ネットワーク（黄）、自治体が指定するウォーキングコース（青）、その両者（緑）から200mのバッファを取り、その範囲に含まれる人口割合を評価した。大規模公園は双方に該当するとみなした。その結果、震災、戦災復興に伴う都市基盤整備が行われた都心北東部、港北ニュータウン等の新都市基盤整備がされた横浜市北西部等にウォーキングに適した人口割合が高い区があることを明らかにした。また、散歩、徒歩、車椅子、ベビーカー、子どもの安全、シニアカーの通行のため、都市部局と福祉部局との連携が今後有効になると考えられた。

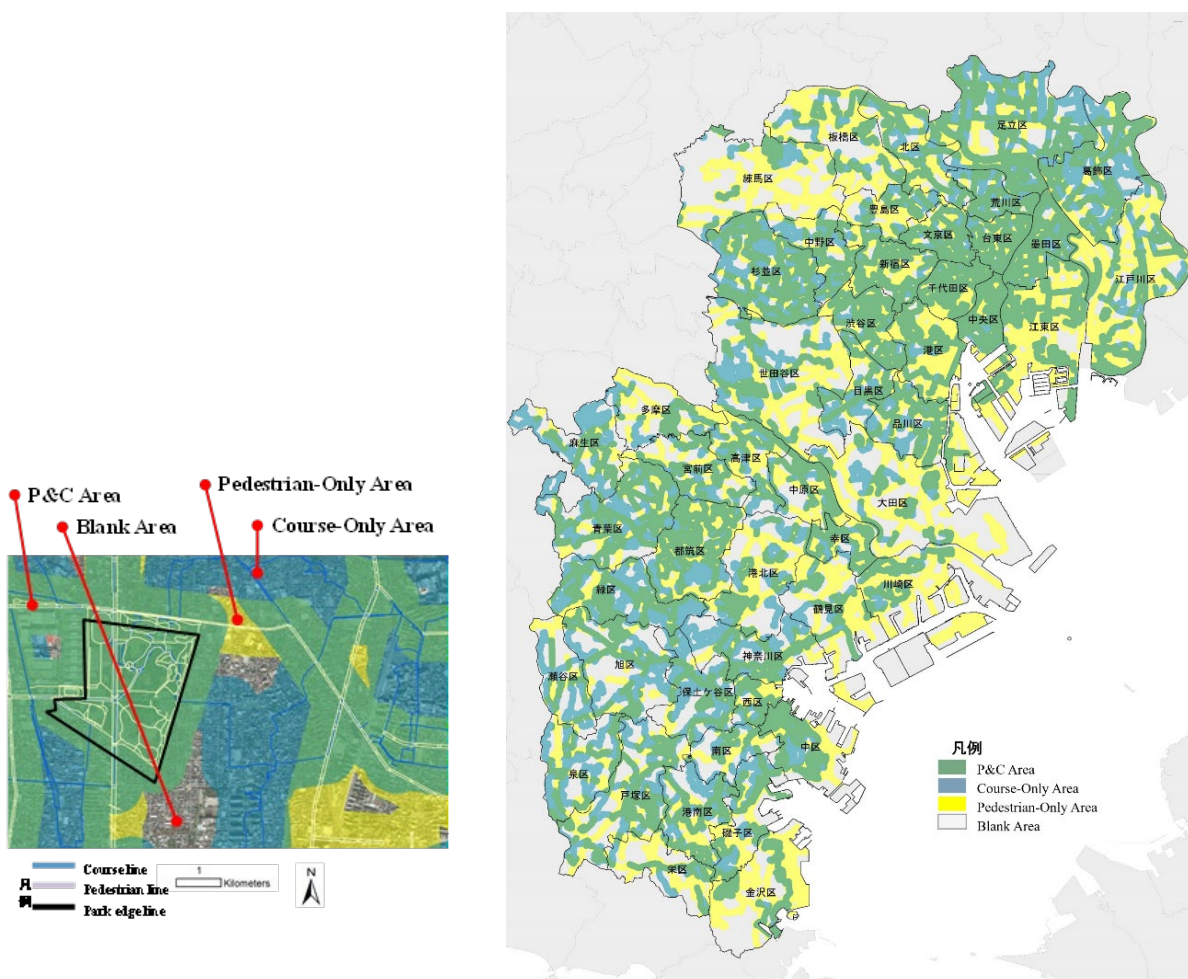


図-4.9 ウォーキング空間から200mに含まれるエリア

## 5. 研究目標の達成状況

目標を上回る成果をあげた。

人口分布の長期変化による乗用車CO<sub>2</sub>排出量の推計に加えて、年齢構成を考慮した将来運転者数の推移を分析・推計の推計を行い、地域の社会・空間構造の長期変化を踏まえた炭素排出量の予測を可能とした。また、全国市区町村別の乗用車走行距離の構成と空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計をサブテーマ1の統合的な分析に提供し、新技術・サービスの導入の組み合わせによる低炭素性評価を可能とした。さらに、徒歩や電動車椅子の利用に適した歩道ネットワーク近隣の居住割合を評価し、望ましい社会・空間

構造とモビリティ低炭素化の方向性を示した。

その他、人口密度別の乗用車CO<sub>2</sub>排出量の係数を更新するとともに、軽乗用車についても空間的に詳細なCO<sub>2</sub>排出量の推計を行う方法を確立するなど、計画以上の成果をあげた。

## 6. 引用文献

- 1) 金昷敏, 松橋啓介, 石河正寛, 有賀敏典: 土木学会論文集G(環境), 77(6), II\_227-II\_234 (2021), 運転免許保有者数と運転者数の推移における年齢・時代・コーホート効果の分析と将来推計
- 2) 石河正寛, 加藤秀樹, 有賀敏典, 金森有子, 金昷敏, 崔文竹, 松橋啓介: 交通工学8(5), 1-10(2022), 自動車検査証の個別統計を用いた全国地域別乗用車CO<sub>2</sub>排出量の試算
- 3) Keisuke MATSUHASHI, Toshinori ARIGA, Masahiro ISHIKAWA: IATSS Research, (2023), Estimation of Passenger Car CO<sub>2</sub> Emissions by Population Density Class Based on Japanese Vehicle Inspection Certificate Data. (in press)
- 4) 崔文竹, 松橋啓介, 石河正寛, 金昷敏, 有賀敏典: 都市計画論文集, 57(3), 887-894 (2022), ウォーキング空間へアクセスしやすい人口の地域差

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

###### 【サブテーマ1】

- 1) 西本祐司、朴秀日、加藤博和、山本祐吾：日本環境共生学会第24回(2021年度)学術大会発表論文集、38巻、1号、56-66(2022)、テレワークを活用した地方移住の低炭素性評価
- 2) 朴秀日、加藤博和、大石直毅：土木学会論文集D3(土木計画学)、78巻、5号(2023)、中大量輸送機関の端末交通としてのパーソナルモビリティツール導入に関する低炭素性評価

###### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

###### 【サブテーマ3】

- 1) 岡田将範、Shreyas PRADHAN、氏原岳人：土木学会論文集D3(土木計画学)、77巻、5号、I\_565-I\_572(2022)、超小型モビリティ導入前後の利用パターンの変化に基づく低炭素性評価
- 2) 岡田将範、氏原岳人、堀裕典：都市計画論文集、57巻、1号、106-113(2022)、COVID-19流行における交通手段の転換パターンと公共交通機関の利用継続・停止の特性把握 東京都特別区及び岡山県の居住者を対象
- 3) 大畑友紀、氏原岳人：都市計画論文集、57巻、1号、151-156(2022)、COVID-19の流行におけるネットショッピング等の利用変化の実態把握
- 4) Shreyas PRADHAN、氏原岳人、岡田将範、堀裕典：都市計画論文集、56巻、3号、1381-1388(2021)、グリーンスローモビリティの利用者に着目した低炭素性評価に関する研究

###### 【サブテーマ4】

- 1) 石河正寛、CHEN HE、松橋啓介、金森有子、有賀敏典：土木学会論文集G(環境)、48巻、6号、199-208(2020)、住宅と自動車の利用に伴うメッシュ別CO<sub>2</sub>排出量の推計と考察
- 2) 金昷敏、松橋啓介、石河正寛、有賀敏典：土木学会論文集G(環境)、77巻、6号、II\_227-II\_234(2021)、運転免許保有者数と運転者数の推移における年齢・時代・コーホート効果の分析と将来推計
- 3) 崔文竹、松橋啓介、石河正寛、金昷敏、有賀敏典：都市計画論文集、57巻、3号、887-894(2022)、ウォーキング空間へアクセスしやすい人口の地域差
- 4) 石河正寛、加藤秀樹、有賀敏典、金森有子、金昷敏、崔文竹、松橋啓介：交通工学論文集、8巻、5号、1-10(2022)、自動車検査証の個別統計を用いた全国地域別乗用車CO<sub>2</sub>排出量の試算
- 5) Keisuke MATSUHASHI, Toshinori ARIGA and Masahiro ISHIKAWA: IATSS Research, (2023), Estimation of Passenger Car CO<sub>2</sub> Emissions by Population Density Class Based on Japanese Vehicle Inspection Certificate Data. (in press) (h-index: 31)

##### <査読付き論文に準ずる成果発表>

###### 【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない

###### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

###### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

#### 【サブテーマ4】

- 1) 松橋啓介: 日交研双書「運輸部門の気候変動対策」室町泰徳 編著、成山堂書店、109-120 (2020), 乗用車起因のCO<sub>2</sub>排出量とメッシュ人口との関係

#### <その他誌上発表(査読なし)>

##### 【サブテーマ1】

- 1) 朴秀日、加藤博和: 第16回日本LCA学会研究発表会、2-B1-02 (2021)  
「モビリティ革命の低炭素性評価のフレームワーク」
- 2) 大石直毅、朴秀日、加藤博和: 第16回日本LCA学会研究発表会、3-D1-01 (2021)  
「新たなパーソナルモビリティツールのライフサイクルCO<sub>2</sub>原単位の作成」
- 3) 朴秀日、加藤博和、森田紘圭: 第17回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2-E4-05 (2022)  
「モビリティ革命の低炭素性評価の方法論」
- 4) 西本祐司、朴秀日、加藤博和: 第17回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2-E4-05 (2022)  
「地方移住型テレワークのLC-CO<sub>2</sub>排出量評価に向けた基礎的研究」
- 5) 山田祐磨、加藤博和、朴秀日: 第17回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2-E4-04 (2022)  
「地域特性及び車両特性を考慮した中量輸送機関のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量の評価」
- 6) 朴秀日、加藤博和、西本祐司: 第18回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2-A2-01 (2023)  
「モビリティ革命を考慮した脱炭素化の検討手法」
- 7) 林龍矢、加藤博和、朴秀日、西本祐司、山田祐磨: 第18回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、2-A2-01 (2023)  
「運輸起源CO<sub>2</sub>大幅削減を実現する地域内旅客交通システムの都市規模別選定」
- 8) 朴秀日、加藤博和: 土木計画学研究・講演集、62, 7357 (2020)  
「モビリティ革命の低炭素性評価の必要性とフレームワーク」
- 9) 朴秀日、加藤博和、大石直毅: 第64回土木計画学研究発表会・講演集、64, 7075 (2021)  
「中大量公共交通と次世代モビリティツールの利用および導入を考慮した低炭素性評価手法」
- 10) 西本祐司、朴秀日、加藤博和、山本祐吾: 日本環境共生学会第24回学術大会発表会・論文集、5-12 (2021)  
「テレワークを活用した地方移住の低炭素性評価」
- 11) 朴秀日、加藤博和、森田紘圭: 第29回土木学会地球環境シンポジウム講演・論文集、37-40 (2021)  
「モビリティ革命に伴う交通活動の低炭素化効果の評価手法」
- 12) 山田祐磨、朴秀日、加藤博和: 土木計画学研究発表会・講演集、66, 7299 (2022)  
「中量旅客輸送システムのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量推計手法」

##### 【サブテーマ2】

- 1) 井原雄人、紙屋雄史: 日本環境共生学会学術大会発表論文集、24, 13-18 (2021)  
「再生可能エネルギーを活用した電動バス導入によるCO<sub>2</sub>排出削減に掛かるコストに関する研究」
- 2) 井原雄人、紙屋雄史: 土木計画学研究発表会・講演集、65, 1255 (2022)  
「バス事業に対する電気バス導入時のエネルギーコストに関する分析」

##### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

##### 【サブテーマ4】

- 1) 松橋啓介: 日本機械学会誌、126巻, 1251号, 19-22 (2023)

「脱炭素社会実現に向けた運輸部門の将来ビジョン」

- 2) 松橋啓介:東京モーターショーシンポジウム 2019 運輸部門のゼロエミッション化、14-23 (2020)  
「乗用車起因CO<sub>2</sub>排出量の地域別動向およびそのメッシュ人口との関係」

## (2) 口頭発表 (学会等)

### 【サブテーマ1】

- 1) 朴秀日、加藤博和: 第64回土木計画学研究発表会 (2020)  
「モビリティ革命の低炭素性評価の必要性とフレームワーク」
- 2) 朴秀日、加藤博和: 第16回日本LCA学会研究発表会 (2021)  
「モビリティ革命の低炭素性評価のフレームワーク」
- 3) 大石直毅、朴秀日、加藤博和: 第16回日本LCA学会研究発表会 (2021)  
「新たなパーソナルモビリティツールのライフサイクル CO<sub>2</sub>原単位の作成」
- 4) 朴秀日、加藤博和、森田紘圭、紙屋雄史、井原雄人、氏原岳人、松橋啓介: 環境科学会2021年会 (2021)  
「モビリティ革命に伴う低炭素性評価手法」
- 5) 西本祐司、朴秀日、加藤博和、山本祐吾: 日本環境共生学会第24回 (2021年度) 学術大会 (2021)  
「テレワークを活用した地方移住の低炭素性評価」
- 6) 朴秀日、加藤博和、大石直毅: 第65回土木計画学研究発表会 (2021)  
「次世代パーソナルモビリティツールの低炭素性評価」
- 7) 森田紘圭、加藤博和: 第65回土木計画学研究発表会 (2021)  
「新たなモビリティサービスの CO<sub>2</sub> 排出構造に関する基礎的考察」
- 8) 朴秀日、加藤博和、森田紘圭: 第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)  
「モビリティ革命の低炭素性評価の方法論」
- 9) 西本祐司、朴秀日、加藤博和: 第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)  
「地方移住型テレワークの LC-CO<sub>2</sub> 排出量評価に向けた基礎的研究」
- 10) 山田祐磨、加藤博和、朴秀日: 第17回日本LCA学会研究発表会 (2022)  
「地域特性及び車両特性を考慮した中量輸送機関のライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の評価」
- 11) 森田紘圭、加藤博和、小路泰広: 第66回土木計画学研究発表会 (2022)  
「モビリティサービスの脱炭素性評価のあり方に関する基礎的考察」
- 12) 山田祐磨、朴秀日、加藤博和: 第66回土木計画学研究発表会 (2022)  
「中量旅客輸送システムのライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量の推計手法」
- 13) 朴秀日・加藤博和・西本祐司: 第18回日本LCA学会研究発表会 (2023)  
「モビリティ革命を考慮した脱炭素化の検討手法」
- 14) 林龍矢、加藤博和、朴秀日、西本祐司、山田祐磨: 第18回日本LCA学会研究発表会 (2023)  
「運輸起源 CO<sub>2</sub> 大幅削減を実現する地域内旅客交通システムの都市規模別選定」
- 15) Yuma Yamada, Hirokazu Kato and Suil Park: The 15th Biennial International Conference on EcoBalanceEco balance 2022, Fukuoka, Japan, 2022  
“Estimation of life cycle CO<sub>2</sub> emission and analysis of factors associated with medium-capacity passenger transport systems”
- 16) Suil Park, Hirokazu Kato, Hiroyoshi Morita and Marjan Khaleghi: The 15th Biennial International Conference on EcoBalanceEco balance 2022, Fukuoka, Japan, 2022  
“A methodology for assessing mobility revolution with low carbonization”

### 【サブテーマ2】

- 1) 三瀬遼太郎、井原雄人、森本章倫: 第62回土木計画学研究発表会・講演集 (2020)  
「将来の交通環境の変化が交通環境負荷に与える影響に関する研究」

- 2) 井原雄人、紙屋雄史：第62回土木計画学研究発表会（2020）  
「太陽光発電を利用した電動バス導入によるCO<sub>2</sub>削減ポテンシャルの検討える影響に関する研究」
- 3) 井原雄人、紙屋雄史：第64回土木計画学研究発表会（2021）  
「バス事業に対する電気バス導入時のエネルギーコストに関する分析」
- 4) 井原雄人、紙屋雄史：第24回日本環境共生学会学術大会（2021）  
「再生可能エネルギーを活用した電動バス導入によるCO<sub>2</sub>排出削減に掛かるコストに関する研究」
- 5) 方亦園、田沼英紘、黄施豪、小林王義、楊イ翔、井原雄人、紙屋雄史：第66回土木計画学研究発表会（2022）  
「電気バス・トラックの導入前性能予測に活用する事を目的とした簡易電費予測理論式の構築」

### 【サブテーマ3】

- 1) プラダンシュレヤス、氏原岳人：第66回土木計画学研究発表会（2022）  
「私的交通手段に起因するCO<sub>2</sub>排出量と公共交通サービス等との関連性」
- 2) 岡田将範、氏原岳人：第64回土木計画学研究発表会（2021）  
「MaaSの利用経験とサービス向上による利用可能性に関する研究」
- 3) 岡田将範、氏原岳人：第62回土木計画学研究発表会（2020）  
「超小型モビリティの利用パターンに基づく低炭素性評価に関する基礎的研究」

### 【サブテーマ4】

- 1) 松橋啓介、石河正寛、金昶敏：日本交通政策研究会（2021）  
「ベイズ型APC分析を用いた免許保有者数と運転者数の年齢・時代・コーホート効果の分析と将来値の試算」
- 2) 松橋啓介：オール東京62気候変動対策研究会第4回緩和策分科会（2023）  
「基礎自治体における交通分野の脱炭素施策について」
- 3) 松橋啓介：環境科学会2022年会要旨集、190-191（2022）  
「持続可能な社会設計に向けたシナリオ評価と社会への反映」
- 4) 松橋啓介：土木学会全国大会研究討論会（2021）  
「低炭素都市から脱炭素都市へ」
- 5) 松橋啓介：日本機械学会2021年度年次大会（2021）  
「脱炭素社会実現に向けた運輸部門の将来ビジョン」
- 6) 松橋啓介：土木学会スマートシェアリングシティ研究小委員会（2021）  
「脱炭素社会とスマートシェアリングシティ」

## （3）「国民との科学・技術対話」の実施

### 【サブテーマ1・2・3・4共通】

- 1) 一般公開シンポジウム「モビリティ革命が脱炭素化を実現するための条件～『地球にやさしい』交通とは何か？～」 （主催：名古屋大学大学院環境学研究科附属持続的共発展教育研究センター、2022年3月16日、オンライン、参加者約80名）
- 2) 公益社団法人環境科学会2022年会シンポジウム「脱炭素化に貢献するモビリティ革命のあり方をさぐる」（2022年9月9日、オンライン）

### 【サブテーマ2】

- 1) 早稲田大学オープンイノベーションフォーラム2021「GTFS（General Transit Feed Specification）などのオープンデータを活用したバス事業の分析」（主催：早稲田大学、2021

年3月12日、参加者約500名)にて講演

- 2) 埼玉県交通政策研修会「地域公共交通とMaaS・新たなモビリティサービスについて」(主催:埼玉県、2022年7月29日、参加者約100名)にて講演
- 3) 「移動ってなんだろう?みんなで考える女川町のモビリティ」(主催:女川町、2022年10月21日、女川町女川小学校社会科、参加者36名)にて講演
- 4) 所沢市マチごとゼロカーボン市民会議「モビリティにおける脱炭素への選択肢」(主催:所沢市、2022年11月27日、参加者約50名)にて講演

#### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

#### 【サブテーマ4】

- 1) 子ども大学水戸第9期、第1回講義「変わるまち、続くまち—カーボンニュートラルと都市計画—」(主催:NPO法人 子ども大学水戸 2022年6月18日、参加者118名)にて講演、質疑
- 2) 第4回マチごとゼロカーボン市民会議「移動のゼロカーボン」(主催:所沢市、2022年11月27日、参加者約50名)にて情報提供
- 3) 武蔵野市気候市民会議第3回「動く・働く(学ぶ)・遊ぶ。」(主催:武蔵野市、2022年9月27日、参加者約60名)にて情報提供

### (4) マスコミ等への公表・報道等

#### 【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない

#### 【サブテーマ2】

- 1) 日本テレビ news zero (2022年12月28日、電動車両導入によるCO<sub>2</sub>削減について3分ほど紹介)

#### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

#### 【サブテーマ4】

- 1) 朝日新聞(2022年12月24日、茨城地域版、26頁、「人口分散率1位 なぜ茨城県」、人口分散と自動車依存、一人あたり乗用車CO<sub>2</sub>排出量を削減する必要についてコメント)

### (5) 本研究費の研究成果による受賞

#### 【サブテーマ1】

- 1) 第16回日本LCA学会学生優秀口頭発表賞、2021年3月5日(金)、大石直毅(朴秀日、加藤博和):  
新たなパーソナルモビリティツールのライフサイクルCO<sub>2</sub>原単位の作成

#### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない

#### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない

#### 【サブテーマ4】

- 1) 2022年環境科学会学術賞、2022年9月9日（金）、松橋啓介：持続可能な社会設計に向けたシナリオ評価と社会への反映

## （6）その他の成果発表

### 【サブテーマ1】

- 1) 月刊誌「道路」（2023年3月、加藤博和、公共財団法人日本道路協会、984号、10-16頁、「脱炭素化に貢献する道路整備に向けて」）
- 2) 情報誌「グローバルネット」（2022年11月、加藤博和、一般財団法人地球人間環境フォーラム、384号、4-5頁、「特集／脱炭素社会に向けた公共交通政策とは ～利用促進と持続可能なまちづくりの両立を目指して～脱炭素化を「正しく」意識した地域交通戦略の在り方」）
- 3) 月刊誌「住民と自治」（2022年7月、加藤博和、自治体問題研究所、712号、14-17頁、「公共交通に今求められる『環境への配慮』」）

### 【サブテーマ2】

- 1) 月刊誌「道路」（2020年12月、井原雄人、公共財団法人日本道路協会、957号、30-34頁、「自動車×交通のデータ連携によるDXの可能性」）
- 2) 月刊誌「運輸と経済」（2021年5月、紙屋雄史、交通経済研究所、887号、50-54頁、「特集 交通と環境－脱炭素社会に向けて－「重量車における電動化対応の動向」」）
- 3) 月刊誌「運輸と経済」（2021年5月、井原雄人・福本雅之・加藤博和・林良嗣、交通経済研究所、887号、72-79、「特集 交通と環境－脱炭素社会に向けて－「新型コロナウイルスの影響下における地方自治体から交通事業者に対する支援の分析」」

### 【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

### 【サブテーマ4】

- 1) 月刊誌「商工金融」（2020年8月、松橋啓介、商工総合研究所、825号、48-51頁、「脱炭素社会と交通の姿」）
- 2) 月刊誌「JIR常陽産研NEWS」（2022年11月、松橋啓介、常陽産業研究所、385号、12-15頁、「気候危機に地域はどのように対応していくか？」）
- 3) 月刊誌「運輸と経済」（2021年5月、松橋啓介、交通経済研究所、887号、4-10頁、「特集 交通と環境－脱炭素社会に向けて－「－都市と交通の未来－」」



#### IV. 英文Abstract

Requirements for the Mobility Revolution toward a Decarbonized Society

Principal Investigator: Hirokazu KATO

Institution: Nagoya University, JAPAN

Tel: 0527892772 / Fax:0527891454

E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp

Cooperated by: Waseda University, Okayama University, National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Keywords: Transportation system; LCA; well to wheel; next-generation mobility tools; MaaS; CASE; scenario analysis

The “mobility revolution” is an upcoming revolution in transportation services and incorporates technological advances in IT (Information Technology), energy, etc. However, there is little academic or objective assessment of how the mobility revolution will affect decarbonisation progress. Therefore, we applied LCA (Life Cycle Assessment) and WtoW (Well to Wheel) methods to comprehensively and quantitatively evaluate the impact of the mobility revolution on CO<sub>2</sub> emissions changes in transportation systems, and developed it into an evaluation methodology that can incorporate changes caused by factors like transportation demand- supply, infrastructure development, and technological advances. Using this, we have clarified the “conditions under which the introduction of new technologies and services to transportation systems can exhibit low-carbon properties” by considering the future socio-economic energy trends through scenario analysis and have made the formulation of an introductory scenario that satisfies these conditions possible.

In this study, we analysed the mechanism involved in the CO<sub>2</sub> emissions changes accompanying the mobility revolution from four perspectives: (1) transportation systems; (2) transportation equipment, energy, and new technologies; (3) transportation management, and (4) population and spatial structures. First, we extracted the major new mobility tools, technologies, and services that will drive the mobility revolution, and created a process tree by identifying the factors that impact CO<sub>2</sub> emissions. To formulate this, we developed the lifecycle CO<sub>2</sub> intensity of each means of transportation and infrastructure, and introduced parameters related to vehicle characteristics analysed in (2) (electrification/regeneration, renewable energy/charging pattern, weight reduction, etc.), transportation characteristics analysed in (3) (new mobility tools, changes in transportation behaviour, IT solutions such as MaaS, car ownership/sharing, etc.), and regional characteristics analysed in (4) (population, spatial distribution, driver’s license holding, etc.). Consequently, we constructed an evaluation technique that allowed us to consider various measures to change each characteristic from the perspective of low-carbonisation.

Using this, we clarified the necessity of implementing various measures, through a back-casting approach, to achieve the 2050 carbon-neutral goal. A socio-economic framework and trends in the spread of renewable energy were selected as scenarios, and the selection and combination of measures related to technology and transportation in each region were considered to assess the probability of achieving the goals. As a result, we identified the conditions for the mobility revolution to achieve decarbonisation. It will contribute to the application

of evaluation methods in national and local governments' low-carbon technology introduction support projects, and to EBPM(Evidence Based Policy Making) for transportation decarbonization measures in local governments.