

道路交通の電動化とスマートシティの構造に
関する研究

道路交通の電動化とスマートシティの構造に
関する研究プロジェクト

2023年11月

公益社団法人日本交通政策研究会

1. “日交研シリーズ”は、公益社団法人 日本交通政策研究会の実施するプロジェクトの研究
成果、本研究会の行う講演、座談会の記録、交通問題に関する内外文献の紹介、等々を印
刷に付して順次刊行するものである。
2. シリーズは A より E に至る 5 つの系列に分かれる。
シリーズ A は、本研究会のプロジェクトの成果である書き下ろし論文を収める。
シリーズ B は、シリーズ A に対比して、より時論的、啓蒙的な視点に立つものであり、折
にふれ、重要な問題を積極的にとりあげ、講演、座談会、討論会、その他の方法によってと
りまとめたものを収める。
シリーズ C は、交通問題に関する内外の資料、文献の翻訳、紹介を内容とする。
シリーズ D は、本研究会会員が他の雑誌等に公けにした論文にして、本研究会の研究調査
活動との関連において復刻の価値ありと認められるもののリプリントシリーズである。
シリーズ E は、本研究会が発表する政策上の諸提言を内容とする。
3. 論文等の内容についての責任はそれぞれの著者に存し、本研究会は責任を負わない。
4. 令和 2 年度以前のシリーズは印刷及び送料実費をもって希望の向きに頒布するものとする。

公益社団法人日本交通政策研究会

代表理事 山 内 弘 隆
同 原 田 昇

令和 2 年度以前のシリーズの入手をご希望の向きは系列番
号を明記の上、下記へお申し込み下さい。

〒102-0073 東京都千代田区九段北 1-12-6

守住ビル 4 階

公益社団法人日本交通政策研究会

電話 (03) 3263-1945 (代表)

Fax (03) 3234-4593

E-Mail:office@nikkoken.or.jp

日交研シリーズ A-881

令和4年度共同研究プロジェクト

「道路交通の電動化とスマートシティの構造に関する研究」

刊行：2023年11月

道路交通の電動化とスマートシティの構造に関する研究

Electrification of Road Transport and Smart City Structure

主査：室町泰徳（東京工業大学）

Yasunori Muromachi

要 旨

本研究では、道路交通の電動化とカーボンニュートラルなスマートシティとの関係、およびこれを実現するための交通政策の検討を目的として研究を実施した。

報告書をまとめるにあたり、3編の研究内容を収めることとした。第1章は、主査と梶原徳剛氏による「BEV購入者を対象としたBEV購入要因に関する研究」である。本章では、電気自動車（BEV）購入者を対象としたWEBアンケート調査を実施し、BEV購入要因の抽出を試みた。その結果、加速が良い点、電気代が安い点に関して非BEV購入者の認識を改めることによるBEV購入促進可能性が示された。また、BEVを活用したV2Hに関しても、導入の可能性が十分にあり、スマートシティの構造の主要な要素となり得ることが示された。

第2章は、内藤彰大氏と主査による「アクティブ交通への転換がもたらす健康増進便益」であり、CO₂排出量の少ないアクティブ交通への転換がもたらす健康増進便益に関する研究を行った。神奈川東部方面線プロジェクトを対象としたケーススタディの結果、プレゼンティーズム（生産性）の減少による便益が支配的である点、交通手段転換者よりも企業の方に大きな便益が帰着する可能性がある点が示された。

第3章は、主査による「IPCC AR6 WG3 Chapter10 Transport（第10章 運輸）の抄訳」である。本文献では、運輸部門の温室効果ガス排出量や緩和策に関する既往の研究が幅広く多様な視点から、先進国のみならず開発途上国の視点から整理されていた。また、内燃機関車の販売禁止等の規制がない限り、今後30年間、多数の小型車が従来型、ハイブリッド車、およびプラグインハイブリッド車による構成で運用され続ける可能性が指摘されていた。

いずれの内容も、運輸部門の脱炭素化を図る上で重要な示唆を与えており、今後の運輸部門における気候変動対策の推進に際し貴重な知見を与えるものとなっている。

キーワード：気候変動、電動化、スマートシティ、CO₂

Keywords: Climate Change, Electrification, Smart City, CO₂

目 次

第1章 BEV 購入者を対象とした BEV 購入要因に関する研究	1
1. はじめに	1
2. 既往研究のレビューと本研究の位置づけ	2
3. WEB アンケート調査の概要	4
4. BEV 購入者と非 BEV 購入者の認識等の相違	7
5. HEV と BEV の選択、及び V2H の選択に関する SP 調査	10
6. 結論と今後の課題	13
第2章 アクティブ交通への転換がもたらす健康増進便益	17
1. はじめに	17
2. 既往研究と本研究の位置づけ	17
3. 健康増進便益算出手法の検討	18
4. ケーススタディ	22
5. 終わりに	25
第3章 IPCC AR6 WG3 Chapter10 Transport (第10章 運輸) の抄訳	27
はじめに	27
1. イントロダクションと概観	27
2. 運輸セクターにおけるシステム変化	32
3. 脱炭素化のための運輸技術革新	40
4. 陸上交通の脱炭素化	54
5. 航空の脱炭素化 (省略)	71
6. 船舶の脱炭素化 (省略)	71
7. 統合モデル、セクター別モデル、地域モデルのシナリオ	71
8. 実現化の条件 (省略)	87

研究メンバーおよび執筆者（敬称略・順不同）

太田 勝敏	東京大学名誉教授
杉山 雅洋	早稲田大学名誉教授
香川 勉	交通評論家
兵藤 哲朗	東京海洋大学海洋工学部教授
室町 泰徳	東京工業大学環境社会理工学院教授（主査、1、2、3章）
大須賀竜治	一般社団法人日本自動車工業会安全・環境領域部長
永田 豊	一般財団法人電力中央研究所社会経済研究所
松橋 啓介	独立行政法人国立環境研究所社会システム領域地域計画研究室長
古屋 秀樹	東洋大学国際地域学部教授
大口 敬	東京大学生産技術研究所教授
小根山裕之	東京都立大学都市環境学部教授

執筆協力

内藤 彰大	東京工業大学大学院（2章）
梶原 徳剛	東京工業大学大学院（1章）

2023年3月現在

第1章 BEV 購入者を対象とした BEV 購入要因に関する研究

1. はじめに

日本は、温室効果ガス排出量を 2030 年度に 2013 年度のレベルから 46%削減することを目指し、2050 年までにネットゼロを達成するという長期目標を表明している¹⁾。運輸部門は、電気・熱配分後の CO₂ 排出量の 17.4%を占めており²⁾、中でもその 45.0%を占める乗用車からの排出量を削減することが、目標を達成する上で重要なポイントの 1 つとなっている。

乗用車からの CO₂ 排出量を削減する方法は複数存在する。IEA は 2050 年までに全世界で乗用車の電動化 100%を目指すシナリオ³⁾を示している一方、日本自動車工業会はカーボンニュートラル燃料を活用してゆくシナリオ⁴⁾を示しており、ネットゼロに向けて各方法をどの程度推進すべきか議論は尽きてはいない。しかし、電源の脱炭素化という条件付きで、乗用車の電動化、特にバッテリー式電気自動車 (Battery Electric Vehicles, 以下 BEV) を積極的に促進する必要があることには疑いの余地がない。日本の 2022 年度の乗用車販売台数に占める BEV の販売シェアは 1.5% (BEV・プラグインハイブリッド車 (Plugin Hybrid Electric Vehicles, 以下 PHEV) 計では 3.2%) であり⁵⁾、急増しているとは言え、中国 16%、欧州 17%、米国 4.5% (いずれも 2021 年 BEV・PHEV 計)⁶⁾といった主要な CO₂ 排出国・地域と比較して非常に低い水準にある。

BEV の促進を図るためには、BEV 購入に至る要因を把握することが重要となる。後述するように、BEV の販売シェアが日本よりも高い国々では、BEV 購入者を対象としたアンケート調査が進められており、購入に関する主要な要因が明らかになってきている。しかし、これらの国々の BEV や背景となる乗用車一般の保有や利用状況が日本にも当てはまるとは必ずしも限らない。また、BEV の販売シェアが低い水準でも、人々の購入意向を Stated Preference (以下 SP) 調査などで測定し、要因を抽出することも多数試みられている。しかし、BEV 購入前後で購入者の BEV に対する認識が変化するという報告もあり^{7,8)}、ある程度のサンプル数が得られるのであれば、BEV 購入者を対象としたアンケート調査により購入要因を検討することが必要となろう。

さらに、BEV 活用の 1 つとして V2H がある。比較的安価な BEV の蓄電池を活用すれば、太陽光発電などの再生可能エネルギーを蓄電して夜間に利用することが可能となる。特にカーボンニュートラルなスマートシティの構造に対して、BEV と住宅屋根上に設置される太陽光パネルを結び付ける V2H の普及は大きな影響を与えられられることから、この点に

関しても検討することが重要である。

本章ではこのような観点から、BEV 購入者を対象としたアンケート調査を実施し、BEV 購入要因と V2H の普及可能性を明らかにすることを目的としている。要因の抽出に際しては、ハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicles, 以下 HEV)、PHEV、ガソリン車購入者、すなわち非 BEV 購入者を対象としたアンケート調査も同時に実施し、BEV 購入者と非 BEV 購入者の BEV に対する認識等の相違の検討も目的の 1 つとしている。

2. 既往研究のレビューと本研究の位置づけ

BEV 購入要因に関する初期の研究例として、Beggs et al.⁹⁾によるものがある。一般的な乗用車保有者を対象とした SP 調査に基づき、航続距離と充電時間が BEV 購入に大きな影響を与えることを示している。さらに、固定係数とランダム係数オーダードロジットモデルの比較から個人属性の相違を考慮することの重要性を明らかにしている。ほとんどの国・地域において、2010 年代後半まで BEV 販売シェアは限定的であったこともあり、BEV 購入要因の抽出は、もっぱら一般乗用車利用者を対象としたアンケート調査、特に SP 調査に基づいて多数進められており、例えば、Maybury et al.¹⁰⁾、Liao et al.¹¹⁾、Wicki et al.¹²⁾等、モデル手法や購入要因に関するレビュー論文も既に少なからず存在している。

日本においては、本格的な BEV 販売がスタートした 2009 年ごろから研究例が多くなっている。例えば、松原他¹³⁾は、一般乗用車利用者を対象とした WEB アンケート調査を実施し、BEV を含むか否か等の選択肢集合形成段階と車種選択段階の 2 段階でモデル構築を行い、車両価格、航続距離、充電時間の他、社会的同調効果や選好の異質性の影響を明らかにしている。Ito et al.¹⁴⁾は、一般者を対象とした SP 調査を実施し、充電時間・場所、航続距離、購入費、維持費用等が BEV 等の購入に与える影響を明らかにしている。Tanaka et al.¹⁵⁾も同様に、購入費、燃料費、航続距離、排出削減量、充電場所等の影響を示している。立花他¹⁶⁾は、一般者を対象としたアンケート調査に基づき、急速充電スポットの整備水準別トリップ目的別にコンジョイント分析を行い、初期費用、維持費用の他、急速充電スポットの整備水準の影響を議論している。土屋他¹⁷⁾は、一般乗用車利用者に焦点を当てた WEB アンケート調査に基づき、主に航続距離と費用の面から BEV 購入選好を規定する要因を詳細に検討している。また、イノベーターやエコ意識といった消費性向の影響も示している。さらに土屋他¹⁸⁾は、航続距離と関係する 1 日当たりの最長走行距離 (100km/日以上) や世帯内保有台数等の乗用車の保有・利用状況を個人・世帯属性、居住地属性、車両属性で説明するカテゴリカル回帰分析を行い、結果を関東地方に適用して BEV 適合車両の割合を推定している。三輪他¹⁹⁾は、

一般者を対象としたアンケート調査を実施し、主に充電切れ確率と希望航続距離に着目した分析を行っている。推定された BEV 購入意向モデルは、乗車人員、購入費、航続距離、燃料費の減額等の影響を明らかにしている。

以上の研究は、BEV 購入に関して重要な要因を明らかにしている一方、一般乗用車利用者を対象としたアンケート調査に基づいている。したがって、BEV 購入者を対象としたアンケート調査を実施して、得られた知見を確認する研究にも意義があると考えられる。BEV 購入者を対象としたアンケート調査の分析例も存在する。例えば、田頭他⁷⁾は、BEV と PHEV 利用者を対象とした WEB アンケート調査を実施し、利用者の BEV に対する認識を把握している。走行費用の安さ、走行時の音の静けさに関しては購入前に期待し、購入後に満足している回答者が多く、加速の良さに関しては購入後の満足が上回っていること、また、航続距離や外出時の充電場所が少ないことに関しては購入前の心配と購入後の不満を示す回答者が多いことを示している。日本自動車工業会⁸⁾も隔年に実施される乗用車市場動向調査の中で次世代自動車への意識を調査している。最新の調査では、BEV と PHEV 保有層は燃料費と静粛性に対する期待と満足度は合致しているが、充電時間、航続距離、車体価格、バッテリー耐久年数に関して懸念があることを明らかにしている。

海外においても BEV 購入者を対象とした研究が進められている。Javid et al.²⁰⁾は、カリフォルニア世帯交通調査データを用いて、BEV と PHEV、それ以外の車種の選択モデルを推定し、年収、学歴、カーシェアリング利用、1 人当たりの充電ポイント、燃料費等が有意であることを示している。Nazari et al.²¹⁾も同様のデータを用いて、BEV 購入に対する子どもの有無、民族、年収、保有台数、学歴といった世帯属性の他、充電場所、環境に良い交通手段利用、カーシェア利用、HOV レーン利用等の影響を明らかにしている。Tal et al.²²⁾は中国における BEV 保有者を対象とした SP 調査を実施し、年収、世帯人員等の個人属性、購入ライセンス取得費、環境等に対する認識、充電場所等の影響を明らかにしている。

以上のように、一般者ではなく BEV 購入者に対するアンケート調査に基づく研究は、BEV 購入要因をより直接的に把握していると言うことができるが、その数は限定的である。この内、田頭他⁷⁾、日本自動車工業会⁸⁾、Tal et al.²²⁾は、BEV 購入者を対象とした調査に基づく研究であることから、非 BEV 購入者の BEV に対する認識は検討していない。また、Javid et al.²⁰⁾、Nazari et al.²¹⁾では BEV 購入者の BEV に対する認識に関する検討は行われていない。

これらの点を踏まえ、本研究では、BEV 購入者、非 BEV 購入者に対する WEB アンケート調査を実施し、BEV 購入要因を明らかにする。特に BEV 購入者と非 BEV 購入者の BEV に対する認識等の相違もあわせて検討する。さらに、スマートシティの構造を検討するため、BEV を活用した V2H の普及可能性についても調査することとした。

3. WEB アンケート調査の概要

WEB アンケート調査は、「自動車に関するアンケート」と題し、株式会社ネオマーケティングを通じて実施した。対象地域は、関東地方として7都県、比較のため寒冷地方として北海道・東北6県・北陸4県・山梨県・長野県とし、地方別に2018年以降のBEV購入者、非BEV購入者を各64サンプル収集した。収集されたサンプルは、主要な調査項目に関して欠損が無いサンプルとなっている。また、回答者は世帯の乗用車購入に関与することが想定される世帯主とし、WEB アンケート調査の制約から20～69歳を対象としている。

表1にWEB アンケート調査の主な調査項目を示す。調査項目は、世帯人員、運転者数（世帯における1カ月に1回以上乗用車を運転する人数）、世帯年収等の世帯属性、メーカー・モデル名、年間走行距離、使用頻度等の購入車や既に保有している乗用車の属性、HEVと比較した場合のBEVに対する認識、HEVとBEVの選択等に関するSP調査、回答者自身に対する一般的な認識、に分かれている。

表1 WEB アンケート調査の主な調査項目

<p><u>世帯属性</u> 世帯人員、運転者数（世帯における1カ月に1回以上乗用車を運転する人数）、世帯年収、世帯主の性別、年齢、学歴、住宅の種類（持ち家/賃貸、一戸建て/集合住宅等）、平均的な電気代、太陽光パネルの有無等</p> <p>購入車や既に保有している乗用車属性 メーカー・モデル名、年間走行距離、使用頻度等</p> <p>HEVとBEVの選択に関するSP調査 V2Hの選択に関するSP調査</p> <p>HEVと比較した場合のBEVに対する認識 「あなたはハイブリッド車と比較して、電気自動車の方が加速が良いと思いますか」等</p> <p><u>回答者自身に対する一般的な認識</u> 「あなたは新しいテクノロジーに対する興味が強い方だと思いますか」等</p>

HEVとBEVの選択、およびV2Gの選択に関するSP調査は、いずれも5要因4水準の直交表に基づいた2項選択実験を各回答者が2回行う調査票を16パターン作成した。関東地方・寒冷地方、BEV購入者・非BEV購入者の4区分で各 $16 \times 4 = 64$ サンプルとなるようにWEB アンケート調査票が配信されるようにした。HEVとBEVの選択に関する5要因には図1の赤字で示すように、HEVとBEVの購入額の差（-50～+100万円）、HEV走行費（5～

20万円)とBEVの走行費(2~8万円)、航続距離(200~800km)、充電性能(30~120km)を設定している。ただし、「税金:自動車税、自動車重量税、環境性能割の5年間の合計~いずれも(BEVの方が)15万円安い」という想定は一定としている。また、V2Hの選択に関する5要因には図2の赤字で示すように、V2Hの初期費用(20~110万円)、仮想状況A(BEV充電のみケース)の場合の年間電気代(3~12万円)、仮想状況B(V2Hケース)の場合の年間電気代(1~7万円)、停電時に普段通り電気が使用できる日数(1~7日)、電気使用によるCO₂排出量は現状の何%(20~80%)(正味)を設定している。

次のような仮想的な状況で、あなたは①電気自動車(ガソリンを使わずバッテリーに充電した電気のみで走行する自動車)、あるいは②ハイブリッド車(プラグインハイブリッド車は含まない)のどちらの選択をしますか。

- ・あなたは必要に迫られて、あるいは買い替えなどの理由で乗用車を購入することとなりました。
- ・あなたの気に入ったデザインの乗用車に対して、①電気自動車、あるいは②ハイブリッド車が選べるとします。
- ・現在、使用している車庫には無料で普通充電器が備え付けられ、電気自動車が車庫にある間は充電可能です。①電気自動車は10時間以内で満充電にすることができます。
- ・普通充電器よりも短い時間で満充電にできる急速充電器は、あなたの住んでいる地域のガソリンスタンドと同じ程度の数だけあり、走行途上で利用可能であるとします。
- ・①電気自動車の走行用の電気代(税など込み)、②ハイブリッドの走行用のガソリン代(税込み)は、2023年3月の状況とは異なる想定です。
- ・納期、アフターサービス、自動車保険など他の条件は①と②で同じです。



 ①電気自動車	 ②ハイブリッド車
<p>購入額:補助金と消費税を含めた購入額はハイブリッド車より50万円高いです。</p> <p>税金:自動車税、自動車重量税、環境性能割の5年間の合計はハイブリッド車より、軽乗用車・小型乗用車・普通乗用車のいずれも15万円安いとします。</p> <p>走行費:電気代は、10,000km走行した場合8万円かかります。</p> <p>航続距離:満充電で走行できる距離は800km(エアコン、カーナビなどオン状態で)</p> <p>充電性能:走行途上で(普通充電器ではなく)急速充電器で充電10%の状態から10分充電すれば60km走行できます。</p>	<p>走行費:ガソリン代は、10,000km走行した場合15万円かかります。</p>

図1 HEVとBEVの選択に関するSP調査(例)

また、HEVと比較した場合のBEVに対する認識、回答者自身に対する一般的な認識、に関しては、BEV購入要因に関するレビュー論文 Wicki et al.¹²⁾を参考にしている。Wicki et al.¹²⁾は、2010~2019年に発表された96本の既往の研究に基づいてBEV購入要因を図3に示す

25項目に整理している。また、各要因について正に有意、有意でない、負に有意としている論文数を示している。本研究では、世帯年収、学歴、性別、年齢、世帯年間走行距離、世帯乗用車保有台数、経験以外の要因に関しては、「1.そう思う」、「2.ややそう思う」、「3.あまりそう思わない」、「4.そう思わない」の選択肢から回答できるように質問項目を作成し、この内、1.と2.を肯定、3.と4.を否定として集計している。

あなたは、すでに電気自動車（ガソリンを使わずバッテリーに充電した電気のみで走行する自動車）をお持ちであると想定して下さい。

次のような①仮想的な状況A、さらに②仮想状況B（V2Hケース）に進むことで、あなたは生活費を節約できると想定します。

あなたは、どちらの仮想状況を選びますか。



①仮想状況A

- (屋根や壁面など)お住いの建物に太陽光パネルを設置します。
(屋根貸しや場所貸しで)太陽光パネルの設置料は無料で、**発電量は十分であると想定します。**
- お住いの建物の車庫には充電器がすでに設置され電気自動車は主にここで充電します。
- ご家庭の電気代と電気自動車の電気代の合計が**年間6万円**となります。
- 停電時は**太陽光がある昼間の時間帯は電気を使用できますが**、それ以外は停電のままです。
- ご家庭からの電気使用によるCO2排出量は現状の**80%(20%削減)**となります(正味)。



②仮想状況B（V2Hケース）

- (屋根や壁面など)お住いの建物に太陽光パネルを設置します。
(屋根貸しや場所貸しで)太陽光パネルの設置料は無料で、**発電量は十分であると想定します。**
- お住いの建物の車庫には充電器がすでに設置され電気自動車は主にここで充電します。
さらに**初期費用110万円を負担し電気自動車からご家庭に電気を送れるようにします。**
また、その際の電気自動車への影響(バッテリー劣化)はありません。
- ご家庭の電気代と電気自動車の電気代の合計が**年間3万円**となります。
- 停電時は太陽光パネルと電気自動車からご家庭に電気を送ることにより**1日間は普段通り電気が使用できます。**
その後は①仮想状況Aと同じです。
- ご家庭からの電気使用によるCO2排出量は**0(100%削減)**となります(正味)。

図2 V2Hの選択に関するSP調査(例)

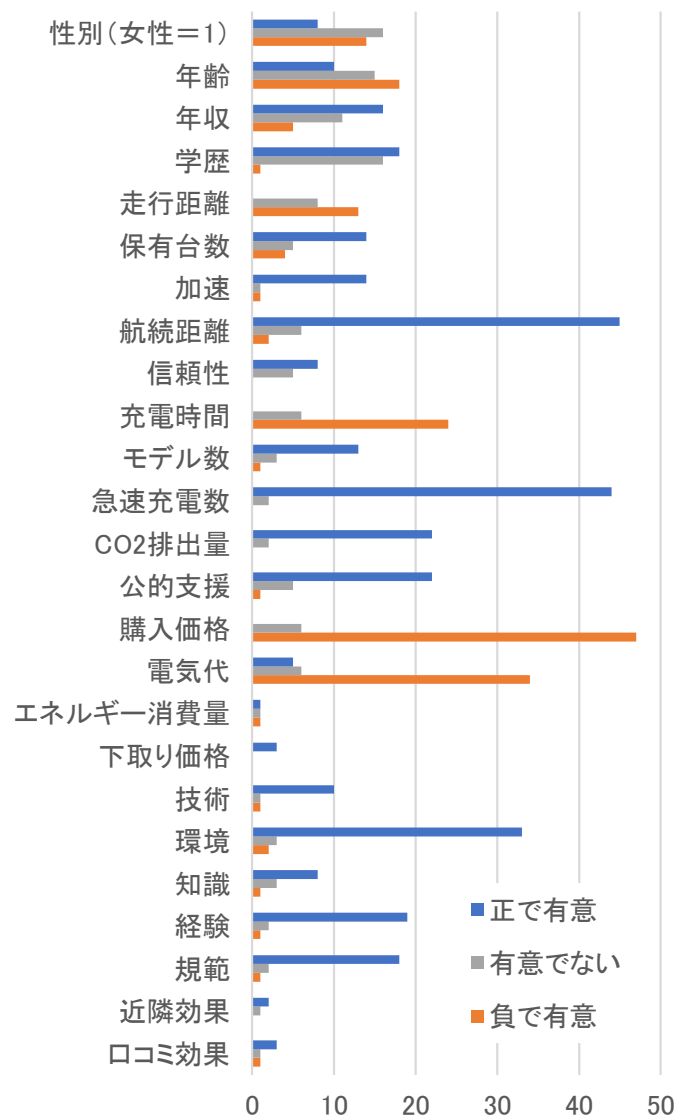


図3 BEV 購入要因 (Wicki et al. 12)

4. BEV 購入者と非 BEV 購入者の認識等の相違

図4は世帯属性である世帯主の性別、年齢、学歴、世帯収入、世帯年間走行距離、保有台数に関してBEV購入者、非BEV購入者別に示したものである。まず、より一般的と想定される非BEV購入者に関して、年齢別割合をWEBアンケート調査と日本自動車工業会乗用車市場動向調査⁸⁾とで比較したところ、20+30代の割合は、前者は関東地方13%、寒冷地方9%、後者の主運転者年齢(全国)は20%となっており、前者の20+30代の割合が相対的に小さかった。また、同様に、女性世帯主の割合を2020年国勢調査(全国)と比較したところ、前者

は関東地方、寒冷地方共に8%、後者は23%となっており、前者の女性世帯主の割合が相対的に小さかった。WEB アンケート調査では、20~69歳を対象としたことから、70歳以上の女性世帯主が調査対象から外れる影響があるものの、20+30代や世帯主女性の割合が少なくなっている可能性がある。ただし、本研究ではBEV購入者と非BEV購入者の相違に焦点を当てていることから、上記の点に留意して分析を進めることとする。

世帯主の性別、年齢、学歴、世帯収入、世帯年間走行距離、保有台数に関して、年齢については関東地方と寒冷地方のいずれでもBEV購入者の方が有意に若かった。また、関東地方ではBEV購入者の方が有意に世帯年収が高く、世帯年間走行距離が多く、保有台数も多いという結果となった。図3と比較すると、世帯年収、保有台数に関しては傾向が一致しているが、世帯年間走行距離は逆の傾向、年齢は一致する部分と逆の部分が認められる。図5はBEV購入者と非BEV購入者の認識等の相違を示したものである。まず、黒線の上部はHEVと比較した場合のBEVに対する認識を示しており、図3との比較では、エネルギー消費量少ない、下取り価格低い以外は概ね傾向が一致している。エネルギー消費量は寒冷地方で、下取り価格は関東地方と寒冷地方でBEV購入者と非BEV購入者の認識の相違が有意であり、特に下取り価格は非BEV購入者がBEV購入に至った場合に課題となり得る項目である。他の項目では、加速が良い、(ガソリン代と比較して)電気代安いが関東地方と寒冷地方で、CO₂排出量少ないが寒冷地方で認識の相違が有意となっている。いずれの項目も非BEV購入者の認識を改めることでBEV購入促進を図ることができる可能性がある。

次に、黒線の下部は回答者自身に対する一般的な認識を示している。ロコミの勧める行動したいは寒冷地方で、技術の興味が強い、BEVにくわしい(知識)は関東地方と寒冷地方でBEV購入者と非BEV購入者の認識の相違が有意となっている。技術の興味が強い、BEVにくわしい(知識)という回答者自身の認識はBEV購入促進に結び付けることが困難であるが、BEV購入者と非BEV購入者を分ける一因となっていると言える。図2との比較では、CO₂減らしたい(環境)、規範に合う行動したいは、既にBEV購入者、非BEV購入者共に高い割合を示しており、BEV購入を促進する傾向と一致している。なお、BEV経験がある(経験)はBEV購入者に対しては不適切であることから、非BEV購入者のみ数値を示している。非BEV購入者のBEV経験者数は低く、この値を高めることもBEV購入促進に結び付くと考えられる。

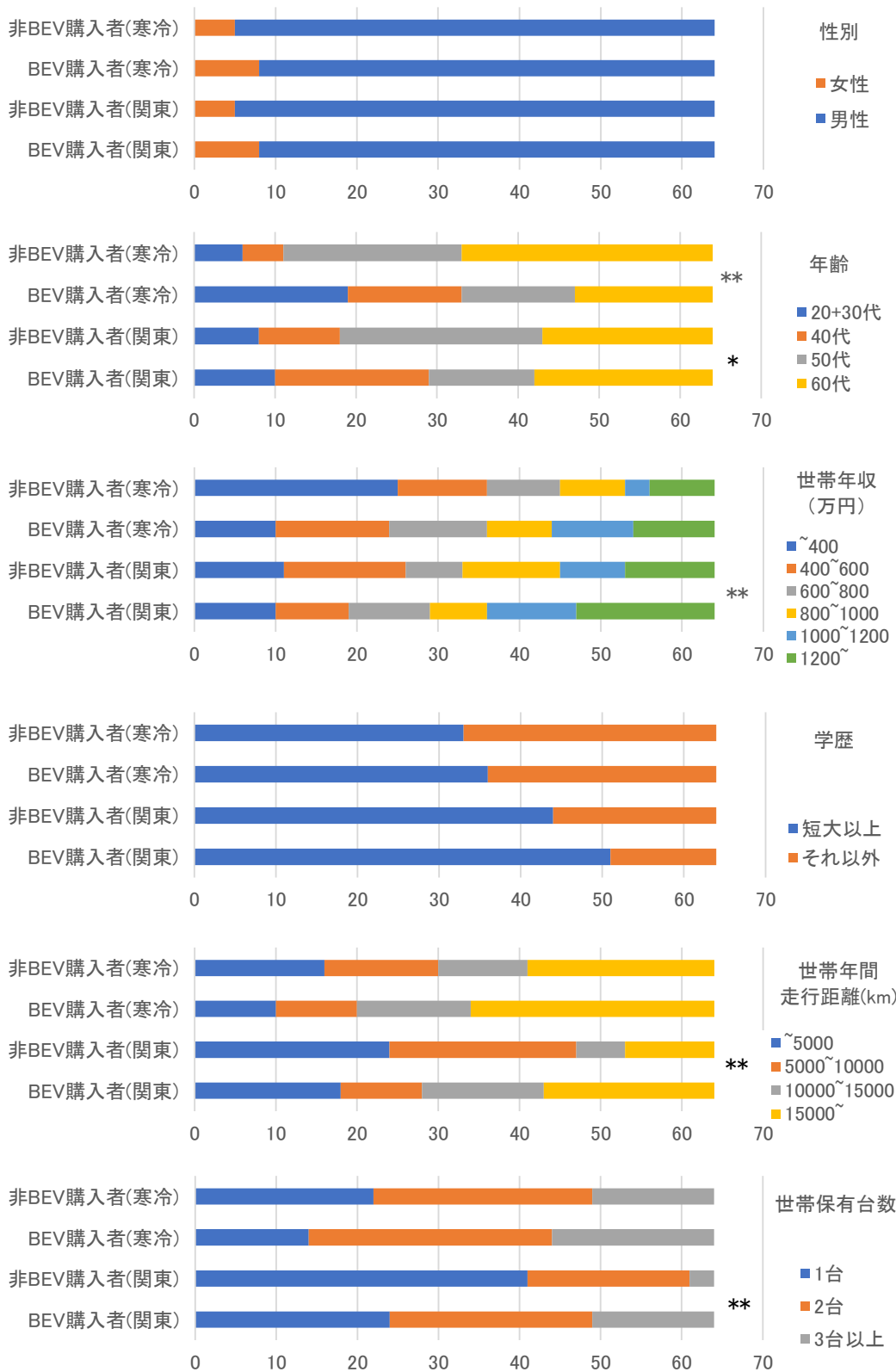


図4 BEV購入者と非BEV購入者の世帯属性の相違

(有意水準* : 10%、** : 5%以下)

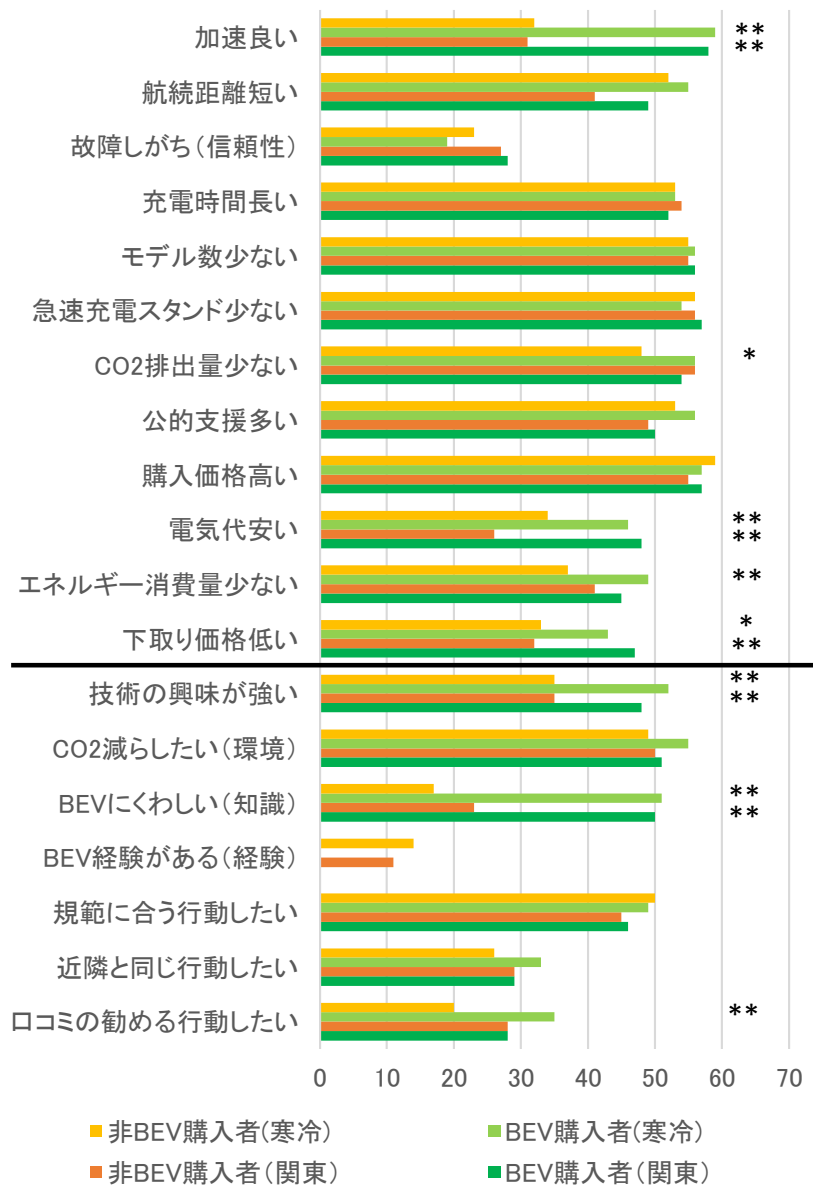


図5 BEV購入者と非BEV購入者の認識等の相違

(有意水準* : 10%、** : 5%以下)

5. HEV と BEV の選択、及び V2H の選択に関する SP 調査

最後に、HEV と BEV の選択、及び V2H に関する SP 調査に基づき選択モデルの推定を行った。WEB アンケート調査では、各回答者が 2 回選択実験を行っていることからサンプル数は 256、ケース数は 512 となる。調査対象とした関東地方と寒冷地方における乗用車販売台数を反映させるために、2018～2021 年までの当該地方における乗用車販売台数²³⁾の比で重み

付けして推定を行った。なお、2022年の販売台数は未公表となっている。また、WEBアンケート調査は選択肢別抽出の形式をとっていることから、地方ごとにBEV定数項を組み込んでいる。

主要な説明変数は、まず、SP調査で用いた購入額の差、HEV走行費とBEVの走行費、航続距離、充電性能である。ただし、HEVとBEVの走行費は共通変数としている。さらに、第4節で検討した25項目のBEV購入要因を検討したが、一部の変数は有意でない、符号条件が合わないなどの理由からモデルから除外している。なお、これらの変数は全てBEV側で推定している。

離散選択ロジットモデルの推定結果を表2に示す。モデル1はBEV購入要因25項目の一部に対する係数を全サンプルから推定したものである。モデル2では、係数をBEV購入者、非BEV購入者別に求めている。いずれのモデルも ρ^2 は十分な値を示しており、ある程度説明力のあるモデルが推定されたと考えられる。ただし、SP調査で用いた変数に関しては、全て符号条件は満たすものの航続距離のみが10%有意で、他の変数は有意とはならなかった。SP調査のサンプル数を増やす必要があると考えられる。

BEV購入要因に関しては、概ね第4節で検討した結果と合致している。モデル1では性別（女性=1）は負、世帯年収は正の係数が得られているが、モデル2ではBEV購入者に対してのみ有意な係数が得られている。これらはBEV購入後の具体的なメリット、デメリットを反映していると考えられ、今後、具体的な内容を把握する必要がある。

HEVと比較した場合のBEVに対する認識については、(ガソリン代と比較して)電気代安い、下取り価格安いがモデル1とモデル2のBEV購入者、非BEV購入者で有意となっており、これらがBEV購入に関わらず共通した認識となっていることが示されている。一方、モデル2において、急速充電スタンド少ないはBEV購入者に対して正、CO₂排出量少ないは非BEV購入者に対して正の有意な係数が得られている。前者についてはBEV購入者が購入後に直面する課題と考えられ、後者については非BEV購入者が電源の脱炭素化を考慮せずBEVのメリットを考えている可能性が示唆される。

回答者自身に対する一般的な認識については、モデル1とモデル2のBEV購入者で技術の興味が強いが正、モデル1でCO₂減らしたい(環境)が正、モデル2のBEV購入者で近隣と同じ行動したいが負となっている。後者は、BEV購入者がBEV販売シェアの低い中でBEV購入に至ったということを表していると考えられる。

なお、地方ごとに組み込んだBEV定数項に関しては、モデル1もモデル2も係数に大きな違いは無かった。本分析からは特に関東地方と寒冷地方の顕著な相違は見いだせなかった。

次にV2Hの選択に関するSP調査に基づき選択モデルの推定を行った。HEVとBEVの選択と同様に、WEBアンケート調査では、各回答者が2回選択実験を行っていることからサン

表2 HEVとBEVの選択に関するSP調査に基づくBEV選択ロジットモデルの推定結果

	モデル1			モデル2					
	係数	t値	P値	係数	t値	P値	係数	t値	P値
購入額の差	-0.003	-1.286	0.199	-0.003	-1.247	0.212			
走行費	-0.027	-1.433	0.152	-0.028	-1.492	0.136			
航続距離	0.001	1.731	0.083	0.001	1.762	0.078			
充電性能	0.005	1.420	0.156	0.004	1.122	0.262			
BEV購入者ダミー	2.047	7.663	0.000	0.131	0.112	0.911			
BEV定数項(関東)	-4.479	-5.816	0.000	-3.361	-3.578	0.000			
BEV定数項(寒冷)	-4.513	-5.851	0.000	-3.434	-3.653	0.000			
	共通			BEV購入者			非BEV購入者		
性別(女性=1)	-0.931	-2.371	0.018	-1.316	-2.591	0.010	0.114	0.179	0.858
世帯年収	0.001	2.605	0.009	0.001	2.405	0.016	0.000	1.376	0.169
充電時間長い	-1.499	-3.557	0.000	-1.201	-1.576	0.115	-0.443	-1.386	0.166
急速充電スタンド少ない	1.083	2.607	0.009	1.229	1.986	0.047	0.498	0.924	0.356
CO2排出量少ない	0.888	2.718	0.007	0.386	0.559	0.577	0.810	1.980	0.048
電気代安い	0.973	3.698	0.000	1.037	2.139	0.033	0.885	2.818	0.005
下取り価格安い	-0.896	-3.288	0.001	-0.962	-1.799	0.072	-0.814	-2.559	0.011
技術の興味が強い	0.650	2.190	0.029	1.303	2.395	0.017	0.377	1.049	0.294
CO2減らしたい(環境)	0.695	1.929	0.054	0.778	1.417	0.156	0.249	0.534	0.594
BEVにくわしい(知識)	0.501	1.581	0.114	0.705	1.278	0.201	0.333	0.870	0.385
近隣と同じ行動したい	-0.307	-1.235	0.217	-0.749	-1.692	0.091	-0.063	-0.204	0.838
サンプル数			256						256
ケース数			512						512
ρ^2			0.325						0.326
調整済み ρ^2			0.308						0.285

:10%有意

:5%有意

プル数は 256、ケース数は 512 となる。離散選択ロジットモデルの推定結果を表 3 に示す。変数の取捨選択も HEV と BEV の選択と同様であるが、主な変数に関して、家庭電気料金が負で 10%有意の他は有意とならなかった。また、停電時に普段通り電気が使用できる日数は期待される符号と逆となっている。モデル全体の説明力 ρ^2 は、低い値となっており、不十分な状況にある。ただし、規範ダミーや環境ダミーが有意となっており、V2H を普及させるためには規範意識や環境意識を高めることが重要である可能性が示唆された。

表 3 V2H の選択に関する SP 調査に基づく V2H 選択ロジットモデルの推定結果

	係数	t値
V2H初期費用	-0.004	-1.304
家庭電気料金	-0.017	-1.709
停電時に普段通り電気が使用できる日数	-0.026	-0.618
CO2削減%	0.001	0.185
短大・大卒以上ダミー(短大・大卒以上を1)	0.390	1.874
技術ダミー	0.502	1.889
知識ダミー	-0.627	-2.305
規範ダミー	0.866	2.956
環境ダミー	0.686	2.152
ロコミ効果ダミー	-0.451	-2.209
BEV(関東)ダミー	0.457	1.821
BEV(関東外)ダミー	0.614	2.277
V2H定数項	-1.204	-2.015
PV定数項	-0.278	-1.022
サンプル数		128
ケース数		512
ρ^2		0.058

6. 結論と今後の課題

本研究では、BEV 購入者を対象とした WEB アンケート調査を実施し、BEV 購入要因の抽出を試みた。また、BEV 購入者と非 BEV 購入者の BEV に対する認識等の相違の検討も行った。本研究の主な結論としては、

- (1) BEV 購入者と非 BEV 購入者の BEV に対する認識の相違に関しては、エネルギー消費量は寒冷地方で、下取り価格は関東地方と寒冷地方で BEV 購入者と非 BEV 購入者の認識の相違が有意であり、特に下取り価格は非 BEV 購入者が BEV 購入に至った場合に課題となり得ることを明らかにした。

- (2) また、加速が良い、(ガソリン代と比較して) 電気代安いが関東地方と寒冷地方で、CO₂ 排出量少ないが寒冷地方で認識の相違が有意となっており、いずれの項目も非 BEV 購入者の認識を改めることで BEV 購入促進を図ることができる可能性が示唆された。
- (3) HEV と BEV の選択に関する SP 調査からは、BEV 購入要因に関して、全サンプルモデルでは性別 (女性=1) は負、世帯年収は正の係数が得られているが、BEV 購入者と非 BEV 購入者別モデルでは BEV 購入者に対してのみ有意な係数が得られた。これらは BEV 購入後の具体的なメリット、デメリットを反映していると考えられる。
- (4) (ガソリン代と比較して) 電気代安い、下取り価格安いが全サンプルと BEV 購入者と非 BEV 購入者別の BEV 購入者、非 BEV 購入者で有意となり、これらが BEV 購入に関わらず共通した認識となっていることが示された。一方、BEV 購入者と非 BEV 購入者別モデルにおいて、急速充電スタンド少ないは BEV 購入者に対して正、CO₂ 排出量少ないは非 BEV 購入者に対して正の有意な係数が得られた。前者は BEV 購入者が購入後に直面する課題と考えられ、政策的対応が必要と考えられる。
- (5) V2H に関する SP 調査からは、全体的に説明力の高いモデルが得られなかったが、V2H を普及させるためには規範意識や環境意識を高めることが重要である可能性を示唆する結果が得られた。

本研究の主な今後の課題については、まず、本研究からは、特に関東地方と寒冷地方の顕著な相違は見いだせなかった。世帯年間走行距離、保有台数等に関して、関東地方では見いだされた BEV 購入者と非 BEV 購入者の相違が寒冷地方では確認できなかったが、これは地方の乗用車利用の特徴を反映しており、寒冷地方を反映したものではないと考えられる。BEV 促進に関して、寒冷地方の特徴を見出すことが今後の課題の 1 つである。

また、本研究は WEB アンケート調査に基づいており、サンプルの偏りの可能性は否定できない。簡易的な分析では、女性世帯主や 20+30 代のサンプルが少なくなっている可能性があり、この点を考慮した分析も今後の課題の 1 つと考えられる。さらに、全体的に説明力の高いモデルが得られなかった V2H の普及に関する調査検討も進める必要がある。

参考文献

- 1) United Nations Climate Change, Nationally Determined Contributions Registry (2021), 「Japan's Nationally Determined Contribution (NDC)」, <https://unfccc.int/NDCREG>, 2023 年 4 月閲覧.
- 2) 環境省 (2023), 「2021 年度 (令和 3 年度) の温室効果ガス排出・吸収量 (確報値 1) について」, <https://www.env.go.jp/content/000128750.pdf>, 2023 年 4 月閲覧.
- 3) IEA (2021), 「Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector」, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, 2022 年 3 月閲覧.

- 4) 日本自動車工業会(2022), 「2050年カーボンニュートラルに向けたシナリオ分析」,
https://www.jama.or.jp/operation/ecology/carbon_neutral_scenario/PDF/Transitioning_to_CN_by_2050_A_Scenario_Based_Analysis_JP.pdf, 2023年4月閲覧.
- 5) (一社)日本自動車販売協会連合会(2023), 「2022年4月~2023年3月燃料別メーカー別台数(乗用車)」, <http://www.jada.or.jp/wp-content/uploads/d044c6faaf89a46f9cc188344b396427.pdf>, 2023年4月閲覧.
- 6) IEA(2022), 「Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future」,
<https://www.iea.org/events/global-ev-outlook-2022>, 2023年3月閲覧.
- 7) 田頭直人・池谷知彦(2013)(2013), 「電気自動車・プラグインハイブリッド車の利用実態と利用者意識 調査報告: Y12029」, 電力中央研究所.
- 8) 日本自動車工業会(2022), 「2021年度乗用車市場動向調査」, 日本自動車工業会.
- 9) Beggs, S., Cardell, S., Hausman, J. (1981), 「Assessing the Potential Demand for Electric Cars」,
Journal of Econometrics, Vol. 17(1), pp.1-19.
- 10) Maybury L., Corcoran, P., Cipcigan, L. (2022), 「Mathematical Modelling of Electric Vehicle Adoption: A Systematic Literature Review」,
Transportation research Part D, pp.103278.
- 11) Liao, F., Molin, E., Wee, B. W. (2017), 「Consumer Preferences for Electric Vehicles: A Literature Review」,
Transport Reviews, Vol.37(3), pp.252-275.
- 12) Wicki, M., Brückmann, G., Quoss, F., Bernauer, T. (2022), 「What Do We Really Know about the Acceptance of Battery Electric Vehicles? - Turns Out, Not Much」,
Transport Reviews, DOI:10.1080/01441647.2021.2023693.
- 13) 松原司・桑野将司・塚井誠人(2012), 「選別・選択段階における他者への同調効果を考慮した電気自動車普及要因に関する研究」, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol.68(5), pp. I_691-I_699.
- 14) Ito, N., Takeuchi, K., Managi, S. (2013), 「Willingness-to-pay for Infrastructure Investments for Alternative Fuel Vehicles」,
Transportation Research Part D, Vol.18, pp.1-8.
- 15) Tanaka, M., Ida, T., Murakami, K., Friedman, L. (2014), 「Consumers' Willingness to Pay for Alternative Fuel Vehicles: A Comparative Discrete Choice Analysis between the US and Japan」,
Transportation Research Part A, Vol.70, pp.194-209.
- 16) 立花潤三・田中渉太(2015), 「EV用充電スポットの整備状況を考慮した自動車購入行動の要因解析」, *土木学会論文集 G(環境)* Vol.71(6), pp.II_83-II_90.
- 17) 土屋依子・伊藤史子・田頭直人・馬場健司・池谷知彦(2014), 「電気自動車に対する消費選好と規定要因に関する基礎的分析」, *Discussion Paper No.129*, 東京大学空間情報科学研究センター, pp.1-19.
- 18) 土屋依子・伊藤史子・田頭直人・池谷知彦・馬場健司(2016), 「自家用車の利用実態からみた電気自動車の地域別普及可能性 -関東圏を対象として-」, *都市計画論文集*, Vol.51(1), pp.46-57.
- 19) 三輪富生・森川高行(2016), 「電気自動車の航続距離が購入意向に与える影響に関するモデル分析 -充電切れ確率と希望航続距離に着目して-」, *都市計画論文集*, Vol.51(3), pp.667-372.
- 20) Javid, R.J., Nejat, A. (2017), 「A Comprehensive Model of Regional Electric Vehicle Adoption and Penetration」,
Transport Policy, Vol.54, pp.30-42.
- 21) Nazari, F., Mohammadian, A., Stephens, T. (2019), 「Modeling Electric Vehicle Adoption Considering

- a Latent Travel Pattern Construct and Charging Infrastructure」, Transportation Research Part D, pp.65-82.
- 22) Tal, G., Xing, Y., Wang, Y., Sun, S. (2018), 「Motivations and Barriers Associated with the Adoption of Battery Electric Vehicles in Beijing: A Multinomial Logit Model Approach」, <https://escholarship.org/uc/item/8x01q28r>, US Davis Institute of Transportation Studies, 2023 年 4 月閲覧.
- 23) 日本自動車販売協会連合会 (2022), 「自動車統計データブック (第 40 集)」, 日本自動車販売協会連合会.

第2章 アクティブ交通への転換がもたらす健康増進便益

1. はじめに

近年、自転車や徒歩など身体活動を伴う移動である「アクティブ交通」の推進が図られている。アクティブ交通がもたらす便益は、大気汚染や騒音といった環境負荷の軽減、不動産価値の向上や地域活性化といった経済的な利益など多岐にわたるが、とりわけ、健康増進に関する便益が注目されている。国内では、運動不足は喫煙、高血圧に次いで3番目の死亡の要因となっており、その数は毎年約5万人とされている¹⁾。身体活動や運動量が多い人は少ない人に比べて循環器疾患やがんなどの発症リスクが低いことは世界的にも実証されており、WHOは高血圧、喫煙、高血糖に次いで、身体活動不足は全世界の死亡に対する危険因子の第4位であると認識している。Lee et al.²⁾は、運動不足を解消することで世界の平均寿命が0.68年延伸すると推計している。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

健康増進便益に関する研究として、村田ら³⁾は通勤交通手段が健康状態に与える影響を分析している。また、程ら⁴⁾は、通勤交通手段転換施策の導入による医療費削減効果を明らかにした。これらの研究は共通して、医療費削減額をアウトカム指標としている。また、Woodcock et al.⁵⁾、Rodrigues et al.⁶⁾、Clockston et al.⁷⁾は、異なるアウトカム指標としてDALYを用いて健康便益の算定を行なっている。しかし、既往研究ではこれら複数のアウトカムに関する比較・検討はほとんどなされていない。

また、これらの研究は、受益者の社会的属性による便益の違いを十分に考慮していない。身体活動によって得られる健康増進便益は、個人が従前からなしていた身体活動量に依存する。また、健康増進便益は個人の罹患リスクにも依存し、罹患リスクの高い高齢層の身体活動は、若年層の身体活動より大きなリスクの低下が期待される。

以上より、アウトカムが国や研究によって複数存在し包括的な健康増進便益に言及できていないこと、社会的属性（性別年齢）による効果の相違を考慮できていないことが課題である。そこで本研究では、アクティブ交通がもたらす健康増進便益について、社会的属性（性別年齢）による効果の違いを考慮した上で、複数のアウトカムを用いて包括的に比

較・検討を行うことで、日本国内の交通プロジェクトに対して有効な健康増進便益評価手法を検討することを目的とする。

3. 健康増進便益算出手法の検討

3. 1. 健康増進便益発生の流れ

本研究では、アクティブ交通の利用により生じる健康増進便益を算出する。具体的には、アクティブ交通への手段転換が起こることで身体活動の増加が生じ、対象とする5疾病それぞれの罹患率・死亡率の減少という過程を経て各種便益が生じる。さらに、それらを金銭価値に変換することで統一的な指標で評価を行う。

3. 2. 用量反応関係

身体活動量と罹患リスクの関係用量反応関係と呼ぶ。本研究では Kyu et al.⁸⁾のメタ分析によって得られた、身体活動量と5つの疾病に対する罹患リスクの間の用量反応関係 $F_c(p)$ を採用する。Kyu et al.⁸⁾においては、乳がん、大腸がん、糖尿病、虚血性心疾患、虚血性脳卒中の5疾病 c を対象として、身体活動量 p が不在の状態の罹患リスクを1とした際の、身体活動量 p が600 (METs・分/週) 増加するごとの罹患リスクをそれぞれ算出している。それらの離散的な値の間では $F_c(p)$ の線形性を仮定した。以上より、 p_b ⁹⁾の身体活動量を持つ個人が、交通手段の転換によって p_a の身体活動量となったとき、罹患リスクの変化RRは、

$$RR = F(p_a)/F(p_b)$$

となる。なお、Woodcock et al.⁵⁾より $F_c(p)$ は死亡リスク変化にも適用されるとする。

3. 3. 社会的属性の考慮

社会的属性として年齢と性別を考慮する。原則として、分析に使用するデータは性年齢別に取得したものとしている。また、年齢区分は、20-24歳、25-29歳、…、95歳以上の16区分とする。

3. 4. 便益種別算出方法

本研究では、「健康関連 QOL の増加 (Δ DALY)」「医療費の減少 (Δ MB)」「死亡退職の減

少 (ΔDR)」「アブセンティーズム (欠勤) の減少 (ΔAB)」「プレゼンティーズム (不調) の減少 (ΔPR)」の 5 項目を便益として算出する。総便益 B は、以下のように求められる。

$$B = \Delta DALY + \Delta MB + \Delta DR + \Delta AB + \Delta PR$$

健康関連 QOL を示す指標として DALY (Disability Adjusted Life Years : 障害調整生存年) を用いる。DALY とは、「障害の程度や障害を有する期間を考慮した生存年数」のことで、病気の程度によって設定された障害の重み付けを生存年と掛け合わせることで算出される。具体的には、早死によって失われた年数 (YLL) と、疾病により障害を有している年数 (YLD) の和として記述され、1DALY の損失は、健康な状態で過ごす人生を 1 年失ったことを意味している。

健康関連 QOL の増加 $\Delta DALY$ は、疾病 c 、年齢 g 、性別 s における従前の DALY である $DALY_{b,c,s,g}$ ¹⁰⁾、疾病 c の罹患リスク変化 RR_c を用いて、年齢 g 、性別 s の個人 $n(s,g)$ に関して足し合わせることで、

$$\Delta DALY = \sum_{c,n(s,g)} \{DALY_{b,c,s,g} \cdot (1 - RR_c)\}$$

となる。この値に、DALY の貨幣換算値として 500 万円/1DALY¹¹⁾ を掛け合わせることで金銭価値に換算する。

医療費の減少額については以下のようなになる。疾病 c に対する性別 s 、年齢 g における有病率¹⁰⁾ を $MPR_{c,s,g}$ 、一人当たり年間医療費¹³⁾¹⁴⁾ を $MBP_{c,s,g}$ とすると医療費減少額 ΔMB は、

$$\Delta MB = \sum_{c,n(s,g)} \{MPR_{c,s,g} \cdot (1 - RR_c) \cdot MBP_{c,s,g}\}$$

となる。

死亡退職とは、死亡により退職を余儀なくされることであり、身体活動増加により死亡リスクが低下することで死亡退職損失が減少する。死亡退職損失は、本人損失と事業主体損失に分けられる。

本人損失については、医療費減少額と同様に交通事故減少便益の人的損失額に関する算出方法¹²⁾を参考に、「身体に残した障害による労働能力の減少で将来発生するであろう収入減」である逸失利益という概念を用いる。疾病 c に対する性別 s 、年齢 g における死亡

率¹⁰⁾を $MP_{c,s,g}$ 、性別 s 、年齢 g における一人当たり逸失利益を $LPP_{s,g}$ とすると、就業者である個人 $n'(s,g)$ に関して足し合わせることで、死亡退職の本人損失減少額 ΔDR_1 は

$$\Delta DR_1 = \sum_{c,n'(s,g)} \{MR_{c,s,g} \cdot (1 - RR_c) \cdot LPP_{s,g}\}$$

となる。なお、 $LPP_{s,g}$ は、性別 s 、年齢 g における年間平均給与額¹⁵⁾を $I_{s,g}$ 、 $r=0.5$ 、年齢 g における稼働可能期間に対応するライブニッツ係数¹⁵⁾を L_g として以下のように求められる。

$$LPP_{s,g} = I_{s,g} \cdot (1 - r) \cdot L_g$$

また、事業主体の損失に関しては交通事故減少便益の事業主体損失の算出方法¹²⁾を参考にする。単位時間・就業者 1 名あたり付加価値額を AVP 、人件費を LC 、年齢 g における期待労働年数¹²⁾を Y_g とすると、死亡退職の事業主体損失減少額 ΔDR_2 は、

$$\Delta DR_2 = \sum_{c,n'(s,g)} \{MR_{c,s,g} \cdot (1 - RR_c) \cdot (AVP - LC) \cdot Y_g\}$$

となる。 AVP は、年間・従業者 1 名あたり付加価値額¹⁶⁾を AV 、平均就業時間¹⁷⁾を H とすると、

$$AVP = AV/H$$

となる。なお、 LC と AVP は以下の関係¹⁶⁾を持つとする。

$$LC = 0.715 AVP$$

以上より死亡退職減少便益 ΔDR は以下のようになる。

$$\Delta DR = \sum_{c,n'(s,g)} [MR_{c,s,g} \cdot (1 - RR_c) \cdot \{LPP_{s,g} + (AVP - LC) \cdot Y_g\}]$$

アブセンティーズムとは、体調不良等を原因として従業員が働いていない状態を指す。欠勤により、本人は給与分の損失を受け、事業主体は人件費を払わない代わりに欠勤分の業務による付加価値額を失うことになる。

まず、従業員本人の損失を考える。身体活動時間 p' (分) とアブセンティーズム量との関係を表す関数を $g(p')$ 、欠勤率を ABR とすると、アブセンティーズムによる本人の損失減少額 ΔAB_1 は、

$$\Delta AB_1 = \sum_{n'(s,g)} g(p') \cdot I_{s,g} \cdot ABR$$

となる。なお、 $g(p')=0.0083p'^{18)}$ 、 $ABR=1.04\%^{19)}$ とする。

次に、事業主体の損失を考える。アブセンティーズムによる事業主体の損失減少額 ΔAB_2 は以下のようになる。

$$\Delta AB_2 = \sum_{n'(s,g)} \{g(p') \cdot (AVP - LC) \cdot ABR\}$$

よって、アブセンティーズム損失減少額 ΔAB は以下のようになる。

$$\Delta AB = ABR \cdot \sum_{n'(s,g)} \{g(p') \cdot (I_{s,g} + AVP - LC)\}$$

プレゼンティーズムとは、出勤しているにも関わらず、体調不良、ストレス等の理由で生産性が低下している状態を指す。出勤はしているため、本人は給与を受け取っており損失は発生しない。しかし、事業主体としては、人件費は発生しているが付加価値を十分に享受できず、その分の損失が発生する。

身体活動量 p とプレゼンティーズム量との関係を表す関数を $h(p)$ 、不調率を PRR とすると、プレゼンティーズムによる事業主体の損失減少額 ΔPR は

$$\Delta PR = \sum_{n'} h(p) \cdot AVP \cdot PRR$$

となる。なお、 $PRR=6.11\%^{19)}$ とする。また、 $h(p)$ は Walker et al.²⁰⁾を参考に導出し、 $h(p)=0.0017p$ とする。

4. ケーススタディ

4. 1. 分析方法

本研究では神奈川東部方面線プロジェクトを対象とし、ケーススタディを行う。本プロジェクトは、横浜市と都心部との接続強化、乗り換え回数の減少等を整備効果として、相鉄・JR 直通線、相鉄・東急直通線を整備区間として行われている。以上により、交通手段を自動車またはバスから鉄道に転移することによって生じる鉄道へのアクセス・イグレス交通におけるアクティブ交通の利用に伴う健康増進便益を算出する。

まず、プロジェクトにより誘発される交通手段転換予測数を算出する。「神奈川東部方面線付属資料」²¹⁾より年度別利用者数予測を得た。また鉄道・運輸機構へのヒアリングより、新規利用者（2025年度）の2.78%が自動車からの転移、0.31%がバスからの転移、残りが鉄道（他路線）からの推移であることを得た。これらより、自動車またはバスからの転移による鉄道利用者数を算出する。なお、全利用者が週5日間利用していると仮定し、新規利用者の性年齢別割合ならびに就業者・非就業者割合は外出者全体の割合²²⁾に従うものとする。

次に、鉄道利用者のアクセス・イグレス交通手段と手段別平均所要時間を算出する。アクセス交通に関しては本プロジェクトの区間内である新横浜、日吉、西谷各駅におけるデータ²³⁾より算出し、イグレス交通に関しては首都圏全体の平均値²³⁾を用いる。なお、徒歩及び自転車の身体活動量に関しては国立健康・栄養研究所²⁴⁾よりそれぞれ4METs、6.8METsとする。

以上より、本プロジェクトにおける健康増進便益の算出を行う。なお算出においては、現在価値化基準年度を2021年度とし、社会的割引率を4%に設定した上で、2023年（供用開始年）から2052年までの30年間を計算期間とする²¹⁾。

4. 2. 結果と考察

総健康増進便益Bとして算出された結果を表1に示す。総健康増進便益は環境等改善便益と同程度になる。対象としたプロジェクトは鉄道プロジェクトであることから、健康増進便益が鉄道利用者に関係する便益と比べて大幅に小さくなる。しかし、環境等改善便益は健康増進便益と同様に鉄道利用による交通手段の転換をターゲットにした便益であり、同程度の便益が見込めるということは意義のある結果と考えられる。本研究では対象としていないが、アクティブ交通への交通手段転換がさらに起こり得るプロジェクトを対象とした際は、健康増進便益が総便益において大きな割合を占める可能性があることが示唆される。

表 1 総健康増進便益と他便益²¹⁾

総便益の内訳 (百万円)		計算期間：30年	
鉄道・運輸機構 (『鉄道プロジェクトの 評価手法マニュアル 2012』に基づく)	利用者便益	時間短縮便益	787,792
		費用節減便益	22,352
		車両内混雑緩和便益	168,861
		乗換回数低減便益	59,891
		合計	1,038,893
	環境等改善便益	局所的環境改善便益	535
		地球的環境改善便益	397
		道路交通事故削減便益	4,405
		合計	5,337
	供給者便益		-99,299
	残存価値		62,394
便益計		1,007,326	
本研究の便益	総健康増進便益	9,454	

次に、健康増進便益をアウトカムの種別に図1に示す。以上より、全体の77%をプレゼンティーズムの減少による便益が占めている。既往研究においては、国内では医療費を、国外では医療費、健康関連QOLをアウトカムにした研究がほとんどである。しかし、実際にはプレゼンティーズムが支配的であり、既往研究ではこれらの便益を見落としていることが示唆される。

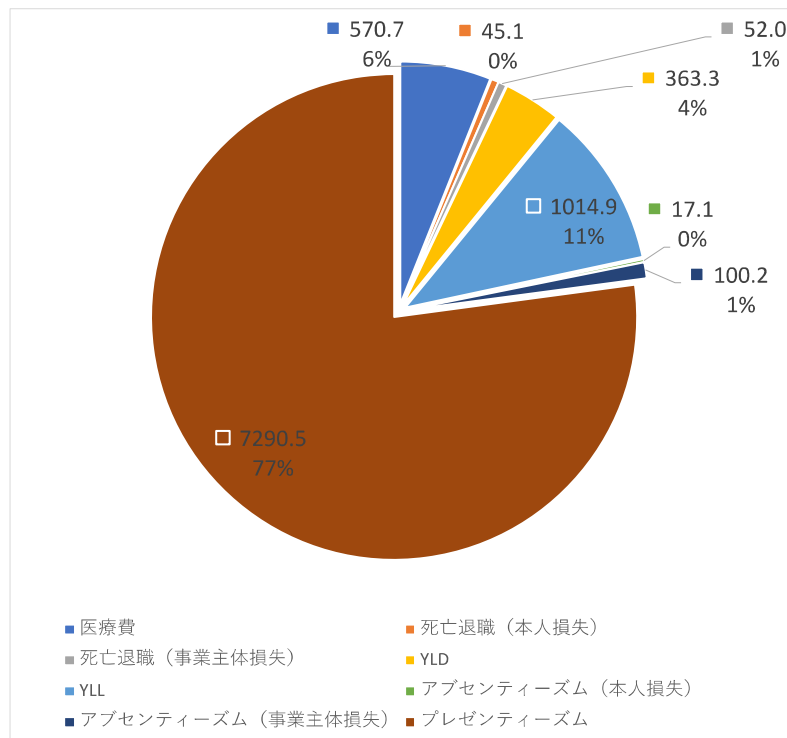


図1 アウトカム種別便益 (百万円)

次に、各関係主体に帰着する便益額を考える。まず、健康関連 QOL に係る便益は全て実際にアクティブ交通に転換した「手段転換者」が享受する。次に、医療費に係る便益は、国民医療費財源別割合¹⁴⁾より、国庫・地方負担分が「政府」、事業主負担分が「企業」、被保険者負担分が「家計」、患者負担分が「手段転換者」として分配される。次に、死亡退職に係る便益は、給与を得られないことを避けた本人すなわち「手段転換者」の便益と、付加価値を得られないことを避けた事業主体すなわち「企業」の便益に分けられる。アブセンティーズムに係る便益も同様に、「手段転換者」の便益と「企業」の便益に分けられる。プレゼンティーズムに係る便益は、付加価値の減少を避けた事業主体すなわち「企業」の便益となる。以上の結果得られた各関係主体に帰着する便益を表 2 に示す。

表 2 利害関係者別便益額（百万円）

	手段転換者	家計	企業	政府	合計
ΔDALY	1378.2	-	-	-	1378.2
ΔMB	65.6	160.9	121.6	219.1	570.7
ΔDR	45.1	-	52.0	-	97.1
ΔAB	17.1	-	100.2	-	117.3
ΔPR	-	-	7290.5	-	7290.5
便益計	1506.1	160.9	7564.2	219.1	9453.8

以上より、プレゼンティーズムが支配的であることが大きく影響をしており、従来便益を享受する主体として考えられていた交通手段転換者よりも企業の方が 5 倍程度大きな便益を享受していることがわかる。また、交通手段転換者と企業の双方に便益が生じている医療費、死亡退職、アブセンティーズムに係る便益に着目しても、全て企業の方が大きな便益を享受していることがわかる。以上より、一般に交通手段の転換、特にアクティブ交通手段の利用を促す施策において、実際に交通手段を転換した者に比べて企業の方がより大きな便益を享受する可能性があることが示唆される。

5. 終わりに

本研究の結論として以下のことが挙げられる。

- 1) 健康増進便益が環境等改善便益と同程度である点である。両便益共に交通手段の転換をターゲットとした便益であることから、アクティブ交通への転換を主目的としたプロジェクトにおいてはこれらの便益が卓越することが示唆される。
- 2) 便益の内でもプレゼンティーズムの減少による便益が支配的である点である。医療費や健康関連 QOL をアウトカムにした研究がほとんどであった既往研究においては便益の一部を見落としている可能性があることが示唆される。
- 3) 交通手段転換者よりも企業の方が大きな便益を享受していることである。一般に利用者のためとされるプロジェクトであっても実際には企業も多大な便益を享受しており、そのような行動変容施策を企業が先導するメリットが大いにあることが示唆される。

参考文献

- 1) 厚生労働省、平成 26 年度厚生労働省白書 (<https://www.mhlw.go.jp/wp/hakusyo/kousei/14/dl/1-02-1.pdf>) (参照：2022/8/26)、2014
- 2) Lee, I.M., Shiroma, E.J., Lobelo, F., Puska, P., Blair, S.N., Katzmarzyk, P.T., Impact of Physical Inactivity on the World's Major Non-Communicable Diseases, *Lancet*, Volume 380, Issue 9838, pp.219-229, 2012
- 3) 村田香織・室町泰徳、個人の交通行動が健康状態に与える影響に関する研究、土木計画学研究・論文集、Vol.23、pp.497-504、2006
- 4) 程琦・近藤光男・竹内駿祐、通勤交通における自動車利用から徒歩・自転車への転換施策による健康促進効果分析、土木計画学研究・論文集、Vol.26、pp.947-956、2009
- 5) Woodcock, J., Givoni, M., Morgan, A.S., Health Impact Modelling of Active Travel Visions for England and Wales Using an Integrated Transport and Health Impact Modelling Tool (ITHIM), *PLOS ONE*, Volume 8, Issue 1, e51462, 2013
- 6) Rodrigues, P.F., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Saldiva, P., Sa, T.H., Sousa, S.I.V., Health economic assessment of a shift to active transport, *Environmental Pollution*, Volume 258, 113745, 2020
- 7) Clockston, R.L.M., Rojas-Rueda, D., Health impacts of bike-sharing systems in the U.S., *Environmental Research*, Volume 202, 111709, 2021
- 8) Kyu, H.H., Bachman, V.F., Alexander, L.T., Mumford, J.E., Afshin, A., Estep, K., Veerman, J.L., Delwiche, K., Iannarone, M.L., Moyer, M.L., Cercy, K., Vos, T., Murray, C.J.L., Forouzanfar, M.H., Physical activity and risk of breast cancer, colon cancer, diabetes, ischemic heart disease, and ischemic stroke events: systematic review and dose-response meta-analysis for the Global Burden of Disease Study 2013, *British Medical Journal*, 354, 2016

- 9) 笹川スポーツ財団、スポーツライフ・データ (https://www.ssf.or.jp/thinktank/sports_life/index.html)
(参照 : 2023/1/23)
- 10) Institute for Health Metrics and Evaluation, GBD Results 2019 (<https://www.healthdata.org/data-visualization/gbd-results>) (参照 : 2023/1/22)
- 11) Shiroiwa, T., Igarashi, A., Fukuda, T., Ikeda, S., WTP for a QALY and health states: More money for severer health states?, *Cost Effectiveness and Resource Allocation*, 11:22, 2013
- 12) 内閣府、交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査 (平成 29 年 3 月)、
(<https://www8.cao.go.jp/koutu/chou-ken/h28/index.html>) (参照 : 2023/1/22)
- 13) 厚生労働省、令和 2 年度患者調査、(<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/20/index.html>)
(参照 : 2023/1/22)
- 14) 厚生労働省、令和 2 年度国民医療費、
(<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/20/index.html>) (参照 : 2023/1/22)
- 15) 国土交通省、自賠責保険ポータルサイト 限度額と保書内容、
(<https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/04relief/jibai/payment.html>) (参照 : 2023/1/22)
- 16) 財務総合政策研究所、財政金融統計月報第 835 号、
(https://www.mof.go.jp/pri/publication/zaikin_geppo/hyou/g835/835.html) (参照 : 2023/1/22)
- 17) 厚生労働省、労働統計要覧 (D 労働時間)、(https://www.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyr_d.html)
(参照 : 2023/1/22)
- 18) Department for Transport, Transport analysis guidance, (<https://www.gov.uk/guidance/transport-analysis-guidance-tag>) (参照 : 2023/1/22)
- 19) Nagata, T., Mori, K., Ohtani, M., Nagata, M., Kajiki, S., Fujino, Y., Matsuda, S., Loeppke, R., Total Health-Related Costs Due to Absenteeism, Presenteeism, and Medical and Pharmaceutical Expenses in Japanese Employers, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 5, 60, pp.273-280, 2018
- 20) Walker, T.J., Tullar, J.M., Diamond, P.M., Kohl, H.W., Amick, B.C., The Relation of Combined Aerobic and Muscle Strengthening Physical Activity with Presenteeism, *Journal of physical activity & health*, 14, 11, pp.893-898, 2017
- 21) 鉄道・運輸機構、令和 3 年度事業評価監視委員会 神奈川東部方面線付属資料、
(<https://www.jrnt.go.jp/construction/committee/asset/10.pdf>) (参照 : 2023/1/22)
- 22) 東京都市圏交通計画協議会、基礎集計項目の提供 (パーソントリップ調査データ)、
(https://www.tokyo-pt.jp/data/01_02) (参照 : 2023/1/22)
- 23) 国土交通省、第 12 回第都市交通センサス調査結果集計表、
(https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/sosei_transport_tk_000035.html) (参照 : 2023/1/22)
- 24) 国立健康・栄養研究所、改訂版「身体活動のメッツ (METs) 表」、
(<https://www.nibiohn.go.jp/files/2011mets.pdf>) (参照 : 2023/1/22)

第3章 IPCC AR6 WG3 Chapter10 Transport

(第10章 運輸) の抄訳

はじめに

IPCC では、約 7 年ごとに気候変動に関する研究を包括的にレビューした報告書を発表しており、2022 年には AR6 WG3 (第 6 次評価報告書気候変動緩和策) が報告されている。報告書の重要性を考慮し、以下、運輸セクターに関連して重要と考えられる第 10 章 運輸の抄訳を行うこととした (図表番号は原著通り)。

1. イントロダクションと概観

この章では、気候変動の緩和における運輸セクターの役割を検討する。車両や燃料の技術を超えた輸送システムの相互作用を評価し、緩和オプションの完全なライフサイクル分析、実現するための条件の見直し、運輸の脱炭素化目標の前進を促進できる指標を含める。本章では、陸上輸送システムの発展を評価し、AR5 以降の新機能として、航空と海運の傾向と課題に焦点を当てた 2 つの章を導入する。また、本章では、世界、エネルギー、および国のシナリオから示される将来の軌道を評価し、セクターの変革を可能にする条件についての議論で締めくくる。

本セクション(10.1)では、運輸が事実上すべての持続可能な開発目標(SDG)にどのように関連しているか、運輸が温室効果ガス(GHG)排出の大きな原因となっている傾向と推進要因、緩和の一部として気候変動が運輸に及ぼす影響、および低炭素運輸経路を形成する可能性を秘めた現在生じている運輸の破壊的変化の概要、について説明する。

17 の SDGs は、169 のターゲットと 232 の SDG 指標によって特定される全体的な目標を定めており、その多くは運輸に関連している。持続可能な運輸システムは、現在および将来の世代に、安全で包括的で手頃な価格のクリーンな旅客と貨物の移動を提供する。運輸は特に SDGs 3、7、8、9、11、12、および 13 に関連している (表 10.1)。

運輸セクターは、1990 年の 5.1GtCO_{2eq} から、2019 年には約 8.9GtCO_{2eq} を直接排出した (図 10.1)。2019 年の GHG 排出量の第 4 位は、電力、産業、農業・林業・土地利用(AFOLU)セクターに次ぐ世界の運輸であった。絶対値では、運輸セクターは温室効果ガス(GHG)総排出量

















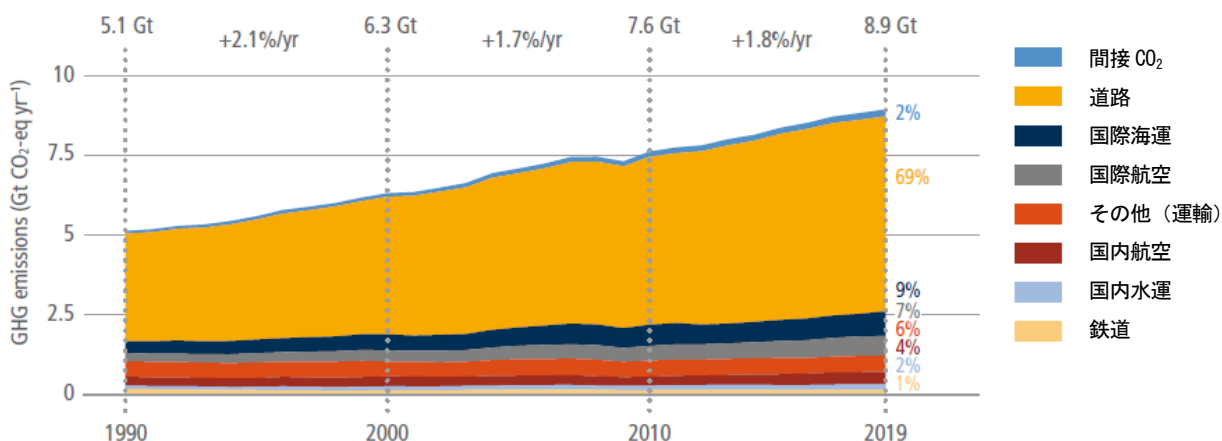
	人間の基本的なニーズ	地球の前提条件	持続可能な資源の使用	社会的および経済的發展	普遍的な価値観
	  	  	  	  	   
運輸関連トピックス (低炭素交通、アクティブ交通、電気自動車)、 車両技術の進歩、公共交通機関の改善	- 大気汚染の低減は、健康上のプラスの成果に貢献する。	- バリューチェーン全体(例: Well-to-Wheel)に沿ったGHG 排出量の削減。	- 再生可能エネルギー使用の割合。	- 経済と人間の発展のための運輸の役割。	- 運輸における男女平等。
	- エネルギーへのアクセスは貧困緩和に貢献できる。	- マイナーな GHG の 排出と汚染物質に対処するさらなる開発。	- 車両のエネルギー効率。	- 脱炭素化自家用車ではなく、公共交通機関の使用。	- 不平等の減少。
	- 交通計画は都市の貧困削減において主要な役割を果たす。	- 持続可能な開発を志向した運輸。	- クリーンで手頃な価格のオフグリッドエネルギー。	- 持続可能な発展を目指した運輸。	- 質の高い教育へのアクセスを可能にする。
	- 医療へのアクセス。	- 運輸に循環経済原則を適用。	- 生産段階の原材料消費の削減、バリューチェーン全体を含む車両とその運用のライフサイクル分析。	- 都市と農村地域のための持続可能な運輸インフラとシステム。	- 目標に向けたパートナーシップ。
	- 大気汚染による病気。		- 循環経済にリンクした閉ループの炭素と栄養素の循環。	- 手頃な価格のモビリティサービス。これは公共交通機関への「ユニバーサルアクセス」でもカバーできる。	
	- 交通事故による負傷および死亡。			- アクセシビリティ vs モビリティ: 機会へのモビリティ。運輸の公平性。自由の発展。	
	- 運転によるストレスの軽減。			- 資源効率と生産エネルギーコストの低下によるプラスの経済成長(雇用)結果。	
	- ウォーキングやサイクリングのポジティブな効果によるアクティブな交通手段と健康とのつながり。			- 仕事へのアクセスにおける交通機関の提供の役割、在宅勤務といった社会規範の再構成。	
- 障害のあるユーザーの道路アクセシビリティを改善する。			- 主要な雇用者としての運輸メーカーは、プラットフォーム経済と自動運転車のイノベーションにより運輸関連労働者の役割を変化させている。		
- 交通/モビリティに費やす時間を削減する。					

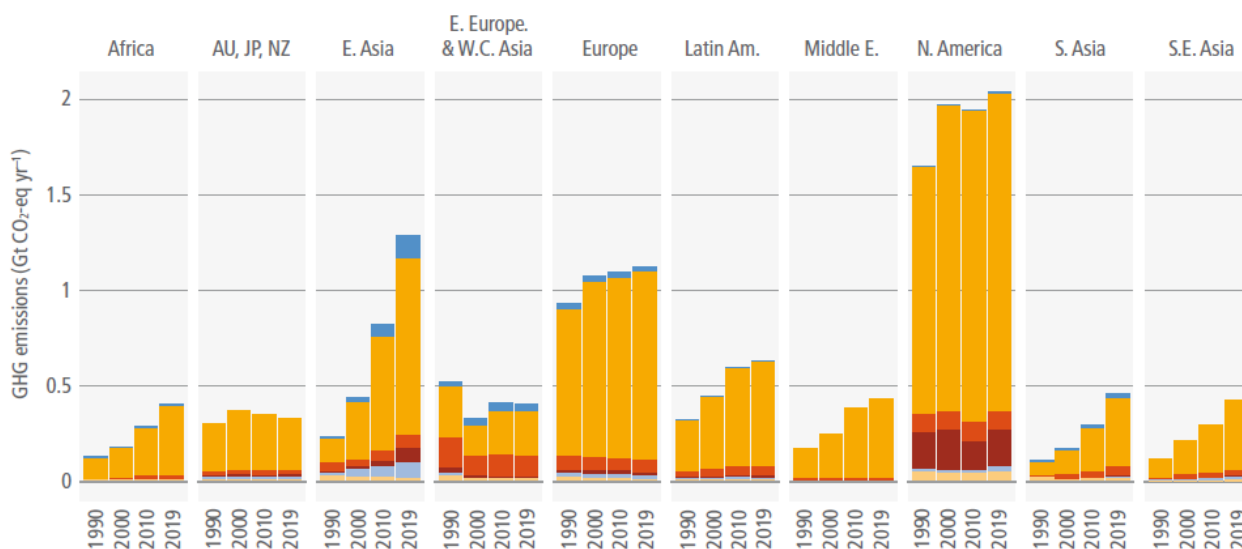
表 10.1 持続可能な開発目標: 相乗効果とトレードオフ

(アイコンは、国際連合広報センター、SDGs のアイコン、https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/sdgs_logo/sdgs_icon/、

(アクセス 2023 年 5 月 29 日) による)



(a) 運輸計 GHG 排出量の傾向



(b) 運輸の地域別 GHG 排出量の傾向

図 10.1 世界および地域の運輸 GHG 排出量の傾向

パネル(a)は、運輸で消費される電気と熱からの間接排出を示しており、主に鉄道システムの電化に関連している。これらの間接排出量には、セクション 10.4 で評価される運輸システム(車両製造やインフラストラクチャーなど)のライフサイクル全体の排出量は含まれない。国際航空と国際海運はパネル(a)に含まれているが、パネル(b)からは除外されている。燃料生産、車両製造、インフラ建設からの間接排出は、セクターの合計には含まれていない。出典: Minx 他(2021) のデータを用いた Lamb 他(2021) から引用

の約 15%を占め、世界のエネルギー関連 CO₂ 排出量の約 23%を占めている (IEA 2020a)。運輸 GHG 排出量は、過去 20 年間で急速に増加しており、2010 年以降、このセクターの排出量は他の最終用途セクターよりも急速に増加し、年間平均+1.8%の成長率を示している。運輸セクターは世界の 40%の国で最大のエネルギー消費セクターである。

2019 年現在、最大の運輸排出源は、道路交通における旅客と貨物の移動である (6.1GtCO_{2eq}、セクター全体の 69%)。国際海運は 2 番目に大きな排出源であり、0.8GtCO_{2eq} (セクター全体の 9%) を占め、国際航空は 0.6GtCO_{2eq} (セクター全体の 7%) で 3 番目である。鉄道を含む他のすべての運輸排出源は比較的些細なものであり、2019 年の合計は 1.4 GtCO_{2eq} であった。道路交通は、全世界のエネルギー使用セクターの中で最も急速に成長している (年間 +1.7%)。2020 年以降に実施された COVID-19 に起因する経済的ロックダウンは、運輸セクターの排出量に非常に大きな影響を与えていることに注意が必要である。これは、他のどのセクターよりも高いものである (第 2 章を参照)。Crippa 他 (2021) による予備的な推定は、世界の運輸 CO₂ 排出量が 2020 年に 7.6GtCO₂ に減少し、2019 年と比較して 11.6%減少したことを示している。これらのロックダウンは、すべての運輸セグメントに影響を与えたが、特に国際航空 (2020 年の世界の CO₂ 排出量の推定で-45%)、道路交通 (-10%)、および国内航空 (-9.3%) に影響を与えた。比較として、COVID-19 パンデミックの結果、全セクターの総 CO₂ 排出量は 5.1%減少したと推定されている。

旅客交通活動の世界的な増加は、ほぼ完全に非 OECD 諸国で発生している (SLoCaT 2018a)。乗用車、二輪車、三輪車、ミニバスは旅客輸送関連の CO₂ 排出量の約 75%を占めており、公共交通サービス (バスと鉄道) は旅客輸送関連の CO₂ 排出量の約 7%を生成している。過去 10 年間、世界規模で SUV の販売は着実に伸びており、2019 年に販売された自動車の 40%が SUV であった (IEA 2020a)。

トンキロ (tkm) で測定された世界の貨物輸送は、2000 年から 2015 年の間に 68%増加し、2050 年までに 3.3 倍になると予測されている (ITF 2019)。この成長が抑制されなければ、貨物輸送の脱炭素化は非常に困難になる (McKinnon 2018; ITF 2019)。地理的に離れた場所にあることが多い業界の国際貿易とグローバルサプライチェーンは、貨物輸送からの CO₂ 排出量の急速な増加の原因であり (Yeh et al. 2017; McKinnon 2018)、旅客輸送からの排出量よりも急速に増加している (Lamb et al. 2021)。大型車 (HDV) は、粒子状物質と高い短期温暖化係数を伴うブラックカーボンを大量に排出するため、世界に存在する台数に比べて大気汚染に不釣り合いなほど寄与している (Anenberg et al. 2019)。

道路上の乗用車と貨物車は、世界の輸送関連の CO₂ 排出量を支配し、最大の緩和の可能性を提供する (Taptich et al. 2016; Halim et al. 2018)。この章では、考えられる幅広い運輸排出削減戦略を検討する。これらの戦略は、第 5 章で説明されている「アヴォイド-シフト-インプ

ルーヴ」(ASI)フレームワークに分類できる(Tapich et al. 2016)。

アヴォイド戦略は、車両の総移動量を減らす。これは移動距離を最小限に抑え、価格設定と需要マネジメントプログラムを通じて効率的な輸送を促進する、コンパクトなコミュニティやその他のポリシーが含まれる。シフト戦略は、移動を高排出モードから低排出モードにシフトする。これらの戦略には、アクティブおよび公共交通手段を改善するよりマルチモーダルな計画、コンプリートストリート道路設計、シェアモードを優先する高占有率車両(HOV)優先戦略、Mobility as a Service (MaaS)、およびマルチモーダルナビゲーションと支払いアプリが含まれる。インプルーヴ戦略は、1キロメートルあたりの排出量を削減できる。これらの戦略には、ハイブリッド車と電気自動車のインセンティブ、低炭素でクリーンな燃料、排出量の多い車の廃車プログラム、効率的な運転とアイドリング防止キャンペーンが含まれる(Lutsey and Sperling 2012; Gota et al. 2015)。

極端な高温、洪水につながる激しい降雨、強風や暴風雨、海面上昇などの気候変動の影響は、運輸インフラ、運用、道路、鉄道、船舶、航空のモビリティに深刻な影響を与える可能性がある。AR5以降の調査では、すべての運輸インフラに対する深刻な課題が増加しており、その結果、遅延や脱線が発生していることが確認されている(Miao et al. 2018; Moretti and Loprencipe 2018; Pérez-Morales et al. 2019; Palin et al. 2021)。これらの影響はますます文書化されているが、Forzieri 他(2018)によれば、地方から大陸規模の重要インフラに対する複数の極端な気候のリスクについてはほとんど知られていない。

ほとんどの国は、適応行動の基礎として、運輸関連のGHG排出削減と汚染物質削減を通じて気候変動を緩和する必要性から、緩和と適応を組み合わせた取り組みの機会を検討している(Thornbush et al. 2013; Wang et al. 2020)。例えば、都市のスプロール化は間接的に気候プロセスに影響を与え、排出量と脆弱性を増加させ、適応の可能性を悪化させる(Congedo and Munafò 2014; Macchi and Tiepolo 2014)。

利用可能な証拠によると、パリ協定の目標を達成するためには、運輸関連のCO₂排出量は、2050年に約2~3Gt(1.5°Cシナリオ - 1.5DS、B2DS)、または2015年レベルより約70~80%削減する必要がある。また、アヴォイド、シフト、インプルーヴの各手段をバランスよくインターモーダルに適用することで、2030年までに2.39GtCO_{2eq}、2050年までに5.74GtCO_{2eq}の運輸セクターの排出量を削減できることも示されている(IPCC 2018; Gota et al. 2019)。このような世界の運輸システムの変革的な脱炭素化には、技術的な変化に加えて、人々のニーズを満たすために必要な移動量を最小限に抑え、公共交通とアクティブな交通モードを優先する、アクセシビリティの高い運輸ソリューションの優先順位付けを保証するパラダイムシフトが必要となる(Lee and Handy 2018; SLoCaT 2021)。これらの変化は、技術システムを通じて加速していく様相に驚くことが多いため、破壊的と呼ばれることがある。

運輸の革新と緩和の可能性の評価は、この章が運輸関連の GHG 軌道を変更する可能性をどのように検討するかを中心に据える。この章で分析された運輸技術革新の文献は、緩和技術オプションと社会変化の混合物が現在どのように収束しているか、そしてそれらがどのように組み合わさって、低炭素交通への移行への傾向を加速する可能性があるかを強調している。このような変化は、破壊的または変革的であると見なされる (Sprei 2018)。文献で取り上げられている現在の運輸トレンドのうち、この章では、3 つの主要な技術と政策分野に焦点を当てている。陸上輸送車両の電気モビリティ、船舶と航空機の新しい燃料、全体的な需要の削減と効率である。

2. 運輸セクターにおけるシステム変化

運輸セクターの排出量と経済成長の切り離しが先進国と開発途上国ですでに起こっていることを示唆する証拠がある。ヨーロッパと中国は最も劇的な変化を示しており (Huizenga et al. 2015; Gao and Newman 2018; SLoCaT 2018b)、多くの都市が新たなネットゼロの都市経済活動を通じて運輸関連排出量のデカップリングを実証している (Loo and Banister 2016; SLoCaT 2018a)。セクション 1 で概説した SDGs を達成するためには、運輸関連の GHG 排出量の増加と経済成長との継続的かつ加速的なデカップリングが不可欠である。本セクションでは、GHG 排出量に影響する運輸セクターのドライバーについて、重なり合うシステム変化部分に焦点を当てる。例えば、都市形態、物理的地理、およびインフラストラクチャー、行動と手段選択、そして新しい需要の概念である。

市街地を構成する物理的特性は、都市の形態を定義する。これらの物理的特性には、人間の居住地の形状、サイズ、密度、構成が含まれる。都市の形態は、本質的に、人間の居住地の運営を可能にするインフラと結びついている。運輸セクターの文脈では、都市の形態と都市インフラが旅行の時間と費用に影響を与え、それが旅行需要と手段の選択を促進する (Marchetti and Ausubel 2004; Newman and Kenworthy 2015)。

歴史を通じて、3 つの主要な都市構造が発達してきた。それぞれが約 1 時間の固定移動時間予算に基づく運輸パターンに異なる影響を与えている (Newman et al. 2016)。過去数千年にわたって開発された高密度の都市構造は、ほんの数キロメートル (km) の歩行とアクティブな交通に有利に働いた。19 世紀半ば、都市居住者は、10~30 km の回廊を移動する電車や路面電車に適した中密度のファブリックを開発した。最後に、20 世紀半ば以降、都市形態は自動車による移動を支持し、50~60 km の間で大量の移動が可能になった。

AR5 以降、アーバンデザインは、都市交通システムからの GHG 排出量に影響を与える主

要な方法としてますます見られるようになった。実際、調査によると、都市形態の変更を実施することで、通常のシナリオと比較して、2050年に都市交通からのGHG排出量を25%削減できることが示唆されている(Creutzig et al. 2015b; Creutzig 2016)。研究者は、都市形態と運輸関連のGHG排出量との関係を研究するために、さまざまな変数を特定した。注目すべき3つの側面がこれらの関係を要約している: 都市空間の利用、都市の空間形態、および都市交通インフラ(Tian et al. 2020)。都市密度(人口または雇用密度)と土地利用の組み合わせは、都市空間の利用を定義する。都市密度と混合機能の増加は、移動回数を減らし、移動距離を短縮することで、1人あたりの自動車の使用を効果的に減らすことができる。同様に、都市空間の連続性とセンターの分散により、移動距離が短縮されるが(Tian et al. 2020)、そのような変化は、運輸インフラへの投資を道路容量の増加から遠ざけることなく達成されることはめったにない(Newman and Kenworthy 2015; McIntosh et al. 2017)。たとえば、公共交通機関への投資の増加、最適な移動計画、公共交通の移動時間の短縮、および公共交通の移動効率の向上により、公共交通機関はより魅力的なものになり(Heinen et al. 2017; Nugroho et al. 2018a,b)、したがって密度が高まり、地価が上がる(Sharma and Newman 2020)。同様に、歩行者や自転車用の道路を整備するために幹線道路の整備を控えることは、アクティブな交通手段の魅力を高める(Zahabi et al. 2016; Keall et al. 2018; Tian et al. 2020)。

最終的に、インフラ投資は自動車への構造的依存に影響を与え、それは次に、GHG排出による運輸オプションのロックイン、または経路依存に影響を与える(Newman et al. 2015b; Grieco and Urry 2016)。21世紀には、徒歩や公共交通機関の利用が復活した結果、一部の国で自動車の利用がピークに達するという新たな傾向が見られた(Grieco and Urry 2016; Newman et al. 2017; Gota et al. 2019)。一部の都市、たとえば上海や北京(Gao and Newman 2020)では、1人あたりの自動車利用がピークに達する傾向が続いているが、世界中で自動車への依存を減らし続けることができる都市形態戦略への投資を増やす必要がある。

章横断的内容 Box 7 都市形態: 都市交通の排出量を削減し、インフラストラクチャーのロックインを回避し、アクセス可能なサービスを提供することを同時に実現

都市交通は、世界のCO₂排出量の約8%、または年間3GtCO₂の原因となっている(第5章と第8章を参照)。エネルギー供給技術とは対照的に、都市交通はモビリティライフスタイルと直接的に相互作用する(セクション5.4を参照)。同様に、渋滞、大気汚染、騒音、安全性などのGHG排出以外の外部性は、都市の生活の質に直接影響し、かなりの厚生損失をもたらす。低炭素でアクセスしやすいアーバンデザインは、主要な緩和オプションであるだけでなく、幸福に関連するより包括的な都市サービスも提供する(第5章、セクション5.1

および 5.2)。人々のための都市計画とアーバンデザインは、技術だけに依存することなく排出削減を実現するための中心となるが、好まれる交通手段は、自動車使用に関するロックインを克服する能力に影響する (Gehl 2010; Creutzig et al. 2015b)。

ロックインが発生した場合、他の戦略によって GHG 排出量の負担が軽減される可能性がある。都市計画は、地域のハブを再構築する上で依然として重要な役割を果たしている。利用可能な土地は、鉄道ベースの交通機関の建設に使用でき、駅周辺の土地の価値から利益を得ることで財政的に実行可能になる (Ratner and Goetz 2013)。シェアまたはプールされたモビリティは、柔軟なオンデマンドモビリティソリューションを提供できる。このソリューションは、郊外でも効率的であり、長時間の通勤交通と統合することもできる (ITF 2017)。

急速に都市化が進むアジアとアフリカにおいて、都市交通の世界的な排出経路が決定されるであろう。都市交通に関連する GHG 排出量は、収入と自動車の保有によって左右されるが、収入と自動車の保有レベルが類似している都市間でもかなりの差がある (Newman and Kenworthy 2015)。電動化は都市交通を脱炭素化するための重要な戦略であるが、都市インフラはエネルギー使用と誘発される GHG 排出において最大 10 倍の違いを生むことができる (Erdogan 2020)。進行中の都市化パターンは、GHG 排出に対して将来的にロックインされた誘発需要の危険をもたらし、ライフスタイルをエネルギー集約的で高 CO₂ 関連技術に制約する (セクション 5.4; 8.2.3; 10.2.1 を参照) ; (Erickson and Tempest 2015; Seto et al. 2016)。代わりに、気候の解決策は、特に徒歩と公共交通の都市構造の強化を通じて都市の政策とインフラストラクチャーにロックインすることができる (Ürge-Vorsatz et al. 2018)。他の外部性と共に都市スプロールを避けることは脱炭素化の必要条件であり、燃料価格の上昇と交通機関の限界費用によってマクロ経済的に導くことができる (Creutzig 2014)。結果として得られる都市形態は、運輸からの GHG 排出を削減するだけでなく、熱損失 (Borck and Brueckner 2018) の削減を通じて建物からの GHG 排出も削減する。車への依存度の低下による健康上の利点は、この政策課題を推進する要素として増加している (セクション 10.8; (Speck 2018))。

低炭素でアクセスしやすいアーバンデザインは、主要な緩和オプションであるだけでなく、幸福に関連するより包括的な都市サービスも提供する (第 5 章、セクション 5.1 および 5.2)。解決策には、徒歩または自転車ですぐに 10 分以内にショッピング、仕事、レジャー活動などの複数の目的地にアクセスできる、徒歩で移動できるサブセンター周辺の都市計画が含まれる (Newman and Kenworthy 2006)。全体として、都市計画の緩和の可能性は、通常のスナリオと比較して、2050 年に約 25% である (Creutzig et al. 2015a,b)。都市が都市再生アプローチを採用し、大気に対して地球工学システムとして機能する場合、はるかに高いレベルの脱炭素化を達成できる (Thomson and Newman 2016)。

運輸の脱炭素化は需要に直接対応するため、行動は引き続き主要な関心の中心である。行動とは、好みに基づいた人々のアクションに関するものである。第5章では、セクター別排出量に影響を与える需要側の変化に対する「アヴォイド、シフト、インプルーヴ」プロセスについて説明した。このセクションでは、運輸セクターに関連する行動の要因のいくつかと、それらがこの「アヴォイド、シフト、インプルーヴ」プロセスにどのように関連しているかについて説明する。

アヴォイド - 需要に対する価格と所得の影響: 調査によると、家計の所得と価格は、運輸サービスに対する人々の好みに強い影響を与えることが示されている (Bakhat et al. 2017; Palmer et al. 2018)。所得と需要の関係は、需要の所得弾力性によって定義される。たとえば、調査によると、中国では高齢者や富裕層が引き続き車での移動を好む傾向があり (Yang et al. 2019)、若くて低所得の旅行者はさまざまな交通手段を求めていた (Song et al. 2018)。同様に、Bergantino 他 (2018b) は、英国の交通手段に対する所得の弾力性を評価した。彼らは、自家用車の所得弾力性が 0.714 であるのに対し、鉄道とバスの利用の所得弾力性は 3.253 であることを発見した。調査では、航空の所得と需要の間に正の関係があることも示されており、航空需要の所得弾力性は正で 2 にもなる (Gallet and Doucouliagos 2014; Valdes 2015; Hakim and Merkert 2016, 2019; Hanson et al. 2022)。インドの 98 都市での調査でも、旅行需要に影響を与える主な要因として所得が示された (Ahmad and de Oliveira 2016)。したがって、世界中で所得と富が増加するにつれて、旅行需要も増加する可能性がある。

需要の価格弾力性は、サービスの価格の変化の結果としての需要の変化を測定する。エネルギー需要の価格弾力性のメタ分析 (Labandeira et al. 2017) では、ガソリンとディーゼルの需要の平均長期価格弾力性は、それぞれ -0.773 と -0.443 であると報告されている。つまり、価格が上昇すると需要が減少する。米国、英国、スウェーデン、オーストラリア、ドイツの長期データの同様の分析では、自動車旅行需要に対するガソリン価格の弾力性が報告されている (1 人当たりの車両キロ-vkm-で測定)。その範囲は -0.1 から -0.4 である (Bastian et al. 2016)。鉄道旅行需要の価格弾力性は、-1.05 から -1.1 の間であることがわかっている (Zeng et al. 2021)。同様に、航空の価格弾力性は、旅行の目的 (ビジネスまたはレジャー)、季節、出発月と日などのさまざまな要因に応じて、-0.53 から -1.91 の範囲になる (Morlotti et al. 2017)。需要の価格弾力性は、自動車の利用は価格に対して非弾力的であるのに対し、鉄道の利用は利用コストに対して比較的弾力的であることを示唆している。逆に、消費者は航空のコストに対してより敏感であるように思われるため、航空コストを増加させる戦略は、航空関連の GHG 排出の回避に貢献する可能性がある。

最後に、金融危機、パンデミック、または気候変動の影響などの構造的ショックが、運輸サービスに対する需要の価格と所得の弾力性に影響を与える可能性がある (van Ruijven et al.

2019)。COVID-19 のロックダウンは旅行需要を 19% 減少させ(航空は 32% 減少)、ロックダウンから出現したパターンのいくつかは、輸送需要の弾力性を恒久的に変化させる可能性がある(Tirachini and Cats 2020; Hendrickson and Rilett 2020; Newman 2020a; SLoCaT 2021; Hanson et al. 2022)。

シフト - 都市内および都市間輸送モード選択: (需要を回避するのではなく) 需要パターンをシフトすることは、運輸セクターの脱炭素化において特に重要になる可能性がある。その結果、輸送モード間の需要の交差弾力性は、モーダルシフトの機会を理解する上で特に重要となる。交差弾力性は、モード j (例:鉄道) の属性がわずかに変化したときのモード i (例:バス) に対する需要効果を表す。都市内移動のモード選択の交差弾力性に関する研究は、車の需要に対する交差弾力性は低い、車に対する徒歩、バス、鉄道の交差弾力性は比較的大きいことを示唆している(Fearnley et al. 2017; Wardman et al. 2018)。実際には、これらの交差弾力性は、車の運転手は公共交通機関の値上げにあまり反応しないが、公共交通機関の利用者は車の運転コストの削減に反応することを示唆している。公共交通機関の選択肢(バス vs. 地下鉄 vs. 鉄道)の交差弾力性をみた調査によると、消費者は公共交通手段を選択する際に車内と待ち時間に特に敏感であることが示されている(Fearnley et al. 2018)。これらの一般的な結果は、アクティブな交通や公共交通機関の利用を増やすには、公共交通機関をより便利にする一方で、車の使用をより高価にする介入が必要であるという追加の証拠を提供している。

都市間移動のモード競争に関する文献では、移動の費用が重要な要素である一方で(Zhang et al. 2017)、所得が増えるにつれて感度が低下し、移動の費用が他の誰かによって支払われた場合にも感度が低下することが明らかになっている(Capurso et al. 2019)。いくつかの研究では、バスと航空の間の競争はほとんどないことが示唆されているが、航空と鉄道間の交差弾力性は強い相互作用を示唆している(Wardman et al. 2018)。鉄道運賃の割引などの価格引き下げ戦略は、航空から高速鉄道への切り替えを促進する可能性がある。航空運賃と運航頻度の両方が、高速鉄道(HSR)の使用に影響を与える(Zhang et al. 2019b)。航空会社は、HSR と直接競合する路線の運賃を引き下げ(Bergantino et al. 2018a)、非 HSR 路線の運賃を高く設定する(Xia and Zhang 2016)。ローマーミラノ間のルートでは、HSR 各社間の競争により、便数と接続が向上し、HSR のコストが低下したため、航空とバスと車のシェアが大幅に減少した(Desmaris and Crococolo 2018)。

インプルーヴ - 改善された代替車両に対する消費者の好み: 移動需要の減少と交通手段の選択の変化は、運輸セクターからの GHG 排出量の削減に貢献するであろうが、自動車は引き続き重要な役割を果たし続ける可能性がある。その結果、自動車の性能を向上させることは、運輸セクターの脱炭素化にとって非常に重要になる。セクション 10.3 および 10.4 では、車両からの CO₂ 排出量を削減するために利用できる技術オプションについて説明する。

このような技術展開による効果は、消費者の好みとその受容率への影響に部分的に依存する。電気自動車の利用可能性が拡大していることを考えると、自動車を選択するドライバーに関する研究も増えている。南京での調査によると、女性は男性よりも多様な旅行目的を持っており、その結果、電動自転車により受け入れられていることがわかっている (Lin et al. 2017)。個人は、電気自動車(EV)を採用することが環境に利益をもたらすか、個人の属性にプラスの影響を与えると考える場合、電気自動車(EV)を採用する可能性が高くなる (Noppers et al. 2014, 2015; Haustein and Jensen 2018)。他の研究では、EV に対する人々の好みは、車両の属性、インフラストラクチャーの利用可能性、および EV の採用を促進するポリシー、具体的には、購入コストと運用コスト、走行距離、充電時間、車両性能、およびブランドの多様性に依存することが示唆されている (Liao et al. 2016)。運輸の変革を可能にするための行動の変化は、時間、スペース、およびコストのより構造的な問題にも取り組みながら、これらの要因を最大限に活用する必要がある。

運輸関連の GHG 排出を促進する構造的および行動上の選択（貨物の地理的位置や都市構造に基づく時間とコストなど）は、引き続き主要な要因となる可能性がある。しかし、交通手段の選択肢を間接的に変える価値観に関連する個人的な需要要因に基づいて、それぞれの構造上の選択肢にもばらつきがある。第5章では、サーキュラーエコノミー、共有経済、デジタル化など、サービスの需要に影響を与える3つのメガトレンドを特定した。これらの3つのメガトレンドは、以下に説明するように、運輸セクターの排出量に特定の影響を与える可能性がある。

循環型経済: 資源とその環境への影響の問題が、循環型経済への移行を後押ししている (Bleischwitz et al. 2017)。循環型経済の原則には、材料効率の向上、再利用または製品寿命の延長、リサイクル、グリーンロジスティクスが含まれる。脱物質化、つまり1ユニットの製品の生産に使用される材料の量の削減は循環型経済の原則であり、使用される材料の量の削減により輸送の必要性が減少するため、運輸セクターの運用と排出に影響を与える可能性がある。製品の軽量化により、輸送効率が向上する。非物質化は、より効率的な生産プロセスを通じて発生する可能性があるが、複数の製品と同じ機能を提供するために新製品が開発される場合にも発生する。この傾向の最も良い例は、少なくとも22の以前には他のデバイスによって提供されていたサービスを提供するスマートフォンである (Rivkin 2019)。整理整頓されたライフスタイルへの移行も非物質化を促進する可能性がある (Whitmarsh et al. 2017)。3D プリンティングによる非物質化の可能性が示唆されており、製品コンポーネントの現地生産を通じて運輸セクターの排出量も削減される (d'Aveni 2015; UNCTAD 2018)。しかし、より効率的な製品設計または製造による材料使用の削減は、消費者需要の増加によって相殺されることを示唆する証拠がある (Kasulaitis et al. 2019)。非物質化が運輸セクターからの排出量の削減につ

ながるかどうかは、製品エコシステム全体を評価する必要がある未解決の問題である (Van Loon et al. 2014; Coroama et al. 2015; Kasulaitis et al. 2019)。

シェア経済: シェアードモビリティは、間違いなくシェアリングエコノミーの中で最も急速に成長し進化している分野であり、自転車の共有、e スクーターの共有、カーシェアリング、オンデマンドモビリティが含まれる (Greenblatt and Shaheen 2015)。より共有された経済を創造することの価値は、需要の減少と効率の向上の両方に関連している。また、単に自分のために所有するのではなく、共有する行為に関連するコミュニティの幸福の概念にも関連している (Maginn et al. 2018; Sharp 2018)。シェアードモビリティに関する文献は増えていますが、シェアードモビリティが運輸需要とそれに伴う排出量に与える影響については、多くの不確実性がある (Nijland and Jordy 2017; ITF 2018a; Tikoudis et al. 2021)。

アジアは最大のカーシェアリング地域であり、世界のメンバーシップの 58%と世界の共有車両の 43%が配備されている (Dhar et al. 2020)。ヨーロッパは、世界のメンバーの 29%と共有車両の 37%を占めている (Shaheen et al. 2018)。ライドソーシングと相乗りシステムは、短期的なシェアードモビリティオプションとして、多くの新規参入者がみられるものの 1 つである。技術で補完されたオンデマンド交通オプションは、アップスケリングの可能性を高めている (Alonso-González et al. 2018)。カーシェアリングはタクシーと同じレベルのサービスを提供できるが、タクシーは 3 倍の費用がかかる可能性がある (Cuevas et al. 2016)。シェアリングエコノミーは、新興の経済技術現象として (Kaplan and Haenlein 2010)、オンラインショッピングによるコンテナ移動の増加をデータが示しているもの (Kaplan and Haenlein 2010)、物流需要の主要な原動力となる可能性がある (Suel and Polak 2018)。

単一の家族よりも大きなグループによってサポートされるシェア経済の実践によるこのより構造化された形態の行動変化は、特に脱炭素化されたグリッド電力で補完された場合、運輸セクターの排出量を大幅に節約する可能性があるという証拠が増えている (Greenblatt and Shaheen 2015; Sharp 2018)。たとえば、カープールは空車または非生産的な乗客キロ (pkm) を必要としないため、vkm が 11%削減され、排出量が 12%削減される可能性がある (ITF 2020a,b)。ただし、オンデマンド交通などのローカル共有モビリティシステムの利用は、公共交通からの全体的なモーダルシフトがある場合、より多くの運輸セクターの排出量を生み出す可能性がある (ITF 2018a; Schaller 2018)。同様に、一部の研究では、Uber や Lyft などの商用共有車両サービスでは、回送によって車両の移動距離(および関連する GHG 排出量)が増加していることを示唆している (Schaller 2018; Tirachini and Gomez-Lobo 2020; Ward et al. 2021)。成功しているプロバイダーは、シェア文化を可能にするのではなく、個人の快適さと利便性を最適化することによって競争しており (Eckhardt and Bardhi 2015)、これらのシステムのより広い社会的影響や高齢者などの特定のユーザーグループに対する影響に関する懸念が提起されて

いる (Fitt 2018; Marsden 2018)。デマンドレスポンス交通システムの経済的実行可能性 (Ryley et al. 2014; Marsden 2018)、シェアードモビリティシステムの主流化を公平に制度化する方法、およびモードのみ、およびオペレーター中心の既存システムの運用とガバナンスについても懸念が表明されている (Akyelken et al. 2018; Jittrapirom et al. 2018; Pangbourne et al. 2020; Marsden 2018)。

デジタル化: 運輸セクターでは、デジタル化によって在宅勤務が可能になり、旅行需要が減少している。一方、デジタル経済によって可能になったオンラインショッピングの普及は、運輸セクターの排出量にさまざまな影響を与える可能性がある (Le et al. 2021)。たとえば、オンラインショッピングは vkm を減らすことができるが、速達または急ぎの配送への移行は、貨物の統合を妨げるため、いくつかの利点を減じる可能性がある (Jaller and Pahwa 2020)。

デジタル化は、スマートモビリティを可能にすることで、体系的な変化にもつながる可能性がある。スマートモビリティパラダイムとは、ICT やその他の洗練されたハイテクイノベーションを交通機関に同化するプロセスと実践を指す (Noy and Givoni 2018)。スマートモビリティは、運輸需要と効率性に影響を与えるために使用できる (Benevolo et al. 2016)。

Box 10.1 スマートシティ技術と運輸

ICT (省略)、IoT (省略)

Mobility as a Service (MaaS): 新しいアプリベースのモビリティプラットフォームにより、さまざまな交通手段 (ラストマイル交通、共有交通機関、さらにはスクーターや自転車などのマイクロ交通手段など) を簡単に統合できるようになり、簡易なプラットフォームに集約される。これらのモードを統合することで、ユーザーは必要な予約と支払いを1つのサービスで行うことができ、最も効率的なモードに基づいて A から B、C へとナビゲートできるようになる。スマートシティプランニングにより、これらのプラットフォームは、より多くの人々に1人乗りの予約の便利さを選択するよう促すのではなく、共有された高速公共交通(これらのシステムを中心とするはずである) に導くことができる (Becker et al. 2020)。しかし、低密度の自動車依存都市では、電動スクーター/バイクの使用などの MaaS サービスは、距離が長すぎるため効果が低く、密集した駅構内なら発生し得る簡単なシェアリングが生じない (Jittrapirom et al. 2017)。

AI とビッグデータ分析 (省略)、ブロックチェーンあるいは分散台帳技術 (省略)

新興技術 (ICT、IOT、ビッグデータ) とシェア経済の相乗効果により、新興技術の採用が直面しているいくつかの課題を克服できる (Marletto 2014; Chen et al. 2016; Weiss et al. 2018; Taiebat and Xu 2019)。新興都市で予想される大幅な成長をより持続可能にすることができる

(Docherty et al. 2018)。しかし、ICT、特に IoT は、より多くの世界的なエネルギー需要を引き起こす可能性もある (Hittinger and Jaramillo 2019)。Box 10.1 は、世界中の都市で急速に採用されている主要なスマート技術とそれらの運輸における使用をまとめている。

自動運転車は、乗り心地と安全性を大幅に向上させる可能性を秘めたもう 1 つの新しい運輸技術である。航空機や高速鉄道は、すべての動き、特に駅や空港に入るときに誘導されるため、すでに大部分が自律的であるが、必ずしもドライバーレスというわけではない。自動化は、トラックレストラムのような新しいオンロード公共交通システムでも使用されている (Ndlovu and Newman 2020)。自家用車にはますます多くのレベルの自律要素が備え付けられ、多くの都市で「無人運転」が試行されている (Aria et al. 2016; Skeete 2018)。自律システムを使用して、道路公共交通が時間とコストの点で車との競争力を高めることができれば、運輸の脱炭素化を支援するために必要な変革的で破壊的な変化がより実現可能となる (Bösch et al. 2018; Kassens-Noor et al. 2020; Abe 2021)。同様に、車両の自動化によって車両の効率が向上し、渋滞が緩和され、排出量が削減される可能性がある (Vahidi and Sciarretta 2018; Massar et al. 2021)。一方、自動運転車が運転をより便利にすると、公共交通の需要が減る可能性がある (Auld et al. 2017; Sonnleitner et al. 2021)。逆説的に言えば、自動運転車は、高齢者、障害者、運転できない人などのグループにアクセスを提供する可能性があり、その結果、運輸需要が増加する可能性がある (pkm で測定) (Harper et al. 2016)。

鉱業の大型運搬用トラックはすでに自動化されており (Gaber et al. 2021)、長距離トラックの自動化は、小型車 (LDV) の自動化よりも早く実現する可能性がある (Hancock et al. 2019)。自律型トラックは、ルート、速度の最適化、および燃料の使用量の削減を促進する可能性があり、その結果、排出量を削減できる (Nasri et al. 2018; Paddeu and Denby 2021)。荷物の配送にドローンを使用することへの関心が高まっている。ドローンは、地上での配送よりも影響が少ない可能性があり、慎重に配備されれば、貨物輸送によるエネルギー使用と GHG 排出を削減できる (Stolaroff et al. 2018)。全体として、一部のコメントーターは、スマートで自律的な技術が運輸セクターからの GHG を変革できると楽観的である (Seba 2014; Rivkin 2019; Sedlmeir et al. 2020)。

3. 脱炭素化のための運輸技術革新

このセクションでは、運輸セクターの脱炭素化をサポートするための車両技術と低炭素燃料の革新に焦点を当てる。図 10.2 は、このセクションで検討した主な経路をまとめたものである。図 10.2 で説明したエネルギーキャリアの進歩については、第 6 章 エネルギーと第 11

章 産業で詳しく説明するが、この章で紹介するレビューでは、運輸セクターでの応用に焦点を当てる。このセクションでは、AR5以降の代替燃料、電気、および燃料電池技術の進歩に注目する。

新しい内燃機関(ICE)車両の平均燃料消費量は、より厳しい排出規制により、近年大幅に改善されている。しかし、改善は現在鈍化している。小型車(LDV)の平均燃料消費量は、2016年から2017年の間にわずか0.7%しか減少せず、2017年には100kmあたり7.2リットルのガソリン換算値(Lg-eq)に達した。2005年から2016年(GFEI 2020)の間の年間1.8%の改善と比較してはるかに遅くなっている。これらの改善は、運輸セクターにおける大幅な脱炭素化レベルを満たすには十分ではない。電気自動車や燃料電池車への関心が大きく高まっている一方で、将来のシナリオでは、(一部の国が発表したように)ICE車両の販売禁止によって規制されていない限り(IEA 2021a)、今後30年間、多数の小型車が従来型、ハイブリッド、およびプラグインハイブリッドの構成のICEによって運用され続ける可能性があることを示している(IEA 2019a)。さらに、ICE技術は、船舶と航空の一般的なオプションであり続ける可能性がある。したがって、低炭素またはゼロ炭素燃料の使用によるICEからのCO₂およびその他の排出量の削減は、大気汚染物質レベルを制限するためのバランスのとれた戦略に不可欠である。このようなICE車両用の代替燃料には、天然ガスベースの燃料、バイオ燃料、アンモニア、およびその他の合成燃料が含まれる。

天然ガス: 天然ガスは、ガソリンやディーゼルに代わる代替燃料として使用できる。自動車の天然ガスは、圧縮天然ガス(CNG)および液化天然ガス(LNG)として使用できる。CNGは、比較的高圧(10~25MPa)、および一定の温度(-40~30°C)で気体である。対照的に、LNGは比較的低い圧力(0.1MPa)と温度(-160°C)で液体の形で使用される。そのため、CNGは商用車および小型から中型の車両に特に適しているが、大型車(HDV)のディーゼルを置き換えるにはLNGが適している(Dubov et al. 2020; Dziejatkowski et al. 2020; Yaïci and Ribberink 2021)。一部の地域、特にアジア太平洋諸国では、CNG車が広く配備されている。たとえば、中国には約600万台のCNG車があり、どの国よりも多い(Qin et al. 2020)。ただし、CNGを使用して動作する車両の20%のみが、もともとCNG車として設計されており、残りはCNGで動作するように改造されたガソリン燃料車である(Chala et al. 2018)。

天然ガスベースの車両には、基準大気汚染物質の排出量が少ない、すすや粒子がない、水素に対する炭素の比率が低い、適度な騒音、幅広い可燃性限界、および高オクタン価など、従来の燃料を動力源とするICE車両に比べて一定の利点がある(Kim 2019; Bayat and Ghazikhani 2020)。さらに、天然ガス車の技術的準備は非常に高く(TRL 8-9)、既存のガソリン車とディーゼル車を直接改造することが可能である(Transport and Environment 2018; Peters et al. 2021; Sahoo and Srivastava 2021)。一方、天然ガスのサプライチェーンからのメタン排出

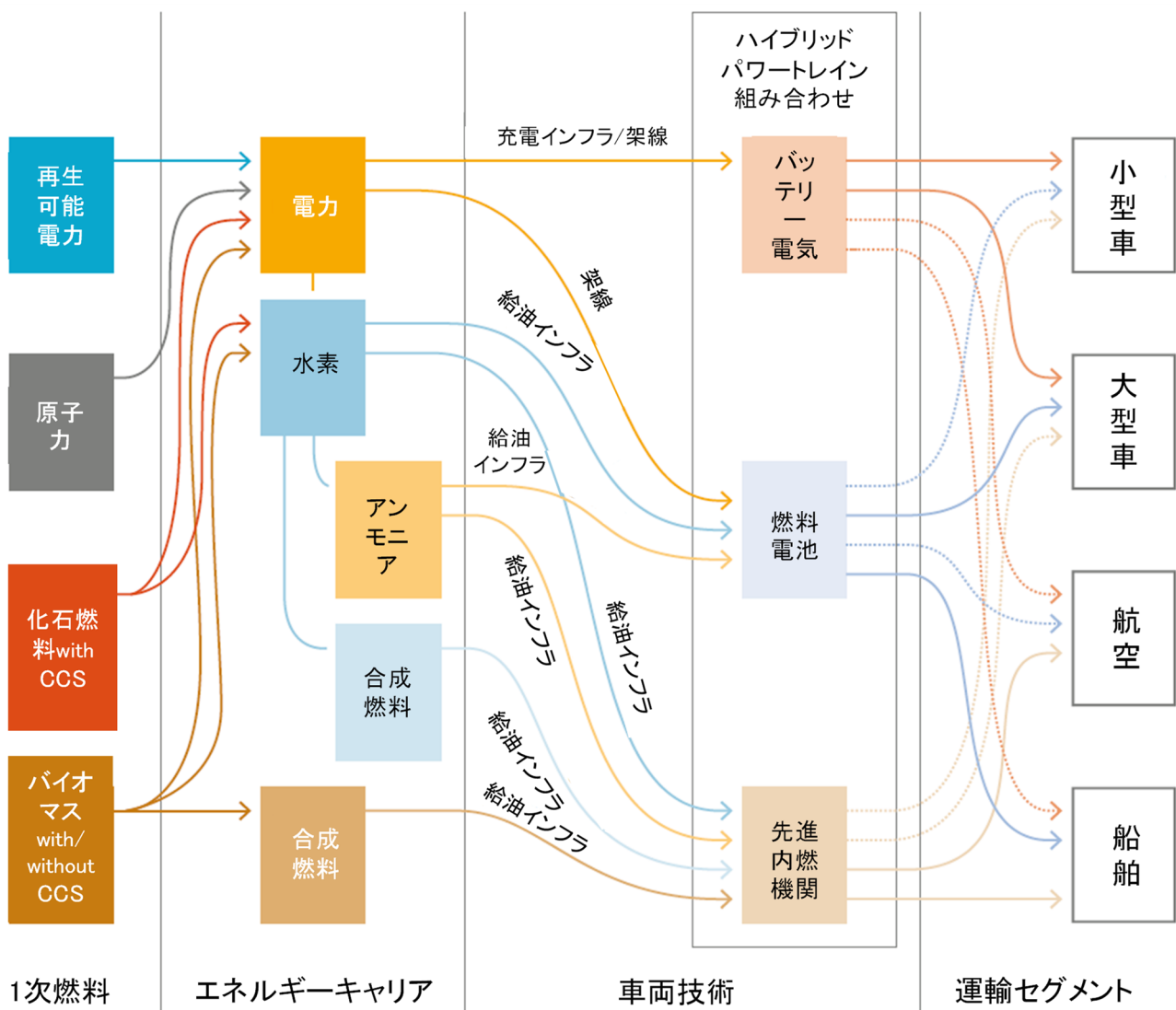


図 10.2 低炭素輸送技術のためのエネルギー経路

一次エネルギー源は左端に表示され、運輸システムのセグメントは右端に表示されている。

エネルギーキャリアと車両技術は真ん中に表示されている。一次経路は実線で示され、破線は二次経路を表す。

と排気管の CO₂ 排出は、依然として重大な懸念事項である (Trivedi et al. 2020)。その結果、トランジションにおける運輸燃料としての天然ガスは、利用可能なより良い代替オプションと、運輸セクターに急速な脱炭素化を求める規制圧力により、制限される可能性がある。たとえば、国際海事局 (IMO) は、2030 年までに船舶の炭素強度を 40%削減するという目標を設定したが、これは単に天然ガスに切り替えるだけでは達成できない。

バイオ燃料: AR5 以降、主に LDV 向けのエレクトロモビリティの採用が予想よりも早く進んだことで、バイオ燃料の主な用途に関する議論が陸上輸送から船舶および航空に部分的に

移行した (Davis et al. 2018; IEA 2017a)。同時に、他の研究では、特に開発途上国では、バイオ燃料が道路交通における電気自動車を補完しなければならない可能性があることが強調されており、短期および中期 (2050 年まで) において関連する緩和の機会がある (IEA 2021b)。バイオ燃料の重要な利点は、現在のパワートレインや燃料インフラなど、既存の技術と互換性のあるエネルギーキャリアに変換できることである。また、バイオ燃料は、輸送燃料の供給を多様化し、多くの国でエネルギー自給率を高め、農業産業セクターを多様化および強化するための戦略として使用することができる (Puricelli et al. 2021)。緩和戦略としてのバイオ燃料の使用は、さまざまなバイオ燃料変換技術のコストと技術準備レベルだけでなく、バイオマス原料と代替緩和オプションの両方の入手可能性とコスト、および相対的なエネルギーおよび運輸セクターにおけるエネルギー移行の速度と規模によっている。

多くの研究は、陸上輸送、航空、および海運のバイオ燃料変換経路のライフサイクル排出量算出に取り組んできた。(Edwards et al. 2017; Staples et al. 2018; Tanzer et al. 2019)。バイオエネルギー技術は、一般にコストが高いため、既存の化石燃料ベースの技術と競争するのに苦労してきた。ただし、コストギャップの程度は、バイオマス原料の入手可能性とコストに大きく依存する (IEA 2021b)。とうもろこしやサトウキビからのエタノールは、ブラジルや米国などの国で市販されている。油糧作物からのバイオディーゼル、水素化処理されたエステルおよび脂肪酸は、さまざまな国、特にヨーロッパや東南アジアの一部で入手できる。インフラ面では、米国とヨーロッパの一部の地域、特にドイツで政策的支援を受けてバイオメタン混合が実施されている (IEA 2021b)。これらのバイオ燃料変換技術の多くは、海藻原料オプションを使用して実装することもできるが、これらのバリューチェーンはまだ成熟していない (Jiang et al. 2016)。

航空部門内では、バイオマス資源から製造されたジェット燃料(いわゆる持続可能な航空燃料、SAF)は、適切な政策環境の下で重要な気候緩和の機会を提供する可能性がある。航空バイオ燃料への関心が高まっているにもかかわらず、需要と生産量は、従来の化石航空燃料と比較してごくわずかである。バイオ燃料を動力源とするほぼすべてのフライトで、植物油由来の燃料が使用されており、現在、テスト用の従来の航空燃料へのバイオ燃料の混合レベルは最大 50% である (Mawhood et al. 2016)。今日まで、廃油原料に基づいて SAF を定期的に生産している施設は、米国内で 1 つだけである。バイオベースの SAF 量を拡大する可能性は、低コストで持続可能な原料オプションがないため、厳しく制限されている(第 7 章を参照)。リグノセルロース原料は、多くの地域で経済的に競争力のあるバイオベースの SAF を生産する大きな可能性を秘めていると考えられている。ただし、生産施設には多額の設備投資が必要であり、推定平準化コストは通常、従来のジェット燃料の販売価格の 2 倍以上である。場合によっては(特に植物油の場合)、原料価格がすでに化石ジェット燃料の価格よりも

高くなっている (Mawhood et al. 2016)。リグノセルロース原料から SAF を生産するための有望な技術的ルートのいくつかは、技術準備レベル(TRL) 6 (パイロットスケール)を下回っており、これらの技術開発に関与しているプレーヤーはわずかである。航空部門でのバイオ燃料の相当な使用に関する世紀半ばの予測を行うことは物理的に可能であるが(IEA およびその他の部門別組織による(ICAO 2017))、この燃料展開規模は、バイオベースの SAF 生産インフラストラクチャーへの非常に大規模な資本投資、および実質的な政策支援によってのみ達成できる。

アンモニア: 室温および大気圧では、アンモニアは独特の臭気のある無色の気体である。液化条件が比較的穏やかなため、アンモニアは液化ガスまたは圧縮ガスとして移送および貯蔵され、多くの製品に不可欠な工業用化学資源として使用されてきた。また、アンモニアは化学構造に炭素分子がないため、燃焼効率も向上できるカーボンニュートラルな燃料として注目されている (Gill et al. 2012)。さらに、アンモニアは水素キャリアとしても機能し、燃料電池で使用される。これらの特性により、アンモニアの低炭素生産への関心が高まっており、低炭素水素生産(必要なエネルギーを提供する低炭素電力または CCS) と組み合わせる必要性も存在する。

従来の内燃機関の場合、燃焼速度が比較的遅く、発火温度が高いため、アンモニアの使用は依然として困難である。したがって、Frigo and Gentili (2014) は、液体アンモニアと水素で作動する二重燃料の火花点火エンジンを提案した。水素は、排気ガスの熱エネルギーを使用してアンモニアから生成される。一方、アンモニアのオクタン価が高いということは、火花点火エンジンのノッキング耐性が良好であることを意味し、熱効率の向上に有望である。圧縮着火エンジンの場合、アンモニアの着火温度が高いため、高い圧縮比が必要となり、機械的摩擦が増加する。Gray et al. (1966) 以来、Dimitriou and Javaid (2020) によって要約されているように、自己着火温度の低いディーゼルや水素などの二次燃料と混合することで、圧縮比を下げるができることが多くの研究で示されている。セタン価の高い二次燃料を使用し、適切な燃料噴射タイミングを採用することで、最大 95%のアンモニア比率で、デュアル燃料モードでの圧縮着火エンジンの高効率燃焼が可能となっている (Dimitriou and Javaid 2020)。セクション 6.4.5 で説明したように、アンモニア燃料エンジンを実現するための 1 つの主要な課題は、未燃アンモニアの削減である (Reiter and Kong 2011)。検討中のプロセスには、排気ガス再循環(EGR) (Pochet et al. 2017)、および後処理システムの使用が含まれている。ただし、これらのプロセスにはスペースが必要となる。これは、小型車と航空輸送の制約であるが、船舶の場合にはより実用的となる。造船所は、2025 年にサービスを開始するために、既存のディーゼル二重燃料エンジンをベースにしたアンモニアエンジンを開発している (Brown 2019; MAN-ES 2019)。したがって、アンモニアは海運部門での脱炭素化に大きく貢献

する可能性があり（セクション 10.6 で拡張）、また、他の場所での潜在的にニッチな適用可能性がある。

合成燃料: 合成燃料は、低炭素電力で生成された電解水素、あるいは CCS を伴い生成された水素、および回収 CO₂ をフィッシャー・トロプシュプロセスを使用して合成され、運輸の脱炭素化に貢献できる (Liu et al. 2020a)。合成燃料の特性は化石燃料の特性と似ているため、合成燃料はエンジン設計を大幅に変更することなく、既存の車両と新しい車両の両方で GHG 排出量を削減できる。フィッシャー・トロプシュ法は十分に確立された技術であるが (Liu et al. 2020a)、低炭素合成燃料の生産はまだ実証段階にある。再生可能エネルギーの電力価格の低下、生産規模の拡大、および学習効果により、それらの生産コストは将来低下すると予想されるが、合成燃料は依然として従来の化石燃料の最大 3 倍の費用がかかる（セクション 6.6.2.4）。さらに、合成燃料の製造には熱力学的な変換損失が伴うため、電気自動車よりも総合的なエネルギー効率が低くなることが懸念される (Soler 2019)。これらの高コストと限られた規模を考えると、合成燃料の採用は、電動化による脱炭素化がより困難な航空、船舶、および長距離道路交通セグメントに集中する可能性がある。特に、合成燃料は航空燃料として有望であると考えられている（セクション 10.5 で展開）。

運輸セクターの広範な電動化は、運輸セクターの排出量を削減するために重要である可能性が高く、適切なエネルギー貯蔵システム (EES) に依存している。ただし、EES の大規模な普及は、エネルギー密度（単位体積あたりに保存されるエネルギー）、比エネルギー（単位重量あたりに保存されるエネルギー）、およびコストの改善に依存する (Cano et al. 2018)。最近の傾向は、EES 対応車両が小型車 (LDV) の主要な技術となる道を歩んでいることを示唆しているが、大型貨物車への貢献はより不確実である。

小型および中型車両の電気化学貯蔵: 電気化学貯蔵、つまりバッテリーは、運輸セクターのエネルギー貯蔵の最も有望な形態の 1 つであり、AR5 以降、商業性が劇的に向上している。充電式バッテリーは、車両の電動化をサポートできる成熟した、あるいは新しい化学物質の範囲で、運輸セクター内のアプリケーションにとって主な関心事となっている。AR5 および SPR1.5 以降の最も重要な変化は、リチウムイオン電池 (LIB) の劇的な増加であり、これにより、エレクトロモビリティが脱炭素化の主要な特徴となっている。

LIB の市場シェアが最近拡大する前は、鉛蓄電池、ニッケル電池、高温ナトリウム電池、およびレドックスフロー電池が運輸セクターで特に注目されていた (Placke et al. 2017)。鉛蓄電池は低コストであるため、小型の車両に使用されている。例えば、e スクーターと e 人力車 (Dhar et al. 2017) である。ただし、電気自動車への適用には比エネルギーが低いことため制約されている (Andwari et al. 2017)。ニッケル水素電池 (NiMH) は、鉛蓄電池よりもエネルギー密度が高く、回生ブレーキ用に最適化されている (Cano et al. 2018)。その結果、NiMH 電池はハイ

ブリッド電気自動車(HEV)に最適なバッテリーとなっている。ニッケルカドミウム電池(NiCd)はエネルギー密度がNiMH電池より低く、コストは鉛蓄電池の約10倍である。このため、NiCd電池は自動車用途では大きな見込みがない。また、自動車用途で高温ナトリウム、またはレドックスフロー電池が使用された例もない。

自動車用途でのLIBの商業利用は、LIBの価格がkWhあたり1,000ドル超であった2000年頃に始まった(Schmidt et al. 2017)。2020年までに、自動車用途のバッテリー製造能力は年間約300GWhになった(IEA 2021a)。さらに、2020年までに、バッテリーパックの平均コストはkWhあたり137ドルにまで下がり、2010年から実質で89%削減された(Henze 2020)。さらなる設計最適化によって、LIBの比エネルギー、エネルギー密度(Nykvist et al. 2015; Placke et al. 2017)、および耐用年数(Liu et al. 2017)の改善が期待されている。これらの進歩により、EVの航続距離がさらに伸び、運輸用途へのLIBの採用がさらに促進されると予想されている(Cano et al. 2018)。ただし、低温および高温下でのLIBの性能は、信頼性に関する懸念事項となっている(Liu et al. 2017)。自動車メーカーは、バッテリーが非常に寒い条件でうまく機能するように、バッテリーの予熱システムを備えている(Wu et al. 2020)。

2018年に販売されたEVの材料需要は、最適化されたリチウムが約11キロトン(kt)、コバルトが15キロトン、マンガンが11キロトン、ニッケルが34キロトンであった(IEA 2019a, 2021a)。EV 30@30シナリオにおけるIEAの2030年予測は、これらの材料需要がリチウムで30倍、コバルトで約25倍になることを示している。コバルトなどの高価な材料から離れようとする努力がなされている一方で(IEA 2019a, 2021a)、リチウムへの依存は残り、懸念材料となる可能性がある(Olivetti et al. 2017; You and Manthiram 2018)。

現在のリチウムの量は他の金属(鉄鋼、アルミニウム)よりもはるかに少ないが、資源採取による外部性も別の懸念事項である。その結果、リチウムはUNEPのグローバルリソースアウトLOOK(IRP 2019)でも言及されなかった。それにもかかわらず、リチウムの需要は今後何倍にも増加するため、需要を管理し、外部性を制限することが不可欠である。EVで使用されたLIBを定置型エネルギーアプリケーションに再利用することでLIBの需要を減らすことができる。ただし、主な課題は、リサイクルされるバッテリーの状態に関する情報にアクセスすることの難しさ、寿命を過ぎたバッテリーから再製造する際の技術的な問題にある(Ahmadi et al. 2017)。使用済みバッテリーからのリチウムのリサイクルは、別の可能な供給源になる可能性がある(Winslow et al. 2018)。商業化にはさらなる研究開発が必要であるが(Ling et al. 2018)、最近のLIBのリサイクルへの取り組みは非常に有望である(Ma et al. 2021)。LIBのリサイクル率を高めるには、車両プラットフォーム内、および車両プラットフォーム間でのバッテリーモジュールとパッケージングの標準化、リサイクル可能な設計への注目の高まり、支援的な規制が重要となる(Harper et al. 2019)。

バッテリーの技術的準備は、EV の進歩における重要なパラメーターである (Manzetti and Mariasiu 2015)。エネルギー密度、電力密度、サイクル寿命、カレンダー寿命、および kWh あたりのコストは、さまざまなバッテリー技術の技術的準備状況を比較するための適切なパラメーターとなる (Manzetti and Mariasiu 2015; Andwari et al. 2017; Lajunen et al. 2018)。第 6 章の表 6.5 は、代替バッテリー技術のこれらのパラメーターの値をまとめたものである。LIB は他のバッテリータイプを包括的に支配しており、陸上輸送用途 (自動車、スクーター、電動アシストサイクル) に適用できる準備ができており、バッテリーパックのコストは kWh あたり 150 ドル未満であるため、EV は従来の車両とのコスト競争力がある (Nykqvist et al. 2019)。2020 年には、バッテリー式の LDV のストックが 1,000 万台を超えた (IEA 2021a)。Schmidt et al. (2017) は、LIB 用のバッテリーパックのコストが 2030 年までに 1kWh あたり 100 ドルに達すると予測しているが、最近の傾向は、これがもっと早く起こる可能性があることを示している。たとえば、IEA によると、バッテリーパックのコストは 2030 年までに 1kWh あたり 80 ドルまで下がる可能性がある (IEA 2019a)。さらに、現在、自動車メーカーは、より大きなバッテリー、より長い走行距離、より高い最高速度、より速い加速、およびすべてのサイズカテゴリーを備えた車両を提供していくという明確な傾向がある (Nykqvist et al. 2019)。2020 年には、世界中で 600,000 台以上のバッテリー電気バスと 31,000 台以上のバッテリー電気トラックが運行している (IEA 2021a)。

LIB は現在、長距離輸送に適しているとは考えられていない。ただし、いくつかのバッテリー技術が開発中であり、EV の競争力をさらに高め、その適用範囲を非常に短距離の航空および船舶、特に小型車両に拡大する可能性がある。Li-S、Li-air、および Zn-air は、これらのセグメントで最も高い可能性を秘めている (Cano et al. 2018)。これら 3 つの技術はいずれも、比較的安価な要素を利用することに依存しており、バッテリーのコストを下げるのに役立つ (Cano et al. 2018)。これらの技術が直面する主な課題は、サイクル寿命に関するものである。3 つのうち、Li-S は比エネルギーが比較的高い (最先端の LIB のほぼ 2 倍) ため、無人航空機のアプリケーションに既に使用されている (Fotouhi et al. 2017)。ただし、サイクル寿命が短い場合でも、Li-air と Zn-air は、長距離道路交通用のレンジエクステンダーバッテリーとして、また、通常都市部での運転に使用される車両において商用化される見込みがある (Cano et al. 2018)。

大型車、船舶、航空など、電動化が難しい運輸セグメントでは、低炭素エネルギー源を使用して製造された場合、水素は排出削減を実現する大きな可能性を秘めている。特に、水素燃料電池は、陸上輸送用の大型車両に電力を供給する新たなオプションと見なされている (Tokimatsu et al. 2016; IPCC 2018; IEA 2019b)。この可能性にもかかわらず、水素燃料電池がより大きな役割を果たすためには、技術的および経済的成熟度のさらなる進歩が必要になる。

このセクションでは主に水素燃料電池に焦点を当てているが、アンモニアおよびメタノール燃料電池も低電力アプリケーションのオプションとして登場する可能性がある。

過去 10 年間、水素燃料電池車(HFCV)は注目を集めており、燃料電池技術は研究開発によって改善されている。燃料電池システムのコストは、2000 年代初頭に比べて 80~95%安くなり、軽負荷(80kW)で 1kW あたり約 50 ドル、中重負荷(160kW)で 1kW あたり約 100 ドルとなっている。これらのコストは、米国エネルギー省(US DOE)の目標である、2025 年に年間 500,000 システムの生産目標で 1kW あたり 40 ドルに近づいている(IEA 2019c)。コスト削減に加えて、燃料電池スタックの出力密度は現在約 3.0kW/L に達しており、平均耐久性は約 2,000~3,000 時間に改善されている(Jouin et al. 2016; Kurtz et al. 2019)。これらの改善にもかかわらず、燃料電池システムはまだ多くの商業用アプリケーション向けに成熟していない。たとえば、米国 DOE は、水素燃料電池連結トラック(セミトレーラー)がディーゼル車と競合するためには、燃料電池の耐久性が 30,000 時間に達する必要があると概説している(US DOE 2019)。一部の燃料電池バスはこれらの目標に近い耐久性を示しているが(Eudy and Post 2018a)、小型燃料電池車の別のレビューでは、最大耐久性が 4,000 時間であることが示されている(Kurtz et al. 2019)。より多くの燃料電池車が試されるにつれて、進行中の燃料電池の耐久性の改善を追跡するために、より多くの実世界のデータが利用可能になると予想されている。

いくつかの FCV 関連技術は、デモンストレーションと早期の市場展開の準備が完全に整っているが、おそらく 2030 年以降、本格的な商業化を達成するには、さらなる研究開発が必要になる(Staffell et al. 2019; Energy Transitions Commission 2020; IEA 2021b)。一部のレポートでは、2020 年代後半に燃料電池大型トラックの連続生産を達成でき、2030 年以降にはディーゼル車に匹敵するコストが達成できる可能性があると主張している(Jordbakker et al. 2018)。今後 10 年ほどで、水素 FCV はさまざまな輸送用途でコスト競争力を持つようになる可能性があり、これは長距離トラック、海運、航空を含む(FCHEA 2019; FCHJU 2019; BloombergNEF 2020; Hydrogen Council 2017, 2020)。燃料電池システムのコスト削減のスピードは、普及を達成するための重要な要素である。しかし、専門家の間では、燃料電池の需要規模、コスト、および性能向上の関係について意見が分かれている(Cano et al. 2018)。小型、中型、および大型の燃料電池パワートレインのコストは桁違いに減少しており、継続的な技術進歩によりさらに 2 分の 1 に削減されることが予想されている(Whiston et al. 2019)。たとえば、燃料電池スタック用のプラチナのコストは 1 桁下がった(Staffell et al. 2019)。現世代の FCV は約 0.25g/kW のプラチナを使用しており、2030 年までにさらに 50~80%の削減が見込まれている(Hao et al. 2019)。

水素は、将来のエネルギーシステムでさまざまな役割を担う可能性がある。運輸だけでな

く、産業や建物の燃料として、変動する再生可能電力のエネルギー貯蔵として使用される。運輸の水素燃料供給システムがより大きな水素エネルギーシステムにどのように適合するか、特に送電網や天然ガスパイプラインシステムなどの既存のインフラストラクチャー内での統合の観点からよりよく理解するには、さらなる研究が必要である(IEA 2015)。

輸送燃料としての水素の広範な使用を可能にし、水素 FCV が電気自動車とのコスト競争力を持つようになるための数十年にわたる移行期間中に勢いを維持するには、強力で永続的な政策が必要である(IEA 2019c; FCHEA 2019; FCHJU 2019; BNEF 2020; Hydrogen Council 2017, 2020)。これらの分析は、水素が運輸、特に長距離船舶と航空において戦略的かつニッチな役割を持つ可能性が高いことを示唆している。継続的な改善により、水素と電化は、大型道路交通および鉄道の脱炭素化に役割を果たす可能性がある。

運輸セクターは、液体ガソリン、陸上交通用のディーゼル、航空用のジェット燃料、船舶用の重油に依存している。液体化石燃料を補給するための広範なインフラストラクチャーはすでに存在する。アンモニア、合成燃料、およびバイオ燃料は、陸上、船舶、および航空で使用される燃焼エンジンおよびタービンに動力を供給するための代替燃料として出現した(図 10.2)。e-メタノールやフィッシャー・トロプシュ液体などの合成燃料は類似の物理的特性を持ち、既存の化石燃料インフラストラクチャーで使用できる(Soler 2019)。同様に、バイオ燃料はいくつかの国で化石燃料と一緒に使用されている(Panoutsou et al. 2021)。アンモニアは液体であるが、圧力がかかっているため、液体化石燃料の燃料補給インフラストラクチャーとは互換性がない。しかし、アンモニアは肥料や化学原料として広く使用されており、年間アンモニア生産量の10%が海上輸送されている(Gallucci 2021)。そのため、多くの港湾施設にはアンモニアの貯蔵および輸送インフラが含まれており、海運業界はアンモニアの取り扱い経験がある(Gallucci 2021)。このインフラストラクチャーは、海運用燃料としてのアンモニアの使用をサポートするために拡張する必要がある可能性が高いため、港はこれらの新しい燃料補給施設の主要な場所になる可能性がある。

EV と HFCV には、液体燃料とは別のインフラが必要である。新しい車両技術の普及の成功は、先行するインフラの展開に依存しているため(Leibowicz 2018)、新しい充電および燃料補給インフラの適材適所の展開は、EV や HFCV などの新しい輸送技術の採用をサポートするために重要である。その結果、運輸セクターの脱炭素化を加速するために、インフラと車両技術の両方に同時に投資する必要がある可能性がある。

充電インフラ: 充電インフラは、いくつかの主な理由から重要である。消費者の観点からは、技術に対する信頼を築き、しばしば引用される「航続距離の不安」という障壁を克服するために、頑強で信頼性の高い充電インフラストラクチャーネットワークが必要である(She et al. 2017)。航続距離に対する不安は、消費者が EV が航続距離の要件を満たしているという

確信を持ってない場合である。LDV の場合、充電の大部分(75~90%)は自宅またはその近くで行われることが報告されている (Figenbaum 2017; Webb et al. 2019; Wenig et al. 2019)。家庭での充電は、消費者が家庭での充電なしで EV を購入する気がないため、EV の採用において特に重要な要素である (Berkeley et al. 2017; Funke and Plötz 2017; Nicholas et al. 2017)。ただし、家庭用充電は、すべての消費者にとってオプションではない場合がある。たとえば、集合住宅の住人は、充電インフラを設置する際に特定の課題に直面する可能性がある (Hall and Lutsey 2020)。したがって、公共の充電インフラの提供は、航続距離の不安を軽減し、EV の長距離移動を促進し、ひいては採用を促進するためのもう 1 つの手段である (Hall and Lutsey 2017; Melliger et al. 2018; Narassimhan and Johnson 2018; Melton et al. 2020)。現在、充電の約 10% は公共の場所で行われており、AC (低速) 充電と DC (高速) 充電が大まかに半々である (Figenbaum 2017; Webb et al. 2019; Wenig et al. 2019)。職場や通勤用駐車場に充電インフラを配備することも重要である。特に、これらの車両はこれらの場所に長時間駐車されるためである。実際、現在、EV 充電の約 15~30%がこれらの場所で行われている (Figenbaum 2017; Webb et al. 2019; Wenig et al. 2019)。自動車メーカーと電力会社が家庭用充電インフラの設置をサポートできることが示唆されており (Hardman et al. 2018)、政策立案者が公共の充電をサポートできる。これらに対する支援は、支援的な計画政策、建築規制、および財政支援を通じてもたらされる可能性がある。政策支援は、また、職場や通勤用駐車場に充電ステーションを設置することを奨励することもできるであろう。これらの場所での充電には、日中に生成された余分な太陽エネルギーを使用するという追加の利点がある (Hardman et al. 2018; Webb et al. 2019)。

小型車の電動化にとって充電インフラは非常に重要であるが、高出力の充電インフラのコストを考えると、大型車にとってはさらに重要となる。急速充電ハードウェアの設置コストは、充電レート、サイトあたりの充電器の数、およびその他のサイト条件に応じて、充電器あたり約 45,000 ドルから 200,000 ドルの間で変動する可能性があると推定されている (Nicholas 2019; Hall and Lutsey 2019; Nelder and Rogers 2019)。バスやトラックのデポ、貨物配送センター、海運港、空港などの主要な輸送ハブに共有充電インフラを導入することで、重量のある運輸セグメント全体で電気自動車への移行を促進できる。さらに、充電インフラサイトが小型車両と大型車両の両方に対応するように設計されている場合、複数のアプリケーションや車両全体での使用率が向上するため、インフラのコストが削減される可能性がある (Nelder and Rogers 2019)。

電気自動車の充電インフラには、物理的な接続を伴う導電充電とワイヤレス/誘導充電の 2 種類がある。現在、小型および大型車両用に導入されている充電インフラの大部分は導電である。しかし、ワイヤレス充電技術が出現し始めており、特に BRT などの用途で、駐車中お

よび/または走行中に車両を自律的に充電できるようになっている (IRENA 2019)。道路車両に対しては、電気道路システム、または道路の電化も、導電充電インフラの代替形態として出現し、物理的なプラグに取って代わっている (Ainalis et al. 2020; Hill et al. 2020)。このタイプの充電インフラは、積載需要が高い道路貨物に特に適している。道路の電化は、道路舗装に組み込まれる、道路の脇に沿って走る、あるいは、上部架線を介する - 鉄道に使用されている電気インフラと同様に - 充電レールの形をとることができ、またはルートに沿った駅の充電施設でも可能となる。このインフラは、また、ハイブリッドや HFCV などの他の電動パワートレインに直接電力を供給するためにも使用できる (Hardman et al. 2018; Hill et al. 2020)。

充電インフラも、充電電力のレベルによって異なる。小型車両の場合、充電インフラは一般に最大 350 kW で、10 分の充電ごとに約 350km を提供する。バスやトラックなどの大型車両の場合、充電インフラは一般に最大 600kW で、10 分の充電で約 50~100km を提供する (バス/トラックのサイズによって異なる)。最後に、現在、特に長距離トラックや短距離の海上輸送および航空用に、1MW を超える速度をもつさらに高出力の充電インフラが開発されている。たとえば、現在、デンマークで運航されている世界最大の電気フェリーの 1 つは、4.4MW の充電器を使用している (Heinemann et al. 2020)。

最後に、いくつかの異なる課金基準があり、運輸セグメントや地理的な場所によって異なっている。電化製品と同様に、ヨーロッパの CCS2 (ECA 2021)、中国の GB/T (Hove and Sandalow 2019) など、さまざまな EV 充電コネクタとソケットがさまざまな地域で登場している。充電ステーション間の相互運用性を実現することは、政策立案者が EV 充電器の設置場所に関する透明性のあるデータを市場に提供し、充電セッションの支払いに対する一貫したアプローチを提供するために取り組むべきもう 1 つの重要な問題と見なされている (van der Kam and Bekkers 2020)。相互運用性も、スマート充電インフラを実現する上で重要な役割を果たす可能性がある (Neaimeh and Andersen 2020)。

スマート充電 - EV とグリッドの統合戦略: EV は、適切に統合された場合、電力グリッドをサポートするいくつかの機会を提供する。逆に、統合の欠如は、特に需要のピーク時に複数の車両がより高い充電レートで並行して充電した場合、グリッドに悪影響を与える可能性がある (Webb et al. 2019; Jochem et al. 2021)。EV 充電には主に 3 つのアプローチがある。管理されていない充電では、EV は、接続されているときはいつでも、より広範な電力グリッドの状態に関係なく、アドホックに充電される (Webb et al. 2019; Jochem et al. 2021)。第 2 に、管理された充電では、再生可能エネルギーの高い発電期間および/または需要の低い期間といったグリッドにとって有益な期間に EV が充電される。また、管理された充電により、電力会社は充電レートを調整できるため、グリッドに周波数と規制に沿ったサービスを提供できる (Weis et al. 2014)。最後に、双方向充電または車両対グリッド (V2G) では、EV は一般に管理

された充電の対象となるが、拡張により、車両のバッテリーから建物やより広い電力グリッドに電気を供給する機能が提供される (Ercan et al. 2016; Noel et al. 2019; Jochem et al. 2021)。「スマート充電」という用語は、管理された充電 (V1G と呼ばれることが多い) と車両対グリッド (V2G) の両方を包含する包括的な用語となっている。電力会社にとって、スマートな充電戦略は、バックアップ電力を提供し、負荷分散をサポートし、ピーク負荷を減らし (Zhuk et al. 2016; Noel et al. 2019; Jochem et al. 2021)、1 日および 1 時間ごとの電気負荷の予測における不確実性を減らし (Peng et al. 2012)、また、発電容量のより大きな活用を可能とするものである (Hajimiragha et al. 2010; Madzhrov et al. 2014)。

スマート充電戦略は、EV の気候上の利点も強化できる (Yuan et al. 2021)。制御された充電は、高炭素電力源の回避、アンシラリーサービス市場の脱炭素化、または高炭素電力源のピークカットを行うのに役立つ (Jochem et al. 2021)。V2G 対応の EV は、特に他の代替手段と比較した場合、総排出量をさらに減らすことができる (Reddy et al. 2016)。Noel et al. (2019) は、デンマークの V2G 経路を分析し、2030 年までに 75% の普及率で、340 億ドルの社会的便益が発生する可能性があることを指摘している (汚染の除去などによって)。これらの社会的便益は、車両 1 台あたりでは 1,200 ドルに相当する。V2G 対応の EV は、最適化された充電スケジュールを仮定すると、従来のガソリン車と比較して最大 59% まで炭素排出量を削減できる可能性があることが判明している (Hoehne and Chester 2016)。

エネルギー貯蔵の予測は、スマート充電戦略が将来のエネルギーシステムで重要な役割を果たすようになることを示唆している。ヨーロッパ向けのさまざまなエネルギー貯蔵技術の評価では、V2G が他のオプションと比較して最大の貯蔵可能性を提供し、2060 年までに 200GW の貯蔵容量を占める可能性があることが示されている。一方、グリッド内の蓄電池と揚水発電所は、160GW の貯蔵容量を提供できる (Després et al., 2017)。別の研究では、充電制御を備えた EV は、はるかに低コストで定置型ストレージと同様のサービスを提供できることがわかっている (Coignard et al. 2018)。スマート充電戦略のほとんどの展開はまだパイロット段階であるが、V2G ハブは 2021 年に 22 か国で少なくとも 90 件の V2G プロジェクトが存在するとしており、プロジェクトの数は増え続けている (Vehicle to Grid VG 2021)。政策立案者は、スマートな充電戦略を実現し、EV がグリッドの安定性と再生可能エネルギーの取り込みをサポートできるようにするために、自動車メーカー、電力会社、インフラストラクチャープロバイダー、および消費者の間のコラボレーションを促進する重要な役割を担っている。これは運輸の脱炭素化のクリティカルな部分となる。

水素インフラ: HFCV は、広範で便利な水素補給ステーションの開発に依存している (FCHEA 2019; IEA 2019c; BNEF 2020)。世界には約 540 の水素補給ステーションがあり、その大部分は北米、ヨーロッパ、日本、中国にある (IEA 2021a)。これらの補給ステーションの

約 70%は一般公開されている (Coignard et al. 2018)。典型的な補給ステーションは現在、100～350kg/日の補給能力を持っている (CARB 2019, 2020; H2 Tools 2020; AFDC 2021)。せいぜい、現在の水素燃料補給能力は 500 kg/日未満である (Liu et al. 2020b)。

水素補給ステーションの設計は、水素の供給と配送、圧縮と貯蔵、および販売戦略の方法の選択に依存している。水素の供給は、オンサイトでの生産、またはオフサイトで生産された水素の輸送と配送を介して行われる。圧縮段階では、経済的な定置型や車両による保管に必要な圧力を達成するために水素が圧縮される。この圧力は、貯蔵戦略によって異なる。水素は、液体または気体として貯蔵できる。水素は、車両の設計に応じて、ガスまたは液体として車両に販売することもできる (ただし、工業製品として極端な温度範囲と貯蔵容量がテストされる)。これらの各コンポーネントの技術的および経済的開発が引き続き研究されている。

水素が大規模な集中型プラントでオフサイト生産される場合、水素は貯蔵され、水素補給ステーションに配送されなければならない。水素配送のコストは、配送される水素の量、配送距離、保管方法 (圧縮ガスまたは極低温液体)、および配送モード (トラックまたはパイプライン) によって異なる。今日のほとんどの水素補給ステーションはトラックで供給されており、ごくまれに水素パイプラインが使用されている。固定費が低い (変動費は高くなるが)、近い将来、またはより短い距離で水素を供給するために、ガスチューブトレーラーを使用することもできる。液化トラックトレーラーとパイプラインの両方が、中長期的には、より高い容量と長距離における低コストを実現するためのオプションとして認識されている (FCHJU 2019; Li et al. 2020; EU 2021)。代替的に、水素は電解槽、または CCS と組み合わせた水蒸気メタン改質装置によって小規模オンサイトで生産される。水素は一般に、圧力 350 または 700bar の圧縮ガスとして、または-253℃の液化水素として車両に供給される (Hydrogen Council 2020)。

水素補給ステーションのコストは大きく異なり、将来については不確実なままである (IEA 2019c)。IEA の報告によると、1 つの水素補給ステーションの投資コストは、700 バールの圧力と 1 日あたり 1,300 kg の供給能力の場合、60 万ドルから 200 万ドルの範囲である。低圧 (350bar) で供給される低容量 (1 日あたり水素約 50kg 以下) の水素補給ステーションの投資コストは、15～160 万ドルの範囲である。International Council for Clean Transport による別の見積もりでは、1 日あたり 600 kg の水素容量で、1 つの水素補給ステーションの資本コストは約 180 万ドルになるとされている (ICCT 2017)。水素補給ステーションの投資コストが高いことを考えると、使用率が低いと配送される水素の価格が高くなる可能性がある。ヨーロッパでは、ほとんどのポンプが 10%未満の容量で稼働している。1 日あたり 50 kgH₂ の容量を持つ小規模な水素補給ステーションの場合、この利用率は、現在の小売価格に沿うと

水素 1kg あたり約 15～25 ドルという高い価格に相当する (IEA 2019c)。水素の販売コストは、もし、低炭素水素を生産するために水電解で生産する場合、低炭素水素を生成するために必要な電気のコストとも大きく関連する。

4. 陸上交通の脱炭素化

小型車 (LDV) は、一般市民の主要な交通手段であり (ITF 2019)、現在、世界の運輸セクターの排出量の最大の割合を占めている (IEA 2019d)。現在、ガソリンおよびディーゼル燃料に依存するパワートレインは、LDV セグメントの主要な技術であり続けている (IEA 2019d)。しかし、HEV と完全バッテリー式電気自動車 (BEV) は、近年ますます人気が高まっている (IEA 2021a)。これに対応して、HEV、BEV、および燃料電池車を検討するライフサイクルアセスメント (LCA) 調査の数が増加している。歴史的には、LDV のテールパイプからの排出に焦点が当てられてきたが、LCA の研究では、車両のバリューチェーン全体、特に代替パワートレイン技術による排出を含めることの重要性が示されている。

図 10.4 は、コンパクトおよび中型 LDV の選択されたパワートレイン技術と燃料チェーンの組み合わせの累積ライフサイクル排出量を示している。この図は、付録 10.1 で説明されているように、レビューされた学術文献と IPCC データ収集作業を通じて提出されたデータから調和のとれた調査結果をまとめたものである (Cusenza et al. 2019; Hawkins et al. 2013; Tong et al. 2015b; Bauer et al. 2015; Gao et al. 2016; Ellingsen et al. 2016; Kim and Wallington 2016; Cai et al. 2017; Ke et al. 2017; Lombardi et al. 2017; Miotti et al. 2017; Evangelisti et al. 2017; Valente et al. 2017; de Souza et al. 2018; Elgowainy et al. 2018; Luk et al. 2018; Bekel and Pauliuk 2019; Messagie et al. 2014; Hoque et al. 2019; IEA 2019a; Rosenfeld et al. 2019; Shen et al. 2019; Wang et al. 2019; Wu et al. 2019; Benajes et al. 2020; Ambrose et al. 2020; Hill et al. 2020; Knobloch et al. 2020; JEC 2020; Qiao et al. 2020; Cox et al. 2018; Sacchi 2021; Zheng et al. 2020; Wolfram et al. 2020; Valente et al. 2021)。図の値 (およびこのセクションの残りの図) は、各研究で使用された 100 年 GWP に依存しており、WGI による最近の GWP 更新とは異なる場合がある。ただし、更新された 100 年 GWP 値を使用しても、このセクションの数値から得られる定性的な洞察が変わる可能性は低い。

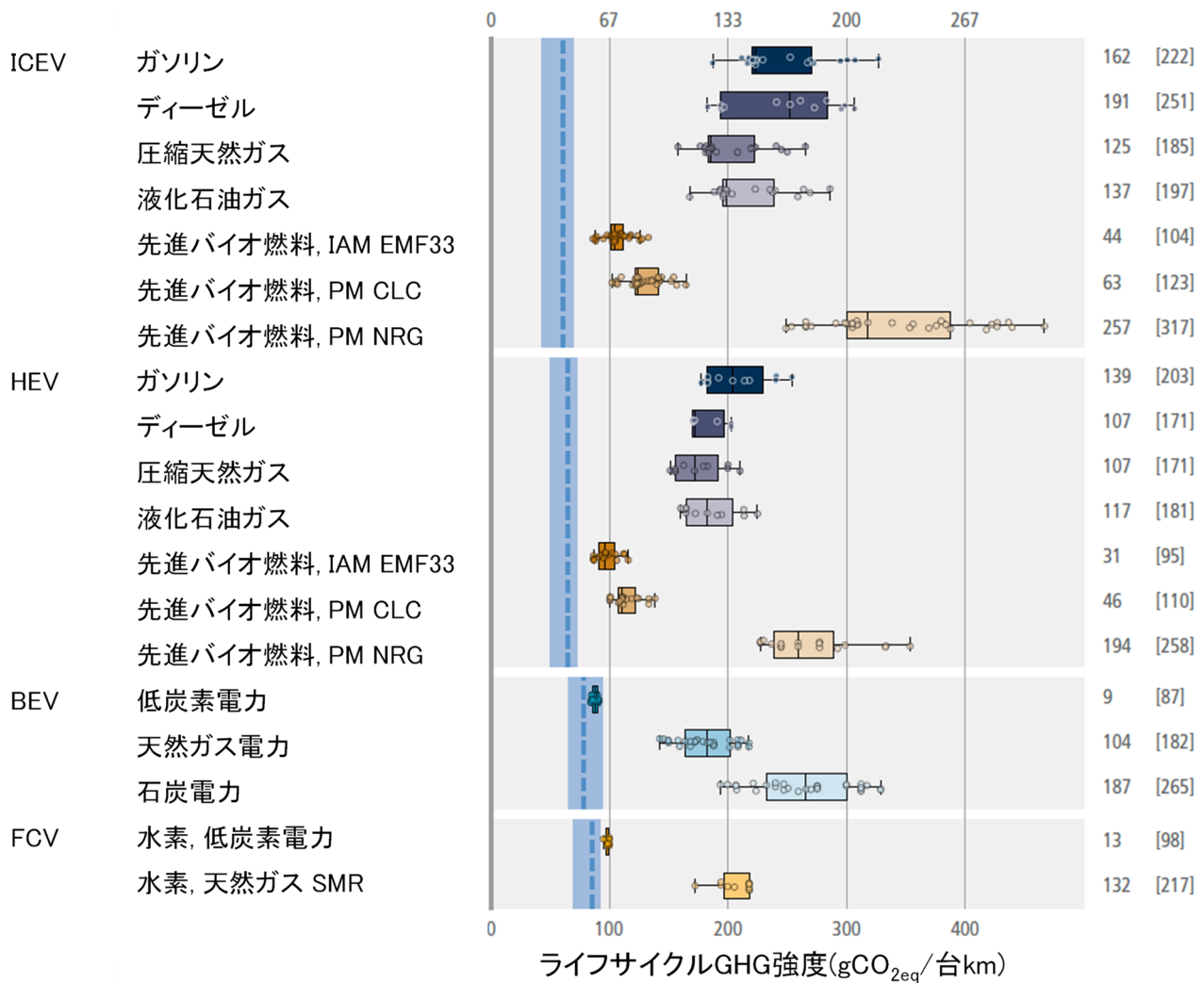
さらに、図 10.4 で使用されているバイオ燃料のカーボンフットプリントは、個々のバリューチェーンや燃料の種類に固有の数値ではないことに注意が必要である。それらは、セクション 10.3 で説明されているように、第 7 章の土地利用関連の炭素排出量と変換効率、および排出量を組み合わせることによって導き出される。具体的には、ここで採用されている 3

つのモデリングアプローチから得られた土地利用フットプリントは次の通りである。1) 統合評価モデル - エネルギーモデリングフォーラム 33 (IAMEMF33)、2) 一定の土地被覆 (CLC) を仮定した部分モデル、および 3) 自然再成長 (NRG) を使用した部分モデル。ここで使用されている排出係数は、エネルギー目的のバイオマスの世界的な生産量が 100EJ/年であるシナリオに対応しており、消費レベルが低いほど排出係数が低くなると予想され、逆もまた同様である。詳細については、Box 10.2 および第 7 章を参照のこと。

文献で報告されている排出量と燃料消費量は、一般的に経験的な排出データを使用していない。むしろ、新欧州運転サイクル (NEDC) や米国 EPA 連邦試験手順などの運転サイクルを使用して燃料効率を報告する傾向がある。その結果、使用される運転サイクルによっては、文献で報告されている運用時の排出量は、実走行運転時の排出量と比較して、15~38% も過小評価されている可能性がある (Fontaras et al. 2017; Tsiakmakis et al. 2017; Triantafyllopoulos et al. 2019)。ただし、これらの過小評価の程度は、パワートレインのタイプ、エンジンのサイズ、運転行動、および環境によって異なる。

中型 ICEV の現在の平均ライフサイクル影響は、約 $65\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ から $210\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ に及び、両方の値はバイオ燃料で稼働する内燃機関車 (ICEV) に由来する。この値の範囲内で、現在の参照すべき技術の値が見つかり、ディーゼル駆動の ICEV のライフサイクル全体の影響の中央値は $130\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ であり、ガソリン燃料車は $160\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ である。燃料消費は ICEV のライフサイクル排出量の大半を占めており、排出量の約 75% は排気管と燃料チェーンから発生している。

ハイブリッド (HEV) とプラグイン HEV (PHEV) では、パワートレインの電動化の度合いが異なる。HEV は、主にバッテリーの充電を回生ブレーキに依存している。PHEV は、回生ブレーキと外部電源を組み合わせてバッテリーを充電する。運用時の排出強度は、電動化された運転が実行される程度に大きく依存し、これはユーザーとルートに依存する。PHEV の場合、排出原単位は充電用の電力源にも依存する。HEV および PHEV の生産における影響は、バッテリーが BEV のバッテリーに比べて一般的に小さいため、ICEV の生産で発生する排出量に匹敵する。現在の HEV は、燃料によっては、ICEV と比較して排出量を最大 30% 削減する可能性があり、ライフサイクル強度の中央値は、 $60\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ (バイオ燃料、EMF33) から $165\sim 170\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{pkm}$ の間で変化している (バイオ燃料、部分モデル NRG)。この広い範囲内で、化石燃料で 100% 運転するためのライフサイクル強度だけでなく、電気と化石燃料による運転のすべての組み合わせを見つけることができる。HEV は主なエネルギー変換プロセスとして燃焼に依存しているため、緩和の機会に限られている。しかし、現在、電力ミックスが非常に炭素集約的であり、PHEV と BEV の使用が効果的な緩和策ではない地域では、



凡例

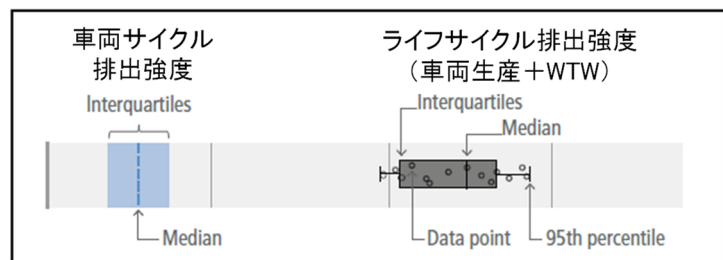


図 10.4 文献からの中型 LDV 車両および燃料技術に対するライフサイクル GHG 排出強度

主な x 軸は、車の寿命を 180,000km と仮定し、単位を gCO_{2eq}/vkm として報告している。2 番目の x 軸は、平均乗車人員を 1.5 と仮定して、 gCO_{2eq}/pkm の単位を使用している。図の値は、ソースデータに埋め込まれた 100 年 GWP 値に依存しており、WGI により更新された 100 年 GWP 値とは若干異なる場合がある。網掛け部分は、車両生産段階と廃棄段階を合わせた四分位範囲を表している。箱とひげの長さは、さまざまな燃料チェーンの運用段階の四分位範囲を表し、x 軸上の配置は絶対的なライフサイクル気候強度を表す。つまり、生産段階と廃棄段階が含まれる。

個々のマーカーはそれぞれデータポイントを示す。先進バイオ燃料、つまり高度なバイオ燃料とは、第 2 世代のバイオ燃料の使用とそれぞれの変換および栽培に関する排出係数を指す。「IAM EMF33」は、統合評価モデルの EMF33 シナリオからのシミュレーション結果から導き出された先進バイオ燃料の排出係数を指す。「PM」は部分モデルを指し、「CLC」は土地被覆が一定 (constant land cover) で、「NRG」は自然再成長 (natural regrowth) を伴う。「水素 低炭素電力」は、低炭素電力を用いた電気分解により、「水素 天然ガス SMR」は、天然ガスの水蒸気メタン改質によって生成される燃料を指す。

HEV は適切な一時的な解決策であり、中程度の緩和の可能性をもたらす (Wolfram and Wiedmann 2017; Wu et al. 2019)。

HEV とは対照的に、PHEV は LDV の使用段階での排出量削減の大きな機会を提供する可能性がある。これらの潜在的な利点の増加は、低炭素電力でバッテリーを充電できることと、HEV と比較して完全な電気での航続距離が長いことによる (Laberteaux et al. 2019)。消費者の行動 (例: 電気使用率 (UF) と充電パターン)、メーカーの設定、および充電のための再生可能電力へのアクセスは、全体的な運用上の影響を強く左右する (Wu et al. 2019)。UF は、電荷を使用して移動した距離 (電荷減少 (CD) 段階) と内燃エンジンを使用して移動した距離 (電荷維持 (CS) 段階) の割合の重みである (Paffumi et al. 2018)。PHEV が CS モードで動作する場合、内燃エンジンが推進力として使用され、バッテリーの充電状態を特定の範囲内に維持するとともに、回生ブレーキが使用される (Plötz et al. 2018; Raghavan and Tal 2020)。CS モードで走行している場合、PHEV は緩和の可能性が低く、効果は HEV に匹敵する。一方、PHEV が CD モードで動作する場合、バッテリーだけで必要な推進エネルギーが供給される (Plötz et al. 2018; Raghavan and Tal 2020)。したがって、CD モードでは、PHEV は低炭素電源でバッテリーを充電できる可能性があるため、より高い緩和の可能性を秘めている。その結果、UF は PHEV のライフサイクル排出量に大きく影響する。現在の査読済みの文献では、主に燃料効率とユーザーの行動を推定するために適用されるさまざまなテストプロトコルが原因で、幅広い UF が示されている (Pavlovic et al. 2017; Paffumi et al. 2018; Plötz et al. 2018, 2020; Raghavan and Tal 2020; Hao et al. 2021)。これらの要因により、PHEV 研究間で効果を調整して比較することが難しくなっている。他の LDV 技術と比較して適切な PHEV 研究の数が少なく、利用可能な PHEV の結果を調整することが複雑であるため、この技術は図 10.4 から省略されている。ただし、PHEV 車両の二重の動作特性により、これらの車両のライフサイクル GHG 排出強度は、同等のサイズと性能を持つ ICEV と BEV の中間にあると予想できる。

現在、BEV は同等サイズの ICEV よりも製造時の排出量が多く、中央値の排出量は 14 トン CO₂ 換算/車両であるのに対して、中型の化石燃料を燃料とする同等の車両は約 10 トン CO₂ 換算/車両である。BEV のこれらの高い製造時排出量は、主にバッテリーパックの製造と、必要な追加のパワーエレクトロニクスに起因している。製造技術と設備稼働率が改善され、グローバルに低炭素電力の地域に移るにつれて、バッテリー製造時の排出量は減少する可能性がある。電動パワートレインのエネルギー効率が高いため、BEV は運転段階でこれらの高い製造時排出量を補うことができる。ただし、ICEV と比較した場合のこの技術の緩和能力は、車両の充電に使用される電力の組み合わせに大きく依存する。現在利用可能なエネルギー源が多様であるため、現在の BEV は広範囲の効果を与える可能性があり、風力発電と石炭発電でそれぞれ 60~180gCO_{2eq}/pkm の範囲の平均ライフサイクル排出量となる。したが

って、車両の電動化によって大幅な炭素削減を達成できるかどうかは、低炭素電力の発電に大きく依存しており、低炭素電力でバッテリーを充電するときに最大の緩和効果が得られる。文献によると、現在の BEV が低炭素電力で製造され、低炭素電力で動作する場合、コンパクトサイズの自動車のフットプリントは $22\text{gCO}_2\text{eq/pkm}$ と低くなる (Ellingsen et al. 2014, 2016)。この値は、同サイズの化石燃料車と比較して約 85% の削減可能性を示唆している (中央値)。さらに、BEV には、特に人口密集地域で、人間の健康上の合併症の原因となる局所的な大気汚染物質を削減するという副次的な利点がある (Hawkins et al. 2013; Ke et al. 2017)。

BEV と同様に、現在の水素燃料電池車 (HFCV) は同様のサイズの ICEV や BEV よりも生産時の排出量が多く、平均で約 15 トン CO_2 換算/車両を生成する。BEV と同様に、FCV のライフサイクルへの影響は、燃料チェーンに大きく依存している。今日まで、水素製造の最も一般的な方法は、天然ガスからの水蒸気メタン改質であった (Khojasteh Salkuyeh et al. 2017)。これは比較的炭素集約的であり、ライフサイクル排出量は約 $88\text{gCO}_2\text{eq/pkm}$ になる。FCV のライフサイクルへの影響を扱った現在の文献によると、天然ガスを介した水蒸気メタン改質から生成された水素を燃料とする車両は、ICEV と比較して緩和の可能性がほとんど、あるいは全くないことが示されている。他の利用可能な水素燃料チェーンは、合成方法と使用するエネルギー源 (電気分解または水蒸気メタン改質、化石燃料または再生可能エネルギー) に応じて、炭素強度が大きく異なる。炭素集約度が最も低い水素経路は、低炭素電力による電気分解に依存している。ICEV や BEV と比較すると、LDV 用の FCV は、セクション 10.3 で説明したように、技術の準備レベルが低い状態である。

主に低出力のモペッドと高出力のオートバイで構成される二輪車は、人口密度の高い都市、特に開発途上国での個人の移動手段として人気がある。このクラスの車両の LCA 調査は、四輪車の LDV に比べて比較的一般的ではない。ただし、入手可能な結果では、二輪車はさまざまなパワートレイン技術で LDV と同様の傾向を示しており、電動パワートレインは生産時の排出量が多いが、通常は運用中の排出量が少ない。二輪車のライフサイクル排出原単位も、車両キロベースで四輪車の LDV よりも一般的に低くなる。ただし、二輪車は一般に、四輪車の LDV ほど多くの乗客を運ぶことはできない。したがって、旅客キロベースでは、満席の乗用車は満席の二輪車よりも排出量が少ない可能性がある。しかし、今日、ほとんどの乗用車の平均乗車人員は比較的 low、それに伴って pkm ベースでの排出強度が高くなる。これは、 pkm ベースで LDV のライフサイクル強度を低減するために、平均乗車人員の高い乗用車を利用することが重要であることを示している。たとえば、ガソリン乗用車の排出原単位の中中央値は $222\text{gCO}_2\text{eq/vkm}$ 、ガソリン二輪車の場合は $160\text{gCO}_2\text{eq/vkm}$ である (Cox and Mutel 2018)。最大乗車人員がそれぞれ 4 名と 2 名の場合、これらの車両の運輸排出原単位は 55 および $80\text{gCO}_2\text{eq/pkm}$ である。同じ乗車人員の仮定の下で、BEV 二輪車は、ヨーロッパの平均的な電

Box 10.3 - 車両サイズの傾向と LDV の燃費への影響

車両サイズの傾向: 世界規模で、SUV の販売は過去 10 年間で常に増加しており、2018 年に販売された車両の 39% が SUV であった (IEA 2019d)。車両のサイズとエンジン出力が増加する傾向が続く場合、LDV 車両からの全体的な排出量が増加する可能性がある (同じパワートレイン技術を備えた小型車両と比較して)。車両質量が燃費に与える影響の大きさは、効率の異なるパワートレインによって異なる。Box 10.3 図 1 は、図 10.4 の作成に使用されたのと同じ文献からのデータを使用して、この関係を強調している。パワートレインの効率が高いほど、動作中のエネルギー損失が少なくなるため、効率の低いパワートレインよりも、特定の質量を動かすために必要なエネルギー入力が少ないで済む。このパターンは、Box10.3 図 1 の BEV の傾斜が緩やかになっていることで示されている。車両の大型化と重量の増加に伴い、使用段階での排出量が増加する傾向は、パワートレインの設計、燃料効率、軽量化、空気力学の改善によっていくらか相殺される可能性がある (Gargoloff et al. 2018; Wolfram et al. 2020)。これらの戦略によって提供される潜在的な改善は、ケース固有のものであり、個別に、または複数の戦略の組み合わせとして、文献で完全に評価されているわけではない。

軽量化 (省略)

粒子状物質に対する相乗効果 (省略)

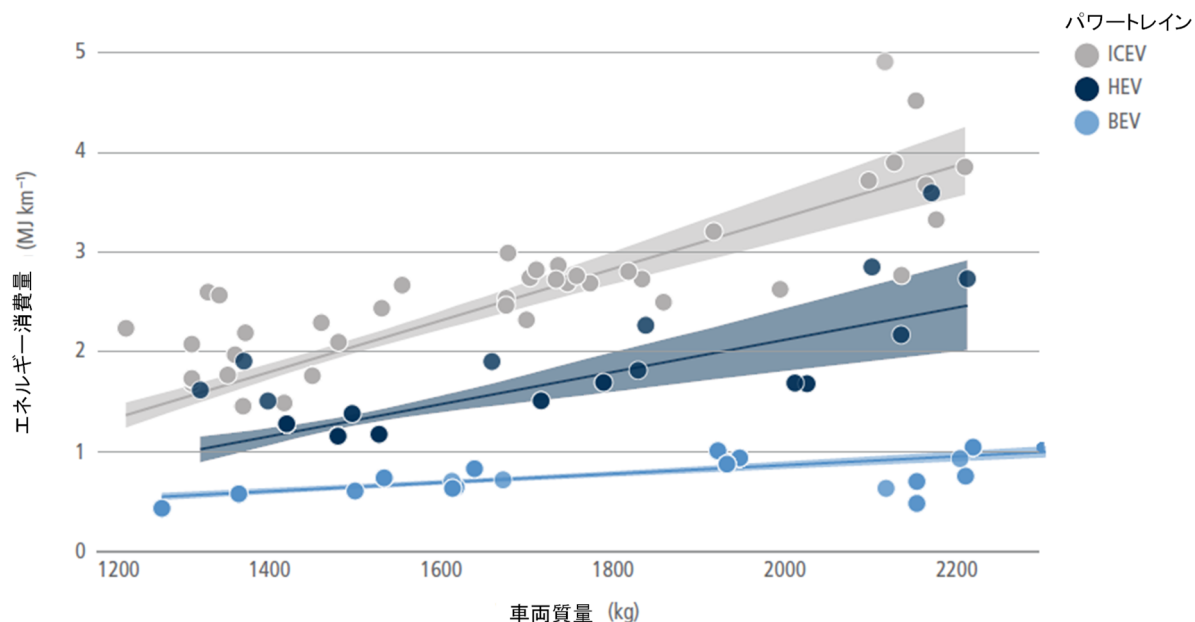


図 1 車両サイズ (代用として質量を使用) およびパワートレイン技術の関数としてのエネルギー消費の図。FCV はデータ不足のため省略。

力構成で充電された場合、BEV 四輪車 LDV よりも低いライフサイクル GHG 強度を実現する。一方、水蒸気メタン改質によって生成された水素を使用する FCV 二輪車は、高い乗車人員の下で pkm ベースで比較すると、四輪車よりも高い GHG 強度を示す。

低炭素燃料またはエネルギー源を利用する LDV への移行を成功させるには、できるだけ多くの人々が技術を利用できるようにする必要がある。これには従来のディーゼル車やガソリン車と比較して競争力のあるコストが必要である。LDV のライフサイクルコスト (LCC) は、車両の購入コスト、効率、燃料費、割引率によって異なる。図 10.5 は、ディーゼル LDV、BEV、および FCV の LCC のパラメトリック分析の結果を示している。図 10.5 で取得された車両効率の範囲は、図 10.4 で使用された範囲と同じであるが、燃料費と車両購入価格の範囲は文献から取得されている。このパラメトリック分析の想定割引率は 3% である。付録 10.2 には、この図を作成するために使用された方法と基礎となるデータに関する詳細が含まれている。

図 10.5 は、さまざまなパワートレイン技術の LCC の範囲 (ドル/km) と、車両効率 (低または高)、車両購入価格、および燃料/電気コストが LCC 全体に及ぼす影響を示している。図 10.4 との一貫性を保つために、平均乗車人員を 1.5 と仮定している。中型の ICEV の購入価格は 20,000~40,000 ドルで、平均燃料費は 1~1.5 ドル/L の範囲である。これらの条件では、化石燃料を燃料とする LDV の LCC は、低効率、高効率の ICEV でそれぞれ pkm あたり 0.22~0.35 ドル、pkm あたり 0.17~0.28 ドルの範囲となる (図 10.5)。

BEV の購入価格は ICEV よりも高くなるが、AR5 以降急激な低下が見られる。長年にわたるリチウムイオン電池技術の急速な発展 (Schmidt et al. 2017) といくつかの国での補助金の導入により、BEV は急速に ICEV と同等のコストに達している。中型の BEV の平均購入価格は 30,000~50,000 ドルの範囲であるが、電力の平準化コストは、地理的な場所と技術に応じて、より大きな差 (65~200 ドル/MWh) を示す (第 6 章を参照)。したがって、ICEV と BEV の購入価格が同等であると仮定すると、BEV は GJ あたりのベースで化石燃料と比較して効率が高く、電力コストが低いいため、LCC が低くなる (図 10.5 の 2 番目の y 軸)。

FCV は LDV の最も高価なソリューションであり、これは主に車両自体の現在の購入価格が高いためである。ただし、FCV の技術準備レベルが低く、この技術の研究開発における現在の取り組みを考えると、FCV は今後数年間で LDV の実行可能な技術になる可能性がある。ただし、水素の生成と燃料補給サイトへの供給に伴う余分なエネルギーに関する問題は残る。GJ あたりの水素の平準化コストは、従来の化石燃料よりも低くなるが、電気よりは高くなる。

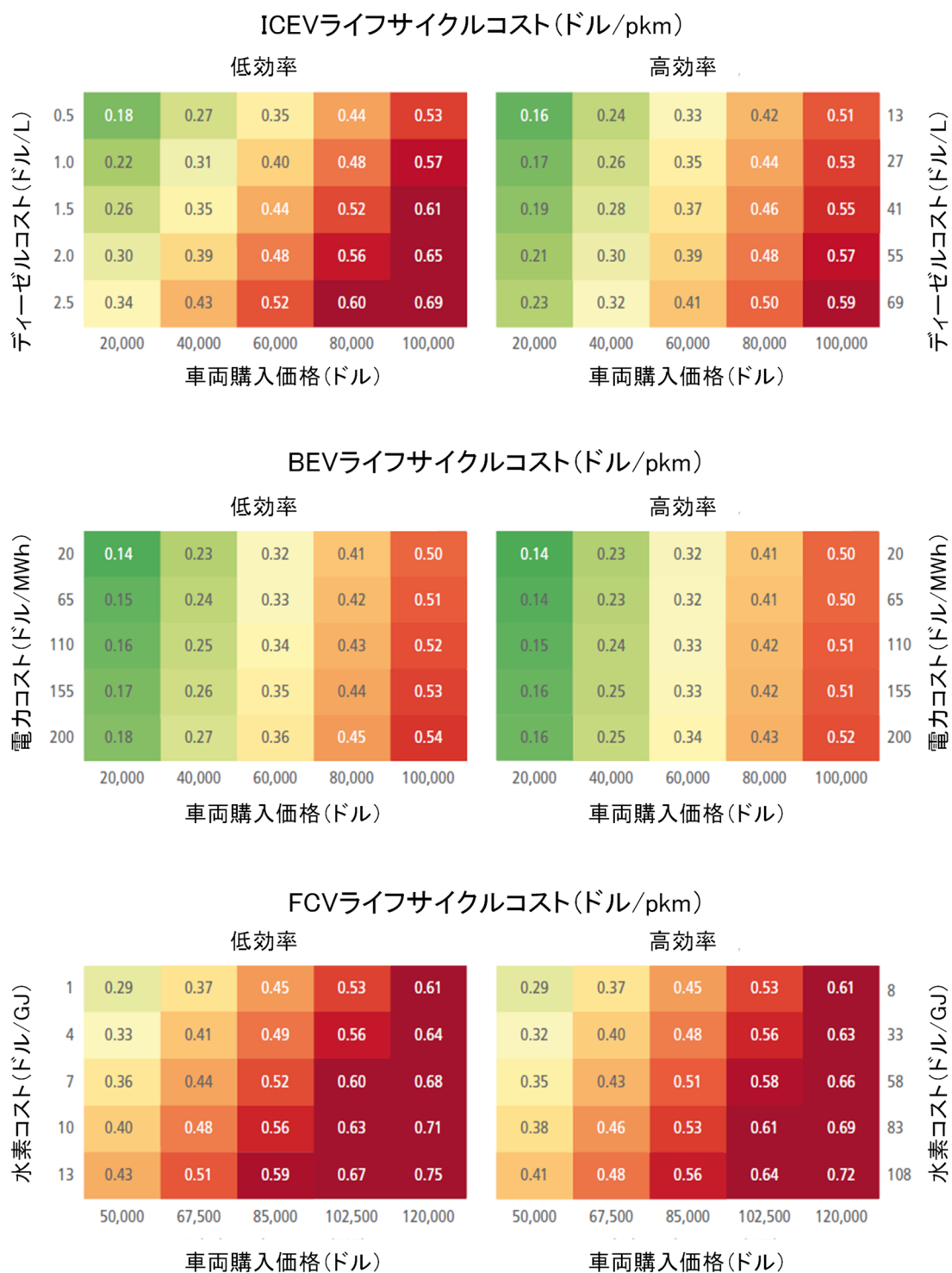


図 10.5 小型 ICEV、BEV、および HFCV の LCC

ICEVの結果は、ガソリンで走行する車両のLCCを表している。ただし、ガソリンとディーゼルのソリューションの文献のコスト範囲は類似しているため、これらの値はディーゼルで動作するICEVの代表でもある。第2のy軸は、相互比較を容易にするためにドル/GJで正規化されたさまざまなエネルギーキャリアのコストを表している。

さらに、水素の平準化されたコストの中で、水素生産技術の間には大きなコスト差がある。石炭のガス化や天然ガスからの水蒸気メタン改質などの従来の技術は、炭素の回収と貯留の有無にかかわらず、最も安価な選択肢である (Bekel and Pauliuk 2019; Parkinson et al. 2019; Khzouz et al. 2020; Al-Qahtani et al. 2021)。電気分解によって生成される水素は、現在最も高価な技術であるが、現在の技術の準備レベルにより、大幅なコスト削減の可能性が存在する。

バスは、世界中の何百万人もの人々に都市および都市周辺の運輸サービスを提供しており、ますます多くの輸送機関が代替燃料バスを検討している。従来のディーゼル駆動バスの代替技術には、CNG、LNG、合成燃料、およびバイオ燃料（バイオディーゼル、再生可能ディーゼル、ジメチルエーテルなど）駆動バス、ディーゼルハイブリッド電気バス、バッテリー電気バス、架線電気バス、水素燃料電池バスが含まれる。鉄道は、陸上ベースの旅客移動の脱炭素化をサポートできる代替交通手段である。電気鉄道システムは、長距離輸送だけでなく、都市サービス（ライトレールおよび地下鉄システム）も提供できる。実際、世界の多くの都市にはすでに大規模な地下鉄システムがあり、中国、日本、ヨーロッパなどの地域には頑強な都市間高速鉄道ネットワークがある。都市間鉄道輸送は電気で駆動され得るが、一部の地域では、化石燃料が依然として長距離鉄道旅客輸送に広く使用されている。バッテリー電気長距離鉄道は、これらの地域の将来のオプションになる可能性がある。

図 10.6 は、バスと旅客鉄道のさまざまなパワートレインと燃料技術からのライフサイクル GHG 排出量を示している。各パネルのデータは、多くの関連する科学研究から得られたものである (IEA 2019e; Tong et al. 2015a; Dimoula et al. 2016; de Bortoli et al. 2017; Meynerts et al. 2018; Cai et al. 2015; de Bortoli and Christoforou 2020; Hill et al. 2020; Liu et al. 2020a; Valente et al. 2021, 2017)。バーの幅は、報告された車両の効率、サイズ、または駆動サイクルの変動性によって主に左右される利用可能な推定値の変動を表している。一部のバーが重なっているが、この図は結果間の相関関係を完全に捉えていない場合がある。たとえば、積極的な運転サイクルに関連する低効率は、複数の技術の排出範囲の上限を押し上げる可能性がある。したがって、重複は、比較可能な旅行でどの車両タイプの排出量が少ないかについての不確実性を必ずしも示唆するものではない。さらに、報告されたライフサイクル排出量には、インフラストラクチャーの建設と維持管理に関連する具体化された GHG 排出量は含まれていない。これらの具体化された排出量は、他の輸送モードよりも鉄道のライフサイクル排出量において大きな割合を占める可能性がある (Chester and Horvath 2012; Chester et al. 2013)。ある研究では、旅客キロあたり 10~25 グラムの CO₂ の値が報告されている (国際鉄道連合 2016) が、鉄道からの具体化された排出量はケーススタディ間で大きく異なることが知られている (Olugbenga et al. 2019)。これらの警告は、このセクションの他の図にも当てはまる。

図 10.6 は、低炭素電力または低炭素水素を動力源とする BEV および FCV バスと旅客鉄道が、ディーゼル動力のバスまたはディーゼル動力の旅客鉄道と比較して、GHG 排出量を削減できることを強調している。しかし、当然のことながら、発電と水素生産が化石燃料に依存している場合、これらの技術による排出削減効果はごくわずかとなる。CNG および LNG を動力源とするバスは、ディーゼルを動力源とするバスと比較して、いくらかの削減をもたらす可能性がある。しかし、これらの削減は、運輸セクターの大幅な脱炭素化に貢献するには不十分であり、すでに利用可能で商業化されている低炭素またはゼロ炭素オプションへの転換を遅らせる可能性がある。バイオディーゼルおよび再生可能なディーゼル燃料（上流の排出量が少なく、土地利用の変化が誘発されるリスクが低いソースからの）は、これらの燃料が既存の車両インフラストラクチャーで使用できることが多いため、バスや旅客鉄道の重要な短期的な削減を提供する可能性がある。また、以下および後のセクションで説明するように、長距離トラックや鉄道、船舶、航空にも使用できる。

平均乗車人員が高い場合、バスと鉄道の両方の輸送手段は、排出量が最も少ない自家用車のオプションと比較しても、1km あたりの GHG を大幅に削減する可能性がある。平均乗車人員が 20% であっても、バスと鉄道は乗用車に比べて排出量を削減できる可能性があり、BEV と低炭素電力（すべての技術で排出量が最も少ないオプション）の 3 つのモードを比較すると特に顕著である。平均乗車人員の低い化石燃料を動力源とするバスと、平均乗車人員の高い低炭素乗用車を比較した場合にのみ、この結論が逆転する。したがって、公共交通システム、特に前述の低炭素燃料を燃料とするバスや旅客鉄道に基づいたシステムの使用は、運輸セクターの脱炭素化への取り組みを支援する。これらの公共交通システムの使用は、アーバンデザインと消費者の好み（セクション 10.2 および第 5 章と第 8 章で説明）に依存し、さらに時間、コスト、および行動の選択に依存する。

図 10.7 は、GHG 排出削減の可能性が最も高い公共交通技術の LCC のパラメトリック分析の結果を示している。図 10.5 と同様に、車両効率の範囲は LCA 推定値（80%の占有率）からのものと同じである。車両、燃料、および維持管理費は、文献における範囲を表している（Eudy and Post 2018b; IEA 2019e; Argonne National Laboratory 2020; BNEF 2020; Eudy and Post 2020; Hydrogen Council 2020; IEA 2020b,c; IRENA 2020; Johnson et al. 2020; Burnham et al. 2021; IEA 2021c,d; U.S. Energy Information Administration 2021）。割引率は該当する場合は 3% である。この章の付録 10.2 には、これらの見積もりの詳細が記載されている。ICEV のパネルは、あらゆる形態、石油由来、合成炭化水素由来、またはバイオ燃料由来のいずれの形態でも、ディーゼルを動力源とするバスや旅客鉄道を表すことができる。参考までに、2015 年から 2020 年までの世界平均自動車用ディーゼル価格は 1 ドル/L 前後で変動し、2019 年の世界平均産業用電力価格は約 100 ドル/MWh であった（IEA 2021d）。13 ドル/kg を超える小売水素価格が観

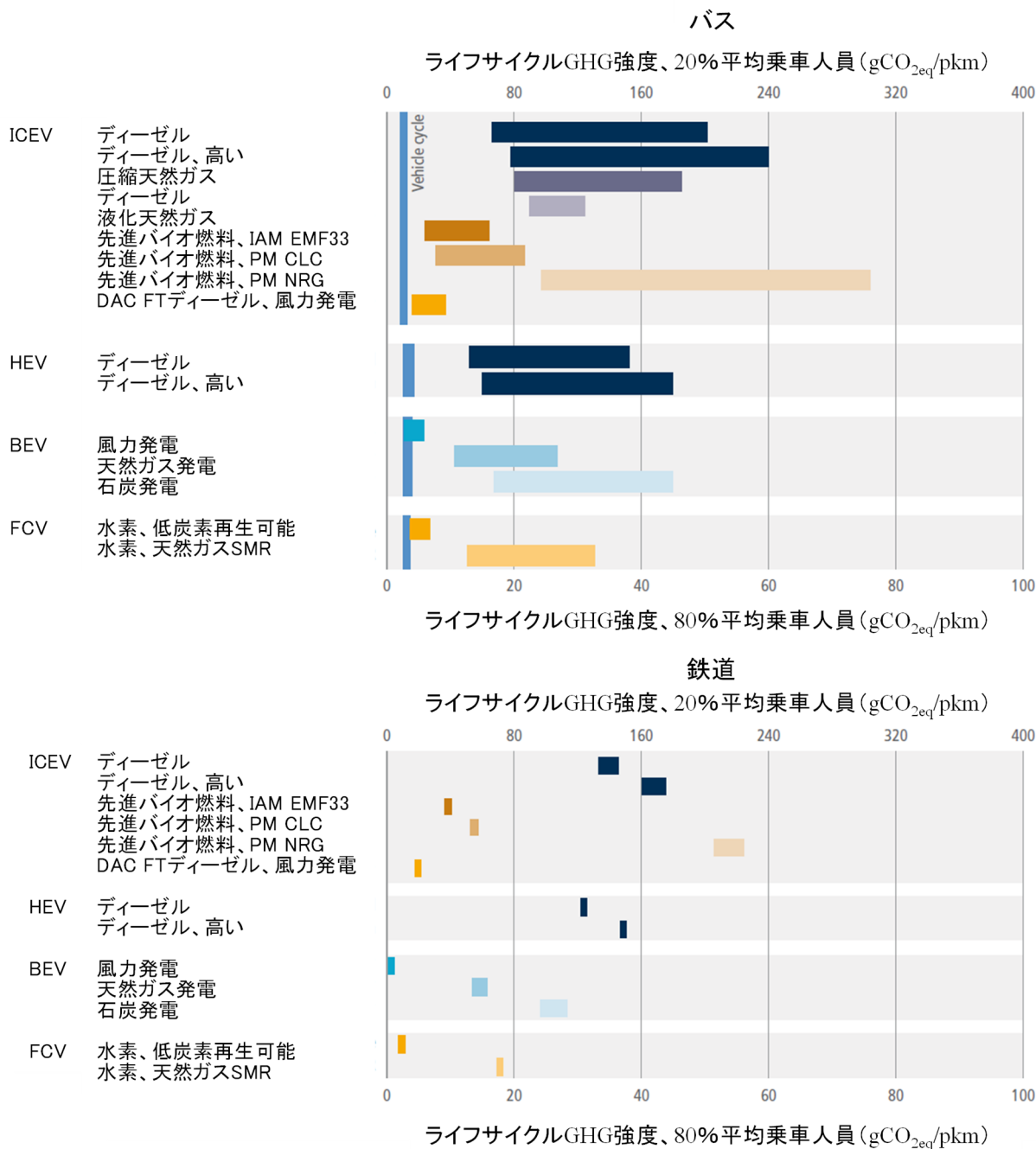


図 10.6 バスおよび鉄道技術のライフサイクル GHG 強度

各バーは、各燃料/パワートレインの組み合わせについて報告された1 kmあたりの最小および最大エネルギー使用量によって制約されたライフサイクル推定値の範囲を表す。範囲は、車両特性と運用効率の違いによって決まる。上流での排出量が大きく変動するエネルギー源については、低、中、および/または高の代表値が別々の行に示されている。主要な x 軸は、80%の平均乗車人員を想定して、ライフサイクル GHG 排出量 (gCO_{2eq}/pkm) を示す。2 番目の x 軸は 20%の平均乗車人員を想定している。図の値は、ソースデータに埋め込まれた 100 年 GWP 値に依存しており、WGI により更新された 100 年 GWP 値とは若干異なる場合がある。バスの場合、メインのバーは完全なライフサイクルを示し、垂直のバーは車両サイクルで細分化している。「ディーゼル、高い」は、オイルサンドからのディーゼルの排出係数を参照している。先進バイオ燃料、つまり高度なバイオ燃料とは、第 2 世代のバイオ燃料の使用と、それぞれの変換および栽培に関する排出係数を指す。「IAM EMF33」は、統合評価モデルの EMF33 シナリオからのシミュレーション結果から導き出された先進バイオ燃料の排出係数を指す。「PM」は部分モデルを指し、「CLC」は土地被覆が一定で、「NRG」は自然再成長を伴う。「DAC FT ディーゼル、風力発電」とは、風力発電を使用する CO₂ 直接空気回収プロセスを介して生産されるフィッシャー・トロプシュディーゼルを指す。「水素、低炭素再生可能エネルギー」とは、低炭素電力を用いた電気分解により生成される燃料を指す。「水素、天然ガス SMR」は、天然ガスの水蒸気メタン改質によって生成される燃料を指す。ライフサイクル排出量は石油ディーゼル ICEV よりもかなり高いと推定されるため、「天然ガスからの高排出 DAC FT-Diesel」を備えた ICEV の結果はここには含まれていない。

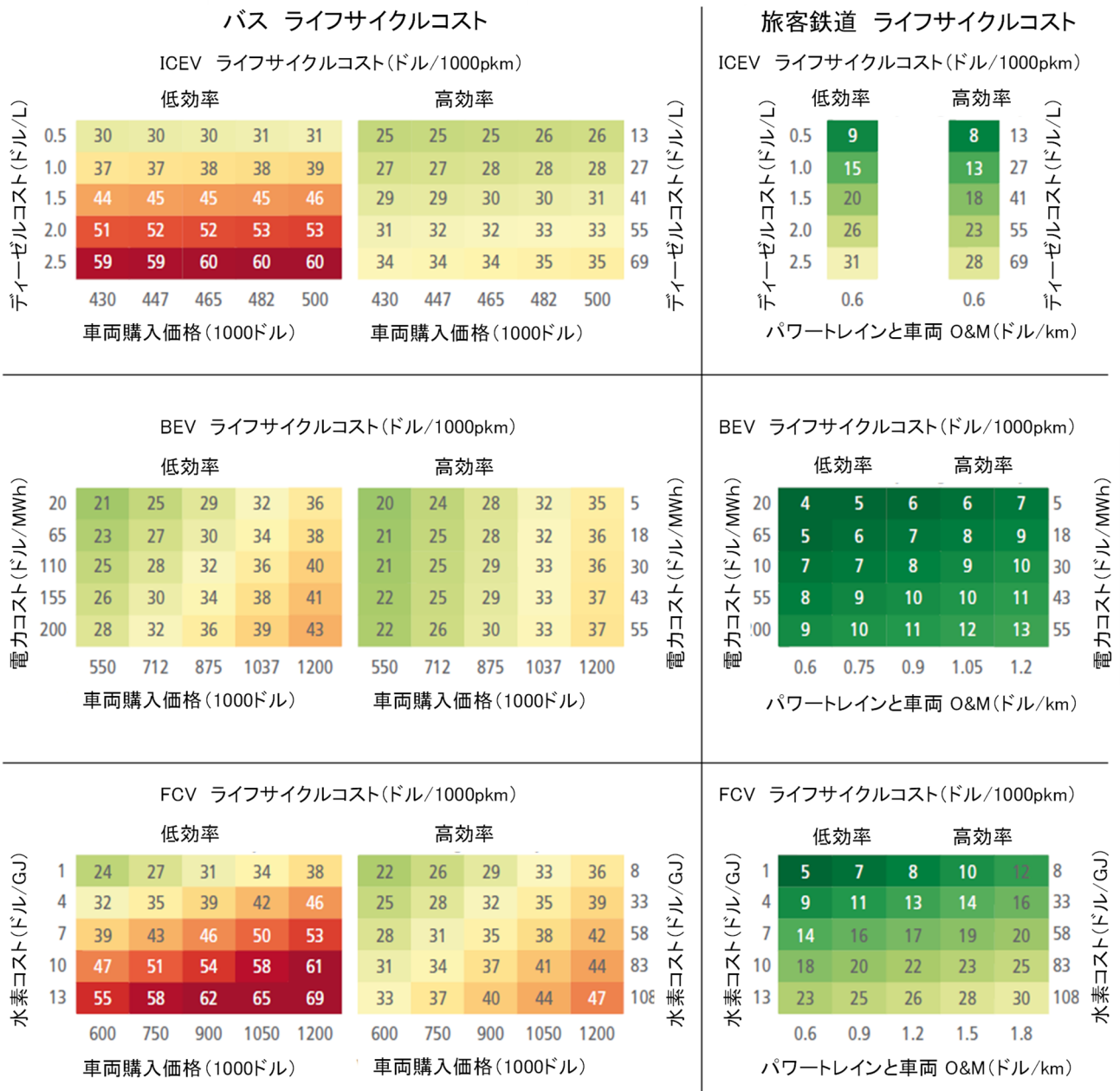


図 10.7 内燃エンジン車 ICEV、BEV、および FCV バスと旅客鉄道の LCC

各車両タイプの効率の範囲は、図 10.6 の効率の範囲(平均乗車人員 80%)と一致している。ICEV の結果は、石油、合成炭化水素、バイオ燃料など、これらすべての燃料で運行する車両の効率の範囲は類似しているため、あらゆる形態のディーゼルで運行される ICE バスと旅客鉄道のライフサイクルコストを評価するために使用できる。第 2 の y 軸は、相互比較を容易にするためにドル/GJ で正規化されたさまざまなエネルギーキャリアのコストを表している。

察されている (Eudy and Post 2018a; Argonne National Laboratory 2020; Burnham et al. 2021) が、電気分解から生産された水素の現在の生産コストの見積もりははるかに低くなっており (IRENA (2020)、および第 6 章で報告されているように)、約 5~7 ドル/kg であり、将来の予測は 1 ドル/kg まで下がっている (IRENA (2020); BNEF (2020); Hydrogen Council (2020)、

および第 6 章で報告されているように)。

ほとんどのパラメーターの組み合わせで、鉄道が最も費用対効果の高い選択肢であり、次にバスが続く。どちらも乗用車よりも桁違いに安価となる。pkm あたりのコストは、平均乗車人員の仮定に大きく影響されることに注意が必要である。平均乗車人員が低い場合（例：バスが 20%未満、鉄道が 10%未満）、公共交通コストは乗用車の LCC に近づく。ディーゼル鉄道とバスの場合、コスト範囲は燃料費によって左右されるが、バッテリーと燃料電池スタックに関連する高コスト（ただし、大幅な改善も見込まれる）のため、電気または水素モードの場合、車両コストが重要となる。ICEV 技術の現状は、安価な車両とディーゼルの低燃料コスト（各パネルの左上）によって最もよく表されているが、これらのコストは、排出/燃費規制の強化と原油価格の上昇により、将来的に上昇する可能性がある。逆に、代替燃料の現在の状況は、高い資本コストと中程度から高い燃料費（各パネルの右側、中から下の行）によってより適切に表されるが、技術コストは経験と R&D が増加するにつれて低下すると予想されている。したがって、電気鉄道はすでにディーゼル鉄道と競争力があり、電気バスは低効率のケースでディーゼルバスと競争力があるが、現在のディーゼルコスト、高効率ルートに基づく最新のディーゼルバスと競争するには、バッテリーコストの改善が依然として必要である。同様に、水素自動車はディーゼル車や電気自動車と比較して費用対効果の高いものになるには、車両コストと燃料コストの両方を改善する必要がある。ディーゼルのコスト範囲の上限（ICEV パネルの下の列）、2030 年から 2050 年のバッテリーコスト、燃料電池コスト、水素コスト予測（BEV と FCV パネルの左上）においては、バッテリーと水素の両方の車両は経済的に魅力的となる。

旅客輸送の場合と同様に、貨物輸送からの GHG 排出量を削減できる代替燃料への関心が高まっている。天然ガスペースの燃料（CNG、LNG など）はその一例であるが、これらはディーゼルと比較して GHG 排出量の大幅な削減にはつながらない可能性がある。大気質への影響を緩和する手段として、天然ガス車が議論されてきたが（Khan et al. 2015; Pan et al. 2020; Cai et al. 2017）、これらの影響はこのレビューの焦点ではない。中型および大型トラックの脱炭素化には、バッテリー電気トラックでの低炭素電力の使用、燃料電池トラックでの低炭素水素またはアンモニア、または ICE トラックで使用されるバイオベースの燃料（上流の排出量が少なく、誘導される土地利用の変化のリスクの小さいソース）が必要となる。

貨物鉄道は、物流の内陸移動の主要な手段でもある。鉄道はトラックよりも（tkm あたり）エネルギー効率が高いため、鉄道システムの使用を拡大すると（特に物流の需要が急激に増加する開発途上国で）、炭素削減の機会が得られる可能性がある。ディーゼルベースの機関車は依然として貨物鉄道で使用される主要な推進力であるが、低炭素推進技術への関心が高まっている。ヨーロッパの多くの国々では、架線を使用してすでに貨物鉄道に電力が供給され

ている。鉄道用のその他の低炭素技術には、高度な貯蔵技術、バイオ燃料、合成燃料、アンモニア、または水素が含まれる場合がある。

図 10.8 は、陸上輸送技術（大型および中型トラック、鉄道）からのライフサイクル GHG 排出量のレビューを示している。図内の各パネルは、左側のラベルで示されているように、さまざまな技術や燃料の種類によって輸送された貨物の tkm あたりの GHG 排出量のデータを表している。各パネルのデータは、多くの関連する科学的根拠に基づいている (Merchan et al. 2020; Frattini et al. 2016; Zhao et al. 2016; CE Delft 2017; Isaac and Fulton 2017; Song et al. 2017; Cooper and Balcombe 2019; S. Mojtaba et al. 2019; Nahlik et al. 2016; Prussi et al. 2020; Hill et al. 2020; Liu et al. 2020a; Valente et al. 2021; Gray et al. 2021; Valente et al. al 2017; Tong et al. 2015a)。バスの結果と同様に、貨物の排出量を大幅に削減する技術には次のようなものがある。低炭素電気で充電された BEV、再生可能ベースの電解水素、またはアンモニアを動力とする FCV。アンモニアとフィッシャー・トロプシュのディーゼルは水素から生成されるため、排出量は水素源よりも高くなるが、水素と比較してロジスティクス上の利点も考慮する必要がある (セクション 10.3 で説明)。

トラックは燃料消費量の規模の経済を示し、大型トラックは一般に中型トラックよりも tkm あたりの排出量が少ない。トラックと鉄道のライフサイクル GHG 排出量を比較すると、内燃機関を使用する鉄道は、内燃機関を使用するトラックよりも炭素効率が高いことが明らかである。鉄道の排出量は平均的な代表的なペイロードについて報告されていることに注意が必要である。一方、トラックは利用可能なデータに基づいて 50% および 100% のペイロードで示されている。電気または水素を動力源とするトラックと鉄道との比較は、あまり明確ではない。特に、これらの値がインフラストラクチャーの建設による GHG を除外していることを考慮する必要がある。ある研究では、鉄道についてトンキロあたり 15g CO₂ の鉄道インフラの総排出量が報告されているが (International Union of Railways 2016)、鉄道からのそのような総排出量はケーススタディ間で大きく異なることが知られている (Olugbenga et al. 2019)。いずれにしても、低炭素電気または低炭素水素を使用するトラックと鉄道は、既存の技術よりも排出量が大幅に少なくなる。

トラックの場合、図 10.8 には、ペイロードに関する 2 つの異なる仮定を表す。2 つの x 軸が含まれており、トンキロあたりの排出量に大きく影響する。これらの結果は、たとえば Kaack et al. (2018) にも示されているように、排出量削減メカニズムとしてのトラック積載計画の重要性を強調している。いくつかの研究では、貨物輸送からの排出量を削減するための重要なメカニズムとして、車両効率の改善も指摘されている (Taptich et al. 2016; Kaack et al. 2018)。しかし、2030 年以降のこのような効率を利用したディーゼル車の予測は有望なもの、低炭素源を動力源とする車両よりも依然として排出量のはるかに高くなっている。

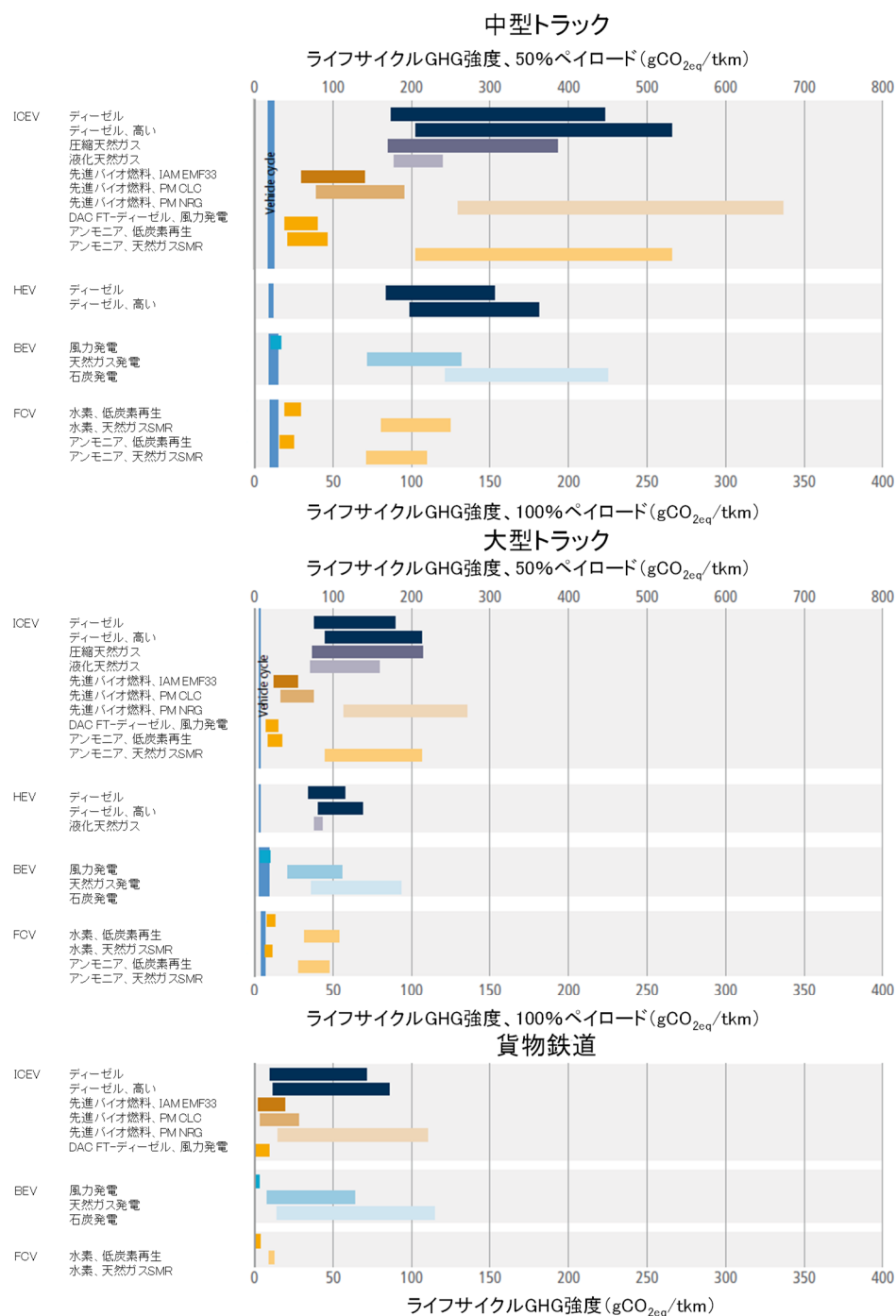


図 10.8 陸上輸送技術と燃料タイプのライフサイクル GHG 強度

各バーは、各燃料/パワートレインの組み合わせについて報告された tkm あたりの最小および最大エネルギー使用量によって制約されたライフサイクル推定値の範囲を表す。範囲は、車両特性と運用効率の違いによって決まる。上流での排出量が大きく変動するエネルギー源については、低、中、および/または高の代表値が別の行に表示されている。トラックの場合、主要な x 軸はライフサイクル GHG 排出量を gCO_{2eq}/tkm で示し、ペイロードを 100% と仮定している。2 番目の x 軸は 50% のペイロードを想定している。図の値は、ソースデータに埋め込まれた 100 年 GWP 値に依存しており、WGI により更新された 100 年 GWP 値とは若干異なる場合がある。貨物鉄道の場合、値は平均ペイロードを表す。トラックの場合、メインバーは完全なライフサイクルを示し、垂直バーは車両サイクルで細分化している。「ディーゼル、高い」は、オイルサンドからのディーゼルの排出係数を参照している。先進バイオ燃料、つまり高度なバイオ燃料とは、第 2 世代のバイオ燃料の使用と、それぞれの変換および栽培に関する排出係数を指す。「IAM EMF33」は、統合評価モデルの EMF33 シナリオからのシミュレーション結果から導き出された先進バイオ燃料の排出係数を指す。「PM」は部分モデルを指し、「CLC」は土地被覆が一定で、「NRG」は自然再成長を伴う。「DAC FT ディーゼル、風力発電」とは、風力発電を使用する CO₂ 直接空気回収プロセスを介して生産されるフィッシャー・トロブシュディーゼルを指す。「アンモニア/水素、低炭素再生可能エネルギー」とは、低炭素電力を使用した電気分解によって生成される燃料を指す。「アンモニア/水素、天然ガス SMR」は、天然ガスの水蒸気メタン改質によって生成される燃料を指す。

図 10.9 は、大幅な GHG 削減の可能性が最も高いトラックと貨物鉄道技術の LCC のパラメトリック分析の結果を示している。図 10.8 と同様に、車両効率の範囲は LCA 推定値（トラックの 80%ペイロード、鉄道の参照元の研究で報告された実効ペイロード）からのものと同じである。車両、燃料、維持管理費は、文献(Moultak et al. 2017; Eudy and Post 2018b; IEA 2019e; Argonne National Laboratory 2020; BNEF 2020; IRENA 2020; Burnham et al. 2021; IEA 2021c) の範囲を表し、割引率は該当する場合は 3%としている（詳細は付録 10.2 を参照）。ICEV のパネルは、石油由来、合成炭化水素由来、またはバイオ燃料由来のいずれであっても、あらゆる形態のディーゼルを動力源とするトラックや貨物列車を表すことができる。現在の世界の

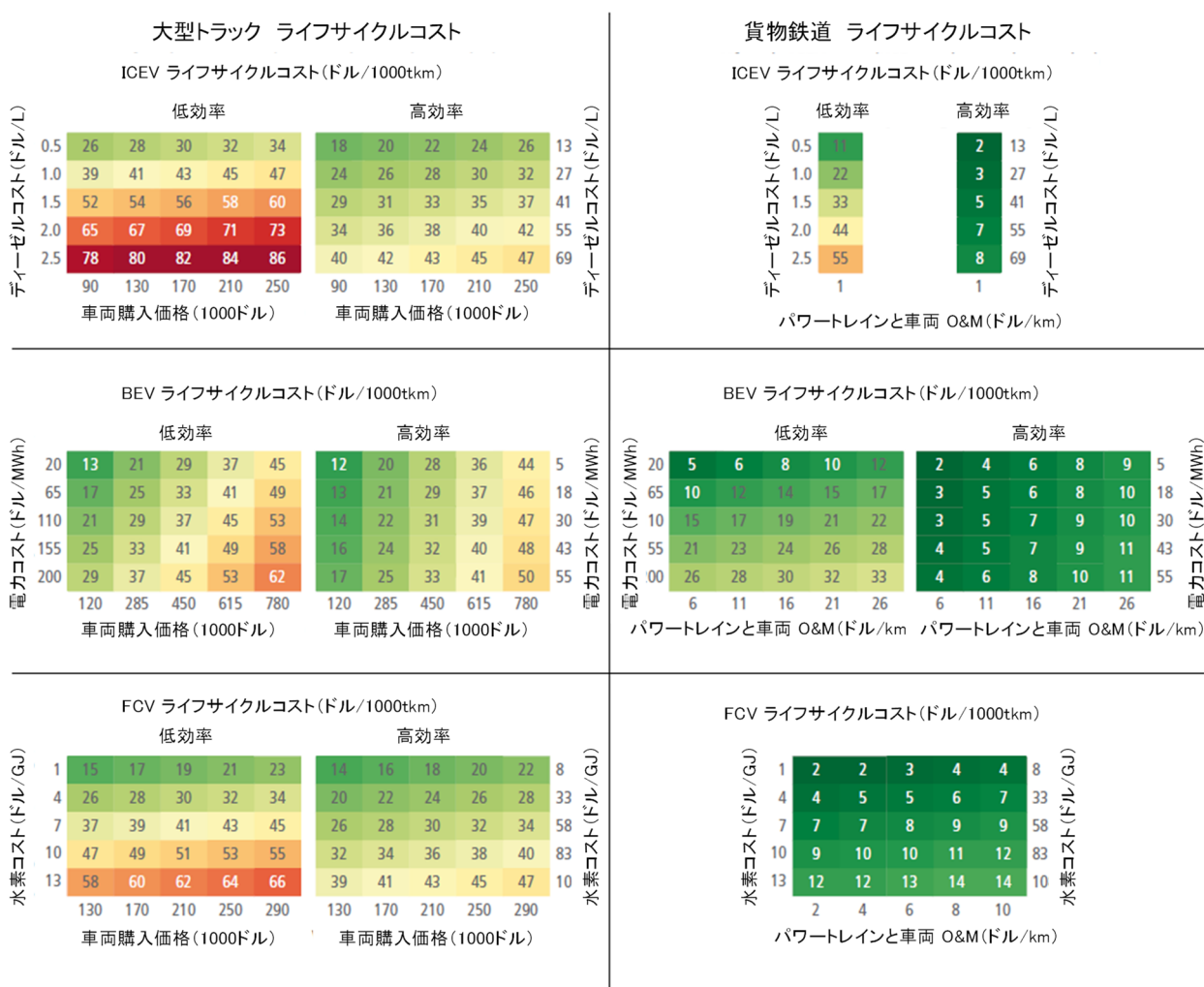


図 10.9 大型トラックと貨物鉄道の ICEV、BEV、HFCV の LCC

各車両タイプの効率の範囲は、図 10.8 の効率の範囲と一致している。ICEV の結果は、石油、合成炭化水素、バイオ燃料など、これらすべての燃料で運行する車両の効率の範囲は類似しているため、あらゆる形態のディーゼルで運行される ICE トラックと貨物鉄道のライフサイクルコストを評価するために使用できる。第 2 の y 軸は、相互比較を容易にするためにドル/GJ で正規化されたさまざまなエネルギーキャリアのコストを表している。

燃料費の詳細については、図 10.7 の前の説明を参照できる。ほとんどのパラメーターの組み合わせでは、鉄道の方が費用対効果の高いオプションであるが、トラックの高効率のケース（燃料効率の高い車両、好ましい駆動サイクル、および高いペイロードを表す）は、鉄道の低効率のケース（より高い燃料消費量、より低いペイロードのシステムを表す）よりも費用対効果が高くなる可能性がある。BEV トラックの場合、コストの範囲は車両の購入価格によって左右される。これは、大型のバッテリーが必要であり、現在の高コストと予想される将来のコスト削減の間の幅が広いことに関連している。他のすべてのトラックおよび鉄道技術では、燃料費の範囲がより大きな役割を果たす。公共交通技術と同様に、貨物 ICEV 技術の現状は、安価な車両とディーゼルの低燃料費（各パネルの左上）によって最もよく表されており、代替燃料の現在の状態は、高い資本コストと中程度から高い燃料費によってよりよく表されている（各パネルの右側、中央から下の列）。ただ、ICEV の LCC は将来的に増加し、代替燃料車の LCC は減少すると予想される。電気と水素の貨物鉄道は、潜在的にすでにディーゼル鉄道（特に電気架線（IEA 2019e））と競争力があるが、データの入手可能性が低く（特に水素の効率範囲について）、報告されているディーゼル鉄道の効率の範囲が広い（低い容量の稼働率を含む可能性が高い）ため、これは困難な比較となる。現在、代替燃料トラックはディーゼルトラックよりも高価であるが、将来的にディーゼルコストが上昇するか、水素コストまたは BEV の資本コスト（特にバッテリー）がそれぞれ減少することで、いずれの代替燃料技術も経済的に魅力的なものになるであろう。これらの結果は、既存の文献で報告されている元々の結果とほぼ一致しており、BEV トラックがすでに競争力を持っているかどうかについてはあいまいさがある。また、水素はまだ競争力がないが、将来的には競争力を持つ可能性があるというより一貫した結果となっている（Zhao et al 2016; White and Sintov 2017; Moultak et al. 2017; Sen et al. 2017; Zhou et al. 2017; Mareev et al. 2018; Yang et al. 2018a; El Hannach et al. 2019; S. Mojtaba et al. 2019; Tanco et al. 2019; Burke and Sinha 2020; Jones et al. 2020）。貨物鉄道の LCC に関する利用可能なデータは限られているが、IEA の少なくとも 1 つの研究（2019g）は、電気架線鉄道はディーゼル鉄道と同様のコストがかかる可能性が高いことを示唆しており、前向きなコスト削減シナリオでは、バッテリー式電気鉄道は依然として高価であり、水素鉄道は低コストになる可能性があるとしている。

まとめると、このセクションの結果は、陸上輸送からの GHG 排出量を削減するための費用対効果の高いさまざまな機会を示唆している。乗用車から公共交通輸送（バスまたは鉄道）へのモードの移行は、LCC を削減しながら GHG 排出量を削減することができる。同様に、車両の利用率（つまり、乗用車の平均乗車人員または貨物車両のペイロード）を高めると、同時に排出量と pkm あたり、または tkm あたりのコストがそれぞれ減少する。特定のモード内で、代替燃料源も最小限の追加コストで排出量を削減する大きな可能性を示している。

LDV の場合、BEV はすでに従来の ICEV と近い LCC で、排出削減を提供できる。公共交通と貨物の場合、低炭素 BEV および FCV オプションの短期的な削減コストは、対応するディーゼルと比較して、ほぼ 0 ドル/tCO_{2eq} (BEV バスと BEV 旅客鉄道など) から数百またはせいぜい数千ドル/tCO_{2eq} の範囲である (たとえば、現在の車両および燃料コストでの大型 BEV および FCV トラックの場合)。しかし、貯蔵、燃料電池、および低炭素水素燃料のコストが将来的に低下すると予測されているため、BEV と FCV の両方の技術は、2030 年以降、すべての陸上輸送モードで負の削減コストで GHG 削減を同様に提供できる。費用と可能性についての詳細については、第 12 章において参照できる。

5. 航空の脱炭素化 (省略)

6. 船舶の脱炭素化 (省略)

7. 統合モデル、セクター別モデル、地域モデルのシナリオ

このセクションでは、運輸システムの脱炭素化経路を生成するためのさまざまなアプローチを評価するために、オプションを体系的に組み合わせた次の 3 種類のモデルの結果をレビューする。(1) 統合評価モデル (IAM)、(2) グローバル運輸エネルギーモデル (GTEM)、(3) 国家運輸エネルギーモデル (NTEMs) (Yeh et al. 2017; Edelenbosch et al. 2017)。3 つのモデルタイプに共通する仮定には、社会経済的発展、技術開発、資源の利用可能性、政策、および行動の変化の軌跡が含まれる。これらのモデルの根底にある主な違いは、技術的および行動的な詳細さとセクター別および地域的な範囲である。より一般的に言えば、セクターと地域の観点から範囲が狭いほど、空間的、技術的、および行動の詳細がより深くなる。これらのモデルからのシナリオの大規模なセットは、第 3 章が主導し、第 10 章などによってサポートされた共同作業で収集された。100 を超えるモデルから得られた結果は、レポート全体の付録 III に記載されている方法論を使用して、この章で分析されている。

運輸による GHG 排出量は、旅行需要、旅行モード、輸送技術、燃料の GHG 強度、およびエネルギー効率の関数である。これらの原動力は、運輸システムの脱炭素化を進めることが

できるレバーのグループの中心に置くことができる。したがって、レバーには、旅行活動の削減、低炭素モードの使用の増加、モーダルエネルギー強度と燃料炭素含有量の削減が含まれる。このセクションでは、IAM と G/NTEM の 3 つのモデルタイプの結果を検討することにより、運輸セクターの脱炭素化に対する各手段の貢献を検討する。

IAM は、燃料の入手可能性やコストなど、運輸システムと内生的に相互作用する他のセクターからの要因を統合する。IAM は、緩和コストを最小限に抑えて、経済のすべてのセクターで長期間（通常は 2100 年まで）にわたって温度目標を達成する。IAM は通常、より詳細な技術/燃料と他のセクターに関連する内生性により、エネルギーと炭素強度の変化に対する緩和オプションを捉える。運輸セクターの非常に大規模な電動化を伴うシナリオでは、燃料の生産、貯蔵、および利用における他のセクターとの結合がより重要となる。G/NTEMs および関連する地域運輸セクター別モデルは、IAM よりも輸送需要、技術、行動、および政策の詳細を持っているが、他のセクターとの相互作用を外生的に扱い、電気の燃料価格や炭素強度などの重要な相互作用を見逃している可能性がある。国家モデルは、運輸とエネルギーに関連する国家政策を詳細に表現しており、場合によってはより高い空間解像度を備えている。IAM と比較して、G/NTEM は通常、空間、文化、および行動の詳細をより明確に表すことができ、活動およびモードの次元に沿って緩和オプションを探索するためのより詳細な表現が可能となっている。附属書 III の付録は、これらのタイプのモデルに関する詳細を提供している。海運と航空のシナリオは、それぞれセクション 10.5 と 10.6 でより詳細に扱われている。

このセクションでは、次のシナリオの分類を適用する（詳細については、第 3 章の表 3.1 を参照のこと）：

- C1 21 世紀中に 50% 超の確率で温暖化 1.5°C に制約（オーバーシュート無し/制限）
- C2 21 世紀中に 50% 超の確率で温暖化 1.5°C に戻る（高いオーバーシュートの後）
- C3 21 世紀を通じて 67% 超の確率で温暖化 2°C に制約
- C4 21 世紀を通じて 50% 超の確率で温暖化 2°C に制約
- C5 21 世紀を通じて 50% 超の確率で温暖化 2.5°C に制約
- C6 21 世紀を通じて 50% 超の確率で温暖化 3°C に制約
- C7 21 世紀を通じて 50% 超の確率で温暖化 4°C に制約
- C8 21 世紀中に 50% 以上の確率で温暖化 4°C を超える

シナリオの大部分は 2020 年より前に開発された。そのようなシナリオからの結果は、（非 COVID）2020 年モデル化としてインデックス化され、2020Mod と参照される。

2018 年、運輸は 8.5GtCO_{2eq} を排出し、年間 2% の排出量増加が 20 年続いた後、1990 年のレベルからほぼ倍増した（セクション 10.1 を参照）。将来の軌道を評価するために、図 10.17 は、IAM（色のバー）と選択された GTEM（灰色のバー）による運輸セクターからの直接 CO₂

排出量の推定値の概要を示している。IAM からの結果は、さまざまな温度目標ごとのカテゴリー別にグループ化される。GTEM は、参照および政策のカテゴリー別にグループ化される。これは、運輸セクターだけでは固定された地球温暖化の目標を達成できないためである。G/NTEMs の政策シナリオは、たとえば、「フェアシェアアクション」の原則に基づく仮定を含む、幅広い「非参照」シナリオをカバーしている。これらのシナリオでは、運輸による排出量は、2°C の温暖化レベルに合わせた全体的な排出量の軌跡と一致する排出量削減に達する。これらのシナリオでは、燃費基準の引き上げや電気自動車の大規模な展開など、既存の交通政策の強化も検討される場合がある。ほとんどの場合、これらの政策シナリオは、IAM によって検討された温度目標と必ずしも一致しているとは限らない。

図 10.17 に示されている IAM および GTEM モデルのシミュレーション結果によると、世界の運輸による排出量は、21 世紀を通じて 50% 超の確率で温暖化 4°C に制約する C7 シナリオと 21 世紀中に 50% 以上の確率で温暖化 4°C を超える C8 シナリオでは、2030 年までに 2~47% (5~95 パーセントイル)、2050 年までに -6~130% まで増加する可能性がある。

人口と GDP の成長、および 1 人あたりの旅行サービス需要の増加や GDP あたりの貨物活動の増加などの二次的影響が、これらのシナリオでの排出量の増加を促進する (セクション 10.7.3 を参照)。輸送効率 (pkm あたり、および tkm あたりのエネルギー使用量) は、過去の傾向に沿って改善し続けると予想されるが (セクション 10.7.4 を参照)、炭素強度がほぼ一定であるため、C7 と C8 シナリオの下では、運輸による総排出量は増加する (セクション 10.7.5)。これらのシナリオでは、排出量の大幅な増加 (2050 年までに中間値で 150% を超える) は、アジアと太平洋、中東、アフリカで生じる。2050 年の先進国では、C7 シナリオでは 2020 年レベルよりも中間値で 25% 減少、C8 シナリオでは 15% 増加する。

気温目標を達成するには、世界の運輸による排出量を 2050 年までに C3、C4、C5 シナリオグループ (オレンジ色のバー) では 2020Mod レベルより 17% (5~95 パーセントイル値で +67~-23%)、C1、C2 シナリオグループ (緑のバー) では 47% (5~95 パーセントイル値で +14~-80%) 削減する必要がある。

ただし、運輸関連の排出削減は、地域間で均一に発生しない可能性がある。たとえば、先進国、東ヨーロッパ、西中央アジアからの運輸による排出量は、すべての C1、C2 シナリオで 2020 年のレベルから 2050 年までに減少するが、これらのシナリオの一部では、アフリカ、アジアと太平洋、ラテンアメリカとカリブ海、中東では増加する可能性がある。特に、インドとアフリカの運輸による排出量の中央値は、C1、C2 シナリオで 2050 年までに増加する可能性があり、一方、アジアと太平洋、ラテンアメリカとカリブ海、および中東の 95 パーセントイル排出量は、2020 年よりも 2050 年の方が高くなる可能性がある。

図 10.17 で説明されている GTEM からの参照シナリオの排出経路は、2050 年の C7、C8 シ

ナリオグループと同様の範囲を持っている。政策シナリオは、世界の C6、C7 シナリオとほぼ一致している。結果は、ここでレビューされた GTEMs によって検討された政策シナリオの大部分が、IAM によって検討された C3~C6 シナリオの範囲内にあることを示唆している (Gota et al. 2016; Yeh et al. 2017; IEA 2017b; Fisch-Romito and Guivarch 2019)。運輸セクターの NDC にはさまざまな対策が含まれている。車両とトラックの効率改善、公共交通機関サービスの改善、バイオ燃料、化石燃料またはバイオベースの天然ガス、電動化などの代替燃料と技術による燃料の脱炭素化、ITS、および車両規制 (Gota et al. 2016) など。技術転換には長いタイムラグがあるため、これらの対策によって 2030 年の排出量が大幅に変わることはないと予想される。しかし、それらは 2050 年の排出量により大きな影響を与える可能性がある。

AR6 シナリオデータベースに含まれていないいくつかの GTEM は、野心的な CO₂ 緩和シナリオを検討している。例えば、シナリオのメタ分析は、2°C の温暖化レベルと一致する世界の運輸による排出量が、2020 年に約 7~8GtCO₂ でピークに達し、2050 年までに (Gota et al. 2019) 2°C レベルで 2.5~9.2Gt に減少し、平均で 5.4Gt になることを示唆している。比較のために、IEA の持続可能な開発シナリオ (SDS) では、世界の運輸による排出量が 2050 年までに 3.3Gt (または 2020 年レベルから 55% 削減) に減少することを示唆している (IEA 2021f)。最新の IEA Net Zero by 2050 レポートでは、運輸による排出量を 2050 年までにほぼゼロにすることを提案している (IEA 2021e)。後者は、ここで分析した AR6 データベースのシナリオ C1 グループの四分位範囲よりも低くなっている。

低炭素シナリオは、運輸セクターをよく表した国家モデル (ラテンアメリカ、ブラジル、カナダ、中国、フランス、ドイツ、インドネシア、インド、イタリア、日本、メキシコ、南アフリカ、英国、米国) からも利用できる。低炭素シナリオは、例えば、2°C/1.5°C シナリオ (Dhar et al. 2018) などの地球規模の気候安定化レベル、または、ネットゼロ排出経路など (Bataille et al. 2020; IEA 2021e)、NDC で考慮されているものよりも厳しい CO₂ 目標に関して定義される。これらの研究は、一般に分析にボトムアップモデル (付録 III を参照) を使用しているが、場合によっては、各国のチームによってグローバルモデル (中国とインドの GCAM など) を使用して実施されている。各国の調査によると、運輸による CO₂ 排出量は、検討したすべての先進国の低炭素シナリオで大幅に減少する可能性があることが示されており (Bataille et al. 2015; Kainuma et al. 2015; Viridis et al. 2015; Pye et al. 2015; Criqui et al. 2015; Kemfert et al.; Williams et al. 2015; Zhang et al. 2016a)、2010 年から 2050 年の削減量は 65% から 95% までさまざまである。しかし、開発途上国に関するレビュー (Altieri et al. 2015; Buirra and Tovilla 2015; Teng et al. 2015; Rovere et al. 2015; Siagian et al. 2015; Shukla et al. 2015; Di Sbroiavacca et al. 2014; Dhar et al. 2018) では、排出量は 2050 年に 2010 年のレベルと比較して 35% から 83% の範囲で増加する可能性がある。開発途上国の 1 人あたりの運輸による CO₂ 排出量は、先進国

(1人あたり 1.76 から 5.95tCO₂ の範囲) と比較して、2010 年にははるかに低かった (1人あたり 0.15 から 1.39tCO₂ の範囲)。しかし、各国のモデル化の取り組みの結果は、2050 年までに、先進国の 1 人あたりの CO₂ 排出量 (1 人あたり 0.19~1.04tCO₂ の範囲) が開発途上国 (1 人あたり 0.21~1.7tCO₂ の範囲) よりもはるかに低くなる可能性があることを示唆している。

運輸シナリオの文献の平均的な結果は、運輸セクターがセクター間の平均よりも緩やかな排出削減軌道をたどる可能性があるが、依然として 2°C 目標と一致していることを示唆している。たとえば、1.5°C 軌跡シナリオ (C1、C2) のほとんどは 2060 年までにゼロエミッションを達成するが、運輸セクターの排出量は 2020 年 Mod レベルで 2100 年に 20% 程度 (10~90 パーセンタイル値で 4~65%) を占める。この発見は、運輸が脱炭素化の最も困難な分野の 1 つであることを示唆する既往文献の見方と一致している (Davis et al 2018)。ただし、2050 年の結果にはかなりの広がりがある。気温上昇レベルはすべてのセクターからの地球規模の排出量に関連しているため、IAM のモデリング結果は、短中期的にはコスト削減の選択肢が他のセクターにある可能性があることを示唆する傾向がある。一方、G/NTEM と比較して、一部の IAM では、特に航空と海運に関する技術、行動の変化、政策ツールなど、利用可能な緩和オプションが限られている可能性がある。したがって、モデルは、全体的な望ましい温暖化レベルを達成する上で、他のセクターおよび/または他の場所での負の排出に依存している。この潜在的な欠点は、IAM からセクター別の結果を解釈する際に留意する必要がある。

旅客および貨物需要の伸びは、人口の増加と GDP に大きく依存する。2015 年の運輸活動は、年間約 35~50 兆 pkm、または 1 人あたり 5,000~7,000pkm と推定されており、研究によって大きなばらつきがある (IEA 2017b; ITF 2019)。使用されている乗用車の数は、2005 年から 2015 年の間に世界で 45% 増加し、アジアと中東 (119%)、アフリカ (79%)、南アメリカと中央アメリカで最も大きな成長があり、ヨーロッパと北米の成長は最低であった (それぞれ 21% と 4%) (IOMVM 2021)。一方、2015 年の人口 1,000 人あたりの乗用車保有率は、アジアと中東 (141 台)、アフリカ (42 台)、中南米 (176 台) といった開発途上国で低く、ヨーロッパと北アメリカは比較的高くなっている (それぞれ 581 と 670) (IOMVM 2021)。商用車 (貨物および旅客) の成長率は、2005 年から 2015 年の間で 41% であり、先進国と開発途上国全体でより均等な成長率であった (IOMVM 2021)。

図 10.18 は、IAM の AR6 データベースに基づいた貨物と旅客の運輸活動の軌跡を示している。IAM の需要予測によると、世界の旅客および貨物の運輸需要は、2020 年のモデル化された年と比較して、いずれの温度目標でも増加する可能性がある。2.5°C 未満の温暖化レベル (C1~C5) に沿ったすべてのシナリオの IAM の運輸需要中央値は、モデル化された 2020 レベルと比較して、世界の旅客需要が 2030 年に 1.14~1.3 倍、2050 年に 1.5~1.8 倍に増加する可能

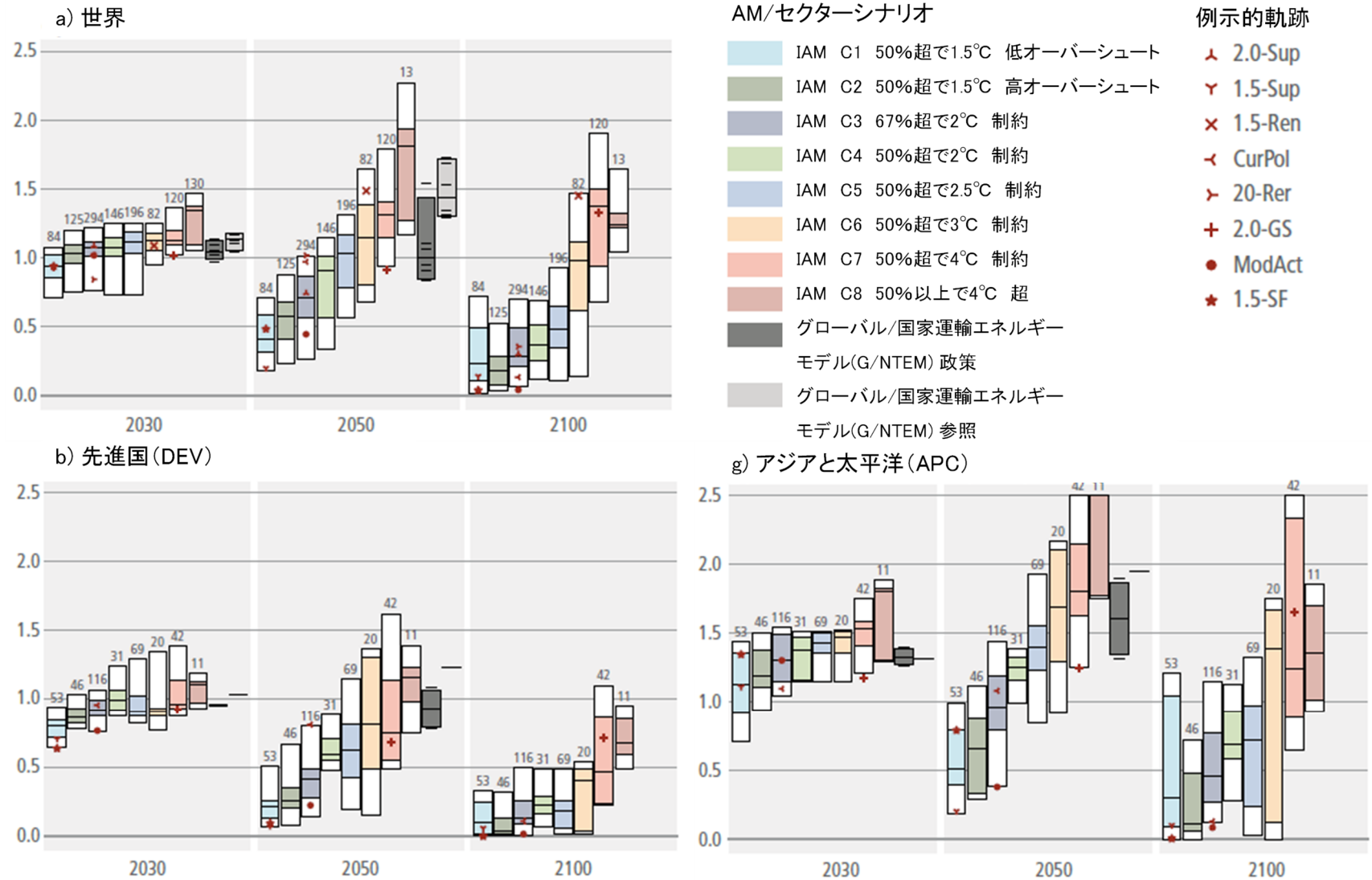


図 10.17 2020 年モデルとしてインデックス化された R6 地域と世界全体の 2030 年、2050 年、2100 年の直接 CO₂ 排出量

IAM の結果は、温度目標ごとにグループ化されている。セクター別研究は、参照および政策のカテゴリー別にグループ化されている。プロットは、5/95 パーセンタイル、25/75 パーセンタイル、および中央値を示している。バーの上の数字は、シナリオの数を示す。AR6 シナリオデータベースからのデータによる。

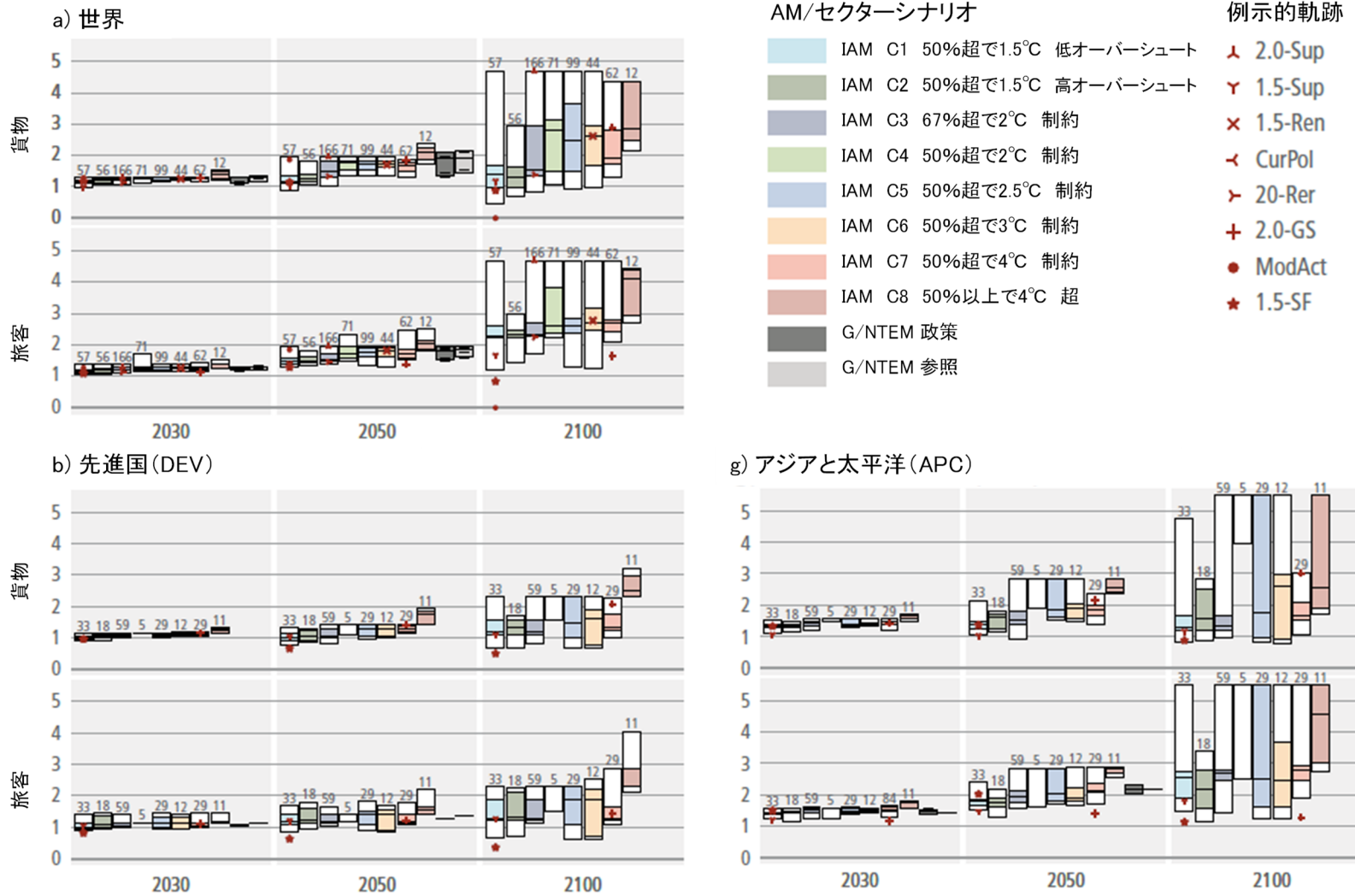


図 10.18 R6 地域と世界全体の 2020 年モデルによる 2030 年、2050 年、2100 年の旅客（下のパネル）と貨物（上のパネル）の運輸活動軌跡
 プロットは、5/95 パーセンタイル、25/75 パーセンタイル、および中央値を示している。バーの上の数字は、シナリオの数を示す。AR6 シナリオデータベースからのデータ。

性があることを示唆している(C1~C5のシナリオ全体で5~95パーセントイルの場合は1.27~2.33)。北米やヨーロッパを含む先進地域では、2050年の旅客需要の伸びが、すべてのシナリオで開発途上国に比べて低くなる。2030年には、2.5°C以下のシナリオ(C5)で、世界の旅客需要の伸びのほとんどがアフリカ(AF)(2020年比で44%の成長)、およびアジアと太平洋(APC)(2020年比で中国で57%の成長、インドで59%の成長)で発生する。これらの地域は、1人あたりの需要が低いレベルから始まる。たとえば、インドでは需要が84%増加する可能性がある。しかし、2010年の1人あたりの需要は、1人あたり年間7,000km未満であった(Dhar and Shukla 2015)。同様に、中国では、2010年の1人あたり年間8,000kmの需要から始まり、需要は52%増加する可能性がある(Pan et al. 2018)。これらの地域の1人あたりの旅客需要は2010年の先進国よりも低かったが、より緩やかな気候シナリオでは先進国の1人あたりの旅客需要に収束している(C6~C7)。より厳しい気温安定化シナリオ(<2.5および1.5シナリオ、C1~C5)では、温暖化レベルがより高いシナリオ(C7~C8)と比較して、旅客需要の増加率は緩やかになる。温暖化レベルが1.5°C未満のシナリオ(C1~C2)における世界の旅客需要の中央値は、C8と比較して2050年に27%低くなる。利用可能なデータが限られているため、世界的に一貫した貨物データを取得することは困難である。2015年の世界の貨物需要は108兆tkmと推定され、そのほとんどは海上輸送であった(ITF 2019)。貨物サービス需要の成長率は、地域によって大きく異なる。1975年から2015年の間に、インドの道路貨物活動は9倍以上、中国では30倍以上、米国では2.5倍以上に増加した(Mulholland et al. 2018)。世界の貨物需要は増加し続けているが、2020年のモデル値と比較して、2050年のすべてのシナリオの旅客需要よりも、その成長速度は鈍化している。世界の貨物需要の中央値は、温暖化レベルが2.5°Cを下回るすべてのシナリオで、2030年に1.17~1.28倍、2050年に1.18~1.7倍に増加する可能性がある(C1~C5)。旅客輸送と同様に、C5シナリオではアフリカ(AF)およびアジア地域で大きな割合の成長が見られることを示唆している(モデル化された2020年と比較して、2030年にはインドで59%の成長、中国で50%の成長)。世界の貨物需要の中央値は、厳しい気温安定化シナリオでは成長が遅くなり、4°Cを超える温暖化レベルのシナリオ(C8)と比較して、2050年には1.5°C未満のシナリオ(C1~C2)と2.5°C未満のシナリオ(C3~C4)でそれぞれ40%、22%減少する。

GTEMは、将来の運輸需要、特に貨物セクターの幅広い範囲を示している。これらの結果は、ベースラインまたは政策シナリオよりもモデルへの依存度が高いことを示している。ITF Transport Outlook(ITF 2019)によると、BAUシナリオでは、世界の旅客輸送と貨物輸送の需要は2050年までに2倍以上になる可能性がある。Mulholland et al. (2018)の参照シナリオでは、貨物セクターは2015年から2050年にかけて2.4倍に成長する可能性があり、その成長の大部分は開発途上国に起因することを示唆している。IEAは、気候政策のない参照シナリオと

排出量を 2°C未満に制限する気候シナリオで、2014 年の 51 兆 pkm から 2060 年の 110 兆 pkm へという旅客輸送のより緩やかな増加を提示している。ただし、2060 年の陸上貨物輸送の需要は、参照シナリオ（130 兆 tkm）と比較して、気候シナリオ（116 兆 tkm）ではわずかに低くなる（IEA 2017b）。しかし、ITF は、BAU シナリオと比較して、野心的な脱炭素化政策は 2050 年に世界の旅客輸送需要を 13~20%削減する（ITF 2019, 2021）としている。シェアモビリティによる車両移動の削減は、BAU シナリオと比較して、都市の旅客輸送からの排出量を 30%削減する可能性がある。また、非常に低い炭素排出経路を達成するには、2030 年と 2050 年に旅客と貨物の両方で平均 25%を超える削減が必要になる可能性があることを示唆するものもある（Fisch-Romito and Guivarch 2019）。大規模な CO₂除去が行われない中で、2°Cをはるかに下回るシナリオにおいて、重要なセクター（航空、海運、道路貨物）で大幅な需要削減の必要性を強調する世界的な研究はほとんどない（van Vuuren et al. 2018; Grant et al. 2021; Grant et al. 2021; Sharmina et al. 2021）。

IAM モデルは人口、GDP、およびサービスの需要の間の過去の関係に依存して将来の需要を推定するため、多くのモデルでは、気温目標全体で旅客輸送の需要の違いはわずかである。この仮定は、モデル化の取り組みに制約をもたらす。緩和の取り組みは、運輸需要の低下につながる可能性がある輸送コストを増加させる可能性があるためである（Zhang et al. 2018）。ほとんどのモデルでは、需要は通常、外生的な入力である。これらのモデルは、多くの場合、排出量を削減するために、最も炭素集約的なモード（旅客では乗用車と航空、貨物ではトラック輸送）から炭素集約度の低いモード（公共交通機関と旅客鉄道、貨物鉄道）への活動のモーダルシフトを想定している。

従来、IAM モデルとボトムアップのセクター別モデルまたは都市ベースのモデルとの間には、異なるスケール（部分的小および一時的）と焦点（気候緩和 vs 都市汚染、安全性（Creutzig 2016））が原因で断絶がある。シェアおよびオンデマンドのモビリティソリューションの急増は、旅行需要のリバウンド効果につながっており（Chen and Kockelman 2016; Coulombel et al. 2019）、これはモデリングの新たな課題である。いくつかの IAM 研究は最近、文化と低炭素のライフスタイル（Creutzig et al. 2018; van Vuuren et al. 2018）、都市開発（Creutzig et al. 2015a）、平均乗車人員の増加（Grubler et al. 2018）、ロジスティクスの改善と貨物セクターのサプライチェーンの合理化（Mulholland et al. 2018）、そして、破壊的な低炭素イノベーションの組み合わせを通じて運輸需要を削減し、非常に低炭素のシナリオを達成するための需要側の対策を模索し始めている。それらは、「消費者に斬新な価値提案を示し、大規模に採用されれば GHG 排出量を削減できる」技術およびビジネスモデルのイノベーションとして説明されている（Wilson et al. 2019）。国家モデルの文献では、国家レベルで想定される政策、プロジェクト、プログラムを中心に構築された物語（Shukla et al. 2015; Dhar and Shukla 2015）と、旅行需要の

価格弾力性を通じて、従来の開発シナリオと持続可能な開発シナリオの間で需要が区別されている (Dhar et al. 2018)。しかし、エネルギー関連の意思決定と行動の根底にあるメカニズム (Brosch et al. 2016)、および持続可能な行動の動機 (Steg et al. 2015) をより深く理解することは、これらの解決策を現実に実現するために非常に必要である。

全体として、旅客と貨物の活動は C7 (>3.0°C) シナリオの下で急速に成長し続ける可能性が高いが、ほとんどの成長は開発途上国で起こるのであろう。ほとんどのモデルは、人口と GDP の成長に従って運輸需要を外生的に扱っているが、より厳しい緩和シナリオで発生すると予想される価格の変化、政策的インセンティブ、行動の変化、革新的なモビリティソリューションの対応の表現は限られている。第 5 章では、社会的および行動的介入から生じる可能性のある需要変化の機会についてのより詳細な議論が示されている。

過去 100 年間、世界的により高速な交通手段のシェアは、旅客需要の増加に伴い、一般的に増加してきた (Schafer and Victor 2000; Schäfer 2017)。短距離から中距離の移動では、特に OECD 諸国では、さまざまな要因、例えば、多くの状況での移動時間の短縮、GDP の成長に伴う消費者の時間価値の増加と利便性増大、道路対公共交通インフラの提供といったより広範な交通政策 (Mattioli et al. 2020) により、自家用車が公共交通機関に取って代わった (Liao et al. 2020)。

長距離交通では、レジャーやビジネスのための航空による旅行が増加している (Lee et al. 2021)。これらの傾向がすべての国や都市に当てはまるわけではなく、現在、多くの国や都市で自動車よりも高速な鉄道輸送が利用されている (Newman et al. 2015a)。たとえば、公共交通機関の需要は、フランス、デンマーク、フィンランドで 1990 年から 2016 年にかけて増加した (eurostat 2019)。一般に、都市化率が高い、または増加している、小さくて密度の高い国や都市は公共交通機関のシェアを増やすことに大きな成功を収める傾向がある。ただし、公共交通機関の民営化 (Bayliss and Mattioli 2018) や都市形態 (ITF 2021) などの他の要因も影響する。さまざまな交通手段が旅客と貨物のサービスを提供し、セクターの排出量の軌跡に影響を与える。

世界的に、IAM の気候シナリオ、および GTEM の政策および参照シナリオは、2100 年までほとんどの手段における貨物および旅客需要の増加を示している (Yeh et al. 2017; Zhang et al. 2018; Mulholland et al. 2018; Khalili et al. 2019)。道路旅客輸送は、シナリオ全体で 2100 年まで同様の増加 (約 3 倍) を示す。道路旅客輸送の場合、温暖化を 1.5°C に制限するシナリオ (C1~C2) (中央値は 2020 年のモデル化されたレベルの 2.4 倍) は、より高い温暖化レベル (C3~C8) のシナリオよりも上昇が小さい (2020 年のモデル化されたレベルから 2.7~2.8 倍)。小型車 (LDV) による道路旅客輸送も同様のパターンであり、モデル化された 2020 年レベルからの増加の中央値は、C3~C5 (3.1 倍)、または C6~C7 (3.2 倍) よりも C1~C2 (3

倍)の方が小さい。航空による旅客輸送は、C1~2 および C3~C5 の5つのシナリオでは、モデル化された2020年のレベルと比較して中央値で2.2倍の増加を示すが、C6~C8では6.2倍の増加を示す。IAMによると、2100年までの中央値の低下を示す唯一の旅客交通手段は、C3~C5 および C6~C8 シナリオの徒歩/自転車である。ただし、C1~C2 シナリオでは、2020年のモデル化されたレベルと比較して、徒歩/自転車利用は1.4倍に増加する。IAMソリューションの5パーセンタイル（バンドの下端）では、旅客交通のバスと徒歩/自転車の両方が大幅に減少している。

貨物の場合、道路を介した輸送で最大の成長が見られる (Mulholland et al. 2018)。2100年までに、GTEMは、モデル化された2020年のレベルと比較して、中型・大型トラック輸送レベルの中央値が約4倍になることを示唆しているが、IAMは2100年までに道路による貨物輸送が2~4倍になることを示唆している。特に、IAMソリューションの95パーセンタイル値では、温暖化レベルに関係なく、モデル化された2020年のレベルと比較して、2100年までに道路輸送が最大4.7倍増加すると見られる。他の貨物輸送モード - 航空、国際海運、国内水運 (navigation)、鉄道 - は、道路輸送よりも成長が小さい。温暖化を1.5°Cに制限するシナリオ (C1~C2) では、国内水運と鉄道はほとんど変化せず、国際海運は2100年までに約2倍になる。より高い温暖化のシナリオ (つまり C1~C2 から C6~8 への移行) では、一般に、鉄道による貨物が多くなり、国際海運による貨物が少なくなる。

セクション10.2で述べたように、手段変更に関連して一般的に検討されている緩和オプションには、公共交通機関への移行、モビリティのシェア、および都市形態の改善、旅客移動に取って代わるリモート会議などさまざまな手段による需要の削減 (Creutzig et al. 2018; Grubler et al. 2018; Wilson et al. 2019)、貨物セクターでは、物流効率の改善、グリーンロジスティクス、貨物部門の合理化されたサプライチェーンが含まれる (Mulholland et al. 2018)。NDCは、特に中所得国および低所得国において、汚染、渋滞、および都市開発に関する共同便益をもたらすバスの改善やモビリティの向上などのオプションを優先することがよくある (Fulton et al. 2017)。逆に、高所得国では、そのほとんどにおいて自家用車の保有が飽和し定着しており、通常、電動化や燃費基準などの技術オプションに重点を置いている (Gota et al. 2016)。利用可能なIAMおよび地域モデルは、モーダルシフト戦略を表現する機能が限られている。その結果、モーダルシフトだけでは気候シナリオを区別することができない。この機能の欠如はモデルの限界であるが、そのような介入がモデルが示唆する需要の増加を完全に打ち消す可能性は低い。したがって、小型車 (LDV) や航空による輸送、道路による貨物輸送、およびその他の手段は、今世紀末まで増加し続ける可能性が高い。その結果、次のサブセクションで説明するように、燃料と炭素効率、および燃料エネルギーと技術は、気候シナリオを区別する上でおそらく重要な役割を果たすこととなる。

このセクションでは、IAM および GTEM に基づき AR6 データベースで利用可能なデータから、車両のエネルギー効率と燃料炭素強度の軌跡が、さまざまな温度目標と互換性があるかどうかを調べる。小型車 (LDV) は、旅客のエネルギー強度において大きなシェアを占めている。Yeh et al.(2017) は、モデル全体で小型車 (LDV) セグメントは 2020 年に 2.5~2.75MJ/vkm であることを報告しており、これは 2017 年の小型車 (LDV) の世界平均燃料消費量に関する IEA 推定値 2.5MJ/vkm に非常に近い (IEA 2020d)。参考までに、これらの数値は、平均乗車人員 1.5 に対して 1.6~1.7MJ/pkm に相当する。AR6 データベースの結果は、燃料炭素強度における削減を条件としている。2°C未満の温暖化レベルに沿ったシナリオでは、旅客輸送のエネルギー強度が 2030 年に 10%~23% (C1 ~C4 の四分位範囲) に低下することを示唆している。2050 年には、1.5°Cシナリオ (C1~C2) と 2°Cシナリオ (C3~C4) のグループ全体の中央値は、それぞれ 51%と 45~46%のエネルギー原単位の削減を示唆している。これらの値は、2020 年から 2050 年までの年間平均エネルギー効率改善率においてそれぞれ 2.3~2.4%、および 2.0~2.1%に相当する。参考までに、IEA は 2005 年から 2016 年までの年間平均エネルギー効率改善率は 1.85%と報告している (IEA 2020d)。対照的に、GTEM の結果は、エネルギー効率の改善率が低いことを示唆しており、政策シナリオの中央値は 2050 年に 39%削減となり、年間エネルギー効率改善率では 1.6%近くに相当する。IAM シナリオは、今世紀末までに旅客輸送のエネルギー原単位を中央値で 57~61%削減することは、対応する燃料の脱炭素化を考慮すると、1.5°Cと 2°C (C1~C4) の両方の温暖化レベルと一致することを示唆している。

1.5°Cまたは 2°C目標の温暖化レベルに沿ったシナリオは、貨物エネルギー強度に関して異なる傾向を示している。オーバーシュートの量と貨物サービスの需要の違い、およびある程度、燃料炭素強度がこれらの違いに寄与している。1.5°Cの温暖化レベルに対応する 2 つのシナリオでは、2030 年と 2050 年の軌跡はまったく異なる。高いオーバーシュートのカテゴリー (C2) のシナリオ中央値では、今世紀前半のエネルギー強度の改善がより低い軌道をたどる。対照的に、制限されたオーバーシュートのシナリオ (C1) では、全手段でより着実に減少する軌道をたどる。IAM は、さまざまな温度目標に関連する必要なエネルギー強度の改善の明確な全体像を旅客ほど貨物に関しては提供しない。旅客と貨物の両方で使用される直接エネルギーの炭素強度に関しては、モデリングシナリオは 2030 年までに非常に緩やかな削減を示唆している。C1 シナリオの四分位範囲は、世界的な平均炭素強度の 5%から 10%の削減となる。1.5°Cまたは 2°Cの温暖化レベルに対応する他のシナリオ (C2~C4) では、四分位範囲は、運輸で使用される直接エネルギーの炭素強度の 1%から 6%の削減となる。2050 年のシナリオは、燃料の脱炭素化への依存度が、より厳しい気温目標によって増加することを示唆している。1.5°Cシナリオ (C1) では、運輸で使用されるエネルギーの世界的な炭素強度

は、2050年までに37%~60%（四分位範囲）減少し、平均で50%減少する。AR6データベースのIAMシナリオは、2100年までに運輸燃料の完全な脱炭素化を示唆していない。2°C以下の温暖化レベルに対応するC1~C4のシナリオ全体の四分位範囲は、2020Modレベルと比較して61%~91%削減となる。

旅客輸送の平均乗車人員の増加(Grubler et al. 2018)と、物流効率の改善または合理化されたサプライチェーン(Mulholland et al. 2018)による貨物配送の空走の削減、またはペイロードの増加(Gucwa and Schäfer 2013; McKinnon 2018)は、エネルギー効率を効果的に改善し、運輸におけるGHG排出量を削減する重要な機会を提示できる。しかし、消費者行動の最近の傾向は、先進国における小型車(LDV)の平均乗車人員の低下を示しており(Schäfer and Yeh 2020)、SUVへの嗜好の高まりが乗用車市場での排出削減を困難としている(IEA 2019d)。これらの傾向は、需要側のオプションに対する強力な動機となっている。

シナリオに関する文献に基づく、2050年までに旅客交通のエネルギー強度の中央値を51%削減し、それに対応して炭素強度の中央値を38%~50%削減することは、最終的に1.5°C未満の温暖化レベルを世紀末にもたらず移行軌道に沿ったものになるであろう。比較のために、LCAの文献では、現在のICEから現在のBEVに切り替えると、中型車のエネルギー強度が45%をはるかに超えて最大70%削減されることが示唆されている(セクション10.4を参照)。対応して、ディーゼルまたはガソリンから低炭素電力または低炭素水素に切り替えると、シナリオの中央値を超える炭素強度の削減が得られる。したがって、LCAの文献は、低温暖化レベルのために2050年までに必要となる可能性のあるエネルギーと炭素強度の中央値に匹敵し、それを超える技術が今日既に存在することを示唆している。

運輸セクターからの炭素排出量を削減するための2つのメカニズムは、現在の車両技術の燃料切り替えと低炭素車両技術への移行である。図10.21は、燃料別の運輸最終エネルギーシェアに関するIAMとGTEMからのデータを組み合わせたものである。これらのシェアは、道路、航空、鉄道、海運、および旅客交通と貨物交通のあらゆる手段にわたる燃料の使用を示している。技術の変換効率は異なるため、燃料別の最終エネルギーにおけるこれらのシェアは、燃料別のサービス(pkmまたはtkm)のシェアおよび燃料別の車両ストックのシェアとは必然的に異なる。たとえば、現在のバッテリー式小型車(LDV)パワートレインは、同等のICEパワートレインよりもエネルギー効率が約3倍高い(セクション10.3および付録10.1の表10.9を参照)。したがって、電力の0.25と石油の0.75の燃料シェアは、それぞれ0.5と0.5の車両ストックのシェアに対応することとなる。一般に、EVが道路車両ストックのより大きなシェアを構成し、道路旅客キロのより大きなシェアを提供することをモデルが予測するかもしれないが、運輸最終エネルギーのシェア(図10.21を参照)は、効率の低い(ICEなど)車両で使用される燃料量の最終エネルギーシェアよりも低いままである可能性がある。

したがって、図 10.21 に示されている燃料別運輸最終エネルギーの割合は、注意して解釈する必要がある。

サービスごとの運輸最終エネルギーの燃料割合 世界(割合)

エネルギーキャリア



例示的軌跡

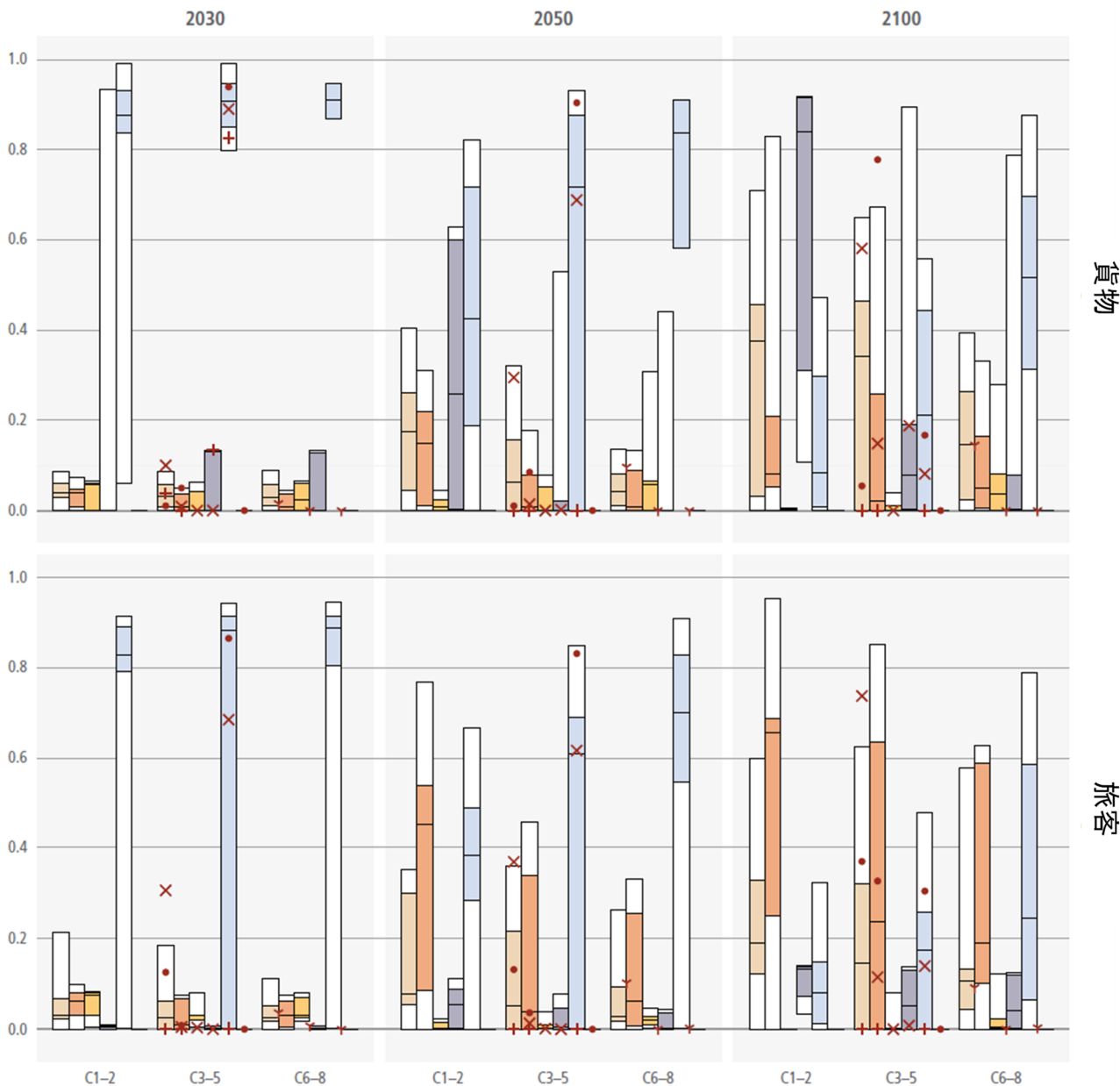
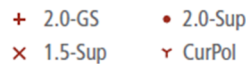


図 10.21 2030年、2050年、2100年の運輸セクターにおける貨物車

および乗用車の最終燃料エネルギーの世界シェア

プロットは、10/90 パーセンタイル、25/75 パーセンタイル、および中央値を示す。AR6 シナリオデータベースのデータ。

IAM と GTEM のシナリオは、炭素排出量を削減してより低いレベルの温暖化を達成するには、燃料と技術の転換が重要であることを示している (Edelenbosch et al. 2017; IEA 2017b)。運輸セクター全体では、先進燃料車への技術シフトが、モデル予測における脱炭素化の主要な原動力となっている。この傾向は気候シナリオ全体で一貫しており、温暖化のレベルが徐々に低くなるシナリオでは、石油の最終エネルギーのシェアが大幅に減少する。効率の改善、先進燃料車のより高い効率、貨物セクターの遅い改善のため、石油の最終エネルギーシェアは 2030 年以降に急速に減少する。2050 年までに、電力、バイオ燃料、代替ガス燃料の最終エネルギーのシェアが増加し、電力のシェアは、バイオ燃料とガスのシェア（中央値 5%~10%）と比較して、一般的に約 2 倍（あらゆる温暖化レベルで中央値 10%~30%）となる。IAM は、2050 年までに水素の最終エネルギーのシェアが低いままであることを示唆しているが、2100 年までの予測の中央値には、運輸最終エネルギーにおいて 5%~10%の水素が含まれている。

運輸の手段別または旅客/貨物別の最終エネルギーシェアを報告している IAM はほとんどないが、いくつかの関連研究は旅客 LDV と貨物の燃料シェア傾向に関する洞察を提供している。IEA は、LDV の完全電動化が 1.75°C 目標を達成するための最も有望な低炭素経路であること示唆している (IEA 2017b)。MIT の経済予測および政策分析 (EPPA) モデルは、世界の小型車 (LDV) ストックにおけるガソリン技術と EV 技術の将来の展開に焦点を当てている (Ghandi and Paltsev 2019)。これらの著者らは、世界の自動車ストックは 2015 年の 11 億台から 2050 年までに最大 18 億台に増加し、EV は 2015 年の約 100 万台から 2050 年には最大 5 億台に増加すると推定している。これらの変化は主にコスト予測（主にバッテリーのコスト削減）によって引き起こされる。同様に、国際クリーン交通評議会 (ICCT) は、小型車 (LDV) 分野での EV 技術の導入が気候変動に多大な恩恵をもたらす可能性があることを示唆している。彼らのシナリオでは、世界中で小型車 (LDV) の電動化がほぼ 100%に達し、2050 年には世界の GHG 排出量が 2010 年の小型車 (LDV) レベルの 0%から 50%の範囲に達することになる (Lutsey 2015)。Khalili et al. (2019) は、道路交通による排出をほぼゼロにする積極的な気候緩和シナリオの下で、2050 年までの運輸ストックを推定している。彼らは、旅客交通需要は 2050 年までに 3 倍になる可能性があるが、BEV (LDV の 80%)、そして程度は低いものの燃料電池自動車やプラグインハイブリッド電気自動車の普及によって排出目標を達成できる可能性があることを見出している。これらの推計に反して、米国エネルギー情報局 (EIA) は、小型車 (LDV) における電動化の導入程度が低いことを見出し、その代わりに OECD 諸国、さらには 2040 年までに非 OECD 諸国で天然ガス燃料の LDV が大々的に普及するとしている。これは、LDV 保有者の増加率を低下させ、代替燃料車への選好を高める「低液体」ケースである。多くの方法論的アプローチが採用されている地域技術導入モデルの包

括的なレビューとしては Jochem et al. (2018) がある。

貨物交通については、代替燃料への移行を効率改善によって補う必要があることが研究で示されている。IEA は、短期から中期的にはトラック、航空、海運の脱炭素化には効率改善が不可欠であることを示唆している。同時に、IEA は、長期的に貨物の脱炭素化を図るには燃料を先進的なバイオ燃料に切り替える必要があるとしている (IEA 2019d)。Mulholland et al. (2018) は、2 つのシナリオで道路貨物の脱炭素化の影響を調査している。COP21 の約束を遵守する国々に基づくシナリオと、地球の気温上昇を 1.75°C に制限する 2 つ目のより野心的な削減シナリオである。COP21 シナリオでは、ロジスティクスの改善、高効率技術、低炭素燃料の導入にも関わらず、活動の拡大により道路貨物のエネルギー需要は 2015 年と比較して 47% 増加し、貨物からの全体的な GHG 排出量は 2050 年に 55% (4.8 GtCO_{2eq}) 増加する。1.75°C シナリオでは、脱炭素化は主に代替燃料 (ハイブリッド電気トラックやフルバッテリー電気トラック) への切り替えを通じて起こり、2050 年には貨物からの GHG 排出量が 2015 年と比較して 60% 削減される。Khalili et al. (2019) ではまた、積極的な気候緩和シナリオの下では、大型車 (HDV) における代替燃料への大幅な移行が見出されている。2050 年には、バッテリー電力、水素燃料電池、プラグインハイブリッド電気自動車が大車 (HDV) の 50%、30%、15% を構成する。また、バスの 90% が 2050 年までに電動化することがわかっている。

このセクションでは、幅広い想定を前提とし、一連の政策目標と条件の下で、IAM および G/NTEM による将来の運輸シナリオに関する最新の詳細な評価を提供した。シナリオモデリングツールは、個々のオプションを集約し、システムの観点からそれらが緩和経路にどのように適合するかを理解するために必要となる。このシナリオは、2050 年までに運輸からの CO₂ 排出量を 43% (四分位範囲では 30~63%) 削減すれば、1.5°C の温暖化レベルに匹敵することを示唆している (C1-C2 グループ)。世界的なシナリオは、エネルギー供給セクター全体での排出削減が必要セクターの排出削減に先行することを示唆しているが (セクション 3.4.1 を参照)、シナリオの一部では、運輸セクターでのより厳格な排出削減が実現可能であることも示している。例えば、例示的な緩和経路 IMP-REN と IMP-LD は、世紀末に温暖化レベル 1.5°C (C1-C2) に至る途中で、温暖化によるオーバーシュートが低いかまったくなく状態で、2050 年までにそれぞれ 80% と 90% の排出削減が実現可能であることを示唆している。

さまざまなモデルのシナリオでは、特に開発途上国における貨物および旅客サービス需要の継続的な成長が予測されている。需要削減の可能性は明らかであるが、需要削減措置の詳細については、シナリオ文献ではあまり検討されていない。この制約にもかかわらず、IAM と GTEM は、エネルギーと燃料の炭素強度を削減する介入が緩和戦略を成功させるために重要である可能性が高いことを示唆している。

シナリオ文献によれば、運輸セクターにおける炭素削減に真剣に取り組むには、代替燃料の導入を検討する必要がある。IAM および GTEM の文献に記載されているシナリオでは、燃料の組み合わせによって脱炭素化を実現する。どのシナリオにおいても、電動化は重要な役割を果たし、バイオ燃料と水素によって補完される。一般的に、旅客輸送では電動化が重要な役割を果たす傾向があり、貨物輸送ではバイオ燃料と水素がより顕著となる。ボックス 10.4 の 3 つの例示的な緩和経路は、これらの技術を組み合わせ、オーバーシュートが低いかまったくなくない状態で 1.5°C の温暖化レベルに対応できるさまざまな方法を例示している。すべての代替燃料は上流に影響を与えるため、代替燃料への移行は、他の分野のクリーン技術への移行と並行して行われなければならない。他の分野を考慮しなければ、燃料転換はその緩和の可能性を最大限に発揮できないであろう。変革をもたらす緩和の可能性は電力セクターの脱炭素化に大きく依存しているため、これらの共同の取り組みは運輸の電動化にとって特に重要である。この点において、シナリオの文献はセクション 10.4 で検討した LCA 文献とよく一致している。

このセクションで検討したモデルはすべて、一般的に燃料、技術、コストを適切に表現していると考えられるが、多くの場合、船舶や航空よりも陸上輸送モードをより適切に表現している。これらのモデルには一部の領域で強みがあるが、行動的側面などの他の領域ではいくつかの制約がある。同様に、これらのモデルは、大型車両の燃料、AI、自律性、ビッグデータの画期的な進歩、さらには旅行に代わるデジタル通信の範囲など、予期せぬ技術革新を説明する能力にも限界がある（セクション 10.2 を参照）。このような種類の制約の結果、モデルは運輸セクターの脱炭素化のための完全に網羅的なオプションのセットを提供できていない。しかし、これらの制約にもかかわらず、このモデルは運輸セクターとその他のセクターとの相互作用を包含し、厳格な排出削減努力と両立できる解決策を見つけることができる。したがって、運輸技術の軌跡のソリューション空間はモデルで検討された範囲よりも広いいため、すべてのオプションを組み合わせるとどのように変革的な緩和目標をサポートできるかをさらによく理解する必要がある。

8. 実現化の条件（省略）

日交研シリーズ目録は、日交研ホームページ

http://www.nikkoken.or.jp/publication_A.html を参照してください

A-881 道路交通の電動化とスマートシティの構造に
関する研究

道路交通の電動化とスマートシティの構造に
関する研究プロジェクト

2023年11月 発行

公益社団法人日本交通政策研究会