

新たなモビリティサービスの CO₂ 排出構造に関する基礎的考察

森田 紘圭¹・加藤 博和²

¹正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒451-0045 名古屋市西区名駅 2-27-8)
E-mail: morita_hiroyoshi@ne-con.co.jp

²正会員 名古屋大学大学院教授 環境学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)
E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp (Corresponding Author)

世界全体が脱炭素社会への転換に向けて舵を切り始め、モビリティ分野においても新たな技術やサービスが次々と生まれている。しかし、新たなモビリティサービスの環境負荷を適切かつ包括的に評価する枠組みはいまだ整っていない。本研究では、開発や普及が進んでいる新たなモビリティサービスの動向を概観し、これらの二酸化炭素排出構造とその変動要因を既往研究から整理した。その結果、新たなモビリティサービスの二酸化炭素排出量を適切に評価、比較するためには、1)電力原単位の適切な設定、2)シェアリングサービスをはじめとした運行管理部門の排出増加、3)都市構造や交通行動の大幅な変革、4)他部門への波及効果の拡大を考慮することが必要不可欠であること、そのためには LCA (Life Cycle Assessment) による新たな評価の枠組み設定が必要であることが明らかとなった。

Key Words: *Mobility revolution, MaaS, CASE, Sharing economy, Life Cycle Assessment*

1. はじめに

2019年6月に英国が気候変動法改正において、長期目標を「2050年までに温室効果ガス(GHG)正味排出ゼロ」に改訂した¹⁾ことを皮切りに、世界各国で脱炭素社会構築に向けた流れが加速化している。EUは2020年3月に欧州気候法の提案において、2050年までに気候中立(climate-neutral)、すなわち英国と同様の目標を提案している。中国においても、2020年9月の国連総会において2060年にカーボンニュートラルを目指す²⁾と表明している³⁾ほか、米国においても2021年4月におけるバイデン米大統領主催の気候リーダーズ・サミットにおいて、改めて2050年までのGHG正味排出ゼロを宣言している⁴⁾。日本においても、2020年10月の第203回臨時国会の所信表明演説において、菅義偉内閣総理大臣(当時)が「2050年までに、GHGの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」⁵⁾ことを宣言しており、今後世界的にあらゆる分野において脱炭素社会への転換が求められる。

このような中、2017年時点において世界の二酸化炭素総排出量の23%(旅客と貨物を含む)を占めると推計されている⁶⁾運輸部門もまた、脱炭素化に向けて積極的な努力が求められる。その1つの動きとして、世界各国に

おいて2020年以降のガソリン車の新車販売の規制や禁止などの動きも進み始めている。

他方、運輸分野においては、電動車だけでなく、自動運転やシェアリングシステムなど様々な技術やサービスの開発や実証が加速化している。自動車業界においては2016年にダイムラーが発表した中長期戦略において、“Connected”、“Autonomous”、“Shared & Service”、“Electric”の頭文字をつなげたCASEという概念が発表されている⁷⁾。また、2014年ごろから北欧を中心として提案された新しい交通の概念、Mobility as a Service(MaaS)もまた、幅広い展開を見せている⁸⁾。これまでのように交通をモード(機関)としてとらえるのではなくサービスとしてとらえ、あらゆる交通手段を統合し、ワンストップで予約・決済・利用できるようにする概念として広く使用されている。このような概念に基づく技術革新やサービス開発は、運輸部門における様々な交通課題の解決、交通不便の解消やサービス向上はもとより、自動車産業の産業構造の転換、ライフスタイルの変革とともに、環境負荷の低減と持続可能性の回復が付記されている。また、これらを総称し“The Mobility Revolution”、つまりモビリティ革命と定義した Neckenmann⁹⁾は、副題に“Zero Emissions, Zero Accidents, Zero Ownership”と3つのゼロを冠し、その1つ目に“Zero Emission”を掲げている。

しかし、これらの新たなモビリティ技術やサービスそれぞれについて、適切な GHG 排出量の算定及び評価手法は現在のところ、確立していない。電動車両については、これまで欧州や米国において適応されてきた走行時排出量、すなわち Tank to Wheel での評価が、徐々に Well to Wheel や Life Cycle Assessment での評価に移行する可能性が生まれ始めており、それにより、電源構成が電動車の GHG 排出量に大きく影響すること、特に蓄電池を中心に生産時の環境負荷増大の可能性があることなどが共通の理解になり始めている¹⁰⁾。しかし、燃料源の調達変更による充電器などのインフラ整備の考慮、シェアリングサービスや MaaS などのサービス提供形態に対応した考え方はいまだ確立していない。

脱炭素社会の早期の実現のためには、モビリティ革命を機とした新たな技術やサービスの積極的な活用や普及が必要不可欠である。一方、これらの技術には新しいモビリティに対応した新たなインフラの整備、従来の交通モードでは発生しなかった分野での環境負荷の計上など、これまでの交通システムでは想定されなかった要因による GHG 排出量の変動も想定される。脱炭素社会への最

短シナリオを描くために最適な政策選択を行うにあたっては、それぞれの技術やサービスにおける GHG 排出量を、包括的かつ適確に評価することが必要である。そのためには、単独の製品製造プロセスを評価する LCA はもちろんのこと、システム全体やさらにその外部への影響を包括的かつ同じ境界条件で評価する、SyLCEL (System Life Cycle Environmental Load : システムのライフサイクル環境負荷) または ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load : 拡張ライフサイクル環境負荷) の視点も必要不可欠である¹¹⁾。

以上の背景を踏まえ、本研究では、モビリティ革命に総称される 2010 年代以降に出現してきた新たなモビリティ技術やサービスを対象として、これらが脱炭素を達成するための条件を明らかにする。具体的には、1) 新たなモビリティ技術・サービスの GHG 排出構造を既往研究の文献レビューから整理する。そのうえで、新たなモビリティ技術・サービスの環境性能をより適切に評価するための論点と、その排出責任や施策の可能性について、基礎的な考察を行う。

表-1 本稿が想定するモビリティ革命を構成する技術・サービスの概要

種別	技術・サービス	概要・特徴
1) モード	電動車両	電気自動車 (EV) に加え、ハイブリッド自動車 (HEV)、プラグインハイブリッド自動車 (PHEV)、水素燃料電池自動車 (FCV) を含む (本稿では従来規格の電動化を示す)。近年、欧州や中国で EV の新車販売台数に占める割合が加速的に増加している ⁹⁾ 。
	グリーン・スロー・モビリティ (GSM)	日本において、時速 20 km 未満で公道を走ることが可能な 4 人乗り以上の電動パブリックモビリティと定義されている。2018 年から全国各地で実証実験が行われ、観光用モビリティ、施設間移動などの事例がある ¹²⁾ 。無償運行が多いが、乗合・乗用事業としての営業運行や自家用有償旅客運送も出てきている。
	超小型モビリティ	日本において、自動車よりコンパクトで小回りが利き、環境性能に優れ、地域の手軽な移動の足となる 1 人～2 人乗り程度の車両を指す ¹³⁾ 。2013 年に公道走行を可能とする認定制度が創設され、公務や観光、日常利用、宅配等の業務利用が想定されている。
	マイクロモビリティ	1 人～2 人乗り程度の電動モビリティ全般を指す ¹⁴⁾ 。本稿では超小型モビリティと区別して 2 輪以下の電動アシスト付き自転車や電動バイク、電動キックボード等を示す。2021 年に電動キックボードのシェアリングサービスに対し特例として実証実験の指定区域内の指定車両に限りヘルメットの着用を任意としている ¹⁵⁾ 。
	自動運転車 コネクテッドカー	自動運転車とは、人の運転行為の一部または全部を自動で行うことができる車両を指し、代替行為の内容により 6 段階で分類されている ¹⁶⁾ 。コネクテッドカーは、インターネット、インフラ、車両をセンサーで接続することで相互に情報取得や制御を行い様々なサービス強化を想定している技術である ¹⁷⁾ 。
	空飛ぶクルマ (Vertical take-off and landing aircrafts: VTOL)	道路混雑と土地利用の制約を克服するための技術として、「空飛ぶクルマ」の技術開発が進んでいる ¹⁸⁾ 。日本においても、2018 年に国土交通省と経済産業省を中心に「空の移動革命に向けた官民協議会」 ¹⁹⁾ が作られ、2023 年を事業開始目標として後押しを進めている。
2) サービス	カーシェアリング	1 台の自動車を複数の会員が共同で利用する自動車の利用サービスであり、世界的に規模を拡大している。日本では 2020 年時点で車両台数約 4 万台、会員数 200 万人以上であり急速に普及している ²⁰⁾ 。日本では発着場所が同じのラウンドトリップ方式がほとんどであるが、海外では Free floating 型のサービスが拡大しつつある。
	ライドシェアリング	ドライバーと同じ目的地を有する相乗り希望者をマッチングするサービスであり、世界的な拡大が進んでいるが、日本においては一般運転者による報酬型のサービスは認められていない ²¹⁾ 。
	マイクロモビリティ シェアリング	自転車や電動アシスト付き自転車、その他電動マイクロモビリティのシェアリングサービスを指す。シェアサイクルは 2019 年 12 月末時点で世界で 2,300 都市、日本で 225 都市で導入が進んでいる ²²⁾ 。海外で普及が進む電動キックスクーターのシェアリングについて、日本においても 2021 年に特例として実証実験の指定区域内の指定車両に限りヘルメット着用を任意としている ¹⁵⁾ 。
	オンデマンド サービス	利用者が事前に予約することでその都度、それに合わせて運行する地域の公共交通を指す。日本では、路線バスの廃止エリアの補完交通や公共交通空白地対策として早期から取り組まれてきた運行形態である ²³⁾ 。近年、AI の活用や配車システムの高度化により都市部での取り組みも進んでおり、端末交通としての活用や通勤対応 ²⁴⁾ 、定時定路線への代替検討も行われている。
	マルチモーダル サービス (MaaS)	複数の交通モードをまたいだ案内・予約・決済を行うプラットフォームサービスを指す ²⁵⁾ 。フィンランドの Whim が著名であり、欧州をはじめとして様々な都市で実証実験や実装が行われている。日本でも多数の事業者や地域が実証実験等を行っており、地域ごとに様々な取り組みが実施されている ²⁶⁾ 。
	貨客混載輸送	貨物と旅客の輸送を一緒に行う形態を指す。日本では 2017 年に一部規制緩和 ²⁷⁾ が行われ、2020 年にこれらの手続きの円滑化が行われている ²⁸⁾ 。鉄道や路線バスだけでなく、タクシーや航空機、新幹線など幅広く実証実験や本格運行等が実施されており、今後ますます拡大する可能性がある。
3) ライフ スタイル	オンラインサービス	従来、目的地に移動することで得られたサービスをオンライン環境で代替するサービスを指す。中でもテレワークや在宅勤務は 2020 年の新型コロナウイルス感染症流行により大幅に増加し、2020 年 4～5 月の緊急事態宣言下では半数近く、その後も 3 割前後と急拡大している ²⁹⁾ 。また、オンライン診療の時限的特例措置 ³⁰⁾ 、e ラーニング ³¹⁾ の世界的な拡大も進行している。
	デリバリーサービス	EC やフードデリバリー、デジタル配信などの電子商取引により直接購買ではなく電子購買を可能とするサービスを指す。2019 年の物販系の EC 化率は 6.76% と右肩上がりで増加しており ³²⁾ 、新型コロナウイルス感染症の拡大によりさらに加速化している。

2. モビリティ革命を構成する技術とサービス

2019 年の交通政策白書¹²⁾では、この年を”モビリティ革命元年”と位置づけている。本研究では、この整理をもとにモード・サービス・ライフスタイルの 3 つの視点から表-1 の通り対象とする技術を整理する。

1) モードの変革：電気自動車や水素燃料電池自動車など、パワートレインの電動化が大きな変化として挙げられる。また、電動化を前提として、グリーン・スロー・モビリティや超小型モビリティ、マイクロ・モビリティなど、モビリティ規格の多様化も普及実装段階にきている。また、自動運転車両やコネクテッド・カーなども段階的、部分的に実装が始まっており、これらは交通行動の変化だけでなく、様々な社会影響をもたらす可能性が指摘されている³²⁻³⁵⁾。加えて、いわゆる「空飛ぶクルマ」(Vertical take-off and landing aircrafts: VTOL) の開発や実装の機運も高まりつつある。これは航空運輸分野における技術開発であるが、都市間や都市内など、比較的短距離の旅客交通への普及を見越して、陸上運輸にも大きく影響をもたらす。

2) サービスの変革：自動車や自転車など車両を保有し個人で移動する方法と、公共交通など定時定路線で大量輸送を行う方法の 2 つの間を埋める様々な交通サービスが生まれている。その 1 つの形態が、モードの「保有」という部分を「共有」に代えるカーシェアリングやモビリティシェアリングなどのシェアリングサービスである。他方、大量輸送手法の中心であった定時定路線運行に対してオンデマンド運行の適用範囲も広がりつつある。配車の最適化シミュレーション技術が高度化するとともに、IT のリテラシーが全年代的に向上しつつある中で、これまでのような交通空白地の代替サービスであったサービスから、都市型や目的型サービスへとカバー範囲が広がりつつある。ライドシェアリングは、上記 2 つの方向性を併せ持ったサービスとして世界的拡大を見せているが、交通行動や政策への影響はもちろんのこと、産業や雇用など多方面への影響も懸念されている³⁶⁻³⁸⁾。また、MaaS に代表される通り、モード間の統合に関するサービスだけでなく、旅客に加え、貨物も同時に輸送する貨客混載サービスの実装も進み始めている。単一モードではなく複数のモードや目的間を円滑につなげるサービスも大きな変化をもたらす。

3) ライフスタイルの変革：テレワークやオンライン診療、e ラーニングなど、これまででは職場や病院、教育機関などに通っていたサービスを移動せずに享受できるオンライン代替サービス、そして EC やフードデリバリーなど、直接購買ではなくオンライン購買によってデリバリー化しているサービスの 2 つを取り上げた。この 2 点はモビリティ技術・サービスとは言えないが、交通需要

に大きなインパクトを与える変化の 1 つとして本稿で取り上げる。

以上の通り、モビリティ革命を構成する技術やサービスは、単に効率化や交通利便性向上につながるだけでなく、従来の交通分野に関わる車両等の生産やビジネスモデル、産業構造、さらには交通需要に大きな構造変革をもたらすものが多く存在している。それは、GHG 排出量の大きな削減可能性が期待できると同時に、従来発生していなかった部門での排出増加、他分野への排出負荷の移転、など排出構造全体に大きな影響をもたらす。それゆえに、単に走行時に着目するのではなく、モードやサービス全体のライフサイクル、さらにはその波及効果に至るまで、モビリティシステム全体の構造から、GHG 排出構造とその変動要因、そしてそれぞれのサービスにおける排出主体を整理・特定することが必要不可欠となる。

3. モビリティ技術による CO₂ 排出量変動要因に関する既往研究の整理

前章で整理したモビリティ革命を構成する技術・サービスについて、既往研究の収集・整理に基づき、GHG 排出量の変動要因の整理を行う。

(1) パワートレインの電動化

EV や FCV など、パワートレインの電動化は、走行時に排気ガスを放出しない。そのため、1990 年にカリフォルニア州で策定された Zero Emission Vehicle (ZEV) 規制に基づき、ゼロエミッション車とも呼ばれている³⁹⁾。しかしこの規制は主に大気質改善を目的として実施されたもので、走行時以外に排出される GHG は考慮されていない。Well to Wheel に基づき走行時の GHG 排出量を評価している研究は多数実施されており⁴⁰⁻⁴³⁾、EC の共同研究センターにおいても定期的な評価の対象となっている⁴⁴⁾。いずれの研究においても、車体のエネルギー消費効率と使用する燃料（電気及び水素）の排出原単位に大きく依存することが明らかとなっている。一方、これらの研究の多くは、各代替燃料の排出原単位をシナリオとして与えて評価したものが中心である。EV や FCV が再生可能エネルギーの余剰電力を効率的に消費する可能性に関する研究も実施されている⁴⁵⁻⁴⁷⁾。一方で、マクロな視点に立てば、世界のエネルギー消費量の 2 割を占める運輸部門が電化すれば、電力需要と原単位に遡及的に影響を与える可能性も指摘されている⁴⁸⁻⁴⁹⁾。

車両等の製造段階や維持管理段階の GHG 排出量については、EV や FCV が既存のガソリン車より製造時 GHG 排出量が増加することは多くの研究で明らかとなっている⁵⁰⁻⁵²⁾。それに加えて、すでに燃料供給インフラが整っ

ているガソリン車と比較して、充電や水素供給インフラなど新たなインフラの建設に伴う GHG 排出量の増加も指摘されている^{53,54}。これら供給インフラの技術もまた様々なものがあり、かつその整備量と車両の普及率が比例関係にあることも明らかとなっている⁵⁵。廃棄段階における CO₂ 排出量の代替オプションの研究も実施されている。特に製造段階において大きな負荷を占める車両用の蓄電池については、そのリサイクルや再利用を通じて CO₂ 排出量の削減可能性を期待する研究も実施されている^{56,57}。

以上を概観すると、車両単位でのライフサイクル CO₂ 排出量の研究はすでに実施されてきており、走行効率や電源構成等により一定の変動は見られるものの、多くの研究では CO₂ 排出量の大幅な削減に寄与する技術として評価されている。他方、将来的な電動車両への急速かつ大量な移行と普及による社会全体としての CO₂ 排出量のインパクトについては明らかになっていない部分もあり、これらの影響把握が必要となる。

(2) 車両規格の多様化

GSM や超小型モビリティなど、車両規格が多様化している点も、モビリティ革命の特徴と言える。車両規格、とりわけ車両重量の違いはパワートレインの種類に依らず、生産時、走行時ともに CO₂ 排出量に大きな影響を与えることも既往研究からすでに明らかとなっている^{58,59}。車両規格の多様化は、例えば自家用車への 1 人乗り需要に対する超小型モビリティの導入、比較的需要が少なく短距離の公共交通への GSM の導入など、交通需要に対する供給の最適化という点で、CO₂ 排出量を低減させる可能性があり、普及・導入地域や方法にその効果が大きく依存する可能性がある。

(3) 自動運転技術の実装

自動運転技術は、現在開発が盛んに行われており、その普及や実装が CO₂ 排出量に与える影響に関する研究は、個別要素の影響評価に関する研究、シナリオ研究、そしてそれらを総合的にレビューした研究など多数実施されている。総合的視点から CO₂ 排出量に与える影響を検証した研究^{61,62}によると、エコドライブや経路選択、隊列走行、あるいは乗車する車両サイズの最適化と小型化など、これまで人が制御・判断してきた部分の最適化が図られることで、走行時の CO₂ 排出量が削減されることの指摘がなされている。また、これらの普及が拡大することで、全体制御による混雑緩和、新たなモビリティサービスの普及もまた、CO₂ 排出量削減の可能性があると指摘されている。他方、高速道路等における速度向上に伴う燃費低下、自動車での移動障壁が下がることによる自動車利用者数の増加も指摘されており、これらが

CO₂ 排出量の増加をもたらす懸念も指摘されている。特に走行時のエネルギー消費効率については、大幅な効率化が期待されている一方、自動運転制御技術による燃費の変化については不確実性が高く、更なる実証データ等の蓄積が必要であるとの指摘もなされている⁶⁰。また、車両に搭載される各種センサーやシステム、制御機器の製造及び通信に伴う電力消費もまた、無視できない影響を与える⁶⁰と想定されており、これら制御システムも含めた評価が必要不可欠である。

(4) VTOL の有人化

有人 VTOL の環境負荷は、他の陸上交通機関と大きく排出構造が異なっている。Kasliwal et al.⁶³によれば、現時点での技術水準では、使用時の CO₂ 排出量は離着陸時のホバー運転時に多くの CO₂ が排出されるため、輸送距離がある程度長くないと陸上交通機関よりも有利にならないこと、揚力比や風によって大きく変動する可能性があることが指摘されている。また、Melo et al.⁶⁴によれば、バッテリー製造時を含めた LCA 分析によって、現段階の走行効率では、バッテリー寿命までに自動車の排出基準を下回る効率を達成することは困難であるとの試算結果を出しており、都市内交通での実装を想定する場合には、現在よりもさらに高効率化が必要であると想定される。

(5) シェアリングサービスの展開

シェアリングサービスの普及は、自動車や自転車、パーソナルモビリティまで様々な形態が展開されており、これらにより都市部の交通行動が大きく変化している。すでに世界の多くの都市で普及が進んでいるラウンドトリップ型のカーシェアリングでは、自動車の所有率の低下と、利用距離の削減やモーダルシフトの双方に効果があることが日本及び海外のいくつかの都市で実証されている^{65,66}。一方、全体としては上記同様に CO₂ 排出量が削減されるものの、車両寿命が短くなることで、走行距離あたりの生産段階排出量の割合が増加する⁶⁷と指摘している研究もある。一方、日本ではあまり展開されていない、自由に乗降場所を選べる free floating 方式については、車両の偏在に伴う再配置に係る負荷、旅行需要の増加や公共交通からの転換などの行動変化により CO₂ 排出量があまり減少しないかあるいは増加する可能性が指摘されている^{74,75}。一方、ライドシェアサービスは、タクシーや自家用車だけでなく公共交通からの転換を生むこと、そして車両走行距離、とりわけ乗客が乗っていない走行距離が大幅に増加していることが複数の実証研究から明らかとなっており、更にそれが場合によっては混雑の悪化を招くことも示唆されている^{73,74,75}。

一方、自転車やキックボード、その他の小型モビリティ

イのシェアリングサービスは、自動車のシェアリングとは異なる排出構造を有している。Liao and Correia⁷⁶⁾の包括的なレビューの結果によると、これらのサービスはいずれも、都市部の短距離自家用車利用からの転換を促し、自動車走行距離の削減に貢献していることが指摘されているとともに、単独のトリップだけでなく、自動車の保有や行動パターンの変化を通じて、大幅にCO₂排出量が減少できる見込みがあること、ただし、その変化の程度はステーションの密度や天候などに大きく左右されることが明らかとなっている。加えて、走行時におけるCO₂排出量がいずれも非常に小さいことから、製造時CO₂排出量と個々の車体の寿命が排出効率に大きく影響を与えることが指摘されている⁷⁷⁾。一方、マイクロモビリティサービスを運営するにあたっては再配置、そして定期的かつ頻度の高い維持管理が必要となる。これらにより生じるCO₂排出量については、ほとんどの研究で指摘されておらず、検証が必要である。

(5) オンデマンドサービスへの転換

オンデマンドサービスと既存公共交通システムのCO₂排出量の違いについては、いくつかのシミュレーション研究が実施されている^{78,79)}。いずれの場合でもサービスを提供するための車両の規模、配車ルート・時間の自由度、導入地域の需要量及びパターンが複雑に影響していることが明らかとなっているが、どの場合もオンデマンドサービスによる車両占有率が排出量変化の要因となっている。導入地域の需要特性に対して、より最適化された運行が可能となればCO₂排出量は減少傾向となり、また需要が増加すればするほど定時定路線型に近づく傾向にある。

(6) モード間統合サービスの拡大

モード間の乗り継ぎや連携を円滑にするプラットフォームサービスは、それ単独では交通サービスではないため、そのCO₂排出量評価を実施した研究はほとんど見られない。しかしこれらのサービスは、利用者に対して目的地までの交通情報と予約、そして決済を提供するものであるため、どれだけ利用者がよりCO₂排出量の少ない交通手段や経路へ行動変容を起こしたのかがこれらサービスのCO₂排出量の削減効果とみることができる^{80,81)}。スウェーデンのサービス「UbiGO」を対象とした調査⁸²⁾では、利用者の約半数がサービスの利用によりバイクシェアリングやカーシェアリング、バス交通に積極的となり、約2割が自家用車の利用に消極的になるなど、サービスの設計によって利用者の交通行動を大きく変容させる可能性を有している。

他方、貨客混載によるCO₂排出量削減効果を評価する研究はあまり行われていない。いくつかの研究では、都

心部及び過疎地区のラストワンマイルにおける貨客混載における経済的、環境的メリットを提示している^{83,84)}が、その具体的な算出方法や勘定方法は示されていない。国土交通省の総合効率化計画として認定された事例の多くは、貨物側の視点から貨客混載の実施により削減された貨物輸送に関するCO₂排出量を削減量としている⁸⁵⁾が、旅客輸送サービスの提供の視点からどのような評価を行うことが望ましいかを検討する必要がある。

(7) オンライン/デリバリーサービスの普及

様々なオンラインサービスが増加することによる交通需要の減少は古くから指摘されている変化⁸⁶⁾であり、旅客交通起源のみに着目すれば、これらのサービスのいくつかはCO₂排出量の削減をもたらす。しかし、交通から発生するCO₂排出量すべてが削減されるわけではなく、その他の要因によりCO₂排出量が増加する可能性もある。

デリバリーサービスのうち、特に普及率の高い電子商取引(EC)に着目すると、商取引がオンライン化することで小売店をはじめとした買い物のための交通需要は減少する一方で、物流需要が増加することが明らかとなっている⁸⁷⁾。この優位性はももとの買い物交通の手段や距離、そして配送ルートや手段によって大きく変化することが指摘されている。加えて、商品が配送となることで包装が変化することや、生鮮食品等の配送となればそこに冷却による排出量の増加⁸⁸⁾も想定されるなど、これらを考慮した評価が必要となる。

他方、モノの移動を伴わないオンラインサービスについても、旅客交通起源によるCO₂排出量以外のリバウンド効果が指摘されている。新型コロナウイルスの拡大により急速に普及したリモートワークのLCA分析^{89,90)}では、通勤交通だけでなく勤務先のエネルギー消費量を合わせて分析している研究がいくつか見られる。これらの研究結果によれば、通勤距離や時間、手段の違いによってCO₂排出量の変動が大きく変わることで、また自宅のエネルギー消費状況やメインオフィス縮小の有無などによっても大きく影響を受けることが明らかとなっている。交通分野に限定した場合、これらは大幅にCO₂排出量を引き下げる可能性がある一方、より包括的な枠組みでの評価では、限定的な範囲での評価よりもその削減効果は小さくなる可能性がある。

4. モビリティ技術の排出構造に関する考察

表-2に前章で整理した各技術やサービスのCO₂排出量変動要因を整理した。CO₂排出量の視点から各技術のを概観すると、減少要因のみで構成されているのは、車両規格の多様化とオンデマンドサービスに限られる。これ

表-2 各技術・サービスによる CO₂排出量変動要因の整理

種別	技術・サービス変化	CO ₂ 排出量変動要因	製造 廃棄	動力 調達	走行 運行	維持 管理	行動 変容	波及 効果
1)モード	パワートレインの 電動化	・電動化にともなう動力源と電源の変更、走行時のエネルギー消費構造変更	+	±	-	+		
		・新たな動力源充填のためのステーションの整備	+					
		・電動化車両の急速な普及に伴うエネルギー原単位への影響		+	-			
	車両規格の多様化	・小型化や交通需要に対応した最適化による輸送効率化			-			
	自動運転技術の実装	・運転挙動や経路選択、隊列走行などの走行最適化			-			
		・運転が困難だった層・行動の利用促進による自動車利用者数の増加					+	
		・自動運転制御機器やセンサー等の製造と通信エネルギー消費量の増加	+		+			
	VTOLの有人化	・長距離移動におけるCO ₂ 排出効率の優位性			±			
2)サービス	シェアリングサービス	・自動車保有率の低下、公共交通や自転車への転換促進						-
		・サービス提供のためのステーションやポートの整備	+					
		・サービス維持のための車両再配置や維持管理等の増加			+	+		
	オンデマンドサービス	・車両の規模、配車ルート・時間の最適化に伴う占有率の改善			-			
モード間統合サービス	・より便利で快適な交通手段への転換や誘導						±	
		・貨物輸送需要の削減						-
3)ライフ スタイル	オンラインサービス	・通勤や通学などの交通需要の削減						-
		・自宅でのエネルギー消費量の増加						+
	デリバリーサービス	・買い物や外食等の交通需要の削減						-
		・運送需要の増加と包装や食品冷却によるエネルギー消費の増加						+

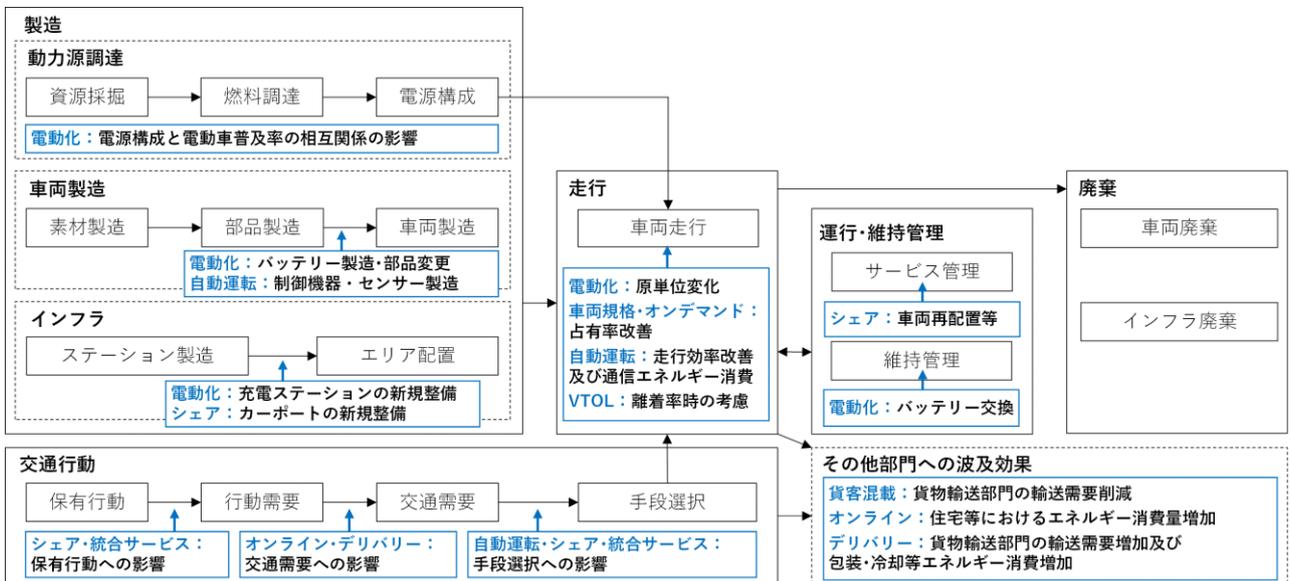


図-1 ELCEL フローにおける各技術・サービスの影響

らの技術・サービスは、適切な導入（すなわち、車両占有率が增加する導入・代替）さえ図られれば、追加的なエネルギー消費量なく導入できる点が特徴である。一方、それ以外の技術やサービスにおいては、いずれも不確定または増加要因を有しているものがほとんどである。

各分野ごとの特徴では、交通モードに関する技術については追加的に必要となる部品やインフラの整備、交通サービスについてはサービス運行のための負荷が生じるほか、サービスによっては望ましくない行動変容を起こす可能性も指摘されている。また、ライフスタイルの視点では、交通需要の削減の代わりに他部門への波及効果としてCO₂排出量を増加させる可能性が示唆されている。

加藤ら⁹⁾が定義した ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load)を範囲とした交通部門のCO₂排出構造に、各

技術・サービスの変動要因を位置づけたフローを図-1に示す。これらを概観すると、単に走行時におけるCO₂排出量を評価するのみでは、新たなモビリティ技術やサービスによるCO₂排出量の変化が包括的に評価できないことが分かる。これまで多くのLCA研究で実施してきた車両製造時や廃棄時の形状はもちろんのこと、シェアリングサービス等においては運行・維持管理における環境負荷の増加も見込まれる。加えて、交通行動変化への直接介入やその他部門への波及効果なども想定されるため、単に走行時だけでなくLCAを拡張した評価の枠組みが必要不可欠である。

今後のモビリティ技術・サービスのより適切なCO₂排出量算出にあたっては、特に以下の論点が重要となる。

(1)交通需要変化や電動車普及による電力原単位変動

将来的な交通需要（生成原単位）は、オンラインサービスやデリバリーサービスの更なる普及により、将来的に減少する可能性があり、とりわけ公共交通関連サービスでは、それを前提とした評価を行う必要がある。また、電力原単位についても将来の社会経路によって大きく変化する。特に現時点ではあまり議論されていないが、車両電動化の普及は電力需要全体を押し上げ、それが電力原単位の低下速度を減衰させる可能性もある。交通需要や電動車普及などの社会経路によって電力原単位、つまり CO₂排出削減量が大きく変化する可能性がある。

(2)新たな技術・サービスの運行管理による排出量増加

これまで、既存公共交通サービスにおける運行管理側の CO₂排出量は、路線間やサービス間でその構造にあまり変動がなかったために注目されてこなかった。しかし、車両の電動化は新たな充電／充填拠点の設置を伴っており、その設置密度と車両の普及率、回送時間は常にトレードオフが生じる。また、ライドシェアやサイクルシェアなどは、そのサービス提供形態によってバックグラウンドで生じる環境負荷が大きく異なる。これらを踏まえると、利用時には直接関係しない運行側で生じる CO₂排出量の評価も重要な論点となる。

(3)都市構造と交通行動の大幅な変換

シェアリングサービスの普及は、単に交通機関選択だけでなく、目的地選択や自動車保有、つまりライフスタイルに大きな影響があることが実証されている。これらのサービスによる行動変容の程度は都市構造によって規定される部分も大きいので、都市構造や特性にあったサービスのタイプ、そしてそれによる行動変容の分析が個々のサービスの環境性能を決定づけるうえで極めて重要となる。

(4)オンラインサービスや貨客混載による波及効果

オンラインサービスやリモートサービスは交通需要の（主に）減少に大きく影響を与える一方で、交通行動以外の環境負荷を増加させる可能性が高い。一方、貨客混載はこれを相殺する形で、貨物輸送部門の CO₂排出量を削減できる可能性があり、これらサービスの適切な評価には分野を超えた波及効果の評価が必要不可欠である。

5. おわりに

本研究では、近年の「モビリティ革命」を構成する各技術・サービスとその CO₂排出構造を既往研究より概観し、これら新たなサービスにおける環境性能を適切に評

価・算定するために必要な論点について考察を行った。

これまで、これらの技術やサービスの CO₂排出量評価は、個別技術での評価あるいは具体的サービスのケーススタディとして実施された研究や報告が多かった。そのためいずれの評価も、現状の交通システムと比較した場合の CO₂排出量削減効果を示すにとどまっており、それぞれの技術が持つ CO₂排出構造の特性や、既存交通システムとの違いを総合的な把握、異なるサービス・技術間を横並びで比較するための枠組みの議論は行われなかった。

今後、旅客交通分野においても本格的に脱炭素を目指すことが求められる時代が訪れようとしている。その際には、現状との評価よりも、むしろ数ある技術やサービスの中で、その地域により適切かつより CO₂排出量の少ない技術・サービスを選択することが求められる。その際には、本研究で示したような各種変動要因を考慮したうえで、最大限環境負荷の小さいサービスを選択、あるいは組み合わせることが求められる。今後はこれら論点を踏まえて、新たな交通技術・サービスの動向も踏まえた総合的な環境評価の仕組みづくりが必要となろう。

加えて、仕組みの構築にあたっては、その排出責任及び管理を誰が負うのかを合わせて議論する必要がある。これまでの都市部における交通システムは、主に「自動車一所有」「公共交通一共有」の2つで成り立っており、自動車の人 km あたり排出原単位のほうが公共交通より大幅に大きかったために、自動車の技術向上と都市全体での公共交通システムの2つのアプローチを行うことが重要となっていた。しかしながら、シェアリングサービスや MaaS など、より多様なサービス形態が普及し、加えてより様々な主体が増加する現状においては、車体性能向上のみでは不十分であり、また多様な民間サービスが入る中で自治体の制御のみでは環境的に最適な交通システムの提供が困難になりつつある。実効性の高い政策を進めるにあたっては、メーカーと自治体だけでなく、モビリティに関わるそれぞれの主体が、多段階で責任を有する仕組みを構築することが望まれる。

謝辞：本研究は（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20201G01）により実施した。

参考文献

- 1) Skidmore C.: Law for net zero emissions begins passage through Parliament (Speech), 2019.
<https://www.gov.uk/government/speeches/law-for-net-zero-emissions-begins-passage-through-parliament>
- 2) European Commission: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the framework for achieving climate ne

- utrality and amending Regulation (EU) 2018/1999 (European Climate Law), 2020.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020PC0080&from=EN>
- 3) Mallapaty S.: How China could be carbon neutral by mid-century, *Nature*, Vol.586, pp.482-483, 2020.
 - 4) White House: FACT SHEET: President Biden’s Leaders Summit on Climate, 2021.
<https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/04/23/fact-sheet-president-bidens-leaders-summit-on-climate/>
 - 5) 首相官邸: 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026/shoshinhyomei.html
 - 6) IRENA: Reaching zero with renewables: Eliminating CO₂ emissions from industry and transport in line with the 1.5°C climate goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2020.
 - 7) Daimler: Annual Report 2016, Stuttgart, 2016.
<https://www.daimler.com/documents/investors/reports/annual-report/daimler/daimler-ir-annualreport-2016.pdf>
 - 8) Heikkilä S: Mobility as a Service—A proposal for action for the Public Administration, Case Helsinki (Master’s thesis), Aalto University, Aalto, 2014.
 - 9) Neckermann L.: The Mobility Revolution: Zero Emissions, Zero Accidents, Zero Ownership, Troubador Publishing, Leicester, 2015.
 - 10) IEA: Global EV Outlook 2020, IEA, Paris, 2020.
<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>
 - 11) 加藤博和: 交通分野へのライフサイクルアセスメント適用, *IATSS Review*, Vol.26, No.3, pp.205-212, 2001.
 - 12) 国土交通省: 令和元年度交通政策白書, 2019.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/so-sei_transport_fr_000098.html
 - 13) 国土交通省総合政策局環境政策課, 公益財団法人 交通エコロジー・モビリティ財団: グリーンスローモビリティリーフレット, 2020.
<https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/content/001363315.pdf>
 - 14) 国土交通省自動車局: 地域から始める超小型モビリティ導入ガイドブック, 2014.
https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_fr1_000043.html
 - 15) Abduljabbar R. L., Liyanage S. & Dia H.: The role of micro-mobility in shaping sustainable cities: A systematic literature review, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol. 92, 102734, 2021.
 - 16) 警視庁: 特例電動キックボードの実証実験の実施について, 2021.
<https://www.keishicho.metro.tokyo.jp/kotsu/doro/dendosukuta.html>
 - 17) SAE International and ISO: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles J3016_202104, SAE International, USA and Switzerland, 2021.
https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104/
 - 18) Berdigh A. and Yassini K. E.: Connected car overview: solutions, challenges and opportunities, *Proc. of the 1st International Conference on Internet of Things and Machine Learning (IML '17)*, Association for Computing Machinery, New York, Article 56, pp.1–7, 2017.
 - 19) Kasliwal, A., Furbush, N.J., Gawron, J.H, KcBride J.R., Wallington T.J., DeKleine R.D., Kim H.C. and Keoleain G.A.: Role of flying cars in sustainable mobility. *Nat Commun*, Vol. 10, 1555, 2019.
 - 20) 空の移動革命に向けた官民協議会: 空の移動革命に向けたロードマップ
<https://www.mlit.go.jp/common/001266909.pdf>
 - 21) 交通エコロジー・モビリティ財団: わが国のカーシェアリング車両台数と会員数の推移, 2020.
http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/carshare_graph2020.3.html
 - 22) 松野由希: ライドシェアの現状の取り組みと今後の展望について, *Transportation & economy*, Vol.80, No.2, pp.35-42, 2020.
 - 23) 奥田謁夫: 日本におけるシェアサイクルの現状と展望, *Traffic engineering*, Vol.55, No.1, pp.25-28, 2020.
 - 24) 国土交通省: 地域公共交通に関する新技術・システムの導入促進に関する調査, 2009.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/so-sei_transport_fr_000037.html
 - 25) Arthur D. Little Japan, Inc.: 自動走行が活用されうるモビリティサービスの海外動向・国内事業性の調査報告書 (平成 29 年度高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業), 2019.
https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000677.pdf
 - 26) 国土交通省自動車局: 貨客混載を通じた自動車運送業の生産性向上について, 2017.
https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk4_000032.html
 - 27) 国土交通省総合政策局: 地域公共交通の活性化及び再生に関する法律について, 2020.
https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/transport/so-sei_transport_tk_000055.html
 - 28) 後藤学, 濱野和佳: 新型コロナウイルス感染症流行下でのテレワークの実態に関する調査動向, *INSS Journal*, Vol.27, pp.252-274, 2020.
 - 29) 厚生労働省: 新型コロナウイルス感染症の拡大に際しての電話や情報通信機器を用いた診療等の時限的・特例的な取扱いについて, 2020.
<https://www.mhlw.go.jp/content/R20410tuuchi.pdf>
 - 30) Li C. and Lalani F.: The COVID-19 pandemic has changed education forever. This is how, *World Economic Forum Global Agenda*, 2020.
<https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-education-global-covid19-online-digital-learning/>
 - 31) 経済産業省商務情報政策局: 令和元年度内外一体の経済成長戦略構築にかかる国際経済調査事業 (電子商取引に関する市場調査) 報告書, 2020.
<https://www.meti.go.jp/press/2020/07/20200722003/20200722003-1.pdf>
 - 32) 坂井康一, 大口敬, 須田義大: 自動走行システムの高度化・普及展開の姿およびその社会的・産業的インパクトに関する検討, *生産研究*, Vol.70, No.2, pp.69-74, 2018.
 - 33) 坂井康一, 大口敬, 須田義大: 日本における自動走行システムの社会的ニーズおよびその普及展開に伴う社会的影響等にかかる検討, *生産研究*, Vol.71, No.2,

- pp.97-104, 2019.
- 34) Meyer J., Becker H., Bösch P. M. and Axhausen K. W.: Autonomous vehicles: The next jump in accessibilities?, *Res. Transp. Econ.*, Vol.62, pp.80-91, 2017.
 - 35) Kröger L., Kuhnimhof T. and Trommer S.: Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA, *Transp. Res. Part A Policy. Pract.*, Vol.122, pp. 146-161, 2019.
 - 36) Tirachini A.: Ride-hailing, travel behaviour and sustainable mobility: an international review, *Transportation*, Vol.47, pp.2011–2047, 2020.
 - 37) George C. and Julsrud T. E.:Chapter Two - Cars and the sharing economy: The emergence and impacts of shared automobility in the urban environment, Fishman E.(Eds): *Advances in Transport Policy and Planning*, Academic Press, Vol.4, pp.7-38, 2019.
 - 38) 太田和博: ライドシェア出現による公共交通システムの変革, *IATSS Review*, Vol.42, No.1, pp.21-29, 2017.
 - 39) Collantes G. and Sperling D.: The origin of California's zero emission vehicle mandate, *Transp. Res. Part A Policy. Pract.*, Vol.42, Issue 10, pp.1302-1313, 2008.
 - 40) Granovskii M., Dincer I. and Rosen M. A.: Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles, *J. Power Sources*, Vol.159, Issue 2, pp.1186-1193, 2006.
 - 41) Woo J., Choi H. and Ahn J.: Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol.51, pp.340-350, 2017.
 - 42) Kamiya G., Axsen J. and Crawford C.: Modeling the GHG emissions intensity of plug-in electric vehicles using short-term and long-term perspectives, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol.69, pp.209-223, 2019.
 - 43) 小宮山涼一, 藤井康正: 日本の電源構成の展望と電気自動車, プラグインハイブリッド自動車の省エネ, CO₂削減効果に関する分析, *電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌)*, Vol.133, No.1, pp.10-18, 2013.
 - 44) Prussi M., Yugo M., De Prada L., Padella M. & Edwards R.: JEC Well-To-Wheels report v5, EUR 30284 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
 - 45) Bellekom S., Benders R., Pelgröm S. and Moll H.: Electric cars and wind energy: Two problems, one solution? A study to combine wind energy and electric cars in 2020 in The Netherlands, *Energy*, Vol.45, Issue 1, pp.859-866, 2012.
 - 46) Richardson D. B.: Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol.19, pp.247-254, 2013.
 - 47) 太田豊: 電気自動車の電力貯蔵応用, *電気学会誌*, Vol.140, No.4, pp.221-224, 2020.
 - 48) Gryparis E., Papadopoulos P., Leligou H. C. and Psomopoulos C. S.: Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective, *Energy Reports*, Vol.6, Supplement 6, pp.475-486, 2020.
 - 49) Kapustin N. O. and Grushevenko D. A.: Long-term electric vehicles outlook and their potential impact on electric grid, *Energy Policy*, Vol.137, 111103, 2020.
 - 50) Kosai S., Nakanishi M. and Yamasue E.: Vehicle energy efficiency evaluation from well-to-wheel lifecycle perspective, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol.65, pp.355-367, 2018.
 - 51) Yang Z., Wang B. and Jiao K.: Life cycle assessment of fuel cell, electric and internal combustion engine vehicles under different fuel scenarios and driving mileages in China, *Energy*, Vol.198, 117365, 2020.
 - 52) 石崎啓太, 中野冠: 内燃機関自動車, ハイブリッド自動車, 電気自動車, 燃料電池自動車における車内空調を考慮した量産車両 LCCO₂ 排出量の比較分析, *日本機械学会論文集*, Vol. 84, No.866, pp.18-00050, 2018.
 - 53) Bekel K. and Pauliuk S.: Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany, *Int. J Life Cycle Assess.*, Vol.24, pp.2220–2237, 2019.
 - 54) Zhu Y., Skerlos S., Xu M. and Cooper D. R.: System level impediments to achieving absolute sustainability using LCA, *Procedia CIRP*, Vol.90, pp.399-404, 2020.
 - 55) Watabe A., Leaver J., Shafiei E. and Ishida H.: Life cycle emissions assessment of transition to low-carbon vehicles in Japan: combined effects of banning fossil-fueled vehicles and enhancing green hydrogen and electricity, *Clean Techn. Environ. Policy*, Vol.22, pp.1775–1793, 2020.
 - 56) Raugei M. and Winfield P.: Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles, *J. Clean. Prod.*, Vol.213, pp. 926-932, 2019.
 - 57) Silvestri L., Forcina A., Arcese G. and Bella G.: Recycling technologies of nickel–metal hydride batteries: An LCA based analysis, *J. Clean. Prod.*, Vol.273, 123083, 2020.
 - 58) Li Y., Ha N. and Li T.: Research on Carbon Emissions of Electric Vehicles throughout the Life Cycle Assessment Taking into Vehicle Weight and Grid Mix Composition, *Energies*, Vol.12, No.19, 3612, 2019.
 - 59) Ambrose H., Kendall A., Lozano M., Wachche S. and Fulton L.: Trends in life cycle greenhouse gas emissions of future light duty electric vehicles, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol. 81, 102287, 2020.
 - 60) Kopelias P., Demiridi E., Vogiatzis K., Skabardonis A. and Zafiropoulou V.: Connected & autonomous vehicles – Environmental impacts – A review, *Sci. Total Environ.*, Vol. 712, 135237, 2020.
 - 61) Wadud Z., MacKenzie D. and Leiby P.: Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles, *Transp. Res. Part A Policy. Pract.*, Vol. 86, pp.1-18, 2016.
 - 62) Taiebat M., Brown A. L., Safford H. R., Qu S., and Xu M.: A Review on Energy, Environmental, and Sustainability Implications of Connected and Automated Vehicles, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.52, No.20, pp.11449-11465, 2018.
 - 63) Liu F., Zhao F., Liu Z. and Hao H.: Can autonomous vehicle reduce greenhouse gas emissions? A country-level evaluation, *Energy Policy*, Vol. 132, pp. 462-473, 2019.
 - 64) Gawron J. H., Keoleian G. A., De Kleine R. D., Wallington T. J. and Kim H. C.: Life Cycle Assessment of Connected

- and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects, *Environ. Sci. Technol.*, Vol.52, No.5, pp.3249-3256, 2018.
- 65) Kasliwal A., Furbush N. J., Gawron J. H., McBride J. R., Wallington T. J., De Kleine R. D., Kim H. C. and Keoleian G. A.: Role of flying cars in sustainable mobility, *Nat Commun*, Vol.10, 1555, 2019.
- 66) Melo S. P., Cerdas F., Barke A., Thies C., Spengler T. S. and Herrmann C.: Life Cycle Engineering of future aircraft systems: the case of eVTOL vehicles, *Procedia CIRP*, Vol. 90, pp. 297-302, 2020.
- 67) Nijland H. and Meerkerk J.: Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands, *Environmental Innovation and Societal Transitions*, *Environ. Innov. Soc. Transit.*, Vol. 23, pp.84-91, 2017.
- 68) 交通エコロジー・モビリティ財団: カーシェアリングによる環境負荷低減効果の検証報告書, 2013. http://www.ecomo.or.jp/environment/carshare/data/carshare_report2013.pdf
- 69) Amatuni L., Ottelin J., Steubing B. and Mogollón J. M.: Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective, *J. Clean. Prod.*, Vol. 266, 121869, 2020.
- 70) Chicco A. and Diana M.: Air emissions impacts of modal diversion patterns induced by one-way car sharing: A case study from the city of Turin, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol. 91, 102685, 2021.
- 71) Ding N., Pan J., Zhang Z. and Yang J.: Life cycle assessment of car sharing models and the effect on GWP of urban transportation: A case study of Beijing, *Sci. Total Environ.*, Vol. 688, pp. 1137-1144, 2019.
- 72) Sun S. and Ertz M.: Environmental impact of mutualized mobility: Evidence from a life cycle perspective, *Sci. Total Environ.*, Volume 772, 145014, 2021.
- 73) Tirachini A.: Ride-hailing, travel behaviour and sustainable mobility: an international review, *Transportation*, Vol.47, pp.2011-2047, 2020.
- 74) Henao A. and Marshall W. E.: The impact of ride-hailing on vehicle miles traveled, *Transportation*, Vol.46, pp.2173-2194, 2019.
- 75) Acheampong R. A., Siiba A., Okyere D. K. and Tuffour J. P.: Mobility-on-demand: An empirical study of internet-based ride-hailing adoption factors, travel characteristics and mode substitution effects, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Vol. 115, 102638, 2020.
- 76) Liao F. and Correia G.: Electric carsharing and micromobility: A literature review on their usage pattern, demand, and potential impacts, *Int. J. Sustain. Transp.*, 2020.
- 77) Kazmaier M., Taef, T. T., and Hettesheimer T.: Techno-Economical and Ecological Potential of Electric Scooters: A Life Cycle Analysis, *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.*, Vol.20, No.4, pp.233-251, 2020.
- 78) Dang L., von Arx W. and Frölicher J.: The Impact of On-Demand Collective Transport Services on Sustainability: A Comparison of Various Service Options in a Rural and an Urban Area of Switzerland, *Sustainability*, Vol.13, No. 6, 3091, 2021.
- 79) Liyanage S. and Dia H.: An Agent-Based Simulation Approach for Evaluating the Performance of On-Demand Bus Services, *Sustainability*, Vol.12, No.10, 4117, 2020.
- 80) Kamargianni M., Li W., Matyas M., Schäfer A.: A Critical Review of New Mobility Services for Urban Transport, *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, pp.3294-3303, 2016.
- 81) Jittrapirom P., Caiati V., Feneri A. M., Ebrahimigharehbaghi S., Alonso González M.J. and Narayan J.: Mobility as a Service: A critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges, *Urban Planning*, Vol.2, No.2, pp. 13-25, 2017.
- 82) Karlsson I. C. M., Sochor J. and Strömberg H.: Developing the ‘Service’ in Mobility as a Service: Experiences from a Field Trial of an Innovative Travel Brokerage, *Transportation Research Procedia*, Vol.14, pp.3265-3273, 2016.
- 83) Bruzzone F., Cavallaro F. and Nocera S.: The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations, *Transp. Policy*, Vol. 100, pp. 31-48, 2021.
- 84) Fatnassi E., Chaouachi J. and Klibi W.: Planning and operating a shared goods and passengers on-demand rapid transit system for sustainable city-logistics, *Transp. Res. Part M Meth.*, Vol. 81, No. 2, pp. 440-460, 2015.
- 85) 国土交通省: 物流総合効率化法について, 2021. <https://www.mlit.go.jp/seisakutokatsu/freight/buk-kouhou.html>
- 86) Banister D.: The sustainable mobility paradigm, *Transp. Policy*, Vol. 15, No. 2, pp. 73-80, 2008.
- 87) Jaller M. and Pahwa A.: Evaluating the environmental impacts of online shopping: A behavioral and transportation approach, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, Vol. 80, 102223, 2020.
- 88) Escursell S, Llorach-Massana P. and Roncero M. B.: Sustainability in e-commerce packaging: A review, *J. Clean. Prod.*, Vol. 280, No. 1, 124314, 2021.
- 89) Heldt B., Matteis T., Schmidt A. and Heinrichs M.: Cool but dirty food? – Estimating the impact of grocery home delivery on transport and CO2 emissions including cooling, *Res. Transp. Econ.*, Vol. 87, 100763, 2021.
- 90) Guerin T. F.: Policies to minimise environmental and rebound effects from telework: A study for Australia, *Environ. Innov. Soc. Transit.*, Vol. 39, pp.18-33, 2021.
- 91) 加藤博和, 柴原尚希: ELCEL 概念による Social / Dynamic LCA への挑戦, *日本 LCA 学会誌*, Vol.5, No.1, pp. 12-19, 2009.

A REVIEW OF THE CARBON DIOXIDE EMISSION STRUCTURE OF NEW MOBILITY SERVICES

Hiroyoshi MORITA and Hirokazu KATO

As the world begin to move toward a decarbonized society, new mobility technologies and services have begun to emerge one after another. However, a framework for evaluating the environmental impact of new mobility services in an appropriate and comprehensive manner has not yet been established. In this study, the trends of new mobility services that are being developed and spread are overviewed, and the carbon dioxide emission structure and its factors of change are summarized using the framework of ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load) from previous studies. The results show that in order to properly evaluate and compare the carbon dioxide emissions of new mobility services, it is essential to take into account the following factors: 1) appropriate setting of electricity intensity, 2) increased emissions in the operation and management sector, including sharing services, 3) significant changes in urban structure and transportation behavior, and 4) evaluation of spillover effects to other sectors. It is essential to consider these factors. In order to achieve this goal, it is necessary to establish a new evaluation framework based on LCA.