モビリティサービスの脱炭素性評価手法開発に向けたライフサイクル CO2 排出量の算出
—シェアサイクル事業を対象として—

三浦 大貴[1]・森田 紘圭[2]・高野 剛志[3]・加藤 博和[4]

[1]正会員　大日本ダイヤコンサルタント㈱　インフラ技術研究所（〒451-0045 名古屋市西区名駅 2-27-8）
E-mail: miura_taiki2@dcne.co.jp

[2]正会員　大日本ダイヤコンサルタント㈱　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@dcne.co.jp

[3]正会員　大日本ダイヤコンサルタント㈱　インフラ技術研究所（〒451-0045 名古屋市西区名駅 2-27-8）
E-mail: takano_tsuyoshi@dcne.co.jp

[4]正会員　名古屋大学大学院教授　環境学研究科（〒464-0814 愛知県名古屋市千種区不老町）
E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp

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，多様なモビリティサービスの環境負荷を一元的に評価・認証する枠組みは国際的にもいまだ整っていない．

そこで本研究では，様々なモビリティサービスのＣＯ２排出量を，事業者が有しているデータから横断的に算出する手法開発を目指し，シェアサイクル事業を対象としたライフサイクル CO2 排出量の算出を実施した．２都市で展開されているシェアサイクル事業において，サービス提供により生じる「製造・廃棄」「走行」「維持管理」の各段階で生じるＣＯ２排出量を事業者が有しているデータから算出しその原単位を明らかにするとともに，そのサービスの提供がもたらすＣＯ２排出削減量を算出した．実データを用いることで，シミュレーションでは評価しにくかった排出構造が明らかになるとともに，都市や利用状況による差異，サービス提供手法による影響の分析が可能となることが明らかとなった．

Key Words: *Maas, Environmetal certification, Life Cycle Assesment, CO2 emmision*

1. はじめに

2020 年 10 月，日本政府は 2050 年までに温室効果ガス排出量を実質ゼロにする，2050 年カーボンニュートラルの実現を宣言し，あらゆる分野で脱炭素化の取り組みが進められている．このうち，運輸部門は日本の CO2 排出量の 17.4%を占め [1]，その 8 割以上は自動車に由来していることから，非ガソリン車の普及や自動車に過度に依存しないライフスタイルへの転換に向けた脱炭素まちづくりが進められている．

近年は Mobility as a Service（MaaS）[2]を開発・実装する取組みが注目を集めている．MaaS は，地域住民や旅行者一人一人の移動ニーズに対し，複数の公共交通やシェアリングサービスを最適に組み合わせて検索・予約・決済等を一括で行うサービスであり，移動の利便性向上や地域の問題解決が期待されている．環境負荷の観点では，MaaS が普及することで，公共交通の利用が促進され，自家用車由来の CO2 排出が抑制される可能性 [3][4]がある．また，シェアリングによる個人所有から共有への流れは，車両製造や維持管理などに関わる CO2 排出を低減させる可能性 [5]がある．

シェアリングサービスの一つとして近年利用が増加しているのが，シェアサイクルである．コロナ禍による密を避けた移動ニーズの高まり [6]や健康志向の高まり，観光時の移動手段 [7]として，都市部を中心に需要が高い．自転車の貸出・返却拠点となるポート数は年々増加傾向かつ高密度化が進んでおり，より一層の利便性向上が図られている [8]．自転車は走行時に CO2 を排出せず，電動アシスト車であっても乗用車に比べて排出量 [9]が非常に低いため，普及による環境負荷低減が期待されている．

以上のように，MaaS やシェアリングサービスには，人々の利便性を高め，CO2 排出を低減させる可能性があ

る．しかし，これらのサービスが実態としてどの程度環境負荷削減に貢献しているのかは明らかになっていない．導入都市やサービスの違いによっても異なると考えられる．また，一部のサービスにおいては車両台数等の供給過多により，車両製造や維持管理・廃棄時の環境負荷が大きくなる可能性もある．とりわけシェアサイクル事業においては，ユーザーによる走行時排出量がほぼゼロであったとしても，トラック等による自転車の再配置輸送が多くなるほど，環境負荷が増加する．そのため，モビリティサービスによる環境負荷を捉える上では，走行時の CO2 排出量だけでなく，車両やインフラの製造，サービスの運行や維持管理において発生する CO2 排出量を含めたライフサイクルアセスメント（LCA）の観点で把握する必要がある．

LCA は，ある製品の原料調達から製造，流通，消費，廃棄に至るライフサイクル全体の環境負荷を定量的に把握する手法であり，運輸や交通の分野においても評価手法の開発 [10][11][12]が行われている．加藤ら [11]は，輸送機関だけでなく，インフラ構造物等を含む輸送システム全体のライフタイム全負荷を考慮した手法として，SyLCEL（System Life Cycle Environmental Load)を定義した．また，朴ら [12]は LCA や W to W（Well to Wheel）評価の手法を拡張し，次世代モビリティツールや新技術・サービスが交通システムの低炭素性に与える影響を包括的・定量的に把握する手法について，そのフレームワークを提示している．

これらの背景を踏まえ本研究では，シェアサイクル事業を対象として，サービス全体による CO2 排出量とその環境負荷低減効果について検証することを目的とする．CO2 排出量は，自転車やポート等駐輪設備の製造・廃棄，維持管理，再配置のための運行，電動アシスト車による走行を考慮して算出する．実態データを用いて算出することで，再配置や配置台数の問題も含めた課題を明らかにし，実態の経年変化を評価・モニタリングできる手法として開発する．また，規模や導入サービスが異なる 2 都市での CO2 排出量を比較することで，導入都市やサービスの違いが環境負荷低減効果に与える影響を考察する．

2. 分析手法

(1) 対象シェアサイクル事業の概要

本研究では，国内複数の政令指定都市でシェアサイクル事業「ChariChari」を展開する neuet 株式会社から協力を得た．分析には，名古屋市と熊本市の 2 都市分の事業実績データを用いる．対象シェアサイクル事業は，スマートフォンアプリを用いて利用できる会員制のサービスであり，自転車は電動の「アシストタイプ」と非電動の「ベーシックタイプ」の 2 種類が用意されている．アプリで近場の自転車を検索して乗車，その後目的地近くの空きポートに乗り捨てることで返却する．ポートは駐車場や商業施設等の民間施設，路上の一角等に設置されており，主要駅や観光地等を中心とした高密度な配置がなされている．利用料金は利用時間や分単位での精算である．

表- 1 シェアサイクル事業の実績データ（2022 年）

	名古屋市	熊本市
自転車配置台数	**計 650 台**	**計 460 台**
ベーシックタイプ	550 台	200 台
アシストタイプ	100 台	260 台
ポート数（2023 年 3 月末時点）	**計 191 箇所**	**計 164 箇所**
鉄製ラック	503 個	292 個
ゴムマット	282 個	255 個
使用ラインテープ	56m	589m
ユーザーによる総走行距離	**計 361,603km**	**計 174,139km**
ベーシックタイプ	358,960km	145,524km
アシストタイプ	2,643km	28,615km
再配置用トラックの燃料消費量		
ガソリン	2,702L	1,123L
軽油	10L	－
チューブ・タイヤ交換本数（2023 年 2 月のみ）		
チューブ	4 本	7 本
タイヤ	1 本	0 本

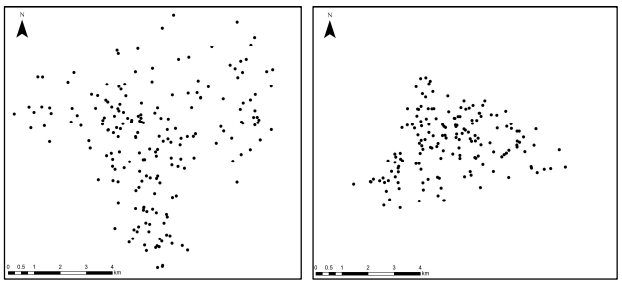


図- 1 ポート配置図（左：名古屋市，右：熊本市）

(2) 対象都市と対象期間

表-1 に 2022 年における名古屋市と熊本市のシェアサイクル事業の運航実績を示す．両市を比較すると，ポート数はそれほど大差がないものの，**図-1** に示す通り名古屋市のほうがサービス提供エリアが広く，熊本市のほうが高密度に配置されている．また，自転車配置台数は名古屋市の方が多いが，熊本市の方がアシストタイプの台数が多いという違いがある．また，ユーザーによる総走行距離は両市で約 2 倍の開きがあり，名古屋市では自転車設置台数の多さと展開区域の広さが影響している．

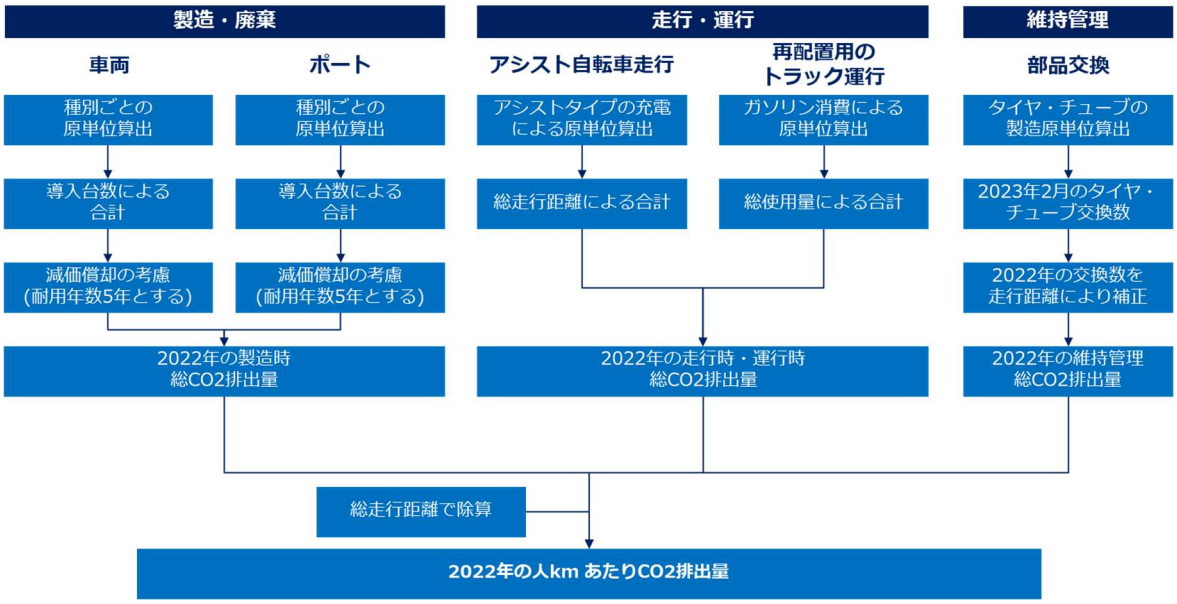


図- 2　本研究における CO2 排出量算定フロー

これらは再配置用トラックの燃料消費量にも影響し，名古屋市は熊本市の 2 倍以上の燃料を消費している．これらのデータを基に，2022 年の各都市の LCA に基づく人 km あたり CO2 排出量（以下，LC-CO2 排出量）を算出する．

(3)　算出方法

CO2 排出量の算定フローを図-2 に示す．LCA の段階として「車両の製造・廃棄E_b」「ポート設備の製造E_f」「アシストタイプの走行E_r」「再配置用のトラック運行E_o」「維持管理E_m」を設定した．ある都市の年間 LC-CO2 排出量E [kg-CO2/人 km]は次の式(1)で推計する．

$$E = \frac{E_b + E_f + E_r + E_o + E_m}{L} \qquad (1)$$

ここで，L：対象年 1 年あたりのユーザーによる総走行距離である．

a)　車両の製造・廃棄

車両の製造・廃棄時の CO2 排出量は，車種別に車体を構成する部品の規格や材質に基づいて算出する．まず，車種kbの製造時排出量原単位$v_{b,kb}$は，事業者より提供された車種（アシスト・ベーシック）別の自転車構成部品リストに基づき，それぞれの部品の規格と材質を把握し，LCA データベース IDEA （以下，IDEA）[13]の材質別製造 kg あたり CO2 排出原単位にそれぞれの部品の重量を乗算後，全部品を合計することで算出した．また，ここでは製造地（中国）から使用する各都市までの輸送に関わる排出量も製造時排出量として含めた．廃棄については IDEA に自転車の廃棄に関する推計が無いため，自動車の kg あたり廃棄時 CO2 排出量に自転車の重量を乗算することで推計し，$v_{b,kb}$に含めた．

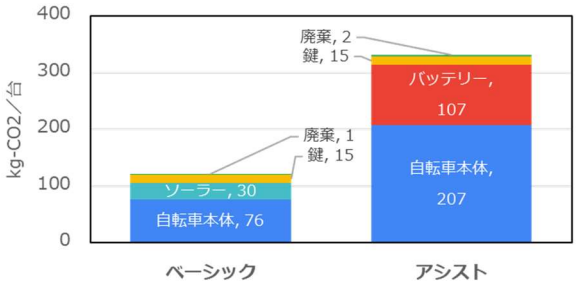


図- 3　車種別製造時排出量の原単位

算出されたv_bはアシストタイプで 331.0kg-CO2/台，ベーシックタイプで 121.9kg-CO2/台となり，その内訳を図-3 で示す．アシストタイプではフレームにアルミ材が使用されていることや，バッテリー製造のために大きい値となっている．ベーシックタイプでは鍵を制御する電源としてソーラーパネルを設置している．

また，製造時排出量は本来，製造した年しか排出されないものであるが，本研究では減価償却期間に合わせて毎年一定数排出されるものとした．今回，自転車の耐用年数N_bは 5 年とし，製造時排出量を 5 で割った値を 1 年間の排出量として推計した．なお，自転車の法定耐用年数は 2 年であるが，実際はメンテナンス等によってそれ以上の期間使用されるケースが多く，実態に近づけるため 5 年としている．以上より，車両の製造・廃棄に関する CO2 排出量は，次の式(2)で推計する．

$$E_b = \sum_{kb} \frac{v_{b,kb} \cdot x_{b,kb}}{N_b} \qquad (2)$$

ここで，$x_{b,kb}$：車種kbの自転車配置台数である．

b) ポート設備の製造

ポートの製造・廃棄に関する CO2 排出量は，ポートの種別ごとの材質や規格に基づき算出する．ポート種別kfは鉄製ラック，ゴムマット，ラインテープの 3 種類があり，それぞれの製造時排出量原単位$v_{f,kf}$を算出した．車両と同じく事業者からポートの規格と素材の情報を把握し，IDEA の材質別製造 kg あたり CO2 排出原単位にそれぞれの重量を乗算することで算出した．v_fは鉄製ラックで 27.1kg-CO2/個，ゴムマットで 41.0kg-CO2/個，ラインテープで 0.7kg-CO2/m とした．また，耐用年数N_fは自転車と同じく 5 年として設定した．以上より，CO2 排出量は次の式(3)で推計する．

$$E_f = \sum_{kf} \frac{v_{f,kf} \cdot x_{f,kf}}{N_f} \quad (3)$$

ここで，$x_{f,kf}$：ポート種別kfの設備数である．

c) アシストタイプの走行

アシストタイプの走行に必要な充電で発生する CO2 排出量を，次の式(4)で推計する．今回のバッテリー容量CCは 0.378kWh であり，フル充電した場合の航続距離Dは 72km である．また，電力の CO2 排出係数EFCは，所属地方の違いにより，名古屋市で 0.388kg-CO2/kWh，熊本市で 0.385kg-CO2/kWh を用いた．

$$E_r = CC \times \frac{L_{assist}}{D} \times EFC \quad (4)$$

ここで，L_{assist}：対象年 1 年あたりのユーザーによるアシストタイプ総走行距離である．

d) 再配置用のトラック運行

トラック運行による CO2 排出量は次の式(5)で推計され，一年間の燃料消費量FCに IDEA の燃料精製及び燃焼時 CO2 排出原単位v_{fuel}を乗算して算出した．なお，v_{fuel}はガソリンで 3.878kg-CO2/L，軽油で 3.741kg-CO2/L を用いた．

$$E_o = FC \times v_{fuel} \quad (5)$$

e) 維持管理

維持管理に関する CO2 排出量は，タイヤとチューブの交換を対象とし，それぞれの製造時 CO2 排出原単位$v_{m,km}$に交換部品数$x_{m,km}$を乗算すること算出する．自転車の維持管理で交換が必要になる部品種別kmは，タイヤとチューブ以外にも多数あるが，交換本数の集計が容易なため，対象とした．素材と規格の把握により IDEA で$v_{m,km}$を算出した結果，チューブで 0.931kg-CO2/本，タイヤで 2.150kg-CO2/本となった．なお，これらは消耗品であることから，車両やポートで行ったような耐用年数による按分は行わない．以上より，CO2 排出量は次の式(6)で推計する．

また，今回は 2023 年 2 月のチューブ・タイヤ交換本数$x_{m,km}^{Feb2023}$しか得られなかったため，式(7)により，2022 年の交換本数$x_{m,km}$を推計した．

$$E_m = \sum_{km} v_{m,km} \cdot x_{m,km} \quad (6)$$

$$x_{m,km} = x_{m,km}^{Feb2023} \times \frac{L}{L^{Feb2023}} \quad (7)$$

ここで，L：2022 年のユーザーによる総走行距離，$L^{Feb2023}$：2023 年 2 月のユーザーによる総走行距離である．

3. 推計結果

(1) 各都市の 2022 年 LC-CO2 排出量

自転車とポート設備の耐用年数を 5 年とした場合の LCA 排出量を**表-2** に，排出量の内訳を**図-4**，**図-5** に示す．走行距離や配置台数の多さから名古屋市の方が合計排出量は多いが，人 km あたりの換算では両市ともにほぼ同じ値の約 71g-CO2/人 km となった．合計排出量の内訳として，車体製造と運行がそれぞれ全体の 4 割程度を占めており，ポート製造がそれに続く割合である一方，走行や維持管理による影響は軽微なものであった．

人 km あたり排出量では，車体製造分は熊本市の方が大きく，運行分は名古屋市の方が大きい．車体製造分の要因として，熊本市の方がアシストタイプの配置台数の多いことが考えられる．アシストタイプの製造時排出量はベーシックタイプの約 2.7 倍である（**図-3**）ことも，影響していると考えられる．また，名古屋市で運行が高くなった要因として，広いエリアでのポート配置（**図-1**）が考えられる．エリアの大きさは両市で大きく違うものの，名古屋市のポート数は 191 箇所，熊本市のポート数は 164 箇所でそれほど大差がなく，熊本市の方が高密度で効率的な運行ができている可能性がある．さらに，事業者へのヒアリングの結果，名古屋市では運行トラックを自転車の巡回点検のため，1 日中走行させていると報告があり，排出量に大きく影響していることが明らかとなった．

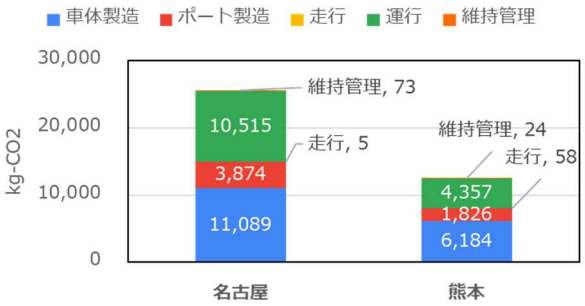
(2) 他モビリティとの走行・運行時排出量比較

ここでは LCA は考慮せず，従来の走行時排出量に関して，他のモビリティと比較した結果を**図-6** に示す．比較データには，国土交通省「輸送量当たりの二酸化炭素の排出量（旅客）」の 2021 年のデータ[1]を用いた．比較の結果，シェアサイクルによる走行・運行時排出量は，両市ともに鉄道の走行時と同程度であることが明らかになった．

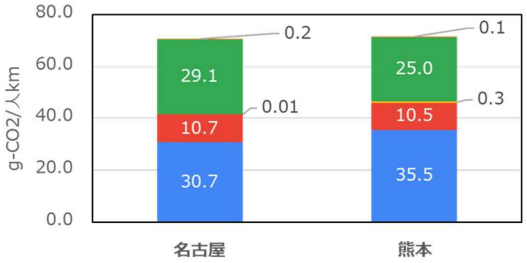
ただし，シェアサイクル事業の走行・運行時排出量は再配置用のトラックによるものがほとんどを占めており，効率的な再配置計画や低燃費な車両を使用することで，排出量が低下する可能性がある．

表− 2　LCA 排出量算出結果

	名古屋市	熊本市
2022 年合計 LCA 排出量[kg-CO2]	25,556	12,448
2022 年人 km あたり LCA 排出量[g-CO2/人 km]	70.7	71.5
2022 年人 km あたり LCA 排出量 (走行・運行時のみ)[g-CO2/人 km]	29.1	25.4



図− 5　2022 年合計 LCA 排出量の内訳

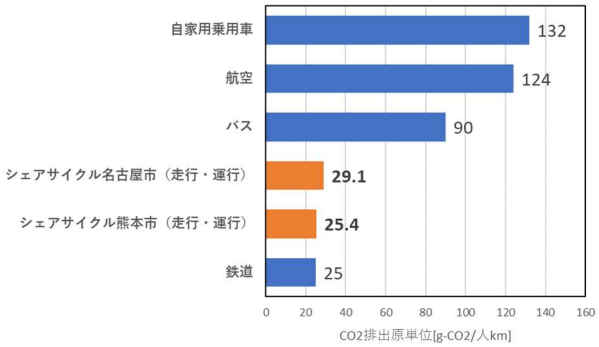


図− 6　2022 年人 km あたり LCA 排出量の内訳

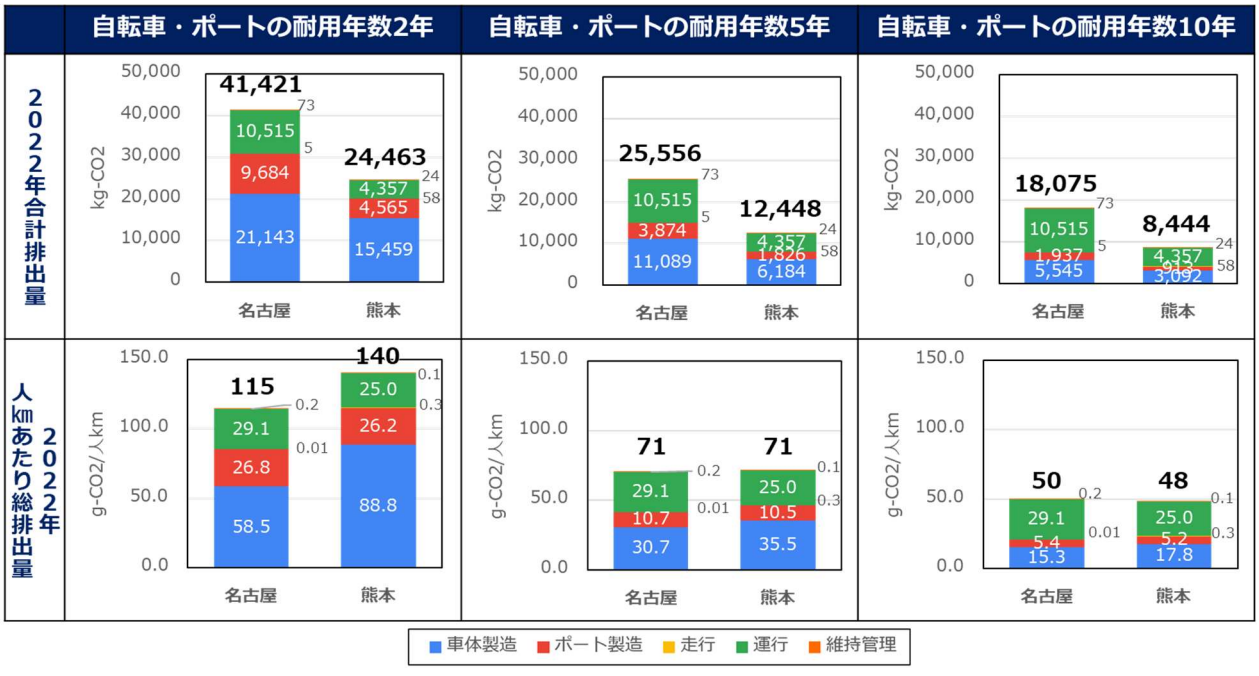
また，自家用乗用車と比較しても約 4 分の 1 程度の排出量であり，都市内移動の手段として自家用乗用車からの転換が進むと，CO2 排出量の大きな削減が期待できる．

(3)　耐用年数が変動した場合の感度分析

以上の分析では，自転車とポートの耐用年数を 5 年としたが，使用環境やメンテナンスの頻度に応じて変動する可能性がある．そこで，自転車を法定耐用年数に合わせて 2 年で入れ替えるケースと，10 年長持ちした場合のケースを想定し，LC-CO2 排出量の感度分析を行った．感度分析の結果を**図−7** に示す．耐用年数が長いほど，1 年あたりの LC-CO2 排出量は小さくなり，耐用年数 10 年の場合は両市ともに約 50g-CO2/人 km となった．



図− 7　他モビリティとの走行・運行時排出量比較



図− 4　耐用年数の感度分析による LCA 排出量の比較

熊本市は排出原単位の高いアシストタイプ配置比率が高く，耐用年数 2 年の場合は 140g-CO2/人 km で名古屋市と比べて大きいものの，耐用年数を伸ばすことでその影響は小さくなることが示唆された．一般的に，アシストタイプは身体的負荷が小さく，利便性も高い．そのため，アシストタイプの導入はシェアサイクルの利用者拡大や自動車からの転換に繋がる可能性がある．したがって，利用者の嗜好に合わせた車体タイプの最適化と，アシストタイプの長寿命化は，更なる CO2 排出量削減に寄与する可能性がある．

4. シェアサイクル事業の LC-CO2 排出量の改善に向けた考察

本研究では，自転車とポートの耐用年数が 5 年の場合の LC-CO2 排出量は 70.7g-CO2/人 km，走行・運行時に限れば鉄道と同程度であることが明らかとなった．シェアサイクル事業による環境負荷低減効果をより高め，確実なものとするためには以下の方策が考えられる．

(1) 普及と高頻度・長距離利用促進による稼働率向上

本研究で対象とした事業はサービス開始から日が浅く，市民の認知が進んでいない可能性がある．今後需要が拡大し，利用者や利用距離が伸びることで，人 km あたりの排出量は低下する可能性がある．

(2) 運行の高効率化

再配置用トラックの巡回ルートを可能な限り短距離にすることで，ガソリン消費に由来する排出量を低下させることができ，巡回ルートや再配置計画の最適化等が考えられる．再配置の最適化は，人員削減や稼働率の向上といった効果が得られる可能性もある．

また，トラック自体の燃費を改善することも排出量の低下に繋がり，低燃費車の導入を検討する必要がある．

(3) 車両の長寿命化

感度分析で実施した通り，自転車やポートの耐用年数が向上すれば，LC-CO2 排出量は減少していく．自転車や設備の長寿命化のためには日頃からの維持管理が重要となる．

5. おわりに

本研究では，シェアサイクル事業 1 事業者による 2022 年 LC-CO2 排出量を，名古屋市と熊本市を対象に算出した．シェアサイクル事業の LCA は，「車両の製造・廃棄」「ポート設備の製造」「アシストタイプの走行」「再配置用のトラック運行」「維持管理」を設定し，各段階における CO2 排出量を推計した．推計の結果，LC-CO2 排出量は広範囲でサービスを提供する名古屋市で 70.7g-CO2/人 km，高密度でサービスを提供する熊本市で 71.5g-CO2/人 km となり，導入都市による違いを明らかにした．また，走行・運行時排出量に関しては鉄道と同程度であり，都市内の短距離移動が自動車等から転換されることで，排出量が削減される可能性が示唆された．耐用年数の感度分析結果は，耐用年数が長いほど，LC-CO2 排出量は低下することを示した．最後に，LC-CO2 排出量を改善するための方策として「普及と高頻度・長距離の利用促進による稼働率向上」「運行の高効率化」「車両の長寿命化」を考察し，シェアサイクルによる環境負荷低減効果をより確実なものとする方向性を示した．

本研究で取り扱ったシェアサイクル事業は導入からの年月が浅く，実績データがまだ乏しい状況にある．特に，車両の廃棄やバッテリー交換等の維持管理に関する実態データがまだ無く，LC-CO2 排出量にどの程度影響を及ぼすか把握できていない．今後は長期間のデータ分析による排出量の経年変化分析により，運営上の更なる課題発見と運行の改善状況把握が求められる．また，比較対象都市を増やし，導入条件や地理的環境の違いに関する分析も必要となる．

今後は，本研究で構築したモビリティサービスにおける LCA 評価の枠組みを応用し，シェアサイクル事業以外のサービスについても評価の展開可能性がある．これにより，環境に良いと謳われることの多い新たなモビリティサービスの環境負荷を一元的に評価・認証する枠組みを整備し，サービス間や自動車等と CO2 排出量を比較することで，環境負荷低減効果の把握が期待される．

謝辞

本研究を進めるにあたり，neuet 株式会社様より，シェアサイクル事業「ChariChari」に関する資料を提供頂いた．ここに深く感謝申し上げる．

参考文献

1) 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量,2023 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html
2) Heikkilä, S. (2014). Mobility as a service-a proposal for action for the public administration, case helsinki (Master's thesis).
3) 香月秀仁, 東達志, 高原勇, & 谷口守. (2018). シェア型自動運転車による自動車利用変化―空走時間発生による環境負荷への影響―. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 74(5), I_889-I_896.
4) 三瀬遼太郎, 井原雄人, & 森本章倫. (2020). 次世代交

通の組み合わせに着目した交通環境負荷に関する研究. 都市計画論文集, 55(3), 652-658.
5) 山本俊行, 成瀬弘恵, & 森川高行. (2006). カーシェアリングが自動車保有および交通行動に及ぼす影響の分析. 土木計画学研究・講演集, 34(55).
6) 須永大介, 谷下雅義, & 原田昇. (2022). COVID-19 流行前後での札幌市都心部の外出・移動行動およびシェアサイクル利用の変化. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 78(6), II_603-II_612.
7) 鈴木美佳. (2021). 日本の都市部におけるシェアサイクル運営の課題. 地理学評論 Series A, 94(3), 152-169.
8) 国土交通省：シェアサイクルの在り方検討委員会,2020 https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/sharecycle/index.html
9) Blondel, B., Mispelon, C., & Ferguson, J. (2011). Cycle more often 2 cool down the planet. Brussels: European Cyclists' Federation.
10) 加藤博和. (2000). 交通分野へのライフサイクルアセスメント適用. IATSS Review, 26(3).
11) 加藤博和, & 柴原尚希. (2009). ELCEL 概念による Social/Dynamic LCA への挑戦. 日本 LCA 学会誌, 5(1), 12-19.
12) 朴秀日, 加藤博和, & 森田紘圭. (2021). モビリティ革命に伴う交通活動の低炭素化効果の評価手法. 地球環境シンポジウム講演集/土木学会地球環境委員会編, 29, 37-40.
13) LCI データベース IDEA version2.3(2019/12/27) , 国立研究開発法人産業技術総合研究所安全化学研究部門 IDEA ラボ一般社団法人サステイナブル経営推進機構

(2023.10.13)

CALUCULATION OF LIFECYCLE CO2 EMISSION FOR THE DEVELOPMENT OF DECARBONIZATION EVALUATION METHODS IN MOBILITY SERVICES -FOCUSING ON BICYCLE SHARING SERVICE-

Taiki MIURA, Hiroyoshi MORITA, Tsuyoshi TAKANO and Hirokazu KATO