

LCA手法を用いた電動バス普及による二酸化炭素排出量の予測

Prediction of CO₂ emissions from popularization of electric buses using LCA

20D3101024F 犬竹 智哉 (交通まちづくり研究室)
Tomoya INUTAKE / Mobility Planning Lab.

Key Words : Fuel Cell Vehicle, Life cycle assessment, Environmental Impact, Hydrogen production

1. 研究の背景

近年、二酸化炭素濃度の増加による地球温暖化が進んでいる。2020年度における運輸部門の二酸化炭素排出量は全体の17.7%を占めており、産業部門に次いで排出が多いことから、運輸部門の脱炭素化が必要とされている¹⁾。脱炭素化を進めるにあたって、EV(Electric Vehicle)やFCV(Fuel Cell Vehicle)が注目されている。中でも、一台の導入による効果が大きい燃料電池バスや電気バスなどの電動バスの導入は、二酸化炭素排出量の削減に寄与することができる。

しかし、電動バスに必要な電気は約8割が化石燃料による発電方法で賄われており、水素製造においても二酸化炭素を排出する化石燃料の水蒸気改質が主流となっている²⁾。また、車両製造やメンテナンス、車両廃棄においても二酸化炭素が排出されており、自動車では車両製造段階などガソリン車よりも多くの二酸化炭素を排出している段階もある³⁾。

したがって、バス走行時だけでなく、車両製造や燃料製造過程などを含めたライフサイクル全体で電動バス導入による二酸化炭素排出の評価を行う必要がある。

2. 研究の位置付け

(1) 既往研究の整理

EVやFCVの将来予測に合わせた二酸化炭素排出量の評価を行う研究は、秋久ら⁴⁾により行われている。秋久らは地域特性を考慮したWell-to-Wheel評価のモデルを構築し、水素製造割合や発電構成比を考慮した二酸化炭素排出量算出のための数式を示している。Well-to-Wheel評価とは、走行時の環境負荷に加え、走行に必要な燃料の生産、供給を含めた全体の環境負荷を評価する手法のことである。また、京都府と福岡県を対象にEVやFCVなどの次世代自動車が普及した場合の二酸化炭素削減割合を算出した結果、割合は概ね一致しており地域による差異は見られないことを示した。伊藤ら⁵⁾はLRTとEVが連携するシステムが環境改善に及ぼす影響を調査した結果、LRT導入後すべての運行間隔別ケースで現行のガソリン車よりもEVの二酸化炭素排出量が小さくなることを示した。

車体のライフサイクルアセスメント(以下LCA)については、Kawamotoら³⁾がGE(Gasoline Engine Vehicle)、

DE(Diesel Engine Vehicle)、BEV(Battery Electric Vehicle)の二酸化炭素排出量をLCAの手法を用いて評価している。ここで、LCAとは製品の製造から廃棄までのライフサイクル全体を考慮した温室効果ガス排出量の評価方法を指す。その結果、GE、DE、BEVのすべてで二酸化炭素排出量が国や地域に依存し、また、BEVは発電源の影響が大きいことを示した。

このように、自動車のWell-to-Wheel評価やLCAを利用した二酸化炭素排出量の評価は行われているが、電動バスに関する二酸化炭素排出量の評価や電気バスと燃料電池バスを同時に導入した際の二酸化炭素排出量の評価はいずれも行われていない。

(2) 本研究の目的

本研究では、電動バスの導入に際しエネルギー源の製造過程や車体のLCA、バスの燃費向上の影響を分析することにより、電動バスの導入による二酸化炭素排出量の変化を定量的に示すことを目的とする。

3. 研究手法

(1) 対象のバス会社について

本研究の対象は、東京都交通局(以下都営バス)とする。都営バスは、燃料電池バスの導入を推進しており、2023年現在国内バス事業者最大の73両を運用している。

(2) 二酸化炭素排出量算出方法

本研究では、LCAを用いてディーゼルバス・燃料電池バス・電気バスの車両製造、メンテナンス、廃棄時二酸化炭素排出量評価を行う。また、車両走行時に使用する燃料は、Well-to-Wheel評価を用いて評価を行う。2023年の二酸化炭素排出量は以上2つの手法により算出する。その後、電動バス普及のシナリオを設定し、そのシナリオに沿った場合の2030年の二酸化炭素排出量を同様の手法により算出する。使用年数は、都営バスがおおよそ15年使用したバスを新車に置き換えていることから、15年とし、車種による差異はないとした。

(3) 各項目の算出方法

バスの運行に必要な項目について、項目別に二酸化炭素排出量の算出方法を詳述する。また、生涯走行距離の違いによるバス一台のLCAについても述べる。

a) 燃料製造時二酸化炭素排出量

水素製造時および発電時の二酸化炭素排出量は、秋

久らの水素自動車のWell-to-Wheel評価に関する研究⁴⁾から、製造方法や発電構成比を考慮し二酸化炭素排出量の算出を行う。軽油や重油については、原油の二酸化炭素排出量の原単位と原油から算出される割合を考慮し、二酸化炭素排出量の算出を行う。

b) 燃料輸送時二酸化炭素排出量

燃料輸送時の二酸化炭素排出量については、燃料輸送距離を輸送手段の燃費で除し、輸送手段の燃料の二酸化炭素排出原単位をかけることで、輸送量当たりの二酸化炭素排出量を算出する。その値を用いてバスの燃料使用量当たりの輸送時二酸化炭素排出量を算出する。海上輸送はC重油、陸上輸送は軽油を使用する。

$$CO_2 \text{ 排出量} [g - CO_2 / \text{日}] = \frac{(x_1 / e_1) k_1}{V_1} L_1 \quad (1)$$

k_1 : 各燃料のCO₂排出原単位[g - CO₂/L]

x_1 : 輸送手段の走行距離[km]

e_1 : 輸送手段の燃費[km/L]

V_1 : 一度に輸送できる燃料量[L]

L_1 : 燃料使用量[L/日]

また、水素の供給方法は3通り設定した。外部から水素を供給するオフサイト型では、福島水素エネルギー研究フィールドから輸送する方法とオーストラリアから輸入する方法の2通り、水素ステーション内で水素製造を行うオンサイト型では、都市ガスから水素を製造する方法の1通りを設定している。国産水素は水の電気分解から製造された水素、輸入水素は褐炭から製造された水素を使用する。輸入水素は低炭素社会戦略センターの提案書⁹⁾より、褐炭から水素を製造する際に発生する二酸化炭素の回収率は0.88とし、水素製造22.55万t-H₂に対して63.69万t-CO₂の二酸化炭素が回収・貯留されずに排出されるとする。

c) 車両走行時二酸化炭素排出量

車両走行時の二酸化炭素排出量は、都営バス車両台帳⁷⁾や国土交通省の自動車燃費一覧⁸⁾、都営バス運用情報⁹⁾を利用し、原単位に走行距離をかけてディーゼルバスの二酸化炭素排出量を算出する。原単位は、各形式の走行時二酸化炭素排出量原単位から台数を考慮した加重平均で算出する。燃料電池バス・電気バスは走行時二酸化炭素排出量0とする。

$$CO_2 \text{ 排出量} [g - CO_2 / \text{日}] = k_2 x_2 \quad (2)$$

k_2 : 走行時CO₂排出原単位[g - CO₂/km]

x_2 : 総走行距離[km/日]

d) 車両製造時二酸化炭素排出量

車両製造時の二酸化炭素排出量は、Kawamotoらのガソリン自動車・電気自動車のLCAに関する研究³⁾とトヨタ自動車の燃料電池自動車のLCAに関するレポート¹⁰⁾を

バスに応用し、一台当たり二酸化炭素排出量を算出する。その値に各種バスの台数をかけて車両製造時全体の二酸化炭素排出量を算出する。表-1に製造時の二酸化炭素排出係数をまとめる。

e) 車両メンテナンス時二酸化炭素排出量

車両メンテナンス時の二酸化炭素排出量は、Kawamotoらのガソリン自動車・電気自動車のLCAに関する研究³⁾をもとに、タイヤ・鉛蓄電池・エンジンオイル・ラジエーター冷却水・BEV用リチウムイオンバッテリーを対象とした。各部品において、メンテナンス間隔を考慮の上、自動車用部品とバス用部品の体積比を用いて一日一台当たり二酸化炭素排出量を算出する。その値に各種バスの台数をかけて車両メンテナンス時全体の二酸化炭素排出量を算出する。なお、リチウムイオンバッテリーのみ体積を比較できなかったためバッテリー容量の比で算出する。表-1にメンテナンス時の二酸化炭素排出係数をまとめる。

f) 車両廃棄時二酸化炭素排出量

車両廃棄時の二酸化炭素排出量は、車両製造時と同様に既往研究^{3) 10)}をバスに応用し、一台当たり二酸化炭素排出量を算出する。その値に各種バスの台数をかけて車両廃棄時全体の二酸化炭素排出量を算出する。なお、上記既往研究より車両廃棄時の二酸化炭素排出量は全種類のバスで同値であるとする。表-1に廃棄時の二酸化炭素排出係数をまとめる。

g) シナリオの設定

表-2.3のように、電動バス普及のシナリオは二通り設定した。新車導入台数のうち電動バスの割合は英国の過去のEV販売シェア率推移¹¹⁾に従うとし、シナリオIは、ディーゼルバス・燃料電池バス・電気バス、シナリオ

表-1 各種バスの二酸化炭素排出原単位(単位: g-CO₂/台)

原単位	ディーゼル	燃料電池	電気
製造	6648.4	10776.3	14155.3
メンテナンス	1749.4	1749.4	13154.4
廃棄	74.8	74.8	74.8

表-2 シナリオの違い

シナリオ	ケース	オフサイト型 水素供給	導入車種
I	I-A	国産	ディーゼル 燃料電池 電気
	I-B	輸入	
II	II-A	国産	ディーゼル 燃料電池
	II-B	輸入	

表-3 各ケースのバス所属台数(単位: 台)

シナリオ	ディーゼル	燃料電池	電気
現状	1375	73	0
I	1349	84	15
II	1349	99	0

IIは、ディーゼルバス・燃料電池バスが導入されるとした。また、各シナリオにおいて、オフサイト型の水素供給方法が国産である場合をケースA、輸入である場合をケースBとした。新車導入台数は、2030年までに使用年数15年を迎える台数分とし、置き換え方法は、算出した電動バス置き換え台数分、2023年の任意のディーゼルバスを選択し、その車両運用が電動バスに置き換わるとした。

h) 発電構成

2023年、2030年の発電構成比は表4のように定める。2030年の発電構成比は資源エネルギー庁の2030年度におけるエネルギー需給の見通し¹²⁾から設定する。

i) 走行距離の違いによるバス一台のLCA

3(2)より、都営バスで各種バスを15年使用するとし、総走行距離を変化させた場合の二酸化炭素排出量を算出する。総走行距離は、路線バスの総走行距離が100万km程度であることから、10万km～100万kmを10万km間隔で設定する。また、発電構成によって結果が異なることから、3(h)の2通りで算出する。使用年数を固定しているため、バス製造、メンテナンス、廃棄段階の二酸化炭素排出量は変化せず、燃料製造、輸送、バス走行の二酸化炭素排出量が変化する。

4. 研究結果

(1) 走行距離の違いによるバス一台のLCA

発電構成が2023年の場合のLCAを図-1に、発電構成が2030年の場合のLCAを図-2にまとめる。これより、使用年数を固定した場合、総走行距離が長くなるほど燃料電池バス(オフサイト国産・オンサイト)とディーゼルバスの生涯二酸化炭素排出量の差は大きくなることが明らかになった。一方で、電気バスの生涯二酸化炭素排出量については、総走行距離が長くなるほどディーゼルバスとの差が小さくなることが明らかになった。また、発電構成が2030年の値になると、総走行距離が40万kmを超えたところでディーゼルバスよりも電気バスの生涯二酸化炭素排出量が小さくなることが明らかになった。これは電源構成において非化石燃料の割合が大幅に増加したことが要因である。したがって、非化石燃料による発電割合が増加することで、LCAを考慮しても電気バスがディーゼルバスよりも生涯二酸化炭素排出量を少なくすることができる。

(2) 都営バス全体の日当たり二酸化炭素排出量

都営バス全体の日当たり二酸化炭素排出量の変化をケース別にそれぞれ図-3.4にまとめる。2023年に注目すると、ケースAでは89.75t-CO₂、ケースBでは79.42t-CO₂となった。これより、ケースBにおいてオーストラリアからの輸入水素を使用することで総二酸化炭素排出量が少なくなることが明らかになった。燃料製造時に排出

される二酸化炭素を一部回収・貯留していることが要因である。

また、都営バス全体の日当たり二酸化炭素排出量の変化をケース別にそれぞれ図-4.5にまとめる。シナリオに沿ってバスの置き換えが進んだ場合、2030年一日当たり二酸化炭素排出量は、ケースI-Aでは85.90t-CO₂、ケースII-Aでは87.49t-CO₂、ケースI-Bでは79.42t-CO₂、ケースII-Bでは79.28t-CO₂となり、ケースAでは電動バ

電源	2023年(%)	2030年(%)
天然ガス	39	20
石炭	31	19
石油	6	2
太陽光, 風力	8	20
水力	8	11
原子力	4	21
バイオマス	3	5
地熱	1	1

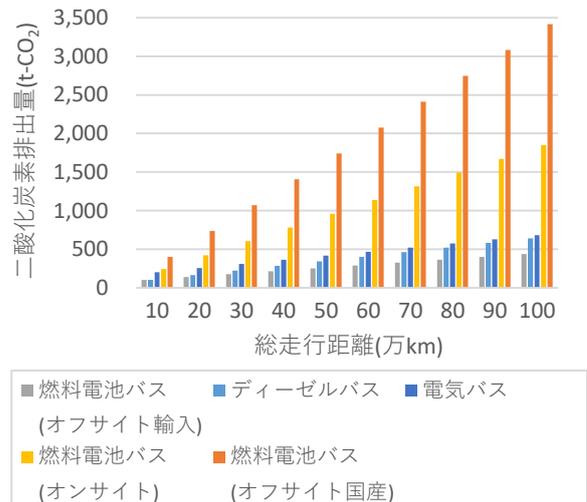


図-1 走行距離の違いによる各種バスのLCA(発電構成 2023)

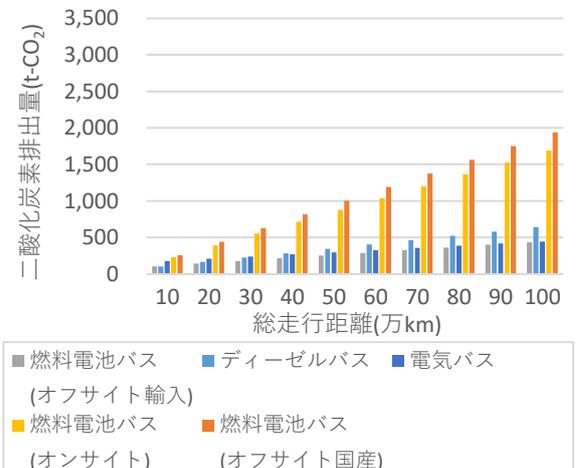


図-2 走行距離の違いによる各種バスのLCA(発電構成 2030)

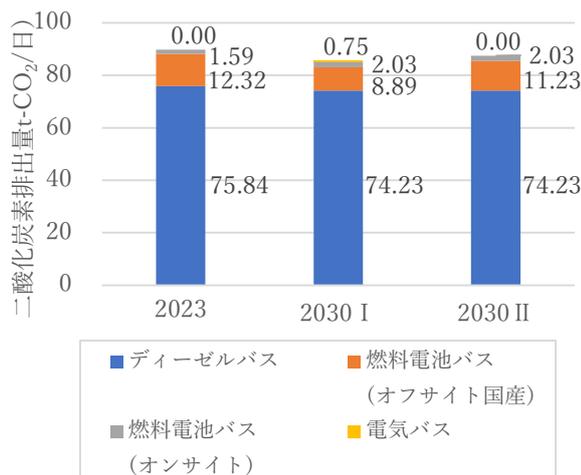


図3 ケース A 一日当たり二酸化炭素排出量の変化

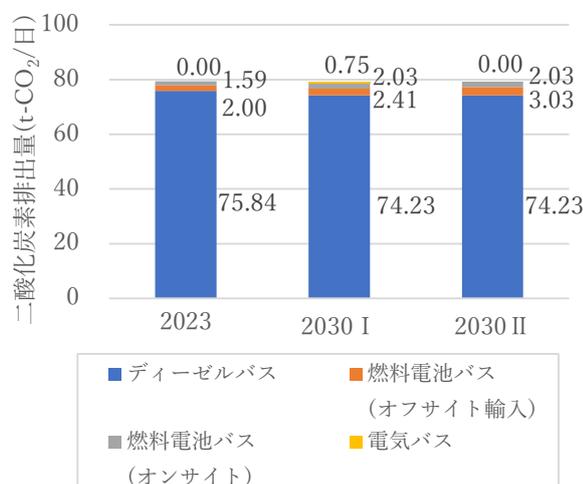


図4 ケース B 一日当たり二酸化炭素排出量の変化

スの導入によって二酸化炭素排出量が少なくなることが明らかになった。ケース A で二酸化炭素排出量が減少したのは、非化石燃料による発電割合が増加したことで、燃料電池バス一台当たりの二酸化炭素排出量が大幅に減少したことが要因である。また、ケース B ではシナリオ II で二酸化炭素排出量が微減したものの、燃料製造時の二酸化炭素回収・貯留率によっては増加することが見込まれる。

5. 結論

本研究では、都営バスを対象として、LCAを考慮した電動バスの二酸化炭素排出量評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 都営バスにおいて、発電構成比が2030年の値になると、総走行距離40万km以上で電気バスのLCAを考慮した生涯二酸化炭素排出量がディーゼルバスよりも少なくなる。

- (2) 発電構成比が2030年の値になると、都営バスの一日当たり二酸化炭素排出量は減少する。

6. 今後の課題

シナリオにおいて、水素製造割合の変化の考慮、LCAの詳細な値の使用ができていないため、その部分も今後考慮することで、二酸化炭素排出量の増加・減少量が変化する可能性がある。また、政策による電動バス導入割合の変化やバス使用継続による二酸化炭素排出量の変化も考慮すべきである。

参考文献

- 1) 環境省「2020年度温室効果ガス排出量(確定値)概要」最終閲覧 2024.2.3
<https://www.env.go.jp/content/900518857.pdf>
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁「令和3年度エネルギーに関する年次報告」最終閲覧 2024.2.3
[2_1.pdf \(meti.go.jp\)](https://www.meti.go.jp/2_1.pdf)
- 3) Kawamoto Ryuji, Mochizuki Hideo, Moriguchi Yoshihisa, Nakano Takahiro, Motohashi Masayuki, Sakai Yuji, Inaba Atsushi. Estimation of CO2 Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA. Sustainability(Web). 2019, 11(9), 2690
- 4) 秋久和裕, 脇英正, 森雄一, ステファンロメロ シェイン, サムウィルソン スコット, 足立正之, 千田二郎. 水素自動車社会に向けた地域対応型Well-to-Wheel評価モデルの提案(第2報). 自動車技術会論文集. 2013, 44(3), p.171-176
- 5) 伊藤真依子, 浅野周平, 森本章倫. LRTと電気自動車が連携した次世代交通システムの環境改善効果に関する研究. 都市計画論文集. 2019, 54(3), p.1268-1274
- 6) 国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター「石炭ガス化による水素、アンモニアの経済性とCO2排出量」最終閲覧2024.2.19
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-13.pdf>
- 7) 東京都交通局「都営バス車両台帳」最終閲覧2024.2.3
https://www.kotsu.metro.tokyo.jp/about/koukai/bus_ledger.html
- 8) 国土交通省「自動車燃費一覧」最終閲覧2024.2.3
https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_mm10_000002.html
- 9) バスロケーション情報「都バス運用情報」最終閲覧2024.2.3
<https://bus-location.1507txyz/umyo/toei>
- 10) TOYOTA「The MIRAI LCAレポート」最終閲覧2024.2.3
https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/esg/challenge2050/challenge2/life_cycle_assessment_report_jp.pdf
- 11) IEA「Global EV Data Explorer」最終閲覧2024.2.3
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>
- 12) 資源エネルギー庁「2030年度におけるエネルギー需給の見通し」最終閲覧2024.2.19
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/opinion/data/03.pdf