

太陽光発電を利用した電動バス導入による CO₂ 削減ポテンシャルの検討

井原 雄人¹・紙屋 雄史²

¹正会員 早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 (〒169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1)
E-mail: ihara@aoni.waseda.jp

²非会員 早稲田大学 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: kamiya@waseda.jp

パリ協定における CO₂ 削減目標に対して、運輸部門においては内燃機関自動車の効率化に加え、次世代自動車としての電動車両の普及が求められる。しかし、乗用車では初期普及段階にある一方で、バスなどの重量車では、航続距離や充電時間の制約による稼働率の低下に課題があり普及が進んでいない。また、電動車両の CO₂ 削減効果の検討においては、走行時の消費エネルギーだけでなく、エネルギー源となる電力の発電構成を考慮する必要がある。

本研究では乗合バス事業を対象に、オープンデータである GTFS-JP および GTFS-RT を活用し、バス車両 1 台ごとの稼働状況を把握する。これにより昼間の充電可能時間に対して太陽光発電を由来とした電力を優先的に充電することでの、電動バスの CO₂ 削減ポテンシャルについて推計する。

Key Words: Electric vehicle, Electric bus, Renewable energy, GTFS-JP

1. 研究の背景・目的

パリ協定に対する目標として、我が国の地球温暖化対策計画¹⁾においては、2013年度比で2030年度までに26%、2050年度までに80%のCO₂排出削減を掲げている。

また、CO₂排出量の現状を部門別に見ると、運輸部門は約20%を占めている²⁾。運輸部門のCO₂排出削減に資する施策としては、既存の内燃機関自動車の高効率化とともにEVやPHEVといった電動車両の普及促進が求められている。しかし、電動車両の普及は、乗用車では自動車メーカーからの市販が始まっている一方で、バスやトラックといった重量車の導入は、航続距離や充電時間などの制約による稼働率の低下が課題となり進んでいない。重量車の多くは業務用車両として使われており、1台あたりの走行距離が長いことから、稼働率の課題が解決すれば、電動化されることによるCO₂排出削減への貢献は大きいと考えられる。

また、電動車両のCO₂排出削減を考える際には、走行時のエネルギー消費だけでなく、供給される電力の発電構成を考慮する必要がある。我が国の発電構成は東日本大震災以降、原子力発電の減少が続いている。現在の発電の中心は、天然ガスや石炭を1次エネルギーとした火力発電であり、これに加えて、徐々に太陽光発電をは

じめとした再生可能エネルギーの導入が進んでいる。図1に示すのは、資源エネルギー庁のエネルギー白書において公開³⁾されている発電構成および電力由来のCO₂排出原単位の推移である。電動車両のCO₂排出量は、走行により使用された電力に対してCO₂排出原単位を乗ずることで算出するため、排出原単位に優れる再生可能エネルギーの有効活用が重要となる。



図1 発電構成とCO₂排出原単位の推移

このような背景を踏まえ本研究では、重量車の中でバス車両に着目し、導入の進まない要因について指摘する。また、太陽光発電を有効利用することでCO₂削減量を最大化し、普及促進策を検討することを目的とする。

2. 電動バスおよび太陽光発電の現状と課題

(1) 電動バスの現状と課題

電動バスの普及は、2011年から国土交通省による「地域交通のグリーン化に向けた次世代自動車普及促進事業」⁴⁾などの補助事業により、50台ほどの導入実績がある。しかし、その多くは1事業者または自治体に対し1台きりのシンボリックな導入となっており、既存の路線に対してディーゼル車両と混走する形で、複数台導入されている事例は少ない。⁵⁾

本研究では、同事業において電動バスを導入した事業者および自治体に対しヒアリングを行い、導入時の課題や導入後の運行方法について調査した。

電動バス導入時の課題としては、ディーゼルバスと比較した際の車両価格が以前より指摘されている。これに対しては、量産効果による価格低減や同事業による導入補助などにより改善されてきている。また、運行時の課題としては、航続距離の短さ、充電時間の確保などの要因による稼働率に低さが共通的に指摘された。

バス事業者は車両が稼働することで、運賃収入を得て事業を継続する。このため、車両価格がディーゼルバスと同等になったとしても、稼働率が低下し運賃収入が損なわれることは避けなければならない。また、稼働率を維持するために増車をすることも考えられるが、近年の運転手不足などの要因により、増車しての運行することも困難である。

しかし、バス事業の実態としては、朝夕のラッシュ時には稼働率が高いが、前述した運転手不足や利用減少などにより昼間の稼働率は必ずしも高くない。

以上の現状を踏まえ本研究では、車両単位の稼働状況を分析し、現在の仕業を維持することを制約条件に、稼働していない時間帯における充電可能時間を把握することで、電動バスの普及可能性について検討する。

(2) 太陽光発電の現状と課題

太陽光発電は、東日本大震災以降に急速に導入が進み、2018年の発電構成では全体の9%の発電量を占めている。

しかし、太陽光発電は発電方法の特性上、あらかじめ発電出力を安定的に設定することができず、日々の気象条件に左右される。このため、太陽光発電を系統に受け入れる電力事業者は、太陽光発電の発電量の下限に備えた発電計画を立てる必要がある。逆に気象条件が良く太陽光発電の発電量が多かった場合には、出力制御を行う必要がある。

太陽光発電の導入が進むとともに、出力制御の問題は顕在化している。2015年の再エネ特措法施行規則の一部を改正する省令により、一定の基準を超えて連系した太陽光発電設備には、電力事業者からの出力制御の要請に

無制限・無補償で応じる必要がある。太陽光発電の導入率が高い九州電力管内では、2018年度には年間26回の出力制御が行われたのに対し、2019年度に74回に急増し、最大289万kWの出力制御が行われた。⁶⁾

太陽光発電は、図1で示したように、2018年のCO₂排出原単位が0.463kg-CO₂/kWhであるのに対し、電力中央研究所の公表値⁷⁾によれば、建設時の環境負荷を含めても0.038-0.059kg-CO₂/kWhとなっており、CO₂排出量を10%程度に低減できる。

本研究では、これまで出力制御を行っていた時間帯において、電動バスへの充電という需要をマッチングさせることで、CO₂削減量の最大化を検討する。

3. 研究の概要

(1) 研究の流れ

本研究では、太陽光発電を有効活用し、電動バスを導入した際のCO₂削減効果のポテンシャルを明らかとするために、下記の手順で検討を行う。

なお、検討結果の推計にあたっては、西日本で営業運行を行っているA営業所に所属する3系統34路線を対象に実施した。

- i. GTFS-JP および RT のデータを利用し、車両の稼働状況を時間帯ごとに把握する。
- ii. 把握された稼働状況に対して、電動バスを導入した際の電力消費、それに対して必要な充電時間を算出する。
- iii. 現状の仕業を維持しつつ、太陽光発電を行われている昼間の時間帯に充電可能な割合を推計し、CO₂削減ポテンシャルを示す。

(2) 対象とする電動バスおよび充電器

検討を行った営業所では、実際には電動バスが導入されていない。そのため導入を想定する電動バスの基本性能として、2014年より乗合バスで電動バスを運行している三重交通による走行データを用いることとした。

三重交通により運行されている車両は、74人乗りの大型の乗合バスであり、本研究で検討を行う営業所の路線と同程度の車格である。また、搭載バッテリーは66kWh、走行データより算出された平均電費は1.02kWh/kmとなっており、これらの値を用いて検討を行う。

また、充電出力については、国内では6kWの普通充電から150kWの超急速充電まで多様の事例がある。本研究では66kWhのバッテリーに対して、昼間の充電のためある程度の出力が必要であり、今後の普及促進を目的とすることから、最も一般的なCHAdeMO形式による50kWでの充電を行うことを想定する。

4. GTFS-JP および RT を用いた稼働状況の把握と電動バスの導入可能性

(1) GTFS-JP および RT の概要

GTFS-JP および RT とは、2016 年に国土交通省により標準化が進められている「標準的なバス情報フォーマット」に包含される、バス事業者と経路検索等の利用者との情報の受渡しのための共通フォーマットである。⁸⁾⁹⁾

GTFS-JP には、停車するバス停や時刻表などのデータが含まれており、どの時間帯に車両が走行しているか、バス停に停車しているか、営業所に回送し待機しているか、などの判別が可能である。しかし、このデータだけでは、どの車両が走行しているかを特定することができない。そこで、GTFS-RT に含まれる車両情報と時刻ごとの位置情報を時刻表と組み合わせることで、走行している車両を特定することとした。

(2) 稼働状況の把握例

GTFS-JP および RT より、5分ごとの車両の状態を

- 「営業所」での待機
- 「停留所」での停車
- 乗客を乗せての「走行」
- 乗客を乗せない「回送」

の 4 種類に分類し、時間帯ごとの台数を積み上げたものを図 2 に示す。

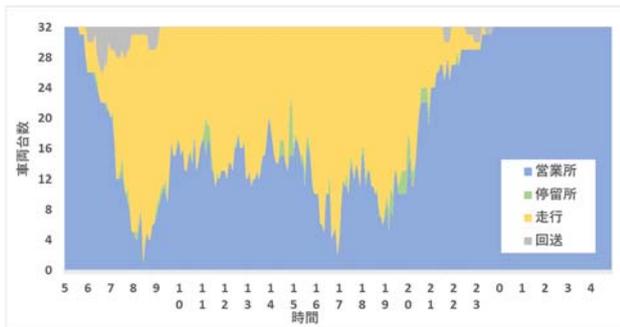


図 2 車両稼働状況の把握例

この営業所の仕業では、回送を含めて 6 時台から運行を開始し、終発は 23 時台まで運行されている。朝夕の通勤・通学需要に対応した 7 時から 9 時と 17 時前後の時間帯においては、ほぼ全て車両が稼働している一方で、昼間は営業所で待機している車両が多く存在していることが分かる。

電動バスの運行時の課題として、現状に比べて稼働率が低下するということが指摘されている。しかし、実際の車両の稼働率は、夜間の停車時間を入れた場合 35.9%、始発から終発までの運行時間帯に限定した場合 47.6% となっており、昼間においてはおおよそ半分の車両が稼働していないという状況が確認された。

(3) 電動バスの導入可能性の検討

次に、この営業所に対して前述した条件の電動バスを導入した場合の充電時間について検討する。電動バスへの充電は営業所での待機時間または、停留所での停車時間に行うことが可能である。しかし、本研究で導入を想定する CHAdeMO 形式による 50kW の充電器を停留所に設置する場合には、新たに大規模な電源工事が必要となるため、営業所での待機時間にのみ充電すると想定して検討を行った。

図 3 に示すのは、バスが営業所に戻るごとに、成り行きで順番に充電する場合の車両の状態を積み上げたものである。朝のラッシュ時間帯を終えた後は、そのまま運行を続ける車両と営業所に戻る車両に分かれるため、同時に充電する充電器は最大 6 台で運用可能である。しかし夕方のラッシュ時間帯においては、そのまま運行を終了し営業所に戻る時間が集中するため、最大 16 台が必要となる。同時に使用する充電器が増えるほど、充電器の導入費用とともに、電力契約における基本料金が高額となるため、交通事業者として望ましくない状態となる。

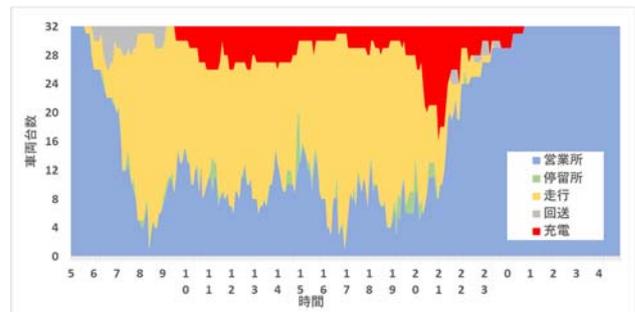


図 3 充電時間の検討 (成り行き充電)

そこで、仕業に影響を与えないことを条件に、充電時間を分散させることで、必要となる充電器を最小化した結果を図 4 に示す。具体的な手法としては、成り行きで充電するのではなく、次便の走行に必要な電力量のみ頻繁充電を行う。これにより、1 台が長時間充電器を占有する必要がなくなり分散が可能となる。

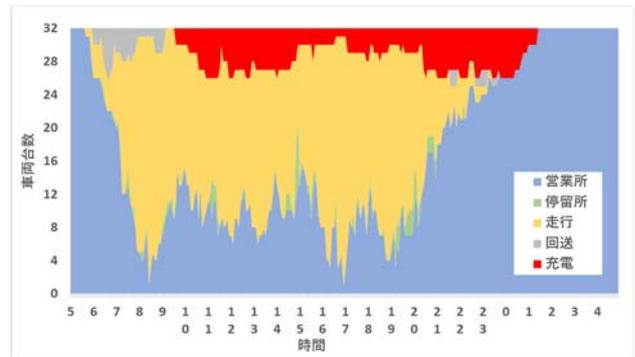


図 4 充電時間の検討 (充電器最小化)

この結果、夕方のラッシュ後でも朝のラッシュ時間帯と同等の 6 台での運用が可能であることが分かった。

この営業所での充電量の総計は 3,142kWh となっており、これを 50kW×6 台の充電器で実施することとなるため、1 台あたり 628kWh の充電を行う必要がある。これを充電器の稼働率を置き換えると 52.0%の稼働率となる。前述したように車両の稼働率は 37.6%であることから、合計 89.6%の時間帯において走行または充電していることとなる。

このことから現状の性能の電動バスでも、効率的な充電パターンを構築することで、仕業に影響を与えず導入が可能であると考えられる。

5. 太陽光発電利用の最大化と CO2 削減ポテンシャルの検討

(1) 太陽光発電利用の最大化の検討

電動バス導入による CO2 削減量を最大化するために、太陽光発電の出力制御が行われる時間帯に優先的に充電し、新たな電力需要とすることを検討する。

具体的には、出力制御が行われる 9 時から 15 時の時間帯において太陽光発電からの電力を優先的に充電するパターンを構築する。

充電器最小化を行った際と同等の 6 台の充電器で、優先充電を行った場合の車両の稼働状況について、図 5 に示す。

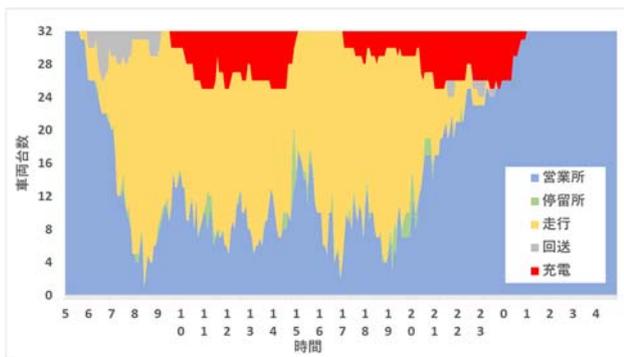


図 5 充電時間の検討 (太陽光優先)

夕方のラッシュ時間帯が始まる 17 時以前は車両稼働に余裕があるため、仕業に影響を与えることなく 15 時以前に優先充電が可能である。一方で、17 時以降の充電を昼間に移動した場合は、夕方のラッシュ時間帯以降の仕業を維持することができなくなることから、優先充電を行うことができないことが分かった。

次に、充電器最小化を行った際と優先充電を行った際の昼間の充電量の割合を比較したものを図 6 に示す。

充電器最小化の場合は同時帯における充電量は合計 1,233kWh であるのに対して、太陽光発電により優先充電した場合は合計 1,438kWh となった。前述したようにこの営業所における総充電量は 3,142kWh であることから、

太陽光発電に由来した電力の使用を 7.1%向上させることができることが分かった。

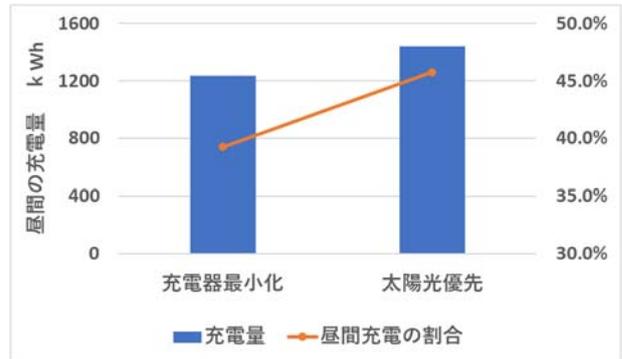


図 6 昼間充電の割合

(2) 太陽光利用時の CO2 削減ポテンシャル

最後に、ここまでの検討を踏まえて、

- 既存のディーゼルバス
- 系統電力を利用しつつ充電器の最小化
- 昼間の太陽光発電を優先充電

の 3 つのパターンにおける営業所全体の CO2 排出量を比較したものを図 7 に示す。

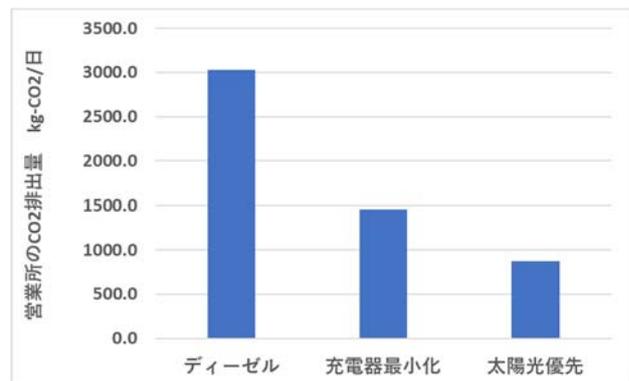


図 7 CO2 排出量の比較

ディーゼルバスと比較した場合、系統電力を利用した電動バスでも走行時の CO2 排出量は 52% 削減される。これに対して、太陽光発電から優先的に充電した場合の排出量は 71% 低減できることが分かった。

このように電動バスの導入は CO2 排出削減に効果を発揮するが、太陽光発電を利用し削減ポテンシャルを最大化した結果、さらなる削減効果を生むことが可能となる。

6. 結論

(1) 本研究により得られた知見

本研究では、GIFS-JP および RT を利用してバス車両の稼働状況を詳細に把握する方法を導出し、これを利用して充電時間の最適化を行うことで、現状の性能の電動バスにおいても仕業に影響を与えずに導入が可能である

ことを示した。

さらに充電時間の最適化において、太陽光発電の出力制御が行われている時間帯に優先充電を行うパターンを示し、電動バス導入によるCO₂削減効果を52%から71%まで拡大するポテンシャルがあることを示した。

これにより、電動バス導入の課題である稼働率の維持を達成しつつ、導入によるCO₂排出削減効果を最大化することで、電動バスの普及に貢献することを可能とした。

(2) 本研究の課題と今後の展望

本研究では、CO₂排出削減にのみ焦点をあて電動バスの導入効果について検討した。しかし、実際の電動バスの導入にあたってはCO₂排出削減の環境性能に加えて、軽油から電力へのエネルギー源の転換によるランニングコストの変動についても考慮する必要がある。

現在の電力契約においては、昼間の出力制御が行われている時間帯に優先充電を行ったとしても、価格的なメリットは存在しない。電力卸売市場におけるシステムプライスの変動¹⁰⁾においても、必ずしも出力制御が行われる時間帯の価格が安くなるわけでない。むしろ価格が高くなる夕方以降の時間帯には充電を行わず、夜間充電を行うことの方が価格的なメリットは大きいと考えられる。

また、今回の検討に使用した電動バスの電費は、実際の営業所の路線で取得されたものではなく、他の路線で取得されたものを使用している。実際の電費は車速や勾配などの走行パターンにより異なることから、走行時のエネルギー消費については、路線ごとの走行パターンを組み込むことで精度の向上を図る必要がある。

バス事業者が電動バスを導入する際には、保有車両を一斉に交換するという事は考えづらく、車両の更新のタイミングで徐々に交換されていくと考えられる。その際には、電動バスの導入効果が大きい路線から導入することが有効であるため、走行パターンの組み合わせによる

精度向上の必要性は高いと考える。

今後は、CO₂排出削減の効果だけでなく、ランニングコストの低減との最適バランスを示し、同時に路線ごとの走行パターンを組み込むことでの精度向上により、バス事業者における電動バスの導入時のエビデンスとしての活用を行う。その結果をもって、電動バスの普及および運輸部門でのCO₂排出削減に貢献したいと考える。

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)により実施したものであり、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：日本の約束草案, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2020.html>, 2015.
- 2) 資源エネルギー庁：エネルギー基本計画, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf, 2018.
- 3) 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2020, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/>, 2020.
- 4) 国土交通省：地域交通のグリーン化に向けた次世代自動車の普及促進事業, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk1_000003.html, 2020.
- 5) 国土交通省：電動バス導入ガイドライン, https://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000036.html, 2020.
- 6) 九州本土の再生可能エネルギー発電設備の出力抑制における公平性の検証結果, 電力広域的運営推進機関 2020.7.
- 7) 日本における発電技術のライフサイクルCO₂排出量総合評価, 電力中央研究所研究報告書, 2016.7.
- 8) 国土交通省：静的バス情報フォーマット(GTFS-JP)の仕様, <https://www.gtfs.jp/developers-guide/format-reference.html>, 2018.
- 9) 国土交通省：動的バス情報フォーマット(GTFSリアルタイム)ガイドライン, https://www.gtfs.jp/developers-guide/gtfs-realtime_guidelines.html, 2018.
- 10) JEPX 日本卸電力取引所：スポット取引インデックス情報, <http://www.jepx.org/index.html>, 2020.9.
- 11) 井原雄人, 紙屋雄史, 高橋俊輔, 一宮航, 電動バス普及に向けた稼働率向上に関する研究, 第19回日本環境共生学会学術論文集 p69-75, 2019.
- 12) 富澤勇輝, 井原雄人, 宮崎輝, 飯野穰, 林泰弘, 山本良太, 実都市データを用いたPV逆潮流削減を目的とした電動バスの最適充電スケジュール決定手法, 電気学会論文誌 p21-27, 2020.

Study of the CO₂ reduction potential of electric buses using solar power generation

Yuto IHARA, Yushi KAMIYA

In response to the reduction targets set by the Paris Agreement, the transportation sector needs to increase the use of electric vehicles in addition to improving the efficiency of internal combustion engines. However, while passenger cars are in the early stages of widespread use, heavy-duty vehicles such as buses are not as widespread due to limitations in range and charging time.

In addition, it is necessary to consider not only the energy consumption during driving but also the power generation composition of electric power when examining the CO₂ reduction effect of electric vehicles.

In this study, the GTFS-JP/RT was used to understand the constraints of each vehicle in the bus business. We estimate the CO₂ reduction potential of the electric bus service by combining the amount of solar power generation and the surplus.