

再生可能エネルギー利用を最大化できる 電気バスの充電パターンに関する検討

澤志 勇樹¹・井原 雄人²・楊 イ翔³・紙屋 雄史⁴

¹正会員 早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科 (〒367-0035 埼玉県本庄市富田 1011)

E-mail: sa2wa1_sense08@akane.waseda.jp

²正会員 早稲田大学スマート社会研究技術融合研究機構 (〒162-0041 東京都新宿区早稲田鶴巻町 513)

E-mail: ihara@aoni.waseda.jp

³非会員 早稲田大学理工学術院 (〒367-0035 埼玉県本庄市富田 1011)

E-mail: matrixyang@aoni.waseda.jp

⁴非会員 早稲田大学理工学術院 (〒367-0035 埼玉県本庄市富田 1011)

E-mail: kamiya@waseda.jp

EV を用いた CO₂ 削減効果を高めるためには、再生可能エネルギーの活用が重要だが、その発電量は自然環境に左右されるために時間帯によって異なる。一方で、路線バスなどの定時路線で運行する車両を EV 化する際、現状の仕業を維持することが制約条件となり、充電に使用できる時間帯は限定的となる。

本研究では、このトレードオフの中で仕業を損なわず再生可能エネルギー利用を最大化できる充電パターンを検討する。電力事業者が公開している電力需給実績から時間帯別の再生可能エネルギーによる発電量を推計する。GTFS-JP および RT からバス車両の稼働率を把握することに加え、実走行に即したエネルギー消費を評価することで、充電時間による制約を明らかにする。さらに、従来の昼間充電に対して、再生可能エネルギー利用を最大化し充電を行った際の CO₂ 削減効果を推計する。

Key Words: Electric bus, Renewable energy, Charging pattern, GTFS, CO₂ emissions reduction

1. はじめに

(1) 研究背景

地球温暖化への対策として、温室効果ガスの排出削減が急務である。これに対し各国は、2020 年以降の気候変動に関する国際的な枠組みとしてパリ協定を設けた。我が国においても例外ではなく、2030 年までに運輸部門での CO₂ 排出量を 2013 年度比の 32%削減¹⁾することを目標に掲げている。

これに対する具体的な施策である次世代自動車戦略においては、2030 年までに電気自動車 (EV) ・プラグインハイブリッド車 (PHEV) の普及率を 20%~30%程度²⁾にするとしている。しかし、現状の普及率は 1%程度³⁾であり、目標達成には一層の普及促進が必要となる。特に重量車の電動化は、航続距離や充電時間の確保のため車両稼働率に制約があり進んでいないという背景がある。

また、EV による CO₂ 排出量は走行距離と供給される電力の発電構成に依存しており、CO₂ 排出原単位の低い太陽光発電や風力発電による電力を供給することが重要である。しかし、現状の我が国の発電構成は火力発電

の割合が高く、CO₂ 排出原単位が高くなる傾向にある。これは東日本大震災以降、原子力発電の割合が低くなった状況があるが、同時に再生可能エネルギーへの関心もパリ協定などの後押しなどにより高まっている。2019 年度の国内の総発電量における再生可能エネルギーの割合は 18.1%であり、震災前 2009 年の 9.4%と比較すると大幅に向上している⁴⁾。

このような現状において、EV 導入による CO₂ 排出削減量を最大にするには、使用する電力の CO₂ 排出原単位の低い再生可能エネルギーを活用すべきであり、特に昼間の太陽光発電などの電力を活用することが有効である。

(2) 研究目的

本研究では、運輸部門における CO₂ 排出削減に貢献するため、1 日あたりの走行距離が長いバス車両を対象とし、航続距離および充電時間を制約条件に、再生可能エネルギー利用の最大化を行うことを目的とする。

具体的には、栃木県宇都宮市の関東自動車宇都宮営業所に所属するディーゼルバスを対象とし、GTFS などの

オープンデータを基に、現状の仕事を維持するために必要な車両稼働率を明らかにする。これにより、電気バスの導入可能性を検討し、それに伴う電力供給において、再生可能エネルギーの利用による CO2 排出削減効果の最大化を見込める充電パターンの検討を行う。

はじめに、バスの車両稼働率を明らかとするため、GTFS を用いて、「走行」「回送」「停留所での停車」「営業所での停車」に車両の状態を分類し、車両 1 台あたりの稼働状況を把握する。また、バス事業者が公開している路線情報と組み合わせ、車両の消費エネルギーを算出することで必要な充電時間を推計する。次に、電力事業者が公開している発電構成から、時間帯別の CO2 排出原単位を推計する。最後に、これらのデータを組み合わせ、現状の仕事を損なわず、昼間の営業所での停車時間に充電することで、再生可能エネルギー利用の最大化を行う。これにより、電気バス導入の障害である航続距離や充電時間による制約を明らかするとともに、導入時の CO2 排出削減を促進することで、電気バスの普及に貢献する。

(3) 従来研究と本研究の位置付け

電気バスの運用を対象とした従来研究は、車両 1 台あたりのエネルギー消費の評価と最適充電パターンの検討に大別される。

車両 1 台あたりの消費エネルギーの評価については、実系統での走行エネルギーの計測に加えて、空調と補機電力のエネルギー消費⁵⁾や回生エネルギーによる充電といった領域までを評価対象としている。また、外気温等の周辺環境が与える車両の消費エネルギーへの影響についても季節間評価の考察⁶⁾を行っている。

最適充電パターンの検討については、「短距離走行・高頻度充電」型と「日中走行・夜間充電」型の車両に対してそれぞれ 1 系統もしくは 2 系統における走行での車両の消費エネルギーを算出し、車両の性能評価を行うことで有用性について比較検討している⁷⁾。

しかし、いずれの研究においても CO2 排出量の算出には、走行時の消費エネルギーに対して、電力事業者らにより一律に公開されている CO2 排出原単位を用いて推計している。さらに、評価範囲も車両単体での性能評価に留まっているために、バス事業における路線全体の CO2 排出削減量の算出は、平均的な走行距離に乗ずることのみで行われている。

これに対して本研究では、GTFS を用いることで営業所単位の車両稼働率を把握し、最適な充電パターンを構築することで、CO2 排出削減を行う。また、CO2 排出量の評価にあたっては、時間帯ごとの発電手法の変化を考慮した CO2 排出原単位を用いることに特徴がある。

2. 電気バスの CO2 排出削減量の現状と発電構成

(1) 電気バスの運用状況

国土交通省は、次世代自動車を導入する事業者に対し補助事業である地域交通グリーン化事業を実施している。平成 29 年度時点で 15 事案、21 台の電気バス導入補助を行っている。電気バスの導入における課題は、運行・運用における課題と充電に関する課題に大別できる。

運行・運用における課題は、1 日の仕事を搭載されているバッテリー容量だけでは行うことができない場合や既存車両と電気バス車両を併用して運行するため、ダイヤなどの運行管理が難しいことなどの課題が挙げられる。

充電に関する課題は、充電器の設置数によって導入できる電気バスの台数が増減する場合や、充電設備が屋外に設置されることによる乗務員への負担が増えることなどが挙げられる。これらのことから電気バスを導入する際には、充電器の台数と CO2 排出削減効果との関係や、導入コストを明らかにした上で、現状の仕事を損なわないような電気バスの充電パターンを検討することが重要となる。

また、電気バスの CO2 排出削減効果について、従来研究では、大型車の CO2 排出削減率は 20%~30%程度、中型車の CO2 排出削減率は 18%前後、小型車の CO2 排出削減率は 40%以上⁸⁾となることが報告されている。この報告では、CO2 排出削減効果を算出する際に、全国の一般送配電事業者の CO2 排出原単位の平均値 0.518 kg-CO2/kWh (2016 年度) を使用している。

しかし、運用の実態として、1 日の運行終了後の夜間に充電するような場合では、火力発電の割合が多い電力を使用することとなり、本研究で提案するような昼間の再生可能エネルギーの利用と比較した際の差異が大きくなるという課題がある。

(2) 発電構成と時間帯別の CO2 排出原単位

前述したように本研究では、一律の CO2 排出原単位ではなく、発電構成および充電パターンを踏まえた時間帯別の CO2 排出原単位を用いて評価を行う。

これを行うため、東京電力が公表している 2019 年度の時間帯別の電力需給実績⁹⁾と、その発電量に伴う CO2 排出原単位を電力中央研究所によるライフサイクル CO2 排出量¹⁰⁾を用いて推計したものを図 1 に示す。

5 時台から太陽光発電による発電が開始されることに伴い CO2 排出原単位は低下し、12 時台に CO2 排出原単位は最小となる。13 時以降は時間経過とともに CO2 排出原単位は増加していき、23 時台には最大となる。また、太陽光発電による発電が終了するのは 18 時台である。電気バス導入を検討する際に、昼間に充電時間を確

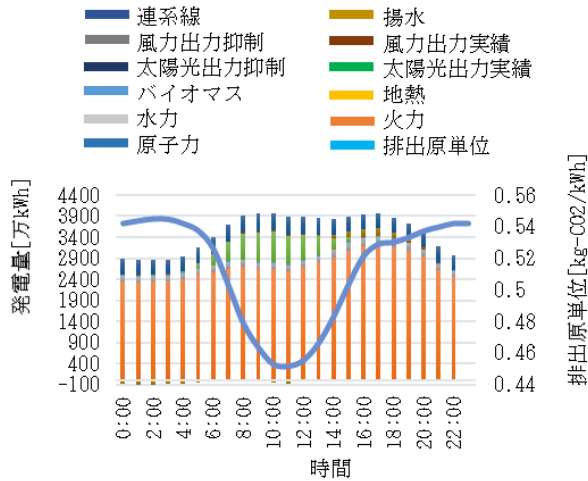


図-1 2019年度における東京電力の時間帯別の電力実績と CO2 排出原単位

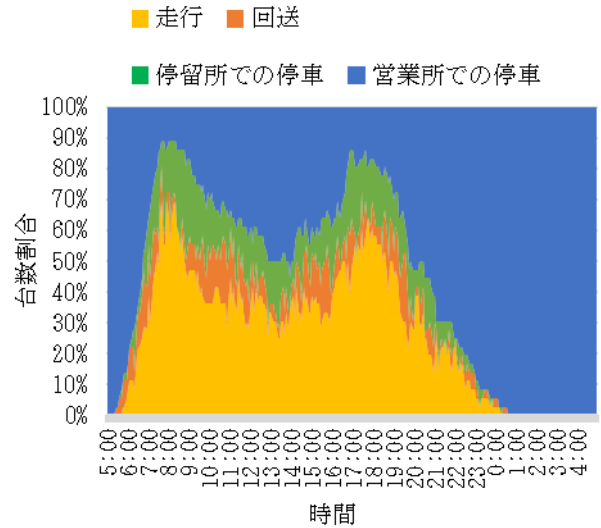


図-2 関東自動車宇都宮営業所の車両稼働率

保できるような充電パターンを検討するが、本研究において昼間とは、太陽光発電による電力供給が行われている5時から18時とした。

3. GTFS による 1 台ごとの車両稼働状況の把握

(1) GTFS (General Transit Feed Specification) と標準的なバス情報フォーマットの概要

GTFS とは統一されたファイル名や項目で作られたテキストファイル群であり、経路検索サービスや地図情報サービスへの情報提供を目的として策定された世界標準の公共交通データフォーマットである。

また、標準的なバス情報フォーマットとは、GTFS を基本として日本における使用を前提として作成されたバス事業者と経路検索等の情報利用者との情報の受け渡しのための共通フォーマットである。国土交通省により2016年から標準化が進められている。GTFS と標準的なバス情報フォーマットには互換性がある。本研究ではこの「標準的なバス情報フォーマット」を活用して検討を行う。

(2) 車両稼働率の把握

本研究では、栃木県宇都宮市の関東自動車宇都宮営業所で運行されているディーゼルバス 36 台を対象として、標準的なバス情報フォーマットを用いて、車両の稼働状況を「走行」「回送」「停留所での停車」「営業所での停車」に分類し、車両の稼働状況を把握している。

図2に示すのは時間帯別の車両稼働率である。7時台をピークとして、昼間の11時から13時では低くなって

おり、43%から63%の車両が宇都宮営業所に停車していることが確認できる。この時間帯は再生可能エネルギーによって発電された電力の割合が多い時間帯と一致しており、CO2 排出削減効果を最大化するために優先的に充電することが有効である。

これにより本事例では、充電器の操作を10分とした場合でも、昼間の充電時間が1台あたり約35分～95分の充電時間を確保できることが分かった。

4. 走行シミュレーションによる消費エネルギーの推計

(1) 対象とする系統

本研究では、バス車両1台ごとに対して充電時間を算出する。関東自動車宇都宮営業所に所属するバス車両において、系統ごとに消費エネルギーを算出するためのシミュレーションを行った。表1に各系統の距離を示す。各系統における消費エネルギーを算出するシミュレーションは、これを入力値とする。

(2) 導入検討を行う電気バス車両

作成するシミュレーションにおいて使用する車両は、関東自動車宇都宮営業所に導入されることを想定し、実際に運行されているバス車両と類似した規格であることが望ましい。そこで、電気バスの導入事例の中から関東自動車と同等の車格で運行を行っている、西日本鉄道株式会社が福岡県福岡市で運行している車両の諸元を用いてシミュレーションを行うこととした。表2に使用するバス車両の基礎情報¹¹⁾を示す。

(3) 走行シミュレーションの結果

シミュレーションは、車両ごとに走行する系統の始点から終点までを1回走行するものであり、営業所と始点終点間の回送は考慮していない。また空調などを含む補機電力は一律 1.5 kW とした。系統を走行する際の電費値は、消費エネルギーが最も多い車両が仕業を維持できる最低の値である 0.72 km/kWh とした。この条件下では、宇都宮営業所に所属する 36 台中 32 台が、夜間充電だけでは1日の仕業を維持できない結果となり、昼間の充電が必要であることが分かった。

表-1 対象とする系統番号と距離

系統番号	距離[m]
40	6,230
A	6,186
31	9,103
36	8,966
43	6,586
36	6,978
34	6,700
37	6,111
25	10,640
37	9,221

5. 充電パターンの検討

(1) 昼間成り行き充電パターン

シミュレーションにより得られた消費エネルギーと車両稼働率を用いて、昼間の充電パターンを検討する。前述したように導入を想定する電気バスのバッテリー容量では、夜間充電だけでは仕業を維持できない。そこで昼間に充電時間を確保し、営業所に戻ってくる車両から随時充電を行う。この充電パターンを昼間成り行き充電と呼称し、今後検討する充電パターンの原型とした。充電電力は 50 kW、充電作業に伴う時間は、計 10 分とした。検討した充電パターンを図 3 に示す。

なお、今回設定したバッテリー容量や電費の条件下において、36 台中 10 台は充電時間を十分に確保できないため仕業が維持できなくなることから、残り 26 台を対象に電動化の検討を行った。

以上を踏まえて、これらを対象に成り行き充電を行なった際には、合計 2,896 kWh の充電が必要となり、時間帯別の CO2 排出原単位を適用した場合の CO2 排出量は 1,463 kg-CO2/日となることが分かった。

また、充電時間が重複するため充電器は最大 13 台が必要であることが分かった。

(2) 再生可能エネルギー利用が最大となる充電パターン

昼間成り行き充電パターンは、仕業に合わせて充電を行うため充電時間が最適化されていない。CO2 排出原単位の最も低い時間帯に集中して充電することで、より高い CO2 排出削減効果を見込めるため、図 1 で示した時間帯別の発電構成と組み合わせ、充電器 13 台において再生可能エネルギー利用の最大化を見込める充電パターンを検討した結果を図 4 に示す。

時間帯別の CO2 排出原単位を適用した場合の CO2 排出量は 1,441 kg-CO2/日であることが分かった。これは昼間成り行き充電パターンに対し、1.5%の CO2 排出削減効果である。

表-2 シミュレーションに用いる電気バス車両の基礎情報

ベース車両	GPG-LV234N3
車両重量	11,220 kg
乗客	71 人
総車両重量	15,125 kg
モーター	UPM-PP200
バッテリー容量	105.6 kWh
推奨 SOC	95~15 %

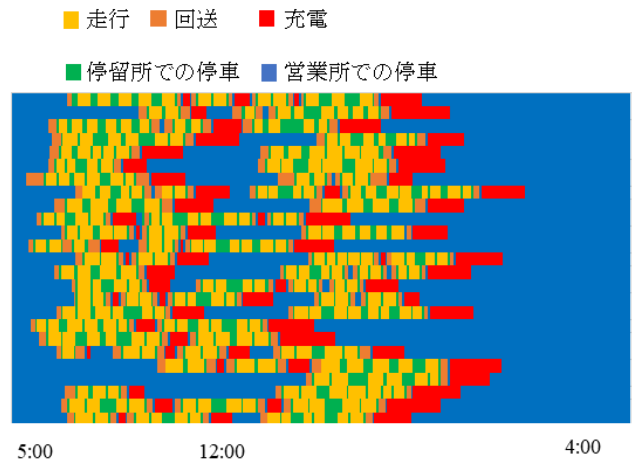


図-3 昼間成り行き充電パターン

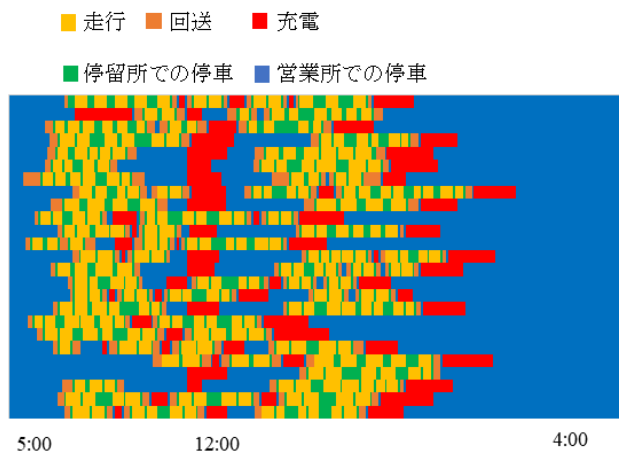


図-4 再生可能エネルギー利用が最大となる充電パターン

(3) 充電器の台数と CO2 排出削減効果の関係

a) 充電器の最小台数

充電パターンを検討するにあたり、制約条件の一つとして充電器の台数がある。そこで充電器の台数が最大となる 13 台より 1 台ずつ減らして充電パターンを検討していった場合、CO2 排出削減効果にどのような影響を及ぼすのかを考察する。

充電パターンは、二段階に分けて検討した。第一段階は、12 時から 13 時に集中して充電することを優先しつつ、この時間帯に充電時間を確保できない車両は、CO2 排出原単位が低い他の時間帯に充電する。第二段階は第一段階に加え、充電器の重複使用を避けるために充電量を変更して充電を行う。

なお、充電器の台数が 4 台以下の場合には、充電器の重複によって、仕業に必要な電力を充電できない車両が発生するため、CO2 排出量に関わらず最小で必要な充電器の台数は 5 台となることが分かった。

これを踏まえて、充電器が 5 台である場合の充電パターンを図 5 に示す。時間帯別の CO2 排出原単位を適用した場合の CO2 排出量は 1,460 kg-CO2/日であることが分かった。これは昼間成り行き充電パターンに対し、0.2%の CO2 排出削減効果である。

b) 充電器の台数が CO2 排出削減効果に与える影響

同様に充電器の台数を変化させ、それぞれ充電パターンを構築した際の CO2 排出削減効果の推移とそれにより増加した夜間充電の車両台数について図 6 に示す。

充電器の台数が減少すると、昼間において同時に充電できる車両台数が減少するため CO2 排出削減効果が小さくなる。特に、7 台以下となった場合のその傾向は顕著なものとなる。これは、8 台までの場合は昼間の充電時間を前後させることで必要な充電量を確保することができるが、7 台以下の場合には、確保できなくなった分の充電量を、CO2 排出原単位の高くなる夜間充電で行う必要が生じるためである。

6. おわりに

本研究は、バス事業者が電気バスを導入するうえで、現状の仕業を維持しつつ CO2 排出削減効果を最大限にできるような充電パターンを検討した。時間帯別の CO2 排出原単位に、1 台ごとに把握した充電可能な時間帯を組み合わせ、現状の仕業に対し CO2 排出削減効果を最大限に高めた充電パターンを検討している。また、充電器の台数が充電パターンを検討するうえでの制約条件となり、CO2 排出削減効果に影響を及ぼすことを確認したことに加え、充電器の台数を可能な限り削減し、

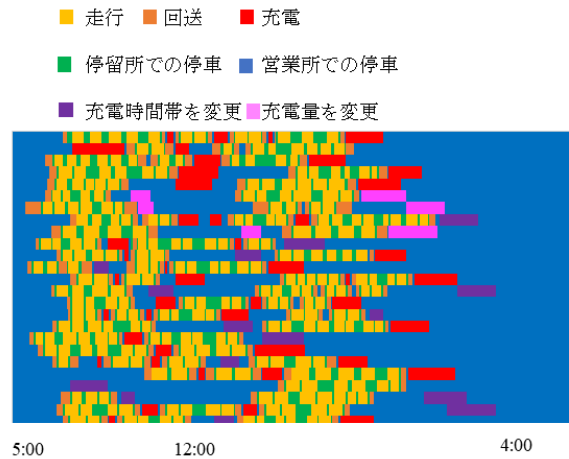


図-5 充電器が台数 5 台の場合の充電パターン

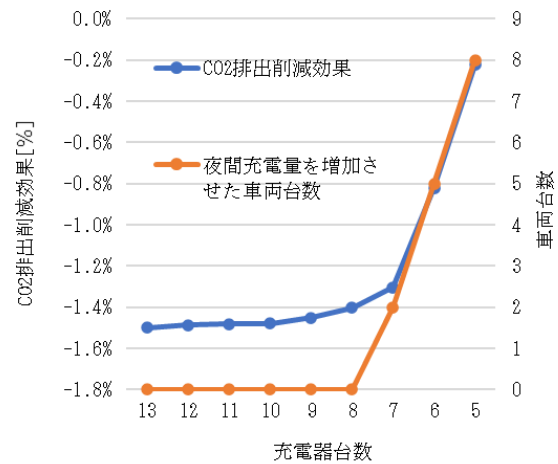


図-6 夜間充電量を増加させた車両台数と各充電器台数の CO2 排出削減効果の関係

かつ CO2 排出削減効果を発揮するには、8 台の充電器を設置することが望ましいことも分かった。

CO2 排出削減効果は、昼間成り行き充電パターンと比較した場合、最大 1.5%であったが、これは今後再生可能エネルギーの導入が進み、昼間充電時の CO2 排出原単位が低くなれば、一層の CO2 排出削減効果が期待できる。

また、本研究では、全ての車両に対して最も消費エネルギーの多い車両が 1 日の仕業を終えることのできる最低の電費値に設定している。しかし実際には車両ごとに走行する系統は異なるため、電費値を 1 台ごとに設定することができれば、より精度の高い消費エネルギーを算出することができる。同様に補機の電力消費を一律に設定しているのに対して、季節間の変動を考慮することも有効であると考えられる。

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）により実施したものであり、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 公益財団法人自然エネルギー財団「EV普及の動向と展望」(2018) 2021.9.23 (https://www.renewable-ei.org/activities/reports/img/pdf/20180627/REI_EVreport_20180627.pdf)
- 2) 一般社団法人次世代自動車振興センター「クリーンエネルギー自動車普及に関する調査報告書」(2018) 2021.9.23 (http://www.cev-pc.or.jp/chosa/pdf/2019_chosa_1_honpen.pdf)
- 3) 国土交通省,経済産業省「EV/PHEV普及の現状について」(2010) 2021.9.23 (<https://www.mlit.go.jp/common/001283224.pdf>)
- 4) 資源エネルギー庁「令和2年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2021)」2021.9.23 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/2-1-4.html>) 第214-1-6
- 5) 加永龍太郎：先進電動マイクロバス交通システムの開発と性能評価(第7報)開発車両の長期営業運行中に得られた低炭素効果とエネルギーコスト削減効果の詳細分析, (2014)自動車技術会2014年秋季大会学術講演会前刷集
- 6) 三好宏和: 高速道路走行を想定した電気バスの設計・試作・性能評価(2019)自動車技術会2018年秋季大会学術講演会講演予稿集
- 7) 楊イ翔: 電気バスを対象とした“短距離走行・高頻度充電型”と“日中走行・夜間充電型”の比較設計と性能評価(2017)自動車技術会2016年秋季大会学術講演会講演予稿集
- 8) 国土交通省自動車局「電動バス導入ガイドライン」(平成30年12月)
- 9) 電力広域的運営推進機関「送配電等業務指針」(平成27年4月28日施工) p.107
- 10) 今村栄一, 井内正真, 坂東茂: 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(2016)
- 11) ぼると出版: バスラマインターナショナルNo.178(2020) p.7~p.10

(2021 ? . ?受付)

Considerations of Electric Bus Charging Pattern Maximizing Renewable Energy Utilization

Yuki SAWASHI, Yuto IHARA, Wei-hsiang Yang, Yushi KAMIYA

Utilization of renewable energy is important to enhance the EVs' CO2 reduction effects. However, the amount of power generation depends on the natural circumstances that varies in different period of time. On the other hand, when electrifying vehicles that operate on fixed routes such as buses, due to the constraint condition that the current work capability has to be maintained, the period of time for charging is limited.

In this study, we investigated a charging pattern that can maximize the use of renewable energy while maintaining the buses current work capabilities within this trade-off situation. The amount of power generated by renewable energy for each period is estimated from the actual power supply and demand published by electric power companies. In addition to grasping the bus operating rate information from GTFS-JP and RT, we clarified the charging time restrictions by evaluating the energy consumption of actual driving. Furthermore, we estimated the CO2 reduction effect according to the current circumstances on condition that maximizing the use of renewable energy by charging at night.