

ゼロエミッション化に向けた 電気自動車の充放電制御の分析

川崎 直哉¹・室町 泰徳²

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-5)
E-mail:kawasaki.n.ac@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系
(〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町4259 G3-5)
E-mail:muromachi.y.aa@m.titech.ac.jp

本研究では、茨城県つくば市を対象として、電気自動車 (EV) の充放電制御を充放電による総電気料金最小化問題および充電電力の発電時CO₂排出量最小化問題として定式化し、経済性・環境性を評価した。また、深夜帯電気料金の設定と高額な炭素税の賦課を行った場合の影響について検討した。さらに、1年間の電力需要およびEVの充放電需要を太陽光発電 (PV) 量のみで賄うことにより都市をゼロエミッション化する可能性についても分析を行った。その結果、EVの充放電制御により、充電需要の集中による電力ピークの増大や負荷率の悪化を軽減・改善することが出来ることが確認された。また、都市をゼロエミッション化する場合、PVと家庭用蓄電池の最適導入容量がトレードオフの関係にあること等が明らかとなった。

Key Words: electric vehicle, zero emission, charging and discharging control, smart grid, photovoltaic

1. はじめに

(1) 背景と目的

2016年に閣議決定された地球温暖化対策計画¹⁾において、我が国は長期的目標として2050年までに温室効果ガス排出量の80%削減を掲げた。また、2018年のIPCCによる特別報告書では、地球温暖化を1.5°Cに抑制するため、2050年頃にCO₂排出量を正味ゼロにする必要があるとした²⁾。そうした中、運輸部門におけるCO₂排出量は、自動車の燃費改善や貨物輸送における輸送量の減少等によって減少傾向にあるものの、依然として2割弱を占めている³⁾。この削減に向け、エネルギー効率に優れる電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHV) といった次世代自動車の普及が推進されている⁴⁾。

将来、EV が大量に普及すれば、その充電に伴う大きな電力需要が発生することが想定され、さらに充電が夕方以降の時間帯に集中すれば、電力システムに新たな電力需要ピークが発生し、これが電力システムの運用に悪影響を及ぼすことが懸念されている⁵⁾。

一方、エネルギー部門においては、再生可能エネルギーにより低炭素化が図られており、特に太陽光発電

(PV) については、2030年度には約6,400万kWが導入されると見込まれている⁶⁾。PVの問題点として、天候による出力変動や余剰電力の発生が挙げられ、今後こうした問題を軽減するために電力システムの調整機能を増強する必要が生じている⁷⁾。

これらの問題に対し、EVを電力システムに接続し、EVのバッテリーの充放電を行う、Vehicle-to-Grid (V2G) が注目されており、V2Gの技術によって、新たな電力需要ピークの発生を回避することや、PVの調整機能を担うことが期待されている⁸⁾。

こうした背景の下、将来発生しうる諸問題に対し、V2GによりEVの充放電制御を行うことで解決することが想定される。その場合、例えば電力需要の少ない深夜帯といった、特定の時間帯に充電が行われることが考えられる。しかし、EVの走行に伴うCO₂排出量は走行時に使用する電力の発電時のCO₂排出量に依存するため、充放電制御によって単位電力あたりのCO₂排出量が大きい時間帯に充電が集中すれば、EVの環境性能が変化することが懸念される。一方で、EVの充放電を単位電力あたりのCO₂排出量が少ない時間帯に誘導すれば、環境性能の向上が期待できる。本研究では、EVが大量導入さ

れた将来を想定し、充放電制御による経済性に加え、環境性の変化を明らかにする。さらに、今後のゼロエミッション化に向けては、火力発電中心の電源構成を改善することが重要になる。そこで、EVの充放電の活用とPVや家庭用蓄電池の導入により、都市をゼロエミッション化する可能性についても検討する。

(2) 既往研究と本研究の位置づけ

EVの大量導入による充電負荷が電力系統に悪影響を及ぼす可能性が指摘されており⁹⁾、この問題への対策が数多く議論されてきた。

Qian *et al.*⁹⁾は、充電開始時刻の統計的な分布や充電のオンオフの確率分布を考慮した、EV充電負荷のモデル化を行った。小田ら¹⁰⁾は、乗用車の利用面から、EV充電負荷曲線を算出し、充電時間が長時間となるように規制すると昼間の負荷が減り、電力需要が平準化されることを示した。高木ら¹¹⁾は、利用者の利便性を考慮した、深夜電気料金の設定や充電開始時刻の分散といった方策を設け、それらによる充電負荷の分散効果について検討した。田頭ら¹²⁾は移動目的地での充電を考慮した充電負荷を推計した。

近年では、スマートグリッドやV2Gに関連し、EVの充放電制御の手法についての研究が活発に行われている。Schill *et al.*¹³⁾は、ドイツの電力系統にEVが与える影響の将来推計を、電源構成の変化とEVへの充電を同時に考慮したコスト最小化モデルによって行った。池上ら¹⁴⁾は5種類のEV充電制御手法によるEV充電負荷を算出、発電燃料費低減効果の評価を行い、PVとEVの普及状況に応じた適切な充電制御手法を検討した。環境性の変化やEV放電の放電を考慮したものとしてはEser *et al.*¹⁵⁾があり、エネルギーシステムに焦点を当て、エネルギーシステムモデルEnepolを用いて2030年のEVの充放電がもたらす影響の予測を行った。また、シナリオ分析において、賦課される炭素税額による違いにも言及した。しかし、これらは、電力システム全体等の広域を対象として分析を行っており、今後のスマートグリッドにEVを接続するV2Gを想定した場合、都市レベルなどのより狭い範囲での分析による知見が必要になる。

EVの充電に関して実際の都市を扱った例としては、金森ら¹⁶⁾は、統合型交通需要予測モデルを用いてEVの利用をシミュレートし、都市交通への影響を分析したうえで、都市の電力需要への影響に言及した。落合ら¹⁷⁾は全国の市区町村を対象に、EVやPVが導入された将来を想定し、電力の自給自足の可能性について分析し、都市の特性や施策による影響について考察した。しかし、これらの研究では、EVの充電制御は考慮されておらず、今後都市レベルでのエネルギーマネジメントが行われることが想定されていない。また、都市に一定量のEV、PV

が導入された際の影響については考察されているが、ゼロエミッション化する可能性について議論されている研究は見られない。

以上を踏まえ、本研究では、都市レベルでのEVの充放電制御の効果や各種施策による影響を考察する。具体的には、茨城県つくば市を対象として、EVの充放電制御を充放電による総電気料金最小化問題および充電電力の発電時CO₂排出量最小化問題として定式化し、経済性・環境性を評価する。施策として、深夜帯電気料金の設定と高額な炭素税の賦課を行った場合の影響について考察する。さらに、1年間の電力需要およびEVの充電需要をPV発電量のみで賄うことにより都市をゼロエミッション化する可能性についても分析を行った。

2. 分析手法の概要

(1) 分析の流れ

EVのトリップデータとして、平成17年道路交通センサスオーナーインタビュー調査¹⁸⁾を用い、このうち、EVに置き換わりうる車両の条件を設定し、適合したものを本研究での対象車両とする。本研究では、これら多数のEVの充放電を同時に制御することを考える。

第3章では、電力需要が逼迫する可能性が高い、夏季(8月)の平日の平均的な1日を想定し、総電気料金最小化による充放電制御が経済性・環境性にもたらす効果を分析した。まず、EVの充放電制御手法に応じてシナリオを設定した。続いて充放電制御を、シナリオに応じて充電による総電気料金および充電電力の発電時CO₂排出量のいずれかを目的関数、トリップデータから得た、走行に伴う電力消費量や駐車時間帯等を制約条件とし、非線形計画問題として定式化した。電力システムにおける限界燃料費は電力システム負荷に対し線形に増加する¹⁹⁾ことを踏まえ、電力需要から電力料金を決定することとした。そのため、電気料金算出にあたり、電力需要の推計を、つくば市の需要家分布に基づいた手法で行った。

第4章では、前半と同様に自動車がEVへ転換した想定の下、将来のゼロエミッション化が、PVや家庭用蓄電池をどの程度導入すれば達成できるかを推計した。この推計では、PV発電量や電力需要の季節変動を考慮するため、通年での分析とした。まず、EVおよび家庭用蓄電池の充放電を制御したうえで、1年間の家庭部門・業務部門の電力需要および運輸部門の一部としてEVの電力需要を、PVのみで賄う際に必要な最小PV導入容量を、線形計画法により求めた。さらに、ゼロエミッション化せず、グリッドから全電力を買電する場合と比較し、PV・家庭用蓄電池の設備導入費用の回収期間を算出し、これらの最適な導入構成比について考察した。

(2) 本研究における充放電制御の特徴

本研究では、充電のみを扱った研究が多い中、充電のみならず、放電を考慮しており、V2Gを想定した分析になっている点が特徴の一つとして挙げられる。

また、多くの研究では乗用車のみを対象としているが、比較的小さい貨物車はEVの転換が可能であり、実際に、日本郵便²⁰⁾やヤマト運輸²¹⁾は配送用車両の一部としてEVの導入を進めている。本研究では、軽乗用車、乗用車に加え、軽貨物車や小型貨物車のEV化を考慮し、これらを対象車両に加えている。

多くの場合、EVの充電は車庫(自宅、事務所等)で行われることが多いが、EVの利便性向上のため、商業施設や公共施設等への充電器の整備も進められている。こうした背景を踏まえ、本研究では目的地充電を考慮している点も特徴である。

(3) 分析における前提

データの制約や計算負荷軽減のため、分析の時間解像度は1時間とした。充放電については、つくば市内であれば、すべての駐車場で充放電制御が可能であるとして分析した。充放電制御によってEV利用者の利便性が損なわれることの無いよう、翌日の出発時刻までに満充電の状態にする制約を設けた。買電時と売電時の電力価格は、同時刻であれば同価格とした。

(4) 対象地・対象車両の設定

本研究の分析対象地は、茨城県つくば市とした。つくば市を対象とした理由は、スマートコミュニティやスーパーシティといった新たな社会システム実装に前向きであり、そうした都市の中でも車の交通手段分担率が61% (第6回東京都市圏パーソントリップ調査²²⁾より推計)と比較的高く、EVの重要性が高まっていくと考えられるためである。

車両については、道路交通センサスにおける8車種のうち、軽乗用車・乗用車・軽貨物車・小型貨物車の4車種を対象とした。さらに車種ごとに電費・バッテリー容量を設定し、それらにより求められる航続距離が平日・休日ともに下回る車両をEVに転換する対象車両とした(表-1)。この条件に適合する車両の総走行距離は、つくば市の全車両の総走行距離のうち、7割前後であった(図-1)。また、運輸部門(自動車)CO₂排出量推計データの車種別のCO₂排出量²³⁾と、全車両に占める対象車両の総走行距離の割合から推計した結果、本研究の対象車両CO₂排出量は、つくば市の全車両のCO₂排出量のうち、61.1%を占めていることがわかった。

表-1 EV車種別電費・バッテリー容量の設定

車種	電費 [km/kWh]	バッテリー容量 [kWh]	航続距離 [km]
軽乗用車	9.00	15.0	135
乗用車	7.00	60.0	420
軽貨物車	8.00	15.0	120
小型貨物車	5.00	40.0	200

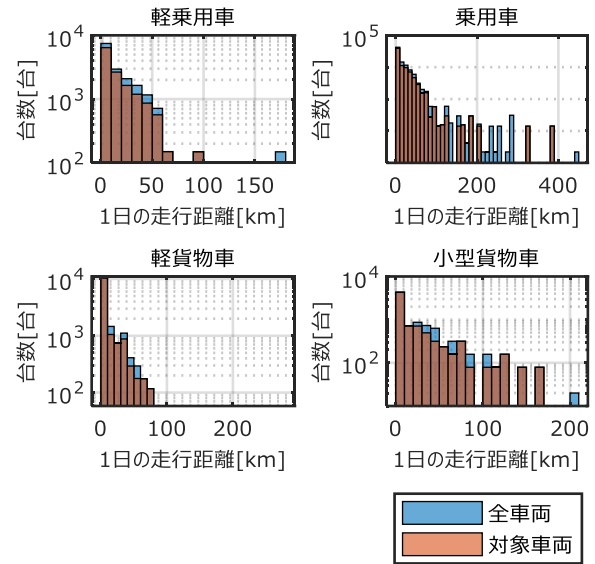


図-1 対象車両の車種別1日の走行距離(平日)別分布

(5) 電力需要の推計

本研究では、電力需要として運輸部門のEVの他、家庭部門と業務部門を対象とし、これを推計した。

家庭部門については、福原ら²⁴⁾を参考に、需要家分布とエネルギー消費原単位を用いて推計した(図-2)。需要家分布は、国勢調査の建て方別世帯数²⁵⁾と住宅・土地統計の建て方別平均延べ床面積²⁶⁾を用いて推定した。エネルギー消費原単位は、冷暖房需要とその他需要に分けて推計を行った。冷暖房需要については、福原ら²⁴⁾の手法に窪田ら²⁷⁾の手法を組み合わせることで、標高の影響を考慮しており、日平均気温²⁸⁾、観測地点標高²⁹⁾から計算した冷暖房デGREEを用いて、家庭用エネルギー統計年報の都道府県別冷暖房エネルギー消費原単位³⁰⁾を補正した値を使用した。その他需要については、家庭用エネルギー統計年報の都道府県別照明・家電製品・他のエネルギー消費原単位³⁰⁾を使用した。これらから年間エネルギー需要を推計し、年間エネルギー種別消費構成比³¹⁾の電化率(46.7%)と月別・時刻別エネルギー需要パターン³²⁾を用いて時刻別電力需要を推計した。

業務部門についても、同様に需要家分布と産業別電力消費原単位を用いて推計した(図-3)。需要家分布は経済センサス基礎調査の都道府県別総従業者数³³⁾と法人建物調査の都道府県別総延べ床面積³⁴⁾から産業別に従業員

1人当たり延べ床面積を算出し、これと経済センサス基礎調査の産業別従業者数³⁵⁾を用いて推計した。電力消費原単位は平成23年度エネルギー管理システム導入促進事業費補助金(BEMS)において計測された事業所の時刻別電力消費量データ³⁶⁾から8月の平均的な電力需要を算出したうえで、産業別時刻別に算出し、これらを用いて時刻別電力需要を推計した。

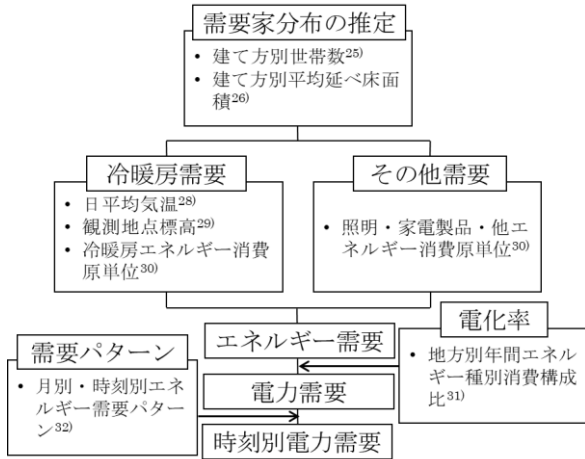


図-2 家庭部門電力需要の推計フロー

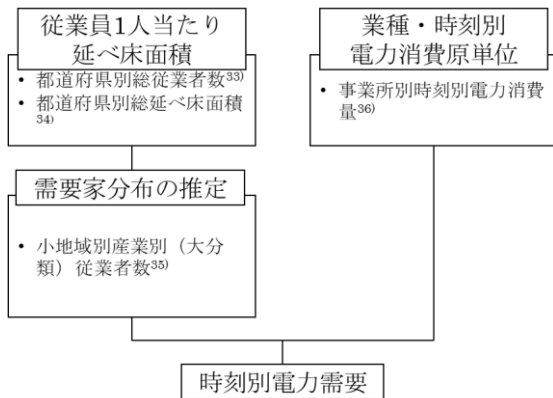


図-3 業務部門電力需要の推計フロー

(6) 発電時 CO₂排出量の推計

EV 充放電制御による環境性の評価のため、発電時に発生する CO₂排出量の推計を行った。時刻別の CO₂排出量を推計するため、燃料別 CO₂排出係数 k_f を設定し、時刻別電源構成から時刻別 CO₂排出係数 K_t を算出した。これと、EVの充放電による電力需要を用いて推計した。

燃料別 CO₂排出係数 k_f は、今村ら³⁷⁾の推計を基に設定した。ただし、火力発電については、東京電力火力発電設備容量³⁸⁾を基に石炭・石油・LNGの構成比を決定し、火力発電として CO₂排出係数を設定した(表-2)。

時刻別電源構成については、東京電力から買電することを想定し、東京電力のエリア供給実績³⁹⁾と同一とした。時刻別 CO₂排出係数 K_t [kg-CO₂/kWh]は、各時刻の東京

電力の電源構成をベースに決定し、EVの充電に必要な電力は火力発電によって賄うとして式(1)で計算する。

$$K_t = \frac{\sum_{f=1}^7 k_f \cdot S_{f,t} \cdot 10^4 + k_1 \cdot \sum_{i=1}^n load_{t,i}}{(\sum_{f=1}^7 S_{f,t} \cdot 10^4 + \sum_{i=1}^n load_{t,i}) / 10^3} \quad (1)$$

ここで、 f : 燃料種別 (1:火力, 2:水力, 3:太陽光, 4:風力, 5:地熱, 6:原子力, 7:連携線), k_f :燃料別 CO₂排出係数[g-CO₂/kWh], $S_{f,t}$:燃料別時刻別電力供給量[万kW], $load_{t,i}$:時刻 t における車両 i の充放電負荷[kW] (充電が正)である。

これと EV の充放電による電力需要を用いて、発電時 CO₂排出量 E [kg-CO₂]を推計した。

$$E = K_t \cdot \sum_{i=1}^n load_{t,i} \quad (2)$$

表-2 燃料別CO₂排出係数

燃料種別	CO ₂ 排出係数 [g-CO ₂ /kWh]
火力	585
水力	11
太陽光	59
風力	26
地熱	13
原子力	19

3. EV充放電制御のもたらす効果の分析

(1) 分析手法

本研究では、まずEVの充放電制御が電力システムへの影響、経済性、環境性に与える効果を分析するため、EV充放電制御を最適化問題として定式化し、シナリオ分析を行った。

a) シナリオの設定

分析シナリオは、1) BAU (EVの充放電制御を行わない場合)、2) 総電気料金最小化、3) 発電時CO₂排出量最小化の3つに大別される。さらに、そのうち、2)については、電気料金体系の違い、放電の有無、炭素税賦課の有無によって5つのシナリオを、3)については、放電の有無によって2つのシナリオを、それぞれ設定した(表-3)。目的関数は、シナリオ2-1~2-5については充電による総電気料金、シナリオ3-1~3-2については環境性を最重要視した際のCO₂排出量削減のポテンシャルを明らかにするため、充電電力の発電時CO₂排出量とした。

電気料金体系は、シナリオ2-1は夜間に優先して充電を行うことを想定し、夜間の電気料金が低減される東京電力の料金プラン「夜トク8」⁴⁰⁾を参考に設定した。シナリオ2-2~2-5については、荻本ら¹⁹⁾、池上ら⁴⁰⁾を参考に、

図-4のように電気料金を電力システム負荷の関数として設定した。なお、電力システム負荷は、人口比によってつくば市の電力需要を東京電力エリア全域に拡大した値を用いた。

炭素税は、これを賦課することによって、CO₂排出係数の小さい時間帯に充電させ、環境性に配慮した充放電制御を実現するための施策としてシナリオに組み込んだ。現在の日本では、炭素税として「地球温暖化対策のための税」が課されており、その額は289円/t-CO₂となっている⁴²⁾が、将来の炭素価格の予測値は0.1~3.5万円/t-CO₂であり⁴³⁾、今後日本においても増額される可能性がある。本研究では、炭素価格を5万円/t-CO₂と設定し、発電時のCO₂排出量に応じて賦課することとした。この設定額は、非常に高額であるといえるが、今後炭素価格が増額される可能性を考慮したこと、また高額に設定することで炭素税賦課がもたらす影響を明らかにすることが理由である。

b) シナリオ1におけるEVの充電負荷計算

シナリオ1は、充電を制御せず、ユーザーの意向によって充電が行われるシナリオ (BAU) として設定した。

充電の有無は各トリップ終了時に判断するものとし、式(3)で表される充電確率によって決定した。式(3)は、充電の要否はSoC (バッテリーの充電率, State of Charge) によって判断するというアンケート結果に基づき、前川ら⁴⁴⁾が示したシグモイド関数である。ただし、翌日の出発までに充電が完了しない可能性がある場合は、充電確率にかかわらず充電を行うこととした。

$$p = \begin{cases} 1 & (\text{SoC} < 10) \\ 1 - (1 + e^{-0.2(\text{SoC}-35)})^{-1} & (10 \leq \text{SoC} < 60) \\ 0 & (\text{SoC} \geq 60) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 p : 充電確率, SoC : バッテリーの充電率である。

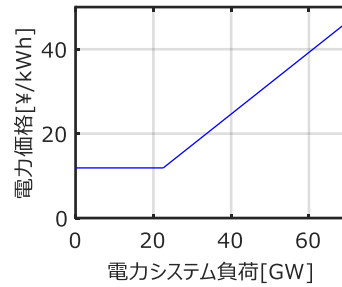


図-4 電力価格の設定

c) EV充放電制御の定式化

本研究では、池上ら¹⁴⁾やTeshigawara *et al.*⁴⁵⁾を参考に、EVの充放電制御を非線形計画問題として定式化した。

シナリオ2-1~2-5の目的関数は充電による総電気料金とし、式(4)で表される。

$$\text{minimize: } \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} (pr_t + prct_t) \cdot load_{t,i} \quad (4)$$

ここで、 pr_t : 時刻 t における電力価格[円/kWh], $prct_t$: 時刻 t における炭素税[円/kWh]である。

電力価格 pr_t はシナリオ2-1では式(5)、シナリオ2-2~2-5では式(6)で表される。

$$pr_t = \begin{cases} 22.768 & (0 \leq t \leq 6) \\ 35.228 & (7 \leq t \leq 23) \end{cases} \quad (5)$$

$$pr_t = \begin{cases} \left(\frac{0.731}{r_{pop}} \right) \cdot LOAD_t - 4.597 & (LOAD_t \geq 22.544) \\ 11.88 & (LOAD_t < 22.544) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $LOAD_t$ は式(7)で表される電力システム負荷 [GW]であり、つくば市の家庭・業務部門の電力需要とEVの充放電負荷の和である。

表-3 シナリオの概要と目的関数

シナリオ名	概要	目的関数
1 BAU	充放電制御を行わない場合	-
2-1 深夜充電 (放電なし)	深夜帯料金を設定し、充放電制御を行う場合	総電気料金
2-2 総電気料金最小化 (放電なし)	電気料金を電力システム負荷の関数とする電気料金体系を導入し、充放電制御を行う場合	
2-3 総電気料金最小化 (放電あり)		
2-4 総電気料金+炭素税最小化 (放電なし)		
2-5 総電気料金+炭素税最小化 (放電あり)		
3-1 CO ₂ 排出量最小化 (放電なし)	EVの充電に伴うCO ₂ 排出量を最小化する場合	CO ₂ 排出量
3-2 CO ₂ 排出量最小化 (放電あり)		

$$LOAD_t = LOAD_{org,t} + \sum_{i=1}^n load_{t,i} / 10^6 \quad (7)$$

ここで、 $LOAD_{org,t}$: 家庭・業務部門電力需要[GW]である。

炭素税 $prct_t$ は、各時刻の CO_2 排出量に基づき、式(8)で表される。

$$prct_t = prc \cdot K_t / 10^3 \quad (8)$$

ここで、 prc : 炭素価格[円/t- CO_2]である。

シナリオ3-1~3-2の目的関数は充電電力の発電時 CO_2 排出量とし、式(1)で表される時刻別 CO_2 排出量を用いて式(9)で表される。

$$minimize: \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{24} K_t \cdot load_{t,i} \quad (9)$$

また、制約条件として、EV 充放電時の最大出力制約(式(10))、電池残量の上限制約(式(11))、電池残量の下限制約(式(12))、翌日の出発時刻における満充電制約(式(13))を、車両ごとに設けた。

$$-6[kW] \cdot trip_{t,i} \leq load_{t,i} \leq 3[kW] \cdot trip_{t,i} \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^t load_{k,i} \leq cons_{t,i} \quad (11)$$

$$bat_i + \sum_{k=1}^t load_{k,i} - cons_{t,i} \geq 0 \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^{24} load_{t,i} = \sum_{t=1}^{24} cons_{t,i} \quad (13)$$

ここで、 $trip_{t,i}$: 車両*i*の時刻*t*における運行状況(トリップ中:0, 駐車中:1), $cons_{t,i}$: 車両*i*が時刻*t*までに走行に

より消費した電力[kWh], bat_i : 車両*i*のバッテリー容量[kWh]である。

EV充放電時の最大出力制約は、各EVの出力は充電時は3kW、放電時は6kWとし、EVがつくば市内で停車している時間のみ充放電が可能であるとして、設定した。電池残量の上限制約および電池残量の下限制約では、各時刻の各EVのSoCが0~100%に納まることを条件とした。また、翌日の出発時刻までに満充電にすることを想定し、翌日の出発時刻における満充電制約を設けた。

(2) 分析結果

a) EV充放電による電力需要曲線の変化

定式化した最適化問題を解くことによって得られた、各EVの充放電量の結果を用いて、EVの充放電が加わった際の電力需要曲線を得た。

各シナリオでのつくば市における電力需要とEV充放電による電力需要曲線を図-5に示す。また、それぞれのピーク電力を図-6に、負荷率を図-7に示す。EV充放電負荷率とは、最大電力に対する平均電力需要の比率を表し、この値は大きいほど変動が小さく、電力システムへの負荷は小さいといえる。

シナリオ1および2-1については、既往研究と同様に、帰宅時間帯以降に充電が集中することで、電力需要曲線のピークが増大していることがわかる。また、図-7から負荷率も低下しており、1日を通して変動の程度も大きく、EVの充電が電力システムへ悪影響を及ぼしていることがわかる。充電による総電気料金の最小化を行うシナリオ2-2では、電力需要の少ない時間帯から充電を行うため、ピーク電力は増大せず、また負荷率は向上していることがわかる。また、充電に加えて放電の制御を行うシナリオ2-3では、シナリオ2-2と比べ、さらに負

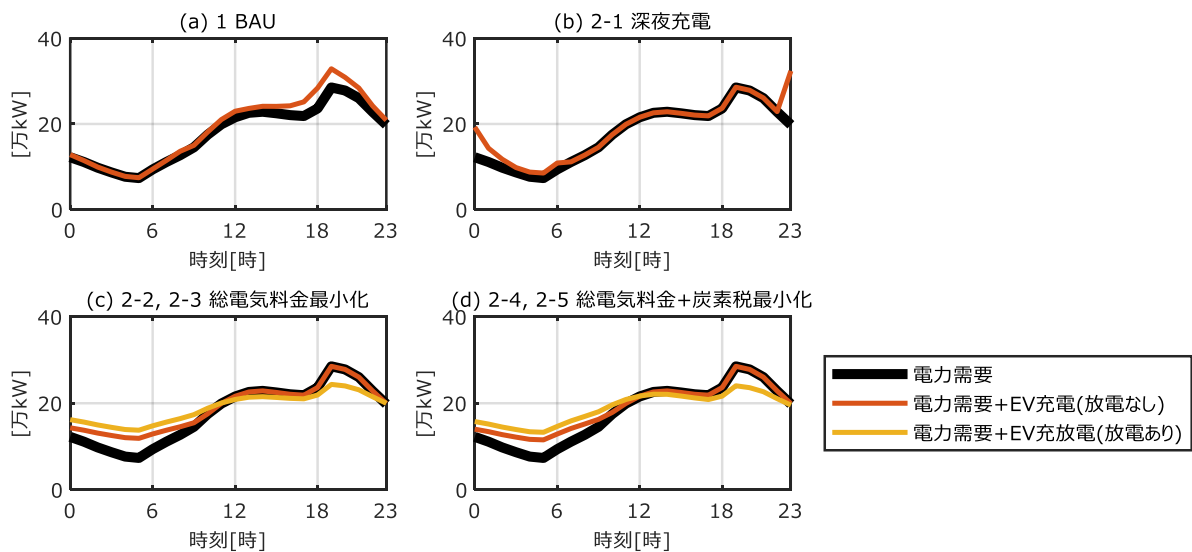


図-5 電力需要とEV充放電による電力需要曲線

荷率は高く、ピーク電力については既存の値よりも低下している。このように、充放電制御を行うことで、電力系統への悪影響を低減することができ、その効果は放電を行うことでより大きくなることが分かった。

また、炭素税を賦課するシナリオ 2-4、2-5 では、5 万円/t-CO₂ という高額な炭素価格を設定しているものの、ピーク電力、負荷率ともにあまり変化は見られなかった。

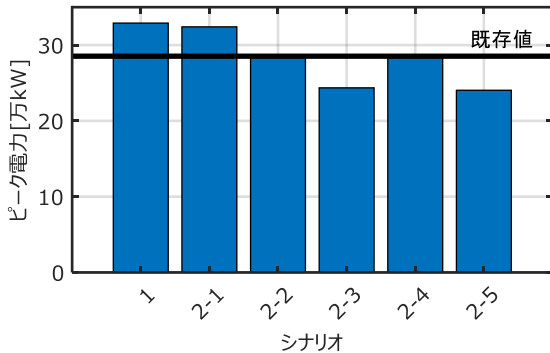


図-6 電力需要曲線におけるピーク電力の比較

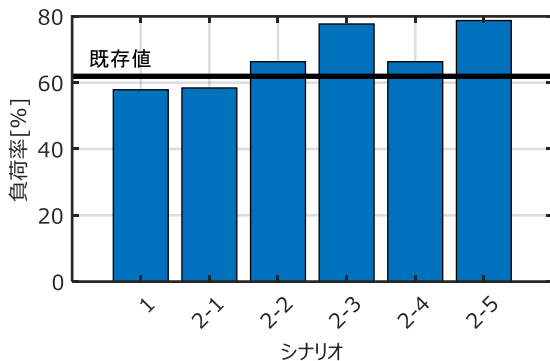


図-7 電力需要曲線における負荷率の比較

b) 総電気料金への影響

充放電制御による、経済性に与える影響を確認するため、EVの充放電による総電気料金を算出した。

図-8 は各シナリオにおける電気料金および炭素税の総額である。目的関数に総電気料金を用いているため、総電気料金は低減され、特にシナリオ 2-2~2-5 においては BAU であるシナリオ 1 と比較し、半分以下に低減されていることがわかる。総電気料金最小化による充放電制御は、電力システムにおけるピーク電力や変動といった悪影響を低減することを目的として行っているが、EVの燃料費の低減という形で、利用者にとっても利点があることが示された。ただし、総電気料金の最小化であるため、必ずしも個々の EV 利用者の電気料金は最小化されていないことには留意されたい。

また、炭素税を賦課するシナリオである 2-4、2-5 では、電気料金に対し 2 倍程度の炭素税が賦課されており、EV

利用者の負担が大きく増加しているといえる。

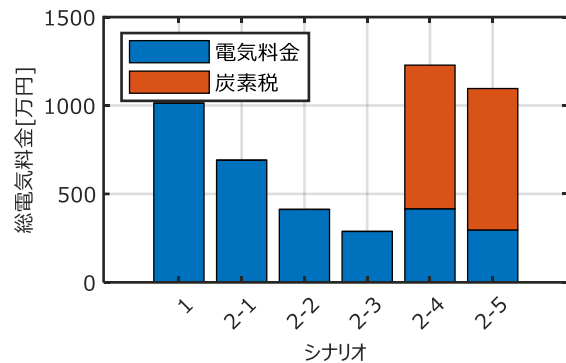


図-8 EVの充放電電力による総電気料金の比較

c) CO₂ 排出量への影響

充放電制御による、環境性への影響を確認するため、EVの充放電電力の発電による CO₂ 排出量を算出した。

図-9 は各シナリオにおける EV の充放電電力による CO₂ 排出量である。総電気料金を最小化するシナリオ 2-2~2-5 では、BAU であるシナリオ 1 と比較し、CO₂ 排出量が 6~9% 程度減少していることがわかった。これは、火力発電の構成比が高い夕方以降の時間帯の充電需要が減少したこと、また充電需要が集中することによる CO₂ 排出係数の悪化が軽減されたためであると考えられる。

一方、放電の有無による違い (2-2 と 2-3) や、炭素税の賦課の有無による違い (2-2、2-3 と 2-4、2-5) はほとんど見られず、1% 未満であった。これは、東日本大震災以降、東京電力における電源構成が火力発電中心となり、1 日を通して CO₂ 排出係数の変動がほとんどない (図-10) ことに起因すると考えられる。

a)、b)での結果も踏まえると、火力発電中心の現状では、放電を行うことは電力システム・EV 利用者にはメリットをもたらすが、環境性の改善にはあまり効果がなく、炭素税の賦課は、電力システム・EV 利用者・環境性のいずれにおいてもメリットは少ないといえる。

また、CO₂ 排出量を最小化する理想的なシナリオ (3-1、3-2) では、他のシナリオと比較して、CO₂ 排出量は低減され、特に放電を行う 3-2 では、39% 低減した (シナリオ 1 比)。これは、放電を行うことによって、CO₂ 排出係数の少ない時間帯に充電を集中させているためである。しかし、この低減幅は、将来のゼロエミッション化を考えると限定的であるといえる。

充放電制御による運輸部門のゼロエミッション化の観点から考えると、充放電制御や炭素税の賦課などの運用方法の工夫による環境面の改善では不十分であり、この原因は火力発電中心の電源構成であると考えられる。よって、電源構成を大幅に改善しない限り、EV の環境性能の改善はほとんど期待できないといえる。

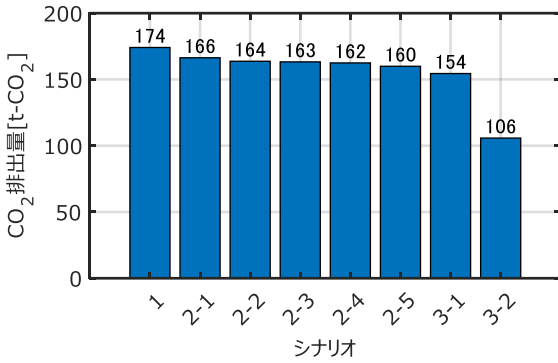


図-9 EVの充放電電力によるCO₂排出量の比較

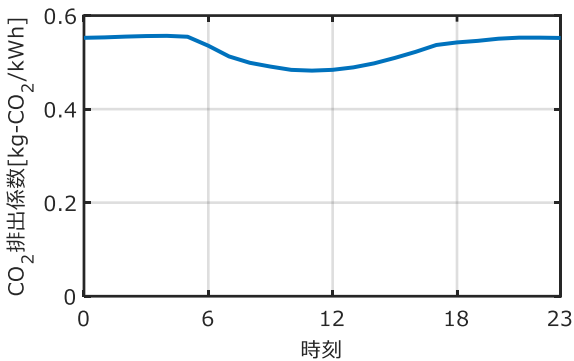


図-10 時刻別CO₂排出係数(EV充放電負荷なし)

4. 都市のゼロエミッション化分析

(1) 分析手法

EVの充放電制御を行ったうえで、新たに都市へPVや家庭用蓄電池を導入することでゼロエミッション化する可能性について、その導入容量や費用を算出することで分析した。

a) 平日・休日の設定

道路交通センサスのデータは平日・休日にわかれている。本研究では、休日を、土曜日、日曜日および国民の祝日、年末年始(1月1日~1月3日、12月31日)、お盆(8月13日~8月15日)とした。

b) PV発電量の推定

岸田ら⁴⁶⁾を参考に、式(14)により、単位PV容量あたりの発電量を求めた。

$$E(t) = I_T(t) / G_s \cdot K_{pt}(t) \cdot C' \quad (14)$$

ここで、 $E(t)$: 時刻 t における単位PV容量あたり発電量[kWh/kW], $I_T(t)$: 時刻 t における斜面日射量[kWh/m²], G_s : 標準試験条件における日射強度(=1.0)[kW/m²], $K_{pt}(t)$: 時刻 t における温度補正係数, C' : その他のシステム補正係数(PVパネルの汚れ・劣化, パワーコンディショナの運転効率による補正等)(=0.80)である。

また、温度補正係数 $K_{pt}(t)$ は式(15)および(16)を用いて算定した。

$$K_{pt}(t) = 1 + \alpha_{Pmax} \cdot (T_{CR}(t) - 25) \quad (15)$$

$$T_{CR}(t) = T_A(t) + \left(\frac{A}{B \cdot V^{0.8} + 1} \right) \cdot I_T(t) - 2 \quad (16)$$

ここで、 α_{Pmax} : PVパネルの最大出力温度計数(=-0.0041)[°C⁻¹], $T_{CR}(t)$: 時刻 t における加重平均PVモジュール温度[°C], $T_A(t)$: 時刻 t における気温[°C], A, B : 係数($A=46, B=0.41$), V : 風速[m/s]である。

また、PVパネルの傾斜角は、一般的な設置角度を考慮して、30°とした。斜面日射量の推定に用いた水平面全天日射量, 法線面直達日射量, 水平面散乱日射量については、気象庁の観測データ²⁸⁾を用いた。

c) 最小PV導入容量計算の定式化

本分析では、PV発電量のみで電力需要および、EV充放電需要を賄うことを考え、一定量の家庭用蓄電池が導入された際に必要な最小PV導入容量を計算する。なお、前半の分析では、EVの充放電は1台ごとに計算したが、本分析では、計算負荷軽減のため全EVの制約条件を1台分に集約して計算を行った。

目的関数はPV導入容量とし、式(17)で表される。

$$\text{minimize: } Cap_{PV} \quad (17)$$

ここで、 Cap_{PV} : PV導入容量[kW]である。

また、制約条件として、EV充放電時の最大出力制約(式(18)), 家庭用蓄電池充放電時の最大出力制約(式(19)), EVの電池残量の上限制約(式(20)), 家庭用蓄電池の電池残量の上限制約(式(21)), EVの電池残量の下限制約(式(22)), 家庭用蓄電池の電池残量の下限制約(式(23)), 年末における満充電制約(式(24), (25)), EV・家庭用蓄電池の充放電および電力需要とPV発電量の需給バランス制約(式(26))を設けた。

$$\sum_{i=1}^{N_{EV}} -6[\text{kW}] \cdot \text{trip}_{t,i} \leq \text{load}_{EV,t} \leq \sum_{i=1}^{N_{EV}} 3[\text{kW}] \cdot \text{trip}_{t,i} \quad (18)$$

$$-Cap_{BAT} \cdot 0.5[\text{kW/kWh}] \leq \text{load}_{BAT,t} \leq Cap_{BAT} \cdot 0.5[\text{kW/kWh}] \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^t \text{load}_{EV,k} \leq \text{cons}_t \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^t \text{load}_{BAT,k} \leq 0 \quad (21)$$

$$-\sum_{k=1}^t \text{load}_{EV,k} \leq \sum_{i=1}^{N_{EV}} \text{bat}_i \cdot N_{EV} - \text{cons}_t \quad (22)$$

$$-\sum_{k=1}^t load_{BAT,k} \leq Cap_{BAT} \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^{365 \cdot 24} load_{EV,t} = \sum_{t=1}^{365 \cdot 24} cons_{t,i} \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^{365 \cdot 24} load_{BAT,t} = 0 \quad (25)$$

$$load_t + D - E(t) \cdot Cap_{PV} \leq 0 \quad (26)$$

ここで、 N_{EV} : EV の台数[台], $load_{EV,t}$: 時刻 t における全 EV の充放電負荷[kW], Cap_{BAT} : 家庭用蓄電池の導入容量[kWh], $load_{BAT,t}$: 時刻 t における全家庭用蓄電池の充放電負荷[kW], D : 家庭部門と業務部門の電力需要の和である。

最大出力制約は、EV は前項と同様に、家庭用蓄電池は、容量 1kWh につき 0.5kW の出力とした。EV・家庭用蓄電池の充放電および電力需要と PV 発電量の需給バランス制約では、EV・家庭用蓄電池の充放電および電力需要が PV 発電量を上回らないよう設定した。

d) 設備導入費用の回収期間

PV と家庭用蓄電池の導入によってゼロエミッション化を行った際に、電気料金が削減されると考え、設備導入費用が回収されるまでの期間を回収期間とし、これを算出した。なお、設備導入費用は、PV の単価を 29 万円/kW、家庭用蓄電池の単価を 6 万円/kWh として計算した。

まず、PV と家庭用蓄電池の導入がない場合にかかる年間の電気料金を計算した。ここでは、EV に加え、家庭部門・業務部門の電気料金を指す。EV の充放電については充電による総電気料金の最小化問題とし、式(4)、(6)、(7)、(10)~(13)を 1 年間の期間として計算した。ただし、EV については 1 台分に集約した。

設備導入費用が上記で計算された年間電気料金の何年分に相当するかを計算し、回収期間とした。また、余剰電力の売電の有無によって 2 つの回収期間を計算しており、売電を考慮する場合、売電時の価格は 10 円/kWh とした。余剰電力はすべて売電できるとした。

(2) 分析結果

a) 最適 PV・家庭用蓄電池導入容量と設備導入費用

家庭用蓄電池導入容量を複数設定し、計算を行った。結果を図-11 に示す。また、図-11 上に、設備導入費用をプロットした。

その結果、PV 導入容量と家庭用蓄電池導入容量はトレードオフの関係にあることがわかった。また、本研究で計算を行った中では、PV を 197 万 kW、家庭用蓄電池を 750 万 kWh 導入した場合が最小の設備導入費用 (1.17

兆円) となった。EV が充放電を行うことで、蓄電池と同様の機能を果たしているものの、依然として大量の家庭用蓄電池の導入が必要であるといえる。

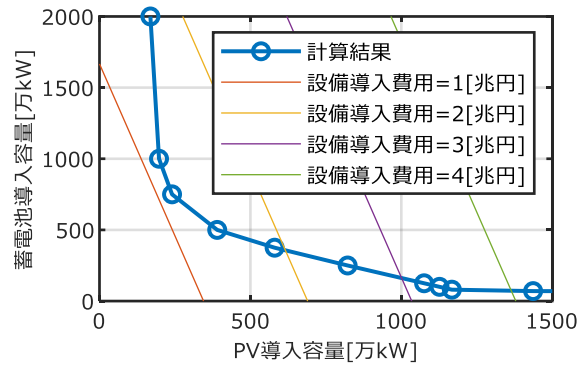


図-11 設備導入容量と設備導入費用

b) 設備導入費用の回収期間

図-12 に、PV 導入容量と設備導入費用の回収期間を、余剰電力の売電を考慮する場合・しない場合について示す。

売電を行わない場合、設備導入費用が最小となる場合が最も短く、39.5 年となった。一方、売電を考慮する場合、PV 導入容量が 1,167 万 kW、家庭用蓄電池導入容量が 80 万 kWh の場合が最も短く、21.1 年となった。PV パネルの稼働年数は 20~30 年程度とされることが多い⁴⁾ため、21.1 年で設備導入費用を回収することができれば、PV と家庭用蓄電池によりゼロエミッション化を行うことは、経済的にも割に合う可能性がある。

また、売電の考慮の有無によって最小の回収期間となる設備導入容量が異なるのは、PV を多く導入すると PV 発電量の利用率が低下し、設備導入費用は高くなるが、余剰電力が多く発生するため (図-13)、売電による利益が大きくなるためである。このように、PV と家庭用蓄電池の導入容量構成を考えるうえでは、売電による利益の大きさによって最適な構成が変わるため、将来の売電価格の変動を十分に見極める必要があるといえる。

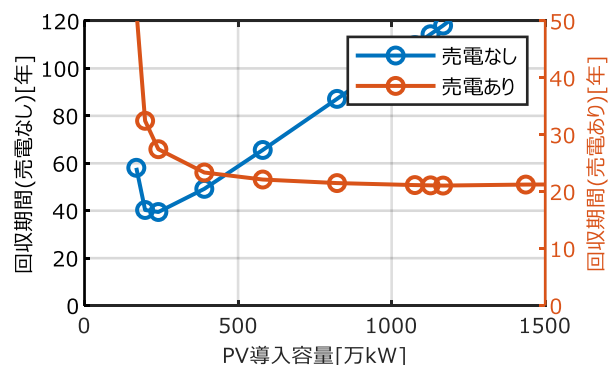


図-12 設備導入費用の回収期間

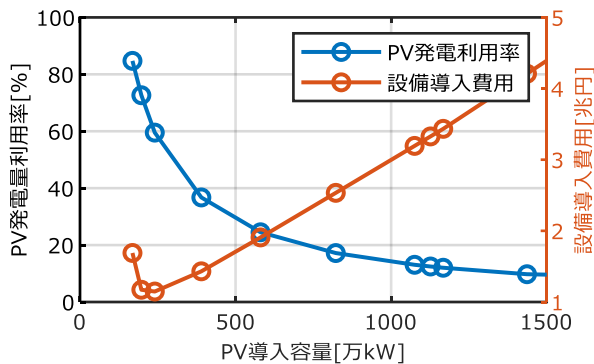


図-13 PV 発電量利用率と設備導入費用

5. おわりに

本研究では、茨城県つくば市について、将来 EV の充放電制御が行われることを想定し、家庭部門・業務部門の電力需要を推計した上で、EV の充放電制御の計算を行い、経済性・環境性の変化を分析した。また、運用方法として、高額な炭素税の賦課が行われた場合の効果を分析した。

その結果、充放電制御により、充電需要の集中による電力ピークの増大や負荷率の悪化を軽減・改善出来ることが確認された。また、電力システムへのメリットだけでなく、充電による総電気料金の低減という形で EV 利用者にとってもメリットがあることがわかった。

環境性については、充放電制御を行わない BAU のシナリオと比較して、本研究で示したいずれの充放電制御手法においても環境性が悪化することはなかった。一方、CO₂ 排出係数の小さい時間に充電を誘導するため、非常に高額な炭素税を賦課しても、環境性の改善はほとんど確認できなかった。また、CO₂ 排出量最小化を行うシナリオにおいても、将来、運輸部門をゼロエミッション化することを考えると、環境性の改善は限定的であることが示唆された。これは、現状の電源構成において、火力発電の構成比が大きくなっているためと考えられ、ゼロエミッション化に向け、電源構成の大幅な脱炭素化を計っていくことが必要であることがわかった。

また、ゼロエミッション化に向けて電源構成の大幅な改善が必要であるとの前提の元、都市のゼロエミッション化分析では、PV と家庭用蓄電池の導入容量について計算を行い、設備導入費用やその回収期間の観点から考察した。計算の結果、これらの最適導入容量がトレードオフの関係にあることが明らかとなり、最小設備導入費用に近い導入容量構成を得た。

導入容量構成を、設備導入費用の回収期間から見ると、余剰電力の売電の有無によって最小期間となる導入容量構成が異なることがわかった。そのため、導入容量構成を決定する際には、将来の売電価格や売電可能量を適切に設定する必要があることが示唆された。

一方、本研究における充放電制御は EV 利用者の利便性を考慮していないことや、EV 利用パターンが既知であるとしていることが問題として挙げられる。また、都市のゼロエミッション化分析においては、PV や家庭用蓄電池が実際に都市内に整備可能であるかについては検討していない。これらを踏まえたうえで、都市のゼロエミッション化へのより現実的な道筋を示すことを今後の課題としたい。

謝辞：本研究では、国土交通省より道路交通センサス、環境共創イニシアチブよりエネルギー管理システム導入促進事業費補助金（BEMS）のデータをご提供頂きました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 環境省: 地球温暖化対策計画, <https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/tai-saku.html>, 2016.
- 2) IPCC: Global Warming of 1.5°C, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_Low_Res.pdf, 2018.
- 3) 国土交通省: 運輸部門における二酸化炭素排出量, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/so-sei_environment_tk_000007.html, 2020.
- 4) 国土交通省: 国土交通省における地球温暖化対策について【概要】, https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/so-sei_environment_tk_000006.html, 2020.
- 5) S. Rahman, G.B. Shrestha: An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 591-597, April 1993.
- 6) 経済産業省: 長期エネルギー需給見通し, https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf, 2015.
- 7) 経済産業省 再生可能エネルギーの全量買取に関するプロジェクトチーム, 「再生可能エネルギーの全量買い取り制度の導入に向けた検討について」, <https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/9497930/www.meti.go.jp/committee/materials2/download-files/g100324a03j.pdf>, 2010.
- 8) 日本エネルギー経済研究所: Vehicle-to-Grid 導入の利点と課題, <https://eneken.ieej.or.jp/data/8438.pdf>, 2019.
- 9) Kejun Qian, Chengke Zhou, Malcolm Allan, Yue Yuan: Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 2, pp. 802-810, May 2011.
- 10) 小田拓也, 伊藤雅一, 川崎憲広, 宮崎隆彦, 柏木孝夫: 交通センサス観測結果等を用いた乗用車の EV 充電負荷曲線と充電ポテンシャルの推定, 電気学会論文誌 B (電力・エネルギー部門誌), Vol.131, No.12 pp.920-926, 2011.

- 11) 高木雅昭, 田頭直人, 浅野浩志:電気自動車の利用者利便性を考慮した夜間充電負荷平準化方策,電気学会論文誌B(電力・エネルギー部門誌),134巻,11号,p.908-916,2014.
- 12) 田頭直人, 高木雅昭:電気自動車の移動目的地での充電可能性を考慮した充電負荷曲線の推計,電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.135, No.1, pp.18-26, 2015.
- 13) Wolf-Peter Schill, Clemens Gerbaulet: Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables?, Applied energy 156, 185-196, 2015.
- 14) 池上貴志, 矢野仁之, 工藤耕治, 萩本和彦:負荷平準化による発電燃料費低減を目的とした電気自動車の多数台充電制御効果の評価,電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), Vol.133 No.6 pp.562-574, 2013.
- 15) Patric Eser, Ndaona Chokani, Reza S. Abhari: Impacts of battery electric vehicles on renewable integration within the 2030 European power system, International Journal of Energy Research, 42: 4142–4156, 2018.
- 16) 金森亮, 森川高行, 奥宮正哉, 山本俊行, 伊藤孝行:電気自動車の普及による都市交通と電力需要への影響分析,土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol.68, No.5(土木計画学研究・論文集第 29 巻), I_1243-I_1251, 2012.
- 17) 落合淳太, 中川喜夫, 松橋啓介, 谷口守:全国の市区町村における太陽光発電による電力自給自足の潜在的な可能性—居住地でのスマートグリッド導入を踏まえ—, 土木学会論文集 G(環境), 69 巻, 6 号, p.II_217-II_225, 2013.
- 18) 国土交通省:平成 17 年度 全国道路・街路交通情勢調査 自動車起終点調査, 2005.
- 19) 萩本和彦, 大関崇, 植田謙:太陽光発電大量導入の電力系統の運用コストに与える影響試算,第 26 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 17-4, pp.1-4, 2010.
- 20) 日本郵政株式会社:ガソリン車 1200 台の電気自動車への切り替え,
https://www.post.japanpost.jp/notification/pressrelease/2019/00_honsha/0326_01_01.pdf, 2019.
- 21) ヤマト運輸株式会社:日本初、宅配に特化した小型商用 EV トラックを導入,
https://www.kuronekoyamato.co.jp/yt/pressrelease/2019/news_191119.html, 2019.
- 22) 東京都市圏交通計画協議会:第 6 回東京都市圏パーソントリップ調査, 2018.
- 23) 環境省:運輸部門(自動車)CO2 排出量推計データ,
https://www.env.go.jp/policy/lo-cal_keikaku/tools/car.html, 2020.
- 24) 福原大祐, 吉川直樹, 天野耕二, 島田幸司:近畿地方民生部門を対象とした再生可能エネルギーの電力融通ポテンシャルの評価,日本 LCA 学会誌, 12 巻, 2 号, p.86-96, 2016.
- 25) 総務省 統計局:国勢調査 平成 22 年国勢調査 人口等基本集計(男女・年齢・配偶関係,世帯の構成,住居の状態など),
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003038611>, 2011.
- 26) 総務省 統計局:住宅・土地統計調査 平成 25 年住宅・土地統計調査 確報集計,
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003105175>, 2015.
- 27) 窪田真樹, 二宮秀興, 曾我和弘:標高を考慮した住宅の省エネルギー基準の地域区分に関する考察,日本建築学会環境系論文集 第 77 巻 第 681 号, 855-862, 2012 年 11 月.
- 28) 気象庁:気象観測統計,
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, 2020.
- 29) 気象庁:地域気象観測所一覧,
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/ame-das/ame_master.pdf, 2020.
- 30) 住環境計画研究所:家庭用エネルギー統計年報 2003 年版,住環境計画研究所, 2003.
- 31) 環境省:平成 30 年度 家庭部門の CO2 排出実態統計調査(確報値),
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/kate-iCO2tokei.html>, 2018.
- 32) 柏木孝夫:天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2008, 日本工業出版, 2008.
- 33) 総務省 統計局:経済センサス-基礎調査 平成 21 年経済センサス-基礎調査 事業所に関する集計,
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003032532>, 2011.
- 34) 総務省 統計局:法人建物調査 平成 20 年法人建物調査 都道府県編 報告書掲載表,
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003189613>, 2020.
- 35) 総務省 統計局:経済センサス-基礎調査 平成 21 年経済センサス-基礎調査 事業所に関する集計,
<https://www.e-stat.go.jp/dbview?sid=0003032559>, 2011.
- 36) 環境共創イニシアチブ: SII エネマネオープンデータ,
<https://www.ems-opendata.jp/>, 2018.
- 37) 今村栄一, 井内正直, 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,電力中央研究所報告 Y06, 2016/07.
- 38) 東京電力ホールディングス株式会社:電力供給設備火力発電所,
<https://www.tepco.co.jp/corporateinfo/illustrated/electricity-supply/thermal-j.html>, 2018.
- 39) 東京電力パワーグリッド株式会社:エリアの需給実績公表について,
https://www.tepco.co.jp/forecast/html/area_data-j.html.
- 40) 東京電力エナジーパートナー:夜トクプラン,
<https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan/yorutoku/index-j.html>.
- 41) 池上貴志, 岩船由美子, 萩本和彦:電力需給調整力確保に向けた家庭内機器最適運転計画モデルの開発,電気学会論文誌 B(電力・エネルギー部門誌), 130 巻, 10 号, p. 877-887, 2010.
- 42) 環境省:地球温暖化対策のための税の導入,
<https://www.env.go.jp/policy/tax/about.html>.
- 43) 環境省:諸外国における炭素税等の導入状況,
<https://www.env.go.jp/policy/policy/tax/mat-4.pdf>, 2018.
- 44) 前川隆文, 小田拓也, 渡辺陽子, ムハンマド・アズイッズ, 柏木孝夫:充電要否判断モデルに基づく電気自動車の充電行動解析-基地充電の有無と電池容量増大の影響,電気学会論文誌 C(電子・情報・システム部門誌), Vol.139 No.11 pp.1357-1367, 2019.
- 45) Yu Teshigawara, Takashi Ikegami: Charging Load Aggregation Potential of Multiple Electric Vehicles Based on Road Traffic Census Data, Electric Engineering in Japan, Vol.203, No.1, 2018.

- 46) 岸田真一, 三浦尚志, 西澤繁毅: 太陽光発電設備の年間発電量の推計方法に関する調査, 建築研究資料, No.188, 国立研究開発法人建築研究所, 2018.
- 47) 発電コスト検証ワーキンググループ: 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告,
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/009/pdf/009_06.pdf, 2015.

(Received October 2, 2020)