

# 電気自動車の充電需要が電力系統に与える影響評価

Evaluation of the influence of electric vehicles' charging demand on power system

田草川智秋<sup>\*1</sup>  
Tomoaki Takusagawa

内田英明<sup>\*1</sup>  
Hideaki Uchida

藤井秀樹<sup>\*1</sup>  
Hideki Fujii

吉村忍<sup>\*1</sup>  
Shinobu Yoshimura

<sup>\*1</sup>東京大学大学院工学系研究科  
School of Engineering, The University of Tokyo

In recent years, the expectation for electric vehicles (EVs) and renewable energy is increasing from the viewpoint of environmental protection. However, considering the spread of EV in the future, it is necessary to clarify the demand for EV charging in large cities and the importance of photovoltaic power generation by simulation. In this study, we evaluate the influence of EV spreading on the electric power system around Okayama city by using the traffic simulator with EV agent installed, and compared it with the current photovoltaic power generation. As a result, we showed that it is necessary to properly induce the charging time and improve the performance of the EV in order to stably cover the EV power consumption by photovoltaic power generation.

## 1. はじめに

日本の電源構成は 2011 年の福島第一原子力発電所事故を境に大きく変化している [1]. 原子力発電による安定した電力供給が絶たれたことによって化石燃料を用いた発電への依存度が高まっており、その結果コスト・環境の両面における負荷が高まっている。日本国内においては温室効果ガス排出量のほとんどをエネルギー消費を起源とする二酸化炭素が占めており、化石燃料由来のエネルギー消費を低減することが重要視されている。特に運輸部門から排出される二酸化炭素の割合は全産業のおよそ 25%と大きく、中でも自動車は主要排出源の一つである。

電気自動車 (electric vehicle, 以下 EV) は、運輸部門における温室効果ガス排出量削減に大きく貢献するものと期待されている。EV の普及は現在全世界で指数関数的に進んでおり [2], ガソリン車から EV への転換の機運が高まっている。しかしその普及に伴い電力の供給元として化石燃料の消費が増大してしまうことが懸念されており、それゆえ EV の充電には太陽光・風力といった再生可能エネルギーが利用されることが理想的である。しかし再生可能エネルギーにも多くの懸念点があり、たとえば安定的に電力を供給することが難しいことや、現状では火力発電を代替する供給量に到達していないといったことがあげられる。

将来的に EV の普及と温室効果ガス排出量削減の取り組みが広く進んだ場合、大規模な都市においてどのような電力需給が見込まれ、太陽光発電がどれほどの重要性を担うことになるのかをシミュレーションにより明らかにする必要がある。そこで本研究では交通シミュレータを用いて EV の普及による都市全体の電力系統への影響を定量的に評価し、現状の再生可能エネルギーによる発電量と比較する。

## 2. EV エージェント

EV は従来の自動車の概念とは大きく異なる特性を持っており、モデル化の際にもこれらの特性を適切に表現しなければなら

ない。本研究では、著者らの所属する研究室で研究および開発が行なわれている知的マルチエージェント交通流シミュレータ ADVENTURE\_Mates[3] に実装された EV エージェントを改良した。ここではエージェントの電力消費、充電方式、回生制動の 3 つについて述べる。

### 2.1 電力消費

車両を希望速度で走行させるために必要な駆動力はそのときの走行抵抗に等しく、これは (1)~(4) に示す物理式により求めることが可能である。これらは (1) 式から順に空気抵抗・転がり摩擦抵抗・勾配抵抗・慣性抵抗を表す。ただし  $\rho$  は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $C_d$  は空気抵抗係数,  $A$  は車両前面投影面積 [m<sup>2</sup>],  $v$  は速度 [m/s],  $\mu$  は転がり抵抗係数,  $M$  は車両総質量 [kg],  $g$  は重力加速度 [m/s<sup>2</sup>],  $\theta$  は勾配,  $a$  は加速度 [m/s<sup>2</sup>],  $k$  は回転部慣性質量係数である。

$$F_{aer} = \frac{1}{2} \rho C_d A v^2 \quad (1)$$

$$F_{roll} = \mu M g \cos \theta \quad (2)$$

$$F_{gra} = M g \sin \theta \quad (3)$$

$$F_{ine} = (1 + k) m a \quad (4)$$

これらの抵抗に加え、電装品等による消費  $E_{acc}$  を考慮することで式 (5) よりバッテリーにおける消費電力を推定することができる。

$$F = ((F_{aer} + F_{roll} + F_{gra} + F_{ine}) \cdot v + E_{acc}) \cdot \Delta t \quad (5)$$

ただし、実際の消費電力量には機会損失や充電残量 (state of charge, 以下 SOC) による性能劣化、回生ブレーキによる影響があることが知られている [4]. そこで、これらの影響についても式 (6)~(8) を用いることで考慮することとする。ここで、 $\eta$  は機械損失率,  $C$  は変換効率,  $R$  は回生率,  $SOC$  は充電残量,  $\alpha$  は SOC 依存係数を表している。

連絡先: 田草川智秋, 東京大学大学院工学系研究科,  
113-8656, 東京都文京区本郷 7-3-1, 03-5841-6994,  
t.takusagawa@save.syt.t.u-tokyo.ac.jp

$$E_{bat} = \begin{cases} \frac{1}{\eta} F \cdot C(SOC) & (F \geq 0) \\ \eta F \cdot R(v) & (F < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$C(SOC) = (1 - \alpha)SOC + \alpha \quad (7)$$

$$R(v) = \begin{cases} 0.5 \times \frac{v}{5} & (v < 5) \\ 0.5 + 0.3 \times \frac{v-5}{20} & (v \geq 5) \end{cases} \quad (8)$$

## 2.2 充電方式

各 EV エージェントは急速充電と普通充電の二種類の方式によって充電を行う。

急速充電では急速充電器により 200V の三相交流を直流に変換して電力供給を行う。数十 kW の電力供給が可能であるため数十分程度でバッテリーを満充電することができる。ほとんどの急速充電は市街に設置された急速充電専用のスタンド (charging station, 以下 CS) で行なわれ、CS に到達した EV エージェントは SOC が 80% になるまで充電を行い、その後即座に CS から目的地へ再出発する。

普通充電では一般家庭の 200V または 100V の単相交流を取り込み、車載充電器によって直流に変換することでバッテリーへ電力供給を行う。急速充電とは異なり交流電源の供給能力が高々数 kW であるため、家庭や職場において 8~12 時間かけて充電をするような使用方法となる。各 EV エージェントは目的地に到達後即座に普通充電を開始し、3kW の出力で SOC が 100% になるまで充電を行う。

## 2.3 回生制動

EV のブレーキは一般的なガソリン車で使用されている摩擦ブレーキに加え、駆動モーターを発電機とする回生ブレーキを併用している。下り勾配等における減速時にはこの回生ブレーキが働き、モーターの逆回転によって運動エネルギーを回収することで充電が行われる。ただし急ブレーキや低速時では回生ブレーキが十分に機能しないため摩擦ブレーキを主として用いる。

## 3. シミュレーションによる評価

### 3.1 対象地域

シミュレーション実行のためのモデル地域として、図 1 の赤枠内に示した岡山市・倉敷市・総社市の 3 つの市からなる、縦約 28km、横約 20km の地域を選出した。高速道路と国道、一部県道の主要道路のみを抽出し、岡山駅周辺部のみ詳細な地図データを結合する。また、高速道路のインターチェンジやジャンクション、国道 2 号線を通る岡山バイパス新たにこれらを地図に追加することで図 2 の白線で示した地図データを作成した。

ネットワーク内の交差点は 258 個である。車両はネットワーク内に存在する 58 個の端点のいずれかから発生し、出発地点以外の端点を目的地として最短経路を通るように設計されている。また出発地 (origin) と目的地 (destination) のペアを OD ペアと呼び、その総数は 1071 である。これは端点の組み合わせ総数  $58 \times 57$  のうち約 3 分の 1 に相当する。

### 3.2 交通需要の推定

シミュレータ内で現実の交通量を再現するために既存の二次計画ソルバーを用いて各 OD ペア間の交通需要の推定を行った [5][6]。観測リンク交通量と推定リンク交通量の残差が最小となるような制約付き最適化逆問題を CGAL[7] を用いて

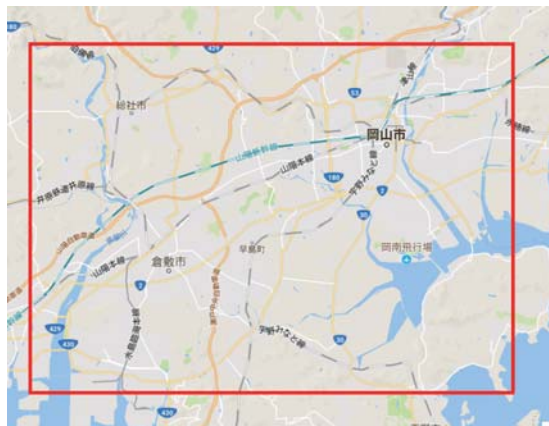


図 1: 対象とするモデル地域



図 2: 作成した地図および CS の設置箇所

解くことで推定を実施し、推定後に大規模な渋滞が発生しない範囲内において交通量を手動で変化させることで、誤差が著しく大きいリンクに対し修正を加えた。

推定結果を図 3 に示す。横軸が観測リンク交通量、縦軸が推定リンク交通量を表している。近似直線の傾きが 0.796、相関係数が 0.846 であり、全体の約 8 割の交通量が再現できていると考えることができる。今回作成した地図は広範囲な上にすべての道路が再現されているわけではないため、現実と比べて迂回路が少なくなっている。またエージェントが事前に混雑を予想して回避することも難しいため、これ以上交通量を増やしてしまうと大規模な渋滞、さらにはグリッドロックを引き起こしてしまう。ゆえに多少現実とは乖離があるが、図 3 に示した交通需要をシミュレーションの入力に用いることとする。

### 3.3 充電設備

都市全域での電力消費を推定するために、急速充電用と普通充電用の二種類の充電設備をモデル地域内に設置した。

岡山県が公開する地理情報 [8] をもとに、地図内に 41 箇所の CS を置き、そこに 49 台の急速充電器を設置した。その内訳は、12kW が 1 台、20kW が 5 台、25kW が 8 台、30kW が 2 台、44kW が 24 台、50kW が 9 台となっている。図 2 内の赤点が CS の設置箇所を示している。また EV の普及が進むと CS の数も増えると考えられるため、普及率が 10% 増加するごとに CS を地図内の任意の 5 箇所に追加で設置する。追加する各 CS はそれぞれ 24 台の急速充電器を持ち、その出力は

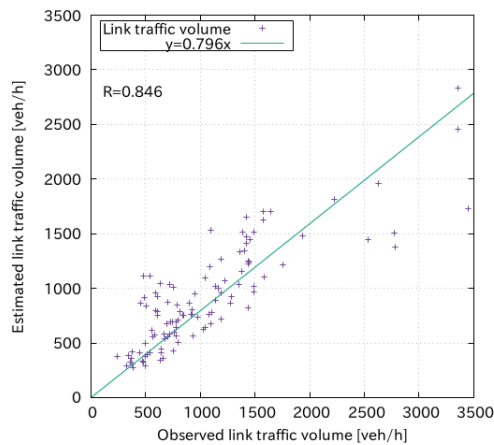


図 3: OD 推定の結果

| 表 1: EV エージェントの諸元 [9] |           |                           |
|-----------------------|-----------|---------------------------|
| 項目                    |           | 設定値                       |
| $\rho$                | 空気密度      | 1.205[kg/m <sup>3</sup> ] |
| $C_d$                 | 空気抵抗係数    | 0.37                      |
| $A$                   | 車両前面投影面積  | 2.14[m <sup>2</sup> ]     |
| $\mu$                 | 転がり抵抗係数   | 0.015                     |
| $M$                   | 車両総質量     | 1180[kg]                  |
| $\theta$              | 勾配        | 0[rad]                    |
| $k$                   | 回転部慣性質量係数 | 0.08                      |
| $\eta$                | 機械損失率     | 0.87                      |
| $\alpha$              | SOC 依存係数  | 2.0                       |
|                       | 充電容量      | 10.5[kWh]                 |

一律で 44kW とする。

普通充電器は家庭や職場以外にも大型施設の駐車場や車の販売店に設置されているが、本研究では EV が目的地に到達した場合のみ普通充電を行うと見なすため、エージェントの移動中に発生する充電行動はすべて急速充電となる。普通充電器は出発専用の端点を除いた 48 か所の端点すべてに設置されており、充電のための待ち行列が発生しないような十分な容量を持っている。

### 3.4 シミュレーション条件

以上の設定のもと、EV の充電による都市全域での電力消費を推定する。このとき EV の普及率を変化させてその影響を定量的に予測する。得られた結果に対し、モデル地域の太陽光発電による電力供給との比較を行ない将来的な電力需要の傾向を分析する。

シミュレーションの実行にあたり、EV エージェントの諸元は表 1 のように与えた。また各 EV エージェントの初期 SOC は満充電の 20% から 85% の値でランダムに与えられるが、OD 間の直線距離が長いほど SOC に余裕を持って走行すると仮定し、初期 SOC の値が比較的大きくなるように補正をしている。すなわちこの仮定は、移動が長距離になるほどドライバーは電欠を起こすことに対して不安を抱くため、SOC を高い値で維持することを想定している。

シミュレーションの実行時間は平日 18 時からの 80 分間とし、最初の 20 分間はエージェントが地図全体に行き渡っていないためその後の分析に使用しないこととする。また EV の普及率は 10% から 50% まで 10% 刻みで与えシミュレーション

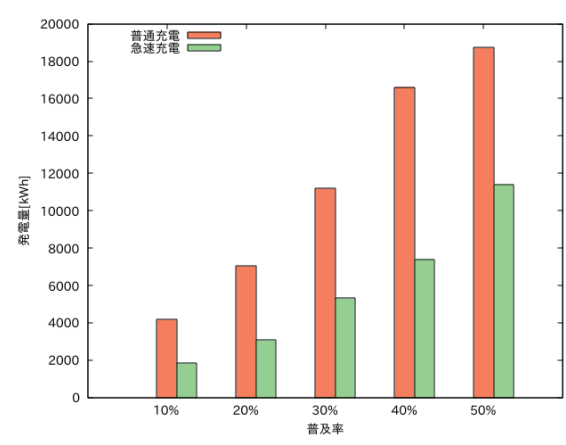


図 4: 急速充電器・普通充電器での 1 時間当たりの消費電力

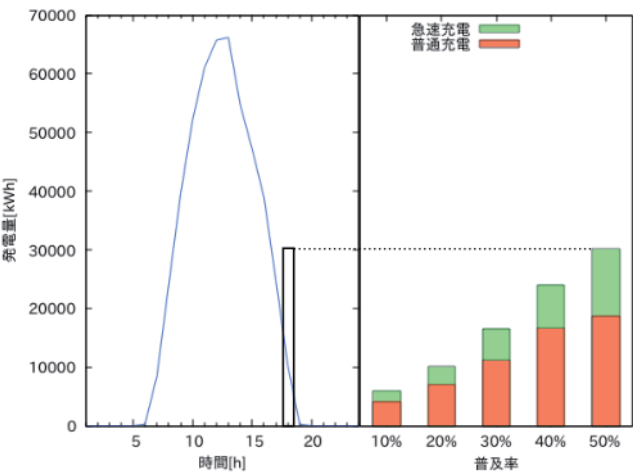


図 5: 太陽光による発電量と EV の消費電力の比較

を行なった。なお、シミュレーションの結果得られた EV の充電による消費電力量は交通量と同様に現実の約 8 割の値と考えられるため、出力値を 1.25 倍した値を結果に用いた。

### 3.5 結果と考察

図 4 は EV 普及率と 1 時間当たりの消費電力量との関係を表したグラフである。普通充電、急速充電のいずれにおいても電力量が線形に増加していることがわかる。普通充電に関しては今回推定した以外にも家庭・職場以外の充電施設における充電や 18 時以前からの充電についても考慮しなければならないため、推定値はさらに大きな値となると考えられる。

図 5 は EV による充電電力量とモデル地域内の太陽光による 1 日の発電量を比較したものである。太陽光による発電量は、平成 29 年 9 月の岡山県全体における発電量 [10] に、県全体に対するシミュレーション対象モデル地域の人口割合 [12] を掛け合わせ、それを 1 日分に変換した後、晴天日の水平面日射量の分布に当てはめることで算出した。また岡山県では火力・水力・太陽光以外の発電は行われておらず、火力発電が発電量全体に占める割合は 9 割以上となっている。

今回示したグラフの範囲においては EV による電力消費は太陽光による発電量でカバーすること可能であり、また 50% 以上の普及率においても同様にカバー可能であると推定できる。しかし、太陽光発電のピーク時間帯と EV の充電のピーク時

間帯には乖離があるため、蓄電を行う必要がある。また、図5は晴天時のものであるが、曇りや雨の日には発電量が大きく減るため太陽光発電によって安定的にEVの電力消費をまかなうことは困難である。したがって、EVの充電時間を適切に誘導するような施策やEVの性能向上、再生可能エネルギーの普及等の取り組みが将来的に重要になってくるはずである。

#### 4. まとめ

本研究ではシミュレーション実行のためにMATESに実装されたEVエージェントの改良を行なった。続いて岡山市周辺の広範囲の都市に対してEVの普及による都市全体の電力系統への影響を示し、太陽光発電の普及の重要性を述べた。

今後の課題として、今回のシミュレーションではEVのみを変動的な要因として電力負荷を考えたが、太陽光発電や電源構成そのものを変化させることで、多様でありなおかつ正確に将来を予測したシミュレーションを行っていきたい。さらにEVや再生可能エネルギーの普及による二酸化炭素排出量に注目することも考えられる。ガソリン車や火力発電のシェアが変化することで環境にどのような影響を与えるのかを評価したいと考えている。

#### 参考文献

- [1] 環境エネルギー政策研究所:「自然エネルギー・データ集」, <http://www.isep.or.jp/archives/library/9570>
- [2] IEA: International Energy Agency: "World Energy Outlook 2017", <https://www.iea.org/weo2017/>
- [3] 吉村忍, 西川紘史, 守安智: 知的マルチエージェント交通流シミュレータ MATES の開発, シミュレーション, Vol.23-No.3, 2003.
- [4] Zhang, R. and Yao, E.: Electric vehicles' energy consumption estimation with real driving condition data, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 41, pp. 177-187, 2015.
- [5] K. Abe, H. Fujii and S. Yoshimura.: Inverse Analysis of Origin-Destination Matrix for Microscopic Traffic Simulator. *Computer Modeling in Engineering and Science*. vol. 113, No. 1, pp. 68-85, 2017.
- [6] 阿部和規, 藤井秀樹, 吉村忍. 交差点の交通容量を考慮した微視的交通流シミュレータのための OD 推定, 人工知能学会 合同研究会 2017 第 30 回 社会における AI 研究発表会 (SIG-SAI), 慶應義塾大学 矢上キャンパス, 神奈川県横浜市, 2017 年 11 月.
- [7] The Computational Geometry Algorithms Library: <https://www.cgal.org/>
- [8] 岡山県: 「岡山全県統合型 GIS」, <http://www.gis.pref.okayama.jp/pref-okayama/Portal>
- [9] 三菱自動車: i-MiEV 主要諸元表: [http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/spec/spe\\_02.html](http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/spec/spe_02.html)
- [10] 資源エネルギー庁:「平成 29 年度 統計表一覧—電力調査統計」, [http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric\\_power/ep002/results.tml](http://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.tml)
- [11] 日射量データベース閲覧システム: <http://app0.infoc.nedo.go.jp/>
- [12] 総務省統計局:「日本の統計 2017—第 2 章 人口・世帯」, <http://www.stat.go.jp/data/nihon/02.htm>