

# 充電料金戦略を考慮した ミクロモデル交通流シミュレーション

Microscopic Traffic Flow Simulation Considering Charging Fee Strategy

小沢謙太郎<sup>1)</sup>, 藤井秀樹<sup>2)</sup>

Kentaro Ozawa and Hideki Fujii

1) 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, E-mail: ozawa-kentaro@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

2) 博(環境) 東京大学大学院 工学系研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, E-mail: fujii@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Electric vehicles (EVs) are expected to serve as a means of reducing environmental impact by lowering greenhouse gas emissions and promoting the adoption of renewable energy. One of the key challenges for EV adoption is the efficient utilization of charging stations (CSs). In this study, a charging fee strategy algorithm was implemented into a microscopic traffic flow simulation capable of reproducing vehicle interactions and its impact on the utilization of CSs was analyzed.

**Key Words :** Electric vehicle (EV), Charging fee strategy, Microscopic traffic flow simulation

## 1. 序論

現在, 地球温暖化の進行を防ぐため, 環境負荷削減が世界的な課題となっている. 特に輸送分野は, 世界の一次エネルギー消費の約5分の1を占め, またエネルギー関連の二酸化炭素排出量の約4分の1を占めており, そのうちの約半分が乗用車からの排出によるものである[1]. 電気自動車 (EV) は, 温室効果ガス排出を削減し, 再生可能エネルギーの普及を高めることができるため, 環境負荷削減の手段として期待されている[2]. EVの普及における問題点として, 充電ステーション (CS) の整備と効率的な利用が挙げられる. EVのCSでの充電には, 現行のガソリン車の給油に比べて長時間を要するため, 待ち時間が発生して周囲の交通に影響を与える可能性がある. 周囲の交通への影響を最小限にするCSの利用戦略の一例として, 料金インセンティブによるCSの利用分散の促進が挙げられる[3].

そこで本研究では, 車両同士の相互作用を再現可能なシミュレーションモデルにおいて, 料金インセンティブがCSの分散利用に与える影響について検討する. 具体的には, 車両同士の相互作用を再現可能なミクロモデル交通流シミュレータであるADVENTURE\_Mates[4]に, 充電料金戦略アルゴリズムを導入し, CSの利用状況への影響を検討する.

## 2. 交通モデル

### (1) CSの選択アルゴリズム

本研究でのシミュレーションでは, 最適経路探索アルゴリズムにA\*アルゴリズムを用いている. またCSの選択時について, 式(1)で表される $C_{route}$ が最小になるCSが選択されるアルゴリズムを用いている.

$$C_{route} = \sum_{s \in route} \sum_{i=1}^n \omega_i C_{s,i} \quad (1)$$

ここで,  $s$ は道路セグメント,  $C_{s,i}$ は経路選択のパラメータ,  $\omega_i$ は $C_{s,i}$ をどの程度選好するかを示す重み,  $n$ は経路選択のパラメータの数を表す.  $C_{s,i}$ には, ノード間の距離[m], ノード間の移動に要する通過時間[s], CSでの充電時間[s], CSでの充電料金[円]の4つのパラメータを用いた. CSでの充電料金のパラメータについて, 次節で説明する充電料金戦略アルゴリズムを導入する.

### (2) 充電料金戦略アルゴリズム

式(1)の経路選択のパラメータ $C_{s,i}$ の中の, CSでの充電料金のパラメータについて, 式(2), (3), (4)で表される充電料金戦略アルゴリズム[5]の充電料金 $P_K(T_r)$ を導入する.

$$(i) \quad 0 \leq G_K(T_r) + M_K(T_r) < \frac{1}{\eta} U_K$$

$$P_K(T_r) = P_0 + P_s \quad (2)$$

$$(ii) \quad \frac{1}{\eta} U_K \leq G_K(T_r) + M_K(T_r) < U_K$$

$$P_K(T_r) = P_0 + \eta P_s \times \frac{G_K(T_r) + M_K(T_r)}{U_K} \quad (3)$$

$$(iii) \quad U_K \leq G_K(T_r) + M_K(T_r)$$

$$P_K(T_r) = P_0 + \eta P_s + \frac{\theta T_w}{E_{re}} \quad (4)$$

ここで、 $G_K(T_r)$ はCSで充電中のEVのキュー、 $M_K(T_r)$ は充電を必要とするがまだCSに到達していないEVのキュー、 $U_K$ はCSの数を表す。また、 $P_0$ はCSが電力系統から購入する電気の価格、 $P_s$ はCSでの基本サービス料金、 $T_w$ はEVのCSでの列待機時間、 $E_{re}$ はCSでのEV1台あたりの充電量を表す。 $\eta$ は列待機時間 $T_w$ に基づく追加料金を計算するためのパラメータである、料金調整係数であり、 $\theta$ はCSの利用率に応じて基本料金を調整するためのパラメータである、待ち時間コスト係数である。式(2)、(3)、(4)で表される充電料金戦略アルゴリズムでは、低混雑時に式(2)で表される基本料金、中混雑時に式(3)で表される混雑度に応じた変動料金、式(4)で表される待ち時間に応じた変動料金が適用される。

3. シミュレーション

(1) シミュレーション設定

前章で採用したアルゴリズムの動作の様子をシミュレーションによって確認する。

シミュレーションには、図-1のように、縦が600 m、横が2000 mの長方形の道路網に、長方形の道路網を二分する、縦が1000 mの幹線道路を配置した道路網を用いる。また図-1のように、幹線道路の交差点間を3等分する位置の右側にCS1、左側にCS2を配置し、左端の道路の中心にCS3、右端の道路の中心にCS4を配置する。各CSにはそれぞれ1台ずつの充電スタンドがあり、出力は50 kWhとする。シミュレーション時間は4.5時間であるが、交通流が定常状態になるまでの時間を0.5時間と考え、後の4時間分の結果を分析対象とする。EVの生成台数について、幹線道路の北側から南側へ40 台/時、南側から北側へ40 台/時とし、EVが1時間あたり80台生成するようにする。また、EVの電池容量は20 kWhとし、EVが充電行動を開始する充電残量 (SoC) の閾値を20%として、充電行動を終了するSoCの閾値を80%とする。EVの生成時点で充電が必要な車両は全体の約15%、充電が不要な車両は全体の約85%となるように設定する。

式(1)の経路選択のパラメータの重み $\omega_i$ について、ノード間の距離に対する $\omega_i$ を202.3とし、ノード間の移動に要する通過時間に対する $\omega_i$ を23.87とし、CSでの充電時間に対する $\omega_i$ を23.87とし、CSでの充電料金に対する $\omega_i$ を0または7とする。CSでの充電料金に対する $\omega_i$ が0の場合が、

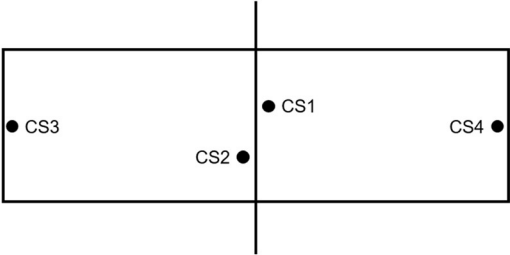


図-1 道路網と CS の配置

充電料金戦略アルゴリズムを導入しない場合に相当し、 $\omega_i$ が7の場合が、充電料金戦略アルゴリズムを導入する場合に相当する。これらの数値は、最低賃金の全国平均および一般道路の昼間旅行速度の全国平均に基づいて算出したものである。また式(2)の諸数値について、 $P_0$ は14.6 円/kWh、 $P_s$ は16.8 円/kWh、 $\eta$ は2、 $\theta$ は0.18とする。

シミュレーションは、充電料金戦略アルゴリズム導入前後の比較を行うため、導入しない場合と、導入した場合の2つの場合について行う。また結果のばらつきを考慮するため、それぞれ5回シミュレーションを行う。

(1) EVのCSへの到着台数

充電料金戦略アルゴリズムの導入によるCSの利用状況への影響を検討するため、導入前後のEVの各CSへの到着台数の比較を行う。充電料金戦略アルゴリズムを導入しない場合、各CSへの到着台数の分布は、図-2のようになり、導入する場合は、図-3のようになる。また、2つの場合それぞれの5回のシミュレーションの平均と、2つの場合の差は表-1のようになる。表-1より、充電料金戦略アルゴリズムを導入することで、CS2の到着台数が1.2台減少

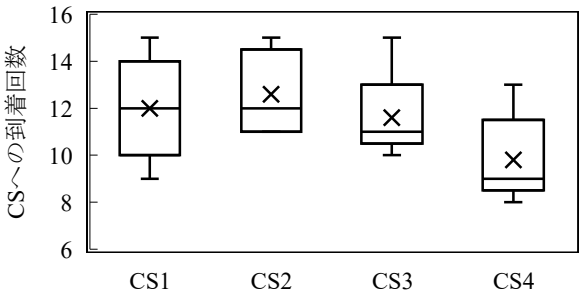


図-2 導入しない場合のCSへの到着回数

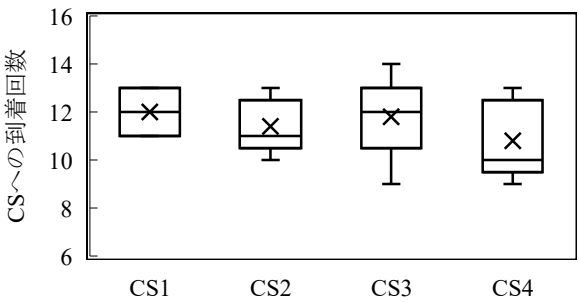


図-3 導入する場合のCSへの到着回数

表-1 各場合の平均到着台数とその割合

	CS1	CS2	CS3	CS4	合計
未導入	12	12.6	11.6	9.8	46
導入	12	11.4	11.8	10.8	46
導入 - 未導入	0	-1.2	0.2	1.0	0

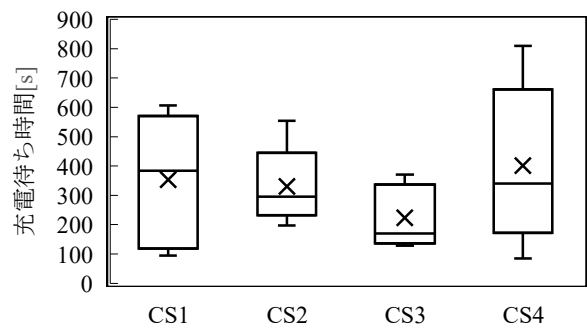


図-4 導入しない場合のEV1台あたり充電待ち時間[s]

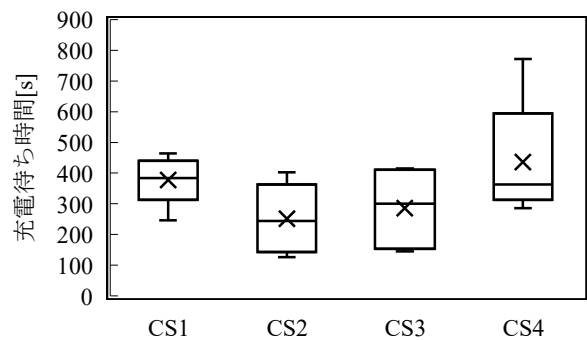


図-5 導入する場合のEV1台あたり充電待ち時間[s]

表-2 各場合の平均充電待ち時間[s]と差

	CS1	CS2	CS3	CS4	合計
未導入	382.2	342.2	225.9	401.7	336.0
導入	374.6	253.0	296.5	454.8	343.3
導入 - 未導入	-7.6	-89.2	70.6	53.1	7.3

し、CS4の到着台数が1.0台増加することがわかる。これは、充電料金戦略アルゴリズムを導入したことにより、幹線道路から近いため到着台数の多いCS（CS1、CS2）の充電料金が高く設定され、また幹線道路から遠いため到着台数の少ないCS（CS3、CS4）の充電料金が安く設定された結果、CS3、CS4の利用が促進されたことが原因だと考えられる。よって、充電料金戦略アルゴリズムの導入により、特定のCSの利用の集中を防ぐことができたと言える。

(2) EV1台あたりのCSでの充電待ち時間

充電料金戦略アルゴリズムの導入によるCSの利用状況への影響を検討するため、導入前後のEV1台あたりの、CSに到着してから実際に充電が開始されるまでの待ち時間の比較を行う。充電料金戦略アルゴリズムを導入しない場合の、各CSでのEV1台あたりの平均待ち時間の分布は、図-4のようになり、導入する場合は、図-5のようになる。また、2つの場合それぞれの5回のシミュレーションの平均と、2つの場合の差は表-2のようになる。表-2より、充

電料金戦略アルゴリズムを導入することで、CS2での充電待ち時間は89.2 s減少した一方で、CS3では70.6 s増加し、CS4では53.1 s増加した。これは、充電料金戦略アルゴリズムを導入したことにより、CS2が利用されにくくなって待ち行列も生成されにくくなり、CS3、CS4がより利用されやすくなったことで待ち行列も生成されやすくなったことによるものだと考えられる。また図-2より、全EVの平均充電待ち時間は、導入しない場合が336.0 sで、導入する場合が343.3 sとなっており、大きく変化していないと考えられる。よって、充電料金戦略アルゴリズムの導入により、導入しない場合に利用台数の多いCSの待ち時間は減少し、利用台数の少ないCSの待ち時間は増加したものの、平均待ち時間に関しては大きな変化が見られなかった。

4. 結論

本研究では、周囲の交通への影響を最小限にするCSの利用分散の促進のため、車両同士の相互作用を再現可能なミクロモデル交通流シミュレータに、充電料金戦略アルゴリズムを導入し、CSの利用状況への影響を検討した。充電料金戦略アルゴリズムの導入により、利用台数の多いCSへの利用集中を防ぎ、利用台数の少ないCSへの利用分散を促進することができた。CSでの充電待ち時間については、利用台数の多いCSでの待ち時間が減少した一方で、利用台数の少ないCSでの待ち時間が増加し、全体としては待ち時間がわずかに増加した。

今後の課題としては、ミクロモデルだからこそ見ることのできる、個々の車両の挙動に起因する渋滞などの事象や、実際の電力供給との兼ね合いなどについての検討を行うことが必要であると考えられる。

参考文献

[1] Nanaki, A.E. and Koroneos, J.C.: Climate change mitigation and deployment of electric vehicles in urban areas, *Renewable Energy*, Vol.99, 2016.

[2] Solanke, U.T. et al.: A review of strategic charging–discharging control of grid-connected electric vehicles, *Journal of Energy Storage*, Vol.28, 2020.

[3] Zhang, Y. et al.: Optimal Charging Scheduling by Pricing for EV Charging Station with Dual Charging Modes, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.20, 2019.

[4] Fujii H. et al.: Agent based Simulation Framework for Mixed Traffic of Cars, Pedestrians and Trams, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.85, 2017.

[5] Li, X. et al.: Price Incentive-Based Charging Navigation Strategy for Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.56, 2020.