

スマート EV 充電予約システムの提案と評価

—変動価格とナビシステムを利用した充電待ち時間の短縮—

Proposal and evaluation of smart EV charge reservation system

蔡 詩傑^{1*}, 林 久志^{1*}

Shijie Cai¹, Hisashi Hayashi¹

¹産業技術大学院大学

¹Advanced Institute of Industrial Technology

Abstract: In order to realize EV (Electric Vehicle) society, the development of EV charge infrastructures is indispensable. Under current situation, existing EV charge infrastructures are insufficient. If the number of EVs continue to increase with this pace, there will be long queues at EV charging stands, and the waiting time for charging EVs in cities will become much longer. However, if we naively increase capital investment, the low profitability and investment return risk would be a problem as well. In this study, we aim to develop a smart EV charging reservation system that combines a dynamic pricing system according to the degree of congestion and a car navigation system that recommends and reserves EV charge stands that match user's preference (time or price). Using this smart EV charging reservation system, we can disperse their charging locations and decrease total waiting time for charging. We will evaluate the effect of this new system by means of multi-agent simulation.

1 はじめに

現在、世界中でEV（電気自動車）の導入が進められている。この背景には地球温暖化とピークオイルという二つの社会問題が存在している[1]。これらの社会問題は、どちらも石油燃料に由来したものであるため、世界中の自動車メーカーはこれまで同様に内燃機関式エンジン車を作り続けることが非常に難しい。その結果、自動車各社はEVを主流とする車社会を目指して新たな活動を進めている[2]。

一方、社会問題とは別に、経済的観点から見た場合、日本にとって自動車産業は重要な基幹産業である。日本政府は社会問題を解決しつつ、かつ産業の活性化を進めるべく、2020年までに、国内のPHEV・EVの保有台数を最大100万台にすることを新たに目標として設定している[3]。現状ではEVの国内普及台数は未だ数十万台レベルではあるが、今後ますます増加していくのは間違いない。

また、EVの普及に重要な充電設備の側面を考えた場合、現状で日本国内の充電場所に関する統計で

は、EV購入者の9割が戸建の住宅にて充電を行っているという報告されている[4]。現在、日本国内にて戸建と共同住宅の割合は6:4である。共同住宅では、共有の駐車場に充電設備を後から導入するのは難しいため、現在の共同住宅の多さから、充電設備の不足がEVの普及に与える影響は無視できない[5]。

EVの充電設備不足から、充電待ち時間を減らすことがEV普及のための課題となっており。さらに、充電スタンドオーナーの利益を増やすことで、長期的に充電スタンドの数を増やすことが重要である。

本論文では混雑度に応じた変動価格とEVユーザーの好み（時間と価格）に合わせた充電予約カーナビシステムを組み合わせるスマートEV充電予約システムを提案する。

本システムの目的は、第一にEVの充電待ち時間を減らすこと、第二に、各充電スタンドオーナーの利益を増やすことを目指す。

本論文は、以下のように構成される。2章で関連研究について議論する。3章で問題設定を行う。4章で提案手法、5章でシミュレーションモデル、6章で

*連絡先: 産業技術大学院大学産業技術研究科創造技術専攻

〒140-0011 東京都品川区東大井1-10-40

E-mail: {b1740sc, hayashi-hisashi}@aiit.ac.jp

シミュレーションシナリオを説明し、7章で評価基準を定義する。8章で評価結果を示し、9章で本論文をまとめる。

2 関連研究

これまでの研究によると、公共のEV充電設備についての立地場所や分布、家庭でのEV利用の視点から、総合的な充電環境の充実・発展が課題となっている[6]。

また、EV充電の利便性を高める上で、所有住宅だのみの充電環境確保には限界がある。ベルリンにあるスタートアップ企業 Ubitricity のように、街灯や自動販売機、時間貸し駐車場にも、充電機能を付加することができる[7][8]。しかし、充電器の利用にはバラツキがあるため、新規の設備投資を考えた際、収益率が低く、投資を回収できない恐れもある。

また、走行中のEVのバッテリー切れを起こさないための電欠シミュレーションにより、約30kmごとに充電器を設置すれば電欠が起きないことが分かっている。そして現在、平均26.4kmごとに一つの充電設備が設置されているが、実際は県別に見ると、30kmを超える地域があり、電欠の不安を感じるEVユーザーもいる[9]。

木山らの研究[10]では、適切な充電スタンドを経由し、途中で充電しながら進むことによって、バッテリー切れを起こさずに目的地に到達するためのEV向けのルート探索手法を提案している。また、全てのEVが最適充電スタンドを選んで充電すると、町の中心部に列ができ、長い待ち時間が発生するという問題も残る。内田らの研究[11]では、複数のEVを異なるルートに分散してガイドすることにより、交通渋滞を考慮したルート探索手法を提案している。しかしながら、充電スタンドの混雑状況は考慮されていない。

Hayashiら[12]は、高速道路で走行するEVのために、各充電スタンドの待ち時間をデジタルサイネージに表示することにより充電場所を分散化したり、行列ができた充電スタンドで充電できる充電量を制限したりすることにより、充電待ち時間を減らす手法を提案し、その効果をマルチエージェントシミュレーションで検証している。しかしながら、デジタルサイネージで誘導できる充電スタンドは周囲数か所の充電スタンドに限定されており、また、充電量の制限はEVユーザーの満足度を下げるといった問題も残る。

Hiwatariら[13]はEVの電欠回数を減らすことを目指した充電スタンドの設置場所の最適化手法を提案しており、その効果をマルチエージェントシミュレ

ーションで検証している。このアプローチは、長期的な充電スタンド整備計画を策定するためには重要である。しかしながら、短期的かつ動的な充電待ち時間の軽減の視点には欠けている。

3 問題設定

本研究では、従来の研究では不十分であったEVの充電場所の動的な分散化と、充電待ち時間を減らすことを第一の目標とする。さらに、充電スタンドオーナーの利益を増やすことにより、長期的に充電インフラへの投資を促すことを第二の目標とする。そのためのスマートEV充電予約システムの設計を本論文の問題とする。

4 提案手法

現在、日本国内では充電ステーションの予約はできるが、価格は基本的に固定である。図1のように、利用者は最寄りの充電スタンドで充電することが多い。それに対し、我々は、時間優先と価格優先を選択できる充電予約カーナビシステム(図2)と変動価格を組み合わせたスマートEV充電予約システムを提案する。

時間優先を好む利用者は、待ち時間の少ない充電スタンドを選択する。それにより、時間優先の利用者の充電場所の分散を期待できる。一方で価格優先を好む利用者は、価格の安い充電スタンドを選択する。利用率に応じて価格を変動することにより、価格優先の利用者の充電場所も分散することが期待できる。

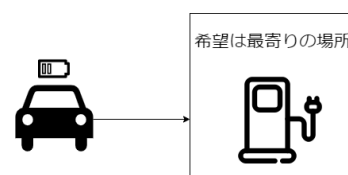


図1：一般充電予約カーナビシステム

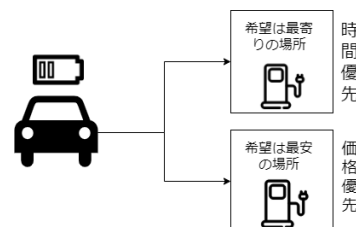


図2：時間優先と価格優先を選択できる充電予約システム

5 シミュレーションモデル

5.1 価格設定

固定価格は1分あたり15円とする。変動価格はそれぞれの充電スタンドの利用率によって変動する。ユーザーが選ぶ条件によって、価格設定方法が変わる。各充電スタンドでは独立した変動価格を設定する。利用率は累計充電時間 / 24時間と定義する(日付が変わると累計充電時間はゼロに戻る)。

変動価格は次のように設定する：

$$\text{変動価格} = \text{利用率} * 30 + 7.5$$

5.2 EVの状態遷移

EVの充電と走行はバッテリー残量によって以下の4つの状態に分類できる。

- 状態1：正常走行状態。
- 状態2：充電スタンド検索状態。
- 状態3：充電中の状態。
- 状態4：充電待ち状態。

以下の流れで上記の4種の状態が遷移する。

- 状態1：目的地に向かう。途中、バッテリー残量が不足すると状態2へ。
- 状態2：充電スタンドを選択(予約)し、移動する。到着後は状態3へ。充電スタンドの選択・予約が出来ない場合は状態4へ。
- 状態3：100%まで充電し、状態1に戻る。
- 状態4：最寄りの充電スタンドに向かう。到着後、充電待ち行列がなければ状態3へ。充電待ち行列があれば、待機し、自分の順番になれば状態3へ。待機中、よりよい充電スタンドを選択(予約)できればそこへ移動し、状態3へ。

5.3 充電スタンドの状態遷移

充電スタンド自体も充電の利用状況によって下記の3つの状態を遷移する。

- 状態1：空き状態。予約が入れば状態2へ。
- 状態2：予約済み状態。充電が必要なEVが到着次第状態3へ。
- 状態3：充電中の状態。累計充電時間はスタンド側に記録される。充電後状態1へ。

5.4 EVユーザーのタイプと充電パターン

ユーザーのカーナビ使用、新予約システムの導入、

価格優先条件を選択有無によって3タイプのEVユーザーを設定する。

- EVユーザー1(ncar)：距離優先
カーナビを使わず、一番距離が近い充電スタンドを選択する。予約システム利用せず、固定価格を選択する。
- EVユーザー2(kcar)：時間優先
一番待ち時間と移動時間の短い充電スタンドを選択する。予約システムを導入し、変動価格を選択する。
- EVユーザー3(pcar)：価格優先
一番価格の安い充電スタンドを選択する。予約システムを導入、変動価格を選択する。

以上の各EVユーザーが充電に行くときは、ユーザーの好み(距離優先、時間優先、価格優先)に応じて異なる充電スタンドを選択する。図3のフローチャートのように、カーナビを使わない距離優先のEVユーザー1は最寄りの充電スタンドへ向かう。EVユーザー2と3カーナビをもっているが、どこにも充電予約ができない場合には、最寄りの充電スタンドへ向かう。時間優先のEVユーザー2は、予約可能ならば、一番待ち時間と移動時間の短い充電スタンドを選択する。価格優先のEVユーザー3は、予約可能ならば、一番価格の安い充電スタンドを選択する。

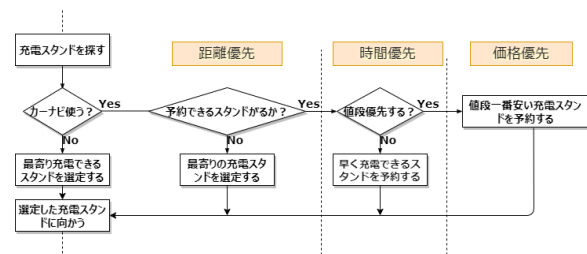


図3：充電スタンドを探すEVフローチャート

6 シミュレーションシナリオ

6.1 地図

町は縦16km横16km、間隔2kmの基盤目状都市である。町の中心部範囲(赤線内)は縦横10kmの正方形を設定する(図4)。

6.2 EVの出発地と目的地

全ての電気自動車は図4の町の中心部にある各目的地に向かって走行する。出発地は地図のランダムな場所に設定し、目的地は地図の中心部にあるラ

ランダムな場所に設定する。町の中心部範囲は縦横10kmの正方形の範囲とする。目的地に到着すると、地図の中心部でランダムに新しい目的地を設定する。

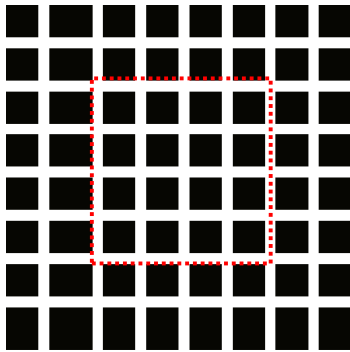


図 4：シミュレーション地図設定画面

6.3 EV の仕様と台数

EV は日産リーフ（電気自動車）の仕様を参考に、バッテリー容量 62kWh、電費 9.2km/kwh、運転速度は平均 30 km/h としたうえで、初期 EV バッテリー残量は一様乱数で設定する。

6.4 各種 EV ユーザーの割合

以下の 4 つのモデルケースを図 5 にまとめる(それぞれ EV 計 100 台)。

	カーナビ利用				予約種別		
	なし		あり		予約なし	時間優先	価格優先
	固定価格	変動価格	固定価格	変動価格			
Case0	100				100		
Case1	40 ^{※3}		60		40	60	
Case2	40			60		30	30
Case3				100		50	50

図 5：ケース設定

- Case0:ncar 100 台
- Case1:ncar 40 台, kcar 60 台,
- Case2:ncar 40 台, kcar 30 台, pcar 30 台
- Case3:kcar 50 台, pcar 50 台.

ncar：距離優先, kcar：時間優先, pcar：価格優先

Case0 では、全てのユーザー（距離優先）がカーナビと予約システムを使用せず、固定価格を選択する。

Case1 では、カーナビデータ[14]により 4 割のユ

ーザー（距離優先）はカーナビを使用せず、固定価格を選択する。6 割のユーザー（時間優先）はカーナビを使用し、固定価格を選択する。

Case2 では、カーナビデータにより 4 割のユーザー（距離優先）はカーナビを使用せず、固定価格を選択する。残り 6 割のカーナビユーザー（時間優先と価格優先の割合は 1：1）はスマート EV 充電予約システムを使用し、変動価格を選択する。

Case3 では、全てのユーザー（時間優先と価格優先の割合は 1：1）がスマート EV 充電予約システムを使用し、変動価格を選択する。

6.5 充電スタンドの種類と数と位置

充電スタンドは急速充電タイプとし、満タン充電に必要な時間は 60 分と設定し、充電スタンド 10 カ所をランダムに設置する。青いマークは設置後の充電スタンドを表している（図 6）。

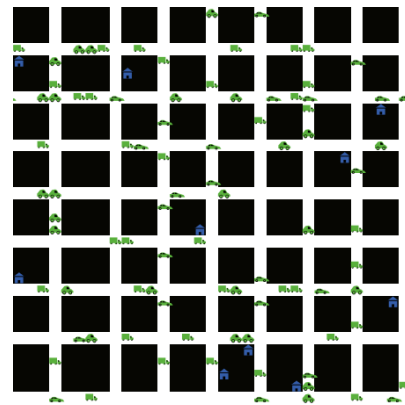


図 6：シミュレーション画面

7 評価基準

評価基準 1：充電待ち時間

ユーザーの充電好み条件によって、地図のそれぞれの場所で充電することになる。一番近い場所で充電することを選んだ場合、充電待ちの列ができ、長い充電待ち時間が生じる。一方で、安くて遠い場所へ充電することを選んだ場合、移動距離が長くなり、長い移動時間が生じる。そのため、ここでの待ち時間は、電気自動車のバッテリーが少量になり、充電スタンド検索状態になってから、充電中状態になるまでにかかる全ての時間を指している。

充電待ち時間＝

各 EV の充電スタンドへの移動時間
＋充電スタンドでの充電待ち時間

評価基準 2 : 充電スタンド収益

充電の時間と単価をかけて、充電スタンド側の収益が生まれる。車両の予約システム導入の有無によって計算が異なる。各充電スタンドの収益はこの2種類のユーザーが充電することによって生み出した利益の合計である。

予約システムを導入/使用していない車両ユーザーからの収益計算：

充電スタンド収益＝

固定価格（時間単価）＊充電時間

予約システムを導入/使用している車両ユーザーからの収益計算：

充電スタンド収益＝

変動価格（時間単価）＊充電時間

8 評価結果

各ケース100回ずつシミュレーションして評価する。評価基準は充電待ち時間平均値と各EV充電スタンドの収益の平均値を用いている。

【充電待ち時間】Case1は、カーナビを使わないCase0よりも待ち時間が大幅に減少した。Case2とCase3は、優先予約を使わないCase1よりも待ち時間がそれぞれ12%、60%減少した（図7）。

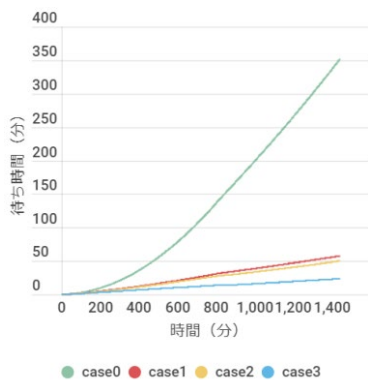


図 7 : 各 EV 充電待ち時間の平均値

【充電スタンド収益】Case0は充電の待ち時間が長く、充電時間が短いため、同じ固定価格のCase1よりも利益が少ない。Case3が、優先予約を使わないCase1と優先予約一部導入のCase2よりも充電スタンド利益平均値が高い（図8）。

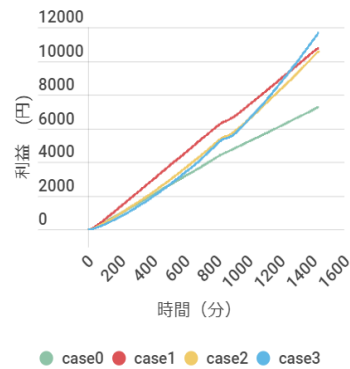


図 8 : 各 EV 充電スタンド利益の平均値

今回のシミュレーション結果により、時間優先と価格優先を選択できるスマートEV充電予約システムを導入することにより、全体の充電待ち時間が減り、充電スタンド側の収益も上がる結果が得られた。

9 まとめ

本論文では、充電待ち時間と充電スタンドへの移動時間の短縮、および、充電スタンドの増益の二つを目的とし、混雑度に応じた変動価格とEVユーザーの好み（時間と価格）に合わせた充電予約カーナビシステムを組み合わせるスマートEV充電予約システムを提案した。提案手法の有効性は複数のモデルケースにより、マルチエージェントシミュレーションにより評価した。そして、時間優先と価格優先を選択できる充電予約カーナビシステムを導入することにより、全体の充電待ち時間が減り、充電スタンド側の収益も上がる結果が得られた。今後の研究方向は実際の様々な交通状況や自宅充電設備利用状況を踏まえ、より詳細に仮説検証していく予定である。

参考文献

- [1] 岡本博之, “世界のエネルギー情勢の長期展望—シェール革命を超えて—,” 名古屋市立大学 22 世紀研究所 評論集, pp. 1-18, 2017.
- [2] 奥田修司, “EV-PHV 普及に関する経済産業省の取組,” 2017.
<http://www.chademo.com/wp2016/wp-content/japan-uploads/2017GA/2017GAMETL.pdf>. [アクセス日: 2019年9月14日].

- [3] 経済産業省, 国土交通省, “EV/PHV 普及の現状について,” 自動車新時代戦略会議, 2018.
<http://www.mlit.go.jp/common/001283224.pdf>.
[アクセス日: 2019年9月16日].
- [4] 経済産業省製造産業局自動車課, “電気自動車・プラグインハイブリッド自動車の充電インフラ整備事業補助金について,”
https://www.meti.go.jp/information_2/publicoffer/review/2017/html/h29_s6.pdf.
[アクセス日: 2019年9月14日].
- [5] 森川郁子, “日本のEVシフトに立ち塞がる集合住宅の重荷, 共同駐車場に充電設備は簡単に入らない,” 東洋経済新報社, 2018. <https://toyokeizai.net/articles/-/214568>.
[アクセス日: 2019年9月13日].
- [6] 土屋依子, 田頭直人, 池谷知彦, 馬場健司, 伊藤史子, “電気自動車の自宅での充電環境の確保に関する一考察,” 交通工学論文集, 第2巻, 第3号, pp. 1-10, 2016.
- [7] アイティメディア株式会社, “自販機と電気自動車用充電器を併設, ホーキングら10社がインフラ普及事業,” 2011.
<https://www.itmedia.co.jp/promobile/articles/1103/09/news071.html>.
[アクセス日: 2019年9月13日].
- [8] T. Alexa and C. Liv, “Driving electric mobility forward: How a German start-up is transforming EV charging infrastructure.” *Energy News*, vol. 35, no. 3, pp. 11-13, 2017.
- [9] 中国自動車技術研究センター日本自動車研究所, “日中新エネ自動車と充電インフラ協働研究成果報告,” 日中省エネルギー・環境総合フォーラム, 2016.
- [10] 木山昇, 小林雄一, 青島弘和, 白井啓介, 柏山, “正守航続可能距離と充電時間を考慮した電気自動車向けルート探索手法”, 情報処理学会論文誌 Vol.54 No.1 156-165 (Jan. 2013)
- [11] 内田英明, 藤井秀樹, 吉村忍, “マルチエージェント交通シミュレーションにおける充電を考慮したEVの経路選択,” 人工知能学会論文誌, 第32巻, 第5号, pp. AG16-I_1-9, 2017.
- [12] H. Hayashi, T. Paul, S. Sakakibara, H. Aisu, and H. Yamada, “Modeling key players of highway EMS as MetaMAS™ agents that interact with traffic and power simulators.” *International Journal of Transportation*, 4(1), pp. 57-70, 2016.
- [13] R. Hiwatari, T. Ikeya and K. Okano, “A road traffic simulator to analyze layout and effectiveness of rapid charging infrastructure for electric vehicle,” *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011.
- [14] マイボイスコム株式会社, “カーナビの利用に関する調査 (第9回) /アンケートデータベース(MyEL),” https://myel.myvoice.jp/products/detail.php?product_id=24504
[アクセス日: 2020年3月01日].