

電力需要平準化を考慮するEVインフラシステムの最適設計手法 -電力供給エリア内のユーザへのバッテリー提供による-

卜部 静香^{†1} 奥田 隆史^{†1} 井手口 哲夫^{†1} 田 学軍^{†1}

概要: 東日本大震災による日本の電力・エネルギー危機や、地球温暖化の環境問題などの世界的なエネルギー危機が進行している中、「スマートグリッド」が注目されている。スマートグリッド構想で重要な役割を担うのが、電力を蓄えることができる蓄電技術である。蓄電技術を用いれば、電力需要の少ない夜間に蓄えた電気を昼間に使うことができるため、電力需要の平滑化に大いに役立てることが可能である。そこで我々はこの蓄電機能をもつバッテリーと、そのバッテリーを搭載した、どこにでも移動可能な電気自動車に着目した。先行研究では、EVを普及させるために、EVのバッテリーの交換と充電をおこなうEVインフラシステムの構想を提案し、最適設備数の検討をおこなった。そこで本稿では、EVを用いて電力供給エリア内のユーザに電力(バッテリー)を提供することで電力のピークシフトを実現し、電力需要平準化を考慮する新たなEVインフラシステムの設計をおこなう。具体的に、電力供給エリア内のEVインフラシステムの最適設置数や配置問題、ユーザへの電力提供案の検討をおこなう。

キーワード: 待ち行列理論, 電気自動車, バッテリー, ピークシフト

Optimum provision of EV Infrastructure System for electric-load leveling -Providing batteries to the users in electricity supply area-

URABE SHIZUKA^{†1} TAKASHI OKUDA^{†1} TETSUO IDEGUCHI^{†1} XUEJUN TIAN^{†1}

Abstract: Smart grid system is increasingly recognized as the solution to the energy crisis due to the Great East Japan Earthquake disaster and global warming as well. In the concept of smart grid, energy storage technologies are important and it can be a great help for electric-load leveling. We have focused on Electric Vehicles(EV) that has preceding technologies and in the previous study, we have proposed an EV Infrastructure System that exchanges and charges EV's batteries in order to spread EV. In this paper, we will plan a new EV infrastructure system that will provide electricity(battery) to the users in electricity supply area which will level the electricity-load by the concept of smart grid. We will discuss optimum numbers of EV infrastructure system, optimum place of EV infrastructure system in the electricity supply area, and optimum basic structure of EV infrastructure system.

Keywords: Queuing Theory, Electric Vehicle, Battery, Peak-shift

1. はじめに

東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故は、日本の電力・エネルギー危機に関する危惧と懸念が露わになっ

^{†1} 現在、愛知県立大学大学院 情報科学研究科 情報システム専攻
Presently with Graduate School of Information Science and
Technology, Aichi Prefectural University

た [1]. また, 二酸化炭素による地球温暖化の環境問題などの世界的なエネルギー危機も進行している. このため, 「スマートグリッド」を推進させることが早急な課題となっている.

スマートグリッドは, ICT(情報通信技術)を使用して電力を効率的に活用して節電・省エネを実現する仕組みのことである [2]. スマートグリッド構想で重要な役割を担うのが蓄電技術である [3]. 電気は性質上, 生産と消費が同期していて, 発電と電力消費の間で在庫ができない特徴をもっている. よって, 電力消費量に応じて, 供給能力を調整する必要がある. しかし, 蓄電技術を用いれば, 電力需要の少ない夜間に蓄えた電気を昼間に使うことができるため, 電力需要の平滑化に大いに役立てることが可能である*1. また, 太陽光発電や風力発電など, 天候に発電量が左右される不安定な電力源においては, 蓄電池 (以下, バッテリー) *2 に充電しておくことで必要な時に必要な量を取り出せて, 安定的な電力供給が可能となる. この蓄電機能は, 停電や電力供給が危険な状況になったときにも大いに役立つ.

このような背景のもと, 我々はこの蓄電機能をもつバッテリーと, そのバッテリーを搭載した, 電気自動車 (以下, EV) に着目した. EV は, 地球温暖化などの環境問題の解決策となるが, EV が備え持ついくつかの問題点*3 があるため, 普及しない. そこで先行研究では, EV の普及促進問題に焦点を当て, EV のバッテリーの交換と充電をおこなう EV インフラシステムを確率モデルとして表した, 新たな EV インフラシステムの構成を提案した [4].

本稿では, EV がどこにでも移動可能である点, そして EV に搭載されているバッテリーを活用することができる点を更なる EV の特徴として生かした上で, EV を用いて電力供給エリア内 (以下, エリア内) のユーザに電力 (バッテリー) を提供することでピークシフトを実現し, 電力需要平準化を考慮する新たな EV インフラシステムの設計をおこなう. 具体的には, エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数の検討, エリア内の EV インフラシステムの最適配置場所の検討, そして, EV インフラシステムを用いたエリア内のユーザへの電力提供案の確率モデルを提案し, EV インフラシステムに必要なサーバ数や, 待ち行列時間, 呼損率を検討する [5].

以下, 2 節で本稿が提案する EV インフラシステムの設計検討について述べ, 3 節では電力提供案を評価モデルとして表し, 4 節では数値例で本稿で提案した評価モデルのシミュレーション結果及び考察をおこなう. 最後に 5 節

*1 一般家庭において, ピーク電力の使用が集中しないように時間的に移動させる制御のことをピークシフトという.

*2 充電して再利用可能な電池のこと.

*3 EV の問題点は, (1) 連続航続距離が短い, (2) バッテリーの充電時間が長い, (3) 充電設備などのインフラ整備が不十分である, などが挙げられる.

で, まとめと今後の課題について述べる.

2. EV インフラシステムの最適設計手法

ここでは, EV インフラシステムにおいて, エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数 (2.1 小節), エリア内の EV インフラシステムの最適施設配置 (2.2 小節), EV インフラシステムの基本構造並びに電力提供案 (2.3 小節) について述べる.

2.1 エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数

ここでは, エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数を検討する. 文献 [6] では, あるひとつの家庭内に存在するいくつかの電気機器のさまざまな組合せから, 最も低コストとなる最適な組み合わせを求めるための LP 問題が記載されている. この LP 問題を用いた低コストを目的とした解き方は, 電気機器が放つ熱量及び電力量が, 与えられた全ての熱量と電力量の需要量と合致することが鍵となっている.

そこで本稿では, エリア内の全電力需要量を E_{all} とし, エリア内の全電力量は, 全 EV インフラシステムの使用電力量 E_s , 全家庭の使用電力量 E_h , 全企業の使用電力量 E_b の合計量から成り立つものとする.

また, ここであるエリア内に n 基の EV インフラシステムがあるものとし, 各 EV インフラシステムの使用電力量は, x_1, x_2, \dots, x_n とする. 以上から, 次のように定式化できる.

$$E_{all} = E_s + E_h + E_b \quad (1)$$

$$E_s = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (2)$$

$$E_s = E_{all} - E_h - E_b \quad (3)$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = E_{all} - E_h - E_b \quad (4)$$

なお, ここで各 EV インフラシステムの使用電力量は全て同じであると仮定すると,

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = nx_n \quad (5)$$

$$nx_n = E_{all} - E_h - E_b \quad (6)$$

$$n = \frac{E_{all} - E_h - E_b}{x_n} \quad (7)$$

となり, エリア内の EV インフラシステムの最適数 n が求められる.

2.2 エリア内の EV インフラシステムの最適施設配置

ここでは, エリア内に限られた数の EV インフラシステムをどのように配置するか述べる. この問題は, 「ボロノイ図」という幾何図形で解く [7].

ボロノイ図を用いた施設配置の考え方では, 次のことが仮定される:

仮定 1 施設のユーザは, ユーザの居場所から最も近い距

離の施設を利用する

仮定 2 ユーザは、施設までの距離を直線距離で判断する
これらの仮定は場合によっては非現実的であるかもしれないが、仮定 1 においては各 EV インフラシステムの機能は同じであるため、十分信憑性があると考えられる。また、仮定 2 においても、道路距離と直線距離は高い相関性があることが認められている [8].

ポロノイ図を用いた施設配置の考え方は、郵便ポストの配置問題や学校区制限があるもとの中学校配置問題などにも用いられている。これらの問題は、ある区内に限られた数の施設をどのように配置すればユーザが利用するにあたって最も便利であるか、そして各施設が利用される頻度のばらつきの大差をなくすという共通点を持ち、EV インフラシステムの最適施設配置の検討においても、最適な検討方法であるといえる (付録 A.1 参照).

2.3 EV インフラシステムの基本構造並びに電力提供案

ここでは、EV インフラシステムの基本構造と、EV インフラシステムを用いたエリア内のユーザへの電力提供案について述べる。

2.3.1 EV インフラシステムの基本構造

EV インフラシステムは、EV のバッテリーを交換する **バッテリー交換スペース**と、交換された空バッテリーを充電する **充電システム**で構成されている (図 1, 付録 A.2 参照).

バッテリー交換スペース

バッテリー交換スペースでは、EV の空バッテリーを交換設備で EV から取り外し、満充電済みのバッテリーと交換する仕組みになっている [9]. 交換作業は全て機械によっておこなわれ、その交換時間はガソリンスタンドでの給油よりも短時間で完了する。

充電システム

バッテリー交換スペースで交換されたバッテリーは、充電システムに移動される。移動されたバッテリーは、充電器^{*4}でバッテリー充電がおこなわれる。

バッテリー交換スペースで EV から取り外したバッテリーは、充電システムの収納棚 A に收容される。①充電システムが保有している充電器が空くまで、バッテリーは充電器が空くまで収納棚 A で待機し、②充電器が空き次第、バッテリーを収納棚 A から取り出し、充電器を用いて充電を開始する。③充電終了後、満充電状態となったバッテリーは収納棚 B に收容される。よって、バッテリー交換スペースに到着した EV のバッテリーは、収納棚 B から取り出した満充電済みのバッテリーと交換される仕組みとなる。

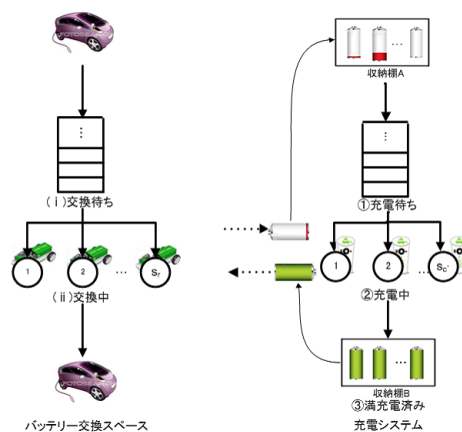


図 1 EV インフラシステムの基本構造

Fig. 1 Basic structure of EV infrastructure system

2.3.2 電力提供案

ここでは、EV インフラシステムを用いたエリア内のユーザへの電力提供案について述べる (図 2 参照).

ユーザは EV インフラシステムに電力要請する。EV インフラシステムがユーザから電力要請を受けると、ユーザのもとへバッテリー (電力) を提供するために、バッテリー交換スペースにストックされているバッテリーを EV に積み、ユーザのもとへ EV が出発する。ユーザのもとへ EV が到着したら、EV はユーザにバッテリーを提供し、ユーザからは使用済みのバッテリーを回収する。その後、EV は EV インフラシステムに戻り、使用済みのバッテリーを充電システムへ運ぶ。使用済みのバッテリーは充電システムで充電され、EV は新たなユーザのもとへバッテリーを提供しに行く。

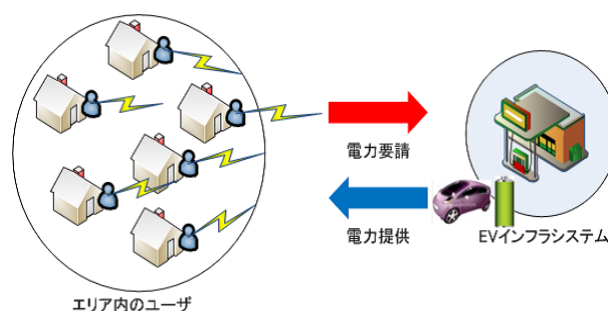


図 2 電力提供案のイメージ図

Fig. 2 An image figure of proposal of offering electricity by EV infrastructure system

3. 評価モデル

本稿では、2.3.2 小節で述べた電力提供案を待ち行列モデルとして表す (図 3 参照).

3.1 電力提供案の待ち行列モデル化

ユーザは平均電力要請間隔 λ^{-1} のポアソン到着で、EV インフラシステムに電力要請する。ユーザは確率 p_A で **A** :

*4 一般家庭用電源と同じ交流電源 (单相 100 ボルト (普通充電) あるいは单相 200 ボルト (倍速充電)) を用いた充電器で満充電する。充電時間はおよそ 4~8 時間である。

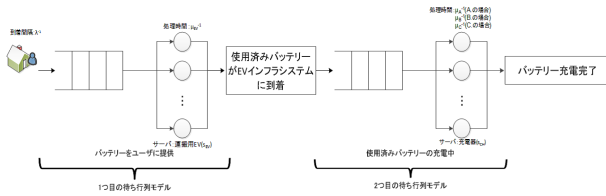


図 3 電力提供案の待ち行列モデル

Fig. 3 Queuing model of proposal of offering electricity by EV infrastructure system

電力需要ピークタイム分、確率 p_B で B : 一日分、確率 p_C で C : 全バッテリー容量分の電力量を EV インフラシステムに要請するとする。なお、 $p_A + p_B + p_C = 1$ とし、ユーザが要請する電力量の大小関係は $A < B < C$ とする。

ユーザから要請された電力量が決まると、次に EV インフラシステムはバッテリー在庫の状況確認をおこなう。バッテリー在庫がある時、EV は EV インフラシステムから出発し、ユーザのもとへ EV が到着したら、EV はユーザにバッテリーを提供し、ユーザからは使用済みのバッテリーを回収する。その後、EV は EV インフラシステムに戻る。EV が EV インフラシステムからユーザのもとへ出発し、ユーザにバッテリーを提供した後に EV インフラシステムに戻ってくるまでの移動時間 (図 3 の 1 つ目の待ち行列モデルの処理時間) を μ_{EV}^{-1} とする。なお、EV が EV インフラシステムからユーザのもとへ出発される際に EV にバッテリーを積み処理と、EV が EV インフラシステムに戻り、使用済みのバッテリーを充電システムへ移動する処理は、図 1 のバッテリー交換スペースでおこなわれている。この処理時間は、図 3 の 1 つ目の待ち行列モデルの処理時間に含まれているものとする。

EV インフラシステムに回収した使用済みのバッテリーをもった EV が到着したら、使用済みのバッテリーは充電システムへ運び、充電される (図 3 の 2 つ目の待ち行列モデル)。つまり、図 3 の 2 つ目の待ち行列モデルは、図 1 の充電システムのことである。バッテリー充電時間 (図 3 の 2 つ目の待ち行列モデルの処理時間) はユーザの使用電力量が A の場合 μ_A^{-1} 、B の場合 μ_B^{-1} 、C の場合 μ_C^{-1} とする。ただし、電力使用後のバッテリーをもった EV が EV インフラシステムに到着した時が電力需要ピークタイムの場合、使用済みのバッテリーの充電は一旦中断し、電力需要ピークタイム後、一旦中断された分の使用済みバッテリーの充電が開始される。

なお、ユーザが EV インフラシステムに電力要請した時にバッテリー在庫がない場合、ユーザはバッテリーを提供されることができない。この時のバッテリー在庫がない時の確率 (呼損率) を E_{PL} とする。

本稿で提案する EV インフラシステムの待ち行列モデルは、ユーザの平均電力要請間隔 λ^{-1} 後、1 つ目の待ち行列モデルで処理され、その後、2 つ目の待ち行列モデルで処

理がおこなわれる流れとなっている。また、図 4 は EV インフラシステムの電力提供案をフローチャートとして示したものである。

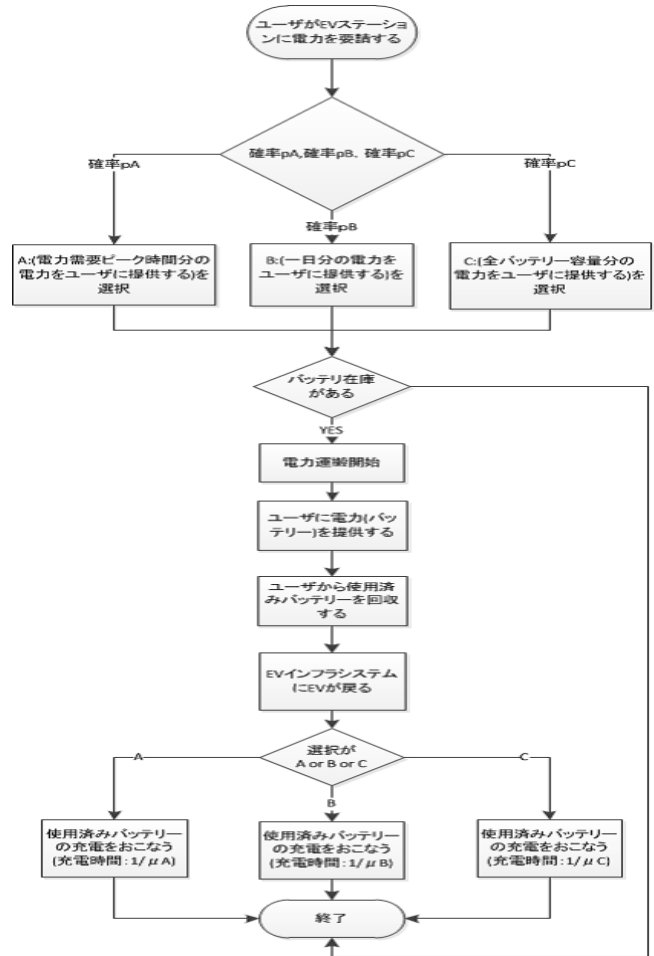


図 4 EV インフラシステムの流れ

Fig. 4 Flowchart of EV infrastructure system

4. 数値例

ここでは、数値例に入る。ユーザの EV インフラシステムへの平均電力要請間隔 λ^{-1} とし、電力需要ピークタイム中は超指数分布、電力需要ピークタイム以外は指数分布に伴うポアソン到着とする。ユーザのもとへバッテリーを運ぶ EV と、使用済みのバッテリーを充電する充電器はそれぞれ s_{EV} , s_{CH} ずつあるものとする。EV の移動時間は μ_{EV}^{-1} 、バッテリー充電時間は、ユーザの使用電力量が確率 p_A で A の場合 μ_A^{-1} 、確率 p_B で B の場合 μ_B^{-1} 、確率 p_C で C の場合 μ_C^{-1} とし、すべて指数分布に伴うものとする。また、EV インフラシステムに保管されているバッテリー在庫数は N とする。

本稿では、 $\lambda^{-1} = 3$ (分)、超指数分布において、平方変動係数 $Ca^2 = 16$ 、電力需要ピークタイムは 1 日のうち 10~14 時、16~20 時とし、 $s_{EV} = 15$ (台)、 $\mu_{EV}^{-1} = 30$ (分)、 $\mu_A^{-1} = 60$ (分)、 $\mu_B^{-1} = 180$ (分)、 $\mu_C^{-1} = 240$ (分)、 $N = 100$ (個)、 $p_A = 1/3$ 、 $p_B = 1/3$ 、 $p_C = 1/3$ とする。

4.1 シミュレーション結果

本稿では、(a) 使用済みのバッテリー容量が空でなくても充電をおこなう場合と、(b) 使用済みのバッテリー容量が空になってから充電をおこなう場合の2つの条件でシミュレーションをおこない、比較検討をおこなう。

(a) 使用済みのバッテリー容量が空でなくても充電をおこなう場合

(a) の場合、3.1 小節で述べた通り、ユーザから回収した使用済みのバッテリーはすぐに充電システムへ移動し、使用済みのバッテリー容量が空でない場合でもすぐに充電が開始される。ユーザの使用電力量は A : 電力需要ピークタイム分、B : 一日分、C : 全バッテリー容量分の3種類あるため、使用済みのバッテリー充電時間も μ_A^{-1} 、 μ_B^{-1} 、 μ_C^{-1} の3種類であるものとする。

(b) 使用済みのバッテリー容量が空になってから充電をおこなう場合

(b) の場合、ユーザから回収した使用済みのバッテリー容量が空でない場合、そのバッテリーは使用中バッテリーとみなす。その使用中バッテリーは一旦図1の充電システム内の収納棚 B に収容する。使用中バッテリーは、そのバッテリー容量が新たに EV インフラシステムに電力要請するユーザの電力要請量に適合したら、収納棚 B から使用中バッテリーを取り出し、そのユーザのもとへ使用中バッテリーを提供する。また、満充電済みのバッテリーより、使用中バッテリーを優先的にユーザに提供するものとする。空バッテリーの定義は、使用中バッテリー容量が A : 電力需要ピークタイム分より少なくなった時とし、充電時間は指数分布に伴う μ_C^{-1} とする。

4.1.1 (a) と (b) の比較検討結果とその考察

図5~7は、(a) と (b) それぞれの場合のバッテリー在庫がない時の確率(呼損率: E_{PL})、EV が出発するまでの平均待ち時間、充電システム内の平均待ち時間の結果を示している。各図の横軸は、充電システムの充電器 $s_{CH} = 30 \sim 100$ (台)である。

図5では、(a) より (b) の方が呼損率 E_{PL} が低い結果を示している。これは、(b) の場合の使用中バッテリーを優先的にユーザに提供することで、満充電済みバッテリーの使用頻度が減り、効率良くバッテリーを提供していることが表れている。そして、この結果は (b) の方が、ユーザにとって EV インフラシステムが利用しやすいということがわかる。同様に図7も、バッテリーが空になるまで充電がおこなわれないため、(b) の方が充電システム内の平均待ち時間が (a) より短いことがいえる。

しかし、図6を見ると、(a) の方が (b) より EV が出発するまでの平均待ち時間が短いことがわかる。これは、図5において、(b) の方が呼損率が低いことから、(b) の場合のユーザの EV インフラシステムの利用率が (a) より増加し、その結果 (b) では EV が出発するまでの平均待ち時間

が長くなってしまったと考えられる。よって、(b) の場合、ユーザの EV インフラシステムの利用満足度を上げるためには、EV 台数を増やす必要があると考えられる。

また、各図より、充電システムの充電器 $s_{CH} = 70$ (台)あたりからそれぞれの結果は安定してきているため、本稿の数値例において、充電システムの充電器 $s_{CH} = 70$ (台)が理想値であるといえる。

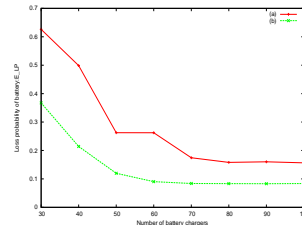


図5 バッテリーの呼損率: E_{PL}
Fig. 5 Loss probability of battery: E_{PL}

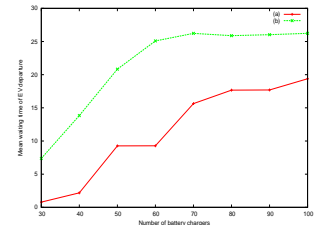


図6 EV 出発までの平均待ち時間
Fig. 6 Mean waiting time of EV departure

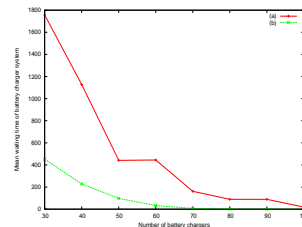


図7 充電システム内の平均待ち時間
Fig. 7 Mean waiting time of charging system

5. おわりに

5.1 本稿のまとめ

本稿では、エリア内のユーザにバッテリーを提供することでピークシフトを実現し、電力需要平準化を考慮する新たな EV インフラシステムの設計をおこなった。具体的に、エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数、エリア内の EV インフラシステムの最適施設配置、そして EV インフラシステムを用いたエリア内のユーザへの電力提供案の3つの観点からおこなった。そしてその中でも電力提供案のシミュレーションをおこない、得られた結果の考察をおこなった。その結果、ユーザに提供するバッテリーを効率良く使用することの有効性を示すことができた。

5.2 今後の課題

今後の課題は、エリア内に配置する EV インフラシステムの最適数、エリア内の EV インフラシステムの最適配置場所のシミュレーションをおこない、得られる結果の考察をおこなうことである。そして、実際にユーザのもとへバッテリーを提供するための具体的手法の検討をすることで、より実現可能な EV インフラシステムの設計をおこなうことである。

参考文献

- [1] 村上憲郎, 福井エドワード, 『「スマート日本」宣言』, 株式会社アスキー・メディアワークス, 2011.
- [2] インプレス R & D インターネットメディア総合研究所, 『スマートハウス&スマートグリッド用語辞典』, 株式会社インプレスジャパン, 2012.
- [3] 大久保隆弘, 『「エンジンのないクルマ」が変える世界』, 日本経済新聞出版社, 2009.
- [4] 卜部静香, 奥田隆史, 井手口哲夫, 田学軍, “電気自動車のインフラシステムの提案と評価”, 情報処理学会 第74回全国大会講演論文集, 1ZF-5, 名古屋工業大学, 2012年3月.
- [5] Sheldon M. Ross, Probability Models, Academic Press, 2006.
- [6] Albert Molderink, Vincent Bakker, Maurice G.C. Bosman, iohann L. Hurink, Gerard i.M. Smit, “Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in Smart Grids”, IEEE Bucharest, pp. 1-7, 2009.
- [7] 石亀篤司, 松田真典, “充電インフラの適正配置に関する検討”, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.56, No.7, pp.388-394, 2011.
- [8] 岡部篤行, 鈴木敦夫, 『最適配置の数理』, 朝倉書店, 1992.
- [9] 本間裕大, “EV バッテリー交換ステーションにおける安全在庫モデル”, 社団法人 日本オペレーションズ・リサーチ学会, vol. 55, No. 6, pp. 347-352, 2010.
- [10] ベタープレイス・ジャパン-EV ネットワークとサービスのグローバル・プロバイダー, <http://japan.betterplace.com/>.

付 録

A.1 ボロノイ図を用いた施設配置最適化

A.1.1 ボロノイ図

施設配置問題を解く上で用いられる代表的な考え方に、ボロノイ図が [7]。これにより、施設が距離的に均一に配置される。ボロノイ図の原理とその性質について説明する。

平面上に n 個の点 p_1, p_2, \dots, p_n , があるとし、任意の点 q と点 p_i とのユークリッド距離を $d(q, p_i)$ とする。このとき集合 $V(p_i)$ を「 p_1, p_2, \dots, p_n の中で最も近いものは p_i である」という点 p をすべて集めた集合とし、(A.1) 式のように定める。ここで、 $V(p_i)$ を用いて分割された多角形をボロノイ領域もしくはボロノイ多角形と呼び、この分割図形をボロノイ図と呼ぶ。

$$V(p_i) = \{p | d(q, p_i) \leq d(q, p_j), j \neq i, j = 1, 2, \dots, n\} \tag{A.1}$$

ここで n 個の点 p_1, p_2, \dots, p_n は各ボロノイ多角形の母点と呼び、それぞれの分割線をボロノイ辺もしくはボロノイ多角形と呼ぶ。このとき、ボロノイ辺は、各母点の垂直二等分線の一部となっている。各母点の位置を施設が配置される位置と考えると、ボロノイ領域は各施設の勢力圏を表す図であるとみなすことができる。

A.1.2 平均距離の最小化

次に、EV インフラシステムの最適な配置について考える。各ユーザからの最近隣施設までの距離の全ユーザにわたる平均値を評価関数とすることは妥当である。

ある地域に n 個の施設が地点 p_1, p_2, \dots, p_n にあるとし、これらの地点を $x - y$ 平面上の $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ で表す。また対象地域を領域 S で表し、この地域 S に施設のユーザ N 人存在するとする。このユーザの分布を密度関数で表現し、地点 (x, y) でのユーザの分布を $f(x, y)$ と表す。この $f(x, y)$ をユーザ密度関数と呼ぶ。地域 S 内のある地区 A にいる施設のユーザ $P(A)$ は次の式で表される。

$$P(A) = \iint^A f(x, y) dx dy \tag{A.2}$$

次に平均距離の数式化をおこなう。いま、地域 S 内の方形の微小地区 s について考える。微小地区 s の中心点を q とし、施設 p_i のボロノイ領域 V_i の中にあるとする。 q から最も近い施設は p_i であるため、 q から最近隣施設までの距離は $d(q, p_i)$ である。微小地区 s の辺長を dx, dy とすれば、微小地区 s 内のユーザから最近隣施設までの延べ距離 t は次の式で表される。

$$t = d(q, p_i) f(x, y) dx dy \tag{A.3}$$

施設 p_i のボロノイ領域 V_i にいるユーザの最近隣施設までの総距離 T_i は、 V_i 内の微小地区の総距離を足し合わせればよいので、次のようになる。

$$T_i = \iint^{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \tag{A.4}$$

地域 S にいる全ユーザの最近隣施設までの総距離 T と平均距離 M はそれぞれ次の式となる。

$$T_i = \sum_{i=1}^n \iint^{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \tag{A.5}$$

$$M = \frac{T}{N} \tag{A.6}$$

ユーザ総数 N は一定であるため、平均距離 M を最小化することは総距離 T を最小化することと同義である。総距離 T は、 n 個の施設の配置 $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ が定まれば一意的に定まるため、 $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$ の関数として次のように書ける。

$$T = F(x_1, y_1, \dots, x_n, y_n) \tag{A.7}$$

面的地域に n 個の施設がある場合の平均距離を最小化する配置問題は、式 (A.7) を最小とする $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ を求める問題となり、式 (A.8) で表すことができる。

$$\min_{x_i, y_i} \sum_{i=1}^n \iint^{V_i} \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} f(x, y) dx dy \tag{A.8}$$

($i = 1, \dots, n$)

式 (A.8) はポロノイ図を用いた最適配置検討の最も基本となるモデルであり、ユーザ密度 $f(x, y)$ を適当に設定することで、EV インフラシステムや郵便ポストなど種々の配置検討をおこなうことができる。

$$k = \frac{[1 + \sqrt{1 - \frac{2}{(1+C_a^2)}}]}{2} \quad (\text{A.10})$$

$$\lambda_1 = 2k\lambda, \lambda_2 = 2(1-k)\lambda \quad (\text{A.11})$$

A.2 バッテリー交換ステーション

ここでは、EV インフラシステムの構成の一部であるバッテリー交換ステーションの説明をする [10].

EV で長距離を走行するには、バッテリーと充電用インフラを改善する一方で、バッテリーを使ってすばやく確実に走行距離をのばす方法を開発する必要がある。ベタープレイスは、バッテリー交換ステーションのネットワークを通してこのソリューションを提供する。バッテリー交換ステーションは独創的なロボット・システムで、消耗したバッテリーを新しいものと交換、在庫のバッテリーを冷却、充電し、また、ステーションにきたすべての EV がフル充電されたバッテリーを確実に得られるために、ネットワークを管理している。

ベタープレイスは、EV とバッテリー交換ステーションの互換性を確保するため、自動車メーカーと協力して作業を進めている。エンジン、排気系統および複雑なギア・システムが、EV ではシンプルなギア・ボックス、電気モーターおよび固体バッテリーに置き換えられるため、自動車メーカーは革新的な設計を自由に実践することができる。平らな「パンケーキ型 (薄型)」のバッテリーが車体の下に配置されるため、車の重心が低くなって操作がしやすくなり、室内のパッケージングの柔軟性が増す。性能上の利点に加えて、手が届きやすい位置にバッテリーを配置することにより、製造が簡略化され、メンテナンス費用を少なくすることができる。

ベタープレイスのバッテリー交換ステーションでは、ドライバーが EV をレーンに乗り入れた後は、ステーションがすべての作業をおこなう。EV がコンベヤーに沿って進む間に、EV の下側の自動交換プラットフォームがバッテリーの下に移動、ボディの底面を洗浄し、取り外し作業を開始してバッテリーをはずす。消耗したバッテリーは収納棚に收容され、充電がおこなわれる。バッテリーが外された EV にはフル充電されたバッテリーが上がってきて取り付けられる。このバッテリー交換プロセスは、ガソリンスタンドでの給油よりも短時間で完了し、作業中、ドライバーや乗客は EV から降りる必要がない。

A.3 超指数分布

到着間隔が 2 次の超指数分布 (H_2) に従うとき、密度関数 $f(x)$

$$f(x) = k\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-k)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (\text{A.9})$$

を持ち、 $\frac{k}{\lambda_1} = \frac{(1-k)}{\lambda_2}$ が平衡条件であり、次のようになる。