

# 交通シミュレーションを用いた 電気自動車(EV)充電スタンド配置の検討

田中 伸治<sup>1</sup>・矢野 圭二郎<sup>2</sup>・大口 敬<sup>3</sup>・中村 文彦<sup>1</sup>・王 鋭<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)  
E-mail:stanaka@ynu.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 グーグル株式会社 (〒106-6126 東京都港区六本木6-10-1)

<sup>3</sup>正会員 東京大学生産技術研究所 先進モビリティ研究センター (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

電気自動車 (EV) は今後の普及拡大が見込まれているが、航続距離が短いため充電スタンドを適切に配置することは重要な課題である。本研究では交通シミュレーションを用いて充電切れEVの発生位置を予測することにより、充電スタンドを効率的に配置する手法を提案した。東京23区の道路ネットワークを対象に試算を行った結果、空間的に均等に充電スタンドを配置する場合に比べ、半分以下のコストでエリア全体をカバーするように充電スタンドを配置できることが明らかになった。

**Key Words :** *electric vehicle (EV), charging station location, traffic simulation*

## 1. はじめに

近年エネルギー問題や環境問題への意識の高まりから、電気自動車 (以下EV) をはじめとする次世代自動車の導入が進められている。中でもEVはエネルギー効率が高く二酸化炭素排出量が少ないため、今後大幅な普及拡大が見込まれている。しかしEVの普及には、ガソリン車と比較して航続距離が短いことが課題として指摘されており、電池の性能が向上するまではこれを補うための急速充電施設を各地に配置することが必要である。例えば東京都ではEV・PHV普及促進プロジェクト<sup>1</sup>として充電インフラの整備に取り組んでいるほか、経済産業省も充電設備設置のための補助金制度を整備している。しかしどのくらいの数の充電スタンドをどのように配置すればよいかについては、十分な検討がなされていないのが実態である。例えば空間的に均等な間隔で充電スタンドを配置したとしても、実際の交通需要や交通状況、EVの走行状態によっては、必要な充電スタンドの分布はそれとは異なるものとなる可能性がある。

そこで本研究では、EVを含む車両の走行状態を考慮するために、交通シミュレーションを利用し、これを元に望ましい充電スタンドの配置を検討することを目的とする。これにより、EVがネットワークの上を移動した結果、どの地点で電池残量がなくなるかを考慮することができ、より現実的な条件下で充電スタンドの配置を

検討することが可能になる。

## 2. EVを考慮した交通シミュレーション

本研究では、既存の交通シミュレーションモデルをベースにEVの挙動を模擬する機能を追加することにより、EVを考慮した交通シミュレーションを実現する。

### (1) 基本モデル

ベースとなる交通シミュレーションモデルには、東京大学生産技術研究所で開発されたSOUNDモデルを用いる。SOUNDは交通量-密度関係で流量を管理しつつ個々の車両の挙動を表現することができるメソタイプのモデルである。リンク上の車両は自由走行車両パケットと流出可能車両パケットに区分され、それぞれ別の待ち行列により管理される。このとき、三角形近似された交通量-密度関係を用いることで、交通流の厳密な管理を可能にしている。

また、経路選択行動のモデルにはDial配分を利用している。一定時間間隔ごとに経路選択確率を更新することで、動的な交通状況変化を反映した経路選択を行うことができる。

## (2) EVシミュレーション機能

上記の基本モデルに、EVの挙動を模擬するために、a) EV走行挙動モデル、b) 充電スタンドモデル、c) EVパラメータ設定機能、d) 充電スタンドパラメータ設定機能、を追加している。それぞれについて以下に述べる。

### a) EV走行挙動モデル

EVの走行挙動を、通常走行(SOC(State Of Charge)：電池残量の減少)、充電スタンドの探索、充電およびSOCゼロ時の走行停止の4つに分類し、それぞれのモデル化を行う。通常走行においては、SOUNDの車両移動ロジックに従って目的地へ向かい、同時にEVの電池残量であるSOCを更新し、移動していく。またトリップチェーンの第2トリップ以降のSOCはその直前のトリップ終了時のSOCの値を引き継ぐ。

EVのエネルギー消費については、走行抵抗と移動距離と正味モーター効率と伝達効率の積であり、加速時と巡航時のエネルギーは式(1)に示すとおりである。単位は単位時間当たりのエネルギーでkW/secである。

$$P_i = P_{idle} + \frac{\mu Mg}{\varepsilon \eta} V + \frac{k}{\varepsilon \eta} V^3 + \frac{M+m}{\varepsilon \eta} |\alpha| V \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$  は正味熱効率、 $\eta$  は総伝達効率である。

走行抵抗が負の場合（減速時）は回生エネルギーを考慮する必要があり、消費エネルギーは式(2)に示すとおりである。

$$P_i = P_{idle} + \mu MgV + kV^3 + (M+m)\alpha V \quad (2)$$

本研究で用いているEVシミュレーション機能では、式(2)および式(3)を逐次計算することでSOC消費量の推定を行なっている。

充電スタンドの探索は、あるEVが一定のSOCになった場合に行われる行動で、SOCが閾値以下になったとき、周辺の充電スタンドを探索し、充電スタンドまでの一般化コストを計算し、最もコストが低い充電スタンドを選択する。なお、充電スタンドへ行って充電するよりも、目的地へ向かったほうがコスト的に有利と判断される場合は、充電スタンドへの立ち寄りを行われず、目的地に向かう。充電の際は、充電スタンドが利用可能であれば、充電スタンドに入り充電器による充電を行う。しかし、充電スタンド内の充電器がすべて使用されている場合、EVは充電スタンドの後方に滞留する。図-1にEVの充電スタンド探索行動を示す。

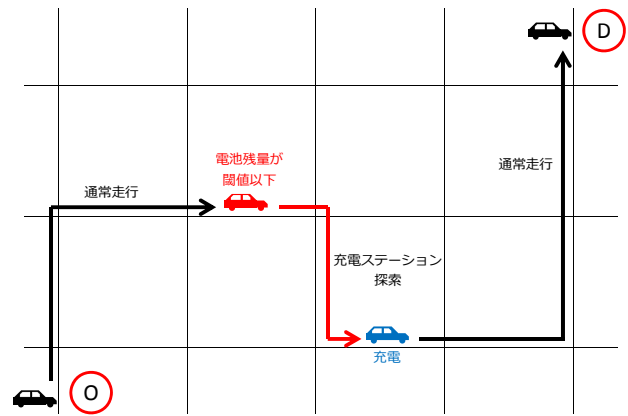


図-1 EVの充電スタンド探索行動

SOCがゼロになったEVは現在走行中のリンクをそのまま走行し、リンク下流の交差点を通過した時点でトリップを終了する。その場合、SOUNDはEVがトリップを終了した地点を結果として出力する。

### b) 充電スタンドモデル

充電スタンドモデルは、充電を必要とするEVが立ち寄る充電スタンドでの処理を表現する。充電器の数のほか、各充電器の充電レート、すなわち通常充電器(100V, 200V)や急速充電器を設定可能となっている。充電スタンドに入った車両は、充電レートが高い充電器を優先的に選択し充電を行い、充電スタンドのすべての充電器が使用されている場合、後続のEVは充電スタンド待ちとして、上流に滞留する。

### c) EV車両のパラメータ設定

EV車両については、電池残量やSOCに影響を与える要因について以下のパラメータが設定可能である。

- 電池キャパシティ
- 車両発生時電池残量(%)
- 車両発生時電池残量分布
- 充電速度
- 目的地変更開始電池残量(%)

車両発生時電池残量および車両発生時電池残量分布は、EVが発生したときの初期SOCを設定するためのパラメータであり、後者は車両発生時電池残量を平均値としたときの正規分布に従った標準偏差を意味している。目的地変更開始電池残量は、EVが通常走行から充電スタンド探索行動へと切り替わるSOCの閾値を意味している。

### d) 充電スタンドのパラメータ設定

充電スタンドについては、キャパシティに影響を与える以下の要因についてのパラメータが設定可能である。

- 設置場所
- 総電力供給量
- 最大受け入れ台数
- 使用料金

### 3. 充電スタンドの配置決定手法

#### (1) 概要

本研究では、クラスタリングを用いた充電スタンドの配置決定手法を提案する。以下に手法の概要を示す。図-2に示すとおり、まず、電池残量が少なくなったEVを2次元座標上にプロットし、それらの点をクラスタに割り当てる。次に、各クラスタに属する点が同一の充電スタンドを利用するEVの集団であり、各クラスタの重心に充電スタンドが設置されていると考える。各クラスタ内の点とクラスタの重心との距離がその電池残量で走行可能な距離よりも長い場合は、その充電スタンドが担当している範囲(クラスタ)内に充電切れ車両が発生してしまうため、クラスタの数を追加して再度クラスタリングを行う。クラスタ内のすべての点とクラスタの重心との距離がその電池残量で走行可能な距離以下となったとき、クラスタの重心に充電スタンドを配置することで、充電切れ車両を発生させないことができる。この作業をクラスタ数1から順番に行なっていくことで、最小限の充電スタンドにより充電切れ車両を発生させないような充電スタンドの配置決定を行うことができる。

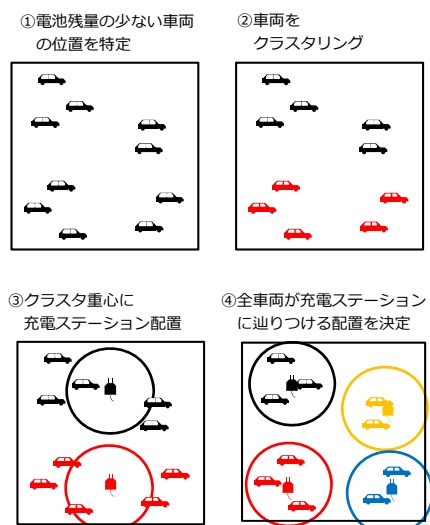


図-2 充電スタンド配置決定手法の概要図

#### (2) K-means法とK-means+法

K-means法はクラスタリングと呼ばれるデータ解析手法の一種であり、教師データなしに与えられたデータを分類する手法である。K-means法はその中でも非階層型クラスタリング手法に属し、アルゴリズムが単純であり拡張性が高い点から様々な用途に広く用いられている。また、あらかじめ生成するクラスタの数を任意に決定することができる点も特徴である。K-means法という名前の由来はk個のクラスタの中心となる点が与えられれば、個体を最も近い中心点に割り当てることによって、個体

の集合をk個のクラスタに分割できる、というものである。K-means法は様々なアルゴリズムが提案されているが、本研究では1967年にMacQueenによって提案されたアルゴリズムに準拠したものを利用する。以下に、MacQueenのアルゴリズム<sup>3)</sup>について述べる。図-3はk=5の場合の概要図である。

#### 【K-means法のアルゴリズム】

n個のデータ $x_i$  ( $i=1\cdots n$ )が与えられており、これをk個のクラスタに分類する。

- 【手順1】  $x_i$  ( $i=1\cdots n$ )の最初のk個をそれぞれk個のクラスタの重心 $V_j$  ( $j=1\cdots k$ )とみなす。
- 【手順2】 残り  $n-k$ 個のデータと各 $V_j$  ( $j=1\cdots k$ )とのユークリッド距離を求め、最も距離の近い重心のクラスタに割り当てる。
- 【手順3】 割り当てたデータを基に各クラスタの重心 $V_j$  ( $j=1\cdots k$ )を再度計算する。
- 【手順4】  $x_i$  ( $i=1\cdots n$ )を最も距離の近い重心のクラスタに再度割り当てる。
- 【手順5】 手順3と手順4を、クラスタへの割り当てが変化しなくなるまで繰り返す。

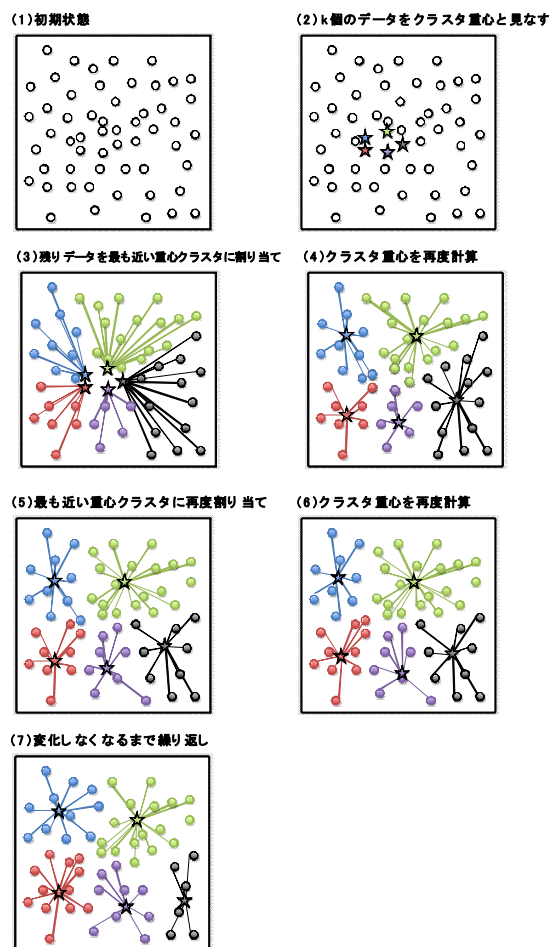


図-3 k=5の場合のK-means法の概要図

K-means法はアルゴリズムが単純かつ高速であるため、

様々な用途に用いられている。しかしそのクラスタリング結果が初期値に大きく依存してしまうという問題点が指摘されている<sup>4)</sup>。そこで本研究では初期値への依存を低減するため、MacQueenのアルゴリズムの【手順1】における初期値選択に改良を加えたK-means++法<sup>9)</sup>を用いる。以下は、そのアルゴリズムの説明である。図4はk=5の場合の初期値の決定法の概要図である。

【K-means++法のアルゴリズム】

n個のデータ $x_i (i=1\cdots n)$ が与えられており、これをk個のクラスタに分類する。

【手順1】  $x_i (i=1\cdots n)$  からランダムに1個選択し、第1クラスタの重心とみなす。

【手順2】  $x_i (i=1\cdots n)$  と既に決定されたクラスタの重心  $V_j (j=1\cdots k)$  との最短距離を表す  $D(x)$  を定義し、 $\{D(x^*)\}^2 / \sum\{D(x)\}^2$  を最大化するデータ  $x^*$  を次のクラスタの重心とみなす。

【手順3】 クラスタの重心を k 個選択するまで、手順2を繰り返す。

【手順4】 割り当てたデータを基に各クラスタの重心  $V_j (j=1\cdots k)$  を再度計算する。

【手順5】  $x_i (i=1\cdots n)$  を最も距離の近い重心のクラスタに再度割り当てる。

【手順6】 手順3と手順4を、クラスタへの割り当てが変化しなくなるまで繰り返す。

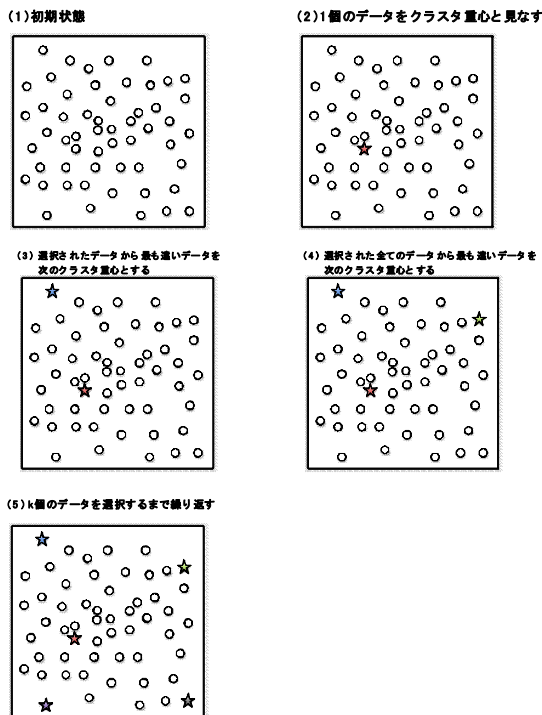


図-4 k=5の場合のK-means++法の初期値の決定法

#### 4. 東京23区におけるケーススタディ

以上で構築した手法を用いて、東京23区を対象としたケーススタディを行い、充電スタンド配置の検討を行う。

##### (1) 対象ネットワーク

本研究では東京都区部を対象地域に設定し、充電インフラの設置場所決定法のケーススタディを行う。図-5に、今回の分析を行った2012年2月時点における、対象地域内の急速充電器マップを示す。



図-5 対象地域内の急速充電器

本研究のシミュレーションで対象とする道路ネットワークを図-6に示す。これは都内の主要幹線道路を中心とするネットワークで、ノード数は418、リンク数は1400である。各リンクにはリンク長、車線数、容量の情報が付与されている。

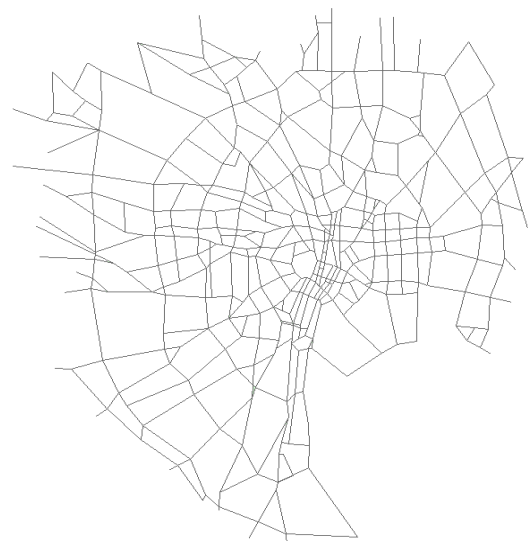


図-6 対象道路ネットワーク



このネットワークでシミュレーションを行うに際して、本研究ではPT調査の計画基本ゾーンを参考に、東京都内を23ゾーン、東京都全体を33ゾーンに分割した。セントロイドは各ゾーンの中心に設定した。なお、今回の試算では、計算負荷の制約から、全てのトリップチェーンパターンに1トリップチェーンずつ交通需要を発生させた結果を示す。

## (2) シミュレーション結果

シミュレーションにより算定した23区内における138箇所のEVの充電切れ発生位置を図-7に示す。交通需要集中地である東京、大手町エリアに多くの充電切れ車両が発生していることが見て取れる。またそれ以外の地域にも散発的に充電切れ車両が発生している。

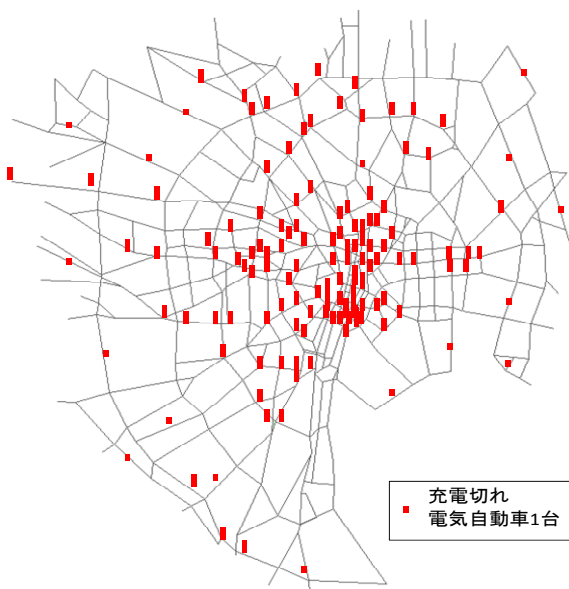


図-7 充電切れEV発生位置

以上の充電切れEV車両の座標値を取得し、前述した手法を適用することで、望ましい充電スタンドの設置位置を求めた。今回はクラスター中心となる充電スタンドから充電切れ車両までの距離が3km以内になるようクラスター数を増加させていき、90%の車両が充電切れを回避できるような充電スタンドの設置案を検討した。

### a) 空間的に均等配置したケース

まず、上記のような充電切れ車両の発生位置が予測できず、空間的に均等に充電スタンドを配置する場合を考える。現状の充電スタンド整備は、これに近い方針で行われていると考えられる。この場合、単位リンク距離あたりの充電切れ発生確率が一定と考え、これをカバーするように充電スタンドを配置することになる。図-8にその結果を示す。空間的に満遍なく比較的多くのスタンド

が必要になることが分かる。

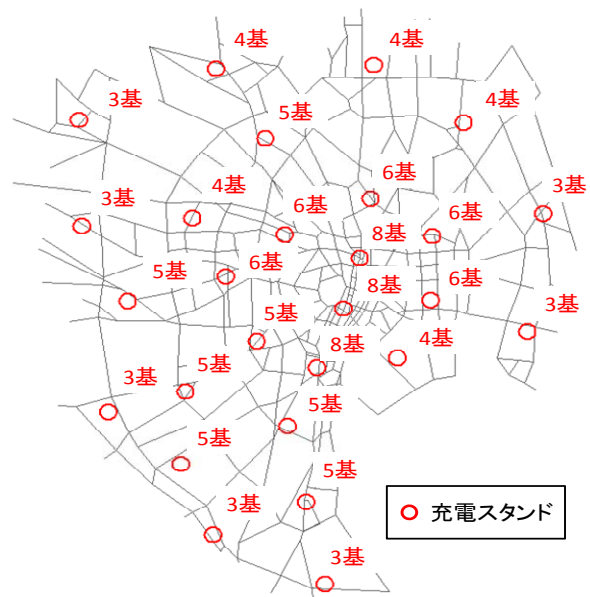


図-8 a)空間的に均等配置したケース

### b) 充電切れEV発生位置を予測したケース

次に、先の充電切れEV発生位置を考慮し、それをカバーするように充電スタンドを配置した場合の結果を図-9に示す。充電切れが多く発生する地域に集中的に配置することで、少ない数の充電スタンドを効率的に配置できていることが分かる。

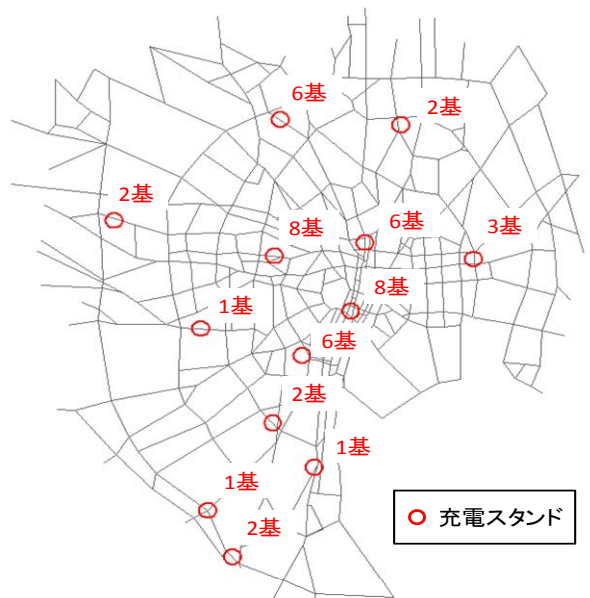


図-9 b)充電切れEV発生位置を予測したケース

### c) 充電切れEV発生位置を予測したケース（既存スタンドに追加）

最後に、既存の充電スタンドの存在を前提に、充電切

れEV発生位置を考慮して不足する充電スタンドを配置した場合の結果を図-10に示す。ここでは、既存のスタンドで賄える位置を青丸、新規に整備が必要なスタンド位置を赤丸、既存スタンドに増設が必要な位置を青+赤丸で示している。b)のケースよりは多くの充電スタンドが必要であるが、a)のケースよりは少ない設置数で必要エリアをカバーできていることが分かる。

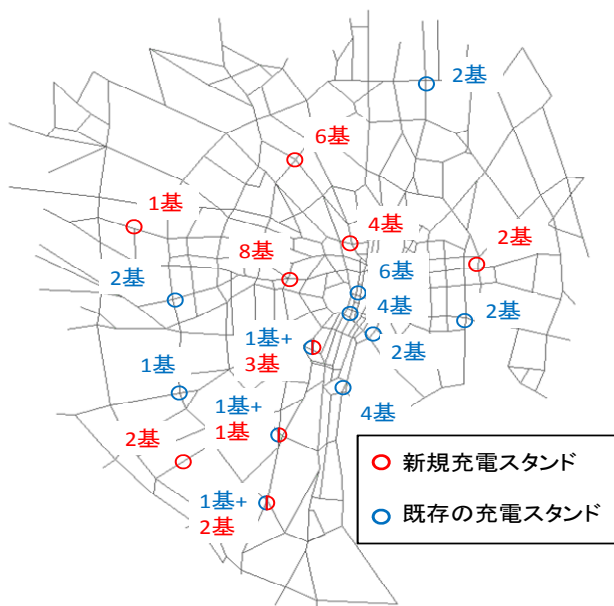


図-10 c)充電切れEV発生位置を予測したケース (既存スタンドに追加)

表-1 充電スタンド設置案の比較

	ケース a)	ケース b)	ケース c)
充電スタンド数(箇所)	27	13	11+8
急速充電器数(基)	108	48	26+29
設備費用(百万円)	513	231	137+140

以上a)~c)の結果をまとめたものを表-1に示す。設置費用に関しては、急速充電器を1台あたり150万円、設置工事費を1台あたり250万円、設置場所1箇所あたりの高圧受電設備を300万円と仮定して計算し、またケースc)に関しては追加整備に必要な費用を「+」以降に表記している。その結果、充電切れEVの発生位置を予測したケースb)では、均等配置をしたケースa)より大幅に少ないスタンド数、充電器数でエリア全体をカバーでき、コストも約45%に抑えられることが明らかになった。既存のスタンドを利用するケースc)については、ケースb)よ

りは大きいもののこの傾向は同様であるといえる。

## 5. まとめ

本研究では今後のEV普及を念頭に、充電スタンドを適切に配置するための手法として、交通シミュレーションを利用してEVの充電切れ発生位置を予測し、それをカバーするように充電スタンドを配置する手法を提案した。そして東京23区の道路ネットワークを対象に適用計算を行った結果、空間的に均等に充電スタンドを配置するケースと比べて、大幅に少ない設置コストで充電切れEVをカバーできることを示した。このように、車両がネットワーク上をどのように移動するかまでを考慮することによって、必要なインフラをコストを抑えつつ整備することが可能になると考えられる。

ただし前述のように、今回の試算では交通シミュレーションに本来の交通需要を与えた計算は行っておらず、十分に信頼性のある結果が得られたとは言えない。今後交通シミュレーションの処理能力の向上させるとともに、EVの挙動に関してもモデルの精緻化を図る等、さらなる改良が必要である。

## 参考文献

- 1) 東京都, 東京都 EV・pHV 普及促進プロジェクト, <http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/vehicle/sgw/promotion/>
- 2) 安士光男・福田達也・大澤進・藤井馨一郎: EV の走行可能範囲を予測するナビシステム, PIONEER R&D, Vol.20, 2011
- 3) MacQueen, J. B.: Some methods for classification and analysis of multivariate observations. Proc. of the Fifth Symposium on Math, Statistics, and Probability, pp.281-297, Berkeley, CA: University of California Press, 1967
- 4) 坂井美帆, 山田誠二, 小野田崇: 独立成分分析による k-means 法の初期値設定手法の提案, The 24th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2010
- 5) David Arthur et al., "k-means++: The advantages of careful seeding," Proc. of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, pp.1027-1035, 2007
- 6) CHAdeMO 協議会, <http://www.chademo.com/jp/>

(2012.8.3 受付)

## METHOD OF OF ELECTRIC VEHICLE (EV) CHARGING STATION ARRANGEMENT USING TRAFFIC SIMULATION

Shinji TANAKA, Keijiro YANO, Takashi OGUCHI,  
Fumihiko NAKAMURA and Rui WANG