

WIAS Discussion Paper No.2011-007

高速道路における EV 充電インフラ整備に関するモデル分析
—到着台数に着目した EV 充電スタンド数の概算—

Model Analysis of Electric Vehicle Charging Infrastructure Development on Highways
--An Approximation of the Number of Electric Vehicle Charging Stations--

March 26, 2012

本間裕大（早稲田大学高等研究所）

Yudai HONMA
Waseda Institute for Advanced Study, Waseda University



WIAS 早稲田大学高等研究所
Waseda Institute for Advanced Study

1-6-1 Nishiwaseda, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8050, Japan

Tel: 03-5286-2460 ; Fax: 03-5286-2470

高速道路における EV 充電インフラ整備に関するモデル分析 —到着台数に着目した EV 充電スタンド数の概算— *1

抄 録

“EV 元年”などの言葉に代表されるように、近年、環境意識の高まりも後押しし、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に対する注目が高まっている。相次いで市販用 EV の発売も開始されており、社会全体への普及が期待される。しかしながら、日々、性能向上が試みられているものの、現状では連続航続距離が 160km 程度と、未だ十分な性能を有していない。当該問題は、長距離トリップが前提となる高速道路において、特に課題となる。そこで本研究では、EV の支援インフラとして高速道路における充電施設に焦点を当て、各充電施設に対する EV 到着数の見積もりを行うための数理モデルを提案する。また、東名高速道路・下り線の東京 IC ~ 小牧 IC 間へと、モデルを適用し、給電間隔やインフラ施設数等を様々に変化させ、当該条件下で必要となる EV 充電スタンド数の試算を行う。

JEL classification:

Keywords: 電気自動車, EV 充電スタンド, 高速道路, インフラ整備

Corresponding author. Tel.: +81-3-5286-2146

E-mail address: yudai@aoni.waseda.jp

*1 本研究を進めるに当たり、数多くの貴重なコメントを下された (社) 日本オペレーションズ・リサーチ学会「持続可能社会のためのインフラストラクチャー戦略」研究部会の皆様に心より御礼申し上げます。

本研究は、科学技術人材育成費補助金 (テニユアトラック普及・定着事業) 『早稲田高等研究所テニユア・トラックプログラム』(課題番号: A07167200), ならびに科学研究費補助金若手研究 (B) 『電気自動車の社会的普及に向けた EV ステーションの整備・運用方策に関する数理的研究』(課題番号: 23710183), 都市交通システムへの影響分析に関する数理的研究』の補助を受けました。

1 はじめに

“EV 元年”などの言葉に代表されるように、近年、環境意識の高まりも後押しし、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に対する注目が高まっている。相次いで市販用 EV の発売も開始されており、社会全体への普及が期待される。しかしながら、日々、性能向上が試みられているものの、現状では連続航続距離が 160km 程度と、未だ十分な性能を有していない。当該問題は、長距離トリップが前提となる高速道路において、特に課題となる。そこで本研究では、EV の支援インフラとして高速道路における充電施設に焦点を当て、各充電施設に対する EV 到着数の見積もりを行うための数理モデルを提案する。

本稿の構成は次の通りである。まず、第 2 章では、本研究で着目する高速道路における EV 支援インフラ整備の必要性について、大局的な視点からの試算を踏まえつつ概説する。続く、第 3 章では、当該インフラ整備を数理的観点から分析すべく、(i) 高速道路における EV の OD パターン、(ii) EV の給電パターン、(iii) 充電施設の配置パターン、の 3 要件が与えられたときに、各充電施設への EV 到着数を見積もるための数理モデルを提案する。その上で、第 4 章では、提案数理モデルを東名高速道路・下り線へと適用し、種々の要因が各充電施設への EV 到着数へ如何なる影響を与えるか、実データに基づく試算結果を示す。また、本研究のまとめと今後の課題についても述べる (第 5 章)。

2 高速道路における EV 支援インフラ整備の必要性

まず、本研究で着目する高速道路において、EV 支援インフラ整備を行う重要性について述べる。

前述のように、EV 普及において最も課題とされている点として、バッテリーの性能限界が挙げられる [2]。最新の市販 EV の場合、連続航続距離は 160km 程度であり、また、急速充電器を 30 分利用した場合は 80% 程度まで充電が可能と公表されている [4]。したがって長距離を連続走行する際には、約 120km 毎に 30 分程度ずつ途中で再充電する必要があるものと思われる。

高速道路では、その整備目的からも明らかなように、多数の長距離トリップの発生が予想される。加えて、その移動経路について、ほとんど選択の余地はない。すなわち、高速道路を EV で移動しようと試みた場合、利用者は高速道路に用意

された充電施設で再充電を繰り返しながら，トリップを行うことになる．

では，EV 支援インフラとして必要な充電施設規模とは一体どれほどであろうか．ここでは東名高速道路を例に，ごく単純な試算を試してみたい．平成 17 年度・道路交通センサス [5] によると，東京 IC—東名川崎 IC 間における平日 12 時間の平均交通量は約 60000 台強である．その半数が下り車線とすると約 30000 台が東京 IC から流入していることになる．これらの全てが EV に置き換わったとして，かつ 2/3 程度は 120km 以上先の富士 IC まで高速道路を利用するものとしてみよう．すると，航続距離の上限からして，この 20000 台の EV は，富士 IC までの間に一度，再充電をすることが予想される．

ここで東京 IC—富士 IC 間の SA・PA 数を数えてみると，7 箇所である (SA のみに限定すれば高々 2 箇所)．すなわち，全ての SA・PA に充電施設を整備したとしても，一つの充電施設に対し，おおよそ

$$\frac{20000}{12 \times 7} \approx 240[\text{台/時間}] \quad (1)$$

の EV が到着することになる．さらに注意すべきは，これらの EV がある一定時間は充電器を占有してしまうことである．全ての EV が急速充電で高々 30 分しか占有しなかったとしても，240[台/時間] の EV へサービスを提供するためには 120 台の急速充電器が必要となり，大規模な支援インフラ整備となることが示唆される．

実際には他の IC から続々と EV が流入し，かつ富士 IC 以降も給電をしていく訳であるから，上記ほど単純ではない．SA と PA の違いや給電パターンによって，その到着数にバラつきも出てくるはずである．つまり，インフラ整備における重要な判断基準となる，各充電施設への EV 到着数は

- 高速道路における EV の OD パターン
- EV の給電パターン
- 充電施設の配置パターン

に依存するはずである．そこで，本研究では，上記の三要素が判明した時に，各充電施設への EV 到着数を見積もるための数理モデルを提案する．

3 基本モデルの定式化

本章では，第 2 章で述べた高速道路の EV インフラ整備について分析すべく， \approx 変換に基づく数理モデルを提案する．

3.1 問題設定

都市モデルとして，ある一定間隔 L ごとに充電施設が整備されている高速道路を考え， N 台の EV がある IC から乗車するものとする．ただし，これらの EV は特に下車することなく，充電を繰り返しながら高速道路を走行するものと仮定する．図 1 に示すような，端に 1 つだけ IC が存在し，一定間隔ごとに充電施設が点在している，無限に長い高速道路を考える訳である（理由は後述）．

いま，EV の給電パターンとして

$$p(t) = [\text{充電した施設 (or 入口の IC) から} \\ t + 1 \text{ 個目の施設で再充電する確率}] \quad (2)$$

が判明しているものとしよう．議論を単純化するため，本節では入口の直前に充電するものと想定する（当該仮定に対する一般化は第 3.5 節で行う），このとき，

$$r(t) = [\text{IC から } t \text{ 個目の施設で充電する EV の割合}] \quad (3)$$

が，それぞれどのようになるか計算してみたい．



図 1 本研究における高速道路のイメージ

3.2 問題の妥当性

さて，以上の定式化では，“1” 起点・“無” 終点の EV のみを取り扱っており，複数の OD パターンが明らかに考慮されていない．そこで，具体的な計算に先立ち，複数の OD パターンを導入するための拡張について述べておく．

まず，1 起点・“多” 終点への一般化について整理する．仮に，図 1 の高速道路において，複数の降車用 IC が存在し，高速道路上の EV が，それらのいずれか

で降車するものとしよう．すると，

$$s(t) = [\text{入口から } t \text{ 箇所目の施設より} \\ \text{先にある IC で下りる EV の割合}] \quad (4)$$

なる指標が計算できるはずである (充電施設と降車用 IC が併設されているならば，施設の直前や直後に IC があるものと想定すれば良い)．このとき， $s(t)$ すなわち当該 OD パターンは，充電行動とは独立に決定されるものと考えられるので，つまるところ， t 箇所目の施設で充電する EV 数は， $N \cdot r(t) \cdot s(t)$ で計算できることになる．以上が，1 起点・“多” 終点への一般化の概要である．

次に，“多” 起点・“多” 終点への一般化について整理する．これは，到着する EV 台数の増加や充電施設の混雑が，EV の給電パターンに影響しないと仮定すると，入口 IC (起点) が増えたとしても，それぞれ個別の問題として計算して差し支えない．すなわち，多起点への一般化は，それぞれの入口 IC について $N \cdot r(t) \cdot s(t)$ を求めた上でそれらを足し合わせるだけで良い．これらの議論より， $r(t)$ さえ判明すれば，多起点・他終点への一般化は，単純な加算・乗算のみで可能であることが判明する．

3.3 $r(t)$ の導出

以上を踏まえた上で， $p(t)$ から $r(t)$ を導出しよう．まず， $p(t)$ と $r(t)$ の関係について整理したい．最初に， $r(1)$ の導出であるが，これは入口 IC で乗車した EV が，1 箇所目の充電施設で直ちに充電する割合 (確率) であるので，

$$\begin{aligned} r(1) &= p(0) \\ &= r(0) \cdot p(0) \end{aligned} \quad (5)$$

と書ける．ただし， $r(0) \stackrel{\text{def}}{=} 1$ と置いた (これは入口 IC で乗車した EV の割合に対応する)．次に， $r(2)$ を導出する．これは，入口 IC で乗車した EV が，2 箇所目の充電施設で充電する割合 (確率) と，1 箇所目の充電施設で充電した EV が，直近の施設で改めて充電する割合 (確率) を足し上げたものとして，計算できる．これを整理すると

$$r(1) = r(0) \cdot p(1) + r(1) \cdot p(0). \quad (6)$$

同様に， $r(3)$ を導出すると，これは，入口 IC で乗車した EV が 3 箇所目の充電施設で充電する割合と，1 箇所目の充電施設で充電した EV が，そこから 2 か所

目の施設で改めて充電する割合，2ヶ所目の充電施設で充電したEVが，そこから直近の施設で改めて充電する割合，を足し上げたものとなるので，

$$r(1) = r(0) \cdot p(2) + r(1) \cdot p(1) + r(2) \cdot p(0) \quad (7)$$

となる． $r(4)$ 以降も，同様に計算すれば良い．つまりところ， $p(t)$ と $r(t)$ の間には，

$$\begin{cases} r(0) = 1 \\ r(t+1) = \sum_{\tau=0}^t r(\tau) \cdot p(t-\tau) \end{cases} \quad (8)$$

なる漸化式が成立することになる．これは， $p(t)$ と $r(t)$ のたたみ込み計算に他ならない．

(8)のような離散的なたたみ込み計算には， z 変換 [6] が有効である．そこで(8)を z 変換すると

$$z^{-1} \{R(z) - r(0)\} = R(z) P(z) \quad (9)$$

を得る．ただし， $P(z)$ と $R(z)$ は，それぞれ $p(t)$ と $r(t)$ を z 変換した関数である．さらに，(9)を変形すると，

$$R(z) = \frac{1}{1 - zP(z)} \quad (10)$$

が導かれる．したがって，求めるべき $r(t)$ は， $R(z)$ を逆 z 変換することで導出できる：

$$r(t) = \mathcal{Z}^{-1} \left[\frac{1}{1 - zP(z)} \right]. \quad (11)$$

3.4 数値例

一例として， $p(t)$ を鋸波関数

$$p_{\text{鋸}}(t) = \begin{cases} \alpha(t+1) & t = 0, \dots, T-1 \\ 0 & t \geq T \end{cases} \quad (12)$$

$$\alpha = \left[\sum_{t=0}^{T-1} t + 1 \right]^{-1} \quad (13)$$

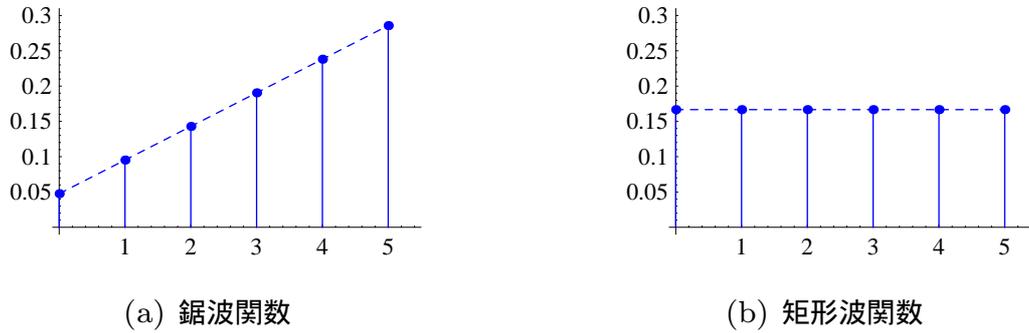


図2 $p(t)$ の概形 ($T = 6$)

ならびに，矩形波関数 (それぞれ一周分のみ)

(14)

$$p_{\text{矩}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{T} & t = 0, \dots, T-1 \\ 0 & t \geq T \end{cases} \quad (15)$$

で与えた場合の数値例を示す (図2を参照)．ただし， T は一回の充電でスキップできる最大施設数である．

まず，それぞれを z 変換すると，

$$P_{\text{鋸}}(z) = \frac{\alpha(1 - (T+1)z^T + Tz^{T+1})}{(1-z)^2}, \quad (16)$$

$$P_{\text{矩}}(z) = \frac{1 - z^T}{T(1-z)} \quad (17)$$

である．したがって， $r(t)$ は，これらを (11) に代入することによって計算できる．ただし，上記のような一般的な関数において，逆 z 変換を手計算で導出することは困難であるので，本研究では， z 変換に関する微分定理

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{1}{t!} \frac{d^t}{dz^t} F(z) = f(t) \quad (18)$$

を用いて，Mathematica による解析計算で導出した．

SA・PA の設置間隔が約 20km 間隔，(急速充電後の) 連続航続距離が 120km と想定し， $L = 20, T = 6$ とした場合の $r(t)$ を，線形・矩形波関数それぞれにつ

いて図 3 に示す．これを見ると分かるように，初めの給電ピークは連続航続距離
 ちょうどの 120km 地点 ($T = 6$) に生じ，その後，2 回目の給電ピーク，3 回目の
 給電ピークと進むにつれて，割合が一定値に落ち着いていることが観察できる．
 これは，施設が入口 IC から遠ざかるにつれ，各 EV の給電パターンが分散され
 ていくことを意味している．なお， $r(t)$ の収束値は， z 変換に関する極限定理

$$\frac{1-z}{z}F(z) = \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) \quad (19)$$

を用いて，それぞれ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_{\text{鋸}}(t) = \frac{3}{2T+1} \quad (20)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r_{\text{矩}}(t) = \frac{2}{T+1} \quad (21)$$

と計算できる．

次に，給電施設間隔の影響について分析する．SA のみに充電施設が設置され
 ているものと想定し（約 60km 間隔）， $L = 60, T = 2$ とした場合との比較結果を
 図 4 に示す（給電パターンは鋸波関数を想定）．これを見ると分かるように，給電
 施設数が $1/3$ となるため，施設で給電する EV の割合が大きく増加していること
 が見て取れる．また，給電できる施設が限定される結果，入口 IC からの距離が
 進んでも，各施設ごとのばらつきが均一化されていないことも確認できる．

3.5 初期給電間隔の考慮

定式化の最後に，EV が入口の直前に充電“しない”と仮定したときの一般化
 について，議論しておく．当該仮定への一般化は，

$$q(t) \stackrel{\text{def}}{=} [\text{入口の IC から } t+1 \text{ 個目の施設で再充電する確率}] \quad (22)$$

を， $p(t)$ に加えて準備すれば，容易に可能である．この場合， $r(t)$ と $p(t)$ ， $q(t)$
 の間には

$$\begin{cases} r(0) = 1 \\ r(t+1) = q(t) - p(t) + \sum_{\tau=0}^t r(\tau) \cdot p(t-\tau) \end{cases} \quad (23)$$

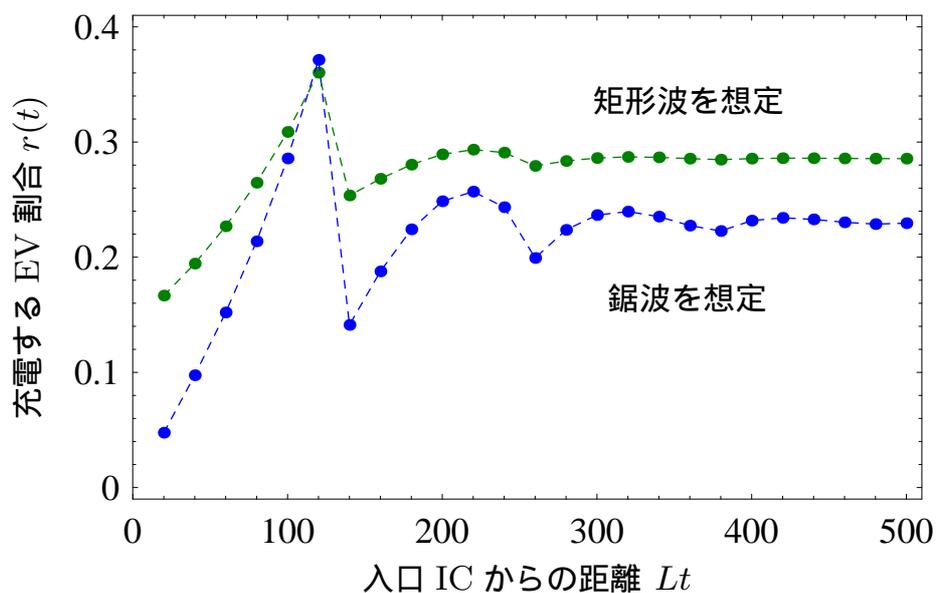


図3 様々な給電パターン $p(t)$ における $r(t)$

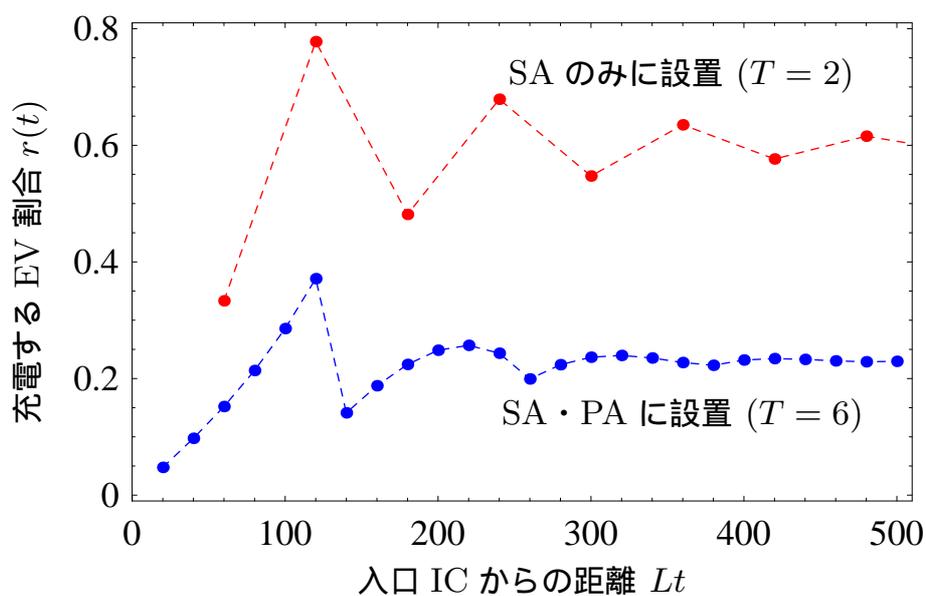


図4 様々な最大給電間隔 T における $r(t)$

なる漸化式が成立することになる。したがって、

$$z^{-1} \{R(z) - r(0)\} = Q(z) - P(z) + R(z)P(z) \quad (24)$$

より，求めるべき $r(t)$ は，

$$r(t) = \mathcal{Z}^{-1} \left[\frac{z(Q(z) - P(z)) + 1}{1 - zP(z)} \right] \quad (25)$$

と， $R(z)$ を逆 z 変換することで導出できる．

4 東名高速道路における試算

本章では，第 3 章の基本モデルを用いて，東名高速道路における試算を行う．

4.1 対象地域と OD データの準備

本章では，東名高速道路・下り線の東京 IC～小牧 IC 間へと，モデルを適用し，EV 普及に対するインフラ整備の必要性について，議論する．当該高速道路は，日本における高速道路ネットワークのなかでも，もっとも利用車両の多い区間となっており，車両が EV となることによる試算が必要と考えられる．

本研究では，現在，当該区間を走行している車両が全て EV 化したものと仮定し，必要な充電施設数と，その到着台数の試算を行う．利用する OD データを計算するに当り，まず平成 17 年度道路交通センサスを用いて，当該ネットワークの区間別交通量（平日 12 時間・交通量）を抽出した．その上で，区間制約型の空間相互作用モデルを適用することによって，各 IC 間の OD 交通量を導出した．

4.2 設置間隔の影響

まず，設置間隔の違いによる，到着台数への影響を分析する．給電間隔分布を， $q(t)$ は矩形波関数， $p(t)$ は鋸波関数と仮定し，SA のみに充電施設を設置した場合 ($T = 2$) と，SA・PA とともに充電施設を設置した場合 ($T = 6$) を比較する．図 5 に計算結果を示す．これを見ると，SA のみに充電施設を設置した場合は，その施設数の少なさから，各施設に対する EV の到着数が，大きく増加していることが見て取れる．その台数は，おおよそ 600～1400[台/時間] であることが判明した．ここで，SA の駐車場台数はおおよそ 250 台程度である．したがって，各 EV が 1 時間程度充電スタンドを占有するものと想定すると，全ての SA の駐車場に充電スタンドを設置すれば，EV の普及率が約 30% 程度までは，対応できることが判明する．

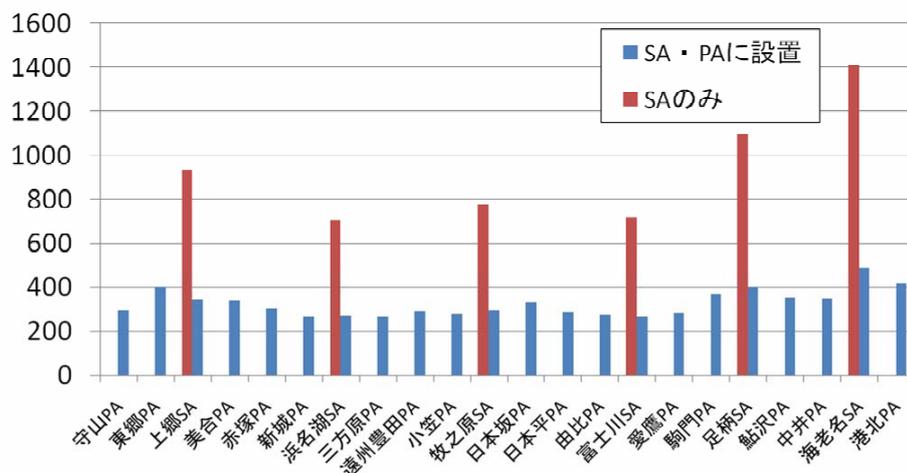


図5 設置間隔の違いを考慮した各 SA・PA への1時間当り到着台数の見積もり

4.3 給電パターンの違い

次に、給電パターンの違いによる、到着台数の変化を分析する。ここでは、SA・PAともに充電施設を設置した場合 ($T = 6$) を想定する。給電間隔分布を、 $q(t)$ は矩形波関数、 $p(t)$ は鋸波関数と仮定した場合と、全てのEVが6ヶ所ごと ($T = 6$) に規則正しく給電した場合を、比較する。図6に計算結果を示す。これを見ると全てのEVが6ヶ所ごと ($T = 6$) に規則正しく給電した場合は、特定の充電施設に到着が偏ってしまっていることが確認できる。その最大台数は、700[台/時間]であり、駐車台数を大きく上回っている。したがって、当該分析から、EVの導入に当っては、その“給電周期”を上手くばらつかせるための仕組みを考える必要があることが判明する。

4.4 連続航続距離による違い

最後に、連続航続距離による違いについて考察する。給電間隔分布を、 $q(t)$ は矩形波関数、 $p(t)$ は鋸波関数と仮定し、また、SA・PAともに充電施設を設置したものとす。その上で、連続航続距離を120km程度を想定し $T = 6$ として計算した場合と、連続航続距離を180km程度を想定し $T = 9$ として計算した場合の、比較結果を図5に示す。これを見ると、連続航続距離が180kmへ延長する

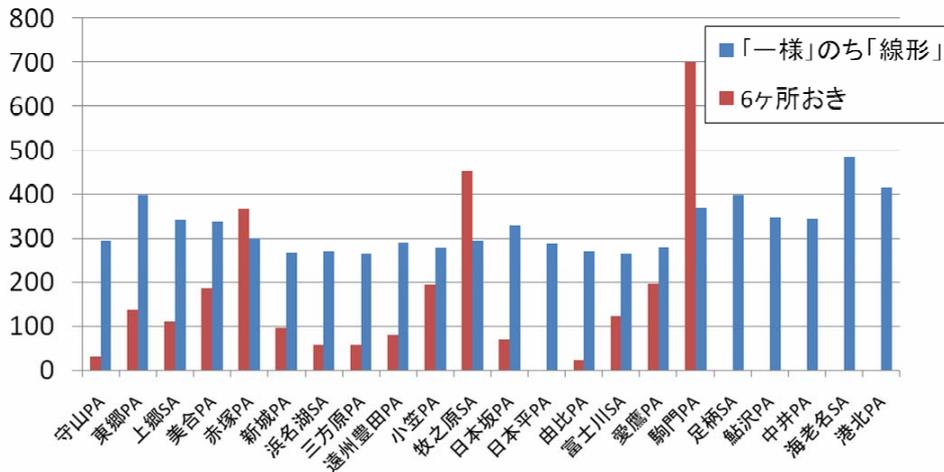


図 6 給電パターンの違いを考慮した各 SA・PA への 1 時間当り到着台数の見積もり

ことにより、各充電施設への到着台数が 120km の場合の 60% 程度に減少していることが見て取れる。また給電周期が異なってくる結果、到着台数の大小関係も異なっていることが確認できる。なお、連続航続距離が 180km の場合、各充電施設への到着台数は、おおよそ 200～300[台/時間]であることが判明した。前述のように、SA の駐車場台数はおおよそ 250 台程度であるので、各 EV が 1 時間程度充電スタンドを占有するものと想定しても、全ての SA・PA に 250 台程度の駐車場を用意し、かつ充電スタンドを設置すれば、完全 EV 化に対応できることが判明する。

5 おわりに

本研究では、近年大きな注目を浴びている電気自動車 (EV: Electric Vehicle) に着目し、その社会的普及のための EV 支援インフラ整備の重要性に焦点を当てた。EV は、日々、その性能向上が試みられているものの、現状では連続航続距離が 160km 程度と、未だ十分な性能を有していない。当該問題は、長距離トリップが前提となる高速道路において、特に課題となると考えられる。そこで本研究では、EV の支援インフラとして高速道路における充電施設に焦点を当て、各充電施設に対する EV 到着数の見積もりを行うための数理モデルを提案した。また、東名高速道路・下り線の東京 IC～小牧 IC 間へと、モデルを適用し、給電間隔やインフラ施設数等を様々に変化させ、当該条件下で必要となる EV 充電スタンド

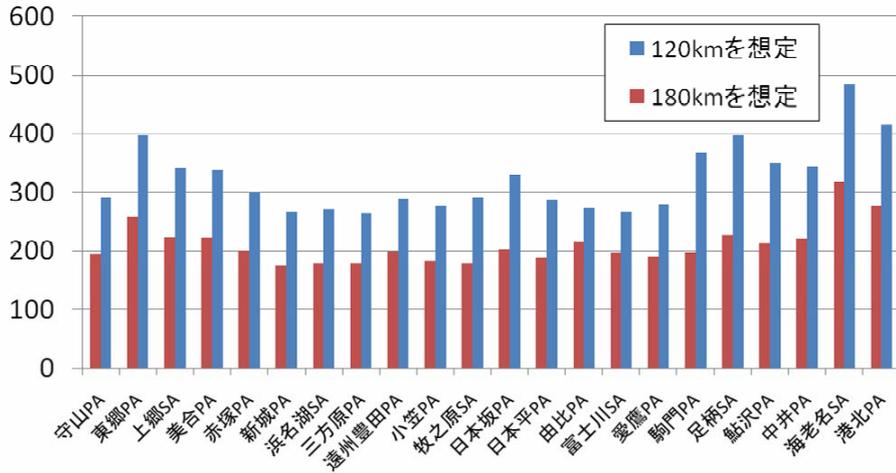


図 7 連続航続距離の違いを考慮した各 SA・PA への 1 時間当り到着台数の見積もり

数の試算を行った．本研究では，SA と PA を同一のものとしてモデルを構築したが，両者に対する利用者行動の違いなど，複数の充電施設の種別を考慮し得るよう，本モデルを一般化することも可能である．今後の課題としては，提案モデルを，全国規模の高速ネットワークへ適用し，その詳細な試算を行うことなどが挙げられる．

【付録】 z 変換に関する公式集

z 変換とは，以下の級数によって定義される：

$$F(z) = \mathcal{Z}[f(t)] = \sum_{t=0}^{\infty} z^t f(t). \quad (26)$$

当該変換を用いると，関数のたたみ込みに関し

$$\mathcal{Z}\left[\sum_{\tau=0}^t f(\tau) g(t-\tau)\right] = F(z) G(z) \quad (27)$$

が成立する．また，関数の平行移動については，

$$g(t) = \begin{cases} f(t+1) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (28)$$

$$G(z) = z^{-1} \{F(z) - f(0)\} \quad (29)$$

となる．

参考文献

- [1] 船瀬俊介 (2004) : 奔れ！電気自動車，築地書館．
- [2] 飯塚昭三 (2006) : 燃料電池車・電気自動車の可能性，グランプリ出版．
- [3] 森村英典，大前義次 (1975)，応用待ち行列理論，日科技連．
- [4] 日産自動車 (2010) : 日産ゼロ・エミッションサイト．
<http://www.nissan-zeroemission.com/>
- [5] 社会システム研究所 (2005) : 平成 17 年度 道路交通センサス，交通工学研究会．
- [6] 柳井 浩 (1988) : z 変換とその応用，日科技連．