

電気自動車充電施設の配置が 経路及び車種の選択に及ぼす影響

城間 洋也¹・福田 大輔²

¹学生会員 東京工業大学大学院修士課程 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: h.shiroma@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学准教授 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 (〒 152-8552 目黒区大岡山 2-12-1-M1-11)
E-mail: fukuda@plan.cv.titech.ac.jp

電気自動車 (EV) の普及において、航続距離の短さや充電施設の不足等の充電特性は普及を促進する上で解決すべき課題であり、充電施設の配置計画においては、利用者 (消費者) の戦略的な行動を考慮した包括的な評価が行われる必要がある。本研究では、複数種類の充電施設が配置された道路ネットワークにおける EV の経路選択行動 (短期的意思決定) と消費者の車種選択行動 (長期的意思決定) の相互依存関係について、数理的な評価モデルを構築した。簡単な数値計算により構築したモデルの基本的な挙動を確認し、充電施設の不足に対して、ネットワーク外部性や長期的な EV の需要変動を考慮した、より緻密な評価が可能であることを示した。

Key Words: traffic equilibrium, vehicle type choice, charging facility location, network externality

1. 序論

(1) 研究背景

近年、蓄電技術等の進展に伴い、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) の普及が世界的に進んでいる。消費者が EV を購入する利点としては、ガソリン車と比較して走行距離当たりの燃料費が安価なことや、非常用電源としての活用などの移動以外の目的で利用できることなどが挙げられる。また社会全体としても、EV の普及は、都市大気環境の改善、蓄電池としての活用によるエネルギー需給の効率化等に寄与することが期待されている。一方で EV の普及促進のためには、その走行性能が大きく影響していると考えられる。Lebeau et al.¹⁾ は、消費者に対して EV の購入に関するアンケート調査を行い、車両購入費の高さに加えて、航続距離の短さ、充電施設の不足、長時間の充電の必要性などの EV 特有の走行性能が消費者に抵抗感を与えていることを明らかにしている。また、Ministry of Economy, Trade and Industry²⁾ によると、現状で EV の航続距離は平均としてガソリン車の半分以下 (EV : 90km~200km, ガソリン車 : 500km 以上) であり、充電時間については、航続距離 160km の規格の EV を一般家庭用のコンセントで満充電すると約 14 時間、公共の充電ステーションの高電圧の充電設備 (急速充電) でも約 30 分時間を要するとされている。このように、EV はガソリン車と比較して高頻度で長時間のエネルギー補給が必要な点で利便性が低いことがわかる。

EV のこうした普及課題を解決すべく、近年様々な充電施設が提案、導入され始めている。EV は、基本的には活動時間帯でない夜間に自宅で充電 (基礎充電) され、昼間に走行利用されることが想定されているため、一見、公共用の充電施設は必要ないように思われる。しかし、現在の蓄電技術では EV に搭載可能な電池容量は限られ、航続距離は短いため、走行距離によっては、走行途中の公共の充電施設での補充電も必要となる。従来のガソリンステーションのような有線線の充電施設の増設に加えて、最近では、ワイヤレス充電の技術を応用して、走行中に EV が充電可能な無線給電レーン (西川ら³⁾) が提唱されており、ヨーロッパの一部の地域では既に導入が進んでいる。(Highways England⁴⁾) これらの充電施設を比較すると、従来のステーション型の充電施設は導入コストが低く、無線給電システムは導入費が高く、充電効率が悪いため利用者の費用負担が高くなる反面、利用者のオペレーションの負担の軽減、EV の航続距離の延伸に寄与するなど、それぞれの充電施設で一長一短ある。(Jang⁵⁾) したがって、これらの施設の導入に際しては、導入の効果を適切な手法で事前に評価する必要がある。

(2) 関連研究と本研究の位置付け

充電施設の導入を適切に評価するためには、道路空間上の充電施設の配置によって、利用者の交通行動 (経路選択行動、充電行動) がどのように変化するかを数理的にモデル化する必要がある。EV 保有者の経路選択

行動、充電行動は、ガソリン車の場合と比較して、自動車の航続距離の制約が強いことが大きな特徴として挙げられる。そのため、充電施設が空間的に偏って分布している場合、ドライバーが最短経路を走行できず、旅行時間が公共の充電施設における充電時間の分だけ増加し、EV を保有する利便性が低下する。また充電施設が不足している場合、充電施設で待ち時間が発生したり、施設周辺の道路ネットワークで混雑が発生し、利便性がさらに低下することも考えられる。即ち、EV の利便性は、充電施設のアクセス性と他のドライバーの経路選択行動、充電行動の影響を受けると言える。

このような充電施設の配置と EV を保有するドライバー同士の経路選択行動の相互依存関係の空間的な記述として、多くの既往研究では利用者均衡配分 (UE: User Equilibrium) を用いた定式化がなされている。代表的な研究例としては、He et al.⁶⁾, He et al.⁷⁾, He et al.⁸⁾, Chen et al.⁹⁾, Xu et al.¹⁰⁾, Liu and Wang¹¹⁾ が挙げられるが、充電施設の混雑による外部性、及びそれらが車種保有に与える影響の記述という点でモデルの拡張の余地があると思われる。

そこで本研究では、これらの影響を考慮し、充電施設を有する道路ネットワークにおける EV の経路選択行動と消費者の車種選択行動の相互依存関係について数理的にモデル化することを目的とする。本研究で構築したモデルを活用することで、充電施設の配置計画の定量的評価に寄与することが期待される。

2. モデルの定式化

(1) モデルの概要

本研究で構築するモデルは消費者（ドライバー）の短期的な選択行動（日常的な交通行動における選択）、長期的な選択行動（車両購入時における選択）を数理的にモデル化するものである。短期的には、ドライバーは旅行時間、燃料費や電気自動車特有の特性（航続距離の制約、充電待ち時間、充電時間など）を考慮し、自身の効用が最大となるような経路・目的地を選択することを行動規範として仮定する。長期的には、消費者は車両購入費、及び短期的な選択行動の期待効用を考慮し、自身の効用が最大となるような車種を選択することを行動規範として仮定する（図-1）。また、一般的な利用者均衡配分の仮定に加え、本研究ではモデルの前提条件として以下を措定する。

- ドライバーは、属性に応じていくつかのクラスに分類され、同一クラス内ではそれらの属性に関して同質性を仮定する。
- 各出発点からの発生交通量は固定とする。
- ドライバーはガソリン車、有線充電型 EV、無線

充電型 EV の 3 種類の車種から 1 つを選択し保有する。

- 充電施設については、有線充電型 EV のための有線型充電ステーションと無線充電型 EV のための無線充電型の充電ステーションと無線充電レーンの 3 種を想定し、有線充電型 EV は有線充電型の充電施設、無線充電型 EV は無線充電型の充電施設でのみ充電が可能であるとする。
- ガソリン車の給油行動については、EV と比較して燃料補給に要する時間が短く、補給頻度も低いいため、無視できるものとする。
- トリップ開始時の充電状態 (Initial SOC) は所与とする。(基礎充電行動 (自宅における充電) は外生的に扱う。)
- エネルギー消費は走行距離にのみ依存する。
- 無線充電レーン上における充電挙動は走行速度に影響しないものとする。(即ち、充電量を増やすために走行速度を下げることはしない。)
- 充電ステーションにおける待ち時間は、当該充電ステーションの容量と流入交通量にのみ依存するものとする。
- 充電ステーションにおける充電時間は、充電量に比例するものとする。

(2) 経路選択行動・目的地選択行動の定式化

ドライバーの車種選択行動を与件として、ドライバーの交通行動（目的地選択行動、経路選択行動、充電行動）を以下のように定式化する。以下のモデルは分布・配分統合モデル¹²⁾を応用したものである。数式中の文字については表-1 に示すとおりである。

$$c_{k,m,v}^{r,s,p} = \sum_{a \in A} \{t_a(x_a) + \frac{\pi_v l_a}{\gamma_m}\} \delta_{m,v,a}^{r,s,p} + \sum_{i \in N} \{\tau_{i,v}(w_{i,v}) \psi_{i,k,m,v}^{r,s,p} + \kappa_v F_{i,k,m,v}^{r,s,p}\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} c_{k,m,v}^{r,s,p} - \mu_{m,v}^{r,s,p} = 0 & (\text{for } f_{k,m,v}^{r,s,p} > 0) \\ c_{k,m,v}^{r,s,p} - \mu_{m,v}^{r,s,p} > 0 & (\text{for } f_{k,m,v}^{r,s,p} = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$c_{k,m,v}^{r,s,p} - \mu_{m,v}^{r,s,p} \geq 0 \quad (3)$$

$$f_{k,m,v}^{r,s,p} \geq 0 \quad (4)$$

$$\text{for } \forall (r, s, m, v, p, k) \in R \otimes S \otimes M \otimes V \otimes P_{m,v}^{r,s} \otimes K_{m,v}^{r,s,p}$$

$$g_{m,v}^{r,s} = h_{m,v}^r \frac{\exp\{\theta_S (u_{m,v}^s - \mu_{m,v}^{r,s})\}}{\sum_{s' \in S} \exp\{\theta_S (u_{m,v}^{s'} - \mu_{m,v}^{r,s'})\}} \quad (5)$$

$$g_{m,v}^{r,s} = \sum_{p \in P_{m,v}^{r,s}} \sum_{k \in K_{m,v}^{r,s,p}} f_{k,m,v}^{r,s,p} \quad (6)$$

$$g_{m,v}^{r,s} \geq 0 \quad (7)$$

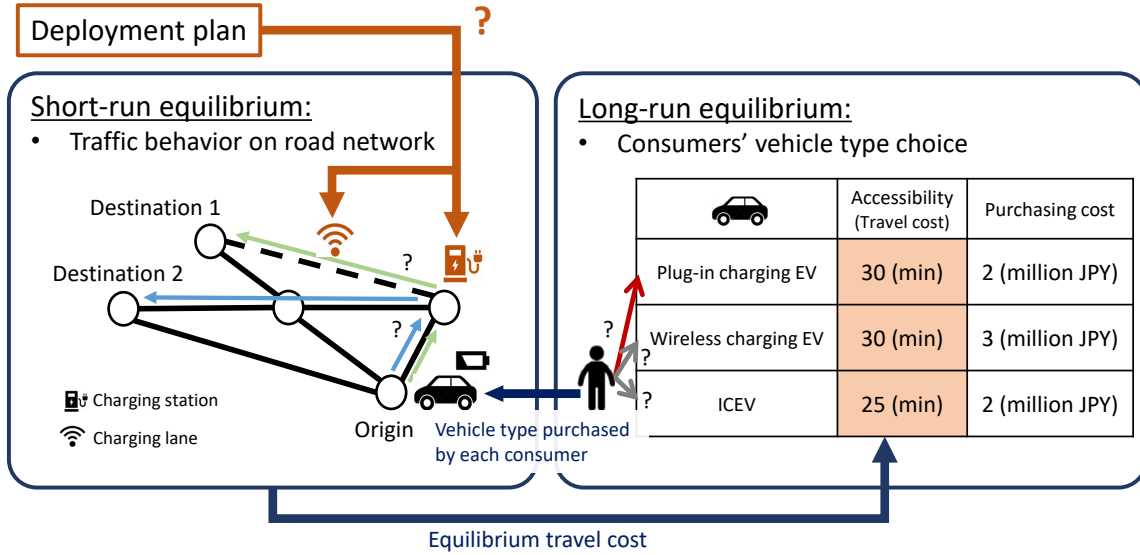


図-1 モデルの概略図

for $\forall(r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V$

$$h_{m,v}^r = \sum_{s \in S} g_{m,v}^{r,s} \quad \text{for } \forall(r, m, v) \in R \otimes M \otimes V \quad (8)$$

$$x_a = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P_{m,v}^{r,s}} \sum_{k \in K_{m,v}^{r,s,p}} \delta_{m,v,a}^{r,s,p} f_{k,m,v}^{r,s,p} \quad (9)$$

for $\forall a \in A$

$$w_{i,v} = \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P_{m,v}^{r,s}} \sum_{k \in K_{m,v}^{r,s,p}} \psi_{i,k,m,v}^{r,s,p} f_{k,m,v}^{r,s,p} \quad (10)$$

for $\forall(i, v) \in N \otimes V$

式 (1) は経路の旅行費用を総走行時間、総消費燃料費、充電ステーションにおける充電待ち時間及び充電時間により表したものである。特に、本研究では旅行費用として充電施設の混雑による外部性を考慮した充電待ち時間を導入することで、充電施設の不足が電気自動車保有の利便性に与える影響についてより緻密な記述を試みている。各ドライバーは、相互に干渉し合いながら、式 (1) で定義される経路の旅行費用を最小とするような経路選択行動、充電行動を行う。その結果、式 (2)、式 (3) のような均衡状態が実現する。 $\mu_{m,v}^{r,s}$ は均衡時利用されている経路の旅行費用（最小旅行費用）を表している。充電施設が不足している場合は、利用可能な経路 $P_{m,v}^{r,s}$ が限定される、あるいは充電ステーションに流入する交通量が増加し混雑が発生することで経路の旅行費用が増大し、利便性が低下する。式 (5) はドライバーの目的地選択行動について Logit モデルを用いて定式化したものであり、ドライバーは目的地特有の魅力度 $u_{m,v}^s$ と目的地までのアクセス性 $\mu_{m,v}^{r,s}$ を考慮して自身の効用が最大となるよう選択することを示して

いる。式 (6)、式 (8)、式 (9)、式 (10) はそれぞれリンク交通量、充電ステーションへの流入交通量、OD交通量、車種別発生量の保存則を表している。また、式 (4)、式 (7) は交通量の非負制約を表している。

(3) 車種選択行動の定式化

本研究では、ドライバーの車種選択行動と (2) で示したドライバーの交通行動の関係性を Nested logit モデルの概念を用いて以下のように定式化する。数式中の文字については表-1 に示すとおりである。

$$h_{m,v}^r = H_m^r \frac{\exp\{\theta_v(U_{m,v}^r - \frac{\phi_m}{\rho_m} C_v)\}}{\sum_{v' \in V} \exp\{\theta_v(U_{m,v'}^r - \frac{\phi_m}{\rho_m} C_{v'})\}} \quad (11)$$

$$U_{m,v}^r = \frac{1}{\theta_s} \ln \sum_{s' \in S} \exp\{\theta_s(u_{m,v}^{s'} - \mu_{m,v}^{r,s'})\} \quad (12)$$

$$h_{m,v}^r \geq 0 \quad (13)$$

for $\forall(r, m, v) \in R \otimes M \otimes V$

$$H_m^r = \sum_{v \in V} h_{m,v}^r \quad \text{for } \forall(r, m) \in R \otimes M \quad (14)$$

式 (11) はドライバーが、当該車種を保有する場合に交通行動を行うことで得られる効用と車両購入費を考慮して、保有する車種を決定することを意味している。式 (12) は目的地選択・経路選択を行うことで得られる効用の期待値（期待最大効用）を表しており、この量の増減によって、充電施設が新規整備された場合の出発地から複数の目的地へのアクセス性の向上を包括

的に評価することが可能である。また、式 (13) は出発地ノードの車種別発生量の非負制約を、式 (14) は出発地ノードの発生量の保存則をそれぞれ表している。

3. モデルの解法

(1) 等価な最適化問題

2. で示した非線形相補性問題 (式 (1)–(14)) を解くことで、車種の保有シェアの均衡状態、及び均衡フローパターンを得ることができる。これらの非線形相補性問題 (1)–(14) には、以下に示す等価な最適化問題が存在し、非線形最適化のアルゴリズムを用いて効率的に解くことが可能である。この等価最適化問題への変換法は、Beckmann et al.¹³⁾ に倣うものであり、最適化問題の最適性条件 (Karush-Kuhn-Tucker 条件) が非線形相補性問題 (式 (1)–(14)) と等価となっている。

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize}_{f,g,h} Z(f, g, h) \\
 & = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(z) dz + \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} \int_0^{w_{i,v}} \tau_{i,v}(z) dz \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P_{m,v}^{rs}} \sum_{k \in K_{m,v}^{rs,p}} (\kappa_v \sum_{i \in N} F_{i,k,m,v}^{rs,p}) f_{k,m,v}^{rs,p} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P_{m,v}^{rs}} \sum_{k \in K_{m,v}^{rs,p}} \left(\sum_{a \in A} \frac{\pi_{v,a}^{rs,p}}{\gamma_m} \delta_{m,v,a}^{rs,p} \right) f_{k,m,v}^{rs,p} \quad (15) \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \left\{ -u_{m,v}^s + \frac{1}{\theta_S} \ln \left(\frac{g_{m,v}^{rs}}{h_{m,v}^r} \right) \right\} g_{m,v}^{rs} \\
 & + \sum_{r \in R} \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} \left\{ \frac{\phi_m}{\rho_m} C_v + \frac{1}{\theta_V} \ln \left(\frac{h_{m,v}^r}{H_m^r} \right) \right\} h_{m,v}^r
 \end{aligned}$$

Subject to

$$\text{Eqs. (4), (6), (7), (9), (10), (13), (14)}$$

(2) 補助問題の定式化

本節では、3.(1) で示した等価最適化問題を解く準備段階として、以下の3つの補助問題 (有線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題、無線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題、ガソリン車の最小費用経路探索問題) を定義する。なお、以下に示す補助問題の定式化は He et al.⁷⁾, He et al.⁸⁾, Chen et al.⁹⁾, Liu and Wang¹¹⁾ を応用したものである。これらの補助問題を用いた具体的な解法については、3.(3) で述べる。

a) 有線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題

リンクフロー x_a 、充電ステーション流入量 $w_{i,v}$ を与件とした場合の有線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題について定式化したものを以下に示す。数式中の変数の定義は表-2 に示すとおりである。

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize}_{\delta, \hat{\psi}, \hat{F}} \hat{C}_{m,plug}^{rs} \\
 & = \sum_{a \in A} \left\{ t_a(\tilde{x}_a) + \frac{\pi_{plug} l_a}{\gamma_m} \right\} \hat{\delta}_{m,plug,a}^{rs} \\
 & + \sum_{i \in N} \left\{ \tau_{i,plug}(\tilde{w}_{i,plug}) \hat{\psi}_{i,m,plug}^{rs} + \kappa_{plug} \hat{F}_{i,m,plug}^{rs} \right\} \quad (16)
 \end{aligned}$$

Subject to

$$\hat{\delta}_{m,plug,a}^{rs} \in \{0, 1\} \quad (17)$$

$$\Gamma \hat{\delta}_{m,plug}^{rs} = E^{rs} \quad (18)$$

$$\hat{L}_{j,m,plug}^{rs} - \hat{L}_{i,m,plug}^{rs} + l_a \varpi - \hat{F}_{j,m,plug}^{rs} = \varepsilon_{m,plug,a}^{rs} \quad (19)$$

$$-O(1 - \hat{\delta}_{m,plug,a}^{rs}) \leq \varepsilon_{m,plug,a}^{rs} \leq O(1 - \hat{\delta}_{m,plug,a}^{rs}) \quad (20)$$

$$\hat{L}_{i,m,plug}^{rs} - l_a \varpi \geq -O(1 - \hat{\delta}_{m,plug,a}^{rs}) + \sigma_m^{rs} \quad (21)$$

for $\forall (i, j) = a \in A$

$$\hat{L}_{r,m,plug}^{rs} = e_0 L_{plug,max} \quad (22)$$

$$0 \leq \hat{L}_{i,m,plug}^{rs} \leq L_{plug,max} \quad (23)$$

$$\hat{\psi}_{i,m,plug}^{rs} \in \{0, 1\} \quad (24)$$

$$\hat{\psi}_{i,m,plug}^{rs} \geq \frac{\hat{F}_{i,m,plug}^{rs}}{B} \quad (25)$$

$$0 \leq \hat{F}_{i,m,plug}^{rs} \leq b_i \quad (26)$$

for $\forall i \in N$

式 (16) は有線充電型 EV を保有するドライバーの経路費用を表しており、式 (16) - (26) はドライバーが航続距離の制約を満たした上で旅行費用を最小とするような経路、充電戦略を選択することを表している。式 (17) はドライバーが走行するリンクを表す変数を定義しており、経路にリンク a が含まれるのであれば 1、含まれないのであれば 0 となる。式 (18) は式 (17) で定義した変数により生成される経路が、出発点ノードから目的地ノードまで分岐せず、一筆書きで表すことができる条件を表している。リンクが経路に含まれる場合、式 (20) より、式 (19) の右辺は 0 となり、式 (19) の当該リンクの始点ノードから終点ノードに至るまでの消費エネルギーとバッテリー残量の保存則を表している。リンクが経路に含まれない場合は、式 (20)

表-1 変数の定義

変数	定義
N	ノード集合 (要素を i とする)
A	リンク集合 (要素を a とする)
N_v^c	充電ステーションノード集合
A^c	無線充電リンク集合
R	出発地ノード集合 (要素を r とする)
S	目的地ノード集合 (要素を s とする)
M	利用者属性クラス集合 (要素を m とする)
V	車種集合 (要素を v とする)
$P_{m,v}^{rs}$	車種 v を保有するクラス m のドライバーの OD ペア rs における経路選択肢集合
$K_{m,v}^{rs,p}$	経路 $p \in P_{m,v}^{rs}$ を走行するドライバーの充電戦略集合
x_a	リンク交通量
$w_{i,v}$	充電ノードへの流入交通量
$f_{k,m,v}^{rs,p}$	経路 $p \in P_{m,v}^{rs}$ を走行し、充電戦略 $k \in K_{m,v}^{rs,p}$ を選択するドライバーの総数
$g_{m,v}^{rs}$	クラス・車種別 OD 交通量
$h_{m,v}^{rs}$	出発地ノードの車種別発生量
H_m^{rs}	出発地ノードの発生量
$c_{k,m,v}^{rs,p}$	経路旅行コスト
$u_{m,v}^{rs}$	目的地効用
$\Delta_{m,v}^{rs}$	パスリンクインシデンスマトリクス (要素を $\delta_{m,v,a}^{rs,p}$ とする)
$\psi_{i,k,m,v}^{rs,p}$	充電戦略 $k \in K_{m,v}^{rs,p}$ の充電ノードを表すバイナリー変数. 充電ノードであれば 1
$F_{i,k,m,v}^{rs,p}$	充電戦略 $k \in K_{m,v}^{rs,p}$ の充電ノード i における充電量
$t_a(x_a)$	リンクパフォーマンス関数
$\tau_{i,v}(w_{i,v})$	充電ノードの待ち時間関数
π_v	走行距離あたりに消費される燃料費
l_a	リンク長
κ_v	単位 kWh あたりの充電所要時間
γ_m	時間価値
ρ_m	所得水準パラメータ (Y_m/\bar{Y} =所得/平均所得)
C_v	車両購入費
ϕ_m	車種選択モデルの説明変数 (購入費) の係数パラメータ
θ_S, θ_V	スケールパラメータ

より、式 (19) の右辺は任意の実数となり、式 (19) の制約条件は無効となる。したがって、式 (19)、式 (20) は経路に含まれる各リンクの始点ノードから終点ノードに至るまでの消費エネルギーとバッテリー残量の保存則を表している。同様に考えると、式 (21) は経路が通過するリンクに対してのみ有効な制約であり、始点ノードから終点ノードに至るまでに EV のバッテリー残量が下限値未満とならないことを意味している。式 (22) は出発地ノードにおける初期のバッテリー残量を表している。式 (23) は EV の蓄電池容量以上は充電できないことを意味している。式 (24) は充電ステーションを利用するかどうかを表す変数を定義しており、利用するのであれば 1、そうでなければ 0 となる。式 (25) は充電ステーションの利用有無と充電量の関係を表すものであり、充電ステーションにおける充電量が正であれば、式 (24) より式 (25) の左辺が 1 となり、充電ステーションを利用したということになる。式 (26) は充電量が非負であることを表している。

b) 無線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題

リンクフロー x_a 、充電ステーション流入量 $w_{i,v}$ を与件とした場合の無線充電型 EV の充電挙動を考慮した最小費用経路探索問題について定式化したものを以下に示す。数式中の変数の定義は表-2 に示すとおりである。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \delta, \hat{\psi}, \hat{F}, \hat{x}, \hat{I} \quad \hat{C}_{m,wls}^{rs} \\ & = \sum_{a \in A} \{ t_a(\hat{x}_a) + \frac{\pi_{wls} l_a}{\gamma_m} \} \hat{\delta}_{m,wls,a}^{rs} \\ & + \sum_{i \in N} \{ \tau_{i,wls}(\hat{w}_{i,wls}) \hat{\psi}_{i,m,wls}^{rs} + \kappa_{wls} \hat{F}_{i,m,wls}^{rs} \} \end{aligned} \quad (27)$$

Subject to

$$\hat{\delta}_{m,wls,a}^{rs} \in \{0, 1\} \quad (28)$$

$$\Gamma \hat{\delta}_{m,wls}^{rs} = \mathbf{E}^{rs} \quad (29)$$

$$\hat{L}_{j,m,wls}^{rs} - \hat{L}_{i,m,wls}^{rs} + l_a \varpi - \hat{F}_{j,m,wls}^{rs} - I_{m,wls,a}^{rs} = \varepsilon_{m,wls,a}^{rs} \quad (30)$$

$$-O(1 - \hat{\delta}_{m,wls,a}^{rs}) \leq \varepsilon_{m,wls,a}^{rs} \leq O(1 - \hat{\delta}_{m,wls,a}^{rs}) \quad (31)$$

Subject to

$$\hat{L}_{i,m,wls}^{rs} - l_a \varpi \geq -O(1 - \hat{\delta}_{m,wls,a}^{rs}) - O\hat{\chi}_{i,m,wls}^{rs} + \sigma_m^{rs} \quad (32)$$

$$\chi_{m,wls,a}^{rs} \geq \frac{I_{m,wls,a}^{rs}}{I_a^0} \quad (33)$$

$$\hat{\chi}_{m,wls,a}^{rs} \in \{0, 1\} \quad (34)$$

$$\chi_{m,wls,a}^{rs} \leq OI_{m,wls,a}^{rs} \quad (35)$$

$$0 \leq I_{m,wls,a}^{rs} \leq I_a^0 \quad (36)$$

for $\forall(i, j) = a \in A$

$$\hat{L}_{r,m,wls}^{rs} = e_0 L_{wls,max} \quad (37)$$

$$0 \leq \hat{L}_{i,m,wls}^{rs} \leq L_{wls,max} \quad (38)$$

$$\hat{\psi}_{i,m,wls}^{rs} \in \{0, 1\} \quad (39)$$

$$\hat{\psi}_{i,m,wls}^{rs} \geq \frac{\hat{F}_{i,m,wls}^{rs}}{B} \quad (40)$$

$$0 \leq \hat{F}_{i,m,wls}^{rs} \leq b_i \quad (41)$$

for $\forall i \in N$

式 (27) は無線充電型 EV を保有するドライバーの経路費用を表しており、式 (27) - (41) はドライバーが航続距離の制約を満たした上で旅行費用を最小とするような経路、充電戦略を選択することを表している。式 (28) - (29)、式 (37) - (41) は、a) で示した経路の成立条件と充電ステーションでの充電戦略の条件にそれぞれ対応するものである。式 (30) - (32) は、a) の式 (19) - (21) に示した EV の消費エネルギーとバッテリー残量の保存則において、充電レーンにおける充電量を考慮に入れたものである。式 (33) - (36) は、充電レーンにおける充電有無と充電量の関係性を定式化したものである。

c) ガソリン車の最小費用経路探索問題

リンクフロー x_a 、充電ステーション流入量 $w_{i,v}$ を与件とした場合のガソリン車の最小費用経路探索問題について定式化したものを以下に示す。数式中の変数の定義は表-2 に示すとおりである。

$$\text{Minimize}_{\delta} \hat{c}_{m,gas}^{rs} = \sum_{a \in A} \{t_a(\tilde{x}_a) + \frac{\pi_{gas} l_a}{\gamma_m}\} \hat{\delta}_{m,gas,a}^{rs} \quad (42)$$

$$\hat{\delta}_{m,gas,a}^{rs} \in \{0, 1\} \quad \text{for } \forall a \in A \quad (43)$$

$$\Gamma \hat{\delta}_{m,gas}^{rs} = E^{rs} \quad (44)$$

式 (42) はガソリン車を保有するドライバーの経路費用を表しており、式 (42) - (44) はドライバーは旅行費用を最小とするような経路を選択することを表している。式 (43) - (44) は a) の式 (17) - (18) で示した経路の成立条件の条件に対応するものである。

(3) 親問題の求解アルゴリズム

3.(1) では、2. で示した均衡条件が等価な最適化問題として変換可能であり、数理最適化のアルゴリズムを用いて効率的に解くことが可能であることを示した。最適化問題を解くにあたっては、事前に利用可能な経路集合 $P_{m,v}^{rs}$ と充電戦略集合 $K_{m,v}^{rs,p}$ を列挙する必要がある。しかし、ネットワークの規模が大きい場合、利用可能な経路、充電戦略について全選択枝を数え上げることは困難であることが多い。そこで本研究では、He et al.⁷⁾、He et al.⁸⁾、Chen et al.⁹⁾、Liu and Wang¹¹⁾ に倣い、Simplicial Decomposition 法 (Larsson and Patriksson¹⁴⁾) を用いたアルゴリズムにより、効率的な経路、充電戦略の選択枝列挙及び最適解の求解を行う。Simplicial Decomposition 法では、元の最適化問題 (親問題) とは別に補助問題を定義し解くことによって、選択されている可能性の高い選択枝を生成し、選択枝集合を更新するステップと、それを基に選択枝集合を限定した場合の元の最適化問題を解くステップを繰り返すことで、有限回の繰り返し計算で最適解を得ることができる。具体的なアルゴリズムを以下に示す。

Step 0: 初期のリンクフロー、充電ステーション流入量、均衡経路コスト、経路選択枝集合、充電戦略集合を以下のように置く。

$$\tilde{x} = \mathbf{0}, \tilde{w} = \mathbf{0}, \tilde{\mu}_{m,v}^{rs} = \infty, \hat{P}_{m,v}^{rs} = \{\mathbf{0}\}, \hat{K}_{m,v}^{rs,p} = \{\mathbf{0}\}$$

$$\forall(r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V$$

Step 1: リンクフロー、充電ステーション流入量を与件として、 $\forall(r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V$ について補助問題を解く。(補助問題を解くことで得られる最小費用経路、最適充電戦略、最小経路費用をそれぞれ、 $\hat{\delta}_{m,v}^{rs*}, \hat{\psi}_{m,v}^{rs*}, \hat{c}_{m,v}^{rs*}$ とする。)

$\forall(r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V$ について、 $\mu_{m,v}^{rs} \leq \hat{c}_{m,v}^{rs*}$ であれば、アルゴリズムを終了する。 $\mu_{m,v}^{rs} > \hat{c}_{m,v}^{rs*}$ であれば、 $\hat{\delta}_{m,v}^{rs*}, \hat{\psi}_{m,v}^{rs*}$ を $\hat{P}_{m,v}^{rs}, \hat{K}_{m,v}^{rs,p}$ にそれぞれ追加する。

Step 2: 更新された経路集合 $\hat{P}_{m,v}^{rs}$ 、充電戦略集合 $\hat{K}_{m,v}^{rs,p}$ を用いて等価最適化問題を解き、最適解を基に $\tilde{x}, \tilde{w}, \tilde{\mu}_{m,v}^{rs}$ を更新し、Step1 へ戻る。

表-2 変数の定義

変数	定義
\bar{x}_a	与件のリンクフロー
$\bar{w}_{i,v}$	充電ステーション流入量
$\bar{\delta}_{m,v}^{rs}$	最小費用経路の通過するリンクを表すベクトル (要素を $\bar{\delta}_{m,v,a}^{rs}$ とする)
$\bar{\psi}_{m,v}^{rs}$	最小費用経路における充電ノードを表すベクトル (要素を $\bar{\psi}_{i,m,v}^{rs}$ とする)
$\bar{\chi}_{m,v}^{rs}$	最小費用経路における充電リンクを表すベクトル (要素を $\bar{\chi}_{m,v,a}^{rs}$ とする)
$\bar{F}_{m,v}^{rs}$	充電ノードにおける充電量を表すベクトル (要素を $\bar{F}_{i,m,v}^{rs}$ とする)
$\bar{I}_{m,v}^{rs}$	充電レーンにおける充電量を表すベクトル (要素を $\bar{I}_{m,v,a}^{rs}$ とする)
Γ	ノードリンクインシデンスマトリクス
E^{rs}	OD ペア rs の始終点ノードを表す行列 (始点ノードの場合 1, 終点ノードの場合 -1, その他のノードの場合 0)
$\bar{L}_{m,v}^{rs}$	ノード出発時の EV のバッテリー残量を表すベクトル (要素を $\bar{L}_{i,m,v}^{rs}$ とする)
ϖ	走行距離当たりの電力消費量
σ_m^{rs}	バッテリー残量の下限值
e_0	バッテリーの初期状態 (無次元量)
$L_{v,max}$	車両のバッテリー容量
b_i	充電ステーションが整備されているノードの場合十分大きい実数 そうでない場合は 0
B	$B = \max_{i \in N} b_i$
I_a^0	充電レーンにおける最大充電量 (リンク走行時間に比例)
l_a	リンク長
κ_v	単位充電量当たりの充電時間
O	十分大きい実数

4. 数値計算例

本章では、仮想的なネットワークを用いて、構築したモデルの計算例を示す。

(1) 入力データの整理

本研究では、数値計算用のネットワークとして、交通量配分のベンチマークテストとしてよく用いられる仮想ネットワークである Sioux Falls ネットワーク (Bar-Gera¹⁵⁾) を用い、充電施設配置を図-2 のように与える。数値計算に際し、ネットワークを構成するリンクのリンクパフォーマンス関数を式 (45) の BPR 関数 (Branson¹⁶⁾) のように特定化する。ただし、 t_a^0 , cap_a はそれぞれフリーフロー状態におけるリンク旅行時間とリンク容量である。

$$t_a(x_a) = t_a^0 \{1 + 0.15(x_a/cap_a)^4\} \quad \text{for } \forall a \in A \quad (45)$$

また、航続距離の影響が大きいことが想定される中・長距離の移動に対するモデルの挙動を確認するため、ネットワークを構成するリンクの属性を表-3 のように設定し、首都圏道路ネットワーク程度のスケールの仮想ネットワークにモデルを適用する。

また、ノード上に配置される充電ステーションの待ち時間関数をリンクパフォーマンス関数と同様に式 (46) のような BPR 関数で特定化する。

$$\tau_{i,v}(w_{i,v}) = \tau_v^0 \{1 + 0.15(w_{i,v}/cap_{i,v})^4\} \quad \text{for } \forall (i,v) \in N^c \otimes V \quad (46)$$

ただし、 $\tau_{i,v}^0$, $cap_{i,v}$ はそれぞれフリーフロー状態にお

ける充電待ち時間と充電施設容量である。充電ステーションの待ち時間関数のパラメータ、及び充電効率に関しては、表 4 のように置く。無線充電型の EV の場合は、ケーブルを自動車に接続する必要がない分ドライバーのオペレーションの負担が軽減されるため、 $\tau_{i,plug}^0 > \tau_{i,wls}^0$ としている。また、数値計算では全ての充電ステーションの容量は等しく設定している。また、全ての充電レーンの充電効率は Chen et al.⁹⁾ に倣い 1.5(kWh/min) とし、充電レーンにおける走行中給電が充電ステーションでの充電と比較して非効率となるよう設定している。

各車種の価格 C_v 、蓄電池容量 $L_{v,max}$ 、走行距離当たり燃料費 π_v は表 5 のように設定する。ここで、無線充電型 EV の燃料費 (走行距離当たりの電気代) を有線充電型 EV よりも高く設定しているのは、無線充電が有線充電よりも非効率な充電方法であるためである。また、EV の走行距離当たりの電力消費 ϖ を 0.36(kWh/km) と設定する。

本研究における数値計算では、ドライバーの属性クラスとして高所得層と低所得層の 2 クラスを想定し、各クラスの出発地ノードからの発生量 H_m^r と所得 Y_m を表-6 に示す。また、目的地ノードとその目的地効用を表-7 のように設定する。ここでは、ノード 0 からノード 19 へのトリップは充電施設を経由しなければ目的地に到達できないよう設定している。車両購入費と交通行動の利便性のトレードオフ関係を表すパラメータ ϕ_m 、時間価値 γ_m 、初期のバッテリー残量 e_0 、バッテリー残量の下限值 σ_m^{rs} 、スケールパラメータ θ_S , θ_V に関しては、

表-3 リンク属性の設定

Link	cap_a (100 veh/h)	t_a^0 (min)	l_a (km)	Link	cap_a (100 veh/h)	t_a^0 (min)	l_a (km)	Link	cap_a (100 veh/h)	t_a^0 (min)	l_a (km)
0 → 1	3.01	7.2	10.8	9 → 10	10	6	9	16 → 18	4.825	2.4	3.6
0 → 2	4.505	4.8	7.2	9 → 14	13.51	7.2	10.8	17 → 6	23.405	2.4	3.6
1 → 0	6.01	7.2	10.8	9 → 15	5.135	6	9	17 → 15	19.68	3.6	5.4
1 → 5	7.96	6	9	9 → 16	4.995	8.4	12.6	17 → 19	4.055	4.8	7.2
2 → 0	23.405	4.8	7.2	10 → 3	4.91	7.2	10.8	18 → 14	2.21	4.8	7.2
2 → 3	17.11	4.8	7.2	10 → 9	10	6	9	18 → 16	4.825	2.4	3.6
2 → 11	23.405	4.8	7.2	10 → 11	4.91	7.2	10.8	18 → 19	5.005	4.8	7.2
3 → 2	12.91	4.8	7.2	10 → 13	4.875	4.8	7.2	19 → 17	4.055	4.8	7.2
3 → 4	14.125	2.4	3.6	11 → 2	23.405	4.8	7.2	19 → 18	3.025	4.8	7.2
3 → 10	4.52	7.2	10.8	11 → 10	4.91	7.2	10.8	19 → 20	5.06	7.2	10.8
4 → 3	23.425	2.4	3.6	11 → 12	25.9	3.6	5.4	19 → 21	5.075	6	9
4 → 5	6.93	4.8	7.2	12 → 11	25.9	3.6	5.4	20 → 19	5.06	7.2	10.8
4 → 8	5.26	6	9	12 → 23	5.09	4.8	7.2	20 → 21	5.23	2.4	3.6
5 → 1	4.96	6	9	13 → 10	4.875	4.8	7.2	20 → 23	4.885	3.6	5.4
5 → 4	4.95	4.8	7.2	13 → 14	5.13	6	9	21 → 14	10.315	4.8	7.2
5 → 7	10.81	2.4	3.6	13 → 22	4.925	4.8	7.2	21 → 19	5.075	6	9
6 → 7	7.84	3.6	5.4	14 → 9	13.51	7.2	10.8	21 → 20	5.23	2.4	3.6
6 → 17	23.405	2.4	3.6	14 → 13	5.13	6	9	21 → 22	5	4.8	7.2
7 → 5	4.9	2.4	3.6	14 → 18	4.82	4.8	7.2	22 → 13	4.925	4.8	7.2
7 → 6	7.84	3.6	5.4	14 → 21	10.315	4.8	7.2	22 → 21	5	4.8	7.2
7 → 8	5.05	4	6	15 → 7	5.045	6	9	22 → 23	5.08	2.4	3.6
7 → 15	5.045	6	9	15 → 9	5.135	6	9	23 → 12	5.69	4.8	7.2
8 → 4	10	6	9	15 → 16	5.23	2.4	3.6	23 → 20	4.885	3.6	5.4
8 → 7	5.05	4	6	15 → 17	19.68	3.6	5.4	23 → 22	5.08	2.4	3.6
8 → 9	13.915	3.6	5.4	16 → 9	4.995	8.4	12.6				
9 → 8	13.915	3.6	5.4	16 → 15	5.23	2.4	3.6				

表-4 待ち時間関数のパラメータ

	有線充電型 EV	無線充電型 EV
$\tau_{i,v}^0$	5.0 (min)	2.5 (min)
$cap_{i,v}$	50 (veh/h)	50 (veh/h)
κ_v	3.0(min/kWh)	3.0(min/kWh)

表-5 自動車に関するパラメータの設定

	ガソリン車	有線充電型 EV	無線充電型 EV
C_v	2(百万円)	3(百万円)	4(百万円)
$L_{v,max}$	-	20 (kWh)	20 (kWh)
π_v	14(円/km)	2(円/km)	8(円/km)

表-8のように一律に与える。各パラメータの設定値は、Nie et al.¹⁷⁾, Chen et al.⁹⁾, Liu and Wang¹¹⁾に準拠している。なお、3.(1)の等価最適化問題の解が一意となるためには、式(15)の目的関数が凸関数となる必要がある¹⁸⁾ので、スケールパラメータに関しては $\theta_S > \theta_V$ としている。

(2) 計算結果

4.(1)の入力データを用いたモデルの出力(車種別経路交通量, 車種保有シェア)を表-9, 図-3に示す。表-9において、電気自動車(有線充電型EV, 無線充電型EV)の均衡パズフローに着目すると、経路充電の必要のない起終点ペア(0→6, 1→6, 1→19)のトリップに

表-6 発生交通量と利用者クラス属性の設定

出発地ノード	クラス	Y_m (million JPY)	H_m (vehicle)
0	0	4	1000
0	1	8	1000
1	0	4	1000
1	1	8	1000

表-7 目的地の効用値

目的地ノード	目的地効用 (min)
6	100
19	200

表-8 その他のパラメータ

パラメータ	変数値
ϕ_m	2.5(min/million JPY)
γ_m	40(JPY/min)
e_0	0.70
ω	0.36 (kWh/km)
σ_m^{rs}	1.0(kWh)
θ_S	0.1
θ_V	0.05

おいては、電気自動車の経路選択肢は制限されていないが、一方で経路充電が必要な起終点ペア(0→19)においては、電気自動車の経路選択肢が各車種の充電施設を

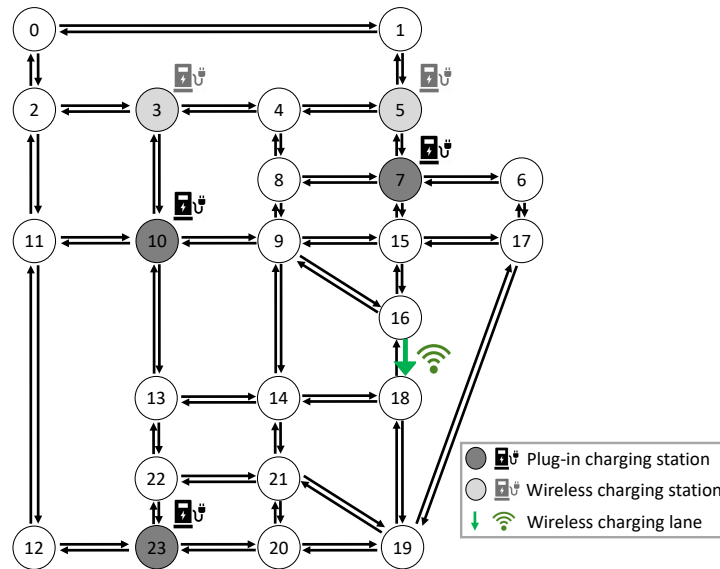


図-2 充電施設配置 (Sioux Falls network)

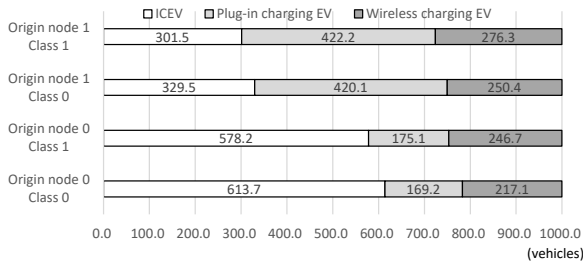


図-3 均衡車種シェア

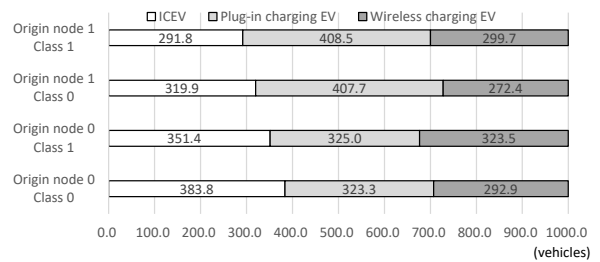


図-4 均衡車種シェア (混雑を考慮しない場合)

通過する経路に制限されていること等のモデルの基本的な挙動が確認される。図-3の各出発地ノード，所得層における均衡車種シェアに着目すると，所得が低く，目的地ノード群に対してトリップ長が長い出発地ノードであるほど電気自動車の普及シェアが小さくなることがモデルの挙動として確認される。また，図-4は充電施設の不足による混雑を考慮しない場合（充電待ち時間を固定値 $\tau_{i,v}^0$ で与える場合）の均衡車種シェアの出力結果であるが，図-3と比較すると，電気自動車の普及シェアが大きく推計されていることが確認される。このことから，充電施設の混雑を考慮せず評価を行った場合，充電施設の配置が電気自動車の普及に与える影響を過大に評価する可能性が示唆される。一方で本研究のモデルでは，これらの点を考慮した上で，充電施設の不足による不効用がドライバーの車種保有に与える影響をより緻密に評価することが可能である。

5. まとめと今後の課題

本研究では，電気自動車充電施設配置計画の定量的評価を目的として，電気自動車充電施設の空間的配置とドライバーの日常的な経路選択行動，及び長期的な自動車購買行動の相互依存関係について，均衡概念を用いた数理的なモデリングを行った。既往研究のアプローチに加え，充電施設の混雑現象や目的地の多様性を考慮したドライバーの車種購買行動をモデル化することで，充電施設の不足に対して，ネットワーク外部性や長期的なEVの需要変動を考慮した理論的により緻密な評価が可能であることを示した。さらに，定式化した数理モデルを用いた数値計算を行い，構築したモデルの基本的な挙動を確認した。本研究ではモデルの基本的な特性について確認するため，簡単なクラス分類，車種分類，目的地集合，出発地集合，ネットワークについて数値計算を行ったが，これらをより多層化・大規模化した問題設定についても本研究のモデルの枠組みの範囲内で容易に記述することが可能である。

今後の課題としては，自宅における基礎充電及び目

表-9 均衡パスフロー

出発地ノード	目的地ノード	車種	経路	経路交通量 (veh)
0	6	ICEV	0 → 1 → 5 → 7 → 6	2.2
		P-EV	0 → 1 → 5 → 7 → 6	13.6
		W-EV	0 → 1 → 5 → 7 → 6	4.98
0	19	ICEV	0 → 2 → 11 → 12 → 23 → 20 → 19	874
			0 → 2 → 11 → 10 → 13 → 22 → 21 → 19	83
			0 → 2 → 3 → 10 → 13 → 22 → 21 → 19	232
		P-EV	0 → 2 → 11 → 12 → 23 → 22 → 21 → 19	122
			0 → 2 → 11 → 10 → 13 → 14 → 18 → 19	113
			0 → 1 → 5 → 7 → 15 → 16 → 18 → 19	95.5
		W-EV	0 → 2 → 3 → 4 → 8 → 9 → 16 → 18 → 19	104
			0 → 1 → 5 → 7 → 15 → 16 → 18 → 19	240
			0 → 1 → 5 → 7 → 15 → 16 → 18 → 19	114
			0 → 1 → 5 → 7 → 15 → 16 → 18 → 19	114
1	6	ICEV	1 → 5 → 7 → 6	2.24
		P-EV	1 → 5 → 7 → 17 → 6	0.54
		W-EV	1 → 5 → 7 → 17 → 6	0.42
1	19	ICEV	1 → 5 → 7 → 8 → 9 → 14 → 21 → 19	313
			1 → 5 → 7 → 6 → 17 → 6	96.1
			1 → 5 → 4 → 8 → 9 → 14 → 21 → 19	219
		P-EV	1 → 5 → 7 → 6 → 17 → 6 → 19	842
			1 → 5 → 7 → 15 → 16 → 18 → 19	500
		W-EV	1 → 5 → 7 → 6 → 17 → 15 → 16 → 18 → 19	26.6
			1 → 5 → 7 → 6 → 17 → 15 → 16 → 18 → 19	26.6

P-EV : 有線充電型 EV, W-EV : 無線充電型 EV, ICEV : ガソリン車
 □ : 充電ノード, ⇒ : 充電リンク

的地充電などのドライバーの充電行動の内生化や自動車保有の動的なプロセスの記述など、実用化に向けたモデルの拡張が挙げられる。また、本研究では数値計算用のネットワークとして Sioux Falls ネットワークを用いてモデルの基本的な挙動を確認したが、本研究で構築したモデルを実ネットワークに対して適用することで、現状の充電配置と車種保有の関係性に関して数理的な知見を得たいと考えている。

参考文献

- 1) Lebeau, K., Van Mierlo, J., Lebeau, P., Mairesse, O. and Macharis, C.: Consumer attitudes towards battery electric vehicles: a large-scale survey, *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, Vol. 5, No. 1, pp. 28–41, 2013.
- 2) Ministry of Economy, Trade and Industry: Initiatives for the diffusion of EV and PHV, 2017.
- 3) 西川和廣, 論説委員, 国土交通省: 電気自動車 (EV) 普及が拓げる道路インフラの可能性への期待, *土木學會誌*, Vol. 96, No. 4, pp. 43, 2011.
- 4) Highways England: Off road trials for “electric highways” technology 2015a.
- 5) Jang, Y. J.: Survey of the operation and system study on wireless charging electric vehicle systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 95, pp. 844–866, 2018.
- 6) He, F., Wu, D., Yin, Y. and Guan, Y.: Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 47, pp. 87–101, 2013.
- 7) He, F., Yin, Y. and Lawphongpanich, S.: Network equilibrium models with battery electric vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 67, pp. 306–319, 2014.

- 8) He, F., Yin, Y. and Zhou, J.: Deploying public charging stations for electric vehicles on urban road networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 60, pp. 227–240, 2015.
- 9) Chen, Z., He, F. and Yin, Y.: Optimal deployment of charging lanes for electric vehicles in transportation networks, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 91, pp. 344–365, 2016.
- 10) Xu, M., Meng, Q. and Liu, K.: Network user equilibrium problems for the mixed battery electric vehicles and gasoline vehicles subject to battery swapping stations and road grade constraints, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 99, pp. 138–166, 2017.
- 11) Liu, H. and Wang, D. Z.: Locating multiple types of charging facilities for battery electric vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 103, pp. 30–55, 2017.
- 12) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析: 最新の理論と解法, 土木学会, 丸善 (発売), 1998.
- 13) Beckmann, M., McGuire, C. B. and Winsten, C. B.: Studies in the economics of transportation, Technical Report 1956.
- 14) Larsson, T. and Patriksson, M.: Simplicial decomposition with disaggregated representation for the traffic assignment problem, *Transportation Science*, Vol. 26, No. 1, pp. 4–17, 1992.
- 15) Bar-Gera, H.: Transportation network test problems, 2002.
- 16) Branston, D.: Link capacity functions: A review, *Transportation research*, Vol. 10, No. 4, pp. 223–236, 1976.
- 17) Nie, Y. M., Ghamami, M., Zockaie, A. and Xiao, F.: Optimization of incentive policies for plug-in electric vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 84, pp. 103–123, 2016.
- 18) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定, *土木学会論文集*, No. 744, pp. 123–137, 2003.

(Received 2020. ?? . ??)

(Accepted ?? ?? ??)

Network Equilibrium Model Considering Electric-Vehicle Type Choice and Charging Facility Location

Hiroya SHIROMA and Daisuke FUKUDA

It is essential to deploy the charging facilities sufficiently for the widespread of electric vehicles and it is also important to evaluate the deployment plan appropriately. In our study, we propose the network equilibrium model for electric vehicles that aims to evaluate the deployment plan of charging facilities quantitatively. The presented model considers the changes in demand for each vehicle and traffic congestion of charging facilities caused by that. Besides, we proposed that the formulated model can be solved using a non-linear optimization algorithm. Also, by showing numerical examples of the proposed model, we illustrated the basic properties of the model.