

ワンウェイ EV カーシェアリングを考慮した 混雑ネットワークにおける給電施設配置に 関する研究

壇辻 貴生¹・城間 洋也²・福田 大輔³

¹正会員 東京工業大学研究員 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: t.dantsuji@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社九州支社 (〒 812-0012 福岡県福岡市博多区博多駅中央街 7-21)
E-mail: hiroya.shiroma@tk.pacific.co.jp

³正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1)
E-mail: fukuda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

近年電気自動車 (EV) の普及により、カーシェアシステムにも EV を導入する事例が増えてきている。しかし、EV 特有の航続距離の短さや給電時間の長さは更なる普及への大きな弊害となっている。それら欠点の解決策として様々な給電方法が開発されているが、それら給電施設を道路ネットワークに配置することで EV カーシェアの利用がどのように促進されるか、給電施設配置とそれを踏まえた利用者の交通行動の関係性を考慮した評価を行う必要がある。そこで、本研究では、複数種類の給電施設が配置された混雑道路ネットワークにおける利用者の交通手段選択・経路選択行動を分担・配分を統合した確率的利用者均衡モデルによって定式化し、給電施設配置の EV カーシェア利用への影響を分析する評価モデルを構築する。

Key Words: *Electric vehicle, car sharing, multiple charging facilities, stochastic user equilibrium*

1. はじめに

都市部では、自動車の保有台数が年々減少している一方で、カーシェアの会員数と車両台数は増加傾向にある¹⁾。クルマの「保有」から「利用」への転換が起きており、モビリティにおいてカーシェアの重要性がますます高くなってきていると言える。他方、近年の蓄電技術等の進展に伴い、電気自動車 (EV) の普及が世界的に進んでおり、都市大気環境の改善など社会全体に対する貢献も期待できることからカーシェアシステムへの導入事例も既にある。例えば、昨年 2019 年に日本ではタイムズ 24 株式会社が手掛けるタイムズカーシェアにおいて、EV を 100 台導入することを発表²⁾し、シンガポールでは the Land Transport Authority と Economic Development Board が 2014 から 2024 年の間 1000 台の EV を用いたワンウェイカーシェアに関する実験³⁾を行っている。また、トヨタが今年はじめに発表した「Woven City」と名付けたスマートシティ開発⁴⁾のプロジェクトでは、MaaS の導入が考えられ、走行する車はゼロエミッションのモビリティのみと構想されており、EV の役割はますます大きくなってきているといえる。

しかし、EV のカーシェアの更なる普及には課題があ

る。多くの既存研究において、普及に向けた欠点として短い航続距離と長い給電時間が挙げられている。経済産業省⁵⁾によると、平均的な EV は現在、ガソリン車の半分以下の航続距離 (EV : 90~200km, ガソリン車 : 500km 以上) にとどまっており、多数の利用者が一つの車を共有するカーシェアリングにおいては大きな弊害になりうる。また、給電時間に関しても、航続距離 160km 規格の EV をフル給電するのに要する時間は、一般家庭用のコンセントで約 14 時間、公共の給電ステーションの高電圧の給電設備 (急速給電) であっても約 30 分で、現状では高頻度かつ長時間の給電が必要となり普及への大きな弊害となっている。実際に、Lebeau et al.⁶⁾ による 2011 年にベルギーにおいて行われたアンケート調査では、車両購入費の高さに加えて、航続距離の短さ、給電施設の不足、給電時間の長さなど EV 特有の特性が購入の妨げになっていることが明らかとなっている。

こうした EV 特有の航続距離や給電時間の欠点を解決すべく、現在様々な給電方法が開発されている。既存のガソリンステーションのような停止・有線型給電ステーション (CS) や、ワイヤレス給電技術を応用した走行中に給電することが可能な走行・無線型給電レーン (WCL) (西川ら⁷⁾) などがあげられる。しかし、そ

それぞれの給電施設には一長一短ある。CS は導入コストが安い一方で停止して給電するため利用者の負担が大きい。WCL はそうした利用者の負担は少ない一方で導入コストが高く、給電効率が悪い側面がある。

EV カーシェア普及に向けて、こういった給電施設を道路ネットワークに適切に配置することが期待される。そこで、本研究では給電施設の配置がどのように EV カーシェア利用に影響を与えるのか定量的に評価するモデルを構築し、道路ネットワーク内での給電施設の最適配置を決定する方法論を提案することを目的とする。

2. 既存研究の整理

給電施設の配置は、給電が必要な EV ドライバーの経路選択行動に影響を与え、その結果として道路ネットワークの交通状態にも影響を与えられられる。また、道路ネットワークの交通状態次第では、人々は交通手段を変更しうするため、そうした交通行動と交通状態の関係性を一体的に記述する必要がある。このような給電施設の配置とドライバーの交通行動の関係性を記述するモデルとして、He et al.⁸⁾ による静的な交通ネットワーク均衡配分による分析がある。He et al.⁸⁾ では、プラグインハイブリッド型 EV を保有するドライバーを想定し、分布・配分を統合した確定的利用者均衡モデルに基づいた分析をしており、目的地選択の効用関数に目的地での給電施設の数と給電料金も組み込み、給電施設配置と各給電施設での料金設定が利用者の交通行動に与える影響を考慮している。しかし、本モデルでは目的地での給電行動のみ考慮し、走行途中での給電行動は考慮しておらず、経路距離が EV の航続距離制約を満たしていない場合でも経路選択枝集合に含まれてしまう場合もある課題があった。He et al.⁹⁾ では、その課題の解決策として航続距離が制約条件となる経路列挙アルゴリズムを構築し、CS を考慮した交通ネットワーク均衡配分問題を定式化している。これら研究以外にも利用者の終日行動を考慮したツアーベースモデルへの拡張 (He et al.¹⁰⁾、WCL を考慮した分析 (Chen et al.¹¹⁾ やバッテリースワップステーションを分析対象に給電施設での待ち時間を考慮した分析 (Xu et al.¹²⁾) なども行われている。

1. で述べたとおり現在様々な給電方法が開発されつつあり、それぞれの給電施設の配置が消費者の車種選択行動 (有線給電型 EV, 無線給電型 EV) に影響すると思われる。Liu and Wang¹³⁾ では交通ネットワーク均衡配分問題と車種選択モデルを統合した枠組みを構築し、それぞれ給電施設の配置による車種選択行動への影響を分析している。そして、EV 需要の増加に伴う給電施設のサービスレベル低下 (待ち時間の増大) と

目的地の多様性 (目的選択) を考慮した枠組みに城間・福田¹⁴⁾ によって拡張されている。

以上の研究は、利用者がマイカーとして EV を保有する想定をした分析に留まっており、都市部でのカーシェアのような EV の利用を念頭においた分析対象ではない。また、Liu and Wang¹³⁾ や城間・福田¹⁴⁾ では、車種選択はランダム効用理論に基づいたネスティッドロジットモデルによる定式化が行われているが、交通ネットワーク均衡配分が確定的に行われおり、強い仮定が置かれている。

確定的な配分という強い仮定を緩和する配分としてランダム効用理論に基づいた確率的配分と確定的な利用者均衡配分を組み合わせ確率的利用者均衡 (SUE) 配分がある。Daganzo and Sheffi¹⁵⁾ によって SUE は、どのドライバーも経路を変更することで旅行費用を改善することができないと想定している状態と定義され、様々な拡張がされている (詳細は土木学会¹⁶⁾ や Sheffi¹⁷⁾ を参照されたい)。例えば、SUE における確率的な社会最適化状態の研究 (Yang¹⁸⁾、Maher et al.¹⁹⁾ や Xie and Waller²⁰⁾ や、セカンドベスト課金であるコードン型課金 (Liu et al.²¹⁾、マルチモーダルネットワークへの拡張 (Uchida et al.²²⁾) などが挙げられる。

SUE の元での EV の給電行動に着目した研究もいくつかされており、Riemann et al.²³⁾ は WCL の配置問題を Logit 型 SUE 配分を制約条件とした最適化問題を定式化し、WCL の配置と交通量のパターンとの関係性を分析している。Jing et al.²⁴⁾ は同様に給電施設の配置を上位問題、Logit 型 SUE 配分を下位問題とした二段階最適化問題を定式化を行い、給電施設と交通量パターンとの関係性の分析を行っている。しかし、Riemann et al.²³⁾ では交通手段は EV のみで、Jing et al.²⁴⁾ はガソリン車 (GV) と EV の二つの交通モードを考慮しているが本研究で重要となる交通手段選択行動は考慮されておらず、車の保有を念頭に置いた分析を行っている。

以上の議論より、EV カーシェアの利用の普及と給電施設配置の関係性の分析の際には、

- 複数の交通手段が利用可能な交通システムの中で交通手段選択を行うモデル
- EV の航続距離が制約となる経路列挙アルゴリズムとそれに基づく均衡配分
- それら交通手段選択モデルと均衡配分を統合し、給電施設配置と EV の経路選択行動の関係性を一体的に記述するモデル

が必要であると考えられる。

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	CS ノード集合
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)
\tilde{V}	車種集合 (要素を v とする)
V	公共交通も含めた交通手段選択肢集合
P_v^{rs}	EV カーシェアのドライバーの OD ペア rs における経路選択肢集合
$K^{rs,p}$	経路 $p \in P_v^{rs}$ を走行するドライバー給電戦略集合
x_a	リンク交通量
$f_k^{rs,p}$	経路 $p \in P_v^{rs}$ を走行し、給電戦略 $k \in K^{rs,p}$ を選択するドライバーの総数
q_{rs}	OD 交通量
q_v^{rs}, q_{PT}^{rs}	EV カーシェアと公共交通の OD 交通量
$U_{k,v}^{rs,p}$	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 p 戦略 k の効用
$U_{PT}^{rs,p}$	クラス m の OD ペア rs における公共交通の効用
$C_{k,v}^{rs,p}$	経路旅行コスト
$C_{PT}^{rs,p}$	公共交通の旅行コスト
Δ^{rs}	パスリンクインシデンスマトリクス (要素を $\delta_a^{rs,p}$ とする)
$F_{i,k}^{rs,p}$	給電戦略 $k \in K^{rs,p}$ の給電ノード i における給電量
$t_a(x_a)$	リンクパフォーマンス関数
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	単位 kWh あたりの給電所要時間
γ	時間価値
α	$= 1 + p_{v,t}/\gamma_m$ で時間帯別利用料金を含めたパラメータ
θ_m, θ_v	スケールパラメータ
補助問題の変数	定義
\tilde{x}_a	与件のリンクフロー
$\hat{\delta}^{rs}$	最小費用経路の通過するリンクを表すベクトル (要素を $\hat{\delta}_a^{rs}$ とする)
$\hat{\psi}^{rs}$	最小費用経路における給電ノードを表すベクトル (要素を $\hat{\psi}_i^{rs}$ とする)
$\hat{\chi}^{rs}$	最小費用経路における給電リンクを表すベクトル (要素を $\hat{\chi}_a^{rs}$ とする)
\hat{F}^{rs}	CS における給電量を表すベクトル (要素を \hat{F}_i^{rs} とする)
\hat{I}^{rs}	WCL における給電量を表すベクトル (要素を \hat{I}_i^{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)
\hat{L}^{rs}	EV のバッテリー残量を表すベクトル (要素を \hat{L}_i^{rs} とする)
ω	走行距離あたりの電力消費量
σ^{rs}	バッテリー残量の下限値
e_o	バッテリーの初期状態 (無次元量)
e_d	バッテリーの最小最終状態 (無次元量)
L_{max}	車両のバッテリー容量
b_i	CS 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	WCL における最大給電量 (リンク走行時間に比例)
l_a	リンク長
O	十分大きい実数

3. モデル

(1) 概要

本研究では、EV ワンウェイカーシェア及び道路ネットワークとは独立した公共交通 (e.g., 鉄道) が利用可能な近未来スマートシティにおける交通システムを考える。その交通システム内で旅行者は交通手段と経路

を選択する交通行動を記述するモデルを構築する。旅行者は、旅行時間、利用料金、カーシェアやEVの特性 (e.g., 目的地での一定程度以上のバッテリー残量や航続距離の制約)などを考慮して、自身の効用が最大となる交通手段と経路選択することを行動規範として仮定する。また、モデルの前提条件は以下の通りである。

(a) 旅行者は、効用最大化原理に従う合理的個人とする。

- (b) 旅行者の選好は同質であると仮定する。
- (c) 交通手段選択及び経路選択には、認知誤差などによる不確実要因が存在し、間接効用関数の確率変数として表現する。
- (d) 各起終点の総交通需要は固定とする。
- (e) 各起点から、旅行者はそれぞれ EV カーシェア、公共交通の中から交通手段を選択し、目的地まで旅行する。
- (f) EV カーシェアを選択した旅行者は、車両の航続距離制約によって制限された選択肢集合の中から目的地までの経路と給電戦略を選択する。
- (g) 給電施設に関しては、EV はノードにおける CS とリンクにおける WCL で給電することが可能とする。
- (h) EV カーシェアのトリップ開始時の給電状態 (Initial State-of-charge: Initial SOC) は所与とする。
- (i) EV カーシェアのトリップ終了時の給電状態 (Final SOC) は一定程度以上とする。
- (j) 電力消費は、走行距離のみに依存する。
- (k) WCL 上における給電挙動は、走行速度に影響しないものとする。すなわち、給電量を増やすために走行速度を下げる行動は考慮しない。
- (l) CS での時間は、給電量に比例するものとする。
- (m) 起点におけるカーシェア車両は需要を満たすのに十分な台数があるとする。
- (n) カーシェアの利用料金は旅行時間に比例するものとする。

仮定 (a) は、旅行者が効用最大化理論に従う主体であることを意味する。仮定 (b) は、簡易のため個人属性 (e.g., 時間価値) は全ての旅行者は同質であると仮定を置いている。仮定 (c) は各選択行動が確率的なモデルとして定式化されることを表す。仮定 (d) は、各起終点の総需要は外生的に与えることを意味している。仮定 (e) は交通手段の選択肢集合を限定する仮定である。仮定 (f), 仮定 (g) は、EV の給電行動とそれに伴う経路選択肢集合が制限される状況を示しており、給電施設配置によって行動が大きく変化することが想定される。仮定 (h), 仮定 (i) は起点での給電行動は外生的に与え、カーシェアの特性でもある終点では Final SOC を一定程度以上で返却する必要があることを示している。例えば、日本のカーシェアシステムの場合は半分以下になった場合に給油のお願いをするシステムが多い。仮定 (j) は、Wu et al.²⁵⁾ によって走行速度が約 100(km/h) の場合に有効な仮定とされており、一般道路を対象とした本研究では妥当な仮定であると言える。仮定 (k) は簡易のため設けた仮定であるが、給電のために走行速度を下げる行動のモデリングが Chen et al.¹¹⁾ によって行

われており、拡張することは可能である。仮定 (l) は給電・給油行動に関する仮定であり、CS には十分な給電施設が配置されている仮定が置かれている。ワンウェイカーシェアに関する研究では、需要と供給のミスマッチが大きな課題とされており、車両の再配置 (Boyacı et al.²⁶⁾) などによる最適化手法が提案されている。しかし、本研究では給電施設配置によって EV カーシェアがどの程度普及する可能性があるか分析することを主目的としているため、仮定 (m) を簡易のために置き、需要と供給のミスマッチが生じないと仮定を置く。起点でのカーシェア特有の車両台数制約の考慮は今後の課題としたい。そして、仮定 (n) は一般的なカーシェアシステムと同様の料金システムを想定している。

(2) 分担・配分を統合した Logit 型 SUE モデル

本研究では SUE の中でも最も一般的な Logit 型 SUE で分担・配分を統合したモデルを考える。公共交通は各 OD ペアに対して一つの経路が存在し、運行頻度や列車内混雑などは考慮せず、一定の交通費用が生じると仮定する。他方、道路ネットワークにおいては各 OD ペアに対して複数の経路が存在する。それらの経路を選択しトリップを行う際の間接効用関数は以下のように表される。

$$U_{PT}^{rs} = -c_{PT}^{rs} + \xi_{PT}^{rs}, \quad \forall (r, s) \in R \otimes S \quad (1)$$

$$U_{k,v}^{rs,p} = -c_{k,v}^{rs,p} + \epsilon_{k,v}^{rs,p}, \quad \forall (r, s, p, k) \in R \otimes S \otimes P \otimes K \quad (2)$$

ここで、 $U_{PT}^{rs}, U_{k,v}^{rs,p}$ はそれぞれ OD ペア rs で公共交通によってトリップした場合と EV カーシェアで経路 p ・給電戦略 k によってトリップした場合の間接効用関数である。また、 $\xi_{PT}^{rs}, \epsilon_{k,v}^{rs,p}$ は誤差項であり、それぞれ独立なガンベル分布に従う確率変数であるとする。 c_{PT}^{rs} は公共交通によってトリップした際の交通費用を表しており、前述の通り各 OD ペアに応じ一定の費用が生じる。そして、 $c_{k,v}^{rs,p}$ はそれぞれ OD ペア rs で経路 p ・給電戦略 k によってトリップした場合の交通費用を表しており、以下の様に定式化する。

$$c_{k,v}^{rs,p} = \alpha \sum_{a \in A} t_a(x_a) \delta_a^{rs,p} + \sum_{i \in N} \kappa F_{i,k}^{rs,p}, \quad (3)$$

$$\forall (r, s, p, k) \in R \otimes S \otimes P \otimes K$$

第一項は旅行時間と利用時間に応じてかかる利用料金に関する費用を表している。例えば、EV が単位時間あたり p の利用料金がかかる場合には $\alpha = 1 + p/\gamma$ となる。このカーシェアシステムにおける時間単位あたりにかかる料金は、ネットワーク均衡配分における混雑課金の time toll と等価であり、Liu et al.²¹⁾ と同様な定式化である。そして、第二項は CS で給電にかかる時間の費用を表している。

利用者が交通手段及び経路選択を行う際には、効用

が最大となる選択肢を選択するとし、交通手段選択と経路選択の関係性を Nested logit model を用いて以下のように表現する。

$$P_k^{r,s,p} = \frac{\exp(\theta_m c_{k,v}^{r,s,p})}{\sum_{k' \in K} \sum_{p' \in P} \exp(\theta_m c_{k',v'}^{r,s,p'})},$$

$$\forall (r, s, p, k) \in R \otimes S \otimes P \otimes K \quad (4)$$

$$P_v^{r,s} = \frac{1}{1 + \exp(-\theta_v (c_{PT}^{r,s} - S_v^{r,s}))},$$

$$\forall (r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V \quad (5)$$

$P_k^{r,s,p}$, $P_v^{r,s}$ はそれぞれ OD ペア rs で EV カーシェアの経路 p ・戦略 k を選択する確率及び OD ペア rs で旅行者が EV カーシェアを選択する確率を表している。 θ_m , θ_v はそれぞれの選択モデルのパラメータである。ただし、後述の等価最適化が凸関数となるためには、 $\theta_m > \theta_v$ の条件が必要なことを注意されたい。また、 $S_v^{r,s}$ は OD ペア rs で EV カーシェアを選択した場合の交通行動の期待最小費用をであり、以下の様にログサム変数で与えられる。

$$S_v^{r,s} = -\frac{1}{\theta_v} \ln \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \exp(-\theta_k c_{k,v}^{r,s,p}),$$

$$\forall (r, s, m, v) \in R \otimes S \otimes M \otimes V \quad (6)$$

OD ペア rs の総需要が $q^{r,s}$ で与えられるとすると、公共交通及び EV カーシェアの需要は式 (5) より、

$$q_v^{r,s} = q^{r,s} P_v^{r,s}, \quad \forall (r, s) \in R \otimes S \quad (7)$$

また、OD ペア rs で EV カーシェアを利用した時の経路 p ・戦略 k の交通量は、

$$f_k^{r,s,p} = q_v^{r,s} P_k^{r,s,p},$$

$$\forall (r, s, m, v, p, k) \in R \otimes S \otimes P \otimes K \quad (8)$$

となる。

以上の利用者の行動の結果として現れる交通ネットワークのネットワークフローは以下の保存条件が成立する。

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

$$x_a \geq 0 \quad (10)$$

$$\forall a \in A$$

$$f_{k,v,m}^{r,s,p} \geq 0,$$

$$\forall (r, s, m, v, p, k) \in R \otimes S \otimes M \otimes \bar{V} \otimes P \otimes K \quad (11)$$

式 (9) はリンク交通量の保存則、式 (10) 及び式 (11) は交通量の非負条件である。

4. モデルの解法

(1) 等価な最適化問題

(2) で示した条件を満たす均衡フローパターンは、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。その等価な最適化問題は次の通りである。

$$\begin{aligned} \min Z(\mathbf{f}, \mathbf{q}) &= \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} \alpha t_a(z) dz \\ &+ \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} (\kappa \sum_{i \in N} F_{i,k}^{r,s,p}) f_k^{r,s,p} \\ &+ \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left(\sum_{a \in A} \frac{\pi_v l_a}{\gamma_m} \delta_{m,v,a}^{r,s,p} \right) f_{k,m,v}^{r,s,p} \\ &+ \frac{1}{\theta_m} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} f_k^{r,s,p} \ln(f_k^{r,s,p} / q_v^{r,s}) \\ &+ \frac{1}{\theta_v} \sum_{r \in R} \sum_{s \in S} \{ q_v^{r,s} \ln(q_v^{r,s} / q^{r,s}) + q_{PT}^{r,s} \ln(q_{PT}^{r,s} / q^{r,s}) \} \end{aligned} \quad (12)$$

Subject to

式 (7), (8), (9), (11), (10)

(2) 補助問題の定式化

本節では、上述の最適化問題を解くために必要となる補助問題の定式化を行う。この補助問題ではリンクフロー $x_a, \forall a \in A$ が与件の中で、EV の経路探索を行う。SUE モデルの解法として link-based の解法と path-based での解法の二つの種類がある。link-based での解法 (e.g., Dial²⁷, Bell²⁸, Akamatsu²⁹) は経路選択肢の列挙を必要としないが、EV の航続距離や給電行動を考慮した場合にはアルゴリズムに改良する必要があるため、本研究では、SUE の枠組みで EV の経路選択行動を分析した Riemann et al.²³ や Jing et al.²⁴ と同様に、取扱いが簡易である path-based での解法を用いることとする。ただし、Path-based の解法では、限定された経路選択肢集合内での均衡解となることに注意されたい。Path-based の解法を用いる際に経路選択肢の生成方法として、k-shortest paths を列挙する方法 (De La Barra et al.³⁰) や Ben-Akiva et al.³¹ による labeling method や Cascetta et al.³² や Cascetta et al.³³ によって提案された labeling method と k-shortest path methods を組み合わせた手法などが挙げられる (詳細は Prashker and Bekhor³⁴ や Cascetta et al.³⁵ を参考にされたい)。Labeling method は様々な基準 (e.g., 最短経路、高速道路利用率最大経路) を用いてそれぞれの基準 (目的関数) にあった最適な経路を経路選択肢集合に加える手法であり、例えば、Ben-Akiva et al.³¹ によるケーススタディでは、六つの

基準によって生成された経路選択肢集合は全ての旅行者が選択した経路の内 90% を網羅していることが明らかとなっている。EV の特性 (e.g., 航続距離の長さによる不安) を踏まえるといくつかの基準の中で人々は経路を選択することが予想されるため, labeling method を用いて経路列挙を行うこととする。

a) EV カーシェアの給電挙動を考慮した経路探索

本研究で取り扱う EV カーシェアは, ネットワークのノードに設置された CS だけでなくリンクに設置された WCL から無線での給電が可能な EV 車両を仮定する。そして, リンクフロー $x_a, \forall a \in A$ を与件として, 本研究では Adler et al.³⁶⁾などを参考に EV 車両の特性を踏まえ, 以下の五つの基準を満たす経路をそれぞれ探索を行う。

- (a) 最小費用経路: $\min \alpha_{v,m} \sum_{a \in A} t_a(\tilde{x}_a) \delta_a^{rs,p} + \sum_{i \in \hat{N}} \kappa_v F_{i,k}^{rs,p}$
- (b) 経路長最短経路: $\min \sum_{a \in A} l_a \delta_a^{rs,p}$
- (c) 給電時間最小経路: $\min \sum_{i \in \hat{N}} \kappa_v \hat{F}_{i,k}^{rs}$
- (d) 最小バッテリー残量最大経路: $\max \min \hat{L}_i^{rs}$
- (e) 遅れ時間最小経路: $\min \sum_{a \in A} D_a(\tilde{x}_a) \delta_a^{rs,p}$

経路探索を行う際の EV 車両の制約条件は以下の通りである。

$$\tilde{\delta}_a^{rs} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

$$\tilde{\chi}_i^{rs} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$\Gamma \tilde{\delta}_a^{rs} = \mathbf{E}^{rs} \quad (15)$$

$$\tilde{L}_j^{rs} - \tilde{L}_i^{rs} + l_a \varpi - \tilde{F}_j^{rs} - \tilde{I}_a^{rs} = \epsilon_a^{rs} \quad (16)$$

$$-O(1 - \tilde{\delta}_a^{rs}) \leq \epsilon_a^{rs} \leq O(1 - \tilde{\delta}_a^{rs}) \quad (17)$$

$$\tilde{L}_i^{rs} - l_a \varpi \geq -O(1 - \tilde{\delta}_a^{rs}) - O\tilde{\chi}_i^{rs} + \sigma_m^{rs} \quad (18)$$

$$\tilde{\chi}_i^{rs} \geq \frac{\tilde{I}_{v,a}^{rs}}{I_a^o} \quad (19)$$

$$\tilde{\chi}_i^{rs} \leq O\tilde{I}_a^{rs} \quad (20)$$

$$0 \leq \tilde{I}_a^{rs} \leq I_a^o \quad (21)$$

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

$$\tilde{L}_r^{rs} = e_o L_{max} \quad (22)$$

$$\tilde{L}_s^{rs} \geq e_d L_{max} \quad (23)$$

$$0 \leq \tilde{L}_i^{rs} \leq L_{max} \quad (24)$$

$$\tilde{\psi}_i^{rs} \in \{0, 1\} \quad (25)$$

$$\tilde{\psi}_i^{rs} \geq \frac{\tilde{F}_{j,v}^{rs}}{B} \quad (26)$$

$$0 \leq \tilde{F}_i^{rs} \leq b_i \quad (27)$$

$$\forall i \in N$$

式 (13) は, 走行経路にリンク a が含まれるか否かの変数を表しており, 経路にリンク a が含まれる場合は 1, 含まれない場合は 0 となる。また, 式 (14) は WCL での給電の有無を表す変数で, 給電する場合は 1, 給電し

ない場合は 0 となっている。式 (15) は式 (13) で定義した変数によって生成される経路が出発地ノードから目的地ノードまで一つの経路として成立する条件を示している。式 (16) はリンク a において始点ノードから終点ノードまで移動する際にリンクでの消費電力とバッテリー残量の保存則を表している。ただし, 式 (16) の右辺の値 $\epsilon_{v,a}^{rs}$ は, 式 (17) によって決まり, リンク a が経路に含まれる場合は式 (17) より $\epsilon_{v,a}^{rs} = 0$ となり, 式 (16) の制約条件が有効になるが, 経路に含まれない場合は $\epsilon_{v,a}^{rs}$ は任意の値をとり, 式 (16) は制約条件として成立しない。式 (18) は同様に経路にリンク a が含まれる場合に有効な制約条件であり, リンク a の終点ノードに到着した時のバッテリー残量が下限値未満にならないことを意味している。式 (19) は WCL で給電しない場合は給電量がゼロである制約条件で, 式 (20) は給電量がゼロの場合は給電しないため, $\tilde{\chi}_i^{rs} = 0$ となる。そして, WCL で給電する場合は最大給電量を上限とした量を給電することが可能である (式 (21))。

式 (22), 式 (23) は, 出発地ノードでの初期バッテリー残量, 到着地ノードでの最終バッテリー残量を表している。そして, トリップの途中でバッテリー残量はゼロから満タンまでの間で変動する (式 (24))。式 (25) は, ノード i の CS において給電するか否かを表す変数で, 給電する場合は 1, 給電しない場合は 0 となる。よって, 式 (26) では, 給電しない場合は必然的に給電量はゼロとなる条件である。給電する場合は b_i が十分に大きな実数であるため, 必要な分を給電する (式 (27))。

(3) 求解アルゴリズム

本研究では, 親問題の求解アルゴリズムとして Simplicial Decomposition (SD) 法 (Larsson and Patriksson³⁷⁾) を用いる。SD 法は二つのフェーズがあり, 全経路集合の部分集合によって親問題を近似させた限定親問題を解くフェーズと部分集合を拡張させていく列生成フェーズに分かれたアルゴリズムである。以下, 具体的なアルゴリズムである。

Step.0 初期設定

繰り返し回数を $n=0$ に設定し, 初期経路交通量と初期リンクフローを $\tilde{\mathbf{f}}^{(n)} = \mathbf{0}$, $\tilde{\mathbf{x}}^{(n)} = \mathbf{0}$ に設定する。初期リンクフローにおける経路選択肢集合及び給電・給油戦略を $\tilde{\mathbf{P}}^{(n)}$, $\tilde{\mathbf{K}}^{(n)}$ とする。

Step.1 限定親問題を解く。

Step.1.0 Step.1 内の繰り返し回数を $l=0$ に設定し, 初期交通手段別交通需要, 初期経路交通量と初期リンク交通量を以下の様に設定する。

$$\mathbf{q}^{(l)} = \mathbf{q}^{(n)}, \mathbf{f}^{(l)} = \mathbf{f}^{(n)}, \mathbf{x}^{(l)} = \mathbf{x}^{(n)}$$

Step.1.1 設定した経路交通量とリンク交通量を基にリ

リンクコスト $t_a^{(l)} = t_a(x_a^{(l)})$, 経路コスト $c_{k,v}^{r,s,p,(l)} = \alpha \sum_{a \in A} t_a^{(l)} \delta_a^{r,s,p,(n)} + \sum_{i \in \hat{N}} \kappa_v F_{i,k}^{r,s,p,(l)}$ を計算し, 各交通手段の補助交通需要と各経路の補助交通量を以下の様に求める.

$$g_k^{r,s,p,(l)} = v_v^{r,s,(l)} \frac{\exp(\theta_m c_{k,v}^{r,s,p,(l)})}{\sum_{k' \in K} \sum_{p' \in P} \exp(\theta_m c_{k',v'}^{r,s,p',(l)})}$$

$$S_v^{r,s,(l)} = -\frac{1}{\theta_v} \ln \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} \exp(-\theta_k c_{k,v}^{r,s,p,(l)})$$

$$v_v^{r,s,(l)} = q^{r,s} \frac{1}{1 + \exp(-\theta_v (c_{PT}^{r,s} - S_v^{r,s}))}$$

$$v_{PT}^{r,s,(l)} = q^{r,s} - v_v^{r,s,(l)}$$

Step1.2 以下の次元探索を解いて, 最適ステップサイズを決定する.

$$\min_{\alpha} Z(\mathbf{f}^{(l)} + \alpha(\mathbf{g} - \mathbf{f}^{(l)}), \mathbf{q}^{(l)} + \alpha(\mathbf{v} - \mathbf{q}^{(l)}))$$

Step1.3 経路交通量及び OD 交通量を更新する.

$$\mathbf{f}^{(l+1)} = \mathbf{f}^{(l)} + \alpha(\mathbf{g} - \mathbf{f}^{(l)})$$

$$\mathbf{q}^{(l+1)} = \mathbf{q}^{(l)} + \alpha(\mathbf{v} - \mathbf{q}^{(l)})$$

Step1.4 収束条件 $\|\mathbf{f}^{(l)} - \mathbf{g}\| < \epsilon$ を満たしている場合は $\tilde{\mathbf{f}} = \mathbf{f}^{(l)}$ として Step2 へ. 満たさない場合は $l=l+1$ として Step.1.0 へ.

Step.2 部分集合の拡張 (列生成)

Step.1 によって求められた限定親問題の解である経路交通量をネットワークに流し, 各リンクで計算されるリンクコストを基に五つの基準によって生成された経路を新たに経路選択枝集合に加える. 新たな経路がない場合はアルゴリズムを終了する. 新たな経路がある場合は, Step.1 に戻り再び限定親問題を解く.

5. おわりに

本研究では, 給電施設配置がどのように EV カーシェア利用に影響を与えるかを定量的に評価するモデルを構築した. 構築したモデルでは分担・配分を統合した Logit 型 SUE の枠組みの中で, カーシェアの利用料金を含めた一般化費用の定式化を行い, カーシェアの経路探索アルゴリズムの開発を行った. 本論文ではモデルの定式化に留まっているが, モデル挙動の確認を行う数値計算例や給電施設配置を決定する最適化問題の定式化などは今後行う予定である.

謝辞 本研究は, 東京工業大学共同研究部門「スマートな都市インフラを構築するための複合ソリューションの研究開発」(株式会社東芝) [研究代表: 東京工業大学屋井鉄雄教授] の一環として行われた. ここに記して感謝の意を表したい. なお, 本稿の見解と含まれ得る誤りについては, 著者のみが責任を負うものである.

参考文献

1) 国土交通省: 平成 24 年度 国土交通白書, 国土交通省, 2012.

- 2) タイムズ 24 株式会社: [タイムズ 2 4] タイムズカーシェアに EV100 台導入を決定! ~世界的な EV シフトに備え、EV カーシェアの運用体制を構築~ 2019.
- 3) LTA: Joint news release by the land transport authority and EDB on EV phase 2 - share an electric car, 2014.
- 4) Toyota: トヨタ、「コネクティッド・シティ」プロジェクトを CES で発表 2020.
- 5) 経済産業省製造産業局: EV・PHV 普及に関する経済産業省の取組, 2017.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 城間洋也, 福田大輔: 電気自動車充電施設の配置がドライバーの経路・車種選択に及ぼす影響の評価モデル, 土木学会論文集 2020 (under review).
- 15) Daganzo, C. F. and Sheffi, Y.: On stochastic models of traffic assignment, *Transportation science*, Vol. 11, No. 3, pp. 253–274, 1977.
- 16) 土木学会 (丸善): 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, 1998.
- 17) Sheffi, Y.: *Urban transportation networks*, Vol. 6, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ 1985.
- 18) Yang, H.: System optimum, stochastic user equilibrium, and optimal link tolls, *Transportation science*, Vol. 33, No. 4, pp. 354–360, 1999.
- 19) Maher, M., Stewart, K. and Rosa, A.: Stochastic social optimum traffic assignment, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 39, No. 8, pp. 753–767, 2005.
- 20) Xie, C. and Waller, S. T.: Stochastic traffic assignment, lagrangian dual, and unconstrained convex optimization, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 46, No. 8, pp. 1023–1042, 2012.
- 21) Liu, Z., Wang, S. and Meng, Q.: Optimal joint distance and time toll for cordon-based congestion pricing, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 69, pp. 81–97,

- 2014.
- 22) Uchida, K., Sumalee, A., Watling, D. and Connors, R.: Study on optimal frequency design problem for multimodal network using probit-based user equilibrium assignment, *Transportation research record*, Vol. 1923, No. 1, pp. 236–245, 2005.
- 23) Riemann, R., Wang, D. Z. and Busch, F.: Optimal location of wireless charging facilities for electric vehicles: flow-capturing location model with stochastic user equilibrium, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 58, pp. 1–12, 2015.
- 24) Jing, W., An, K., Ramezani, M. and Kim, I.: Location design of electric vehicle charging facilities: A path-distance constrained stochastic user equilibrium approach, *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2017 2017.
- 25) Wu, X., Freese, D., Cabrera, A. and Kitch, W. A.: Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 34, pp. 52–67, 2015.
- 26) Boyaci, B., Zografos, K. G. and Geroliminis, N.: An integrated optimization-simulation framework for vehicle and personnel relocations of electric carsharing systems with reservations, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 95, pp. 214–237, 2017.
- 27) Dial, R. B.: A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation research*, Vol. 5, No. 2, pp. 83–111, 1971.
- 28) Bell, M. G.: Alternatives to dial's logit assignment algorithm, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 29, No. 4, pp. 287–295, 1995.
- 29) Akamatsu, T.: Cyclic flows, markov process and stochastic traffic assignment, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 30, No. 5, pp. 369–386, 1996.
- 30) De La Barra, T., Perez, B. and Anez, J.: Multidimensional path search and assignment, In *PTRC Summer Annual Meeting, 21st, 1993, University of Manchester, United Kingdom* 1993.
- 31) Ben-Akiva, M., Bergman, M., Daly, A. J. and Ramaswamy, R.: Modeling inter-urban route choice behaviour, In *Proceedings of the 9th international symposium on transportation and traffic theory*, pp. 299–330, , VNU Science Press Utrecht, The Netherlands 1984.
- 32) Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A.: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. specification and some calibration results for interurban networks, In *Transportation and Traffic Theory. Proceedings of The 13th International Symposium On Transportation And Traffic Theory, Lyon, France, 24-26 July 1996* 1996.
- 33) Cascetta, E., Russo, F. and Vitetta, A.: Stochastic user equilibrium assignment with explicit path enumeration: comparison of models and algorithms, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 30, No. 8, pp. 1031–1037, 1997.
- 34) Prashker, J. N. and Bekhor, S.: Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: a review, *Transport reviews*, Vol. 24, No. 4, pp. 437–463, 2004.
- 35) Cascetta, E., Papola, A., Russo, F. and Vitetta, A.: Implicit Availability/Perception Logit Models for Route Choice in Transportation Networks, *World Transport Research: Selected Proceedings of 8th World Conference on Transport Research*, 1998.
- 36) Adler, J. D., Mirchandani, P. B., Xue, G. and Xia, M.: The electric vehicle shortest-walk problem with battery exchanges, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 16, No. 1, pp. 155–173, 2016.
- 37) 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.

(2020.10.02 受付)

Takao DANTSUJI, Hiroya SHIROMA and Daisuke FUKUDA