

再生可能エネルギーの活用に向けた宅配電気トラックの

充電ステーションの最適配置

大阪大学 *植田 和樹 UEDA Kazuki
01604524 大阪大学 森田 浩 MORITA Hiroshi

1. はじめに

電気自動車(EV: Electric Vehicle)の普及に向けて、航続距離の短さと充電ステーションの不足が大きな課題となっている。宅配トラックはこれらの影響を受けにくいとされており、実際にEV 宅配トラックの導入に踏み切る企業も出てきている。EV 宅配トラックを導入する際に生じる、重要な問題の一つが充電ステーションをどこに設置するかである。

これまで、充電ステーションの配置を決定する研究では、EV の航続距離に着目したものが多かった。しかし近年、太陽光発電の普及に伴い、昼間の電力市場取引価格が夜間よりも低くなっており、この状況に対応するため、昼間の電力を有効活用し、充電コストを最小化する配送計画が必要とされている。本論文では、このような配送を実現するための充電ステーションの最適配置を検討する。

2. モデルの定式化

本論文で提案するモデルはSchiffer and Walther[1]のモデルを、充電コストを算出できるよう拡張したものである。ある一つの配送拠点とその担当地域を想定し、需要や配達指定時間が既知の顧客の集合を対象とする。Schiffer and Walther のモデルにおいては充電ステーションだけでなく、顧客のノードにおいても充電が可能としていたが、本研究においては充電ステーションと配送拠点でのみ充電が可能とする。

図1は5人の顧客、3つの充電ステーション候補地の例である。充電ステーションを最大1箇所に設置できるとして、最適化を行うと、図のように配置する充電ステーションが決定し、その充電ステーションを通る経路が出力される。この場合EVはC5を出発してからC2を訪問する前にS1で充電を行う。Schiffer and Walther のモデルでは同一の充電ステーションにおいて複数回の充電を可能にするため、充電ステーションの候補点と同一の座標を持つダミー頂点を生成していた。本研究では、ダミー頂点に電気料金の変化に応じた時間枠を設定することで、時間により電気料金単価が異なる状況においても充電コストの算

出を可能にした。図1においては、D,S1,S2,S3の各点においてダミー頂点が生成される。EVはS1のいずれかのダミー頂点に訪れている。訪れた頂点の時間枠に対応した電気料金単価を用いて、充電コストが算出される。

本研究のモデルで用いる記号と変数を表1に示す。全ての経路は配送拠点から始まり配送拠点で終わる。始点と終点をそれぞれ S, T と表す。

充電コストを最小化する経路と配置を求める問題は以下の混合整数計画問題として定式化される。

$$\min. \sum_{i \in F'} c_i w_i \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{j \in V' \setminus \{i\}} x_{ij} = 1, i \in V_S \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V' \setminus \{i\}} x_{ij} \leq y_i, i \in F' \setminus \{S, T\} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V' \setminus \{j, T\}} x_{ij} - \sum_{i \in V' \setminus \{j, S\}} x_{ji} = 0, j \in V' \setminus \{S, T\} \quad (4)$$

$$\tau_i + (t_{ij} + s_i)x_{ij} - l_{n+1}(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \quad (5)$$

$$\tau_i + t_{ij}x_{ij} + r w_i - (l_{n+1} + rQ)(1 - x_{ij}) \leq \tau_j, \quad (6)$$

$$e_i \leq \tau_i \leq l_i, i \in V' \quad (7)$$

$$w_i \leq Q y_i, i \in F' \quad (8)$$

$$\sum_{i \in F' \setminus \{S, T\}} y_i \leq Z \quad (9)$$

$$y_i \geq y_j, \forall i \in F' \setminus \{S, T\}, \forall j \in F_i \quad (10)$$

$$0 \leq q_j \leq q_i - od_{ij}x_{ij} + Q(1 - x_{ij}), \quad (11)$$

$$0 \leq q_j \leq q_i + w_i - od_{ij}x_{ij} + Q(1 - x_{ij}), \quad (12)$$

$$0 \leq q_i + w_i \leq Q, i \in F' \quad (13)$$

$$w_T \geq q_S - q_T \quad (14)$$

$$w_i \geq 0, i \in F' \quad (15)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i \in V' \setminus \{T\}, j \in V' \setminus \{S\} \quad (16)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, i \in F' \quad (17)$$

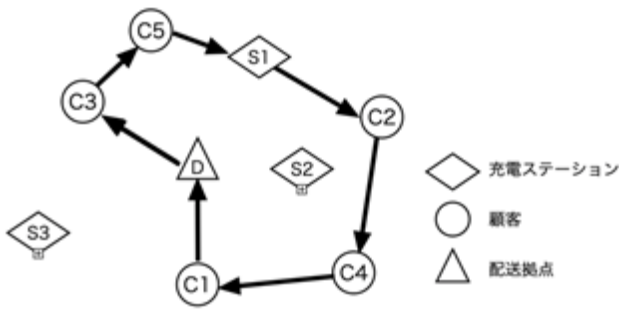


図1 最適化の例

表1 使用する文字の説明

表記法	意味
V	顧客の頂点の集合
V_S	$V \cup \{S\}$
F	充電ステーションの候補点と配送拠点の集合
F_k	頂点 k のダミー頂点の集合 $k \in F$
F'	全ダミー頂点と配送拠点の集合
V'	$V \cup F'$
x_{ij}	辺 ij をトラックが通るなら1、通らなければ0
y_i	頂点 i に充電ステーションを配置するなら1、そうでないなら0
τ_i	頂点 i の到着時刻
w_i	頂点 i での充電量
q_i	頂点 i 到着時のバッテリー残量
t_{ij}	辺 ij の移動時間
d_{ij}	辺 ij の距離
s_i	頂点 i での宅配業務にかかる時間
c_i	頂点 i で充電時の電気料金単価
e_i	頂点 i の到着時間の下限
l_i	頂点 i の到着時間の上限
r	1 単位の充電にかかる時間
o	単位距離あたりのバッテリー消費量
Q	バッテリーの容量
Z	充電ステーション開設数の上限

3. 計算結果

大阪府吹田市に配送拠点があると仮定し、配送拠点を中心とする 8.5km 四方を配送地域とした。顧客は 5 人、10 人、15 人の場合を考え、人口の重み付き確率によって生成される。充電ステーション候補点は 4 箇所を設定した。電気料金単価は昼間 (10~15 時) とその他の時間の 2 つの時間帯に分け、それぞれ 2.49(円/kWh), 4.64(円/kWh)とした。

以上のような設定の下、インスタンスを 15 個生成しモデルを適用した。また、比較として以下の総距離においても最適化をおこなった。

$$\min. \sum_{i \in V' \setminus \{T\}} \sum_{j \in V' \setminus \{i, S\}} d_{ij} x_{ij} \quad (18)$$

図2はインスタンス番号5と6の最適化結果である。顧客の配送順序は目的関数に関わらず各インスタンスにおいて同じであった。しかし、いずれのインスタンスにおいても充電コスト最小化では、充電ステーションが設置され、経路途中で充電が行われた。他の全てのインスタンスにおいても、充電コスト最小化は充電ステーションへの迂回のために、総距離が増える一方で総距離最小化よりも充電コストは低くなる結果が得られた。

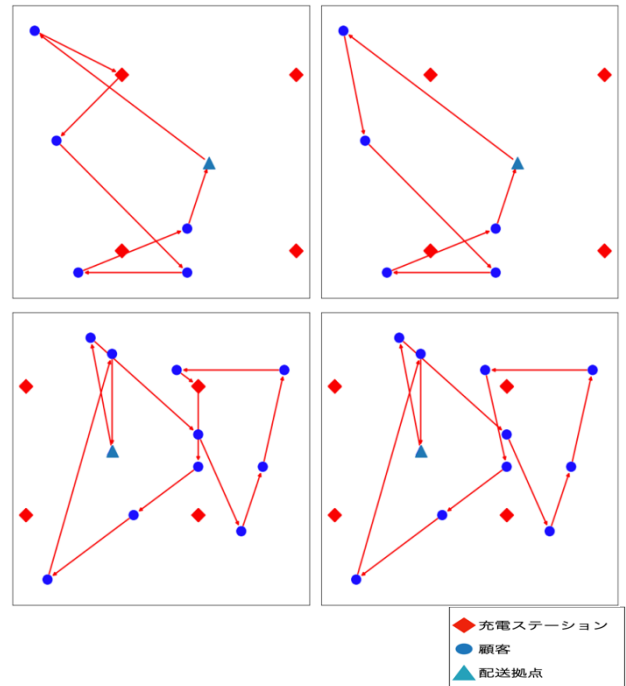


図2 インスタンス5と6の最適化結果

(上段がインスタンス5, 下段がインスタンス6. 左列が充電コスト最小化, 右列が総距離最小化.)

4. おわりに

本論文では、宅配用のEVを対象として、充電にかかるコストが最小となるEVの経路と充電ステーションの配置を同時に求めるモデルを提案した。本モデルは充電ステーションの候補点を既存の充電ステーションに置き換えることで、顧客の配置に応じてその都度最適な充電ステーションを利用した経路を選択することも可能となる。

参考文献

[1] Schiffer, M., & Walther, G. (2017). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. European journal of operational research, 260(3), 995-1013.