

## 複数事業者による宅配EVトラックの充電スケジューリング最適化 Charge Scheduling Optimization of Electric Trucks by Multiple Operators

和田 恭祐<sup>1,2)</sup> 重中 秀介<sup>2)</sup> 西田 遼<sup>2)</sup> 大西 正輝<sup>2)</sup>  
Wada Kyosuke Shigenaka Shusuke Nishida Ryo Onishi Masaki

### 1 はじめに

地球温暖化防止の観点から、二酸化炭素を排出しない電気自動車 (electric vehicle; EV) の導入が世界的に進められている。しかし、日本のEV普及率は他国と比較して低い水準にある。その主な要因として、充電ステーションの整備が十分でないことが挙げられる [1]。このような状況の中で、日ごとの走行距離の変動が少ない宅配トラックは、EVへの置き換えが比較的容易であると考えられている。そのため、日本の運輸部門においては、宅配トラックを中心にEVの導入が進み始めている。

しかし山間部のような100km以上の配送が要求されるエリアでは、一回の充電で全ての顧客に荷物を届けられないことがあるため、配送中に充電して航続距離を延ばす必要がある。しかし、山間部の充電ステーションは都市部に比べて数が少ないため、宅配トラックの充電量が不足するタイミングで追加充電が可能な設備が近くに存在しない場合がある。また、近くに充電ステーションが存在しても、別のトラックが使用している場合は同ステーションを使用できないため、順番待ちによる時間損失や渋滞が発生する可能性がある。この問題を解決するためには、配送前にステーションの空き状況と充電時間を考慮した配送計画を立案することが望まれる。

既存研究の多くでは、複数の事業者がそれぞれ独立に、自社の顧客に対して最適な配送ルート进行計算し、EVの配送計画を立てるという前提で問題が設定されている。しかし、このような個別最適に基づく運用では、充電のための共用充電ステーションへの訪問が同時帯に集中し、充電待ちによる想定外の配送遅延が発生する可能性がある。このような競合を避け、配送効率を高めるためには、事業者間で充電タイミングを調整する手法の導入が求められる。

本稿では、このような課題を解決するために、図1のように複数事業者が共用の充電ステーションを利用する際の、全体配送効率または事業者間の公平性を考慮した充電スケジューリングの最適化手法を提案する。具体的には、各事業者が個別に最適化した配送ルートを運輸事業者とは異なる第三者機関が受け取り、その中から充電タイミングの衝突を避けるような組み合わせを選択・調整することで、全体の所要時間の削減を図る。実験として、都市部および

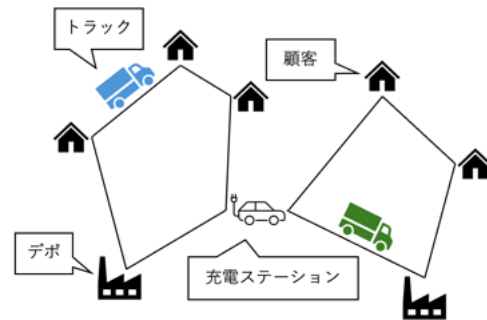


図1: EVRPの概観

山間部の地理的制約を想定した仮想配送環境を対象にシミュレーションを行い、全体の効率性および事業者間の公平性という2つの観点で評価する。

以下、2節で関連研究について説明し、3節で問題の定義と提案手法について、4節で実験および考察について述べ、5節でまとめる。

### 2 関連研究

本節では、EVを対象とした配送経路最適化の研究動向について述べる。特に、EV特有の充電制約を考慮した問題、複数の事業者が関与する配送計画に関する研究を整理し、本研究の目的である共有インフラの効率的かつ公平な利用に関係する既存のアプローチとの違いを明らかにする。

複数のトラックが配送拠点(デポ)から出発し、顧客の集合を訪問してデポに再び戻ってくるまでの経路のうち、移動コストを最小化するような経路を求める問題を Vehicle Routing Problem (VRP) と呼ぶ [2]。これまで、顧客への訪問に時間窓制約が課される VRP (VRP with Time Windows; VRPTW) [3] や、トラックに載せることができる荷物の容量の制約付きの VRP (Capacitated VRP; CVRP) [2]、トラックが出発および到着するデポが複数ある場合の VRP (Multi-depot VPR; MDVRP) [4] などの派生問題が研究されてきた。そのような派生問題の一つに、EVのルーティングを対象とした Electric VRP (EVRP) がある [5]。EVRPは従来のVRPに加えて、航続可能距離や充電ステーションでの充電などのEV特有の制約や特性を考慮する必要がある [6]。

複数の事業者がEVを運行するケースを想定した Multi-depot EVRP (MDEVPR) の研究も行われている。EVトラックで配送を行う際には、デポの外の充電ステーションでの充電が必要となる場合があり、充

- 1) 専修大学 Senshu University
- 2) 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

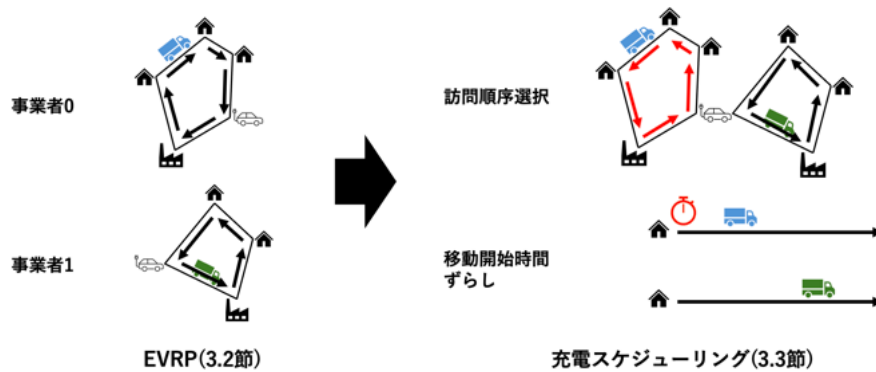


図2: 最適化の流れ

電ステーションを複数事業者間で共用することが考えられる。なお、共用充電ステーションの利用を考慮した VRP ということで、VRP with shared charging stations (VRP-SCS) とも呼ばれる。それを踏まえて、Koc らは、複数の事業者が充電ステーションを共同で設置することを仮定し、充電ステーションの位置と各デポの EV の経路を、充電ステーションの設置費と走行時間、充電時間からなるコストの観点で最適化する問題を提案している [7]。しかし、複数事業者が負担するトータルのコストが評価対象となっており、事業者ごとのコストの偏りについては考慮されていない。一方、Wang らは、複数事業者が EV トラックで共用の充電ステーションを利用しつつ、共同配送を行う設定において、総運行コストと EV 台数を最小化する問題を扱い、さらに共同配送の利益の最適な配分戦略についても分析している [8]。

既存研究では、共用の充電ステーションを用いることで運行効率を改善できることを示しているが、複数事業者間で協調することが前提となっている。また、充電ステーションの同時利用台数の制約は設けられていない。しかし実際には、充電ステーションの同時利用台数は限られており、複数の運輸事業者が個別にトラックのルートを最適化して運行する場合、共用充電ステーションでの充電タイミングが重なり、運行に遅延が発生する可能性がある。そのため、充電ステーションでの同時利用台数の制約を考慮したうえで、充電スケジュールの調整方法について検討する必要がある。また、調整の際には事業者間の公平性についても考慮する必要がある。

### 3 充電スケジューリング最適化モデルの構築

本研究では、複数事業者のトラックが配送中に充電ステーションを利用しつつ、担当顧客に対する配送を行うことを想定する。ただし、充電ステーションの利用台数には制約があり、同時に使用できるのは 1 台のみとする。提案手法では、各事業者が個別に最適化した配送ルートを第三者機関が受け取り、それらに対して充電タイミングの衝突を避けるようなスケジューリングを行うことで、全体の所要時間

の削減や事業者間の公平性向上を図る。これらの最適化の流れを、図 2 に示す。本節では、3.1 で問題設定について説明した後、3.2 で EVRP の定式化、3.3 で提案手法である充電スケジューリングの定式化について示す。その後、3.4 で最適化指標について説明する。

#### 3.1 問題設定

EVRP では、全ての事業者が全ての顧客に配送を完了し、デポに戻ってくるまでの運行時間が最小になる訪問順路を最適化する。各トラックはデポから出発し、デポに戻って業務を終了する。各トラックは、担当する全ての顧客を必ず一度ずつ訪問して配送を行う。配送中には、共用の充電ステーションに立ち寄り充電を行うことが可能であるが、充電には毎回固定の長さの時間を要し、その都度満充電されるものとする。各トラックは配送時間内に全ての配送を完了させなければならない。途中でバッテリー残量が 0 になってはならない。また、複数のトラックが同じ時間帯に充電ステーションに立ち寄る場合は、待ち時間が生じる。具体的な定式化については 3.2 で説明する。

提案手法である充電スケジューリングでは、EVRP で計算した各トラックの訪問順路の候補から、充電ステーションの利用時間が重ならないように、各トラックの最適な移動開始時刻や訪問順路を決定する。具体的には 3.3 節で定式化する。さらに、目的関数として全体の効率性と事業者間の公平性の 2 つを提案する。全体の効率性として、全トラックの合計待機時間を用いる。以後、この目的関数を対象とする問題をトータルコスト最小化と呼ぶ。充電スケジュールを事業者間で調整することで、トータルコストは短縮可能である一方で、事業者間で短縮できる時間に差が生じる、もしくは片方の事業者の運行時間が延びる可能性がある。このように、一部の事業者に負担が偏る可能性があるため、公平性最大化の指標も重要である。そこで、事業者間の公平性として、充電スケジューリングによる調整なしの場合から短縮された待機時間の長さを事業者ごとに算出

表 1: EVRP のモデルで用いる記号の説明

| 記号               | 説明   |
|------------------|--|
| <b>集合</b>        |  |
| $V$              | 顧客の集合                                      |
| $F$              | 充電ステーションの集合                                |
| $K$              | トラックの集合                                    |
| $S$              | 始点となるノード                                   |
| $T$              | 終点となるノード                                   |
| $F_S$            | $F \cup \{S\}$                             |
| $V'$             | $V \cup F$                                 |
| $V'_S$           | $V' \cup \{S\}$                            |
| $V'_T$           | $V' \cup \{T\}$                            |
| $V_k$            | トラック $k$ が担当する顧客の集合                        |
| $V'_k$           | $V_k \cup F$                               |
| $V'_{S_k}$       | $V_k \cup \{S\}$                           |
| $V'_{T_k}$       | $V_k \cup \{T\}$                           |
| <b>パラメータ</b>     |  |
| $d_{ij}$         | ノード $i$ とノード $j$ のマンハッタン距離 [km]            |
| $speed$          | トラックの速度 [km/h]                             |
| $t_c$            | 1 回の充電に要する時間 [h]                           |
| $n_c$            | トラック 1 台の充電回数上限                            |
| $l$              | 配送時間の上限                                    |
| $u$              | 1km あたりのバッテリー消費量                           |
| $Q$              | バッテリー容量                                    |
| $BIG$            | 十分大きい数                                     |
| <b>変数</b>        |  |
| $x_{ij}$         | トラック $k$ が辺 $(i, j)$ を使用していれば 1, そうでなければ 0 |
| $\bar{x}_{ij}$   | $1 - x_{ij}$                               |
| $z_{ik_1}^{k_2}$ | 制約式内で OR 条件を実装するための, 1 または 0 をとる補助変数       |
| $z_{ik_1}^{k_2}$ | $1 - z_{ik_1}^{k_2}$                       |
| $q_{ik}$         | トラック $k$ がノード $i$ に訪問した時点のバッテリー残量          |
| $\tau_{ik}$      | トラックが $k$ ノード $i$ に訪問した時刻                  |

し, その差分の小ささをを用いる. 以後, この目的関数を対象とする問題を公平性最大化と呼ぶ. 詳細は 3.4 で説明する.

### 3.2 EVRP の定式化

EVPR では, 各事業者が個別最適な配送ルートを決する際, 顧客及び充電ステーションの訪問順序を最適化する. 全てのトラックは必ずデポの始点から出発し, デポの終点に戻ってくる. 各トラックはそれぞれのデポから移動可能な充電ステーションを候補とし, バッテリー残量が少なくなれば訪問する. デポや充電ステーション, 顧客などの特定の地点のことをノードと呼び, 個別に番号を振って区別する. EVRP のモデルで用いる記号を表 1 に示す. 本研究における EVRP は, 植田らによるロケーションルーティング問題 [9] を基礎としており, 以下のように定式化される.

目的関数

$$\min \sum_{k \in K} \tau_{Tk} \quad (1)$$

制約条件

$$\sum_{i \in V'_{S_k}, i \neq j} x_{ij} = 1, \forall j \in V_k, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V'_{T_k}, i \neq j} x_{ij} \leq n_c, \forall i \in F, \forall k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in V'_{T_k}, i \neq j} x_{ij} - \sum_{j \in V'_{S_k}, i \neq j} x_{ji} = 0, \forall i \in V'_k, \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V'_{T_k}} x_{Sj} = 1, \sum_{j \in V'_{S_k}} x_{iT} = 1, \forall k \in K, \quad (5)$$

$$q_{jk} \leq q_{ik} - ux_{ij}d_{ij} + Q\bar{x}_{ij}, \quad (6)$$

$$\forall i \in V_k, \forall j \in V'_{T_k}, i \neq j, \forall k \in K,$$

$$q_{jk} \leq Q - ud_{ij}x_{ij}, \quad (7)$$

$$\forall i \in F_{S_k}, \forall j \in V'_{T_k}, i \neq j, \forall k \in K,$$

$$\tau_{ik} + \frac{d_{ij}x_{ij}}{speed} - l\bar{x}_{ij} \leq \tau_{jk}, \quad (8)$$

$$\forall i \in V_k, \forall j \in V'_{T_k}, i \neq j, \forall k \in K,$$

$$\frac{d_{Sj}x_{Sj}}{speed} \leq \tau_{jk}, \quad (9)$$

$$\forall j \in V'_{T_k}, \forall k \in K,$$

$$\tau_{ik} + \frac{d_{ij}x_{ij}}{speed} + t_c - (t_c + l)\bar{x}_{ij} \leq \tau_{jk}, \quad (10)$$

$$\forall i \in F, \forall j \in V'_{T_k}, i \neq j, \forall k \in K,$$

$$\tau_{ik} \leq l, \forall i \in V_k, \forall k \in K, \quad (11)$$

$$\tau_{ik_2} + t_c \leq \tau_{ik_1} + BIG \cdot z_{ik_1}^{k_2},$$

$$\tau_{ik_1} + t_c \leq \tau_{ik_2} + BIG \cdot z_{ik_2}^{k_1}, \quad (12)$$

$$\forall i \in F, \forall k_1, k_2 \in K,$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i \in V'_S, j \in V'_T, \quad (13)$$

$$z_{ik_1}^{k_2} \in \{0, 1\}, k_1, k_2 \in K, \quad (14)$$

$$q_{ik} \geq 0, i \in V'_T, \quad (15)$$

$$0 \leq \tau_{ik} \leq l, i \in V'_T, k \in K. \quad (16)$$

式 (1) は目的関数であり,  $\tau_{Tk}$  はトラック  $k$  がデポの終点  $T$  に到着する時間をあらわす. 以下, 制約式について述べる. 式 (2) は顧客の訪問制約であり, 各トラックについて, 担当する各顧客への入次数が 1 であることを保証する. 式 (3) は充電ステーションの訪問制約であり, 各トラックについて, 充電ス

ーションへの入次数が充電回数制限  $n_c$  以下であることを保証する。式 (4) と式 (5) は流量保存制約であり、各ノードの入次数と出次数が等しいことを保証する。式 (6) と式 (7) は電欠を起こさないための制約であり、式 (6) は顧客から別ノードに移るとき、走行距離分のバッテリーが減ることを表し、式 (7) は充電ステーションから別ノードに移るとき、バッテリーが満充電されてから移動距離分減ることを表現する。式 (8) と式 (9)、式 (10) は時間の実現性を保証する制約であり、式 (8)、式 (9) はそれぞれ顧客、デポから別ノードに移るとき、走行距離分の時間がかかること、式 (10) は充電ステーションから別ノードに移動するとき、充電時間と走行距離分の時間がかかることを表現する。式 (11) は配送時間の制約であり、各顧客への訪問時刻が配送時間上限を超えないことを保証する。式 (12) はトラック同士の充電時間帯の重なりを防ぐ制約であり、トラック 2 台の組み合わせ全てに対して、一方の充電開始時刻がもう一方のトラックの充電終了時間より後、もしくはもう一方の充電終了時間がもう一方の充電開始時刻の前であることを保証する。式 (13)、式 (14)、式 (15)、式 (16) は変数の制約である。

### 3.3 充電スケジューリング問題の定式化

3.2 節の EVRP では、異なる事業者のトラック同士の充電時間帯の重なりについて考慮されていない。充電スケジューリングでは、充電時間帯が重ならないように各トラックの移動開始時刻と訪問順序を最適化する。充電スケジューリングのモデルで用いる記号を表 2 に示す。訪問順序は、正順・逆順という 2 つの候補から選ぶ。ここで、ソルバがノード番号で  $\{1, 3, 2, 4\}$  という訪問順序を出力した場合、これを正順といい、 $\{4, 2, 3, 1\}$  のように正順と逆の訪問順序を逆順という。時間の重なりを防ぐことができない場合は、トラックの移動開始時刻をずらす。充電スケジューリングでは、全体の効率性を最適化するため、全トラックの合計待機時間を最小化する。ここで、充電ステーションでの待ち時間とトラックの移動開始時刻のずれを、まとめて待機時間と呼ぶ。定式化は以下の通りである。

目的関数

$$\min \sum_{k \in K} w_k. \quad (17)$$

制約条件

$$\begin{aligned} w_{k_1} + \tau_{k_1 i} + t_c & \leq w_{k_2} + \tau_{k_2 i} + \text{BIG} \cdot (z_{k_1 k_2} + x_{k_1} + x_{k_2}), \\ w_{k_2} + \tau_{k_2 i} + t_c & \leq w_{k_1} + \tau_{k_1 i} + \text{BIG} \cdot (\bar{z}_{k_1 k_2} + x_{k_1} + x_{k_2}), \\ & \forall i \in F, \forall k_1, k_2 \in K, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} w_{k_1} + \tau_{k_1 i} + t_c & \leq w_{k_2} + u_{k_2 i} + \text{BIG} \cdot (z_{k_1 k_2} + x_{k_1} + \bar{x}_{k_2}), \\ w_{k_2} + u_{k_2 i} + t_c & \leq w_{k_1} + \tau_{k_1 i} + \text{BIG} \cdot (\bar{z}_{k_1 k_2} + x_{k_1} + \bar{x}_{k_2}), \\ & \forall i \in F, \forall k_1, k_2 \in K, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} w_{k_1} + u_{k_1 i} + t_c & \leq w_{k_2} + \tau_{k_2 i} + \text{BIG} \cdot (z_{k_1 k_2} + \bar{x}_{k_1} + x_{k_2}), \\ w_{k_2} + \tau_{k_2 i} + t_c & \leq w_{k_1} + u_{k_1 i} + \text{BIG} \cdot (\bar{z}_{k_1 k_2} + \bar{x}_{k_1} + x_{k_2}), \\ & \forall i \in F, \forall k_1, k_2 \in K, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} w_{k_1} + u_{k_1 i} + t_c & \leq w_{k_2} + u_{k_2 i} + \text{BIG} \cdot (z_{k_1 k_2} + \bar{x}_{k_1} + \bar{x}_{k_2}), \\ w_{k_2} + u_{k_2 i} + t_c & \leq w_{k_1} + u_{k_1 i} + \text{BIG} \cdot (\bar{z}_{k_1 k_2} + \bar{x}_{k_1} + \bar{x}_{k_2}), \\ & \forall i \in F, \forall k_1, k_2 \in K, \end{aligned} \quad (21)$$

$$w_k \geq 0, k \in K, \quad (22)$$

$$x_k \in \{0, 1\}, k \in K, \quad (23)$$

$$z_{k_1 k_2} \in \{0, 1\}, k_1, k_2 \in K. \quad (24)$$

目的関数 (式 (17)) は、全トラックの合計待機時間を最小化する。 $g_k$  は、調整なしで配達を開始する際の、充電ステーション訪問時に他のトラックが充電中だったときの充電ステーションでの待ち時間で

表 2: 充電スケジューリングのモデルで用いる記号の説明

| 記号                  | 説明                                  |
|---------------------|-------------------------------------|
| 集合                  |                                     |
| $D$                 | デポの集合                               |
| $F$                 | 充電ステーションの集合                         |
| $K$                 | トラックの集合                             |
| $K_d$               | デポ $d$ に所属するトラックの集合                 |
| パラメータ               |                                     |
| $g_k$               | 調整なしで走った場合のトラック $k$ の待機時間 [h]       |
| $w_k$               | 調整ありで走った場合のトラック $k$ の待機時間 [h]       |
| $\tau_{ki}$         | 正順でのトラック $k$ のノード $i$ 訪問時刻          |
| $u_{ki}$            | 逆順でのトラック $k$ のノード $i$ 訪問時刻          |
| $t_c$               | 1 回の充電に要する時間                        |
| $\text{BIG}$        | 十分大きい数                              |
| 変数                  |                                     |
| $T_{\min}$          | 短い方のデポの合計待機時間をあらかず補助変数              |
| $x_k$               | トラック $k$ が逆順を採用していれば 1, そうでなければ 0   |
| $\bar{x}_k$         | $1 - x_k$                           |
| $z_{k_1 k_2}$       | 制約式内で OR 条件を実装するための、1 または 0 をとる補助変数 |
| $\bar{z}_{k_1 k_2}$ | $1 - z_{k_1 k_2}$                   |

ある。  $w_k$  は、調整ありで配達を開始する際の、トラックの移動開始時刻のずれである。

式 (18), 式 (19), 式 (20), 式 (21) はそれぞれ、2 つのトラックがどちらも正順、正順と逆順、逆順と正順、どちらも逆順のルートを採用するとき、式 (12) と同様にして充電時間帯の重なりを防ぐ制約である。式 (22), 式 (23), 式 (24) は変数の制約である。

### 3.4 最適化指標

本研究では、充電スケジューリング問題において、3.3 節で説明した目的関数での最適化問題に加えて、事業者間の公平性を考慮した問題も扱う。本節では、トータルコスト最小化について 3.4.1、公平性最大化について 3.4.2 で説明する。

#### 3.4.1 トータルコスト最小化

トータルコスト最小化では、全トラックの合計待機時間を最小化することで、全体の配送効率の向上を図る。この指標は、3.3 節で示したものと同じである。トラック  $k$  のスケジューリング有りの待機時間を  $w_k$  であらわす。この目的関数を用いた問題を以下のように定義する。

目的関数

$$\min \sum_{k \in K} w_k. \quad (25)$$

制約条件

式 (18), 式 (19), 式 (20), 式 (21),

式 (22), 式 (23), 式 (24)

#### 3.4.2 公平性最大化

公平性最大化では、各事業者に所属する全トラックの合計短縮時間のうち、最も小さい値を最大化する。ここで、スケジューリング無しの待機時間からスケジューリング有りの待機時間を引いた値を短縮時間と呼ぶ。各事業者の合計短縮時間の最小値最大化を行うことで、全体の待機時間を減らしつつ、事業者間の短縮時間の差も小さくする。本研究では、事業者間の短縮時間の差の小ささを公平性としてあつかう。各事業者の合計短縮時間の最小値を  $T_{min}$ 、トラック  $k$  のスケジューリング無しの待機時間からスケジューリング有りの待機時間を引いた値を  $(g_k - w_k)$  であらわし、 $T_{min}$  を最大化する。この目的関数を用いた問題を以下のように定義する。

目的関数

$$\min T_{min}. \quad (26)$$

制約条件

式 (18), 式 (19), 式 (20), 式 (21),

式 (22), 式 (23), 式 (24) and

$$T_{min} \leq \sum_{k \in K_d} (g_k - w_k), \forall d \in D, \quad (27)$$

$$T_{min} \geq 0. \quad (28)$$

表 3: シナリオパラメータの設定値

| パラメータ                   | 値        |
|-------------------------|----------|
| ステーション数 $ F $           | 1        |
| 事業者数 (デポ数) $ D $        | 2        |
| 車両数                     | 6        |
| 各デポが保有する車両数             | 3        |
| 各車両が担当する顧客数             | 4        |
| ノード分布エリアの一辺の長さ          | 50[km]   |
| 配送時間上限 $l$              | 10[h]    |
| 充電に要する時間 $t_c$          | 0.5[h]   |
| 車両 1 台の充電回数上限 $n_c$     | 3        |
| バッテリー容量 $Q$             | 100      |
| 1km あたりのバッテリー消費量 $u$    | 1        |
| 車両の速度 $speed$           | 20[km/h] |
| デポ・ステーション<br>・顧客位置の設定方法 | 都市/山間    |

## 4 仮想配送環境を対象とした実験

本節では、提案手法の有効性を検証することを目的として、仮想的に構築した配送環境においてシミュレーション実験を行う。実験では、事業者ごとに個別最適化された配送ルートをベースラインとし、そのうえで提案手法を適用した場合に、運行全体の効率性および事業者間の公平性にどのような改善効果が得られるかを評価する。まず、4.1 節で実験方法、各種パラメータの設定方法、評価指標について説明した後、4.2 節ではそれらに基づく実験結果を提示し、結果に対する考察を行う。

### 4.1 設定

本節では、実験で使用する問題例の生成方法、トラックおよび充電ステーションに関するパラメータ設定、マップ構成の条件、および評価指標の定義について説明する。

実験に使用するインスタンス (問題例) は、手動で設定したパラメータとシード値に基づき、二次元平面上のマップとしてランダムに生成される。シード値は 1 から 200 まで順に設定し、生成されたインスタンスのうち、ノード配置やパラメータ設定によって配送が完了できないもの (バッテリー切れを起こす、または制限時間内に配送を終えられないもの) を除いた最初の 100 個を対象として分析を行う。

トラックのバッテリー容量などのパラメータを表 3 のように設定した。ノード数やトラック数は、実験環境でのソルバ実行時間を考慮し、現実的な時間で実験が終了するような設定にしている。

本研究では、山間エリアでの配送を想定したモデルとそれ以外の地域との比較を行うために、2 種類のマップシナリオを用意した。1 つ目は図 3(a) のように、正方形のエリア内に全種類のノードをランダムに分布させる都市マップシナリオである。2 つ目は図 3(b) のように、正方形のエリアを南北方向に均等に 3 分割し、各エリアにランダムに発生するノードの種類をデポ・充電ステーション・顧客と限定する山間マップシナリオである。山間マップシナリオ

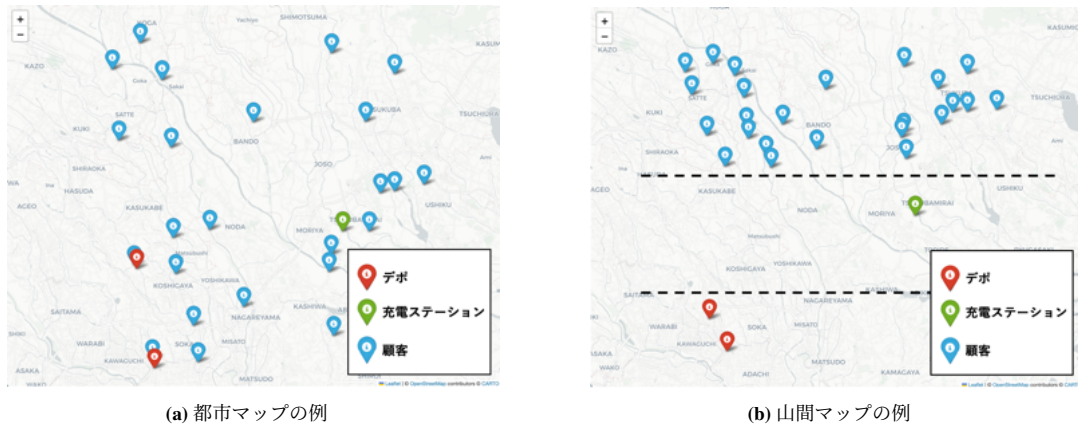


図 3: マップの例 (leaflet で作成)

表 4: 都市マップシナリオでの最適化結果 (単位:[h])

| 番号 | 調整なし   |        |        | 調整あり (トータルコスト最小化) |        |        |       | 調整あり (公平性最大化) |        |        |       |
|----|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------|---------------|--------|--------|-------|
|    | 事業者 0  | 事業者 1  | トータル   | 事業者 0             | 事業者 1  | トータル   | 事業者間差 | 事業者 0         | 事業者 1  | トータル   | 事業者間差 |
| 1  | 20.258 | 20.887 | 41.146 | 19.789            | 20.556 | 40.345 | 0.138 | 19.927        | 20.556 | 40.484 | 0.000 |
| 2  | 13.666 | 18.426 | 32.092 | 13.666            | 18.138 | 31.804 | 0.288 | 13.666        | 18.426 | 32.092 | 0.000 |
| 3  | 19.531 | 15.938 | 35.469 | 18.448            | 15.088 | 33.536 | 0.233 | 18.448        | 15.088 | 33.536 | 0.233 |
| 4  | 15.072 | 19.685 | 34.758 | 15.072            | 19.685 | 34.758 | 0.000 | 15.072        | 19.685 | 34.758 | 0.000 |
| 5  | 20.281 | 23.546 | 43.827 | 19.799            | 23.546 | 43.345 | 0.482 | 19.799        | 23.546 | 43.345 | 0.482 |
| 6  | 16.043 | 22.309 | 38.352 | 16.097            | 22.227 | 38.324 | 0.136 | 16.043        | 22.309 | 38.352 | 0.000 |
| 7  | 16.955 | 14.341 | 31.296 | 16.955            | 14.071 | 31.026 | 0.270 | 16.955        | 14.341 | 31.296 | 0.000 |
| 8  | 16.148 | 16.257 | 32.405 | 16.148            | 16.257 | 32.405 | 0.000 | 16.148        | 16.257 | 32.405 | 0.000 |
| 9  | 17.893 | 19.322 | 37.215 | 17.718            | 19.322 | 37.040 | 0.175 | 17.754        | 19.322 | 37.076 | 0.138 |
| 10 | 21.749 | 12.975 | 34.724 | 21.749            | 12.975 | 34.724 | 0.000 | 21.749        | 12.975 | 34.724 | 0.000 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮                 | ⋮      | ⋮      | ⋮     | ⋮             | ⋮      | ⋮      | ⋮     |
| 平均 | 17.677 | 18.115 | 35.792 | 17.562            | 17.976 | 35.539 | 0.193 | 17.593        | 18.035 | 35.628 | 0.045 |

表 5: 山間マップシナリオでの最適化結果 (単位:[h])

| 番号 | 調整なし   |        |        | 調整あり (トータルコスト最小化) |        |        |       | 調整あり (公平性最大化) |        |        |       |
|----|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-------|---------------|--------|--------|-------|
|    | 事業者 0  | 事業者 1  | トータル   | 事業者 0             | 事業者 1  | トータル   | 事業者間差 | 事業者 0         | 事業者 1  | トータル   | 事業者間差 |
| 1  | 24.360 | 22.597 | 46.957 | 21.809            | 21.609 | 43.417 | 1.564 | 22.860        | 21.097 | 43.957 | 0.000 |
| 2  | 19.602 | 21.386 | 40.988 | 18.770            | 21.386 | 40.156 | 0.832 | 19.270        | 21.386 | 40.656 | 0.332 |
| 3  | 16.183 | 14.627 | 30.810 | 16.183            | 14.627 | 30.810 | 0.000 | 16.183        | 14.627 | 30.810 | 0.000 |
| 4  | 19.652 | 20.756 | 40.408 | 19.652            | 20.756 | 40.408 | 0.000 | 19.652        | 20.756 | 40.408 | 0.000 |
| 5  | 18.951 | 20.201 | 39.152 | 18.113            | 19.434 | 37.547 | 0.072 | 18.184        | 19.434 | 37.619 | 0.000 |
| 6  | 15.354 | 21.693 | 37.047 | 15.512            | 21.352 | 36.863 | 0.500 | 15.354        | 21.693 | 37.047 | 0.000 |
| 7  | 16.912 | 18.768 | 35.680 | 17.006            | 18.332 | 35.338 | 0.532 | 16.912        | 18.732 | 35.644 | 0.036 |
| 8  | 23.400 | 23.066 | 46.467 | 23.400            | 23.066 | 46.467 | 0.000 | 23.400        | 23.066 | 46.467 | 0.000 |
| 9  | 20.652 | 15.617 | 36.268 | 20.652            | 15.617 | 36.268 | 0.000 | 20.652        | 15.617 | 36.268 | 0.000 |
| 10 | 21.060 | 14.853 | 35.913 | 20.644            | 14.853 | 35.497 | 0.416 | 21.000        | 14.853 | 35.853 | 0.060 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮                 | ⋮      | ⋮      | ⋮     | ⋮             | ⋮      | ⋮      | ⋮     |
| 平均 | 18.611 | 18.757 | 37.367 | 18.322            | 18.481 | 36.803 | 0.272 | 18.386        | 18.547 | 36.934 | 0.083 |

では、デポが市街地エリアに、顧客が山間エリアに、充電ステーションがその中間に位置するように考えた。

各インスタンスにおいて、EVRP を用いて各事業者が個別最適化を行った結果に基づき、調整を行わなかった場合と、充電スケジュールリングにより調整を行った場合における実際の運行時に発生する待機時間を比較し、その差をもとにトータルコストと公平性の評価を行う。

## 4.2 結果

本節では、仮想配送シナリオに対して提案手法を適用した結果を示す。トータルコスト最小化および公平性最大化という 2 種類の目的関数に基づく最適化において、調整なしの場合と比較して運行時間にどのような変化が生じたかを評価する。また、各シナリオにおける事業者別の短縮効果や、地理的条件による影響の違いについてもあわせて分析する。4.2.1 で調整の有無による運行時間の変化、4.2.2 で調整の有無による運行時間の変化の分布について明らかにし、4.2.3 で公平性最大化の効果の説明する。

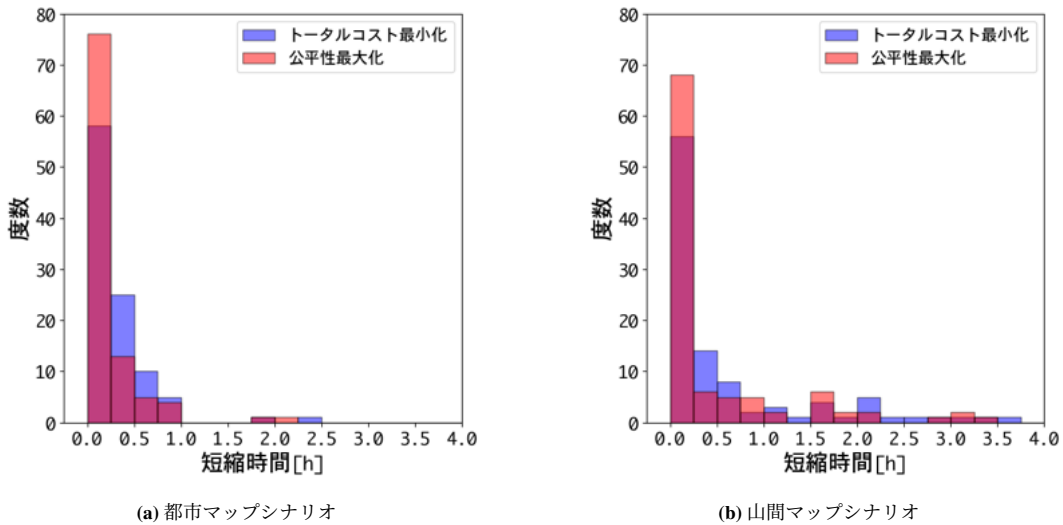


図 4: マップシナリオ別の短縮時間分布 (目的関数別比較)

表 6:  $t$  検定の結果 (トータルコスト最小化)

| シナリオ | 調整なし<br>平均 [h] | 調整あり<br>平均 [h] | 短縮時間<br>平均 [h] | $p$ -value              |
|------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| 都市   | 35.792         | 35.539         | 0.254          | $3.516 \times 10^{-10}$ |
| 山間   | 37.367         | 36.803         | 0.564          | $1.357 \times 10^{-9}$  |

表 7:  $t$  検定の結果 (公平性最大化)

| シナリオ | 調整なし<br>平均 [h] | 調整あり<br>平均 [h] | 短縮時間<br>平均 [h] | $p$ -value             |
|------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| 都市   | 35.792         | 35.628         | 0.165          | $5.608 \times 10^{-6}$ |
| 山間   | 37.367         | 36.934         | 0.434          | $1.181 \times 10^{-7}$ |

#### 4.2.1 調整の有無による運行時間の変化

表 4 および表 5 は、都市エリアおよび山間エリアの各シナリオに対する最適化結果の最初の 10 インスタンスを示したものである。各表では、調整なし、調整あり (トータルコスト最小化)、調整あり (公平性最大化) の 3 つの条件について、事業者ごとの運行時間とその合計 (トータル) を比較している。調整ありの場合は、運行時間の合計だけでなく、公平性の評価指標として事業者間差を併記している。

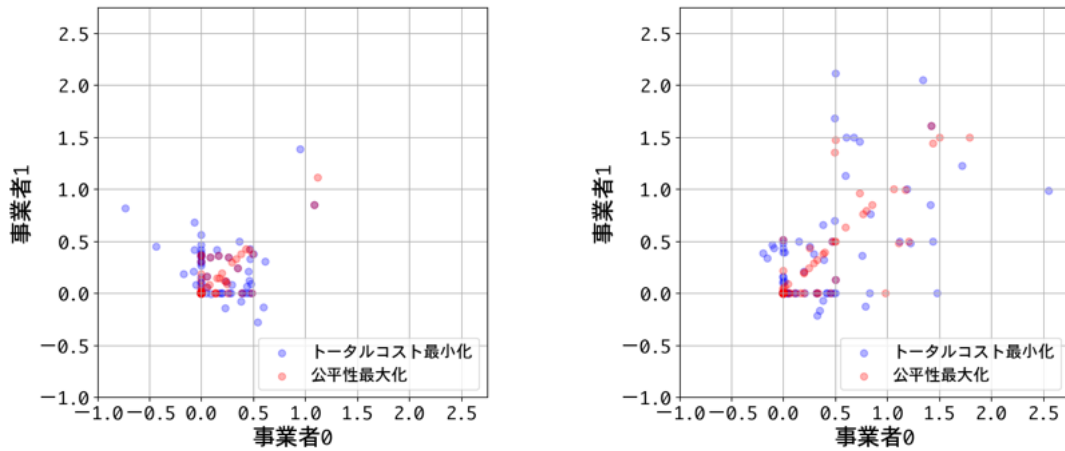
これらの結果をもとに、調整の有無による運行時間の変化が統計的に有意であるかを確認するため、 $t$  検定を実施した。その結果を表 6 および表 7 に示す。表 6 は、トータルコスト最小化を目的とした場合の  $t$  検定結果であり、都市マップ・山間マップいずれのシナリオにおいても、 $p$  値は  $10^{-9}$  オーダーであり、運行時間の合計に有意な改善が見られることが確認された。また、表 7 に示す公平性最大化の場合においても、 $p$  値は  $10^{-6} \sim 10^{-8}$  の範囲であり、こちらも統計的に有意な改善が認められた。これらの結果から、提案手法を用いることで、いずれの目的関数においても、充電ステーションの混雑回避による運行効率の改善が実現されることが確認された。

#### 4.2.2 調整の有無による運行時間の変化の分布

図 4(a) および図 4(b) は、各目的関数を用いたときの短縮時間を比較したヒストグラムである。これらの分布の差を見ると、都市マップと山間マップのいずれのシナリオにおいても、トータルコスト最小化を行った方が時間短縮効果が大きい結果を多く得られた。また、都市マップシナリオに比べて山間マップシナリオの方が時間短縮効果が大きい結果を多く得られた。このような結果となる要因として、山間マップにおけるノードの配置の偏りが挙げられる。このシナリオでは、デポを出発して充電ステーションのあるエリアを通過し、顧客が分布するエリアで業務を行い、再び充電ステーションのあるエリアを経由してデポに戻る経路となる。そのため、配送に向かう前に充電するか、配送を終えてから帰路で充電するスケジュールに偏りやすい。このスケジュールの偏りによって、複数のトラックが同時に充電ステーションを利用しようとする状況が頻発し、待機時間が発生する。しかし、この競合は一部のトラックが経路を逆順にすることで緩和されることが多く、その結果、山間マップでは調整による短縮効果がより大きく現れる傾向があると考えられる。

#### 4.2.3 公平性最大化の効果

図 5(a)、図 5(b) は事業者ごとの短縮時間を  $x$ - $y$  軸に取った散布図である。1 つの点が 1 インスタンスの結果であり、点の位置は各事業者の短縮時間の効果をあらわす。 $y=x$  の直線に近いほど、その効果が均等であるといえる。青色はトータルコスト最小化の結果を、赤色は公平性最大化の結果を示している。トータルコスト最小化は、片方の事業者は短縮されて、もう一方はむしろ長くなっているようなケースが見られる。公平性最大化では、そのようなケースがなくなっていることが確認できる。



(a) 都市マップシナリオ

(b) 山間マップシナリオ

図5: マップシナリオ別の事業者同士の短縮時間比較 (目的関数別比較)

## 5 おわりに

本稿では、複数の運輸事業者が宅配EVトラックで配送を行う際の充電ステーション混雑を回避し、配送効率を向上させる充電スケジューリング最適化手法を提案した。本手法では、各事業者の配送ルートに対し、第三者が充電タイミングを調整する枠組みを採用し、トータルコスト最小化と公平性最大化の2種類の目的関数モデルを構築した。実験として、都市部および山間部の地理的制約を想定した仮想配送環境を対象にシミュレーションを行い、提案手法による調整がトータルコストを減少できることを確認した。特にトータルコスト最小化は配送全体の効率性向上に有効であった。公平性最大化は、全体の短縮時間では劣るものの、特定の事業者が不利益を被る状況を緩和する点で有効性を示した。また、地理的制約が強い山間部では、充電競合の調整により、提案手法の短縮効果がより顕著であった。

本研究の限界は、ソルバ実行時間を考慮し、実験規模をトラック数やノード数が少ない設定にした点である。実運用では、より大規模なシナリオに対応するため、今後は高速なヒューリスティクスやメタヒューリスティクスの開発が不可欠である。また、公平性の定義を事業者間の短縮時間の合計の差としたが、実際にはサービスレベルや顧客満足度など多面的な指標設計が求められる。将来的には、各事業者が部分的な情報のみを開示する状況での戦略的行動を考慮したモデル拡張も課題となる。

### 謝辞

この成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業 (JPNP21028) の結果得られたものです。

### 参考文献

- [1] 藤川清史, 栗洋, 李蕪顯. <研究ノート> 中国・韓国・日本の電気自動車 (ev) 普及の現状と政策. 経済研究所所報, No. 5, pp. 67–89, 2025.
- [2] G B Dantzig and J H Ramser. The truck dispatching problem. *Management science*, Vol. 6, No. 1, pp. 67–89, October 2025.
- [3] Marius M Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations research*, Vol. 35, No. 2, pp. 254–265, April 1987.
- [4] Frank A Tillman and Thomas M Cain. An upperbound algorithm for the single and multiple terminal delivery problem. *Management science*, Vol. 18, No. 11, pp. 664–682, July 1972.
- [5] Jane Lin, Wei Zhou, and Ouri Wolfson. Electric vehicle routing problem. *Transportation research procedia*, Vol. 12, pp. 508–521, 2016.
- [6] Aurélien Froger, Ola Jabali, Jorge E Mendoza, and Gilbert Laporte. The electric vehicle routing problem with capacitated charging stations. *Transportation science*, Vol. 56, No. 2, pp. 460–482, March 2022.
- [7] Çağrı Koç, Ola Jabali, Jorge E Mendoza, and Gilbert Laporte. The electric vehicle routing problem with shared charging stations. *International transactions in operational research: a journal of The International Federation of Operational Research Societies*, Vol. 26, No. 4, pp. 1211–1243, July 2019.
- [8] Yong Wang, Jingxin Zhou, Yaoyao Sun, Jianxin Fan, Zheng Wang, and Haizhong Wang. Collaborative multi-depot electric vehicle routing problem with time windows and shared charging stations. *Expert systems with applications*, Vol. 219, No. 119654, p. 119654, June 2023.
- [9] 植田和樹, 森田浩, 太田豊, 岩田章裕. 再生可能エネルギーの活用のための宅配電気トラックの最適経路選択. 日本経営工学会論文誌, Vol. 75, No. 2, pp. 37–48, 2024.