

電気自動車とガソリン自動車を併用した 配送計画問題に対する解法

村上 啓介^{1,a)} 森田 浩^{2,b)}

概要：近年、環境的理由や経済的理由から電気自動車が注目を集めている。しかしながら、電気自動車は頻繁に充電しなければならないことや充電に時間がかかりすぎるという理由から現時点ではあまり普及していない。電気自動車の普及のために最適化の分野からも様々な研究が行われている。その中の1つが電気自動車を用いた配送計画問題がある。電気自動車はガソリン自動車に比べて燃料(電力)費が安いというメリットを持つ。一方で、電気自動車は充電をしないで走行できる距離が短いというデメリットをもつため、電気自動車のみで広い配送範囲をカバーすることは難しい。そこで、本研究ではガソリン自動車と電気自動車を併用した配送計画問題を考える。ガソリン自動車を用いる場合は従来の配送計画問題と同様に解くことができるが、電気自動車はガソリン自動車とは異なった特徴を持つため、電気自動車特有のアプローチが必要になる。そこで、本研究では電気自動車の経路を求めるためのモデルと解法を提案する。最終的にガソリン自動車と電気自動車の経路を組合せることで、より燃料(電力)費が安くなる解を求める。

キーワード：電気自動車、最適経路、配送計画問題、ラベリング法

An algorithm for the electric and gasoline-powered vehicle routing problem

Abstract: Electric vehicles have recently received attention due to the environmental and financial implication. However, they are still not popular because of their inconvenience; limited battery capacities and long recharge times. In order to grow popular of electric vehicles, several studies in the field of optimization have been engaged. One of the optimization problems is a electric vehicle routing problem. Electric vehicles can have lower total fuel costs than gasoline-powered vehicles. However they have demerits, such as a short driving distance, long recharging time, and high price. Thus it would be hard to cover whole delivery (pickup) area only by using electric vehicles. In this paper, we deal with a vehicle routing problem using electric vehicles and gasoline-powered vehicles. In order to find routes of gasoline-powered vehicles, we can use techniques for solving the standard vehicle routing problem. On the other hand, a special approach is required for finding routes of electric vehicles because electric vehicle has different features from gasoline-powered one. We propose a model and an algorithm for the electric vehicle routing problem, and we finally find a solution to the electric and gasoline-powered vehicle routing problem.

Keywords: Electric vehicle, Optimal route, Vehicle routing problem, Labeling algorithm

1. はじめに

近年、環境問題対策として電気自動車が注目を集めている

¹ 青山学院大学
Aoyama Gakuin University, Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

² 大阪大学
Osaka University, Ymadaoka, Suita, Osaka, Japan

^{a)} murakami@ise.aoyama.ac.jp

^{b)} morita@ist.osaka-u.ac.jp

る。環境省の試算では、電気自動車の販売数は2030年には250万台超に達する。また、国土交通省も電気自動車を含むエコカーを対象に大幅な減税を行っている。電気自動車のメリットは、排気ガスが出ない、燃料費がガソリン自動車に比べて安い、振動や騒音が少ないなどが挙げられる。ところが、現在の電気自動車の普及率はそれほど高くない。電気自動車が普及しない原因としては、1回の充電で走行できる距離が短い、充電する場所が少ない(インフ

ラ整備が遅れている), 充電に時間がかかるなどが挙げられる。また, 電気自動車は上り坂では平地に比べて多くの電力を消費し, 逆に下り坂では, 電力が回復するという特徴を持つ。このように電気自動車は様々な問題や特徴を持つことから, 最適化の分野からも多くの研究が行われている。その中の1つが, 電気自動車にとってエネルギー効率的なよい経路を求めるためのモデルやアルゴリズムの研究である [1]。バッテリー容量の制約の下に最適なエネルギー効率の経路を求める問題は, Artmeier らによって紹介されている [2]。また, Storand はエネルギー効率の最適化だけではなく移動距離や時間も考慮した問題を考えている [3]。Adler らは途中で充電する回数に制限がある場合とない場合のそれぞれで移動距離の最小化問題を扱っている [4]。さらに, Adler らは移動中にバッテリーに充電する方法以外で, すでに充電されているバッテリーそのものと取り替える方法についても言及している。バッテリーごと取り替える方法は充電時間が必要ないので, 充電時間がかかるという電気自動車のデメリットを払拭できる。ところが, バッテリーはタイヤやワイパーなどと一式になっていることが多く, バッテリーを取り替える場合はタイヤやワイパーなども取り替える必要があり, 費用が多くかかってしまう [5]。したがって, 現状では同じ車種を使用している東京のタクシー会社などが試験的に導入している程度である。

また, 配送計画問題においても電気自動車を用いた問題が考えられている [7]。このような問題は総じて *Green Vehicle Routing Problem(G-VRP)*[8] と呼ばれ, ガソリンなどの燃料エネルギーを動力源とする従来型の車を使用せず, 電力などを動力源とする車を使用した配送計画を立てる問題である。G-VRP においては, 配送する際の電気自動車の消費電力が最小になる経路を求める。ただ, 先にも述べたように電気自動車は1回の充電で走行できる距離が短いことから, 配送する範囲が広い場合は充電が必要になり, 時間効率が悪くなる。そこで, 本研究では充電を行わないですむ範囲で電気自動車を活用して, ガソリン自動車と併用することで費用が安くなる配送計画を立てる。つまり, 電気自動車とガソリン自動車の両方を用いた配送計画問題を考える。第2節では本問題設定を説明する。第3節では本問題を配送計画問題としてモデル化する。第4節では第3節でモデル化した問題に対して解法を提案する。

2. 問題設定

まず, 走行の際の電気自動車の消費電力とガソリン自動車の消費燃料の定義を述べる。電気自動車での消費電力は2種類存在する。1つ目は距離に伴う消費電力で, 走行距離に比例する。2つ目は道の標高差で必要になる電力で, 坂を上る際には平たんな道に比べて多くの電力を消費する。逆に坂を下るときには, 電気自動車の蓄電量が回復する。

● 配送地点 □ 交差点(標高差が大きな地点) — 道

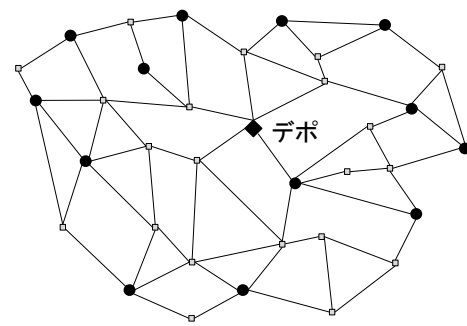


図1 交差点等を含んだネットワーク図

ただし, ある標高から坂を上った後に, 同じ標高まで坂を下った場合に坂を上る前より蓄電量が増えていることはない。したがって, 電気自動車は平坦な道を通る場合, 電力消費量が小さく, 標高差の大きな道を通る場合, 電力消費量が大きくなる。一方, ガソリン自動車は電気自動車に比べて道の標高差に影響を受けないので, ガソリン自動車の消費燃料は距離に比例するものとする。

次に, 本研究で扱う配送計画問題について説明する。複数のガソリン自動車と電気自動車を用いて配送計画を立てる。それぞれのガソリン自動車と電気自動車は, デポ(拠点)を出発して複数の配送地点に荷物の配送を行う。標準的な配送計画問題は, 配送地点を頂点として全ての頂点を訪問する経路が実行可能解となる。本問題では, 配送地点以外にも頂点を設ける。すなわち, 配送地点から配送地点への移動するときに通る交差点や標高差の大きな坂道の最高地点と最低地点などを頂点とする(図1)。標高差の大きな坂道の最高地点と最低地点を頂点とする理由は, 電気自動車の消費電力は標高差に大きな影響を受けるためである。配送地点を意味する頂点は全て訪れる必要があるが, その他の頂点に関しては全て訪れる必要はない。

また, ガソリン自動車と電気自動車には使用できる燃料(電力)と積載容量の上限があるので, それらの上限を超えないような経路を求めなければならない。

3. モデル化

本研究では電気自動車とガソリン自動車を用いて配送計画問題を解く。ガソリン自動車と電気自動車の台数の上限をそれぞれ m_g , m_e とする。ガソリン自動車と電気自動車は, それぞれ1台の積載容量と使用可能燃料(電力)が定められている。ガソリン自動車の積載容量を q_g , 電気自動車の積載容量を q_e とする。また, 使用可能燃料(電力)はガソリン自動車では p_g , 電気自動車では p_e とする。ガソリン自動車と電気自動車をそれぞれ数台用いて, 全ての配送地点に荷物を届ける。配送地点と交差点等を頂点集合 V_0 , 頂点間の枝集合を E_0 とおいて有向グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ を定義する(図1)。また, 各枝 $(v_l, v_m) \in E_0$ は標高差 h_{lm}

を持つとする。枝 $(v_l, v_m) \in E_0$ が上り坂の場合は h_{lm} は正の値を取り、下り坂の場合は h_{lm} は負の値を取る。ガソリン車の場合は、坂道の上り下りで消費する燃料費にあまり差が出ないので、頂点 $v_l \in V_0$ から頂点 $v_m \in V_0$ までの距離を費用 (消費燃料) d_{lm} と定義する。一方、電気自動車の場合は、坂道の上り下りに大きな影響を受けるので、頂点 $v_l \in V_0$ から頂点 $v_m \in V_0$ へ移動するときにかかる費用 (消費電力) を $d'_{lm} = w_2(d_{lm} + w_1 h_{lm})$ と定義する。重み w_1 は水平方向 (平坦な道) の移動で消費する電力と垂直方向 (坂道) で消費する電力の比率を表している。例えば、平坦な道を 1km 走行する場合と、標高差 0.1km の坂道する場合の消費電力が等しいとき $w_1 = 10$ となる。重み w_2 はガソリン自動車の燃料代と電気自動車の電力代の比率を意味している。例えば、ガソリン自動車が 1km 走行するのに 100 円の燃料代がかかり、電気自動車が平坦な道を 1km 走行するのに 10 円の電気代がかかる場合は $w_2 = 0.1$ になる。重み w_1, w_2 は電気自動車の車種やガソリンの値段などから一意に決まるので、電気自動車にかかる枝の費用 d'_{lm} は定数になる。

次に、グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ の頂点を配送地点のみに縮約したグラフ $G = (V, E)$ を作る。頂点集合 V は配送地点の集合を意味して、枝集合は E は配送地点間の経路の集合を意味する。グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ を $G = (V, E)$ に縮約するためには、配送地点間の道とその費用を定義する必要がある。同じ配送地点間でもガソリン自動車と電気自動車の場合で経路は変わるので、それぞれ違った方法で経路と費用を求める。まず、配送地点 v_i, v_j 間のガソリン自動車の経路の求め方を説明する。ガソリン自動車の場合、グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ において負の費用の枝を持たないので、出発する配送地点をソース v_i 、到着する配送地点をシンク v_j としてダイクストラ法を用いて最短 (最小費用) 経路を求めれば、配送地点 v_i, v_j 間の経路と費用が求まる。ただし、使用可能燃料 p_g を超える経路は実行不能になるので、ダイクストラ法において各頂点のラベル (費用) を更新する際に、ラベルが使用可能燃料 p_g を超えていないかのチェックを行う。もし、使用可能燃料 p_g を超えていれば、ラベルが小さくなる場合でもラベルの更新は行わない。次に、配送地点 v_i, v_j 間の電気自動車の経路の求め方を説明する。電気自動車の場合、グラフ $G_0 = (V_0, E_0)$ は負の費用の枝を持つが、問題の条件に「ある標高から坂を上った後に、同じ標高まで坂を下った場合に坂を上る前より蓄電が増えていることはない」というものがあるので負閉路は含ない。したがって、電気自動車の配送地点 v_i, v_j 間の最短 (最小費用) 経路は基本的にはベルマン・フォード法で求めることができる。ただし、ガソリン自動車のときと同様に、ラベル更新の際に使用可能電力 p_e を超えていないかのチェックを行う必要がある。さらに電気自動車の場合は、ラベルが負になるのを避ける必要がある。なぜなら、

ベルマン・フォード法における頂点のラベルは、その頂点に至るまでの消費電力を意味しているので、負の値は取らないからである。仮に、ある頂点でラベルが負の値を取ったとすると、その頂点からは使用可能電力 p_e 以上の電力使用を許してしまい、実行可能性を失ってしまう。ゆえに、電気自動車の場合は、ラベルを更新する際に、ラベルが負の値になっていないかのチェックも行う。もし、ラベルが負の値になるならば、ラベルを 0 に設定しなおす。

以上より、配送地点間の経路と移動にかかる費用を、ガソリン自動車と電気自動車の場合でそれぞれ求める。配送地点 v_i から v_j へ移動によるガソリン自動車の費用を c_{ij} 、電気自動車の費用を c'_{ij} とすると、配送地点のみを頂点としたグラフ $G = (V, E)$ を定義することができる。これ以降は、グラフ $G = (V, E)$ において、ガソリン自動車と電気自動車を用いた配送計画問題を考える。

3.1 定式化

本節ではガソリン自動車と電気自動車を用いた配送計画問題の定式化を行う。決定変数を以下のように定義する。ガソリン自動車の経路が枝 $(v_i, v_j) \in E$ を使用するならば $x_{ij} = 1$ 、使用しないならば $x_{ij} = 0$ とする。電気自動車の経路が枝 $(v_i, v_j) \in E$ を使用するならば $x'_{ij} = 1$ 、使用しないならば $x'_{ij} = 0$ とする。また、変数 y_i と z_i はガソリン自動車が頂点 $v_i \in V$ に至るまでの使用燃料と需要量をそれぞれ意味していて、変数 y'_i と z'_i は電気自動車が頂点 $v_i \in V$ に至った時点での消費電力と需要量をそれぞれ表している。

$$\min \sum_{(v_i, v_j) \in E} c_{ij} x_{ij} + \sum_{(v_i, v_j) \in E} c'_{ij} x'_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_i}} (x_{ij} + x'_{ij}) = 1, \quad \forall v_i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_i}} x_{ji} - \sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_i}} x_{ij} = 0, \quad \forall v_i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_i}} x'_{ji} - \sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_i}} x'_{ij} = 0, \quad \forall v_i \in V \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_0}} x_{0j} \leq m_g \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_0}} x'_{0j} \leq m_e \quad (6)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_0}} x_{j0} \leq m_g \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{v_j \in V \\ v_j \neq v_0}} x'_{j0} \leq m_e \quad (8)$$

$$y_i \leq y_j - c_{ij} x_{ij} + p_g (1 - x_{ij}),$$

$$\forall (v_i, v_j) \in E, v_j \neq 0 \quad (9)$$

$$y_i \leq p_g - c_{i0}x_{i0}, \quad \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (10)$$

$$y'_i \leq y'_j - c'_{ij}x'_{ij} + p_e(1 - x'_{ij}),$$

$$\forall (v_i, v_j) \in E, v_j \neq 0 \quad (11)$$

$$y'_i \leq p_e - c'_{i0}x'_{i0}, \quad \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (12)$$

$$z_i \leq z_j - a_jx_{ij} + q_g(1 - x_{ij}),$$

$$\forall (v_i, v_j) \in E, v_j \neq 0 \quad (13)$$

$$z'_i \leq z'_j - a_jx'_{ij} + q_e(1 - x'_{ij}),$$

$$\forall (v_i, v_j) \in E, v_j \neq 0 \quad (14)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (v_i, v_j) \in E \quad (15)$$

$$x'_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall (v_i, v_j) \in E \quad (16)$$

$$0 \leq y_i \leq p_g, \quad \forall v_i \in V \quad (17)$$

$$0 \leq y'_i \leq p_e, \quad \forall v_i \in V \quad (18)$$

$$0 \leq z_i \leq q_g, \quad \forall v_i \in V \quad (19)$$

$$0 \leq z'_i \leq q_e, \quad \forall v_i \in V \quad (20)$$

目的関数 (1) はガソリン自動車と電気自動車の合計費用の最小化を表している。制約条件 (2) は、全ての頂点はガソリン自動車か電気自動車のどちらかで必ず訪問されることを意味している。制約条件 (3)(4) はフロー保存則を意味している。すなわち、訪問した頂点からは必ず出て行くことを表している。制約条件 (5)-(8) は、ガソリン自動車と電気自動車の台数制約を意味している。制約条件 (9)-(12) は、使用可能燃料 (電力) の制約を表している。制約条件 (13)(14) は、積載容量の制約を表している。また、制約条件 (9)-(14) は部分閉路除去制約を兼ねている。例えば、制約条件 (9) においては、 $x_{ij} = 1, x_{jk} = 1$ のときに $y_i < y_j < y_k$ が成り立つ。このとき、必ず $x_{ki} = 0$ となる。なぜなら、 $x_{ki} = 1$ になると $y_i < y_j < y_k$ に矛盾するからである。したがって、部分閉路を作ることはない。

式 (1)-(20) で定式化した問題を解くことができれば本研究の配送計画問題の最適解は求まる。ところが、配送計画問題は解くことが難しい問題として知られており、最適解を求めることは困難であり、本問題も例外ではない。そこで、本研究では最適解ではないが速く解を求めることができるアルゴリズムを提案する。

4. アルゴリズム

一般的に電気自動車の移動費用 c'_{ij} は、ガソリン自動車の移動費用 c_{ij} に比べて非常に安い。したがって、電気自動車をうまく活用することによって、大幅な費用の改善が見込まれる。本アルゴリズムでは、費用の改善に有効な電気自動車の経路を求めることで良い解を求める。アルゴリズムの概要を以下に示す。まず、初期解としてガソリン自動車のみを使用して配送計画問題を解く。次に、1 台の電気

自動車を導入して解を改善する。これを電気自動車の台数が m_e 台になるまで繰り返す。また、電気自動車を導入するたびに、局所探索法を用いて解全体を改善する。

電気自動車とガソリン自動車を用いた配送計画問題の解法

Step 0 ガソリン自動車のみを用いて配送計画問題を解く。

Step 1 電気自動車の経路を 1 つ追加して、ガソリン自動車の経路も作り変える。

Step 2 ガソリン自動車と電気自動車のそれぞれの経路に対して局所探索を行い解を改良する。

Step 3 電気自動車の経路 (台数) が m_e ならば終了して、 m_e より小さいならば Step 1 へ戻る。

Step 0 では、標準的な配送計画問題を解いている。標準的な配送計画問題に対しては、様々な解法が提案されているので、いずれかの解法を用いればよい。ちなみに、本研究における数値実験ではセービング法を用いた。Step 1 は、電気自動車を導入することで解の改善を行っている。電気自動車の経路を求める方法と、電気自動車の導入に伴うガソリン自動車の経路の改良方法は第 4.1 節で述べる。Step 2 では、局所探索により解全体を改良している。局所探索の詳細は第 4.2 節で説明する。Step 3 では、全ての電気自動車が導入されたのかの確認を行っている。

4.1 電気自動車の経路発見法

本節では、「電気自動車とガソリン自動車を用いた配送計画問題の解法」の Step 1 における電気自動車の経路を求めるための解法を提案する。電気自動車の経路を求めるためのグラフを $G_e = (V_e, E_e)$ とする。電気自動車は、ガソリン自動車の経路でかかる費用を改善するために導入される。そこで、グラフ $G_e = (V_e, E_e)$ におけるコストを「頂点を電気自動車が訪問した場合に改善する費用」と定義する。すなわち、グラフ $G_e = (V_e, E_e)$ 上のコストは頂点に付随しており、頂点 v_i のコスト c_i^e は頂点 v_i を電気自動車で訪問したときに節約できる費用で定義する。現在のガソリン自動車の経路の一部が $v_j \rightarrow v_i \rightarrow v_k$ であり、電気自動車のデポに帰る枝が $v_h \rightarrow v_0$ である場合に、頂点 v_i を電気自動車で訪問するように経路を作り変えるときに節約できる費用は以下の式で表される。ただし、頂点 v_0 はデポを意味する。

$$c_i^e = c'_{hi} + c'_{i0} - c'_{h0} - c_{ji} - c_{ik} + c_{jk} \quad (21)$$

式 (21) における前の 3 項は電気自動車で頂点 v_h と v_0 の間に頂点 v_i を訪れる場合に増加 (減少) する費用を意味しており、後ろの 3 項はガソリン自動車の経路から頂点 v_i を外した場合に減少する費用を意味している。ただし、ガソリン自動車の経路から頂点 v_i を外す場合は、頂点 v_i の前後の頂点 v_j と v_k を接続するものとする (図 2)。以上よ

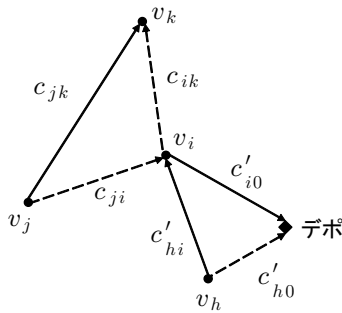


図 2 コスト計算

り、電気自動車の経路を求める問題は、式 (21) のコストを用いた最短 (コスト最小) 路問題として扱うことができる。ただ、電気自動車は使用電力の上限と積載容量を考慮する必要があるため、この問題は制約付き最短路問題になる。

本研究では、式 (21) のコストを用いてラベリング法を応用とした解法を提案する。ラベリング法とは、ダイクストラ法やベルマン・フォード法に代表される解法の総称であり、頂点に付いたラベルを随時更新しながらソースノードから各頂点への最短経路を求める解法である。制約付きの最短路問題に対してラベリング法を用いる場合は、各頂点が複数のラベルを持つ必要がある [9]。なぜなら、ある頂点において、それまでにかかったコスト (式 (21)) は小さいが電力の残量や積載残量が少ないラベルと、コストは小さいが電力の残量や積載残量が多いラベルが存在する場合にはどちらのラベルが優れているかの判断ができないので、両方のラベルを残す必要があるからである。電力の残量や積載残量が多いことは、今後コストが改善する余地が大きいことを意味している。すなわち、式 (21) のコストと電力の残量と積載残量を目的関数とした場合のパレート解をラベルとして頂点ごとに保持する必要がある。ところが、パレート解のサイズ (ラベルの数) は非常に大きくなることが予想され、ラベルの数に伴って計算時間も莫大になってしまう。そこで、本解法ではラベルの数を減らすためにパレート解の 2 つの目的関数の「電力の残量」と「積載残量」を「訪問頂点数」に置き換える。訪問頂点数とは、その頂点に至るまでに訪問した頂点の数である。訪問頂点数は、電力の残量や積載残量と同様に今後コストが改善する余地を表す指標と見なすことができる。訪問頂点数が少ない場合は、電力の残量や積載残量が多い可能性が高く今後コストが改善する余地が大きい。一方で、訪問頂点数が多い場合は、電力の残量や積載残量が少ない可能性が高く今後コストが改善する余地が小さいと見なすことができる。

以下に電気自動車の経路を求める方法を示す。電気自動車の経路を求めるラベリング法における頂点 v_i のラベルを $l_i = (l_i[0], l_i[1], \dots)$ とおく。ラベル $l_i[k]$ は頂点 v_i において訪問頂点数 k のコストを意味している。先述のようにラベリング法はラベルを随時更新する方法だが、更新するラベルがなくなったときに探索を終了する。ここで、今後他の

ラベルを更新する可能性があるラベルの集合を L とおく。また、頂点 v_i に隣接する頂点の集合を A_i とする。

電気自動車の経路発見法

Step 0 デポのラベルを $l_0 = 0$ 、その他の頂点のラベルを $l_i[1] = \infty$ に設定する。 $L := \{l_0\}$ とおく。

Step 1 $L = \emptyset$ ならば終了、 $L \neq \emptyset$ ならば Step 2 へ進む。

Step 2 L の中から任意のラベル $l_i[k]$ を選び、頂点 v_i の次に頂点 $v_j \in A_i$ を訪問すると仮定する。実行可能性を満たすならばラベル $l_i[k] + c_{ij}^e$ を計算して Step 3 へ進む、そうでないならば Step 4 へ進む。

Step 3 もし、 $l_i[k] + c_{ij}^e < l_j[k+1]$ ならば $l_j[k+1] := l_i[k] + c_{ij}^e$ 、 $L := L \cup \{l_j[k+1]\}$ として Step 4 へ進む。

Step 4 頂点 v_i の隣接頂点集合内の全ての頂点 $v_j \in A_i$ に対して Step 2 の処理を行ったならば、Step 5 へ進む。そうでないならば、Step 2 へ戻る。

Step 5 $L := L \setminus \{l_i[k]\}$ として Step 1 へ戻る。

Step 0 はラベルの初期化を行っている。Step 1 は終了条件を表している。Step 2 では更新されるラベルの実行可能性を確かめている。Step 3 ではラベルの更新をしている。Step 4 は頂点 v_i に隣接する全ての頂点に対してラベルの更新を試みたかを確認している。Step 5 はラベル集合 L からラベル $l_i[k]$ を外すことを意味している。つまり、ラベル $l_i[k]$ から他のラベルは更新しないことを表す。

以上の電気自動車の経路発見法により、1 台の電気自動車の経路を求めることができる。1 台の電気自動車の経路を追加した後に、電気自動車が訪問した頂点を除いてガソリン自動車で作成した経路を作り直す。すなわち、電気自動車が訪問する頂点以外を用いてガソリン自動車の配送計画問題を再び解く。この工程を電気自動車の数が上限に達するまで繰り返すことで解を求める。

4.2 局所探索

本節では、「電気自動車とガソリン自動車を用いた配送計画問題の解法」の Step 2 における局所探索法について説明する。本アルゴリズムでは局所探索法として 2-opt 近傍を用いる。2-opt 近傍は TSP に対する局所探索法として有名であるが、配送計画問題に対する 2-opt 近傍も提案されている [10]。2-opt 近傍をガソリン自動車の経路と電気自動車の経路に分けて適用することで解を改良する。すなわち、ガソリン自動車の経路だけを 1 つの配送計画と見なし配送計画問題に対する 2-opt 近傍を用いる。同様に電気自動車の経路に対しても 2-opt 近傍を用いる。

以下で配送計画問題に対する 2-opt 近傍を説明する。まず、実行可能解である複数の経路に対して、デポを複製して図 3 のように 1 つの経路にする。このとき、デポとデポの間の経路をパスと呼ぶものとする。次に、TSP に対して

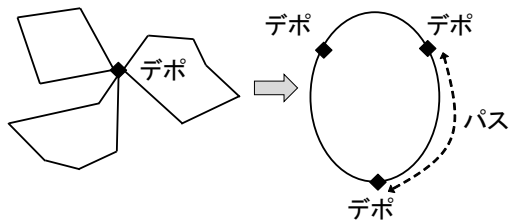


図 3 1つの経路への変換

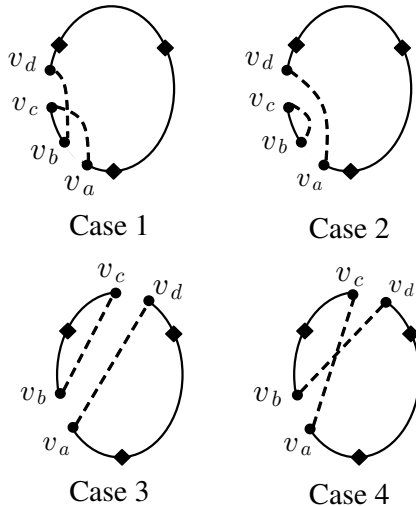


図 4 2-opt 近傍

行うのと同様に、作り変えた1つの経路に対して2-opt近傍を用いる。このとき、2-opt近傍は以下の4つの場合に分けられる。ここで、頂点 v_a と v_b 、頂点 v_c と v_d はそれぞれ実行可能解(経路)上で隣り合う頂点とする。

1. 頂点 v_a, v_b, v_c, v_d が同一パス上にあり、頂点 v_a と v_c を繋いで、頂点 v_b と v_d を繋ぐ場合：TSPにおける2-opt近傍と同様なので、作り変えた後のパスの実行可能性を調べる必要はない。

2. 頂点 v_a, v_b, v_c, v_d が同一パス上にあり、頂点 v_a と v_d を繋いで、頂点 v_b と v_c を繋ぐ場合：頂点 v_b と v_c を含むパスがデポを含まないで、実行不能解になる。2-opt近傍は行わない。

3. 枝 (v_a, v_b) と (v_c, v_d) が同一のパス上になく、頂点 v_a と v_d を繋いで、頂点 v_b と v_c を繋ぐ場合：作り変えた後のパスが実行可能になるならば、2-opt近傍を行う。2-opt近傍実行後、再び1つの経路に作り直す。

4. 枝 (v_a, v_b) と (v_c, v_d) が同一のパス上になく、頂点 v_a と v_c を繋いで、頂点 v_b と v_d を繋ぐ場合：作り変えた後のパスが実行可能になるならば、2-opt近傍を行う。

この2-opt近傍は経路自体を改良するだけでなく、経路(パス)の数を減らすこともあり大きな解の改善が見込める。

本問題において、以上の2-opt近傍はガソリン自動車の経路に対しては適用できる。ところが、電気自動車の枝の

費用が非対称なために、経路の向きによってかかる費用が変化する。したがって、電気自動車の経路にこの2-opt近傍を適用するためには、経路を作り変えるたびに向きを考慮して費用の変化を求める必要がある。

以上より、「電気自動車とガソリン自動車を用いた配送計画問題の解法」を用いて、ガソリン自動車と電気自動車を併用した配送計画問題を解く。数値実験の結果は紙面の都合上発表当日示す。

5. おわりに

本研究では、ガソリン自動車と電気自動車を併用した配送計画問題を考えた。まず、ダイクストラ法とベルマン・フォード法を繰り返し用いて配送地点(配送先)間の経路を求めることで配送計画問題としてモデル化した。次に、モデル化した配送計画問題に対してアルゴリズムの提案を行った。提案アルゴリズムではガソリン自動車の経路を元にして、電気自動車の経路を追加することで解を求めた。

参考文献

- [1] Sweda, T. M., Klabjan, D., Finding Minimum-Cost Paths for Electric Vehicles, *In Proceedings of 2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, pp. 1-4 (2012).
- [2] Artmeier, A., Haselmayr, J., Leucker, M. and Sachenbacher, M., The Shortest Path Problem Revisited: Optimal Routing for Electric Vehicles, *In KI 2010: Advances in Artificial Intelligence*, pp. 309-316 Springer Berlin Heidelberg (2010).
- [3] Storandt, S., Quick and Energy-Efficient Routes: Computing Constrained Shortest Paths for Electric Vehicles, *In Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science*, pp. 20-25 (2012).
- [4] Adler, J. D., Mirchandani, P. B., Xue, G., Xia, M., The Electric Vehicle Shortest-Walk Problem With Battery Exchanges., *Networks and Spatial Economics*, pp. 1-19 (2012).
- [5] Shemer, N., Better Place Unveils Battery-Swap Network, *Jerusalem Post* (2012).
- [6] Miettinen, K., Nonlinear Multiobjective Optimization, *Kluwer Academic Publishers, Boston*, (1999).
- [7] Schneider, M., Stenger, A. and Goeke, D., The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations, *Transportation Science*, Vol. 48 No. 4 pp.500-520 (2014).
- [8] Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., Chung, S. H., and Lam, H. Y., Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and Future Trends, *Expert Systems with Applications*, Vol. 41 No. 4 pp.1118-1138 (2014).
- [9] Dumitrescu, I. and Boland, N., Algorithms for the Weight Constrained Shortest Path Problem, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 8 No. 1, pp.15-29 (2001).
- [10] Gendreau, M., Hertz, A., Laporte, G. : New Insertion and Pstoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research* Vol. 40, 1086-1094 (1992).