

# 航続可能距離と充電時間を考慮した 電気自動車向けルート探索手法

木山 昇<sup>1,a)</sup> 小林 雄一<sup>1</sup> 青島 弘和<sup>2</sup> 白井 啓介<sup>2</sup> 柏山 正守<sup>2</sup>

受付日 2012年4月6日, 採録日 2012年10月10日

**概要:** 本論文では, 適切な充電スタンドを経由し充電することで, バッテリ切れを起こさずに目的地に到達可能なルートを探査する, 電気自動車向けのルート探索手法を提案する. 提案手法では, 電気自動車の航続可能距離と充電スタンドの位置関係を基に, 充電スタンドを頂点とする重み付き有向グラフを作成する. 各辺の重みには, 各頂点間の移動時間に加えて, 充電スタンド到着後に必要となる充電時間を算出して用いる. この重み付きグラフに対してダイクストラ法を適用することで, 充電スタンドを経由する複数のルートの中で, 充電時間を含む移動時間が最短となるルートを導出する. 提案手法による移動時間の短縮効果を確認するために, 提案手法に基づくルート探索システムを実装し, 複数のルート探索結果について充電時間を考慮しないルート探索手法と比較した. その結果, 提案手法では移動時間は増加するが, 充電時間は大きく削減できており, 充電時間を含む移動時間が約 62%削減されたルートを導出していることが確認できた.

**キーワード:** 電気自動車, 充電スタンド, 航続可能距離, ルート探索

## A Route Search Method for Electric Vehicles in Consideration of Cruising Range and Charging Time

NOBORU KIYAMA<sup>1,a)</sup> YUICHI KOBAYASHI<sup>1</sup> HIROKAZU AOSHIMA<sup>2</sup> KEISUKE SHIRAI<sup>2</sup>  
MASAMORI KASHIYAMA<sup>2</sup>

Received: April 6, 2012, Accepted: October 10, 2012

**Abstract:** In this paper, we propose a new route search method for electric vehicles (EVs), which calculates a optimal route going through charging stations to recharge its battery if current state of charge is not sufficient to reach the destination. In this method, firstly we prepare a directed graph consisting of charging stations as nodes based on the EV's cruising range and locations of charging stations. The weight of each link consists of not only travel time among nodes but also charging time required to arrive the next charging station. And we search a least-time route by Dijkstra's method on this graph. We implemented this method to evaluate reduction travel time of the route by comparing travel time including charging time of some routes calculated by this method with that calculated by the method which uses only travel time for weight. Through the evaluation, it was confirmed that travel time between the departure point and destination calculated by proposed method was 62% shorter than that by conventional method.

**Keywords:** electric vehicles, charging stations, cruising range, route search

<sup>1</sup> 株式会社日立製作所横浜研究所  
Hitachi, Ltd., Yokohama Research Laboratory, Yokohama,  
Kanagawa 244-0817, Japan

<sup>2</sup> 日立オートモティブシステムズ株式会社  
Hitachi Automotive Systems, Ltd., Chiyoda, Tokyo 100-  
0004, Japan

<sup>a)</sup> noboru.kiyama.sn@hitachi.com

### 1. はじめに

近年, 化石燃料を使用せず環境への負荷が少ない, 電気自動車 (EV: Electric Vehicle) が注目されている. ガソリンを消費して走行する内燃機関車 (ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle) とは異なり, EV は走行時に

電気を利用する。風力発電や太陽光発電など自然エネルギーを用いた発電方式では、発電時に化石燃料を使用せず、また二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量が少ない。そのため、利用車種を ICEV から EV へ変更することは環境負荷の低減につながることから、各国政府は環境問題対策の一環として、EV の普及に向けた補助金・減税制度 [1], [2] や環境対応車販売台数の義務化政策 [3] などを実施している。

一方で、EV には普及に向けた課題がまだいくつか存在している。たとえば、(1) 搭載されているバッテリーの容量が少ないため、走行可能な距離（航続可能距離）が 100～200 km 程度とガソリン車と比べて短い、(2) ガソリンスタンドの代わりとなる充電スタンドの普及が進んでおらず、日本では約 3,000 台 [4] とガソリンスタンドの 1/10 程度である、(3) 充電スタンドでの充電に 30 分～数時間程度必要である、などがあげられる。これらの課題が原因で、多くのユーザが EV での長距離移動に対して不安をいだいており [5], [6]、EV の普及に影響を与えている。

本論文では、航続可能距離の短さや充電スタンド不足に起因する EV での長距離移動への不安を取り除く方法として、EV 向けのルート探索手法を提案する。提案手法ではまず、出発地、目的地および充電スタンドを頂点とする重み付き有向グラフを生成する。有向辺の生成基準には各バッテリー残量に応じた航続可能距離を利用し、バッテリー切れを起こさずに移動可能な頂点間に辺を生成する。また辺の重みには、頂点間の移動時間に加えて、経由する各充電スタンドでの充電時間も利用する。充電時間は、充電スタンドの機器種別に応じて異なる出力電力を基準に算出する。この重み付き有向グラフに対してダイクストラ法を適用することで、バッテリー切れを起こさずに到達可能な充電スタンドを経由する複数のルートの中で、充電時間を含む移動時間が最短となるルートを導出する。

提案手法による充電時間を含む移動時間の短縮効果を確認するために、提案手法に基づくルート探索システムを実装し、複数のルート探索を実行した。そして、経由する充電スタンドの数に応じた移動時間と充電時間それぞれの変化について、充電スタンドの種別（出力電力）を考慮しない手法によるルート探索結果と比較した。その結果、提案手法では EV での移動時間が増加するものの、充電時間は大きく削減できており、充電時間を含む移動時間が約 62% 削減されたルートを導出していることが確認できた。

## 2. 関連研究

### 2.1 電気自動車の利便性向上に関する研究

航続可能距離の短さや充電スタンド不足に対する不安を解消し、EV の利便性を向上させることを目的として、様々なテレマティクスサービスが提案され、EV の正確な航続可能距離を導出する手法や、EV 向けのルート探索手法に

関する研究が進められている。

文献 [7], [8] では、外出先で利用されることを想定した充電スタンドを新しく配置する場合において、走行履歴を利用した充電スタンドの最適な配置場所の決定手法を提案している。文献 [7] では、ガソリンスタンドに新しく充電スタンドを配置することを前提に、過去にガソリン車が走行した経路を EV でもバッテリー切れを起こさずに走行できることを評価基準として、充電スタンドの最適な配置場所を決定している。また文献 [8] では、まず EV の走行状況を、目的地に移動中である、充電スタンドへ寄り道している、充電中である、の 3 つに分類して定義している。そのうえで、寄り道および充電中の時間が最も短く、かつ各充電スタンドでの充電量が分散されることを評価基準として、充電スタンドの最適な配置場所を決定している。

さらに文献 [9] では、電力網に直接接続せずバッテリーを内蔵することで移動を可能とした充電スタンドを対象に、充電スタンドの最適配置手法を提案している。通常、充電スタンドは充電施設に集約・充電され、必要に応じて各地に配備する。評価基準としては、現在のバッテリー残量で配置場所に到達可能な EV の台数を利用して、決定した場所に専用のトラックで充電スタンドを運搬することを想定している。

文献 [10], [11] では、電力網の出力制限や利用時間制限に基づく、EV の充放電のスケジュールに関する最適化手法を提案している。文献 [10] では、電力網の負荷上限、電気代、バッテリーの劣化、各 EV ユーザの希望充電量や出発時刻を対象に、進化的アルゴリズムを利用した充放電時間帯の最適化を提案している。また文献 [11] では、電力網のピークシフトを目的として、各 EV ユーザから送られる充電開始時刻、充電終了時刻、希望充電量を基に、電力網の負荷が平均化されるよう、各 EV の充放電スケジュールを決定する手法を提案している。

文献 [12], [13] では、出発地から目的地に向かう複数のルートの中で、最もバッテリー消費量が少ないルートを探索する手法が提案されている。文献 [12] では、大規模な道路情報に対して事前計算を実施することにより、最小消費電力ルートを高速に導出する手法を提案している。事前計算では、高度情報を含む地図情報とモデル化された算出式を利用し、道路単位で回生ブレーキによる発電量を推測することで、回生ブレーキの発電量を考慮した最小消費電力ルートを導出している。また文献 [13] では、回生ブレーキによる発電量を考慮したうえで、各道路の移動コストを消費（あるいは発電）電力で表現し、バッテリー残量およびバッテリー容量をふまえた制約付き最短経路問題として解くことで、最小消費電力ルートを導出している。

さらに文献 [14] では、電気自動車の航続可能範囲を動的に変化させながら地図上に表示するシステムを提案している。たとえばカーナビなどが蓄積している地図情報に加

え、外気温、風速、高低差などサーバで管理される地理情報と連携することで、精度の高い航続可能範囲の表示を行う。また航続可能範囲の表示には、複数の運転モデルのうち、ユーザごとに最適に割り当てられたモデルを用いて算出することで、より精度の高い航続可能範囲の表示を実現している。

## 2.2 本研究の目的

従来研究では、充電スタンドの最適配置や最適な充電スケジュールの決定、EV 向けのルート案内など、EV の利便性向上に向けた研究が行われている。しかしながら、従来研究では EV の航続可能距離の短さや充電スタンド不足に対する不安を軽減しているものの、EV での移動中におけるバッテリー切れの不安を軽減しておらず、現状では EV ユーザは自ら経由する充電スタンドを選択する必要がある。そのため、EV で長距離移動する場合、ユーザはつねにバッテリー残量と充電スタンドの位置を把握していなければならず、EV に対する不安を完全に取り除いているとはいえない。

本論文では、出発地から目的地までの移動ルートを導出する前に、まず初めに航続可能距離、移動時間および充電時間を基準として経路に最適な充電スタンドを選出する。そのうえで、該当する充電スタンドを経由地に設定したルート探索を実行することで、長距離移動時にバッテリー切れを心配する必要がないルートを導出する。提案手法によるルート探索結果をユーザに提供することで、移動中のバッテリー切れに対する不安を払拭し、その結果 EV 普及促進に貢献することを目的としている。

## 3. 提案手法のアルゴリズム

### 3.1 電気自動車の特性の考慮

従来のガソリン車と同様、EV には様々な車種が存在し、またその利用状況に応じて EV の状態は異なる。特に EV 本体に関する部分としては、EV のバッテリー容量や出発時のバッテリー残量などが例としてあげられる。さらに、同一車種・バッテリー残量の EV であっても、運転するユーザに応じて航続可能距離は変化する。これは、ガソリン車と比較して航続可能距離の短い EV では、ルート探索結果に対するユーザへの影響が大きい。そのため提案手法では、EV の車種・バッテリー状態・ユーザに応じて変化する航続可能距離に対応するため、1 kWh あたりの航続可能距離である電費 (EM: Electric Mileage) を利用する。電費は、たとえば EV がつねにテレマティクスセンタへ走行履歴を送信し、テレマティクスセンタはその走行履歴を解析することで導出する方法などが考えられる。

なお、一般的に EV は回生ブレーキと呼ばれる発電機能が搭載されているため、ブレーキ時にはバッテリーの充電が可能である。そのため、経路が上り坂であるか下り坂であ

るかに応じて、電費 EM の値は変化する。したがって EM の算出には、これから走行する経路の勾配情報を利用したうえで正確に導出するべきであるが、本論文では簡単化のため、勾配情報は考慮しないものとし、航続可能距離はバッテリー残量と比例関係にあるものとする。

EV の航続可能距離は電費 EM (km/kWh) とバッテリー残量 (kWh) の値を用いることで導出できる。現在のバッテリー残量  $BL_R$  (kWh) における航続可能距離  $CR_R$  (km) は、

$$CR_R = BL_R \times EM$$

により算出される。同様に、満充電時のバッテリー容量  $BL_F$  における航続可能距離  $CR_F$  (km) は、

$$CR_F = BL_F \times EM$$

により算出される。

またガソリン車とは異なり、ガソリンスタンドの代わりとなる充電スタンドは複数種類存在する。現在、普及している充電スタンドには普通充電スタンド [15] と急速充電スタンド [16] の大きく 2 種類が存在する。普通充電スタンドは家庭用電源での充電に対応しているが、満充電に必要な充電時間は数時間以上と長く、移動中の充電用途としては適していない。一方、急速充電スタンドの場合は満充電に必要な充電時間は 30 分程度と比較的短い、専用の電源設備が必要となるため高価であり、そのため普及が進んでいないのが現状である。EV 向けのルート探索サービスを提供するにあたり、普通充電スタンドと急速充電スタンドでは充電時間の差が大きいことから、できる限り急速充電スタンドするルートを導出し EV ユーザに提供する必要がありますと考えられる。また、充電時間が移動時間と比較して無視できないほど大きい値をとることからも、提案手法では充電時間を含む移動時間が最短となるルートを導出することとする。以降では、充電時間を含む移動時間を移動コストと定義し、移動時間とは EV の運転時間を表すものとする。また提案手法では、2 種類の充電スタンドの違いを表現するため、充電スタンドの出力電力として充電効率  $CE_i$  (kW) を定義する。

提案手法では、移動中にバッテリー切れを起こさないよう、充電スタンド  $SCS_1, SCS_2, \dots, SCS_j$  を経由しながら目的地へ向かうルートを導出する。以降では、このルートを EV アシストルートと表現し、出発地 Dep と目的地 Des の EV アシストルートを  $EVR(Dep, Des)$  と示す。また EV アシストルートの情報として、走行距離  $EVD(Dep, Des)$  (km), 移動コスト  $EVT(Dep, Des)$  (h) についても導出する。提案手法で利用するパラメータを表 1 に示す。

なお、出発地・充電スタンド・目的地の各地点間のルート探索には、従来手法による 2 地点間のルート探索アルゴリズムを用いることとする。勾配情報を考慮する場合には、文献 [12], [13] で提案されるような電気自動車向けの

表 1 提案手法における入力値および出力値

Table 1 Input/output data in proposed method.

Data	Parameter	Symbol
Input	State of Charge	$BL_R$ (kWh)
	Battery Capacity	$BL_F$ (kWh)
	Cruising Range with Current State of Charge	$CR_R$ (km)
	Cruising Range with Fully Charged Battery	$CR_F$ (km)
	Electric Mileage	EM (km/kWh)
	Charging Stations (Location Information)	$CS_1, CS_2, \dots, CS_i$
	Charging Efficiency of $CS_i$	$CE_i$ (kW)
	Departure Point	Dep
	Destination	Des
	Output	Search Result of EV Assist Route
Travel Distance		EVD(Dep, Des) (km)
Travel Time including Charging Time		EVT(Dep, Des) (h)
Stopover Charging Stations		$SCS_1, SCS_2, \dots, SCS_j$

ルート探索手法を用いるべきであるが、勾配情報を考慮しない場合にはガソリン車向けのルート探索アルゴリズムで対応可能である。このルート探索関数を  $F$  と定義すると、 $F$  の入力は2つの地点であり、出力結果は2地点間のルート、走行距離および移動時間である。以降では、従来手法によるルート探索により導出されるある地点  $P_1$  から別の地点  $P_2$  へのルートを  $R(P_1, P_2)$ 、走行距離を  $D(P_1, P_2)$ 、移動時間を  $T(P_1, P_2)$  と記述する。また、ルートの結合を“+”演算子で標記する。すなわち、出発地  $S$  から経由地  $T$  を通って目的地  $G$  に向かうルートは  $R(S, T) + R(T, G)$  と記述する。

以降の節では、EV アシストルート導出のアルゴリズムを、(1) 出発地-目的地間の距離およびバッテリー残量に応じた、経路の対象となる充電スタンドの選出方法、(2) 出発地、目的地および充電スタンドを頂点とする重み付き有向グラフの生成方法、(3) ダイクストラ法に基づく、充電時間を含む移動時間が最短となるルートの導出方法、に分けて説明する。

### 3.2 経路対象となる充電スタンドの選出

EV アシストルートを探査するにあたり、経路対象となる充電スタンド数の増加に応じて、検索結果の精度は向上する。一方で、東京-横浜間のルート探索を実行する際に

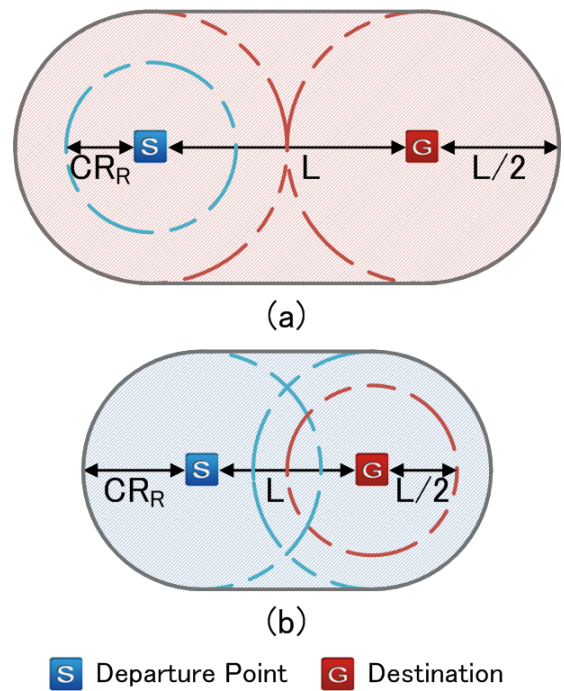


図 1 経路候補となる充電スタンドを探査する領域 (a)  $CR_R > L/2$  の場合 (b)  $CR_R < L/2$  の場合

Fig. 1 Search area for potential stopover charging stations, (a) In case of  $CR_R > L/2$ , (b) In case of  $CR_R < L/2$ .

日本全国の充電スタンドを対象とすることは、検索時間の大幅な増加につながる。そのため、ルート探索時には経路対象となる充電スタンドを適切に限定する必要がある。

充電スタンドの限定には様々な方法が考えられるが、本論文では、出発地-目的地の直線距離  $L$  を基準として利用することとした。まず、直線距離  $L$  の半分を半径とした円を、出発地および目的地を中心として2つ描く。対象となる領域は、図 1 (a) に示すような、2円および平行な共通接線によって囲まれた領域である。経路対象となる充電スタンドは、この領域に存在するものと定める。一方で、 $L/2$  が現在のバッテリー残量における航続可能距離  $CR_R$  より小さい場合には、出発地から到達可能な充電スタンドを対象外としてしまう。そのため、出発地から現在のバッテリー残量で到達可能な充電スタンドをすべて経路対象とするため、 $CR_R$  が  $L/2$  より大きい場合に限り、図 1 (b) に示すような、前述の2円の半径を  $CR_R$  とした領域を利用することと定める。

### 3.3 充電スタンドを頂点とする重み付き有向グラフの生成

従来のルート探索手法では、交差点を頂点に、道路を辺に、辺の重みを移動時間と見立てたうえで重み付き有向グラフを生成している。そのため、3.2 節で導出した充電スタンドを対象に、複数の充電スタンドを経由するルートの中で最も移動コストが低いルートを導出する場合には、充電スタンドも交差点と同様に頂点として扱い、バッテリー残量に基づく制約条件の下、最短経路探索を実施する方法が

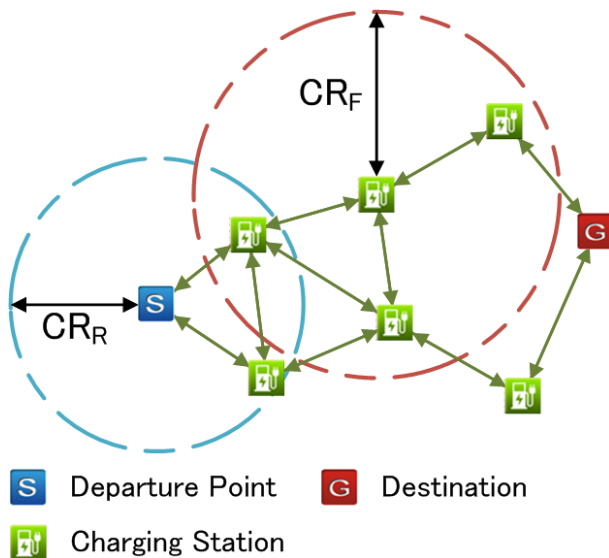


図 2 出発地, 目的地, 充電スタンドを頂点とする充電スタンドグラフ 1 の例

Fig. 2 Example of “Charging-Station-Graph” consisting of departure point, destination and charging stations as nodes.

考えられる。しかしながら、充電スタンドを経由して充電した後に次の交差点に向かうべきであるか、充電スタンドを経由せずに次の交差点に向かうべきであるかは、目的地や次の経由充電スタンドに到達できるか否かに応じて異なるため、交差点ごとに順次最小移動時間を決定する従来手法では、充電するか否かの判断が難しい。そこで提案手法では、まず初めに経由する充電スタンドを決定し、次にその経由充電スタンドを経由するルートを導出することで、EV アシストルートを導出することとする。そのため、出発地、目的地および充電スタンドを頂点に、充電スタンド間の移動コストを重みに、対象となる EV が到達可能な充電スタンド間に有向辺を生成した充電スタンドグラフを生成し、EV アシストルート探索に利用する。

出発地、目的地および充電スタンドを頂点とする充電スタンドグラフを作成するにあたり、頂点間に有向辺を生成する基準としては、対象となる EV が頂点 A から頂点 B 間へ移動可能であるかをを用いる。頂点 A から頂点 B へ移動可能であるとは、

1. 頂点 A が出発地である場合は、A, B 間の走行距離  $D(A, B)$  が、現在のバッテリー残量に基づく航続可能距離  $CR_R$  未満である
2. 頂点 A が充電スタンドである場合には、A, B 間の走行距離  $D(A, B)$  が満充電時の航続可能距離  $CR_F$  未満である

ことであると定義する。頂点 A が充電スタンドである場合には、その充電スタンドで充電可能であることから、満充電時の航続可能距離  $CR_F$  を基準として用いている。

グラフ生成時にはまず、経由候補となる充電スタンド、

出発地および目的地すべてのペアに対して、ルート探索関数  $F$  を利用することで、各頂点間の走行距離を導出する。そして、導出した各走行距離が  $CR_R$  あるいは  $CR_F$  未満であるかを判断し、有向辺を生成する (図 2)。図 2 のように、各 EV のバッテリー量に応じて到達可能な頂点間に有向辺を生成することで、複数の充電スタンドを乗り継ぎながらバッテリー切れを起こさずに目的地に到達可能なルートの候補を導出している。

次に、導出した有向辺に対して重みを与える。提案手法では、遠回りをしたとしても急速充電スタンドを経由する方が移動コストが少ない場合を考慮するため、走行距離の増加による移動時間の増加と充電設備の違いによる充電時間の短縮の優劣を判断する必要がある。そのため、充電スタンド到着時のバッテリー残量から満充電するまでに必要な充電時間を計算し、辺の重みとして利用する。地点 A から充電スタンド  $CS_i$  に向かい、 $CS_i$  で満充電する場合における、 $CS_i$  での充電時間  $CT(A, CS_i)$  は、

1. A が出発地 Dep である場合は

$$CT(Dep, CS_i) = \frac{BL_F - BL_R + \frac{D(Dep, CS_i)}{EM}}{CE_i}$$

2. A が充電スタンド  $CS_h$  ( $h = 1, 2, \dots, i$ ) である場合は

$$CT(CS_h, CS_i) = \frac{D(CS_h, CS_i)}{EM \times CE_i}$$

となる。辺の重みとしては、この充電時間に移動時間を加えた移動コストを利用する。地点 A から地点 B へ移動する際の移動コスト  $C(A, B)$  は、

1. 地点 A が出発地 Dep である場合は

$$C(Dep, CS_i) = CT(Dep, CS_i) + T(Dep, CS_i)$$

2. 地点 B が目的地 Des である場合は

$$C(CS_i, Des) = T(CS_i, Des)$$

3. 両地点とも充電スタンド  $CS_h, CS_i$  である場合は

$$C(CS_h, CS_i) = CT(CS_h, CS_i) + T(CS_h, CS_i)$$

となる。この移動コストを比較することで、走行距離が長くなったとしても急速充電スタンドを経由するべきかどうかの判断を行う。

なお、充電スタンドの出力電力・位置情報は EV アシストルート探索実行前に与えられる情報である。そのため、充電スタンド間の有向辺に関しては、ルート探索を実行するたびに生成するのではなく、たとえば充電スタンド間の経路を事前に探索しておき、データベースに登録・保持しておくことが考えられる。これにより、充電スタンド間の経路探索の処理時間は減少し、EV アシストルート導出の高速化が実現できる。

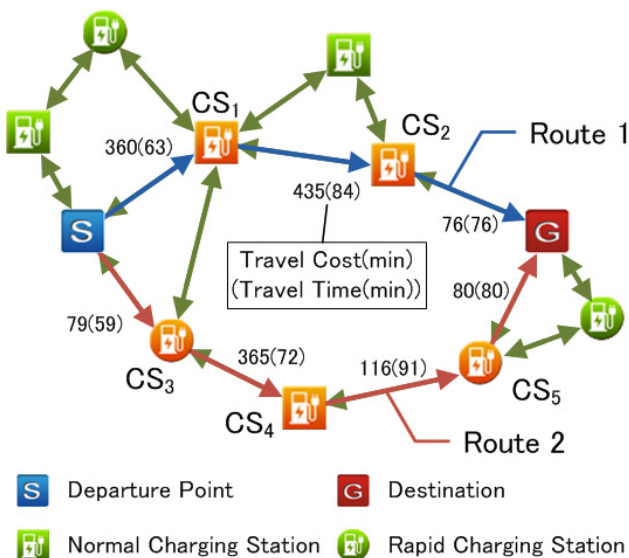


図 3 2つ以上の充電スタンドを経由する EV アシストルート探索例  
 Fig. 3 Example of EV assist route search with two or more stopover charging stations.

3.4 重み付き有向グラフに対するダイクストラ法の適用

3.3 節で生成した充電スタンドグラフに対してダイクストラ法 [17] を適用することにより、充電時間を含む移動時間が最短となるルート導出し、経由すべき充電スタンド群  $SCS_1, \dots, SCS_j$  を選出する。

EV アシストルート探索の例を図 3 に示す。図 3 には、普通充電スタンドを 2 つ経由して出発地から目的地に移動可能な Route1 と、急速充電スタンド 2 つと普通充電スタンド 1 つ、合計 3 つの充電スタンドを経由して目的地に到達可能な Route2 が表示されている。充電時間を考慮しない場合には、普通充電スタンド  $CS_1, CS_2$  を通るルート Route1 (移動時間合計 223 分) を、Route2 (移動時間合計 302 分) より移動時間が短いため最短ルートと判断した。しかしながら充電時間を考慮する提案手法では、急速充電スタンド  $CS_3, CS_5$  を通るルート Route2 (移動コスト合計 640 分) の方が Route1 (移動コスト合計 871 分) より移動コストが短いことから、Route2 を最短ルートとして導出し、EV アシストルートとして提供する。

経由する充電スタンド  $SCS_1, \dots, SCS_j$  が決定した場合には、ルート探索関数  $F$  を利用して得られる、充電スタンド  $SCS_1, \dots, SCS_j$  を経由地とするルート探索結果、その走行距離および移動時間を EV アシストルート探索結果として返す。EV アシストルート、そのルートの走行距離および移動時間は、

$$EVR(Dep, Des) = R(Dep, SCS_1) + R(SCS_1, SCS_2) + \dots + R(SCS_j, Des)$$

$$EVD(Dep, Des) = D(Dep, SCS_1) + D(SCS_1, SCS_2) + \dots + D(SCS_j, Des)$$

$$EVT(Dep, Des)$$

$$= T(Dep, SCS_1) + CT(Dep, SCS_1) + T(SCS_1, SCS_2) + CT(SCS_1, SCS_2) + \dots + T(SCS_{j-1}, SCS_j) + CT(SCS_{j-1}, SCS_j) + T(SCS_j, Des)$$

により導出される。

なお、生成した重み付き有向グラフについて、以下の 2 つの場合においては、出発地から目的地に対して現在のバッテリー残量では到着できない。

1. 出発地を始点とする有向辺が存在しない、すなわち出発地から航続可能距離の範囲内に目的地は存在せず、かつ充電スタンドも存在しない場合
2. 出発地から目的地に向かう経路が存在しない、すなわち出発地からバッテリー切れを起こさずに充電スタンドを経由しながら目的地に向かう道が存在しない場合

この場合は、EV アシストルートは存在せず、現在のバッテリー残量では目的地に到達できないと判断する。

4. 評価実験

4.1 実験環境

提案手法が充電時間を含む移動時間をどの程度短縮させるかを確認するために、仮想の充電スタンド群と充電効率を用いて、ルート探索結果を地図上に示すシステムを実装した。なお、ルート探索対象国は日本とした。また、充電スタンドには日本全国に点在する約 4 万カ所のガソリンスタンドから無作為に抽出したガソリンスタンドを利用した。充電スタンドの配備数は 2010 年、2011 年、2012 年における日本国内での外部利用可能な充電スタンドの軒数 [4] を参考とし、2,500 軒、3,000 軒、4,000 軒それぞれについて評価実験を行った。なお、各年における急速充電スタンドの軒数は順に 300 軒、500 軒、1,000 軒である。評価実験では、バッテリー容量を 24kWh、電費を 5km/kWh (最大航続可能距離 120km) としたうえで、出発時のバッテリー残量を 12kWh (航続可能距離 60km) と定義した。また、充電効率は普通充電の場合は 2kW、急速充電の場合は 48kW と設定し、満充電に必要な時間をそれぞれ 12 時間、30 分と定義した。実験環境における各設定値を表 2 に示す。

作成したシステムに対して、関東地方に存在する道の駅 114 軒を対象に、出発地および目的地をそれぞれ道の駅と設定したルートを総当たりで実行した。なお、関東地方に存在する充電スタンドの軒数は、年順に 745 軒、838 軒、1,074 軒である。実行の結果、充電スタンドを 1 度以上経由するルート探索結果を約 10,000 件得た。また従来手法として、充電スタンドの種別を考慮しない、すなわち辺の重みに充電時間を利用しない手法によるルート探索結果も同様に得た。得られたルート探索結果を基に、提案手法および従来手法それぞれについて経由充電スタンドの数に応じた移動時間の変化を確認した。

表 2 評価実験における各パラメータの値  
Table 2 Parameters in evaluation experiment.

Parameter	Value
Battery Capacity	24 (kWh)
State of Charge	12 (kWh)
Electric Mileage	5 (km/kWh)
Charging Efficiency of Rapid Charging Station	48 (kWh)
Charging Efficiency of Normal Charging Station	2 (kW)
# of Charging Stations (Rapid/Total)	300/2500 (in 2010), 500/3000 (in 2011), 1000/4000 (in 2012)

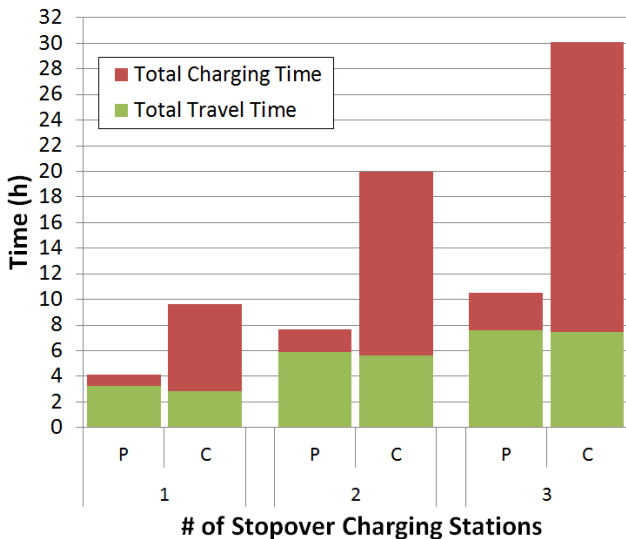


図 4 経由する充電スタンド数に応じた移動時間・充電時間 (2010年). P: 提案手法による探索結果, C: 従来手法による探索結果

Fig. 4 Travel/charging time according to # of stopover charging stations (in 2010). P: Proposed method, C: Conventional method.

なお、作成したシステムでは充電スタンド間の経路は事前に探索し、その結果をデータベースに保持している。事前探索の対象となる充電スタンドの組合せの条件としては、充電スタンド間の移動距離が 320 km 以下であることと定義した。そして EV アシストルート探索時には、設定された満充電時の航続可能距離 (本評価実験では 120 km) 以下の距離で移動可能な充電スタンド間についてのみ、重み付き有向辺を生成し利用している。なお、この条件の場合、日本全国に 3,000 軒充電スタンドを配備した環境における事前探索の対象となる充電スタンドの組合せ数は、約 60 万件であることを確認している。

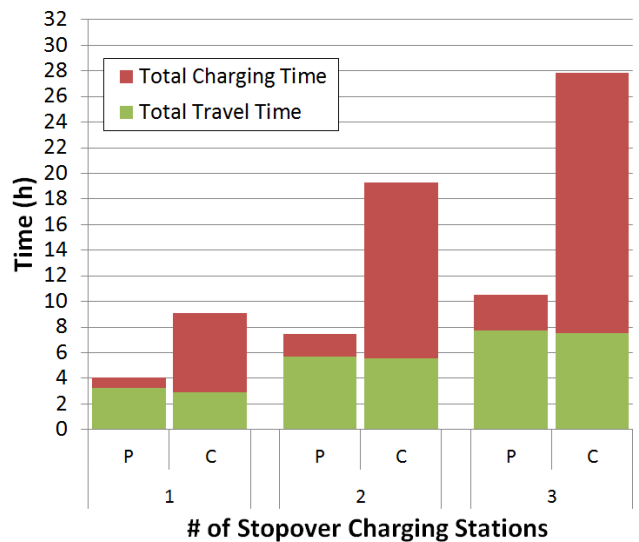


図 5 経由する充電スタンド数に応じた移動時間・充電時間 (2011年). P: 提案手法による探索結果, C: 従来手法による探索結果

Fig. 5 Travel/charging time according to # of stopover charging stations (in 2011). P: Proposed method, C: Conventional method.

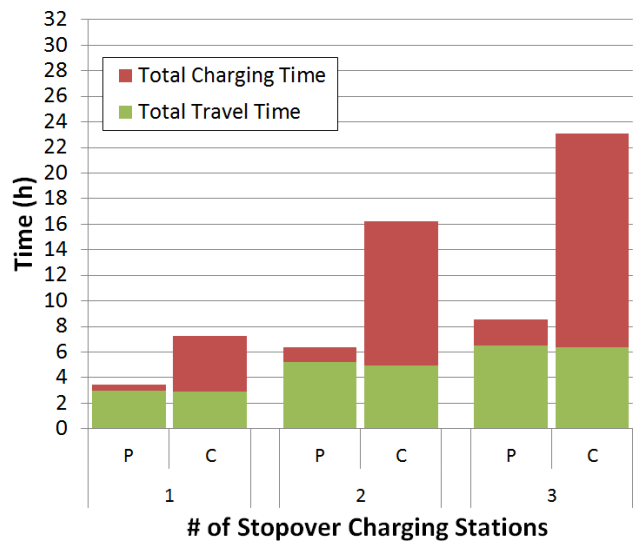


図 6 経由する充電スタンド数に応じた移動時間・充電時間 (2012年). P: 提案手法による探索結果, C: 従来手法による探索結果

Fig. 6 Travel/charging time according to # of stopover charging stations (in 2012). P: Proposed method, C: Conventional method.

#### 4.2 実験結果と考察

図 4 では、2010 年時点での充電スタンド普及状況下における、提案手法と従来手法それぞれの充電時間を含まない移動時間と充電時間の平均を示している。移動時間および充電時間の平均は、経由する充電スタンド数ごとに算出している。図 4 に示すとおり、提案手法は従来手法と比較して、移動時間が約 10 分~20 分程度長くなる傾向が見られた。しかしながら、充電時間については提案手法の方が

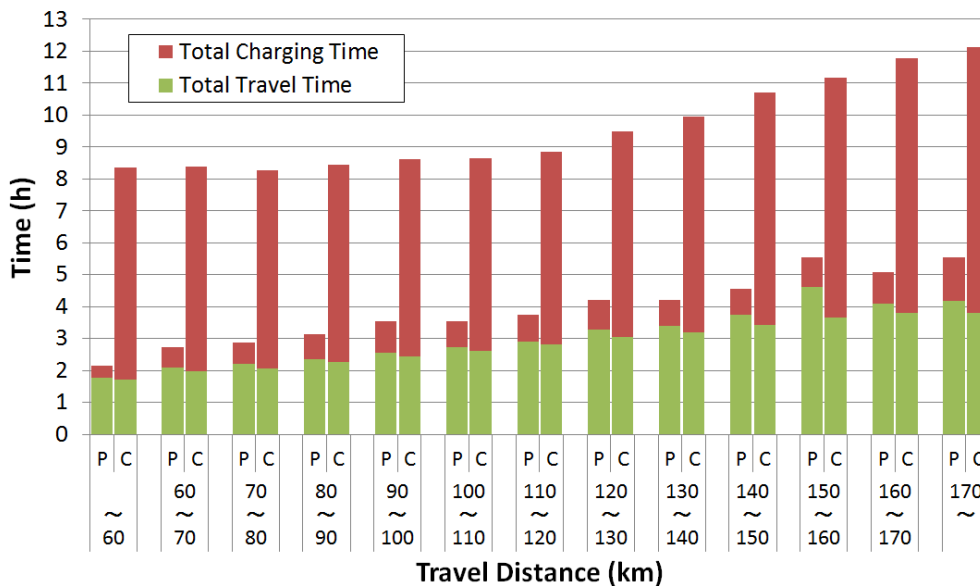


図 7 走行距離に応じた移動時間・充電時間. P: 提案手法による探索結果, C: 従来手法による探索結果

Fig. 7 Total travel/charging time according to travel distance. P: Proposed method, C: Conventional method.

短く、また経由する充電スタンドの数が増えるに従って、提案手法と従来手法の充電時間の差が拡大する傾向が見られた。これは、従来手法では充電スタンドの電力出力を考慮しないため配備台数が多い普通充電スタンドを経由するケースが多いのに対して、提案手法では遠回りをしてでも可能な限り急速充電スタンドを経由するルートを選択するため、経由する充電スタンドごとに急速充電と普通充電の充電時間の差が生じているためと考えられる。

図 5 では、2011 年時点の充電スタンド普及状況下における、提案手法と従来手法の移動時間および充電時間の平均を示している。経由する充電スタンド数にともなう移動時間および充電時間の変化の傾向は、提案手法、従来手法ともに図 4 と同一の傾向が見られた。また、図 4 と図 5 を比較した場合、提案手法、従来手法ともに充電時間に短縮の傾向が見られた。提案手法においては、急速充電スタンドの増加にともない、バッテリー残量の制約上やむをえず普通充電スタンドを経由していたルートが減少したためだと考えられる。従来手法においては、全充電スタンドに占める急速充電スタンドの割合が 12% から約 16% へ増加したためだと考えられる。

図 6 では、2012 年時点での充電スタンド普及状況下における、提案手法と従来手法の移動時間および充電時間の平均を示している。経由する充電スタンド数にともなう変化傾向は、図 4、図 5 と同一の傾向が見られた。また、図 5 と図 6 を比較した場合、提案手法、従来手法ともに移動時間と充電時間両方の短縮が確認できた。充電時間が短縮した理由は図 4 と図 5 の関係と同様と考えられる。移動時間が短縮された理由としては、2010 年-2011 年間で比較し

て 2011 年-2012 年では急速充電スタンドを含む充電スタンドの増加台数が多く、結果として従来の充電スタンドを考慮しないルート探索結果から充電スタンドに寄り道する距離が短くなったためだと考えられる。なお、図 4~図 6 いずれの場合においても、従来手法と比較した場合、提案手法では移動コストが平均で約 62% 短縮されていることが確認できた。

また、走行距離に応じた移動コストの変化の例として、2011 年時点の充電スタンド普及状況下における、経由する充電スタンド数が 1 つの場合の移動時間および充電時間の変化を図 7 に示す。図 7 では、提案手法と従来手法それぞれにおける移動時間と、移動時間に含まれる充電時間を、探索したルートの走行距離 10 km ごとの平均値として示している。提案手法、従来手法ともに走行距離が増加するにつれて移動時間が増加するが、移動時間は提案手法の方が大きいことが判明した。これは、移動時間が増加した場合でも、それ以上に充電時間を短縮できる急速充電スタンドを経由するルートを探しているためと考えられる。また、提案手法では急速充電スタンドを利用するため、走行距離の増加にともなう充電時間はほとんど変化が見られない。一方で従来手法では、走行距離の増加にともない充電時間が増加した。従来手法では普通充電スタンドを経由するルートを導出する可能性が高いが、普通充電スタンドでは 10 km に相当する充電量であっても充電に 1 時間程度必要となる。そのため、走行距離の増加にともなう充電時間の増加量は、移動時間に対して割合が大きくなったと考えられる。

また、ルート探索結果の妥当性については、日本全国が





図 8 EV アシストルート探索結果表示例

Fig. 8 Display example of EV assist route.

ら出発地あるいは目的地を無作為に設定したルート探索を相当数行い、ルート探索結果の位置座標群から、航続可能距離で到達可能な充電スタンドを経由して目的地に到着していることを確認した。一例として、ルート探索結果画面を図 8 に示す<sup>\*1,\*2</sup>。なお、日本全国を対象としたルート探索結果についても、関東地方を対象とした場合と同様、提案手法は従来手法と比較して約 62%の移動コスト短縮効果を確認することができた。

## 5. まとめ

本論文では、EV 普及の課題点である航続可能距離の短さ、充電設備の少なさへの不安を取り除く方法として、EV アシストルートを提案した。提案手法では、充電時間を含む移動時間を考慮したうえで経由する充電スタンドを適切に選択し、目的地までバッテリー切れを起こすことなく到着可能なルートを提供している。評価実験の結果、提案手法では経由する充電スタンドの数に応じて EV での移動時間が増加するものの、充電時間は大きく削減できており、充電時間を含む移動時間が約 62%削減されたルートを導出していることが確認できた。

今後の予定としては、経由対象となる充電スタンドの限定方法と、EV アシストルート探索の計算量および全充電スタンドを対象とした最適ルートからの移動コストの増加量に関する検証が考えられる。また、EV が普及するにつれて充電スタンドでは混雑が予想されることから、充電スタンドグラフの辺の重みに到着後の待ち時間（満空情報）を考慮することも考えられる。

## 参考文献

- [1] 国税庁：環境性能に優れた自動車等に対する自動車重量税の減免措置，入手先 (<http://www.nta.go.jp/taxanswer/inshi/7194.htm>).
- [2] 国土交通省：自動車運送事業用車両の低公害車導入に係る補助制度のご案内（平成 24 年度），入手先 (<http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha.tk1-000003.html>).
- [3] Zero Emission Vehicle (ZEV) Program, available from (<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevprog.htm>).
- [4] 株式会社富士キメラ総研：スマート交通関連市場のグローバル展望 2011 (2011).
- [5] 岡山県：電気自動車に関するアンケート調査について，入手先 (<http://www.pref.okayama.jp/page/detail-41962.html>).
- [6] かながわ電気自動車普及推進協議会：電気自動車についてのアンケート実施結果について，入手先 (<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f4259/p7772.html>).
- [7] Christensen, L., Norrelund, A.V. and Olsen, A.: Travel Behaviour of Potential Electric Vehicle Drivers. The Need for Charging, *Proc. European Transport Conference 2010* (2010).
- [8] Hanabusa, H. and Horiguchi, R.: A Study of The Analytical Method for The Location Planning of Charging Stations for Electric Vehicles, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.6883, pp.596–605 (2011).
- [9] Li, Z., Sahinoglu, Z., Tao, Z. and Teo, K.H.: Electric Vehicles Network with Nomadic Portable Charging Stations, *Proc. 2010 IEEE 72nd Vehicular Technology Conference*, pp.1–5 (2010).
- [10] Ramezani, M., Graf, M. and Vogt, H.: A Simulation Environment For Smart Charging of Electric Vehicles Using a Multi-objective Evolutionary Algorithm, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.6868, pp.56–63 (2011).
- [11] Kim, H.J., Lee, J. and Park, G.L.: Constraint-Based Charging Scheduler Design for Electric Vehicles, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.7198, pp.266–275 (2012).
- [12] Artmeier, A., Haselmayr, J., Leucker, M. and Sachenbacher, M.: The Optimal Routing Problem in the Context of Battery-powered Electric Vehicles, *2nd International Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability* (2010).
- [13] Eisner, J., Funke, S., Storaandt, S.: Optimal Route Planning for Electric Vehicles in Large Networks, *Proc. 25th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, pp.1108–

\*1 図中の地図に関する権利は、株式会社ゼンリンに帰属する。（許諾番号：Z11MA 第 078 号）

\*2 図中の地図に関する権利は、株式会社ゼンリンデータコムに帰属する。（許諾番号：Z12LE 第 300 号）

- 1113 (2011).
- [14] Conradi, P., Bouteiller, P. and Hanssen, S.: Dynamic Cruising Range Prediction for Electric Vehicles, *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2011*, pp.269–277 (2011).
- [15] Bauer, P., Zhou, Y., Doppler, J. and Stembridge, N.: Charging of Electric Vehicles and Impact on the Grid, *Proc. IEEE 13th International Symposium MECHATRONIKA 2010*, pp.121–127 (2010).
- [16] Etezadi-Amoli, M., Choma, K. and Stefani, J.: Rapid-charge Electric-vehicle Stations, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.25, No.3, pp.1883–1887 (2010).
- [17] Dijkstra, E.W.: A Note on Two Problems in Connection with Graphs, *Numerische mathematik*, Vol.1, No.1, pp.269–271 (1959).



山山 昇 (学生会員)

平成 22 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。同年より、株式会社日立製作所横浜研究所に勤務。平成 23 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程入学。電気自動車向けのテレマティクスシステムに関する

研究に従事。



小林 雄一

平成 11 年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了。同年より、株式会社日立製作所横浜研究所に勤務。平成 20 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。電気自動車向けのテレマティクスシステムに関する研究

に従事。



青島 弘和

早稲田大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。株式会社日立製作所を経て、平成 24 年より日立オートモティブシステムズ株式会社に勤務。テレマティクスシステムの開発に従事。



白井 啓介

平成 3 年東京工科大学工学部情報工学科卒業。同年株式会社日立製作所情報システム事業部入社。平成 18 年より、同社オートモティブシステムグループ CIS 事業部にて、テレマティクスシステム開発に従事、現在に至る。



柏山 正守

昭和 58 年日本大学理工学部物理学科卒業。同年株式会社日立製作所神奈川工場入所。スーパーコンピュータ、オープンサーバの開発を経て、平成 8 年より、同社オートモティブシステムグループ CIS 事業部にて、テレマティクス

システム開発に従事、現在に至る。