

勾配などを考慮した電気自動車の最適経路問題とその近似解法*

An approach to shortest path problem of electric vehicles considering gradients*

清水太朗**・國府方久史***・松本修一****・川嶋弘尚*****
By Taro SHIMIZU**・Hisafumi KOKUBUGATA***Shuichi MATSUMOTO****・Hironao
KAWASHIMA*****

1 研究背景・研究概要

現在、環境に優しい次世代自動車として電気自動車（以下「EV」と記す）が注目されている。また、多くの自動車メーカーがEVの販売を発表しており、経済産業省は新車販売台数に占めるEVの割合を2030年までに約3割に高める計画を立てている。更に、2020年までに普通充電器を現在の約2万基から200万基に増やす一方、急速充電器も現在の160基程度から5,000基に増やす等、EVが現在のガソリン車に代わって我々の日常の足となる日はそう遠くないと考えられている（図－1参照）¹⁾。

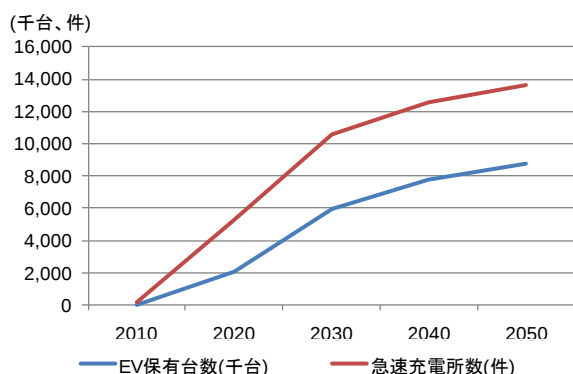


図1 EV保有台数と急速充電所数の見通し

現在、EV普及における課題として、以下の3点が考えられている²⁾。

1. EVは走行距離が短い
2. EVの本格的な市場導入が控えているのにも関わらず、充電施設数が少ない
3. 充電施設情報などを一元的に集約し、確実に情報を流通させる仕組みが必要

*キーワード：電気自動車、電費、勾配、経路問題
**学生員、工学士、慶應義塾大学大学院理工学研究科

(神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1、
TEL:045-566-1141、FAX:045-566-1617)

***非会員、工修、慶應義塾女子高等学校

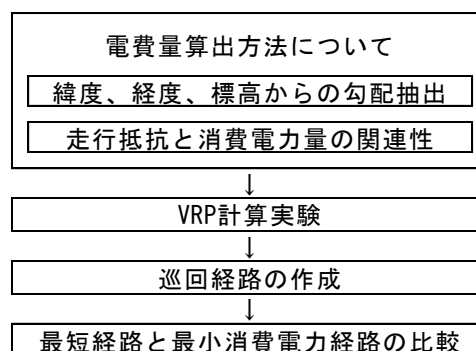
****正員、博（工）、慶應義塾大学先端研究センター

*****正員、工博、慶應義塾大学理工学部

特にEVの走行可能距離に関しては、ガソリン車に比べてとても短く、エアコン利用、上り勾配等の条件によって走行可能距離は更に短くなる。また、EVは減速、下り坂走行時にモーターが発電機となり電気が回収される回生ブレーキ機能を備えている。そのため走行する路面の勾配によって消費電力量が変化を受ける。しかし、このような道路勾配やEVの消費電力量を加味した経路決定問題に関する研究は殆ど行われていない。

本研究では、電気自動車の消費電力量（以下「電費」と記す）に焦点を当て、道路勾配と電費、回生ブレーキによる電力回収の関係を表す数式モデルを定式化し、複数の立ち寄り地点を巡回する制約下において、電費の削減効果の可能性を明らかにする。具体的には、与えられたすべての配達地点に対して、複数の車両で巡回してその配達デマンドを満たす最適巡回経路を決定するVRP(Vehicle Routing Problem)において、一般的に用いられている移動距離を最小にする最短巡回路解と、本研究で活用する勾配を考慮した電費算出モデルを用いて計算した最小消費電力巡回路解との比較を行う方法を提案する。これら研究のフローを図－2に示す。

適用例として、長崎EV&ITSプロジェクトで100台のEVを運用している長崎県の五島列島において、福江島内に実在する教会群を対象に、1台の車両で主要な教会を最小消費電力で回る経路決定問題をTSP(Travelling Salesman Problem)として取り扱い、計算実験を行った。



図－2 本研究のフロー

2 電費算出方法について

(1) 緯度、経度、標高からの勾配抽出

道路走行において、勾配は自動車のエネルギー消費に大きな影響を与える。特にEVでは、回生ブレーキ機能があるため、道路勾配を考慮することは、電費を算出する上でとても重要である。

本研究では、4つのGPS端末を用いて、国道・県道・主要地方道と教会へとつながる道路の緯度・経度・標高を、実際に走行しながら1秒ごとに測定したデータを用いて、道路勾配を算出した。このデータから道路を等間隔に区切った地点に最も近い位置にあるものの標高をその地点の標高と仮定した。(図-3参照)

なお、本研究では、勾配を設定する間隔を5、10、50、100[m]とし、それぞれの勾配を算出した(図-4参照)。4つの間隔のデータを作成した理由は、GPSの測定誤差からの勾配データへの関与を出来るだけ少なくするために標高の間隔を大きく設定したデータと、逆に勾配を詳細に表現するために標高の間隔を小さく設定したデータの違いを考察するという目的からである。長崎県五島市の主要地方道27号線のそれぞれの設定間隔での標高の変化を表したものが図-5(縦軸:標高、横軸:道路移動)である。勾配の設定間隔が短いデータほど、勾配の変化の数が多くなるデータになることが見て取れる。

(2) 走行抵抗と消費電力量の関連性

走行時の自動車にかかる抵抗 F [N]と走行距離に準じて消費電力量[Wh]が変化すると仮定した。また、速度、加速度は一定と仮定した。自動車にかかる走行抵抗は以下の通りである。³⁾

$$\text{走行抵抗 } F = F_r + F_w + F_a + F_g \quad (1)$$

$$F_r: \text{転がり摩擦抵抗} \quad F_r = \mu m_t g \quad (2)$$

(μ :転がり摩擦係数、 m_t :車の総重量[kg]、 g :重力加速度[m/s²])

$$F_w: \text{空気抵抗} \quad F_w = \rho C_d S v^2 / 2 \quad (3)$$

(ρ :空気密度[kg/m³]、 C_d :空気抵抗係数、 S :前面投影面積[m²]、 v :車速[m/s])

$$F_a: \text{加速抵抗} \quad F_a = (m_t + m_n) a \quad (4)$$

(m_t :自動車重量[kg]、 m_n :自動車回転部分相当重量[kg]、 a :加速度[m/s²])

$$F_g: \text{登坂抵抗} \quad F_g = m_t g \sin \theta \quad (5)$$

(θ :斜度 [rad])

今回はモデルとなるEVとして、五島列島において運用されている三菱自動車工業株式会社のi-MiEVを想定した。公表されているi-MiEVの総電力量と10・15モードから算出される1回の充電における走行可能距離から消費電力率[Wh/J]を算出した。

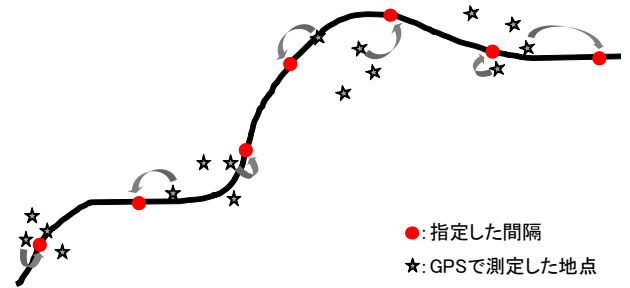


図-3 測定データの当てはめ

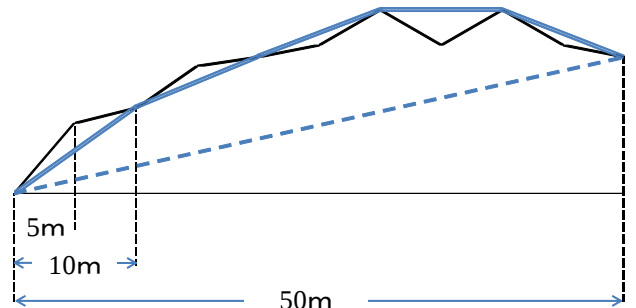


図-4 勾配を設定する間隔のイメージ

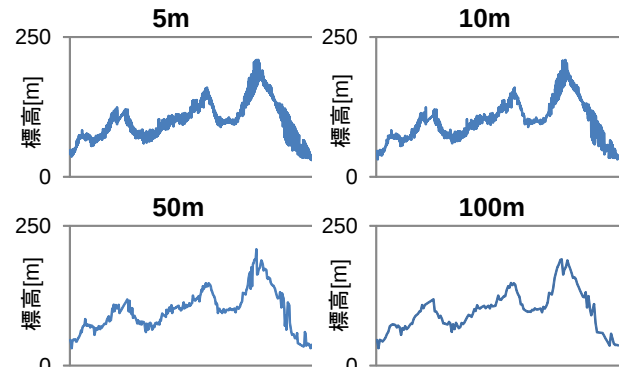


図-5 設定間隔における標高の変化

回生ブレーキによる電気回収の作動条件は、転がり抵抗(F_r)と空気抵抗(F_w)の合計が重力($mg \sin \theta$)によって打ち消されると計算される時と仮定した。

また、回生ブレーキ使用時の電力回収率に関する既存の資料が公開されていないため、回生ブレーキは作動時にかかる0.5[m/s²]の負荷が75%の回収率で電気エネルギーに変換され、電池内の電気になると仮定した^{4),5)}。

3 最適巡回路の計算手法

与えられたすべての配達地点に対して、複数の車両で巡回してその配達デマンドを満たす最適巡回経路を決定するVRPでは、規模が大きく複雑になるにつれて計算量が飛躍的に増大し最適解を求めることは困難となる。そこで最適解を短時間で効率よく探す近似解法の研究が進んでおり、筆者らはこのうち、試行変形を制御して最適解へ誘導するシュミレーテッド・アニーリング法（以下「SA法」と記す）を用いて最適巡回路を探索する計算法を開発している⁶⁾。SA法は、熱した固体を徐々に冷却すると、完全格子をもつ構造に再結晶できるという、金属工学における原理を取り入れた確率的探索手法である。SA法では、繰返し計算における現在の解の近傍解のうちの1つをランダムに選んで次の時点の解の候補とするが、評価関数の値を改善する場合だけでなく、評価関数が改悪する場合にも、温度に対応する変数 T の値に従う確率 $\exp(-\Delta E/T)$ で、その解を次の時点の解として許容する。解探索の初期では、温度変数 T の値を大きく設定し、解の改悪を実行する確率を高くして局所最適解に陥らないようにし、徐々に T の値を低くしていった探索の後期には、改悪の確率を減らし大域的な最適解への収束を促す。

本提案手法に適用したSA法のアルゴリズムは以下のように表現できる。

- 1 初期解 x を生成
- 2 評価関数の値 $E(x)$ を最良値 E^* として記録
- 3 同一温度での平均探索近傍数 N を指定
- 4 温度変数 T を $INITTEMP$ に設定
- 5 試行回数 $trials := 0$,
解変形実施回数 $changes := 0$ に設定
- 6 x の近傍解 x' をランダムに生成し、
 $trials := trials + 1$: $\Delta E := E(x') - E(x)$
- 7 $\Delta E < 0$ のときは必ず、そうでないときも T の値
に従う確率 $\exp(-\Delta E / T)$ で解変形を実施し、
 $changes := changes + 1$, $x := x'$,
 $E(x) < E^*$ ならば、 $E^* := E(x)$, $x^* := x$
- 8 $trials < SIZEFACTOR \cdot N$ かつ
 $changes < CUTOFF \cdot N$ なら step 6へ
- 9 $T := T \cdot TEMPFACOR$
- 10 $T > INITTEMP / FINDIVISOR$ なら step 5へ
- 11 最良解 x^* の出力

ここで、アルゴリズム中のJohnson et al⁷⁾によるパラメタ（大文字斜体標記）は以下の意味をもつ。
 N : 問題の大きさ

$SIZEFACTOR$, $CUTOFF$: 1つの T の値での繰返しの回数を定めるパラメタで、試行回数が $trials \geq SIZEFACTOR \cdot N$ または解の受理回数が $changes \geq CUTOFF \cdot N$ となるまで繰り返す

$INITPROB$: 初期の受理確率であり、初期温度
 $INITTEMP$ は、 $changes / trials = INITPROB$ となるように定める

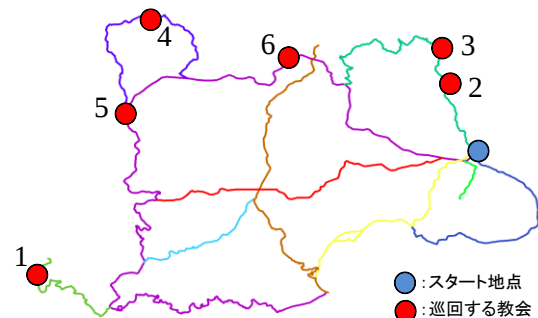
$TEMPFACTOR$: 温度を下げる係数

$FIN_DIVISOR$: 最終温度を決めるパラメタで、
 $T \leq INITTEMP / FIN_DIVISOR$, となるとき、すべての繰返しを終了する

今回の計算実験で用いた例は、データ収集場所等の関係で1台の車両で7個のノードを巡回するという小規模なTSPの問題となったが、ノード数が多い大規模な問題で、時間帯制約、消費コスト制約がある複数の車両による配送の巡回路決定等の際にも一般的に利用できるように、筆者らの開発したVRPの計算法を用いて計算した。

4 計算実験

2章で作成した電費算出方法と3章の計算手法を使って、計算機実験にて福江島における福江港をスタート地点とし、福江島内にある6つの教会を最少消費電力で巡回するという問題を解く（図－6参照）。まず、乗車人数を2人（1人55[kg]）と仮定し、作成した各道路の消費電力量を求め、各ノードから各ノードへの最小消費電力経路をワーシャル・フロイド法を用いて計算した。スタート地点と巡回すべき教会をノードとして、それらをすべて巡回する最適順回路を求めた。



図－6 計算機実験対象のネットワーク

3章に示したSAのパラメタの値は、Johnsonら⁷⁾の推奨している値および筆者らの予備実験の結果から、次のように定めた。

$TEMPFACTOR = 0.95$ (つまり $T_{n+1} = 0.95T_n$)

$SIZEFACTOR = 8$

$CUTOFF = 0.2$

$INIT_PROB = 0.4$

$FINTEMP_FACTOR = 80$

この実験における計算結果は、表－1、2のようになった。表－2は算出されたルートを逆走行した

際の消費電力量と通常走行を基準とした増減率も記載している。表－1、2より、巡回経路は最短巡回ルートと同じ結果であったが、逆ルートで回った時は消費電力量が変わるということが見て取れる。これは同じ道を走行する場合でも、走行方向によって勾配の緩急が異なるため、回生ブレーキによる電力回収量が変わってくるためである。回収勾配を設定した間隔によって値が大きく違うのは、間隔が小さくなるほどデータに緩急が付き（図－4参照）、勾配変化の数が多くなるデータになる（図－5参照）ことと、GPSの測位誤差によりその差が更に大きくなってしまったことが原因と考えられる

乗車人数による消費電力量の違いを表したものが図－7である。算出された最少消費電力巡回ルートにおいて乗車人数が1人のときの消費電力を1とした時の各乗車人数の増減率を表している。乗車人数が一人増えるにつき5～10%ほど消費電力が増え、その増え方は勾配の設定間隔の大きいもの程大きい。

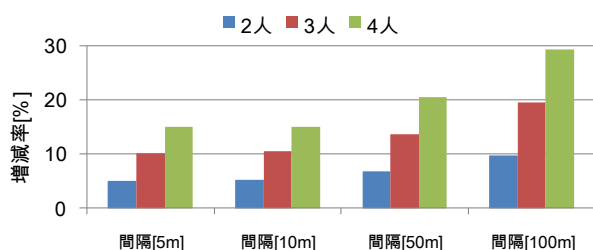
表－1 最短巡回ルート

算出されたルート	距離[m]
0→2→3→6→4→5→1→0 0→1→5→4→6→3→2→0	103,665

表－2 最少消費電力巡回ルート

使用データ	算出されたルート	消費電力量[wh]	
			逆走行
間隔 5m	0→2→3→6→4→5→1→0	152,590	152,897 (+0.20%)
間隔 10m	0→2→3→6→4→5→1→0	54,387	54,394 (+0.01%)
間隔 50m	0→2→3→6→4→5→1→0	11,699	12,152 (+3.87%)
間隔 100m	0→2→3→6→4→5→1→0	5,729	6,569 (+14.66%)

(括弧内は通常走行を基準とした増減率)



図－7 乗車人数による消費電力量の変化

5 おわりに

本研究では、勾配を考慮したEVの消費電力量算

出モデルを作成し、勾配と消費電力量の関連性に定量的な評価を行った。今回の実験では経路選択において、通常の最短巡回ルートと同じ結果になったが、最小電力巡回ルート問題では巡回方向によって通常走行と比べて逆走行の消費電力量が最大14.7%増と異なった値になる。これは回生ブレーキによる電力回収が行われたことが原因である。

以上のことにより、EVの電費算出を行う場合においては、行きと帰りで同じ経路を選択した場合でも勾配と回生ブレーキ機能による電力回収量の違いにより、消費電力量が変わってくるということから、道路勾配の影響が小さくないことがわかった。また、EVの正確な走行距離・消費電力量を算出するには、既存の道路データに標高・勾配等の情報をどのように整備すべきかという課題があることが分かる。

このように巡回ルート問題の最小化基準としてEVの消費電力量を適用させたことは新しい試みであり、これらのEVの普及を考える上で重要な視点となる。今後は複数台のEVを利用した貨物輸送のVRP問題、給電施設における充電を考慮したモデル等を考えていきたい。

謝辞

本研究にあたっては、長崎EV&ITSコンソーシアムより多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 環境省：次世代自動車普及戦略、
<http://www.env.go.jp/air/report/h21-01/index.html>、2010
- 2) 国土技術政策総合研究所：充電施設の情報流通仕様（案）に関する検討会について、2010.
- 3) 電気学会：電気自動車の最新技術・電気自動車駆動システム調査専門委員会編、オーム社、1999.
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所：エネルギー回生型車両の開発について、2003.
- 5) 株式会社GSユアサ：リチウムイオン電池を採用した電鉄用電力貯蔵システムの開発、2005.
- 6) 平島浩一郎、古谷秀樹、川嶋弘尚：自動車排出ガス量低減のための車両巡回計画問題に関する研究、土木計画学研究・論文集 Vol.19 no.2 pp.275-282、2002.
- 7) Johnson,D.S., Aragon,C.R., McGeoch, L.A. and Schevon,C. : Optimization by simulated annealing:an experimental evaluation, part II, graph coloring and number partitioning, Operations research, Vol.39, pp.378-406, 1991.