

道路勾配などを考慮した電気自動車の最適経路問題

AN OPTIMAL ROUTING PROBLEM OF ELECTRIC VEHICLES CONSIDERING ROAD GRADIENTS

清水 太朗¹・國府方 久史²・松本 修一³・川嶋 弘尚⁴

¹B.S. (工学) 慶應義塾大学大学院理工学研究科 (E-mail:taro-smz@a8.keio.jp)

²M.S. (工学) 慶應義塾女子高等学校教諭 (E-mail:kokubu@mita.cc.keio.ac.jp)

³Ph.D. (工学) 慶應義塾大学先導研究センター講師 (E-mail:shuichi@ae.keio.ac.jp)

⁴Ph.D. (工学) 慶應義塾大学名誉教授 (E-mail:kawashima@ae.keio.ac.jp)

本研究では、道路勾配と電気自動車の消費電力の関係を定量化するための経路問題に関する検討を行った。電気自動車を用いた経路問題では、電気自動車の内部状態（バッテリー性能、車両重量）や回生ブレーキの利用状況などによって消費電力や走行距離が変化するので、従来の自動車の経路問題とは異なる面が多い。本研究では、道路状態を考慮した消費電力算出手法を提案し、実際に測定した標高データを用いて道路勾配等の要因が電気自動車の経路問題に与える影響を考察した。

キーワード：電気自動車、最適経路問題、回生ブレーキ、勾配

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。また、2020年までにEVの充電に用いる普通充電器を現在の約2万基から200万基に、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 (Fig. 1 参照)¹⁾。

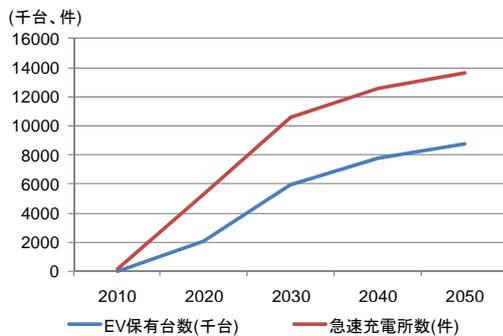


Fig. 1 EV保有台数と急速充電所数の見通し

現在、EV普及における課題として、以下の3点が

指摘されている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

特にEVの走行可能距離に関しては、2010年の段階では、ガソリン車に比べ短く、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は減速時、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。そのため走行する道路勾配によって消費電力量が変化を受ける。しかし、現在のEVに関する研究は、EV導入によるCO₂削減といったような環境問題に対する研究³⁾やEV内部の機械的な効率改善に関する研究⁴⁾が多く、道路状況や走行方法に関する研究は少ない。

既に販売されているEVには、電池残量と走行可能距離を示すことが出来るものも存在するが、その値は道路勾配などの理由から通る経路、巡回路等により大きく変わってくる。

本研究では、道路勾配が電気自動車に与える消費電力量の算出に焦点を当て、道路勾配と消費電力量、回生ブレーキによる電力消費量に関するモデルを作成す

る。このモデルを用いて、複数の立ち寄り地点を巡回する制約下において、経路や勾配を考慮することによる消費電力量の削減効果の可能性、最も消費電力の少ない経路の導出などを行った。

具体的には、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経路と、本研究で活用する勾配を考慮した消費電力量算出モデルを用いて計算した最小消費電力巡回経路との比較を行う。本研究における実際の検討地域として、長崎 EV&ITS プロジェクト⁵⁾で未来型観光ドライブを目指しレンタカーとして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EV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。本研究のフローを Fig. 2 に示す。

本来、観光交通は観光を行う人々の効用を最大化するのが目的であり、最小消費電力量や最短距離で巡回するといった行動を本質としていない。しかし、今回はEV走行データの収集等の関係から、便宜上福江島における観光スポットに着目し、島内を周遊する際の消費電力量を基準に検討することとした。

また、日本郵政が2011年度から集配車にEVを1,000台導入するといったように、EVが社会に普及することが予測される。今後は商用車におけるEVの導入も進んでいくと考えられる。郵便や宅配便の経路を選定する際、既知の道路情報から経路をあらかじめ選定しておく必要がある場合に本研究は有効であると考えられる。

2. 消費電力量モデルの検討

2.1. 緯度、経度、標高からの勾配抽出

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、消費電力量を算出する上で非常に重要である。

また、道路勾配に関しては、今後のデジタル道路地図(DRM)の整備をする際に標高情報を付加することが検討されているが、EV普及を視野に入れると、EVの走行性能なども考慮した社会資本として仕様の策定が必要である。

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 DRMを任意の間隔に区切った地点に最も近い位置にあるデ

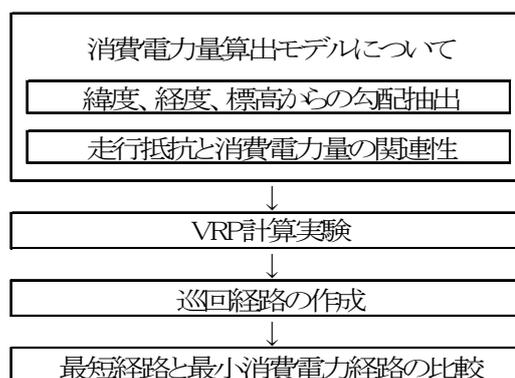


Fig. 2 本研究のフロー

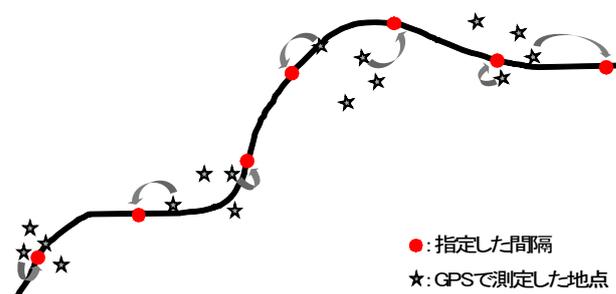


Fig. 3 標高データの当てはめイメージ

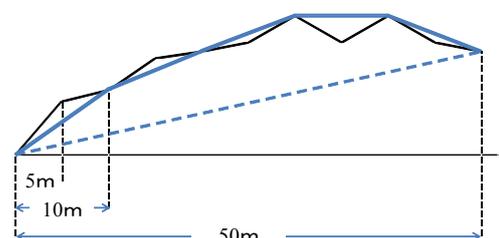


Fig. 4 勾配を設定する間隔のイメージ

ータの標高をその地点の標高と仮定した。Fig. 3として、この標高データの当てはめに関するイメージを示す。

なお、本研究では、勾配を設定した任意の間隔を5, 10, 50, 100[m]とし、それぞれの勾配を算出した (Fig. 4 参照)。4つの間隔のデータを作成した理由としては、今回使用したGPS端末の標高に対するあまり精度が高くないということから、勾配データへのGPSの測定誤差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、逆に勾配を詳細に示すために標高の間隔を小さく設定し、データの違いを考察した。このそれぞれの設定間隔で標高の変化を表した例が Fig. 5 である。この図から勾配の設定間隔が短いデータほど勾配の変化が大きいデータになることが見

て取れる.

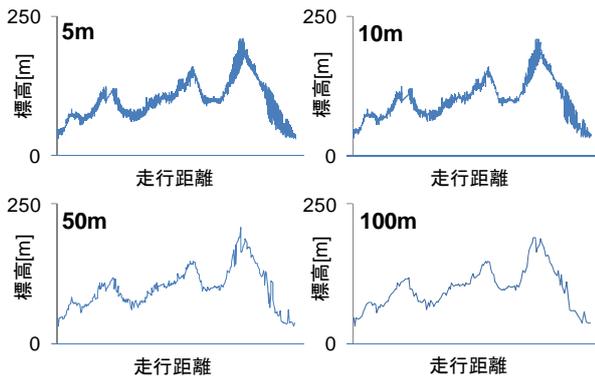


Fig. 5 設定間隔における標高の変化の例(全長約15km)

2.2. 走行抵抗と消費電力量の関連性

EV の消費電力量に関する既存のデータが入手できなかったため、既存の研究などを参考に走行時の自動車にかかる走行抵抗 F [N]と走行距離や勾配に応じて消費電力量[Wh]が変化すると仮定した。また、本研究でのEVの走行時は、速度40[km]で等速走行すると仮定した。その際にEVにかかる走行抵抗は以下の通りである⁶⁾。

$$F = F_r + F_w + F_a + F_g \quad (1)$$

$$F_r = \mu m_t g \quad (2)$$

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

$$F_w = \rho C_d S v^2 / 2 \quad (3)$$

(F_w : 空気抵抗[N], 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])

$$F_a = (m_t + m_n) a \quad (4)$$

(F_a : 加速抵抗[N], 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])

$$F_g = m_t g \sin \theta \quad (5)$$

(F_g : 登坂抵抗[N], θ : 斜度 [rad])

式(1)のモデルとなるEVとしては、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 とした。i-MiEV に関して公表されている総電力量と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。

また、回生ブレーキによる電気回収の作動条件は、

転がり抵抗と空気抵抗の合計が重力によって打ち消されると計算される時と仮定した (Fig. 6)。

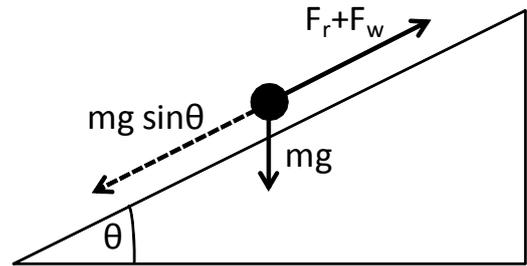


Fig. 6 回生ブレーキの作動条件

次に、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^{7,8)}。

3. 最適巡回経路の計算手法

VRP では、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、その配達デマンドを満たす最適巡回経路を決定するため、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) を用いて最適巡回経路を探索する計算法を開発している⁹⁾。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する。更に 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。これら本提案手法で適用した SA 法のアルゴリズムは以下のように表現できる。

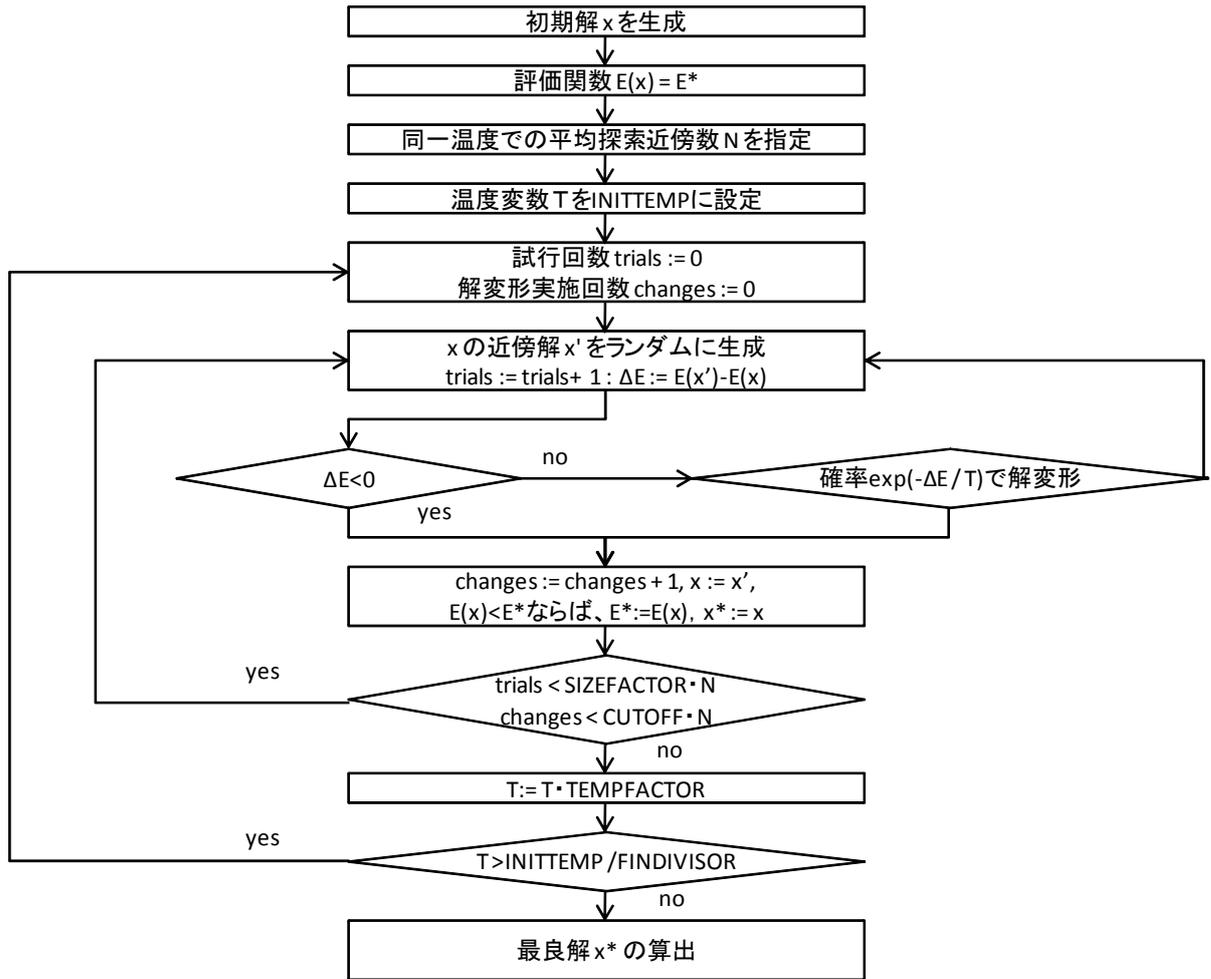


Fig. 7 今回使用した SA 法のアルゴリズム

- 1 初期解 x を生成
- 2 評価関数 $E(x)$ 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 step6へ
- 9 $T := T \cdot TEMPFACOR$
- 10 $T > INITTEMP / FINDIVISOR$ なら step5へ

- 11 最良解 x^* の出力

ここで, アルゴリズム中の Johnson et al ¹⁰⁾ 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。今後五島における走行データなどを収集することで、ノード数が多い大規模な問題や、時間帯制約、消費コスト制約がある複数の車両による巡回路決定等への拡張を視野に入れているため、筆者らの開発したVRPの計算法を用いて計算することとした。

4. 計算実験および考察

4.1. 計算機実験の概要

2章で作成した消費電力量算出方法と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、五島列島の福江島 (Fig. 8 参照) 内にある6つの教会を最小消費電力で巡回するという問題として解いた (Fig. 9 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、ノードからノードへの最小消費電力経路に関して、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巡回経路を求めた。

また、計算機実験で得られたルートを実走し消費電力量を計測した。実走行には、三菱自動車株式会社のi-MiEVを使用した。i-MiEVは使用電力量、残存電力量の表示を行うことが出来ないため、充電時のスタンドに表示される電池残量、追加電力量から巡回路の実際の消費電力量を計測した。走行台数は1台、走行回数は巡回経路、巡回経路の逆走行それぞれ1回ずつである。

3章に示したSAのパラメタの値は、Johnsonら⁷⁾の推奨している値から、次のように定めた。

$$TEMPFACTOR = 0.95 \quad (T_{n+1} = 0.95T_n)$$

$$SIZEFACTOR = 8$$

$$CUTOFF = 0.2$$

$$INIT_PROB = 0.4$$

$$FINTEMP_FACTOR = 80$$

この計算機実験および実走行における結果をTable. 1に示す。また、EVの走行経路はFig. 10のようになった。

4.2. 計算機実験結果の考察

本節では、4章1節での結果をもとに実験の考察を行う。Fig. 10に示す通り、最少消費電力巡回路

と最短巡回路は同じルートであった。Table 1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。

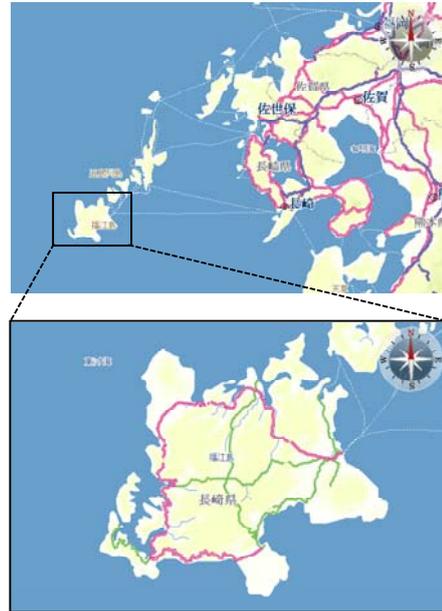


Fig. 8 長崎県五島列島福江島

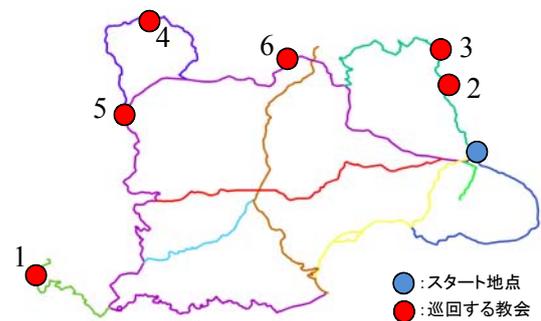


Fig. 9 計算機実験対象のネットワーク

Table 1 算出された巡回路における消費電力量

データ		消費電力量[Wh]	
		通常走行	逆走行
消費電力量算出モデル	間隔 5m	152,590	152,897 (+0.20%)
	間隔 10m	54,387	54,394 (+0.01%)
	間隔 50m	11,699	12,152 (+3.87%)
	間隔 100m	5,729	6,569 (+14.66%)
実走行		14,600	15,100 (+3.42%)

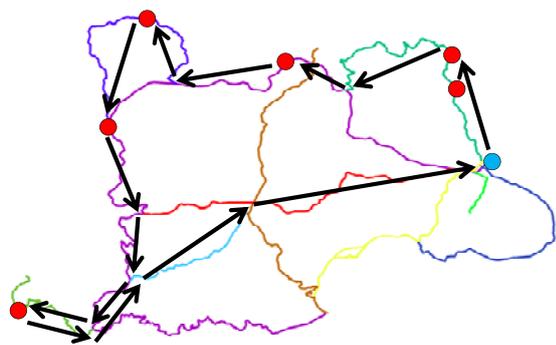


Fig. 10 最小消費電力巡回路と最短巡回路が変わると

Fig. 10, Table. 1 より, 巡回経路は最短巡回路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ということが見て取れる. これは同じ道を行く場合でも, 走行方向によって勾配の緩急が異なるので, 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 (Fig.4 参照), 勾配変化の数が多いデータになる (Fig.5 参照) ことが原因と考えられる.

標高の設定間隔を短くすればするほど消費電力量算出における精度は上がると理論上は考えられる. しかし実際は設定間隔を短くしすぎると, 今回使用した道路データでは, 標高の部分での誤差が大きくなってしまいう問題がある. Fig.11 は同じ道路 (27 番道路の一部) での標高の違いである. 設定間隔が 5m, 10m では, 計測した標高の値の違いが非常に大きいことがわかる. 標高の違いが大きいと勾配の緩急が実際よりも多くなるため, 登板抵抗が増え, 消費電力量も実際より増えてしまう. しかし設定間隔が 100m ともなると実際の道路勾配が反映され難くなり, 登板抵抗が少なくなってしまう. そのため本研究では, 50m の算出消費電力量が実走行の消費電力量に一番近かったのではないかと考えられる.

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.

その結果, 同じ巡回経路でも走行方向による勾配, 消費電力量, そして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ため, 道路勾配の影響が EV の消費電力量に

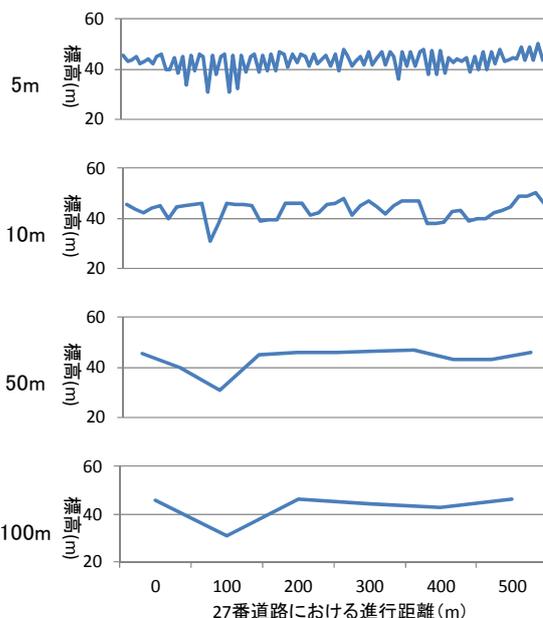


Fig. 11 設定間隔における標高の変化の例 (上から間隔 5m, 10m, 50m, 100m)

与える影響が小さくないことがわかった. そして勾配を設定する間隔によって, 今回作成した消費電力量算出モデルでは算出される消費電力量が変わってくるということもわかった.

以上より, 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社会資本整備における課題があるといえる.

今後の研究課題としては, 消費電力量算出モデルを改良し, EV の実走行に沿ったものに改良する試みを行う必要がある. また, 五島列島における複数台の EV の走行データなどを取得し, 本研究のモデルに組み込み計算実験を行うことや, 充電施設における充電時間などをモデルに組み込むなど本研究で提案したモデルの長所を活かした研究を考えていきたい.

このように巡回路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, EV の運用などを考える上で重要な視点となる.

参考文献

- 1) 環境省 (2010) 『次世代自動車普及戦略』 <http://www.env.go.jp/air/report/h21-01/index.html> [2010, September 10].
- 2) 国土技術政策総合研究所(2010)『充電施設の情報流通仕様 (案) に関する検討会について』 2-4
- 3) 武内博孝, 谷内利明(2010)『カーシェアリングにお

- ける小型 EV 導入による CO2 削減効果』電気学会産業電力電気応用研究会資料 10(1-9)37-42.
- 4) 河村篤男, 稲坂翔, 弦田幸憲(2008)『10-15 モードでの電費向上のためパワートレイン設計に関する一考察』電気学会自動車研究会資料 8(11-18)11-16
 - 5) 長崎県産業労働部 EV プロジェクト推進室(2010) <http://www.pref.nagasaki.jp/EV/EV&its/> [2010, September 10]
 - 6) 電気学会(1999)『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
 - 7) 財団法人鉄道総合技術研究所(2003)『エネルギー回生型車両の開発について』
<http://www.rtri.or.jp/press/h15/aug20.html> [2010, September 10].
 - 8) 株式会社 GS ユアサ(2005)『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』
http://www.gs-yuasa.com/jp/technic/vol2_2/pdf/002_2_025.pdf [2010, September 10].
 - 9) 平島浩一郎, 古谷秀樹, 川嶋弘尚(2002)『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 19(2) pp.275-282.
 - 10) Johnson,D.S., Aragon,C.R., McGeoch, L.A. and SchEVon,C. (1991) *Optimization by simulated annealing:an experimental EValuation, part II, graph coloring and number partitioning, Operations research*, 39, 378-406.

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。また、慶應義塾大学大門樹准教授からは様々な有益なアドバイスを頂きました。ここに感謝の意を表します。

AN OPTIMAL ROUTING PROBLEM OF ELECTRIC VEHICLES CONSIDERING ROAD GRADIENTS

Taro SHIMIZU¹, Hisafumi KOKUBUGATA², Shuichi MATSUMOTO³, Hironao KAWASHIMA⁴

¹B.A. (Engineering) Keio University, Faculty of Science and Technology.
(E-mail: taro-smz@a8.keio.jp)

²M.S. (Engineering) Teacher, Keio Girls Senior High School.
(E-mail: kokubu@mita.cc.keio.ac.jp)

³Ph.D. (Engineering) Senior Assistant Professor, Keio University, Advanced Research Center
(E-mail: shuichi@ae.keio.ac.jp)

⁴Ph.D. (Engineering), Professor, Keio University, Faculty of Science and Technology.
(E-mail: kawashima@ae.keio.ac.jp)

Electric Vehicle (EV) is coming up as an eco-friendly next-generation vehicle. A lot of companies release plans to sell EV, and then it is expected that EV becomes a means of transportation in daily life in the near future.

This study aims to pose an optimal routing problem of EV considering gradients (slopes) of roads. An optimal routing problem of EV differs from that of conventional cars, because electricity consumption and cruising range vary with inner states (battery performance and weight) of EV and the use of regenerative brake. In this study, a calculation model of electricity consumption of EV considering gradients is proposed. The influence of road gradient on an optimal routing of EV is also evaluated by using elevation data collected during an experimental run.

Key Words: *ELECTRIC VEHICLES, OPTIMAL ROUTING PROBLEM, GRADIENT, REGENERATIVE BRAKE*