

EVの走行可能範囲を予測するナビシステム

Car navigation system that shows the driving range of an electric vehicle

安士 光男, 福田 達也, 大澤 進, 藤井 馨一郎
Mitsuo Yasushi, Tatsuya Fukuda, Susumu Ohsawa, Kyoichiro Fujii

要旨 EVでは航続距離が短いという課題を抱えていることから、バッテリーの性能向上の他にも様々な方法で課題解決を図ろうとしている。例えばナビゲーションには走行可能範囲を案内することや目的地までの消費電力を予測することが望まれている。EVの走行可能範囲は、バッテリー残量、道路の状態、車の状態、運転行動に依存する。そこで本論文ではモデル式を作成し、走行可能範囲を予測するシステムを開発した。このプログラムは、車両側よりバッテリー残量情報と車両の速度、加速度を取得し、予めシステムに入力した車重などのデータと合わせて走行抵抗等を計算し、走行可能距離を推測する。またこのプログラムの有効性を実験的に検証する。

Summary System, that estimates the cruising range of the electric vehicles and displays the range on the map, is developed. The driving range of an electric vehicle is highly dependent on the battery state of charge, the traffic jam, vehicle performance, and driver's action. With the parameters fed to the mathematical model, this system allows accurate prediction of driving range. This report describes the result of "Effectiveness of the program (that composes the system above)" that is experimentally verified.

キーワード：電気自動車, 燃費, 効率, エネルギー回生, 充電インフラ, エネルギーマネージメント

1. はじめに

二酸化炭素排出による地球温暖化問題といった環境意識の高まりと共にEVは有望な次世代自動車として開発が進んでいる^(1,2)。EVのバッテリーは高価であり重量も重いので、ナビゲーションでこれらの欠点を補う事が望まれている。EV向けナビゲーションに必要な機能は、充電ステーションの案内と誘導、エコ・ルートの探索、航続距離の正確な予測と適切な充電時期を提示することである^(3,4)。今回は、電気自動車の



図1 EV

走行可能範囲の正確な推定に必要な要素として、電力消費量推定式についての検討を行ったので、これを報告する。

2. 方法

ガソリンエンジンの車両では、エンジンの熱力学的モデルと車両の運動方程式から燃料消費量を理論的に求める手法が知られている^(5,6,7,8,9,10,11,12)。その手法を電気自動車に適用することを考えた場合、加速時と巡航時についてはよく一致するが、減速時については別途回生エネルギー等についての考慮が必要となる。平坦な道路を走行している場合、加速時に消費されるエネルギーの多くが車両の前進の運動エネルギーおよび回転機構の運動エネルギーとして保存される。走行中アクセルを離しブレーキを踏んでいない状態では、慣性走行で速度を低下させながら走り続ける。この状態では、加速時に保存された運動エネルギーが、路面の摩擦抵抗や空気抵抗等の走行抵抗等の仕事として消費される。(図2)

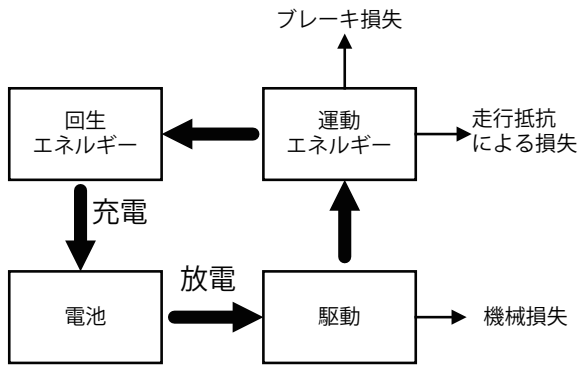


図2 EVのエネルギーの流れ

また、電気自動車の走行距離を向上させる手段として、回生制御によるエネルギー回収がある。加速のために必要なエネルギーは車両の前進の運動エネルギーおよび回転機構の運動エネルギーに変換され蓄えられている。これらのエネルギーは、減速時には前述の路面摩擦抵抗や空気抵抗などの仕事として消費される他、電氣的回生エネルギーとして回収される。(図3)

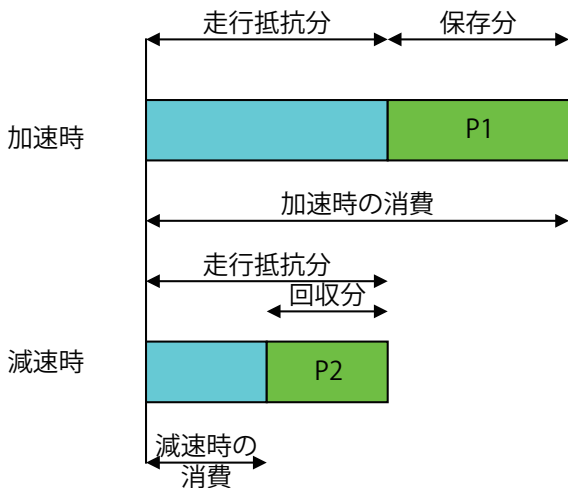


図3 加減速時のエネルギーの流れ

今回電気自動車向けに回生エネルギーを考慮した推定手法の開発が必要と考え、新しいモデル式を作成し、走行可能範囲を予測するシステムを開発した。走行可能範囲は、バッテリー残量、道路の状態、車両の状態、運転行動と回生エネルギーに依存する。バッテリー残量は、車両側よりSOC(充電率)の値を取得した。走行の状態は、平均速度、加減速情報を取得した。車両の状態は、車重、空気抵抗、エンジン効率等のデータを使用した。今回、減速時に回収されるエネルギー割合を回収率 β として定義した。(図3)

$$\beta = \frac{\text{減速時のエネルギーの回収分}}{\text{加速時のエネルギー保存分}} \quad (1)$$

回収率は0から1の値であり、大きいほど回収率が高い。この回収率の有効性を実験的に検証した。

3. 瞬間エネルギー消費量推定式

3.1 理論式

一般的に加速時と巡航時に車両の走行抵抗は次のように表される。

$$Rt = \mu Mg + kv^2 + Mg \sin \theta + (M + m)\alpha \quad (2)$$

ここに、

Rt : 総抵抗

μ : 転がり摩擦抵抗

M : 車両質量

g : 重力加速度

θ : 路面勾配

m : 加速時回転部分相当質量

α : 車両加速度

k : 空気抵抗係数

車両の消費エネルギーは、走行抵抗と移動距離と正味モータ効率と伝達効率の積である。加速時と巡航時の消費エネルギーは次のように表される。単位は単位時間当たりのエネルギーで(kW/sec)である。

$$P_{t1} = P_{idle} + \frac{(\mu + \sin \theta)Mg}{\varepsilon\eta} \times V + \frac{\kappa}{\varepsilon\eta} V^3 + \frac{M + m}{\varepsilon\eta} |\alpha| \cdot V \quad (3)$$

ここで、 ε は正味熱効率、 η は総伝達効率である。

走行抵抗が負の場合は回生状態であり、電力の消費エネルギーは次のように表される。

$$P_{t2} = P_{idle} + (\mu + \sin \theta)Mg \times V + \kappa V^3 + (M + m)\alpha \cdot V \quad (4)$$

3.2 実証式

車両の消費エネルギーは、走行抵抗と移動距離と正味モータ効率と伝達効率の積である。理論式ではモータの効率と駆動効率は一定と見なしている。しかし、実際にはモータ回転数、トルクの影響で変動する。また、ガソリン車の燃料推定式では熱効率が出力とエンジン回転数に依存する性質がある。そこで、実証式では変数増減法で説明変数の選択を行い、次のモデルのように説明変数と

して速度の2乗項をいれて重回帰モデルを作成した。ここで a_1 , a_2 は常数として扱い、加速時の説明変数を3つ(k_1 , k_2 , k_3)にしている。車両の加速度と道路勾配から重力の加速度との合計を合成加速度とすると、合成加速度が正の場合の実証式は次のようになる。

$$P_1 = k_1 + k_2 \cdot |\alpha + g \sin \theta| \times V + k_3 \cdot (V^3 + a_1 \cdot V^2 + a_2 \cdot V) \quad (5)$$

合成加速度が負の場合の実証式は次のようになる。

$$P_2 = k_1 - \beta \times k_2 \cdot |\alpha + g \sin \theta| \times V + k_3 \cdot (V^3 + a_1 \cdot V^2 + a_2 \cdot V) \quad (6)$$

回帰分析から求める理論式(3)と実証式(5)は似た構造を持っている。実証式の第一項は速度に依存しない成分で、全く同じ意味をもつ。実証式の第二項は勾配抵抗と加速抵抗分のエネルギーであり、速度増加による運動エネルギーの増分と位置エネルギーの増分を表し、理論式の第二項の勾配部分と第四項の加速部分に相当する。実証式の第三項は、理論式の第二項の転がり抵抗成分と、第三項の空気抵抗成分に相当する。減速時に実証式(6)の第二項の β は位置エネルギーと運動エネルギーの回収分である。実測値と推定値を図4に示す。

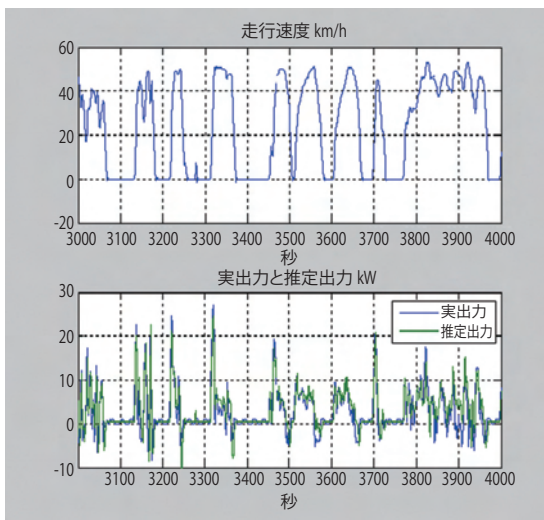


図4 市街地走行時の実測値と推定値

4. 区間エネルギー消費量推定式

前章までに示したエネルギー消費量は、実証式(5), (6)に単位時間毎の移動速度 V と移動加速度 α を入力することで求めることが出来る。ところが、走行可能範囲を推定する場合は、これから走行する全行程

における単位時間毎の速度と加速度まで定義しようとすると、計算量が膨大になってしまう恐れがある。そこで、ある程度まとまった区間における走行速度、加速度の平均値を用いてエネルギー消費量を推定する手法について検討する。

まず、区間における消費エネルギーについて検討する。(5), (6)式は瞬時の消費エネルギーの式であるが、これらの式を用いて単位時間の走行エネルギー P の区間実証式は次のように定義する。

高度差 Δh が正の場合

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = k_1 + (1 - \beta) \cdot \frac{k_2}{2} \cdot |\bar{\alpha}| \cdot \bar{V} + k_2 \cdot g \cdot \Delta h + k_3 \cdot (\bar{V}^3 + a_1 \cdot \bar{V}^2 + a_2 \cdot \bar{V}) \quad (7)$$

高度差 Δh が負の場合

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = k_1 + (1 - \beta) \cdot \frac{k_2}{2} \cdot |\bar{\alpha}| \cdot \bar{V} + \beta \cdot k_2 \cdot g \cdot \Delta h + k_3 \cdot (\bar{V}^3 + a_1 \cdot \bar{V}^2 + a_2 \cdot \bar{V}) \quad (8)$$

但し上記は加速と減速の時間が概ね等しく、速度がそれほど大きくなく速度変化が小さい場合に成り立つ。これらの推定式を定義することで、実際に活用されている道路ネットワークデータを用いた実運用が可能となる。

道路ネットワークデータの構成要素の一つとして、リンク(道路区間)がある。リンクは、ノード(道路点)とノードの間を1つの単位として定義されたものである。リンク情報にはリンク長(距離)データと、走行日時における旅行速度や平均加速度の予想データが含まれる。一方、上記の道路ネットワークデータに示される当該リンクの旅行速度は、あくまでも予測のデータであり、実走行における状況と合わない可能性がある。

そこで今回は走行データから実証検証するために、走行データから求められた道路区間における実際の旅行時間を用い、この値を推定式に適用した上でエネルギー消費量を推定し、車両から得られた実際のエネルギー消費量との差異によって評価する手法を用いることとした。また、道路区間の定義は上記のリンクの代わりに、旅行区間とした。旅行区間はここでは「一旦発進して走行した後に停止して、次に発進するまで」

と定義する。市街地走行では信号機等で停止する機会が多い。旅行区間間隔は、複数のノードを通過して複数のリンク間の合成であると考えられる。その旅行区間について、旅行距離Dと旅行時間T、旅行速度Sを求めた。区間内で平均速度を求めて(7)、(8)式の予測式で区間の消費エネルギーを推定した。

5. 推定式における各種パラメータの決定

5.1 実証式の説明変数k1, k2, k3パラメータの導出

自動車の実証式と電力消費の関係を解析するために、高速道路走行と市街地走行と渋滞からなる走行パターンを設定し、平坦路において往復走行試験を行った。試験は晴天で無風の日にいった。k1, k2, k3パラメータは瞬時の消費エネルギー推定式(5)式を用いて同定する。なお、平坦な道路を用いて、出発地点と到達地点を同じ場所にすることにより道路勾配の影響を無視できると考え $\theta=0$ とした。

5.2 回収率 β パラメータの導出

走行パターンは平坦な市街地走行からなる走行パターンで、停止しているデータを省いたものを用いた。旅行区間での実証式(7)において加速項(第二項)の消費エネルギーを P_{acc} とすると、これは全消費エネルギーから第一項と第四項成分を減じたものである。

$$P_{acc} = P - k_1 - k_3 \cdot (\bar{V})^3 + a_1 \cdot \bar{V}^2 + a_2 \cdot \bar{V} \quad (9)$$

上記(9)式を実証式(7)に代入して、次式を得る。

$$\beta = 1 - \frac{2 \cdot P_{acc}}{k_2 \cdot |\alpha| \cdot \bar{V}} \quad (10)$$

5.3 回帰分析によるパラメータの導出

実験車両は、最高出力47kW、車両重量1080kgの電気自動車である。バッテリー容量は16kWhである。SOC(充電率)、車速、電力消費量データは、車両より入手した。データは1秒毎に記録した。

被験者は、日常的に乗用車を運転する40代の男性1名であった。実験は2010年7月に行った。川越市内を出発し、平坦な道路を東松山方面へ往復走行をした。車室内では25度の設定温度でエアコンを作動させた。データは1秒間隔で速度、加速度、消費電力を収集した。ただし、平坦な道路を走行したため $\Delta h=0$ とする。回帰分析により各項の常数を求めた。

5.4 実測値での回収の効果

電気駆動による効率を表す指標として、電力消費率(電費)=走行時電力消費率(Km/kWh)を用いる。消費電力は、1時間当たりの電力消費(kWh)を用いる。

走行区間40.06km、全体の走行消費電力は5.1kWh、電費7.86km/kWhである。平均速度は23.6km/h、平均加速度1.22km/h/sである。実消費電力の平均は3.0kWであり、加速時の消費電力分は1.33kWである。走行抵抗で、加速以外の空気抵抗、転がり抵抗等の合計は2.6kWである。回収分は0.99kWであった。回収率は74%である

6. 推定式の精度の検証

6.1 瞬間推定式の精度検証

被験者は、日常的に乗用車を運転する40代の男性1名であった。実験は2010年7月に行った。川越市内を出発し、平坦な道路を鶴ヶ島方面へ往復走行をした。データは1秒間隔で速度、加速度、消費電力を収集した。

図5に1分毎の平均速度の変化を示す。

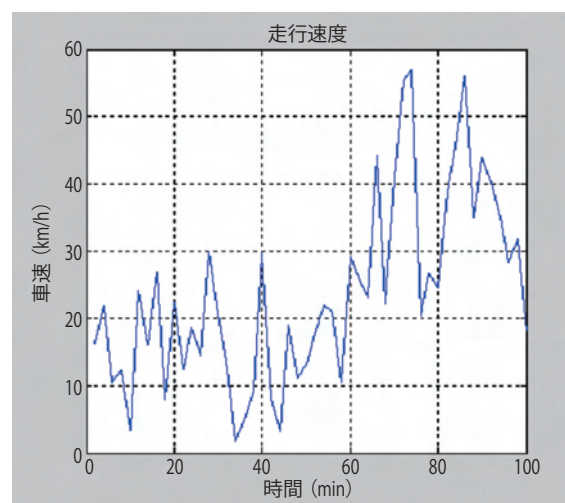


図5 市街地走行時の平均速度の変化

前半は渋滞の多い走行であり、後半は空いている国道であった。走行距離は40.06km、平均速度23.6km/h、平均加速度1.25km/h/s、走行時間1時間42分であった。

図6に、SOCの変化を示す。

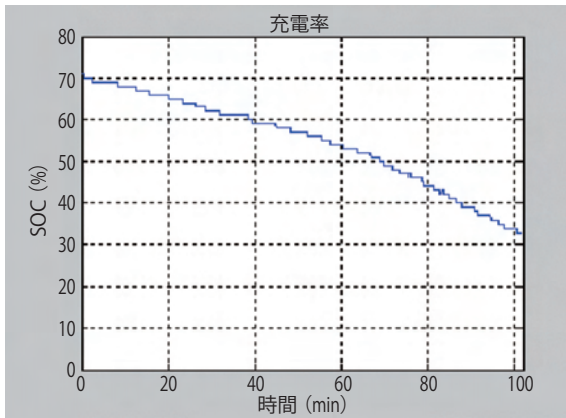


図6 SOCの変化

SOCは77%から33%に低下した。また、SOCの値の変化より求めた単位時間当たりの消費電力は5.9kWhであった。

図7に、瞬間の実電力と推定電力の関係を示す。

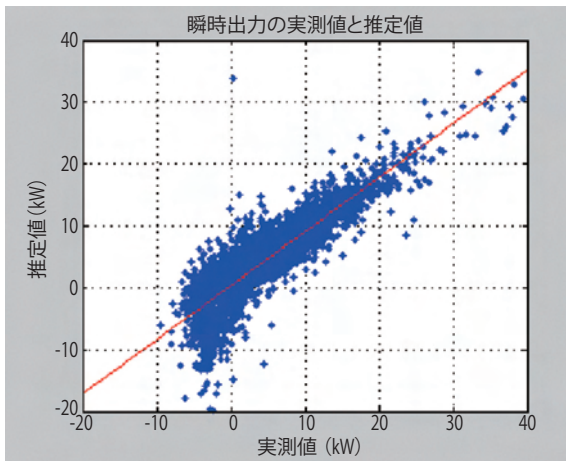


図7 電力の推定値と実測値

瞬間出力の実測値と推定値の相関係数は0.87であった。

この結果から、パラメータが十分有用であると判断した上で、区間での消費エネルギー量の推定を行うこととした。

6.2 区間推定式の精度検証

次に、今回の全走行行程を旅行区間に分割しての解析結果について示す。

全旅行区間の平均旅行距離は759m、平均旅行速度は23.9km/hであった。また、単位時間当たりの実消費エネルギーは2.89kWであり電力消費率（電費）は6.79(km/kWh)であった。

旅行区間毎の消費エネルギー量を、(7)式を用いて求めた。その結果、単位時間当たりの予測消費エネルギー

ギーは2.82kWとなり、単位時間当たりの実消費エネルギーとの差異は2.4%であった。

図8に、旅行区間における消費エネルギー量の実測値と推定値の時間推移を示す。相関係数は0.83であった。

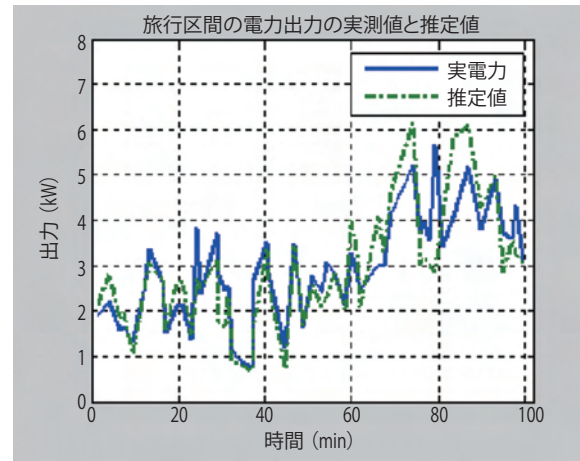


図8 区間電費推定式の予測と実際

走行区間の累積結果について、縦軸を消費エネルギー量の積算値として図9に示す。

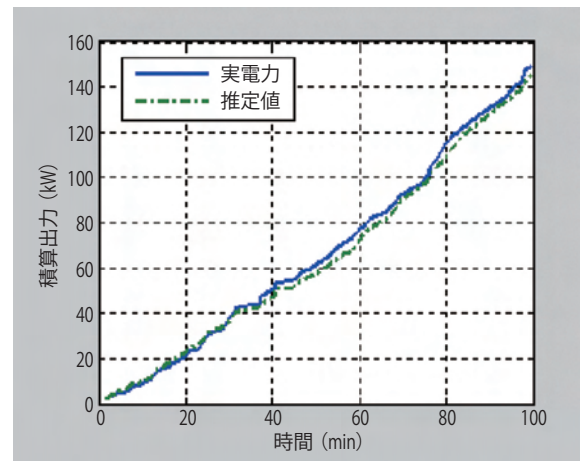


図9 予測電力と実際の電力の違い

当該走行区間全体で(7)式を用いて消費エネルギー量を旅行区間毎に推定した値は、全体にわたって実消費エネルギー量との差異が5%以内であることが分かった。この結果から、今回実験に使用した車両に対し、(7)式の有用性が認められる。

以上の結果により、区間毎の平均速度と平均加速度が分かっている場合、区間におけるエネルギー消費量を推定出来ることが示された。この手法を用いることにより、これから走りしようとするルートの情報から道路ネットワークデータから参照出来れば、走行可能範囲の予測が可能になることが分かる。

7. ハイブリッド車とガソリン車への適応

電費推定式はガソリン自動車とハイブリッド車へも適応できる可能性がある。今回はこの可能性の検証の一環として、3種類の車両について回収率を計算した。

車両Aは、排気量1.3L、車両重量1000kgのガソリン自動車である。車両Bは排気量3.0L、車両重量1940kgのガソリン自動車である。車両Cは排気量1.8L、車両重量1490kgのハイブリッド自動車である。但し、ハイブリッド車では走行開始時のバッテリー容量と終了時のバッテリー容量が同じであることを確認した。

速度、加速度の実測データより、転がり抵抗、空気抵抗、加速抵抗の各走行抵抗と回収率を算出した。実験コースは平坦な市街地17.8kmを走行した。車両Aは燃費13.2km/L、平均速度27.5km/h、回収率は14%であった。車両Bは燃費7.2km/L、平均速度26.7km/h、回収率は11%であった。車両Cは燃費26.1km/L、平均速度26.4km/h、回収率は77%であった。

表1 ガソリン車、HEVの回収率

車両	形式	排気量	車重	速度	燃費	回収率
A	Gasoline	1.3	1000	27.5	13.2	0.14
B	Gasoline	3.0	1940	26.7	7.2	0.11
C	Hybrid	1.8	1490	26.4	26.1	0.77

以上により、ガソリン自動車ならびにハイブリッド自動車における回収率の検討を行った。この結果を本稿にて説明した消費エネルギー推定式に適用することで、従来より精度の高い推定結果が得られるものと考ええる。

8. 結果

電気自動車の電費推定式を作成した。加速に要するエネルギー成分を、減速時に回収する割合(回収率)は74%であった。瞬間電力の実測値と推定値の差異は1.1%であり、相関係数は0.87であった。また、旅行区間の実測値と推定値の差異は2.4%であり、相関係数は0.83であった。

目的地までの予想消費電力は、SOCとリンク間の平均速度から計算し、実消費電力との差異5%以内で推定可能であった。

また、今回作成した推定式を従来のガソリン車とハイブリッド車へ適用するための検討として、回収率の算出を行った。回収率はシステムとしてエネルギーを回収する割合であり、ガソリン車の場合は燃料カット時に相当する。

9. まとめ

電気自動車では航続距離が短いという課題を解決するための一助として、ナビゲーションで走行可能範囲を案内することが望まれている。今回電気自動車向けに回生エネルギーを考慮した新しい消費エネルギーの推定モデル式を作成し走行可能範囲の予測に必要な電力消費量の推定方法について検証した。この方法では、車両側よりバッテリー残量情報と車両の速度、加速度を取得し、予めシステムに入力した車重などのデータと合わせて走行抵抗等を計算し、精度の高い消費エネルギー量の推定を実現する。これを用いることで、精度の高い走行可能距離の推測が可能となる。

加速時にエネルギーは車両の前進の運動エネルギーおよび回転機構の運動エネルギーに変換され蓄えられている。減速時には運動エネルギーの多くが電気的回生エネルギーとして回収される。今回、減速時に回収されるエネルギー割合を「回収率」として定義した。回収率は0から1の値であり、大きいほど回収率が高い。今回の試算の結果としては、ガソリン車では0.2前後、電気自動車とハイブリッド車では0.7から0.8程度である結果が得られた。この回収率を考慮することで、電気自動車のみならずハイブリッド車やガソリン車においても、消費エネルギーの推定を高い精度で行うことが可能になると考える。またこのモデル式は応用機能として最少燃料消費量ルートの探索についても精度を高めることが可能である。

今後の課題として、高低差を考慮したルート探索、高速道路走行時についても検討したい。エアコン、ヒータ等の使用状況による影響も大きいと考えられる。電気自動車、ハイブリッド車とも様々な方式が実用化されつつあるので、今後は様々な対応の車両に適応する推定手法の開発が必要である。

- (1) 野田智輝：電気自動車，プラグインハイブリッド自動車普及に向けた経済産業省の取り組み，自動車技術，Vol.63, No.9, p.4-10 (2010)
- (2) 角知憲，広松新ら：交通機関のエネルギー効率に係わる技術的性格に関する検討：運輸政策研究 Vol.3.No.1 2000 p14-22
- (3) 伊東敏夫，杉野泰三，有吉正昭：高さ情報を利用した省エネルギーガイドランスの検討，自動車技術会 学術講演会前刷集，No48-10, 20105155, p15-18
- (4) 藤本博志，鈴木亨，角谷勇人：電気自動車の航続距離延長制御システム，自動車技術会学術講演会前刷集，No53-10, 20105437, p11-14
- (5) 大口敬，片倉正彦，谷口正明：都市部道路交通における自動車の二酸化炭素排出量推定モデル，土木学会論文集，No.695/IV-54(2002)
- (6) 大口敬，谷口正明，岡本智：実用燃費を規定する要因について，自動車技術会学術講演会前刷集 955, 1995-9, p17-20
- (7) 大口敬：燃費推定モデルを用いた道路交通施設整備効果の試算，土木計画学研究・論文集，No.12, p.575-582, 1995
- (8) 石谷久，深川正一 他：市街地走行における乗用車の燃料推定モデル，シミュレーション，Vol4.No.3第4巻第3号，pp.16-25, 1985
- (9) 村野昭人，鈴木武：湾岸エリア及び高速道路を走行するコンテナトレーラーの燃料消費量推定モデルの構築，国土技術政策総合研究所資料第198号，2004, p-11
- (10) 片山硬：交通流と燃料消費率に関する調査，日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集，Vol.2nd, p.489-494, 1993
- (11) 小鷹稔生：地方都市中心部における自動車の走行燃費の推定，日本機械学会・自動車技術会内然機関シンポジウム講演論文集，Vol.16th, p.337-342, 2000
- (12) 松木裕二：自動車の運転特性と燃料消費量の関係について，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.106, No.266, p.1-6, 2006

安 土 光 男 (やすし みつお)

カー技術部 ソフト研究開発部 開発2課に所属。主な経歴は，リラクゼーション機器の開発，生理心理情報処理，快適空間制御技術の開発を行う。現在はナビゲーションのエコ機能開発に従事。

福 田 達 也 (ふくだ たつや)

カー技術部 ソフト研究開発部 開発2課に所属。主な経歴はカー用CD, DVD, BT, iPod関連の製品及び技術開発。現在は，カーナビゲーション機能の技術開発に従事。

大 澤 進 (おおさわ すずむ)

カー技術部 ソフト研究開発部 開発2課に所属。主な経歴はLDのLBR開発，アナログ系IC開発，RF開発含めたDAB, XMラジオ受信機の開発。現在は，カーナビゲーションのエコ機能開発に従事。

藤 井 馨 一 郎 (ふじい きょういちろう)

カー技術部 ソフト研究開発部 開発2課に所属。主な経歴は半導体プロセス開発，RF 回路技術開発，デジタル放送用受信機開発を担当。現在は，カーナビゲーション製品の機能開発に従事。