

車載センサを用いたEVエネルギー消費ログDBの モデル構築とV2X効果推定

笛田 尚希[†] 萩本真太郎[†] 林 拓也[†] 讃井 峻^{††} 富井 尚志^{†††}

[†] 横浜国立大学大学院環境情報学府情報メディア環境学専攻 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{††} 横浜国立大学工学部電子情報工学科 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{†††} 横浜国立大学大学院環境情報学研究院 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

E-mail: †{fueda-naoki-yd,hagimoto-shintaro-tw,hayashi-takuya-hb,sanui-ryo-xn,tommy}@ynu.ac.jp

あらまし 本研究では自動車に搭載した簡易なセンサから得た日常的な走行ログを蓄積するデータベースの構築手法について述べる。本手法では、GPSや加速度センサによって収集された走行ログデータを電気自動車(EV)のエネルギー消費モデルに基づいて正規化し、エネルギーマネジメントに特化した多様な検索を効果的に実行できるようにする。EVのバッテリーにある電力を別の場所・時間帯に提供するV2X(Vehicle to X)の観点では、ガソリン車をEVに置き換えた場合にどの程度の電力をEVから賄うことができるかを、このデータベースの検索によって推測することができる。このデータベースおよびモデルの評価のために、実際にデータベースを構築するとともに、EVによる評価実験を行った。

キーワード センサデータベース、電気自動車、消費エネルギー推定、GPS、加速度センサ、スマートフォン、走行ログ、V2X

Model Construction of a Database for Energy Consumption Log of Electric Vehicles by Vehicle-Mounted Sensors, and Estimation of V2X Effects

Naoki FUEDA[†], Shintaro HAGIMOTO[†], Takuya HAYASHI[†], Ryo SANUI^{††}, and Takashi
TOMII^{†††}

[†] Department of Information Media and Environment Sciences, Graduate School of Environment and
Information Sciences, Yokohama National University

^{††} Division of Electrical and Computer Engineering, College of Engineering, Yokohama National University

^{†††} Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

79-7 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

E-mail: †{fueda-naoki-yd,hagimoto-shintaro-tw,hayashi-takuya-hb,sanui-ryo-xn,tommy}@ynu.ac.jp

Abstract In this paper, we propose a construction method of database that contains daily driving logs acquired by vehicle-mounted simple sensors. In this method, driving logs acquired by GPS and accelerometer are normalized by energy consumption model of electric vehicles (EVs). Then we can retrieve these logs variously specialized energy management. In terms of V2X, a system in which EVs communicate with power grid, buildings and houses to supply energy by either delivering electricity, we can estimate electric energy by searching this database. We constructed a prototype of the system, and evaluated the results of the estimations by using a real EV.

Key words Sensor Database, Electric Vehicle, Estimation of Electric Energy, GPS, Acceleration Sensor, Smart Phones, Logs from Driving, V2X

1. はじめに

人類の技術革新によって、温室効果ガスの排出量増加による地球温暖化、石油などの化石燃料の枯渇といった問題が発生し、世界各国で省エネルギーへの要求が高まっている。その中で、現在の日本におけるエネルギー消費量のおよそ4分の1が運輸部門から、またそのおよそ9割が道路交通分野からであることから、道路交通分野からの省エネルギーが必要とされている[1]。

道路交通分野における省エネの例として、まず個々のドライバーによる運転改善が挙げられる。しかし、現状での自動車のエネルギー消費量を把握する手段は、満タン法などの大雑把すぎる手法や、瞬間燃費計を使用するといった細かすぎる手法でしかない。これらの情報は運転状況が個々に異なるドライバーにとって必ずしも有効な情報とはなっていない。また近年では高性能のカーナビゲーションシステムを用いることで、時間や距離、通行料金だけではなく燃費を考慮したルート選択を行う事が可能になってきている。さらにドライバー自身も運転を行う際に、「この道路はエネルギーを多く使いそうだ」、「この運転の仕方は燃費に良いだろう」などの経験から得られる暗黙知を持っている。しかし、ドライバーが実際に行ったアクションがどの程度燃費に影響を及ぼすものなのか、どの場所が燃費に影響を与えている場所なのか、という情報を定量的に表すことは難しい。

また、道路交通分野における省エネを実現する媒体として、電気自動車 (Electric Vehicle : EV) が注目を集めている。EV はこれまで主流であったガソリン車 (GV) やハイブリッド車 (HV) に比べ、燃料コスト、二酸化炭素排出量が大幅に削減される。しかし、現状において EV は GV や HV に比べ普及が進んでいない。その理由の一つとして、実際に EV に乗り換えた場合にどの程度の効果が期待できるのか、EV が自分のライフスタイルに合うのか、ということが事前に見積れないという点が挙げられる。例えば日産の電気自動車 LEAF [2] は 24kWh のバッテリーで 228km の走行が可能とされているが、実際に自分が普段運転するルートで、自分なりの運転をした場合も同じような電費で走行できるのかということとはわからない。

ここで、EV の大きな特徴の一つとしてバッテリーを搭載していることが挙げられる。このバッテリーを用いて、運転に使用しない余剰電力を別の場所、もしくは別の時間帯へと供給を行う V2X (Vehicle to X) への応用が期待されている。その一方で個々の EV のバッテリー容量は小さく、また寿命も長くはないため、現状では V2X は不安定であるという見方もある。そのため V2X を安定的に実現するためには、ある程度のマスをもって安定的な供給を実現することが望まれる。つまり EV を電力の供給源とするためには 1 か所に多くの EV が集まって十分な電力を与えることが望ましい。例えば、通勤などの一定の使い方をしていない EV が事業所に数台～数十台程度集まり、各 EV が少しずつ事業所に電力を与えるというようなスタイルである。しかし、個々の EV は運転状況が異なるため、各 EV がどの程度運転で電力を必要とするのかがわからなければ、V2X としてどの程度電力提供が行えるのかということがわからない。さらに通勤の場合、帰宅にどの程度電力を使うのかがわからないまま電力を取り出してしまえば、帰宅途中にバッテリー切れ

を起こしてしまう可能性も否定できない。したがって、帰りの運転で使用するエネルギーの確保を考慮に入れた、V2X 提供可能電力量を推定するモデルが必要となる。

そこで本研究では、次のような手順でこれらの課題の解決を試みる。まず、自動車に GPS や加速度センサなどの簡易なセンサを搭載し、走行ログを収集する。収集したログを蓄積しておくセンサデータベースを構築し、データを蓄積していく。また、EV のエネルギー消費モデルを構築し、蓄積したデータに対してこのモデルを適用することで、実際の個々の運転状況におけるエネルギー消費量を推定する。本システムにおいては GV でデータを収集し、EV のモデルに適用することができるため、GV を EV に置き換えた場合の効果の推定を行う事が可能となる。この推定した消費エネルギーのデータに対して検索を行う事で、ドライバーの観点では地点別・時点別などの消費エネルギー量を提示し運転の振り返りを行い、EV の集まる事業所からの観点ではどの程度の電力が V2X によって賄えるかを見積もることが可能となる。

2. 研究背景

2.1 電気自動車と V2X

電気自動車 (Electric Vehicle : EV) はバッテリーを搭載し、モータで駆動する新たなモビリティである。例えば日産の電気自動車 LEAF [2] は 24kWh の容量のバッテリーを搭載し、満充電時には 228km の走行が可能とされる。日常の通勤などの用途であれば、夜間に自宅で充電した電力を用いて、日中に通勤を行うことが十分に可能である。

EV の大きな利点として、走行時の自動車からの排気ガスが一切無いことが挙げられる。近年の地球温暖化への対策として二酸化炭素排出の無い電気自動車は注目されている技術の一つである。発電の為に排出される二酸化炭素量を考慮しても、EV が排出する二酸化炭素量はガソリン車 (GV) やハイブリッド車 (HV) に比べ少なく済むことが知られている [3]。さらに騒音を出さないこと、夜間電力による充電を行うことによって燃料コストが低く済むことなどが利点として挙げられ、今後より一層の普及が進むと考えられる [4]～[6]。

また、EV に搭載されたバッテリーに充電した電力を、電力網 (Grid:V2G) や家 (Home:V2H)、ビル (Building:V2B) に提供する技術は V2X (Vehicle to X) と呼ばれ、その実現に向けて様々な取り組みがなされている。Kempton ら [7] [8] は V2G をアメリカの電力市場に投入した際、どの程度の効果と利益を得られるかの検証を行った。Kamboj ら [9] は送電網に EV を組み込むためにマルチエージェントシステムを適用し、実際の市場において収入が見込めることを実証した。Jansen ら [10] は既存の電力網に V2G を投入した際、V2G が果たす役割について論じた。昨年には日産自動車が LEAF to Home [11] として、V2H の製品化を行った。

さらに、EV を用いることで、電力需要の低い夜間にバッテリーに充電した電力を、電力需要の高い昼間に用いるという電力のピークシフトを行うことが可能となる (図 1)。家庭用の蓄電池も販売されているが、充電した電力を別の時間帯だけでなく、別の場所へ運ぶこともできる EV への期待は高い。また、自動車は通常運転している時間よりも停車している時間の方が長いので、停車している自動車の新たな価値を創造するもので

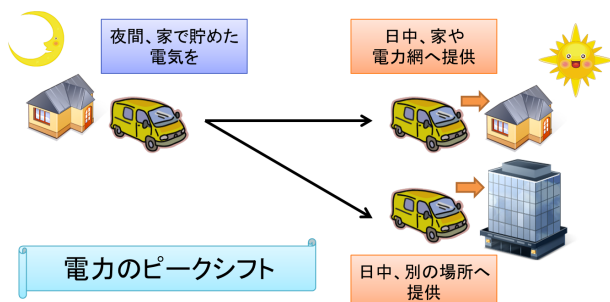


図1 V2X イメージ図

あると考えられている。

しかし、V2X 実現のためには様々な課題がある。その中でもEV 自体のバッテリーの小ささはEV 自体の普及においても問題とされている。その他にも課題としては充放電の繰り返しによるバッテリー寿命の短縮 [12], [13], 新技術ゆえの社会制度、十分な数の充電ポイントの設置などがあり、これらに関してはEV の普及とともに官民が協力して解決していくべき課題であるといえる。

さらに、上記のEV とV2X は、現時点において十分に普及しているとはいえない。その理由として、実際にEV に乗り換えた場合に、EV の導入でどの程度の効果が期待できるのか、EV が自分のライフスタイルに合うのか、ということが事前に見積もれないという点が挙げられる。日産のLEAF は満充電で228km の走行が可能とされているが、実際に自分が普段運転するルートで、自分なりの運転をした場合も同じような電費で走行できるのかということとはわからない。つまり個々の運転状況において、EV に置換えた場合の効果を示すことが必要である。

2.2 センシング技術

近年の情報技術の発達により、計算機やネットワークの高速化、低価格化が進んでいる。さらに無線IC タグやGPS、加速度センサのような実空間情報を取得することを目的としたセンサ類の発達により、いつでもどこでも誰でも計算機の恩恵を受けられるユビキタス環境が実現された。ユビキタス環境では環境内の様々な場所、モノにセンサを取り付けることで、ユーザの無意識下で様々なデータが取得可能となる。

その発展として、これらのセンサ類を自動車に搭載することで、自動車自体を一つのセンサとして情報の収集を行う「プローブカーシステム」に関する研究が行われている。Manzoni ら [14] はバスのような運転スタイルによって燃費が大きく影響される車両にセンサを搭載し、運転者別や時間帯別でエネルギー消費に差があることを確認した。森川ら [15] はプローブカーデータに気象状況や道路状況を組み合わせた動的経路案内システムを開発し、その性能評価を行った。

近年このようなGPS や加速度センサは身近なデバイスであるスマートフォンにも搭載されている。このスマートフォンを自動車に搭載することで、自動車の走行ログを取得することが可能になった。八木 [16] はスマートフォンの加速度センサを用いて走行時の段差の検出を行う研究に加え、先の東日本大震災において発生した路面段差の調査も行った。佐藤ら [17] はスマートフォンがプローブ情報取得センサとして十分使用可能であることを検証した。Sawada ら [18] は自動車に搭載したスマートフォン同士でWi-Fi 通信を行うことで、車々間通信を行

うシステムを提案した。

しかし、これらのセンサからは大量のログデータが発生してしまう。近年では大容量のストレージが安価に手に入るようになったため、これらのログを保存しておくことが可能になった。そこで、このログを蓄積し、ユーザへ有効な情報を提示するデータベースシステムが必要となる。

2.3 関連研究

2.1 節で述べたEV と2.2 節で述べたセンシング技術を組み合わせた研究も行われている。

兵藤ら [19] はEV にGPS ロガーを搭載して取得したデータを基に、消費エネルギーの計算を行っている。その上でEV にとってのエコドライブについて論じている。しかし、兵藤らの手法ではEV の電気エネルギーから運動エネルギーへの変換効率やブレーキ時のエネルギー回生について考慮されていない。本研究ではその点においてモデルに組み込んでおり、より精度の高い結果が得られると考える。

岩坪ら [20] はEV のシミュレーションモデルを構築し、GPS データから得た速度情報を当てはめることで消費エネルギーの計算を行っており、消費電力の正解データとして充電の際の電力を測定し、比較を行っている。これに対して本研究では、スマートフォンのような簡易なセンサを用いており、また走行データもより多く収集することができている。

また、上記の研究においてGV からEV への置換え、V2X 効果の検討などは為されていないため、本研究ではこの点においても新たな知見を得ることができる。

2.4 解決すべき課題

前節までで述べたように、EV の普及やV2X に関して様々な課題が存在する。本研究では、「EV を夜間自宅で充電を行い、日中勤務先に通勤してV2X を行う」という通勤モデルを考え、このモデルに関する以下の課題について解決を試みる。

- 個人ドライバーに対して、GV やHV からEV に置換えた場合に、具体的にどのようなエネルギー消費が為されるか、またV2X で自分がどの程度電力を提供し、社会に貢献できたかを定量的に示す。
- V2X によって電力提供を受ける事業所に対して、通勤してくる自動車がEV に置換えられた場合に、EV からどの程度電力を賄うことが出来るのかを見積もる。
- 以上の定量的な見積もりを、できるだけドライバーや事業所への負担をかけずに実現する。

3. ECOLOG システムの概要

2.4 節で設定した課題に対し、本研究では以下のような流れで解決を試みる。

- (1) 自動車に後付の簡易なセンサを搭載し、自動車走行のログを収集する。
- (2) 走行ログに対し、EV エネルギー消費モデルを適用して、瞬間のエネルギー消費を推定する。
- (3) EV エネルギー消費ログを蓄積し、効果的な検索を可能とするデータベースシステムを構築する。
- (4) 個人ドライバーに対して、EV への置換え効果や、地点別・時点別のエネルギー消費を提示する。
- (5) 事業所に対して、V2X による効果を検討する。

我々は、このEV エネルギー消費ログをECOLOG(Energy

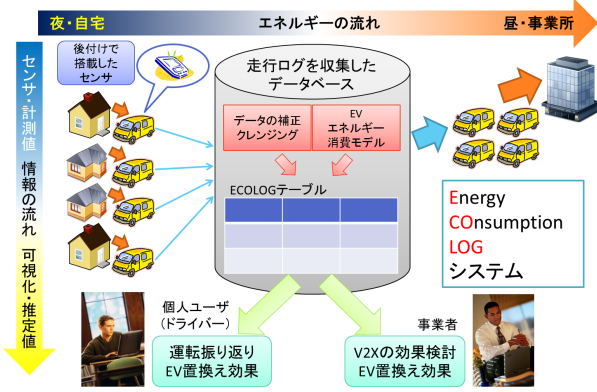


図 2 ECOLOG システム全体像



図 3 データ取得の様子

COnsumption LOG) と名付け、このログを中心としたデータベースシステムを ECOLOG システムとして研究を行ってきた [21]～[25]。このシステムの全体像を図 2 に示す。本章ではその概要について述べる。

3.1 データロガーの設計

本研究では、自動車に後付の簡易なセンサを搭載して、そのセンサから走行ログを取得する。ただし、このログ取得の際にドライバーに余計な機器操作を強いないことが望ましい。そこで本研究では近年著しく普及し、かつ様々なセンサも内蔵されているスマートフォンのデータロガーアプリを制作することで、この課題を解決することとした [23]。このデータロガーでは自動車の運転状態として、GPS による位置情報と 3 軸加速度を取得するものとする。

データロガーの実装にはスマートフォンの代わりに、Android OS を搭載したタブレット型 PC(東芝社製 REGZA Tablet AT570) を用いた。ほかに、GPS ロガー (Transystem 社製 747Pro) と加速度センサ (ATR-Promotion 社製 WAA-010) を別に搭載し、ログの取得を行った。ログ取得の様子を図 3 に示す。

3.2 EV モデルに基づく消費エネルギー推定

本研究では EV の消費エネルギーを、運動方程式や変換効率などを考慮した EV モデルを構築して推定を行う。推定した消費エネルギーは ECOLOG としてデータベースに蓄積される。本節では消費エネルギーの推定式の概要と EV の消費エネルギーのモデル化について述べる。推定式の詳細は文献 [22] に示す。

EV の特徴として、GV や HV に比べて内部構造が容易である点が挙げられる。GV は多段のトランスミッションや化学熱-機械エネルギー変換など、複雑な工程を経て、ガソリンを車の動力としている。EV は 1 段の減速のみ、電気-機械エネ

ルギー変換と、GV に比べ工程が単純である。HV は GV と EV の両方の機能を併せ持ち、さらにそれらを制御するシステムも持つため、非常に複雑な構造になっている。そのため本研究では EV のエネルギー消費に関してモデル化することとした。図 4 に電気自動車における電力消費のブロック図を示す。AC 電源からバッテリーに充電された電力は、インバータやモーターを経て車の動力へと変換されていく。本研究では、この車の駆動をセンサで計測し、バッテリーの消費電力の推定を行う。

自動車が走行する際には、自動車には速度や大気の状態による空気抵抗 R_{AIR} 、路面やタイヤの状況による転がり抵抗 R_{ROLL} 、斜面の上り下りによる登坂抵抗 R_{SLOPE} 、加速による加速抵抗 R_{ACC} の 4 種類の抵抗がかかる [26]。それらの総和につり合うようにしてモーターが駆動力 $F_d[N]$ を出力している。ここで、3.1 節のデータロガーから GPS の位置情報と加速度を取得できる。GPS の位置情報からは速度を算出でき、さらに地図データを組み合わせることで高度データを取得できる。地図データは国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル (10m メッシュ) を使用した。これらのデータと車両のカatalog値などをを用いることで、4 種類の抵抗が全て計算でき、 F_d が求まる。

次にこの F_d から時刻 t_{start} から t_{end} までの 1 回の運転 (トリップ) による消費電力量 $E_e[kWh]$ を推定する。モーターの仕事率 $P_d(t)[W]$ は $P_d(t) = F_d(t) * v(t)$ と求めることができる。ここでモーターが電気エネルギーを運動エネルギーへと変換することを考える。モーターの電気エネルギー変換効率 η は、モーターの回転速度 $[rpm]$ と出力トルク $[Nm]$ から決定されることがわかっている [27]。このことから E_e は $E_e = c \int_{t_{start}}^{t_{end}} P_d(t) / \eta dt$ と求められる。ただし、 $c[Wh/J]$ は定数である。また、今回は 1Hz のサンプリングレートとした^(注1)ため、次のような単純な加算で求めることができる。

$$E_e = c \sum_{t=t_{start}}^{t_{end}} P_e(t)$$

図 5 に EV 走行時のパワーグラフを示す。それぞれの図において縦軸は仕事率 (パワー)、横軸は時間を示す。

図 5 の加速区間内では、進行方向に加速度 $a(> 0)$ で等加速運動をしていると仮定する。つまり時間の経過と共に速度が上昇している状態である。仕事率は力と速度の乗算で求められるため、黄色で示される空気抵抗、橙で示される転がり抵抗、青で示される登坂抵抗、緑で示される運動エネルギーとなる加速抵抗に対応する仕事率が速度の上昇と共に徐々に増加している。また、電気エネルギーから運動エネルギーに変換が行われる際に発生する変換ロスが赤の部分である。

続いて、巡行区間ではそれまで行っていた加速をやめ ($a = 0$)、一定速度で走行を行う。この区間では加速を行わなくなるため、緑の運動エネルギーによる消費がなくなる。しかし、速度に依存する空気抵抗、タイヤを回転させて走行していれば必ず発生する転がり抵抗、および坂道の上りによって発生する登坂抵抗はこの区間でも自動車のエネルギーを消費させる。

最後に、減速区間ではブレーキをかけて ($a < 0$)、車を停止させる。ブレーキによる運動エネルギーの減少分は図の薄緑の

(注1)：事前調査において、処理速度や情報量などから考慮し、正規化サンプリングレートを 1Hz とした。

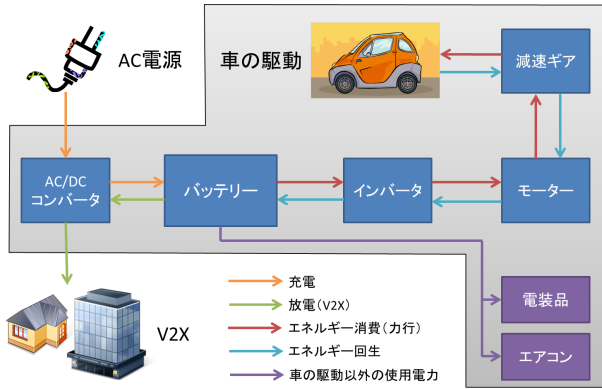


図4 電気自動車の電力消費ブロック図

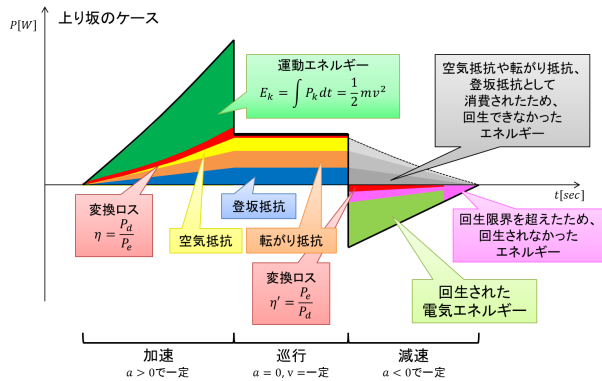


図5 パワーグラフ（上り坂のケース）

部分で示される回生エネルギーとしてバッテリーに充電される。しかし、その一部は空気抵抗や転がり抵抗、登坂抵抗として消費される。 a がある値を下回った場合、つまり過度にブレーキをかけた場合、回生ブレーキだけではスピードを落とすしきれなくなる。その場合摩擦ブレーキも同時に作動するので、一部回生されないエネルギーが生じる。また、速度が一定値を下回ると、安全に車を停止させるために摩擦ブレーキへと切り替わるため、エネルギー回生が行われなくなる[27]。これらに関しては回生ブレーキの限界を超えたロスとして、図5では桃色の部分で示す。また、回生時には運動エネルギーを電気エネルギーへ変換するが、その際にも電気エネルギーから運動エネルギーへ変化する時と同等な変換ロスが発生する。

図6にEV走行時のエネルギーグラフを示す。図6において縦軸はエネルギー量、横軸は時間を示す。加速時には電気エネルギーは運動エネルギーに変換される。この運動エネルギーは減速時に電気エネルギーに再度変換され、回生されることがわかる。登坂抵抗は上り坂ではエネルギー消費となるが、坂を下ることで回生することができる。しかし、空気抵抗や転がり抵抗、変換ロスや回生限界ロスは回生することのできないエネルギーのロスになるという事がわかる。つまりEVを効率よく走行させるためには、このエネルギーロスを減らすことが重要である。

3.3 ECOLOG データベースの設計

3.2節でGPSや加速度センサのデータなどからEVの消費エネルギーを推定を行った。本節ではセンサデータや推定した値を保持しておくデータベースについて説明する。データベーススキーマや実装に関しては文献[22]や[23]に示す。本節では

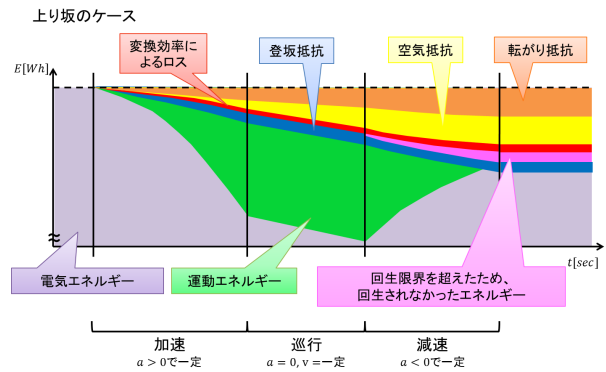


図6 エネルギーグラフ（上り坂のケース）

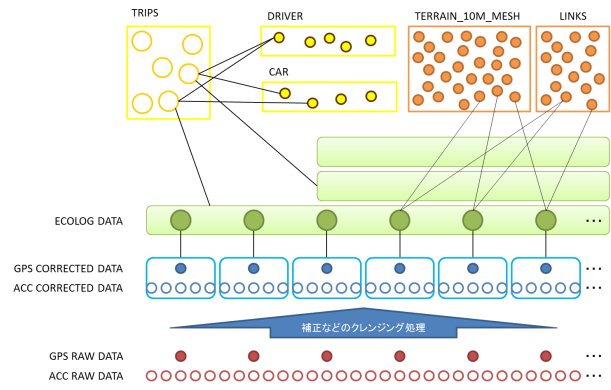


図7 ECOLOG データベースインスタンス図

データベースをインスタンス図を用いて説明し、その中心となるECOLOGテーブルについて概説する。

ECOLOGデータベースのインスタンス図を図7に示す。最下段の赤の丸がGPSと加速度のセンサから得られる生データ1レコードに相当する。これらのデータはセンサ側で設定したサンプリングレートにより時系列に集められる。これらのデータに対し補正などのクレンジング処理を行ったCORRECTED.GPSデータ、CORRECTED.ACCデータが青の丸によって表される。補正されたデータ群に対し、適切なサンプリングレートでリサンプルしたデータが緑の丸で示されるECOLOGの1レコードとなる。ECOLOGのレコードはそれぞれ高さデータを保持するメッシュや、集約単位となる道路リンクの情報を保持している。また、1回の運転（トリップ）におけるECOLOGの集合は、TRIPSテーブルの1レコードと結び付けられる。また、1トリップにおけるドライバーと車両は変わらないと考えられるため、TRIPSの1レコードとドライバー、車両それぞれの情報が結び付けられる。

図8にECOLOGテーブルを示す。ECOLOGテーブルに保持されるECOLOGはセンサによる計測値、方程式から計算された算出値、計算値から検索される導出値、最終的に求められる消費エネルギーの推定値を1秒毎に1タプル、1レコードとして保持している。このようにすることで後にエネルギーの計算を行う場合に、このテーブルに対してのみ検索を行い、かつその記述も容易に行い、計算することが可能になる。

3.4 実車を用いた長期データ取得

データベースやV2Xの効果の検証のために長期的なデータ取得を行った。実験の概要とその結果を表1に示す。我々は2011年7月から2013年2月までのおよそ1年半の期間で725

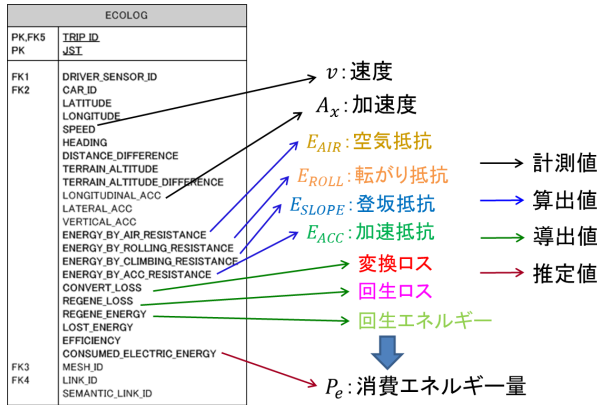


図 8 ECOLOG テーブル

表 1 長期データ取得実験概要と結果

データ収集期間	2011/07/12 ~ 2013/02/28
被験者	4 人
ECOLOG レコード数	2,659,264
電気自動車のレコード数	340,285
トリップ数	725

本のトリップ、約 270 万の ECOLOG レコードを取得した。

4. EV エネルギー消費モデルの検証

我々は 3 章の通り、センサから得たデータに EV エネルギー消費モデルを適用することで、消費電力の推定を行っている。しかし、このモデルには未検証だった点、修正すべき点が存在する。本章ではパワーグラフとエネルギーグラフを実データを用いて示し、転がり抵抗係数と高度データについてより深い検証を行う。

4.1 実データによるモデルの表現

3.2 節で EV モデルに基づく消費電力推定を行い、それに伴う消費電力の時間的変化 (パワーグラフ)、バッテリー内電力量の時間的変化 (エネルギーグラフ) のモデル図を示した。これを実際に取得したデータから示したのが図 9, 10 である。

図 9 にある区間におけるパワーグラフを示す。棒の 1 本が ECOLOG の 1 レコードに対応する。このように時間軸に展開することで、エネルギー消費の由来を視覚的に把握することができる。この区間では加速と同時に坂を上り、その後平坦な道で巡行、最後に停車する際ブレーキを強くかけたために回生限界を超えてロスになってしまった、という運転の流れが見える。

図 10 にある 1 日におけるエネルギーグラフを示す。加速抵抗や登坂抵抗は一時的なエネルギー損失にはなるが、その後ブレーキや下り坂で回生することができる。しかし、空気抵抗、転がり抵抗、変換ロス、回生限界ロスはその後回収できないエネルギーロスになっていることがわかる。出発時の基準電力量を 12kWh^(注2)とし、運転によって消費された電力を除いた 5.2kWh が V2X に提供可能な電力であるという事がわかる。

4.2 転がり抵抗係数の実測

3.2 節の消費エネルギー推定において、転がり抵抗係数 μ は

(注2)：日産の LEAF は 24kWh のバッテリーを搭載している。出発前の充電量を 80% とし、通勤往復が終了した時点での残すべき最低残量を 30% とすると、1 日の往復トリップで使用可能な電力量は $80 - 30 = 50\%$ である。ここから、24kWh の 50% である 12kWh を 1 日で使用可能な電力量とした。

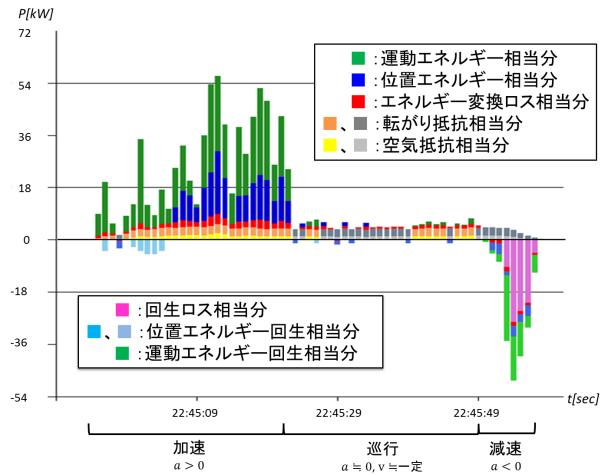


図 9 実データによるパワーグラフ

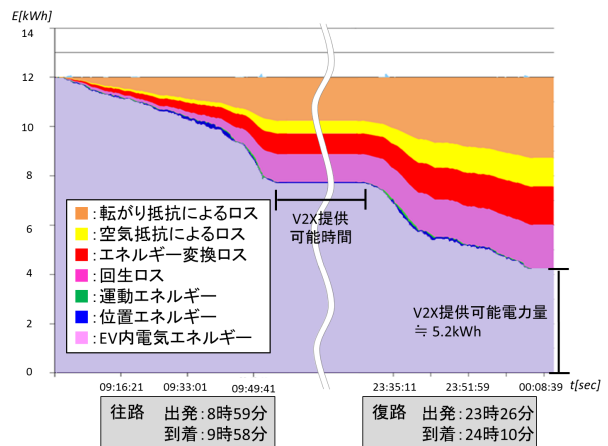


図 10 実データによるエネルギーグラフ

文献[27]から 0.015 としていた。これをより実際のデータに近づけるため、我々は実際の EV(日産 LEAF) を用いてこれを実測することとした。

モータの駆動力 $F[N]$ は空気抵抗、転がり抵抗、登坂抵抗、加速抵抗の 4 種の抵抗の総和と釣り合うように働く。モータの駆動力は車のアクセルを離し、ギアをニュートラルにすることで 0 となる。空気抵抗は速度が小さければほぼ 0 と見なすことができ、登坂抵抗は水平な道路を走行すれば無視できる。つまり水平な道路を、低速かつニュートラルの状態とすることで、転がり抵抗+加速抵抗=0 とすることが出来る。ここで、転がり抵抗 $R_{ROLL} = \mu mg$ 、加速抵抗 $R_{ACC} = ma$ から、 $\mu mg + ma = 0$ という式が成り立つ。 $(m: \text{車両重量} [kg], a: \text{進行方向加速度} [m/s^2], g: \text{重力加速度} [m/s^2])$ つまり転がり抵抗係数 μ は加速度 a を求めることで計算できる。そこで以下のような実験を行った。

- (1) 地点 $A_0(x_0 = 0)$ から距離 $x_1, x_2, \dots, x_{10}$ の地点にそれぞれ目印 $A_1, A_2, \dots, A_{10}$ を配置する、
- (2) 車両を初速度 v_0 で地点 A_0 からギアをニュートラルに入れた状態で通過させる。この時 v_0 は任意の低速度とする。
- (3) $A_1, A_2, \dots, A_{10}$ を通過する時刻 $t_1, t_2, \dots, t_{10}$ を計測する。
- (4) 取得した $(x_1, t_1), (x_2, t_2), \dots, (x_{10}, t_{10})$ の組をそれぞれ、 $x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ の式に代入し、10 本の v_0 と a の一次関

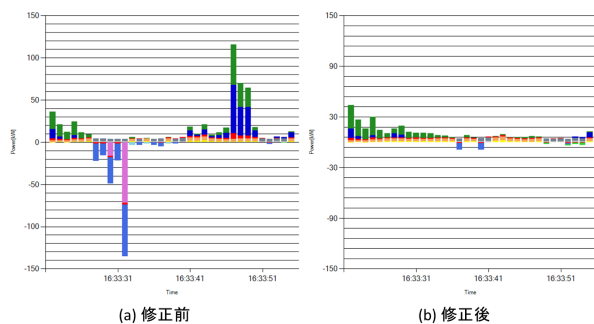


図 11 高度データの修正

数を導出し、 a の値を求める。

(5) (1)~(4) を複数回行い、 a の平均値を求める。

求めた a から計算し、 $\mu = 0.013$ を得た。以降、転がり抵抗係数はこの値を使用することとする。

4.3 メッシュデータ修正による道路勾配データの考察

3.2 節の消費エネルギー推定において、高度データの取得には国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル (10m メッシュ) を使用している。しかし、このモデルは地図上に引かれた $10\text{m} \times 10\text{m}$ のメッシュの中のある点における高度を示すものであり、実際に運転した道路の高度を示すものとは限らない。そのため、本当に取得したい道路の高度とは違う個所の高度を取得してしまう可能性がある。以下にその例を示す。

- 地上の道路と高架上の道路が並走している場合
- 道路が立体交差をしている場合
- 切り通しのような道路の側面に崖などがある場合
- 川や崖に架かる橋を渡る場合

以上のような高さデータのエラーを修正しなければ、消費エネルギー推定において、登坂抵抗分のエネルギーや変換ロス、回生限界ロスに大きな誤差が生じてしまう。そのため、我々は手動で高度データの修正を行った。本研究は日常の通勤をモデルにしており、この場合ドライバーはある程度決まったルートを走行することになる。ゆえにドライバーの通るルートに対して 1 度だけ修正を行うことで、全てのデータを修正することが可能となる。

図 11 にある区間における高度データ修正前と修正後のパワーグラフの変化を示す。この区間は川に架かる橋を通過する場所である。本来はほぼ水平に架かっている橋を通過するため、高度にほぼ変動はない。しかし、地図データ上では川に向かって急激に下っていき、川を越えると坂を上っているデータになっている。そのため、改正前では橋の入口では大幅なエネルギー回生と回生限界を超えたエネルギーロスが、出口では急激な登坂抵抗が発生している。これに対し高度データの改正を行った後では橋の入口、出口でのエネルギー変化はほぼなく、橋の上で車両が走行している様子が見える。

これら勾配に関する課題は高度なマップマッチングと正確な道路高度情報があれば解決できる課題である。したがって、十分に正確なデータを事前に取得できれば生じない問題であるといえる。今回はプロトタイプシステムで得られたデータを検証する上で、ある程度正確な勾配データが必要であると考えたため、以上のように独自に修正する手法を用いて勾配データを取得している。

5. 電気自動車を用いた精度評価実験

3 章で構築したモデルの評価として、実際の EV を用いて実験的评价を行った。実験は以下のような流れで行った (図 12)。

(1) 被験車両である EV にデータロガーを搭載し、往復の走行ログを取得する。取得したログを基に消費電力 (ECOLOG) の推定を行う。

(2) 往路の出発時は EV が満充電の状態から運転を行い、復路の運転終了後に充電する際に、充電量を電力計を用いて測定する。

(3) 推定した消費電力と電力計によって測定した電力とを比較し、相関を求める。

2012 年 9 月 24 日~10 月 18 日、2013 年 2 月 4 日~8 日の期間で被験者 1 名、被験車両 1 台 (日産 LEAF) による往復トリップ 19 件を取得した。実験の結果を図 13 に示す。図 13 において、縦軸は本研究において構築したモデルによる推定消費電力量、横軸は電力計で測定した充電量を示す。棒グラフの緑の部分がある往復トリップにおける ECOLOG による推定消費電力量を示す。ここで、ECOLOG では電装品やエアコンによる消費電力は考慮されていない。電装品は、ヘッドライトやワイパーの ON/OFF を別に記録し、その他の電装品の影響も考慮したうえで、ある一定の電力がトリップを通じて消費されると仮定した。エアコンに関しては、使用車両のメータに表示されるエアコン消費電力を読み、その値と外気温からモデル式を構築し、推定を行った。図 13 の棒グラフにおける橙の部分電装品、青の部分がエアコンの推定消費電力量を示す。これらの影響を考慮した結果、推定消費電力量 y と測定充電量 x の間には、 $y = 0.830x$ の相関を得た。

今回の測定では実際にバッテリーに充電された電力量ではなく、家庭用電源から放電された電力を計測している。そのため、実際にはバッテリーの充放電率や、充電時の損失も考慮しなくてはならない。充電効率はおおよそ 80% ~90% とされているため、修正後の結果はおおよそ妥当な相関であると考えられる。

また、おおよそ 10kWh 程度の領域における推定消費電力量と測定充電量の差の標準偏差 σ が $0.89[\text{kWh}]$ となった。この結果、 $\pm 1\sigma$ の範囲の推定誤差は 9% 程度であり、また、 $\pm 2\sigma$ の範囲に収まるということが確認された。ここで、グラフの右側、つまり電力計で計測した充電量が多かった上位 7 ケースは冬季 (2 月) に行った実験の結果となっている。冬季実験中は EV で影響が大きいとされるヒーターを使用しているため、エアコンの概算電力量が大きくなっている。また、この期間は寒さのため充電効率が悪く、計測充電量が多くなっている可能性がある。

ただし、これはあくまで間接的な評価であるため、自動車内の CAN データを用いるなど、より正確な精度評価手法を確立する手法が必要である。

6. ま と め

本稿では EV への置換えや V2X の効果を推定する ECOLOG システムについて述べた。自動車走行ログの取得についてはスマートフォンのような簡易なセンサによって行い、集めた走行ログに対して EV エネルギー消費モデルを適用することで、実際の個々の運転状況におけるエネルギー消費量を推定した。また、エネルギー消費量を蓄積するデータベースを構築し、個人

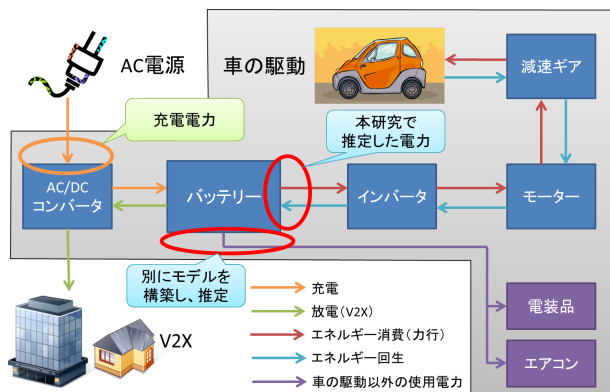


図 12 EV 消費電力図を用いた実験概要

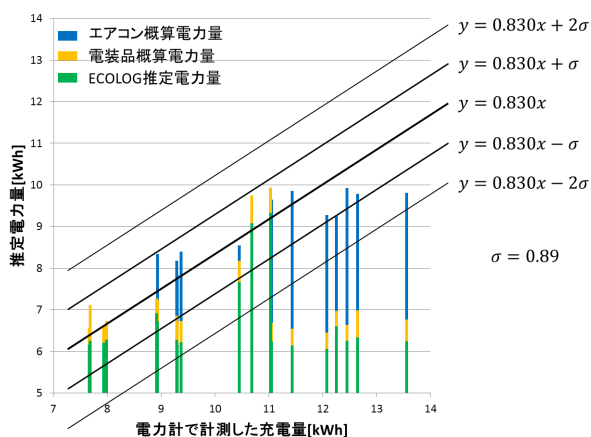


図 13 ECOLOG 推定値と充電量の比較

ドライバー観点、事業所観点からの多様な検索を可能にした。本稿では EV モデルの検証を行い、実際の電気自動車を用いてモデルの精度を評価した。評価は実際の EV を用い、推定消費電力量と充電量を比較し、充電効率を考慮して 83% のおよそ妥当な相関を得た。今後はさらなる精度の検証とともに、被験者を増やしてより効果的な情報の提示を考察していく。

謝辞 本研究の一部は公益財団法人日産財団研究助成による。また、横浜国立大学大学院環境情報研究院共同研究推進プログラム「家庭における省エネ行動メカニズムの分析と効果的な対策の提案」、および同研究院基軸プロジェクト「信頼と納得の情報学」の支援を受けた。

文 献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁エネルギー白書 2012, <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2012/>
- [2] 日産 LEAF Web カタログ, <http://ev.nissan.co.jp/LEAF/>
- [3] 堀 雅夫, 金田 武司, “HEV, PHEV 導入によるエネルギー需給変化と CO2 削減の効果”, 自動車技術会論文誌 Vol.40, No.4, pp.1101-1106, 2009.
- [4] 自動車技術ハンドブック 第 10 分冊 設計 (EV・ハイブリッド) 編, 自動車技術ハンドブック編集委員会, 自動車技術会, 2011.
- [5] 中上 聡, 山本 博巳, 山地 憲治, 高木 雅昭, 岩船 由美子, 日渡 良爾, 岡野 邦彦, 池谷 知彦, “車種別パターンを考慮したプラグインハイブリッドと電気自動車の導入評価”, エネルギー・資源学会論文誌, Vol.31, No.6, pp.7-15, 2010.
- [6] 内田 晋, “電気自動車の電費から燃費への換算とその東日本大震災による影響”, エネルギー・資源学会論文誌, Vol.32, No.6, pp.14-18, 2011.
- [7] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, Journal of

- Power Sources, Vol.144, Issue.1, pp.268-279, 2005.
- [8] W. Kempton, J. Tomic, “Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy”, Journal of Power Sources 144, pp.280-294, 2005.
- [9] S. Kamboj, W. Kempton, K. S. Decker, “Deploying power grid-integrated electric vehicles as a multi-agent system,” Proc. of the 10th Int'l Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011), pp.13-20, 2011.
- [10] Bernhard Jansen, Carl Binding, Olle Sundstrom, Dieter Gantenbein, “Architecture and Communication of an Electric Vehicle Virtual Power Plant”, Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on, pp.149-154, November, 2010.
- [11] 日産 LEAF to Home, <http://ev.nissan.co.jp/LEAFTOHOME/>
- [12] 廣田 幸嗣, 足立 修一 編著, 小笠原 悟司, 出口 欣高 著, “電気自動車の制御システム 電池・モータ・エコ技術”, 東京電機大学出版局, 2009.6.
- [13] 戸高 宗一郎, 田崎 裕人 企画編集, “リチウム二次電池部材の測定・分析データ集”, 技術情報協会, 2012.6.
- [14] Vincenzo Manzoni, Andrea Corti, Pietro De Luca, S. M. Savaresi, “Driving Style Estimation via Inertial Measurements”, 2010 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2010), Madeira Island, Portugal, pp. 777-782, 2010.
- [15] 森川 高行, 山本 俊行, 三輪 富生, 王 立曉, “動的経路案内システム「PRONAVI」の開発と性能評価実験”, 交通工学, Vol.42, No.3, pp.65-75, 2007.
- [16] 八木 浩一, “加速度センサを用いた路面段差検出手法の改善と東北地方太平洋沖地震後の観測データへの適用”, 第 10 回 ITS シンポジウム 2011, 1-A-05, 2011.11.
- [17] 佐藤 雅明, 和泉 順子, 松井 香奈, 上田 憲道, 植原 啓介, 村井 純, “スマートフォンを活用したプローブ情報システムの構築”, 第 12 回インターネットテクノロジーワークショップ, 2011.
- [18] Dan Sawada, Masaaki Sato, Keisuke Uehara, Jun Murai, “iDANS: A Platform for Disseminating Information on a VANET Consisting of Smartphone Nodes”, International Conference on ITS Telecommunications (ITST2011), pp.252-257, August, 2011.
- [19] 兵藤 哲朗, 渡部 大輔, 橋本 大夢, “電気消費特性からみた電気自動車エコドライブ方策の考察”, 交通工学, Vol.47, No.4, pp.72-79, 2012.
- [20] 岩坪哲四郎, 池谷知彦, “電気自動車の性能評価技術-電費シミュレーション基本モデルの開発-”, Energy Engineering Research Laboratory, Rep.No.M11023, 2012.
- [21] 富井 尚志, 萩本 真太郎, 出口 達, 笛田 尚希, “電気自動車の日常ログを蓄積する V2G 指向データベースの設計”, ITS Japan, 第 10 回 ITS シンポジウム 2011 Proceedings, 1-B-11, pp.91-97, 2011.11.
- [22] 笛田 尚希, 萩本 真太郎, 出口 達, 富井 尚志, “スマートフォンを用いた自動車走行ログ収集と EV モデルに基づくデータベースの構築”, 第 4 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM2012), C6-4, 2012.3.
- [23] 萩本 真太郎, 河野 弘樹, 笛田 尚希, 出口 達, 富井 尚志, “スマートフォンを用いた自動車走行ログ収集と EV モデルに基づくデータベースの構築”, 第 155 回情報処理学会データベースシステム研究会, 2012.
- [24] 富井 尚志, 萩本 真太郎, 笛田 尚希, 出口 達, 河野 弘樹, 出縄 誠, 林 拓也, “自動車の日常移動ログデータベースの構築と EV への置換えによる V2X 効果推定”, ITS Japan, 第 11 回 ITS シンポジウム 2012 Proceedings, 1-B-08, 2012.
- [25] 出口 達, 出縄 誠, 富井 尚志, “電気自動車の運転ログを用いた多様な状況提示システムの実装と評価”, ITS Japan, 第 11 回 ITS シンポジウム 2012 Proceedings, 2-C-01, 2012.
- [26] 樋口 健治 監修, 自動車工学編集委員会著, “自動車工学”, 東京電機大学出版局, 2008.
- [27] 廣田 幸嗣, 小笠原 悟司編著, 船渡 寛人, 三原 輝儀, 出口 欣高, 初田 匡之 著, “電気自動車工学”, 森北出版, 2010.