

解析者の興味に基づく道路区間集計が可能な EV 推定消費エネルギーデータ解析システムの構築と応用

植村 智明^{1,a)} 能條 太悟^{2,b)} 吉瀬 雄大^{1,c)} 富井 尚志^{3,d)}

受付日 2021年3月10日, 採録日 2021年7月1日

概要: 本研究では, 自動車走行ログの活用を目的として, 電気自動車 (EV) の推定消費エネルギーデータ解析システムを構築する. 本システムは, 消費エネルギーデータをデータ解析者が興味・関心を持つ道路区間 (興味区間) で集計可能なデータベースと, 可視化の状態を SQL に類似した言語形式により保存可能な多次元データ可視化ビューアーで構成される. データベースには, ユーザが所有する既存の自動車の走行ログから推定した EV の消費エネルギーデータを蓄積する. これにより, 次世代自動車の EV を持たずに, EV の消費エネルギーに関する特性を定量的に把握することを可能にする. また, 実際に収集した自動車走行ログから推定した EV の消費エネルギーデータを利用した本システムの応用例を示し, 本システムの有用性を示す. 応用例では, 興味区間による集計を利用することで, 走行した道路の特性に依存した EV の消費エネルギーやその要因を可視化して分析する例題を示す. これにより, 本システムによって, 自動車走行ログが EV 特有の有用なデータ活用に利用可能であることを示した.

キーワード: Path-based Query, 消費電力量, データ可視化, 探索的データ分析, 関係データベース

Electric Vehicles' Estimated Energy Consumption Data Analysis System Enabling Aggregations by Road Sections in Analysts' Curiosity

TOSHIAKI UEMURA^{1,a)} DAIGO NOJO^{2,b)} YUDAI KICHISE^{1,c)} TAKASHI TOMII^{3,d)}

Received: March 10, 2021, Accepted: July 1, 2021

Abstract: In this research, we constructed Electric Vehicles (EVs)' estimated energy consumption data analysis system to utilize vehicle driving logs. The system consists of a database and multivariate data visualization system. The database enables energy consumption data aggregations by road sections in analysts' curiosity, which are required by data analysts. The data visualization system enables data analysts to save the analysis process as a language form like SQL. The database accumulates EV's energy consumption data estimated by users' existing cars driving logs. Therefore, it enables users or data analysts to understand EV's energy consumption characteristics quantitatively without EV utilization. We present the system application examples utilizing actual driving logs, and the system's usefulness. In these examples, we used aggregations by road sections. And the system visualizes EV's energy consumption and these factors which are dependent on road characteristics. As a result, we presented that the system enables useful vehicle driving logs utilization specific to EVs.

Keywords: path-based query, energy consumption, data visualization, exploratory data analysis, relational database

¹ 横浜国立大学大学院環境情報学府情報環境専攻
Department of Information Environment, Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Yokohama, Kanagawa 240–8501, Japan
² 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科
Department of Mathematics, Physics, Electrical Engineering and Computer Science, College of Engineering Science, Yokohama National University, Yokohama, Kanagawa 240–8501, Japan

³ 横浜国立大学大学院環境情報研究院
Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University, Yokohama, Kanagawa 240–8501, Japan
a) uemura-toshiaki-xh@ynu.jp
b) nojo-daigo-gf@ynu.jp
c) kichise-yudai-vb@ynu.jp
d) tommy@ynu.ac.jp

1. はじめに

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイスなどの普及により、日常をデータとして記録する「ライフログ」を、個人でも気軽に取得・蓄積することが可能となった。これらのデバイスをデータロガーとして利用すれば、センサーデータを自動的に取得・蓄積できる。すなわち、ユーザの意識や手間なくライフログを収集することができる。しかしながら、その大量に収集したライフログを利用する際には、そのデータの特性や利用目的などに適したクエリを実行する必要がある。それに対し、データに適したクエリの実行を想定した関係データベースを構築することで、ライフログの有用なクエリを実行可能にすることが1つの解決法として考えられる。また、データ分析者がデータから有用な情報を発見するには、多数のクエリの実行結果をグラフなどによって可視化しながら、試行錯誤を繰り返すことが必要となると考えられる。

一方、地球温暖化対策として、電気自動車 (EV) が次世代自動車として注目されている。EV は、走行中の温室効果ガスの排出物がないゼロエミッション車 (ZEV: Zero Emission Vehicle) の一種であり、Well-to-Wheel (エネルギー製造から走行まで) の二酸化炭素排出量削減への貢献が可能である。加えて、比較的大型な二次電池を持つことから、分散型エネルギー社会に参画し、エネルギーの効率的利用や、非常時のエネルギー供給の確保などに貢献することができる。また、消費者にとって、急速充電時間が30分ほどかかることや、航続距離に関する不安などのEV導入に対する障壁が多くある一方、低ランニングコストなどの観点から世界的にEVに対する関心が高まっている [1]。特に航続距離に関しては、EV は内燃機関自動車 (ICV) とは異なる傾向を持つ。たとえば、エアコンやバッテリーなどの要因により、気温次第でエネルギー消費量が大きく変化する。ほかにも、ブレーキ時のエネルギー回生があるために、ドライバのブレーキの踏み方でもエネルギー消費量が変化する。すなわち、EV の航続距離は、ドライバの運転の違い、道路の違いや季節によっても変化する。そのため、EV の走行データを利用せずに、EV の特性を把握することは難しいといえる。この問題の解決法として、「今の車の走行データ」から「EV に乗り換えた場合の推定消費エネルギーデータ」を求めることがあげられる。これにより、もしもEV でこの道路をこの運転で走行した場合の消費エネルギーの定量的な把握が可能になる。

以上に対し我々は、解析者の興味に基づく道路区間で集計可能なEVの推定消費エネルギーデータ解析システムを構築することを考えた。本システムは、(1)「推定消費エネルギーデータを蓄積するデータベース」と(2)試行錯誤の過程をSQLに類似した言語形式で保存可能な「多変量データ解析支援システム」から構成される。

(1)については、我々の先行研究 [2] において、自動車に搭載したスマートフォンから取得したGPSなどのセンサーデータから、「EVに乗り換えた場合の推定消費エネルギー」の推定方法を確立してきた。それにより推定したEVの消費エネルギーデータを蓄積、有用な検索が可能なECOLOG (Energy Consumption LOG) データベースを構築してきた。ECOLOGシステムにおいて、我々は、解析者の興味に基づく道路区間で消費エネルギーデータを集計することで、EVの消費エネルギーの特性 [3] を把握することができることに着目した。解析者の興味に基づく道路区間を自由にデータベース内に定義することで、データ解析者が求めるEV消費エネルギーに関するデータ解析を可能にする。しかしながら、実際のデータ解析においては、設定した道路区間で集計した結果の可視化を行い、データ解析者が求める適切な道路区間が設定できたかを確認する必要がある。

そこで可視化の支援のため、我々の先行研究である (2) 多変量データ解析支援システム [4], [5] を利用することを考えた。この解析支援システムは、多変量データに対してアドホックなクエリが実行できるGUIアプリケーションプログラムである。多変量データを可視化し、選択・射影・結合などの関係代数演算の基本的な演算が表現可能なGUIとしてParallel Coordinates Plot (PCP) を利用する。そのデータ操作結果を任意の手法で可視化することで解析を進める。その過程において、PCP上のデータ操作と可視化の状態をSQLに類似した(PC)²L^{*1}の言語表記形式で保存できる。本論文では、これらの機能を利用し、EVの推定エネルギーの有用なデータ解析を支援する。

なお、本論文では、過去の先行研究 [2], [3], [4], [5] の要素をすべて組み合わせることで1つのシステムとして実装・構築し、実践的にデータ蓄積まで行ったことによって得られた有用なデータ解析例を報告する。データ解析例では、数年にわたる長期間の被験者実験により蓄積した自動車走行ログと本システムを用い、EVとICVの消費エネルギー比較による特性の比較や、EVのデータ消費要因を特定する例を示す。それにより、この被験者にとって有用な、自動車に関するライフログの利用法を示すことを目指す。

2. 関連研究

本研究において、以下の3種類の関連研究があげられる。

- (1) EVの消費エネルギー推定 (2.1 節)
- (2) 自動車走行ログの活用と時空間クエリ (2.2 節)
- (3) データ解析支援 (2.3 節)

以下の節でそれぞれ説明する。なお、2.1, 2.2 節で説明する研究は、主に1章で記述した「推定消費エネルギーデータを蓄積するデータベース」に関連が深い。2.3 節で説明

*1 Parallel Coordinates Plot Commutative Language の頭文字より。

する研究は、主に1章で記述した「多変量データ解析支援システム」に関連が深い。

2.1 EVの消費エネルギー推定

EVの消費エネルギー量・航続距離を評価するために、走行データを活用したEVの消費電力や電費推定の研究がさかに行われている。EVは運動方程式を用いることで、EVの消費電力や電費推定を行うことが可能である[6], [7]。本研究の推定エネルギーは、この運動方程式を利用した手法を使用している[2]。この手法のメリットとして、消費エネルギーの要因（転がり抵抗や空気抵抗など）も推定することが可能であることがあげられる。消費エネルギーの要因も利用することで、よりEVの分析を詳細に行うことが可能になる。

さらには、機械学習を利用したEVの消費電力推定の研究も行われている。機械学習を利用した消費電力推定のメリットとして、細かいパラメータの変化^{*2}を実際のデータを利用して考慮に入れることが可能なことがあげられる。その一方で、機械学習モデルの出力は電費、あるいは、消費電力のみとなり、消費エネルギーの要因まで把握することは難しい。Felipeらは、人工ニューラルネットワークにドライバの運転スタイルと走行ルートの特徴を入力することで、EVの走行時の消費電力量推定を行った[8]。Feiらは、運動方程式を利用した消費電力量推定モデルに、機械学習を利用したモデルを組み合わせたハイブリッドモデルの提案を行った[9]。

以上にみられるように、EVのエネルギー消費量は複数の方法で推定することが可能である。ただし、これらの研究の目的は、EVのバッテリー残量や航続距離、運転スタイルなどの推定に限定されており、エネルギーの消費要因を細かく分析することを考慮しているとはいえない。一方で、我々の研究は、推定したEVの消費エネルギーデータの分析方法や利用方法を提示するものであり、これらの研究と立場が異なる。

2.2 自動車走行ログの活用

近年、自動車より収集した走行ログを活用する研究がさかに行われている。特に、交通データの可視化[10]は注目されており、多くの研究がみられる。しかし、その多くは移動時間に関する可視化に関するもので、EVの消費エネルギーに着目した可視化に関する研究は行われていない。それに対し、我々は今後のEV社会を見据え、EVの消費エネルギーに関する有用なデータ可視化を提案していく必要があると考える。

他の自動車の走行ログの可視化に関する研究として、飯島らは、プローブカーで収集した道路状況を元に、渋滞状

況を地図の色分けで可視化するシステムを構築した[11]。Komamizuらは、EVの運転軌跡をドライバの属性情報とともに表示し、道路を走行するEVの数を可視化するフレームワークを提案した[12]。これらの研究は、渋滞情報の可視化に着目しており、EVの消費エネルギーのデータ解析に着目する我々の立場と異なる。

Wilminkらは、情報提示による運転の改善が二酸化炭素の排出を削減することをシミュレートした[13]。この研究は、ドライバへのデータフィードバックを主な目的としており、データ解析手法を提案する我々と立場が異なる。

我々の先行研究として、既存の自動車の走行ログからEVの消費エネルギーを推定し、EVなしで未来のEVを予測するデータベースシステム（ECOLOGシステム）を構築してきた[2]。このシステムを利用したデータ可視化として、解析者の興味に基づく道路区間の通過時間と消費エネルギーの可視化[3], [14]を行ってきた。これらの研究により、解析者の興味に基づく道路区間による消費エネルギーデータの集計を行い、EVの消費エネルギーに関する有用な可視化が可能という知見を得ることができた。この道路区間による時空間データの検索は、文献[15]によると、指定した経路（Path）上を移動したデータを結果として返すPath-based Queryに相当すると考えられる。Kroghらは、Path-based QueryをGPSなどの軌跡データに対し高速に実行するためのインデックスを提案した[16]。本論文の目的は、解析者の興味に基づく道路区間を利用したデータ解析が有用であることを示すことであり、この研究とは立場が異なる。そのため、クエリ応答時間などのデータベースの性能評価については、本論文の対象外とし今後の課題とする。

その一方で我々の先行研究は、実際のデータ解析を想定したデータ応用を示したのとはいい難い。それに対して本論文では、多変量データ解析を支援する可視化システムである我々の先行研究[4], [5]を組み合わせ、より実践的なEVの消費エネルギーデータの解析例を示す。

2.3 データ解析支援

他の研究として、データやシステムの操作過程を管理する研究（Provenance）が行われている[17]。特にデータやシステム、プログラミングコードなどの操作過程や意図を保存することは、複雑なデータ処理を支援するために重要なことであるといわれている。さらには、解析結果データの操作過程や意図を示すことは、SQLのような関係代数演算をサポートする問合せ言語で記述することが有効であるともいわれている。その点で、我々が定義したSQLに類似した言語（PC）²Lを用いて、可視化システムによるデータの操作過程を保存することは有効な手段であるといえる。

システムの操作過程を保存してユーザのタスクを支援する手法として、Waldnerらは、PCのアプリケーション操

^{*2} たとえば、消費エネルギーの要因の1つである転がり抵抗はタイヤや路面などの要因によって変化する。

作ログを記録し、そのログを時系列が理解できるように可視化することで、ユーザが過去に行った意思決定の検証やデータソースの再取得の支援を行った [18]。Mindekらは、画像データに、分析過程に利用する他のデータソースのデータを同時に表示し、分析者の文脈を保存したスナップショットを保存することで、シミュレーションデータの可視化や文書分析の支援を行った [19]。Gratzlらは、PCPやヒートマップ、散布図行列など様々な可視化手法を組み合わせることで複数のデータソースから得られたデータとその解析過程を可視化し、データ解析の支援を行った [20]。

また、大量のデータを対象とし、インタラクティブにデータ可視化を行う研究については多くの事例が見られる [21]。なかでも、関係データベーススキーマに基づくデータに対し、GUI上でクエリの記述や複数の可視化の連携を可能にし、データ解析を支援する研究も複数行われている。Derthickらは、データオブジェクトを可視化しつつ、インタラクティブにGUIでクエリが表現可能な環境を構築した [22]。Northらは、データの可視化と、表示した複数の可視化間の連携をユーザが自由に変更可能なインタフェースの構築を行った [23]。杉渕らは、クエリフローモデルによる直感的かつ段階的なクエリが構築可能なGUIを機能として備えた、可視化フレームワークを実装した [24]。

これらの研究は、可視化とクエリをGUI上で連携させることで、インタラクティブなデータ解析を支援する点では、我々と立場が同じといえる。その一方で、これらの研究は、「可視化システムのデータ解析過程を可視化して見せる」点や、「データベースに習熟していないデータ解析者を支援する」点を重視している。本研究は、「SQLに類似した言語を用いてデータ解析の途中結果を保存し、問合せ言語として一般的なSQLに親しみのあるデータ解析者を支援する」ことを目的としており、これらの研究とは立場が異なる。また、言語を用いて操作過程を保存する利点として、言語の一部を書き換えるだけでデータ解析の改善をすることが容易であり、その点でこれらの研究と比較して優位性を持つ。

3. EV 推定消費エネルギーデータ解析システム

本章では、EV 推定消費エネルギーデータ解析システムの概要 (図 1) について説明する。本システムは、EV の推定エネルギーデータを格納するデータベースである ECOLOG システムと ECOLOG システムにより集計したデータを解析するための多変量データ解析支援システムで構成される。本システムの想定される利用の流れを以下に説明する。

- (1) 既存の自動車にスマートフォンを搭載し、自動車の走行ログを収集する。
- (2) 収集した走行ログから EV の消費エネルギーデータの推定を行い、その他センサデータとともに、ECOLOG

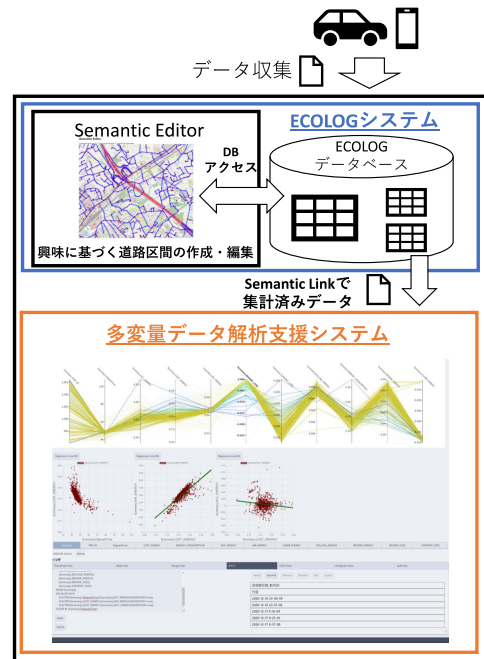


図 1 EV 推定消費エネルギーデータ解析システムの概要

Fig. 1 Overview of an EV's estimated energy consumption data analysis system.

データベースに蓄積する。

- (3) データ解析の目的やデータ解析者の仮説に基づき、専用の UI (Semantic Editor) を用いて解析者の興味に基づく道路区間 (Semantic Link, 以後、SL とよぶ) をデータベース内に作成する。
- (4) ECOLOG データベースを利用して、SL による EV の推定消費エネルギーデータの集計を行う。
- (5) SL による集計結果を多変量データ解析支援システムで表示する。
- (6) 多変量データ解析支援システム上で、可視化、データ操作をインタラクティブに行いながらデータ解析を進める。
- (7) 作成した SL による集計結果で所望の結果が得られなければ、再度 Semantic Editor を利用し、SL を新たに作成、もしくは、既存の SL の編集を行う。
- (8) データ解析者が満足する結果が得られるまで、(4) から (7) を繰り返す。

なお、ECOLOG システムおよび多変量データ解析支援システムの詳細については、それぞれ 4 章および 5 章に記述する。

4. ECOLOG システム

本章では、ECOLOG システムについての説明を記述する。ECOLOG システム (図 2) は、スマートフォンを用いて収集した走行ログを利用した EV の推定消費エネルギーデータを蓄積し、EV の消費エネルギーに関する有用な検索が可能なデータベースである。走行ログから消費エネル

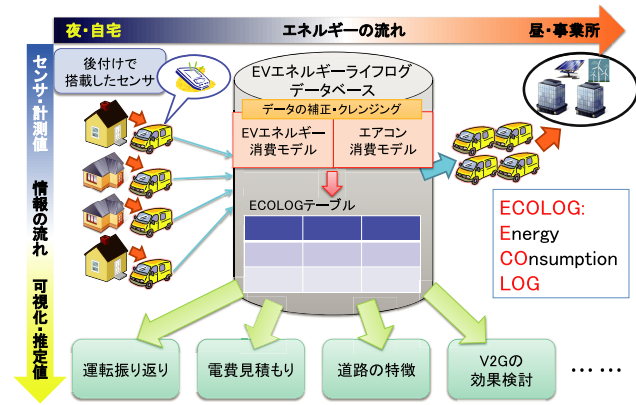


図 2 ECOLOG システムの全体像
Fig. 2 Overview of ECOLOG system.

ギーデータを推定する方法については、先行研究 [2] にて取り組んできた。本論文でも、先行研究 [2] と同様の消費エネルギーの推定を行う。以下には、先行研究のなかでも、データ収集方法、EV の消費エネルギー推定モデル（以後、EV モデル）や ECOLOG データベースのスキーマ設計などを抜粋して記述する。また、ECOLOG データベース内に SL を作成・編集するための UI, Semantic Editor についても説明する。

4.1 データ収集

本システムにおけるデータ収集には、Android 端末を利用することで、GPS データ、CAN データを取得した。

GPS データの取得には、自作 Android アプリ Driving Logger を実装し、GPS 計測により取得可能な位置、対地速度をサンプリングレート 1 Hz で取得した。これらの GPS データは、ECOLOG データベースへの蓄積および、EV の消費エネルギー推定への利用を行った。

CAN データの取得には、Android アプリ TORQUE PRO *3 を利用した。TORQUE PRO を利用することで、ICV の CAN (Controller Area Network) データから燃料消費量 (L) や速度などが取得できる。取得した CAN データは、ECOLOG データベースへの蓄積を行った。

4.2 EV モデルによる瞬間の消費電力推定

本節では、瞬間の EV 消費電力を推定するための EV モデルについて説明する。EV の消費電力 $P_e(t)$ [kW] は、空気抵抗により消費されるエネルギー P_{AIR} [kW]、タイヤの摩擦などの転がり抵抗により消費されるエネルギー P_{ROLL} [kW]、坂道の勾配によって発生する登坂抵抗により消費されるエネルギー P_{SLOPE} [kW]、自動車の加減速に応じて発生する加速抵抗により消費されるエネルギー P_{ACC} [kW] の総和 ($P_d(t)$ [kW]) と変換効率 η の積で求めることができる。式における各パラメータを表 1 に示す。

*3 <https://play.google.com/store/apps/details?id=org.prowl.torque&hl=ja&gl=US> (参照 2020-12-18)

表 1 EV モデルのパラメータ
Table 1 Parameters of EV model.

パラメータ	単位	意味	取得方法
g	m/s ²	重力加速度	定数
ρ	kg/m ³	空気の密度	定数
μ		転がり抵抗係数	定数
C_d		空気抵抗係数 (CD 値)	カタログ値
A	m ²	車両前面投影面積	カタログ値
M	kg	車両重量	カタログ値
M_i	kg	慣性重量	定数
θ	rad	坂路勾配	地図データから
v	m/s	自動車の走行速度	GPS より取得

なお、 θ については、GPS の位置データを元に、地図上の標高データを参照することで算出している。そのため、EV モデルのエネルギー推定に必要な計測値は、GPS で計測した位置と速度のみである。多くの誤差が含まれる GPS の位置データの補正手法については、先行研究 [25] で利用したマップマッチングアルゴリズムを利用している。

$$\begin{aligned}
 P_e(t) &= (P_{AIR} + P_{ROLL} + P_{SLOPE} + P_{ACC}) \\
 &\quad \times \frac{1}{\eta(v(t), P_d(t))} \\
 &= \left(\frac{1}{2} \rho C_d A v(t)^2 \times v(t) + \mu M g \cos \theta \times v(t) \right. \\
 &\quad \left. + M g \sin \theta \times v(t) + \frac{1}{2} (M + M_i) \frac{dv(t)}{dt} \times v(t) \right) \\
 &\quad \times \frac{1}{\eta(v(t), P_d(t))} \quad (1)
 \end{aligned}$$

また、EV は減速時に運動エネルギーの一部を電気エネルギーに変換して充電を行うエネルギー回生技術が用いられている。実際の EV の回生は安全を考慮して以下のように制限されている [7]。ただし、 G は重力加速度を表す。

- 加速度が $-0.15 G$ 以下の際には、 $-0.15 G$ 分の運動エネルギーが回生される。
- 速度が 7 km/h 以下であれば回生は行われない。

したがって、実際の回生時における $P_e(t)$ は式 (2) のようになる。ただし、回生の際のエネルギー変換効率は η と同等とする。また、 P_0 は加速度 $-0.15 G$ のときのモータの仕事率である。

$$P_e(t) = \begin{cases} P_d \times \eta & (P_d(t)/(Mv(t)) > -0.15 G \\ & \text{かつ } v(t) > 7 \text{ km/h} \\ P_0 \times \eta & (P_d(t)/(Mv(t)) \leq -0.15 G \\ & \text{かつ } v(t) > 7 \text{ km/h} \\ 0 & (v(t) \leq 7 \text{ km/h}) \end{cases} \quad (2)$$

$P_e(t)$ を時間積分することで消費電力量 E_e を求めることができる。ただし、 c は [J] から [kWh] への単位変換のための定数 ($1/(3600 \times 1000)$) である。

$$E_e = c \int_{t_{start}}^{t_{end}} P_e(t) dt \quad (3)$$

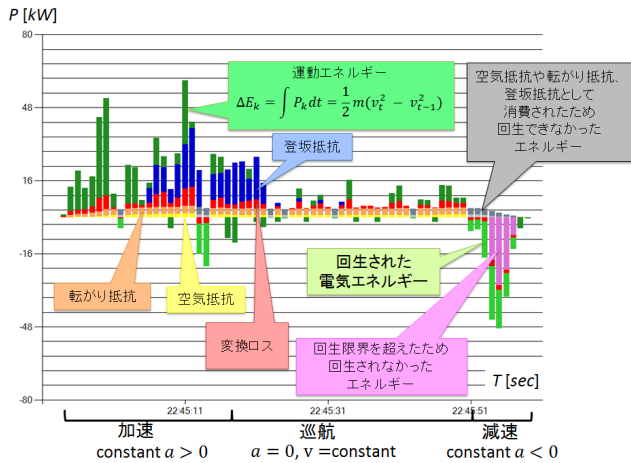


図 3 EV モデルによる電力消費推定の例
Fig. 3 Power estimation by EV model.

式 (1), 式 (2), 式 (3) を基に EV の消費電力 (瞬時値) について説明する. 図 3 は実際の走行における発進から停止までの走行ログから EV モデルでの推定値を示したグラフであり, 横軸は時刻, 縦軸が推定した消費電力である. 図 3 ではまず, 加速時に自動車を加速させるために P_{ACC} (緑色) を消費した. 次に一定速度を維持したまま坂道を上る際に P_{SLOPE} (青色) を消費した. その後減速時にブレーキによりエネルギーを回生 (黄緑色) したが, 強い減速を行ったために回生ブレーキのほかに摩擦ブレーキを併用したのでエネルギー損失 (桃色) も発生した. 図 3 においては P_{SLOPE} と P_{ACC} が瞬間の消費電力として示されるが, これらの電力は減速時や坂道を下るときに回収される. したがって, 最終的なエネルギー損失に影響するのは転がり抵抗, 空気抵抗, エネルギー変換による損失 (赤色), 摩擦ブレーキによる損失, エアコンや電装品による消費である.

4.3 ECOLOG テーブル

EV モデルによって推定されたエネルギー消費量は CAN データや GPS データとともにデータベース内に蓄積される. このテーブルを ECOLOG テーブルと名付けた. ECOLOG テーブルでは 1 秒ごとに時間正規化したデータを蓄積する. これにより EV エネルギー消費量 (積算値) を求める時間積分 (式 (3)) を, 式 (4) に示す単純な加算集約により計算できるようになる.

$$E_e = c \sum_{t=t_{start}}^{t_{end}} P_e(t) \Delta t \quad (\text{ただし, } \Delta t = 1 \text{ sec.}) \quad (4)$$

ECOLOG テーブルに蓄積される主なデータ要素としてはセンサから取得した時刻, 緯度, 経度, 車速, 地図データから取得される標高, EV モデルにより計算される P_{AIR} , P_{ROLL} , P_{SLOPE} , P_{ACC} , η , $P_e(t)$ などが含まれる.

4.4 ECOLOG データベース

ECOLOG データベースは, 先行研究 [2] で示したデータベーススキーマを元に構築した.

ECOLOG データベースにおいて, ある時刻に運転者が車を運転して, ある場所から別の場所へと移動することを 1 回のトリップと定義する. たとえば, 「運転者 A」が「車 1」を運転して時刻「2018/12/18 08:34:48」に「運転者 A 自宅」を出発し, 時刻「2018/12/18 09:44:49」に「運転者 A オフィス」に到着したという移動は, 「往路」のトリップであるといえる. ECOLOG テーブルに対する検索では, キーとしてトリップやセンサはもちろん, トリップテーブルを介して運転者や車, 時間, 場所が利用可能である. また, 検索や集約の単位として利用できる地図情報として道路リンクや解析者の興味に基づく道路区間 SL, 道路セグメントがある.

次節で, 道路リンクと SL の詳細を説明する. なお, 本論文では, SL を用いた有用な EV の推定消費エネルギーデータの活用事例を示すことが主な目的であるため, 本論文の範疇外の道路セグメントに関する説明は省略する.

また, 本研究の実験環境として, Microsoft SQL Server を利用し, このデータベーススキーマを反映したデータベースを構築, 運用を行っている.

4.5 道路リンクと SL

道路リンクは, 交差点間の 1 つの道路を 1 つのリンクとして示したものである. 本研究では, 国土交通省が公開している数値地図 2500 (空間データ基盤) [26] を用いた. 一方で我々は, データ解析者が意味があると考える道路区間を, 解析者自身が興味や関心に基づき自由に設定可能にすることで, 自動車の消費エネルギーデータに対し, 有用なデータ集計が可能になると考えた. データ解析者が意味があると考える道路区間の例として, 高速道路や一般道などの走行パターンが大きく変わる道路カテゴリに基づく道路区間や, 有名な交差点やインターチェンジ間の道路区間, 渋滞がよく起きる・起きにくい道路区間などがあげられる. 道路リンクは, 交差点間という道路上における小さな区間を示したものであり, ほとんどの場合データ解析者が意味があると考える道路区間としては非常に小さく, 有用なデータ集計に利用するには不十分である. そこで, 我々は, 解析者の興味に基づく道路区間 SL を, 「任意の道路リンクの集合」として ECOLOG データベース内に作成可能にした [3].

SL により, 多様な「データ解析者にとって興味・関心のある道路区間」という単位での集計を高速に行うことができる.

4.6 Semantic Editor

本節では, ECOLOG データベース内に SL を作成・編集

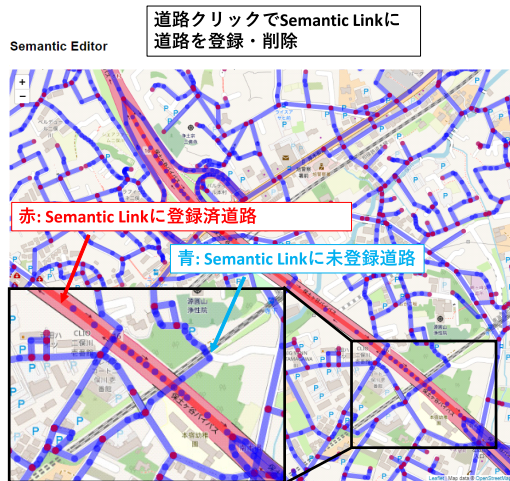


図 4 Semantic Editor の表示例
Fig. 4 An example of Semantic Editor.

するための UI である Semantic Editor (図 4) について説明する。

図 4 で示すように、Semantic Editor には地図上に道路リンクデータが表示される。SL を作成する時点では、すべての道路が未登録道路となっている。表示された地図上の道路をクリックすることで、編集中の SL にその道路リンクを登録するか否かを選択することができる。地図上の道路が赤色であれば編集中の SL にその道路が登録されている、青色であれば編集中の SL にその道路が登録されていないことを示す。

この Semantic Editor は、環境を問わず気軽に利用できるようにするため、Web アプリケーションとして実装を行った。この UI により、データ解析者が求める SL を自由に作成・編集が可能になる。

5. 多変量データ解析支援システム

本章では、我々の先行研究 [4], [5] に対して、拡張を行った部分を中心に説明する。

5.1 データ解析支援システムの概要と機能拡張

データ解析支援システムの概要を図 5 に示す。このシステムでは (PC)²L という SQL ライクな言語によりデータ操作を行った状態を保存・再現することが可能である [5]。以下で示す手順で、多変量データ解析者を支援する。

- (1) 1 つのリレーションを PCP により可視化する。
- (2) PCP を補完する形で、任意のグラフの描画を行う (本論文における機能拡張)。
- (3) 可視化結果をもとに、PCP 上でインタラクション (データ操作) を行う。その際、データ操作結果をリアルタイムに (2) で表示したグラフに反映する。
- (4) データ解析者が所望するときに、(2), (3) の解析過程のスナップショットを (PC)²L で保存する。

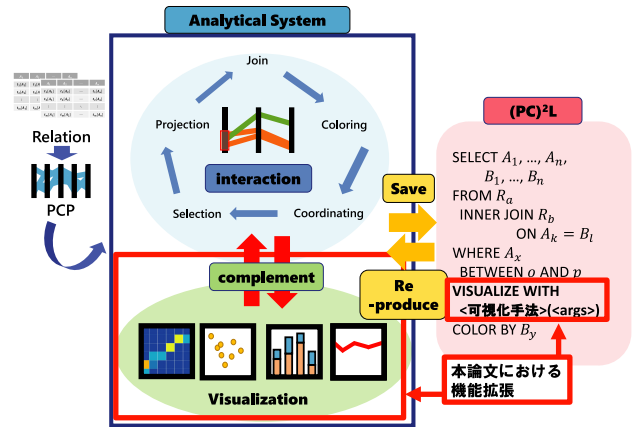


図 5 多変量データ解析支援システムの概要図
Fig. 5 A multivariate data analysis assistance system overview.

(5) (2)–(4) を繰り返す。その際、過去のスナップショットに戻る必要がある場合は該当する (PC)²L を入力し、システム上にデータ解析過程を再出力する。

(6) データ解析者が所望の可視化結果を獲得する。

上記手順 (2) に示したように、先行研究 [5] に対して本論文では、グラフ描画によるデータ可視化およびそれともなう (PC)²L の文法拡張を行った。具体的には、グラフ描画可視化の状態を記述するための句である VISUALIZE WITH 句を (PC)²L に追加した。この句ではグラフの種類 (図 5 における <可視化手法>) を指定する。現時点で指定可能な可視化手法を表 2 に示す。PCP 上の任意の軸を引数指定した積み上げ棒グラフや散布図などが利用可能である。これらの使用方法と例については 6 章で述べる。

5.2 実装システムの表示例

実装システムの画面の例を図 6 に示す。実装システムは、先行研究 [4], [5] と同様に、環境を問わず利用できるようにするため、Web ブラウザを通して多くの端末から利用できるように構築した。

図 6 の A : PCP View では、指定したリレーションのデータを可視化した PCP が表示され、先行研究 [4] で定義したデータに対するインタラクションのなかでも、Selection, Coloring, Coordinating が可能である。

図 6 の C : Join & Projection Button では、横一行がリレーション 1 つに対応するトグルボタンが表示される。このボタンにより、先行研究 [4] で定義したデータに対するインタラクションの Join と Projection が利用可能である。ボタン最左部には、Join のためのリレーション名が表示されたリレーションボタンが配置されており、クリックすることで結合条件を選ぶための画面が表示される。そこで指定した結合条件に応じた Join を実行することが可能である。なお、すでに Join されているリレーションボタンを再度クリックすると、Join が解除できる。リレーションボ

表 2 VISUALIZED WITH 句で指定できる可視化手法
Table 2 Available methods at VISUALIZED WITH statement.

可視化手法名	記法	引数
積み上げ棒グラフ	$BAR(A_x, A_y^1, \dots, A_y^n)$	A_x : X 軸に対応する属性名 A_y^1, \dots, A_y^n : Y 軸に積み上げる属性名
折れ線グラフ	$LINE(A_x, A_y)$	A_x : X 軸に対応する属性名 A_y : Y 軸に対応する属性名
散布図	$SCATTER(\text{xAxes}=(A_x^1, \dots, A_x^n), \text{yAxes}=(A_y^1, \dots, A_y^n), \text{Regression}=reg)$	A_x^1, \dots, A_x^n : X 軸に対応する属性名 A_y^1, \dots, A_y^n : Y 軸に対応する属性名 reg : 回帰直線の表示状態を表す属性 (bool 値, true/false)
ヒートマップ	$HEATMAP(A_x, A_y, d)$	A_x : X 軸に対応する属性名 A_y : Y 軸に対応する属性名 d : ヒートマップの分割数
バイオリン図	$VIOLIN(A)$	A : 属性名

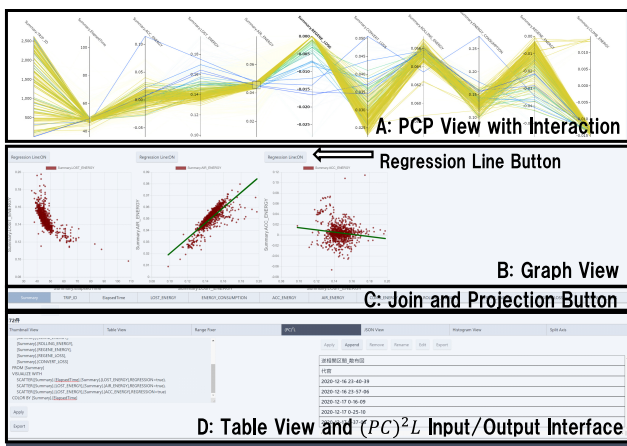


図 6 多変量データ解析支援システムの表示例

Fig. 6 An example of a multivariate data analysis assistance system screen.

タンより右側には、Projection のための軸ボタンが配置されており、クリックすることで軸の表示/非表示を切り替えることができる。

図 6 の D: Table View & (PC)²L Input/Output Interface では、A、C でのインタラクションを反映したデータセットのテーブル表示と (PC)²L の入出力を受け付ける UI を持つ。

図 6 の B: Graph View では、(PC)²L の VISUALIZE WITH 句で指定したグラフが表示される。A、C 上のインタラクションを反映したデータセットがグラフ上に表示される。

6. データ解析例

本章では、構築した EV 推定消費エネルギーデータ解析システムを用いたデータ解析例を示す。解析例に使用するデータセットは、ある被験者の通勤時に収集したものを利用する。以下の節で示す 3 つの解析例により、解析システムを利用した SL による集計を行った EV の推定エネルギー

表 3 解析例 1 で使用するデータセット
Table 3 Dataset used at the analysis example 1.

属性	値
取得期間	2013-01-07~2013-07-25
トリップ数	174
取得データ	GPS データ, CAN データ

表 4 解析例 1 で使用する SL “General”

Table 4 SL “General” used at the analysis example 1.

属性	値
走行距離	約 10 km
説明	被験者復路の一般道区間

表 5 解析例 1 で使用する SL “Highway”

Table 5 SL “Highway” used at the analysis example 1.

属性	値
走行距離	約 13 km
説明	被験者復路の高速道路区間

ギーデータが有用であることを示す。解析例 1 では、EV と ICV の消費エネルギーの比較を行うデータ解析例を示す。解析例 2 では、解析例 1 で利用した SL 内の道路区間を SL として改めて定義し、その SL と EV の消費エネルギーの要因データを利用したデータ解析を示す。解析例 3 では、他 2 つの解析例と異なり、複数の SL の特徴を比較する解析例を示す。

6.1 データ解析例 1: EV と ICV の特性の比較

解析例 1 と解析例 2 では、ECOLOG データを SL で集計したデータを解析し、被験者が走行した場合の EV と被験者の ICV の消費エネルギーに関する特性を明らかにする。利用したデータセットは、表 3 に示す。データの集計に利用した SL については、表 4、表 5 に示した。被験者復路が一般道路、高速道路区間という意味を理解しやすい

表 6 リレーション “EV vs. ICV” の属性
Table 6 Attributes of relation “EV vs. ICV”.

属性名	図 7 における属性のラベル	説明
LOST_ENERGY_W2W_BY_L_Highway	区間 Highway での推定エネルギー損失	WtW 換算後の区間 Highway を走行したときの推定エネルギー損失 [L]
TRIP_TIME_Highway	区間 Highway での走行時間	区間 Highway を走行するのにかかった時間 [s]
CONVERT_LOSS_Highway	区間 Highway での変換ロス	区間 Highway を走行したときの推定変換ロス [kWh]
CONSUMED_FUEL_W2W_BY_L_Highway	区間 Highway での燃料消費量	WtW 換算後の区間 Highway を走行したときの ICV の燃料消費量 [L]
TRIP_DIRECTION	トリップの方向	TRIP の方向 (復路 or 往路 or その他)
LOST_ENERGY_W2W_BY_L_General	区間 General での推定エネルギー損失	WtW 換算後の区間 General を走行したときの推定エネルギー損失 [L]
TRIP_TIME_General	区間 General での走行時間	区間 General を走行するのにかかった時間 [s]
CONVERT_LOSS_General	区間 General での変換ロス	区間 General を走行したときの推定変換ロス [kWh]
CONSUMED_FUEL_W2W_BY_L_General	区間 General での燃料消費量	WtW 換算後の区間 General を走行したときの ICV の燃料消費量 [L]

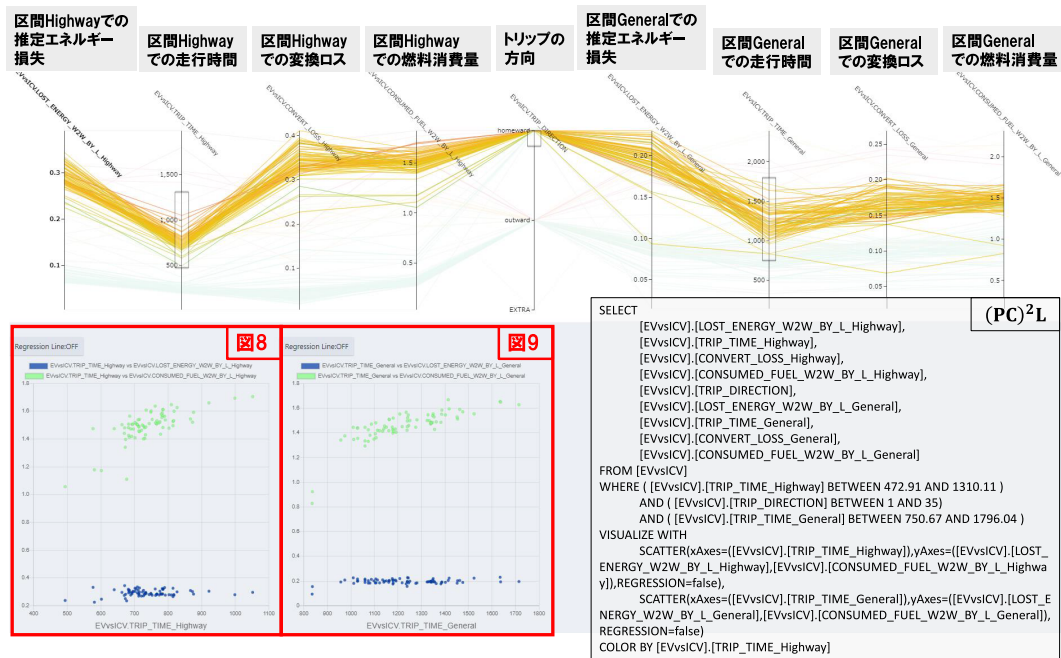


図 7 解析例 1: EV と ICV の消費エネルギー比較

Fig. 7 A comparison of energy consumption between EV and ICV.

形での分割が可能のため、以上のような形で2つのSLをSemantic Editorを用いて作成した。使用したリレーションを表6に示した。EVとICVの消費エネルギーを公平に比較するために、ECOLOGデータベースによるデータ集計時に、WtW換算^{*4}を行った。すなわち、推定エネルギー損失にはEVのWtW換算係数、CANデータから取

得したICVの燃料消費量にはICVのWtW換算係数を乗算し、リレーション“EV vs. ICV”として多変量データ解析支援システムで表示した。

まずは、時間とエネルギーの散布図により、ICVとEVの消費エネルギーの違いを可視化することとした。その結果を図7に示す。図7では、VISUALIZE WITH句に2つの散布図を指定した(PC)²Lを入力して散布図の表示を行った^{*5}。表示した散布図は、今回作成した高速道路区間 Highway のデータを表示する散布図と一般道区間 General のデータを表示する散布図の2つである。また、PCPを用いて、散布図で表示するデータから今回の対象外データを除外する

*4 Well-to-Wheel 換算。その自動車が社会全体でいかにどのエネルギーを消費したかを示す値への換算。原油の採掘から走行までに利用したすべてのエネルギー量をガソリンの熱量に換算したもの。単位は、ガソリンの量に換算したため、L。「平成30年度省エネルギー政策立案のための調査事業(自動車におけるエネルギー性能の評価方法に関する調査検討事業)」、https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H30FY/000787.pdfの値を利用。換算係数として、EVは0.875/8700 * 1000/0.653 L/kWh, ICVは、1/0.875 L/Lをそれぞれ利用。

*5 図7の余白に(PC)²Lもあわせて記載した。同様に図12、図16にも(PC)²Lを記載した。

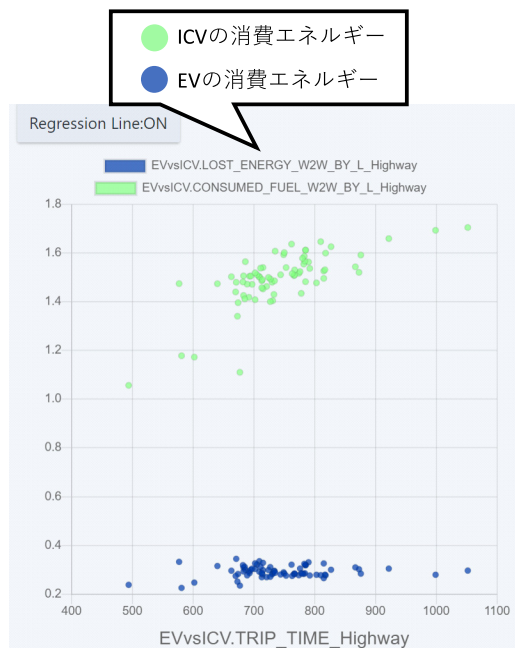


図 8 解析例 1：高速道路区間の EV と ICV の消費エネルギー比較
Fig. 8 A comparison of energy consumption on the highway road section between EV and ICV.

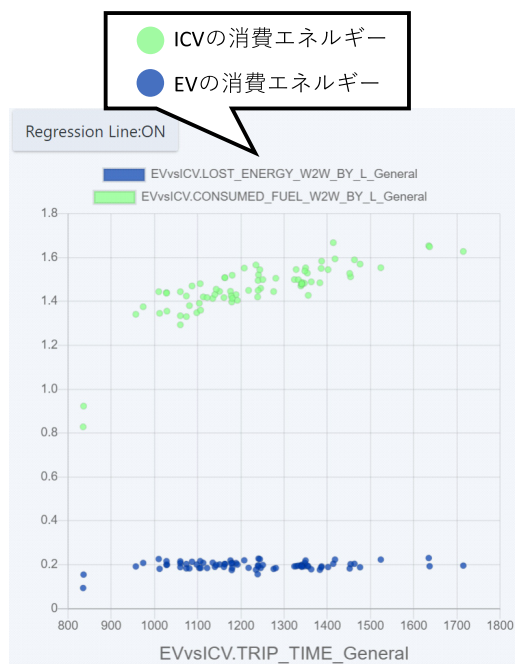


図 9 解析例 1：一般道路区間の EV と ICV の消費エネルギー比較
Fig. 9 A comparison of energy consumption on the ordinary road section between EV and ICV.

([TRIP_DIRECTION]) (トリップの方向) が復路以外のデータを除外する) などの処理を行った。図 7 で表示した 2 つの散布図の拡大図をそれぞれ図 8, 図 9 に示す。図 8 には, X 軸が [TRIP_TIME_Highway] (区間 Highway での走行時間), Y 軸に [CONSUMED_FUEL_W2W_BY_L_Highway] (区間 Highway での燃料消費量) および [LOST_ENERGY_W2W_BY_L_Highway] (区間 Highway での推定エネルギー損失)

を指定した散布図, すなわち, 高速道路区間の ICV と EV の消費エネルギーデータを可視化した散布図を示す。「もし ICV と同じ運転のまま EV に乗り換えた場合」の消費エネルギーデータが図 8 中の青点, ICV の消費エネルギーデータが図 8 中の緑点として表示されている。この散布図を見ると, EV の消費エネルギーは 0.2 から 0.4L 付近, ICV の消費エネルギーは 1.4 から 1.6L 付近に主に分布しており, ICV のほうが EV と比較して約 4 倍から 7 倍消費エネルギーが大きいことが読み取れる。図 9 には, X 軸が [TRIP_TIME_General] (区間 General での走行時間), Y 軸に [CONSUMED_FUEL_W2W_BY_L_General] (区間 General での燃料消費量) および [LOST_ENERGY_W2W_BY_L_General] (区間 General での推定エネルギー損失) を指定した散布図, すなわち, 一般道路区間の ICV と EV の消費エネルギーデータを可視化した散布図を示す。図 9 の消費エネルギー量を見てみると高速道路区間と同様に, ICV のほうが EV と比較して消費エネルギーが大きいことが確認できる。以上のことから, 被験者の ICV は EV に乗り換えることで, WtW 換算を行ったエネルギー消費量がかなり小さくなるということが, 散布図による可視化により示された。これは, 車両走行ログを実際に収集し, 個人のデータに合わせた有用な結果が得られたといえる。

また, 図 8, 図 9 から, ICV は時間に対して消費エネルギーが正相関を持つこと, EV は時間に対して消費エネルギーの相関が弱いことが推察される。そこで, 図 8, 図 9 の ICV のデータ, EV のデータそれぞれを別々の散布図に分割して表示し, 相関を確認することとした。ただし, Highway と General ではほぼ変わらない結果となったため, 本論文では, General の結果を省略する。なお, 多変量データ解析支援システムの状態は, 随時 (PC)²L で保存することができる。そのため, PCP で行ったデータ選択をそのままに, VISUALIZE WITH 句だけを書き換えるだけで, この変更が可能である。

新たに描画した散布図をそれぞれ図 10, 図 11 に示す。図 10 の決定係数を見ると, 約 0.02 である。すなわち, この SL “Highway” においては, 時間に対して EV の推定エネルギー損失は無相関であることが確認できた。一方, 図 11 の決定係数を見ると, 約 0.52 である。すなわち, この SL “Highway” においては, 時間に対しての ICV の燃料消費量は弱いながらも正相関を示していることが確認できた。以上のことから, ICV は道路を走行する時間が短くなる (大きい速度で走行する) ほど, 消費エネルギーを少なく走行できることが分かる。その一方で, EV は走行時間とは違う要因で消費エネルギーが変化するということが推察される。このことから, この被験者の運転環境や運転スタイルにおいて, ICV と EV では, 消費エネルギーを少なくする運転をする上で意識する点が異なるという事実を示すことができた。

表 9 リレーション “Summary” の属性
Table 9 Attributes of relation “Summary”.

属性名	図 12 における属性のラベル	説明
TRIP_ID	トリップの ID	走行トリップの ID
ElapsedTime	走行時間	区間 ICs を走るために要した時間 [s]
ACC_ENERGY	加速抵抗による消費エネルギー	区間 ICs を走るために要した加速抵抗による消費エネルギー [kWh]
LOST_ENERGY	エネルギー損失	区間 ICs を走るために要したエネルギー損失 [kWh]
ENERGY_CONSUMPTION	消費エネルギー	区間 ICs を走るために要した消費エネルギー [kWh]
AIR_ENERGY	空気抵抗による消費エネルギー	区間 ICs を走るために要した空気抵抗による消費エネルギー [kWh]
CLIMB_ENERGY	登坂抵抗による消費エネルギー	区間 ICs を走るために要した登坂抵抗による消費エネルギー [kWh]
ROLLING_ENERGY	転がり抵抗による消費エネルギー	区間 ICs を走るために要した転がり抵抗による消費エネルギー [kWh]
REGENE_ENERGY	回生エネルギー	区間 ICs を走るために要した回生エネルギー [kWh]
REGENE_LOSS	摩擦ブレーキによるエネルギー損失	区間 ICs を走るために要した摩擦ブレーキによるエネルギー損失 [kWh]
CONVERT_LOSS	変換ロス	区間 ICs を走るために要した変換ロス [kWh]

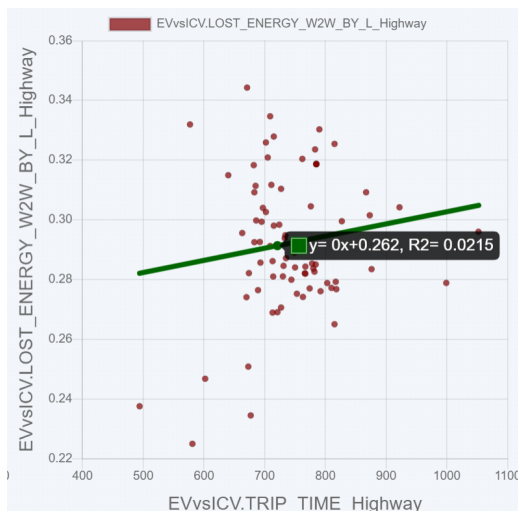


図 10 解析例 1：高速道路における走行時間に対する EV の推定エネルギー損失の相関

Fig. 10 A correlation between EV's energy loss and trip time on the highway.

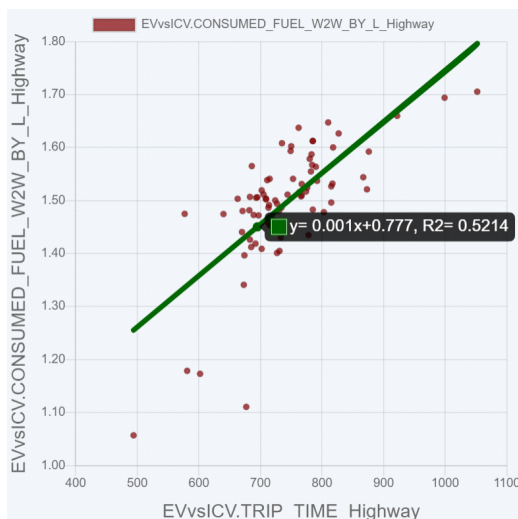


図 11 解析例 1：高速道路における走行時間に対する ICV の燃料消費量の相関

Fig. 11 A correlation between ICV's energy loss and trip time on the highway.

表 7 解析例 2 で使用するデータセット

Table 7 Dataset used at the analysis example 2.

属性	値
取得期間	2016-05-16 ~ 2020-12-14
トリップ数	923
取得データ	GPS データ

表 8 解析例 2 で使用する SL “ICs”

Table 8 SL “ICs” used at the analysis example 2.

属性	値
走行距離	約 1 km
説明	SL “Highway” の経路中から、ある 2 つのインターチェンジ間の経路を SL としたもの

6.2 データ解析例 2：EV の消費エネルギーの要因解析

データ解析例 2 では、データ解析例 1 で明らかにすることができなかった、同被験者が運転した場合の EV の消費エネルギーの変化する要因を明らかにするデータ解析を示す。利用するデータセットは、表 7 に示す。使用する SL は、表 5 で示した道路区間内にある、2 つのあるインターチェンジ間の道路区間 “ICs” である (表 8)。このデータ解析の結果として、走行時間に対し、推定エネルギー損失が ICV とは異なり逆相関を示したため、この SL を対象としたデータ解析例を示す。使用したリレーションを表 9 に示す。解析例 1 と同様にリレーション “Summary” を多変量データ解析支援システム上でデータ解析を行った。

図 12 に、表示したリレーション “Summary” に対し線の色を属性 [ElapsedTime] (走行時間) で色分け*6した PCP を示した。[ElapsedTime] 以外の PCP の各軸の色の順番を見ることにより、[ElapsedTime] と各軸間の相関の見当をつけることができる。図 12 中の左から 4 番目の [LOST_ENERGY] (エネルギー損失) および 6 番目の [AIR_ENERGY] (空気抵抗による消費エネルギー) の軸上

*6 赤に近いほど値が大きく、青に近いほど値が小さい。

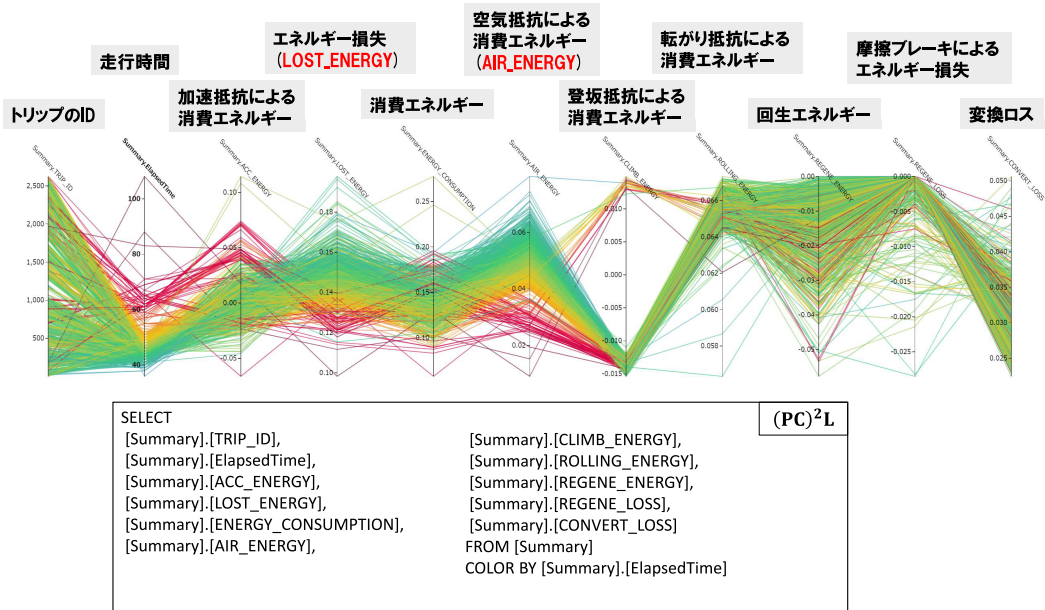


図 12 解析例 2：属性 [ElapsedTime] で PCP を色分け
 Fig. 12 A PCP colored by an attribute “ElapsedTime”.

の線が、おおむね上から順番に緑 → 黄 → 赤と推移しており、[ElapsedTime] と相関がある可能性が高いと見当をつけることができる。

その後、相関がある可能性が高い各軸と [ElapsedTime] の散布図を描画することで、より正確な相関を把握することができる*7。属性間の相関を発見するその他の手法として、散布図行列が候補としてあげられる。散布図行列は属性数の 2 乗に比例して散布図を描画するため、属性数が多いリレーションでは、非常に大きい画面空間を使う必要がある。そのため、PCP によって相関の有無をある程度把握し、描画したい散布図の優先順位を決めることは、データ可視化をとまなうデータ解析にとっては非常に有用である。

図 13、図 14 に、[ElapsedTime] を X 軸、PCP で [ElapsedTime] と相関がある可能性が高いと見当をつけた [LOST_ENERGY], [AIR_ENERGY] をそれぞれ Y 軸とした 2 つの散布図を示した。図 13 によると、走行時間と [LOST_ENERGY] の間の決定係数は約 0.51 である。そのため、この道路区間 “ICs” においては、走行時間に対して EV のエネルギー損失は一定の逆相関を示すことが分かる。すなわち、EV は走行する道路次第で、走行時間に対して ICV とは逆の特性、逆相関を示すことがこの散布図から示唆される。また、図 14 によると、走行時間と [AIR_ENERGY] の間の決定係数は、約 0.84 である。そのため、道路区間 “ICs” においては、走行時間に対して空気抵抗による消費エネルギーが強い逆相関を示す。この現象は、走行時間が小さいほど、この道路区間を走行する際の平均速

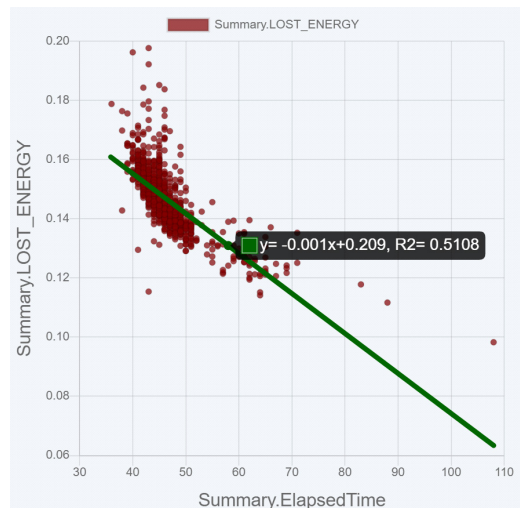


図 13 解析例 2：走行時間に対する推定エネルギー損失の散布図
 Fig. 13 A scatter plot of elapsed time vs. estimated energy loss.

度が上がり、空気抵抗が増えるためと説明ができる。さらに、X 軸に [AIR_ENERGY], Y 軸に [LOST_ENERGY] の散布図 (図 15) を作成した。図 15 によると、ほぼ $y=x$ の回帰直線かつ決定係数は 0.66 であるため、道路区間 “ICs” においては、エネルギー損失のほとんどが空気抵抗成分であることが推察される。

以上のことから、SL を適切に作成することにより、この被験者の運転環境や運転スタイルにおいて、ICV とは反対の相関である時間に対する EV の消費エネルギーの逆相関を、解析システムから把握することができた。以上のように、有用な結果を得るためには、本システムを利用して、SL の編集やデータ操作、データ可視化を組み合わせた試

*7 PCP は、データ全体を把握することが難しいため、軸間の関係を正確に把握することが難しいと考えられる。そのため、データ全体を視認することができる散布図で補完することで、より正確な軸間の関係を把握することが望ましいといえる。

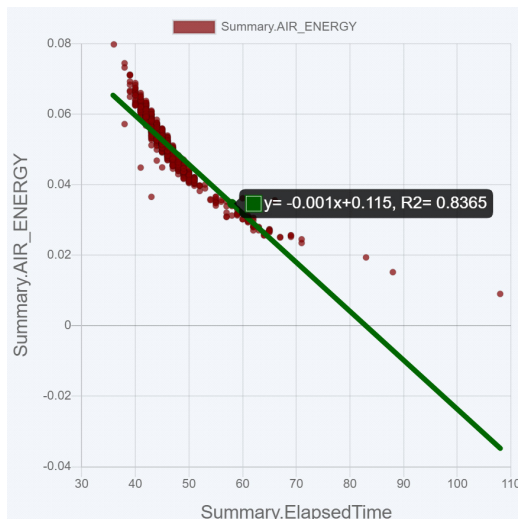


図 14 解析例 2：走行時間に対する空気抵抗による推定消費エネルギーの散布図

Fig. 14 A scatter plot of elapsed time vs. estimated energy consumption of air resistance.

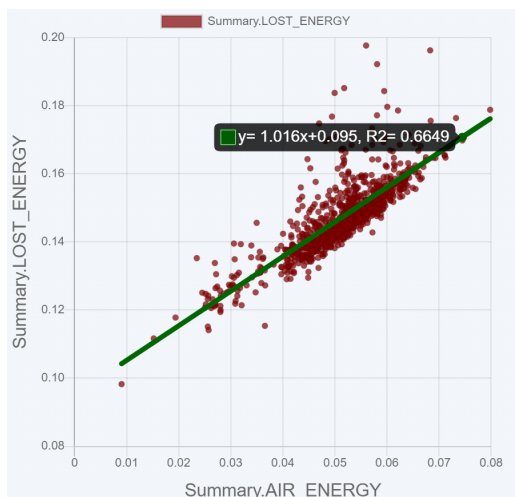


図 15 解析例 2：空気抵抗による推定消費エネルギーに対する推定エネルギー損失の散布図

Fig. 15 A scatter plot of estimated energy consumption of air resistance vs. estimated energy loss.

行錯誤を行う必要がある。今回は、簡単のため、エアコンによる消費電力の分析を省略した。実際の EV では、温度と走行時間に依存するエアコンという消費エネルギーの要因が存在するため、ICV と比べてより状況や道路区間に依存する特性があると考えられる。エアコンを含めたデータ解析については、今後の課題とする。

6.3 データ解析例 3：定速走行時の EV の消費エネルギーの SL 間比較

データ解析例 3 では、車両のアダプティブクルーズコントロール (ACC) 機能を利用した定速走行実験により収集したデータを利用した。この実験は、渋滞が発生していない高速道路において、制限速度で一定速度の走行を行っ

表 10 解析例 3 で使用するデータセット

Table 10 Dataset used at the analysis example 3.

属性	値
取得期間	2020-07-10~2021-02-12
データ件数	82 件
取得データ	GPS データ
説明	ACC による定速走行実験データ

表 11 解析例 3 で使用する SL “HILLCLIMB.HIGHWAY”

Table 11 SL “HILLCLIMB.HIGHWAY” used at the analysis example 3.

属性	値
走行距離	約 1.8 km
走行速度	70 km/h
説明	SL “Highway” の経路中の道路。主に上り坂。

表 12 解析例 3 で使用する SL “DOWNHILL.HIGHWAY”

Table 12 SL “DOWNHILL.HIGHWAY” used at the analysis example 3.

属性	値
走行距離	約 1.9 km
走行速度	70 km/h
説明	SL “Highway” の経路中の道路。主に下り坂。

表 13 解析例 3 で使用する SL “UPDOWN.HIGHWAY”

Table 13 SL “UPDOWN.HIGHWAY” used at the analysis example 3.

属性	値
走行距離	約 3.2 km
走行速度	80 km/h
説明	SL “Highway” の経路中の道路。上り坂と下り坂が交互に繰り返される。

た、このデータを利用することで、ドライバーの運転スタイルにかかわらず SL ごとの消費エネルギーの特性を比較することを目指す。利用するデータセットは、表 10 に示す。使用する SL を、表 11、表 12、表 13 に示す。これらの SL は、表 5 で示した高速道路区間内の区間であり、SL “ICs” と異なる SL である。また、SL を利用してこれらのデータセットを集計することで得たリレーションを表 14 に示す。このリレーション “CSC” における消費エネルギーに関する属性は、SL 間を比較するため、各消費エネルギー量から SL の道なり距離を除外したものを利用する。

図 16 に、表示した PCP と SL ごとのエネルギー損失の要因ごとの平均値の積み上げ棒グラフを示す。PCP により、クラスタを見ることで、SL の消費エネルギーの違い、積み上げ棒グラフにより、SL ごとのエネルギー損失要因の割合の違いを可視化することを目指した。

PCP に表示されている線は、[SLID] (SL の ID) により SL ごとに色分け (緑: HILLCLIMB.HIGHWAY,

表 14 リレーション “CSC” の属性
Table 14 Attributes of relation “CSC”.

属性名	図 16 における属性のラベル	説明
TRIP_ID	トリップの ID	走行トリップの ID
ELAPSED_TIME	走行時間	SL を走るために要した時間 [s]
AVG_SPEED	平均速度	SL における平均速度 [km/h]
STDEVP_SPEED	速度の標準偏差	SL における速度の標準偏差 [km/h]
SL_ID	SL の ID	SL の ID
SL_NAME	SL の名称	SL の名称
DIST_NORMALIZED_ROLL_LOSS	転がり抵抗成分	SL を走るために要した距離あたりの転がり抵抗によるエネルギー損失 [kWh/km]
DIST_NORMALIZED_AIR_LOSS	空気抵抗成分	SL を走るために要した距離あたりの空気抵抗によるエネルギー損失 [kWh/km]
DIST_NORMALIZED_CONV_LOSS	変換ロス成分	SL を走るために要した距離あたりの変換ロス [kWh/km]
DIST_NORMALIZED_FRIC_LOSS	摩擦ブレーキロス成分	SL を走るために要した距離あたりの摩擦ブレーキによるエネルギー損失 [kWh/km]

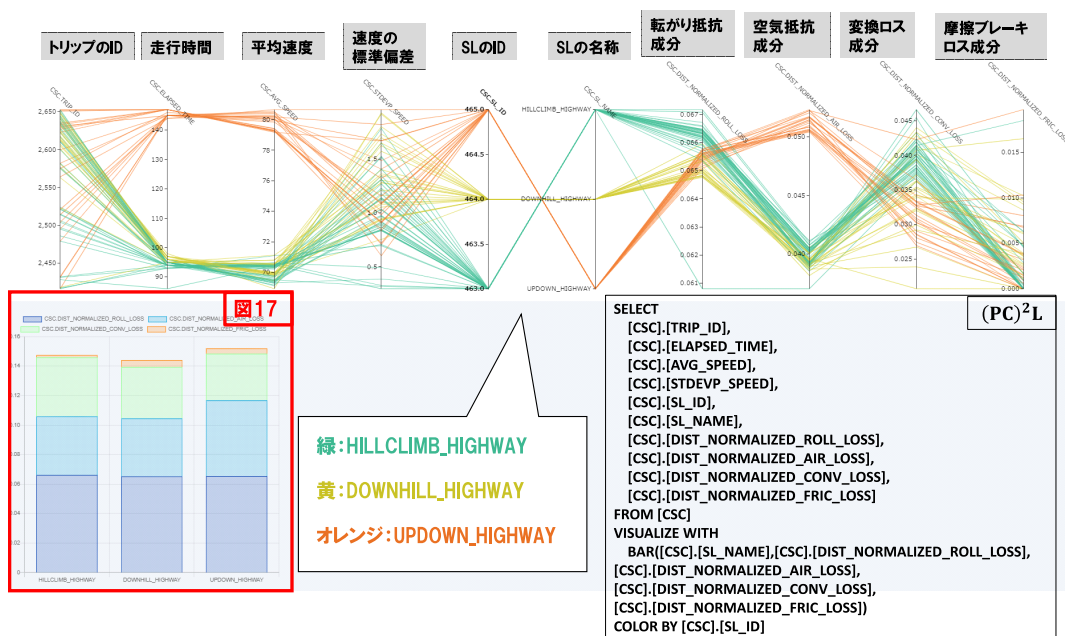


図 16 解析例 3：定速走行時の EV の消費エネルギーの SL 間比較

Fig. 16 A comparison of EV energy consumption at a constant speed between SLs.

黄：DOWNHILL_HIGHWAY，オレンジ：UPDOWN_HIGHWAY)を行った。図 16 の PCP の右端 4 つの軸であるエネルギー損失の要因 ([DIST_NORMALIZED_ROLL_LOSS] (転がり抵抗成分), [DIST_NORMALIZED_AIR_LOSS] (空気抵抗成分), [DIST_NORMALIZED_CONV_LOSS] (変換ロス成分), [DIST_NORMALIZED_FRIC_LOSS] (摩擦ブレーキロス成分)) において、線の色ごとにクラスタができていていることが見える。特に、空気抵抗成分では、UPDOWN_HIGHWAY のクラスタと HILLCLIMB_HIGHWAY と DOWNHILL_HIGHWAY のクラスタが大きく分かれていることが分かる。これは、UPDOWN_HIGHWAY における走行速度が 80 km/h に対して、他 2 つにおける走行速度が 70 km/h と走行速度の違いによるものと推察される。他の軸については、線の重なりが多く、クラスタを視認することが難しい。

積み上げ棒グラフの拡大図を図 17 に示す。図 17 は、横軸が SL 名を示し、縦軸に距離あたりのエネルギー損失成分の平均値を積み上げた棒グラフである。まず、エネルギー損失の合計では、UPDOWN_HIGHWAY、HILLCLIMB_HIGHWAY、DOWNHILL_HIGHWAY の順番で値が大きいことが分かる。次に、成分ごとに比較することで、どの成分で合計で差が出たのかを考察する。

最もエネルギー損失の合計が大きい UPDOWN_HIGHWAY は、空気抵抗成分が他の 2 つに比べて大きい一方で、変換ロス成分が他の 2 つに比べて小さいことがグラフから読み取れる。空気抵抗成分については、上述したように UPDOWN_HIGHWAY の走行速度が大きいためと考えられる。また、変換ロス成分が小さいことから、UPDOWN_HIGHWAY の道路区間の特徴として、他の 2 つの SL と比較すると、モータの入出力が小さい、あるいは

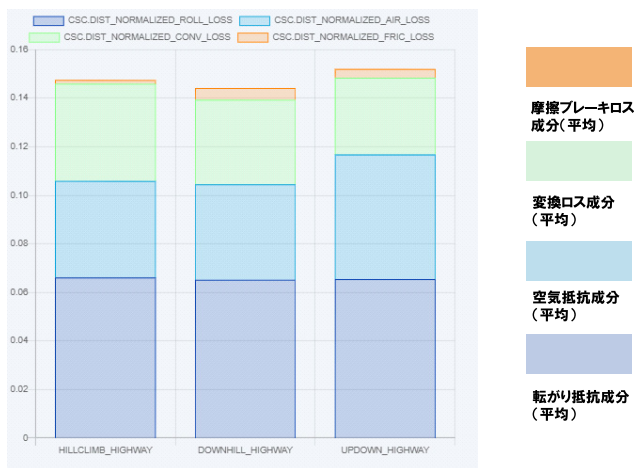


図 17 解析例 3：積み上げ棒グラフの拡大図

Fig. 17 An enlarged figure of a stacked bar graph.

は、モータ効率が優れた速度，トルクでの走行が可能な道路^{*8}であることが推察される。

一方で、HILLCLIMB_HIGHWAY に着目すると、他の 2 つの SL と比較して、摩擦ブレーキロス成分が小さい特徴があることがグラフから読み取れる。他の 2 つの SL は、下り坂が含まれる道路区間である一方、HILLCLIMB_HIGHWAY は主に上り坂である道路区間であるため、摩擦ブレーキを利用する機会が非常に少ないためと推察される。しかしながら、摩擦ブレーキ成分は、他の成分と比較して非常に小さく、エネルギー損失の合計値にほとんど影響を及ぼしていないことが把握できる。なお、定速走行時という摩擦ブレーキを利用するような強いブレーキをほとんど利用しない走行条件で、摩擦ブレーキ損失が計上された。これについて、集計前の ECOLOG データを精査して原因を確認した。その結果、GPS の速度の計測誤差に起因することが明らかになった。このように、当システムが示す結果は推定消費エネルギーに基づくものであるため、誤差が含まれる。しかし、多数のライフログを積み上げて集計したものであるため、要因の割合の把握や道路間での比較など、おおまかな傾向をつかむことはできると考えられる。

以上のことから、定速走行実験のデータと本システムを利用することで、道路区間ごとの EV の消費エネルギーの特徴の比較を行うことができた。

7. まとめと今後の課題

本研究では、SL で集計可能な EV 推定消費エネルギーデータ解析システムを構築した。また、本システムと長期間にわたって収集した実際の被験者の走行ログを利用することにより、ICV と EV の消費エネルギーの差や時間に対する特性の違い、EV の消費要因など、その人にとっての

*8 式 (1) に示されるとおり、変換ロスはモータの仕事率 $\times \eta$ によって算出される。変換効率 η はモータの回転速度と出力トルクの組によって決定される。

有用な情報を示すことができた。これにより、本システムを用いた、有用なデータ解析が可能であることを示し、自動車走行ログが EV の消費エネルギーについて有用に応用可能であることを示した。今後の課題として、データベースの性能評価、エアコンの消費電力も含めたより高度なデータ解析例などがあげられる。これらにより、本システムを用いたより多様なデータ解析が可能であることを示していく。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費（課題番号 18K11750）、および、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、ならびに横浜国立大学学長戦略経費の支援による。

参考文献

- [1] デロイトトーマツグループ：次世代車に関する消費者意識調査 2020，入手先 <<https://www2.deloitte.com/jp/ja/pages/about-deloitte/articles/news-releases/nr20200414.html>>（参照 2021-03-20）。
- [2] 齊藤祐亮，植村智明，富井尚志：EV 消費エネルギーログデータベースにおける消費電力量推定の精度検証，情報処理学会論文誌データベース（TOD），Vol.12, No.4, pp.40-52 (2019)。
- [3] Kawanuma, D., Kashiwabara, Y., Uemura, T. and Tomii, T.: Data Analysis Framework for Visualizing Correlation of Energy Consumption and Transit Time in Road Sections Using the ECOLOG Database, *Adjunct Proc. 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services*, pp.207-212 (2016)。
- [4] 濱崎裕太，植村智明，富井尚志：多変量データを SPJ 質問により統合する平行座標プロット型情報可視化システムと操作言語，情報処理学会論文誌データベース（TOD），Vol.12, No.4, pp.27-39 (2019)。
- [5] 植村智明，吉田顕策，吉瀬雄大，富井尚志：試行錯誤を許容するデータ解析支援システムと電気自動車の走行ログ解析，情報処理学会論文誌データベース（TOD），Vol.13, No.4, pp.13-26 (2020)。
- [6] Ehsani, M., Gao, Y. and Emadi, A.: *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles 2nd Edition*, Power electronics and applications series, CRC press (2010)。
- [7] 廣田幸嗣，船渡寛人，三原輝儀，出口欣高，初田匡之：電気自動車工学，森北出版 (2017)。
- [8] Felipe, J., Amarillo, J.C., Naranjo, J.E., Serradilla, F. and Diaz, A.: Energy Consumption Estimation in Electric Vehicles Considering Driving Style, *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp.101-106 (2015)。
- [9] Fei, Y., Guoyuan, W., Boriboonsomsin, K. and Barth, M.: A hybrid approach to estimating electric vehicle energy consumption for ecodriving applications, *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp.719-724 (2016)。
- [10] Chen, W., Guo, F. and Wang, F.: A Survey of Traffic Data Visualization, *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol.16, No.6, pp.2970-2984 (2015)。
- [11] 飯島護久，堀口良太：プローブデータに基づくエリア流動性情報提供に関する研究，第 9 回 ITS シンポジウム 2010 論文集，pp.1-4 (2010)。
- [12] Komamizu, T., Amagasa, T. and Kitagawa, H.: Visual Spatial-OLAP for Vehicle Recorder Data on Micro-Sized

- Electric Vehicles, *Proc. 20th International Database Engineering & Applications Symposium*, pp.358–363, Association for Computing Machinery (2016).
- [13] Wilmink, I., Olstam, J., van Noort, M. and Choudhury, C.F.: Microscopic Simulation of Eco-driving Systems Using Real-world Vehicle Models, *22nd ITS World Congress, Bordeaux*, pp.1–12 (2015).
- [14] 出縄 誠, 出口 達, 富井尚志: EV エネルギー消費ログ DB を用いた多様な可視化システムと運転状況に基づく情報の提示, *日本データベース学会論文誌*, Vol.12, No.1, pp.127–132 (2013).
- [15] Fouladgar, M. and Elmasri, R.: Formalization of network-constrained moving object queries with application to benchmarking, *Proc. 7th ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoStreaming – IWGS ’16*, pp.1–10 (2016).
- [16] Krogh, B., Pelekis, N., Theodoridis, Y. and Torp, K.: Path-Based Queries on Trajectory Data, *Proc. 22nd ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, SIGSPATIAL ’14*, pp.341–350, Association for Computing Machinery (online), DOI: 10.1145/2666310.2666413 (2014).
- [17] Herschel, M., Diestelkämper, R. and Ben Lahmar, H.: A survey on provenance: What for? What form? What from?, *The VLDB Journal*, Vol.26, No.6, pp.881–906 (2017).
- [18] Waldner, M., Bruckner, S. and Viola, I.: Graphical Histories of Information Foraging, *Proc. 8th Nordic Conf. on Human-Computer Interaction: Fun, Fast, Foundational (NordiCHI ’14)*, pp.295–304 (2014).
- [19] Mindek, P., Bruckner, S. and Gröller, M.E.: Contextual Snapshots: Enriched Visualization with Interactive Spatial Annotations, *Proc. 29th Spring Conf. on Computer Graphics (SCCG ’13)*, pp.49–56 (2013).
- [20] Gratzl, S., Gehlenborg, N., Lex, A., Pfister, H. and Streit, M.: Domino: Extracting, Comparing, and Manipulating Subsets Across Multiple Tabular Datasets, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics (TVCG)*, Vol.20, No.12, pp.2023–2032 (2014).
- [21] Godfrey, P., Gryz, J. and Lasek, P.: Interactive Visualization of Large Data Sets, *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, Vol.28, No.8, pp.2142–2157 (2016).
- [22] Derthick, M., Kolojechick, J. and Roth, S.F.: An Interactive Visual Query Environment for Exploring Data, *Proc. 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.189–198 (1997).
- [23] North, C. and Shneiderman, B.: Snap-Together Visualization: A User Interface for Coordinating Visualizations via Relational Schemata, *Proc. Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp.128–135 (2000).
- [24] 杉測剛史, 田中 譲: 関係データベースモデルに基づくデータベース可視化フレームワークの提案と実装, *電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム*, Vol.90, No.3, pp.918–932 (2007).
- [25] Uemura, T., Kashiwabara, Y., Kawanuma, D. and Tomii, T.: Accuracy Evaluation by GPS Data Correction for the EV Energy Consumption Database, *Adjunct Proc. 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services, MOBIQUITOUS 2016*, pp.213–218, ACM (2016).
- [26] 国土地理院: 数値地図 2500 (空間データ基盤), 入手先 (<http://www.gsi.go.jp/geoinfo/dmap/dm2500sdf/>) (参照 2021-03-20).



植村 智明 (学生会員)

2021 年横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程後期修了。2018 年横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程前期修了。2016 年横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科卒業。マルチメディアデータベース, 時空間データベースの研究・開発に従事。日本データベース学会, ACM 学生会員。



能條 太悟

横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程前期在学中。2021 年横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科卒業。マルチメディアデータベース, 時空間データベースの研究・開発に従事。



吉瀬 雄大

会員。

2021 年横浜国立大学大学院環境情報学府博士課程前期修了。2019 年横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科卒業。マルチメディアデータベース, 時空間データベースの研究・開発に従事。日本データベース学会学生会員。



富井 尚志 (正会員)

会, 日本データベース学会正会員。

横浜国立大学大学院環境情報研究院教授。1999 年横浜国立大学大学院工学研究科博士課程後期修了。博士 (工学)。マルチメディアデータベース, 時空間データベースの研究に従事。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 日本データベース学会正会員。

(担当編集委員 天方 大地)