

空間サンプリングされた道路データのスキーマによる EV エネルギーライフログの有効活用

七里 祐輔[†] 劉 屹[†] 曾我紗代子[†] 田中 悠斗^{††} 何 新^{††}
富井 尚志^{†††}

[†] 横浜国立大学大学院環境情報学府情報環境専攻 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

^{††} 横浜国立大学理工学部数物・電子情報系学科 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

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

E-mail: [†]{shichiri-yusuke-st,liu-yi-tk,soga-sayoko-cz}@ynu.jp, ^{††}{tanaka-yuto-kt,he-xin-fw}@ynu.jp,
^{†††}tommy@ynu.ac.jp

あらまし 本稿では、電気自動車（Electric Vehicle：EV）のエネルギーライフログを収集し、空間に紐づいたエネルギーデータ解析手法を提案する。EV のエネルギー消費は、道路勾配を始めとした道路条件や、加減速や速度帯などの走行条件によって大きく変化する。したがって、EV のエネルギー消費を推定し、地点ごとに集約・可視化したいという需要がある。本稿では、道路を一定距離で分割した「セグメント」を集約単位とし、地点ごとに消費したエネルギーを明らかにした。これにより走行や道路の分析をより精密に行うことができ、運転の意志決定支援や運転の振り返りに役立つ。様々な解析例から、EV のエネルギーライフログが有用であることを示した。

キーワード 電気自動車、時空間データ処理、地理データ活用、CAN データ

1 はじめに

近年、センサ技術やストレージ技術の発達により、実世界の大量かつ多様なデータを気軽に取得・蓄積することが可能になった [1]。中でもスマートフォンなどのスマートデバイスや IoT（Internet of Things）の普及により、ヒトの生活に関する記録である「ライフログ」が容易に利用できるようになった。しかし、ライフログは膨大かつ多様であるため、蓄積されずに捨てられているものも多い。それに対し、データの特性や利用用途に適したスキーマを設計しデータベースを構築することで、検索によって有用な情報を発見できるようになる。

一方で、気候変動問題が世界的な課題となり、脱炭素化および省エネルギー化が求められている。日本では、2030 年度において、2013 年度比で温室効果ガス 46%削減を目指すという目標が掲げられている [2]。目標達成のために、現在の日本におけるエネルギー消費の 2 割以上を占める運輸部門についても、対策が必要である。省エネルギー化や CO₂ 排出量削減を実現する次世代自動車の候補として、電気自動車（Electric Vehicle：EV）が挙げられる [3]。EV は走行時に CO₂ を排出せず、ライフサイクルにおける CO₂ 排出量も同クラスのガソリン車（Internal Combustion Vehicle：ICV）と比べて 6 割程度であるという特徴がある [4]。さらに、EV は十分大きなバッテリーを搭載していることから、非走行時にバッテリーの充電電を行うことで電力系統と電力の融通を行うこと（Vehicle-Grid Integration：VGI）が期待されている [5]。しかし、EV には航続距離が短いという課題がある。また、そのエネルギー消費は、道路勾配を始めとした道路条件や、加減速や速度帯などの走行

条件によって大きく変化する。さらに、季節による変動も大きく、特に冬の低温下ではエネルギー消費が大きく増加する [6]。したがって EV で走行する際に、いつ、どこで、何を原因としてエネルギー消費が発生するのかを知ることは重要である。

以上に対し我々は、車のライフログを収集し、EV のエネルギーデータを蓄積するデータベースを構築することを考えた。本稿における車のライフログとは、自動車の移動軌跡である GPS（Global Positioning System）データおよび、EV のエネルギー消費に関するデータを含む CAN（Controller Area Network）データの 2 種類のデータを指す。我々の先行研究では、GPS データを収集し、運動方程式に基づく物理モデル [7] により EV の要因別のエネルギー消費を推定する、「ECOLOG システム」を提案した [8], [9], [10]。また、我々の別の先行研究では、CAN データを収集することで実際のエネルギー消費を知ることができるだけでなく、ECOLOG システムと組み合わせることで、CAN データを本来の目的とは異なる目的にも利用できることを示した [11], [12]。

ここで、我々の先行研究における EV エネルギーデータベースでは、GPS データや CAN データから得られるエネルギー消費データを、時系列データとして蓄積していた。一方で、エネルギー消費を空間単位の時間積算値で示し、地点ごとの消費を可視化したいという需要もある。そこで、EV のエネルギー消費計算を、空間単位で高速かつ一貫性を保ちながら行えるスキーマを提案した [13]。この空間サンプリングされた道路データのスキーマ（以下、「空間サンプリングスキーマ」と呼ぶ）では、道路を一定距離で分割したものを「セグメント」と定義し、セグメント単位でエネルギー消費の集約を行う。本稿では、空間サンプリングスキーマに基づく EV エネルギーライフログの

有効活用の例を示す。時系列データを空間データに変換することで、走行や道路の分析をより精密に行うことができ、運転の意志決定支援や運転の振り返りに役立つ。様々な解析例から、EV のエネルギーライフログが有用であることを示す。

本論文の構成を次に示す。2 章では関連研究を示し、我々の研究との比較を行う。3 章では、我々が提案する空間サンプリングされた道路データのスキーマについて説明する。4 章では、空間サンプリングスキーマに基づき、EV のエネルギー消費という観点から、道路や走行の特徴を解析した例を示す。5 章では結論を述べる。

2 研究背景

2.1 関連研究

近年、自動車より収集した走行ログを活用する研究が盛んに行われている。特に、ITS (Intelligent Transport System : 高度道路交通システム) のための自動車内蔵センサの活用 [14] や、交通データの可視化 [15] は注目されており、多くの研究が見られる。

自動車から収集した走行ログを活用する他の研究として、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 [16]。矢野らは、プローブカーデータをもとにした EV のエネルギー消費を分散処理基盤上で管理し、EV のバッテリー残量を考慮した EV 経路探索プラットフォームの提案を行った [17]。これらはいずれもプローブカーのデータを利用しており、ただ走行するだけで簡単に集められる EV の走行データを自己のために有効活用する我々とは立場が異なる。芳澤らや Wu らは我々の先行研究 [9] と同様に、運動方程式を用いて EV のエネルギー消費を推定するモデルを提案し、走行ログを用いてその推定結果の精度を示した [18], [19]。本研究ではさらに、空間単位での集約により、走行や道路に関する様々な解析を行えることを示す。

2.2 CAN データ

CAN は、複数の電子制御装置 (Electric Control Unit: ECU) 間で通信を行う車載ネットワーク用に開発されたシリアルバス通信規格である。ドイツの Robert Bosch 社によって開発され、現在では国際規格 (ISO11898 [20] 及び ISO11519 [21]) として、ほぼすべての自動車に採用されている。CAN データはメーカーや車種によって異なるが、ICV なら燃料噴射量、EV ならバッテリーパックのセル電圧や電流、バッテリー残量、エアコンや電装品による電力出力といったデータが存在する。現在では CAN データを個人で容易に取得することができる。CAN データを利用した他の研究として、田中らは、スマートフォンから取得した位置情報と ICV の CAN データを利用して 3 次元道路情報の生成を行った [22]。Hjelkrem らは、電気バスの CAN データを利用して HVAC によるエネルギー消費の推定モデルの評価を行った [23]。一方本研究では、CAN データを車の日常的なライフログと見なし、走行や道路の分析に活用する。

2.3 ECOLOG システム

我々は先行研究 [8], [9], [10] で、ECOLOG (Energy CONsumption LOG) システムを提案してきた。ECOLOG システムでは、EV のエネルギー消費に関する検索可能なデータベースを EV のライフログから作成する。ECOLOG システムは以下の機能で構成される。

- (1) 自動車に後付けで搭載するセンサによって、自動車の走行ログ (GPS データおよび CAN データ) を収集する。
- (2) GPS データに対して、我々が構築した EV エネルギー消費モデル (以下「EV モデル」と呼ぶ) を適用し、1 秒ごとの消費電力 [W] を推定する。
- (3) GPS データや EV モデルにより推定した消費電力の瞬時値などを、データベースに蓄積する。
- (4) 地点別・時点別・走行状況別の消費電力を検索・集約する。

ECOLOG システムでは、EV の消費電力が運動方程式を用いて説明可能 [7] である点に着目し、EV のエネルギー消費を要因ごとに推定する EV モデルを定義した [10]。この EV モデルでは、移動軌跡のライフログを用いて、EV のエネルギー消費の瞬時値を要因ごとに推定する。これにより、ECOLOG データは時間に正規化されたエネルギー消費要因データとして、データベースに格納される。

要因別の消費電力推定の計算式をそれぞれ式 (1) ~ (7) に示す。式中の各パラメタについては、表 1 に示す。式 (1) ~ (4) は、車両が運動をする際に必要なエネルギーの瞬時値 (仕事率 [W]) を表しており、それぞれ加速抵抗、登坂抵抗、転がり抵抗、空気抵抗によるエネルギー消費を意味する。これらの和を $P_{DRIVING}(t)$ とする (式 (5))。この値が正の時は力行、負の時は回生ブレーキもしくは摩擦ブレーキにより減速していることができる。

力行時のモータの消費電力 $P_{ELECTRIC}(t)$ [W] を考える。モータには、電気エネルギーを機械エネルギー (運動エネルギー) に変換する変換効率が存在する。EV のモータはインバータモータであるため、変換効率としてモータ・インバータ総合効率 η を考える。 η はモータの回転速度とトルク $T(t)$ によって決定される値である。したがって車種固有の 2 変数関数 $\eta(v(t), T(t))$ と捉えることができる。 $T(t)$ はモータの出力軸トルクを表し、式 (6) により算出できる。 $\eta(v(t), T(t))$ は文献 [7] に示されたものを用いた。力行時の EV の瞬時消費電力 $P_{ELECTRIC}(t)$ [W] は $P_{DRIVING}(t)$ と変換効率の逆数 $\frac{1}{\eta(v(t), T(t))}$ の積で表すことができる (式 (7))。

$$P_{ACC}(t) = \frac{1}{2}(M + M_i) \frac{dv(t)}{dt} \times v(t) \quad (1)$$

$$P_{SLOPE}(t) = Mg \sin \theta \times v(t) \quad (2)$$

$$P_{ROLL}(t) = \mu Mg \cos \theta \times v(t) \quad (3)$$

$$P_{AIR}(t) = \frac{1}{2} \rho C_d A v(t)^2 \times v(t) \quad (4)$$

$$P_{DRIVING}(t) = P_{ACC}(t) + P_{SLOPE}(t) + P_{ROLL}(t) + P_{AIR}(t) \quad (5)$$

表 1 EV モデルのパラメタ

パラメタ	単位	意味	取得方法
g	m/s ²	重力加速度	定数
ρ	kg/m ³	空気密度	定数
μ		転がり抵抗係数	定数
C_d		空気抵抗係数 (CD 値)	定数
A	m ²	車両前方投影面積	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
$TireRadius$	m	タイヤ径	カタログ値
$ReductionRatio$		減速比	定数
θ	rad	坂路勾配	地図データ
$v(t)$	m/s	自動車の走行速度	GPS より取得
$T(t)$	Nm	モータの出力軸トルク	モータの仕事率から算出

$$T(t) = \frac{P_{DRIVING}(t) \times 1000 \times 3600 \times TireRadius}{v(t) \times ReductionRatio} \quad (6)$$

$$P_{ELECTRIC}(t) = P_{DRIVING}(t) \times \frac{1}{\eta(v(t), T(t))} \quad (7)$$

次に回生時のエネルギー回収 $P_{REGENE}(t)$ [W] について考える。EV に搭載されている、車両の力学的エネルギーを電気エネルギーとして回収する回生エネルギーは、次のように定義した。ただし、 g は重力加速度を表す。

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

この定義に従い、回生エネルギーの瞬時値 $P_{REGENE}(t)$ を式 (8) に示す。このとき、 P_0 は加速度 $-0.15g$ におけるモータの仕事率である。また、回生時もモータ・インバータ総合効率 $\eta(v(t), T(t))$ に影響される [7]。

$$P_{REGENE}(t) = \begin{cases} P_{DRIVING}(t) \times \eta(v(t), T(t)), \\ (P_{DRIVING}(t)/(Mv(t)) > -0.15g \\ \text{かつ } v(t) > 7\text{km/h}) \\ P_0 \times \eta(v(t), T(t)), \\ (P_{DRIVING}(t)/(Mv(t)) \leq -0.15g \\ \text{かつ } v(t) > 7\text{km/h}) \\ 0, \quad (v(t) \leq 7\text{km/h}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、EV の走行におけるエネルギー損失について説明する。EV の走行で一時的に消費するエネルギーの中には、エネルギー回生によって後から回収されるものも含まれる。したがって EV の走行によるエネルギー消費のうち、後から回収されない、その道路で本当に失ったエネルギーに着目する。これを「エネルギー損失」と呼ぶ。式 (1) は積算された量が運動エネルギーに相当する。EV では、運動エネルギーは減速時に回生エネルギーによって一部が回収され、回生時の損失は回生ロスとして計上する。そのため、式 (1) は損失とは見なさない。また、式 (2) は積算された量が位置エネルギーに相当する。位

置エネルギーは下り坂の走行時に加速抵抗のエネルギーや回生エネルギーとして一部が回収されるため、損失とは見なさない。式 (3) は転がり抵抗による損失である。式 (4) は空気抵抗による損失である。電気エネルギーから機械エネルギーへの変換に伴って発生する変換ロス $P_{CONVERT}(t)$ [W] を式 (9) に示す。また、式 (8) のように、エネルギー回生では全ての力学的エネルギーは回収されず、エネルギー変換や回生限界によって失われる回生ロスも存在する。この回生ロス $P_{REGENE_LOSS}(t)$ を式 (10) に示す。

$$P_{CONVERT}(t) = P_{ELECTRIC}(t) - P_{DRIVING}(t) \quad (9)$$

$$P_{REGENE_LOSS}(t) = P_{REGENE}(t) - P_{DRIVING}(t) \quad (10)$$

式 (5) により、 $P_{DRIVING}(t)$ の一部には転がり抵抗や空気抵抗による回収不能なロスが含まれる。よって式 (9) に影響を与えるのは加速抵抗と登坂抵抗による電力消費と変換効率 $\eta(v(t), T(t))$ である。以上をまとめると、EV の走行におけるエネルギー損失の瞬時値 P_{LOST} [W] は式 (11) のようになる。つまり EV のエネルギー損失は、エネルギー変換ロス、回生ロス、転がり抵抗によるエネルギー消費、空気抵抗によるエネルギー消費の合計である。

$$P_{LOST}(t) = P_{CONVERT}(t) + P_{REGENE_LOSS}(t) + P_{ROLL}(t) + P_{AIR}(t) \quad (11)$$

ここまでで説明した、EV の要因別のエネルギー消費推定を「ECOLOG 推定」と呼ぶ。すなわち ECOLOG 推定とは、式 (1) ~ (11) の各瞬時値を物理モデルにより算出することを意味する。

3 空間サンプリングされた道路データのスキーマ

本稿では、先行研究 [13] で提案し本稿で用いる、空間サンプリングされた道路データのスキーマ（以下、「空間サンプリングスキーマ」と呼ぶ）について説明する。

3.1 トリップの定義

ある時刻からある時刻まで運転者が車を運転し、ある場所からある場所へと移動することを、1 回のトリップと定義する。例えば、「運転者 A」が「車 1」に乗車し、時刻「2022/04/21 09:41:30」に「運転者 A 自宅」を出発し時刻「2022/04/21 10:47:47」に「勤務地 A」に到着したという移動は一つのトリップであると言える。ここで、トリップは運転者、車、時間、場所から構成されるリレーションシップであるが、ID を割り振り、エンティティと見なすことにする。この冗長化された構造により、トリップ単位での集約を容易に行えるようになる。各トリップでは、GPS 軌跡データと CAN データの 2 種類のデータを取得する。GPS 軌跡データは、2.3 節で述べた ECOLOG 推定および、3.2 節で述べるセグメントのラベル付けに利用する。推定結果は EV の 1 秒ごとのエネルギー消費 [W] として、ECOLOG テーブルに格納する。CAN データには、バッテリーパックの



図1 セグメントの生成例

セル電圧や電流などのデータが含まれ、実際のエネルギー消費の計算に利用する。

3.2 セグメントの定義と意義

2.3 節で述べた ECOLOG 推定値はエネルギー消費の瞬時値 [W] となる。一方で、エネルギー消費の時間積算値 [J] を地図上に示し、地点ごとのエネルギー消費を可視化したいという需要もある。すなわち、単位距離当たりのエネルギー消費である [J/m] の次元で電費を可視化する¹。そのために本節では、検索や集約の単位として利用する地図情報として、セマンティックリンクとセグメントを定義する。

まずセマンティックリンク (SL) は、高速道路や渋滞が起りやすい区間といった「運転者やデータ解析者にとって有意な道路区間」である [24]。さらに、「セマンティックリンクをある一定間隔 $d[m]$ で分割した区間単位」をセグメントと定義する。セマンティックリンクからセグメントを生成する例を図1に示す。図1の橙枠で囲った拡大図の中で、青いピンの間が1つのセグメントとなる。GPS データを用いてエネルギーの時系列レコードにセグメントの対応付けを行うことで、地点ごとのエネルギー消費の分析や可視化がクエリ処理により瞬時に容易に行えるようになる。これは EV のユーザやデータ解析者にとって有用である。

3.3 EV エネルギー消費データベーススキーマ

本節では、スキーマ全体の構造を説明する。空間サンプリングスキーマのインスタンス図を図2、図3に示す。図2にはトリップ関連のスキーマを示す。また、図3には道路データおよび空間集約関連のスキーマを示す。スキーマの記述には ER ダイアグラム [25] を用いた。ただし、リレーションシップをあえてエンティティと見なす「リレーションシップエンティティ」[26] も用いた。エンティティを白丸、リレーションシップを黒丸、リレーションシップエンティティを二重丸で表した。また、IS-A 関係 [27] も用いた。

以下、各エンティティについて説明する。

0. 時間

本稿では1秒を時間のサンプリング間隔とする。

1. 場所

リップにおける「始点」や「終点」となる場所の情報を保持

する。

2. 車

車の情報を一意的に保持する。ECOLOG 推定に用いる車両諸元の値を保持する。

3. 運転者

運転者の情報を一意的に保持する。

4. トリップ

トリップを定義する。あるトリップは、開始日時と終了日時、始点と終点、車、運転者が決まれば一意に定まる (3.1 節)。

5. センサ

GPS データを取得するためのセンサを定義する。

6. トリップ・センサセット

あるトリップにおいて、GPS データ取得に用いたセンサの ID を保持する。

7. ECOLOG テーブル

GPS データを用いて 2.3 節に示した ECOLOG 推定を行い、その結果を1秒ごとのエネルギー消費などのデータとして保持する。属性値の詳細は文献 [28] に示されている。

8. CAN データテーブル

あるトリップで取得した CAN データを保持する。

9. セマンティックリンク

セマンティックリンクは、「運転者やデータ解析者にとって有意な道路区間」である (3.2 節)。

10. セグメント

セグメントは、「セマンティックリンクをある一定間隔 $d[m]$ で分割した区間単位」である (3.2 節)。

11. セマンティックリンク・セグメント

セマンティックリンクを構成するセグメントの ID を保持する。

12. セグメント対応

あるトリップのあるレコードがどのセグメントに属しているかを保持する。

13. ECOLOG セグメント集約

ECOLOG テーブルとセグメント対応テーブルをトリップ ID と時間で結合することで、ECOLOG 推定結果の空間集約ができる。

14. CAN データセグメント集約

CAN データテーブルとセグメント対応テーブルをトリップ ID と時間で結合することで、CAN データの空間集約ができる。

4 空間サンプリングスキーマに基づく EV のエネルギー消費データ解析

本章では、3 章で示した空間サンプリングスキーマに基づいた EV のエネルギー消費データの解析例を示す。4 つの解析例により、EV のエネルギーライフログが有用であることを示す。

4.1 利用データ

EV のライフログとして、本稿では GPS データと CAN データの2種類のデータを利用する。データ収集のために、表2に示す日産 LEAF を用いた。CAN データの取得には Android

¹ : EV の電費の単位は一般に [Wh/km] または [km/kWh] が用いられる。これらはそれぞれ [J/m], [m/J] の次元に一致する。[km/kWh] および [m/J] は、ガソリン自動車の燃費 [km/L] に相当する。

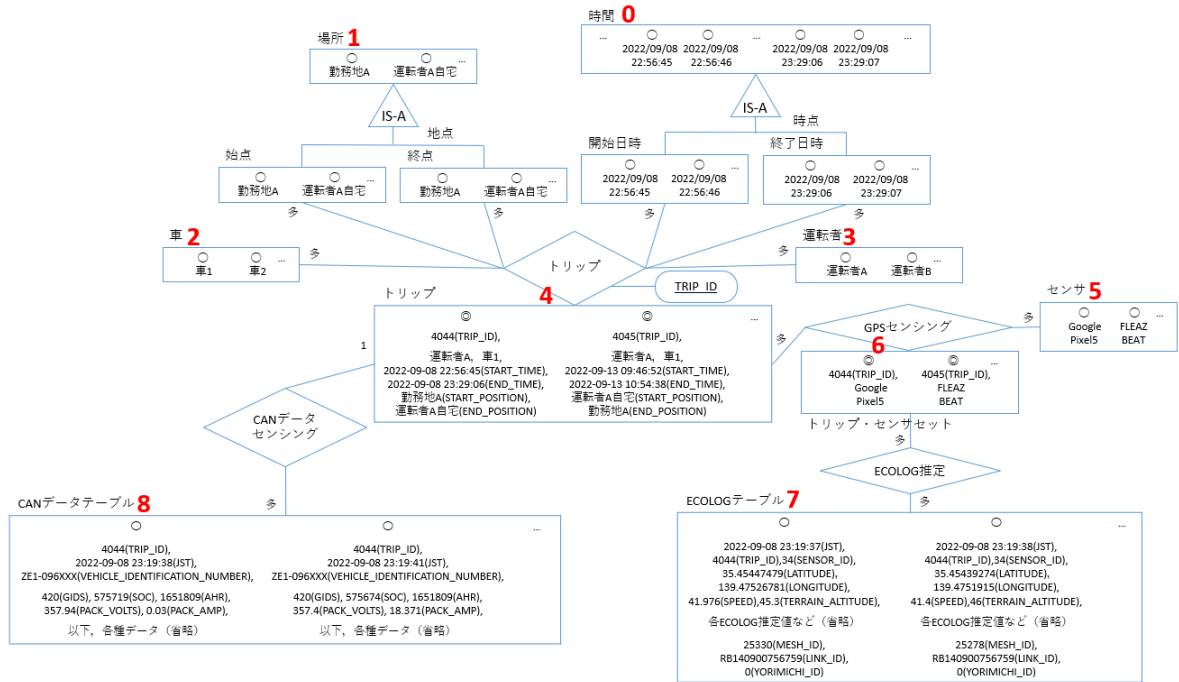


図 2 空間サンプリングスキーマ (トリップ関連)

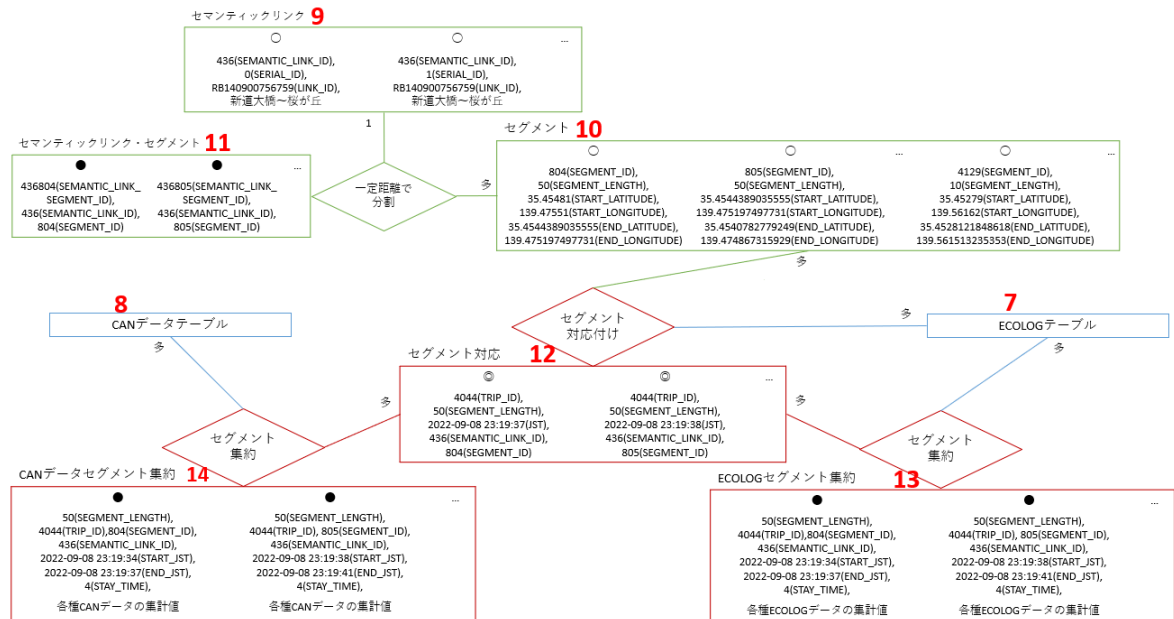


図 3 空間サンプリングスキーマ (セグメント関連)

アプリ Leaf Spy Pro²を使用した。また、OBD2 (On Board Diagnosis second generation) 接続用の Bluetooth 通信端末として Kiwi3 OBD2 Wireless Bluetooth Diagnostic Scanner³を使用した。本研究では、Leaf Spy Pro の仕様書において、EV 内部を流れる電流および電圧、エアコンの電力、電装品の電力とされる値を用いて、エネルギー消費を算出した。GPS デー

2: “Leaf Spy Pro”, Google Play, https://play.google.com/store/apps/details?id=com.Turbo3.Lead_Spy_Pro&hl=ja&gl=US, 参照 Dec 26, 2022.

3: “PLX Devices model Kiwi3”, Inc. PLX Devices, <https://www.plxdevices.com/Kiwi-3-OBD-Car-to-Smartphone-Connection-p/897346002832.html>, 参照 Dec 26, 2022.

表 2 EV ライフログ取得環境

属性	値
日程	2020 年 06 月 28 日～2022 年 12 月 11 日
使用車両	日産 LEAF ZAA-ZE1 型
被験者数	1 名
EV 使用用途	通勤および観光
GPS データ 取得方法・取得端末	自作の Android アプリ, Android タブレット端末
CAN データ 取得方法・取得端末	Android アプリ”Leaf Spy Pro”, PLX Kiwi 3 OBD2, Android タブレット端末

タの取得には自作の Android アプリを利用した。

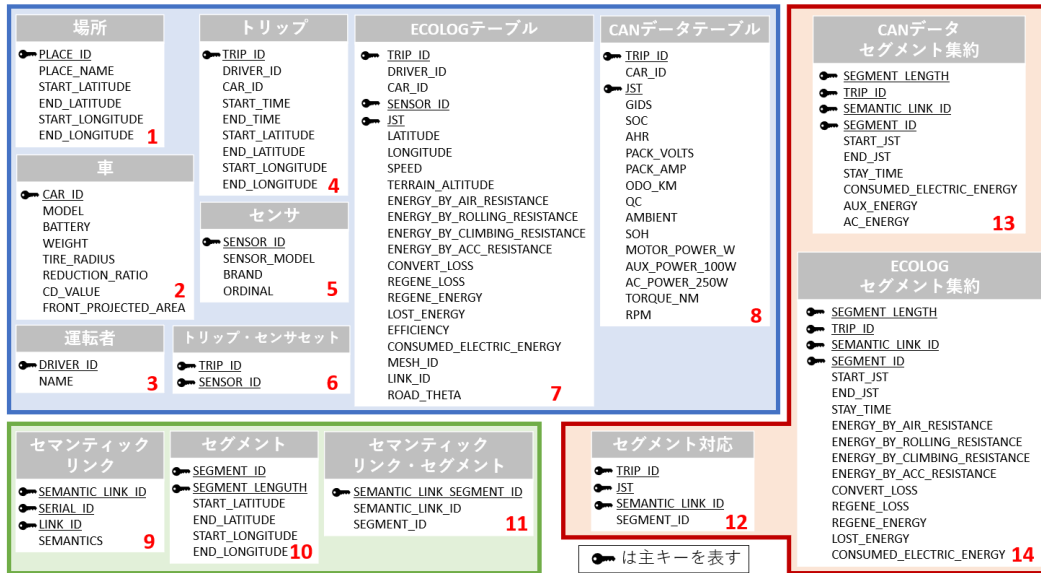


図 4 RDB スキーマ

表 3 実験機および実験環境の諸元

パラメタ	単位	値
g	m/s^2	9.80665
ρ	kg/m^3	1.22
μ		0.015
C_d		0.28
A	m^2	2.19
M	kg	1680
$TireRadius$	m	0.3155
$ReductionRatio$		8.193

表 4 作成した主なテーブル

テーブル名	図 2・図 3 中の名称	説明
ECOLOG.RECORDS	ECOLOG テーブル	GPS データから推定したエネルギーデータ
CAN.DATA.RECORDS	CAN データテーブル	CAN から取得したデータ
SEMANTIC.LINK	セマンティックリンク	任意に設定したセマンティックリンクのデータ
SEGMENT	セグメント	セグメントのデータ
SEGMENT.MAPPING	セグメント対応	トリップのレコードとセグメントを対応付けるデータ

表 5 作成した主なカラム

カラム名	単位	説明
SEMANTIC.LINK.ID		セマンティックリンクの ID
SEGMENT.ID		セグメントの ID
SEGMENT.LENGTH	m	セグメント距離
TRIP.ID		トリップの ID
JST		時刻
SPEED	km/h	車速
CONSUMED.ELECTRIC.ENERGY	kWh	ECOLOG 推定エネルギー消費
LOST.ENERGY	kWh	ECOLOG 推定エネルギー損失
PACK.VOLTS	V	バッテリー電圧
PACK.AMP	A	バッテリー電流
AUX.POWER.100W	100W	エアコンの電力
AC.POWER.250W	250W	電装品の電力

4.2 空間サンプリングスキーマに基づくデータベースの実装

3 章で述べた空間サンプリングスキーマに基づくデータベースを実装した。RDB スキーマを図 4 に示す。赤番号は図 2,

図 3 に対応している。実験環境として、Microsoft SQL Server 2019 を利用した。作成した主なテーブルおよびカラムを表 4, 表 5 に示す。収集した GPS データは ECOLOG 推定を経てエネルギーデータとともに ECOLOG テーブルに、CAN データは CAN データテーブルに挿入した。ECOLOG 推定で利用したパラメータを表 3 に示す。さらに ECOLOG テーブルの各レコードに対し、それぞれどのセグメントに属するのかを判定する処理（セグメント対応付け）を行った。この情報を格納したセグメント対応テーブルと、ECOLOG テーブルや CAN データテーブルを結合することで、セグメント集約がクエリ処理により、一貫性を保ちながら瞬時に実行できる。

4.3 解析例 1: 速度帯の異なるトリップのエネルギー消費の比較

本節では、高速道路のある道路区間 $SL1$ (SEMANTIC.LINK.ID=487) を異なる速度帯で走行した際の、地点ごとのエネルギー消費の違いを分析する。 $SL1$ の詳細を表 6 に示す。 $SL1$ を、ある日のトリップ (TRIP.ID=3921) では速度 100km/h で、別の日のトリップ (TRIP.ID=3861) では速度 80km/h でおおむね定速走行した。エネルギー消費のデータは時系列データであるため、そのままの状態では巡航速度が異なるトリップを比較できない。したがってセグメントごとに空間集約して比較を行う。CAN データテーブル、セグメント対応テーブルを利用して、エネルギー消費のセグメント集約を行うクエリを SQL1 に示す。また、集約結果を地図上に可視化したものを図 5 に示す。地図上の可視化ツールとして、本稿では Microsoft Excel の 3D Maps 機能⁴を用いた。

全体的に、80km/h のトリップよりも 100km/h のトリップの方がエネルギー消費が大きいことが分かる。これは、速度が速

4: “Get started with 3D Maps”, Microsoft, <https://support.microsoft.com/en-us/office/get-started-with-3d-maps-6b56a50d-3c3e-4a9e-a527-eea62a387030>, 参照 Dec 26, 2022.

表 6 sl1 およびトリップの特徴

属性	値
距離	約 8.0km
道路の特徴	制限速度 100km/h の高速道路
セグメント距離	100m
セグメント数	80
トリップ種別	通勤トリップ

SQL 1 セグメント毎のエネルギー消費を求めるクエリ

```

SELECT SEGMENT.TRIP_ID
,SEGMENT.SEGMENT_ID
,SUM(CAN_CONSUMED_ENERGY_KWH) AS
CAN_CONSUMED_ENERGY_KWH_PER_SEGMENT
FROM SEGMENT_MAPPING
INNER JOIN (
SELECT TRIP_ID
,JST
,PACK_VOLTS * PACK_AMP * SECONDS_DIFF / 3600 / 1000
AS CAN_CONSUMED_ENERGY_KWH
FROM (
SELECT TRIP_ID
,JST
,DATEDIFF(SECOND, LAG(JST, 1) OVER (ORDER BY
JST), JST) AS SECONDS_DIFF
,PACK_VOLTS
,PACK_AMP
FROM CAN_DATA_RECORDS
WHERE TRIP_ID IN (3861, 3921)
) AS CAN_RAW_RECORD
) AS CAN_ENERGY ON SEGMENT_MAPPING.JST = CAN_ENERGY.JST AND
SEGMENT_MAPPING.TRIP_ID = CAN_ENERGY.TRIP_ID
WHERE SEGMENT_MAPPING.SEMANTIC_LINK_ID = 487
AND SEGMENT_LENGTH = 100
GROUP BY SEGMENT_MAPPING.TRIP_ID, SEGMENT_MAPPING.SEGMENT_ID

```

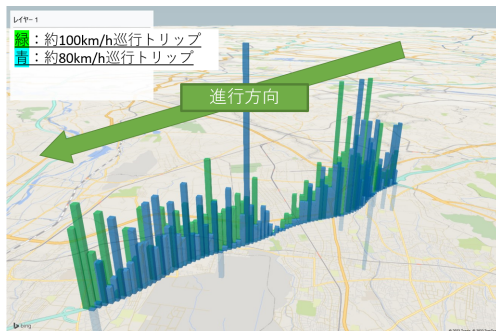


図 5 速度帯の異なるトリップのエネルギー消費の比較

いほど空気抵抗によるエネルギー消費が増加するためと考えられる。EV は走行時間とエネルギー消費はトレードオフの関係にあり、速く目的地に向かうかエネルギー消費を抑えるかを運転者が選択することができる。また、80km/h のトリップでは、道路区間の中央で唐突にエネルギー消費が増大しているところがある。これは自動車の追い抜きのために一時的に 90km/h まで加速し、加速抵抗によるエネルギー消費が増大したためである。他の部分についてはどちらのトリップのエネルギー消費も同じように増減している。これは道路の勾配により、登坂抵抗によるエネルギー消費が発生するためである。以上のように、セグメントを使った空間集約を行うことにより、異なる速度帯のトリップ同士を空間に紐付けて分析できることを示した。今回は CAN 由来のエネルギー消費のセグメント集約を行ったが、目的に応じたクエリを実行することで、CAN データテーブルや ECOLOG テーブルの各カラムについて、セグメント集約を簡単に行うことができる。

表 7 sl2 およびトリップの特徴

属性	値
距離	約 1.2km
道路の特徴	信号や踏み切りにより渋滞が頻発する道路
セグメント距離	50m
セグメント数	24
該当トリップ数	240
トリップ種別	通勤トリップ

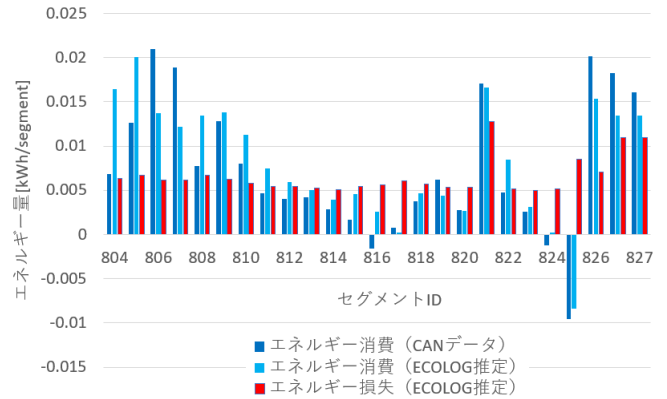


図 6 sl2 におけるエネルギー消費とエネルギー損失

4.4 解析例 2: エネルギー消費とエネルギー損失の比較

本節では、ある道路区間を繰り返し走行した際のエネルギー消費とエネルギー損失を比較する。同じ EV で同じ道路区間を走行する場合でも、EV のエネルギー消費は加減速のしかたや速度帯などにより変化する。EV の運転者は走行中、CAN データに現れるエネルギー消費の瞬時値を見ることができる。しかし、これには運動エネルギーや位置エネルギーに変換され、後で回生エネルギーとして回収されるものも含まれる。2.3 節で示した ECOLOG 推定を用いることで、その瞬間に本当に失ったエネルギーであるエネルギー損失を算出することができる。そこで、時間帯により渋滞が頻発する道路区間 sl2 について、エネルギー消費とエネルギー損失をセグメント単位で比較する。

sl2 を平日に寄り道や駐車を行うことなく走行し 240 トリップについて、CAN データから算出されるエネルギー消費および、ECOLOG 推定により計算されるエネルギー消費とエネルギー損失を求めた。sl2 およびトリップの特徴を表 7 に示す。この時、CAN データから算出するエネルギー消費は、エアコンおよび電装品による消費を除外した。それぞれの値をセグメントごとに中央値で集約したものを図 6 に示す。中央値で集約することで、典型的な走行を行った時のエネルギー量を抽出できると考えられる。CAN データおよび ECOLOG 推定により得られたエネルギー消費を比較すると、どのセグメントでもおおむね一致する。したがって、ECOLOG 推定は合っていると仮定する。

CAN データから得られたエネルギー消費と ECOLOG 推定により得られたエネルギー損失を、道路の特徴とともに地図上に可視化したものを図 7 に示す。この道路区間の序盤は上り坂になっており、エネルギー消費は大きく増加する。しかしこの増加分の多くは後で回収されるため、エネルギー損失はほとんど

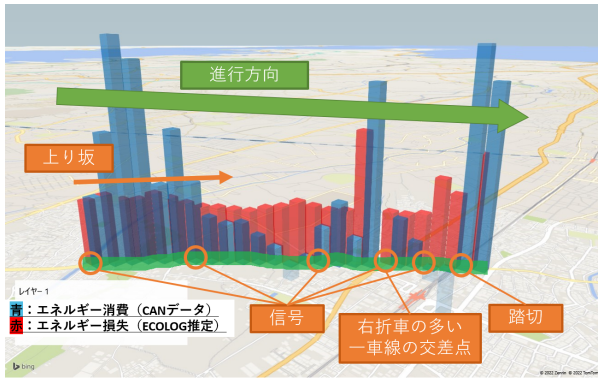


図 7 SL2 における道路の特徴によるエネルギー消費とエネルギー損失の傾向の違い

表 8 sl3 およびトリップの特徴

属性	値
距離	約 300m
獲得標高	約 17m
道路の特徴	交差点から始まる上り坂の一般道路
セグメント距離	10m
セグメント数	30
トリップ種別	通勤トリップ

表 9 しっかり加速およびゆっくり加速の定義

加速種別	定義	該当トリップ数	平均通過時間
しっかり加速	10 番目のセグメント到達時に速度 45km/h 以上	23	23.2 秒
ゆっくり加速	10 番目のセグメント到達時に速度 45km/h 未満	70	25.5 秒

ど変わらないことが分かる。一方、この道路区間の後半は信号や踏切のために加減速や渋滞が頻発する。余計な加減速が発生すると、定速で走行する場合と比べてエネルギー変換ロスが大きくなるので、エネルギー損失が積み上がっている。したがって EV の運転時は、坂道による一時的なエネルギーの増減を気にするよりも、加減速をなるべく抑制し、エネルギー損失を減らすことが重要であることが分かる。ECOLOG 推定とセグメントによる空間集約を組み合わせることで、CAN データからは見えない知見を得られた。

4.5 解析例 3: 上り坂の理想的な加速方法の考察

EV の走行において、道路勾配と加減速はエネルギー消費に大きな影響を及ぼす。したがって、上り坂で加速が必要になる場合、大きなエネルギーを消費する。本節では、信号のある交差点から始まる上り坂の一般道路 sl3 において、どのような加速を行うのが理想的かを考察する。具体的には、信号で停車した後で発進する時に、しっかり加速して巡航速度まで早く到達する走行をしっかり加速、ゆっくり加速する走行をゆっくり加速と定義し、時間とエネルギー消費を比較する。sl3 の詳細を表 8 に示す。今回は表 9 のように、10 番目のセグメント到達時に速度 45km/h 以上のものをしっかり加速、速度 45km/h 未満のものをゆっくり加速と定義した⁵。

しっかり加速、ゆっくり加速それぞれに該当するトリップ

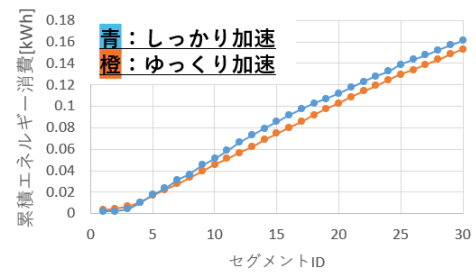


図 8 加速方法の違いによるエネルギー消費の比較

表 10 sl4 およびトリップの特徴

属性	値
距離	約 68km
道路の特徴	高速道路と一般道路が混在する経路
セグメント距離	1km
セグメント数	68
トリップ種別	観光トリップ
温度帯	-7.7~-5.6 °C
カーエアコン設定	18 °C オートエアコン

について、セグメントごとにエネルギー消費を平均値で集約し、累積したものを図 8 に示す。しっかり加速した場合とゆっくり加速した場合を比較すると、累積のエネルギー消費の差は 5% 程度とわずかである。ただし、実際の道路においてはゆっくり加速は後続車両の発進を妨げ、渋滞を誘発する。渋滞は円滑な走行を妨げるだけでなく、交通全体で余計なエネルギー消費を発生させるため、安全な範囲でしっかり加速を行うのが望ましいと考えられる。

4.6 解析例 4: 渋滞時のエアコンによるエネルギー消費の顕在化

解析例 1 では、EV は走行時間とエネルギーはトレードオフの関係にあると述べた。しかし、速度が遅いと空気抵抗によるエネルギー消費は減少するが、走行時間が長くなる分、エアコンや電装品によるエネルギー消費は増加する。特に EV は暖房によるエネルギー消費が顕著であり、また寒冷下でバッテリー性能が低下することから、冬季のエアコンによるエネルギー消費は無視できない。そこで本節では、冬の北海道の高速道路と一般道路を走行した際の、要因別のエネルギー消費を可視化する。2021 年 12 月に、北海道で EV の走行実験を行った。その中で、苫小牧から札幌まで走行したトリップに着目する。このトリップでは、14 時頃に苫小牧を出発し、苫小牧東 IC から恵庭 IC までの約 20km の道のりを、高速道路で速度約 80km/h で 30 分程度走行した。恵庭 IC より先の高速道路は積雪のため通行止めになっており、一般道路を走行したが、渋滞と路面凍結のため速度が出せず、約 30km の道のりを約 4 時間かけて走行した。このトリップの走行経路 sl4 の詳細を表 10 に示す。

このトリップの地図および、走行、エアコン、電装品の要因別のセグメントごとのエネルギー消費を図 9 に示す。恵庭 IC までの高速道路区間は、エアコンや電装品の消費割合はほとんどなく、消費の大部分が走行によるものであった。それに対し、渋滞の一般道路を走行した恵庭 IC 以降では、走行による消費は減少した一方で、消費の 2 割以上をエアコンが、1 割を電装

5：この閾値は加速度 0.16g に相当する。

data from bus fleets in China and Norway, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol.94, pp.102804, 2021, ISSN 1361-9209.

- [24] Daiki Kawanuma, Yuta Kashiwabara, Toshiaki Uemura, and Takashi Tomii. Data Analysis Framework for Visualizing Correlation of Energy Consumption and Transit Time in Road Sections using the ECOLOG database, Adjunct Proceedings of the 13th International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing Networking and Services, pp. 207-212, 2016.
- [25] Peter Pin-Shan Chen. The Entity-Relationship Model—Toward a Unified View of Data, ACM Transactions on Database Systems, Volume 1, Issue 1, pp 9–36, 1976.
- [26] H.Arisawa, T.Tomii, H.Yui, H.Ishikawa. Data Model and Architecture of Multimedia Database for Engineering Applications, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E78-D, No.11, pp.1362-1368, 1995.
- [27] ロバート・J・マラー (著), 荻部英司 (訳). オブジェクト指向設計法によるデータベース設計技法 UML によるデータ・モデリング, 三元社, 2002.
- [28] 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 への置き換えによる V2X 効果推定, 第 11 回 ITS シンポジウム 2012 Proceedings, 1-B-08, pp.103-108, 2012.12.