

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の消費エネルギー計算の高速化

七里 祐輔^{1,a)} 劉 屹^{1,b)} 曾我 紗代子^{1,c)} 富井 尚志^{2,d)}

概要: 本研究では、空間サンプリングされた道路データのデータベーススキーマを提案する。そしてこのスキーマにより、電気自動車 (Electric Vehicle: EV) のライブログを用いた EV の消費エネルギーの計算および集約の高速化を図る。EV には航続距離が短いという課題があり。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。従って、EV の消費エネルギーを推定し、地点ごとに集約・可視化したいという需要がある。本研究では、道路を一定距離で分割したものを「道路セグメント」と定義し、消費エネルギー集約の単位とする。このスキーマにより、EV の消費エネルギー計算を、高速かつ一貫性を保ちながら行うことができる。本稿では、二つの分析例によりこのスキーマの有用性を示した。

1. はじめに

近年、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 [1]。目標達成のために、現在の日本におけるエネルギー消費量の 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 [2]。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 [3]。更に、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。

一方で、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。従って 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。我々の先行研究では、運動方程式に基づく物理モデルにより、EV の要因別の消費エネルギーを推定する、「ECOLOG システム」を提案した [4]。ECOLOG システムにより、自動車の走行ログを用いて、エネルギーという観点で走行振り返りを行ったり、道路の特徴を分析したりすることができる [5][6]。

本研究では、EV の消費エネルギー計算を、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する。従来の ECOLOG システムでは、エネルギー消費の瞬時値を 1 秒を 1 レコードとして推定していた。一方で、エネルギー消費量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。本稿で提案するスキーマでは、道路を一定距離で分割したものを「道路セグメント」と定義し、道路セグメント単位で消費エネルギーの集約を行う。

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 の消費エネルギーという観点から、道路や走行を分析した例を示す。5 章では、空間サンプリングスキーマを用いたことによる処理速度の違いを評価する。6 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

¹ 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

² 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

a) shichiri-yusuke-st@ynu.jp

b) liu-yi-tk@ynu.jp

c) soga-sayoko-cz@ynu.jp

d) tommy@ynu.ac.jp

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 [8] や、交通データの可視化 [9] は注目されており、多くの研究が見られる。しかし、高精度な自動車内蔵センサにより取得したデータは膨大であるために、その多くは事故回避や自動運転を目的とした自動車制御のためだけに使われる。それに対し、我々は今後の EV 社会を見据え、これからますます社会に溢れ出るこれらのログを蓄積し、有効に活用する方法を提案することを考える。

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 [10]。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 バッテリ残量を考慮した EV 経路探索プラットフォームの提案を行った [11]。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易に集められる EV のライフログを自己のために有効活用する我々とは立場が異なる。芳澤らは、実走行履歴データを元に、移動経路を特定し EV の電力消費を推定するモデルの提案を行った [12]。我々は、ICV と比較して構造が単純で現在普及が進んでいる EV を用いて、EV のライフログから簡易に EV の走行時の道路固有のエネルギー消費を明らかにすることを目指している。

2.2 ECOLOG システム

我々の先行研究 [4][5][6] 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 システムを提案してきた。本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、自動車走行 (GPS) ログを収集する。
- (2) 走行ログに対して、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) を適用して、1 秒ごとの消費電力 [W] を推定する。
- (3) 推定した瞬間の消費電力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 [13] である点に着目し、EV のエネルギー消費要因ごとに推定を行う EV モデルを定義した。この EV モデルでは、移動軌跡のライフログを取得するサンプリングレートに合わせて、EV の瞬間の消費電力を消費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) ~ (6) に示す。式中の各パラメタについては、表 1 に示す。式

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
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

(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 $P_d(t)$ とする。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と見ることができる。

また、モータの特性により、EV 内部のエネルギー変換効率を表すモータ・インバータ総合効率 η が存在する [13][14]。EV が力行する時の瞬時消費電力はその効率に影響される。従って、EV の瞬時消費電力 $P_e(t)$ [W] は $P_d(t)$ と変換効率の逆数 $\frac{1}{\eta}$ の積で表すことができる。これを式 (6) に示す。

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

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

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

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

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

$$P_e(t) = P_d(t) \times \frac{1}{\eta(P_d(t), v(t))} \quad (6)$$

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ぬ。

この定義に従うと、回生時のエネルギーの瞬時値は式 (7) のようになる。ただし、回生時のエネルギー変換率は η と同等とする [13]。また、 P_0 は加速度 $-0.15G$ におけるモータの仕事率である。

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

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。式(1)は積算された量が運動エネルギーに相当する。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る。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。式(2)は積算された量が位置エネルギーに相当する。位置エネルギーは降下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 $P_{CON}(t)[W]$ を式(8)に示す。

$$P_{CON}(t) = P_e(t) - P_d(t) \quad (8)$$

式(5)により、 $P_d(t)$ 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(8)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 η 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 $P_{LOST}(t)[W]$ は式(9)のようになる。

$$P_{LOST}(t) = P_{CON}(t) + P_{ROLL}(t) + P_{AIR}(t) \quad (9)$$

ここまでで説明した、EVの要因別の消費エネルギー推定を「ECOLOG推定」と呼ぶ。すなわちECOLOG推定とは、式(1)～式(9)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

本章では、本稿で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(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。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



図1 道路セグメントの生成例

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(Controller Area Network)データの2種類のデータを取得する。GPS軌跡データは、2.2節で述べたECOLOG推定に利用する。推定結果はEVの1秒ごとの消費エネルギーとして、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セル電圧や電流などのデータが含まれ、実際の消費エネルギーの計算に利用する。

3.2 道路セグメントの定義と意義

2.2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、エネルギー消費量の時間積算値[J]を地図上に示して、地点ごとの消費エネルギーを可視化したいという需要もある。すなわち、単位距離当たりの消費エネルギーである[J/m]の単位で電費を可視化する*1。そのために、本節では道路のサンプリング区間である「道路セグメント」を定義する。

「分析対象道路をある一定間隔 $d[m]$ で分割した区間単位」を道路セグメントとする。分析対象道路から道路セグメントを生成する例を図1に示す。図1の青枠で囲った拡大地図の中で、青いピンの間が道路セグメントとなる。ECOLOG推定結果に道路セグメントのラベル付けを行うことで、地点ごとの消費エネルギーの分析や可視化が瞬時に容易に行えるようになる。これはEVのユーザや分析者にとって有用である。

3.3 EV消費エネルギー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。本稿で我々は、空間単位で消費エネルギー集約を行うための統一された手法を提案する。空間サンプリングスキーマのインスタンスを図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にはトリップから取得したCANデータ、GPSデータおよびECOLOG推定値を道路セグメント単位で集約したものを示す。スキーマの記述にはER

*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。ガソリン自動車の燃費[km/L]に相当する。

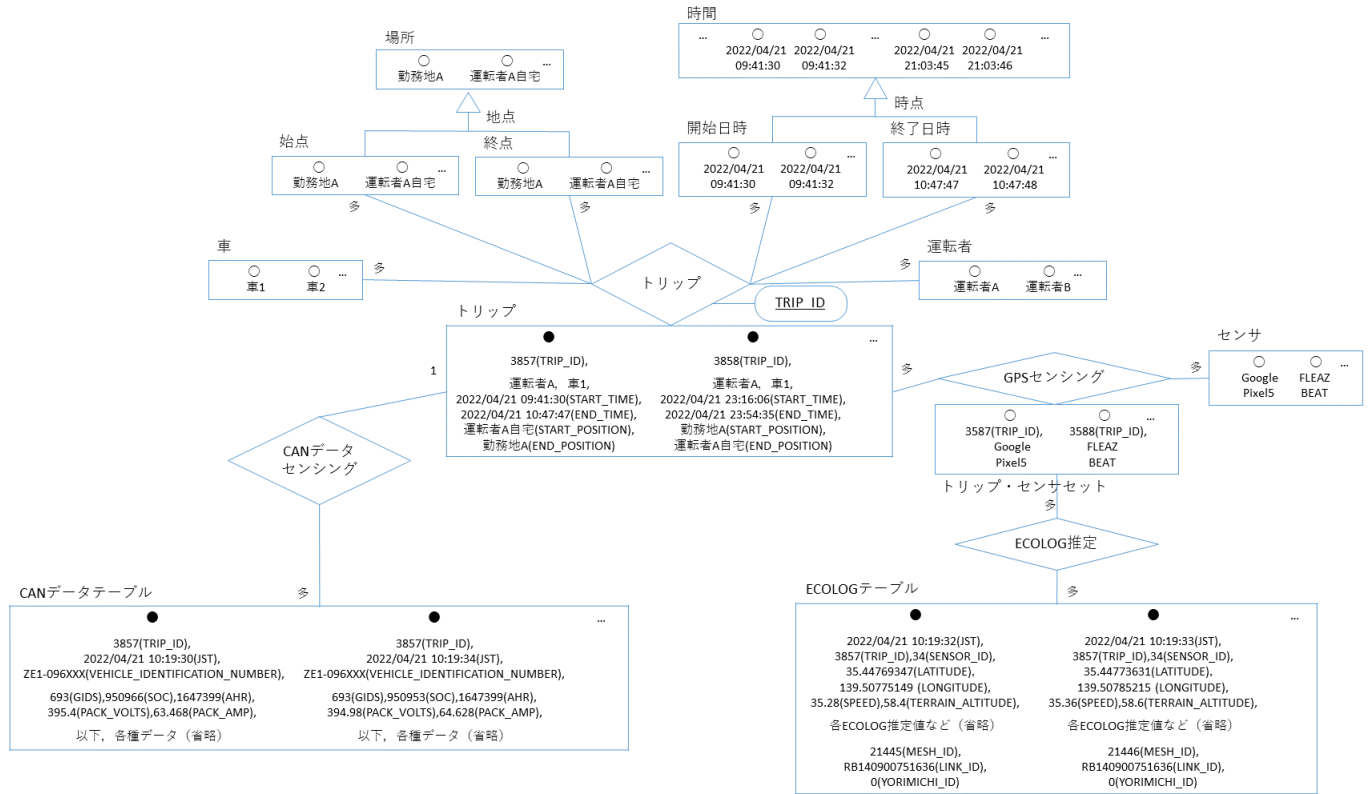


図 2 空間サンプリングスキーマ (トリップ関連)

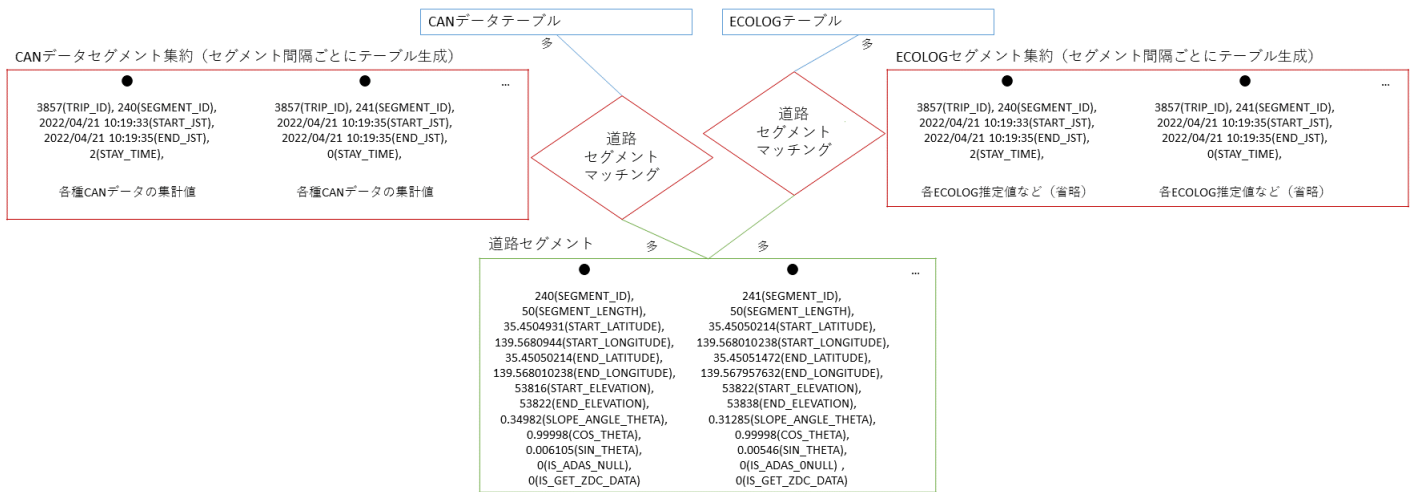


図 3 空間サンプリングスキーマ (空間サンプリング関連)

ダイアグラム [15] 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」[16] が用いられている。また、IS-A 関係 [17] も用いられている。

4. 空間サンプリングスキーマに基づく EV の消費エネルギー分析

本章では、空間サンプリングスキーマを用いた分析例を示す。

4.1 EV のエネルギーベースラインマップの作成

航続距離が短い EV で走行を行う際、充電切れを起こすことなく目的地に着くために、あるいは適切な充電計画を立てるために、どの場所でどれだけのエネルギーを消費・回生するのかを事前に見積もりたいというニーズがある。本節では、道路セグメントごとに、EV が走行する際にその区間で必ず消費する、基準となるエネルギーを算出し、地図上に可視化する。一般に EV の消費エネルギーは、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

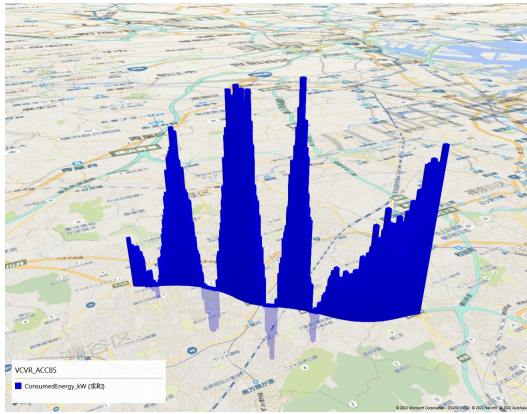


図 4 EV のエネルギーベースラインマップの例

行条件で変化する．ここでは，道路の制限速度で加減速を一切せずに走行した時，すなわち定速走行で走行した時の消費エネルギーを，「その道路の走行で必ず消費する最低限のエネルギー」と定義し，分析のベースラインとする．また，この消費エネルギーを地図上に可視化したものを，ここではEV のエネルギーベースラインマップと呼ぶ．エネルギーベースラインマップの例を，図 4 に示す．

今回は，仮想定速走行（Virtual Constant Velocity Running：VCVR）のシミュレーションに基づいて，ベースラインとなる消費エネルギーを推定した．まず，対象の道路を一定の速度で走行した際の 1 秒ごとの座標系列を，走行シミュレーションにより生成する．次に，この VCVR 座標系列の各座標が，それぞれどの道路セグメントに属するかを判定し，道路勾配を取得する．そして，ECOLOG 推定モデルに基づいて消費エネルギーを計算し，道路セグメントごとに消費エネルギーを集約する．これを地図上に可視化すると図 4 のようになる．

バッテリー残量が少ない場合や長距離を移動する場合は特に，目的地まで充電することなく走り切れるのか，あるいはどれくらいのエネルギーを消費し，どの程度の充電が必要なのかという情報は，EV のユーザにとって非常にニーズが高い．従って，このベースラインマップは，EV の走行計画に役立つと考えられる．

4.2 EV のエネルギーベースラインマップを用いた走行分析

本節では，前節で示した EV のエネルギーベースラインマップと実際に走行した際の消費エネルギーを比較した分析例を示す．

トリップ i が対象道路を走行した時に消費したエネルギー E_i [kWh] は式 (10) から算出できる．式 (10) 中のパラメータを表 2 に示す．式 (10) における $P(t)$ として次のものを用いた．

- (1) VCVR に基づく定速走行時の消費電力推定値 $P_e(t)$ [W]
(2.2 節の式 (6) または式 (7) ただし $v(t)=80\text{km/h}$

表 2 EV モデルのパラメータ

パラメータ	単位	意味
t	s	対象道路へ進入してから経過時間 ($t = 0, 1, \dots, n$)
n	s	対象道路を退出するまでにかかる時間
$P(t)$	W	時刻 t における消費電力
i		トリップ ID
E_i	kWh	トリップ i が対象道路を走行した時に消費したエネルギー

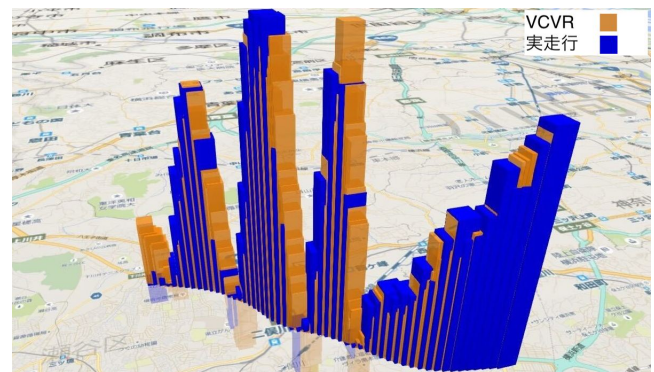


図 5 実走行データと VCVR に基づくベースラインの比較例

一定)

- (2) 実走行車両から収集したバッテリー端消費電力 P_{can} [W]
(ただし，クルーズコントロールによる 80km/h 定速走行時)

$$E_i = \int_0^n P(t) dt \times \frac{3600}{1000} \quad (10)$$

VCVR に基づくベースラインデータの系列と実際に消費したエネルギーの系列を，本稿 3.3 節で定義した道路セグメントで集約することで比較できる．その可視化例を図 5 に示す．

自分の運転により消費したエネルギーを地図上でベースラインと比較することで，理想の運転に比べてエネルギーをロスした場所が一目で分かり，運転改善に役立てることができる．

5. 空間サンプリングスキーマによる処理速度の高速化の評価

本章では，空間サンプリングスキーマの構築による EV の消費エネルギー集約の処理速度の違いを検証する．具体的には，図 6 に示す二種類の手順で EV の消費エネルギー計算を行い，その処理時間を比較する．これらの手法はどちらも，あるトリップにおける 1 秒ごとの ECOLOG 推定値である ECOLOG レコードを入力とし，EV の消費エネルギーを道路セグメントごとに集約するものである．手法 1 は，1 レコードごとに所属する道路セグメントをマッチング判定した後で，道路セグメントごとの集約を行う．一方手法 2 は，本稿で提案する空間サンプリングテーブルを

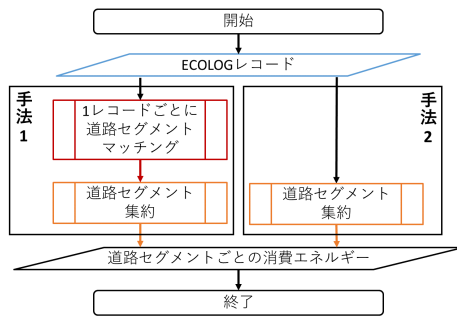


図 6 空間サンプリングスキーマによる処理速度の高速化の検証

表 3 空間サンプリングスキーマによる処理速度の高速化の結果

手法	実行時間 [sec]
手法 1	206.282
手法 2	0.357

使用する。このテーブルでは道路セグメントのマッチング処理が既にされているので、手法2では道路セグメントごとの集約処理のみを行う。したがって手法2の方が手法1より速く処理できることは明らかである。

結果を表3に示す。検証に用いたデータは、神奈川県内の高速道路約5kmを走行した53トリップの13786レコードである。勾配付き道路セグメントテーブルにより、処理時間が半分程度に短縮された。道路や走行の分析において、このような空間単位での集約は頻繁に発生する。従って、空間サンプリングしたデータを最初に一度用意しておく、分析時の処理速度を短縮することは有用性が高い。

6. まとめと今後の課題

本稿では、空間サンプリングされた道路データのスキーマを提案した。分析対象道路を一定距離で分割した単位、道路セグメントごとの集約により、EVの走行におけるベースラインとなる消費エネルギーや、実際のエネルギー消費の様子を地図上に可視化した。また、空間サンプリングされたレコードを予め生成しておくことで、空間単位での集約の処理速度が短縮された。

今後の課題としては、このスキーマを活用した他の事例を示すことが挙げられる。本稿で行ったEVのエネルギーベースラインマップに基づく分析以外にも、同一区間を何度も走行した際の統計的な分析や、一つのトリップに対する細かな走行分析など、様々な分析に応用できると考えられる。

謝辞 本研究の一部はJSPS科研費(課題番号22H03810)の支援による。

アルゴリズムの実装と分析結果の作成は同じ研究室に所属する田中悠斗氏と何新氏の協力を得た。

参考文献

- [1] 環境省：地球温暖化対策計画（令和3年10月22日閣議決定）。Last accessed: 22 July 2022.
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁：令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2022）。Last accessed: 22 July 2022.
- [3] 黒川文子：EVへのシフトとCO2排出量に関する考察，環境共生研究，No.11，pp.25-36（2018）.
- [4] 富井尚志，萩本真太郎，出口達，笹田尚希，“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
- [5] 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（2019-10-23）
- [6] 植村智明，能條太悟，吉瀬雄大，富井尚志，“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”，情報処理学会論文誌データベース（TOD），Vol.14，No.4，pp.70-85（2021-10-14）
- [7] 田中成典，外山諒，上谷弘平．プローブデータを用いたサグ部とヒヤリ・ハット地点の3次元道路情報の生成に関する研究．第77回全国大会講演論文集，第2015巻，pp.407-408，mar 2015
- [8] Arthurs, P., Gillam, L., Krause, P., Wang, N., Halder, K. and Mouzakitis, A.: A Taxonomy and Survey of Edge Cloud Computing for Intelligent Transportation Systems and Connected Vehicles, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-16 (online), DOI: 10.1109/TITS.2021.3084396 (2021).
- [9] Chen, W., Guo, F. and Wang, F.-Y.: A Survey of Traffic Data Visualization, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, No. 6, pp. 2970-2984 (online), DOI: 10.1109/TITS.2015.2436897 (2015).
- [10] 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）.
- [11] 矢野純史，西村茂樹，福永邦彦，中島正浩，山田浩之，森口雅弘：プローブ情報を活用したEV電費推定と経路探索への応用，SEIテクニカルレビュー，No.184，pp.24-29(2014).
- [12] 芳澤信哉，坂井勝哉，太田豊，上田嘉紀，香川公司，岩田章裕：実走行履歴データを活用したEV電力消費推定モデルの評価，24.Sep.2021 Joint Technical Meeting on Vehicle Technology/Transportation and Electric Railway，pp.7-12（2021）.
- [13] 廣田 幸嗣，小笠原 悟司，“電気自動車工学”，森北出版，ISBN9784627743120，(2017-07)
- [14] 曾我紗代子，大橋弘典，富井尚志，“定速走行時のEVの内部データを用いたエネルギー変換効率推定”，第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム（DEIM2022），A41-1，pp.1-7，2022.3
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] ロバート・J・マラー（著），菊部英司（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.