

電気バス・トラックの導入前性能予測に 活用する事を目的とした 簡易電費予測理論式の構築

方亦園¹・田沼英紘²・黄施豪²・小林王義²
楊イ翔²・井原雄人³・紙屋雄史²

¹正会員 早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: fyy@fuji.waseda.jp (Corresponding Author)

²非会員 早稲田大学大学院 環境・エネルギー研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: kamiya@waseda.jp

³正会員 早稲田大学 電動車両研究所 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: ihara@aoni.waseda.jp

本研究の目的は、バスやトラックの事業者が、ある特定車種の電気バス・トラックの導入を既定のルートに対して実施する場合において、その電費値を自ら容易に予測計算できるような理論式を構築する事である。同理論式の構築には車両側の情報が必要であり、また、構築式を用いた電費予測には運用側に係る情報も必要となるが、特に後者については事業者の情報収集負担を考慮し、「必ず取得すべき情報」「取得すべき情報」「可能ならば取得すべき情報」の三段階に区分した検討とする。本論文では、はじめに電費予測のために最低限必要な運用側情報について整理する。つづいて同情報を変数として車両側の情報に基づき構築された電費予測理論式の提案を行う。最後に、我々が先に開発した電気バスとその公道走行データをを用いて構築式の妥当性と精度を検証する。

Key Words: *electricity consumption prediction, prediction theoretical formula, electric bus, simple method*

1. はじめに

近年、電気バスの普及が進みつつある¹⁾。しかし、実運用時の性能予測等が難しく、導入を検討したものの、結局、躊躇・断念するバス事業者も多い。そこで本研究では、最も基本的な性能指標である車両電費値[kWh/km]²⁾を、事業者自身が容易に予測計算できるような理論式について検討する。

従来の車両導入前電費値予測手法としては、以下のものが挙げられる。最も確実な方法は、導入予定車両を用いた現地試走による電費データ実測である。しかし、実施にあたりコストを要するためハードルは高い。他の方法として、車両消費エネルギーシミュレーション³⁾を実施するケースも存在する。具体的には、事業者既所有のディーゼルバスを用いて導入予定ルートを試走しつつ(速

度変化データの収集)、地図等から収集するルート勾配データと合わせて、シミュレーションにより電費を算出する手法である。しかし、車両シミュレーションに係る専門知識や技術が必要となる。

このような背景のもと、本論文では、導入予定ルートや運用方法に係る基礎的車速情報や地図情報のみから、事業者自身が導入予定車両の電費を簡易的に予測できる手法を構築する。ここでは、①「予定ルートや運用方法に係る基礎情報の整理」、②「基礎情報を変数とする電費予測式の構築」、③「開発電気バスを対象とした構築電費予測式の適用ならびに精度の検証」の順に検討を進める。なお、事業者の負担を考慮し、必要な基礎情報については、「必ず取得すべき情報(低精度予測用)」、「取得すべき情報(中精度予測用)」、「可能ならば取得すべき情報(高精度予測用)」の三段階で検討する。

2. 予定ルートや運用方法に係る基礎情報の整理

電費の予測には、車両側の情報と運用側の情報が必要となる。本章では、後者について整理する。本検討では、事業者の情報収集負担を考慮し、低精度予測用（必要情報 1 種）、中精度予測用（必要情報 3 種）、高精度予測用（必要情報 4 種）の三段階に分類する方針とする。

(1) 低精度電費予測

低精度電費予測においては、簡易さを重視し、1 種の基礎情報（平均速度）のみから実施可能な手法とする。本手法は、平坦路における車両の一定速巡航を想定したものである。基礎情報については、例えば走行距離は地図、走行時間は時刻表からの収集を想定し、事業者に対して、同情報より平均速度値を算出してもらう事とする。

(2) 中精度電費予測

中精度電費予測においては、予測精度と簡易さのバランスを重視し、3 種の基礎情報（平均速度、発進停止回数、停車時間割合）のみから実施可能な手法とする。本手法は、平坦路における車両の三角波速度変化パターン⁹走行を想定したものである（詳細は次章参照）。実路走行で発生する加速・減速・停車の状況がある程度考慮できるため、実態に近い簡易的な電費予測が可能となる。発進停止回数と停車時間割合については、例えばルート上の信号数や停留所数の情報からの収集を想定する。

(3) 高精度電費予測

高精度電費予測においては、道路勾配状況も考慮することで、さらに予測精度を向上させる。本手法では、中精度予測用の 3 種の基礎情報に獲得標高⁹情報を加え、4 種で対応する（平均速度、発進停止回数、停車時間割合、獲得標高）。同情報については、例えば地図等⁷からの収集を想定する。以下、ここで用いる獲得標高情報について補足する。走行ルート全体を、図 - 1 に示すように登坂区間と降坂区間に分類した後、すべての登坂区間の登り標高を足し合わせたものを全獲得登り標高（正值）、降坂区間で同様の処理をしたものを全獲得下り標高（負値）とする。また、これら数値を走行ルート全体の距離で除することで、最終的に予測式にて用いる事になる単位走行距離あたりの獲得登り/下り標高値を得る。

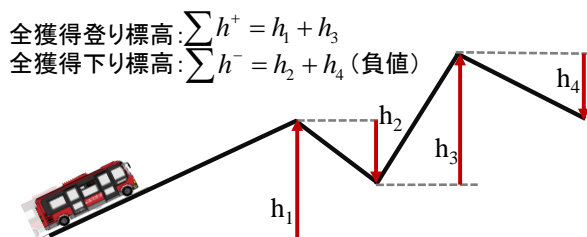


図 - 1 獲得標高値のイメージ

3. 基礎情報を変数とする電費予測式の構築

本章では、前章にて整理した基礎情報を変数とする電費予測式について、低・中・高精度の三段階で構築する。一般的な車両走行消費エネルギーの理論式⁸⁾は、

$$E = E_{Air} + E_{Roll} + E_{Mech} + E_{Aux} \quad (1)$$

と記述される。ここで、

E : 車両走行消費エネルギー [J],

E_{Air} : 空気抵抗消費分エネルギー [J],

E_{Roll} : 転がり抵抗消費分エネルギー [J],

E_{Mech} : 機械ブレーキ消費分エネルギー [J],

E_{Aux} : 補器類消費分エネルギー [J],

である。同式は当然ながら電気自動車だけでなく内燃機関自動車にも成立する一般式である。ここでは、これをベースに検討を進める。

(1) 低精度予測式の構築

本節では、平坦路における車両の一定速巡航を想定した電費予測式を構築する。加速や減速、さらには停車も生じないため、走行抵抗は空気抵抗と転がり抵抗のみとなる。そのため、式 (1) における機械ブレーキ項は存在せず、

$$E = E_{Air} + E_{Roll} + E_{Aux} \quad (2)$$

となる。

はじめに、空気抵抗の項について、動力システム効率（ギア効率・モーターインバータ効率）を考慮すると、

$$\begin{aligned} E_{Air} &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \int F_{Air} V dt \\ &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \int \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 V dt \\ &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 X \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで、

η_G : ギア効率,

η_{Mot} : モーターインバータ効率,

F_{Air} : 空気抵抗 [N],

V : 平均速度 [m/s] (基礎情報),

t : 時間 [s],

ρ : 空気密度 [kg/m³],

A : 前面投影面積 [m²],

C_d : 空気抵抗係数,

X : ルート全体の走行距離 [m],

である。

同様に、転がり抵抗の項は、

$$E_{Roll} = \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g X \quad (4)$$

と記述できる。ここで、

C_r : 転がり抵抗係数,
 m_{Car} : 空車重量 [kg],
 m_{Pas} : 乗客重量 [kg],
 g : 重量加速度 [m/s^2],
 である.

最後に, 補器類消費エネルギーの項は,

$$E_{Aux} = P_{Aux} T \quad (5)$$

と記述できる. ここで,

T : ルート全体の走行時間 [s],

P_{Aux} : 補器類消費パワー [W],

である. また, 電費 EC [J/m]は,

$$EC = \frac{E}{X} \quad (6)$$

となるため, 最終的な低精度電費予測式は,

$$EC = \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \left[\frac{1}{2} \rho A C_d V^2 + C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g \right] + \frac{P_{Aux}}{V} \quad (7)$$

と導出される.

(2) 中精度予測式の構築

本節と次節では, 予測精度を若干重視する電費予測式を構築する. 本節では平坦路走行を, 次節では勾配路走行を想定する.

中精度予測式では, 前節で言及した平均速度に, 発進停止回数と停車時間割合を加えた, 計 3 種の基礎情報を使用することとする. 前者については, 単位走行距離あたりの回数と定義する. 同値の導入により, 前節の検討では無視した車両の加速や減速の状況を反映することが可能となる. 後者については, ルート全体の所要時間に対する停車時間 (停留所停車や信号待ち停車等) の割合として定義する.

本検討における走行パターンは, 前述した 3 種の基礎情報から一意的に決定される三角波速度変化とする (図 - 2 参照). 同三角波を基本トリップとし, これをルート全体の走行距離分だけ繰り返すものである.

はじめに, この基本トリップの決定方法について述べる. 基本トリップの全時間, 加速時間 (= 減速時間), 停車時間, および最高速度については, 以下の通り導出できる.

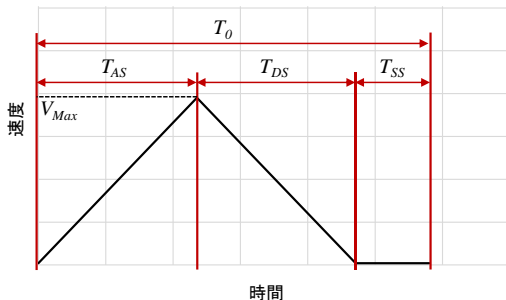


図 - 2 三角波速度変化パターンの基本トリップ

$$T_0 = \frac{T}{N} = \frac{T}{n \cdot X / 1000} = \frac{1000}{n \cdot V}$$

$$T_{AS} = T_{DS} = \frac{(1-\alpha)T_0}{2} \quad (8)$$

$$T_{SS} = \alpha T_0$$

$$V_{Max} = \frac{2V}{(1-\alpha)}$$

ここで,

T_0 : 基本トリップの全時間 [s],

T_{AS} : 基本トリップの加速時間 [s],

T_{DS} : 基本トリップの減速時間 [s],

T_{SS} : 基本トリップの停車時間 [s],

V_{Max} : 最高速度 [m/s],

N : ルート全体の発進停止回数 [回],

n : 発進停止回数 (単位走行距離あたり) [回/km] (基礎情報),

α : 停車時間割合 (基礎情報),

である. 以下, 図 - 2 に示した基本トリップの速度変化パターンに基づき, 式 (1) をベースとして中精度予測式を構築する.

はじめに, 空気抵抗の項について,

$$E_{Air} = E_{Air_AS} + E_{Air_DS}$$

$$= 2E_{Air_AS}$$

$$= 2 \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \int_0^{T_{AS}} F_{Air} v(t) dt$$

$$= 2 \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \int_0^{T_{AS}} \frac{1}{2} \rho A C_d v^3(t) dt \quad (9)$$

$$= 2 \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \int_0^{T_{AS}} \frac{1}{2} \rho A C_d \left(\frac{V_{Max}}{T_{AS}} t \right)^3 dt$$

$$= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \cdot \frac{1}{4} \rho A C_d V_{Max}^2 X_0$$

となる. ここで,

E_{Air_AS} : 空気抵抗消費分エネルギー (加速区間) [J],

E_{Air_DS} : 空気抵抗消費分エネルギー (減速区間) [J],

$v(t)$: 速度の時間関数 [m/s],

X_0 : 基本トリップの全走行距離 [m],

である.

同様に, 転がり抵抗の項は,

$$E_{Roll} = \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g X_0 \quad (10)$$

となる.

つづいて, 減速時の機械ブレーキ消費分エネルギーや回生エネルギーに係る定式化を行う. 車両減速時 (平坦路走行) において, 減速開始時に保有する運動エネルギーは, はじめに走行抵抗分に有効利用され (転がり抵抗分, 空気抵抗分), 残存分のうちの機械ブレーキ損失や動カシステム損失を除いたものが, 回生エネルギーとなる (ここ

では、簡易化のためにリアケースとなる減速力行時等については無視する。)。そこで、本検討では同現象を考慮しつつ運動エネルギー利用率 η_K を定義する。同値は、減速開始時に保有する①運動エネルギーに対する、③空気抵抗消費分(有効利用分)／④転がり抵抗消費分(有効利用分)／⑥回生エネルギー、の3者合算分の比率であり(図-3)、以下で表記される。

$$\eta_K = \frac{E_{Air_DS} + E_{Roll_DS} + E_{Reg_K}}{E_K} \quad (11)$$

ここで、

E_K : 減速開始時に保有する運動エネルギー [J],
 E_{Air_DS} : 空気抵抗消費分エネルギー(減速区間) [J],
 E_{Roll_DS} : 転がり抵抗消費分エネルギー(減速区間) [J],
 E_{Reg_K} : 減速分回生エネルギー [J],
 である。

計算の便宜上、動力システム損失等を機械ブレーキ消費分に含めると、同図より、機械ブレーキ消費分 E_{Mech} は、

$$\begin{aligned} E_{Mech} &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} E_K - (E_{Air_DS} + E_{Roll_DS} + E_{Reg_K}) \\ &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} E_K - \eta_K E_K \\ &= \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} - \eta_K \right) (m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) a X_{AS} \end{aligned} \quad (12)$$

となる。上式導出の際には、

$$\begin{aligned} E_K &= (m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) a X_{AS} \\ a &= \frac{V_{Max}}{T_{AS}} = \frac{nV^2}{250(1-\alpha)^2}, \end{aligned}$$

m_{Rot} : 等価慣性重量 [kg],

a : 加速度(加速区間) [m/s^2],

X_{AS} : 走行距離(加速区間) [m],

の関係を利用している。

最後に、補器類消費エネルギーの項であるが、

$$E_{Aux} = P_{Aux} T_0 \quad (13)$$

となる。

最終的な中精度電費予測式は、

$$\begin{aligned} EC &= \frac{E}{X_0} \\ &= \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \left[\rho A C_d \frac{V^2}{(1-\alpha)^2} + C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g \right] \\ &\quad + \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} - \eta_K \right) (m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) \frac{nV^2}{500(1-\alpha)^2} + \frac{P_{Aux}}{V} \end{aligned} \quad (14)$$

と導出される。

(3) 高精度予測式の構築

前節では、平坦路での発進・加減速・停止を想定した電費予測式を構築した。本節では、同構築式に登坂・降坂走行に伴う位置エネルギー変化の状況を簡易的に付加することで、より精度の高い予測式を構築していく。

登坂路においては、当然ながら位置エネルギー増加分はエネルギー消費分となる。動力システム効率を考慮すると、

$$E_{Up} = \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} (m_{Car} + m_{Pas}) g \sum h^+ \quad (15)$$

となる。ここで、

E_{Up} : 登坂に伴う消費分位置エネルギー [J],
 $\sum h^+$: 全獲得登り標高 [m],
 である。

つづいて、降坂路について検討する。はじめに、前節において導入された運動エネルギー利用率 η_K と同様の現象考察を行うことで、位置エネルギー利用率 η_P を定義する。同値は、図-4に示すように降坂開始時に保有する②位置エネルギーに対する、③空気抵抗消費分(有効利用分)／④転がり抵抗消費分(有効利用分)／⑥回生エネルギー、の3者合算分の比率となる(ここでは、簡易化のためにリアケースとなる降坂力行時等については無視する)。同値を利用する事で、登坂時に備蓄した位置エネルギーの再利用分(負値)は、

$$E_{Down} = \eta_P (m_{Car} + m_{Pas}) g \sum h^- \quad (16)$$

となる。ここで、

E_{Down} : 降坂に伴う再利用分位置エネルギー [J],
 $\sum h^-$: 全獲得下り標高(負値) [m],
 である。

上記2項を合算することで、勾配に起因する電費変化量は、

$$\begin{aligned} E_{Slp} &= E_{Up} + E_{Down} \\ &= (m_{Car} + m_{Pas}) g \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \sum h^+ + \eta_P \sum h^- \right) \\ \Delta EC_{Slp} &= \frac{E_{Slp}}{X} \\ &= (m_{Car} + m_{Pas}) g \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \frac{\sum h^+}{X} + \eta_P \frac{\sum h^-}{X} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

と導出される。ここで、

E_{Slp} : 登坂降坂時における消費エネルギー [J],

ΔEC_{Slp} : 登坂降坂走行による電費変化量 [J/m],

$\frac{\sum h^+}{X}$: 獲得登り標高 [m/m] (基礎情報),

$\frac{\sum h^-}{X}$: 獲得下り標高(負値) [m/m] (基礎情報),

である。

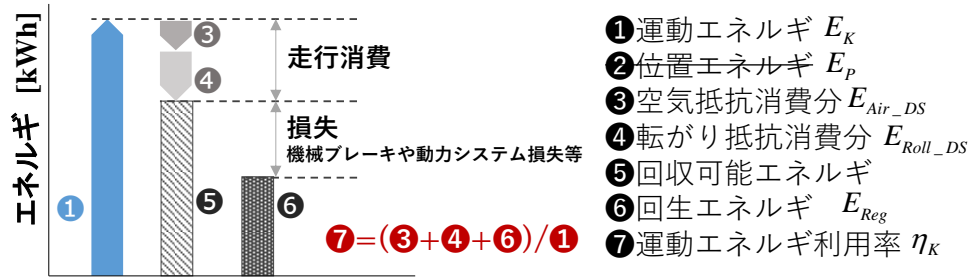


図 - 3 車両減速時（平坦路走行）における運動エネルギー利用率の定義

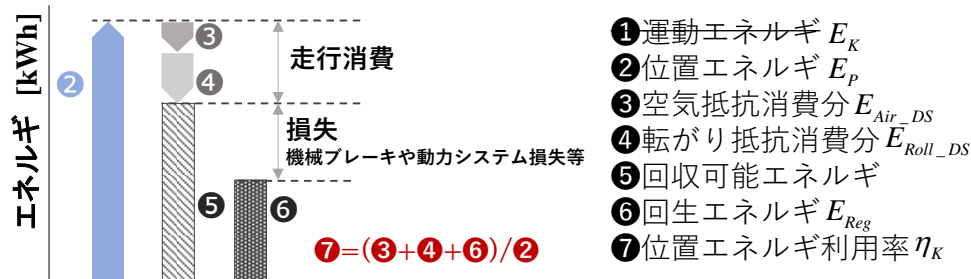


図 - 4 車両降坂時（巡航回生走行）における位置エネルギー利用率の定義

これらを前節において導出した中精度電費予測式に簡易的に付加することで、最終的に以下の高精度電費予測式が得られる。

$$\begin{aligned}
 EC = & \frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \left[\rho A C_d \frac{V^2}{(1-\alpha)^2} + C_r (m_{Car} + m_{Pas}) g \right] \\
 & + \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} - \eta_K \right) (m_{Car} + m_{Pas} + m_{Rot}) \frac{n V^2}{500(1-\alpha)^2} + \frac{P_{Aux}}{V} \\
 & + (m_{Car} + m_{Pas}) g \left(\frac{1}{\eta_G \eta_{Mot}} \frac{\sum h^+}{X} + \eta_p \frac{\sum h^-}{X} \right) \quad (18)
 \end{aligned}$$

4. 開発電気バスを対象とした構築電費予測式の適用ならびに精度の検証

(1) 構築電費予測式の精度検証に用いる電気バス

本研究の目的は、事業者自身が導入予定車両の電費を簡易的に予測できる手法を構築することである。本章において、構築電費予測式の精度検証を進めるが、その際の具体的車両としては、当研究グループが以前開発した小型電気バス Waseda Electric Bus-3 (WEB-3) を選定する⁹⁾。同車は日野自動車製小型ディーゼルバスをベースに、電動化やワイヤレス充電器搭載等を進め、コンバート製造したものである。基礎車両諸元と予測式構築に必要な係数等を表 - 1 と表 - 2 にまとめる。回生強度については運転手により変更が可能であり、本検証における運動エネルギー利用率/位置エネルギー利用率は、これまでの走行実績より 60% とする。本車両を対象とする場合の電費予測理論式を以下にまとめる。

表 - 1 Waseda Electric Bus - 3 の基礎車両諸元

空車質量	kg	5990	
乗車定員	人	25	
モータ最大出力	kW	145	
モータ最大トルク	Nm	440	
バッテリー容量	kWh	44	

表 - 2 予測式構築に必要な係数等

平均乗車人数	人	10
等価慣性質量	kg	162
前面投影面積	m ²	5.91
モータインバータ 平均効率（巡航時）		85% (75%)
ギア効率		85%
補器類消費パワー	W	600

低精度予測式（平均速度 V ）：

$$EC = 0.00091V^2 + 0.35 + \frac{0.17}{V} \text{ [kWh/km]} \quad (19)$$

中精度予測式（平均速度 V ，発進停止回数 n ，停車時間割合 α ）：

$$\begin{aligned}
 EC = & \frac{0.0016V^2}{(1-\alpha)^2} + 0.31 + \frac{(0.0052 - 0.0022)nV^2}{(1-\alpha)^2} \\
 & + \frac{0.17}{V} \text{ [kWh/km]} \quad (20)
 \end{aligned}$$

高精度予測式（平均速度 V ，発進停止回数 n ，停車時間割合 α ，獲得登り/下り標高

$$\frac{\sum h^+}{X} / \frac{\sum h^-}{X} \text{）} :$$

$$EC = \frac{0.0016V^2}{(1-\alpha)^2} + 0.31 + \frac{(0.0052 - 0.0022)nV^2}{(1-\alpha)^2} + \frac{0.17}{V} + (25 \cdot \frac{\sum h^+}{X} + 11 \cdot \frac{\sum h^-}{X}) \text{ [kWh/km]} \quad (21)$$

(2) 構築電費予測式の精度検証方法

前述の通り、予測式の本来の使用方法は、事業者自身が各種基礎情報を収集し、同式にそれら数値を代入することで電費を算出するという流れである。一方、ここでの検証は、実走行データを活用して実施する。

本論文にて予測式を適用する電気バス WEB-3 は、これまでに種々の地域にて運用された実績を持つ。そこで、これら地域にて得られた速度情報や地図情報より基礎情報を得て電費予測を実施し、同値を電費実測値と比較する事で精度検証を行うこととする。

同車両を用いた過去の運用に係る情報を、図 - 5 に整理する。(a)は長野・ぐるりん路線である¹⁰⁾。中心市街地の 8.5 km のルートを約 50 分で周回するコミュニティバス路線であり、①②…⑧の順に走行した。図中の②、③および⑦は標高の高い地点であり、標高差は約 30 m である。(b)は長野・平林路線である。長野駅前と長電バス柳原営業所を結ぶ片道約 11.5 km のルート(約 45 分)をシャトル運用した。長野駅側が柳原営業所と比べて 30 m ほど標高が高いため、長野駅発の下り走行ルートと、柳原営業所発の登り走行ルートに分類して検討する。(c)は埼玉・本庄路線である。本庄駅と早大本庄キャンパスを結ぶ往復 12.3km のルート(約 40 分)を運用したが、大学付近を除いてほぼ平坦路である。(d)は埼玉・熊谷路線であり、中心市街地の約 5.1 km の周回ルートを 20 分で運用したが、本路線もほぼ平坦路である。同図(e)は佐賀・唐津路線であり、中心市街地における 3.3km の周回ルートを 20 分で運用した。

次に、長野・ぐるりん路線を例として低・中・高精度予測に必要な基礎情報の抽出方法について詳述する。同路線走行時の実測速度変化パターンと標高変化パターンを図 - 6 に示す。なお、後に導出される三角波近似速度変化パターンや平均速度についても併載している。電費予測に用いる基礎情報は、速度変化パターンより導出される項目と標高変化パターンより導出される項目に分類できるが、前者は平均速度、発進停止回数、停車時間割合の 3 項目であり、その抽出方法については図 - 7 にまとめた通りである。後者は獲得登り・下り標高であるが、その抽出方法について図 - 8 にまとめる。

以上の手順により抽出された、各運用ルートに対する基礎情報を表 - 3 にまとめる。これら数値を電費予測式に代入することで、電費予測が可能となる。



図 - 5 WEB-3 運用ルートの概要

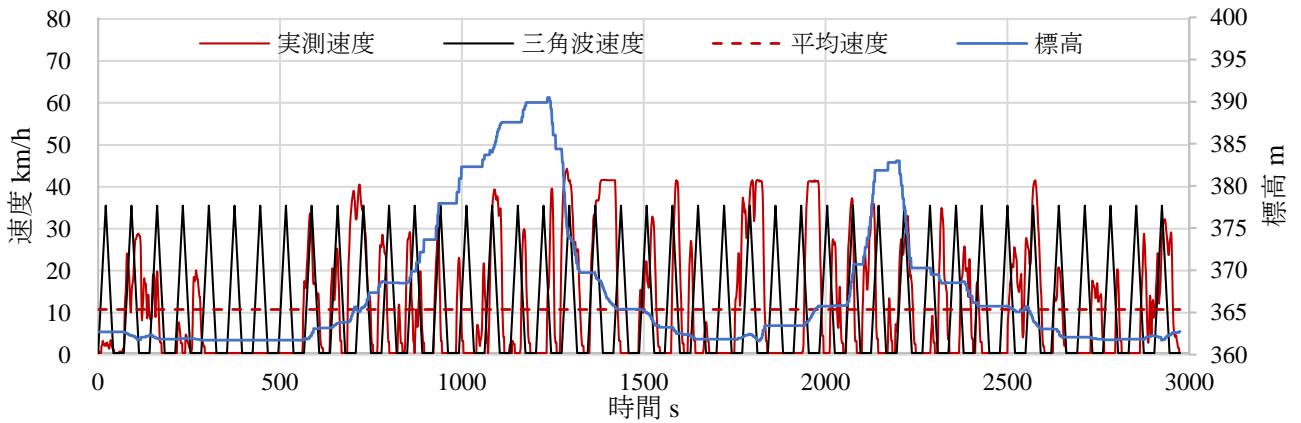


図 - 6 実測速度変化パターンと標高変化パターン (例: 長野・ぐるりん路線)

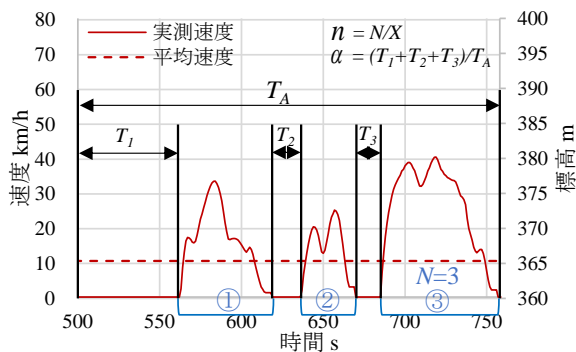


図 - 7 発進停止回数と停車時間割合の抽出方法 (例: 長野・ぐるりん路線)

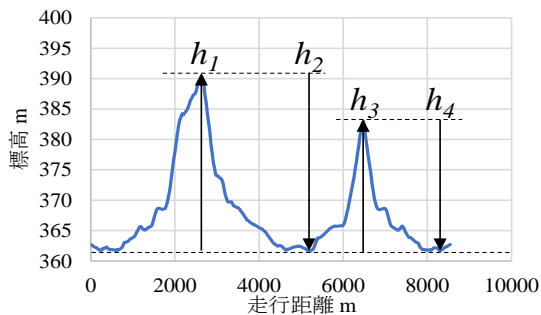


図 - 8 獲得登り/下り標高の抽出方法 (例: 長野・ぐるりん路線)

表 - 3 実運用時の情報より抽出した各路線の基礎情報

路線	走行距離	走行時間	基礎情報				
			平均速度	発進停止回数	停車時間割合	獲得登り標高	獲得下り標高
			V	n	α	$\frac{\sum h^+}{X}$	$\frac{\sum h^-}{X}$
km	s	km/h	回/km	%	m/km	m/km	
長野ぐるりん	8.5	2975	10.3	4.91	41.0%	6.5	-6.5
長野平林下り	11.5	2766	15.0	2.43	30%	1.4	-3.8
長野平林登り	11.5	2645	15.6	1.92	36%	3.9	-1.4
埼玉本庄	12.3	2395	18.4	1.88	17%	4.2	-4.3
埼玉熊谷	5.1	1145	15.9	3.17	16.8%	2.4	-2.4
佐賀唐津	3.3	1185	10.1	3.90	31.5%	5.4	-5.4

表 - 4 各路線の予測電費と実測電費の比較

路線	実測電費	低精度予測電費	中精度予測電費	高精度予測電費
	kWh/km	kWh/km	kWh/km	kWh/km
長野ぐるりん	0.83	0.41	0.75	0.84
長野平林下り	0.64	0.41	0.66	0.65
長野平林登り	0.72	0.40	0.68	0.76
埼玉本庄	0.68	0.41	0.61	0.67
埼玉熊谷	0.70	0.40	0.65	0.68
佐賀唐津	0.72	0.42	0.59	0.66
平均誤差		43%	9%	3%

(3) 構築電費予測式の検証結果

前述した表 - 3 の基礎情報を、電費予測式(19)~(21)に代入する事で得られる電費予測値について、実測値と比較したものを表 - 4 にまとめる。

同表より、実測電費を仮に真値とすると、低精度予測式を用いた場合には平均誤差 43% となっている事が確認できる。路線バスは一般的に、他の自動車運用と比較して発進停止回数が多く、停車時間の割合も高いため、当然ながら一定速巡航を想定した低精度予測式の適用には限界がある。それに対して、簡易的であるものの発進停止回数と停車時間割合を考慮できる中精度予測式を用いた場合、大幅な改善が得られており(平均誤差 9%)、初期検討レベルとしては充分許容できる精度が達成できたと考える。また、高度変化の影響を簡易的に付加考慮している高精度予測式においてはさらなる改善が達成され、平均誤差は 3% となった。

5. まとめ

本論文では、新たな路線に電気バスを導入する場合において、予定ルートや運用方法に係る基礎的情報のみから、事業者自身が導入予定車両の電費を簡易的に予測できるような手法を構築し、その精度を検証した。得られた成果を以下にまとめる。

はじめに、各種電費予測式を構築した。低精度電費予測式については、平坦路における車両の一定速巡航を想定し、1種の基礎情報（平均速度）のみから予測が可能な手法とした。中精度電費予測式については、三角波速度変化を想定しつつ3種の基礎情報（平均速度、発進停止回数、停車時間割合）のみから予測が可能な手法とした。高精度電費予測式については、中精度式に獲得標高情報を加えた4種の基礎情報より予測が可能な手法とした。

つづいて、開発電気バスを対象とした構築電費予測式の適用を実施した。具体的には、小型電気バス WEB-3 の車両諸元に基づき 3 種の電費予測式の係数を決定し、同車両を用いた過去の公道運用時のデータ（6 ルート）から各種基礎情報を得て、予測電費値を導出した。

最後に、同予測値を電費実測値と比較検証し、低精度予測式平均誤差 43%、中精度予測式平均誤差 9%、高精度予測式平均誤差 3% の結論を得た。

謝辞：本研究は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20201G01）により実施したものであり、関係各位に謝意を表す。

REFERENCES

- 1) 紙屋雄史：我が国におけるバス電動化の動向ならびに電気バスと燃料電池バスの特徴比較，国土交通省近畿運輸局～交通環境セミナー～，基調講演，pp. 1-22，2022.
- 2) 井本伸：バッテリー式電気自動車の電費性能について，JARI Res. J., pp. 1-4, 2019.
- 3) 楊イ翔，劉函林，井原雄人，紙屋雄史，大聖泰弘，尾林秀一：電気バス的高速道路走行時に生じる回生エネルギーに着目した詳細分析，自動車技術会論文集，Vol. 50, No. 2, 20194232, pp. 365-370, 2019.
- 4) 野澤岳人，御室哲志，高梨宏之：秋田県におけるEV導入に向けた電費シミュレーション，日本機械学会東北支部講演論文集，Vol. 49, pp. 165-166, 2014.
- 5) 兵藤哲朗，渡部大輔，橋本太夢：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 47(4), 72-79, 2012.
- 6) 牝小路諒，猪八重拓郎：サイクリングルートของผู้別満足要因の差異と道路環境の満足度モデル構築 - しまなみ海道メインルートを対象として -，日本都市計画学会都市計画論文集，Vol.56 No.3, 2021.
- 7) 国土地理院地理院地図：<https://maps.gsi.go.jp/>，2022.
- 8) 環境優良車普及機構：エコドライブ講習会資料，P7, 2016.
- 9) 紙屋雄史：早稲田大学電動車両研究所における電動バス研究の紹介，JST-RISTEX「創発的地域づくりによる脱温暖化」プロジェクト，「地域が元気になる脱温暖化全国大会」，分科会 3 資料，pp. 56-75, 2015.
- 10) W. Yang, K. Eda, Y. Kamiya, T. Hirota, Y. Daisho, Performance evaluation of short range frequent charging electric bus "WEB-3" over long-term operation, Proceedings of the IEEE VPPC 2015 conference, ISBN 15: 978-1-4673-7637-2, CFP15VPP-USB, P-RT-5-7, pp. 1-8, 2015.

(Received July 14, 2022)

(Accepted ?)