

ガラス及びボデーの伝熱特性が電気自動車の 電費・航続距離に与える影響

Effects of heat transfer characteristics of glass and body on electricity consumption and cruising distance for electric vehicle

尾関義一*・斉藤恒洋*・永野秀明**・郡逸平**

Yoshiichi Ozeki, Tsunehiro Saito, Hideaki Nagano and Itsuhei Kohri

EVに関する部品開発を行う際、燃費・電費・航続距離の特性を知ることは不可欠である。しかしEV開発社以外は、詳細な仕様や制御論理が不明なため、諸特性の予測が難しい。本報では、公表されたデータからそれらの概略特性を構築する方法を考案し、ガラス及びボデーの伝熱特性の影響を検討したので、その概要を紹介する。

For the development of various parts and components of electric vehicles, it is inevitable to realize the effects of those structure and thermal performance on the electricity consumption and cruising distance. However, in general, essential and detailed information is not always open to the vehicle parts and components suppliers. In this report, authors propose a simple method to estimate the cruising performance and the control algorithm roughly according to the published information for the suppliers who cannot get necessary information. Particularly, the effects of heat transfer characteristics of glass and body on the cruising performance are introduced as an example of the application.

*AGC旭硝子株式会社 生産技術センター共通基盤グループ

**東京都市大学工学部

1. 緒言

EVに関わる様々な部品やコンポーネントを開発する際、それらの構造や熱的な特性が電費、航続距離に及ぼす影響を考えずに済ますことはできない。しかし、一般的には、部品やコンポーネントの開発に必要な肝心の細部の情報は、車両メーカーからそれらを提供するサプライヤー企業に公示されることが少ない。確かに、それらの情報は車両メーカー内の重要秘匿事項であるため、公示できないのもやむを得ない事情である。一方で、サプライヤー企業にとっては、その結果、効率の悪い開発を余儀なくされる局面もある。このため、公開された車両の情報から、電費、航続距離などの走行性能を簡易的に見積もる方法の提案が望まれている。

そこで、本報では、部品開発に役立てるため、一般的に公開された情報を基に、走行性能や制御論理を簡易的に推定する手法を提案する。さらにこの手法を用いて、特にガラスやボデーの伝熱特性が走行性能に及ぼす影響を検討し、冬場の暖房による航続距離低下を抑えるためのガラス仕様を、窓ガラスの曇り防止制御と組み合わせて提案する。

2. EVの簡易走行性能予測モデル

2.1 走行性能の予測

車両走行に必要な動力 P_{drv} は、一般の内燃機関車でもEVでも基本的には変わりがなく、タイヤの転動摩擦抵抗成分 P_{rr} 、空気抵抗成分 P_{ad} 、加速成分 P_{acl} 、勾配抵抗成分 P_{gr} の和となる。

$$P_{drv} = P_{rr} + P_{ad} + P_{acl} + P_{gr} \quad (1)$$

ここで、 P_{rr} は、車速を V 、車両の質量を m 、タイヤの転動摩擦係数を μ_r 、重力加速度を g とする時、次式で与えられる。

$$P_{rr} = \mu_r \cdot m \cdot g \cdot V \quad (2)$$

P_{ad} は、空気密度を ρ 、空気抵抗係数を C_D 、前面投影面積を A とする時、次式で与えられる。

$$P_{ad} = 1/2 \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^3 \quad (3)$$

P_{acl} は、乗員質量を m_p 、車両の回転慣性相当質量を m_r とする時、次式で与えられる。

$$P_{acl} = (m + m_p + m_r) \frac{dV}{dt} \cdot V = \frac{m + m_p + m_r}{2} \frac{dV^2}{dt} \quad (4)$$

また、今回の評価では勾配のある斜面での走行は扱わないので、 $P_{gr}=0$ とする。

EV車でも、電池からモータに電力を供給する際、インバータ部で発熱があるため、インバータ効率 η_{iv} を考える必要がある。さらに、モータと駆動軸の間に最終減速装置が装着されているため、動力伝達効率 η_{tm} を考える必要がある。したがって、電池で単位時間当たり

消費される電気エネルギー L_{drv} は、次式で与えられる。

$$L_{drv} = P_{drv} / (\eta_{iv} \cdot \eta_{tm}) \quad (5)$$

しかし、ここで、 η_{iv} や η_{tm} の具体的な値は、必ずしも公表されていない。さらに、冷暖房空調で消費される電気エネルギーを L_{ac} 、そのほかの機器で消費される電気エネルギーを L_{aux} とする時、走行時に単位時間当たり消費される電気エネルギー L_{cru} は次式で与えられる。

$$L_{cru} = L_{drv} + L_{ac} + L_{aux} \quad (6)$$

内燃機関車に無いEVの特徴は、エネルギー再生機構である。制動時に、モータを発電機として利用しエネルギー再生できるため、エネルギー効率を高めることができる。今、再生で吸収する動力が制動動力全体に占める割合を ϕ_d とすると、減速時に再生できる動力 P_{del} は次式となる。

$$P_{del} = \phi_d \cdot \left| \frac{m + m_r}{2} \frac{dV^2}{dt} \right| \quad (7)$$

再生時も最終減速装置やインバータを介するため、結局、 L_{cru} は、次式で与えられる。

$$L_{cru} = -P_{del} \cdot \eta_{iv} \cdot \eta_{tm} + L_{ac} + L_{aux} \quad (8)$$

つまり、 L_{cru} が負の時、電池に充電されることになる。しかしここで、 ϕ_d は車両メーカー独自の技術が盛り込まれて決められており、一般に公開されていない。

2.2 走行性能の評価条件

本報では、電費、航続距離などの走行性能を、JC08モード走行時で評価する。JC08は、図1に示すように、市街地走行と高速走行が含まれており、1サイクルが1204秒で、1秒毎の車速が規定されている。航続距離は、これらのサイクルを繰り返して走行するものと仮定して算出する。今回、冬季の暖房条件で検討する際は、外気温が -5°C 、相対湿度が80%、日射なし、換気量が $200\text{m}^3/\text{h}$ の条件を仮定して評価した。

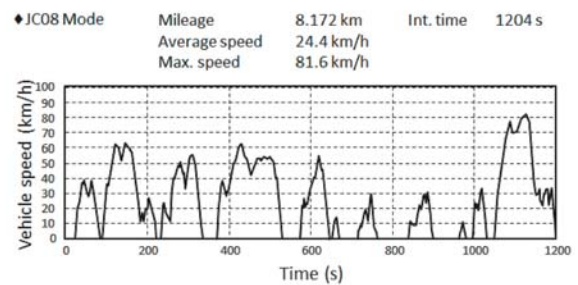


Fig.1 Driving pattern defined as JC08 mode (2)

2.3 電池残量・航続距離の計算

電池残量・航続距離は時間ステップ幅 $\Delta t = 1$ 秒で計算する。今、電池に蓄えられている電気エネルギー(電池残量)を Q_s 、電池に蓄えられる最大の電気エネルギー(電池容量)を Q_c 、時刻 $t = \Delta t \times i$ において単位時間当たり消費する電気エネルギーを $L_{cru i}$ とした時、

任意の時間ステップ*n*時の Q_s は、最初 $t=0$ 時に $Q_s=Q_c$ であるとして、次式で求められる。

$$Q_s = Q_c - \sum_{i=1}^n (L_{cru_i} \times \Delta t) \quad (9)$$

航続距離は、 $Q_s=0$ となるまで走行し続けた場合の走行距離 X_d で評価する。尚、 X_d は V を時間で積分して求める。

3. 公開されたデータからの特性同定方法

Table 1に、小型EVであるA車の公表データを示す。これは、開発メーカーのHPや、技報、公開諸元等を基にした値である。尚、計算時はこれらをSI単位に直して用いている。

その結果、走行性能を算出するに当たり、公開情報で直接得られない諸元は、 A 、 m_r 、 η_{tm} 、 η_{iv} 、 ϕ_d 、 L_{aux} となる。このうち A は、カタログに掲載された写真や簡易図面から凡その値を推定することができる。 m_r は、内燃機関車に比べ変速機などの回転部品が少ないことを勘案し、内燃機関車の平均値 $m_r \approx 0.08 \cdot m$ よりやや小さい $m_r \approx 0.05 \cdot m$ と見積もった。 L_{aux} は空調機器以外の電装部品の消費電力で、制御コンピュータや灯火器などの電力消費を想定し、最長の航続距離を評価する省電力条件の際は $L_{aux} \approx 30W$ 、冬季夜間暖房時は $L_{aux} \approx 100W$ と見積もった。また技報によると、モータの総エネルギー変換効率率は最大で97~98%であり、平均で約95%と記載されている。そこで本報では、 $\eta_{iv} = 0.95$ とした。また動力伝達効率は内燃機関車よりやや良好であることを勘案し、 $\eta_{tm} = 0.95$ と仮定した。

したがって、残っている未知の諸元は ϕ_d だけである。 ϕ_d は、本来、制動条件や制動フィーリングに応じて制御されるが、ここでは簡便のために ϕ_d が一定値であると仮定し、航続距離の公表データから逆算することとした。航続距離の公表データは、空調機器が作動していない省電力条件なので、 $L_{ac} = 0W$ と仮定し、1名乗車として、2章で述べた計算方法により、 ϕ_d と航続距離の関係性を求めた。図2にその結果を示す。これより、 $\phi_d = 0.27$ となり、一般的に知られている値 $\phi_d = 0.3 \sim 0.4$ より、やや小さな値となった。尤も、ここで $\phi_d = 0.35$ としても、航続距離は $X_d = 235km$ となり、公表値に対して3%程度の誤差にしかならず、簡易予測としては実用上十分な精度と考えることができる。

Table 2に、軽自動車クラスのEVであるB車の公表データを示す。ここでも、 A 、 m_r 、 η_{tm} 、 η_{iv} 、 L_{aux} を同様にして見積もり、 $\phi_d = 0.35$ とすると、航続距離は $X_d = 125km$ となり、公表値に対して4%程度の誤差で予測することができた。したがって、本報で提案した方法を用いて各諸元を同定することで、EVの走行性能の概略を実用的な精度で予測できることが分かった。

Table 1 Published data of Car-A (3)

Coefficient of aerodynamic drag	C_D	0.28	-
Rolling resistance of tire	μ_r	0.0065	-
Specification of tire		205/55/R16	
Mass of vehicle	m	1440	kg
Body width	w_b	1770	mm
Body height	h_b	1550	mm
Battery capacity	Q_c	24	kWh
Cruising distance		X_d	228 km

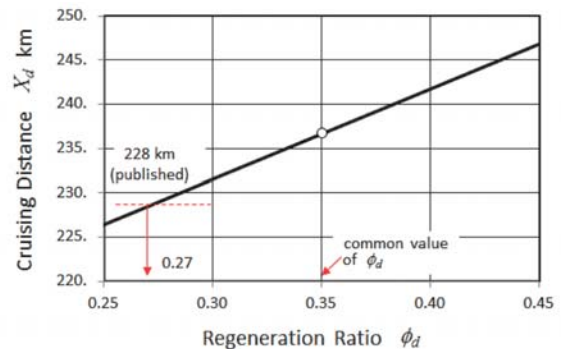


Fig.2 Relationship between regeneration ratio and cruising distance of Car-A

Table 2 Published data of Car-B (4)

Coefficient of aerodynamic drag	C_D	0.35	-
Rolling resistance of tire	μ_r	0.0065	-
Specification of tire		14/65/R15	
Mass of vehicle	m	1070	kg
Body width	w_b	1475	mm
Body height	h_b	1610	mm
Battery capacity	Q_c	10.5	kWh
Cruising distance		X_d	120 km

4. 代表的な条件下の計算例

4.1 暖房走行時の熱収支の計算方法

2章で述べた走行性能の評価条件下で、A車の暖房時の走行性能を計算する。

ここで、暖房装置はPTCヒータを想定し、消費した電気エネルギーが100%暖房エネルギーに変換されると仮定している。ボデーや窓ガラスから車外への放熱時の熱貫流率 k は、車体表面の熱伝達率を h_{co} 、ボデーやガラスの熱通過率を k_b および k_g 、車室内壁面の熱伝達率を h_{ci} とすると、次式で求められる。

$$k = \frac{1}{1/h_{co} + 1/k_b + 1/h_{ci}} \quad \text{or} \quad k = \frac{1}{1/h_{co} + 1/k_g + 1/h_{ci}} \quad (10)$$

空調のための外気導入量は $\dot{V}_{ac} = 200m^3/h$ とした。ここでは、後述する窓ガラスの曇りの検討を見据えて、乗員は5名とし、乗員発熱の顕熱成分(一人当たり69W)が暖房に寄与するとしている。 k_b および k_g は全部位で共通とし、平均的な値 $k_b = 1.6W/m^2 \cdot K$ 、 $k_g = 200W/m^2 \cdot K$ を用いている。 h_{co} および h_{ci} は、流速を u としたとき、簡便のためISO-13837に準拠した次

式を用いた⁽⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} h_c &= 5.57 + 3.94 \cdot u && \text{for } u < 5 \text{ m/s} \\ h_c &= 7.1 \cdot u^{0.78} && \text{for } u \geq 5 \text{ m/s} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで h_{co} は、JC08モードの平均車速 $V_{ave}=24.4\text{km/h}$ 相当の風速 u で評価した。ボデーや窓ガラスからの放熱量計算に際し、それらの表面積は、前面面積と同様に、カタログの簡易図面を基にして概算した。空調負荷は、車室内温度を 25°C に保つための条件で評価した。

4.2 ボデーおよびガラスの熱通過率の影響

上記の条件で走行した場合、ボデーの熱通過率およびガラスの熱通過率を各々独立に変化させた場合の、航続距離に対する寄与の計算結果を図3に示す。横軸は、標準条件の $k_{b, std}$ および $k_{g, std}$ との比を示している。

このように、ボデーの熱通過率を20%まで低減して断熱しても、航続距離は115kmと、基準条件の109kmに対して5%程度の向上しか得られない。また、ガラスの熱通過率を10%まで低減して断熱しても、航続距離は僅かしか変化しないことが分かる。図4は主要なエネルギー負荷の寄与を示しており、これより、ボデーや窓ガラスからの放熱による暖房負荷より、換気負荷の方が卓越しているため、ボデーやガラスの断熱に対する効果が小さいことが分かる。

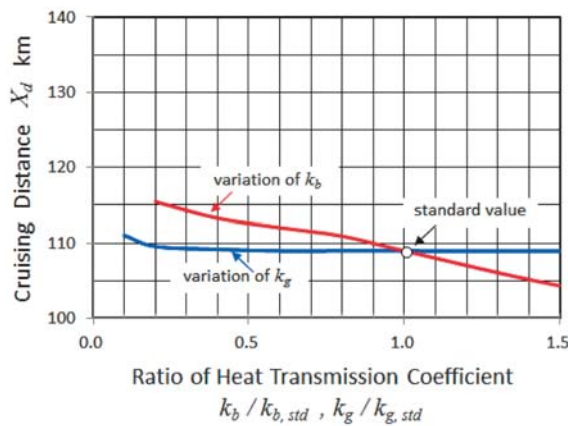


Fig.3 Contribution of the heat transmission coefficient of the body and the glass of Car-A

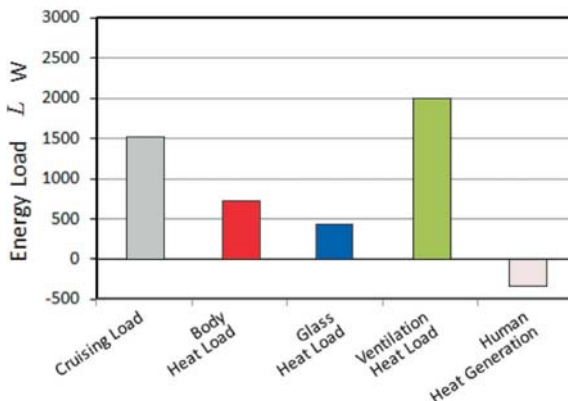


Fig.4 Contribution of principal heat loads of Car-A

5. 窓ガラス防曇制御と電費・航続距離

5.1 窓ガラス防曇制御とその予測計算法

冬季の強制換気は、本来、主に窓ガラスの曇り防止のために行われている。そこで、換気量と内気循環量の比率を変化させる防曇制御を前提とすれば、窓ガラスの断熱は航続距離増大に寄与することが期待できるので、その効果を試算する。

窓ガラスを通過する熱流束 \dot{q}_g は、室温 T_{in} と外気温 T_a の差が決まっているので、式(10)で求めた k より次式で求められる。

$$\dot{q}_g = k \cdot (T_{in} - T_a) \quad (12)$$

したがって、窓ガラスの内表面温度 T_{gin} は次式より求められる。

$$T_{gin} = T_{in} - \dot{q}_g / h_{ci} \quad (13)$$

曇りが発生するのは、窓ガラス内表面温度が露点に達した時なので、ここでは簡便のため窓ガラス内表面の相対湿度が90%以下になるような防曇制御を考える。すなわち、車室内の水蒸気分圧を p_c とし、 T_{gin} 時の飽和水蒸気圧を $p_s(T_{gin})$ とすると、

$$p_c = 0.9 \cdot p_s(T_{gin}) \quad (14)$$

となるように、換気量と内気循環量の比率を変化させて制御するシステムを考える。

5.2 防曇制御を前提にしたガラス諸元の影響

ボデーや窓ガラスの特性を標準条件とし、防曇制御⁽⁷⁾を作動させたと仮定すると、必要な外気導入量は $180\text{m}^3/\text{h}$ となり、 $20\text{m}^3/\text{h}$ は内気循環で良いことになる。そこで、4.2節と同様に、ガラスの熱通過率を変えた場合の効果を計算する。図5に、航続距離への寄与を示す。これより、ガラスの熱通過率を10%にすることができれば、防曇制御と組み合わせることにより、航続距離を21km、つまり20%程度伸ばすことができることが分かる。これは、電費に換算すると、基準条件で $220\text{Wh}/\text{km}$ であったのが、 $182\text{Wh}/\text{km}$ まで改善できることに相当する。

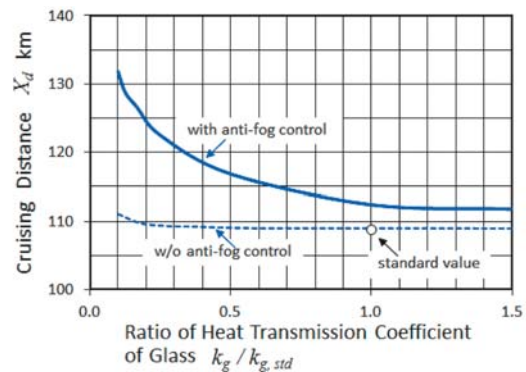


Fig.5 Effects of combination of the anti-fog control and improvement of the heat transmission coefficient of glass

このように、防曇制御と組み合わせることを前提として、ガラスの熱通過率を10%にまで落とすと、すなわち透明ペアガラスよりやや劣るレベルの断熱性能を実現したとすると、航続距離を20%程度増大させることができ、顕著な効果が得られることが分かった。

6. 結論

EVの部品開発に役立てるため、一般的に公開された情報を基に、走行性能や制御論理を簡易的に推定する手法を開発した。この手法を用いて、特に窓ガラスやボデーの伝熱特性が走行性能に及ぼす影響を吟味し、冬場の暖房による航続距離低下を抑えるためのガラス仕様を、窓ガラスの曇り防止制御と組み合わせて検討し、以下の結論を得た。

EVにおいて、冬季暖房時は、窓ガラス曇り防止のために導入する外気の加熱に要するエネルギーの寄与が突出している。このため、ボデーやガラスの伝熱特性を改善しても、航続距離の改善効果は比較的小さい。しかし、防曇のための外気導入量制御を用いると、ガラスの断熱特性が窓ガラス内表面の露点に直結するため、その効果は顕著になる。具体的には、窓ガラス内表面温度が露点より僅かに高い温度となるように外気導入量を制御すれば、航続距離を顕著に改善できる可能性のあることが確かめられた。

謝辞

本論文作成に際し、当時東京都市大学の学部生である廣枝篤志氏、渡部理子氏に多くの協力を得た。ここに謝意を表す。

—参考文献—

- (1) 中根重治, 門井勝, 瀬戸寛樹, 梅津康平: 電気自動車における空調システム, 自動車Vol.64, No.4, (2010)
- (2) 国土交通省, 道路運送車両の保安基準の細目を定める告示(平成14年国土交通省告示第619号), 軽・中量車の排出ガス試験モード, (2003)
- (3) Nissan LEAF: <http://ev.nissan.co.jp/LEAF/SPEC/>
- (4) Mitsubishi i-Miev: <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/i-miev/spec/>
- (5) 自動車の使用実態調査報告書(平成9年度県境負荷低減技術基盤等整備事業), 財団法人石油産業活性化センター(1997)
- (6) ISO 13837:2008 (E) Annex B, (2008)
- (7) 平井伸一郎他, 冬季換気損失低減に寄与する湿度コントロールシステムの開発, デンソーテクニカルレビュー vol.17, (2012)