

講演 1. 電気重量車の電力消費率を高精度に評価するための 新たな HILS 試験手法の検討

環境研究部

奥井 伸宜

1. はじめに

プラグインハイブリッド自動車及び電気自動車等の電動化技術搭載車両の普及が急速に進んでいる。トラックやバス等の重量車分野においても、同様の流れにある。その普及の拡大を受け、国際連合の自動車基準調和世界フォーラム（WP29）にて、WHDC（Worldwide Heavy-Duty Certification procedure）の gtr（global technical regulation）No.4 で、ハイブリッド重量車を含む重量車の排出ガス試験法が規定され、運用されている。一方、それら車両の燃料消費率については、各国が独自に取り決め運用している。ここで、日本におけるハイブリッド重量車やプラグインハイブリッド重量車の燃料消費率（燃費）及び電気重量車の電力消費率（電費）の整備状況を、表 1 に示す。ハイブリッド重量車の燃費試験法は整備されているが、プラグインハイブリッド重量車の燃費試験法及び電気重量車の電費試験法は、未整備の状況にある。そこで、現在、国土交通省や環境省が中心となり「重量車の電費等試験法検討会」を立ち上げ、整備を進めている。その検討においては、既に整備されている「ハイブリッド重量車試験法（従来 HILS（Hardware In the Loop Simulation）試験法）」を参考とし、それら重量車に必要な改良を行っている。

従来 HILS 試験法は、車両のみならず、エンジン、電動モーター及びバッテリー等のパワートレイン部分をモデルで再現し、机上で計算機を用いて評価するものである。この際、エンジン等の状態が安定した「ホットスタート」を前提としていることから、モデルでそれらを再現することは比較的容易である。しかしな

表 1 電動重量車の試験法整備状況（日本）

	ハイブリッド (HEV)	プラグインハイブリッド (PHEV)	電気自動車 (EV)
乗用車	TRIAS_5-9-2009	TRIAS_5-9-2009	TRIAS_99-011-01
重量車	TRIAS_99-007~9-01 TRIAS_31-J041(1~3)-01	なし(→拡張HILS)	なし

(TRIAS : Test Requirements and Instructions for Automobile Standards)

がら、電動化技術搭載車両の実運用時は、コールドスタートとなる場面が多く、エンジン等は熱変化を伴うため、そのモデル化は困難である。そこで、プラグインを含むハイブリッド重量車のコールドスタートの燃費や排出ガスを高精度に評価することを目的として、エンジン部分をモデルから実機に置き換えて運用する「拡張 HILS」手法を提案している¹⁾。

バッテリー搭載容量が多い電気重量車は、車両運用時にバッテリーが発熱する、劣化する等でバッテリーの各種特性が時々刻々変化する。そのため、バッテリーをモデルで扱うことは容易ではない。そこで、電気重量車の電費を高精度に評価することを目的に、上述した拡張 HILS 手法で得た知見を応用した「バッテリー HILS」手法を検討した。具体的には、従来 HILS に実機バッテリーを組み合わせる手法である。本実験においては、電気重量車が入手困難であったため、市販の電気乗用車を対象とした。実際に、新たな HILS でこの電気乗用車をモデルで再現させ、各種検証を行った。以下、その内容を紹介する。

2. 電気自動車用バッテリーのモデル化の課題

実機バッテリーを低温環境下で使用した際、バッテリーの内部抵抗が増加するためバッテリー温度は上昇する。そこで市販の電気自動車を用い、この一般特性に対して車両性能がどの程度影響を受けるかを調べた。

表 2 供試車両

Vehicle weight	[kg]	1,100
Motor	Type	Permanent magnet synchronous motor
	Max. output [kW/min ⁻¹]	47 / 3,000 ~ 6,000
	Max. torque [Nm/min ⁻¹]	180 / 0 ~ 2,000
Battery	Type	Lithium-ion
	Rated voltage [V]	330
	Rated capacity [kWh]	16
	Control system	Inverter control
Drive-train		Rear-wheel drive
Product year		2009



2.1 供試車両

本実験に用いた供試車両を表 2 に示す。軽自動車カテゴリーに属する電気自動車（2009 年製）である。リチウムイオンバッテリーを 16kWh 搭載している。

2.2 課題把握（実車両を使用して）

シャシダイナモメーターを用いて、供試車両のバッテリー特性を調査した。バッテリー満充電からバッテリー残量が無くなるまで、JC08 モードを繰り返し走行した。車室内空調機は「オフ」である。

(1) 時間経過の影響

車両購入時から約 10 年が経過しており、その間の航続可能距離の推移を調査した。図 1 に、航続可能距離の結果を示す。納車後はカタログ性能（160km）に近い約 157km 走行できたが、2019 年 7 月時点は約 115km となり、走行可能距離は約 42km（約 27%）短くなった。

(2) 車両周囲（外気）温度の影響

従来試験法規定の周囲温度 25°Cに加え、7°C及び 37°Cの環境下で航続可能距離を調査した。図 2 に周囲温度に対する航続可能距離の結果を示す。試験実施時の車両積算走行距離（オドメータ）は、約 5,000km である。周囲温度が下がれば航続可能距離は減少し、周囲温度が上がればその逆となった。

(3) モード繰り返し走行時の影響

周囲温度違いの影響を詳細に調べるため、モード繰

り返し走行時のバッテリー温度の推移を、バッテリー蓄電状態（SOC : State of Charge）を横軸として整理した。結果を図 3 に示す。走行を繰り返すとバッテリー温度が上昇し、その温度上昇幅（ ΔT ）は、低温環境下ほど大きくなった。

以上の (1) ~ (3) で確認した通り、実使用時の電気自動車搭載バッテリーは、様々な影響を受けることを確認した。

ここで、電気重量車の電費評価は、従来 HILS 試験法をベースに検討されている。従来 HILS 試験法では、電池の直流内部抵抗や端子電圧を求める際、「電圧測定は単位電池端子間又は車両搭載状態端子間で行う。試験開始時の電池温度は、25°C±2°Cとする。ただし、車両搭載状態相当でのモード運転時における電池温度実測値を申請することで、45°C±2°Cを選択することができる。」と規定され、バッテリーをモデル化の際は、「電流や電圧特性を、最小二乗法によって求める。」とされる。しかし、ハイブリッド車に比べ、電気自動車のバッテリー使用領域（SOC 幅）は広く、走行時の実機バッテリーは、上述した通り、自己発熱により温度が上昇し、バッテリー特性が常に変化する。このことから、規定通りの 25°C±2°Cまたは 45°C±2°Cで保たれた環境下でバッテリーをモデル（マップ）化し、仮想車両を走行させた場合、実車両の走行性能を再現できない恐れがある。

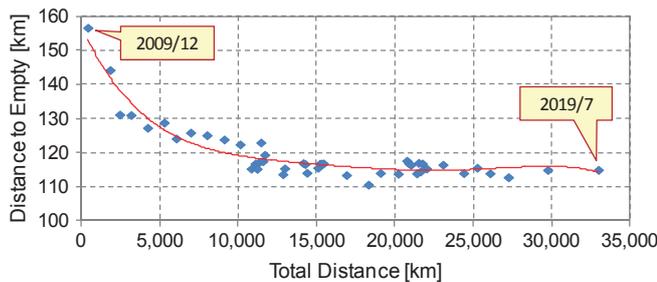


図 1 時間経過の影響（実車両、周囲温度：25°C）

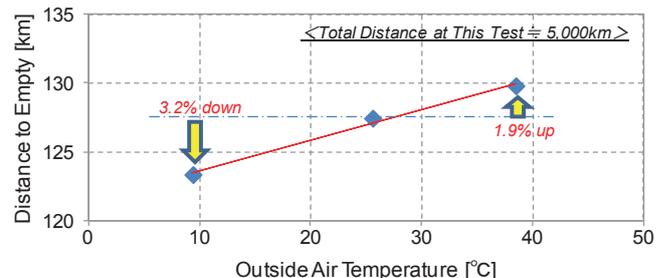
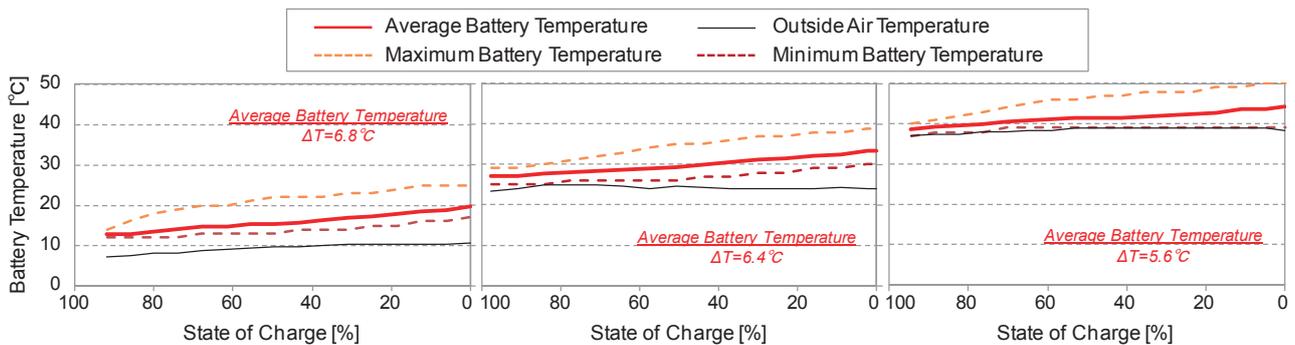


図 2 周囲温度の影響（実車両）



(a) Initial Outside Air Temperature = 7°C (b) Initial Outside Air Temperature = 25°C (c) Initial Outside Air Temperature = 37°C

図 3 モード繰り返し走行時のバッテリー温度の推移（実車両）

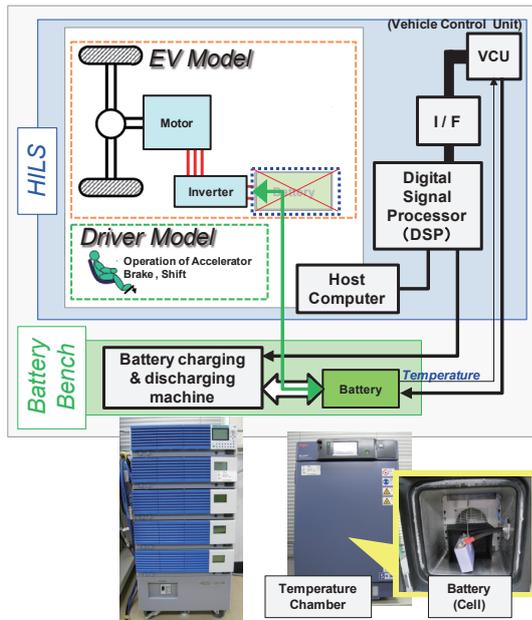


図4 バッテリーHILSの構成図

3. 課題対応 (高精度評価に向けて)

電気重量車の電費を高精度に評価するには、従来 HILS でバッテリーをモデル化して扱うことは困難である。そこで、拡張 HILS 手法で得た知見を応用し、電費を高精度に評価する新たな HILS 手法を検討した。以下、その装置を「バッテリーHILS」と呼ぶ。

3.1 バッテリーHILSの構築

バッテリーHILSの構成図を、図4に示す。

操作 PC 上で実行される HILS プログラムは、電気自動車モデル、ドライバモデル、道路状況等から構成され、車両制御装置 (VCU) と制御信号を送受信することで、机上で仮想車両の走行が可能となる。今回構築したバッテリーHILSは、従来 HILS のバッテリー部分をモデルから実機に置き換え、車両モデルと実機バッテリーをリアルタイムに協調制御させる装置である。バッテリーHILSの構築に伴い、外部指令によりバッテリーを充放電できる「バイポーラ方式直流安定化電源装置 (PBZ20-100SR : KIKUSUI)」とバッテリーの周囲温度を -40°C ~ $+150^{\circ}\text{C}$ で調整できる「恒温槽 (SH-242 : ESPEC)」を使用した。

ここで、従来 HILS 試験法の試験電池は、「単位電池 (モジュール) 又はバランス装置等を含めた車両搭載状態とする。」とあるが、今回は『バッテリーHILSを構築し、運用の可能性を調査すること』を目的としており、「セル単位」で評価を進めた。本実験に使用した電池は、供試車両が搭載している同型の電池であ

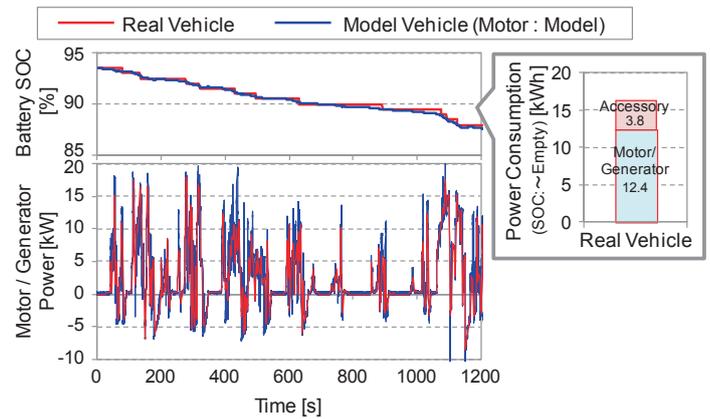


図5 バッテリーHILSによる供試車両性能の再現

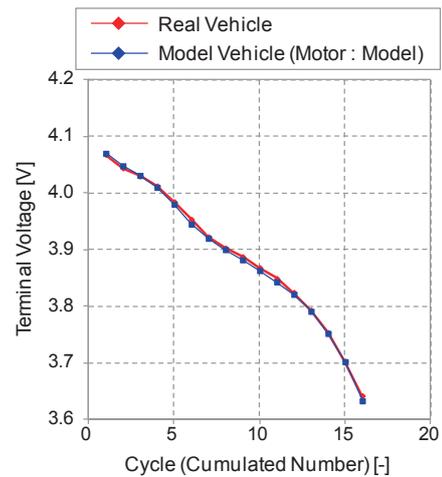


図6 モード繰り返し走行時の端子電圧の推移の再現

り、HILS 上でスケーリング (セル単体 $\times 88$ 個) することで、実車同等の電池パック容量を再現した。

3.2 バッテリーHILSの検証

(1) 仮想車両の構築

実車両と同型の電動モーターを動力計に設置し、バッテリーHILSで必要となる電動モーターの特性 (マップ) を取得した。そのマップを使い、電気乗用車の仮想車両を HILS 上に構築した。図5に、バッテリーHILS上に再現した仮想車両が、JC08モードを走行した際の電動モーター出力とバッテリーSOCを、実車と比較して示す。実車両やバッテリーHILSの実機バッテリーの周囲温度は約 25°C である。ここで、実車両の電動モーターと補機の消費電力量を、シャシダイナモメーターを用いて調査し、バッテリーHILSで構築した仮想車両に、この補機の電力量を付与した。

結果は、両者とも同等の傾向及び値を示し、仮想車両がバッテリーHILSで再現できることを確かめた。

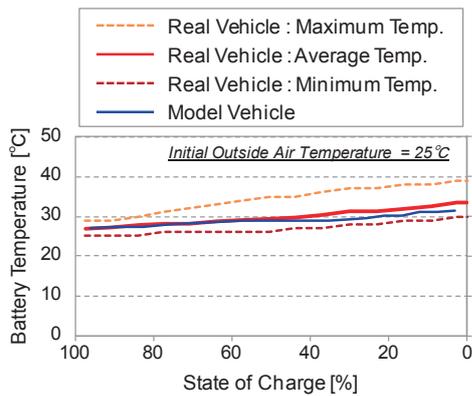


図7 モード繰り返し走行時のバッテリー温度の推移の再現

(2) モード繰り返し走行

JC08 モードを繰り返し走行し、バッテリー（セル単体）端子電圧及びバッテリー温度を調べた。この時の実車及びバッテリーHILS（実機バッテリー）の周囲温度は約 25°Cである。今実験における実機バッテリー周囲温度の設定においては、恒温槽の温度調節機能を停止し、操作室の室温条件下で実施した。

図6に、バッテリー端子電圧の推移をサイクル毎に整理し、実車両と仮想車両で比較して示す。実車両及びバッテリーHILSの実機バッテリー（セル単体）の端子電圧は、サイクルに対し同じ変化を示した。

次に、上記試験で得たバッテリーHILSと実車両のバッテリー温度の推移をSOCでまとめ、図7に示す。バッテリーHILSの実機バッテリー温度の推移は、実車両と同様、サイクルが増すにつれ上昇し、バッテリーHILSで実使用時のバッテリー特性が再現できた。

3.3 バッテリーHILSの応用（周囲温度の影響）

バッテリーHILSの実機バッテリーの周囲温度を、恒温槽を用いて変化させ、サイクルを繰り返し走行した。実際の周囲温度（平均）は、54°C、40°C、26°C、14°C、0°C、-8°C、-16°C、-28°Cである。セル単体の端子電圧を調べた結果を図8に示す。周囲温度が低温側（0°C以下）になるほど、1サイクル当たりのバッテリー電圧が劣る結果が得られた。この時のバッテリー温度上昇幅（満充電サイクルの走行開始時から、バッテリーが空となるサイクルの走行終了時の温度の差）を整理し、図9に示す。周囲温度が低温側（0°C以下）になるほど、電池の温度は上昇した。これは、低温側になるほど、バッテリーの内部抵抗の抵抗損失による自己発熱が要因で、温度が上昇したと判断でき

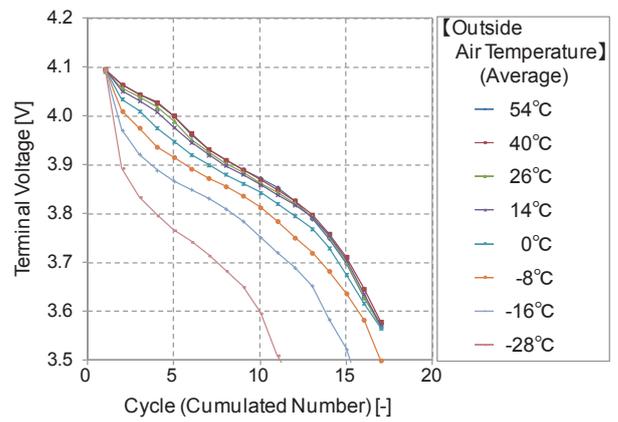


図8 バッテリー周囲温度と開放電圧の関係

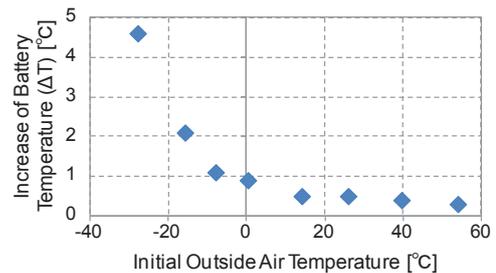


図9 バッテリー周囲温度とその上昇幅

る。参考までに、今回用いた恒温槽内の容積は小さく、槽内設置ファンの風による影響を多少受けている。

以上より、今回構築したバッテリーHILSを用いれば、電気重量車のあらゆる温度環境下における試験が容易に高精度に行うことが可能である。ここで、WLTP（乗用車）においては、低温環境下（-7°C程度）における性能試験が今後検討される。重量車への適用予定は決まっていないが、低温条件下の試験が求められた際、このバッテリーHILSは有効な手法となる。

4. まとめ

バッテリーをモデルで扱う従来HILS手法で電気重量車を評価する動きがある。しかし、車両走行時のバッテリー特性は常に変化するため、モデルで扱う事とは容易ではない。そこで、従来HILSのバッテリー部分をモデルから実機に置き換え、車両モデルと実機バッテリーをリアルタイムに協調制御させる「バッテリーHILS」を構築した。このバッテリーHILSの手法により、電気重量車のあらゆる温度環境下における試験が容易に高精度に行える可能性がある。

参考文献

- 1) 奥井伸宜：次世代電動重量車の燃費・排出ガス試験に対応した新たな評価手法の検討、交通安全環境研究所講演会、p.37-51 (2019)