

⑩ JC08 モード走行を想定した電気自動車 (EV) ・ プラグインハイブリッド車 (PHEV) 用バッテリー劣化試験結果の解析

環境研究領域 ※新国 哲也 河合 英直

1. はじめに

プラグインハイブリッド車 (PHEV) や電気自動車 (EV) では、ハイブリッド車と比べて広い SOC (State of Charge) 範囲でバッテリーが使用される。このような厳しい使用条件下ではバッテリー劣化の早期の進行が懸念されるが、PHEV や EV の台数は少なく、実態が把握できていない。そこで著者らは、自動車用バッテリーとして最も有望視されているリチウムイオンバッテリーを用いて、PHEV の使用条件を模擬した充放電波形を繰り返し加えて、バッテリーの劣化特性を測定してきた。本発表では、バッテリーの初期段階での放電容量低下を計測し、この放電容量の低下が保存劣化ではなく JC08 の走行を模擬した充放電ストレスを印加した結果表れたものであることを実験的に明らかにしたので報告する。

2. 研究背景

2. 1. 外部電力走行距離と SOC 範囲について

2. 1. 1. PHEV

PHEV は、通常のハイブリッド車で行われている減速時の回生エネルギーを次の駆動に利用することに加え、走行エネルギーの一部を化石燃料から車外からの電気エネルギーで代替し、ハイブリッド車よりも積極的に電気駆動を行うものである。

図1には PHEV の一つの例として、AER (All Electric Range) を主体とするタイプにおける、外部からの電気エネルギーによる走行 (プラグイン走行) の概念を示す。商用電源などから充電した電力を使い切り、SOC が a% まで低下すると、その後は化石燃料によるエネルギー主体の走行、すなわちハイブリッド車と同じく SOC を一定とする走行に切り替わる。

プラグイン走行できる距離はバッテリー容量に依存する。外部電力による走行距離を延伸しようとすれば、バッテリー

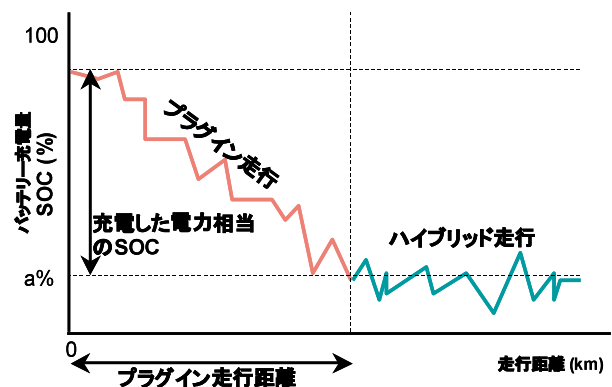


図1 PHEVの走行距離に対するSOC変化例

の搭載量を増やすことが考えられる。しかし、そもそもハイブリッド車がエンジンに電気機器を追加する構成により価格や車両重量が増加するところに、さらに大容量バッテリーを積載することは、普及車としては現実的でない。したがって、限られたバッテリー容量において広いSOCで運転することが、電気主体の走行距離を確保する現実的な手法と考えられる。

2. 1. 2. EV

PHEV ではバッテリーに充電された電気を使い果たしてもガソリンにより走行継続が可能であるのに対し、EV においてはバッテリー容量と SOC の幅が走行距離の長短を決める。走行距離を延伸するためにEV ではPHEV よりも大容量のバッテリーが搭載されることが考えられるが、その量にも限りがあることを考慮すると、PHEV と同じようにSOC範囲は広い範囲で運転されると思われる。

2. 2. 環境性能評価の課題

バッテリーの劣化は一般的に知られており、使用の状況に応じて劣化の進行度合いは変化する。SOC の変化幅が大きいと、劣化の進行が早まるという報告例もあることから⁽¹⁾、先述のような広いSOC範囲で使用される PHEV や EV のバッテリーでは、劣化が進行しやすいと考えられ

る。

ところで、通常のエンジン車やハイブリッド車の環境性能評価において、特に排出ガスについては、その触媒による浄化効果を新車状態でなく耐久走行後の自動車の状態で評価することになっている。一方EVでは、現状は航続距離などの性能は新車の状態のみで評価されている。したがって、PHEVやEVのバッテリーの劣化は、その進行の度合いが懸念されるものの、実態の把握はできておらず、性能評価においても考慮されていないという問題がある。

そこでPHEVやEVでは、実際の使用条件下でバッテリーの劣化がどの程度顕著に生じるのか、また耐久走行後のPHEVやEVの環境性能評価を、どのような加速条件のもとで迅速に行うのかを検討する必要がある。

3. 研究の目的

PHEVやEVといった外部からの電力を利用する自動車の環境性能を正しく評価することを目標に、本研究では供試バッテリーに車両を模擬した充放電パターンを繰り返し印加して、供試バッテリーがどのように劣化するかを把握する。この結果は、今後検討を行うバッテリーの劣化加速条件作成に応用する。

4. 実験方法

4. 1. バッテリー充放電電流波形の計算

現在型式認定を得たPHEV、あるいはEVを市場で入手することは難しいため、この研究では任意の車体を想定し、この車体をJC08の車速パターンで運転したときの仕事量からバッテリーの充放電電力の変化を計算した。計算式を下に示す。

$$\Delta E(t) = (m\alpha + F_r) \times v(t) \Delta t \quad \dots (1)$$

$$\alpha = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \dots (2)$$

式(1)、(2)において、 ΔE : 単位時間の仕事量[J]、 m : 質量[kg]、 α : 加速度[m/s²]、 F_r : 走行抵抗[N]、 v : 速度[m/s]である。

4. 2. 車両諸元

車両の質量に対する積載バッテリーの比率が低い方が充放電頻度は多くなると予想されるため、本稿では小型のEVでなく、ハイブリッド車として現在最も一般的な中型サイズの車両を仮定した。表1に車両の諸元を示す。走行抵抗は図2の特性を用いた。なお、プラグイン走行においてはエンジンを利用せず、電力のみで走行する制御を前提とした。

次に、計算において下記のように簡略化した。式(1)

で得られた仕事量を電力に換算するが、バッテリーモータ間の電機効率を90%、モーター車軸間の機械効率を90%とそれぞれ仮定した。バッテリー電圧は180V一定とした。また回生については、減速トルクに比例する電力を回生するものとした。

表1 仮定した車両の諸元

質量	1500kg
バッテリー電圧	180V (一定)
バッテリー容量	2.7kWh
バッテリー容量対質量	0.0018kWh/kg

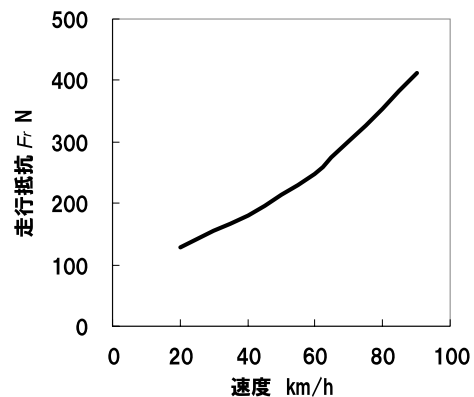


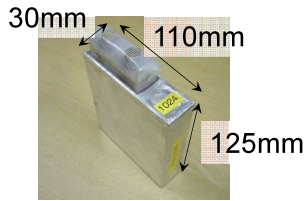
図2 仮定した車両の走行抵抗

4. 3. 供試バッテリーの諸元

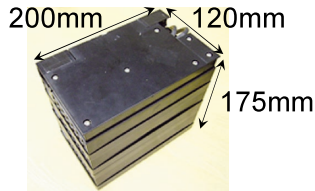
リチウムイオンバッテリーでは、充電時にリチウムイオンが負極表面材料に充填されるが、この際に電極表面材料の膨張が生じる。この膨張の度合いは負極の材料の種類により異なる。今回用いた供試バッテリーの負極材料はカーボンであり、他の合金系負極表面材料に比べて膨張の度合いが低い。このことから、カーボンを用いたバッテリーでは広範囲のSOCで充放電を繰り返しても、膨張・収縮の過程での体積変化が少なく、機械的破壊が進行しにくいと考えられ、比較的耐性が高いと期待できる。そこで供試バッテリーとして、負極はカーボンを主体とする材料(LiC₆)、正極はスピネル型結晶構造のマンガン酸リチウムという構成のバッテリーを用いることにした。表2には供試バッテリーの諸元を示した。

表2 供試バッテリー(1セル)の諸元

容量	15Ah
体積	0.36L
重量	0.91kg
エネルギー密度	73Wh/kg
出力密度	470W/kg
許容電流	200A



供試バッテリー(セル)



供試バッテリーモジュール(4セル)

図3 供試バッテリーの外観

4. 4. バッテリー劣化試験方法

図4には実験回路を示す。バッテリー充放電装置(高砂製作所製)の最大電圧および最大電流は 60V、700A である。充放電立ち上げ/立ち下げ時間は(設定値の 10~90%において)2ms であり、車載バッテリーの充放電電力の再現には十分である。

またバッテリーは、10・15 モード試験の技術基準⁽²⁾を参考に、標準温度である 25℃の環境が得られるように恒温槽(エスペック社製 WU-200)の内部に設置する。以上の実験装置を用い、計算で得られたバッテリーの充放電電流波形を再現するようバッテリー充放電装置をプログラムし、バッテリーに繰り返し負荷をかけ、バッテリー容量の変化を測定した。

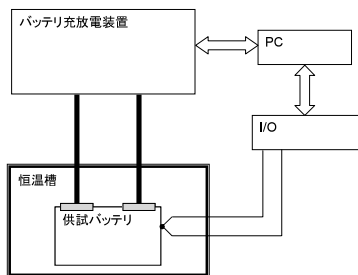


図4 バッテリー劣化試験回路

4. 5. 試験条件

バッテリーへの繰り返し負荷の与え方を図5に示す。水色の帯がJC08での車両走行状態を模擬したバッテリー電圧の変化の様子を示しており、この約 20 分間に JC08 を 1 回走行したのと同様な負荷を与えられる。その後 0.2C で充電を行う。このような JC08 と

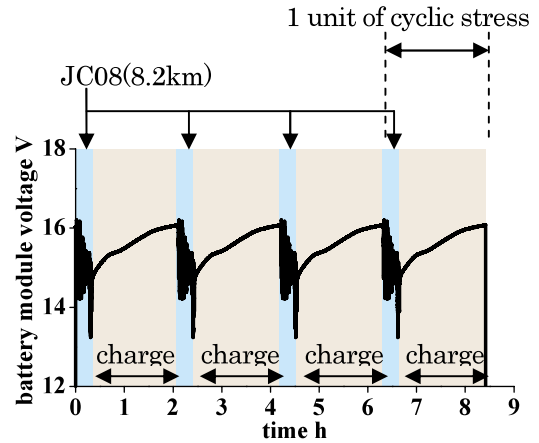


図5 サイクルストレスの印加条件

充電のサイクルを繰り返し、20 回ごとにバッテリーの放電容量を測定し、その変化を測定した。

5. 結果

図6に初期状態で一定電流(15A)にて放電を行ったときのバッテリーの電圧の変化を示す。初期放電容量は、バッテリー1モジュール4セル当たり 226.4Wh であった。

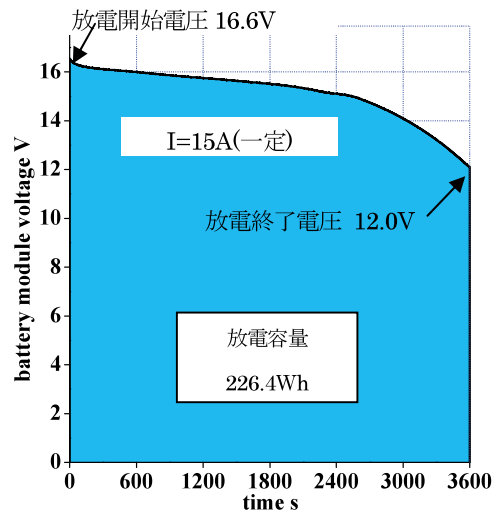


図6 初期状態でのバッテリーの放電容量

図7はサイクル負荷印加に対する放電容量の変化を示す。なお、図5のようなストレスを加えず、保存劣化の効果のみで生じた劣化成分を抽出するため、供試バッテリーを設置してある恒温槽内部に供試バッテリーと同じロットの単セルバッテリーを設置し、その放電容量も計測した。図7の黒のプロットに単セルの放電容量の変化を示す。

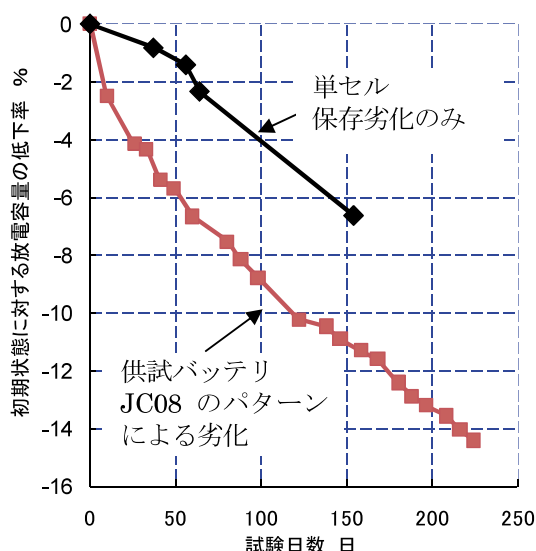


図7 サイクル負荷印加後の放電容量の変化

一方、図7の赤のプロットは、図5のサイクルストレスを受けた供試バッテリーの放電容量の変化を示しており、連続的な充放電を続けた結果として約 220 日の試験日数で放電容量の減少率は約 14% となった。比較的減少率が大きくなったことについて、本実験で用いた供試バッテリーは電極材料のポテンシャルとしてサイクル劣化に強いと期待されたものの、開発中のバッテリーであり、耐性向上のための最適化がなされていないことなども原因と考えられる。

一方、放電容量の変化の仕方についてであるが、図7の試験日数 0~50 日における JC8 のパターンによる放電容量の傾き（赤色のプロット）と、保存劣化による放電容量の傾き（黒色のプロット）は異なる結果となった。このことから、前者には保存劣化とは別の劣化過程が存在したといえる。

ところでリチウムイオンバッテリーの劣化過程として BADIN らは、保存劣化の主プロセスと考えられるアレニウス則に従う熱劣化と、充放電により電極材料が膨張収縮する機械的なストレスにより電極材料が疲労しバッテリー劣化が進行する機械的劣化について研究を行っている⁽³⁾。これと同様な劣化過程が JC08 を想定した本研究の実験結果にも寄与している可能性が考えられる。

2. でも述べたように、現在一般的なエンジン車の排出ガスなどの環境性能評価においては、同車両が耐久走行後の状態でも基準値を満たすことが求められている。一方現状の EV の評価においては新車の状態での評価にとどまっている。EV でも一般の自動車と

同様な考え方で、車両の耐久走行後の状態で環境性能を評価することが求められるとすれば、加速劣化の条件を設定する必要がある。図7の結果は、この加速劣化条件として、熱劣化と機械的劣化を複合化する必要があることを示唆していると思われる。今後はこのような複合的な劣化過程を加味した劣化加速条件の提案に当たり、まず熱劣化成分と機械的劣化を切り離してそれぞれ検討し、最終的に両者を複合化する流れで検討を進める。

6. 結論

PHEV を JC08 で繰り返し走行することを模擬した電氣的負荷を供試バッテリーに加えて、放電容量の低下を測定した。その結果、14%の低下がみられ、劣化の特性は単純な保存劣化とは異なるものとなった。主な原因はJC08のパターンによる劣化には機械的劣化が重畳されていたためであると予想された。

7. 今後について

本実験を引き続き行い、JC08 を想定したバッテリー劣化の特性を取得するとともに、自動車の耐久走行後の状態を迅速に再現するための複合的なバッテリー劣化加速条件についても検討していく計画である。

8. 参考文献

- (1) 例えば、市村雅弘, 小型リチウムイオンバッテリーの寿命特性, 電子情報通信学会 (2005)
- (2) 国土交通省自動車交通局技術安全部, 新型自動車審査関係基準集 (2001)
- (3) François BADIN, Modeling of On-board Energy Storage System ageing The French SIMSTOCK research network , EVS24(2009)