

テレマティクス技術を活用した BEV 用リチウムイオン バッテリー容量の推定と推移予測

Accurate Capacity Estimation and Forecast of Li-ion Battery for BEV Using Telematics

武 政 幸一郎*

Koichiro TAKEMASA

羽 田 知 史***

Satoshi HADA

宮 下 拓 也*

Takuya MIYASHITA

上 甲 昌 郎***

Masao JOKO

赤 松 健 治**

Kenji AKAMATSU

要 旨

ABSTRACT

2012 年から米国でリース販売している FIT EV 全車両のバッテリーデータをタイムリーに収集するため、テレマティクス技術を用いたバッテリートレーサビリティシステムを開発した。本システムは、リチウムイオンバッテリーの使い方と容量推移を把握することを主目的にしている。収集した全車両のバッテリー時系列データを Honda サーバ上へ展開し、バッテリー容量の全算出データから精度の高いデータのみを抽出するアルゴリズムを構築、適用することで、車載 Electric Control Unit よりも精度高く容量算出することが可能になった。その結果、バッテリー容量低下が 3% 以内に収まっていることを 97% の FIT EV で確認できた。また、FIT EV のバッテリーの使い方は、容量低下促進領域の滞在頻度が低いことが確認できた。加えて、ユーザの使い方を容量推移予測モデルに適用することにより、今後数年間で、容量低下が 5% 以内に収まることを予測した。

A battery traceability system that uses telematics technology was developed in order to acquire timely battery data from all FIT EVs that have been leased in the United States since 2012. The main purpose of this system is to track lithium-ion battery usage and capacity.

It has become possible to estimate battery capacity with greater accuracy than on-board Electronic Control Units (ECU) by loading the time-series battery data collected from all the vehicles onto Honda servers, and applying an algorithm created to isolate the data of high accuracy from the totality of battery capacity estimation data. As a result, it was confirmed that battery capacity degradation remains within 3% in 97% of the FIT EV. It was also confirmed that FIT EV battery usage has a low frequency of remaining in the accelerated capacity degradation zone. In addition, it has been forecast by applying this data to the capacity forecast model for user patterns of usage that capacity degradation will be within 5% over the next several years.

1. はじめに

リチウムイオンバッテリー (Lithium-ion battery: LIB) の容量は、その使い方や使用年数に応じて低下する。これは、LIB を搭載した Battery Electric Vehicle (BEV) の航続可能距離等の商品性へ影響を与える。そのため、BEV の下取り査定時の性能評価や中古車販売時の値付け等において、LIB の容量低下度合を正確かつタイムリーに把握すること

は重要である。

2012 年、FIT EV のリース販売を米国で開始した。本リースでは、まず 3 年間のリース期間を設け、一定期間経過時点の LIB の容量低下度合を一つの判断材料として、リース期間を延長できるか判断する予定であった。リース期間を延長するためには、この LIB 性能評価時に、LIB の健全性、特異的な使い方がされていないこと、リース延長期間の LIB の健全性を確認する必要があった。

* 四輪 R&D センター

** 株式会社ティ・アイ・シー

*** 日本アイ・ビー・エム株式会社

従来、ハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicle: HEV) では、車載された LIB の使い方や性能状態を、故障診断機 (Honda Diagnostic System: HDS) を通じて収集してきた。

この手法では、車載センサで計測した使い方のデータと車載 Electric Control Unit (ECU) で推定した LIB 容量データが ECU に蓄積される。蓄積されたデータは、Honda ディーラにて非定期に実施される車両点検等の際に HDS により収集される。収集されたデータは Honda サーバへ送信され、分析、活用されてきた。

しかし、リース期間延長を判断する上で HDS によるデータを収集する方法には 3 点の課題があった。車両点検時等にデータ収集の機会が限られるため、タイムリーで網羅的なデータ分析、活用ができない。HEV の車載 ECU は、主に故障判定目的で LIB 容量を推定している。そのため、BEV 特有の航続可能距離への影響度合いを評価するのに必要な容量推定精度を有していない。さらに、将来の容量推移予測には、使い方の膨大なデータ蓄積と使い方を基にした高負荷な容量推移予測計算が必要である。しかし、車載 ECU に許容される搭載スペースとコスト制約下では上記の対応が課題であった。これらの課題を解決し、お客様への負担無くデータを収集する手法として、Honda が既にサービス展開しているテレマティクス技術を活用することにした。

2. 開発のねらい

前章の課題を解決するためには、新たな BEV 用 LIB データの収集、蓄積、分析システムが必要と考え、以下 3 点を主要なねらいとした。

- (1) 全車両の LIB の使い方と容量変化をタイムリーに、ユーザに追加負担無く収集、分析、活用できること。
- (2) LIB 容量を ECU 算出値と比べ精度良く推定できること。
- (3) 個々の車両の使い方に応じた、LIB 容量の将来推移予測ができること。

3. LIB データ活用フロー

走行および充電時に FIT EV から収集される LIB 関連の時系列データ量は膨大になる。膨大なデータを分析する場合、課題と課題解決フローを定義しないままデータ収集、分析を開始すると、意図した分析結果を効率良く求められなくなることが懸念された。そこで、データ収集システムの構築にあたり、課題を明確に定義し、LIB 関連のデータを効率的に収集、分析、活用するための LIB データ活用フロー (Fig. 1) の構築を目指した。

約 1,000 台の FIT EV からのデータをユーザやディーラに負担無く収集するため、米国ですでにサービス展開し

ているテレマティクスシステム⁽¹⁾を活用したバッテリートレーサビリティシステムを開発した。

データ収集は、ユーザの同意を得た上で、米国の全 FIT EV の時系列データをタイムリーに収集する。走行中および充電中の車両、LIB の生データは、車載通信ユニット (Telematics Control Unit: TCU) と携帯回線網を通じて、時系列バイナリデータとして送信される。送信データは、Honda サーバに蓄積される。蓄積データを逐次テキストデータに変換し、1 走行ごと、1 充電ごとのデータセットに要約する。これにより、全車両の使い方を網羅的に把握することができる。要約したデータの中から、LIB の高精度容量算出、使い方解析、容量推移予測に関するデータを抜き取り、それらを分析するためのモデルを作製する。分析者は、データをモデルに適用する過程で、モデルを改修し精度を上げていく。また、計算処理負荷の高い容量推定と容量推移予測をサーバ側で実施することで、ECU より精度の高い容量の推定と推移予測の実現を目指した。なお、容量推移予測にあたっては、FIT EV の開発と並行して構築した LIB 容量推移予測モデル⁽²⁾を活用する。

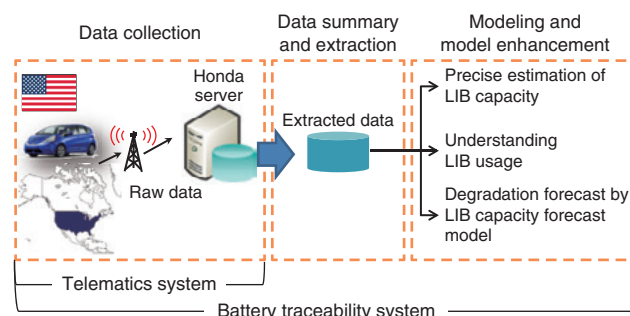


Fig. 1 LIB data utilization flow

4. 高精度容量算出

4.1. 車載 ECU の容量算出方法

LIB 容量は、電流の積算値 (ΔAh) と同期間中の LIB の充電率 (State Of Charge: SOC) の変位分 (ΔSOC) から、逐次最小二乗法によって線形回帰 (Fig. 2) して求め⁽³⁾、式 (1) であらわされる。

$$Capacity = \frac{\Delta Ah}{\Delta SOC} \quad (1)$$

これを車載 ECU でおこなう場合、 ΔAh は車載電流センサの電流値を積算して算出する。

一方、SOC は車載センサにより直接観測できない物理量であるため、推定する必要があるが、その方法は大きく分けて二通りある。一つ目は LIB の端子開放電圧 (Open

Circuit Voltage: OCV)を推定した後に、SOC-OCV カーブ (LIB に固有の SOC と OCV の関係)を用いて OCV を SOC へ変換する方法 (OCV 推定法)である (Fig. 3)。

二つ目は電流の積算値と LIB 容量を用いて走行初期からの SOC 推移を推定する方法 (電流積算法)である。

4.2. 車載 ECU の容量算出誤差

OCV 推定法では、OCV を直接計測できない通電中に、OCV 推定誤差が発生する。そのため、OCV を SOC へ変換する際、OCV 推定誤差が SOC 推定誤差へ影響を及ぼす (Fig. 4)。

一方、電流積算法では、車載電流センサに数%の測定誤差があるため、時間の経過に伴いその誤差が積算され、SOC の推定誤差が増大していく。

上記のどちらの方法を使うにせよ、推定する SOC には誤差が含まれるため、LIB 容量算出にも誤差が発生する。Fig. 5 は、ある走行モードにおける、LIB 容量真値 100% に対する車載 ECU による LIB 容量推定値の割合を経時変化で示したものである。約 4,000 秒の走行期間中、ECU 推定容量が、容量真値に対して $\pm 10\%$ 程度の誤差を有している。この容量推定誤差により、LIB そのものの容量低

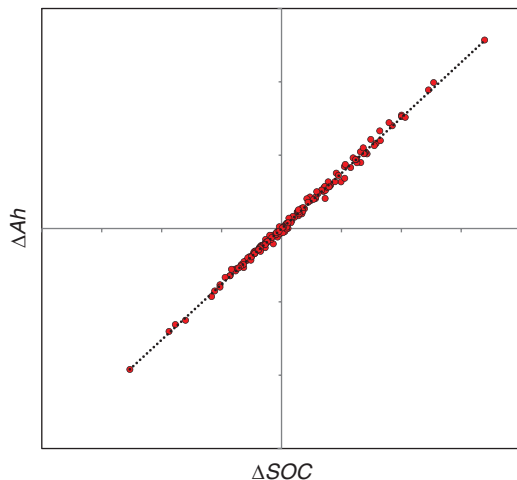


Fig. 2 Recursive least square method for capacity estimation

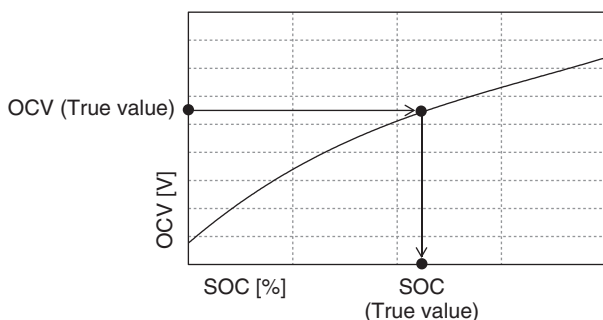


Fig. 3 Conversion of OCV to SOC

下分を車載 ECU では高精度に把握できないという課題がある。

4.3. サーバを使用した高精度容量算出方法

容量真値の誤差に対応するため、サーバに蓄積された膨大な時系列データを用いて容量を高精度に算出するモデルの構築を検討した。

容量算出精度の目標設定にあたり、10% の航続距離低下がユーザの使い勝手へ影響を及ぼすと仮定した。本仮定と LIB 容量が低下することを考慮し、目標算出誤差許容値は $\pm 6\%$ 以内とした。

モデル構築にあたり、容量算出誤差の小さい (算出精度が高い) 走行あるいは充電条件のデータのみを、全走行、充電データから抽出することを考えた。そこで、算出精度が高い条件を抽出するため、さまざまな走行、充電条件を調べた結果、以下二つの条件で算出精度が高くなることがわかった。

一つ目の条件は、 ΔSOC が大きくなる (走行距離が長くなる) 程、容量算出精度が高くなる。Fig. 6 は横軸に ΔSOC 、縦軸に ECU が算出した容量を示す。 ΔSOC が大きくなるほど真値の 60 Ah に収束する傾向が認められる。

二つ目の条件は、走行あるいは充電後に十分な放置期間があり、放置期間も含めて容量算出すると、算出精度が高

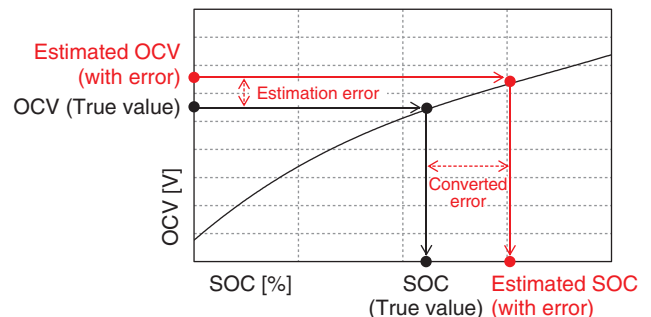


Fig. 4 Conversion of estimated OCV with error to SOC with error

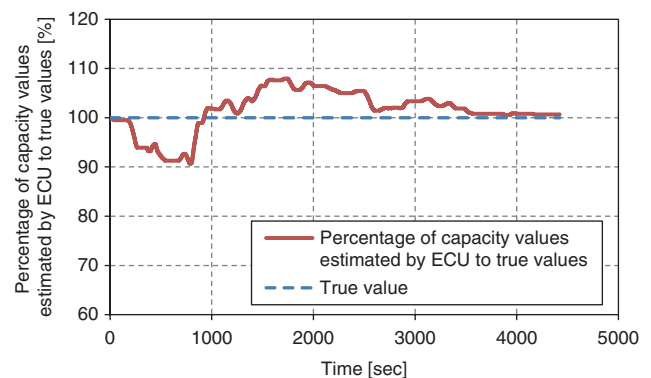


Fig. 5 Variation in capacity values estimated by ECU

くなる。この理由は Fig. 7 に示すように、ECU にて算出された走行終了時の SOC を使用するよりも、十分に放置されて安定した OCV をもとに算出した SOC を使用したほうが、容量算出精度が向上するためである。そのため、収集している時系列データの中から、走行あるいは充電データと期間の長い放置データを結合させて、放置も含めた期間で容量を算出した。

全収集データから上記の二条件に合うデータを抽出すると、想定どおり、抽出サンプルは算出精度が高くなることが確認できた。しかし、算出精度を上げれば上げる程、容量算出できる車両台数が減少するという新たな課題が顕在化してきた (Fig. 8)。

これは、ユーザの使い方として、長距離走行 (ΔSOC が大きい走行) の頻度が低いためである。目標誤差許容値 $\pm 6\%$ を達成するためには、 ΔSOC 30% 以上のデータを抽出する必要がある。しかしこの場合、車両包含率 (目標誤差許容値 $\pm 6\%$ 以内で算出できる車両割合) が 78% まで下がってしまい、22% の車両の容量を高精度に推定できない結果となった。

4.4. 車両包含率の向上

車両包含率低下の課題を解決するために、個別の走行データを連結させて ΔSOC の大きい走行パターンを新た

に作成することを考えた。そこで、放置時間の抽出条件を満たす連続する複数の走行の ΔAh , ΔSOC を、それぞれ連結して一つのデータセットとして容量推定に用いた (Fig. 9)。

このように走行履歴を結合させて容量算出すると、高い算出精度と高い車両包含率を両立できるようになった。 ΔSOC 20% 以上の走行履歴を結合すれば、目標許容誤差以内の精度と 97% 以上の車両包含率が達成できる (Fig. 10)。

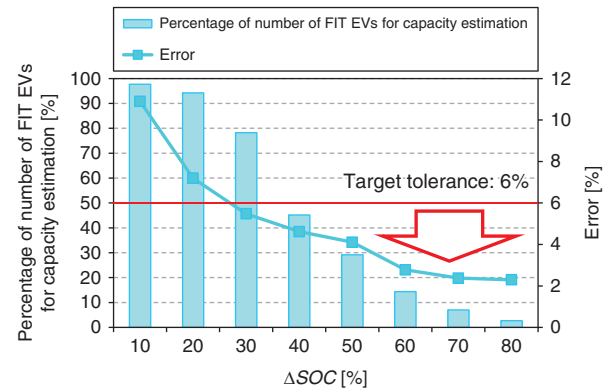


Fig. 8 Number of EVs with accurate capacity estimation and estimation error to used ranges of SOC

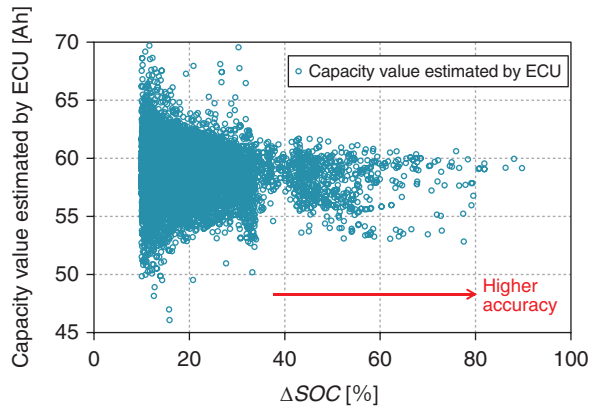


Fig. 6 Used range of SOC and variation in capacity estimation

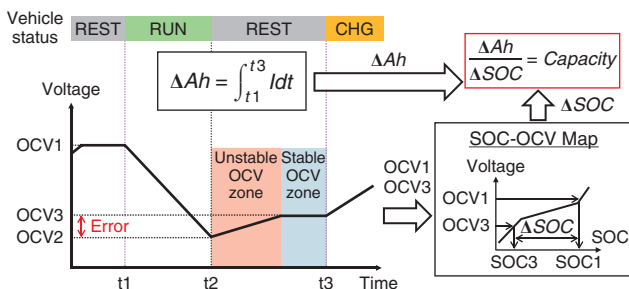


Fig. 7 Method for capacity estimation with battery traceability data

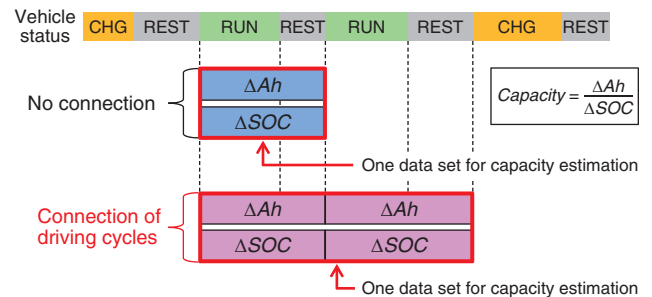


Fig. 9 Connection of driving cycles for precise capacity estimation

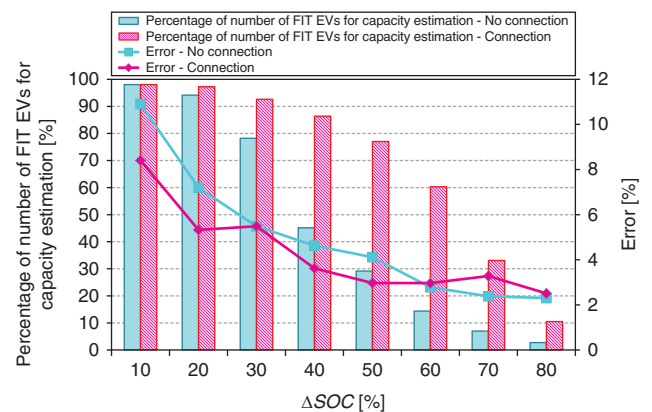


Fig. 10 Enhancement of vehicle coverage and estimation error

4.5. 推定容量算出結果

Fig. 11 は、本容量算出方法を用いて、米国向け FIT EV 805 台の LIB 容量を走行距離 10,000 km ごとにプロットしたグラフである。容量算出誤差幅とその頻度を箱ヒゲグラフで表現した。色の濃い部分はサンプル密度が高く、薄い部分はサンプル密度が低いことを示している。また、本容量算出法の確からしさを検証するため、上記耐久車両を含める 4 台の FIT EV から LIB パックを取り外し、LIB 充放電試験機と高精度電流センサを用いて LIB 容量を計測した。実測した容量値は、本容量算出法により算出された容量中央値の内挿線、外挿線上にある。本容量算出法の確からしさと LIB 容量低下が 3% 以内に収まっていることがわかった。

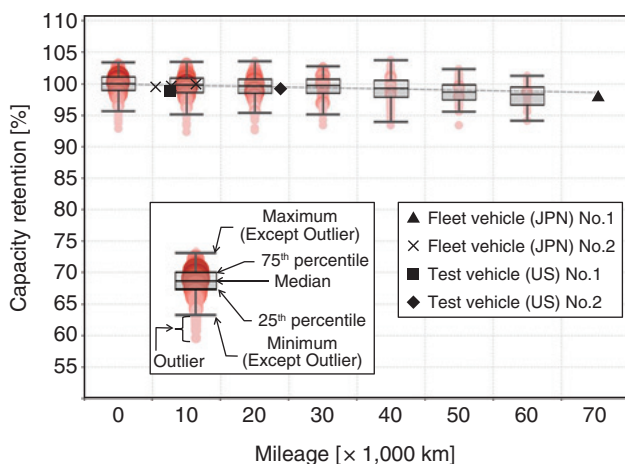


Fig. 11 Estimated FIT EV capacity

5. LIB 容量推移

5.1. 容量低下促進条件

一般的に、LIB 容量低下の促進因子は、LIB 温度、充放電電流値、使用 SOC (電圧) 幅であるといわれている⁽⁴⁾。

FIT EV の LIB も上記因子を変化させた台上サイクル耐久試験をおこない、それぞれの条件によりどの程度容量低下が促進されるかを確認した。

Fig. 12 に、温度の影響をみるため、充放電時の電流を 20 A に、SOC 幅を 100% から 0% に固定して、LIB 温度を 25℃、35℃、45℃、55℃ の 4 水準で変化させた結果を示す。LIB 温度が高くなるにつれて容量低下が促進され、特に 55℃ 以上で顕著な容量低下がみられることがわかった。

Fig. 13 に、充放電時の SOC 幅が容量低下へ与える影響をみるため、充放電時の電流を 20 A に、LIB 温度を 35℃ に、放電開始 SOC を 100% に固定し、放電終了 SOC のみ 0%、40%、70%、85% の 4 水準で変化させた結果を示す。

放電終了 SOC 0% の時に顕著な容量低下がみられた。

Fig. 14 に、電流値が容量低下へ与える影響をみるため、充放電時の LIB 温度を 35℃ に、SOC 幅を 100% から 0% に固定し、電流値を 10 A、20 A、40 A の 3 水準で変化させた結果を示す。電流値が高くなるにつれてわずかながら容量低下が促進されることがわかったが、温度や SOC 幅のように顕著な傾向はみられないことを確認した。

前述のように、さまざまな耐久条件で試験をした結果、温度、放電終了 SOC、電流の三因子の容量低下度合いを定量的に把握することができた。

ユーザの使用環境において、これらの容量低下促進領域に入る頻度が高ければ高いほど、LIB の容量低下がより顕著に進むと予想された。

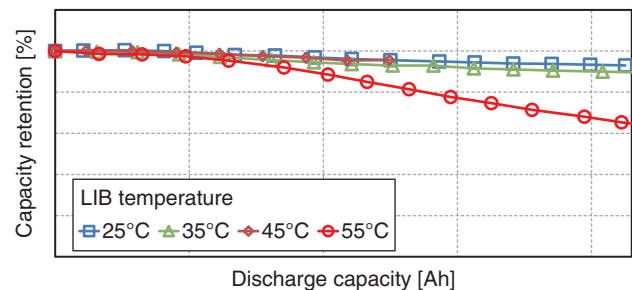


Fig. 12 Durability test with LIB temperature as parameter

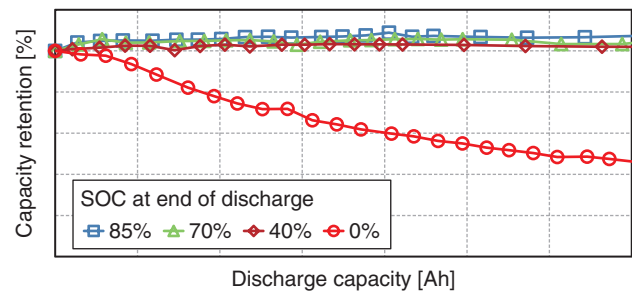


Fig. 13 Durability test with width of SOC window as parameter

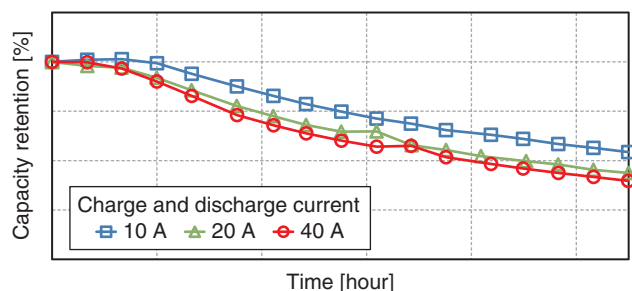


Fig. 14 Durability test with current as degradation parameter

5.2. 使い方分析による LIB への影響

前節で確認した各容量低下促進領域にて LIB がどの程度使用されるかの頻度を、リース開始から 1 年以上の走行実績がある 580 台の車両データを用いて調査した。

Fig. 15 に示すとおり、走行、充電時の LIB 最大温度頻度を確認すると、55℃ 以上の容量低下促進領域の頻度はほぼゼロであった。

充電開始時の SOC 頻度分布 (分解能 5%) を確認すると、SOC 55% から SOC 60% が最頻値となり、容量低下促進領域 (SOC 0% から SOC 5%) の滞在頻度は全領域で最も少なく 3.8% 未満となった (Fig. 16)。

Fig. 17 では、走行、充電時の電流頻度を確認した。ゼロ付近のピークはシステム稼働用の電力供給分である。これを除くとグラフはほぼ正規分布の形状をしている。回生側 (マイナス領域) において容量低下促進領域への滞在はな

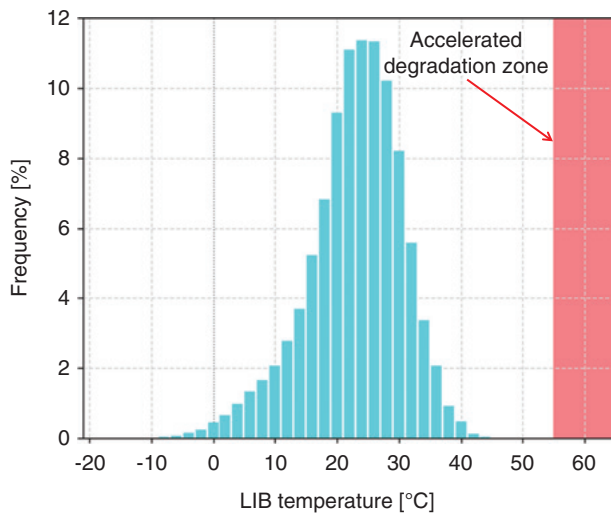


Fig.15 Frequency distribution of battery temperatures

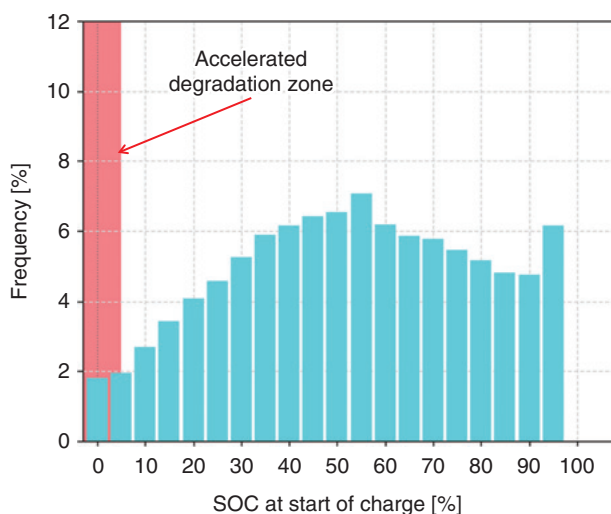


Fig. 16 Frequency distribution of SOC at start of charge

く、放電側は回生側よりも滞在頻度は高いが、顕著な頻度差はみられなかった。

SOC 幅の容量低下促進領域のみ 3.8% の滞在頻度があったが、他の容量低下促進領域の滞在頻度はほぼゼロであった。これら三つの容量劣化促進領域への滞在頻度が総体的に低かったことを鑑みると、ユーザーの使い方による LIB への容量低下促進影響は小さかったといえる。この使い方分析結果により、FIT EV の LIB 容量の低下が小さいことが裏付けられた。

5.3. 容量推移予測

リース期間の延長判断にあたっては、将来の LIB の容量推移予測をすることが重要であると考えた。そこで、LIB 容量推移予測モデル⁽²⁾に、682 台の直近過去 1 年分の LIB 使い方データを車両ごとに適用し、仮に将来同じ使い方が繰り返された場合の容量推移を予測した。その結果、仮にリース期間を延長したとしても、リース期間中の LIB 容量低下は 5% 以内に収まることが予測された (Fig. 18)。

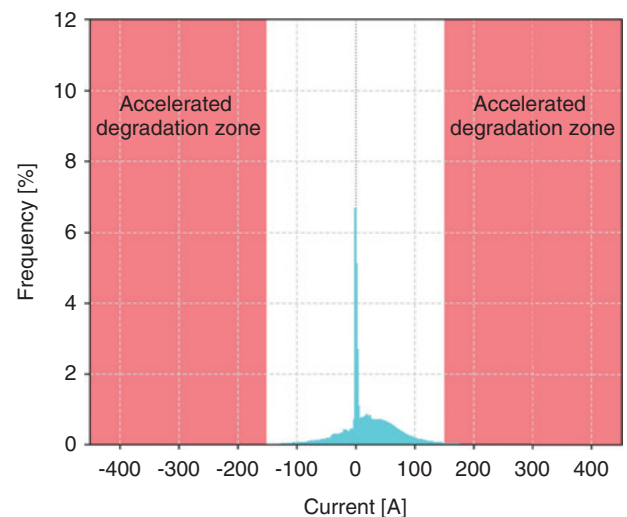


Fig. 17 Frequency distribution of battery current

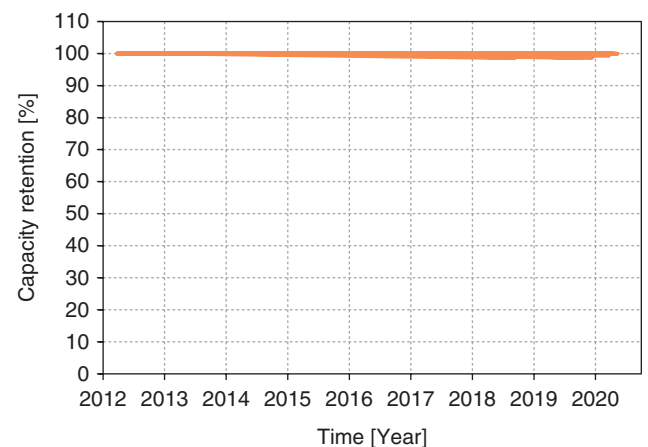


Fig. 18 Forecasted capacity degradation

6. まとめ

テレマティクス技術をベースとしたバッテリートレーサビリティシステムを構築し、以下の成果をあげることができた。

- (1) 目標精度許容値 $\pm 6\%$ 以内および車両包含率 97% 以上を満足する高精度容量推定方法を確立し、FIT EV の LIB 容量低下が 3% 以内に収まっていることを確認した。
- (2) FIT EV の LIB の使い方は、容量低下促進領域の滞在頻度が低いことを確認した。
- (3) ユーザの使い方を容量推移予測モデルに適用して容量推移を予測すると、延長するリース期間中に容量低下が 5% 以内に収まることを予測できた。

お客様からリース期間延長の要望があり、前述のとおり LIB の健全性を検証できたため、2015 年 3 月 23 日に American Honda Motor Co., Inc. は FIT EV を 2 年間リース延長することを発表した。

参考文献

- (1) 武政幸一郎, 内田翼, 鶴谷泰介, 富永由騎, 佐藤圭嗣: EV 用バッテリートレーサビリティシステム開発, Honda R&D Technical Review, Vol.25 No.1, p.35-40
- (2) 富永由騎, 川村雅之, 武政幸一郎: 内部劣化状態を加味した容量劣化推定モデルの構築, 第 54 回バッテリー討論会講演要旨集, p.101, (2013)
- (3) 丸野直樹, 小茂田訓, 西田義一: HEV 用 Li-ion バッテリーシステムのバッテリーコントロール技術, Honda R&D Technical Review, Vol.24 No.1, p.72-77
- (4) 市村雅弘: 小型リチウムイオン電池の寿命特性, NTT Building Technology Institute 2005, p.1-7, (2005)

■ 著 者 ■



武政幸一郎



宮下 拓也



赤松 健治



羽田 知史



上 甲 昌 郎