

電動車駆動用リチウムイオン電池性能の 確率分布の推定と推移予測

Estimation of Probability Distribution of Li-ion Battery Performance
for Electrically-propelled Vehicles

宮 下 拓 也*

Takuya MIYASHITA

川 村 雅 之**

Masayuki KAWAMURA

要 旨

Hybrid Electric Vehicle に搭載されたりチウムイオン電池の使い方と性能状態を、故障診断機を通じて収集した。収集データの分析により、ユーザ使用環境におけるリチウムイオン電池容量と、開発時に最も劣化が早いと想定した容量劣化予測ラインとの間にかい離があることがわかった。ユーザ使用環境におけるリチウムイオン電池性能は、初期性能ばらつき、使い方劣化ばらつき、耐久後劣化ばらつき、Electric Control Unit による性能算出誤差により構成されている。容量のかい離は、開発時に想定した性能劣化予測ラインが、上記の各性能因子のばらつきの厳しい位置づけの値が同時に発生する条件で算出されていることが原因で発生していた。

電池性能を構成する各ばらつきと、ばらつき間の相関関係を正確に把握し、それらを反映したリチウムイオン電池の劣化後性能の確率分布算出式を構築した。日本向け 2013 年モデル FIT HYBRID 126,742 台の使い方データと容量データを用いて、構築した算出式の妥当性を検証した。その結果、車両登録から 1.5 年経過後の実容量分布と、構築した式を用いて算出した 1.5 年後の推定容量分布の一致性が示され、算出式の妥当性が証明された。また、目標使用期間後の性能の予測確率分布に対し、開発時に想定した容量劣化予測ラインを用いた予測容量は 9.6σ の位置づけにあることを定量化できた。劣化後性能の確率分布を算出できるようになったことで、リチウムイオン電池の最適なコスト設計や、目標使用期間中に Hybrid Electric Vehicle の車両性能を最大限引き出すことが可能となった。

ABSTRACT

The usage and performance status of Li-ion batteries installed in hybrid electric vehicles were collected by means of fault diagnosis devices. Analysis of the collected data showed the existence of a margin between the Li-ion battery capacities in users' usage conditions and the estimated capacity degradation line that is foreseen during development to show the most rapid degradation. The distribution of the actual Li-ion battery performances in the users' usage conditions is composed of the initial performance distribution, the degradation distribution created by different usage patterns, the degradation distribution of Li-ion batteries within an identical set, and the performance calculation errors made by the electric control units. The capacity margin occurred as a result of the estimated performance degradation line foreseen during development being calculated under conditions in which the distributions of the above performance factors were simultaneously positioned at severe extreme values.

A formula, which reflects the actual distributions and the correlations between the distributions, was created to calculate the probability distribution of performance degradations of Li-ion batteries. Usage data and capacity data on 126,742 cars of the 2013 model FIT HYBRID for the Japanese market were used to verify the validity of the formula that was created. The results show that the probability distribution of real capacity at 1.5 years after a vehicle is registered agrees with the probability distribution of estimated capacity after 1.5 years as calculated using the created formula. This verified the validity of the formula. This also successfully quantified the position of the capacity estimated using the estimated capacity degradation line foreseen during development with respect to the estimated probability distribution of performance after a target use period as 9.6σ . As it became possible to calculate the probability distribution of performance after degradation, this enabled optimal cost design of Li-ion batteries, bringing out the maximum vehicle performance of hybrid electric vehicles during the target use period.

* 四輪 R&D センター

** R&D センター X

1. はじめに

リチウムイオン電池 (Lithium-ion battery: LIB) の性能とは容量または入出力特性を意味し、その使い方や使用年数に応じて劣化する。これは、LIB を搭載した Hybrid Electric Vehicle (HEV) の燃費等へ影響を与える。そのため、ユーザ使用環境で LIB の使い方や性能劣化度を把握することは、LIB を性能設計するうえで重要である。

Honda は、北米向け 2012 年モデルの Civic Hybrid を皮切りに、HEV に LIB を搭載している。LIB 開発時には、過去のユーザ使用環境サーベイや経験を元に性能設計する。そのため、LIB の使い方や性能状態を把握することを目的に、LIB を搭載したすべての HEV で、車載センサで計測した使い方データと車載 Electric Control Unit (ECU) で算出した性能データを ECU に蓄積している。蓄積されたデータは、Honda ディーラにて定期的に実施される車両点検等の際に故障診断機 (Honda Diagnostic System: HDS) を通じて収集される⁽¹⁾。収集されたデータは Honda サーバへ送信され、分析、活用されている⁽²⁾。収集されたデータを分析すると、ユーザ使用環境での LIB 容量と、開発時に最も劣化が早いと想定した容量劣化予測ラインおよび、ユーザ使用環境における入出力特性値と、開発時に最も劣化が早いと想定した入出力特性劣化予測ラインとの間にかい離があることがわかってきた。

例として、日本向け 2013 年モデル FIT HYBRID 126,742 台の ECU 算出容量と開発時に想定した容量劣化予測ラインを Fig. 1 に示す。

Fig. 1 から、開発時に想定した容量劣化予測ラインと比較すると、ユーザ使用環境での容量との間にかい離があることがわかる。

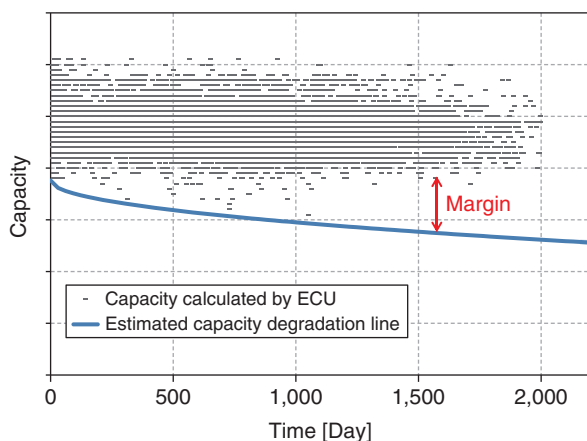


Fig. 1 LIB capacity of FIT HYBRID calculated by ECU

2. 現状課題

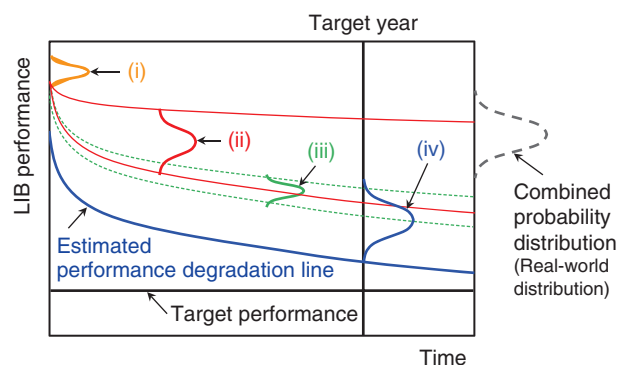
前章で記載したかい離の原因を解析するため、LIB の劣化後性能の要因を、以下の四つの性能構成因子 [(i) 初期

性能ばらつき, (ii) 使い方劣化ばらつき, (iii) 耐久後劣化ばらつき, (iv) ECU 性能算出誤差] に分解した。

(i) 初期性能ばらつきは、LIB の製造工程において、LIB の初期性能に影響を与える構成材料が LIB の個体ごとにばらつくことより生じる。(ii) 使い方劣化ばらつきは、さまざまなユーザが、さまざまな走行条件や環境条件で HEV を使用することに起因する LIB 性能の劣化度合のばらつきと定義する。使い方劣化ばらつきが生じる要因は、走行時に LIB にかかる電流負荷の差や、LIB がおかれる温度環境の差により、LIB の劣化速度が異なることである。(iii) 耐久後劣化ばらつきは、初期同一性能の LIB を同一使用条件、同一環境条件で使用する時に生じる LIB 性能の劣化度合のばらつきと定義する。耐久後劣化ばらつきが生じる要因は、劣化速度に影響を与える LIB の構成材料が製造工程でばらつくことである。(iv) ECU 性能算出誤差は、ECU が LIB 性能を算出する時に生じる誤差であり、センサ誤差や制御誤差が含まれる。これら四つのばらつきを用いることで、LIB の劣化後性能を漏れなく重複なく構成因子に分解することができる。

Fig. 2 に示すとおり、開発時に想定した性能劣化予測ラインは、各ばらつき因子の厳しい位置づけの値が同時に発生する条件で設定されている。一方で、これらのばらつきからなる開発時に設定した目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布を算出し、開発時に想定した性能劣化予測ラインが予測確率分布上でどのような位置づけになるか確認したことはなかった。

一般的に、LIB 性能劣化の促進因子は、LIB 温度、充放電電流値、使用充電率 (State of Charge: SOC) または電圧幅であるといわれている⁽²⁾。(ii) 使い方劣化ばらつきに着



Distribution factor		Value for estimation
(i)	Initial performance distribution	Lower specification limit
(ii)	Degradation distribution created by different usage patterns	Most severe usage profile
(iii)	Degradation distribution of LIB within an identical set	-3 σ of distribution
(iv)	Distribution created by ECU's calculation errors	-3 σ of distribution

Fig. 2 Factors of LIB performance degradation

Table 1 Usage factors in performance degradation for FIT HYBRID LIB

Usage factors in performance degradation		Test condition of durability test based performance estimation line
Drive	LIB temperature	Highest operational limit
	Charge and discharge pattern	Follows hardest pattern among all drive patterns
	Charge and discharge time	Longest time among real-world data
Park	LIB temperature	Highest temperature profile among major cities
	Voltage or SOC	Highest operational limit

目しても、例えば、FIT HYBRID に搭載した LIB の開発時に想定した性能劣化ラインは、これらの各劣化促進因子について想定されうる最も厳しい値が同時に発生する条件で算出されている (Table 1)。

しかし、LIB の使い方を分析すると、主要な劣化因子において、開発時に想定した最も厳しい使い方条件とユーザー使用条件の実態との間にかい離があることがわかってきた (Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5)。

Fig. 3, Fig. 4 から、LIB 温度、充放電電流ともに、性能劣化を促進する領域とユーザー使用環境での LIB の使い方

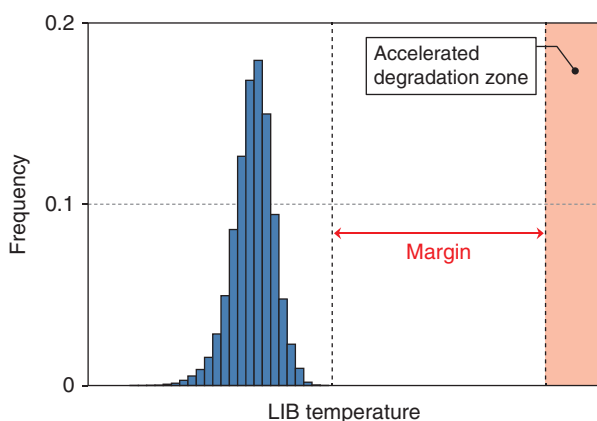


Fig. 3 LIB temperature during operation

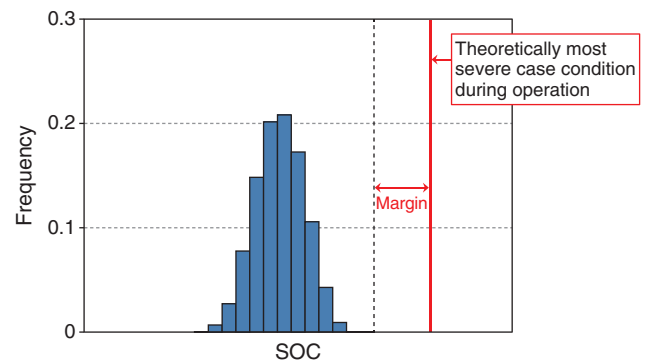


Fig. 5 SOC during park

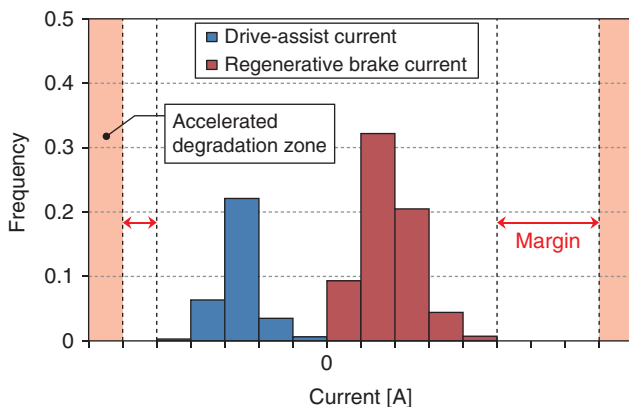


Fig. 4 Current during operation

の上限値または下限値との間にかい離があることがわかる。同様に、Fig. 5 から、想定される中で最も劣化が厳しいと考えられる SOC 値とユーザー使用環境での SOC の上限値の間にかい離があることがわかる。

これらのように、想定される中で最も劣化が厳しいと考えられる条件で LIB を性能設計した理由は、目標使用期間中に、高い信頼度で LIB の目標性能を満足させたかったためである。

一方、HEV は、目標使用期間中に燃費等の車両性能を変化させないことを前提に車両が設計される。そのため、経年劣化する LIB を搭載する場合、目標使用期間後の LIB 性能値を基準に HEV が設計される。仮に目標使用期間後の LIB 性能を過小に評価してしまうと、目標使用期間中の車両性能を過小に設定してしまうことになる。

目標使用期間中の HEV 性能を最大限引き出すためには、目標使用期間後の LIB 性能を正確に予測し、その正確な性能値を基準に車両性能を設計することが必要である。そのためには、ユーザー使用環境の実態に即して LIB 性能ばらつきの推移を正確に予測し、適切な信頼度で目標使用後の LIB 性能を設計する必要がある。LIB の性能、信頼度を定量的に設計するために、ユーザー使用環境における LIB の劣化後性能を確率分布として算出することが必要である。

3. 開発のねらい

目標使用期間中の HEV 性能を最大限引き出すことを目的とし、ユーザー使用環境における LIB 性能の確率分布の劣化推移を算出する。ECU 性能算出誤差は、車載状態での LIB 性能算出値に影響をおよぼすが、LIB 性能そのものには影響をおよぼさないため、本稿の考察対象外とし、以下 3 点を主要なねらいとした。

- (1) LIB 性能を構成する三つのばらつき (i) 初期性能ばらつき, (ii) 使い方劣化ばらつき, (iii) 耐久後劣化ばらつきを正確に把握すること。
- (2) 上記 (i), (ii), (iii) のばらつき間の相関関係 (非線形の相関関係も含む) を正確に把握すること。

- (3) (1), (2)を反映したばらつきの合成方法を構築し、ユーザ使用環境での LIB の劣化後性能を確率分布として算出すること。

4. 劣化後性能の確率分布算出手法構築

4.1. ばらつき値およびばらつき間の相関関係の把握手法
前章のねらいを達成するため、LIB 性能を構成するばらつき値および、それらばらつき間の相関関係を把握するための手法を Table 2 にまとめた。

(i) 初期性能ばらつきは、LIB 製造業者が提供する生産工程における LIB 性能値のデータから把握することができる。初期性能ばらつきデータのサンプル数、期間が不十分である場合、生産工程の工程管理基準値 (例: 設計ねらい中央値, 上下限規格値, 生産能力指数) から予測した、初期性能ばらつきを使用することも可能である。

(ii) 使い方劣化ばらつき、および (i) と (ii) の相関関係は、車両モデルおよび LIB 劣化モデルを用いて求める (Fig. 6)。車両モデルは電池の初期性能と時系列の車速, 外気温, 日射量を入力すればそれに応じた車両における LIB 印加電力推移を出力する。また、LIB 劣化モデルはその印加電力推移に応じて、LIB の電圧, 電流, 温度を時系列で算出し、その算出値の推移から LIB の劣化量を出力するモデルである。

使い方劣化ばらつきはさまざまな条件での車両の使い方によって生じる。しかし、膨大な数の車両における電力推移のパターンを実際の LIB に印加して劣化のばらつきを求めることが、資源制約上容易ではないため、モデルを用いてこのばらつきを算出している。ある初期性能の場合の使い方劣化ばらつきを求めるには、初期性能を固定してさまざまな使い方条件をモデルに入力する。そうすると、そ

Table 2 Methods to find distributions or correlations

Distribution or correlation		Method to find
Distribution	(i) Initial performance	Production history or production process
	(ii) Usage degradation	Models -Vehicle performance -LIB degradation
	(iii) Degradation within identical set	Durability tests
Correlation	(i) and (ii)	Models -Vehicle performance -LIB degradation
	(ii) and (iii)	Durability tests under various usage conditions
	(iii) and (i)	Durability tests of LIB with various initial performance levels

の使い方に応じたさまざまな LIB 劣化推移が得られる。得られた数千程度のデータから、その発生頻度を考慮して度数を足し合わせることで、使い方劣化ばらつきを把握することが可能となる。また、(i) と (ii) の相関関係の把握に関しては、同様にさまざまな使い方条件をモデルに入力するが、その際に初期性能を変化させる。こうすることで、初期性能が変化した際の劣化挙動への影響、すなわち (i) と (ii) の相関関係を把握することができる。

(iii) 耐久後劣化ばらつき、および (ii) と (iii) の相関関係、(iii) と (i) の相関関係は複数の LIB の耐久テストによって把握することが可能である。Fig. 7 に示すように、初期性能を固定して使い方を変化させる耐久テストと、使い方を固定して初期性能を変化させる耐久テストを実施することによって、ばらつき値と相関関係が把握できる。耐久後劣化ばらつきの発生要因は、初期の性能には顕在化していない LIB 工程因子のばらつきである。そのため、ど

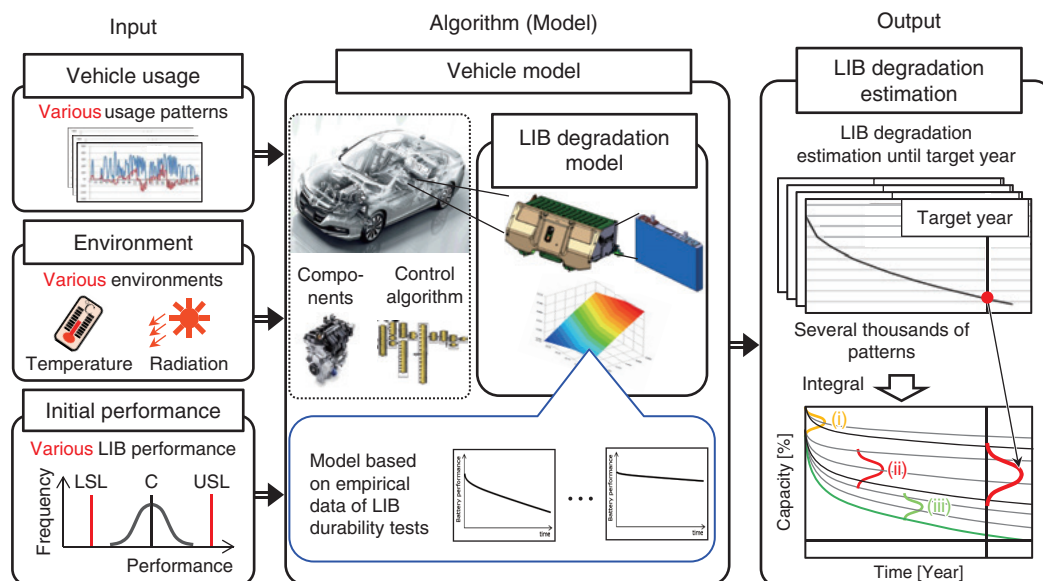


Fig. 6 Models for estimating performance degradation

らのテストの際にも複数セルの初期性能をほぼ同一に合わせ、その試供体を工程ラインから無作為抽出することが必要となる。

4.2. ばらつき因子の合成方法の構築

把握した相関関係に基づいて、(i)、(ii)、(iii)の各ばらつき因子の合成方法(畳み込み積分)を構築した。

(i)と(ii)の相関関係に関しては、モデルを用いたシミュレーションの結果、単純な線形の相関関係ではなく、条件付き分布となっていることがわかった。このことは、初期性能が異なれば、複数の異なる電力推移をLIBに印加して得られる使い方劣化ばらつきの確率分布が異なることを意味している。これは、LIBに同じ電力推移を印加しても、初期性能が違えば、LIBの使用SOC範囲や印加電流、またそれによる発熱量などが異なるためである。

また、(ii)と(iii)、(iii)と(i)の相関関係に関しては耐久テストによって、こちらも同様に線形の相関関係ではなく、条件付き分布となっていることがわかった。これは同じ初期性能から耐久テストをしても、使い方が異なれば劣化後性能ばらつきの確率分布は異なり、また、同じ使い方をしても、初期性能が異なれば劣化後性能ばらつきの確率分布が異なることを意味している。

よって、車両の使い方を環境条件と走行条件に分けて、以下とおく。

初期性能: Per_{ini}

環境条件(気温、日射量の時系列データセット): Env

走行条件(車速等の時系列データセット): $User$

劣化後性能: Per

ある初期性能と環境条件と走行条件を与えた時の劣化後性能の条件付き確率密度関数は、(iii)耐久後劣化ばらつきも含めて、以下と定義することができる。

$$g(Per|Per_{ini}, Env, User) \quad (1)$$

これは、ある初期性能と環境条件と走行条件を与えると、それに応じた劣化後性能ばらつきの確率分布が一意に定まることを意味している。最終的に求めたい劣化後性能の確率密度関数 $f(Per)$ は、畳み込み積分の考え方をを用いて、この式に初期性能と環境条件と走行条件からなる確率

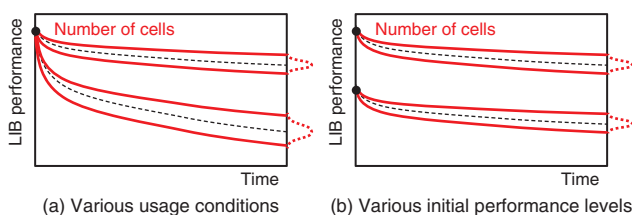


Fig. 7 LIB durability tests to obtain degradation distribution within identical set

密度関数をかけて、全範囲で積分すれば良いので、以下のように表現することができる。

$$f(Per) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(Per|Per_{ini}, Env, User) h(Per_{ini}) u(Env, User) dPer_{ini} dEnv dUser \quad (2)$$

ここで、 $h(Per_{ini})$ は初期性能の確率密度関数で、 $u(Env, User)$ は環境条件と走行条件の同時確率密度関数である。一般的にLIBの初期性能と環境条件、走行条件には相関関係はないが、環境条件と走行条件の間には相関関係があると考えられるため、同時確率密度関数で表現している。

(1)式の条件付き確率密度関数はモデルでのシミュレーション結果と耐久後劣化ばらつきテストから構築する。また、(2)式の右辺の初期性能の確率密度関数はLIB製造業者から提供されるデータを元に設定し、環境条件と走行条件の同時確率密度関数は実環境で収集した車両データから設定する。ただし、開発途中で十分な確度のデータがない場合には、予測した確率密度関数を用いても良い。目的に応じて適切な確率密度関数を設定することが必要となる。

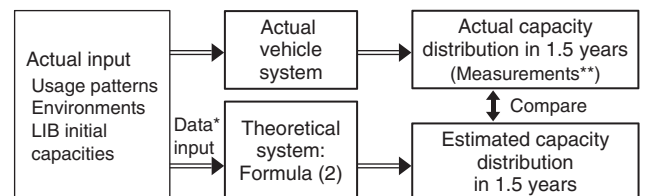
5. 算出式の妥当性および予測

5.1. 劣化後性能の確率分布算出式の妥当性検証

ユーザ使用環境におけるLIBの劣化後性能の確率分布算出式(2)の妥当性を検証するため、実車両に搭載されているLIBの実容量分布と、実際のLIBの使われ方データをもとに算出した推定容量の確率分布を比較した。両者の比較フローをFig. 8に示す。

推定容量分布が実容量分布と近しくなると、性能分布を正しく算出できていることとなり、算出式の妥当性が証明できることになる。前章と同じく、日本向け2013年モデルFIT HYBRIDのデータを活用し、算出式の妥当性を検証した。

使用する車両モデルは上記FIT HYBRIDの挙動分析用に構築したものをを用い、LIB劣化モデルはFIT HYBRIDに搭載されたLIB用に構築したモデルを用いた。走行パターン、環境条件、および実容量データはHDSより収集し、LIBの初期容量データは搭載LIBの製造業者から入手した。HDSの実容量データは車載ECUで算出した容量で



* Input data acquired through HDS or by LIB manufacturer

** Measurements acquired through HDS

Fig. 8 Analysis flow of comparison between actual and estimated capacity distributions

あるため、推定誤差が含まれる。そのため、比較条件を揃える目的で推定容量分布には、事前のテストで把握できている容量推定誤差のばらつきを付与した。

Fig. 9 に車両登録日から 1.5 年後の実容量分布と推定容量分布の比較を示す。

青で示したヒストグラムが実容量分布で、赤で示した確率分布が推定容量分布である。実容量分布と推定容量分布の中央値、分布幅、分布形状がほぼ一致していることが見て取れる。以上より、構築した算出式で正しく劣化後性能の確率分布を算出できていることを証明した。

5.2. 目標使用期間後の LIB 性能の確率分布予測

次に、目標使用期間後の LIB 性能の確率分布を算出する。この劣化後性能の確率分布と、開発時に想定した性能劣化予測ラインを比較することで、予測ラインのユーザー使用環境での位置づけを定量化した。両者の比較フローを Fig. 10 に示す。

開発時に想定した性能劣化予測ラインと、ユーザー使用環境での劣化後性能の確率分布の算出にあたり、車両モデル

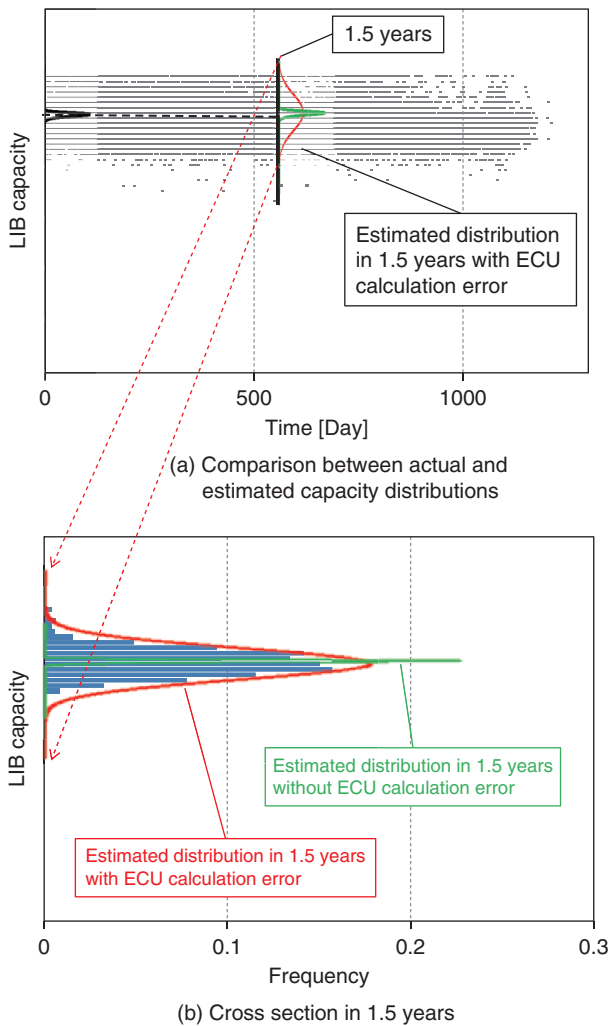


Fig. 9 Comparison between actual and estimated capacity distributions of LIB for FIT HYBRID

と LIB 劣化モデルは前項に記載のモデルで統一した。予測ラインは、2 章で記載したとおり、(i)初期性能ばらつき、(ii)使い方劣化ばらつき、(iii)耐久後劣化ばらつきの厳しい位置付けの値が同時に発生するものとして算出した。一方、実環境を反映した劣化分布の算出にあたり、(ii)使い方劣化ばらつきを算出するための走行条件、環境条件は実環境を想定したパターンが目標使用期間続くと仮定し、LIB の (i)初期性能データと (iii)耐久後劣化ばらつきデータは LIB 製造業者から入手した分布を使用した。

Fig. 11 に、容量と入出力特性のそれぞれに対して、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布と、開発時に最も劣化が早いと想定した性能劣化予測ラインを示す。

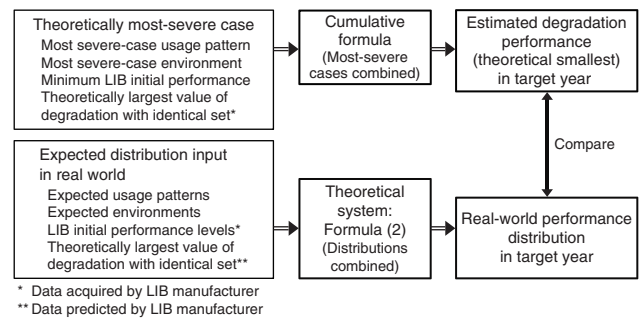


Fig. 10 Analysis flow of comparison between real-world performance distribution and theoretical smallest performance in target year

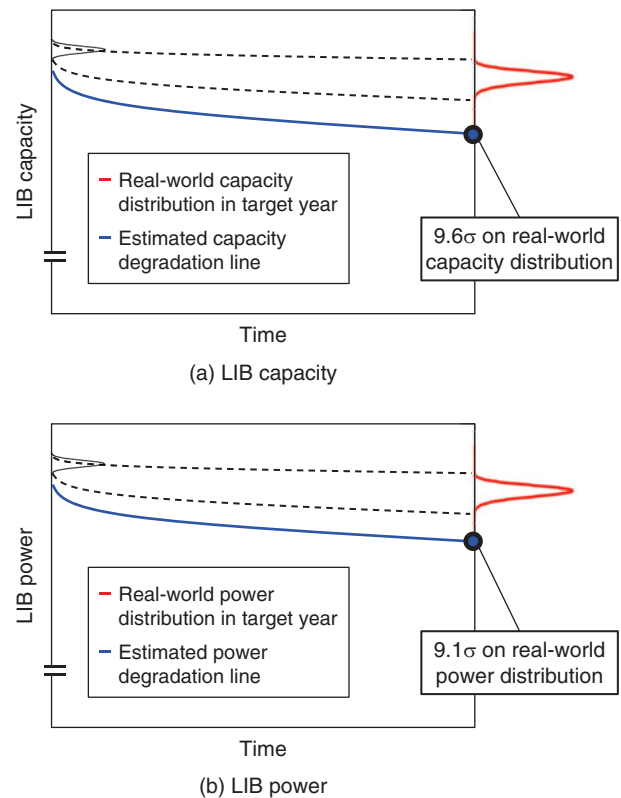


Fig. 11 Comparison between real-world performance distribution and estimated performance degradation line in target year

新規に構築した算出式(2)と入力データの分布化によって、目標使用期間後の LIB 性能を確率分布として算出することが可能になった。また、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布に対し、最も劣化が早いと開発時に想定した劣化予測ラインを用いた予測性能は、容量で 9.6σ 、入出力特性で 9.1σ の位置づけにあることを定量化できた。

6. 価値

目標使用期間後の LIB 性能を確率分布として算出できるようになったことで、LIB の性能、信頼度を定量的に設計することが可能になった。仮に LIB 性能の予測確率分布に対し、過剰な信頼度で LIB 性能が設計されている場合、過剰な信頼度を最適化することにより生まれる価値は以下 2 点である。

一つ目の価値は、適切な信頼度になるまで設計性能を削減することにより、LIB コストや LIB 重量を削減できる (Fig. 12)。部品コストが安価になることで、HEV 売価を下げることが可能となり、その価値をユーザへ還元することが可能となる。

二つ目の価値は、適切な信頼度になるまで目標使用後の LIB 性能目標を向上することである (Fig. 13)。こうすることで、LIB を搭載する車両の LIB 性能設定値を向上することができ、燃費等の車両商品性においてより性能の高い HEV を提供することが可能となる。

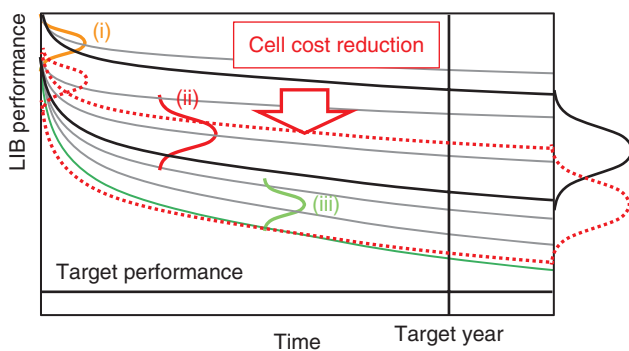


Fig. 12 First value option: Cell cost reduction

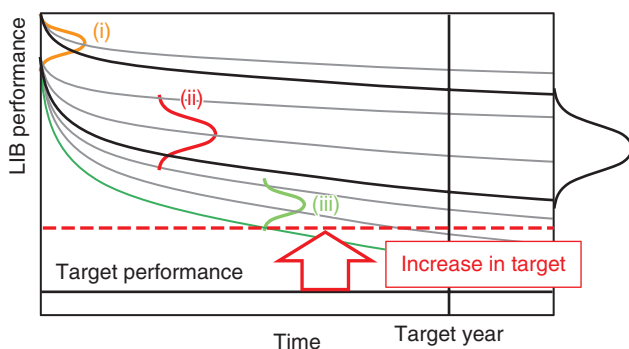


Fig. 13 Second value option: Increase in target

7. まとめ

HDS を通じて収集される、ユーザの HEV に搭載され LIB の使い方および性能データを分析し、以下の成果を得た。

- (1) (i) 初期性能ばらつき、(ii) 使い方劣化ばらつき、(iii) 耐久後劣化ばらつきの相関関係を正確に把握し、それらを反映したリチウムイオン電池の劣化後性能の確率分布算出式を構築した。
- (2) FIT HYBRID 126,742 台のデータを活用して、構築した算出式の妥当性を検証し、目標使用期間後の LIB 性能の予測確率分布に対し、開発時に最も劣化が早いと想定した劣化予測ラインを用いた予測性能は容量で 9.6σ 、入出力特性で 9.1σ の位置づけにあることを定量化できた。
- (3) LIB 性能の確率分布を算出できるようになったことで、最適な LIB のコスト設計、信頼度設計をすることが可能となり、目標使用期間中に HEV の車両性能を最大限引き出すことが可能となった。

謝辞

株式会社ブルーエナジーの井口隆明氏、倉富純一氏、落合誠二郎氏、新田和司氏、古川和輝氏には、初期性能ばらつきデータの提供や耐久後劣化ばらつきのテスト手法構築などの面で多大なる協力を頂き、心より感謝致します。

参考文献

- (1) 武政幸一郎、宮下拓也、赤松健治、羽田知史、上甲昌郎：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, Honda R&D Technical Review, Vol. 28, No. 1, p. 145-151
- (2) Miyashita, T., Kawamura, M.: Customer Usage and Durability of Li-Ion Batteries for Honda's Electrically-Propelled Vehicles, the 17th Annual Advanced Automotive Battery Conference, (2017)
- (3) 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



宮下 拓也



川村 雅之