

温度変動に対応した鉄道車両用リチウムイオン電池の劣化予測手法

田口 義晃* 門脇 悟志* 吉川 岳*

Degradation Prediction Method for Lithium-Ion Battery for Railway Vehicle Considering Temperature Variation

Yoshiaki TAGUCHI Satoshi KADOWAKI Gaku YOSHIKAWA

Regarding the capacity degradation of lithium-ion battery, the Weibull-law-based long term prediction method has been studied. However, the use of this method has been limited to the case of a constant temperature. Therefore, we developed a method which allows us to vary temperature conditions, to lead to more practical prediction compared with the conventional method. We executed accelerated aging test with using two types of battery modules: one is used for traction, and another is used for control circuit for railway vehicle. The test results of both types demonstrated that the calculated values and measured values of battery capacity and inner resistance are in good agreement.

キーワード：リチウムイオン電池, 車両主回路, 車両制御回路, 保存劣化予測, ワイブル則, 温度変動

1. はじめに

鉄道車両にリチウムイオン電池を搭載する事例は目的に応じて様々である。近年の事例¹⁾としては、環境性能や経済性の向上を目的とした蓄電池電車²⁾、ディーゼルハイブリッド車両³⁾があるほか、非常時に架線停電した際の安全確保を目的とした非常走行用電池の搭載車両⁴⁾がある。これらはいずれも駆動用（主回路用）電池としての搭載である。

2020年7月に営業走行を開始した新幹線電車N700S⁵⁾には、非常走行用に加えて制御回路用としてもリチウムイオン電池が採用された。これは、従前の鉛電池等と比べて長寿命化することによるメンテナンスの低減や、高エネルギー密度の特性による小型軽量化にも寄与する。また、出力パワーに余裕を設ければ、架線停電中の旅客サービス機能（トイレ動作等）が追加可能となる。

車載リチウムイオン電池の信頼性を確保するためには、劣化を的確に予測し、適切なタイミングで交換を行う必要がある。著者ら⁶⁾は高精度な劣化予測のためには実使用条件での電池温度の変動を考慮することが重要と考え、これまでにルート則（1/2乗則）に従う保存劣化について、温度変動を考慮した容量減少予測法を提案した。一方、劣化傾向がルート則とは異なる電池に対してはワイブル則に基づく予測手法が提案されている⁷⁾。ただし、この予測手法を適用するには電池温度を一定とする必要がある。そこで、本研究では、このワイブル則のパラメータを可変とすることで温度変動に対応可能とし

た容量予測法を提案する。さらに、実際に車両駆動用または制御回路用として適用例のある2種類のリチウムイオン電池を用いた加速劣化試験結果により、電池容量と内部抵抗の予測値を評価する。

2. 劣化予測手法の概要

2.1 劣化指標と劣化機構

電池の劣化度の指標として、特に重要なのは容量および内部抵抗である。容量は、電池内部で有効に機能するリチウムイオンや電極活物質の量に関係し、内部抵抗は電子やリチウムイオンの移動を妨げる要素に関係する。

劣化のメカニズムは、時間によって進む保存劣化と、通電によって進むサイクル劣化に分離して考えるのが一般的である⁸⁾。代表的な劣化因子に注目して劣化メカニズムを整理したのが図1である。保存劣化は、電極活物質の表面に形成される被膜や、電解液の分解反応等に起因し、温度や充電率（State of charge: SOC）に依存することが知られている。温度依存性は化学反応速度に関わるアレニウス則で表される。一方のサイクル劣化は、充放電に伴う電極活物質の膨張収縮による微細構造の崩壊

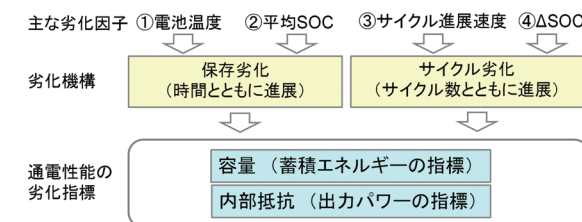


図1 リチウムイオン電池の一般的な劣化機構

* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室

や、活物質の剥離や脱落による導電経路の減少等に起因し、充放電の深さ（SOC 変化幅： Δ SOC）と充放電回数に依存する。

なお、本報告で提案する劣化予測手法は、あらゆる用途に共通して生じる保存劣化のみを対象とする。ディーゼルハイブリッド用などの一部用途では、サイクル劣化が劣化の主要因となり得るが、サイクル劣化の高精度な予測については今後の課題とする。また、保存劣化の因子としては実用上考慮が必須と考えられる温度のみに注目し、充電率（SOC）の変化の考慮が必要な場合については今後の検討課題とする。

2.2 容量予測手法（提案手法）

リチウムイオン電池の容量の経年変化の予測式として、ルート則、べき乗則が知られている。これらに比べて長期的な精度が良好とされるのがワイブル則による予測式であり、初期容量との比率 $Q_{\%}$ は式 (1) で表せる⁷⁾。

$$Q_{\%} = 100 \times \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \quad (1)$$

ここで、 t は経過時間（本報告では経過日数とする）、 m は形状パラメータ、 η は尺度パラメータであり、信頼性解析で用いる信頼度関数に相当する。信頼性解析における m は故障率の増減傾向を表し、多様な形状を表現可能である。 η は寿命の尺度である。式 (1) においては m 、 η を一定とする必要がある。ここで、形状パラメータ m は劣化メカニズムに対応すると考えられるため一定として差支えないが、尺度パラメータ η を一定としないと適用できない点には課題があった。これは、劣化因子である電池温度などが一定の場合にしか適用できないことを意味し、実車両の使用環境において電池温度が変動する場合の劣化予測には適用困難となるためである。

そこで著者ら⁹⁾は、時々刻々の電池温度変化に対応可能となるよう、式 (1) を式 (2) のように拡張した。

$$Q_{\%} = 100 \times \exp \left\{ - \left(\int_0^t \frac{1}{\eta(t)} dt \right)^m \right\} \quad (2)$$

すなわち、 $1/\eta(t)$ は経過日数 t における劣化の進展速度に相当し、式 (3) で示すように温度の関数として表現できる。

$$\frac{1}{\eta(t)} = K_{\eta} \exp \left\{ - \frac{E_{\eta}}{R T_b(t)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 T_b は電池の絶対温度、 R は気体定数、 E_{η} は活性化エネルギー、 K_{η} は定数であり、容量減少に関する

化学反応速度を示すアレニウス則を表現している。

2.3 内部抵抗予測手法

電池の内部抵抗の予測式としては式 (4) のべき乗則や、同式の $M=0.5$ とした特殊な場合であるルート則が知られており、本報告の供試電池にも適用可能であった。

$$R_{\%} = 100 + 100 \times \left(\int_0^t r(t) dt \right)^M \quad (4)$$

ここで、 $R_{\%}$ は内部抵抗の初期値に対する比率、 $r(t)$ は内部抵抗増加に関する速度パラメータであり、式 (5) で示すアレニウス則で電池温度への依存性を表現できる点は式 (3) と同様である。

$$r(t) = K_r \exp \left\{ - \frac{E_r}{R T_b(t)} \right\} \quad (5)$$

3. 車両駆動用電池に対する劣化予測の検証

3.1 加速劣化試験の実施条件

提案する劣化予測手法を車両駆動用電池に適用した場合の精度を検証するため、劣化を促進させる加速劣化試験を実施した。使用した駆動用電池の仕様を表 1 に示す。この電池モジュール（組電池）を 2 台使用し、個別に恒温器に格納した（図 2）。劣化を加速させるため、恒温器の設定温度は平均的な実車両の温度より高め、45℃を基準とした。

表 2 に各試験期間における試験条件および目的を整理した。Term1 では、No.1 モジュールを高温、No.2 モジュールを低温として保存し、劣化度を定期的に把握する。この期間の劣化傾向から、劣化予測式のパラメータを取得した。なお、電池温度（セル表面温度）は 45℃を基準・中心とし、等間隔に全 5 段階で設定した。Term2 以降では構築した予測式の評価を行った。Term1

表 1 駆動用供試電池の仕様

セル電圧	公称 3.7 V
セル容量	公称 90 Ah
モジュール内部構成	6 セル直列
特徴	負極活物質：炭素系

表 2 各期間の条件設定

期間	電池温度		サイクル通電
	No.1 モジュール	No.2 モジュール	
Term1	T4 (高)	T2 (低)	無し
Term2	T2 (低)	T4 (高)	無し
Term3	T3 (中)	T3 (中)	主に No.1 に実施
Term4	T3 (中)	T3 (中)	主に No.2 に実施
Term5	T1~T5 各種	T1~T5 各種	無し

※温度設定は T3(45℃)を中心に等間隔に T1~T5 の 5 段階とした。



図2 駆動用電池の試験実施状況

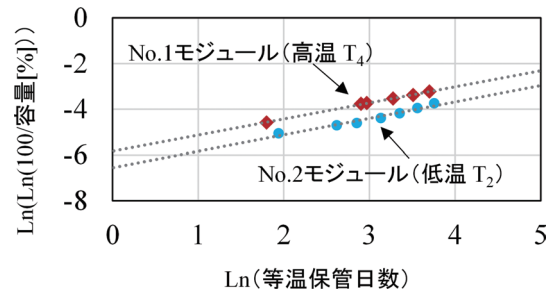


図3 駆動用電池の容量に関するワイブルプロット

から Term5 までを約1年にわたって連続して実施した。

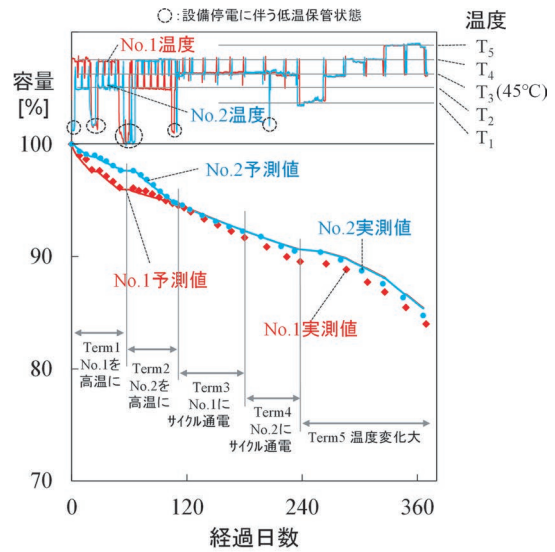
劣化度の測定は数週間おきに、電池周囲の環境温度を45℃として実施した。まず内部抵抗の測定では20秒間のパルス状の通電を行い、通電時と非通電時の電圧差と電流差の比率から算出した。次いで容量の測定は所定の満充電状態から45Aで下限電圧まで放電した際の放電電荷量として算出した。

3.2 試験結果

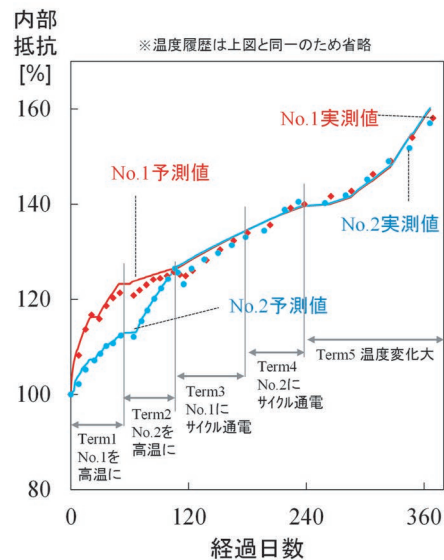
3.2.1 容量予測

まず、提案する容量予測式を構築する。このため、Term1で実測した容量推移を、図3に示すワイブルプロットとして描画し、直線近似した。縦軸は容量の逆数の二重対数であり、横軸は等温保管日数の対数である。等温保管日数とは、恒温器を休止して低温保管となった期間を除外するため、目標設定温度±6℃以内であった経過日数として定義したものである。近似直線は実測値に良好にフィットし、直線の傾きから式(2)における形状パラメータ m が得られた。 m は両モジュールともほぼ同等 (0.70 および 0.72) であった。これはワイブル則適用の妥当性を示唆するものである。ここで、形状パラメータ m は劣化メカニズムに対応しているため一定と扱うべきものと考えられている⁷⁾。そこで、両モジュール一括で算出した直線の傾き $m=0.71$ を採用した。切片についてはモジュール個別の値を採用し、各電池温度に対応した切片の値から、式(3)における E_n および K_n を得た。

次に、容量予測の精度を評価する。容量予測値と実測値を比較した結果を図4(a)に示す。予測式のパラメータ取得に用いた Term1 で生じる予測誤差はわずかである。その後、温度条件を反転した Term2 終了時点でも殆ど誤差が見られない。Term3 および Term4 では実車両走行時の充放電を模擬したサイクル通電を実施したため、サイクル通電の影響を考慮していない予測式よりも、実測値の方が劣化の進展が速まる結果となった。ただし、その差はわずかであり、予測誤差がさほど拡大することなく推移した。サイクル通電の影響が殆ど見られなかった理由として、温度による保存劣化が実車両より大幅に



(a) 電池容量



(b) 内部抵抗

図4 駆動用電池の劣化度実測値と予測値

加速する条件とした一方で、サイクル通電はさほど加速しない通電パターン(休止時間のみ短縮)としたため、劣化への寄与が相対的に小さかったことが考えられる。

Term5 ではそれ以前よりも幅広い温度条件としたが、誤差の拡大は殆ど見られず、最終的な予測誤差は No.1 モジュールで 1.3%、No.2 モジュールで 0.6% に留まった。試験期間全体での最大誤差も同等であり、それぞれ $\pm 1.5\%$ 、 $\pm 1\%$ となった。この結果から、容量が約 84% に低下するまでの長期にわたり、良好な予測精度であることを確認した。

なお、提案手法の代わりに従前のルート則を適用することも可能である。この場合には最終的な誤差は No.1 モジュールで 6.8%、No.2 モジュールで 6.0% となり¹⁰⁾、提案手法による大幅な誤差低減効果を確認した。

3.2.2 内部抵抗予測

内部抵抗の予測については、広く知られているルート則がよく適合した。Term1 における内部抵抗推移を、横軸を等温保管日数の平方根としてプロットした近似直線から予測式のパラメータを得た¹⁰⁾。

内部抵抗予測値と実測値を比較した結果を図 4(b) に示す。前節での容量予測値と同様に、Term2 終了時点までは誤差が小さい。Term3 でサイクル通電を開始した直後は、わずかであるが劣化が回復する挙動を示した。その後は、サイクル通電の影響により、これを考慮していない予測値よりもやや速い速度で劣化が進展したものの、Term4 終了時点で予測値と実測値はほぼ一致した。サイクル通電による影響が殆ど見られなかった点は容量の推移と同様である。Term5 においても誤差はさほど拡大することなく、最終的な予測誤差は、No.1 モジュールで 2.1%、No.2 モジュールで 3.1% に留まった。試験期間全体での最大誤差は、一時的な拡大が生じた影響で、それぞれ $\pm 3\%$ 、 $\pm 4.5\%$ となったが、内部抵抗が約 160% に増加するまでの長期的な予測結果は良好であった。

4. 制御回路用電池に対する劣化予測の検証

4.1 加速劣化試験の実施条件

提案する劣化予測手法を車両制御回路用電池に適用した場合の精度を検証するため、加速劣化試験を実施した。使用した制御回路用電池の仕様を表 3 に示す。モジュールの樹脂製筐体は密閉構造であり、電池温度の定義は筐体内部の複数点で測定した平均値とする。6 台の供試モジュールに対して表 4 のように条件を割り付け、劣化度の温度依存性やサイクル依存性を把握することを目的とした。しかしながら結果的には、異なるサイクル条件としたモジュール A~C 間や D~F 間の劣化傾向に有意差が生じなかったため、サイクル劣化は把握できず、保存劣化のみの把握となった¹¹⁾。次節では、有意差の無かったモジュール A~C を B で代表し、モジュール D~F を E で代表して試験結果の評価を行う。

恒温槽は 2 台使用し、恒温槽 A にモジュール A~C

を、恒温槽 B にモジュール D~F を格納した (図 5)。恒温槽の設定温度は以下の手順によって定めた。

- (1) 実車両が走行する沿線の大都市 (東京, 名古屋, 京都, 大阪, 岡山, 広島, 福岡) の中で 8 月の平均気温が最も高い大阪における過去の気象統計データに基づいて、季節毎に一定の外気温を想定する (冬期 7℃, 春期・秋期 17℃, 夏期 27℃)。
- (2) 外気温の想定値に機器箱内外の温度差 5℃ (実測例) を加算した電池周囲温度を想定する。
- (3) 恒温槽 A では電池周囲温度の想定値に 10℃ を加算し、時間経過を 3 倍に加速して設定する。同様に、恒温槽 B では 20℃ (3 年目の試験のみ 35℃) を加算し、時間経過を 9 倍に加速して設定する。

恒温槽 A と B の加算温度については、劣化を加速する目的と、式 (3)、式 (5) に示すアレニウス則のパラメータ取得に必要な 2 つの異なる温度条件を設定する目的から決定した。また、時間経過を 3 倍および 9 倍に加速したのは、各恒温槽の温度を 10℃ および 20℃ 高めることで、電池劣化の加速倍率が約 3 倍および約 9 倍になることが見込まれたためである。

劣化度 (電池容量, 内部抵抗) の測定は 2~5 週間おきに、電池周囲の環境温度を 25℃ として実施した。まず満充電から 8A で放電した際の電荷量から容量を算定し、次いで駆動用電池と同様のパルス通電から内部抵抗

表 3 供試制御回路用電池の仕様

セル電圧	公称 2.3 V
セル容量	公称 20 Ah
モジュール内部構成	セル 2 並列×12 直列
特徴	負極活物質： チタン酸リチウム

表 4 各電池モジュールの条件設定

温度条件 通電条件	恒温槽 A 加算温度 10℃	恒温槽 B 加算温度 20℃ (3 年目のみ 35℃)
サイクル通電無し	モジュール A	モジュール D
サイクル通電有り	モジュール B モジュール C	モジュール E モジュール F

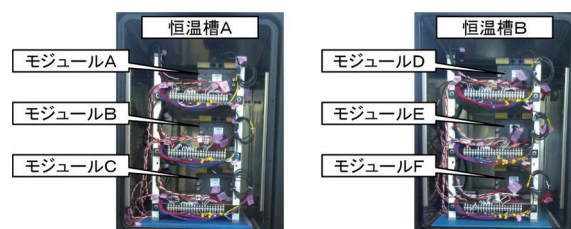


図 5 制御回路用電池の試験実施状況

を算定した。1年目と2年目の劣化度データから劣化予測に用いるパラメータを取得し、続く3年目のデータから劣化予測の精度検証等を行った。

4.2 試験結果

4.2.1 容量予測

電池容量と電池温度の実測値、および電池容量の予測値を図6(a)に示す。モジュールBよりも温度設定を高めたモジュールEでは劣化が急速となり、特に+35℃の設定とした3年目の試験で大幅に劣化した結果、最終的に約80%に達した。これは事前に想定した実使用条件に換算して約60年以上に相当する劣化度である。

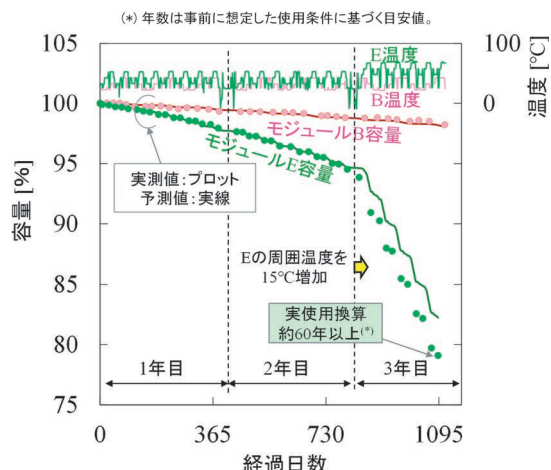
予測式の構築については2年目までの劣化度の実測値と予測値の二乗誤差が最小となるよう反復計算を行うことによりパラメータを算定した。3.2.1項とは異なる手法としたのは、電池温度を数日単位で変動させた結果、図3のような直線状のワイブルプロットを得てパラメータを算定することが困難であったためである。ワイブル則の形状パラメータ m は約1.3となり、3.2.1項で記載した駆動用電池(約0.7)とは異なる値となった。上記のようにパラメータを適切に設定することにより、長期的な容量変化の傾向が大きく異なる複数種類のリチウムイオン電池に対して、ワイブル則に基づく提案式は汎用的に適用可能であることを確認した。

予測値と実測値を比較すると、モジュールBは全期間を通して、モジュールEは2年目までにおいて誤差 $\pm 0.5\%$ 以内となる高精度な予測となっている。すなわち、約50℃以下の電池温度で試験した期間では予測誤差は十分に小さい。一方、3年目のモジュールEは最高約67℃の電池温度で試験しており、ここでは大きな予測誤差が生じている。これは予測式を構築した温度域とは異なる劣化反応が生じる等の理由で、予測以上に劣化が進展したためと考えられる。ただし、実車両で想定される電池温度は約50℃以下であるため、このような予測誤差は生じないと考えられる。

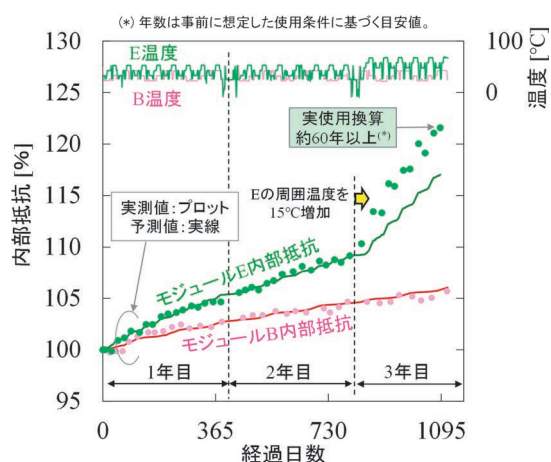
4.2.2 内部抵抗予測

内部抵抗と電池温度の実測値、および内部抵抗の予測値を図6(b)に示す。モジュールBよりも温度設定を高めたモジュールEでは劣化が急速となり、最終的に約120%までの把握を行った。これは事前に想定した実使用条件に換算して約60年以上に相当する劣化度である。

内部抵抗の予測式はべき乗則が適合した。予測式のパラメータは容量の場合と同様に、2年目までの実測値に予測値が近づくよう反復計算を行って算定した。予測値と実測値を比較すると、約50℃以下で試験した期間の実測値に対しては誤差 $\pm 1\%$ 以内と高精度な予測となっている。3年目のモジュールEについては大きな予測誤差が生じているが、前節と同様の理由により、実車両の



(a) 電池容量



(b) 内部抵抗

図6 制御回路用電池の劣化度実測値と予測値

温度条件においては生じないと考えられる。

5. まとめ

リチウムイオン電池を搭載した車両の信頼性を確保するためには、経年劣化した電池を適切なタイミングで交換するための劣化予測が重要となる。本報告では、リチウムイオン電池の温度に起因する劣化を高精度に予測可能な手法を提案した。この手法は長期的な容量予測に適するワイブル則に基づく予測手法を拡張し、電池温度の変動に対応可能としたことにより実使用時の温度条件を容易に反映できる特徴を有する。

車両駆動用と制御回路用の電池モジュール(組電池)を用いた加速劣化試験により、提案手法の適用性や予測精度に関する以下の知見を得た。

- (1) 車両駆動用電池と制御回路用電池のいずれに対し

ても、電池容量の予測にはワイブル則を拡張した提案手法が適用可能であり、内部抵抗の予測には既存のべき乗則が適用可能であった。

- (2) 車両駆動用電池での加速劣化試験により、電池容量については約84%に至るまでの予測誤差が $\pm 1.5\%$ 以内、内部抵抗については約160%に増加するまでの予測誤差が $\pm 4.5\%$ 以内であった。容量予測誤差は、従前のルート則を用いた場合に比べて大幅に低減した。
- (3) 制御回路用電池での加速劣化試験により、約50℃以下の電池温度においては、容量の予測誤差 $\pm 0.5\%$ 以内、内部抵抗の予測誤差 $\pm 1\%$ 以内と高い精度での劣化予測が可能であった。

提案した劣化予測手法により、車両用リチウムイオン電池の温度に起因する劣化（保存劣化）を、想定する実使用環境に応じて長期間高精度に予測可能となった。これを活用すれば、容量や内部抵抗が限度値に達する前の適切なタイミングで交換する計画を策定可能である。また、車両設計段階での寿命予測にも活用可能である。ただし、加速劣化試験で想定していない振動や、劣化予測で仮定した電池温度の実際値との差異が、実車両電池の劣化進展を予測値から乖離させる要因となり得る。このため、実際の劣化進展を定期的に把握し、予測値を補正していくことが望ましい。

なお、本報告の制御回路用電池ではサイクル劣化の寄与は些少で無視できたため、提案手法による保存劣化の予測で劣化全体が把握可能と考えられる。この前提が成り立たない車両駆動用途等ではサイクル劣化を別途予測する必要がある。サイクル劣化に関する高精度で汎用性のある予測手法については今後検討していきたい。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、東海旅客鉄道株式会社、九州旅客鉄道株式会社、供試電池メーカー、株式会社テスの関係各位には多大なご指導とご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 小笠正道：バッテリー電車の最近の動向，鉄道総研報告，Vol.29, No.9, pp.51-60, 2015
- 2) 田口義晃，門脇悟志，吉川岳，畠田憲司，金子貴志：蓄電池電車で主回路蓄電池の熱モデルを用いた密閉箱内冷却ファン制御手法，電気学会論文誌D, Vol.140, No.9, pp.625-632, 2020
- 3) 白木直樹，近藤圭一郎：ディーゼルエンジン・リチウムイオン蓄電池ハイブリッド気動車のエンジン・電池容量設計法とその評価，電気学会論文誌D, Vol.132, No.2, pp.178-184, 2012
- 4) 加藤宏和，佐藤賢司：高速鉄道車両でのバッテリー自走システムについて，電気学会論文誌D, Vol.140, No.5 pp.349-355, 2020
- 5) K. Sato, H. Kato, T. Fukushima, "Outstanding Technical Features of Traction System in N700S Shinkansen New Generation Standardized High Speed Train," IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.10, No.4, pp. 402-410, 2021
- 6) 田口義晃，門脇悟志：リチウムイオン電池の温度変動に対応した容量減少推定法と劣化係数測定法の提案，電気学会産業応用部門大会，3-93, pp.III-429-430, 2011
- 7) 杉山秀幸，原富太郎，福永孝夫，河上清源：ワイブル則による新規寿命予測式，第59回電池討論会，2D14, 2018
- 8) 廣田幸嗣，小笠原悟司：電気自動車工学，森北出版，2010
- 9) 田口義晃，門脇悟志：パラメータを変としたワイブル則によるLIBの温度変動に対応した容量予測法の検討，第61回電池討論会，3A07, 2020
- 10) 田口義晃，門脇悟志：鉄道車両駆動用リチウムイオン電池の温度変動条件に対応した保存劣化長期予測の実験検討，電気学会自動車/交通・電気鉄道合同研究会 VT-21-023, TER-21-064, pp.19-24, 2021
- 11) 田口義晃，門脇悟志，吉川岳，加藤宏和，佐藤賢司，関野正宏，月原達也，吉川賢一：鉄道車両制御回路用リチウムイオン電池の保存劣化長期予測に関する実験検証，電気学会 ITS/交通・電気鉄道合同研究会 ITS-21-024, TER-21-073, pp.15-20, 2021