

リチウムイオン電池の 温度変化に応じた劣化を予測する



田口 義晃
Yoshiaki Taguchi
車両技術研究部
駆動システム研究室
主任研究員



渡邊 有人
Aruto Watanabe
車両技術研究部
駆動システム研究室
研究員

はじめに

モバイル機器や電気自動車など、日常生活に幅広く浸透しているリチウムイオン電池（以後、単に蓄電池と称します）は、鉄道車両でも使われています。蓄電池を使う鉄道車両の例を図1に示します。JR九州BEC819系は、非電化区間を走るための駆動用蓄電池を搭載した蓄電池電車です。JR東海N700Sは、架線停電時の安全性や利便性を向上するための非常走行用蓄電池と制御回路用蓄電池を搭載した新幹線電車です。このほかにも、エンジンの環境性能を改善

するために蓄電池を併用するディーゼルハイブリッド車両も数多く用いられています。

鉄道総研でも蓄電池を鉄道車両に適用する研究開発を行っており、LH02形試験電車（愛称：ハイ！トラム）の開発¹⁾や、JR九州BEC819系蓄電池電車の共同開発などに取り組んできました。最近では車載蓄電池を電力需給調整に活用するための検討²⁾も行っています。

蓄電池は充電して繰り返し使えますが、次第に劣化して寿命を迎えます。劣化してケースが膨張する場合は目に見えますが、多くの場合

図1 蓄電池を搭載した車両の例



駆動用蓄電池の搭載例
(JR九州 BEC819系)



提供(協力) JR東海

非常走行用と制御回路用の蓄電池搭載例
(JR東海 N700S)

はケースの内部で目に見えない形で劣化が進行します。電気自動車やモバイル機器では、蓄電池の劣化度合いが自動的に演算されるシステムもあります。しかし、鉄道車両用の蓄電池については劣化の演算機能が備わっていない場合が多いため、いかにして「見える化」するかが課題となります。

蓄電池の劣化

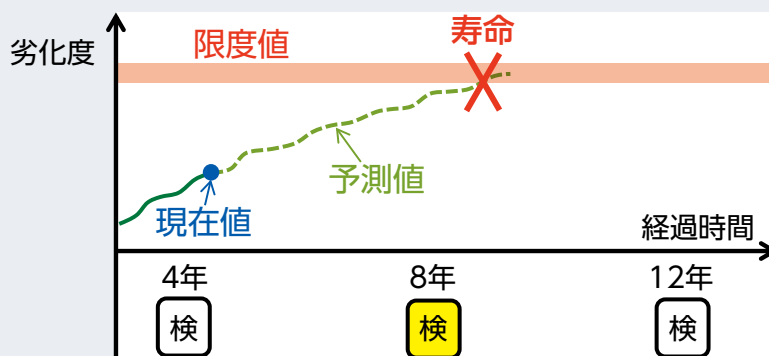
劣化への対応

蓄電池が劣化して寿命が到来すると、蓄電池で走行する際の充電残量不足や、蓄電池の過熱などが生じて車両が走れなくなるおそれがあります。車両の寿命は20年～40年程度ですが、それに対して蓄電池の寿命は数年～10数年と短いので途中で交換する必要が生じます。

車両用の蓄電池は注文から納品までに長い期間を要します。また、大型で重い蓄電池の交換作業は大規模な検査に合わせて行うのが効率的です。したがって、

図2に示すような方法で交換すべき検査のタイミングを早めに計画することが重要です。早すぎる交換はコストの増加につながるため、寿命に至る少し手前が適切な交換時期と言えます。寿命を見極めるためには、まず現在の蓄電池の劣化度を把握し、次いで将来の劣化度を予測する必要があります。

① 劣化度の現在値を把握し将来値を予測



② 寿命となる手前の検査での交換を計画

検 = 車両の大規模な検査

図2 交換計画の検討方法の例



図3 蓄電池劣化のイメージ

劣化のイメージ

蓄電池の劣化をイメージで示したのが図3です。ボトルを蓄電池に、ボトルの中の水を蓄電池が蓄えるエネルギーの量に見立てます。このとき、特性を表す指標である「容量」はボトルの容積に対応し、「内部抵抗」は入り口の狭さに対応します。劣化が進むと容量が減り、内

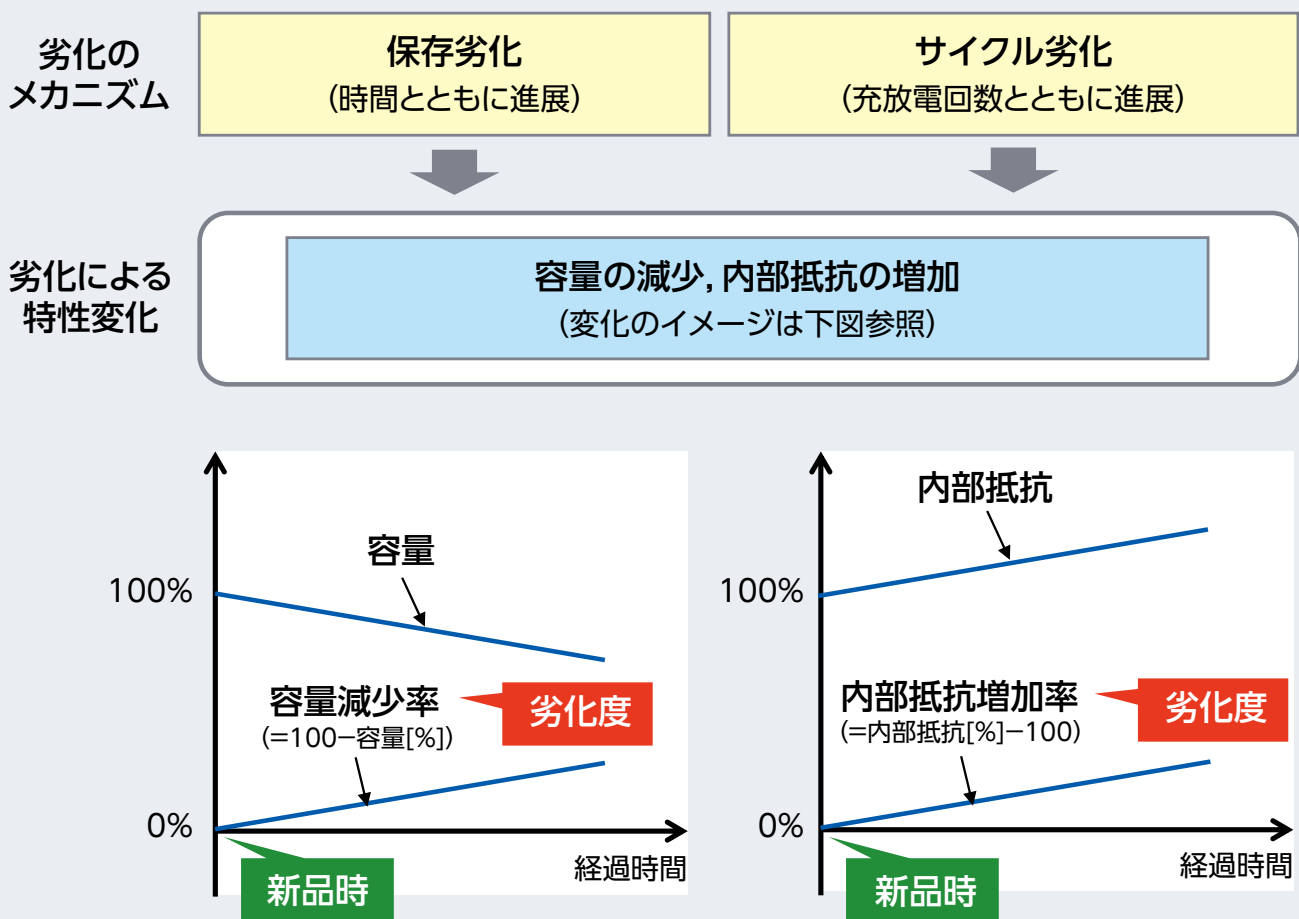


図4 劣化のメカニズムと指標

部抵抗が増加します。これはボトルがつぶれて入り口が狭まるイメージです。容積が減ったので蓄えられる水の量は少なくなり、入り口が狭まったので水が出入りしにくい状態となります。

劣化のメカニズム

蓄電池の劣化メカニズムは2つに分けて考えるのが一般的です(図4)。1つは蓄電池を使わなくても進む保存劣化で、時間とともに進展します。もう一つは蓄電池を使うことによって進むサイクル劣化で、充放電の回数とともに進展します。これら2種類の劣化メカニズムが原因となって容量は減少し、内部抵抗は増加します。新品の蓄電池の容量と内部抵抗をそれぞれ100%として、その後の変化量を表したのが容

量減少率と内部抵抗増加率であり、これらを劣化度と見なすことができます。頻繁に大きな電流が流れる用途では、サイクル劣化と保存劣化の両方が発生します。そうではない制御回路用や非常時走行用の蓄電池では、サイクル劣化は小さく保存劣化が支配的です。

劣化度の調べ方

蓄電池の劣化は、例えば電極の物質が剥がれることや、充放電以外の副反応が起こることによって進展し、容量や内部抵抗の変化をもたらします。この変化を調べるには測定するのが最も正確です。容量も内部抵抗も、決められた手順と大きさとで電流を流し、その際の電圧波形を記録すれば正確に測定できます。しかし、測定

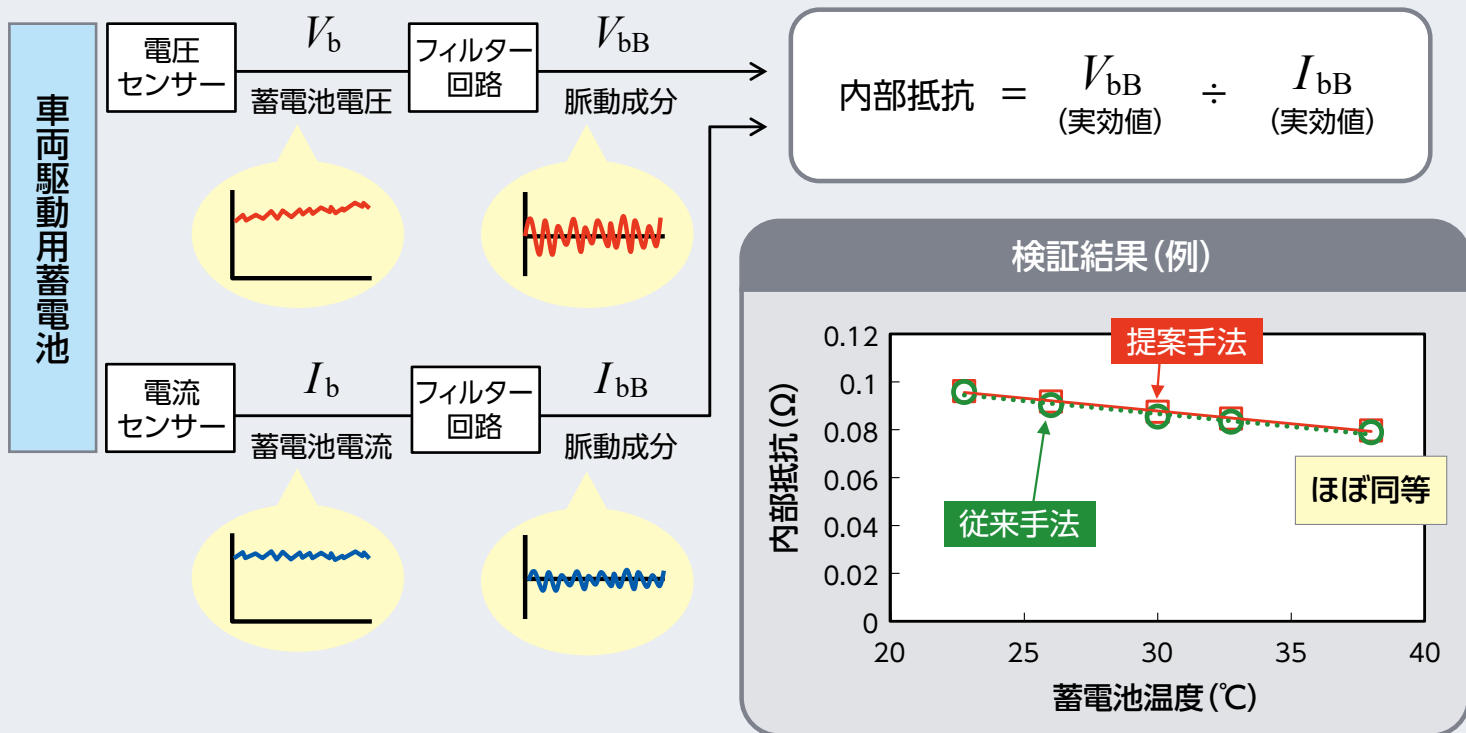


図5 電圧と電流の脈動成分による内部抵抗推定

のための大掛かりな装置を車両の蓄電池に接続するのは難しいことが多く、測定にかけられる時間も限られています。よって、測定より精度は劣りますが、簡便に劣化度を推定する方法が求められています。

劣化度の推定手法

内部抵抗の算出方法は、オームの法則を利用して電圧の変化量を電流の変化量で割ることが基本となります。測定装置を用いずに、蓄電池が稼働しているときの電流と電圧から内部抵抗を推定する手法は各種提案されています。一例として、鉄道総研では、試験車両LH02形において、主に直流電流の変化から内部抵抗を推定

する試験を行いました¹⁾。その後、蓄電池電車やディーゼルハイブリッド車両において、充電中の電流や電圧に含まれる交流の脈動成分を用いて推定する試験を行いました³⁾。その結果、厳密な周波数分析を用いる従来手法と、よりシンプルな実効値演算を用いる提案手法とで、内部抵抗の演算値はほぼ同等となりました(図5)。

容量については、蓄電池を満充電から完全に放電する際の放電電荷量として測定可能です。しかし、実車両では小刻みで浅い充電と放電を繰り返すため、その際の電荷量などに基づく推定では誤差を生じやすいのが実情です。現在、内部抵抗と容量の双方を、簡便かつ高精度に推定するための研究を行っています。

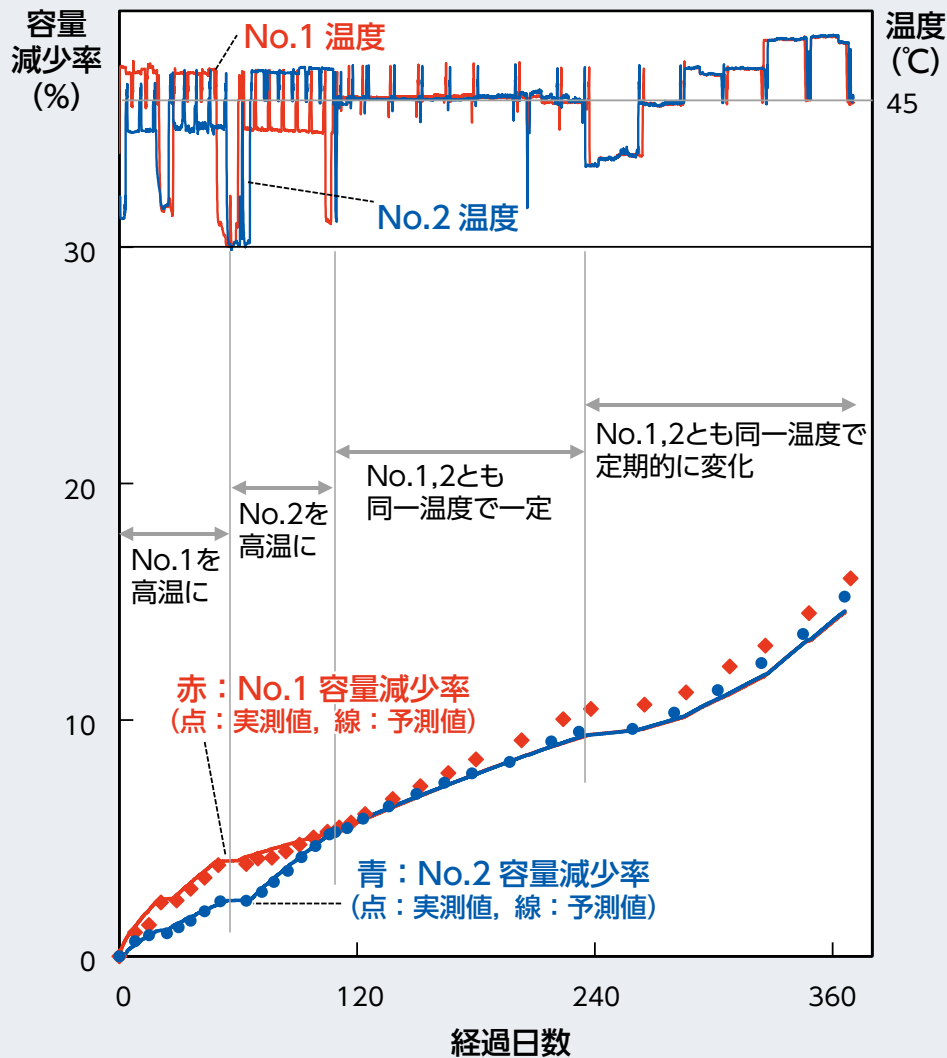


図6 容量減少率予測値の評価例

温度変化に応じた劣化予測

蓄電池の劣化メカニズムのうち、保存劣化は高温のときに急速に進みます。したがって、劣化度を高精度に予測するためには、蓄電池の温度を平均温度などに固定せず、季節などによる温度変化を扱える手法が必要です。しかし、従来の予測手法の中には、長期間の予測精度に優れたものや、温度変動に対応可能なものはあっても、それら両方の特長をもつ手法はありませんでした。そこで、容量を予測する従来式を拡張し、温度変化にともなう係数の変化を扱えるようにしました。内部抵抗については、温度変化に対応可能な予測式を用いました。

この提案式による容量減少率の予測値を、駆

動用蓄電池 (No.1とNo.2の2つのモジュール) を用いた基礎実験で評価した例を図6に示します。同様に、内部抵抗増加率の予測値の評価例を図7に示します。容量減少率と内部抵抗増加率の予測値は、蓄電池温度の変化にともなって変化しており、長期的に精度が高いことを確認しました⁴⁾。基礎実験を行えば蓄電池のタイプに応じた予測式が得られます。それに将来の蓄電池温度の変化 (想定値) を当てはめれば高精度な保存劣化の予測が可能です。また、タイプが異なる制御回路用蓄電池の場合も高精度に保存劣化が予測できることを別途確認しています⁴⁾。

なお、図6と図7は実車両での蓄電池より高

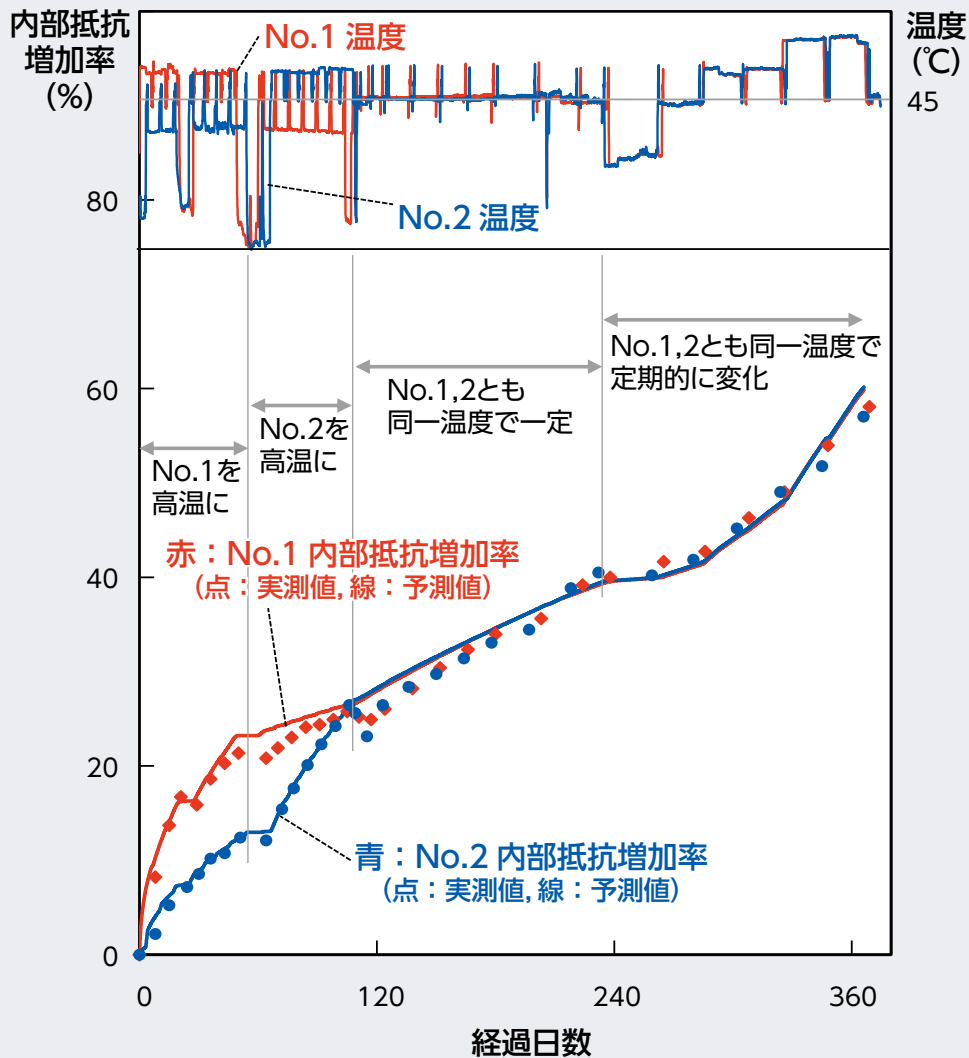


図7 内部抵抗増加率予測値の評価例

めの温度として実験期間を短縮しています。それでも予測式の構築には約60日分のデータが必要でした。予測値の評価のために大幅な劣化状態とするには約1年の期間を要しました。蓄電池の温度をさらに上げれば実験期間は短縮できますが、実車両では生じないような特殊な劣化が生じ、構築した予測式の精度が低下する場合がありますので注意が必要です。

おわりに

目に見えない蓄電池の劣化について、将来の劣化度を予測する手法を紹介しました。充放電をしなくても進む保存劣化については、温度変化に対応可能で高精度な予測が可能となりました。

た。充放電にともなって進むサイクル劣化の予測手法については現在も開発中です。引き続き、鉄道車両のメンテナンスにおいて使いやすい劣化予測手法の構築を目指していきます。[RRR]

文献

- 1) 田口義晃, 小笠正道: 架線ハイブリッド電車用リチウムイオン電池の充電率推定手法, 鉄道総研報告, Vol.26, No.10, pp.35-40, 2012
- 2) 渡邊有人, 田口義晃, 小西武史: 鉄道車両用蓄電池のさらなる有効活用方法を考える, RRR, Vol.80, No.4, pp.20-25, 2023
- 3) 尾崎興介, 田口義晃, 渡邊有人: 車両駆動用主回路蓄電池の電圧電流脈動測定による内部抵抗把握手法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.6, pp.1-6, 2023
- 4) 田口義晃, 門脇悟志, 吉川岳: 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, 鉄道総研報告, Vol.36, No.2, pp.29-34, 2022