

# 車両駆動用リチウムイオン電池の 簡便な温度上昇推定手法

田口 義晃\* 寺田 篤人\*\* 三木 真幸\*  
 畠田 憲司\*\*\* 木村 卓美#

## A Simple Method of Estimating the Temperature Rise of the Traction Lithium-ion Battery

Yoshiaki TAGUCHI Atsuto TERADA Masaki MIKI  
 Kenji HATAKEDA Takumi KIMURA

The thermal design of the lithium-ion battery is important to achieve its longer lifetime and better electric performance. We developed a simple thermal network model of the traction lithium-ion battery for the AC-fed and battery-powered EMU (electric multiple unit train) to grasp holistic thermal characteristics quickly and easily. This thermal model helps us to estimate the average temperature of the battery modules inside the respective battery cases. In this paper, we described how to construct the thermal model, accuracy of the estimated temperature by comparing it with the measured temperature in summer and winter running tests, and an example of the effective use of the thermal model.

キーワード：蓄電池電車，リチウムイオン電池，熱回路モデル，温度推定

### 1. はじめに

鉄道車両に蓄電媒体を搭載すれば、ブレーキ時の回生エネルギーをより有効に再利用し、省エネルギー性を向上できる。蓄電媒体として近年の採用例が多いのは、エネルギー密度に優れたリチウムイオン電池である。2003年から試験車両<sup>1)</sup>への搭載が始まり、営業車両ではディーゼルハイブリッド方式の気動車<sup>2)</sup>や機関車<sup>3)</sup>への採用を経て、2014年に蓄電池駆動直流電車であるJR東日本EV-E301系“ACCUM”<sup>4)</sup>に採用された。その他海外での営業車両<sup>5)</sup>も増えつつある。

リチウムイオン電池は高温になるほど劣化が加速し、100℃を超えるような高温では発煙等のリスクも生じる。一方で低温では入出力特性が低下し、車両加速度の減少や充電時間の増加につながる。よって、安全かつ長寿命に使用し、良好な電気的性能を発揮するためには蓄電池箱全体の熱設計や温度管理制御が重要となる。熱設計の検討には、ミニモデルや実機を用いた実験が有効であるが、将来の電池劣化や過酷な環境などの様々な条件を考慮するために、温度推定シミュレーションを併用することが多い。

しかし、これまでに知られている温度推定手法は、小型の単電池（セル）や組電池（本稿でのモジュール相当）を対象とし、熱解析専用ソフトや有限要素法モデルといった計算リソースを必要とするものが多い。そこで著者らは、蓄電池電車の駆動に用いる大型の蓄電池箱を対象とし、かつ専用ソフトを用いずに推定できる手法として、熱回路網法を適用した熱モデルによる簡便な推定手法を提案<sup>6)</sup>した。構築した熱モデルは、交流架線式蓄電池電車（817系改造による試験車）<sup>7)</sup>の駆動用蓄電池を対象とした。本稿では試験車の走行試験データを用いて提案手法の実用性を検証し、熱設計への活用を検討したので報告する。

### 2. 試験車の概要

#### 2.1 車両概要と蓄電池の配置

著者らが2013年に共同開発した交流架線式蓄電池電車（817系改造試験車、以下は単に試験車と称する）を図1に示す。既存の交流電車2両編成を改造し、Tc車の床下に蓄電池箱及び関連機器を搭載した。試験車の主要諸元を表1に、主回路構成を図2に示す。高電圧の蓄電池システムとして開発したため、既存主回路の直流ステージ部に直結可能となった。架線からの充電と蓄電池から補機への放電はPWMコンバータによって制御し、力行時の放電とブレーキ時の充電は駆動用インバータによって制御する。その結果、充電・放電制御用の電力変

\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室  
 \*\* 車両制御技術研究部 駆動制御研究室（現九州旅客鉄道株式会社）  
 \*\*\* 九州旅客鉄道株式会社  
 # 株式会社GSユアサ

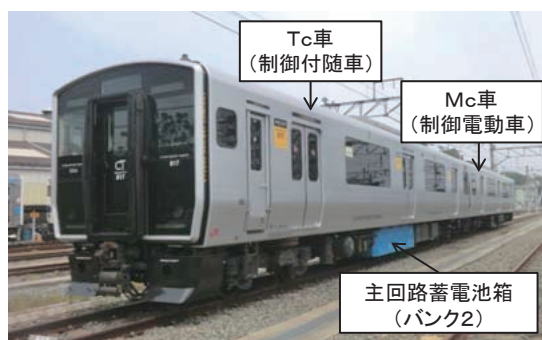


図1 試験車の外観

表1 試験車の主要諸元

車両形式	817系 1000番代
編成空車質量	63.1t (改造前) 67.1t (改造後)
設計最高速度	120 km/h (電化区間) 85 km/h (非電化区間)
蓄電池航続距離	約 30 km (フル充電から)
蓄電池定格	1382 V-83 kWh (システム) 3.6 V-30 Ah (セル)
システム構成	1 モジュール = 8 セル直列 1 バンク = 48 モジュール直列 システム全体 = 2 バンク並列

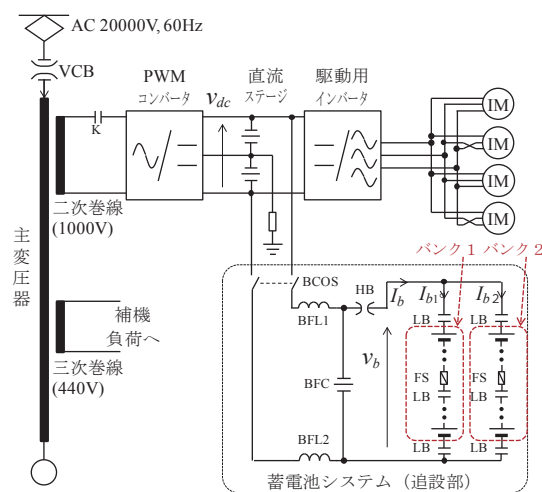


図2 主回路構成

換器は不要でありコンパクトな主回路となる。蓄電池は2バンクの並列接続となっており、異常が生じたバンクは開放し、残った健全バンクのみでの運転継続が可能である。

Tc車の床下機器配置を図3に示す。既存の床下機器は極力移設しないこととしたため、蓄電池搭載用のスペースはレール方向で約4mに制約された。バンク1とバンク2は別々の蓄電池箱に格納されているため、放熱の観点では独立と考えてよい。

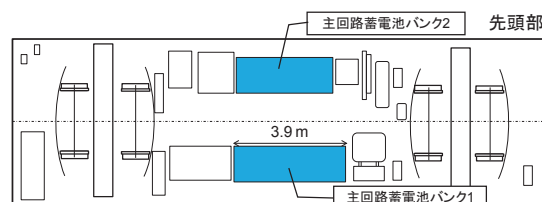
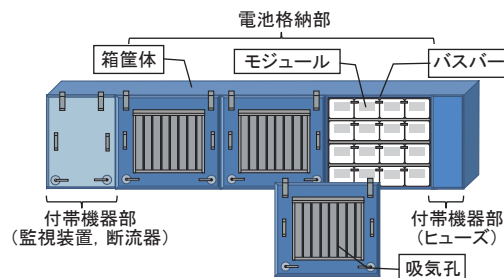
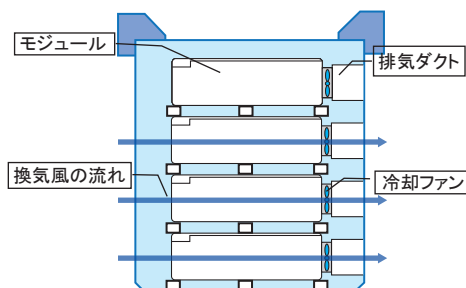


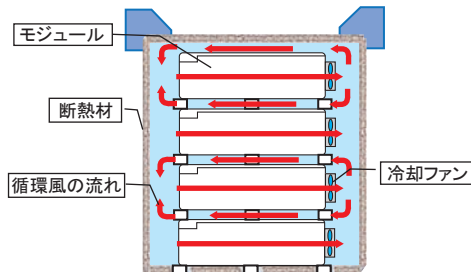
図3 Tc車床下の蓄電池箱配置 (概略図)



(a) 蓄電池箱 (バンク1) の概略図



(b) 蓄電池箱の断面図 (夏期)



(c) 蓄電池箱の断面図 (冬期)

図4 蓄電池箱の概略構造

## 2.2 蓄電池箱の内部構造

蓄電池箱 (バンク1) の概略図を図4 (a) に示す。箱内部は電池格納部と付帯機器部に大別できる。蓄電池部分は仕切板で3区画に分割されており、1区画に16モジュール格納されている。また隣接するモジュールはバスバーで直列接続されている。付帯機器のうち、監視装置はバンク1側に集約して格納されているため、両バンクの寸法差が生じている。

夏の試験車走行試験では吸気孔から取り入れた外気によりモジュールを冷却し、排気ダクトより外部に排出する構成 (図4 (b)) とした。冬の試験車走行試験では蓄電池箱への低温外気侵入を防止し、箱筐体からの放熱を緩和するため、断熱材及び吸排気孔へのふさぎ板を設置し、排気ダクトを撤去した (図4 (c))。

### 3. 温度上昇推定用熱モデル

#### 3.1 熱回路網法

ある物体内に一次元の熱の流れがある場合に、温度差を  $\Delta T$  [K]、熱抵抗を  $R_T$  [K/W]、熱流量を  $W$  [W] とおくと、式 (1) が成り立つ。

$$\Delta T = R_T \times W \quad (1)$$

この関係を、温度差 ( $\Delta T$ )  $\Rightarrow$  電位差 ( $E$ )、熱抵抗 ( $R_T$ )  $\Rightarrow$  電気抵抗 ( $R$ )、熱流量 ( $W$ )  $\Rightarrow$  電流 ( $I$ ) と対応させれば電気回路のオームの法則 ( $E=RI$ ) と等価である。さらに、熱容量は静電容量に対応する。この等価な電気回路網、すなわち熱回路網を熱モデルとして用い、これを解いて温度を試算する手法を熱回路網法という。

#### 3.2 熱モデル構造

簡便な熱モデルとするため、以下の仮定を行った。①蓄電池箱内の全セルは同一温度である。②内気温度、外気温度、蓄電池箱筐体温度は各々均一である。③冷却風は全セル表面に均一に当たっている。

以上の仮定に基づいて、図5のように熱回路網を構築し、セル平均温度  $T_b$  の推定を行う。図5で用いた記号

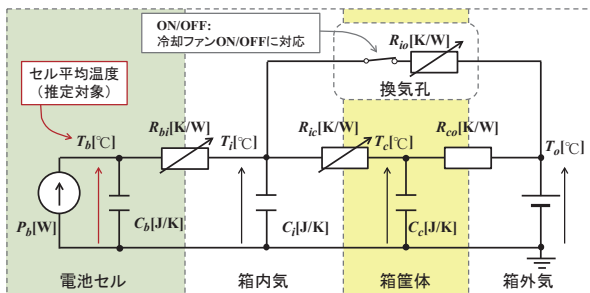


図5 1バンク単体の蓄電池熱モデル (熱回路網による構築)

表2 熱回路網の使用記号一覧

$R_{bt}$	セル～箱内気間の熱抵抗 [K/W]
$R_{ic}$	箱内気～箱筐体間の熱抵抗 [K/W]
$R_{co}$	箱筐体～箱外気間の熱抵抗 [K/W]
$R_{io}$	箱内気～箱外気間の熱抵抗 (換気作用) [K/W]
$C_b$	1バンク分 (384セル) の電池熱容量 [J/K]
$C_i$	箱内気の熱容量 [J/K]
$C_c$	蓄電池箱筐体の熱容量 [J/K]
$T_b$	1バンク分 (384セル) のセル平均温度 [°C]
$T_i$	箱内気温度 [°C]
$T_c$	蓄電池箱筐体の温度 [°C]
$T_o$	箱外気温度 [°C]
$P_b$	1バンク分のセル内部発熱パワー [W]

の一覧を表2に示す。

#### 3.3 熱モデルパラメータ

図5に示すパラメータの算定方法を記す。熱回路網内の各熱抵抗  $R_{bt}$ ,  $R_{ic}$ ,  $R_{co}$  は、温度平衡と見なせる状態での実測温度とその時のセル内部発熱パワーから式 (1) を用いて算出した。 $R_{bt}$ ,  $R_{ic}$ ,  $R_{io}$  は冷却ファンの状態と断熱材の有無により数値が変化する可変抵抗であり、各条件に応じた値を算定した。また、走行風等による箱筐体～箱外気間の熱抵抗の変動は無視して、 $R_{co}$  は固定値とした。また  $R_{bt}$  に関しては、類似形状のセル・モジュールを使用した過去の実験結果<sup>8)</sup>も参考とした。

換気孔部の熱抵抗  $R_{io}$  は、式 (2) で表せる。

$$R_{io} = 1 / (c\rho F) \quad (2)$$

ここで、 $c$  は空気比熱値 [J/kgK]、 $\rho$  は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $F$  は箱内外の換気流量 [m<sup>3</sup>/s] である。換気流量  $F$  は実測できなかったため、 $R_{io}$  についても温度平衡状態での実測温度と既知の熱抵抗とから算定した。なお、実態により近い熱モデルとするため、夏期に冷却ファンがOFFの場合も走行風等の影響によりONの時の10%の換気が行われ、冬期に換気孔を塞いだ場合も塞ぎきれない隙間から同5%の換気が行われていると仮定した<sup>6)</sup>。

セル内部発熱パワー  $P_b$  [W] は、内部抵抗  $R_{bk}$  [Ω] でのジュール発熱のみ考慮し、式 (3) により算出した。以後、添え字  $k$  は  $k=1$ : バンク1、 $k=2$ : バンク2を表すものとする。

$$P_b = R_{bk} I_{bk}^2 \quad (3)$$

ここで、内部抵抗  $R_{bk}$  は、実験式 (4) にセル平均温度  $T_{bk}$  の推定値を代入して算出した。

$$R_{bk} = r_1 / (T_{bk} + r_0) + r_2 \quad (4)$$

ここで、 $r_0$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  は内部抵抗値を曲線近似して得られた係数であり、バンク1と2で共通とする。内部抵抗  $R_{bk}$  は温度が上昇するにつれて単調減少して  $r_2$  に漸近する。

熱回路網内の熱容量  $C_i$ ,  $C_c$  はそれぞれ、空気と鉄の比熱に質量を乗じて決定した。なお、電池熱容量  $C_b$  に関しては、実験的に求めたセル単体の熱容量に1.5を乗じて合せ込みを行った。1.5を乗じることは、セル単体の熱容量に加えて、セルから熱が伝導する部材 (モジュール間とセル間のバスバー、モジュールの樹脂製筐体、支持部材) の熱容量を、等価的に考慮したことに相当する。

#### 3.4 2バンク並列モデル

試験車の蓄電池は2バンクが並列接続されているため、各バンクの内部抵抗や内部起電圧 (開回路電圧) が異なれば電流分担はアンバランスとなり、電池セルの内

特集：車両技術

部発熱や温度変化に差が生じる。このようなバンク間の電流分担も推定可能とした、熱・電気連成モデルが図6である。全電流  $I_b$  および外気温度  $T_o$  および各部初期値を与えれば、各バンクの電流やセル平均温度が推定可能である。

各バンクの電流  $I_{b1}, I_{b2}$  は、最も単純な電池等価回路（開回路電圧  $E_k$  および内部抵抗  $R_{bk}$  の直列接続）を仮定すると、式(5)で計算できる。

$$\begin{cases} I_{b1} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} I_b - \frac{E_1 - E_2}{R_{b1} + R_{b2}} \\ I_{b2} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} I_b + \frac{E_1 - E_2}{R_{b1} + R_{b2}} \end{cases} \quad (5)$$

各バンク電流  $I_{bk}$  [A] の時間積分を電池容量  $Q$  [Ah] で除すことにより各バンクの充電率  $S_k$  [%] が得られる。これを電池種別によって決まる関係式(6)に代入することで、各バンクの開回路電圧  $E_k$  を得る。

$$E_k = a_3 S_k^3 + a_2 S_k^2 + a_1 S_k + a_0 \quad (6)$$

式(6)は、充電率  $S_k$  が増加するにつれて電圧  $E_k$  が増加する特性を表わしており、 $a_0 \sim a_3$  は電池固有の定数である。今回は関数を用いているが、換算用テーブル等で表現してもよい。

4. 温度上昇推定精度の検証

4.1 走行試験の実施概要

試験車の走行試験が、2013年度の春期、夏期、冬期に分割して実施された。走行区間や実施日数を図7に示す。走行試験は主に筑豊本線にて40日間実施し、実際の非電化路線である日田彦山線でも6日間実施した。本稿での検証用データはすべて筑豊本線で測定されたものである。電化区間ではあるが、蓄電池のみによる走行を主体とし、1日に7～8時間走行する中で、折り返し駅での急速充電を数回実施した。検証用データは、外気温度が大きく異なる夏期と冬期の中から、蓄電池走行の時間比率が大きいものを選択した。

4.2 1バンク単体での検証

図5に示す熱モデルを用いてバンク1のセル平均温度を推定し、試験車の夏、冬の走行試験における実測値と比較した結果を図8、図9に示す。各部温度の初期値には実測値を代入し、電流値  $I_{b1}$  と外気温度  $T_o$  には実測値を用いた。夏、冬共にセル平均温度の推定誤差は最大で約2℃であり、実用上十分な精度が得られている。他の試番でも最大誤差は概ね2℃以内に収まった。誤差が拡大するタイミングは冷却ファンの動作状態が変化した時である。セル温度は電池セル間を接続するバスバー部で

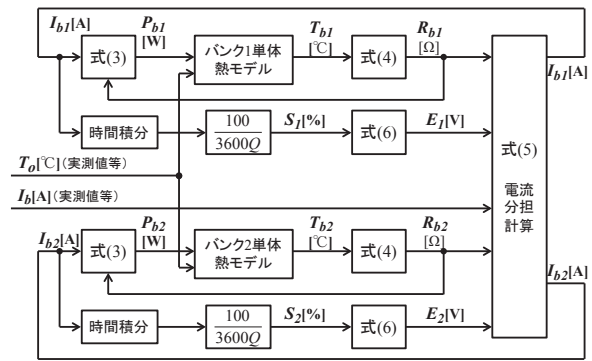


図6 2バンク並列蓄電池の熱・電気連成モデル

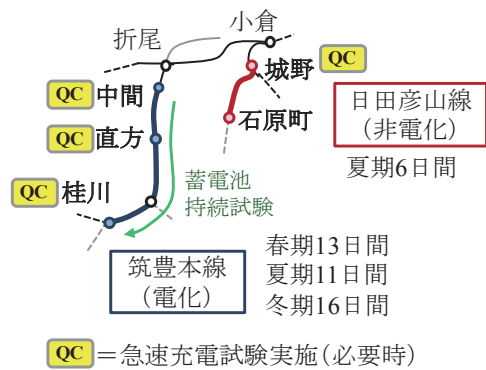


図7 試験車走行試験の実施区間と日数

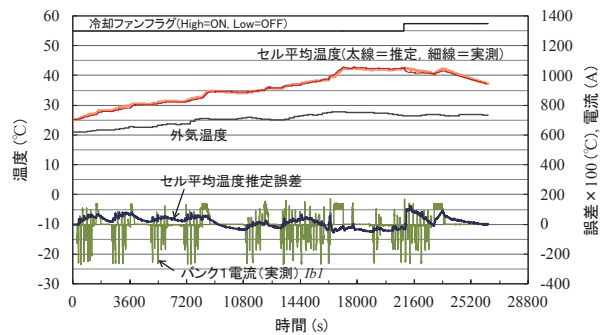


図8 バンク1単体の温度推定値と実測値の比較（夏）

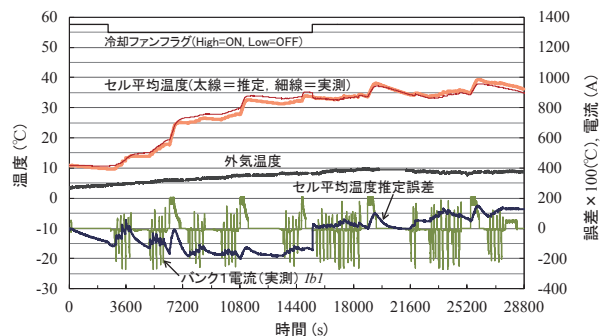


図9 バンク1単体の温度推定値と実測値の比較（冬）

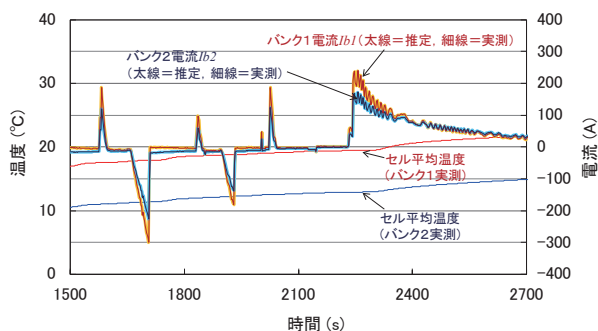


図 10 2バンク並列の電流推定値と実測値の比較

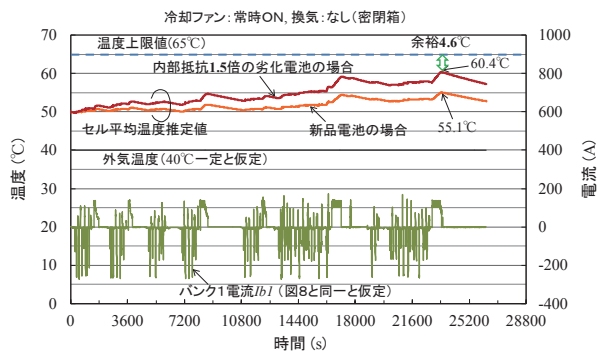


図 12 電池劣化時の温度上昇推定例（換気なし）

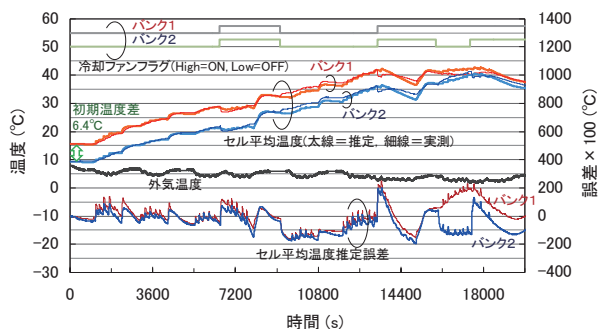


図 11 2バンク並列の温度推定値と実測値の比較

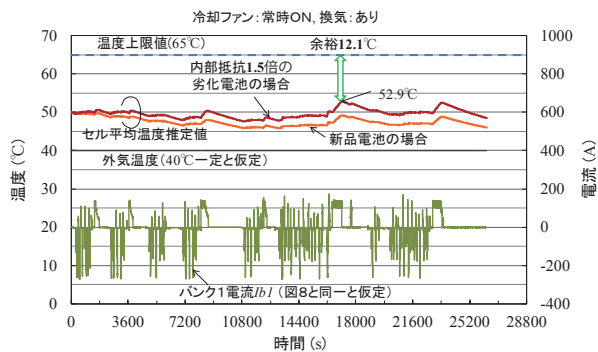


図 13 電池劣化時の温度上昇推定例（換気あり）

実測している。バスバー部には冷却風が当たりにくい設計ではあるが、わずかに風の流れが変化してバスバー内の温度勾配が増減すると、その影響を受けるためと考えられる。

なお、推定温度の計算には専用ソフトは使用していない。汎用の表計算ソフトに提案手法を適用し、計算時間刻み2秒での数値解を得た。

### 4.3 2バンク並列での検証

図6に示す2バンク並列モデルを用いて各バンクの電流とセル平均温度を推定し、実測値と比較した結果を図10、図11に示す。各部温度の初期値と、2バンク分の和である全電流  $I_b$ 、および外気温度  $T_o$  には実測値を用いた。検証に用いたのは、バンク間の初期温度差を6.4°Cとして開始した冬期のデータである。初期温度差を意図的に与えた理由は、バンク2に故障が生じて開放され、健全なバンク1のみが通電されて温度上昇し、その後バンク2も健全に復帰した状態を模擬するためである。試験の結果は図10に示すように、バンク1（高温側）の内部抵抗が相対的に低いため、電流が集中する結果となった。各バンク電流の推定値は、実測値とよく一致している。図11に示すように、バンク間の初期温度差は約2時間の間、ほぼ一定かわずかに拡大する状態が続いた。拡大が生じたのは、電流が集中したバンク1では、温度上昇が速い→内部抵抗の低下が速い→さらに電流集中するという一種の正帰還が生じたためと考えられる。

このような場合においても、各バンクのセル平均温度の推定誤差は最大約2°Cに収まっている。以上から、バンク間に温度差が生じた状態からでも、2バンク並列モデルを用いれば実用上問題なく電池温度や電流値の推定が可能であることを確認した。

なお、電流集中が生じると電池の許容電流値を超過しやすくなる。図10に示すようにバンク1電流は放電時のピークが-300Aであり、ほぼ許容値に達していた。並列接続されるバンク間に温度差が生じた場合は、図11の15900秒付近から実施しているような冷却ファンの制御によって、早期に温度差を解消することが望ましい。

## 5. 温度上昇推定手法の活用例

提案した温度上昇推定手法を活用すれば、過酷な外気環境や、将来の電池劣化時における電池温度上昇特性を簡便に推定することが可能となる。現車試験では実施困難な条件まで考慮すれば、蓄電池箱の熱設計が万全なものとなる。

将来、電池が劣化した場合の温度上昇推定例を図12に示す。劣化により、電池の内部抵抗が新品時の1.5倍に増加したと仮定する。外気温度は40°C一定と厳しい条件とし、蓄電池箱は塵埃侵入を防ぐため換気なしの密閉構造（隙間からの換気は考慮しない理想的な密閉）とする。さらに通電電流は図8に示す実測値と同一と仮定

## 特集：車両技術

した場合に、上限温度 65℃までの余裕を調べた。その結果、新品時には 9.9℃であった余裕は、劣化時には 4.6℃に減少すると推定された。

多くの場合、蓄電池セル温度は均一ではなくばらつきを伴う。試験車での実測では±5℃程度のばらつきが生じることもあった。このばらつき分を考慮すると、上限温度までの余裕が 4.6℃しかない場合、最大セル温度は上限温度を超過する可能性がある。ここから、冷却性能を強化するか、通電電流値を低減する必要があることが分かる。

そこで、冷却性能を強化するために、蓄電池箱の換気を「なし」から「あり」に変更して再計算した結果を図 13 に示す。この場合には劣化電池のセル平均温度の最高値は 52.9℃と推定された。密閉構造を仮定した図 12 に比べて 7.5℃低下し、上限温度 65 度までの余裕は 12.1℃と十分である。以上のように、提案手法を用いれば熱設計変更の必要性や効果についての示唆が簡便に得られる。

## 6. まとめ

鉄道車両への適用が拡大しつつある駆動用リチウムイオン電池を対象とし、電池温度上昇を簡便に推定するための手法を提案した。熱回路網法によるシンプルな熱モデルとしたため、有限要素法を用いる熱流体解析ソフトのような特別なソフトは不要である。汎用の表計算ソフトに、通電電流や外気温、冷却ファン状態、電池劣化等の条件を入力すれば、直ちにセル平均温度を推定できる。

817 系改造試験車のデータを用いて温度推定値の精度を検証した結果は以下の通りであり、ここから提案手法の実用性を確認することができた。

- 1) 1バンク単体モデルの温度推定誤差は、夏期・冬期いずれの場合も約 2℃以下である。
- 2) 2バンク並列モデルを用いれば、各バンクに温度差が生じた状態から、1バンク単体モデルと同等精度での温度推定と電流分担推定が可能である。

提案手法を活用すれば、現車試験では考慮しきれない各種条件下での電池温度上昇を簡便に推定し、蓄電池箱の熱設計に反映可能となる。一例として、将来電池が劣化した場合でも上限温度 65℃を超えないように熱設計

を変更する例を示した。

提案手法の課題点として、①蓄電池箱内の温度ばらつきには対応していない、②熱モデルパラメータの算定に必要な温度平衡状態データの取得試験や抽出作業に手間がかかる点が挙げられる。今後はこれらを改善して実用性を向上させるために、熱モデルの高精度化や、効率的な熱モデル構築方法について検討する必要がある。

## 謝辞

本開発の一部は、JR九州が国土交通省の鉄道技術開発費補助金の交付を受けて実施した。共同開発に参画頂いた株式会社日立製作所の関係各位、および、試験測定に御協力頂いた株式会社テスの関係各位のご尽力に対し謝意を表す。

## 文献

- 1) 小笠：バッテリー駆動架線レストラム（架線・バッテリーハイブリッド）、平成 18 年電気学会 D 部門大会講演論文集、Vol.1, 1-05-2, pp.107-112, 2006
- 2) 白木、近藤：ディーゼルエンジン-リチウムイオン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
- 3) 添田、杉山、小川、芳賀、長石：入換用ハイブリッド機関車の環境性能評価、平成 23 年電気学会 D 部門大会講演論文集、Vol.3, 3-99, pp.449-452, 2011
- 4) 滝口：蓄電池駆動電車 EV-E301 系の概要、R&M, Vol.22, No.4, pp.4-7, 2014
- 5) 小笠：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
- 6) 寺田、三木、田口、木村、畠田：蓄電池電車用リチウムイオン電池の熱回路網による温度上昇推定手法の検討、平成 27 年電気学会 D 部門大会講演論文集、pp.V287-290, 2015
- 7) 田口、門脇、仲村、三木、畠田、有田：交流電化区間に対応した蓄電池電車主回路の開発と走行試験による蓄電池性能評価、鉄道総研報告、Vol.28, No.7, pp.17-22, 2014
- 8) 田口、小笠：架線レス LRV のバッテリー温度上昇抑制方法の開発、鉄道総研報告、Vol.22, No.9, pp.41-46, 2008