

## 架線レス LRV のバッテリー温度上昇抑制方法の開発

田口 義晃\* 小笠 正道\*

Development of a Measure to Suppress Temperature Rising of Batteries  
Boarded on a Contact-wire-less LRV

Yoshiaki TAGUCHI Masamichi OGASA

Recently, a large-capacity secondary battery has been widely used for railway vehicles, automobiles, and so on. Especially, the Lithium-ion battery can be mounted in a small space because of its high energy density and power density. Railway vehicles require the large-capacity battery cells, whose temperature tends to rise easily. So, it is very important to suppress the temperature rising of on-board batteries, from the viewpoint of battery lifetime and safety operation. We developed a measure to determine a flow rate of cooling air, by measuring the temperature-rising characteristics under the various conditions. Based on the developed measure, we designed the battery modules boarded on a contact-wire-less LRV.

キーワード：リチウムイオン二次電池，架線レス LRV，強制空冷，風量

## 1. はじめに

近年、鉄道車両やハイブリッド自動車等の用途で大容量二次電池の適用が進んでいる。中でもリチウムイオン二次電池は、一般にニッケル水素電池より高いエネルギー密度とパワー密度を持つため、狭い空間にも搭載しやすい。電池からの放熱特性を高めるには、小さいセル（単電池）を多数組み合わせ合わせて間隔を開けて配置するのが望ましい。しかし、鉄道車両が要求する大容量電池を構成するためにはセル数が膨大となり、配線量増大や信頼性低下の問題が生じる。そこで、大容量セルを使用することになるが、大型セルは発熱体積に対して放熱表面積が小さいため温度が上昇しやすい。

リチウムイオン二次電池の寿命は、充放電の繰り返し回数と深さに依存するサイクル寿命<sup>1)</sup>と、保管時や使用時の温度に依存するカレンダー寿命の双方から決まる。寿命が短いと交換コストが増加して不経済である。一般には5年～8年と言われるカレンダー寿命は、ある種のリチウムイオン二次電池については約7～8℃上昇すると半減するという加速試験結果<sup>2)</sup>も存在する。温度依存性の強さは電池設計によって異なるが、一般には10℃の上昇で寿命が半減と言われている。温度が60～65℃を超えてくると劣化反応が急速になり、さらに著しく上昇すると安全上の問題も生じるため、保護回路によって使用を停止する。経済的かつ安全に使用するためには、電池温度上昇を十分に抑制することが不可欠である。

著者らは電池温度上昇を抑制するために、実電池を用

いた通電実験を実施した。これによって温度上昇特性を把握するとともに、様々な使用条件に対応可能な冷却風量の設計指針を得た。また、その指針に基づいて架線レスLRV搭載用電池モジュール（組電池）を開発したので報告する。

## 2. 通電実験の実施

## 2.1 実験用電池モジュール

実験に使用した電池モジュール（LIM30H-8S）は図1に示すように、3.6V-30Ahの角型セルを8セル直列接続したものである。セルは産業用として実績のある高出力タイプとした。モジュールの背面に備わった2台のファン（AC100Vタイプ）で冷却風を排気する。この他の冷却方法としては、多数のモジュールの排気ダクトを集約してから大型ファンで排気する方法も考えられるが、通風ダクトの設置スペースや、モジュール間での風量のばらつきが懸念されたため、モジュール個別に小型ファン

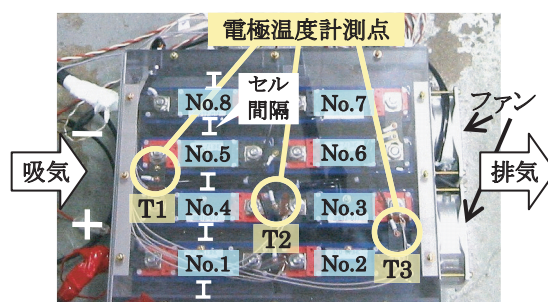


図1 実験用電池モジュール外観

\* 車両制御技術研究部（駆動制御）

特集：車両技術

を搭載した。筐体は厚さ20mmの透明樹脂製，セルの間隔は可変とし，上蓋は開閉可能，ファンの風量は電圧に応じて可変とした。

温度計測用のK熱電対は，冷却風の上流 ( $T_1$ )，中流 ( $T_2$ )，下流 ( $T_3$ ) にあたる電極表面に絶縁テープによって固定した。電池温度を電極温度で代表したのは，電池内部の温度上昇が敏感に伝わり，温度管理対象として適しているためである。

2.2 実験装置構成と実験条件

実験装置の全体構成を図2に示す。電池の充電と放電はそれぞれ別の電源装置で行う。これらの電源装置に電流指令を与える制御器にはマイクロシーケンサを使用しており，任意の電流パターンで連続通電可能である。風量調整はスライドトランスによってファンへの印加電圧を変えることによって行う。風量測定はベーン式風速計を用いて，簡易な風洞によって集約した排気の平均風速を計測する。電池電圧や温度に異常が生じた場合は監視装置がアラームを発し，通電制御器を介して遮断器を開放することで充電・放電を停止する。

実験条件は，表1に示すように設定する。すなわち，セル間隔，通電電流，冷却風量の各3通りを組合せて27通りの条件を生成する。これら各条件下で，15～20分間通電する際の温度上昇特性を取得する。通電後はファンを最大風量で回転して電池を十分冷却してから次の条件に移る。

恒温槽は使用していないが大型の実験棟にて実施したため，冷却風の吸気温度は10～13℃の範囲で安定していた。

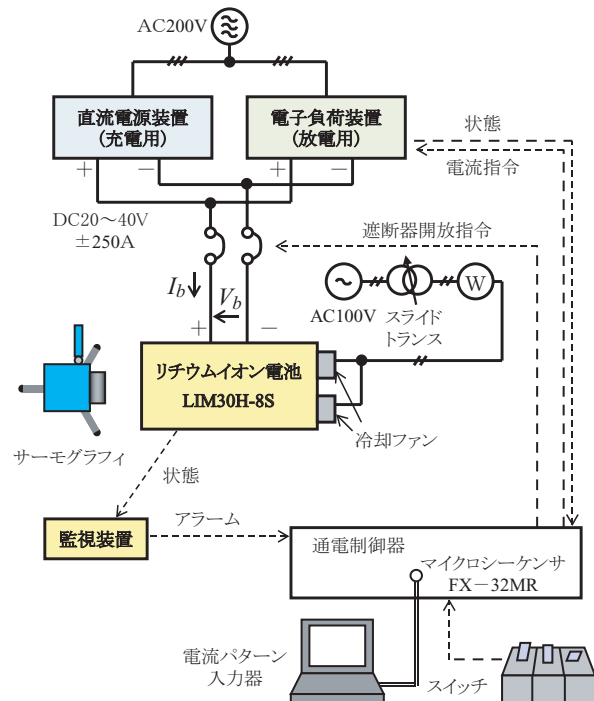


図2 実験装置全体構成

3. 温度測定結果

3.1 電極温度の分布

20分間通電した際の温度分布をサーモグラフィで撮影した結果を図3に示す（セル間隔5mm，電流170A，風量56m<sup>3</sup>/h）。電極部は，周囲の部分（外装フィルムや樹脂）と比較して温度が上昇していることが分かる。電極の端部や六角ナットの部分が低温に見えるのは撮影用の黒色塗料を塗布していないためである。

また，冷却風の上流側で温度が低く，下流側で温度が高い。セル間隔を15mmに固定し，通電電流と風量を変えた場合の電極温度の分布を図4に示す。通電開始から15分経過した際の各電極温度  $T_1 \sim T_3$  およびそれらの平均値を整理した。210A通電の場合，最大温度と最小温度の差は5.5～6.6℃となり，120A通電の場合には3.6～4.5℃となった。温度が最大となるのは中流部の  $T_2$  または下流部の  $T_3$  であり，風量によって異なる。このような個々の電極温度の挙動を分析して設計指針を導出するに

表1 通電実験の条件設定

セル間隔	5mm, 10mm, 15mm
通電電流 (ハイレート)	±120A (4C), ±170A (5.7C), ±210A (7C)
冷却風量	28 m <sup>3</sup> /h, 56 m <sup>3</sup> /h, 168 m <sup>3</sup> /h

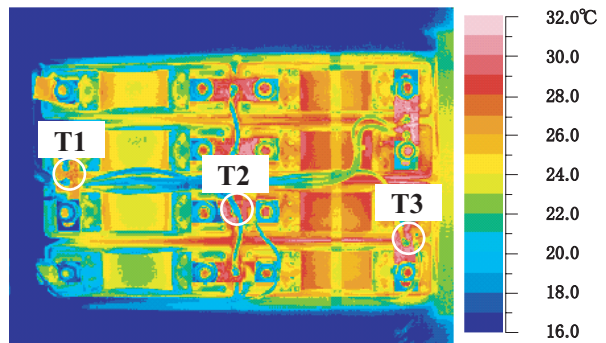


図3 温度分布の一例

(間隔5mm，電流170A，風量56m<sup>3</sup>/h，20分通電時)

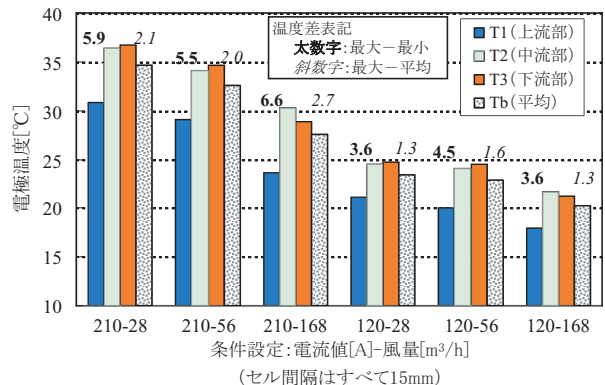


図4 通電後15分経過時の電極温度分布の例

は、各電極の熱伝導と電極周囲の冷却風温度や流れを考慮する必要がある。そこで、本稿では以後、解析を容易にするために、各電極の平均温度  $T_b$  のみを扱い、 $T_b$  を評価指標とする。最大温度と平均温度の差は、図4中の斜体数字が示すように15分通電で最大3℃程度である。平均温度  $T_b$  から最大温度を推定する場合にはこの点に留意する必要がある。

### 3.2 条件毎の温度上昇

各条件で15分通電した際の平均電極温度を図5に示す。各セル間隔ともに、電流値が増加し、風量が減少するほど温度上昇が顕著になっている様子が分かる。一部でこの傾向と逆転している箇所が存在するのは、通電開始時の平均電極温度が一樣でないためである。この影響を排除して比較しやすくするため、次章で初期温度に依存しない特徴を抽出する。なお、図5(a)の一部に数値の空白が存在するのは実施できなかった試番である。

## 4. 温度上昇特性の解析

### 4.1 電池電極の推定到達温度

平均電極温度の時間変化を図6に示す。通電電流  $I_b$  は数十秒おきに充電と放電を切替えている。これは、電池の充電量が100%または0%に達しないためであり、内部発熱パワーは一定電流が継続するのとはほぼ等価となる。この例が示すように、通電期間中の平均電極温度は式(1)で示す一次遅れ応答の曲線によってよく近似され、いずれの条件下でも同様であった。

$$T_b = T_{b\infty} - a \exp(-t/\tau) \dots\dots\dots(1)$$

図6の場合、最小自乗法によって求めた定数は  $T_{b\infty} = 47.5^\circ\text{C}$ 、 $a = 30.7^\circ\text{C}$ 、 $\tau = 980\text{ s}$  である。それぞれ、 $T_{b\infty}$  は平均電極温度の推定到達値を表し、 $a$  は初期値から到達値までの上昇分、 $\tau$  は時定数を表す。算出した推定到達温度  $T_{b\infty}$  を全条件で整理したのが図7である。図5に比べ、各条件による差異が明確に現れている。図5からは読み取るのが困難であったセル間隔の影響についても考察可能

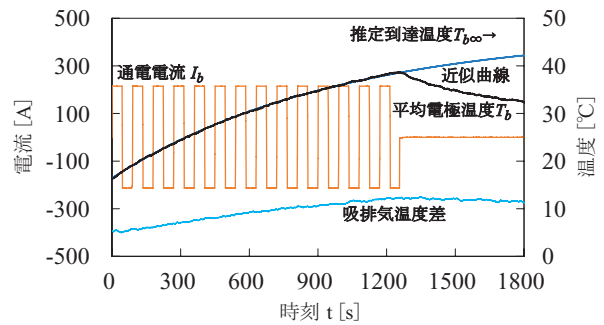


図6 温度変化特性の一例  
(通電電流210A, セル間隔15mm, 風量28m³/h)

であり、風量と電流値を同一として比較すると、セル間隔が大きいほうが推定到達温度は高い傾向がある。この要因は、風量が同一であってもセル間隔が大きいほうが冷却風の流速が遅くなり、冷却風への熱伝達率が低下するためと考えられる。そこで、次節で平均風速を算出する。なお、セル間隔10mmより15mmの推定到達温度が高いという傾向が一部で逆転している。これは吸気温度の差による影響と考えられるが、この影響は4.4節で考慮する。

### 4.2 冷却風の平均風速

図8に電池モジュールの冷却風流路の断面を示す。流路断面積  $S [\text{m}^2]$  は、セル間隔  $g [\text{mm}]$  を用いて、

$$S = \{17 \times (47 \times 4 + 5g) + 123 \times 5g\} \times 10^{-6} \\ = 7.0 \times 10^{-4} g + 3.2 \times 10^{-3} [\text{m}^2] \dots\dots\dots(2)$$

と表せる。風速は場所毎に異なり、例えば筐体床面付近では遅い。しかし、ここでは簡易な指標として式(3)で定義する平均風速  $V$  を用いる。但し、 $Q$  は風量  $[\text{m}^3/\text{s}]$  である。

$$V = Q/S [\text{m/s}] \dots\dots\dots(3)$$

セル間隔  $g$  および風量  $Q$  を与えると、式(2)と(3)から平均風速  $V$  が求まる。 $V$  に対する  $T_{b\infty}$  をプロットしたのが図9であり、このようにほぼ同一曲線上に並ぶ。すな

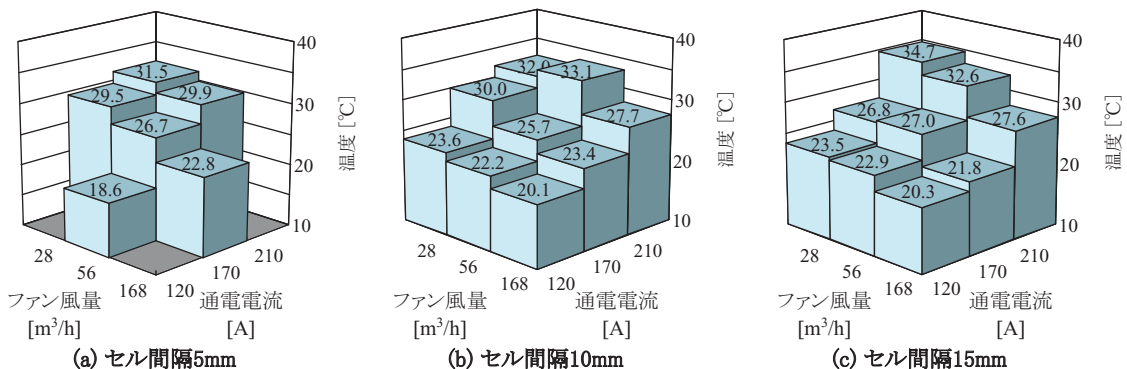


図5 15分間通電時の平均電極温度

特集：車両技術

わち、セル間隔で区別する必要はなく、平均風速のみで冷却性能を評価可能である。以後、セル間隔 $g$ と風量 $Q$ の2条件は式(2),(3)によって平均風速 $V$ に統合する。

4.3 電池の内部発熱量

電池の内部発熱パワーが時間によらず一定であれば、式(1)から電池の等価的な熱容量や熱伝達率を算出することも可能である。しかし、電池の直流内部抵抗 $R_i$ は平均電極温度 $T_b$ に大きく依存するため、実際の内部発熱パワーは時間変化する。供試電池で実測した結果、 $15 \leq T_b \leq 50$ の領域では、定数 $r_1, r_2$ を用いて式(4)で近似可能であった。すなわち、低温時ほど値が大きい。

$$R_i = \frac{r_1}{T_b} + r_2 \dots\dots\dots(4)$$

ここで、電池の内部発熱は式(4)で示す抵抗分でのジュール熱のみと仮定する。実際には充放電中のエントロピー変化による発熱・吸熱を伴う<sup>3)</sup>が、本稿で扱う大電流充放電ではジュール熱に比べて影響が小さいため無視する。 $T_b$ が推定到達値 $T_{b\infty}$ に達した際の電池内部発熱パワー $P_\infty$ は、式(5)で表現できる。

$$P_\infty = R_i I_b^2 = \left( \frac{r_1}{T_{b\infty}} + r_2 \right) I_b^2 \dots\dots\dots(5)$$

4.4 電池の総括熱コンダクタンス

$T_b$ が推定到達値 $T_{b\infty}$ で一定となっている間の熱平衡の関係は式(6)で表される。ただし $K$ は電池セルから環境への総括熱コンダクタンス[W/K]<sup>4)</sup>であり、式(6)を変形した式(7)で定義する。ただし、 $T_a$ は吸気温度[°C]である。

$$P_\infty = K(T_{b\infty} - T_a) \dots\dots\dots(6)$$

$$K = \frac{P_\infty}{T_{b\infty} - T_a} \dots\dots\dots(7)$$

図10に、 $I_b=170A$ の場合の総括熱コンダクタンス $K$ を

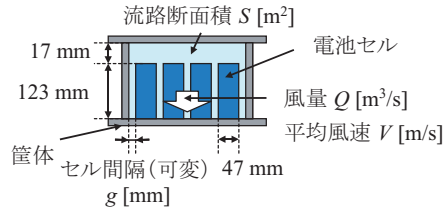


図8 冷却風流路の断面形状

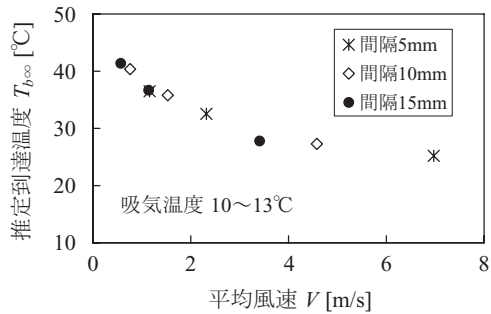


図9 平均風速と推定到達温度 (通電電流 170A)

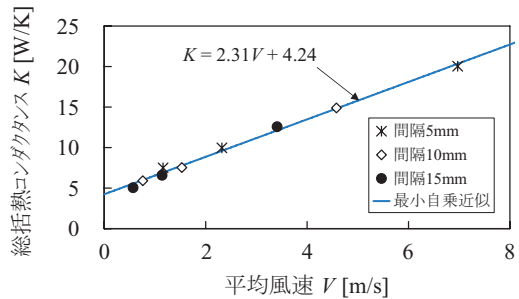


図10 平均風速と総括熱コンダクタンス (通電電流 170A)

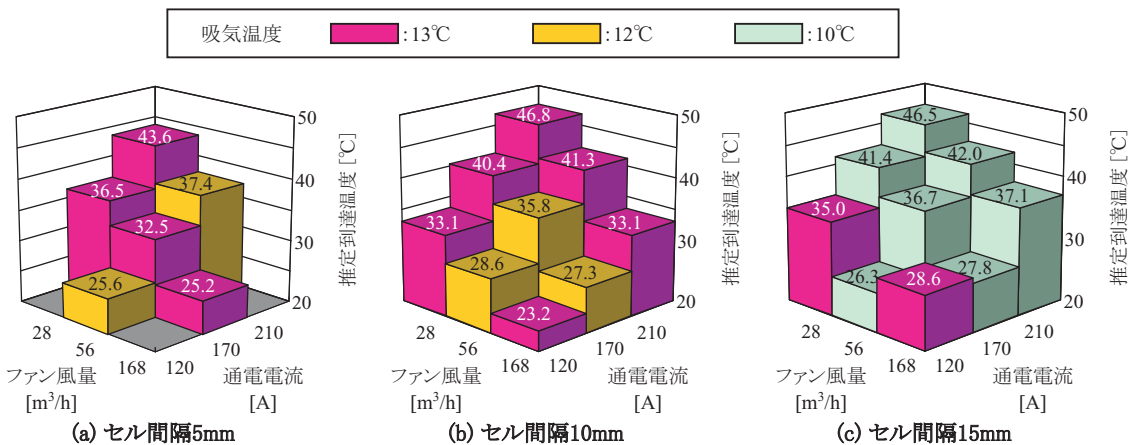


図7 温度上昇カーブから算出した電池電極の推定到達温度

プロットした。設定した風速条件の範囲においては、 $K$  は平均風速  $V$  に対して直線的に増加するため、図中に示す近似直線を求めることができる。平均風速  $V$  が増大するほど放熱特性が向上する傾向を定量的に示すものである。風速 0 m/s における値は、自然対流による熱伝達や筐体等への熱伝導に相当する数値と考えられる。

## 5. 使用条件変化に対応可能な風量設計指針

### 5.1 算出式の導出

図9の実験結果を用いれば、吸気温度が 10～13℃の条件で 170A で連続通電した場合に、例えば、推定到達温度を 30℃以下とするには約 3m/s の平均風速が必要であることが分かる。しかし、電流の条件が異なる場合や、吸気温度の仮定を変更した場合には、再度通電実験を実施する必要性が生じて不便である。そこで以下では、使用条件が異なる場合にも簡便に推定到達温度や必要風量が求まるよう、算出式を導出する。

式(6)に式(5)を代入して整理すると、式(8)となる。

$$KT_{b\infty}^2 - (KT_a + r_2 I_b^2) T_{b\infty} - r_1 I_b^2 = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

これを  $T_{b\infty}$  について解いたのが式(9)である。

$$T_{b\infty} = \frac{1}{2K} (KT_a + r_2 I_b^2 + \sqrt{(KT_a + r_2 I_b^2)^2 + 4K r_1 I_b^2}) \quad \dots\dots(9)$$

ここで  $K$  は、図 10 の近似直線を表す式(10)である。

$$K = k_1 V + k_2 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(9)および式(10)から、推定到達温度  $T_{b\infty}$  が、吸気温度  $T_a$ 、通電電流値  $I_b$ 、平均風速  $V$  によって算出可能である。

一方、式(7)に式(5)と式(10)を代入して平均風速  $V$  について解くと、

$$V = \frac{I_b^2 \left( \frac{r_1}{T_{b\infty} - T_a} + r_2 \right)}{k_1} - \frac{k_2}{k_1} \quad \dots\dots\dots(11)$$

となり、吸気温度  $T_a$ 、通電電流値  $I_b$  の条件で推定到達温度を  $T_{b\infty}$  に抑制するために必要な平均風速  $V$  が算出可能である。 $V$  の値が 0 以下となる場合は、ファンを回す必要がなく、自然対流や筐体等への熱伝導で十分であることを意味する。

### 5.2 算出式の精度

図 11 では、実測ベースの推定最高温度  $T_{b\infty}$  と比較することで算出式(9)の精度を検討した。実測は吸気温度 10℃～13℃にて実施したため、計算値は吸気温度 10℃と 13℃の 2 通りを示した。その結果、図 11(a) の通電電流 170A の場合では、ほぼ計算値の 2 曲線の内側に実測ベースのプロットが位置し、よく一致することが分かる。図 11(b) の通電電流 210A の場合では計算値から 2℃程度外れた

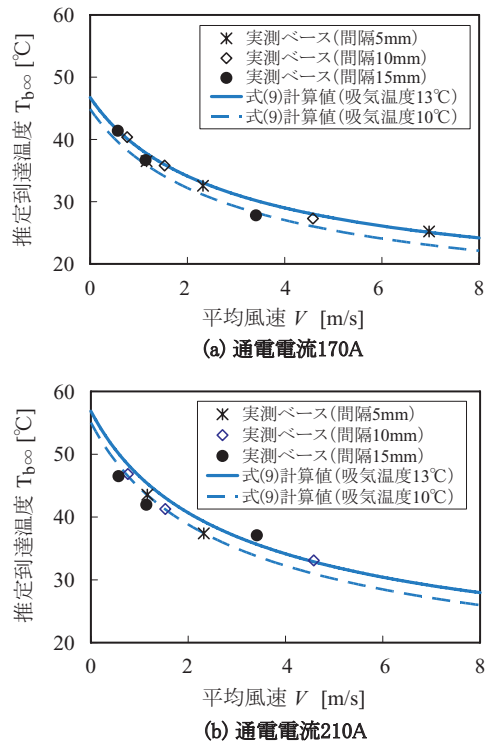


図 11 推定到達温度算出式の精度検証

プロットも存在するが、実用上問題ない範囲と言える。これらから、実測以外の使用条件にも適用可能な算出式が得られたと考えられる。

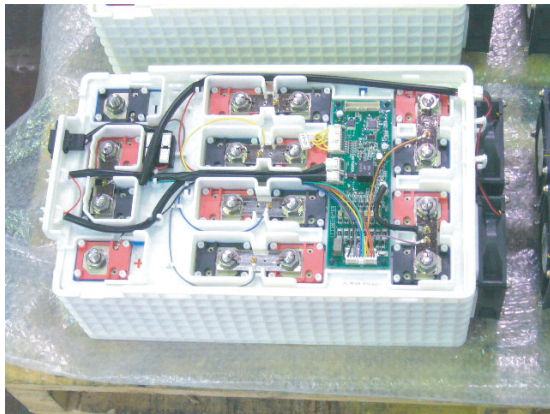
新規電池の風量設計をする場合は、少なくとも 2 通りの平均風速において通電実験を実施して推定到達温度と内部抵抗の式(4)を得て、式(7)から総括熱コンダクタンス  $K$  の実験式(10)を求めれば、設計指針である式(9)と式(11)が得られる。

## 6. LRV 用電池モジュールの開発

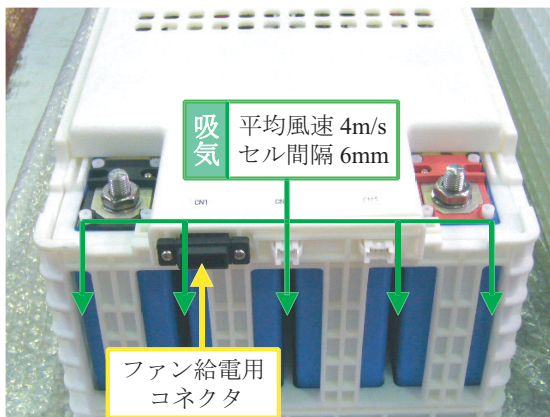
LRV 搭載用に開発した電池モジュール LIM30H-8R<sup>5)</sup> の外観を図 12 に示す。実験用モジュールと同じく角型セルを 8 セル直列接続しており、背面に 2 台の冷却ファンを備える。ファンの電源は車両側の要求から DC24V タイプに変更されている。セル間隔は固定であり、セルが移動しないように底面部と上面部にスペーサが入っている。このため、冷却風は上下スペーサの中間、すなわち電池セルの側面を流れる。モジュールの筐体やスペーサには樹脂材料を使用して難燃性・絶縁を確保しつつ軽量化を図っている。

冷却性能の目標は、吸気温度 30℃ の環境で 300A の連続通電をしても電池温度が 40℃ を超えないことと定めた。開発した架線レス LRV の電池システムは、図 12 に示すモジュールを 21 直列 × 4 並列接続して構成する。よって、全体で 300A の通電は、モジュールで 75A の通

特集：車両技術



(a) 上部部スペーサと背面ファン



(b) 前面の吸気部

図12 開発したLRV用電池モジュールの外観

電に相当する。電池の経年劣化によって内部抵抗が上昇しても冷却性能が不足しないよう、式(4)の内部抵抗は劣化時を想定して2倍と仮定する。実験用モジュールに比べて、セル上面(放熱表面積の約10%)には冷却風が当らなくなるため、同一風速での総括熱コンダクタンスは減少する。この減少率を概算で0.8倍と見積もる。

以上の仮定を式(9)に代入して、図13の計算値を得た。ここから、目標の冷却性能とするには1.6m/s以上の平均風速が必要であることが判明した。これを基に選定したファンは平均風速4m/s以上の性能であり、連続運転しなくても十分な冷却性能となることが期待される。

また、セル間隔は6mmと決定した。この理由は、5mm～15mmの範囲では、冷却性能を左右するのは平均風速のみと考えてよく、セル間隔による差異がなかったためである。これに加えて、セル間隔が小さいほうがモジュールの体積を削減できるためである。セル間隔を5mm以下とする場合には、冷却風の圧力損失が増大してファンの種類が限定される点や、セル間に吸い込まれた異物が詰まる可能性に注意する必要がある。

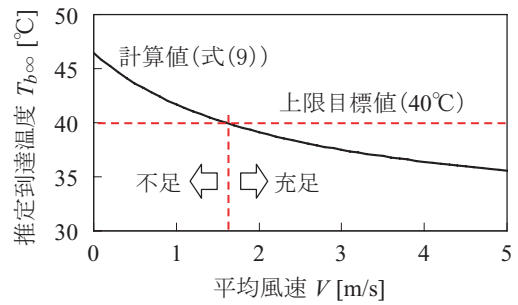


図13 LRV電池モジュール用計算値  
(劣化時内部抵抗2倍, 通電電流75A, 吸気30°C)

7. まとめ

車載リチウムイオン二次電池を安全かつ経済的に使用するためには冷却設計が重要である。著者らは、実電池を用いた通電実験に基づいて、様々な使用条件(通電電流, 内部抵抗, 吸気温度)に簡便に適用可能な冷却風量の設計指針を得た。この指針に従って架線レスLRVに搭載した電池モジュールの所要冷却性能を計算したところ、必要風速は1.6m/s以上と求まった。

LRV搭載用電池の実際の冷却性能については、今後様々な条件下でバッテリーを使用しながらデータ収集していく予定である。

なお、本研究開発は、経済産業省からの交付金を原資として実施する「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一環として、NEDO技術開発機構との委託契約に基づき実施した。

文献

- 1) 米山, 田口, 小笠, 山本: リチウムイオン二次電池の放電深度による寿命予測法, 平成17年電気学会産業応用部門大会, 3-32, Ⅲ - pp.193, 2005
- 2) H.Yoshida, N.Imamura, T.Inoue, K.Komada "Capacity Loss Mechanism of Space Lithium-Ion Cells and Its Life Estimation Method," Electrochemistry Vol.71, No.12, pp.1018-1024, 2003.
- 3) 乾, 渡瀬, 花本, 綾部: 円筒型リチウムイオン二次電池内温度・電流分布の簡易発熱モデルを用いた2次元解析, 電気学会論文誌B, 124巻8号, pp.1041-1048, 2004
- 4) 庄司: 伝熱工学, 東京大学出版会, p.70, 1995
- 5) 西山, 中本, 瀬山: 鉄道車両用リチウムイオン電池の開発, 鉄道車両と技術, No.135, pp.10-14, 2007