

論文・解説

22

## リチウムイオン電池内部温度モデリング技術の開発 Development of LIB Internal Thermal Modeling Technology

大路 潔<sup>\*1</sup> 富岡 沙絵子<sup>\*2</sup> 吉本 淳<sup>\*3</sup>  
Kiyoshi Oji Saeko Tomioka Atsushi Yoshimoto  
安永 亨<sup>\*4</sup> 庄司 明<sup>\*5</sup> 藤田 弘輝<sup>\*6</sup>  
Toru Yasunaga Akira Shoji Hiroki Fujita

### 要約

電動車両においては、リチウムイオン電池の充放電能力を引き出すことが車両性能に直結することから、電池マネジメント技術の開発が進められている。特に、電気化学反応が発生している電池セル内部の温度挙動を推定するモデル化手法は、電池能力を引き出す重要な技術である。一方、モデルベース開発を実現するには、高い推定精度を持ちつつ、高速に演算できる温度予測モデルが求められている。そこで、車載用リチウムイオン電池セルを対象に、車載で想定される温調環境下においても内部温度を推定可能なモデリング技術を開発した。内部熱特性の計測/同定、及び内部熱流れを解明することで、高速かつ高精度化を実現し、電池内部温度の実測値と予実差検証を行った。

### Abstract

In electric-powered vehicles, development of a battery management technology is underway because the ability to draw out capabilities of lithium-ion batteries is directly linked to vehicle performance. In particular, the modeling method for estimating the temperature behavior inside the battery cell where the electrochemical reaction occurs is an important technique for bringing out the battery performance. On the other hand, in order to realize Model Base Development, a temperature prediction model that can be operated at high speed while maintaining high estimation accuracy is required. Therefore, a modeling technology that can estimate the internal temperature of automotive lithium-ion battery cells even in the temperature-controlled environment expected in the vehicle was developed. By measuring/identifying the internal thermal characteristics and clarifying the internal heat flow, we achieved a high-speed and high-accuracy modeling technology, and verified the difference between the measured value and the predicted temperature inside the battery.

**Key words :** EV and HEV systems, Battery technology, Lithium ion battery, Cooling/Heat and temperature management

### 1. はじめに

近年、環境問題への対応として、車の電動化が加速している。電動車両においては、リチウムイオン電池（以降、LIB）の充放電能力を引き出すことが、車両性能に直結することから、電池マネジメント技術の開発が進められている。特に、その電気化学反応の温度依存性が大きいことから、各社でLIBの温度管理は、要の技術となっている<sup>(1)~(4)</sup>。更にその中でも、電気化学反応が発生している電池セル内部の温度挙動を推定する手法は、電池能力を引き出す重要な技術である。既に、電池セル内部の

温度を推定する技術構築の取り組みもなされている<sup>(5)(6)</sup>。しかし、これら取組の対象は、車載用に比べ、小型の電池セルであり、電池セル全体に風を当てるなど、車載とは異なる温調状態での検証にとどまっている。一方、車両の開発効率化には、モデルベース開発（MBD）を行うことが有効であり、車載条件下で、高速、かつ高精度に演算可能なモデルが求められている。そこで、本取り組みでは、車載用の大型電池セルを対象とし、車載を想定した温調環境において、内部の温度挙動を高速、かつ高精度に推定可能な電池セル内部温度モデル化技術の開発を目的とする。

\*1,2,5,6 技術研究所  
Technical Research Center

\*3,4 電駆・PT制御部品開発部  
Electric Drive & PT Control Parts Development Dept.

## 2. LIB 内部温度管理とモデル構築方法について

### 2.1 LIB 内部温度管理とモデル構築方法について

LIB の温度依存性の一例を、Fig. 1 に示す。LIB の出力や、容量維持率 (SOH-C) はその温度によって、大幅に変化する。これは、1 章で述べたように、電池セル内部の電気化学反応に伴うものである。温度が低い場合は、Li イオンの移動速度が低下するため、出力が低下する。一方、温度が高い場合は、電解液の分解速度が上がる等により劣化が促進し、容量維持率が低下する。このため、容量を維持しつつ、高出力を可能となる温度域は、例えば約 10°C から 40°C といったようにとても狭い範囲となる。また、電池セル内部温度 (以降、内部温度) は、電池セルサイズや、内部熱特性によって、電池セル表面温度 (以降、表面温度) と乖離する場合がある。その温度差は、式(1)に示すように、内部と表面間の移動熱量と、内部熱伝導率、内部寸法によって見積もることができる。本式を用いて机上計算した結果例を Fig. 2 に示す。ここでは、車載を想定し、電池セル底面を冷却面としている。また、発熱量を移動熱量として計算している。電流レートに応じて、温度差は拡大していくことが分かる。電流レートが 2C (30 分で SOC100% 使用する電流値) 超では、内部温度と表面温度差は 10°C に到達した。このように、調温目標値は狭いことに加え、内部と表面の温度差が発生することから、その充放電能力を引き出すには内部温度の緻密な管理が必要であり、その実現のために、電池セル内部の温度推定の高精度化が求められる。

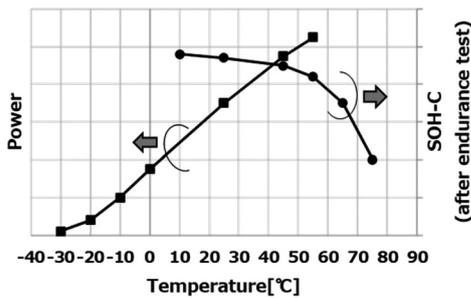


Fig. 1 Temperature Dependence of the LIB

$$\Delta T_{inner-surface} = Q_{inner-surface} \frac{L}{\alpha A} \quad (1)$$

- $\Delta T_{inner-surface}$  : 内部表面温度差
- $Q_{inner-surface}$  : 内部表面移動熱量
- $L$  : 熱移動距離
- $\alpha$  : 内部熱伝導率
- $A$  : 熱伝導面積

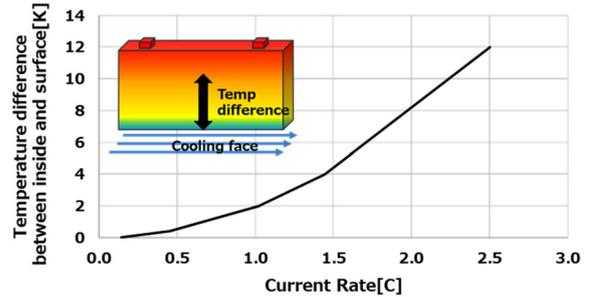


Fig. 2 Example of the LIB Temperature Difference between Inside and Surface

### 2.2 高速高精度モデル構築方法について

環境温度や、温調制御の変化に対応し、高速、かつ高精度な内部温度モデルを実現するには、式(1)で示した温度差発生メカニズムに基づき、定量的に、かつ必要最小限な構成で表現できていなければならない。そこで、まず、電池セル内部の発熱、伝熱特性を把握し、3次元解析で熱流れによる温度差発生メカニズムを解明する。次に、メカニズムを踏まえた主要な熱流れのみを抽出し、簡易的な 1D 伝熱等価回路に縮退することで、高速、かつ高精度モデルを実現することとした。更に、モデル化を容易化するために、電池内部の材料特性など、詳細な材料分析が必要な情報は用いず、実験データとモデルを組み合わせた内部熱特性取得を行うこととした。本モデル作成プロセスを Fig. 3 に示す。初めに、発熱特性と、伝熱特性の一つである内部熱容量の同定を行う。次に、3次元モデルを構築し、内部熱流れを分析、それに基づき、1D 熱等価回路に縮退し、最後に実験データと構築した等価回路を用い、残された未知パラメーターの同定を行う。これらの詳細を、3 章と 4 章に述べ、構築したモデルの精度検証を 5 章に述べる。なお、本取り組みでは、車載用の角缶形状で、内部電極体は積層タイプの LIB を対象とした。

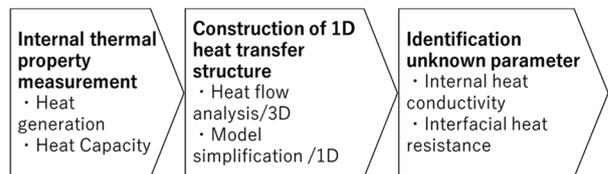


Fig. 3 Process of Thermal Model Construction

## 3. 電池内部熱特性取得方法

### 3.1 電池ジュール熱、分極熱発熱量

電池発熱量の式を式(2)に示す。今回対象とした発熱要素は、電子移動抵抗に伴うジュール熱、イオン移動に伴う分極熱、及びエントロピー変化熱とした。

ジュール熱、分極熱は、電気挙動を再現した等価回路モデルを用いて表現している。等価回路を Fig. 4 に、

ジュール熱、及び分極熱の合計熱量の算出式を式(3)に示す。等価回路中の抵抗成分、コンデンサパラメータは、温度、SOC 依存性をもっており、各条件において、電流パルスを与えた際の電圧挙動から、同定を行い、マップ化して使用している。本等価回路にて、モード走行時の電圧再現性を確認した結果を Fig. 5 示す。電圧変動の予実差は、最大でも 8% とよく一致することを確認している。低温や、低 SOC、大電流では、誤差は拡大するものの、EV 常用域では、同レベルでの精度を確保することが可能である。

$$Q_{bat} = Q_{joule} + Q_{polariz} + Q_{entropy} \quad (2)$$

$Q_{joule}$  : ジュール熱

$Q_{polariz}$  : 分極熱

$Q_{entropy}$  : エントロピー変化熱

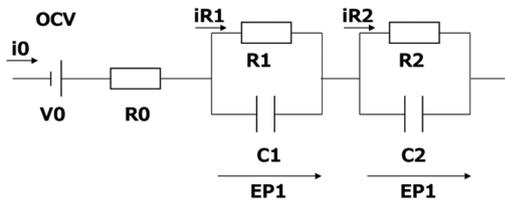


Fig. 4 Equivalent Circuit Model

$$\begin{aligned} Q_{jule} + Q_{polariz} &= i_0^2 R_0 + i_{R1}^2 R_1 + i_{R2}^2 R_2 \\ &= i_0^2 R_0 + \frac{EP_1^2}{R_1} + \frac{EP_2^2}{R_2} \end{aligned} \quad (3)$$

$i_0$  : 電流  $EP_1$  :  $R_1 C_1$  並列回路部電位

$i_{R1}$  :  $R_1$  通過電流  $EP_2$  :  $R_2 C_2$  並列回路部電位

$i_{R2}$  :  $R_2$  通過電流

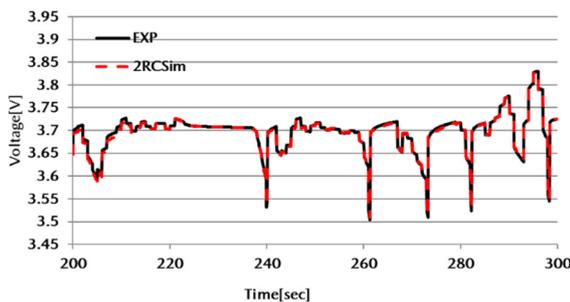


Fig. 5 Validation Result of Equivalent Circuit Model

### 3.2 エントロピー変化熱

エントロピー変化熱は、リチウムイオンの挿入脱離によるエントロピー変化に伴う吸発熱であり、その熱量による温度変化の影響は、数°C程度ではあるものの、発熱のみならず、吸熱現象もあるため、傾向の再現性や、予実差数°Cレベルの高精度化を行うには、無視できない。また、電池内部の構造や材料の改良により、ジュール熱、分極熱は、低減が進んでいくことが考えられるため、相

対的に、エントロピー変化熱の占める割合が大きくなることから、考慮する必要性が高まることが考えられる。

エントロピー変化熱の SOC 依存性は、式(4)に示しているように、エントロピー変化マップ  $\Delta S$  (SOC) によって表現される。エントロピー変化  $\Delta S$  の取得方法にはいくつかの報告例<sup>(7)~(10)</sup>があり、起電力の温度依存性からエントロピー変化  $\Delta S$  値を導出する方法 (①起電力計測法) と、低レートで充放電させて、直接熱量を計測する方法 (②熱量計測方法) である。Table 1 に、それぞれの概要と特徴を示す。

$$Q_{entropy} = \frac{T_{bat} \cdot I \cdot \Delta S(SOC)}{F} \quad (4)$$

$T_{bat}$  : 電池セル内部温度  $I$  : 電流

$\Delta S$  : エントロピー変化  $F$  : ファラデー定数

Table 1 Identification Method of Entropy Change

Method	Howto	Required time	Precedents
① Method of OCV measurement	Measure OCV Change when Temp changes $\Delta S = \frac{\partial V_{ocv}}{\partial T_{bat}}$	~10days SOC 20point adjustment 1h/SOC Temp Control 10h/SOC	General method
② Method of Heat Measurement	Measure the Amount of Heat at Low Rates $\Delta S = \frac{F \cdot I_{bat} \cdot Q_{bat}}{T_{bat}}$	~1days SOC Continuous Heat Measurement 20h (0.05C)	Netzsch (Coin Cell) Several research institutes (Large Cell)

OCV 計測法 (Table 1 中①) は、計測作業は比較的容易ではあるが、数 mV ~ 数十 mV レベルの微小な電圧挙動を計測できる環境と、計測時間を要する。特に、計測時間は、内部温度が安定していると判断できるように、十分な時間を取る必要がある。このため、計測 SOC ポイントが多くなると多くの装置時間が必要となる。一方、熱量計測方法 (Table 1 中②) では、低レートでの充放電を行うことで、エントロピー変化値の SOC 依存性を連続的に計測することが可能である。結果、前者の手法に比べて、計測時間を短縮することが可能である。本取り組みでは、熱量計測方法を用いることとしたが、極低レートでの微小熱量を漏らすことなく計測する環境構築はせず、比較的低レートで計測しつつ、混入するジュール熱、分極熱を 3.2. で示したモデルを用いて補正し、エントロピー変化熱を導出するハイブリッド同定を行った。

用いた計測環境を Fig. 6 に、エントロピー変化熱導出式を式(5)に示す。

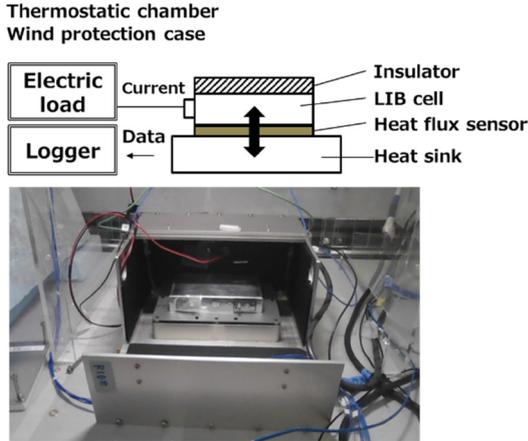


Fig. 6 Test Configuration of LIB Thermal Measurement

$$Q_{entropy} = Q_{measure} - (Q_{joule} + Q_{polariz}) \quad (5)$$

$Q_{measure}$  : 熱流センサー計測熱

この方法では、熱量計測値とモデル双方に誤差要因があるため、総合的に誤差を最小化させる適切な電流レート選定が必要である。考え方を Fig. 7 に、導出式を式(6)(7)(8)に示す。熱量計測誤差は、熱流センサーの感度と用いたロガーの分解能から導出し、ジュール熱、分極熱誤差は、モデルの抵抗誤差から演算した。結果、約 0.04C が適切であることを導出した。以上より、取得したエントロピー変化を Fig. 8 に示す。導出したターゲット値に近い 0.05C において、OCV 計測法と同等の値を連続的に得ることができた。また、本エントロピー変化を用いた電池温度挙動の予実差を Fig. 9 に示す。エントロピー変化を考慮することで、後半の定レート充電における吸熱と発熱反応が切り替わることで上下限する温度挙動を再現できることを確認した。

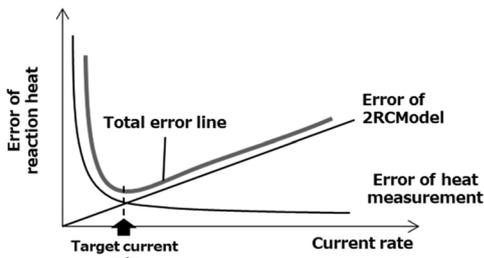


Fig. 7 Concept of Identification Accuracy

$$\Delta S_{error} = \left( \frac{Q_{measure\_error}}{I} + R_{error} \cdot I \right) \cdot \frac{T}{F} \quad (6)$$

$$\frac{d|\Delta S_{error}|}{dI} = 0 \quad (7)$$

$$I_{target} = \sqrt{\frac{Q_{measure\_error}}{R_{error}}} \cong 1.8[A] \cong 0.04[C] \quad (8)$$

$\Delta S_{error}$  : エントロピー変化誤差

$Q_{measure\_error}$  : 熱量計測誤差

$R_{error}$  : 等価回路抵抗誤差

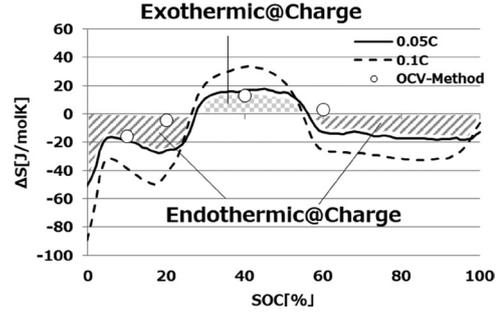


Fig. 8 Curve of the Entropy Change

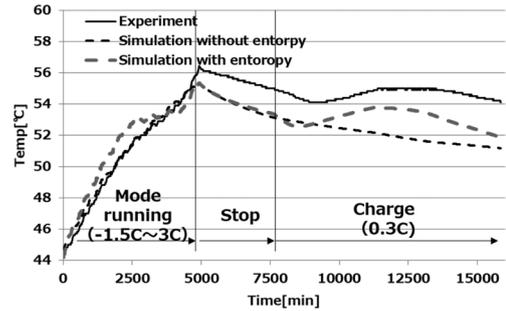


Fig. 9 Effect of Entropy Change Consideration

### 3.3 内部熱容量

次に、電池内部熱容量の導出方法について述べる。電池セルケースや端子の熱容量は、形状や材料特性から導出できるものの、内部の熱容量は、設計情報が入手できない場合、導出が困難である。そのため、電池セル全体の熱容量を計測し、ケースや端子の熱容量を差し引くことで、内部熱容量を導出することとした。また、電池セル全体の熱容量計測には、計測の容易化をねらい 3.2. にて示した熱流計測装置を用いることとした。式(9)に導出式を示す。熱流計測装置を恒温槽内に入れ、槽内設定温度を変化させる。このときに電池セルとヒートシンク間の熱流センサーが検出した通過熱量を積算し導出する。検証用にアルミニウムの熱容量計測を実施し、物性値から導出される値との差異を確認した。電池セル計測値とともに結果を Fig. 10 に示す。大きさを離れた 2 つのアルミニウムにおける推定誤差は、平均 5% であることから、本簡易的手法でも熱容量計測が可能であることを確認した。前述のように、得られた電池セルの熱容量から、ケースや端子の熱容量を差し引くことで、内部熱容量導出を実現した。なお、本手法は、一部で実施されており<sup>(12)</sup>、本取り組みでは、電池セルとヒートシンク間以外の電池セル面にも熱流センサーを取り付けることで、高精度化を試みた。

$$C_{inner} = \frac{\int Q_{measure} dt}{\Delta T_{bat}} - (C_{case} + C_{terminal}) \quad (9)$$

$C_{inner}$  : 電池セル内部熱容量

$C_{case}$  : 電池セルケース熱容量

$C_{terminal}$  : 電池セル計測誤差

$\Delta T_{bat}$  : 電池セル温度変化量

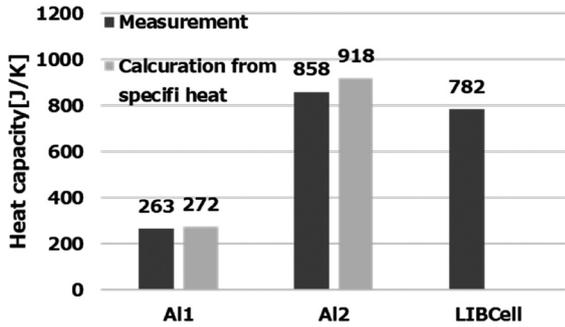


Fig. 10 Heat Capacity of Al-Block and LIB Cell

### 4. 1D 熱等価回路モデルの構築

#### 4.1 電池内部熱流れ分析による縮退

2章で述べたように、3章で取得した熱特性を用い、3次元解析を行い、電池内部の熱流れを分析した。この時、モジュール化されて搭載した状態を想定し、底面を冷却面、電池セルの広いケース側面は断熱とした。3次元熱解析による熱流れ分析結果の一例を Fig. 11 に示す。電池内部で発生した熱量は、冷却面であるケース底面に伝わり上下の温度分布を発生させている。それとともに、広いケース側面に伝わり、ケース伝いにケース底面に伝熱し、放熱されていることが分かった。これを踏まえ、構築した熱等価回路を Fig. 12 に示す。温度分布と熱流れを表現可能なように最小要素で構築した結果、熱容量、熱抵抗を合わせて 30 個の 1D 熱等価回路とすることができた。なお、電池内部の熱抵抗は、後に同定しており、ここでは、仮の値を使用している。

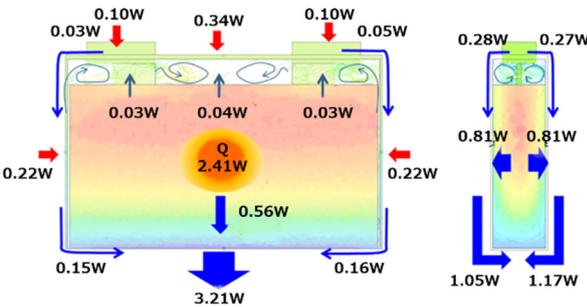


Fig. 11 Results of Internal Heat Flow 3D Analysis

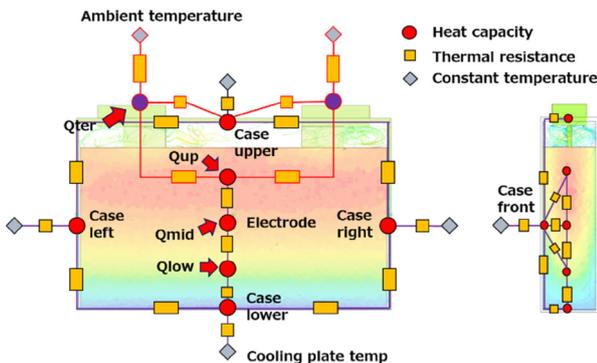


Fig. 12 LIB Cell Thermal Equivalent Circuit

#### 4.2 内部未知パラメーター同定

これまでに、電池セル内部の発熱量、熱容量の同定を行ってきた。ここでは、残った内部未知パラメーターである、内部熱抵抗成分の同定について述べる。

Fig. 13 に同定の全体像を示す。特定の電流モードで充放電を行った際の温度上昇と表面熱流束を利用して、前節に構築した熱等価回路中の内部熱抵抗値の同定を行った。今回対象とした熱抵抗は、電解液、正負極の活物質、集電体、バインダーで構成された電極体、その周囲の絶縁材料の熱抵抗、そして、其々の界面熱抵抗に当たる。前節にて述べたように、熱等価回路は熱流れを再現するために最小化されており、この部分の熱抵抗は、LIBセル高さ／奥行き軸ごとに1つの熱抵抗で表現されている。それに従い、個別部材や、材料ごとに同定はせずに、一体として同定を行った。これにより、同定時間の短縮が可能であるとともに、1Dモデル固有である、「離散化した熱容量で平均温度を表現しつつ、局所温度の再現を行う相反問題」の解消につながっていると考える。なお、本同定作業には、5.1に述べる電池内部温度結果も同定に使用しており、精度向上につなげている。以上により、1D熱等価回路の構築を実現した。

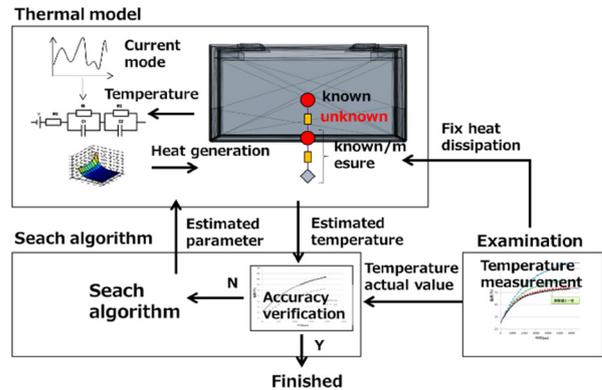


Fig. 13 Identification Structure of Unknown Parameter

### 5. 予実差検証

#### 5.1 内部温度計測

対象電池セルの内部温度計測を行い、予実差検証を行った。温度計測点、及び実験構成を Fig. 14 に示す。温度計測は、電池セル内部の下部、中央部、上部、各表面とし、表面熱伝達係数を把握するために、熱流束センサーを表面に設置した。また、モジュール状態を想定し、側面に断熱材を当てるとともに、底面に水冷冷却プレートを設置した。この装置を恒温槽内に設置することで、任意の環境温度と冷却温度条件での検証を可能としている。実験条件一覧を Table 2 に示す。このうち環境温度 25°C、冷却水温度 15°Cでの温度、熱流束データを 4.2 で述べた未知パラメーターの同定データとして使用し、他条件でのデータを、検証データとした。温度条件ごとに、

複数の電流レートの充放電パルスを加えて、各レートにおいて温度が収束するまで計測している。Fig. 15 に、計測データの一例を示す。最高環境温度と最低冷却水温度の条件で表面と内部の温度差は 10°C を超え最大となった。

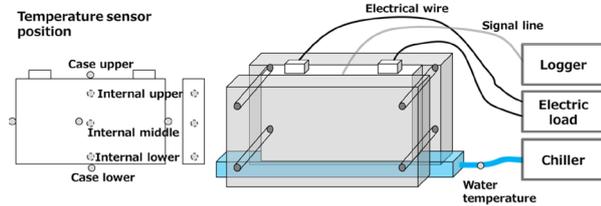


Fig. 14 Experimental Apparatus of LIB Temperature

Table 2 Condition List of Examination

		Cooling water temperature			
		Without cooling water	5°C	15°C	25°C
Ambient temperature	10°C	—	—	—	○
	25°C	○	—	Training data	—
	45°C	—	○	○	—

○ : Measured  
 — : Not measured

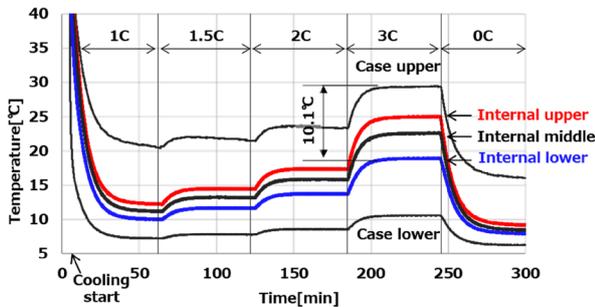


Fig. 15 Results of Temperature Measure

5.2 予実差検証結果

5.1 で述べた実験データとモデルとの予実差について、時系列で示したものを、Fig. 16 に、条件ごとに集計したものを Fig. 17 に示す。時系列のグラフでは、発熱量を変化させていった際も、各部の温度傾向がよく再現できていることが確認できた。また、各条件一覧では、予実散布グラフで示しているように、環境温度、冷却温度が変わっても、モデル値の予実差は最大で 3°C 台、平均では、1°C と精度が高いことが確認できた。

なお、本パルス充放電試験で SOC 変動は小さく、前述の電池エントロピー変化熱の影響は含まれていないため、モード走行などの実用状態での予実差は多少拡大すると考える。

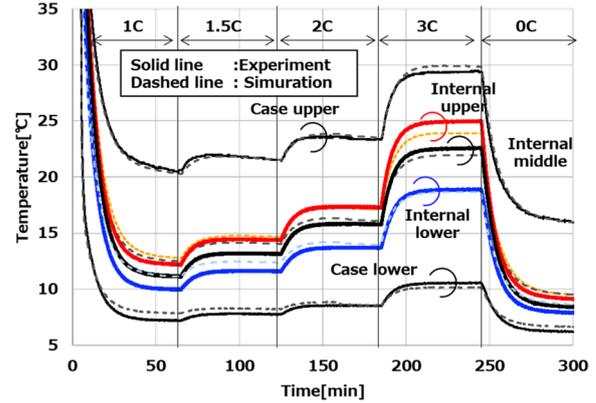
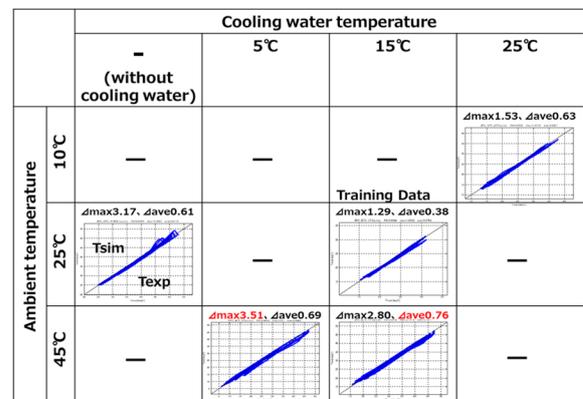


Fig. 16 Comparison Experiment with Simulation (Ambient Temp=45°C Cooling Water Temp=5°C)



- : Not measured

Fig. 17 Validation of LIB Temperature

6. おわりに

1) LIB セル内部のエントロピー変化や熱容量、熱抵抗を表面温度、表面熱流値、モデルを組み合わせ、内部の詳細設計情報を得ずとも、同定できる手法を構築し、電池内部温度モデル化技術を開発した。

2) 取得した内部熱特性を用いた 3 次元解析により、LIB セル内部の熱流れを解明し、角型セルの場合、ケースを伝わる熱流れが大きく影響していることを示した。

3) 3 次元解析で明らかにした主要熱流れを踏まえ縮退した 1D 熱等価回路にて、予実差検証を行い、車載用の大型セルで、車載を想定した温調環境においても、内部の温度挙動を高精度に推定できることを示した。

なお、本内容は、公益社団法人自動車技術会「2023 年春季大会学術講演予稿集」に掲載されたものである。

参考文献

- (1) 長島富雄ら：電動車バッテリーモジュール向け熱伝導シート部材の熱抵抗保証方法確立，自動車技術会 2021 年秋季大会学術講演会 (2021)
- (2) 松本貴郁ら：冷媒 2 次ループを用いたサーモサイフォン式電池冷却システムの開発，自動車技術会

2020年春季大会学術講演会 (2020)

- (3) 山添孝徳ら：電気自動車用電池パック冷却技術 相変化材料を用いた冷却方式，自動車技術会 2019 年秋季大会学術講演会 (2019)
- (4) 浮田哲嗣ら：空冷システムにおける電池温度変化予測手法の開発，自動車技術会 2017 年秋季大会学術講演会 (2017)
- (5) 加藤啓路；山本祐介；林 磊；福井正博：リチウムイオン蓄電池の熱特性解析モデルの構築と内部温度推定手法，第 54 回電池討論会 (2013)
- (6) 乾義尚ら：リチウムイオン蓄電池の熱特性解析モデルの構築と内部温度推定手法，電気学会論文誌電学論 B124 巻 8 号 (2004)
- (7) 齋藤喜康ら：開回路電圧の温度依存性評価によるリチウムイオン電池の反応エントロピー変化の評価，第 58 回電池討論会 (2017)
- (8) 川瀬誠ら：宇宙用リチウムイオン電池の吸発熱および構造変化の相関把握，第 58 回電池討論会 (2017)
- (9) 塚本修ら：リチウムイオン電池の充放電における熱的安定性評価，第 55 回電池討論会 (2014)
- (10) 山内悟留ら：リチウムイオン二次電池の熱量および熱容量測定，第 58 回電池討論会 (2017)

■著 者■



大路 潔



富岡 沙絵子



吉本 淳



安永 亨

庄司 明



藤田 弘輝