

蓄電池冷却のモデル化と検証

北川 友貴 瀬川 明大 福井 正博

立命館大学大学院 理工学研究科
〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1
E-mail: mfukui@se.ritsumeai.ac.jp

あらまし 本稿では蓄電池の発熱と冷却に関して、理論と実験結果を述べる。まず、発熱と冷却の理論を述べ、次に単一蓄電池の冷却効果を測定する。これらの結果から、最も電力効率の良い冷却方法を議論する。次に組蓄電池において、場所における冷却効率の違いについて述べる。

キーワード 蓄電池、発熱、冷却

Modeling and Verification of Battery Cooling

Yuki KITAGAWA, Akihiro SEGAWA, and Masahiro FUKUI

[†]Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan
[†]E-mail: mfukui@se.ritsumeai.ac.jp

Abstract This paper describes theory and an experimental result about generation of heat and cooling of a Li-ion battery. First, the theory of generation of heat and cooling is described and then the chilling effect of a single battery is measured. From these results, it argues about a chilling method with the most sufficient electric power efficiency. Next, in a stacked cell battery, the difference in the cooling efficiency in a place is described.

Keywords Battery, heat, cooling

1. 序論

現在、低炭素・省エネルギー社会の実現が求められている。自然エネルギーの多くは、天候などに左右されるため発電量が不安定であるが、据置型の蓄電池を用いることによって、安定して電力を活用することができる。

リチウムイオン蓄電池は、繰り返し充放電することができることや、エネルギー密度が高い、メモリ効果が少ない、自己放電が少ないなどの

優れた特長をもつ。そのため、据置型の蓄電池以外にも、電気自動車(EV)や、携帯電話、スマートフォン、パソコンなどのモバイル機器など、多くの分野で広く採用されている。

リチウムイオン蓄電池は比較的劣化が少ない蓄電池とされるが、高価であるため、劣化を抑えた使用が望まれる。蓄電池劣化には様々な要因があるが、負極活物質表面におけるSEI生成や、正極活物質における立方晶化などの化学現象が温度により加速されることから、蓄電池の温度管理の重要性が求められている[1, 2]。図

1に蓄電池使用時における蓄電池容量の減少による蓄電池劣化の例を示す[3]. 横軸は充放電回数を示すサイクル回数, 縦軸に容量の劣化比率を環境温度別に示す. 環境温度の上昇に伴い, 劣化が加速されていることがうかがえる.

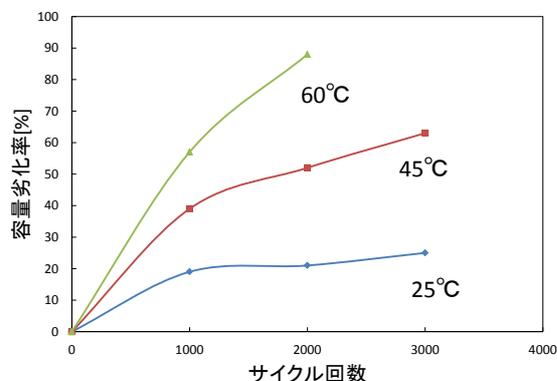


図1 蓄電池劣化の温度依存性

蓄電池は, 充放電に伴うジュール発熱により, 温度が上昇する. 著者らの手元にある 18650 型蓄電池を用いた実験によれば, 図2に示すような温度上昇が観測される. 電流量の上昇に伴い, 温度も上がる. ここで, 蓄電池の充放電において, 電流は[C] (シー) という単位を用いる. 電流 1C とは, 1 時間で容量を放電しきる電流値, 2C とは 0.5 時間で容量を放電しきる電流値である. 蓄電池の充電容量によらず, 蓄電池に対する負荷を表現する単位として用いられる.

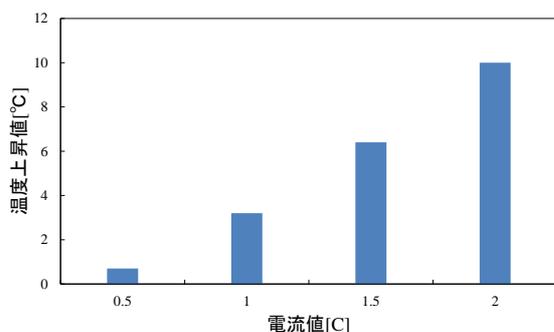


図2 充電電流と温度上昇

以上のことから, 蓄電池の温度を低く抑えるためには, 特に充放電時の蓄電池の温度上昇を抑えることが重要である. 本稿では, 蓄電池の発熱と冷却に関して, 理論と実験結果を述べると共に, それらの実験結果から, 最も電力効率の良い冷却方法を議論する. また, 組蓄電池においては, 場所における冷却効率の違いについて実験結果に基づき議論する.

本稿における実験では, 各電流値で環境温度を 25°C に設定し, 上限電圧 (4.2V) まで充電を行った. 使用したリチウムイオン蓄電池は 18650 型である. 詳細の仕様を表1に示す.

表1 実験に使用した 18650 型蓄電池の仕様

公称電圧		3.6V
公称容量		2250mAh
寸法	直径	最大 18.6mm
	高さ	最大 65.2mm
質量		約 44g

2. 理論

2.1. 発熱と放熱

熱が発生する要因として, 大きく2つある. その1つが蓄電池の内部抵抗によるジュール発熱 Q_p [J/S] であり, (1)式で示される i [A] は蓄電池の放電電流, V_0 [V] は蓄電池電圧, V_{OC} [V] は開回路電圧, R_n [Ω] は蓄電池の内部抵抗である. 2つ目が化学反応によるエントロピー発熱 Q_s [J/S] であり, (2)式で示される. T_{in} [K] は蓄電池の内部温度である.

エントロピー発熱は充電時, 吸熱となる. 2つの発熱因子により生じた熱は, 蓄電池自体の加熱と蓄電池外部に放熱に使用される. 蓄電池表面からの放熱量 Q_{out} [J/S] は以下の(3)式で示される. A [m^2] は蓄電池の表面積, T_s [K] は蓄電池表面の温度, T_a [K] は環境温度, h [$J/m^2 \cdot K$] は熱伝達係数である[1].

$$Q_p = i \cdot (V_0 - V_{OC}) = i^2 \cdot R_n \quad (1)$$

$$Q_s = i \cdot T_{in} \cdot \frac{\partial V_{OC}}{\partial T_{in}} \quad (2)$$

$$Q_{out} = A \cdot h(T_s - T_a) \quad (3)$$

2.2. 熱回路

熱回路法は物体の伝熱を, ノードの温度 T [K], および, ノード間の熱の流れを熱流量 Q_T [J/S], ノード間の熱の伝わりにくさを熱抵抗 R_T [K/W] により, 伝熱経路を表現する方法である. また, ノードに温度あたりの蓄熱できる量を熱容量 C_T [J/K], 熱量を H [J] であらわされる. 熱回路において, 温度 T [K], 熱流量 Q_T [J/S], 熱抵抗 R_T [K/W], 熱容量 C_T [J/K], 熱量 H [J] は, 電気回路における電圧 V , 電流 I , 電気抵抗 R_E , 静電容量 C_E , 電荷量 Q_E に対応づけられ, オームの法則や過渡応答などが同様に成立する.

蓄電池の発熱や放熱の挙動は熱回路で表すことができ、図 3 のように示すことができる。 Q_{ALL} [J/S] は、ジュール発熱 (Q_p) とエントロピー発熱 (Q_s) の和であり、蓄電池内部で発生する熱流量である。 T_{in} [K] は蓄電池の内部温度、 T_s [K] は蓄電池表面の温度、 T_a [K] は環境温度である。 C_{in} [J/K] は蓄電池の熱容量。 R_{in} [K/W] は蓄電池内部の熱抵抗、 R_a [K/W] は蓄電池外部 (空気) の熱抵抗である。

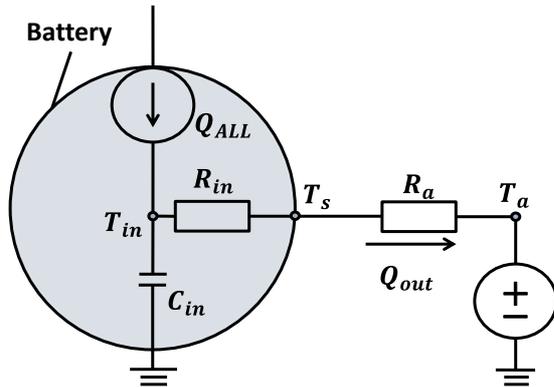


図 3 熱回路モデル

熱量の総和 Q_{ALL} 、ジュール発熱 Q_p 、エントロピー発熱 Q_s は式 (1-2) から求める。実験条件は、充電電流 1C、環境温度 25 [°C] とし、SOC を 0.1 毎に変化させ測定した。結果を図 4 に示す。

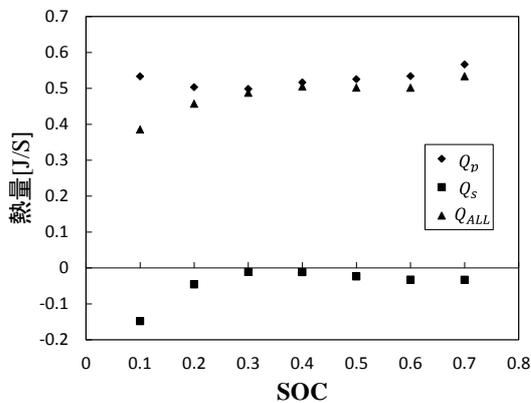


図 4 蓄電池の発熱量

つぎに、 R_{in} を求めるために、図 5 のような蓄電池を作成した。この構造は、同じ蓄電池を 7 個用意し、図 5 のように一つの蓄電池 7 を囲った。1 から 6 の蓄電池は直列につなぎ合わせた。そして、 T_1 と T_2 で温度を測定した。環境温度は 25 [°C] で電流は 1C とした。まず、周りの蓄電池を SOC0 から 0.1 まで充電を行い。その後に、蓄電池 7 も SOC0 から 0.1 まで充電を行い、温度を測定した。これを、SOC が 0.7 になるまで繰り返した。

蓄電池 7 の中央の温度 (内部温度 T_{in}) を、測定した温度から比率により求めた。また、 T_2 を表面温度 (T_s) とし、図 4 の結果の Q_{ALL} から、式 (4) より、SOC 別で R_{in} を算出した結果を図 6 に示す。また、 C_{in} は過渡応答の $\tau = R_{in} \cdot C_{in}$ から式 (5) より求めた。その結果を図 7 に示す。使用したリチウムイオン蓄電池は 18650 型であり、詳細は表 1 に示す。

$$R_{in} = \frac{T_{in} - T_s}{Q_{ALL}} \quad (4)$$

$$C_{in} = \frac{\tau}{R_{in}} \quad (5)$$

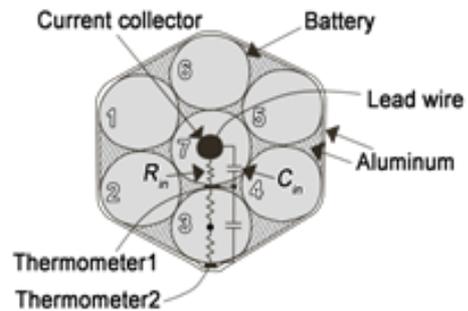


図 5 R_{in} 測定に使用した蓄電池

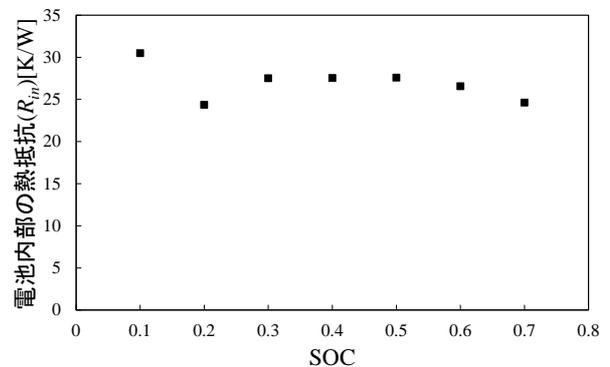


図 6 蓄電池の熱抵抗 R_{in}

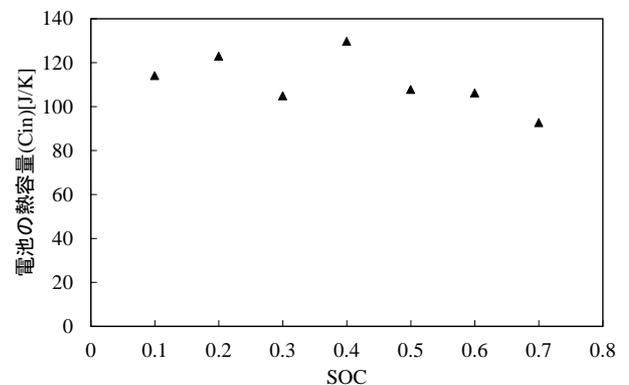


図 7 蓄電池熱容量 C_{in}

2.3. 空気の熱抵抗

図 3 の熱回路図から、空気の熱抵抗である R_a [K/W] の抵抗が小さくなると、熱を外に逃がしやすくなるため蓄電池の温度を下げられる。 R_a [K/W] は、以下の式 (6) で示される。 A [m²] は蓄電池の表面積、 h [J/m²·K] は熱伝達係数である。 h [J/m²·K] は以下の式 (7) で示される。 Nu はヌセルト数、 λ [W/(m·K)] は流体の熱伝導率、 d [m] は蓄電池の代表長である。

$$R_a = \frac{1}{Ah} \quad (6)$$

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} \quad (7)$$

ヌセルト数 Nu は、自然対流の場合以下の式 (8) で示される。 α は蓄電池の形状により決定する数値であり、 α は円筒型の場合は 0.53 である。 Gr はグラスホフ数、 Pr はプラントル数である。また、 Gr 、 Pr は以下の (9) 式と (10) 式で示される。 g [m/s²] は重力加速度、 β [1/K] は流体の体膨張係数 (空気の場合、温度を T [K] とすると $1/T$ となる。)、 ν [m²/s] は動粘性係数、 a [m²/s] は温度拡散係数、 ν 、 a 、 λ は物性値である。

$$Nu = \alpha(Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (8)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_a)d^3}{\nu^2} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (10)$$

また、強制対流の場合、 Nu は以下の式で示される。 Re はレイノルズ数、 C と n はレイノルズ数に依存する値である。レイノルズ数は以下の式 (10) で求められる。 U [m/s] は風速である。 ν [m²/s] は動粘性係数、 ν 、 a 、 λ は物性値である。(6-7)、(11-12) 式から、以下の (13) 式が求められる。 K は補正経緯数とした。この (13) 式より、風速 U を大きくすることで、 R_a の値が小さくなり、蓄電池の温度をさらに下げることができる [4-6]。

$$Nu = C(Re^n \cdot Pr^{\frac{1}{3}}) \quad (11)$$

$$Re = \frac{U \cdot d}{\nu} \quad (12)$$

$$R_a = \frac{d}{AC \left(\frac{U d^n}{\nu} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right) \lambda} \quad (13)$$

3. 空冷を用いた実験

4.1. 単セルでの空冷実験

リチウムイオン蓄電池の CC 充電のときに温度上昇が激しいため、ファンを用いて CC 充電時に風を与え冷却を行った。配置として、図 8 のように送風機から風速計までの距離が 7.5cm、ファンから蓄電池までの距離が 10.5cm とした。

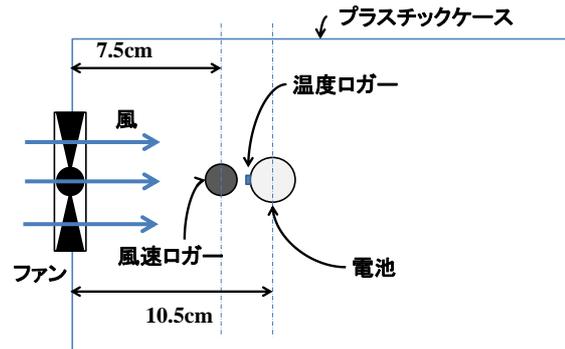


図 8 単セル空冷実験配置

充電電流は 2C で行い、風速は充電時に与えた風速の平均値をとった。風速は 0m/s、3.7m/s、5.1m/s、6.7m/s、7.8m/s である。使用したリチウムイオン蓄電池は、18650 型、表 1 に示すものを使用した。温度変化の結果を図 9 に示す。

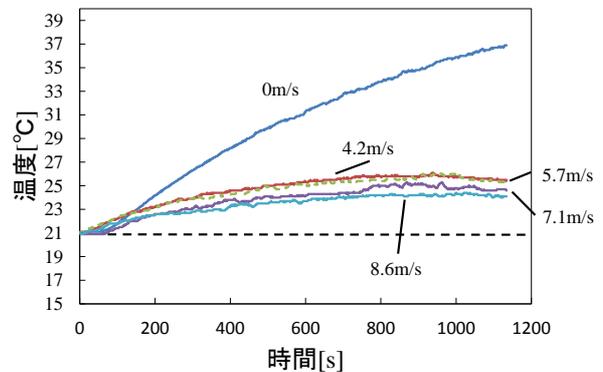


図 9 充電電流 2C 空冷を用いた充電時の温度

表 2 空冷の効果

風速 [m/s]	4.20	5.70	7.10	8.60
C: 抑えられた温度上昇値 [°C]	11.4	11.6	12.3	12.8
P: 電力 [W]	1.00	2.90	4.70	7.20
C/P: 空冷の効果 [°C/W]	11.4	4.03	2.62	1.78

図 9 の結果から風を与えることによって温度上昇が抑えられることが分かる。また、風速を大きくすることによって、充電時の温度上昇をより抑えられることが分かった。表 2 では、空冷の効果と使用した電力についてまとめた。実験を行った中では、4.2 m/s のときに 1W 当たりの抑えられた温度上値が 11.4℃と一番大きく効率が良いと考えられる。 R_a について、式(13)より求めた結果を理論値と実験から求めた実測値を図 10 に示す。理論値と実測値の値が違うのは、理論値は空気に全ての熱を逃がすと考えているが、実験では、蓄電池が下のプラスチックケースに接しているために、そこから熱が逃げているためだと考えられる。そこで、式(13)に補正係数を用いて、式(14)として求めた。補正係数は、今回 $K=0.39$ である。その結果が補正後の理論値とした。また、空気の熱抵抗の実測値と補正後の理論値との比較を表 3 に示す。

$$R_a = \frac{K \cdot d}{A \cdot C \left(\frac{u d^n}{\nu} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \right) \lambda} \quad (14)$$

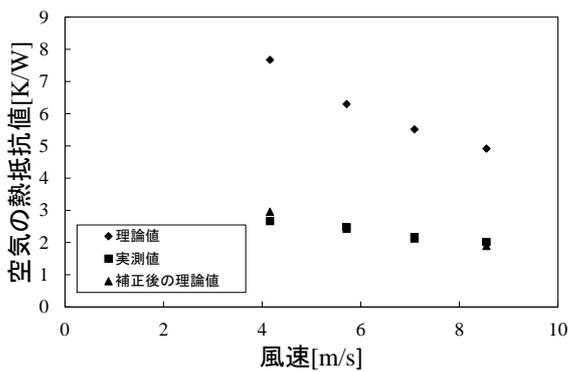


図 10 空気の熱抵抗値

表 3 空気の熱抵抗の実測値と補正後の理論値

風速 [m/s]	4.20	5.70	7.10	8.60
実測値 [K/W]	2.67	2.47	2.16	2.01
補正後の理論値 [K/W]	2.96	2.43	2.12	1.89
誤差 [%]	9.76	1.65	1.89	6.35

4.2. 組セルでの空冷実験

蓄電池の位置によって変わりやすさを確認するために、図 11 と図 12 で示されるような組セルでの空冷のための実験の環境を作った。蓄電池はそれぞれ①-⑥と識別した。それぞれの蓄電池は、図 13 で示されるように、風速と温度センサーを配置した。

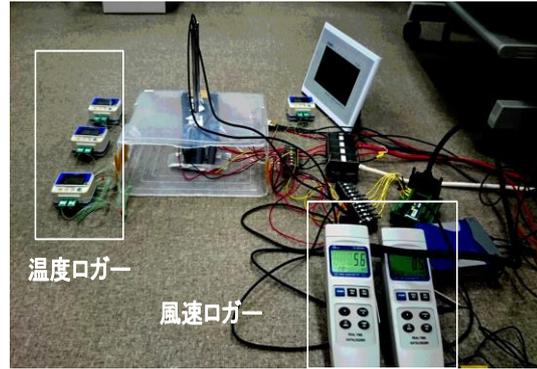


図 11 実験環境

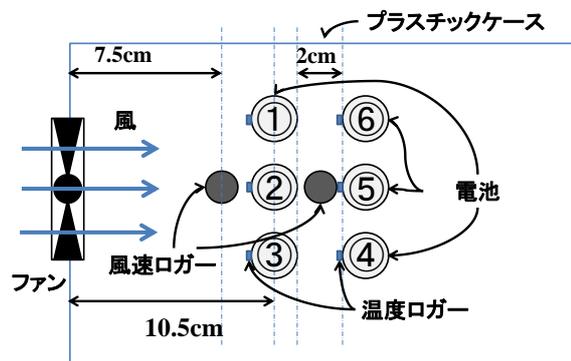


図 13 組セル空冷実験配置

セル②および⑥の温度上昇の結果を、図 14 と図 15 に示す。セル②の結果は図 10 に似ている。しかし、セル⑥の結果は、気流の違いのため、周囲の温度よりはるかに高い。この観察から、より低い風速と高い周囲温度であるからだと考えられる。図 16 は、位置の違いによる温度の違いを示す熱写真である。大きな違いは見られないが、前方の①~③は後方の④~⑥に比べて温度が低く抑えられている。

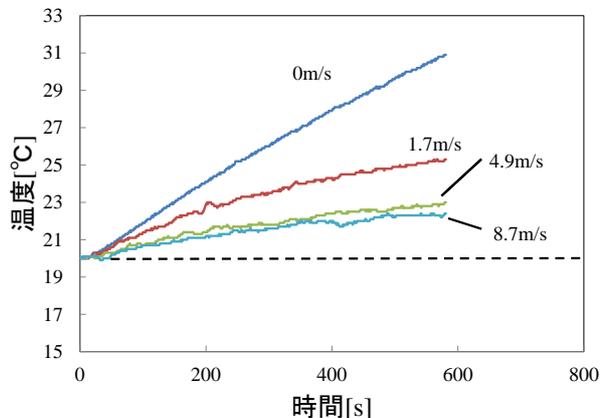


図 14 蓄電池②の温度上昇 (電流値=2C)

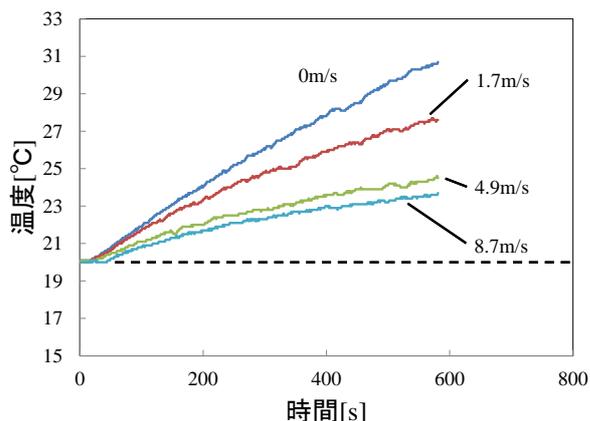


図 15 蓄電池⑥の温度上昇値（電流値=2C）

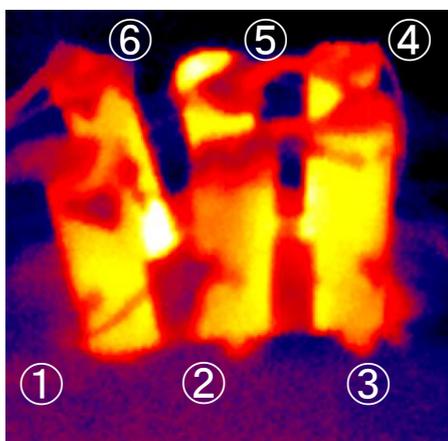


図 16 組蓄電池の熱写真

4. 結論

劣化の主要因である温度上昇に着目し研究を行った。リチウムイオン蓄電池を熱回路で表し、発熱の理論や、各パラメータの解析を実験により行い、蓄電池内部の熱抵抗を求めた。さらに、その結果を用いて、蓄電池の熱容量を求めた。また、空冷を用いることによって温度上昇が抑えられる理論を実験により検証した。実験結果では、温度上昇が抑えられることが確認でき、温度上昇の傾向は風速に依存すると考えられた。空冷での理論式に、補正係数を用いることによって空気の熱抵抗を求めることができた。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省・地域イノベーション戦略支援プログラム「地産地消型エネルギー源の要素技術である分散電源・熱源などの研究開発、および、スマートグリッドのコアとなる制御技術・装置の研究開発」の支援を得て実施した。

参 考 文 献

- [1] Y. Yamamoto, K. Kato, L. Lin, and M. Fukui, "A thermal management system for lithium-ion battery in mobile systems," *Proc. ECCTD*, pp. 1-4, 2013.
- [2] M. Fukui, I. Tanaka, R. Miyahara, and S. Gora, "Cost-effective power management for smart house considering degradation of batteries," *Proc. IEEE PES POWERCON*, 2012.
- [3] Y. Seyama, T. Shimozono, K. Nisiyama, H. Nakamura, and T. Sonoda, "Development of large-scale lithium ion batteries "LIM series" for industrial applications," *GS NEWS TECH. REP*, vol.62, no.2, pp.73-78, 2003.
- [4] F. Christophe, D. V. Dinh, F. Guy, M. Mathieu, and D. Charles, "Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery," *J. of Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2961-2968, 2010.
- [5] M. Chris, L. Ben, B. Derrick, and O. Naoki, "Advanced electro-thermal modeling of Lithium-ion battery system for hybrid electric vehicle applications," *Proc. VPPC*, pp. 107-111, 2007.
- [6] M. Mousavi, S. Hoque, S. Rahnamayan, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Optimal design of an air-cooling system for a Li-ion battery pack in electric vehicles with a genetic algorithm," *Proc. Evolutionary Computation Cong.*, pp. 1848- 1855, 2011.