

小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の発熱挙動

学生員 大島 孝昌* 学生員 中山 正人*
学生員 福田 健一* 正員 荒木 拓人*
正員 恩田 和夫*

Thermal Behavior of Small Lithium-Ion Secondary Battery during Rapid Charge and Discharge Cycles

Takamasa Ohshima*, Student-member, Masato Nakayama*, Student-member, Kenichi Fukuda*, Student-member,
Takuto Araki*, Member, Kazuo Onda*, Member

The secondary batteries for the electric vehicle (EV) generate much heat during rapid charge and discharge cycles than the rated condition, when EV starts quickly consuming the battery power and stops suddenly recovering the inertia energy. During rapid charge and discharge cycles, the cell temperature rises significantly and may increase more than the allowable temperature. So we calculated the temperature rise of a small lithium-ion secondary battery during rapid charge and discharge cycles using our battery thermal behavior model, which we have developed being confirmed its validity during discharge cycle at the smaller current than the discharge rate of 1C. The heat source factors were measured by the methods described in our previous study, because the present batteries have been improved in their performance and have low overpotential resistance. The battery heat capacity was measured by a twin-type heat conduction calorimeter, and determined to be a linear function of temperature. Further, the heat transfer coefficient was measured again precisely by the method described in our previous study, and was arranged as a function of cell and ambient temperatures. The calculated temperature by our battery thermal behavior model using these measured data agrees well with the cell temperature measured by thermocouple. Therefore we can confirm the validity of this model again during rapid charge and discharge cycles.

キーワード：リチウムイオン二次電池、過電圧抵抗、エントロピー変化、急速充放電、発熱挙動モデル

Keywords : lithium-ion secondary battery, overpotential resistance, entropy change, rapid charge and discharge cycles, thermal behavior model

1. はじめに

現在、昼夜間の電力需要の格差を小さくするため、夜間に蓄えた余剰電力を昼間のピーク需要に用い、電力需給の平準化が図られている⁽¹⁾。また、深刻化する自動車による大気汚染を軽減するため、ハイブリッド自動車や電気自動車の実用化が進められている⁽²⁾。これら電力貯蔵や電気自動車に用いる二次電池として、エネルギー密度や出力密度、充放電効率が高いリチウムイオン二次電池が期待され、数多くの機関で研究開発されている。このような用途では、より大型の電池が定格電流(本論文では定格容量を1時間で放電する電流値)を越える電流値で急速充放電されると想定される。その際、より大型である程、発熱体積に対する放熱面積の割合は少なく、また充放電電流が大きい程、発熱量は増えるため、電池温度が著しく上昇し、許容温度を超える恐れがある。また、電池は温度が高い程充放電特性が優れるため、電池内部で温度分布が生じると性能が偏り、電

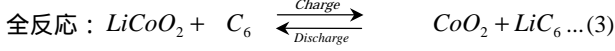
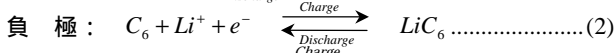
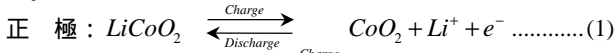
流分布が偏って、局所劣化する恐れがある。これまで、電池材料やその構成法については多くの研究が報告されているが、電池の熱挙動に関する研究は余り報告されていない。

そこで我々は、大型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の熱挙動解析モデルを構築することを最終目標に、まず市販の小型リチウムイオン二次電池を用い、前報⁽³⁾では定格電流以下の放電時に対して、発熱因子である過電圧抵抗やエントロピー変化を測定し、構築した熱挙動解析モデルにこれらを用いて電池温度を計算し、実測電池温度と比較した。計算温度は実測温度とほぼ一致し、構築した解析モデルの信頼性を確認した。その後、本報告ではこの解析モデルは定格を越える電流値での急速充放電時にも適用され、特性が改善された小型リチウムイオン二次電池の過電圧抵抗やエントロピー変化を、また、電池から外気への熱伝達率を再測定し、更に、前報⁽³⁾とは異なる方法で電池の熱容量を測定した。これらの測定結果を用い、解析モデルで急速充放電時の電池温度を計算し、自然対流下での測定温度と比較したところ、ほぼ両者は一致したので、小型リチウムイオン二次電池の急速充放電時の熱挙動を以下に報告する。

* 豊橋技術科学大学 電気・電子工学系
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Toyohashi Univ. Tech., Electrical and Electronic Eng.,
1-1, Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580

2. 熱挙動解析モデル

2.1 リチウムイオン二次電池の充放電反応と発熱因子
電池の熱挙動を簡単に記述する。本研究で用いた電池は、正極にコバルト酸リチウム($LiCoO_2$)を、負極に炭素材料($C:graphite$)を、電解液にリチウム塩を溶解した有機溶媒を用いている。この電池の充放電反応は次式⁽⁴⁾の通りである。



ただし、はリチウムイオンの空サイトを示す。

電池は充放電反応に伴い、発熱あるいは吸熱する。電池反応における吸発熱は理想的な可逆電池の場合、定温定圧下における熱力学的関係式⁽⁵⁾

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots(4)$$

より、電池反応のエンタルピー変化 H と電気的工作 $G(= -nFE_{emf})$ の間のエネルギー変換において、余剰項 $T \Delta S$ が熱エネルギーとして補償されるとして説明される。エントロピー変化 S によるエントロピー発熱 Q_s は次式のように表される。

$$Q_s = T_{cell} \cdot \Delta S \cdot \frac{I}{F} \dots\dots\dots(5)$$

$$\Delta S = - \frac{\partial \Delta G}{\partial T_{cell}} = n \cdot F \cdot \frac{\partial E_{emf}}{\partial T_{cell}} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 T_{cell} は電池温度、 I は充電時を正とする充放電電流、 F はファラデー定数、 E_{emf} は電池の起電力、 n は反応に関与する電荷数で、リチウムイオン二次電池の場合 1 である。充電時と放電時では反応の向きが逆となるので、 Q_s は充電時に吸熱であれば、放電時には発熱となる。

電流が流れている電池のセル電圧 V は電気化学的分極によって開回路電圧 V_0 から外れ、この分極によるエネルギー損失は熱になる。この発熱を過電圧発熱 Q_p とし、 Q_p は次式で表される。

$$Q_p = I(V - V_0) = I^2 \cdot R_{\eta} \dots\dots\dots(7)$$

Q_p は充放電時とも発熱項となる。 V と V_0 との差を IR とすれば、 Q_p はこの過電圧抵抗 R から求められる。

2.2 代表電池温度モデル 電池温度が代表的な一つの温度 T_{cell} で表せれば、 T_{cell} は Q_s と Q_p 、周囲への放熱 Q_B を用いた以下の熱収支式により計算される。

$$C_{cell} \frac{dT_{cell}}{dt} = Q_p + Q_s - Q_B \dots\dots\dots(8)$$

$$Q_B = A \cdot h(T_{cell} - T_{amb}) \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 C_{cell} は電池の熱容量、 t は時間、 T_{amb} は周囲温度、 A は電池の円筒面と端面を合わせた全表面積、 h は熱伝達率を表す。

充放電時に電池内部の温度がほぼ一樣であることを確認できれば、(8)式で簡便に計算できる代表的な電池温度を、測定した電池表面温度と比較することができる。

2.3 電池温度分布の一次元解析⁽⁶⁾ 急速充放電時の電池内部の温度分布を推定するため、半径方向の 1 次元温度分布モデルを構築した。この時、スパイラル電池の正負極・電解質シート方向の電流分布を考慮した。電流分布は正負極・電解質シートを広げた状態で等価回路を考え、以下のような仮定をおいている。(1)活物質層内はシートに沿って電流は流れない、(2)電極幅方向に電流は分布しない、(3)近似的にシートに沿う帯状電池とする、(4)集電リードの抵抗は無視できる。これらの仮定から、正極と負極の集電シート内の電流 I_1 、 I_2 および電流密度 J は次式で表される。

$$\frac{\partial V_x}{\partial J} \frac{\partial J}{\partial x} = rI_1 - rI_2 - \frac{\partial V_x}{\partial SOC} \frac{\partial SOC}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial T_{cell}} \frac{\partial T_{cell}}{\partial x} \dots\dots\dots(10)$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = -2H \cdot J \dots\dots\dots(11)$$

$$\frac{\partial I_2}{\partial x} = 2H \cdot J \dots\dots\dots(12)$$

$$SOC = SOC_i - \int \frac{J}{C_s} dt \dots\dots\dots(13)$$

ここで、 x は集電シートに沿った負極リードからの距離、 SOC は充電状態、 V_x は負極リードからの距離 x におけるセル電圧で J 、 SOC 、 T_{cell} の関数である。また、 r は集電シート単位長さ当りの抵抗、 H は集電シートの幅、 C_s は電極の単位面積あたりの電気容量、添字 i は初期を表す。

次に、同モデルは半径方向の温度分布を解析するため、以下のような仮定をおいている。(1)電池半径方向に熱伝導率は一定とする、(2)スパイラル電池の軸方向の熱伝導は無視する、(3)電池の熱伝導率や密度などの物性は充放電により変化しない、(4)電解液の対流は無視する。以上の仮定により、半径方向の温度分布は軸対称一次元として扱うことができ、次式が成り立つ。

$$c\rho \frac{\partial T_{cell}}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T_{cell}}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_{cell}}{\partial R} \right) + (Q_s + Q_p) \dots\dots\dots(14)$$

ここで、 c 、 ρ 、 λ 、 R はそれぞれ、比熱、密度、熱伝導率、電池の半径で、また Q_s 、 Q_p は(5)、(7)式で表される。つまり、(10)~(13)式で求まる電流と充電状態の分布から(14)式中の Q_s と Q_p を(5)式と(7)式で求め、(14)式で求まる温度分布を再び(10)式の T_{cell} に与え、反復計算を進める。

3. 発熱因子の測定

本研究で用いた被測定電池は前報⁽³⁾と同じ市販の円筒スパイラル小型リチウムイオン二次電池(SONY-US18650G3: 定格容量 1800mAh、直径 18mm、長さ 65mm)である。発熱因子の測定は電池温度を一定とするため、電池を薄い絶縁シートで包み電氣的に絶縁された状態で、恒温水槽に浸し充放電した。本研究においても各測定の前に充放電の前歴が残らないように定格充放電を 2 度行った。ここで定格充放電とは、1C(1.8A)定電流と 3 時間の 4.2V 定電圧による定格充電と、終止電圧 2.7V まで 0.2C(0.36A)定電流による定格放電を 3 時間の休止を挟んで行うサイクルと定義する。ただし、この時の電池温度は諸測定と同じ温度とした。ま

た、定格充電と定格放電の終了時の充電状態をそれぞれ SOC=1.0、SOC=0 とした。

3・1 過電圧抵抗 発熱因子の一つである過電圧抵抗は前報⁽³⁾に述べた4種類がある。本報と前報⁽³⁾の被測定電池は同じ型番であるが再測定したところ、特性が改善され、抵抗が小さくなっていることが確認されたため、同じ4つの方法で抵抗を測定し直した。ただし、前報⁽³⁾のように定格電流値以下の放電時だけでなく、本報では定格電流値を越える急速充放電時でも測定した。

3・1・1 V-I 特性による抵抗 0.2~1.7C (xC とは定格電流の x 倍を意味する) の定電流充電を電池温度 20、30、40 に対して行った。また、0.2~3.0C の定電流放電を電池温度 20、30、40、50 に対して行った。充放電ともに電流値が大きい程充放電の終止電圧に早く到達し、特に充電時では顕著であった。得られた定電流充放電特性を、SOC をパラメータとして電圧・電流(V-I)特性に書き直した。30 充電時の V-I 特性を図 1 に示す。

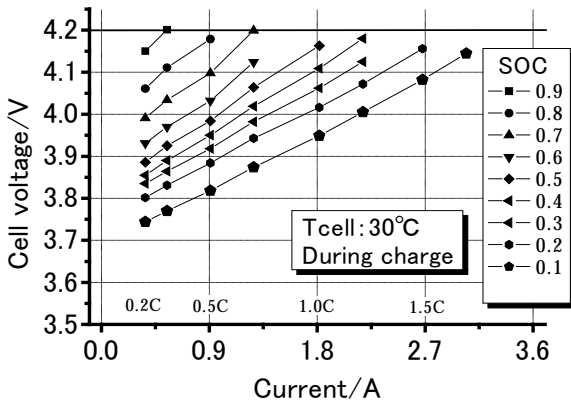


図 1 SOC をパラメータとした V-I 特性
Fig. 1. V-I characteristics with SOC parameter.

V-I 特性はほぼ直線状で、この傾きを各 SOC における過電圧抵抗として求めることができる。ここで、傾きの取り方として、V-I 特性全体に渡って直線であるとし、最小二乗近似で傾きを求める方法と、電流の関数として各電流値における傾きを求める方法、定格電流以下の V-I 特性から傾きを求める方法の合計 3 種類が考えられる。これら 3 つの抵抗の比較を図 2 に示す。

傾きの取り方の違いによる抵抗のばらつきは 3 つ目の抵抗を基準に、30 の放電時で 1 割以下と小さく、また 40 以上ではどの抵抗もほぼ等しい値となった。よって、これら 3 種類から求められる抵抗はほぼ等しいので、活物質の拡散を含まない抵抗を表すと考えられる 3 つ目の 1C 以下の抵抗を代表値として充放電共に図 3 に示す。抵抗は充放電の進行と共に増加し、電池温度が高いほど小さくなった。また、充電時の 30 以上で、また、放電時の 40 以上で温度に対する変化はなくなった。なお、前報⁽³⁾の放電時の抵抗 (40)と比較すると約半分減少し、特性が改善していることが分かる。

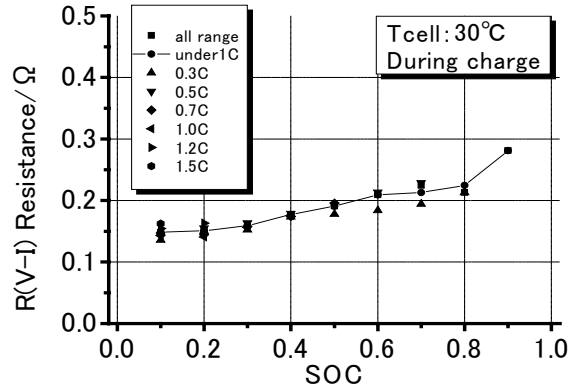
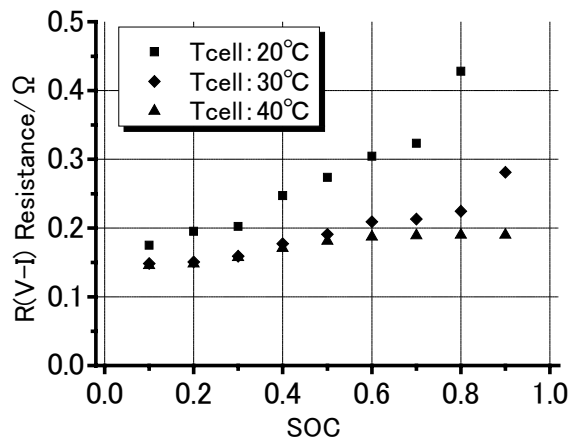
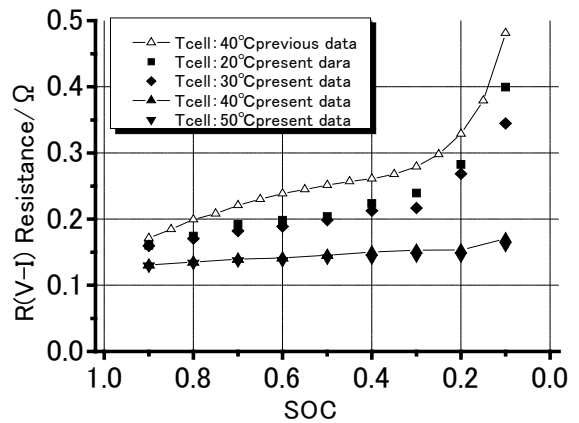


図 2 V-I 特性による 3 種類の抵抗の比較
Fig. 2. Comparison of three types of resistances by V-I characteristics.



(a) During charge

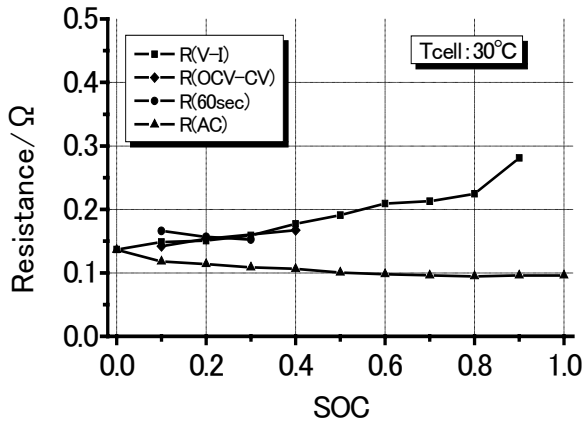


(b) During discharge

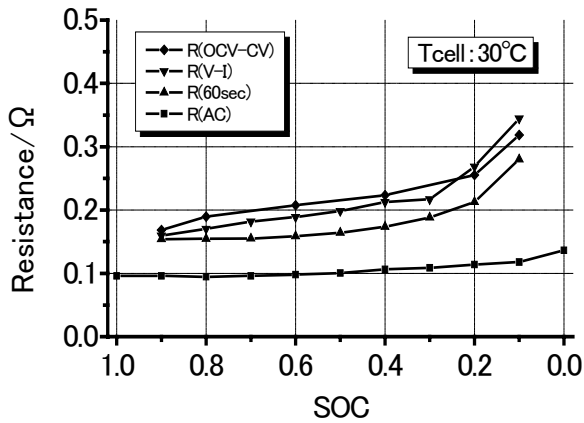
図 3 1C 以下の V-I 特性による過電圧抵抗 R(V-I) による V-I 特性 under 1C.

3・1・2 開回路電圧とセル電圧の差による抵抗 充放電時のセル電圧 V は、開回路電圧 V_0 から外れる。この電圧差を充放電電流で割れば、過電圧抵抗 $R(OCV-CV)$ が求まる。ここで、 V_0 は充放電後、時間と共に多少変わるので、本研究では満充電状態から 0.2C 放電により任意の SOC に揃えた

後、活物質の拡散等の影響が少なく安定した、21 時間後のセル電圧を V_0 とした。図 4 に 30、1C での R(OCV-CV) をその R(V-I) と比較して示す。電池温度や充放電電流を変えても、R(OCV-CV) は充放電共に R(V-I) とほぼ等しい値を示した。



(a) During charge.



(b) During discharge.

図 4 各種測定法による過電圧抵抗の比較

Fig. 4. Comparison of overpotential resistances by four methods.

3.1.3 間欠充放電による抵抗 間欠充放電によっても過電圧抵抗 R(60sec) が簡便に求められる。間欠放電による測定は、満充電状態から SOC を 0.1 毎に下げた後、放電開始から 60 秒後の電圧降下 V_{60sec} をその時の放電電流で割って求める方法である。ここで、SOC は 60 秒間に变化した SOC の中間値としている。間欠充電による測定も同様である。図 4 に 30、1C での R(60sec) をその R(V-I) と比較して示す。電池温度や充放電電流を変えても、R(OCV-CV) と同様に R(60sec) は R(V-I) と等しい値を示した。

3.1.4 交流インピーダンス計による抵抗 電池の抵抗は電気化学の分野では交流インピーダンス法によりよく測定される。本報でも電気化学測定ユニット(Solartron,1280B)を用い、周波数 50kHz から 25mHz の 70mA(rms)の交流電流を電池に印加して過電圧抵抗を測定した。前報⁽³⁾で、放電電流に寄らず抵抗の測定結果に変化は見られなかったため、本報でも充放電電流を流さずに測定した。測定した

Cole-Cole プロットを図 5 に示す。拡散による応答の遅い Warburg インピーダンスの部分を除いた、実軸の抵抗成分を R(AC) とし、図 4 に比較して示す。R(AC) は R(V-I) に比べ半分程度の値となった。電池によっては、小さい抵抗が測定されることが、前報⁽³⁾同様にここでも観測された。

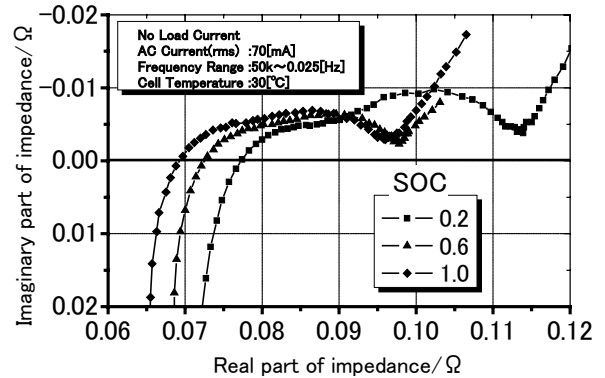


図 5 測定した電池の交流インピーダンス

Fig. 5. AC impedance measured for battery.

3.2 エントロピー変化の測定 もう一つの発熱因子であるエントロピー変化についても、同じ型番の電池でも性能改善が見られたため、測定し直した。任意の SOC に揃えた電池を、まず 40 の恒温水槽中に 21 時間保ち、その後 10、20、30、40 にそれぞれ 3 時間保って、 V_0 の温度変化 dV_0/dT を測定した。(6)式の E_{emf} を V_0 で近似できるとし、計算した S を前報⁽³⁾と比較して図 6 に示す。前報⁽³⁾では SOC が 0.8 付近で S が正となったが、今回の電池では温度に対して多少は変わるものの、どの SOC においても温度平均は SOC の全域で負となり、エントロピー発熱 Q_S は放電時に発熱、充電時に吸熱となった。

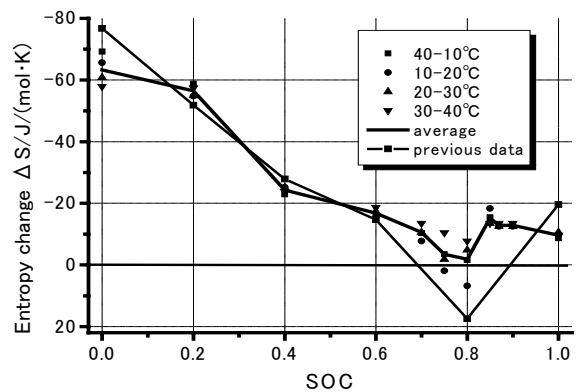


図 6 SOC と温度に対するエントロピー変化の測定結果

Fig. 6. Measured entropy change for SOC and cell temperature.

4. 電池の熱容量と熱伝達率の測定

4.1 電池の熱容量の測定 本報では前報⁽³⁾と異なり、熱容量が温度の増加関数と思われたため、実験温度範囲で電池熱容量変化が測定できる双子型熱量計(C-80,SETARAM)⁽⁷⁾を用いた。これは試料側および参照側の

物質を同じ温度になるように一定速度で加熱しながら、熱容量が分かっている参照側を基準に試料の熱容量を測定する。このようにして電池温度を 20 から 90 まで 0.4 /min で等速昇温させ、使用した電池の熱容量を測定した。この測定系は一次遅れを持つと仮定⁽⁸⁾し時定数を求め、熱量の遅れを補正した。温度変化が一定である範囲で、補正した熱量から電池の熱容量を求めたところ、電池の熱容量 C_{cell} は図 7 に示すように、温度の一次関数として近似できた。

$$C_{cell}(T_{cell})[J/]=35.12+0.048T_{cell}[] \dots\dots\dots(15)$$

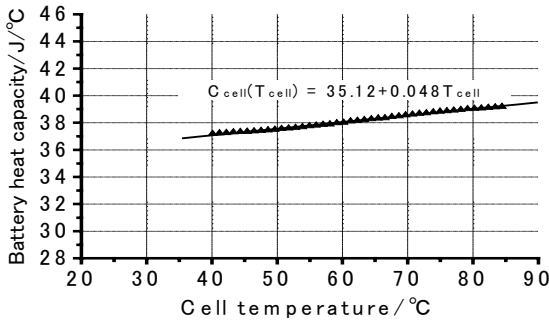


図 7 電池熱容量の温度変化

Fig. 7. Change of battery heat capacity by cell temperature.

4・2 電池から外気への熱伝達率の測定 充放電測定用リード線が付いた電池の、外気への熱伝達率を再度正確に求めるため、恒温水槽で 90 に加熱した電池を室温一定の自然対流下で水平円筒状態にリード線で吊るし、電池の温度降下を測定した。図 8 に示す測定結果を 80 から 10 間隔で区切り、各温度範囲でのリード線を含んだ電池の熱伝達率を求めた。

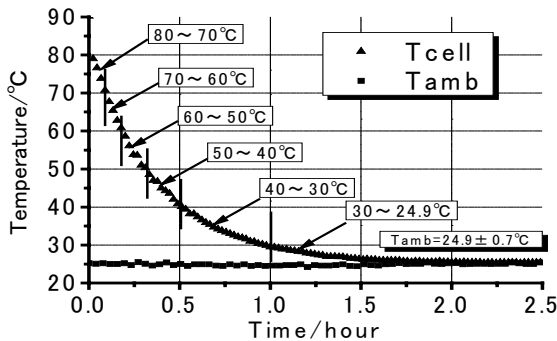


図 8 リード線を含む電池温度降下の測定結果

Fig. 8. Measured temperature drop of battery with lead wires.

この測定値を空気中の水平円筒に対する熱伝達式⁽⁹⁾と比較し、熱伝達式に対する比を電池温度に対して補正係数として求めた。この補正係数から図 9 に示すような近似曲線で、リード線を含む電池の熱伝達率 h を電池温度 T_{cell} と周囲温度 T_{amb} の関数として求めた。補正係数はリード線の影響と思われる低温度域での増加傾向を示した。

5. 電池温度上昇の解析と実験結果の比較

5・1 測定した発熱因子の解析への取込み これま

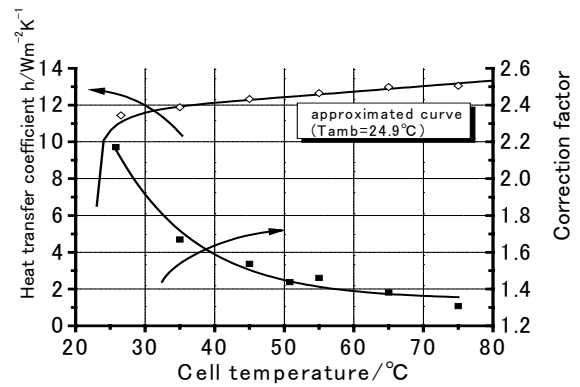


図 9 補正係数と測定した熱伝達率とその近似曲線

Fig. 9. Correction factor and measured heat transfer coefficient and its approximated curve.

での章で述べたように、充放電時の電池の発熱挙動を解析する上で不可欠な過電圧発熱を決める過電圧抵抗、エン트로ピー発熱を決めるエン트로ピー変化、電池の熱容量と外気への熱伝達率を測定した。過電圧抵抗 R を 4 種類の方法で測定したが、以下の解析では拡散損失による発熱遅れが少ないと思われる 1C 以下の V-I 特性から求めた過電圧抵抗 $R(V-I)$ を電池温度と SOC の関数として解析に用いた。エン트로ピー変化については、温度を変えて計った開回路電圧の温度変化を平均した値を SOC に対して線形近似して用いた。電池熱容量 C_{cell} は、電池温度の関数として(15)式を用いた。熱伝達率 h は前報⁽⁹⁾と同様、電池温度 T_{cell} と周囲温度 T_{amb} の関数とする熱伝達式と補正係数を用いて求めた。

5・2 電池温度分布の一次元解析結果 2・3 で述べた、電池シート方向の電流密度分布を考慮した電池半径方向の一次元温度分布を計算すると、3C 放電時の温度差は図 10 に示すようになった。電池中心と外側の温度差は、放電終了時に最大で 1.6 と計算された。このことより、定格電流を越える急速充放電時でも、電池内部の温度はほぼ一様に分布し、電池表面温度と(8)式による代表電池温度モデルから計算される電池温度とを比較することは妥当と思われる。なお、3C 放電時の電池中心と表面の実測温度差は、図 11 に示すように 1.9 であり、解析結果を裏付けた。

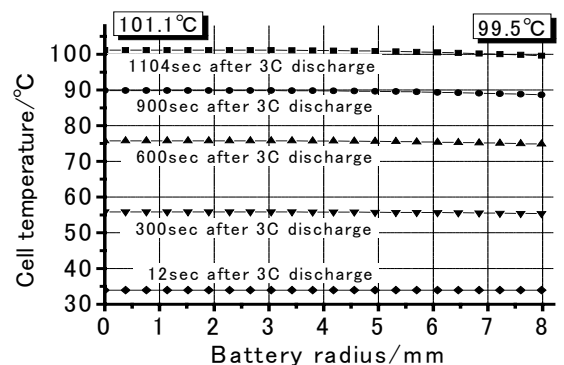


図 10 電池内温度分布の解析結果

Fig. 10. Calculated radial distribution of cell temperature.

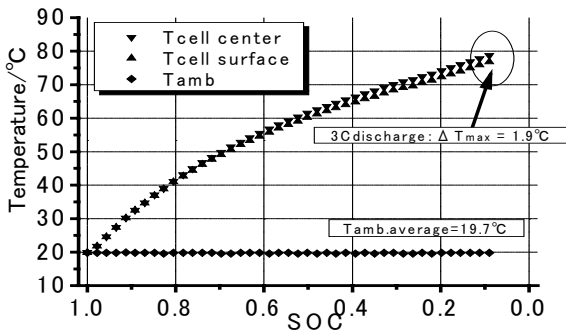
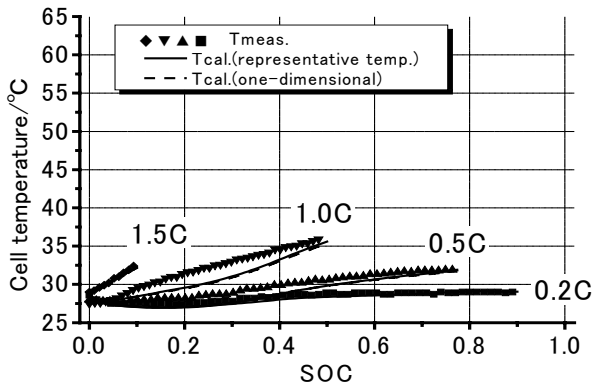


図 11 電池中心と表面の測定温度

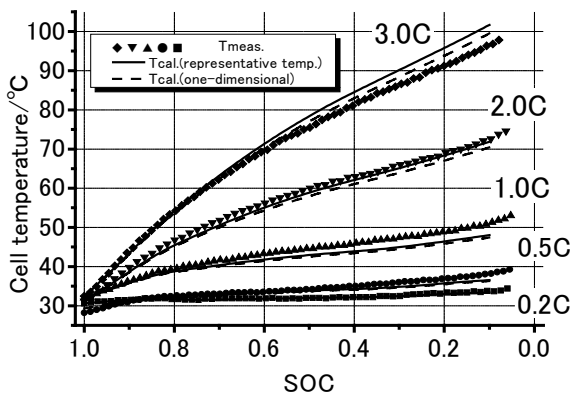
Fig. 11. Measured temperature of center and surface.

5.3 急速充放電時の解析と実測電池温度の比較

(8)式による R(V-I)を用いた代表電池温度モデルと、(14)式による電池半径方向の一次元熱挙動解析モデルから計算される急速充放電時の電池温度を、電池表面の測定温度と比較して図 12 に示す。



(a) During charge.



(b) During discharge.

図 12 解析と測定電池温度の比較

Fig. 12. Comparison of calculated and measured cell temperatures.

充放電される電池は自然対流下でリード線を用いて水平に吊るされ、電池温度は電池表面中央部にハンダ付けした素線径 0.1mm の熱電対で測定された。急速充放電共に計算温度は測定温度に比較的良く一致した。このことより、本

報で試験したような小型電池であれば、ここで示したような解析法で、温度分布の無い電池の熱挙動を代表的温度で記述できることが分かる。ただし、1C 以下の充放電時は僅かに低い計算値となり、急速放電時は僅かに高い計算値となった。また、1C 充電時の計算温度は測定とは異なる温度上昇傾向を示した。なお、R(OCV-CV)と R(60sec)を用いた電池温度も計算し、測定温度に対する温度偏差を求めた結果、R(V-I)による計算温度の温度偏差が充電時全体で 1.0、放電時全体で 1.6 と最も小さかった。よって、本研究の実験範囲では R(V-I)が最も正確に電池温度を推定できる過電圧抵抗であるといえる。今後、これらの差を詰め、大型電池の熱挙動が予測できる解析法を開発する必要がある。

6. まとめ

本研究では市販の小型リチウムイオン二次電池を用いて、その発熱挙動因子である過電圧抵抗とエントロピー変化、電池の熱容量、充放電用リード線を考慮した熱伝達率を測定した。過電圧抵抗については定電流充放電時の V-I 特性と、開回路電圧とセル電圧との差、および間欠充放電により測定された抵抗はほぼ一致したが、交流インピーダンス法による抵抗は前三者の半分程度であった。これらの測定結果を用いて、3C 程度までの急速充放電時の代表温度モデルと、半径方向一次元モデルで電池の熱挙動を解析した。解析には 1C 以下の V-I 特性から求めた過電圧抵抗を用い、急速充放電時の電池温度を計算し、測定温度と比較したところ、両者は比較的良く一致し、電池中心と外側で温度差が小さいことが分かった。本解析法は小型電池の熱挙動予測に有効と思われる。しかし、充放電電流値によっては解析と測定は十分一致していないため、この差を今後詰める必要がある。

なお、電池の熱容量測定に際し、産業技術総合研究所の高野清南氏、齋藤喜康氏に多大なご指導を得たことをここに付記し、感謝の意を表す。本研究の一部は文部科学省 21 世紀 COE プログラム「インテリジェントヒューマンセンシング」の援助により行われた。

(平成 16 年 2 月 24 日受付,平成 16 年 6 月 15 日再受付)

文 献

- (1) 電気事業連合会：「図表で語るエネルギーの基礎 2001」, pp.18-19 (2001)
- (2) 田村：「次世代型リチウム二次電池」, NTS p.443 (2003)
- (3) H. Kameyama, T.Hanamoto, K. Ito, Y. Inui, and K. Onda : "Study on Heat Generation Behavior at Small Lithium-Ion Secondary Battery", TEEE Japan, Vol.122-B, No.11 pp.1191-1199 (2002) (in Japanese)
亀山・花本・伊藤・乾・恩田：「小型リチウムイオン二次電池の発熱挙動の研究」, 電学論 B, Vol.122, No.11 pp.1191-1199 (2002)
- (4) 電池便覧編集委員会：「電池便覧」, 第 3 版, p.257 (2001)
- (5) 玉虫伶太：「電気化学」, 第 2 版, 丸善, pp.91-92 (2000)
- (6) K. Takano, T. Hirayama, and T. Nakano : "Simulation of Electrical Characteristics in a Large-Capacity Lithium Secondary Battery", Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol.60, No.12 pp.817-824 (1996)
高野・平山・中野：「大容量リチウム二次電池の電気特性シミュレーション」, 電総研彙報, Vol.60, No.12 pp.817-824 (1996)

- (7) Y. Saito, K. Kanari, K. Takano, and T. Masuda : "Thermal Measurement of a Lithium Secondary Battery", Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol.60, No.12 pp.763-769 (1996)
 斎藤・金成・高野・増田 : 「円筒型リチウムイオン二次電池の熱測定」, 電総研彙報, Vol.60, No.12 pp.763-769 (1996)
- (8) Y. Saito, K. Takano, K. Kanari, and T. Masuda : "Heat Generation Behavior of a Lithium-Ion Secondary Battery During Charge and Discharge", Bulletin of the Electrotechnical Laboratory, Vol.60, No.12 pp.771-778 (1996)
 斎藤・高野・金成・増田 : 「リチウムイオン二次電池の充放電における発熱挙動」, 電総研彙報, Vol.60, No.12 pp.771-778 (1996)
- (9) Y. Fujioka, S. Kagame, T. Ohshima, K. Ito, and K. Onda : "Thermal Behavior of Nickel-Metal Hydride Battery during Charge Cycle", T.EEE Japan, Vol.122-B, No.12 pp.1417-1423 (2002)
 藤岡・影目・大島・伊藤・恩田 : 「ニッケル水素二次電池の充電時の発熱挙動」, 電学論 B, Vol.122, No.12 pp.1417-1423 (2002)

恩田 和夫 (正員) 1941年6月20日生まれ。1966年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年10月電子技術総合研究所入所。95年9月豊橋技術科学大学教授(電気電子工学系)。主として、燃料電池、二次電池などの研究に従事。電気化学会、応用物理学会、エネルギー・資源学会会員。工学博士。



大島 孝昌 (学生員) 1979年5月16日生まれ。2002年3月豊橋技術科学大学工学部電気電子工学課程卒業。2004年3月同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。主として、二次電池に関する研究に従事。



中山 正人 (学生員) 1980年9月23日生まれ。2003年3月豊橋技術科学大学工学部電気電子工学課程卒業。現在同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程に在学中。主として、二次電池に関する研究に従事。



福田 健一 (学生員) 1981年5月30日生まれ。2004年3月豊橋技術科学大学工学部電気電子工学課程卒業。現在同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程に在学中。主として、二次電池に関する研究に従事。



荒木 拓人 (正員) 1975年5月2日生まれ。2003年3月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。04年1月豊橋技術科学大学助手(電気電子工学系)。主として、燃料電池、水電解、二次電池、放電脱硝に関する研究に従事。電気化学会、機械学会、伝熱学会会員。工学博士。

