

〈一般研究課題〉 使用環境条件によらず長期間安定運用を達成する
安全安心なりチウムイオン電池管理システムの構築
助成研究者 名古屋大学 宮田 喜久子



使用環境条件によらず長期間安定運用を達成する 安全安心なりチウムイオン電池管理システムの構築

宮田 喜久子
(名古屋大学)

Construction of a safe and secure lithium-ion battery management system
for a long time stable operation under variable environmental condition

Kikuko Miyata
(Nagoya University)

Abstract :

The application targets for the lithium-ion battery is enlarging day by day and becoming their necessities of life. Generally, the lithium-ion battery requires the operation under suitable temperature and state of charge range to achieve the long-term operation keeping stable performance. However, the environmental temperature maintenance is difficult in an emergency such as disasters. In addition, their life duration and safety are strongly related to the operating temperature, and an inappropriate operating temperature causes a fatal disaster due to the shortening of the life, reduction of power or capacity, and thermal runaway. Moreover, the operation condition variation also causes a difference in life duration. Therefore, the system is required which manages the lithium-ion battery operation under the suitable temperature and state of charge. This study proposes a lithium-ion battery management system by solving two problems, especially for a low-temperature condition. The first problem is the construction of the feasible battery management system using the battery state of charge estimation system considering temperature dependence. Here, the mathematical model is constructed for battery with temperature variations. A state of charge estimation method is also established using the model. The optimization method using future state estimation is also proposed to keep the suitable charging range. The second problem is a feasibility study for the construction of the effective temperature

variation mitigates system under the environmental temperature variations. The application of the phase change material is discussed to establish a thermally stable system around the desired temperature. The evaluation and validation of the problems are performed both in numerically and experimentally. The feasibility of the proposed system is shown with the combination of the solutions of the defined problems.

1. はじめに

現在、携帯電話をはじめとした携帯用電子機器は生活必需品であり、人々の生活活動と共に災害時も含め様々な条件下で使用されている。その駆動に用いられるリチウムイオン電池には、小型・軽量かつ使用環境条件によらず長期的に安定した性能を発揮することが求められる。

しかし、現在のところ一般的なりチウムイオン電池を長期的に安定した性能でもって運用するためには、25~40℃の温度範囲内において電池間または各電池内の温度差を5℃以下に保ち、適切な充電範囲で運用することが求められる。[1]よって、動作温度に依存して性能が不安定となっている。例えば、冬期やスキー場、山中などの低温環境において立上げ不良や急激な電圧低下により必要時における機器の適切な使用が阻害される問題が生じている。特に、災害時・遭難時など非常事態においては環境温度維持が不可能となりやすい。このような条件下での機器動作不良は救助の遅れなど生命の危険に直結する事態を招く。また、寿命や安全性も動作温度と強く関係し、不適切な使用温度は耐久年数の短縮、電力/容量の低下や熱暴走による致命的な災害を引き起こす。

現在、電池の温度管理システムの研究は少なく、その研究も冷却技術が主であり、低温環境下での保温・加熱に対する研究はさらに少ない。しかし、前述したようにこの技術の確立は急務である。さらに、機器の動作条件による電池寿命の差異も長期安定運用やメンテナンスの視点から問題となっている。電池寿命は使用容量に依存するため、長寿命化・安定運用には使用容量範囲の適切な管理が必要となる。

本研究では前述の課題に対応するために、特に低温時の性能安定化に焦点を置いた携帯機器に搭載可能なリチウムイオン電池管理システムの構築を目指す。その実現のために、2つの課題に取り組む。1つ目の課題としては、温度変化を考慮した電池充電状態推定およびその情報を用いた電池管理システムの実現可能性の検討である。本項目に対しては、温度依存性を考慮した電池数理モデルを実験的に構築し、そのモデルを用いた充電状態推定を行う。また、その推定結果とモデルを用いて、将来の挙動を推定し、適切な充電範囲での使用を可能とする制御系を提案する。2つ目の課題としては、効率的に外部温度環境変化の影響を緩和するハードウェアの実現可能性を検討する。本項目に対しては、相変化蓄熱材を用いることにより受動的に設計温度近辺で安定するシステムを構築する。能動的な仕組みを極力排除し、電池用温度制御システムの小型・軽量・省エネルギー化を目指す。これらを組み合わせることによって、リチウムイオン電池の使用温度・充電範囲が適切に管理され、使用環境条件によらず長期間安定運用が可能となると期待される。

2. 温度変化を考慮した電池充電状態推定およびその情報を用いた電池管理システムの検討

2.1 温度依存性を考慮した電池数理モデルの構築

一般的なりチウムイオン電池を使用環境条件によらず長期的に安定した性能でもって運用するた

めには、まずはその状態を正確に把握することが必要となる。中でも本課題の目的に対しては、特に温度環境変動下に対しても正確な充電状態の情報を得ることが必要である。その状態推定には、対象を正確に模擬するモデルが必要となる。また、実験的検証の施行条件を数値解析により絞り込むためにも、高精度なモデルは必須となる。

本研究では、先行研究[2]にならい、図1で示されるような3次のフォスター型回路で表される等価回路で電池のモデル化を行った。等価回路のパラメータには泳動抵抗 R_0 、電荷移動抵抗 R_{ct} 、電気二重層容量 C_{dl} 、拡散抵抗 R_d 、拡散容量 C_d がある。ここで、泳動抵抗とは電解液内での泳動過程などに起因する抵抗である。電気二重層容量は電極表面付近に発生する電気二重層に起因する容量である。拡散インピーダンスは、電極反応過程の拡散過程に起因する。

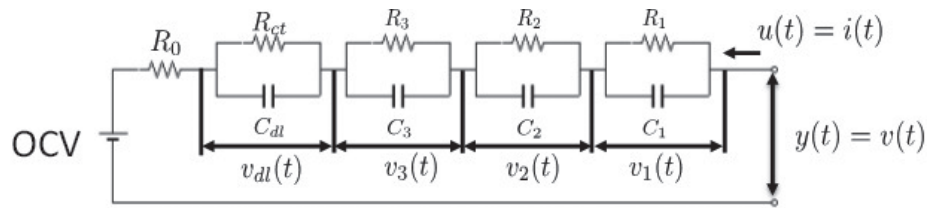


図1. 電池の等価回路モデル

入力として $u(t) = i(t)$ 、出力 $y(t) = v(t)$ とし、 $i(t)$ は回路全体を流れる充放電電流、 $v(t)$ は回路全体の電圧降下、OCVは開回路電圧(Open circuit voltage)、状態変数は式(1)のように充電率(SOC: State of Charge)と等価回路内部それぞれの電位差とする。

$$\mathbf{x}(t) = [\text{SOC}(t) \ v_{dl}(t) \ v_3(t) \ v_2(t) \ v_1(t)]^T \quad (1)$$

その際、キルヒホッフの法則よりFCCを満充電容量とする状態空間表現は下記で表される

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} u(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \text{diag} \left[0 \ -\frac{1}{C_{dl} R_{ct}} \ -\frac{1}{C_3 R_3} \ -\frac{1}{C_2 R_2} \ \frac{1}{C_1 R_1} \right], \quad \mathbf{b} = \left[\frac{1}{\text{FCC}} \ \frac{1}{C_{dl}} \ \frac{1}{C_3} \ \frac{1}{C_2} \ \frac{1}{C_1} \right]$$

$$C_l = \frac{C_d}{2}, \quad R_l = \frac{8R_d}{(2l-1)^2 \pi^2} \quad (l = 1, 2, 3)$$

また、出力を電池の端子電圧とし、下記で表す

$$y(t) = f_{ocv}(\text{SOC}(t)) + [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \mathbf{x}(t) + R_0 u(t) \quad (3)$$

モデル内の未知パラメータについては、実験的に同定する。ここで、OCVとSOCの関係性は式(4)で表される温度・放電電流に依存しない関数とし、微弱電流で放電させた際の電池端子電圧・電流プロファイルをフィッティングし、各定数を求める。

$$f_{ocv}(\text{SOC}(t)) = K_\theta - \frac{K_1}{\text{SOC}(t)} - K_2 \text{SOC}(t) + K_3 \ln(\text{SOC}(t)) + K_4 \ln(1 - \text{SOC}(t)) \quad (4)$$

ここで、 K_0 は標準電極電位、 $K_1 \sim K_4$ は係数となる。図2に測定データ、表1に同定パラメータを示す。

R_0 、 R_{ct} 、 C_{dl} についてはバッテリーに交流の微小電圧・微小電流を流し、周波数領域でのインピーダンスを計測する交流インピーダンス法[3]を用いる。これらについては、先行研究の結果から温度および充電状態依存性がある可能性があることから、OCVを3.42~4.17Vの範囲で9条件、温度を

-20～50℃の範囲で9条件の計81条件に対する計測を行い、得られた結果から関数を定義し、最小二乗法でフィッティングし係数を同定した。

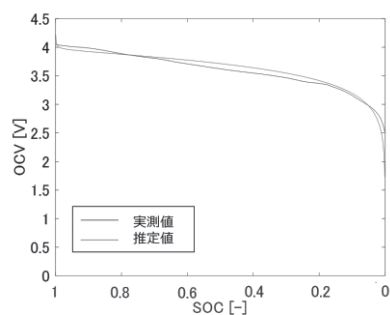


図2. SOC-OCV曲線

表1. 開回路電圧モデル定数

Parameter	value
FCC ₀ [mAh]	3339
K ₀	3.925
K ₁	-1.914e-04
K ₂	-1.788e-03
K ₃	-3.185e-02
K ₄	0.7337

各々の計測結果を図3～5に示す。この結果から、温度依存性に比べてOCV依存性が小さいこと、-10℃以下でのパラメータ変化が大きいこと、本研究ではハードウェア的に温度の安定化を図ることから、-10℃以上の温度依存性に対してのみ関数を定義した。各々のパラメータに対し定義した関数を式(5)-(7)に、同定した定数を表2に示す。

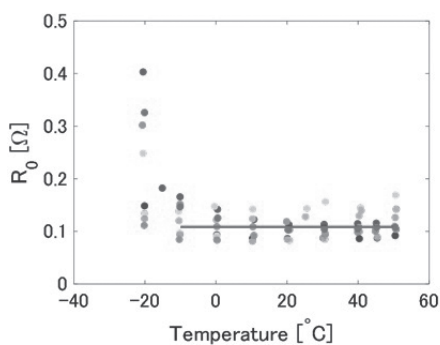


図3. R₀推定値

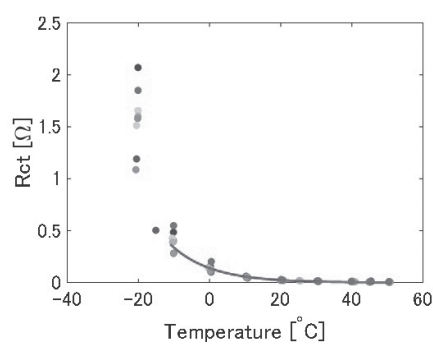


図4. R_{ct}推定値

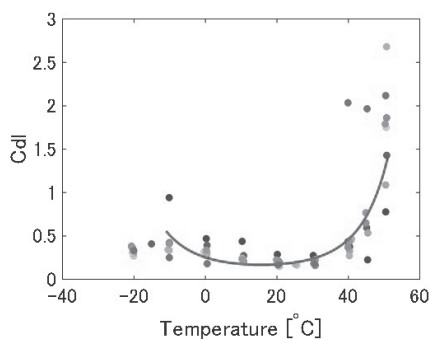


図5. C_{dl}推定値

表2. 電池内部パラメータ

R ₀	a _{Rct}	b _{Rct}	a _{Cdl}	b _{Cdl}	c _{Cdl}
0.104	0.0881	1.97	-0.00169	0.0527	1.37

- R₀近似関数

$$R_0 = R_0 \text{ (定数)} \quad (5)$$

- R_{ct}近似関数(温度Tに対する関数)

$$R_{ct} = \exp(-(a_{Rct}T + b_{Rct})) \quad (6)$$

- C_{dl}近似関数(温度Tに対する関数)

$$C_{dl} = \exp(-(a_{Cdl}T^2 + b_{Cdl}T + c_{Cdl})) \quad (7)$$

以上により、温度依存性を考慮した電池数理モデルを構築した。

2.2 電池数理モデルを用いた充電状態推定

2.1節で構築したモデルを離散化し、拡張カルマンフィルタを用いて充電状態推定器を構築し、その性能を検証するための実験を実施した。その結果を図6～8に示す。実験条件としては、SOC初期値を100%、温度一定は一定としている。図6は電流入力履歴、図7-8は高精度に計測した電流の積算値を正の値と仮定した際のSOC推定値および誤差である。ハッチングは推定分散の $\pm 2\sigma$ 値である。図7はSOC推定値の初期値が100%、図8が90%の場合である。このように初期推定値に誤りがある際にも、モデルとフィルタにより状態量の初期誤差が低減されることを確認した。

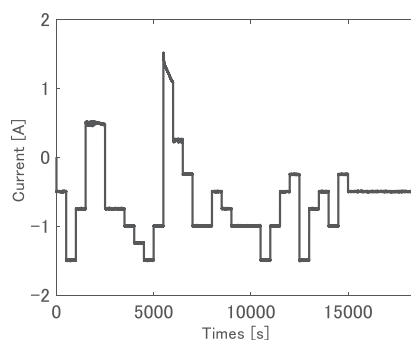


図6. 入力履歴

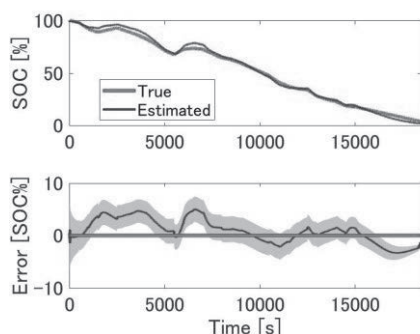


図7. 初期誤差が無い場合の推定結果

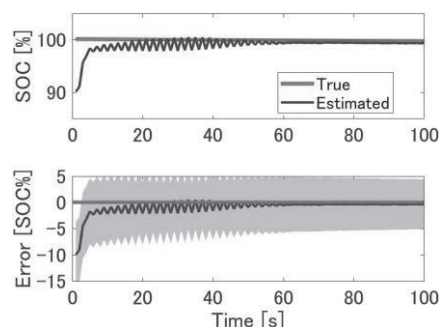


図8. 初期誤差がある場合の推定結果(拡大)

2.3 電池充電状態管理システムの検討

2.1節で構築したモデルを用いて将来の挙動を推定し、適切な充電範囲での使用を可能とする制御系を提案する。ここで、ケーススタディとして周期的な温度・負荷状態変化が発生する厳しい条件の適用事例として、低軌道地球周回軌道上の小型宇宙機の運用計画立案を設定する。

2.3.1 適用対象のモデル化と条件

衛星の運動は2次元平面内と仮定し、高度は300kmとした。運用モードは既存衛星[4]を参考にミッションモードと充電モードの2種類とした。モードの切替は1周期を n 分割しそれぞれの区間ごとに設定するとした。ミッションモードでは総負荷電力は78.5 W、地心指向の姿勢で地球観測のミッションの実施を想定した。充電モードの負荷電力は機能維持に必要な最小限の38.5 W、太陽指向の姿勢をとる。軌道上の位置と姿勢変動および温度変化による太陽電池発電量の変化もモデル化する。運用時の目標SOC範囲は2年間の運用期間を想定した充放電サイクル数とバッテリーの寿命の関係より、100-75%とし、ミッションを実施する軌道上位置やタイミングには特に制約を設けずにミッション時間の最大化を実現する。また、適切な電源制御器を実装することを仮定し、電池の充電時には定電流定電圧充電[5]を実施するとし、運用条件に応じて5つの充放電電流値を定義した。

2.3.2 逐次2次計画法による運用モード最適化と実装に対する課題の解決

充電モードでは0, ミッションモードでは1の値をとるとし, 最適化変数として各区間の運用モードをとる. また, その変数の和を評価関数とし, その値の最大化を狙う. 制約条件としては区間内の最大・最小SOC値が所望の範囲から逸脱しないこととする. しかし, この設定した問題では最適化変数が離散値をとり, 制約条件の式の内部にも離散値が存在する. そこで, シグモイド関数を導入して連続化し, 新たに連続緩和問題を設定した. この連続緩和問題を逐次2次計画法で最適化し, 得られた最適解を任意に設定する閾値を用いて再度離散化することによって, 所望の解を得ることとする.

この手法は計算負荷が高いため実時間実装は困難である. よって, 実機には事前に決定したモード切替プロファイルを実装する. しかし, 実際にはモデル化誤差などにより推定されるSOCプロファイルと事前計算値には偏差が生じることが想定される. この誤差の積算を防ぐために, 許容偏差に対する閾値を設定し, 偏差を低減する運用モードに切替ることにより対処する.

2.3.3 提案手法の有効性およびモデルの検証

SOCの初期値を100%, 軌道1周期の分割数を48, SOC制約範囲を73-98%とし, 8周期分の運用を実施する場合について, 数値シミュレーションおよびハードウェアシミュレータ(図9)を用いた検証を行った. それらの結果のまとめを図10に示す. この結果から, 解析的にも実験的にも提案手法がSOC制約範囲を逸脱していないことが確認できる. 以上により, 電池充電状態管理システムの有効性を確認した.



図9.ハードウェアシミュレータ構成概要

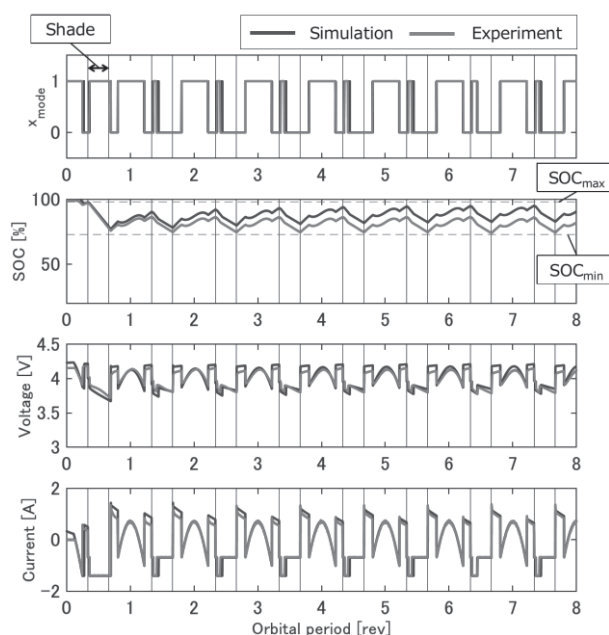


図10. 数値シミュレーションおよびハードウェアシミュレータを用いた検証結果

3 効率的に外部温度環境変化の影響を緩和するハードウェアの検討

3.1 電池の発熱モデルの構築

制御系設計に先駆けて 制御対象である電池の熱数学モデルの構築が必要となる よって、先行研究など[6]を参考に 電池の発熱モデルを構築した。内部の諸量分布が一様とみなせる小型の電池が電流 I で放電を行っている際、単位時間当たりの総発熱量 Q は 等価内部抵抗を R_i 、セル温度を T_c 、エントロピー変化 ΔS Faraday定数 F から以下の式(8)で表すことができる

$$Q = I^2 R_i - \frac{T_c \Delta S I}{F} \quad (8)$$

また、この発熱モデルに加えて各種文献などを用いてセル内部の熱伝導率などの熱物性パラメータを整理し、バッテリー単体に対する熱数学モデルを構築した 構築したモデルを用いた結果の一部を下記に示す

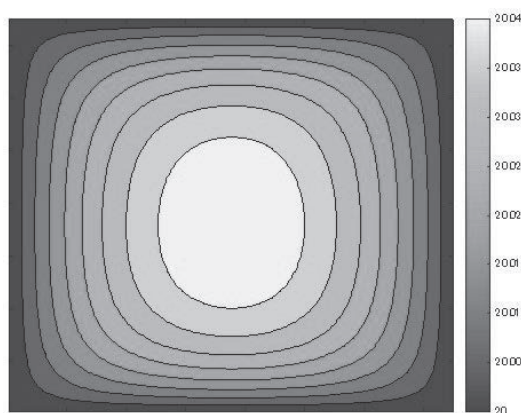


図11. 発熱モデルを用いた場合の2次元平面内での温度分布

3.2 蓄熱材・断熱材の選定, 特性評価

低温域で相変態が発生する相変化蓄熱材を調査し、物性や入手性・加工性などを鑑みてトレードオフを実施した。また、主に対象として考える低温で対流のある環境下での使用を考慮し、断熱材に関しても併せて選定・評価を実施した。カタログ等に詳細熱物性の記載がないものに関しては、別途測定も実施した。図12にあるサンプルの示差走査熱量計を用いた潜熱測定結果を示す。このように、個々のサンプルに対して所望の温度近辺での相変態が行われていることを確認した。

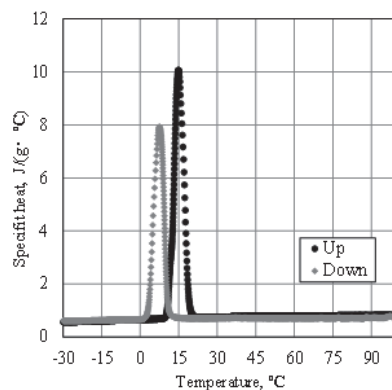


図12. 示差走査熱量計を用いた潜熱測定結果

3.3 温度制御システム構成案と数値シミュレーションによる評価

3.1項, 3.2項の情報を用いて, 温度制御システムの構成案を検討した. 個々の構成案は, 全体システムの熱数学モデルを構築し, 想定される様々な条件に対して数値シミュレーションを実施することによって評価した. このような形で, 数値シミュレーションによる解析を進めており, 所望の熱的安定特性をもつシステムの実現可能性が確認されている.

4. おわりに

本研究では, リチウムイオン電池を長期的に安定した性能でもって運用するために, ①温度変化を考慮した電池充電状態推定およびその情報を用いた電池管理システムと②効率的に外部温度環境変化の影響を緩和するハードウェアの実現可能性を検討した. 1つ目の課題に関しては, 温度依存性を考慮した電池数値モデルの構築, そのモデルを用いた充電状態推定手法の確立, 推定結果とモデルを用いて, 将来の挙動を推定し, 適切な充電範囲での使用を可能とする制御系を提案し, 数値解析および実験によりその有効性を確認した. 2つ目の課題に対しては, リチウムイオン電池の発熱モデルおよび熱数学モデルを構築し, 受動的に設計温度近辺で安定するシステムを構築するための相変化蓄熱材などの評価を行った. また, 数値解析を用いて提案するシステムの実現可能性を示唆した. これらの成果を組み合わせることによって, リチウムイオン電池の使用温度・充電範囲が適切に管理され, 使用環境条件によらず長期間安定運用が可能となると期待される.

参考文献

- [1] Pesaran, A.A., Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *J. Power Sources* 110, pp. 377-382, 2002.
- [2] 足立修一, 廣田幸嗣, 押上勝憲, 馬場厚志, 丸田一郎, 三原輝儀, バッテリマネジメント工学, 東京電機大学出版局, 2015.
- [3] 板垣昌幸 :電気化学インピーダンス法 第2版 原理・測定・解析, 丸善出版, 2011.
- [4] K. Miyata, and S. Nakasuka, On-Orbit Evaluations of the Three Axis Stabilization Performances of Standard Micro-Satellite Buses, *Transactions of the Japan society for aeronautical and space sciences, aerospace technology Japan*, Vol. 14, No. ists30, pp. Pf 17-Pf 24, 2016.
- [5] 白田 昭司, リチウムイオン電池回路設計入門, 日刊工業新聞社, 2012
- [6] 乾 義尚, 渡瀬 祐樹, 花本 武史, 綾部 泰, 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 (電力・エネルギー部門誌)*, 124 巻, 8 号, p. 1041-1048, 2004

本研究に関する業績

- [1] 高木新, 宮田喜久子, 山口皓平, 原進, バッテリ状態推定に基づいた充電率制約を満たす超小型人工衛星の運用計画最適化の検討, 第55回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2018