

物理と情報と制御

Physics, Information and Control

足立 修一¹

Shuichi Adachi

要 旨

本稿では、電気自動車やハイブリッド自動車のエネルギー源として重要なリチウムイオン二次電池の充電率推定を具体的な対象として、工学/技術において物理と情報の両面から問題を取り扱うことの重要性を述べる。そして、物理と情報を結ぶ重要な技術であるモデリングと制御の役割について説明する。リチウムイオン二次電池の充電率推定では、電池の物理化学的な知見に基づいた単純化モデルの導出と、非線形カルマンフィルタを用いた充電率とパラメータの同時推定を紹介する。最後に、提案法を電気自動車の走行データに適用し、提案法の有効性を明らかにする。

Abstract

The importance of cyber-physical approach to problems in engineering and technology is addressed. Modeling and control are key technologies to bridge between physics and information. As an example, estimation of state of charge (SOC) of lithium-ion secondary batteries for hybrid electric vehicles (HEVs) and electric vehicles (EVs) is explained. Especially, a simplified modeling of the lithium-ion secondary batteries in consideration of physicochemical knowledge and simultaneous estimation of the SOC and circuit parameters by nonlinear Kalman filter are introduced. The proposed method is verified by performing experiments using an EV.

Key Word: Physics, Information, Modeling, Control, State of charge, Electric vehicle, Lithium-ion secondary battery,

1. はじめに

たとえばロボットのようなメカニカルシステムを制御する場合、制御対象のダイナミクス（動力学、あるいは、動特性と訳される）を記述する数学モデル（たとえば、伝達関数や状態方程式など）が重要な役割を果たす。特に、1960年代以降に提案されたアドバンスト制御理論（現代制御、ロバスト制御、モデル予測制御⁽¹⁾など）は対象の数学モデルに基づく**モデルベースト制御**（Model-Based Control : MBD）であり、制御対象のモデリングは非常に重要なステップである。

ひとたび制御対象のモデルを手に入れれば、アドバンスト制御理論を適用することによってコントローラを標準的な方法で系統的に設計することができる。産業界で幅広く利用されているPID制御に代表される古典制御⁽²⁾では、現場のオペレータの経験と勘による試行錯誤によってコントローラを設計しているが、アドバンスト制

御を用いることによって試行錯誤の過程を削減することができ、それによって設計者への依存が少ない設計が可能になる。

それと同時に、対象のモデルを用いることによって、センサで計測できないような物理量（状態量とも呼ばれる）を、たとえばカルマンフィルタ⁽³⁾を用いることによって推定することもできる。さらに、どのようなときに対象を制御できるのか（これを可制御性という）、そして、どのようなときに状態を観測できるのか（これを可観測性という）という疑問に制御理論は明快に答えてくれる⁽⁴⁾。

本稿では、制御と状態推定のためのモデリングに焦点を絞り、モデリングの方法、モデリングの重要性などについて解説する。そして具体例として、われわれが研究開発を続けている電気自動車やハイブリッド自動車のエネルギー源として用いられているリチウムイオン二次電池のモデリングと充電率（State Of Charge: SOC）推定⁽⁵⁾

¹ 慶應義塾大学理工学部 教授

について解説する。

リチウムイオン電池の充電率推定という具体的な例を用いて、工学／技術における物理の世界（本稿では自然界など現実の世界をこのように呼ぶ）と情報の世界（本稿では紙と鉛筆や計算機などの仮想的な世界をこのように呼ぶ）の関係の重要性を述べる。さらに、物理と情報を結ぶ重要な技術としての制御の役割についても強調する。

2. 第一原理モデリングとシステム同定

たとえば、バネ・マス・ダンパ系と呼ばれる力学系は、2階微分方程式

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + c \frac{dx(t)}{dt} + kx(t) = f(t) \quad (1)$$

で記述できる。ただし、 $x(t)$ は時刻 t における質点の位置であり、 $f(t)$ は質点に印加される力である。また、 m は質点の質量、 c はダンパの粘性摩擦係数、 k はバネのバネ定数である。

いま、初期値を0とおいて(1)式をラプラス変換すると、力から位置までの伝達関数は、

$$G(s) = \frac{x(s)}{f(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (2)$$

となる。これが対象とする力学系のモデルの一つである。このように、対象が従う物理的な法則に基づいてモデリングを行う方法を**第一原理モデリング**、あるいは物理モデリングと呼ぶ。したがって、モデリングを行う場合、対象が従う第一原理（たとえば、運動方程式、マクスウェルの方程式など、あるいはさまざまな保存則など）を積極的に利用する第一原理モデリングがモデリングの王道であり、モデリングの第一歩でもある。また、このような方向で制御のためのモデリング技術は発展してきた。

最近、ビックデータという言葉聞く機会が増えてきた。おおざっぱに言うと、世の中に溢れている大量のデータの有効活用をめざした学術分野である。制御のためのモデリングの分野でも実験データに基づく方法が開発されており、それは**システム同定**(system identification)⁶⁾と呼ばれる。

システム同定では、対象をブラックボックスとみなし、対象のさまざまな動特性を励起するような入力信号を印加し、それに対する出力信号を測定する。そして、その入出力データから主に統計的な方法でモデルのパラメータを推定する。そのため、システム同定はブラックボックスモデリングと呼ばれ、それに対して第一原理モデリ

ングはホワイトボックスモデリングと呼ばれることがある。前述したように、第一原理モデリングが「物理」（現実の世界）を背景としているのに対して、システム同定は「情報」（紙と鉛筆と計算機の世界）を背景としているとも考えられる。

対象が従う物理法則が明確でない場合、あるいは複雑な場合には、入出力データに基づくモデリング法であるシステム同定の出番になる。たとえば、電気自動車⁷⁾を考えた場合、駆動部分であるモータは電気回路と回転運動の方程式に支配されるため、第一原理モデリングを適用することができる。一方、エネルギー源である二次電池は、複雑な物理化学法則に支配されており、それらを用いてモデリングを行うと非常に複雑なモデルが得られ、それを制御系設計や状態推定に用いることは一般に困難である。そのため、二次電池のモデリングはシステム同定の適用が適している。本稿では、二次電池の入出力データから対象のパラメータを推定する方法について考える。

3. リチウムイオン二次電池の充電率推定

本章では、モデリングと状態推定の具体的な例として、電気自動車やハイブリッド自動車などに用いられるリチウムイオン二次電池の充電率推定について解説する。

3.1. 二次電池の充電率

ガソリン車の燃料の残量を測ることは比較的容易であるが、電気自動車のエネルギー源であるリチウムイオン電池の残量を直接測ることは難しい。

図1に示したように、二次電池はタンクモデルを用いて説明することができる。図においてタンクの高さが満充電容量であり、実際の液面の高さが電池残量である。これらより、二次電池の充電率(SOC)は、

$$\text{SOC} = \frac{\text{液面の高さ}}{\text{タンクの高さ}} \quad (3)$$

で定義される。ガソリンと違って、二次電池の場合、このタンクの高さと液面の高さを直接測ることはできず、実際にわれわれが手に入れられるものは、タンクから流れる流量（電流に対応）とその圧力（端子電圧）だけである。そのため、SOCを直接測定することはできず、電流と電圧を用いて何らかの方法で推定しなければならない。

本稿では、SOCを推定する方法を以下で紹介する。

なお、電池を使用していくと、タンクの容量がだんだん小さくなって電池容量が減っていく。そのため、同じ液面の高さでも、利用可能な電池の容量は減少する。そ

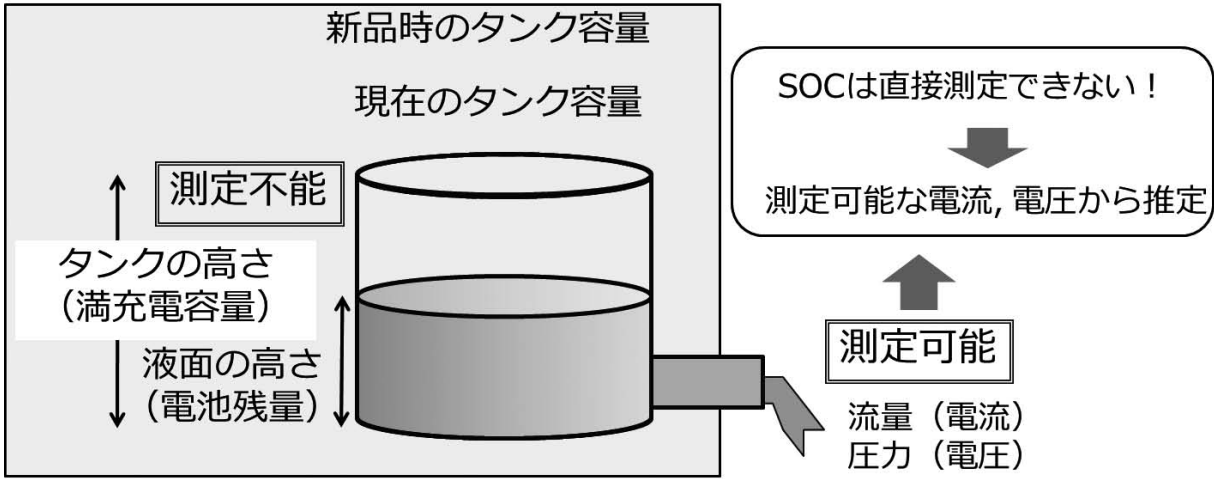


図1 タンクモデルを用いた電池の充電率 (SOC) の説明

ここで、二次電池の健全度 (State-Of-Health : SOH と略記する) を

$$SOH = \frac{\text{現在のタンク容量}}{\text{新品時のタンク容量}} \quad (4)$$

のように定義するが、本稿ではSOHの推定までは議論しない。

3.2. 実用化されているSOC推定法

従来からもっともよく知られているSOC推定法は、クーロンカウント法(電流積算法)である。その計算式は、

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{1}{FCC} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (5)$$

で与えられ、SOCは通常%で表される。ただし、 t_0 は初期時刻で、 $SOC(t_0)$ はSOCの初期値であり、FCCは満充電容量(Full Charge Capacity)を表す。 $i(t)$ は時刻 t における充放電時の電流であり、充電する方向を正にとる。

高精度な電流センサを利用し、SOCの初期値誤差がない場合には、クーロンカウント法によって高精度なSOC推定を行うことができる。しかし、初期値誤差があると、その誤差も積分してしまうため、推定精度は劣化してしまう欠点をもつ。また、電流だけを利用しており、端子電圧を用いていない。

一方、二次電池の端子電圧とSOCの関係をさまざまな電流に対して実測して、複数個のグラフを作成し、それを用いて端子電圧と電流からSOCを推定する方法も実用化されている。しかし、温度などの条件によってこの関係は変わってしまうため、精度良いSOC推定を行うことが難しかった。

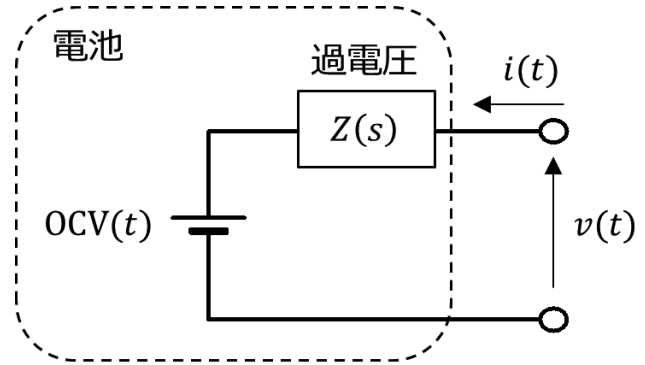


図2 二次電池の等価回路モデル

3.3. モデルベースSOC推定法

二次電池を等価回路で記述すると、図2が得られる。この図で、測定可能な量は、電流 $i(t)$ とそれに対応する端子電圧 $v(t)$ である。また、電池の内部変数は、開回路電圧(Open Circuit Voltage : OCVと略記)と内部インピーダンス $Z(s)$ による電圧降下 $Z(s)i(t)$ (これは過電圧と呼ばれる)である。すると、キルヒホッフの電圧則から

$$v(t) = OCV(t) + Z(s)i(t) \quad (6)$$

が得られる。

いま、OCVとSOCの間にはSOC-OCV特性と呼ばれる静的な非線形関係があることが知られている。この特性は、電極や電解液などの材料によって決まり、電池の温度や劣化にはあまり影響しないことが知られている。図3にリチウムイオン二次電池のSOC-OCV特性の一例を示した。本稿では、この非線形関係を

$$OCV(t) = f_{ocv}(SOC(t)) \quad (7)$$

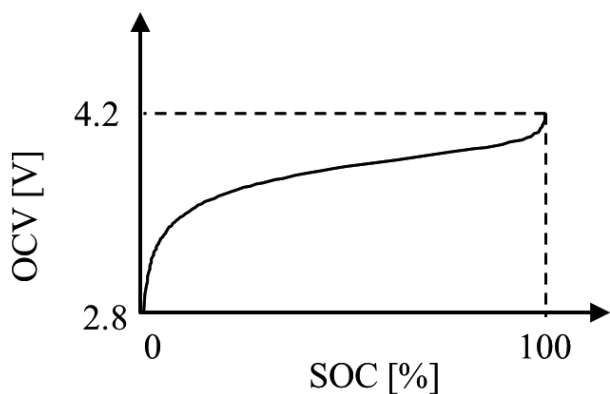


図3 リチウムイオン二次電池の SOC-OCV 特性

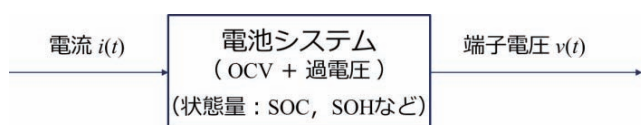


図4 システムとしてみた二次電池

と記述する。

OCV (t) が測定できれば, (7) 式を用いて SOC を直接推定することができるが, 充放電中に OCV を測定することはできない. そこで, (6) 式を用いて OCV を求めることを考えるが, そのためには内部インピーダンス $Z(s)$ が必要になる. この内部インピーダンス, あるいは過電圧のモデルをどのように構築するかが, モデルベース SOC 推定の第一歩である.

以上をブロック線図としてまとめたものが図4である. ポイントは, 二次電池の入力を電流 $i(t)$, 出力を端子電圧 $v(t)$ とするシステムとして捉えることである. システムの中には直接測定できない内部状態量として SOC や SOH がある. さらに, SOC は OCV の既知の非線形関数で記述され, 過電圧は等価回路モデルによって記述する. このように, 本稿で対象としている二次電池システムは未知の非線形システムであると考えられる.

対象をシステム制御理論的に見るためには, 対象をシステムとみなし, 何が入力で, 何が出力で, そして, 何が状態変数かを明確にすることが重要である.

3.4. フォスター型等価回路モデル

過電圧を等価回路で表現する方法はさまざま考えられるが, われわれはこれまでの研究, 特にこの分野における先駆的な研究である Plett の研究⁽⁸⁾を参考にして, 図5で表されるフォスター型等価回路を用いることにした.

フォスター型等価回路の特徴は, リチウムイオン電池内の3つの物理化学現象, すなわち,

(1) 電解液内での泳動過程の抵抗

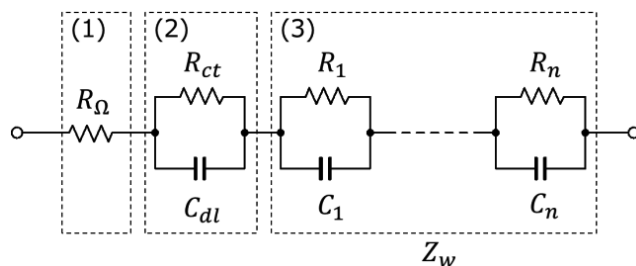


図5 二次電池のフォスター型等価回路

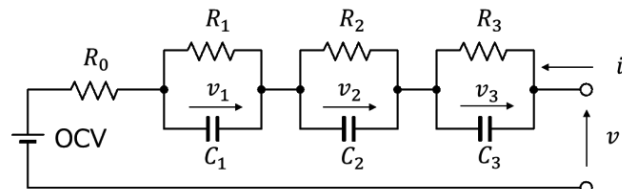


図6 Plett が用いたフォスター型等価回路

(2) 電極表面の溶媒和・脱溶媒和過程のインピーダンス
(3) リチウムイオンの拡散過程のインピーダンスを直列接続の形式で表現できる点にある. 図において, R_Ω は泳動抵抗, R_{ct} は溶媒和・脱溶媒和抵抗, C_{dl} は電気二重層容量である.

Plett は図6に示したように, フォスター型等価回路において, 泳動過程の抵抗 R_Ω と4つの RC 並列回路を用いて過電圧を記述した.

図より, 内部変数である状態ベクトルを

$$x(k) = [\text{SOC}(k), v_1(k), v_2(k), v_3(k)]^T$$

とおく. ここで, k は離散時刻を表す. 回路パラメータをベクトル表現し,

$$\theta(k) = [R_0(k), R_1(k), C_1(k), R_2(k), C_2(k), R_3(k), C_3(k)]^T$$

とおく. ここで, $\theta(k)$ は時刻 k における未知パラメータベクトルである.

さらに, 状態ベクトルとパラメータベクトルをまとめ,

$$z(k) = [x^T(k) \theta^T(k)]^T$$

とし, これを拡大状態と呼ぶ.

詳細⁽⁹⁾省略するが, この拡大状態は非線形状態方程式

$$z(k+1) = f(z(k), \theta(k), u(k)) + v(k) \quad (8)$$

$$y(k) = h(z(k), \theta(k), u(k)) + w(k) \quad (9)$$

によって記述できる. ただし, f と h は非線形関数である. 入力 $u(k)$ は電流 $i(k)$, 出力 $y(k)$ は端子電圧 $v(k)$ である. また, $v(k)$ はシステム雑音, $w(k)$ は観測雑音である.

このように定式化することにより、状態と回路パラメータをたとえばUKF (Unscented Kalman Filter) などのような非線形カルマンフィルタを用いて同時推定することができる⁽⁴⁾。

3.5. 電気自動車を用いた走行実験

1台の電気自動車 (EV) を用いて走行実験を行った。実験に用いたEVに搭載したリチウムイオン二次電池は、正極にマンガン系材料、負極にグラファイトを用いたものであった。また、新品時の満充電容量は65.6 Ahであった²。

SOH=1 とみなしてよい新車を用いた走行実験によって得られたデータの一例を図7に示す。図には、電流と全セルの平均電圧の波形、SOCの真値、そして電池の平均温度と外気温を示した。ここで、SOCの真値とは、高精度な電流センサを用いて、初期値の調整を十分にを行い、クーロンカウント法を行った結果である。走行実験では、急速充電を繰り返ししながら、高速度道路や山岳路

を10時間走行した。

このデータに対して、Plettが提案したUKFによる状態とパラメータの同時推定を適用し、SOCと等価回路パラメータを推定した。その結果を図8に示す。図より、ほぼ正確にSOCを推定していることがわかり、SOC推定誤差のRMSE (Root Mean Square Error) は4.93%であった。しかし、回路パラメータの推定値は変動しており、また、物理的にはあり得ない負値をとることもあって、精度よい推定を行うことができなかった。

SOCの推定だけが目的であれば、この結果でも決して悪くはないが、等価回路のパラメータ推定などには改善すべき点があった。拡大系を構成するため、モデルを構成する未知パラメータの数が増加し、そのため推定精が劣化したと考えられる。特に、モデルの精度を向上させるためにはモデルパラメータを増やす必要があり、モデルの精度と状態推定の精度とはトレードオフの関係にあることが本質的な問題であった。

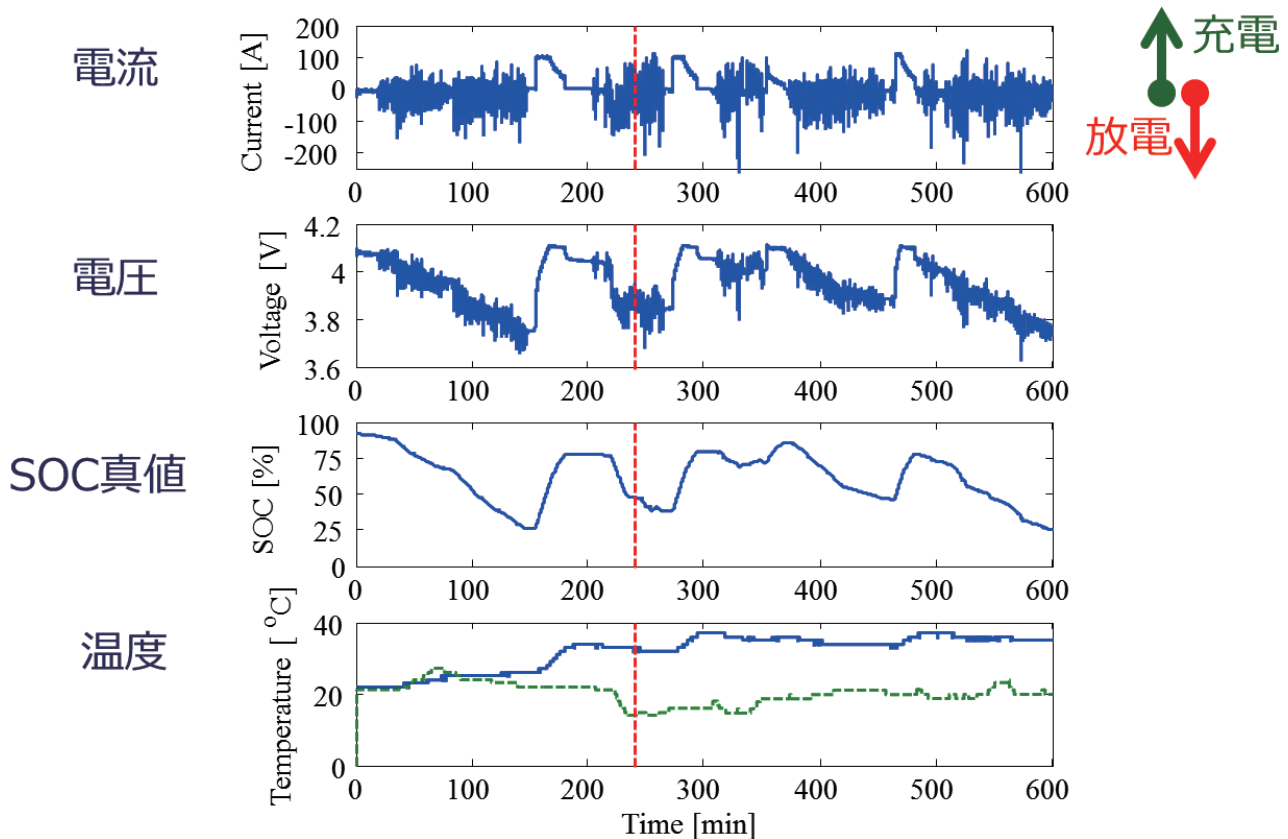


図7 走行実験データ

² Ahは電荷量の単位であり、1Ah=3600Cである。

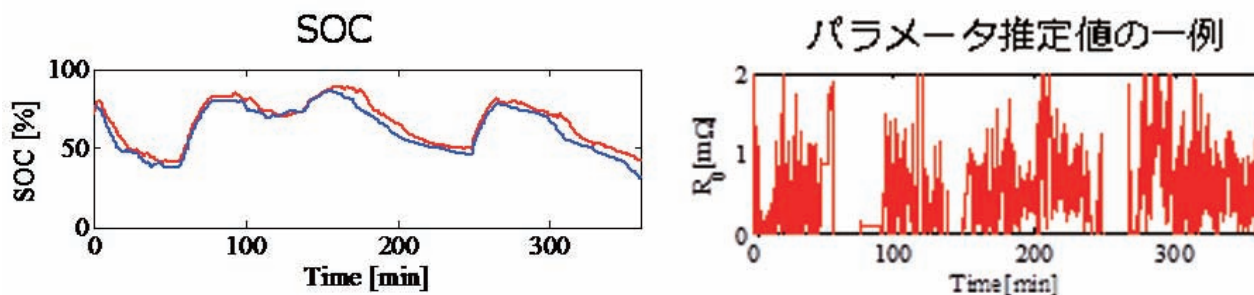


図8 Plettの方法によるSOCと回路パラメータの推定結果

4. SOCと回路パラメータの新しい同時推定法

4.1. 提案法の概要

前章で述べたPlettの方法の問題点を改善するため、われわれは以下の3点を提案した⁽⁶⁾。

- [1] 二次電池の物理化学的知見を用いた少数個のパラメータで構成されるモデル
- [2] UKFの数値的安定性を向上させるための正規化UKFの適用
- [3] 物理パラメータの分布を考慮した対数化UKFの適用

以下ではそれぞれの提案について簡単に説明する。

4.2. ワールブルグインピーダンスを用いた拡散現象のモデル

図5のフォスター型等価回路の(3)の拡散過程を次式で表されるワールブルグインピーダンス

$$Z_w(s) = \frac{R_d}{\sqrt{\tau_d s}} \tanh \sqrt{\tau_d s} \quad (10)$$

で記述することをわれわれは提案した。ここで、 R_d は周波数 $\omega \rightarrow \infty$ での拡散抵抗であり、 τ_d は拡散時定数である。この式は非整数階微分を含むが、フォスター型等価回路の拡散抵抗に対応するRC並列回路のインピーダンスは、

$$Z_w(s) = \sum_{l=1}^n \frac{R_l}{R_l C_l s + 1} \quad (11)$$

で近似することができる。ただし、

$$R_l = \frac{8}{(2l-1)^2 \pi^2} R_d, \quad C_l = \frac{\tau_d}{2R_d} = \frac{1}{2} C_d \quad (12)$$

であり、 C_d は拡散容量、 $\tau_d = R_d C_d$ である。

Plettは n 段のRC並列回路を用いていたが、この回路では抵抗とキャパシタンスで $2n$ 個のパラメータが必要

であった。それに対して、ここで述べた近似を用いると、わずか2個のパラメータだけで等価回路を構成でき、しかも、物理化学的意味が明確なモデルを得ることができた。

提案した近似モデルの精度を周波数領域で比較したものを図9に示した。実線が対象の周波数特性をシステム同定法によって高精度に求めたもので、これをリファレンスとした。点線は $n=8$ としたときの近似モデルの周波数特性であるが、リファレンスとほぼ同じ値が得られた。さらに次数を減らしていっても、 $n=3$ 以上あれば近似の精度がよいことを確かめた。

われわれは、図6に示したPlettが用いたものと同じフォスター型の等価回路をモデルして利用した。

Plettの場合、拡大状態ベクトルは、

$$z = [\text{SOC}, v_1, v_2, v_3, R_0, R_1, C_1, R_2, C_2, R_3, C_3]^T$$

の11状態であったが、提案したモデルでは、

$$z = [\text{SOC}, v_1, v_2, v_3, R_0, R_d, C_d]^T \quad (13)$$

の7状態であり、同時推定によって推定すべきパラメータ数を削減することができた。二次電池の物理化学的な特性をワールブルグインピーダンスで記述し、さらにフォスター型回路で近似することにより、少数個のパラメータでモデルを構成できた点が提案法の利点である。モデリングにおいて、対象が従う第一原理をきちんと理解し、それを利用することが非常に重要である。対象によって重要な第一原理が異なるため、対象を深く理解していないと、正しいモデリングを行うことが難しい。このため「モデリングは難しい」と言われることが多い。モデリングを成功させるためには、きちんと学問と経験と積み重ねていくことが重要である。モデリングに近道はない。

4.3. 状態変数の正規化

(13)式に示した状態変数を非線形カルマンフィルタによって推定することがつぎの問題である。状態変数である R_0, R_d は、たとえば 10^4 のオーダーであり、 C_d のオー

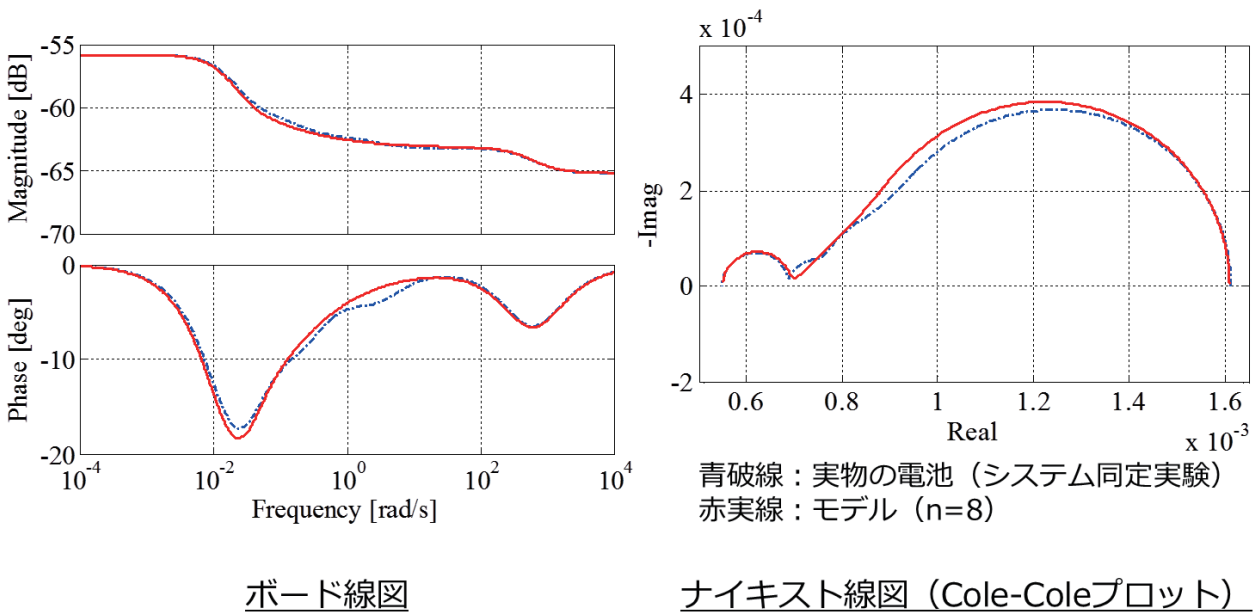


図9 ワールブルグインピーダンスを用いた近似

は、たとえば 10^5 であり、それら大きさは 10^9 も異なる。このようなとき、状態変数の大きさのオーダーが同じくらいになるように次式のように正規化することが重要である。

$$z = \left[\text{SOC}, v_1, v_2, v_3, \frac{R_0}{N_1}, \frac{R_d}{N_2}, \frac{C_d}{N_3} \right]^T \quad (14)$$

ここで、 N_1, N_2, N_3 は正規化定数であり、事前に設計者が選定する。この操作は非常に手軽なものであるが、実問題において正規化の効果は大きいことが多い。

4.4. 対数化

等価回路のパラメータ R_0, R_d, C_d は必ず正値をとるので、状態推定を行う場合、この制約条件を導入することを考えた。

さらに、内部抵抗はアレニウスの式

$$R = \Lambda \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

に従った温度依存性をもつことが知られている。ただし、 Λ は温度依存性がない係数、 E_a は活性化エネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である。これより、回路パラメータは対数正規分布に従うことが予想される。そこで、われわれは拡大状態ベクトルのうち回路パラメータに対応する部分を対数化した、

$$z = [\text{SOC}, v_1, v_2, v_3, \ln R_0, \ln R_d, \ln C_d]^T \quad (15)$$

としたものを用いることを提案した。

図10に正規分布と対数正規分布の確率密度関数の例を示した。正規分布では、正値をもつ変数でも分布がなだらかだと負値をとる可能性があるが、対数正規分布を仮定すると、必ず正値をとることが保証される。

4.5. 提案法による同時推定結果

3.5節で示した走行データに対して3つの工夫を行った提案法を適用し、SOCと回路パラメータを同時推定した結果を図11に示した。Plettの方法ではSOCの推定値のRMSEが4.93%であったのに対して、提案法では1.36%までRMSEを低減できた。さらに、安定した回路パラメータの推定値を得ることができた。SOCのみならず、回路パラメータを走行データから推定できるようになると、これらを今後SOCの推定以外の用途に活用することができる。

5. おわりに

本稿では、リチウムイオン二次電池の充電率 (SOC) の推定問題を例にとりて、対象のモデリングの重要性を述べた。

特に、二次電池の内部インピーダンスを記述する等価回路を物理化学的な知見をもとにワールブルグインピーダンスでモデリングしたことにより、モデルの精度を劣化させることなく、モデルを構成するパラメータを低減することができた。また、回路パラメータが正値しかと

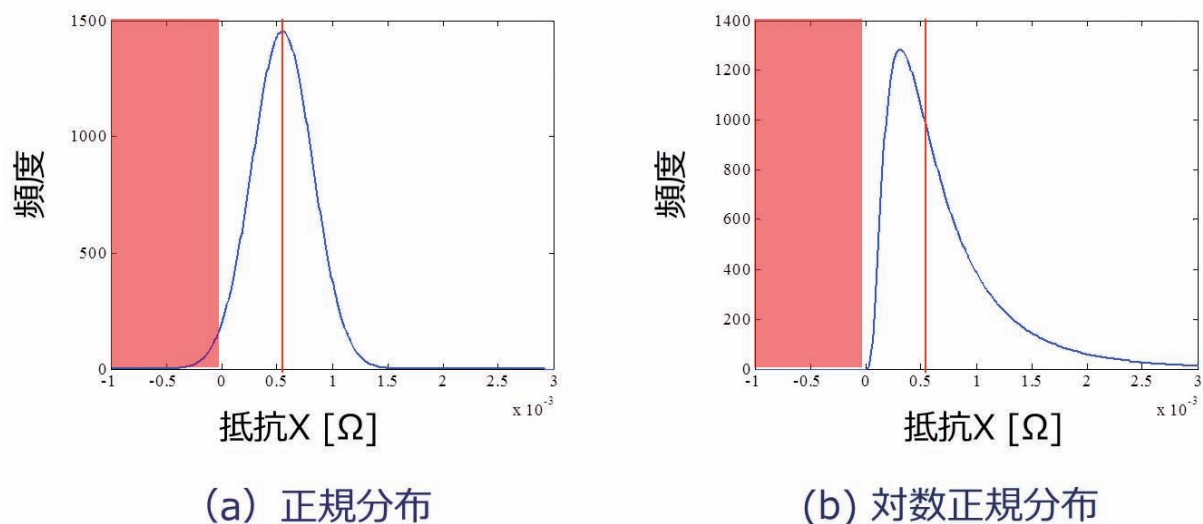


図10 正規分布（左）と対数正規分布（右）

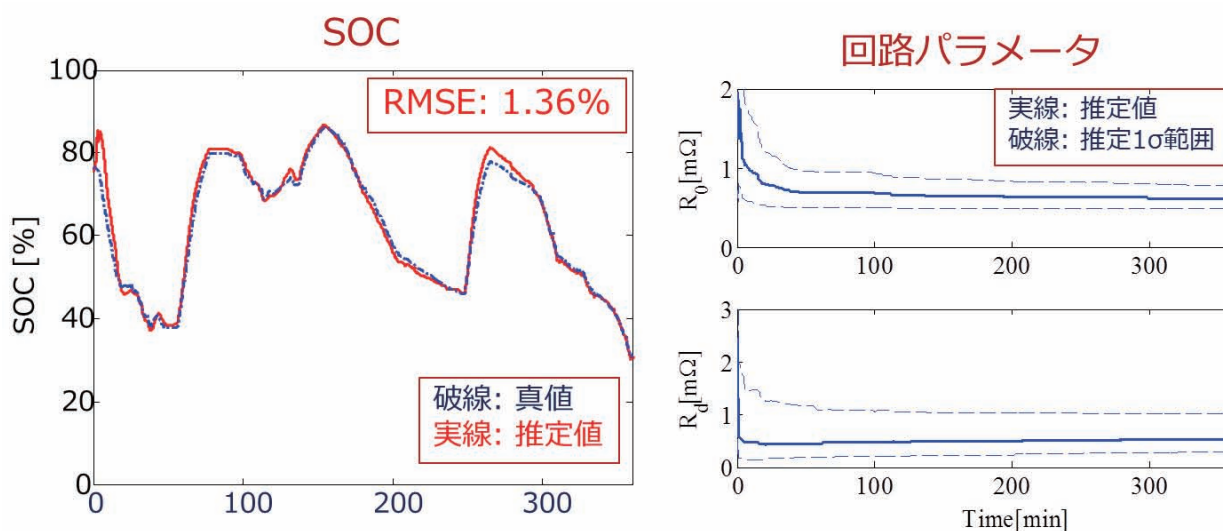


図11 提案法による推定結果

らないという物理特性を考慮するため、対数化する方法を提案した。このように、われわれが取り扱う対象は物理的なものであり、その第一原理を深く理解することによって、モデリングを行うことが非常に重要である。

近年、対象から潤沢な入出力データを収集することができる環境が整ってきた。今回の例でも10時間分のEVの二次電池の電流と端子電圧のデータを利用可能であった。したがって、物理だけではなく、ビッグデータの活用である、情報論的な側面も非常に重要になる。

物理と情報の両面が揃ってはじめて対象を記述する精度よいモデルが構築できる。

物理と情報の両面を結びつけるものが「モデリング」であり、「制御」であり、広く言うとシステム論である。

開発の現場でも、モノ（物理）やデータ（情報）を単体で使うのではなく、システム制御論的なセンスをもって両者をうまく融合し、使いこなすことが成功への近道で

あろう。

最後に、本稿で述べた研究成果はカルソニックカンセイとの長年にわたる共同研究の成果であり、そのキーパーソンである廣田幸嗣氏、馬場厚志博士、長村謙二博士をはじめとして、共同研究に関係されているCKの技術者、慶應義塾大学足立研究室の学生達、そして丸田一郎博士（京都大学）に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) J.M.Maciejowski 著, 足立 修一・管野 政明訳: モデル予測制御 制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出版局 (2005)
- (2) 足立 修一: MATLAB による制御工学, 東京電機大学出版局 (1999)
- (3) 足立 修一, 丸田 一郎: カルマンフィルタの基礎, 東京電機大学出版局 (2012)
- (4) 佐藤 和也, 下本 陽一, 熊沢 典良: はじめての現代制御理論, 講談社 (2012)
- (5) 馬場 厚志, 足立 修一: 対数化 UKF を用いたリチウムイオン電池の状態とパラメータの同時推定, 電気学会論文誌 (D), Vol.133, No.12, pp.1139-1147 (2013)
- (6) 足立 修一: システム同定の基礎, 東京電機大学出版局 (2009)
- (7) 廣田 幸嗣, 足立 修一編著, 出口 欣高, 小笠原 悟司著: 電気自動車の制御システム ~電池, モータ, エコ技術~, 東京電機大学出版局 (2009)
- (8) G.L.Plett : Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs, Part 1 Background, Journal of Power Sources, Vol. 134, No.2, pp.252-261 (200)



足立 修一

略 歴

1981年 慶應義塾大学工学部電気工学科卒業
1986年 慶應義塾大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了, 工学博士
同年, (株)東芝入社, 総合研究所に勤務
1990年 宇都宮大学工学部電気電子工学科助教授
1993~96年 航空宇宙技術研究所客員研究官
2002年 同教授
2003~04年 ケンブリッジ大学工学部客員研究員
2006年 慶應義塾大学理工学部物理情報工学科教授となり, 現在に至る.

システム同定理論, 状態推定理論, 制御系設計理論などとそれらの産業応用研究に従事. カルマンフィルタの基礎, システム同定の基礎, 電気自動車の制御システム (東京電機大学出版局) など13冊の著書. 計測自動制御学会著述賞, 同教育貢献賞, 日本機械学会賞 (論文) などを受賞. 計測自動制御学会理事, 日本鉄鋼協会理事などを歴任