

# 車載バッテリー状態推定システム

Battery State Estimation System for Automobiles

片岡 智美\*  
Tomomi Kataoka

武智 裕章\*  
Hiroaki Takechi

畑中 碧  
Aoi Hatanaka

山口 洋平  
Youhei Yamaguchi

松浦 貴宏  
Takahiro Matsuura

松谷 佳昭  
Yoshiaki Matsutani

リチウムイオン電池を搭載する電動車両の増加を受け、電池を安全かつ有効に活用し、効率的に再利用するために、電池の状態を高精度に推定する技術が重要となっている。当社は、車載リチウムイオン電池向けに、電池モデルのパラメータ推定アルゴリズムを組み込んだ電池状態推定ユニットを開発した。本ユニットを実車両に搭載し、推定した電池セル毎の残容量および劣化状態を、サーバに送信するシステムにて評価を行ったので結果を報告する。

Recently lithium-ion batteries have been widely used for electric vehicles. The states of batteries should be estimated accurately for their safe and effective use. We have developed a battery state estimation system that has a parameter estimation algorithm for a battery model. This paper describes the estimation results including the SOC (state of charge) and SOH (state of health) for each battery cell, and presents the system that transmits these results to a server.

キーワード：電気自動車、リチウムイオン電池、電池状態推定、IoT

## 1. 緒言

原油等のエネルギー制約の高まりや地球温暖化対策の必要性を受け、HEV (Hybrid Electric Vehicle)、EV (Electric Vehicle)、PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) 等の電池を搭載する車両が世界的に増加の傾向にある。また、IoT技術の高まりにより、車両をインターネットに接続することで多様なサービスの実現が期待できるコネクティッドカー (Connected Car) の技術開発も進められている<sup>(1)</sup>。

近年、電動車両に搭載される電池は、リチウムイオン電池 (以下、LiB) が主流となっている。LiBは、鉛電池に比べて、エネルギー密度が高く軽量であるという利点があるものの、安全かつ有効に使用するためには、電池の状態を把握し、適切に保護する技術が必要となる。また、車両には、複数の電池セルを接続して容量や電圧を調整した組電池が搭載されるが、個々のセル毎に温度等の使用環境や性能にばらつきがあるため、用途によっては、セル単位で電池の状態を把握することが重要となる。

当社では、LiB向けの電池状態推定技術を組み込んだ状態推定ユニットを開発し、インターネット経由でサーバと連携する車載システムを構築して車両評価を行ったので、報告する。

## 2. システム構成

本稿で評価対象としたシステムの構成を図1に示す。車載部は、LiB向けの状態推定アルゴリズムを組み込んだ「電池状態推定ユニット」と対クラウドサーバ通信の機能を有

する「車載無線通信機」で構成されている。「電池状態推定ユニット」は、車両システムより、車載電池の電流・電圧等のセンサ情報を受け取り、電池の状態を推定し、その結果を、「車載無線通信機」を経由して、クラウドサーバに送信する。

今回は、電気自動車よりセンサ情報を受け取り、セル単位の電池状態を演算する構成とした。なお、本構成では電池状態推定機能を、独立したユニットに配置しているが、車載時の汎用性を考慮し、車載無線通信機、または、BMU (Battery Management Unit) 等の別のユニットに組み込む機能配置も可能である。

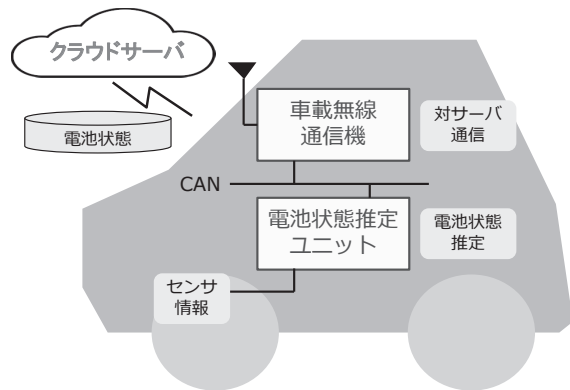


図1 システム構成

### 3. 電池状態推定方式の概要

#### 3-1 電池の状態量

二次電池には、電池の中に残っている残存電荷 (RC) に関わる重要な状態量として、充電率 (SOC<sup>\*1</sup>)、健全度 (SOH<sup>\*2</sup>) がある。SOHには、電池が新品時の満充電容量に対する比率を表す容量維持率 (SOH\_C) と、電池の劣化と共に増加する内部抵抗の増加率 (SOH\_R) が含まれる。また、電池に対して充放電可能な電力量を表す実用上重要な状態量として充放電可能電力 (SOP<sup>\*3</sup>) がある。

これらの推定値は電池の劣化抑制や有効活用、燃費向上等の目的で、車両の制御において重要な判断要素となる。しかし、電池の外部から計測可能な物理量は、電流・電圧・温度であり、SOC等の状態量は直接計測ができない。そのため、OCV (開放電圧) 推定法や、電池を電気回路で表現した等価回路モデルを用いる手法、非線形カルマンフィルタを用いた手法<sup>(2), (3)</sup>等の検討が進められている。

本稿における電池の状態量推定処理の概略ブロック図を図2に示す。外部から計測可能な電流・電圧・温度を入力とし、二次電池の等価回路モデルを活用したパラメータ推定、および拡張カルマンフィルタ (EKF<sup>\*4</sup>) 等の手法を組み合わせて、各種電池状態量を推定する。

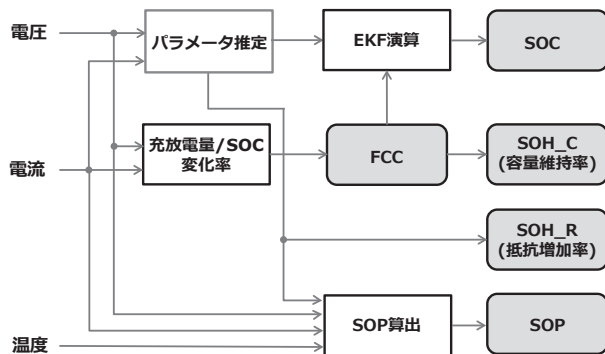


図2 電池状態量推定ブロック図

#### 3-2 電池充電率 (SOC) の推定

電池の状態量を推定するために、図3に示す等価回路モデルを使用する。一般に、電池の充放電時の電圧変化には、溶液抵抗や電荷移動抵抗等に起因する早い反応と、拡散抵抗の増加に起因する遅い反応が混在して影響する。今回のモデルでは、前者の早い反応を抵抗成分Raにて合成近似し、後者の電極内部の拡散現象をRbとCbの並列回路で表す。

図3の等価回路モデルのパラメータについて、以下の近似式 (同定式) 式 (1) ~ (5) が成立する<sup>(4)</sup>。

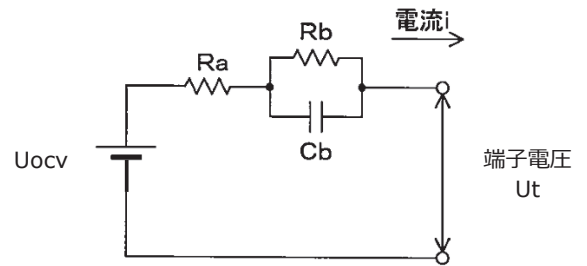


図3 パラメータ推定用の電池等価回路モデル

$$Ut(k) = b_0 \cdot i(k) + b_1 \cdot i(k-1) - a_1 \cdot Ut(k-1) + f \dots (1)$$

$$b_0 = Ra \dots (2)$$

$$b_1 = Ts \cdot Ra / (Rb \cdot Cb) + Ts / Cb - Ra \dots (3)$$

$$a_1 = Ts / (Rb \cdot Cb) - 1 \dots (4)$$

$$f = (1 + a_1) Uocv \dots (5)$$

但し、Ut : 端子電圧、i : 充放電電流、Ts : 計測周期、k : 計測時点を示す整数

ここで、 $\theta = (b_0, b_1, a_1, f)$  を未知パラメータとおき、忘却係数付き逐次最小二乗法を用いて、 $\theta$  を推定する。 $\theta$  の値が得られれば、上記の式 (2) ~ (5) を逆算して得られる式 (6) ~ (9) より、パラメータであるRa、Rb、CbおよびUocvを求めることができる。

$$Ra = b_0 \dots (6)$$

$$Rb = (b_1 - a_1 \cdot b_0) / (1 + a_1) \dots (7)$$

$$Cb = Ts / (b_1 - a_1 \cdot b_0) \dots (8)$$

$$Uocv = f / (1 + a_1) \dots (9)$$

以上の手順で得られた等価回路パラメータをEKF用の電池モデルに適用して逐次演算を行うことで、SOCの推定値を算出している。なお、線形回帰式 (1) に含まれる開放電圧Uocvは、充電率SOCに依存して変化する物理変数であるが、本稿では、EKFで推定した1周期前のSOC値より、SOC-OCVの関係式を用いて算出した値を使用した。

また、この方式では、電流の絶対値が小さい、もしくは、電流の時間変化量が小さい状況が一定時間継続したときに、パラメータの推定誤差が大きくなる傾向が見られる。そのため、電流に所定の条件を加味し、推定精度の低下を防ぐ判断処理を追加した。

### 4. 実車両評価

前章で述べた電池状態推定アルゴリズムを組み込んだ状態推定ユニットを、市販の電気自動車 (総走行距離 : 7万 km以上) に搭載し、実際の車載電池のセンサ情報を入力と

して、走行評価を行った。市街地を約2.5時間走行して取得した電流と電圧（全セル電圧の平均値）のグラフを図4に示す。電流は、車両走行時のモータ駆動による放電（マイナス値）と回生エネルギーの回収による充電（プラス値）を繰り返し、-250Aから+60A程度の範囲で推移しており、全セルの平均電圧は、充放電により、走行開始時の約4.1Vから約3.8Vまで低下している。

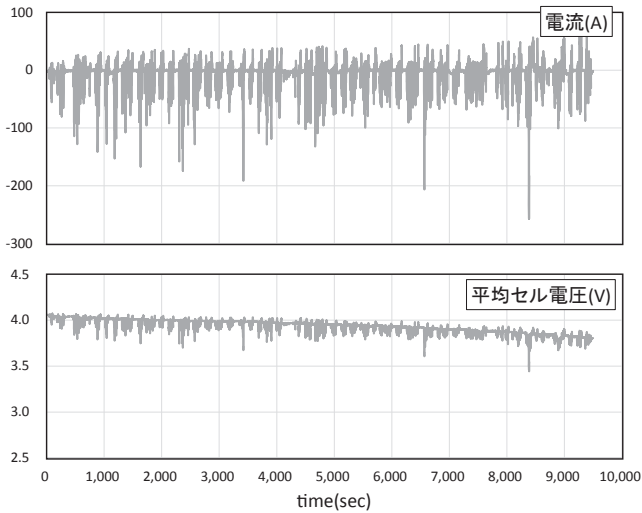


図4 市街地走行時の電池電流・電圧の時間推移

今回の評価では、この電流値、および車載組電池内で直列に接続されている複数セルの各電圧値を使用して、セル毎に状態推定を行った。本稿では一例として、一つのセルに対する電池等価回路パラメータの推定結果を図5に示す。この図は、電池の等価回路モデルパラメータのうち、電池の溶液抵抗を含む早い反応に関連するR0の推定値の時間推移を表している。走行開始から所定時間後に初回の推定値を算出した後、「推定R0」の値は時間経過とともに

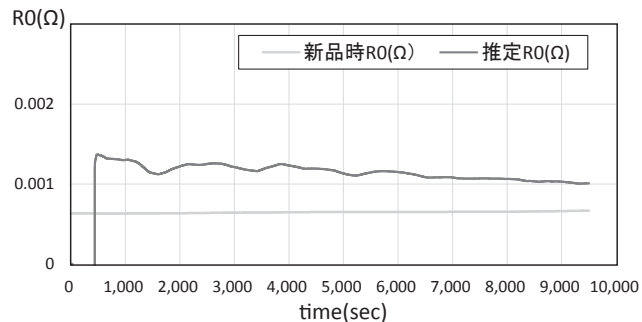


図5 パラメータ推定結果（溶液抵抗R0）

収束する結果が得られた。なお、「新品時R0」は、新品の電池で予め計測した同温度条件下のR0値を示しており、「推定R0」には電池の劣化による内部抵抗の上昇が確認できる。

また、同車両の走行データを元に、現在の電池の満充電容量（FCC<sup>\*5</sup>）を算出した。このFCC演算値は、次の演算ステップとなるEKFへの入力値としても使用する。FCC演算値と新品時の満充電容量との比率から個々の電池セルのSOH\_Cを算出した結果を、図6に示す。個々セルのSOH\_Cには、67%~74%程度までのばらつきが見られ、使用環境や個々セルの特性に依存して、容量維持率が異なる結果となっていることがわかる。

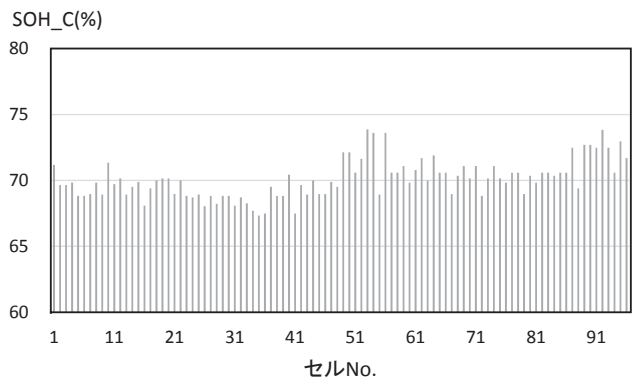


図6 SOH\_C (容量維持率) 算出結果

次に、推定したパラメータ群を電池等価回路モデルに設定し、EKFにて電池セル毎のSOCの逐次推定を行った。本稿では、そのうちの一つのセルに対するSOC推定結果を図7に示す。高精度に計測した電流積算量から求めたSOC真値に対し、SOC推定値の二乗平均平方誤差（RMSE）は1%未満となり、最大誤差は2%以内に収まる良好な結果が得られた。

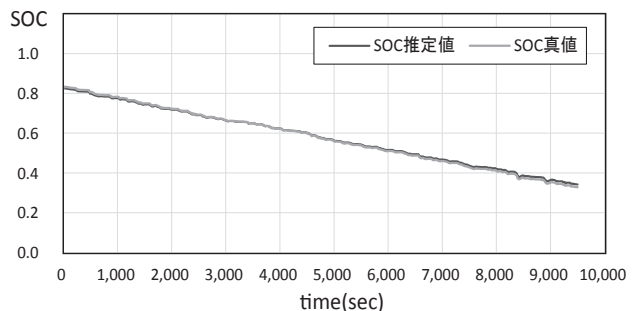


図7 EV車両電池のSOC推定結果

以上の手順で求めたセル毎の各状態推定結果は、車載無線通信機を経由して定期的にサーバにアップロードし、車両の電池状態の履歴として収集・管理できることを確認した。

## 5. 結 言

電動車両への電池搭載のニーズが高まる中、LiB向けの電池状態の推定技術を活用した状態推定ユニットを開発し、市販EV車両に搭載された複数の電池セルの状態量SOC・SOH等を、セル毎に高精度で推定できることを確認した。また、推定した電池状態量をサーバに履歴データとして蓄積する仕組みを構築した。

今後は、開発した電池IoTの基盤システムをベースに、サーバ蓄積情報の活用、および電池のリユースも含めたシステム検討を進めていく。

## 6. 謝 辞

本研究開発を遂行するにあたり、電池状態推定に関する技術のご支援をいただきました。立命館大学理工学部電子情報工学科 福井正博教授 に感謝の意を表します。

### 用語集

#### ※1 SOC

State of Charge：電池の充電率。

#### ※2 SOH

State of Health：電池の健全度。

#### ※3 SOP

State of Power：充放電可能電力。

#### ※4 EKF

Extended Kalman filter：拡張カルマンフィルタ。

#### ※5 FCC

Full Charge Capacity：電池の満充電容量。

### 参 考 文 献

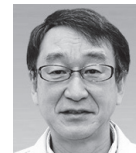
- (1) 林、目々澤、神頭、大橋、高山、「テストベッド活用によるコンセプト提案に向けたコネクティッド技術の実車評価」、SEIテクニカルレビュー第191号、pp.6-10 (2017)
- (2) Ishizaki, Lin, Fukui, "An accurate SOC estimator for Lithium-ion batteries which considers thermal variation," Journal of Electrochemistry, vol.83, no.10, pp.852-854 (2015)
- (3) 馬場、板橋、寺西、枝本、長村、丸田、足立、「HEV/EV向けリチウムイオン電池の充電率とパラメータの同時推定」、自動車技術会論文集 Vol.46、No.1、pp.97-102 (2015)
- (4) 林、石崎、鷹羽、福井、「適応的忘却係数調整によるリチウムイオン蓄電池の逐次最小2乗同定」、電子情報通信学会論文誌B Vol.J99-B、No.7、pp.481-489 (2016)

### 執 筆 者

片岡 智美\*：自動車新領域研究開発センター  
主席



武智 裕章\*：自動車新領域研究開発センター  
シニアテクニカルエキスパート



畑中 碧：自動車新領域研究開発センター  
主査



山口 洋平：自動車新領域研究開発センター



松浦 貴宏：自動車新領域研究開発センター  
グループ長



松谷 佳昭：自動車新領域研究開発センター  
部長



\*主執筆者