

リチウムイオン電池の放電特性をモデル化するための一手法

A technique for modeling the discharge property of lithium-ion batteries

○盛田 孝介, 佐藤 淳

○ Kosuke Morita, Atsushi Satoh

岩手大学

Iwate University

キーワード： リチウムイオン二次電池 (Lithium-Ion Battery), モデリング (Modeling),
定電流放電曲線 (Constant Current Discharge Curve).

連絡先： 〒 020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5
岩手大学大学院 総合科学研究科 理工学専攻 機械・航空宇宙コース
佐藤 淳, Tel: 019-621-6404, E-mail: satsushi@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

リチウムイオンバッテリーは、鉛蓄電池やニッケル・カドミウム蓄電池といった2次電池の中で特にエネルギー密度・起電力が高いという特長がある。現在では電気自動車に代表される大型のものから、スマートフォンなど小型のものまで多様な機器の電源に利用されており¹⁾、今後もさらに応用が進むと考えられる。そのためリチウムイオンバッテリーのモデル化を行うことは有意義であると考えられる。

リチウムイオンバッテリーには、電流値、環境温度、劣化によってバッテリー容量が変化するという放電特性があることが知られている²⁾。本研究では、特に電流値に関するバッテリー容量の変化が機器への応用に重要であると考えている。以降、電流値についての放電特性を単に放電特性と呼称する。横軸に放電容量、縦軸に電圧を取った放電特性曲線の例を Fig. 1 に示す。放電容量 (Discharged Capacity) とは、放電開始か

ら放電終止電圧まで放電した際の電荷の量 (容量)[Ah] を意味する。Fig. 1 より、放電電流が大きいほど内部抵抗による電圧降下が大きくなり、最終的にバッテリーの実効容量が小さくなることが確認できる。

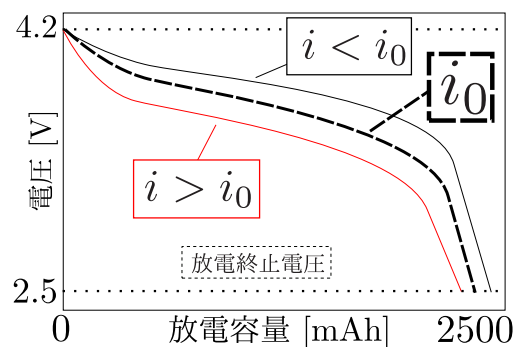


Fig. 1 放電特性曲線の例

この放電特性をモデル化する手法には、例えば放電特性曲線の分布を最小化するような回帰曲線を推定する手法³⁾が提案されているが、このモデルでは内部抵抗による電圧降下を考慮していない。そこで本稿では、上記の提案方法に

加えて内部抵抗による電圧降下を考慮し、SOD-OCV 特性曲線を基礎式としてカーブフィッティングを施すというモデル化手法を提案する。

2. 放電特性

放電容量は、定電流放電試験の電流値 i [A] と放電時間 t [h] から

$$D = i \times t \quad (1)$$

$$D_j = i \times (\Delta t) + D_{j-1} \quad (2)$$

のように計算する。式(2)中 j は正の整数、 Δt [h] は時間差を表す。

また、SOC-OCV 特性とは、次の非線型関数で表される関係である。

$$\begin{aligned} OCV &= f_{OCV}(SOC) \\ &= E^0 + k_1 \ln(SOC) + k_2 \ln(1 - SOC) \\ &\quad - \frac{k_3}{SOC} - k_4 SOC \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 SOC はバッテリーの充電率 [%]、 OCV は電池内部の化学反応が平衡状態のときの電圧 [V]、 E^0 は標準電極電位 [V]、 $k_1 \sim k_4$ は適当な係数を表す¹⁾。OCV は内部抵抗による電圧降下を考慮していないため、SOC-OCV 特性曲線は直接フィッティングに使うには適していない。

また、 $1 - SOC$ のことを放電率 SOD と呼ぶ。SOD の定義より、SOD-OCV 特性曲線は SOC-OCV 特性曲線のデータ順を逆にした形になるが (Fig. 2)、式(3)中の SOC を SOD に置換することができる。

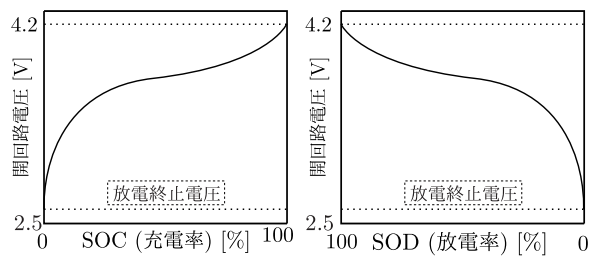


Fig. 2 (左) SOC-OCV 特性, (右) SOD-OCV 特性

3. モデリング

定電流放電試験により得た放電特性曲線を、その分布を最小化する方法により変換する。その後全ての放電容量を最大の放電容量 D_{max} により SOD に正規化し、 $V_i^n - SOD$ 特性のモデリングを行う。最後にカーブフィッティングにより 5 本の曲線から 1 本の曲線に近似することで、内部抵抗の影響を考慮した放電特性モデルを構築する。

3.1 放電特性曲線の分布の最小化

定電流 i [A] と適当な指数 n 、放電容量 D [Ah] を用いて

$$V_i^n(D) = D \quad (4)$$

$$Sum(n) = \sum_{j=1}^M \{V_j i_j^n - \overline{V_i^n}\}^2 \quad (5)$$

を求める³⁾。ただし、式(5)中 $\overline{V_i^n}$ は

$$\overline{V_i^n} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (V_j i_j^n) \quad (6)$$

である。式(4)は、ある放電容量 D_j と $V_j i_j^n(D)$ の交点を決めることを意味し、左辺 V_i^n の指数 n は式(5)の評価関数 $Sum(n)$ を最小化するように決定する。式(6)中 M はデータケース数であり、放電特性曲線の本数に対応している。この処理により放電特性曲線の分布を最小化する。

3.2 内部抵抗を考慮した放電特性モデル

上記の処理後、実験により得た最大の放電容量 D_{max} で放電容量を相対的な SOD に変換し、(3)(4)(5)式をもとに、全領域で内部抵抗 R [Ω] による電圧降下が起こることを考慮した放電特性モデルの式を次のように定める。

$$V_i^n = f(SOD) - R$$

$$= \begin{cases} f(2\%) + f'(2\%) \cdot (SOD - 2\%) - R & (SOD < 2\%) \\ E^0 + k_1 \ln(SOD) + k_2 \ln(1 - SOD) - \frac{k_3}{SOD} - k_4 SOD - R & (2\% \leq SOD \leq 98\%) \\ f(98\%) + f'(98\%) \cdot (SOD - 98\%) - R & (SOD > 98\%) \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式中 2 本目を基礎式として, $V_i^n - SOD$ 曲線を MATLAB のカーブフィッティングツール (cftool 関数) を用いて 1 本の曲線に近似し, 係数 $k_1 \sim k_4, R$ の値を求める. E^0 [V] は放電開始電圧の平均値から得られる. 発散を防ぐための線型外挿の範囲は, 数回の実験から適するものを決定する. 以上から予想されるモデルの概形を Fig. 3 に示す.

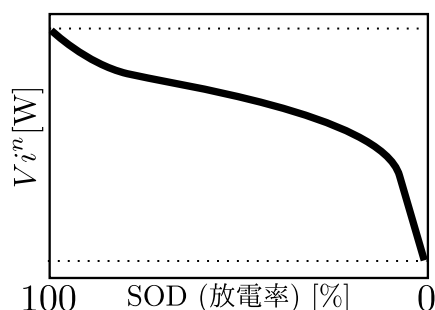


Fig. 3 予想されるモデルの概形

4. 放電試験

今回放電特性をモデル化するリチウムイオンポリマーバッテリー Zion 99Wh(以降, テストバッテリー)の外観を Fig. 4, 仕様を Table 1 に示す.

セル数	6
公称電圧 [V]	22.2 (3.7 [V]/1cell)
公称容量 [Wh]	99 (~ 4460[mAh])



Fig. 4 Zion 99Wh (enRoute)

バッテリー容量は JIS C 8711⁴⁾ に則った手順により決定する. 放電開始電圧を 4.2[V], 放電終止電圧を 3.2[V] とし, 1, 2, 3, 4, 6[A] の 5 種類の値で定電流放電試験を実施する. 試験において公称容量約 4460[mAh](~ 99[Wh]) を超えた放電容量の最大値 D_{max} [mAh] をテストバッテリーの定格容量とする. 定電流放電試験には, 150[W] まで消費可能である電子負荷装置 PLZ152WA (菊水電子工業)(Fig. 5) を用いて行った.



Fig. 5 PLZ152WA (菊水電子工業)

電圧の変化は電子負荷装置のインジケータを録画し, 20[s] ごとの値を記録した. その後, 得られたデータを MATLAB に読み込み, すべての計算とプロットを行うプログラムを作成し, 実行した.

5. 結果

テストバッテリーの 1 セル当たりの放電特性曲線を Fig. 6 に示す. 大電流ほど電圧降下の影響で下側にプロットされていることが確認できる.

Fig. 6 に示したデータ中の最大放電容量 D_{max} は 4789[mAh] であった. この値は公称容量約 4460[mAh] を超えているため, テストバッテリーの定格容量に決定した.

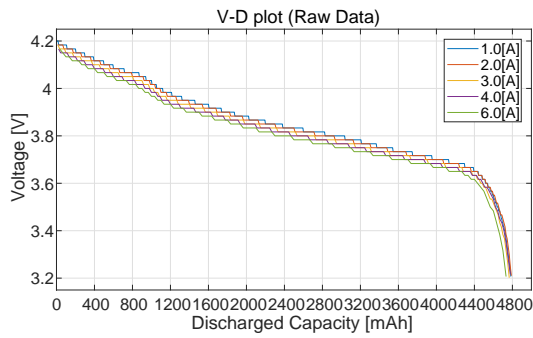


Fig. 6 テストバッテリーの放電特性曲線

次に放電特性曲線において $\Delta D = 400[\text{mAh}]$ ごとの 12 点で式(4)(5)(6)に従い求めた $V_i^n - D$ 曲線を Fig. 7 に示す。式(6)におけるデータケース数は $M = 5$ である。また、二分法により指数 $n = 0.0063$ を導出した。放電特性曲線に比べ、各 D_j 上でデータの分布が小さくなっていることが確認できる。

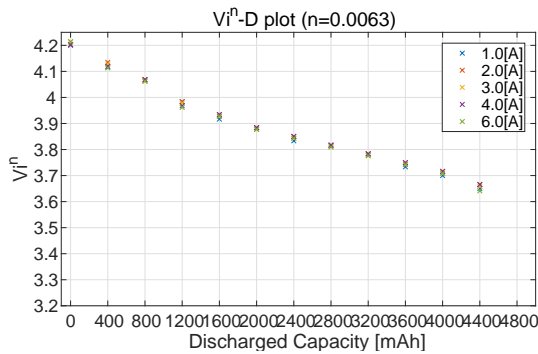


Fig. 7 $V_i^n - D$ 曲線

D_{max} を満充電容量として扱い、全ての放電容量の値を正規化することにより相対的な SOD としてプロットした $V_i^n - SOD$ 曲線を Fig. 8 に示す。 $V_i^n - SOD$ 曲線は全ての領域でデータの分布が小さくなっていることが確認できる。

5 種の $V_i^n - SOD$ 曲線から、1[A] 放電試験のデータ $V_1^{i_1^n}$ とその時の SOD の変化 SOD_1 を代表させ、カーブフィッティングをすることにより求めた放電特性モデルを表す曲線を Fig. 9 に示す。また、式(7)における各パラメータを Table. 2 に示す。ここで線型外挿の範囲は、 $SOD < 8\%$, $SOD > 99\%$ に決定した。以上でリチウムイオンバッテリーの放電特性モデルを同

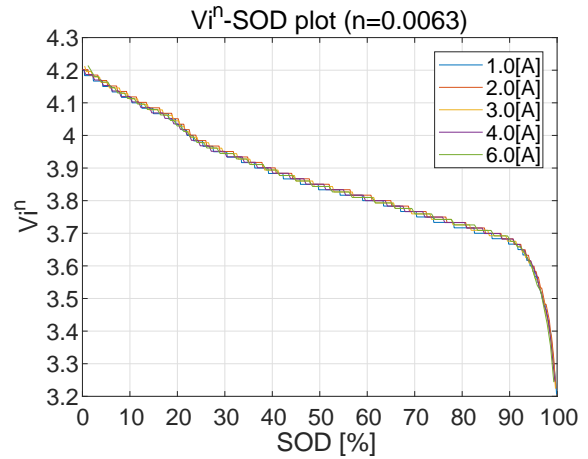


Fig. 8 $V_i^n - SOD$ 曲線

定した。

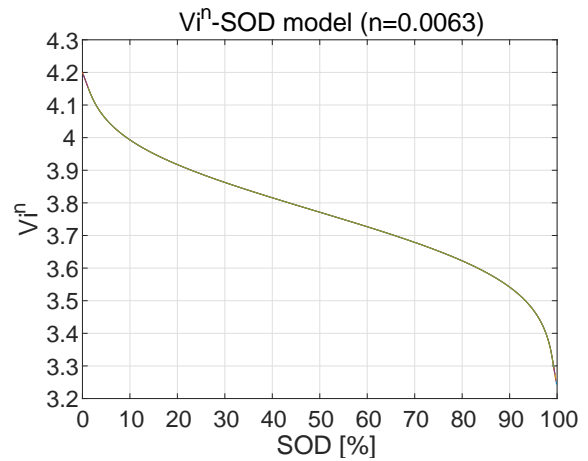


Fig. 9 放電特性モデル

6. 結言

本論文では、リチウムイオンバッテリーの放電特性をモデリングする一手法について述べた。まずリチウムイオンバッテリーの定電流放電試験を行うことにより、放電特性曲線から定格容量と放電率 SOD を決定した。次に放電特性曲線の分布を最小化するために、 $V_i^n - D$ 曲線の分布を最小化する指数 n を二分法により導出した。最後に $V_i^n - SOD$ 曲線のうち代表させた曲線にカーブフィッティングをすることにより基礎式のパラメータを求め、放電特性モデルを同定した。

今後は、本稿で提案した手法を異なる試験環

Table 2 放電特性モデルのパラメータ

E^0	4.18[V]
k_1	0.08353[V]
k_2	0.0879[V]
k_3	0.0004633[V ⁻¹]
k_4	0.09863[V]
R	0.2654[Ω]

境から得られるデータに適用しモデル化すること
 とで、その妥当性を評価する予定である。

参考文献

- 1) 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, 1,2,3,4,5,6,7,8,98,99,102,103,180, 東京電機大学出版局 (2015)
- 2) 株式会社ベイサン : リチウムイオン電池の話 10. 放電特性カーブの見方 , http://www.baysun.net/ionbattery_story/lithium10.html , 2018.5.14 閲覧.
- 3) L.W.Traub : Calculation of Constant Power Lithium Battery Discharge Curves , MDPI Batteries , Vol.2 , Issue2 , No.17 (2016)
- 4) JIS C 8711:2013 : ポータブル機器用リチウム二次電池, <http://kikakurui.com/c8/C8711-2013-01.html> , 2018.5.14 閲覧.