

組電池の統計的寿命解析手法に関する研究

A Study on a Statistical Method for Analyzing Lifetime of a Battery Pack

電気電子情報通信工学専攻 佐々木 大介

Daisuke SASAKI

1. 序論

昨今、我々は様々な電化製品に、何度も繰り返し充電をして利用できる電池（二次電池）が搭載されているのを見かけるようになった。電気自動車（EV）や電力系統用に利用される大型・高出力タイプの二次電池は、しばしば複数の単位セルを直並列接続してできる組電池として設計される[1]。設計者はそれぞれの用途に合わせた最適な組電池を設計する必要があるが、その設計手法は様々なばらつきを考慮した統計的手法でなければならない。なぜなら、たとえ用途を限定したとしても、その使用形態は決して単一の確定的なものではなく、経年劣化がセル毎にばらつきからである。

組電池を構成する個々の単電池セルが全て同一のセルであったとしても、その性能は同一ではなく、組電池のパフォーマンスも同一の挙動を示さないので、組電池を設計する上で、このような手法は重要である。この手法を利用した結果から、充放電サイクル（充放電回数）に対して組電池の劣化率を推定できる。更に、組電池の設計時に、長寿命で低コストなどといった設計指標を満たす電池の接続方法を知るのに有用だろう。

本研究においては各セルの劣化にばらつきが与えられた時、直並列組電池の寿命を統計的に得る手法を提案し、実際に市場で売られている電池を用いた電池充放電試験を通じて直列手法、並びに、並列手法の妥当性の検証を進めた。その結果を報告する。

2. 準備

SOC (State of Charge : 充電率) とは電池がある充放電サイクル数 t で蓄えられる、満容量に対し、実際に保持している容量の比(残量)を表した指標で、 r_c ($0 \leq r_c \leq 1$)という

パラメータを用いて定義する。SOH (State of Health : 容量維持率)は電池の理想状態の満容量に対して、電池がある充放電サイクル t で蓄えることが出来る満容量との比(満容量劣化率)を表した指標である。Absolute SOH (ASOH) は、この理想的な満容量を「ある電池の理想的な個体における初期満容量」 Q_{\max} と定義し、 Q_{\max} に対してある個体のある時の満容量 $Q_0(t)$ のを表したものであり、 r_h ($0 \leq r_h \leq 1$)というパラメータを用いて定義する。

ところで、電池のある時点での容量 q はこの SOC と ASOH を用いて、

$$q = r_c \cdot r_h \cdot Q_{\max}$$

と表現できる。 r_c 、 r_h というふたつのパラメータで、ある時点の電池の保持容量を決定することができる。今後、SOC と ASOH の積 $r = r_c \cdot r_h$ を劣化ファクターと呼ぶ。

3. 直列・並列化による劣化ファクター変化

前述した劣化ファクターは直列化、並列化によって変化すると考えられる。

異なる劣化ファクターの電池が直列につながれた場合を考える。組電池は BMS (Battery Management System) を用いた制御がしばしば行われているが、電池を危険な状態に晒す過充電・過放電にならないよう、BMS によって、上限電圧 V_{\max} と下限電圧 V_{\min} の電圧範囲によって運用がなされるようになっている。今、 n 段直列接続された組電池の各セルの劣化ファクターが $r(t, k)$ ($0 \leq k \leq n$) とし、各セルの容量が $q_k = r(t, k) Q_{\max}$ で与えられるとする。劣化ファクターは各サイクル t 、組電池各セル k で異なる値を取ることから、この 2 変数の関数としてこのように表記している。二次電池の特性として、充電をすることで電圧が上昇し、放電をすれば電圧が低下する。今、直列組電池

が充電完了状態から放電を開始し、あるセルが下限電圧 V_{\min} に達した時に、BMS は全体の放電を停止する。この場合、直列組電池全体の放電容量は直列組電池 M_S の劣化ファクター $r_M(t, M_S)$ として、

$$r_M(t, M_S) Q_{\max} = \text{Min}[r(t, k) \mid 1 \leq k \leq n] Q_{\max}$$

となり、変形して

$$r_M(t, M_S) = r_{\min}(t, M_S) = \text{Min}[r(t, k) \mid 1 \leq k \leq n]$$

となり $r_M(t, M_S)$ は各セルの $r(t, k)$ の最小になる。

次に、異なる劣化ファクターの電池が並列につながれた場合を考える。電池セルをキャパシタと考えれば、並列組電池 M_P の容量は各セルの容量の和になる。並列組電池 M_P の劣化ファクター $r_M(t, M_P)$ として

$$r_M(t, M_P) \cdot n Q_{\max} = \sum_{k=1}^n r_M(t, M_S) \cdot Q_{\max}$$

となり、変形して、

$$r_M(t, M_P) = r_{\text{ave}}(t, M_P) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_M(t, M_S)$$

となる。 $r_M(t, M_P)$ は各セルの $r(t, k)$ の平均になる。文献[5]でも劣化度の異なる電池が並列接続された時、劣化度は次第に同じレベルに平均化されていることが報告されている。

本手法では、分布の表現に際し GMM(Gaussian Mixture Model: 混合正規分布)[6] と呼ばれる、正規分布の確率重み和という考え方を採用しており、以下のように表される。

$$m\text{GMM}(r) = \sum_{i=1}^m P_i \cdot \frac{1}{\sigma_i} \cdot \phi\left(\frac{r - \mu_i}{\sigma_i}\right), \quad \sum_{i=1}^m P_i = 1$$

ここで $\phi(x)$ は $N(0,1)$ に従う標準正規分布の PDF を表す。

4. 提案手法

次に、直並列組電池の寿命分布を求める手法を提案する。厳密なアルゴリズムに関しては[3][4]で議論されているから割愛するとして、ここでは概略を説明することにする。

(0) 組電池の構造と、 k 番目のセルの t サイクルにおける ASOH $n_h(t, k)$ 、ならびに充電完了時の SOC $r_c(t, k)$ を確率変数とみなし、その分布を GMM で与える。同時に各セル間の相関も同時に与える。(1) 次に各セル k 、各サイクル t の $n_h(t, k)$ 、 $r_c(t, k)$ に対して、 $r(t, k) = n_h(t, k) \cdot r_c(t, k)$ の分布を統計的積演算による 2-GMM として得る。(2) 各サイクル t に対して、組電池 M の $r(t, M)$ の分布を 3 章の方法に

より求める。ただし $r(t)$ は確率変数であるから、直列なら統計的最小値演算、並列なら統計的平均演算を施す。直並列電池の分布は並列化と直列化の演算を組み合わせ得る。確率変数 $0 \leq r \leq 1$ を用いて確率密度関数 (PDF) $\phi_t(r)$ で表す。(3) t に対する $r(t, M)$ の分布を t 毎に連続的に並べることにより、 t と r に関する 2 変数関数 $\Psi(t, r)$ を求める。この関数に対し、寿命となる劣化ファクター値を $r = R_{TH}$ として $\Psi(t, R_{TH})$ を求め、分布の積分値が 1 となるよう正規化すれば、寿命 L_{TH} の PDF を得る。

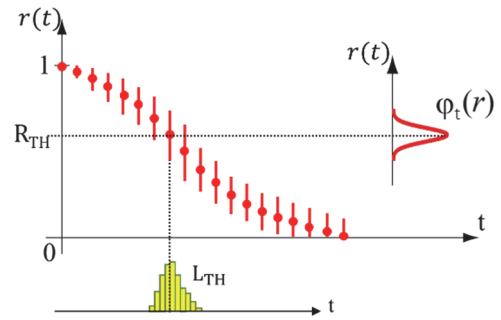


図1 寿命分布導出概略

図1には(3)のプロセスを図で示したもので、図中赤点とその周りの縦棒は各 t における分布 $\phi_t(r)$ を示している。各 t で昇順に分布を並べ、寿命値となる $r = R_{TH}$ でこれらの分布群を区切れば、 L_{TH} のヒストグラムが得られる。

5. 実験結果

市販の 18650 型円筒形リチウムイオン二次電池を 50 セル用意し、0.7C の定電流(CC)充電と 4.2V の定電圧(CV)充電、1C 放電を 700 サイクル程度繰り返すサイクル試験を行った。1C とは 1 時間で電池の全容量を放電できる電流値を指す。この時の放電容量を用いて各サイクルで $n_h(t)$ の分布を調べ、その時の平均 μ (赤実線)、平均 $\mu \pm$ 標準偏差 σ (緑点線・紫点線) と最大値 (橙実線) と最小値 (青実線) の変化を図2に示す。この時、 $t = 200$ 、 $t = 500$ における $n_h(t)$ 分布は図3のヒストグラムの様になった。茶実線で示しているのはこの時の 2GMM 近似の PDF である。

このデータより推定の寿命分布を求めるにあたって、今回は充電完了時の SOC のばらつきは考慮せず ($r_c = 1$)、各セルが独立の分布である (相関 0) とし、各セルに同一の $n_h(t)$ 分布を与える。

次に、2 段並列組電池の試験を単セル試験と同様の条件

下で行った。その結果を図4に示す。この試験における $r_h(t)$ 算出の基準は、単セル試験での最大容量 Q_{max} の2倍の値を用いて算出している。図5には $R_{TH}=0.9$ として単セル(黒点線)、手法により単セル $r_h(t)$ から推定した2段並列(青実線)、実際の2段並列(茶破線と黄ヒストグラム)の寿命分布を導出し、比較をしている。

推定の並列分布は単セル分布に比べて、ばらつきが小さく、単セル分布の中央によった形で得られており、統計的平均演算の影響を見ることが出来る。実際のヒストグラムは、推定した物と比べピーク値に関して実際の分布が364サイクルなのに対し、推定の分布では391サイクルであり、若干のずれが生じているものの、推定した分布の範囲内に実際の分布が収まっているのがわかる。サンプル数が10サンプルしかないことで、信頼性に関して不利ではあるが、例えば $r_h(200)$, $r_h(500)$ の分布の標準偏差が単セルで0.00820, 0.01000であったものが2並列で0.00600, 0.00810へそれぞれ減少するなど、全サイクルに渡って単セルよりもばらつきの少ないデータとなっているのは事実であり、ある程度の手法有効性は確認できている。

次に、4段直列組電池の試験を単セル試験とほぼ同様の条件で行った。直列試験ではSOCばらつきの影響が非常に大きく、ばらつきを低減させるためにCV充電の時間を単セル比4倍程度にした。その結果、ばらつきを抑えることに成功したが、結果として図6に示すような結果となった。 $r_h(t)$ 算出の基準は、単セル試験での最大容量 Q_{max} としたが、単セル試験に比べ、CV時間を長く取った関係で、容量が大きく出、 $r_h(t)$ が1を超えてしまった。また、300サイクル以降で急激な劣化が生じている。この結果に対して、並列と同様に推定の4段直列と単セル、実際の4段直列の寿命分布を比較したのが図7である。 $t < 400$ 以降で $\mu + \sigma$ が Best を超えており、今回提案する手法の適用限界を超えているため、その影響が少なくなるよう $R_{TH}=0.97$ として寿命分布を算出した。推定4直列は最小値演算の影響で、単セル分布の左端に来るような分布となった。実際の4直列寿命は前述した原因により、全く異なる位置に分布が生じている。[9]によれば、4.2VのCV時間を長く取った場合には、容量は大きく出るが、劣化が促進されることが報告されており、今回の事象もこのCV時間の長時間化の影響が考えられる。

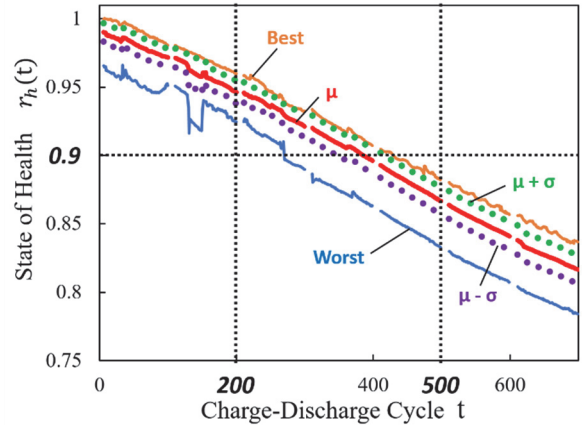


図2 単セルサイクル試験 $r_h(t)$ 変化

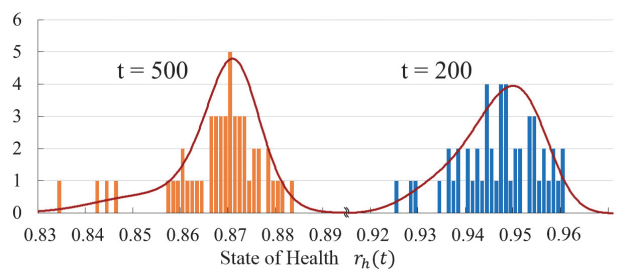


図3 単セルサイクル試験 $r_h(200)$, $r_h(500)$

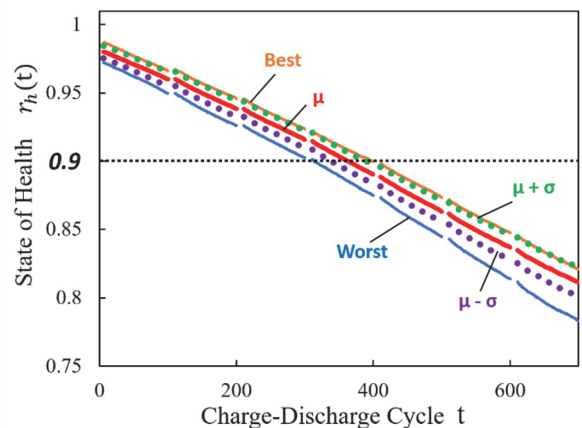


図4 並列サイクル試験 $r_h(t)$ 変化

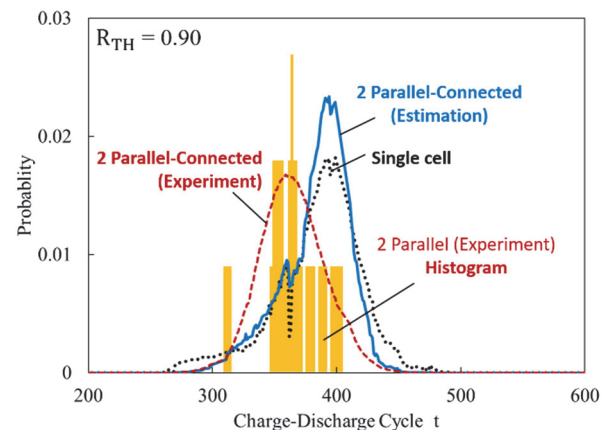


図5 並列寿命分布比較

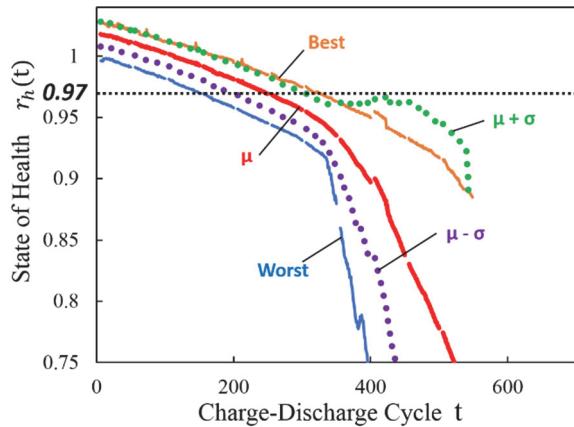


図6 直列サイクル試験 $r_h(t)$ 変化

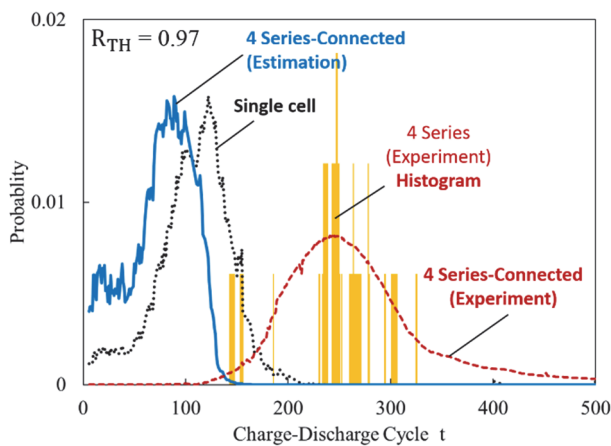


図7 直列寿命分布比較

6. 結論

本研究では、単セル電池の劣化が統計データとして与えられた際に、直並列組電池の寿命分布を推定する方法を提案し、実際の4段直列組電池、2段並列組電池の試験を通して、その有効性の確認を行った。並列組電池の寿命推定に関しては一定の有効性を示せたが、直列組電池に関しては比較実験として成立する実際の4段直列組電池データが取得できなかった。

これまで、種々の電池サイクル試験を行ってきた。その実際の調査や文献[7][8]等により電池の挙動は温度データやCV時間・電圧、電流量、放電深度など様々な要因により変化することがわかっている。しかし、それらの要因をひとつひとつ確認することまでは出来ていない。これらの劣化変動要因を解析して寿命導出手法に取り込み、より精度の高い手法とすることが、今後の課題である。また、提案手法はSOCばらつきを考慮することもできる。SOCばらつきのデータを実際の電池より得た上で、

手法の検討を行っていくことも課題である。

謝辞

本研究における試験データは日本電気株式会社(NEC)との共同研究により得られたものである。試験に際し協力を頂いた NEC SE 研の石橋修様、宮本潤一様、NEC APACの高橋真吾様にこの場を借り感謝の意を示す。

参考文献

- [1] Christopher D. Rahn, Chao-Yang Wang, Battery Systems Engineering, John Wiley & Sons, 2013.
- [2] 佐々木大介, 築山修治, 松永真理子, 高橋真吾, "直列接続された組電池の統計的寿命解析について", 信学技報,VLD, vol.113, no.454, pp.25-30, 2014.
- [3] D.Sasaki, S.Tsukiyama, M.Matsunaga, O.Ishibashi, S.Takahashi, "A statistical method for analyzing lifetime of a battery pack," IEEE PESGM 2015, Paper No.1311, 2015.
- [4] D.Sasaki, S.Tsukiyama, M.Matsunaga, J.Myamoto, S.Takahashi, "A Statistical Method for Analyzing Lifetime of a Series-Connected Battery Cells", ISCIT '15 Proceedings, pp.41-44, 2015.
- [5] 伊藤俊介, 綿引祥隆, 田中正志, 垣本直人, 乾義尚, "劣化度の異なるリチウムイオン二次電池を並列接続した組電池の電流分布に関する検討", 第9回新エネルギー技術シンポジウム, Paper No. D-3, 2014.
- [6] S.Tsukiyama, M.Fukui, "A statistical maximum algorithm for Gaussian mixture models considering the cumulative function curve," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E94-A, no.12, pp.2528-2536, 2011.
- [7] S.S.Choi, H.S.Lim, "Factors that Affect Cycle-Life and Possible Degradation Mechanisms of a Li-ion Cell Based on LiCoO₂", Journal of Power Sources, 111, pp.130-136, 2002.
- [8] 市村雅弘, 下村誠, 竹野和彦, 代田玲美, 高野和夫, "小型リチウムイオン電池の寿命特性", 信学技報, EE, vol.105, no.197, pp19-23, 2005.