

# リチウムイオン充電電池の安全性に関する検証実験

倪 永 茂

## はじめに

情報機器、電気自動車、小型家電、電動工具等など、数多くの製品にバッテリーが内蔵されている（小久見、2008）。いわば、コードレスやモバイル商品のほとんどはバッテリーの使用を避けて通れない。加えて、自然災害の多い日本では、停電対策としてのバッテリーの重要性は日増しに認識されている。

バッテリーに様々なものが存在する。そのなかで、単体の出力電圧、体積エネルギー密度と重量エネルギー密度が高く、繰り返し再充電可能なものとして、リチウムイオン充電電池は情報化社会の担い手（西、1997）といわれるほど、目下最も注目されているバッテリーであろう。

リチウムイオン充電電池（以下では Li-ion と略す）は単体での公称電圧が 3.7 V ないし 3.6 V であり、様々なサイズや形で製造されており、写真 1 はその一部である。そのうち、18650 型という円筒形 Li-ion は最も多く製造販売されている。



写真 1 筆者が所有する Li-ion の一部

Li-ion は端子電圧が約 4.2 V を超えて充電すると過充電状態になり、端子電圧が約 2.4 V を下回って放電すると過放電状態になる。過充電・過放電状態では Li-ion が発熱するので、そういう状態が継続すると、発火・爆発にいたる恐れがある。

言い換えると、Li-ion の問題点はその安全性で

ある。発火や爆発等の事故がよく報道されており、ショートさせない、衝撃を加えない、過放電・過充電しない等、丁寧な取扱が不可欠である。

本文では Li-ion の安全使用に必要な過放電・過放電対策として開発されている充放電保護基板に対して、安全確認に関する検証実験を行う。つぎに応用実験を 2 つ考案し、安全性について確認する。

## I 充放電保護基板の検証

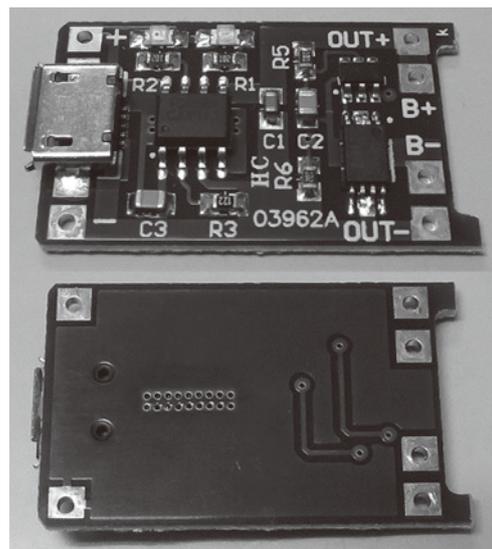


写真 2 TP4056 を載せた充放電保護基板

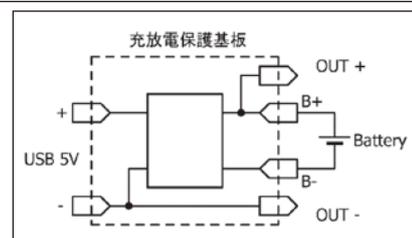
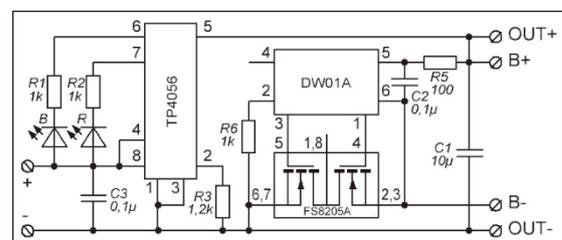


図 1 充放電保護基板の電子回路図と外部接続図

Li-ion を安全に使用するために多くの専用保護回路が開発されてきた。本文で取り扱うものもそのうちのひとつである。Li-ion に対する定電流定電圧充電や、過充電・過放電防止を基板 1 枚で完成するのである。写真 2 は基板の表裏面を、図 1 はその電子回路図、外部接続図を示す。

基盤サイズは  $28 \times 17$  mm、厚み 4mm と超小型で、以下で説明する IC を搭載している。

## 1 専用 IC の役割

写真 3 に示した、充放電保護基板に搭載している重要なパーツについてここで説明する。

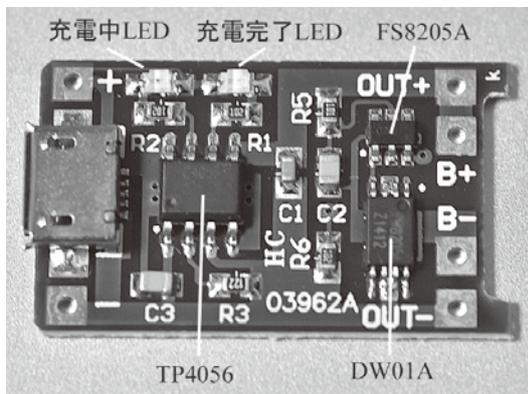


写真 3 主要パーツの搭載位置

### ① 充電専用 IC TP4056

TP4056 は Li-ion の過充電防止のために中国南京拓微集積回路有限公司 (www.tp-asic.com) が開発した専用 IC である。電源は外部 USB 5V から取り、充電時にしか動作しない。最大充電電流が 1A に制限され、外部抵抗器の値を変えれば最大充電電流の大きさが変わる。また、充電終止電圧が 4.2V に設計され、充電電流が最大充電電流の 1/10 に減少すると充電が中止する。充電時に Li-ion の端子電圧が 4.2V になるまでは定電流充電であるが、電圧が 4.2V になると定電圧充電に自動的に切り替わる。そのほかに、温度センサーを IC の外部につけることで、高温になると充電を中止することができ、また、LED を 2 つ外部につければ、それぞれが充電中と充電完了後に点灯する。

### ② 過充電・過放電保護 IC DW01A

DW01A は台湾富晶電子 (Fortune Semiconductor Corporation, www.ic-fortune.com) が開発した IC である。電源は Li-ion から取り、放電時も充電時もつねに動作する。充電時に、電圧が 4.3V 以上になると充電中止、4.1V 以下に下がると充電再開と

いう電気信号を外部に送り出す。放電時に、電圧が 2.4V 以下になると放電中止、3V 以上に上がると放電再開という電気信号を送り出す。それら以外、Li-ion から流れ出す電流 (端子間のショート等) が 3 A 強を超えた場合にも、直ちに充電中止や放電中止の電気信号を発する。放電中止後の IC の消費電流は実測ではわずか  $1.4 \mu\text{A}$  で、数年間の長期放置でも Li-ion が過放電に陥らないような設計になっている。

### ③ スwitchング IC FS8205A

FS8205A も台湾富晶電子が開発したもので、N チャネル MOSFET が 2 つ内蔵されている。DW01A からの電気信号を受け取り、充電中止・充電再開、放電中止・放電再開等のスイッチング動作を行う。なお、FS8205 の on 抵抗値は  $30\text{m}\Omega$  程度であるが、Li-ion の放電効率を大きく左右するので、複数並列接続等の改善を加えるといいだろう。

## 2 動作確認

基板の動作を確認するために、充電用の外部電源として、5V / max 1.6A の外部 USB 電源を電子回路図左端の +- (写真 1 での Micro USB コネクタに対応) に接続する。放電時の外部負荷として  $8\Omega$  抵抗器を電子回路図右端 OUT +- に接続する。Li-ion をバッテリーホルダーに入れて、電子回路図右端 B +- に接続する。写真 4 は測定器やケーブル以外に、基板、USB 外部電源、抵抗器、Li-ion およびホルダー等、実験に必要なものを示している。

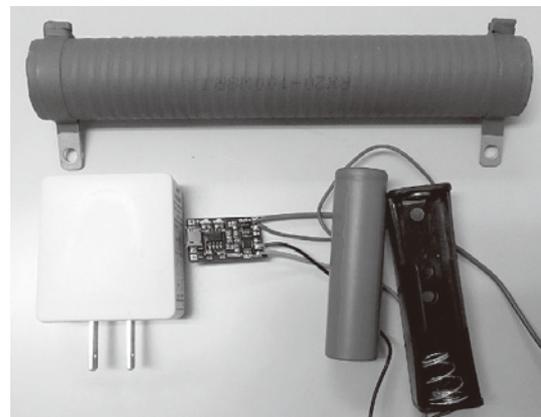


写真 4 動作確認実験に必要なもの

満充電した Li-ion に対して、まず放電実験を行い、つまり  $8\Omega$  抵抗器をつけて測定したところ、Li-ion の端子電圧、および流れ出す電流は図 2 のとおりであった。

図2では、抵抗負荷をつけたLi-ionの端子電圧は3.7Vから徐々に下がり、6時間かけて3Vを切ったところで、下げ幅が急拡大し30分で2.4Vを切った。そこで基板の過放電防止回路が機能し、放電電流がゼロになり、放電ストップになった。抵抗負荷から切り離されたLi-ionは端子電圧が一旦上昇し、その後内部では起電力がわずかずつ回復していった。Li-ionの端子電圧がわずかずつ上昇するのがそのことの反映である。回復後の電圧が3Vを超えると基板は放電を再開したことも観測された。

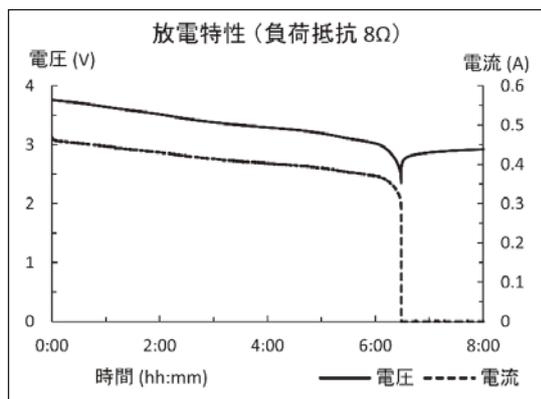


図2 放電特性 (実測)

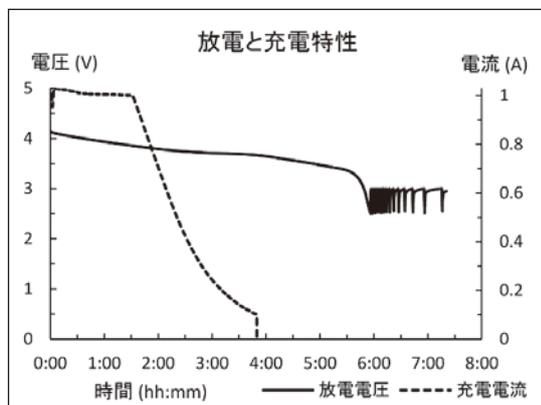


図3 放電中止と再開を繰り返すLi-ion (実測)

放電中止と放電再開の繰り返しをよりわかりやすくした実験結果を図3に示した。図3の実験で使ったLi-ionは図2と異なるものであった。図3のLi-ionは内部抵抗が低く(初期電圧値が高いことから)、容量が少なく(放電中止までの放電時間が短いことから)、回復力が強い(放電中止と放電再開との時間間隔が短いことから)。この比較から、一口Li-ionといっても、メーカーや製造時期、使用状況の違いによって放電特性がだいぶ異なることがわかる。

図2で放電中止となったLi-ionに対して、つづ

けて充電実験を行った。つまり、外部抵抗器を外し、外部USB電源をつけた測定したところ、Li-ionの端子電圧、および流れ込む電流は図4のとおりであった。

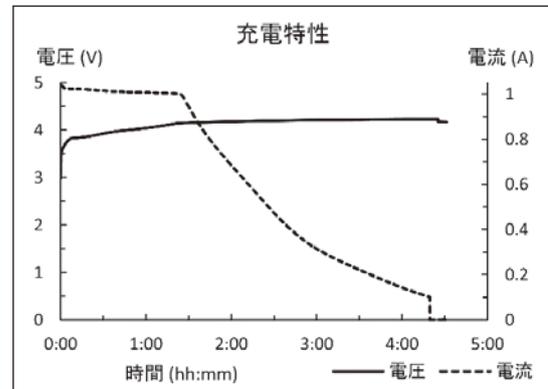


図4 充電特性 (実測)

図4では、最初の1時間30分間、Li-ionの端子電圧が4.2V近くに達するまで、約1Aの定電流で充電していた。その後、Li-ionの端子電圧が4.2Vの定電圧になり、充電電流が徐々に下がっていった。充電電流が0.1A、つまり最大充電電流の1/10になったところで充電がストップした。そして、外部電源の給電がストップした瞬間、電圧が外部電源からLi-ion自身の起電力に変わるので、端子電圧の値が多少下がった。

なお、充電しながら、基板から負荷に給電することを同時に実行できるが、最大充電電流は負荷が消費する分低下する。

以上の実験結果により、Li-ionに対する充電においても、Li-ionからの放電においても、4.2V以上の過充電や2.4V以下の過放電になることはなく、充放電保護基板が過充電・過放電対策として確かに機能することが確認できたといえよう。

## II 充放電保護基板の応用

### 1 バランス補正

上記で説明した充放電保護基板は1つのLi-ionに対して保護機能を働くものであるが、複数のLi-ionを同時に充電したい場合はどうすればいいか。

同一製造ライン、同一製造時期、同一製造材料、同一製造工程でない限り、Li-ionの内部抵抗や容量がそれぞれ異なることが一般的に知られている。図2と図3の実験がその一例である。

内部抵抗や容量の異なるLi-ionを直列して充電電を繰り返すと、個々のLi-ionの間では起電力や

容量のバランスが少しずつ崩れ、最終的に充電不足か過充電・過放電状態に陥る。

したがって、アンバランスにならないためには、直列した Li-ion の充電にバランス補正回路が必要である。最も簡単なバランス補正は直列した Li-ion のそれぞれを別々に充電、いわゆる、単独充電である。写真5は実験として、直列した2本の Li-ion の単独充電で使ったものである。図5は基板の接続方法を示す。

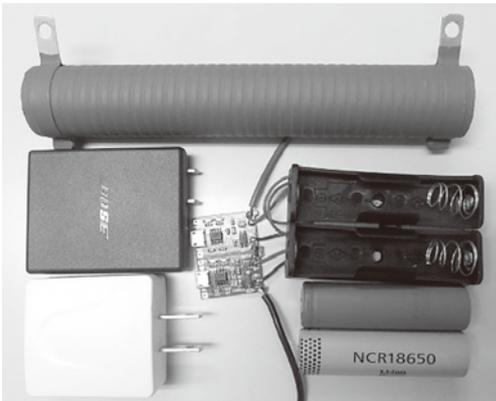


写真5 バランス補正実験に必要なもの

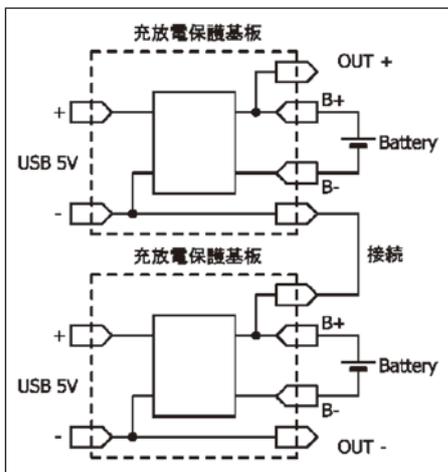


図5 Li-ion に対する単独充電のための接続図

図5のとおりに接続したものに、満充電した2本の Li-ion をホルダーに装着し、外部負荷として抵抗器  $8\Omega$  を図5の右端 OUT プラスマイナスに接続して、Li-ion それぞれの端子電圧と全体（負荷抵抗器の端子電圧）の電圧を測定したところ、図6を得た。

図6で使った2本の Li-ion はそれぞれ図2（セル1）、図3（セル2）で使ったものである。直列接続したことで、負荷抵抗器にかかった電圧（図6の負荷電圧）は基板の電圧降下が若干あるにせよ、図2（または図3）の倍ちかくなり、各 Li-ion の放電中止時間が約半分に短縮される。また、3時

間～3時50分にわたる電圧の激しい変動は、セル2の放電中止と放電再開（図3）との繰り返しに対応する。その後、セル1（図2）も放電中止になり、全体的に負荷抵抗器にかかる電圧が0になる。

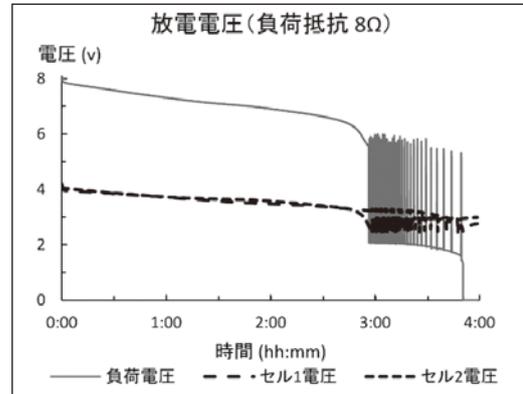


図6 直列した Li-ion 2本の放電特性（実測）

図6で放電中止になった2本の Li-ion に対し、外部 USB 電源2つを図5の左端につけて充電し、それぞれの Li-ion に流れ込む充電電流を測定したところ、図7を得た。

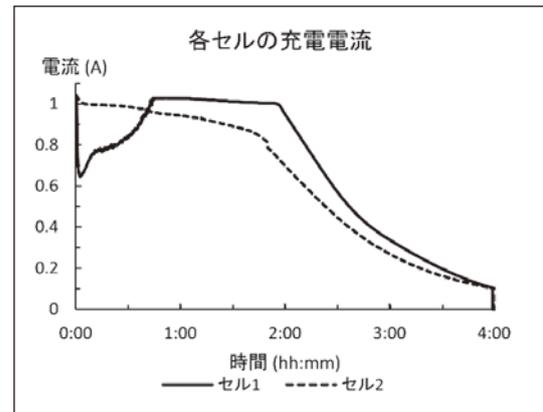


図7 直列した Li-ion 2本の充電特性（実測）

図7では、セル1（図2）の Li-ion は充電電流が一旦低減してから徐々に最大充電電流  $1\text{A}$  に戻して、約2時間経ったところで定電流充電が終わり、定電圧充電モードに入った。セル2の Li-ion は図3に示した充電特性よりは多少緩やかなカーブで下がっていった。セル1もセル2も充電終止時間に関しては大きな差がなく、図6の放電実験では直列接続によりほぼ同じ量の電力を消費したので、ほぼ同じ充電時間で満充電状態になったと考えられる。

以上のように、Li-ion はそれぞれが単独で充電されるので、放電充電の繰り返しによるアンバランスはおきにくいことが実験で確認することができた。

なお、絶縁型  $5\text{V DC-DC}$  コンバータを外部 USB 電源個数分用意しておけば、外部 USB 電源

はひとつで済むこともできるが、DC-DC コンバータは外部 USB 電源よりもコストが高くて入手しにくい。

## 2 急速充電

大電流で充電すれば、Li-ion は充電完了までの時間が短くなることが予想できる。基板は最大充電電流を 1A と設計されているが、基板を複数枚並列接続すれば、Li-ion に対して枚数分の大電流で充電することになる。ただ、あまりにも大電流で充電すると、発火・爆発になる危険を孕む。

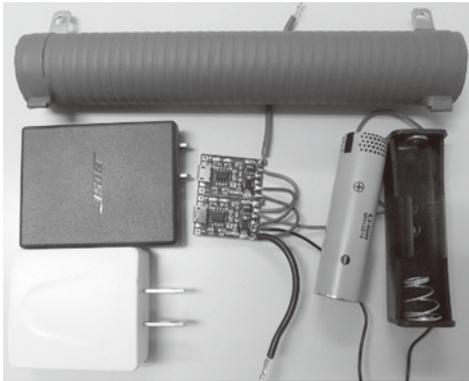


写真 6 急速充電実験に必要なもの

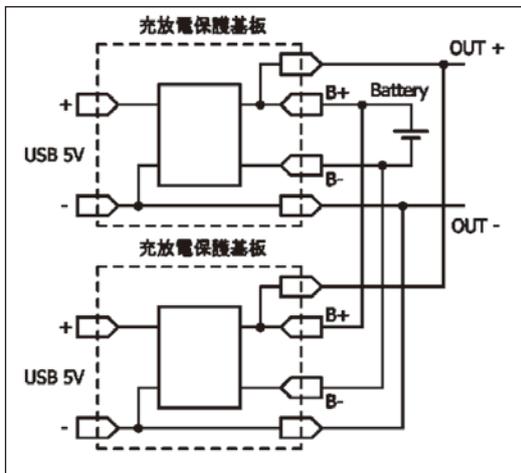


図 8 急速充電実験のための接続図

Li-ion に関する安全かつ最大充電電流は製品によって、劣化程度によって異なるが、一般的には 1C 充電が目安とされている。つまり、定格容量が 2000 mAh の Li-ion であれば、最大充電電流が 2A なら安全だという。市販されている Li-ion は公称容量 2000 ~ 3000 mAh のものが多く、以下では基板を 2 枚使って最大充電電流を 2A とし、充電時間が基板 1 枚のときと比べてどれほど短縮するか、実験した。写真 6 は実験で使用したパーツ、図 8 は基板の接続方法を示す。

図 8 のとおりに接続したものに、満充電した Li-

ion (図 2 の実験で使用したもの) を装着し、外部負荷として抵抗器 8 Ω を OUT プラスマイナスに接続して、Li-ion の端子電圧を測定したところ、図 9 の放電電圧特性を得た。さらに、放電中止になった Li-ion に対し、外部 USB 電源 2 つを図 8 の左端につけて充電し、Li-ion に流れ込む充電電流を測定したところ、図 9 の充電電流特性を得た。

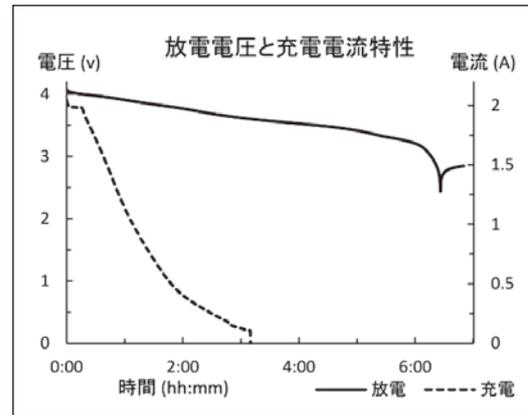


図 9 放電と急速充電 (実測)

図 9 では、放電電圧特性が図 2 とほぼ同じである。基板を 2 枚並列接続したとしても、放電効率が下がることはないと言えよう。また、充電時の最大電流は 2A で、終止までの充電時間は 3 時間 10 分であり、図 4 の 4 時間 20 分に比べて、1 時間 10 分 (27%) 短縮したことが確認できる。

充電終止時間は 2 時間 10 分 (図 4 の半分) になっていない理由についてはつぎのように考察する。

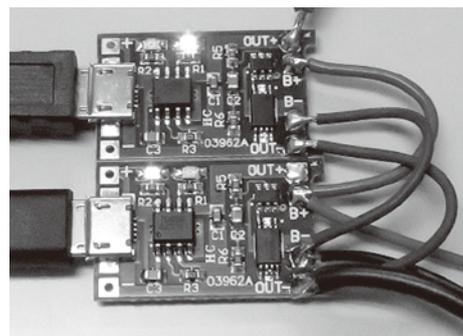


写真 7 上側基板の LED が充電完了を示す

充電時の Li-ion 端子電圧が最大でも 4.2V しかなく、定電流充電から 4.2V 近辺の定電圧充電に変わった後、Li-ion の内部抵抗によって充電電流の大きさがきまり、外部からの大電流供給ができたとしても実際の充電電流が内部抵抗によって、必ずしも 2 倍にならない。実験では、充電電流が 1A を切った後、写真 7 (カラー写真ではないが、点灯する LED 位置の違いにより判別できる) の

とおり、基板2枚のうち、1枚が充電完了を示すLEDが点灯していた。つまり、基板1枚のみが充電電流を供給していることになっていた。

上記の考察を裏付けるために、さらに、充電電流の違いによる充電容量の時間推移を計算して図10を得た。また、図10のベースとなるデータの一部を表1に示す。

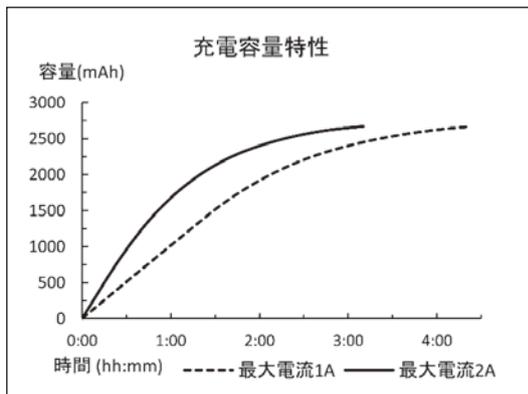


図10 充電電流の違いによる充電容量の変化

表1 充電容量ごとの充電時間短縮率

充電容量		充電時間 (hh:mm)			短縮率 %
%	mAh	最大充電電流1A時	最大充電電流2A時		
10	265	0:15	0:07	49%	
20	530	0:31	0:16	49%	
25	663	0:38	0:20	48%	
30	795	0:46	0:24	48%	
40	1060	1:02	0:33	46%	
50	1325	1:18	0:44	44%	
60	1590	1:34	0:56	41%	
70	1855	1:54	1:11	38%	
75	1988	2:06	1:20	37%	
80	2120	2:19	1:30	35%	
90	2385	2:57	2:00	32%	
95	2518	3:26	2:24	30%	
100	2650	4:19	3:10	27%	

※ Li-ion の満充電時容量は 2650mAh

表1では、図9の実験で用いた Li-ion の満充電容量 2650mAh に対して約 50 % の容量 1325mAh に達するまでの充電時間は、最大電流 1A 時 (図4) の1時間18分に比べて、最大電流 2A 時では44分となっていて、充電時間は44%短縮された。また、約 75 % の容量 1988mAh に達するまでの充電時間は2時間6分から、1時間20分に短縮され、短縮率は37%となる。このように、充電による容量の増加に伴い、充電時間の短縮率が低下するのである。

実験中の Li-ion が発熱したことは筐体から感知できなかったが、より大きな電流で充電する場合は、温度センサーによる温度管理をしっかりと行う

ことが安全性の観点から必要であろう。

なお、実験では外部 USB 電源を2つ用いたが、電源の側は共通したグランドになるので、2A以上の電流を供給できれば、USB 電源1つでも問題ない。ただし、図8左端の+同士、-同士を結べる。

## 終わりに

新しい充電電池が次々開発された現代社会では、安全性が性能以上に確保しなければいけない。

本文では市販されている充放電保護基板について、その過充電・過放電機能を確認するための検証実験を行った。また、その応用実験として、①高電圧の放電に必要とした直列接続 Li-ion のバランス充電実験、②充電時間の短縮に貢献する Li-ion の急速充電実験を行った。

いずれの実験においても、Li-ion が過充電・過放電から守られていること、充放電保護基板をうまく使いこなすことで Li-ion の安全性が向上することが確認された。

新しい見地として、充放電保護基板のもとでは、①放充電時の Li-ion の挙動、②放電中止と放電再開が繰り返す現象、③特性の著しく異なる Li-ion でもバランス充電が可能であること、④最大充電電流を倍にしたとしても、充電時間は半分にならないこと、等が実験データから得られた。

充放電保護基板に対して外部回路を追加し、より複雑な応用例を検証することは今後の課題としよう。

## 参考文献

- 小久見善八 (2008)、『リチウム二次電池』オーム社
- 神山敦 (2018)、「リチウムイオン電池の信頼性と安全性について (電子機器の信頼性・安全性の作り込み:故障物性研究会特集 (2))」日本信頼性学会誌 40 (4)、196-203、2018-07
- 高橋邦明 (2012)『「エネルギーデバイス」の信頼性入門 — 二次電池、パワー半導体、太陽電池の特性改善と信頼性試験』日刊工業出版社
- 西美緒 (1997)、『リチウムイオン二次電池の話』裳華房

# Experiment on Safety of Lithium-Ion Rechargeable Battery

NI Yongmao

## Abstract

Lithium-Ion (Li-Ion) rechargeable batteries are a good option for today's electronics as these cells typically have higher output voltage or higher energy capacities than their counterparts. However there is a potential serious safety risk – overcharging / over-discharging, which can cause the Li-ion cell to overheat and potentially burn.

In this paper, we carried out verification experiments on safety confirmation of an overcharge / over-discharge protection PCB including TP4056 and DW01A these were developed for safe handling of Li-Ion. And two application experiments were devised to confirm the safety of balanced charging or fast charging of Li-Ion cells

(2018年10月29日受理)