

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2007 年度～2008 年度
課題番号：19760207
研究課題名 (和文) セル電圧均等化回路を用いた蓄電モジュールの劣化解析
研究課題名 (英文) Analysis for Degradation Trend of Energy Storage Modules with Cell Equalizers
研究代表者 鵜野 将年 (UNO MASATOSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・研究員
研究者番号：70443281

研究成果の概要：

複数個の蓄電セルの直列接続により構成された蓄電モジュールにおいて、各セルの電圧ばらつきを防止するために均等化回路が用いられる。この均等化回路は各セル間で高周波にて充放電を行うことにより電圧ばらつきを防止する。本研究では均等化回路使用時に発生する高周波の充放電がセルの劣化に及ぼす影響を解明するため、高周波充放電サイクル実験を Li イオン電池を用いて実施した。その結果、100 Hz 以上の高周波条件において劣化率は低く、均等化回路には適切な動作周波数領域があることが示された。本研究の成果は均等化回路設計などの電気工学の分野に有益な情報を提供するものと期待できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19 年度	2,300,000	0	2,300,000
20 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電気機器工学

キーワード：電気エネルギー工学（発生・変換・貯蔵、省エネルギーなど）

1. 研究開始当初の背景

Li イオン電池や電気二重層キャパシタ等の蓄電セル（以下、セルと呼ぶ）の使用の際には、機器が必要とする電圧・電気容量に応じて複数個のセルを直列ならびに並列に接続しモジュールを構成して使用する。しかしモジュールを構成した場合、様々な理由によりセル単体のエネルギー性能や寿命性能が十分に発揮されないのが現状である。セルを複数個直列に接続したモジュールを使用する場合、セルの内部抵抗、容量、自己放電率等のセルの個体差や環境条件の違い等によりセル電圧が徐々にばらつく。モジュールに

おいては最も電圧の低いセルによって放電可能なエネルギーは制限を受け、最も電圧の高いセルにより充電可能なエネルギーは制限を受けてしまうため、セル電圧のばらつきはモジュールとしての利用可能なエネルギーを低下させることになる。またモジュール内において電圧の高いセルは電圧の低いセルに比べて劣化が進みやすくなり、劣化の進んだセルはさらに電圧が上昇し劣化が加速される。このような悪循環により最終的にはモジュール内の局所的な劣化が発生し、モジュールとしての寿命を著しく縮めることになる。このような理由により、セルの寿命を

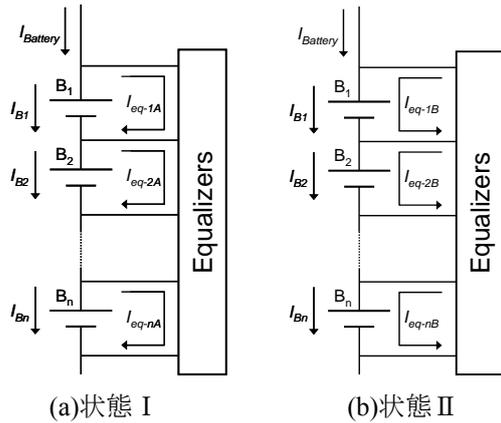


図1 均等化回路

最大限に活用するためには、長期使用において発生するセル電圧のばらつきを解消するセル電圧均等化回路が必要不可欠である。

一般的な均等化回路方式では図1に示すようにいくつかのスイッチング状態を経て（図では状態ⅠとⅡ）各セル間にて高周波で電荷を相互交換、つまり充放電を行うことにより電圧ばらつきを防止する。よってセルは通常の数分～数時間オーダの充放電サイクルに加えて高周波の充放電サイクルにおいても使用されることになる。一般的にセルは放電の深さが深ければ深いほど、充放電のサイクル数が増えれば増えるほど劣化が進行することが明らかにされている。しかし均等化回路により発生する高周波の充放電サイクルがセルの寿命性能に及ぼす影響については深く議論されていないのが現状である。今後のエネルギー問題の深刻化に伴い均等化回路の必要性がますます増すことを考慮すると、均等化回路の動作がセル寿命に与える影響は把握しておくべき要素であることは間違いない。この劣化要素を把握することにより、均等化回路の制御パラメータを最適化することができ、均等化回路の更なる発展が望めるだけでなく、蓄電池の寿命性能およびエネルギーを最大限に活用することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記のような高周波の充放電サイクルがセルの寿命性能に及ぼす影響を解明することにある。均等化回路の動作パラメータと寿命性能の相関を定量的に把握することが出来れば、均等化回路の制御パラメータ等を改善することが可能となる。それにより、既存の均等化回路の更なる発展が望めるだけでなく、セルの寿命性能ならびにエネルギーの有効活用が期待できる。

3. 研究の方法

高周波の充放電サイクルが電池の寿命性能に及ぼす影響を確認するために、均等化回路使用時を想定した高周波充放電サイクル実験をLiイオン電池に対して行った。充放電サイクル実験には定格容量2000mAhのLiイオン電池を用いた。これらの電池に対して、1-100kHzの充放電サイクル周波数（ $1-10 \times 10^{-6}$ secの充放電周期）において、1Aの充放電電流により平均電圧4.2Vにおける充放電実験を実施した。サイクル中におけるセルの平均電圧を一定に保つために充放電の時比率（1周期における放電時間の比率）は50%とし、自己放電によりセルの平均電圧が低下した場合には自動的に充電電流が増加して自己放電分を補償するよう充放電器の制御を行った。充放電条件の違いによるセルの劣化傾向を把握するために、充放電サイクルの前後において25°Cで放電容量を測定した。これらの実験と並行して、フローティング充電によるカレンダー劣化の影響を把握するため、4.2Vにおけるフローティング試験も併せて実施した。

また、上記の充放電サイクル中におけるセル内部の電流分布特性を把握するために、Liイオン電池に対して交流インピーダンス測定を行い、得られた各種パラメータを元に等価回路に用いる定数を決定し、スイッチング電源高速シミュレータSCATを用いて充放電シミュレーションを行った。

4. 研究成果

充放電サイクル試験における劣化率の周波数依存性を図2に示す。100Hz以上の高いサイクル周波数では劣化率は低く、10Hz以下の低い周波数領域では比較的大きな劣化率を示しており、試験期間が長くなるにつれて劣化傾向の差異は顕著となった。高周波条件における劣化率はフローティング条件の劣化率と同等であることから、高周波条件に

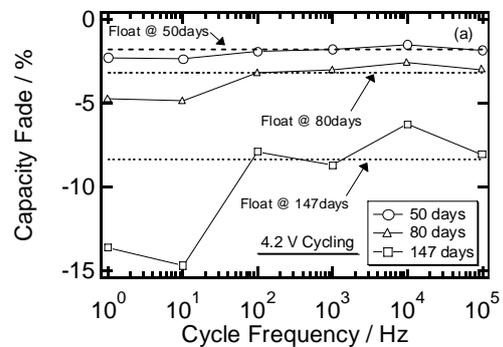


図2 高周波充放電サイクルにおけるLiイオン電池の劣化傾向

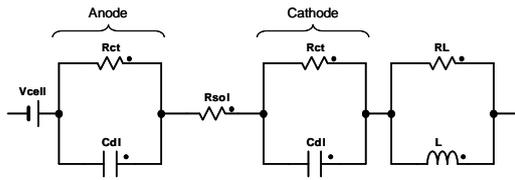


図3 電池の簡易等価回路

おける劣化は主にカレンダー劣化によるものだと考えられる。その一方で低周波条件の劣化率は高周波条件と比較して高いことから、低周波条件ではカレンダー劣化に加えて充放電サイクルによる劣化も寄与しているものと推察される。

一般的に Li イオン電池は正負極の電気二重層容量と電荷移動抵抗から決定される固有の時定数を有している。本研究で行った充放電サイクル実験は従来の実験と比較して高周波であることから、電池内部における電気二重層容量と電荷移動抵抗への電流分布の周波数依存性解析が劣化メカニズム解明の鍵になると考えられる。

図3に示すように、一般的に電池のアノードとカソードはそれぞれ電気二重層容量 C_{dl} と電荷移動抵抗 R_{ct} の並列回路で構成される固有の時定数を有しており、 C_{dl} および R_{ct} に流れる電流は充放電サイクル周波数に大きく依存する。

充放電サイクル周波数が 10 kHz ならびに 10 Hz 時における電池電圧、電解液抵抗 R_{sol} ならびに正負極の C_{dl} と R_{ct} に流れる電流波形を図4、5にそれぞれ示す。図4の充放電サイクル周波数が 10 kHz の条件において、充放電電流は R_{ct} にほとんど流れておらず、 C_{dl} が充放電電流の流れるバッファとして機能していることが確認できる。一方で、図5の 10 Hz の条件では、充放電の切り替わりの際こそ C_{dl} に電流が流れているが、全体としては R_{ct} に流れる電流が支配的であることが分かる。このように、 C_{dl} と R_{ct} に流れる充放電電流には周波数依存性があることが示された。

シミュレーション解析より得られた、充放電サイクル時における実効電流分布の周波数依存性を求めた結果を図6に示す。低いサイクル周波数領域においてはアノードとカソード共に R_{ct} に電流が流れるが、高い周波数領域では C_{dl} がバッファとなるため R_{ct} には電流がほとんど流れていないことが確認できる。

図2と図6を比較すると、電荷移動抵抗に支配的に電流が流れる低周波領域にて劣化率が高いことが分かる。電荷移動抵抗に電流が流れるということは、化学反応が起きていることを意味しているので、低周波域における劣化率は充放電反応に伴う劣化が寄与

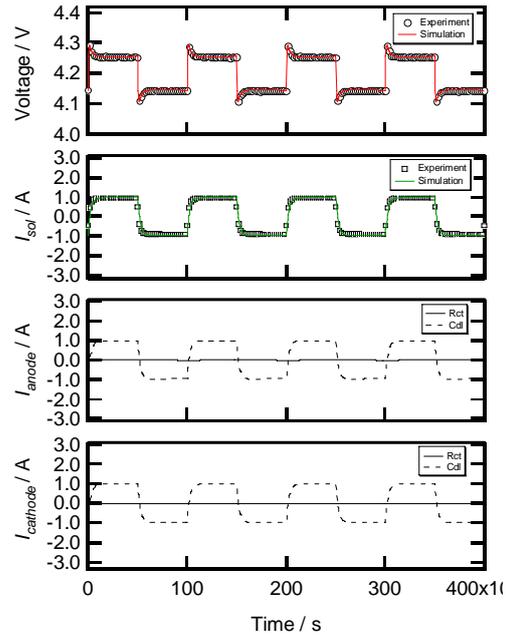


図4 充放電サイクル周波数 10 kHz における電圧・電流波形

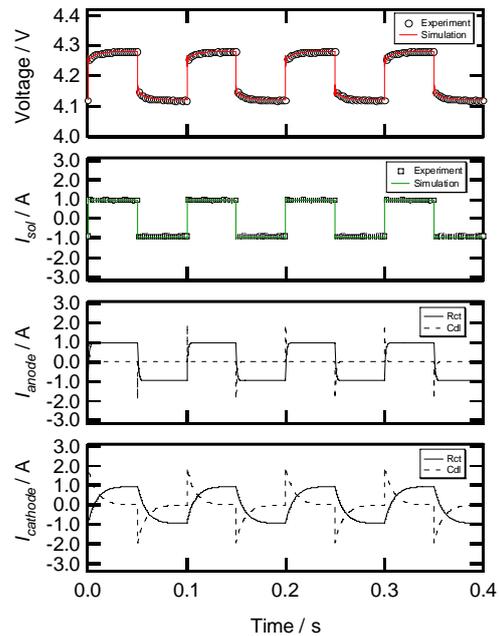


図5 充放電サイクル周波数 10 Hz における電圧・電流波形

しているものと考えられる。特にカソードにおける電気二重層容量-電荷移動抵抗の電流分布特性は電池の劣化率と相関があることから、高周波充放電サイクルにおける劣化は主にカソード側で起こっていることが示唆された。

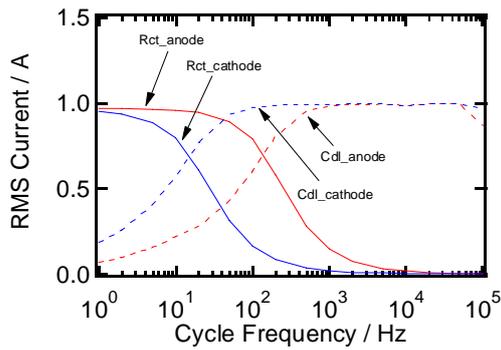


図6 高周波充放電サイクル時におけるLiイオン電池の R_{ct} と C_{dl} への電流分布

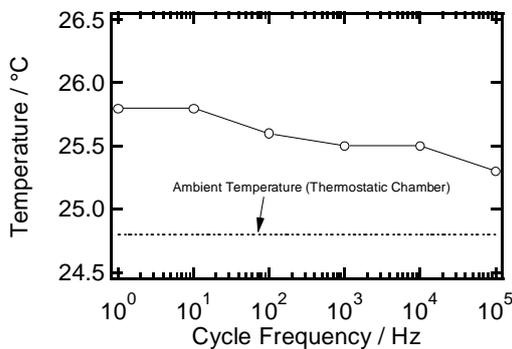


図7 高周波充放電サイクル時における電池表面温度

充放電電流によるジュール熱が電池の劣化に影響を及ぼしている可能性が考えられる。高周波充放電サイクル時における電池表面温度を24.8°Cの高温槽中において計測した結果を図7に示す。低周波条件の電池において温度が若干高くなる傾向が確認された。これは高周波条件においては電解液抵抗 R_{sol} のみがジュール熱の発生に寄与するのに対して、低周波条件では R_{sol} のみならず R_{ct} の成分も発熱に加わるためであると考えられる。一見すると、図7の温度傾向は図2で示した劣化傾向と相関があるように見える。しかしながら、フローティング条件の電池温度（高温槽温度と同一の24.8°C）は高周波条件の電池温度（25.5°C）と比較して明らかに低いが、図2で示した結果では同一の劣化率を示している。これらの結果から、熱による劣化分は無視しうる程度であり、主な劣化要因は上記の充放電サイクルであることが示された。

均等化回路の機能はバッテリー内の各セルの電圧を揃えることによりバッテリーの長寿命化を図ることであり、均等化回路自身がバッテリーを劣化させることがあってはならない。ここで得られた結果は、バッテリーの長寿

命化の観点において均等化回路には適切な動作周波数領域（100 Hz以上）が存在することを意味しており、通常の均等化回路の動作周波数領域（数kHz～数百kHz）ではほとんど影響はないものと考えられる。以上の実験より得られた結果は、均等化回路の設計・製作を行う電気工学の分野に対して有益な情報を提供するものと期待される。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

Masatoshi Uno, Analysis for lithium-ion cells on high-frequency charge/discharge cycling induced by cell equalizers, Journal of Power Sources, Submitted, under being reviewed.

〔学会発表〕（計3件）

- ① 鶴野将年、浅く高頻度な充放電サイクルにおけるLiイオン電池の劣化挙動、第48回電池討論会予稿集、pp. 396-397、2007年11月15日、福岡、査読無
- ② 鶴野将年、高周波充放電サイクルにおけるリチウムイオン電池の劣化解析、第49回電池討論会予稿集、pp. 143、2008年11月7日、堺、査読無
- ③ 鶴野将年、バランス回路使用時に発生する高周波充放電がリチウムイオン電池の劣化に及ぼす影響、平成21年電気学会全国大会講演論文集[4]、pp. 224-225、2009年3月17日、札幌、査読無

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計2件）

名称：電源システム
 発明者：鶴野将年
 権利者：独立行政法人宇宙航空研究開発機構
 種類：特許
 番号：特願2008-091861
 出願年月日：2008年3月31日
 国内外の別：国内

名称：キャパシタ電源システム
 発明者：鶴野将年
 権利者：独立行政法人宇宙航空研究開発機構
 種類：特許
 番号：特願2008-053087
 出願年月日：2008年3月4日
 国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鵜野 将年 (UNO MASATOSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究本部 研究員
研究者番号： 70443281