

電気二重層キャパシタの宇宙機適用研究
Applicability of Electric Double Layer Capacitors for Spacecrafts

宇宙科学研究本部

Institute of Space and Astronautical Science

鵜野将年、曾根理嗣、豊田裕之、廣瀬和之、田島道夫、齋藤宏文

Masatoshi Uno, Yoshitsugu Sone, Hiroyuki Toyota, Kazuyuki Hirose, Michio Tajima, Hirobumi Saito

Abstract

Electric double layer capacitors (EDLCs) which have been developed for terrestrial applications are energy storage devices without electrochemical reaction. EDLCs are interesting energy storage candidate in space applications, for example, Space Solar Power Systems (SSPS), where long-life electrical power sub-system is required. In this study, cycle life performance of EDLCs under different satellite operating conditions was tested.

In order to realize performance of EDLC modules, circuits that equalize voltages of individual cells in modules are necessary. Equalization circuits were designed with a simple configuration utilizing only electric switches. The effectiveness of the equalization circuit for EDLC modules was successfully demonstrated.

1. はじめに

近年、ミッションの高度化や深宇宙探査に向けて、宇宙機電源の長寿命化がますます要求されている。通常の宇宙機の電源には Ni-Cd 電池、Ni-MH 電池や Li イオン電池などの化学電池が用いられるが、化学反応を伴う電池では更なる長寿命化への対応には様々な課題を有する。

民生分野において盛んに研究開発が行われている電気二重層キャパシタ (EDLC : Electric Double Layer Capacitor) は化学反応を伴わない蓄電デバイスであり、長寿命、高効率充放電、良好な低温特性等の特徴を有する。民生分野においてはこれらの特徴を活かし、ハイブリッド自動車用電源、UPS 電源、アシスト電源、蓄電設備等への応用が試みられている。宇宙分野においても小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された探査ロボット「ミネルバ」用の電源として適用実績がある。また EDLC の長寿命性能に着目し、宇宙太陽発電衛星 (SSPS : Space Solar Power Systems) に代表される従来の 2~10 倍の充放電サイクル寿命を必要とするミッションへの適用を目指し、研究が進められている。ここでは EDLC の寿命性能の把握を目的とし、異なる充放電条件による充放電サイクル試験を実施したので報告する。

EDLC の長寿命性能を最大限に活用するためには、長期の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。EDLC を複数個直列に接続したモジュールを使用する場合、内部抵抗、容量、自己放電率等のセルの個体差や環境温度の違い等によりセル電圧が徐々にばらついてくる。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、またモジュール内のセルが局所的に劣化してしまう等の様々な問題を引き起こす。このような背景を受け、セル電圧のばらつきを防止するために種々の均等化回路が考案されているが、素子数、構成、効率等の観点において様々な課題を有しているのが現状である。ここでは直／並列接続されたモジュールにおいて、構成が簡単で半導体スイッチのみを用いてセル電圧を考案し、その有効性を評価したので報告する。

Table 1 Charge/discharge cycle life performance test conditions.

Sample		Charge	Discharge
Basic Test	Cell 1	CC/CV 2.7 V 5 A 1 h	CC 5 A, 0 V cut off
	Cell 2	CC/CV 2.7 V 1 A 1 h	CC 1 A, 0 V cut off
	Cell 3	CC/CV 2.7 V 5 A 1 h	CC 5 A, DoD(E) = 50%
	Cell 4	CC 2.7 V 5 A (No CV charge)	CC 5 A, 0V cut off
	Cell 5	CC/CV 2.5 V 5 A 1 h	CC 5 A, 0V cut off
Simulation for Satellites	Cell 6	CC/CV 2.7 V 65 min (CC = 45 min, CV = 20 min)	CP 35 min DoD(E) = 80%, (DoD(C) = 55%)
	Cell 7		CP 35 min DoD(E) = 80%, (DoD(C) = 55%)
	Cell 8		CP 35 min DoD(E) = 40%, (DoD(C) = 23%)
	Cell 9		CP 35 min DoD(E) = 60%, (DoD(C) = 37%)
	Cell 10		CP 35 min DoD(E) = 20%, (DoD(C) = 11%)

DoD(E) : Energy DoD DoD(C) : Capacity DoD

2. 研究概要

平成 18 年度は以下の項目について研究を行った。

2.1 寿命性能確認試験

2.1.1 基礎データ取得を目的とした充放電サイクル試験

供試体として定格容量 1350 F、定格電圧 2.7 V のラミネートタイプ EDLC を 5 セル (Cell 1~5) 用いた。充放電サイクル試験における設定条件を Table 1 に示す。恒温槽内において 25°C 一定のもと、異なる条件において充放電試験を実施した。セルの劣化傾向を把握するために、適宜、容量確認試験を実施した。容量確認試験時における充放電条件を Table 2 に示す。また比較検討の為に小型科学衛星「れいめい」に搭載実績のある Mn 系 Li イオン二次電池について Tabel 中の Cell 3 に相当する条件にて充放電サイクル試験を実施した^{[1][2]}。

2.1.2 衛星負荷を模擬した充放電サイクル試験

供試体として定格容量 1350 F、定格電圧 2.7 V のラミネートタイプ EDLC を 5 セル (Cell 6~10) 用いた。衛星負荷を模擬するために 100 分を 1 サイクルとする 65 分の定電流/定電圧 (CC/CV : Constant Current/Constant Voltage) 充電、35 分の定電力 (CP : Constant Power) 放電において充放電サイクル試験を実施した。充放電サイクル試験における設定条件を Table 1 に示す。恒温槽内において 25°C 一定のもと、異なるエネルギー放電深度 (DoD : Depth of Discharge) において充放電サイクル試験を実施した。基礎データ取得試験と同様に、セルの劣化傾向を把握する為に、適宜、容量確認試験を実施した。容量確認試験時における充放電条件を Table 2 に示す。

また比較検討の為に「れいめい」に搭載実績のある Mn 系 Li イオン二次電池について Tabel 1 中の Cell 8 に相当する条件にて充放電サイクル試験を実施した^{[1][2]}。

2.2 セル電圧均等化回路

2.2.1 均等化回路の原理

考案した均等化回路の一例を Fig. 1 に示す。この回路において、それぞれ直列に接続されたセル $C_{1A} \sim C_{4A}$ 、 $C_{1B} \sim C_{3B}$ 、 $C_{0C} \sim C_{3C}$ が 2 系統の半導体スイッチ $S_{a1} \sim S_{a8}$ 、 $S_{b1} \sim S_{b8}$ を介して並列に接続されており、

Table 2 Capacity measurement test conditions.

Sample	Charge	Discharge
Cell 1~5	CC/CV 2.7 V 5 A 10 h	CC 5 A 0 V Cut off
Cell 6~10	CC/CV 2.7 V 1 A 10 h	CC 1 A 0 V Cut off

3 直列/3 並列のモジュールを構成している。2 系統のスイッチを交互にオン/オフさせることにより、モジュール内のセルの直列および並列接続される組み合わせが切り替えられる。初期状態として S_a 系統オン/ S_b 系統オフの場合を考えた時、セル電圧 $V_{1A} \sim V_{4A}$ 、 $V_{1B} \sim V_{3B}$ 、 $V_{0C} \sim V_{3C}$ は、

$$V_{1A} = V_{1B} = V_{1C} \quad (1)$$

$$V_{2A} = V_{2B} = V_{2C} \quad (2)$$

$$V_{3A} = V_{3B} = V_{3C} \quad (3)$$

である。次に、この状態から S_a 系統オフ/ S_b 系統オンの状態にスイッチを切り替えることにより、直列および並列接続されるセルの組み合わせを切り替える。各セルには、並列に接続されるセルの電圧差に応じた充放電電流が流れ、最終的には、

$$V_{2A} = V_{1B} = V_{0C} \quad (4)$$

$$V_{3A} = V_{2B} = V_{1C} \quad (5)$$

$$V_{4A} = V_{3B} = V_{2C} \quad (6)$$

となる。この時にセル間に流れる充放電電流は並列に接続されるセルの内部抵抗とスイッチのオン抵抗により制限される。以上の動作を繰り返し行うことによって、式(1)~(3)と式(4)~(6)は等しい状態、つまり全てのセル電圧は等しくなる。なお、この構成において C_{1A} 、 C_{4A} 、 C_{0C} 、 C_{3C} はスイッチのオン/オフに応じて回路からは開放状態となるため、充放電中にスイッチングを行った場合はこれら 4 つのセルは他のセルと比較してスイッチングのデューティ比に応じて充放電容量が少なくなる。よってこれら 4 つのセルには充放電容量、つまりデューティ比に応じた容量値を選択する必要がある。

2.2.2 均等化動作確認試験

Fig. 1 の回路において C_{1A} 、 C_{4A} 、 C_{0C} 、 C_{3C} には 50 F、 $C_{2A} \sim C_{3A}$ 、 $C_{1B} \sim C_{3B}$ 、 $C_{1C} \sim C_{2C}$ に 100 F の円筒形セルをそれぞれ用いてモジュールを構成した。初期状態としてそれぞれのセルを 0.5~2.5 V の範囲でばらつかせておき、モジュールとしての充放電は行わずにセル電圧の均等化を行った。半導体スイッチのドライブは 2 系統のスイッチが同時にオンしないように適当なデッドタイムを設け、ファンクションジェネレータを用いてスイッチング周波数 10 Hz、デューティ比 50% にて行った。本稿においてはドライブ回路を簡素化するために、半導体スイッチには絶縁駆動が可能であるフォトMOSリレーを用いた。

2.2.3 均等化回路を用いた充放電試験

均等化回路を使用しない場合として、定格容量 100 F の円筒形セルを用いてモジュールAを構成した。このモジュールに対して 210 mA (1 C 相当) の電流において CC/CV 充電、CC 放電により充放電試験を行った。また、均等化回路を用いた場合として $C_{2A} \sim C_{3A}$ 、 $C_{1B} \sim C_{3B}$ 、 $C_{1C} \sim C_{2C}$ に 100 F のセル、 C_{1A} 、 C_{4A} 、 C_{0C} 、 C_{3C} にはデューティ比に応じた容量である 50 F のセルをそれぞれ用いてモジュールBを構成した。スイッチング周波数 10 Hz、デューティ比 50% において 210 mA (1 C 相当) の電流において CC/CV 充電、CC 放電により充放電試験を行った。またモジュール内のあるセルが局所的に劣化した場合を想定して C_{2B} を 100 F から 50 F セルに置き換えて、上記の二種類のモジュールに対して同様の条件において充放電試験を行った。

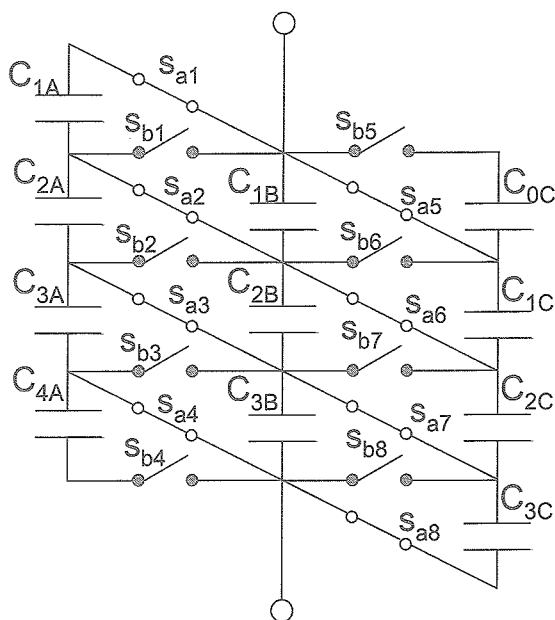


Fig. 1 An example of equalization circuit for series/parallel connected module.

3. 成果の概要

3.1 寿命性能確認試験

3.1.1 基礎データ取得を目的とした充放電サイクル試験

Fig. 2 に基礎データ取得試験におけるセルの容量維持率の推移を示す。Li イオン二次電池の容量維持率が約 2000 サイクルにおいて 83%であったのに対して、EDLC の容量維持率は約 6000 サイクルにおいても 93%以上であり、Li イオン二次電池と比較して EDLC の容量維持率は著しく良好であることが確認された。その中でも Cell 4 は他の供試体と比較して劣化の程度が小さいことが分かった。本試験は他の試験と異なり定電圧 (CV) 充電を行っておらず、高電圧 (2.7 V) で維持される期間がほとんど存在しない。一般的に化学電池においては高電圧で維持される時間が長くなると電解液の分解反応が進み、セルの劣化が促進される。EDLC においても同様に高電圧でセルを維持する時間の長さがセルの劣化に影響を与えることが示唆された。

Fig. 3 に容量確認試験時における Cell 1 および Cell 4 の充電カーブの推移を示す。CV 充電を行った Cell 1 においては充放電サイクルを経るにつれて充電時のセル電圧が上昇していることが確認された。それに伴い、CC 充電から CV 充電へ移行する時間が早まり充電容量は低下した。これは充放電サイクルによりセルが劣化し、容量が低下していることに起因するものと考えられる。一方、CV 充電を行わなかった Cell 4 においては充放電サイクルを経ても充電カーブにほとんど変化は見られなかった。

Fig. 4 に容量確認試験時における Cell 1 および Cell 4 の放電カーブの推移を示す。充電カーブ推移の場合

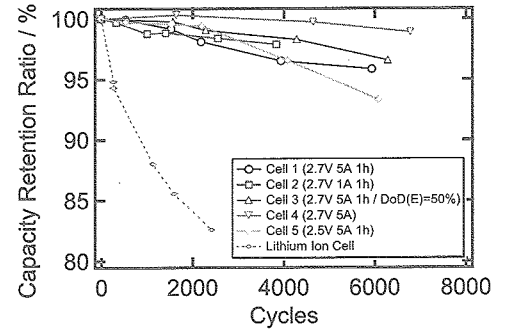
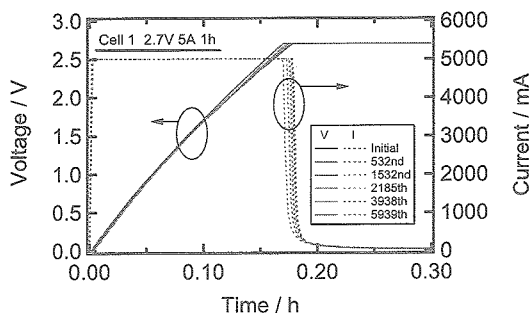
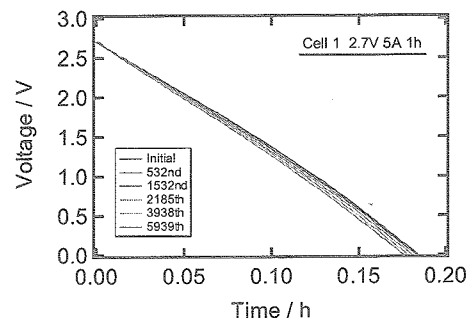


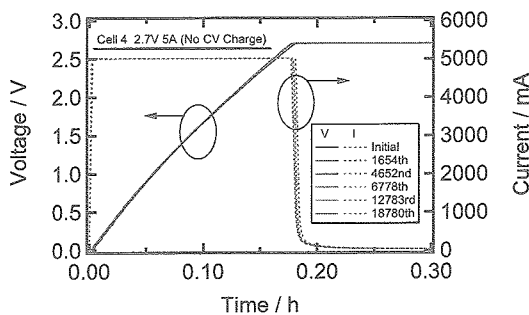
Fig. 2 Capacity retention ratio trends of the EDLCs during the basic performance tests.



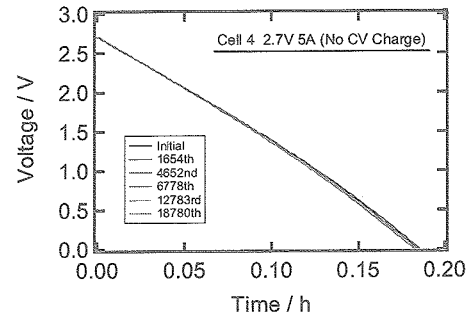
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3 Charge curves trends of (a) cell 1 and (b) cell 4 during the capacity measurement tests.

Fig. 4 Discharge curves trends of (a) cell 1 and (b) cell 4 during the capacity measurement tests.

と同様に、充放電サイクルを経るにつれて Cell 1 の放電カーブが徐々に低下し放電容量も低下したのに対して、Cell 4 の放電カーブはほとんど変化しなかった。以上の結果からも CV 充電を行わなかった Cell 4 の劣化が小さいことが確認された。

3.1.2 衛星負荷を模擬した充放電サイクル試験

Fig. 5 に衛星負荷を模擬した充放電サイクル試験におけるセルの容量維持率の推移を示す。3000 サイクルにおいて EDLC の容量維持率は 96% 以上であり、Li イオン電池 (容量維持率=約 82%) と比較して容量劣化が著しく小さいことが確認された。通常、化学電池では深い DoD

での使用において劣化の進行は顕著になる。しかし EDLC においては異なる DoD において充放電サイクル試験を実施したにも関わらず、顕著な劣化傾向の違いは確認されなかった。異なる DoD による劣化傾向の違いを確認するためには更なる長期的な充放電サイクル試験が必要であると考えられる。充放電条件によるセルの劣化傾向の違いを確認するために、現在、試験を継続中である。

3.2 セル電圧均等化回路

3.2.1 均等化動作確認試験

あらかじめモジュール内のセル電圧をばらつかせた状態から均等化を行った場合のセル電圧の応答波形を Fig. 6 に示す。均等化を行うことにより並列に接続されるセル間において充放電が行われ、最終的にはばらついていた初期の平均電圧である約 1.5 V に収束した。このことよりセルに蓄えられた電荷を失うことなくセル電圧の均等化が行われたことが分かる。なお、均等化速度の時定数 τ は並列に接続される EDLC の合成静電容量を C、内部抵抗を r、スイッチのオン抵抗を R とすると、簡易的に、

$$\tau = C \times (r + R) \quad (7)$$

と表される。よって内部抵抗の小さい EDLC およびオン抵抗の小さいスイッチを用いることにより均等化速度を速くすることが可能である。

3.2.2 均等化回路を用いた充放電試験

均等化回路を使用しない場合におけるモジュール A 内のセル電圧の充放電カーブを Fig. 7 (a) に示す。一般的に EDLC のセル電圧 V は電荷量 Q に対して、

$$V = \frac{Q}{C} \quad (8)$$

で表される。劣化相当セルを含む段の容量 ($C_{2A} // C_{2B} // C_{2C} = 100 \text{ F} // 50 \text{ F} // 100 \text{ F} = 25 \text{ F}$) は他段の容量 ($100 \text{ F} // 100 \text{ F} // 100 \text{ F} = 33 \text{ F}$) よりも低いため、同じ充電量であっても他段よりも電圧が急速に上昇し、最終的に電圧は 400 mV 程度高くなった。これは劣化したセルを含むモジュールにおいてはセル電圧が容易にばらつくことを意味している。

Fig. 7 (b) に均等化回路を使用した場合におけるモジュール B 内のセル電圧の充放電カーブを示す。劣化相当セルが含ま

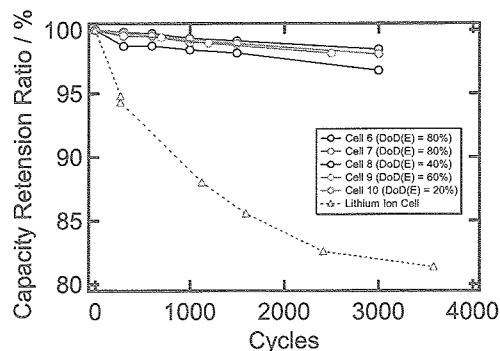


Fig. 5 Capacity retention ratio trends of the EDLCs during the simulation tests for satellites.

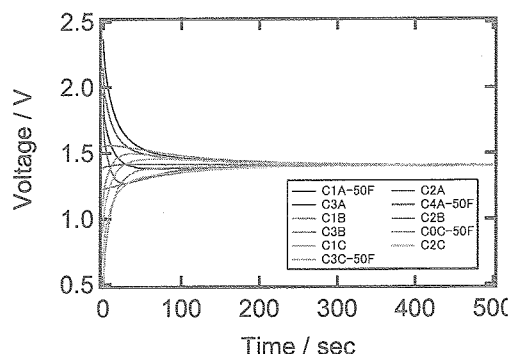


Fig. 6 Transient waveforms of cell voltages in the case of equalization.

れているにも関わらず、電圧ばらつきは充放および放電時において約 10 mV、定電圧充電領域においては約 5 mV であり大きなばらつきは確認されなかった。よってモジュール内のセルが何らかの理由で局所的に劣化した場合においても本均等化回路を用いることによりセル電圧を均一に維持することが可能であると考えられる。

本均等化方式はドライブ回路を除くと EDLC セル自身と半導体スイッチのみを使用しており、非常に簡素化された構成となっている。また本方式においては複数個のセルが直接もしくは間接的に並列接続されるので、素子が故障した場合においても蓄電能力および均等化能力を喪失することはなく、信頼性の高い均等化方式であると考えられる。本均等化方式は構成が簡素であり信頼性が高く、長寿命電源として期待される EDLC の利点を最大限に活用することが可能であると考えられる。

4. まとめ

EDLC の寿命性能を把握するために、基礎データ取得を目的とした充放電サイクル試験、および衛星負荷を模擬した充放電サイクル試験を実施し、以下の事項が確認された。

- (1) EDLC は Li イオン二次電池と比較して著しく容量劣化率は小さかった。
- (2) CV 充電を行わなかった条件のセルにおいて最も劣化率が小さかったことから、高電圧でセルを維持する期間の長さが劣化に影響を与えている。
- (3) 衛星負荷を模擬した充放電サイクル試験においては、どの DoD においても劣化率に大きな差は見られなかった。

また EDLC を複数個直列に接続したモジュールの寿命と性能に悪影響を与えるセル電圧のばらつきを最小限に抑える均等化回路を提案し、実験によりその有効性を検証した。本均等化回路は構成が簡素であり信頼性が高く長寿命の EDLC を最大限に活用することができると考えられる。

5. 参考文献

- [1] 鶴野将年、曾根理嗣、三田 信、田中孝治、田島道夫、齋藤宏文、「INDEX 用ラミネート式リチウムイオン二次電池の耐環境性能」第 24 回宇宙エネルギーシンポジウム (2005)
- [2] 武田康男、鶴野将年、曾根理嗣、齋藤宏文、廣瀬和之、田島道夫、「れいめいにおけるリチウムイオン二次電池の運用シミュレーション」第 25 回宇宙エネルギーシンポジウム (2006)

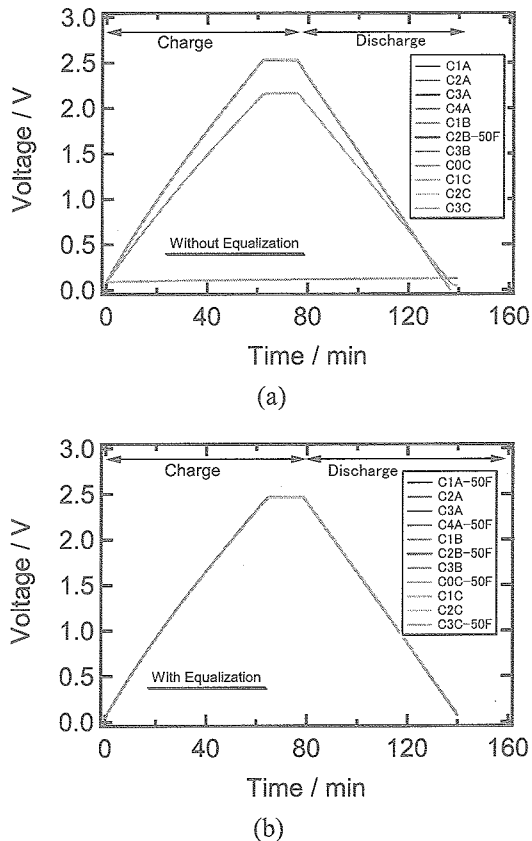


Fig. 7 Charge and discharge curves of cells in the EDLC modules (a) without equalization and (b) with equalization.