

「はやぶさ」搭載リチウムイオン電池の運用経過

In-Orbit Operations of Li-Ion Battery aboard HAYABUSA Spacecraft

大登 裕樹^{*}
Hiroki Ooto

山本 真裕^{*}
Masahiro Yamamoto

吉田 浩之^{*}
Hiroyuki Yoshida

久保田 昌明^{*}
Masaaki Kubota

江黒 高志^{*}
Takashi Eguro

Abstract

World's first spacecraft powered with Li-Ion battery, that is HAYABUSA, was successfully launched in May 2003 and since then operational events were conducted as scheduled, which demonstrates the battery and its operation method work well with keeping sufficient capacity to meet the mission. HAYABUSA or former Muses-C was designed and handled by JAXA and its 4-year scientific mission was to collect soils and rocks of an Asteroid, ITOKAWA.

The battery consisted of 11 prismatic cells in series with a rated capacity of 13.2 Ah, SOC of which was maintained in a certain controlled range according to battery's calendar degradation of capacity and each cell voltage of which was reset periodically with a cell-by-cell balancing circuit. Through one and a half year operation on space, battery's performances for events and capacity change were measured and analyzed in comparison to the initial planned values.

1. はじめに

当社は宇宙研究用及び人工衛星用 Ni-Cd 電池、Ni-MH 電池の研究開発と製造実績を基に、宇宙用リチウムイオン電池を開発し^{1)~3)}、宇宙科学研究所（現：宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部）殿の小惑星探査用工学実験探査機「MUSES-C」に搭載され、2003年5月に打上げられ、「はやぶさ」と命名された。

「はやぶさ」は世界初の大容量リチウムイオン電池を電源とし、4年間のミッションに向け現在順調に運航している。

「はやぶさ」ミッションの概要図を図1に示す。

2005年夏に小惑星「ITOKAWA」に到着し、数ヶ月に亘り小惑星表面の観測とサンプル採取を行い、2007年6月に地球に帰還する。この小惑星「ITOKAWA」の土壌をサンプリングして地球に持ち帰るミッションは、小惑星の観測と土壌の分析から太陽系の生い立ち、成り立ちを解明する。

搭載したリチウムイオン電池は、ミッションの大部分を占める軌道運行中の4年間、緊急時の衛星姿勢制御（セーフホールド）に備えて充電状態で運用

される。そして、①打上げ②スウィングバイ③タッチダウン④ターミネータ観測の4つのオペレーションにおいて大出力（1CA以上）の放電が予定されている。

このオペレーションを確実に実施するための運用のポイントは次の2つである。

- 1)電池の容量劣化を最小限に抑制する特殊な運用パターン
- 2)電池の特性バラツキを抑制するリセットオペレーション

本報は電池納入後3年弱、打上げ後1年半の期間で行ったバッテリーの運航実績を紹介する。

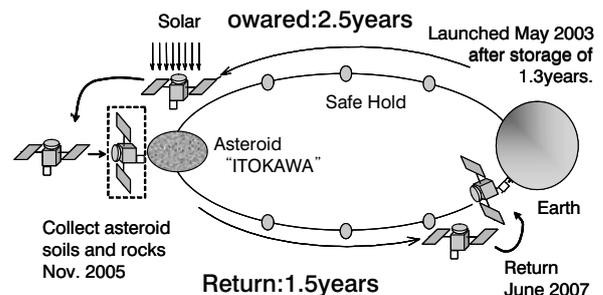


図1 「はやぶさ」ミッション
Fig.1 The asteroid sample return mission spacecraft, HAYABUSA.

* 技術開発部

2. 「はやぶさ」搭載バッテリーの開発と諸元

2.1 要求性能とバッテリーの構成

「はやぶさ」搭載バッテリーへの要求性能を表 1 に示す。この要求性能を満たすため、電池特性の経年劣化と最大負荷電流を考慮し、定格容量 13.2Ah 公称電圧 3.6V の角形リチウムイオン電池を設計した。

表 1 「はやぶさ」搭載バッテリーの要求性能
Table.1 Requirements of Li-Ion cell for HAYABUSA spacecraft.

	使用時期 (年)	最大負荷容量 (Ah)	最大負荷電流 (A)
Launch	0	7.03	12.78
Swing By	1.06	4.76	14.27
Touch Down	2.37	2.51	16.70
Terminator	2.45	5.95	17.61
Safe Hold	Mission 全期間	3.43	15.23

設計した電池は、正極活物質にコバルト酸リチウムを、負極に人造黒鉛を、電解液に有機溶媒系電解液を用いた低温特性に優れた長寿命な電池構成となっている。電極端子の封口には、宇宙用アルカリ電池で実績のあるセラミックハーメティックシール技術を応用し、耐宇宙環境用の高真空シール構造を実現した。

また世界で最高レベルの機械強度が要求される M-V ロケットの打上げ時の振動・衝撃にも十分に耐えられる機械特性を有している。

この電池の諸元を表 2 に、外観を図 2 に示す。

「はやぶさ」にはこのリチウムイオン電池を 11 セル直列接続したバッテリーを搭載した。

表 2 「はやぶさ」用リチウムイオン電池の諸元
Table.2 Specification of Li-Ion cells for HAYABUSA spacecraft.

Rated Capacity	13.2 Ah
Size W × T × H	69.3 × 24.4 × 132mm
Mass	570g
Specific Energy Density	> 85 Wh/kg
Volumetric Energy Density	> 220 Wh/l



図 2 「はやぶさ」用リチウムイオン電池の外観
Fig. 2 External View of a 13.2 Ah Li-Ion Cell for HAYABUSA spacecraft.

2.2 搭載バッテリーの運用方法

(1) 搭載バッテリーの運用パターン

リチウムイオン電池は SOC (充電状態) が高くなるほど容量劣化が促進される⁴⁾。「はやぶさ」搭載バッテリーはミッション期間中に生じる容量劣化をできるだけ抑制するため、軌道運行中は必要最低限の SOC を維持する特殊なパターンで運用する^{5)~6)}。

この SOC は軌道運行中の、

- ・セーフホールド容量
- ・電池の自己放電容量
- ・モニター回路への放電容量

等からなる最小必要容量とその時の電池容量で決定する。そして運用中の電池の容量劣化に合わせて、電池の SOC を徐々に上げていく。

例えば、最小必要容量が 8.0Ah で初期の電池容量が 13.2Ah であれば SOC を 60% に設定し、その後容量が劣化し、例えば 12.5Ah となった時点では SOC を 64% に設定するのである。

この容量劣化の確認には搭載バッテリーの容量確認が必要であるが、オペレーション以外で搭載バッテリーを完全放電することは探査機の運用上の負担が大きいため、頻繁に行うことが難しい。そこで、地上試験により、搭載バッテリーの運用パターンによる容量劣化をシミュレーションし、その結果を基に搭載バッテリーの SOC を決定することを試みた。

そして、オペレーションの前などに、容量比較を実施してシミュレーション試験の妥当性を確認する。

(2) リセットオペレーション

11セル直列で構成されたセル間のSOCのバランスが崩れた場合、セル間で特性劣化の進行にバラツキが生じ、最も特性劣化が進行したセルにバッテリー全体の特性が支配される。そこで、「はやぶさ」には各セルのセル電圧を揃える充電バイパス回路が採用されており、これにより定期的によりリセットオペレーションを実行する。

図3に今回計画されている運用パターンと容量劣化のシミュレーションを示す。

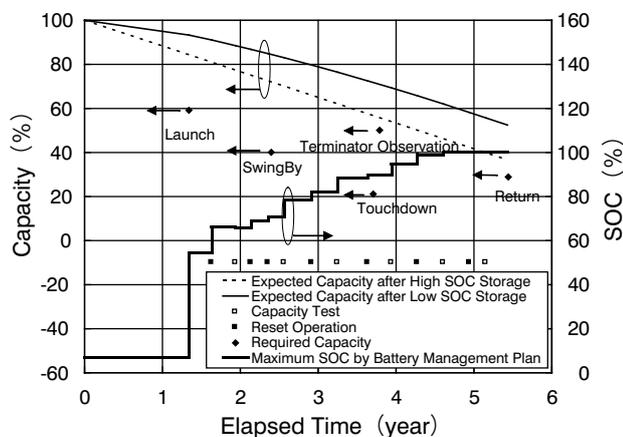


図3 「はやぶさ」搭載バッテリーの運用パターンと容量劣化シミュレーション
Fig.3 SOC and capacity requirements scheduled through the mission and capacity changes simulated for two cases of SOC.

常に満充電状態で運用するケース(図3中、点線)に比べ、低SOCに制御する本運用法(同、実線)はミッション全期間に亘り高い電池容量を維持できると予想される。

3. 搭載バッテリーの運用経過

「はやぶさ」は現在、スウィングバイを終えて小惑星「ITOKAWA」に向けて順調に軌道運航を続けている。以下に、これまでのバッテリーの運用状況とリセットオペレーション、シミュレーションによる容量劣化予測、容量確認試験によるシミュレーションの妥当性検証結果について述べる。

3.1 搭載バッテリーの電圧挙動の推移

図4に搭載バッテリーの電圧、温度の推移と地上モニターバッテリー電圧の推移を示す。

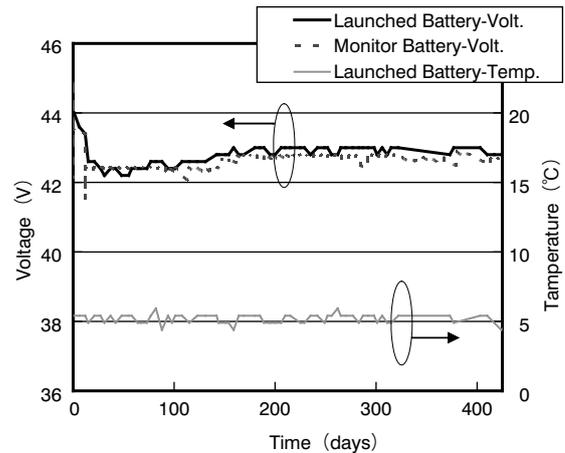


図4 「はやぶさ」搭載バッテリーの運用の推移
Fig.4 Performance of Li-Ion battery in HAYABUSA spacecraft in operation.

これまで①打上げ②リセットオペレーション③スウィングバイ④バッテリー容量確認試験、のオペレーションが行われたが、搭載と地上モニターの両電池電圧の推移はおおむね一致している。以下に、これらのオペレーションにおける運用状況を述べる。

3.2 打上げ

「はやぶさ」は打上げの際、探査機内の温度を一定範囲に保つため、ヒーター作動時の負荷電力に応じてバッテリーを放電する予定であった。

しかし、実際には探査機内の温度が予想より低下しなかったため、ヒーターが殆ど動作せず、バッテリーは予想した放電量のわずか10%に当たる0.8Ah程度を放電しただけであった。

3.3 リセットオペレーション

打上げ後、約4ヶ月ごとの間隔でリセットオペレーションを2回行った。図5に第1回リセットオペレーション時のバッテリー電圧、セル電圧の充電挙動を示す。

リセットオペレーションは、11個のセルを所定の電圧(4.1 ± 0.05V、± 0.05Vの誤差 = 制御装置の誤差 ± 0.03V + テレメトリの誤差 ± 0.02V)まで充電した後、充電電流をバイパスするバイパス充電回路を装着して行った。

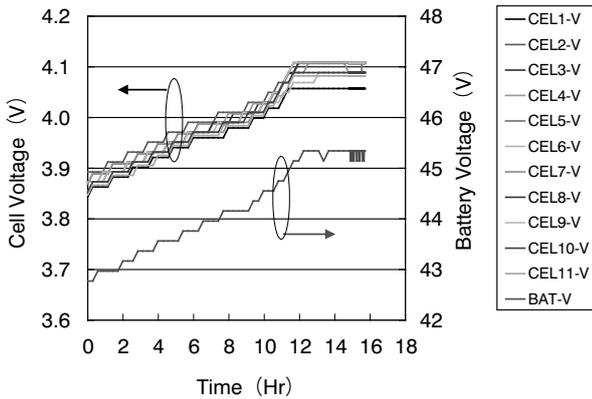


図5 「はやぶさ」搭載バッテリー
リセット充電時の電圧挙動
Fig.5 Changes of voltage of Li-Ion battery in
HAYABUSA spacecraft during reset operation.

図6に打上げ以降の搭載バッテリーの各セルの電圧の推移を示す。この定期的なリセットオペレーションの効果で、打上げ以降11個のセル電圧のバラツキは広がることなく順調に推移している。

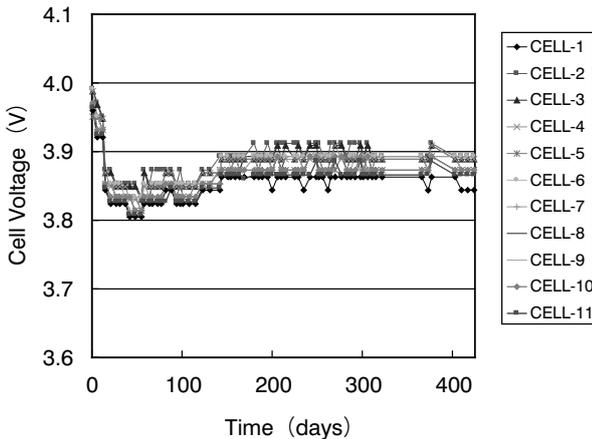


図6 「はやぶさ」搭載バッテリー
セル電圧の推移
Fig.6 Performance of voltages of Li-Ion cells in
HAYABUSA spacecraft in operation.

3.4 スウィングバイ

スウィングバイは、地球の重力を利用し探査機に搭載する推進剤を使用することなく、軌道の方向や速度を大きく変更するオペレーションである。

このオペレーションにおいて「はやぶさ」は地球の夜側を通過するため約30分間の日陰が生じ、通常時探査機の電源として働いている太陽電池パドルが使用できないので搭載バッテリーのみで探査機を運用した。

図7にスウィングバイの日陰時における搭載バッテリーの放電挙動を示す。26分間の日陰時に約

3Ahの放電が行われた。このイベントで探査機は初めて本格的なバッテリーのみの運用を行った。

今回、スウィングバイ時のバッテリー放電負荷は設計では485Wの予定だったが、実際には280W(平均)であった。これは日陰時のヒーター消費電力量を削減するため、スウィングバイ直前に探査機内を20℃付近まで昇温しておいた効果である。

探査機は目標点(地球からの再接近点)から1km程度の誤差という高い精度の軌道を通り、スウィングバイが成功した。

スウィングバイ後もリチウムイオン電池を含む全搭載機器は良好に動作しており、電気推進(イオンエンジン)とスウィングバイを併用したオペレーションの成功という世界初の快挙が達成された。

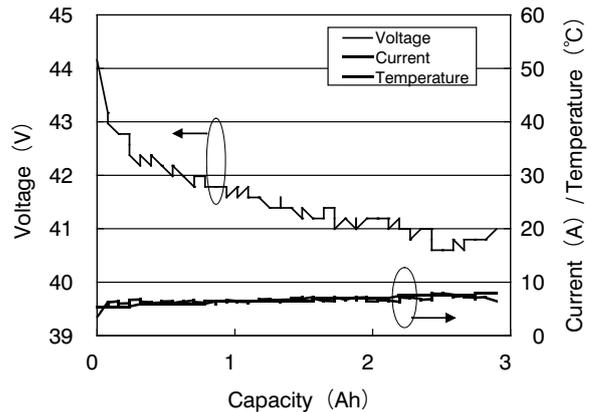


図7 「はやぶさ」搭載バッテリー
スウィングバイ時の放電特性
Fig.7 Discharging characteristics of Li-Ion battery in
HAYABUSA spacecraft at swingby.

3.5 バッテリー容量確認試験

スウィングバイ後、「はやぶさ」はイオンエンジンの本格的な再稼働を行い、小惑星「ITOKAWA」に向けて運航を続けている。

小惑星に到達した後は、バッテリーの放電オペレーションとして最大の負荷が要求されるターミネータ観測が控えている。このオペレーションで十分な電力量が得られるかどうか搭載バッテリーの容量を確認し、シミュレーションによる劣化予測を検証するため、2004年7月に実機による容量確認試験を実施した。結果を図8に示す。

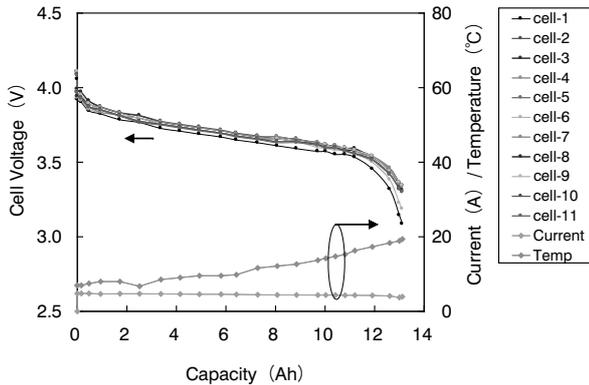


図8 「はやぶさ」搭載バッテリー容量確認試験

Fig.8 Discharging characteristics of Li-Ion battery in HAYABUSA spacecraft during tentative discharging.

11個のセルの電圧挙動と容量にはほとんど差がなく、リセットオペレーションの効果が十分に得られていると考える。

これまでの搭載バッテリーの容量実測値と設計値との対比を図9に示す。図には容量速度式(詳細省略)から予測される容量変化(図中点線)を併記した。

図から搭載バッテリーの容量劣化はシミュレーション予測にほぼ従い、若干予測より良好に充放電特性を維持していることが判った。

この容量確認試験により「はやぶさ」搭載用のリチウムイオン電池に用いた運用パターンは、電池の特性劣化の抑制に有効であることを実際の探査機の運用で検証することができた。

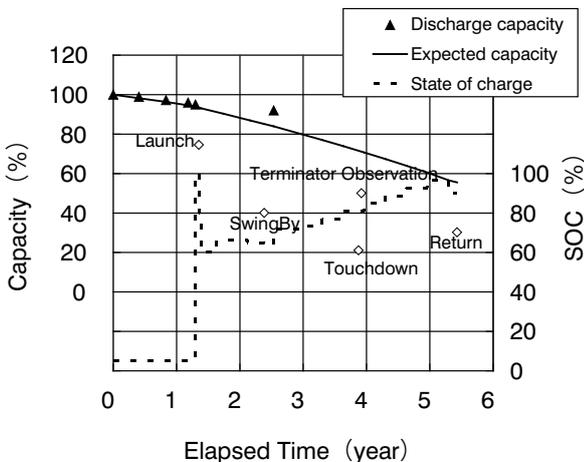


図9 「はやぶさ」搭載バッテリー容量測定と予想

Fig.9 Capacity measured and forecast of Li-Ion battery in HAYABUSA spacecraft.

4. まとめ

- ①2003年5月、世界初の探査機用リチウムイオン電池を搭載した小惑星探査機「はやぶさ」が打上げられ、軌道上での実用性検証を開始した。
- ②搭載バッテリーの運用では、容量劣化を最小限に抑制するための特殊な運用パターンが用いられ、この運用パターンの決定のため地上モニターによるシミュレーションが行われた。また11直列セルの電圧バラツキを抑制するリセットオペレーションが行われた。
- ③実機による容量確認試験において、搭載バッテリーの容量劣化が地上モニターのシミュレーションの推移とよく一致していること、容量劣化抑制の運用パターンの効果を確認できたこと、リセットオペレーションによる特性バラツキ抑制の効果が確認できたことなど、多くの成果が得られた。
- ④スウィングバイでは、初めて軌道上でリチウムイオン電池のみで探査機を本格運用し、電気推進(イオンエンジン)とスウィングバイを併用したオペレーションとして世界初の成功という快挙に寄与することができた。

5. 今後の「はやぶさ」の運用計画

「はやぶさ」は2005年11月から12月にかけて、小惑星表面のターミネータ観測と、サンプル採取のためのタッチダウンオペレーションを行う予定である。搭載バッテリーはこの2つのオペレーションで最大の負荷放電を要求される。

ミッションが完了する2007年6月には、探査機が地球に帰還した際に、最後の姿勢制御オペレーションでバッテリーは使用される予定である。

6. 謝辞

本研究開発は財団法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部殿、NEC 東芝スペースシステム株式会社殿の御指導の下で実施している。ここに、御指導、御協力を賜った関係各位に感謝を申し上げます。

(参考文献)

- 1) 山本、大登、高椋、酒井、高橋、廣瀬、田島：第 18 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集、47 (1999)
- 2) 大登、高椋、山本、酒井、高橋、廣瀬、田島：第 19 回宇宙エネルギーシンポジウム、1 (2000)
- 3) 山本、高椋、大登、酒井、FB テクニカルニュース、No.56、64 (2000)
- 4) 加藤、野崎、津田、根岸、高野：第 39 回電池討論会、209 (1998)
- 5) 大登、山本、酒井、高橋、廣瀬、田島：第 20 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集、11 (2001)
- 6) 山本、大登、江黒、高橋、廣瀬、田島：第 21 回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集、1 (2002)