

Development and Operation of Battery for the Venus Climate Orbiter "AKATSUKI"

Second report

Hiroki Ooto, Kazuya Koide, Tomohiko Sakamoto, Hidetoshi Abe
The Furukawa Battery Co. LTD., 23-6 Kuidesaku, Joban-shimofunaomachi,
Iwaki, Fukushima 972-8501, Japan

Hiroyuki Toyota
ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210, Japan

Abstract :

Li-ion battery, which has the advantage of high energy density, is coming into space usage in recent years. Furukawa Battery Co. Ltd. developed world's first Li-ion batteries for the asteroid explorer "HAYABUSA" of JAXA, which was launched in 2003. The batteries had rated capacity of 13.2 Ah, and continued to function normally for 3.5 years in space. Based on the fundamental technologies of these batteries, we developed 23.5-Ah Li-ion batteries for the Venus probe "AKATSUKI", energy density and life performance of which were improved according to the mission requirement.

"AKATSUKI" was successfully launched in May, 2010. In order to keep capacity retention as high possible, the batteries has been operated at a minimum state-of-charge (SOC), which corresponds to the required power to restore from the safe hold mode. The batteries have functioned as expected in the launch operation, eclipse periods, and the Venus orbit insertion operation so far.

After the Venus orbit insertion failed December, 2010, the spacecraft entered a new trajectory to reach at Venus five years later. To satisfy the required performance until an extended mission is completed, we designed the optimum operation plan of the batteries by a capacity deterioration simulation and planned for restraint of aging deterioration. The degradation trend of the onboard batteries agreed well with that of the monitor batteries on the ground and the prediction by a capacity deterioration simulation. The status of the onboard batteries have been evaluated by the telemetry data of the reset operations, in which all battery cells are charged to 4.1 V(108% SOC) then discharged to the former SOC (currently 30%) to mitigate the variation of the battery cell voltages.

"AKATSUKI" succeeded in the Venus orbit insertion operation in December, 2015. The onboard batteries started operation in the Venus orbit.

Presented at the 35th ISAS Space Energy Symposium, 3rd March, 2016

金星探査機「あかつき」搭載バッテリーセルの開発と運用（2）

古河電池 大登裕樹、小出和也、坂本智彦、阿部英俊
I S A S / J A X A 豊田裕之

1. はじめに

古河電池株式会社が開発した世界初となる宇宙研究用及び人工衛星用リチウムイオン電池は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の小惑星探査機「はやぶさ」に搭載され、3.5年に亘る軌道上での実証評価により宇宙用として十分な性能と品質を有する事を確認した^{1)~3)}。

「はやぶさ」用バッテリーの開発成果をベースに高容量・高エネルギー密度化、長寿命化検討を行い、金星探査機「あかつき」搭載用リチウムイオン電池を開発した^{4)~7)}。2010年5月、「あかつき」は打ち上げされ、搭載バッテリーも軌道上で運用を開始した⁸⁾。金星周回軌道投入（以下、「VOI」と記す）後、「あかつき」が日陰に入る軌道に併せて搭載バッテリーはサイクルユースによる運用を開始する計画であったが、2010年12月の軌道投入の失敗により、金星到着までのクルージング期間が5年間延長となった⁸⁾。2015年12月、「あかつき」は金星周回軌道再投入（以下、「VOI-R」と記す）に成功し、搭載バッテリーのサイクルユース運用が開始された。

本報では「あかつき」搭載バッテリーの運用実績について記すと共に、延長したミッションが終了するまでの要求性能を満たすため、容量劣化シミュレーション予測手法と地上モニター試験によって搭載バッテリーの経年劣化を抑制した成果について報告する。

2. 「あかつき」の運用計画と搭載バッテリーの仕様

開発を開始した当時の「あかつき」のミッション計画をFig.1に示す。1.5年間の地上運用を経た後「あかつき」は打ち上げされ、金星に到着するまで最長で2.5年のトランスファー期間が予想された。金星到着後、「あかつき」は約30時間で金星を一周する軌道に投入され、2年間金星を観測する計画であり、「あかつき」、及び搭載機器には6年の寿命性能が要求された。

「あかつき」用のバッテリーは、金星到着までの期間は探査機のセーフホールドモードに備えた非常用電源としてスタンバイユースで運用される。VOI後は、探査機が日陰を通過する際のヒーター電力等の電源としてサイクルユースで運用されると共に、探査機のセーフホールドモードに備えたスタンバイユース運用も求められる。金星到着後は、ミッションが終了する6年後まで、最大日陰時の400W、1.5時間の放電と、セーフホールドの500W、0.5時間の放電を満たす容量がバッテリーに要求された。

この要求条件を満たす「あかつき」用のバッテリーセルは、定格容量23.5Ah、質量エネルギー密度107Wh/kg以上の角形リチウムイオン電池（以下「セル」と記す）と設計された。探査機には11個の23.5Ahセルを直列接続してなるバッテリーを2系統搭載している。

「あかつき」は2010年5月に打ち上げされ、半年後の2010年12月のVOIに失敗。金星到着までのクルージング期間を5年間延長して軌道修正を行い、2015年12月のVOI-Rに成功し、金星周回軌道へ投入された。



Fig.1 「あかつき」ミッション計画
(開発開始当時)

3. 搭載バッテリーの運用計画と容量劣化シミュレーション

ミッション要求条件を基に最適なバッテリーの充電状態 (State of Charge、以下「SOC」と記す) と管理温度を設計し、ミッション終了までの容量劣化の推移を計算により求める容量劣化シミュレーションを作成し、延長したミッションに適合可能な搭載バッテリーの運用計画を検討した。

3. 1. 搭載バッテリーの運用条件

リチウムイオン電池の一般的性能として低温、低 SOC の運用において経年劣化を抑制できる傾向にある事から、「あかつき」の打上げ後、搭載バッテリーは $5 \pm 5^\circ\text{C}$ の環境下、緊急時のセーフホルドに必要な最低限の容量のみ充電した 40%SOC で管理した。半年後の VOI において「あかつき」がセーフホルドモードに移行した際、必要な SOC は 30% に見直された。またミッション延長に対応するため管理温度も $0 \pm 5^\circ\text{C}$ に変更した。「あかつき」が金星に到着するまでの期間は、定期的なメンテナンス運用であるリセットオペレーションで一時的に SOC を上げた以外、低温、低 SOC 管理を 5.5 年間継続し、搭載バッテリーの特性の維持に努めた。

3. 2. 容量劣化シミュレーション

SOC、温度条件のパラメーターから求められる搭載バッテリーの容量劣化量を積算し、ミッション終了までの搭載バッテリーの容量の推移をシミュレーションした結果を Fig. 2、Fig. 3 に示す。VOI における搭載バッテリーの容量維持率は 93.4%、5 年後の VOI-R の際は 88.6% とそれぞれ求められた。搭載バッテリー 1 台あたりの初期容量は、定格容量の 23.5Ah を超える 26Ah で、これを 2 台、並列に接続する構造のため 52Ah となる。搭載バッテリーは VOI-R において定格容量 ($23.5\text{Ah} \times 2 \text{台} = 47\text{Ah}$) とほぼ同じ 46Ah の容量を放電可能と予測された。

尚、Fig. 2、Fig. 3 の VOI-R 以降の軌道計画は 2015 年 10 月当時であり、現在は更新されているが、同様の容量劣化シミュレーション手法により、ミッション終了まで要求性能を達成可能な搭載バッテリーの運用計画の検討を続けている。

4. 地上モニター試験

搭載バッテリーのバックアップバッテリーを用いて、軌道上と同じ条件で運用する地上モニター試験を実施している。地上モニター試験用バッテリーの容量を定期的に測定する事で搭載バッテリーの容量劣化の推移を地上で追跡すると共に、容量劣化シミュレーションとの比較を行い、シミュレーションによる劣化予測の妥当性確認を行った。地上モニター試験により測定した容量維持率とシミュレー

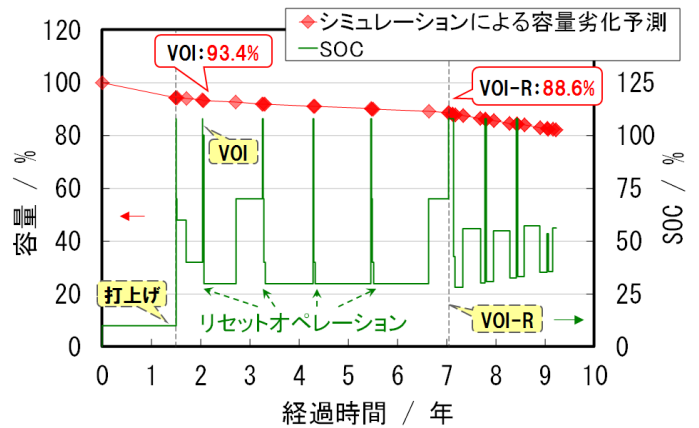


Fig. 2 搭載バッテリー 容量劣化シミュレーション

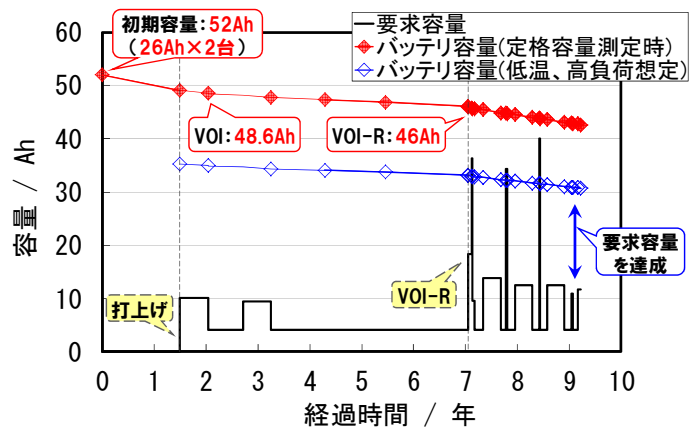


Fig. 3 搭載バッテリーの容量の推移

(VOI-R 以降の計画は 2015 年 10 月当時)

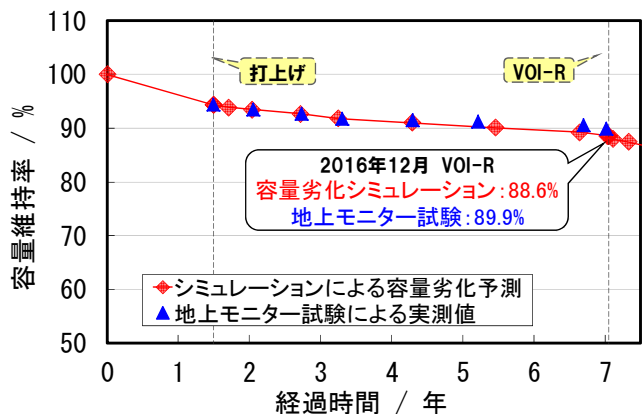


Fig. 4 地上モニター試験の容量維持率

シミュレーション予測との比較

シミュレーションによる予測との比較を Fig. 4 に示す。「あかつき」の打上げから VOI-R まで搭載バッテリーと同じ SOC、温度条件で運用した地上モニター試験の容量はシミュレーション予測に従い推移しており、シミュレーションによる劣化予測の正確さを確認した。

搭載バッテリーは、定期的にセル個別に $4.1 \pm 0.05V$ (108%SOC) に充電するリセットオペレーションを実施し、直列接続内の電圧バラツキをリセットしている。Fig. 2 の通り、打上げから VOI-R までの期間で 4 回のリセットオペレーションを実施したが、その後、所定の 30%SOC まで搭載バッテリー

を放電する機会を利用して搭載バッテリーの健全性の調査を行った。リセットオペレーションと同じ条件で、地上モニター試験用バッテリーを充放電させる再現試験を行い、両者の挙動を比較した結果を Fig. 5 に示す。5°C 環境下、平均 1.2A の電流で 108%SOC から 30%SOC まで放電させた挙動は非常によく合致しており、地上モニター試験による搭載バッテリーの特性の追跡が順調に行われている事が確認できた。

3. 3. 項の通り、地上モニター試験の容量は容量劣化シミュレーションに従い推移している事から、搭載バッテリーの容量劣化も容量劣化シミュレーションの予測通り、良好に維持されていると推測できた

5. 金星周回軌道投入後の搭載バッテリーの特性

5. 1. 金星周回軌道における搭載バッテリーの運用

2015 年 12 月、「あかつき」は VOI-R に成功し金星周回軌道へ投入された。「あかつき」は 10~13 日で金星を周回する楕円軌道を運航しており、「あかつき」が日陰を通過する際に搭載バッテリーは放電モードに移行し、太陽電池パドルの発生電力の低下を補う電源として運用している。

Table1 「あかつき」搭載バッテリー 日陰運用における要求性能

VOI-R 後 経過日数	日陰 要求性能			セーフホールド 必要容量	全要求容量
	日陰時間	電力負荷	予想容量		
35 日	143 分 21 秒 (本影 127 分 25 秒)	586W	37.80Ah	4.06Ah	41.86Ah
45 日	207 分 56 秒 (本影 80 分 47 秒)	586W	31.72Ah	4.06Ah	35.78Ah

VOI-R から 35 日目、45 日目の各日陰における要求性能を Table1 に示す。日陰時間、負荷が当初計画 (2. 項参照。400W、1.5 時間) を上回っており、セーフホールド要求を含めた全要求容量は、搭載バッテリーの VOI-R 時の予測容量の 46Ah に近いことから容量不足が懸念された。この対策として、日陰の前にリセットオペレーションを行って搭載バッテリーを 108%SOC に充電し、更に周囲温度を 20°C に昇温して負荷と放電容量の低減を図った。

搭載バッテリーの 35 日目日陰における放電挙動を

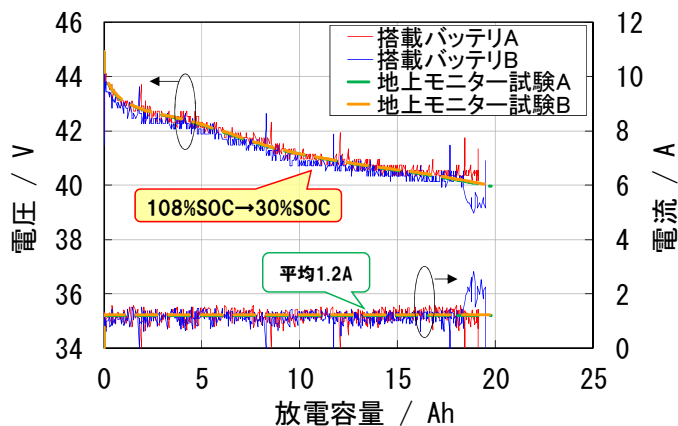


Fig. 5 リセットオペレーション再現試験

2014 年 5 月実施 (打上げ後 5.5 年)

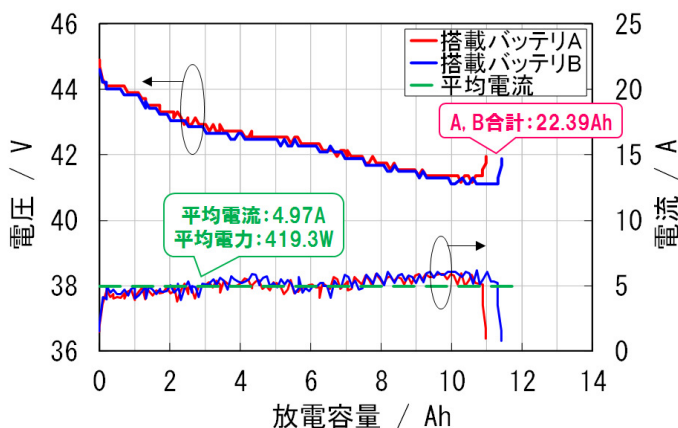


Fig. 6 35 日目日陰における搭載バッテリーの放電挙動

Fig. 6 に、同じく 45 日目日陰における放電挙動を Fig. 7 に示す。両日陰とも予想より放電時の負荷が小さく、搭載バッテリーは予想の 6~7 割の放電で日陰運用を完了した。セーフホールドへの移行も起こらず「あかつき」は問題なく日陰を通過した。

5. 2. 日陰中の搭載バッテリーの再現試験

地上モニター試験用バッテリーを用いて 35 日目日陰の再現試験を行った結果を Fig. 8 に示す。搭載バッテリーと地上モニター試験用バッテリーの放電挙動は非常によく合致しており、金星到着までの期間が 5 年延長となったが、搭載バッテリーの特性は地上モニター試験、並びに容量劣化シミュレーションによる予測と同様に良好に維持できている事が確認できた。

6. 今後の予定

金星周回軌道における「あかつき」と搭載バッテリーの運用を支援すると共に、容量劣化シミュレーションと地上モニター試験による搭載バッテリーの電池特性の追跡を継続し、ミッション終了まで搭載バッテリーの最適な運用計画を設計する。

7. おわりに

金星探査機「あかつき」用リチウムイオン電池を開発した。2010 年 5 月、「あかつき」は打上げされ、金星到着まで 5 年間の延長を経た後、2015 年 12 月の VOI-R により金星を周回する軌道に投入された。

延長したミッションの要求性能を満たすため、容量劣化シミュレーションにより最適なバッテリー運用計画を設計し、経年劣化の抑制を図った。また搭載バッテリーと同じ条件でバックアップバッテリーを保管運用する地上モニター試験を並行して行い、両者の充放電挙動を比較する事で、搭載バッテリーの経年劣化がシミュレーション予測に従い進行している事を確認した。

5 年間のミッション延長後も搭載バッテリーの充放電挙動はシミュレーション予測通り良好に維持されており、地上モニター試験による特性の追跡も順調に行われている事を確認した。

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, pp. 47-50 (Feb 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要旨集, pp. 1-5 (Feb 2000)
- 3) 山本, 高椋, 大登, 酒井, FBテクニカルニュース, No. 56, p64 (2000)
- 4) 大登, 大平, 山本, 江黒, 豊田, 鶴野, 廣瀬, 田島 : 第27回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp. 11-15 (Mar 2008)
- 5) H. Ooto, K. Ohira, H. Toyota et al, Proc. of the '8th European Space Power Conference', (Sep 2008)
- 6) 大平, 大登, 山本, 江黒, 豊田, 鶴野, 廣瀬, 田島 : 第28回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, pp. 1-5 (Mar 2009)
- 7) 大登, 大平, 山本, 江黒, 豊田, 鶴野, 廣瀬, 田島 : 第29回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, (Mar 2010)
- 8) 大登, 大平, 山本, 井奈福, 豊田, 鶴野, 廣瀬, 田島 : 第30回宇宙エネルギーシンポジウム要旨集, (Mar 2011)

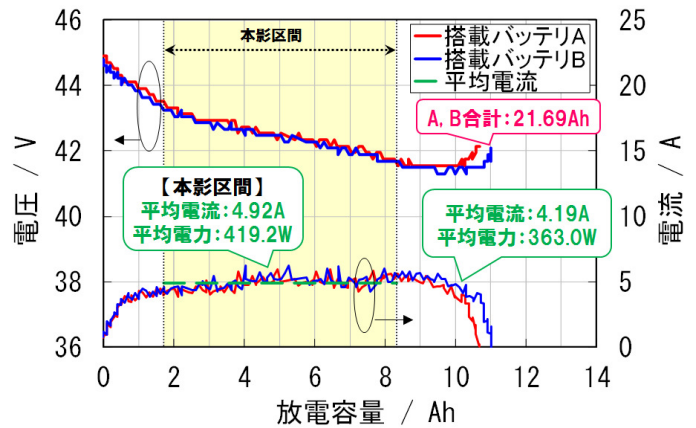


Fig. 7 45 日目日陰における搭載バッテリーの放電挙動

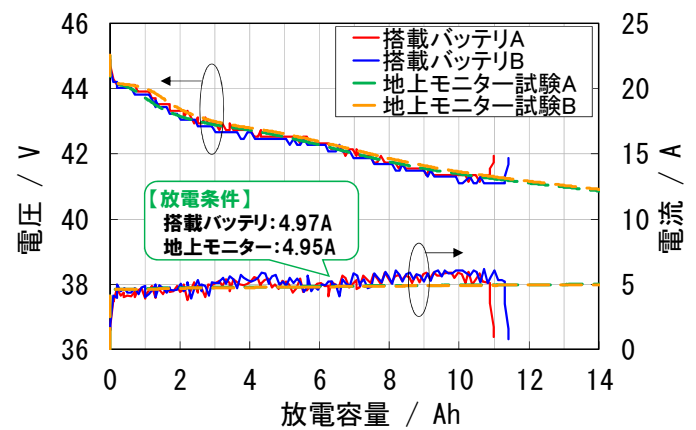


Fig. 8 35 日目日陰 再現試験