

バテてもめげないBAT（充電式電池）， サッパリわからんSAP（太陽電池）



前田 良知

＜宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1＞

e-mail: ymaeda@astro.isas.jaxa.jp

すぎく衛星のような近地球軌道の場合、必ず1.6時間周期で太陽から地球の影に隠れる。そのため、日照中（約1.0時間）は太陽電池（SAP）から、日陰中（約0.6時間）では日照中に充電したNiCd充電式電池（BAT）から、電力が供給される。すぎくは、このサイクルを每周回欠かさず、ほぼ10年繰り返し続けてきた。この二つの電池にかかわる顛末記を個人的な目線で紹介する。

1. 電池素人

私が電池に最初に向き合ったのはたぶん小学生だと思う。ラジコンカーを走らせていると、そのうち電池がなくなってしまう、動かなくなる。乾電池は冷やせば少し復活するぞ伝説が出回っていて、私もそれに乗っかって、冷蔵庫に入れて保管する。翌日ラジコンに入れると、伝説どおりに動く。もちろん新品ほど長持ちはしないけど、何度か繰り返して、使えなくなるまで遊んでいた。

少し年齢がいくと、充電式電池が普及していて、その充電器にアルカリやマンガン乾電池（一次電池）を差し込む。すると、びっくりするくら

い持ち直す。一方、液漏れした電池は、うまく持ち直せた経験がない。充電時に熱くなると液漏れしそうな気がしたので、そうなる前に充電をやめていた。一次電池の充電は決してやってはいけないが、この処置が効いたのか、充電で液漏れは一度も起こしたことはなかった。温度が上がらない限り、電池は使い続けられるようだ。

大学院で電池の知識や経験を増やしたわけでもなく、この程度の実績を引っさげて、第23号科学衛星ASTRO-E2（すぎく）の電池周りのお守りをするようになった。すぎくの電池には二つある。日照中に発電する太陽電池ことSAP（Solar Array Paddle）と、日陰中の電力を担う充電式電

表1 すぎくの電力周りの履歴。当文章に関連する事象のみを集めた。

番号	YDAY	YYYY.MM	イベント	主な処置
①	2305	2011.11	SAP発生電力第一低下期開始（～20%）	推葉排出、節電。
②	3108	2014.01	BAT-B熱暴走（OT mode）	BAT-Bトリクル充電運用開始。観測中断。
③	3149	2014.02	大幅な節電開始（主に日陰中）	観測再開。
④	3187	2014.04	SAP発生電力第二低下期開始（～20%）	HXD検出器の稼働率を下げる。
⑤	3334	2014.08	BAT-B使用停止。BAT-A単独運用	観測中断。
⑥	3340	2014.09	運用電圧下方修正	観測再開。
⑦	3473	2015.01	BAT-A熱暴走（OT mode）	BAT-B解凍開始。BAT-Aトリクル充電運用開始。観測中断。
⑧	3491	2015.01	運用電圧下方修正。BAT-B CC/CV 充電運用再開	観測再開。
⑨	3613	2015.06	衛星電源OFF	観測中断。復帰未定。

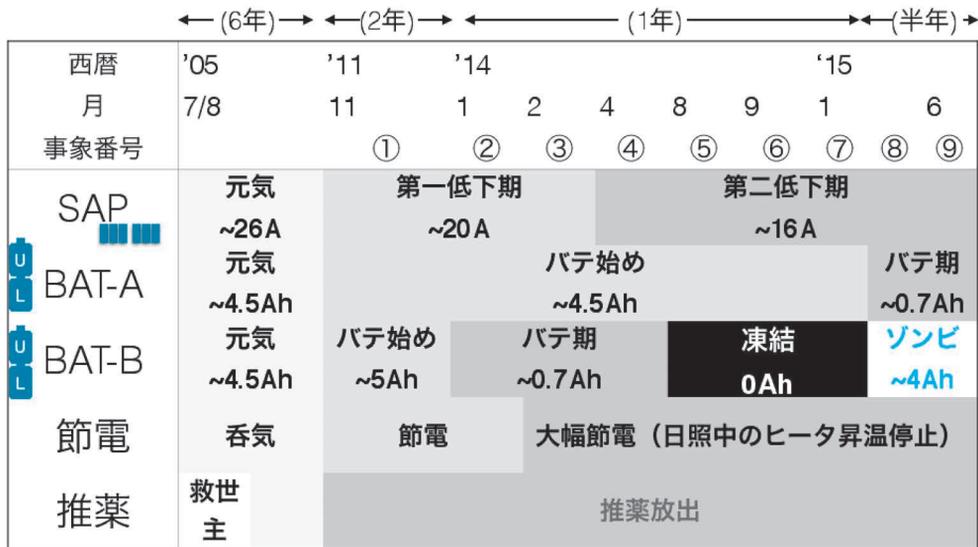


図1 すぎくの電力周りの履歴のまとめ.

池BAT (Battery) である. この電池に関連した主な事象を表1および図1にまとめた. 事象には番号を付けている.

2. サッパリわからんぞ, SAP

SAPの発生電力の予測は本当に悩ましい. 2005年の打ち上げ以降何の前触れもなく, 20%の電力低下が2回起きている. 太陽フレアの放射線による劣化, 太陽電池セルの剥がれなど議論されたが, 原因はわかっていない.

図2 [1] は打ち上げからのSAPの発生電力である. 1回目の急激な低下は, 2011年の後半からだった(図2 [1] 事象①). また, 2回目の低下は2014年4月に1カ月の短いタイムスケールで起きた(図2 [1] 事象④).

1回目の電力低下のときにはこの低下がいつまで続くのかわからないまま, 毎日が過ぎていった. 電力が足りなくなれば観測ができなくなる. 事は重大だ. 衛星運用経験豊富な堂谷忠靖さんや国分紀秀さんも加わって, 強力な体制で立ち向かうことになった. 電力供給が減ったので, 節電に努めた. 2012年4月18日(打ち上げから2474日

目, 以降Y2474)には, 軌道上の動作実証試験を行っていたX線カロリメーター検出器(XRS)の機械式冷凍機を停めた. 世界最長記録の更新中だったので, とても寂しい限りである. ただ, これで生き残っていた残りの二つの検出器, X線CCDカメラ(XIS)と硬X線検出器(HXD)の動作電力を確保することができた.

節電だけでは済まなかった. SAPの発生電力を回復する手段はなく, 最悪の事態を想定して, 衛星を無事に運用終了できるような処置をしなければいけなくなった. こういう嫌な仕事になるとプロジェクトマネージャー(当時)の満田和久さん他を引っ張りだすことになる. メーカーさんも含むJAXA内外の専門家と議論を重ね, 緊急事態の姿勢制御に使う推薬を放出することになった. 今後衛星が電力不足になって温度制御機能を失ったとき, 推薬が凍結し配管等が破裂する可能性を完全には否定することができないからである. 理屈はよくわかるが, とてもつらい. なぜなら, すぎくは打ち上げ直後と1カ月後に, 2度危機を迎えているが, この推薬を用いた緊急姿勢復旧システムのおかげで, そのたびに救われているから

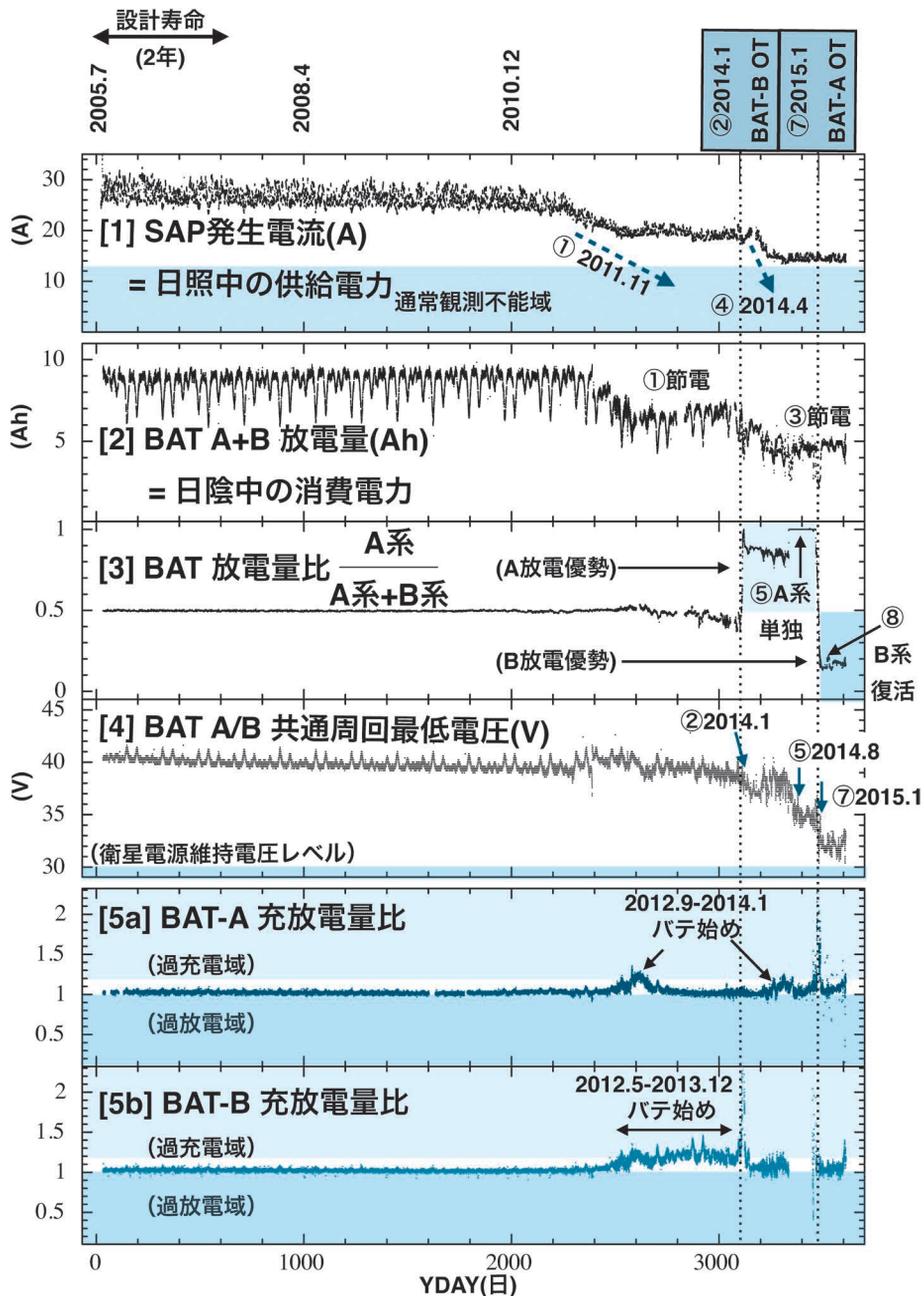


図2 SAPおよびBATの1軌道周期ごとの履歴。横軸は打ち上げからの経過日(YDAY)。丸数字は表1の番号に対応する。USC運用当番により集められたデータを再プロットしている。[1] SAPの発生電流(A)。日照中の平均供給電流に相当する。少なくとも1台の観測機器を動かすには13A程度が必要になる。[2] BATの放電量。A系、B系を足している。日照中の消費電力量に相当する。[3] 放電量の比。1だとA系のみ、0だとB系のみで電力が供給されたことになる。[4] A/B共通周回最低電圧(放電末期電圧)。並列なのでA系とB系はほぼ同じになる。[5a] A系、[5b] B系の充放電量比。日照中の充電量を分子に、日陰中の放電量を分母に取っている。[2]の放電量に[3]放電量の比と[5a,5b]の充放電比を掛けると充電量になる。

だ。皮肉なものだが、推葉放出運用をやればらくすると、発生電力の低下は収まった。

2014年4月の2回目の電力低下は観測能力に大きな影響を与えた。この事象以降生き残っていた二つの検出器のうち、HXDの電源を常時は入れられなくなった。XISのみ動作させることが多くなったが、観測はあきらめない。

図2 [2] に衛星が地球を1周する(1周回)ごとのBAT放電電流の積分値(放電量)を載せる。BATは衛星が日陰になると同時に放電を始め、日照入り直前まで続ける。放電量は日陰中の消費電力に対応するので、節電の履歴を表している。打ち上げからずっと9 Ahであったが、2012年4月18日(Y2474)ぐらいから7 Ah弱に下がっている。また2014年4月(Y3200)からさらに負荷を減らし、5 Ah弱にまで減らしている。それぞれ、XRS, HXDの節電に大まかに対応している。

3. BAT, バテる

BATはA系, B系の2ユニットでできている。それぞれが32個のセル^{*1}の直列接続になっている。BAT-AとBAT-Bはダイオードを介して並列につながっているため、放電電圧は同じ(共通)になる。両系が同じ性能であれば、同じ放電電流が流れるが、相対的に性能の差があれば、元気なほうから多くの放電が起こる。一方、充電電圧は別々に与えることができ、それぞれの状態に合わせて充電電流を流すことができる。

われわれはよくテスターを使って、BATの電圧(以降、BAT電圧)を計るが、このときは電流がほとんど流れていない。一方、実際の使用時には充電時、放電時とも電流が流れ、充電電圧はBAT電圧に比べ常に高く、放電電圧は常に低い。充電電圧を上げると、多くの充電電流を流すことができる。ただしあまり流しすぎると、電池の容量を超えてしまい、過充電になる。そこで、この

過充電を避けつつ、効率的な充電ができる充電回路が組み込まれており、定電流・定電圧充電(通称CC/CV充電)と言われる。

CC/CV充電では、BATは日照入りと同時に6.8 Aの一定電流で充電される。充電が進むとBAT電圧が上がるので、充電電圧も上げる。充電電圧の上限しきい値を決めておき、その値に到達すると充電電圧を維持する。結果として充電電流が絞られる。しきい値をうまく設定すると、電池はおなかをすかしているときは素早く、その後ゆっくりと充電され、満充電になるちょっと前に次周回の放電を迎えることができる。こうして、電池は常に満タンよりちょっと手前で、充放電を繰り返すことになる。

電池が年老いて劣化すると、CC/CV充電がうまく機能しなくなる。いくつかのセルがセミショートを起こすため、設定していた充電電圧のしきい値では過充電になってしまうのである。充電電流は熱に変わり、温度が上がる。温度が上がると、NiCd電池はBAT電圧が下がる特徴がある一方、充電電圧はそれほど下がらないので、より多くの電流が流れてしまう。その結果、発熱が増え、さらに温度が上昇するという正のフィードバックがかかる。これが熱暴走で、BATの温度がぐんぐん上昇する。

BATの性能劣化は、放電電圧に顕著に現れる。図2 [4] にBAT-A/B共通周回最低電圧を表す。日照入りの直前の放電から充電に切り替わるところで記録されるので放電末期電圧とも呼ばれる。

2014年1月(Y3108: 事象②)から3 Vほどこの電圧が落ちた。これはBAT-Bの熱暴走の直後に相当し、バテて放電電圧が下がったためである。3 Vは2セル相当なので、2セルがショート状態に遷移したという解釈もできる。1年後の2015年1月(Y3473: 事象⑦)でも同様にBAT-Aが熱暴走し、放電最低電圧が3 Vほど下がっている。

*1 セルは市販の充電式電池1本に相当する。

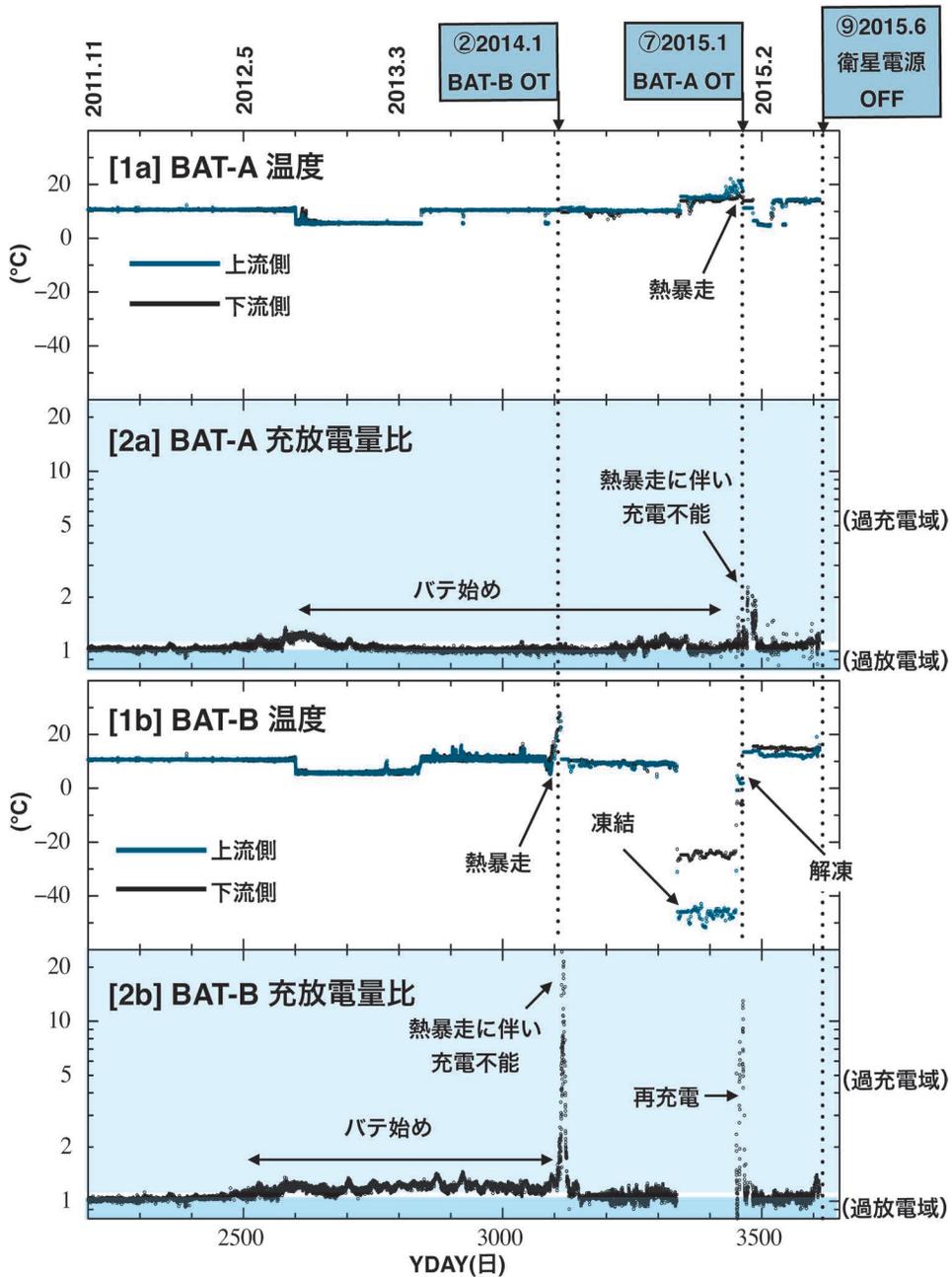


図3 末期運用時期のBAT温度と充放電量比。[1a,1b] BAT周回平均温度(°C)の履歴(山岸泉さん作成)。[1a]がA系,[1b]がB系。温度は、電圧の上流側と下流側を担うユニットでそれぞれ計られており、図中の青が電圧で上流側、黒が下流側の温度にそれぞれ対応する。2014年1月と2015年1月に制御温度から逸脱し、OT modeに移行した。[2a,2b] 充放電量比。図2 [5a,5b]と同じデータだが、縦軸が対数表示になっている。

4. BAT-B熱暴走

熱暴走をもたらす過充電は日照中の充電量^{*2}を分子に、日陰中の放電量を分母に取った充放電比を見ればわかる。図3 [1b] に1周回毎の充放電比を示しているが、2014年1月(Y3108: 事象②)のBAT-B熱暴走時には、この値が、20程度まで上昇し、過充電だったことがわかる。この際には充電でBATに流れたエネルギーの95%が熱になったことを意味しており、温度が上がったのはこのためである。

衛星は一般に熱暴走を強制的に止める仕組みをもっている。すざくの場合はOT (Over Temperature) modeと呼ばれ、温度がしきい値 (~28°C) を超えるとBATへの充電をやめ、~22°Cを下回ると再開する。温度が30度より上がらなかったのは、このOTが機能したためである。

図2 [3] にA, B系の放電比を載せる。A系のみで電力を担うと1、その逆は0になる。この熱暴走から抜け出すために、BAT-Bへの電流供給を1/10程度に減らした(トリクル充電^{*3}、2014年1月-8月)。その結果、日陰中にはBAT-Aが全体の8割以上の電力を担うことになった。

BAT-Bの熱暴走に対応していたこの時期は毎日がとにかくたいへんで、私は寝る暇がなく、BAT-Bのようにバテそうになった。このとき地上側にもBAT-Aが登場した。勝田哲さんである。数多くの観測成果を引っ下げて、JAXAのすざく担当プロジェクト研究員として採用されたのだ。早速運用に参加することになった。観測を立て直した3月は、銀河系中心、およびおうし座方向を観測できる時期に対応し、この時期しか見ることができない観測が集中する。何とかOver Timeに持ち込むことができ、ほんどによかった。

5. バットビー (BAT-B), ゾンビのように復活

前述したが、BAT-AもBAT-Bから遅れること1年、2015年1月(Y3473)に過充電(図3 [2a])および熱暴走(図3 [2b])を起こした。B系ですでに経験していたので、すぐに熱暴走から回復させることができた。また、そこにはBAT-Bの嬉しい復活劇も隠されていた。

BAT-Aが熱暴走になった当時BAT-Bは充放電を停止していた。限られた電力を検出器に回すため、保温ヒーターを切って、凍結させ、運用を停止していたのであった。温度は-50°C程度を表示していた(図3 [1b] Y3334-3473: 2014年8月-2015年1月)。電解液がイオンを運べないので、電気的にはただの抵抗と同じであった。急ぎ、日照中の余剰電力を使って、暖めてみることにした。数日かけて、10°Cを超えるところまで持ち上げたところで、トリクル充電を開始してみた。解凍直後の充放電比(図3 [2b])は10程度まで達し、BAT-Bが勢いよくお腹を満たしていく様子が見て取れる。その後も何周回か充電を行うと、充放電比は1程度に収まってくれた。順調に充電が進んで、BAT-Bが仮死状態からゾンビのごとく復活してくれたのであった。さらに、観測機器の電源を落とした状態なら、何とか安定に電力を供給できる解が見つかった。でも、観測するにはさらに2 Aぐらいの負荷をBATに担ってもらわねばならなかった。

もうやることは一つしかない。1年前は熱暴走に至ってしまったが、そのときに採用していたCC/CV充電に戻すのである。トリクル充電ですべて充電していたところを、3分、5分と少しずつCC/CV充電時間の割合を増やしていく。BAT-Bは苦しんでいるのか、6.8 Aの充電定格電

^{*2} 充電量は、実際に電池に蓄えられた量ではなく、充電するためにBATに流す電流の積分値を表す。

^{*3} 0.7 Aの少なめの定電流で主に自然放電分を保障するトリクル(TRICKLE)充電制御というモードを使用した。

流値まで増えなかった。このままでは観測に必要な電力の確保は難しかった。そんな中でも、明るいニュースがあった。温度が不思議と上がらなかった。過充電ではないのだ。そうだ、小学生以来、熱くならない電池には成功体験しかない。

CC/CV充電ができるようになってしばらくすると、なぜか充電電流が周回ごとに増えたり減ったりするようになった。充電電流が減り、放電電圧も下がって停電ぎりぎりまで到達したかと思えば、次の周回では充電電流が増えて充電過多で発熱しないかヒヤヒヤした。そういう中でも、2月の終わりには、日照の最後まで綺麗に充電できるようになった。図3 [2b] の充放電量比もほぼ1に張り付けてくれるようになった。

同時に、BAT-Bが8割強の負担を引き受けて、検出器も動くことができることがわかった。しかし、放電電圧だけはどうしても上がらず、電圧は30V程度まで落ちるときも見られた(図2 [4] Y3491/2015年1月から)。30Vは停電して、衛星を失うぎりぎりの電圧に対応する。2015年1月末以降、土俵際の観測を進めることになった。

6. 最後 に

この原稿を書き始める6月1日に、衛星電源が落ちたことがわかった。私自身は受信の様子をスピーカー越しに聞いていたのだが、なにも声がせず、通常と異なっていた。もしやと思ったら、やはり、衛星からの電波を正常に受信できなかったからだ。放電電圧が許容値を下回ってしまったのだろう。観測の都合で下げられない4.5 Ahの負荷をBATは担い続けてくれた。2015年1月末からぎりぎりの電圧で、5月末までの4カ月もの間データ取得を支えてくれた。一度は熱暴走に陥り、充放電をやめたBAT-Bのあきらめない粘りによってデータが取得できたのだ。

以上、私の目線で書いたすざくの10年の電源周りの運用顛末記である。すざくは6月1日以降、およそ3-6分の周期で自転している。SAPに

日が当たる期間だけ、電源がONになり、電波が地上に届くため、この周期がわかっている。8月現在3万回以上の電源のOn/Offを繰り返しても、満身創痍だが何とか動いているように見える。

毎周回電源が入れられ、復活するすざくを見るたびに、10年近くも運用ができたのはこの強靱なハードウェアを作製したメーカーさんも含めた先人たちの英知の賜物であると確信する。運用でやりくりしてOver Timeを戦うためには、この優れたハードウェアの下地があった。

劣化したSAPやBATの理解は本当に難しい。そのため、しばしばJAXA内外の専門家に長い時間相談に乗ってもらい、状況の理解に努めてきた。ただ、結論に至ることが、極めて困難で、当文章では記述を大幅に割愛している。本当に何度も何度も強力な協力があつた。

また、BATやSAPの劣化状況はほぼ毎日、鹿児島県内之浦で取得された。2012年からいつ状態が変わるかもしれないBATとSAPと格闘し始めたが、その後に取得したデータで今年Nature誌に論文も出版されている。あきらめずに運用を続けた運用関係者との連携の賜物かもしれない。

振り返ってみると、私がやったことは枯渇するまで電池を動かし続けて、温度がなるべく上がらないようにしているだけだったと1行でまとめることができるかもしれない。結局小学生のころに乾電池相手に格闘した自分と変わってないのが現実のようだ。初等教育での実験理科教育は心底大事なんだなあ、というのがすざくの電池運用の結論でもある。

A Story of the Operation of the *Suzaku* Battery and the Solar Array Paddle

Yoshitomo MAEDA

ISAS/JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara 252-5210, Japan

Abstract: The *Suzaku* electric power is provided by the solar array paddle (SAP) in daytime and by the battery (BAT) at night. The *Suzaku* has repeated the power supply with this system almost for a decade. A story of the operation for a decade is presented.