

一番星へ行こう！ 日本の金星探査機の挑戦 その35 ～暑い夏の、長くて寒い夜～

山崎 敦¹, 豊田 裕之¹, 太刀川 純孝¹, 近藤 宏篤², 坂本 智彦²,
あかつきプロジェクトチーム

(要旨) 日陰運用の難関である低温対策と省エネの工夫について報告します。熱制御は、日陰前に探査機全体を昇温し日陰初期は余熱で保温し、日陰中は最低限の温度を保つという対応策をとりました。バッテリーについては、温度と充電状態を可能な限り低く維持し、容量劣化を低減してきています。長時間日陰中は、消費電力の削減に加え、安全な範囲でバッテリーの過充電や昇温を行い、放電容量の最大化を図りました。その結果、打上げ前設計の最大日陰時間を超える長くて寒い夜を無事乗り切りました。

1. はじめに

金星探査機あかつきは、2018年7月29日12時00分(UTC)から229分(うち本影148分)の長時間日陰を経験しました。打上げ前の設計の最大日陰時間90分を大きく超える日陰時間です。地上では、日陰に入ると涼を感じホッとしますが(今年の夏はそうでもない)、宇宙空間では危機的状況です。放射冷却により探査機温度は冷える一方なので、保存温度を保つにはヒータを焚いて温める必要があります。しかしながら、当然のことですが日陰中は太陽電池パネル(SAP)による発電は期待できなくなるため、すべての電力はバッテリーで賄う必要があります。ヒータ電力は最小限に抑える必要があります。あかつきチームはどのように乗り切ったのか、その段取りと結果を報告いたします。

2. 熱制御運用

日陰中には、探査機の保存温度を保ちつつ消費電力は最小限とする、という状況を作り出す必要があります。まず、搭載機器は、探査機維持に必要なバス機器のみ動作させ、すべての観測機器はオフにしました。

次に検討したことは、冷える一方の日陰中にすべての搭載機器の保存温度を保ちつつ、ヒータ電力を最小限に抑えることです。全ヒータの温調設定を保存温度下限ぎりぎりにすることとしました(日陰設定)。ただし、日陰に入る直前まで探査機温度を通常より高く持ち上げておき(昇温設定)、日陰中の全体のヒータ電力量も下げることにしました。日照中に可能な限り昇温しておく算段です。さらに留意すべき点は、日陰が終了し日照が復活したとき探査機はキンキンに冷えきっているため、温調設定を通常状態(通常設定)に戻すのですが探査機が十分に温まるまで待つことです。

これらの段取りでどのくらい省エネできるかは、探査機の熱放射率が重要な値です。2017年12月11日の長時間日陰(半影)の運用実績をもとに検討しました。あかつきの熱放射率では、探査機の平均的な温度は1-2時間の時間スケールで冷えていくことがわかっていました。この時間は2018年7月29日の長時間日陰の継続時間229分と比較して短く、探査機は十分に冷えきってしまいます。そこで、今回の長時間日陰に耐え得る運用として、日陰前に探査機全体の温度を昇温し日陰の初期は余熱で保温する、日陰に入る直前に温調設定を保存温度下限ぎりぎりにより切り替え日陰中は最低限のヒータ電力設定とする、という運用方針を採択しました。

日陰前の昇温設定は、搭載機器の動作温度の上限値

1. 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
2. 古河電池株式会社
yamazaki@stp.isas.jaxa.jp

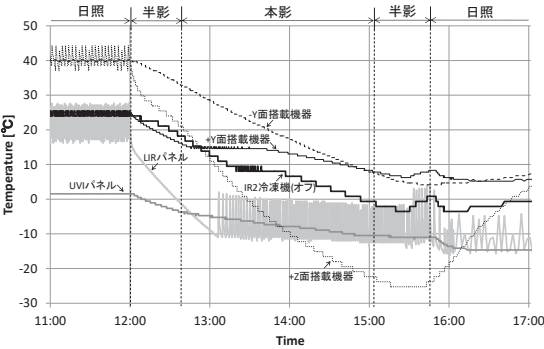


図1：長時間日陰中の探査機代表点の温度の変化。

からマージンを確保し探査機構体の温調設定を+40℃としました。この温度設定での運用は金星周回軌道に投入してからはじめてのことであり、探査機全体の温度分布を確認する必要性があり、一週間前の7月23日の運用パス中に実施しました。温調は正常に動作し問題なく昇温状態に入りました。このまま7月29日まで過ごし、無事事前準備が整いました。実は、この昇温設定期間にも金星観測を実施していました。

7月29日当日は、12時01分に日陰設定に切り替わり最低限のヒータ電力とする長時間日陰モードに突入しました。そのときの温度変化を図1に示します。事前検討通り、事前昇温していた探査機構体温度は1-2時間の時間スケールで低下していき、13時を過ぎて、LIRやUVIのパネル温度が設定された低温側に漸近することが見て取れます。

本影は15時4分に終了し、徐々に日光が当たり始めましたが、探査機温度はまだ低温側に張り付いています。本影が終了したからと言って、ここで慌てて通常設定に戻してはいけません。この時間帯はもちろん半影終了時刻後まで、最大ヒータ電力(200W)が消費されていて(図3の中段ヒータ電力を参照)、通常温度に戻るには数時間の時間スケールが必要であることが見て取れます。ただし、3章で説明がなされるように、半影途中でSAP発生電力が回復し、電源事情としては安心な状態に戻っています。

結果として、事前の昇温設定、保存温度下限ぎりぎりの低温にした日陰設定、半影終了後通常設定への復帰、と熱制御運用は計画通り安全に実施することができました。

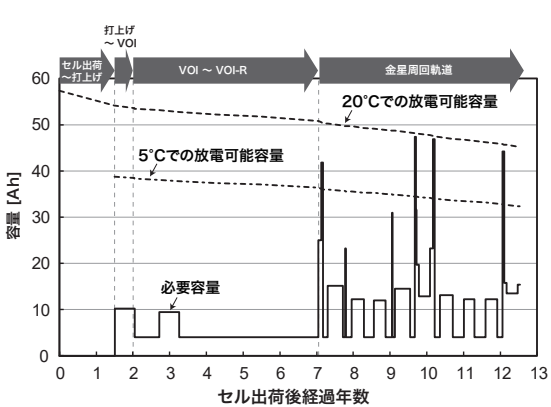


図2：バッテリーの必要容量と放電可能容量の推移。

3. 電源系運用

日陰を無事に乗り切るためにはバッテリーが欠かせません。あかつきの運用フェーズには、惑星間航行中の全日照期間と、金星周回軌道上の日陰存在期間があり、かつ日陰の長さは一定ではないため、必要容量は図2に示すように大きく変動します。これに対し、表1のとおりバッテリーの温度と充電状態をきめ細かく調節することで、運用チームはバッテリーの容量劣化を低減する努力を行ってきました。バッテリーの容量劣化は、充電状態が高いほど、そして温度が高いほど速く進行するため、可能な限りそれらを低く維持してきたのです。

図2には、必要容量に加え、放電時の温度5℃および20℃でのバッテリー放電可能容量を示しました。通常は容量劣化低減のため5℃で運用していますが、セル出荷後7.1年、9.6年、10.1年、12年には、要求容量が放電可能容量(放電時5℃)を超えるピークがあります。これらが対策を要する長時間日陰で、2018年7月29日の日陰は9.6年のピークにあたり、バッテリーの放

表1：バッテリーの運用方法。

フェーズ	セル出荷～打上げ	打上げ～VOI	VOI～VOI-R	金星周回軌道
運用形態	開回路	定電圧充電	定電圧充電	充放電サイクル
期間	1.5年	0.5年	5年	2000日
温度	25℃	10℃	0℃	5～20℃
充電状態	10%	41%	30%	30～110%

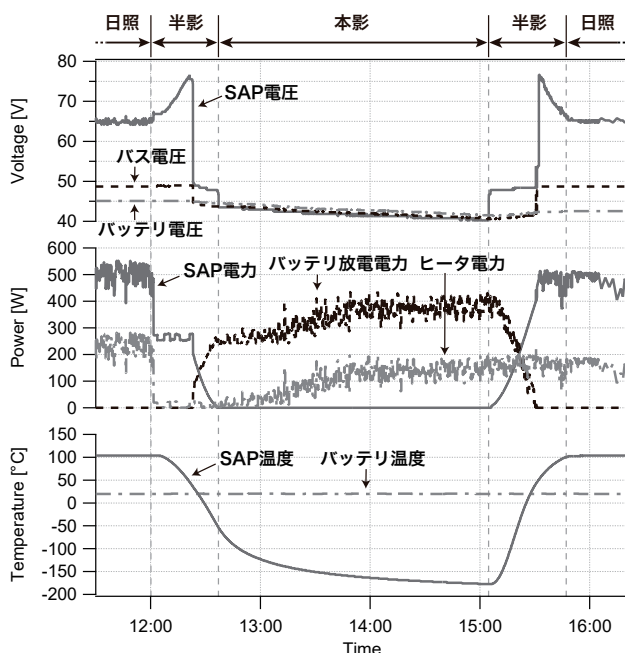


図3：長時間日陰中の電源系テレメトリデータ。

電量が最大となります。探査機の開発時に想定していた最大日陰は90分でしたが、軌道が大きく膨らんだために、これが229分(うち本影148分)に延長され、バッテリーに求められる容量は約47 Ahに達しました。

この厳しい日陰を乗り切るため、運用チームは次の方針を定めました。

- ・日陰中の負荷電力を、平常時の500 Wから450 Wに削減する。前述した日陰入り前のコンボ昇温と、日陰中は機器制御温度をギリギリまで下げるにより実現。
- ・通常の100 %充電電圧である4.0 V/セルを超え、安全性を確保しつつ4.1 V/セルまで過充電する。
- ・バッテリーの制御温度を5 °Cから20 °Cへ高め、放電可能容量の拡大を図る。

その結果を、長時間日陰中の電源系テレメトリデータ(図3)を振り返りながら、評価しましょう。

日陰は、2018年7月29日12時00分(UTC)に始まりました。その直後、計画通りにヒータのONデューティが低下し、負荷電力は500 Wから260 W程度に低下しました。この時点ではSAP電力で全ての負荷を賄えていますので、図3中段のSAP電力が、そのまま全負荷電力にあたります。事前に搭載機器を昇温して

おいたお陰で、ヒータ電力は25 W以下の低い値で推移しています。半影の半ば過ぎまでSAP電圧が上昇を続けているのは、SAP温度の低下のためです。

12時23分、日陰率が35 %に達し、バッテリーの放電が始まりました。図3中段のBAT放電電力がゼロから約260 Wまで徐々に立ち上がり、同時に図3上段のバス電圧がBAT-A/B電圧まで低下、SAP電圧が48 V程度まで低下しました。これはロックアップと呼ばれる状態で、バッテリー放電中には、SAPの動作点電圧が低く固定され、最大電力を取り出せなくなる挙動です。

そして12時36分、ついに本影が始まり、SAP電力はかき消えました。SAP電圧が40数Vとなっているのは、バス電圧がスイッチングコンバータを逆に通して見えているもので、実際にはSAPの発生電圧ではありません。本影開始後は、太陽光による熱入力がなくなり、機器を保温するヒータ電力が増加を始めます。13時45分頃にヒータ電力は設定上限値の200 Wに達するようになり、本影の後半には平均140 W程度で推移しました。この間のバッテリー放電電力は平均370 W、最大435 W程度で、事前に想定した450 Wよりもかなり低く保たれました。

15時4分に本影は終了し、再び半影が訪れます。SAP電力が徐々に立ち上がり、しばらくはバッテリーの放電を伴うロックアップ状態が続きますが、15時30分にはSAP電力が全負荷電力を超え、バッテリーは充電モードに切り替わりました。そして15時48分には半影も終了して日照に戻り、探査機が健全であることを確認して、全員がほっと胸を撫で下ろしました。終わってみると、バッテリーの放電量は約23 Ahと当初の想定約半分にとどまり、放電深度は53 %と余裕を持った運用結果となりました。前述の負荷電力低減策やバッテリー昇温の効果に加え、半影中のSAP電力が期待以上に大きかったことが余裕をもたらしました。今後、何年間あかつきの運用を継続できるのかわかりませんが、はやぶさの運用経験を踏まえてバッテリーを大切に使ってきたこと、初めての内惑星探査機に搭載する太陽電池パネルの開発を慎重に進めたことを思い返し、「段取り八分」という言葉が頭に浮かんだ運用となりました。

4.おわりに

あかつきは、2018年7月29日に、打上げ前に設計されていた金星周回軌道と投入軌道が変わった影響で、設計上の最大日陰時間を超える日陰時間を経験しました。長時間日陰に耐え得る方策として、熱制御と電源系の特殊運用を実施しました。もちろん本運用も想定外ではありましたが、丁寧かつ慎重な探査機開発も手伝って無事乗り切ることができました。今回得られた知見により、将来の長時間日陰運用プランを定型化することができました。これにより長時間日陰中の科学観測の実現も視野に入れることが可能となり、さらに優れた科学成果創出を目指して参ります。最後になりますが、関係各位のご協力にこの場を借りて御礼申し上げます。