

第二章 電源システム開発

本章では、主に電源システムの設計・仕様について述べる。はじめに電源システムの設計要求とそれに基づく電源システムの最終設計（フライトモデル）、設計検証について述べる。ここでは、バッテリーを除くすべての電源システムコンポーネント、電力系統、テレメトリ、そして外部インターフェースについて記述する。また、EM 開発の途中で実施した FMEA（故障モードとその影響解析）の結果と設計への反映についても記述する。次に、電源システム設計の熱解析へのフィードバックについて述べる。これは衛星の熱入力に関係するため、より正確な熱解析のために重要である。最後に、フライト品の電源システムの健全性検査について述べる。

2.1 電源システムの設計要求

電源システムの設計要求には衛星のシステム要求からブレイクダウンした要求と、各サブシステムからの電力に関する要求がある。まず、衛星のシステム要求からブレイクダウンした電源システムの要求を以下に示す。

- A. 衛星の各システムへの安定した電力供給
- B. テレメトリデータの出力
- C. シングルイベントラッチアップ対策
- D. 3 カ月間の補充電なしでのバッテリー残量維持
- E. 衛星分離までコールドロンチを保持（3 冗長）
- F. 運用終了時におけるバッテリーの完全放電（衛星の破砕を防止するため）
- G. 打ち上げ時の振動環境に耐える
- H. 打ち上げ時の衝撃環境に耐える
- I. 軌道上の熱真空環境に耐える

次に、各サブシステムからの電力要求を衛星の動作モードと供給電圧別に以下に示す。これらの要求に基づき電源システムを開発した。

表 2.1-1 各系からの電力要求（動作モード別）

Table 2.1-2 Power requirement from each systems

| 動作モード | 要求電力 [W] | 動作時間 [min] |
|----------------|------------|--------------|
| 通常運用 | 0.8 | always |
| FM Downlink | 3 | 10 |
| ミッション 300V | 1.5 | 60 |
| ミッション ELF+Trek | 2 | 20 |
| ミッション Debris | 0.1 | 5 |
| ミッション Scamp | 0.5 | 5 |

2.2 電源システムの設計概要

電源システムは 2.1 で記述した設計要求に基づき設計した。電源システムのブロック図を下図に示す。電源システムの基本動作は衛星が日照の時、太陽電池で発電した電力を各機器に供給し、余った電力をバッテリーに充電する。そして蝕時はバッテリーに蓄えた電力を各機器に供給する仕組みである。また、DC/DC コンバータは各サブシステムが要求する電圧に変換し、電力を供給する役割を担う。これにより、安定した電力の供給を行う（設計要求 A）。また、電源システム内には電流センサ、電圧センサを複数設置し、太陽電池の発電状態やバッテリーの充電状態、消費電力の変化をモニタリングする（設計要求 B）。全ての電力供給ラインには過電流防止回路を設置しており、消費電力が 2 倍以上に増加した場合、電源を落とす（設計要求 C）。バッテリーのホット側に 2 つ、リターン側に 1 つ設置された分離検知スイッチは、衛星分離までの間のコールドロンチを保持する役割を担う（設計要求 E）。また、分離検知スイッチ 3 によりバッテリーの漏れ電流を無くし、3 カ月間のバッテリー残量維持を可能にする（設計要求 D）。バッテリーと充電回路間に設置されたキルスイッチは、運用終了後に開放することで太陽電池電力を遮断し、衛星をバッテリー駆動にすることでバッテリーを完全放電させる（設計要求 F）。次に、これらのコンポーネントの詳細設計と設計検証について述べていく。

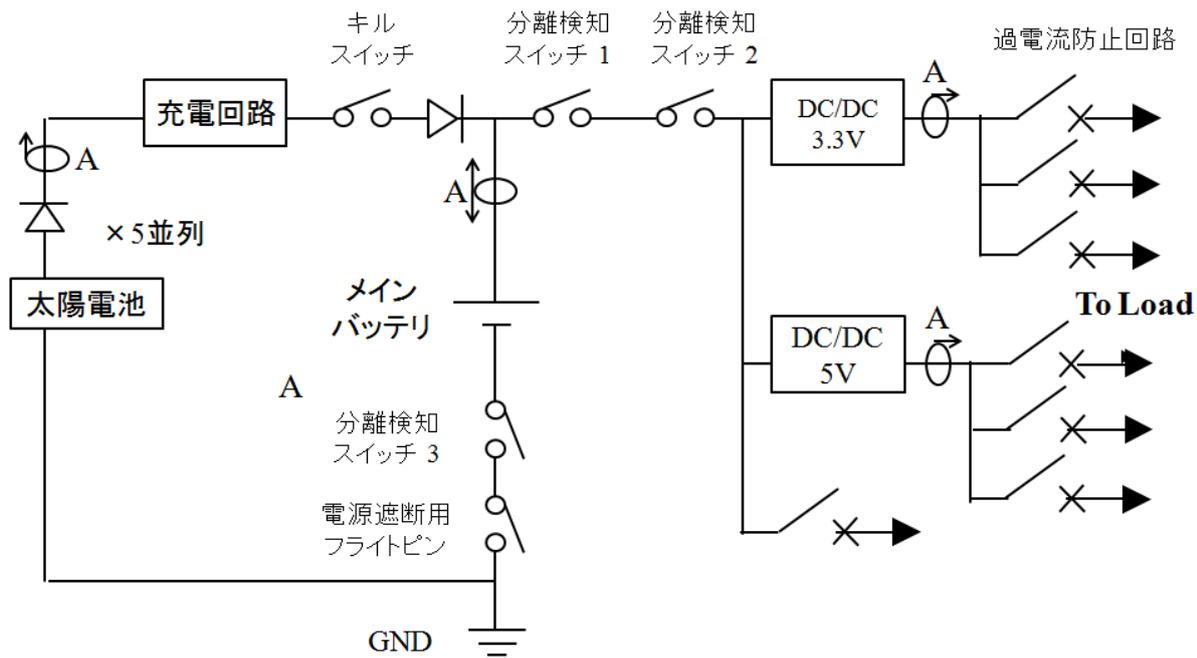


図 2.2-1 電源システムブロック図

Fig 2.2-1 Block diagram of power supply system

2.3 コンポーネント設計と設計検証

ここではバッテリー以外のコンポーネントの詳細設計と設計検証について述べる。

2.3.1 太陽電池

(i) 仕様

バス系太陽電池は図 2.3.1-1 に示すように、衛星の-X 面以外の計 5 面に 1 モジュールずつ設置した。1 モジュールは 4 セルを直列にしたものであり、計 5 モジュールの太陽電池は逆流防止ダイオードと電流センサを介して並列に接続した (図 2.3.1-2)。バス系太陽電池以外はミッション用の太陽電池であり、発電して電力として使用しない実験用である。

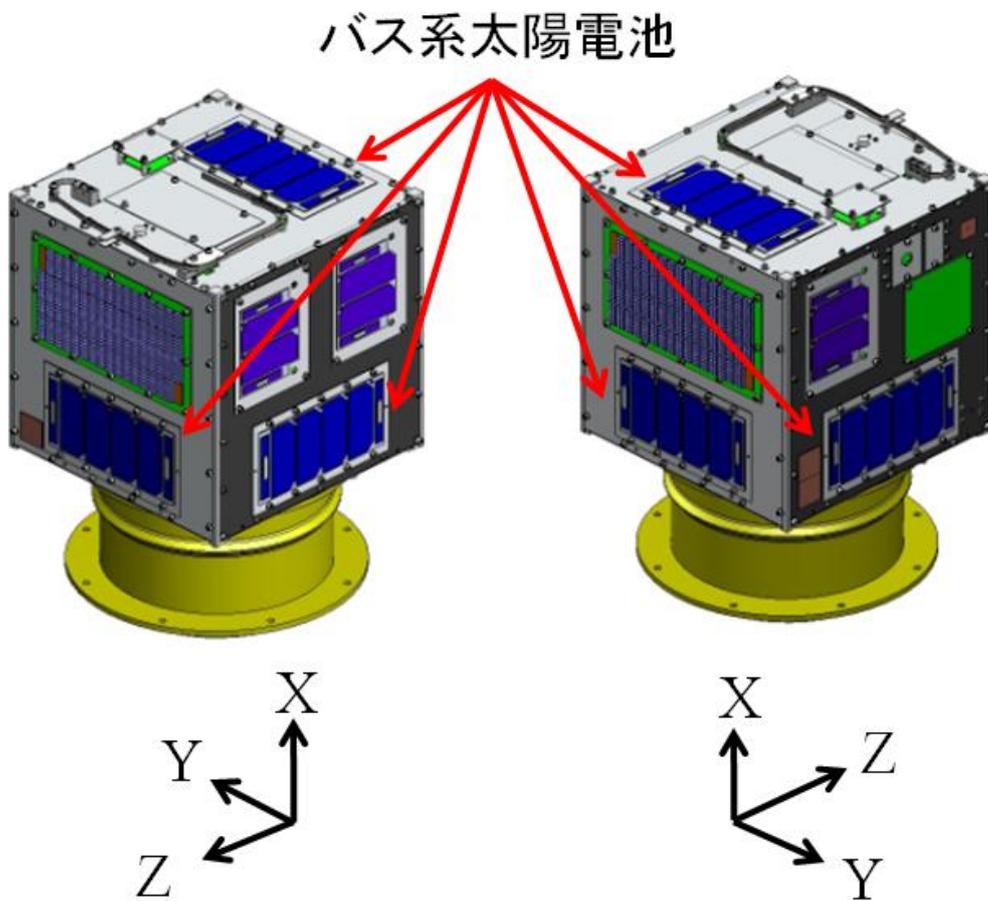


図 2.3.1-1 太陽電池設置面

Fig 2.3.1-1 Panels placed SC

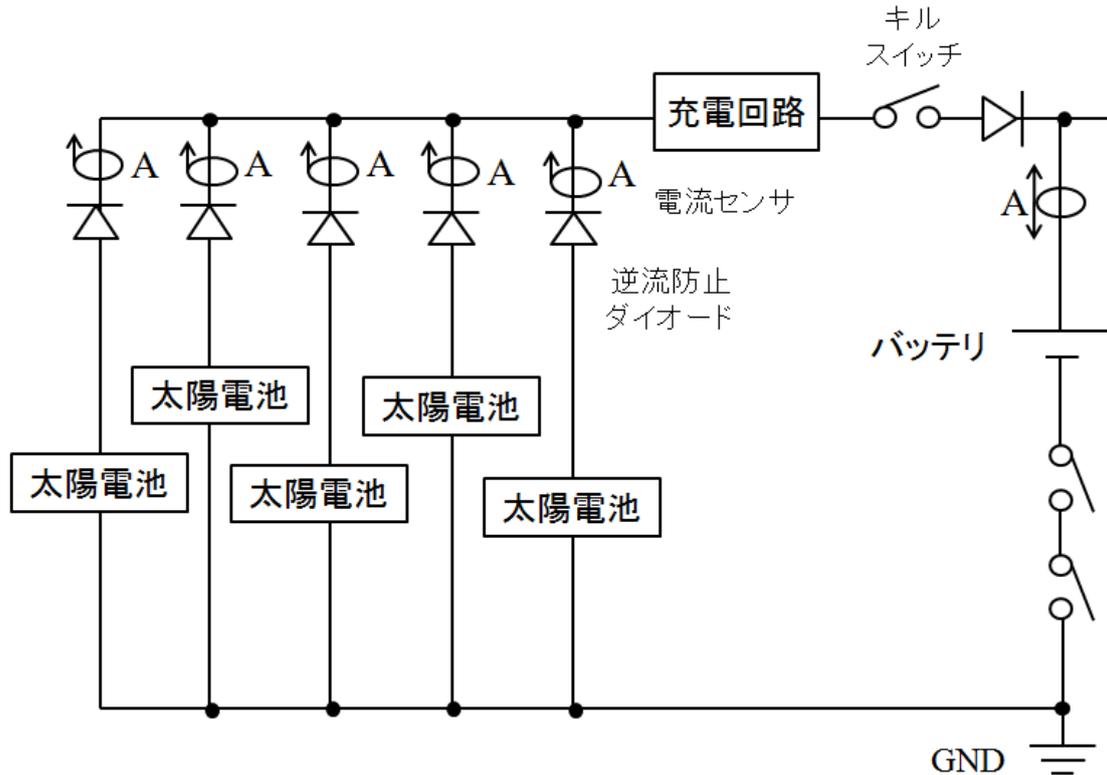


図 2.3.1-2 太陽電池接続図

Fig 2.3.1-2 Figure of SC connection

表 2.3.1-1 に 1 モジュール当たりの太陽電池性能（データシート値）を示す。

表 2.3.1-1 1 モジュール当たりの太陽電池性能

Table 2.3.1-1 SC characteristics per 1 module

| | |
|-------|---------|
| P max | 2.88 W |
| V oc | 9.10 V |
| V mp | 7.86 V |
| I sc | 0.390 A |
| I mp | 0.366 A |
| F.F. | 0.811 |

※AM0, 25°Cデータシート値

逆流防止ダイオードは電圧降下を小さくするためにショットキーバリアを使用した。その電圧－電流特性（データシート値）を図 2.3.1-3 に示す。1 モジュール当たりの発電電流が約 0.4A であるため、電圧降下は約 0.2V である。また、このダイオード

は、定格順方向電流 3.0A、最大 DC 逆電圧 15V のものを選定したため、十分余裕がある。電流センサについては 2.3.7 で述べる。

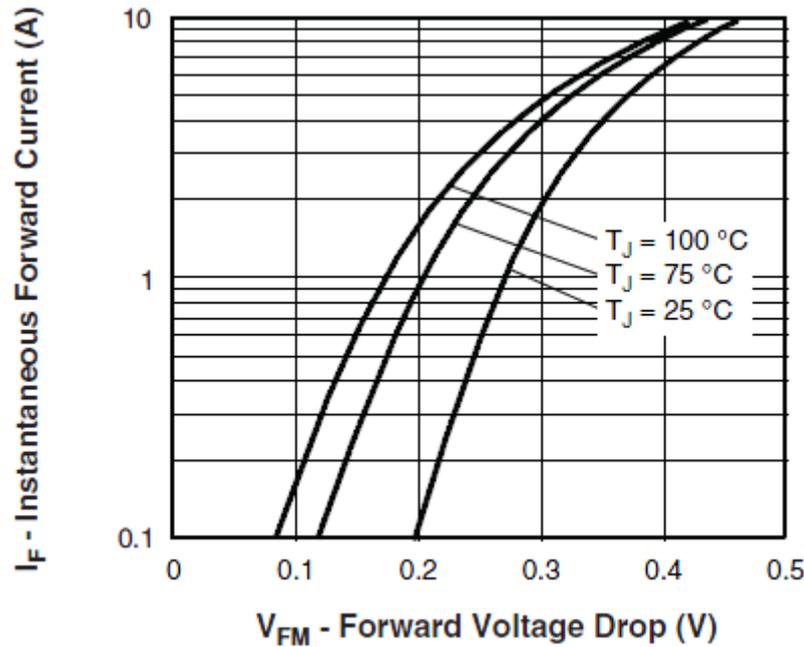


図 2.3.1-3 最大順方向電圧降下特性

Fig 2.3.1-3 Characteristics of the maximum forward direction voltage drop

(ii) 光 V-I 特性と温度特性測定

太陽電池特性を測定するために、光 V-I 特性を測定した。また、太陽電池の温度を変化させ、温度特性も測定した。図 2.3.1-4 に試験システムを示す。光源にはイカ釣り用のメタルハライドランプを使用した。図 2.3.1-5 にイカ釣りランプと測定系の写真を示す。太陽電池には可変抵抗 (0 ~ 120 Ω) と電流検出用抵抗 (1 Ω) を接続し、可変抵抗を 120 Ω から 0 Ω に変化させたときの太陽電池電圧と電流をオシロスコープで取得した。また、太陽電池には熱電対を設置し、テスターで太陽電池温度をモニタリングした。太陽電池の温度変化には扇風機を使用し温調をかけた。図 2.3.1-6 に測定結果を示す。

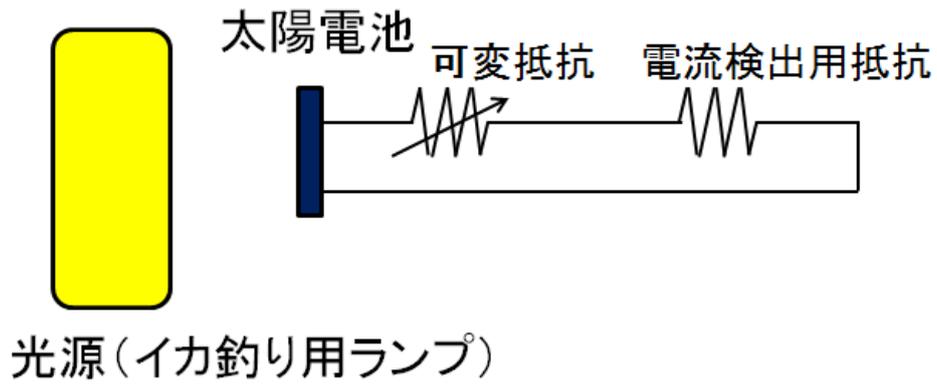


図 2.3.1-4 光 V-I 特性測定試験システム

Fig 2.3.1-2 Measurement system of V-I characteristic

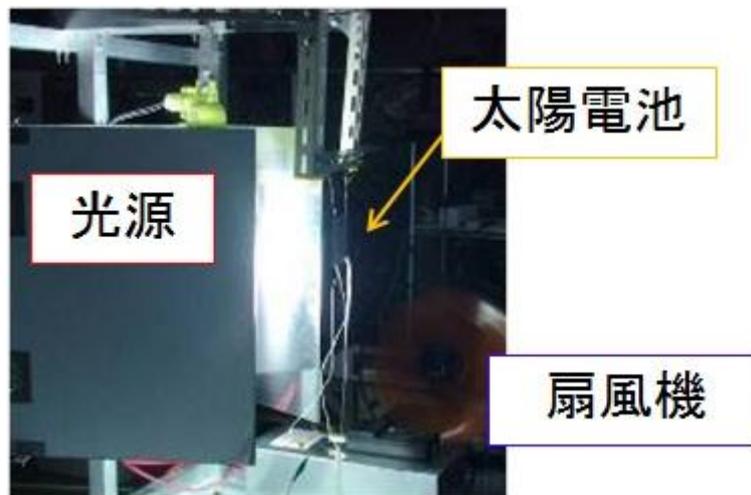
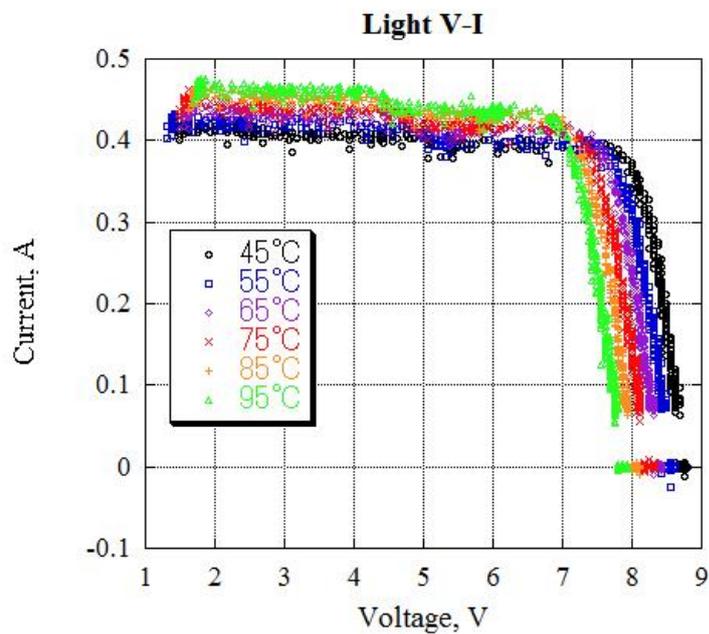


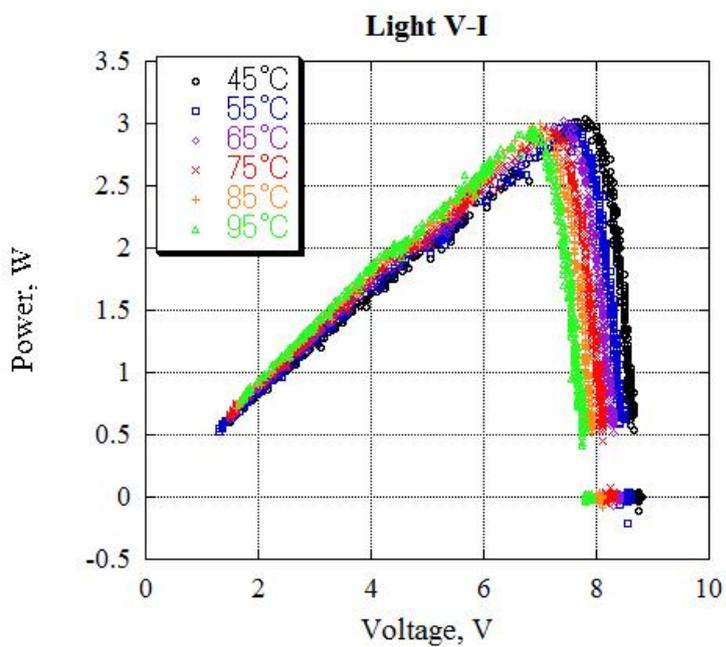
図 2.3.1-5 光 V-I 特性測定試験セッティング

Fig 2.3.1-5 Setting of V-I characteristic measurement test



(a) V - I 特性

(a) V - I characteristic



(b) V - P 特性

(b) V - P characteristic

図 2.3.1-6 太陽電池特性測定結果

Fig 2.3.1-6 Measured result of SC characteristics

測定結果より、太陽電池温度が高くなるにつれて電圧が下がり、電流が上昇、最大発電電力が低下することがわかる。これは一般的な太陽電池の温度特性と同様である。また、データシート値と 45°Cでの特性 (V_{mp} , V_{oc} , I_{mp} , I_{sc}) を比較するとほぼ一致していることがわかる。V-I 特性の 5V 付近の波形のゆがみは、空調によって太陽電池モジュールがわずかに傾くことにより4セルに均一に光が当たらなかったため発生した。次に、この測定結果を用いて軌道上での太陽電池特性を予測する。

(iii) 軌道上の太陽電池特性予測

本項では外面パネルの熱解析結果と太陽電池の温度特性測定結果より、軌道上の太陽電池特性を予測する。はじめに、外面パネルの熱解析結果（最低温度解析と最高温度解析結果）を図 2.3.1-7 と図 2.3.1-8 に示す。

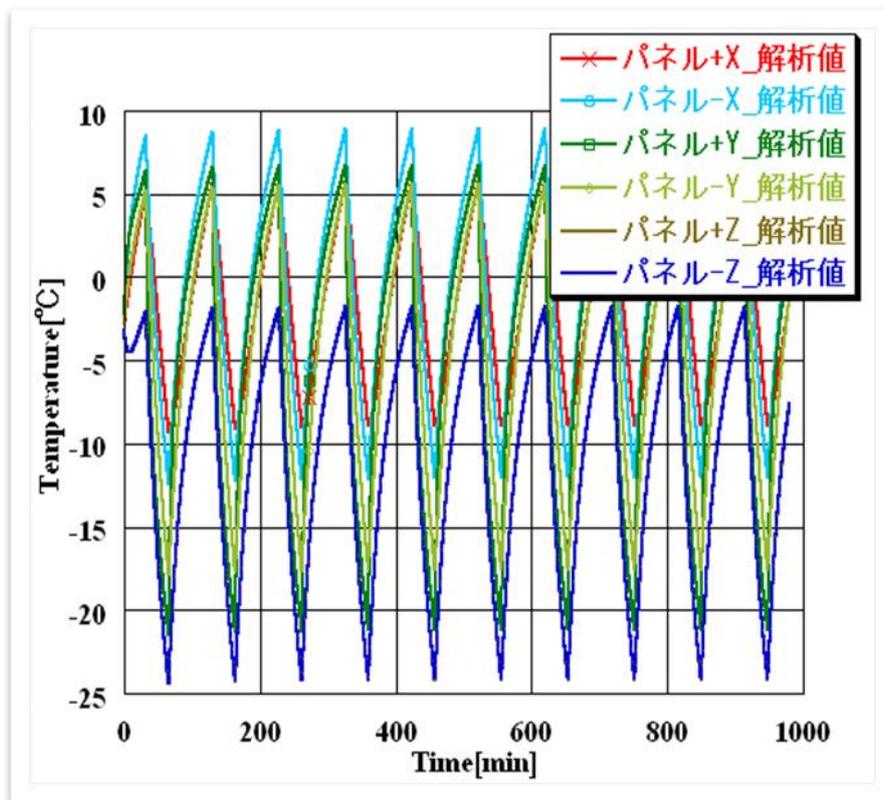


図 2.3.1-7 外面パネル最低温度解析結果

Fig 2.3.1-7 Result of lowest temperature analysis of outer panels

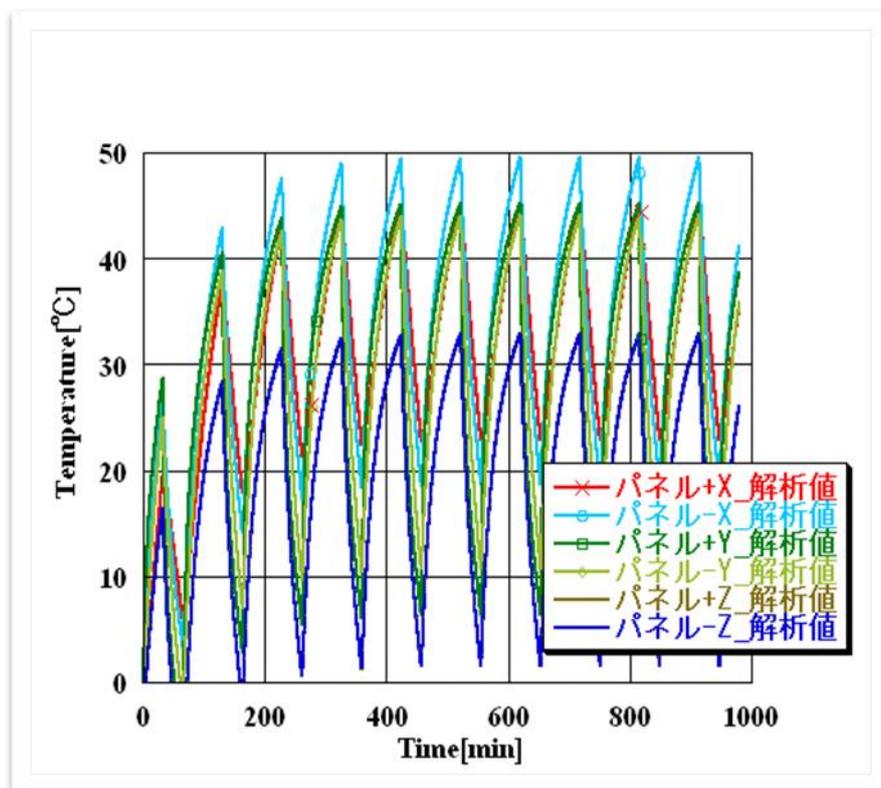


図 2.3.1-8 外面パネル熱解析結果

Fig 2.3.1-8 Result of thermal analysis of outer panels

上記の熱解析結果より太陽電池温度は最低で -24°C 、最高で 50°C になることが分かる。

次に、太陽電池の温度特性測定結果から V_{oc} , V_{mp} , I_{sc} , I_{mp} を読み取り、表 2.3.1-2 に示す。黄色で示した部分は AM0, 25°C の環境下で測定されたデータシート値である。

表 2.3.1-2 対応電池温度特性まとめ

Table 2.3.1-2 Characteristics of battery temperature

| | AM0, 25°C | 45°C | 55°C | 65°C | 75°C | 85°C | 95°C |
|----------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| V_{oc} | 9.096 | 8.72 | 8.56 | 8.37 | 8.21 | 8.06 | 7.87 |
| V_{mp} | 7.86 | 7.81 | 7.56 | 7.43 | 7.06 | 7.00 | 6.87 |
| I_{sc} | 0.39 | 0.414 | 0.423 | 0.435 | 0.446 | 0.458 | 0.466 |
| I_{mp} | 0.366 | 0.388 | 0.396 | 0.407 | 0.419 | 0.429 | 0.431 |

上記の表の太陽電池温度 45°C ~ 95°C の実測値より、温度が 10°C 上昇するにつれて、 V_{oc} が約 0.17V 、 V_{mp} が約 0.19V 下がり、 I_{sc} が約 0.009A 、 I_{mp} が約 0.01A 上昇していることがわかる。太陽電池温度の低温側でも同様の直線的な特性変化であると仮定すると、この温度特性をデータシート値に反映し最高・最低温度での太陽電池特性は表 2.3.1-3 の様になると予測できる。また、その特性図を図 2.3.1-8 に示す。

表 2.3.1-3 最低・最高温度時の太陽電池特性予測

Table 2.3.1-3 SC characteristic calculation at lowest and highest temperature

| | 最低温度 (-24°C) | 最高温度 (50°C) |
|-----|-----------------|----------------|
| Voc | 9.78 | 8.67 |
| Vmp | 8.62 | 7.39 |
| Isc | 0.354 | 0.413 |
| Imp | 0.326 | 0.391 |

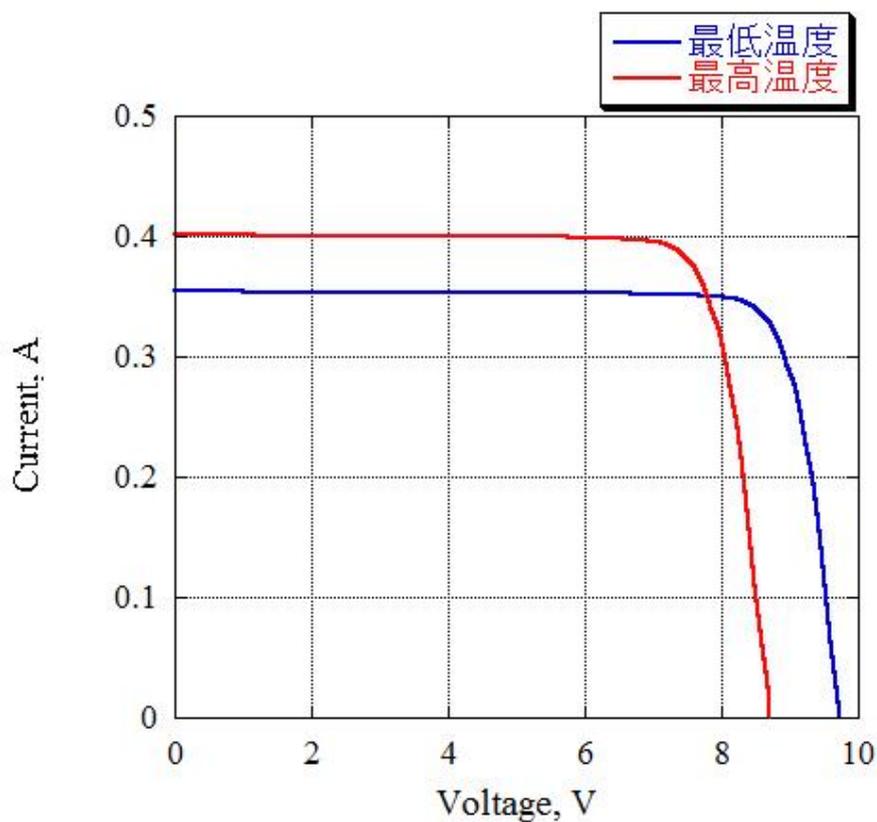


図 2.3.1-9 最低最高温度下での太陽電池特性

Fig2.3.1-9 SC characteristic at lowest temperature

軌道上での太陽電池の発電電力は4章の電力収支で述べる。

2.3.2 キルスイッチ

キルスイッチは充電回路とバッテリー間に設置された、バッテリーの充電を停止するスイッチである。これは設計要求「運用終了時におけるバッテリーの完全放電」を満たすために開発した。設計において消費電力の最小化とバッテリー過放電時に電源がない状態でも OFF 状態（発電電力を充電する状態）を維持することを考慮し、機械式のラッチングリレーを核として開発を行った。

(i) 設計仕様

キルスイッチの詳細回路を図 2.3.2-1 に示す。キルスイッチは下図に示した回路とまったく同じものを並列に接続し、2冗長構成にした（フォールト・トレラント）。それぞれのキルスイッチの制御は OBC のメイン H8 と COM H8 の信号で行う。これにより、2つある OBC の H8 の一方が誤作動してキルスイッチを ON したとしても、もう一方のキルスイッチは OFF 状態のままにバッテリーへの充電は遮断されない。また、誤作動をなくすためにキルスイッチは OBC の定期リセット毎（約 3 時間ごと）に ON になっていないことをチェックする。OBC の制御信号はカットオフ周波数 442Hz のローパスフィルタを通して ON 又は OFF 用のトランジスタのベースに入力され、ラッチングリレー内部の ON 又は OFF 用コイルに電流を流すことでラッチングリレースイッチ部が切り替わり、Pch-MOSFET が ON/OFF する。ここで、ローパスフィルタはノイズ対策、逆起電力防止用ダイオードは回路保護のために設置している。キルスイッチの ON/OFF 状態の判断は、OBC へのテレメトリで判断される（テレメトリ High : OFF、Low : ON）。運用終了後、キルスイッチ ON のアップリンクコマンドを地上から送ることで、キルスイッチが ON になりバッテリー充電が遮断される。そして衛星はバッテリー駆動で動作し続け、やがてバッテリーは完全放電する。

ったが、振動と衝撃の対策は相反するため、「剛」と「柔」の中間付近となるように配慮した。（ラッチングリレーを普通に実装するとイメージ的には「剛」となり振動には強いが衝撃には弱い。逆の場合は「柔」となり衝撃には強いが振動には弱くなる。）対策はラッチングリレー実装時に厚さ 1mm のラムダゲル（熱伝導率の良いシリコン系ゲル）を基板と素子の間に挟んだ（図 2.3.2-2）。これにより、基板からラッチングリレー本体に伝わる衝撃を緩和する。また、ラッチングリレーは可能な限り基板の中央に配置し、ラッチングリレーが受ける衝撃レベルが弱くなるように配慮した（図 2.3.2-3）。

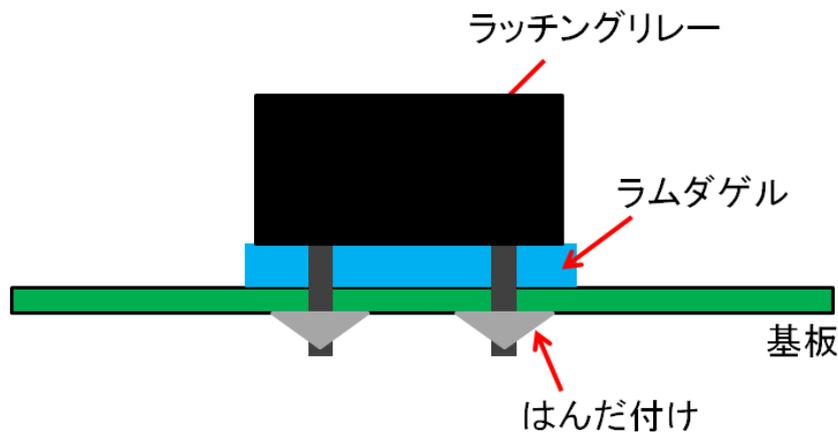


図 2.3.2-2 ラッチングリレーの実装方法

Fig 2.3.2-2 Method of placed relay device

電源基板

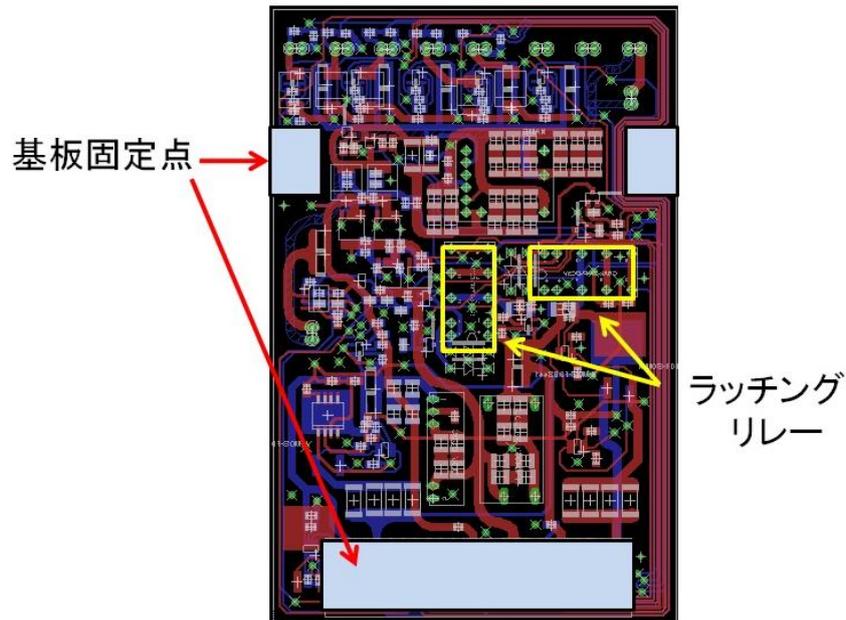


図 2.3.2-3 基板上の配置

Fig 2.3.2-3 Location on the board

(ii) 動作検証

キルスイッチの動作検証は地上局からのアップリンクコマンドによりキルスイッチが ON/OFF 制御でき、ON 時は太陽電池電力を遮断、OFF 時は太陽電池電力を負荷で使用しバッテリーに充電できることを確認する。試験システムを図 2.3.2-4 に示す。衛星はEMを統合したものを使用した。太陽電池電力はSASを用いて模擬(8.8V, 0.43A 出力)し、DAQでSAS電圧・電流とバッテリー電圧・電流をモニタリングする。ここで電流は 0.1Ω 抵抗を使用しその両端電圧で検出している。地上局は鳳龍式号機へキルスイッチのON/OFFコマンドをアップリンクする。

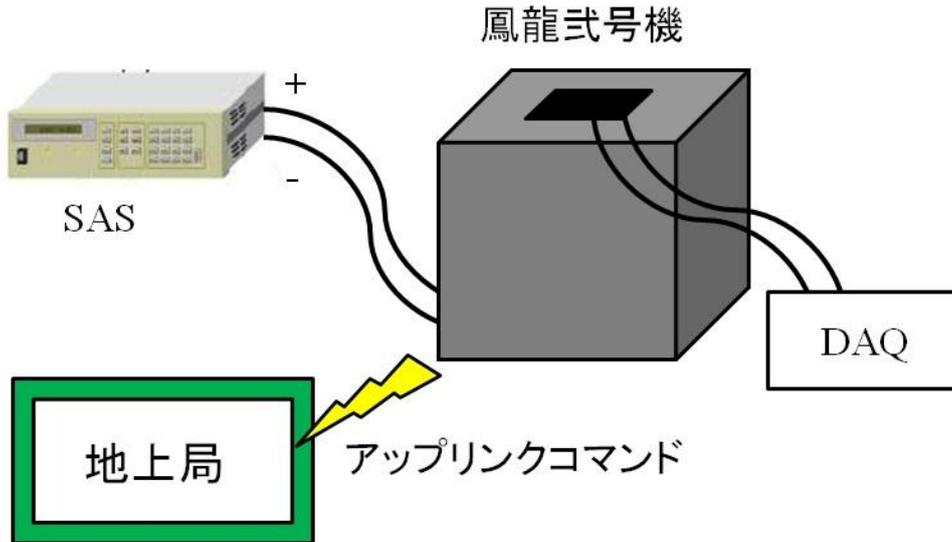


図 2.3.2-4 キルスイッチ試験システム

Fig 2.3.2-4 Kill switch test system

表 2.3.2-2 に結果を示す。アップリンクコマンド通りキルスイッチは正常に動作し、電力を遮断できることを確認した。図 2.3.2-5 に SAS 出力電圧と電流、図 2.3.2-6 にバッテリー電圧と電流を示す。ソーラーアレイシュミレーター（以下 SAS）出力はキルスイッチが ON になると電圧が太陽電池の V_{oc} 付近まで上昇し、電流は 0.1A 以下になっている。ここで、電流値が 0 にならないのは充電回路の入力側で消費されているからである。次に、バッテリー出力はキルスイッチ OFF 時では正方向で約 0.3A 充電されており、ON になると負方向で約 0.2A 放電していることがわかる。また、バッテリー電圧においてもキルスイッチ ON/OFF に伴う充電と放電動作が電圧の変化によりわかる。

表 2.3.2-2 キルスイッチ動作シーケンスとテレメトリ対応結果

Table 2.3.2-2 Measured result of operation of kill switch and telemetry

| コマンド | キルスイッチ 1 | キルスイッチ 2 | 電力の遮断 |
|------|-------------|-------------|-------|
| OFF | OFF | OFF | 導通 |
| ON | ON | ON | 遮断 |

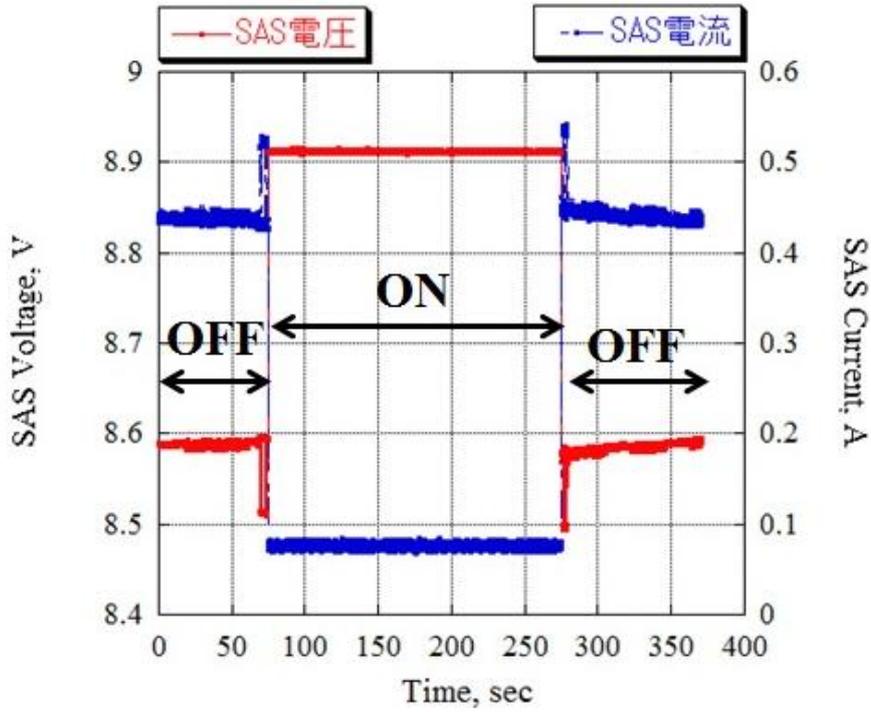


図 2.3.2-5 SAS 電圧・電流
Fig 2.3.2-5 SAS voltage and current

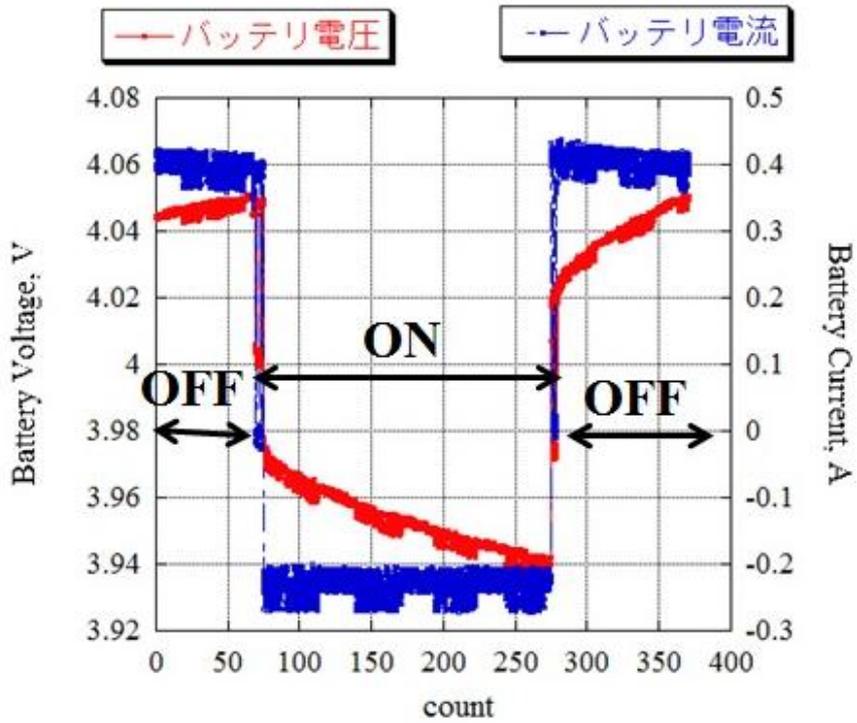


図 2.3.2-6 バッテリ電圧・電流
Fig 2.3.2-6 Battery voltage and current

2.3.3 充電回路

(i) 設計仕様

充電回路は太陽電池で発電した電力を効率良くバッテリーに充電するためのものである。この充電回路は PFM 開発フェーズで開発することになったため、構成をシンプルかつインターフェース変更・素子追加を最小にし、開発後期での設計変更リスクが最小となるよう設計した。図 2.3.3-1 に充電回路図を示す。充電回路は DC/DC コンバータモジュールと外部回路で構成し、PPT 制御と充電制御の 2 つの役割を担う。ここで DC/DC コンバータモジュールは出力の立ち上がり電圧同期用の機能があるものを選定した。その機能を応用して PPT 制御を行い、太陽電池の発電点を P_{max} に近づけ、効率良く太陽電池電力を発電する。充電制御はバッテリー残量によって充電量を調節し、バッテリーの過充電を防ぐ。

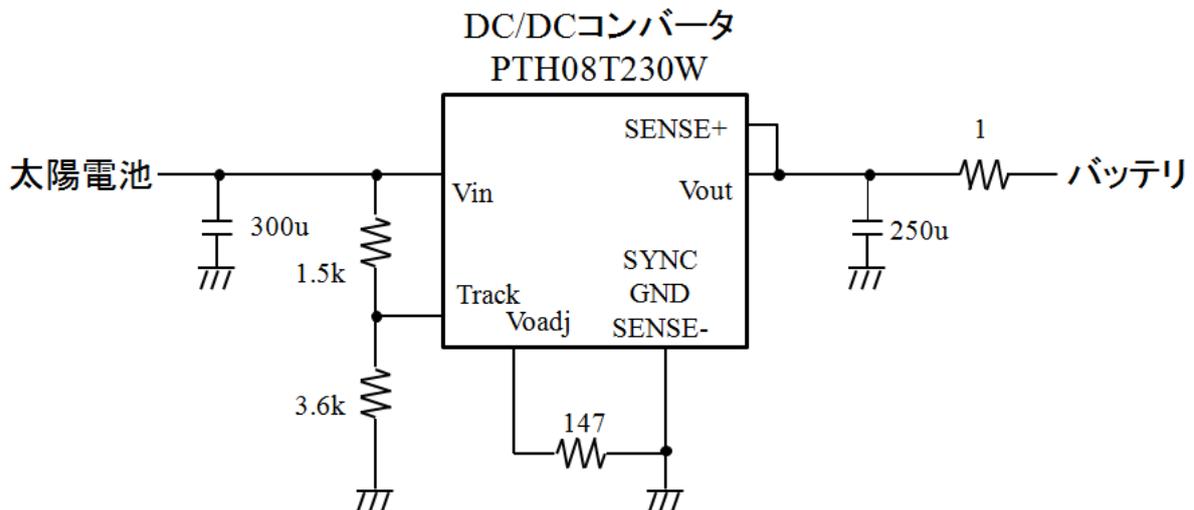


図 2.3.3-1 充電回路図

Fig 2.3.3-1 Charging circuit

次に充電回路の詳細について述べる。DC/DC コンバータの入力側と出力側のキャパシタは DC/DC コンバータの安定動作のために必要なバイパスコンデンサである。このキャパシタは 100uF の積層セラミックを 2 直列 5 又は 6 並列にして使用している。高容量の積層セラミックキャパシタは一般的に振動・衝撃によりクラックが発生する可能性が低い容量のものに比べ高いため 2 直列にして使用している。DC/DC コンバータの Voadj 端子は出力電圧を設定するための端子で 147Ω を介して GND に接地することで出力電圧の上限を 5.08V に設定する。この設定によりバッテリー満充電付近での充電量を調節することができる。SYNC、GND、SENSE - 端子は GND に接地する (SYNC : スイッチング周波数の同期用端子、SENSE - : 出力電圧精度向上用端子)。また、SENSE+ 端子は DC/DC コンバータ出力に接続する (SENSE+ : 出力電圧精度向

上用端子)。Track 端子は入力電圧を $1.5k\Omega$ と $3.6k\Omega$ で分圧した電圧を入力する。この端子は出力電圧立ち上がり同期用の端子で PPT 制御に用いる。DC/DC コンバータ出力に直列に設置した 1Ω 抵抗はバッテリー残量低下時の DC/DC コンバータの発振動作を防ぐものである。もし、DC/DC コンバータが発振動作してしまう場合、出力電圧上限を下げるか適した値のコイルを 1Ω 抵抗の代わりに入れてやればよい。

充電回路の動作は PPT モードと CV モードの 2 つの動作モードがある。どちらのモードも基本的に太陽電池の発電点を変化させることでバッテリー充電量を変化させる (図 2.3.3-2)。この様なシリーズ方式の電源システムは太陽電池の発電点が変化するため、衛星の熱解析に反映させる必要がある。それについては、2.8 項の熱解析への電源システム設計のフィードバックで述べる。

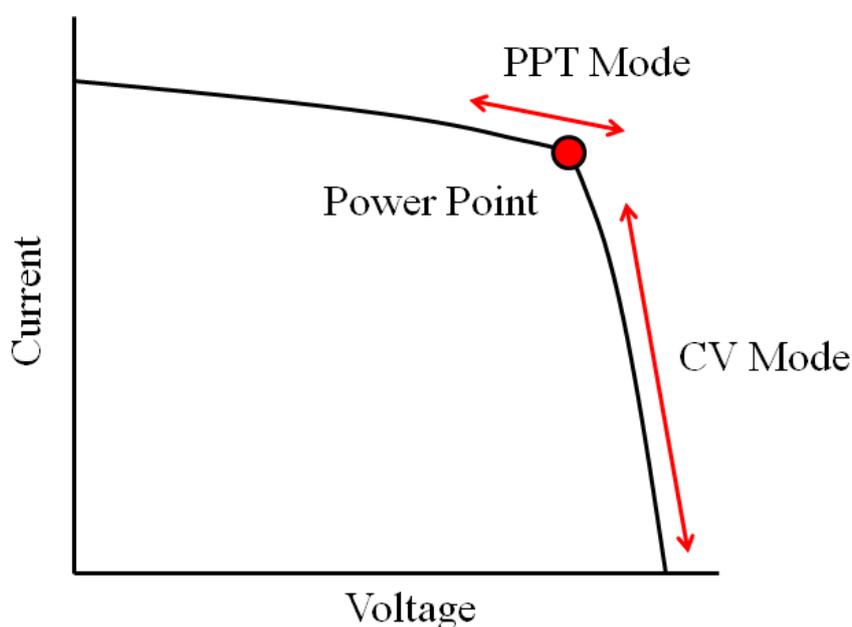


図 2.3.3-2 発電モードイメージ図

Fig 2.3.3-2 Figure of power generation mode

PPT モードはバッテリー残量が少ない時に動作するモードで、最大の発電電力で太陽電池を発電させる。太陽電池が発電すると充電回路はバッテリー電圧と DC/DC コンバータ出力電圧の電位差に依存する電流を出力する。この時、バッテリー残量が少ない (即ちバッテリー電圧が低い) ため、より大きな電流を出力しようとして、太陽電池電流が増加し電圧は低下する。太陽電池電圧が低下すると Track 端子電圧が低下し、DC/DC コンバータ出力電圧が低下する (Track 端子入力電圧が出力電圧になる。但し上限は $5.08V$ である)。よって、バッテリー電圧との電位差が小さくなり DC/DC コンバータ出力電流は低下する。この様な原理により最終的に太陽電池電圧を P_{max} 付近に保ち、 P_{max} 付近で発電を行う。

CV モードは発電量を調節するモードであり、バッテリー残量が一定以上の時、発電電力を低下させることで充電量を減らす。PPT モードで動作中において、DC/DC コン

バータ出力電圧が上限値（5.08V）に達したとき、それ以上出力電圧が上がらないため DC/DC コンバータ出力電流が抑制され、充電電流が減少する。このとき、太陽電池の発電点は上図に示すように Pmax 点より電圧が高い位置で発電する。

次に発電電力抑制のイメージを図 2.3.3-3 に示す。バッテリー残量が 0% のとき、抑制ラインは 0% の点線まで上昇するため発電電力の抑制がない（常に PPT モード）。バッテリー残量の上昇に伴い発電電力の抑制量は大きくなる（バッテリー充電電流が減少）。例えば、下図の赤ラインの抑制が効いている場合、発電電力は抑制ラインで抑えられる。この動作が CV モードとなる。また、抑制ラインより発電電力が小さい時は PPT モードで動作する。バッテリー残量の増加に伴い、抑制ラインは下がり、CV モード比率が大きくなる。バッテリー 100% 付近では通常運用の消費電力と発電電力がほぼ釣り合う状態にすることで、バッテリーの過充電を防ぐ。実際は、マージンを設け発電電力の方が少し大きく設定している（その大きさはバッテリーの発熱とのトレードオフを考慮）。

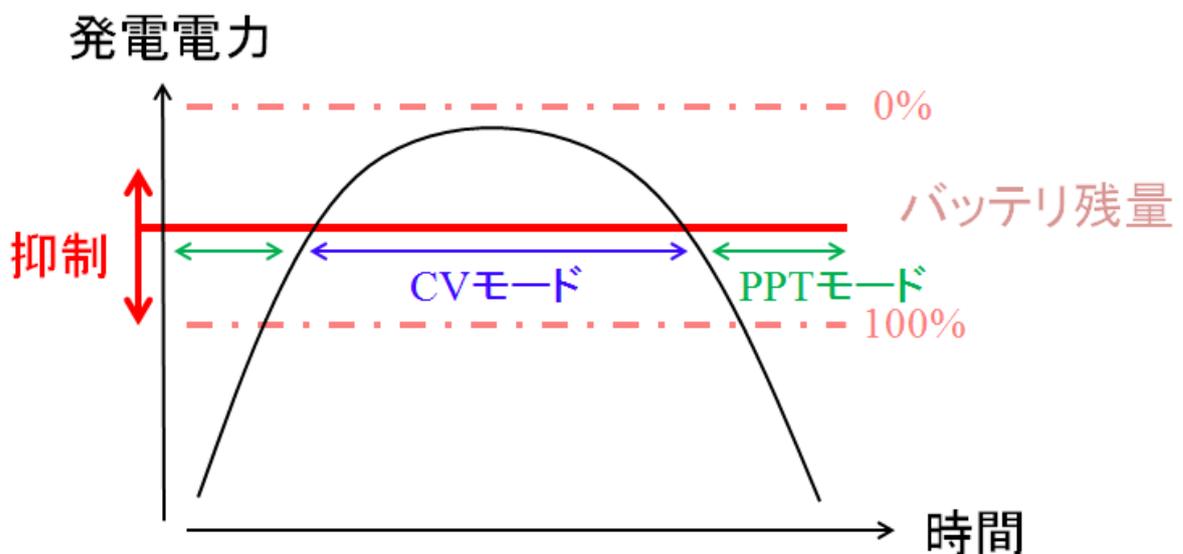


図 2.3.3-3 発電電力

Fig 2.3.3-3 Power generation

(ii) 動作検証

ここでは、充電回路動作テストについて述べる。図 2.3.3-4 に試験システムを示す。太陽電池発電電力の模擬には SAS を使用し、バッテリーはフライト品と同じ特性の EM バッテリーを使用した。試験時のバッテリーは残量 0%で行った。衛星はバス系の基板と通信機を統合し、通常モード (CW 送信、FM 受信) で動作させた。また、赤丸で示した点を DAQ で計測した。ここでの試験は全て衛星開発室 (大気常温環境下) で実施した。

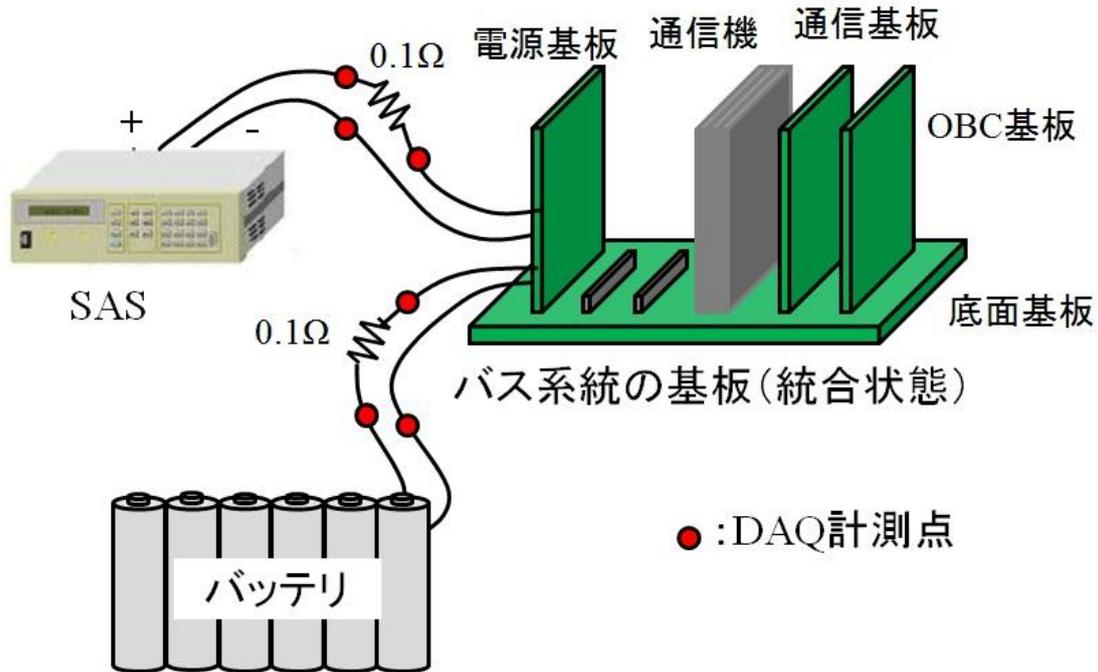


図 2.3.3-4 充電動作試験システム

Fig 2.3.3-4 Test system of charging operation

SAS で模擬した太陽電池発電電力を図 2.3.3-5 に示す。これは地球 1 周当たりの日照中の最低発電電力計算より求めたものである。また、その最低発電電力において太陽電池の温度特性を考慮し、AT 低温 (-24°C)・常温 (20°C)・AT 高温 (50°C) の 3 パターンの太陽電池特性を使用した (SAS で太陽電池温度別の V-I 特性を模擬)。これらの太陽電池の発電電力の詳細については 4 章の電力収支で述べる。本試験では 1 サイクルの時間を 1/20 に短縮して行った。サイクル数は 1 サイクルのみ実施した。この試験の目的は太陽電池の最高・最低時の光 V-I 特性に対してどの程度 PPT 効率、電力変換効率が変化するか確認することである。

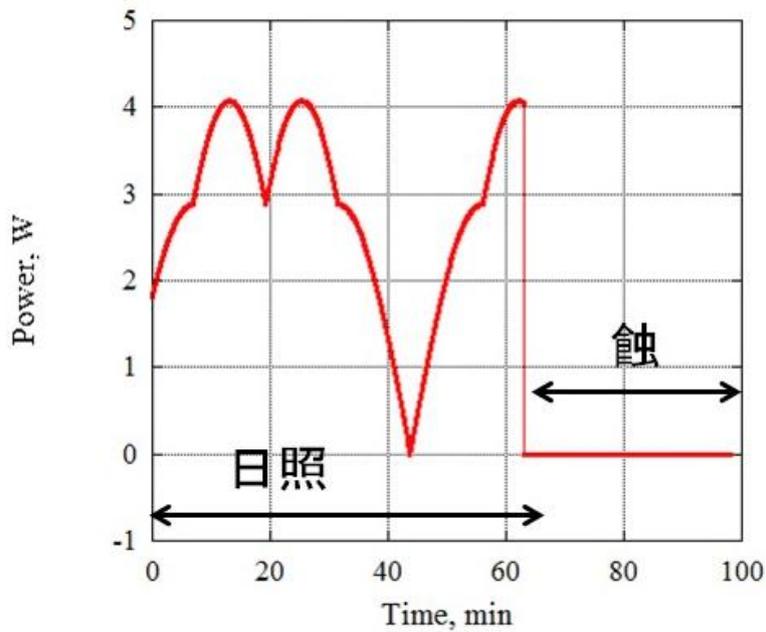


図 2.3.3-5 地球 1 周当たりの発電電力 (最小ケース)

Fig 2.3.3-5 Power generation per Earth one lap (minimum case)

試験結果を下図に示す。バッテリー電流は正方向が充電、負方向が放電を示す。これらの結果から、太陽電池特性が高温になるほど、バッテリーの充電電流量が大きくなることから、太陽電池の温度特性変化における発電の影響は小さいことがわかる。SAS 出力が途中で 4V 付近まで低下しているのは、発電電力が小さすぎるためである。入力電圧（太陽電池電圧）4.5V 以下のとき DC/DC コンバータは動作を停止する。このように発電電力が非常に小さくなり太陽電池電圧が 4.5V 付近まで低下するとき、DC/DC コンバータは発振動作しやすくなるため注意が必要である（1Ω 抵抗で対処している）。

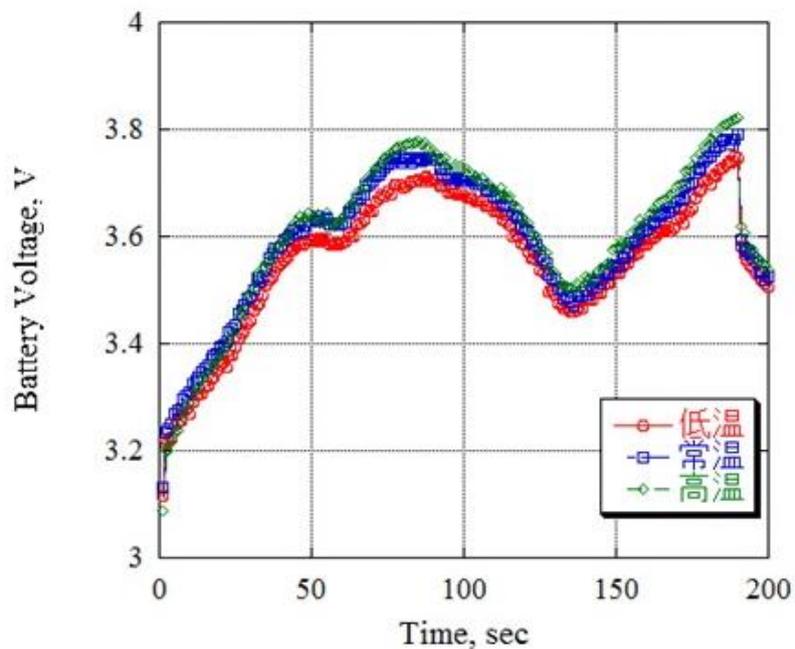


図 2.3.3-6 バッテリ電圧

Fig 2.3.3-6 Battery voltage

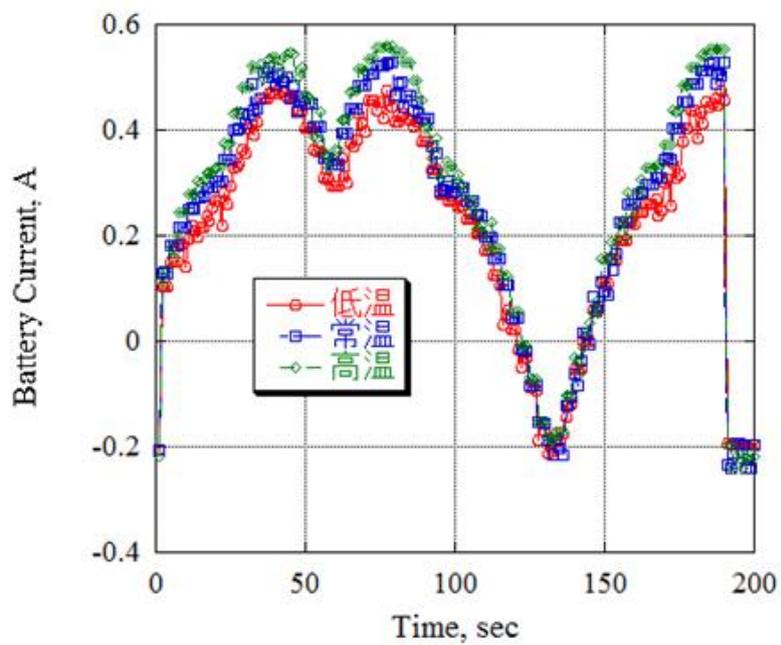


図 2.3.3-7 バッテリ電流

Fig 2.3.3-7 Battery current

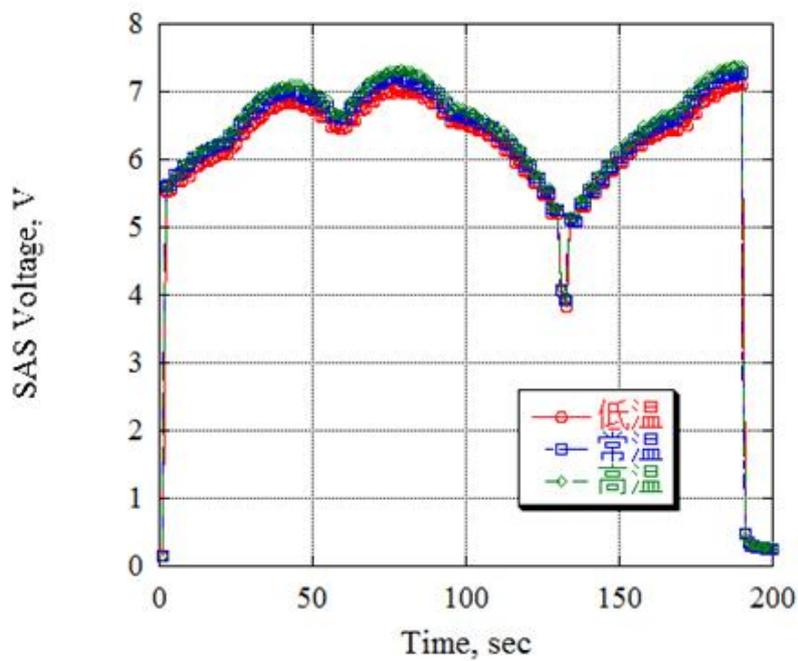


図 2.3.3-8 SAS 出力電圧
Fig 2.3.3-8 SAS output voltage

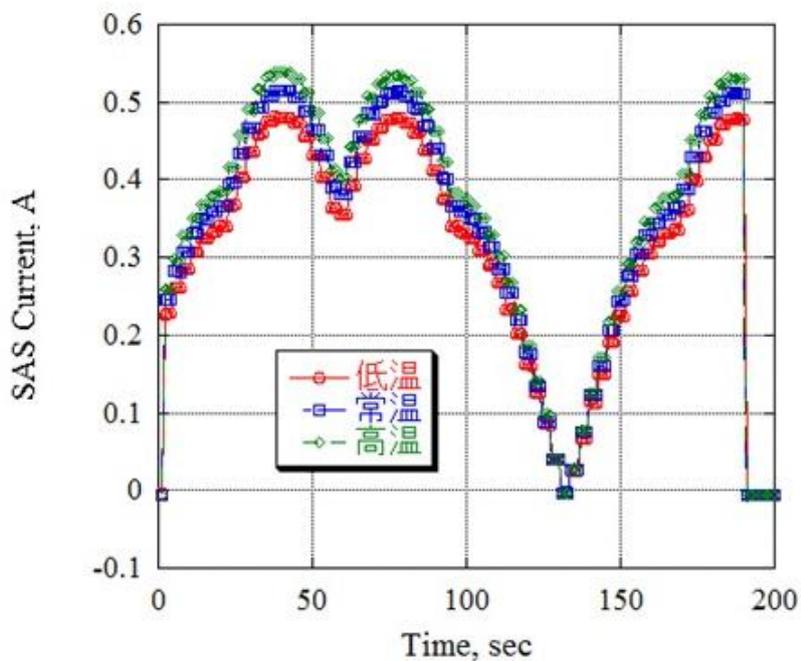


図 2.3.3-9 SAS 出力電流
Fig 2.3.3-9 SAS output current

次に上記の取得データから、太陽電池の発電点と充電回路内の DC/DC コンバータ効率を算出した。図 2.3.3-10 に発電電力変化に対する太陽電池温度別の効率を示す。太陽電池の発電点効率は 60~95% の範囲で推移していることがわかる。ここで示す最低温度は太陽光に光が当たっていないときなので、下図低温プロットは最悪値である。太陽電池が高温になると発電点効率は上昇し、最大 95% になる。通常、太陽電池が発電するときはモジュール温度が上昇し常温~高温プロット程度となる。従って、平均的な発電点の効率は約 90% である。図 2.3.3-11 に発電電力変化に対する充電回路の DC/DC コンバータ電力変換効率を示す。効率は 90% 以上で動作していることがわかる。

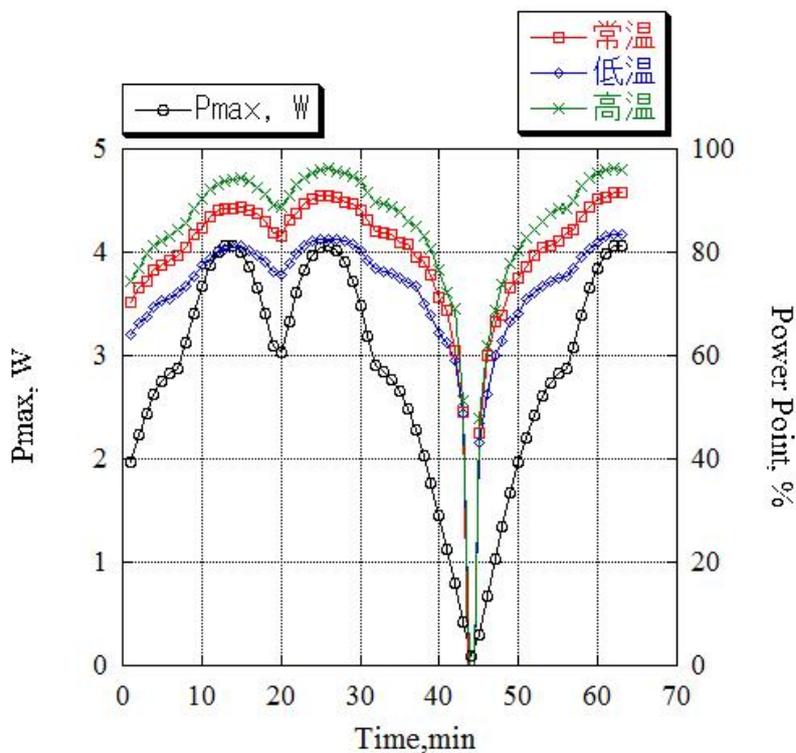


図 2.3.3-10 発電点効率

Fig 2.3.3-10 Power generation efficiency

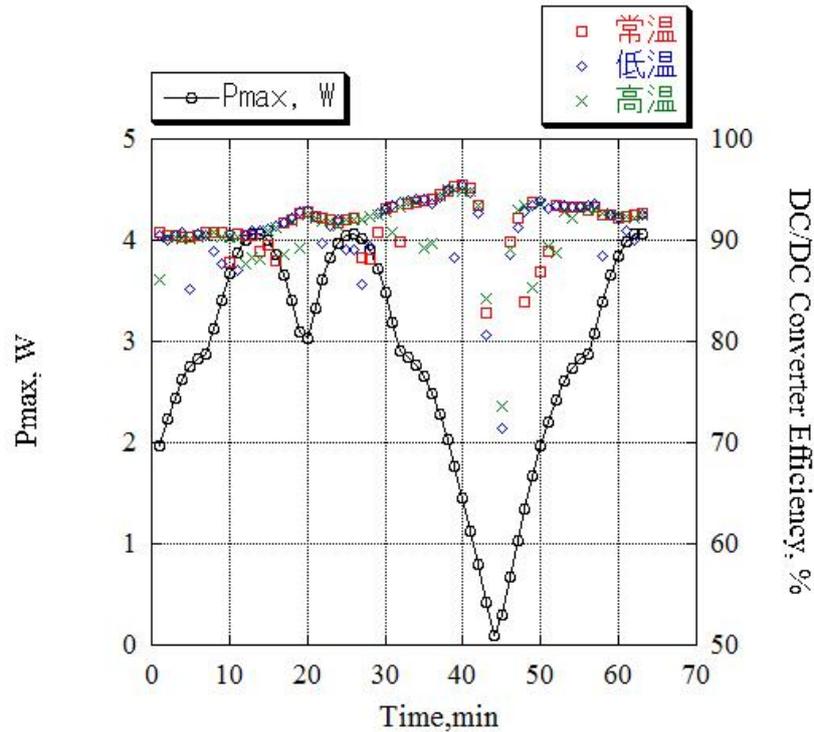


図 2.3.3-11 充電回路の電力変換効率

Fig 2.3.3-11 Power conversion efficiency of charging circuit

次に、上記と同様の試験装置でバッテリー残量 0% から 100% まで充電した場合の試験を行った。ここでは、CV モードの動作を確認することが目的である。変更点は、発電電力が最低発電電力の低温ケース（ -24°C の太陽電池特性を SAS で模擬）で日照・蝕のサイクル時間の短縮をしていない点である。試験は衛星開発室（大気・常温）で実施した。下図に試験中のバッテリー電圧・電流、SAS 出力電圧・電流を示す。試験開始時は 0%、終了時は 100% のバッテリー容量である。バッテリー容量が増える（バッテリー電圧上昇する）と SAS 出力電流は低下し、バッテリー充電電流が減少していることが分かる（バッテリー電流は正側が充電、負側が放電）。この結果から、バッテリー残量が増えると充電電流が減少し、正常に動作していることがわかる。

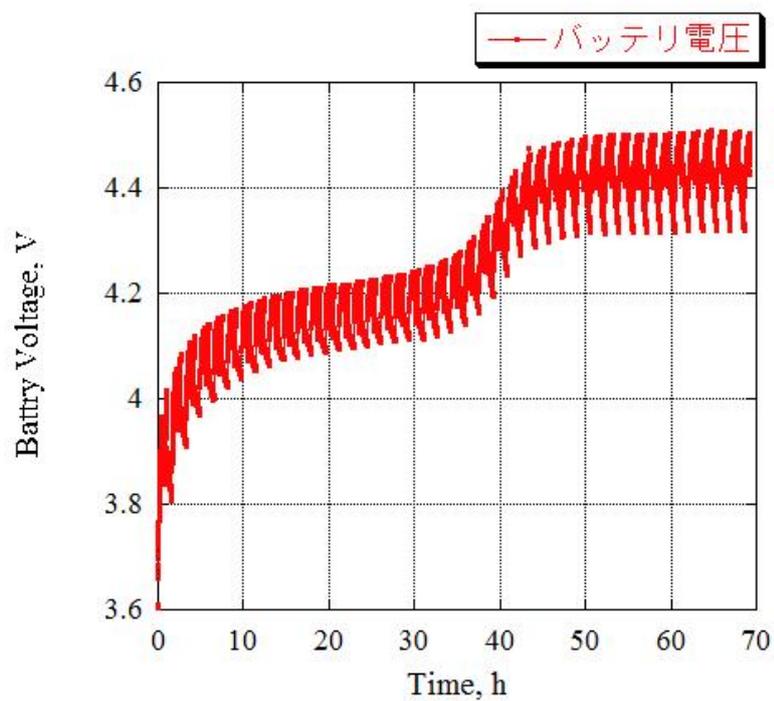


図 2.3.3-12 バッテリー電圧

Fig 2.3.3-12 Battery voltage

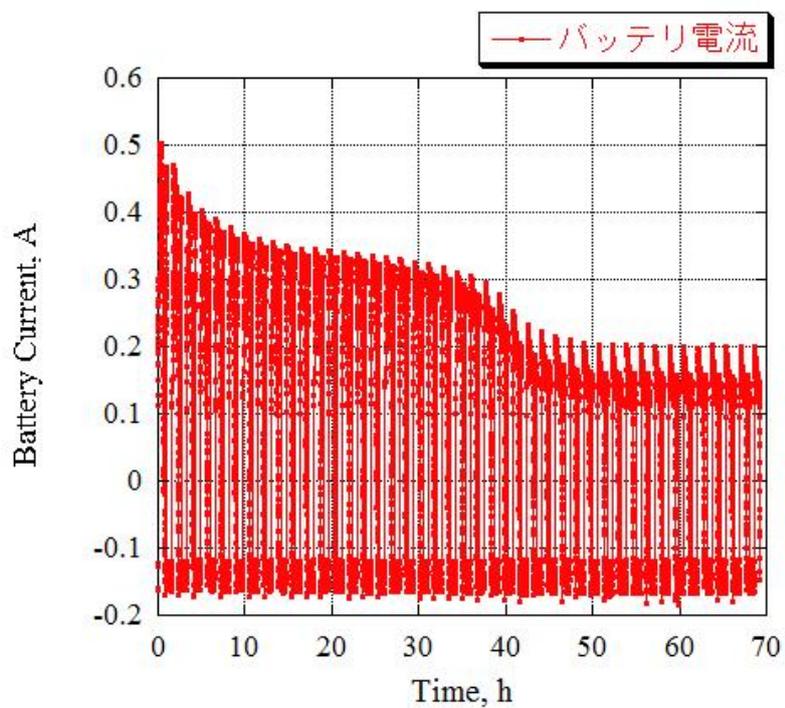


図 2.3.3-13 バッテリー電流

Fig 2.3.3-13 Battery current

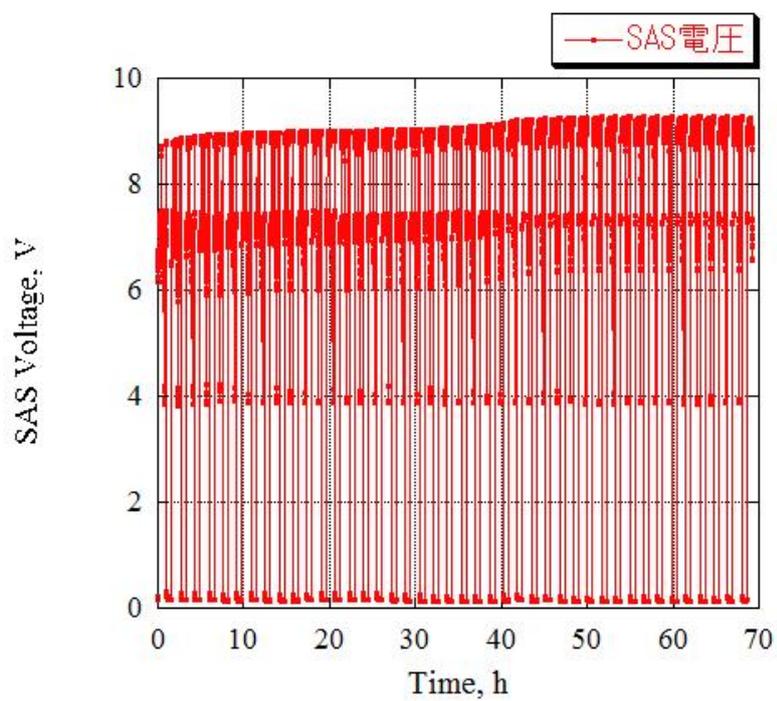


図 2.3.3-14 SAS 電圧

Fig 2.3.3-14 SAS voltage

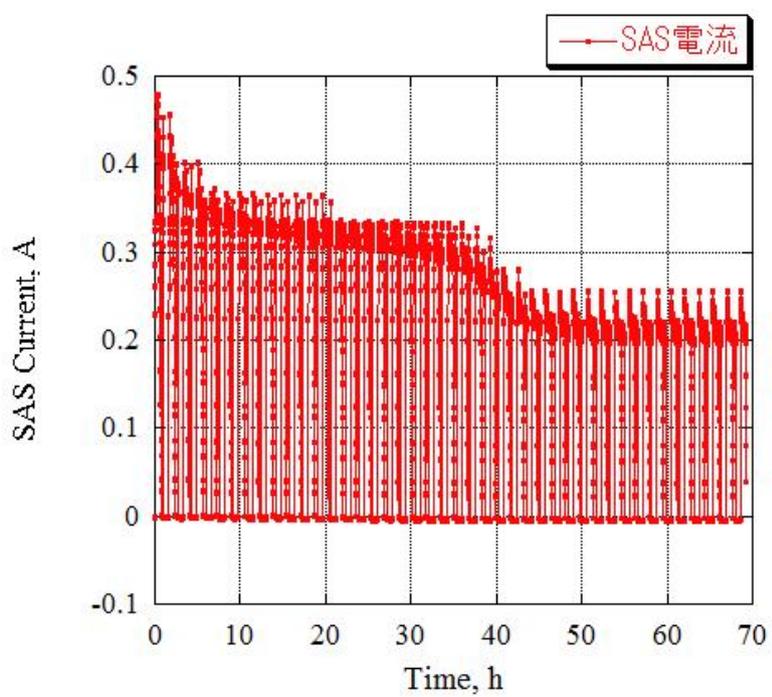


図 2.3.3-15 SAS 電流

Fig 2.3.3-15 SAS current

2.3.4 分離検知スイッチ

分離検知スイッチは衛星が分離機構から分離したことを検出し、衛星の電源を ON するものである。一度、衛星が分離すると OFF することはない。また、このスイッチは衛星の安全審査に関わる重要な部分であり、3 インヒビットで衛星をコールドローンチに保たなければならない。以下に詳細な仕様を述べる。

分離検知スイッチは図 2.3.4-1 に示すように、バッテリーのホット側に 2 つ、リターン側に 1 つ設置している。これはハーネス作業時等に電源ラインの地絡故障の安全性を考慮した結果である。

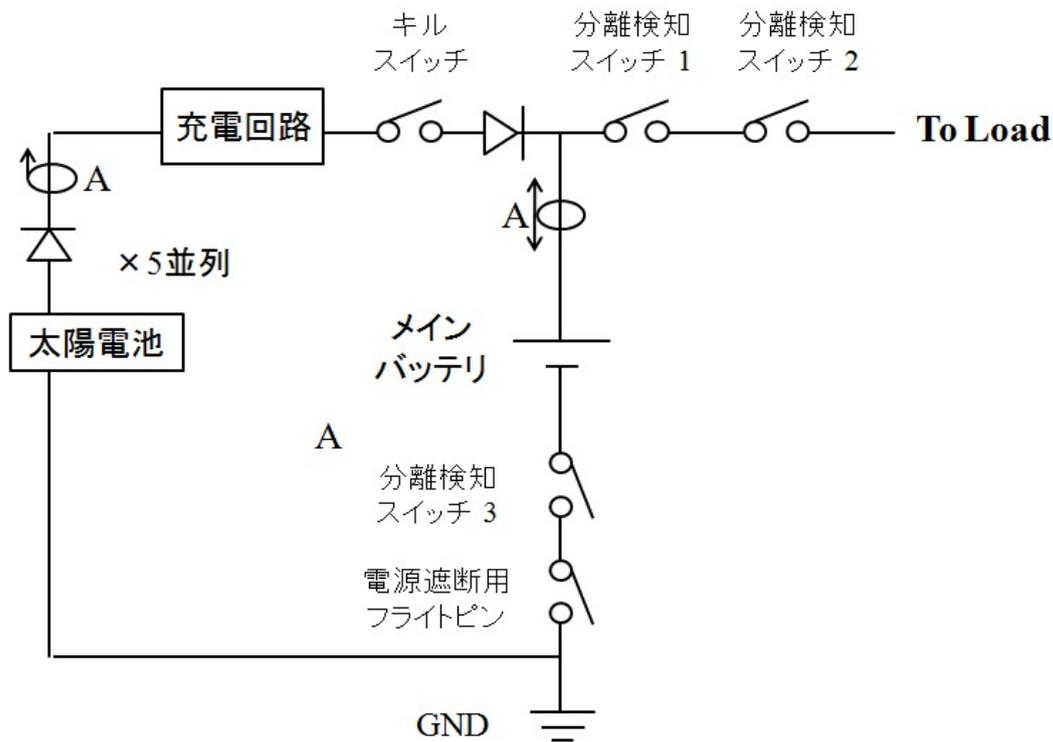


図 2.3.4-1 分離検知スイッチ設置箇所

Fig 2.3.4-1 Location of separation check switch

分離検知スイッチの回路を図 2.3.4-2 に示す。分離検知スイッチはホット側に設置した 1, 2 とリターン側に設置した 3 では設計が異なる。分離検知スイッチ 1, 2 は P 型 MOSFET と機械式スイッチで構成し、分離スイッチ 3 は機械式スイッチのみで構成している。打ち上げ前、機械式スイッチは衛星分離機構に押しつけられ開放状態になり、全ての分離検知スイッチは OFF 状態となり、衛星に電力は供給されない。衛星分離時に押しつけられていた機械式スイッチが外れ、短絡状態になることで全ての分離検知スイッチが ON になり衛星に電力が供給される。このとき分離検知スイッチ 1, 2 は機械式スイッチが短絡することで 100kΩ 抵抗に電流が流れ、P 型 MOSFET のゲートドレイン電圧が発生し MOSFET が ON 状態になる。P 型 MOSFET のゲート部に設

置している $1k\Omega$ 抵抗は MOSFET のゲートソースの短絡故障モード対策である。MOSFET は開放故障を考慮し 2 並列にしたが、どちらか一方の MOSFET ゲートソース間が短絡故障するとゲートドレイン電圧低下により 2 並列のどちらの MOSFET も ON にならなくなる可能性がある。そのためゲート部に $1k\Omega$ 抵抗を設置し、最悪の場合でもバッテリー電圧の半分の電圧がゲート - ドレインに印加される（スレッシュホールド電圧は $0.8\sim 2V$ ）。

次に電界放射感受性解析について述べる。まず、外部へ露出した機械式スイッチへの配線をダイポールアンテナ（ L ：長さ $20cm$ ）と見立て、 $V=E\times L\div\pi$ なる電圧が誘起すると仮定する。ここで H2A 相乗り副衛星ユーザーズマニュアルの電界放射特性より $155\text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}=50\text{ V}/\text{m}$ から最大約 3.18 V の電圧が配線に印加されることになる。この場合、P 型 MOSFET のスレッシュホールド電圧値を上回る。そこで、下図の位置にローパスフィルタ（LPF）を設けた。フィルタは抵抗が $1k\Omega$ 、キャパシタが $0.2\mu\text{F}$ のものを使用することで、 20 dB 以上減衰させることができ、最大印加電圧が 0.318 V となり感受性をなくした。

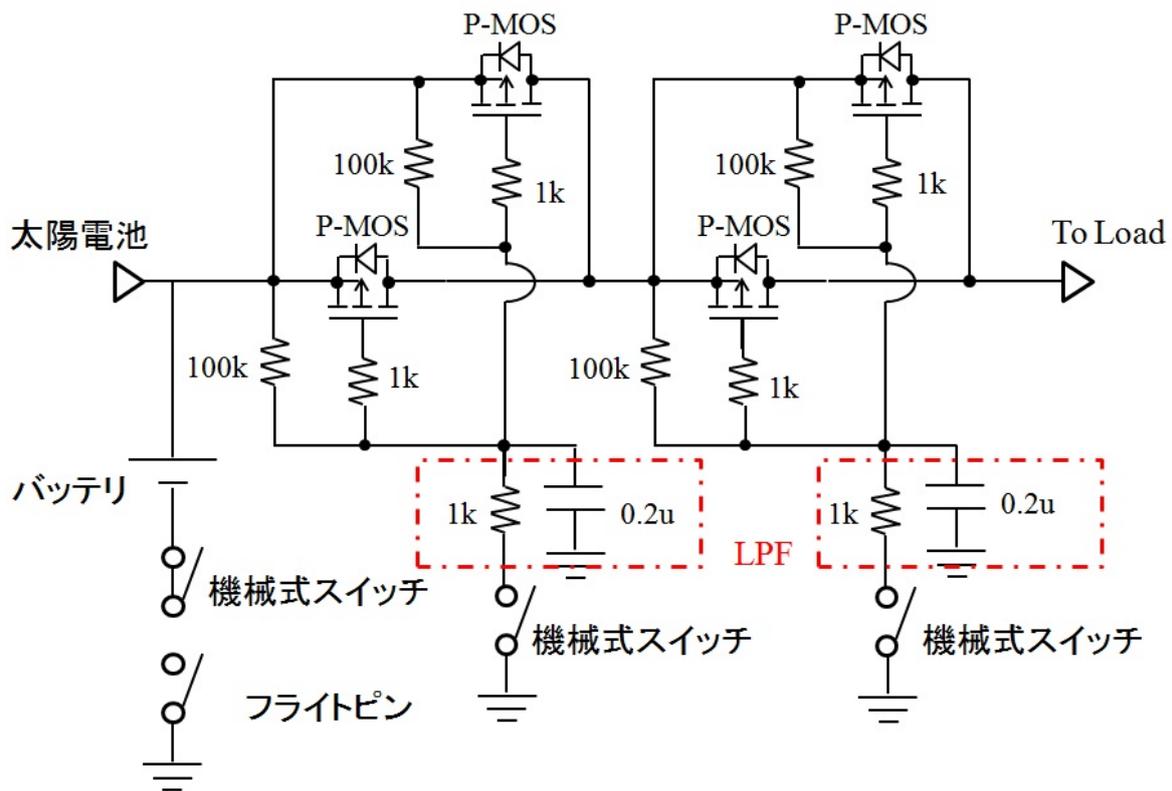


図 2.3.4-2 分離検知スイッチ回路図

Fig 2.3.4-2 Circuit of separation check switch

次に機械式スイッチの詳細について述べる。機械式スイッチの写真を図 2.3.4-3 に示す。下図の左が機械式スイッチ全体写真で右側がケーブル接続写真である。機械式

スイッチへのケーブルの接続は半田付けで行い、半田部の上に熱収縮チューブ、さらにアラルダイト（接着剤）で強固に固めた。下図左側の赤矢印部が可動部でこの部分が分離面に接触する。その分離機構（PAF239M）とのインターフェースについて以下に述べる。

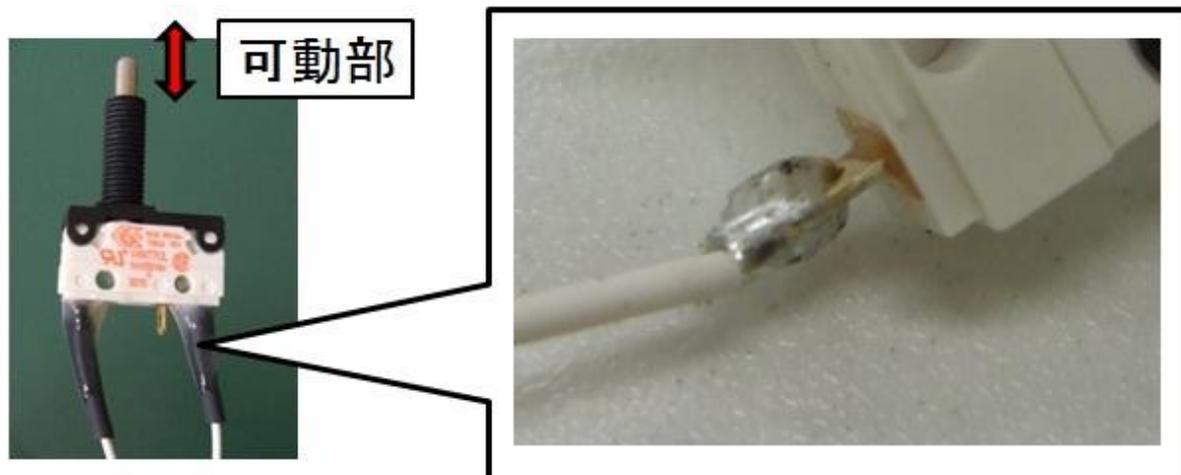


図 2.3.4-3 機械式スイッチ

Fig 2.3.4-3 Mechanical Switch

下図 2.3.4-4 にロケット側の PAF239M の図面を示す。赤の長方形部分は『 interface point of spacecraft separation switch 』と呼ばれ、ロケット側分離検知スイッチ受金具が設けられている。ここに対応する衛星底面部分に衛星側分離検知スイッチを取り付けることで PAF239M からの分離を検知する。

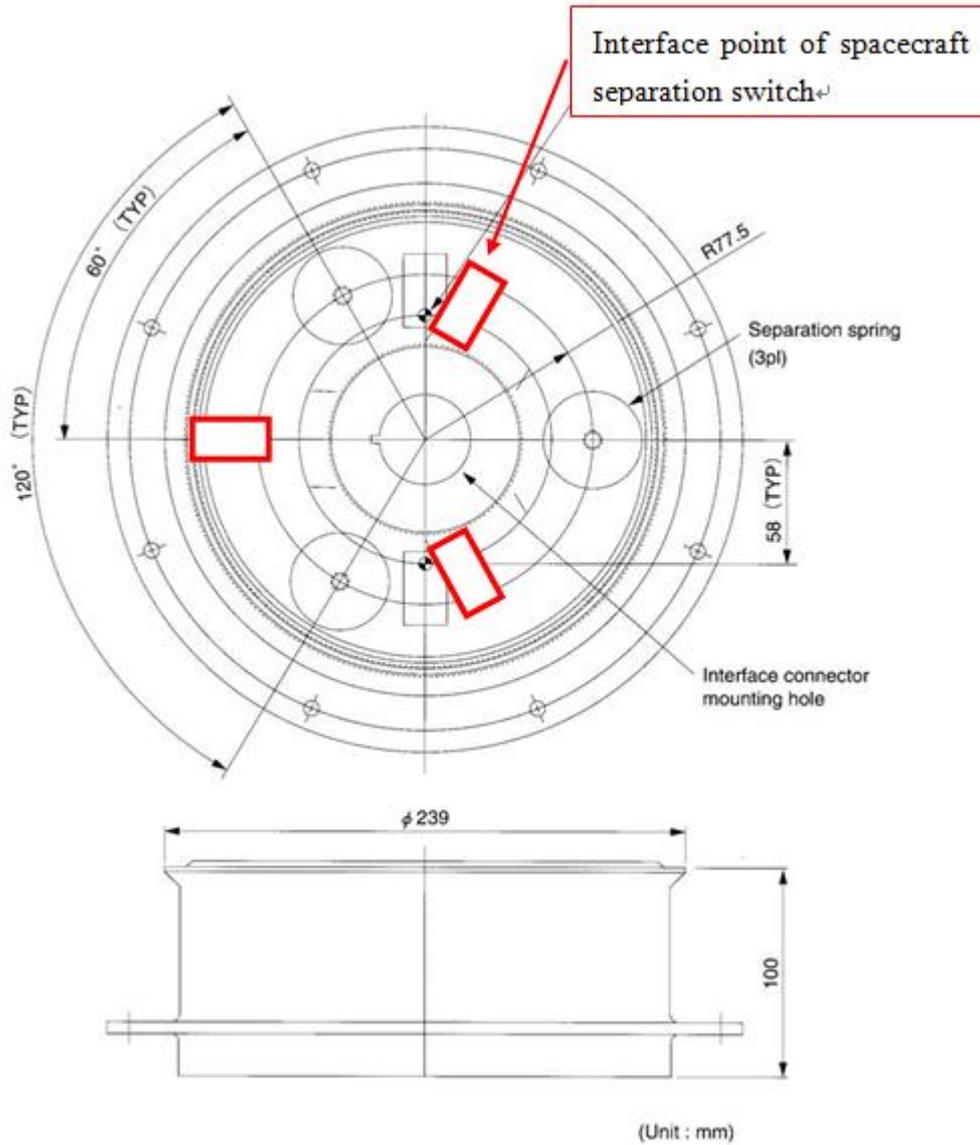


図 2.3.4-4 ロケット側 PAF239M
Fig 2.3.4-4 PAF239M (side of rocket)

図 2.3.4-5 に示すように、衛星側に PAF239M の分離部分（黄色部分）が残る。その高さが 50mm あるため機械式スイッチを図 2.3.4-6 のようなブロック状の補助具を用いて底上げしている。

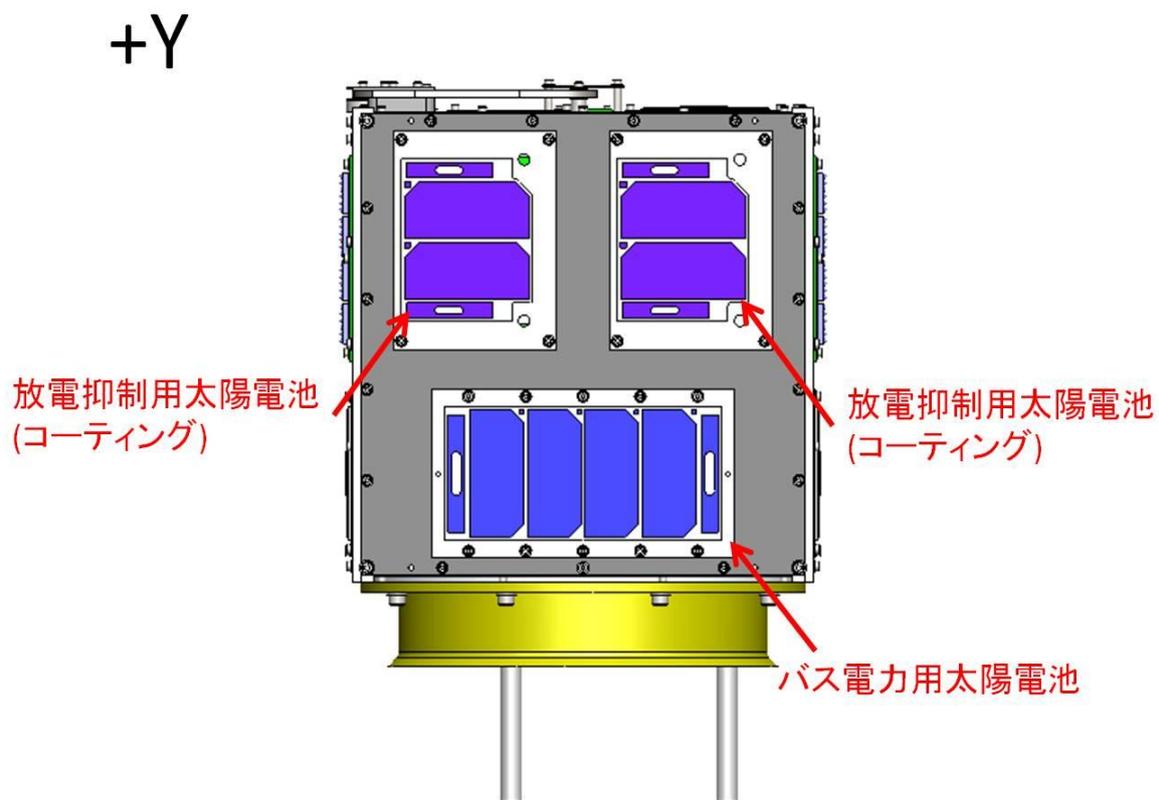


図 2.3.4-5 衛星側 PAF239M
Fig 2.3.4-5 PAF239M (side of satellite)

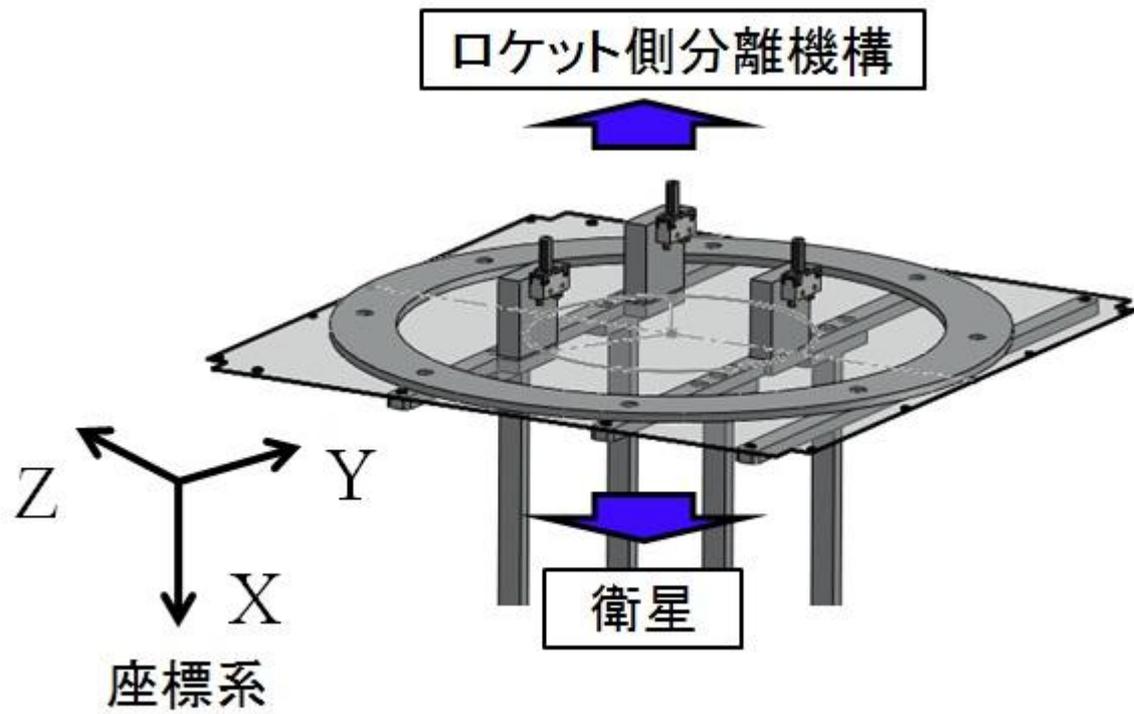


図 2.3.4-6 分離検知スイッチの取り付け図
Fig 2.3.4-6 Figure of installation of separation check switch

次に機械式スイッチの固定位置の算出方法を示す。まず、機械式スイッチの動作範囲を測定した。図 2.3.4-7 の黒い点線で示した範囲が機械式スイッチの可動域である。この距離を X と定義する。スイッチの動作領域としては、スイッチ先端を 0.8mm 押しこんだ状態、つまり X が 5.6mm まで押し込まれたときにスイッチが動作し、端子間が開放状態になる。機械式スイッチの取り付け位置は、PAF239M に設けられている機械式スイッチ受け金具の公差および振動による分離面の変動が起きてもチャタリングを起こさない位置に設置しなければならない。また、機械式スイッチが振動によって押し込まれた際に壊れないようマージンを設ける必要がある。以下にマージンの設け方と機械式スイッチ取り付け位置の決め方について述べる。

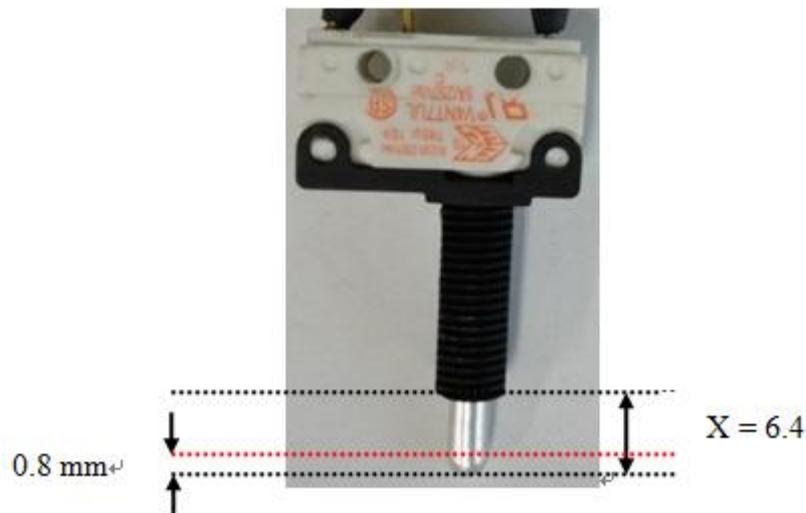


図 2.3.4-7 分離検知スイッチの可動領域と動作域

Fig 2.3.4-7 Movable region and operating range of separation check switch

図 2.3.4-8 に機械式スイッチと機械式スイッチ受け金具の位置関係と分離面について示す。図中の点線で示す部分が分離面である。この分離面より上側が衛星に残る部分、下側がロケットに残る部分である。そして、この分離面の公差が $\pm 0.5\text{mm}$ と記載されているのでこの値をマージンとして考慮する。また、ロケットの打ち上げ振動による分離面の変位を $\pm 1\text{mm}$ と仮定する。これらの条件のもと、分離検知スイッチの取り付け位置を決定する。

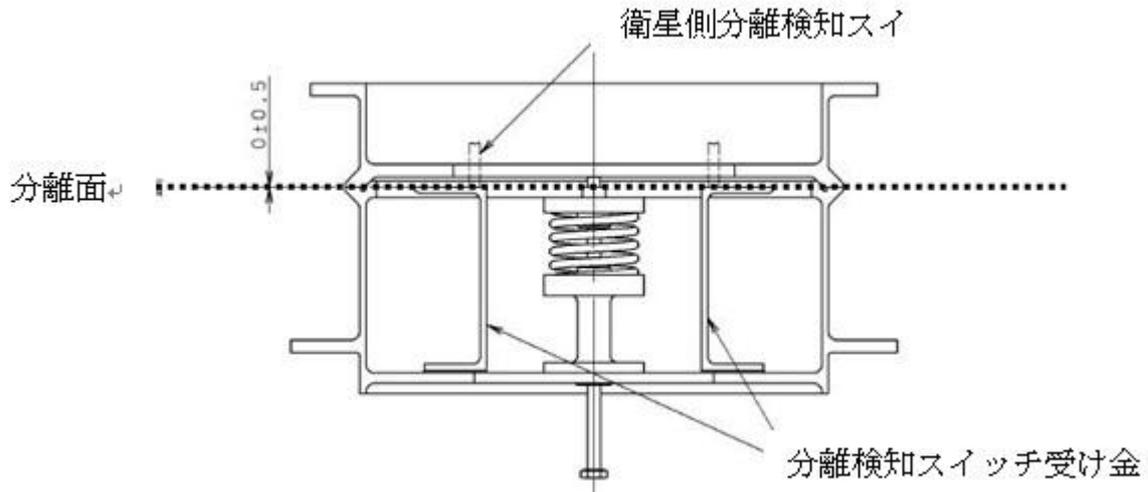


図 2.3.4-8 分離面の定義

Fig 2.3.4-8 Definition of separation plane

前述した公差を考慮して機械式スイッチの寸法を以下のように決めた。スイッチの可動部分の全長が 6.4mm であるので、そのうち 1.4mm をスイッチが動作する押し込みのマージンとする。また 1mm を押し込みによる機械的負荷を抑えるためのマージンとした。そして 6.4mm から上記のマージンを差し引いた寸法がこの分離検知スイッチが動作状態を保証できる領域である。この場合は図 2.3.4-9 より 4mm である。先ほど分離面の公差が $\pm 0.5\text{mm}$ 、振動による分離面の変位が $\pm 1\text{mm}$ と定義しているので 4mm の許容範囲でカバーできることが分かる。この 4mm の範囲内に衛星フレームの分離面がおさまることが必須条件であり、この条件を満たすように構造系開発者が機械式スイッチ固定ジグの設計を行った。このスイッチの許容範囲を最も有効に利用できる設計は、分離面からスイッチの先端が 3.4mm 出ている状態である。この状態だと分離面は許容範囲の 4mm のちょうど中央に位置し、分離スイッチ受け金具の公差および振動による分離面の変位の公差を合わせて $\pm 2\text{mm}$ まで許容できる設計である。

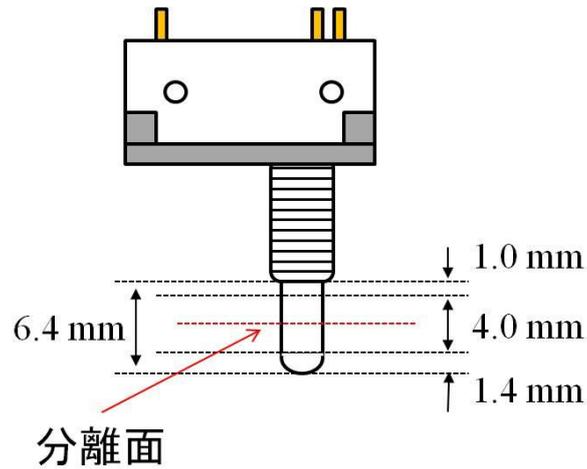


図 2.3.4-9 分離面の位置

Fig 2.3.4-9 Location of separation plane

機械式スイッチを上記の位置に固定したときの図面を以下に示す。鳳龍式号では衛星フレームと底面パネル間に厚さ 4mm のドーナツ状のスペーサーを挟んでいるため、この厚みも考慮した。図 2.3.4-11 に固定ジグの三面図を示す。

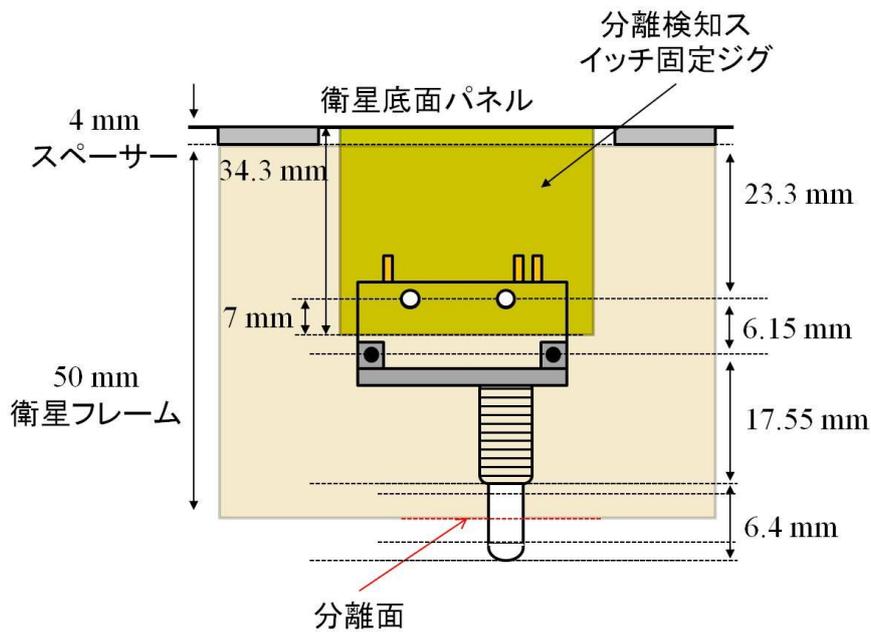


図 2.3.4-10 分離検知スイッチ機構詳細寸法

Fig 2.3.4-10 Detailed size of separation check switch

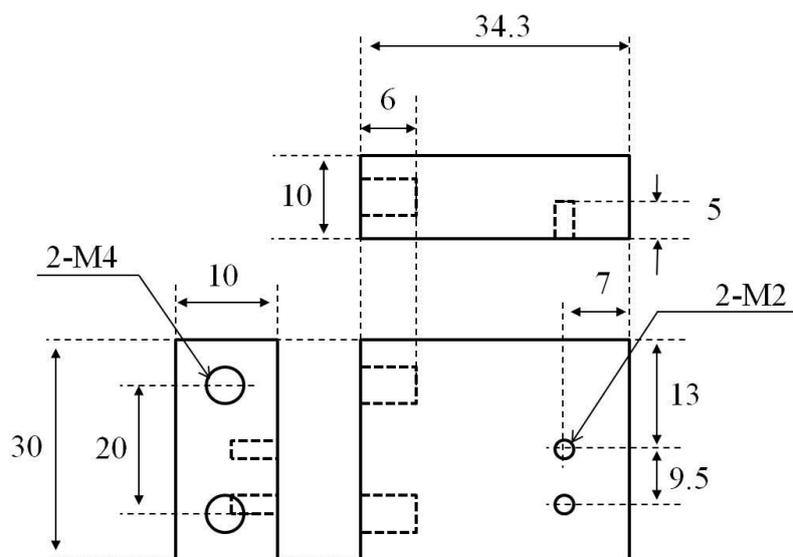


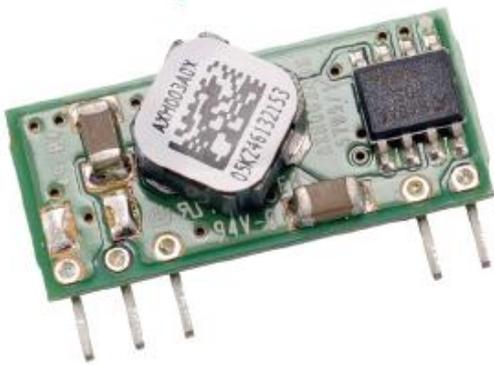
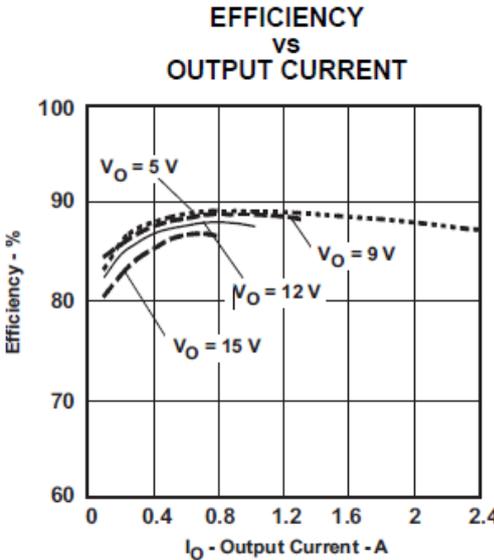
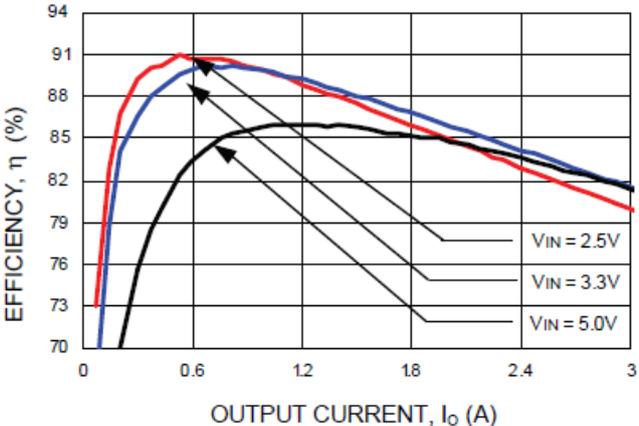
図 2.3.4-11 分離検知スイッチ固定ジグ

Fig 2.3.4-11 Jig for fixation of separation check switch

2.3.5 DC/DC コンバータ

DC/DC コンバータはバッテリー電圧から各系が要求する電圧で電力を供給するために設置した。各系が必要とする電源電圧は 3.3V と 5V である。そこで、バッテリー電圧から 3.3V と 5V を作るために降圧型と昇圧型の 2 種類の DC/DC コンバータを使用した。以下に DC/DC コンバータの概要を示す。コンバータはモジュールとして販売されていたものを使用することで開発期間を短縮した。

表 2.3.5-1 DC/DC コンバータ概要
Table 2.3.5-1 Summary of DCDC converter

| 降圧型 DC/DC コンバータ | 昇圧型 DC/DC コンバータ |
|---|--|
| メーカー : Lineage Power | メーカー : Texas Instruments |
| 型番 : AXH003A0XZ | 型番 : PTN04050 |
|  |  |
| 最低入力電圧 : 3.6V | 最低入力電圧 : 2.5V |
| 出力電圧 : 3.3V | 出力電圧 : 5V |
| 最大出力 : 9W | 最大出力 : 12W |
| 変換効率  | 変換効率  |

2.3.6 過電流防止回路

(i) 設計仕様

過電流防止回路は各系に供給する電力ライン上に設置し、負荷側でシングルイベントトラッチアップや地絡故障が発生した時に流れる過電流を遮断するためのものである。シングルイベントトラッチアップは高エネルギー粒子の放射線によって引き起こされる現象である。一般的に、LSI などの半導体デバイスには回路構成の組み合わせによってサイリスタに似た構造ができることがあり、その部分に高エネルギー粒子の放射線が当たると、過電流が流れることがある。この電流によりサイリスタが ON になった状態になり、最悪の場合、ハードウェアが永久故障に陥る可能性がある。これを防ぐために、過電流防止回路を開発した。下図に詳細回路を示す。設置箇所については、2.4 電力システムに示す。

過電流防止回路は下図抵抗 R の両端に 50mV 以上の電位差が発生したとき、N 型 MOSFET のゲート電圧を 0V に下げ、電力を遮断する。その応答速度は 1 u sec 以下である。一度過電流が発生し、50mV の閾値を上回ると 130 m sec の遅延の後に再起動させる。このとき、過電流が再び発生する場合は常に電力遮断と再起動を繰り返す。抵抗 R の両端電圧が 50mV 以下の時は N 型 MOSFET のゲート電圧を High (9V) に上げ、電力を負荷に供給する。回路中の 100k Ω はプルダウン抵抗、1k Ω は地絡故障対策用に設置している。電流検出用の抵抗 R は電力ラインごとに設定している。各電力ラインの遮断電流閾値をまとめた表を以下に示す。

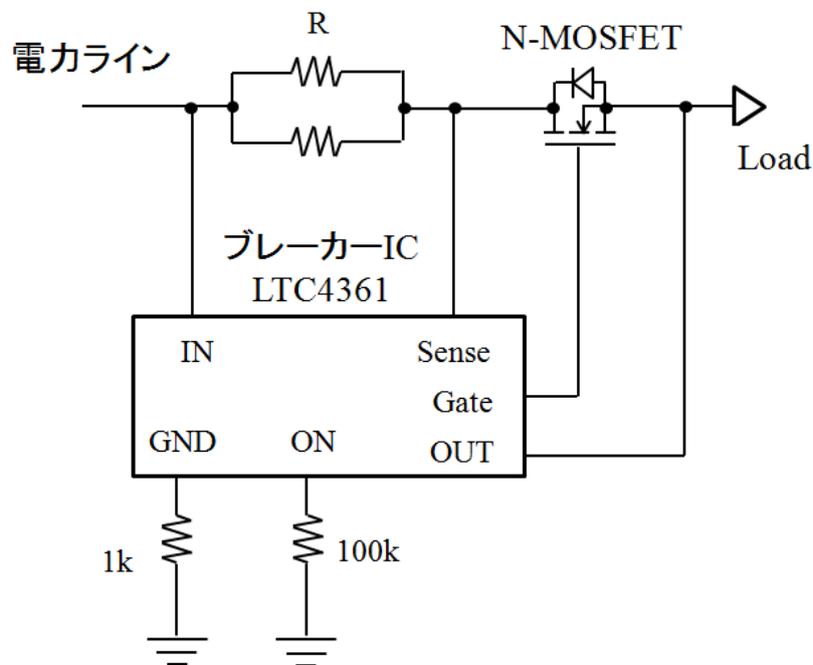


図 2.3.6-1 過電流防止回路詳細回路

Fig 2.3.6-1 Circuitry of circuit breaker

表 2.3.6-1 過電流防止回路の遮断電流閾値

Table 2.3.6-1 Threshold of circuit breaker

| 電源電圧 | 電力ライン名称 | 遮断閾値, A |
|---------|-------------|---------|
| 3.3V | PS-3.3-O | 0.5 |
| | PS-3.3-S | 0.75 |
| | PS-3.3-300V | 0.25 |
| 5V | PS-5-O | 0.5 |
| | PS-5-S | 1 |
| | PS-5-300V | 1.5 |
| | PS-5-ELF | 1 |
| | PS-5-COM | 2.5 |
| バッテリー電圧 | PS-BAT-COM | 1 |

バスシステムが使用している電力ライン PS-3.3-O と PS-5-O の過電流防止回路は上図で示した回路と異なる。電力ライン PS-5-O は電力遮断時に A/D コンバータ IC 内部の保護ダイオードで PS-3.3-O への電流リークがあるため同期させる必要がある。従って、上図の過電流防止回路に同期機能を付加している。同期は PS-5-O が電力遮断されたとき PS-3.3-O も遮断させるもので、その逆はない (PS-3.3-O が遮断になっても PS-5-O はそのままの状態)。PS-3.3-O と PS-5-O の過電流防止回路の詳細回路図を図 2.3.6-2 に示す。PS-5-O の N 型 MOSFET のソース電圧を抵抗で分圧し、コンパレータに入力している。コンパレータは 2.5V の抵抗分圧の基準電圧と比較し、PS-5-O 電力ラインが遮断されたときコンパレータ出力が High になり、PS-3.3-O の ON 端子が High になる。ON 端子が High になると PS-3.3-O の過電流防止回路は停止モードになり N 型 MOSFET を OFF 状態にし、PS-3.3-O 電力を遮断する。コンパレータの電力供給端子 (Vdd) に 470Ω の抵抗を挿入しているのは地絡故障対策である。

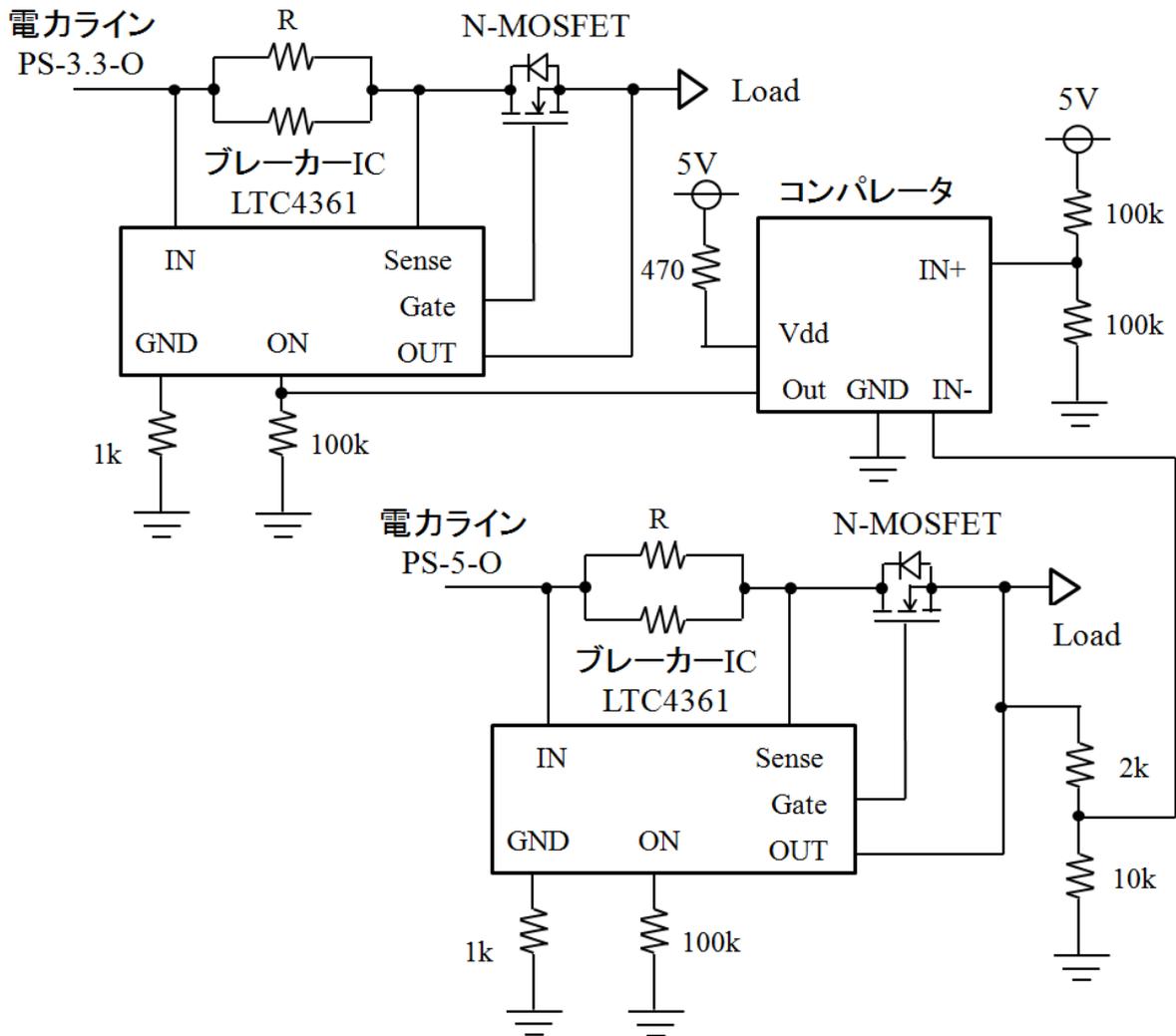


図 2.3.6-2 PS-3.3-O と PS-5-O の過電流防止回路

Fig 2.3.6-2 Circuit breaker for PS-3.3-O and PS-5-O

(ii) 設計検証

過電流防止回路の動作試験について以下に述べる。図 2.3.6-3 に試験回路を示す。直流電源から電源基板（バッテリー接続端子）に電力を供給し、インターフェースボードから出ている各電力ラインに可変抵抗を接続し、電流を変化させた。また、 1Ω 抵抗を用いて電流検出を行った。ここでは、同期あり（PS-3.3-O と PS-5-O）の過電流防止回路と同期なし（PS-5-S）の単体の過電流防止回路について動作試験を行った。

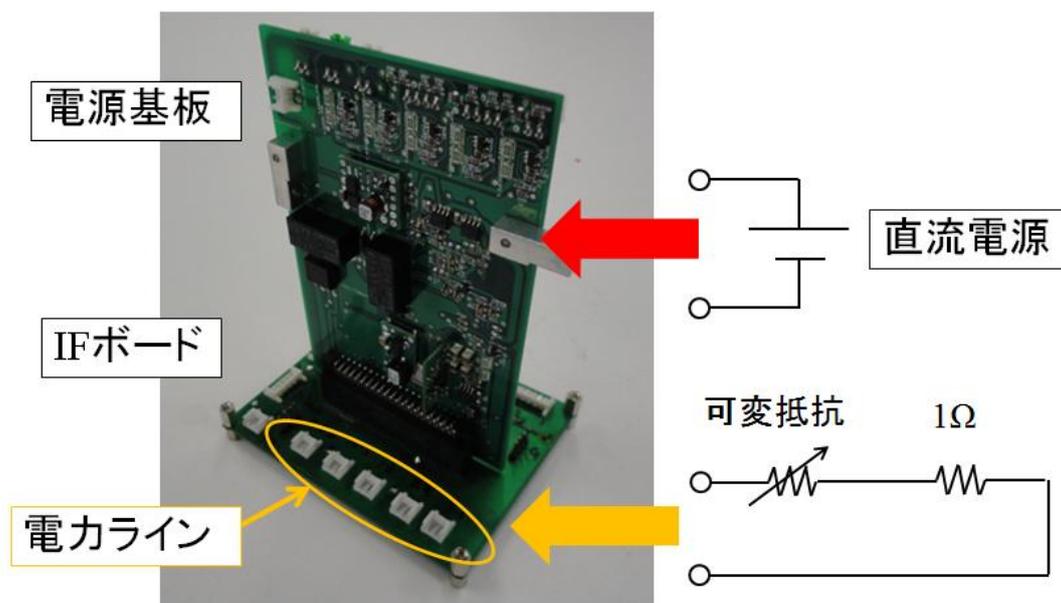


図 2.3.6-3 過電流防止回路動作試験回路図

Fig 2.3.6-3 Test circuit for operation of circuit breaker

図 2.3.6-4 に同期なし (PS-3.3-S) の過電流防止回路の試験結果を示す。設定どおり 0.75A 程度で電力ラインが遮断されていることがわかる。電力遮断中のノイズのような部分は、電力遮断後の再起動によるものである。また、負荷電流を下げると電力ラインが復旧していることがわかる。

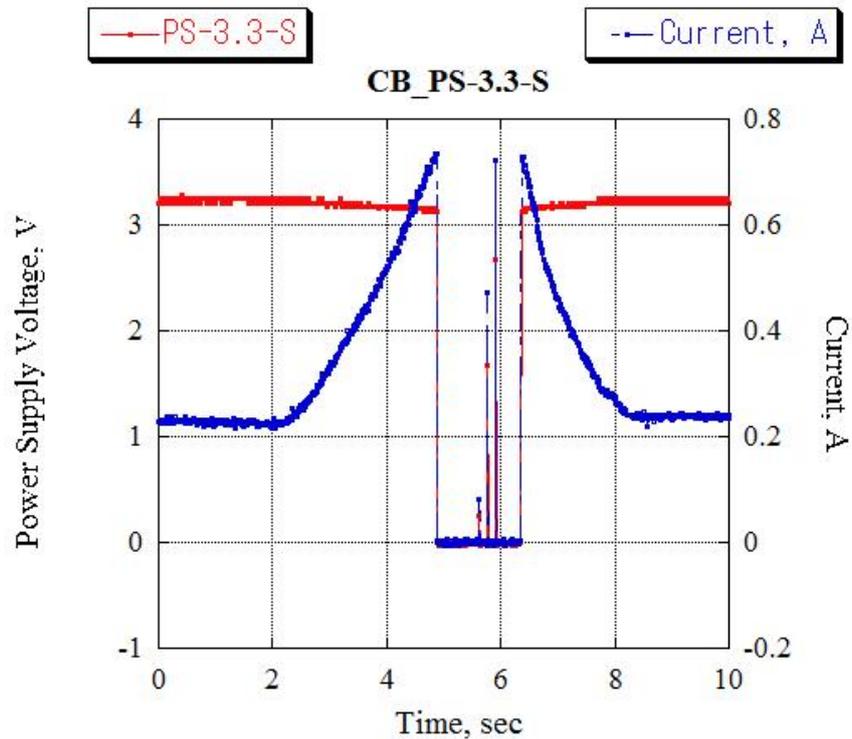


図 2.3.6-4 同期なし過電流防止回路動作 (PS-3.3-S)

Fig 2.3.6-4 Operation of circuit breaker without synchronization (PS-3.3-S)

図 2.3.6-5,6 に同期ありの過電流防止回路の動作結果を示す。図 2.3.6-5 は PS-3.3-O に負荷電流を流した時の動作結果である。このとき、負荷電流約 0.5A で PS-3.3-O 電力が遮断されていることがわかる。また、PS-5-O は電力が遮断されていないため、設計通りに動作していることがわかる。図 2.3.6-6 は PS-5-O に負荷電流を流した時の動作結果である。負荷電流約 0.5A で PS-5-O の電力が遮断され、同時に PS-3.3-O も電力を遮断しており、設計通りに動作していることがわかる。下図において負荷電流の増加によって供給電圧の低下が見られるが、計測点の取り方が悪かったため、線路インピーダンスが大きくなり、若干の電圧降下が発生した。

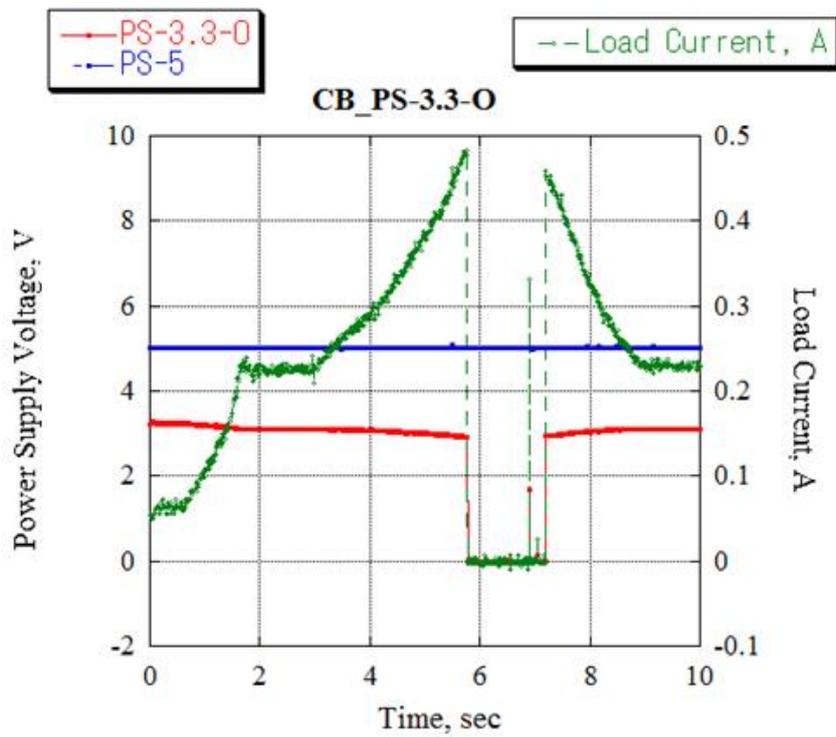


図 2.3.6-5 同期あり過電流防止回路動作 (PS-3.3-O に過電流)

Fig 2.3.6-5 Operation of circuit breaker with synchronization (over current to PS-3.3-S)

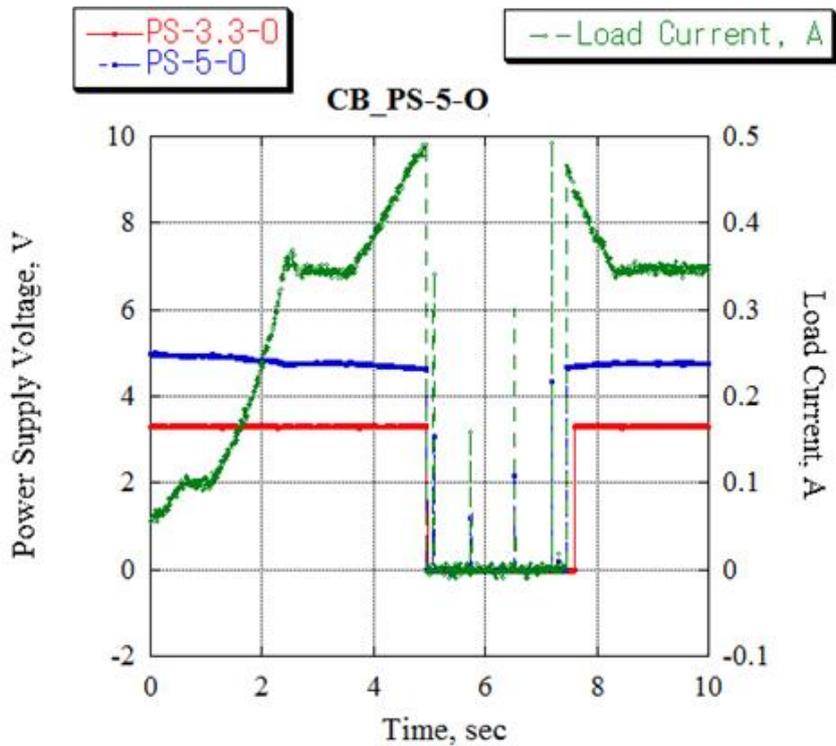


図 2.3.6-6 同期あり過電流防止回路動作 (PS-5-O に過電流)

Fig 2.3.6-6 Operation of circuit breaker with synchronization (over current to PS-5-S)

2.3.7 電流センサ

電流センサで計測する箇所は太陽電池出力電流×5面、3.3V用DC/DCコンバータ出力電流、5V用DC/DCコンバータ出力電流、バッテリー充放電電流である（設置箇所は図2.2-1 電源システムブロック図参照）。この中でバッテリー電流のみ、双方向の電流を計測する必要がある。そこで、電流センサは一方向電流センサと双方向電流センサを開発した。はじめに、一方向電流センサの設計仕様について述べる。

2.3.7.1 一方向電流センサ

図2.3.7-1に一方向電流センサの詳細回路を示す。一方向電流センサは 0.01Ω の抵抗の両端電圧を増幅し、その出力をA/Dコンバータに入力している。下図抵抗 R を用いて出力特性を変化させることができる。各電流センサで最適のレンジになるよう抵抗 R を調節している。電流センサICのGND端子とセンサ出力に設置している $1k\Omega$ 抵抗は地絡故障対策用である。図2.3.7-2に出力特性の例を示す。出力特性は線形である。

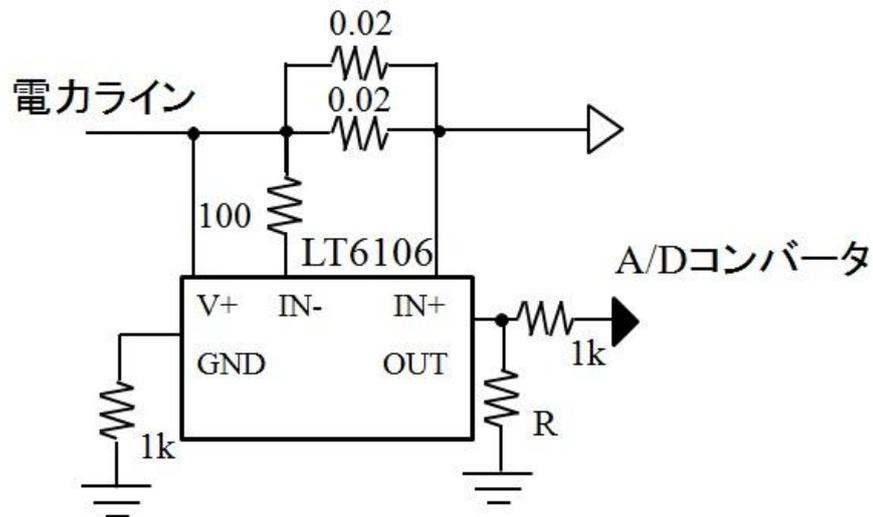


図 2.3.7-1 一方向電流センサ詳細回路

Fig 2.3.7-1 Circuitry of circuit of one-way current sensor

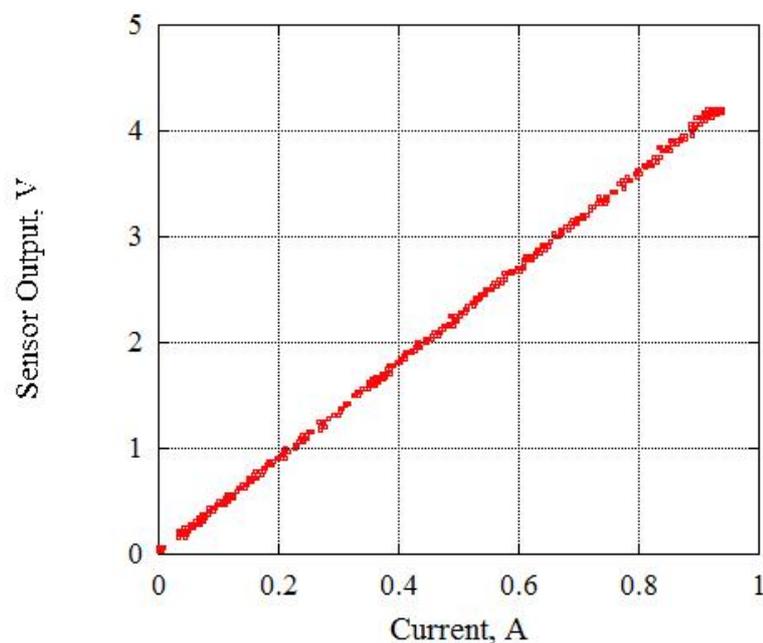


図 2.3.7-2 一方向電流センサ出力

Fig 2.3.7-2 Output of one-way current sensor

2.3.7.2 双方向電流センサ

図 2.3.7-3 に双方向電流センサの詳細回路を示す。双方向電流センサは $0.01\ \Omega$ の抵抗の両端電圧を増幅し、その出力を A/D コンバータに入力している。下図の $101\text{k}\ \Omega$ 抵抗を用いて出力特性を設定している。電流センサ IC の GND 端子とセンサ出力に設置している $1\text{k}\ \Omega$ 抵抗は地絡故障対策用である。また、 $0.05\ \mu\text{F}$ のキャパシタは出力の安定化のために設置している。図 2.3.7-4 に出力特性の例を示す。出力特性は線形である。バッテリー電圧の変化によってサチュレーションする出力電圧が変化するため注意が必要である（バッテリー電圧と一緒にデータを見ればわかる）。

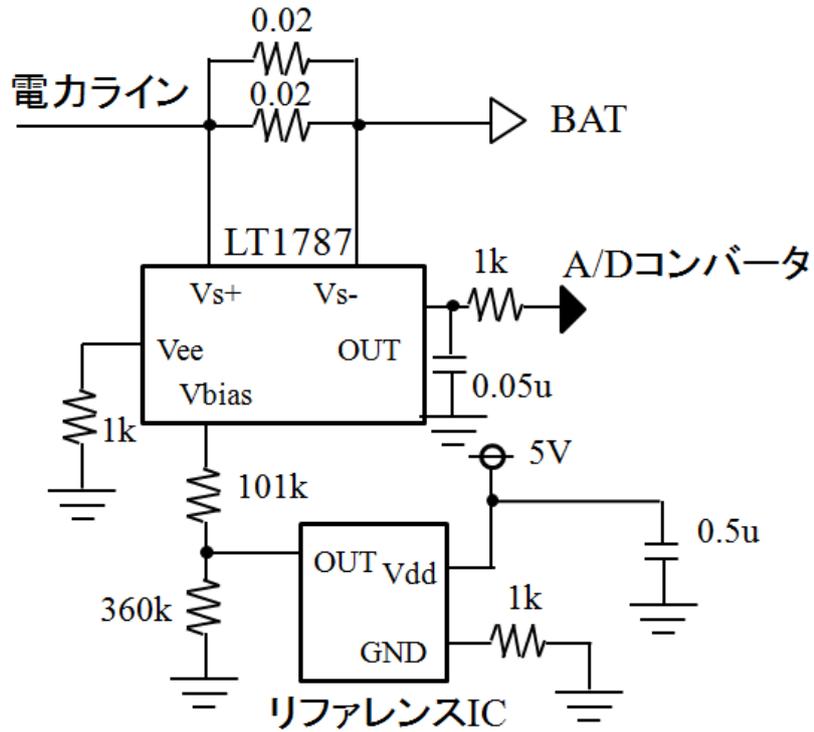


図 2.3.7-3 双方向電流センサ詳細回路

Fig 2.3.7-3 Circuitry of circuit of bidirectional current sensor

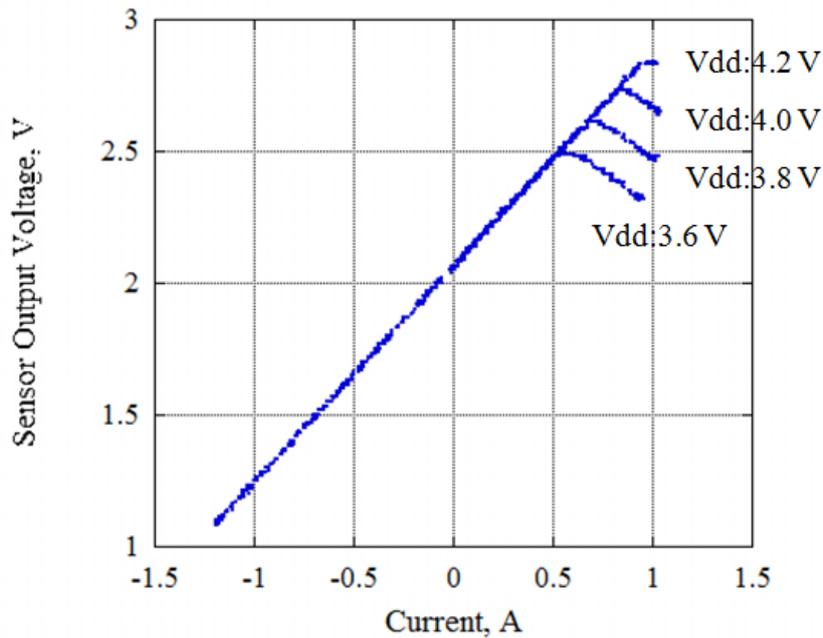


図 2.3.7-4 双方向電流センサ出力

Fig 2.3.7-4 Output of bidirectional current sensor

2.4 電力系統

鳳龍式号機の電力系統を図 2.4-1 に示す。電力系統は主にバス系と各ミッション系で分けている。例えば、OBC 系（バス系）と通信系（バス系）で使用する 3.3V の電力ラインは同じであるが、ミッションで使用する 3.3V の電力ラインは別である。これは、過電流防止回路の発動閾値の設定を電力ライン毎に個別に行うためと、ミッション系の地絡故障時の電力ライン停止による影響を小さくするためである。

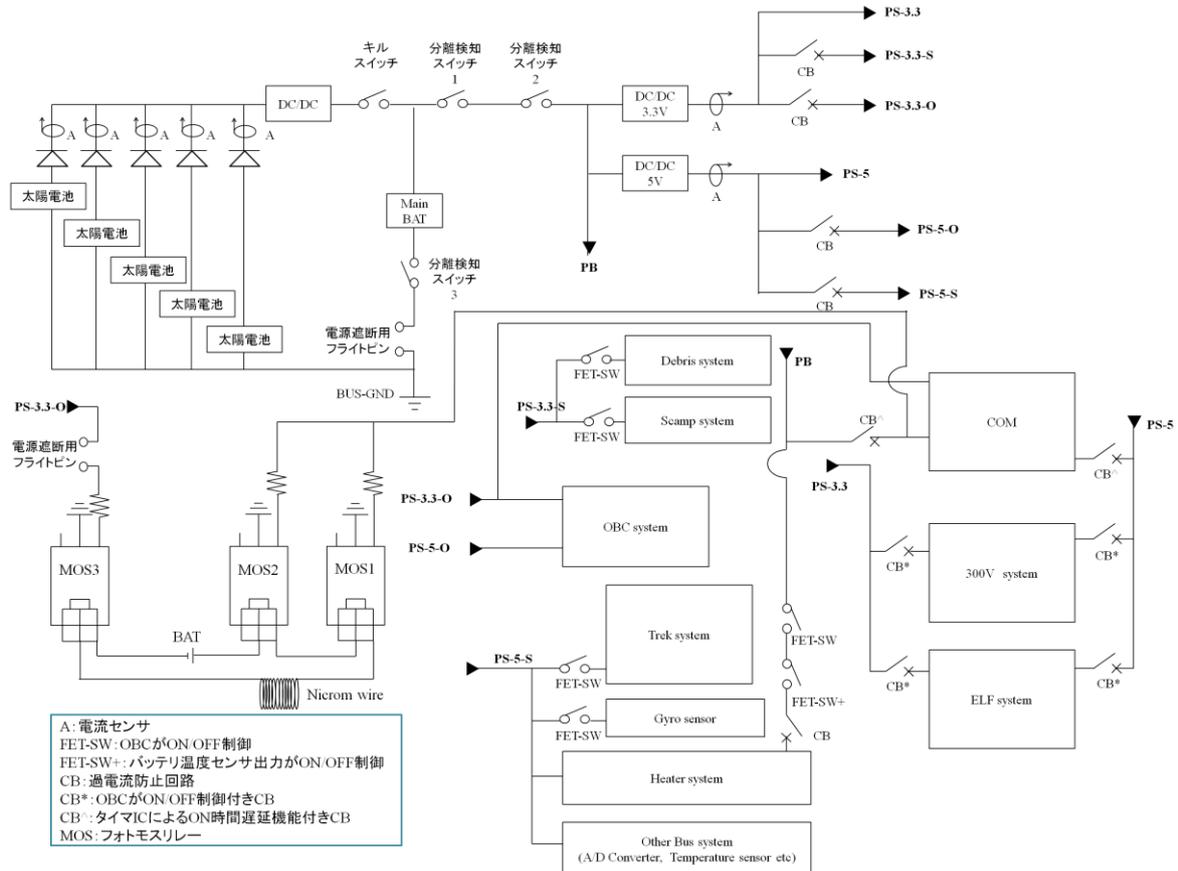


図 2.4-1 電力系統図

Fig 2.4-1 Power system diagram

2.5 テレメトリデータ

電源系で取得するテレメトリデータをまとめた表を以下に示す。キルスイッチ以外は OBC 系の A/D コンバータで計測しており、その分解能は 8 bit である。また、A/D コンバータの基準電圧は ADC1 : 4.096V, ADC2 : 5V であるため、計測精度はそれぞれ ADC1 : 16 mV, ADC2 : 20mV である。キルスイッチはデジタル入力ポートにテレメトリを接続し、OBC (3.3V 駆動 H8 マイコン) は信号を High 又は Low で検出する。キルスイッチのテレメトリは High : 3.2V, Low : 0.06V を出力する。

表 2.5-1 電源系テレメトリデータ
Table 2.5-1 Telemetry data of power system

| 名称 | 信号概要 | 接続先 |
|------------------------|--------------|------------------------------|
| キルスイッチ 1 テレメトリ | デジタル I/O | Main H8 |
| キルスイッチ 2 テレメトリ | | Com H8 |
| 基準電圧 | 4.096 V 基準電圧 | ADC2-CH 2 |
| バッテリー電圧 | アナログ電圧 | ADC 2-CH 3 ADC5-CH 5 (予備) |
| +Y 面太陽電池電圧 | | ADC 2-CH 4 |
| -Y 面太陽電池電圧 | | ADC 2-CH 5 |
| +Z 面太陽電池電圧 | | ADC 2-CH 6 |
| -Z 面太陽電池電圧 | | ADC 2-CH 7 |
| +X 面太陽電池電圧 | | ADC 2-CH 8 |
| +X 面太陽電池電流 | | ADC 1-CH 1 |
| +Y 面太陽電池電流 | | ADC 1-CH 2 |
| -Y 面太陽電池電流 | | ADC 1-CH 3 |
| +Z 面太陽電池電流 | | ADC 1-CH 4 |
| -Z 面太陽電池電流 | | ADC 1-CH 5 |
| バッテリー電流 | | ADC 1-CH 6 ADC5-CH 6 (予備) |
| 3.3V 用 DC/DC コンバータ出力電流 | | ADC 1-CH 7 |
| 5V 用 DC/DC コンバータ出力電流 | | ADC 1-CH 8 |
| バッテリー温度センサ 1 | | ADC4-CH 2 ADC5-CH 2 (予備) |
| バッテリー温度センサ 2 | | ADC4-CH 8 ADC5-CH 3 (予備) |

2.6 外部インターフェース

電源系の外部インターフェースは衛星+X面（上面）の68ピンコネクタとJSTコネクタから出ている。一覧を表2.6-1に示す。これらの端子を用いて以下のことを行うことができる。

- ・メインバッテリー充電
- ・衛星の外部電源駆動
- ・振動・衝撃試験時のチャタリング検出
- ・インヒビット確認（分離検知スイッチの健全性確認）
- ・衛星電源OFF状態でのキルスイッチ状態確認
- ・3.3V, 5VDC/DCコンバータの電圧確認と衛星外部使用
- ・フライトピンでの衛星の電源管理

表 2.6-1 電源系外部インターフェース一覧

Table 2.6-1 External interface of power system

| 名称 | コネクタ | PIN 番号 | ライン名 | 詳細 |
|------------------|------------|-----------------------------------|----------|--|
| POWER-SW | JST - 2pin | 図に記載 | PBSW-3 | バッテリー電力の ON/OFF |
| | | | GND | |
| Chattering | JST - 5pin | | M-SW1 | 1. 振動試験時のチャタリング検出で使用 2. インヒビット確認用 (PB-, PBSW-3) |
| | | | M-SW2 | |
| | | | GND | |
| | | | PBSW-3 | |
| | | | PB- | |
| Output Connector | 68pin コネクタ | 1~4,35~38 | PBSW-1 | 1. メインバッテリー充電ライン (+) 2. インヒビット確認用 |
| | | 16~19, 50~54 | PB- | メインバッテリー充電ライン (-) |
| | | 26~29, 60~63 | PB | 外部電源動作用ライン (+) |
| | | 8 | PS-3.3-O | 衛星 3.3V 電力ライン |
| | | 42 | PS-5-S | 衛星 5V 電力ライン |
| | | 7 | Kill-C-M | キルスイッチテレメトリ (main 側) |
| | | 41 | Kill-C-C | キルスイッチテレメトリ (Com 側) |
| | | 43 | PBSW-2# | インヒビット確認用端子 |
| | | 44 | PBSW-3# | |
| | | 5,6,20,21,31~34,39,40,55~57,65~68 | GND | 衛星 GND |

図 2.6-1 に外部コネクタ設置箇所を示す。図中の黄色で示したコネクタは JST コネクタ、黒で示したコネクタが 68 ピンのコネクタである。

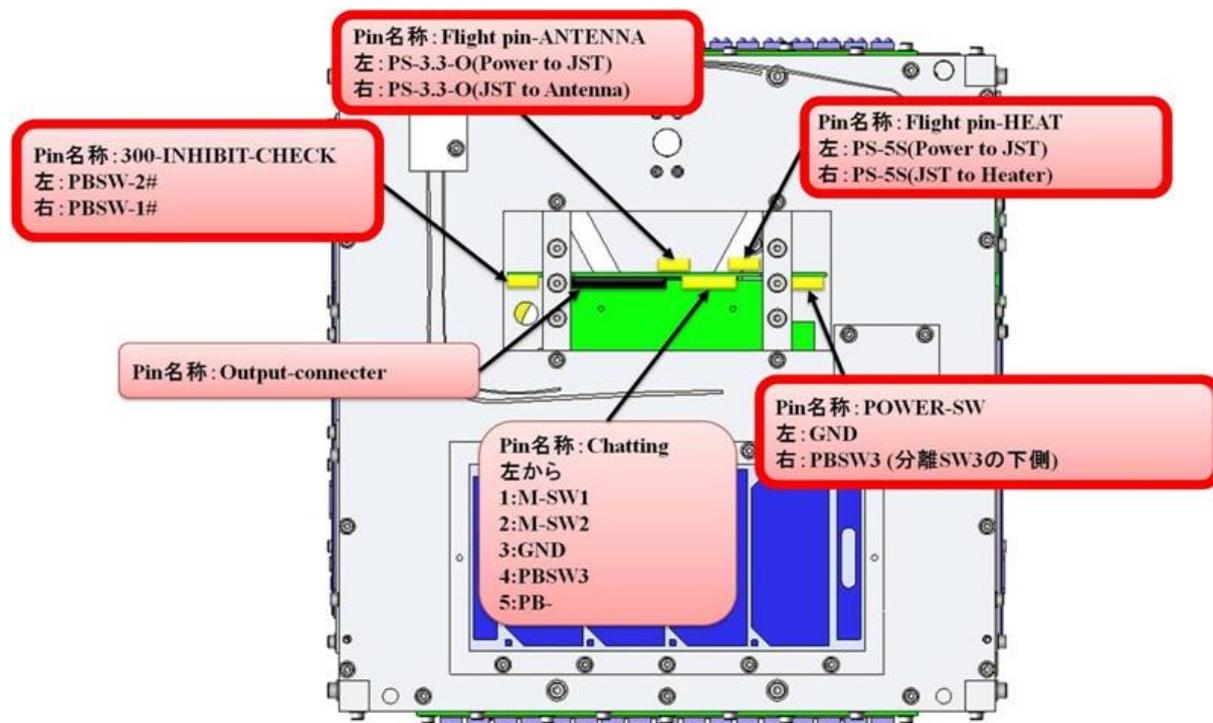


図 2.6-1 外部コネクタ設置箇所

Fig 2.6-1 Location of external connector

2.7 熱解析への電源システム設計のフィードバック

鳳龍式号機の電源システムはシリーズ方式を採用しているため、バッテリー残量の変化によって太陽電池の発電効率が変化する（図 2.7-1）。そのため、この変化が衛星の熱解析にどの程度影響するかを調べた。熱解析は衛星の熱設計者に依頼した。

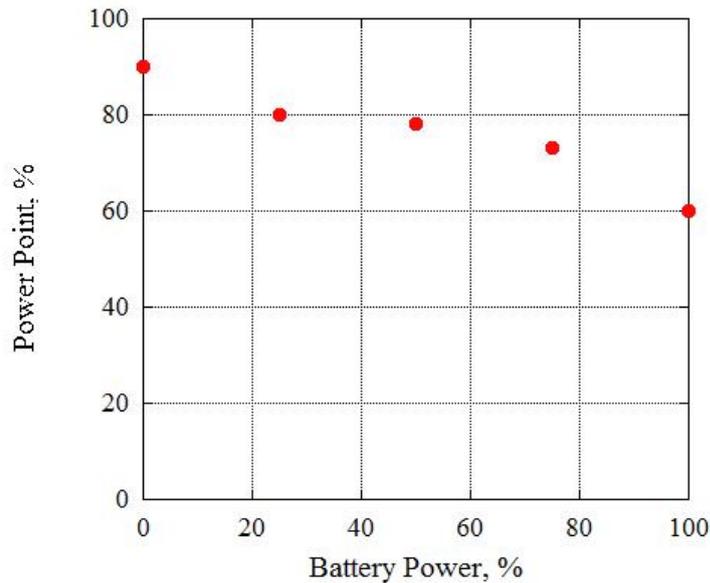


図 2.7-1 太陽電池の発電点効率 - バッテリー残量の関係

Fig 2.7-1 Relationship between power generations of SC and remaining battery

以下にバッテリー、電源基板の発電点効率 60%と 90%時の最低・最高温度解析結果を示す。バッテリー満充電になり、発電点効率が 60%になると電源基板とバッテリー温度は上昇する傾向にあることがわかる。また、発電点効率変動による温度変化は非常に小さいことがわかる。これは、衛星表面積に占めるバス系太陽電池面積が小さいからである。もし、衛星外面パネルの大部分を太陽電池が占めた場合、温度差はもっと大きくなると考えられる。鳳龍式号機の場合、発電点効率の変化に伴う温度変化が非常に小さいことを確認することができた。

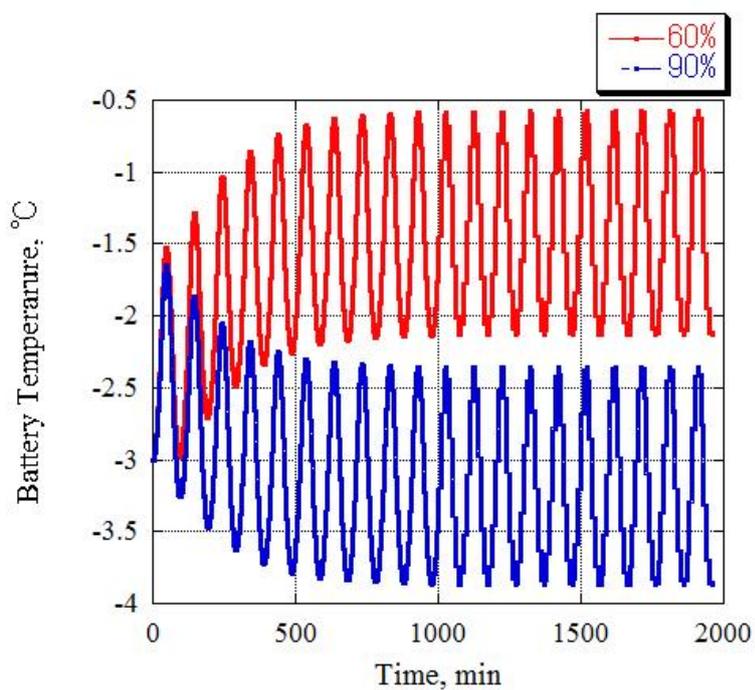


図 2.7-2 バッテリ最低温度解析値比較

Fig 2.7-2 Comparison of lowest temperature analysis of battery

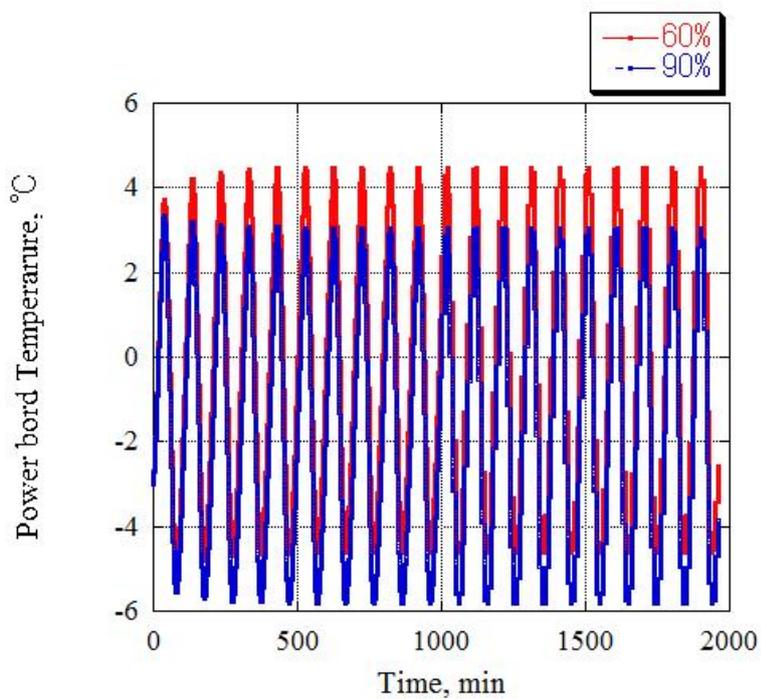


図 2.7-3 電源基板最低温度解析値比較

Fig 2.7-3 Comparison of lowest temperature analysis of power board

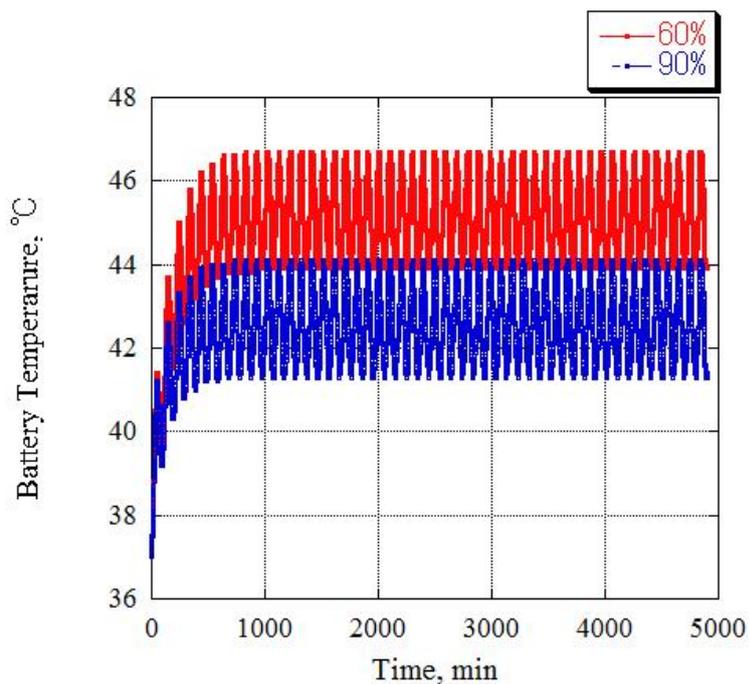


図 2.7-4 バッテリ最高温度解析値比較

Fig 2.7-4 Comparison of highest temperature analysis of battery

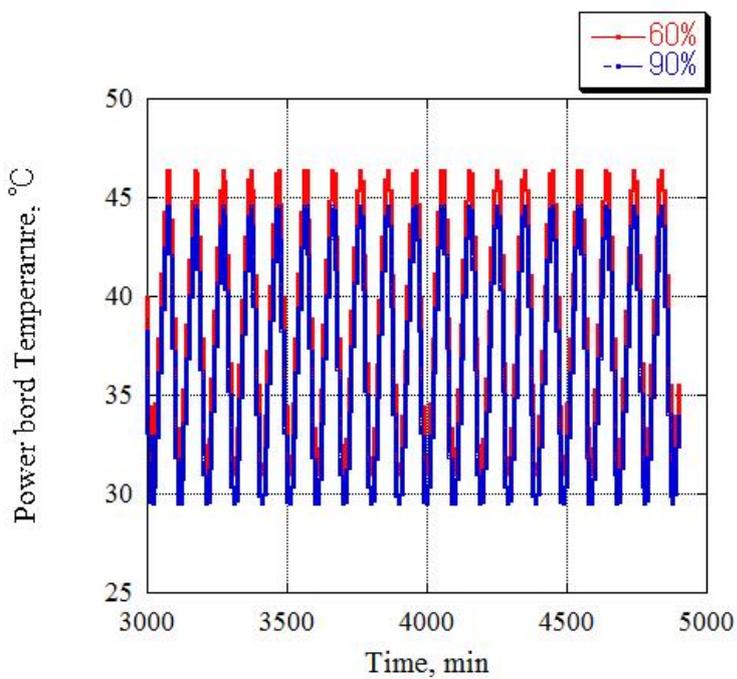


図 2.7-5 電源基板最高温度解析値比較

Fig 2.7-5 Comparison of highest temperature analysis of power board

2.8 フライト品検査

フライト品検査は実際に打ち上げる衛星（フライトモデル）の組み立ての健全性を確認する試験である。試験手順と検証結果を以下に示す。

◆ バッテリー絶縁チェック

【検査手順】

- ① PBSW3 と GND、PB-と GND の絶縁をテスターで確認する

【評価】

- － PBSW3 と GND、PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上である。

| 結果 | 抵抗値 (PBSW3 と GND) | 抵抗値 (PB-と GND) |
|--|----------------------|-------------------|
| PBSW3 と GND、PB-と GND の抵抗値が 10kΩ 以上であることを確認した | Over Lange | Over Lange |
| 検証 | ○ | |

◆ 【Power-SW】フライトピン・分離検知スイッチ・メインバッテリー接続チェック・インヒビット確認

【検査手順】

- ① 全てのバス系太陽電池への光を遮光する。
- ② 【Power-SW】フライトピンが挿入されていない状態で分離検知スイッチの3つの機械式スイッチ接続部が開放状態（OFF 状態）であることを確認する。
- ③ インヒビットチェック用回路を用いて、外部コネクタのインヒビットチェック端子電圧を確認する。
- ④ 【Power-SW】フライトピンが挿入されていない状態で、分離検知スイッチの3つの機械式スイッチ接続部にそれぞれフライトピンを挿入し短絡し（ON 状態にし）、電源が入らないことを確認する。
※PAF が付いているので、+Z 面から電源基板の分離検知スイッチの機械式スイッチ接続端子を短絡・開放することで対応する。
- ⑤ ④で挿入した分離検知スイッチの機械式スイッチのフライトピンを全て（3 つ）外す。
- ⑥ テスターで【Power-SW】フライトピン（JST メスコネクタ両端）の導通チェックをする。
- ⑦ 【Power-SW】フライトピンを挿入する。
- ⑧ 分離検知スイッチの3つの機械式スイッチ接続部にそれぞれフライトピンを挿入し短絡し（ON 状態にし）、電源が入ることを確認する。

【評価】

- ◆ 【Power-SW】 フライトピン接続チェック
- 【Power-SW】 フライトピンが挿入されていない状態で分離検知スイッチを 3 つ共 ON しても衛星の電源が入らない。
- 【Power-SW】 フライトピンが挿入されている状態で分離検知スイッチを 3 つ共 ON したときのみ衛星の電源が入る。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

- ◆ 分離検知スイッチ接続チェック
- 分離検知スイッチ 3 つを全て ON した場合のみ衛星の電源が入る。
※ここでは機械式スイッチの操作ができないため、機械式スイッチ部をフライトピンで代用。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

- ◆ メインバッテリー接続チェック
- 【Power-SW】 フライトピンが挿入され、分離検知スイッチが 3 つとも ON になった時、衛星の電源が入り OBC が外部接続 PC に衛星状態を出力する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

- ◆ インヒビット確認

分離検知スイッチ 1 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 A 端子と検出器+端子、B 端子と-端子をケーブルで接続し検出器の 1k Ω 抵抗の両端電圧をテスターで計測する。計測電圧値が 150mV 以下であればインヒビットが健全であると判断する。(MOSFET のドレイン遮断電流が最大-10 μ A であるため)

| | |
|----|------|
| 結果 | 28mV |
| 検証 | ○ |

分離検知スイッチ 2 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 B 端子と検出器+端子、C 端子と-端子をケーブルで接続し検出器の 1k Ω 抵抗の両端電圧をテスターで計測する。計測電圧値が 100mV 以下であればインヒビットが健全であると判断する。

| | |
|----|-------|
| 結果 | 29 mV |
| 検証 | ○ |

分離検知スイッチ 3 の検査

- 図 3 と図 4 の衛星側 D 端子と E 端子の両端をテスターで導通チェックを行う。導通していなければ健全であると判断する。(PFM での検査ではスイッチ 3 に MOSFET を用いているため上記のスイッチ 1、2 と同様の方法で検査を行う)

| | |
|----|------------|
| 結果 | Over Lange |
| 検証 | ○ |

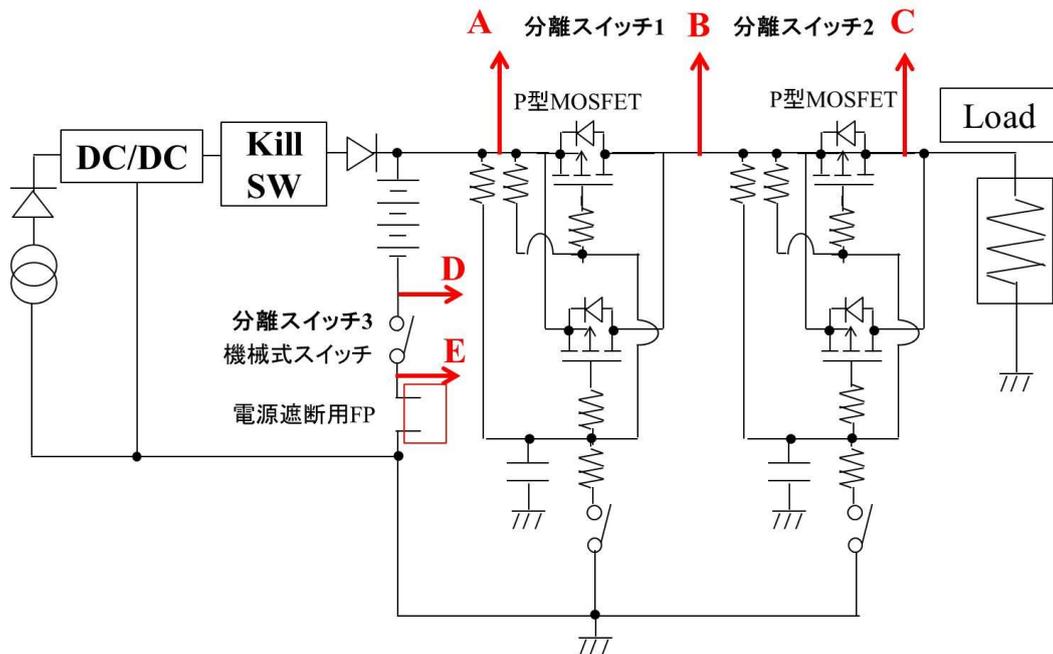


図 2.8-1 分離検知スイッチ外部端子

Fig 2.8-1 External pin of separation check switch

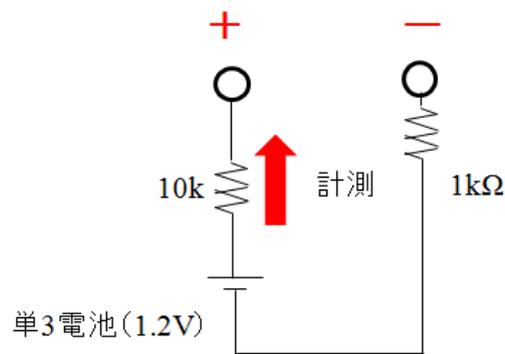


図 2.8-2 インヒビット確認回路

Fig 2.8-2 Inhibit check circuit

- ◆ キルスイッチ動作・バス系太陽電池接続・電流センサ動作・バッテリー充電回路動作チェック

『Power-SW』フライトピンは挿入された状態

【検査手順】

※キルスイッチは2つあり、H8 Main と Com でそれぞれ制御する。

※衛星はバッテリー駆動状態。

- ① OBC でキルスイッチを制御できる状態にする。
- ② 外部コネクタから 2 つのキルスイッチテレメトリをテスター測定器で確認する。
(High : キルスイッチ OFF Low : キルスイッチ ON (太陽電池電力遮断))

- ③ キルスイッチを2つとも ON にする。
- ④ 外部コネクタから2つのキルスイッチテレメトリをテスター測定器で確認する。
(High : キルスイッチ OFF、Low : キルスイッチ ON (太陽電池電力遮断))
- ⑤ キルスイッチを2つとも OFF にする。
- ⑥ 外部コネクタから2つのキルスイッチテレメトリをテスター測定器で確認する。
(High : キルスイッチ OFF、Low : キルスイッチ ON (太陽電池電力遮断))
- ⑦ キルスイッチを2つとも ON にする。
- ⑧ 外部コネクタから2つのキルスイッチテレメトリをテスター測定器で確認する。
(High : キルスイッチ OFF、Low : キルスイッチ ON (太陽電池電力遮断))
- ⑨ OBC 出力データのバッテリー電圧・電流、太陽電池電圧・電流をモニタリングできる状態にする。
- ⑩ 任意のバス系太陽電池にハロゲンランプで光を照射し、その面の太陽電池電圧値が 4.2V 程度、太陽電池電流センサ出力値が 0.5V 以下、バッテリー電圧・出力電流が変化しないことを OBC モニタリングデータにより確認する。
- ⑪ 全ての太陽電池において上記手順⑩を行い、キルスイッチの電力遮断の健全性を確認する。また、太陽電池の電圧計測値の妥当性を確認する。
- ⑫ OBC でキルスイッチを2つとも OFF にする。
- ⑬ 衛星各面のバス系太陽電池にハロゲンランプで光を照射し、その面の太陽電池電流センサ出力値の上昇と太陽電池電圧上昇を OBC モニタリングデータにより確認する。また、バッテリー電圧の上昇とバッテリー充電電流の上昇を確認する。
- ⑭ ハロゲンランプと太陽電池距離を離し、太陽電池電圧・電流、バッテリー電圧・電流センサ出力が下がることを確認する。
- ⑮ 全ての太陽電池において上記手順⑩～⑪を繰り返す(※全太陽電池同様の検査を行う)。
上記確認によりキルスイッチ動作、キルスイッチ電力遮断、太陽電池電圧・電流センサ、バッテリー電圧・電流センサの正常動作を確認。

【評価】

以下に OBC で取得したデータを示す。「光源なし」は蛍光灯の光のみの状態である。キルスイッチが ON の時は電力が遮断されているため、光源が「近」状態においてキルスイッチ OFF 状態・光源「近」と比べ太陽電池電圧は高くなる。加えて、バッテリー電圧・電流に変化がないことを確認することで電力断能力を確認できる。このとき(キルスイッチ ON、光源「近」、太陽電池電流はコンバータ消費分だけ上昇する。キルスイッチ OFF の時は太陽電池電力から消費電力を引いた電力がバッテリーに充電される。充電動作は、光源「近」と「遠」を比較し、「近」状態の方が太陽電池電圧・電流、バッテリー電圧・電流が大きくなることで確認できる。上記より、同時に太陽電池電圧センサ、電流センサ、バッテリー電圧センサ、電流センサの健全性も確認できる。

| X 面 | | ADC 値 | | | |
|-----|----------|-------|-------|---------|---------|
| 光源 | キルスイッチ状態 | SA 電圧 | SA 電流 | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| なし | ON | 320 | 2 | 3075 | 1951 |
| 近 | ON | 3345 | 368 | 3076 | 1951 |
| 近 | OFF | 2386 | 1447 | 3122 | 2135 |
| 遠 | OFF | 295 | 1 | 3077 | 1954 |

| Y 面 | | ADC 値 | | | |
|-----|----------|-------|-------|---------|---------|
| 光源 | キルスイッチ状態 | SA 電圧 | SA 電流 | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| なし | ON | 404 | 1 | 3069 | 1913 |
| 近 | ON | 3403 | 365 | 3079 | 1951 |
| 近 | OFF | 2377 | 1359 | 3128 | 2128 |
| 遠 | OFF | 1695 | 160 | 3077 | 1954 |

| -Y 面 | | ADC 値 | | | |
|------|----------|-------|-------|---------|---------|
| 光源 | キルスイッチ状態 | SA 電圧 | SA 電流 | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| なし | ON | 364 | 2 | 3073 | 1950 |
| 近 | ON | 3289 | 357 | 3074 | 1914 |
| 近 | OFF | 2349 | 1343 | 3124 | 2109 |
| 遠 | OFF | 1904 | 255 | 3087 | 1953 |

| Z 面 | | ADC 値 | | | |
|-----|----------|-------|-------|---------|---------|
| 光源 | キルスイッチ状態 | SA 電圧 | SA 電流 | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| なし | ON | 354 | 11 | 3244 | 1950 |
| 近 | ON | 3328 | 248 | 3243 | 1950 |
| 近 | OFF | 2463 | 1066 | 3309 | 2094 |
| 遠 | OFF | 1861 | 142 | 3286 | 2017 |

| -Z 面 | 光源 | キルスイッチ状態 | ADC 値 | | | |
|------|----|----------|-------|-------|---------|---------|
| | | | SA 電圧 | SA 電流 | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| | なし | ON | 310 | 2 | 3137 | 2016 |
| | 近 | ON | 3374 | 387 | 3093 | 1914 |
| | 近 | OFF | 2394 | 1400 | 3134 | 2112 |
| | 遠 | OFF | 1683 | 246 | 3087 | 1954 |

◆ キルスイッチ動作チェック

- キルスイッチが2つとも OBC の制御により任意に切り替えることができる。
- キルスイッチを2つとも ON にし電源を遮断した場合、太陽電池の発電電力を遮断できる。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ バス系太陽電池接続チェック

- ハロゲンランプ光を照射したとき、太陽電池電流センサの出力の ADC 値が上昇する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ 電流センサ動作チェック

太陽電池出力電流センサ

- 太陽電池に光を照射したとき、太陽電池電流の ADC 値が上昇する。
- 太陽電池の照射光を遠ざけたとき、太陽電池電流の ADC 値が下降する。

バッテリー電流センサ

- 太陽電池に光を照射したとき、バッテリー電流の ADC 値が上昇する。
- 太陽電池の照射光を遠ざけたとき、バッテリー電流の ADC 値が下降する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ 電圧センサ動作チェック

太陽電池電圧センサ

- 太陽電池に光を照射したとき、太陽電池電圧の ADC 値が上昇する。
- 太陽電池の照射光を遠ざけたとき、太陽電池電圧の ADC 値が下降する。

バッテリー電圧センサ (充電側動作)

- 太陽電池に光を照射したとき、バッテリー電圧の ADC 値が上昇する。
- 太陽電池の照射光を遠ざけたとき、バッテリー電圧の ADC 値が下降する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ バッテリー充電回路動作チェック

- 太陽電池に光を照射したとき、バッテリーに充電できる (バッテリー電圧の ADC 値が上昇、バッテリー電流センサの ADC 値の上昇)。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ DC/DC コンバータ出力電圧、DC/DC コンバータ電流センサ動作チェック

【検査手順】

※ここではまだセンサ動作を確認していないものをチェックする。

※衛星はバッテリー駆動状態

『Power-SW』フライトピンは挿入された状態

- ① 外部コネクタの 5V・3.3V 出力ピンを、テスター測定器を使い確認する。
- ② OBC 出力データのバッテリー電圧・電流センサ出力、5VDC/DC コンバータ電流センサ出力、3.3VDC/DC コンバータ電流センサ出力をモニタリングできる状態にする。
- ③ バッテリー電圧・電流、5V・3.3VDC/DC コンバータ電流の ADC 値を取得する。
- ④ 外部コネクタの電力ライン PS-3.3-O に可変抵抗 (20Ω) を接続し、3.3VDC/DC コンバータ電流センサ出力の ADC 値が上昇、バッテリー電圧 ADC 値が下降、バッテリー電流センサ出力の ADC 値が上昇することを確認する。
- ⑤ 接続していた可変抵抗を外す。
- ⑥ 外部コネクタの電力ライン PS-5-S に可変抵抗 (20Ω) を接続し、5VDC/DC コンバータ電流センサ出力の ADC 値が上昇、バッテリー電圧 ADC 値が下降、バッテリー電流センサ出力の ADC 値が上昇することを確認する。
- ⑦ 接続していた可変抵抗を外す。

【評価】

以下に OBC で取得したデータを示す。負荷を接続したとき、DC/DC コンバータ出力電流センサ値が上昇、バッテリー電圧・電流が下降すれば正常動作である。

| 3.3VDC/DC コンバータ | ADC 値 | | |
|--------------------|-----------------|---------|---------|
| | 3.3VDC/DC 電流センサ | バッテリー電圧 | バッテリー電流 |
| 負荷なし (衛星のみ) | 182 | 3066 | 1951 |
| 負荷 20Ω 接続 | 636 | 3046 | 1877 |

| 5VDC/DC コンバータ | ADC 値 | | |
|------------------|-------------------|---------|-------------|
| | 5VDC/DC 電流セン サ | バッテリー電圧 | バッテリー電 流 |
| 負荷なし（衛星の み） | 143 | 3074 | 1914 |
| 負荷 20Ω 接続 | 865 | 3018 | 1742 |

- ◆ バッテリ電圧センサ
- PS-3.3-O の負荷電流が大きくなるのに伴い、バッテリー電圧センサ ADC 値が下降する。
- PS-5-S の負荷電流が大きくなるに伴い、バッテリー電圧センサ ADC 値が下降する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

- ◆ バッテリ電流センサ（放電側動作）
- PS-3.3-O の負荷電流が大きくなるのに伴い、バッテリー電流センサ ADC 値が上昇する。
- PS-5-S の負荷電流が大きくなるに伴い、バッテリー電流センサ ADC 値が上昇する。
- 通常運用モードで動作中のバッテリー電流センサ出力 ADC 値が 1.850 ~ 1.950V 以内である。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

- ◆ DC/DC コンバータ出力電圧

3.3VDC/DC コンバータ

- テスター計測値が 3.135V~3.465V 以内である（±5%精度）。

5VDC/DC コンバータ

- テスター計測値が 4.75V~5.25V 以内である（±5%精度）。

| | |
|-----------|---------|
| 結果 | |
| 3.3VDC/DC | 3.259 V |
| 5VDC/DC | 5.00 V |
| 検証 | ○ |

- ◆ DC/DC コンバータ電流センサ

3.3VDC/DC コンバータ電流センサ

- PS-3.3-O の負荷電流が大きくなるのに伴い、3.3VDC/DC コンバータ出力電流センサ出力 ADC 値が上昇する。

5VDC/DC コンバータ電流センサ

- PS-5-S の負荷電流が大きくなるのに伴い、5VDC/DC コンバータ出力電流センサ出力 ADC 値が上昇する。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

◆ バッテリ補充電チェック・外部電源動作チェック

【検査手順】

- ① バス系太陽電池を遮光する。
- ② 分離検知スイッチの機械式スイッチ接続部のフライトピンを外し、分離検知スイッチを3つ共 OFF 状態にする。
- ③ 【Power-SW】 フライトピンを外す。
- ④ 外部コネクタのバッテリ充電端子に直流電源を接続する。
※バッテリから直流電源に電流が逆流しないよう直流電源出力を 0.1A、5.0V 出力状態にして接続する。
- ⑤ 直流電源が 0.1ACC モードになっていることを確認する。
- ⑥ 充電電流を徐々に上げ、0.5A にする。
- ⑦ このとき直流電源電圧が徐々に上昇することを確認する。
- ⑧ 直流電源を OFF にし、配線を取り外す。
- ⑨ 直流電源の設定を 3.8V の定電圧モードにする。(上限電流値を 1A に設定)
- ⑩ 直流電源を外部コネクタの外部電源動作ラインに接続する。
- ⑪ 直流電源を ON し、OBC 出力が外部 PC に表示されることを確認する。

【評価】

- ◆ 補充電動作チェック
 - フライトピンなし、分離検知スイッチすべて OFF 状態でバッテリに充電できる。直流電源電圧の上昇を確認できる。

| | |
|----|-------------------------------|
| 結果 | 約 2 分でバッテリ電圧 4.16 → 4.18V に上昇 |
| 検証 | ○ |

- ◆ 外部電源動作チェック
 - フライトピンなし、分離検知スイッチすべて OFF 状態で外部電源により衛星を起動させることができる。

| | |
|----|---|
| 検証 | ○ |
|----|---|

まとめ

電源系の分離検知スイッチの機械式スイッチ以外の正常組み上げを確認することができ、また電源システムは正常に動作していることが確認できた。