

第七章 総括

7.1 総括

本研究の目的は鳳龍式号機の電源システムを開発・検証することである。これを大きく4つの項目に分け、研究を行った。以下にこれらの項目別に総括を行う。

1. 設計要求を満たす電源システムを設計・製作する
2. 電源システムの検証（性能、地上試験）
3. 衛星の運用（データ取得、システム検証）
4. システム工学的設計開発手法の取得

1. 設計要求を満たす電源システムを設計・製作する

以下に設計要求に対する結果を示す。

A. 衛星の各システムへの安定した電力供給

太陽電池、バッテリー、充電回路、DC/DC コンバータを用いて、各システムが要求する電力を安定して供給できる電源システムを開発できた。また、電力収支もとれていることを電力計算・電力サイクル試験により確認することができた。

B. テレメトリデータの出力

一方向電流センサ、双方向電流センサ、太陽電池・バッテリー電圧センサを用いて、検証に必要である太陽電池電圧・電流、バッテリー電圧・電流、DC/DC コンバータ出力電流を計測できる電源システムを開発できた。

C. シングルイベントラッチアップ対策

過電流防止回路を用いて、電力ライン毎に閾値電流を設定することで、シングルイベントラッチアップによる過電流が流れた時、又は地絡故障時にその電力ラインを遮断できる電源システムを開発できた。

D. 3 カ月間の補充電なしでのバッテリー残量維持

バッテリーは自己放電量が小さいものに変更し、18~25°Cで4カ月放置しても約80%の残量を維持できることを検証した。

E. 衛星分離までコールドロンチを保持（3冗長）

3冗長かつ振動・衝撃環境下においてもコールドロンチを保持できる分離検知スイッチを開発できた。

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）

バッテリーの完全放電の手段として、太陽電池 - バッテリー間を開放し、発電電力を遮断するという方法を採用したキルスイッチを開発し、地上からのアップリンクコマンドにより発電電力を遮断できることを検証で来た。

G. 打ち上げ時の振動環境に耐える

QT レベル振動試験を EM、PFM 開発フェーズ、AT レベル振動試験を FM 開発フェーズで実施し、電源システム内の各コンポーネントが振動環境に構造的にも電気性能的にも耐えられることを検証できた。

H. 打ち上げ時の衝撃環境に耐える

QT レベル衝撃試験を EM、PFM 開発フェーズ、AT レベル衝撃試験を FM 開発フェーズで実施し、電源システム内の各コンポーネントが衝撃環境に構造的にも電気性能的にも耐えられることを検証できた。

I. 軌道上の熱真空環境に耐える

QT レベル熱真空試験を EM、PFM 開発フェーズ、AT レベル熱真空試験を FM 開発フェーズで実施し、電源システム内の各コンポーネントが熱真空環境に構造的にも電気性能的にも耐えられることを検証できた。

これら全ての設計要求を満たす電源システムをすることができた。

2. 電源システムの検証（性能、地上試験）

・ 電源システム性能

電源システムの各コンポーネントが衛星を組み上げた状態（フライト品）で正常に動作できることを検証した。

・ 地上試験（電力収支）

電力計算、各ミッションモードの消費電力量、軌道上の電力収支状態を模擬した電力サイクルを実施し、電力収支が十分であることを検証できた。また、各ミッションも安全に動作できるバッテリー残量を確保できていることも検証することができた。

3. 衛星の運用

衛星の運用については、打ち上げ時期の延期により実施することができなかった。従って、宇宙実証は今後の課題となるが、本研究では運用・電源システム実証の計画を立てることができた。

4. システム工学的設計開発手法の取得

衛星開発初期においてシステム工学を学び、それを取り入れながら開発を進めてきた。開発初期では、要求割り当て表（Requirements Allocation Sheet）を作成し、衛星設計要求からブレイクダウンした電源システムの設計要求や各系からの設計要求を管理しながら開発を行うことで設計・検証の漏れをなくすことができた。開発中期ではコンポーネントの新規設計や開発の途中での設計変更を行う際に、性能・スケジュール・信頼性のトレードオフや衛星の組み立て

工程を考慮した設計にすることの大切さを、身を持って学ぶことができた。また、不具合が発生した時には故障解析手法を取り入れ、原因の究明に役立った。このように、システム工学を学び、実際に取り入れた開発を行うことができた。

7.2 今後の課題

今後の課題として衛星納入までのタスクと衛星の運用、電源システムの高信頼化が挙げられる。以下に詳細を述べる。

1. 衛星射場搬入までのタスク

衛星射場搬入までの残りのタスクとして PAF 分離衝撃試験、ベーキング、End to End 試験を予定している。電源系として、PAF 分離衝撃試験後の衛星システムの健全性確認、ベーキング前後の衛星システムの健全性確認、End to End 試験では運用の模擬を行い、運用の練習を行わなければならない。また、電源系固有のタスクとして射場輸送直前にバッテリー補充電を行い満充電状態にしなければならない。可能であればメモリー効果対策として End to End 試験などで、バッテリーを使い切り、一度リセットした方が良い。

2. 衛星の運用

衛星の運用において電源系が行うことは、電源システム状態の監視、センサーデータの取得・解析、バッテリーヒーター制御 ON コマンド送信の可否、バッテリー残量からミッションモード移行のタイミング管理、運用終了時にはキルスイッチを ON にすることである。この中で特に重要なのはバッテリー状態の管理である。最も悪い状態はバッテリーが低温で残量が低いケースであり、この状態で誤って瞬時電力の大きいミッションを実行すると、バッテリー電圧低下により衛星全体のシステムが不安定動作し、最悪の場合復帰できなくなる可能性がある。この様な事を避けるために、衛星の CW ダウンリンクデータで常にバッテリー状態を監視し、状態を考慮しながら運用することが大切である。

3. 電源システムの高信頼化

本研究で鳳龍式号機の電源システムを開発し、今後のベースとなる電源システムを開発することができた。この電源システムは 1 点故障による地絡対策としてバイパスコンデンサを 2 直列にする、電流制限抵抗を各所に入れるといった対策を行っている。しかし、基本的にシングル系（一部のコンポーネントは冗長を組んでいる）で設計を行っているため、充電回路や DC/DC コンバータなどの重要なコンポーネントの故障時にはどうすることもできない。そこで 2 系統の発電・充電バスをつくり、耐放射線性能の高い MPU を電源システムに搭載する。MPU で故障検知を行い、負荷側の電力供給は双方のバス電力ラインを選択して使用できるシステムを組むと現電源システムより高信頼な電源

システムができると考える。また、バス電力ラインを3系統にするとさらに高信頼化することができるが、開発時間、検証試験コストが増大する。最終的には超小型衛星のメリットである短期開発・低コスト開発とのトレードオフを考慮し、バランスのとれた最善のシステムにするべきである。