

第7章 有人システム維持機能技術～電気・通信系技術

1. 序論

我国初の有人宇宙システム「きぼう」は、従来衛星とは異なり、長期間、人が生活するために高い信頼性と安全性が求められることから、システムが複雑かつ大規模である。また、多種多様な実験装置が出入りして運用されるため、実験装置が要求する電力と通信回線を考慮した柔軟的運用が必要となる。これを実現するためには、多忙な宇宙飛行士の手を煩わせることなく、容易に電力分配と通信トラフィックの管理が行え、かつ信頼性の高いアビオニクス機器で構成することが重要である。

本章では、「きぼう」開発において獲得した電気・通信系技術、すなわちアビオニクスの設計技術、および、それらを統合してシステムとして成立させるために実施したエンジニアリングについて報告する。

2. 電気・通信系の技術

「きぼう」を構成する電気・通信系は、電力系、情報データ伝送系（伝送レートに応じた低速、中速、高速の3種）、ビデオ系および音声系からなる。

衛星との大きな相違は、「きぼう」は大型有人宇宙機であること、長期間にわたり様々な実験装置を入れ替えて運用していくこと、故障時は修理・交換、そして時代のニーズに合わせてアップグレードしていくことを前

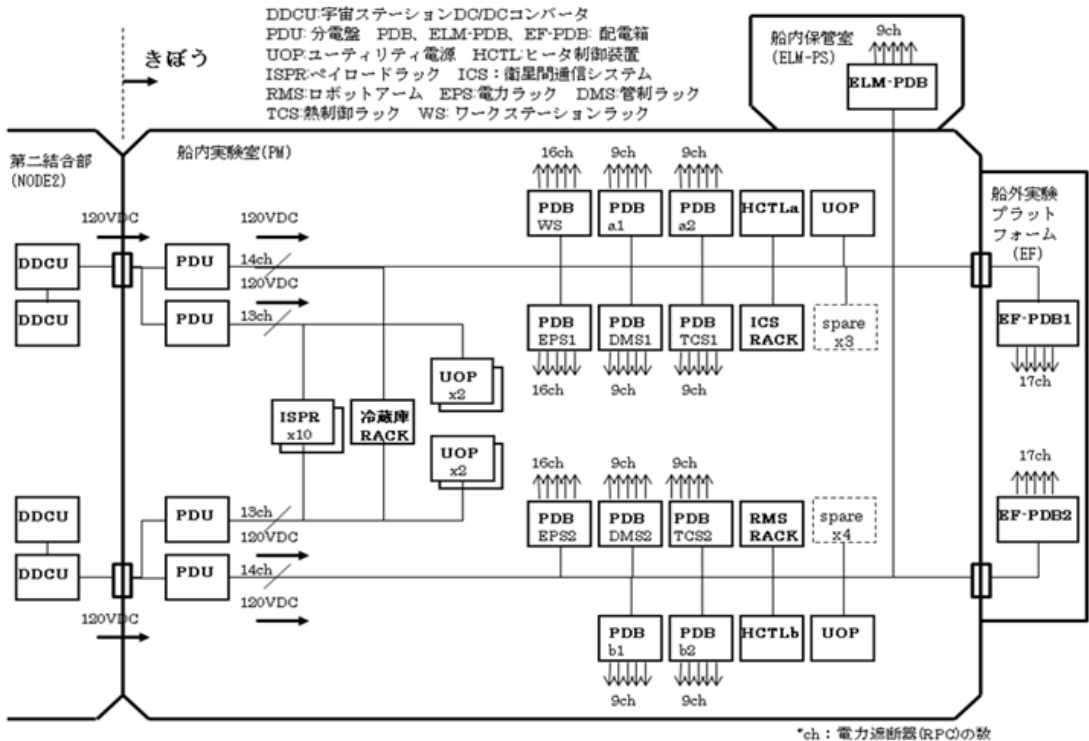
提とした宇宙機である点である。

「きぼう」の電気・通信系は、同時に多数の実験運用が可能な標準化されたインターフェース、冗長系統、安全化装置をもち、またアビオニクス機器は容易に交換が可能な設計としている。

2.1 電力系

「きぼう」の電力系は、国際宇宙ステーション（ISS）第二結合部のDC/DCコンバータ（DDCU）から、独立した直流120V・最大12.5kWを2系統引き込んでおり、システム機器および実験装置に分配する（第1図）。

直流120Vの電力系は従来衛星でも採用の前例がなかったため、「きぼう」の電力系を構成する分電盤（PDU）と配電箱（PDB）はいずれも、リレーではなく半導体（パワーMOSFET）スイッチを採用した限流遮断機能付きの電力遮断器を組み込んでおり、電力遮断器数は合計で200個を超える。これを、ISSの電力事情に応じて筑波宇宙センターから制御することにより、きめ細かな電力配分管理と実験運用計画の立案を可能とした。



第1図 「きぼう」の電力系

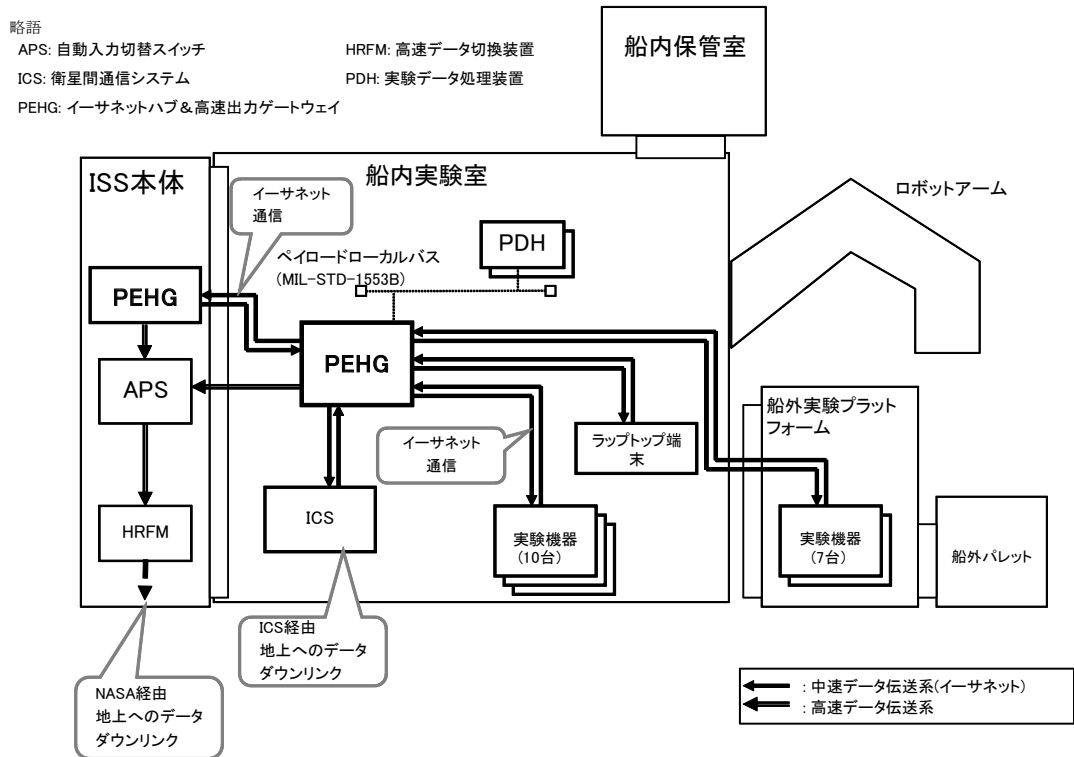
2.2 低速データ伝送系

低速データ伝送系(別名、監視制御系)は、システム機器の監視制御、および実験装置の実験データ通信の監視制御を行う(第2図)。

システム監視制御系は、「きぼう」の中央コンピュータ(JCP)の下に、米国規格の通信バスシステムである MIL-STD-1553B バス(以下、1553B バスという)を張り巡らしており、下流のコンピュータ、ラップトップ端末等と通信する。1553B バスは海外の航空機・人工衛星アビオニクスシステムとして実績があり、我が国で「きぼう」で初めて本格的に設計に取り入れ、その後、日本のロケット・衛星に応用された。各 1553B バスは二重冗長構成である。各コンピュータ下の

各サブシステムは地上とのコマンド/テレメトリ授受により制御される。

実験装置の監視制御は実験データ処理装置(PDH)が行っている。多様な実験装置の運用に対応するため、実験データ処理装置は、地上から書き換え可能な通信コンフィギュレーションテーブル(CCT)を基に実験装置からのデータ配列を編集する機能を有する。通信コンフィギュレーションテーブルは、地上設備である運用手順検証・訓練システムを用いて通信トラフィックに無駄のないきめ細かな設定と事前検証を行った上で、PDHに送られる。

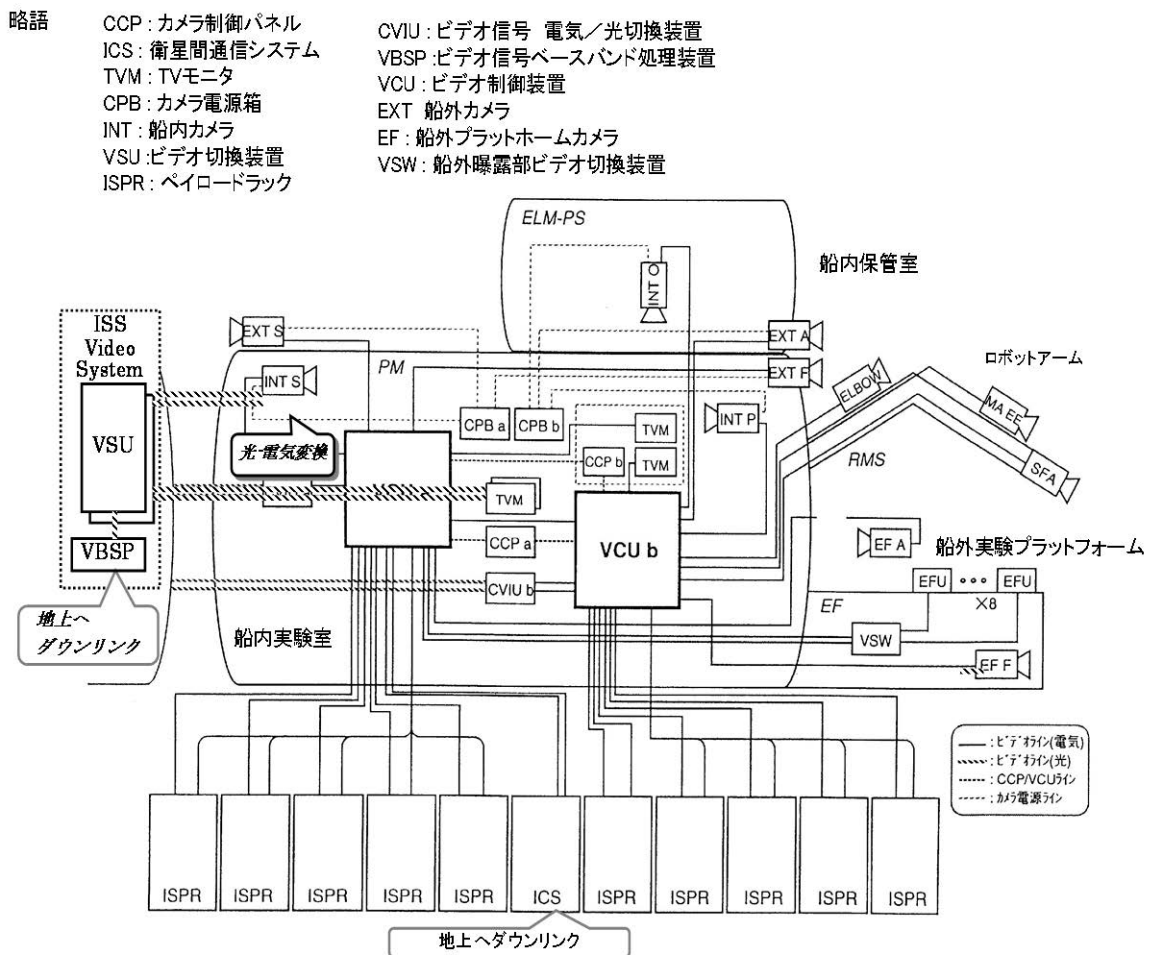


2.4 高速データ伝送系

高速データ伝送系は、光ファイバを用いた高速ネットワークであり、実験装置から大容量の実験データを地上に送ることができる（第4図）。「きぼう」の実験データは、高速データ多重切替装置（HRMS）により多重化または選択されて米国実験棟経由で地上にダウンリンクされる。高速データ多重切替装置でのチャンネル選択は宇宙飛行士がパッチ

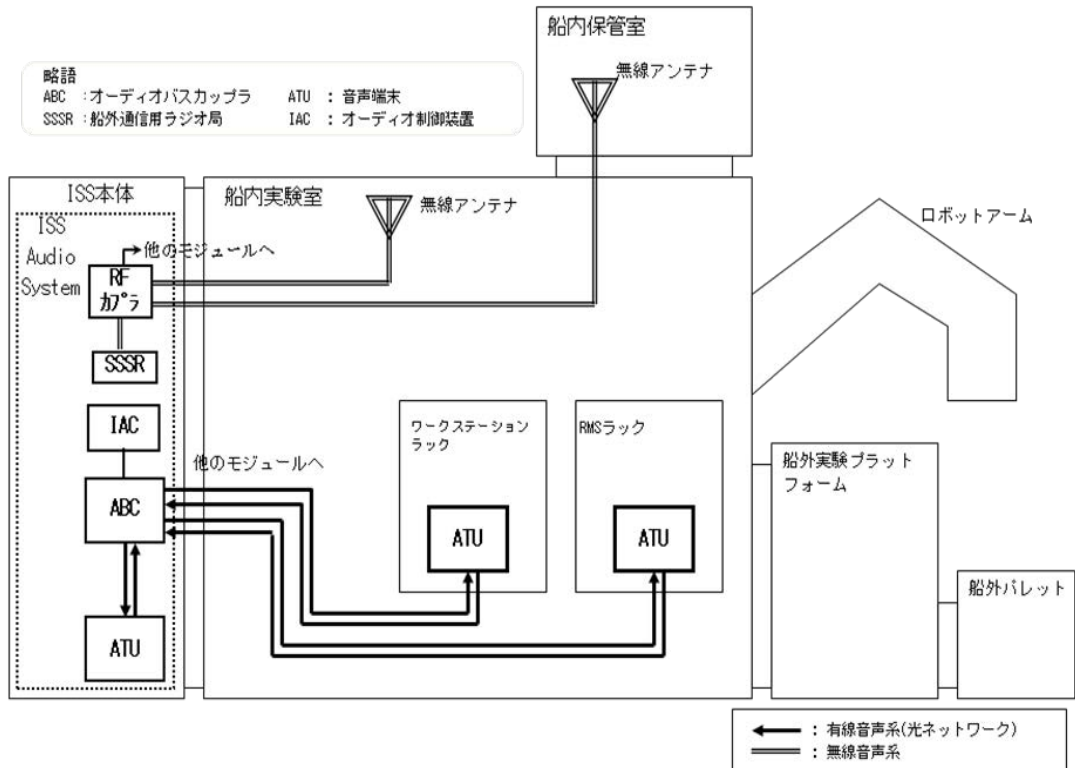
パネルにて切替を行う。このため、コネクタの配置、光ファイバの取り回し等、視認性、操作性などの宇宙飛行士とのインターフェースを確保した設計とした。

また「きぼう」は高速データ多重切換装置を介さない系統、衛星間通信システムに繋がる系統も有しており、冗長および同時実験運用への対応が可能となっている。



2.6 音声系

「きぼう」には ISS 各棟と同様に、オフィスのビジネスフォンに似た端末とアンテナ（船外活動中の宇宙飛行士との通信用）を複数機設置しており、船内外の宇宙飛行士、地上管制官間での同時通信や別々の会話が可能となっている（第6図）。



第 6 図 「きぼう」の音声系

3. エンジニアリング

「きぼう」は、これまで日本が経験したことのない大規模な有人宇宙機であり、開発メーカーも多様、かつ、多極各国機関の多様なシステムと結合して問題なく協調運用する必要がある。また「きぼう」に取り付けられる実験装置の開発メーカーは必ずしも宇宙機器の設計に詳しいメーカーとは限らない。

このため、「きぼう」の電気・通信系の構成成品は、システムとして組んだときに長期的に維持・安定して動作するよう、開発仕様書およびインターフェース管理仕様書（ICD）にて仕様を厳密に定め、かつ段階的に検証するものとし、そのための開発フェーズと開発

モデルを設定した。開発フェーズとしては、大別して、基本設計・詳細設計・維持設計の3フェーズを基本とし、Plan-Do-Check-Actionのサイクルを回している。

しかしながら、それでも「きぼう」全体の協調動作を担保することは難しい。なぜならば、ICDでの定義自体に、解釈違いの可能性があるためである。よって、実際にフライト実機を組み合わせでのインターフェース検証、および、その検証結果を元にコリレーションをかけたシステム全体のモデリングとシミュレーションが重要となる。

そこで、電気・通信系のインターフェース検証として、①米国実験棟（USLAB）エミュレータと第二結合部（Node2）に「きぼう」

を接続してのインテグレーション試験 (MEIT: Multi-Element Integration Test)、②「きぼう」と TKSC 地上管制装置を結合した End-to-End 形態での総合インターフェース試験 (全体システム試験等) を行った。また、試験で取得した各種特性データを「きぼう」の数値解析モデルに反映している。

3.1 電力系インターフェース検証

電力系は、実験装置も含め不特定多数の機器が接続される中で安定して維持し続けることが求められる。同時運用される機器の数は 100 を超える。これらの機器は DC/DC コンバータを有しており、不安定共振の原因となりうる。また、最大で 3kW (25A) に達する機器のオンオフあるいはモード切替時のステップ的な負荷変動に対する安定性の確保も重要である。

このため、各開発メーカから提示された数値解析モデルを電子回路シミュレータである SABER に組み込んでの解析評価を実施し、かつ、フライト実機の組合せ試験を行った。これらの解析・試験の過程で、インピーダンス不整合がいくつか見つかったが、すべてシステムマージン範囲に十分収まっていることを確認している。

3.2 低速データ伝送系インターフェース検証

低速データ伝送系は、End-to-End でコマンド・テレメトリ確認、1553B 適合性確認 (1553B バス・スタブ電圧波形状評価) を実施している (第 7 図: MEIT でのクルーデモンストラーション)。計測したデータは、後述する 1553B 特性解析モデルに反映した。



第 7 図 MEIT でのクルーデモンストラーション

3.3 中速データ伝送系インターフェース検証

中速データ伝送系は、米国モジュールとのインテグレーション試験で中速系の接続確認を、また全体システム試験で地上管制装置と End-to-End での接続確認をおこなった。

3.4 高速データ伝送系インターフェース検証

「きぼう」は 20m 程度の長さがあり、かつ中継コネクタが多い。このため、全体システム試験において、「きぼう」の End-to-End での光減衰特性を取得し、通信リンク規格に対してのマージン評価、および規定上の最低光出力レベルで送出した光信号がデータエラーなしに伝送されることのデモンストラーション確認を行った。また米国モジュールとのインテグレーション試験で米国実験棟と米国ラボを接続しての確認、さらに高速系ジョイント試験で高速データ多重切換装置および実験データ処理装置を米国に持ち込み、米国側機器とのインターフェース確認を行っている (第 8 図)。

高速データ多重切換装置

米国ラボでの試験模様



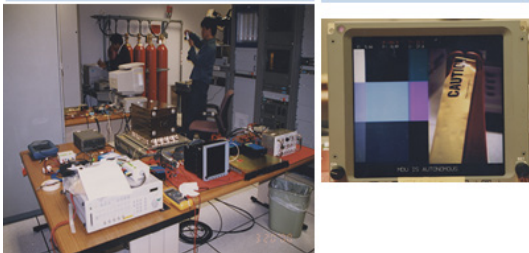
第8図 高速系ジョイント試験

3.5 ビデオ系，音声系インターフェース検証

ビデオ系ジョイント試験（第9図）、米国モジュールとのインテグレーション試験および全体システム試験において、ビデオ系については、ビデオコマンド・テレメトリの一通りの確認および、入出力チャンネル切替・画像出力確認、有線音声系については、通信確認と警告音発動の確認、無線音声系については、宇宙服のアンテナと「きぼう」内アンテナ間の通信特性と、電波の届く距離の確認を実施している。

米国側機器と「きぼう」ビデオ機器組合

画面分割表示試験の模様



第9図 ビデオ系ジョイント試験

3.6 総合インターフェース試験

筑波宇宙センターでは、「きぼう」のフラ

イト実機にて、全体システム試験、統合システム試験、曝露実験装置組合せ試験を行い、この中で電気・通信系については、大分類して32からなる、国際間検証を含むインターフェース確認及び運用性確認を実施した。本試験は地上管制装置を含む最終的なEnd-to-End試験である。

4. サステイニングエンジニアリング

情報通信テクノロジーが急速に進歩した結果、「きぼう」の情報処理性能は目新しいものではなく部品も製造中止となったものが多く、また情報処理性能に対するユーザーの要求も増大していることから、これらに応える新型の補用品を「きぼう」に投入すべく、整備作業を行っている。

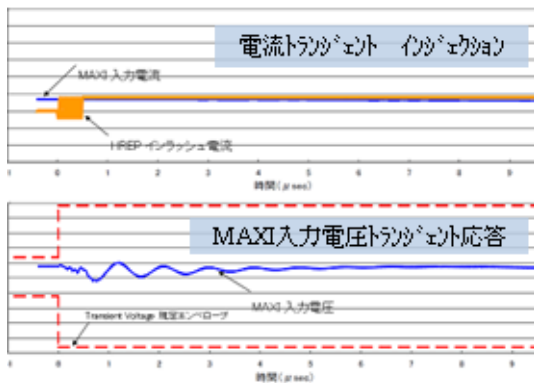
また、以下に示すハードウェア／ソフトウェアシミュレータの整備をおこない、実験装置が「きぼう」に搭載されても電力・通信系が問題なく稼働することを事前に確認する体制を構築している。

4.1 電力系シミュレータおよび電力系安定性解析モデル

供試体配電箱補用品



第10図 電力系シミュレータ



第 11 図 電力系安定性解析モデルの使用例

(大気圏／電離圏リモート探知システム実験装置 (HREP) 起動時インラッシュ電流が、運用中の全天 X 線監視装置 (MAXI) の電源ラインに及ぼす影響をシミュレータで確認している模様)

また、実験運用者が設計段階で容易に「きぼう」結合時の安定性を評価できるよう、回路シミュレータ (SPICE) を使用した「きぼう」電力系の卓上モデルを整備しており、静的・動的な応答解析、安定性解析が可能である (第 11 図)。

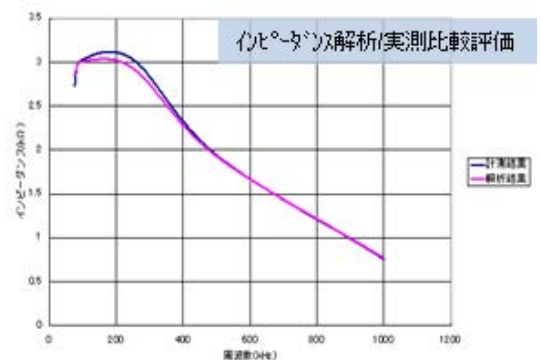
4.2 運用手順検証・訓練システム (低速データ通信系シミュレータ) および 1553B 特性解析モデル

「きぼう」中央コンピュータ、実験データ処理装置、ラップトップ端末の機能等価モデルと既実験装置の模擬を組み込んだ低速データ通信系シミュレータを構築しており新規フライト品のインターフェース確認に使用する (第 12 図)。また本システムは、実験データ処理装置用の通信設定テーブル作成機能・検証機能を有し、通信トラフィックについて無駄のないきめ細かな設定と事前検証を行う。

1553B 通信の品質は、バス長、スタブ長、およびターミナルのインピーダンスに左右されるが、特にインピーダンスについては 1553B 基準値を下回るターミナルチップを搭載した実験装置が多いことから、それらの機器が「きぼう」に結合しても、1553B バスの成立性の評価が可能のように、SPICE を使用した 1553B バス数値解析モデルを整備し、卓上での解析を可能としている (第 13 図)。



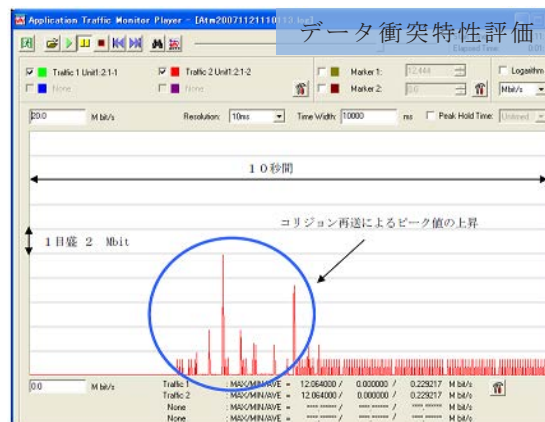
第 12 図 運用手順検証・訓練システムによるインターフェース確認試験



第 13 図 1553B 数値解析モデルによるシミュレーション

4.3 中速データ伝送系検証器材

有線ネットワーク中継器の補用品を中核とし、負荷印加用装置とアナライザを付加することにより、今後開発される実験装置を接続して、スループット、データ衝突評価、および有線ネットワーク中継器の高速ゲートウェイとのインターフェース整合確認が行える器材である（第 14 図）。ここで取得するデータをもとに、将来の実験運用を計画する。



第 14 図 中速データ伝送系評価器材による
ネットワーク負荷試験

5. 軌道上運用（電気・通信系）

2008 年の打上げから「きぼう」の運用が始まり、これまで絶えることなく運用が続いている。ここでは電気・通信系について、経験した不具合、工夫していること、追加した機器などについて紹介する。

5.1 過電流発生

「きぼう」のシステム機器は分電盤（PDU）や配電箱（PDB）を経由して電力が供給されている。下流機器に何らかの原因により短絡が生じた場合、過電流が流れ、分電盤（PDU）や配電箱（PDB）に組み込まれた半導体（パワー MOS FET）スイッチで限流遮断機能（トリップと呼ぶ）が働く。この機能によりそれ以上の過電流を防ぐことができるが、短絡の原因となった下流機器は遮断されることになる。「きぼう」ではこれまで 2 回、過電流によりトリップした経験がある。

(1) きぼうの衛星間通信システム（ICS）

「きぼう」には独自の通信インフラとして、こだま（DRTS）を経由した衛星間通信システム（ICS）があるが、2011 年 8 月に ICS の与圧部側の電源系に過電流が発生した。これにより、上流側にある PDU のスイッチで設計通り限流遮断機能が働き、結果、ICS の与圧部側機器は遮断され、ICS による衛星間通信はできなくなってしまった。ICS にはアンテナなどの曝露部側の装置もあり、これは ICS の与圧部側機器を経由して制御しているため、衛星間通信だけでなく、ICS の曝露部側の制御・モニタもできなくなってしまった。そこで、最低限 ICS の曝露部側の制御・モニタを復活させるべく、宇宙飛行士による復旧作業を行った。まず、軌道上に別の目的で保管されていたケーブルに加工を施し、こ

のケーブルを利用して ICS の与圧部側にある制御装置 (DPU) に直結給電することを検討した。「きぼう」の高機能化の一環で、現在のコンフィギュレーションでは使用することを中止した右舷側与圧部外壁カメラ用の配線を汎用の電源として整備したものがあり、これを電源として使用した。これにより、DPU の起動に成功した。DPU が起動できたことで ICS の曝露部側の装置の制御・モニタも可能になった。残念ながら、このコンフィギュレーションでは衛星間通信はできないが、現在、故障した機器は地上で改修および新規に製作しており、これが完成し、軌道上に打ち上げ、取り付けられ、再び衛星間通信ができるその日まで、ICS 関連機器の制御・モニタを継続している。

(2) 低温系冷却ポンプ

「きぼう」には低温系冷却ループと中温系冷却ループがあり、これらの 2 つのループはそれぞれ独立したポンプで循環させている。2012 年 3 月に低温系冷却ポンプユニットに過電流が発生し、上流で配電箱 (PDB) の半導体スイッチの限流遮断機能が働いた。結果、低温系冷却ループは循環を停止した。トラブルシュートの結果、ポンプ側に短絡が確認されたため、そのポンプによる復旧はあきらめ、低温系冷却ループと中温系冷却のループを 1 つのループとするコンフィギュレーションに変更し、中温系冷却ポンプだけで両冷却ループを維持することとなった。約 4 ヶ月後、軌道上宇宙飛行士によりポンプが交換され、現在は復旧している。

5.2 機器の更新

(1) PEHG から LEHX へ

「きぼう」では中速系中継装置として、PEHG (Payload Ethernet Hub Gateway) を使用していたが、アップグレードのため、

2011 年 4 月に新たに LEHX (Layer 2 Ethernet Hub and Multiplexer) へ換装した。LEHX は民生品をベースに宇宙用に改良したもので、従来の CCSDS の中速データだけでなく、TCP/FTP/UDP といったプロトコルのサポートが可能であり、加えて高速系 3ch の入力ポートもあり、これらすべての多重化が可能となっている。LEHX への入力制限レートおよび LEHX からの総出力レートは変更が可能であり、これらはユーザからのリクエストを元に NASA 側と調整して計画し、ユーザの使用に合わせて都度、設定を変更している。LEHX の更なる特徴として、その構成単位に「きぼう」システム機器で初めて、ORU 以下の分割レベルが導入され、ORU 全体の交換でなくサブコンポーネントレベルでの保全が可能な点が挙げられる。

(2) 船内カメラ

「きぼう」の船内にはポート側 (ハッチより入って奥側) に設置されたカメラと入り口側に設置されたカメラがあり、このうちポート側のカメラが 2010 年 8 月ごろから白黒画像になってしまった。トラブルシュートを実施したが復旧しなかったため、新カメラに換装した。新カメラは民生品をベースに宇宙用に改良したもので、従来のアナログ NTSC 出力だけでなく、High Definition による出力も可能になった。加えて、High Definition 仕様の 3D カメラも新たに追加された。これも民生品ベースのものである。

5.3 外部カメラのライト故障

ISS は約 90 分で地球を一周しており、約 45 分間隔という地球上に比べて頻繁に昼と夜がやってくる。これを考慮して、外部カメラにはライトが装備されている。ライトは 1 台のカメラに対し 2 つあり、On/Off するたびにこの 2 つのライトが交互に点灯するこ

とで長寿命な設計となっている。ところが 2 台ある曝露部カメラの内 1 台のライトがまったく点灯しなくなっていることが判明した。ライトの消費電流のテレメトリを頼りにデータを遡って確認すると数ヶ月前から点灯しなくなっており、もう 1 台のカメラも 2 つあるライトのうちの 1 つが点灯しなくなっていた。ただ、残念ながら運用者はこのことに誰も気付いていなかった。というのも異常を示すテレメトリがないこと、ISS では常に通信が確保できている訳ではなく、ダウンリンクされている画像の見えない期間があること、また他のカメラからのライトもあることなどから、明らかに点灯していないと言い切れる状況にならなかったためである。なお、故障したライトは交換するしかないが、外部にあるため、すぐに交換することはできない。

運用者側の対応として、以前はカメラ起動後、ライトの必要性の有無に関わらずすぐにライトも点灯させていたが、現在は、必要時のみ点灯させるように変更した(点灯／消灯回数が増えないよう注意している)。また、すぐに故障に気付けるようライト点灯中はライトの消費電流と温度テレメトリを重点的にモニタするようにしている。

5.4 軌道上宇宙飛行士の動きを読む

「きぼう」の船内カメラで「きぼう」船内のモニタが可能であるが、軌道上宇宙飛行士のプライバシー保護の観点から起床中のみ映像をダウンリンクすることが許されている。とはいえ、起床中だからといって常時「きぼう」船内をモニタすることは通常していない。ましてや就寝中は一切「きぼう」内をモニタすることはできない。しかし、このようにカメラで船内をモニタしていない状況下でも宇宙飛行士が「きぼう」内にいるかいな

いかといったレベルであれば、経験上、把握することが可能である。その方法は、船内の蛍光灯とラップトップの消費電流の動きを見ることである。たとえば、「きぼう」船内の蛍光灯の On/Off テレメトリはないが、消費電流を連続したグラフで見れば、付け消しが分かる。同様にラップトップも消費電流の動きから今そのラップトップを操作しているかどうか分かる。就寝中も「きぼう」の蛍光灯を切らない宇宙飛行士がいることなども分かり、宇宙飛行士の好みも分かる。宇宙飛行士が「きぼう」内にいる場合、何らかのコールダウンがくる可能性があるため、たとえ船内が見えなくても心の準備ができるのである。

6. まとめ

「きぼう」の電気・通信系はフライト品製造から約 10 年、軌道上運用から 4 年を経た現在において順調に稼働している。これは、アビオニクスの高信頼性設計、および緻密かつ着実に推し進めたインターフェース確認の成果であるのは間違いない。

JAXA は、現在、サステイニングエンジニアリングの段階に入っており、代替補用品の整備時期に合わせて、民生品の技術も適用し、長期運用に向けた技術的更新を行っていくとともに、整備した各種のハードウェア／ソフトウェアシミュレータを用いて、今後「きぼう」に搭載される補用品、実験装置の組合せ検証を行い、確かなものを打上げに供する。

我が国初の有人宇宙施設であり ISS 中、最大級の実験棟となった「きぼう」の電気・通信系が堅調に稼働しているという事実は、米露が先行していた有人宇宙開発の領域において、我が国に対する各国の評価を大きく改善し、世界の一流に肩を並べることとなっ

た。これを達成できたのは、関係各位、すなわちシステムインテグレータから小部品メーカー・素材メーカーに至るまでの開発メーカー、各研究機関、加えて、メーカー間を取り持った商社、運輸業者等による「確かな技術・物づくり・サービスを提供する心」が協調・連携することにより開発事業を進めることができたことによる。

我が国の誇りである関係各位、および開発にあたり多大なる助言と協力を頂いたNASA（アメリカ航空宇宙局）と宇宙飛行士に深く感謝申し上げるとともに、今後も、国民の期待と信頼に応えるべく、更なる研鑽と飛躍を行うことを表明して、本章のまとめの言葉とさせて頂く。