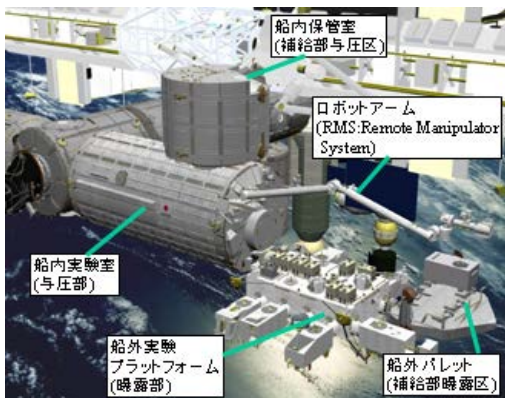


第 13 章 「きぼう」 与圧系システムの開発成果

～管制システム

1. 序論

日本実験モジュール「きぼう」(JEM : Japanese Experiment Module) は、2008 年 2 月に船内保管室が、2008 年 6 月に船内実験室が、それぞれ打上げられ、軌道上にて国際宇宙ステーションに取り付けられ、宇宙服無しで活動できる空間(与圧空間)を提供している。与圧系システムとは、これら船内実験室と船内保管室のシステムを指し、電力系、熱制御系、環境制御系などのサブシステムを提供している。管制システムはそのサブシステムの一つとして、地上運用管制システム、宇宙ステーション(ISS)全体の管制ソフトウェア、クルーからの指示に基づき、「きぼう」システム、サブシステム、機器、ペイロードの監視/制御を行う。



第 1 図 「きぼう」構成(与圧システムは船内実験室・船内保管室から構成)

本章では、与圧系システムとして開発した、管制システムの主要機器である管制制御装置のソフトウェアとシステム・ラップトップ・ターミナルのソフトウェアを中心に、管制システム機能および、検証として実施した試験について説明し、開発の成果を報告する。

2. 「きぼう」管制システム概要

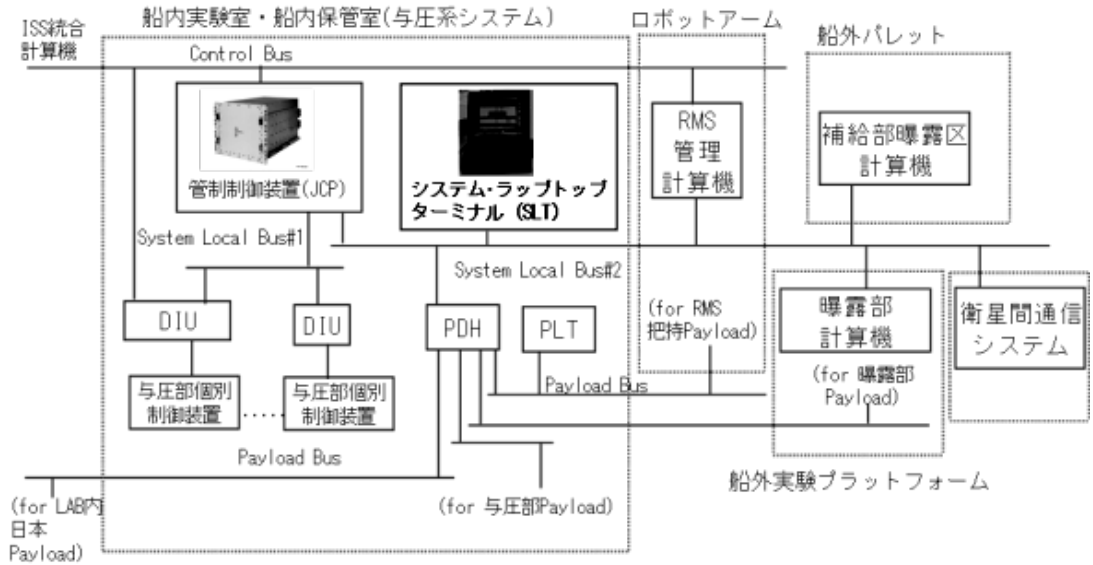
2.1 管制システム構成

「きぼう」の管制システムは、以下の計算機とそのソフトウェア(含むファームウェア)、およびそれらを接続するバスによって構成される。

- (1) 管制システムの中核となる管制制御装置(JCP)
- (2) クルーとのインターフェースを司るシステム・ラップトップ・ターミナル(SLT)
- (3) 船外実験プラットフォーム、船外パレット、衛星間通信装置、ロボットアーム等の各部計算機/各サブシステムの制御を司る制御装置
- (4) ペイロード運用をサポートする実験データ処理装置(PDH)、ペイロード・ラップトップターミナル(PLT)
- (5) 計算機間の通信を司るデータ・インターフェース・ユニット(DIU)

管制システムは、これら多様な計算機・ソフトウェア間及びISS統合計算機・ISS管制ソフトウェアとインターフェースを取りながら機能を分担し、各々固有な特性を持つ「きぼう」の末端ハードウェア機器すべてをモニタ・制御して、「きぼう」全体として整

合の取れた、統合監視制御を行うシステムである。



第 2 図 「きぼう」 管制システム構成

2.2 管制システム機能

ここでは与圧系システムの構成部品であり、管制システムの中核機器である管制制御装置ソフトウェアが実行する処理と、クルーとインターフェースを行うシステム・ラップトップ・ターミナル・ソフトウェアの処理を中心に、管制システムの主要な機能を示す。

(1) モード管理・制御

管制制御装置ソフトウェアでは「きぼう」全体でのモード (JEM モード) を管理する。JEM モードは第 1 表に示す 4 つのモードからなる。

管制制御装置ソフトウェアは JEM モードが宇宙ステーション全体のモード (ISS モード) に整合する様に、ISS モードに合わせて JEM モードを遷移させ、JEM モード遷移のコマンドに対しては遷移先のモードが ISS モードで許可される場合のみコマンドを受け付ける。ISS モードと JEM モードの対応を第 2 表に示す。

第 1 表 JEM モード定義

JEM モード	モード定義
スタンダート	ロボティクスを除く実験支援が可能なモード
ロボティクス運用	ロボティクスを含む実験支援が可能なモード
スタンバイ	実験支援を禁止して、最小限のシステムで運用するモード
隔離	実験支援を禁止し、「きぼう」の与圧環境が保証されないモード ISS と「きぼう」の間のハッチは閉じられている

第2表 ISSモードとJEMモードの対応

ISSモード \ JEMモード	STANDARD	REBOOST	MICROGRAVITY	SURVIVAL	PROXIMITY	ASSURED	EXTERNAL OPS
スタンダード	A	A	A	NA	A	A	A
ロボティクス運用	NA	NA	NA	NA	NA	NA	A
スタンバイ	A	A	A	A	A	A	A
隔離	A	A	A	A	A	A	A

(凡例) ISSモードに対し、JEMモードが
A：許容される NA：許容されない

また、JEMモードの下にTHC系（環境制御系）動作モード、FDS（火災検出消火）動作モード、TCS系（熱制御系）動作モード等を持ち、各モードで実行できるコンフィギュレーションを制約している。JEMモードと各系統の動作モードの対応を第3表に示す。

第3表 JEMモードと各系統の動作モード

各系統動作モード	JEMモード	スタンダード	ロボティクス運用	スタンバイ	隔離
THC系動作モード	ノーマル	A	A	A	NA
	マニュアル	NA	NA	A	A
FDS系動作モード	火災検知	A	A	A	NA
	自動隔離	A	A	A	NA
	マニュアル	A	A	A	A
TCS系動作モード	2WCL	A	A	A	A
	A系1WCL	A	A	A	A
	B系1WCL	A	A	A	A
ELM-PSモード	スタンダード	A	A	A	NA
	スタンバイ	A	A	A	A
	隔離	A	A	A	A
曝露部動作モード	ノーマル	A	A	NA	NA
	ミッション停止	A	A	A	A
	マニュアル	A	A	A	A
RMS部動作モード	ノーマル	NA	A	NA	NA
	スタンバイ	A	A	A	A

(凡例) A：許容される NA：許容されない

(2) シーケンス実行機能

管制制御装置ソフトウェアでは予め自動シーケンスをファイルに定義して、コマンドによって実行することができる。シーケンスの中には時間待ちや判断分岐制御を組み入れることができる。

自動シーケンスは、コマンドによって起動される他、後述の異常検出・自動処置で示す様にデータ値の変化に伴って起動することもできる。

(3) コマンド処理

管制制御装置ソフトウェアは、地上運用管制システム/ISS管制ソフトウェア/クルー及び上記シーケンス実行機能からのコマンドを受けて、「きぼう」内の機器への操作指示を行う。

受けたコマンドに対して、前述の「きぼう」内モードや現状の「きぼう」コンフィギュレーションにおける実行可否の判定や、コマンド・パラメタの検査などを実施する。

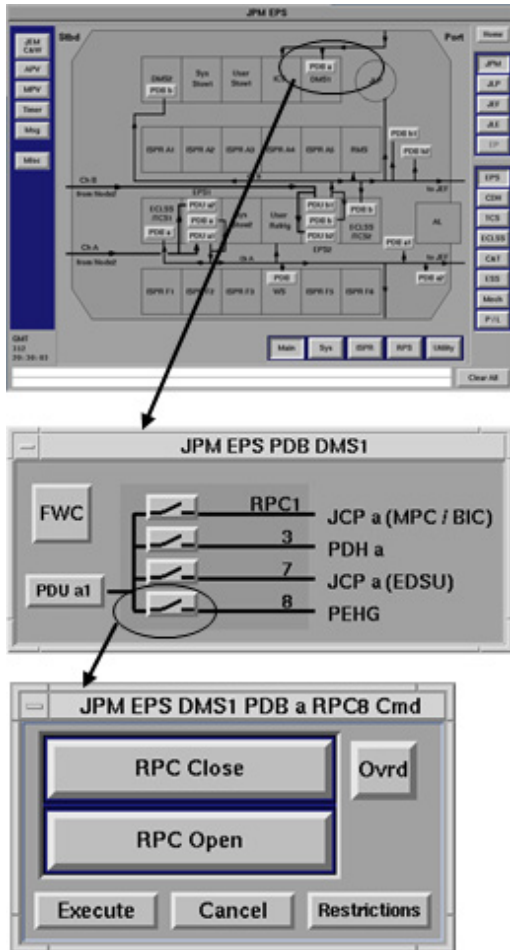
すべての検査で問題が無ければ、機器への操作指示を実施する。この時、1コマンドに対して、複数の機器への指示を出すこともある。例えば、機器の電源を落とす場合には、その機器の通信上位の機器に通信停止指示を行い、その後電力供給元に電力供給停止を指示する。これによって、煩雑なコマンド発行を抑え、地上管制員やクルー操作の負担を低減している。

システム・ラップトップ・ターミナルではクルーに対してロボットアーム操作を除く「きぼう」内機器の操作画面を提供している。基本的には操作対象を画面から選び、アイコンやボタンを押下してコマンドの発行を行う。

第3図のコマンド発行画面例では、最後のExecuteボタン押下でコマンドが発行される。モードやコンフィギュレーションで制約を受けるコマンドは、管制制御装置ソフトウェアの判定により実行されないが、クルー等の判断であえてその判定をスキップして強制実行させる(OvrDボタン選択)ことも可能である。

管制制御装置ソフトウェアで処理するコ

マンドとして約 2,000 点のコマンドを定義している。



第 3 図 コマンド発行画面例

(4) データ収集・表示

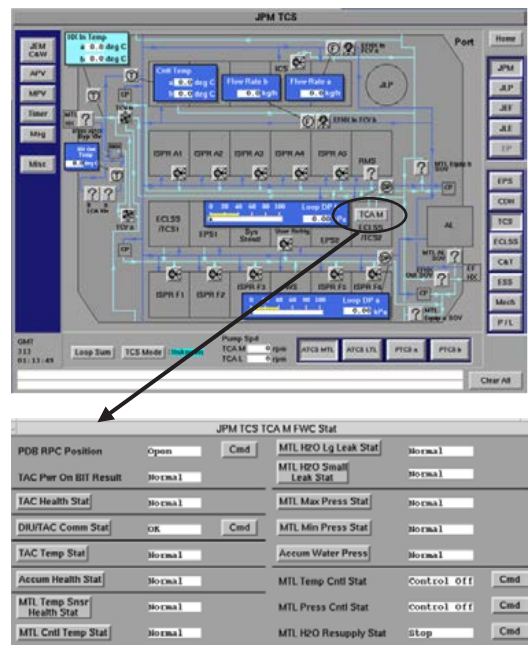
管制制御装置ソフトウェアは、各部の計算機やデータ・インターフェース・ユニット経由で各サブシステム制御装置から、周期的にデータを収集する。

収集したデータを編集して、ISS 管制ソフトウェアへ送信する。ISS で更に編集を行い、地上運用管制システムへダウンリンクする。また、ICS（衛星間通信システム）経由でもデータをダウンリンクできる。

管制制御装置ソフトウェアで収集・処理して地上運用管制システムへ送信するデータは約 10,000 点である。

また、収集したデータを管制制御装置からシステム・ラップトップ・ターミナルにも送信して、クルーへ表示する。

表示はクルーがシステムの状態を視覚的に把握し易い様に系統図上にデータ値を表示している。モニター対象のアイコン・ボタンの押下により詳細な情報を表示する。例として熱制御系のデータ表示を第 4 図に示す。



第 4 図 データ表示例

(5) リソース管理

管制制御装置ソフトウェアでは ISS 管制ソフトウェアからの電力削減要求を受けて、「きぼう」内機器の電源オフを指示する。

(6) 異常検出・自動処置

管制制御装置ソフトウェアでは収集したデータ値の検査を行い、異常を検出する。緊急または重大な異常を検出した際は、ISS 管

制ソフトウェアに対して通知を行うと共に、その異常事象が 24 時間以内にシステムに対し影響を及ぼす場合は自動処置を行う。自動処置の実行に際しては上述のシーケンス実行機能を使用する。

管制制御装置ソフトウェアは「きぼう」内データの約 500 データの検査値、及び約 100 の異常対応自動処置を有している。

3. 「きぼう」管制システム検証

管制システムの機能検証は、「きぼう」システムとしての機能／性能確認はもとより、軌道上でインターフェースを持つ ISS 管制ソフトウェアとの相互機能確認も非常に重要である。

管制システムの検証は、以下の 3 つの試験に大別される。

- (1) ソフトウェア試験
- (2) システム試験
- (3) ソフトウェア・インターフェース確認試験

(1) ソフトウェア試験

管制制御装置ソフトウェア、システム・ラップトップ・ターミナルのソフトウェアは、単独でのソフトウェア試験を実施した後、両者を組合せた状態でソフトウェア試験を実施した。

その後、与圧部システムに組み込み、システム試験に供した。

(2) システム試験

システム試験は、実機を用いたシステム・レベルの試験であり、その試験の中で確認対象のサブシステムの一つとして、管制システムの機能確認を実施した。

試験は積み上げ方式で、小さな単位で試験をそれぞれ行った後、それらを統合してより大きな単位で試験を実施した。但し、射場であるケネディ宇宙センター (KSC) への輸送時期は各モジュールで異なる為に、KSC での試験は与圧系システムと「きぼう」以外のシステムの組合せ試験となっている。

第 4 表に各システム試験での試験内容を

示す。

第 4 表 システム試験

試験名	試験内容
与圧部システム試験	船内実験室 (与圧部システム) を対象とした機能確認試験
JEM 全体システム試験	船内実験室、船内保管室、船外実験プラットフォーム、船外パレット、ロボットアームを組み合わせた機能確認試験
JEM 統合システム試験	JEM 全体システム、地上運用管制システム、衛星間通信システム、ペイロード ^{*)} の組合せでの機能確認試験
MEIT (Multi-Element Integration Test)	KSC にて実施した与圧システムと ISS 側システム (エミュレータ) との組合せでの機能確認試験
JEM End-to-End 試験	KSC の船内実験室、ISS 側システム (エミュレータ)、MCC-H (Mission Control Center · Houston)、筑波の運用管制システムの組合せでの機能確認試験

(3) ソフトウェア・インターフェース確認試験

実機を用いたシステム試験前などにリスク軽減のためにソフトウェア・インターフェースを確認する場合や、異常処置等、実機システムを使用出来ないインターフェースを確認する場合に、管制制御装置ソフトウェアが動作する模擬設備を用いて、「きぼう」外のソフトウェア／システムとのインターフェース確認試験を実施した。

第 5 表に各ソフトウェア・インターフェース確認試験の試験内容を示す。

第 5 表 ソフトウェア・インターフェース確認試験

試験名	試験内容
SS/JEM C&DH I/F 試験	ISS 管制ソフトウェアと管制制御装置ソフトウェアとのインターフェース確認試験
運用管制システム／管制制御装置ソフトウェア試験	地上運用管制システムと管制制御装置ソフトウェアのインターフェース確認試験
HTV 曝露パレット／JEM C&DH インターフェース試験	HTV 曝露パレットの制御装置と管制制御装置ソフトウェアのインターフェース確認試験

上記の他に、実際の運用手順に沿って操作できることを、KSC で実機の与圧系システムを用いて確認する試験(与圧部運用手順確認試験)を実施した。これにより、管制システムと運用手順との整合を打上げ前に確認した。

4. 管制システムの軌道上運用における知見

ここでは管制システムについて、これまでの運用を通じて経験した不具合、獲得した知見、運用上の工夫、追加した機能などについて紹介する。

4.1 管制制御装置(JCP)は a 系か b 系か

きぼうには管制制御装置(JCP)が JCP a と JCP b の 2 台装備され、常にどちらか 1 台を運用の主系として稼働している。2 台あることで片方に異常が生じてても他系に切り替えて運用を継続することが可能である。また、この 2 台は A 系と B 系という別々の電力系統から電力供給されており、片方の電力系統に異常が生じてても同様に他系で運用することが可能である。

(1) 初期起動 (2008 年 6 月)

- ・フライト 1J での船内実験室打上げ時の軌道上起動の初期コンフィギュレーションが B 系電力システムであったため JCP b を起動し、主系 JCP として運用

- ・その後、電力 A 系統システム機器(事前にフライト 1J/A にて船内保管室で打ち上げられていた)を搬入したうえで、JCP a を起動(ただし、Hot Standby モードまで)

- ・フライト 1J 後、チェックアウト含めて JCP b→JCP a へ主系の切り替えを実施し、JCP a を定常コンフィギュレーションとした。

主系 JCP を a 系にすることで、B 系電力

が全遮断し機器冷却用ポンプが止まっても JCP は遮断されないため、自動処置により遅延なく冷却機能を回復させることが可能である。JCP b の場合、B 系電力遮断により機器冷却用ポンプとともに JCP b も遮断されるため、一旦、JCP b→JCP a への自動切り替えが行われるため、その分だけ冷却機能の回復が遅れる。

(2) JCP a EDSU(External Data Storage Unit)異常 (2009 年 6 月)

JCP の外部記憶装置(EDSU)には Disk タイプと Solid State タイプの 2 種類がある。

初期コンフィギュレーションは以下の通り。

- ・ JCP a : EDSU (Disk タイプ)
- ・ JCP b : SSEDSU (Solid State タイプ)
- ・ 軌道上予備品 : SSEDSU (Solid State タイプ)

EDSU (Disk タイプ) は、当初、NASA 側の軌道上管制システムで使用していたものだが、異常により Solid State タイプに換装されたため、きぼう管制システムも追随した。(ただし、JCP a には開発試験で実績のある Disk タイプを搭載)

JCP a の EDSU (Disk タイプ) は、フライト 2J/A 前に EDSU へのアクセス不具合が発生。固定故障と判断し、若田飛行士により予備品の SSEDSU (Solid State タイプ) へ交換された。現状のコンフィギュレーションは、JCP a、JCP b とも SSEDSU である。

(3) その後から現在

JCP a のコンフィギュレーション継続する中で、JCP a に当初予想していなかった異常がたびたび発生した。(詳しくは後述)

再起動することで復帰したので、固定異常ではなく、一時的な異常である。地上試験では数週間・数か月といった長期の運用はしていないため、軌道上で発生したこれらの異常

の経験はなく、根本原因は分かっていない。原因切り分けのため、JCP b を主系として長期に運用し、JCP a と同じ異常が発生するかどうかを試したところ、発生頻度は少ないものの、JCP b でも同じ異常が発生した。したがって、本異常は JCP a 特有の症状ではなく、JCP 固有の症状である。

(4) JCP a 固有事象

上記により長期間 JCP b を主系、JCP a を Cold Standby モードで維持していたが、JCP a を Cold Standby モード→Hot Standby モードへ遷移させても、途中で止まってしまい、Hot Standby モードへ遷移できない不具合が発生した。(経験上、遮断している期間が 3 日程度であれば問題なく遷移可能)

この症状が出た場合は一度遮断し、再度起動することで復帰可能である。JCP b では一度も起きていないため、JCP a 特有の症状である。このため、JCP b に異常が発生した場合に備え (JCP a に切り替えられるよう)、JCP a は Hot Standby モードを維持している。

4.2 JCP に発生した異常について

これまで JCP に発生した 2 種類の異常について紹介する。

(1) フレームカウンタ異常

<症状>

- ・ JCP が通常 1 秒ごとに更新されるカウンタが 3 秒おきに更新 (更新の遅延)

- ・ その後すぐ JCP の外部記憶装置 (SSEDSU) に異常が発生

- ・ 結果、JCP 異常の Caution メッセージが発令

この JCP 異常には周期性があり、一度異常が発生すると、16 分間の異常→11 分間の正常→16 分間の異常→・・・が繰り返され

る。

<発生頻度>

- ・ JCP a : 1~2 カ月に 1 回程度

- ・ JCP b : 半年に 1 回程度

<原因>

- ・ 不明 (継続調査中)

<対処>

- ・ 11 分間の正常な期間のうちに異常を起こした JCP の電源を遮断し、待機系 JCP へ切り替え

当初の手順では、JCP 切替コマンドであったが、経験上、JCP の切り替え途中で止まってしまうため、異常を起こした側の JCP の電源を遮断する手段に変更した。

(2) 約 50 日周期の異常

<症状>

- ・ JCP の外部記憶装置 (SSEDSU) に異常が発生

- ・ その数秒後に自動で正常に復帰

自動で復帰するため、インパクトはない。

<発生頻度>

- ・ 50 日 6 時間 (発生履歴から判明)

<原因>

- ・ SSEDSU にて採用されている市販のリアルタイム OS ベースのシステムソフトウェア内のクロックが 50 日でロールオーバー (カウンタが 0 に戻る)

- ・ そのクロックを利用している処理の中に動作不良を起こすものがあるため

<対処>

- ・ 事象が一時的であり、自動で復帰することから予めカウンタのロールオーバー前の対策は不要

- ・ 但し、ロールオーバー後、SSEDSU のデータ更新が行われない可能性があるため、50 日毎に関連するテレメトリを調べ、通常と違う挙動が見られる場合は再起動

4.3 自動実行プロシーダの追加

管制制御装置(JCP)にはあらかじめ定められた手順に従いJEMのコンフィギュレーションを変更する目的で自動実行プロシーダが搭載されている。その多くは、異常時の対応処理(FDIR)となっている。一方、地上からのコマンド制御による運用を経験していく中で、地上から一つずつコマンドで制御するよりも、予め判明している手順を自動実行プロシーダとして準備しておき、この手順を地上からのコマンドで自動実行させた方が効率的かつ有効であることがわかってきたため、自動実行プロシーダの追加を行った。地上-ISS間は常時通信できるわけではないため、自動実行プロシーダであれば、一度走らせれば、地上-ISS間の通信状態によらず、実行されるのも利点である。新規の自動実行プロシーダの追加に当たっては運用者の意見がより多く取り入れられた。新たに追加したプロシーダの例を以下に示す。

(1) 緊急時対応

宇宙ステーション(ISS)が急減圧という緊急事態になった場合、まず対応する自動処置が実行され、軌道上宇宙飛行士の安全確保が実施されるこれと並行してきぼう内の減圧下での動作が許容されていない機器についても安全化処置、すなわち遮断が必要となる。きぼう内の各機器の運用限界気圧はそれぞれ違うため、船内気圧に応じて機器の遮断をしていくが、これまでは運用者が船内気圧のテレメトリを確認しながら、対応する機器を1つずつコマンドで遮断する手順になっていた。緊急時になると、運用者は軌道上宇宙飛行士からのコールダウンを把握し、同時にNASA側運用者からの情報を把握することが重要になるため、コマンドを送信する余裕があまりないのが実情である。よって、コマ

ンド送信という負荷を低減させるべく船内気圧に応じて機器を遮断する自動実行プロシーダを作成し、JCPへ搭載した。これにより、急減圧という事態になった場合、このプロシーダを走らせるだけであとは船内気圧に応じて機器を遮断することができるようになった(注:実際に軌道上で急減圧は発生したことはないため、実機で使用したことはない)。

他にもISSの姿勢制御機能が失われ、結果、ソーラアレイによる発電量が落ちてしまうような緊急時には、きぼうを含めISS全体で消費電力を削減する必要が生じる。これまでは機器を1つずつコマンドで遮断する手順となっていたが、速やかに遮断できるよう、自動で順次機器を遮断する自動実行プロシーダを作成し、JCPへ搭載した(注:実際に軌道上で姿勢制御機能が失われたことはない)。

(2) 外部カメラ制御

処理手順の自動化という本来のプロシーダ利用の想定とは外れるが、プロシーダを利用した自動処理の応用として、外部カメラ制御がある。外部カメラは、「きぼう」の曝露エリア(船内実験室外部、船外プラットフォーム、ロボットアームひじ関節、手首関節)に搭載されるカメラを指し、焦点距離、ズーム倍率の調整だけでなく、雲台を持ちパン、チルトの画角の設定機能も有している。外部カメラは、ロボットアーム運用などの船外タスクの視野支援として活用される。当初JEM搭載の外部カメラの制御(パン/チルト/ズーム/フォーカスの設定)は、クルーが軌道上でモニタ画面の映像を見ながら行うことを前提に設計されており、カメラの制御は動作の開始と停止をコマンドで与えるものとなっている。そのため、制御信号の遅延を伴う地上からの操作では、細かなカメラの制

御は想定されていなかった。一方、クルー時間の効率化の観点から、クルー操作をできるだけ地上で代行する試みがなされ、テレメトリとして入手できるパン/チルト角度、焦点距離、ズーム倍率に基づき、低速動作モードで動作させ、現在のカメラ状態から目標の状態まで停止するまでの時間を計算し、地上からカメラを停止させる方法で試行していた。自動実行プロシージャを利用した制御では、これらのカメラ情報をプロシージャから参照することにより、地上で行っていたロジックを軌道上で実現することによって、宇宙機/地上設備間及び地上設備内部の遅延要素を排除することが可能となった。また、地上運用では、目標位置をオーバーシュートすることを恐れて、使用する事ができなかった、高速動作モードによるカメラ制御を可能とし、従来の地上からの制御時よりも遥かに短時間で制御することが可能となった。このプロシージャの実現には、目標とするカメラ状態の把握が必要であるが、これにはロボティクス運用を円滑に行うために取り入れられた、コンピュータグラフィクスによるカメラ取得映像のシミュレート技術も大きく寄与している。このコンピュータグラフィクスを用いて、カメラの向き、焦点、ズーム倍率を算出し、その結果をコマンドとして軌道上に指示することで、シミュレートしたものと同一実画像を地上で入手することができるようになった。

4.4 ラップトップの異常

きぼうを含め、ISS ではラップトップを多く使用している。ラップトップの躯体自体は宇宙用に開発したものではなく、民生品である。軌道上のラップトップは、たびたび通信異常やロックアップが発生している。きぼう管制システム構成機器のシステム・ラップト

ップ・ターミナル(SLT)も ISS 共通の民生品ラップトップを用いており、同様に通信異常やロックアップが発生している。

<頻度>

- ・経験上、2,3カ月に1度程度

<(推定)原因>

- ・放射線
- ・ハードディスクが微小重力にあまり適していない
- ・一般的な家庭用PCと同様、長期に渡って起動し続けている

<対処>

- ・定期レポートの実施(月に1回)

経験上、これである程度、異常の発生回数を減らせることができています。ただし、この方法だと軌道上宇宙飛行士の時間を使ってしまうため、地上からレポートする方法や、使うときだけ起動するオプションを検討中。

5. まとめ

Flight 1J(シャトル・フライト STS-124)で「きぼう」船内実験室が国際宇宙ステーションに結合されて、管制制御装置に電源が入り、ソフトウェアが起動した時から、「きぼう」管制システムは本格稼動を開始した。その後の与圧系システム起動・軌道上機能確認を経て、実験運用が継続されている。

幾つか小さな既知事象は発生しているものの、何れも運用上対処可能なものであり、管制システム全体としては、実装した機能によって、「きぼう」に以下を安定して提供することができている。

- ・システム状態の常時モニタ
- ・与圧環境の維持
- ・地上運用管制システムからの遠隔操作
- ・クルーへのシステム情報表示とシステム操作
- ・異常発生のお知らせ
- ・異常事象に対する自動処置

大規模で複雑な「きぼう」の管制システムが正常に動作して、設計通りの機能を実現できているのは、綿密な計画に基づく着実な検証試験を含む開発の成果である。

「きぼう」の運用が本格化し、軌道上有人施設の運用に不可欠な管制システムの役割は、ますます重要となっている。

また、システムが大規模かつ複雑になるほど、管制システムの重要度は増す。「きぼう」管制システムの開発作業で得た多くの知識、特に効率の良いソフトウェア開発／検証の方法、適切な検証レベルの設定は、今後の宇宙機開発に活かしていかなければならない。