

宇宙インフラストラクチャー技術の研究  
Research on Space Infrastructures

HTV ランデブ地上系の確実化・発展研究  
Research on Advanced Ground Systems for Rendezvous Space Vehicle

システム誘導技術グループ 稲場典康, 山元 透, 巳谷真司, 小田光茂  
HTV プロジェクトチーム 山中浩二

Spacecraft Guidance Control and Dynamics Engineering Group

Noriyasu Inaba, Toru Yamamoto, Shinji Mitani and Mitsushige Oda

HTV Project Team

Koji Yamanaka

## Abstract

Autonomy in space systems is a promising way not only to expand performance and functions of systems but also to achieve cost reduction, particularly in large and complicated systems and constellations. Now a day, a number of constellation systems are proposed or under development which provide advanced services in earth observations, tele-communication and satellite based navigations. We newly organized this spacecraft autonomy research area in 2002, and defined two target missions, constellation for Earth observation and rendezvous spacecraft such as HTV. We started to study on three themes related with the target missions, autonomous orbit maneuvering function, intelligent vision and AI based ground support systems for rendezvous operations from fiscal year 2003. Major results of these studies are reported.

### 1. はじめに

国際宇宙ステーションにランデブ飛行を行う宇宙ステーション補給機 (HTV) の開発が進められている。また、近年複数の衛星を利用し、単独衛星では達成が困難な高度なミッションを達成する地球観測や通信・測位を行う衛星群システムが多数構想されている。前者では、安全上の理由から、2宇宙機の相対距離を常時管理するクリティカルな運用が求められ、後者では撮像時間の同期や衛星間位相の保持のための同期軌道・姿勢制御、先行衛星の取得データ処理に基づく後続衛星の運用の迅速な変更等、状況に応じた多彩・高度な運用機能が求められる。これらの運用は従来の衛星運用と比較し格段に難度の高いものであり、これを確実かつ効率的に行うためには、長足の進歩を遂げる搭載計算機の能力を利用し、地上システムと宇宙機の適切な役割分担のもと、宇宙システムの自動化・自律化技術が不可欠である。当グループでは上記ミッションに必要な技術として宇宙システムの自動化・自律化の研究を行っている。本稿では、このうち、HTVの地上系の確実化・効率化の研究の平成16年度の成果を纏めるものである。

### 2. 研究の概要

異常事象発生時に太陽指向モードとすることで安全状態を確保できる地球近傍の通常の人工衛星と異なり、ランデブ宇宙機運用は、ターゲットとの「衝突」や「離別」の危険から、一息つける安全な状態 safe state を確保することが非常に難しい運用である。安全確保の急を有する運用のみならず、正常の手順に於いても、状況、不具合の原因等に応じて手順の分岐が多く発生することもランデブ運用の難しい点であることが改めて認識された。このための対処として、①分岐

を含む運用手順を設計し、シミュレータや地上システム試験等により確認し、更に実運用時にタイムリーに運用者に提示する、ライフサイクルを通じた運用手順の作成・維持に利用できる「運用記述言語」の必要性、②運用手順の検証や運用者の手順習熟、更に実運用での宇宙機の自動状態監視のためのシミュレータの有効利用方法の検討等の課題が抽出された。平成15年度は、①については、従来の種々独立作成・管理していた運用関連情報を一元的に管理する運用手順の電子記述の構想検討及び、運用者への統合運用表示のサンプル画面等を作成した。平成16年度は引き続き上記2課題についてそれぞれ「運用記述言語の記述ルール検討」ならびに、シミュレータ利用技術の一例である「テレメトリを利用した故障診断記述の基礎検討」を進めた、以下順に記す。

### (1) 運用記述言語の検討

宇宙機の運用に当たっては、送信コマンド列や確認テレメトリの時系列作業を定めた「運用フロー」、運用手順書(SOP)、管制卓画面表示、並びに運用定義文書(SOOP 運用定義編等)等多数の文書・電子ファイルが利用されているが、これらの間の情報共有は殆ど行われておらず、作成・保守は個別に行われ大きな手間となっている。また、衛星の初期運用やランデブ運用等では、条件に応じて運用フローに分岐があり、リアルタイムの運用の状況に応じ、適切なフローを瞬時に選択実行する必要がある。現状では、運用者が上記紙媒体の形で作成される「運用フロー」を事前に覚え、また運用時に携行することで対応しているが、宇宙機の複雑化により本方法での対応が難しくなっている。従来の紙ベースの運用フローに替わり、自動車のナビゲーション機能の様に、手順分岐を運用流れに従い運用装置に電子的に表示することにより利便性の高いシステムとなる。また、本機能は実運用に先立つ、運用者訓練にも有効に活用できる。(Fig. 1)

本システムの実現のために、条件に応じた分岐を含み、「テレメトリの確認」、「コマンドの送信」、「局設備運用」、並びに「他系とのデータや音声の交信」といった一連の行為の組み合わせにより「運用手順」を記述する「言語」(Spacecraft Operations Markup Language (SOML) 仮称)を考案した。これにより運用手順を一元的に作成・保守・管理し、上記種々のプロダクトで共通的に利用することにより、従来運用プロダクト毎に行っていた情報の作成、維持管理作業の共通化が可能となり、運用及び運用準備作業の大幅な効率化が期待できる。なお、SOMLは開発試験時の手順作成・確認にも利用可能で、試験段階で作成された手順を運用手順の核とすることで更に作業の効率化や後続の同種ミッションへの再利用も期待できる。Fig.2に示すとおり、宇宙機の運用作業は、宇宙機(それを構成するサブシステム)、運用者(細分化すれば運用ポジション)、地上システム等を構成単位とする「主体」間のメッセージ交換をトリガとした、連携作業により遂行される。作業には、一定の条件が達成されるまで処理を繰り返す「ループ処理」、条件により手順を選択する「分岐」、複数の作業が同時に進行する「並列」等の作業が考えられるため運用手順記述言語は、これら概念の表現力が不可欠である。

### (2) シミュレータへの運用への利用法の検討

宇宙機の運用に当たっては、運用前に短時間に確実な運用計画を作成することが必要である。地上試験での実機を利用した運用用コマンド列の確認に加えて、環境(太陽位置、大気抵抗、GPS位置、DRTS位置)並びに衛星機能(送信コマンドに連動し、機器状態ならびにスラスト噴射に

より軌道位置が変化する．等）双方を模擬したシミュレーターを整備し，これに対し運用コマンド列を送信することにより，環境との相互作用も加味した運用手順の事前確認が効率的に行える．

その際，シミュレーターの機能範囲や精度は必要度を踏まえ適切な範囲・規模に設定するとともに，過去の運用経験を通して得られたノウハウを系統的に整理・形式知化し計画作成機能に入れ込む仕組みを構築することが重要である．

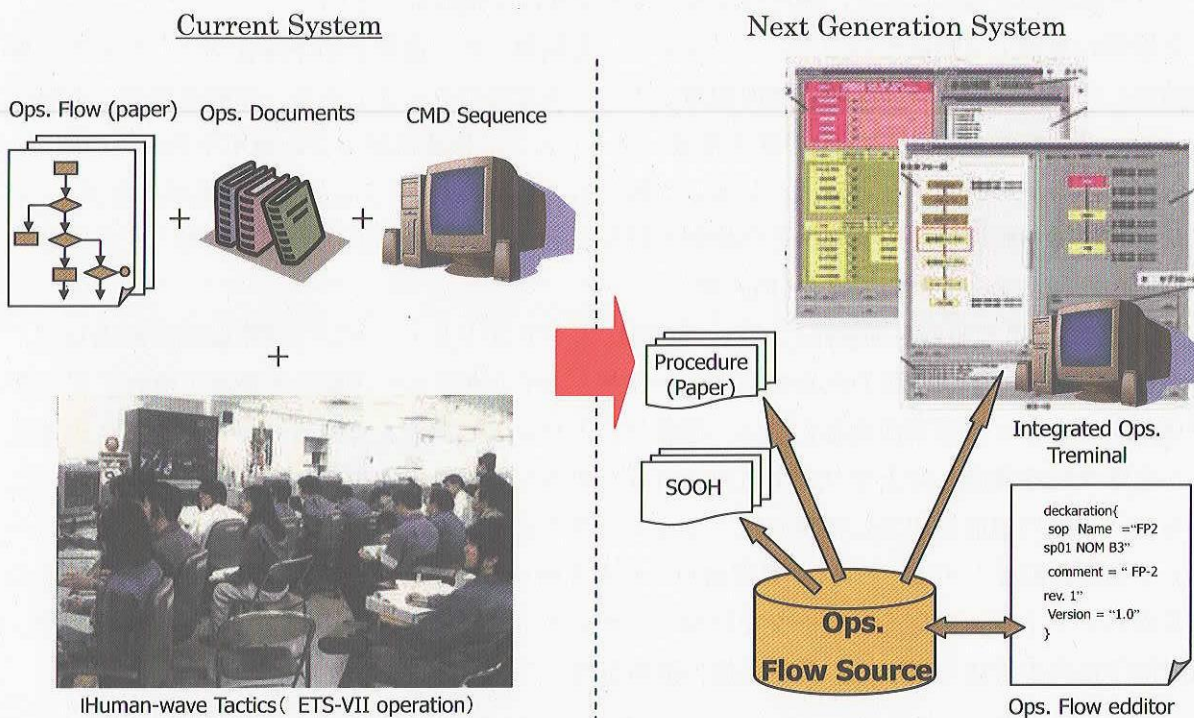


Fig. 1 Data and command flow of Earth observation satellite system

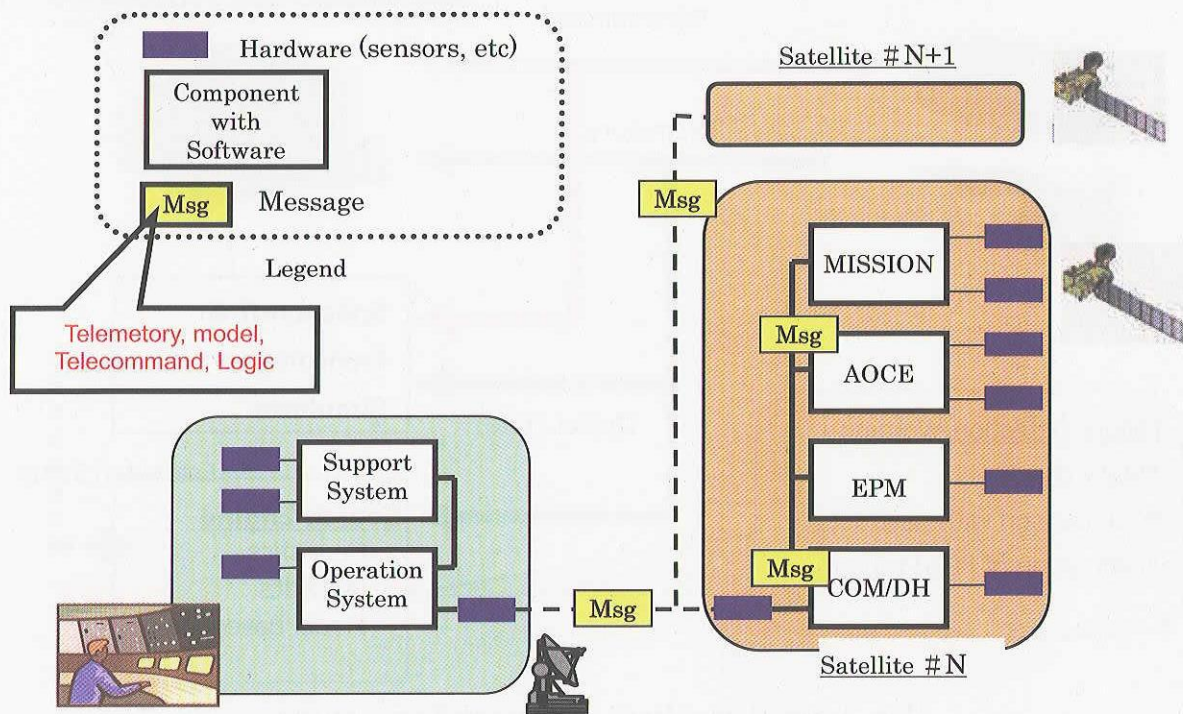


Fig. 2 Spacecraft Ops. Modeled by Message Exchange

現状では姿勢制御系やデータ処理系の機能モデルを核としたシミュレータ（以後、ハードウェアシミュレータ）による、コマンド列の整合性確認や搭載ソフトウェアの確認、ソフトウェアで機器や環境を模擬したシミュレータ（以後、ソフトウェアシミュレータ）による運用者の訓練等が行われている。前者は実機の模擬忠実度が高いものの、宇宙機依存性が高く、また手順の加速実行や模擬故障を含む初期値の設定等運用性に制約が大きい。一方後者は、ハードウェアシミュレータと相補的な関係にあり、運用性は高いが忠実度には制約が大きい。

宇宙機の複雑化高機能化の中で、シミュレータを利用した「運用手順や搭載ソフトウェアの事前検証」や「宇宙機の状態確認や故障診断」のニーズは高まる一方である。本研究では、上記シミュレータの特性を踏まえつつ、「変更搭載ソフトウェアの機能確認を含む運用手順の事前確認」ならびに、予測テレメトリと実機の状態を比較することにより、「宇宙機の異常兆候の発見」、更には想定故障を模擬し実機データとの比較を行うことによる「故障原因の究明」等、シミュレータの新たな利用手法を検討する。（Fig. 3）

まず、「運用手順の事前検証」では、SOML とテレメトリ・コマンド送信装置を経由して、分岐を含む網羅的手順検証のためのシミュレータとのインタフェース要求を整理・検討する。「変更搭載ソフトウェアの事前検証」では、搭載ソフトウェアの機能を停止させることなく、迅速にしかも安全性を確認した上でソフト更新を行うためのシミュレータ機能について検討を行う。これらは、実機の機能を忠実に再現したシミュレータが必要となるため「ハードウェアシミュレータ」の利用を前提とする。一方、「異常検知・原因究明」の用途を目指した研究では運用利便性の観点からソフトウェアシミュレータを利用し、テレメトリデータの時系列からモデル規範型や、統計的手法等の手法を用いて、異常状態の検知を行うことを目指す。

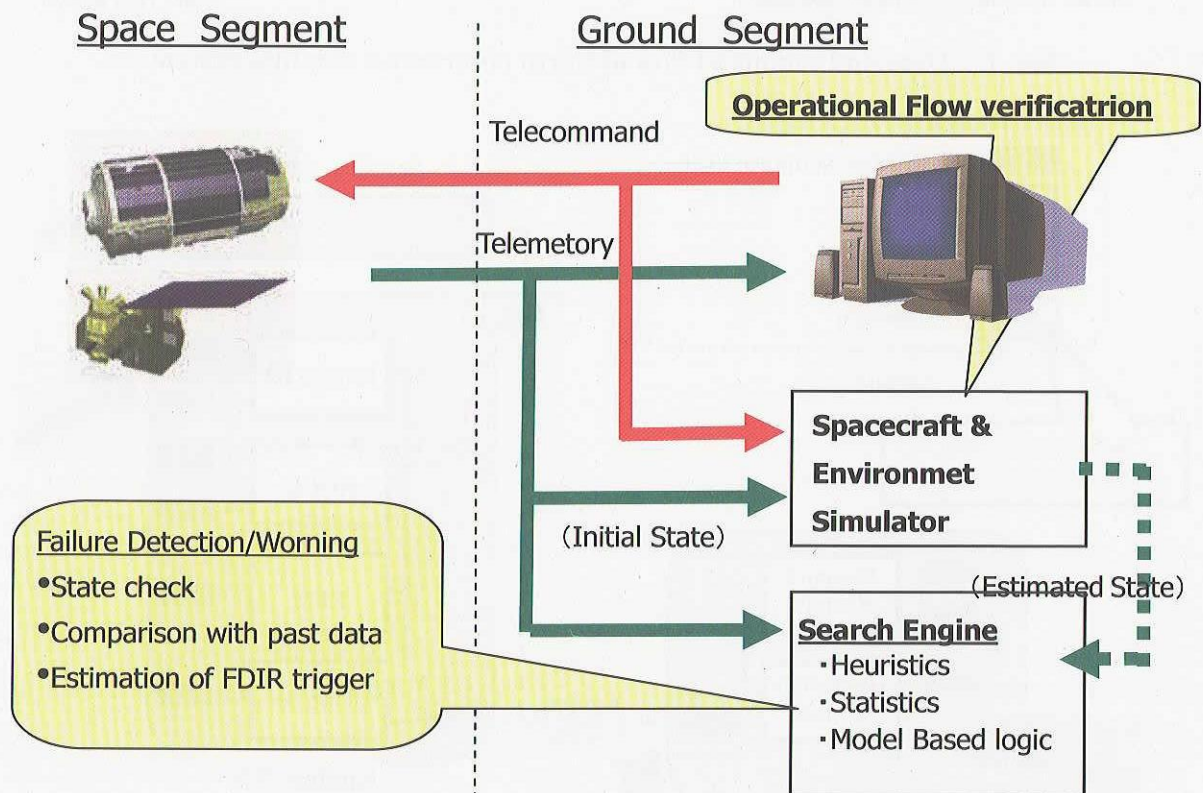


Fig. 3 Simulator Usage in Spacecraft Operations

### 3. 成果の概要

#### (1) 運用技術言語の検討

今年度は、宇宙機の運用を分析し、SOMLの原型記述ルールを作成した。Fig.4にSOMLの記述ルールの骨格となる主体 (Subject) とこれへの入出力と、主体内での処理のモデルを示す。

主体には時刻情報、宇宙機からの直接テレメトリやこれを元に地上推定を加えた各種合成テレメトリ (Secondary data) 地上システムの状態、ならびに他運用者からの音声連絡等が入力となる。入力を契機として、行動の判断基準となるチェック作業が主体の中で行われる。"check"の内容は入力量と算術および論理演算により表現され、その結果に従い、アクションとしての出力が選択される。出力は他主体へのメッセージの送信であり、具体的にはコマンドの送信や音声連絡の発出となる。主体内の処理のブロック化のための "Go\_sub"や異常時対応のための手順分岐を表す "Jump"ならびに、並列作業の開始宣言のための "Parallel"等の概念がSOMLに必要な要素となる。入力の多くはテレメトリ・合成テレメトリであり、これらは宇宙機のテレメトリ・コマンドデータベースにより管理されており、テレメトリ名称によりSOMLによる運用の記述とリンクする。出力としてのコマンドには、入力値や状況依存性のあるパラメタ付きのコマンドが存在する。これらパラメタについては、大別して「主体内の処理として記述」、「Go\_sub"を利用し外部オブジェクトの中で計算しパラメタを受け取る」の2つの方式が考えられる。

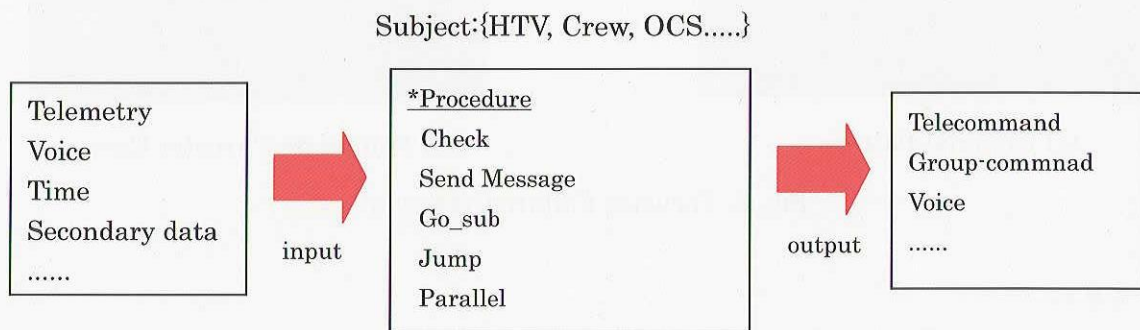


Fig. 4 Conceptual Model of Subject for SOML definition

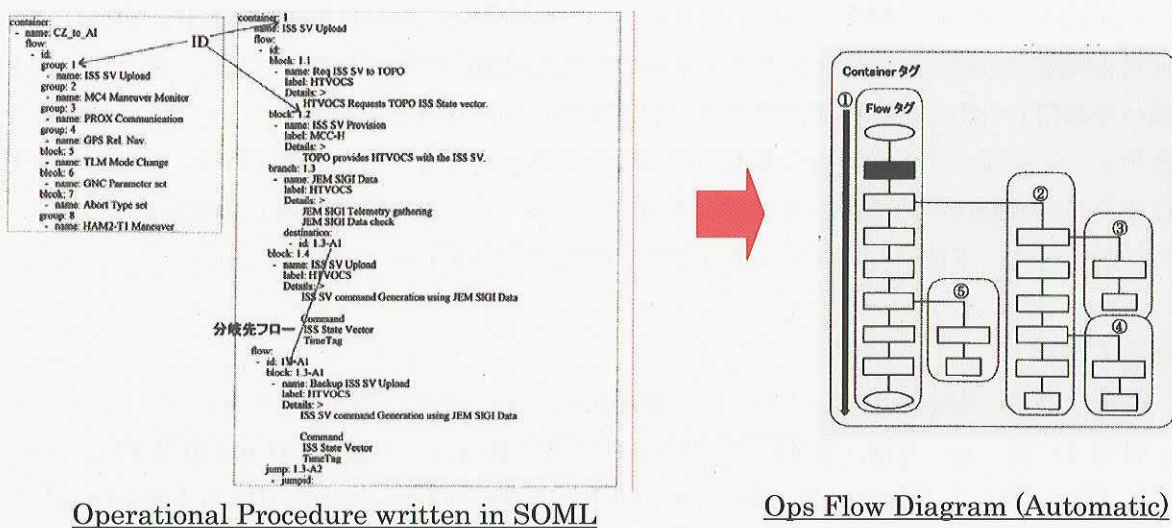


Fig. 5 Automatic Operational Flow Drawing

Fig.5 には SOML での運用手順の記述例と、これから自動生成した運用フロー図の例を示す。

## (2) シミュレータへの運用への利用法の検討

テレメトリを利用した宇宙機の異常検知技術の一手法として、国際宇宙ステーション (ISS) に接近飛行を行う HTV のスラスタ異常の発見法を検討した。検討では、ソフトウェアシミュレータを利用し、飛行に使用する 14 本のスラスタの一部に推力低下を発生させ、この際の HTV の位置・姿勢ならびにスラスタ噴射指令等の模擬時系列テレメトリデータの相関関係を解析することにより、異常の検知ならびに異常スラスタの特定を行う手法を研究し、基本点な成立性を確認した。Fig. 6 にダイナミクスモデルを利用した相関による故障検知の例を示す。正常時は縦軸横軸に配した 2 種の状態量が比例関係にあるが、故障発生時には大きく異なるパターンを示し、異常スラスタの特定が出来ていることがわかる。

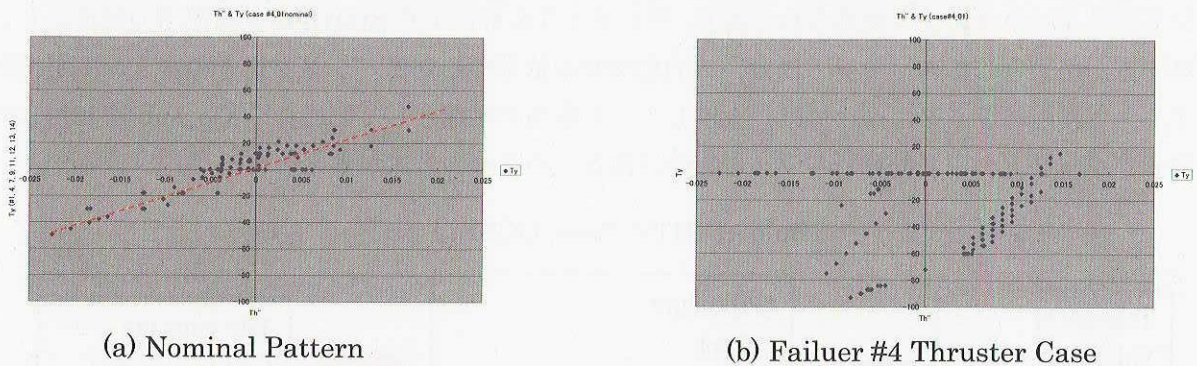


Fig. 6 Thruster Failure Detection

## 4. まとめ

宇宙システムの自動化・自律化は、地上システムや海外の宇宙システムとの競合の中、魅力ある高度なミッションを経済的に実施するシステムを構築する上で、必須の技術である。今年度検討した SOML の基本構造を用いて、今後は HTV の代表的運用を記述する「記述実験」を進め、構造・記述ルールの妥当性を評価の上改良を行い、本格的な採用を目指すとともに、SOML からの運用手順書ならびに送信コマンドファイルの自動生成機能の検討を行う。また、SOML の一般衛星への適用も目指し地球観測衛星での「記述実験」も行う予定である。一方、シミュレータ利用技術については、今年度実施し基本的成立性を見つけたスラスタ診断に加え、当グループに知見のある誘導制御関連機器の機器診断手法について、モデル情報を利用した機器診断手法について検討を進め、本技術もプロジェクトでの本格採用を目指す。

### 【参考文献】

- [1] 稲場, 福島, 山本, 川井, 小田: 宇宙機運用にかかる熟考・意思決定作業のシーケンス化・自動化に関する一考察, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会, 予稿集 CD-ROM(2F14).
- [2] S. Harauchi, T. Kojima, H. Koyama and N. Inaba: A Generation-Based Framework for Spacecraft Operation, Proc. 6<sup>th</sup> International Symposium Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations (RCSGSO)