

衛星自動運用システムの開発

永松 弘行^{*1}, 齋藤 宏文^{*1}

Development of Automatic Satellite Operation System

Hiroyuki NAGAMATSU^{*1} and Hirobumi SAITO^{*1}

Abstract

We are in progress to develop a system for automatic operation of a satellite in order to reduce human load at satellite steady operation phase. The ground station for small satellite REIMEI is used as a test bench for verification of the proposed method. In our new automatic operation system, a scheduler software as a substitutive operator manages all the operations through a unified procedure, including sending command, receiving telemetry, and driving antenna in accordance with an operation time line which is prepared before the operation pass. The scheduler also performs diagnostics of satellite anomaly based upon the received telemetry data and status of the ground station. In case that some anomaly of the satellite is detected, the scheduler initiates an emergency schedule that was prepared depending on the emergency level. The automatic operation system is nearly completed for downlink operations of the data recorder that account for 80% of REIMEI steady operation. This approach is very effective to reduce psychological and physical load of operators.

概要

衛星の定常運用における運用者の負担軽減を目的とする自動運用システムを開発中である。「れいめい」衛星の運用システム(相模原局)を実験ケースとしてシステムを構築した実例を紹介する。提案手法の中心となるソフトウェアである「スケジューラ」が、オペレータに代わり、運用システムの機能ブロックを取り出したAPIを通じて運用システム全体を制御する。すでに「れいめい」の定常運用の約80%を占める観測データのダウンリンクの自動運用を実現、相模原局にて実験継続中である。

1. はじめに

衛星やロケットは高度に自動化されたシステムであるが、その運用においては、人間(オペレータ)が行うマニュアル操作が多くの割合を占める。運用にはルーチンの作業がある一方で、システムの異常検知、それに対する適切な対応、復旧作業などの一連のタスクには、衛星および地上局についての高度な知識も求められる。衛星や地上局についての知識が豊富な人たちが必ずしも運用に従事しているわけではない。そのような場合は衛星および運用システムをブラックボックスとして扱うことになり、緊急時の対応には適切さを欠くこともありうる。地球周回衛星で夜中に運用パスがある場合など、オペレータの精神的・肉体的な負担は大きい。運用にかかるコストも無視できない問題である。一方で、今後ますます多くの衛星打ち上げプロジェクトが計画されており、それらに対応した運用体制を作り上げることも重要である。

衛星運用の現場にはさまざまな問題がある。すなわち、十分な運用要員が確保できるとは限らない、十分なスキルを

*1 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
(Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

持つ要員が確保できるとは限らない、運用時の精神的・肉体的負担が大きい、運用コストは削減傾向にある、などである。定常運用の負担軽減、効率化、コスト削減のための現実的な方策が求められると考える。運用システムを可能な限り自動化してオペレータの負担を軽減する方法がいくつか提案され、また、実施している例、機関もある [1][2][3]。

本稿では、衛星自動運用を実現するための一方法を提案する。本稿で紹介するシステムの最終目的は、「観測者(ユーザ)が運用計画を立て、それをサーバに登録すれば、以後の検証、運用、運用データのアップロード、運用ログ配信などの作業を自動的に行ってくれる」運用システムの実現である。その第一歩として、既存の設備をほぼそのまま使い、できる限りシンプルなシステムを用いて、コマンド送信、テレメトリ受信、衛星・地上局設備の監視・診断を自動的に行うシステムの実現を目指す。また、地球周回衛星における定常運用の自動化を主なターゲットとし、改修対象はソフトウェアのみとする。開発した自動運用システムは、ISAS/JAXAが開発した小型科学衛星「れいめい」の地上局(相模原局)をテストベッドとした運用試験に用いている。

本稿の構成は以下の通りである。第2章で、「れいめい」および相模原局の概要を述べる。第3章で、開発した衛星自動運用システムについて説明する。第4章で、自動運用の「れいめい」衛星・相模原局を用いた運用試験結果を紹介する。第5章で、自動運用システムの検証用に開発中の簡易衛星・地上局シミュレータについて紹介する。最後に第6章で、今後の課題を示し、本稿をまとめる。

2. 「れいめい」衛星と相模原局について

小型科学衛星「れいめい」(INDEX)はISAS/JAXAが開発した衛星である[4]。オーロラ観測と新規衛星技術の軌道上実証を目的とし、2005年8月24日、カザフスタンにあるバイコヌール基地からドニエプルロケットによって、光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS)のピギーバッグ衛星として打ち上げられた。2012年6月30日現在、軌道上にて順調に稼働中である。図1に「れいめい」のフライトモデルを示す。

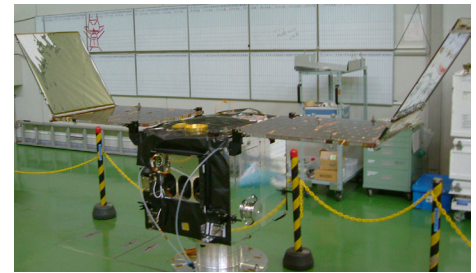


図1 「れいめい」フライトモデル

「れいめい」は専用地上局をISAS/JAXA相模原キャンパス内に保有しており、日常の運用はこの専用局(相模原局)を用いて行われる。相模原局は、簡易地上局による運用を開発当初からミッションの一部として捉え、ISAS/JAXA教職員、学生、およびベンチャーハード/ソフト開発者の協力で、インハウスの手法で開発を行った。また、運用計画コマンドの(半)自動生成、運用計画の事前検証の自動化など、運用を省力化するための様々な工夫が取り入れられている[5][6]。

相模原局の概略を図2に示す。運用計画コマンドを作成・検証する運用計画PC(Personal Computer)、軌道データサーバ、データ分配蓄積の役割を担うゲートウェイ、コマンド送信のためのコマンドPC、テレメトリ受信のためのテレメPC、テレメトリデータをコマンドPCやQL-PCに配信するサーバPC、オペレータが衛星の状態を監視するために用いるQL(Quick Look)-PC、アンテナ(3mφ、アップリンク/ダウンリンクともSバンド対応)のサーボ制御を行うアンテナ制御PCより構成される。また、衛星の動作を模擬する、搭載計算機のプロトタイプを使ったシミュレータ(試験運用システム)があり、これを用いたコマンド計画の事前検証も可能である。相模原局には、衛星運用に必要な設備一式が揃っており、これを用いた衛星運用システムを開発してゆけることが大きな特長である。ISASが運用する他の科学衛星の運用システムとは独立した環境でシステムを開発し、その成果は他の科学衛星への転用が期待できる。

3. 衛星自動運用システム

衛星自動運用の実現に必要な技術開発および実験検証[7]にあたり、既存設備を有効活用したシンプルなシステムによる実現を目指すという観点から、図2の相模原局をテストベッドとしている。相模原局では第2章で述べたように運用の省力化や自動化のための様々な工夫が取り入れられているが、それらをさらに一歩進める形で自動運用システムの実現を目指している。図3に自動運用システムの概略を示す。

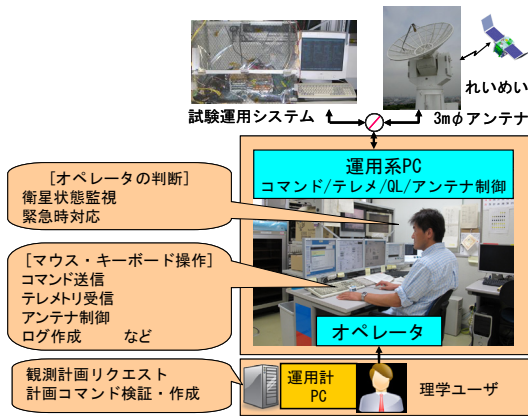


図2 相模原局の運用システム概略

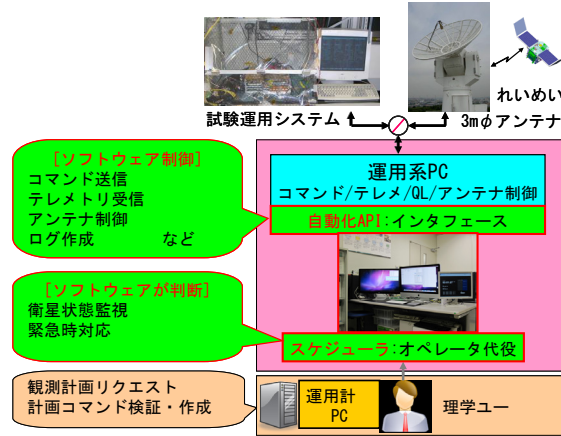


図3 自動運用システム概略

自動運用システムの開発方針は以下の通りである。1) 改修対象は運用システム「ソフトウェアのみ」とし、ハードウェアの改修、変更は行わない、2) 現用の運用システムソフトウェアに加える改修は最小限とし、現状の運用体制に支障をきたさないよう配慮する、3) 開発するシステムは現運用システム（特にコマンド・テレメトリ処理システム）とは独立性が高く、既存設備による定常運用を行いながら、自動運用システムの開発を可能とする。

自動運用システムの中心的役割を担うソフトウェア「スケジューラ」は、オペレータの代役として運用システム全体を管理・統括・制御する。スケジューラは、運用システム各PC（コマンドPC/テレメPC/アンテナ制御PC）と、運用システムの機能をブロック単位で取り出した自動化API(Application Program Interface)を介して通信（マウス・キーボード操作によるコマンド送信，データ受信をソフトウェアすなわちスケジューラが行う）する。図2と図3の違いを表1にまとめる。

表1 手動運用と自動運用の相違点

実施項目	手動運用	自動運用
コマンド送信 テレメトリ受信 など	キーボード操作, マウス操作による手動送信	自動化APIによる ソフトウェア制御
衛星状態監視 緊急時対応 など	人間が判断し, 状況に応じて対応	スケジューラが判断し, 状況に応じて対応

スケジューラは、あらかじめ準備された運用手順から生成されるスケジュールファイルにしたがって、自身の管理下にある運用システム各PCの動作を制御する。時刻情報については、入感/消感時刻、アップリンク(UPLINK)開始/終了時刻などをアンテナ予報値ファイルより抽出・整理し、ファイル(パス情報ファイル)にまとめる。可視時間帯の指定時刻に送信するコマンドがある場合には、運用計画から時刻情報を取得し、これもパス情報ファイルにまとめる。パス情報ファイルはスケジューラによる運用時間管理の基本情報を与える。スケジューラには運用システムのステータスやテレメトリ情報を読み込んで工学値変換する機能も実装し、状態監視による運用時間中の運用システムおよび搭載システムの監視・診断に用いる。この状態監視機能は、スケジューラの動作中はアクティブであり、例えば可視時間中にテレメトリデータのロックオフを検知して自動的に再ロック操作をすることで、データ欠損を防ぐ。また、可視時間中にチェック項目に異常を検知した場合、診断レベルに応じて、あらかじめ準備された「緊急スケジュール」を実行する。例えば衛星がセーフホールド状態で入感した場合、地上局のアンテナが停止した場合、受信機などが故障した場合などは、オペレータにメール通知し、オペレータに復旧運用を引き継ぐ。運用終了後は、運用データ(テレメトリデータ、コマンド送信履歴、地上局設備データなど)をデータサーバに登録するとともに、ユーザに運用ログとしてメール配信する。

図4にスケジューラによる自動運用シーケンスをまとめる。ただし、主だった機能の提示にとどめ、運用前後処理のいくつか(スケジュールファイル準備, アンテナ予報値取得, 運用データ登録, メール配信など)は省略した。

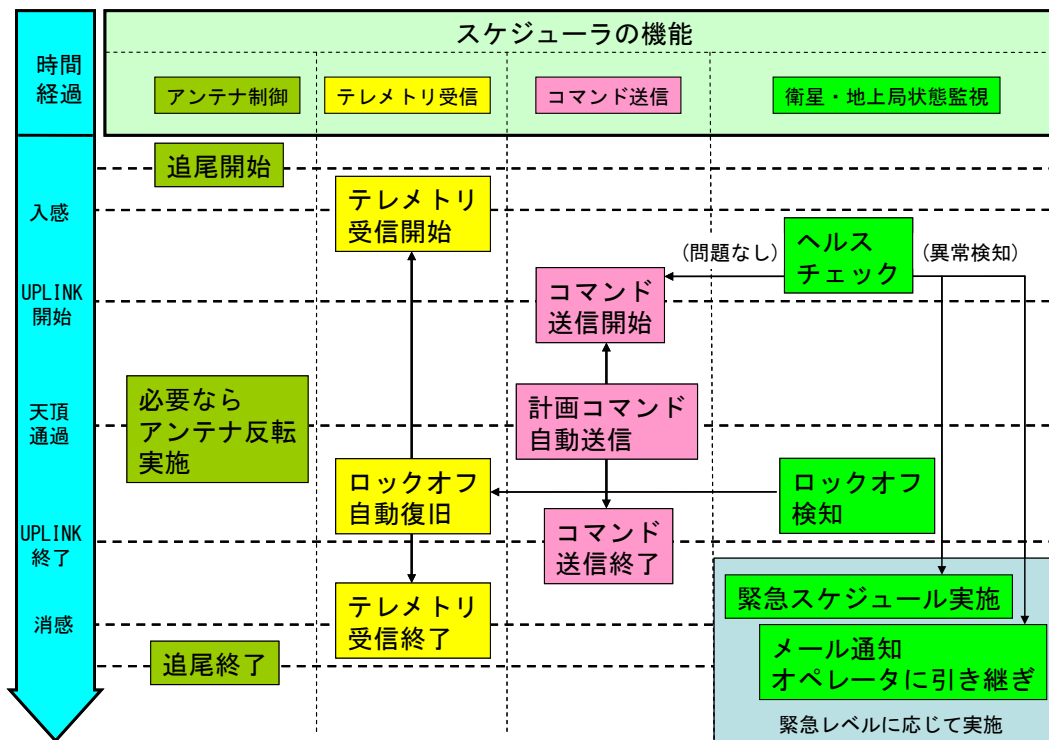


図4 自動運用システムによる自動運用シーケンス概略

4. 自動運用実験

自動運用システムの機能確認のため、「れいめい」実機を用いての自動運用実験を、2010年末より継続している(実験回数は2012年6月末現在、400回以上)。その結果を紹介する。「れいめい」の定常運用では、週単位では、月曜日・木曜日の昼可視時間帯で観測計画をアップロードし、火曜日・水曜日・金曜日の昼可視時間帯では、観測データのダウンリンクを行っている。前者の可視時間帯の一部、後者の可視時間帯を使って自動運用実験を継続している。

典型的な実験結果を、図5、図6に示す。図5、図6の縦軸は相模原局のアンテナ受信レベル〔dBm〕を、横軸は時刻〔UT〕を、それぞれ表す。図5はアンテナ最大仰角が約 40° 、図6はアンテナ最大仰角が約 89° である。図6の場合、仰角・方位角方式アンテナの駆動問題対策として、天頂通過時にアンテナ反転を行う。相模原局のアンテナはプログラム追尾方式であり、スケジューラはアンテナ予報値の登録、追尾モードへの切換を可視開始時間前に行う。スケジューラは可視開始時間になると衛星からの信号を自動的にロックオンし、データ受信を開始する。また、スケジューラは受信レベルが設定した閾値を上回ると判断したら、ビットレートを低速から高速に切り替え、テレメトリ受信モードも切り替え、観測データのダウンリンクを開始する。可視時間中、アンテナパターン、衛星の姿勢、アンテナ反転動作に起因するアンテナ受信レベルの変動がある場合でも(例えば図5の02:23:52付近、図6の15:41:23付近)、スケジューラが変動を予測し(受信レベルの絶対値〔dBm〕と絶対値の変動〔dBm/sec〕が、あらかじめ設定した閾値と比較して高いか低いかを判断する)、受信ビットレートや受信モードを切り替えることで、データ欠損を防いでいる。可視終了時刻になると、スケジューラは観測データの受信を中止し、運用終了の手続き(ビットレート、テレメトリ受信モードの変更)を行う。スケジューラは図4のシーケンスにしたがって人間のオペレータと類似の挙動を実現しており、この意味において実験結果は良好と言える。

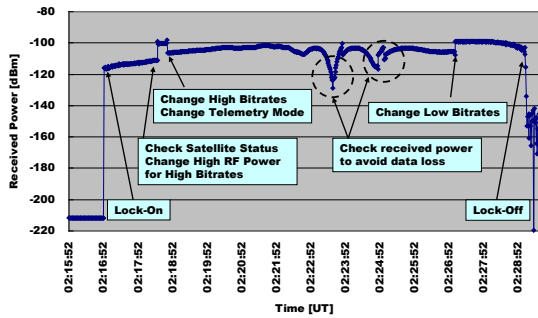


図5 自動運用実験結果

(アンテナ最大仰角:40°, アンテナ反転なし)

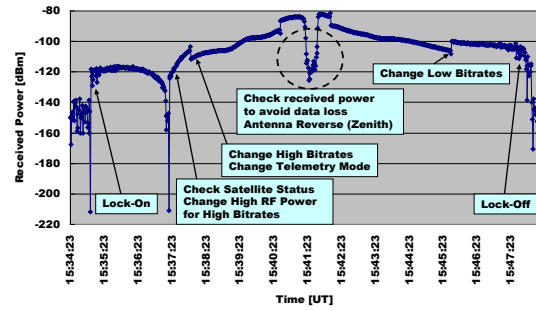


図6 自動運用実験結果

(アンテナ最大仰角:89°, アンテナ反転あり)

ここで、人間のオペレータの労力が自動運用システムによってどの程度軽減されるのか、簡単に考察してみる。人間のオペレータが運用する場合、図5、図6中の四角で囲んだ操作を、すべてキーボード・マウス操作にて行う。コマンド送信は、コマンド選択、必要ならパラメータ入力、送信、結果確認、の4ステップで構成される。自動運用システムでは、この4ステップすべてをソフトウェアが制御しており、オペレータは「自動運用の様子を見ているだけ」である。また、オペレータは運用中に衛星・地上局の状態監視・緊急時対応を行うが、これは自動運用システムの衛星・地上局状態監視機能が代行し、例えば信号ロックオフ検知・修復は自動化される。軽度障害の場合は、あらかじめ準備してある(検証済みの)緊急スケジュールを自動送信する。地上局機器トラブル、セーフホールド時対応など、人間が介在せざるを得ない場合は、オペレータに通知・運用を引き継ぐ。2010年末以来の400回以上の自動運用実験中、セーフホールド状態で衛星が入感し、人間が対応せざるを得なかったケースは一件だけであり(これ以外は、原則「見ているだけ」である)、自動運用による定常運用負担軽減の効果は大きいと考える。観測データのダウンリンクを例に、自動運用によってどの程度の労力が軽減されるか、キーボード・マウス操作数で手動運用と比較してみる。コマンドを一つ送信する場合、コマンド選択・送信の二回、パラメータ入力が必要な場合は、パラメーター一つにつきキーボード操作一回、とカウントした。結果を表2にまとめる。自動運用システムにより、オペレータが行うキーボード・マウス操作はすべてソフトウェア制御に置き換えられており、この点でも負荷軽減の効果は大きいと言える。

表2 手動運用と自動運用のキーボード・マウス操作数比較

コマンド入力 操作など	手動運用		自動運用	
	キーボード操作	マウス操作	キーボード操作	マウス操作
入感時	2	10 ~ 12	0	0
UPLINK 中	2 ~ 4	6 ~ 30	0	0
消感時	2	10 ~ 12	0	0

今後も実績を重ねつつ、最終的には観測計画コマンドのアップリンクも含め、定常運用のほぼすべてのシーケンスを自動化し(セーフホールド状態からの復帰などを除く)、定常運用のさらなる負担軽減を目指したい。また、緊急時のリモート運用にも対応する予定である。

5. 簡易衛星・地上局シミュレータの開発について

現在の自動運用システムは、第4章で述べたように、実運用に適用するための一定の目処は立った。一方で、アンテナ受信レベルの変動に信号の欠損なく追従するためのアルゴリズム、衛星状態をモニタし、問題がある場合には適切なコマンド処理を施すためのアルゴリズム、などの自動化アルゴリズムの検証に限界がある、という課題が浮上してきた。その理由は、自動化アルゴリズムの検証に用いている相模原局・試験運用システムの出力信号が、必ずしも試験信号と

して期待するものにはなっておらず、試験パターンに限界があり、十分な検証ができていないと言いき難いからである。そこで、自動運用アルゴリズムの検証を容易にするため、衛星実機および地上局の挙動に近い(擬似)信号パターンを容易に生成できるシステム「簡易衛星・地上局シミュレータ」を開発中である(図7)[8]。擬似信号を発生できれば、自動運用アルゴリズムの検証がより確実になるし、自動運用システムでは現時点ですでに自動的に連続して複数の運用シナリオを走らせることができるので、試験もやりやすくなる。自動化アルゴリズム検証テストベッドとしての相模原局の有効活用も図れる。

この簡易シミュレータの一部機能は自動運用システムの改良に用いている。簡易シミュレータは、図7中にある「手のひらサイズ」の計算機に実装されている。これは安価だが十分な処理能力を持つ計算機で、一般に高価なシミュレータ導入の敷居を下げる効果(例えば開発メンバー一人に一台配布するなど)を期待している。また、簡易シミュレータはXML形式で記述される衛星・地上局データベースを書き換えることで他衛星・地上局への適用可能な汎用性を確保しており、他衛星・地上局への適用も検討中である。簡易シミュレータの詳細については、別の機会に発表させていただく予定である。

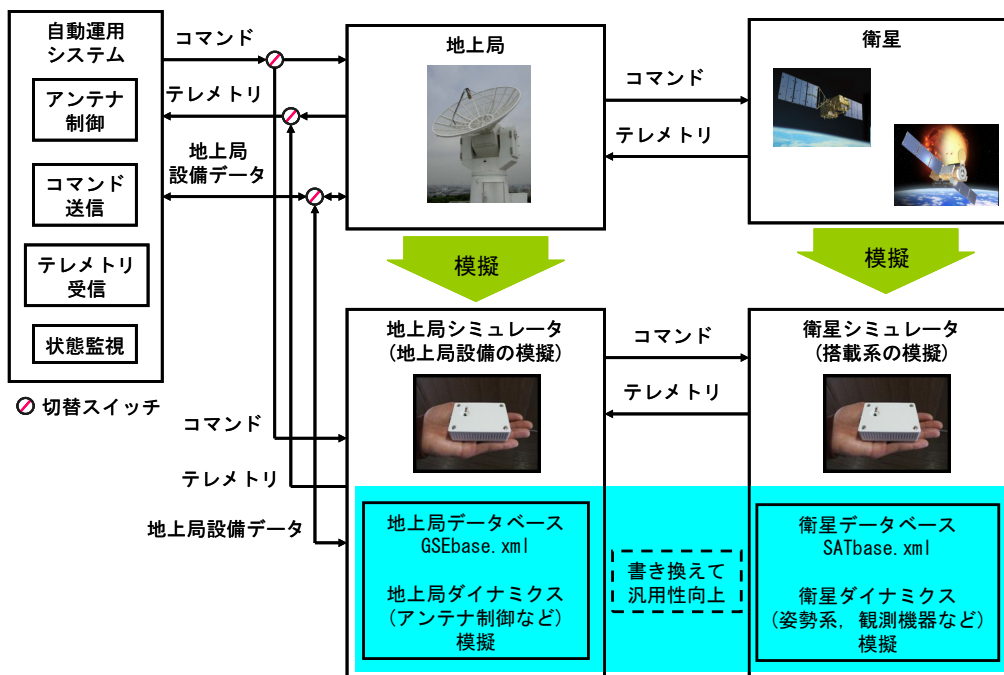


図7 簡易衛星・地上局シミュレータの概略

6. おわりに

本稿では、定常運用の負担軽減を目的として開発中の衛星自動運用システムの概略を紹介した。また、本システムを相模原局に実装し、「れいめい」衛星実機を用いての試験運用について述べた。今後は、観測計画コマンドの登録を含む定常運用の全自動化を目指す。緊急時に対応可能な、携帯端末を用いたリモート運用機能の検討も進める。他局・他衛星に転用可能なノウハウも蓄積したい。

謝辞

日頃からご指導ご鞭撻頂いております、「れいめい」開発メンバ、運用メンバの皆様、自動運用システムのソフトウェア開発でお世話になっております秋丸忠隆氏に、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Jean-Marc Soula: “Automation of CNES Ground Station Networks”, 8th International Workshop on RCGSO, Tsukuba, Japan, 2009.
- [2] D.Chung et.al.: “Concept Design of the Generic Mission Operation System”, 8th International Workshop on RCGSO, Tsukuba, Japan, 2009.
- [3] J.Jackson et.al.: “NASA’s Ground Network’s Right Sizing and Transition to Outsourcing” , 8th International Workshop on RCGSO, Tsukuba, Japan, 2009.
- [4] H. Saito et.al. : “An overview and initial in-orbit status of “INDEX”satellite”, 56th International Astronautical Congress, Fukuoka, Japan, Oct. 2005, IAC-05-B5.6.B.05.
- [5] S. Fukuda et.al.:“Flexible operation system for the microsatellite ‘REIMEI’ (INDEX)”, SpaceOps 2006, Rome, Italy, AIAA-2006-5895, June 2006.
- [6] 高原他 : れいめい衛星の統合化と効率的運用について, 第 50 回宇科連, pp.542-546, 2006.
- [7] H. Nagamatsu and H. Saito : “Development of Automatic Operation System-Using REIMEI Ground Station as a Test Bench”, 62nd International Astronautical Congress, Cape Town, South Africa, Oct. 2011, IAC-11-B4.3.4, 2011.
- [8] 永松 : 簡易衛星シミュレータの開発, SANE, SANE2011-163, 三重大学, 2012.