

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

「すざく」衛星コマンド計画作成システムの開発

寺島 雄一，「すざく」運用チーム

2007 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

「すざく」衛星コマンド計画作成システムの開発

寺島 雄一^{*1}, 「すざく」運用チーム^{*2}

Development of Command Plan Generation System for the Suzaku Satellite

By

Yuichi TERASHIMA^{*1} and the Suzaku operation team^{*2}

Abstract: The X-ray observatory Suzaku observes celestial objects according to a list of targets selected by a peer review process. Command plans to conduct the observations are made at ISAS/JAXA and sent to the satellite from the tracking station in Uchinoura Space Center (USC). We developed a command plan generation system, which allows us to prepare daily plans easily and reliably. Details of the system, status of satellite operations, and future prospects are discussed.

Keywords: 「すざく」衛星, コマンド, 運用

概 要

X線天文衛星「すざく」は公募によって選ばれた観測対象の観測を続けている。観測を進めるために必要な衛星のコマンド計画は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部で作成し、内之浦宇宙空間観測所から衛星に対して送信する。我々はこのような日々の観測を容易かつ確実に行うための、コマンド計画作成システムを開発した。システムの詳細、これまでの衛星の運用の経緯とともに、今後のコマンド作成システムへの展望を述べる。

1. は じ め に

2005年7月10日に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」は、世界の研究者に開かれた軌道上天文台として、様々な天体の観測を進めている¹⁾。観測を安全かつ確実に進めていくためには、日々の観測に必要なコマンド計画を用意するためのコマンド作成システムを確立することが必須である。本稿では、観測対象リストをもとに、観測スケジュールを決定し、コマンドを作成する一連のシステムについて述べる。

2. コマンド作成の概要

「すざく」衛星は、初期の機器立ち上げを経て、打ち上げ後約半年間にわたりサイエンスワーキンググループによって選定された天体の観測を行ったあと、公募観測を進めている。世界の研究者によって提案され、審査によって採択された観

* 1 Ehime University

* 2 The Institute of Space and Astronautical Science/JAXA

測対象のリストをもとに、スケジューリング担当者により長期スケジュールを立案する。観測時期が近づくと、より綿密な観測スケジュールを作成し、観測提案者による観測モード等の最終確認を行う。こうして決定された最終的な観測計画に基づき、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部相模原キャンパス（以下、宇宙研と呼ぶ）において科学者2名からなる当番（以下コマンド作成当番と呼ぶ）により、原則として日曜と年末年始を除き毎日コマンド計画作成が行われる。宇宙研において作成、チェックされたコマンドは内之浦宇宙空間観測所（Uchinoura Space Center; USC）へ送信し、内之浦に滞在している科学者2名からなる当番（USC 当番）によりチェックが行われる。（コマンド作成および USC 当番は、主に日本の大学・研究機関の X 線天文学に関係した研究グループの研究者・大学院生が交代であたっている）。USC でのコマンドチェックで問題が見つければコマンド作成当番に修正を依頼し再チェックを行う。こうして、確認が終了したコマンドは、USC より衛星に送信される。このように一連のコマンド作成は、(1) 観測に必要な情報を管理し、観測計画を決定する、(2) 最終決定された観測計画に基づきコマンドを作成・チェックする、という手順を経て行われる。

様々なコマンドは衛星共通系（データ処理、姿勢制御など）用のものと観測系用のものからなる。観測系は4台の X 線 CCD カメラ（X-ray Imaging Spectrometer; XIS）²⁾ と、硬 X 線検出器（Hard X-ray Detector; HXD）³⁾ を、観測計画にあわせて適切な観測モードに設定し観測データを取得する。

作成するコマンドは主に、USC から追跡中に衛星に送信して実行するリアルコマンド、衛星のメモリ上に書き込んだプログラム（コマンド内容と実行する時刻）に従ってコマンドを実行する Operation Program (OP)、実行時刻を秒単位で指定できる時刻指定コマンドからなる。時には、ある種のバイナリデータを衛星に書き込む RAM サブ計画と呼ばれるコマンド計画も作成することがある。具体的な例としては、必要な観測モードにあわせて XIS 検出器の CCD の駆動クロックパターンを RAM サブ計画として書き込む場合がある。

3. ネットワーク構成と情報の流れ

観測をスケジューリングし観測計画を決定する部分は「すざく」プロジェクトの汎用ネットワーク上の計算機を用いて行う。観測計画は各週の観測に割り当てられる1名の担当者（コンタクトサイエンティスト）がコマンド作成当番に送信する（コンタクトサイエンティストは宇宙研の助手と研究員が交代であたっている）。それ以降のコマンド作成から USC での衛星へのコマンド送信までの作業は、外部からファイヤーウォールによって分離された衛星専用ネットワーク（衛星 LAN）上に接続された計算機を用いて行なう。コマンド作成当番は送られた観測計画の情報をもとに、衛星 LAN に接続された計算機を用いてコマンド作成を行なう。完成したコマンドは衛星 LAN を通じて宇宙研の「データ蓄積装置」、USC の「データ蓄積装置」を経由し USC 衛星管制へと送られる。

4. 観測計画

4.1. 観測データベース

「すざく」衛星の観測対象は公募によって選ばれる。応募する研究者は観測提案書を提出する際に、観測天体の座標、観測時間、観測機器のモード、衛星姿勢や観測時期に対する制限など、観測計画の決定に必要な様々な観測パラメータも電子的に投稿する。これらの情報は、株式会社セックと宇宙研によって開発された観測データベース（Observation Data Base; ODB）に保持され、観測計画の策定から観測後のデータ処理やデータ管理にも用いられる。観測上重要な情報を常にこの ODB から取得することで観測に必要なパラメータ管理での人為的ミスができるかぎり排除してコマンド作成ができるようになっている。

次に述べるようなシステムによって観測スケジュールがほぼ決定すると、ODB の内容を観測提案者に示し内容の再確認を求めている。これにより観測計画に問題がないことを確認し、貴重な衛星の観測時間がミスにより失われることをできる限りなくすようにしている。パラメータの修正が必要な場合は ODB の内容を変更するが、この際にも複数の担当者によって多重の確認を行っている。

4.2. 観測スケジュールの作成

公募と審査を経て選ばれた観測対象リストをもとに、いくつかの要素を考慮に入れてスケジュールを作成する。まず、衛星を安全に運用するために衛星の姿勢に対する制限を考慮する。具体的には、(1) 衛星に必要な電力を確保するために太陽電池パドルと太陽との間の角度（太陽角）が適切な範囲にあること、(2) 望遠鏡に太陽からの光が入らないこと、(3)

衛星の姿勢を決定するためのスタートラッカー（STar Tracker; STT）の視野に適切なガイド星が入っており、視野内に惑星がなく、月が視野の近くにないこと、(4) 直前の観測対象から次の対象への姿勢変更時に姿勢制御が安全にできること、などが要請される。

衛星の安全とともに、できる限り観測効率がよくなるように考慮する。一つの天体を観測しているときでも、衛星が地球の周囲を周回するのに応じて望遠鏡の視野が地球に遮られたり（地没と呼ぶ）、南米上空の荷電粒子が多い領域（South Atlantic Anomaly; SAA）を通過したりしている間は有効な観測が行えない。貴重な衛星の観測時間をより有効に使うため、衛星と地球と観測対象の位置関係を考慮し、できるだけ地没の時間が短い時期や、地没とSAA通過が重なるような時期を選ぶことで、観測の効率がよくなるようにスケジュールを作成する。さらに、観測の目的によっては、観測提案者が指定した観測時期に対する制限がある。例えば、決まった時間間隔で天体の変化を観測する、天体がある特別な状況にある時間帯を観測する、といった要請が考えられる。これらもスケジュール時に考慮される。

このような条件を満たすようなスケジュールの作成作業には、NASAで開発され様々な衛星の運用に実際に使用されている天文衛星の観測スケジュール作成用ソフトウェア TAKO（Timeline Assembler, Keyword Oriented）に、「すざく」用に必要な機能を付け加えたものを使用している。スケジュール作成に必要な観測天体の座標などの情報は、前節で述べた ODB より取得する。また、衛星の軌道要素も決まったフォーマットのファイルがあり、それを読み込むようにしている。これらの情報をもとに TAKO でスケジュールを作成した後、手作業で調整し最適化を行う。作成されたスケジュールは、ODB から取得した観測パラメータとともに決まったフォーマットのファイル（短期観測計画ファイル）に出力し、この後のコマンド作成に使用する。ここまでの流れを図1の上側に示す。

「すざく」による観測の公募は1年に1度の頻度で行われており、採択された1年分の観測対象のリストをもとにスケジュール作成を行う。観測対象の選定の際には、優先順位（Priority A, B, C）も決められ、それぞれ全観測時間の50%、40%、50%の時間が割り振られる。このうち優先順位の低い Priority C の観測対象はスケジュール作成の際のバッファとして用いられ、観測時間とスケジュール作成の条件が許される場合のみ観測される。

時には、天体の突発現象に応じて急遽観測を行う、機器の臨時メンテナンスを行う、などといった理由でスケジュール変更が必要になる場合もある。そのような場合に対応するため、長期スケジュールと短期スケジュールの2段階にわけてスケジュールを作成している。まず1年分の観測対象リストから長期スケジュールを作成し、およそ週単位で観測予定天体を決定する。観測が近づくと、観測の進行状況などを考慮してより厳密な短期スケジュールを作成する。短期スケジュール決定前には、コンタクトサイエンティストが観測提案者に観測モードなどの最終確認を求める。このように、詳細な観測スケジュールは短い期間のみをカバーするようにし、臨機応変なスケジュール変更をやりやすくしている。長期および短期スケジュールは「すざく」衛星のウェブページ上で公開し、ユーザが把握できるようになっている。

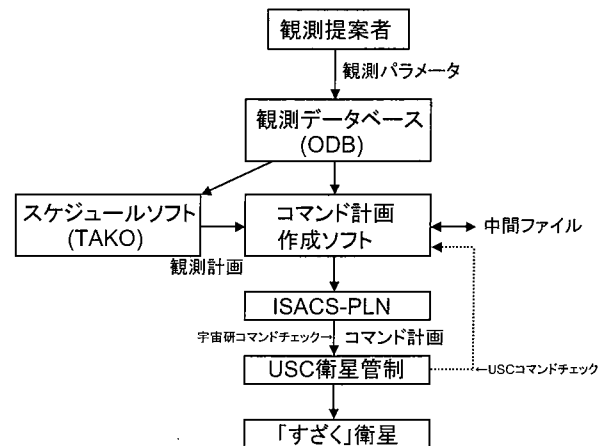


図1 コマンド計画作成の流れ

5. コマンド計画

5.1. コマンド計画作成ソフトの概要

観測スケジュールなど、必要な情報をもとに日々のコマンド計画を作成するのがコマンド計画作成ソフトである。コマンド計画はまず ORL（Operation Request Language）と呼ばれる言語で記述し、富士通株式会社と宇宙研によって開発された衛星コマンド作成システム ISACS-PLN（Intelligent Satellite Control Software - Planner）でコンパイルすることで、衛星管制に対応したフォーマットのファイル（コマンド計画インターフェースファイル; cmdi と呼ぶ）になる⁴⁾。この ISACS-PLN は「すざく」、「あかり」、「ひので」で共通に使われているシステムである。宇宙研でのコマンド内容のチェック後、この cmdi ファイルを USC に転送し、USC でのコマンドチェック後に衛星に対して送信される。ここまでの流れを図1に示す。

ORL でコマンド計画を記述するためのソフトウェアは、多数の小さなツールのから構成されており、これらが情報をやりとりするための複数の中間ファイルを介しながら ORL 言語でコマンドを作成する。主な記述内容はコマンドを実行する

時刻を定義する「イベント時刻対応表」、コマンドの組み合わせである「シーケンス」の定義、その時刻に実行したい一連の「シーケンス」を記述する「実行定義」である。これらの内容の例を図2に示す。

(上) イベント時刻対応表の一部。あるイベントが起こる時刻を一覧にしてある。この例の場合、上から順に「A 399_401_FILAMENT」という名称の観測対象観測中にデータレートをLowにする」、「望遠鏡の視野が地球の昼部分を見始める」、「SAAに入る」、「望遠鏡の視野が地球の夜部分を見始める」、「SAAを出す」というイベントの時刻を意味する。

(中) シーケンス定義の例。1番目の例は、衛星がSAAに入るときにXIS検出器に対して実行されるコマンドシーケンス。「XISのデジタルエレクトロニクスをstdbyモードにし、20秒以上の時間間隔を置いてから、XISのアナログエレクトロニクスをリセットする」という内容になっている。2番目の例は、「XISを5X5という観測モードに変更する」という一つのコマンドからなるシーケンス。これらの例のうち、INTERVALとSETで始まる行はISACS-PLNの中で処理され衛星には直接送信されない。SETは、ISACS-PLNの中で定義できる変数(モード変数)であり、次の実行定義の例のように条件判断に用いることができる。

(下) 実行定義の例。イベント時刻対応表の中で定義されている、「A 399_401_FILAMENT_SH」の時刻になったら、この一連のシーケンスを実行する。イベント時刻対応表で、同じイベント名で複数の時刻を記述することで、同じパターンのシーケンスを指定したすべての時刻に実行することができる。ここでは、「XIS_EDIT」というモード変数を使い条件判定をしている。この例の場合「XISの観測モードが5X5モードでなければ、5X5モードに変更するコマンドシーケンスを実行する」という意味。

```
A399_401_FILAMENT_LOW : 2006/08/21.17:33:39 ;
DAYEARTH                : 2006/08/21.18:03:59 ;
SAAHXD_IN               : 2006/08/21.18:03:59 ;
NIGHTEARTH              : 2006/08/21.18:22:59 ;
SAAHXD_OUT              : 2006/08/21.18:28:59 ;
```

```
DEFSEQ (OP) : seq_xis_saa_in {
  CMD : XIS_STDBY F0 ;
  INTERVAL : 20 ;
  CMD : XIS_AE_ONLY_RESET F0 ;
}

DEFSEQ (OP) : seq_xis_5x5 {
  CMD : XIS_5X5_MODE F0 ;
  SET : XIS_EDIT ~= xis_5x5 ;
}
```

```
START : A399_401_FILAMENT_SH {
  CASE : XIS_EDIT ~= xis_5x5 {
    SEQ : seq_xis_5x5 ;
  }
  DEFAULT { /* */ }
}
```

図2 ISACS-PLN への入力ファイルの例

5.2. コマンド計画作成とチェックの手順

コマンド作成は次のような手順で行う。各手順がほぼ一つのソフトウェアツールで実現されており、コマンド作成者はソフトウェアを順に走らせ、一部で簡単な手編集を行うだけでコマンドを完成させることができる。ツールはC言語、perl言語、またはシェルスクリプトで書かれている。各コマンドは表1に示すような中間ファイルを介して必要な情報をやりとりする。

(1) 衛星追跡予定の決定

「すざく」の定常運用で使用する地上局はUSCのみであり、USCでの衛星追跡のスケジュールをもとにコマンド計画を作成する。「すざく」の軌道の1周回は約96分で、USCでは通常連続した5パスを追跡する。地上局のスケジュール(他衛星の追跡予定との調整など)によって3または4パスの運用になる場合もある。このような追跡スケジュールと地上局から見た衛星の仰角の計算結果から追跡予定時間帯を決定し、決まったフォーマットのファイルに保持する。それをもとに以下で様々なコマンドを作成する。

(2) 観測対象情報の取得

追跡予定を決定すると、どの期間のコマンドを作るべきか決まる。通常は、運用する日のUSCパスでOPを衛星に送信、実行開始し、次の運用日のUSCパス終了までの期間のコマンド計画を作成する。この期間中に観測を行う天体と、その直前の観測天体のパラメータを「短期観測計画ファイル」から読み込み、これをもとにコマンドを作成する。また、コマンド作成者はこの観測計画の内容を把握し、コマンド作成とチェックに利用する。

(3) 衛星状態の計算

コマンド作成の期間、観測対象の情報、衛星の軌道要素をもとに、観測中の衛星の状態を計算する。具体的には各時刻での、衛星の位置(座標、高度、SAA中か否か)、地上局から見た衛星の仰角、望遠鏡の視野と地球との位置関係、衛星の日陰日照(衛星が地球の陰になっているか、太陽があたっているか)などを計算しファイルに保持する。この計算結果はグラフィック表示が可能であり、衛星の状態が一目でわかるようになっている。グラフィック表示の例を図3に示す。この計算と表示を行うツールを「dp10」と呼んでおり、他の衛星の運用にも使えるように拡張性を持たせてある。衛星状態の

計算のためには、衛星の軌道や天体の座標計算を行うためのライブラリである `atFunction` を使用している。このライブラリは、日本の X 線天文衛星の運用とデータ解析のために開発され現在も改良が続けられている。また、NASA で X 線観測データ解析ソフトウェアパッケージの一部として管理・配布もされている。

(4) 軌道関連イベント時刻の作成

衛星の周回とともに、様々な衛星状態が変化していく。そのタイミングにあわせて実行する各種コマンドの時刻を先に計算した衛星状態をもとに決定し、イベント時刻対応表を作成する。例えば、USC のリアルパスの直前にアンテナの出力パワーを上げる、SAA に出入りするときには検出器の動作を変える、などの時刻の一覧を出力する。

(5) データレートの切り替えイベント時刻の作成

「すざく」衛星には半導体データレコーダ (Data Recorder; DR) が搭載されており 6 ギガビットのデータを記録することができる。この限られた容量に必要なデータを確実に記録し DR を有効に活用できるよう、衛星のサブシステムから出力されるデータを編集し、データ量 (データレート) を切り替えることができるようになっている。データレートは Super High, High, Medium, Low の 4 種類が使用可能で、それぞれ 512 Kbps, 256 Kbps, 128 Kbps, 32 Kbps までのデータを出力できる。これらの切り替えは先に計算した衛星状態をもとに、期待される観測データの質を考慮して決定する。例えば、SAA 中では有効な観測データは取得できないため、観測機器からのデータ出力を減らし、よい条件で観測データが取得できる時間帯にはデータ出力を増やし、質のよい観測データをより多く記録するようにしている。データレートの割り当ては、地上局の追跡予定を考慮しデータが確実にダウンリンクできるように行う。あらかじめマージンをとったデータ量の上限値と、より高いデータレートを割り当てる観測条件の優先順位を定義しておくことで、ほぼ自動的にデータレートを割り当てることができるようになっている。これらの定義は、設定ファイルを書き換えることで簡単に更新できるようになっている。コマンド作成後、dp10 ツールにより、カラーでグラフィック表示されるデータレート割り当てを確認し、必要に応じて切り替えタイミングを手編集してよりよい観測データを得られるよう工夫をすることもある。

(6) USC リアルコマンドの作成

USC からの追跡時に送信する一連のコマンドを作成する。ファイルに記録された追跡予定と、その日の運用計画 (どのパスでどのような運用をするか) をもとに、必要なコマンド (DR の再生、姿勢系パラメータの書き込み、非可視中のコマンド (OP) の書き込みなど) を作成する。運用計画は宇宙研のコマンド作成当番が、追跡予定と観測スケジュールを考慮して毎日決定する。この決定事項は決まった用紙に記入して USC に送信し情報を共有する。

各リアルパスでは、DR に記録されたデータをダウンリンクする。確実にデータを取得するため、次の 2 点を考慮して DR の再生を中断するようなコマンドを用意している。まず、地上局から見た衛星の仰角が大きいと、地上局アンテナは衛星の追尾を一旦中断して、アンテナの向きを反転させる必要がある、この間は DR 再生を中断する。コマンドはあらかじめ用意しておき、コマンドを送信するタイミングは USC で判断する。次に、衛星に搭載されている通信アンテナのうちダウンリンクに用いる X 帯アンテナは、そのアンテナビームパターンと地上局との位置関係によっては、データの通信に欠損が起こる場合がありうるということが実際の運用からわかっている。データ欠損ができるかぎり起こらないように、あらかじめ衛星と地上局との位置関係を計算し、欠損が起こりうる時間帯には DR のデータ再生を行わないよう、指定した時刻に DR 再生の中断と再開ができるような時刻指定コマンドを用意する。なお、USC では毎パス終了後にデータが完全に取得できているか確認し、欠損があった場合は次のパスで該当部分の DR を再び再生してすべてのデータを取得することになっている。

「すざく」はあらかじめ決められたスケジュールに従って、多くの天体を順に観測している。次の観測天体へ向けた姿勢変更が予定されているときには、その天体観測時の衛星の姿勢情報 (スタートラッカの視野内に見える星のカタログ) を USC でリアルパス中に衛星に書き込む。なお、姿勢変更 (maneuver) 開始コマンドは OP の中に書き込んである。

(7) 観測装置関連コマンドの作成

観測装置関連のコマンドは、ほぼ毎日決まったパターンで実行されるものと、観測対象に応じて変わるものがある。前者のコマンドはあらかじめ orl で記述して用意しており、コマンドの中に取り込まれるようになっている。具体的な例としては、HXD 検出器の光電子増倍管用の高電圧電源を SAA に入る前に落とし、SAA を出た

表 1 主要な中間ファイルの内容

ファイルの名称	主な内容
観測計画ファイル	観測対象の名前、座標 姿勢変更の開始時刻 各データレート XIS の観測モード予想される XIS 検出器での X 線計数率
passid (追跡予定)	作成中コマンドを用いる予定日の USC 追跡の開始/終了時刻 その翌日の USC 追跡の開始/終了時刻 USC から見た衛星の最大仰角
衛星状態ファイル	各時刻での衛星の状態 (衛星の座標と高度、USC から見た衛星の仰角、SAA 中か否か、望遠鏡の視野が天体を見ているか、星地球を見ているか、夜地球を見ているか、など)

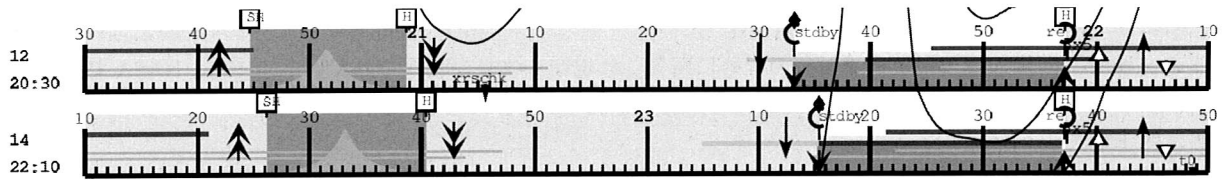


図3 dp10 プロットの例。一段が100分（おおよそ1周回）で時間とともに変わる衛星の状態を表示している。この例の場合、図の一段目が20:30から22:10、二段目が22:10から23:50までをカバーしている。20:45と22:26ころから始まる山状に見える記号がUSCから見た衛星の仰角で、リアルパスに対応する。21:33と23:16から始まる帯がSAAを示す。衛星状態に加え、コマンドを記号などで表示しコマンド計画の確認ができるようになっている。例えば、SAAに入る前にHXD検出器の光電子増倍管用の高電圧を落とし（21:30と23:12の下向き矢印）XIS検出器をstandby状態にする（21:33と23:15のstdbyの文字）、SAAを出た後に、HXD検出の高電圧を上げ（22:04と23:44の上向き矢印）XIS検出器をrestartさせる（21:57と23:37のreの文字）。その他のコマンドも文字や記号で書き込まれている。

後で再投入する、などのパターンがある。観測対象に応じて変わるコマンドも、頻繁に使われるものは観測計画ファイルを参照して自動的にコマンドが作成できるようなツールを用意してある。このような例としては、XIS検出器のSAA前後の動作がある。SAA前にXIS検出器をstandby状態にするが、SAA後には観測対象とその時点でのデータレートに応じて適切な観測モードに復帰させる必要がある。このような判断はツールが自動的にを行いコマンド作成することができる。

USCでの衛星状態のモニターによって、検出器に何らかの異常が見つかった場合に備えて緊急コマンドもそなえてある。これは、毎パス同じパターンのコマンドを組み込んでおき、必要になったときはUSCですぐに実行することができるようになっている。

まれに、特殊な観測モードや検出器の診断のために通常と異なるコマンドを使用することがある。これらの場合、検出器の専門家がorl言語でコマンド内容を記述して提供すれば、コマンド作成当番がそれを通常のコマンドのorlのファイルに張り込むだけで簡単に実現できる場合がほとんどである。

(8) 姿勢コマンドの作成

観測スケジュールに従って観測対象に衛星を向けるために姿勢制御を行う。衛星の姿勢は観測対象の天球上の座標と太陽角制限を考慮して決定し、衛星をその姿勢に変更するためのコマンドを作成する。時には観測提案者から望遠鏡の視野の向き（望遠鏡の光軸まわりの回転角）の指定があり、それを満たすように姿勢コマンドを作ることもある。

姿勢コマンド作成のコアになるツールは、姿勢軌道制御系の担当であるNEC航空宇宙システム株式会社による。ここでも、姿勢変更前後の天体の座標や観測開始時間などの重要な入力情報は「観測計画ファイル」から取得している。姿勢コマンド作成時には、姿勢制御のシミュレーションが行われ、姿勢変更中のモーメントホイールの回転数や太陽角の変化などがグラフィックと数値で表示される。これらがあらかじめ決められた問題ない範囲であることを確認した上で姿勢変更コマンドを作成する。また、2台搭載されているSTTそれぞれの視野内に適切なガイド星があるような姿勢をとるようにする。姿勢変更のための一連のコマンドはorl形式で出力されるので、これを取り込んで使用する。

衛星上では20種類の目標姿勢データを保持することができ、1から20までの姿勢番号を割り当てて参照することができる。観測対象に一つずつ姿勢番号を割り当て1から20をサイクリックに使用している。観測対象の名称、座標、姿勢変更開始時刻、姿勢番号の履歴はファイルで管理している。

(9) ISACS-PLNによるコンパイル

ここまでで必要なコマンドがorlで記述されるので、これをISACS-PLNでコンパイルする。ISACS-PLNはコンパイル時に衛星LAN上にあるデータベースであるSIB（Satellite Information Base）を参照し、コマンド名と衛星で認識されるコマンドコードの対応などを行い、cmdi形式のコマンド計画を生成する。また、コマンド内容についてのいくつかのチェックも行う。まず、SIBに記述されているコマンドに関する情報を読み込み、そこに「危険コマンド」に指定されているものが見つければ警告を出す。また、決まったパターンのコマンドについてはあらかじめorlで記述したチェックをさせ、問題があれば警告を出すことも行っている。例えば、USC受信開始前に衛星のアンテナの出力パワーが上げられていることなど、いくつかの項目をチェックしている。

(10) コマンド計画のチェック

ISACS-PLNでコンパイルし生成されたcmdi形式のコマンド計画を、時刻とコマンド内容を一覧にした読みやすい形式にフォーマットし直し、dp10ツールによるグラフィック表示を併用してチェックを行う。望遠鏡の視野内の意図した位置に目標天体があることも、グラフィック表示できるツールを用いてチェックする。追跡予定、観測計画、姿勢コマンド作成

時のシミュレーション画面、DR 使用量の計算など、重要な情報は再度確認し多重のチェックをかけている。チェックすべき項目はリスト化されており、もれがないようになっている。

(11) USC へのコマンド計画の送信

チェックが終了したコマンド計画を USC に送信し、さらに USC でチェックをする。ここで問題が見つかった場合は、コマンド作成当番が修正し再チェックし、問題がなくなるまで繰り返す。

(12) 運用

完成したコマンド計画は USC の衛星管制に保持され、計画に従って運用が行われる。USC で衛星の状態をモニターした結果や USC 地上系の問題によってコマンド計画の変更が必要になる場合がまれにある。その場合、宇宙研でコマンドを修正し、通常と同様なチェックを経たあと USC で使用される。最終的に運用に用いられ衛星に送信されたコマンドはすべて保管するようになっている。

6. 運用の経過

「すざく」衛星は打ち上げの約2か月後からは、ほぼ上に述べたような定常的なコマンド計画の作成を順調に行っている。打ち上げ直後は、ISACS-PLN を使用せず、USC で管制上でのコマンド編集を行っていた。打ち上げ後約2週間で衛星の共通系の立ち上げはほぼ終了し、順次観測系システムの立ち上げが始まった。このころからコマンド計画作成はすべて ISACS-PLN を用いて行っている。初期運用のコマンド内容は日々変わるため、検出器担当者が用意したコマンドを編集してコマンド計画にまとめ上げることが普通であった。このときも、コマンドチェックはすでに現在とほぼ同様のツールと手順で行っていた。その後、定常観測に近づくにつれ、打ち上げ前に準備した定常運用用のツールを使用するように手順を改良していった。これまでに述べた手順を実現するツールはほとんどが打ち上げ前に構想され作成されたものであり、打ち上げ後のノウハウの蓄積とともによりよい手順に改善してきたものである。

7. 考察

衛星に対するコマンド計画の作成は間違いが入らないように行うことが極めて重要である。ささいな間違いによって、観測時間を無駄にする可能性があるばかりでなく、場合によっては衛星そのものを危険に陥れる可能性がある。安全な運用を容易に行うようにいくつも工夫を行い、これまで良好に機能してきた。有効であると考えられる点には以下のようなのものがあげられる。

(1) 重要な観測パラメータは決められたファイルを介することで、手入力によるミスをなくすようにしている。手作業で入力を行う状況も一部にはあるが、それらはコマンド計画作成とチェックの中で何重にも確認されるような手順になっている。

(2) 各手順を小さなツールが担当するような構成になっているため、手順を改良、追加、デバッグすることが非常に容易である。重要な入出力情報は決まったフォーマットのファイルになっているという点でも動作の検証が容易である。

(3) ISACS-PLN の「モード変数」という機能によってコマンド実行時の衛星状態のチェックが可能である。orl では変数を定義することができるので、コマンド計画作成上有用な衛星の状態を「モード変数」と呼ばれる変数に保持させることができる。これを用いることで、衛星の状態を判断してどのコマンドを実行するかしないかを決定することができる。例えば、「衛星が SAA に入る何分前になったら、あるシーケンスを実行し始める」といったコマンドが容易に記述できる。一度このような条件式を記述してしまえば、複雑な判断も確実に実行される。また、この「モード変数」は先にも述べたような ISACS-PLN の中でのコマンドチェックにも利用している。

(4) dp10 上のグラフィック表示に、コマンドを記号で書き加えることで、衛星状態とコマンド計画の両方を視覚化している。衛星の状態の変化とコマンドとの対応が簡単に認識でき、コマンドチェックが短時間でできるとともにミスも入りにくい。

日々のコマンドは比較的短い時間で容易に作成することが可能で、これまで順調に行われてきている。コマンド作成手順のマニュアルやコマンドチェック項目も整備されている。また、ソフトやマニュアルは責任者が全体を把握して管理し、課題が発生したときは迅速に対応できる体制になっており、安全な運用を進めていけるようになっている。

「すざく」衛星で用いているコマンド計画作成システムは、「あすか」など過去の衛星のコマンド作成システムをふまえて改善を加えたものであり順調に稼働している。「すざく」の経験をふまえることで、将来の衛星の運用にも現在のコマン

ド作成システムを応用していくことが可能である。そこで、将来の衛星用のよりよいコマンド作成システムの開発について重要と思われる点を述べる。これらは「すざく」衛星ではほぼ達成されているが、今後も徹底していくことが必要であり、将来の衛星システムの開発・運用でも重要と考えられるものである。

(1) 容易なコマンド作成

平常は翌日用のコマンド作成を行うことが多いという意味では、短時間でコマンド作成ができることは必須ではない。しかし、突発天体の観測や衛星の緊急時に対応するためには、できるかぎり早くコマンド作成ができる必要がある。コマンド作成担当者の負担を減らし、不要なミスを起こさないためにも、コマンド作成は容易であることが望ましい。現状の「すざく」のコマンド作成システムはこれらの条件を満たしており、突発天体の観測を極めて短時間で実現した実績もある。仮に将来の衛星のコマンド体系が「すざく」よりも複雑になったとしても、ソフトウェアによる支援や自動化により容易にコマンド作成ができることが重要である。

(2) 容易なコマンド修正

現在のシステムでは、コマンド計画はすべて orl によって記述されることになっている。実際のコマンド計画のチェックと修正の状況を見ると、わずかなコマンド計画の変更のみを行いたい場合が多い。このような場合、orl の編集ではなく、orl で記述された内容をコマンド実行時刻とコマンド内容の一覧にまで展開した状態で編集ができると、作業が早く orl 記述の文法ミスなどによるデバッグ作業の手間を軽減することができる。

(3) 自動化とシステムの理解

容易なコマンド作成を行うためには、コマンド計画作成の大部分を自動化することは必須である。自動化の結果作業が容易になっても、コマンド計画作成の詳細（個別のコマンドの意味、システムの動作）などの理解が疎かになることがあってはならない。そのために、コマンド体系、ソフトウェア動作や衛星のシステムなどを理解してコマンド計画作成に臨む、という当然のことが守られる体制であることが重要である。

(4) ソフトウェアと文書の管理

コマンド計画作成に必要な手順を多数のツールで実現していることで、機能の追加が容易にできるようになっている。ツールの数が多くかつ容易に改変できるがゆえに、システム全体を把握し、適切に管理して改良することが重要である。また、コマンド作成は多くの人が交代で行うため、マニュアルなどがわかりやすく整備されていることが当然のことながら必須である。ソフトウェアとマニュアル双方の詳細を把握している責任者が明確に定義され、コマンド作成当番の意見を積極的に収集することで、定常的な運用を円滑に進めていくことができる。

謝 辞

「すざく」衛星のコマンド作成システムは多くの方の協力で作られたものです。富士通株式会社、株式会社セック、NEC 東芝スペース株式会社、NEC 航空宇宙システム株式会社の関係者の皆様に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Mitsuda, K. *et al.*, “The X-ray Observatory Suzaku”, PASJ, in press, 2007
- 2) Koyama, K. *et al.*, “X-ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku”, PASJ, in press, 2007
- 3) Takahashi, T. *et al.*, “The Hard X-ray Detector (HXD) on Board Suzaku”, PASJ, in press, 2007
- 4) 富士通株式会社, ISACS-PLN 言語仕様書第 3.9 版, 2006

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-006

発 行 平成 19 年 3 月 30 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

