

温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT） 地上システム

Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) Ground Systems

あらまし

日本の宇宙開発利用と航空研究開発を行う機関である独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）様は、温暖化の基礎データである温室効果ガスを観測するための衛星、温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT：Greenhouse gases Observing SATellite）の打上げを2008年度に予定している。富士通は、長年にわたり衛星の搭載システムや地上システムの構築に携わってきており、そこで培った業務ノウハウと、富士通の持つソフトウェア開発技術、IT機器計算機がGOSAT地上システムでも活用されている。

本稿では、一般的な衛星地上システム、GOSAT地上システムの紹介と、富士通が担当するシステムと計算機、ミドルウェアについて紹介する。また、GOSAT地上システムの中で、とくに富士通が貢献している、軌道決定、観測計画などのシステムについて詳しく紹介する。

Abstract

The Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) is an independent administrative agency responsible for the development and utilization of space and R & D in the aviation field. The mission of JAXA's Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) is to obtain basic data on global warming by monitoring greenhouse gases, and its launching is scheduled during fiscal 2008. Fujitsu's operational know-how accumulated over many years of building onboard satellite systems and satellite ground systems, and its software development technologies and computer hardware have been applied in GOSAT ground systems.

This paper examines general satellite ground systems, the ground systems for GOSAT, as well as the systems, computers and middleware for which Fujitsu is responsible. The paper also describes the ground systems for determining orbits and planning observation in particular detail, given Fujitsu's major contribution to such systems.



横溝正人（よこみぞ まさと）

科学システムソリューション統括部
所属
現在、衛星データ利用ビジネスに
従事。

ま え が き

日本の宇宙開発利用と航空研究開発を行う機関である独立行政法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）様（以下、JAXA）は、長期ビジョンの中で「安全で豊かな社会の実現への貢献」を一つの柱とし、地球環境監視システムの構築などを計画している。一方、1990年代後半に入ってから地球温暖化の懸念が広がっており、1997年に採択された「京都議定書」により、先進国における温室効果ガスの削減が義務付けられ、各国が地上・海洋・宇宙での観測を一段と強化することが求められている。日本のこのような国際公約への貢献を目的に、JAXAは、2008年度に温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT：Greenhouse gases Observing SATellite）を打ち上げる。GOSATプロジェクトは、JAXAと環境省および独立行政法人国立環境研究所（以下、環境研）が共同開発するプロジェクトであり、JAXAは衛星と観測センサの開発を、環境省と環境研は主にデータ利用を担当する¹⁾プロジェクトでは、GOSATに搭載される観測センサにより、地球から宇宙へ放射される赤外線を観測・分析し、大気中の温室効果ガスの濃度を算出する。GOSATの打上げにより、3日に1回の割合で、地球表面のほぼ全域にわたる温室効果ガス濃度分布の測定が可能になり、温室効果ガス吸収排出状況の把握、温暖化防止の国際的な取組みへの貢献が期待されている。

本稿では、JAXAのGOSAT地上システムの全体像と、富士通と富士通アドバンスソリューションズが担当する主なサブシステムについて述べる。

地球観測衛星の地上システム概要

一般的に、地球を周回する観測衛星（以下、衛星）は、その目的を遂行するためのミッション機器と、ミッション機器の動作に必要なサービスを提供するバス機器から成る。バスは、地上との通信を行う通信系や、太陽電池パドルで発生した電力を各機器に供給する電力系、各機器からのデータを処理（記録を含む）するデータ処理系などから成り、衛星の基幹を成す。GOSATは、温室効果ガスの測定が目的であるため、衛星に搭載される測定用のセンサがミッション機器になる。

衛星の運用は、衛星がロケットで打ち上げられ、

ミッション運用を行う所定の軌道に投入され、各機器の動作チェックが行われる初期クリティカル運用フェーズと、ミッション運用を行う定常運用フェーズに分類される。ここでは、一般的な衛星運用である、定常運用フェーズの運用を中心に説明する。定常運用フェーズの運用フローを図-1に、フローのそれぞれのステップと作業概要を以下に説明する。

● 計画立案 {図-1 (1)}

衛星（バス機器、ミッション機器）の運用計画を立案する。運用計画とは、利用者が実施したい漠然とした要求を、衛星搭載機器を動作させるコマンドとその実行時間に変換することである。

(1) ミッション観測要求 {図-1 (1) ①}

ミッションデータの利用者が観測要求を立てる。

(2) 観測計画立案 (同②)

ミッション機器に対する複数の観測要求に対し、競合調整を行い、最終的にミッション機器を動作させるコマンドとその実行時間の計画を立案する。

(3) バス運用要求 (同③)

衛星運用計画とも言う。バス機器の運用計画を立案する。

(4) コマンド計画立案 (同④)

前述の(2)と(3)の結果から、追跡局の可視（アンテナで衛星を捕そくできる状態）の間に衛星へ送信するコマンドの計画を立てる。

● 軌道決定・予測 {図-1 (2)}

(1) 軌道決定 {図-1 (2) ①}

衛星の正確な位置が分からないと衛星からのデータの受信や衛星を制御するコマンドの送信ができなくなる。衛星の軌道は、ニュートンの運動方程式によって表され、この運動方程式を数値積分することにより衛星の位置、速度を求めることができる。しかし、実際の衛星は、重力、微小な空気抵抗など、様々な影響を受け、運動方程式に対する誤差が蓄積されていく²⁾このため、追跡局のアンテナで衛星を捕そくする際に、追跡局から衛星に向けて電波を放射することにより得られた、レンジデータ（電波の往復時間）とドップラーデータ（周波数の変化量）の二つの観測量を使って、定期的に衛星の高度と速度成分を計算し、軌道決定を行う³⁾

(2) アンテナ角度予報値生成 (同②)

衛星の軌道から、運用する追跡局における時々刻々のアンテナ角度を予測する。軌道決定値に基づ

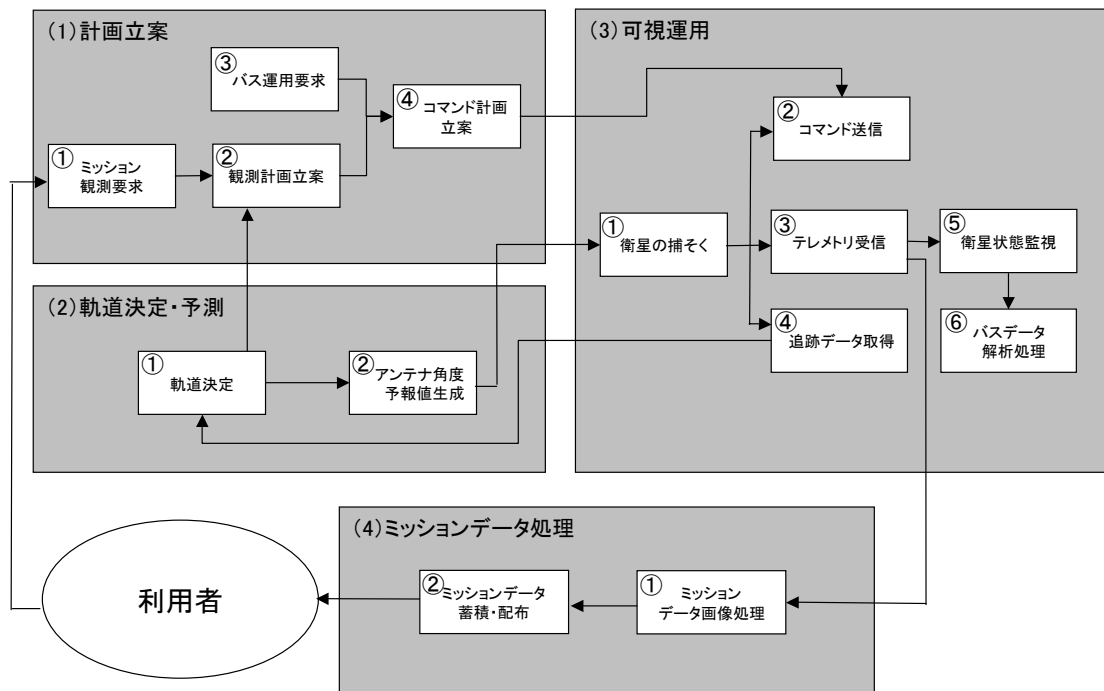


図-1 衛星運用フロー
Fig.1-Satellite operation.

き、数日先のアンテナ角度予報値を計算し、各追跡局に配布する。

● 可視運用 {図-1 (3)}

高度約600 kmの周回衛星の場合、約90分で地球を1周する。このため、一つの追跡局で衛星を捕そくできるのは約10分前後である。可視運用では、限られた10分間の間で、コマンドの送信、衛星からのデータ受信、追跡データの取得を行う。

(1) 衛星の捕そく {図-1 (3) ①}

アンテナ角度予報値を基に、追跡局のアンテナで衛星を捕そく、追尾しながら衛星からの電波を受信し、衛星へのコマンド送信のための電波を送信する。

(2) コマンド送信 (同②)

コマンド計画を基に、衛星管制システムから追跡局にコマンドを送信し、追跡局のアンテナを経て電波として衛星へ送信する。

(3) テレメトリ受信 (同③)

衛星のバス機器・ミッション機器の状態を示すデータや、ミッション機器の観測データを「テレメトリデータ」という。テレメトリデータは、衛星管制システムや衛星データ処理により意味のある物理量やステータスに変換される。

(4) 追跡データ取得 (同④)

軌道決定に必要なレンジデータやドップラーデータを受信する。

(5) 衛星状態監視 (同⑤)

可視中に、衛星管制システムで受信したテレメトリデータから衛星の状態を監視する。

(6) バスデータ解析処理 (同⑥)

可視後に、衛星データ処理で非可視中のデータを解析しバス機器の状態を解析する。

● ミッションデータ処理 {図-1 (4)}

(1) ミッションデータ画像処理 {図-1 (4) ①}

ミッション機器のテレメトリデータを処理し、画像やグラフなど、人間が見て分かる形式に変換する。この際、補正処理も施し、値の精度を高める。

(2) ミッションデータ蓄積・配布 (同②)

ミッションデータ処理で処理されたデータを蓄積するとともに、利用者へ配布する。

GOSAT地上システムの概要

前章までは、一般的な衛星運用を説明した。本章では、GOSATの運用に使用される地上システムについて説明する。GOSAT地上システムの構成を図-2に示す。また、図中の各設備、システムの説明

を以下に示す。

● 局設備（JAXA追跡局，JAXA地球観測センター，スバルバード局）

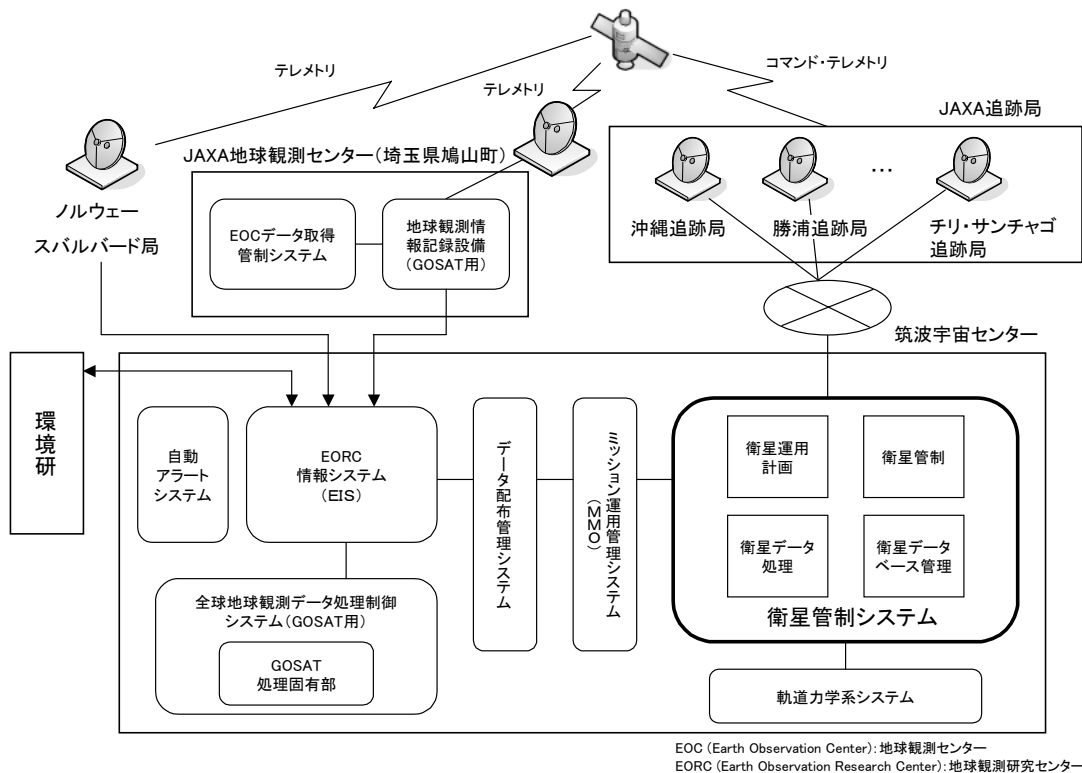
GOSATでは，JAXA追跡局，埼玉県鳩山町にあるJAXA地球観測センター（EOC：Earth Observation Center），ノルウェーのスバルバード局を使う。JAXA追跡局では，ミッション機器（以下，センサ）以外のテレメトリデータの受信とコマンド送信，追跡データの取得を行う。EOCとスバルバード局では，主にセンサのテレメトリデータを受信する。EOCには，アンテナ設備のほかに，「地球観測情報記録設備（GOSAT用）」（以下，記録設備）と「EOCデータ取得管制システム」がある。記録設備は，受信したテレメトリデータをいったん蓄積し，筑波宇宙センターに伝送する。EOCデータ取得管制システムは，EOCにある複数のアンテナに対し，GOSAT以外の複数の衛星とともに効率良く利用するため，各衛星のアンテナ利用要求に対し，あらかじめ決められた優先順位に基づき，アンテナ利用計画を立案する。

● 衛星管制システム

衛星管制システムは，「衛星運用計画」「衛星管制」「衛星データ処理」「衛星データベース管理」の四つのサブシステムから成る。衛星運用計画は，バス機器の運用計画と，ミッション運用管理システムから受信した観測計画から，コマンド計画を立案する。衛星管制は，コマンド計画に基づいて，GOSATへのコマンド送信，テレメトリを受信して衛星状態の監視をリアルタイムで行う。衛星データ処理では，受信したテレメトリから，非可視中のデータも含めて衛星状態の解析を行う。衛星データベース管理は，テレメトリを工学値に変換するための情報，コマンドコードの変換情報など，衛星にかかわる情報をデータベース化して管理する。

● 軌道力学系システム

軌道力学系システムでは，局設備で取得した追跡データに基づき，軌道決定を行う。軌道決定結果を使って将来の衛星の位置と速度を予測するとともに，アンテナ角度予報値を作成する。



EOC (Earth Observation Center): 地球観測センター
EORC (Earth Observation Research Center): 地球観測研究センター

図-2 GOSAT地上システムの構成
Fig.2-GOSAT ground systems.

● ミッション運用管理システム（MMO：Mission operation Management Organization system）

観測データ利用者からの観測要求を受信し、競合調整を行い、センサを動作させるコマンドと実行時間の計画を立案する。立案結果を、衛星管制システム（衛星運用計画）に送信する。

● データ配布管理システム

衛星管制システム、ミッション運用管理システム、軌道力学系システム間で運用に必要なデータを伝送する、共通基盤システムである。

● 全球地球観測データ処理制御システム（GOSAT用）（以下、処理制御システム）

処理制御システムは、観測データを意味のある物理量に変換処理するために必要な各種データの待合せを行い、すべてのデータがそろった段階で、「GOSAT処理固有部」（以下、固有部）を起動する。固有部では、センサのアルゴリズム仕様に基づいて、物理量や画像データへの変換処理を行う。処理制御システムでは、固有部の処理状況を管理し、処理した結果をEORC情報システムに送付する。

● EORC情報システム（EIS：EORC Information System）

ミッション運用に必要なデータ管理を行う。具体的には、ミッション運用に必要な各種データの保存と、記録設備をはじめとするGOSAT地上システムの設備間、環境研やスバルバード局などの対外機関とのデータの送受信、観測データのマスタ保存を行う。

● 自動アラートシステム

GOSAT地上システムのうち、必要な設備の状態監視を行い、設備に異常が発生した場合は、運用者にアラームまたは異常通知をメールで通知するとともに、機器の状態表示を行う。

これらのGOSAT地上システムのうち、富士通が担当しているシステムの機能、主要計算機、ミドルウェアを表-1に示す。

富士通が貢献する技術

本章では、前章で紹介したシステムのうち、富士通の業務ノウハウや技術で貢献しているシステムについて紹介する。とくに、軌道力学系システム、ミッション運用管理システム、EORC情報システムは、類似システムを長年にわたり開発し提供してお

表-1 富士通担当部分

システム名	富士通担当の機能	主要計算機	主要ミドルウェア
EOCデータ取得管制システム	衛星ごとにアンテナの利用計画を立案	PRIMERGY RX300 ETERNUS4000	Interstage PRIMECLUSTER Symfoware
衛星管制システム（衛星データ処理）	バステレメトリデータの蓄積・評価・提供	PRIMEPOWER250	—
軌道力学系システム	衛星の軌道決定およびアンテナ予報値の作成	PRIMEPOWER450 PRIMEPOWER250 ETERNUS3000	Interstage ORACLE CyberGRIP CentricMGR
データ配布管理システム	運用に必要なデータの送受信	PRIMEPOWER250 ETERNUS4000	PRIMECLUSTER
ミッション運用管理システム	観測計画を立案	PRIMERGY RX300 ETERNUS SX300	Interstage PRIMECLUSTER Symfoware Systemwalker
EORC情報システム	観測データなどの蓄積・配布		
全球地球観測データ処理制御システム	観測データの生産管理	PRIMEPOWER450 ETERNUS4000 PRIMERGY RX200 PRIMERGY TX150 NR1000F350	Interstage PRIMECLUSTER Symfoware Systemwalker Platform LSF
GOSAT処理固有部	—	PRIMERGY RX200	Platform LSF Systemwalker
自動アラートシステム	各地上機器のアラート通知および状態表示	PRIMERGY TX200 ETERNUS SX300	PowerGress PRIMECLUSTER

り、そこで蓄積した業務ノウハウ、開発技術を生かし、地上システム開発・運用に貢献をしている。

● 衛星の位置を決定する技術：軌道力学系システム

GOSATは従来と異なり、衛星にGPS受信機を搭載し、定常運用において衛星自身による自律航行を行う衛星である。従来衛星では、追跡局で取得したレンジデータとドップラーデータを基に軌道決定を実施していたが、GOSATでは、衛星オンボードGPSデータを用いた軌道決定を行う。

衛星定常運用としてGPSデータによる軌道決定を行うのは、JAXAの衛星として初の試みであり、富士通がJAXAの衛星運用の初期段階から培ってきた軌道系業務の知識と経験を基に、今後10年の運用に耐え得る軌道決定システムを構築している。

● センサの運用を計画する技術：ミッション運用管理システム

GOSATは、観測データの利用者からの要求に基

づいて運用される。要求は、地表面上の「ある点」をある期間であれば、いつでもよいから観測してほしいとか、さらにその観測時間は、ある一定時間以上できるだけ長く観測してほしいなど、一意的な解が得られない曖昧なものが多い。これらの要求に対し、最終的に、衛星搭載センサを動作させるコマンドの実行時間を決定する必要がある。MMOの大きな役割の一つは、このように曖昧な観測要求を明確な運用計画（コマンドと実行時刻）に変換することである。

MMOにおいて、観測要求を運用計画に変換する際に必要となる主要な技術として、「運用時刻競合調整」「センサパラメタ計算」「データ容量管理」がある。運用時刻競合調整とは、観測要求から、それを実現することが可能な運用時刻を算出し、なるべく多くの観測要求を実現する最適配置を行うことである。センサパラメタ計算とは、センサの視野角度など必要なパラメタを計算して、センサ制御のコマンドを生成することである。例えば、日本の筑波を観測したいという要求があった場合、衛星の軌道から、いつ日本上空を通過するかを検索し、センサの視野角度と衛星軌道から、何時から何時までがその地表面を観測可能か計算する。この計算結果により、センサに対する視野角度と時刻をセンサパラメタとしてコマンドを生成する。データ容量管理は、センサの観測データを衛星上のメモリに保存し、可視中に地上局に伝送する時刻の算出を行うことである。衛星が地上局に伝送できる時刻には制限があり、また衛星上のメモリ容量にも限りがあるため、メモリが飽和しないように効率的なデータ伝送を立案する。

● 汎用化を目指した生産計画システム：全球地球観測データ処理制御システム（GOSAT用）（以下、処理制御システム）

衛星に搭載されたセンサで観測されたデータを意味のある物理量に変換するためには、補正データや関連データが必要になる。これらのデータは、観測データと同時に受信するとは限らず、待合せ処理が必要になる。

処理制御システムは、データ依存で動作する。観測データを受信した時点で、処理に必要なデータがそろっているか確認し、ないデータがあればそのデータが来るまで待つ。そろった段階で、観測データを処理する固有部のソフトウェアを起動し、固有

部に処理を渡す。固有部は処理が完了した時点で、処理制御システムに通知を行い、処理制御システムは、処理されたデータ（生産物）を、蓄積・配布先であるEORC情報システムに渡す。

従来の処理制御システムは、衛星個別に開発されてきたが、今回のシステムは、将来JAXAが打ち上げる衛星への流用を考慮に入れ、汎用化設計を取り入れた先進的なシステムとなっている。

具体的には、処理に必要な待合せをするデータ、待合せのタイムアウト時間、タイムアウト後の処理内容、処理のために起動するプログラムなどをパラメタとしてテーブル化し、また、センサ固有の処理を個々の計算機で動作可能にしたクラスタ構成にすることにより、処理の増加、センサの増加に柔軟に対応できる設計となっている。

● 大切な観測データを保存するシステム：EORC情報システム（EIS）

GOSATは、通常、1日に地球を14～15周回して観測を行い、その観測データはEOCとスバルバード局で受信される。観測はほぼ毎日行われるため、5年間のミッション期間中で蓄積される観測データは、約300 Tバイトと膨大となる。この膨大なデータから、データ利用者が必要とするデータを効率良く簡単に取得できるように、観測した時刻や位置、データ種類など、データの特徴となる管理データを管理情報として観測データとともに保管している。

また、EISは、EOC、スバルバード局、処理制御システムなどの設備間や、環境研などのデータ利用ユーザとの間で、24時間365日連続で、必要なデータの送受信を行っており、利用ユーザの重要な資産となる各種データを保存管理している。

このようにEISは、重要なデータの蓄積と、他設備とのデータ送受信、ユーザへのデータ配布といった任務を担っている。富士通アドバンストソリューションズは、現在JAXAが運用中の陸域観測技術衛星「だいち」や過去の地球観測衛星の蓄積処理システムの構築実績から、業務ノウハウを生かし、EISの開発を担当している。

なお、EISでは、GOSAT以降の地球観測衛星のデータも保存管理可能なように、衛星追加による拡張部分はすべてパラメタ化され、簡易な手順で衛星の追加などが実現できるシステムとなっている。

む す び

本稿では、衛星の一般的な地上システム運用と、GOSAT地上システムを紹介し、その中で富士通が開発した主要システムについて紹介した。富士通は、長年にわたりJAXAの衛星地上システムの開発に対し、要件整理から運用までライフサイクル全般にわたり幅広く支援させていただき、そこで蓄積した業務ノウハウと富士通のソフトウェア開発技術、IT機器を活用してGOSAT地上システムの開発に貢献している。JAXAにおいて、将来、環境監視衛星、災害監視衛星などを打ち上げる計画があり、引き続き富士通が今まで蓄積してきた業務ノウハウ、開発

技術などを活用し貢献していきたいと考える。

最後に、本システムの開発に当たりご指導いただきましたJAXAの関係者の方々に心からお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 宇宙航空研究開発機構：温室効果ガス観測技術衛星。
http://www.jaxa.jp/projects/sat/gosat/index_j.html
- (2) 北嶋秀俊 ほか：人工衛星の軌道決定技術．
FUJITSU, Vol.48, No.1, p.26-33 (1997).
- (3) 茂原正道：宇宙システム概論．初版，東京，培風館，1995，p.217-223.

