

# JAXA における衛星レーザ測距システムの運用

○内村 孝志<sup>†</sup> 中村信一<sup>†</sup> 工藤伸夫<sup>†</sup> 村田 茂<sup>††</sup>

Improvement and Operation of Satellite Laser Ranging System in JAXA  
Takashi UCHIMURA, Shinichi NAKAMURA, Nobuo KUDOH and Shigeru MURATA

<sup>†</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙基幹システム本部 統合追跡ネットワーク技術部

<sup>††</sup> 日本電気株式会社 誘導光電事業部

Key Words : Precise Orbit Determination, Global Positioning Satellite, Satellite Laser Ranging

In order to meet the scientific mission requirements for high accuracy orbit determination strongly required by future earth observation missions in the early 2000's, JAXA's precise orbit determination system with GPS (Global Positioning System) and SLR (Satellite Laser Ranging) is now operating at the JAXA/TACC (Tracking and Control Center). This system, which is called GUTS (Global and High Accuracy Trajectory Determination System), has used for demonstrate precise orbit determination with ADEOS-II (Advanced Earth Observing Satellite II), which launched in 2002. This paper presents an overview of the GUTS system and the SLR system of GUTS.

## 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、2000年以降の地球観測衛星等に搭載される高分解能センサを用いた高精細画像の取得処理、及びインターフェロメトリ観測等に必須な高精度軌道決定要求に応えるため、1996年よりGPS(汎地球測位システム)データとSLR(衛星レーザ測距)データを用いた高精度軌道決定システム(GUTS: Global and High Accuracy Trajectory Determination System)の整備に着手し、2004年に完成させた。

本システムは、ユーザ衛星に搭載された搭載GPSRデータ、World Wideで取得された地上GPSデータ及びSLRデータを使用して、ユーザ衛星の位置を軌道全周にわたって高精度(数十cm)に決定し、ミッションユーザに提供するものである。JAXAでは、GUTSを用いて2002年に打ち上げられたADEOS-II(Advanced Earth Observing Satellite II)で実験を行い、ADEOS-IIの軌道位置決定精度として46cm(rms)を達成した。GUTSを用いた本格的な運用は、2005年に打ち上げ予定のALOS(Advanced Land Observing Satellite)から開始する計画である。

本稿では、GUTSの概要、GUTSの一構成要素であるSLR設備の概要及び利用計画を中心に紹介する。

## 2. 高精度軌道決定システムの概要

### 2.1 システム概要

GUTSは、GPS地上設備、SLR設備、中央監視運用計画サブシステム、軌道決定サブシステム及び外部インタフェースサブシステムの5つのカテゴリに大別される。最終的に軌道決定処理を行うのは軌道決定サブシステムであるが、これに必要な軌道観測データ(測距データ)の取得をGPS地上設備及びSLR設備、軌道決定に必要な情報(地球回転パラメータ、Solar Flux等)の取得及び外部機関とのデータ交換を外部インタフェースサブシステム、GUTS全体の運用計画並びに監視業務を中央監視

運用計画サブシステムが行っている。

ユーザ衛星の高精度軌道決定運用は、GPS利用決定とSLR利用決定に大別でき、それぞれ全く異なる観測系のデータを使用して軌道決定を行う。GPS利用軌道決定では、軌道決定対象となるユーザ衛星に搭載されたGPS受信機と、地上に展開されたGPS受信機においてGPS衛星の測位信号を受信し、この観測データに基づきGPS衛星及びユーザ衛星の軌道推定処理を行う。

SLR軌道決定では、軌道決定対象となるユーザ衛星に搭載されたレーザ反射体に対して地上のSLR局からレーザ測距を行い、その観測データを用いてユーザ衛星の軌道推定処理を行うものである。

高精度軌道決定システムの概要図を図2.1に示す。

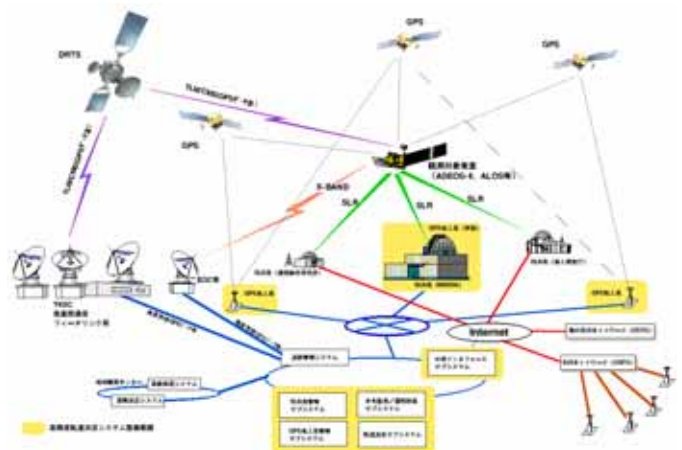


図 2.1 Schematic Diagram of GUTS system

### 2.2 GPSとSLRの相補関係

SLRとGPSは異なる観測系であるため、両者を併用して互いの優位点を活用することにより、相補的な効果が得られる。

SLRとGPSの両観測データ併用の相補的な利用として、SLRによる幾何学的な位置決定に加え、SLRデータの電離層の非依存性を利用して、GPSデータ中の電離

層屈折遅延量の抽出及び屈折補正モデルの検証・改良、搬送波位相波数不確定性の除去が行える。また、SLRは高度方向の測位精度が極めて高いため、GPSデータ処理に必須となる地球重力ポテンシャルモデルの高精度化にも有効である。

一方、GPSは、グローバルな観測を行う地球観測衛星ミッションにおいてはSLRの局所性、天候不良による観測不可を補う軌道観測手段であり、主たる観測システムとなる。

また、現状においてGPS観測結果の正当性を確認する手段としては、SLR観測のみであるため、GPS及びSLRの二つの観測システムを整備する必要がある。

したがって、SLRはGPSによるユーザ衛星の軌道決定技術を確立する上で必須であり、その後は、定期的な校正手段として利用される。

### 3. SLRシステムの概要

#### 3.1 SLRの概要

1960年代初頭にレーザが発明されてから数年後には、衛星にレーザーリフレクタが搭載され、レーザ測距観測が行われるようになった。

近年では衛星までの距離をmmオーダの精度で計測できるところまで発展している。このように高精度で衛星を追跡できるようになったため、地球重力場、潮汐効果を始めた衛星に及ぼす各種力学モデルおよび物理定数の研究がなされ、その成果として衛星運動モデルの高精度化が図られ、精密な軌道決定/予報が可能となっている。

SLRは、主にLAGEOS、STARLETTE、あじさい等の測地衛星に対して行われ、地球重力場、地球回転、地殻変動等の観測に利用されているが、近年では地球観測衛星においても、観測センサの高分解能化により、大量な観測画像を高精度かつ効率的に処理する必要性が生じてきている。このためには衛星の高精度姿勢決定に加え、軌道位置の高精度化も必要のため、グローバルに測位データを取得できるGPS受信機を搭載し、この校正のためにSLRを使用する例が多くなってきている。

SLRの動作原理は概ね次のとおりである。

大型望遠鏡を、ターゲットとする衛星の予報値に基づいて駆動させながら、衛星(レーザーリフレクタ)に対して超短パルスのレーザ光を放射し、衛星で反射されてきた微弱な光を大型望遠鏡で受信する。その往復経過時間(光が行き来する絶対時間)を計測することにより、SLR局から衛星までの距離を計算するものであり、現在では、数十ピコ秒(距離換算でmmに相当)の精度でこの往復時間を計測することが可能である。

図3.1にADEOS-II、ALOSに搭載されるレーザーリフレクタの外観を示す。低軌道衛星に搭載されるレーザーリフレクタは直径15cm程度で半球体状のものであり、静止軌道衛星には更に大型で平面状のものが搭載される。

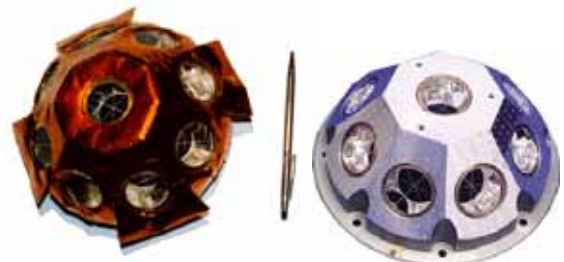


図 3.1 Laser Retro-reflector (Left: ADEOS-II, Right: ALOS)

#### 3.2 JAXAのSLRシステム概要

JAXAのSLRシステムは、SLR局とこれを遠隔で制御するSLR局管制サブシステムから構成される。JAXAにおけるSLR設備の運用は基本的に局側に運用者を置かず、筑波宇宙センターからの遠隔監視制御により行う。システム全体の機能構成は以下のとおりである。



図 3.2 Appearance of SLR facility

##### 3.2.1 SLR設備の機能

ここでは、SLR設備の機能概要について述べる。図3.3にシステムブロック図を示す。

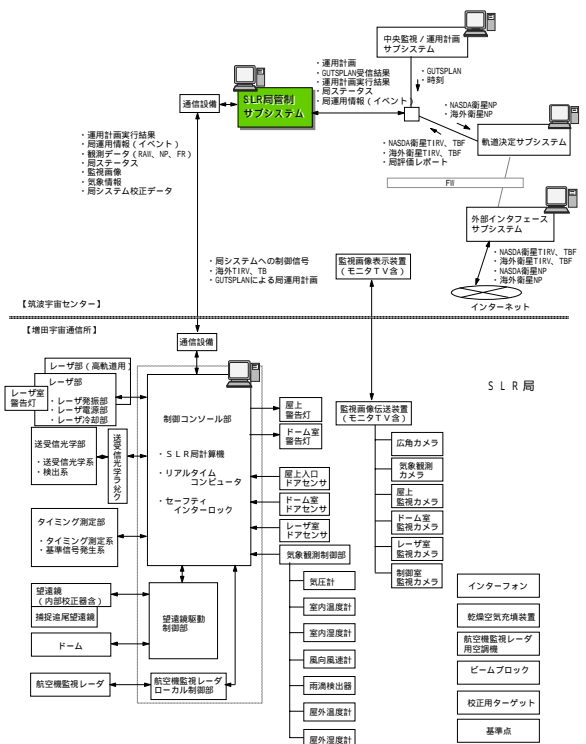


図 3.3 Block Diagram of SLR system

(1) SLR 局管制サブシステム(筑波宇宙センター)

(a) GUTS の運用は GUTS 内の各サブシステムを監視 / 制御している中央監視 / 運用計画サブシステム(以下「COPs」という)で一元的に運用される。SLR 設備もこの COPs 配下で運用される。SLR 局管制サブシステムは COPs で自動立案された運用計画に従って、SLR 局を遠隔にて制御・監視するシステムである。また、本サブシステム及び SLR 局サブシステムの運用状況等を逐次 COPs に伝送する。

(b) SLR 局で取得したデータの集信、品質検定、所定フォーマットへの変換及び関連サブシステムへの配信を自動処理により行う。

(c) 安全対策面では、SLR 局で取得した監視画像(天空モニタカメラ、SLR 建屋内の各部屋のモニタカメラの画像)、システムの温度センサ、ドアセンサ、気象センサ、各機器ステータス及び航空機監視レーダの航空機検出情報をリアルタイムで取り込み、運用者が必要な判断を的確に下せるように加工して表示する。

なお、レーザ停止等のクリティカルなものについてはコンピュータが判断して自動処理を行う。

(2) SLR 局(種子島、増田宇宙通信所内)

定常の運用では、基本的に無人(保守要員は駐在)であり、SLR 局管制サブシステムから集中監視、制御を可能とする。また、筑波側のシステムダウンや通信ラインがダウンした場合でも、SLR 局にて単独での自動運用または訓練を受けた運用要員が介在することで観測そのものが可能である。

SLR 局の基本機能を以下に示す。

(a) 運用計画機能

計画立案においては、観測仰角、最低観測時間、最大観測時間及び優先順位を事前に指定しておくことにより観測対象衛星の軌道予報値、設備保守計画等の情報入力のみで太陽、月との干渉を考慮した自動立案が可能である。

(b) 校正機能

望遠鏡のジンバル補正を行うために、GSC(ガイドスターカタログ)を用いたスターキャリブレーション機能、測距系システムの内部校正(CFD: Constant Fraction Discriminator, EVT: Event Timer)、地上ターゲット(望遠鏡副鏡に埋め込まれたレーザ反射体あるいは望遠鏡から一定距離にあるレーザ反射体)を用いたキャリブレーションが可能である。地上ターゲットキャリブレーションデータは衛星測距値の補正に用いられる。

(c) 自動運用機能

以下の運用を自動的に行う機能を有する。

- ・人工衛星の捕捉、追尾、測距、データの一次的な処理等の観測業務
- ・データの授受及び処理
- ・地上標的によるキャリブレーション及び恒星を利用したスターキャリブレーション
- ・航空機の監視と警報信号送出及びレーザ停止
- ・ターゲット衛星の変更に伴うシステムリコンフィギュ

レーション

- ・SLR 局管制サブシステム間との回線障害時における自動検出及びフェイルセーフ
- (d) 回線障害時にフェイルセーフで停止した SLR 局に、回線復旧後、SLR 局管制サブシステム側から自動アクセスすることで、SLR 局の制御権を獲得できる。

3.2.2 SLR 設備の性能

(1) 測距可能衛星

本システムでは、レーザ反射体を搭載した高度約 300km から静止軌道高度(直線距離で約 40,000km)までの全ての衛星に対して測距が可能である。

(2) 測距精度

本システムの測距精度は以下の通りである。

- ・地上ターゲット測距 1.7mm(rms)仕様<3mm(rms)
- ・LAGEOS 衛星 5.6mm(rms)仕様<10mm(rms)
- ・GPS35 衛星 16mm(rms)仕様<30mm(rms)

表 3.1 に SLR 設備の主要性能を示す。

表 3.1 Major Specifications of SLR System

| Telescope              |   |
|------------------------|---|
| Aperture               | 1m, Tracking Camera: 7 Telescope+CCD        |
| Telescope Type         | Casegren, Wavefront error<0.058lrms@632.8nm |
| Mount                  | ALT-AZ                                      |
| Pointing Accuracy      | <2arcsec                                    |
| Maximum Slew Rate      | Az: 25deg/s, El: 10deg/s                    |
| Focal Length           | 1.25m                                       |
| Field Of View          | 3.5arcmin (Coude)                           |
| Dome                   |   |
| Diameter               | 5m±0.5m                                     |
| Max Slew Rate          | 15deg/s                                     |
| Laser                  |   |
| Laser Type             | Nd:YAG                                      |
| Primary Wavelength     | 532nm                                       |
| Pulse Width (FWHM)     | Low type: 60ps, High Type: 300ps            |
| Max. Repetition Rate   | 10Hz  |
| Primary Maximum Energy | Low type: 50mJ/pulse, High type:            |
| Fullw. Beam Divergence | 50µrad~1mrad                                |
| Detector               |   |
| Transmit               | Pin Diode                                   |
| Receive                | MCP-PMT                                     |
| Daylight Filter Type   | Spectrum Filter: 0.38nm                     |
| Timing Electronics     |   |
| Time of Flight Observ. | EVENT TIMER                                 |
| Resolution             | <4ps  |
| Precision              | <5ps  |
| Time System            |   |
| Frequency Standard     | Rubidium                                    |
| Time Reference         | GPS   |

(1) レーザ部

GUTS で開発したレーザシステムは、低中高度衛星用と高軌道衛星用の発振器(LD: Laser Diode)を備え、所定の出力まで増幅する回路については共用(5台のフラッシュランプ励起アンプ)する構成となっている。図 3.4 に GUTS で開発したレーザシステム本体の外観写真を示す。

(2) 光学望遠鏡

ターゲットとなる衛星を高い精度で追尾し、レーザパルスの最終増幅とレーザリフレクタからの反射光を集光する重要な役目を担うのが光学望遠鏡である。

光学望遠鏡の外観を図 3.5 に示す。構造はトローラス型(丸筒で内部を保護しないタイプ)であり、レ

ーザシステムとのインターフェースはクーデ光学系を介したものとなっているため、望遠鏡側ではナスミス焦点系で使用するような構造となっている。望遠鏡独自の機能として、オートフォーカス機能、太陽干渉回避機能及びビデオトラッキング機能等を有する。



図 3.4 Appearance of Laser system



図 3.5 Appearance of Telescope system

### (3) タイミングシステム

SLR システムの中核となるタイミングシステムは SLR システム全体の制御を一元的に行うとともに、送受信光学系と電気系とのインターフェースを司るシステムである。



図 3.6 Appearance of Timing system

### (4) 制御部

SLR 局システム全体の監視・制御を一元的に行える。制御部は、種子島の増田宇宙通信所にある SLR 観測

棟と筑波宇宙センターに設置されており、通常、筑波宇宙センターから遠隔運用を行っている。



図 3.7 Appearance of SLR Remote Control System

## 4. SLR システムの利用計画

JAXA では、今後、SLR システムを GPS 軌道決定技術の検証、校正に利用していく一方、以下を目的としてシステムを幅広く活用する計画である。

### (1) ILRS への貢献

世界的なレーザ測距ネットワークである ILRS(International Laser Ranging Service) の一 Tracking Station として、世界各国が打ち上げるレーザ測距衛星の支援を行う。

### (2) 測位ミッションにおける要素技術修得支援

ETS-VIII 等では、日本版衛星測位システムの基盤技術修得を目的とした搭載原子時計の評価、時刻管理技術の修得、高精度軌道決定実験が予定されている。これら衛星に対するレーザ測距運用を行い、データ提供等を行う。

### (3) 宇宙基盤技術の研究開発を推進

軌道決定に重要な重力モデルの改良、地球回転パラメータ等の推定を、SLR データ取得を通じて行う。

また、運用及び設備維持結果を評価し、次世代 SLR システム開発へのフィードバックを行う。

## 5. むすび

本稿では、GUTS の概要とその構成要素である SLR 設備の概要等について紹介した。GUTS で整備した構成品目は開発要素が多く、特に軌道決定ソフトウェアについては自主開発を行った。また、軌道観測システムについても最新技術を取り入れ、運用の省力化を図った。

今後、SLR システムの運用実績を重ね運用スキルを向上させるとともに、高い計測精度を維持しながら幅広い分野でのアウトプットを出して行きたいと考える。