

レーザー測距と GPS

前田 真紀・内村 孝志

Satellite Laser Ranging and GPS

Maki MAEDA and Takashi UCHIMURA

In order to meet the scientific satellite mission requirements for precise orbit determination strongly required from earth observation satellite missions (i.e., ADEOS-II / ALOS), NASDA (National Space Development Agency of Japan) has started to develop the precise orbit determination system which is called GUTS (Global and high accuracy Trajectory determination System). GUTS uses GPS (Global Positioning System) and SLR (Satellite Laser Ranging) data instead of RARR (Range And Range Rate) data to determine the orbit precisely. SLR is one of the superior technique to measure distance between a ground station and a satellite precisely. In the GUTS-SLR system, the laser generates two laser pulses simultaneously to perform the laser ranging from low earth orbit to geostationary orbit efficiently. The laser has capability to generate 50-250 mJ as an average of output power, at the wavelength of 532 nm. The output power will be changed flexibly according to the satellite altitude. The 1-m diameter telescope will be used to expand transmitting laser beam to a target satellite and to condense the reflected signal from target satellite. SLR is used for orbit determination of satellite as a calibration of GPS technique because the SLR method is easier than GPS technique. SLR is also used for time synchronous experiments that is the one of main essential techniques for global positioning mission and inter-satellite optical ranging. In this paper, we introduce the outline of SLR technique, ground system of SLR, and precise orbit determination that is the main application of the SLR technique.

Key words: SLR (Satellite Laser Ranging), GPS (Global Positioning System), precise orbit determination, ADEOS-II, ALOS

1. 衛星による地球観測と高精度軌道決定

人類初の人工衛星打ち上げから半世紀が過ぎた現在では、さまざまな目的・任務（ミッション）をもった衛星が打ち上げられ運用されている。われわれの生活に身近な気象衛星、通信・放送衛星などは、日本を中心とした広範囲にわたって同時かつ継続して観測あるいはサービスを提供する必要があるため、静止軌道とよばれる高度 36000 km のところを周回し、地球上から見るとほとんど動かずに静止しているように見える。その一方で、地球上をくまなく観測する必要のある地球観測衛星などの低中高度衛星は、

高度数千 km 以下で 1 日に何度も地球を回りながら地球上の植生、海洋・大気の様子、温度などを多様な観測機器によって観測しており、その観測データは林業・漁業などさまざまな分野で活用されている。

この地球観測衛星による観測は、近年観測センサーの高分解能化やインターフェロメトリ観測等というミッションの高精度・高度化が図られつつあり、これに伴うデータ解析のために衛星の軌道決定に対する精度要求も高まっている。

一般的に人工衛星の状態把握および衛星の制御は、地上

宇宙開発事業団衛星総合システム本部衛星運用技術部 (〒305-8505 つくば市千現 2-1-1) E-mail: maeda.maki@jaxa.jp

宇宙開発事業団は、2003 年 10 月 1 日をもって宇宙科学研究所、航空宇宙技術研究所と統合、独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency) となった。

に設けられたアンテナと衛星に搭載されている電波の送受信機との間で電波通信を行うことで実施する。また、これと同時に地上局と衛星間の距離を計測 (ranging) しており、使用する波長にもよるが、この計測精度はおおよそ数 m ～数十 m である。この測距データを使用して得られる軌道決定精度は、衛星および地上局内部そして経路上における各種遅延量の影響のため、周回衛星の位置誤差として 100 数十 m になり、先に述べた高精度な軌道決定要求を満足することはできない。しかし、2002 年 12 月に打ち上げられた ADEOS-II (Advanced Earth Observation Satellite-II) や、2004 年に打ち上げ予定の ALOS (Advanced Land Observing Satellite) などでは、通常行われている軌道決定精度の 100 分の 1 程度に当たる数 m ～1 m 以下の軌道決定精度が求められている。

この要求に応える手段として、GPS (global positioning system) と SLR (衛星レーザー測距; satellite laser ranging) を用いた高精度軌道決定技術がある。この手法では、地上局の GPS 受信機が受信した測位信号である地上 GPS データ^{*1}、衛星搭載 GPS 受信機が受信した測位信号である搭載 GPSR (GPS receiver) データ^{*2}、そして SLR データ^{*3} を観測データとして利用すると同時に、軌道決定に使用する運動モデルならびに観測モデルを従来よりも精密なものに変更し、かつ推定パラメータを増やすことで軌道決定精度を大幅に向上させることができる。

2. SLR システム

以降では SLR の概要を簡単に述べ、その利用例として、GPS と SLR を使用した衛星の高精度軌道決定、将来想定されている SLR や高精度軌道決定の応用例について紹介する。

2.1 SLR の歴史

1960 年代初頭にレーザーが発明されてからその数年後には、衛星にレーザーリフレクターが搭載され SLR が開始された。SLR はもともと「あじさい」(NASDA(1986): 図 1)、米国の LAGEOS (NASA: The National Aeronautics and Space Administration)、フランスの STARLETTE (CNES: Centre National d'Etudes Spatiales)

等の、測地衛星とよばれる表面に鏡やプリズムを搭載した球状の衛星に対して行われるものであった。このように単純な形状の衛星に対して SLR を行うことで高精度軌道決定が実現し、その結果、SLR データによる地球重力場や地球回転パラメータの推定、地殻変動などの観測が可能となる。

近年は、高精度軌道決定のために全周回でデータを取得できる GPS 受信機を搭載する衛星が増加し、この校正に SLR を使用する例¹⁾ が世界的にみても多くなっている。

2.2 SLR の概要

SLR は、ターゲットとする衛星の予報値をもとに望遠鏡を駆動させながら超短パルスのレーザー光を発射し、衛星搭載のリフレクターで反射されて戻ってきた微弱な光を再び望遠鏡で受信する。その光が地上-衛星間を行き来する絶対時間を計測することにより、SLR 地上局から衛星までの距離を知ることができる。現在ではこの計測精度は数十 ps 程度であり、距離に換算すると数 mm となる。SLR の利用法はさまざまであるが、前述した測地衛星の軌道決定、後述する GPS データを使用した GPS 衛星やユーザー衛星の軌道決定の校正・検証のほかに、搭載原子時計の時刻管理や衛星間レーザー測距等への応用も検討されるなど、研究開発的な分野での利用が多くなっている。

2.3 SLR システムの例 (GUTS-SLR)

2.3.1 SLR システムの機能・性能概要

NASDA で整備する SLR システム (以下 GUTS-SLR: global and high accuracy trajectory determination system-SLR) は、2004 年からの観測開始を目標として現在整備中である。GUTS-SLR は静止衛星の測距も可能であり、ETS-VIII (Engineering Test Satellite-8) に搭載される原子時計を利用した測位実験 (高精度軌道決定・時刻同期等) にも供される。

GUTS-SLR システムの主要性能を表 1 に示す。

(1) レーザー部

GUTS-SLR ではモードロック Nd:YAG レーザー光を多段増幅し、主波長の第二高調波 (532 nm)^{*4} を発生させて使用する。レーザー部のシステムブロック図を図 2 に示す。レーザー部は、その発振パルス幅とレーザーパワーの

^{*1} GPS は、L1 帯 (1575.42 MHz)、L2 帯 (1227.60 MHz) とよばれる 2 つの周波数帯を使用しており、それぞれの周波数に C/A コード、P コードとよばれるコードがのっている。軌道決定には、GPS 衛星-GPS 受信機 (地上局に設置されたものならびに衛星に搭載されたものの 2 種類) 間の搬送波位相と擬似距離、そして GPS 衛星が発信した GPS 衛星の概略位置を表す航法メッセージ等を使用する。このうち、地上局の GPS 受信機で計測した信号を地上 GPS データとよぶ。

^{*2} ADEOS-II などのユーザー衛星搭載の GPSR で計測した測位信号を搭載 GPSR データとよぶ。

^{*3} 地上局から衛星に搭載されたレーザーリフレクターに向けてレーザーを発射し、その反射光が戻ってくるまでの時間の計測値を距離に変換したものを SLR データとよぶ。

^{*4} 大気の透過率がよく、損失も小さい。しかも安価で手軽に利用できるということで、現在では世界各国のほとんどの局が 532 nm のレーザーを使用している。

表 1 SLR 局 (GUTS-SLR) の主要性能.

望遠鏡	
口径	主望遠鏡：1 m 捕捉望遠鏡：7 inch
受信光学方式	カセグレン型 (総合波面収差： $\lambda/8$, 以下@632.8 nm)
駆動方式	ALT-AZ 方式
ポインティング精度	2 arcsec 以下
方位角駆動範囲	670 deg (± 335 deg)
仰角駆動範囲	190 deg ($-5 \sim 185$ deg)
最大駆動速度	Az：25 deg/s, El：10 deg/s
エンコーダー分解能	26 bit
天頂追尾限界仰角	88 deg
焦点	1.25 m
ビーム角	3.5 arcmin (クーデ焦点)
ドーム	
形式	半球型開閉式
周囲直径	5 $\pm$ 0.5 m
回転速度	10 deg/s
レーザー	
機種	モードロックパルス増幅式 Nd:Yag パルスレーザー
波長	532 nm
パルス幅	低軌道用：60 ps 以下
	高軌道用：500 ps 以下
繰り返し周波数	10 Hz
最大エネルギー	低軌道用：50 mJ/pulse 以上
	高軌道用：300 mJ/pulse 以上
ビーム広がり角	50 $\sim$ 1 mrad
受信装置	
追尾誤差検出器	カラー CCD カメラ
測距用検出器	受信用：MCP-PMT, 送信用：フォトダイオード
干渉フィルター帯域幅	0.3 nm
タイミングエレクトロニクス	
方式	エポックタイミング方式 (パルス受信のタイミングに, UTC タグを付与)
タイマー	粗タイマー (26 bit 以上の同期カウンタ) の値に, バーニアタイマー (126 bit A/D コンバータ) の値を補間する
	入力イベント数：3 以上
回路数	入力イベント数：3 以上
時計装置	
時計装置	ルビジウム標準および水晶発振を周波数標準とし, GPS により時刻構成を行う UTC 同期の原子時計
時刻同期精度	UTC に対して ± 100 ns 以内

違いによって高軌道用と低軌道用の 2 つのレーザー発振器を有する.

(2) 送受信光学部 (T/R optics)

送受信光学部の構成を図 3 に示す.

送受信光学部に入射したレーザー光は, スタートパルス検出ユニットの PIN ダイオードにより発射タイミングを検出すると同時に, 測距用レーザー光として望遠鏡のクーデパスへ入る. 一方, 測距ターゲットから反射してきた光は, 受信タイミングを計測する MCP-PMT (micro-channel-plate photo-multiplier tube) へ入射する.

(3) 送受信兼用大口径光学望遠鏡

望遠鏡は, レーザーの放射とリターンパルスの受信を同時に行うために必要なアフォーカル光学系を備えたクーデパスを有する.

GUTS-SLR システムの送受信兼用望遠鏡を図 4 に示す. 望遠鏡は有口径 1 m の主鏡を備えたカセグレン型望遠

鏡であり, 主鏡の鏡面精度は $\lambda/17$ である.

(4) タイミング計測・標準時刻信号ほか

レーザー測距とは送信と受信のパルス光のエポックタイムを精密に計測することであり, 高精度測距のためには正確な時刻信号と高速・高感度な検知器が必要となる. 光検知器で得られたアナログ電気信号はタイミング信号に変換され, 送信タイミングと合わせて測距データを生成する.

また, GUTS で生成するタイミング信号の同期精度は, UTC (coordinated universal time) に対して 100 ns 以下と非常に高精度である.

(5) 安全監視装置・気象観測装置

レーザー光から航空機等の搭乗員の安全性 (特に眼球の保護) を確保するため, 光学望遠鏡に追従して動作する航空機監視レーダーを具備している.

また, 気象状態を監視し, 計測データの補正に必要な気象パラメーターを取得する気象観測装置を有する.

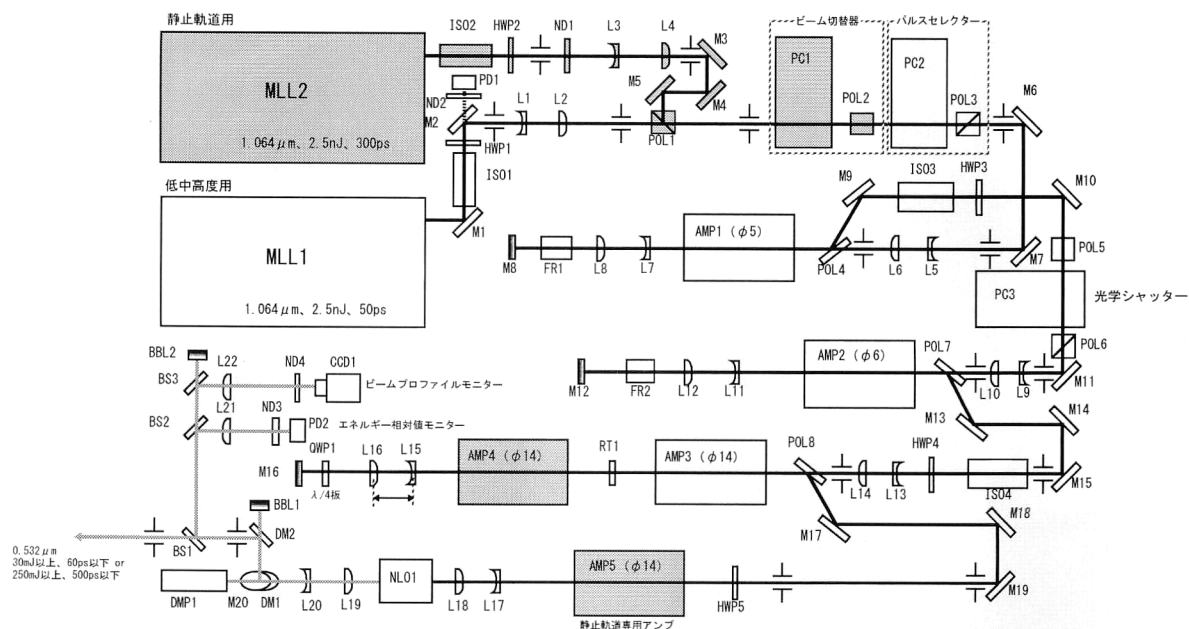


図 2 GUTS-SLR レーザ器構成図。MLL：モードロックレーザー発振器，ISO：アイソレータ，L：レンズ，M：ミラー，HWP： $\lambda/2$ 板，QWP： $\lambda/4$ 板，ND：ND フィルター，POL：ポラライザ，PC：ポッケルセル，DM：ダイクロイックミラー，BS：ビームスプリッター，RT： 90° ローテーター，FR：ファラデーローテーター，BBL：ビームブロック，DMP：減衰器，NLO：波長変換結晶，PD：PIN フォトダイオード，CCD：CCD カメラ，AMP：アンプヘッド， $\frac{1}{2}$ ：アイリス

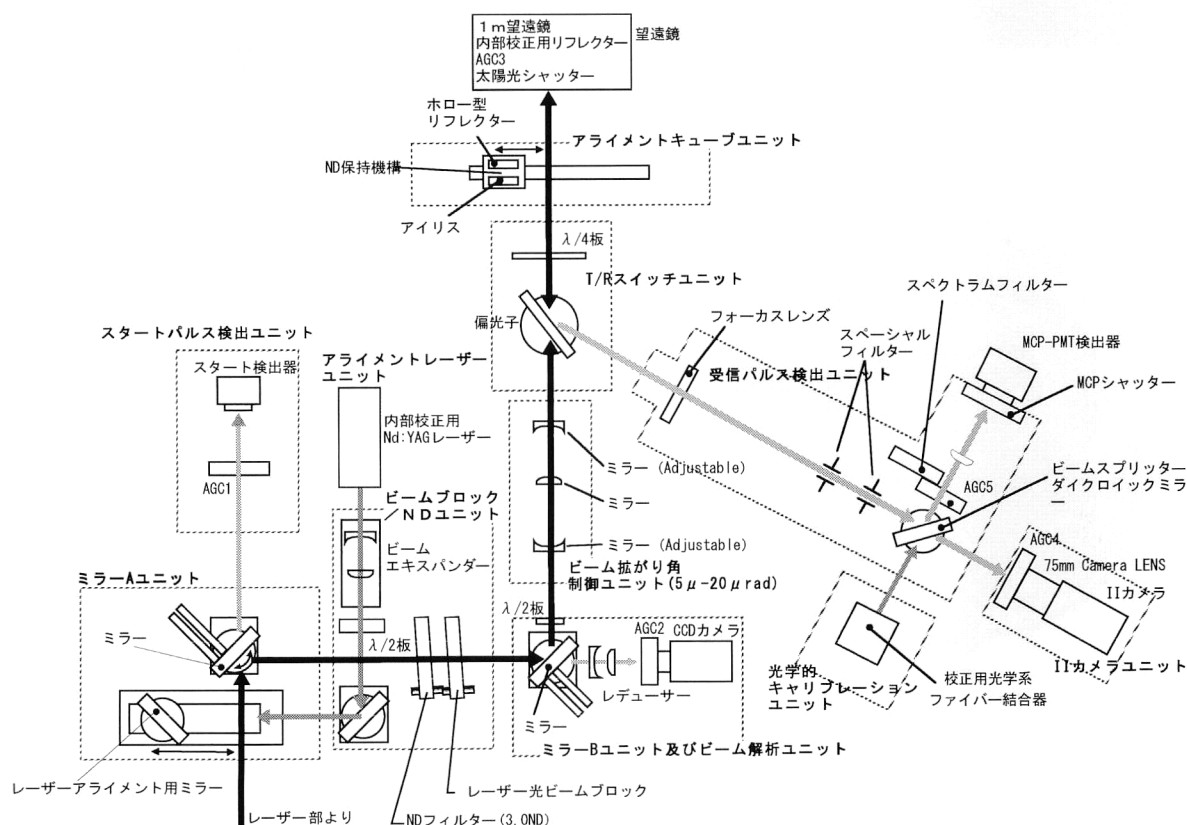


図 3 GUTS-SLR 送受信光学系構成図.

2.4 SLR システムの総合性能

2.4.1 測距可能衛星

SLR で測距可能な衛星の高度は、望遠鏡の口径、レーザ

—出力，衛星に搭載されるリフレクターの性能によってさまざまである²⁾。

GUTS-SLR は、レーザー反射体を搭載した高度 300 km

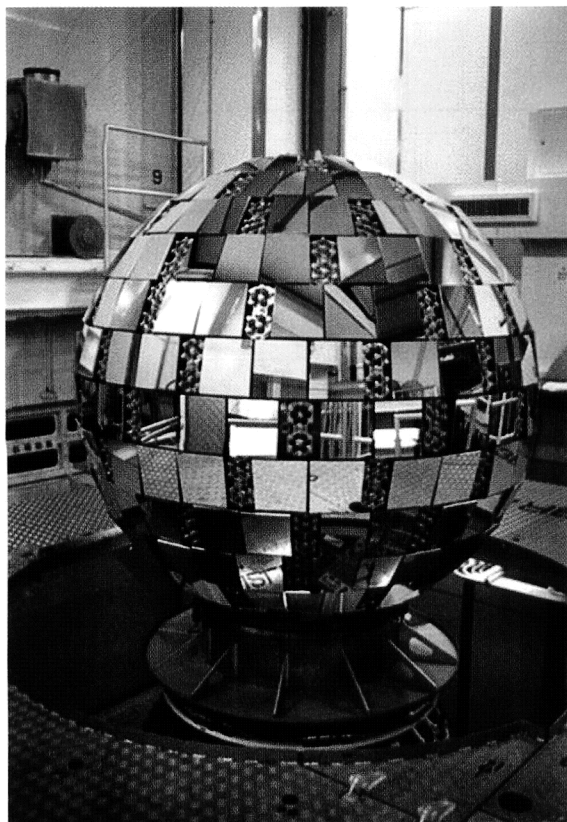


図 1 測地衛星「あじさい」.

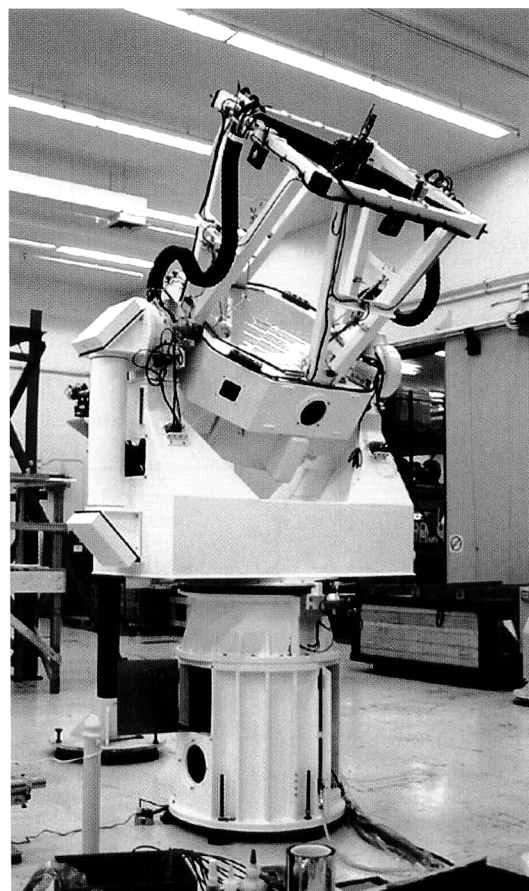


図 4 GUTS-SLR 望遠鏡外観.

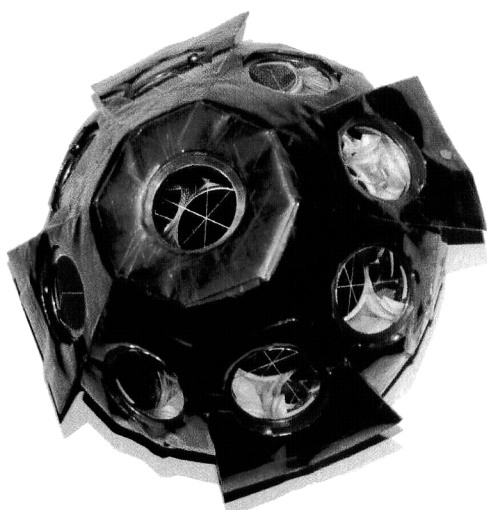


図 6 ADEOS-II 搭載 CCR.

の衛星から直線距離 40000 km の静止衛星までの衛星に対して測距が可能である。いくつかの局では、月面のリフレクターに対する測距も可能である。

2.4.2 測距精度

測距精度は、通常、地上キャリブレーションターゲットや LAGEOS などの基準衛星に対するシングルショット精

度で規定する。GUTS-SLR の測距精度を表 2 に、各国の SLR 局との精度比較を図 5 に示す。

3. SLR の応用例

3.1 高精度軌道決定分野における利用

3.1.1 GPS 利用軌道決定

冒頭でも述べたとおり、GPS 測位信号を使用した軌道決定（以下 GPS 利用軌道決定）とは、地上 GPS データと搭載 GPSR データを観測量として使用し、複数の GPS 衛星から受信した搬送波位相データと擬似距離データを組み合わせて ADEOS-II や ALOS などのユーザー衛星の位置を決定するものである。

軌道決定に使用するデータは、地上ならびに衛星搭載の GPS 受信機で計測する搬送波位相とコードから算出した擬似距離である。これらのデータを衛星と地上で同時に受信し、その行路差から各受信機の位置と時刻を割り出すことになる。ただし、これらの処理においては、電離層による遅延の影響、波数不確定性とよばれる整数値バイアスなどが原因となり、容易に各受信機の位置を特定することはできない^{3,4)}。

表 2 測距精度 (GUTS-SLR).

	シングルショット精度	系統誤差要因補正後	
キャリブレーション測距	3 mm 以下	—	望遠鏡からの距離が数 m~数十 m の地上に設置したターゲットに対する測距
LAGEOS 測距	10 mm 以下	5 mm 以下	LAGEOS 基準衛星に対する測距
静止衛星測距	3 cm 以下 (目標)	—	レーザーのパルス幅や経路上の誤差などを考慮

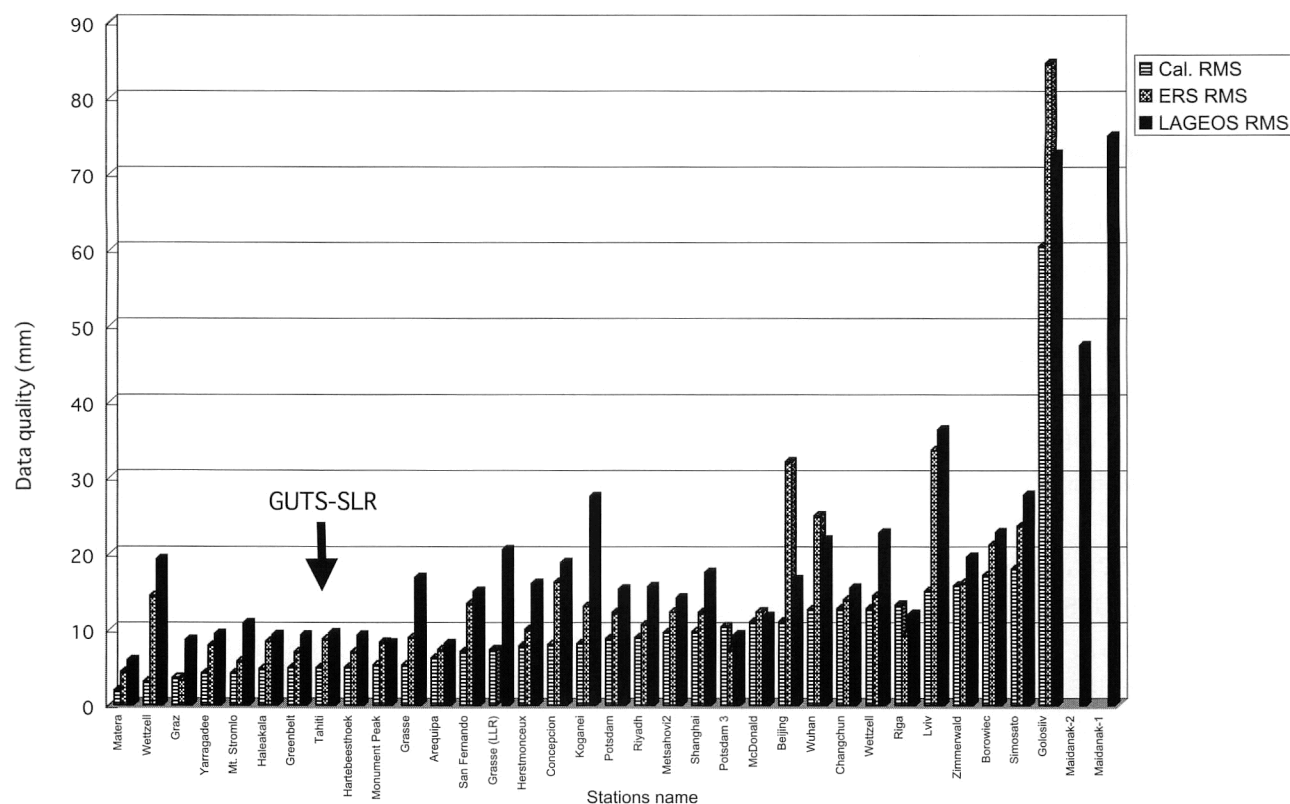


図 5 各 SLR 局の測距性能比較.

この推定には、衛星の場合でも地上における測量と同じ手法をとっている。しかし、衛星の場合には、地上の受信機同士での測量と違い、衛星が宇宙空間を飛行する際に地球重力のゆがみが衛星の運動に与える影響、大気抵抗や太陽・地球からの輻射圧などが衛星に与える力のモデル化が衛星の軌道決定そのものに大きな影響を与えるため、そのためのパラメーターについても推定する必要がある^{5,6)}。

衛星の軌道推定においてもひとつ重要な点は、ユーザー衛星の軌道を高精度に推定するためには、28 機 (2003 年 4 月現在) の GPS 衛星群についても高精度な軌道決定が必要となることである。GPS 衛星の軌道は GPS 衛星から放送暦として配信されているが、その精度はおおよそ 10 m である。筆者らの解析では、ADEOS-II などのユーザー衛星の軌道決定精度に GPS 衛星の位置誤差が与える影響は 5 分の 1 程度という結果を得ている。つまり、GPS 衛星の位

置誤差が 10 m であればその 5 分の 1、すなわち 2 m がそのままユーザー衛星の軌道誤差にのることになり、それだけで要求精度を逸脱する。したがって、ユーザー衛星の軌道決定精度を向上させるためには、GPS 衛星の軌道決定精度も向上させる必要がある。そのため、GPS 利用軌道決定では、全世界的に配置され、かつその位置が測量などによって高精度に求められている地上 GPS データを、搭載 GPSR データと一括して処理することで、GPS 衛星群とユーザー衛星の軌道を同時に決定する³⁻⁶⁾。

搭載 GPSR データは軌道全周回において取得されるため軌道全周においてユーザー衛星の軌道決定が可能となり、ユーザー衛星の精密な軌道位置を提供することが可能である。しかし、GPS 利用軌道決定の処理アルゴリズムは複雑で技術開発要素が多く、推定するパラメーターも膨大な量であるため、計算機の能力にもよるが、一度の計算に数十分~数時間を要する。

3.1.2 SLR 利用軌道決定

SLR データを使用した軌道決定は、ユーザー衛星に対する複数局からの精度のよい距離データを使用した幾何学的位置決定によりその軌道を求めるため、単純でも高い精度が得られる。また、その計算時間は数分と短い。さらに、SLR データは電離層の影響をほとんど受けず、かつ対流圏屈折などの遅延量はその大きさがすでに既知でありモデル化が容易であるので、軌道決定に必要なデータ前処理が少ない利点がある。しかし、SLR は、気象条件等により取得できるデータ量にばらつきが生じるため定常的な運用には適さない。

一方、GPS 利用軌道決定は、先にも述べたとおり、データ前処理や軌道決定アルゴリズムも複雑かつ多大であり、単独でのアルゴリズムや決定結果の検証が非常に困難である。そのかわり、データは衛星の軌道全周回において取得可能であるため、適切な補正・モデル化が施されることにより、軌道上のどこの位置でも高精度な軌道決定結果を得ることができ、観測画像処理などにも有効に活用できる。

これら 2 種類のデータがもつ特質から、宇宙における高精度軌道決定分野では、SLR と GPS の両観測データの相補的な利用により GPS 利用軌道決定における技術課題を解決する手法がとられている。特に、GPS データの大きな誤差である電離層屈折遅延量補正モデルの検証・改良、搬送波位相の波数不確定性の効率的な除去は、SLR を用いることにより可能となる。

このように、GPS とはまったく異なる観測系である SLR を使用することで、短期間での精度検証ならびに精度評価を確実に行うことができる。

3.1.3 目標到達精度

2002 年 12 月に打ち上げられた ADEOS-II では、搭載 GPSR が L1 帯のみ受信可能であることから、L1 データのみを使用した電離層遅延量補正を行うこととし、目標軌道決定精度を 2~3 m としている。SLR 利用軌道決定目標精度は、搭載のレーザーリフレクター (図 6) に対する視野制限のため十分なデータが取得できないことを考慮し、幾何学的な位置決定精度において 50 cm を目標としている。

ALOS は L1/L2 両方のデータを受信可能であるので、電離層遅延量の高精度な補正が可能であることから、GPS 利用軌道決定で 25 cm、SLR 利用軌道決定は ADEOS-II で存在した視野制限がないために 20 cm 以下を目標軌道決定精度としている。

3.2 高精度時刻推定と測位分野への発展

3.2.1 リアルタイム高精度軌道決定

GUTS で行う高精度軌道決定は、提供データの利用がオフライン処理であるためデータ提供の迅速性は考慮しておらず、むしろ高精度化を主眼に置いている。よって、将来計画されている測位システムに対する基盤技術提供は可能であるが、システムの即時転用は困難である。

そこで、2005 年に打ち上げ予定の ETS-VIII では、GUTS で確立したオフライン高精度軌道決定技術をベースとして、GPS とは異なる周波数・コード等をもった独自の測位信号と GPS 信号を併用したリアルタイム高精度軌道決定と、衛星に搭載された原子時計の高精度時刻管理技術の確立を目的とした「高精度時刻基準装置 (HAC: high accuracy clock) 実験」を計画している。

GUTS と HAC という 2 つの段階的技術検証を経て、2008 年に打ち上げが計画されている準天頂衛星^{*5}でも、独自の測位信号と SLR データを使用して高精度な軌道決定を行う計画としている。

準天頂衛星を利用した測位実験システムは、日本およびアジア・オセアニア地域を対象として独自の測位サービスを提供することを目指しているが、測位サービスの提供には衛星の高精度軌道決定ならびに時刻同期技術は欠かせない技術要素となる。

3.2.2 光応用時刻同期システム

測位システムにおいては、地上と衛星の時計を同期させる技術が非常に重要な技術のひとつである。HAC 実験における時刻同期実験もその技術検証のひとつであるが、衛星と地上の時刻同期に関するもうひとつの要素技術として、光を応用した時刻同期システムがある。

これは、地上の SLR システムの時刻を基準として、レーザーパルスを送信して地上・搭載原子時計の同時読み出しを行い、必要な補正を行うことで、地上原子時計に対する搭載原子時計の時刻同期精度を 1 ns 以下とするものである。

本稿では、GPS データを使用した高精度軌道決定の概念と、GPS 利用軌道決定の有効的なシステム検証手段である衛星レーザー測距について、現在 NASDA において高精度軌道決定システムの一環として整備している SLR システムを例にして紹介した。

GPS と SLR を使用した軌道決定システムは、日本国内

^{*5} 静止軌道では、高緯度地方や衛星の静止経度によっては衛星の仰角が低くなったり建物に視野を遮られたりして十分な通信ができない。そこで、静止軌道と同じ高度で軌道傾斜角を 45 度程度にすることにより、日本付近で常に衛星が高仰角で見えるようにした軌道を準天頂衛星軌道といい、移動体ミッションおよび測位ミッションで優位となる。

ではまだその例はなく課題も多い。SLR システムについても、国内では過去に2例（海上保安庁下里水路観測所ならびに通信総合研究所）を数えるのみである。

このように国内においてあまり例のないシステムではあるが、海外ではすでに実用化されており、数々の衛星運用やミッションデータ処理に役立てられている。また、もともと軍用に開発され民間向けには精度劣化対策もとられていたGPSも、現在では筆者らが使用しているような特殊な用途に限らず、カーナビゲーションシステムをはじめ広く一般に使用されるようになってきている。

高精度軌道決定システムは、宇宙機を使用した一般的な測位システムに関する技術検討から始まり、着々と技術蓄積を図りつつある。今後はさらに技術開発と応用が進み、GPSにかわる日本独自の測位システムの確立に大きく貢献するものと考え、またそうであってほしいと期待するところである。

文 献

- 1) J. R. Guinn, J. R. Jee and T. N. Munson: *TOPEX/POSEIDON Orbit Determination Using Global Positioning Satellites in Anti-Spoofing Mode*, AAS-94-138 (1994).
- 2) J. J. Degnan: *Millimeter Accuracy Satellite Laser Ranging: A Review*. *Geodynamics Series*, Vol. 25 (AGU, Washington DC, 1993).
- 3) 土屋 淳, 辻 宏道: 新・やさしいGPS測量(日本測量協会, 2001).
- 4) 土屋 淳, 辻 宏道: 新・GPS測量の基礎(日本測量協会, 2002).
- 5) S. Katagiri, Y. Yamamoto, H. Ogasawara, H. Kitabatake, M. Kojima, H. Aoki, M. Sawabe, T. Uchimura and M. Maeda: "Overview of the NASDA's precise orbit determination software," *22nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS)*, ISTS2000-f-06 (2000).
- 6) 片桐征治, 山本洋介, 北畠秀俊, 前田真紀, 内村孝志, 齋藤正敏, 沢辺幹夫: "GPS衛星を用いた人工衛星の高精度軌道決定システムの開発", 電子情報通信学会論文誌GPS特集号(電子情報通信学会, 2001).

(2003年6月23日受理)