

cm 精度で人工衛星の軌道を決める

情報通信研究機構 鹿島宇宙通信研究センター

大坪 俊通

Email: otsubo@nict.go.jp

1. はじめに

地球を周回する人工衛星の精密な軌道情報は、従来の宇宙工学や測地学といった枠を超え、最近では固体・流体の地球物理、大気科学、ナビゲーション、天文学など幅広い分野で必要とされている。

レーザパルスや GPS 信号を使って、現在では数 cm の精度で地上局・衛星間、あるいは衛星・衛星間の距離の測定が技術的に可能になっており、さらには衛星に加わる摂動を測定する加速度計を搭載する衛星も現れている(図1)。このような高い観測精度を生かすため、観測値から軌道要素あるいは他の測地パラメータ等を決定するソフトウェアが必要になる。情報通信研究機構においては、90 年代半ばより、主にレーザ測距データの解析のためのソフトウェア ‘concerto’ を開発している(大坪, 2005)。

2. ソフトウェア ‘concerto’ の構成と物理モデル

ソフトウェア ‘concerto’ の現バージョン 4.1 は、Java 言語を用いて記述されている。Java のオブジェクト指向の利点を活かして、モデルの追加や機能の拡張が比較的容易な構成になっている。本ソフトウェアは、機能別にいくつかの「パッケージ」に分割され、その下に数多くの「クラス」を配置

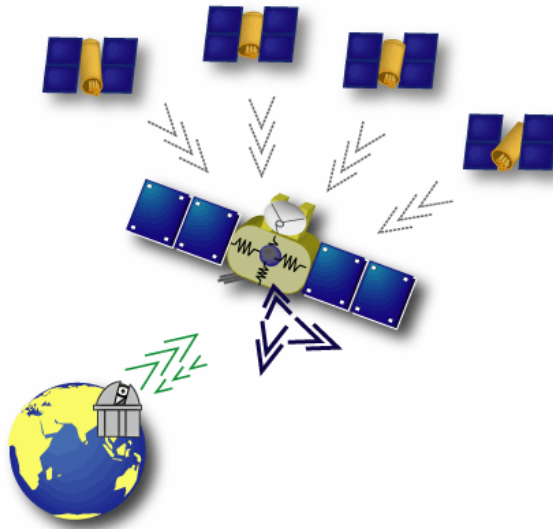


図 1：レーザ測距・GPS・加速度計による精密軌道決定イメージ図。

する格好をとる.

cm あるいは mm の精度のプロダクトを得るためには, 考慮すべき物理モデルは, それと同等あるいはそれをしのぐ精度が必要であり, 内容も多様化・複雑化する. 衛星の運動を支配する加速度モデル, 地球回転のモデル, 局位置変動のモデルについて, 表 1 に簡単に示しておく. このように, 多くのモデルは IERS Conventions (2003) (McCarthy and Petit, 2004) に準拠させ, 国際標準モデルを採用している一方, 一部のモデルについては先進的あるいは試験的なものを組み込み, 研究開発に利用している. そのほかのモデルや全体のソフトウェア構成については, 大坪 (2005) を参照されたい.

本ソフトウェアは, 当初衛星レーザ測距データ解析専用で作られたが, 現在では低軌道衛星で取得される GPS 受信データ, 加速度計による非重力摂動データ, 光学アストロメトリ観測による測

jp.go.crl.mmii.accel パッケージ

2体問題	<i>AccTwoBody</i>	GM: IERS Conv 2003
地球重力場	<i>AccGeopotential</i>	GGM, EIGEN, GRIM, EGM モデルな
3体問題	<i>AccThirdBody</i>	惑星暦: DE-405
固体地球潮汐	<i>AccSolidEarthTide</i>	IERS Conv 2003
海洋潮汐	<i>AccOceanTide</i>	IERS Conv 2003
輻射圧	<i>AccRadiationPressu</i>	球状, Box-Wing, 衛星固有モデル
大気抵抗	<i>AccDrag</i>	大気密度: DTM94, NRLMSISE-00
相対論補正	<i>AccRelativity</i>	IERS Conv 2003
経験項	<i>AccConst*</i>	Along/Cross/Radial 一定の加速度
	<i>AccRev*</i>	Along/Cross/Radial 周期性の加速
加速度計	<i>AccAccelerometer</i>	加速度計によって計測される摂動

jp.go.crl.mmii.earth パッケージ

歳差・章動	<i>PrecessionNutation</i>	IERS Conv 2003 = IAU2000
日周運動	<i>EarthRotationAngle</i>	IERS Conv 2003
極運動	<i>PolarMotion</i>	IERS Conv 2003
固体地球潮汐	<i>SolidEarthTide</i>	IERS Conv 2003
海洋荷重	<i>OceanTide1996</i>	IERS Conv 2003 = IERS Conv 1996
	<i>OceanTide2005</i>	分潮数の拡張(54分潮モデル)
極潮汐	<i>PoleTide</i>	IERS Conv 2003
大気荷重	<i>AtmLoading1D</i>	鉛直成分 $\propto$ 気圧変化
	<i>AtmLoading3D</i>	3次元変形モデル取り込み
陸水荷重	<i>HydLoading3D</i>	3次元変形モデル取り込み
非潮汐性海洋荷重	<i>NtoLoading3D</i>	3次元変形モデル取り込み

表 1 : concerto で採用している加速度モデル・地球回転モデル・局位置変動モデル. IERS Conv 2003 は, IERS Convention (2003) (McCarthy and Petit, 2004) の意.

角データの解析も可能になっている。

3. 精密軌道決定の例

コーナークューブリフレクタを搭載した SLR 衛星の軌道は、数ある衛星の中でも最も高精度に決定することができる。なかでも、大気抵抗の影響が無視できる高度にある双子の LAGEOS 衛星は、世界中の観測局から年間 10000 パス前後の観測が行われており、最高の軌道決定精度が得られていると考えられる。しかしながら、各解析センターが作る LAGEOS 軌道が評価されることは過去にはほとんどなかった。

ILRS (International Laser Ranging Service) の Analysis Working Group (筆者もメンバー) では解析キャンペーンが行われ、1999 年 10 月の 1 か月間の LAGEOS-1 軌道を、複数の解析センターから集めて比較を行った。同一の観測データセットを用い、物理モデル等は完全ではないができるだけ合わせた条件設定にして、軌道を決定している。ソフトウェア内部では、衛星軌道の記述は赤道座標系でなされるのが普通であるが、観測局が乗る地球基準座標系に変換して、軌道を持ち寄った。これは、解析センター間での座標変換の差を表面に出さないための工夫である。

全部で、7 解析センターが参加したが、そのなかで最も一致度が高かったのが、われわれ(当時は通信総合研究所, CRL)と、テキサス大学 Center for Space Research (CSR) の組であった。図 2 にその 3 次元比較を示す。動径方向の一致が最も高く、平均のずれは 1 mm 未満で、ばらつきもわずか 5 mm RMS であった。その他の 2 成分も 3 cm RMS 前後で一致した。最大で 10 cm ほどの差が見られるが、これは測距データが希薄な時間帯の存在や、重み付けの違い、わずかな物理

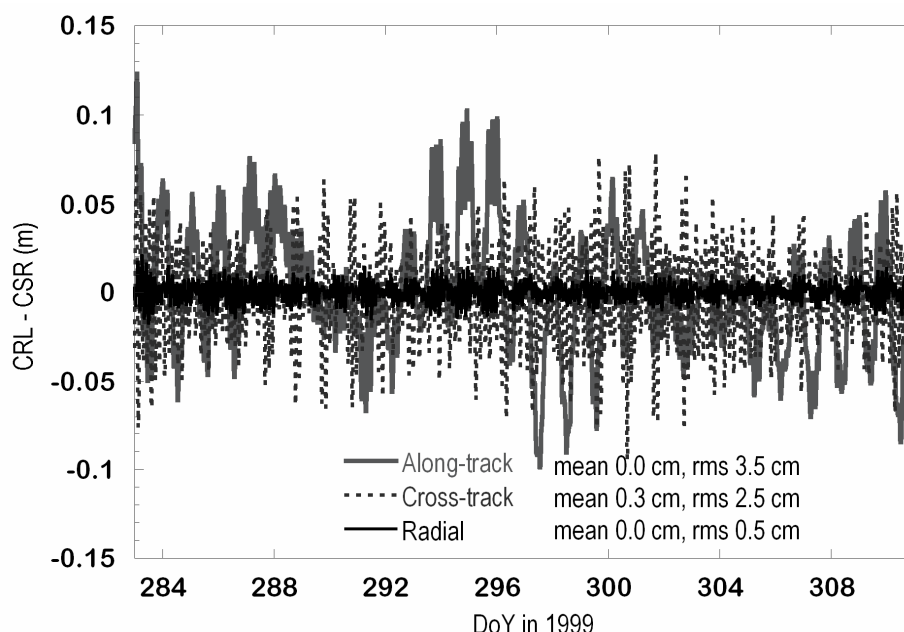


図 2 : LAGEOS-1 決定軌道の比較. "concerto" による軌道と、テキサス大学 Center for Space Research の "UTOPIA" による軌道の差の 3 次元表示。

モデルの差に起因していると考えられる。

さらに, SLR データの精密解析により, 世界の地上局の位置および速度を決め, 地球基準座標系を構築することも行っている. 現在グローバルスタンダードとして用いられている ITRF2000 への寄与も行った. このほか, GPS 受信機を搭載した低軌道衛星 CHAMP や GRACE の軌道決定も行っており, やはりわれわれの決定した軌道と他機関の軌道との比較において, 条件のよいときに 5 cm RMS 程度の一致を確認している. これらの衛星には加速度計も搭載されており, そのデータを使った軌道決定や, 大気密度モデルとの比較も行っている.

4. 今後の展望

近年, 高精度な衛星軌道を要求するミッションが増えており, 同時に副産物として新たな知見を得ることもできる. 例えば,

- ナビゲーション
- 地球重力場決定
- 大気掩蔽法による大気プロファイル
- 時刻比較
- 潮汐・荷重変形
- 超高層大気の密度

など非常に幅広い. 今後, NICT においては, 新しい衛星古い衛星問わず対象とし, 精密軌道決定を中心とする研究開発を展開していくつもりである.

参考文献

- ◆ 大坪 俊通: 衛星レーザー測距データの高精度解析 ～cm から mm へ～, 測地学会誌, 51, 1, 1-16, 2005.
- ◆ McCarty, D. D. and G. Petit (eds.): IERS Conventions (2003), IERS Technical Note No. 32, International Earth Rotation and Reference Systems Services, 2004.