

cm 精度で軌道を決める 地球を測る

大坪 俊通*¹

cm-Precision Determination of Satellite Orbits and Geodetic Motion

By

Toshimichi OTSUBO*¹

Abstract: New technologies have made it possible to measure the satellite orbits at cm precision. Precise orbit determination software requires a number of physical models on the satellite acceleration, the rotation of the Earth, the site displacement, and so on. Reversely it can be used for detecting precise effects of cm or even sub-cm order.

Keywords: Precise orbit determination, Satellite laser ranging, Global Navigation Satellite System, Space Geodesy

概 要

近年の新しいテクノロジーにより、人工衛星の軌道を cm で測定することが可能になっている。そのデータ解析を行う軌道決定ソフトウェアにおいては、衛星に作用する加速度・地球の回転・地上局の動きなど、数多くの物理モデルを取り込む必要がある。一方で、精密軌道決定を通して、cm あるいは mm オーダーの新たな物理現象を検出することも可能である。

1. はじめに

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。

cm の精度で衛星までの距離を測る技術としては、1990 年代までは衛星レーザ測距 (Satellite Laser Ranging; SLR) 技術がほぼ唯一の手段として用いられてきた。2000 年代に入ると、GPS 受信機を搭載した低軌道衛星が多く現れ、SLR に近い精度で、それも絶え間なく連続的な計測が可能であることが示されている。また、衛星に加速度計を搭載することで、重力以外に起因する摂動を測定することも可能になっている。このような、図 1 にまとめた技術を単独であるいは複合的に利用することで、正確な衛星の軌道決定が可能になっている。日本の例を挙げると、2006 年に打ち上げられた ALOS 衛星 (中村ほか, 2006)、2012 年打ち上げ予定の ASTRO-G 衛星 (吉川ほか, 2006) は、ミッションは地球環境と電波天文で異なるものの、どちらも高精度な軌道情報を必要とするもので、図 1 で示した技術の一部が用いられる。

このような高い観測精度を生かすためには、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、1990 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)。最近では、GPS や加速度計を使ったデータ解析にもこのソフトウェアを発展させ活用している。本稿では、まず本ソフトウェアにて考慮している物理モデルについて概観し、さらに精密軌道解析を通して得られた最近の新しい測地学・地球物理学上の知見についても紹介する。

* 1 National Institute of Information and Communications Technology.

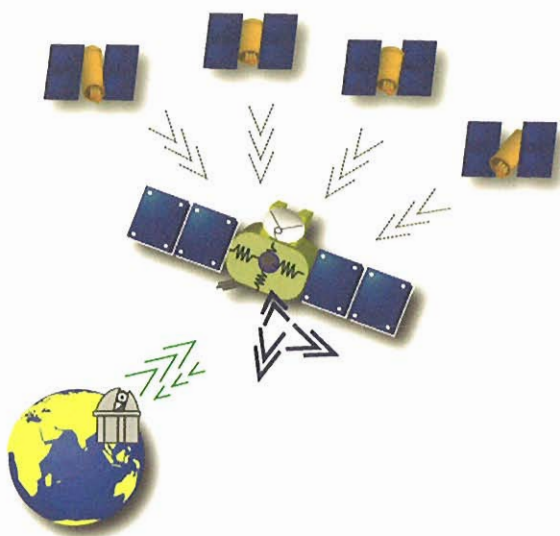


図1：レーザ測距・GPS・加速度計による精密軌道決定イメージ図

2. 精密軌道決定のための物理モデル

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 SLR 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角データの解析も可能になっている。そのなかで、図2は、本ソフトウェアにより決定した SLR 衛星 LAGEOS-1 の28日

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。

| 衛星に作用する加速度 | | 地球回転 | |
|------------|---|--------|---|
| 2体問題 | GM: IERS Conv 2003 | 歳差・章動 | IERS Conv 2003 = IAU2000 |
| 地球重力場 | GGM, EIGEN, GRIM, EGM モデルなど | 日周運動 | IERS Conv 2003 |
| 3体問題 | 惑星暦: DE-405 | 極運動 | IERS Conv 2003 |
| 固体地球潮汐 | IERS Conv 2003 | | |
| 海洋潮汐 | IERS Conv 2003 | 局位置の動き | |
| 輻射圧 | 球状, Box-Wing, 衛星固有モデル | 固体地球潮汐 | IERS Conv 2003 |
| 大気抵抗 | 大気密度: DTM94, NRLMSISE-00 | 海洋荷重 | IERS Conv 2003 = IERS Conv 19 分潮数の拡張 (54分潮モデル) |
| 相対論補正 | IERS Conv 2003 | 極潮汐 | IERS Conv 2003 |
| 経験項 | Along/Cross/Radial 一定の加速度 Along/Cross/Radial 周期性の加速度 | 大気荷重 | 鉛直成分 \propto 気圧変化 3次元変形モデル取り込み |
| 加速度計 | 加速度計によって計測される摂動 | 陸水荷重 | 3次元変形モデル取り込み |

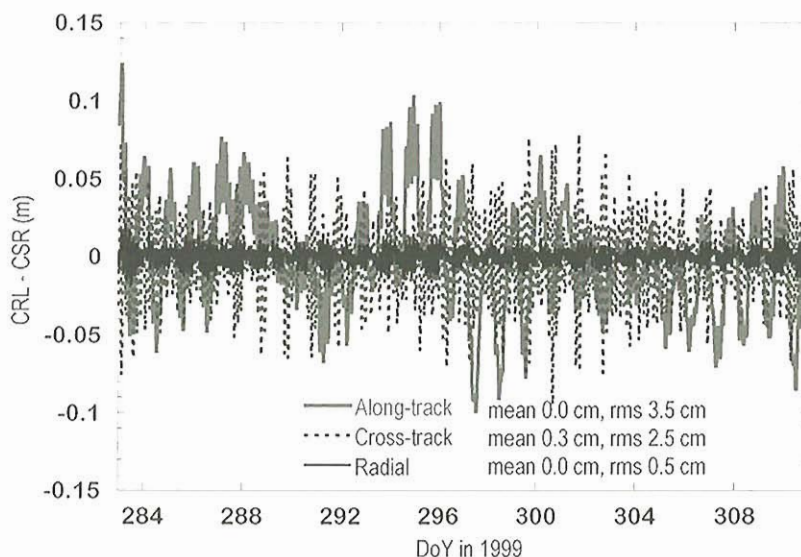


図2：LAGEOS-1 決定軌道の比較。“concerto”による軌道と、テキサス大学 Center for Space Research の“UTOPIA”による軌道の差の3次元表示。

間の軌道を、同様にテキサス大学 Center for Space Research の有するソフトウェア UTOPIA で決定した軌道と比較した例である。3次元成分のうち、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。そのほかの2成分も3 cm RMS 前後で一致した。また、ほぼ同程度の結果は、GPS による GRACE 衛星の軌道決定においても、JPL 決定値との比較において得られている。

3. 精密軌道決定により得られる地球の動き

表2で示したような細かな地球物理現象まで考慮しなければならないということは、逆にそのような現象が検出可能だということでもある。例えば、地球上の様々な物質の質量の動きにより、地球はほぼ弾性体として振る舞い変形する。結果として、地上の点の3次元座標が動くことになる。これを荷重変形と呼び、近年様々な物質に関して研究が進められている。それらのうち、海洋潮汐による荷重変形はすでに知られており数 mm の精度で定式化されている (McCarthy and Petit, 2004) が、例えば雪や陸水による効果も報告されている。われわれは大気の影響について、レーザ測距データを使って調べてみることにした。

地上の点よりも上に存在する大気の変化により、地上の点の位置は1~2 cm 程度変化するとモデル計算されている。水平成分よりも、鉛直成分の変化 Δu (mm) が大きく、それはおよそ地上の大気圧の変化 Δp (hPa) と関連付けられる。すなわち、

$$\Delta u = \alpha \Delta p$$

とおき、 α を推定パラメータとする。大気圧が高いほど鉛直成分が低くなる、すなわち α が負の値をとることが期待される。VLBI や GPS による大気荷重変形の検出は過去に報告されているが、SLR による検出を世界で初めて試みた。

1999-2003 年の5年間の LAGEOS-1 および LAGEOS-2 データを、'concerto' を使って解析した。図3は、オーストリアの Graz 局、イギリスの Herstmonceux 局に対する α の推定結果を示す。一般的に負の値が出たことで、大気荷重変形の検出に成功したことになる。また、これら結果は、IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) によるモデル計算値 -0.47 mm/hPa、 -0.33 mm/hPa に近いものになっている。

4. お わ り に

情報通信研究機構において開発中の精密軌道決定ソフトウェア 'concerto' の実装を通して、cm オーダーの軌道決定のために必要な物理モデルを概観した。さらに、大気荷重変形の例を挙げて、精密軌道決定により地球上の点の cm ないし sub-cm の小さな動きが検出可能であることを示した。同様な手法により、荷重変形・地球重力場・地球回転などの高精度な決定が盛んに行われており、今後その流れは加速すると思われる。固体地球に対する貢献のみならず、高層大気密度プロファイル・アルチメータ・リモートセンシング・電波天文衛星・時刻比較など、精密軌道決定が必要とされている分野は非常に幅広い。

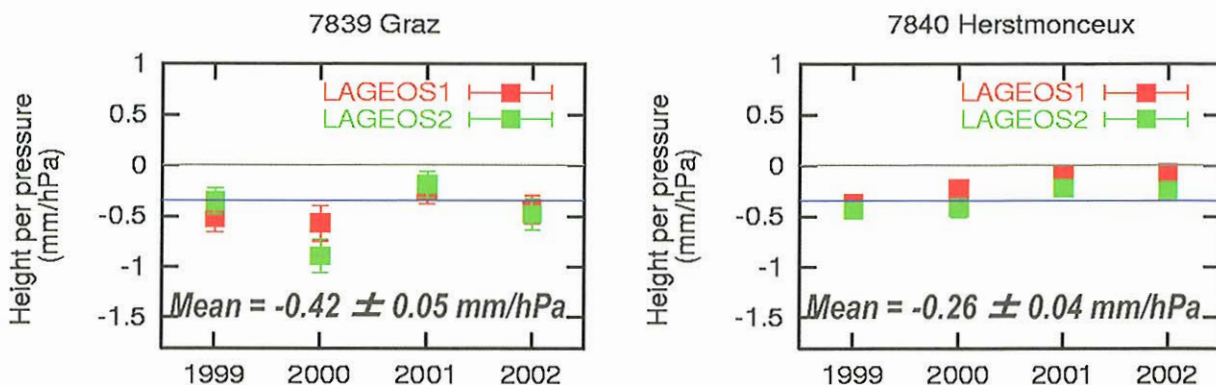


図3：LAGEOS 解析による大気荷重係数の推定。

参 考 文 献

- [1] McCarty, D. D. and G. Petit (eds.): IERS Conventions (2003), IERS Technical Note No. 32, International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2004.
- [2] 中村涼, 工藤伸夫, 中村信一, “ALOS の精密軌道決定”, 本集録, 2006.
- [3] 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.
- [4] 吉川真, ASTRO-G 軌道決定サブチーム, “ASTRO-G における高精度軌道決定の検討”, 本集録, 2006.