

# GPS 受信機を搭載した低軌道衛星の軌道決定

Orbit determination for low earth orbiters with GPS receiver

後藤 忠広, 大坪 俊通, 久保岡 俊宏

Tadahiro Gotoh, Toshimichi Otsubo, and Toshihiro Kubo-oka

情報通信研究機構, National Institute of Information and Communications Technology

Email: tara@nict.go.jp

## 概要

NICT has been developing satellite orbit analysis software “concerto”. Though the old version of the software can only solve SLR observations, it is now possible to solve GPS H-L SST observations with kinematic method. We determined CHAMP satellite orbit by the software, and compared the difference between JPL-determined CHAMP orbit and our orbit. The two orbits agreed within a few tens of cm.

## 1 はじめに

独 GFZ が 2000 年 7 月に打上げた CHAMP (CHallenging Minisatellite Payload) や米 NASA が 2002 年 3 月に打ち上げた GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) などの低軌道衛星 (LEO) は地球重力場係数の精密決定を主な目的としている [1, 2]. いずれの衛星も, 地球重力場の変化による衛星の軌道擾乱を精密に観測する事で地球重力場係数の決定を行う事から, より正確な軌道決定精度が要求され, この目的を達成するためにこれらの衛星は GPS 受信機を搭載し, 常に衛星測位による位置決定が行えるようになっている. また, 衛星に作用する非重力効果による加速度を計測するため, 加速度計の搭載も併せて行われる. CHAMP 搭載の加速度計については本誌 [3] に詳しい.

一般的な軌道解析ソフトウェアは衛星の初期位置と速度を元に, 衛星に加わる加速度を求め, 任意の時刻における計算した軌道と, 地上観測により求めた観測量から衛星の軌道決定を行う. 一方 GPS 受信機を搭載した衛星の場合は, 任意の時刻において 4 個以上の観測値が得られる可能性が高いことから, 各時刻における衛星の 3 次元位置と受信機のクロックオフセットを直接求める事ができる. このような方式は GPS H-L SST (High-Low Satellite-to-Satellite Tracking) と呼ばれる (図 1).

情報通信研究機構 (NICT) では, 衛星レーザ測距 (SLR) のデータを用いた軌道解析ソフトウェア “concerto” [4] の開発を行ってきた. これまでは SLR のデータしか扱えなかったが, “ver.4” として開発中のソフトは CHAMP や GRACE などの GPS H-L SST データを使用した軌道決定が可能ないように実装中である. 本稿では, 開発中のソフトウェアを使用し CHAMP 衛星の軌道を H-L SST から決定し, JPL が公開している CHAMP 軌道と比較した結果について報告する.

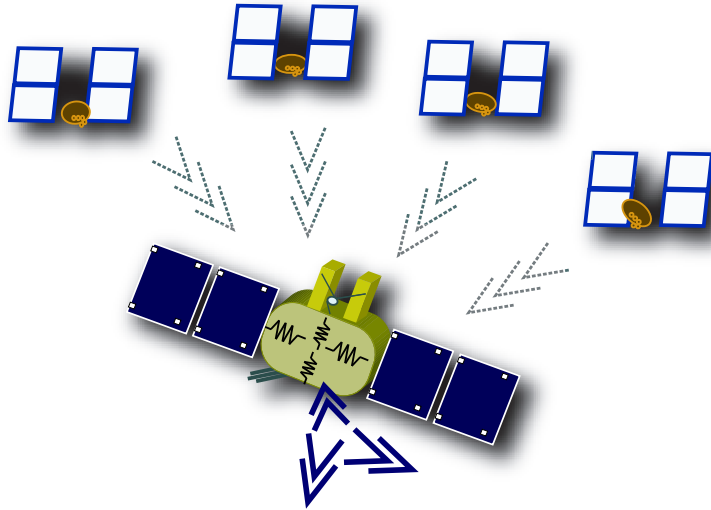


図 1: High-Low Satellite-to-Satellite Tracking.

## 2 GPS H-L SST 解析

### 2.1 Dynamic 法と Kinematic 法

地上の観測局からのデータを使用して軌道決定を行う場合、ある瞬間に複数の観測値が常時得られる可能性は極めて低い事から、観測量に応じたアークを決定し、観測時刻  $t$  における観測値  $y(t)$  から衛星の軌道要素  $x(t_0), v(t_0)$  を求める。このような方法は Dynamic 法と呼ばれる (図 2 左)。一方、GPS 受信機を搭載した衛星の場合は、常時 4 個以上の衛星が観測可能な事から、任意の時刻において衛星の位置  $x(t)$  と受信機のクロックオフセットが求まる。このような方式は Kinematic 法 (または Geometric 法) と呼ばれる (図 2 右)。Dynamic 法に対する Kinematic 法の利点としては、観測時刻

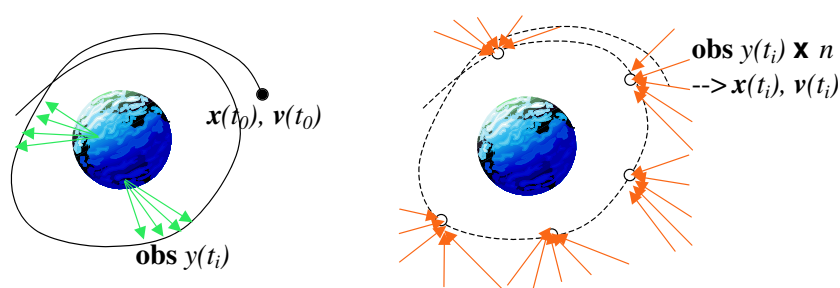


図 2: Dynamic 法と Kinematic 法.

における位置が直接的に決まる事から、衛星の初期値や力学モデルに依存しない軌道を得る事ができる。また、Dynamic 法では、推定パラメータの時刻と観測値の時刻が一致しないため、両者を結ぶための状態遷移行列を軌道と一緒に数値積分する必要があるが、Kinematic 法では数値積分そのものがなくなる。反面、Kinematic 法は衛星の位置情報しか求まらず、速度は数値微分に頼る事から速度情報が必要な場合は精度が劣化する。また、各観測時刻において常に 4 個の

パラメータを解くため単純なバッチ処理では長時間の処理が一度に行えなくなる。GPS H-L SST のみのデータを使用した解析では、GPS 衛星の位置やクロックオフセットは推定できない事から、あらかじめ作られた GPS 軌道やクロックの精度に依存する事にもなる。

## 2.2 GPS H-L SST の観測値

LEO の受信機 ( $L$ ) が時刻 ( $t$ ) に受信する GPS 衛星 ( $s$ ) からの信号は以下のように表す事ができる。

$$P_{L,i}^s(t) = \rho_L^s(t, t - \tau_L^s) + I_{L,i}^s + dm_i + c[dt_L(t) - dt^s(t - \tau_L^s)] + e_{L,i}^s \quad (1)$$

$$\Phi_{L,i}^s(t) = \rho_L^s(t, t - \tau_L^s) - I_{L,i}^s + \delta m_i + c[dt_L(t) - dt^s(t - \tau_L^s)] + \phi_{L,i}^s(t_0) + \varepsilon_{L,i}^s \quad (2)$$

ここで、 $P$  はコード位相 (疑似測距値) を表し、 $\Phi$  は搬送波位相を表す。 $\rho$  は GPS 衛星と LEO 衛星の幾何学距離、 $I$  は電離層の遅延を表す。 $dt_L, dt^s$  は LEO 受信機、GPS 衛星のクロックオフセットを表す。 $dm, \delta m$  はコード、搬送波それぞれのマルチパスを表す。コード位相は重畳している航法メッセージに 1 秒信号の情報が載っているため、不確定性を持たない測距値が観測できる。これに対し、受信機が観測可能な搬送波位相は 1575.42 MHz または 1227.6 MHz の周期内の位相差と、周期の整数倍の加算値のみのため、衛星捕捉時の衛星と受信機の各発信器に依存する初期位相  $\phi(t_0)$  が発生する。 $e, \varepsilon$  はコード、搬送波位相の観測誤差およびモデル誤差を表す。なお、下付きの  $i$  は GPS 信号の 2 種類の周波数帯を示す。

Kinematic 法では、式 (1), (2) のうち、GPS 衛星の位置とクロックオフセットを既知とし、LEO 衛星の位置と受信機のクロックオフセットを未知パラメータとして推定する。搬送波位相を使用する場合は初期位相も同時に推定する。マルチパスの影響は補正できないため観測誤差として扱う。電離層の遅延は周波数分散性を利用し、式 (3),(4) で示す線形結合を使用する事で除去する。

$$P_{L,3}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{L,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{L,2}^s \quad (3)$$

$$\Phi_{L,3}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_{L,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \Phi_{L,2}^s \quad (4)$$

## 3 Kinematic 法による CHAMP 衛星の軌道決定

concerto に実装した GPS H-L SST による Kinematic 法を使用して CHAMP 衛星の軌道決定を行った。使用したデータは JPL が公開している RINEX 形式の 10 秒間隔の観測値を 60 秒間隔に間引きして使用した。観測量としては、コード、搬送波位相それぞれについて、2004 年 8 月 8 日の 6h - 12h UTC の 6 時間のデータで解析を行った。両観測量とも電離層の遅延は式 (3),(4) の線形結合により除去した。GPS の軌道は IGS が公開している 15 分毎の精密暦を補間して使用した。解析は、LEO 衛星の 3 次元位置と搭載受信機のクロックオフセットをエッポック毎に解いた。搬送波位相の場合は、衛星のパス毎に初期位相の推定も行った。なお、初期位相と受信機クロックオフセットは相関がありそのままでは解けないため、クロックオフセットは和がゼロになるような拘束条件を設定して推定した。

### 3.1 GPS クロックの影響

IGS が公開している GPS のクロックオフセットには、衛星の位置情報と同一ファイルで公開される 15 分毎の値と、各衛星および観測局のクロックオフセットのみを含んだ 5 分毎の値の 2 種類の公表値が存在する。そこで、5 分間隔および 15 分間隔が推定精度に与える影響について比較を行った。図 3 がそれぞれのクロックオフセットを使用して解析した際

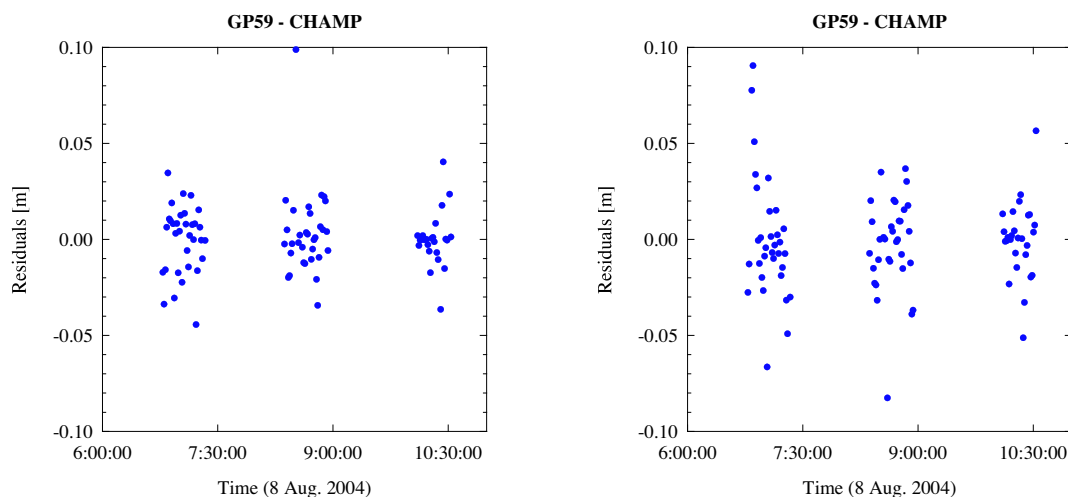


図 3: IGS が公開している 2 種類の GPS クロックオフセットを使用した場合の解析後の残差. 左側が 5 分間隔の値を使用した場合. 右側が 15 分間隔の値を使用した場合.

の GPS SV59 についての残差である. 図の左側が 5 分間隔の値を使用した結果で, 右側が 15 分間隔を使用した結果である. 横軸が観測時刻, 縦軸がパラメータ推定後の残差を表す. 15 分間隔を使用すると 5 分間隔を使用した場合に比べ残差が悪化しており, より高精度な軌道決定を行う場合には 15 分間隔のクロックオフセットでは精度が不足している事がわかる.

### 3.2 コード位相と搬送波位相による比較

図 4 にコード位相を使用して軌道決定を行った場合の結果を示す. 左の図はパラメータ推定後の観測値に対する残差を示す. 右の図は, JPL が決定した CHAMP 衛星の軌道と, コード位相で解いた時の軌道との差を, along-track, cross-track, radial 方向のそれぞれについてプロットした結果である. 使用した GPS クロックオフセットは 5 分間隔の値である. JPL の軌道は GIPSY/OASIS II を使用して求められた値で, 観測量は 30 秒間隔のコード位相, 搬送波位相を使用している. 解析アークは前日の 21:00 からの 27 時間アークで, Reduced Dynamic 法により解かれた軌道である [5]. 公表されている軌道は, J2000 の慣性座標系と ITRF97 の地球固定座標系の 2 種類がある. 比較に使用した軌道は, 地球固定座標系を concerto と同様のモデル (IERS Conventions 2003) で慣性座標系に変換した軌道を使用した. 同様の解析を搬送波位相を使用して求めた場合の結果を図 5 に示す. 軌道決定後の残差の標準偏差はコード位相が 96.9 cm, 搬送波位相は 3.2 cm であった. コード位相は観測誤差が大きく, 決定精度を議論できるまでいかないが, 搬送波位相については残差が 10 cm 以下に収まっており, それなりの決定精度が得られている. ただし JPL 決定軌道との比較では, 進行方向及び鉛直方向に peak-to-peak で 1m 近くの周期成分が見られる. 周期はほぼ 90 分であり, CHAMP の周回に依存した系統誤差が載っていると思われる. 軌道が大きくずれている箇所は残差もよくないので, 捕捉可能な衛星の仰角が低いなど条件が悪い場合と考えられる.

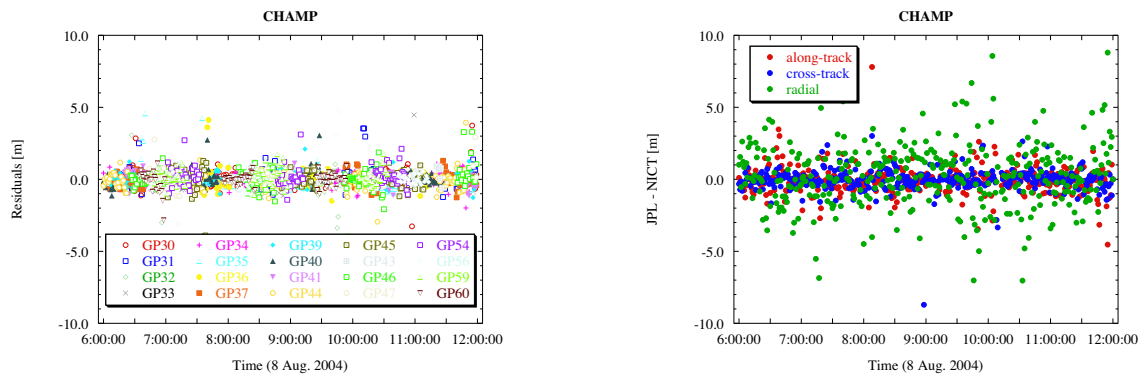


図 4: コード位相を使用して CHAMP 軌道決定を行った時の、軌道推定後の残差 (左) と JPL 決定軌道との差 (右)。

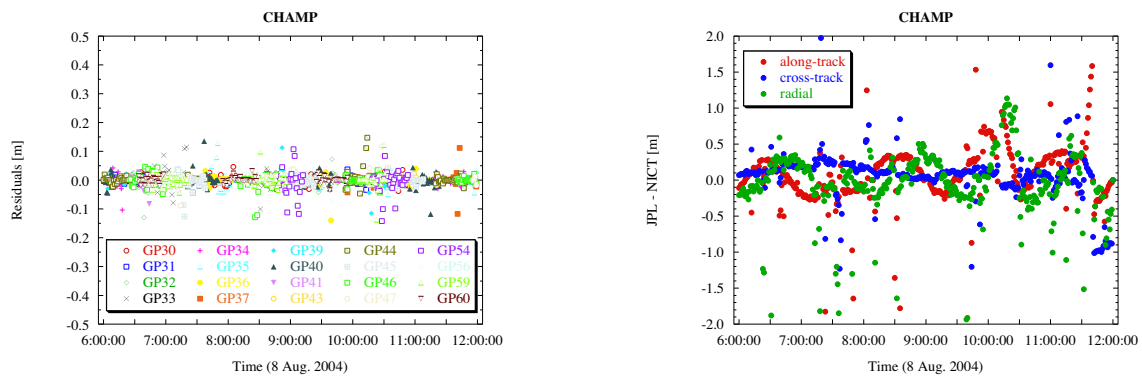


図 5: 搬送波位相を使用して CHAMP 軌道決定を行った時の、軌道推定後の残差 (左) と JPL 決定軌道との差 (右)。

## 4 まとめ

concerto の Kinematic 法を使用して、CHAMP 衛星の軌道決定を行った。現時点では、JPL 決定軌道と比較した場合、搬送波位相を使用しても数十 cm の差が存在し、決定精度が不足している。また、捕捉可能な衛星に依存する位置決定精度の劣化も見られた。これらの事から、LEO 衛星の高精度軌道決定には、短いアークで軌道解析を行う Reduced Dynamic 法を取り入れて、決定精度が不足する場所は一般的な Dynamic 法で軌道を推定する必要があると思われる。また、進行方向や鉛直方向に見られる周期成分については、GPS 衛星のクロックオフセットなどの影響と考えられるが、はっきりした原因は究明できていない。この点に関しては、今後検討していく必要がある。

## 参考文献

- [1] C. Reigber, G. Balmino, P. Schwintzer, R. Biancale, A. Bode, J.M. Lemoine, R. Koenig, S. Loyer, H. Neumayer, J.C. Marty, F. Barthelmes, F. Perosanz, and S.Y. Zhu, “A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and Accelerometry (EIGEN-1S),” *Geophysical Research Letters*, 29(14), 10.1029/2002GL015064, 2002.
- [2] M.M. Watkins, E.S. Davis, W.G. Melbourne, T.P. Yunck, J. Sharma, S. Bettadpur, and B.D. Tapley, “GRACE: A new mission concept for high resolution gravity field mapping,” *Proc. of European Geophysical Society*, Hamburg, Germany, 1995.
- [3] 久保岡俊宏, 大坪俊通, 後藤忠広, “CHAMP に作用する非重力摂動 – モデルによる計算値と衛星搭載加速度計の比較 –”, 地球の「流れ」を見る衛星重力ミッション, 地震研究所, 2004.
- [4] 大坪俊通, “衛星レーザ測距データの高精度解析 – cm から mm へ –”, *測地学会誌*, in press, 2005.
- [5] “CHAMP *quick orbits*”, <http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Missions/CHAMP/>.