

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計測値の比較 -

Comparison of perturbation model of concerto ver. 4
and accelerometer data onboard the CHAMP satellite

久保岡俊宏、大坪俊通、後藤忠広

Toshihiro Kubo-oka, Toshimichi Otsubo, and Tadahiro Gotoh

情報通信研究機構, NICT

Email : tkubooka@nict.go.jp, otsubo@nict.go.jp, tara@nict.go.jp

Abstract At National Institute of Information and Communications Technology (NICT), precise orbit determination software "concerto" has been developed and the new version 4 is now being tested. Major features of this new version are expansion to deal with multiple observation data types and improvement of orbit determination accuracy. Using new version of concerto, non-gravitational perturbations acting on CHAMP satellite were computed and were compared with the onboard accelerometer data. Two different satellite shape models, cannonball model and macro-model, are also compared. In alongtrack component, there are two maxima per one revolution in computed value with macro-model and the observed value, while there is only one maximum in the case of cannonball model. The absolute value and amplitude by two models are quite different from observed one. Therefore, scale factor and bias should be estimated during orbit determination process.

1. はじめに

情報通信研究機構では、1993年頃から人工衛星の軌道解析ソフトウェア concerto の開発を続けている [1] [2]。現在開発中の ver. 4 での主な「新機能」は、解析可能な観測データの種類の拡大（衛星搭載の GPS 受信機データ等）と、最新物理モデルの取り込みによる更なる高精度化の2つである。後者には、衛星に作用する各種の摂動、例えば、地球の上層大気による抵抗、太陽光の輻射圧等をこれまでより精密に計算するためのモデルが含まれている。これに対し、近年、軌道解析ソフトウェア中の摂動モデルの精密化とは別のアプローチとして、非重力効果による加速度を搭載した加速度計によって直接計測する衛星が打ち上げられるようになった。例えば、2000年7月に独 GFZ が中心となって打ち上げた衛星 CHAMP は、地球重力場係数の高精度決定が主目的の一つであり、「ノイズ」となる非重力効果による加速度を直接計測するために高精度加速度計 STAR を搭載している。この様な衛星搭載加速度計のデータは、衛星に作用する摂動のモデルを精密化する上で重要な指針となるばかりでなく、将来的には観測データの一つとして軌道決定の際に取り込むことも考えられる。本稿では concerto ver. 4 に組み込んだ摂動モデルから求められる非重力効果による加速度の値と、加速度計 STAR の計測値を比較した結果について述べる。前者については、衛星の形状モデルとして、衛星を単一の球体とみなす Cannonball Model と、衛星形状を平板の組み合わせで近似した Macro Model を比較する。Macro Model では、大気との相互作用による摂動の計算で、揚力成分（相対速度に垂直な方向成分の

総称) を新たに考慮した結果についても説明する。

2. CHAMP 搭載の加速度計 STAR の概要

CHAMP の重心に設置されている高精度加速度計 STAR は、直方体状の Proof-mass を板状の電極からなる "鳥カゴ (cage)" の中心に保持するために各電極に印加する電圧から、非重力効果による加速度を求めるものである。概念図を Fig. 1 に示す。設計上は $3 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ の精度をもつのだが、x (Radial) 方向の1つの電極に不具合が発生したため、この方向の成分については精度が低下している [3]。この様な事情により Radial 方向成分については、通常の Scale Factor と Bias の補正の他に、各時刻のデータレコード中に含まれている補正值を使って、電極の不具合によって時間変動するノイズの分を次の式に従って補正する必要がある [4]。

$$a_{\text{corrected}} = (a_{\text{uncorrected}} + acc_{02} - \text{Bias}) \times \text{ScaleFactor} + acc_{01}$$

ここで acc_{02} が電極の不具合による radial 方向成分の補正項で、 acc_{01} は proof mass が電荷を帯びることによって発生する Lorentz 力による分を補正する項を表している [3]。本来は大気抵抗の影響で alongtrack 成分が卓越するはずなのだが、上式の補正を加えた後でも、Radial 方向成分が最も大きく、しかも値は常に負なので地心方向に出るという不自然な結果になっている。この傾向はどの日のデータにも普遍的に見られるものである。さらに Radial 方向成分の絶対値は日々増加を続けている。GFZ や JPL が軌道決定の際、この問題にどう対処しているのかについては、本稿執筆段階ではまだ調査中である。

Alongtrack 方向成分の時間変動を1年単位の長いスパンで調べると、いくつかの興味深い特徴を見いだすことができる。例えば、2003年10月末から11月中旬にかけて発生した巨大太陽フレアの直後には、Alongtrack 方向の加速度に鋭いピークが見られる。実際に CHAMP の軌道高度がこの時期に急激に低下していることから、この現象はフレアに起因する加速度計の異常ではなく、地球の上層大気密度の一時的な上昇を示すものと考えられる。

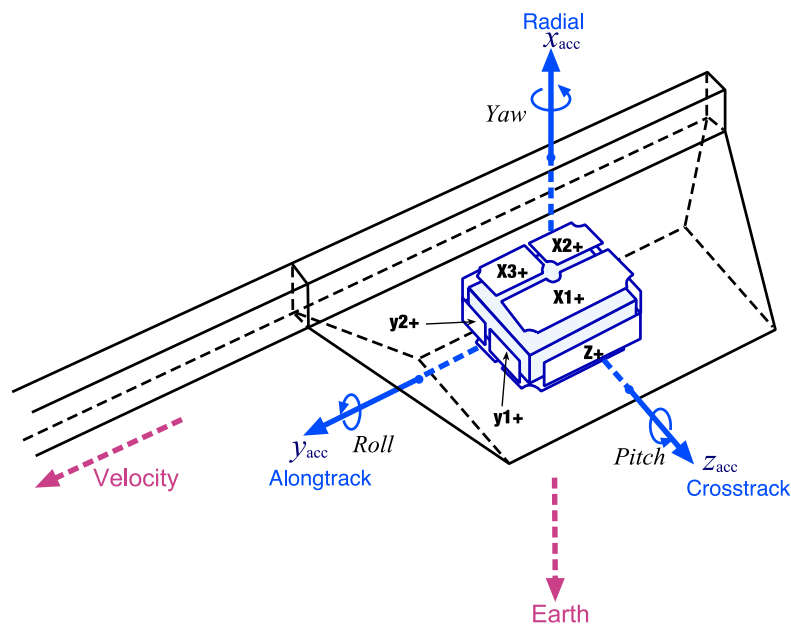


Fig. 1 CHAMP 搭載加速度計 STAR の概念図

3. concerto ver.4 の摂動計算ルーチン

前述の様に concerto ver. 4 では、非重力効果による摂動として、大気抵抗、太陽光輻射圧、地球からの照り返しを計算するルーチンを実装している。この他にも、軌道決定の際にモデル化されていない摂動の寄与を吸収するために「経験的加速度」という項を付加することが可能になっている。衛星の形状モデルとしては、広く用いられている Cannonball Model [5] の他に、衛星の形状を複数の平板で近似した Macro Model が利用可能である。Cannonball Model は衛星の形状を単一の球で近似するもので、多くの軌道解析ソフトウェアで摂動計算のためのデフォルトのモデルとして採用されている。このモデルのメリットは、衛星の姿勢情報が不要で計算量が少なく済むことである。これに対し、Macro Model は衛星の形状を少数の平板の組み合わせとして近似するもので、衛星の姿勢制御、太陽電池パドルの様な可動部分、各面の表面材質の違いを考慮することができるため、結果的に Cannonball Model よりも正確に大気抵抗や輻射圧を計算することが可能になる。CHAMP の Macro Model は衛星本体が 8 枚、磁力計ブームが 5 枚の計 13 枚の平板からなる [6]。Fig. 2 にその概念図を示す。磁力計ブームが直方体であるにもかかわらず面の数が 1 枚少ないのは、進行方向の反対側に相当する -y 面の寄与を無視しているためである。CHAMP は細長い磁力計ブームの方向に飛行し、面 #2 を地心方向に向けている。輻射圧計算に必要な衛星表面の材質は面 #3 と面 #5 が太陽電池セル、その他の面は Multi Layer Insulator (MLI) と仮定し、それぞれの反射率については、TOPEX/Poseidon 衛星の太陽輻射圧モデルのデータを流用した [7]。平板 1 枚に関するパラメータは、それぞれ、各平板の面積、機体固定座標系における法線ベクトルの 3 成分、鏡面反射率、拡散反射率の 6 個であり、CHAMP では合計 $6 \times 13 = 78$ ものパラメータが必要となる。

大気抵抗を計算するために必要となる大気密度モデルとしては、concerto ver. 4 では現在 DTM (Drag Temperature Model) 94 のみが利用可能である [8]。太陽輻射圧については、地球による "食" および地球～太陽間の距離変動に伴うフラックスの変化を考慮している [9]。地球からの照り返しは、地球表面を 37 のセグメントに分割し、各セグメントからの光による力を計算する。それぞれの具体的な計

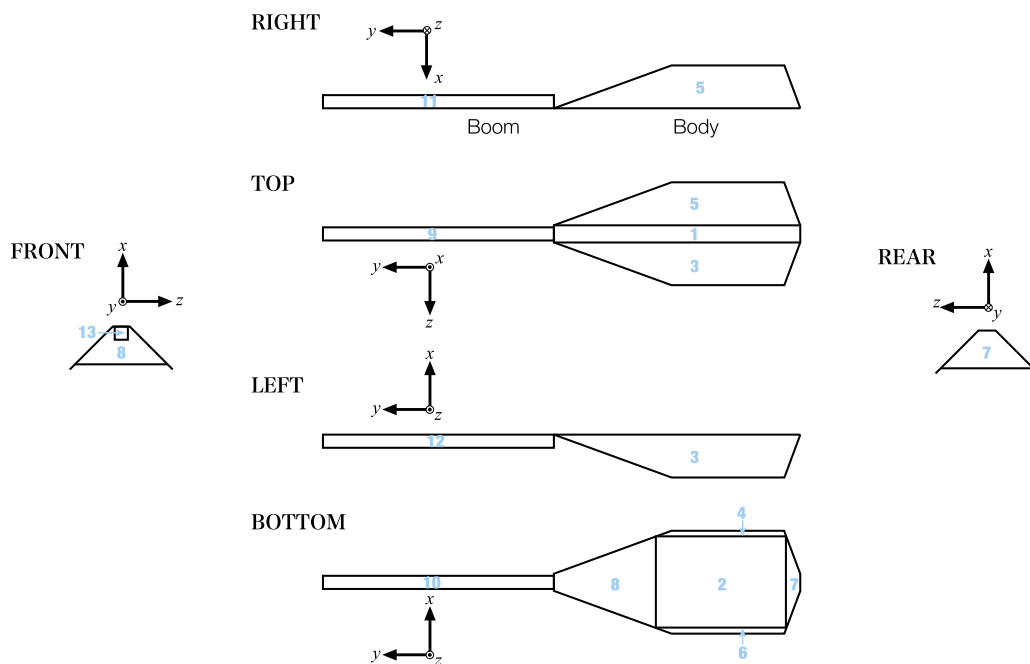


Fig. 2 CHAMP の Macro Model

算方法については、本集録中の別の原稿を参照されたい [10]。

衛星の表面に衝突する気体分子（原子）と表面の相互作用によって流速ベクトルと垂直な方向にも力が作用する。concerto ver. 4 では、ERS-1 の軌道解析で用いられている Lift Model を参考にして、

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{1}{2} C_L \rho \frac{v_r^2}{m} \sum_i A_i \cos \theta_i \sin \theta_i \mathbf{e}_L^i$$

で計算する。ここで \mathbf{e}_L^i は Lift 方向の単位ベクトルで、面 j の法線ベクトルと大気に対する衛星の相対速度ベクトルから決まる。

モデルから非重力摂動による加速度を計算するためには、各時刻における衛星の位置 \mathbf{r} 、速度 \mathbf{v} 、及び衛星の姿勢情報が必要となる。今回は JPL が決定した CHAMP の軌道から \mathbf{r} と \mathbf{v} を concerto ver. 4 に入力し、姿勢については Star Camera の実測値データを用いるのではなく、磁力計ブームの方向に飛行し、面 # 2 の法線方向が地心方向に一致するというノミナルな姿勢を維持しているものと仮定した。

4. 測定値と計算値の比較

2004 年 5 月 13 日の STAR による加速度の計測値（第 2 節で説明した補正を加えた後の値）を Fig. 3 に、Macro Model 及び Cannonball Model を用いて計算した非重力効果による加速度を Fig. 4 と Fig. 5 に示す。第 2 節で述べた様に、STAR による結果は補正を加えた後でも Radial 方向成分が最大で、しかも値は常に負なので地心方向に出るという結果になっている。これに対し、Fig. 4 の Macro Model による計算結果では alongtrack 方向成分が卓越する。大気抵抗が 10^{-6} m/s²、太陽輻射圧と地球からの照り返しが 10^{-8} m/s² のオーダーである。大気抵抗については、特に Front Panel (Fig. 2 の平板 #8) に作用する分の寄与が大きい。Macro Model の計算値と加速度計データの変動のパターンを alongtrack 成分について比較すると、ピークの位置はほぼ同一で軌道周期（約 90 分）と等しい周期での変動が見られるが、計算値の方が鋭いピークを示す傾向にある。また Macro Model と加速度計データの alongtrack 成分には極大値から極小値へ移行する途中に小さなピークがあるが、Cannonball Model の計算値には見られない。これは、Cannonball Model では衛星の断面積が一定であるのに対し、実際の CHAMP 及び Macro Model では 1 周回の間には衛星の側面にも「気流」が当たる期間があり、衛星の有効断面積が変化することを反映している。大気密度は CHAMP の 1 周回で $3.0 \times 10^{-11} \sim 6 \times 10^{-11}$ kg/m³ と 2 倍程度変動する。Macro Model 及び加速度計データで見られる alongtrack 成分の複雑な変動パターンは、この大気密度変化と有効断面積の変化、さらには大気に対する衛星の相対速度の変化が重なり合って生じたものと考えられる。Macro Model と Cannonball の radial 成分を比較すると、前者の方に 10^{-7} m/s² オーダーの加速度が + 方向（動径方向）に現れていることが分かる。これが今回考慮した "Lift" の分である。Drag と同様、Lift に関しても Front Panel の寄与が最大となる。

太陽輻射圧及び地球からの照り返しによる加速度の 3 時間分（約 2 周期に相当）の変化を Fig. 6 (Macro Model) 及び Fig. 7 (Cannonball Model) に示す。加速度の値が急減している時間帯が約 2 分続いているが、これは地球による「食」に対応している。このとき radial 成分（緑線）が 0 にならないのは、地球からの赤外放射の効果によるものである。Cannonball Model の場合、断面積が一定であるため太陽光が当たっている間の輻射圧による加速度はほぼ一定であるのに対し、Macro Model では 1 周回の間には太陽光が当たる部分の面積が変化するため輻射圧による加速度も複雑な変化を示す。2 つのモデルによる違いは特に crosstrack 成分に顕著に現れている。

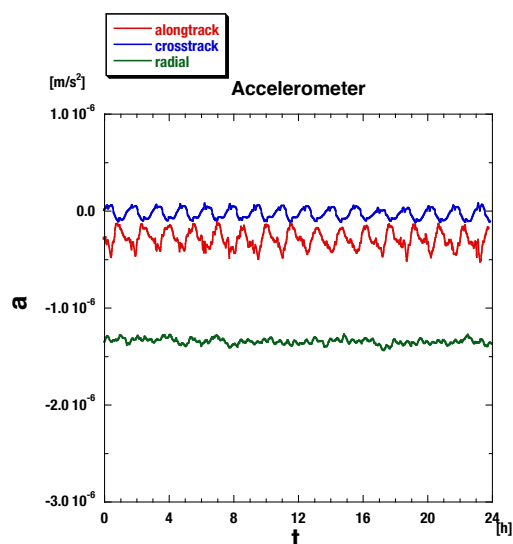


Fig. 3 搭載加速度計によって計測された CHAMP に作用する非重力摂動の実測値 (2004 年 5 月 13 日)

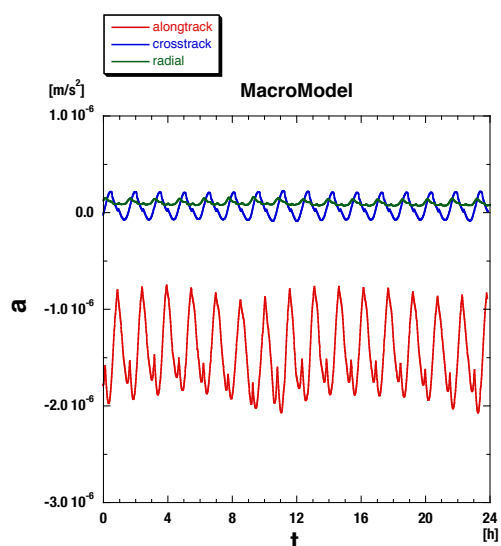


Fig. 4 Macro Model を使って計算した非重力摂動による加速度

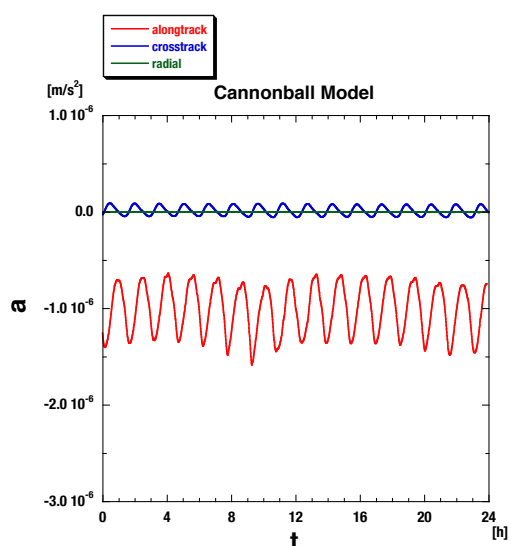


Fig. 5 Cannonball Model を使って計算した非重力摂動による加速度

5. まとめ

CHAMP の加速度計データと concerto ver. 4 を使って計算した非重力摂動による加速度を比較した結果、alongtrack 及び crosstrack 方向の変動のパターンはよく一致するものの、alongtrack 成分の値そのものには大きな差が見られることが分かった。モデル側の Scale Factor と Bias を調節して観測値に合わせられるかどうかについては、加速度計データのピークが計算値に比べて「鋭くない」理由と合わせて検討する必要がある。また、電極の不具合によって error を含んだ加速度計データの radial 方向成分を、軌道決定の際にどのように扱っているのかについても現在調査中である。今後は、STAR をはじめとする衛星搭載加速度計のデータを軌道決定に活用出来るようにすると共に、DTM94 以外の新しい大気密度モデル、例えば NRLMSISE-00 [11] の取り込みと検証を行いたいと考えている。

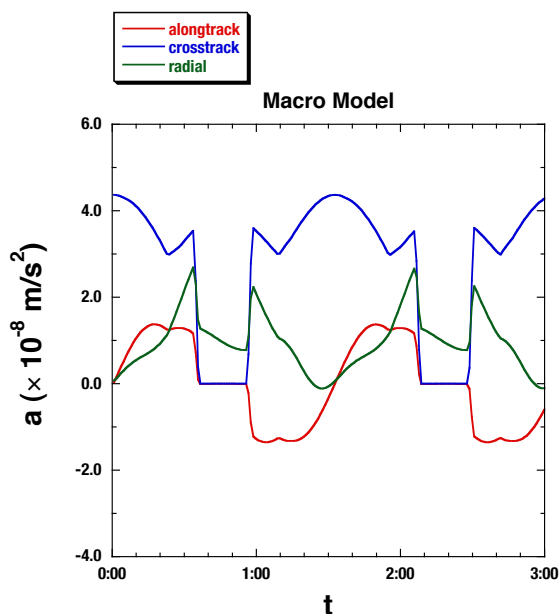


Fig. 6 Macro Model を用いて計算した太陽輻射
圧+地球からの照り返しによる加速度

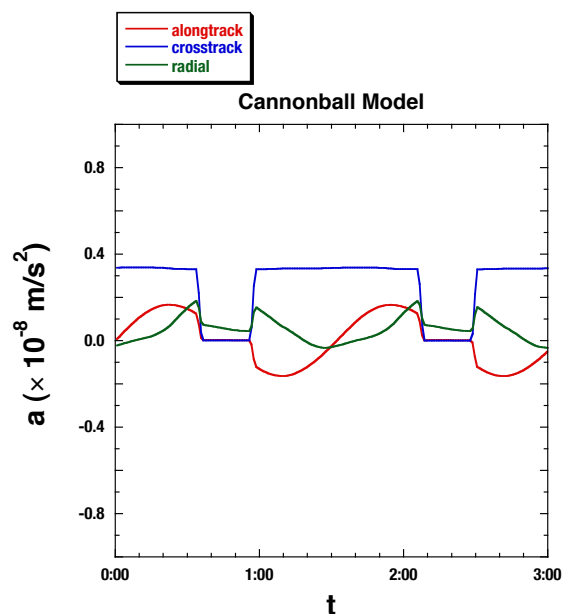


Fig. 7 Cannonball Model を用いて計算した太陽
輻射圧+地球からの照り返しによる加速度

Reference

- [1] 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, in press, 2005.
- [2] 久保岡俊宏, 大坪俊通, 後藤忠広, 軌道解析ソフトウェア concerto v4 の開発, 第4回宇宙科学シンポジウム集録, 2004.
- [3] Perosanz, F., R. Biancale, S. Loyer, J. M. Lemoine, A. Perret, P. Touboul, B. Foulon, G. Pradels, L. Grunwaldt, T. Fayard, N. Vales, and M. Sarrailh, On Board Evaluation of the STAR Accelerometer, in *First CHAMP Mission Results for Gravity, Magnetic and Atmospheric Studies*, edited by C. Reigber, H. Lühr, and P. Schwintzer, Springer, 2003.
- [4] Förste, Ch., Format Description: The CHAMP Data Format, *CH-GFZ-FD-001*, 2002.
- [5] Milani, A., A. M. Nobili, and P. Farinella, 1987, *Non-gravitational Perturbations and Satellite Geodesy*, Adam Hilger, Bristol.
- [6] Lühr, H., L. Grunwaldt, and Ch. Förste, CHAMP Reference Systems, Transformations and Standards, *CH-GFZ-RS-002*, 2002.
- [7] Antreasian, P. G., and G. W. Rosborough, Prediction of radiant energy forces on the TOPEX/POSEIDON spacecraft, *J. Spacecraft and Rockets*, **29** (1), 81-90, 1992.
- [8] Berger, C., R. Biancale, M. Ill, and F. Barlier, Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94-comparative review on various temporal variations and prospects in space geodesy applications, *J. Geodesy*, **72**, 161-178, 1998.
- [9] Otsubo, T., H. Kunimori, B. Engelkemier, and F. Takahashi, Error control of numerical integration in SLR analysis software CONCERTO, *J. Geod. Soc. Japan*, **40**, 4, 347-335, 1994.
- [10] 久保岡俊宏, やさしい軌道力学 - 人工衛星に作用する摂動 -, 本集録, 2005.
- [11] Picone, J. M., A. E. Hedin, D. P. Drob, and A. C. Aikin, NRL-MSISE-00 Empirical Model of the

Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues, *J. Geophys. Res.*, **107** (A12), 1468,
doi:10.1029/2002JA009430, 2002.