静止衛星の軌道解析に関する研究－Ⅳ． －潮汐力による観測局位置の補正モデル－

河 合 雅 司*

A Study on the Orbital Analysis of Geosynchronous Satellites－Ⅳ．

－A Model for the Horizontal Displacement of Tracking Station Location due to Tidal Generating Forces－

Masashi KAWAI

Abstract

It is reported that periodic fluctuations of about 1-meter amplitude and about 12-hour period appear in post-fit range residuals of geosynchronous satellites. In order to explain the cause of the periodic fluctuations, two hypotheses were established in this study. They are as follows.

- (1) It was assumed that the along-track force acts on the only satellites which are spinning.
- (2) The tracking stations move horizontally with the earth's crusts due to tidal generating forces, the period of the crust movements is about 12 hours and the amplitude is 1 to 2 meters.

The fluctuation of the mass distribution in the earth, such as solid earth tides and ocean tides, varies forces which act on the earth's crusts periodically, as a result, the crusts move horizontally. A model for the horizontal movement of the earth's crusts was developed, and it is confirmed that the periodic fluctuations in post-fit range residuals are removed by correcting the tracking station locations using the developed model in the orbital analysis of geosynchronous satellites. These results are reported in this paper.

1. 緒 言

静止衛星の軌道解析において、軌道決定後の観測距離と計算距離の残差（以下O-Cと呼ぶ）に振幅約 1 m、周期約12時間の周期的変動が存在することが報告⁽¹⁾⁽²⁾されている。本研究では、次に示す2つの仮定を行うことにより、静止衛星の軌道解析を行なった。

- (1) 回転（スピン）している衛星については、慣性座標系における衛星の進行方向に作用する加速度（未知の力）を仮定。
- (2) 潮汐力により地球全体の質量分布が変化し、その結果地殻に作用する力が周期的に変化し、地殻が水平方向に動いている（周期約12時間、振幅 1～2 m）と仮定。

(1)については、衛星力学モデルに未知の力による加速度を考慮してそれを推定し、又(2)については潮汐力による観測局位置水平変動モデルを開発して観測局位置の補正を行った。その結果、静止衛星の軌道解析において軌道決定後のO-Cに存在する周期変動を除去し、O-Cをほぼ雑音レベルまで小さくすることが出来ることを確認した。これらの結果について以下に報告する。

*正会員 富山商船高等専門学校（〒933-02 新湊市海老江練合1-2）

2. 軌道計算システムの概要

人工衛星軌道計算システムのアルゴリズムについては、他の文献に詳しく報告されている⁽³⁾ので、ここでは、本研究で使用された軌道解析システムTOCS (Toyama Orbit Computation System) の衛星力学モデル等について簡単に紹介する。

2.1 衛星力学モデル

衛星運動方程式はJ2000.0赤道面座標系(慣性座標系)において次の力を考慮して積分した。

(1) 地球万有引力による加速度

地心引力定数は $3.9860044 \times 10^{14} \text{ [m}^3/\text{s}^2]$ を用いた。

(2) 地球重力乱れポテンシャルによる加速度

重力モデルはGEM-10B⁽⁴⁾を使用した。ただし、次数は4次で打ち切った。又、重力ポテンシャル係数 C_2^1 、 S_2^1 は真の地球固定座標系における地球形状軸の位置を表す係数であり、本研究では真の地球固定座標系としてITRF (IERS Terrestrial Reference Frame) を用いているので正規化された C_2^1 、 S_2^1 の係数はIERS Standards⁽⁵⁾に基づいて、次の値を用いた。

$$C_2^1 = -0.17 \times 10^{-9} \quad S_2^1 = 1.19 \times 10^{-9} \quad (1)$$

(3) 月、太陽、惑星の引力による加速度

月、太陽、水星、金星、火星、木星、土星の引力を考慮した。

(DE200/LE200 JPL ephemerides⁽⁶⁾を用いた。)

(4) 太陽輻射圧による加速度

太陽パドルでの光の反射を考慮した。

(5) 地球潮汐による加速度

ラブモデル⁽⁷⁾を使用した。月、太陽にかんするLag Angleは 2.5° 、ラブ定数は0.25を用いた。

(6) 一般相対性理論による加速度

IERS Standardsに基づいて、一般相対性理論による衛星運動方程式における加速度の補正を行った。

(7) 未知の力による加速度

衛星がスピンすることにより慣性座標系(J2000.0赤道面座標系)における衛星の速度ベクトルの方向に加速度(CS-3a, CS-3bの場合は 10^{-9} m/s^2 程度の大きさの加速度)が作用すると考えられる⁽⁸⁾ので、それを未知の力による加速度(速度ベクトルの方向が正、その逆方向が負)として推定した。

2.2 大気補正

電波で衛星までの距離を測定する時、電波が大気中を進む時にその速度が変化したり、屈折したりするために、観測距離が実際の距離よりも長くなる。これを補正するのが大気補正である。本研究では、電離層及び対流圏における補正を行った。電離層における補正については土屋モデル⁽⁹⁾を用い、対流圏における補正についてはGSFC NONAME式⁽¹⁰⁾を用いた。又、測角データの大気屈折補正は行わなかった。

2.3 地球潮汐による観測局位置の変動

地球潮汐による観測局位置の変動については、IERS Standards (1992) に紹介されているWahrの理論によるモデル(2次の潮汐まで考慮)を用いて補正を行った。

2.4 潮汐力による観測局位置の水平変動

本研究では、月や太陽等の潮汐力によって地球の質量分布が周期的に変化する(地球潮汐、海洋潮汐)ことにより、地殻に加わる力が周期的に変化し、これによって地殻が主として水平方向に変動すると仮定している。この地殻の水平方向の変動について本研究では次の様に考えた。

(1) 日本周辺における地殻の水平変動方向(θ_D)は 135° と仮定。

(2) 水平変動の振幅($D(T_F)$)は月と太陽の潮汐力(T_F)に比例していると仮定。

(3) 日本周辺の水平変動の位相は東経 150° における潮汐力の位相に対して、潮汐力が大きい場合は約 70° 、潮汐力が小さい場合は約 45° 遅れている。

以上を考慮し、表1に示された衛星観測データの解析においてO-Cの12時間周期の変動がうまく除去出来る様にモデルを作った。そのモデルを以下に示す。

$$\Delta X = A \cdot \cos \theta_D, \quad \Delta Y = A \cdot \sin \theta_D \quad (2)$$

$$A = D(T_F) \cdot \cos[2 \cdot (L_O - L_D - \alpha_M)]$$

$$D(T_F) = C_1 \cdot T_F + C_2 = 0.20 \cdot T_F + 1.3$$

$$L_D = 45^\circ + 25^\circ + \cos^2(\theta_{MES})$$

$$T_F = T_{FM} + \cos(2 \cdot \theta_{MES}) \cdot T_{FS}$$

$$T_{FM} = GM_M [1/(D_M - A_E)^2 - 1/D_M^2] \times 10^6$$

$$T_{FS} = GM_S [1/(D_S - A_E)^2 - 1/D_S^2] \times 10^6$$

ΔX : 地殻変動量の東西方向成分 (東が+, 西が-) [単位: m]

ΔY : 地殻変動量の南北方向成分 (北が+, 南が-) [単位: m]

A : 地殻変動量 [単位: m]

θ_D : 地殻変動の方向 ($0^\circ \leq \theta_D < 180^\circ$: 地域により値は異なる。日本周辺では $\theta_D = 135^\circ$ と仮定)

L_O : 経度 L_O での潮汐力に対して位相遅れ角 L_D で地殻が水平方向に動いていると考える。日本周辺の場合 $L_O = 150^\circ E$ と仮定した。

L_D : 地殻変動の潮汐力に対する位相遅れ角度

θ_{MES} : 地球から月へのベクトルと地球から太陽へのベクトルがなす角

$D(T_F)$: 地殻変動の振幅 [単位: m] (係数 C_1 、 C_2 は地域により異なった値をとると考えられる。本研究では日本周辺での値として $C_1 = 0.20$ 、 $C_2 = 1.3$ を用いる。)

α_M : 月の地位の経度 (地球固定座標系における月位置の経度)

T_{FM} : 月による潮汐力に 10^6 を乗じた値 [単位: m/s²]

T_{FS} : 太陽による潮汐力に 10^6 を乗じた値 [単位: m/s²]

T_F : 月と太陽による潮汐力の大きさを表わすパラメタ [単位: m/s²]

G : 万有引力定数、 M_M : 月の質量、 M_S : 太陽の質量

A_E : 地球赤道半径、 D_M : 地球と月の距離、 D_S : 地球と太陽の距離

観測局の位置は地殻の周期変動により東西方向に ΔX 、南北方向に ΔY だけ偏位しているので、上記の地殻変動モデルを用いて補正する。

3. 解析結果

君津衛星管制センターで1993年6月～7月に観測された通信衛星3号a (CS-3a) の観測データ (測距データと測角データ) 及び宇宙開発事業団 (勝浦局、増田局、沖縄局) により1987年12月に観測された技術試験衛星ETS-Vの観測データ (測距データのみ) を用いて、軌道解析システムTOCSにより軌道解析を行った。解析に用いた衛星データ及び観測局のアンテナ位置を表1、表2に示す。観測データの精度については、CS-3aの場合測距データで約0.4m、測角データで約2/1000度、ETS-Vの測距データの場合は約1mである。本研究ではO-Cの1時間毎の標準偏差を測距データの観測精度 (軌道計算の誤差は無視出来る) とし、測角データについては通

信・放送機構の発表値を観測データの精度とした。CS-3aについては、測距データと測角データの重み付けを行う必要があり、前回の論文と同様に測距データの重みを4とし、測角データの重みを0.0004として重み付き最小自乗法により以下のパラメタを推定した。(測距データに対する測角データの重みを一桁重くした場合でも、推定されるパラメタ

表1 衛星観測データ (CS-3a, ETS-V)

θ_{MES} : 太陽と月が地球においてなす角

データ番号	データ観測期間(JST)	θ_{MES}
Ca1	1993年06月05日08時～06月07日07時	162.1°
Ca2	1993年06月19日08時～06月21日07時	2.0°
Ca3	1993年07月17日08時～07月19日07時	19.9°
ETSV	1987年12月13日07時～12月15日06時	85.3°

表2 観測局のアンテナ位置

TSCJ-C1	: 君津衛星管制センター通信衛星用アンテナ
TSCJ-ANG	: 君津衛星管制センター放送衛星用アンテナ
KTDS	: 勝浦追跡管制所アンテナ
MTDS	: 増田追跡管制所アンテナ
OTDS	: 沖縄追跡管制所アンテナ

アンテナ	座標系	緯度	経度	高さ
TSCJ-C1	GEM-10B	35° 11' 35.627"N	140° 04' 28.319"E	188.763m
TSCJ-ANG	GEM-10B	35° 11' 36.822"N	140° 04' 31.221"E	200.836m
KTDS	WGS-84	35° 12' 21.230"N	140° 17' 59.165"E	187.892m
MTDS	WGS-84	30° 33' 19.897"N	131° 01' 04.022"E	143.313m
OTDS	WGS-84	26° 29' 59.522"N	127° 54' 12.572"E	147.714m

の値はほとんど同じである) 同時に推定されたパラメタはCS-3aの場合

- (1) 衛星6軌道要素 (X, Y, Z, V_x, V_y, V_z)
 - (2) 太陽輻射圧における反射係数 (1個)
 - (3) 慣性座標系における衛星速度ベクトル方向の加速度
(速度ベクトルの方向が正、その逆方向が負)
 - (4) 測角データ (高度、方位角) の定誤差
- であり、ETS-Vの場合は、

- (1) 衛星6軌道要素 (X, Y, Z, V_x, V_y, V_z)
- (2) 太陽輻射圧における反射係数 (2個)
- (3) 測距データの定誤差 (1個)

である。

表1に示された2日アーク(48時間分のデータ)の各データについて、本研究で紹介された潮汐力による地殻変動モデルを用いて観測局位置の補正を行った場合と行わなかった場合について、軌道決定後のO-Cの1時間毎の平均値を図1～図8に示す。これらの図の縦軸はO-Cの1時間毎の平均値であるが、これは具体的には図1～図6については毎時17分～21分の約4分間に1秒毎に観測された201個の距離データによ

図1 観測距離-計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCal、RMS=0.7m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮しない場合)

図2 観測距離-計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCal、RMS=0.6m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮した場合)

図3 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCa2、RMS=0.6m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮しない場合)

図4 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCa2、RMS=0.5m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮した場合)

図5 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCa3、RMS=0.5m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮しない場合)

図6 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データCa3、RMS=0.4m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮した場合)

図7 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データETSV(勝浦局)、RMS=1.6m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮しない場合)

図8 観測距離－計算距離(O-C)の1時間毎の平均値
データETSV(勝浦局)、RMS=1.5m
(潮汐力による観測局位置の水平変動を考慮した場合)

るO-Cの平均値であり、図7と図8（データETS-V）については毎時40分～50分の約10分間に2秒毎に勝浦局で観測された約280個の距離データによるO-Cの平均値のことである。これらの図から潮汐力による観測局位置の補正を行うことにより、O-Cに存在する12時間周期の変動が除去されていることが分かる。地殻の水平変動モデルによる地殻水平変動量の振幅 (D) と東経150°における月の潮汐力に対する位相遅れ (L_D) はデータ期間のほぼ中央において、データCa1の場合 $D=1.63\text{m}$ 、 $L_D=67.6^\circ$ 、データCa2の場合 $D=1.62\text{m}$ 、 $L_D=70.0^\circ$ 、データCa3の場合 $D=1.61\text{m}$ 、 $L_D=67.1^\circ$ 、データETS-Vの場合 $D=1.40\text{m}$ 、 $L_D=45.2^\circ$ であった。

O-Cに存在する周期変動はETS-Vの場合顕著に現れ、通信衛星 (CS-3a, CS-3b) の場合は潮汐力が大き

い時にのみ現れる傾向があり、放送衛星 (BS-3a) についてはほとんど現れないこと⁽¹⁾⁽²⁾が分かっている。O-Cの周期変動がETS-Vの場合に顕著に現れて、放送衛星 (BS-3a) の場合にはほとんど現れない理由を衛星力学モデルで説明するためには、ETS-Vに作用してBS-3aには作用しない力を考えなければならないが両衛星はほぼ同じ形 (箱型の両側に太陽パドルを展開) をしており、この様な力を考えることは困難である。又、電波伝搬の補正モデルで説明する場合も同様で、観測局からみた衛星の高度 (仰角) はETS-Vが約48°、BS-3aが約38°でほぼ同じであり、ETS-Vにのみ作用してしかも振幅1 m、周期12時間で変動する様な伝搬補正を考えることは困難である。

4. 結 言

潮汐力による観測局位置の水平変動をモデル化し、日本周辺の地殻の周期変動の方向を北西 (315°) ~ 南東 (135°) 方向と仮定して静止衛星の観測データを解析した。その結果、CS-3aの場合 (大潮の場合) は、150° Eの経度線上の月の潮汐力に対して約70°の位相遅れで振幅約1.6 m、又、ETS-Vの場合 (小潮の場合) は、150° Eの経度線上の月の潮汐力に対して約45°の位相遅れで振幅約1.4 mの局位置水平変動を考慮することにより、軌道決定後のO-Cに存在する周期変動を除去することが出来た。

本研究では、大潮の場合と小潮の場合の周期変動の振幅がほとんど同じになっている。しかしこれは、通信衛星の軌道解析においては、大潮の場合にのみ軌道決定後のO-Cに12時間周期の変動が存在するという結果と矛盾している。そこで、大潮と小潮あるいは夏と冬で地殻の水平変動の方向が若干変化している可能性もあるので、この様な点も考慮して、大潮の場合と小潮の場合の地殻の水平変動の振幅の差がもう少し大きくなる様に地殻の水平変動モデルについて今後検討する必要がある。地殻変動モデルの改良及び慣性座標系における衛星速度ベクトルの方向に作用する未知の力 (衛星がスピンすることにより生じると思われる力) の原因の解明については今後の課題である。

謝 辞

本研究を行うにあたり貴重な観測データを提供して頂いた通信・放送機構に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 河合雅司：静止衛星ETS-Vの軌道解析に関する一考察，日本航海学会論文集，第89号，pp.253-260，1993.
- (2) 河合雅司：静止衛星の軌道解析に関する研究-I，日本航海学会論文集，第91号，pp.153-159，1994.
- (3) Minoru Sasaki：STUDY OF THE EARTH'S DYNAMICS BY MEANS OF SATELLITE LASER RANGING TECHNIQUES, Report of Hydrographic Researches, No.26, pp.99-187, 1990.
- (4) Francis J. Lerch, Barbara H. Putney, Carl A. Wagner and Steven M. Klosko：Goddard Earth Models for Oceanographic Applications (GEM10B and 10C), Marine Geodesy, Vol.5, No.2, pp. 145-187, 1981.
- (5) Dennis D. McCarthy：IERS STANDARDS 1992, International Earth Rotation Service, 1992.
- (6) E.M. Standish, Jr.：Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Epoch of J2000, Astronomy and Astrophysics, 114, pp.297-302, 1982.
- (7) 古在由秀：人工衛星による地球・海洋潮汐の検出，月刊海洋科学，地球と海洋潮汐，106号，pp.640-643，1978.
- (8) 河合雅司：静止衛星の軌道解析に関する研究-II，第27回天体力学研究会集録，pp.19-28，1995.
- (9) 宇宙開発事業団：レンジとレンジレートの補正，宇宙開発事業団データベース，ABS No.2612.C.
- (10) J.H. Berbert and H.C. Parker：GEOS Satellite Corrections for Refraction in the Troposphere, International Symposium on Electromagnetic Distance Measurement and Atmospheric Refraction, Boulder Colorado, 1969.

質 疑 応 答

和気博嗣（神戸商船大学）：地球潮汐は本来的に静力学的な二体問題として解けると思うが、そうした方法で算出した変動分と理論的に合致するものとなっているのか？

河合雅司：貴重な御質問を頂き誠にありがとうございます。本研究における潮汐力による地殻変動モデル（本論文2.4節参照）は必ずしも理論的に合理的なモデルにはなっていないので、今後より合理的なモデルに改良する必要があると考えています。日本周辺の地殻の水平変動の大きさですが、大潮の場合と小潮の場合でほとんど水平変動の大きさに差がないのは理論的にも問題がある様に思われます。本研究では技術試験衛星（ETS-V）の軌道決定後のO-Cの全てを、地殻の水平変動で説明しようとしています。3カ所の観測局の時計の同期誤差等による原因も考えられるので、この点については今後検討が必要です。又、地殻の水平変動の方向を常に一定（北西～南東方向）と仮定していますが、大潮と小潮、あるいは冬と夏で変動の方向が若干変化している可能性があるため、これらの点も考慮して大潮と小潮の場合の周期変動の振幅の差がもう少し大きくなる（例えば0.5m程度）ように地殻の水平変動モデルを改良する必要があるように思います。