静止衛星の軌道解析に関する研究—I.

—通信衛星と放送衛星の観測データの解析—

河 合 雅 司*

A Study on the Orbital Analysis
of Geosynchronous Satellites—I.

—Analysis of Tracking Data of CS-3a and BS-3a—

Masashi KAWAI

Abstract

Results are presented on orbital analysis of the communications satellite-3a (CS-3a) and the broadcasting satellite-3a (BS-3a), which are geosynchronous satellites. Range and angle data were obtained at Kimitu Satellite Control Center from June to July, 1993.

Post-fit RMS residuals of range data of 48-hour arcs were about 1 meter when the sun and the moon are located in the same direction or in the opposite direction, and about 2 meters when the angle between the moon and the sun at the earth were about 90 degrees. The analysis of CS-3a orbit shows that there are periodic fluctuations of 12-hour period were detected in post-fit residuals of the range data when the sun and the moon are located in the same direction or in the opposite direction.

1. 緒 言

ジェット推進研究所の F.F. Donovan 他が VLBI 技術による観測データを用いて、又筆者が沖縄、増田、勝浦の追跡管制所 (宇宙開発事業団) で観測された測距データを用いて、静止衛星の軌道解析を行い、観測距離と計算距離の残差 ($O-C$) に周期 12 時間程度の周期的変動が存在することを報告している⁽¹⁾⁽²⁾。この周期的変動の原因については現在のところよく分かっていない。そこで、この周期的変動について詳しく調べるために、君津衛星管制センター 1 局のみで観測された通信衛星 (CS-3a) と放送衛星 (BS-3a) の 2 日アークの測距データと測角データを用いて、これらの静止衛星の軌道解析を行った。その結果、地球、月、太陽の位置関係によって $O-C$ の RMS に相当違いがあることが分かった。更に通信衛星の軌道解析において、 $O-C$ の RMS が 1m 以下になった場合には、 $O-C$ に周期的変動が存在していることが確認出来た。これらの結果について以下に報告する。

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、文献 (3)、(4) に詳しく報告されているので、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) で用いた座標系、力学モデル等について簡単に紹介する。

2.1 座標系

人工衛星の軌道計算では、地球重心に原点を置いた、次のような座標系を用いた。

* 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)

(1) Mean of J2000.0 赤道面座標系

J2000.0 (力学時 2000 年 1 月 1.5 日、JD2451545.0) における平均赤道面、平均春分点の方向を基準とする慣性座標系 (平均春分点の方向が X 軸)。

(2) 真の地球固定座標系

極運動を考慮して地球に固定された座標系として、IRP (The IERS Reference Pole) の方向へ Z 軸、赤道面における IRM (The IERS Reference Meridian) の方向へ X 軸をとった座標系を用いた。IRP は慣用国際原点 (CIO) と $\pm 0''.03$ の精度で一致している。

(1) と (2) の座標の相互変換に必要な地球回転パラメタは、IERS (INTERNATIONAL EARTH ROTATION SERVICE) の BULLETIN B に発表された値を用いた。

2.2 衛星力学モデル

衛星運動方程式は J2000.0 赤道面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^⑤ 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^⑥ に基づいて、次の値を用いた。

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

(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

(DE200/LE200 JPL ephemerides^⑦) 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^⑧ を使用した。月、太陽に関する 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。

2.3 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、電離層の補正は土屋モデル^⑨ を用い、対流圏における補正については GSFC NOMAME^⑩ 式を用いた。又、測角データの大気屈折補正は行わなかった。

2.4 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。

3. 使用データ

通信衛星 3 号 a (Communications Satellite-3a : CS-3a) は、昭和 63 年 2 月に、東経 132° の静止軌道に打ち上げられ、日本電信電話株式会社、警察庁、消防庁等により遠隔通信のために利用されている。又放送衛星 3 号 a (Broadcasting Satellite-3a : BS-3a) は、平成 2 年 8 月に東経 110° の静止軌道に打ち上げられ、日本放送協会 (NHK) 等により衛星放送のために利用されている。これらの衛星のトラッキングは君津衛星管制センターで行われており、衛星外観を図 1、衛星定数等を表 1、GEM-10B 座標系における君津衛星管制センターのアンテナ位置を表 2 に示す。通信衛星、放送衛星は毎週土曜～日曜にかけて 48 時間のトラッキングが行われている。トラッキングは約 4 分間 1 秒毎に衛星までの距離と角度 (高度、

方位角)を観測する作業が1時間毎に2日間(48回)行われている。解析に用いたデータを表3に示す。これらのデータは、通信・放送機構より入手したものである。通信衛星(CS-3a)、放送衛星(BS-3a)共に毎週姿勢制御等のためにガスを噴射しているため、2日アークの解析のみ行った。又、衛星データが観測された時の太陽と月の位置及び、太陽と月が地球においてなす角を表4に示す。

図1 通信衛星(CS-3a)と放送衛星(BS-3a)の外観

表1 通信・放送衛星の主要諸元等

衛星名	CS-3a	BS-3a
形状	デスパンアンテナ 付き円筒形	展開型ソーラパドル 付き箱型
寸法	直径2.18m, 高さ3.56m	本体 1.6×1.3×3.2(m)
重量	589.7 kg	592.9 kg
衛星断面積	6.0 m ²	18.4 m ²
トランスポンダ 遅延量	391.450 m	261.719 m
レンジング 周波数	4 GHz	12 GHz
測距アンテナ	TSCJ-C1	TSCJ-K1
測角アンテナ	TSCJ-ANG	TSCJ-ANG

表2 君津衛星管制センターのアンテナ位置(座標系: GEM-10B)

TSCJ-C1	35° 11' 35.627" N	140° 04' 28.319" E	188.763m
TSCJ-K1	35° 11' 40.223" N	140° 04' 28.264" E	193.910m
TSCJ-ANG	35° 11' 36.822" N	140° 04' 31.221" E	200.836m

4. 解析結果

筆者が開発した軌道解析システム TOCS を用いて、軌道解析を行なった。通信・放送機構は測角データの観測精度を2/1000度としている。これは距離に換算して1km程度であり、測距データの観測精度は観測距離と計算距離の残差の1時間毎の標準偏差で判断して0.4m程度と考えられる。そして、測距データ数は測角データ数の半分なので、測距データの重みを2とし、測角データの重みを0.4m/1000mとするのが適当と思われる。しかし、測距データに定誤差はないが測角データには、5/100度程度 of 定誤差がある。更に、測角データについては大気中での電波の屈折を補正する必要があるが、本研究ではこの補正を行っていない等の理由により、本研究における実際の測角データの精度は更に悪くなっているため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各パラメ

表3 観測データ(1993年)

データ	衛星	観測期間(協定世界時)
C1	CS-3a	6月4日23時～6月6日22時
C2	CS-3a	6月11日23時～6月13日22時
C3	CS-3a	6月18日23時～6月20日22時
C4	CS-3a	6月25日23時～6月27日22時
C5	CS-3a	7月9日23時～7月11日22時
C6	CS-3a	7月16日23時～7月18日22時
B1	BS-3a	6月18日23時～6月20日22時
B2	BS-3a	6月25日23時～6月27日22時
B3	BS-3a	7月16日23時～7月18日22時

表4 太陽、月の赤経、赤緯(1993年 0時 UTC)

∠MES:地球から太陽へのベクトルと地球から月へのベクトルがなす角

月日	データ	太陽		月		∠MES
		赤経	赤緯	赤経	赤緯	
6月6日	C1	74.2°	22.6°	274.0°	-21.5°	161.6°
6月13日	C2	81.4°	23.2°	358.4°	4.8°	81.7°
6月20日	C3, B1	88.7°	23.4°	87.6°	22.0°	1.7°
6月27日	C4, B2	96.0°	23.3°	183.7°	-6.8°	90.7°
7月11日	C5	110.4°	22.1°	5.9°	7.6°	100.4°
7月18日	C6, B3	117.5°	21.0°	96.7°	21.1°	19.3°

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次のとおりである。

- (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(CS-3a:1個、BS-3a:2個)
- (3) 測角データ(高度、方位角)の定誤差

表3に示された2日アークの各データについて、人工衛星の軌道を決定し、軌道決定後の観測距離と計算距離の残差($O-C$)のRMSを求めた。その結果及び地球において太陽と月がなす角を表5、表6に示す。表5、表6から通信衛星、放送衛星共に $\angle MES$ が 0° 又は 180° に近いとき、すなわち月、太陽、地球がほぼ一直線上に存在する時は $O-C$ のRMSが小さく($RMS < 1$)、逆に $\angle MES$ が 90° に近い時は $O-C$ のRMSが大きくなっていることが分かる。

表5 観測距離と計算距離の残差のRMS (通信衛星 CS-3a)

データ	C1	C2	C3	C4	C5	C6
RMS	0.69m	1.36m	0.92m	2.42m	2.10m	0.71m
$\angle MES$	161.6°	81.7°	1.7°	90.7°	100.4°	19.3°

次に、データC4、C6、B2、B3について、推定されたパラメタ(衛星軌道要素等)を表7～表10に示す。これらの表において、本研究により決定された軌道と通信・放送機構により決定された軌道には、通信衛星で約10km、放送衛星で約2kmの違いがある。TOCSと通信・放送機構の軌道解析システム(NOCS)¹⁰⁾では、

- (1) 運動方程式の積分法(TOCS:8次のルンゲ・クッタ法、MOCS:予測子・修正子法)
- (2) 軌道解析に用いるデータ(TOCS:2日アークで約30000個の生データ、MOCS:生データを2日アークで144個に圧縮したノーマルポイントデータ)

等に違いがあるが、TOCSとNOCSで決定された衛星の位置が、衛星進行方向に大きく異なっている理由は現在のところよく分かっていない。又、放送衛星よりも通信衛星の決定位置が大きく異なっている理由については、次のように考えることが出来る。測距データと測角データを用いて衛星の軌道を推定しているが、測角データについては定誤差の推定を行っているために基本的には測距データにより軌道を推定している。主として測距データを用いて軌道を推定する場合は、幾何学的理由により軌道面における動径方向(放射方向)の衛星位置は正確に推定出来るが、衛星進行方向については、推定誤差が大きくなる。通信衛

表6 観測距離と計算距離の残差のRMS (放送衛星 BS-3a)

データ	B1	B2	B3
RMS	1.26m	2.40m	0.67m
$\angle MES$	1.7°	90.7°	19.3°

表7 データC4解析結果 (Mean of J2000.0 赤道面座標系)
()内は通信・放送機構による軌道決定値

元	期	1993-6-26	0 ^h	0 ^m	0.0 ^s (UTC)
位置	X	29195253.94 (29187453.69)m			
	Y	30421513.73 (30429036.52)m			
	Z	4941.26 (5010.08)m			
	V _X	-2218.207(-2218.754)m/s			
速度	V _Y	2129.102(2128.530)m/s			
	V _Z	0.351(0.338)m/s			
反射係数	C _{R 1}	1.280			
定誤差(方位, 高度)		-0.0490° , 0.0203°			
O-C の RMS		2.42 m			

表8 データC6解析結果 (Mean of J2000.0 赤道面座標系)
()内は通信・放送機構による軌道決定値

元 期		1993-7-17	0 ^h	0 ^m	0.0 ^s (UTC)
位置	X	16525721. 59 (16516178. 09)m			
	Y	38793646. 27 (38797724. 79)m			
	Z	13603. 96 (13661. 59)m			
	V _X	-2828. 605(-2828. 901)m/s			
速度	V _Y	1204. 939(1204. 243)m/s			
	V _Z	0. 915(0. 916)m/s			
反射係数	C _{R1}	1. 320			
定誤差(方位, 高度)		-0. 0473°, 0. 0202°			
O-C の RMS		0. 71 m			

星の場合静止経度は東経 132°で君津衛星管制センターの経度とほぼ一致しているが、放送衛星の静止経度は東経 110°であり、君津衛星管制センターの経度と約 30°ずれている。従って、放送衛星は通信衛星に比べて衛星進行方向の位置誤差が $O-C$ に与える影響が大きくなり、通信衛星よりも衛星進行方向の位置が決まり易いのである。

シミュレーションにより静止衛星の軌道推定精度について調べた結果、一つの観測局で得られた 48 時間分の測距データ(精度約 0.4m)と測角データ(精度約 2/1000 度)を用いて衛星 6 軌道要素、太陽輻射圧係数、測角データ(高度、方位角)の定誤差の合計 9 個のパラメタを推定する場合、静止衛星の位置を精度 10m のオーダーで推定することができ、軌道決定後の $O-C$ は雑音レベルまで小さくなり、48 時間アークにおける $O-C$ の RMS は、測距データの観測精度とほぼ一致する(RMS = 0.4m)ことが分かっている。従って、もし本研究で使用された衛星力学モデルが完全であれば、軌道決定後の $O-C$ の RMS は測距データの観測精度とほぼ一致するはずである。測距データの観測精度が月、太陽、地球の位置関係によって変化しているとは考えにくいので、本研究で使用された衛星力学モデルに問題がある可能性が極めて高いと考えられる。

データ C1~C6、B1~B3 に関する軌道決定後の $O-C$ の 1 時間毎の平均値等を図 2~図 6 に示す。これらの図から通信衛星については月、太陽、地球がほぼ一直線上に存在する時は $O-C$ に振幅約 0.8m、周期約 12 時間の周期的変動が存在していることが確認出来る。又、 $\angle MES$ が 90°に近い時は、地球、太陽、月がほぼ一直線上に存在する場合に比べて $O-C$ の RMS が大きくなっている。これは、 $\angle MES$ が 90°に近い時は、地球、太陽、月がほぼ一直線上に存在する場合に比べて衛星力学モデルに含まれる誤差が大

表 9 データB2解析結果 (Mean of J2000.0 赤道面座標系)
() 内は通信・放送機構による軌道決定値

元 期	1993-6-26	0 ^h 0 ^m 0.0 ^s (UTC)
位置	X	38459646.44 (38458740.29)m
	Y	17274607.18 (17276746.70)m
	Z	69141.01 (69275.75)m
速度	V _X	-1260.579(-1260.733)m/s
	V _Y	2804.679(2804.607)m/s
	V _Z	-1.193(-1.199)m/s
反射係数 C _{R1} 、C _{R2}	1.310 ,	0.019
定誤差(方位, 高度)	-0.0332° ,	0.0231°
O-C の RMS	2.40 m	

表 10 データB3解析結果 (Mean of J2000.0 赤道面座標系)
() 内は通信・放送機構による軌道決定値

元 期	1993-7-17	0 ^h 0 ^m 0.0 ^s (UTC)
位置	X	29867183.23 (29865936.35)m
	Y	29762241.50 (29763489.91)m
	Z	61066.76 (61069.59)m
速度	V _X	-2170.958(-2171.050)m/s
	V _Y	2177.313(2177.222)m/s
	V _Z	-3.238(-3.240)m/s
反射係数 C _{R1} 、C _{R2}	1.334 ,	-0.001
定誤差(方位, 高度)	-0.0315° ,	0.0235°
O-C の RMS	0.67 m

図 2 観測距離-計算距離($O-C$)の 1 時間毎の平均値と標準偏差

データ C6(RMS=0.7m)、I: 標準偏差、 $\angle MES=19.3^\circ$

図 3 観測距離-計算距離($O-C$)の 1 時間毎の平均値

・: C1(RMS=0.7m)、+: C3(RMS=0.9m)、Y: C6(RMS=0.7m)

(地球、月、太陽がほぼ一直線上に存在する場合)

図4 観測距離-計算距離($O-C$)の1時間毎の平均値

・: $C2$ (RMS=1.4m)、+: $C4$ (RMS=2.4m)、
 ∇ : $C5$ (RMS=2.1m) ($\angle \text{MES} \div 90^\circ$ の場合)

きくなり、衛星の軌道がうまく決まっていなかったためであると思われる。

$O-C$ の周期的変動の理由として、観測局の位置が月、太陽等の潮汐力により12時間周期で変動しているのではないかと考えることも出来るが、本研究ではWharの理論による観測局位置補正モデルにより地球潮汐による観測局位置の変動を補正しており、この補正モデルに0.8mもの誤差があるとは考えにくい。そこで、この周期的変動の原因についても人工衛星に作用する力が正確にモデル化されていないこともある可能性が非常に高いと考えられる。

放送衛星については、 $O-C$ の周期的変動は存在しなかった。この原因として、放送衛星の場合は太陽パドルにおける太陽光の反射等を考慮する必要があり通信衛星に比べて太陽輻射圧のモデル化が困難であること等が考えられる。

5. 結 言

(1) 君津衛星管制センターの衛星測距精度は、2日アークにおける軌道決定後の $O-C$ の1時間毎の標準偏差で判断して、通信衛星(TSCJ-C1 アンテナ)の場合約40cm、放送衛星(TSCJ-K1 アンテナ)の場合約20cmであると考えられる。

(2) 地球、月、太陽の位置関係によって軌道決定後の $O-C$ のRMSが小さくなったり大きくなったりする。又、 $O-C$ のRMSが小さい場合でも、まだ $O-C$ に振幅約0.8m、周期約12時間の変動が残っており、観測距離(O)と計算距離(C)を雑音レベルまで一致させることは出来ない。 $O-C$ のRMSが、地球、太陽、月の位置関係によって変動する理由及び $O-C$ を雑音レベルまで小さくすることが出来ない理由は現在のところよく分からないが、現在一般に用いられている衛星力学モデルが不完全であり、人工衛星に作用する力が正確にモデル化されていない可能性が非常に高いと考えられる。

地球、月、太陽の位置関係によって $O-C$ のRMSの値が大きく変わる理由及び $O-C$ に存在する周期的変動の原因解明については、今後の課題である。この研究を進めるためには、更に季節毎の静止衛星観測データが必要である。

図5 観測距離-計算距離($O-C$)の1時間毎の平均値

・: $B1$ (RMS=1.3m)、+: $B3$ (RMS=0.7m)
 (地球、月、太陽がほぼ一直線上に存在する場合)

図6 観測距離-計算距離($O-C$)の1時間毎の平均値と標準偏差

データ $B2$ (RMS=2.4m)、 I : 標準偏差、
 ($\angle \text{MES} \div 90^\circ$ の場合)

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重な助言をして頂いた国立天文台の木下宙教授、そして通信衛星と放送衛星の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) F.F. Donivan, Jr., J.S. Border and B. Moultrie : Geosynchronous Orbiter Tracking by VLBI : Demonstration Results, AIAA/AAS Astrodynamics Conference, August 20-22, 1984.
- (2) 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.
- (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) 国立天文台 : 海洋観測衛星の軌道計算について, 平成 2 年度宇宙開発事業団委託研究研究成果報告書, pp.40-64, 1991.
- (5) 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, 145-187, 1981.
- (6) Dennis D. McCarthy : IERS STANDARDS 1992, International Earth Rotation Service, 1992.
- (7) E.M. Standish, Jr. : Orientation of the JPL Ephemerides, DE200/LE200, to the Dynamical Equinox of J2000, Astronomy and Astrophysics, 114, 297-302, 1982.
- (8) 宇宙開発事業団追跡管制部 : 人工衛星の軌道, 1979.
- (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.
- (11) 竹内端夫 : 人工衛星追跡解析資料, 宇宙開発事業団, 1981.

質 疑 応 答

長岡 栄(電子航法研究所) :

- (1) この研究の目的は衛星の力学モデルがあまり正確でないのではないかという予想があって、これを検証することなのではないでしょうか？
- (2) 君津の測距データを用いて残差を調べておられますが、残差の変動特性がモデルよりは測距データに依存しているという可能性はありませんか？

河合雅司 :

- (1) 軌道決定後の観測距離と計算距離の残差 ($O-C$) が雑音レベルまで小さくならない原因を解明することが本研究の目的です。本研究の結果として、この原因は衛星力学モデルが不完全なことにあるのではないかと考えています。
- (2) 残差 ($O-C$) の RMS は地球、太陽、月の位置関係によって変動しており、測距データの観測精度が、地球、太陽、月の位置関係によって変動しているとは、常識的に考えにくいと思います。