静止衛星の軌道解析に関する研究－V. －観測距離と計算距離の残差と気象要素の関係－

河 合 雅 司*

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

－The Relation between Post-fit Range Residuals and Meteorological Elements－

Masashi KAWAI

Abstract

It was tried to investigate the relations between meteorological elements and post-fit range residuals for discussing the causes of the 12-hour and 24-hour period fluctuations in post-fit range residuals in orbital analysis of geosynchronous satellites. The results of the investigation are as follows.

- (1) There is a correlation between 24-hour period fluctuations of residuals and relative humidity variation.
- (2) A 12-hour period fluctuation of residuals appears clearly, when the relative humidity scarcely changes.
- (3) There is a correlation between the 12-hour period fluctuations of residuals and tidal generating forces.

It was shown that the 12-hour period fluctuations of residuals could be explained only under the assumption that the tracking station moves horizontally with earth crust. It is considered that there are horizontal flows of asthenosphere which are induced by tidal generating forces, and the earth crusts moves horizontally with the flows in the mantle such as ocean currents and tidal currents.

It is estimated that the observed range to CS-3b increases by about one meter with 20 percents increase of the relative humidity.

1. 緒 言

電波で観測された静止衛星のデータを用いて軌道解析を行うと軌道決定後の観測距離と計算距離の残差($O-C$)に12時間周期又は24時間周期の変動が生じる。12時間周期の変動については、潮汐力と強い相関があることから、潮汐力によって衛星観測局が主として水平方向に変動していると考えることにより説明可能である。⁽¹⁾しかし、 $O-C$ の24時間周期の変動については潮汐力とは無関係であり、その原因についてはよく分かっていない。そこで、 $O-C$ の周期変動の原因について調べるために、 $O-C$ の周期変動と衛星観測局周辺の気象要素(気圧、相対湿度、気温、蒸気圧)との関係について調べた。その結果、 $O-C$ に12時間周期の変動がきれいな形で表れる場合は相対湿度がほとんど変化していないこと、及び $O-C$ の24時間周期の変動と相対湿度の変動との間に相関があることが明らかになった。尚、筆者の論文“静止衛星の軌道解析に

*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)

関する研究－Ⅳ.⁽²⁾における潮汐力による地殻水平変動モデルの式に誤りがあることが分かったので、本論文では訂正させて頂いた。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、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。

[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
- (2) 地球重力乱れポテンシャルによる加速度
(重力モデル: GEM-10B⁽⁴⁾ 4 次で打ち切り)
- (3) 月, 太陽, 惑星の引力による加速度
(天体歴: DE200/LE200 JPL ephemerides⁽⁵⁾)
- (4) 太陽輻射圧による加速度
- (5) 地球潮汐による加速度
(ラブモデル⁽⁶⁾, Lag Angle は 2.5° , ラブ定数は 0.25)
- (6) 一般相対性理論による加速度⁽⁷⁾
- (7) 未知の力による加速度⁽⁸⁾
(衛星速度ベクトルの方向に加速度を仮定)

[2] 電波伝搬補正モデル

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、測角データについては角度の変化量が小さい (方位変化は 0.05° 未満、高度変化は 0.1° 未満) ので補正量は一定と考えて定誤差として処理し、大気屈折補正は行わなかった。本研究で用いた対流圏補正モデル (GSFC NONAME 式) を次に示す。

$$\Delta R = \frac{8432.336 \cdot N_s}{0.026 + \sin(E)} \text{ m} \quad \text{ただし, } \Delta R_{MAX} = 101.5 \text{ m} \quad (1)$$

$$N_s = N_D + N_W$$

ΔR : 距離の補正量, E : 衛星仰角

$N_s + 1$: 地表でのマイクロ波に対する空気の屈折率 (月毎の定数)

N_D : N_s の乾燥分, N_W : N_s の湿潤分

(1) 式における N_s は、月ごとに定められた定数であり、 N_D 及び N_W の値を表 1 に示す。衛星までの距離を観測した月が同じであれば、対流圏電波伝搬補正量 ΔR は衛星仰角 E にのみ依存する。静止衛星の場合、衛星仰角はほぼ一定であるので、対流圏電波伝搬補正量は一定値になる。

表 1 日本付近の月別 N_s (N_D : N_s の乾燥分, N_W : N_s の湿潤分)

1月	$N_D=0.2851 \times 10^{-3}$, $N_W=0.02427 \times 10^{-3}$	7月	$N_D=0.2644 \times 10^{-3}$, $N_W=0.10950 \times 10^{-3}$
2月	$N_D=0.2845 \times 10^{-3}$, $N_W=0.02669 \times 10^{-3}$	8月	$N_D=0.2636 \times 10^{-3}$, $N_W=0.11310 \times 10^{-3}$
3月	$N_D=0.2817 \times 10^{-3}$, $N_W=0.03040 \times 10^{-3}$	9月	$N_D=0.2672 \times 10^{-3}$, $N_W=0.09391 \times 10^{-3}$
4月	$N_D=0.2765 \times 10^{-3}$, $N_W=0.04572 \times 10^{-3}$	10月	$N_D=0.2735 \times 10^{-3}$, $N_W=0.06696 \times 10^{-3}$
5月	$N_D=0.2721 \times 10^{-3}$, $N_W=0.06421 \times 10^{-3}$	11月	$N_D=0.2784 \times 10^{-3}$, $N_W=0.04768 \times 10^{-3}$
6月	$N_D=0.2680 \times 10^{-3}$, $N_W=0.08468 \times 10^{-3}$	12月	$N_D=0.2829 \times 10^{-3}$, $N_W=0.03106 \times 10^{-3}$

[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。

[4]潮汐力による地殻の水平変動

月や太陽等の潮汐力により地殻が水平方向に変動していると考えられる。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 315° 。
- (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。
- (3) 水平変動の周期は約12時間であり、その変動の位相は観測局における潮汐力の位相に対して、約2～4時間(角度で約 $30^\circ \sim 60^\circ$)遅れている。
- (4) 地殻の周期変動の振幅は大潮の場合(潮汐力が大きい場合)で2 m程度、小潮の場合(潮汐力が小さい場合)で1 m程度である。

(VLBI等の観測では潮汐力による地殻水平変動は数cm程度であり、本研究における変動量は、現在考えられている値とは大きく異なっている。)

以上を考慮し、表2に示された衛星観測データの解析においてO-Cにおける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。(静止衛星の軌道解析に関する研究－IV.で示したモデルには誤りがあったのでここではそれを訂正した。)そのモデルを以下に示す。

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

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

$$D(T_F) = C \cdot T_F = 1.60 \cdot T_F$$

$$L_D = 18^\circ \cdot T_F + 25^\circ$$

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

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

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

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(θ_D : 北を 0° として時計回りに 360° まで測る。地域により値は異なり、日本周辺では $\theta_D = 315^\circ$ と仮定)

L_O : 観測局の経度

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 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 $C = 1.60$ 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/s^2]

T_{FS} : 太陽による潮汐力に 10^6 を乗じた値[単位: m/s^2]

T_F : 月と太陽による潮汐力の大きさを表わすパラメータ[単位: m/s^2]

G : 万有引力定数, M_M : 月の質量, M_S : 太陽の質量

表2 通信衛星(CS-3b)観測データ

θ : 太陽と月が地球においてなす角

データ	データ観測期間 (JST)	θ
Cb1	1993年06月05日08時～1993年06月07日07時	162°
Cb2	1993年06月12日08時～1993年06月14日07時	82°
Cb3	1993年06月19日08時～1993年06月21日07時	2°
Cb4	1993年06月26日08時～1993年06月28日07時	90°
Cb5	1993年07月03日08時～1993年07月05日07時	177°
Cb6	1993年07月10日08時～1993年07月12日07時	101°
Cb7	1993年07月17日08時～1993年07月19日07時	20°
Cb8	1994年06月04日08時～1994年06月06日07時	48°
Cb9	1994年06月11日08時～1994年06月13日07時	30°
Cb10	1994年06月18日08時～1994年06月20日07時	118°

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。

表3 君津衛星管制センターのアンテナ位置

TSCJ-C2: CS-3b測距用アンテナ

TSCJ-ANG: 測角用アンテナ

アンテナ	座標	緯度	経度	高さ
TSCJ-C2	GEM-10B	35° 11' 35.795"N	140° 04' 29.486"E	189.742m
TSCJ-ANG	GEM-10B	35° 11' 36.822"N	140° 04' 31.221"E	200.836m

3. 解析データ

君津衛星管制センターで、1993年6月～7月及び1994年6月に観測された通信衛星(CS-3b)のデータを用いて軌道解析を行った。観測は、4GHzの電波を用いて毎週土曜～日曜にかけて48時間行われる。具体的には、約4分間1秒毎に衛星までの距離と角度を観測し、その観測が1時間毎に48回繰り返される。それらのデータを表2に示す。表2において θ は、観測期間のほぼ中央で太陽と月が地球においてなす角であり、潮汐力の大きさを表す指標である。 θ が 0° 又は 180° に近い時は潮汐力が大きく、 θ が 90° に近い時は潮汐力が小さい。距離データの精度については、軌道決定後の $O-C$ の1時間毎の標準偏差で判断して、約0.4mである。角度データの精度は約 0.002° (距離換算で約1,000m) である。各衛星の観測に使用された観測局アンテナ位置を表3に示し、各観測局に月が正中する時刻(日本標準時)を表4に示す。

表4 観測局(君津衛星管制センター)に月が正中した時刻

データ	月の観測局正中時刻 (JST)
Cb1	1993年 6月 6日 1時, 1993年 6月 7日 2時
Cb2	1993年 6月13日 6時, 1993年 6月14日 7時
Cb3	1993年 6月19日11時, 1993年 6月20日12時
Cb4	1993年 6月26日17時, 1993年 6月27日18時
Cb5	1993年 7月 3日23時, 1993年 7月 5日 0時
Cb6	1993年 7月11日 5時, 1993年 7月12日 5時
Cb7	1993年 7月17日10時, 1993年 7月18日11時
Cb8	1994年 6月 4日 8時, 1994年 6月 5日 8時
Cb9	1994年 6月11日13時, 1994年 6月12日14時
Cb10	1994年 6月18日19時, 1994年 6月19日20時

又、本研究で用いた対流圏補正モデルでは、静止衛星の場合電波伝搬遅延量がほぼ一定となっている。しかし、実際には気象条件によって、対流圏における伝搬遅延量が相当変化している可能性が強いと思われるので、これを確かめるために君津衛星管制センター付近の気象データ(1993年6月～7月と1994年6月に館山、勝浦、銚子、横浜の各観測所で1時間毎に観測された気象庁地上気象観測データ)を使用した。

4. 解析結果

表2に示された48時間アークのデータを用いて静止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($O-C$)を求めた。

距離データの重みを1、角度データを距離に換算した量の重みを0.0001として重み付き最小自乗法によりパラメータを推定した。同時に推定されたパラメータは次の通りである。

- (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
- (3) 慣性座標系における衛星速度ベクトル方向の加速度

この加速度の符号は、速度ベクトルの方向が正、その逆方向が負。

- (4) 定誤差

角度データ(高度、方位角)の定誤差。

観測距離とは観測局から衛星に搭載されたトランスポンダーまでを電波が往復するのに要した時間に光

図1 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値

地殻水平変動は考慮していない

縦線：月が観測局に正中した時刻

・：データCb 3, $\theta = 2^\circ$, RMS=0.9m

×：データCb 6, $\theta = 101^\circ$, RMS=0.5m

図2 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と相対湿度

地殻水平変動は考慮していない

縦線：月が観測局に正中した時刻

＋：データCb 7, $\theta = 20^\circ$, RMS=0.8m

・：君津衛星管制センター周辺の平均相対湿度

図3 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と相対湿度

地殻水平変動は考慮していない

縦線：月が観測局に正中した時刻

＋：データCb 3, $\theta = 2^\circ$, RMS=0.9m

・：君津衛星管制センター周辺の平均相対湿度

図4 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と相対湿度

地殻水平変動は考慮していない

縦線：月が観測局に正中した時刻

＋：データCb10, $\theta = 118^\circ$, RMS=0.8m

・：君津衛星管制センター周辺の平均相対湿度

速度を乗じた値の1/2であり、計算距離とは軌道解析理論に基づいて計算された衛星の重心と観測局の距離である。トランスポンダーの位置と衛星重心とはずれているので観測距離に対してその補正を行う必要があるが、本研究ではこれを無視している。表2に示された衛星観測データの解析結果を図1～図8に示す。これらの図の横軸は日本標準時、縦軸は軌道決定後の $O-C$ の1時間毎の平均であり、図1～図6におけるRMSは、 $O-C$ の2乗平均の平方根である。

図1は、軌道決定後の $O-C$ に12時間周期の変動がきれいな形で表れた場合の一例である。これは、データCb 3とCb 6の解析結果であり、Cb 3は潮汐力が大(大潮)の時のデータであり、Cb 6は潮汐力が小(小潮)の時のデータである。この図から月が観測局に正中してから2～4時間後に $O-C$ が最大になっており、12時間周期の変動の振幅については、潮汐力が大きい時は大きく、潮汐力が小さい時は小さくなっており、潮汐力が大きい時の振幅は潮汐力が小さい時の振幅の約2倍になっていることが分かる。更に、潮汐力による地殻水平変動モデルを用いて地殻水平変動の振幅を調べた所、潮汐力が大きい場合は2 m程度、潮汐力が小さい場合(データCb 6の場合)は、約1 mであった。図2～図4は、 $O-C$ と相対湿度の時間変化を示したものである。気象データ(相対湿度)については、君津衛星管制センターの周辺にある館山、勝浦、銚子、横浜の各観測所で1時間毎に観測された気象庁地上気象観測データ(相対湿度)を時間毎に平均したものである。図2と図3は、12時間周期の変動がきれいな形で表れた場合(データCb 7, Cb 3)の $O-C$ であり、相対湿度はほとんど変化していない。又図4はデータCb10に関するものであり最初の18時間は相対湿度が約30%変化しており、 $O-C$ の周期の変動の形が崩れているが、18時間以後は相対湿度が安定しているため $O-C$ に12

図5 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と海面気圧
地殻水平変動は考慮していない
縦線：月が観測局に正中した時刻
+：データCb7, $\theta=20^\circ$, $RMS=0.8m$
・：君津衛星管制センター周辺の平均海面気圧

図6 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と気温
地殻水平変動は考慮していない
縦線：月が観測局に正中した時刻
+：データCb3, $\theta=2^\circ$, $RMS=0.9m$
・：君津衛星管制センター周辺の平均気温

図7 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と相対湿度
地殻水平変動モデルで観測局位置の周期変動を除去
縦線：月が観測局に正中した時刻
+：データCb1, Cb2, Cb4, Cb5, Cb8
・：君津衛星管制センター周辺の平均相対湿度

図8 観測距離－計算距離 ($O-C$) の1時間毎の平均値と気温
地殻水平変動モデルで観測局位置の周期変動を除去
縦線：月が観測局に正中した時刻
+：データCb1, Cb2, Cb4, Cb5, Cb8
・：君津衛星管制センター周辺の平均気温

時間周期の変動がきれいな形で表れていることが確認出来る。データCb3, Cb6, Cb7については、相対湿度の変化が少ないために、 $O-C$ に12時間周期の変動がきれいな形で表れている。 $(O-C$ の1時間毎の平均値と平均相対湿度の相関係数は、図2の場合 -0.19 、図3の場合 -0.06 、図4の場合 0.19 であった。)

図5及び図6は、 $O-C$ の12時間周期の変動と気圧及び気温(相対湿度の場合と同様に4カ所の気象庁観測所で観測された海面気圧及び気温の時間毎の平均)の時間変化を示したものである。これらの図から $O-C$ の12時間周期の変動と気圧及び気温の変動との間に相関はなく両者が無関係であることが確認出来る。(図5において $O-C$ の1時間毎の平均値と平均海面気圧の相関係数は -0.01 、図6において $O-C$ の1時間毎の平均値と平均気温の相関係数は -0.06 であった。)

図7及び図8は、潮汐力による地殻水平変動モデルを用いて $O-C$ に存在する12時間周期の変動を除去した後、24時間周期の変動が存在する場合(データCb1, Cb2, Cb4, Cb5, Cb8)について $O-C$ と相対湿度及び気温の時間変化を示したものである。これらの図における相対湿度及び気温は、各観測所で観測された値を時間毎に平均し、更に各データ期間における値を時間毎に平均したものである。(図7と図8において $O-C$ の1時間毎の平均値と平均相対湿度又は平均気温との相関係数は、図7の場合が 0.81 、図8の場合が -0.79 であった。)図7から、潮汐力による地殻水平変動が $O-C$ に与える影響を除去した後の $O-C$ と相対湿度の間には相関があり、両者とも日本標準時の2～3時頃最大となり、14～15時頃最小となっており、

通信衛星CS-3b(衛星仰角約 49°)の場合、相対湿度が約20%増加すると衛星までの観測距離が電波伝搬遅延量の増加により約1 m長くなっていることが分かる。次に図8から、 $O-C$ の変動と気温の変動との間には相関があり、気温が 5° 増加すると電波伝搬遅延量が1 m減少していると考えられることも出来るが、本研究で使用している対流圏補正モデルでは、気温の低い冬よりも気温の高い夏の方が電波伝搬遅延量が大きくなっており、気温が増加すると電波伝搬遅延量が減少すると考えると矛盾が生じる。又、図6から、気温が 5° 程度変化しても $O-C$ にほとんど影響を与えていないことが分かっており、図7及び図8における $O-C$ の24時間周期の変動の原因は、相対湿度の変化による電波伝搬遅延量の変化であると考えるのが合理的である。図8において $O-C$ と気温が逆相関関係にある様に見えるのは、気温と相対湿度が逆相関関係にあるためである。

本研究では、トランスポンダーの位置と衛星重心がずれていることに対する補正を行っていないので、衛星が重心を中心に揺れている場合は、その揺れが $O-C$ の変動となって表れることになる。しかし、衛星が潮汐力の大きさや位相に合わせて揺れたり、又は相対湿度の変化に合わせて揺れることは物理的に考えられない。又、 $O-C$ の12時間周期の変動は湿度、気圧、気温等の気象要素とは無関係であること、及び南東方向にある静止衛星(ETS-V)の場合は周期変動が大きく⁽¹¹⁾、南西方向にある静止衛星(BS-3a)の場合は12時間周期の変動が存在しない⁽¹²⁾ことから、この周期変動は衛星観測局が水平方向(北西～南東)に周期的に動くことによって生じていると考えるのが合理的である。

5. 結 言

本研究における解析結果をまとめると次の様になる。

- (1) $O-C$ の12時間周期の変動の位相は、全ての場合において潮汐力に対して2時間～4時間遅れている。
- (2) $O-C$ の12時間周期の変動は、相対湿度がほとんど変化しない場合にきれいな形で表れる。
- (3) $O-C$ の12時間周期の変動と気圧、相対湿度、気温等の気象要素の変動との間に相関は無い。
- (4) $O-C$ の24時間周期の変動と相対湿度の変動との間には相関がある。
- (5) 衛星仰角が約 49° の静止衛星の場合、相対湿度が約20%増加すると衛星までの観測距離が約1 m長くなる。(対流圏における電波伝搬遅延量が1 m増加する。)

本研究における観測局位置の水平変動量は、従来のVLBI等の観測による変動量とは大きく異なっている。しかし、以前の研究から南東方向にある静止衛星(ETS-V)の場合は周期変動の振幅が大きく、南西方向にある静止衛星(BS-3a)の場合は12時間周期の変動がほとんど存在しない⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ことが分かっており、このような結果を矛盾なく説明するためには、衛星観測局の位置が、北西～南東方向に潮汐力に対して2～4時間の位相遅れで周期的に変動しており、その変動の振幅は、潮汐力が小さい時は1 m程度、潮汐力が大きい時は2 m程度であると考え必要がある。そして、 $O-C$ と気象要素との相関を調べることで、この様に考えることによってのみ静止衛星軌道における理論値と観測値を雑音レベルまで一致させることが可能であることが確認された。

観測局の位置が水平方向に周期的に変動する原因については、海洋に存在する潮流や海流の様な水平方向の流れがマントル内部にも存在(アセノスフェアの流動)し、この様な流れとともにその上に浮いているリソスフェアすなわち地殻が水平方向に動き、その結果観測局の位置が変動すると考えることが出来る。又、自転している地球に月や太陽の潮汐力が作用することにより生じるマントル内部の流動(アセノスフェアの流動)を考えることにより、極運動や大陸移動等の地殻の水平変動についても説明することが可能である。更に、このような地球内部の流動(外核やアセノスフェアの流動)は地球磁場の発生にも深く係わっている様に思われる。

$O-C$ の24時間周期の変動については、本研究で用いられた対流圏補正モデル(GSFC NONAME式)は標準的な大気を仮定して電波の伝搬補正を行っており、大気に含まれる水蒸気量が標準的な状態からずれることにより補正誤差が生じ、それが $O-C$ の24時間周期の変動として表れていると考えることが出来る。

衛星力学モデルで仮定した未知の力の原因について調べることで、及び対流圏電波伝搬補正モデルの改良については今後の課題である。

最後に通信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。更に、

研究全般に渡って貴重な助言をして頂いた元国立天文台長の古在由秀氏、国立天文台の木下宙氏、磯部瑋三氏、及び軌道解析プログラムの作成において色々指導して頂いた海上保安庁水路部の仙石新氏、国立天文台の福島登志夫氏、宇宙科学研究所の吉川真氏、又計算機の使用等において指導して頂いた国立天文台の平山智啓氏、富山商船高等専門学校の門村英城氏に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 河合雅司：潮汐力による地殻の水平変動について，第30回天体力学研究会集録，pp.121-130，1998.
- (2) 河合雅司：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－，日本航海学会論文集，第97号，pp.31-37，1997.
- (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) 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.
- (6) 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.
- (7) Dennis D.McCarthy: IERS STANDARDS 1992, International Earth Rotation Service, 1992.
- (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.
- (11) 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.
- (12) 河合雅司：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－，日本航海学会論文集，第91号，pp.153-159，1994.

質 疑 応 答

山田多津人(海上保安大学校)：起潮力によるO-Cの変動成分は観測地の水平方向への移動によるもの説明であったと思いますが、測距誤差の性質上衛星方向への変動のように思えますが、その点について御説明下さい。

河合雅司：観測局の位置が水平方向に変動する結果、観測局と静止衛星までの距離が変動し、それがO-Cの12時間周期変動として表れているということです。

山田多津人：同一観測地でも静止衛星の見える方向が違えば、変動量が違うという理解で宜しいのでしょうか？

河合雅司：その通りです。

樊 春明(東京商船大学)：対流圏による影響が1mということですが、この値の電磁波周波数への依存性はあるのでしょうか？

河合雅司：対流圏における電波伝搬遅延量は電波の周波数には依存しません。

安田明生(東京商船大学)：大気の蒸気圧の観測は気象予報に用いられると思うが、その場合には実時間性が要求される。この方法による湿度の実時間観測は可能でしょうか？

河合雅司：現在は48時間分の衛星観測データを用いて軌道決定を行いO-Cを求めているので実時間性はありませんが、衛星軌道を予測してO-Cを求めることにより湿度の実時間観測を行うことも不可能ではありません。ただしこの場合は、衛星軌道の予測誤差や衛星の重心回りの揺れ(衛星が揺れている場合は、その影響がO-Cに表れる。)等の問題点を解決する必要があります。