

TOPEX/Poseidon の軌道決定に対する下里水路観測所の観測データの効果

久保岡 俊宏*

Effect of SLR Data Obtained at Simosato Hydrographic Observatory on the Orbit Determination of TOPEX/Poseidon

Toshihiro KUBO-OKA*

Abstract

The effect of SLR data of Simosato Hydrographic Observatory on the orbit determination of TOPEX/Poseidon (T/P) was investigated by comparing orbits calculated with and without Simosato data. The orbit of T/P was calculated by using GEODYN-II, which is an orbit analysis software used for orbit determination of T/P at NASA Goddard Space Flight Center. The accuracy of resulting orbit solution is about 3 [cm] RMS in radial direction. By the presence of Simosato data, the spheroidal height of T/P differs by 1-4 [cm]. The difference becomes largest at the vicinity of the observation period at Simosato and appears for about one day before and after it. This result suggests that the effect of Simosato data appears not only above Japan but also on the whole orbit of T/P.

1. はじめに

下里水路観測所では、アルチメータ衛星 TOPEX/Poseidon (以下 T/P) の SLR (人工衛星レーザー測距) 観測を、1992年の打ち上げ以来継続的に実施している。その観測データは NASA のゴダード宇宙飛行センター (以下 GSFC) に送られ、同衛星の高精度の軌道決定に役立てられている。T/P の軌道決定の精度は、打ち上げ前には、衛星の楕円体高の RMS (アルチメータのデータを利用する上で最も重要) が、10日間のアークで 13 [cm] 以下であることを要求されていた。現在では地球の重力ポテンシャルのモデル、及び T/P に作用する他の摂動力のモデルの高精度化によって、楕円体高の RMS で 3 [cm] 程度という精度を実現している (Tapley et al., 1994)。GSFC における T/P の軌道決定は、SLR とドップラー効果を利用した電波による測距システムである

DORIS (例えば, Seeber, 1993) のデータを基にして行われている。その結果は NASA POE (Precision Orbit Ephemeris) と呼ばれ、一部の期間を除いては、米カリフォルニア工科大学のジェット推進研究所 (JPL) で GPS のデータを用いた T/P の軌道決定について研究しているグループのホームページから FTP によって入手できる (URL は ftp://bodhi.jpl.nasa.gov/pub/topex/WWW/topex_gdpf.html)。また、同ホームページからは GPS のデータを用いて計算した T/P の軌道データも入手できる。

T/P の SLR 観測は下里を含む全世界の30箇所以上の観測局で行われている。Fig. 1 は、1995年7月から1996年10月までに T/P の SLR 観測を行った観測局の位置を地図上にプロットしたものである。主に、欧州、極東、北米地域に観測局が集中していることが分かる。Fig. 1 における各観測局の記号は、GSFC における軌道決定作業にお

† Received 1997 November 25th; Accepted 1998 January 19th
* 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

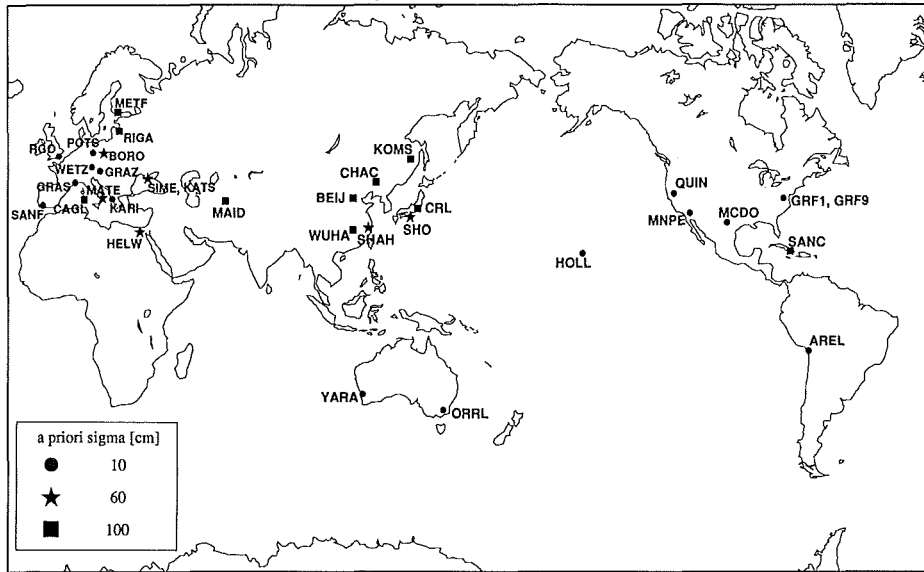


Fig. 1 SLR stations tracking TOPEX/Poseidon during the period from July 1995 till October 1996.

Table 1 Number of passes observed by Asian SLR stations in 1995.

Station	Pass
Simosato	133
Communication Resarch Laboratory (Tokyo)	9
Shanghai	61
Beijing	83
Changchun	0
Wuhan	2
Komsomolsk-na-Amure	89

いて、その局のデータにどれくらいの重みを置いているのかを表わしている。重みづけは解析する際にあらかじめ指定する観測局のアプリオリシグマに関連しており、この値が小さいほどその観測局のデータに大きな重みを置いていることになる。GSFCでは、欧米、及びオーストラリアの主要な観測局に対しては、10 [cm] という値を与えている。一方、極東地域においては、下里と上海だけが60 [cm] で、それ以外の観測局は100 [cm] となっている。また、下里は極東地域の観測局の中では、T/Pの観測データ数が最も多い (Table 1)。この意味で下里は、極東地域ではT/Pの軌道決定に最も大きな影響を与えている観測局であると言ってよいものと思われる。

それでは、下里における観測データは、T/Pの

軌道計算の結果にどの程度の影響を及ぼしているのか？特に日本周辺におけるT/Pの楕円体高は、下里の観測データを入れることによってどれくらい変化するのか？という疑問が生じてくる。本研究では、GSFCで行われている軌道決定作業に出来るだけ近い条件を設定して、実際にT/Pの軌道計算を行い、下里の観測データの影響について調べた。

2. 解析の方法及び条件

今回の解析にはNASAが開発した軌道解析ソフトウェアGEODYN-II (Eddy et al., 1990) を用いた。このソフトウェアはGSFCで実際にT/Pの軌道決定に用いられているものである。GEODYN-II及びT/Pの軌道解析モードの概略については、藤田及び仙石(1997)、藤田他(1998)に述べられている。

解析は以下の様な手順で行った。まず、下里のデータを含めた場合の軌道を計算する。次に、GEODYN-IIに用意されている、特定の観測局のデータを使わない様にするオプション (DELETEカード) を利用して (Pavlis et al., 1997)、下里のデータを解析から省き、下里のデータを使わない場合の軌道を求める。GEODYN-IIでは、最後のiterationの後に、各時刻における衛星の座標、速

Table 2 Adopted force models and measurement models for TOPEX/Poseidon orbit analysis.

Item	Model and Value	Reference
Geopotential	JGM-3 70 × 70	Tapley et al. (1996)
Atmospheric density	Thermospheric Drag Model	Barlier et al. (1978)
Ocean tide	TOPEX/Poseidon Based Model	Ray et al. (1994)
Solid Earth tide	IERS Standards	Wahr (1981)
Ocean loading	IERS Standards	McCarthy (1992)
GM	398600.4415 km ³ /s ²	Ries et al. (1992)
TOPEX/Poseidon Model	"Macro Model"	Marshall and Luthcke (1992)
Radiation from the Earth	Albedo and infrared 2nd degree zonal model	Knocke et al., (1988)
N-body	Sun, Moon and Planets except Pluto	McCarthy (1992)
Relativistic effect (dynamical)	IERS Standards	McCarthy (1992)
Laser range correction		
Tropospheric delay	IERS Standards	Marini and Murray (1992)
Relativistic effect (propagation delay)	IERS Standards	McCarthy (1992)
Center of mass / phase center	TOPEX/Poseidon model	Chinn, private communication, (1996)

度、緯度経度、及び楕円体高を出力することができる。この機能を利用して得られた2種類の軌道、特に衛星の楕円体高を比較する。

本研究で用いた力学モデルを Table 2 に示す。これらは、GSFC で NASA POE の計算に用いられているものと同一である。T/P の軌道計算をする上で最も重要な点は、衛星に作用する太陽輻射圧、大気抵抗等の摂動力を正確に計算することである。このためには衛星の断面積、表面の光学的・熱的特性をより正しくモデル化する必要があるが、今回は GSFC と同様に "Macro Model" と呼ばれるものを用いた (Marshall et al., 1992, Marshall and Luthcke, 1994)。これは、複雑な形状を持つ T/P を細かい要素に分割し、各要素に作用する摂動力を計算して加え合わせるという作業を毎ステップ毎に行うには莫大な計算時間が必要となるので、それを回避するために考案されたものである。まず T/P を300程の細かい要素に分割した "Micro Model" と呼ばれるものを作り、摂動力の大きさを厳密に計算しておく (Antreasian and Rosborough, 1992)。次に、T/P を箱状の本体と太陽電池パネルに相当する板からなる簡単なモデルで近似し、"Micro Model" の結果をうまく再現できるように、本体6 + パネル2、計8

つの面の面積や反射率等のパラメータを調節する。こうして得られたパラメータは、GEODYN-II のセットアップファイルの中で与える。

GEODYN-II の内部では、軌道の数値積分は Cowell 法を用いている。時間積分する際の刻み幅はセットアップファイルで与えるが、今回は NASA POE を計算する場合と同じ30秒とした。また SLR 観測局の座標については、測地衛星 LAGEOS の SLR データの解析によって決められた CSR93L01 で与えられているものを用いた (Eanes and Watkins, 1993)。推定するパラメータは、元期における T/P の位置と速度、大気抵抗係数、経験的加速度 (Along Track 方向の公転周期の周期成分、Cross Track 方向の公転周期の周期成分、計4成分) である。大気抵抗係数については8時間おき、経験的加速度については1日おきに推定している。これらの推定頻度についても GSFC での解析と同じ条件にしている。

今回の解析が GSFC で行われている軌道決定作業と異なる点は以下の通りである。最も大きな違いは、GSFC では入力するデータとして SLR と DORIS の観測データを併用しているのに対し、今回の研究では、DORIS のデータが入手出来なかったために、SLR のデータだけを用いている

点である。解析に用いるデータが少なくなっているため、相対的に下里の観測データの効果を大きく見積もっていることになる。次に、前述のように GSFC では、欧米及びオーストラリアの主要な観測局のデータについては、アプリアオリシグマを 10 [cm] としているのに対し、下里のアプリアオリシグマは 60 [cm] と一段階重みを下げられている。その理由は不明であるが、下里の測距値にバイアスがあるということが原因の一つとなっている可能性がある。今回は、GSFC と同じ 60 [cm] にした場合と、主要局と同じ 10 [cm] にした場合の両方について解析した。また、GSFC では下里の測距値に対してバイアスを入れていない。下里のレンジバイアスの値は 7 [cm] とされており、測地衛星等の解析ではこの値が多く用いられている。ただし、T/P の場合は測地衛星に比べるとリターンが強いので、レンジバイアスの値も変化する可能性がある。今回は、下里のアプリアオリシグマを 10 [cm] とした場合についてのみ、7 [cm] のレンジバイアスを入れた。その値の妥当性に関しては 3 で考察する。なお、本研究における解析では、最初に軌道計算を行った後、測距残差が 10 [cm] を超えるような観測データを除外するオプションを付け加えてから再度軌道計算を行っている（藤田他, 1998）。

計算するアークの長さに関しては、T/P の Ground Track Repeat Cycle である約 10 日間とした。また、元期については、GSFC での各 Cycle の解析結果 (NASA POE) と同じ値を用いた。また、解析する区間としては、次の 3 つの条件を満たすものを選んだ。

- a. 下里における観測が含まれていること
- b. 途中で姿勢の反転が起こらないこと
- c. 軌道制御イベントを含まないこと

b の姿勢反転は、太陽電池パネルに効率良く光を当てるために、ほぼ 50~70 日毎に行われている。また、c の軌道制御は所定の軌道から 1 [km] 程度ずれた際に推進モジュールからプロペラントを噴射して軌道を修正するもので、4 ヶ月~半年おきに行われている。特に姿勢反転のイベントを含む区間では、外部姿勢ファイルと呼ばれる、姿勢反転イベント中の T/P の姿勢に関するデータを記述した容量の極めて大きいファイルを用いなければ、軌道を精度良く計算することができない。このため、今回はこのようなイベントを含む期間を解析から除外した。本研究で解析した期間について、下里で観測したパス数、Normal Point 数、全観測局におけるデータ数、下里のデータの占める割合をまとめたものを Table 3 に示す。

姿勢の変化に対応して、T/P に作用する大気抵

Table 3 Data summary of the cycles. The last column represents the percentage of Simosato data to total.

Cycle	Period	Pass at Simosato	Normal Point		
			Simosato	ALL	%
103	1995, 7/1 11:05 ~ 7/11 13:03	4	111	5291	2.1
108	8/20 1:05 ~ 8/30 2:58	8	277	3708	7.5
110	9/8 20:57 ~ 9/18 22:55	2	80	3714	2.2
111	9/18 18:55 ~ 9/28 20:54	2	73	4064	1.8
114	10/18 12:51 ~ 10/28 14:49	8	306	7515	4.1
116	11/7 8:48 ~ 11/17 10:46	10	403	5170	7.8
120	12/17 0:42 ~ 12/27 2:41	10	323	2760	11.7
126	1996, 2/14 12:33 ~ 2/24 14:32	7	181	3921	4.6
128	3/5 8:30 ~ 3/15 10:29	3	48	5410	0.9
132	4/14 0:24 ~ 4/24 2:23	1	27	5377	0.5
140	7/2 8:13 ~ 7/12 10:11	1	35	4982	0.7
151	10/19 9:56 ~ 10/29 11:55	2	131	5176	2.5

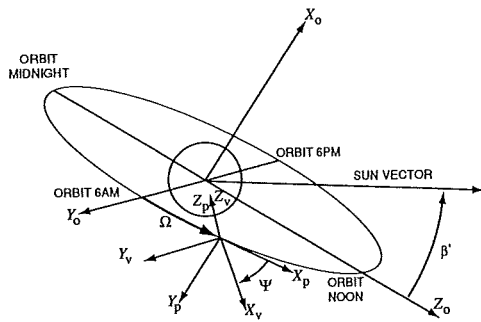


Fig. 2 TOPEX/Poseidon inertial coordinate system (from Perrygo, 1987).

抗, 輻射圧, さらに放熱のために衛星本体に付けられている“よろい戸”からの熱放射による加速度も変化するため, 軌道計算の際には各ステップにおける T/P の姿勢の情報が不可欠である。

今回計算した期間では, T/P は Sinusoidal Yaw と呼ばれる通常の姿勢制御モードにある。このモードでは, T/P は太陽電池パネルに効率良く光を当てするため, Yaw 軸 (地球方向) を軸として,

$$\Psi = \pm 90^\circ \pm 90^\circ \cos \Omega - \beta' \cos \Omega \quad (1)$$

となるように yaw angle Ψ を調節している (Marshall et al., 1992)。ここで, β' は軌道面と太陽方向の単位ベクトルのなす角, Ω は軌道面内で太陽と直交する方向から軌道面に沿って測った Orbit Angle である (Fig. 2, Perrygo, 1987)。(1) 式において, \pm の符号は, 太陽が軌道面よりも「上」にあるとき ($\beta' > 0$) が “+”, 太陽が軌道面よりも「下」にあるとき ($\beta' < 0$) が “-” に対応している。さらに, 太陽電池パネル自体も,

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \Omega \cos \beta'}{\cos \Omega \cos \beta' \cos \Psi - \sin \Psi \sin \beta'} \right) \quad (2)$$

というルーチンに従って衛星本体に対する角度 g を変化するようになっている (Marshall et al., 1992)。GEODYN-II には, このような T/P の姿勢を毎ステップ毎に計算する特別なサブルーチンが用意されている。

3. 計算結果と考察

(1) 軌道の精度について

下里の観測データを入れて計算した場合の全観測局及び下里の測距残差の Weighted RMS を

Table 4 SLR range residuals RMS. A priori sigma of Simosato is 10 [cm], which is the same as the value applied to the data of the stations in U. S. A., Europe, and Australia.

Cycle	Weighted RMS	
	All	Simosato
103	0.270	0.543
108	0.271	0.466
110	0.297	0.356
111	0.293	0.314
114	0.270	0.450
116	0.208	0.312
126	0.259	0.511
128	0.274	0.444
132	0.312	0.523
140	0.328	0.579
151	0.302	0.368

Table 4 に示す。ただし, 下里のアプリオリシグマを他の主要観測局と同じ 10 [cm] とし, 下里の測距値には 7 [cm] のレンジバイアスを入れた (以下特に断わらない限り同様)。主要局のアプリオリシグマが 10 [cm] であるから, 実際の測距残差の RMS は 2 ~ 3 [cm] 程度ということになる。Tapley et al. (1994) が Cycle 1 から 15 について計算した結果が平均で 4.3 [cm] であるから, それよりも若干小さい値を与えていることになる。これは, 重力場等のモデルが変わっていることと, 本研究では解析の際に測距残差が 10 [cm] よりも大きくなるような観測データを除外していることが原因と思われる。また, GSFC が求めた軌道 (NASA POE) と今回計算した軌道について, 楕円体高の差をとり, その RMS を計算したところ, どの Cycle についてもほぼ 3 [cm] 以下 (平均で 2.1 [cm]) となった。GSFC における T/P の軌道決定の精度は, 高さ方向に関しては RMS で 3 [cm] 以内とされている (Tapley et al., 1994)。また, Guinn et al. (1995) が T/P に搭載されている GPS の観測データを用いて計算した軌道について NASA POE との比較を行った結果, 高さ方向の差の RMS は各 Cycle の平均で 2.3 [cm] であった。以上のことから, SLR のデータが十分あ

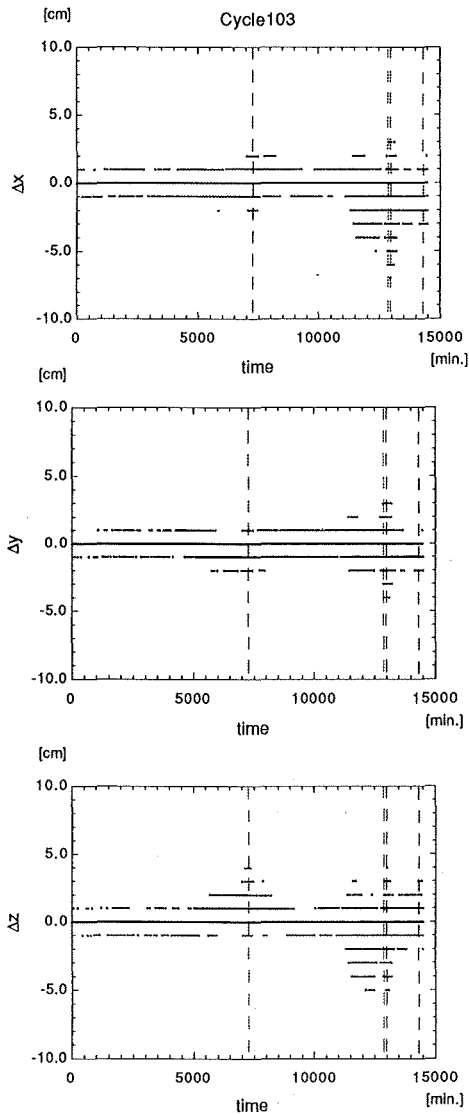


Fig. 3 Difference of coordinates between the T/P orbit calculated with and without data of Simosato (Cycle 103; Jul. 1, 11:05 - Jul. 11, 13:03, 1995). Dashed lines represent the observation periods at Simosato.

る Cycle では、SLR のデータだけでも NASA POE と同程度の精度での軌道決定が出来るものと考えられる。

(2) 座標値の変化

まず、下里のデータを用いた場合と用いない場合の2種類の軌道について、出力された T/P の赤道地心直交座標値 (True of Date) の各時刻における差 Δx , Δy , Δz を計算した。その結果を Fig. 3, 4 に示す。Fig. 3 は Cycle 103 (1995年7/1 11:05 ~ 7/11 13:03), Fig. 4 は Cycle 116 (1995年11/7 8:48 ~ 11/17 10:46) の場合で、前者は

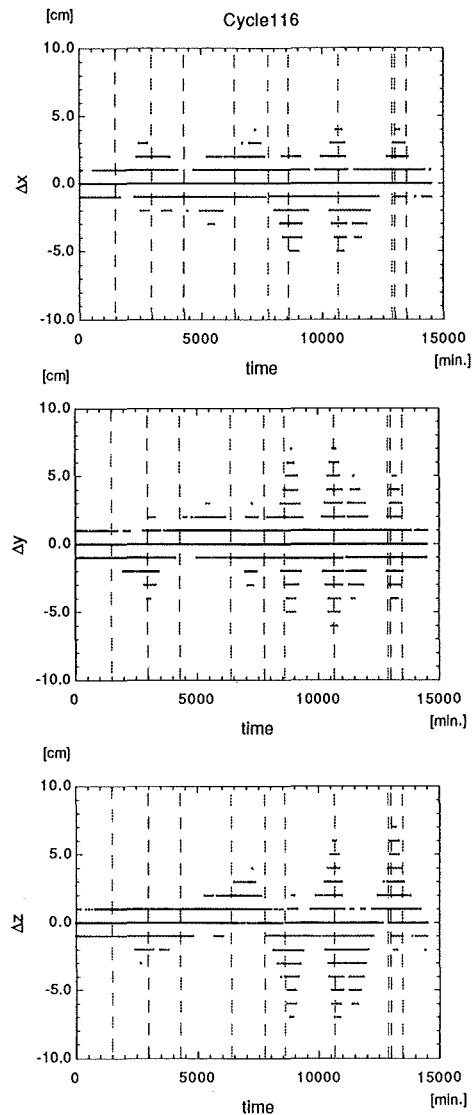


Fig. 4 Same as Fig. 3 (Cycle 116; Nov. 7, 8:48 - Nov. 17, 10:46, 1995).

下里における観測パス数が少ない場合、後者は下里の観測が全区間で均等に行われている場合の例である。これらの図において、横軸は元期からの時間、縦の点線は下里で実際に観測を行っている期間 (約10分間) を示している。なお、グラフが離散的に見えるのは、GEODYN-II では cm のオーダーまでしか座標値を出力しないためである。これらのグラフから、ピーク的位置は下里の観測時期とほぼ一致することが分かる。ずれの最大値は ± 8 [cm] 程度であり、この値は SLR の観測データが極端に減少するような特別な場合 (例えば年末) を除けば、Cycle にかかわらずほぼ一定である。また、下里の観測パス数の多少に関係なく、

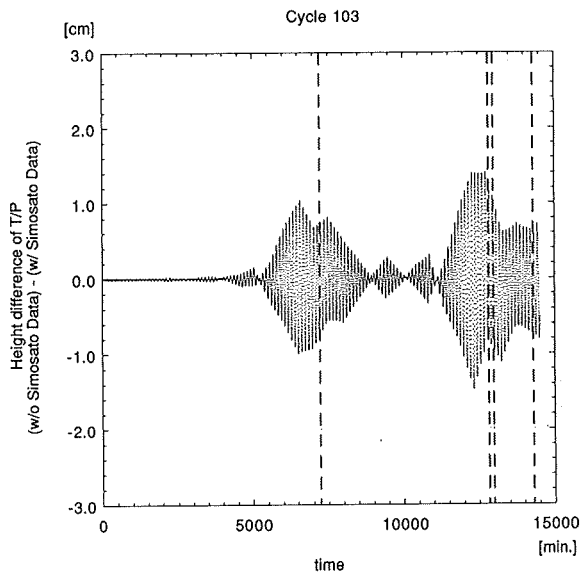


Fig. 5 Height difference of TOPEX/Poseidon between with and without data of Simosato (Cycle 103). Dashed lines represent the observation periods at Simosato.

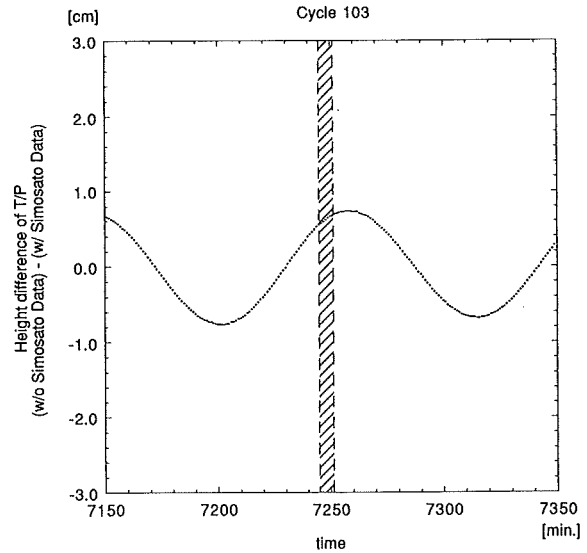


Fig. 7 Height difference of TOPEX/Poseidon around the observation period at Simosato (Cycle 103). Hatched region represents the observation period of Simosato.

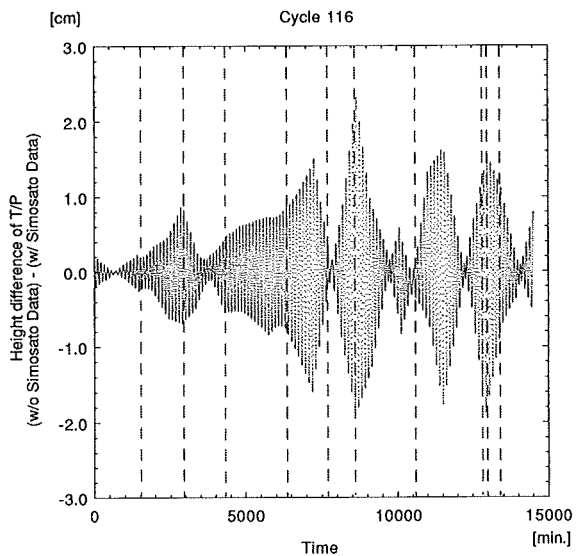


Fig. 6 Same as Fig. 5 (Cycle 116).

常に 1 [cm] 程度のずれが生じている。これは、下里のデータの有無によって、推定した T/P の元期における座標と速度に差が生じ、それがアークの最後まで消えずに残っているものと考えられる。

(3) 衛星の楕円体高の変化

Fig. 5 及び 6 に、下里のデータを用いた場合と用いない場合とで、計算される各時刻の T/P の高度 (楕円体高) にどれくらいの差が生じるのかを示す。座標の場合と同じく、ピークの位置はほ

ぼ下里の観測区間と一致する。また、下里の観測の前後 1 日はずれが残るという特徴がある。これは、下里のデータの影響が日本上空だけにとどまらず、T/P の軌道全体に及んでいることを意味している。ただし、直交座標の場合と異なり、下里の観測から前後に 1 日以上離れると、楕円体高の差がほとんど見られなくなる (Fig. 5)。全域に渡って見られる細かい変動の周期は約 110 分で、T/P の公転周期と一致する。最大のずれは 3 [cm] 程度であるが、この値は計算する Cycle によって変化する。Fig. 7 は Cycle 103 (Fig. 5) において下里で最初の観測が行われている期間の前後を拡大したものである。この場合、下里の観測中は、楕円体高のずれはプラスになっている (下里のデータを抜いた方が T/P の高度は高くなる) が、地球の裏側に回るとマイナス側に転じている (下里のデータを抜いた方が低くなる)。つまり、日本の上空で高度が高く (位置エネルギーが増加) した分を、地球の裏側で埋め合わせていることになる。このようにすることで、一箇所の観測局のデータの有無によって、T/P の力学的エネルギーが極力変化しない様になっているものと考えられる。

(4) NASA POE との比較

GSFC が SLR と DORIS のデータを用いて計

Table 5 Height difference RMS with respect to NASA POE.

Cycle	RMS [cm]	
	w/ Simosato	w/o Simosato
103	1.76	1.81
108	2.59	2.14
110	2.15	2.19
111	1.95	1.90
114	1.87	1.87
116	1.28	1.31
126	1.92	2.16
128	2.74	2.82
132	2.98	2.98
140	1.31	1.30
151	2.84	2.79

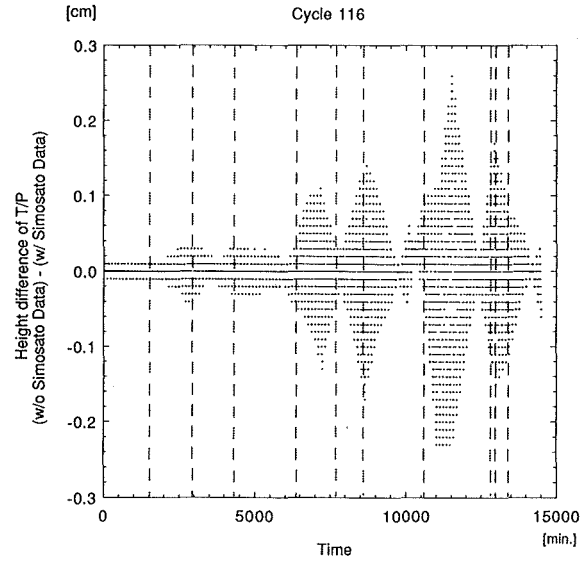


Fig. 9 Same as Fig. 5. (a priori sigma of Simosato is 60 [cm]).

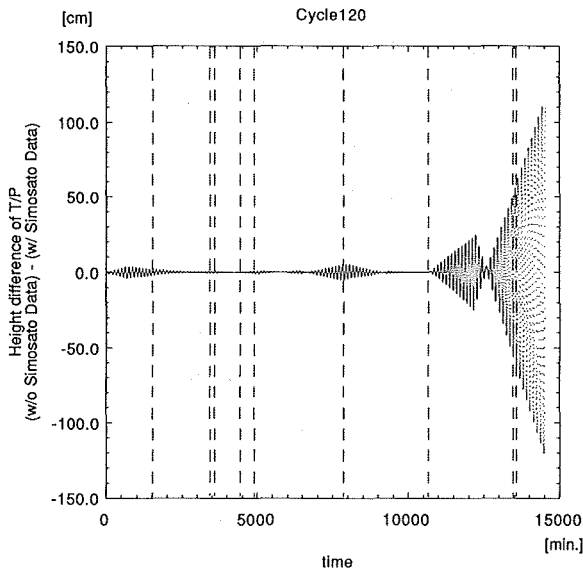


Fig. 8 Same as Fig. 5 (Cycle 120; Dec. 17, 0:42 - Dec. 27, 2:41, 1995).

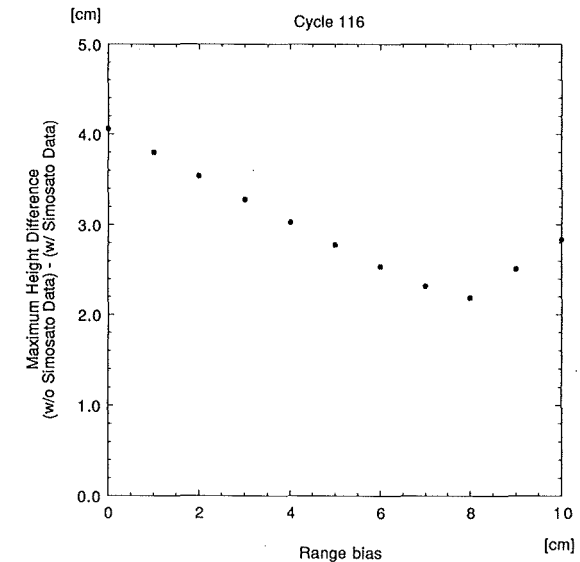


Fig.10 Maximum height difference of TOPEX/Poseidon as a function of range bias of Simosato (Cycle 116).

算した軌道データ (NASA POE) を入手して、今回の計算結果と比較してみた。まず、各時刻における T/P の楕円体高の計算値と NASA POE の値の差をとり、次にその RMS を計算した。各 Cycle における結果を Table 5 に示す。GSFC の値との差の RMS は、下里のデータの有無によって、あまり変化していない。

(5) SLR の観測データが極端に少ない場合

次に、世界中の観測局で SLR の観測データが不足している場合の例を示す。Fig. 8 は

Cycle120 (1995年12/17 0:42~12/27 2:41) について、下里のデータを用いた場合と用いない場合での楕円体高の差をプロットしたものである。クリスマスイブ (横軸の10000 [min] 付近) 以降では、世界中で SLR の観測がほとんど行われていないために、データが極端に減少している。そして、観測データが少なくなっている時期から、下里の有無による T/P の楕円体高の差が急増し、1 [m] を超える程の違いが生じている。また、

Table 6 Range bias of Simosato which minimizes SLR residuals RMS.

Cycle	Range Bias of Simosato [cm]
103	4.7
108	1.9
110	4.8
111	6.6
114	5.8
116	6.3
126	2.2
128	9.6
132	2.1
140	7.4
151	6.6

NASA POE との T/P の楕円体高の比較では、下里のデータを入れない場合は差が最大1.5 [m] に達するのに対し、下里のデータを入れた場合は最大で80 [cm] 程度の差にとどまる。しかし、これは下里の観測のデータを入れることによって軌道がより正確に決められるようになった例と言うよりは、SLR のデータが不足している期間では1ヵ所の観測局のデータだけでは軌道を完全に決められないことを示すものと考えられる。

(6) 下里のデータの重みを下げた場合

Cycle116について、下里のアプリオリシグマをGSFCでの解析と同じ60 [cm] にした場合の結果を Fig. 9 に示す。この場合、下里のデータの有無による T/P の楕円体高の差は最大で2.6 [mm] とアプリオリシグマが10 [cm] の場合よりも一桁小さくなっている。他の Cycle についても同様の傾向が見られる。これは、下里のデータの重みが単純に減少したために、他の観測局、特にハワイやオーストラリアの観測局のデータによって軌道がほとんど決められてしまっていることが影響しているものと考えられる。

(7) レンジバイアスについて

最後に下里のレンジバイアスの値を変化させた場合の影響について調べた結果について述べる。各 Cycle において、全観測局の測距残差が最も小

Table 7 Maximum difference in spheroidal height of TOPEX/Poseidon by use of Simosato SLR data.

Cycle	Maximum height difference [cm]	
	$\sigma = 10$ [cm]	$\sigma = 60$ [cm]
103	1.47	0.09
108	3.55	0.18
110	1.57	0.18
111	1.32	0.04
114	1.67	0.11
116	2.32	0.26
120	1.20	1.17
126	3.03	0.26
128	2.24	0.25
132	0.34	0.01
140	0.58	0.02
151	2.10	0.18

さくなるような下里のレンジバイアスの値を Table 6 に示す。これらの値にはかなりのばらつきがあるが、全体としては今回用いた 7 [cm] よりは小さくなる傾向が見られる。また、Fig.10は、Cycle116について、下里のデータの有無による楕円体高の差の最大値とレンジバイアスの値の関係を示したものである。この Cycle では、レンジバイアスの値によって、楕円体高の差の最大値は 1.9 [cm] 程度変化する。

4. 結論

SLR のデータのみからでも、T/P の軌道決定を高さ方向の RMS で 3 [cm] 以下という高い精度で行えることが分かった。ただし、年末のように全世界での SLR のデータが不足している時期に関しては、DORIS のデータを利用することが不可欠と思われる。また、今後測地衛星に比べて複雑な形状を持つ衛星が打ち上げられた場合についても、衛星に作用する摂動力のモデルと姿勢制御に関するサブルーチンを GEODYN-II に追加することで、同じように高精度の軌道決定が行えるものと期待できる。

T/P の場合、下里のデータの有無による衛星の

座標のずれは、 x , y , z 成分共に最大で 8 [cm] 程度である。ただし、解析しているアーク全体に 1 [cm] 程度のずれが常に生じるという特徴がある。それに対して、下里のデータの有無による T/P の楕円体高の変化は、下里の観測がある付近で最も大きくなるが、差が生じるのは下里の観測前後 1 日程度である。以上のことから、下里の観測データが T/P の軌道計算の結果に与える影響は日本上空という局所的なものではなく、軌道全体に及んでいるということになる。各 Cycle における T/P の楕円体高の違いの最大値を Table 7 にまとめた。下里のデータの重みを主要観測局と同じにした場合は cm オーダー、下里のデータの重みを GSFC における解析と同じにした場合は mm オーダーの差が生じている。ただし、これらの差は DORIS のデータを併用した場合には、縮小する傾向に向かうことが予想される。また、楕円体高のずれの大きさは下里のレンジバイアスの値にも依存するが、大きさがオーダーで変化することはないものと考えられる。今回は、測地衛星の解析で通常用いられている 7 [cm] より小さい値で全観測局の測距値の RMS が最小になる傾向が見られたが、T/P の軌道計算の際に用いるべき最適な値を見出すことは出来なかった。この点に関しては、今後より詳しく調べる必要があるものと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、海洋研究室ならびに航法測地課の方々に貴重な意見を頂きました。また、ゴダード宇宙飛行センターの Douglas Chinn 氏には、GEODYN-II による TOPEX/Poseidon の軌道計算について数多くのアドバイスを頂きました。ここに感謝いたします。

参 考 文 献

Antreasian, P. G., and G. W. Rosborough : Prediction of radiant energy forces on the TOPEX/POSEIDON spacecraft, *J. Spacecr. Rockets*, **29**, 81-92, (1992).

Barlier, F., C. Berger, J. Falin, G. Kockarts, and G. Thuillier : Atmospheric model based on satellite drag data, *Ann. Geophys.*, **34**, 9-24, (1978).

Eanes, R. J. and M. M. Watkins : The CSR93 L01solution, IERS Annual Report for 1992, Int. Earth Rotation Serv., Obs. de Paris, (1993).

Eddy, W. F., J. J. McCarthy, D. E. Pavlis, J. A. Marshall, S. B. Luthke, L. S. Tsaoussi, G. Leung, D. A. Williams : GEODYN-II System Operations Manual, Contractor Report, ST Syst. Corp., Lanham, Md., (1990).

藤田雅之, 久保岡俊宏, 池田信広 : GEODYN-II/SOLVE 対話型解析システム (GDIS) による SLR データ解析, 水路部技報, **16**, (1998), *in press*.

藤田雅之, 仙石新 : NASA の衛星データ解析ソフトウェア「GEODYN-II」の導入, 水路部技報, **15**, 5-10, (1997).

Guinn, J. R., R. J. Muellerschoen, L. A. Canga-huala, D. N. Yuan, B. J. Haines, M. M. Watkins, E. J. Christensen : TOPEX/Poseidon Orbit Determination Using Combined GPS, SLR, and DORIS, presented at the IUGG Conference, Boulder, CO., (1995).

Knocke, P. J., J. C. Ries, and B. D. Tapley : Earth radiation pressure effects on satellites, in *Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Conference*, pp.577-587, Am. Inst. Aeron. Astronaut., Washington, D. C., (1988).

Marini, J. W., and C. W. Murray, Jr. : Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevation above 10 degrees, *Rep. X-591-73-351*, Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, MD, November 1973, (1973).

- Marshall, J. A. and S. B. Luthcke : Radiative force model performance for TOPEX/POSEIDON, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2171-2174, (1994).
- Marshall, J. A., S. B. Luthcke, P.G. Antreasian, and G. W. Rosborough : Modeling Radiation Forces Acting on TOPEX/Poseidon for Precision Orbit Determination, NASA Technical Memorandum 104564, (1992)
- McCarthy, D. D. ed. : IERS Standards 1992, IERS Tech. Note 13, Obs. de Paris, November (1992).
- Pavlis, D. E., D. Moore, S. Luo, J. J. McCarthy, S. B. Luthcke : GEODYN II Operations Manual Vol. 3, (1997).
- Perrygo, C. : TOPEX Satellite Yaw Maneuvers, Fairchild IOC REF : 968 : SE : 87-074, 11, (1987).
- Ray, R. D., B. Sanchez, D. E. Cartwright : EOS, **75(16)**, Spring Meeting Suppl., 108, (1994).
- Ries, J. C., R. J. Eanes, C. K. Shum, and M. M. Watkins : Progress in the determination of the gravitational coefficient of the Earth, *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 529-531, (1992).
- Seeber, G. : Satellite Geodesy, *de Gruyter*, 137-138, (1993).
- Tapley, B. D., J. C. Ries, G. W. Davis, R. J. Eanes, B. E. Schutz, C. K. Shum, M. M. Watkins, J. A. Marshall, R. S. Nerem, B. H. Putney, S. M. Klosko, S. B. Luthcke, D. Pavlis, R. G. Williamson, and N. P. Zelensky : Precision orbit determination for TOPEX/POSEIDON, *J. Geophys. Res.*, **99** C12, 24383-24404, (1994).
- Tapley, B. D., M. M. Watkins, J. C. Ries, G. W. Davis, R. J. Eanes, S. R. Poole, H. J. Rim, B. E. Schutz, C. K. Shum, R. S. Nerem, F. J. Lerch, J. A. Marshall, S. M. Klosko, N. K. Pavlis, and R. G. Williamson : The Joint Gravity Model 3, *J. Geophys. Res.*, **101**, 28029-28049, (1996).
- Wahr, J. M. : Body tides on elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **64**, 677-703, (1981).