

LageosI 及び LageosII の long-arc 解析による本土海洋測地基準点座標決定と 日本測地系と世界測地系の変換パラメータの再決定†

仙石 新*, 加藤 剛*, 福良 博子*, 小山 薫*, 藤田 雅之**, 矢吹 哲一朗**

Determination of the Position of Shimosato by LageosI and LageosII Long-arc Analysis and Transformation Parameters between Tokyo Datum and World Geodetic System †

Arata SENGOKU*, Goh KATOH*, Hiroko FUKURA*, Kaoru KOYAMA*,
Masayuki FUJITA** and Tetsuichiro YABUKI**

Abstract

To determine precise position of the satellite laser ranging (SLR) station at the Shimosato Hydrographic Observatory in a geocentric terrestrial reference system, or a world geodetic system, 13-year Lageos SLR data obtained at global SLR network were analyzed. Combining 1-year solutions of LageosI and LageosII, a terrestrial reference frame based on the world geodetic system was established. This reference frame is compatible with International Terrestrial Reference Frame 96 (ITRF96) but the coordinate values of Shimosato is closer to ITRF 97. Position of the datum origin of the Tokyo Datum was connected to Shimosato using SLR and GPS techniques. The transformation parameters were re-determined from the coordinate values at the datum origin. The parameters give only several-cm difference from those determined by the Geographic Survey Institute, though these are independent results derived from different techniques.

1. はじめに

水路部では、我が国の測地系（日本測地系）と地心を原点とする地球基準座標系（世界測地系）との関係を明らかにし、海洋測地網の精度を維持するとともに、世界測地系そのものの精度を維持・向上させるため、人工衛星レーザー測距（SLR：Satellite Laser Ranging）観測を実施している（Kubo, 1988, Sengoku et al., 1999b）。この中で、第五管区海上保安本部下里水路観測所（以下、下里と呼ぶ）は、海洋測地網の原点である本土基準点として位置づけられ、1982年以降、米国

の測地衛星「Lageos」等の定常観測を行うことによって、世界測地系に基づく下里の位置が正確に求められてきた（Sasaki, 1984, Sasaki, 1990, Sasaki and Sengoku, 1993, 辰野・藤田, 1994, Sengoku, 1998）。下里は国際地球回転監視事業（IERS：International Earth Rotation Service）の観測局として世界測地系の構築に貢献し、IERSが初めて決定した地球基準座標系である ITRF88（IERS, 1989）から最新の ITRF97（Boucher et al., 1999）に至るまで常時安定した座標を提供している。特に、東アジアの SLR の観測局としては、IERSによる世界測地系の構築に当初か

† Received 1999 December 22nd.; Accepted 2000 February 15th.

* 航法測地課 Geodesy and Geophysics Division.
** 海洋研究室 Ocean Research Laboratory.

ら参加しているのは下里と上海（中国科学院上海天文台）だけであり、下里がこれまでに東アジア地域の座標系の構築・維持に果たしてきた役割は大きい。

下里には、固定式レーザー測距装置 (Sasaki et al., 1983) が設置され、また、本土基準点標石が設置されている。レーザー測距装置の不動点と標石の間の位置関係は、1982年に光学測量によって決定され (竹村, 1983), その後、1987年に再度光学測量により (Sengoku, 1989), 1994年, 1996年には GPS 測量により、それぞれ管理測量が行われている (Takanashi et al., 1997)。

下里のレーザー測距装置不動点の世界測地系における座標値としては、従来は海洋測地成果 (辰野・藤田, 1994) が用いられてきた (衛星測地室, 1996)。海洋測地成果は、1984年から1991年の LageosI の SLR データを、グローバルな SLR データとともに、水路部が開発した SLR 解析プログラム Hydrangea (Sasaki, 1990) を用いて解析したもので、約1年毎の2ヶ月程度の期間について5日アーク解析が行われ、各期間の座標値はこれらの5日アークの結果を平均して決定している。解析に際して、Yaragadee (オーストラリア), Wettzel (ドイツ), Matera (イタリア), Quincy (アメリカ) の4局の座標を、当時としては最も精度が高いと考えられていたテキサス大学の成果 (SSC (CSR) 86L07, Tapley et al., 1986) をプレート運動モデル AM0-2 (Minster and Jordan, 1978) によって各期間の元期に動かした値に固定している。このため、海洋測地成果は、1) LageosI の SLR データのうち一部しか用いられていない、2) テキサス大学の座標値に依存している、3) 座標値を固定する SLR 局数が redundant である、4) 1990年の年初における下里の座標値であり下里の動きが考慮されていない、などの問題があった。しかし、1) 1992年10月に打ち上げられた LageosII によって、近年、下里の位置算出精度は向上していることが期待され、2) 世界測地系として ITRF が利用可能となり、3) SLR の解析ソフトウェア「GEODYN-II/SOLVE」の導入に

伴い (藤田・仙石, 1997b) 1年間の SLR データを一括して解析することが可能になった。このため、より精度の高い下里の座標を決定することを目指して、LageosI と LageosII のグローバル SLR データについて GEODYN-II/SOLVE を用いた再解析を行った。

水路部が現在用いている日本測地系から世界測地系への変換パラメータは、海洋測地成果として辰野・藤田 (1994) が算出したものであるが、この値は、下里近傍の国土地理院三角点 (高芝) の日本測地系における座標と世界測地系である海洋測地成果を比較することにより求めたもので、日本経緯度原点から下里近傍の三角点 (高芝) までの三角網の歪み (日本測地系の歪み) が考慮されていない。しかし、測地系の変換パラメータは、本来、日本経緯度原点における座標値で比較すべきである。このため、1996年に行った一次基準点「銚子」の SLR データを再度解析し、下里—銚子基線を精密に再決定するとともに、銚子と日本経緯度原点近傍の一等三角点「東京大正」間を、GPS により結合した (Fig. 1)。以上から、日本測地系から世界測地系への変換のために必要な原点シフト量を日本経緯度原点において正確に算出したので報告する。

2. SLR による下里の位置決定

SLR のグローバルデータを解析し、地心に準拠した下里の座標を決定した。本節では、解析に用

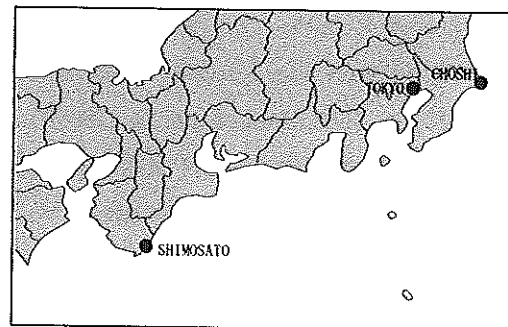


Fig. 1 Geodetic observation sites of the Hydrographic Department used in the paper.

いたデータ、解析方法、結果について述べる。

2.1 データ

解析に用いたデータは、1986年の年初から1998年の年末までの間に世界中のSLR観測局で得られたSLRデータを圧縮したノーマルポイント(normal point)データである(Table 1)。1993年以降は毎年20局程度で、あまり変動がない。LageosIIは1992年に打ち上げられたため、その年の測距観測局数は少ないが、その他の年についてはLageosIとほぼ同数である。観測パス数については、LageosI, LageosIIそれぞれについて、毎年グローバルなSLR観測局によって3000~5000パスが得られており、近年増加する傾向にある。これらのデータは、SLRのデータセンターである米国航空宇宙局(NASA)の地殻力学データ情報システム(CDDIS: Crustal Dynamic Data Information System)のデータベースから抽出したものである。Lageosのノーマルポイントは2分毎の測距データの代表値であり、1984年にHerstomonceuxで行われた第5回のInternational Workshop on Laser Ranging Instrumentationで勧告された基準に準拠している(Watkins, 1990)。

Fig. 2に解析に用いたSLR観測局の分布を示

す。ここに示したものの以外に、観測データの精度が低い観測局があるが、本論文では下里の座標を安定して決定することが目的であるため、解析を行っていない。例えば、近年、中国に4局、ロシアに1局設置されるなど、東アジアでSLR観測が精力的に行われているが、ここではこれらのデータは用いていない。図から明らかのように、SLR観測局の分布は、北半球に偏っている、ヨーロッパ、北アメリカに集中している、などの特徴がある。

下里の測距データには数cmの正のバイアスがあることが知られている。このため、解析に際しては、下里のバイアス値としてSengoku et al. (1999a)により決定された値を用いた。これは、下里をはじめグローバルなSLR観測局の座標をITRF96(Boucher et al., 1998)に固定して下里のバイアスを各年毎に推定したものである。ただし、本稿では下里のバイアスは各年毎に一定値であることを仮定している。

2.2 解析方法

解析は、GEODYN-II/SOLVEを対話的に処理するために水路部で開発したシステム(GDIS)を流用した下里データ定常解析システム(福良・藤田, 1999)を用いて、HPのワークステーションに

Table 1 Number of Lageos tracking stations and Lageos passes used in the analysis

year	Lageos I			Lageos II		
	global		Shimosato	global		Shimosato
	no. of stn.	pass	pass	no. of stn.	pass	pass
1986	17	2229	222			
1987	15	2506	114			
1988	14	2019	85			
1989	12	1739	91			
1990	13	1701	89			
1991	12	1385	93			
1992	11	1681	99	8	354	14
1993	19	2967	61	20	2770	94
1994	22	3516	72	21	3232	74
1995	21	3618	125	21	3249	124
1996	22	3730	86	22	3211	101
1997	22	4124	59	21	3705	40
1998	20	5353	74	21	4583	94

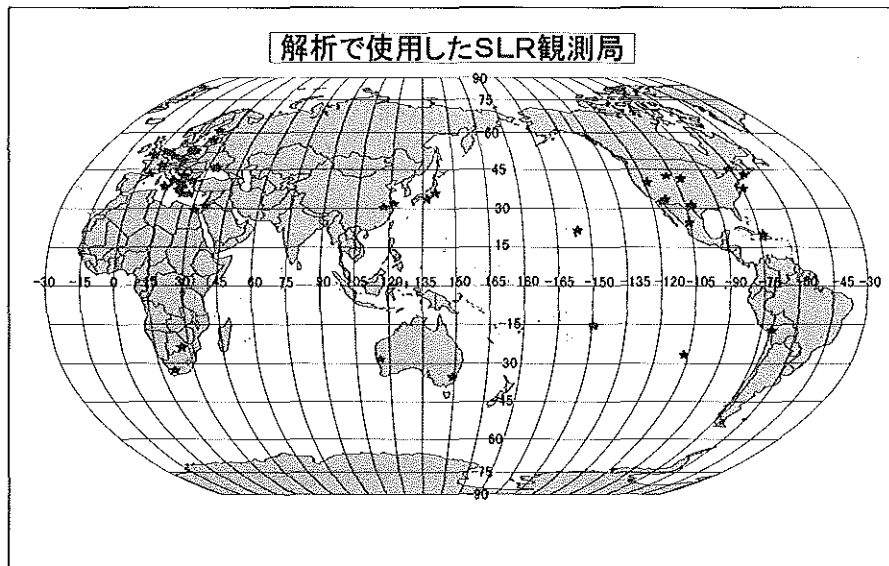


Fig. 2 Global SLR observation network used in the paper.

より行った。

用いた地球重力場モデルは JGM-3 (Tapley et al., 1994), 地球回転パラメータは, IERS の値を用いている。他の力学モデル, 諸定数などについては, 藤田他 (1998) を参照していただきたい。SLR によって地心座標系を決定する場合, 最低3つのパラメータを固定する必要がある。ここでは, Greenbelt (米国メリーランド州, station ID: 7105) の緯度と経度, 及び Maui (米国ハワイ州, station ID: 7210) の緯度を ITRF96 の位置と速度に固定した。このような拘束条件を採用したのは,

- ・両点とも解析を行った期間中良質なデータが十分あるため, 安定した解析が可能であること,
- ・両点とも大陸内部に位置するため, プレート運動に伴いほぼ一定の速度で水平方向に動いていると考え得ること (Robbins et al., 1993),
- ・地心から見た両者の角度が90度に近く, 直交性が良いこと

などのためである。

GEODYN-II による解析は15日のアーク毎に行い, 衛星の初期位置と速度, 太陽輻射圧係数, 経験的加速度 (アークパラメータ) をまず決定し, ノイズデータを除去する。経験的加速度は5日おきに, 他のパラメータは各アークで一度推定する。次に, 各アーク毎に出力される偏微分係数ファイ

ル (EMATRIX) をまとめて, SLR 観測点の座標とアークパラメータを SOLVE も用いて解くことにより, SLR 観測点の座標を1年毎に算出した。これを1年解と呼ぶことにする。

本稿では, 13年間のデータからひとつの世界測地系を構築する。そのため, 各1年解を ITRF96 に合わせ込んだ結果を成果とする。

2.3 下里本土基準点の位置決定

1986年1月から1998年12月までの LageosI 及び LageosII のグローバル SLR データを解析し, ソフトウェア GEODYN-II/SOLVE を用いて1年解を生成した。各アーク毎の GEODYN-II による解析後の O-C の RMS を Fig. 3 に示す。1980年代後半は 2 cm 以上, 1990年代初頭は 1.5 cm 程度であった RMS は1990年代後半になって 1 cm まで下がっている。これは, 観測機器の精度が向上したことが主要な原因と考えられる。Fig. 3 から下里のノーマルポイントデータについては, 現在 1 ~ 2 cm の精度が得られている, ということができよう。

1年解は, それ自身が ITRF と同様に地心を原点とする世界測地系であるが, 1) ITRF は VLBI など SLR 以外の成果も用いていること, 2) 1年解は1年分のデータしか用いていないため, 10年以上のデータを用いている ITRF に比較すると

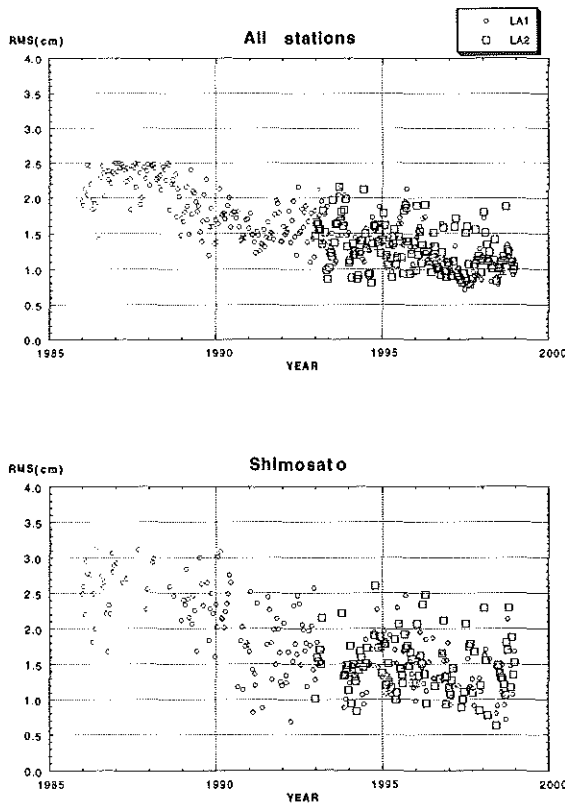


Fig. 3 RMS of O-C after GEODYN-II analysis. Circles are for LageosI and squares are for LageosII. Unit of RMS is cm.

安定度が低いこと、などのため ITRF とは差がある。さらに、1年解には、1) LAGEOS の SLR データが必ずしも十分にないこと、2) 観測機器のふらつき、3) 観測・物理モデルの誤差、などによる誤差も存在する。

SLR の解析結果から ITRF と compatible な座標系を構築するためには、各1年解と ITRF の関係を明らかにする必要がある。このため、各1年解を以下の式により ITRF96 に変換する場合の7つのパラメータ (原点、方向及びスケール) を最小自乗法により決定した (詳しくは、例えば Sen-goku, 1998 を参照)。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{ITRF96} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{annual} - \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix}$$

$$- \begin{pmatrix} s & -r_z & r_y \\ r_z & s & -r_x \\ -r_y & r_x & s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{annual} \dots\dots\dots(1)$$

x は地心から赤道面とグリニッジ子午線の交点方向、 z は地心から国際慣用原点 (CIO) 方向、 y は直交座標系 (x, y, z) が右手系となるように定義する。

パラメータ決定に用いた SLR 観測局は、Yaragadee (オーストラリア, station ID=7090), Greenbelt (米国メリーランド州, 7105), Monument Peak (米国カリフォルニア州, 7110), Maui (米国ハワイ州, 7210), Grasse (フランス, 7835), 下里 (7838), Graz (オーストリア, 7839), Herstomonceux (英国, 7840), Matera (イタリア, 7939) の9点である。これらは、1986年から1998年までの各年について十分なデータが存在し、かつ各年ごとに精度良く座標が決定できた全ての観測局である。下里は、この13年間にわたり安定したデータが取得できた数少ない SLR 局のひとつである。Fig. 4 は各1年解と ITRF96 の原点の差 (dx, dy, dz) を表している。図から明らかなように、両者の差は1994年以降ほぼ一定である。すなわち、この期間については各1年解の地心はmmオーダーの精度があることになる。 z 成分が他の成分に比べて安定しないのは、南半球に SLR 局が少ないためである。 x, y 成分については、数mmのバイアスがある。スケールについては、4mm程度の安定度がある。方向については、1~2cmの安定度であった。これらは、1年間の SLR データから決定される地球基準座標系 (世界測地系) の精度を表している。各1年解を ITRF96へ変換す

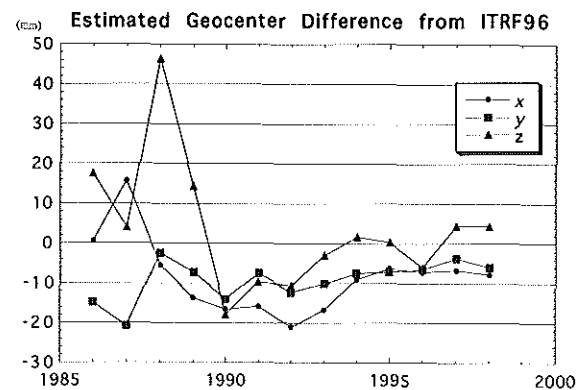


Fig. 4 Geocenter difference between one-year arc analysis results and ITRF96.

ることにより、ITRF96と compatible な1年解 (地球基準座標系) を構築することができる。本稿では、このITRF96と compatible な1年解(以後1年解と呼ぶ)を用いて下里の座標を評価する。これは、各1年解の地心、スケール、方向をそろえることにより、下里の座標値が安定するからである。

次に、13年間の成果をひとつの地心座標系にまとめることを考える。このため、下里の座標推定誤差を重みとした最小自乗法により、下里の位置

を時間の一次関数で表した。この、一次関数で回帰させた結果を海洋測地成果2000 (MGC2000) と呼ぶことにする。Fig. 5は、解析から求めた下里の固定式レーザー測距装置不動点位置(下里の位置)とそれを一次関数で回帰させたMGC2000、及びITRF96とITRF97を直角座標系で示したものである。Fig. 6はWGS-84の楕円体(赤道半径: 6378137m, 扁平度: 1/298.257223563)を用いて測地座標に変換したものである。1992年以前については、解析から求めた各年の下里の位置と

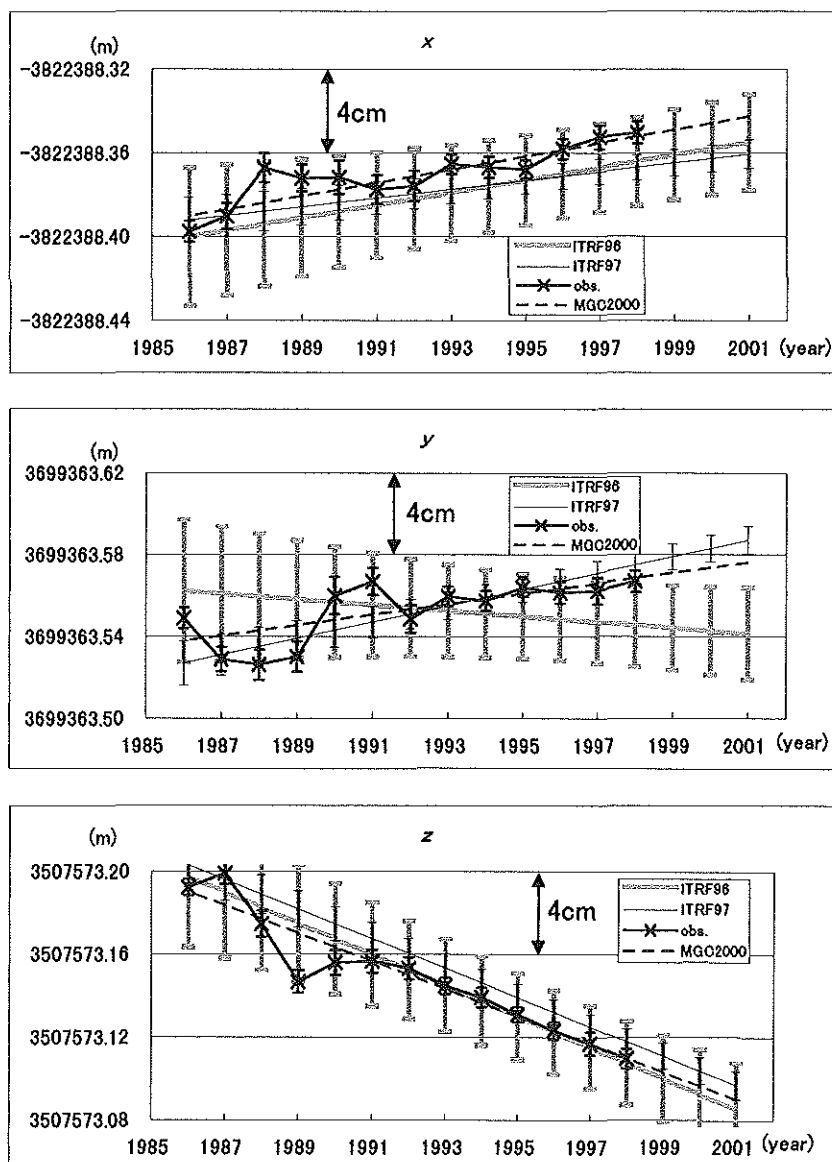


Fig. 5 Geocentric rectangular coordinate of the reference point of the Shimosato SLR station in one-year arc results, MGC2000, ITRF96 and ITRF97. The one-year arc results are adjusted to ITRF96 through 7-parameter transformation procedure.

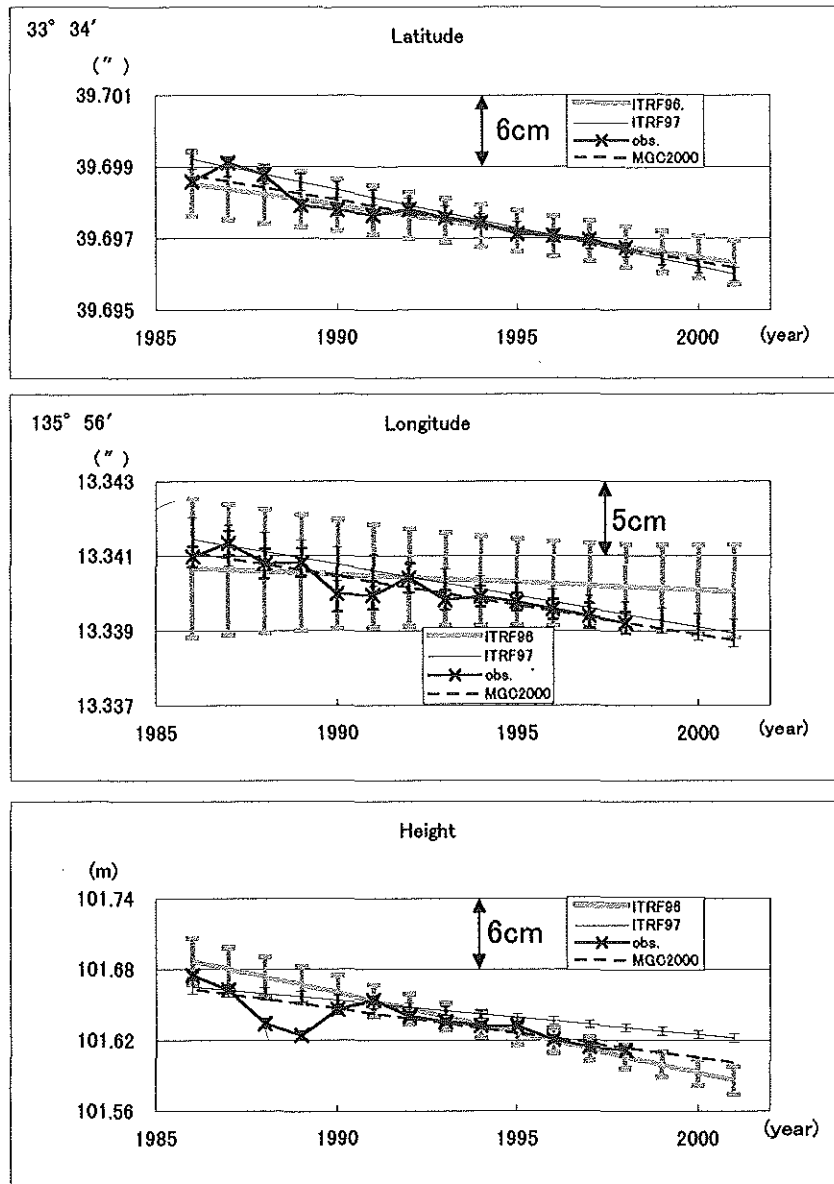


Fig. 6 Geodetic coordinate of the reference point of the Shimosato SLR station in one-year arc results, MGC2000, ITRF96 and ITRF97. The one-year arc results are adjusted to ITRF96 through 7-parameter transformation procedure.

MGC2000との差は1 cm程度であるが, LageosII が打ち上げられた1992年以降は5 mm以下であり, 非常に安定した結果が得られた。MGC2000は, 経緯度についてはITRF97により近く, 楕円体高についてはITRF96に近い。楕円体高がITRF96に近いのは, 下里のバイアス値をITRF96に合うように決定しているためと考えられ, この結果は妥当である。Table 2に, 1992年以降の各1年解とITRFの差のRMSを緯度, 経度, 楕円体高それぞれ

について示す。楕円体高を除くと本稿の成果はITRF97により近いことがわかる。特に, 経度方向については, RMSが4倍以上も改善される。これは, ITRF96の経度方向の速度がSLR成果と合わないためである。当然ながら, ITRF93, ITRF92など, 古い世界測地系との差は新しいものに比べて大きい。

MGC2000による下里レーザー測距装置不動点の位置は以下の一次式で表すことができる。

Table 2 RMS of difference between ITRF and Lageos one-year arc solution which are adjusted to ITRF96 through 7-parameter transformation procedure after 1992

	ITRF97	ITRF96	ITRF93	ITRF92
latitude	0.11mas	0.08mas	0.55mas	0.22mas
longitude	0.12mas	0.34mas	0.41mas	0.49mas
height	0.53cm	0.45cm	1.66cm	1.38cm

$$x_{fp} = -3822388.355 + 0.0032 \times (t - t_0) \text{ m}$$

$$y_{fp} = 3699363.566 + 0.0026 \times (t - t_0) \text{ m} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$z_{fp} = 3507573.117 - 0.0067 \times (t - t_0) \text{ m}$$

ただし、時刻 t は西暦(単位:年)、 t_0 は1997.0である。添え字 fp はレーザー測距装置の不動点を表す。

MGC2000における下里本土基準点(下里標石)の位置は、水路部観測報告第7号 p.106に記載された値(辰野・藤田, 1994)を用いて計算する。

$$x_H = x_{fp} + 14.960 \text{ m}$$

$$y_H = y_{fp} - 3.684 \text{ m} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$z_H = z_{fp} + 12.672 \text{ m}$$

添え字 H は本土基準点を表す。なお、この値については、その後の水路部観測報告第10号 p.120のGPSによる管理測量(Takanashi et al., 1997)でも同値と算出されている。

元期1997.0年における、下里レーザー測距装置不動点の位置は、

$$x_{fp} = -3822388.355 \text{ m}$$

$$y_{fp} = 3699363.566 \text{ m (元期: 1997.0)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$z_{fp} = 3507573.117 \text{ m}$$

本土基準点標石の位置は、

$$x_H = -3822373.395 \text{ m}$$

$$y_H = 3699359.882 \text{ m (元期: 1997.0)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$z_H = 3507585.789 \text{ m}$$

となる。

3. SLR による一次基準点「銚子」の位置決定

SLR のグローバルデータを解析し、下里-銚子の相対位置関係を決定した。本節では、解析に用いたデータ、解析方法、結果について述べる。

3.1 データ

一次基準点「銚子」における SLR 観測は、1996年1月5日から3月14日にかけて行われた。銚子において得られたデータを Table 3 に示す。銚子では、LageosI 及び LageosII が計26パス、Ajisai が64パス得られた。これをノーマルポイント(NP)化し、世界中の SLR 観測局で得られた SLR ノーマルポイントデータとともに GEODYN-II/SOLVE を用いて解析を行った。解析を行った期間は、LageosI が1996年1月17日~3月6日(総 NP 数: 5487, 下里 NP 数: 187, 銚子 NP 数: 35), LageosII が同年1月17日~3月6日(総 NP 数: 6594, 下里 NP 数: 308, 銚子 NP 数: 118), Ajisai が同年1月10日~3月6日(総 NP 数: 15145, 下里 NP 数: 1540, 銚子 NP 数: 1005)である。用いたグローバルステーションの数は25~26と前節に述べた1年解よりも多かった。これは、観測期間が短かったため、前節では除去した精度の低い観測局のデータも採用したためである。

Table 3 Used SLR data for Shimosato-Choshi baseline determination

satellite	year	global		Shimosato	Choshi
		no. of stn.	pass	pass	pass
Lageos I	Jan. 10, 1996~Mar. 6, 1996	25	929	23	8
Lageos II	Jan. 17, 1996~Mar. 6, 1996	26	569	33	18
Ajisai	Jan. 10, 1996~Mar. 6, 1996	26	609	81	64

3.2 解析結果

解析は、まず GEODYN-II を用いて、それぞれの衛星について2ヶ月の解析を行い、各衛星ごとに得られる偏微分係数ファイル (EMATRIX) をまとめて、SLR 観測点の座標とアークパラメータを SOLVE と用いて解いた。固定した観測局は Greenbelt (経度と緯度) と Maui (緯度) である。用いたモデル、定数については前節に述べたものと同一である。それ以外に、Ajisai については大気抵抗力を考慮している。大気密度モデルは、MSIS-86 (Hedin, 1987) を用いた。推定パラメータについては、太陽光輻射圧係数を30日ごとに推定している。Ajisai のアークパラメータについては、大気抵抗係数と経験的加速度を3日ごとに推定した。解析を行った後の O-C の RMS は、LageosI, LageosII, Ajisai それぞれにつき、2.6 cm, 1.4cm, 2.9cmであった。

この解析により、下里と銚子の値がそれぞれ決定されるが、銚子と下里の相対位置関係を成果とする。

$$\begin{aligned} x_{\text{銚子-下里}} &= -198944.001 \text{ m} \\ y_{\text{銚子-下里}} &= -425887.068 \text{ m} \quad \dots\dots\dots(6) \\ z_{\text{銚子-下里}} &= 194137.531 \text{ m} \end{aligned}$$

前節では、決定された地球基準座標系を ITRF と compatible にするために座標変換を行ったが、下里-銚子間の相対座標の結果については行わなかった。これは、相対座標には、座標系間の原点の差 (dx , dy , dz) は寄与せず、スケールと方向についても下里-銚子間の基線長が約500km と短く前節のようなグローバルな座標決定の場合と比べて10%以下の寄与しかないため、無視したものである。

また、上記の成果は、元期が1996.03であることに注意する必要がある。

4. GPS による一等三角点「東京大正」の位置

日本測地系と世界測地系の変換量を求めるためには、日本経緯度原点において、両者の座標を比較する必要がある。このため、日本経緯度原点-銚子間の相対位置関係を決定する必要がある。しか

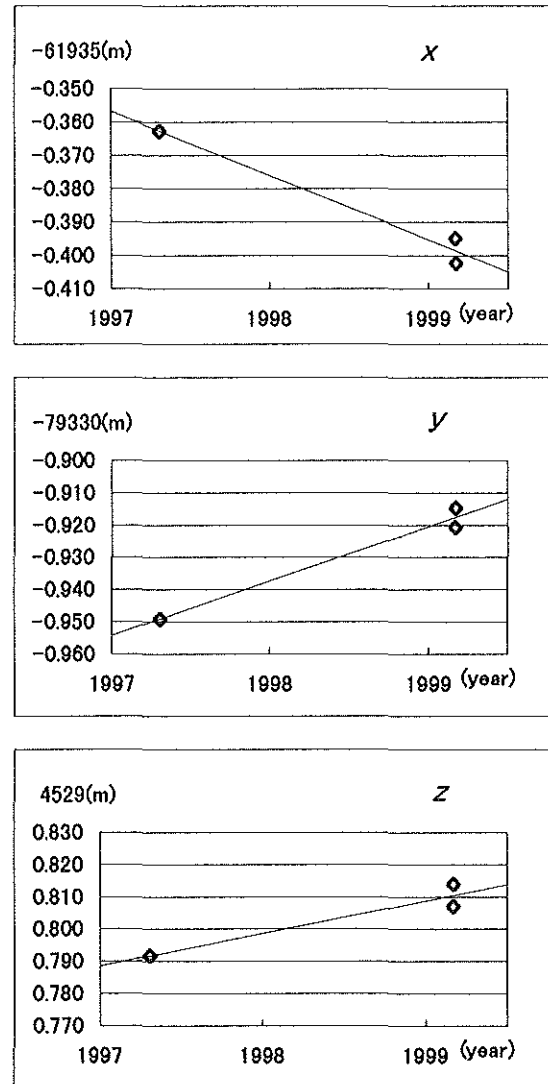


Fig. 7 Position of Tokyo-Taisho with respect to Choshi estimated from GPS observation at both sites in 1997 and 1999. The upper, the middle and the lower figures stand for x , y and z components, respectively.

し、現在、東京麻布にある日本経緯度原点は、ひとつのモニュメントであり、日本経緯度原点の座標とは若干ずれた場所に設置されていることが知られている。このため、日本経緯度原点から約80 mの距離にある一等三角点「東京大正」の位置をGPSにより銚子から測定した。この三角点は、日本測地系の座標が知られており、日本測地系の実質的な原点と考えることができる。

GPS 観測は、1997年4月22日、1999年3月2日、1999年3月4日にそれぞれ24時間観測を行った。

観測を行ったのは、一次基準点「銚子」、一等三角点「東京大正」及び下里本土基準点の3点である。これらのGPS同時観測データを、下里本土基準点を海洋測地成果に固定して、ベルニーズ基線解析ソフト(ver. 4.0)を使用して解析し、東京大正—銚子間の相対位置関係を算出した。Fig. 7は銚子—東京大正間のGPSによる基線決定の結果である。この3日間の観測結果から、銚子と東京大正のベクトルを時間の一次式で表すと、

$$\begin{aligned} x_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= +61935.357 + 0.0192 \times (t - t_0) \text{ m} \\ y_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= +79330.954 - 0.0169 \\ &\quad \times (t - t_0) \text{ m} \\ z_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= -4259.789 - 0.0101 \times (t - t_0) \text{ m} \end{aligned} \quad (7)$$

東京—銚子間は、太平洋プレートによる圧縮のため、距離は短くても比較的大きな相対速度を持っている。元期1997.0における相対位置関係は、

$$\begin{aligned} x_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= +61935.357 \text{ m} \\ y_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= +79330.954 \text{ m} \quad (\text{元期: } 1997.0) \quad \dots(8) \\ z_{\text{東京大正}-\text{銚子}} &= -4259.789 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。

5. 測地系変換パラメータの算出

前節まで述べた成果から一等三角点「東京大正」の世界測地系における位置が算出できる。

一方、国土地理院による東京大正の日本測地系における測量成果を差し引くと、世界測地系と日本測地系の変換パラメータが算出できる。

(4), (6), (8)式から、元期1997.0における一等三角点「東京大正」の世界測地系に基づく位置は、

$$\begin{aligned} x_{\text{東京大正}} &= -3959396.999 \text{ m} \\ y_{\text{東京大正}} &= +3352807.452 \text{ m} \quad (\text{元期: } 1997.0) \quad \dots(9) \\ z_{\text{東京大正}} &= +3697450.859 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。但し、下里—銚子の成果は元期が1996.03であるが、1997.0としている。このため、0.97年分の下里—銚子間の地殻変動が無視されている。

また、国土地理院による一等三角点「東京大正」の日本測地系における成果は、

$$\begin{aligned} \text{緯度} &= 35^\circ 39' 16.7000'' \\ \text{経度} &= 139^\circ 44' 43.3980'' \quad \dots\dots\dots(10) \\ \text{標高} &= \text{楕円体高} = 25.404 \text{ m} \end{aligned}$$

ただし、東京大正におけるジオイド高は0 mと仮定している。ベッセル楕円体を用いて直交座標系に変換すると、

$$\begin{aligned} x_{\text{東京大正改算}} &= -3959250.616 \text{ m} \\ y_{\text{東京大正改算}} &= +3352300.155 \text{ m} \quad \dots\dots\dots(11) \\ z_{\text{東京大正改算}} &= +3696770.415 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。
(9)-(11)から、世界測地系と日本測地系の変換パラメータは、

$$\begin{aligned} \Delta x_{\text{東京大正}} &= -146.383 \text{ m} \\ \Delta y_{\text{東京大正}} &= +507.298 \text{ m} \quad (\text{元期: } 1997.0) \quad \dots\dots(12) \\ \Delta z_{\text{東京大正}} &= +680.443 \text{ m} \end{aligned}$$

となる。
これは、日本測地系で用いているベッセル楕円体の中心位置を地球重心からのずれ量として地心座標値で表したものである。

6. まとめと考察

1986年から1998年にわたる13年間のLageosのグローバルデータを解析し、下里の位置を地心に準拠した座標系である世界測地系で決定した。Lageosのデータは、観測局の数、パス数、ノーマルポイント数など各年ともほぼ一定であり、安定した成果が得られた。

各1年解による座標系の決定精度は、地心については1992年以降は数mm、方向については1~2 cm、スケールで4 mm程度であった。地心については、ITRF96と数mmのバイアスがあった。

下里の座標の決定精度は、各1年解で1~2 cmであった。

本成果はITRF96と一貫性がある。しかし、下里の座標成果はITRF97により近い。

本稿では、ITRF94との関係を算出していないが、これは、ITRF94では下里の速度が与えられていないためである。ITRF94では、1993年に行った固定式レーザー測距装置のオーバーホールに起因する欠測時期と重なり、下里の速度が与えられていない。

本稿のLageosによる下里の世界測地系に基づく座標成果は、用いているデータの量、力学モデ

ル、解析手法など、いずれをとっても海洋測地成果に比べて優れており、MGC2000は海洋測地成果に代わるべき成果といえる。従来の座標と元期1990.0で比較すると、MGC2000—(海洋測地成果)は、

$$dx_{\text{MGC2000-海洋測地成果}} = -0.105 \text{ m}$$

$$dy_{\text{MGC2000-海洋測地成果}} = -0.034 \text{ m}$$

$$dz_{\text{MGC2000-海洋測地成果}} = -0.023 \text{ m}$$

であり、10cm程度の差がある。これは、基礎となる地球基準座標系が、海洋測地成果はSSC(CSR)86L07であり、MGC2000ではITRF96と異なること、解析手法が異なること等が原因と考えられるが、1990年代後半のLageosの成果がそれ以前に比べて良くなっていること、MGC2000では解析方法、データ量、用いている力学モデルの精度などが向上しており、以前の座標系の誤差に起因するものが大きいと考えられる。

銚子の位置は、これまでHYDRANGEAを用いた業務成果(松本他, 1997)、GEODYN-IIによる成果(藤田, 仙石, 1997a)がある。これらと今回の結果を比較すると、

$$dx_{\text{MGC2000-MMT}} = -0.007 \text{ m}$$

$$dy_{\text{MGC2000-MMT}} = 0.007 \text{ m}$$

$$dz_{\text{MGC2000-MMT}} = -0.035 \text{ m}$$

$$dx_{\text{MGC2000-FS}} = -0.039 \text{ m}$$

$$dy_{\text{MGC2000-FS}} = 0.008 \text{ m}$$

$$dz_{\text{MGC2000-FS}} = 0.014 \text{ m}$$

ただし、MMTは松本他を、FSは藤田・仙石の結果を表す。これらから、下里—銚子間の相対位置決定の精度は、3~4cmと考えられる。一方、下里の位置決定と下里—銚子の基線決定がともにSLRで行ったため、座標系が同一であることは大きなメリットである。

銚子—下里のSLRによる相対位置決定は、1996年の1~3月に行われており、元期が1996.03である。したがって、厳密に言えば、本稿の成果は0.97年分の銚子—下里間の地殻変動による影響を無視していることになる。しかし、銚子も下里もそれぞれ相対するプレート(太平洋プレートとフィリピン海プレート)による影響で、ユーラシ

アプレートに対して北西から西北西に動いていることが知られており、このための誤差は1cm程度と考えられる。例えば、Robaudo and Harrison (1993)によると下里、鹿島はユーラシアプレートに対して、それぞれ方位角296度、294度の方向に、毎年2.5cm、1.9cmの速度で動いており、両者の動きは極めて近い。鹿島と銚子は距離も近く、相対運動は小さいことが期待できるため、下里と銚子の相対速度も比較的小さいことが期待できる。また、銚子—東京大正のGPS観測の際に取得した下里のGPSデータを解析して求めた下里—銚子間の相対速度は年間1cm以下であった。

飛田(1997)は、VLBIとGPSを用いて、東京大正における変換パラメータを求めている。これは、鹿島のVLBI局のITRF94座標を用い、鹿島—東京大正間は、茨城、千葉、東京の電子基準点(GPS)の、1996年7月23日1日間の観測データから、網平均計算により決定している。

$$\Delta x_{\text{国土地理院}} = -146.414 \text{ m}$$

$$\Delta y_{\text{国土地理院}} = +507.337 \text{ m} \dots\dots\dots(13)$$

$$\Delta z_{\text{国土地理院}} = +680.507 \text{ m}$$

なお、一等三角点「東京大正」の日本測地系における成果は、本稿と飛田(1997)で同一である。

(12)と(13)では数cmの差があるが、これは、

- 1) 本稿ではITRF96に、飛田(1997)はITRF94に準拠していること、
- 2) 水路部はSLRとGPS、国土地理院はVLBIとGPS、と異なる技術を用いていること、
- 3) SLRによる銚子—下里間の位置決定が元期1997.0でないこと、
- 4) 地理院のGPS観測も1996年7月に行われており、元期が1997.0ではないこと、

等が原因と考えられる。また、ITRF94とITRF96では、座標系全体としてはほとんど差がないといわれているが、個々の観測局の座標値には数cmの差があるため、両者を比較する場合は注意する必要がある。さらに、SLR、VLBIの絶対的な位置決定精度は数cmと考えられ、VLBIについては原理的に地心座標系が得られないためSLRなどの衛星技術との結合によって地心座標系が実現されて

いる。こういった意味からも、両者は誤差の範囲で一致しているといえるだろう。

謝 辞

本成果は、下里水路観測所職員の努力の積み重ねの上に得られたものである。ここに深く感謝する。また、世界中の SLR 観測局と SLR のデータセンター（米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター-Crustal Dynamics Data Information System）のスタッフの方々のご尽力に感謝する。

参 考 文 献

- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard, Results and Analysis of the ITRF96, IERS TECHNICAL NOTE 24 (1998).
- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard, The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97), IERS TECHNICAL NOTE 27 (1999).
- 衛星測地室, 海図等に記載する測地系変換補正量の改正, 水路観測報告衛星測地編, 9, 付 1 (1996).
- 福良・藤田, 下里水路観測所 SLR データの測距バイアス解析, 水路部技報, 17, 51 (1999).
- 藤田・仙石, 「あじさい」SLR データ解析による一次基準点・下里間の基線ベクトル推定, 水路部研究報告, 33, 1 (1997a).
- 藤田・仙石, 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 (1997b).
- 藤田・久保岡・池田, 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, 108 (1998).
- Hedin, A.E., MSIS-86 thermospheric model, *J. Geophys. Res.*, 92, 4649, (1987).
- IERS, Annual Report for 1988, Observatoire de Paris, Paris (1989).
- Kanazawa, T., Transformation between WGS-84 and Tokyo Datum, *Data Report of Hydrogr. Obs., Series of Satellite Geodesy*, 1, 76 (1988).
- Kubo, Y., Establishment of satellite geodesy office, *Data Report of Hydrogr. Obs., Series of Satellite Geodesy*, 1, 1 (1988).
- 松本, 松下, 富山, 海洋測地網一次基準点の位置決定銚子, 水路部観測報告衛星測地編, 10, 42, (1997).
- Minster, J.B. and T.H. Jordan, Present-day plate motions, *J. Geophys. Res.*, 83, 5331 (1978).
- Robbins, J.W., D.E. Smith, and C. Ma, Horizontal crustal deformation and large scale plate motions inferred from space geodetic techniques, *Crustal Dynamics, Geodynamics 23*, p.21, American Geophysical Union, Washington D.C. (1993).
- Robaudo, S. and C.G.A. Harrison, Plate Tectonics from SLR and VLBI Global Data, *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics, Crustal Dynamics, Geodynamics 23*, p.51, American Geophysical Union, Washington D.C. (1993).
- Sasaki, M., Y. Ganeko, and Y. Harada, Satellite Laser Ranging System at Shimosato Hydrographic Observatory, *Data Report of Hydrogr. Obs., Series of Astronomy and Geodesy*, 17, 49 (1983).
- Sasaki, M., Algorithm for determination of satellite orbit and geodetic parameters by using laser ranging data and preliminary results of its application, *Rep. Hydrogr. Res.*, 19, 107 (1984).
- Sasaki, M. and A. Sengoku, SLR observation and data analysis made by the Hydrographic Department of Japan in the last decade and the motion of the Shimosato site, *Proceedings of the International Workshop for Reference Frame Establishment and Technical Development in Space Geodesy (iRiS '93 TOKYO)*, p.

Determination of the Position of Shimosato by LageosI and LageosII Long-arc Analysis and Transformation Parameters between Tokyo Datum and World Geodetic System

- 134, Communications Research Lab., Tokyo, Jan. 18 (1993).
- Sasaki, M., Study of the earth's dynamics by means of satellite laser ranging techniques, *Rep. Hydrogr. Res.*, **26**, 99 (1990).
- Sengoku, A., Collocation observation between two SLR stations at the Shimosato Hydrographic Observatory in 1987, *Data Report of Hydrographic Observations, Series of Satellite Geodesy*, **2**, 28 (1989).
- Sengoku, A., A plate motion study using Ajisai SLR data, *Earth Planets Space*, **50**, 61 (1998).
- Sengoku, A., M. Fujita, H. Fukura, and M. Sasaki, Range bias problem associated with SLR data at Shimosato, *Proceedings of the International Workshop on Geodetic Measurements by the collocation of Space Techniques ON Earth (GEMSTONE)*, January 25-28, 1999, Tokyo (1999a).
- Sengoku, A., M. Fujita, K. Matsumoto, K. Terai, M. Sasaki, Determination of Precise Positions of the Mainlands and Isolated islands in the Japanese Territory -A Review of Marine Geodetic Control Network Deployed by the Hydrographic Department-, *Rep. of Hydrogr. Res.*, **35**, 79 (1999b).
- Takanashi, Y., H. Noda, Y. Watanabe, Y. Sumiya, Management survey of the Mainland Control Point (Shimosato) by Using GPS, *Data Report of Hydrographic Observations, Series of Satellite Geodesy*, **10**, 120 (1997).
- 竹村, 下里水路観測所における測地・天文観測基準点の座標, 水路部観測報告天文測地編, **17**, 44 (1983).
- Tapley, B.D., R.J. Eanes, and B.E. Schutz, Earth rotation from laser ranging to LAGEOS, ERP (CSR) 85L07, *Rep. MERIT-COTES Campaign on Earth Rotation and Reference System, Part III*, Feissel (ed.), IHB, Paris, B67 (1986).
- 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, E.C. Pavlis, and R.G. Williamson, The JGM-3 Gravity Model, *XIX General Assembly of the European Geophysical Society*, Grenoble, France, April 25-29 (1994).
- 辰野・藤田, 海洋測地網本土基準点の位置決定, 水路部観測報告衛星測地編, **7**, 102 (1994).
- 飛田, 最近の測地座標系と座標変換についての考察, 測地学会誌, **43**, 231 (1997).
- Watkins, M.M., Tracking station coordinates and their temporal evolution as determined from laser ranging to the LAGEOS satellite, CSR-90-1, Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX, U.S.A. (1990).