

「LAGEOS」SLR データ解析による下里の移動速度の再計算†

佐藤まりこ*¹, 松下 優*², 藤田雅之*³, 仙石 新*⁴

Re-estimation of the velocity of Simosato from analysis of LAGEOS SLR data†

Mariko SATO*¹, Hiroshi MATSUSHITA*², Masayuki FUJITA*³ and Arata SENGOKU*⁴

Abstract

Simosato Hydrographic Observatory in Wakayama Prefecture has been carrying out Satellite Laser Ranging (SLR) observation for AJISAI, LAGEOS-1, LAGEOS-2, and other geodetic and Earth-observation satellites, since 1982. More than 26,000 passes have been obtained.

In this report, we re-estimated the velocity of Simosato from LAGEOS SLR data for 15 years. As a result, the velocity of 2.9 cm/year in direction to 294° N relative to the Eurasian plate was obtained. This velocity is close to the subduction velocity of the Philippine Sea plate. This indicates that the interplate coupling at this region is strong. In addition, our result is consistent with other researches using SLR data (e.g., ITRF 2000, ITRF 2005 SLR rescaled).

1 はじめに

海洋測地網の本土基準点である下里水路観測所(和歌山県那智勝浦町)では, 1982 年以来, 国産の測地衛星「AJISAI」や米国の測地衛星「LAGEOS-1」「LAGEOS-2」等の人工衛星レーザー測距(SLR: Satellite Laser Ranging)観測を行っており, 現在までの観測回数は 26,000 パスを超えている (Fig. 1).

これまでに, 2002 年 4 月に経緯度の基準を世界測地系への移行するため, 日本測地系から世界測地系への変換パラメータを決定(仙石・他, 2000)して「海洋測地成果 2000」として取りまとめた。また, 1988 年から 2001 年まで行わ

れた離島や本土の海洋測地網一次基準点等 15ヶ所における可搬式 SLR 装置によるキャンペーン観測では, 島嶼等の精密な位置決定のための本土基準点としての役割を果たした(例えば, Sengoku, 1999)。

長期にわたる定常的な SLR 観測は, 長波長の地球重力場とその時間変動の決定に貢献し, 地球科学の基礎となる国際地球基準座標系(ITRF: International Terrestrial Reference Frame)の構築に寄与しているとともに, グローバルな視点でプレート運動を観測することを可能とし, 地震の発生メカニズムの解明等の地球科学の理解にも貢献している。

†Received December 26, 2008 ; Accepted January 29, 2009

*1 航法測地室 Geodesy and Geophysics Office

*2 第二管区海上保安本部 2nd Regional Coast Guard Headquarters

*3 技術・国際課 Technology Planning & International Affairs Division

*4 海洋調査課 Hydrographic Surveys Division



Fig. 1 Satellite Laser Ranging at the Simosato Hydrographic Observatory.

SLR データからプレート運動を求める研究は、1970 年代末以来、数多く行われており（例えば、Smith et al., 1979, Tapley et al., 1985 など）、その大半は世界中の SLR 観測局で日々多くのデータが得られている米国の測地衛星「LAGEOS」の SLR データを使用したものである。

Sengoku (1998) は、1986 年から 1994 年までの 8 年間の「AJISAI」SLR データを用いて、下里を含む SLR 観測局のプレート運動を求め、下里のユーラシアプレート安定域に対する移動速度 (291° , 3.2 cm/year) を報告した（以下、本稿では、方位角を北から時計回りの角度として定義する）。「AJISAI」は、「LAGEOS」と比べて衛星の軌道高度が低く、また形状も大きく表面力の影響を大きく受けるため、衛星に働く力のモデル化が難しく、地球基準座標系の決定には不利であるが、「LAGEOS」SLR データ等から求められるプレート運動と統合的な結果が得られることを示した。この成果は、当庁が行っている GPS 地殻変動監視観測や海底地殻変動観測においても本土基準点の動きとして、現在でも幅広く活用されている。

今般、Sengoku (1998) による移動速度の推定から 10 年が経過したことから、近年の「LAGEOS」SLR データを用いて下里のユーラシアプレート安定域に対する移動速度の再計算を

行ったので、その結果について報告する。

2 SLR データ解析

まずはじめに、SLR データ解析について述べる。

解析に用いたデータは、1993 年から 2007 年までに世界中の SLR 観測局で取得された LAGEOS-1 及び LAGEOS-2 のノーマルポイント (NP) データである。年ごとの観測局数、パス数、NP データ数を Table. 1 に示す。観測局数は年平均 37 局であり、2005 年以降若干減少しているものの、パス数及び NP データ数は増加傾向にあり、現在でも世界中で精力的に観測されていることが分かる。

SLR データの解析は、NASA ゴダード宇宙飛行センター (GSFC) で開発された GEODYN-II/SOLVE (Eddy et al., 1990 ; Ullman, 1992) を用いた多衛星結合解析により行い、各年における各観測局の位置 (1 年解) を推定した (藤田・仙石, 1997)。GEODYN-II の解析に用いたモデルは概ね次のとおりである。詳細については、藤田・他 (1998)、松下・他 (2005 a) を参照されたい。

- ・重力モデル：GGM 01 C (Tapley et al., 2003)
- ・海洋潮汐荷重変形：IERS Conventions (McCarthy, 1996)

Table. 1 Summary of global LAGEOS data from 1993 to 2007.

Year	LAGEOS-1			LAGEOS-2		
	Station	Pass	NP	Station	Pass	NP
1993	40	5,793	68,291	41	4,847	67,760
1994	40	4,792	54,454	39	4,276	54,698
1995	41	5,100	58,076	39	4,436	58,415
1996	38	5,359	57,402	39	4,677	56,639
1997	34	5,084	52,985	33	4,657	55,641
1998	38	5,930	65,824	39	4,948	59,732
1999	36	7,208	76,274	35	5,928	69,485
2000	37	6,462	65,955	38	5,610	65,016
2001	39	6,946	73,542	39	5,983	71,538
2002	37	7,169	73,314	38	6,037	66,382
2003	40	7,190	76,312	39	6,577	76,483
2004	40	7,074	76,386	40	5,914	69,774
2005	35	8,040	94,059	35	6,460	82,421
2006	31	8,414	97,886	31	7,393	96,817
2007	32	9,017	101,632	32	7,299	89,202
Ave.	37	6,639	72,826	37	5,669	69,334

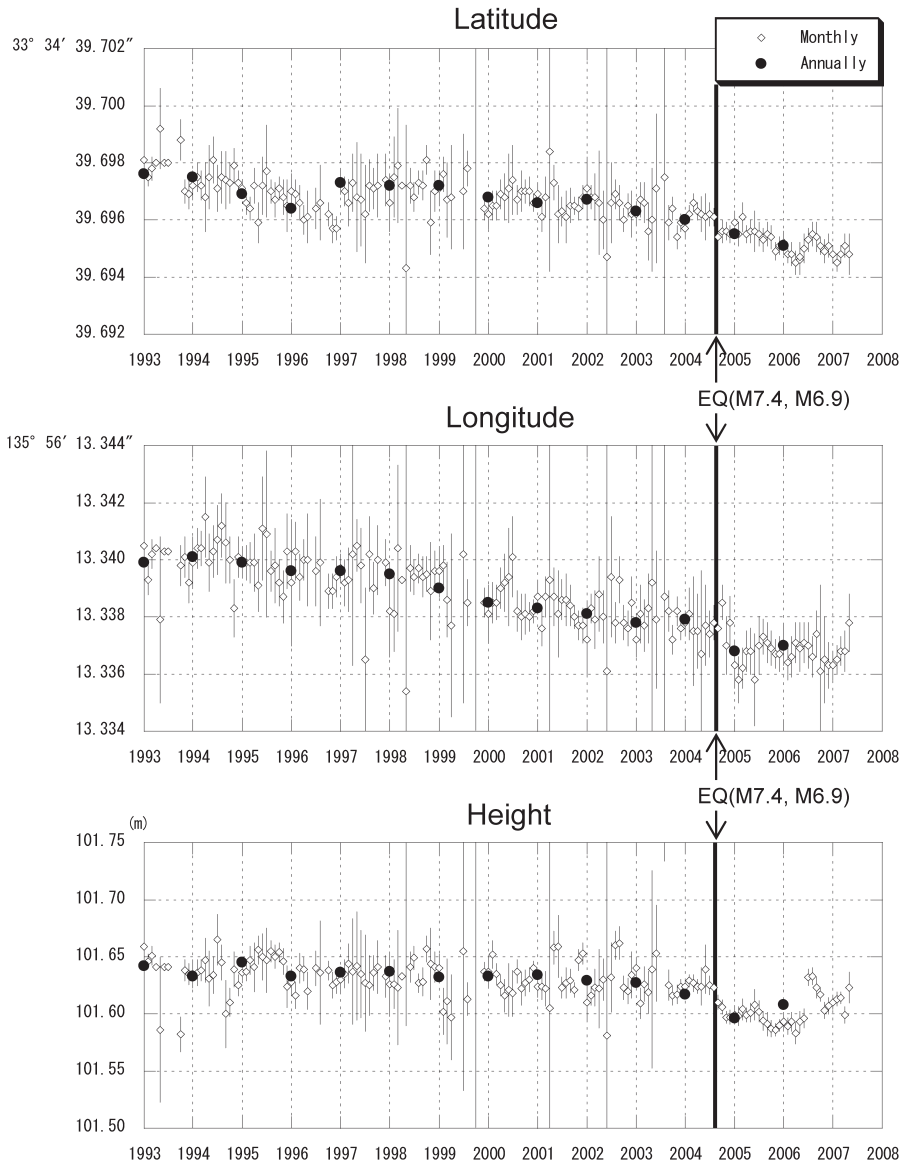


Fig. 2 Time series of estimated coordinate of Simosato station. Large earthquakes (M 7.4, M 6.9) occurred about 100 km southeast of Simosato on September 5th, 2004.

- ・地球回転パラメータ：IERS Bulletine B の最終値
- ・基準座標系：ITRF 2000 (Boucher et al., 2004)
- ・解析で固定した座標及び速度場：ITRF 2000 で与えられた米国メリーランド州の Greenbelt (7105)局の経緯度とその速度, 英国の Herstmonceux (7840)局の緯度とその速度.

Greenbelt局と Herstmonceux局は, プレート境界から十分に離れておりプレート内の安定域にあることからほぼ一様な動きをしているとみなすことができ, また解析期間中十分なデータ量が取

得されていることから, 座標を固定する局として妥当と判断している.

解析結果の一例として, 下里の経緯度及び楕円体高の推移を Fig.2 に示す. 参考として1ヶ月解(1ヶ月ごとの座標値)も併せて示した. Fig.2 より, 1ヶ月解にはばらつきが見られるが, 1年解では非常に安定していることが分かる. 2004年9月5日には, 下里の南東約100kmの海域でM7.4及びM6.9の地震(2004年紀伊半島南東沖地震)が発生し, この地震に伴う地殻変動として南に2cm, 1~2cmの沈降が報告されている

(松下他, 2005).

3 移動速度の算出

3.1 算出方法

移動速度の算出は、観測局間のアーク長の変化率を使用する方法で行った。アーク長とは、地球を半径が赤道半径に等しい球と仮定したときの観測局間の球面上の距離であり、次の式で表わされる (Fig. 3).

$$l = a_e \Psi_g$$

$$= a_e \cos^{-1}(\sin\phi_1 \sin\phi_2 + \cos\phi_1 \cos\phi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2))$$

ここで、 a_e は地球の赤道半径、 Ψ_g は観測局間の地心角度、 ϕ は観測局の地心緯度、 λ は観測局の地心経度である。通常の SLR 解析で得られる座標の時系列には、座標系の原点 (地心)、方向、スケールの不一致による誤差が含まれているが、アーク長は座標系の方向とスケールの誤差による影響を受けないため、より安定した移動速度を求めることができる。さらに、アーク長の変化率は、観測局の水平速度のみに依存し、レンジバイアス等により生じる観測局位置誤差の鉛直成分の影響を受けないという利点があり、プレート運動のような水平速度を求めるのに適している (Sengoku, 1998)。なお、第2節で得られた1年ごとの座標系の地心のばらつきはたかだか1 cm 程度であり、アーク長に与える影響は小さいと考

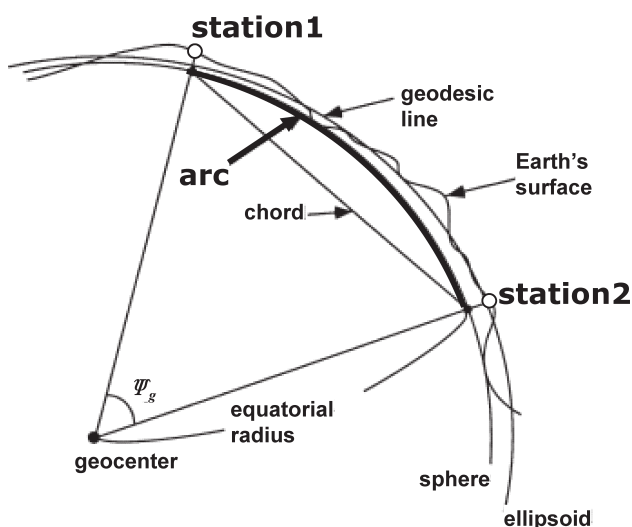


Fig. 3 Definition of arc between station 1 and station 2 (Sengoku, 1998).

えられるため、本稿では各1年解に対する地心補正は行っていない。

具体的には、以下の手順で移動速度を算出した。

- ①各観測局の観測期間、データ量、1年解の安定性等から、移動速度の算出に使用する観測局を選定する。
- ②年ごとに2局間のアーク長を全ての組み合わせについて求め、直線回帰により、それぞれのアーク長の変化率を計算する。
- ③アーク長の変化率から、最小二乗法により、各観測局の絶対速度 (ここでは、no-net-rotation (NNR) 系に基づく速度を便宜的にこう呼ぶ) を推定する。
- ④③で得られた絶対速度から、地質学的に求められたプレート運動モデル (NNR NUVEL-1 A: DeMets et al., 1994) で計算される速度を差し引く。

なお、③の速度の推定においては、プレート内の安定域に位置し、NNR NUVEL-1 A で表わされるプレート運動とほぼ一致した動きをしている米国メリーランド州の Greenbelt (7105) 局の速度、英国の Herstmonceux (7840) 局の南北方向の速度を、同モデルに整合的な ITRF 2000 (Boucher et al., 2004) で与えられている速度に固定した。これにより、ここで求めた速度は、定義上、no-net-rotation (NNR) 系に基づく速度と考えることができる。その量的な整合性の評価については3.4で議論する。

また、④で得られる速度は、言い換えると、各観測局の位置するプレートが仮想的に剛体だとしたときの速度と観測された速度との差であり、ユーラシアプレート上にある下里では、この速度が本稿の目的であるユーラシアプレート安定域に対する移動速度となる。

3.2 観測局及び観測期間の選定

第2節で得られた1993年から2007年までの各観測局の1年解の時系列から、5年以上安定した1年解が得られていることや観測局の幾何学的配

Table. 2 List of SLR stations used for the estimation of velocities.

ID	Station	Country	Plate*	Period
1884	Riga	Latvia	EU	1995-2007
7080	McDonald	United States	NA	1993-2007
7090	Yarragadee	Australia	AU	1993-2007
7105	Greenbelt	United States	NA	1993-2007
7110	Monument Peak	United States	PA	1993-2003
7124	Tahiti	French Polynesia	PA	1998-2007
7210	Haleakala	United States	PA	1993-2004
7237	Changchun	China	EU	1996-2007
7249	Beijing	China	EU	1996-2007
7403	Arequipa	Peru	SA	1995-2000, 2002-2007
7501	Hartebeesthoek	South Africa	AF	2000-2007
7806	Metsahovi	Finland	EU	1998-2004
7810	Zimmerwald	Switzerland	EU	1996-2007
7811	Borowiec	Poland	EU	1995-2007
7832	Riyadh	Saudi Arabia	AR	2001-2007
7835	Grasse	France	EU	1993-2005
7836	Potsdam	Germany	EU	1993-2004
7837	Shanghai	China	EU	1997-2007
7838	Simosato	Japan	EU	1993-2004
7839	Graz	Austria	EU	1993-2007
7840	Herstmonceux	United Kingdom	EU	1993-2007
7845	Grasse	France	EU	1998-2004
7849	Mt.Stromlo	Australia	AU	1998-2003
8834	Wetzell	Germany	EU	1993-2007

*EU: Eurasian plate, NA: North American plate, PA: Pacific plate, AU: Australian plate, SA: South American plate, AR: Arabian plate, AF: African plate

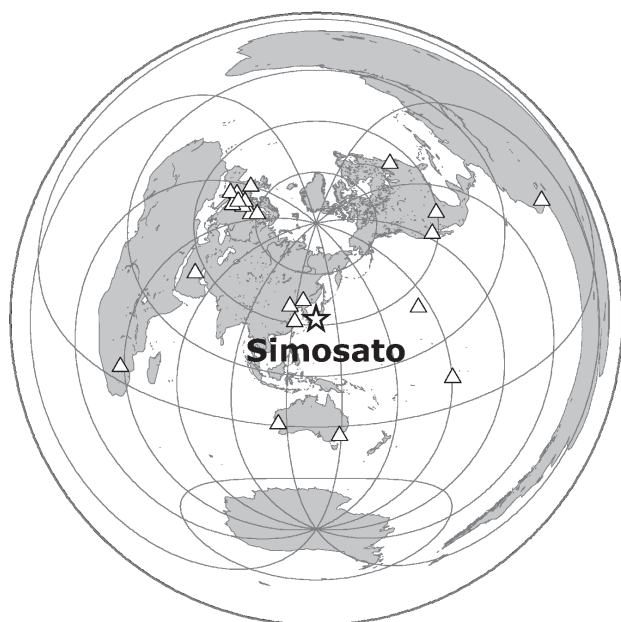


Fig. 4 Locations of SLR stations used for velocity estimation.

置等を考慮して、移動速度の算出に使用する観測局 24 局を選定した (Table. 2 及び Fig. 4). また、観測が行われていてもデータが少ない等の理由により、1 年解のばらつきが大きい期間は除外しており、Table. 2 には移動速度の算出に使用した期間も示した。

先に述べたように、下里 (7838) 局の近傍では、2004 年 9 月 5 日に紀伊半島南東沖地震 (M 7.4, M 6.9) が発生し、2 cm 程度の地殻変動が検出された (松下他, 2005). 2004 年の 1 年解については、1 年分のデータに占める地震後のデータが少なく、2004 年の 1 年解への地震の影響は小さいと考えられることから、移動速度の算出に使用した。2005 年以降の 1 年解には、この地震に伴う地殻変動に加え、測距値の較正方法の一時的な変更や信号の検出方法の変更等による人為的な影響が反映されている可能性が高いため、移動速度の算出には使用していない。また、Arequipa (7403) 局は、2001 年 6 月 23 日にペルー南部地震 (M

8.1)が発生したため、1年解が安定している1995年から2000年までの解を使用した。ただし、Hartebeesthoek(7501)局は2000年に観測を開始しているため、Arequipa(7403)局とHartebeesthoek(7501)局とのアーク長変化率を求めるときのみ、2002年から2007年までの1年解を使用した。

移動速度の算出に使用した観測局はヨーロッパには多く集中しているが、南米、南アフリカ、オーストラリアの観測局を採用し、できるだけ異なるプレート上の観測局を使うよう努めた。

3.3 アーク長変化率

次に、3.2で選定した24局の観測局について、2局間のアーク長を年ごとに全ての組み合わせで求め、直線回帰により、各アーク長の変化率を計算した。アーク長の組み合わせの数は276で、アーク長変化率の推定誤差は平均0.11 cm/yearである。

一例として、下里と各観測局とのアーク長変化率をTable.3に示す。アーク長変化率の推定誤差は平均0.08 cm/yearで、全アークの平均より小さい。McDonald(7080)局とArequipa(7403)局は下里とのアーク長が若干伸びているが、それ以外の観測局は2~7 cm/yearの速度で縮んでいる。下里との変化率が最も大きいのはオーストラリアのYarragadee(7090)局で-7.3 cm/year、最も小さいのはMcDonald(7080)局で0.3 cm/yearである。

3.4 絶対速度の推定

3.3のアーク長の変化率から最小二乗法により各観測局の絶対速度(no-net-rotation(NNR)系の速度)を求めた。速度の推定にあたっては、米国メリーランド州のGreenbelt(7105)局の速度及び英国のHerstmonceux(7840)局の南北方向の速度をITRF 2000で与えられている速度に固定した。絶対速度の推定結果をTable.4及びFig.5に

Table.3 Arc length rates between Simosato and other SLR stations.

Arc	Rate (cm/year)	Sigma (cm/year)	Plate
Simosato - Changchun	-2.65	0.05	EU-EU
Simosato - Beijing	-4.26	0.12	EU-EU
Simosato - Shanghai	-3.40	0.06	EU-EU
Simosato - Riga	-2.33	0.12	EU-EU
Simosato - Metsahovi	-2.56	0.16	EU-EU
Simosato - Zimmerwald	-2.50	0.04	EU-EU
Simosato - Borowiec	-2.50	0.10	EU-EU
Simosato - Grasse(7835)	-2.65	0.06	EU-EU
Simosato - Potsdam	-2.48	0.05	EU-EU
Simosato - Graz	-2.73	0.05	EU-EU
Simosato - Herstmonceux	-2.21	0.04	EU-EU
Simosato - Grasse(7845)	-2.55	0.17	EU-EU
Simosato - Wettzell	-2.54	0.06	EU-EU
Simosato - McDonald	0.33	0.04	EU-NA
Simosato - Greenbelt	-0.40	0.07	EU-NA
Simosato - Monument Peak	-3.28	0.04	EU-PA
Simosato - Tahiti	-6.93	0.11	EU-PA
Simosato - Haleakala	-6.29	0.04	EU-PA
Simosato - Yarragadee	-7.32	0.03	EU-AU
Simosato - Mt.Stromlo	-4.85	0.14	EU-AU
Simosato - Arequipa	0.69	0.13	EU-SA
Simosato - Hartebeesthoek	-3.10	0.10	EU-AF
Simosato - Riyadh	-4.68	0.09	EU-AR

Table 4 Estimated velocities and the differences from velocities of ITRF 2000, ITRF 2005 (SLR rescaled) and NUVEL-1A. (unit : cm/year)

ID	Station	This study				ITRF2000		ITRF2005(slr)		NUVEL-1A		vs ITRF2000		vs ITRF2005		vs NUVEL-1A		Plate
		Vn	Sigma	Ve	Sigma	Vn	Ve	Vn	Ve	Vn	Ve	dVn	dVe	dVn	dVe	dVn	dVe	
7838	Simosato	-0.37	0.02	-0.60	0.03	-0.53	-0.55	-0.48	-0.74	-1.53	2.01	0.16	-0.05	0.11	0.14	1.16	-2.61	EU
7237	Changchun	-1.19	0.03	2.52	0.03	-1.07	2.26	-1.12	2.57	-1.39	2.06	-0.12	0.26	-0.07	-0.05	0.20	0.46	EU
7249	Beijing	-1.72	0.04	3.32	0.04	-2.14	3.38	-1.09	3.01	-1.23	2.25	0.42	-0.06	-0.63	0.31	-0.49	1.07	EU
7837	Shanghai	-1.31	0.03	3.19	0.03	-1.47	3.21	-1.29	3.21	-1.33	2.23	0.16	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.96	EU
1884	Riga	1.17	0.04	2.07	0.03	1.24	2.10	1.33	2.05	1.14	2.10	-0.07	-0.03	-0.16	0.02	0.03	-0.03	EU
7806	Metsahovi	1.52	0.04	2.16	0.04	1.17	2.02	1.16	2.24	1.13	2.04	0.35	0.14	0.36	-0.08	0.39	0.12	EU
7810	Zimmerwald	1.60	0.02	2.00	0.02	1.51	2.01	1.64	2.02	1.43	1.97	0.09	-0.01	-0.04	-0.02	0.17	0.03	EU
7811	Borowiec	1.50	0.03	1.98	0.03	1.37	2.04	1.42	1.99	1.27	2.06	0.13	-0.06	0.08	-0.01	0.23	-0.08	EU
7835	Grasse	1.64	0.02	2.02	0.02	1.47	2.03	1.64	2.01	1.44	2.01	0.17	-0.01	0.00	0.01	0.20	0.01	EU
7836	Potsdam	1.59	0.02	1.94	0.02	1.42	1.93	1.50	1.88	1.34	1.98	0.17	0.01	0.09	0.06	0.25	-0.04	EU
7839	Graz	1.57	0.02	2.17	0.02	1.45	2.21	1.53	2.15	1.30	2.11	0.12	-0.04	0.04	0.02	0.27	0.06	EU
7840	Herstmonceux*	1.58	—	1.70	0.01	1.58	1.81	1.63	1.73	1.52	1.76	—	-0.11	-0.05	-0.03	0.06	-0.06	EU
7845	Grasse	1.57	0.03	2.17	0.02	1.47	2.03	1.55	2.02	1.44	2.01	0.10	0.14	0.02	0.15	0.13	0.16	EU
8834	Wetzell	1.56	0.02	1.99	0.02	1.44	2.03	1.56	1.97	1.35	2.03	0.12	-0.04	0.00	0.02	0.21	-0.04	EU
7080	McDonald	-0.67	0.03	-1.17	0.02	-0.72	-1.21	-0.57	-1.22	-0.72	-1.19	0.05	0.04	-0.10	0.05	0.05	0.02	NA
7105	Greenbelt*	0.28	—	-1.44	—	0.28	-1.44	0.36	-1.44	0.36	-1.50	—	—	-0.08	0.00	-0.08	0.06	NA
7110	Monument Peak	1.70	0.03	-3.74	0.02	1.72	-3.88	1.77	-3.86	2.23	-4.08	-0.02	0.14	-0.07	0.12	-0.53	0.34	PA
7124	Tahiti	3.22	0.03	-6.58	0.04	3.17	-6.19	3.39	-6.70	3.15	-6.28	0.05	-0.39	-0.17	0.12	0.07	-0.30	PA
7210	Haleakala	3.32	0.03	-6.11	0.03	3.33	-6.11	3.38	-6.17	3.21	-5.83	-0.01	0.00	-0.06	0.06	0.11	-0.28	PA
7090	Yarragadee	5.84	0.02	3.94	0.02	5.59	3.91	5.76	3.90	5.91	3.90	0.25	0.03	0.08	0.04	-0.07	0.04	AU
7849	Mt.Stromlo	5.04	0.05	1.93	0.03	5.46	1.92	5.57	1.85	5.37	1.78	-0.42	0.01	-0.53	0.08	-0.33	0.15	AU
7403	Arequipa	-0.04	0.07	0.41	0.09	1.45	1.09	1.50	1.15	0.93	-0.33	-1.49	-0.68	-1.54	-0.74	-0.97	0.74	SA
7832	Riyadh	2.91	0.03	3.16	0.03	0.66	2.25	3.00	3.20	3.32	2.78	2.25	0.91	-0.09	-0.04	-0.41	0.38	AR
7501	Hartebeesthoek	1.90	0.03	1.94	0.03	1.79	1.81	1.84	1.87	2.01	2.07	0.11	0.13	0.06	0.07	-0.11	-0.13	AF

* Vn, Ve of Greenbelt and Vn of Herstmonceux are fixed to the velocities of ITRF2000.

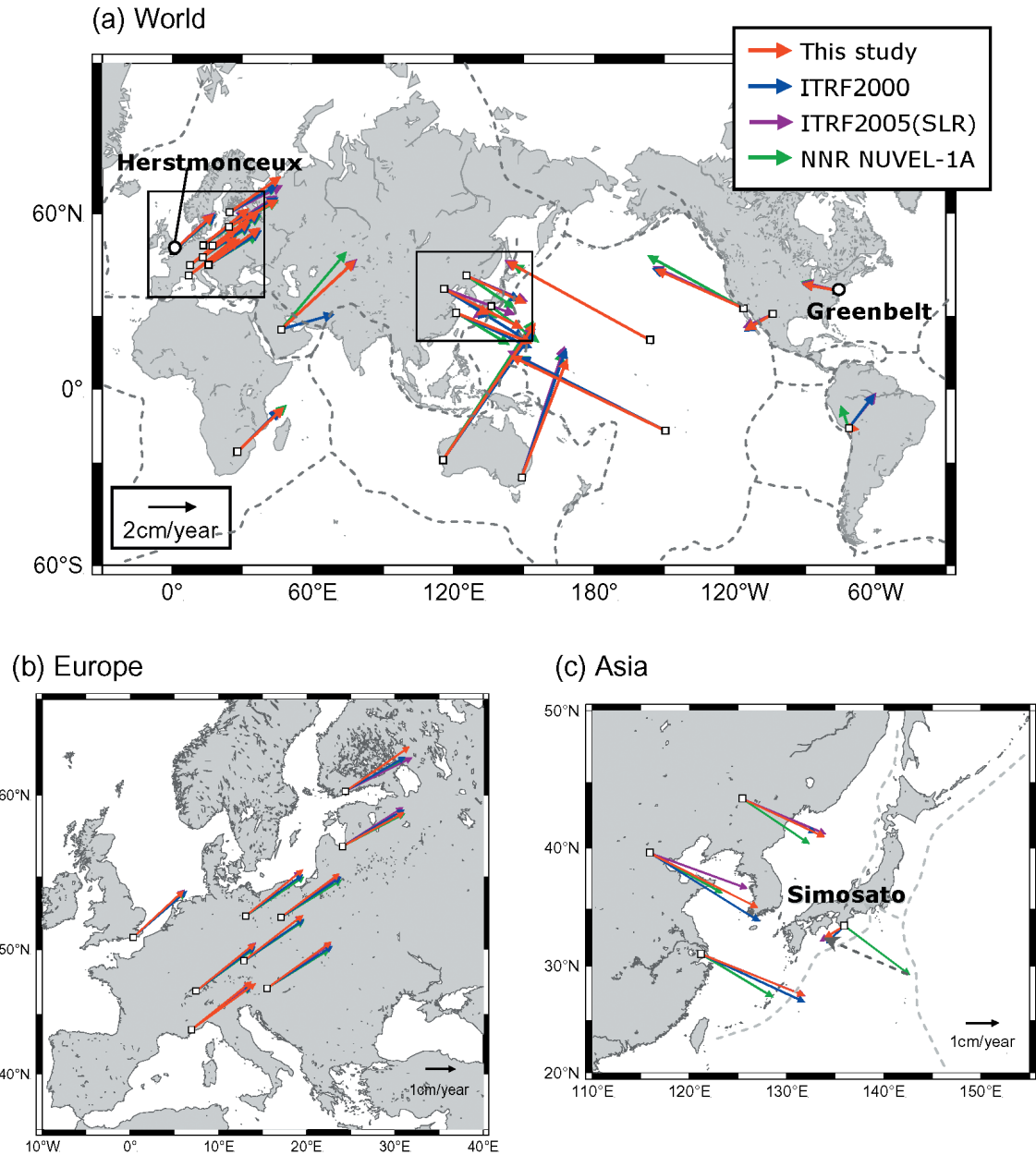


Fig. 5 Velocity vectors of SLR station : (a) World, (b) Europe, (c) Asia. Red arrows, blue arrows, purple arrows and green arrows show the estimated velocities, velocities of ITRF 2000, ITRF 2005 (SLR rescaled) and NUVEL-1 A, respectively.

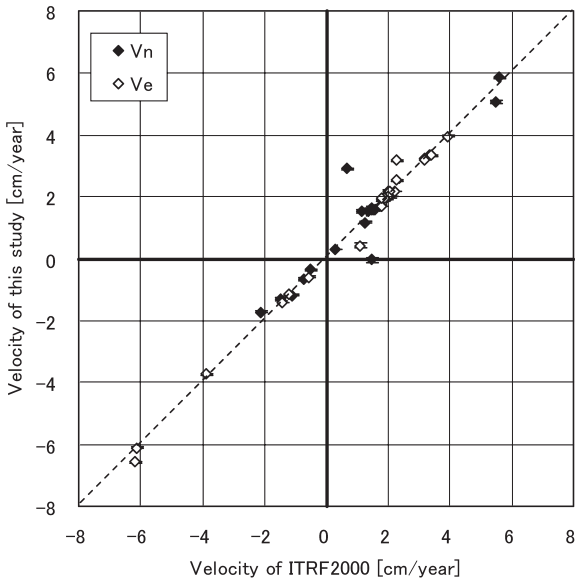
示す。なお、Table. 4 及び Fig. 5 には、比較のため、ITRF 2000, ITRF 2005 (SLR rescaled, Altamimi et al., 2007), NUVEL-1 A による速度及びそれぞれの速度と今回推定された速度との差も併せて示している。

絶対速度の推定誤差は、南北方向、東西方向ともに平均 0.03 cm/year であり、南半球にあるオーストラリアの Mt. Stromlo (7849) 局とペルーの Arequipa (7403) 局ではやや大きいものの、全

ての観測局について 0.1 cm/year 以内である。

この結果を ITRF 2000 及び ITRF 2005 (SLR rescaled) による速度と比較すると、一部の観測局を除き、差は 0.1~0.2 cm/year と非常に良い一致を示していることが分かる。Riyadh (7832) 局では、ITRF 2000 による速度との差が 2 cm/year 以上あるが、ITRF 2005 (SLR rescaled) で速度が改善され、我々の結果との差はほとんどなくなった。一方、Arequipa (7403) 局では、ITRF 2000, ITRF

(a) ITRF2000



(b) ITRF2005 SLR rescaled

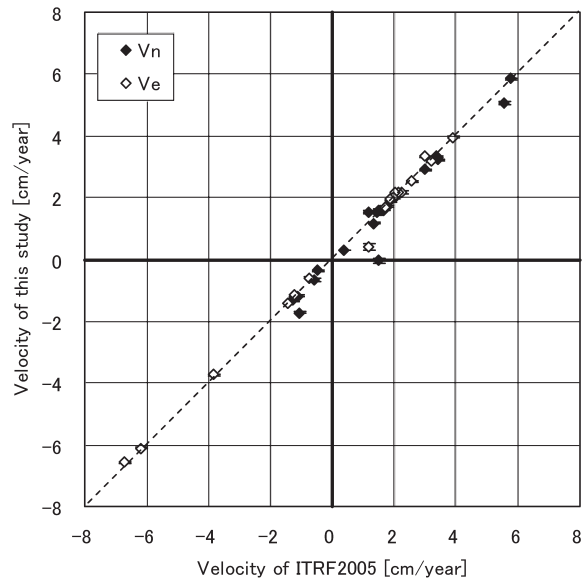


Fig. 6 Correlations between estimated velocities and (a) ITRF 2000 / (b) ITRF 2005 (SLR rescaled).

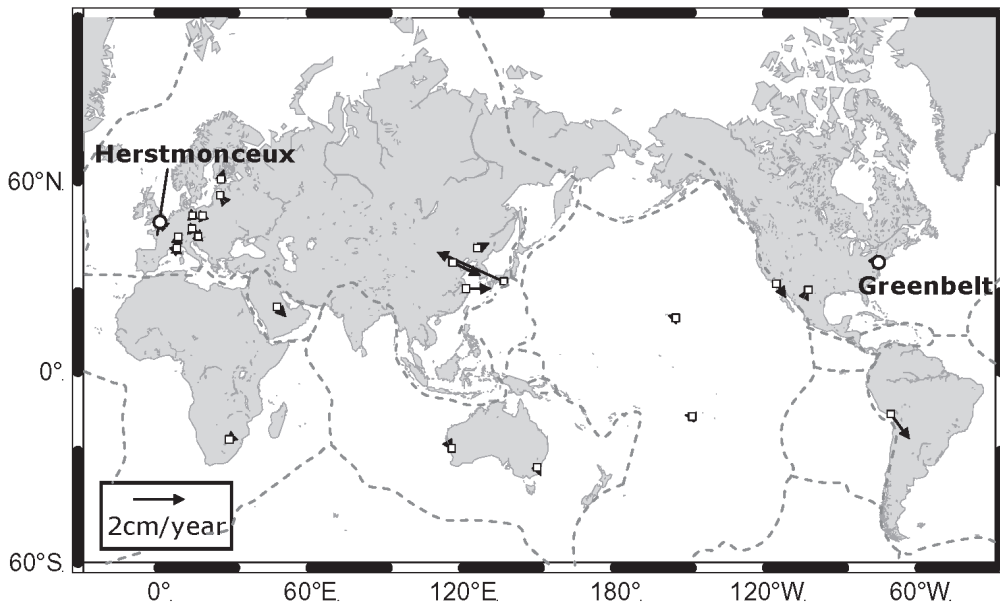


Fig. 7 Differences between estimated velocities and velocities calculated from NUVEL-1 A.

2005 (SLR rescaled) とともに推定された速度との差が大きい。これは、本稿で用いた Arequipa (7403) 局の 1 年解の期間が 5 年と短いことや他の観測局に比べて 1 年解のばらつきが大きいことが影響している可能性があるが、今後慎重に検討していきたい。また、ITRF 2000, ITRF 2005 (SLR rescaled) の速度と今回推定された速度との相関を

Fig. 6 に示す。いずれも相関係数は 0.95 以上と非常に強い相関を示しており、相対的には ITRF 2005 (SLR rescaled) の方が推定結果と合っている。

次に、推定された絶対速度を地質学的に求められたプレート運動モデルである NUVEL-1 A と比較する。絶対速度と NUVEL-1 A による速度との

差を Fig. 7 に示す. Table. 4 及び Fig. 7 より, プレート内部に位置しているヨーロッパや南アフリカ, オーストラリア等の観測局では, NUVEL-1 A との差が 0.2 cm/year 程度と小さく, SLR データによる絶対速度の推定結果は NUVEL-1 A と良い一致を示していることが分かる. プレート境界付近に位置する観測局では, NUVEL-1 A による速度との差が大きいが, この差は隣接するプレートとの相互作用を示唆しており, 次節で取り上げることとする.

以上より, 推定された絶対速度は, ITRF 2000, ITRF 2005 (SLR rescaled) による速度及び NUVEL-1 A による速度 (プレート境界付近を除く) と調和的であることが示された.

3.5 プレート境界付近に位置する観測局の NUVEL-1 A に対する移動速度

ここでは, 本稿の目的である下里のユーラシアプレート安定域に対する移動速度について述べる. 繰り返しになるが, ここでいう「ユーラシアプレート安定域に対する移動速度」とは, 下里が位置しているユーラシアプレートが仮想的に剛体だとしたときの速度, すなわち NUVEL-1 A に対する速度のことであり, この速度は隣接するプレートとの相互作用を示唆していると考えられる.

また, 下里以外にも NUVEL-1 A による速度との差が大きい観測局があるため, 本論の趣旨とはやや逸れるが, そのような観測局についても簡単に言及することとする.

3.5.1 下里

Table. 4 及び Fig. 7 より, 下里では, NUVEL-1 A (ユーラシアプレート) に対する動きとして 294° , 2.9 cm/year の速度が求められた (Fig. 8). この速度は, 隣接しているフィリピン海プレートの沈み込みに伴って下里が西北西方向に引き込まれていることを意味している.

Seno et al. (1993) によると, 南海トラフに沈み込むフィリピン海プレートの速度は紀伊半島沖

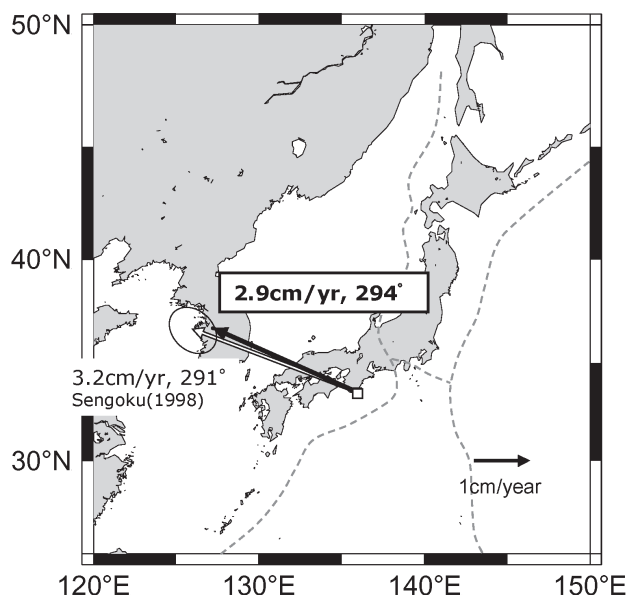


Fig. 8 Velocity vectors of Simosato station relative to the Eurasian plate. The solid arrow shows our result and the open arrow shows the velocity vector estimated from Sengoku (1998).

で西北西 4~5 cm/year と推定される. この速度は, 今回求められた速度と方向, 大きさともに近いことから, この辺りの海底下ではプレート間の固着が強いことが示唆される.

Table. 5 に, 今回の結果とこれまでに報告されている下里の移動速度についての他の研究結果を示す. 本稿, Torrence (1998) 及び ASI 07 L 01 (Luceri and Bianco, 2008) は「LAGEOS」SLR データ, Sengoku (1998) は「AJISAI」SLR データ, ITRF 2000 及び ITRF 2005 (SLR rescaled) (Altamimi et al., 2007) は SLR/VLBI/GPS/DORIS の観測データから求めた速度である. 全ての結果において概ね良い一致を示しており, 時期の違いと見られる有意な変化は見られない. Sengoku (1998) による移動速度は, 「AJISAI」SLR データを使用していることもあり, 若干推定誤差が大きいが, LAGEOS 等から求められた速度の推定誤差は 0.1 cm/year 程度であり, 方位角が 291° ~ 294° , 大きさが 2.6~3.0 cm/year の範囲内にある. 比較的最近求められた ITRF 2000 や ITRF 2005 (SLR rescaled), 1984 年から 2007 年までの LAGEOS データを使用した ASI 07 L 01 と比べると, 方位角は若干大きい結果となった. これらの

Table. 5 Velocities of Simosato station by other researches.

Reference	Technique	Data period	Velocity (cm/yr)	Azimuth (deg)	vs
This study	LAGEOS SLR	1993-2007	2.9	294	NUVEL-1A
Sengoku (1998)	AJISAI SLR	1986-1994	3.2	291	NUVEL-1
Torrence (1998)	LAGEOS SLR	1976 -1995	2.6	293	NUVEL-1A
ASI07L01 (Luceri and Bianco, 2007)	LAGEOS SLR	1984-2007	2.9	292	NUVEL-1A
ITRF2000	SLR/VLBI/GPS/DORIS	1976-2000	2.8	291	NUVEL-1A
ITRF2005 rescaled	SLR/VLBI/GPS/DORIS	1980-2006	3.0	291	NUVEL-1A

速度の違いは、主として移動速度の推定に用いた衛星、観測局、観測データの期間によるものと考えられる。

3.5.2 その他の観測局

中国の Changchun (7237) 局, Beijing (7249) 局, Shanghai (7837) 局では, NUVEL-1 A (ユーラシアプレート安定域) に対して東から東南東の方向に約 1 cm/year の速度が検出された。ユーラシアプレートの東方にはユーラシアプレートよりやや東向きの速度が大きいアムールプレートの存在が示唆されており (例えば, Heki et al., 1999), 今回の結果はそれと調和的である。

また, 南米の Arequipa (7403) 局でも NUVEL-1 A (南米プレート安定域) に対して南東へ 1.2 cm/year の速度が求められた。NUVEL-1 A によると, アレキパ沖ではナスカプレートが約 8 cm/year の速度で東北東方向に沈み込んでおり, Arequipa (7403) 局の移動速度もナスカプレートの沈み込みの影響を受けて東北東方向に移動していると推定されるが, SLR データによる速度は南東方向を示しており方向が異なっている。今回得られた速度は, 3.4 で述べたように ITRF 2000 や ITRF 2005 (SLR rescaled) と異なっていることから, 速度の差異については今後注意深く検討していきたい。

4 まとめ

1993 年から 2007 年までの「LAGEOS」SLR データを用いて下里のユーラシアプレートに対する速度の再計算を行った。その結果, 下里のユー

ラシアプレートに対する動きとして, 294°, 2.9 cm/year が得られた。当庁で長年使用してきた Sengoku (1998) の結果と比べると, 速度はやや小さく, 方位角はやや大きくなったが, SLR データから求められた他の研究結果と比べて有意な差はなく調和的だと考えられる。今後は, GPS 観測等, 他の観測手法による結果との比較も行っていきたい。

移動速度を精度良く決定するためには, 長期にわたる安定した観測が重要であることは言うまでもない。アジアを代表する SLR 観測局である下里水路観測所において, 今後も継続して観測が行っていくことが重要である。

謝 辞

観測に携わった歴代の下里水路観測所の所長及び所員の方々のご尽力に深く感謝いたします。また, 本稿の作成にあたり, LAGEOS-1, LAGEOS-2 のグローバルデータを使用させていただきました。また, SLR 解析では, NASA/GSFC の GEO-DYN-II/SOLVE を使用させていただきました。本稿の改訂にあたっては, 匿名の査読者から大変有益なコメントをいただきました。記して感謝いたします。

要 旨

下里水路観測所では, 1982 年以来, 測地衛星「AJISAI」や「LAGEOS」等の SLR 観測を実施している。今回, 1993 年から 2007 年までの 15 年間の「LAGEOS」SLR データを用いて, 下里の移動速度の再計算を行った。その結果, ユーラシア

プレート安定域に対して、 294° の方向に2.9 cm/yearという速度が得られた。この速度はフィリピン海プレートの沈み込み速度に近く、この辺りのプレート間カップリングが強いことを示唆している。本結果は、これまでにSLRデータから求められた他の研究結果と概ね調和的である。

参考文献

- Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher (2007), ITRF 2005 : A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, **112**, B 09401, doi : 10. 1029/2007 JB 004949.
- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard, and M Feissel-Verne (2004), The ITRF 2000, *IERS Technical Note*,**31**.
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein (1994), Effect of Recent Revisions to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motions, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- Eddy, W. F., J. J. McCarthy, D. E. Pavlis, J. A. Marshall, S. B. Luthke, L. S. Tsaoussi, G. Leung, and D. A. Williams (1990), *GEODYN-II System Operations Manual, Vol.1-5*, Contractor Report, ST Syst.Corp., Lanham, Md.
- 藤田雅之・仙石新 (1997) : 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.
- 藤田雅之・久保岡俊宏・池田信広 (1998) : 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**, 108-117.
- Hedin, A. E. (1987), MSIS-86 Thermospheric Model, *J. Geophys. Res.*, **34**, 13-24.
- Heki, K., S. Miyazaki, H. Takahashi, M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, N. Vasilenko, A. Ivashchenko and K. An (1999), The Amurian plate motion and current plate kinematics in Eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, **104**, 29147-29155.
- Luceri, V. and G. Bianco (2008), Earth Orientation and site coordinates/velocities from the Matera Space Geodesy Center solution ASI 07 L 01, http://geodaf.mt.asi.it/html_old/ASImed/solution.html.
- 松下 優・藤田雅之・佐藤まりこ (2005 a) : SLR データ解析におけるモデルの更新とその評価, *海洋情報部技報*, **23**, 73-77.
- 松下 優・藤田雅之・河合晃司・長岡 継 (2005 b) : SLR グローバル解析により検出された紀伊半島南東沖地震による地殻変動, *日本地球惑星科学連合 2005 年大会予稿集*.
- McCarthy, D. D. (1996), IERS Conventions (1996), *IERS Technical Note*,**21**.
- Sengoku, A (1998), A plate motion study using Ajisai SLR data., *Earth Planets Space*,**50**, 611-627.
- Sengoku, A, M. Fujita, K. Matsumoto, K. Terai, and M. Sasaki (1999), 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. Hydrogr. Res.*, **35**, 79-95.
- 仙石新・加藤剛・福良博子・小山薫・藤田雅之・矢吹哲一郎 (2000) : 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, *水路部研究報告*, **36**, 97-109.
- Seno, T., S. Stein, and A. E. Gripp (1993), A Model for the Motion of the Philippine Sea Plate Consistent with NUVEL-1 A and Geological Data, *J. Geophys. Res.*, **98**, 17941-17948.
- Smith, D. E., R. Kolenkiewicz, P. J. Dunn, and M. H. Torrence (1979), The measurement of fault motion by satellite laser ranging, *Tectonophysics*,**52**, 59-67.
- Tapley, B. D., B. E. Schutz, and R. J. Eanes (1985), Station coordinates, baselines, and Earth rotation from LAGEOS Laser Ranging : 1976-1984, *J. Geophys. Res.*, **90**, 9235-9248.
- Tapley, B. D., D. P. Chambers, S. Bettadpur, and J. C. Ries (2003), Large scale ocean circulation from the GRACE GGM 01 geoid. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2163, doi : 10. 1029/2003 GL 018622.
- Torrence, M (1998), Tectonic Plate Motion, <http://cddisa.gsfc.nasa.gov/926/slrrecto.html>.
- Ullman, R. E. (1992), SOLVE Program, *NASA Contract Report* NAS 5-29393, Task 503.