

水路部の地球基準座標系について†

仙石 新*

ON THE CONVENTIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAMES DETERMINED BY HYDROGRAPHIC DEPARTMENT OF JAPAN†

Arata Sengoku*

Abstract

Hydrographic Department determined terrestrial reference frames by using Satellite Laser Ranging (SLR) data of LAGEOS in 1984 (JHDSC-1) and in 1990 (JHDSC-2, 3, 4). These JHDSC's and ITRF89, which was determined by IERS (International Earth Rotation Service), have been compared through 7-parameter fitting procedure. Difference between JHDSC-2, 3, 4 and ITRF89 are several cm. Precision of JHDSC-2, 3, 4 is estimated to be 5cm. Difference between JHDSC-1 and ITRF89 is much larger since JHDSC-1 was a preliminary result. Relation between WGS84 and other conventional terrestrial reference frames is also mentioned.

1. はじめに

近年、GPS (Global Positioning System) などの衛星航法が急速に普及しはじめ、それにともなって海図、陸図の採用している測地系、測地系間の変換、測地系の定義や性質について、測地学の分野ばかりでなく、衛星航法を用いる多くのユーザーからも問い合わせが来るようになった。これは、GPS等の米国航行衛星が用いている測地系 (WGS84) と日本の海図、陸図で用いている測地系 (日本測地系: Tokyo Datum) が数100m異なっているため、これを混同すると、不都合を生じることが多いためであろう。

測地系とは、地球に固定された座標系という意味である。測地系は、局所的なものとグローバルなものに分かれる。

局所的な測地系とは、主として天文観測と経緯儀や測距儀等を用いた測量によって構築された測地系で、測地系の原点の座標と原点からみたある点の方位角および準楕円体によって、通常定義される。例えば、日本測地系は、天文観測から求めた日本経緯度原点の経緯度、驗潮観測から求めた日本水準原点の楕円体高、日本経緯度原点から見たある点の方位角及びヘッセル楕円体によって定義される。このような局所的な定義は、地球的規模の測地系を構築するには不向きであるが、各国の海図、陸図で用いている測地系は、歴史的な経緯からこのようなものがほとんどである。

† Received 25th January 1992

* 航法測地課衛星測地室: Satellite Geodesy Office,

Geodesy and Geophysics Division

一方、グローバルな測地系とは、通常、地球の中心を原点とし、 z 軸が国際慣用原点 (the Conventional International Origin ; CIO) ないしはこれと同等とみなされる地球慣用極 (the Conventional Terrestrial Pole ; CTP), x 軸がグリニッジにおける鉛直線方向 (BIHの定義) をむいた地球固定座標系として提起される。これを、地球基準座標系 (Conventional Terrestrial Reference Frame) と呼ぶこともある。地球基準座標系は、1980年代後半からは、人工衛星レーザー測距 (SLR) や超長基線電波干渉計 (VLBI) などの宇宙測地技術を用いて決定されている。

航法では、よく世界測地系 (World Geodetic System) という用語を用いている。これは、世界的に統一された測地系というような意味に用いられていることが多いようであるが、本来はWGSが米国国防省による地球基準座標系のことを表す固有名詞であることに注意しなくてはならない。しかし、測地学的な精度が要求されない場合は、世界測地系と他の地球基準座標系とを同一視しても構わない。

水路部では、1982年から第五管区海上保安本部下里水路観測所において人工衛星レーザー測距観測を行っており (Sasaki and Nagaoka, 1984), これらの観測データ測距観測から求められた地球基準座標系における座標値と他の宇宙測地技術を用いて求められた地球基準座標系における座標値とを比較するとともに、WGS84とこれらの地球基準座標系の違いについても言及する。

2. 地球基準座標系

もし、地球が静的であり変動しないものであるならば、地球の自転は決定論的に計算が可能であるはずである。このような場合、地球基準座標系の定義は非常に簡単で、適当な3点の経緯度を定義しておけば、十分である。しかしながら、地球はプレート運動、潮汐、海洋や大気の大循環など様々な要因によって変動し続けている。このため、地球は固定した座標系を張るためには、プレート運動、潮汐変形などの変動モデルを仮定しなければならない。したがって、地球基準座標系は、これらの変動モデルに依存しており、どのような地球物理モデルを用いるかによって異なることになる。また、モデル化できない変動成分もあるために、地球基準座標系を維持するためには、継続した観測が必要となる。

現在、世界的に最も権威ある地球基準座標系は、国際天文学連合 (IAU) 及び国際測地系地球物理学連合 (IUGG) のもとに作られた国際的な組織である国際地球回転監視事業 (IERS) で毎年求められる ITRF (International Terrestrial Reference Frame) である。これは、IERSに属する解析センターが宇宙技術を用いて求めた地球基準座標系を相互に比較し統一した地球基準座標系であり、以下のような特色がある (Boucher and Altamimi, 1989)。

- (1) 地心座標系
- (2) z 軸がCIOないしはCTPと無矛盾
- (3) x 軸がグリニッジ方向 (BIHの定義)
- (4) 採用している地球物理モデルが明確
- (5) プレート運動モデル (AM0-2) を採用
- (6) 全体が回転しない
- (7) 観測点の具体的な座標値が手に入る
- (8) ITRFとIERSの各解析センターが求めた地球基準座標系の関係が明らか

ITRFの原点は、SLRの成果によって決定されている。これは、人工衛星の軌道解析を通じて地心が明確に決定できるためである。また、ITRFの座標軸の方向は、VLBIによる寄与が大きい。また、採用する物理定

数, 地球物理モデルが異なると, 地球基準座標系も異なってくる。このため, IERSでは標準モデルを指定している (IERS standards, McCarthy ed., 1989)。(6)の条件を満たすためには, 通常Tisserandの条件,

$$\int \vec{r} \times \vec{v} \, dm = 0$$

が用いられる。ただし, r は地心を原点とする位置ベクトル, v は速度ベクトル, m は質量である。上式は, 実際には計算不可能であるため, 各観測点についての和を用いる。

$$\sum_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i = 0$$

ITRFはIERSから毎年出版され (IERS, 1988, 1989, 1990), 観測点の具体的な座標値が明記されており, IERSの各解析センターが求めた地球基準座標系との比較がなされている。ITRFは現在の測地学的あるいは地球物理学的知見を総合した結果であるから, 一部観測データが少ない点を除けば, 現在最も信頼のおける地球基準座標系である。Table1に1989年のITRFであるITRF89を掲げる (Boucher and Altamimi, 1991)。これらはSLR, VLBIまたはLLR (月レーザー測距) の観測点である。

一方, 水路部ではSLRの解析によって独自に地球基準座標系を求めてきた。1984年にはじめての成果が得られ (JHDSC-1と呼ぶ, Table 2, Sasaki, 1984), この成果をもとに世界測地系と日本測地系の関係を求め, 海図などに記載する世界測地系から日本測地系への変換値の根拠としている。JHDSC-1はテキサス大学のLPM81.12を基礎とし, 経度の定義を合わせるためにLPM81.12を0.197" z軸の回りに回転させたものである。その後, 軌道解析ソフトウェアの改良などによってより精密な成果が得られた (Sasaki, 1990)。地上の観測点の位置は, プレート運動や地殻変動の影響を受け変動しているため, 地球基準座標系は通常元期を明記するが, 1984, 86, 88年の成果をそれぞれJHDSC-2, JHDSC-3, JHDSC-4 (Table 3, 4, 5)と呼んでいる。JHDSC-2, 3, 4は同じくテキサス大学のSSC(CSR)85L07 (Tapley et al., 1986)を基礎としているが, これはITRFに非常に近いので, 1 m程度の精度ならば両者は一致していると見なして構わないが, 厳密には両者の間には差がある。また, 水路部の解析ではMERIT Standards (Melbourne et al., 1983)と呼ばれる地球物理モデルを採用している。MERIT StandardsとIERS Standardsは細かい点を除けばほとんど同一であると考えて差し支えない。

3. ITRFと水路部の地球基準座標系との関係

ある地球基準座標系におけるある点の座標 (x_1, y_1, z_1) から他の地球基準座標系における座標 (x_2, y_2, z_2) への変換は下式によって行う。

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

ただし, T_1, T_2, T_3 は座標系間の原点の差, D はスケールの違い, R_1, R_2, R_3 は座標系間の微小回転を表す。これらの7パラメータによって, 地球基準座標系間の変換が行える。座標系内に歪みがある場合には, 上式で変換を行うことは出来ない。

同一のシステム (時刻, モデルなど) で比較するために, 以下の補正を行う。

(1) 離心較正

ITRF89ではほとんどの点が, 装置の座標ではなく, 標識の座標で与えられているため, これを装置の座標

Table 1. ITRF89(epoch : 1988.0, permanent tide included, IERS, 1990)

DOMES NUMBER	NAME	CDP NUM.	X m	Y m	Z m	SX m	SY m	SZ m	PLATE
10002M003	GRASSE	VLBI 7605	4581697.839	556125.667	4389351.287	0.014	0.014	0.014	EURA
10002S001	GRASSE	SLR 7835	4581691.824	556159.402	4389359.388	0.014	0.014	0.014	EURA
10002S002	GRASSE	LLR 7845	4581692.402	556195.875	4389354.950	0.014	0.014	0.015	EURA
10004M002	BREST	VLBI 7604	4228877.244	-333104.261	4747180.845	0.023	0.023	0.024	EURA
10302M002	TROMSO	VLBI 7602	2102904.247	721602.486	5958201.247	0.023	0.023	0.023	EURA
10402S002	ONSALA	VLBI 7213	3370606.206	711917.439	5349830.613	0.017	0.017	0.018	EURA
10503M002	METSAHOVI	VLBI 7601	2890652.914	1310295.292	5513958.596	0.023	0.023	0.023	EURA
10503S001	METSAHOVI	SLR 7805	2892595.614	1311807.764	5512610.728	0.023	0.023	0.024	EURA
11001S002	GRAZ	SLR 7839	4194426.737	1162693.882	4647246.547	0.016	0.016	0.016	EURA
12205S001	BOROWIEC	SLR 7811	3738332.911	1148246.139	5021815.804	0.030	0.033	0.034	EURA
12302S002	RIGA	SLR 1884	3183896.022	1421496.637	5322803.161	0.030	0.030	0.032	EURA
12337S006	KATZIVELY	SLR 1893	3785945.097	2550780.427	4439461.268	0.031	0.032	0.032	EURA
12602M002	DIONYSOS	SLR 7515	4595216.461	2039435.353	3912629.489	0.020	0.020	0.020	EURA
12602S008	DIONYSOS	SLR 7515	4595218.871	2039436.386	3912628.295	0.044	0.043	0.044	EURA
12612M001	ASKITES	SLR 7510	4353444.930	2082666.290	4156506.648	0.020	0.020	0.020	EURA
12612S001	ASKITES	SLR 7510	4353447.330	2082667.443	4156505.610	0.044	0.043	0.043	EURA
12613M001	ROUMELLI	SLR 7517	4728694.708	2174373.380	3674572.931	0.017	0.017	0.017	EURA
12613S001	ROUMELLI	SLR 7517	4728697.078	2174374.492	3674571.617	0.043	0.043	0.044	EURA
12613S002	ROUMELLI	SLR 7517	4728697.994	2174374.831	3674573.595	0.043	0.043	0.044	EURA
12614M001	KARITSA	SLR 7520	4596042.646	1733476.814	4055720.832	0.022	0.021	0.021	EURA
12615M001	KATAVIA	SLR 7512	4573400.092	2409322.208	3723881.751	0.021	0.021	0.021	EURA
12615S001	KATAVIA	SLR 7512	4573402.424	2409323.368	3723880.443	0.050	0.045	0.047	EURA
12616M001	XRISOKALAR	SLR 7525	4745949.581	1905705.949	3799169.031	0.021	0.021	0.021	EURA
12616S001	XRISOKALAR	SLR 7525	4745952.057	1905706.824	3799167.811	0.045	0.044	0.044	EURA
12706M001	LAMPEDUSA	SLR 7544	5072832.032	1130886.253	3684836.962	0.024	0.025	0.025	EURA
12711M002	BOLOGNA	SLR 7546	4461399.730	919566.858	4449510.495	0.015	0.016	0.017	EURA
12711S001	BOLOGNA	VLBI 7230	4461370.199	919596.762	4449559.050	0.015	0.016	0.016	EURA
12717S001	NOTO	VLBI 7547	4934563.319	1321201.194	3806484.311	0.020	0.019	0.022	EURA
12718M002	TRIESTE	SLR 7550	4336738.594	1071271.509	4537911.033	0.026	0.028	0.026	EURA
12725M002	CAGLIARI	SLR 7545	4893398.123	772673.322	4004140.947	0.018	0.019	0.019	EURA
12734M004	MATERA	SLR 7541	4641990.340	1393042.306	4133231.833	0.029	0.029	0.029	EURA
12734M005	MATERA	SLR 7540	4641984.621	1393057.748	4133233.440	0.040	0.040	0.040	EURA
12734S001	MATERA	SLR 7939	4641965.109	1393069.957	4133262.222	0.016	0.016	0.016	EURA
13201S002	CHILBOLTON	VLBI 7215	4008310.258	-100650.843	4943794.658	0.018	0.018	0.019	EURA
13212S001	HERSTMONCE	SLR 7840	4033463.851	23662.362	4924305.020	0.016	0.016	0.016	EURA
13296M002	CARNUSTY	VLBI 7603	3526416.532	-171421.184	5294098.749	0.023	0.023	0.023	EURA
13407S001	MADRID	VLBI 1563	4849092.769	-360180.603	4115109.009	0.061	0.061	0.063	EURA
13407S003	MADRID	VLBI 1561	4849245.358	-360278.220	4114884.376	0.042	0.023	0.039	EURA
13407S010	MADRID	VLBI 1565	4849336.800	-360488.886	4114748.631	0.018	0.018	0.019	EURA
13504M002	KOOTWIJK	SLR 8833	3899237.870	396769.148	5015055.206	0.020	0.020	0.020	EURA
13504S001	KOOTWIJK	SLR 7833	3899224.134	396742.866	5015073.869	0.037	0.037	0.037	EURA
14001S001	ZIMMERWALD	SLR 7810	4331283.632	567549.546	4633139.944	0.016	0.016	0.016	EURA
14005M002	MONTE GENE	SLR 7590	4390309.915	696752.028	4560835.914	0.041	0.041	0.041	EURA

ON THE CONVENTIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAMES
DETERMINED BY HYDROGRAPHIC DEPARTMENT OF JAPAN

313

14106S001	POTSDAM	SLR	1181	3800621.336	882005.355	5028859.521	0.019	0.019	0.018	EURA
14201S002	WETTZELL	SLR	7834	4075530.091	931781.322	4801618.178	0.013	0.013	0.013	EURA
14201S004	WETTZELL	VLBI	7224	4075540.094	931735.174	4801629.250	0.013	0.013	0.013	EURA
14201S007	WETTZELL	SLR	7599	4075517.452	931754.091	4801630.292	0.060	0.064	0.040	EURA
14201S010	WETTZELL	SLR	7596	4075585.306	931837.815	4801559.303	0.013	0.013	0.013	EURA
14202M002	HOHENBUNST	VLBI	7600	3778215.036	698644.703	5074053.486	0.023	0.023	0.024	EURA
14209S001	EFFELSBERG	VLBI	7203	4033947.677	486990.425	4900430.667	0.018	0.018	0.019	EURA
20702S001	BAR GIYYOR	SLR	7530	4443968.450	3121946.872	3334695.458	0.029	0.029	0.029	AFRC
20801M001	DIYARBAKIR	SLR	7575	3848636.001	3251760.924	3898909.231	0.027	0.025	0.026	EURA
20802M001	YOZGAT	SLR	7585	4029730.694	2802093.318	4062068.007	0.024	0.024	0.022	EURA
20803M001	MELENGICLI	SLR	7580	4247620.510	2778638.987	3851607.491	0.028	0.027	0.026	EURA
20804M001	YIGILCA	SLR	7587	4117362.036	2517076.880	4157679.031	0.026	0.024	0.025	EURA
21605S001	SHANGHAI	SLR	7837	-2831087.792	4676203.493	3275172.831	0.018	0.018	0.020	EURA
21605S008	SHANGHAI	VLBI	7226	-2847698.171	4659872.978	3283958.844	0.125	0.109	0.099	EURA
21605S009	SHANGHAI	VLBI	7227	-2831686.669	4675733.893	3275327.811	0.018	0.017	0.020	EURA
21701S001	KASHIMA	VLBI	1856	-3997892.278	3276581.318	3724118.291	0.019	0.019	0.022	NOAM
21725S001	NOBEYAMA	VLBI	7244	-3871168.279	3428274.050	3723697.613	0.025	0.024	0.029	EURA
21726S001	SIMOSATO	SLR	7838	-3822388.355	3699363.504	3507573.098	0.017	0.017	0.019	EURA
21732S002	CHICHIJIMA	SLR	7844	-4491072.503	3481527.838	2887391.654	0.043	0.043	0.045	EURA
30101S001	HELWAN	SLR	7831	4728283.610	2879670.580	3156894.276	0.031	0.032	0.031	AFRC
30302S001	JOHANNESBU	VLBI	7232	5085442.832	2668263.404	-2768697.266	0.023	0.024	0.023	AFRC
40104S001	ALGONQUIN	VLBI	7282	918034.931	-4346132.200	4561971.094	0.016	0.019	0.019	NOAM
40105M001	PENTICTON	VLBI	7283	-2058840.349	-3621286.300	4814420.706	0.022	0.028	0.030	NOAM
40118M001	WHITEHORSE	VLBI	7284	-2215213.530	-2209261.574	5540292.513	0.022	0.022	0.022	NOAM
40127M001	YELLOWKNIF	VLBI	7285	-1224124.412	-2689530.586	5633555.275	0.022	0.024	0.028	NOAM
40400M001	PASADENA	SLR	7896	-2493211.866	-4655229.531	3565574.500	0.018	0.018	0.018	PCFC
40400M003	PASADENA	VLBI	7263	-2493305.929	-4655197.586	3565519.378	0.017	0.017	0.018	PCFC
40403M001	PALOS VERD	VLBI	7268	-2525452.712	-4670035.680	3522886.743	0.022	0.022	0.022	PCFC
40404M001	PEARBLOSSO	VLBI	7254	-2464070.842	-4649425.649	3593905.693	0.022	0.022	0.022	PCFC
40405M001	GOLDSTONE	SLR	7085	-2353394.094	-4641529.610	3676899.206	0.012	0.013	0.013	NOAM
40405M002	GOLDSTONE	SLR	7115	-2350861.549	-4655546.276	3660997.826	0.015	0.015	0.015	NOAM
40405M006	GOLDSTONE	SLR	7265	-2356475.652	-4646618.292	3668424.711	0.011	0.011	0.011	NOAM
40405M013	GOLDSTONE	VLBI	7288	-2356494.019	-4646607.670	3668426.597	0.011	0.012	0.012	NOAM
40405S001	GOLDSTONE	VLBI	1514	-2353621.135	-4641341.569	3677052.298	0.058	0.059	0.060	NOAM
40405S003	GOLDSTONE	VLBI	1512	-2350443.694	-4651980.872	3665630.941	0.058	0.059	0.060	NOAM
40405S009	GOLDSTONE	VLBI	7222	-2356170.906	-4646755.882	3668470.582	0.010	0.011	0.011	NOAM
40405S014	GOLDSTONE	VLBI	1513	-2351129.052	-4655477.097	3660956.884	0.015	0.015	0.015	NOAM
40405S019	GOLDSTONE	VLBI	7231	-2353538.667	-4641649.585	3676670.056	0.013	0.013	0.013	NOAM
40406M001	SAN FRANCI	VLBI	7252	-2707704.790	-4257609.607	3888374.170	0.022	0.022	0.022	NOAM
40407M001	PINYON FLA	VLBI	7256	-2369635.863	-4761324.925	3511116.129	0.022	0.022	0.022	PCFC
40408S002	FAIRBANKS	VLBI	7225	-2281547.099	-1453645.009	5756993.211	0.015	0.015	0.015	NOAM
40410M001	POINT REYE	VLBI	7251	-2732333.019	-4217634.897	3914491.037	0.022	0.022	0.022	PCFC
40412M001	AUSTIN	SLR	7890	-754162.049	-5459061.230	3200744.016	0.271	0.240	0.300	NOAM
40412M003	AUSTIN	VLBI	7271	-737793.705	-5459892.271	3202990.456	0.022	0.022	0.022	NOAM
40416M001	YAKATAGA	VLBI	7277	-2529744.129	-1942091.269	5505027.934	0.022	0.022	0.022	NOAM
40417M002	PATRICK AF	SLR	7069	917958.975	-5548370.255	2998776.585	0.107	0.061	0.090	NOAM
40419M001	KODIAK	VLBI	7278	-3026940.108	-1575911.768	5370362.496	0.022	0.022	0.022	NOAM
40420M002	VANDENBERG	VLBI	7223	-2678094.662	-4525450.829	3597410.121	0.016	0.016	0.016	PCFC
40421M001	NOME	VLBI	7279	-2658150.350	-693821.852	5737236.603	0.022	0.022	0.022	NOAM
40423M001	SANDPOINT	VLBI	7280	-3425461.854	-1214669.110	5223858.281	0.022	0.022	0.022	NOAM
40424S001	KAUAI	VLBI	1311	-5543845.990	-2054564.161	2387813.763	0.013	0.012	0.013	PCFC
40425M001	SOURDOUGH	VLBI	7281	-2419993.407	-1664228.720	5643538.257	0.022	0.022	0.022	NOAM
40427M001	FORT ORD	VLBI	7266	-2697026.684	-4354393.315	3788077.589	0.022	0.022	0.022	PCFC
40427M002	FORT ORD	VLBI	7241	-2699840.181	-4359127.103	3781050.941	0.022	0.022	0.022	PCFC
40428M001	SANTA PAOL	VLBI	7255	-2554476.590	-4608627.393	3582138.284	0.022	0.022	0.022	PCFC

40430M001	BLACK BUTT	VLBI	7269	-2306306.869	-4787914.438	3515736.408	0.022	0.022	0.022	NOAM
40431M001	DEADMAN LA	VLBI	7267	-2336819.570	-4732586.967	3570329.967	0.022	0.022	0.022	NOAM
40432M001	ELY	VLBI	7286	-2077236.221	-4486712.712	4018753.736	0.021	0.022	0.022	NOAM
40433M001	QUINCY	SLR	7051	-2516893.108	-4198845.072	4076411.494	0.012	0.012	0.012	NOAM
40433M002	QUINCY	SLR	7109	-2517234.682	-4198556.251	4076569.651	0.012	0.012	0.012	NOAM
40433M004	QUINCY	VLBI	7221	-2517230.792	-4198595.238	4076531.242	0.012	0.012	0.012	NOAM
40433M005	QUINCY	SLR	7886	-2517242.293	-4198550.943	4076570.267	0.012	0.012	0.012	NOAM
40433S006	QUINCY	SLR	7109	-2517235.959	-4198558.294	4076571.636	0.030	0.030	0.030	NOAM
40434M002	MOUNT HOPK	SLR	7888	-1936744.267	-5077639.091	3331993.855	0.029	0.029	0.029	NOAM
40434S001	MOUNT HOPK	SLR	7921	-1936760.105	-5077707.166	3331922.475	0.029	0.029	0.029	NOAM
40436M002	SAN DIEGO	SLR	7062	-2428825.839	-4799750.485	3417272.689	0.011	0.014	0.014	PCFC
40436M003	SAN DIEGO	SLR	7035	-2428826.595	-4799754.316	3417267.050	0.011	0.014	0.014	PCFC
40437M001	MAMMOTH LA	VLBI	7259	-2448246.687	-4426738.319	3875435.881	0.022	0.022	0.022	NOAM
40438M001	BEAR LAKE	SLR	7082	-1735997.103	-4425048.201	4241430.413	0.029	0.029	0.029	NOAM
40439M001	OWENS VALL	SLR	7114	-2410422.364	-4477802.691	3838686.694	0.012	0.012	0.012	NOAM
40439M004	OWENS VALL	VLBI	7853	-2410421.141	-4477800.429	3838690.311	0.012	0.012	0.012	NOAM
40439S002	OWENS VALL	VLBI	7207	-2409600.654	-4478349.550	3838603.198	0.012	0.012	0.012	NOAM
40440M001	WESTFORD	SLR	7091	1492453.790	-4457278.749	4296815.889	0.011	0.011	0.012	NOAM
40440S002	WESTFORD	VLBI	7205	1492404.925	-4457266.485	4296881.695	0.011	0.011	0.012	NOAM
40440S003	WESTFORD	VLBI	7209	1492206.788	-4458130.470	4296015.461	0.011	0.011	0.012	NOAM
40441S001	GREENBANK	VLBI	7204	882880.050	-4924482.269	3944130.605	0.016	0.021	0.021	NOAM
40441S004	GREENBANK	VLBI	7214	882325.748	-4925137.959	3943397.608	0.017	0.017	0.018	NOAM
40442M001	FORT DAVIS	SLR	7086	-1330125.262	-5328526.629	3236150.242	0.010	0.010	0.010	NOAM
40442M005	FORT DAVIS	SLR	7885	-1330125.263	-5328526.628	3236150.242	0.010	0.011	0.011	NOAM
40442M006	FORT DAVIS	SLR	7080	-1330020.935	-5328401.844	3236480.795	0.010	0.012	0.011	NOAM
40442M008	FORT DAVIS	VLBI	7850	-1330008.060	-5328391.567	3236502.726	0.010	0.011	0.011	NOAM
40442M009	FORT DAVIS	VLBI	7900	-1324227.837	-5332063.043	3232023.035	0.010	0.011	0.011	NOAM
40442S001	FORT DAVIS	SLR	7086	-1330120.906	-5328532.260	3236146.687	0.010	0.011	0.011	NOAM
40442S002	FORT DAVIS	LLR	7206	-1330781.239	-5328755.574	3235697.674	0.010	0.011	0.011	NOAM
40442S003	FORT DAVIS	VLBI	7216	-1324210.865	-5332023.137	3232118.374	0.010	0.010	0.010	NOAM
40445M001	MAUI	SLR	7210	-5466006.472	-2404427.949	2242187.473	0.012	0.012	0.013	PCFC
40445M002	MAUI	VLBI	7120	-5465998.457	-2404408.540	2242228.400	0.012	0.012	0.013	PCFC
40445S002	MAUI	LLR	7210	-5466003.553	-2404426.662	2242197.549	0.032	0.032	0.033	PCFC
40445S005	MAUI	LLR	7210	-5466006.955	-2404428.161	2242188.476	0.012	0.012	0.013	PCFC
40449M001	OCOTILLO	VLBI	7270	-2335600.997	-4832244.307	3434392.423	0.059	0.054	0.072	NOAM
40451M101	WASHINGTON	SLR	7101	1131240.371	-4831179.743	3994148.438	0.011	0.010	0.011	NOAM
40451M102	WASHINGTON	VLBI	7102	1130686.682	-4831353.020	3994110.875	0.010	0.010	0.010	NOAM
40451M103	WASHINGTON	SLR	7103	1130685.728	-4831348.700	3994116.316	0.011	0.010	0.011	NOAM
40451M104	WASHINGTON	SLR	7104	1131095.904	-4831196.941	3994170.705	0.011	0.010	0.011	NOAM
40451M105	WASHINGTON	SLR	7105	1130719.794	-4831350.567	3994106.477	0.010	0.010	0.010	NOAM
40451M111	WASHINGTON	SLR	7899	1131364.830	-4831168.789	3994128.889	0.011	0.010	0.011	NOAM
40451M112	WASHINGTON	SLR	7063	1130714.847	-4831367.729	3994087.352	0.011	0.010	0.011	NOAM
40451M114	WASHINGTON	SLR	7125	1130745.857	-4831368.051	3994077.079	0.039	0.038	0.037	NOAM
40451M116	WASHINGTON	SLR	7130	1130735.345	-4831324.632	3994132.303	0.128	0.109	0.087	NOAM
40451S101	WASHINGTON	SLR	7105	1130720.346	-4831352.936	3994108.471	0.042	0.042	0.043	NOAM
40451S135	WASHINGTON	SLR	7105	1130720.352	-4831352.940	3994108.483	0.042	0.042	0.043	NOAM
40451S147	WASHINGTON	SLR	7105	1130720.341	-4831352.930	3994108.475	0.042	0.042	0.043	NOAM
40452M001	BLOOMINGTO	VLBI	7291	302384.556	-4941699.025	4007908.450	0.022	0.036	0.030	NOAM
40453M001	CARROLLTON	VLBI	7228	453520.734	-5300506.758	3507207.400	0.022	0.037	0.024	NOAM
40454M001	LEONARD	VLBI	7292	-522231.481	-5145676.879	3720152.333	0.022	0.021	0.022	NOAM
40455M001	MILES CITY	VLBI	7038	-1204438.913	-4239211.092	4596266.058	0.021	0.030	0.030	NOAM
40456S001	PIETOWN	VLBI	7234	-1640953.552	-5014815.986	3575411.893	0.022	0.021	0.022	NOAM
40457M001	SEATTLE	VLBI	7229	-2295347.919	-3638029.484	4693408.721	0.022	0.028	0.033	NOAM

40489S001	HAT CREEK	VLBI	7218	-2523969.856	-4123506.360	4147752.584	0.016	0.016	0.016	NOAM
40490S001	MARYLAND P	VLBI	7217	1106629.484	-4882907.168	3938086.920	0.017	0.017	0.018	NOAM
40491M002	FLAGSTAFF	SLR	7891	-1923976.630	-4850871.713	3658574.853	0.017	0.018	0.018	NOAM
40491M003	FLAGSTAFF	VLBI	7261	-1923992.563	-4850854.501	3658589.222	0.017	0.017	0.018	NOAM
40492M001	VERNAL	SLR	7892	-1631484.650	-4589133.879	4106749.536	0.029	0.029	0.029	NOAM
40492M002	VERNAL	VLBI	7290	-1631473.206	-4589128.919	4106759.869	0.021	0.021	0.022	NOAM
40493M001	YUMA	VLBI	7894	-2196777.814	-4887337.065	3448425.227	0.017	0.017	0.018	NOAM
40496M001	PLATTEVILL	SLR	7112	-1240678.147	-4720463.384	4094480.610	0.013	0.013	0.013	NOAM
40496M002	PLATTEVILL	VLBI	7258	-1240708.041	-4720454.348	4094481.635	0.013	0.013	0.013	NOAM
40497M001	MONUMENT P	SLR	7110	-2386277.917	-4802354.358	3444881.442	0.011	0.011	0.011	PCFC
40497M002	MONUMENT P	SLR	7220	-2386292.186	-4802347.486	3444880.847	0.011	0.011	0.011	PCFC
40497M003	MONUMENT P	VLBI	7274	-2386289.312	-4802346.557	3444883.965	0.011	0.011	0.011	PCFC
40497S001	MONUMENT P	SLR	7110	-2386279.246	-4802357.002	3444883.314	0.043	0.043	0.043	PCFC
40499M002	RICHMOND	SLR	7295	961319.054	-5674090.961	2740489.520	0.012	0.012	0.013	NOAM
40499S001	RICHMOND	VLBI	7219	961258.177	-5674090.030	2740533.732	0.012	0.012	0.013	NOAM
40504M001	MAZATLAN	SLR	7122	-1660089.273	-5619100.401	2511637.839	0.016	0.016	0.016	NOAM
40505M001	CABO SAN L	SLR	7882	-1997241.710	-5528041.214	2468355.232	0.019	0.019	0.019	PCFC ⁺
40506S001	ENSENADA	SLR	7883	-2406127.848	-4898370.369	3290337.985	0.042	0.042	0.042	PCFC
40701S001	SANTIAGO D	SLR	1953	1474548.429	-5811242.478	2168945.024	0.025	0.024	0.026	NOAM
41604S001	NATAL	SLR	7929	5186467.934	-3653856.112	-654321.859	0.029	0.033	0.034	SOAM
41703M001	EASTER ISL	SLR	7061	-1884983.824	-5357606.785	-2892852.664	0.109	0.084	0.101	NAZC
41703M002	EASTER ISL	SLR	7097	-1884984.367	-5357608.159	-2892853.409	0.020	0.020	0.020	NAZC
41705M001	SANTIAGO	SLR	7400	1769699.797	-5044612.924	-3468260.059	0.029	0.029	0.029	SOAM
41706M001	CERRO TOLO	SLR	7401	1815517.158	-5213464.873	-3187999.416	0.029	0.029	0.029	SOAM
42202S001	AREQUIPA	SLR	7907	1942792.013	-5804077.661	-1796919.307	0.017	0.017	0.017	SOAM
42501M001	BERMUDA	SLR	7067	2308538.585	-4874079.947	3393628.546	0.063	0.042	0.059	NOAM
42501M002	BERMUDA	VLBI	7294	2307209.606	-4874215.807	3394317.840	0.022	0.022	0.023	NOAM
43602M002	GRAND TURK	SLR	7068	1920482.869	-5619478.249	2318914.323	0.472	0.260	0.300	NOAM
50103S001	CANBERRA	VLBI	1543	-4460894.400	2682361.619	-3674748.867	0.021	0.020	0.021	INDI
50103S003	CANBERRA	SLR	7943	-4447548.620	2677133.986	-3694996.479	0.018	0.017	0.018	INDI
50103S005	CANBERRA	VLBI	1542	-4460981.029	2682413.708	-3674582.565	0.021	0.021	0.021	INDI
50103S007	CANBERRA	SLR	7843	-4446476.785	2678127.086	-3696251.778	0.018	0.017	0.018	INDI
50103S010	CANBERRA	VLBI	1545	-4460935.077	2682765.779	-3674381.712	0.021	0.020	0.021	INDI
50107M001	YARRAGADEE	SLR	7090	-2389006.531	5043329.300	-3078525.380	0.019	0.018	0.020	INDI
50107S001	YARRAGADEE	SLR	7090	-2389007.754	5043331.814	-3078526.884	0.048	0.047	0.049	INDI
50116S002	HOBART	VLBI	7242	-3950237.448	2522348.094	-4311563.189	0.625	0.386	0.297	INDI
50503M001	AMERICAN S	SLR	7096	-6100045.862	-996203.145	-1568976.334	0.029	0.029	0.029	PCFC
50505M001	KWAJALEIN	SLR	7092	-6143447.273	1364700.188	1034163.111	0.017	0.017	0.019	PCFC
50505S003	KWAJALEIN	VLBI	4968	-6143536.507	1363997.212	1034707.351	0.017	0.017	0.019	PCFC
92202M002	HUAHINE	SLR	7121	-5345865.265	-2958246.631	-1824623.796	0.029	0.029	0.029	PCFC
92202M003	HUAHINE	SLR	7123	-5345865.398	-2958246.716	-1824623.894	0.025	0.024	0.025	PCFC

Table 2. JHDSC-1(epoch : 1982.6, permanent tide not included)

CDP number	name	x(m)	y(m)	z(m)	status*
7090	Yarragadee	-2389002.23	5043333.85	-3078528.53	0
7105	Washington	1130715.79	-4831353.81	3994108.07	0
7110	Mon. peak	-2386283.58	-4802354.63	3444882.83	0
7112	Platteville	-1240683.32	-4720464.66	4094482.58	0
7210	Maui	-5466009.46	-2404422.86	2242187.75	0
7834	Wettzell	4075531.06	931777.31	4801617.83	0
7833	Kootwijk	3899224.71	396739.07	5015073.22	0
7838	Simosato	-3822384.82	3699366.73	3507572.34	1
7907	Arequipa	1942787.15	-5804078.99	-1796919.97	1

* 0 : fixed station
1 : estimated station

Table 3. JHDSC-2(epoch : 1984.80, permanent tide not included)

CDP number	name	x(m)	y(m)	z(m)	status*
1181	Potsdam	3800621.340	882005.309	5028859.739	0
7086	Fort Davis	-1330121.003	-5328532.255	3236146.927	0
7090	Yarragadee	-2389007.481	5043331.868	-3078527.124	0
7105	Washington	1130720.328	-4831352.954	3994108.568	1
7109	Quincy	-2517235.994	-4198558.337	4076571.825	0
7110	Mon. Peak	-2386279.158	-4802356.889	3444883.211	1
7121	Huahine	-5345868.277	-2958148.487	-1824625.026	1
7122	Mazatlan	-1660090.188	-5619103.211	2511639.243	1
7210	Maui	-5466007.043	-2404428.299	2242188.416	1
7810	Zimmerwald	4331283.534	567549.240	4633140.238	1
7834	Wettzell	4075530.188	931781.230	4801618.392	0
7835	Grasse	4581691.869	556159.276	4389359.474	1
7837	Shanghai	-2831087.666	4676203.584	3275172.901	1
7838	Simosato	-3822388.330	3699363.577	3507573.186	1
7839	Graz	4194426.797	1162693.822	4647246.852	1
7840	RGO	4033463.840	23662.263	4924305.153	1
7843	Orroral	-4446476.890	2678127.310	-3696252.010	1
7886	Quincy2	-2517244.864	-4198552.155	4076572.977	1
7907	Arequipa	1942791.901	-5804077.812	-1796919.276	1
7939	Matera	4641965.185	1393069.848	4133262.346	0

Table 4. JHDSC-3(epoch : 1986.76, permanent tide not included)

CDP number	name	x (m)	y (m)	z (m)	status*
1181	Potsdam	3800621.306	882005.341	5028859.759	0
7086	Fort Davis	-1330121.032	-5328532.258	3236146.910	0
7090	Yaragadee	-2389007.584	5043331.884	-3078527.018	0
7105	Washington	1130720.392	-4831353.012	3994108.478	1
7109	Quincy	-2517236.029	-4198558.341	4076571.800	0
7110	Mon. Peak	-2386279.216	-4802356.794	3444883.240	1
7122	Mazatlan	-1660090.204	-5619103.192	2511639.131	1
7210	Maui	-5466007.001	-2404428.137	2242188.454	1
7834	Wettzell	4075530.155	931781.263	4801618.413	0
7838	Simosato	-3822388.362	3699363.594	3507573.190	1
7839	Graz	4194426.800	1162693.823	4647246.696	1
7840	RGO	4033463.875	23662.353	4924305.137	1
7907	Arequipa	1942791.795	-5804077.799	-1796919.213	1
7939	Matera	4641965.152	1393069.884	4133262.370	0

Table 5. JHDSC-4(epoch : 1988.11, permanent tide not included)

CDP number	name	x (m)	y (m)	z (m)	status*
1181	Potsdam	3800621.284	882005.361	5028859.772	0
7090	Yaragadee	-2389007.649	5043331.894	-3078526.951	0
7105	Washington	1130720.259	-4831353.100	3994108.475	1
7109	Quincy	-2517236.051	-4198558.343	4076571.785	0
7110	Mon. Peak	-2386279.222	-4802356.792	3444883.277	1
7122	Mazatlan	-1660090.255	-5619103.286	2511639.256	1
7210	Maui	-5466007.127	-2404427.947	2242188.711	1
7834	Wettzell	4075530.135	931781.242	4801618.427	0
7835	Grasse	4581691.850	556159.423	4389359.610	1
7838	Simosato	-3822388.307	3699363.540	3507573.232	1
7839	Graz	4194426.760	1162693.831	4647246.703	1
7840	RGO	4033463.833	23662.357	4924305.282	1
7939	Matera	4641965.132	1393069.907	4133262.385	0

に引き直すことが必要である。このため、NASAのデータベースであるCDDISの資料 (Noll, 1991) を用いた。

(2) 元期の統一

ITRF89をJHDSC-1, 2, 3, 4の元期にそろえるため、プレート運動モデルAM0-2 (Minster and Jordan, 1978) を用いた。

(3) 潮汐変形の永年項の補正

地上の点は、月、太陽の引力による地球の潮汐変形のため、数10cm変動しているが、この変動には10数cmにおよぶ永年項がある。この永年項が、地球基準座標系に含まれているかどうかは注意しなくてはならない。潮汐変形の永年項は以下の式で与えられる。

$$\Delta h = -0.12083 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \phi - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{m})$$

$$\Delta N = -0.05071 \cos \phi \sin \phi \quad (\text{m})$$

ただし、 Δh は高さ方向、 ΔN は北方向の変位を表す。解析の過程では、ITRF, JHDSCいずれも潮汐変形の効果は考慮されているが、地球基準座標系の表現値には、ITRFでは潮汐変形の永年項が含まれており、JHDSCでは含まれていない。

以上の補正を行うと、同一点、同一時刻、同一モデルでの比較が行える。

ITRF89と他の代表的な地球基準座標系との比較は、IERSの年報 (IERS, 1990) に詳しく掲載されているので、ここではITRF89と水路部の地球基準座標系との比較を行う。

(x_1, y_1, z_1) をITRF89, (x_2, y_2, z_2) をJHDSC-1, 2, 3, 4として7パラメータを最小自乗法によって求めた。JHDSC 2, 3, 4については誤差が求められているので、重み付き最小自乗法を用いた。

JHDSC-1は、古い座標系に準拠しており解析ソフトウェアも開発途上であったこともあって、他と比べて精度が悪く、ITRFに対して、原点で60cm、回転成分で10mas (30cmに相当) 程度ずれている。また、7パラメータで変換を行った後も30cmの残差が残っており、これがほぼJHDSC-1の精度と考えられる。

Table 6. Estimated 7 parameters

	J H D S C - 1	J H D S C - 2	J H D S C - 3	J H D S C - 4
epoch	1982.6	1984.80	1986.76	1988.11
number of stations	9	20	14	13
$T_1(\text{cm})$	-17 ± 12	4.2 ± 1.7	1.4 ± 1.6	1.8 ± 1.8
$T_2(\text{cm})$	1 ± 11	0.6 ± 1.6	-0.1 ± 1.5	0.3 ± 1.8
$T_3(\text{cm})$	62 ± 11	-7.2 ± 1.7	-6.6 ± 1.6	-7.2 ± 1.8
$D (10^{-8})$	0.4 ± 1.7	-1.3 ± 0.2	-1.3 ± 0.2	-1.5 ± 0.3
$R_1(\text{mas})$	6 ± 4	0.5 ± 0.7	0.8 ± 0.6	0.5 ± 0.8
$R_2(\text{mas})$	9 ± 5	1.4 ± 0.7	1.3 ± 0.7	1.1 ± 0.8
$R_3(\text{mas})$	1 ± 4	2.9 ± 0.5	3.6 ± 0.6	3.7 ± 0.6
residuals(cm)	30	5.6	4.6	5.3

JHDSC-2, 3, 4は, ITRFに対して, 原点がz軸方向に7cm, x軸方向に1.5~4cmほど食い違っている。y軸方向の差はほとんどない。スケールについては $1.3\sim 1.5\times 10^{-8}$ (8~10cmに相当)異なっている。水路部の座標系の方が座標の目盛りの間隔が荒い。また, x, y, z軸の廻りに各々0.5~0.8, 1.1~1.4, 3~4 masの回転成分がある。これらは, JHDSC-2, 3, 4 いづれについても同じ傾向を示す。これは, 水路部の座標系がもともとテキサス大学のSLR座標系SSC(CSR)85L07に準拠しているためで, 上記の結果はほぼITRF89とSSC(CSR)85L07の差と考えて差し支えない。7パラメータで変換を行った後の残差は約5cmであり, これがほぼJHDSC-2, 3, 4の精度と考えられる。

JHDSC-2, 3, 4の原点がITRFの原点と異なったのは, JHDSC-2, 3, 4では観測点が地球上に均等に分布しておらず, 北半球の特定の場所に偏る傾向があるため, 固定した観測点の座標の誤差が, 座標系の誤差として残されるためであろう。とくに, 観測点は北半球に集中するため, 原点の南北方向の誤差が大きくなることは避けられない。また, 解析に用いた力学モデルの誤差による影響も考えられる。スケールの差は, 地球の質量と重力定数の積(GM), 衛星の重心補正, 観測点の潮汐変形などのモデルの違いに起因するものと思われる。また, 回転成分については, JHDSC-2, 3, 4で固定された観測点の座標値に起因するものである。これら回転成分は, JHDSC-2, 3, 4に基づいた地球回転パラメータITRFに基づいた地球回転パラメータを比較する際に注意する必要がある。

4. WGS84

現在, 地球基準座標系として最も使われているのは言うまでもなくWGS84である。

座標系を論ずる場合, 座標系の定義と定義にそって実現された座標系とは異なるものであり, 両者は厳密に区別する必要がある。実現された座標系とは, 各観測点の座標値によって逆に定義されているのであり, 実現された座標系の精度は, どのような観測をもとに座標系が作られたかに依存する。

(定義)

WGS84は, 米国国防省が用いている地球基準座標系で, 地球の中心を原点とし, z軸がCTP, x軸がグリニッジ方向(BIHの定義)をむいた地球固定座標系と定義されている(DMA, 1986)。

(実現)

WGS84は, もともとNNSSのモニター局(TRANET)の座標をNNSSのドップラー観測から求めたNSWC9Z-2という座標系に基づいている。

NSWC9Z-2はドップラー観測によっており, 十分な精度で地心と結び付いていないため, SLR座標系との比較が行われ, 原点が4.5m(±0.5m)北に偏っていたことがわかった。また, NSWC9Z-2とSLR座標系の原点は, x, y軸方向にはほとんどずれていなかった。このため, WGS84の原点はNSWC9Z-2の原点を南に4.5m動かしている。また, VLBIとの比較から, NSWC9Z-2をBIHの定義による経度にあわせるために, NSWC9Z-2の原点を0.814"西に動かしている。さらに, NSWC9Z-2において採用されているGM(G; 万有引力常数, M; 地球の質量)と光速の誤差から, 座標系のスケール誤差が生じており, このためNSWC9Z-2を 0.6×10^{-6} (地表で3.8mに相当する)だけ縮めたものをWGS84としている。

NSWC9Z-2はNNSSのドップラー観測から求められた座標系であるから, 1m程度の誤差は含まれているため, これに基づいたWGS84には1m以上の誤差が含まれているものと考えられる。

さらに, WGS84には, 地球の静的モデルしか含まれていない(含まれていたとしてもオープンになっていない)。WGS84にはプレート運動モデルが含まれていないため, 年月の経過とともにプレート運動などに起因

する座標系の歪みは避けることが出来ない。地球表面は、プレート運動の他にも、月や太陽による固体潮汐、海洋潮汐や大気加重による地殻の歪み、地殻変動、火山活動、地震など様々な要因によって変動しているが、WGS84にはこれら変動が取り入れられていない。

地球基準座標系として現在最も使われているWGS84には、以上のような誤差要因があり、測地目的に用いるには不十分な精度であると言わねばならない。

WGS84は軍用の座標系であり、WGS84で正確に座標が分かっている点には一般には公開されていない。このため、WGS84と他の地球基準座標系との関係を明らかにすることは困難であるが、定義からWGS84とITRFは近いものと思われる。一部では、両者の差は約1 m程度であるとの報告もなされているが(Schutz, 1991)、測地目的でなければ両者は一致しているものと考えて差し支えない。

5. 考 察

観測点の位置は、プレート運動や地殻変動などによって変化している。このうちプレート運動については、かなり良いモデルが作られてはいるが、モデル誤差は避けられない。また、地殻変動の多くはモデルさえ作られていないのが現状である。本稿では、地球基準座標系の時間変化をプレート運動モデルAM0-2のみによって評価しているが、下里やアレキパ(ペルー)などのプレート境界域では、AM0-2からのずれが大きいたことが報告されている(Smith et al., 1990)。したがって、ITRF89をJHDSCの元期に変換した際、AM0-2のモデル誤差の影響をうけている。今後、SLR, VLBIなどの観測を継続して行い、地殻力学についての情報を集め、より精度の高いプレート運動モデルを構築する必要がある。

WGS84と他の地球基準座標系の関係は、厳密にはいまだに不明であるが、WGS84のユーザーが非常に多く応用分野も多岐にわたることを考えると、早急にWGS84と他の座標系(例えばITRF)との関係が明らかにされることが望ましい。

参 考 文 献

- Boucher, C. and Z. Altamimi : The Initial IERS Terrestrial Reference Frame, *IERS Tech. Note 1*, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, Paris, (1989).
- Boucher, C. and Z. Altamimi : ITRF89 and other realizations of the IERS Terrestrial Reference System for 1989, *IERS Tech. Note 6*, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, Paris, (1991).
- DMA : Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 Technical Report, *DMA Tech. Rep. 8350.2-A*, DMA, Fairfax, (1986).
- IERS : Annual Report for 1988, 1989, 1990, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, Paris, (1989, 1990, 1991).
- McCarthy, D. D. ed. : IERS Standards (1989), *IERS Tech. Note 3*, Central Bureau of IERS, Observatoire de Paris, Paris, (1989).
- Melbourne W., R. Anderle, M. Feissel, R. King, D. McCarthy, D. Smith, B. Tapley, R. Vicente : Project MERIT Standards, USNO Cir. 167, U. S. Navy Observatory, Washington D. C., (1983).
- Minster, J. B., T. H. Jordan : Present-day plate motions, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, p. 5331, (1978).
- Noll, Carey : private communication, (1991).
- Sasaki, M. and M. Nagaoka : *Data Report of Hydrogr. Obs.*, Series of Astronomy and Geodesy, No. 18,

- p.55, (1984).
- Sasaki, M. : Satellite Laser Ranging at the Simosato Hydrographic Observatory and its preliminary results, *J. Geod. Soc. Japan*, Vol. 30, No. 1, p. 29, (1984).
- Sasaki, M. : Study of the Earth's Dynamics by means of Satellite Laser Ranging Techniques, *Report of Hydrogr. Res.*, No. 26, p. 99, (1990).
- Smith, D. E., R. Kolenkiewicz, P. J. Dunn, J. W. Robbins, M. H. Torrence, S. M. Klosko, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, N. B. Douglas, S. K. Fricke : Tectonic Motion and Deformation from Satellite Laser Ranging to LAGEOS, *J. of Geophys. Res.*, Vol. 95, No. B13, p. 22013, (1990).
- Schutz, B. E. : private communication, (1991).
- Tapley, B. D., R. J. Eanes and B. E. Schutz : Earth Rotation from laser ranging to LAGEOS ; ERP (CSR)85L07, Report of MERIT-COTES Campaign on Earth Rotation and Reference Systems, Part III, M. Feissel ed., B67, IHB, Paris, (1986).