

V. 2 地球回転計測への応用

—国際地球回転事業と西太平洋電波干渉計—

横山 紘一*

(平成元年10月6日受理)

V. 2 APPLICATION TO EARTH ROTATION MEASUREMENT

By

Koichi YOKOYAMA

We describe the expected contribution of the Western Pacific VLBI Network (WPVN) of the Communications Research Laboratory to Earth rotation study, in the light of the fruitful results hitherto achieved by international VLBI activities.

It is quite timely that the WPVN is ready to run when VLBI networks in the International Earth Rotation Service (IERS) are going to be reorganized and extended to the southern hemisphere, so that they may enrich the IERS community with the more accurate and wide-ranging data covering Earth rotation and reference frame issues. Participation of the WPVN in the IERS is indispensable for that purpose.

1. はじめに

1988年1月1日から、それまでの国際極運動観測事業 (International Polar Motion Service: 以下 IPMS と略記) と国際報時局 (Bureau International de l'Heure: BIH) に代わって、国際地球回転事業 (International Earth Rotation Service: IERS)^{(1)~(4)}が新たな国際協力事業として活動を開始した (IERS 発足に至る経緯については筆者の解説⁽⁵⁾を参照されたい)。IERS がこれまでの国際事業である IPMS や BIH, またさらに遡って国際緯度観測事業 (International Latitude Service: ILS, 1899年~1961年) など異なる最も顕著な特徴は、地球回転変動や測位精度の劇的な改良にある。

すなわち、IERS 以前の国際事業が主として用いてきたのは、a) 光学望遠鏡による銀河系内恒星の角度測定法と b) 人工衛星から発信された電波のドップラーシフトを測定する方法であった。前者は1星の角度測定誤差が10分の数秒角 (地上距離にして数 m から 10 数 m) 程度の大気差の影響を避け難く、他方後者においては、後に NOVA 衛星の開発によって大気摩擦の影響を大幅

にとり除くことを可能にした⁽⁶⁾とはいえ、基本的に低高度衛星の軌道決定誤差の影響が避け難い。いずれの方法においても、極運動の決定精度は数 10 cm から 1 m 程度を超えるものではなかった。

一方、IERS が採用した VLBI および月/人工衛星レーザ測距法 (Lunar/Satellite Laser Ranging: LLR/SLR) は、基本的に電磁波伝播路長の測定に依拠するため大気差の影響を2桁以下に抑えることができる。この結果、地球回転変動を数 cm の精度で決定することが可能になった。同時に、時間分解能も今や数時間程度にまで向上し、やはり数時間程度の時間分解能を持つ大気による地球回転励起関数と併せて解析することによって、変動の微細構造とその原因となるメカニズムの解明はここ数年の間に急速な進展を遂げつつある (たとえば、J.O. Dickey 他⁽⁷⁾, T.M. Eubanks 他⁽⁸⁾)。また VLBI データからは歳差と章動の振幅と位相が高精度で決定でき^{(9) (10)}、超伝導重力計などによる地球潮汐の振幅、位相の観測結果と比較解析することにより、コアダYNAMIXS など地球内部物理学への大きな貢献が期待されている。さらに、観測局位置の cm 以下の精度での計測は、測地学の基本である地球基準座標系の確立とともに、グローバル・テクトニクスに関するパラメータを

* 国立天文台 地球回転研究所

産出し、近年急速に整備されつつある GPS 観測網との結合により、局所的地殻変動研究に寄与することができる。また、 μas (10^{-6} 秒角) に迫る精度で銀河系外電波源の位置決定が可能になったことにより、慣性座標系の構築が可能になりつつある。

IERS が用いている観測方法 (VLBI, LLR, SLR) の中で、VLBI は、a) 観測天体が地球から数億光年以上の彼方にあり固有運動の影響をほぼ無視できるため慣性座標系の構築が可能で唯一の方法であること、b) 観測の幾何学が単純で、観測量と目的パラメータ間の関係が簡単に記述できること、c) 極運動、UT1、歳差・章動の3種類の地球回転パラメータを全て推定できる唯一の方法であることなどの理由から、最も優れた方法である。

本稿では、このような認識のもとに、地球回転研究における VLBI に関する国内外の現状と将来を概観しながら、西太平洋電波干渉計の果たし得る役割について筆者の考えるところを述べる。

2. VLBIによる地球回転観測のためのわが国の研究協力態勢

わが国は、緯度観測所 (現国立天文台地球回転研究系/水沢観測センター) を設立して ILS に参加して以来、一貫して地球回転観測のための国際協力事業に寄与してきた。その間緯度観測所は、ILS および IPMS において中央局を担当するとともに、光学天文観測機器の導入・開発・改良、人工衛星ドップラー法の導入など各時代の最先端技術による観測態勢の整備に努め、わが国における地球回転観測・研究の中心的役割を果たしてきた。

1970年代から始まった、LLR, SLR, VLBI などのいわゆる宇宙技術による地球回転の決定精度の劇的な向上とその後組織された MERIT 計画⁽¹⁵⁾の進展を踏まえて、緯度観測所は将来の観測機器として VLBI を保有することがわが国の学問の発展にとって最も有効な選択であるとの結論に達し、位置天文学連絡会などで検討を行った。その結果、1985年12月、位置天文学連絡会は、わが国の関連分野の装置計画としての「地球回転・基準座標系採用 VLBI: VLBI for the Earth Rotation study and Astrometry: VERA」を提言⁽¹¹⁾し、緯度観測所を中心とする建設グループを設立し、計画の作成にあたってきた^{(11)~(13)}。

しかし、緯度観測所の時代にあっては組織体制上の問題から実現できず、また1988年7月1日に国立天文台に改組後も、大型装置計画との関連において依然として実現に至っていない。

この間、国際的には米国、ヨーロッパを中心として

VLBI 観測網が着々と整備されるとともに、わが国では電波研究所 (現通信総合研究所) が、米国の Mark-III VLBI システムと互換性のある K-3 VLBI システムを完成し⁽¹⁴⁾、1983年から NASA Crustal Dynamics Project (CDP) に参加し、多くの成果をあげるようになった。このような国内外の情勢を踏まえ、緯度観測所は電波研究所とともに地球回転の国際観測網に早期に参加することが、わが国の研究発展と国際協力への寄与という両面において極めて重要と考え、鹿島支所の 26 m アンテナと K-3 VLBI システムの地球回転観測への参加を検討した。

1987年3月、緯度観測所と電波研究所は「国際地球回転事業に関する観測協力」協定を調印した。この協定は、緯度観測所が国立天文台に改組後、新たにミリ波 VLBI も含む「VLBI に関する国内共同研究」という形で国立天文台と通信総合研究所との間で調印された。

これらの協定の基づき、国際 VLBI 観測網の整備に責務を負っていた IRIS (International Radio Interferometric Surveying; COSPAR/IAG Sub-Commission, 1983年創設) の中心機関であった米国測地量局 (NGS) と協議の結果、アメリカの3局と鹿島からなる太平洋観測網 (IRIS-P, 詳しくは後述) が創設された。

IRIS-P は、毎月1回の24時間観測を継続し優れた精度の地球回転パラメータを産出している。その結果は欧米の観測局からなる大西洋観測網 (IRIS-A)⁽¹⁶⁾の地球回転パラメータと 1~2 mas 程度で一致することが明らかになっている。しかし、IRIS-A が行っているような5日毎の24時間観測ならびに西独の Wettzell と米国の Westford 間の東西1基線による UT1 の連日観測などのデータ取得の努力に較べると、これまでの IRIS-P は実験観測の域にとどまっていたといえよう。

IRIS グループは、本年8月英国の Edinburgh で開かれた IAG 学術総会の際今後の方針を検討した⁽¹⁶⁾。特筆すべきことは、南半球への VLBI 観測網の拡張が急速な進展を見ていることである。

このような国際情勢の中で、IRIS-P の国際的重要性は急速に高まってきており、新たな観測計画を立案し、より高い学術目標を追求すべき時期にきている。国立天文台は野辺山に口径 6 m の地球回転用アンテナを設置して観測を開始したが、VERA が目指している学術目的を満足するものではなく、したがって単独で上記の目標を達成することは難しい。国立天文台と通信総合研究所との共同研究において、西太平洋電波干渉計を有効に運用することが重要である。

3. 地球回転研究のための国際協力 (IERS)

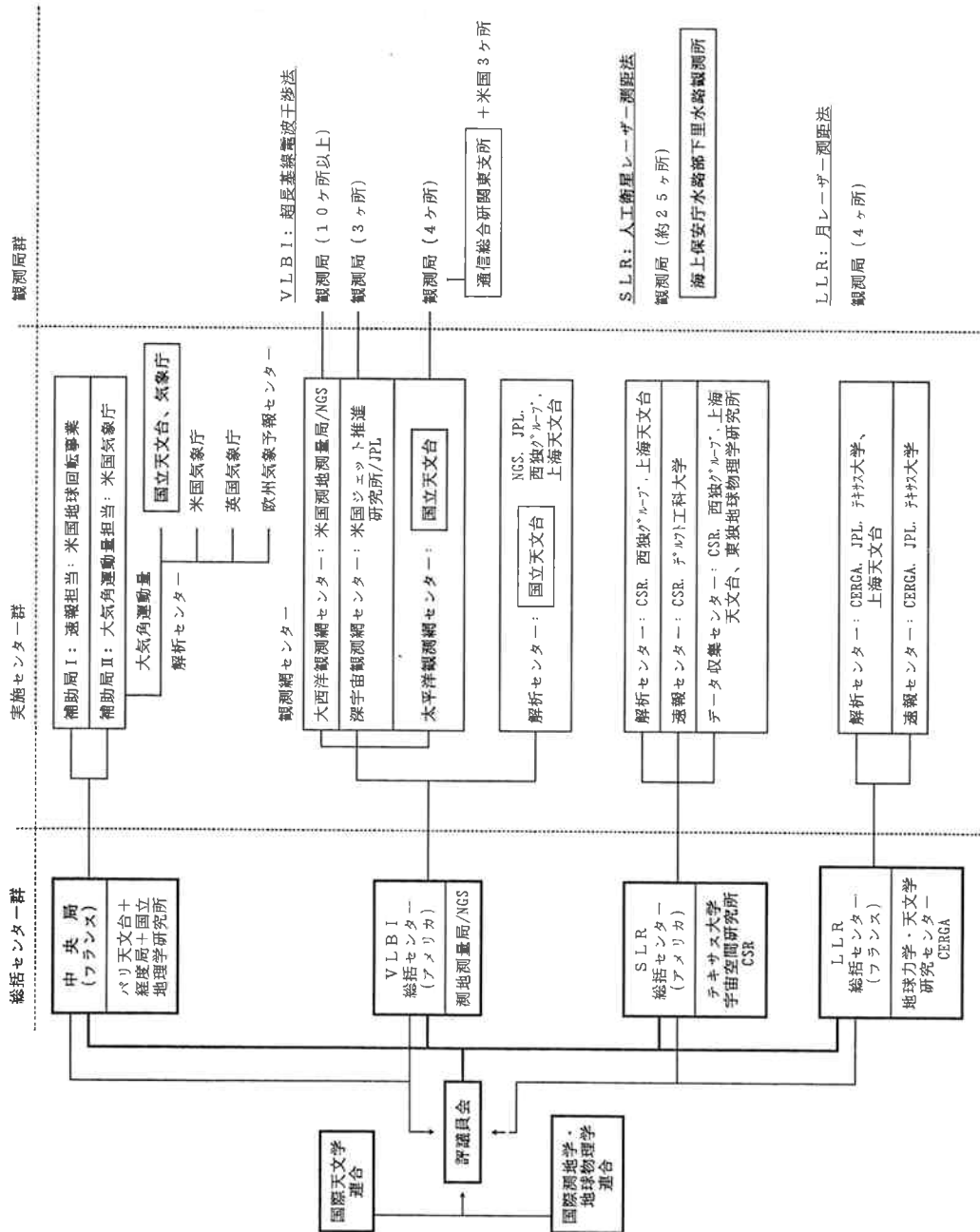
国際天文学連合 (IAU) と国際測地学および地球物理学連合 (IUGG) によって採択された決議には、a) 地球回転の監視に加えて、b) 地球基準座標系の確立と保持が IERS の目的として明記された⁽⁴⁾。これまでの国際事業と明確に異なる問題意識の下に組織されたことがわかる。

IERS の組織図を第1図に示す。

IERS では、中央局に加えて3つの観測方法それぞれの総括センターが最も重要な役割を果たしており、地球回転や基準座標系に関するパラメータの決定に責任を有している。

第2図に IERS 傘下の VLBI 観測局を示す。

第1表には、地球回転観測を主目的として運用中あるいは運用予定の観測網を示した。NAVNET は米国海軍

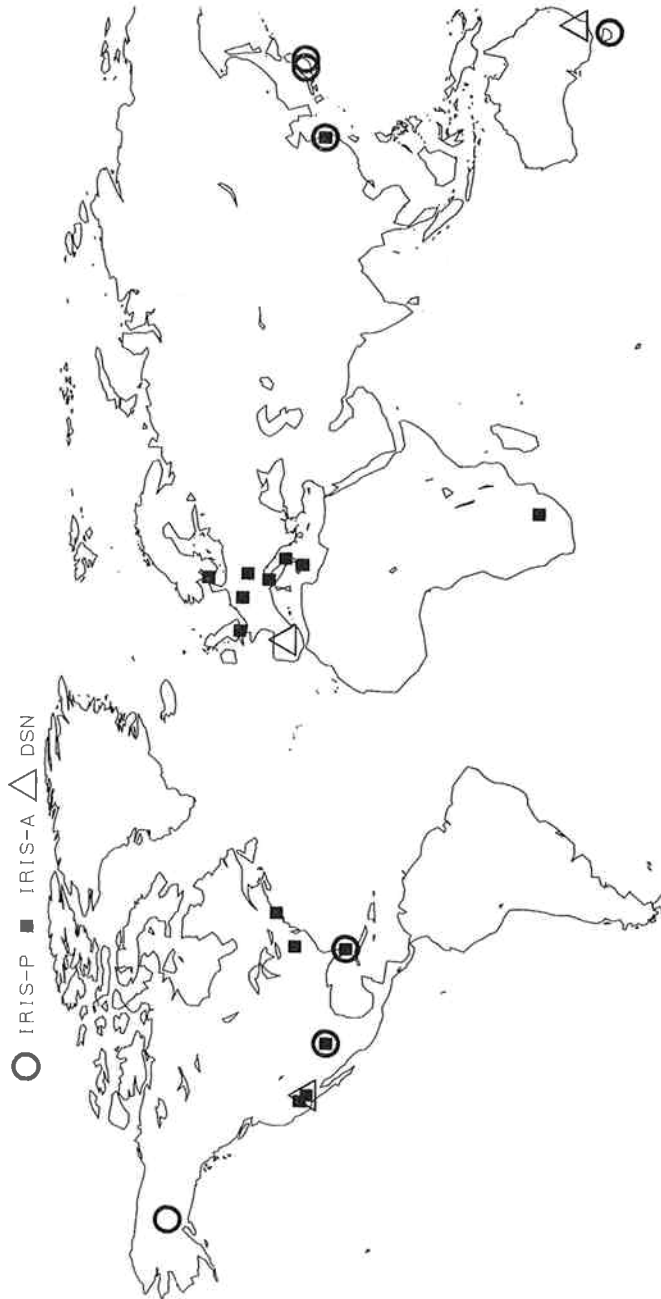


第1図 国際地球回転事業 (IERS) の組織構成と各国の役割分担
1990年からは、GPS 総括センターが加わる予定

天文台 (USNO) が運用している米国の国内観測網であるが、NGS と USNO の協定によれば、将来は現在の IRIS-A と交互に 1 週間間隔の観測を行うことによって、結果的に地球回転パラメータを 3.5 日間隔で産出しようという意図のもとに構築されたものであることを考慮して表に入れた。

第 1 表に示した観測網は必ずいづれかの観測網と重複

する観測局を含んでいる。またすべての局が MK-III または K-3 記録装置を装備し、均質なデータが取得できるシステムになっている (DSN 局も最近 Mark-III 記録装置を導入した)。これらは、観測網相互の地球座標系を高精度で結合し、グローバルな地球基準座標系を確立、保持するという IERS の目的を達成するための VLBI グループの基本的方針によるものである。



(水沢観測センター 石井久氏提供)

第 2 図 IRIS 地球回転観測局 (計画中のものも含む)

第1表 IERS における VLBI 観測網

| 観測網 (センター) | 観測態勢 | 観測局 |
|---------------------------------|---|--|
| IRS-P (国立天文台) | 毎月1回の24時間観測 (1989年4月から継続) および 一定期間の連日24時間集中観測 (1989年に続いて1990年以降も実施予定) | Fairbanks, Alaska, USA Ft. Davis, Texas, USA/Mojave, Cal. USA ¹⁾ Richmond, Fla. USA Kashima, Japan Nobeyama, Japan ²⁾ Tasmania, Austraria ³⁾ Shanghai, China ⁴⁾ |
| | 南北1基線による1日数時間一定期間連日の極運動観測 (1990年から実施予定) | Kashima/Nobeyama-Tasmania 基線 |
| IRIS-A (NGS) | 5日毎の24時間観測 (1980年9月から継続) | 定常観測局 Westford, Mass. USA Richmond, Fla. USA Ft. Davis, Texas USA/Mojave, Cal USA ¹⁾ Wetzell, FRG 間欠的観測局 Hartebeesthoek, RSA Bologna, Italy Noto, Sicily, Italia Matera, Italy Chilbolton, UK Effelsberg, FRG Green Bank, W. Va. USA Goldstone, Cal. USA Big Pine, Cal. USA Onsala, Sweden |
| | 東西1基線による連日数時間の UT1 観測 | Westford-Wetzell 基線 |
| IRIS-S ⁵⁾ (IFAG?) | 1990年から開始予定 (詳細は未定) | Westford, Mass. USA Mojave, Cal. USA Richmond, Fla. USA Wetzell, FRG Hartebeesthoek, FSA |
| DSN (JPL) | 毎週1回の24時間観測 (1978年から実施) | Goldstone, Cal. USA Tidbinbilla, Austraria Madrid, Spain |
| NAVNET (USNO) | 毎週1回の24時間観測 (米国内観測網, 将来は国際観測網に参加の 予定, 1989年1月開始) | Fairbanks, Alaska USA Green Bank, W. Va. USA Richmond, Fla. USA Kauai, Hawaii, USA |

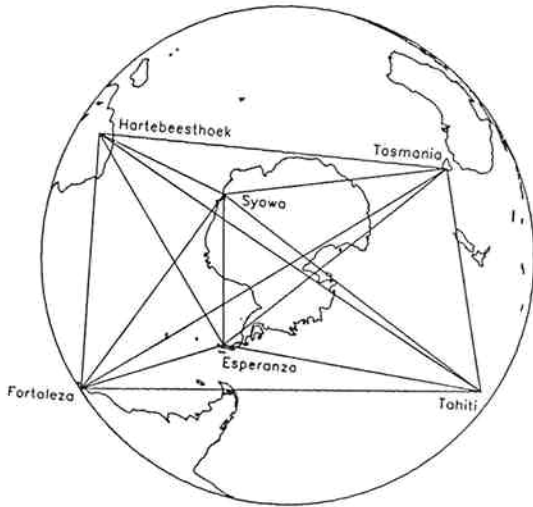
注: 1) Ft. Davis は1989年9月17日で観測中断, 以後 Mojave が引き継ぐ。

2) 国立天文台地球回転研究系所属の口径6mアンテナは, 1989年9月20日に通信総合研究所鹿島の口径26mアンテナとのフリンジテストに成功して, 11月から国際観測網に参加。

3) Tasmania の口径26mアンテナは, Ft. Davis の Mark-III バックエンドを移設, 9月26日のCDP実験を経て, IRIS-P に10月から定常的に参加。

4) 上海天文台は IRIS-P に参加の意向あり。

5) 南半球観測網



第3図 南半球 VLBI 観測局
Fortaleza と Esperanza は計画中
(Carter and Robertson⁽¹⁷⁾ による)

しかし、第1表に示した観測局の中で南半球の局は、Tidbinbilla, Tasmania, Hartbeesthoek の3局だけであり、上の地球基準座標系の目的を追求するためには十分な地理的配置にはない。そこで、IRIS グループは、ブラジルの Fortaleza に米国の Green Bank で結合

素子電波干渉系計として用いたことのあるアンテナを移設することを計画中で、サンパウロ工科大学と折衝中である。また西独フランクフルトの測地学研究所 (IFAG) は、南極の Esperanza (グラハム半島) に VLBI アンテナの建設を計画している。また、通信総合研究所と極地研究所は共同して昭和基地との VLBI 計画を推進している。これらの観測局が整備されると第3図 (Carter and Robertson⁽¹⁷⁾ による) のように、南極をとりまく観測網が構築される。

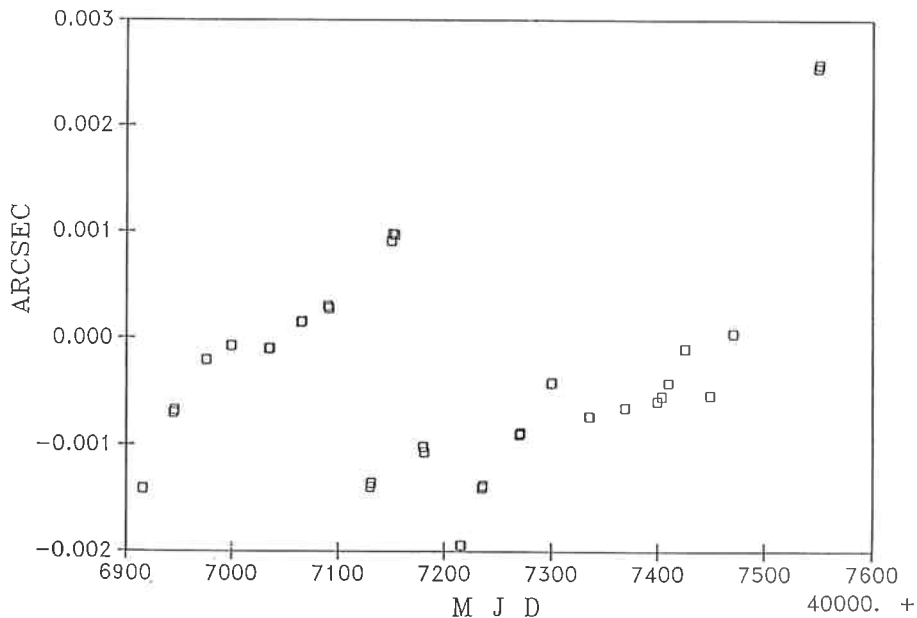
4. IRIS-P の現状と将来

4.1 現状

IRIS-P (P : Pacific) は1988年4月以来、毎月1回の24時間観測を行ってきた。わが国は、国立天文台と通信総合研究が共同で鹿島の26mアンテナ及びK-3 VLBI システムを運用して観測に参加している。水沢の VLBI 解析センターでは、これまで2年半およそ30回の IRIS-P データと1984年以降の IRIS-A データを用いて、観測局位置、電波源位置 (いずれも constant と仮定) および地球回転パラメータを求めた⁽¹⁸⁾。

IRIS-P 傘下の4局の中、Ft. Davis/Mojave と Richmond は IRIS-A 観測網の局でもあり、それらの座標は IRIS 座表系で決められている。一方、Fairbanks

IRIS-P X



第4図 水沢ソフトウェアによる IRIS-P と NGS ソフトウェアによる IRIS-A の極運動の X 成分の比較
水沢-NGS 近接した点は水沢ソフトウェアによる IRIS-A の X 成分

と Kashima は CDP 観測網の局であり、それらの座標は IRIS 座標系にのっていないため、暫定的に採用した座標が IRIS 座標系からずれていることがわかっていた⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。また、電波源の位置についても、数 mas 程度の誤差があることがわかっていた。NGS では、いわゆる SOLVE3 を用いてこれらの補正量を global solution として定期的に解いているが、水沢の解析センターでもこのほど、global solution 用ソフトウェアが完成したので、同様の解を求め NGS のものと比較を行った。

第4図は水沢ソフトウェアによる IRIS-P と NGS ソフトウェアによる IRIS-A との差を、極運動の X 成分について示したものである⁽¹⁸⁾。IRIS-P と IRIS-A の極運動が 1 mas 程度の平均誤差で一致していることがわかる。このことは NGS による IRIS-P のデータ解析でも解認されている⁽²¹⁾。多少のバイアスがあるのは以下の理由によるものと思われる。すなわち、観測局の位置の補正量を求めるにあたって、仮定したのは定数だけであって変化量は考慮されていない。したがって、採用したプレート運動モデル (AM0-2)⁽²²⁾ で補正しきれない実際の運動が地球回転パラメータ (もちろん、電波源位置も含む) の決定に影響しているものと思われる。この問題はデータの積み重ねによって解決することができるものである。

4.2 今後の計画

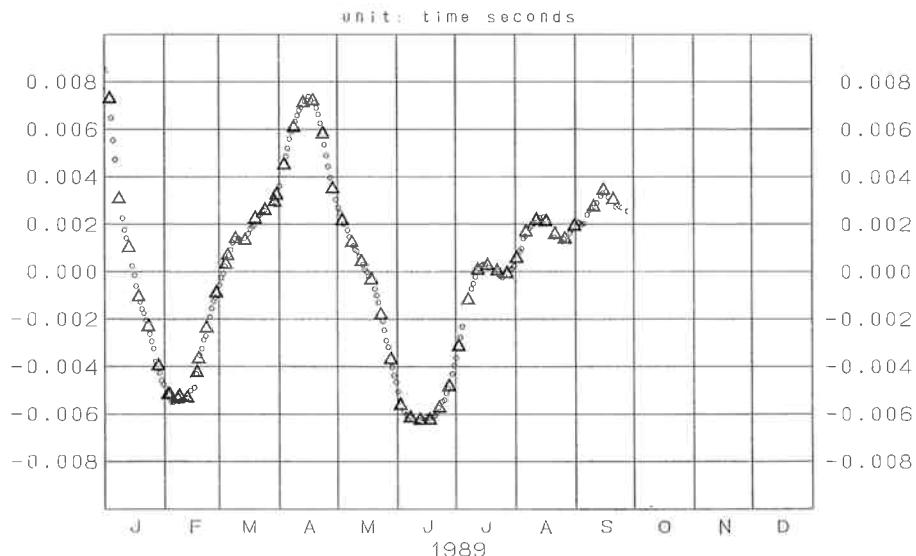
(1) 南半球への拡張

NGS と Tasmania 大学との合意によって、Ft. Davis

にあった Mark-III システムを Tasmania 大学の 26 m アンテナに装着して、国際観測に参加する態勢がこの程整い、10月から試験的に IRIS-P に参加することが決定した。これによって、IRIS-P は最も優れた観測網となることは明かであり、したがって、観測の高頻度化を図ることが大きな課題になってきた。

(2) 集中観測

国立天文台と通信総合研究所は、1988年に連続した集中観測を NGS に提案したが実現しなかった。しかし、平成元年度に再度調整の結果、国立天文台と NGS は、それぞれ日本学術振興会と米国の National Science Foundation に、平成元年度から2年間にわたる「日米共同 VLBI 観測による地球回転変動及び地球・天文基準座標系の研究」を応募して採択された。この研究の目的は、24時間の地球回転観測を連続して行い、地球回転の1日より短い周期の変動を検出しようとするものである。1990年は2月11日 (UT) から21日までの11日間、IRIS-P, IRIS-A, NAVNET 及び NASA CDP が観測を行なうことになっている。その間、IRIS-P は5日間を担当することになっている。集中観測によって得られるデータを、IERS の中央局補助局 (第1図参照) が定常的に公表している大気による地球回転励起関数と併わせて解析しようという試みである。また、UT1 の解析から半日周期の振幅約 0.2 ms の変動がありそうだと最近の報告もあり⁽²¹⁾、コアダイナミクスとの関連において注目される現象である。来年度は Tasmania も含む観測網による年間数回の集中観測を実施できるよう



第5図 IRIS-A による UT1 の日値
 △: 5日毎の24時間観測による値
 ○: 毎日1時間の観測による値

(水沢観測センター石井久氏提供)

調整中である。

(2) 極運動の連続観測

南半球の Tasmania が稼働することにより、IRIS-P の展望は大きく開けることになった。日本の VLBI 局と Tasmania はほぼ南北の基線をなしている。このような基線は、地球回転パラメータの中、極運動の決定に威力を発揮する。来年度は、Kashima/Nobeyama-Tasmania 基線による連日の数時間観測によって極運動を求める実験に着手し、さまざまな観測網の24時間観測によって決定される極運動の間隙を埋めることを計画している。このような1基線観測から極運動を決定するためには、地球回転パラメータの UT1 成分は既知量として予め入力する必要がある。極運動に較べて変動の大きい UT1 の値を正しく入力するためには、通常の5日毎の24時間観測のデータを内挿するのでは十分な精度がえられない。このような目的に合うデータとして、IRIS-A による UT1 の日値がある。これは、Westford-Wetzell というほぼ東西基線による連日の1~2時間観測で決定されているものである。その結果を第5図に

示す。この図から、東西1基線によって決定された UT1 が、24時間観測による結果の間を極めてよい精度で内挿していることがわかる。

IRIS-P の南北基線による極運動の連日観測によって、UT1 の連日観測によって得られた第5図同様なデータを得ることが可能になるのである。

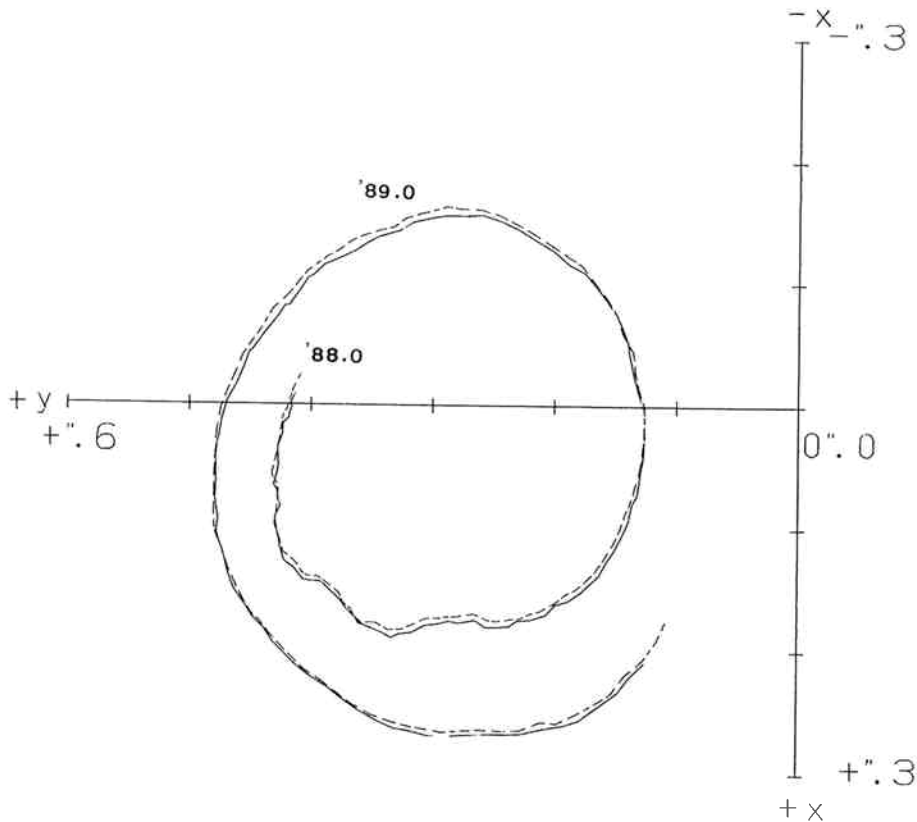
5. VLBI から得られた地球回転に関する成果

VLBI によってこれまで得られた地球回転に関する結果を簡単に紹介するとともに、西太平洋電波干渉計の運用を念頭にきながら将来の見通しについて述べる。

5.1 地球回転パラメータの相互比較 (VLBI と SLR)

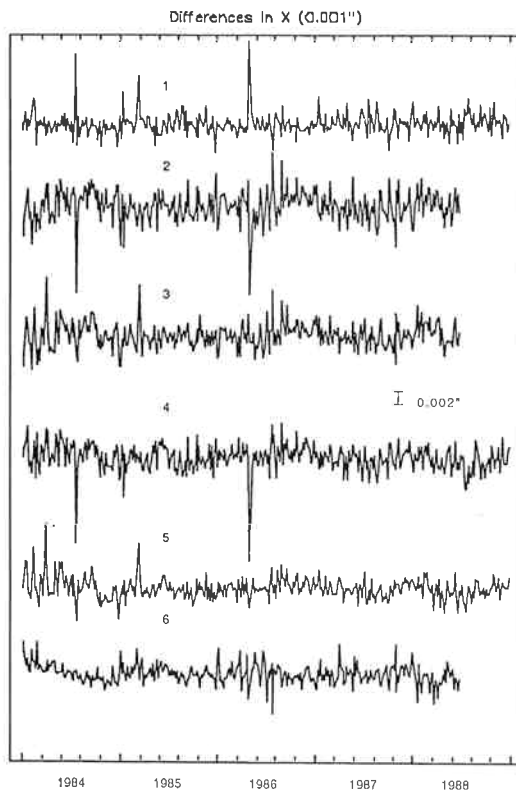
異なる方法によって得られたパラメータの比較は、相互の結果の信頼性を確認するためのほとんど唯一の方法である。

VLBI と SLR の結果を比較する (第6図)。一見して明かなように、VLBI と SLR という2つの異なる方法によって得られた極運動は極めて良い一致を示す。これによって、数カ月より短い周期の細かい変動が実在す



第6図 VLBI と SLR による極軌道図
 — : VLBI
 - - - : SLR

(水沢観測センター石井久氏提供)



第7図 種々の解析センターによる極運動のX成分の比較
 1: VLBI (GSFC)—VLBI (NGS)
 2: VLBI (NGS)—SLR (GSFC)
 3: VLBI (GSFC)—SLR (GSFC)
 4: VLBI (NGS)—SLR (CSR)
 5: VLBI (GSFC)—SLR (CSR)
 6: SLR (GSFC)—SLR (CSR)
 GSFC: Goddard Space Flight Center
 CSR: Center for Space Research,
 University of Texas
 (IERS Annual Report for 1988⁽²³⁾による)

ることがわかる。Eubanks 他⁽⁶⁾は大気圧の変動による励起によってほぼ説明が可能であることを示している。極運動をもっと詳細に比較するために、IERSの1988年報⁽²³⁾に掲載された図を第7図に再掲しよう。この図は、極運動のX成分について、VLBIとSLRのいくつかの解析センターの結果の差を図示したものである。第7図から以上のことが見てとれる。a) いずれの結果も相互に数mas程度の平均誤差で一致している。b) VLBIのデータに基づいたNGSとGSFCの結果の差は、両者の観測局の構成が異なるにもかかわらず、分散が小さいとともにバイアスが一定である。c) SLRとVLBI、SLRとSLRの結果の差は、VLBI同志の差のようにバイアスが安定ではなく、数masに及ぶ周期的および不規則な変動を示す。これはSLRの極運動の誤差によ

第2表 VLBIとSLRの座標系変換に関する7つのパラメータおよび6つのcolocation局の残差と標準偏差 (Carter and Robertson⁽¹⁷⁾による)

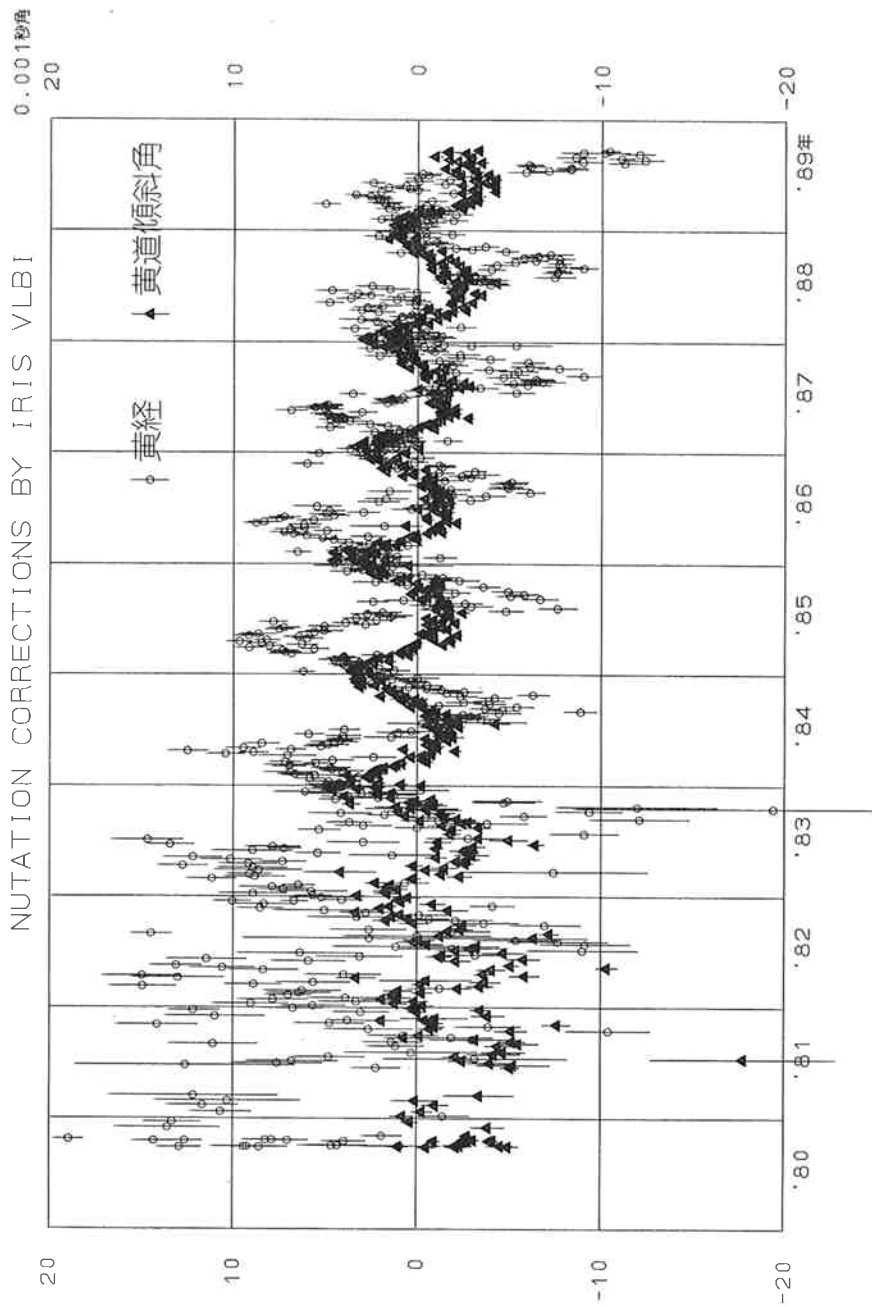
| | | | |
|--------------|-------------------------|---|------------------------|
| ΔX : | -1.350 cm | ± | 1.835 cm |
| ΔY : | 2.045 cm | ± | 1.974 cm |
| ΔZ : | 0.857 cm | ± | 1.933 cm |
| ΔS : | -0.921×10^{-8} | ± | 0.232×10^{-8} |
| Ω : | 14.836 mas; | ± | 0.570 mas |
| Ψ : | 3.990 mas; | ± | 0.691 mas |
| E : | -0.534 mas; | ± | 0.885 mas |
| <hr/> | | | |
| Residuals | Sigma | | |
| GRAS | | | |
| | 1.532 cm | | 2.414 cm |
| | -4.760 cm | | 2.108 cm |
| | 1.886 cm | | 2.108 cm |
| Mojave | | | |
| | 1.988 cm | | 2.812 cm |
| | 2.368 cm | | 2.154 cm |
| | 1.703 cm | | 2.385 cm |
| Westford | | | |
| | 3.756 cm | | 3.476 cm |
| | 0.619 cm | | 3.138 cm |
| | -3.463 cm | | 2.108 cm |
| Wettzell | | | |
| | -4.052 cm | | 2.575 cm |
| | -1.040 cm | | 2.588 cm |
| | 0.259 cm | | 2.082 cm |
| Richmond | | | |
| | 1.408 cm | | 4.008 cm |
| | -1.504 cm | | 2.696 cm |
| | 2.137 cm | | 3.356 cm |
| Haleakala | | | |
| | -0.540 cm | | 1.508 cm |
| | 4.037 cm | | 2.262 cm |
| | -1.666 cm | | 2.588 cm |

るものと結論できる。

UT1 に関しても VLBI の結果は安定である。また、1日の長さについては VLBI と SLR の結果は 0.1~0.2 ms の平均誤差で一致している。しかし、SLR における1日の長さの決定には、UT1 と LAGEOS の軌道の昇交点黄経の永年変化とが couple しているため、初期値としての UT1 の情報が必要であり、その点で SLR による地球回転決定は VLBI に負っている。

5.2 地球基準座標系

IERS に課せられた重要な課題である地球基準座標系の確立と保持のための基本的方法は、SLR と VLBI の colocation による両座標系の結合であるが、現状では十分な精度で colocation が行なわれているのはわずかに6局だけである。



第8図 IRIS-Aによる章動の面成分
(水沢観測センター石井久氏提供)

VLBI は純粋に幾何学的座標系に準拠しているのに対して、SLR は地球重心に準拠した力学的座標系を用いている。地球基準座標系は、地球重心に対して与えられなければならないので、VLBI 座標系を SLR 座標系に変換する必要がある。変換は Zhu and Mueller⁽²⁴⁾ の提唱した方法によって行われているが、それは、座標原点のオフセット ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)、スケールファクター (ΔS)、および、経度原点 (Ω)、章動の面成分 (ψ, ϵ) の違いに

よる回転という7つのパラメータからなる。これらのパラメータと6局の colocation 観測局の座標の精度と残差についての最近の結果⁽¹⁷⁾を第2表に示す。座標原点のオフセットがゼロに近いのは、VLBI 局の座標が既に SLR 系で与えられているからである。

座標系の結合に関して3つの点を指摘しておきたい。1つは、colocation の重要性である。わが国は、通信総合研究所が可搬型 VLBI を、海上保安庁水路部が可搬

第 3 表 IRIS VLBI 電波源
 (NEOS Annual Reprint 1988⁽²⁶⁾による)
 † : 現在観測されている電波源
 * : 赤経の原点を定義している電波源

| Source Name | | Right Ascension | | | | | Declination | | | |
|-------------|-------------------|-----------------|----|----------|-----------------|--------------------------|-------------|----|---------|----------------|
| IAU | Alternate | h | m | sec | Sigma Time s | Scaled Sigma Arc s | d | m | sec | Sigma Arc s |
| †* | 0106+013 | 1 | 8 | 38.77107 | .000002 | .00003 | 1 | 35 | 0.3189 | .0002 |
| † | 0212+735 | 2 | 17 | 30.81321 | .000036 | .00015 | 73 | 49 | 32.6223 | .0002 |
| | 0224+671 4C 67.05 | 2 | 28 | 50.05145 | .000040 | .00023 | 67 | 21 | 3.0298 | .0003 |
| †* | 0229+131 | 2 | 31 | 45.89405 | .000004 | .00005 | 13 | 22 | 54.7176 | .0002 |
| | 0234+285 | 2 | 37 | 52.40566 | .000007 | .00010 | 28 | 48 | 8.9907 | .0002 |
| | 0235+164 | 2 | 38 | 38.93011 | .000011 | .00016 | 16 | 36 | 59.2767 | .0004 |
| | 0300+470 | 3 | 3 | 35.24215 | .000031 | .00031 | 47 | 16 | 16.2758 | .0004 |
| | 0316+413 3C 84 | 3 | 19 | 48.16004 | .000030 | .00033 | 41 | 30 | 42.1039 | .0004 |
| | 0355+508 NRAO 150 | 3 | 59 | 29.74723 | .000017 | .00016 | 50 | 57 | 50.1624 | .0002 |
| † | 0420-014 | 4 | 23 | 15.80070 | .000003 | .00005 | -1 | 20 | 33.0636 | .0002 |
| | 0454-234 | 4 | 57 | 3.17922 | .000016 | .00022 | -23 | 24 | 52.0183 | .0003 |
| †* | 0528+134 | 5 | 30 | 56.41675 | .000004 | .00006 | 13 | 31 | 55.1506 | .0002 |
| † | 0552+398 | 5 | 55 | 30.80560 | .000011 | .00013 | 39 | 48 | 49.1659 | .0001 |
| | 0727-115 | 7 | 30 | 19.11245 | .000008 | .00012 | -11 | 41 | 12.5994 | .0002 |
| | 0742+103 | 7 | 45 | 33.05959 | .000091 | .00135 | 10 | 11 | 12.6877 | .0025 |
| †* | 0851+202 OJ 287 | 8 | 54 | 48.87491 | .000004 | .00006 | 20 | 6 | 30.6414 | .0002 |
| † | 0923+392 4C 39.25 | 9 | 27 | 3.01388 | .000009 | .00010 | 39 | 2 | 20.8525 | .0002 |
| | 1034-293 | 10 | 37 | 16.87972 | .000023 | .00031 | -29 | 34 | 2.8116 | .0004 |
| † | 1055+018 | 10 | 58 | 29.60519 | .000005 | .00007 | 1 | 33 | 58.8240 | .0003 |
| | 1144+402 | 11 | 46 | 58.29790 | .000011 | .00013 | 39 | 58 | 34.3056 | .0002 |
| * | 1226+023 3C 273 B | 12 | 29 | 6.69969 | .000002 | .00003 | 2 | 3 | 8.5988 | .0002 |
| | 1253-055 3C 279 | 12 | 56 | 11.16647 | .000069 | .00102 | -5 | 47 | 21.5217 | .0023 |
| | 1308+326 | 13 | 10 | 28.66387 | .000007 | .00009 | 32 | 20 | 43.7830 | .0002 |
| | 1354+195 | 13 | 57 | 4.43663 | .000014 | .00020 | 19 | 19 | 7.3720 | .0003 |
| †* | 1404+286 O Q 208 | 14 | 7 | 0.39439 | .000005 | .00007 | 28 | 27 | 14.6897 | .0002 |
| | 1418+546 | 14 | 19 | 46.59737 | .000025 | .00021 | 54 | 23 | 14.7869 | .0002 |
| | 1502+106 | 15 | 4 | 24.97977 | .000006 | .00009 | 10 | 29 | 39.1987 | .0002 |
| | 1548+056 | 15 | 50 | 35.26919 | .000005 | .00007 | 5 | 27 | 10.4489 | .0002 |
| † | 1633+382 1633+38 | 16 | 35 | 15.49290 | .000010 | .00011 | 38 | 8 | 4.5008 | .0002 |
| | 1637+574 | 16 | 38 | 13.45634 | .000021 | .00017 | 57 | 20 | 23.9791 | .0002 |
| | 1642+690 | 16 | 42 | 7.84866 | .000039 | .00021 | 68 | 56 | 39.7563 | .0002 |
| * | 1641+399 3C 345 | 16 | 42 | 58.80993 | .000009 | .00011 | 39 | 48 | 36.9938 | .0001 |
| | 1730-130 NRAO 530 | 17 | 33 | 2.70572 | .000009 | .00013 | -13 | 4 | 49.5474 | .0002 |
| † | 1741-038 | 17 | 43 | 58.85609 | .000004 | .00006 | -3 | 50 | 4.6156 | .0002 |
| | 1749+096 | 17 | 51 | 32.81856 | .000008 | .00012 | 9 | 39 | 0.7290 | .0003 |
| † | 1803+784 | 18 | 0 | 45.68385 | .000059 | .00018 | 78 | 28 | 4.0179 | .0001 |
| | 1921-293 | 19 | 24 | 51.05589 | .000021 | .00028 | -29 | 14 | 30.1192 | .0003 |
| | 1923+210 | 19 | 25 | 59.60538 | .000027 | .00038 | 21 | 6 | 26.1605 | .0010 |
| | 1928+738 | 19 | 27 | 48.49473 | .000156 | .00065 | 73 | 58 | 1.5701 | .0010 |
| | 1958-179 | 20 | 0 | 57.09037 | .000064 | .00091 | -17 | 48 | 57.6715 | .0004 |
| † | 2121+053 | 21 | 23 | 44.51736 | .000003 | .00005 | 5 | 35 | 22.0939 | .0002 |

型 SLR を有している。双方の定期的観測による積極的 colocation が望まれる。colocation において、主局である大型アンテナの重要性はいうまでもない。第 2 点は観測点の全地球規模への拡張である。現在観測局位置は Minster and Jordan⁽²²⁾ のプレート運動モデルを用いて予め補正している。これは、地球基準座標系の保持

のためには不可欠な手続きであるが、モデルは地殻の実際の動きを完全に記述しているわけではない。このため、大半の観測局が北半球にある現状では、基準座標系が北半球の局の動きに影響されているであろうことが考えられる。南半球の観測局を増加することによって改良を図らなければならない。この場合も、長基線の観測局

との効率よい観測のために大型アンテナの果たす役割は大きい。第3点はGPS測位における基準点としての役割である。グローバルな地球基準座標系に結合されたVLBI局は、GPSによる地球基準座標系の拡張に不可欠であり、したがって、VLBI局の位置は国際観測網の中で定期的に監視されなければならない。また、GPSと組み合わせたの海面変動の観測は、地球環境の監視という側面からも重要であり、長期の安定した観測態勢が必要である。

5.3 歳差・章動

第8図にIRIS-Aによって得られた章動の両成分を示す。1984年に精度の大幅な改良がなされたのは、米国の3局に加えて、西独のWettzellが定期的に観測網に参加するようになったからである。観測網の形状が精度向上にいかにか重要であるかを示す好例である。

このデータから、IAU章動モデルの補正量が10分の数masの精度で求められ、同時に歳差定数の補正量も高精度で決定される見通しがついた。このことは、2つの意味を持っている。1つは慣性座標系の確立への寄与であり、もう1つは流体核の形状や流体核とマントルとの消散過程の研究に大きな進展をもたらすという点である。

歳差と章動を分離決定するためには、章動の最長の周期である18.6年を最低でもカバーする観測が必要である。今後の国際協力においては、長期間にわたる均質なデータの取得が保証されるような態勢を保ち続ける努力が要請される。

5.4 慣性座標系

歳差や章動の常数系とともに、銀河系外電波源の位置を精密に決定することによって、慣性座標系を構築しようとする努力がなされている。IERSはこの点においてもこれまで大きな役割を果たしてきた。慣性座標系の確立は地球回転やグローバルテクニクスなどの測地目的にとって不可欠であるばかりでなく、銀河系内恒星の位置と運動によって定義される光学座標系と結合することによって、銀河回転など銀河系の力学研究に大きな進展をもたらすことは明かである。

このように重要な電波源の位置は北天についてはさまざまな観測網によって悪くとも数masの精度で200星余りについて決定されているが⁽²⁵⁾、南天星の数は観測局の制限のためにごく限られている。第3表にIRIS観測星の位置と精度を示す⁽²⁶⁾。IRISは地球回転パラメータを高精度で決定するという目的のために、位置のよく決まっている少数の電波源だけを用いている。また、表に示されるように、3C273Bなどの構造を持つ強い電波源⁽²⁷⁾は目的パラメータの決定精度を劣化させるのです

で観測対象からはずされている。このことと、国際観測網が長基線によって構成されることを考え併わせると、アンテナ口径は、観測効率を高める上で大きな要素となる。

6. 西太平洋電波干渉計の役割

前章で述べたように、地球回転は周期的あるいは不規則で、かつ予測不可能なさまざまな変動を示し、また拠って立つ観測局はプレート運動や局地的地殻変動によって長期的かつ不規則に変動する。さらに、慣性座標系の確立のためには電波源の構造の変化を監視する必要がある。これらの研究課題を追究するために最も基本的なことは、長期間にわたって均質なデータを取得できる観測態勢を全地球規模で確立することである。

この態勢は国際的に次第に整備されつつあり、VLBI観測網が再編成、拡張の時期にあることはすでに述べたとおりである。この時期に、西太平洋電波干渉計が稼働することは時宜に適っており、IERSの観測網に参加することの意義は大きい。主局の口径が34mとなったことおよびミリ波観測に対応するため鏡面精度が向上したことによって26mアンテナ以上の集光力が可能になり国際観測網をより効率的、主体的に運用し、第5章で述べたような地球回転に関する多岐にわたる研究の進展に大きな役割を果たすことが期待される。

そのためには、研究課題に応じたさまざまな短期的な観測計画に機動的に参加して成果をあげることと同時に、地球深部に起因する歳差・章動や自転速度のdecade variations、また気候変動に起因する海面変動や後永河期隆起などの長周期現象の研究に不可欠な長期安定な運用を図ることが必要である。

7. ま と め

以上、地球回転の観測・研究をとりまく国内外の状況と学術目的を概観した。わが国の地球回転の観測・研究を進展させ国際協力をさらに推進するためには、国立天文台のVERA装置計画の早期実現を図ることが焦眉の課題である。同時に、通信総合研究所との研究協力のもとに西太平洋電波干渉計の活用によって国際協力に主体的に参画し、26mアンテナの運用によって築き上げてきた学問的地歩をさらに高めることがわが国のVLBI研究を発展させる途であることは明かである。

参 考 文 献

- (1) IAU/IUGG Joint Working Group on the Rotation of the Earth, Project MERIT (Edited by G.A. Wilkins), Roy. Greenwich Obs. Herst-

- monceux Castle, England and Inst. Ang. Geod., Frankfurt, FRG, 1980.
- (2) IAU/IUGG Joint Working Group on the Rotation of the Earth, Project MERIT: Report on the Short Campaign and Grasse Workshop with Observations and Results on Earth-Rotation During 1980 August-October (Edited by G. A. Wilkins and M. Feissel), Roy. Greenwich Obs. Herstmonceux Castle, England, 1982.
- (3) IAU/IUGG Joint Working Group on the Rotation of the Earth, Project MERIT: Report on the Second MERIT Workshop and on the Other Activities in 1983, (Edited by G. A. Wilkins and M. Feissel), Roy. Greenwich Obs. Herstmonceux Castle, England, 1984.
- (4) IAU General Assembly, Resolution B2: Reference Frames, IAU Information Bulletin, 55, pp. 10-11, February, 1986.
- (5) 横山紘一, “最近の地球回転の観測と研究, 現代測量学, 測地測量②”, 追補1, pp. 419-448, 日本測量協会, 1986.
- (6) E. S. Colquitt, W. L. Stein, and R. J. Anderle, Doppler Polar Motion Measurements During Project MERIT, Proc. Int. Symp. on Space Techniques for Geodynamics, July 9-14, 1984, Sopron, Hungary, (Edited by J. Somogyi and Ch. Reigber), 1, 180-188, 1984.
- (7) J. O. Dickey and T. M. Eubanks, Earth Rotation and Polar Motion: Measurements and Implications, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-23, No. 4, pp. 373-384, 1985.
- (8) T. M. Eubanks, J. A. Steppe, J. O. Dickey, R. D. Rosen, and D. A. Salstein, Causes of Rapid Polar Motions of the Earth's Pole, Nature, 334, pp. 115-119, 1988.
- (9) T. A. Herring, C. R. Gwinn, and I. I. Shapiro, Geodesy by Radio Interferometry: Studies of the Forced Nutations, Part I: Data Analysis, J. Geophys. Res., 91, pp. 4745-4754, 1986.
- (10) C. R. Gwinn, T. A. Herring, and I. I. Shapiro, Geodesy by Radio Interferometry: Studies of the Forced Nutations of the Earth, Part II: Interpretation, 同上, pp. 4755-4765, 1986.
- (11) 青木信仰編, 1985年度経緯度研究会収録, 地球回転・基準座標系用国内 VLBI 計画, p. 104, 1985.
- (12) 位置天文学連絡会, VERA 推進小委員会編, VERA 研究会収録, 1986.
- (13) 位置天文学連絡会, VERA 推進小委員会編, 1986年度経緯度研究会収録, 第2回 VERA 研究会収録, 1986.
- (14) K-3型超長基線電波干渉計 (VLBI) システム開発特集号, 電波研究所季報, 30, No. 1, 1984.
- (15) IRIS, IRIS Earth Orientation Bulletin, 67, Sep., 1989 (最新号).
- (16) J. Campbell, Report on the Meeting of the Steering Committee Held During the General Assembly of the IAG in Edinburgh, on Aug., 10, 1989.
- (17) W. E. Carter and D. S. Robertson, Definition of A Terrestrial Reference Frame Using IRIS VLBI Observations: Approaching Millimeter Accuracy, Presented at Gen. Meeting, IAG, Aug. 3-12, Edinburgh, UK, 1989.
- (18) S. Manabe, K. Yokoyama, K. Iwodate, S. Sakai, S. Hama, and N. Kawaguchi, Earth Orientation Parameters and Terrestrial Reference Frame of VLBI IRIS-P Network, Presented at Gen. Meeting, IAG, Aug. 3-12, Edinburgh, UK, 1989.
- (19) T. Yoshino, Y. Takahashi, N. Kawaguchi, K. Heki, K. Yokoyama, and S. Manabe, The IRIS-P VLBI Experiment for the Earth Rotation Measurement and Time Comparison, Vistas in Astronomy, 31, Proc. 4-th Asian-Pacific Regional Meeting, IAU, (Edited by J. B. Hearnshaw and Zhang Erhe), Science Press, Beijing, China, pp. 653-656, 1988.
- (20) K. Yokoyama, S. Manabe, T. Hara, T. Yoshino, Y. Takahashi, and N. Kawaguchi, The Earth Rotation Parameters Determined with the New IRIS-P VLBI Network, 同上, pp. 657-662, 1988.
- (21) D. S. Robertson; Private communication.
- (22) J. B. Minster and T. H. Jordan, Present-Day Plate Motions, J. Geophys. Res., 83, 5331-5354, 1978.
- (23) IERS, Annual Report for 1988, Central Bureau of IERS, Paris, France, 1989.
- (24) Sheng-Yuan Zhu and I. I. Mueller, Effects of Adopting New Precession, Nutation and Equinox Corrections on the Terrestrial Reference

- Frame, *Bull. Geod.*, 57, pp. 29-42, 1983.
- ②5 E. F. Arias, M. Feissel, and J. F. Lestrade, An Extragalactic Celestial Reference Frame Consistent with the BIH Terrestrial System (1987), Annual Report of BIH for 1987, BIH, Paris, pp. D113-D121, 1988.
- ②6 The United States National Earth Orientation Service, Annual Report for 1988, USNO and NGS, 1989.
- ②7 Y. Takahashi, M. Kawaguchi, K. Heki, H. Kunimori, and T. Kondo, Celestial Reference Coordinate System of VLBI with US-Japan Joint VLBI Experiments, Proc, IAU Symp. No. 128, on The Earth's Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics (Edited by A. Babcock and G. A. Wilkins), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, pp. 83-89, 1988.

