

## I-1 VLBI をとりまく情勢

川尻 轟 大\*

(昭和59年7月3日受理)

## 1. はじめに

VLBI の何たるかについてはあとに続く方々の文章中に詳しく記述されているが、本報告ではある程度の予備知識を有する読者を想定して以下の記述に入りたい。

高精度の時刻及び周波数の基準としての原子標準、そして信頼性の高い磁気テープレコーダの出現により、VLBI 技術が初めて世に出たのは1967年頃であった。それ以来17年が経過したが、その間の進展ぶりについては多くの文献に記述されている<sup>(1), (2), (3)</sup>。本特集号の目的であるK-3型 VLBI システムの紹介を機会に、ここでは特にここ数年以内の VLBI 情勢について着目し、VLBI の技術面の進展、応用面の拡大、国際共同観測キャンペーンに占める位置、VLBI に関係した国際組織、測地的、地球物理的立場からみた各国の情況、日本の国内情勢、及び近い将来の発展予測、等について逐次概観してみることにする。

## 2. 技術面の進展と応用面の拡大

## 2.1 技術面の進展

VLBI システムと称せられるものは冒頭に述べたように、1967年米国・カナダにおいて最初に開発された。それ以来、システムとして一応実験、研究或いは実用にまで供された種類はそんなに多くない。その理由は、システムの複雑さ、精密さ、開発の困難さによるのであろう。

システム開発の流れから言えば何といっても米国が VLBI 大国であることは自他共に認めるところであろう。開発の極く初期の1970年頃から1980年まで使用された Mark I システム、1973年頃から現在も一部改良して主として電波天文の分野で用いられている Mark II システム、そして1975年頃から開発が初められ、現在世界で最も広く活躍している Mark III システム、といったところが米国内の技術開発の流れである。これらのうち Mark I は、ヘイスタック観測所とゴダード宇宙飛行センターの共同開発になる Mark III の出現でとって替られた。また Mark II は主として米国国立電波天文

台(NRAO)で開発されたものである。

上記の流れとは別に米国航空宇宙局(NASA)/ジェット推進研究所(JPL)所属のゴールドストーン-キャンベラ-マドリッドの Deep Space Network (DSN) にだけ通用する独特のシステムもある。これは上記3局の時刻比較、極運動・地球回転の速報といった点から週1回定期的に稼働している。

ここ2~3年新たに GPS 衛星を利用し、VLBI 的手法で地上測距を行う目的で、Macrometer<sup>(4)</sup>や SERIES<sup>(5)</sup>といった簡易型のシステムも開発されている。これらは地上距離にして高々300km程度の測距ではあるが、その相対測定精度は $10^{-7}$ 以上と過去の一般的相対精度 $10^{-6}$ を1桁以上突破している。これらの利用は今後 GPS 衛星(現在5個運用)の打上げ数と共に拡大することであろう。

VLBI の黎明期を米国と共に分けあったカナダのシステムはアナログ方式としてそのユニークさを誇ったものであるが、同期再生の点でやや難があり、精度的にもデジタル技術を旨とした米国方式にはたち打ち出来ず、長続きしなかった。

システム開発を行った残りの国として、日本の電波研究所の存在は大きい。これについては本特集号の随所に詳しく記述してあるので、ここでは簡単にふれるにとどめる。

電波研究所は、米国 Mark II を一応の参考にした K-1 システムを1976年に、鹿島-平磯間実時間 VLBI システム(K-2)を1979年にそれぞれ完成させたあと、1979年度-1983年度の5ヶ年計画で米国 Mark III と両立性をもった K-3 型システムを完成させた。後述する IRIS では、測地的準星 VLBI システムとして通用する Mark III と K-3 を合わせて MK-3 システムと呼ぼうという提案がある程である。この MK-3 システムの最大の弱点はデータ記録のランニングコストが高いという点であり、これを解決するため記録密度向上に向け日米で努力がなされている。

上記は各種 VLBI システムについて述べたものであるが、他のシステム技術改良面として米国 NASA の可搬局の開発がある。これは Mark II システム開発の直後から JPL の Mac Doran らが VLBI を地殻変動観測に

\* 周波数標準部

応用すべく ARIES (=Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying) 計画<sup>(6)</sup>として、まず、直径9m (MV-1 と称す) 及び4m (MV-2) を開発したが、その後 ORION (=Operational Radio Interferometric Observing Network) 計画として直径5mの可搬局へと発展している<sup>(7), (8)</sup>。但しこの組立て式アンテナの外、エレクトロニクス部、電源部、居住部等長さ15mのトレーラーが2~3台必要であり、広い米国ではよいが、日本の道路事情では如何なものであろうか。日本の道路事情に合った小型可搬局の開発が望まれる。ORION については本特集号 I-3 の河野氏の記事も参照されたい。

次にデータ処理能力の向上について言及しよう。つい1年程前までは MK-3 データの処理可能な相関器はヘイスタック観測所のみであったが、現在は我が電波研究所鹿島局の外、西独のボンも昨年暮れから稼動し始めた。JPL の Block II システムの相関器もそろそろ稼動している頃である。また USNO (=米国海軍天文台) ではフロリダ州リッチモンド局が POLARIS (POLar motion Analysis by Radio Interferometric Surveying) 計画<sup>(9)</sup>に参加するのを契機に大量のデータ処理を行う相関器 (Haystack 局のと同種) を今年10月頃までに製作するとのことである。現在のヘイスタック型相関器でも、データレコーダ、処理・解析計算機、相関器等の拡張がなされれば、多基線同時処理可能となって、観測頻度向上に反映するであろう。ちなみにヘイスタック観測所では3基線同時処理可能で、24時間操業とのことである。当所鹿島支所の K-3 型相関器では観測の際の記録スピードに対し倍速処理が可能となっている。

VLBI データ記録に磁気テープを用いない方法として、衛星或いは地上のマイクロリンクを利用する方式は10年程前から試みられているが、いまだ大々的に行われているとはいえない。これまでの幾つかの試み乃至実際に行われている事柄を簡単に記す。

古くは1976年カナダの CTS 衛星を用いて、カナダのアルゴンキンと米国国立電波天文台 (NRAO) との間で、使用周波数11.9GHz バンド幅10MHz で実時間 VLBI を行った<sup>(10)</sup>。これについては筆者が電波研究所 VLBI 特集号<sup>(2)</sup>で触れているので参照して頂きたい。

同じくカナダの Anik B を用いた時刻/ローカル周波数の位相情報伝達実験は4~5年前に行われたが、これも VLBI に関係する基礎実験であった。

現在毎週土曜各2時間行っている NASA/JPL の DSN の VLBI システムは2.1の初めに触れたように、衛星回線を用いた準実時間 VLBI のようである。これは10年以上前から行われてきたが、深宇宙探査のため

の基礎データ提供に重要な役割りを果たしている。

地上マイクロリンクを用いた VLBI には電波研究所の K-2 型システムがある。これは鹿島一平磯間を結ぶ実時間 VLBI システムであったが、詳しいことは ECS 特集号<sup>(11), (12)</sup>等を参照して頂きたい。

## 2.2 応用面の拡大

VLBI 開発のそもそもの目的は電波天文にあった。遠く離れたアンテナ群を干渉計として結びつけることにより、より細いビームを形成させ、その細いビームで天体電波源を分解するのに用いられたことはよく知られているところである。その大きな収穫として、点電波源のように見えた準星等の、コア、ジェットへの分解や、見かけ上超光速で離れていく二つ目玉の発見 (3C273, 3C345 など) などがあった。ここ数年は星雲中の線スペクトル源の存在個所を VLBI 観測によって明らかにすることも行われている。

3. や V-2 でも触れられているように、ここ10年程の間、VLBI の測地的応用は目覚ましいものがある。地球表面の岩石圏 (リソスフェア) を扱うプレートテクトニクスは既に確立された学説として、今は各プレート間の相対運動を具体的な数字を挙げて云々する時代となった。代表的な数値として、北米-ヨーロッパ (Haystack-Onsala) 間は1.5cm/年で広がりつつある、アメリカ合衆国の東西 Haystack-OVRO 間距離はほとんど変化がない、カリフォルニア州のサンアンドレアス断層の両側の相対的な動きのスピードは7~8cm/年である、といわれている。VLBI 観測によって世界中のプレート運動の相対的な動きを明らかにする日もそう遠くないであろう。上記の NASA による VLBI 観測結果の例を第1図に示す。

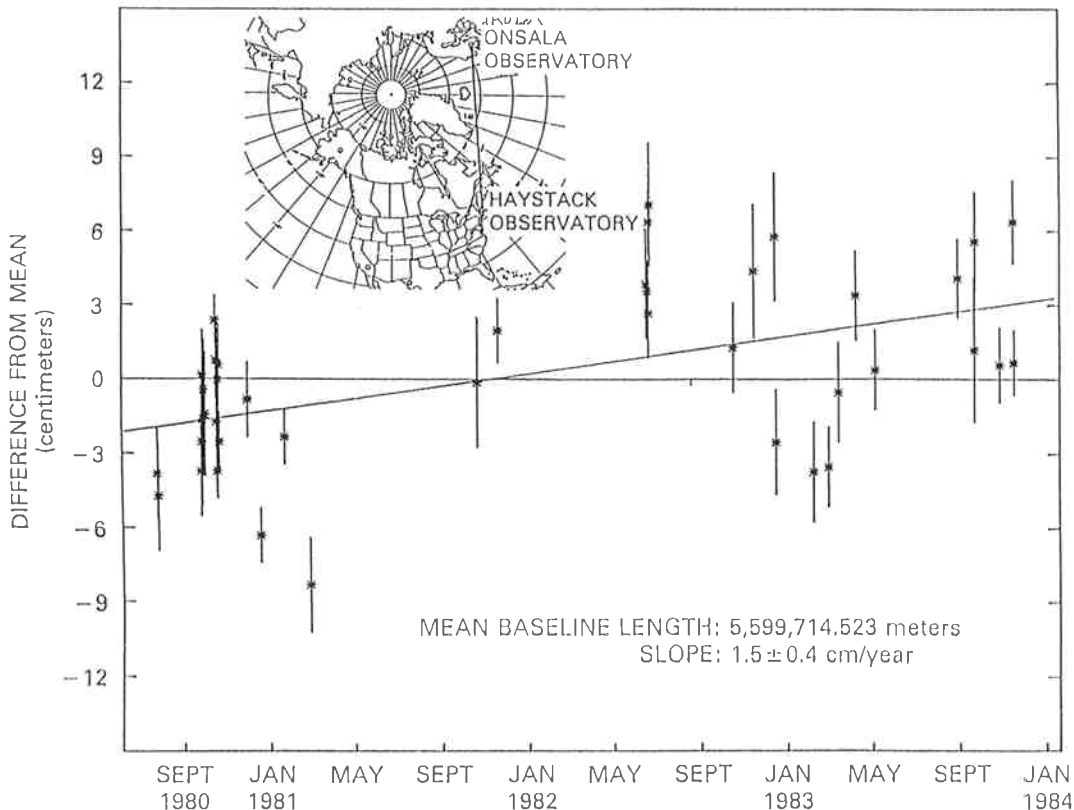
極運動・地球回転の分野でも VLBI 観測が最も精度のよい (X, Y は3cm, UT1 は0.1m sec のオーダ) データを提供することは次章で述べる MERIT キャンペーンから明らかとなった。この分野でも米国 NOAA/NGS の POLARIS 3局体制は、今後の他の地域でのモデル観測としての役割を十二分に果している。ただ今後基線長を国際的にもっと広げた場合、それに見合って精度も更に上るかどうかは充分検討する必要がある (基線長を伸したことによるマイナス要素、例えば電波源が点として扱えなくなること、電離層・大気の相対的影響の大きいこと、等)。

VLBI ではないが、Connected Element Interferometer の名で USNO のクレプチンスキー氏らは NRAO (米国西バージニア州グリーンバンク) に極運動・地球回転用の干渉計を設置し初期の数kmから35km スパンへと拡張し長期的観測を行っている<sup>(13)</sup>。

# VLBI MEASUREMENTS

## NORTH AMERICA TO EUROPE PLATE MOTION

### MASSACHUSETTS TO SWEDEN BASELINE



第1図 ヘイスタック（米国マサチューセッツ州）—オンサラ（スウェーデン）間  
 基線長の時間変化（NASA GSFC 資料より）

VLBI を利用した時刻比較実験も今後増加するであろう。GPS 等他の手段での比較結果を VLBI による結果で校正するといったことが考えられている。特に基線ベクトルが充分わかっている場合、毎月1回2~3時間内の観測で10 n sec 以上の精度が容易に得られる利点がある。現在1 n sec の精度もまず問題なく、今後は0.1 n sec の精度を目指すことになる。ただ時刻差と相対的な局内遅延時間との分離には特別な工夫が必要であろう。電波研究所と USNO/NRL 間の精密時刻比較実験も今秋から開始される予定である。これについてはI-2の吉村氏の記事中の4.1.2を参照されたい。

天体電波源の代りに人工衛星のノイズを用いることにより VLBI で衛星軌道決定を行うことも15年程前から行われてきた。初期のATS-1号を用いたデモンストレーション的なものから、JPLの深宇宙飛翔体軌道決定用の4VLBI法（天空上で衛星ノイズと近くの天体電波

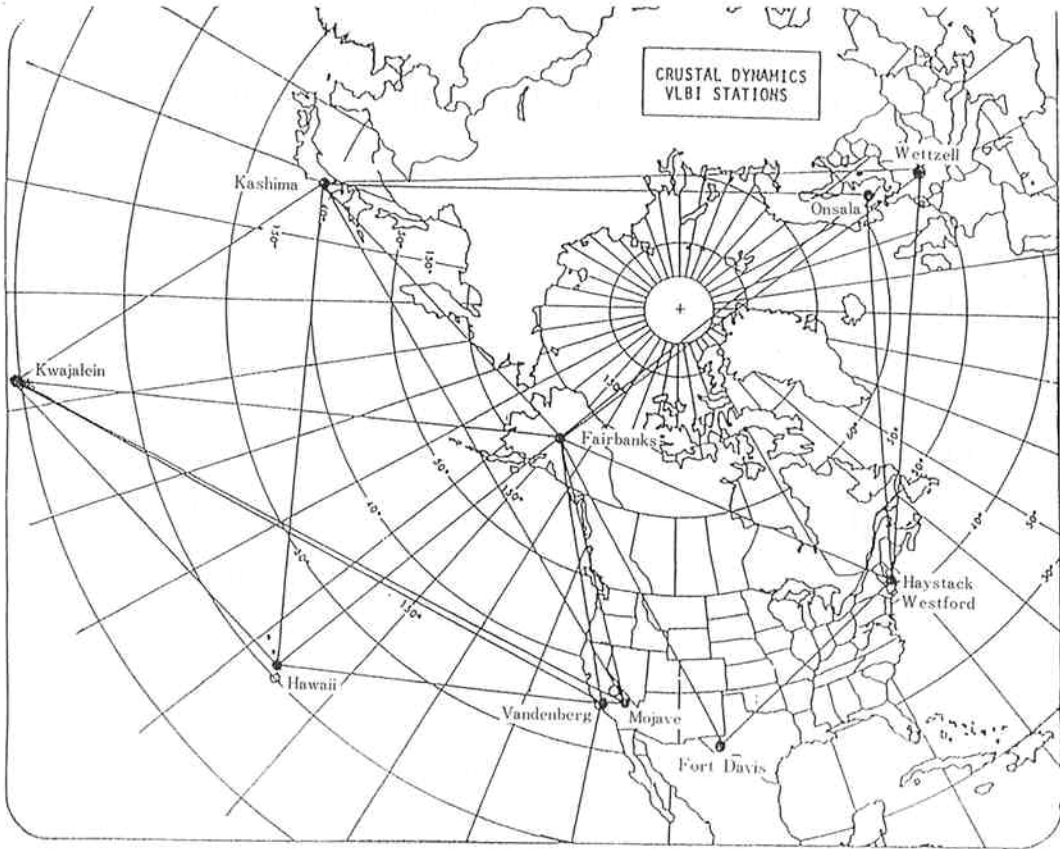
源を交互に切替えて観測する）へと実用的に用いられている。4VLBI法は特に3点観測が有効であり、JPL/RRL間で大洋上の衛星をGoldstone, Canberra, 鹿島の3個所で受信し、数m位の精度で軌道決定する実験も今年6月末に行われ、成功した。

### 3. 国際共同観測キャンペーンと国際組織

VLBI に関係のある国際共同観測キャンペーンや国際的組織について最近の主なものについて記述しよう。

#### 3.1 NASA 地球力学計画

NASA は本地球力学計画の名の下に世界中の25カ国と米国内4機関を相手に共同観測計画を推進しているが、日本の電波研究所との関係もその一つである。本特集号のメインテーマであるK-3型 VLBI システムの開発も、その5ヶ年計画発足の当初から本計画の主旨にも沿って行ってきた。



第2図 NASA 地球力学計画の主要参加局（北太平洋及び北極域）  
(NASA GSFC 資料より)

NASA は従来の宇宙一本槍から 1977 年に成立した米国の地震災害軽減法 (Earthquake Hazard Reduction Act) に基づいた国家計画の一つとして本計画が提案されたもので、

- ① 地震に関するダイナミクス過程を研究することにより、地震災害の防止に関する国家計画を支援し、
- ② 汎地球ダイナミクスに関する現在進行中の国際的研究を支援する

ため、NASA 自身の測地学および地球物理学分野における既存の計画を推進・拡張することがその基本方針となっている<sup>(14)</sup>。

本計画のなかでの主要な項目は、VLBI や月又は衛星レーザ等のいわゆる宇宙技術を用いたプレート運動の研究である。本計画については、既に本報告 2.2 でも若干ふれたが I-2 の「K-3 型 VLBI システムの開発と共同実験計画」の中の 4.1.1 でも吉村氏が記述しておられるのでその項を参照して頂きたい。第 2 図に鹿島局を含んだ北太平洋、北極域の VLBI 局を示す。また第 1 表に観測局と観測スケジュールの例を示す。

### 3.2 MERIT キャンペーン

VLBI という観測手段を“地球診断”に役立てようという他の国際的キャンペーンも既に行われている。その大きなものに MERIT と DELP がある。

MERIT は、画期的な高精度が約束されている宇宙技術が実用化されつつあることを契機に、新旧いろいろな観測手段で極運動・地球回転を国際的に観測し、それらを互いに比較して今後の国際極運動観測事業のあり方を考えようという趣旨の国際キャンペーンである。MERIT は“Monitoring of the Earth Rotation and Intercomparison of Techniques of observation and analysis”の略で、国際天文連合 (IAU) と国際測地学地球物理学連合 (IUGG) の提唱により、MERIT 運営委員会が各国に呼びかけて実施しているものである。MERIT 運営委員会には 6 種の観測手段に対応してそれぞれ coordinator ( ) が設けられている。それらは：

- Classical Techniques (K. Yokoyama)
- Doppler Tracking of Satellites (F. Nouel)
- Satellite Laser Ranging (L. Aardoom)

第1表 NASA 地球力学計画による観測局と観測スケジュールの一例  
SUMMER 1984 -- VLBI EXPERIMENT OPERATIONS

	July				August				September	
	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3
MOD-K, L, M, N			--							
E. PAC-1, 2		--		--						
W. PAC-1, 2					--	--				
POLAR-1, 2									--	--
NAPS-1, 2								--	--	
STATIONS:										
Fairbanks		--	--	----	--	--	--		--	----
Hawaii	--			--	--	--				
Kwajalein	--			--	--	--				
Vandenberg	--		--	----	--	--	--			
Mojave	--		--	--	--	--				
Algonquin									--	--
Kashima					--	--			--	--
Haystack									--	--
Wetzell									--	--
Onsala									--	--
Fort Davis								--	--	
Westford									--	--
POLARIS										
SHUTTLE (no Hawaii)									-----X-----	

- Lunar Laser Ranging (J.D. Mulholland)
- Connected-Elements Radio Interferometry (W.J. Klepczynski)
- Very Long Baseline Radio Interferometry (W.E. Carter)

既に行われた1980年の8月-10月のショートキャンペーンに続き、1983年9月-1984年10月の14箇月間、メインキャンペーンが行われている。特に1984年4月-6月の3ヶ月間は観測強化期間として観測の頻度を上げ、極運動、地球回転の短周期変化を検出しようとしている。ショートキャンペーンでは、わずか3ヶ月のデータではあったがVLBI技術は従来の光学的手段に比較し、1-2桁精度がよいことを実証した。またVLBI、レーザーによる極運動・地球回転の解析は国際極運動観測事業(=IPMS)の結果とも細かい点でよく一致していた。これらの変化はまた大気角運動量の変化ともよく一致していることが第3図からわかる<sup>(15)</sup>。

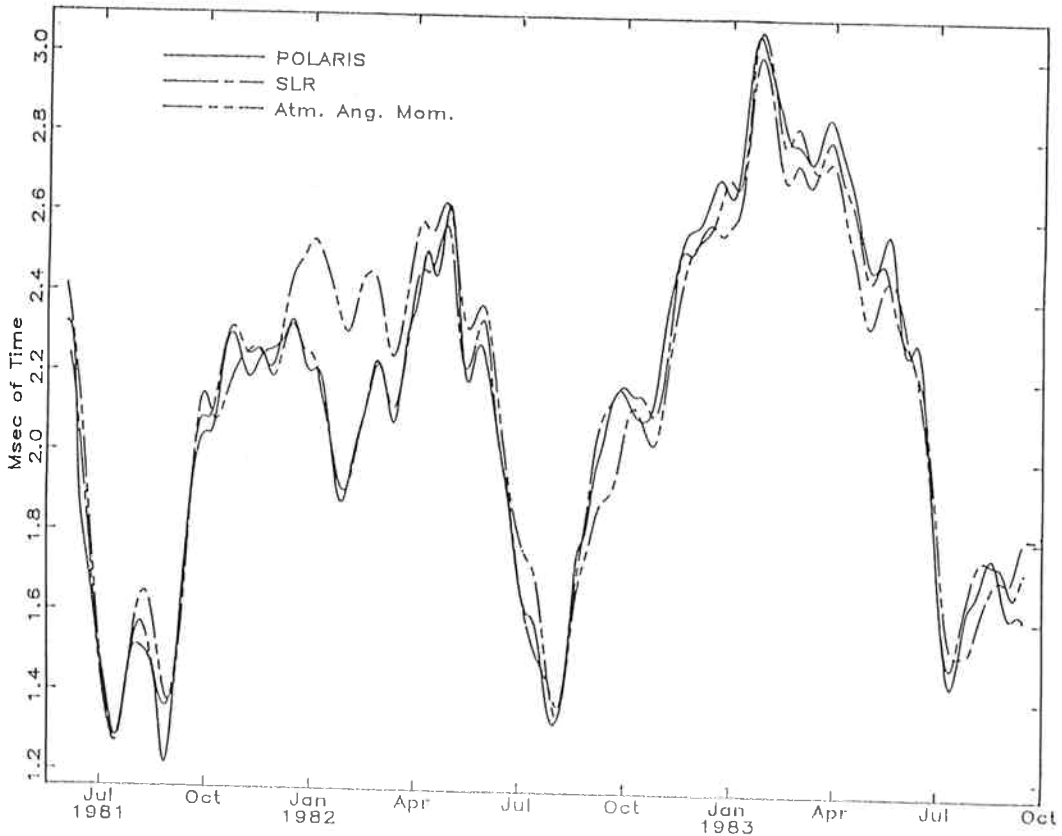
電波研究所鹿島支所の26mアンテナも前記NASA地球力学計画の下でのNASAとの共同観測の外に、MERITキャンペーンに基づく年4回程度の協力観測及びドップラーとのColocation観測が期待されていたが、

前者については今年7月-8月のNASA地球力学計画に基づく、北極及び西部太平洋地域を中心としたVLBI観測を前後4回行ない、後者については国土地理院の協力で5月-6月に実施した。なおMERITキャンペーンの観測技術やデータ処理解析結果の比較検討は1985年7月米国オハイオ州コロンバスにおける第3回MERITワークショップで行われることになっている。

### 3.3 DELP 計画

VLBI観測を含んだもう一つの大きい国際キャンペーンにDELPがある。これはDynamics and Evolution of the Lithosphere Projectの略で、国際リソスフェア探査開発計画と訳されているが、国際的にはILP(International Lithosphere Projectの略)と呼ばれている。このキャンペーンの由来は以下の通りである<sup>(16)</sup>。

固体地球科学では、最近の約20年間に大陸移動の検証や海洋底拡大の発見、更にはプレートテクトニクスの確立などの革命的な発展があった。これらの発展の基礎となったのは国際地球観測年(IGY)に始まる全地球的な規模での観測や研究であり、特に1960年代の国際地球内部開発計画(UMP)および1970年代の国際地球内部ダイナミクス計画(GDP)の果たした役割りが大き



第3図 ポラリス (VLBI), 衛星レーザ測距, 大気角運動量による地球回転の変動の比較

い。これらの国際研究計画を共同して推進してきた IUGG 及び IUGS (国際地質科学連合) では、1980年代に地球科学の一層の発展を計るために、IUGG と IUGS から選出された委員からなる小委員会等で討議した結果、新しい研究計画の対象としてリソスフェアを取り上げることがを提案し、この計画のために必要な国際的な組織の概要をまとめた。

この提案は IUGG 及び IUGS で認められた後、国際学術連合会議 (ICSU) の1980年9月の総会において議決され、その実施機関として IUGG と IUGS の両連合にまたがる国際リソスフェア委員会 (Inter-Union Commission on the Lithosphere, ICL) が設置された。ICSU は各国に対し DELP への参加及び国内委員会の設置を要請した。

我が国でも ICSU からの要請を受けて DELP 計画にとり組むため学術会議の下に DELP 国内委員会が設けられ、文部省傘下の大学と他の国立研究機関等が参加している。幾度かの改訂の後、1982年7月に研究課題を第2表に示す6つの柱にまとめた。このうち電波研究所は課題(1)プレート運動の実測を、国土地理院、海上保安庁

水路部、東京大学地震研究所と共に行っていくことになっている。特に電波研究所-国土地理院間の VLBI 国内実験は、本 DELP 計画の主旨にも沿って進行していく予定である。3.1で述べた NASA 地球力学計画も勿論 DELP キャンペーンの主旨に則って中心的役割をはたすことになる。そのためか ICL の総幹事として NASA 本部の E. A. Flinn 氏が入っている。

3.4. IAG Commission VIII Subcommittee IRIS<sup>(17)</sup>

3.4.1 いきさつ

第2表 我が国の DELP 研究課題

- |    |                           |
|----|---------------------------|
| 1. | プレート運動の実測 (郵政省, 建設省, 文部省) |
| 2. | 背弧海盆の形成                   |
| 3. | 海洋底の深部構造                  |
| 4. | 南部フォッサマグナにおける衝突現象の解明      |
| 5. | 日本列島の構造発達                 |
| 6. | リソスフェアの形成と進化              |

注: 2~6の課題は主として文部省分、この外 DELP 以外の予算で実行する機関もある。いずれも昭和60年度から64年度までの5カ年計画である。

上記の VLBI 関連の観測キャンペーンとは別に測地の VLBI 観測のものに関する永続的な国際組織が IUGG の 7 つの協会の一つである IAG (=国際測地学協会) Commission VIII CSTG (=International Coordination of Space Techniques for geodesy and geodynamics) の中に Subcommission on IRIS という形で存在することになった。この Subcommission on IRIS 設立に至るまでの経緯とその憲章、現在の活動情况等について少し触れよう。

過去 IUGG の 2 期にわたり IAG に特別研究グループ SSG 2.51 Radio Interferometry (for Geodesy) が設立され、前期 (1975~1979 年) は MIT の C.C. Counselman III 氏が、後期 (1980~1983 年) は NGS (米国立測地局) の W.E. Carter 氏が President として活動してきた。しかしながら IUGG の特別研究グループは原則として 2 期以上続けられないことになっており、VLBI の国際的重要性に鑑みて、昨年初めからそのパーマネントな存続が図られていた。そして Carter 氏の尽力で、IAG Commission VIII と COSPAR Interdisciplinary Scientific Subcommission B.2 の共同下に設立されている CSTG の Subcommission on IRIS (=International Radio Interferometric Surveying) として、永続的に存続させることが昨年 8 月西独ハンブルグで開催された IUGG/IAG 総会で決定された。

一方これに先立ち、Carter 氏の属する NGS はその業務の必要からか、西独の三つの測地的機関乃至大学と 1982 年に合意書を取りかわし、同じく IRIS の名の下に、米国の POLARIS 局と西独の Wettzell 局との間で、主に極運動・地球回転及び北米—欧州間プレート運動の観測活動を行っていくこととした。この際の観測活動として週 1 回 Mark III システムを用いた 24 時間観測を行い、その精定精度については X, Y 成分は 10cm 以上、UT 1 は 0.1 m sec 以上の精度で決定する、としていた。従って昨年 8 月に設立された IAG Commission VIII Subcommission on IRIS は NGS—西独機関間合意内容の拡張版ともいえよう。こうして新しい IRIS では、Mark III 又は K-3 システムを用い、精度  $\pm 2$  cm を目標とした測定をとり扱っていくことになった<sup>(18)</sup>。

#### 3.4.2 構成員・憲章・運営委員会

SSG 2.51 は全体で 20 名であったが、Subcommission メンバーの人数は特に制限がなく、現在約 30 名程度である。今回の改編ではこれまでの SSG 2.51 のメンバーをほぼ包含した上で新たに、VLBI システム機器の開発、電波源のカタログ作成、データ解析の改良・発展、実験・観測キャンペーン、等に携わる人々も含むよう範囲を拡大した。

当 Subcommission 設立の際の憲章によると、この Subcommission では「測地応用のための電波天文干渉法の開発と利用に有益と思われる諸活動を、調査し、推奨し、開始し、指導し、管理し、そして調整すること。この目的のため当 Subcommission は運営委員会を設立し、この運営委員会は観測キャンペーンを組織すること、シンポジウム及びワークショップを組織すること、レポート・マニュアル・プロシーディングスを発行すること、そして必要に応じてその他の諸活動を行うこと、の権限を付与されるものとする。運営委員会は当 Subcommission の活動と他の Subcommission の活動との調整や、MERIT, COTES (筆者注; 後述する) のような多種技術に関する計画を助けるための、IAG 組織構成の範囲内での協同的作業、について責任をもつこととする。」となっている。

運営委員会委員としては IRIS 諸観測に、近い将来までに加わるであろう VLBI 観測機関、即ち POLARIS の 3 局、西独の Wettzell、スウェーデンの Onsala、中国の上海、日本の電波研究所から選ばれるとの趣旨により現在カーター委員長を含む以下の 5 名が任命されている。

James Campbell (西独)、William Carter (米国)、Bernt Rönnang (スウェーデン)、Ye Shuhua (中国)、及び筆者 (日本)。

一方国内の Subcommission メンバーとしては、筆者の外東京天文台の土屋氏、国土地理院の須田氏、緯度観測所の原氏が任命されている。

#### 3.4.3 活動内容

Subcommission on IRIS 等は設立されてからいまだ日も浅く、それ程大きな活動はしていない。また運営委員が一堂に会する機会はこれまで一度もなく、今年 7 月のハンガリー、ショプロンでの地球力学シンポジウムは最初のチャンスであった。

当面の活動は、主として現在進行中の MERIT メインキャンペーンを支持し、成功させることである。今春までは Westford, GRAS の POLARIS 2 局による 5 日ごと 1 回 24 時間観測体制であったが、Richmond (フロリダ州, POLARIS 3 局目) と Wettzell が昨年秋以来繰り返し観測に成功しているため、今春からは 4 局体制が整った。カーター委員長は 5 日ごとの観測局をもう一局増やしたい意向であるが、まだ決っていない。また Onsala 局は毎月 1 回参加しており、その際は 5 局参加となる。

MERIT 期間中の 1984 年 4 月~6 月は観測強化期間となっており、この期間中は Westford-Wettzell 間では磁気テープの供給が続くかぎり毎日のように観測を行

ない UT 1 の値を高頻度で決定した。その結果大気現象と関係あると思われる細かな変化を検出している。

なお今年3月から IRIS Polar Motion and UT 1 time Series を報告するため、毎月1回 IRIS Bulletin A "Earth Orientation Bulletin" が発行され始めた。今後この Bulletin に IRIS に関連した活動状況を示す National Report や各アンテナの紹介等も行っていく予定である。この外、測地的 VLBI 観測のための手引書づくりも考えられている。

### 3.5 COTES について<sup>(19)</sup>

MERIT から派生的に出現し、VLBI とも深く関わっているものに COTES がある。これも MERIT と同じように IAG/IAU の Joint Working Group として、Establishment and Maintenance of a CONventional TERrestrial Reference System を取り扱っていく。COTES ではこれまでの地球座標系を見直し、最新の新しい宇宙技術、すなわち VLBI, LLR, SLR, そして新しい NOVA 衛星を用いた Doppler, さらに近い将来の GPS も含む諸技術で、新しい未来の Conventional Terrestrial System (CTS 地球基準座標系) の体系を作っていくとするものである。

これまでの地球座標の決め方には3種の異なる方法があった。具体的に述べると、VLBI は観測局を結ぶ純粋な幾何学的ベクトルを与え、その観測結果から地球座標を求めにはある種の理想的な回転楕円体を基にしている。それに対し従来の光学天体観測に基づく座標はその地点の鉛直線乃至はそれに直角なジオイドを基にして地心座標を決めているため、局地的な重力異常に左右されやすい。また SLR やドップラー観測など人工衛星を用いる方法では地球重心を基にした力学座標を設定することになる。これら3者の関係を明らかにし、より確かな地球基準座標系を確立することが COTES ワーキンググループの役割であろう。

## 4. 測地的 VLBI から見た各国の情況<sup>(20)</sup>

VLBI の応用分野はますます広がっているが、4. では主として測地的、地球物理的、位置天文的な観点から、米国を除く主な国の VLBI の現況について触れてみよう。米国については3.1の外、Mark III 関連の記述が随所にあるので省略する。また日本の国内情勢については5. で触れることにする。

### ○欧州全体の諸計画

欧州には種々の天文目的の電波干渉観測網の調整のため、VLBI プログラム委員会が設立されている。この活動の中で、年に1~2回の24時間観測が、各局の正確

な位置を決定するために割り当てられている。この観測プログラムでは、5GHz で Mark II システムを用いたバンド幅合成を行ってきたが、最近では Mark III を使ってより一層高精度な観測を行おうとしている。1980年及び1981年の観測キャンペーンに参加した局は、Westerbork (オランダ)、Effelsberg (西独)、Jodrell Bank (英)、Onsala (スウェーデン)、Chilbolton (英)そして Metsähovi (フィンランド)であった。別の8.4GHzを用いたキャンペーンでは Madrid (スペイン)、Effelsberg と Onsala が参加した。

ESA では欧州地震予知計画会議(Council of Europe Earthquake Prediction Program) が地上及び宇宙技術と近代的な通信システムを用いて地震予知プログラムを計画している。地震予知用の国内及び国際的なプロジェクトに対する体制を確立することが長期的な目標である。この中において VLBI は地球表面の地殻の物理的状态をモニターする手段として有効であるとしている。この地震予知業務は、まず1985-89年の間、VLBI のような地上施設の整備を前提として予備運用段階を経、1990年には運用段階に達することが期待されている。しかしながら実際には、初期の観測期間中に得られる基線の変位ベクトルに基づく最初の予知計算を行うには当初計画に比べ5年程度の遅れが生ずるだろうとのことである。

ESA には、L-Sat 衛星を仲介として欧州の主要なアンテナを結合してデータ伝送を行い、種々の目的の VLBI 観測を行うという壮大な計画が1977年から検討されていた。残念ながら衛星の設計変更を伴うという理由で L-Sat を使用する計画は1981年秋に中止されてしまった。この計画が動き出していれば来年あたりから欧州各地を結ぶ実際のデータ取得が行われるはずであった<sup>(21), (22)</sup>。

### ○中国の情況<sup>(23)</sup>

上海天文台が中心となって直径25m アンテナを3基整備する予定である。同天文台の提案によると、場所は上海-昆明-烏魯木齊(ウルムチ)を考えており、この VLBI 網は極運動・地球回転に関する古典的手段への支援、及び地震予知技術支援のための地殻変動観測が目的である。3基のうち上海天文台佘山支所に設置されるものは1985年末に完成とのことである。上海天文台には既に直径6mのアンテナが存在しており、これに Mark II システムを結合して西独ボンの100m アンテナとの間で1981年11月に最初の VLBI 実験を1400MHzで行い、成功している。西独とは同じ基線で1983年末に5GHz帯で2チャンネルの観測も実行された。又1984年4



～5月に上海—Goldstone—Tidbinbilla 間で Sバンド、Mark II を用いた観測も計画されていた。上海天文台では Mark III システムが1985年中に整備される予定である。

以上のように中国では上海天文台が最も進んでいるが、他にも VLBI に関心を持つ研究者達が陝西市陝西天文台や武漢市武昌の地震研究所などにいるが、実際的な面での活動は未だのようである。

#### ○西独の情況

3.4の IRIS のところで触れたように、西独の三つの測地学的研究機関及び大学で運営されている Wettzell 局は米国 NGS の POLARIS 局と結んで極運動・地球回転、及びユーラシア—北米プレート間の相対運動を測定している。Wettzell には測地・位置天文専用の20mアンテナがあり、NASA との技術提携によって Mark III システムによる一連のデータ取得機器が完備している。またボン (Effelsberg) にある100mアンテナは主として電波天文観測用であるが、測地的観測にも使われることがある。ボンには Mark III VLBI の大きな支えとなっている相関装置もあるが、これはヘイスタック観測所のものと同じタイプであり、1983年暮から本格的に稼動し、MERIT メインキャンペーン中の多基線データを処理し始めている。

#### ○スペインの情況

地球物理及び天文を目的とした二つのグループがあり、NASA の許可の下に Madrid の DSN のアンテナを使用している。スペインではイベリア半島南部が地震多発地帯に含まれるので、VLBI を汎地球的、地域的な地殻力学観測へ応用しようという試みが INTA/NASA と Instituto Geografico Nacional との共同で開始された。既に DSN complex のアンテナ間の短基線や、他の欧州内の局との中基線でのデータが取得され始めている。

#### ○フランスの情況

CNES (=Centre National d'Etudes Spatiale), CERGA (=Centre d'Etudes et de Recherches Géodynamiques et Astronomiques), IGN (=Institut Géographique National) をしてパリ天文台の研究者からなる宇宙測地研究グループ (CRGS=Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale) が発足し、VLBI に関連する諸活動を行っている。それらは、①いくつかのホストアンテナと結合する2つの可搬型の Mark II ターミナルを整備したこと。② Orsay の原子時計研究所

で水素メーザを完成させたこと。③宇宙測地のため、フランス内での30m電波望遠鏡、アフリカに建設する14m鏡、そして Grasse 近くの CERGA におけるミリ波望遠鏡、につき調査が進んだこと、である。

#### ○イタリーの情況

ボローニヤの電波天文研究所 (Laboratorio di Radioastronomia, Bologna) はフィレンツェの ARCE TRI 観測所と共同して、イタリー内に2ヶ所の VLBI の建設を計画している。一つはボローニヤ近くの Medicina であり、他はシシリー島の南端の Noto の西側である。この計画は主として電波天文方面から支援を受けているが測地・地球物理の目的もこの計画の中に含まれている。Medicina の32mアンテナは順調ならば本年から運用に入る予定であり、またシシリー島のアンテナも建設中のはずである。使用周波数は初期段階では11, 5.0, 1.67 GHz となる。

#### ○南アフリカ共和国の情況

ヨハネスブルグ近郊の Hartebeesthoek 電波天文観測所は以前 NASA DSN で使っていた26mアンテナを運用しており、1972年以来 Mark II を用いた実験に参加してきている。最近はマドリッド近郊の DSN アンテナとの間で、ヨーロッパ—南ア間 N-S 基線の実験を Sバンドで2回行った。現在では観測時間の10%程度が VLBI に使用可能とのことであり、主として西独のグループが技術的に支援している。使用周波数は8.4, 5.0, 2.3, 1.67 GHz である。より高精度な VLBI 観測のため Mark III データ取得装置と水素メーザを整備すべく準備中である。

上記はそれぞれの国の VLBI 活動の全てではないが、筆者の入手した情報的一端を紹介させて頂いた。

## 5. VLBI の国内情勢

ここ2～3年我が国の VLBI 情勢も電波研究所を中心に着実に前進している。これらのうち主な動き、計画、各機関の意向等について触れよう。

### 5.1 電波研究所—国土地理院間国内実験

電波研究所は5ヶ年計画で K-3 型 VLBI システムを開発したが、国土地理院も電波研究所の技術的支援の下に昭和56～58年度で移動可能な5mアンテナとそれに付属する K-3 のデータ取得装置一式を整備した。これらを用いて既に昨年10月に鹿島—筑波間で相関テストに成功しており、本年7月からシステムレベル実験に入り、その後は3.3で述べた DELP 計画にもっとっ

て国内実験を行っていく。電波研究所としては鹿島一筑波間をシステムチェック等のための基準ベースラインとして、また国土地理院は精密測地測量、地殻変動観測にも応用したい意向である。これらについては I-2 の吉村氏の 4.2 でも触れられているので参照されたい。

### 5.2 位置天文学将来計画と国内 VLBI 網案

位置天文学研究者の間では位置天文学連絡会をつくってお互いに研究の情報交換を行っている。この連絡会には将来計画小委員会が設置されている。この小委員会ではこれまで過去 15 年程の間に 3 回「位置天文学の現状と将来」について提言してきたが、最も新しい今年 1 月の提言<sup>(24)</sup>は、一今後数年間の緊要な課題について一という副題つきで、特に VLBI に力点を置いてまとめている。

VLBI のうち特に今回問題となっているのは、国内 VLBI 網についての位置天文の立場からの提言と、VLBI 技術を取り込んだ今後の極運動・地球回転観測事業のあり方、についてであろう。前者については、測地網規正、地殻変動観測などとの両立性と、既存施設の十分な活用を考慮した上で、我が国の国土の北部、中央部及び西部に 3 局の VLBI 局の新設が望まれる、としている。これら 3 局のうち、1 局は 40 m 級のアンテナを持ち、残る 2 局はそれぞれ 25 m 級アンテナを持つことを強調している。後者の極運動・地球回転観測事業については、現在国際的には MERIT キャンペーンが実行されており、また国内的には臨時行政調査会から緯度観測所がその在り方を問われ、文部省測地学審議会においてその将来につき検討されている。いずれにしろこれまでの国際極運動観測事業 (IPMS) は MERIT キャンペーン終了後国際的な場で検討され、新たに VLBI 等の宇宙技術を取り入れた新事業中央局に引きつがれることになる。

上記将来計画小委員会とは別であるが、同じく位置天文学連絡会の下部組織としてスタートした、若手研究者グループの VLBI 「検討会」でも一般的な国内 VLBI 網の検討が 1～2 年前からなされてきた。1983 年 1 月の筑波のシンポジウムでは前記 3 局の外、3 m 級小型可搬局の案がたたき台として示されていたが、今年 2 月宮城県川渡のシンポジウムでもその骨子にそれ程度大きい変更はなかった<sup>(25)</sup>。ただ日本の北部、中央部、西部の外、東南端に位置する南鳥島の重要性が大大強調されていた。

### 5.3 その他

日本国内では電波研究所、国土地理院の外、VLBI 技術を実際に使用中又はこれから導入を検討している機関がいくつかある。それらにつき簡単に紹介する。

○東京天文台野辺山宇宙電波観測所では昨年 Mark III データ取得システム一式を導入し、既にヘイスタック観測所とのテスト観測を昨年 12 月に終え、今年 2 月にも電波天文の国際ネットワークの一局として観測に参加している。観測周波数は現在のところ 22.2 GHz であるが、43 GHz での観測も試みたい意向である。近い将来 Mark II システムも製作して電波天文データを取得する予定である。

○文部省緯度観測所の事情については 5.2 でも述べたが、電波研究所の K-3 ソフトウェア開発に当っては地球物理モデルソフトウェア (KAPRI) につき御協力を頂いた。

○その外文部省極地研究所の関係者による、EXOS-D 観測用 10 m アンテナを利用した南極大陸の回りのプレート運動研究への応用、同宇宙科学研究所及び電波研究所の関係者による衛星・飛翔体の軌道決定への応用、等が考えられている。VLBI 観測のもたらす種々のデータを自分の研究に役立てたいという研究者が各方面にかなり多くいることは言うまでもない。

## 6. 今後の発展予測

現在の最も精度のよい VLBI システムである“MK-3”を更に改良し、ランニングコストを下げるべく精力的に取り組まれているのは磁気記録の高密度化である。電波研究所や JPL、ヘイスタック観測所等の関係者の努力により、現在の数倍以上の記録密度は近い将来実現するであろう。

日本の道路事情に適した車載可搬型の VLBI 局の実現も待たれるところである。これが実現すれば、多基線の観測が定期的に行われることになる。2.1 で触れた GPS 利用システムは、GPS 打上げが順調に進み、データ処理が容易になれば日本でもかなり普及することになると思われる。

VLBI 観測誤差源の最大のものといっても過言ではない対流圏エクセパス (Excess path) 補正用の水蒸気ラジオメータについてはその絶対的校正をめぐって今も種々の議論が行われている。今後も最適周波数の選択や hygrometer 等別の手段との比較を通して誤差 1 cm を実現してほしいものである。

以上のように、装置としての VLBI の精度は、現在、理論的限界と考えられる 1 cm に肉薄しつつある。今後は装置の小型可搬化、価格低減、標準化、実時間処理といった改善が望まれる。観測の基線は、現在のように地球上に置くだけに限らず、将来は衛星・地球間、衛星・

衛星間、そして月・地球間などに設定することも考えられる。これらは主として衛星軌道決定、電波天文学などの分野で利用されることになる。

3. で述べた種々のキャンペーンの外、近い将来予想される計画として日中共同観測がある。日中については4. の中国の項でふれたように来年末には25 m アンテナが完成する予定であり、上海と日本の VLBI 局とを結んでの観測は、プレート運動、極運動・地球回転の研究に応用されよう。

## 7. おわりに

本報告は主として VLBI の測地、地球物理、位置天文の分野からの記述となった。この外にも VLBI は既に電波天文、衛星軌道決定、時刻比較の分野でも実用に供されてきている。これらについては紙面の都合もあるので、それぞれ関連の文献を参照して頂きたい。

観測精度が向上した結果、いろいろな手段で測定されているデータのおおまかな傾向はほぼ一致してきている。特に極運動・地球回転については、これまで極く細かい変動で一致しない点は“ノイズ”として片づけられていたが、今日では局所的な効果、即ち異なる場所での異なる観測手段によってもたらされるものかもしれない、といわれる。この点は、いろいろな手段による colocation 観測が重要視されるゆえんである。中でも精度の高い VLBI とレーザ測距の場合が特に望まれている。これまでのところ測地学及び位置天文学の一部はどちらかといえば準拠基準楕円体を通して相互に動かない地球上での座標を定めることが主な仕事であった。観測精度が上るにつれ、相互に動く地球上の諸現象を動的にとらえることが大いに加味されてしかるべきであろう。

3. で述べた NASA 地球力学計画、MERIT、DELP 等のキャンペーンや IRIS 等の国際組織が十分に活動するようになればいよいよ地球が“見えて”くることになる。次の数年間の発展に期待したい。

(以上)

## 参 考 文 献

- (1) 川尻轟大；“18. 超長基線干渉計実験の現状とその問題点”，電波研季報，20，No. 8，pp. 391—401，May，1974.
- (2) 川尻轟大；“I-1，世界の VLBI 情勢”，電波研季報，24，No.130，pp.446—454，Sep. 1978.
- (3) 川尻轟大；“VLBI”（超長基線電波干渉計）技術の概観”，計測と制御，21，No. 2. pp. 240—246，昭和57年2月.
- (4) Counselman III, C. C.; “The Macrometer™ Interferometer Surveyor:”, GSTG Bulletin No.5, pp. 32—37, March 10, 1983.
- (5) Buennagel, L. A., MacDoran, P. F., Neilan, R. R., Spitzmesser, D. J., and Young, L. E.; “Satellite Emission Range Inferred Earth Survey (SERIES) Project: Final Report on Research and Development Phase, 1979 to 1983” JPL Publication 84—16, March 1, 1984.
- (6) NASA/JPL; “ARIES-space technology applied to earthquake research, Pamphlet, 1982.
- (7) Brunn, D.L., Wu, S.C., Thom, E.H., McLaughlin, F.D., and Sweetser, B.M.; “ORION Mobile Unit Design”, TDA Progress Report 42—60, pp. 6—32, Sep./Oct., 1980.
- (8) Wu, S.C.; “Error Estimation for ORION Baseline Vector Determination”, TDA Progress Report 42—57, pp.16—31, March/April, 1980.
- (9) Robertson, D.S., and Carter, W.E.; “Operation of the National Geodetic Survey POLARIS Network”, NOAA Technical Report Nos. 95, NGS 24, Proc. Symp. No.5, IAG, Tokyo, May, 1982.
- (10) Yen, J., Kellerman, K.I., Rayhrer, B., Broten N.W., Fort, D.N., Knowles, S.H., Waltman, W.B., and Swenson, G.W.; “Real-Time Very Long Baseline Interferometry Based on the use of a Communications Satellite”, Science, 198, pp. 289—291, 1977.
- (11) 吉野泰造，高橋富士信，河野之宣，川尻轟大，小池国正，川口則幸，“5.4 位相シンチレーション実験装置”，電波研季報，ECS 実験用地上施設特集号，第26巻，第136号，pp. 219—232，1980年2月.
- (12) 高橋富士信，河野之宣，吉野泰造；“6.2位相シンチレーション実験系”，同上特集号，pp.255—259，1980年2月.
- (13) McCarthy, D.D., Angerhofer, P., Babcock, A., Florkowski, D.R., Josties, F.J., Klepczynski, W. J., and Matsakis, D.; “The dedicated use of connected-element interferometry for earth orientation”, NOAA Technical Report Nos. 95, NGS 24, Proc. Symp. No.5, IAG, Tokyo, May, 1982.
- (14) 財団法人リモート・センシング技術センター “宇宙技術を用いた広域地殻変動観測システムの調査研究（第7章）” 昭和55年度科学技術庁委託業務成果報告書，昭和56年3月.

- (15) Cater, W.E., Robertson, S., Pettey, J.E., Tapley, B. D., Schutz, B. E., Eanes, R. J., and Miao Lufeng; "Variations in the Rotation of the Earth", (Pre-print) 1984.
- (16) 河野長; (DELP ニュース)これまでの経過" DELP ニュース, No.1, pp.2-6, 1982年10月.
- (17) 川尻轟大; "IAG Commission VIII Subcommission IRIS" について, 「宇宙技術を利用した地球回転運動の研究」に関するシンポジウム集録, pp. 124-128, 於宮城県鳴子町川渡 1984年2月8-10日.
- (18) 横山紘一; "第18回 IUGG 総会における地球回転関係の報告", 測地学会誌, 第29巻第3号, pp. 188-189, 1983年.
- (19) Mueller, I. I. "IAG/IAU Joint Working group on the Establishment and Maintenance of a Conventional Terrestrial Reference System (COTES)", CSTG Bulletin No. 4, pp. 27-33, June 1, 1982.
- (20) Campbell, J.; "Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Geophysics, Status and Prospect", Proc. CNES International Symp. VLBI Techniques, Toulouse August/September 1982.
- (21) ESA; "Very Long Baseline Radio Interferometry Using a Geostationary Satellite, Phase A Study", SCI (80) 1, February 1980.
- (22) ESA; "Very Long Baseline Radio Interferometry Using a Geostationary Satellite, Study of the Ground Segment", SCI(81) 5, August 1981.
- (23) 佐分利義和, 私信, 1983年.
- (24) 位置天文学連絡会将来計画小委員会; "位置天文学の現状と将来—今後数年間の緊要な課題について—", 昭和59年1月.
- (25) 藤下光身; "国内 VLBI 網によるシミュレーションのまとめ", 「宇宙技術を利用した地球回転運動の研究」に関するシンポジウム集録, pp. 217-221, 於宮城県鳴子町川渡, 1984年2月8-10日.

