

# I-1. 世界の VLBI 情勢

川尻 轟大\*

## VLBI SITUATION OF THE WORLD

By

Nobuhiro KAWAJIRI

### 1. はじめに

本特集号の始めに筆を運ぶにあたり、まず、VLBI のよってきたる過程に触れるのが常道であろうが、歴史的な事柄に関する記述は、既に二・三の文献に紹介されているが、ここでは特に触れない<sup>(1),(2),(3)</sup>。本章では、初期からの電波天文的应用に加えてここ数年盛んになりつつある、測地学及び位置天文学的应用に力点を置いて記述するほか、VLBI 観測による電波天文的トピックと観測法の発達、データ処理方法の進展、観測システムについての動き等、現在まで得られている情報を基に、世界の VLBI の現状について述べてみたい。

### 2. 測地学及び位置天文学への応用

#### 2.1 短基線実験

VLBI の測地的応用は、近年ますます盛んになりつつある。7~8年前の段階では、米国カリフォルニア州における McDoran らの ARIES<sup>(4)</sup> (=Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying) 計画があるにすぎなかったが、その後、1000 km 以上もの基線間で本格的に測地を行った例として、Shapiro<sup>(5)</sup> 等の、米大陸横断のヘイスタック (マサチューセッツ州) とゴールドストーン (カリフォルニア州) 間 3900 km の実験がある。このときは、測地精度  $\pm 20$  cm 以下、UT 1 の決定精度数 m sec を得ているが、長距離の測地としては世界最初のものであろう(第 2 図参照)。

一般に測地精度を云々する場合には、後述本特集号、III-3, V-5., V-6., 参照) のように両局での観測条件をできるだけ等しくすることが望ましい。両アンテナに到達する電波の時刻差が直接的にアンテナ間距離を与えるわけだが、その値を正しく導出するためには電波がアン

テナに到達する前後の信号伝搬上の補正が必要である。一つは電離層、対流圏等の大気中の伝搬 (宇宙空間プラズマによる補正も必要との話もあるが、地球上の基線両端から、電波星を見る際の二つの視線は平行、かつ、ほぼ同一と考えられるので、宇宙空間を伝搬する際の絶対的遅延量は両アンテナとも、ほぼ同じと仮定してよいのではないか) の際の excess path であり、他は、いわゆる局内遅延時間である。ここ数年、基線間を比較的長くしたために起こる前者のような補正の不確かさを除き、両局における受信波の位相を良好に保って、VLBI の基本的技術を完全にマスターしようという短基線の実験がカリフォルニア (307 m<sup>(6)</sup>, 16 km<sup>(7)</sup>) 及びニューイングランド (1.24 km<sup>(8)</sup>) で行われてきた (詳細は本特集号、V-12. の北郷氏の記述を参照されたい)。

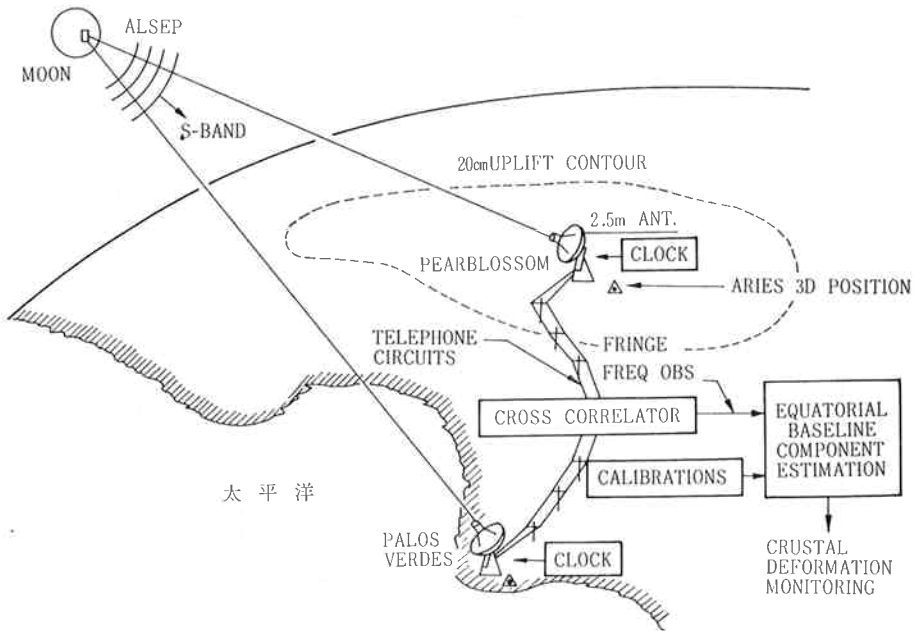
短基線で有利なことは、伝搬媒質が、ほぼ同じであること、電波源の位置の誤差が 2 アンテナの到達時間差 (幾何学的遅延時間  $\tau_g$ ) にそれほど効かない、という点である。それゆえ、短基線干渉計の観測精度が予測値と合うかどうか容易に検証できるし、これまで得られている三角測量等のデータとの比較も容易になる。これらの理由から、短基線の実験は、デジタルレコーディング、バンド幅合成、位相の較正、独立な原振等の VLBI 基本技術のテストを行なう上で重要である。

#### 2.2 ALSEP による測地

毎年米国で行われている PTTI (=Precise Time and Time Interval) に関する会議に、アポロ計画で月の表面に置かれた電波源を利用した干渉計システムの実験<sup>(9)</sup> が提出された。これを用いて地殻変動モニターも行おうというものである。

アポロ計画では ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiments Package) と呼ばれる電波機器やレーザ反射板を月面上に置き、レーザ光で月までの距離を計測したり、月の秤動を観測したりしてきたが、それまで、

\*鹿島支所 第三宇宙通信研究室



第1図 ALSEP電波源を利用したリアルタイム地殻変動モニタシステム

月面上の電波源を地球上の測地目的に使用したことはなかった。

この干渉計システムは、第1図のごとく、Sバンド(約2290 MHz)の月面上の電波源からの電波を米国カリフォルニア州南部の約100km離れた2地点(PearblossomとPalos Verdes)で同時受信するもので、2地点間のデータ伝送に電話回線を用い、リアルタイムにデータ処理を行っている。電波源強度は $5 \times 10^4 J_y$  ( $1 J_y = 10^{-26} \text{W/m}^2 \cdot \text{Hz}$ )と全天で一番強いCas Aと比較しても50倍強い。周波数帯域幅は6 kHz(3 dBダウン)と狭いため(逆にこのことが電話回線利用を可能ならしめている)、通常のVLBI測地の遅延時間決定精度である帯域幅の逆数程度では精度は良くない。そこでもう一つの方法であるdelay rate dataすなわち、フリッジ周波数から基線を決定している。この方法からは基線の赤道面への投影成分である $X, Y$ 成分は検出されるが、 $Z$ 方向(自転軸方向)には感度がない(本特集号V-13. 参照)。

このシステムの特徴は、 $50000 J_y$ に及ぶ電波強度のため、わずか2.5mφのアンテナでも可能となり、システムが簡単化される。ただ、電波源の位置決定に月の動きが入ってくるが、これまでの月レーザ等のデータから0.01秒角で決定され、あまり問題はない。ちなみに、2.5mφの二つのアンテナで、開口効率50%、システム雑音温度200K、バンド幅3kHz、10秒間積分のシステムで $5 \times 10^4 J_y$ のALSEPの電波源を観測した場合、 $S/N$ 比は27となり十分使用に耐える。

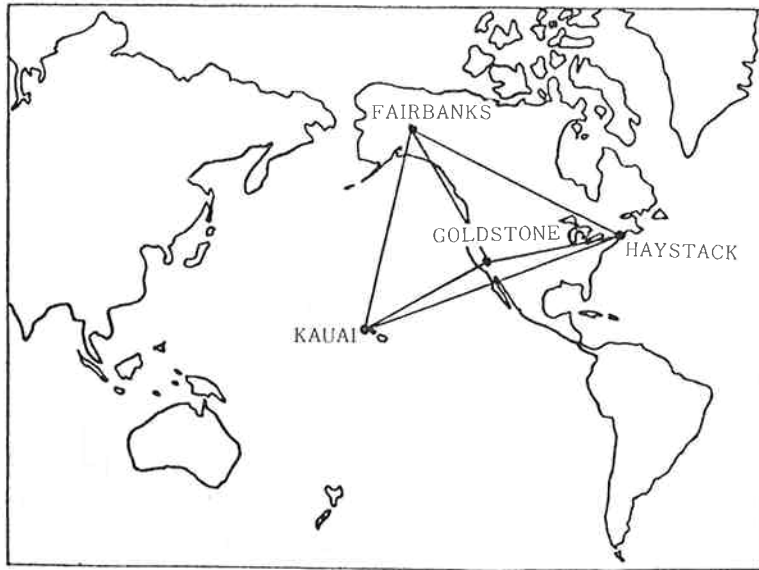
原子標準は水素メーザが望ましいが、C<sub>60</sub>原子標準で

あっても、安定度 $\Delta f/f = 1.6 \times 10^{-13}$ とすれば、Sバンドで350 μHzの位相安定性が得られ(積分時間800秒、これを10時間に伸ばすことにより50 μHzの位相安定度に改善され、10cmの基線決定精度に導くことができる<sup>(9)</sup>。

(ただ、惜しむらくはNASAの方針で、既にこのALSEP電波源は電波を放射していないと思われる。)

ALSEPに関連したもう一つの論文を紹介しよう。Slade等<sup>(10)</sup>はALSEP-Quasar Differential VLBIと銘打ったJ. P. L.での研究をThe Moon誌に報告している。このVLBIプログラムは、準星を用いた準慣性的な、銀河系外の基準座標系を、初めて系統的に、太陽系内の高精度な研究に応用した点で注目される(本特集号、V-13. 位置天文学への応用参照)。

この観測は、基本的にはシステム法<sup>(1)</sup>ののちで行われ、Deep Space Network(DSN, オーストラリア、スペイン、カリフォルニア)やSTDNの26mφアンテナとそれよりかなり小さいアンテナを基線の片側に使用する。大きいアンテナで準星を、小さいアンテナで月面上の電波源を観測することにより、銀河系外電波源(準星)と月面上の幾つかのALSEP送信機との位相関係が得られる。この際、準星用とALSEP用のアンテナのローカル系は共通のものを使用することになる。準星とALSEPを2~3時間連続的に観測して位相を追求することにより、もし、適当な較正が行われるならば、準星を基準とした慣性系に対し、月の位置精度が、1/1000秒角で得られる。これらの高精度観測は、月の運



第2図 P P M E計画におけるアンテナの配置 (本文参照)

行を銀河系外の、ほぼ慣性系に等しい体系に結び付けたり、重力の理論の検証や、地球-月の潮汐摩擦の相互作用の測定、などのため価値あるものとなろう。将来は惑星にも電波源を置き、月に対して行ったのと同じく惑星の運行の精密決定にも役立たせようとのことである (このはしりとして、既に火星に対するマリナー9号やバイキング計画が行われている。)

### 2.3 Mark III による P P M E 計画

V L B I 測距を発展させた形の P P M E 計画と、それを行う手段としての Mark III システムについて Coates ら<sup>(11)</sup>の論文を紹介しておく。P P M E は、Pacific Plate Motion Experiment の略で、最近有名になってきた、巨大地震の原因を説明するといわれるプレートテクトニクス理論に鑑み、太平洋プレートの動きを検出しようという雄大な計画である。第2図にあるとおり、まずアラスカ、ハワイを米本土と結び、次第に西方へ基線を延ばし、日本とも行いたいとの要望は、既に数年前に表明されている (本特集号 V-12. 参照)。この計画は、本章、2.1 で述べた Shapiro ら<sup>(6)</sup>の米大陸のゴールドストーン-ヘイスタック基線の成果を基に太平洋の数千 km に及ぶ基線を 5 cm の精度で結び、測定を継続することにより、毎年 10 cm 程度と考えられる太平洋プレートの動きを検出する。このためには、上記 Shapiro 等の測定精度を、更に上回るべく、2.3と8.4 GHz の2周波を使用して電離層の影響を除き、Mark II<sup>(1)</sup>のバンド幅 2 MHz チャンネルから Mark III の 28チャンネル (最終的には 42チャンネル) 100 MHz 以上にわたるバンド幅合成技術を

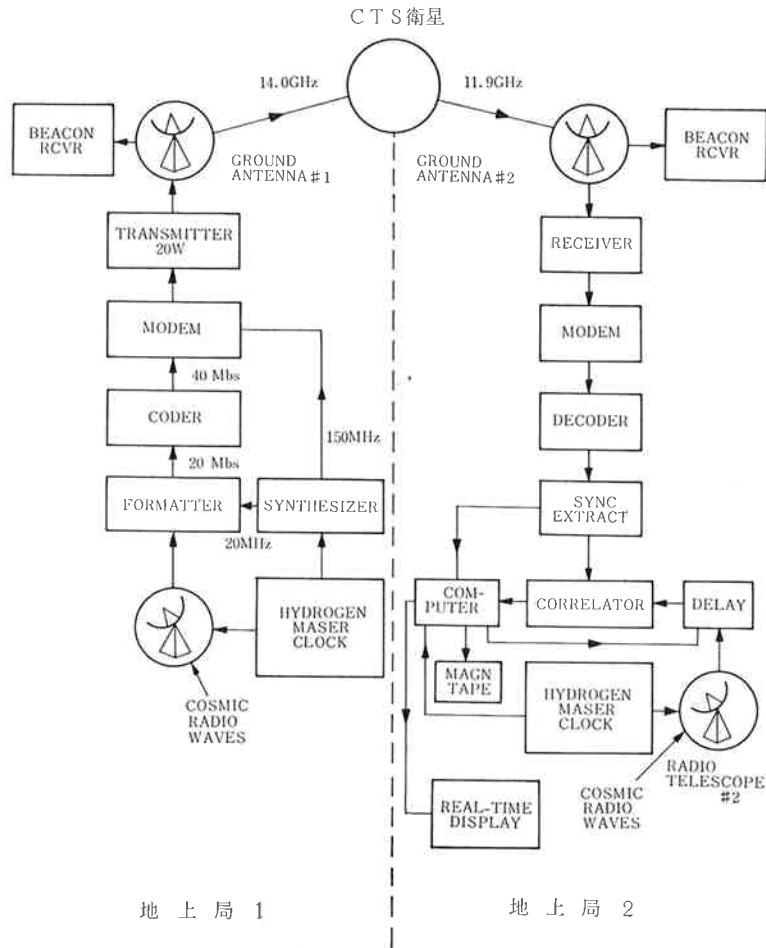
予定している。各チャンネル 2 MHz のまま多くのチャンネルを用いるので、Mark III は一面、多チャンネル Mark II とも呼ばれている。

使用するアンテナは米本土を除き、アラスカ・フェアバンクスの 26 mφ、ハワイ・カウアイ島の 9 mφ (いずれも NASA 所属) と、やや小さい。この点は、その後の受信系の進歩、すなわちシステム雑音温度を ARIES 当初の 200 K から 40 K 以下 (He 冷却の進行波メーザで実験可) へ、受信周波数帯域幅を 2 MHz 2チャンネル 40 MHz 間隔から、Mark III システムの使用へと発展させ、大丈夫なのであろう。J. P. L. の Mac Doran<sup>(12)</sup>によれば、現時点で 4 mφ (transportable) と 40 mφ (固定)、更に、近い将来 4 mφ と 9 mφ (どちらも transportable) のアンテナで、地球上のどの陸地点へも持っていけるようになると発表している。後者の場合でも、一応基線間 1000 km で 3時間程度の観測により 3 次元的に 3 cm の測距が可能としている。既に、100 km 程度の基線網の測距については、在来の、他のどの方法と比較してもコストが安いとまで言っている。

## 3. 電波天文的トピックスと観測法の発達

V L B I を用いた観測法も周辺技術の発達とともに進歩発展を続けている。本節では、最近の V L B I 情勢の中から 2~3 のトピックス的な観測方法、捕らえた現象について触れてみる。

### 3.1 カナダ C T S 衛星利用によるリアルタイム



第3図 CTSを利用したリアルタイムVLBIブロック図

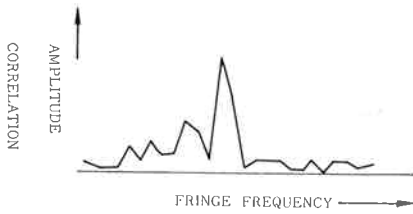
**VLBI**

これまでのVLBIは、それぞれのアンテナサイトにおいて何らかの手段で磁気テープに記録し、後で1か所に集め相関処理を行ってきた(もともと本章2で触れた電話回線やマイクロリンクでデータ伝送を行なうことは、これまでも1部行なわれてきたが)。しかし、衛星通信の発達とともに、これまでの磁気テープVLBIの欠点を克服すべを時期がようやく到来した感がある。磁気テープVLBIの不利な点は、(1)記録するバンド幅が1チャンネル当り数MHzに制限され、したがって受信感度によくないこと、(2)リアルタイムデータ処理が行えないこと、(3)本質的に、いわゆるデータのドロップアウト現象(特にVTRで著しい)から逃がれられないこと等があった。

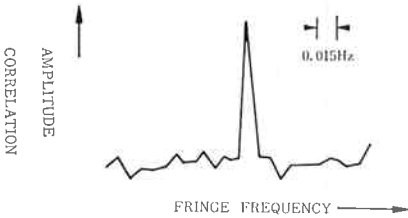
ここで紹介するのは、カナダのC.T.S.(Communications Technology Satellite)をデータ伝送に利用した本格的リアルタイムVLBIである<sup>(13)</sup>。これは、第3図のブロックダイアグラムに示すとおり、まず、カナ

ダのアルゴンキン電波観測所の46mφアンテナとアメリカのNRAO(国立電波天文台)の42mφアンテナで、同じ準星等の天体電波源をVLBI観測する。どちらのアンテナサイトでもバンド幅10MHzの信号を20Mbpsでサンプリングし、更に、NRAO側ではdigital di-phase modulationを行って40Mbpsに直し、別のアンテナで14GHz帯の電波にのせてC.T.S.を通じカナダ側へデータを伝送する。カナダ側では11.9GHzで、天体電波源を観測するアンテナとは別のアンテナで受信し、それを再びdiphase demodulation(複位相復調)を行って、カナダ側でとったデータと同じフォーマットに直し、あらかじめ、衛星リンク伝搬に要する時間と、ほぼ同じ時間(0.275秒程度)だけ遅延させたカナダ側データと相関させる。これらの相関処理はリアルタイムにMTに記録される一方、ディスプレイ装置にも表示される。

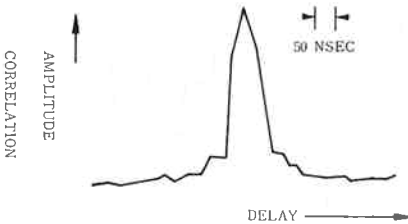
以上のシステムによる観測結果の速報を第4図(a),(b),(c)に示した。このシステムでは前述のように磁気テープによるバンド幅制限が緩和されるため、バンド幅が10



(a) 相互相関対フリッジ周波数の関係 (ルビジウムと水素メーザ使用)



(b) 相互相関対フリッジ周波数の関係 (水素メーザのみ使用)



(c) 相互相関対遅延時間の関係

第4図

MHzと、現在アメリカで多く使用されている Mark II システムの5倍もある。将来の見通しとして10 MHzを50 MHzへ拡大することも可能となり、更には、アナログ相関によるデータのワイドバンド化も達成されよう。

また、ローカル信号を相互に送り合せて位相を比較する two-way transmission によって phase-coherent な干渉システムが実現する。これにより衛星リンク伝搬上の位相の変化が補償され、 $10^{-4}$  秒角の観測が可能になる。これは位置天文学的应用や UT 1 の測定等に特に重要である。

この磁気テープ VLB I に代わる衛星リンク利用システムが多用されるためには、その low cost 化が実現しなければならない。来たるべきスペースシャトル時代には、このことが期待されよう。

### 3.2 “CLOSURE PHASE” 観測法と “CLEAN” 処理法

VLB I はもともとは2素子干渉計の特殊なものである。VLB I 実験が進むにつれて、通常のケーブルで結

ぶ干渉計で、既に開発されている観測法や処理法が VLB I 実験の際にも用いられるようになってきた。この中で、特に天空上の電波源のマッピングに必要な “CLOSURE PHASE” 観測法と “CLEAN” 処理法について簡単に触れよう。

#### (a) “CLOSURE PHASE” 観測法

電波干渉計で天体電波源の2次元輝度分布を知るためには、種々の基線による観測が必要である。つまり、電波源の輝度分布の2次元フーリエ成分をできるだけ多く知ることに対応する。電波源の輝度分布が時間的に変わらず、基線両端での受信電波の位相差が確実に把握できれば、地球の回転を利用した超合成法によって、2素子干渉計でも多くのフーリエ成分を観測することができる。しかし実際には、基線両端において、大気や独立なローカル系によって起こる電波の位相のゆらぎにより、フリッジフェーズを用いた電波源の微細構造決定は不可能に近かった。

そこで考えられたのが、この観測法である。すなわち VLB I の3局同時観測により、三つの基線を形成し、これによって観測される三つの位相のサイクリックな和を考えると、3局の位相の狂いが足されて相殺され、3局についてはあるが一定の位相関係が得られる。

この観測法を初めて VLB I に応用したのは1972年 Rogers ら<sup>(14)</sup>で、ヘイスタック、ゴールドストーンのほかアラスカのギルモアクリークとスウェーデンのオンサラの4局を用い、3C273Bと3C84のマッピングを目指した。最近では Wilkinson ら<sup>(15)</sup>により609 MHzで、大西洋をまたぐジョルドルバンク、グリーンバンク、オーエンスパレイ、フォト・デービスの4局で3C147のマッピングを行っている。これらについては本特集号 V-9. 超合成 VLB I による天体電波源の分解で、更に言及することにする。

#### (b) “CLEAN” 処理法

VLB I でも(a)に挙げた観測法を用いることにより、天体電波源のマッピングに道が開けてきたが、実際の処理段階では種々の工夫が凝らされている。

一般にどんな場合でも天体電波源のマッピングには、一対のアンテナで天体電波源の輝度分布のフーリエ成分を求めることが基本となっている。すなわち地球の回転とともに、基線ベクトルの、電波源に垂直な面への投影の赤経方向成分  $U$  と赤緯方向成分  $V$  は、 $U-V$  平面 (本特集号、V-9. 参照) 上で楕円を描くことになり、素子、つまりアンテナが増えればそれだけ  $U-V$  平面上の楕円が多くなり、フーリエ成分も多く得られる。この  $U-V$  平面の観測値をフーリエ逆変換することにより、実際の天空上の輝度分布  $B(\alpha, \delta)$  を求めることができ

る。

実際の観測では、振幅情報のみで位相情報は得難く、また、参加する観測所もそれほど多くはないので、どうしても電波源のモデルフィッティングが必要となる。ここに挙げた CLEAN と称せられる方法は Högbom<sup>(16)</sup> が最初に提案したもので、それによると、限られた  $U-V$  平面でのフーリエ成分では、合成されたビーム(天空  $\alpha, \delta$  上)のサイドローブが大きくなる。このようなビームで作られた電波源の輝度分布を、少しでも実際に近付けるため、 $U-V$  平面上のビーム成分に重みをかけたり、合成されたビーム( $\alpha, \delta$  上)の中心部分だけを採用してマッピングを行ったりしている。また、Fort and Yee<sup>(17)</sup> はマッピング操作の初期段階で現れる輝度分布のマイナス部分をゼロとして、処理時間を短縮している。しかしながら、これらは電波源が二つ目玉でガウス分布している、といった仮定から出発していることが多く、三つ以上の輝度分布のピークの存在や時間変化を行なう電波源の場合は、まだかなり困難のようである。

### 3.3 その他の電波天文観測

VLBI 技術を使った電波天文観測は数多くあるが、ここでは、幾つかの種類の観測について、文献を記すにとどめたい、

#### (a) 線スペクトル観測

これまでのところ OH 線と  $H_2O$  線の観測が有名である。少し古い論文ではあるが、Moran<sup>(11)</sup> が IEEE 特集号の中で、VLBI による線スペクトル観測法と OH 線源(W3 の中の)の観測例を解説している。最近のトピックスでは、赤外線星(恒星スペクトルの M 型巨星が多い)から放射される OH 線を観測したもの<sup>(18)</sup> やオリオン星雲中で  $H_2O$  (22.235 MHz) のほかに SiO (43.122 GHz) を VLBI 観測し、広がりの下限を得たもの<sup>(20)</sup>、などがある。いずれもメーザ機構より放射された電波である。

#### (b) 長波長での観測<sup>(21)</sup>

長波長における VLBI (ないし VLBI 的) 観測例として、星間空間及び惑星間空間シンチレーションと木星電波の観測がある。

星間空間シンチレーション観測<sup>(22)</sup> は、パルサー PSR 0329+54 を大西洋を隔てたジョドリルバンク(英国)とペンティクトン(カナダ)の間で同時受信して、シンチレータの速度 360 km/sec (local standard of rest に対して)を得ている。ただし、この観測は基線長は長い、自乗検波後の強度の相互相関をとる点で位相を問題にする通常の VLBI とは異なる。Cronyn<sup>(23)</sup> は、星間及び惑星間シンチレーションについて visibility scintillation の測定が有効なことを数値的に解説している。

木星電波については、これから VLBI の手法を使った電波発生源の観測が増加するであろうが、既に Stan-  
nard et al.<sup>(24)</sup> はイオ衛星に関連した電波放射を VLBI で観測し、電波源の運動として 200 km/sec を得ている。

#### (c) その他

天体電波源、ときに銀河系外電波源の構造を探るために行われた VLBI 観測については、波長 4 m から 2 cm に至るまで、既に 40 編以上の論文が発表されている。その代表的なものとして Wittels et al.<sup>(25)</sup> のヘイスタック、ゴールドストーン、フェアバンクス、オンサラの 4 点で合計 25 個の電波源を観測した例を挙げよう。多数の論文のリストについては井上氏の論文<sup>(26)</sup> を参照されたい。

## 4. 世界のその後の動き

### 4.1 VLBI システムの標準化

VLBI システムが初めて開発されてから 10 年以上経過したが、ようやくシステムの標準化の動きが出始めてきた。昨年秋以来、国際測地連合(International Association of Geodesy: IAG)の特別研究グループ(Special Study Group: SSG)の一つとして No. 2.51 に“測地学における電波干渉技術”(Radio Interferometry Techniques in Geodesy)が設立された、との案内があった。これは IAG の Section 2, “Space Technique”の President である Dr. Bernard Chovitz が、MIT の Prof. C. C. Counselman III に要請して作らせたものである。今のところ、この SSG No. 2.51 のメンバーは本来の測地学者ではなく、VLBI 等の電波干渉技術を測地に应用するために、VLBI システムを使用又は開発中の電波天文学者が多いようである。当面の仕事としては、研究情報やアイデアの交換とその流布、重要な技術問題についての討論が考えられている。

また、システム標準化の議論の具体的対象としては、現時点で、次のようなことがある。(1)様々なレベルでの異なる干渉システムや観測データ間の両立性(compatibility)を良くするために、観測方法(狭義の)、記録用フォーマット、観測量の定義等の標準化、(2)観測量への伝搬媒質の影響の較正、(3)電波源の構造の影響、(4)電波源のカatalog 改善、(5)局内遅延時間の較正、(6)アンテナの屈曲と地上測量との関係、(7)周波数標準、(8)移動可能なアンテナ、(9)記録及び処理装置、データ解析のためのアルゴリズム等。

このような VLBI システムや観測手順の標準化は、種々の目的の VLBI 実験が他国間、大陸間で頻繁に行われるようになれば当然考えねばならないことである。

これによりシステム製作のコストが下り、現在VLBIとの縁のない国々にも普及するようになるのではなからうか。

#### 4.2 観測周波数の統一

VLBI実験においては、基線両端における受信周波数の一致が必要不可欠であることは言うまでもない。現在、世界的に行われているVLBI実験での使用周波数は、大きく分けて二つの系統がある。一つは米国NASAの影響下にある、深宇宙探査用周波数であり、他は従来からの電波天文専用周波数である。

前者には、2.27~2.30 GHz (Sバンド) 及び8.0~8.4 GHz (Xバンド) の組合せが主として用いられ、これにより電離層の影響が除去できることはよく知られている(本特集号, V-6. 参照)。8 GHz 帯では7.850 GHz も使用されている。これらは、人工惑星等のテレメトリに使用されてきたが、電波天文観測やVLBI実験にも用いられている。既に米国内のゴールドストーン、ヘイスタック、オーエンスバレイ、グリーンバンクはもとより、オーストラリア、スペイン、スウェーデンに加えて西独のポンの100 mアンテナにも設置を要望しているとのことである。

後者の電波天文観測用保護バンドにおけるVLBI観測は、4.99~5.0 GHz 及び10.68~10.70 GHz が中心であるが、他の2.7 GHz, 1.4 GHz, 609 MHz 等でも行われている。その他、散光星雲などの線スペクトル源を究明する目的で、OH線の1.6 GHz 帯、水蒸気線の22.235 GHz の観測も時々行われていることは本章3.3(a)で触れたとおりである<sup>(18), (19), (20)</sup>。最近では、木星の電波源探査用として、21.85 MHz など極く低い周波数でのVLBI観測も提案されている<sup>(27)</sup> (本特集号, V-8. 惑星電波源のマッピング参照)。木星電波については、VLBI技術が初めて世に出始めたころからよく観測されている<sup>(24), (28)</sup>。

#### 4.3 その他の動き

上記4.2, 4.3のほか、ここ2~3年の動きとして、下記の事柄が注目される。

##### (1) IUGGの勧告

1975年8月フランスのグルノーブルにおいて開催された16回国際測地学・地球物理学連合 IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics) は、次の勧告を行った。極運動研究を促進するための新たな技術開発として、①衛星ドップラー、②月レーザ、③VLBIの3技術を挙げ、各国で発表させようというものがあった。このうち衛星ドップラーは、後の二つに精度的に

劣り、②の月レーザは天気や月の出没に左右される点で③のVLBIほど実験の機会が多くないであろう、との予想で、結局、最後まで残るのはVLBI技術だろうと言われている。

##### (2) 地球地殻の潮汐の検出

1977年9月、ドイツ連邦共和国の首都ボンで第8回国際地球潮汐会議が開催された。この中でVLBI技術により、地球の地殻の潮汐が直接検出されたという報告があった<sup>(29)</sup>、この実験は1974年米国MITのShapiro<sup>(6)</sup>らがゴールドストーン・ヘイスタック間の基線で行ったもので、そのデータを地球潮汐の観点からボンで再処理したところ、見事に地殻潮汐の予測値(±30 cm程度の振幅)と一致した結果が得られた。これについては、本特集号, V-6. でも少し詳しく触れることにす。

##### (3) PTTI会議

毎年12月初めごろに米国でPTTI(Precise Time and Time Interval)の会議が開催される。1977年の会議の中で、VLBIを用いた時刻同期の報告があった<sup>(30)</sup>。それによると、米国のヘイスタック・グリーンバンク間でのVLBI実験で、使用した水素メーザクロックは、Cs原子時計運搬による方法と25 n secの範囲内で一致した。その他、ローカル系共振周波数のフリッジ周波数への寄与から、逆にそのローカル系に用いている原子標準の時計としてのドリフトの割合を求める方法<sup>(31)</sup>や、本章3.1で紹介したC. T. S. 利用リアルタイムVLBIの紹介があった。

##### (4) 特殊なVLBI

様々な形式が考えられようが、ここでは本特集号のV-10. 衛星-衛星間VLBIと地球の公転軌道を利用した“超VLBI”<sup>(32)</sup>を紹介するにとどめる。前者は、地表面では電離層の影響で観測の困難な短波帯の電波で、衛星間の基線を利用して、VLBIシステムを形成し、短波帯ではこれまで作られていないくらいの細かいビームで、新しい物理像を得ようとするものである。

後者の超VLBIは、基線長が地球の直径で制限されている現在システムの限界を突破するもので、位置を決定しようとする天体からの信号が時間的、空間的に十分コヒーレントな場合は、アンテナは1台で済み、基線を地球の公転軌道の直径にまで延長することができる。目的的天体からの信号の位相は、1年間にわたって軌道上の必要な地点で安定な時計と比較される。この方法を使ってラジオパルサーの位置が決定できる<sup>(33)</sup>。

## 5. あとがき

前回、電波研究所季報にVLBIの解説記事<sup>(1)</sup>を書い

てから約4年が経過した。この間の主な進歩について触れたつもりであるが、VLBIに関する文献はいよいよ増加の一途をたどっている。紹介が事実の羅列に終わり、あるいは一部に偏ったかもしれないが、紙面の都合もあり、詳しいことは元の論文等を参照して頂きたい。

本稿を書き終わった時点で、VLBIの解説記事が単行本<sup>(64)</sup>の中にまとめて紹介されているのを知った。初めてVLBIを勉強される方、手っ取り早くアメリカのMark I, Mark II, (本特集号, II-1. 参照), カナダのアナログVLBIシステムについての情報を得たい方や、VLBIの総復習といったことを志す方々には参考になると思う。

本年8月、ヘルシンキで第19回目のURS Iが開催され commission J (電波天文関係)でもVLBIが取り上げられるほか、その後、ボンにおいてVLBIに関するシンポジウムが開催される。どのような話題が飛び出すか注目したい。

最近、日本からVLBI関連の会議に出席した方々の印象では、VLBI技術の最も進んだアメリカにおいては、その技術はほぼ完成の域に近づき、今後は観測のルーチン化、リアルタイム化、そして他の国々とのVLBIの結合が、残された問題となっているとのことである。この点我々は、次のステップであるECS計画中の、VLBI技術による位相シンチレーション実験によりルーチン化、リアルタイム化のテストを行うことになる。我々も早くVLBI先進国の仲間入りを果たしたいものである。

#### 参 考 文 献

- (1) 川尻轟大; “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) 土屋淳, 松波直幸, 中嶋浩一; “長基線電波干渉計の測地・位置天文学的利用(I)”, 天文月報 68, No. 3, pp. 79—84, May, 1975.
- (3) 平林久, “天体物理に与えたVLBI 8年間の影響”, 天文月報 68, No. 5, pp. 151—158, May, 1975.
- (4) Thomas, I. B., Fanselow, I. L., Mac Doran, P. F., Spitzmesser, D. J. and Skjerve L.; “Radio Interferometry: Feasibility Demonstration for Monitoring Tectonic Motions”, A Compendium of J. P. L. Research, presented at the American Geophysical Union meeting, San Francisco, 5 Dec. 1972.
- (5) Shapiro, I. I., Robertson, D. S., Knight, C. A., Counselman III, C. C., Rogers, A. E. E., Hinteregger, H. F., Lippincott, S., Whitney, A. R., Clark, T. A., Niell, A. E. and Spitzmesser, D. J.; “Transcontinental Baselines and the Rotation of the Earth Measured by Radio Interferometry”, Science, 186, pp. 920—922, 6 Dec., 1974.
- (6) Ong, K. M., Mac Doran, P. F., Thomas, I. B., Fliegel, H. F., Skjerve, L. J., Spitzmesser, D. J., Batelaan, P. D. and Newsted M. G.; “A Determination of a Transportable Radio Interferometric Surveying System with 3-cm accuracy on a 307-m Base Line”, J. G. R., 81, 20, pp. 3587—3593 (1976).
- (7) Thomas, J. B., Fanselow, J. L., Mac Doran, P. F., Skjerve, L. J., Spitzmesser, D. J. and Fliegel, H. F., “A Demonstration of an Independent-Station Radio Interferometry System with 4-cm Precision on a 16-km Base line”, J. G. R., 81, 5, pp. 5—1005 (1976).
- (8) Rogers, A. E. E., Knight, C. A., Hinteregger, H. F., Whitney, A. R., Counselman III, C. C., Shapiro, I. I., Gourevitch, S. A. and Clark, T. A., “Geodesy by Radio Interferometry, I. Determination of a 1.24 Kilometer Baseline Vector with ~5 Millimeter Repeatability”, Submitted to J. G. R., (Nov. 1976).
- (9) Mac Doran, P. F.; “A System for Near Real-Time Crustal Deformation Monitoring”, Proc. PTTI 1976, pp. 127—134.
- (10) Slade, M. A., Preston, R. A., Harris, A. W., Skjerve, L. J. and Spitzmesser, D. J.; “ALSEP-Quasar Differential VLBI”, The Moon 17, pp. 133—147, (1977).
- (11) Coates, R. J., Clark, T. A., Counselman III, C. C., Shapiro, I. I., Hinteregger, H. F., Rogers, A. E. E. and Whitney, A. R.; “Very Long Baseline Interferometry for Centimeter Accuracy Geodetic Measurements”, Tectonophysics, 29, pp. 9—18, 1975, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- (12) Mac Doran, P. F.; “High Mobility Radio Interferometric Geodetic Monitoring of Crustal Movements,” Abstract presented to American Geophysical Society meeting, Autumn, 1976.
- (13) Knowles, S. H., Waltman, W. B., Broten, N. W., Fort, D. H., Kellerman, K. I., Rayner, B., Yen, J. L. and Swenson, G. W.; “First Results from a



- Satellite Data Link Radio Interferometer," Proc., PTTI 1976.
- (14) Rogers, A. E. E., Hinteregger, H. F., Whitney, A. R., Counselman, C. C., Shapiro, I. I., Wittels, J. J., Klemperer, W. K., Warnock, W. W., Clark, T. A., Hutton, L. K., Marandino, G. E., Ronnang, B. O., Rydbeck, O. E. H., and Niell, A. E.; "The Structure of Radio Sources 3C 273 B and 3C 84 Deduced from the "Closure" Phases and Visibility Amplitudes Observed with Three-Element Interferometers", *Astrophys. J.* **193**, pp. 293—301, 15 Oct. 1974.
- (15) Wilkinson, P. N., Readhead, A. C. S., Purcell, G. H. and Anderson, B.; "Radio structure of 3C 147 determined by multi-element very long baseline interferometry", *Nature*, Vol. 269, pp. 764—768, 27 Oct. 1977.
- (16) Högbom, J. A.; "Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines", *Astron. Astrophys. Suppl.*, **15**, pp. 417—426, 1974.
- (17) Fort, D. N. and Yee, H. K.; "a Method of Obtaining Brightness Distributions from Long Baseline Interferometry", *Astron. Astrophys.*, **50**, pp. 19—22, 1976.
- (18) Moran, J. M.; "Spectral-Line Analysis of Very-Long-Baseline Interferometric Data", *IEEE*, **61**, No. 9, pp. 1236—1242, Sep. 1973.
- (19) Moran, J. M., Ball, J. A., Yen, J. L., Schwartz, P. R., Johnston, K. J. and Knowles, S. H.; "Very Long Baseline Interferometric Observations of OH Masers associated with Infrared Stars", *Astrophys. J.*, **211**, pp. 160—169, Jan. 1, 1977.
- (20) Moran, J. M., Johnston, K. J., Spencer, J. H. and Schwartz, P. R.; "Observation of the SiO and H<sub>2</sub>O Masers in Orion A", *Astrophys. J.*, **217**, pp. 434—441, 15 Oct., 1977.
- (21) 小島正宣; "VLBI観測"「干渉計」による天文学, 宇電懇東伊豆シンポジウム, pp. 94—96, 1974年12月1—3日.
- (22) Galt, F. A. and Lyne, A. G.; "The Interstellar Scintillation Pattern of PSR 0329+55", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **158**, pp. 281—290, 1972.
- (23) Cronyn, W. M.; "Interferometer Visibility Scintillation", *Astrophys. J.* **174** pp. 181—200, 15 May, 1972.
- (24) Stannard, K.M., Dulk, G. A. and Rayhrer, B.; *Radio Science*, **5**, pp. 1271—1280, 1970.
- (25) Wittels, J. J., Knight, C. A., Shapiro, I. I., Hinteregger, H. F., Rogers, A. E. E., Whitney, A. R., Clark, T. A., Hutton, K., Marandino, G. E., Niell, A. E., Rönnäng, B. O., Rydbeck, E. H., Klemperer, W. K. and Warnock.; "Fine Structure of 25 Extragalactic Radio Sources", *Astrophys. J.*, **196**, pp. 13—39, 15 Feb., 1975.
- (26) Inoue, M.; "The Structure of Extragalactic Radio Sources with Flat Spectra", *Publ. Astron. Soc. Japan*, **29**, pp. 593—614, 1977.
- (27) 高橋富士信, 川尻轟大, 河野宣之, 尾嶋武之, 三木千紘; "VLBI (超長基線干渉計) 技術の木星電波探査への応用", 第 57 回日本地球電気磁気学会予稿, 電波研究所, 1975年5月20日.
- (28) Gargent III, H. H. and Klemperer, W. K.; "A decametric long baseline interferometer system", *Radio Science*, Vol. 5, No. 10, pp. 1283—1286, Oct. 1970.
- (29) Bonatz, M. and Campbell, J.; "Potential of VLBI-technique for direct measurement of Earth tides", 8th International Symposium on Earth Tides at Bonn, Sept. 19—24, 1977.
- (30) Clark, T. A., Counselman, C. C., Hanson, L. B., Hinteregger, H. F., Klepczynski, W., Knight, C. A., Rogers, A. E. E., Shapiro, I. I. and Whitney, A. R.; "Precise Clock Synchronization via Very Long Baseline Interferometry", abstract presented at 9th PTTI Planning meeting, Nov. 29, 1977.
- (31) Cannon, W. H., Petrachenko, W. T. and Langley R.B.; "Clock Rate Comparisons by Long Baseline Interferometry", *ibid.*
- (32) 大師堂経明; "Pulsar Parameters from Timing Observations ("超VLBI") 「干渉計」による天文学, 宇電懇東伊豆シンポジウム集録, pp. 106—108, 1974年12月1—3日.
- (33) Manchester, R. N. and Petero, W. L.; "Pulsar Parameters from Timing Observations", *Astrophys. J.*, **173**, pp. 221—226, 1972 April 1.
- (33) "Interferometers and Arrays", chapter 5, *Methods of Experimental physics*, **12—part C**. Radio Observations, edited by M. L. Meeks, Academic Press, 1976.

VL  
ばい、  
ている  
出する  
こでは  
物理量  
電子計  
うにす  
係にあ

1 個  
ナの直  
m の  
能ある  
更に外  
直径を  
用や括  
する  
さな  
ンチ  
を得  
ば、  
観測  
V  
るい  
分1  
BI  
\*鹿