

I-2 K-3型 VLBI システムの開発と共同実験計画

吉村 和幸*

(昭和59年7月3日受理)

1. はじめに

当所では、昭和54年度より5か年計画で K-3型 VLBI システム (超長基線電波干渉計システム) の開発を進めてきたが、同58年10月にほぼシステムの完成をみた。そして、米国航空宇宙局 (NASA) の VLBI 局との間で、58年11月に試験観測を、また59年1月及び2月の2回にわたって本格観測の一つである予備実験を実施して、いずれも成功を収めた。これによって、K-3システムが計画されたスケジュール通り、所期の性能をもって完成したことが確認された。

本システムは、昭和59年夏期から開始される日米共同実験により、日米間を始めとするいろいろな方向の大陸間距離を3cm以下の精度 (電波の到達時間差決定精度0.1nsec以下) で測定し、地殻プレート運動の検出を行うことを直接の目的としている。これによって、長期的地震予知などに役立てていくものである。また、高精度国際時刻比較や地球回転運動の測定にも使用するほか、国内においては建設省国土地理院の整備する可搬型システムとの間で共同実験を行い、地殻変動の測定及び測地網の規正などに役立てていく予定である。

本報告では、K-3システム開発の経緯、国際及び国内共同実験計画について、VLBIの原理や地殻プレート運動についても簡単に触れながら、その概要を報告する。

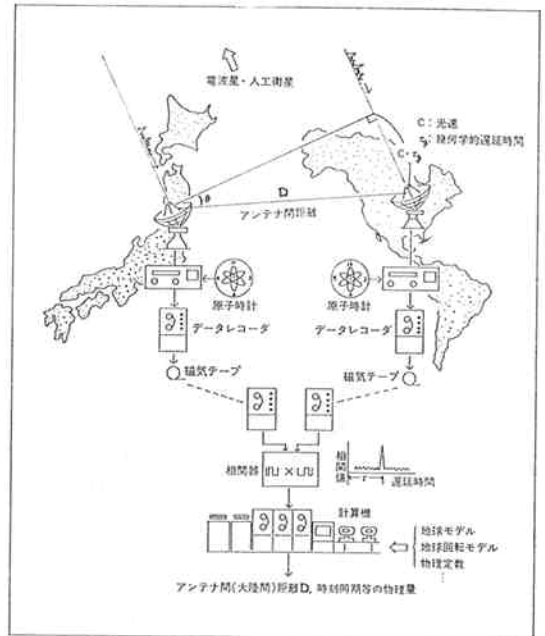
2. VLBI の原理及び地殻プレート運動^{(1)~(15)}

2.1 原理

VLBI (Very Long Baseline Interferometer) とは、電波星あるいは人工衛星などからの電波を二地点で独立にかつ同時に受信をし、受信データを持ち寄って相関処理することによって電波の二地点への到達時間差 (遅延時間と言う) を高精度で決定する装置又はシステムであり、干渉計の一種である。

VLBI では、各受信局がそれぞれ原子時計を保有して時刻やローカル周波数を供給するため、アンテナ間距離 (基線長と言う) を数千 km 以上の長さにとることがで

きる。これにより、大陸間にわたる距離でも高精度で測定することが可能になり、また干渉計の方向性が千分の一秒角にもなりうるため、高分解能の電波天文観測ができるようになった。また、科学技術の進歩によって遅延時間を0.1nsec以下という非常に高い精度で決定できるようになったが、これは原理的に基線長に依らないため距離測定の相対精度は基線長に比例して高くなる。



第1図 VLBI の原理

第1図に VLBI の概念図を示す。準星などからの電波は二つのアンテナに平行に入射すると仮定できるので、基線長、遅延時間に対応する光路長、電波星の方向などは、図に示した三角形で結ばれる。したがって、

$$\tau_g = (D/c) \sin \theta \tag{1}$$

ただし、 τ_g は図に示されるような幾何学的遅延時間、 D は基線長、 c は光速、 θ は基線に垂直な面と電波星のなす角度である。

基線ベクトルの赤経、赤緯を (α_b, δ_b) 、電波星のそれを (α_s, δ_s) とすると、(1)式は次のように書ける。

$$\tau_g = (D/c) [\sin \delta_b \sin \delta_s + \cos \delta_b \cos \delta_s \cos \alpha_s]$$

*周波数標準部 周波数標準値研究室

$$(\alpha_b - \alpha_s) \tag{2}$$

α_b は地球の自転と共に変化する。(2)は地心座標で表せる。基線ベクトルの成分を (X, Y, Z) とし、時刻 t におけるグリニッチの赤経を $\alpha_G(t)$ とすると、

$$\tau_\theta = (1/c) [Z \sin \delta_s + \cos \delta_s \{X \cos(\alpha_G(t) - \alpha_s) - Y \sin(\alpha_G(t) - \alpha_s)\}] \tag{3}$$

VLBI を測地に応用する場合、 D, α_b, δ_b , 又は X, Y, Z を求めることになる。ところで、(3)式には未知数が $\alpha_G(t) - \alpha_s$ を1個として5個ある。一方、(2)又は(3)式を書き替えると、

$$\tau_\theta = A \cos(\omega_e t + B) + C \tag{4}$$

のように書ける。ただし、 ω_e は地球の自転角速度であり、 C には原子時計の時刻オフセットが含まれてよい。

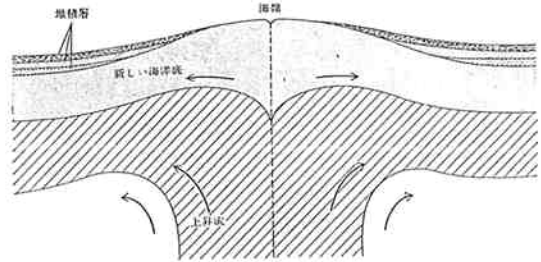
(4)式から、一つの電波星の24時間以上の観測で A, B, C の3個が定まるから、最小限3個の電波星を観測すると、未知数9、測定量9となって全未知数が求められる。実際には、遅延時間と影響するパラメータのモデルの立て方により未知数はいくらでも多くなり得るから、それにつれて観測する電波星の数を増していく必要がある。

VLBI では、二局の受信データから遅延時間を決定するのに、先ずこれらの相互相関関数を計算し、そのフーリエ変換から相互相関スペクトルを求める。そして、この虚数部と実数部の比の \arctan として位相スペクトル $\theta(\omega)$ を求め、これから $\tau_\theta = d\theta(\omega)/d\omega$ を決定する。したがって、遅延時間 τ_θ の決定精度はデータの周波数帯域が広いほど高くなるが、記録装置(ビデオレコーダの一種)の制約から数MHz程度にしかできない。そこで、100 MHz 以上(K-3 システムでは420 MHz)の受信帯域の中からビデオ帯域(K-3 では標準2 MHz)を何チャンネルか選んでデータをサンプルし、これを合成することによって実効的に広帯域受信とすることが出来る。これは帯域幅合成と呼ばれるが、受信した膨大なデータ量を適当に軽減して現実的なものにする重要な技法である。

VLBI で実際に測定される遅延時間 τ には、幾何学的遅延時間 τ_θ のほかに時刻同期誤差 τ_c 、受信システムの遅延 τ_s 、伝搬媒質中の遅延 τ_p などが含まれる。それゆえ、

$$\tau = \tau_\theta + \tau_c + \tau_s + \tau_p \tag{5}$$

となる。また、 τ_θ には基線長のほか、電波星の構造、地球回転運動(極運動、自転速度の変化など)、地球潮汐などの影響が入ってくる。このことは、これらのパラメータのうち任意の一つを未知数として取り扱うことができることを意味し、VLBI が様々な分野で極めて高精度の観測手段として利用できる可能性を有している。



第2図 海洋底拡大のモデル⁽⁹⁾

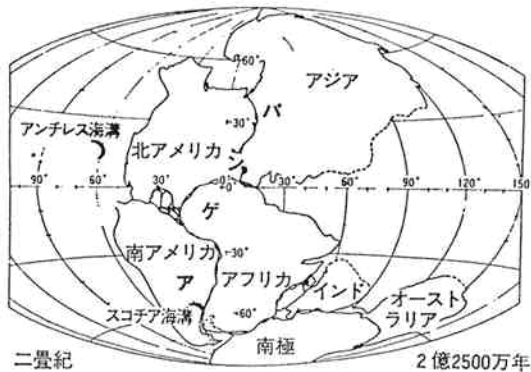


第3図 プレートによる地殻の分割⁽⁹⁾。6個の大きなプレートには名前をのせてあり、6個の小さなものには番号をつけてある。この6個の名前は(1)アラビア (2)フィリピン (3)ココス (4)ナスカ (5)カリブ (6)スコティアである。(F. J. Vine による)

2.2 地殻プレート運動

当所では、K-3 型 VLBI システムを用いて米国の NASA と共同して地球上のいろいろな方向の距離を測定し、地殻プレート運動を検出しようとしている。地殻プレートとは地球内部のマンテルからの物質(岩石の一種)が海嶺から噴出して、厚さ100~150 km のプレート状になって移動しているもので(第2図)、主にマンテルの上部とほぼ同じかんらん石 $(Mg, Fe)_2 - SiO_4$ からなる。第3図に地球上を覆うプレートの主なものを示す。プレートは図に示す矢印の方向に移動するが、このとき海洋性地殻(厚さ5~10 km)や大陸(平均高 \approx 40 km)がその上に乗って運ばれる。そして、プレートとプレートの境界である海溝などで、一方のプレート(海洋性プレート)が他方のプレート(大陸性プレート)の下に沈みこみ、約700 km 程下のマンテル中で再び溶けてしまう。これがプレートテクトニクスの基本的考えであり、大陸移動説や海洋底拡大説が中心になっている。

大陸移動説は17世紀頃からあったが、その考えの発端となったのはアフリカ大陸と南アメリカ大陸の向かいあう海岸線が類似していることによる。これに地質学や古生物学などからの学問的裏付けを与えて科学的論争の舞台に引き出したのが、今世紀初めのドイツ人ウエゲナーであった。ウエゲナーによる大陸移動説は、大陸を動



第4図 パンゲア(II)

かす原動力に弱点があって一時遅けられていたが、1960年代にプレートテクトニクスとして復活し確立した。これによれば、約二億年以上前には大陸はひとつになっていたが(ウエゲナーによりパンゲアと呼ばれた、第4図)、中央海嶺(第3図)などからマントルが噴出し、左右にプレートとなって移動するため今日の姿になったと言われる。日本列島も方々から島が寄せ集まってできたらしい。

プレートの移動する速さは1~10 cm/yearであるが、大西洋側では比較的遅くて1~3 cm/year、太平洋側では5 cm/year以上である。日本海溝附近では6~8 cm/yearと言われ、太平洋プレートが日本列島を乗せているユーラシアプレートの下に潜り込んでいる(フィリピン海プレートは南海トラフで潜り込む)。このとき、大陸プレート(日本列島)は下方に引き込まれ、また圧縮されるが、やがて破壊が起って逆断層型の大地震を起す(関東地震など多数、ただし三陸沖地震は正断層型)。世界の地震の80%は環太平洋地震帯と言われる、太平洋地域のプレートの境目である海溝や断層(米国のサンアンドレアス断層など)附近で発生している。

以上のことから判るように、VLBIによって地殻プレートの動きや地殻の歪みを高精度で測定することは長期的に地震予知をする上で非常に重要である。

3. K-3 システム開発^{(15)~(27)}

3.1 五か年計画策定に至る経緯

当所では、宇宙通信、周波数標準、電波伝搬、データ処理など VLBI システムの開発に必要な技術を総合的に備えた国内唯一の国立研究機関として、比較的早くから同システムの開発に取り組んできた。すなわち、当所が最初の VLBI システム(K-1)の開発に着手したのは昭和49年であり、米国やカナダに遅れること7年であった。K-1 システムは米国の開発した Mark-II を参考にしており、これによって昭和52年1月に鹿島支所

26 m アンテナと電々公社横須賀電気通信研究所 12.8 m アンテナとの間で、4 GHz 帯 2 MHz 幅で我が国初めての VLBI 実験を行った。電波源としては ATS-1 からの雑音を用い、遅延時間決定誤差 ± 5 nsec、相対位相決定精度 $\pm 6^\circ$ を得た。

次いで、実験用静止通信衛星(ECS)実験計画の一環として、衛星からの電波の位相シンチレーションを測定する目的で K-2 システムを鹿島主局と平磯副局間に設置した。そして、両局を結ぶマイクロ波回線によってデータを伝送して実時間処理を行ったこと、4 GHz 帯 100 MHz 幅を5チャンネル(各2 MHz 幅)の帯域幅合成を行って、遅延時間決定精度 ± 0.1 nsec を得たことなどが特徴である。しかし、K-1 及び K-2 システムによるいずれの実験においても、システムの性能の制約からアンテナ間距離を算出するほど充分な観測を行うことはできなかった。

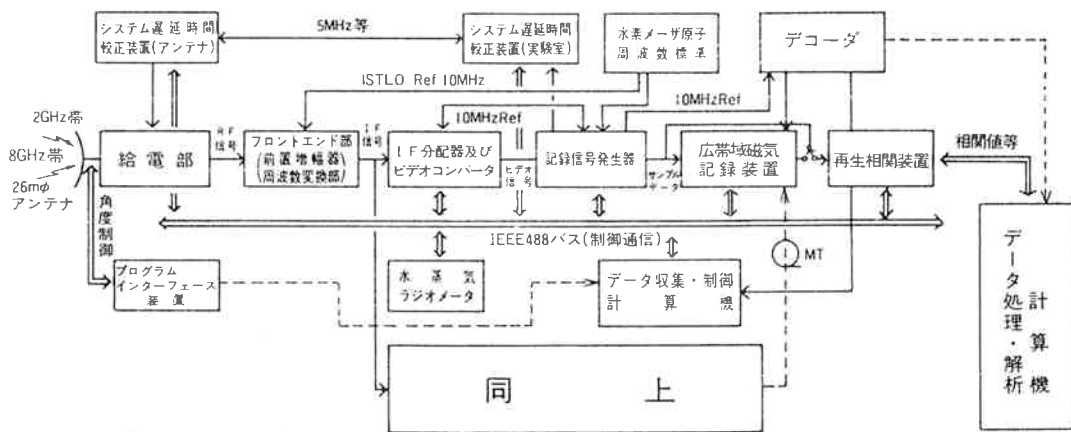
K-2 システム開発の時期と並行して、文部大臣の諮問機関である測地学審議会において第4次地震予知5か年計画に関する答申がなされ、新たに「宇宙技術によるプレート及び地殻変動観測」という項目が採択された。これを受けて当所でも、これらの観測目的に耐えうる高精度で総合的な VLBI システムを開発するための「超高精度電波干渉計システムの開発研究」計画を策定し、昭和54年度を初年度とする5か年計画によって K-3 システムの開発に着手した。

一方、米国 NASA と我が国の宇宙開発委員会との間で進められていた「宇宙分野における日米合同調査計画」において、1979年6月、第3回専門家会議は17項目の合同調査項目をまとめたが、この中の一つに「Study of Crustal Plate Motion」があり、地殻プレート運動の研究に VLBI を含む宇宙技術を適用していくことが確認された。これにもとづいて、当所所長と NASA 国際部長との往復書簡で、1984年から日米間で VLBI 実験を行うことが合意された(1980年2月)。また、「日米間の非エネルギー分野の科学技術研究開発協力協定」が両国政府間で1980年5月に調印・発効したが、上記の合同調査項目は形式上この協定の傘の下に置かれ、VLBI 日米共同実験は協定の第1項目「地球力学」に含まれることとなった。

上記の事実を踏まえて、既に始まっていた K-3 システム開発5か年計画は、米国側の Mark-III システムと両立性を計るべく昭和56年度以降の予算計画を含めてシステムの大幅な見直しを行い、昭和58年11月にシステムの完成をみた。なお、測地学審議会による地震予知5か年計画は既に第5次(昭和59年~63年)に移行しており、「宇宙技術の測地測量への利用」が当所の寄与

第1表 K-3型 VLBI システム開発線表

	54年度	55年度	56年度	57年度	58年度 7 10 12	59年度以降
26mアンテナ 改修工事					→	小型車載局の開発 K-3システムの機能の拡充と性能の改善 国際共同実験及び国内共同実験
フロントエンド部 給電部 低雑音増幅器 周波数変換器 遅延校正装置			←	←	→	
水素メーザ周波数 標準器 (×2)			←	←	→	
水蒸気ラジオメータ				←	→	
バックエンド部 IF分配器 (×2) ビデオ変換器 (×2) 記録信号発生器		←	←	←	→	
広帯域磁気記録装置	←	←	←	←	→	
再生相關装置		←	←	←	→	
電子計算機 データ収集制御用 (×2) データ処理解析用			←	←	→	
ソフトウェア データ収集制御用 相關器制御用 データ処理解析用			←	←	→	



第5図 K-3型 VLBI システムの構成

すべき項目となっている。

K-3 システム開発計画を取巻く今一つ重要な背景に国際リソスフェア探査開発計画 (DELP) がある。これは1960年代の国際地球内部開発計画 (UMP), 1970年代の国際地球内部ダイナミクス計画 (GDP) の期間に達成された大陸移動, 海洋底拡大などのプレートテクトニクスの確立という著しい成果をうけて, 1980年代においても国際的学術的研究計画が実施されるべきとの認識のもとに, 1981年9月国際学術連合 (ICSU) で決定

された。そして, 1981年11月日本学術会議より政府に対して計画の推進に必要な予算的措置をとるよう勧告が出され, また1984年6月には測地学審議会から DELP に関する建議が出される予定である。当所としても国内外の共同実験を通じて DELP に寄与していく予定である。

3.2 K-3 システムの開発

第1表に K-3 システムの開発線表を示す。先に述べたように, 昭和54年度より出発した K-3 システムの

第2表 K-3型 VLBI システムの特性

	機 能 及 び 性 能
ア ン テ ナ	直径 26m, ホーンリフレクタ給電カセグレン, Az-E1 駆動 利得; 53.3dB (2.26GHz), 63.6dB (8.3GHz)
給 電 部	周波数; 2.2~2.3GHz, 8.05~8.55GHz 群分波 VSWR; 1.25 偏波; Xバンド右左円偏波, Sバンド右円偏波
前 置 増 幅 部	Sバンド広帯域系; 周波数 2.20~2.32GHz, 利得 30dB, 雑音温度 120K 以下 Xバンド広帯域系; 周波数 8.18~8.60GHz, 利得 50dB, 雑音温度 75K 以下 Xバンド簡易系; 周波数 8.18~8.28GHz, 利得 50dB, 雑音温度 150K 以下
周 波 数 変 換 部	Sバンド LO; 周波数 2020MHz, 10MHz 基準信号の PLO Xバンド LO; 周波数 8080MHz, Sバンドローカル信号の 4 通倍
I F 分 配 部	IF 周波数; Low IF 100~224MHz, High IF 216~500MHz チャンネル数; 28
ビ デ オ コ ン バ ー タ	ビデオ周波数変換器; イメージリジエクションミキサ ビデオ周波数帯域; 2MHz 標準 (最大 4 MHz 可変) チャンネル数; USB 7, LSB7 LO; 10kHz ステップシンセサイザ
記 録 信 号 発 生 器	チャンネル数; 7 サンプル; 4 MHz で 1 ビットサンプル標準 (最大 8 MHz 可変) データ出力レート; 4.5Mbps (1 バイトごとにパリティビット付加標準, 最大 9 Mbps 可変)
広 帯 域 磁 気 記 録 装 置	記録; NRZM, 全 28 トラック, 4.5Mbps/トラック (135 ips) 再生; 9 又は 4.5Mbps/トラック (270 ips 又は 135 ips)
デ コ ー ダ ー	2 チャンネルパリティエラー, シンクエラー検出, 1 Mビットデータ格納
再 生 相 関 装 置	チャンネル数; 4 クレート 28 チャンネル予備 4, sin 成分 28, cos 成分 28 相関部; 複素 8 ビット相関器, 時間領域フリッジ回転 その他の機能; 実時間システム遅延時間校正信号検出, 1 ビットバッファ時間領域部分ビット 補正
デ ー タ 収 集 制 御 計 算 機	IEEE488 バスによる各機器との通信・制御 HP1000 モデル 10L 周辺装置; ディスプレイ, DS1000 プロ追 (予定), フレキシブルディスク×2
デ ー タ 処 理 解 析 計 算 機	HP1000 モデル 45F 主要—; 1024KB メモリ, 実時間マルチタスク, グラフィックプロットティング, プリンタプロ ット, データベースユーティリティルーチン, 高速演算 周辺装置; カードリーダー, FDD×2, DS1000 (予定), 120MB ディスク×2プロッタ×2, ターミナルディスプレイ×4
水素メーザ型原子周波数標準	周波数安定度; 2.8×10^{-14} (18000秒) より小, 1×10^{-14} (600秒) より小
システム遅延時間校正装置	校正用パルス信号; 1パルス/ μ s, , パルス幅 < 50ps ケーブル遅延測定; 片通 ± 0.5 ps, 短期安定度 ± 5 ps, 長期安定度 ± 10 ps/hour
水 蒸 気 ラ ジ オ メ ー タ	多周波ラジオメータ 測定精度; excess path にして ± 1 cm 以下 (天頂方向)
総 合 位 相 安 定 度	\pm 数度/数分 (全チャンネルにつき)
総 合 遅 延 時 間 誤 差	± 0.1 ns (5時間)

開発は昭和59年から日米 VLBI 共同実験を行うことが日米間で合意されたため、米国の Mark III システムと両立性を計る必要が生じ、56年度からシステムの大規模な見直しを行った。したがって、バックエンド部の一部を除いてシステム開発のほとんどが56~58年度の三年間に集中的に実行された。

第5図に K-3 システムの構成を示す。本システムはアンテナから計算機に至るハードウェアは勿論、観測量である遅延時間、フリンジレート（遅延時間の変化率）及びコヒーレンスから、測地学、地球物理学等に関係した各種物理量を算出し、解析を行うソフトウェアをも含む総合的システムである。システムは、フロントエンド部（26m アンテナ、給電部、前置増幅部、周波数変換部）、バックエンド部（IF 分配器、ビデオ変換器、記録信号発生器）、広帯域磁気記録装置、再生関連装置、電子計算機、水素メーザ周波数標準（原子時計）、水蒸気ラジオメータ、遅延校正装置などから構成される。水素メーザ原子時計は当所において長年にわたって蓄積されてきたノウハウにより開発されたものである。

第2表に K-3 システムの機能及び性能を示す。本システムによって遅延時間決定精度 0.1 nsec（基線長決

定精度 3 cm）以下が実現されており、現存の VLBI システムの中で Mark III とともに最高水準のものとなっている。

このように超高精度でかつ総合システムを開発する場合、①十分な予算的裏づけ、②機関の組織的対応能力、③機関の技術水準、④製造メーカの技術水準及びシステムの総合設計能力、などが必要とされる。K-3 システムの開発においては①と④に問題点があり、当所における通信・放送衛星地上局システム開発計画などの場合と著しく異なる点である。すなわち、予算額については五か年計画の途中から日米共同実験計画へと変更を余儀なくされたこと、折から国家財政が緊縮に向かう時期に直面したことなどから、見積りを大幅に下廻った予算しか認められなかった。この結果、システムを特定のメーカに主契約者として発注することは全く不可能となり、個々の装置をばらばらにして、競争入札などで契約額を極力低く押えるようにして発注する非常形態を取った。こうして VLBI システムは実に 10 社以上が担当することとなり、インタフェースは全て当所で責任をもって設計・指導して進めた。また、発注物件についても予算の都合から仕様をぎりぎりに下げざるを得なかった。

第3表 Mark III システムとの両立性に必要な事項

給電部及びフロントエンド部	1) 受信周波数の一致 2) 偏波面の一致 3) 位相雑音が数度以下 4) データ収集・制御計算機による自動遠隔制御及び通信 5) 周波数帯域が 400 MHz 以上	水素メーザ原子周波数標準	特になし
	IF分配器及びビデオコンバータ	1) IRM 使用 2) 10kHz 使用ステップシンセサイザ使用 3) 位相雑音が数度以下 4) チャンネル数の一致 5) データ収集・制御計算機による自動遠隔制御及び通信	水蒸気線ラジオメータ
システム遅延時間校正装置			1) パルスをを用いた較正法の一致 2) 測定値の出力フォーマットの一致 3) データ収集・制御計算機による自動遠隔制御及び通信
記録信号発生器	1) 出力データフォーマットの一致 2) スケジューリングフォーマットの一致 3) ログフォーマットの一致 4) サンプル速度の一致 5) データ収集・制御計算機による自動遠隔制御及び通信	データ収集・制御計算機	1) 各システムとのデータ通信及び制御 2) スケジューリングフォーマットの一致 3) ログフォーマットの一致
		データ処理・解析計算機	処理チャンネル数
広帯域磁気記録装置及び同期再生装置	1) 磁気テープ記録密度・記録方式の一致 記録速度の一致 2) CRC テストパターンの一致 3) 同時記録チャンネル数 4) 計算機による自動遠隔制御	データ収集・制御ソフトウェア	1) ログフォーマットの一致 2) スケジューリングフォーマットの一致 3) データ収集、システム制御の一致
		データ処理・解析ソフトウェア	基本定数の一致など多数
再生関連装置	1) システム遅延時間校正信号の検出 2) 処理チャンネル数の一致 3) スケジュール及びログの処理		

このような厳しい条件を克服して、K-3 システムをスケジュール通り所期の性能をもって完成させることができたのは、当所担当者及び製造メーカーの努力はもちろんのこと、当所におけるシステム開発の豊かな経験と蓄積によるものである。すなわち、衛星通信システム開発計画などを通じて試みされた組織的に柔軟な対応力（本部/センタ体制）、宇宙通信、周波数標準、電波伝搬など長年にわたって培われた先進的でい研究・技術力などによる。このことによって、技術力に幅のある受注メーカーを一社一社克明に指導し、米国の Mark III との両立性を完全に成し遂げながら K-3 システムを目標通り完成させることが可能となった。

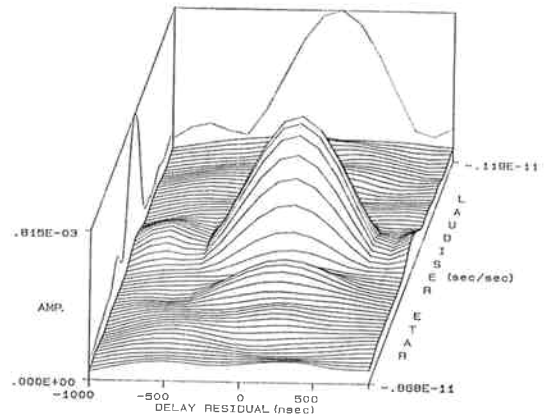
Mark-III システムは米国における最新の VLBI システムであり、Mark-I 及び II を基に NASA のゴダード宇宙飛行センタ (GSFC) とヘイスタック電波観測所が共同で開発したものである。Mark-II は、システムの簡易さと運用コストの安いことなどから、現在も電波天文分野で使用されている。Mark-III の測定精度は、基線長で数 cm 以下、極運動で 10 cm 以下、UT 1 の変化 0.1 m sec 以下である。

K-3 システムの設計・開発に当っては、Mark-III と両立性を計る必要上(第3表)、ハードウェア及びソフトウェアの両者について同システムの資料を厳密に調査・検討し、また多くの書簡のやりとり、担当者の数度にわたる訪米を通じて質問や議論を行って万全を期した。更に、装置ができ上がってきた時点では、バックエンド部の記録テープを米国に携行して再生を行ったり、米国側の受信生データを送附してもらって再生試験を行いながら完成させていった。データ収集制御ソフトウェアについては、電算機そのものとともに米国に空輸して両立性試験を行ったが、これは同時に米国側による同ソフトウェアのノウハウの吸収という点でも貢献した。

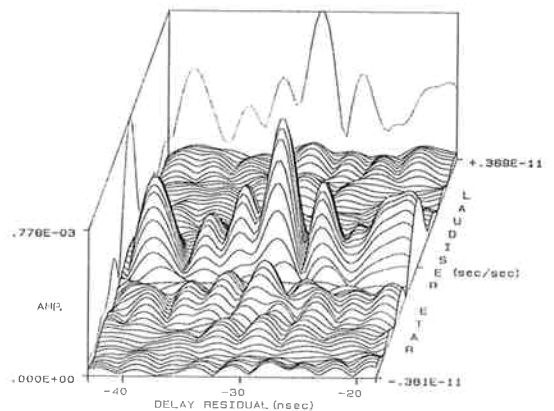
解析ソフトウェアの開発に当っては、文部省緯度観測所から一部協力をうけた。同観測所とは、昭和57年1月覚え書きを交換し、地球回転運動に関する最高水準の研究成果を導入することができた。

3.3 日米試験観測及び予備実験の実施

K-3 システムの開発は、数多くの技術的諸問題に直面し、また納期や製作物件のトラブルも少なからず発生したが、担当者の奮闘と努力により辛抱強く解決しながら進められた。そして、結局スケジュール通り、昭和58年10月にシステムをほぼ完成することができた。このため、システムが計画通り動作し、また米国側の Mark-III システムと両立性を有していることを確認する目的で、11月5日米国の VLBI 局との間で試験観測を実施した。これは日米大陸を挟んで行われた史上初の VLBI



第6(a)図 相関パターン(鹿島局—モハービ局, Xバンド, 3C273B, 粗合成結果)

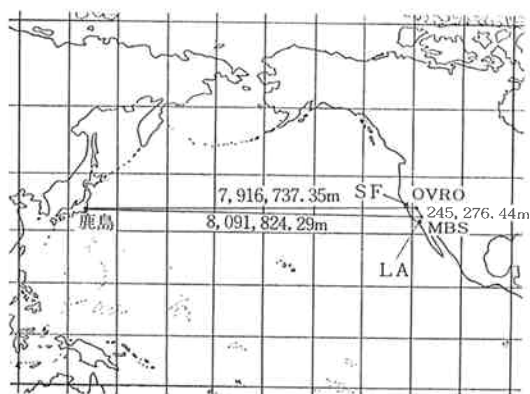


第6(b)図 帯域幅合成された相関パターン(鹿島局—モハービ局, Xバンド, 3C273B)

観測であった。

観測には、鹿島局(26mアンテナ)、米国西海岸のモハービ VLBI 基地局(12mアンテナ, NASA 所属)、オウエンズバレー電波観測所(40mアンテナ, カリフォルニア工科大学所属)が参加し、電波星 3C273B, 3C345, 4C39.25 を早朝5時から7時34分まで観測した。これらの電波星は、いずれも10億光年以上彼方にある準星であるが、電波強度は7 Jy (ジャンスキ)以上の比較的強い星である。受信周波数は、Xバンド8GHz帯8チャンネル、Sバンド2GHz帯6チャンネル(各チャンネルは2MHz幅)であり、各電波星からの電波をそれぞれ12分間づつ交互に繰返しながら受信し、広帯域磁気テープに記録した。

観測終了後、各局で得られたデータを当所で処理した結果、遅延時間を示す明確な相関を検出することができた(第6図(a))。更に、帯域幅合成を行うことによって、遅延時間決定精度について所期の目標通りの0.1nsec以下



(SF: サンフランシスコ (LA: ロスアンジェルズ (OVRO: オーエンズバレー電波観測所 (37°03'N, 118°16'W) (MBS: モハービ局 (35°06'N, 117°06'W) (鹿島: 鹿島26m局 (35°51'N, 140°39'E)

第7図 日米試験観測参加局の配置と算定された距離

下を達成することに成功した(第6図(b)). 今回の観測では、距離を精度よく算出するには観測時間及び電波星の数が非常に不足していたが、極運動などについて既存の値を採用して計算した結果、誤差(確度)80 cm以下で求めることができた(第7図). これはVLBIによる日米間測距としては初めてのものであるだけでなく、人工衛星などによるこれまでの結果の中で最も正確であると考えられる。

上記試験観測の成功の意義は非常に大きく、それ以後のVLBI実験遂行の見通しを確実にしたばかりでなく、システム開発に携さわってきた担当者に大きな自信を与えることとなった。また、試験観測の実施を通じて明らかにされたシステムの幾つかの問題点は速やかに解決することができた。このように、当初計画されていた昭和59年初頭の日米予備実験(本格的観測に属する)にいきなり進む前に、試験観測をクッションとして入れたことは大成功であった。

K-3システムが完成したことにより、システムの総合精度の評価と日米大陸間距離を数cmの確かさで測定することを目的とした日米共同予備実験が、当初の計画通り実施されることとなった。実験は、昭和59年1月23日~24日及び2月25日~26日の2回行われ、それぞれにおいて合計13個の電波星を24時間にわたって観測した。受信チャンネルは試験観測のときと同じであり、各電波星を1回につき6分40秒ずつ、合計152回(各実験につき)追尾し、データを記録した。実験を担当した鹿島VLBIセンタでは、3~4人の班を4班組んで昼夜にわたる観測に万全を期した。観測の相手局はモハー

* National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Geological Survey, National Science Foundation, Defense Mapping Agency.

ビ局とハットクリーク電波天文局(26mアンテナ、カリフォルニア大学所属、第2回実験のみ)であったが、各局とも観測を滞りなく遂行することができた。そして、実験終了後日米双方でデータ処理をした結果、日米間基線長を目標通り3cm以下の誤差で決定することができ、実験の成功が確認された。

4. VLBI共同実験計画^{(23)~(35)}

4.1 日米共同実験計画

4.1.1 地殻プレート運動の測定

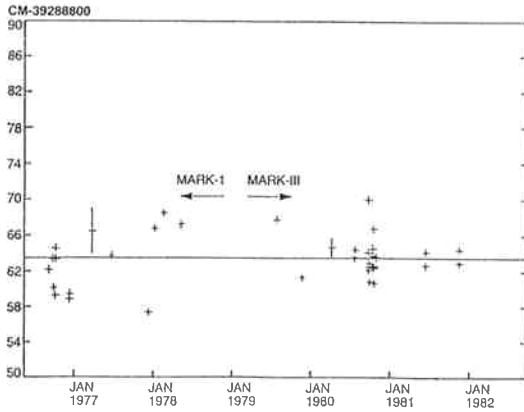
日米VLBI共同実験の合意の背景には、米国NASAの主導する「Geodynamic Program」の一項目である「Crustal Dynamics Project (CDP)」があり、米国の地震災害軽減法の一環として推進されているものである。これは更に、「地殻力学及び地殻研究へ宇宙技術を適用するための連邦計画」という。米国のNASAを始めとする五機関*の共同計画の形で推進されている。CDPの目的は以下の様であるが、これは日米共同実験の目的と内容に当然含まれることになる。

- ①米国西部のプレート周縁部に発生する地震に関連した地域的変形と歪みの蓄積の調査。
- ②北米、太平洋、南米、ユーラシア及びオーストラリアの各プレート間の相対運動の測定。
- ③北米と太平洋の大陸性及び海洋性地殻プレートの内部変形の調査。
- ④地球回転の力学と、それらの地殻プレート運動や他の地球物理学的現象との相関。
- ⑤地震多発地帯で発生する運動及び変形の調査。

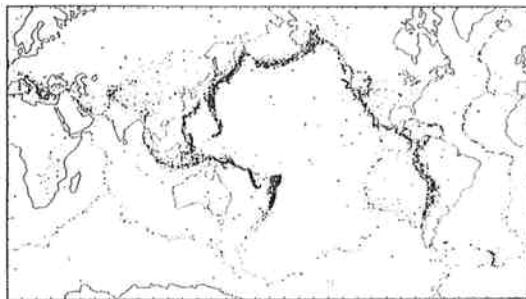
このため、米国内数十か所のVLBI局及びレーザ測距局と、移動形システムを観測に動員している。また、汎世界的規模の観測網を敷くために20数か国と協議していると言われる。

米国におけるVLBI実験は、西海岸のオウエンズバレー電波観測所(OVRO)、モハービVLBI基地局、移動局などの間で、巨大地震の発生地帯であるサンアンドレアス断層などを挟んで行われている。また、東海岸のHaystack観測所や国外のオンサラ観測所(スウェーデン)、エッフェルスベルグ(西ドイツ)などとの長基線長でも実施されてきている。基線長変化としては年間1~5cmが報告されている。第8図はHaystack観測所とOVROとの間で行われた長期間にわたる実験結果で、前半はMark I、後半はMark IIIを用いている。37回の観測のばらつき(rms誤差)は2.9cmであり、基線長約3,928kmの観測期間における有意な変化は検出されていない。

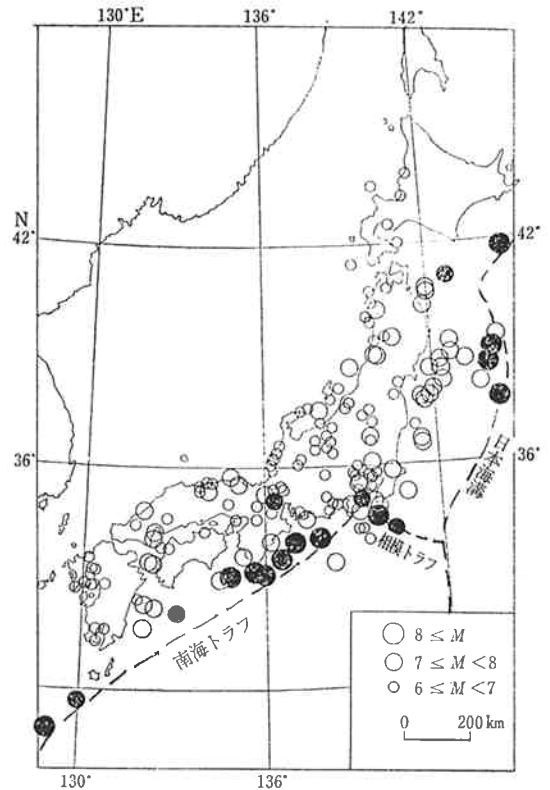
第9図は、1961~1967年に起こった地震の震央をプロ



第8図 米国における VLBI 実験データ例⁽²⁹⁾



第9図 1961—1967年の期間に起こった約3万個の地震の震央を NOAA の標準地震観測網によって決定した結果 (NOAA による)⁽³¹⁾

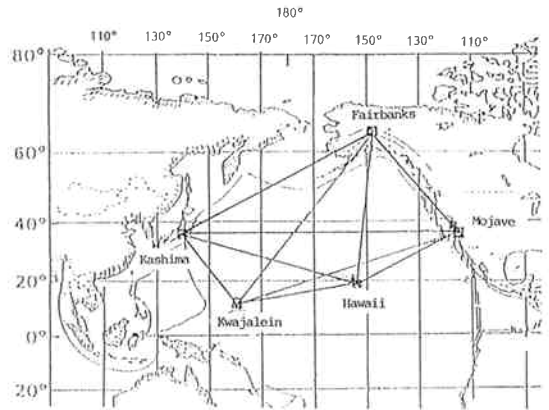


第10図 1600—1964年の期間に起こった日本の破壊地震
黒丸は $M \geq 7.9$ ⁽³¹⁾

ットしたものであるが、第3図と比較すれば判るように、ほとんどがプレートの境界に集中している。第10図は日本列島附近で発生した地震の分布であるが、特に巨大地震はプレートのもぐり込み又は接触地帯に集中していることがわかる。大地震の原因はプレートの移動による地殻(岩石)の変形と歪みの蓄積、そして破壊にあるわけであり、VLBI 観測によって様々な方向の基線の変化を系統的に調べることは、長期的地震予知の点からも極めて有効と思われる。

第1回目米 VLBI 本実験は、昭和59年7~9月の約2か月にわたって行われるが、これは日米のほか西ドイツ、スウェーデン、カナダも参加し、合計20のVLBI局を観測に動員する(第4表)。鹿島局は西太平洋実験及びPolar実験に各2回づつ参加するようになっている。第11図(a)及び(b)に鹿島局が参加する実験の局の配置と基線を示す。

このような実験は少なくとも5年間続けられるが、南米、オーストラリア、中国等も含む全地球的規模に広がっていくことが予想され、実験への参加国、参加局数は増えていく予定である。実験の年間回数については今のところ決まっていないが、一回の実験データの処理に数



(a) 西太平洋実験

第11図 第1回目日本実験: 鹿島局参加の実験組合せ

か月以上かかり、高価な磁気テープを各局で数百巻づつ必要とすることを考えるとき、重要な課題の一つになっている。

4.1.2 国際時刻比較実験

近年における周波数標準器の性能の向上は著しく、確度で 1×10^{-13} 、長期安定度で 1×10^{-14} 前後が実現されるようになった。これは、電波航法網や人工衛星に見られ

第4表 第1回日米本実験スケジュール

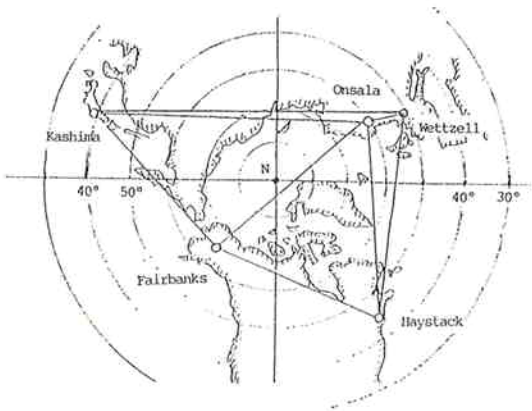
EXPERIMENT	START TIME		STATIONS
	DATE	U. T.	
E. PACIFIC-1	JUL 07	06 : 00	FAIRB-VDB-HAW-KWAJ-MOJ
JPL-84K	JUL 14	18 : 00	FAIRB-NOME-SANDPT-VDB
E. PACIFIC-2	JUL 21	06 : 00	FAIRB-VDB-HAW-KWAJ-MOJ
JPL-23L	JUL 23	18 : 00	FAIRB-NOME-KODIAK-VDB
W. PACIFIC-1	JUL 28	06 : 00	FAIRB-MOJ-HAW-KWAJ-KASH
JPL-84M	JUL 31	18 : 00	FAIRB-SRDO-YAKA-VDB
W. PACIFIC-2	AUG 04	06 : 00	FAIRB-MOJ-HAW-KWAJ-KASH
JPL-84N	AUG 07	18 : 00	FAIRB-SRDO-WHTHOR-VDB
NAPS-1	AUG 23	18 : 00	FAIRB-FD-ALGON-PENT-YELKNF
NAPS-2	AUG 28	18 : 00	FAIRB-ALGON-FD-WEST
POLAR-1	AUG 30	18 : 00	FAIRB-ONS-WETTZ-HAYS-KASH
POLAR-2	SEP 03	18 : 00	FAIRB-ONS-WETTZ-HAYS-KASH

(NOTES)

FAIRB : Fairbanks (Alaska)
 VDB : Vandenberg (California)
 HAW : Hawaii
 KWAJ : Kwajalein
 MOJ : Mojave (Calif.)
 NOME : Nome (Alaska)
 SANDPT : Sand Point (Alaska)
 KODIAK : Kodiak (Alaska)
 KASH : Kashima (Japan)
 SRDO : Sourdough (Alaska)

YAKA : Yakataga (Alaska)
 WHTHOR : Whitehorse (Canada)
 ONS : Onsala (Sweden)
 WETTZ : Wettzell (Germany)
 HAYS : Haystack (Massachusetts)
 FD : Ft. Davis (Texas)
 ALGON : Algonquin (Canada)
 PENT : Penticton (Canada)
 YELKNF : Yellowknife (Canada)
 WEST : Westford (Massachusetts)

各実験の観測時間は総て24時間以上である。



(b) 極域実験

るように地球的規模の結合手段の発達と相まって、周波数・時刻の需要と比較・供給手段の多様さを生みだし、またこれらの精度の一層の向上を促している。すなわち、高精度時刻・周波数の需要は、航行や位置決め、高速デジタル通信、衛星追尾や VLBI などの宇宙技術、

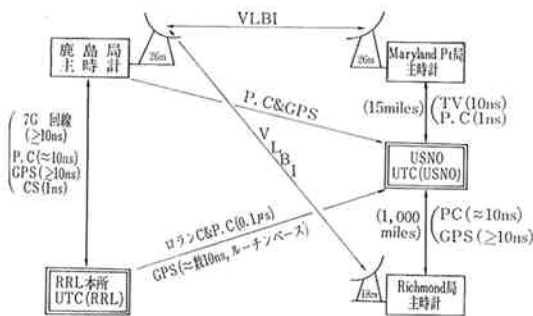
相対論の検証や長さの定義などにおける精密科学分野等々、多様な分野に広がってきている。

現在、世界的規模で行われている時刻比較手段は、ロランC電波航法網、運搬時計、人工衛星などがあるが、時刻比較システムとして確立しているのは前二者のみであり、人工衛星による方法は高精度の有望な手段として様々な実験が行われてきている。特に、米国の測位衛星システム (GPS) は、衛星のカバー範囲が汎地球的であり、地上の受信装置も小型で済むということから、近い将来ロランCに代り得るものと考えられている。ただし、軍事目的のシステムであるため、将来性について懸念する向きも依然として強い。比較精度は、ロランC、運搬時計は約 $0.1 \mu \text{sec}$ 、衛星については使用する衛星や比較方法により異なるが、静止衛星による双方向伝送が最も精度が高く、数 nsec 以下が得られている。GPS の使用では比較地点間の距離に依るが、10 nsec 前後である。

VLBI による時刻比較は衛星よりも高精度の可能性が

あり、世界的規模の比較手段として有望である。すなわち、精度は比較地点間の距離に無関係に遅延時間決定精度の0.1 nsec以下が期待できる。しかし、衛星の場合と同様、これが時刻の絶対値の比較精度(雑度)を必ずしも意味しないことに注意しなければならない。受信局内の遅延量の絶対値を評価する必要があり、簡易型VLBI受信機による零基線長実験でこれを測定する計画が鹿島センタで立てられている(CS実験における小型車載局利用による共通時計法の原理と類似のものである)。米国では精度は高くないが実験例があり、Mark IIシステムによる海軍研究所(NRL)―海軍天文台(USNO)間(3σで5 nsec)、ジェット推進研究所(JPL)のBlock Iシステムによるカリフォルニア―スペイン及びオーストラリア間(50 nsec)などである。

VLBIによる国際時刻比較実験については、USNOとの間で具体的な計画が進められており、昭和59年末に米国海軍のMaryland Point局などとの間で24時間観測を先ず実施して、60年から毎月一回くらいの割合で数10分程度の観測を定期的に続けることになっている。これと並行してGPSによる時刻比較も行う計画であり、ロランCに代る国際比較網として期待されている同システムの精度を、VLBIによって定期的に較正していくという先駆的な意義も有している(第12図)。国際比較実験については、スウェーデン、西ドイツ、イギリス、スペイン、オーストラリアなども参加を表明している。



第12図 日米国際時刻比較実験回線

4.2 国内共同実験計画

建設省国土地理院は、国内測地網規正や外国の座標系との結合を得る目的で、昭和56年度から4年計画で5mアンテナの可搬型VLBIシステムの製作を進めている。このため、55年度末に当所との間でシステム開発の技術協力に関する覚書きが交換され、当所は全面的に技術援助を行った。一方、国土地理院からは、鹿島26mアンテナの座標や水準測量などについて援助を受けた。

昭和58年11月の日米試験観測に先立ち、10月に国土地理院のシステムとの間で既に簡単な試験観測を行い

成功している。59年度後半には同システムがほぼ完成する予定であり、24時間観測の予備実験を実施して60年度からの国内共同実験に備える。すなわち、先ず鹿島―筑波間の約54kmの基線で実験を行った後、年一回程度の割合で5mアンテナシステムを九州や北海道方面に移動する計画である。

我が国における光波測距儀による一等三角測量の相対精度は、100km測定距離以内で 50×10^{-8} 程度である。これより長距離では三角測地網を結合しながら測定するため誤差は大きくなり、1000km以上では相対精度で 200×10^{-8} 以上になる。したがって、東京を原点として日本列島の両端で1m以上の誤差を生じている可能性がある。VLBIによる測定では、測定誤差は距離に関係なく数cmを得ることが可能であり、測地網規正を行う上で極めて有力である。また、日米共同実験による大陸間の精密測距によって、日本測地網を世界の測地網に直接結合することが可能となり、地球の大きさや形状を精密に決定するための基本となる。

国内におけるVLBI共同実験は、また、国内の地殻変動の解明を促し、これを通じて地震や火山噴火の予知などを可能にし、日米共同実験による成果と結合することによって災害軽減に大きく寄与していくものと思われる。

5. むすび

K-3型VLBIシステムの開発経緯と国際及び国内共同実験計画について、VLBIの原理と地殻プレート運動にも簡単に触れながら、概説した。当所におけるK-3システムの開発整備は、折からの厳しい社会情勢の変化を反映している制約された条件の下で、またMark IIIとの両立性を厳密に計らねばならないという技術的制約の下で進められた。しかし、担当者の創意と努力により全体として計画通り進行し、昭和59年初頭の日米共同予備実験の成功をもってシステムの開発が終了した。

当所のVLBIシステムに対する内外の期待は極めて大きく、本報告で述べた日米及び国内共同実験計画とその将来的な実験規模の拡大に止まらず、中国との近い将来における共同実験の可能性、宇宙監視への利用、スペースVLBI、小型車載局の開発とそれによる国内大小様々な基線による実験など、数多くの計画が動き出している。これらの要求に応えることは国内における有数の宇宙技術先進機関として当然であり、「電波の利用(電波計測/宇宙通信)」や「周波数標準」など当所の負っている責務を直接果たしていくことにもなる。

しかし、そのために今後解決していくべき課題も少なくない。第1にデータ処理能力の大幅な増大が必要であ

る。現システムの相関器，広帯域磁気記録装置は一基線の処理能力しかなく，10局以上が同時に参加する日米実験に対しては，米国との分担を考慮しても不十分であり，最低三基線の処理能力を有するようになる必要がある。これに関連して計算機システムの処理能力も大幅に上げていかなければならない。また，磁気テープの記録密度を大幅に上げることが国際的に共通した問題である。一卷が5.5 kg，直径36 cmもある高価で大きな磁気テープに，現在は12チャンネルを受信するとして24分程度しか記録できない。したがって，一回の日米実験について数百巻を必要とするが，そのテープ代，輸送費及び手間は即刻解決を迫られている大きな課題となっている。これによってVLBIの実験回数が直接制限されることになり，光ディスク方式を含め記録密度増大についての検討が進められている。

日本は四つの地殻プレート（ユーラシア，太平洋，フィリピン海及び北アメリカの各プレート）が互いに接する位置にあるため，大地震が頻発する国である。したがって，地震予知は特に重要であるが，それには離島を含め大小様々な基線でVLBI観測することが望ましく，小型可搬（車載）局の開発が急務となっている。米国には大型トレーラ二台で運ぶ，5 mアンテナなどの移動型システムがあるが，狭隘な日本の国情には適さない。もっと小型でしかも高性能の可搬（車載）局の開発が心要であり，鹿島VLBIセンタの担当者によって技術的検討が進められている。

日米共同VLBI実験の中心となる地殻プレート運動の観測は，新しい時代にふさわしい創造的で汎地球的規模の大事業であり，その理論の完成と実験観測体制の確立は今後長い年月をかけて進めていくべき課題である。また，地震予知，測地，地球回転運動の観測，国際時刻比較などについても，VLBIなどによる宇宙技術の適用を通じて，高度に発達した科学技術の社会にふさわしい総合的に新しい概念の下に，観測システムの確立を計っていく重要な契機を得ようとしているように思われる。

参 考 文 献

- (1) “超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号”，電波季，24，130，Sept. 1978.
- (2) 河重宣之；“超長基線電波干渉計 (VLBI)”，現代測量学—測量計測概論，pp. 356—368.
- (3) “測地・地球物理学における VLBI 利用に関するシンポジウム集録”，於電波研，昭56.6
- (4) McDran, P.F.; “Radio Interferometry for International Study of the Earthquakes Mechanism”, *Acta Astronautica*, 1, 1974.
- (5) Cohen, M.H.; “Introduction to Very Long Baseline Interferometry”, *Proc. IEEE*, 61, 9, pp. 1192—1197, Sept. 1973.
- (6) Rogers, A.E.E.; “Very Long Baseline Interferometry with Large Effective Bandwidth for Phase—Delay Measurements”, *Radio Science*, 5, 10, pp. 1239—1247, Oct. 1970.
- (7) 別冊サイエンス；“進化する宇宙”，日本経済新聞社.
- (8) 森本雅樹；“電波で見た宇宙”，講談社ブルーバックス.
- (9) York, D.; “新しい地球像”，日本地学教育学会訳編，秀潤社.
- (10) 萩原尊禮；“地震への挑戦”，講談社ブルーバックス.
- (11) アーサ・クライン；“大陸は移動する”，竹内均訳，講談社ブルーバックス.
- (12) 別冊サイエンス；“プレートテクトニクス”，日本経済新聞社.
- (13) 別冊サイエンス；“地球の再発見”，日本経済新聞社.
- (14) 小嶋稔；“地球史”，岩波新書.
- (15) “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”，リモートセンシング技術センタ，昭56.3.
- (16) “超高精度電波干渉計システム概念書”，電波研，昭56.
- (17) “超高精度電波干渉計 (VLBI) システムの開発 (その1)~(その7)”，昭57信学全大2396~2402.
- (18) Kawajiri, N.; “Introduction of the VLBI System Developed in RRL”, *Denshi Tokyo*, 19, 1980.
- (19) “測地・地球物理学における宇宙電波技術利用に関するシンポジウム集録”，於緯度観測所，昭57.2.
- (20) Kawajiri, N., Ojima, T., Kawano, N., Takahashi, F., Yoshino, T. and Koike, K.; “The First VLBI Experiment in Japan”, *J. Radio Res. Lab.*, 26, 119, pp. 13—64, March 1979.
- (21) Kawano, N., Takahashi, F., Yoshino, T., Koike, K., Kumagai, H. and Kawajiri, N.; “Development of Real-Time VLBI System and Measurements of Scintillation”, *J. Radio Res. Lab.*, 29, 127, pp. 53—102, July 1982.
- (22) “国際リソスフェア探査開発計画”，日本学術会議国際協力事業特別委員会 DELP 分科会，昭56.6.
- (23) Saburi, Y., Yoshimura, K., Kato, S., Tsukamoto, K., Yamashita, F., Kawajiri, N. and Kawano, N.; “Development of VLBI System and Future

- Experimental Plan in RRL”, Proc. of IAG Symp., Tokyo, May 1982.
- (24) 吉村和幸；“超長基線電波干渉計”，日本経済新聞「未来技術」，昭57.10.19～22.
- (25) 吉村和幸；“VLBI と日米共同実験”，電波航法，29，1983.
- (26) “超長基線電波干渉計 (VLBI) システムの開発報告 (その1)～(その8)”，昭59信学全大2741～2748.
- (27) VLBI Research and Development Group, RRL ; “The First US-Japan VLBI Test Observation by use of K-3 System at the Radio Research Laboratories”, J. Radio Res. Lab., 31, 132, pp.31—37, March 1984.
- (28) EOS Transactions, American Geophysical Union, 63, 19, May 11, 1982.
- (29) Abstract of 3rd Crustal Dynamics Working Group Meeting”, NASA/GSFC, Oct. 29, 1982.
- (30) Spencer, J. H. et al. ; “Comparison of VLBI, TV and Traveling Clock Techniques for Time Transfer”, Proc. PTTI, Dec. 1, 1981.
- (31) 力武常次；“巨大地震”，講談社ブルーバックス.
- (32) 佐分利義和；“時間周波数の精密遠隔比較”，信学誌 64, 4, pp.365—371, April 1981.
- (33) 吉村和幸；“時刻と周波数の国際比較”，電気学会技術報告「高安定周波数とその同期」，(II部) 第175号，pp.41—47, 昭59. 9.
- (34) Imae, M., Okazawa, H., Sato, T., Urazuka, M., Yoshimura, K and Yasuda, Y. ; “Time Comparison Experiments with a small K-band Antenna SSRA System via a Domestic Geostationary Satellite”, IEEE Trans. Instrum. Meas. IM-32, 1, pp.199—203, March 1983.
- (35) “地球物理学の展望と課題”，測地学審議会，昭56. 7.

