

# I. 総論

## I. 1 通信総合研究所におけるVLBI技術の開発研究

高橋 富士信\*  
(平成元年10月6日受理)

### I. INTRODUCTION

#### I. 1 RESEARCH AND DEVELOPMENT OF VLBI TECHNOLOGY IN COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY

By

Fujinobu TAKAHASHI

Realization of the New Western Pacific Very Long Baseline Interferometer (VLBI) Project of the Communications Research Laboratory (CRL) strongly relates to and depends on the research and developmental history of VLBI technology in CRL.

This paper presents a brief history in CRL's activities regarding radio astronomy and VLBI since 1968. It also summarizes the major results of joint VLBI experiments both for international and domestic purposes.

#### 1. はじめに

通信総研において開発した K-3 VLBI システムが完成し、日米間での最初の本格的な VLBI 実験である、システムレベル実験が行われた1984年までの経緯や成果については、本季報「K-3 型 VLBI システム開発特集号」<sup>(1)</sup>において詳しく紹介されている。

システム開発の特集号に引続くものは通常、実験成果の特集号であるが、当所の VLBI 計画は、1987年の補正予算により施設整備、実験計画等が大幅に見直されたため、実験成果に加えて、新たに整備した施設を記述し、取りまとめておく必要が生じた。そこで、本特集号が必要となったわけである。

このような経緯からして、著者に割当てられた課題は、1984年以降にさかのぼる当所の電波天文および VLBI の研究開発の経緯や実験成果の概要をレビューするとともに、予想を超える展開を見せた、当所の1984年以降の VLBI 活動を、振り返り報告することであると位置づけて、その流れを記述することにした。

1984年までの当所の VLBI 活動をある程度承知してい

\* 標準測定部 周波数・時刻比較研究室

る読者を想定しているので、記述不足の部分については前述の開発特集号を参照願いたい。

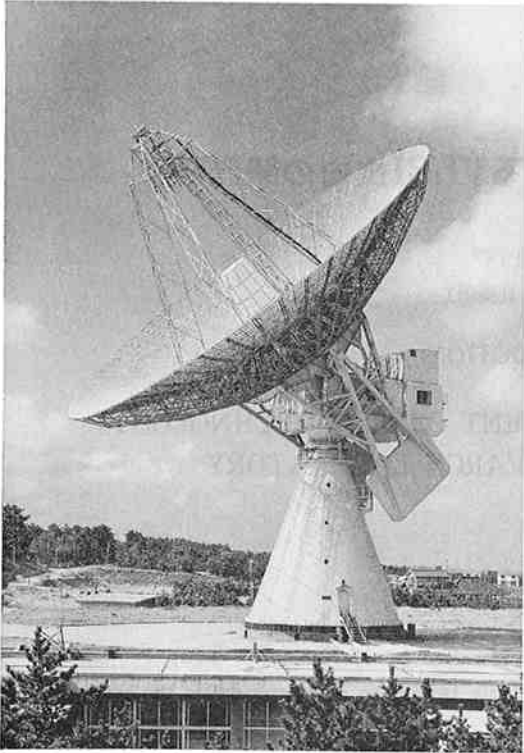
#### 2. 開発の経緯

##### 2.1 電波天文研究の開始

当所の VLBI 研究の前身は電波天文の観測・研究であった。1964年の東京オリンピックの宇宙中継に備えて、鹿島に直径 30 m パラボラアンテナが完成した(第1図参照)。このアンテナを利用した電波天文観測が、東京天文台との協力で開始されたのが、1966年のことであった。4 GHz 帯による銀河系内 H II 領域を対象とする観測が、開始された。

1968年、引き続き完成した直径 26 m のアンテナ(第2図参照)は、30 m アンテナより高効率なアンテナであったため、電波天文観測にはさらに適したものであった。X 線天体である Cyg X-3 の強度変化の観測や、「かに星雲」の太陽コロナによるオカルテーションを利用したファラデー回転の測定などに活用された。

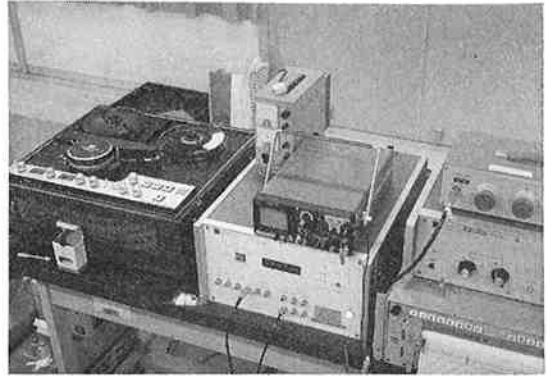
当時は、電波天文に使用できる大口径パラボラアンテナが、国内では当所のアンテナのみという状況の中で、鹿島は日本の電波天文学の基礎をつくり、その成長を支



第1図 鹿島30m アンテナの写真



第2図 鹿島26m アンテナの写真



第3図 K-1システムの外観写真

える重要な役割を果たしていた。電波天文の研究を進める中で、当所は、電波星を正確に連続的に計算機追尾する技術や受信機雑音に埋もれた微弱な電波星信号を取り出す技術そして高度な天文・測地計算の手法などを習得することができた。先進国に比べて20年以上遅れた、当時の我国の電波天文学の研究状況の中で、当所の電波天文グループは東京天文台の観測班とともに徹夜観測を繰り返しながら、日本の電波天文学の将来を論じ合う日々が続いた。その中に既に欧米で成功しはじめていた、VLBI という夢の様な技術の課題も含まれていた。

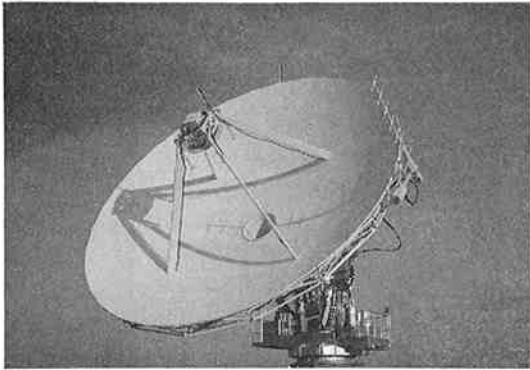
1975年になると、東京天文台野辺山観測所に、大型宇宙電波観測装置の大蔵予算調査費が、初めて認められた。我国に世界最大のミリ波望遠鏡をつくらうという計画が現実化すると、東京天文台のスタッフは野辺山計画の準備に忙殺されるようになった。

この新しい状況下で当所の電波天文グループは自立した研究課題の模索を開始する必要に迫られた。当時、当所の電波天文グループをリードしていた川尻室長、尾嶋主任研究官、河野研究官（いずれも当時）は、電波天文技術と当所の原子標準の技術を組み合わせれば、我国でもVLBIに取り組むことが可能であり、それが当所にふさわしい研究課題であることを、見出ししていた。当所のそして我国のVLBI研究のスタートであった。

## 2.2 VLBI 技術の蓄積

1975年度から、当所のVLBI技術の開発研究が開始された。米国立天文台グループが中心となったMark-II型方式に近い、第1世代のVLBIシステム(K-1)の開発に着手した(第3図参照)。この開発において次のような研究課題が生まれた。

- 1) 通常の電波天文におけるS/N比とVLBI方式の相関出力のS/Nの相異点の解明
- 2) 原子標準の安定度がVLBI観測に与える制約
- 3) 1ビットサンプリングに伴うコヒーレンスの低下お



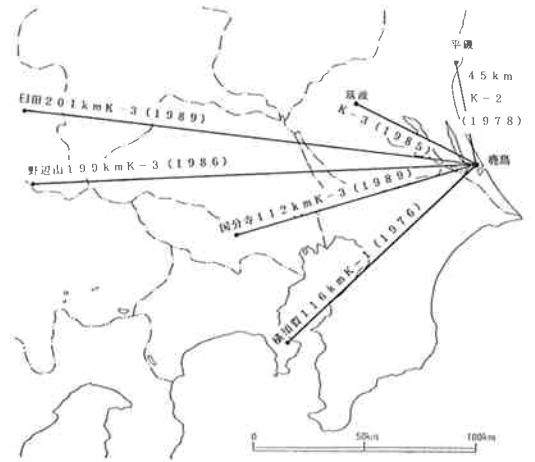
第4図 旧電電公社横須賀通研 12.8m アンテナの写真

よび信号処理上の技術的問題

4) 相関処理システムの製作

これらの課題は、VLBI 技術が進歩した現在にあって、常に問われている本質的課題であった。限られた予算と限られた要員の中で、我国の VLBI 技術の蓄積を開始する研究開発が行われた。この開発において、周波数標準部の佐分利部長（当時）をはじめとする周波数標準関係スタッフの方々から多くの支援・助言が寄せられた。K-1 システムの特徴を列举すると次のとおりである。

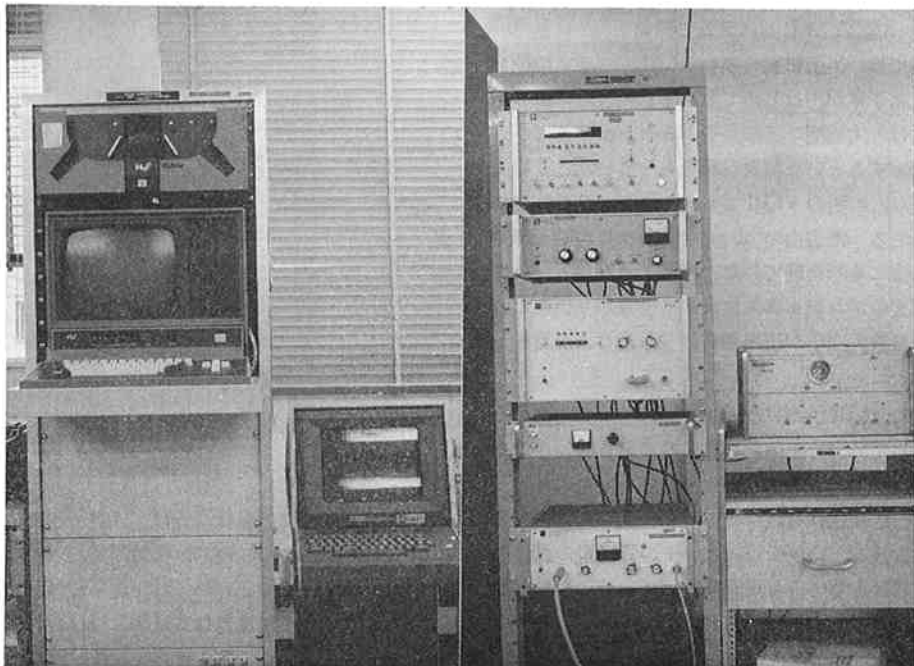
- 1) 原子標準はスーパーチューブセシウム時計を使用
- 2) サンプリングは 4 Mbps とし、デジタルで VTR に 1 ch のみ連続記録



第5図 関東地方の VLBI 局の配置図

- 3) 相関処理はオフラインで NEC-3100 計算機で行う、などである。ハードウェアは、当所の指導のもとに、日本通信機㈱が製作に当たった。ソフトウェアはアセンブラによる完全な手作りのものを使用した。

完成した K-1 システムを利用して、1977年1月、鹿島 26 m アンテナと NTT 横須賀通研の 12.8 m アンテナ（第4図）との間で、我国最初の VLBI 実験が行われた（第5図参照）。観測したのは ATS-1 という静止衛星と 3C273 等の電波星であった。この両者のフリンジを得ることができ、実験は成功した。K-1 システム



第6図 K-2 システムの外観写真

の開発と実験により、将来の本格的 VLBI の基盤となる各種技術の蓄積に成功することができた。

1978 年になると、実験用通信衛星 ECS の地上実験施設として、第 2 世代 VLBI システム (K-2) の開発 (第 6 図参照) が開始された。K-2 システムの特徴は次のとおりである。

- 1) 鹿島・平磯両支所間 (第 5 図参照) を結ぶマイクロ回線により、リアルタイム VLBI を実現する。50 km のリアルタイム VLBI は世界初の試みであった。
- 2) 鹿島はセシウムスーパーチューブ、平磯はルビジウムを原子標準とする。
- 3) アンテナ追尾システムはより充実した計算機制御のもとにおく。
- 4) 時間的にシーケンシャルに受信するチャンネルを切替えるバンド幅合成を実現する。
- 5) ミリ波 VLBI 実験に挑戦する。
- 6) マルチレベルフリンジストップピングを行う。

このうち 5) はミリ波電波源となるべき ECS の打上げ失敗により、実現できなかったが、他の 5 項目は概ね成果を挙げることができた。

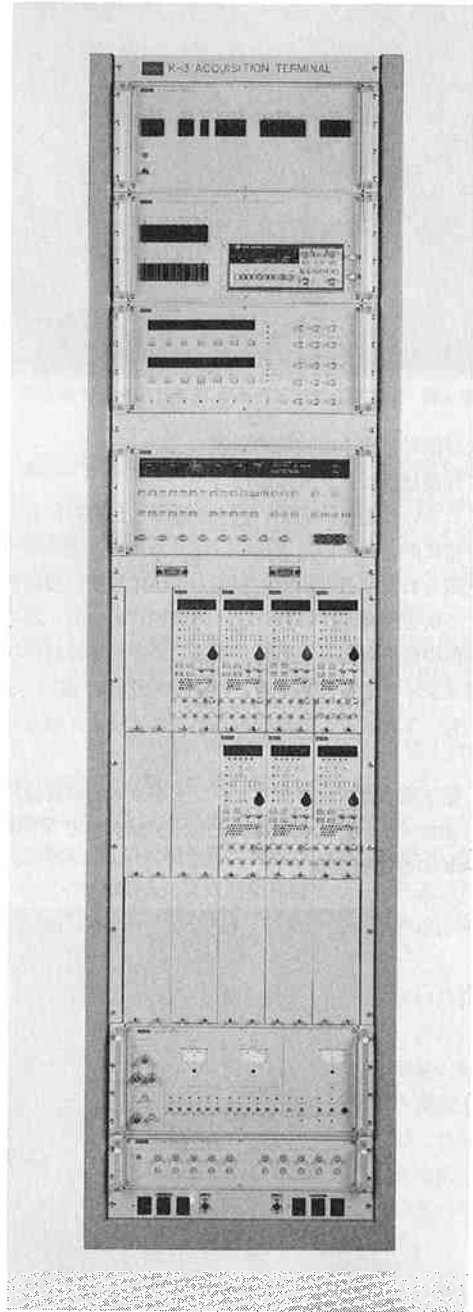
特に K-2 システムにより 100 を越える電波源の相関強度を測定できたことは、大きな成果であった (1980 年)。また測地用 VLBI には必須の技術であるバンド幅合成法を実現したことも大きな成果であった。

K-1, K-2 両技術により、当所は本格的 VLBI システムに取り組む基盤を確立した。

### 2.3 K-3 型 VLBI システムの開発

1979 年度には、当所に K-3 型 VLBI システムの開発のための大蔵予算が、はじめて認められた。この第 3 世代システムは、大陸間の基線長を、3 センチよりも小さい誤差で測定するという開発目標をもっていた。この大蔵予算により、当所の VLBI プロジェクトが公けに認知されたといえる。野辺山の 45 m アンテナに大蔵予算がついてから既に 4 年を経ていた。野辺山と鹿島という 2 つの電波天文のプロジェクトに大型の予算がついたことは、日本の電波天文学が市民権を確立したことを意味した。

当初、この VLBI 予算は、5 か年間のシステム開発を中心とした技術開発を主体としたものであった。ところが 1980 年になって、当時の大平首相が非エネルギー分野の日米科学技術協定締結のため、ワシントンにおいて当時のカーター大統領と会談を行った。その協定書の具体的内容の第 1 項目として、日米共同 VLBI 実験による、地殻プレート運動の測定が挙げられていたのである。この協定調印により、当所の VLBI 計画は技術開発だけでなく、日米間の国際実験という具体的目標をもつことと



第 7 図 K-3 システムの外観写真

なった。

こうした情勢の変化を受けて、当所内には VLBI システムの開発をより組織的・体系的に行ってゆく本部・センター体制づくりが進められた。一種のプロジェクトチーム制度である。本部は本所側に設けられ、佐分利周波数標準部長 (当時) が本部長に就任した。センターは鹿島側に設けられ塚本支所長がセンター長に就任した。

システム開発の中核を担うセンターは、毎週1回のセンター会議を技術検討の場と位置づけ、システム全体の方向づけ、各部間のインターフェースの調整、任務分担の決定などを行った。毎週1回の成果報告会とも言えるこの方式は、1989年9月現在、320回を越えて継続している。当所のVLBIシステム開発の成功と発展は、このセンター会議方式の確立と密接な関係をもっていると考えられる。

本部・センター方式は、VLBIプロジェクトに先行した衛星実験プロジェクトにより、はじめて導入されたものであったが、VLBIプロジェクトはこの方式を独自に発展させてきた。この週1回のセンター会議と、月1回の本部・センター会議により、大型システム構築のための情報交換が円滑となり、これまでの少グループ制の研究方式とは質的に異なった、システム開発・研究が可能となったのである。

#### 2.4 内外からの要請

1981年から1982年にかけて、当所のVLBI計画を推進する取り決めが相次いだ。第1は、上述の「非エネルギー分野の日米協定」の第1回合同委員会において、日米VLBI実験を推進することが決議され(1981年9月)、第2は、日本学術会議が国際リソフフェア探査計画(DELPE)の我国での実施を、政府に対し勧告し(1981年11月)、そして第3は、測地学審議会が建議した第5次地震予知計画の中に、当所のVLBI計画が盛り込まれたことである(1982年10月)。これら国内外からの要請の中で、第3世代のK-3型VLBIシステムが1983年9

月までに完成した(第7図参照)。

K-3 VLBIシステムの開発の技術的内容については前特集号文献(1)に詳しく記述されているので参照されたい。このK-3システム開発の成否を問うはじめての試験観測が、1983年11月に日米間(鹿島とモハービおよびオーエンズバレー)において実施され、成功し、誤差0.1ナノ秒以下の精度で基線長を決定することが出来た。

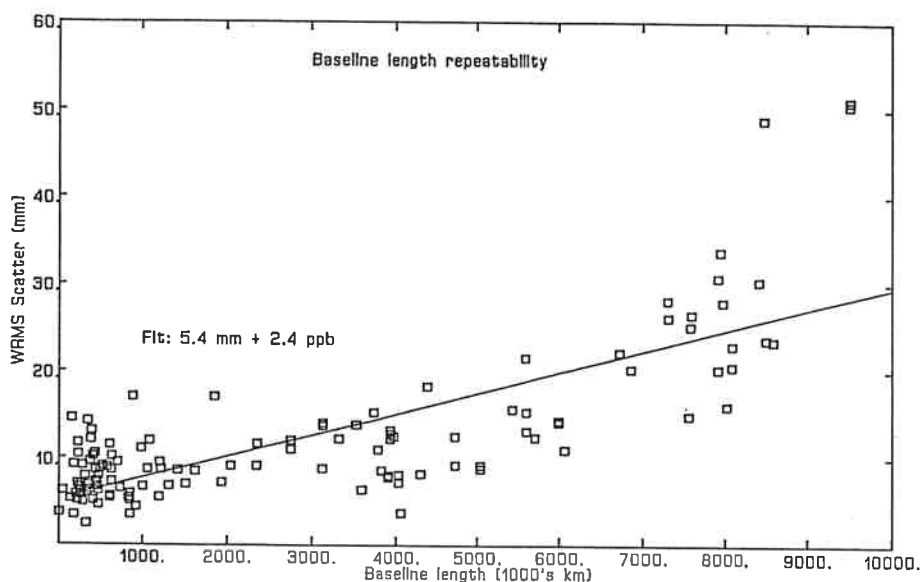
その後2回のシステムレベル実験を経て、1984年以降、太平洋実験を中心とする、定常的な観測段階に入り現在に至っている。

この日米VLBI実験の最大の成果は、史上はじめて太平洋地殻プレートの運動を測定したことである(3.1.2参照)。この成果により、K-3 VLBIシステムは、その最大の開発目標を達成することが出来た。

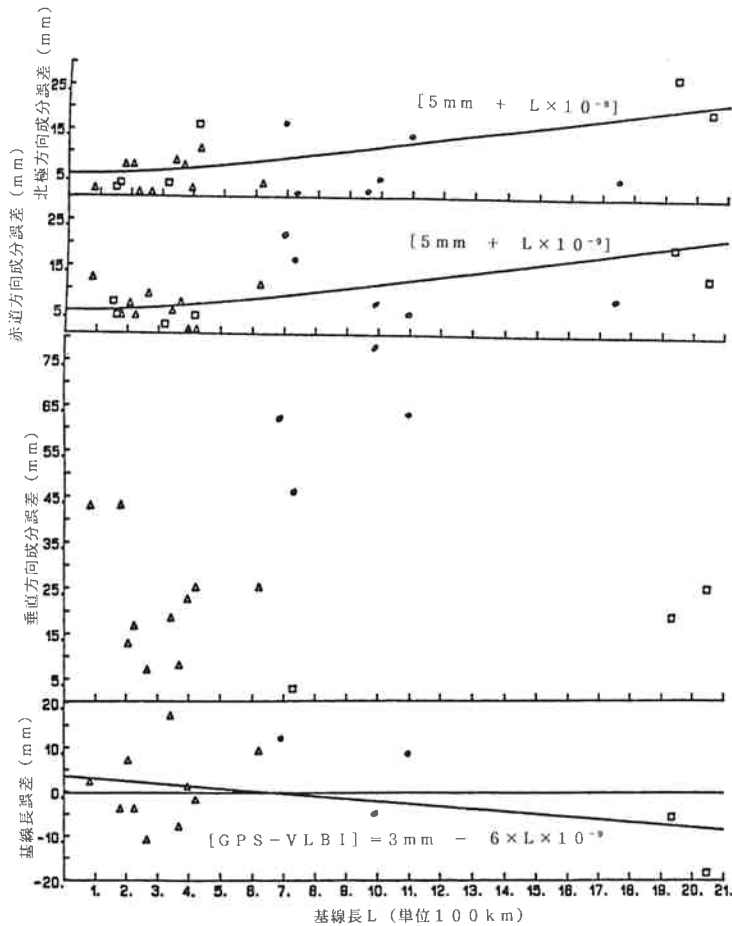
K-3システムの成果をもとに次世代のK-4システムの開発が進められており、本特集号のⅢ章において詳しく紹介されている。

### 3. 実験の経緯と成果

K-3システムの開発完了とともに、当所に対して様々なVLBI共同実験が要請された。前述した日米実験は当所の実験計画の中核をなすものである。日米実験に関連して、時刻比較実験、 $\Delta$ VLBI実験、スペースVLBI実験が行われた。また国際実験としては、日中、日豪、日独実験が行われ、地球回転の精密測定のためのIRIS-P実験も行われている。国内では国土地理院の5mアンテナとの実験や、当所が開発した3m超小型



第8図 VLBI測距精度の再現性。縦軸は再現性誤差。横軸は基線長。



第9図 VLBIとGPSのコロケーション結果。縦軸はコロケーション誤差の各成分。横軸は基線長

VLBI システムによる実験が行われた。各実験の経緯と成果は以下のとおりである。

### 3.1 日米共同実験

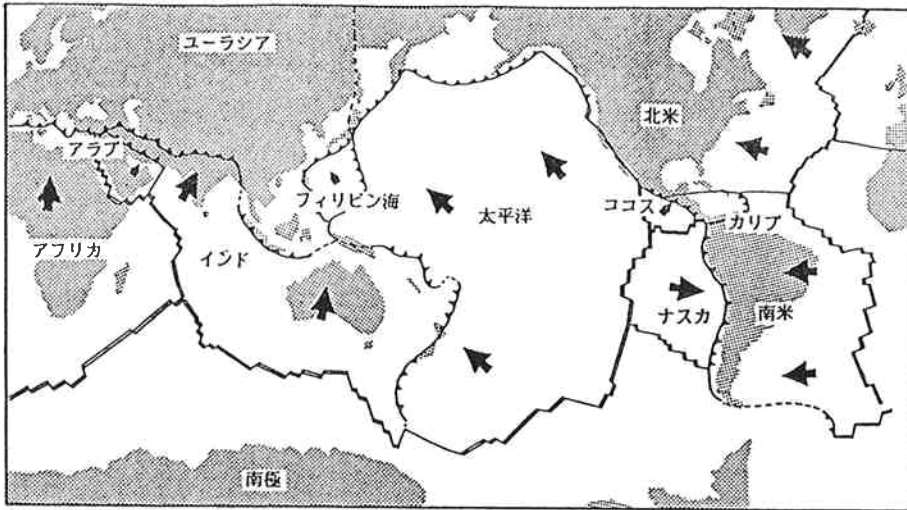
#### 3.1.1 達成されている精度

第8図は、1984年以来 NASA の地殻力学プロジェクト (CDP) の中で測定してきた 107 基線長についての再現性を評価したものである<sup>(2)</sup>。この図の短い基線は主に NASA のモーバイル局観測によるもので、小口径から生ずる低感度のため再現性が良くないためとも考えられる。

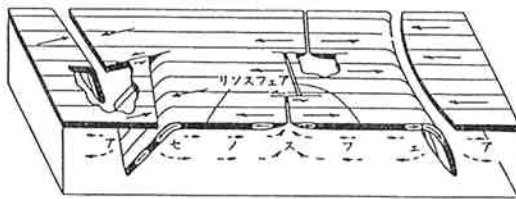
一方、6000 km を越える長基線では、大気モデル誤差が再現性劣化の原因と考えられている。問題は残っているにせよ、2.4 ppb( $10^{-9}$ ) という驚異的再現性が得られていることが分かる。長基線に更に精度を改善するには今後、大気モデルの改善と、小口径でも良い精度の得られるような低雑音の受信系の開発が必要となっている。しかし次節で述べるプレート運動の測定などの相対的測

定では、再現性が重要であり、現在までの VLBI 技術でも十分な精度をもっていることがわかる。

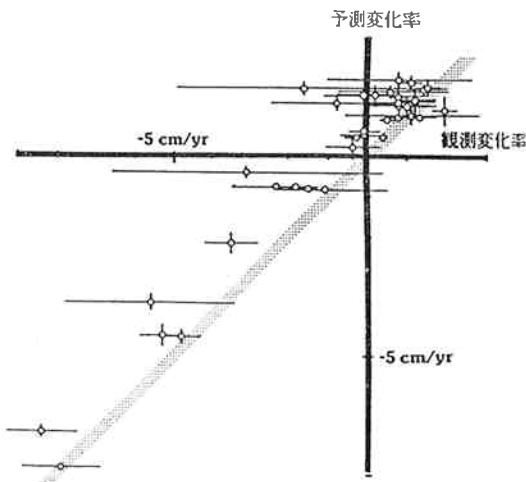
こうした再現性の評価は、あくまで精度についてのものである。精度の評価については、VLBI と同程度以上の精度をもつ他種の技術との相互比較が必須である。衛星レーザ測距 SLR や全世界測位システム GPS が比較の対象となる。これをコロケーションと呼ぶ。第9図に GPS と VLBI のコロケーションの結果を示す<sup>(3)</sup>。こうしたコロケーションは、欧米でもまた十分やられておらず、比較例はそれ程多くない。GPS との比較では、約 2000 km までの基線長について、長さで  $\pm 2$  cm、ベクトル各成分で数 cm のばらつきがみられる<sup>(3)</sup>。これらの相互比較では、使用する座標系の差、VLBI 点と GPS 点の地上接続、衛星の軌道誤差等、さまざまな劣化要因が発生する。以上のことから、VLBI 測地の精度については、10センチ程度までの評価しかできていないといえるであろう。日本でも VLBI、SLR、GPS 等の相互比



第10図 主要な地殻プレートとその運動方向<sup>(5)</sup>



第11図 プレート運動の模式図



第12図 プレート運動の予測 (値ミンスター・ジョルダン) と実測値の相関図<sup>(5)</sup>

という超微速度の地殻プレートの運動が実測されたことである。第10図に地球上をおおう主要なプレートとその運動方向を示す。日本周辺はユーラシア、太平洋フィリピン海、北米の4つのプレートが会合する、極めて活動的な地帯である。

第11図に模式的に示すとおり、海嶺において湧き出したリソスフェア（プレート）は、別のプレートと会合すると、一方が他方の下にもぐり込む。日本周辺では太平洋プレートとフィリピン海プレートが日本列島の下に沈み込んでいると考えられている。この沈み込みが日本周辺の地震発生の主要因と考えられており、VLBIによるプレート運動の測定は地震予知の研究にとって重要なものとして、第6次地震予知5ヶ年計画において位置付けられている。

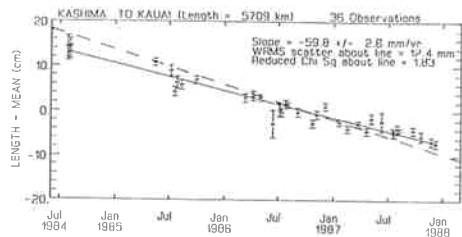
第12図にプレート運動モデルであるミンスター・ジョルダンによる予測値とVLBI技術によって測定された実測値の比較を示す。両者は概ね傾き45°の相関を示しており、実測値はモデルと良く一致していることが分かる。これまで地質学的タイムスケールで議論されてきたプレート運動が、我々の日常的タイムスケールで確認できたことは画期的成果と評価されている。ほぼ同様な成果が衛星レーザ測距 SLR 法によっても得られており、全く異なる手法で一致する結果が得られたことで、これらの測定の正確性が裏づけられたといえる<sup>(5)</sup>。

較が可能な条件が整いつつあり、日本のコロケーション研究への寄与が国際的に期待されている。

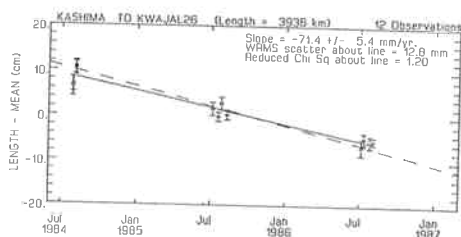
### 3.1.2 プレート運動の検証

NASA の CDP そして日米共同実験の最大の成果は、これまで間接的証拠により推測されてきた年間数センチ

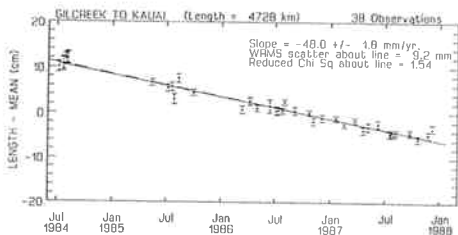
第13図に各基線について、基線長変化の測定例を示す。ハワイのカウアイ局とマーシャル諸島のクェゼリン局は太平洋プレート上にあり、これら2局と鹿島およびギルクリーク（アラスカ）局との距離は、ほぼ一定の割合（年間4~6cm）で減少していることが分かる。一



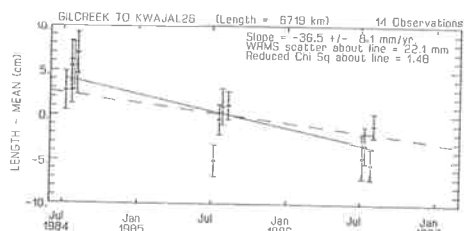
(a)



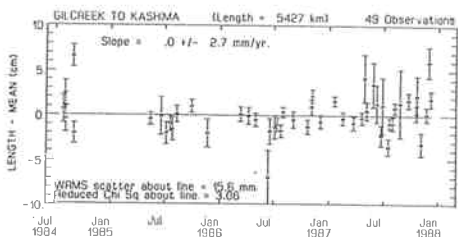
(b)



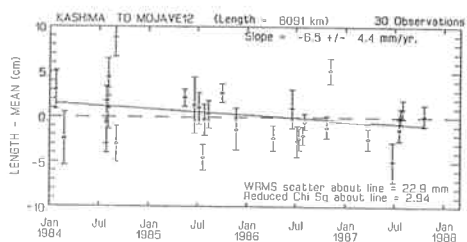
(c)



(d)

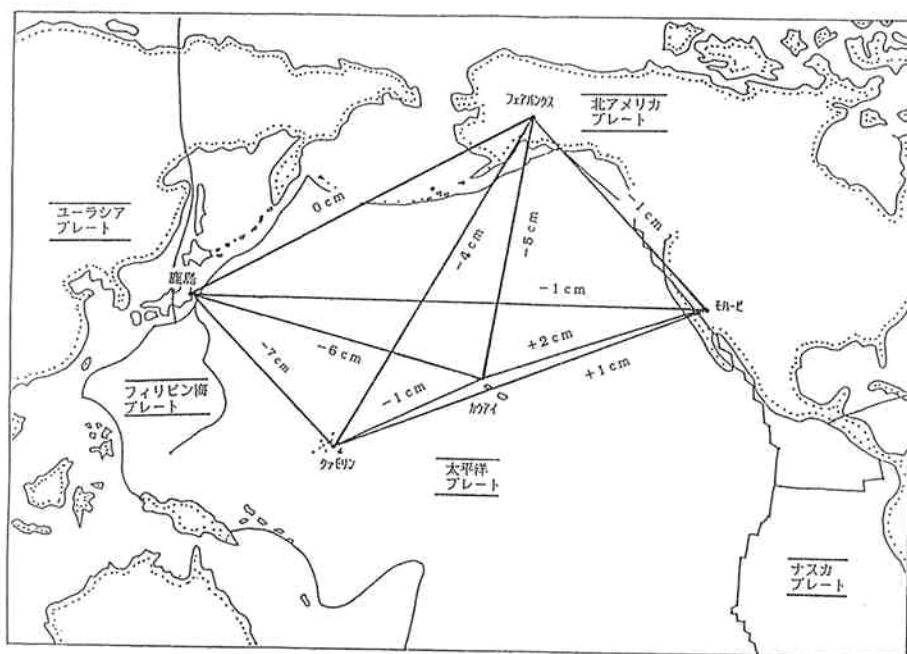


(e)



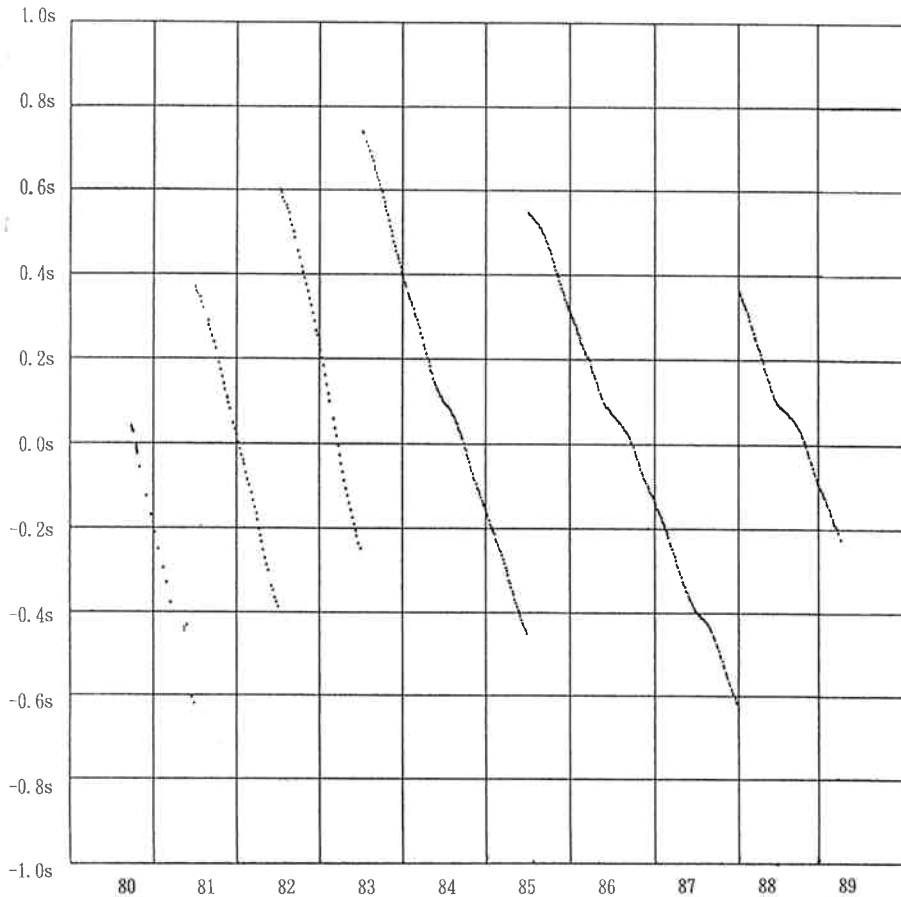
(f)

第13図 日米太平洋実験参加の各基線毎の基線長変化の測定結果



第14図 日米太平洋実験参加の基線長変化





第15図 最近10年間の地球回転の変化

方鹿島とギルクリークやモハービ（カルフォルニア）局間の距離は顕著な変化を示しておらず、同じ北米プレート上にあるものと推察できる<sup>(6)</sup>。

この結果を地図上に示したものが第14図である<sup>(6)</sup>。太平洋上の島々が概ね北西方向に運動しているとするれば、これらの変化を矛盾無く説明することができる。

### 3.1.3 地球回転運動の測定

VLBI 技術により地球自転の高精度の決定が可能となってきている。第15図に最近の地球回転の変化とうるう秒の様子を示す。鹿島は1984年から、NASA との極域実験、1988年から IRIS-P 実験に参加し、地球回転測定に貢献している。1983年頃までは、年に約1秒のペースで地球の自転が遅くなっていた。しかし1984年以降は2年に1秒のペースに現象傾向がゆるくなってきていることがわかる。

VLBI による測定は精度が高いため、地球回転の変化の1次成分以上の複雑なゆらぎを測定することが可能である。第16図は第15図を微分した量（1日の長さの変

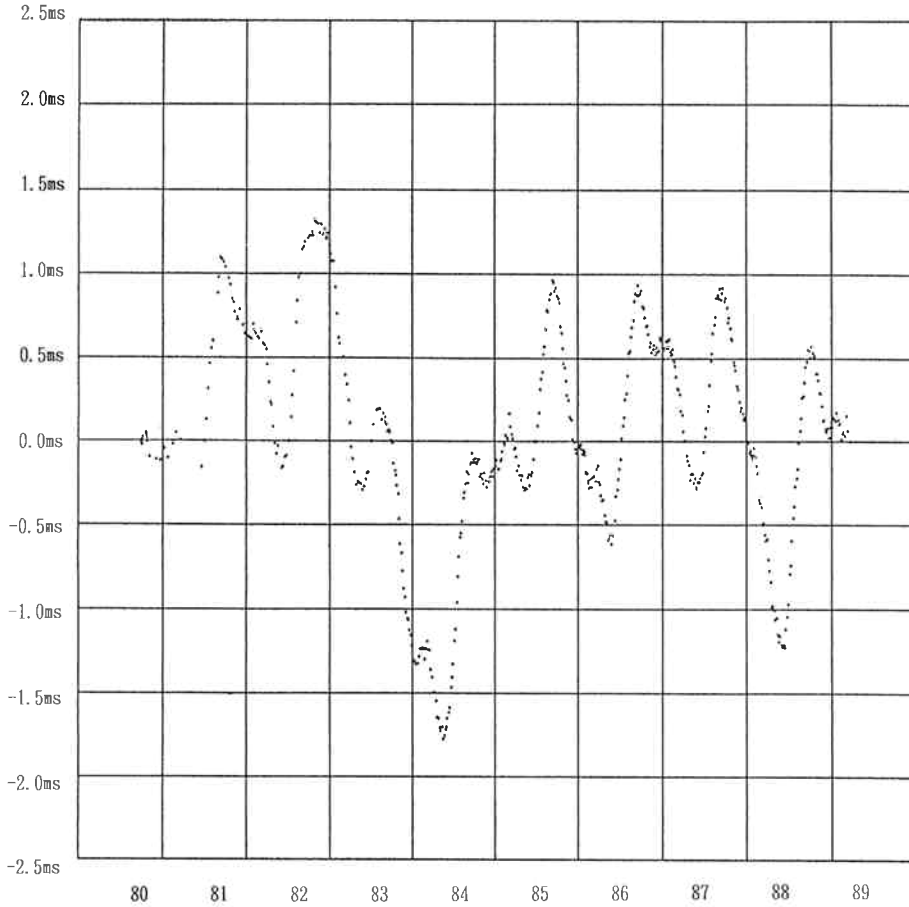
化）を示す。これから1日の長さは、年周的变化をもっていることがわかる。また、エルニーニョ現象の発生した1983年と1988年には、はっきりした負の変化が見えるといわれている。

こうした事実から、固体としての地球の回転運動は、地球規模の大気・海水等の変動の指標として優れた性質をもつものと注目され始めている。

地球回転測定のための日独共同実験が1985年に実施され、1万 km を越える基線による高精度測定にも成功している<sup>(7)</sup>。

### 3.1.4 時刻同期実験

当所では1985年以来米国海軍天文台 USNO との間で、VLBI による時刻比較実験を月1回のペースで継続してきている。測定精度としては0.2 nsec を達成している<sup>(8)</sup>。測定精度を改善するために、1986年と1987年にゼロ基線干渉（ZBI）実験を実施した<sup>(9)</sup>。ZBI とはアンテナ面に超小型の VLBI アンテナを取り付けて、各局遅延を基準受信系に対して測定する手法を言う。米国フロリ



第16図 1日の長さの変化. 第15図微分

ダリッチモンド局と鹿島局についてこの手法による測定を行い、両局の局内遅延差を 0.3 ns 以内の誤差で決定することに成功した。

VLBI による時刻同期法は、現在のところ最も精度の高い時刻比較法である。この時刻比較値を評価するためには、同程度の精度の時刻比較法が必要であり、衛星通信を利用した双方向時刻比較が候補として考えられるので、両者の比較が重要である。

### 3.1.5 衛星の軌道決定

当所は JPL との間で、1984年6月に日米豪基線による米国のデータ中継衛星 DSCS の軌道決定を行った。約 24 時間の軌道測定を行い、約 4 m の誤差で衛星位置を決定することに成功した<sup>(10)</sup>。これは従来の方法に比べて1桁以上の精度の向上であり、静止衛星の軌道決定に VLBI が有効であることを示した。

既に米国では VLBI 技術による静止衛星や深宇宙飛翔体の軌道決定は確立した技術であるが、我国としては初めての成果であった。

### 3.1.6 スペース VLBI 実験

1986年7月～8月と1987年1月に世界初のスペース VLBI 実験が静止衛星 TDRS を用いて行われた。鹿島局はキーステーションである臼田局の精度位置決定等の支援を行った後、TDRS との干渉計実験にも参加した。標準周波数は米国ホワイトサンズ局から TDRS へ送信された。

主たる実験は TDRS—臼田間で行われたが、TDRS—鹿島間でも電波星のフリッジを確認することができた。地球半径の5倍のこれまでで最大長の基線により高分解能の電波星観測が可能となったわけである。

この成果をもとに、宇宙科学研究所を中心としてスペース VLBI 衛星計画が進展している。

### 3.1.7 日米実験の今後

当所の第1次日米実験5か年計画は既に1988年度をもって区切られ、1989年度からは第2次5か年計画に入っている。また米国の CDP は1991年をもって一旦終了することが決まっており、新規計画である固体地球科学プ

プロジェクト (SESP) に参入することが検討されている。このように日米双方とも計画の区切りや見直しをしており、両者ともこれからの将来計画について真剣な検討を進めているところである。

### 3.2 日中共同実験

1983年10月、日中科学技術協定に基づく第2回日中科学技術協力委員会が東京において開催され、日中間で VLBI 共同実験を行ってゆくことで合意した。この合意に基づき当所と上海天文台は実験実施の覚書を交換した。

1985年9月には、上海天文台の構内にある 6 m アン



第17図 上海天文台 6 m アンテナの写真

テナ (第17図) と当所との間で、初の VLBI 予備実験が行われた。当所から受信機以下、K-3 VLBI システム一式を上海天文台へ輸送して実験を行った。この実験では、従来のハネウェルレコーダの記録密度の7倍という、新しいオープンリール型データレコーダ VDR-2000を上海側で使用した。このレコーダの中国への輸送ではソニー株式会社の強い支援を受けた。実験は成功し、鹿島-上海間の基線長を誤差 4 cm の高精度で決定することができた (第18図参照)。この時使用したソニーレコーダの技術が、その後のカセット型 K-4 レコーダの開発につながっている。

また当所がはじめて VLBI 機材を外国へ持ち出したのが日中実験である。ハイテク機器や磁気テープの国外輸送が COCOM に触れることが通産省より示された最初であった。以後、日中実験に関して、ハイテク戦略物資の輸出では、しばしば問題が発生した。これらの成果および経験から、日中実験は、当所の VLBI 計画の力量を高めるなど、多大の貢献をしてきている。

また、中国側は、当所の実験の成果も基礎として、上海近郊の余山に 25 m の大型アンテナを完成させた。更にウルムチや昆明にも VLBI 局を開設する予定であり、将来のアジア大陸を覆う VLBI ネットワークをソビエト連邦やインドと協力して作り上げてゆく計画をもっている。

### 3.3 国内共同実験

2.3 節で述べた国際リソスフェア探査計画 (DELP) に基づき、当所と建設省国土地理院は共同実験を行っている。1984・85の両年は筑波の国土地理院敷地内に設置された 5 m アンテナとの間で約 50 km の基線で繰り



第18図 アジア西太平洋地域の VLBI 局の配置計画