

---

解 説

## 2. VLBI 観測による成果

### 2.1 國際測地 VLBI 観測成果

近藤 哲朗<sup>\*1</sup> 吉野 泰造<sup>\*2</sup>

## 2. VLBI Observation Results

### 2.1 International VLBI Experiments

By

Tetsuro KONDO and Taizoh YOSHINO

The 26-m and 34-m antennas at the Kashima Space Research Center play a big role not only in the advancement of radio astronomy in Japan, but also in the geodetic very long baseline interferometry (VLBI) field throughout the world. In 1985, the motion of the Pacific plate was successfully measured by VLBI for the first time in history. Kashima also participated in the international experiment that aimed at measuring wobbling and the rotation of the earth precisely in parallel. Since that experiment, Kashima has participated in a number of international VLBI experiments and has contributed to the construction of a terrestrial-reference frame and a celestial-reference frame. These activities related to international VLBI are reviewed.

[キーワード] 鹿島, 大型アンテナ, VLBI, 電波天文, 測地

Kashima, Large aperture antenna, VLBI, Radio astronomy, Geodesy

### 1. はじめに

通信総合研究所鹿島宇宙通信センターにある 26m パラボラアンテナおよび 34m パラボラアンテナは日本の電波天文学の発展に貢献しただけでなく、世界の測地 VLBIにおいても大きな役割を果たしてきたが、鹿島での大型アンテナの歴史は 1960 年代に遡る。1963 年、鹿島に直径 30m のパラボラアンテナが完成した（第 1 図）。このアンテナは 1964 年の東京オリンピックの宇宙中継に備えて実験を開始するためのアンテナであったが、当時電波天文観測に使えるアンテナが他になかったことから、東京天文台と共同で電波天文観測にも使用され、日本の電波天文学の発展に貢献することになる。1968 年に鏡面精度が良く高効率の直径 26m のパラボラアンテナが完成し（第 2 図）、電波天文観測にも更に活発に使

用されるようになり、VLBI 技術開発にもつながっていった。

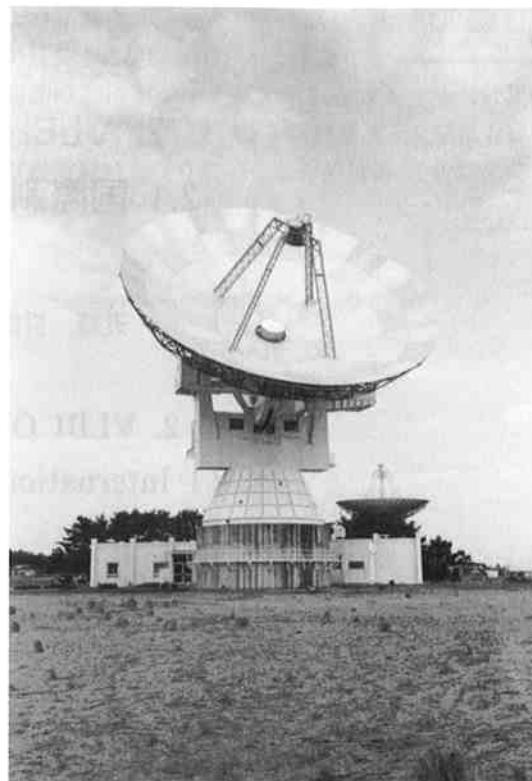
当所が米国が開発した Mark-II システムを参考とした VLBI システム（K-1）の開発に着手したのは、1974 年のことである。このシステムを用いて 1977 年に鹿島 26m アンテナと横須賀電気通信研究所 12.8m アンテナ間で日本初の VLBI 実験を成功させた<sup>(1)</sup>。1979 年には鹿島-平磯間のマイクロ波回線を使用した実時間 VLBI システム（K-2）を完成させた。K-2 システムの開発と並行して、1979 年からは 5 カ年計画で本格的な測地 VLBI 観測に使用可能な K-3 システムの開発に着手した。K-3 システムは米国で開発された Mark-III システムとの互換性を有したシステムであり、NASA が主導していたプレート運動の実測を目的とした地殻力学計画（CDP: Crustal Dynamics Project）<sup>(2)</sup>への参加を目指したものである。1983 年には史上初の日米間 VLBI 試験観測を成功させ、1984 年から定常的な CDP 実験への参加を開始した<sup>(3)</sup>。1985 年には史上初めての太

\*1 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

\*2 第六研究チーム



第1図 日本の電波天文学の発展に貢献した30mパラボラアンテナ（1963－1975年）



第2図 26mパラボラアンテナ（1968年－）。史上初の太平洋プレート運動の実測に貢献



第3図 34mパラボラアンテナ（1988年－）日本の測地学および電波天文学に大きく貢献中

太平洋プレート運動の実測に成功した<sup>(4)(5)</sup>。並行して地球の極運動や地球回転を精密に計測することを目的とした国際実験にも参加してきた。こうした観測は国際的な地球座標系（地球固定基準座標系 TRF）の構築および国際的な天球標準座標系（CRF）の構築に役立てられている<sup>(6)</sup>。この他にも精密な時刻同期を目的とした実験および電波天文目的の国際実験等にも参加してきている。

1987年度には、鹿島に新たに34mアンテナ（第3図）建設の為の補正予算が認められ、日本近辺での太平洋プレート運動の実測を目指す西太平洋電波干渉計網の構築を開始した<sup>(7)</sup>。西太平洋電波干渉計網構築と並行して、小型で可搬性に優れたVLBIシステム（K-4）の開発も進められた。1989年にはK-4システムを用いた初の試験観測（鹿島－つくば基線）に成功した。その後

K-4 システムは西太平洋電波干渉計網の南鳥島での観測にも使用され、日本近辺での太平洋プレート運動の実測に大きく貢献した。こうした実績を首都圏周辺の精密地殻変動観測に役立てるため、1993年に首都圏広域地殻変動観測計画 (KSP: Key Stone Project) を開始した<sup>(8)(9)(10)</sup>。KSP では世界初の定常運用を目指した実時間 VLBI システムが開発され<sup>(11)</sup>、2000年6月の三宅島噴火とともに始まった一連の地殻変動検出にも貢献した<sup>(12)</sup>。

鹿島の大型アンテナはこのように日本の電波天文発展のために大きく貢献したのみでなく、VLBI 技術開発や測地学の分野にも大きく貢献してきている。第1表に鹿島宇宙通信センターおよび宇宙電波応用研究室の歴史を大型アンテナや VLBI に関連した項目についてまとめたので参照されたい。次章以降、鹿島が関係した国際 VLBI 実験について述べていくことにする。

第1表 鹿島大型アンテナの歴史

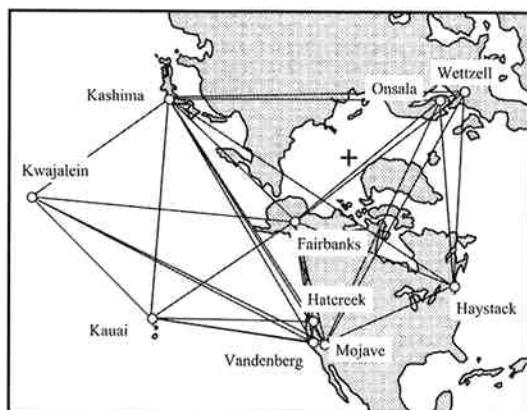
1963年	8月	30m パラボラアンテナ施設完成
1964年	5月	鹿島支所開設
1966年	2月	電波天文観測開始（東京天文台と協力）
1968年	10月	26m パラボラアンテナ施設完成
1970年	8月	準星の定常観測開始（東京天文台と共同）
1973年	12月	26m アンテナで X 線星 CygX-3 からの電波のフレアアップを世界で最初に検出
1975年	5月	30m パラボラアンテナ撤去
1977年	1月	初の VLBI 国内基礎実験（鹿島－横須賀）に成功
1977年	10月	『第三宇宙通信研究室（現宇宙電波応用研究室）』新設
1979年	4月	VLBI 技術開発 5ヶ年計画開始（K-3 システム開発開始）
1979年	12月	鹿島－平磯間実時間 VLBI システム（K-2）稼動開始。K-2 は我が国最初の実時間 VLBI システム
1982年	11月	K-3 と Mark-III VLBI システムのハードウェア適合性試験成功
1983年	11月	太平洋をまたぐ初の日米 VLBI 予備実験の成功（鹿島－モハービーオーエンズバー）
1984年	1月	日米 VLBI システムレベル実験実施（1月および2月）
1984年	6月	△VLBI 法による太平洋静止衛星の精密軌道決定実施（鹿島－ゴールドストーン－キャンベラ）
1984年	7月	国際 VLBI 実験開始（NASA 地殻力学計画 CDP への参加）。日米間の距離を誤差 2cm で決定
1984年	10月	VLBI による日米時刻同期実験開始
1985年	9月	日中 VLBI 実験開始。鹿島－上海間の距離を±3cm で決定
1985年	11月	日独基線による地球回転（UT1）観測 VLBI (GJRO) 実施
1985年	11月	日米 VLBI 実験データ解析。プレート運動理論を実証（ハワイ、マーシャル諸島が年に数 cm 日本に接近）
1986年	7月	世界初の TDRSS を使った宇宙空間 VLBI 実験に参加
1986年	10月	ゼロベースライイン VLBI によるアンテナ遅延の校正実験（鹿島－リッチモンド） 日本初の VLBI 移動局（GSI 宮崎局）実験実施。同時に日本初の電話回線使用によるデータ転送およびフリンジチェックも実施。
1987年	秋	西太平洋電波干渉計画開始
1988年	2月	日豪 VLBI 実験開始
1988年	3月	西太平洋電波干渉計施設（34m アンテナ）完成
1988年	4月	「電波研究所」の名称が「通信総合研究所」に変更
1988年	4月	太平洋地域地球回転観測網 (IRIS-P) VLBI 観測開始（国立天文台水沢と共同）
1988年	7月	34m アンテナ運用開始
1988年	9月	超小型 VLBI 移動実験開始（小金井、稚内、沖縄）
1989年	5月	「通信総合研究所鹿島支所」の名称を「通信総合研究所関東支所鹿島宇宙通信センター」に変更
1989年	7月	南鳥島－鹿島で初の VLBI 実験（西太平洋電波干渉計）
1989年	9月	34m アンテナを使用した惑星間空間シンチレーション (IPS) 観測開始

1989年	10月	ミリ波(43GHz) 国内(鹿島-野辺山) VLBI 観測に成功
1990年	1月	史上初の南極 VLBI(鹿島-昭和基地) 試験観測に成功
1990年	3月	波面同期時計方式による日加(鹿島-アルゴンキン) VLBI 実験に成功
1990年	7月	GPS衛星利用全電子数観測装置を用いての単周波 VLBI 観測時の電離層補正の可能性を実証
1990年	9月	34mアンテナを使用したIPS観測で2周波(S/X)の同時観測および相関解析に成功
1990年	11月	超小型VLBI局(3mアンテナ)による南大東島VLBI実験成功
1991年	1月	34mアンテナを使用してミリ秒パルサー受信に成功
1991年	2月	日伊22GHz測地VLBI実験成功
1991年	2月	ORTHO(東西南北直交基線群による地球回転パラメータ決定実験)実施(2-3月)
1991年	4月	「第三宇宙通信研究室」の名称を「宇宙電波応用研究室」に変更
1991年	6月	24時間×1週間連続VLBI観測に成功(南鳥島)
1991年	11月	メーザ電波源サーベイ観測開始
1992年	2月	ユリシーズ・ドップラートラッキング観測による重力波検出実験に参加
1992年	3月	首都圏VLBI(鹿島-小金井-つくば)観測成功
1992年	10月	VLBIにより鹿島と上海間年間2.9cmの距離短縮の検出
1992年	12月	26mアンテナを建設省国土地理院に所管替え
1993年	4月	首都圏広域地殻変動観測プロジェクト(要石計画:Key Stone Project)開始
1994年	2月	中国ウルムチ局との初VLBI実験実施。ウルムチ局の初フリンジ検出に成功
1994年	3月	首都圏広域地殻変動検出用11mアンテナ完成
1994年	7月	シューメーカレピー彗星の木星衝突に合わせて電波観測実施
1994年	8月	「要石計画(KSP)」のVLBI初観測を実施
1995年	3月	日露VLBI実験成功
1995年	6月	ガリレオ探査機・ドップラートラッキング観測による重力波検出実験に参加
1996年	1月	34m電波望遠鏡を用いた小惑星レーダー国際共同観測(1995年6月実施)結果からGolevka(ゴレブカ)と鹿嶋の「鹿」が天体に命名
1996年	4月	ATM方式実時間VLBIの初フリンジ検出に成功
1996年	5月	鹿島34mアンテナに鹿島アントラーズのマスコット『アントン君』描画
1996年	10月	34mアンテナでの小惑星4197からのレーダーエコー観測に成功
1996年	11月	34mアンテナを使用した木星放射線帯電波放射観測開始
1996年	12月	宇宙測地に関する国際ワークショップ(TWAA96)を開催
1997年	5月	スペースVLBI(VSOP)で鹿島-はるか基線で初フリンジ検出
1997年	6月	「要石計画」による256Mbps実時間VLBI定常観測を開始(史上初)
1997年	9月	「要石計画」によるVLBI観測、隔日24時間観測へ移行
1998年	7月	世界で初めて1ギガビット毎秒を超えるデータ記録速度(従来の4倍)でのVLBI実験に成功
1998年	12月	宇宙科学研究所臼田64mアンテナとの実時間VLBI実験に成功
1999年	6月	34mアンテナでの金星からのレーダーエコー観測に成功
1999年	10月	3mアンテナ岐阜大学に移設
1999年	秋	インターネットプロトコル方式実時間VLBIシステム(IP-VLBI)開発開始
1999年	12月	VLBI懇談会シンポジウムを鹿島で開催
2000年	1月	GIFT実験(鹿島-岐阜)実施(ギガビットVLBIシステムでの測地実験)
2000年	7月	KSP-VLBI観測で三宅島噴火および神津島近辺の地震活動に伴う館山局の地殻変動を検出。連日観測へ移行。
2000年	8月	VLBI標準インターフェースハードウェア仕様(VSI-H)制定
2000年	11月	KSP-VLBI連日観測から通常運用(隔日観測)に戻す

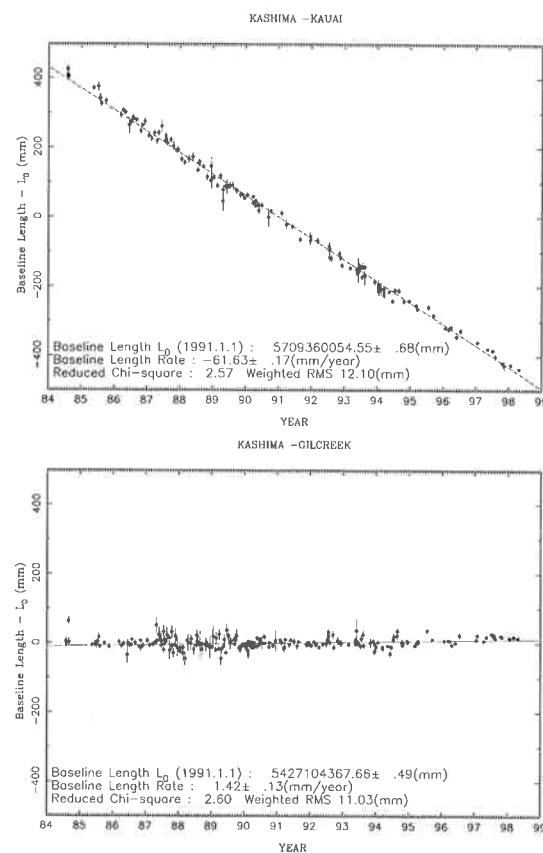
## 2. 地殻力学計画 (CDP) への参加

NASA が主導した地殻力学計画 (Crustal Dynamics Project) は、1980 年代に著しい精度向上がなされていた SLR および VLBI という宇宙測地技術を使って、プレート運動および地殻変動の高精度実測を主目的とした計画であった<sup>(2)</sup>。大陸間距離を高精度で測るには当時としては VLBI が最も優れており、その精度は約 3cm であった。したがって、年間 10cm 弱と予測されていた太平洋プレートの運動も、VLBI 観測では数年の観測で実測可能であると考えられた。鹿島 26m アンテナは 1984 年夏から定常的な CDP 観測に参加した。第 4 図に鹿島が参加した CDP 実験の局配置を示す。第 5 図に一連の実験で観測された鹿島－カウアイ（ハワイ）, 鹿島－アラスカ間の基線長の変化を示す。鹿島, アラスカは同じプレート（北米プレート）上に位置するため（鹿島を含めた日本列島東北部がオホーツクプレートに属しているという考え方もあるが、北米プレートとの間の相対運動は非常に小さい）に、両局間の距離は変化しないが、太平洋プレート上に位置するハワイとの距離は、当時のプレート運動モデルから予想された値に極めて近い変化を示した。観測データが蓄積されるにつれ、数 100 万年の平均的な運動として記述されているプレート運動モデルと、数年から 10 年程度の短い時間スケールのプレート運動は一致しているのかどうかが詳細に比較できるようになった。

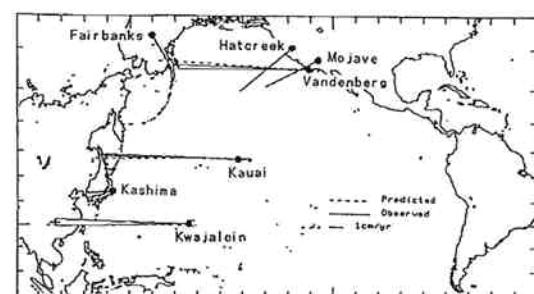
第 6 図はユーラシアプレートに対する各局の 1 年あたりの水平運動をベクトル表示したものである。点線は予測値を示す。なお、図は太平洋プレートのオイラー極（プレート運動を記述する際の回転の極）を極としたメルカトル図法で描いている。この図では、太平洋プレートの運動は緯度に平行な方向になる。図から太平洋プレートに属するバンデンバーグ（カルフォルニア）、カウアイ（ハワイ）、クワジエリン（マーシャル諸島）はほぼプレート運動モデルで予測される運動をしていることが



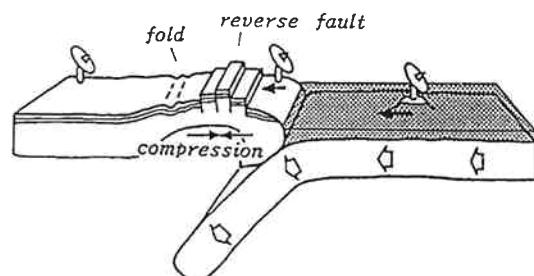
第 4 図 鹿島が参加した地殻力学計画 (CDP) 実験の局配置



第 5 図 観測された鹿島－カウアイ（ハワイ）および鹿島－フェアバンクス（アラスカ）基線長の変化



第 6 図 ユーラシアプレートに対する局移動、太平洋プレートの運動のオイラー極（プレート運動を記述する際の回転の極）を極としたメルカトル図法で描いている<sup>(13)</sup>



第 7 図 太平洋プレート運動に伴う圧縮力による局位置変動の説明図<sup>(13)</sup>

分かる。これに対して、北米プレートに属してはいるが、太平洋プレートとの境界近くに位置する鹿島にも、太平洋プレートの運動の方向に沿った局位置変動が観測されている。これは、日本列島の下に沈み込む太平洋プレートからの圧縮力による変動と解釈されている(第7図)<sup>(13)</sup>。

CDP 実験は地球姿勢(自転軸の方向を示す極運動および UT1)の精密計測も目的としていた。北米とヨーロッパ間で行われていたこうした目的の実験に、日本が加わることの重要性は、第4図の局配置から明らかである。つまり、鹿島が加わることにより、北極を取り囲む基線が構成され、よりバイアスの少ない、極運動の VLBI 観測が可能となったのである。この条件を活かして、1985 年にドイツ・ウェッツェル局との間で UT1 の短期変動を探る目的で集中観測(GJRO)を実施し、基準座標系と系統誤差の解明にも役だった<sup>(14)</sup>。また、その後、1991 年 2 月には東西南北直交基線群による地球回転パラメータ決定実験(ORTHO)など、先進的な実験を実施した。

なお 1992 年に 26m アンテナの所管が国土地理院に変更されてからは、定常的な国際実験への参加は国土地理院のプロジェクトとなった。CDP もやはり NASA の主導する DOSE (Dynamics of the Solid Earth) 計画へと継続され、さらに現在は CORE (Continuous Observations of the Rotation of the Earth) 計画に発展している。CORE は地球回転パラメータを連続的に計測することを目的としており、最終的には連日の世界規模での VLBI 観測を目指している。

### 3. その他の国際実験

NASA 主導の CDP 実験への参加が日本の VLBI 技術開発推進の大きな原動力となったが、それ以外にも種々の国際 VLBI 実験への参加や我々が計画した国際実験を行ってきた。これらの実験についてその概略を以下にまとめておく。詳細については、それぞれの参考文献を参照されたい。

#### 3.1 時刻比較実験

VLBI 技術の応用の一つに各局の時刻比較があり、大陸間の時計を 1nsec 以上の精度で比較することができる。1984 年に鹿島と米国リッチモンド(基線長 10280km)の間で、時刻比較精度確認を目的とした VLBI 実験が行われ、その精度を実証することができた。これは、その当時まで実用化されていた時計運搬法等の時刻比較精度約 10nsec をはるかにしのぐ精度であった<sup>(15)</sup>。しかしながら、VLBI で測定される時計の時刻差にはアンテナおよび機器オフセットが含まれており、絶対的な時刻比較を行うにはこれらの値を取り除かなければならない。このオフセット量を補償する目的のため、可搬型の基準受信器が開発され、基準受信器を目的のアンテナに搭載

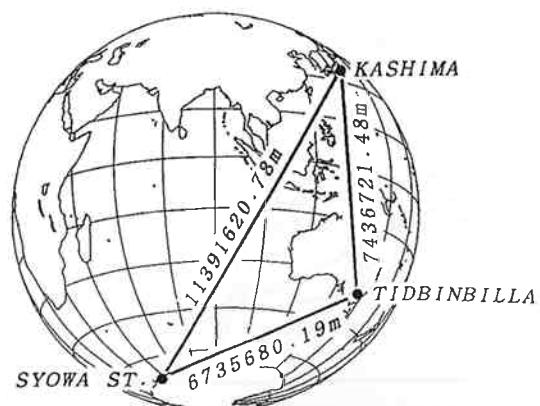
したり、近くに設置し、主アンテナとの間で干渉計観測を行うことにより、基準受信器を介して、両局間の絶対的時刻比較を行うゼロ基線長の VLBI (ZBI) または短基線 VLBI (SBI) と呼ぶ観測技術が開発された<sup>(16)</sup>。

#### 3.2 宇宙空間 VLBI

1986 年 7 月、JPL によりデータ中継衛星(TDRSS)と地上のアンテナ間で史上初の宇宙空間 VLBI 実験が行われたが、この実験に鹿島 26m アンテナが参加し臼田 64m アンテナの補完的役割を果たすアンテナとして重要な役割を果たした<sup>(17)</sup>。その後、宇宙科学研究所が VSOP と呼ばれる宇宙空間 VLBI 計画を推進し、1997 年 2 月に世界初の宇宙空間 VLBI 衛星「HALCA(はるか)」が打ち上げられた<sup>(18)</sup>。鹿島 34m アンテナは宇宙科学研究所に協力して、HALCA との宇宙空間 VLBI 観測に参加し、1997 年 5 月の初フリング検出の成功に貢献した。その後も、電波天文的成果の創出に貢献している。

#### 3.3 南極実験

1988 年に初めての日豪 VLBI 実験を行ったが、オーストラリアの VLBI 局はその後の南極 VLBI 実験計画を進める上で鹿島-昭和基地間の貧弱な相互可視空域を補う上で重要な役割を果たすこととなる。オーストラリア VLBI 局の協力も得て 1990 年 1 月、国立極地研究所と共同で史上初の南極 VLBI 実験(鹿島 26m アンテナ-昭和基地 11m アンテナ)を成功させた。昭和基地には 1989 年に衛星受信用多目的アンテナが建設されたが、VLBI 実験を行うため K-4 システム一式が昭和基地に搬入された。周波数標準として水素メーザ周波数標準を搬入することが困難であったため、実験には当所で開発されたセシウム-X'tal 時計と呼ばれる周波数標準を用いたが<sup>(19)</sup>、オーストラリアのチドビンビラ局を含めた 3 局で 2 回の 24 時間実験を実施し、昭和基地のアンテナ位置を 20cm 以下の誤差で決定することに成功した(第 8 図)<sup>(20)</sup>。この実験の成功により、極地研究所の測地 VLBI プロジェクトが立ち上がり、昭和基地に水素メー



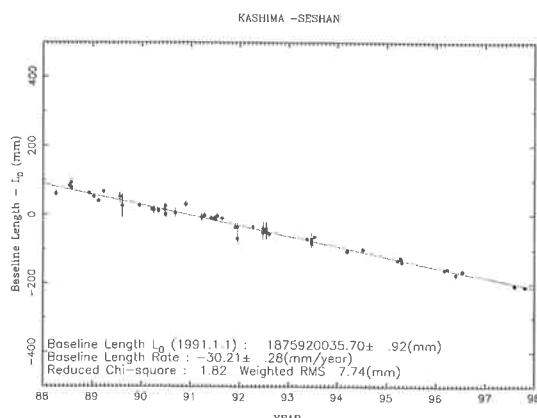
第 8 図 南極 VLBI 実験の参加局配置

ザを含む VLBI システム一式が導入された。現在、極地研究所および国土地理院が本格的に南極 VLBI 実験を進めている。

### 3.4 日中実験

1983 年に第 2 回日中科学技術協力会議が東京で開催され、その席上、上海天文台と通信総合研究所との間で VLBI 実験を行うことが合意された。この合意に基づき 1985 年には鹿島-上海基線での初 VLBI 観測を行った。この観測では K-3 システムおよび当時開発を終えたばかりのヘリカルスキャン方式の VTR を使用したレコーダ（これが後の K-4 レコーダの開発へつながった）を上海に持ち込み、鹿島 26m アンテナと上海 6m アンテナ間で VLBI 実験を成功させた。1988 年に上海に 25m アンテナが完成してからは、鹿島-上海基線で高精度な測地 VLBI 実験が可能となった。その結果、年間約 3cm ずつの基線長短縮（第 9 図）が観測されたが、この短縮率は、上海の位置するユーラシアプレートと鹿島の位置する北米プレート間の相対プレート運動モデルから期待される値よりもはるかに大きな値であった。太平洋プレート運動によって影響を受けている鹿島の変動を考慮しても大きな値である。水平面内での上海の位置変動について解析を行うと、ユーラシアプレートに対して東南東方向の変位が認められ、これは、北上するインドプレートがユーラシアプレートと衝突し、ヒマラヤ山脈を作るのと同時に、ユーラシア大陸東部がアムールプレートとしてユーラシアプレート安定部とは独立に東方に運動する影響と解釈されている<sup>(21)(22)</sup>。

その後、1992 年に中国 2 番目の VLBI 局がウルムチに建設されたが、ウルムチ天文台長の要請により、当所はウルムチ局の立ち上げに全面的に協力することになった。1994 年 2 月には K-4 システムをウルムチ局に搬入し鹿島-ウルムチ基線での初 VLBI 観測を行いフリンジ検出および誤差 3cm での基線長決定に成功した<sup>(23)</sup>。



第 9 図 鹿島-上海基線長の変化

### 3.5 日加波面同期時計方式実験

波面同期時計 (WFC: Wave Front Clock) 方式<sup>(24)</sup>の VLBI 実験の大陸間基線での実証実験を 1990 年 3 月に鹿島 34m アンテナとカナダのアルゴンキン 45m アンテナの間で行った。WFC 方式とは観測時に周波数標準の歩度を人為的にコントロールすることにより、地球回転によって生じるドップラーシフト（フリンジ位相回転）を補正する方式の VLBI であり、相関処理時のフリンジストッピング操作が不要となる他、宇宙空間 VLBI のように大きなドップラーシフトがある場合にコヒーレンスロスを少なくすることができるなどの利点がある。この WFC 方式の有効性を実証するためには大きなドップラーシフトが起こる東西方向の長基線で実験を行うのが望ましく、鹿島-アルゴンキン基線（基線長約 9100 km）はその意味で最適の基線であった。しかしながら、当時アルゴンキンには VLBI ターミナルがなかったため、当時としては先駆的な、計算機ハードディスクへのデータ取り込み、および計算機での相関処理を実施した。その結果、良好なフリンジ検出に成功し、WFC 方式の有効性が確かめられた<sup>(25)</sup>。

### 3.6 その他

測地 VLBI 実験は通常 2GHz 帯および 8GHz 帯を受信するが、さらに高周波数帯の 22GHz での測地 VLBI 実験の可能性を探るため、1991 年、鹿島とイタリア・メジチナとの間で 22GHz での測地 VLBI 実験を行った。22GHz 帯では位相校正信号の発生に工夫を要するが、周波数変換方式の採用により 2/8GHz 帯での測地 VLBI に匹敵する精度を得ることに成功した<sup>(26)</sup>。

また、1988 年から数年間に亘って国立天文台水沢と協力して、太平洋地域地球回転観測網 (IRIS-P) 実験を月 1 回の頻度で行っている。観測スケジュール作成および参加各局の調整は国際地球回転事業 (IERS) の解析センターであった国立天文台水沢が行ったが<sup>(27)</sup>、この実験からも、他の国際実験との比較から基準座標系と系統誤差の解明が進められた<sup>(28)</sup>。

## 4. おわりに

主に測地に関連した国際 VLBI 実験において鹿島の大型アンテナが果たしてきた役割を概観した。鹿島のアンテナが関係した測地 VLBI の特筆すべき成果は史上初めて太平洋プレート運動を実測したことであろう。その後も、鹿島が関係した実験は史上初めてと称されるものが多く、日本だけではなく、世界の VLBI 技術の発達や、学術成果に対して鹿島が果たしてきた役割の重要さが、改めて認識される。その後の宇宙測位技術の進歩は著しく、測地に関しては GPS で VLBI と同程度の精度の計測が可能となり、現在、国土地理院が国内 1000 点以上の GPS 観測網で地殻変動観測を行っている。こ

うした空間密度の高い観測は VLBI ではコスト的に困難であるが、逆に VLBI 観測には GPS 観測の精度の検証および校正点としての役割が期待されている。さらに VLBI と GPS および SLR といった異なる宇宙測位技術での計測結果の比較は、現在もっともホットな研究領域の一つであり、当所の首都圏広域地殻変動計画 (KSP) で取得されたデータも、この目的に使用されつつある。

一方、天球座標系と地球座標系の結合やバイアスのない地球姿勢（地球自転軸の方向及び UT1）の計測においては、測地 VLBI が必要不可欠であり、地球上からの宇宙探査体の位置計測においても、今後も VLBI が重要な役割を果たすと考えられる。現在、我々は KSP で実用化された実時間 VLBI 技術をより汎用化するために、インターネットを利用した実時間 VLBI 技術 (IP-VLBI) の開発を進めている。IP-VLBI 技術が確立されれば、国際基線での実時間 VLBI 観測を容易に行なうことが可能となり、GPS の精度向上にも貢献することができる準実時間での地球姿勢決定が可能となるであろう。

### 参考文献

- (1) 超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号、電波研究所季報、Vol.24, No.130, 1978.
- (2) J.C. Robert, H. Frey, G.D. Mead, and J.M. Bosworth, "Space-age geodesy: The NASA Crustal Dynamics Project", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.GE23, No.4, pp.360-368, 1985.
- (3) K-3 型超長基線電波干渉計 (VLBI) システム開発特集号、電波季、30, 特 1, 1984.
- (4) T. Kondo, K. Heki and Y. Takahashi, "Pacific plate motion detected by the VLBI experiments conducted in 1984-1985", J. Radio Res. Lab., 34, 1-14, 1987.
- (5) K. Heki, Y. Takahashi, T. Kondo, N. Kawaguchi, F. Takahashi and N. Kawano, "The relative movement of the North American and Pacific plates in 1984-1985, detected by the Pacific VLBI network", Tectonophysics, 144, 151-158, 1987.
- (6) C. Ma, J.W. Ryan, D.Gordon, D.S. Caprette, and W.E. Himwich, "Reference frames from CDP VLBI data", Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics Geodynamics 24, pp.121-145, 1993.
- (7) Special Issue of the CRL Journal on "Western Pacific VLBI Network", J. Commun. Res. Lab., 42, 1, pp.3-110, 1995.
- (8) 首都圏広域地殻変動観測システム特集号、通信総研季、42, 1, 1996.
- (9) Key Stone Project -Crustal deformation monitoring system around the Tokyo Metropolitan area-, J. Commun. Res. Lab., 46, Special Issue 1, 1999.
- (10) Y. Koyama, N. Kurihara, T. Kondo, M. Sekido, Y. Takahashi, H. Kiuchi, and K. Heki, "Automated geodetic Very Long Baseline Interferometry observation and data analysis system", Earth, Planets and Space, 50, 709-722, 1998.
- (11) H. Kiuchi, M. Imae, T. Kondo, M. Sekido, S. Hama, T. Hoshino, H. Uose, and T. Yamamoto, "Real-time VLBI system using ATM network", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol.38, pp.1290-1297, 2000.
- (12) 木股, 田部井, "GPS 観測による神津・新島周辺の地殻変動とテクトニクス", 月刊地球, Vol.22, No.12, pp.837-846, 2000.
- (13) K. Heki, "Direct measurement of plate motion", J. Commun. Res. Lab., 38, 3, pp.521-531, 1991.
- (14) T. Yoshino, S. Hama, T. Shiomi, J. Campbell, H. Cloppenburg, H. Schuh, and R. Kilger, "First VLBI experiments between Kashima and Wettzell for monitoring UT1", Adv. Space Res. Vol.6, No.9, pp.13-16, 1986.
- (15) T. Yoshino, "International VLBI experiments between 1984 and 1990", J. Commun. Res. Lab., 38, 3, pp.513-520, 1991.
- (16) S. Hama, H. Kiuchi, Y. Takahashi, J. Amagai, and T. Yoshino, "Japan-U.S. time comparison experiment for realizing better than 1-ns accuracy by using a radio interferometric technique", IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol.38, pp.640-643, 1989.
- (17) G.S. Levy, R.P. Linfield, C.D. Edwards, J.S. Ulvestad, J.F. Jordan, Jr., S.J. DiNardo, C.S. Christensen, R.A. Preston, L.J. Skjerve, L.R. Stavert, B.F. Burke, A.R. Whitney, R.J. Cappallo, A.E.E. Rogers, K.B. Blaney, M.J. Maher, C.H. Ottenhoff, D.L. Jauncey, W.L. Peters, J. Reynolds, T. Nishimura, T. Hayashi, T. Takano, T. Yamada, H. Hirabayashi, M. Morimoto, M. Inoue, T. Shiomi, N. Kawaguchi, H. Kunimori, M. Tokumaru, and F. Takahashi, "VLBI using a telescope in earth orbit. I. The observations", Astrophys. J., 336, 1098-1104, 1989.

- (18) H. Hirabayashi, "The VSOP mission – A new era for VLBI, Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources", ASP Conference Series, Volume 144, IAU Colloquium 164, eds. J.A. Zensus, G.B. Taylor, and J.M. Wrobel, p.11, 1998.
- (19) H. Kiuchi, S. Hama, J. Amagai, T. Yoshino, and M. Imae, "A highly stable crystal oscillator applied to the VLBI reference clock", IEEE-IM, Vol.45, No.1, Feb. 1996.
- (20) N. Kurihara, T. Kondo, Y. Takahashi, and M. Ejiri, "The results of test VLBI experiments with the Syowa station in Antarctica", J. Commun. Res. Lab., **38**, 3, pp.605-611, 1991.
- (21) K. Heki, Y. Koyama, N. Kawaguchi, J. Amagai, H. Kuroiwa, S. Hama, Z.H. Qian, S.H. Ye, L.D. Wu, D.M. Hua, S.D. Xu, M. Imae, N. Kurihara, Y. Sugimoto, T. Yoshino, F. Takahashi, H. Kiuchi, Y. Takahashi, H. Takaba, T. Iwata, Y. Hanado, M. Sekido, T. Kondo, and A. Kaneko, "Movement of the Shanghai station: Implication for the tectonics od eastern Asia", J. Commun. Res. Lab., **42**, 1, pp.65-72, 1995.
- (22) K. Heki, "Horizontal and vertical crustal movements from three-dimensional very long baseline interferometry kinematic reference frame: Implication for the reversal timescale revision", J. Geophys. Res., Vol.101, B2, pp.3187-3198, 1996.
- (23) T. Iwata, J. Nakajima, M. Sekido, Y. Takahashi, K. Heki, M. Imae, Y.S. Dong, B. Deng, Z.H. Qian, and R.X. Zhou, "Short report of the experiments with the Urumqi VLBI station, western China", J. Commun. Res. Lab., **42**, 1, pp.81-84, 1995.
- (24) H. Kiuchi, and T. Kondo, "The Wavefront Clock Technique Applied to Current VLBI Systems", Publ. of the Astronomical Society of Japan, Vol.48, pp.137-146, 1996.
- (25) H. Kiuchi, T. Kondo, J. Popelar, "International VLBI experiment using the wave-front clock technique", J. Commun. Res. Lab., **38**, 3, pp.577-604, 1991.
- (26) Y. Takahashi, H. Kiuchi, N. Kurihara, G. Grueff, and R. Ambrosini, "The first geodetic VLBI experiment at 22 GHz between Japan and Italy", Astronomy and Astrophysics, Vol.282, pp.341-348, 1994.
- (27) K. Yokoyama, S. Manabe, T. Hara, T. Yoshino, and Y. Takahashi, "The earth rotation parameters determined with the new IRIS-P VLBI network", Vistas in Astronomy, Vol.31, pp.657-662, 1988.
- (28) T. Yoshino, Y. Takahashi, N. Kawaguchi, K. Heki, K. Koyama, and S. Manabe, "Intercomparison of the Earth rotation parameters determined by two different independent VLBI networks", Astron. Astrophys., Vol.224, pp.316-320, 1989.

