

わが国における超高精度 VLBI 実験の概要とその成果

高橋 幸雄*・高橋 富士信**

1. はじめに

VLBI (Very Long Baseline Interferometry; 長基線干渉計) は、測地、天文、地球物理の各分野で飛躍的な精度の向上をもたらした。現在、この装置による計測結果は、精度 10^{-9} (約 10000 km の局の間で距離の誤差約 3 cm) にも達し、広範囲な分野に応用され始めている。例えば、プレート運動及び地殻変動の測定、国際精密時刻比較、地球回転の精密測定、電波源構造の解明、人工天体の精密軌道決定などに応用されている。

郵政省電波研究所は、1979 年から 5 カ年をかけ、K-3 型 VLBI システムを開発してきた (川口, 杉本, 天文月報参照)。本稿では、このシステムを用いて行った VLBI 実験とその結果について紹介する。

2. 日米 VLBI 共同実験

電波研究所は、地殻力学プロジェクト (Crustal Dynamics Project) に参加し、米国防空宇宙局 (NASA) と協力して、1984 年以降 VLBI 共同実験を行っている。この実験の主たる目的は、大地震の長期的予知に役立てるため、大地震のエネルギー源と考えられているプレート運動を実測することである。その他に、極運動・地球回転の精密測定を目的としている。

1984 年 1, 2 月の 2 回にわたり、初の VLBI システムレベル実験 (SLE と略す) を行い、鹿島とモハービ局 (カルフォルニア) との距離を 2 cm という極めて小さい誤差で推定し、K-3 型 VLBI システムの総合的な機能の確認を行った。

このシステムレベル実験の成功に基いて、1984 年 7~9 月に、第 1 回日米 VLBI 本実験を行い、日本列島の位置や、プレートをまたぐいくつかの局の間の距離 (基線長) を精密に測定することに成功した。

この実験は、大きく 2 つに分れている。ひとつは、太平洋プレートと北米プレートの相対運動の測定を目的として、1 週間をおいて 2 回にわたり 56 時間観測を行った西太平洋 (WPAC) 実験である。もうひとつは、地球の自転軸の方向や自転速度 (地球回転パラメータ; EOP; Earth Orientation Parameters) の測定を目的として、北極を囲む局配置で行なわれた極 (POLAR) 実験である。表 1 に主な参加局を示す。

表 1 日米共同実験に参加した局

実 験	WPAC	POLAR	SLE
ユーラシアプレート ウェツェル (西独) オンサラ (スエ)		○ ○	
鹿島 (日)	○	○	○
北米プレート フェアバンクス (米) モハービ ヘイスタック ハットクリーク	○ ○ ○	○ ○	○ ○
太平洋プレート カウアイ (ハワイ) クワジェリン (マーシャル群島)	○ ○		

ここで、VLBI の解析方法について、簡単に触れておくことにしよう。

受信信号を記録した観測テープを持ち寄り、米国または電波研究所鹿島支所で、数週間から数カ月をかけて相関処理を行い、受信信号の到達時間差である観測遅延時間とその時間変化 (O) を求める。この観測値に対して、ある一定量の不確定差を補正した上で、誤差が大きくて信頼できないデータを除いておく。さらに、Sバンド (2 GHz 帯)、Xバンド (8 GHz 帯) の 2 周波における観測値から電離層補正を行う。以上が観測値に対する補正である。

一方、遅延時間に関与する物理効果をあらかじめ考慮し、理論的予測遅延時間とその時間変化 (C) を、大規模なソフトウェアを用いて超高精度に計算しておく。もし予測値が全く正しいならば、O-C は観測誤差の範囲内でゼロとなるはずであるが、実際には、局位置、EOP、大気中の伝搬遅延、電波源位置などが正しくないため、O-C は観測誤差の範囲内でゼロとならない。そこで、O-C ができるだけゼロに近づくように、局位置、時刻差、EOP などを最小 2 乗法で決定するのである。パラメータの決定精度は、最小 2 乗後の残差から求められる。このつじつまあわせのゲームが VLBI の解析方法である。この推定方法では、予測値が実際の数値のごく近傍にあること (線形近似) や、推定されない物理効果の予測誤差が極めて小さいことなどが必要となる。そのため、われわれの予測値計算のためのソフトウェアには、

* 郵政省電波研・鹿島 Yukio Takahashi

** 郵政省電波研 Fujinobu Takahashi: Overview and Results of High Precision VLBI Experiments

ウォールの章動モデル, マリーニの大気伝搬モデル, ヨーダの UT 1 潮汐補正など最新の物理モデルが用いられている。この物理モデルソフトウェアは、文部省緯度観測所の協力を得て作成された。

日米 VLBI 実験の解析を行って得られた主要な結果は次のとおりである。

① 観測局間の距離を誤差 3 cm で推定することができた (表 2)。

② 鹿島の直交座標上の位置を誤差 20 cm 以下で決定し、日本測地座標系 (日本測地準拠楕円体) と VLBI 世界座標系とを結びつけた。この結果得られた、鹿島的位置における両者のずれは、 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (-145.54 \text{ m}, 506.90 \text{ m}, 681.55 \text{ m})$ である。なお、ここで用いた EOP は、IRIS (International Radio Interferometric Surveying) データで、電波源カタログは、米国国立測地調査所 (NGS) グループ作成のカタログである。また、日本測地座標系での鹿島的位置は、国土地理院の測量結果を用いた (表 3 参照)。

日米共同実験は、測地ばかりでなく天文学的な成果も得られつつある。

まず、電波源構造の解明が挙げられる。電波源が構造をもつことにより、VLBI の干渉パターンが生じるため、相関強度や観測遅延時間が基線ベクトルの回転に伴って変化する。そこで逆に、これらの変化から電波源構造を求めることができる。現在、電波研究所では、Triangulated Net Amplitude (TNA) という新しい物理量を用いた天体電波源構造の解析が行われつつある。この方法では、非常によく校正された基準局 (たとえば鹿島局) があれば、電波源構造、電波源の相対強度、受信系のコ

ヒーレンスロスなどを同時解析することができる。図 1 に、この TNA 法を用いて求めた電波源の構造を示す。

また、測地 VLBI に用いられる電波源は数億光年以上も離れた準星であり、その方向はほとんど動かないと考えると良い。これらの準星は、地球の動きや我々の銀河の動きに対する非常に良い基準系となる。現在、NASA のゴダード宇宙飛行センター (GSFC)、米国国立測地調査所 (NGS) およびジェット推進研究所 (JPL) の 3 つのグループが、それぞれの観測網で数年間行ってきた VLBI 観測により、それぞれ独自の電波源の位置カタログを作っているが、これらのカタログ間の差は、数ミリ秒角ある。鹿島が参加した実験などの蓄積により、われわれも電波源カタログへの寄与を行いたいと考えている。

VLBI データは、上述した天文分野だけでなく、EOP の精密測定により、地球物理の分野にも多大な寄与をもたらしている。現在、VLBI では、IRIS が、5 日毎の定常観測を行い、最も信頼のおける EOP データを出していると考えられている。この IRIS データが正しければ、推定された各局の位置は実験毎には変わらないはずである

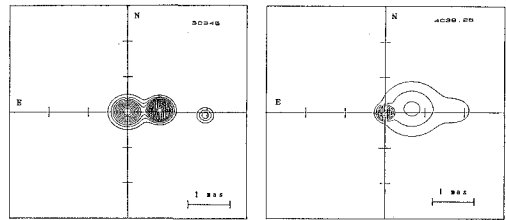


図 1 TNA 法により求められた電波源構造 (電波研究所 鹿島支所川口・国森西氏の計算による)

表 2 西太平洋実験に参加した局の間の距離 (単位: m)

基 線	鹿 島	GSFC	NGS	平 均
MOJ-KAS	8091824.13±0.04	8091824.14	8091824.18±0.04	8091824.15±0.03
MOJ-KAU	4303581.24±0.02	4303581.20	4303581.22±0.03	4303581.22±0.02
MOJ-KWA	7576983.57±0.06	7576983.55	7576983.60±0.05	7576983.57±0.03
MOJ-GIL	3816209.19±0.02	3816209.19	3816209.18±0.02	3816209.19±0.01
KAS-KAU	5709360.48±0.04	5709360.46	5709360.49±0.02	5709360.48±0.02
KAS-KWA	3936330.78±0.04	3936330.78	3936330.73±0.02	3936330.76±0.03
KAS-GIL	5427104.40±0.02	5427104.38	5427104.40±0.02	5427104.39±0.01
KAU-KWA	3725196.31±0.04	3725196.29	3725196.30±0.05	3725196.30±0.01
KAU-GIL	4728114.79±0.03	4728114.76	4728114.71±0.06	4728114.75±0.04
KWA-GIL	6719676.67±0.08	6719676.62	6719676.59±0.04	6719676.63±0.03

MOJ ; モハービ局 (カルフォルニア) KAS; 鹿島局 (日) KAU; カウアイ局 (ハワイ)
 KWA; クワジェリン局 (マーシャル群島) GIL; ギルモアクリーク局 (アラスカ)
 GSFC; ゴダード宇宙飛行センター解析グループから送られてきた局位置から計算 (1985 年)
 鹿島 ; 鹿島での解析結果 (WPAC, POLAR, SLE 実験の平均値) 1985 年 8 月現在
 NGS ; IRIS BULLETIN A No. 17 July, 1985 における解析結果
 平均 ; 鹿島, GSFC, NGS の解析結果の平均値。誤差は、3 つの結果の標準偏差値

表 3 鹿島・国土地理院 (GSI) の位置と基線ベクトル

座 標 系		地上測量値 (日本測地座標系)	地上測量値からの VLBI 座標系変換値 (VLBI 予測値)	VLBI 解析結果±誤差	VLBI 解析結果 -VLBI 予測値
		ベッセル座標系	V L B I 座 標 系		
鹿 島	X	-3997745.04 m	-3997894.93 m	-3997890.58±0.16 m	4.35 m
	Y	3276073.48 m	3276580.09 m	3276580.38±0.03 m	0.29 m
	Z	3723437.25 m	3724115.46 m	3724118.80±0.15 m	3.34 m
国土地理院 (筑波)	X	-3957025.58 m	-3957175.54 m	-3957171.24±0.17 m	4.30 m
	Y	3309729.85 m	3310236.57 m	3310237.04±0.05 m	0.47 m
	Z	3737028.76 m	3737706.98 m	3737709.54±0.16 m	2.56 m
筑 波 — 鹿 島	X	40719.46 m	40719.39±0.14 m	40719.34±0.05 m	-0.05 m
	Y	33656.37 m	33656.48±0.13 m	33656.66±0.04 m	0.18 m
	Z	13591.51 m	13591.52±0.21 m	13590.74±0.05 m	-0.78 m
基 線 長	L	54548.64 m	54548.66±0.10 m	54548.55±0.01 m	-0.11 m

鹿島の位置 (VLBI 結果) は日米共同実験の鹿島解析結果 (IRIS データ使用); 1985 年 8 月現在の結果
 筑波の位置 (VLBI 結果) は (鹿島の位置)+(筑波-鹿島基線ベクトル)
 筑波-鹿島基線ベクトル, 基線長 (VLBI 結果) は国土地理院実験(1984 年 7 月)の結果
 地上測量結果 (ベッセル座標系) は, 国土地理院の測量結果
 地上測量結果 (VLBI 座標系) は, 地上測量結果 (ベッセル座標系) の変換値
 尚, VLBI 結果はヘイスタックの位置を基準とする。

が, 今回の解析では約 5000 km の基線で約 20 cm 程度のばらつきがみられた。この事実は, IRIS による EOP のデータには約 1 ミリ秒角の誤差があることを示している。このような IRIS データの信頼度を, 今回行われた日米実験により評価したいと考えている。同時に, 今回精密に決定された各局の位置を用いて, EOP の日変化についての検討も予定している。

最後に 1985 年以降に行われる日米実験と期待される成果について述べる。1985 年には, 西太平洋実験及び極実験を夏期に昨年と同等又は, それ以上に行なっている。また, 1986 年以降も同様な実験を繰り返す行い, 特に太平洋プレートと北米プレートの相対運動の測定を行っていく。図 2 に, 各基線長の変化の予測値を示す。特に鹿島-ハワイ基線長は年に約 8 cm 縮むものと予想され, 大きな変化を示すであろう。1984 年の観測では, この基線長は, 3 cm 精度で推定されているので, プレート運動の実測が大いに期待される。

3. 国土地理院 (GIS) 実験

電波研究所と国土地理院とは, 国内精密測地共同実験を計画している。国土地理院は K-3 型 VLBI システムを既に整備し, 5 m アンテナを持つ VLBI システムを完成させた。システムの総合的な試験のため, 今後行う本格実験にさきがけ, 1984 年 7 月に 27 時間にわたり鹿島-筑波基線 (約 55 km) による実験を行った。

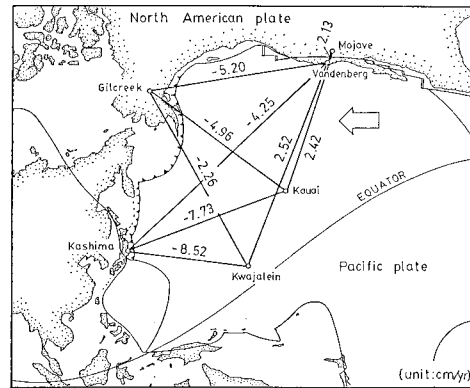


図 2 西太平洋実験に参加した局の間の距離の年変化の予測値 (単位: cm/year)
 Minster & Jordan 1978 の理論値に基づく電波研究所鹿島支所日置氏の計算値。正の値が伸張, 負の値が短縮を示す。北米プレートから見て太平洋プレートは矢印の方向に動く。

この実験を処理解析した結果, 決定された基線長と, 地上測量による基線長との差は, わずか 11 cm であった。これは地上測量の測定誤差の範囲内と考えられ, 実験は成功し, 両者の VLBI システムが国内精密測地に充分応用できることが明らかになった。(表 3 参照)

ここで用いた地上測量値は, 国土地理院が測量したベッセル座標系での緯度, 経度, ジオイド面 (平均海面) からの高さを, ベッセル楕円体に投影したものである。

このとき、各局のジオイド高（楕円体からのジオイド面の高さ）が必要となり、筑波で 1.5 m、鹿島で -0.5 m とした。このジオイド高の誤差は、約 1 m 程度あるが、この誤差による基線長への誤差は 1 cm 以下と小さい。

日本測地座標系（ベッセル座標系）での位置 (x, y, z) は、次の式により VLBI 座標系に変換され、VLBI 解析結果と比較される。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (1 + 0.3263 \times 10^{-6}) R_z(-0.54'') \begin{bmatrix} x - 140 \\ y + 516 \\ z + 677 \end{bmatrix}$$

ここで、 $R_z(-0.54'')$ は、 Z 軸まわりに $-0.54''$ 座標系を回転することを示す行列である。

一方、同時に行われたポータブルクロック (PC) による時刻比較と、VLBI のクロックの推定結果とは、約 10 ns で一致した。

以上のことから、2 局の装置は精密測地 VLBI 実験に使用できることが確認され、今後の本格実験への大きなステップを踏み出した。

4. 国際精密時刻比較実験

日本を含むアジア地域は、従来から定常的な精密時刻比較という点で、国際的な標準時計がある欧米地域との結びつきが弱かった。現在、年 1 回程度のポータブルクロックとアジア地域のロラン C で定常的な時刻比較が行われているが、精度は数百 ns 程度である。

電波研究所は、米国海軍天文台 (USNO) と協力して、リッチモンド局、メリーランド局との間に、VLBI による国際精密時刻比較実験を開始した。昨年 10 月に初の国際精密時刻比較試験を行い、12 月に 24 時間実験を行った。その後、今年 4 月から毎月 1 回の定常実験段階に入った。12 月実験では、リッチモンド-鹿島基線ベクトルが推定され、日米共同実験の結果などから得られた

ものと、約 10 cm の差で一致した。このことで、位置は約 10 cm の誤差として扱えることが確認された。

4 月以降の定常実験は、8 観測 4.5 時間の同一スケジュールで行っている。この実験では、時刻差とその変化の推定のみを目的としているので、その他の物理量（例えば局位置、EOP、大気伝搬遅延等）は、あらかじめ与えられた数値を用いている。これら物理量の誤差に起因する推定された時刻差の誤差は、約 1.0 ns と見積もられている。

VLBI 局間の時刻差を、VLBI 実験と同時に行われた GPS (全世界測位衛星システム) と PC またはロラン C を用いた場合と、VLBI を用いた場合とで比較した結果を表 4 に示す。すべての実験で、誤差範囲内で一致した。

このように超高精度に決定されるのは、VLBI 局の時計どうしの時刻差であり、VLBI 局の時計と、各国の標準時計との時刻比較の精度の向上に努力し、精度 1 ns 以下の国際的な国家標準時刻の精密比較に進みたいと考えている。

5. 野辺山との共同実験

東京天文台野辺山宇宙電波観測所と鹿島局とは、1984 年 12 月と 1985 年 3 月に、電波源の偏波特性及び電波源構造の解明を目的として共同実験を行った。8 GHz 帯の右旋円偏波、左旋円偏波を交互に切り換えながら、いくつかの電波源を観測した。この実験に派生して、野辺山局の位置が、鹿島局の位置を仲介にして高精度に推定された。また、鹿島 26 m と野辺山 45 m という大口径アンテナを使用した実験であるので、システム雑音を低くすることができ、大気のゆらぎの VLBI への影響の検討をするのに適している。その結果、大気のゆらぎによる観測遅延への誤差は、仰角 30° 換算で 70 ps にも達すること、また、季節にはほとんど影響しないことがわか

表 4 鹿島の時計とリッチモンド局の時計との差

実 験	ク ロ ッ ク オ フ セ ッ ト			ク ロ ッ ク レ ー ト	
	VLBI	*GPS (ロラン C または PC 介在)	差	VLBI	*GPS
'83 12 月実験	6096.0 ± 0.2	6063 ± 100	52	1.22	1.30
'84 4 月実験	7648.0 ± 0.2	7643 ± 100	-4	-3.37	—
'84 6 月実験	9929.9 ± 0.4	9979 ± 100	50	0.48	—

単位 : クロックオフセット (ns)、クロックレート (ps/s)

* GPS: GPS による電波研と USNO のマスタークロック間の差 (誤差 20 ns) に鹿島と電波研のマスタークロックとの差と、リッチモンドと USNO のマスタークロックとの差とを補正したもの。この見積もり誤差は、主にリッチモンドと USNO のマスタークロックとの比較誤差によるものである。

VLBI : VLBI の推定値に予測局内遅延を補正したもの。誤差は、VLBI の推定誤差

った。大気のゆらぎによる誤差は、相関処理から求められる遅延決定誤差に比べて数倍も大きな量であり、解析誤差(約0.1 ns)とのくいちがいの大部分は、この誤差によるものと考えられる。

6. 計画中の実験

上述した実験以外に、今年9月に日中共同実験の予備テスト、11月に日独共同実験を計画している。日中実験の予備テストは、日中科学技術協力協定に基づき、上海天文台(6mアンテナ)に8GHz帯受信器を含むK-3型VLBIシステム一式を送り、鹿島局との間でVLBI実験を行うものである。この実験の主な目的は、日本と中国との間の距離をVLBIで精密に結び、その変化を監視することで日本列島周辺のプレート境界を明らかにすることである。その他、日中間の精密時刻比較も予定されている。

また、日独実験は、約1週間にわたり毎日6時間毎の実験を行う。この実験の目的は、測地VLBI実験にとって、重要な未知物理量であるEOPの連続的な変化を測定することである。現在、世界的には、5日おきのIRISネットワークで観測が強化されているが、EOPの変動は不規則であり、短周期変化(1日毎)についても興味をもたれている。この実験により短周期の変動を測定

し、測地VLBIや地球物理に寄与したいと考えている。

7. VLBI 実験の将来計画

1984年から始まった日米VLBI共同実験5カ年計画については多方面より、大きな期待が寄せられている。一方、VLBI技術をより生かすためには、データの蓄積が必要である。例えば歳差定数・章動の測定、電波源カタログ、プレートの微細な変化、EOPの精密な測定などがあげられる。こうした背景により、日米5カ年計画以後も共同実験を継続することを、われわれは強く希望している。また、国内的にも、小型可搬局の開発が強く要請されているし、広域地殻変動の測定など国民生活に切実な分野において、GPS、レーザ測距装置などと相補的な関係でVLBIを生かしていきたいと考えている。

8. おわりに

日米共同実験や、日独実験、日中実験、対国土地理院実験、対野辺山実験など国際的にも、国内的にも幅広く、電波研究所が関係するVLBI実験が行われている。1984年の第1回日米VLBI共同実験で得られた基線長を表紙に示す。これが、1985年以降に、どのように変化しているか、また果たして太平洋プレート運動が検出されるであろうか乞う御期待!

天体観測雑誌

天文ガイド

12月号 定価420円⁷⁵ 11月5日発売

日食、月食、火星の大接近、ハレー彗星、水星の月面経過など
気になる1986年の天文現象

西城恵一さんの解説

変光星の新分類法

ハレー彗星の動きにあわせてガイド

メトカーフ法の極意

沼沢茂美さんの作品集

300mm F4 望遠レンズで迫る天体写真

- 新しい望遠鏡光学系 ●12月の星空
- 天文学とコンピュータ…など情報満載

いよいよハレー彗星の第1次接近、ハレーフィーバーは高まるばかり。明るくなるか、暗いままか、アマチュアの間でも盛んに議論されています。一体どうなるでしょう。

切りぬく本

ハレー彗星観測ガイド

15cmドブソニアン実寸大型紙
簡易天体写真撮影儀実寸大型紙

- ハレー彗星高度早見
- ハレー彗星観測日誌
- ハレー彗星用星座早見
- ハレー彗星出没早見
- ……ほか



その他、眼視、双眼鏡、望遠鏡での観測の仕方や、出没図など最新情報を満載! 収録の型紙どうりに板や紙を切れば、オリジナルの望遠鏡や星座早見ができます。これで観測準備はOK!

キク倍判・56ページ
好評発売中 定価690円

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128