

新十津川VLBI観測施設の整備について

VLBI Observation System installed in Shintotukawa Site

測地部 齊藤 隆・福崎順洋・石原 操・飛田幹男・雨宮秀雄・
川原敏雄・根本正美・谷澤 勝

Geodetic Department

Takashi SAITO, Yoshihiro FUKUZAKI, Misao ISHIHARA,
Mikio TOBITA, Hideo AMEMIYA, Toshio KAWAHARA,
Masami NEMOTO, Masaru YAZAWA

要旨

国土地理院では昭和61年度から、プレート運動や海面変動の観測等を目的として、可搬型VLBI装置による超長基線測量を実施してきたが、平成5年度補正予算により、北海道新十津川町に固定のVLBI観測施設を整備し、平成7年度から運用を開始した。

この施設は、直径3.8mのパラボラアンテナ、K-4型VLBIシステム、水素メーザ周波数標準装置、遠隔自動監視・制御装置等から構成される。

また、これにあわせて鹿島局の改修も実施した。鹿島-新十津川基線のVLBI観測は平成7年6月に行われ、良好なフリンジが検出されている。今後定期的に観測を実施する予定である。

1. はじめに

国土地理院は、図-1に示す各観測点で超長基線測量を実施してきた。これは、日本とその周辺のプレート運動の観測、海面変動観測の高精度化に必要な験潮場の位置変動の監視、GPS衛星軌道追跡局（新十津川、つくば、父島、鹿屋）の位置変動の監視、我が国の測地網・電子基準点網の規正等を目的とするものである。

また、鹿島局の26mアンテナでは、全地球的なプレート運動の監視、海水面変動の観測、国際地球基準系の構築等を目的として、NASAとの共同研究により、国際超長基線測量を行っている。

平成5年度補正予算において、超長基線測量の重要性から、固定観測点の整備が認められた。全国の観測点の内、北海道南西沖地震等地震活動が活発となっているこ



図-1 国土地理院のVLBI観測点

とを考慮し、北海道新十津川町のVLBI観測点の固定化を実施した。あわせて、主局である鹿島局の改修等も行った。

新十津川VLBI観測点は、観測時以外でも無人状態で水素メーザ周波数標準装置が稼働していることから、その状況の把握のため、つくば市の国土地理院から常時モニターできるシステムとした。

施設の整備は平成6年度に終了し、その後の調整・試験観測を終え、平成7年6月7日に開所式を行った。それとともに鹿島局、つくば局との間で24時間VLBI観測を実施した。

本稿では、新十津川局の概要、特に3.8mアンテナと水素メーザ遠隔自動監視制御装置について報告するとともに、国土地理院の今後の超長基線測量について紹介する。

2. 新十津川における超長基線測量

超長基線測量とは、通常数百km以上離れた観測点間の相互の測地座標差を測定するもので、超長基線電波干渉法(VLBI: Very Long Baseline Interferometry)を用いて実施される。

VLBIは、クエーサーと呼ばれる電波天体からの電波を各観測点が独立に受信し、高精度な時刻信号と同時に記録して、互いにその受信時刻を比較することによって、観測点相互の位置関係を求めるものである。観測は各観測点で同期して実施されるが、機能的には独立して行われるため、事実上は観測距離に制限が無く、長距離の観測に適している。VLBIは1980年代から実用的な観測が開始され、最近までの観測で、固定観測局では数mm、移動観測点でも1~2cm程度の観測精度が得られている。

VLBIが実用化するまでは、数百キロから千キロ程度の距離での位置観測は、天文測量や人工衛星ドップラー観測を用いていたが、それらの精度は数10cmから数mであり、VLBIは観測精度を2~3桁向上させたことになる。

新十津川人工衛星重力観測室は、人工衛星観測及び重力測量を目的として設置されたもので、鹿野山測地観測所等とともに観測することにより、日本列島を縦断する基線の測定を行っていた。

新十津川におけるVLBI観測は、平成2年度に5mアンテナを持つ可搬型VLBI装置(写真-1)を用いて鹿島局(写真-2: 当時は郵政省通信総合研究所所有)との間で行われ、新十津川VLBI観測点金属標と鹿島26mアンテナ中心との間の基線ベクトルとして以下の観測値を得ている。

$$X = 355750.423\text{m}$$

$$Y = -415086.455\text{m}$$

$$Z = 646240.655\text{m}$$

$$D = 846452.664\text{m}$$

但し、X, Y, Z: 各方向の成分

D: 基線長

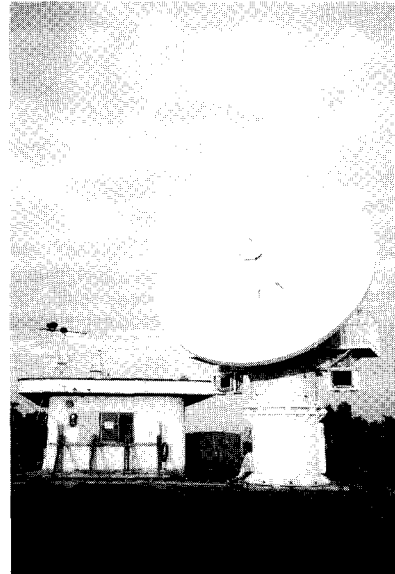


写真-1



写真-2

また、現在はGPS衛星軌道追跡局も併置され、VLBIでの観測成果を基礎として、GPS衛星軌道の決定に必要なデータの取得を実施しており、GPS測量の高精度化にとって重要な役割を果たしている。

3. 新十津川局のVLBIシステム

(1) 概要

新十津川人工衛星重力観測室の平面図を図-2に示す。

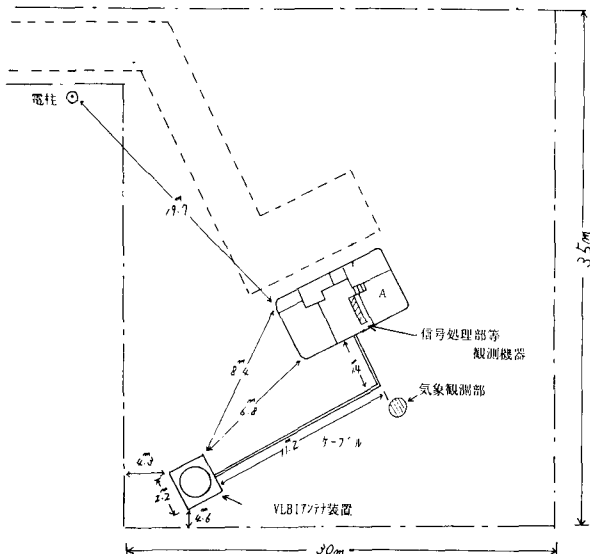


図-2 新十津川人工衛星重力観測室

図-2でAと示した部屋は、かつて写真赤道儀等による人工衛星観測を行っていた部屋であるが、ここに十分な温度管理を行った上で、水素メーザ周波数標準装置及びセシウム原子時計を含む遠隔自動監視制御装置を設

置、中央にはK-4型VLBIシステム、データレコーダ、コンピュータ等の観測装置本体を設置している。また、遠隔地での運用に備え、水素メーザ周波数標準装置用の無停電装置も48時間分が設置されている。

外部には、移動観測時に使用した基台をそのまま利用して、その上に新しい3.8mアンテナが設置されており、近傍に気象観測装置、時刻保持用のGPSのアンテナが設置されている。

図-3に今回整備したVLBI装置のシステムブロック図を示す。

システムは、2 GHz帯（Sバンド）と8 GHz帯（Xバンド）のホーンから周波数変換器までのアンテナ及びフロントエンド部（局舎外に設置）と、それ以降のバックエンド部（局舎内に設置）、及び周波数標準装置等から構成される。

(2) アンテナ及びフロントエンド

アンテナは今回新たに設計したもので、同時に製作した移動局用アンテナと基本的に同一の主反射鏡の直径3.8mのカセグレンアンテナである。概観を写真-3及び図-4に、主な性能を表-1に示す。

今回のアンテナの仕様を決定するに当たり、最も基本においたことは、運用及び保守管理の容易さ、現用5mアンテナと鹿島26mアンテナとの観測による精度と同等の精度を、鹿島26mアンテナを相手として得られることであった。また、敷地の制限や経費の軽減のため、移動型アンテナと同一の小型アンテナを用いることとした。

小型VLBIアンテナについては、郵政省通信総合研究

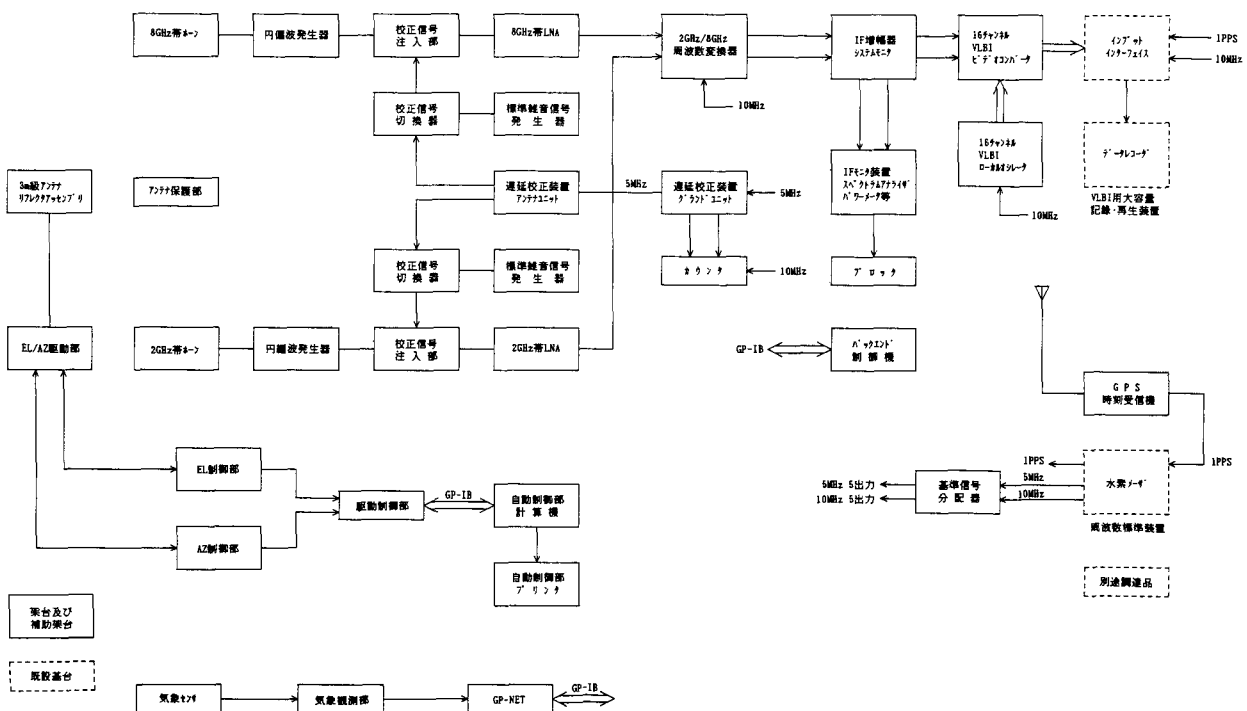


図-3 VLBIシステムブロック



写真-3

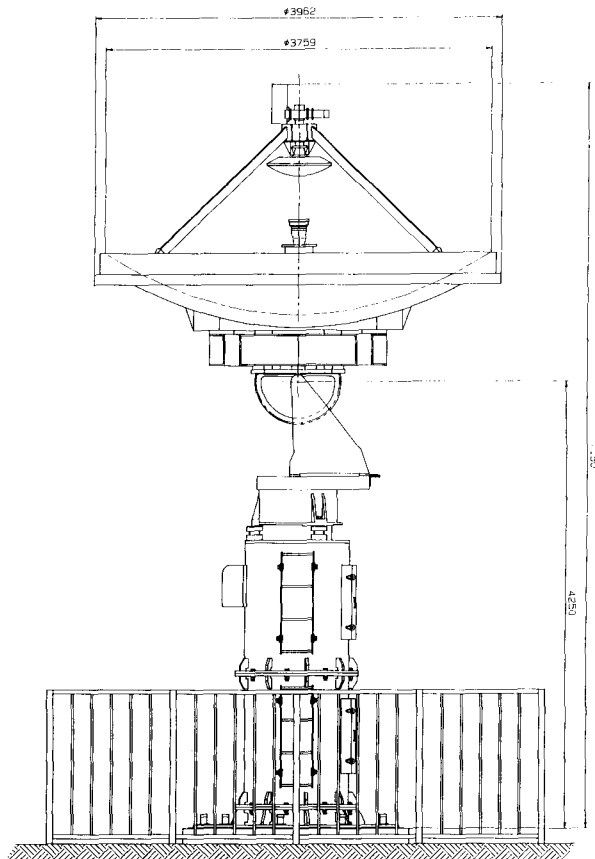


図-4 アンテナ概観図

所と共同で直径2.4mのものを試作し、鹿野山及び礪波等で実験観測を行っているが、これはXバンドのみのシステムであり、電離層補正を別途考慮する必要がある。1000km程度以上の基線長での観測を精度良く実施しようとするれば、観測時における観測方向の電離層による伝

表-1 3.8mアンテナの主な性能

	S	X
アンテナ方式	パラボラ (一次焦点)	パラボラ (カセグレン)
主鏡直径	3.759m (鏡面部), 3.962m (最外部)	
副鏡直径	0.610m	
主鏡開口角	65.9度	
副鏡開口角	23.0度	
主鏡面精度	0.5mm rms	
アンテナ利得	36.26dB (2.33GHz)	47.69dB (8.38GHz)
架台方式	EL over AZ	
交点精度	0.203mm	
交角精度	0.005度	
駆動速度	2.90度/秒 (AZ), 1.0度/秒 (EL)	
駆動範囲	-372.6 ~ +371.6度 (AZ) -2.0 ~ +92.1度 (EL)	
周波数帯域	2210~2450MHz	8180~8980MHz
受信機利得	53.2dB	53.99dB
受信機 等価雑音温度	41.9K (2.33MHz)	54.7K (8.58MHz)
システム 等価雑音温度	140.86K	108.88K
システムG/T	14.77	27.32

搬遅延補正を精度良く行うことが不可欠である。そのため、今回のシステムでは従来方式と同じXバンド、Sバンドの2波長観測を実施可能とすることとした。小型システムに2波長観測システムを設置するため、波長選択性を持つ副反射鏡を用いて、Xバンドは副反射鏡で反射しカセグレン焦点で受信、Sバンドは副反射鏡を透過し、主反射鏡パラボラの一次焦点で受信することとした。これにより、主鏡背面の機器室が小型化され、システムの小型軽量化に大きく寄与することができた。

電波受信システムの性能は、システム全体の利得(G)をシステム全体の雑音温度(T)で割ったものであるシステムG/Tが指標となる。両アンテナのシステムG/T及び観測する電波源からのフラックス等から、次式によってVLBIによる相関強度のS/Nが決定される。

$$R_{SN} = \frac{\eta \cdot S_{flux} \cdot \sqrt{(G/T)_1} \cdot \sqrt{(G/T)_2} \cdot \lambda^2 \cdot \sqrt{(2Bt)}}{8\pi k} \quad (1)$$

ここで、 R_{SN} は相関強度のS/N、 η はコヒーレンスロス、 S_{flux} は電波星のフラックス、 $(G/T)_1$ 及び $(G/T)_2$ は各アンテナのシステムG/T、 λ は電波の波長、Bは各チャンネルの帯域幅、tはチャンネル数、kはボルツマン定数、 π は円周率である。

また、測位精度はS/Nから次式で計算できる。

$$\sigma_H = \frac{c}{\pi \cdot R_{SN} \cdot \Delta f_{rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

$$\sigma_v = \frac{4c}{\pi \cdot R_{SN} \cdot \Delta f_{rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

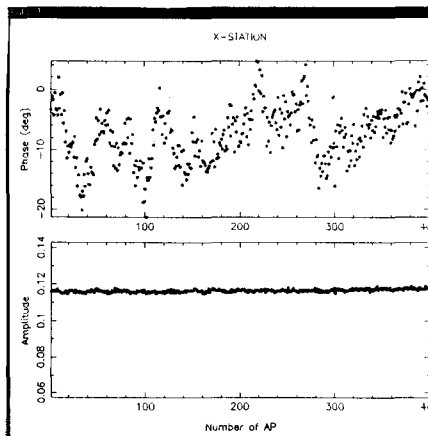
ここで、 σ_H 、 σ_v はそれぞれ水平方向、垂直方向の測位精度、 c は光速、 Δf_{rms} は実効帯域幅、 n は観測する星の数である。

一般的な値を用いて試算すると、ミリメートルオーダーの観測精度を可能とするためには、 S/N が8以上が望ましい。鹿島26mアンテナの性能を前提とすれば、新十津川局が必要とする G/T は、Xバンドで25dB程度、Sバンドで14dB程度となる。

G を決定する大きな要因であるアンテナの大きさを小さくしようとすれば、 T も十分小さくしなければならず、そのためには受信機の発生する熱雑音を低減することが最も有効である。熱雑音の低減には物理的に受信機を冷却することが有効であるが、その一方で受信機の冷却にはヘリウム等を用いることになり、そのメンテナンスには多大の労力とコストがかかることから、特に遠隔地での無人運用には不向きである。今回のシステムは運用の容易さも重要なファクターとして考えていることから、非冷却の高性能増幅器を用い、さらに中間周波増幅器を追加することで、所要のシステム G/T を確保することとした。

次に、観測精度を上げる要因となるのがアンテナ駆動速度である。すなわち、一つの観測で十分なフリンジを検出できれば、観測する星の数が多いほど精度が上がるため、できるだけ高い駆動速度を持つことが望ましい。但し、これは相手局の性能によって押さえられてしまうため、今回のシステムは鹿島26mアンテナの駆動速度以上であることを条件とした。実際の駆動試験では、アジマス軸で約3度/秒の駆動速度を実現しており、相手局がその速度を持てば一層効率の高い観測が可能となる。

そのほか、多雨多湿の状況でもアンテナホーン等への水分の侵入を防ぎ、乾燥状態を保つため、乾燥空気を常時供給するなどの対策を導入している。



例 - 1

(3) バックエンド

バックエンドは、従来から使用しているK-4型VLBIシステムを中心として構成しているが、前述の通り、小型アンテナでのゲインの不足を補うため、バックエンド入力部の前に中間周波増幅器を加えている。

また、従来から位相校正信号の不安定が指摘されていることから、今回は従来とは異なる位相校正システムを導入し、比較検討することとした。その結果は良好で、従来より格段に安定した信号が得られている。その原因はおそらく位相校正システム本体が恒温槽に入れられ、従来以上に温度変化から守られているためであると考えられる。しかし、いまだに特定のチャンネルの不安定が見られている。これはバックエンドで行っているビデオ周波数への変換の際に生じている可能性が高く、バックエンド部の温度管理の一層の強化が必要と考えられる。

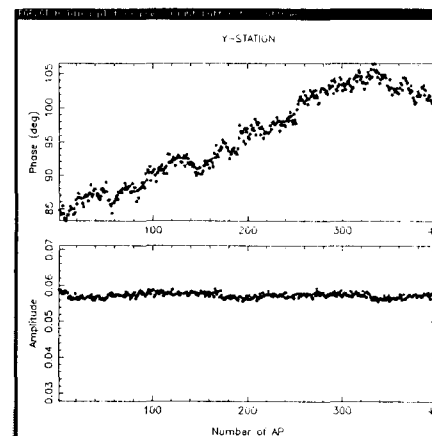
図-5に2種類の位相校正装置による位相変化の測定グラフを示す。一方が不規則な変動を示すのに対し、他方が時間的な変動は残っているもののなめらかな変動になっていることがわかる。

(4) 周波数標準部及び遠隔自動監視・制御装置

VLBIの精度確保の基本となる周波数標準部についても、従来から用いている水素メーザ周波数標準機を設置しているが、新十津川では無人状態で長期連続運転を行うことから、一般の電話回線を用いてつくばから必要に応じて状況を監視し、最低限の制御が行える環境を整備することとした。このため、遠隔自動監視・制御装置を設置している。また、不測の停電等の際につくばから処理に赴くまでの電力を確保するため、48時間分の無停電装置を備えている。

遠隔自動監視・制御装置のシステムブロック図を図-6に示す。また、図-7にシステムで確認できるデータの表示例を示す。

監視データはパーソナルコンピュータによってハード



例 - 2

図-5 位相校正器の位相変化の例

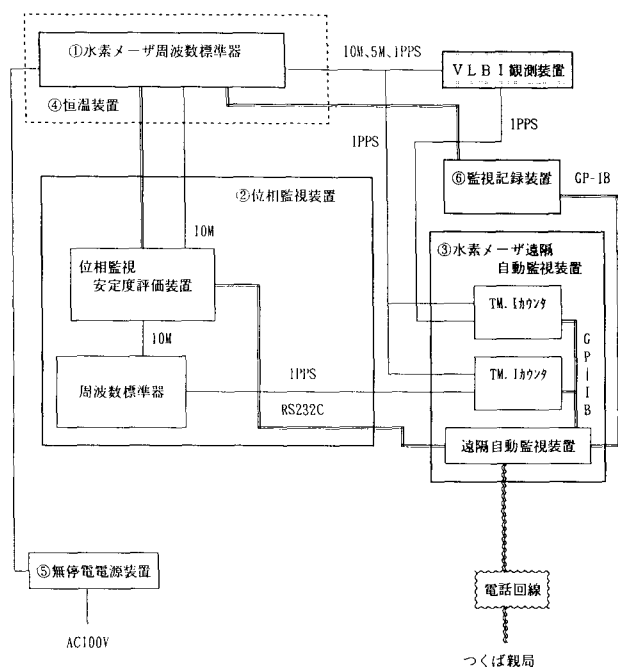


図-6 遠隔自動監視制御システムブロック

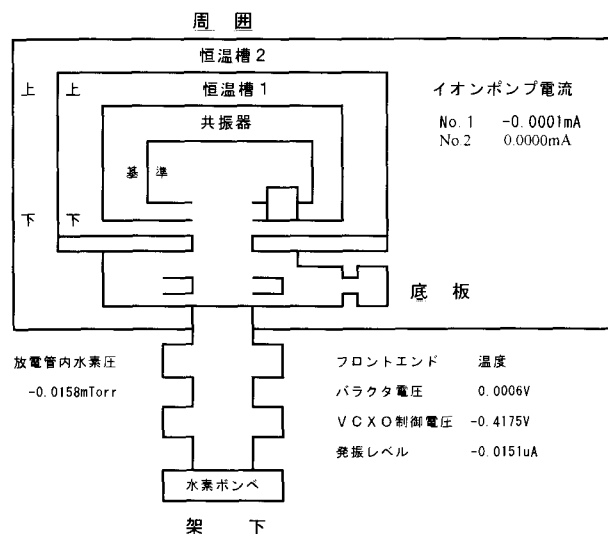


図-7 遠隔自動監視制御システム表示例

ディスクに記憶され、つくば親局から電話回線により呼び出すことによって親局に転送される。つくばで監視できるパラメータは、時刻比較データ（水素メーザ、セシウム原子時計、GPS時刻相互の時刻差）、位相監視データ（水素メーザとセシウム原子時計の位相差）、監視記録データ（共振器、恒温槽、フロントエンド槽の温度、放電管内水素圧、真空度、発振電力等）である。また、水素メーザの発振周波数の調整や、位相の同期等を行うことができる。

水素メーザ周波数標準装置自体の性能も、今までで最高のレベルの 10^{-16} オーダーに達している。図-8に納入直前に工場で測定した周波数安定度を示す。

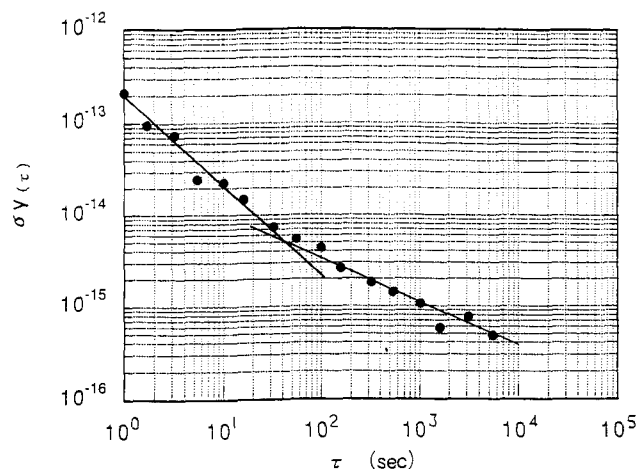


図-8 水素メーザ周波数標準位相安定度

4. 鹿島局の改修

(1) 概要

国土地理院所有の鹿島26mアンテナは、日米科学技術協力協定による共同研究としての国際VLBI観測を実施すると共に、国内の小型アンテナの相手局とする国内VLBI観測の主局として重要な役割を果たしている。しかし、建設後26年経過しており、老朽化が目立ち、各所に故障が発生していた。特に、主鏡面を支えるボルトの腐食が著しく、鏡面精度の著しい悪化の可能性が大きく、早急な改修が必要となっていた。

鏡面精度は、特に、アンテナ利得と密接に関係しており、次式の関係がある。

$$G = \eta \left[\frac{\pi D}{\lambda} \right]^2 \exp \left\{ - \left[\frac{4 \pi \sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}}{\lambda} \right]^2 \right\}$$

ここで、 G はアンテナ利得、 η は開口効率、 π は円周率、 D は直径、 λ は波長である。 ε は理想的鏡面からのズレで、 $\sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}$ で鏡面精度となる。すると、アンテナ利得は、鏡面精度の正規分布の形であるので、鏡面精度が波長の $1/10$ 程度以上の大きさになると、アンテナ利得が、急激に下がる。よって、通常、鏡面精度は、波長の $1/20$ 以下が要求される。

ボルトの交換は、鏡面精度がアンテナ利得に影響を与えないように、以下のような方法で実施した。

1. 交換前に、3024本のボルトの上のアンテナ鏡面の各点のデータ（主鏡中心からの距離と高低角）を、主鏡中心部に設置したトータルステーションを用いて取得する（写真-4）。各点データの測定精度は、読定値で5～10秒とした。
2. ボルト1本毎に、該当点の事前鏡面データと同じになるようにトータルステーションの測定者とボルト交換者とが交信しながら調整して交換を行った。



写真－4

アンテナ半径13mで換算すると、最大でも0.5mm程度しか精度の悪化はあり得ない。改修前のアンテナ鏡面精度が0.71mm (rms) であるので、改修後の鏡面精度は、1.21mm (rms) 以下となる。最大観測周波数が8.6GHz (波長35mm) なので、鏡面精度は、十分な値を保持していると考えられる。

(2) 改修後の特性

改修完了後、下記の7項目について、アンテナ特性試験を行ったが、特に問題はなかった。

1. 最大駆動速度
2. 過度応答 (オーバーシュート)
3. アンテナパターン
4. 電力半値幅 (指向性)
5. 受信機等価雑音温度
6. システム等価雑音温度
7. アンテナ利得 (開口効率)

その結果については、表－2に示す。

表－2 鹿島26mアンテナ改修後の特性

最大駆動速度	AZIMUTH ELEVATION	1.057° / 秒 0.991° / 秒
過度応答 (オーバーシュート)	AZIMUTH ELEVATION	25 % 25 %
Sバンドの電力半値幅 (指向性)	AZIMUTH ELEVATION	0.302° 0.304°
受信機等価雑音温度	Sバンド Xバンド	50.79 K 83.71 K
アンテナ利得 (開口効率)	Sバンド Xバンド (右旋偏波) Xバンド (左旋偏波)	53.5 dB (57.1 %) 63.4 dB (44.3 %) 63.5 dB (45.0 %)

5. 鹿島－新十津川基線観測精度

前項で測定した26mアンテナの性能と、新十津川局のアンテナの性能より、同基線でVLBI観測を行った時の測位精度が見積れる。

まず、電波星のフラックスを4 Jy、積分時間を4分、1つのチャンネルの帯域幅を4 MHz、チャンネル数を8チャンネル、コヒーレンスロス0.5とする。これらは、現在のシステムで実施可能な範囲のパラメータである。

これらの数値を用いると、Xバンドでの相関強度のS/Nは、式(1)を用いて、

$$R_{SN} = 22.6$$

となる。すると、Xバンドをバンド幅合成した時の測位精度は、観測する星の数を200とすると、式(2)、(3)を用いて、

$$\sigma_H = 2.1 \text{ mm (水平方向)}$$

$$\sigma_V = 8.5 \text{ mm (鉛直方向)}$$

程度になると見積もられる。これは、大型アンテナによるVLBIの精度が1mmを目指している現状と比較しても、小型のアンテナとしては十分な精度を発揮できるものと期待している。

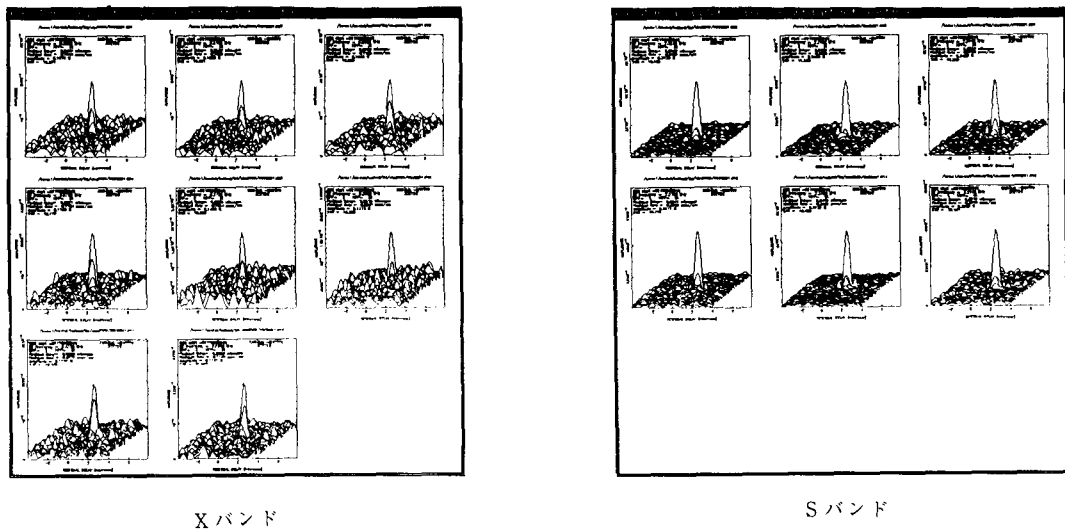
なお、改修後の鹿島局と新十津川局とのVLBI観測は、平成7年6月に24時間観測を実施し、図－9に示すような良好な相関データが得られており、今後定期的な観測を実施する予定である。

5. 他のVLBI固定観測局

新十津川局は鹿島局以外で国土地理院が設置した初のVLBI固定観測局となったが、平成7年度補正予算で、父島、始良に固定局を設置することとなった。仕様については現在検討が進められているところであるが、概要を簡単に紹介する

父島局は、東京都小笠原村父島洲崎地区の国有林内に、始良局は、鹿児島県始良町北山地区の山林内に、それぞれ10m級のアンテナ及び局舎を設置する。システムは基本的に同一のものとなる予定である。父島局は、フィリピン海プレート上に設置される初の固定VLBI観測局となることから、国際的にも貴重なデータを提供することが期待されており、国際観測に参加できるだけの機能を付与する予定である。

これらの観測施設は、観測テープの自動交換装置、システム全般にわたる遠隔自動監視・制御装置を備え、極力省力化を図る方針である。新十津川局、鹿島局についても、同様の設備整備を図り、基本的には4局が同一の運用環境を持つことになる予定である。



実験月日：1995年6月5日～6日
 Source：3C273B
 積分時間：90秒
 B W：2MHz
 観測局：鹿島26m-新十津川3.8m

図-9 相関処理結果例

但し、鹿島局を除く遠隔地での観測において、突発的な障害に迅速に対応することが必要であることから、完全な無人観測は現在のところ考えていない。当面は最少限のオペレータによる監視の下、半自動観測を行う予定である。

6. おわりに

新十津川局及び父島、始良に設置される予定の固定VLBI観測局と、鹿島局を含め4カ所での定常的なVLBI観測が近い将来可能となる。これにより、国内の測地VLBI観測の基本的な骨格がほぼ整うことになったといえよう。

しかし、今後の検討課題も多い。一つは、急速に整備が進んだハードウェアに対して、体制の整備が遅れている観測体制の問題である。現在の超長基線測量は1基線24時間観測を基本として構成しているが、固定観測点4

局による効率的な観測のためには4局同時観測が最適なことはいうまでもない。これに必要な観測体制を確保していく努力が必要となる。技術面からはテープの自動交換装置や遠隔自動観測制御システム等の検討を行っているが、停電等の外的要因によるトラブルやその後の再立ち上げ等について、自動的にかつ安全に対処することは不可能であり、完全な無人観測は非常に困難と考えている。4カ所の観測データをいかに効率よく取得するかの運用システムの検討を緊急に進めなければならない。

また、急激に増加するデータ量に対応し、効率的に解析を行うシステム及び人員の確保も極めて重要である。

今後の超長基線測量は、固定観測局の増加により根幹から変貌することになる。データ取得の効率化とデータ解析及びそれから得られる成果の活用が今後の重要な検討課題となる。

参考文献

Tobita, M., S. Matsuzaka and K. Otoi, 1993, Geodetic Measurements Using Transportable VLBI of GSI, Bulletin of the Geographical Survey Institute, vol.39, 1993, 43-53