

## 国土地理院における超長基線測量の変遷

高島 和宏\*・石原 操  
国土地理院

(2008年7月31日受付, 2008年11月25日改訂, 2008年11月25日受理)

### The History and Transition of Very Long Baseline Survey at Geographical Survey Institute

Kazuhiro Takashima and Misao Ishihara

Geographical Survey Institute,

Kitasato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-0811, Japan

(Received July 31, 2008; Revised November 25, 2008; Accepted November 25, 2008)

#### Abstract

Geographical Survey Institute (GSI) carries out the Very Long Baseline Survey using the technology of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) since 1984 in order to detect plate movements and crustal deformation around Japanese islands, and to connect with international terrestrial reference frame, and to monitor the global changes such as sea level rise or earth orientation. GSI introduced transportable VLBI antennas through collaboration with Radio Research Laboratory (RRL), and then carried out VLBI experiments at nine sites in Japan and Korea for 12 years from 1984 to 1995. In 1995, Shintotsukawa VLBI station was established as the first step to fixed domestic VLBI antenna network. In Japan, as of April 2002, the old Tokyo Datum was legally superseded by a brand new one, the Japanese Geodetic Datum 2000 (JGD2000) based on International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Kashima VLBI station which participated in long term international VLBI observations and domestic mobile VLBI stations contributed to define the framework of JGD2000. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) was established in 1999 as an organization promoting global collaboration on VLBI activity. GSI participates in IVS as an observing station and a correlation center. This paper reports the transition of VLBI at GSI from introduction period to present.

#### 1. はじめに

国土地理院では、世界的な測地網と結合しプレート運動の実測・海面上昇等地球規模の変化の監視を目的として、超長基線電波干渉計 (VLBI) を用いた超長基線測量を 1984 (S59) 年に開始した。その後、2001 (H13) 年 6 月に測量法及び水路業務法の一部が改正され、我が国の経緯度の測定は世界測地系に従うことになったが、この改正に大きく寄与したのが、長年の鹿島における国際 VLBI 観測と国内の移動 VLBI 観測である。また、1999 (H11) 年 2 月に国際 VLBI 事業 (IVS) が設立され、国土地理院は設立当初から、観測局および相関局として参加し、国際的な枠組みでの VLBI 活動に貢献している。現在では、移動観測から固定観測へ主軸を移し、地球姿勢パラメータ決定を目的とした観測など、年間 50 回以上の高頻度観測を実施している。

\* FAX: 029-864-2655, E-mail: takasima@gsi.go.jp

本稿では、国土地理院における VLBI の導入から現在に至るまでの超長基線測量の変遷について述べるものである。

## 2. VLBI 技術の導入

1970 年代の測地測量の分野では、日本の測地原点の位置は世界的にみた場合、南東の方向に約 500 m ずれていることが分かっていたが、この正確な偏位量については不明であった。また、全国の一、二、三等三角点について、電磁波測距儀による三辺測量方式での改測が行われていたが、測地原点から出発して北海道や沖縄にまで至ると、測量誤差の累積のために数 m の位置誤差を持つことになり測地網の規正が必要とされていた。さらに、年間数 cm とされるプレート運動を検出し地殻の変動を適確に把握することが可能ではないかと考えられていた。

国土地理院では、これらの課題に対応する手段として、1973 (S48) 年から海上保安庁と共同で国産衛星による測地システム (人工衛星レーザー測距装置) の研究を進めてきた (Sasaki, 1977)。一方、米国では 1972 (S47) ~ 1973 (S48) 年に北米大陸を横断する 3,900 km の基線での VLBI 実験が行われ高精度な結果 (RMS=±0.2 m 以下) を得ており (北郷, 1978)、国内では、電波研究所<sup>1</sup>において VLBI の技術的機器開発の研究が実施され、1979 (S54) 年から 5 年計画で長期的地震予知のための測地測量技術の研究として、超高精度測量に利用可能な VLBI システムの開発が進められてきた (吉村, 1984)。国土地理院ではこれらの状況を踏まえ、超長基線測量を実施することを念頭に、1980 (S55) 年に VLBI 開発を決定し、1981 (S56) 年 1 月に VLBI 開発プロジェクトチームを院内に立ち上げた。

開発プロジェクトでの検討では、移動性と受信能力を勘案し、「アンテナ径をできるだけ最小のものとする」こととした。なお、VLBI システムの技術開発を円滑に行うには電波研究所の技術援助が欠かせないため、研究所長、院長間で「超長基線電波干渉システムに係る技術開発、実験、測定等に関し、相互に協力して推進することを確認する」覚書を 1981 (S56) 年 3 月に交換した。

国土地理院の VLBI システムの開発は 1981 (S56) 年度から始まり、1984 (S59) 年度に初期のシステムが完成した。システムは移設の容易さを追求するため、システム全体において重量と体積の双方で最も大きな割合を占めるアンテナについて、開口径を 5 m、総重量を 10 t に設定した。更に移設時の輸送および短時間での組み立てを考慮し、アンテナは反射鏡部、架台部及び基礎部に分割が可能で、更に反射鏡部は中央と左右との三分割になる構造とした (Photograph 1)。この結果、10 t クレーンを使用して、分解発送は 3 日、組立調整は 10 日程度で実施できるシステ

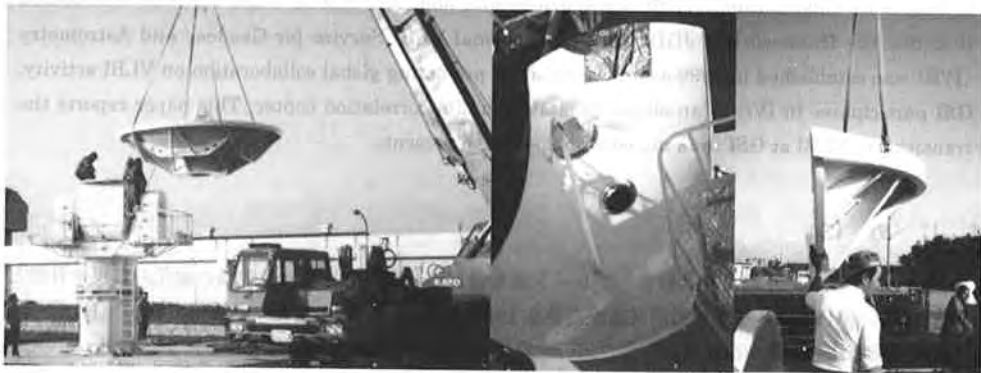


Photo. 1 5 m Transportable VLBI antenna at Tsukuba. The main reflector was made of three parts. (Middle) The center part of main reflector, (right) the side part of main reflector, and (left) the antenna was setting by a 10 tons crane.

<sup>1</sup> 電波研究所 (RRL) は 1988 (S63) 年 4 月に通信総合研究所 (CRL)、2004 (H16) 年 4 月に情報通信研究機構 (NICT) と名称が変わる (近藤, 2004) が、本論文では、当時の年代に応じた名称を使用する。

ムとなった。システムはこの他、制御部（1982年度導入）、バックエンド部（1983年度導入）、水素メーザー周波数標準部（1983年度導入）、水蒸気ラジオメータ部（1984年度導入）で構成されており、システムの整備を終えて、1983（S58）年10月に鹿島-筑波間でフリンジテストを行い、1984（S59）年7月から鹿島26 mアンテナとの間で3回のシステムレベル実験を行った。この実験はJEG（Japanese VLBI Experiment for Geodesy）と呼ばれ、鹿島-筑波間の55 km基線を測定するもので、システムの動作と性能確認のための実験として行われた。測定結果は、距離に関して2 cmの再現性を達成し、地上測量との比較においても11 cmの差で一致することが確認され、当時としては極めて高精度な結果が得られた（杉本・黒岩，1986；齋藤・松坂，1986）。国土地理院のVLBIシステムの相手局は電波研究所鹿島支所の26 mアンテナVLBI局を想定したので、同所が開発したK-3システムに整合したシステムとした。

### 3. 可搬型 VLBI システムによる観測

#### 3.1. 5 m 可搬局

5 m VLBI システムの機能確認が鹿島-筑波間でのシステム実験で得られたことを受け、国土地理院のVLBI本来の目的を遂行するVLBI移動実験を1986（S61）年から開始した（Figure 1, Table 1）。目的は、①日本列島精密測地網の規正、②プレート運動を含む広域地殻変動の検出、③測地網の結合である（吉村，1989）。

国土地理院におけるVLBIシステムの開発と時を同じくして国際学術連合会議（ICSU）は1980（S55）年9月総会で、固体地球科学に関する新しい長期計画として、国際リソスフェア探査開発計画（Dynamics and Evolution of the Lithosphere Project：略称DELP）を国際的協力により推進することを決定し、我が国も1985（S60）年からDELPに参加することになった。

日本におけるDELP計画では6課題に目標を設定し、その内の一課題である「プレート運動の実測」に国土地理院では1986（S61）年から1989（S64～H1）年までの4年間参加し、電波研究所と協力して、日本及びその周辺海域でVLBIによる超長基線の繰り返し測定を行い、測地網の規正（吉村・白井，1989）、プレート運動及びこれに



Table 1 Transportable VLBI observations

1986	新富 5 m (宮崎県)
1987	父島 5 m (東京都)
1988	新富 5 m (宮崎県)
1989	父島 5 m (東京都)
1990	新十津川 5 m (北海道)
1991	水沢 5 m (岩手県)
1992	相良 5 m (静岡県)
1993	鹿野山 2.4 m (千葉県) 海南 5 m (和歌山県) 新富 5 m (宮崎県)
1994	砺波 2.4 m (富山県)
1995	鹿野山 2.4 m (千葉県) 水原 3.8 m (大韓民国)

Fig. 1 The network of VLBI experiments in Japan



5m (Sagara:1992)



2.4m (Tonami:1994)



3.8m (Suwon:1995)

Photo. 2 Transportable VLBI antennas. There is a back-end container behind the VLBI antenna (left photograph)

Table 2 The specifications of transportable VLBI antennas

	5 m Radio Telescope	2.4 m Radio Telescope	3.8 m Radio Telescope
Mount Type	Az-El Mount	Az-El Mount	Az-El Mount
Diameter	5 m Cassegrain	2.4 m Cassegrain	3.8 m Cassegrain
Frequency	S, X	X	S, X
Slewing Speed	Az 1 deg/sec	Az 1 deg/sec	Az 3 deg/sec
	El 0.5 deg/sec	El 1 deg/sec	El 1 deg/sec
Weight	10.1 ton	0.7 ton	3.5 ton

起因する広域地殻歪みの検出 (Yoshimura, 1987) に貢献した。

DELP 計画に伴う観測としては鹿島-宮崎 (1986, 1988), 鹿島-父島 (1987, 1989) の2つの基線測定を実施した。父島における観測では、フィリピン海プレートに位置する父島が、2年間で茨城県鹿島に対して西北西に7.4 cm 移動していることが検証された。これは、フィリピン海プレートの動きを世界で初めて実測により検証した測定であった (Matsuzaka *et al.*, 1991)。この観測も含めて、可搬型アンテナを国内各地に運搬して鹿島26 m アンテナとの間で行う VLBI 実験を VEGA (VLBI Experiment for Geodetic Application) と呼んだ (Photograph 2, Table 2)。

DELP 計画以降に5 m アンテナを移設した VLBI 実験は、新十津川 (北海道 1990), 水沢 (岩手県 1991), 相良 (静岡県 1992), 海南 (和歌山県 1993), 新富 (宮崎県 1993) である。

5 m アンテナを主体とする VLBI システムは可搬型ではあるものの移設作業は容易ではなかったためシステムの効率化を図ることが課題であった (金子・飛田, 1989)。5 m VLBI システムの移設作業は、業者に委託しアンテナを分解・輸送する他、バックエンド及び記録装置等も個々の装置毎に梱包して現地まで運搬し、再度組み立てるという方法を取っていた (Photograph 3)。この時、現地に局舎を建設しバックエンド等の機器をその中に設置するが、VLBI システムの構成は複雑で約 400 本あるケーブルに誤配線等を生じさせないよう細心の注意が必要であり、この設置作業に多くの時間と労力を要した。さらに、機器設置後、水素レーザーに関しては、イオンポンプで高真空状態を維持するための細かな調整作業を全て手作業で実施し、安定発振するまで3日以上を要するなど時刻系の保持は特に気苦労が多かった (新田・松坂, 1989)。このような中、K-4 型 VLBI システムと可搬型水素レーザーが開発・



導入されたことで装置全体が小型化されたことを受け、1992 (H 4) 年にアンテナ以外の部分を一式格納できる車載型コンテナ (4 トントラック搭載可能) を製作した。また、時刻系の保持では、当初はセシウム原子時計 2 台を稼動状態で運搬し、鹿島局の水素メーザーと時刻の同期を取ったが、GPS 時計が導入されたことにより、セシウム原子時計による時刻同期の必要性はなくなった (松坂, 1989)。

これにより、従来は観測開始までに相当必要であった準備時間を大幅に短縮 (約半分) することができるようになった (Figure 2)。

### 3.2. 2.4 m 可 搬 局

「地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究」(環境庁地球環境研究プロジェクト) と「首都圏直下の地震予知手法の高精度化に関する総合研究」(科学技術振興調整費) に資するため、通信総合研究所と共同で開口径 2.4 m の超小型 VLBI 装置を 1990 (H 2) 年度から 1992 (H 4) 年度にかけて開発し、観測を実施した。

前者のプロジェクトの目的には、地球の温暖化に伴う海面上昇について調査するため、験潮場での潮位変化を把握することが重要である。日本の国土は地殻変動により継続的に変形しており、験潮場自体が上下変動してしまい、そのままでは正しい海面の変動を測定することは非常に困難であった。そこで、VLBI や GPS 等の宇宙測地技術により験潮場の地球重心に対する動きを測定し、海面の真の変動量の情報を取得することを目指した (齋藤ほか, 1995a)。

後者のプロジェクトでは、首都圏の鹿島、筑波、小金井、鹿野山にメトロポリタンダイヤモンドクロス (MDX) 基線を設置し、この基線を観測することにより首都圏の地殻の歪みを検出し、直下型地震の予知に関する情報を取得することを目指した (齋藤ほか, 1995b)。

これらの研究のために 2.4 m アンテナを移設した VLBI 観測は、筑波 (茨城県 1992)、鹿野山 (千葉県 1993, 1995) および砺波 (富山県 1994) であり、相手局には鹿島 34 m アンテナを用いた。海面上昇に関する研究では、VLBI 観測点と近隣の験潮場との相対的な位置関係を GPS を用いた観測により測定した。本研究により、長距離基線を VLBI により測定し、中短距離基線を GPS により測定する複合観測が確立された (赤桐ほか, 1992)。

超小型 VLBI 装置の開発に当たりアンテナ開口径を 2.4 m としたのは、道路交通法の制限とアンテナ経費の軽減から、一般に普及している 2.4 m アンテナの使用と架台に既存の水蒸気ラジオメータの架台部分を改造して使用できるようにするためであった。また、研究の目的上、大陸間のような長距離ではなく、首都圏などの短距離基線をターゲットとしていたことから、電離層による影響は限定的と考え、波長の短い X バンドのみを受信することで、当時世界最小の VLBI 局が実現した (高橋ほか, 1995)。

### 3.3. 3.8 m 可 搬 局

国土地理院では、1995 (H 7) 年に、大韓民国 (韓国) の国立地理院 (現在: 国土地理情報院) と共同で、VLBI 観測及び GPS 連続観測を実施した。この観測は、両国間の測地網の高精度な結合、韓国経緯度原点の国際基準座標値の算出、大規模な地震の発生などから、ユーラシアプレートと北米プレートの境界が存在すると目されている日本海東縁部における地殻変動の把握などが目的であった。

観測は、可搬型 VLBI 装置をつくば市より韓国水原市国立地理院構内に移設し、鹿島 26 m アンテナとの間で 4 回実施し、その内 3 回分の観測データを得ることができた。鹿島-SUWON 間の基線長の誤差 5 mm 程度を達成し、かねてからの念願であった日韓の測地網が高精度に結合できた (石原ほか, 1996)。可搬型 VLBI 装置は直径 3.8 m のパラボラアンテナ、K-4 型 VLBI システム、水素メーザー周波数標準装置、遠隔自動監視・制御装置等で構成されており、アンテナ以外は 1992 (H 4) 年に導入した車載型コンテナに搭載されている。アンテナは 1993 (H 5) 年に整備したもので、同時に製作した新十津川局用固定アンテナと基本的に同一のものである。

### 3.4. 観測調整作業

VLBI ではパラボラアンテナにより電波星 (クエーサー) の追尾を行う。電波星の方向は観測時刻における方位角と高度角として与えられる。現地では移設により設置した VLBI アンテナの各軸の向きを正確に把握 (軸校正パラメー

タを決定)し、観測時にアンテナの向く方向の補正を行う必要がある。この補正パラメータを求める作業を「アンテナ軸校正」と呼んでいる。3.8 m や 2.4 m の小型 VLBI アンテナでは集光力が小さいため、アンテナ軸校正に使用できる電波源は太陽と月及び 1, 2 個のクエーサーに限られる。軸校正パラメータを精度良く決めるには、受信可能な電波源に基づき全天を均等に観測するスケジュールを作成し、アンテナ軸校正観測 (24 時間観測を 2 回と更に精度確認に 24 時間観測を 1 回) を実施する。太陽、月、電波星の配置 (赤緯が近いとよくない) がパラメータの精度に大きく影響するので、VLBI 観測の全体計画はアンテナ軸校正の観測計画によっても支配された。

VLBI で得られる成果はアンテナの参照点 (通常は方位軸と高度軸の 2 つの回転軸の交点) 間の基線ベクトルだが、測地網の規正や電子基準点網との結合 (Local tie) などの場合、VLBI アンテナの参照点と近傍の三角点や電子基準点との位置関係を高精度に知る必要がある。このため、可搬型 VLBI アンテナを設置する基台にはアンテナ固定用のアンカーボルトの他に基台中心に十字が刻まれた金属標が埋設されている。この金属標とアンテナ参照点の位置関係を明らかにしたうえで周辺の電子基準点等との結合を GPS 測量で明らかにした。前者の方法として、VLBI アンテナの方位軸の回転部分に赤色レーザー照射器 (3.8 m, 2.4 m) 又は光学求心器 (5 m) が取り付けられており、アンテナを回転させ、金属標も含めた基台コンクリート上に軌跡 (円) を描かせ、この中心を方位軸中心とし、金属標とアンテナとの水平の位置関係を把握した。一方、アンテナの高度軸中心と金属標との高さの関係は、工場での測定値 (高度軸中心 ~ EL 基準プレート) と水準測量等により明らかにした (石原ほか, 1997, 1999)。

### 3.5. 移動観測から固定観測へ

日本における測地 VLBI の状況は GPS の発展により一変した。国土地理院では 1993 (H 5) 年より、全国の広域的な地殻変動の検出と高精度な測地網を構築することを目的として、GPS を用いた連続観測点の整備を開始した。その後、1995 (H 7) 年阪神・淡路大震災が契機となり、1995 年度に 677 点が追加整備された (大瀧, 2004)。同時期に、固定型 VLBI 観測網の構築も実施され (大木ほか, 1998)、VLBI 観測と GPS 観測とを相補的に組み合わせる測地基準体系へと変遷した。これにより、日本全国の高密度、高頻度な観測は GPS を利用した電子基準点網によることとし、VLBI はプレート運動の検出、国際基準座標系の維持・高密度化、電子基準点網の規正をその主な目的として担うこととする状況になった。この結果、1995 (H 7) 年以降、VLBI は従来の移動観測から国内数箇所の固定観測網にその役割を移していくこととなった。移動観測結果については Takahashi *et al.* (1997) を参照された。

## 4. 固定型 VLBI システムによる観測

可搬型 VLBI システムに代わり、固定型 VLBI 観測局の整備が 1994 (H 6) 年より北海道新十津川町への 3.8 m アンテナ設置から開始された (齋藤ほか, 1995c)。この 3.8 m アンテナは、SUWON への可搬型 VLBI 観測システムと同型であり、同時期に 2 基を整備し、1 基は可搬型として、もう 1 基は、固定局として新十津川町に設置した。新十津川町が選点された理由は、北海道は本州との間に、津軽海峡を挟んでおり、従来測量技術においては測地網の歪みが大きくなっている可能性が高いことと、既に 5 m アンテナによる観測実績があったためである。

なお、当初計画においては、可搬型 VLBI システムによる観測から固定型 VLBI 観測網の整備へ一度に移行する計画ではなく、3.8 m アンテナを 2 基購入し、固定観測と移動観測とを並行していく計画であった。しかし、1996 (H 8) 年度に沖縄県宮古島に可搬型アンテナのための基台を設置した以降、固定型へ事業を集中する方針となり、宮古島における移動観測は実施されることなく、事実上、1995 (H 7) 年の日韓 VLBI 観測が移動観測の最後となった。

1997 (H 9) 年には、始良・父島の両局に直径 10 m のアンテナが設置され、鹿島、新十津川と合わせて国内 4 局の観測体制が整備された。翌年、1998 (H 10) 年には、国土地理院構内に念願であった直径 32 m の大型 VLBI 観測局 (つくば観測局) が完成した。つくば 32 m 観測局は、測地 VLBI 専用として設計段階から作られており、Slew 速度は最大 3 度/秒と非常に速く駆動できるだけでなく、国際観測・国内観測のどちらにも参加が可能なように Mark-IV (VLBA) システムと K-4 システムの双方を整備した。

移動観測局および固定観測局のアンテナの主要な性能を Table 3 に示す。つくば、父島、新十津川については、移

Table 3 The performance of VLBI antennas

局名	International name	直径 (m)	鏡面精度 mm (rms)	バンド	開口効率 (%)	アンテナ利得 (dB)	T <sub>sys</sub> (EL=10)	SEFD (Jy) (天頂)
つくば	TSUKUB32	32	0.5	S	66	55.4	125	320
				X	65	66.2	95	300
				K	34	74.0	70	805
鹿島	KASHIMA	26	0.8	S	57	53.5	108	980
				X	40	63.2	125	1,600
父島	CHICHI10	10	0.5	S	62	45.8	128	6,900
				X	60	56.7	150	8,350
				K	55	64.9	—	—
始良	AIRA	10	0.5	S	62	45.8	119	6,400
				X	62	56.8	152	8,240
				K	52	64.6	—	—
新十津川	SINTOTU3	3.8	1	S	40	35.2	125	77,700
				X	54	47.7	154	70,900
移動	(Note1)	5	0.5	S	34	36.9	185	76,500
				X	73	51.5	110	21,200
移動	(Note2)	3.8	1	S	48	35.5	120	62,200
				X	51	47.0	145	70,700
移動	(Note3)	2.4	—	X	40	—	—	—

Note 1: TSUKUBA, MIYAZAKI, TITIJIMA, KAINAN, SINTOTU, SAGARA, MIZUSGSI

Note 2: TSUKU3, SUWON

Note 3: TONAMI, KANOZAN

動および固定の観測局が存在するため、解析時に混同しないために、異なる国際名称を与えている。日本語表記においてもできる限り混同を排除するために、たとえば、「筑波」は移動観測局 (5 m)、「つくば」は固定観測局 (32 m) を表すという内部ルールを定めている。

## 5. 相関処理装置の導入

相関処理業務は、当初通信総合研究所にある K-3 相関器を借用して行っていたが、固定観測局導入と共に、自前での処理が可能となるように相関処理装置を導入することとなった。観測システムは、カセット型の磁気テープ装置「K-4」に移行してきていることと、通信総合研究所において、首都圏広域地殻変動観測計画 (KSP) が 1993 (H 5) 年より開始されたことから、そこで利用されていたリアルタイム型相関処理装置 (KSP 相関器) をベースにカセット型磁気テープによるオフライン処理が可能なる 3 局 3 基線の KSP 相関器を導入した。これに先立ち、国土地理院では、国立天文台において開発された相関器 (NAOCO) 2 局 1 基線を整備し、可搬型 VLBI 観測の処理に用いる計画であった。この NAOCO 相関器は、天文 VLBI 観測用に開発された装置であるため、相関処理そのものではできるものの、出力データから測地解析へのパイプラインが実現できず、実運用には至らなかった。しかし、KSP 相関器はフリンジサーチウィンドウが数マイクロ秒と非常に狭いのに対し、NAOCO 相関器は ±1 秒のオフセットに対しても自動サーチすることが可能であるため、時系のオフセット値をサーチする際に活躍した。

3 局 3 基線 KSP 型相関器 (Photograph 4) は、ワークステーション (HP9000/D370) により制御され、相関出力は 2 ラックのディスクアレイ (総容量 400 GBytes) に保存された。制御ソフトウェアは、通信総合研究所において使用されていた「Kats」を国土地理院仕様で改造した「Oxtail」が使用された。これらのソフトウェアは、HP-UX のオペレーティングシステム上でグラフィカルユーザーインターフェースを用いて操作が可能であった。当時 UNIX 上ではコマンドラインベースで実行することが主流であったことから、1997 (H 9) 年の当時としては画期的であり、初めて携わる職員にも比較的易しい仕様となっていた。相関処理装置は、コスモリサーチ社製の FPGA





Photo. 4 KSP type correlator for 3 stations and 3 baselines

Table 4 The specification of KSP type correlator at GSI

1. The equipment of correlation process : CRC-9403-CR2
○ 3 stations and 3 baselines
○ process maximum speed at 512 Mbps
2. The equipment of data input : CRC-9403-DT2, Sony-DFC-2200
○ Dividable for CRC-9403-CR2 from K4 Digital Recorder
○ Automatic synchronization with each channel data
3. System controller : CRC-9511-CNT1
○ Function of automatic correlation process
4. Computer : HP9000/D370
○ OS : HP-UX10.2
○ CPU : PA-RISC, PA-8000
○ memory : 1,024 MB (main) 256 MB (cash)
○ internal HDD : 10 GB
○ external HDD : 400 GB RAID5
5. Application : Kety KUS880419
○ Support "automatic control" mode
6. Monitor for recording data : CRC-9703-MON1
○ Fourier transform for output data by FFT
○ number of FFT point : 128 - 16,384 points
○ calculation accuracy : 8 bits fixed-point

主体のハードウェア方式となっており、256 ラグ、16 チャンネル、3 台の構成であった。詳細な仕様を Table 4 にまとめる。

## 6. 国際 VLBI 観測と世界測地系への貢献（鹿島 VLBI 観測局）

国土地理院における VLBI 観測の目的の一つに、広域な測地網の規正、すなわち、世界測地系への準拠がある。その意味からも、世界的な測地網との結合は必要不可欠であり、この目的達成のために、当時、通信総合研究所の

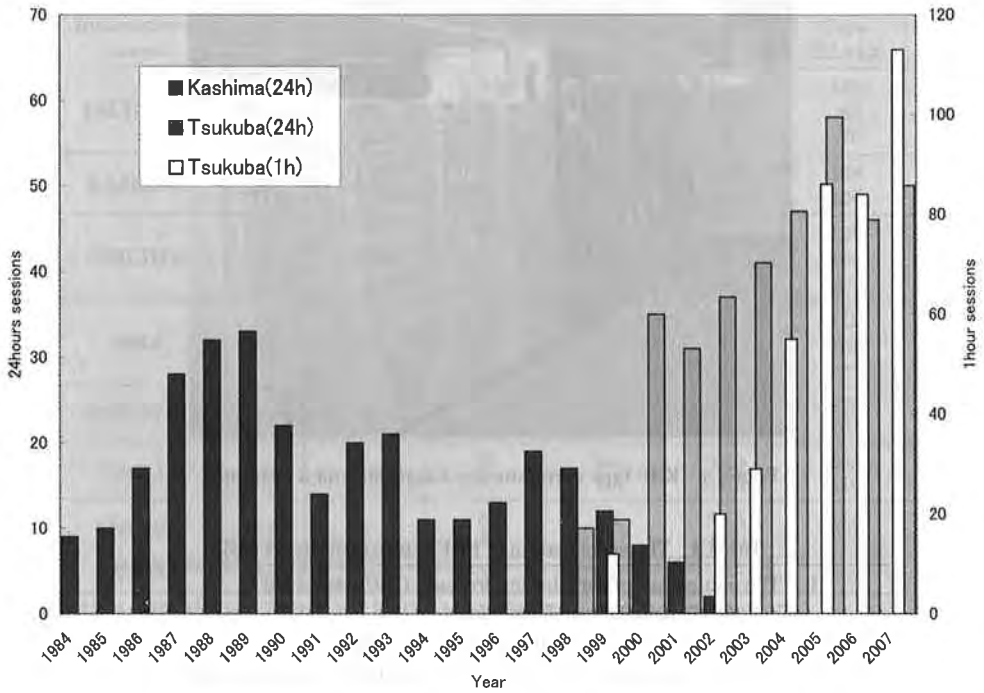


Fig. 3 The number of VLBI sessions at Kashima 26m and Tsukuba 32 m stations. These sessions were operated by RRL/CRL before 1992.

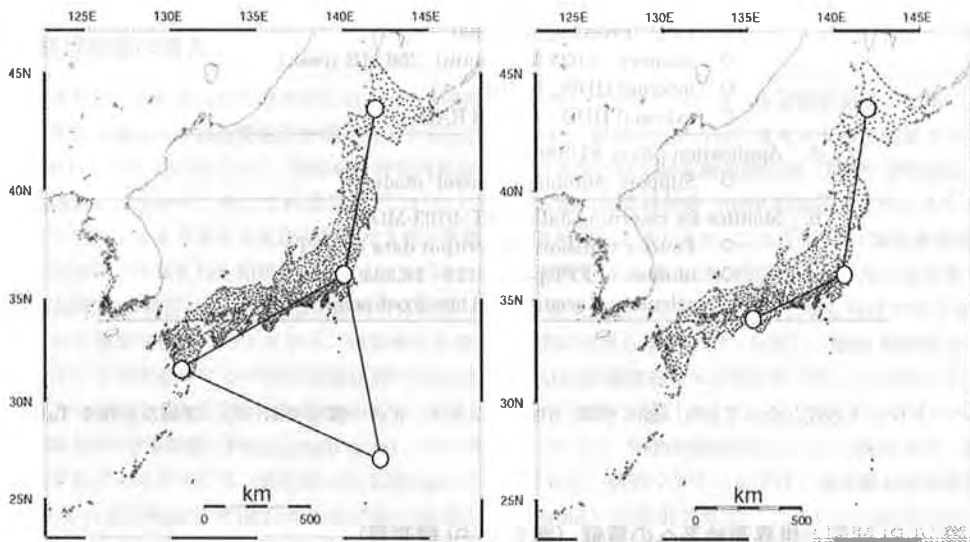


Fig. 4 VLBI and GPS networks. The current VLBI and GPS networks are constructed with 4 VLBI stations and 1233 GPS stations (left). The backbone network of JGD2000 was constructed with 3 VLBI stations and 951 GPS stations (right).

VLBI 観測局であった鹿島 26 m VLBI アンテナを国土地理院へ所管換えし、1992 (H 4) 年より国土地理院による国際 VLBI 観測が開始された。日本国内においては、既に同アンテナを用いて、1984 (S59) 年 7 月から通信総合研究所による国際 VLBI 実験 (CDP) が行われてきた。この成果も引き継ぎながら、鹿島 VLBI 観測局では、国内外あわせて、Figure 3 に示す総計 305 回の観測を実施し、2002 (H14) 年の測量法改正に伴う世界測地系導入のための最も基準となる実質上の原点値を提供した。

国土地理院が 26 m VLBI アンテナを用いて実施した国際 VLBI 観測の相手は主に米国航空宇宙局 (NASA) であった。NASA は固体地球力学観測計画 (DOSE) と称する国際観測事業を進めており、国土地理院も日米科学協力協定に基づきこの推進に協力し共同観測を進めてきた。1993 (H 5) 年からは「地殻変動とプレート運動に関する共同研究」の協定を NASA と結び、この枠組みで国際共同観測を実施した。また、1997 (H 9) 年から 1999 (H11) 年、NASA が主導する地球回転連続観測事業 (CORE) に参加し国際共同観測を実施した。

これらの国際観測を実施したことで、世界測地系に準拠した測地成果 2000 構築の際には、骨格網平均計算の固定点として VLBI 観測点 (鹿島・新十津川・海南) が用いられ、その点検計算には、その他の国内移動 VLBI 観測局および始良、父島の固定 VLBI 観測局の座標値が使用された (国土地理院、2003)。また、同時期に全国展開された電子基準点と共にグローバルな位置決定並びに測地網の規正が実現し、世界測地系に準拠した基準点体系の導入に大きく貢献した (Figure 4)。

以上のほか、1997 (H 9) 年からはアジア太平洋宇宙測地観測 (APSG) を鹿島 26 m VLBI アンテナを含むアジア、太平洋の 6 つの VLBI 観測局で実施した。また、1997 (H 9) 年と 1998 (H10) 年には南極昭和基地の 11 m 衛星受信用多目的アンテナの VLBI システム実験を鹿島 26 m VLBI アンテナを用いて実施した。

## 7. つくば VLBI 観測局と IVS への参加

平成 7 年度の第二次補正予算により整備が行われていたつくば VLBI 観測局は、1998 (H10) 年 3 月に完成し、同年 6 月に運用が開始された。これにより、つくば VLBI 観測局、新十津川 VLBI 観測局、父島 VLBI 観測局、始良 VLBI 観測局及び鹿島 VLBI 観測局より構成される 5 局 8 基線の国内超長基線測量網が構築された (芝ほか、2000)。5 局の観測網で組み合わせられる基線数は最大 10 であるが、新十津川-父島基線と新十津川-始良基線の 2 基線は感度が低く解析に使用しないため、実質的な基線数は 8 基線となっている。つくば VLBI 観測局は、国内超長基線測量の主局として機能するとともに、翌 1999 (H11) 年に発足となる IVS (国際 VLBI 観測事業) にアジア地域における主要な観測局の一つとして参加することとなった。IVS 発足時の最新観測局であっただけでなく、多くの VLBI 観測局が宇宙通信用アンテナの改造型であった時代から、測地観測専用機として設計された大型観測局として注目を集めた。

しかし、すべてが順調であったわけではなく、運用開始からわずか数ヶ月余りで、アジマスレールが破損する事故に見舞われた。事故調査委員会が立ち上げられ、破損原因の徹底した調査が実施された。その結果、設計時の見積もり評価過小による応力不足が原因とされ、アンテナ重量も設計時の見積もり 450 トンに対して、実際には 550 トンであったことなども判明した。その後、受注者負担によりレール部分の設計改良および新規レールの敷設が行われ、1999 (H11) 年 6 月に仮運用を開始し、11 月に本格再運用を開始した (Takashima *et al.*, 2000)。レールを幅が広く大きいものに変更した結果、アンテナは上方向に 4.7 cm 上がり、アンテナ参照点の位置も変わったことから、改修前後のデータを統合解析するには注意が必要となった。

その後は、非常に順調に観測を継続し、2007 (H19) 年で 10 年目を迎えた。この間に実施した 24 時間観測セッション回数は 366 回 (国際 24 時間観測 298 回、国内 24 時間観測 68 回)、1 時間観測セッションは 399 回となっている。隔年毎の回数の推移を Figure 3 に示す。解析の最小単位である観測数では、のべ 330,496 観測 (24 時間観測 321,329 観測、1 時間観測 9,167 観測) のデータを取得している。Figure 5 にハワイ Kauai/Kokee 局との基線長変化を示す。1984 年から継続観測してきた鹿島 VLBI 局の成果を引き継ぐ目的で 1998 (H10) 年から 2000 (H12) 年にかけて、鹿島およびつくば観測局の並行運用を実施すると共に、高精度に相対位置関係を決定する目的で JAPAN-TIE と呼ばれる結合観測を 7 回実施した。これにより、長期間にわたる鹿島局における成果を生かした形で

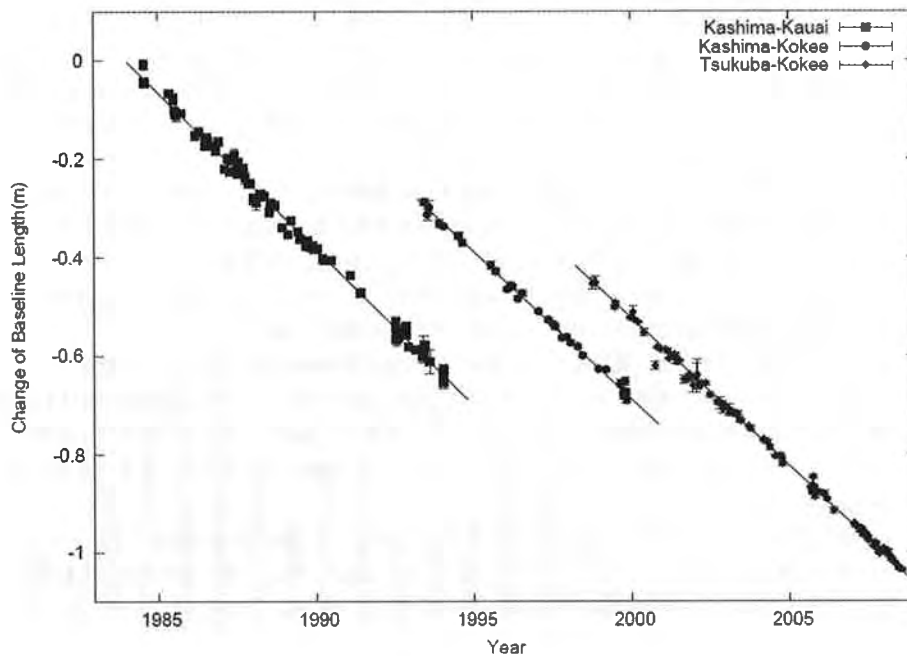


Fig. 5 The change of baseline length between Kashima/Tsukuba and Kauai/Koikee VLBI stations. The baseline lengths are 5,709,360.5 m on Kashima-Kauai, 5,709,353 m on Kashima-Koikee and 5,754,941 m on Tsukuba-Koikee. The velocities are 63.7 mm/year on Kashima-Kauai, 59.5 mm/year on Kashima-Koikee and 59.4 mm/year on Tsukuba-Koikee. This graph has made use of time series of baseline lengths dated Nov. 2008 provided by the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. These data at Kashima were acquired by RRL/CRL before 1992

のつくば局への移譲が実現した。

## 8. 地球姿勢パラメータの決定

宇宙測地技術による世界測地系の構築・維持を行う時代となり、地球姿勢パラメータ (EOP: Earth Orientation Parameter) の決定が重要な要素となってきた。IVS においては、IERS との連携も含めて、発足当初から地球姿勢パラメータ決定を主目的とした VLBI 観測を実施している。この地球姿勢パラメータと地球基準座標系における観測局位置を決定するために必要なのが、複数の観測データベースを用いて行うグローバル解析である。国土地理院では平成 14 年度よりグローバル解析への取り組みを開始し、決定精度を向上させてきている (小門ほか, 2006)。

また、2005 (H17) 年 9 月および 2008 (H20) 年 8 月には IVS の下、15 日間連続観測である CONT 観測が実施され、つくば VLBI 観測局もこれに参加した。この CONT 観測データから、通常の離散的な観測データからは得られない 15 日間連続の詳細な地球姿勢の変動が求められる (Haas, 2006)。また、GPS, SLR, DORIS 等の複数宇宙測地技術ともこの期間のデータを相互比較することで、地球の大気運動など、地球姿勢を変化させるメカニズムとの関連性を解明する足がかりとなる。

## 9. 極小型 VLBI 観測装置とトレーサビリティ

VLBI 観測装置といえば、巨大なパラボラアンテナが象徴的であるが、近年の技術革新により、より小型のアンテナ

ナによる VLBI 観測が可能になりつつある。2002 (H14) 年 10 月には、通信総合研究所において、直径わずか 65 cm の極小型パラボラアンテナを用いたフリンジ検出に成功した (Yonezawa *et al.*, 2002)。これを CARAVAN (Compact Antenna of Radio Astronomy VLBI Adapted for Network) と命名し、小型で持ち運び容易な VLBI 観測装置として開発が行われている。一方、国土地理院では、測量作業に用いている GPS 受信機の距離検定のための比較基線場における改測作業に国家標準からのトレーサビリティも視野に入れた GPS 以外の手法を模索していた。そこで、この CARAVAN を用いた距離測定が利用できるのではないかと考えから、情報通信研究機構との共同研究により、距離比較基線場に使用する目的での極小型 VLBI システム MARBLE 開発を開始した (Ichikawa *et al.*, 2008)。第一ステップとして、受信機や追尾システム等の評価目的のために、本運用で使用するものよりも若干大きめの直径 2.4 m パラボラアンテナを利用して、実用化のための基礎データを取得し、今後、比較基線場において観測可能なサイズ、すなわち、ワンボックスカー 1 台にて全システムが運搬可能な構成に改良していく予定である。なお、この直径 2.4 m アンテナは、砺波や鹿野山にて観測を実施した際の可搬型 VLBI 観測装置を改良して使用している。当時、「超小型」と呼ばれた VLBI アンテナが、10 年の時を経て、更なる小型化を目指した「極小型」開発のためのテストベッドとして再活躍しているのである。

## 10. ま と め

国土地理院では、1970 年代の測地測量の分野における諸課題に対して、その解決方法として VLBI 技術に着目した。そして、国内において VLBI の技術的機器開発の研究が開始された初期に可搬型 VLBI システムの開発を決定し、5 m アンテナを主体とする VLBI 装置の実用化を図った。

5 m VLBI システムを用いた観測では、電波研究所と協力して、日本及びその周辺海域で超長基線の繰り返し測定を行い、測地網の規正やプレート運動及びこれに起因する広域地殻歪みの検出に貢献した。その後、2.4 m や 3.8 m の可搬型システムを導入し、「地球の温暖化による海面上昇等の影響予測に関する研究」や「日韓 VLBI 観測」を実施した。

国土地理院における VLBI 観測の目的の一つに、世界的な測地網との高精度な結合があり (国土地理院, 2008)、この目的達成のために、通信総合研究所の VLBI 観測局であった鹿島 26 m VLBI アンテナを国土地理院へ所管換えし、1992 (H4) 年より国土地理院による国際 VLBI 観測を開始した。鹿島 VLBI 観測局では、国内外あわせて、総計 305 回の観測を実施し、2002 (H14) 年の測量法改正に伴う世界測地系導入のための最も基準となる実質上の原点値を提供した。

日本における測地 VLBI の状況は GPS の発展により一変し、日本全国の高密度、高頻度な観測は電子基準点網によることとし、VLBI はプレート運動の検出、国際基準座標系の維持・高密度化、電子基準点網の規正をその主な目的として担う状況になった。

この目的のために固定型 VLBI 観測局の整備が始まり、1994 (H6) 年に新十津川局に 3.8 m アンテナ、1997 (H9) 年に始良、父島に 10 m アンテナが設置され、鹿島と合わせて国内 4 局の観測体制となった。翌年の 1998 (H10) 年には国土地理院構内に直径 32 m の大型 VLBI 観測局 (つくば観測局) が完成した。32 m VLBI 観測局は、国際的な見地において名実ともに中核的な観測局として貢献している。

今後、国土地理院における VLBI 観測は、世界測地系の基準や地球回転モニタリングといった基盤的な業務だけではなく、極小型 VLBI 観測装置に代表されるような応用分野についても利用可能性が高まっていくと考えられる。一方、衛星測地技術に関しては、準天頂衛星や Galileo に代表されるように巨額の費用をかけたプロジェクトが進行しており、ますます発展している分野である。このような情勢においては、新規的なプロジェクトや応用分野に力が注がれるが、すべては測地基準系の基盤上での実現であることを忘れてはならない。IAG (国際測地学協会) においては、様々な地球測地観測技術を統合する GGOS (Global Geodetic Observing System: 全地球測地観測システム) を推進中であり、測地基準系は、幾何運動学: Geokinematics, 地球回転: Earth rotation, 重力場: Gravity field の測地学三本柱において基盤として位置づけられている。高精度であることはもちろんのこと、長期的な安定性や継続性が重要課題となるだけに、縁の下の力持ち的な部分である測地基準系の維持を第一の役割として担っていくことが、

国家測量事業として必要であり、真に期待されていると考えている。

## 謝 辞

国土地理院の VLBI の導入から今日に至るまでの様々な場面において、情報通信研究機構の VLBI グループの皆様には物心両面のサポートをいただきました。一方、今日、国土地理院の VLBI が国際的に重要な位置を確保できる礎では、NASAゴダード宇宙飛行センターの宇宙測地ブランチによる所が大です。両者の方々に対して記して感謝の意を表します。

また、本稿をまとめるに当たり、国土地理院の小牧和雄氏、齋藤 隆氏、川口 保氏、松坂 茂氏に助言をいただいたほか、査読者からは、本稿の表現をより明確にする上で有益なアドバイスを頂きました。併せて、感謝申し上げます。

## 参 考 文 献

- 赤桐毅一・村上 亮・松坂 茂・米漢武次・飛田幹男・成田次範・小板橋勝 (1992): VLBI および GPS による験潮場の位置測定に関する研究, 地球環境研究総合推進費平成 4 年度終了研究成果報告集, II, 193-202.
- Haas, R. (2006): Investigating High-Frequency Earth Orientation Variations with Continuous Geodetic VLBI Campaigns, IVS2006 General Meeting Proceedings, 316-319.
- 北郷俊郎 (1978): 測地測量及び地殻変動測定への応用, 電波研究所季報, 24, 602-609.
- Ichikawa, R., A. Ishii, H. Takiguchi, H. Kuboki, M. Kimura, J. Nakajima, Y. Koyama, T. Kondo, M. Machida, S. Kurihara, K. Kokado and S. Matsuzaka (2008): Development of a Compact VLBI System for Providing over 10-km Baseline Calibration, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry -MEASURING THE FUTURE-, Proceedings of the Fifth IVS General Meeting, 400-404.
- 石原 操・福崎順洋・吉村愛一郎・飛田幹男・雨宮秀雄・川原敏雄・根本正美・大滝 修・谷澤 勝・板橋昭房・齋藤 隆・佐々木正博・飯村友三郎・宮崎真一 (1996): 日韓 VLBI・GPS 観測, 国土地理院時報, 86, 46-56.
- 石原 操・松坂茂・川原敏雄・飛田幹男・成田次範・越智久巳一・谷澤 勝・雨宮秀雄 (1997): 測地観測網相互の高精度結合に関する研究, 国土地理院調査研究年報, 201, 41-44.
- 石原 操・根本恵造・川原敏雄・岩田昭雄・芝 公成・高島和宏・小林京子・松坂 茂・大木章一 (1999): 国内 VLBI と GEONET の結合と観測結果の比較, 国土地理院時報, 92, 41-51.
- 金子英樹・飛田幹男 (1989): 超小型 VLBI の設計, 国土地理院時報, 69, 76-80.
- 小門研亮・町田守人・高島和宏 (2006): VLBI グローバル解析による地球姿勢パラメータの高精度決定, 国土地理院時報, 110, 11-18.
- 国土地理院 (2003): 測地成果 2000 構築概要, 国土地理院技術資料 B-5, 20.
- 国土地理院 (2008): 国土地理院 VLBI, (<http://vlbi.gsi.go.jp/sokuchi/vlbi/ja/index.html>), (参照 May 23, 2008).
- 近藤哲朗 (独立行政法人情報通信研究機構 VLBI グループ) (2004): VLBI 測地技術の開発とプレート運動の実証, 測地学会誌, 50, 245-262.
- 松坂 茂 (1989): VLBI の観測成果, 国土地理院時報, 69, 60-64.
- Matsuzaka, S., M. Tobita, Y. Nakahori, Y. Amagai and Y. Sugimoto (1991): DETECTION OF PHILIPPINE SEA PLATE MOTION BY VERY LONG BASELINE INTERFEROMETRY, Geophysical Research Letters, 18, 1417-1419.
- 新田 浩・松坂 茂 (1989): VLBI で用いられる精密時計, 国土地理院時報, 69, 65-69.
- 大木章一・石原 操・根本恵造・岩田昭雄・福崎順洋・谷澤 勝・高島和宏・永田勝裕 (1998): つくば VLBI 観測局の概要, 国土地理院時報, 90, 1-10.
- 大龍 茂 (2004): 小特集 電子基準点 1,200 点の全国整備について, 国土地理院時報, 103, 7-11.
- 齋藤 隆・松坂 茂 (1986): 国内 VLBI システムレベル実験の結果 (その 2), 測地学会誌, 32, 72-78.
- 齋藤 隆・雨宮秀雄・石原 操・根本正美・谷澤 勝・飛田幹男・川原敏雄・福崎順洋 (1995a): 地球の温暖化による海面上昇の影響予測に関する研究 - VLBI 及び GPS による験潮場の位置測定に関する研究 -, 国土地理院調査研究年報, 183, 35-38.
- 齋藤 隆・雨宮秀雄・石原 操・根本正美・飛田幹男・川原敏雄・福崎順洋・谷澤 勝 (1995b): 首都圏直下の地震の予知手法の高度化に関する総合研究 - 首都圏宇宙測地観測 -, 国土地理院調査研究年報, 183, 31-34.
- 齋藤 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 (1995c): 新十津川 VLBI 観測施設の整備について, 国土地理院時報, 84, 1-8.
- Sasaki, M. (1977): An Experimental System for Satellite Laser Ranging, 水路部研究報告, 12, 95-106.
- 芝 公成・栗原 忍・高島和宏・石原 操・根本恵造・岩田昭雄・小野垣亨子・小林京子 (2000): 国内超長基線測定の観測結果, 国土地理院時報, 93, 44-51.
- 杉本裕二・黒岩博司 (1986): 国内 VLBI システムレベル実験の結果 (その 1), 測地学会誌, 32, 64-71.
- 高橋幸雄・栗原則幸・齋藤 隆・雨宮秀雄・石原 操・小板橋勝・飛田幹男・川原敏雄・福崎順洋 (1995): VLBI 移動局を用いた験潮場位置の変動に関する研究, 地球環境研究総合推進費平成 7 年度研究成果報告書, II, 238-253.
- Takahashi, Y., Y. Koyama, T. Kondo, N. Kurihara, T. Saito, M. Tobita, Y. Fukuzaki, M. Ishihara and T. Kawahara (1997):

- Movements of VLBI Stations and the Effects of Ionospheric Delay Corrections on the Positions of the Domestic VLBI Experiments in Japan, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **43**, 45-65.
- Takashima, K., S. Kurihara, M. Ishihara, K. Nemoto, M. Iwata, K. Shiba, M. Onogaki and K. Kobayashi (2000): Status and Results of GSI Domestic VLBI Networks, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, **46**, 1-9.
- Yonezawa, I., J. Nakajima, H. Ohkubo, M. Tsuboi and T. Kasuga (2002): Development of compact VLBI system, *IVS Technology Development Center News*, **21**, 29-30.
- 吉村和幸 (1984): K-3 型 VLBI システムの開発と共同実験計画, *電波研究所季報*, **30**, 17-29.
- Yoshimura, Y. (1987): ON THE DETECTION OF CRUSTAL MOVEMENT BY VLBI, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, **32**, 30-40.
- 吉村好光 (1989): VLBI (超長基線電波干渉計) について, *国土地理院時報*, **69**, 56-59.
- 吉村好光・白井康友 (1989): VLBI による測地網の規正, *国土地理院時報*, **69**, 70-75.