

鹿島26m VLBIアンテナの測地学への貢献 Achievements of Outgoing Kashima 26m VLBI Antenna for Geodesy and Surveying

測地部 辻 宏道・田辺 正¹・河和 宏・高島和宏・宮川康平²・栗原 忍
Geodetic Department Hiromichi TSUJI, Tadashi TANABE, Hiroshi KAWAWA, Kazuhiro TAKASHIMA,
Kohei MIYAGAWA, Shinobu KURIHARA
地理地殻活動研究センター 松坂 茂
Geography and Crustal Dynamics Research Center Shigeru MATSUZAKA

要 旨

1968年に建設された鹿島26mパラボラアンテナは、電波研究所（現、通信総合研究所）における宇宙通信実験、電波天文学研究、VLBI（超長基線電波干渉法）によるプレート運動観測等に成果をあげた。1992年に国土地理院へ所管替えされた後は、日本の測地VLBI観測の拠点として国際・国内観測に参加し、国際地球基準系の構築、日本の測地基準系改定等に大きな役割を果たした。その後、つくばに32mアンテナが整備され、鹿島26mアンテナの老朽化も進んだため、鹿島26mアンテナは2003年に解体された。本稿では同アンテナの約34年間の功績を測地学に重点を置きつつ振り返る。

1. はじめに

「去る者は日に疎し」というが、2003年3月に鹿島26m VLBI（超長基線電波干渉法）アンテナが解体されて以来、関係者の間でもこのアンテナが話題に上ることは少なくなった。しかし過去10年に渡り国土地理院のVLBI観測の主局（“メイン・ディッシュ”）として活躍した同アンテナには、測量法改正に伴い、全国の測地基準点の新しい経緯度（いわゆる測地成果2000）を計算する原点になったという輝かしい功績がある。また、1968年以来の歴史を紐解くと、TV放送の実現や電波天文学の発展に貢献し、さらにVLBI技術開発の揺り籠ともなった等の功績があることもわかる。

本稿では、図らずも鹿島26mアンテナの最期を見取ることになった筆者らにより、同アンテナの測地学や測量分野への貢献を回顧し、手向けとするとともに、今まで同アンテナを支えてきた関係者に改めて敬意を表するものである。



写真-1 在りし日の鹿島26m VLBIアンテナ。1999年10月撮影（通総研パンフレット2001年版より）。

2. 鹿島26mアンテナの概要

本アンテナは、通信総合研究所（通総研）鹿島宇宙通信研究センター内にあり、1992年に通総研から国土地理院に所管換えされた。在りし日の姿、諸元及び構造を写真-1、表-1、図-1に示す。

表-1 鹿島26m VLBIアンテナの諸元

形式	鏡面修正カセグレン，Az-Elマウント*
開口直径	26m
総重量	512トン（鉄筋コンクリート基礎を除く）
周波数	Sバンド 2.20～2.32GHz（利得52.8dB）
	Xバンド 7.86～8.60GHz（利得64.8dB）
鏡面精度	0.71mm（rms）
駆動速度	0.002～1.0° / 秒
製造年月	1968年10月
製造者	日本電気，三菱重工業，大林組

*方位角（Az）軸・仰角（El）軸周りにアンテナが回転する。

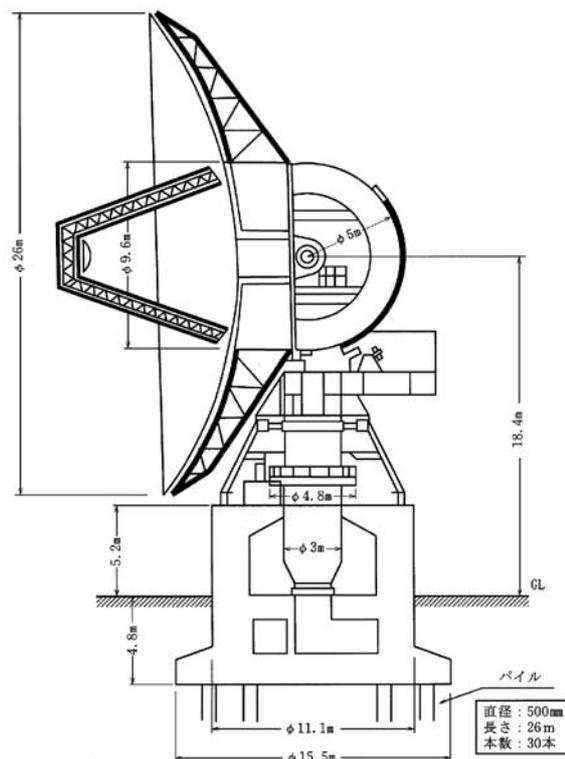


図-1 鹿島26mアンテナの構造

¹現在，測地観測センター；²現在，内閣府

¹Now at Geodetic Observation Center；²Now at Cabinet Office

3. 鹿島26mアンテナの生涯

鹿島26mアンテナは、1968年、郵政省電波研究所宇宙通信実験用パラボラアンテナとして建設された。1970年代前半までに、米国の人工衛星との通信実験、TV信号伝送の基礎技術開発に成果をあげた。このアンテナは鏡面精度が良く高効率なアンテナであったため、電波天文観測にも積極的に活用された(高橋, 1990)。こうした実績の積み重ねが、VLBIの研究開発につながり、1983年に日米VLBI実験の成功、1985年には史上初の太平洋プレート運動の実測という成果が得られた(近藤, 2001)。1980年代半ばから国土地理院の5m可搬型アンテナと共同観測を行い、両機関の協力の基礎も築いた。

その後、通総研は鹿島26mアンテナの後継局として1988年に鹿島に34mアンテナを完成させた。このため、所期の目的を果たした鹿島26mアンテナは、1992年12月、VLBIによる国内測地網の規正及び地殻変動観測に取り組んでいた国土地理院に所管替えされた。

国土地理院では、鹿島26mアンテナを主局として米国航空宇宙局(NASA)や国際VLBI事業(IVS)が計画する数多くの国際・国内観測に参加し、そのデータは、国際地球基準系(ITRS)の構築、地球回転パラメータの算出等に大きく貢献した。特に、2001年の測量法改正により日本の経緯度の基準は世界測地系に変更されたが、その際、鹿島の国際的な座標値が基準となって、総数11万点に上る国家基準点(電子基準点、三角点)の経緯度(測地成果2000)が計算されている。

しかし、鹿島26mアンテナも老朽化には勝てず、後継局として建設された、つくば32mアンテナとの結合観測を十分に行った後、2003年に享年35歳で解体された。表-2に、より詳細な活動状況を示す。



写真-2 竣工時の雄姿(写真提供:通総研)。円筒状の階段室は、アンテナと一緒に方位角軸周りに動いた。

表-2 鹿島26mアンテナの活動。近藤・吉野(2001)等を参考に作成。斜字体は関連事項。

1968-10	鹿島26mパラボラアンテナ施設完成
1969-05	米国の静止衛星ATS-1による単側波帯通信(SSB)実験開始
1969-12	ATS-1の雲写真カメラ・データの受信開始
1970-06	ATS-1によるPCM音声多重TV信号伝送
1971-08	カラーTV時分割多重伝送国内実験(NHK技研と共同)
1971-10	ATS-1による周波数拡散多元接続実験開始
1972-09	狭帯域通信と測距実験(電子航法研と共同)
1973-12	X線星Cyg X-3からの電波のフレアアップ世界初の検出
1974-07	ATS-1による管制実験
1975-08	ATS-1による日米間高精度時刻比較実験
1977-01	K-1システムによる国内初のVLBI基礎実験(鹿島-横須賀)
1979-12	実時間VLBIシステム(K-2)実験開始
1982-11	K-3とMark III VLBIシステムの適合性試験
1983-11	K-3システムによる日米間初のVLBI実験(鹿島-モハービ-オーエンズバレー)
1984-06	ΔVLBI法による静止衛星の精密軌道決定
1984-07	国際VLBI実験(CDP)開始;日米間の距離を誤差2cmで実測
1984-10	VLBIによる日米時刻同期実験開始
1984-07	国土地理院5m可搬型アンテナとのシステム実験開始
1985-09	日中VLBI実験開始(鹿島-上海)
1985-11	日米VLBI実験によりプレートテクトニクス理論を検証(ハワイ、マーシャル諸島が年に数cm日本に接近)
1986-07	米国TDRSS利用スペースVLBI実験に参加
1986-10	国土地理院5m可搬型アンテナと測地VLBI実験開始(鹿島-宮崎)
1988-02	日豪VLBI実験開始
1988-03	西太平洋電波干渉計(34mアンテナ)完成
1990-01	史上初の南極VLBI観測(鹿島-昭和基地)
1992-12	国土地理院へ所管替え(以後、DOSE, CORE等の国際・国内測地VLBI観測局として運用)
1995-10	日韓VLBI観測を実施(鹿島-水原)
1998-03	つくば32m VLBIアンテナ完成
1998-10	国内結合観測開始(鹿島-つくば)
1999-01	国際VLBI事業(IVS)設立
2001-02	国内結合観測終了
2002-04	改正測量法施行(鹿島26mアンテナが日本の新しい経緯度の基準値を提供)
2002-05	最後の国内観測(JADE0202)
2002-11	解体工事開始
2003-03	解体工事終了

4. 鹿島26mアンテナの測地学への貢献

本章では、通総研及び国土地理院時代を通し、鹿島26mアンテナが測地用VLBIアンテナとして、測地学及び測量分野に果たした貢献について、具体的に述べる。

アンテナである以上、貢献の基本は、VLBI観測に参加してデータを提供することである。運用に大規模な施設と資源を要するVLBIでは、国際観測に参加すること自体が大きな国際貢献である。通総研によりVLBIの黎明期から国際観測に参加してきた鹿島26mアンテナは、日本を代表するVLBIアンテナであり、国土地理院に引き継がれた後も、その実績を生かして各種の国際観測に参加した。また、通総研時代から国土地理院の可搬型アンテナの相手局としても利用されている。4. 1節では、鹿島26mアンテナが参加した測地観測を振り返る。

しかし、より重要なのは観測したデータで何がわかったかである。宇宙測地技術の代表格であるVLBIでは、国際的な観測により、cmレベルの精度で、①観測局の3次元位置、②地球の自転速度や自転軸方向が決定できる。また、国際観測を繰り返せば、③観測局の運動速度等もわかる。鹿島26mアンテナの最大の学術的な貢献は、③により、史上初めて太平洋プレート及びフィリピン海プレートの運動を実測したことである。これは、間接的な証拠から構築されていたプレートテクトニクスの直接的な検証として第一級の学術成果である（4. 2節）。

一方、上記の①及び②は、より基礎的ではあるが、宇宙技術によって初めて可能となったグローバル測地学への貢献である。鹿島の観測データは、国際地球回転事業（IERS）における国際地球基準座標（ITRF）や地球回転パラメータ（EOP）の計算に大いに貢献した。これらの成果が一気に結実したのが、2001年の測量法改正である。長年の国際観測で確定していた鹿島26mアンテナの3次元位置が、国家基準点の経緯度（測地成果2000）を算出する実質上の原点となった（4. 3節）。この際、可搬型アンテナによる国内観測の成果も利用されている。

この他、やや定性的な記述となるが、鹿島26mアンテナは日本のVLBI研究開発の拠点だったこと（4. 4節）、同アンテナの運用実績の上に現在のつくば32mアンテナがあること（4. 5節）についても述べる。

4. 1 国際・国内VLBI観測への参加

鹿島26mアンテナの最も基本的な貢献は、数少ないアジア地域の大型アンテナとして、1980年代半ばから、数多くの国際・国内測地観測に参加してきたことである。

現在、VLBIに関する国際協力の中心となってい

るIVSの観測マスターファイル（<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/service/select-master-form.html>）には、過去のVLBI観測の概要が記録されている。鹿島26mアンテナを含む観測セッションは1984年から2002年に存在し、総数は305回である。これには、1984年以降の主な国際・国内観測が網羅されていると考えてよい。その推移を図-2に示す。通総研時代に約180回、国土地理院時代に約120回の観測が行われている。通常1セッションの観測は24時間連続で行い、1局あたり数100GB以上のデータを記録する。

世界のVLBI観測の中で鹿島26mアンテナの寄与をみるため、同アンテナが参加したセッション数を、各年の総セッション数（ただし特定の2局が1時間程度の観測を行うIntensive観測は除く。）で割ってみた（図-3）。鹿島26mアンテナは、19年間にわたる測地VLBI観測の約8%に参加していることがわかる。

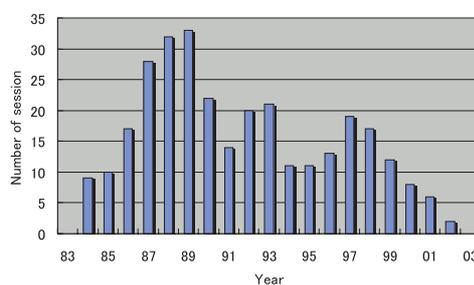


図-2 IVSに登録されている、鹿島26mアンテナが参加したVLBI観測のセッション数（1984～2002年）

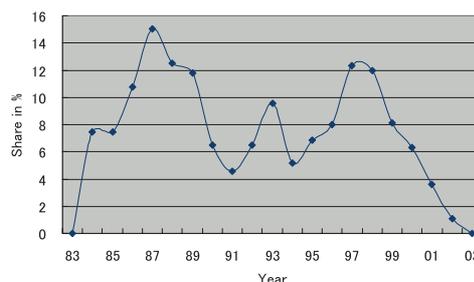


図-3 鹿島26mアンテナが参加したVLBI観測が、世界の測地VLBI観測の中で占める比率（%）

4. 1. 1 国際観測

通総研は、1970年代にVLBIの研究開発を開始し、1983年までに第3世代型のK-3型システムを完成させた。これはNASAのMark III型システムと互換性を持つもので、K-3型システムが導入された鹿島26m局は、日米実験を中心に日中、日豪、日独実験等に参加した（日置・吉野、1990）。代表的な国際観測は、NASAが1979年から1991年まで進めていた地殻力学観測計画（CDP）に基づくものである。CDPは、VLBIや衛星レーザー測距（SLR）等の当時実用化されたばかりの宇宙測地技術を駆使し、現世のプレート運動を実測することが科学的な目的で

あった。また1985年の日独実験では地球の自転角度(UT1)測定に成功した(Yoshino et al., 1986)。これは、後日、つくば32mアンテナによる日独UT1観測の端緒となったものである(栗原他, 2003)。

さらに通総研と緯度観測所(現, 国立天文台)により, EOP決定のための観測が1987年から1994年に行われた。鹿島26m局とアメリカ3局から構成される太平洋観測網(IRIS-P)は, 1988年に発足したIERSへの重要な貢献となった(横山, 1990)。

1990年1月, 通総研と国立極地研究所は, 南極昭和基地の衛星受信用多目的アンテナ(口径11m)を利用して, 鹿島26mアンテナ及び豪州局との間で, 初めての南極VLBI実験に成功している(Kurihara et al., 1991)。

1992年に鹿島26mアンテナを引き継いだ国土地理院は, 1993年から1996年までNASAの固体地球力学観測計画(DOSE)に参加し, アジア発の貴重なデータを提供した。DOSEは, VLBI等の宇宙技術を用いて, 固体としての地球の変動を観測し, 地球の物理学的な様相を明らかにしようとするもので, 具体的には, 地球基準座標系の構築と維持, プレート運動や内部変形の観測, 海面変動の監視等を目的としていた。1997年からは地球回転計測に特化した地球回転連続観測事業(CORE)が始まり, 世界のVLBI局の中でも高い性能を持つ15~20局による観測が行われた。鹿島26mアンテナも1997年から1999年まで合計23回の観測に参加した。

このようにVLBIの国際観測プログラムは, 米国NASAの主導の下, 欧州や日本を初めとする先進諸国の協力により, 順調に発展してきた。一方, VLBIやSLRより後発の宇宙測地技術であるGPS(汎地球測位システム)の進展も目覚しく, 1993年, 国際測地学協会(IAG)の傘下に国際GPS事業(IGS)が設立され, 測地学分野での利用の鍵を握るGPS衛星の位置情報(精密暦)等を定常的に計算する国際協力体制が瞬く間に確立した(<http://igs.csb.jpl.nasa.gov/overview/viewindex.html>)。IGSの成功に刺激され, VLBI分野でも, 1999年, IAG傘下の事業として国際VLBI事業(IVS)が設立された(<http://ivscc.gsfc.nasa.gov/info/aboutivs.html>)。IVSの目的は, ITRSの構築・維持, EOPの提供等で, 従来のプログラムと変わりはないが, 測地学や宇宙開発のユーザに定常サービスを行うため多国間協力による体制が整えられたと言える。なおIVSの運用もNASAが主導しており, VLBI観測でのNASAの重要性に変わりはない。

さて鹿島26mアンテナは, 新しいIVSの下での観測にも参加していたが, 1998年3月に竣工した国土地理院のつくば32mアンテナが本格運用を始めるに伴い, 徐々に国際観測の第一線から身を引き, 2000

年以降は, ほぼ国内観測のみとなる。

なお, 上記の国際観測以外に, 1995年には日韓VLBI観測に, 1997年と1999年には中国が主催するアジア太平洋地域観測(APSPG)にも参加している。

4. 1. 2 国内観測

日本全土に及ぶ精密測量を推進し, また地殻変動観測にも携わる国土地理院は, 高精度・長距離用測量機器としてのVLBI導入を決定し, 1981年より直径5mの小型アンテナを有する可搬型VLBIの開発を進めてきた(吉村, 1981)。本装置は, 電波研究所鹿島支所(当時)の26mアンテナを相手局として観測することを前提に, 同研究所の協力の下に設計・製作された(吉村, 1986)。必要に応じて日本各地に移設できるよう, アンテナ機構部は分解して車両や船舶による輸送が可能な構造となっている。表-3及び写真-3に可搬型アンテナの概要を示す。

表-3 可搬型5mVLBIアンテナの諸元

形式	鏡面修正カセグレン, Az-Elマウント
開口直径	5 m
総重量	約10トン
周波数 (利得)	Sバンド 2.20~2.32GHz (利得36.5dB) Xバンド 8.18~8.60GHz (利得50.7dB)
鏡面精度	0.5mm (rms)
最大駆動速度	Az 1.0°/秒, El 0.5°/秒
製造年	1981年
製造者	明星電気



写真-3 鹿島26mアンテナを相手に, 日本各地でVLBI観測を行った可搬型5mVLBIアンテナ

1984年7月, 鹿島26mアンテナと, つくば市の国土地理院構内に設置した可搬型アンテナとの間でシステム実験が行われ, 良好な結果が得られた(杉本・黒岩, 1986; 齊藤・松坂, 1986)。その後も, 鹿島-つくば基線(基線長55km)の実験観測(JEG)は1989年まで繰り返された。また, 1986年から1989年には, 国際測地学及び地球物理学連合(IUGG)等の進める国際リソスフェア探査計画(DELP)の一環として, 可搬型アンテナを宮崎県や父島に移設

し、鹿島26mアンテナとの間の基線を測定する実験観測 (VEGA) を繰り返し行った (吉村, 1989; 松坂, 1989)。

その後も、国土地理院の行う基本測量として広域地殻変動の検出及び国内測地網の規正を主たる目的に、国内VLBI観測は継続された (Tobita, 1993)。表-4に、鹿島26mアンテナを相手局とする移動観測の一覧を掲げる (福崎・国土地理院VLBIグループ, 2001)。このように、鹿島26mアンテナは、通総研時代から国土地理院の可搬型アンテナの相手局として利用されていた。

表-4 鹿島26mアンテナを相手局とするVLBI移動観測

観測点	観測年
国土地理院 (つくば市)	1984-1991
宮崎県新富町	1986, 1988, 1993
東京都小笠原村父島	1987, 1989
北海道新十津川町	1990
国土地理院水沢測地観測所	1991
静岡県相良町	1992
和歌山県海南市	1993
大韓民国水原市*	1995

*別途開発された口径3.8m可搬型アンテナによる。

その後、国土地理院の国内VLBI観測は、鹿島26mアンテナの所管替えやGPS連続観測を行う電子基準点の全国整備を背景に、固定局による観測へと移行していった。1993年度補正予算による北海道新十津川町への3.8mアンテナの整備を皮切りに (齊藤他, 1995)、1997年には鹿児島県始良町と父島に10mアンテナが、1998年には茨城県つくば市の国土地理院構内に32mアンテナが整備された (大木他, 1998)。

新十津川局が稼働を開始した1996年以降、次々に整備された固定局を相手に、鹿島26mアンテナを主局とする国内VLBI観測 (JADE) が定期的に行われた (芝他, 2000)。つくば32mアンテナが本格運用を始めると、鹿島及びつくば局を含む5局体制での国内観測が2002年まで続いた。IVSのマスターファイルに登録された鹿島26mアンテナでの最終観測は2002年5月27日のJADE0202である。

つくば32mアンテナを初めとする国内VLBI観測網の整備により、長らく我が国のVLBI観測の主局であった鹿島26mアンテナは、その役割をつくば32mアンテナに譲った。両アンテナの間の基線ベクトルを精密に決定するため、1998年から2001年まで合計7回の結合観測 (JAPAN-TIE) が行われた。

4.2 プレート運動の実測

テクトニクスは、地球内部に原因のある地震・火山・地殻変動など、広義の変動を研究する学問であ

る。1912年にA.L.ウェゲナーが提唱した大陸移動説は、1960年頃に提唱された海洋底拡大説を経て、プレートテクトニクスに発展する。ここでは、地球の表層部を覆う厚さ100km程度のリソスフィア (岩石圏) は、いくつかの板のような部分 (プレート) に分かれており、プレートは自らは変形しないまま運動することにより、互いの境界で様々な変動を起こすと説明される。地震、火山、造山運動などの諸現象を統一的に解釈できるため、1960年代以降の地球科学に革命をもたらした重要な学説である。

プレートテクトニクスの地球物理学的な証拠としては、各大陸で得られた岩石の残留地磁気から求めた磁北の移動や、海嶺付近の海洋底で観測される地磁気の縞模様等があったが、最も直接的な証拠となる大陸間の運動 (プレート運動) の実測は、VLBIやSLR等の高精度測地観測技術の登場を待つ必要があった。

鹿島26mアンテナの最初の貢献は、1984年から1985年の日米実験のデータを、通総研グループが解析し、太平洋プレートの運動を初めて実測したことである (Heki et al., 1987)。1984年1月から1985年11月まで、太平洋プレート上のカウアイ (ハワイ)、クワジェリン (マーシャル諸島) 及び北米プレート上の鹿島、ギルクリーク (アラスカ)、モハビ (カリフォルニア) の延べ5局において合計14回のVLBI観測を行い、各局間の基線長変化率を求めたところ、例えば鹿島-クワジェリン間は8.5cm/年の速度で接近していること、測定された運動速度は地磁気の縞模様の分析から得られたプレート運動モデルと良く一致すること、プレート内にある局間の基線長変化はほとんどないこと等が明らかとなった。この論文は、プレートテクトニクスの根拠を与えると同時に、地質学的な年代にわたるプレート運動と、現世での運動速度がほぼ一致することも見出した重要な論文である。

その後も継続された日米間のVLBI観測により、本州とハワイの距離 (基線長約5,700km) は毎年6cmずつ短くなっていることが確認されている (図-4)。これは一般の方々にもわかりやすい、VLBIの代表的な観測成果である。

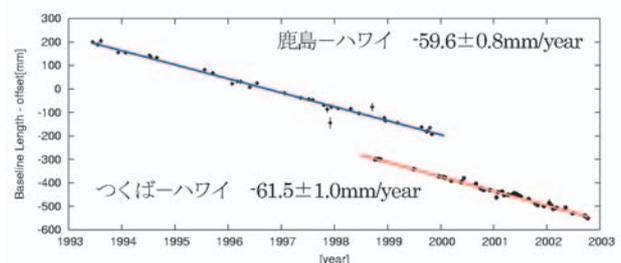


図-4 ハワイ (カウアイ島コキー局) と鹿島、つくば局間の基線長変化。鹿島26mアンテナの役割が、つくば32mアンテナに引き継がれたことも示している。

第二の貢献は、フィリピン海プレート運動の実測である。国土地理院は1987年11月及び1989年11～12月に、フィリピン海プレート上に位置する父島に5m可搬型アンテナを移設し、通総研・鹿島26mアンテナとの間で4回のVLBI観測を行った。その解析結果から、2年間で父島が鹿島に対して北北西に7.4cm接近したことを明らかにした (Matsuzaka et al., 1991)。これは、フィリピン海プレートの現世での運動速度を史上初めて直接測定した重要な論文である。

1990年代に入ると、プレート運動はGPSでも測定できるようになるが、VLBIやSLRの結果は10年以上先行し、地球科学発展に果たした役割は極めて大きい。

4.3 世界と日本の位置を定義

地球上の位置を表すには、測地基準系が必要である。従来、測地基準系は各国が局所的な測量により独自に定義していたが、VLBI等のグローバルな測量が可能となった宇宙測地技術の発達により、全世界で共通の測地基準系を定義することが可能となった。いわゆる世界測地系の登場である。1987年にIUGGと国際天文学連合 (IAU) によって設立されたIERSでは、VLBI、SLR、GPS等の解析結果を統合計算し、各観測局の座標や速度をITRFとして定期的に公表している。当然、鹿島26m局の観測データもITRFの計算に利用されている。また、地球外の信号を利用する宇宙測地では、観測局の位置と地球の自転運動とが密接に関連するため、①地球の自転角度 (UT1)、②地球自転軸の天球に対するふらつき (歳差・章動)、③自転軸の地表面に対する動き (極運動) を表すEOPも重要となる。VLBIはEOP決定に不可欠な情報源で、鹿島26m局のデータもIERSにおけるEOPの計算に利用されてきた。このように鹿島26m局はIERSを通して国際的な測地基準系の定義等に貢献してきた。

一方、国土地理院は、鹿島26m局を含む国内VLBI観測の結果を用いて、日本の測地基準網の規正に関する研究を行っている (例えば、Tobita, 1994; Ogi et al., 1999; 石原他, 1999)。これらの蓄積が一気に結実したのが、測量法改正に伴う測地成果2000の導入である。

測量法及び水路業務法では、測量及び水路測量の成果をそれぞれ統一させる観点から測量及び水路測量の基準を定めており、このうち経緯度の測定についての基準は我が国独自の基準となっていた。しかし、近年、測量及び水路測量の基準に関して世界標準化が進展するとともに、地球規模の測位システムの普及等の測位技術をめぐる国内及び国際の環境が大きく変化し、経緯度の測定についての基準を世界

基準に適合させる必要がある。このため、2001年6月20日、測量法及び水路業務法の一部を改正する法律案が国会で成立し、基本測量及び公共測量における経緯度は、世界測地系に従って測定しなければならないこととなった (国土地理院, 2003)。改正された新しい測量法第十一条を次に掲げる。

第十一条 基本測量及び公共測量は、次に掲げる測量の基準に従って行わなければならない。

- 一 位置は、地理学的経緯度及び平均海面からの高さで表示する。ただし、場合により、直角座標及び平均海面からの高さ、極座標及び平均海面からの高さ又は地心直交座標で表示することができる。
 - 二 距離及び面積は、第三項に規定する回転楕円体の表面上の値で表示する。
 - 三 測量の原点は、日本経緯度原点及び日本水準原点とする。ただし、離島の測量その他特別の事情のある場合において、国土地理院長の承認を得たときは、この限りでない。
 - 四 前号の日本経緯度原点及び日本水準原点の地点及び原点数値は、政令で定める。
- 2 前項第一号の地理学的経緯度は、世界測地系に従って測定しなければならない。
- 3 前項の「世界測地系」とは、地球を次に掲げる要件を満たす扁平な回転楕円体であると想定して行う地理学的経緯度測定に関する測量の基準をいう。
- 一 その長半径及び扁平率が、地理学的経緯度の測定に関する国際的な決定に基づき政令で定める値であるものであること。
 - 二 その中心が、地球の重心と一致するものであること。
 - 三 その短軸が、地球の自転軸と一致するものであること。

この法律の施行には、国土地理院が測量の基準として全国に設置している三角点や電子基準点 (GPS連続観測点) について、世界測地系における経緯度 (狭義の測地成果2000) を公開する必要がある。このための準備作業は1993年頃から進められ、世界測地系として、長年の国際観測により求められた鹿島26mアンテナの1997年1月1日0時UTにおけるITRF94を固定することとした (国土地理院, 2003)。ITRF94は、この方針を定めた時点で公開されていた最も新しいITRFである。

測地成果2000の計算手順は次の通りである (図-5)。

- 1) 計算上の原点となる鹿島26mアンテナ (Az・El軸交点) のITRF94は、IERSの技術報告 (Boucher et al., 1996) に掲載されている (表-5)。これは1993.0年時点での3次元直交座標なので、同じ表にある速度を用いて、1997.0年時点の座標に直す。

- 2) 鹿島26mアンテナを相手局とする国内VLBI観測の結果から、新十津川及び海南VLBI観測点の座標を求める。
- 3) 鹿島、新十津川、海南の各VLBI観測点と最寄りの電子基準点との関係は、コロケーション測量から求められている。また、日本経緯度原点のすぐ側にある一等三角点（東京大正）と最寄りの電子基準点との間のGPS測量も別途行われている。
- 4) 元期である1997年1月1日前後に稼動していた595点の電子基準点の観測データを基線解析する。次に、3点のVLBI観測点の座標を固定して、電子基準点及び一等三角点（東京大正）から構成される骨格網の網平均計算を行い、その座標を求める。
- 5) その他の三角点についても、骨格網の座標を基準に、過去の測量データを網平均計算して経緯度を求める。計算の詳細は国土地理院（2003）を参照されたい。

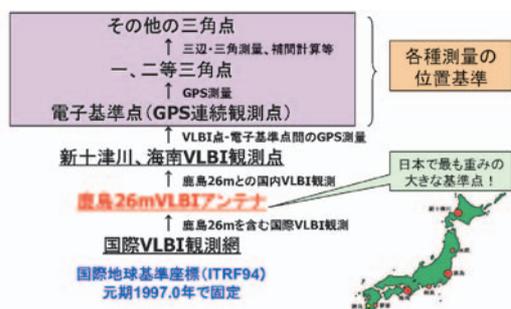


図-5 測地成果2000の計算手順

表-5 鹿島の3次元直交座標値 (Boucher et al., 1996 のT-74から引用)

ITRF94 CLASS C STATION COORDINATES AT EPOCH 1993.0						
DONES NO.	SITE NAME	TECH. ID.	X/Y/z	X/Y/z	X/Y/z	Sigma
21604002	PURPLE MOUNTAIN DORIS FURA 10 12		-2608501.880	4739989.333	3364883.597	.513 .028 .023
21604003						
21605002	SHANSHAI	GPS SHAO 5	-2831731.158	4675666.097	3273365.524	.513 .015 .012
21605008	SHANSHAI	VLBI 7224 1 4	-2847698.122	4659872.632	3283958.664	.261 .230 .217
21613001	CHANGCHUN	SLR 7237 8 9	-2674266.851	3757189.458	4391508.524	.264 .205 .252
21612001	UNINGI	VLBI 7330 1 3 4	-22810.844	4631922.648	4367063.973	.620 .055 .053
21701001	KASHIMA	VLBI 1854 1 3 4	-3997882.268	3276581.242	3724119.288	.097 .007 .048
21702001						
21701004	KASHIMA	VLBI 1857 1 3 4	-3997449.218	3276397.229	3724276.968	.097 .007 .048
21701004						
21702009	MIEDANAMA	VLBI 7314 1	-3862411.924	3105935.911	4001944.894	.029 .026 .030
21702010	MIEDANAMA	VLBI 7324 1 3 4	-3857236.104	3108803.207	4001883.118	.020 .016 .020
21702010						
21704000	TOKYO	SLR 7308 8	-3346200.194	3368097.573	3702191.046	.195 .190 .233
21718001	MIYAZAKI	VLBI 7312 1 3 4	-3582767.942	4052033.993	3349020.606	.090 .093 .088
21725001	NOBAYAMA	VLBI 7244 1 3 4	-3871640.325	3426273.957	37321697.055	.033 .011 .032
21725001						
21726001	SIMOGATO	SLR 7838 8 9	-3822388.333	3699762.510	3507573.118	.069 .069 .110
21728001	USUDA	VLBI 7246 1	-3855355.422	3427427.561	3741091.289	.072 .069 .073
21729007	USUDA	GPS USUD 5 6 7	-3855262.987	3427432.511	3741020.408	.010 .011 .009
21729007						
21731001	SHINTOYOSHIZAKI	VLBI 7315 1	-3642181.893	2861496.569	4370361.703	.045 .042 .046
21732001	CHICKIYAMA	VLBI 7316 1	-4489356.623	3482989.589	2887931.221	.097 .081 .093
21732001						
21732002	CHICKIYAMA	TIE 7844	-4491073.906	3481527.442	2887391.723	.188 .095 .105
21732002						

測量法施行令（2001年12月28日改正）第二条には、測量法第十一条を受け、東京都港区麻布台にある日本経緯度原点金属標の十字の交点の経緯度と、ここから、つくば超長基線電波干渉計観測点金属標の十字の交点を見たときの方位角の数値が規定されている。この原点数値は、直近の一等三角点（東京大正）を經由して、鹿島26mアンテナの世界測地系の座標から逆算して求めた値である。もし、この値が1 cm違えば、国土地理院の約11万点に及ぶ測地基準

点（三角点、電子基準点）の座標も1 cmずつ違っていたという意味で、鹿島26mアンテナは日本の測地基準点の最上位に位置する実質上の原点として機能したのである。

2003年4月1日から新しい測量法が施行され、各種測量に位置の基準を与える測地成果2000も公開された。鹿島26mアンテナが解体されても、その位置情報は、測地成果2000の中に生きていくことになる。なお、鹿島26mアンテナの座標は、7回に及ぶ結合観測により、つくば32mアンテナにmm精度で引き継がれており、今後はつくば32mアンテナが日本の測地基準系の実質上の原点としての機能を果たすことになる。

さて、鹿島26mアンテナは日本だけではなく、韓国の測地基準系構築にも貢献した。1995年、日本海東縁部における地殻変動の把握、日韓の測地網の高精度な結合等を目的に、国土地理院は、韓国建設交通部国立地理院（当時）と共同でVLBI及びGPS連続観測を実施した（石原他，1996）。VLBI観測は、韓国水原（スウォン）市に日本から移設した可搬型VLBI観測システム（口径3.8m）と、鹿島26m局との間で実施した。1995年10～11月にかけての3回の観測成果から、両国の測地網がmm精度で結合され、韓国GPS連続観測局や韓国経緯度原点の位置をITRSで表すことにも成功している。

4.4 技術開発・人的ネットワークの拠点

通総研におけるVLBIの研究開発は1970年代に開始され、1977年には鹿島26mアンテナと横須賀12.8mアンテナとの間で国内初のVLBI観測に成功した（Kawajiri et al., 1979）。その後、鹿島26mアンテナによる本格的なVLBI研究が進められ、通総研はNASAと並ぶVLBI技術の開発拠点となった。現在も通総研は34mアンテナを活用し、IVSの技術開発センターとして先進的なe-VLBIの開発等で世界をリードしている。

一方、国土地理院は、鹿島26mアンテナを軸とする共同研究を通し、通総研から優れたVLBI技術を導入し、その技術を測地事業に応用して、測地基準系の維持や地殻変動の監視等に成果をあげている。通総研での高度な技術開発の結果が、国土地理院における測量行政のニーズに直接生かされた形となっており、両者の協力は非常に効率的かつ効果的なものであると言える。

1990年、天文分野も含めたVLBIに関する技術情報の交換を行うため、通総研、国土地理院、国立天文台、宇宙科学研究所、国立極地研究所、鹿児島大学、岐阜大学、九州東海大学等のVLBI研究者によりVLBI懇談会が組織された（小山，2001）。これは、通総研・鹿島グループが育ててきた国内の人的な

ネットワークの拡大を示すものである。

2002年9月20日、解体に先立って開催された鹿島26mアンテナお別れ会（写真－4）に、30名を超える関係者が参集したのは、同アンテナが日本のVLBI開発の一里塚だったことの証であろう（Tsuji and Koyama, 2003）。この時に奉納したお神酒のお陰か、解体工事は無事終了することになる。



写真－4 鹿島26mアンテナお別れ会
（写真提供：通総研）

4.5 つくば32mアンテナの先駆け

国土地理院が鹿島26mアンテナを取得した時点で、既に建設後25年が経過しており、主鏡面を支えるボルトの交換等の改修工事を行う必要があった（齋藤他, 1995）。また鹿島における24時間観測を実施するため、当時の担当職員は、つくば－鹿島間（基線長55km）の往復や夜間観測に苦勞した。この苦勞の甲斐もあり、国土地理院にVLBI固定局運用のノウハウが蓄積されるとともに、国際的に知名度の高い鹿島26mアンテナの運用を担当したことで、国土地理院の名が国際的にも知られるようになってきた。

阪神・淡路大震災後の1995年度第二次補正予算において、地殻変動観測体制の強化を図るため、つくば32mアンテナ等の建設が認められたが、その背景には鹿島26mアンテナの運用実績があったのである。

5. 解体工事

重量約500トン（基礎を除く）、地上高約31mに及ぶ大型アンテナの解体工事は、国土地理院から国土交通省大臣官房官庁営繕部に支出委任し、関東地方整備局営繕部に発注して頂いた。工事の監理は宇都宮営繕工事事務所にご担当頂いた。

鹿島26mアンテナは、鹿島宇宙通信研究センター構内に位置し、直近に研究施設や民家があるため、解体にあたっては、通総研及び営繕部と協議の上、

極力外部に騒音及び振動を与えない工法及び機械を採用した。工事内容について事前に周辺住民への説明を行った。

アンテナは、鉄筋コンクリート造りの下部躯体（地下1階、地上1階）の上に、鉄骨造（高さ31.5m）の上部構造物及びアルミニウム製の反射板（直径26m）が取り付けられている。下部躯体の下には、深さ26mのパイルが打ち込まれており、計画段階ではその撤去も検討したが、周辺の建物に与える影響等を考慮し、パイルの撤去は行わないことにした。

2003年11月末から周辺の仮設工事が始まり、2004年1月から3月にかけてアンテナ解体工事が行われた。仮設工事では、仮設事務所、仮設道路、仮囲い、フェンス植栽移設、仮設防音パネル、山留め等の工事を行った。また、解体工事には、アンテナ解体撤去、基礎解体撤去の他、渡り廊下撤去、埋め戻し・整地、電気設備撤去、機械設備撤去等の工事が含まれる。

解体中の主な行程を写真－5に示す。アンテナ上部の解体では、アンテナを天頂に向けた状態で固定し、切断部分をレッカー車でつりながら、高所作業車に乗った作業員がガス切断した。レッカー車の位置は固定し、アンテナを方位角方向に30°ずつ回転



写真－5 消え行く鹿島26mアンテナ。しかし、その位置情報は約11万点の国家基準点に引き継がれている。

させて、順次解体した。アンテナ受けリング、ギヤ部分、操作室、階段室、鉄骨基礎についても、切断部分をレッカー車でつりながら、高所作業車を用いて小割ガス切断した。コンクリート解体時の振動・騒音を防ぐため、下部躯体の周囲にはシートパイルを圧入した。その際、水圧によってシートパイルを打ち込むサイレントパイラーと呼ばれる機械を使用した。下部躯体（地上）については、コアマンと呼ばれる機械で穴を開け、その穴に油圧破碎機を差し込んでコンクリートを解体した。下部躯体（地下）については、コアマンで穴を開けた後、油圧をかけてクラックを入れ、さらに油圧破碎機を差し込んでコンクリートを解体した。コンクリートガラは、圧碎機で細かく砕き、コンクリートとスクラップに分別し、コンクリートはリサイクル工場に運搬した。

下部躯体やギヤ部分は、まるで砲塔のように頑丈な造りであり、当初素人目に無事解体できるのか心配したが、熟練した解体専門業者の力も借りて、作業は予定通り無事終了できた。解体工事にご協力頂いた通総研、関東地方整備局営繕部、工事関係者、周辺住民の方々に改めて感謝の意を表す。

6. おわりに

本稿では2003年3月に解体された鹿島26mアンテナの功績を回顧した。それは国土地理院のVLBI事業の創設期と、現在のつくば32mアンテナを中心とする4局体制に至る発展期についての物語でもあった。鹿島26mアンテナは、それまで可搬型アンテナしか有していなかった国土地理院にとって待望の大型固定局であり、それを足がかりに国内観測が確実に実施されるとともに、国際観測の第一線に躍り出る桧舞台となった。通総研VLBIグループのお膝元である鹿島における定常観測は、通総研と国土地理院の連携をさらに深めた。さらに、鹿島26mアンテナにおける測量成果の蓄積は、測量分野における世界測地系の導入というグローバルな流れの中で、世界における日本の位置を定義する実質上の原点を与え、測量行政にも貢献した。現在のつくば32mアンテナを中心とする国土地理院のVLBI体制は、鹿島26mアンテナにおける実績と経験の上に成り立っているのである。

謝 辞

写真1, 2, 4は通信総合研究所鹿島宇宙通信研究センターの吉野泰造センター長のご好意による。

略 語 表

APSG	:Asian-Pacific Space Geodynamics program
ATS-1	:Applications Technology Satellite-1
CDP	:Crustal Dynamics Project
CORE	:Continuous Observations of the Rotation of the Earth
DELP	:Dynamics and Evolution of the Lithosphere Program
DOSE	:Dynamics Of the Solid Earth
EOP	:Earth Orientation Parameters
GPS	:Global Positioning System
IAG	:International Association of Geodesy
IAU	:International Astronomical Union
IERS	:International Earth Rotation Service (2003年4月以降はInternational Earth rotation and Terrestrial Reference systems Service)
IGS	:International GPS Service
IRIS-P	:International Radio Interferometric Surveying - Pacific
ITRF	:International Terrestrial Reference Frame
ITRS	:International Terrestrial Reference System
IUGG	:International Union of Geodesy and Geophysics
IVS	:International VLBI Service for Geodesy and Astrometry
JADE	:Japanese Dynamic Earth observation by VLBI
JEG	:Japanese VLBI Experiment for Geodesy
NASA	:National Aeronautics and Space Administration
PCM	:Pulse Code Modulation
rms	:root mean square
SLR	:Satellite Laser Ranging
TDRSS	:Tracking and Data Relay Satellite
UT	:Universal Time
VEGA	:VLBI Experiment for Geodetic Application
VLBI	:Very Long Baseline Interferometry

参 考 文 献

- Boucher, C., Z. Altamimi, M. Feissel, and P. Sillard (1996): Results and Analysis of the ITRF94, IERS Technical Note 20.
- 福崎順洋・国土地理院VLBIグループ (2001): 国土地理院による測地VLBI観測成果, 鹿島宇宙電波観測用大型アンテナによる研究成果特集, 通信総合研究所季報, Vol.48, No.1, 17-22.
- Heki, K., Y. Takahashi, T. Kondo, N. Kawaguchi, F. Takahashi, and N. Kawano (1987): The relative movement of the North American and Pacific plates in 1984-1985, detected by the Pacific VLBI network, *Tectonophysics*, 144, 151-158.

- 日置幸介・吉野泰造 (1990): 西太平洋電波干渉計システムの開発目的, 西太平洋電波干渉計システムの開発特集, 通信総合研究所季報, Vol.36, No.8, 15-22.
- 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, No.92, 41-51.
- 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・齊藤隆・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, No.86, 46-56.
- Kawajiri, N., T. Ojima, N. Kawano, F. Takahashi, T. Yoshino, and K. Koike (1979): The First VLBI Experiment in Japan, Journal of the Radio Research Laboratories, Vol.26, No.119, 13-64.
- 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, No.20, p.469.
- 近藤哲朗 (2001): 緒言, 鹿島宇宙電波観測用大型アンテナによる研究成果特集, 通信総合研究所季報, Vol.48, No.1, 1-2.
- 近藤哲朗・吉野泰造 (2001): 国際測地VLBI観測成果, 鹿島宇宙電波観測用大型アンテナによる研究成果特集, 通信総合研究所季報, Vol.48, No.1, 3-11.
- 小山泰弘 (2001): 国内測地VLBI観測成果, 鹿島宇宙電波観測用大型アンテナによる研究成果特集, 通信総合研究所季報, Vol.48, No.1.
- Kurihara, N., T. Kondo, Y. Takahashi, and M. Ejiri (1991): The results of test VLBI experiments with the Syowa station in Antarctica, Journal of Communication Research Laboratory, Vol.38, No.3, 605-611.
- 栗原忍・高島和宏・田辺正・河和宏・宮川康平 (2003): UT1決定のための日独共同観測について, 国土地理院時報, No.102, 3-10.
- 松坂茂 (1989): VLBIの観測成果, 国土地理院時報, No.69, 60-64.
- Matsuzaka, S., M. Tobita, and Y. Nakahori (1991): Detection of Philippine Sea Plate Motion by Very Long Baseline Interferometry, Geophysical Research Letters, Vol.19, No.8, 1417-1419.
- Ogi, S., M. Ishihara, Y. Fukuzaki, M. Iwata, K. Shiba, M. Yazawa, K. Takashima, and K. Nagata (1999): Comparison of the time variation with GSI VLBI domestic experiments and daily GPS measurements, Proceedings of the International Workshop on GEodetic Measurements by the collocation of Space Techniques ON Earth (GEMSTONE), 101-105.
- 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, No.90, 1-10.
- 高橋富士信 (1990): 通信総合研究所におけるVLBI技術の開発研究, 西太平洋電波干渉計システムの開発特集, 通信総合研究所季報, Vol.36, No.8, 3-14.
- 齊藤隆・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, Vol.32, No.1, 72-78.
- 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 (1995): 新十津川VLBI観測施設の整備について, 国土地理院時報, No.84, 1-8.
- 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, No.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, Vol.32, No.1, 64-71.
- Tobita, M., S. Matsuzaka, K. Otoi (1993): Geodetic Measurements Using Transportable VLBI of GSI, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.39, 43-53.
- Tobita, M. (1994): Precise Determination of the Geodetic Framework of JAPAN, Bulletin of the Geographical Survey Institute, Vol.40, 7-36.
- Tsuji, H. and Y. Koyama (2003): Sayonara (Good-bye) 26-m antenna at Kashima, IVS Newsletter, Issue 6, 2.
- 横山紘一 (1990): 地球回転計測への応用, 西太平洋電波干渉計システムの開発特集, 通信総合研究所季報, Vol.36, No.8, 157-170.
- 吉村好光 (1981): VLBI—その原理と国土地理院における開発機の紹介—, 国土地理院時報, No.54, 4-10.
- 吉村好光 (1986): VLBIによる広域地殻変動の検出, 国土地理院時報, No.63, 36-39.
- 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, No.69, 56-59.
- Yoshino, T., S. Hama, T. Shiomi, J. Campbell, H. Cloppenburg, H. Schuh, and R. Kilger (1986): First VLBI Experiments between Kashima and Wettzell for Monitoring UT1, Advanced Space Research, Vol.6, No.9, 13-16.