

つくば VLBI 観測局 その功績について Achievements of Outgoing Tsukuba VLBI Station in Geodesy and Surveying

測地部 梅井迪子・栗原忍・石本正芳・若杉貴浩・川畑亮二¹
Geodetic Department
Michiko UMEI, Shinobu KURIHARA, Masayoshi ISHIMOTO,
Takahiro WAKASUGI, and Ryoji KAWABATA

要 旨

つくば VLBI 観測局は、国内の地殻変動観測体制の強化を目的として、阪神・淡路大震災後の 1998 年に整備された。国土地理院構内に設置された 32 m アンテナは、世界トップクラスの性能を有し、その後 18 年間に亘り、国内のみならず海外の観測局とともに VLBI 観測を実施した。

国際 VLBI 事業が主導する国際観測では、世界の VLBI 観測局と協働で観測することで、国際地球基準座標系の構築や地球姿勢パラメータの決定などに貢献した。また、東日本大震災後の測量成果の改定時には、つくば VLBI 観測局の観測データを基にして成果が算出された。さらに、つくば VLBI 観測局は、共同研究により宇宙探査機の軌道決定や、天文学的研究といった測地学以外の分野においても大きな貢献を果たした。

国土地理院は、つくば VLBI 観測局のこれらの役割を継承しつつ発展させるため、次世代の観測システムに対応した VLBI 観測局を茨城県石岡市に整備した。その後、新しい観測局の本格運用が開始されたことから、つくば VLBI 観測局は運用を終了した。

1. はじめに

超長基線電波干渉法 (VLBI) とは、地球から数十億光年離れた電波源 (クェーサー) から放射される電波を複数のアンテナで受信し、その到達時刻の差 (遅延時間、後述) を解析することにより、アンテナ相互の位置関係を高精度に求める技術である。国土地理院は、プレート運動の検出、海面変動の監視等を目的として、1980 年代から直径 5 m の可搬型アンテナ及び鹿島 26 m アンテナを使用して VLBI 観測を開始した。その後、1990 年代に国内 (北海道、東京都小笠原村、鹿児島県) に固定型アンテナを、1998 年には国土地理院構内につくば VLBI 観測局 (以下「つくば局」という.) を整備した。本稿では、つくば局が成し遂げた功績とともに、それを支えた観測・相関処理技術の変遷についてもまとめる。

2. つくば局建設の経緯

国土地理院は、プレート運動の検出や海面変動の

監視等を目的として、1981 年から直径 5 m の可搬型 VLBI アンテナシステムの開発に着手した。1986 年からは、郵政省電波研究所 (現 情報通信研究機構、以下「NICT」という.) の協力の下、同研究所の鹿島 26 m アンテナと全国各地に移送して設置した 5 m 可搬型アンテナの基線で VLBI 観測を実施した (吉村, 1986; 高島・石原, 2008)。写真-1 は宮崎県新富町に設置された 5 m 可搬型アンテナと、電波研究所構内に設置された鹿島 26 m アンテナである。



写真-1 (左) 5 m 可搬型アンテナ (宮崎県新富町)。
(右) 鹿島 26 m アンテナ (茨城県鹿嶋市)。

その後、鹿島 26 m アンテナは、1992 年に郵政省通信総合研究所 (当時、電波研究所から改称) から建設省国土地理院 (当時) に移管され、米国航空宇宙局 (NASA) 等が計画する固体地球力学計画 (DOSE) や地球回転連続観測 (CORE) などの国際 VLBI 観測に参加し、国際地球基準座標系 (ITRF) の構築等に大きく貢献した (辻ほか, 2004)。特に、2001 年の測量法改正により日本の経緯度の基準が世界測地系に変更された際には、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の経緯度が計算された。一方、この 26 m アンテナは 1968 年に完成したもので、老朽化が著しく、今後国土地理院が継続的に国際 VLBI 観測事業を実施していくためには新たなアンテナが必要だった。

阪神・淡路大震災後の平成7年度第二次補正予算にて、つくば局の整備が認められた。直径 32 m の主反射鏡を持つパラボラアンテナと、観測局舎、信号処理装置等からなる観測局は1998年3月に完成し、同6月にNASA Goddard Space Flight CenterのJohn M. Bosworth氏らを招いて、観測開始式を開催した。こうして、鹿島 26 m アンテナが担ってきた役割は、つくば 32 m アンテナに引き継がれた。

つくば局建設から観測開始に至るプロセスと並行して、海外では VLBI に関する新たな組織である国際 VLBI 事業 (IVS) の設立が進められていた。つくば局の観測開始式が行われた 1998 年 6 月に IVS 設立準備委員会から IVS への参加が呼びかけられた。国土地理院は、VLBI システム開発当初の目的であったプレート運動の検出及び海面変動の監視に止まらず、東アジア地域における観測網の空白域を埋め ITRF の構築・維持に積極的に関与していくという観点から、IVS に正式に参加することを決定した。

3. つくば局の概要

在りし日のつくば 32 m アンテナを写真-2 に、諸元を表-1 に示す。本アンテナの特徴は、主反射鏡の口径が 32 m と大型のパラボラアンテナであるにも関わらず、方位角、仰角方向ともに毎秒 3 度という高速駆動が可能な点である。一般に口径が大きいアンテナほど集光力が高くなるため、より高感度に電波を受信できる。また、測地目的の VLBI 観測では、単位時間あたりの観測天体数が多いため、天体の切替え時間が短いほど、実効的な観測時間を増やすことができる。したがって、大口径で高速駆動が可能なつくば 32 m アンテナは、良質なデータを効率的に取得できる、世界トップクラスのアンテナであった。



写真-2 在りし日のつくば 32 m アンテナ。

表-1 つくば 32 m アンテナの諸元。

形式	鏡面修正カセグレンアンテナ 経緯台 (Az-EI マウント ^{*1}) ホイールアンドトラック方式
開口直径	32 m
総重量	550 t
駆動速度	Az, EI 方向それぞれ 3°/sec
可動範囲	Az 方向 ±355° EI 方向 0-90°
受信周波数帯	S: 2.12-2.52 GHz X: 7.78-8.98 GHz (K: 19.5-25.0 GHz) ^{*2}
鏡面精度	0.14 mm (rms) ^{*3}
製造年月	1998 年 3 月

*1 方位角 (Azimuth; Az) と仰角 (Elevation; EI) 軸周りにアンテナが回転する駆動方式。

*2 共同研究協定の下、筑波大学が搭載した受信機の受信周波数帯。

*3 実測値 (大木ほか, 1998)。

つくば 32 m アンテナの構造を図-1、図-2 に示す。アンテナの重みによる経年的な沈下を最小限に抑えるために、アンテナの基礎部には、直径 2 m、長さ 45.5 m の基礎杭 21 本が打設された。国土地理院構内の GNSS 観測点は、農業用地下水のくみ上げの影響で上下変動していることが明らかになったが、つくば 32 m アンテナの基台ではその変動の振幅が小さいことが示された (畑中ほか, 2010)。

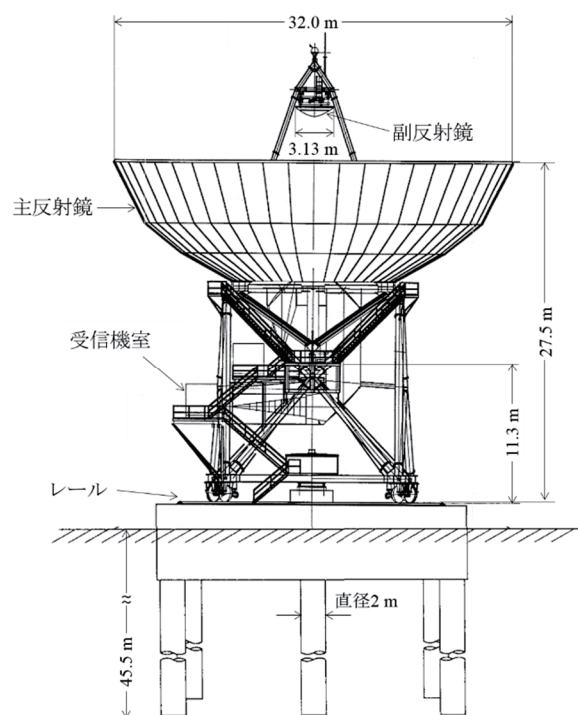


図-1 つくば 32 m アンテナの構造 (正面図)

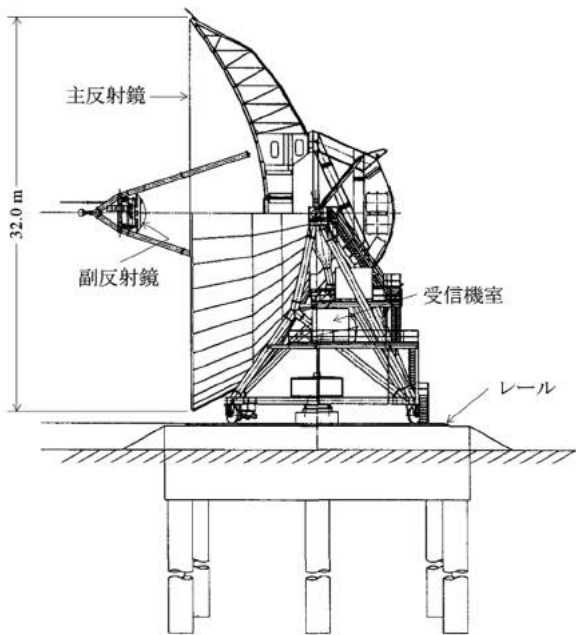


図-2 つくば 32 m アンテナの構造（側面図）。

クェーサーからの電波は、主反射鏡、副反射鏡によって収束され、その後さらに複数の反射鏡で反射されることによって、受信機室に達する。クェーサーからの電波は、携帯電話等の人工電波と比較すると極めて微弱であるため、受信機室内の低雑音増幅器によって増幅される。その後、増幅された S 及び X 帯の信号は観測局舎へ伝送されるが、その際の信号強度の減衰を軽減させるために、中間周波数（以下「IF 信号」という。）と呼ばれるより低い周波数（500–1000 MHz）へ変換される（ヘテロダイン）。さらに、落雷による影響を最小限に抑えるために、IF 信号は電気信号から光信号に変換され、光ケーブルによって観測局舎へ伝送される仕様になっている。

観測局舎に送られた信号は、再度周波数変換された後、アナログ/デジタル変換（以下「A/D 変換」という。）され、記録媒体に記録される。各観測局で得られた観測データは相関局へ集められ、観測データを互いに比較することによって遅延時間が算出される。相関局で行われるこの処理は相関処理と呼ばれ、これによって初めて観測量を得ることができる。国土地理院は、国内の固定型アンテナの整備と合わせて相関処理システムを整備し、つくば 32 m アンテナの解体後も継続して相関処理業務を行っている。

4. つくば局のあゆみ

つくば 32 m アンテナは、国土地理院が設置した 4 番目の固定型 VLBI アンテナとして、1998 年に完成し、その後、国内観測と国際観測に参加した。当時、世界の VLBI アンテナの多くが宇宙通信や電波天文観測用に設計されていたため、測地観測専用に設計

されたつくば 32 m アンテナは世界から注目を集めた（高島・石原，2008）。しかし、つくば 32 m アンテナは、大口徑で高速駆動するという利点を持つ一方、駆動が困難になる重大なトラブルを起こすことがあった。アンテナ完成直後、自重によりレールが破損するトラブルが発生し、約 7 ヶ月間観測を中断した。同様のトラブルは 2013 年にも発生し、約 6 ヶ月間観測を中断した。

つくば局の開局とほぼ同時期の 1999 年に IVS が設立され、測地学と位置天文学の研究を目的とした国際的な VLBI 共同研究が効率よく進められるようになった。国土地理院は IVS 設立当初から、IVS の Directing Board の評議員を務め、VLBI の国際連携に大きく貢献している。つくば局は、IVS の重要な観測局として、数多くの国際観測に参加し、測地基準座標系の構築に大きく貢献した。特に、2011 年 5 月の東北地方太平洋沖地震に伴う電子基準点の測量成果の改定では、つくば 32 m アンテナの位置を基準にして、成果が算出された。つくば局の測地学等への貢献については第 7 章で述べる。

2002 年以降、つくば局は測地基準座標系の構築だけでなく、地球の自転に基づく世界時（UT1）の監視を目的とした VLBI 観測へ参加した。その後、観測・相関処理システムの改良を進め、2005 年から新しい観測システム K5 を本格導入した。これにより、より安定的に観測を実施することができ、また相関処理を迅速に行うことができるようになった。2008 年には観測終了 3 分 45 秒後に UT1 と協定世界時（UTC）の差（以下「dUT1」という。）を求めることに成功した。観測・相関システムの変遷は第 6 章で述べる。

2014 年の石岡 VLBI アンテナの完成後、つくば局の役割は石岡 VLBI 観測施設（以下「石岡局」という。）に引き継がれ、2017 年 3 月につくば 32 m アンテナは解体された。表-2 に、より詳細な内容を示す。

表-2 1998 年以降の VLBI 事業のあゆみ。

1998/03	つくば 32 m アンテナ完成
1998/06	国内観測に参加開始
1998/10	24 時間国際観測に参加開始
1998/11	レールの破損による約 7 ヶ月の観測中断
1999/01	国際 VLBI 事業（IVS）設立
2001/06	測量法改正（鹿島 26 m アンテナの位置が日本の新しい経緯度の基準となる。）
2002/05	地球の自転に基づく世界時（UT1）の監視のための定常観測開始
2003/10	小惑星探査機「はやぶさ」の軌道決定観測に参加

2005/09	15日間連続観測 CONT05に参加（以降2008年，2011年，2014年も参加。）
2005	K5システムの本格導入
2006/12	K帯での観測開始
2008/02	観測終了3分45秒後のdUT1の導出に成功
2011/05	東北地方太平洋沖地震に伴う電子基準点の成果改定（つくば32mアンテナによる観測結果を使用。）
2013/05	レールトラブルによる約6ヶ月の観測中断
2013/12	新十津川 VLBI 観測局（北海道）運用終了
2014/03	石岡 VLBI アンテナの完成
2015/02	石岡局との並行観測開始
2015/03	父島 VLBI 観測局（東京都）運用終了
2015/03	始良 VLBI 観測局（鹿児島県）運用終了
2016/12	つくば局運用終了
2017/03	つくば32mアンテナ解体完了

5. 観測実績

つくば局は，18年間で総計2662回の観測に参加した．年間の観測数の推移を図-3に示す．国内観測は，新十津川局（北海道），鹿島局（茨城県），始良局（鹿児島県），父島局（東京都）とともに2014年度まで実施された．観測は，日周変動を取り除くために，24時間を1セッションとして実施された．国内観測によって得られたデータは，国土地理院で相関処理及び基線解析が行われ，国内の測地基準座標系の構築や維持，プレート運動の監視等に貢献した（芝ほか，2000）．

IVSが主導する国際観測についても，通常24時間で1セッションの観測が実施される．この24時間国際観測は，地球姿勢パラメータ（EOP）や地球基準座標系（TRF）を求めることを目的として毎週実施されている．EOPとは，宇宙空間に固定された天球基準座標系（CRF）から見たUT1，地球の自転軸の天球に対するふらつき（歳差・章動），自転軸の地表面に対するふらつき（極運動）を記述したパラメータである．VLBIだけが事実上，この5つのパラメータを同時に観測できる技術である．

また，2002年からはintensive（集中・強化）と呼ばれる1時間観測シリーズ（以下「INT観測」という．）にも定期的に参加した．INT観測は，EOPのパラメータのうちUT1の値のみを迅速に，かつ高い時間分解能で求めることに最適化したものである．UT1の値はGNSS衛星や宇宙探査機の軌道決定に使用されるため，迅速に提供することが重要である．この観測は，地球の自転に対する感度を高めるため

に，東西に伸びた基線が必要であり，ヴェッツェル観測局（ドイツ），コキーパーク観測局（ハワイ）が参加して実施された．

2005年以降は，次章で述べる観測及び相関処理システムの移行により観測の無人化及びデータ転送のネットワーク化がなされたことによって，観測数が格段に増加した．また，より安定して運用できるようになったため，つくば局は他の観測局に比べて欠測率が低く，IVSから高い評価を受けていた．ただし，2013年はレールの修繕工事のために，観測数が半減している．

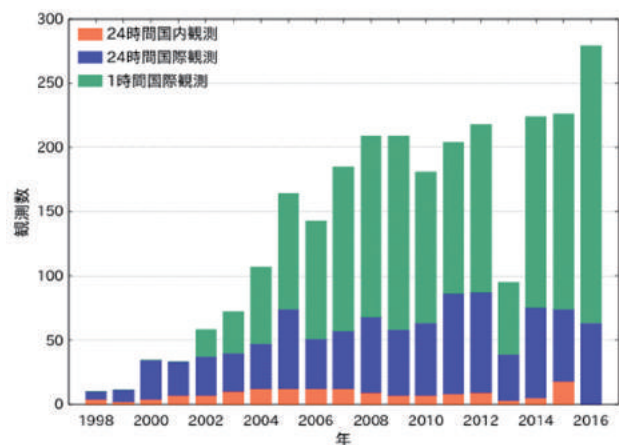


図-3 つくば局が参加した24時間国内観測，24時間国際観測及び1時間国際観測の観測回数の年間推移．

6. 観測・相関処理システムの変遷

6.1 磁気テープ時代の観測

つくば局は，新しい観測システムK5の導入以前は，国際観測と国内観測で2種類の記録システムを使い分けていた．これは，後段の相関処理システムが海外と国内で異なるためである．

国際観測は，米国マサチューセッツ工科大学（MIT）ヘイスタック観測所で開発されたMark 4と呼ばれる記録システムを採用した．周波数変換器からの出力信号をMark 4フォーマットと呼ばれるA/D変換器に入力し，デジタル信号として記録媒体に記録した（写真-3）．記録媒体にはオープンリール型の磁気テープを使用していた（写真-4）．これは当時，VLBI観測のような大容量のデータをリアルタイムで記録できる記録媒体は磁気テープをおいてほかになかったためである．テープ交換はオペレータの手動で行われる．24時間の観測では，2回程度のテープ交換が必要であり，担当職員は交代制で夜勤して対応していた．オープンリールであるがゆえに，テープの取扱いが難しく，テープ交換時にリールからテープが外れてしまうとその復旧に時間と手間がかかり大変な苦勞があった．データが記録されたオープン

リールテープは、米国やドイツの Mark 4 相関局に航空便で輸送した。

一方、国内観測は、郵政省通信総合研究所（当時）が開発した K4 と呼ばれるシステムが導入された（写真-3）。周波数変換器からの出力信号はインターフェイスと呼ばれるサンプラーに入力され、デジタル信号としてレコーダで記録される。K4 システムの記録媒体はカセットカートリッジタイプの磁気テープ（以下「D1 テープ」という。）が採用された（写真-4）。これは、放送局などで使われる汎用のテープで、1 本に 96 ギガバイトのデータを書き込むことができる。オープンリールテープのようにテープが外部に露出していないので、その取扱いは容易であった。このほか、この D1 テープを 24 本とレコーダを収容し、テープの自動交換機能を備えたライブラリーシステムが導入され、オペレータによるテープ交換作業が不要という仕様であった。しかし、導入当初は、観測制御計算機からの制御がうまくいかず、テープの交換を職員が行うことが多く、結局観測室で寝ずの番をしなければならなかった。データの記録モードにもよるが、24 時間の観測で 10 本から 15 本の D1 テープを要した。新十津川局、始良局、父島局でも同様に D1 テープにデータが記録され、相関処理を行う国土地理院本院へ宅配便で輸送された。



写真-3 つくば局の観測局舎に設置された Mark 4 システムの記録装置（写真中央にある黒色の装置）と K4 システムの記録装置（写真左）。

相関処理は、宇宙測地館 2 階の相関処理装置で行われた。相関処理装置は、データを読み出すために観測局と同型のレコーダとライブラリーシステムが組み込まれており、これ以外に時刻信号と天体の信号を取り出すアウトプットインターフェイス、2 局の観測局の信号に遅延時間を与えながら比較する相関器、制御計算機からなる（写真-5）。レコーダとライブラリーシステムは 3 局分あり、3 局 3 基線の相関処理を一度に行うことができる。つくば局を含む 4 局と、ほかにも国立天文台や NICT などの観測局が観測していたため、例えば観測局 9 局の観測では、

36 基線分の相関処理を行わなければならない、1 回の観測の相関処理に最低 1 ヶ月はかかっていた。観測テープの再生は、3 つのレコーダの調走同期を取って行わなければならない、1 つでも再生がずれてしまうとやり直しになってしまうため、相関処理はかなりの手間がかかる作業であった。こうした相関処理技術の蓄積によって、国土地理院は IVS 設立当時から相関局に登録されることとなった。



写真-4 Mark 4 システムで使用されたオープンリール型の磁気テープ（上）と K4 システムで使用された D1 テープ（下）。



写真-5 宇宙測地館 2 階に設置された相関処理装置。

6.2 K5 システムの導入

1990 年代後半には、ハードディスクドライブ（HDD）の大容量化、PC の性能向上が進んだことから、記録媒体として磁気テープに代わり HDD を用いた、汎用 PC をベースとする観測システムの開発が行われた（Whitney, 2002; Kondo et al., 2002）。海外ではヘイスタック観測所が中心となって Mark 5 システムを、日本では NICT が K5 システムを開発した（近藤ほか, 2008）。

NICT で開発された K5 システムは、PC4 台で構成され、各 PC に PCI バスまたは USB の標準的なインターフェイスを介して VLBI 用サンプラーを接続することにより、サンプリングから HDD への記録ま

で行うことができるものである。また、従来は専用のハードウェアが必要であった関連処理を汎用 PC とソフトウェアで行うことが可能となった。このシステムにより、保守費用の削減、観測の無人化、データのネットワーク転送及び関連処理の分散処理化などによる迅速化が期待された。さらに、Mark 5 と K5 の両システムで記録されるデータ形式は、ともに UNIX のファイル形式であるため、ソフトウェアによってファイルフォーマットを相互に変換することができる。したがって、K5 システムの導入には国内及び国際観測の観測システムを統一できるというメリットもあった。

国土地理院では、2003 年からこの K5 システムの導入を開始し、約 2 年間の試験観測を経て、2005 年から本格運用を開始した（高島ほか、2006）。導入後の試験観測を通じて、まず、観測の安定化に向けた機器調整やユーティリティソフトウェアの開発を行った。特に、K5 システムは PC4 台がそれぞれ独立しているため、それらを一括で制御するソフトウェアを整備した。また、関連処理においては、24 時間観測の場合、一基線の処理でも延べ数百天体分のデータを処理する必要があることから、関連処理用に PC を約 50 台導入するとともに、それらを効率的に用いて分散処理するためのソフトウェアを開発した（町田ほか、2008）。その後も拡張や改良を重ね、観測の安定化や関連処理の迅速化等が実現された。

6.3 e-VLBI による dUT1 の即時算出の実現

K5 システムの導入により、理論的には観測データをネットワーク経由で転送すること（以下「e-VLBI」という。）が可能となった。しかし、VLBI の観測データサイズは INT 観測で約 100 ギガバイト、24 時間観測では数テラバイトと通常のインターネット回線で転送することは困難であった。そのため、国立天文台の協力の下、2004 年に光ケーブルによる高速回線を構築し、e-VLBI のための環境を整備した。

高速回線を構築後、即時性が求められるつくば-ヴェッツェル間で実施していた INT 観測において、2004 年から e-VLBI による dUT1 決定のための試験を開始した。観測は、つくば局が K5 システム、ヴェッツェル局が Mark 5 システムを用いていたため、観測終了後にヴェッツェル局が Mark 5 形式のデータを転送し、国土地理院がそれを Mark 5 形式から K5 形式にフォーマット変換したのち、関連処理を実施した。その結果、K4 システムでは約 1 週間要していた dUT1 の算出が約 1 日に短縮した。しかしながら、転送に約 10 時間、フォーマット変換に約 6 時間、関連処理に約 4 時間要していたことなどから、さらなる高速化に向けた取り組みが必要であった（高島ほか、2005）。

2007 年度からは、NICT、オンサラ（スウェーデン）、メツァホビ（フィンランド）とともに、観測終了後 30 分以内の dUT1 算出を目標に試験観測を開始した。データ転送の高速化のため、米国で開発され、メツァホビ局の VLBI グループが VLBI 用に改良した Tsunami と呼ばれる高速データ転送用 UDP プロトコルを導入した。これにより、データ記録速度 (256Mbps) を超える速度での転送が可能になり、ほぼリアルタイムで転送できるようになった。さらに、転送されたデータを逐次フォーマット変換し、関連処理を実行するソフトウェアを整備したことにより、準リアルタイムに関連処理を行うことが可能となった。

その結果、世界最速となる観測終了後 3 分 45 秒で dUT1 を算出することに成功した（Matsuzaka et al., 2008）。また、算出された dUT1 の誤差は、国際地球回転・基準系事業 (IERS) の最終解と 30 マイクロ秒程度で一致しており、IERS の速報解と同等の精度で決定できることが示された（Haas et al., 2010）。国土地理院は IVS の解析センターとして、dUT1 の値を正式な成果物としてユーザーに提供しているほか、ここで開発された技術は、その後の INT 観測の迅速解析や 24 時間観測のデータ転送に活用された。

6.4 高速デジタルサンプラーの導入

VLBI 観測では、取得する帯域幅が広がるほど信号対雑音比が向上するため、観測精度の向上が期待される。つくば局では、NICT 及び宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (JAXA/ISAS) によって開発されたサンプラー (ADS3000+) を 2009 年度に導入し、広帯域取得試験を実施した。このサンプラーは最大で 4 Gsps の速度での記録が可能であり、また、アンテナから送られてくる IF 信号を直接サンプリングすることができる。また、任意のベースバンド帯域を切り出すことができる。

2013 年には、既存のデータ記録装置である K5VSSP と ADS3000+ の間の比較試験が実施され、帯域幅が 2 倍になった場合の測位精度の検証がなされた。その結果、設定した周波数配列の問題により、測位精度の向上は確認できなかったが、信号対雑音比は計算通り $\sqrt{2}$ 倍に向上することが確認された（栗原・川畑、2013）。

7. 測地学等への貢献

7.1 ITRF 構築への貢献

IVS の 24 時間観測により算出された各観測局の座標値は、IVS を経由して IERS に提出される。これらは他の宇宙測地技術によって得られた結果とともに統合解析されることで、ITRF が構築される。ITRF は繰り返し更新されており、つくば局が参加した 24

時間観測の観測結果は、ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 の構築に使用された (Boucher et al., 2004; Altamimi et al., 2007; Altamimi et al., 2011; Altamimi et al., 2016)。

ITRF の構築に使用される 4 つの宇宙測地技術 (VLBI, GNSS, SLR, DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite)) の間には、わずかに系統差が存在する。IERS は、この系統差を小さくするために、異なる技術で決定される、観測局相互の位置関係を求めることを要請している。それを受けてつくば局では、VLBI アンテナ中心と国土地理院構内の IGS 観測局 (以下「TSKB」という。) の間を地上測量で結合させるコロケーション測量を実施した (三浦ほか, 2009)。つくば局では、2001 年, 2007 年, 2011 年にコロケーション測量を実施し、これらはすべて IERS に提出され、ITRF の構築に貢献した。

7.2 UT1 決定への貢献

地球の自転に基づく世界時 (UT1) は海洋潮汐、太陽や月の引力など複雑な物理現象を含んでいるため、不規則に変化する。一方、日常生活で使用される時刻は協定世界時 (UTC) に従っており、これは原子時計が刻む精密な 1 秒を基にしている。UT1 は常に UTC より遅れる傾向にあり、IERS は UT1 と UTC の差が ± 0.9 秒を超えないように、UTC にうるう秒を挿入している。国土地理院で行っている INT 観測は、第 5 章で述べたように、GNSS 衛星や宇宙探査機の軌道決定に使用されるほか、うるう秒の挿入の判断のために利用されている。図-4 につくば局の観測で得られた UT1 と UTC の差を示す。グラフ中の赤色の矢印は、UTC にうるう秒の 1 秒が挿入されたことを示している。

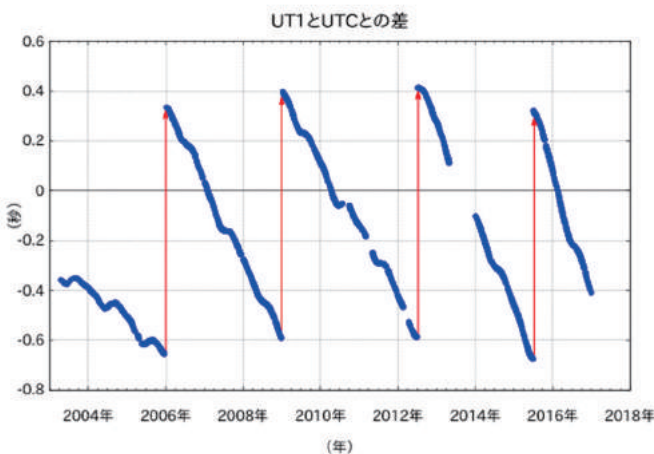


図-4 つくば局の観測で得られた UT1 と UTC の差。赤色の矢印はうるう秒の挿入を表す。

7.3 プレート運動の実測

VLBI の繰り返し観測を行うことによって、各観測局間の基線長変化や各観測局の速度を検出することができる。そのため、各観測局が位置するプレートの運動を高精度に決定することができる。日本国内では、国土地理院のつくば局、鹿島局、新十津川局、始良局、父島局のほか、国立天文台と NICT の VLBI 観測局によって VLBI の繰り返し観測が実施された。これらの結果を、IVS のデータベースに登録されたものと併せて解析することによって、各観測局の移動速度ベクトルを求めることができる (図-5)。このように、国内の VLBI 観測局による繰り返し観測を実施することで、日本周辺のプレート運動を詳細に把握することができる。VLBI 観測から求められた観測局の位置と移動速度は地震予知連絡会に情報提供されている。

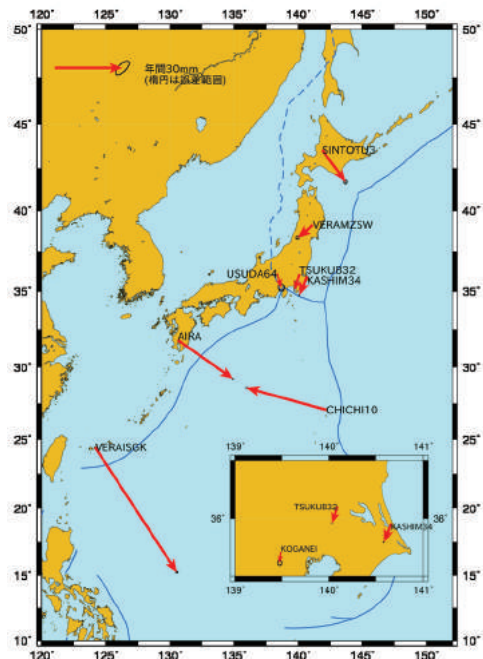


図-5 つくば局を含めた国内の VLBI 観測局の繰り返し観測によって得られた各局の平均的な移動速度ベクトル (ただし、平成 23 年東北地方太平洋沖地震及びそれに付随する余効変動の影響は除く.)。

7.4 東北地方太平洋沖地震後の測量成果の改定

2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い、東北地方から関東甲信越地方にかけての広い範囲で顕著な地殻変動が生じた。この地域の基準点の位置は大きく変動し、公共測量等に影響が及ぶため、基準点測量成果の公表が 3 月 14 日に停止された。その後、余効変動の影響を考慮して同年 5 月末に電子基準点の成果を改定することが決定され、つくば局の観測結果を基にした成果の算出が進められた。

東北地方太平洋沖地震の際、つくば市も震度 6 弱の揺れに見舞われ、つくば局も安全点検のため運用を一時停止したが、被害がないことを確認した 4 月 5 日から国際観測に復帰した。地震後のつくば局の座標値を ITRF2008 に基づいて計算するために、最も新しい 24 時間国際観測のデータベースをダウンロードし、VLBI データ解析ソフトウェア (CALC/SOLVE) で解析を実施した。24 時間観測の場合、相関処理に数週間程度を要するため、測量成果計算時点で相関処理が完了していた最も新しいデータ「IVS R1482」(5 月 10 日~11 日)を使用した。また、解析は東北地方太平洋沖地震の影響を受けていない海外の観測局位置を ITRF2008 に拘束し、適切な解析条件の下、地震後のつくば局の座標値を以下のとおり算出した。

基準座標系：ITRF2008

元期：2011/5/10 04:58:26 (UT)

X：-3957409225.65±6.51 (mm)

Y：3310228896.56±5.12 (mm)

Z：3737494719.44±6.95 (mm)

GEONET に含まれる国土地理院構内の TSKB とつくば局間の正確な相対位置関係は、前述の通りコロケーション測量により確認されている。したがって、上記のつくば局の座標値と 2007 年度に実施したつくば地区コロケーション結果を組み合わせ、新たな測量成果の元期における TSKB の正確な位置を算出した。この値を基にして電子基準点の測量成果が算出され、5 月 31 日に公表された(檜山ほか, 2011)。

7.5 共同研究の成果

つくば局では、外部機関との共同研究協定により、VLBI 観測及び相関処理技術の開発が進められたほか、宇宙探査機の軌道決定や天文学のための観測も実施された。JAXA/ISAS との共同研究では、臼田、内之浦の両宇宙空間観測所とともに VLBI 観測を実施した。これによって、両局の位置が高精度に決定されたため、飛翔体の位置を正確に決定することができた。また、つくば局は、小惑星探査機「はやぶさ」や小型ソーラーセイル実証機「IKAROS」の軌道決定のための VLBI 観測にも参加した。

国立天文台との共同研究の下、VERA 水沢局及び VERA 石垣島局が 24 時間国内観測に参加した。これによって、両観測局の位置が高精度に決定されたため、VERA プロジェクトで研究対象とされた天体の位置を高精度に決定することができた。また、筑波大学との共同研究により、K 帯 (19.5–25.0 GHz) の受信機がつくば 32 m アンテナに搭載され、天文学を目的とした観測に使用された。K 帯の観測では、VLBI だけでなく単一鏡としても利用され、銀河系の構造や星形成領域、系外銀河の銀河中心領域など

を対象とした天文学的研究に貢献した (Miyamoto et al., 2015; Arai et al., 2016)。

8. つくば観測局の運用終了とアンテナの解体

8.1 つくばから石岡へ

IVS は国際測地学協会 (IAG) の下に設立された国際共同事業である。IAG は複数の宇宙測地技術を統合することによって、地球の形状や重力場の時空間的な変化を高精度に測定するための全球統合測地観測システム (GGOS) を推進している。IVS は GGOS に貢献するため、次世代の VLBI 観測システム (以下「VGOS」という。) の具体的な仕様をまとめた。このシステムによって、位置決定精度 1 mm、常時観測、観測後 24 時間以内の解の算出を目指している (Petrachenko et al., 2009)。

国土地理院は、つくば 32 m アンテナの役割を継承しつつ発展させるため、VGOS の仕様を満たす VLBI 観測施設の整備を 2011 年に決定し、2014 年 3 月に茨城県石岡市に直径 13.2 m のアンテナを建設した。その後、石岡局は本格運用を開始し、つくば局との並行観測を約 2 年間実施し、つくば局の役割を引き継いだ。そのため、つくば局は 2016 年末で運用を終了し、その後アンテナが解体されることとなった。

8.2 解体について

2016 年 12 月 31 日、つくば 32 m アンテナにとって最後の観測が終了した。年明け後、アンテナに搭載していた受信機や周波数変換器等を搬出し、アンテナの電源遮断後の 2017 年 1 月 11 日から解体作業を開始した。主反射鏡部は、解体用の大型重機を使って細かく切断し、撤去した (写真-7 ①)。この大型重機は、敷地面積の制限から特定の位置でしか作業できないため、アンテナを回転させる必要があった。しかし、アンテナ駆動系の電源はすでに遮断されていたため、小型の重機でアンテナを物理的に押し、回転させることによって撤去作業が進められた。主反射鏡及び副反射鏡部の撤去作業は、わずか 4 日間で完了した (写真-7 ②)。

一方、主反射鏡中央部は主反射鏡部に比べて硬く、また重量も 3 倍程度あるため、クレーンで吊り上げながらガス切断し (写真-7 ③)、撤去した (写真-7 ④)。この作業を繰り返し、約 3 週間かけて主反射鏡中央部を撤去した。その後、仰角ギア部、支柱、車輪及びレール等が撤去され (写真-7 ⑤)、2017 年 3 月に解体が完了した (写真-7 ⑥)。

解体の様子は、Facebook を通じて定期的に配信された。つくば 32 m アンテナは、その大きさから、つくば市のランドマーク的な存在となっていたため、解体を惜しむ声が多数投稿された。また、つくば局

が担ってきた役割とそれを石岡局へ引き継いだことを紹介する目的で、解体されたアンテナの部品の一部は、国土地理院構内の「地図と測量の科学館」にて展示されている。

9. おわりに

つくば局は 1998 年から 18 年間に亘って、計 2600 回を超える国内観測及び国際観測に参加し、東アジア地域における主要な観測局として、ITRF の構築、プレート運動や地球回転の監視等において大きな役割を果たした。

つくば局では、NICT の協力により、観測・相関処理システムの技術開発が進められ、安定した観測及び迅速なデータ処理が実現した。そのため、つくば

局は他の観測局と比較して観測の欠測が少なく、IVS から高い評価を受けていた。加えて、つくば局の高度化は、担当職員の技術力を向上させてきた。現在の我々の技術力は、共同研究機関の研究者のほか、これまで業務に携わった多くの職員による技術やノウハウの蓄積からなる。それらは、つくば局の後継としての役割を担う石岡局の整備に大いに活かされている。

(公開日：平成 29 年 11 月 17 日)

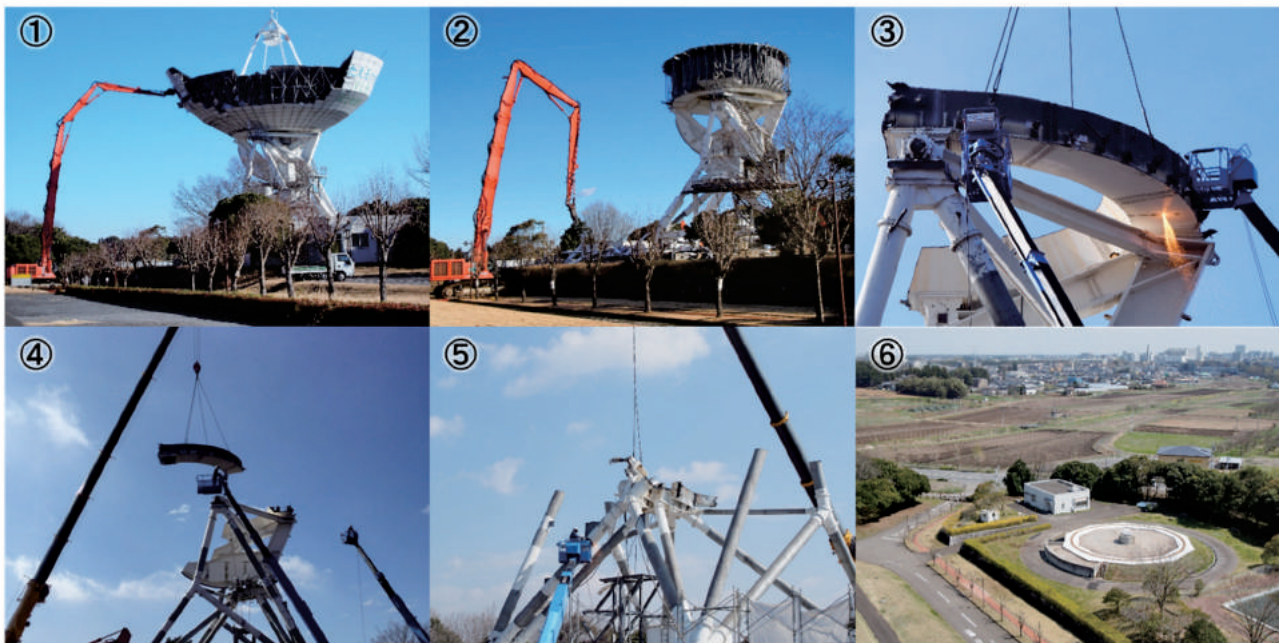


写真-7 解体作業の様子。① 解体作業開始当日、主反射鏡の撤去が開始された。② 解体 4 日目には、主反射鏡と副反射鏡が撤去された。③、④ 主反射鏡中央部はガス切断とクレーンによる吊り下げを繰り返すことによって撤去された。⑤ 支柱も同様にガス切断と吊り下げにより撤去された。⑥ アンテナは完全に撤去され、現在は何も残されていない。

参考文献

- Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, and C. Boucher (2007) : ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., X. Collilieux, & L. Métivier, (2011) : ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame, *J Geod*, 85, 457-473. <https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4>.
- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, and X. Collilieux (2016) : ITRF2014: a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 6109-6131, doi:10.1002/2016JB013098.
- Arai, H., Nagai, M., Fujita, S., Nakai, N., Seta M., Yamauchi, A., Kaneko, H., Hagiwara, K., Mamyoda, K., Miyamoto, Y., Horie, M., Ishii, S., Koide, Y., Ogino, M., Maruyama, M., Hirai, K., Oshiro, W., Nagai, S., Akiyama, D.,

- Konakawa, K., Nonogawa, H., Salak, D., Terabe, Y., Nihonmatsu, Y., and Funahashi, F. (2016) : A multi-line ammonia survey of the Galactic center region with the Tsukuba 32 m telescope. I. Observations and data, PASJ, 68, 76.
- Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard, and M. Feissel-Vernier (2004) : The ITRF2000. (IERS Technical Note ; 31) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. 289 pp., paperback, ISBN 3-89888-881-9.
- Haas R., M. Sekido, T. Hobiger, T. Kondo, S. Kurihara, D. Tanimoto, K. Kokado, J. Wagner, J. Ritakari, and A. Mujunen (2010) : Ultra-Rapid dUT1-Observation with e-VLBI, Artificial Satellites, 45(2), 75-79.
- 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 高島和宏, 黒石裕樹 (2010) : つくば季節的上下変動: 精密計測, 機構説明, およびその監視手法について, 国土地理院時報, 120, 115-124.
- 檜山洋平, 山際敦史, 川原敏雄, 岩田昭雄, 福崎順洋, 東海林靖, 佐藤雄大, 湯通堂亨, 佐々木利行, 重松宏実, 山尾裕美, 犬飼孝明, 大滝三夫, 小門研亮, 栗原忍, 木村勲, 堤隆司, 矢萩智裕, 古屋有希子, 影山勇雄, 川元智司, 山口和典, 辻弘道, 松村正一 (2011) : 平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震に伴う基準点測量成果の改定, 国土地理院時報, 122, 55-78.
- 近藤哲朗, 小山泰弘, 市川隆一, 関戸衛, 川合栄治, 木村守孝 (2008) : K5/VSSP システムの開発, 測地学会誌, 54, 233-248.
- Kondo T., Y. Koyama, J. Nakajima, M. Sekido, R. Ichikawa, E. Kawai, H. Okubo, H. Osaki, M. Kimura, Y. Ichikawa, and GALAXY Team (2002) : Real-time Gigabit VLBI System and Internet VLBI System, IVS 2002 General Meeting Proceedings, 142-146.
- 栗原忍, 川畑亮二 (2013) : VLBI2010 に関する研究 (第 2 年次), 平成 24 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000081565.pdf> (accessed 10 Jul. 2017).
- 町田守人, 近藤哲朗, 小山泰弘 (2008) : K5 関連処理支援アプリケーション “PARNASSUS” の開発, 国土地理院時報, 115, 11-26.
- Matsuzaka, S., Shigematsu, H., Kurihara, S., Machida, M., Kokado, K., and Tanimoto, D. (2008) : Ultra Rapid UT1 Experiments with e-VLBI, IVS 2008 General Meeting Proceedings (Proceedings of the 5th IVS General Meeting), 64, 68-71.
- 三浦優司, 栗原忍, 吉田賢司, 川元智司, 小谷京湖 (2009) : VLBI-GPS コロケーション測量について, 国土地理院時報, 119, 71-85.
- Miyamoto, Y., Nakai, N., Seta, M., Salak, D., Hagiwara, K., Nagai, M., Ishii, S., and Yamauchi, A. (2015) : Hot ammonia in the center of the Seyfert 2 galaxy NGC 3079, PASJ, 67, 5.
- 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.
- Petrachenko, B., Niell, A., Behrend, D., Corey, B., Böhm, J., Charlot, P., Collioud, A., Gipson, J., Haas, R., Hobiger, T., Koyama, Y., MacMillan, D., Nilsson, T., Pany, A., Tuccari, G., Whitney, A., Wresnik, J. (2009) : Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the VLBI2010 Committee, NASA Technical Memorandum, NASA/TM-2009-214180, pp. 58.
- 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) : 国内超長基線測量の観測結果, 国土地理院時報, 93, 44-51.
- 高島和宏, 石原操 (2008) : 国土地理院における超長基線測量, 測地学会誌, 54, 205-219.
- 高島和宏, 石本正芳, 町田守人, 藤咲淳一, 栗原忍 (2005) : VLBI による UT1 観測の高度化に関する研究, 平成 16 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000010184.pdf> (accessed 10 Jul. 2017).
- 高島和宏, 町田守人, 藤咲淳一, 石本正芳, 小門研亮, 谷本大輔 (2006) : VLBI 観測局の高度化に関する研究 (第 3 年次), 平成 17 年度国土地理院調査研究年報, <http://www.gsi.go.jp/common/000055161.pdf> (accessed 10 Jul. 2017).
- 辻弘道, 田辺正, 河和宏, 高島和宏, 宮川康平, 栗原忍, 松坂茂 (2004) : 鹿島 26m VLBI アンテナの測地学への貢献, 国土地理院時報, 103, 53-62.
- Whitney A. R. (2002): Mark 5 Disc-Based Gbps VLBI Data System, IVS 2002 General Meeting Proceedings, 132-136.
- 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, 63, 36-39.