

# 国際測地 VLBI における e-VLBI の現状と展望

情報通信研究機構鹿島宇宙通信研究センター

小山泰弘

## 1 . 国際測地 VLBI 観測の現状

現在、測地および天球基準座標系構築のための国際的な VLBI 共同実験は、IVS (International VLBI Service : 国際 VLBI 事業) の主導のもとに実施されている。IVS が 2000 年に組織されるまでは、各国の研究機関の間、もしくは二国間で結ばれた研究協力のもとに個別の観測プログラムが実施されてきたが、IVS が組織されてからは、観測のスケジューリングが一元化され、より効率的な運用が図られるようになった。2001 年には IVS のもとにワーキンググループが設置され、IVS の提供するべき公式データを定義して、そのために必要な観測形態を検討した結果がレポートとしてまとめられた [Schuh et al., 2001]。そのレポートの中では、IVS の果たすべき役割として ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ・ ICRF (International Celestial Reference Frame) といった基準座標系の構築と維持、および UT1-UTC ・ 極運動 ・ 章動といった EOP (Earth Orientation Parameters) の高精度な決定とが挙げられている。また、その上で現在の問題点は、観測頻度が少ないために EOP のデータが連続していないことと、観測を行ってから結果を得るために要する時間が長いことにあるとして、2005 年を目標に複数のネットワークでの観測を切り替えて連続した観測を行うこと、および観測してからデータ処理を行って結果を得るまでの時間を大幅に短縮することを提言している。情報通信研究機構では、IVS の技術開発センターの一つとして、このレポートの目標を達成するために高速ネットワークを利用した e-VLBI の実現、分散処理による相関処理システムの構築、観測帯域の広帯域化を通じた VLBI 観測データの高精度化などの技術開発を実施している。

表 1 に、2004 年初頭に計画された、IVS 主導の国際測地 VLBI24 時間実験の内訳を示す。この表にある実験のほか、UT1-UTC の推定を目的とした Intensive 実験と呼ばれる実験が、Wettzell-Kauai 基線で週 5 回、Tsukuba-Wettzell 基線で週 2 回実施されている。前者の実験は、Mark-5 観測システムが、後者の実験は K4 観測システムと、一部 K5 観測システムと Mark-5 システムによる e-VLBI 実験が導入されている。いずれも、2004 年初頭にはそれぞれ週 4 回と週 1 回の実施に留まっていたが、2004 年中ごろから、それぞれ週 1 回ずつ頻度を増やすことにより、毎日途切れることなく UT1 を国際 VLBI 実験によって推定することが可能となった。Intensive 実験における e-VLBI は、現在、月に 1 回、Wettzell 局で Mark-5 観測システムで記録した観測データをネットワーク経由で国土地理院に伝送し、そこで K5 データフォーマットに変換した後、K5 ソフトウェア相関器によって相関処理を行うことで実施している。今後、データ伝送と相関処理の自動化を進めることで、徐々に e-VLBI 実験の頻度を増加させていくことが予定されている。

表 1 2004 年初頭に計画された IVS 主導の国際測地 VLBI24 時間実験の内訳

実験区分	実験コード	実験数	平均参加局数	観測局あたり平均データ量 (GByte)	総データ量 (TByte)
Rapid turnaround EOP (Monday)	IVS-R1	52	6.8	1200	427
TRF, all stations 3-4 times per year	IVS-T2	12	7.8	400	38
EOP, TRF using S2	IVS-E3	12	5.3	600	38
Rapid turnaround EOP (Thursday)	IVS-R4	52	6.9	500	179
CRF, emphasis on south	IVS-CRF	13	2.7	400	14
20 station EOP/TRF/CRF sessions	RDV	6	20.0	1000	120
R&D Gigabit/s investigations	IVS-R&D	10	6.1	3000	183
Regional – Antarctica	IVS-OHIG	6	6.0	300	11
Regional – Europe	EURO	4	8.8	300	11
Regional – Antarctica	SYOWA	4	3.0	300	4
Regional – Asia/Pacific	APSG	2	6.0	300	4
TOTAL		173			1027

また、鹿島 34m 局とつくば 32m 局とが参加する国際測地 VLBI24 時間実験では、現在、K5 観測システムを使用してデータ記録を行っており、記録した観測データは観測後、ヘイスタック観測所にネットワークを経由して伝送した後、Mark-5 ファイルフォーマットへと変換し、Mark-5 ディスクパックに記録したあと相関局へと輸送され、相関処理が行われている。これは、現在、まだボン相関局（ボン大学）およびワシントン相関局（米国海軍天文台）がまだ高速ネットワークに接続されていないことが原因であるが、近い将来、両相関局とも高速ネットワークに接続するように努力が払われており、直接、相関局にデータ伝送ができるようになる見通しである。IVS-T2 実験は、表 1 にあるとおり、当初は 7 もしくは 8 局が観測に用いられてきたが、相関局が Mark-4 観測システムのオープンリール型データレコーダーから、ハードディスクをベースとした Mark-5 システムへと移行した結果、相関処理効率が飛躍的に向上したため、2004 年 4 月以降、観測局の数を 16 に増加させて実験が行われている。

## 2 . VLBI2010

前節で述べたように、ごく短期的な IVS の将来展望は IVS Working Group 2 の最終レポートで明確に定義され、そのために必要な技術開発は着実に進みつつあると言える。その一方、VLBI 観測に使用されるアンテナの多くは老朽化が進みつつあり、S バンドでは通信波による混信が多くの観測局で問題となりはじめるなど、長期的に見れば解決すべき課題は多い。そこで、2010 年ごろの将来を想定して、そのころにあるべき測地・位置天文 VLBI システムに VLBI2010 という名称をつけ、2003 年 9 月に開催された IVS 評議員会において VLBI2010 についての検討を行うワーキンググループを設置することとなった。

VLBI2010では、単に現在実施している IVS の国際 VLBI 実験を維持したり、性能を向上させたりするだけにとどまらず、2010年ごろに利用できると予想される技術をフルに活用して、地球物理学や位置天文学における新しいサイエンスを切り拓くようなパラダイムシフトも視野に入れた検討を行う必要があるというのが多くの一致した認識である。このような新しいサイエンスを打ち出すことができなければ、IVSに参加している研究機関の予算状況は年々苦しい状況に陥ることになることは明白であり、VLBI2010の報告書を基にして、各研究機関が新しいプロジェクトの予算要求までできるようなものを目指す必要がある。その意味では、現在日本で進めている VERA 計画のように位相補償を用いた高精度な位置天文観測を取り入れた ICRF の高精度化、もしくは、位相遅延の利用による大幅な測定精度向上、位相合成アレイなどを用いることで同時に複数の視野を観測することのできるシステムの開発、切れ目なく観測を行うために必要な観測・処理の自動化などが検討されることになると考えられる。

VLBI2010のワーキンググループは、2003年9月に開催された IVS 評議員会において議論された後、情報通信研究機構からの2名を含め、16名のメンバー構成で発足した。各メンバーは、観測の形態や最適な周波数配列から、受信機システム、処理システムなど7つの領域のサブグループに分かれ、それぞれのサブグループで具体的な検討が進められている。

2004年2月にカナダ・オタワ市で開催された第三回 IVS 総会では、VLBI2010についてのセッションが設けられてそこで各サブグループの検討結果が報告され、総会後に VLBI2010 の会合を1日スケジュールして、議論が行われた。これらの意見交換を経て、これまでに報告書の草案がまとめられ、2004年10月に情報通信研究機構が主催者となって開催した第3回国際 e-VLBI ワークショップの機会を利用して、さらに議論が行われた。報告者は、相関器についての検討を取りまとめる議長になっており、現状の相関器の仕様、今後計画されている ALMA、EVLA、SKA などの計画で検討されている相関器の性能のレビューを行いつつ、情報通信研究機構で現在開発を進めているソフトウェア相関器の現状での性能と今後の展望についても取りまとめて、中間報告書を作成した。そのほか、観測システムの議論では、EOP を短時間で高精度かつ高頻度に推定するため、6m から 12m 程度の小口径のアンテナを用いて、1Gbps 以上のデータレートで高感度な VLBI 観測を行うことが想定されている。これらのアンテナは、ITRF を高精度に維持するため、地球上いかなる地点でも GPS による測位精度の劣化が見られる 1000km 以内に必ず VLBI 観測局が存在するように、2000km の間隔で設置される。その結果、総観測局数は 40 局程度になると試算されている。これら、小口径のアンテナは、UT1-UTC を迅速に推定するため、e-VLBI が実施できるよう、高速ネットワーク回線で接続されていることが必須であるとされている。一方、ICRF の観測、および 32GHz 帯や 22GHz 帯などの従来の測地 VLBI 実験で使用されている周波数帯よりも高い周波数における電波源のサーベイや ICRF の観測のため、既存のアンテナを含む大口径アンテナが組み合わされて使用されることが議論されている。

### 3 . VSI-E : 伝送フォーマットの標準化

Westford 局と鹿島局とを用いた UT1-UTC 推定実験では、相関処理を行うソフトウェアプログラムの速度改良、効率的に分散処理を行うためのソフトウェア開発、および一連の処理の自動化を進めながら、徐々に UT1 推定までに必要な所要時間を短縮することに成功してきた。今後も、データ伝送速度を制限する原因となっている箇所の調査と対策によってデータ伝送速度の向上を図り、さらに処理システムの自動化を進めることで、所要時間を短縮したいと考えており、同様の試験観測を実施していきながらソフトウェアの開発を継続して行く予定である。また、データ伝送フォーマットの標準化が実現できれば、使用する観測システム固有のフォーマット間の変換が不要となると期待されるため、関係する研究者との間で標準化に向けての作業を精力的に進めている。その後、さらに処理速度を高速化し、観測したデータをリアルタイムに伝送して、そのままハードディスクに記録することなく相関処理を行うためのリアルタイム処理システムの開発も進めて行くことにより、観測が終了すると同時に UT1 などの地球姿勢パラメータすべてを推定することができるようにすることが最終的な目標である。このためには、広帯域を占める e-VLBI の観測データを、極めて遠距離で高遅延時間の地点間で伝送するため、高度な輻輳制御技術や、ネットワーク上の他のトラフィックを阻害することなく状況に応じて効率的に伝送バンド幅を利用するためのダイナミック制御など、研究用高速インターネットを科学計測研究に応用する上での研究を進めていくことが重要である。また、多数の観測局で同時に観測を行うような、大規模な e-VLBI 実験を実施するため、効率的に計算資源を活用し、観測データを時分割して分散処理させる手法や、マルチキャストによって同一のデータを複数の CPU に伝送して、処理を分散させる手法などの研究開発が必要となると考えられる。このような研究開発を進めていくことで、結果的には e-VLBI だけではなくさまざまな科学的計測や研究開発に研究用高速ネットワークを応用するための技術開発が進むと期待される。

このようなことを背景に、情報通信研究機構では、ヘイスタック観測所などと協力して、VSI-E と名づけられて、e-VLBI のデータ伝送フォーマットの標準化が検討されている。現在想定されている草案では、RTP (Real-time Transport Protocol) を基本構造として、ペイロードと呼ばれるデータ格納領域に VLBI のデータ伝送のフォーマットを定義するという方針で検討が進められている。今後、現在提案されている草案のフォーマットに基づいてデータ伝送を行うサーバー・クライアントプログラムが開発されつつあり、情報通信研究機構では、K5 観測システムのデータを VS-E へと変換して、リアルタイムにデータ伝送を行うシステムの開発を行うことを目指している。

#### 参考文献

Schuh, H., C. Patrick, H. Hase, E. Himwich, K. Kingham, C. Klatt, C. Ma, Z. Malkin, A. Niell, A. Nothnagel, W. Schlüter, K. Takashima, and N. Vandenberg (2002), Final Report, IVS Working Group 2 for Product Specification and Observing Program, in 2001 Annual Report, International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, by N. R. Vandenberg and K. D. Baver (eds.), NASA/TP-2002-00817-0, pp. 13-45.