

氏 名 小 山 泰 弘

学位 (専攻分野) 博士(学術)

学 位 記 番 号 総研大乙第126号

学位授与の日付 平成16年3月24日

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学 位 論 文 題 目 Real-time and Near-real-time Very Long  
Baseline Interferometry for Monitoring  
Motion of the Observing Sites, Flux Density  
Variation of Radio Sources, and Variation  
of Earth Orientation Parameters.

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 川口 則幸  
教授 日置 幸介  
助教授 花田 英夫  
教授 井上 允 (国立天文台)  
助教授 藤澤 健太 (山口大学)

## 論文内容の要旨

リアルタイム VLBI は、電波望遠鏡で受信した信号を磁気テープに記録せずに高速ネットワークなどを伝送し、直接相関処理する技術であり、本論文では、その手法を実現するシステムの開発を通じて、観測局位置、電波源強度、及び地球回転パラメタの変動を連続して長時間遅れなく計測することを可能としたことについて述べる。

磁気テープを用いる従来の VLBI では、テープの交換や運搬のためにどうしても人によるオペレーションが必要であり、遠隔地の観測局を長期間自動的に運用して観測を行うことは不可能であった。また、特に国際 VLBI 観測実験などでは、テープの輸送に時間がかかり、観測を行ってから結果を得るまでにかなりの日数を要している。さらに、観測システムとしての感度は磁気テープに記録できるデータ量によって制限され、そのデータ量は最新のデータレコーダーを用いても 1Gbps 程度が現在の限界となっているなど、いくつかの問題点や限界があった。一方、リアルタイム VLBI では、観測から解析までの処理を完全に自動化することによって、連続して自動的に長時間観測を行うことが可能となり、また観測後すぐに解析結果を得ることも可能となった。また、ネットワークによるデータ伝送の速度は現在では 10Gbps が実用化されており、波長多重化の技術を用いれば必要なだけ伝送容量を増やすことができるため、観測システムとしての感度を大幅に改善できる可能性を持っている。

本論文では、まずリアルタイム VLBI もしくは磁気ディスクなどの記録メディアを併用する順リアルタイム VLBI 観測・処理を実現するシステムの開発について述べる。通信総合研究所が実施した首都圏広域地殻変動観測計画においては、2.4Gbps の速度を持つ非同期伝送モード (ATM=Asynchronous Transfer Mode) 方式のネットワークで 4 箇所の観測局を接続して、リアルタイム VLBI による観測・処理を実用化した。また、この際、観測から解析までの処理を完全に自動化し、長期間にわたって無人での連続観測が可能となり、また、解析結果を自動的に公表できることを示した。さらに、その後、世界的に広く利用され、普及している TCP/IP を用いた共用のネットワークによる準リアルタイム VLBI 観測・処理を可能とすることを目標に開発を進めている K5 観測・処理システムは、汎用の PC と新しく開発した A/D ボード、及びソフトウェアによる相関処理を行うソフトウェア相関器から構成され、観測データを一旦磁気ディスクに記録してからネットワークを経由してデータを送受信することができる。

次に、リアルタイム VLBI 及び準リアルタイム VLBI によって可能となった、観測局位置、電波源強度、及び地球回転パラメタの変動の計測及びモニタリングについて述べる。観測局位置変動のモニタリングでは、首都圏広域地殻変動観測計画で、相対的な観測局位置推定結果の再現性として水平成分で 2mm、鉛直成分で 9mm を達成した。また、観測終了後ただちに観測データを解析して観測局位置を推定し、館山局と三浦局の位置が伊豆諸島近海の火山活動の影響を受けて変動したことをごく初期の段階から検出することに成功した。電波源強度変動のモニタリングでは、惑星間・恒星間シンチレーションの影響を大きく受けて電波源強度が短時間に激しく変動する様子を観測した。VLBI によって得られる電波源強度は、基線を長くすることによって対象となる電波減の中心核付近の寄与を大きく反映させることができるので、活動銀河核などの活動を監視して、大きな変動のあったときに多数の電波望遠鏡によるマッピング観測を行うといった研究にも展望を拓くものと言うことができる。最後

に、地球回転パラメタの推定では、首都圏広域地殻変動計画で1日の観測後ただちに推定することが可能であることを技術的に示した上で、K5 観測・処理システムによる日米基線 VLBI 観測実験により、1日以内に UT1-UTC を  $23.9 \mu \text{sec}$  の精度で推定することに成功した。UT1-UTC は、地球の自転速度の変動を反映する地球回転パラメタの一つであるが、本質的に天球座標系に直接結びつく観測を行う VLBI のような観測方法でしか計測できない量である。しかしながら、現在定期的に行われている国際測地 VLBI 実験では、観測データをすべて処理して解析結果を得るまでに最低 2 週間の日数を要しており、UT1-UTC の速報値および予測値は、2 週間以上過去の VLBI 観測データを基準として予測結果が用いられ、大きな誤差を生じる原因となっている。本論文で示したように、準リアルタイム VLBI 観測によって、即座に推定結果を得ることができるようになることは、UT1-UTC の速報値や予測値を大幅に改善することにつながるものである。以上のような観測は、いずれも、リアルタイム VLBI もしくは準リアルタイム VLBI によってはじめて可能となったものであり、今後の地球物理学及び天文学における研究、及び深宇宙探査機などの高精度リアルタイムナビゲーションなどの分野に大きく寄与することが期待される。

## 論文審査結果の要旨

これまでの VLBI 観測では、遠く離れた電波望遠鏡で取得したデータを一旦磁気テープに記録し、相関処理局に輸送して合成処理を行ってきた。このため、観測感度や観測結果の速報性に大きな問題があった。観測感度の制約は、磁気記録速度の限界により可干渉時間内に取得できるデータ量が制約を受けるためであり、受信機が生み出す情報速度（毎秒 2 ギガビット）の 16 分の 1 以下しか磁気テープに記録できないことが問題になっている。また、地球回転パラメータには速報性が要求されるが、磁気テープの輸送、相関処理、データ解析に時間がかかり、VLBI 観測結果は現在でも速報データとしては利用されていない。そこで、超高速通信回線で観測データを相関局に伝送し、実時間で処理を行うシステム、eVLBI システムの開発が 2000 年代になって盛んに行われるようになってきている。

本論文は、eVLBI の先駆けとなる実時間観測システムを、首都圏広域地殻変動観測計画（KSP 計画）における実時間 VLBI 観測システムとして開発した内容や、研究成果について述べたものである。首都圏の観測局 4 局を光データ通信回線で結合し、リアルタイム VLBI による自動観測を世界で初めて実現した。自動観測にすることで飛躍的に観測データ量が増加し、観測局の位置計測精度を飛躍的に高めることに成功した。その結果、三宅島周辺の火山活動に起因する広域地殻変動の検出に成功するなど、大きな成果を上げた。測地精度は当初の 10 数 mm から実時間連続観測が可能になって数 mm にまで向上し、微小な測地精度の季節変化（夏に精度が悪く、冬には精度が向上する）までも明らかにした。また、首都圏内のわずか 130km という短基線においても、1 日以内に地球回転パラメータ（UT1-UTC）が 1 ミリ秒の精度で推定可能であることを実験的に検証した。また、ほぼ 5 年間の膨大な観測結果から 16 天体の電波源強度変動に関しての解析を行い、準星 2134+004 が強度的に非常に安定であること、0059+581 やいくつかの天体に興味ある大きな強度変動を示すことなどを明らかにした。

著者は、KSP 計画の中で自動観測・データ解析システムの研究開発を担当し、その研究成果を専門誌（Earth Planets and Space, 測地学会誌）に論文として 2 編公表した。また、観測天体の強度の変動に関しては別の専門誌（Radio Science）に 1 篇発表している。本論文は、これらの論文を基に作成されたものである。このほか、光データ通信による旬日時間 VLBI 観測に最適な最新観測システム（K5 システム）の開発についても述べている。K5 システムを用いて米国ヘイスタック観測所との間で、世界で初めて国際間準実時間観測を実施し、観測後わずか 1 日で地球回転パラメータを 23.9 マイクロ秒の精度で決定するという成果を上げている。

以上、申請者の研究成果は、VLBI 観測分野に世界で初めて画期的なシステムを導入し、測地学、観測天文学に大きなインパクトを与えた。この研究の結果、世界では米国の NMA 計画や英国の eMERLIN 計画、わが国では国立天文台が行っているスーパー-SINET を利用した光結合 VLBI 計画に多大な影響を及ぼした。この分野に与えた影響は大きく、非常に高く評価できる。

審査委員全員の出席のもと、公開の論文発表を行った。まず、申請者による論文内容の口頭発表を約 40 分間行い、その後引き続き申請者に対し審査委員及び一般聴講者による質疑応答を約 20 分、また審査委員のみによる質疑応答をさらに約 20 分行った。申請者は、研究

背景、目的・意義、観測・解析手法の斬新製、また研究結果の要点、その重要性やこの分野に与えたインパクトなどについて、明快に説明し、質疑に対して的確に対応した。その後審査委員のみによる審議を行った。その結果、論文の学術的な価値は十分に認められる事、出版済みの学術論文も含めて、申請者の寄与が主である事を確認した。さらに申請者の天文学に関する学識や力量も十分であることを確認し、また論文が明快な英文で記述されている事から、語学力についても問題ないことを確認した。

以上の試験・審査の結果、申請者は天文科学において、博士（学術）の学位を受けるに相応しい力量を持つものと認め、審査委員全員一致により合格と判定した。