

4-6 距離基準超小型 VLBI システムの開発とその実証実験成果

4-6 Development of the Compact VLBI System for Calibrating GNSS and EDM Devices

市川隆一 石井敦利 瀧口博士 岳藤一宏 氏原秀樹 小山泰弘
 近藤哲朗 栗原 忍 三浦優司 川畑亮二 小門研亮 町田守人
 高島和宏 藤咲淳一 谷本大輔 農澤健太郎

ICHIKAWA Ryuichi, ISHII Atsutoshi, TAKIGUCHI Hiroshi, TAKEFUJI Kazuhiro, UJIHARA Hideki, KOYAMA Yasuhiro, KONDO Tetsuro, KURIHARA Shinobu, MIURA Yuji, KAWABATA Ryoji, KOKADO Kensuke, MACHIDA Morito, TAKASHIMA Kazuhiro, FUJISAKU Junichi, TANIMOTO Daisuke, and NOZAWA Kentaro

要旨

距離基準超小型 VLBI システムとは、GPS や光波測距儀の検定を目的として測量法に則って運用される距離比較基線場の較正を目的として、NICT が国土地理院と共同で開発する分割可搬型 VLBI システムのことである。実際の運用では、本システムを比較基線場の両端に設置し、これらと 30 m 級の大口徑アンテナとで観測網を構成、この観測網から超小型 VLBI システム同士の基線ベクトルでの群遅延を間接的に求める手法「MARBLE (Multiple Antenna Radio-interferometer for Baseline Length Evaluation/距離基準計測用多アンテナ干渉計)方式」を用いて解析を行う。我々は、まず 2.4 m 口径の小型アンテナを用いた基礎実験を 2006 年から開始し、2009 年度までに超小型 VLBI システムの初号機、及び 2 号機を完成させた。2009 年 12 月 24 日に鹿島の初号機とつくばの 2 号機との間での初の測地実験を成功させ、2010 年 10 月までに 6 回の実験を行った。データ品質の良い 3 回の実験で得られた基線長平均値と再現性は 54184875.1 ± 2.5 mm であった。一連の実験により、MARBLE 方式の妥当性が確認できたと同時に、距離基準超小型 VLBI システムの実用化に一步弾みがついたと言える。

We are developing a compact VLBI (Very Long Baseline Interferometry) system with 1.6 m diameter aperture dish in order to provide reference baseline lengths for calibration. The reference baselines are used to validate surveying instruments such as GPS (Global Positioning System) and EDM (Electro-Optical Distance Measurement) and maintained by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan. The compact VLBI system is designed to be assembled with muscle power simply in order to perform short-term (about one week) measurements at several reference baselines in Japan islands. First, we have evaluated a front-end system with a wide-band quad-ridged horn antenna by installing it on the 2.4 m diameter antenna at Kashima as a feasibility study. We have successfully carried out five geodetic VLBI experiments using it during September 2006 to July 2008. In addition we have concluded the new analysis concept to obtain indirectly the group delays on the baseline between two compact dishes is available. Next, we have carried out the VLBI experiments on the Kashima-Tsukuba baseline (about 54 km) using the two compact VLBI system during December 2009 to October 2010. The averaged baseline length and repeatability of the experiments is 54184875.1 ± 2.5 mm.

【キーワード】

VLBI, GPS, EDM, 測地測量

Very Long Baseline Interferometry, Global Positioning System, Electro-Optical Distance Measurement, Geodetic survey

1 まえがき

情報通信研究機構(以後 NICT と称する)は、2006 年度より始まった第 2 期中期計画の枠組みで距離基準超小型 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) システムとこれを用いた解析技術の開発に着手した。NICT では、これらを統合したシステムを MARBLE システム (MARBLE: Multiple Antenna Radio-interferometer for Baseline Length Evaluation) と名付けている。NICT は国土交通省国土地理院と共同で MARBLE システムの開発を進めており、同システムの第一義的な開発目的は、測地 GPS 受信機や光波測距儀(以下 EDM/Electro-Optical Distance Measurement) の機器検定のために整備された GPS (Global Positioning System) 比較基線場そのものの精度確保である。

比較基線場とは、各測量会社が使用する測地用 GPS 受信機の測位性能を測量法に則って検定するために、国土地理院によって運用される施設のことを言う [1]-[3]。この検定は高性能の EDM によってなされているが、国家標準からのトレーサビリティ確保のために、将来的には本稿で概説する超小型 VLBI システムによる検定で実施することが検討されている。同システムの応用範囲は比較基線場検定のみならず、今までの観測網では手薄だった海洋や僻地での測地 VLBI 観測への応用が考えられる。さらに、NICT としては、その可搬性と高精度という特色を生かして本システムを将来的には標準時系の精度を保持するための時刻比較を実現する技術としても位置づけている。

MARBLE システムの中核となる超小型 VLBI システムの開発は、当初は既存の口径 2.4 m アンテナを用いたフィジビリティスタディから開始した。このアンテナシステムを我々は、CARAVAN2400 (CARAVAN: Compact Antenna of Radio Astronomy VLBI Adapted for Network) と名付け、小口径アンテナによる測地観測で必要とされる知見を得るために、軸校正・電波星の追尾性能・信号強度等の評価を行った [4] [5]。2006 年 9 月 21 日には、初の測地実験に成功している [6]。

その後、2007 年度には、広帯域フロントエンドシステムを搭載した MARBLE 超小型 VLBI シス

テム初号機、2008 年度には同 2 号機を完成させ、それぞれのシステムの性能評価を受けて、2009 年度には複数回の測地実験に成功した。MARBLE システムのもう 1 つの要である新解析手法(後述する「MARBLE コンセプト」)についても平行して開発を進め、過去の測地実験データを用いた評価を経て実際の測地 VLBI 実験でも有効な手法を確立させることができた。本稿では、これまでの MARBLE システム開発の経緯と成果、及び次世代 VLBI 技術として提唱されている「VLBI2010 [7]」への対応を念頭に置いた今後の開発方針について概説する。

2 比較基線場検定と VLBI 計測技術

国土地理院は、日本測量協会に委託して測量会社などが使用する測地用 GPS 受信機の検定作業を実施している。この検定作業を行う設備を比較基線場と言い、茨城県つくば市の国土地理院から 4 km 程東に離れたサイクリングロード沿い(旧筑波鉄道筑波線の廃線跡を整備したもの)に約 10 km の距離にわたって設置されている。ここでの検定は、測量法に準拠した測量機器性能基準で規定されており、特に GPS 測量機については、「5 mm + 1 ppm × 距離 (2 周波スタティック受信機 / 10 km の距離で 15 mm の精度)」が要求される。比較基線場そのものについては、検定の対象である GPS 測量機の要求精度をほぼ 1 桁上回る精度 2 mm で計測、すなわち 10 km の基線ベクトルの長さを RMS 2 mm 以内の再現性で計測することが求められている [1]。さらに、最近では国家計量標準(国際標準)に準拠した性能基準、いわゆるトレーサビリティが測量機器による計測にも要求されるようになってきている [2]。

国土地理院では比較基線場を検定計測するためのレーザ干渉計を産業技術総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) に持ち込み、長さの国家標準となっている「よう素安定化ヘリウムネオンレーザ(ちなみに、2009 年 7 月 16 日以降は新たに光周波数コム装置が国家標準となった)」との比較によりトレーサビリティを確保している。しかしながら、レーザ干渉計は数 km 以上の視通確保が難しいため、現状では約 1 km の距離でのレーザ干渉計と GPS 測量機との比較で検定を実施しており、

GPS 測量とは独立の観測手段を用いて基線場総延長の約 10 km にわたる直接比較での検定は実現していない。つまり、GPS 測量機の検定についてはトレーサビリティが確保されていない状況にあり、早急に GPS 測量と同等もしくは凌駕する精度での計測手段を確立する必要がある。

この問題を解決する手段として有効と考えられたのが、VLBI 技術である。VLBI では、地球から数億光年以上離れた遠方からの電波星(クエーサー)からの信号を 2 地点に設置された電波望遠鏡で受信し、双方のデータの相互相関処理結果に基づいて、双方のアンテナ間の距離と方向(基線ベクトル)を 1 mm 程度の内部誤差で決定できる。ただし、従来の測地 VLBI 技術では恒常的に据え付けられた口径 10 m 以上の中型、ないしは大型の電波望遠鏡が不可欠である。したがって、全国数カ所に設置された基線検定場のすべてに大規模な VLBI 観測システムを常時設置するのは、費用対効果の点から考えて現実的ではない。

そこで NICT では、1 ボックスのワゴン車などで運搬可能な 1 m 級口径の超小型 VLBI システムを各地の基線場に検定観測の度に設置して観測するアイデアを考え、開発を開始した。類似の小型 VLBI システムとしては、我々はかつて CARAVAN システム (Compact Antenna of Radio Astronomy for VLBI Adapted Network) として

天文目的に開発した経験を持つ [8]。アンテナ直径 65 cm の CARAVAN 初号機は、鹿島 34 m パラボラアンテナとの間で 22 GHz 帯の信号受信による水メーザ (W49N) のフリンジ検出に成功している [8]。MARBLE システムの超小型 VLBI システムの開発は、この CARAVAN 開発で培った基礎を踏まえて進めている。

3 MARBLE コンセプトと超小型 VLBI システムの開発

3.1 MARBLE システム

今中期計画において、測地目的に特化した超小型 VLBI システムの開発を開始したが、ここで 1 つ重大な問題を解決する必要がある。電波星からの微弱な信号でも検出可能な VLBI ではあるが、基線の両端のパラボラアンテナがいずれも小口径である場合、十分な信号対雑音比 (SNR) でのデータ取得は困難であり、実際的には測地解を得るのはほぼ不可能である。そこで、従来の測地 VLBI 解析とは異なる手法を検討し、その有効性について評価を行った。この手法を我々は MARBLE コンセプトと呼んでおり、その概念は図 2 のようになる [9]。

図 2 に示すように、比較基線場の両端に超小型 VLBI システムを配置し、これらと NICT 鹿島 34m アンテナや国土地理院つくば 32 m アンテナ等の大型アンテナとで観測網を構成する。ここで、基線場の両端の観測局をそれぞれ X 局、Y 局、大型アンテナ局を R 局とする。これらのうち、大アンテナと各々の超小型アンテナとで構成される



図 1 つくば市に設置された GPS 比較基線場

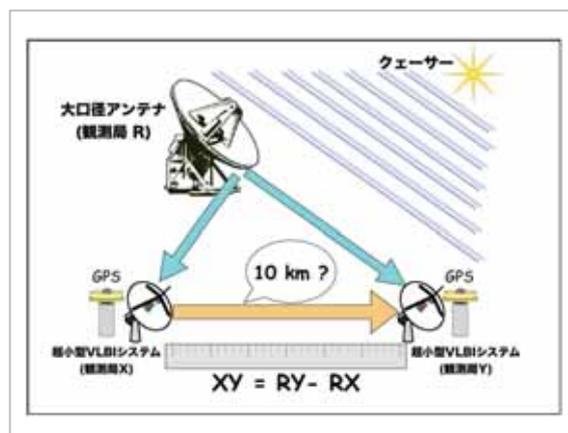


図 2 MARBLE システムのコンセプト

2 基線 RX、及び RY では、十分な SNR で群遅延データを取得することが出来る。

次に、それぞれの基線での群遅延データの観測時刻(エポック)を揃えて双方の差分を取ると、間接的に基線 XY での群遅延データを取得することが可能であり、これを用いて基線解析を行えば超小型アンテナ間の基線ベクトルが計算できる。ただし、間接的に基線ベクトル XY の長さを「精度 2 mm で計測」するためには、基線 RX、及び RY での群遅延を同程度以上の精度で計測する必要がある。先に述べた MARBLE システムとは、この大型アンテナと超小型アンテナで構成される観測網とその解析手法である「MARBLE コンセプト」を統合した総称した呼び名である。また、このシステムの要となるハードウェアが超小型 VLBI システムということになる。

3.2 超小型 VLBI システムの技術要件

3.2.1 観測周波数

比較基線場では、RTK (real-time kinematic) / GPS 観測から GPS 測量機による最高精度が得られる 2 周波スタティック観測までの各種観測形態での検定が想定される。2 周波観測を行う目的は電離層での伝搬遅延を補正することにある。実際上は長さ 10 km 程度の比較基線場の両端での電離層変動の差はあまり顕著でないことも予想される。一方で、「比較基線場の検定」という超小型 VLBI システムの位置付けを考慮すると GPS 測量機による計測を凌駕する精度が必要であり、仮に短距離でも相殺しきれないスケールの電離層変動が生じた場合でも対応可能でなくてはならない。したがって、超小型 VLBI システムにおいても、従来の測地 VLBI 観測システム同様に S 帯 (2 GHz 帯)、及び X 帯 (8 GHz 帯) の信号が受信可能な受信機の搭載を前提とした。これは、MARBLE システムが超小型 VLBI システムと従来の VLBI システムとが混在した観測を想定しており、相互の整合性を取ることが重要であることによる。

3.2.2 観測可能な電波源と SNR の評価

超小型 VLBI システム構想では、可搬性の要請から暫定的にアンテナ口径を 1 m 級とした。しかしながら、要求精度を達成するために必要な SNR、及び遅延決定精度が得られなければ意味がない。まず、関連処理で決定される群遅延の精度

は有効帯域幅の逆数と SNR に比例する。SNR は以下の式で求めることができる [10]。

$$SNR = \rho_{\text{eff}} \sqrt{2BT}$$

B は観測帯域幅 (Hz)、及び T は積分時間 (sec) である。また、 ρ_{eff} は 1 bit サンプリングでデータを記録した場合の実効相関係数である。図 3 は鹿島 34 m アンテナに対して小口径アンテナを組み合わせる VLBI 観測を行った場合の SNR を見積もった結果を示す。ここでは、平均的な従来の VLBI 観測を想定して電波源の信号強度を 1 Jy (ジャンスキー / 1 Jy = 10^{-26} W/m² · Hz)、積分時間を 180 秒とし、8 MHz から 512 MHz までの 5 通りの帯域を設定して各々の SNR を計算した。

図 3 の中に記載した緑と赤の横線は、それぞれ SNR = 7、SNR = 30 のラインであり、各々関連処理でのフリッジ検出の下限値、及び測地観測データとして有効とみなせる下限値である。この図より、34 m アンテナと超小型アンテナとを用いた VLBI 観測において SNR30 以上の値を得るためには、帯域 256 MHz 以上、かつ最低でも 1.5 m の口径が必要であることが分かる。なお、仮に電波源の信号強度が 1 Jy 以下であったとしても、観測帯域幅を 512 MHz 以上取ることが出来れば、ほぼ同等の積分時間で観測スケジュールにその星を含めることが出来る。

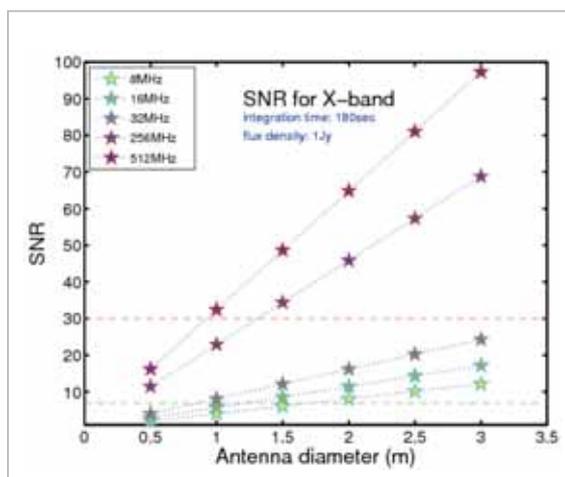


図 3 アンテナ口径による SNR の違い

相手局はアンテナ口径 34 m、T_{sys}: 72 K、開口効率 0.65、超小型局側は T_{sys} が 120 K、開口効率 0.5 として計算した。

表 1 超小型 VLBI システムの遅延決定精度見積りに用いた各設定値

種別	周波数	帯域 × チャンネル数	各チャンネル毎の周波数 (MHz)
CASE1	X-band	16MHz × 8ch	8180, 8237, 8294, 8351, 8408, 8465, 8522, 8579
CASE2	X-band	32MHz × 8ch	7700, 7824, 7948, 8072, 8196, 8320, 8440, 8568
CASE3	X-band	512MHz × 1ch	

3.2.3 遅延決定精度の評価

図 1 において、基線 XY の誤差を RMS 2 mm 以下にするためには、基線 RX、及び RY の内部誤差を 1.4 mm 以下に抑える必要がある。よって、真空中での光速 $c \cong 3.0 \times 10^{11}$ (mm/sec) から、少なくとも 5 psec の遅延決定精度が必要となる。通常の測地 VLBI 観測では、観測帯域や 1 obs あたりの積分時間にもよるが、1 実験あたり 24 時間で約 300 ~ 500 個 (1 電波源の観測を 1 個と数える) の観測データを取得する。仮に 400 個のデータを取得した場合に要求される遅延時間決定精度 σ_{tau} は次のように表される。

$$\sigma_{\text{tau}} = 5(\text{psec}) \times \sqrt{400(\text{obs})} = 100(\text{psec})$$

ただし、これは X 帯での値であり、また議論を簡単にするために群遅延のランダム誤差のみを考慮している (厳密には様々な誤差要因毎に系統誤差とランダム誤差を調べて誤差評価が必要である)。この式を元に、様々なアンテナ口径、観測モードで必要な遅延時間決定精度が得られるかを調べてみた。まず、この評価で想定したのは、次の表 1 に示す 3 通りの事例である。

ここでは、1つの電波星毎 (1 obs 単位) での精度を評価するために、丸 1 日の VLBI 実験を実施した場合の平均的な obs 数 400 を仮定した。なお、電波源強度は 1 Jy とした。この計算結果を示したのが図 4 である。図で示されるように、口径 1.5 m 程度とすれば、32 MHz 帯域 16 チャンネル、あるいは 512 MHz 帯域単チャンネルでのデータ取得を行えば、1 obs 単位での遅延時間決定精度上限の 5 psec は達成可能と結論づけた。ここで

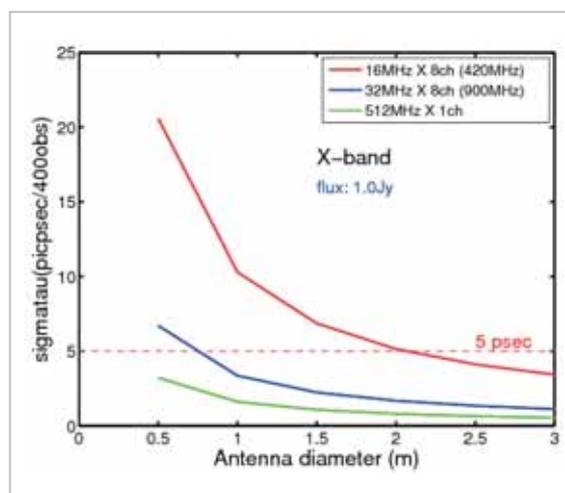


図 4 様々なアンテナ口径に対する 1 obs あたりの遅延時間決定精度 (X 帯)

電波源の信号強度は 1 Jy とした。

の議論を整理すると、距離基準超小型 VLBI システムを用いた VLBI 観測で所定の精度を達成するためには、

- 1obs で観測する電波源の信号強度は 1.0 Jy 以上 (ただし、30 m 級の大口徑アンテナと基線を組む必要がある)。
- 主鏡口径の下限は 1.5 m とする。
- 多チャンネル観測 (少なくとも 8 ch) の場合は 1 ch あたりの帯域幅下限は 32 MHz とする。ただし、少なくとも 1 ch あたり 512 MHz の広帯域観測が望ましい。
- 上記の条件を満たす限りは、1 obs あたりの最大積分時間を 150 秒程度にできる。

といった条件が必須となり、これらに基づいて超小型 VLBI システムの開発を進めることとした。

3.3 CARAVAN2400

本格的な超小型 VLBI システムの開発に取りかかる前に、まずフィジビリティスタディとして、2.4 m 口径のパラボラアンテナシステム CARAVAN2400 による各種の試験を実施した。この 2.4 m アンテナは、もともとは国土地理院により可搬 VLBI 局として運用されていたもので、これを NICT 前身の通信総合研究所時代(2002 年)に小型 VLBI 局テストベッドとして譲り受けた。駆動系、制御系の改修工事を経て、2005 年 2 月に鹿島宇宙技術センター構内の旧 KSP/SLR 観測棟脇に設置された(図 5)。

CARAVAN2400 による各種試験は、まず X 帯常温 LNA (Low Noise Amplifier) を用いた単周波受信から開始した[4][5]。2005 年初頭より本格的な VLBI 局として稼働させるべく作業を進め、2005 年 3 月 30 日に太陽電波受信に初めて成功する、いわゆるファーストライトを達成、その後、受信機雑音温度、システム雑音温度、アンテナ開口効率、アンテナビーム幅などの各種測定に基づく性能評価を進め、2005 年 12 月に太陽電波を鹿島 11 m と共に同時受信しての簡易 VLBI 観測に成功、さらに同 12 月に待ち受けにより Cas A (カシオペア座 A) を CARAVAN2400 単独での受信にも成功、そして 2006 年 3 月 15 日には銀河系外天体からの電波受信による初のフリッジ検出に成功した。引き続き 2006 年 3 月 29 日に小金井 11 m 局との間で初の測地 VLBI 実験を実施した。残念ながらこの実験では測地解析にかけられる品質のデータが得られず、測位解の推定には至らなかった。

た。

2006 年初頭からは、アンテナ制御用ソフト「MAOS」による運用確立を進めた結果、汎用の観測スケジュールに基づいて電波源を追尾することができるようになった。先の 2006 年 3 月のフリッジテスト成功の成果は、この改修によるものである。さらに、2006 年度に入ってから、軸校正試験を実施、さらに電波源の追尾性能向上をはかった。2006 年 9 月に国土地理院つくば 32 m 局との間で実施した 2 回目の測地実験では、ついに測位 VLBI 観測局の仲間入りを果たした[6]。

2007 年 2 月にはギガビットクラスのデータ取得が可能な K5/VSI システム[11][12]による 3 回目の測地 VLBI 実験を実施し、これにも成功した[13]。超小型 VLBI システムで想定する 1.5 m 級アンテナともなると、受信感度では絶対的に不利であり、これを補強するための 1 つの手段が広帯域での信号受信である。この 3 回目の実験では、(1)K5/VSI を用いての帯域 512 MHz での X 帯信号受信、及び(2)従来の測地観測システムと互換の K5/VSSP32[14]を用いての帯域 128 MHz での信号受信、の 2 つの方法で同時記録を行い、双方の測地解を比較した。その結果、整合性の取れた結果が得られ、広帯域受信系の有効性が確認できた(図 7 参照)。

その後、本格的な超小型 VLBI システム開発に向けて、現行の測地 VLBI 観測の一般的な受信モードである S/X 帯同時受信を実現するために、同じ 2007 年から広帯域受信機系の開発も開始した。大口径アンテナでは、比較的余裕のある受信



図 5 CARAVAN2400 と周辺状況

正面の球形ドームが旧 KSP/SLR 観測塔、そのすぐ左に CARAVAN2400 がある。左端は 34 m アンテナ、右端に見えるのが 11 m アンテナである。なお、この写真は 2006 年 3 月 15 日に実施した 3 局フリッジテスト(実験コード: ft6074)の際に撮影した。

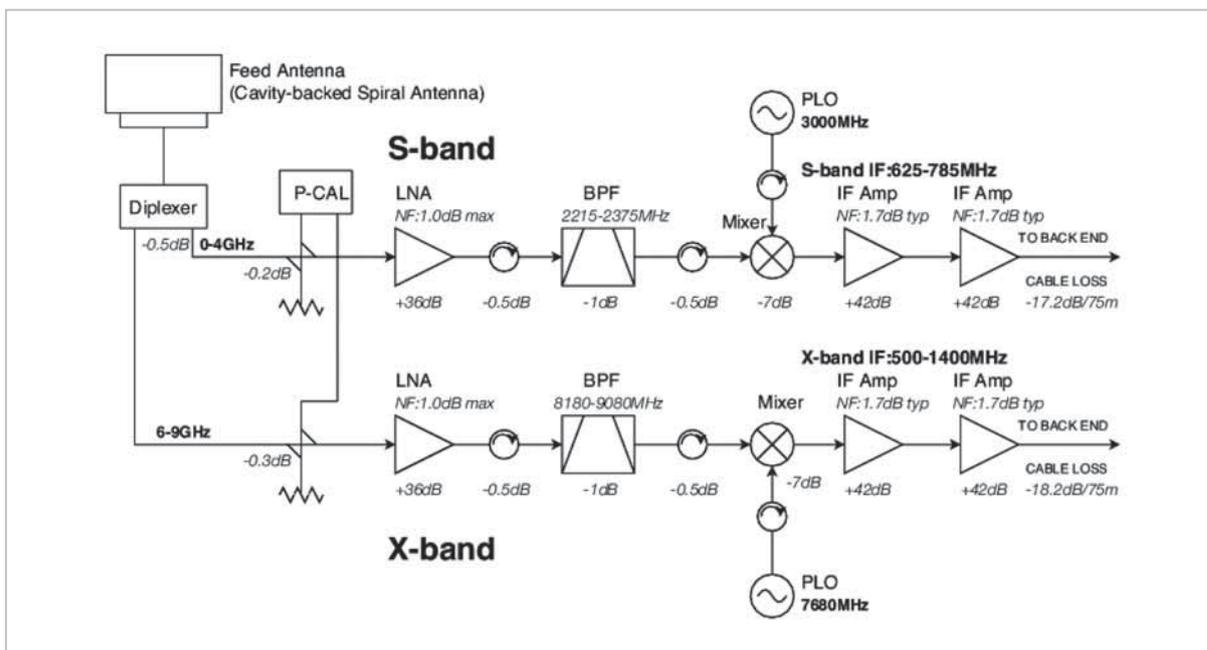


図 6 CARAVAN2400 のフロントエンド

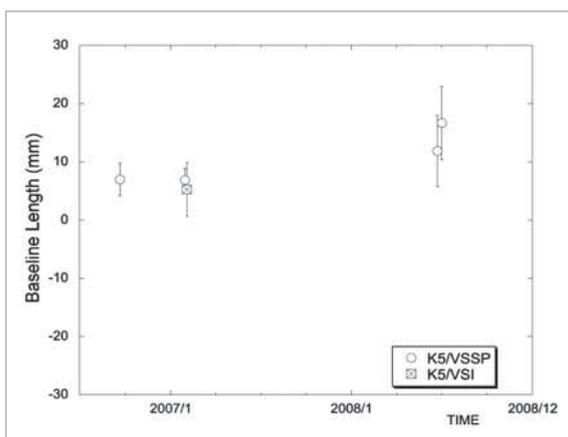


図 7 CARAVAN2400 の測地実験結果

2007年2月の観測では、従来の測地観測システムと互換のK5/VSSP、及び広帯域データ取得システムK5/VS1と並行記録を行なった。双方の結果は誤差の範囲内で一致している。

機配置がアンテナフィード部で可能だが、超小型 VLBI システムで S/X 同時受信可能な受信機配置は空間的に制約が厳しい中で考える必要がある。そこで、S/X の双方を抱合する帯域での信号受信可能な広帯域一時放射器を複数比較検討した結果、クラウドリッジホーンアンテナ (QRHA/Quadridge Horn Antenna, ETS-Lindgren 社製 Model 3164-05、図 11 参照) を採用した。このアンテナは、こ

れ 1 つで帯域 2-18GHz の信号を受けることが出来る。

2007 年末までに、この QRHA を用いたフロントエンドシステムを製作し、改造した CARAVAN2400 の副鏡部に搭載した。2007 年 12 月には、この QRHA を搭載した CARAVAN2400 と鹿島 34 m アンテナとの間で S/X 同時受信でのフリッジ検出に成功し、QRHA が超小型 VLBI システムの一時放射器として有効であることをまず確認した [15]。さらに、2008 年 6 月 23-24 日、及び同年 7 月 2-3 日に同フロントエンドを用いてのつくば 32m 局との間での測地実験に成功した [16]。図 7 に、CARAVAN2400 を用いた一連の測地実験の結果を示した。新フロントエンドを用いた結果での内部誤差は 6 mm とやや大きく、事後の調査からアンテナ開口効率が 10% 以下とかなり低く改善の余地のあることが示唆された。しかしながら、得られた基線長解析結果は内部誤差の範囲内で一致しており、新規開発の広帯域フロントエンドによる測地実験が可能であることを確認できた。

3.4 レーザ励起型 Cs ガスセル原子発信器による測地 VLBI 実験

超小型 VLBI システムを用いた測地 VLBI 観測では、アンテナ本体の小型化に加えて、高安定の

表2 Cs ガスセル発振器測地 VLBI 実験の結果

観測日時と観測種別	観測時間 (時間)	観測数	WRMS(※)残差 (psec)	基線長推定結果(mm)
2007.6.15 (時刻比較)	24.4	982	32	109337424.10±1.17
2007.6.17 (時刻比較)	37.6	1142	29	109337422.26±1.00
2007.6.20 (時刻比較)	71.2	2880	37	109337421.45±0.76
2007.7.19 (Cs ガスセル発振器使用)	25.9	1054	39	109337422.58±1.26

水素メーザを用いた従来の観測との比較(※ WRMS: weighted root mean square)

標準周波数信号をいかに簡便に得るかも重要な検討課題である。アンリツ株式会社が開発したレーザ励起 Cs ガスセル型原子発振器(以下 Cs ガスセル発振器)は、水素メーザの安定度には及ばないものの、平均化時間1-数10秒で 10^{-13} 台、100秒以上で 10^{-14} 台の安定度を示す[17]。また、水素メーザと比較して非常に小型軽量であり、概ねデスクトップPC1台と同程度のサイズ・重量(18kg)である。

そこで、このCsガスセル発振器の有効性を評価するために、2007年7月19日に鹿島34m局-小金井11m局基線(基線長:約110km)での測地VLBI実験を行なった。鹿島34m局のみCsガスセル発振器の10MHzと1PPSを基準信号として用い、一方の小金井11m局では従来の水素メーザを基準信号に用いた。この観測で得られた基線長結果、及び同じ基線で両局とも水素メーザを用いた場合の結果をまとめたのが表2である。各観測で得られた基線長推定値は2mm程度の範囲の範囲内で一致しており、測地VLBI実験の基準信号源としてCsガスセル発振器が有効であることが確認できた。ただ、この発振器については、2010年11月現在開発が停止している段階であり、将来的にMARBLEシステムに利用できるか否か現時点では不透明な状況である。なお、この実験についての詳細は別文献を参照されたい[18]。

3.5 1.5 m級超小型 VLBI システム

2007年度より、CARAVAN2400の開発と平行して、超小型VLBIシステムの開発を本格的に開

表3 超小型 VLBI システムの仕様

項目	仕様
アンテナタイプ	プライムフォーカス・パラボラアンテナ
アンテナ口径	1.5-1.65m
受信周波数	S/X同時受信(2-18GHz広帯域一時放射器使用)
駆動部	方位・仰角駆動
駆動速度	5度/秒(方位-仰角双方とも)
駆動ソフト	Field System 9(FS9[20, 21])
重量	全重量350kg(分割した各パーツの最大重量:100kg)

始した。先に述べた技術要件やCARAVAN2400開発の成果に基づく概念設計により、まずアンテナ口径1.65mの試作初号機の開発に着手、年度末までに完成にこぎ着けることができた[19]。図8はこの初号機の概念図である。また、このアンテナの主要諸元を表2に示した。さらに2008年度には2号機の開発を進めると共に初号機の受信テストを行った。2009年度半ばまでに初号機をNICT鹿島宇宙技術センター、及び完成した2号機を茨城県つくば市の国土地理院構内に設置し、実証実験可能な状態までこぎ着けた(図9)。これらの試作機は、先に述べたように人力での設置が可能であり、図10に示すように吊り三脚を用いて概ね半日程度で組み立てることができる。

超小型VLBIシステムでは、先に紹介したCARAVAN2400の広帯域フロントエンドをさらに改良し、1次放射器の直後に広帯域LNAを組み込んだ受信系とした(図11)。これは、S/X帯双方の信号強度劣化を防ぐためである。この受信系のテストとしては、2009年2月12日に初号機と34mアンテナとの間で4096Mspsのサンプリングレートで動作し高速FPGA機能を搭載した最新鋭のA/Dサンプラー“ADS3000+[22][23]”を用いて

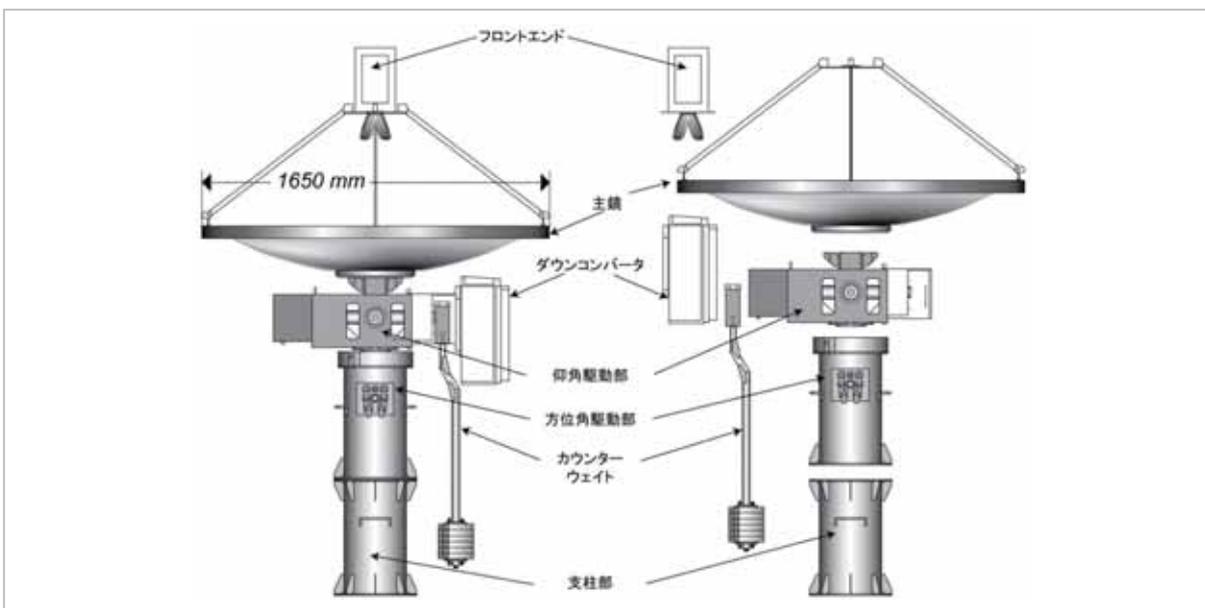


図 8 超小型 VLBI システム初号機の構成

2号機もほぼこれと同様だが、アンテナ口径が1.5mと一回り小さく、アンテナ駆動モータ電圧が100Vである点が異なる。また、2号機は初号機より10%ほど軽量化している。



図 9 NICT 鹿島宇宙技術センターと国土地理院にそれぞれ設置された初号機 (左) と 2号機 (右)



図 10 超小型 VLBI システム初号機を組み立てる様子

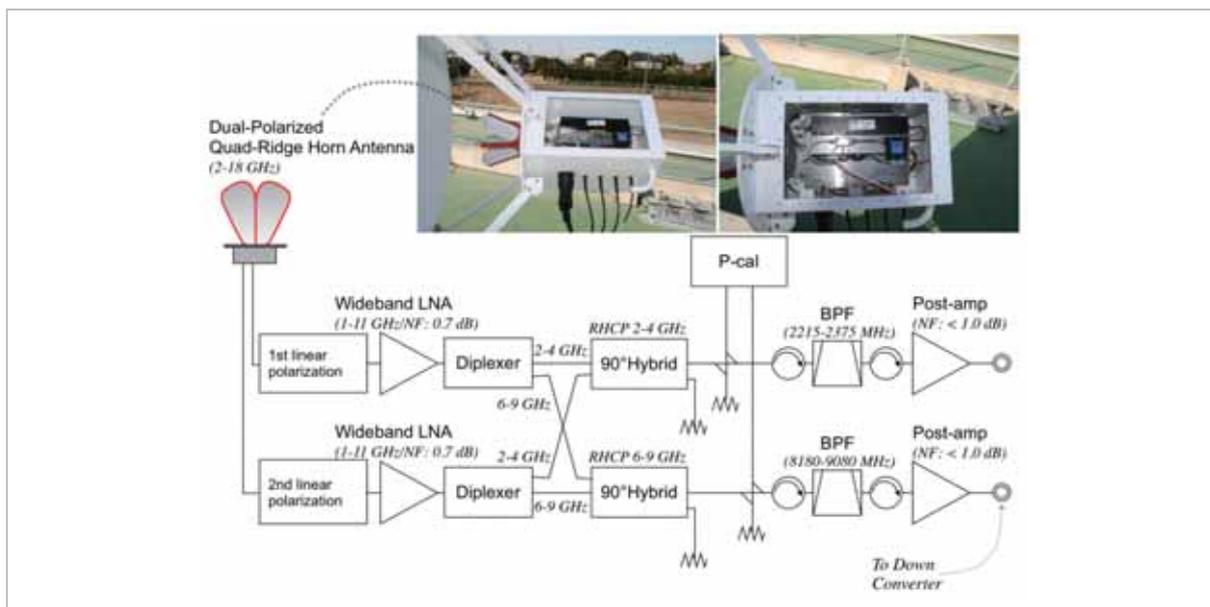


図 11 超小型 VLBI システムのフロントエンドブロック図

の初FRINGE検出に成功し、VLBIとして機能することを確認した[24]。これにより本格的な測地実験を行うための準備を整えることができた。

4 MARBLE システムによる測地観測成果

CARAVAN2400を用いた各種試験、及び初号機のFRINGEテストを受けて、まず、2009年6月25日には、つくば32mアンテナ局を大アンテナ、初号機と鹿島11mアンテナを超小型局と見立てた24時間測地VLBI実験を実施した。この実験では、超小型VLBIシステム初号機の測地観測性能を検証する他、先に述べたMARBLEコンセプトを実地に評価することも目的とした。

この実験の結果、鹿島11mアンテナと初号機とを結ぶ基線ベクトル(約200m)を内部誤差±2.3mmで決定することが出来た。この結果はMARBLEコンセプトを用いて初めて得られた成果である[25]。これを受けて、2009年12月24日には、初号機と2号機、つくば32m局、鹿島34m局の4局で24時間VLBI実験を実施し、超小型局同士の鹿島-つくば間約54kmの基線を内部誤差±2.7mmで決定することに成功した[26]。

冒頭で述べたように、比較基線場検定の目標としては、複数回の基線長解析結果の再現性(タイ

プAの不確かさ[27]と同義)として±2.0mmである。したがって、MARBLEシステムの精度評価をさらに確固たるものとするには、

- (1) タイプAの不確かさを評価するために、超小型局間の基線ベクトルを決定するVLBI実験を複数回実施する。
- (2) 超小型VLBI局の支柱を用いたGPS基線観測との比較を行う(タイプBの不確かさ評価)。

といった実証実験が不可欠である。ただ、2010年度に入り、漏水による2号機方位駆動モータの短絡や駆動系制御ソフトウェアの改修作業などに時間を要し、実際に測地VLBI実験を開始できたのは8月に入ってとなった。2010年11月15日現在までに、

- 2010年8月11-12日
- 2010年9月1-2日
- 2010年9月16-17日
- 2010年10月8-10日
- 2010年11月11-12日

の5回のVLBI実験を実施している。最後の11月の観測については、まだ関連処理中であるため、10月までの結果について図12に示す。なお、2号機の架台には、水平方向に20mmスライド可能な機構を備えており、これを意図的に変位させた場合の局位置変位検出の有無も精度評価項目の1つとできる。図中の最後の2010年10月9日の

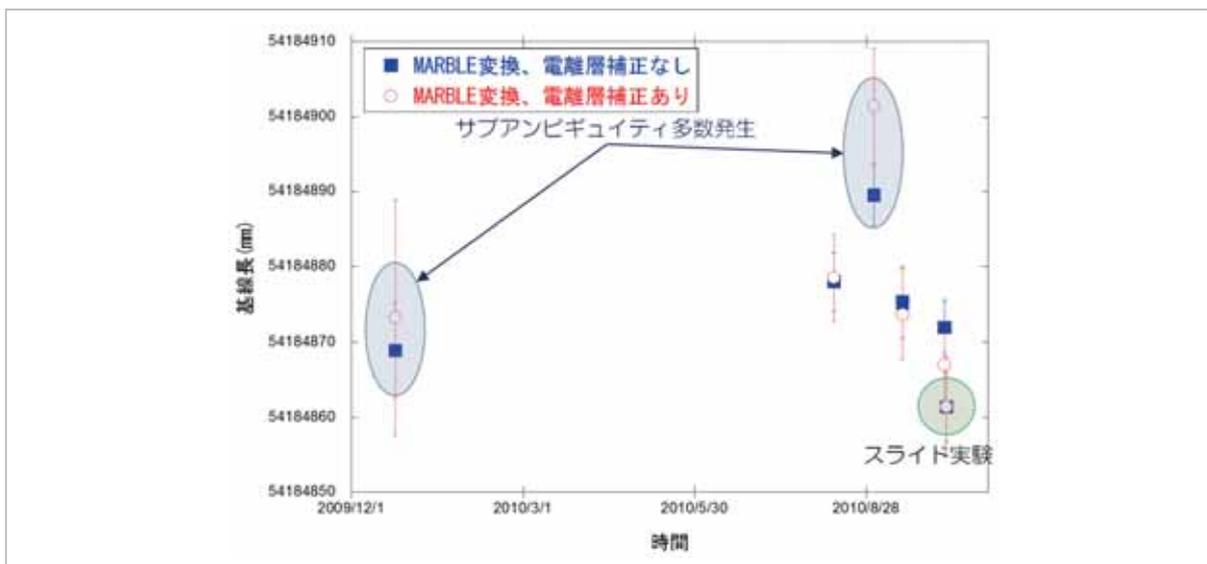


図 12 超小型 VLBI システムによる MARBLE 測地 VLBI 実験結果

24 時間実験では、このスライド機構で支柱を変位させており、他の解析結果とは別に論じる。

まず、残念ながら、2009 年 12 月末、及び 2010 年 8 月の 2 回の観測については、周波数配列の最適化が不十分だったことや、位相校正信号生成装置のトラブルによりバンド幅合成の成功率が低く、他の実験と比べて解析結果の内部誤差が非常に大きい。特に後者のトラブルについては、個々のチャンネルで得られた群遅延のバンド幅合成を行なった際に、多重解(アンビギュイティ)が一定値に収束しないという現象(サブアンビギュイティの発生)が見られ、全観測データの内でも一部しか解析できないという状況であった。そこで、条件の良かった今年 9 月の 2 回の実験、及び 10 月 8 日の実験の計 3 回の実験結果より RMS を求めると、

$$54184875.1 \pm 2.5 \text{ mm}$$

となった。実は、この解析結果は、S/X 帯の双方の群遅延量を用いた電離層遅延補正を行っていない場合のものである。同じく図 12 に示した電離層補正を行なった結果では、RMS 値で 50% ほど悪く 4.7 mm であった。現時点では、この原因は不明である。MARBLE コンセプトにより基線毎の群遅延データの差分を求める際に電離層の遅延誤差をある程度相殺するため、これによる電離層遅延誤差の過大推定、ないしは過小推定している可

能性が考えられ、さらなる検討が必要である。

次に、10 月 9 日に実施したスライド機構による人為的な変位を与えた結果について述べる。このスライド機構を用いると鹿島-つくば基線の方向に最大 18.7 mm の変位を与えることができる。10 月 8 日の結果との比較では 10.5 mm、また、上記の 3 回の解析での平均値との比較では 13.7 mm であり、やや過小だが内部誤差内には入っている。今後同様の実験を複数回実施して詳細に議論する必要があると考えている。

MARBLE システムの精度目標である「10 km の基線ベクトルの長さを RMS2 mm 以内の再現性で計測」に対しては、VLBI が基線長にはほとんど依存しない計測技術であることを考慮すると今回の結果はまだ不足気味である。この目標を達成する上では、受信周波数の広帯域化による高感度化と積分時間短縮による観測数の増加が不可欠と考えている。そこで、11 月の測地実験では、ADS3000+ を用いて S/X 帯のそれぞれを 1 チャンネルずつ 512 MHz 帯域幅(S 帯については実質は 260 MHz 帯域)で A/D サンプリングする方法でデータ取得を行なった。また、この実験では、従来の方法と比べてほぼ 2 倍の観測数を確保している。本稿の執筆段階ではまだ相関処理、及び解析処理が未完のため、結果については報告できないが、MARBLE システムの最高性能を発揮した結果となることを期待している。

5 まとめと超小型 VLBI システムの今後

NICT では、国土地理院と共同で比較基線場検定のための超小型 VLBI システムとその新解析技術を統合した MARBLE システムの開発を今中期計画の枠組みで 2006 年度より進めてきた。テストベッド CARAVAN2400 を用いた広帯域フロントエンド、超小型 VLBI システムの試作、MARBLE コンセプトの確立などを経て、今年度半ばまでに MARBLE システムによる測地 VLBI 実験が可能であることを実証することができた。

一方で、長さの国家標準からのトレーサビリティを確保する上では、まだ精度が不足しており、現在の広帯域データ取得実験が目標達成の鍵となっている。さらに、NICT としては MARBLE システムの将来を考える上で、VLBI 時刻比較法への同システム的应用が重要と考えている。その一環として、近い将来に超小型 VLBI システム試作 2 号機を NICT 小金井本部に移設し、鹿島 - 小金

井での MARBLE システムによる時刻比較実験も予定している。もっとも、時刻比較 VLBI 実験は測地実験と解析手法の面で本質的には同様であり、これらの解析でも測地精度評価を試みる予定である。

来年度から開始予定の次期中期計画では、より高精度の時刻比較 VLBI 観測を実現することが重要となる。そのためには、現行のシステムのさらなる改良が不可欠である。具体的には、次世代 VLBI 技術開発コンセプト「VLBI2010^[7]」を取り込むことを検討中であり、先に紹介した ADS3000+ を用いた広帯域データ取得の他に、

- アンテナ口径や形式の再検討
- 数 10K まで冷却した受信機システム
- 位相校正信号のデジタル化
- ケーブル遅延校正のためのラウンドトリップシステムの導入

等を予定している。次の機会には、広帯域 VLBI 実験の結果と併せて、これらの項目についても論じることとする。

参考文献

- 1 国土地理院測地部, “基線場改測要領,” 国地測二発第 18 号, 平成 15 年 5 月 26 日.
- 2 野神憩, 平井英明, 都筑三千夫, 豊田友夫, 田中博幸, “距離標準基線場におけるトレーサビリティの体系・標準化について,” 国土地理院技術資料, A1-No. 312, pp. 11-12, 2006.
- 3 野神憩, 都筑三千夫, “距離標準基線場におけるトレーサビリティの体系・標準化について,” 国土地理院時報, 第 112 集, 2007.
- 4 Ichikawa R., Kuboki H., Kyama Y., Nakajima J., and Kondo T., "Development of the new VLBI facility with a 2.4-m dish antenna at NICT," NICT IVS TDC News, No. 26, p. 13, Sep. 2005.
- 5 石井敦利, 市川隆一, 久保木裕充, 小山泰弘, 中島潤一, 高島和宏, 藤咲淳一, “小型 VLBI システム CARAVAN2400 の開発,” 日本地球惑星科学連合 2006 年大会, 2006. 5. 16.
- 6 瀧口博士, 石井敦利, 市川隆一, 久保木裕充, 中島潤一, 小山泰弘, 藤咲淳一, 高島和宏, “1 m 級アンテナを用いた基線場検定用 VLBI システムの開発 - CARAVAN2400 を用いた測地実験 -,” 日本測地学会 2006 年秋季 (第 106 回) 講演会, 2006. 10. 18.
- 7 Niell, A., A. Whitney, B. Petrachenko, W. W. Schluter, N. Vandenberg, H. Hase, Y. Koyama, C. Ma, H. Schuh, and G. Tuccari, "VLBI2010: Current and future requirements for geodetic VLBI systems," IVS 2005 Annual Report, NASA/TP-2006-214136, pp. 13-20, 2006.
- 8 Yonezawa I., Nakajima J., Ohkubo H., Tsuboi M., and Kasuga T., "Development of compact VLBI system," CRL IVS TDC news, No. 21, pp. 29-30, 2002.
- 9 Ichikawa R., Ishii A., Takiguchi H., Kuboki H., Kimura M., Nakajima J., Koyama Y., Kondo T., Machida M., Kurihara S., Kokado K., and Matsuzaka S., "Development of a compact VLBI system for providing over 10-km baseline calibration, "Measuring The Future"," Proc. of the Fifth IVS General Meeting, 400-404, 2008.

- 10 Alan Robert Whitney, "Precision geodesy and astrometry via very-long-baseline interferometry," Massachusetts Institute of Technology, 355p., Ph.D. thesis, 1974.
- 11 Kimura M. and Nakajima J., "The implementation of the PC based Giga bit VLBI system," IVS CRL-TDC News, No. 21, pp. 31–33, 2002.
- 12 中島潤一, 木村守孝, "VLBI でギガビット観測が可能にー 毎秒 10 億ビットの天体電波干渉ー," パリテイ, vol. 17, No. 06, pp. 39–41, 2002.
- 13 石井敦利, 市川隆一, 瀧口博士, 久保木裕充, 木村守孝, 中島潤一, 小山泰弘, 藤咲淳一, 高島和宏, "1 m 級アンテナを用いた基線場検定用 VLBI システムの開発ー 広帯域測地 VLBI 実証実験ー," 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007. 5. 19.
- 14 Kondo T., Koyama Y., Ichikawa R., Sekido M., Kawai E., and Kimura M., "Development of the K5/VSSP system," Journal of the Geodetic Society of Japan, 54, 4, 233–248, 2008.
- 15 Ishii A., Ichikawa R., Takiguchi H., Takefuji K., Koyama Y., Kurihara S., Kokado K., and Tanimoto D., "Geodetic VLBI experiments by a small VLBI antenna with a broad-band feed," IVS NICT-TDC news, No. 30, pp. 30–32, 2009.
- 16 石井敦利, 市川隆一, 瀧口博士, 岳藤一宏, 小山泰弘, 栗原忍, 小門研亮, 谷本大輔, "クワッドリッジホーンアンテナ (広帯域フィード) を用いた電波望遠鏡の測地 VLBI における性能評価," 日本測地学会第 110 回講演会, 18, 2008.
- 17 大内裕司, 須藤広志, 曾我登美雄, 藤田幹明, 斉藤崇記, 名古屋彦, "高安定レーザ励起 Cs ガスセル型原子発振器の実用化," 電気学会研究会計測研究会資料, IM-06-29, 2006.
- 18 Ishii A., Ichikawa R., Takiguchi H., Kuboki H., Sekido M., Koyama Y., and Ohuchi Y., "Evaluation of a laser-pumped Cs gas-cell frequency standard on geodetic VLBI," Journal of the Geodetic Society of Japan, 54, 4, 259–268, 2008.
- 19 石井敦利, 市川隆一, 瀧口博士, 久保木裕充, 近藤哲朗, 小山泰弘, 町田守人, 栗原忍, "1 m 級アンテナを用いた基線場検定用 VLBI システムの開発状況," 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, 2008.
- 20 E. Himwich, in Technical Workshop for APT and APSG (Communication Research Lab., Kashima), 1996.
- 21 E. Himwich, in IVS 2000 General Meeting, Ed. by N. Vandenberg and K. Baver (NASA, Washington), 2000.
- 22 小山泰弘, 竹内央, 関戸衛, 近藤哲朗, 岳藤一宏, 堤正則, "汎用高速 A/D サンプラー ADS3000+ の開発," 日本測地学会第 110 回講演会, P-8, 185–186, 2008.
- 23 岳藤一宏, 小山泰弘, 竹内央, 近藤哲朗, 関戸衛, 岳藤一宏, 堤正則, "超高速 A/D サンプラー ADS3000+ の性能評価," 日本測地学会第 110 回講演会, 3, 2008.
- 24 石井敦利, 市川隆一, 瀧口博士, 岳藤一宏, 小山泰弘, 栗原忍, 高野友和, 福崎順洋, 三浦優司, 谷本大輔, "1 m 級アンテナを用いた基線場検定用 VLBI システム (MARBLE) の開発状況その 3," 日本測地学会第 112 回講演会, P. 6, 2009.
- 25 石井敦利, 瀧口博士, 市川隆一, 小山泰弘, 栗原忍, "小型アンテナ同士の基線に於ける新しい VLBI 基線測位法の検証: その 2," 日本測地学会第 112 回講演会, 56, 2009.
- 26 石井他, "1 m 級アンテナを用いた基線場検定用 VLBI システム (MARBLE) の開発状況その 4," 2010 年地球惑星科学連合大会, SGD001-P07, 2010.
- 27 飯塚幸三, 今井秀孝, "計測における不確かさの表現のガイドー統一される信頼性表現の国際ルール," 日本規格協会, 1996.



いちかわりゅういち
市川隆一
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループグループサブ
リーダー 博士(理学)
地球物理学、測地学



いし い あつとし
石井敦利
株式会社エイ・イー・エス正社員/
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ特別研究員
測地学



たかぐち ひろし
瀧口博士
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ専攻研究員
博士(理学)
測地学



たけ ふじ かずひろ
岳藤一宏
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ専攻研究員
博士(理学)
電波天文学



うし はら ひで き
氏原秀樹
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ専攻研究員
博士(学術)
電波天文学



こ やま やすひろ
小山泰弘
新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループグループリー
ダー 博士(学術)
宇宙測地、電波科学



こんどう てつろう
近藤哲朗
新世代ワイヤレス研究センター
鹿島宇宙技術センターセンター長
理学博士
地球物理学、測地学

くり はら しのぶ
栗原 忍
国土交通省国土地理院測地部宇宙測地
課超長基線係係長
測地学

み うら ゆうじ
三浦優司
国土交通省国土地理院測地観測セン
ター地殻監視課海岸昇降監視係
測地学

かわ ばたしやうじ
川畑亮二
国土交通省国土地理院測地部宇宙測地
課超長基線係
測地学

こ かとけんすけ
小門研亮
国土交通省国土地理院測地部宇宙測地
課基線解析係係長
測地学

まち だ もり と
町田守人
国土交通省国土地理院測地部宇宙測地
課調査係係長
測地学

たかしま かずひろ
高島和宏
国土交通省国土地理院地理地殻活動研
究センター宇宙測地研究室主任研究
官測地学

ふじ まくじゆんいち
藤咲淳一
国土交通省国土地理院測地観測セン
ター地殻監視課地殻情報調査係係
長測地学

たにもと だいすけ
谷本大輔
株式会社エイ・イー・エス開発部
測地学

の さわけん たろう
農澤健太郎
株式会社エイ・イー・エス開発
部測地学

時空標準計測技術／距離基準超小型VLBシステムの開発とその実証実験成果