鹿島34mアンテナ2007年年次報告書



情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 光・時空標準グループ



目 次

| 1 | はじ | うめに しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しんしん しん | 1 | | | | |
|----------|-------------|-------------------------------------------------------------|-----------|--|--|--|--|
| 2 | 3 4n | n アンテナの現況 | 2 | | | | |
| | 2.1 | 主要諸元.................................... | 2 | | | | |
| | 2.2 | 受信機性能 | 3 | | | | |
| | 2.3 | 受信状况.................................... | 5 | | | | |
| | 2.4 | 追尾誤差 | 8 | | | | |
| | 2.5 | 34m アンテナのバックエンドシステム | 10 | | | | |
| | 2.6 | 34m アンテナ併設の観測機器など | 12 | | | | |
| | | 2.6.1 測地用 GPS | 12 | | | | |
| | | 2.6.2 水茲ララジオメータ | 14 | | | | |
| | | 263 APPS | 15 | | | | |
| | | 2.6.6 CARAVAN2400 | 15 | | | | |
| | | 2.0.4 Omultviiti2400 | 10 | | | | |
| 3 | 運用 | 引状況 | 17 | | | | |
| | 3.1 | 2007 年運用状況 | 17 | | | | |
| | | | | | | | |
| 4 | 保守 | F状況 | 18 | | | | |
| | 4.1 | 修理・補修 | 18 | | | | |
| | | 4.1.1 背面構造部の補修 | 18 | | | | |
| | | 4.1.2 主反射鏡アクセスはしごの補修 | 20 | | | | |
| | | 4.1.3 副反射鏡部アクセス用はしご(クオドリポッド)の補修............. | 20 | | | | |
| | | 4.1.4 AZ レールボルトの折損 | 20 | | | | |
| | | 4.1.5 IF 帯伝送用光ファイバーの損傷 | 20 | | | | |
| | | 4.1.6 AZ エンコーダ関係不具合 | 25 | | | | |
| | | 4.1.7 駆動モータ AZ#1 故障 | 26 | | | | |
| | | 4.1.8 S 帯 IF 信号伝送用光受信機の故障 | 26 | | | | |
| | | 4.1.9 22GHz 帯 IF 信号伝送用光受信機の故障 | 26 | | | | |
| | 4.2 | 未解決・未対応不具合 | 26 | | | | |
| | | 4.2.1 TLim 誤動作によるブレーキ誤動作の発生 | 26 | | | | |
| | | 4.2.2 ドライブパワーオン時のブレーキ非解除 | 26 | | | | |
| | | 4.2.3 AZ ホイール 回転部 No.2 の異音 | 27 | | | | |
| | | 4.2.4 バックストラクチャーの重度な発錆 | 27 | | | | |
| | | 4.2.5 X 帯スプリアス | 27 | | | | |
| | 4.3 | K 帯ノイズフロア変動 | 28 | | | | |
| | 4.4 | 34m アンテナ内標準信号モニター | 30 | | | | |
| | 4.5 | 34m アンテナおよび 11m アンテナの駆動音測定 ?* | | | | | |
| | 4.6 | FS9の状況 | 35 | | | | |
| | 1.0 | | 00 | | | | |
| 5 | 開発 | Ě | 36 | | | | |
| | 5.1 | e-VLBI に関する技術開発 | 36 | | | | |
| | | 5.1.1 はじめに | 36 | | | | |
| | | 5.1.2 TCP/IP を使ったデータ伝送/JGN2 Symposium におけるリアルタイム VLBI デモンスト | | | | | |
| | | レーション | 36 | | | | |
| | | 5.1.3 e-VLBI による UT1 迅速計測実験 | 38 | | | | |
| | 5.2 | X 帯広帯域化 | 42 | | | | |

| | 5.3 | CARA | VAN2400 による測地観測 | 44 |
|--------------|-----------|--------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| | 5.4 | PC-VI | BI システムを用いた VERA 用相関処理システムの開発 | 45 |
| | 5.5 | 22GHz | - 帯受信機局部発振周波数の変更 | 47 |
| | 5.6 | ガスセ | ル型 Cs 発振器を用いた測地実験 | 48 |
| | | 5.6.1 | 実験概要 | 48 |
| | | 5.6.2 | 解析結果 | 49 |
| | | 5.6.3 | ガスセル型 Cs 発振器の温度依存性 | 49 |
| | | 5.6.4 | アラン分散の結果 | 49 |
| | | 5.6.5 | まとめ | 50 |
| 6 | 終わ | りに | | 51 |
| \mathbf{A} | 鏡面 | ī測定法 | | 52 |
| в | 受信 | 鼶機制御 | プログラムの概要 | 53 |
| С | S/X | K 帯軸彰 | 至正用電波源 | 56 |
| D | IM' | Т-2000 | | 57 |
| \mathbf{E} | シス | 、テム雑 | 音温度の測定法 | 58 |
| | E.1 | Y係数 | (Y-factor) 法 | 58 |
| | E.2 | R-Sky | (room-sky) 法 | 59 |
| F | 自然 | (雑音電) | 波(大気雑音) | 61 |
| G | SEI | FDとは | | 62 |
| н | 略語 | 集 | | 63 |
| Ι | 時空 (2 | ፼統合標 007 | 準プロジェクト鹿島 VLBI グループ成果論文(発表)リスト 年1月-12月) | 65 |

1 はじめに

34m アンテナ (図 1.1) は、西太平洋域でのプレート運動の実測を目指した西太平洋電波干渉計プロジェクトの 主アンテナとして、1987 年度補正予算により通信総合研究所鹿島宇宙通信研究センター (現 情報通信研究機構鹿 島宇宙技術センター)(茨城県鹿嶋市)に建設されたアンテナである。その後、同アンテナは測地学的成果だけでは なく電波天文学分野においても多くの成果を生み出してきており、国内外からその重要度が認知されている。建 設後、19 年が経過しているが、定期的な保守および安定運用性向上を図る種々の対策により安定な運用を実現し ている。

2007年は NICT 第2期中期計画(2006年度に開始された5ヶ年計画)の2年目の年であった。第2期中期計 画開始に伴う NICT 内部の改組により、34m アンテナの運用母体は第一研究部門 新世代ネットワーク研究セン ター 光・時空標準グループ 時空統合標準プロジェクトとなった。また、鹿島宇宙通信センターは鹿島宇宙技術 センターと改名されている。

第1期中期計画 (2001年4月~2006年3月) では、34m アンテナは「宇宙における時空標準基盤技術の研究開発」という課題を遂行するために必要な微弱な天体電波源や小惑星探査機「はやぶさ」などの深宇宙探査機からの電波受信において重要な役割を果たした。

新たに開始された時空統合標準プロジェクトでは『電磁波の干渉技術を用いた基準座標系の高精度化として極 運動で40マイクロ秒角、UT1で2µsを達成するために、リアルタイム地球姿勢決定技術の研究開発を行うと ともに、測位における距離基準を確立するための研究開発』をプロジェクト課題の一つとして掲げており、34m アンテナはプロジェクトを達成する上で引き続き重要な役割を担っている。

この報告書は2007年のアンテナ使用状況、保守、修理、改修等を記述することにより、アンテナの現状を把握 するとともに、必要な基礎的情報を利用者・関係者で共有し、今後もアンテナの安定した運用に資することを目 的としている。更に2007年の研究グループの活動成果についても代表的なものを記した。



図 1.1: 34mアンテナ

2 34m アンテナの現況

2.1 主要諸元

34m アンテナの主要諸元を表 2.1 にアンテナ位置を 2.2 に、アンテナ各部の名称を図 2.1 に示す。受信機性能は 2.2 以降に記している。なお本報告で使用される略語については付録 H にまとめた。

34m アンテナはミリ波帯までの受信要求から鏡面精度の仕様値を 0.5mm rms としたが、建設時の実測値では 仰角 45 °で 0.17mm rms を得た。現在 1.5GHz 帯から 43GHz 帯のミリ波帯までの多数の周波数帯の受信機が搭 載されている。光学系での分類は鏡面修正カセグレンアンテナであり、マウント方式は車輪レール形 AZ(方位 角) - EL(仰角)マウント方式である。測地 VLBIの基準点となる AZ 軸と EL 軸の交点は測地 VLBIの基準点 となるが、両軸が 1mm 以下で交わるように設計されている。さらに高精度測位解を得るため、熱変形による基 準点の移動を低減するための工夫が施されており、アンテナ脚部の鉄骨を鉄板で覆うことにより、直射日光によ る鉄骨の熱変形を避けている。

大型アンテナであるが電波星を高速に切り替えて、単位時間あたりの電波星観測数を増やすことにより測地 VLBIの精度を向上させるため、このクラスのアンテナとしては大きな駆動速度 (AZ:0.8°/s) を有する。またワイ ヤーラップ範囲が通常のアンテナに比べて大きな範囲に取られているため、天体切り替えにおいて柔軟な追尾が 可能である。さらに副反射鏡位置の5軸制御機能により、焦点位置を切り替えることによって多数の周波数帯で の受信が可能となっている。なお仰角は90度まで駆動可能だが、ソフトウェアにより天体の追尾は88度までに 制限されている。

| 主反射鏡開口径 | 34.073 m |
|--------------------|-------------------------------------|
| アンテナ形式 | 鏡面修正カセグレン |
| マウント形式 | 車輪レール型 AZ-EL マウント |
| 主反射鏡鏡面精度 | 0.17mm r.m.s. (EL=45 ° 建設時) |
| 駆動可能範囲 方位角 (AZ) 方向 | 北 ± 270 °(自動運用中) |
| 仰角 (EL)方向 | 7°~90° |
| 副反射鏡5軸駆動制御範囲 | 各軸 ± 60mm |
| 最大駆動角速度 A Z | 0.8 $^{\circ}/\text{s}$ |
| EL | 0.64 °/s |
| 製造 | 米国 TIW (現 VertexRSI) |

表 2.1: 3 4 mアンテナの主要諸元

表 2.2: 34mアンテナの位置(1997年1月1日での値)

| 位置 (m) | 速度 (m/年) |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\rm X:-3997649.227\pm.003$ | $0003 \pm .0004$ |
| Y: $3276690.754 \pm .002$ | $.0052\pm.0003$ |
| Z : $3724278.825 \pm .003$ | $0118\pm.0005$ |
| 北緯 35°57 21.78 | |
| 東経 140°39 36.32 | |
| 標高 43.4 m | |
| | 位置 (m) X: -3997649.227 ± .003 Y: 3276690.754 ± .002 Z: 3724278.825 ± .003 北緯 35 °57 21.78 東経 140 °39 36.32 標高 43.4 m |

*注:2005年版までの年次報告書での緯度、経度は間違っているので注意すること



図 2.1: 34mアンテナ各部の名称

2.2 受信機性能

34 mアンテナの受信周波数帯と受信系の性能を表 2.3 に示す。L 帯の当初の受信帯域は、1.35~1.75GHz であったが、1.5GHz 付近に入る混信を除去するため、現在は LNA 出力と D/C 入力の間に表 2.4 に示すフィルタのいず れかを挿入して受信している(図 2.2)。主に使用するフィルタは中心周波数 1400MHz、帯域幅 100MHz、11 段の フィルタである。S 帯は第 3 世代携帯電話 IMT-2000 (「D IMT-2000」参照)による混信対策のために 2002 年から 2003 年にかけて開発した挿入損失が小さく遮断特性に優れ、遮断帯域での減衰量も大きい高温超伝導(HTS) フィルタを設置している。

X 帯の国際測地 VLBI 実験では測定精度向上のためにより広帯域の受信周波数範囲が要求されるようになった ため 2005 年に上限周波数を 9080MHz まで拡大した。この改修により、従来の X-n 帯 (8.18-8.60GHz) が使用で きなくなっていたが、2006 年に局部発信器出力を分配することにより、X-n 帯を復活させている。更に 2007 年 12 月にはシステムに変更し、両偏波とも 8180–9080MHz の帯域が受信できるようになった(詳細は「5.2 X 帯広 帯域化参照)。



図 2.2: L 帯受信機ブロック図。

| バンド | 周波数 | $T_{\rm rx}$ | $T_{\rm sys}$ | 開口効率 | SEFD | 受信偏波 |
|----------------------------|--------------------|--------------|---------------|------|------|------|
| | (GHz) | (K) | (K) | | (Jy) | |
| L | 1.35 - 1.75 | 18 | 45 | 0.68 | 200 | L/R |
| S | 2.193 - 2.35 | 19 | 72 | 0.65 | 340 | L/R |
| С | 4.60 - 5.10 | 100 | 127 | 0.70 | 550 | L |
| X-n (2007.12.14まで) | 8.18 - 8.60 | 41 | 52 | 0.68 | 230 | L/R |
| X-n (2007.12.14 以降) | 8.18 - 9.08 | | | 0.68 | | L/R |
| X-wH (2007.12.14 まで) | $8.18 - 8.60^{\#}$ | 41 | 53 | 0.68 | 290 | L/R |
| X-wH (2007.12.14 以降) | 8.18 - 9.08 | | | 0.68 | | L/R |
| X-wL (2007.12.14 まで呼称 X-b) | $8.58 - 9.08^{\#}$ | _ | 50 | 0.68 | 270 | L/R |
| X-wL (2007.12.14 以降) | 7.86 - 8.36 | | | 0.68 | | L/R |
| K (2007.1.19 まで) | 21.8 - 23.8 | 105 | 141* | 0.5 | 850 | L(R) |
| K (2007.1.19 以降) | 22.0 - 24.0 | 105 | 141* | 0.5 | 850 | L(R) |
| Ка | 31.7 - 33.7 | 85 | 150 | 0.4 | 1100 | R(L) |
| Q | 42.3 - 44.9 | 180 | 350 | 0.3 | 3500 | L(R) |

表 2.3: 受信機雑音温度 T_{rx} とシステム雑音温度 T_{sys}

[#]:8GHz LNA 広帯域用 (高域側に T_{sys} の上昇が見られる)。

*: IF 出力をパワーメータで測定することにより得た値

SEFD(システム等価フラックス密度)はシステム雑音温度(K)、アンテナ開口面積、および開口効率から産出している(詳細は「G SEFDとは」参照)。

表 2.4: L 帯用フィルタ

| 中心周波数 | 帯域幅 | 段数 | 備考 |
|-------|-------|----|----------------------------------------------|
| (MHz) | (MHz) | | |
| 1400 | 100 | 11 | 11EZ4-1400/100-S(Lorch Microwave 社製)常用 |
| 1400 | 100 | 8 | 8B250-1400/T100-0/0(K&L Microwave 社製) |
| 1700 | 200 | 8 | 8B250-1700/T200-0/0(K&L Microwave 社製) |
| 1400 | 100 | 4 | 4B250-1400/T100-0/0(K&L Microwave 社製) |
| 1600 | 100 | 4 | 4B250-1600/T100-0/0(K&L Microwave 社製) |
| 1650 | 200 | 4 | 4B250-1650/T200-0/0 (K&L Microwave 社製) |
| 1700 | 100 | 4 | 4B250-1700/T100-0/0(K&L Microwave 社製) |

2.3 受信状況

34m アンテナの L 帯、S 帯、C 帯、X 帯および K 帯の受信状況を確認するため各周波数帯の受信機出力をス ペクトラムアナライザを用いて測定した。その結果を図 2.3 ~ 図 2.18 に示す。測定はトロリーを焦点位置に上げ、 副鏡パラメーターは各周波数帯の既定値に合わせ、アンテナは天頂方向、各周波数帯の IF 信号を O/E 変換器背 面の IF 出力からスペクトラムアナライザ (HP 8566B)を用いて1回掃引および最大値保持モードで取得した。 周波数は受信周波数に換算して表示している。

L 帯は挿入するバンドパスフィルターとして中心周波数が 1400MHz (帯域 100MHz)の場合について受信状 況を測定した結果を示している。図 2.3 と図 2.4 は、1回掃引(掃引時間 150ms)および最大値保持モードで 3 分間計測した結果を示している。最大値保持モードの測定結果からわかるように、L 帯のほぼ全域(1250MHz ~ 1750MHz)に亘って混信波が認められる。なお図 2.4 の通過帯域の中程で混信のない部分は 1400 ~ 1427MHz の 電波天文バンドである。



図 2.3: L帯 (RHCP:1400MHz帯フィルター使用) 受信状況。スペクトラムアナライザにより1回掃引 モードで計測した結果。測定日 2007年 12月 19日。

-10 -20 -30 (mgp -40 ШЪ -50 -60 -70 -80 1250 1350 1550 1650 1450 1750 周波数(MHz) RBW 1MHz VBW 10kHz SWP 50ms

L-band-RHCP-MaxHold-3m-20071219

図 2.4: L帯 (RHCP:1400MHz帯フィルター使用) 受信状況。最大値保持モードで3分間測定した結果。

S帯の受信状況を図 2.5 に 1 回掃引、図 2.6~図 2.8 に最大値保持モード 1 分、10 分、30 分の例を示す。各図 の 2520MHz にある信号(IF で 500MHz の信号)は観測室の周波数アップコンバータで使用されている 500MHz の局部発振器の信号が入っているものである。また 2000MHz における急峻なカットオフ特性は高温超伝導フィルターの特性である。1 分の最大値保持モードでは帯域内に混信は認められないが、10 分では帯域内に混信が認められることから、混信は常時発生しているのではなく、数分の時間スケールで発生していると思われる。そのため、測地 VLBI においては数 10~数 100 秒の観測を単位とした観測(スキャンと呼ぶ)を繰り返すが、このスキャン中のデータが混信の影響を受けることなく生き残る可能性は高いと考えられる。実際の観測では混信の起こらない周波数を選んで観測していることもあり、まだ測地 VLBI での S帯の観測は成立している。

C帯、X帯、K帯の受信状況を図 2.9 から図 2.18 に 1 回掃引および最大値保持モードで受信した状況の例を示 すが、C帯、X帯、K帯とも顕著な混信は認められない。

S 帯は第3世代携帯電話からの混信を防止するために通常は HTS フィルタを使用して受信しているため、観 測室での受信機出力には第3世代携帯電話からの混信波は見られないが、図2.19に HTS フィルタを通過する 前のLNA出力(デュワー出力、トロリーは焦点位置)でのS帯の状況を昨年と今年を示す。第3世代携帯電話 (IMT-2000)では2115~2130MHzがKDDI(au)、2130~2150MHzがNTTドコモ(FOMA)、2150~2170MHzが SoftBankのそれぞれの基地局用に割り当てられている。2002年3月2日に鹿島周辺で第3世代携帯電話のサー ビスが開始された頃はドコモの2135MHz~2145MHzの2波(1波は5MHz幅)だけであったが、2005年7月5 日の測定ではドコモが2135MHz~2150MHzの3波に増波され、ボーダフォンも2160MHz~2165MHzの1波が 使用されていた。更に2006年8月21日の測定では2120MHzの電波が確認された。

昨年のデータと比較すると、NTTドコモに割り当てられている周波数帯の内、最下位の 5MHz 帯域 (2130-2135MHz)の電波強度が強くなっていることがわかる。



図 2.5: S 帯 (RHCP) 受信状況。 1 回掃引。2007 年 12 月 19 日。



図 2.6: S帯 (RHCP) 受信状況。最大値保持モード で1分間の測定結果。



図 2.7: S帯 (RHCP) 受信状況。最大値保持モード で 10 分間の測定結果。



図 2.8: S帯 (RHCP) 受信状況。最大値保持モード で 30 分間の測定結果。



図 2.9: C帯 (RHCP) 受信状況。1回掃引。2007年 12月19日。

C-band-RHCP-MaxHold-10m-20071219

-10

-20



図 2.10: C帯 (RHCP) 受信状況。最大値保持モー ドで 10 分間の測定結果。



図 2.11: X-n 帯 (RHCP) の受信状況。1回掃引。 2007 年 12 月 19 日。







図 2.13: X-wH帯 (RHCP) の受信状況。 1回掃引。 2007 年 12 月 19 日。



図 2.15: X-wL 帯 (RHCP) の受信状況。1回掃引。 8080MHz に X-n 帯および X-wH 帯に使用してい るローカル信号が漏れ込んでいる。2007 年 12 月 19 日。

-10 -20 -30 出力(dBm) -40 -50 -60 -70 -80 8100 8300 8500 8700 8900 9100 周波数(MHz) RBW 1MHz RBW 10kHz SWP 360ms

X-wH-band-RHCP-MaxHold-10m-20071219

図 2.14: X-wH帯 (RHCP) の受信状況。最大値保 持モードで 10 分間の測定結果。



図 2.16: X-wL 帯 (RHCP) の受信状況。最大値保 持モードで 30 分間の測定結果。



図 2.17: K帯 (LHCP) の受信状況。1回掃引。2007 年 12月 26日。



図 2.18: K帯 (LHCP) の受信状況。最大値保持モー ドで 10 分間の測定結果。



図 2.19: S帯 LNA 出力 (HTS フィルタを通す前の LNA 出力)の状況。左図は 2006 年 8 月 21 日、右図は 2007 年 12 月 20 日計測。

(H.K.)

2.4 追尾誤差

アンテナ角度エンコーダの読みが示す方向と実際にアンテナビームが指向する方向には種々の要因(例えば、 重力変形や、エンコーダの偏芯誤差等)により誤差が生じるため、ビームを正しく指向するには角度エンコーダ の読みに補正量を加える必要がある。この補正量を求める観測を軸較正観測と呼ぶ。

2007年は軸校正観測を4回実施した(表 2.5)。10月13日から実施した軸校正観測でAZ残差が大きくなっているのは、AZ#1モータ駆動系に不具合があったためである。

12月14日にAZ角度読み取り系に不具合が発見されたため、12月16日にエンコーダ光学ユニットを交換した。光学ユニット交換後、K帯で3天体について指向誤差を測定したが最大0.005度程度であったため、軸較正 観測は省略している。

|観測周波数帯とFS9 起動コマンドおよび使用される軸較正パラメータファイルの関係を表 2.6 に示す。

周波数帯ごとに軸較正パラメータが分かれているのは、周波数帯ごとに受信機の位置が異なるためである。34m アンテナは多周波受信を行うために、トロリーと呼ばれる台車により受信機を焦点位置に移動する構造となって いるが、1台に複数の受信機が搭載されているトロリーでは真の焦点に位置しない受信機があり、副反射鏡を制 御することによりこうした非焦点位置の受信機にも焦点を合わせている。したがって、こうした異なる焦点毎に 軸校正観測を実施している。Ka帯受信機のホーンはS/X帯等と同じ真の焦点に位置するので、軸較正パラメー タファイルは暫定的にS/X帯用のパラメータを使用している。付録CにS/X帯の軸較正観測に使用する電波源

| | - | | | |
|-----------------------|------|-------------|--------------------|----------------------|
| 観測日 (通日) 時 | 周波数帯 | 残差 (rms) AZ | 残差 (rms) EL | 軸較正パラメータ |
| (UT) | | (1/1000 度) | (1/1000 度) | 更新日時 (UT) |
| 2007/1/18(18)0950 ~ | Κ | 3.65 | 2.73 | 2007/1/21(21) 1431 |
| 1/20(20)0800 | | | | |
| 2007/10/13(286)0950 ~ | K | 6.27 | 2.36 | 2007/10/16(289) 1547 |
| 10/14(287)1040 | | | | |
| 2007/11/17(321)0510 ~ | K | 3.24 | 2.97 | 2007/11/18(322) 0555 |
| 11/18(322)0510 | | | | |
| 2007/11/19(323)2215 ~ | Х | 3.37 | 2.45 | 2007/11/21(325) 0518 |
| 11/20(324)2200 | | | | |

表 2.5: 2007 年の軸較正結果

表 2.6: 軸較正パラメータファイル

| 周波数帯 | FS9起動コマンド | 軸較正パラメータファイル | | |
|----------|-----------|---------------|--|--|
| L, S/X | fssx | mdlpo.ctl.sx | | |
| С | fs5G | mdlpo.ctl.c | | |
| Κ | fs22 | mdlpo.ctl.k | | |
| Ka | fs32 | mdlpo.ctl.ka | | |
| Q | fs43 | mdlpo.ctl.43g | | |

を示す。

なお軸較正パラメータファイル等の変更は FS9 起動コマンドにより行われるのでオペレータが意識する必要はない。

2.5 34m アンテナのバックエンドシステム

鹿島 34m アンテナで利用可能なバックエンドは、K3、K4、Mk-IIIA、S-2、K5/VSSP、そして K5/VSI(ギガ ビット系)が準備されている。34m アンテナシステムでは、VLBI 技術開発センターの開発成果の評価検証と いう位置付けから様々なバックエンドが用意されていたが、現在主として使用される VLBI 用バックエンドは K5/VSSP,K5/VSSP32,K5/VSI である。これらの主要なバックエンドの種類と概要について説明する。バックエ ンドの詳細については説明書が個別に準備されている。

トータルパワー計測システム 電波望遠鏡としては基本となる測定システムである。34m アンテナ IF 信号の全 電力、または任意の周波数から 2,4,8,16MHz などの帯域を選択し、受信電力を計測することができる。トータル パワーシステムにより天体の単一鏡によるポインティング、システム雑音などを計測することができる。測定は フィールドシステム(望遠鏡及び測定装置の制御ソフト、名称 FS9)により自動化されている。

K4/KSP システム 定常的に稼動している VLBI データ取得系である。情報通信研究機構の開発した 64/128/256Mbpsの磁気テープによる観測システムで、自動でテープを交換するロボットにより無人テープ交 換運用が可能である。100-600MHz または 500-1000MHz の IF 帯域から任意の 16 チャンネルをベースバンドに 変換した後、DFC2000/DFC2100/DFC1100 という AD サンプラで記録する。K4 システムは測地観測で用いら れている標準的なシステムとして、1996 年~2001 年までの首都圏広域地殻変動観測計画 (KSP) での定常観測、 各種測地実験で使用されたほか、国土地理院に技術移転され我が国の測地網維持に大きく寄与している。運用は フィールドシステムから自動的に行われる。

VSOP システム 宇宙科学研究所が VSOP 観測の為に国立天文台と供に整備したシステムでデータレートは 128Mbps である。IF からは 32MHz 幅を AD コンバータの高次モードと呼ばれる周波数に切り出すサンプライン ターフェース、AD コンバータ DFC2000、および TCU と呼ばれる時系制御装置が併用される。制御は CFS と 呼ばれる Windows のソフトウェアから行う。テープデッキ部及びテープ自動交換ロボットは K4 のものが共通に 使用できる。2005 年は VSOP 衛星の観測がなく、大学 VLBI 連携観測等で使用された。

K5/VSSPシステム AD コンバータが PC のインターフェースに搭載されている為、PC1 台当たり 4ch 入力 で構成される新世代のバックエンドである。現在、PC1 台当たり最高 64Mbps までのデータレートでハードディ スクに記録することができる。またデータはソフトウエアにより相関処理が行われる。相関処理ソフトウエアは K5 システムの一部として JIVE(Joint Institute for VLBI in Europe) にライセンス提供された他、現在も高速 化のための分散相関処理技術の開発が進められている。データの相関処理は、これまでのテープ観測で培われた VLBI の解析処理系にインターフェースされており、スムーズな解析処理が可能となっている。このシステムも技 術移転が行われており、国土地理院、大学等でも採用されつつある。国内測地実証実験や米国 MIT の Haystack 観測所との間での VLBI 実験により測地システムとしての性能が確認されている。その他、チャンネル数とデー タレートの選択の自由度を生かして狭帯域の電波源である衛星と電波天体を受信して飛翔体位置を決定する研究 開発が進められている。

K5/VSSP32 システム PC とのインターフェースに USB2.0 を採用した AD コンバータユニット 1 台当たり 4ch 入力で構成されるバックエンドであり、K5/VSSP システムの後継機として 2005 年に新たに開発された。PC1 台当たり最高 256Mbps (1ch 当たりの最高サンプリング周波数 64MHz)までのデータレートでハードディスク に記録することができる。データフォーマットはヘッダー部以外は K5/VSSP と互換性を有しており、K5/VSSP 用に整備された観測ソフトウェアおよび相関処理ソフトウェアは、すべて K5/VSSP32 システムでも使用できる よう改修がなされている。 表 2.7 に K5/VSSP と K5VSSP32 の仕様の比較を示す。

K5/VSIシステム RAID ハードディスクを用いることにより PC 1 台あたり最大 2048Mbps でデータ取得を行 う汎用 PC ベースの VLBI データ記録システムである。1ch、1024Msps の天文観測用 AD サンプラ (ADS1000)



図 2.20: K5/VSSP システム。ラック組込型の PC4 台 により最大 256Mbps のデータレートで記録が可能で ある。



図 2.21: K5/VSSP32 システム。ラック組込型の PC4 台により最大 1024Mbps のデータレートで記録が可能 である。

16ch、64Msps/ch の測地 VLBI 観測用多チャンネルサンプラ(ADS2000) 1ch、2048Msps、8bit の汎用 AD サ ンプラ(ADS3000)と国際標準インターフェースである VSI(Versatile Scientific Interface)規格に準拠したコ ネクタおよびケーブルで接続しデータ記録を行う(図 2.22)。OS に Linux を利用し、高速 RAID ハードディスク にデータ記録を行いながら同時に高速ネットワークへのリアルタイムデータ送出や、ソフトウェアによる実時間 デジタルデータ処理が可能である。膨大なデータを実時間で処理するため、相関処理には超高速ソフト相関処理 コアプログラムが別途開発されている 2003 年度に構成したシステムでは 2TB の記録容量を持ち、ディスクを交 換することなく4時間程度の連続観測が可能であったが、ハードディスク単体の容量増加と 16 台のハードディ スクをサポートする RAID カードの採用により PC あたりの総記録容量は 8TB となった。1Gbps のデータレー トで記録を行った場合、約 17.8 時間連続して記録できることになる。さらにファイバーチャンネルなどの方式で RAID システムを追加接続することにより記録容量の拡張が可能である。

AOS 分光システム 共同研究協力協定により鹿児島大学が中心となって開発した AOS(音響光学型)分光装置が 整備されている。微弱なメーザー天体などの観測に用いている。ミリ波観測時の軸較正観測システムに組み込ま れ不可欠の装置となっている。今後デジタル化への移行も検討されている。

デジタル分光計 高速サンプラ ADS1000 と高速 PC を用いて AOS 分光システムに代わる新たな分光計として鹿 児島大学と協力して開発した装置。1 台の PC を用いて帯域幅 32MHz、周波数分解能 16kHz の分光処理を実時 間で行う分光計の開発に続いて、4 台の PC による並列演算による帯域幅 256MHz、周波数分解能 32kHz の分光 処理が可能なシステムも開発された。

パルサータイミングバックエンド 旧時間周波数計測グループが開発したタイミング計測用のバックエンド。ミリ秒パルサーは信号強度が非常に弱いことから、直径 60m 以上のアンテナが観測局の主流となっているが、本装置では広帯域受信(最大帯域幅 200MHz)と、パルスの長時間実時間積分(最大 1600 万回)により、十分な感

| | K5/VSSP (ボード) | K5/VSSP32(ユニット) |
|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| サンプリング周波数 (MHz) | 0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, | 0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, |
| | 8, 16 | 8, 16, 32, 64 |
| 内蔵デジタル LPF (ローパスフィルター) (MHz) | _ | 2, 4, 8, 16, through |
| 入力信号レベル | -1V ~ +1V | -1V ~ +1V |
| A D変換器アナログ帯域幅 | 100 MHz | 300 MHz |
| A D 分解能 (ビット) | 1, 2, 4, 8 | 1, 2, 4, 8 |
| ボード(ユニット)あたりのチャンネル数 | 1, 4 | 1, 4 |
| ボード(ユニット)あたりの最大データレート | 64 Mbps | 256 Mbps |
| DCオフセット調整機能 | 無し | ホストPCからリモートで |
| | | 可能 |
| 標準信号入力 | 1PPS, 10MHz | 1PPS, 10MHz または |
| | | 5MHz |
| P C とのインターフェース | PCI バス | USB 2.0 |

表 2.7: K5/VSSP と K5/VSSP32 の仕様の比較



図 2.22: K5/VSI システム。左上が 16ch、64Mbps/ch のサンプラ ADS2000、右上が 1ch、1024Mbps/ch のサン プラ ADS1000 である。それぞれの下の PC のハードディスクは 2TB の記録容量を持つ。

度でミリ秒パルサーを検出している。広帯域化においては狭帯域のチャンネルを多数連ねる必要があるが、ここに AOS を用いているのが本システムの特徴である。この装置では口径比でアレシボに迫る精度でのパルサータ イミング観測が継続的に実施されている。

2.6 34m アンテナ併設の観測機器など

ここでは、34m アンテナに併設された、特に測地用途の観測機器、測地用 GPS 受信システム、水蒸気ラジオ メータ、APPS(高度精密測位システム)、そして小型電波望遠鏡 CARAVAN について概説する。

2.6.1 測地用 GPS

NICT は、全世界約 300 点の GPS 観測点からなる IGS(International GNSS Service) 観測網に参加しており、 34m アンテナを含む所内の VLBI 観測局近傍に GPS 観測点が 2 カ所併設されている。これらの観測点を表 2.8 に示す。

表 2.8: NICT で運用する VLBI 局近傍の IGS/GPS 観測点

| GPS 局観測点名 | アンテナ設置場所 |
|-----------|-------------------------------------|
| KSMV | 茨城県鹿嶋市 NICT 鹿島宇宙技術センター構内 |
| KGNI | 東京都小金井市 NICT 小金井本部 11mVLBI アンテナ庁舎屋上 |



図 2.23: NICT で運用する GPS 観測点 (鹿島 KSMV 局)。後方は 11m アンテナ。

各局に設置されている GPS 受信機は、測地用 2 周波タイプである。2007 年 12 月までは、いずれの観測点でも米 国 Ashtech 社製の Z12 型受信機を使用していた。これらが老朽化したため、新たに Trimble 社製 NetRS 測地受信 機を導入し、小金井については 2007 年 12 月 20 日より、また鹿島については 12 月 26 日より運用を開始した。運 用にあたっては各局に供給されている水素メーザ発振器からの標準信号をこれらの GPS 受信機にも入力し、デー タ品質の向上を図ると共に、時刻比較実験にも応用可能な体制を整えた。その他、12 月 26 日は、34m 庁舎屋上 にも "KS34" と名付けた新たな観測点を設け、こちらにも水素メーザからの標準信号を入力する NetRS 受信機を 設置した。なお、いずれの観測点とも、チョークリングアンテナ(型式:SCIGN レドーム¹ 付きの ASH700936E 型) アンテナを使用し、KGNI と KSMV は鉄製のピラー上に(図 2.23 参照)、KS34 は臨時観測点設置用の 3 脚マ スト上に設置されている。それぞれの観測点のデータは、毎日 2 4 時間の観測終了後に 34m 庁舎内に設置された 専用サーバによりダウンロードされ、データ圧縮・ヘッダの編集処理などをなされた後に CDDIS に ftp 伝送さ れている。また、2005 年 4 月より韓国の IGS データセンターにも同データの伝送を開始した。これらのデータ は数日後には、IGS 各局のデータと共に国土地理院の他、IGS や CDDIS の匿名 ftp サイト² などより自由に取 得できる。なお、NICT 構内には国土地理院が運用する全国約 1400 箇所の GPS 観測網からなる GEONET(GPS Earth Observation Network) の点が、鹿島 (観測点番号: 93009) と小金井 (観測点番号: 93019) にそれぞれ 1 基 ずつある。なお、これらについての詳細は地理院 WEB サイト³ で紹介されている。

2.6.2 水蒸気ラジオメータ

宇宙電波応用グループ庁舎屋上には水蒸気ラジオメータが設置されており、基本的には常時観測を行っている。 我々が使用しているのは、米国 radiometrics 社⁴ 製の WVR1100 型で、23.8GHz、および 31.4GHz の 2 周波を受 信して視線方向の水蒸気積分量を計測できる。ビーム幅は約5度である。図 2.24 は、屋外で観測中の WVR1100 の様子である。写真にあるように、宇宙電波応用グループで運用する WVR1100 には、ラジオメータのアンテナ を任意の方位・仰角に向けることの出来る AZEL 追跡ドライバが付属しており、例えば VLBI や GPS の観測時 にクェーサーや GPS 衛星などの電波源の視線方向の水蒸気観測が可能である。ただし、通常は天頂観測を継続 して実施している。



図 2.24: NICT で運用する水蒸気ラジオメータ Radiometrics 社 WVR1100 型。本体の下部に付属している白い 小さな箱はラジオメータのアンテナを任意の仰角・方位に向けるための AZEL 追跡ドライバ。

¹ http://www.scign.org/

² 例えば http://cddis.gsfc.nasa.gov/ftpgpsstruct.html, http://igscb.jpl.nasa.gov/components/data.html などを参照のこと。

³ 国土地理院 http://www.gsi.go.jp/

⁴ 米国 Radiometrics 社 http://www.radiometrics.com/

2.6.3 APPS

高度精密測位システム APPS(Advanced Precise Positioning System) とは、「いつでも」「だれでも」「かんた んに」、高精度な測位結果を得られることをめざして、情報通信研究機構が開発したシステムである。不特定多 数のユーザを対象とし、個々のユーザが取得した RINEX 形式⁵ での GPS データを電子メールの添付ファイル としてサーバに送信すると、サーバでは自動的に GPS 解析を行い、その解析結果をユーザーに返信する。

このシステムは、測地学、あるいは GPS に関する専門的な知識のないユーザーでも容易に信頼性の高い高精 度測位を行うことを可能とすることを目的としている。システムそのものは、2000 年に旧通信総合研究所と日立 造船情報システムとの共同で開発を開始し、2002 年に試作品を完成させ、その後試験運用に入っている

APPSの中核をなすのは、GPSデータの自動解析サーバである。このサーバでは、ユーザーから RINEX デー タを添付した電子メールを受信すると、そのデータの解析に必要な複数の GPS 観測データ(当初は我が国周辺の IGS 点データのみ)、軌道情報、地球回転パラメータ(EOP)などを ftp により自動で収集し、電子メールに記述 されているユーザーの要求に応じて干渉測位解析を行う。解析結果は、ユーザからの要求に応じて、基線長や3 次元位置情報の独自形式のファイル、および SINEX ファイルなどをテキストファイルとしてメールに添付して ユーザーに返送する。RINEX データの送信から解析結果の受領までに要する時間は平均して10分程度である。 なお、サーバーでの解析エンジンとしては、BERN大学開発の GPS 解析ソフトウェア Bernese Ver.4.2 を用いて いる。これらの一連の処理は全自動で実行され、ユーザは測地学や GPS に関する特別の知識がなくても、ただ 単にGPS受信機を設置するだけで信頼性の高い解析結果を得ることができる。

2007 年 12 月現在、APPS はユーザーが送信した GPS 観測データの局位置推定結果をユーザーにメール返信 で提供するにあたり、以下の付加機能が使用可能である。

- 国土地理院電子基準点網 GEONET データを含めた解析
- 大気遅延量推定機能(天頂遅延量、及び大気勾配係数)
- 多様な軌道情報の利用~世界複数の機関 (BERN 大学、GFZ[GeoForschungsZentrum]、JPL、MIT、スク リップス海洋研究所 [SIO] など) で生産される超高速暦 (ultra rapid orbit)、高速暦 (rapid orbit)、精密暦 (final orbit)
- ユーザ側で用意する ftp サイトに格納された GPS データを自動推定する機能
- GPS メーカから随時リリースされる新型受信機やアンテナの形式に関する情報を更新して APPS で利用 可能

この他、WEB ブラウザを用いた APPS 利用についても開発途上である。これらの詳細と APPS 利用について は、APPS 説明サイト⁶を参照されたい。

今後、APPSの信頼性を高めるために、引き続き公開運用を継続する。なお、電離層遅延の推定機能や潮汐モ デルの組み込みなどを予定している。一方、NICTでは、高速インターネット回線を用いた準リアルタイム EOP 決定の研究を推進しているが、将来的には即時決定された EOP を用いた軌道情報、および測位精度の評価実験 を APPS で行いたいと考えている。

2.6.4 CARAVAN2400

CARAVAN(Compact Antenna of Radio Astronomy VLBI Adapted for Network) とは情報通信研究機構 (以下 NICT) が開発を進めている、小型で持ち運び可能な電波望遠鏡システムの総称である。CARAVAN 開発の究極的な目標は、現在電波望遠鏡の観測網が手薄な大洋域や南半球なども含めて汎地球的規模での観測が可能な VLBIシステムの実現であり、高精度コロケーションや柔軟な運用スケジュールでの深宇宙飛翔体追尾観測などへの寄与を念頭においている。また、基線検定場での VLBI 観測と GPS 観測との比較による GPS 受信機検定への応用

⁵ RINEX 形式 http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Rinex2.html

⁶ http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/research/APPS/

で、より高いトレーサビリティが実現可能となる。特に、最後の GPS 受信機検定に関しては、第2期中期計画 の柱の一つである"距離基準超小型 VLBI システムの開発"として現在推進中のプロジェクトである。

また、VLBIシステムのバックエンド系は汎用 PC により大幅な小型化と低コスト化が進んでいる。特に NICT が開発したギガビットでのデータ取得可能な K5/VSI システム⁷ による高感度化は、小型 VLBI システムの実 用化を達成する上での重要な鍵の一つとなっている。NICT では 2002 年に試作機としてアンテナ直径 65cm の CARAVAN650 の1 号機を完成させ、鹿島 34m パラボラアンテナとの間で 22GHz 帯の信号受信によるクェーサー のフリンジ検出に成功したている⁸。さらに測地分野での機能評価を目的として 4 年前から 2.4m 口径のパラボラ アンテナを用いた CARAVAN2400 の開発を進め、2005 年度からは国土地理院と共同で、天体からの信号を受信 する実験を開始した。

図 2.25 に CARAVAN2400 の外観を、また表 2.9 に仕様を示す。2005 年 12 月に太陽電波を鹿島 11m と共に同 時受信し、初の VLBI 観測および待ち受けでの CasA 単独鏡受信にも成功した。2006 年 9 月 21 日の初 VLBI 測地 観測に成功、2007 年 1 月 31 日から 2 月 1 日にかけて第 2 回の測地 VLBI 観測に成功した (「5.3 CARAVAN2400 による測地観測」参照)。



図 2.25: CARAVAN2400 の外観

表 2.9: CARAVAN2400 の仕様

| アンテナ直径 | 2.4 m | | | |
|----------|---------------------------|--|--|--|
| 受信周波数 | X-band(8.18 8.60GHz) | | | |
| HPBW | 1.1° | | | |
| 偏波 | 右旋円偏波 (RHCP) | | | |
| 雑音温度 | 125K(常温 LNA) | | | |
| アンテナ制御方法 | 専用アンテナコントローラー + SkySensor | | | |
| アンテナ指向精度 | 0.1° | | | |
| アンテナ駆動速度 | 1°/sec (AZ、EL ともに) | | | |
| 形式 | カセグレンアンテナ、AZ-EL マウント | | | |
| 重量 | アンテナ 105kg、架台 535kg | | | |

⁷ Kimura, M. et al., The implementation of the PC based giga bit VLBI system, IVS CRL-TDC News, No.21, pp.31–33, Nov. 2002.

 $^{^8}$ Yonezawa, I. et al., Development of compact VLBI system, IVS CRL-TDC News, No.21, pp.29–30, Nov. 2002.

3 運用状況

3.1 2007年運用状況

2007年1月1日から12月31日までのアンテナの観測目的別使用頻度を図3.1に示す。観測の他、アンテナ保 守、較正等も含めてアンテナ使用時間単位で集計した。アンテナ保守、較正等には日常的な保守、測定、軸較正 観測等も含んでいる。使用時間の合計は2319時間で前年の1717時間からは約600時間と大幅に増加した。主な 要因は、アンテナに大きなトラブルが発生しなかった以外に、e-VLBI観測の大幅な増加、および鹿児島大との 共同研究による単一鏡観測時間の増加が挙げられる。

図 3.2 に過去3年間の運用実績を示す。

(資料作成 H.K.)



図 3.1: 2007 年の 34m アンテナ運用時間



図 3.2: 過去3年間(2005-2007年)の34mアンテナ運用実績

4 保守状況

昨年より経費削減のため、34m アンテナの定期保守についての頻度と中身の見直しを行い、毎年実施していた 定期保守を1年半毎の実施頻度とした。そのため、2007年は大規模な定期保守は実施しなかった。毎年継続的に 行っていたバックストラクチャの補修工事と併せて主反射鏡アクセスはしごの補修工事および副反射鏡部へのア クセス用はしご(クオドリポッド)の補修工事を8月8日から9月28日にかけて実施した。

AZ レールへの油塗布は冬期は1か月に1度程度、その他の高湿度時期は2~3週間に1度程度の頻度で実施 している。

4.1 修理·補修

4.1.1 背面構造部の補修

34m アンテナ主鏡背面構造は中央から放射状に伸びる角パイプ支柱 (トラス) に図 4.1 に示すように主鏡パネル を結合するためのチャネルが取り付けられている。背面構造部の腐食は主にトラスのチャネル取り付け部分で発 生し、支柱に穴が開いている箇所 (図 4.2 に例を示す)では当板を当てて補修溶接を行う。



図 4.1: 背面構造部と主鏡パネルの結合



図 4.2: 主鏡パネルをはずして上側から 見た典型的な腐食部分の例

1998年から主鏡背面構造のブロック毎の補修を行ってきたが、2004年~2005年の大規模補修で一応主鏡背面 構造全体の補修を終えた。しかしながら、海岸部や工場地帯に近いという環境のため、錆の進行が早く、2006年 からは2巡目の補修を開始した。今回の補修範囲は図4.3の右図に示すようにトラス17~22の外周1~4枚目で ある。凡例には過去の補修の有無を示している。2006年の補修では、過去にも補修した箇所が2巡目でも補修が 必要であり、過去からずっと補修を要しない箇所は2巡目も補修を要しなかったという傾向が見られたが、今回 の補修範囲では補修箇所を要する箇所は補修範囲の全域に及んでおり、2006年補修時に見られた傾向は顕著では なかった。しかしながら、サブ支柱(番号の付与していないトラス)のチャネル取り付け部が腐食しやすい傾向 は認められる。

図 4.4 に補修の前後を示す。角パイプ支柱およびチャネル部の錆はケレン作業の後、補修溶接が行われ、防錆 塗装の後、上塗り塗装がされている。

なお、鏡面精度を保つためには補修前後で鏡面パネル位置(特に高さ方向)に変化が無いことが重要であるが、 隣接するパネル間の相対高をパネルの4隅で測定することにより、鏡面パネルの高さに変化が無いこと(0.1mm 以内に収まっていること)を確かめている(ただし、1箇所だけ0.16mmの差あり)。図4.5に隣接パネル間の相 対高の差(補修前 - 補修後)の出現度数分布図を示すが、出現度数が突出しているところは0.02mmのところで ある。また差が0.01mmとなる計測はゼロだったことになる。なお、鏡面調整法の詳細は「A鏡面測定法」を参 照されたい。今回はパネルの取り外しは行っていないがパネルの取り外しを伴う補修の場合、この鏡面測定およ び調整は重要である。



図 4.3: 背面構造部補修箇所。左図は 2005 年までの実施状況、右図は 2007 年の実施状況(太線で囲んだ部分)。 右図の凡例は以前の補修時に補修溶接が必要だったところで今回も補修が必要だった箇所、今回初めて補修を行っ た箇所、前回の情報が無く今回補修を行った箇所の区別を示している。



図 4.4: 今回の主鏡背面構造補修前(左図)と補修後(右図)の例。



図 4.5: 補修前後のパネル相対高の差の統計結果。頻度が突出している部分は 0.02mm。差が 0.01mm となる計測 はゼロだった。

4.1.2 主反射鏡アクセスはしごの補修

主反射鏡へのアクセスはしごの補修(ケレンおよび塗装)を実施した(図 4.6)。

4.1.3 副反射鏡部アクセス用はしご(クオドリポッド)の補修

副反射鏡部アクセス用はしごの補修(ケレンおよび塗装)を実施した(図 4.7)。

4.1.4 AZ レールボルトの折損

34m アンテナの AZ レールは直径 20 mの円周を 16 分割した構造となっている。1 枚のレールは外側 8 本、内 側 8 本のボルトでベースプレートに固定されており、レール全体での固定ボルトの総数は 256 本となる。この ボルトの折損が定期保守毎に発見されるが、2007 年は定期保守を実施していないため、AZ レールボルトの折損 チェックおよび交換作業は行われていない。参考までに昨年 (2006 年) までの年毎のボルト折損本数を図 4.8 に示 す。2001 年から折損本数が大幅に減少したのは 2000 年から首の部分を強化したボルトを折損ボルトの交換に使 用しているためと考えられる。2006 年から折損本数が増加傾向のように見ることもできるが、これらは旧型ボル トの折損で、現時点では強化ボルトの折損は一本も報告されていない。したがって、2000 年までは同一箇所のボ ルトが何度も折損を起こしていたものと思われる。その後、持ちこたえていた未交換の旧型ボルトが 2006 年か ら折損を起こし始めたと考えられる。

4.1.5 IF 帯伝送用光ファイバーの損傷

6月に S/X 帯の IF 出力に異常な振る舞いが見つかった。調査したところ、光ファイバー仰角捻回部箇所でフレキシブル配管の破断が確認された。フレキシブル配管の破断箇所を修復した結果、2 系統あるファイバーケーブルの内、10 番台の 6 本のファイバーは損傷が進行し、ほぼ完全断線状態となったが、20 番台のファイバーは



図 4.6: 補修中の主反射鏡へのアクセスはしご。



図 4.7: 補修中の副反射鏡部アクセス用はしご。



図 4.8: 年ごとの AZ レールボルト折損本数。



図 4.9: S バンド入力をホットロードに接続した状態で観測室で観測される IF レベルに通常の仰角依存性とは逆の変動が見られた(左図)。X バンド(スカイ観測)も通常の仰角依存性とは逆の変動を示した(右図)。図中「Ascending」は仰角を 10 °から 90 °に変化させての測定、「Descending」は逆に 90 °から 10 °に変化させての 測定を意味する。

良好な特性が確認できた。

経緯 6月6日の木星観測時にS/XバンドのIF出力に異常な仰角依存性が見つかった(図4.9)。調査の結果、 原因は IF 信号の光伝送系にあることが判明した。図 4.10 は ETR 室の E/O の電気信号入力部に SG からの信号 (250MHz -10dBm を T 分岐で 2 チャンネルに同時入力) を入力し、観測室にて O/E 出力のレベルを仰角を変 えながら測定した結果である。図中「下り」は仰角を下げていく方向、「上り」は仰角を上げていく方向で測定 した結果を意味する。仰角約60度以下(レベル変動の目視では仰角約65度において変動が現れ始める)におい て、すべての伝送系 (CH1~4) でヒステリシスを伴った仰角依存性が見られるが、CH4 が最も大きな依存性を示 し天頂方向と仰角 10 度におけるレベルの差は約 13dB にも達した。CH4 は S バンド IF 信号の伝送に用いられて おり、図 4.9 に見られた S バンド IF 信号の約 20dB の変動の大半を説明できるが、残り 7dB の変動が光伝送系 以外で生じていることになる。図 4.9 において X バンド IF のレベル変動(ただしスカイを含む)は約 6dB であ るが、X バンド IF 信号伝送系は図 4.10 では CH3 に相当し、光伝送系だけの変動は約 8dB であるが、低仰角で の大気効果を考えるとこの差(2dB)は説明可能と考えられる。これらの測定結果からファイバー損傷の可能性 が大きいと判断し損傷箇所を探ったところ、仰角捻回部で光ファイバ用フレキシブル配管が破断しているのが発 見された(図 4.11)。そこで、破断しているフレキシブル配管の周辺に長さ 30cm の透明ビニールホースを取り 付けて補修した(図4.12)(2007年6月29日補修)。補修にあたってはフレキシブル配管破断部のエッジがファ イバに当たらないように、配管とファイバの間に潤滑性の良い樹脂シートを入れた。また、フレキシブル配管と 周囲の配管を取りまとめていた結束用のひもはフレキシブル配管の曲がりを一部に集中させていたため、取り外 した。これらの作業により、フレキシブル配管の曲がりの集中はなくなった。ビニールホースは配線用黒色タイ ラップで仮止め後、緑色の樹脂で被覆された針金を用いて締め付けたが、再補修の場合、幅の細いステンレスバ ンド等を用いることが望ましいと思われる。

補修後特性測定 フレキシブル配管破断部の補修後、光伝送系の特性測定を7月2日に実施した。図4.13に測定の ブロック図を示す。ETR 室内にてXバンド・ナロー系のIF 出力をT分配器で4分配し、「34M-IF SELECTOR」 と記されたボックス経由で4台のE/Oに入力した。計測時は、Xバンド・ナロー系のLNA入力はホットロード に接続した。観測室内では4台のO/Eからの出力レベルを2入力パワーメータ(HP438)で入力を切り替えなが ら計測した。なお、パワーセンサーは8484Aを使用し入力レベルの最適化のため、10dBのアッテネーターを挿 入した。



図 4.10: 光伝送系の仰角依存性測定結果。仰角 90 度での O/E 出力レベルを基準に取っている。「上り」は仰角 を 10 °から 90 °に変化させての測定、「下り」は逆に 90 °から 10 °に変化させての測定を意味する。



図 4.11: 仰角捻回部の破断した光ファイバ用フレキシブル配管 (仰角10度付近での状態)。右側の配管では、光 ファイバが鋭角に曲がってしまっている。



図 4.12: 仮復旧(補修)後の仰角捻回部の光ファイバ用フレキシブル配管。ビニールホースを曲がりの外周半分 側の周囲を囲むように取り付けフレキシブル配管の破断箇所が広がらないように補修した。左が仰角 90 度、右 が7度の状態である。(2007年6月 29日補修)



図 4.13: 光伝送系特性測定ブロック図。

ETR 室内および観測室内の「光ファイバー接続箱」の中で、光ファイバー#11~#16、#21~#26(除く#24: ETR 室内接続箱でコネクター端子に接続されていなかった)の計 11 本について、コネクター接続を差し替えな がら観測室で計測される O/E 出力レベルの仰角依存性を計測した。仰角は 90 度から 10 度刻みで 10 度まで下げ (下り: DESCEND)また再び 10 度刻みで 90 度まで戻して(上り: ASCEND)計測した。

| ファイバー# | #11 | #12 | #13 | #14 | #15 | #16 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| レベル (dBm) | -59 | -63 | -59 | -62 | -59 | -59 |
| ファイバー# | #21 | #22 | #23 | #24 | #25 | #26 |
| レベル (dBm) | -21 | -33 | -21 | - | -25 | -33 |

表 4.1: 天頂におけるファイバー毎の O/E 出力レベル

結果 天頂におけるファイバー毎の O/E 出力レベルの計測結果を表 4.1 に示す。#11 から#16 はすべて-60dBm 近くの値となっているが、これは入力にほとんど信号がない状態のパワーメータの出力に近く、10 番台のファイ バーはすべて断線状態であると思われる。なお#24 のファイバーは端子板に直接接続されていなかったため計測 を行っていない。20 番台のファイバーについて、天頂でのレベルを基準とした仰角依存性を図 4.14 に示すが、20 番台のファイバーはレベル変動が± 0.5dB 以内に収まっており、良好な特性を示していると言える。



図 4.14: フレキシブル配管修復後の O/E 出力レベルの仰角依存性 (2007 年 7 月 2 日測定)。

4.1.6 AZ エンコーダ関係不具合

2007年11月13日にAZ軸の角度読み取りに約0.01度の角度飛びが発生した。調査の結果、エンコーダ(ITEM RAL20/100S(4)X P/N2908-7X0010 S/N4195)出力のビットD5の振る舞いに不具合が認められたため光学エン コーダを予備機(ITEM RAL20/100S(4)X P/N2908-7X0010 S/N4194: 2005年11月14日に不具合があり取り外 したがその後のテストでは異常が認められなかった)に交換した。1ヶ月ほど正常に運用できていたが再び異常(D7 ビットに不具合)が発生したため、12月14日に2005年度に購入したエンコーダ(ITEM RAL20/106S(4)(4)(A)-4 P/N2908-7X0010 S/N062248)に交換した。その後、安定に運用出来ている。なお、2005年度に購入したエン コーダはそれまでのエンコーダとは形状が若干異なっており、取り付けるためには光学ユニット取り付け箱のね じを一部外す必要がある。そのため、11月には以前不具合があり取り外したが、その後のテストで異常が認められなかったエンコーダを取り付けたが再び異常を起こしたことになる。

4.1.7 駆動モータ AZ#1 故障

補修工事の終了後、アンテナ立ち上げ中の 2007 年 10 月 11 日に AZ#1 モータで Tach Loss/Over Speed が発生 した。調査中の 10 月 22 日にはフィールドロスも発生した。こちらはモータのフィールドコイルが地絡したため であった。これらは 11 月 13 日に駆動モータを予備機と交換することにより復旧した。故障したモータはフィー ルドコイルを交換して使用可能となり予備機とした。

4.1.8 S 帯 IF 信号伝送用光受信機の故障

2007年11月21日、S帯IF信号出力が極端に弱く(約-20dB)なった。調査した所、光受信機 ORTEL 10450Aの光パワーモニタ LED が消灯していた。11月22日に予備光受信機に交換することで復旧した。

4.1.9 22GHz 帯 IF 信号伝送用光受信機の故障

2007 年 12 月 19 日、観測前点検において、22GHz 帯の IF 信号が出力されていないことが発見された。IF 信号伝送用の光送信機前の信号等の点検の結果、IF 信号受信用の光受信機の故障と推定された。この光受信 機 ORTEL 4515A-020 は 5GHz ~ 7GHz の IF 信号を伝送しているが、予備機がないため、国立天文台へ代替機 ORTEL 10458A-020 の借用を依頼した。12 月 21 日に到着した代替機と交換して復旧した。

4.2 未解決・未対応不具合

4.2.1 TLim 誤動作によるブレーキ誤動作の発生

34m アンテナのアンテナ制御装置(ACU)には仰角が設定範囲(6.8度~90.2度)外となった場合には直ちに ブレーキを動作させアンテナを保護するトラベルリミット(TLim)機構が組み込まれている。しかし、設定角度 範囲内であるにも関わらず TLim 誤動作によるアンテナ停止が時々発生する現象が2005年に発生した。当時の 調査では、乾燥空気充填装置の始動、停止時とETR空調用冷水循環ポンプの瞬断時のノイズが一因であるらし いことが判明し、スパークキラー(コンデンサと抵抗を直列に接続したスナバ回路)を取り付けたり、角度信号へ のノイズ混入防止のためにACUの商用電源線へのラインフィルタ挿入や角度信号ケーブルへのフェライトクラ ンプの取り付けなどを行ったが、それ以降のTLim 発生も認められ、抜本的な原因は特定されていない。そこで、 対処療法として2005年に観測制御ソフトにTLim 発生検出ソフトウェアを組み込み、TLim 発生時にメールを送 り、直ちに手動で復旧できるようにしたが、2006年には自動的にACUのリセットを行う装置を手作りし、自動 運用が行えるようにした(詳細は「鹿島 34m アンテナ 2006年年次報告書 5.1 ACU 自動リセット装置」参照)。 その後、抜本的な対策は取られていないが、現在までのところ運用には支障のない状態である。

4.2.2 ドライブパワーオン時のブレーキ非解除

ドライブパワーをオンにした時にブレーキが解除されないという現象が発生している。EL ブレーキ解放信号 (DC24V)が正常に戻らないことがあるため、ブレーキ異常としてブレーキが再びかかるという現象であり、ブレーキ内にあるスイッチが疑われる。修理にはモーター式を取り外す必要があるため、次回定期保守時に点検を 実施予定である。 4.2.3 AZ ホイール回転部 No.2 の異音

AZ ホイール回転部 No.2 での異音発生が 2006 年の定期点検時に指摘されたが、駆動モータのトルクバイアス には異常がないため経過観察中である。

4.2.4 バックストラクチャーの重度な発錆

2006年の定期保守時にバックストラクチャーに生じている重度な発錆(図4.15)を指摘されている。今年の補 修では対処されていないが、来年以降、パネル取り付け部以外の重度の発錆箇所を計画的に補修していく必要が ある。



図 4.15: バックストラクチャーの重度な発錆。

4.2.5 X帯スプリアス

鹿島 34m アンテナ X 帯の受信周波数 8500MHz においてスプリアス信号があるという報告がボンの相関局か らあった。ボンからの報告では PCAL 信号レベルに対して-18dB のスプリアスが認められたとのことであったた め、7月 25日に測定したところ、PCAL 信号レベルに対して-15dB のスプリアスが認められた。調査の結果、こ のスプリアスは 22GHz 帯の受信機のローカル発振器として使用している PLO(CTI XPDRO-14304)をオフす ると無くなることから、PLO が原因であることが特定された。PLO の周波数は 17GHz であるが、半分の周波数 の 8500MHz がスプリアスとして X 帯受信系に混入していると考えられる。

図 4.16 はスプリアス信号が PCAL 信号の位相に与える影響を示している。 \overrightarrow{OP} が PCAL 信号とすると、そこにスプリアス信号 \overrightarrow{PS} が重なると、見かけ上の PCAL 信号は \overrightarrow{OS} となり、 \measuredangle POT が最大の PCAL 位相誤差となる。この位相誤差は $\sin^{-1}(\overrightarrow{PS}/\overrightarrow{OP})$ で求めることができる。今、スプリアス信号パワーが PCAL 信号に比べて -15dB とすると、

 $\frac{\overline{\text{PS}}}{\overline{\text{OP}}} = 10^{-\frac{15}{20}} = 0.1778$

であるから、位相誤差 = $\sin^{-1}(0.1778) = 10.2^{\circ}$ となり、約 10 °の位相誤差が生じることになる。なお、上式に おいて 20 で割っているのはパワー比を振幅比に直しているためである。予測される PCAL 位相誤差が小さくな い値であるため、今後 S/X バンドの測地 VLBI 実験時には 22GHz 帯受信機のパワーをオフとすること。



図 4.16: スプリアス信号が PCAL 信号に与える影響の模式図。

4.3 K帯ノイズフロア変動

鹿児島大グループによって鹿島 34m アンテナの 22GHz 帯観測時のノイズフロアの帯域特性に異常な変動が報告された。図 4.17 左図は、2006 年 4 月にオン・オフ法 (それぞれ 30 秒ずつ)で観測されたプロファイルであるが、図 4.17 右図は 2007 年 2 月に同様な観測で得られたプロファイルである。ノイズレベルは下がっているが帯域特性に大きなうねりが見られる。このうねりは、仰角によっても変動し、時間によっても変動を示した。このノイズフロアの帯域特性の変動は以下のような特徴があった。

- ・時間的に変動し、一定ではない。
- ・オン・オフの差分を取る前のスペクトルも波打っている。
- ・天頂 Sky でもノイズフロアの帯域特性の変動は見られるが、仰角が低い方が変動が大きい。
- ・HOT/HOT の引き算ではノイズフロアは平できれいである。

その後、鹿児島大永山氏が風速とノイズフロアの帯域特性の変動の関係を調査した結果、ノイズフロアの帯域 特性の変動の原因はが「風によるレドームのゆらぎ」であることがわかった。風が強い時ほど、帯域特性の変動 も大きくなる。また、43 GHz 帯に22 GHz 帯と同様の帯域特性の変動があることも判明した。更に故意にレドー ムを振動させ、22GHz 帯のレベルをモニターした結果、レドームの振動に応じてレベルが変動することが確認さ れた(図 4.18)。これらの調査及び実験結果から『レドームに生じたピンホールによりレドーム内が十分に加圧



図 4.17: 22GHz 帯でのオン・オフ法による観測例。左図は 2006 年 4 月の観測、右図は 2007 年 2 月の観測。(デー タ提供:鹿児島大東島氏)



図 4.18: 22GHz 帯受信レベル変動とレドーム強制振動の関係。区間Aでは振動無し、区間Bではゆっくり振動、 区間Cでは早く振動、そして区間Dでは再び振動無し。振動の状況に応じて、受信レベルの変動が見られる(実 験日:2007年3月13日)。(データ提供:鹿児島大永山氏)



図 4.19: シリコン補修前後の分光結果の比較。上が補修前、下が補修後。データ取得時の平均風速は 4m/s。補修 前はアンテナ温度で約 0.8 K のうねりがあるが、補修後は見えない。補修後の 800 チャンネル付近に見えるのは 分子雲 NGC2264 のアンモニア輝線。(データ提供:鹿児島大永山氏)

されず、風によってレドームが振動することによってノイズフロアの帯域特性に変動が生じた』と結論づけた。 4月4日、レドームのピンホールをシリコンで補修した。図4.19にデジタル分光計を用いて確認した補修前後 の分光結果を示すが、補修前はアンテナ温度で約0.8Kのうねりがあるが、補修後はなくなっていることが分か る。この時の平均風速は4m/sであったが、風速が6m/sとなると約0.4Kの変動が見えるため、今後も改善のた めの検討が必要である。

4.4 34m アンテナ内標準信号モニター

X 帯受信機の PLO の周波数に飛びが生じたことから、34m アンテナ内で使用している 10MHz 信号を 1 ヶ月 以上に亘ってモニターした。図 4.20 にモニター時のシステムブロック図を示す。2007 年 6 月 15 日から 7 月 18 日 までは HP 製の分配機のモニターを行うため図 4.20 左図に示されるシステムでのモニターを行った。S/X バン ド PLO に供給されている 10MHz 信号を直接モニターするため、パワーデバイダー (R&K PD8CA) を使用して 10MHz 信号を分配した。モニター用 10MHz 信号は、デカップリング用に 10dB のアッテネータを挿入した後、 同軸ケーブルにて AZ 室まで伝送し、AZ 室にて、スペアナ (HP ESA-L1500A) にてモニターを行った。スペアナ データは GP-IB を介して、ノート PC(Dell INSPIRON/710m) に取り込んだ。2007 年 7 月 19 日から 8 月 29 日 までは、更に日通機製分配機を通した 10MHz 信号がどのような振る舞いをするかをモニターするため、図 4.20 右図に示されるシステムでモニターを行った。なお、スペアナの設定は以下の通りである。

| 周波数範囲 | : | $9 \thicksim 11~\mathrm{MHz}$ |
|---------------------------------|---|-------------------------------|
| $\operatorname{Res}\mathrm{BW}$ | : | $10 \mathrm{~kHz}$ |
| VBW | : | $3 \mathrm{~kHz}$ |
| Sweep | : | $500 \mathrm{msec}$ |
| Ref Level | : | $10 \mathrm{dBm}$ |

結果の1例を図4.21 に示す。図は2007年6月15日の1日分のモニター結果をダイナミックスペクトル表示で 示している。10MHzの所に見られる水平な線が、10MHz信号であるが、周波数の飛びやレベルの変動があった 場合にはスペクトルの変動として現れる。

モニターを行った全期間に亘って(含む日通機製分配機モニター期間)ダイナミックスペクトル表示を行い チェックしたが、10MHz 信号には異常な振る舞いは認められなかった。だが、バックグランドレベルにステップ 状の変動が認められた(図4.23)。この変動がスペアナの電源電圧の変動に起因しているかどうかを調べるため、 図4.22 に示される方法にて電源電圧変動の測定を行った。図4.24 に図4.23 を測定した2007年6月26日の電 源電圧変動モニター結果を示す。電源電圧、バックグランドレベル供にステップ状の変動が見られるが、それら の間には相関はなさそうである。例えば図図4.23のスペアナバックグランドレベルでは、14:30ころに顕著なス テップ状の変動が見られるが、それに対応する変動は図4.24 に示される電源電圧には認められない。逆に、電源 電圧に顕著なステップ状の変動が見られる場合にも、バックグラウンドレベルには対応する変動が認められない。 従って、スペアナのバックグランドレベルの変動は電源電圧変動に起因するものではないと言える。



図 4.20: 34m アンテナ内 10MHz 信号モニターシステムブロック図。左図は HP 製分配機の出力のみのモニター 時のブロック図、右図は日通機製分配機も通した出力モニター時のブロック図。



図 4.21: 34m アンテナ内 10MHz 信号のモニター結果例。2007 年 6 月 15 日の 1 日分のモニター結果をダイナミックスペクトル表示で示している。



図 4.22: 34m アンテナ内 10MHz 信号モニターシステムブロック図。左図は HP 製分配機の出力のみのモニター 時のブロック図、右図は日通機製分配機も通した出力モニター時のブロック図。



図 4.23: スペアナバックグランドレベルのステップ 状変動例 (2007 年 6 月 26 日)。



図 4.24: 電源電圧モニター結果(2007年6月26日)。
4.5 34m アンテナおよび 11m アンテナの駆動音測定

34m アンテナおよび 11m アンテナは住宅地に近接したアンテナ(11m アンテナの場合、最短の民家までは約50m、34m アンテナでも約70m しか離れていない)であるため、駆動時の騒音には十分な配慮が必要である。今まで駆動音の定量的な測定がなく、騒音が環境基準値を満たしているのかどうかの定量的に評価することができなかった。今回実際に騒音計を用いて測定を行った(2007 年 12 月 20 日)。その結果、通常の観測状態では環境基準を満たしていることが確認された。ただし、軸校正観測のような特殊な観測時には夜間に基準を満たさない可能性があるので注意が必要である。

図 4.25 はアンテナ周辺図および騒音測定点を示している。図 4.26 には、測定時の様子を示す。 騒音計を三脚



図 4.25: 34m アンテナおよび 11m アンテナ周辺図と騒音測定点。



図 4.26: 34m アンテナ測定点(左写真)および 11m アンテナ測定点(右写真)での騒音測定の様子。

| | AZ 連続駆動 | | EL 連続駆動 | | バックグラウンドレベル | |
|----------|---------|----------------|------------------|--------------------|-------------|-------------------|
| | 平均值 | 最大値 | 平均值 | 最大値 | 平均值 | 最大値 |
| 34m アンテナ | 48 dB | $66.7 dB^*$ | $53 \mathrm{dB}$ | $64.2 dB^*$ | 44dB | $65.9\mathrm{dB}$ |
| 11m アンテナ | 44dB | $56.8 dB^{\#}$ | 46dB | $50.7 \mathrm{dB}$ | 40dB 以下 | 40dB 以下 |

表 4.2: アンテナ駆動音測定結果

*:バックグランドレベルの可能性あり

#:アンテナが停止するときに発生。

表 4.3: 騒音に関わる環境基準

| | 基準値 | | | | |
|---------------|------------------|------------------|--|--|--|
| 地域の類型 | 昼間 (06:00-22:00) | 夜間 (22:00-06:00) | | | |
| AA | 50dB 以下 | 40dB 以下 | | | |
| A 及び B | 55dB 以下 | 45dB 以下 | | | |
| С | 60dB 以下 | 50dB 以下 | | | |

注 AA を当てはめる地域:療養施設、社会福祉施設等が集合して設置される地 域など特に静穏を要する地域

Aを当てはめる地域:専ら住居の用に供される地域

Bを当てはめる地域:主として住居の用に供される地域

Cを当てはめる地域:相当数の住居と併せて商業、工業の用に供される地域

に固定して測定を行った。それぞれのアンテナから 50m 離れた地点を測定点とした。測定にはカスタム社の騒音 計 SL-1320(測定可能レンジ 40~130dB)を使用し、最大値、最小値記録モードで計測を行った。この騒音計に は平均値計測モードはないのでメータの目視により平均値を見積もった。まず、アンテナを駆動していない状態 での騒音レベルを計測し、次にアンテナを天頂向けたまま、それぞれのアンテナの最高速度での AZ 連続駆動、 アンテナが丁度背面となる方向での EL 連続駆動を行い、騒音レベルを計測した。

結果を表 4.2 に示す。まず 34m アンテナ測定では測定点でのバックグラウンド騒音が意外と大きく、最大値の 値は、バックグラウンド値の可能性もある。目視による平均値は AZ 駆動時は 48dB、EL 駆動時は AZ 駆動時よ りうるさく 53dB であった。アンテナの駆動開始および停止時の騒音はそれほどひどくはない。11m アンテナの 測定点は非常に静かでありバックグランドノイズは測定可能最低レベル(40dB)以下であった。目視による平均 値は AZ 駆動時は 44dB、EL 駆動時は AZ 駆動時より若干うるさく 46dB であった。ただし AZ 駆動でアンテナ が停止するときに大きな騒音が発生し、その値は 56.8dB であった。平均値を定量的に評価するには、データを PC等に取り込む必要があるが、残念ながら現用の騒音計にはその機能がない。

さて、この騒音が如何ほどのレベルであろうか?表4.3 は環境基本法で定められている騒音レベルの環境基準 である。類型を当てはめる地域は都道府県知事が指定するそうである。34m アンテナや11m アンテナの周辺はA またはBの類型に分類されると思われるが、11m アンテナに一番近い民家では、軸校正観測のような頻繁な駆動 開始および停止を伴う観測を行った場合、夜間において騒音基準を満たさなくなる可能性がある。34m アンテナ では一番近い民家まで約70m であるが、距離による音の減少を3dBとすると、EL連続駆動音は50dBとなる が、一番近い民家では夜間に騒音基準を満たさない可能性がある。ただし、詳細な議論をするためには、騒音を 規定に定められた測定法(時間平均を求める)で測定する必要があり、そうした機能を持つ騒音計により、軸校 正観測時等の騒音を評価する必要がある。しかしながら、こうした特殊観測時でも一般的には天体追尾のような 低速駆動時間の方が長く、時間平均騒音レベルは十分に環境基準を満たしていると思われる。

4.6 FS9の状況

34m アンテナを用いた諸観測には NASA が開発した FS9 (Field System Ver.9)を使用している。2007 年はこれ まで使っていた FS9.9.2 (tobiuo) から FS9.10.0(fs9pc5) にアップデートを行った。新しい FS9 の入った、fs9pc5 は S/X バンドの観測では使える状態になっている。K バンドでもポインティング観測など問題なくできるように なっており、2008 年早々には移行の予定である。鹿島 11m アンテナの FS9 も FS9.10.0 に移行した。

5 開発

5.1 e-VLBI に関する技術開発

5.1.1 はじめに

e-VLBI 技術は VLBI と高速ネットワークを含むコンピュータ IT 技術の融合として誕生した新しい VLBI 技術 である。その恩恵は、観測から結果を得るまでの時間が大幅に短縮されたことだけに留まらず、さまざまな相乗 効果をもたらしている。

そのひとつとして、異なる VLBI システム間の互換性を大幅に改善した点が挙げられる。それは、コンピュー タ技術の爆発的な発達によって、それまでハードウェアでなければ扱うことができなかった大容量のデータを汎 用のパーソナルコンピュータ (PC) で扱い、処理できるようになったことで実現した。互換性の改善は世界の電 波望遠鏡が相互に共同観測する可能性を拡大し、国内・海外の VLBI 関係研究機関の共同件研究を加速している。

ふたつめとしては、これまでの VLBI に必要であった専用の相関処理装置が汎用 PC 群の上で稼動するソフト ウェアで取って代わることができるようになったことであろう。ソフトウェアを使った処理システムは、ハード ウェアによる専用処理装置に比べて安価であるほか、開発期間も短くてすみ、実験的な処理システムの設計を大 胆に取り入れることができるなど、多くの利点をもたらしている。また、研究分野の裾野を広げることにも役立っ ている。これまで高価な VLBI データ処理装置は多くの予算を使うことができる国立研究機関だけの特権的な開 発ターゲットであったが、高速な汎用 PC での開発が可能になって、これまで実現が困難であった大規模な電波 分光計の開発などが、大学院生の研究テーマとしていくつかの大学で研究されているほか、VLBI 用のアンテナ を持っていなかった大学が VLBI の研究に参加するようになっている。

NICT は VLBI 研究をするグループとネットワーク研究を行う研究者が同居するユニークな研究機関として、 e-VLBI 技術の開発において世界の先導的な研究をお行ってきている。また、ネットワークの観点から見ると、 VLBI は本質的に遠隔地から大容量のデータを伝送することが観測感度と分解能を向上させるキーファクターで あるという点で、大きな "遅延帯域積 "を要求するデータコンテンツである。帯域保障されたデータ伝送を要求 するという点で、GMPLS(Generalized Multi-Protocol Label Switching) 技術の研究におけるサービスターゲッ トの一つとして重要であり、我々は NICT 内のネットワークアーキテクチャグループや JGN2 との共同研究を進 めている。以下の節では、2007 年の JGN2 シンポジウムで実演した、大陸間の実時間 VLBI のデモンストレー ションと、UT1 の迅速計測を目的としたヨーロッパとの e-VLBI 実験について報告する。

5.1.2 TCP/IP を使ったデータ伝送/JGN2 Symposium におけるリアルタイム VLBI デモンストレーション

2007年1月13-14日に広島国際会議場において JGN2 シンポジウムが開催された。我々はこの会議中、米国 MIT ヘイスタック観測所と e-VLBI 実験を行い、米国東海岸で観測された VLBI データを実時間で日本に伝送し、 秋葉原、大手町に置かれたサーバで鹿島 34m アンテナで観測されたデータと実時間相関処理を行い、その結果を 広島の会議会場に表示するデモンストレーションを行った。この目的のために、我々は NICT が開発した K5/VSI データ取得装置をヘイスタックに設置した。MIT の開発した Mark5 サンプラからの VSI データを、K5/VSI シ ステムで受信し、ネットワークを介して日本に伝送したわけである。このとき初めて行った米国の Mark5 システ ムと K5/VSI システムとの相互接続試験は、VSI-H(VLBI Standard Interface Hardware Specification)の仕様に 従って作られた両システムが容易に接続可能であることを実証した。VLBI のネットワーク伝送の標準仕様とし て VSI-E の提案が MIT の A.Whitney らによっておこなわれているが、この時点では IVS-E の仕様に従ったソフ トウェアの整備が不十分であったため、このシンポジウムのために TCP/IP に基づいたデータ伝送ソフトウェア を独自に開発して使用した。ソフトウェアの開発に当たっては VSI-E のために MIT の David Lpsley 氏が開発し た C++のクラスライブラリを使用した。開発したソフトウェアパッケージの構成要素を表 5.1 にまとめている。 このソフトウエアパッケージでは VLBI 送信データの内容をデータ受信側から送信側に指定するために'Payload' とよぶバイナリーデータを使用している。この'Payload' は C 言語表記で以下のような構造をしている。

表 5.1: JGN2 シンポジウム 2007 での e-VLBI デモンストレーションのために開発した TCP/IP による VLBI(VSI) データ伝送プログラム群

| Module | Function |
|---------------------|----------------------------------------------|
| VLBI Data Sender | VLBI データ送信サーバ (VDS) はサーバとして動作し、クライアントからの接 |
| (VDS) | 続を待つ。クライアントから接続を受け、'Payload'を受け取ると、それに記述 |
| | されているデータ出力モードを設定し、Payload に記述されたデータ転送開始 |
| | 時間を待ち、データ伝送を開始する。 |
| Channel Decomposer | チャンネルデータ分解サーバ (CDS) はサーバとして動作し、クライアントから |
| Server (CDS) | の接続とそれに続く'Payload'を待つ。クライアントからのペイロードが受信さ |
| | れると、そこに記述されたビットマスクがセットされ、指定された VDS への |
| | 接続を試みる。VDS への接続が確立すると、下流から受信したペイロードを上 |
| | 位サーバである VDS へ送信し、上流からのデータ送信を待つ。上位サーバら |
| | からデータを受信すると、ビットマスクに従ってデータを切り出し、パッキン |
| | グして下流のクライアントに送信する。 |
| Data Distribution | データ分配サーバ (DDS) はサーバとして動作し、クライアントからのポート |
| Server (DDS) | X 及びポート Y への接続を待つ。ポート X への接続が行われると、それに続 |
| | く'Payload'の受信を行い、あらかじめ指定された上流サーバへの接続を試み |
| | る。ポート X 節即したクライアントを「マスタークライアント」と呼び、この |
| | クライアントから受信した'Payload' を上流のサーバへ転送する。これに対し |
| | て Y ポートへ接続したクライアントを「ダミークライアント」と呼びダミーク |
| | ライアントから受信した'Payload'については無視される。上流のサーバから |
| | のデータを受信するとマスタークライアントヘデータを送信するほか、他にダ |
| | ミークライアントからの接続があればダミークライアントに対しても同じデー |
| | タを送信する。 |
| Software Correlator | ソフトウェア相関器は受信すべきデータの時刻やビットマスクを指定した' Pay- |
| | load'を生成し、それを X, 及び Y 局に相当する二つの DDS へ送信する。二つ |
| | のデータサーバからデータを受け取ると、それらのデータどうしの同期を取り、 |
| | 相関処理を実行する。 |

```
struct Payload {
```

// total seconds since 1970/1/1

}.

この'Payload'の中にはデータの送信時刻とデータ長(ビット)、エポック当初からのビットオフセット、サンプリン グクロック周波数、ビットマスクの情報を含んでいる。表 5.1 に記述したモジュール間の通信によって、下流か ら上流へ運ばれた'Payload'に従ってサンプラーからのデータが送信され、下流へと流れていく(図 5.1)。このソフ トウェアパッケージではインタフェースを'Payload'で共通化しており、今回のような VDS-CDS-DDS-Correlator の接続のほか、VDS-DDS-Correlator のような接続も可能であり、ネットワークを介して VSI-H の 32bit パラレ ルのデータをそのまま伝送し、複数のクライアントにデータを分配する汎用性の高い機能を持つ。



図 5.1: ひとつの局の VLBI データの流れと開発したそれぞれのソフトウェアモジュールの関係を示すブロックダ イアグラム。ソフトウェア相関器は'Payload' の形でデータ要求をデータ分配サーバ (DD) に送信する。'Payload' の情報はチャンネル分解サーバ (CDS) など中継サーバを経由して VLBI データサーバ (VDS) まで転送される。 観測された VLBI データは'Payload' と逆の経路で伝送され、ソフトウェア相関器に供給される。上流はサーバと して動作し、下流側はクライアントとして動作する。



図 5.2: JGN2 シンポジウム 2007 での e-VLBI デモンストレーションのネットワーク構成。米国 MIT の Westford で観測されたデータは Glownet-Abilene-StarLight-JGN2 のネットワークを経由して大手町、小金井. 秋葉原 に設置された相関処理サーバに送られた。これらのサーバ間は波長の異なる光ネットワークで接続されている。 Westord の観測と同時に鹿島 34m アンテナで受信された信号もこららの相関処理局に伝送され、相互相関処理を 行った後、結果を広島のシンポジウム会場へ伝送・表示した。

このシステムを使って、JGN2 シンポジウムにおいてリアルタイム相関処理のデモンストレーションを行い、 米国東海岸と日本を結んだ大陸基線の実時間 VLBI 実験を成功させた。データ処理には秋葉原、大手町、小金井 に設置したサーバを GMPLS による光回線で結び、分散相関処理を行って結果を、シンポジウム会場である広島 国際会議場に送信し、表示を行った (図 5.2)。

5.1.3 e-VLBI による UT1 迅速計測実験

地球姿勢パラメータ(EOP)は歳差、章動の運動モデルとあわせて地球に固定された座標系 (Terrestial Reference Frame)と宇宙のかなたにあるクエーサを基準とする天球座標系 (CRF)を結ぶために必要な、地球の自転軸の方向を表現するパラメータである。EOP は VLBI,GPS,SLR などの宇宙測地技術による計測の最終解析結果が



図 5.3: UT1 の計測・推定値の精度をあらわす図。中央は現在であり、右側の横軸は未来の時間をログスケール で、左側の過去の時間をリニアスケールで表示している。縦軸は UT1 の精度であり、ログスケール表示である。

IERS(International Earth Rotation and Reference System Service) から Bulletin-B として毎月 1 月前の値が公 表されているほか、大気角運動量 (AAM) などの気象観測データを使って予測推定した値が Bulletin-A として毎 週公表されている。EOP データのうち UT1-UTC は天球座標系に対する地球の回転角を表現するため、クエー サの観測を行うことができる VLBI だけが安定した計測値を提供できることが知られている。IERS によって解 析された UT1 の確定値、推定値の精度を図 5.3 に示す。EOP の値は最終確定値が公表されるまでに 1ヶ月を要し ているため、迅速な UT1 の測定値が必要なユーザのために最大 1 週間遅れの速報値を毎週 Bulletin-A として公 表しているが、未来の EOP の予報値は時間と共に急速にその精度が劣化する。IERS や IVS(International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) では EOP データの速報値を迅速に算出することを目標とする VLBI プロ ジェクトして Wettzell-Kokee 基線の (INT1), Tsukuba-Wettzell(INT2),Tsukuba-Wettzell-Nayales(INT3) 実験 が定常的に行われている。これらの VLBI 実験は、2003 年までは磁気テープに記録したデータを郵送して処理さ れていたが、2004 年以降はネットワークを使って FTP によるデータ伝送で運用されている。しかし、観測から UT1 の結果を得るまでに現在でも 3 日程度を要しており、リアルタイム e-VLBI の実現による迅速な UT1 の計 測が期待されている。⁹

我々は、2007年4月から高速ネットワークの接続された VLBI 局として、スウェーデンのオンサラ局、フィン ランドのメッツアホビ局、つくば32m局及び鹿島の34mアンテナの間で e-VLBI を使った UT1の迅速計測の 実証実験を行っている。図 5.4 に VLBI 観測局のマップを、表 5.2 にそれぞれのアンテナの性能を示している。

| Station Name | Diameter | SEFD (Jy) | |
|--------------|----------|-----------|--------|
| | (m) | X-band | S-band |
| Kashima 34 | 34 | 380 | 430 |
| Tsukuba 32 | 32 | 320 | 360 |
| Onsala 60 | 20 | 1630 | 1110 |
| Metsähovi | 13.7 | 3200 | 4500 |

表 5.2: e-VLBI 参加局のアンテナ性能

これまでに行った実験のリストを表 5.3 に示す。また、計測された UT1 – UTC の値を比較のため、Bulletin-A の予報値、速報値を一緒に図 5.5 に示している。NICT では、迅速な UT1 の結果を得るために、UDP をベース とする Tsunami プロトコルを使ってオンサラ、メッツアホビの観測局から送られてきたデータの処理(データ フォーマット変換、相関処理)を自動的に行うための処理系を Perl を使ったスクリプト言語で開発し、複数のク ラスター PC で自動的に分散処理される仕組みを作っている。ヨーロッパと日本をつなぐ回線速度は、900Mbps 程度が日常的に利用可能になっており、実際の正味の観測データレートとして 256Mbps を中心とした観測を行っ ている。これらの技術により、2007 年 5 月は、観測後 30 分以内に UT1 の計測するという世界最速の UT1 観測 を実現した。これらの技術は、現在定常的に行われている Intensive 実験に技術移転され、定常的な迅速 UT1 計

⁹ Rothacher M., Thaller, D., and Dill, R., "Analysis Coordinator", *IERS Annual Report 2005*, pp. 29-31., 2005.



図 5.4: e-VLBI による迅速 UT1 実験に参加している VLBI 観測局。それぞれの局で観測されたデータは高速ネットワークを介してリアルタイムに日本に伝送される。データ伝送には米国インディアナ大学とフィンランドのメッ ツアホビ局が開発した Tsunami プロトコルが使用されている。データ伝送が終わると、Mark5 フォーマットを K5 にフォーマット変換し、ソフトウェア相関器で処理される。これらの処理の全体を管理するソフトウエアは NICT が開発した。

測が可能になると期待されている。

謝辞 JGN2 シンポジウムのデモンストレーション実験では実験の半年前から米国 Internet2 の Brian Cashman, Chris Robb, Chris Small, Rick Summerhill、DRAGON Project の Jerry Sobieski, Chris Tracy, Tom Lehman, MIT ヘイスタック観測所の A.Whitney, C.Ruszczyk に多大な協力をいただいたことをここで感謝する。また JGN2-NOC の池田貴俊氏他関係者、NICT ネットワークアーキテクチャグループの平原正樹氏、原井洋明氏、徐 蘇鋼氏にも大変大きなサポートをいただいた。

(M.S. 記)

表 5.3: 2007 年 4 月から行われた e-VLBI による UT1 セッションとその結果。局コードは 'Ks':Kashima34, 'Ts':Tsukuba 32, 'On':Onsala, 'Mh':Metsähovi, and 'Wz':Wettzell である. 周波数チャンネル配列の有広帯域幅 は 4 月 3 日から 6 月 4 日の実験までは X-abnd、S-band それぞれ 140.2MHz 、33.1 MHz であり、それ以降の実 験では X-band 280.4 MHz、S-band 48.8 MHz であった。

| Date | Baseline | Data rate | UT1-UTC | UT1-c04 | Error | Latency |
|----------|------------------------------------------|-----------|-----------|----------------------|----------------------|------------------------|
| 2007 | | (Mbps) | (ms) | $(\mu \text{ sec.})$ | $(\mu \text{ sec.})$ | |
| 03 April | $\mathrm{Ks}-\mathrm{On}$ | 256 | -69.6044 | -38.5 | 8 | _ |
| 23 April | $\mathrm{Ks}-\mathrm{On}$ | 128 | -98.4422 | 15.0 | 41 | $1~\mathrm{h}~55$ min. |
| 02 May | $\mathrm{Ks}-\mathrm{On}$ | 128 | -110.0189 | -30.4 | 16 | - |
| 18 May | $\mathrm{Ks}-\mathrm{Mh}$ | 128 | -130.5832 | 67.5 | 98 | 2 h 38 min. |
| 30 May | Ks - On | 128 | -143.2703 | -14.7 | 9 | 28 min. |
| 31 May | $\mathrm{Ks}-\mathrm{On}$ | 128 | -143.7011 | -83.5 | 8 | - |
| 04 June | Ks - On | 256 | -144.6447 | 13.1 | 6 | 31 min. |
| 14 July | Ks-On, Ks-Wz | 256 | -162.0879 | 6.2 | 6 | _ |
| | Ks - On | | -162.1017 | -7.6 | 10 | |
| | $\mathrm{Ks}-\mathrm{Wz}$ | | -162.0715 | 22.6 | 8 | |
| | Ts - Wz, On- Ts | | -162.0674 | 26.7 | 8 | |
| | On - Ts | | -162.0725 | 21.6 | 7 | |
| | $\mathrm{Ts}-\mathrm{Wz}$ | | -162.0585 | 35.6 | 5 | |
| | $\mathrm{Ts}-\mathrm{Wz}(\mathrm{INT2})$ | | -162.0974 | -3.3 | 7 | |
| 15 July | $\mathrm{Ks}-\mathrm{On}$ | 256 | -162.0186 | -30.7 | 6 | _ |
| | $\mathrm{Ts}-\mathrm{Wz}(\mathrm{INT2})$ | | -162.0017 | -13.8 | 8 | |



図 5.5: e-VLBI で計測された UT1-UTC の値を'•'、IERS EOPc04 の値を (実線)、Bulletin-A(2007/4/19 版) の UT1 予報値を'□' で左のパネルに示している。右の図は、EOPc04 を基準として、e-VLBI の測定値'•'と、 Bulletin-A の一週間遅れの速報値'×'を比較のためプロットしている。

5.2 X 带広帯域化



図 5.6: X帯フロントエンド (2006年5月-2007年12月)。

2005 年 9 月に X 帯広帯域化 (X 帯広帯域系は X-wL 系を使用。以下 2007 年 12 月まで X-b と呼ぶ)を実施し たが、X 帯の局部発振出力は 2 分配器 (YL-56: TRIANGLE MICROWAVE)により X 帯広帯域系 (X-b 系) と X-wH 系に入力されていた。X 帯の両偏波を同時受信する場合には X-n 系が必要になるため、局部発振出力の 接続変更が必要であった。この問題を解消するため 2006 年 5 月 17 日に分配器を 4 分配器 (44020: Anaren)に 変更 (図 5.6)してすべての受信系で同時に受信できるようにした。

さらに 2007 年 12 月には図 5.7 に示されるシステムに変更し、両偏波とも 8180-9080MHz の帯域が受信できる ようになった。改修後、12 月 19 日に X 帯の全系統の受信機雑音温度およびシステム雑音温度(天頂方向)の周 波数特性計測を行った。その結果を図 5.8 ~ 5.10 に示す。



図 5.7: X帯フロントエンド (2007年12月-)。



図 5.8: X-n 帯受信機雑音温度 (Trx) と天頂方向でのシステム雑音温度 (Tsys) (2007年12月19日計測)。



図 5.9: X-wH 帯受信機雑音温度 (Trx) と天頂方向でのシステム雑音温度 (Tsys) (2007 年 12 月 19 日計測)。



図 5.10: X-wL 帯受信機雑音温度 (Trx) と天頂方向でのシステム雑音温度 (Tsys) (2007年12月19日計測)。

5.3 CARAVAN2400 による測地観測

2006年9月21日の初 VLBI 測地観測に引き続き、2007年1月31日から2月1日にかけて CARAVAN2400 に よる第2回の測地 VLBI 観測をつくば32mアンテナとの間で実施し成功した。今回は、開発中の距離基準超小型 VLBI システムの検証を行うため広帯域でのデータ取得観測を行い、実際に必要とされる精度で VLBI 計測を行 うことが出来るかどうかの検証を目指した。超小型 VLBI システムでは口径 1.5m 程度のアンテナの使用を検討 しているが、アンテナロ径が小さいことによる受信感度の低下を広帯域受信により補うことが必須である。今回 の観測では、K5/VSI を用いて X 帯の信号を帯域 512MHz でデータ取得した。また、比較のために K5/VSSP も 同時に用い、こちらは帯域 128MHz でデータを取得した。観測は成功し、2つのシステムによる測位解も得られ た。それらの結果は X 帯のみの観測であることを考慮に入れると、充分整合性のとれた結果となった(表 5.4)。 今後、こうした観測を繰り返して、広帯域観測での精度評価を進め、1.5m 口径アンテナを用いた超小型 VLBI シ ステムへの適用を考えていく予定である。なお、観測に協力頂いた国土地理院の皆さんに深く感謝致します。

(R.I. 記)



図 5.11: 国土地理院つくば 32m 局に設置された K5/PC-VSI 装置 (左写真)と K5/PC-VSI による相関処理結果の例(右図)。

| | 解析結果 | | | | |
|----------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--|--|
| 観測日時 | 2006.9.21 (K5/VSSP) | 2007.2.1 (K5/VSSP) | $2007.2.1 \; (K5/VSI)$ | | |
| X (mm) | -3997490931.9 ± 7.3 | $-3997490925.0{\pm}6.5$ | -3997491031.7 ± 4.9 | | |
| Y (mm) | 3276829224.9 ± 7.0 | 3276829227.2 ± 5.1 | 3276829321.6 ± 3.9 | | |
| Z (mm) | 3724308222.1 ± 7.2 | $3724308207.9 {\pm} 5.6$ | 3724308293.9 ± 4.3 | | |
| 基線長 (mm) | $53814847.0{\pm}2.8$ | 53814844.5 ± 1.9 | 53814844.9 ± 4.5 | | |

表 5.4: CARAVAN2400 の局位置推定結果

5.4 PC-VLBIシステムを用いた VERA 用相関処理システムの開発

国立天文台からの委託研究として、VERA プロジェクト¹⁰ で使用されるソフトウェア相関処理システムを構築している。このシステムは3ヵ年計画で実施され 2007 年度が最終年度である。



図 5.12: 5 局相関処理時の機器構成。GICO3 と記されている部分がソフトウェア相関器である。

| 相関処理局数 | 5局(原理的には何局でも可能) |
|-----------|---------------------------------------|
| 相関処理方式 | ソフトウェア FX 型 (自己相関/相互相関) |
| 相関処理速度 | 5 局相関処理時において 0.5~1.0 倍速程度 |
| 相関可能データ型式 | VERA, K5/VSI, GALAXY, K5/VSSP, MARK-V |
| 相関出力型式 | CODA 型式、FITS 型式 |
| 分光点数/出力速度 | 256~65536 程度/1~100Hz 程度 |
| サイズ/電力 | 標準ラック1本 (20U)/最大 4kW |

表 5.5: ソフトウェア相関器仕様

図 5.12 に 5 局相関処理時のシステム構成を、表 5.5 にはソフトウェア相関器の仕様を示す。ソフトウェア相関 処理システムは VERA システムから VSI 出力を受取り、一旦 PC-VSI 上のディスクアレイに 1 倍速でデータコ ピーを行なう。コピー終了後、PC-VSI 自身のプロセッサを利用して相関処理が実行される。観測局数と同数の テープを同時にコピーするため、相関処理にも基本的には観測局数と同数の PC-VSI を利用した分散処理が行な われる。ここでの相関処理は時分割方式が採用されており、特定時刻における全局の観測データはひとつの PC へ ギガビットイーサで集められた後、全基線相関処理が行なわれる。同時に他の PC には異る時刻のデータが集め られ、相関処理に参加する全ての PC 上のプロセッサで処理実行される。個々の PC で処理が完了した後、結果を 一台の PC へ集めてそこで 1 つの相関処理結果ファイルに記録される。ソフトウェア相関処理システムは VERA

¹⁰ VERA:VLBI Exploration of Radio Astrometry の略で VLBI 技術により銀河系の3次元地図を作製するプロジェクト。詳細は http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index-J.html



図 5.13: 汎用ディスクアレイを使用した書き込み 性能。



図 5.14: 観測局数と同数の PC を使用した時の処理 速度。

相関器の後継機として開発されているため、基本的な仕様は現行の三鷹 FX 相関器とほぼ同じとなっている。ただし、ソフトウェアで処理が実行されるため、ハードウェア上の制約で上限が決まっていた局数や FFT 数、相関出力速度などが自由に設定できるようになっている。

PC-VSIの開発コンセプトのひとつは汎用の PC パーツを利用することにより、VLBI システムを安価に構成 することである。そのため VSI 信号を PC へ取り込むまでは NICT で開発された専用のハードウェアが使用され るが、一旦 PC に取り込まれたデータは汎用のディスクアレイ上に記録され、ネットワーク伝送は汎用のイーサ が使用され、相関処理には PC 上のプロセッサーが利用される。このため、ハードウェアの新規開発をせずとも 市場に高性能のパーツが登場すれば、それらを利用することによりシステム全体をより高性能なものにすること が出来る。この PC-VSI システムは開発開始時には 1Gbps のデータ記録性能と数百 Mbps での相関処理性能で あったが、幾つかの構成要素を最新のものに交換換することにより、現在では 4Gbps 以上のデータ記録性能(図 5.13)と専用相関器である三鷹 FX 相関器の性能を超える 1Gbps 以上での処理速度を手に入れることができるよ うになった (図 5.14)。ここで、参考までに VERA 用ソフトウェア相関処理システムを構成する PC のパーツを表 5.6 に記載する。このシステムではサーバー系の比較的高価なパーツを使用してはいるが、PC1 台当たりで 100 万円程度で購入が可能である。

| CPU | Intel Xeon X5355 \times 2 |
|--------------|-----------------------------------------|
| Mother Board | Super Micro X7DBE |
| Raid Card | High Point RR2340 |
| Hard Disk | IBM/Hitachi Desk Star 7K500 $\times 16$ |
| Memory | FB-DIMM DDR2 533 1GB \times 4 |
| Case | T-Win RMC3E2-PI-XPSS |

表 5.6: PC-VSI の現在の構成部品

三鷹 FX 相関器とソフトウェア相関器で処理結果に大きな差異がないかどうかを確認するために、同一天体が 長時間に渡り記録されている磁気テープから観測データをファイルヘコピーし、三鷹 FX に与えたものと同じ遅 延量を与えてソフトウェア相関処理を実行し結果を比較した。なお、両者の比較のため三鷹 FX の結果を CODA 型式からソフトウェア相関処理で使用されるフォーマットヘー旦変換した後、同じ処理ソフトで解析を行なった。 図 5.15 は天体 3C345 における水沢-石垣基線の相関振幅、SNR、群遅延と水沢-入来-小笠原のクロージャ位相を 表示したものであるが、両相関器でほぼ一致した結果が得られた。



図 5.15: ソフトウェア相関器と三鷹 FX の処理結果。

今後、VERA と大学連携観測との混合相関モードの処理機能の検証を行っていく予定である。

(M.K.記)

5.5 22GHz 帯受信機局部発振周波数の変更

24GHz 付近に観測されるアンモニア分子輝線を観測するため、第一局部発振器の周波数を 16.8GHz から 17GHz へに変更した (2007 年 1 月 19 日)。これにより K 帯の観測周波数帯は従来の 21.8 ~ 23.8GHz から 22.0 ~ 24.0GHz となった。

5.6 ガスセル型 Cs 発振器を用いた測地実験

5.6.1 実験概要

アンリツ株式会社製レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器の評価を目的として、測地 VLBI 実験を鹿島 34m アンテナー小金井 11m アンテナ基線 (基線長:約110km) で 2007 年 7 月 19 日に実施した。この度、お借り したのは、図 5.16 に示すガスセル型 CS 発振器 "SD2T01A" である¹¹。この図からもわかるように、ちょうど PC1 台分程度の大きさ (手前に置いたマジックペンと比較されたい) であり、重量は 18kg である。



図 5.16: アンリツ製レーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器の外観

実験では、鹿島側のみ従来周波数標準に使用していた水素メーザーからガスセル型 Cs 発振器に切り替えて各 システムに周波数標準を供給するようにした。観測は、19日 09:00UT-20日 11:00UT の約 26 時間行い、データ 取得できた 1088 個の OBS のうち 1054 個を解析に使用することが出来た (約 97%)。10bs あたりの積分時間は、 30~45 秒程度である。

なお、今回測地 VLBI 実験の際のガスセル型 Cs 発振器、及び水素メーザ発振器が設置された環境は図 5.17 の ようになっている。図 5.17 で示される個々の環境のうち、恒温槽内は $\pm 0.1^{\circ}C$ 程度、またメーザー室そのものは $\pm 1^{\circ}C$ 程度で温度制御されている。それぞれの温度設定は、恒温槽が $23^{\circ}C$ 、またメーザー室が $24^{\circ}C$ である。

測地 VLBI 実験の前には、ガスセル型 Cs 発振器を図 5.17 の恒温槽内に設置して、一定温度条件下での特性を 調べた。また VLBI 実験後は恒温槽の外にガスセル型 Cs 発振器を設置して、水素メーザー室のエアコン設定に より温度を変化させた場合の特性を調べた。



図 5.17: ガスセル型 Cs 発振器、及び水素メーザ発振器の設置環境

¹¹ 大内他、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.

5.6.2 解析結果

まず、表 5.7 に今回実施した CS7200 実験の解析結果を、6 月に実施した同基線での時刻比較連続 VLBI 実験の 結果と共に示す。基線ベクトルの推定値は 2mm 程度の範囲内で一致しており、基線長、水平成分、鉛直成分の σ もほぼ調和的な値を示す。また、CS7200 実験の解析残差 ("Weighted RMS Residual")39psec という値も、他 の 3 回の実験に比べてほぼ同等とみなせる。この結果より、測地 VLBI 実験での周波数標準としてガスセル型 CS 発振器の使用した場合、水素メーザーを使用した場合と遜色ない精度で解析結果を得ることができるといえる。



図 5.18: ガスセル型 CS 発振器の特性変化 (2007.8.8)。上から、水素メーザ室内温度変化、水素メーザ 10MHz 基 準信号に対するガスセル型 CS 発振器 10MHz の周波数差、水素メーザに対するオフセット、外気温。この図で、 水素メーザ室内温度変化と周波数差変化の図に示した赤い線は、青線で示した生データのプロットをスプライン 補完したもの。

5.6.3 ガスセル型 Cs 発振器の温度依存性

次に、ガスセル型 CS 発振器の発振周波数の温度依存性について調べてみた。あいにく、Cs07200 測地実験の 際はガスセル型 CS 発振器が設置された水素メーザー室の温度測定を行っていなかった。そこで、観測後に、水 素メーザー室内においてガスセル型 CS 発振器特性と気温変化を同時に計測した際の結果に基づいて報告する。

まず、メーザ室内の気温を急激に変化させた8月8日の結果を、図 5.18 に示す。図 5.18 の上2枚(水素メー ザ室内温度変化と10MHz 基準信号に対するガスセル型 CS 発振器10MHz の周波数差)をよく見ると、双方の間 の時系列変化が逆相関している。ただし、双方の間に時間オフセットがあり、周波数変化の時系列を72分早め た場合に最も相関が高かった。このように、ガスセル型 Cs 発振器の温度依存性が明瞭に見て取れ、気温変化が 急激な場合には周波数差変化も急であり、気温変化が緩やかな場合は周波数差の変化も緩やかとなる特徴も確認 できた。ただ、発振器のメカニズムの中でどの部分がこのような温度特性を持つのかは現時点ではまだ明らかに なっていない。

5.6.4 アラン分散の結果

最後に、図 5.19 はガスセル型 CS 発振器から得られたアラン分散である。この図には、測地実験の際の値の 他、後日の温度依存性モニターでの結果、及び水素メーザから得られた結果 (黒実線)を並べて示した。この図の うち、赤実線は図 5.17 で水素メーザが設置された恒温槽内にガスセル型 Cs 発振器を置いて計測した結果であり、 現状でガスセル型 Cs 発振器の性能を最も良く引き出せる環境下での評価といえる。 表 5.7 に示した測地 VLBI 実験の際には、図 5.17 に示す状態でガスセル型 Cs 発振器が設置されていた。この 実験で得られたアラン分散は緑色の実線で示している。この事実は逆に言えば、周囲の温度変動を $\pm 1^{\circ}C$ 程度に 抑えることが出来れば、水素メーザを用いた測地 VLBI 実験と遜色ない結果を得られることを意味する。また、 周囲の温度変化が急な場合 (青色の実線)、そして緩やかな場合 (紫色の実線)の場合は、 τ が概ね 300 秒を越える あたりから初めて各々の安定度に違いが生じていることがわかる。このことは、ガスセル型 Cs 発振器の安定度 が、測地 VLBI 実験での一般的な積分時間 (30-300 秒)の範囲で周囲の環境に影響されにくいことを示唆する。



図 5.19: ガスセル型 CS 発振器のアラン分散

| data | WDMC maridual (mass) | b agaling most on (name) | \mathbf{s} igma (mm) | | |
|---------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------|----------|
| date | W RMS residual (psec) Dasenne vector(mm) | | length | horizontal | vertical |
| 2007.6.15 (時刻比較実験) | 32 | 109337424.10 ± 1.17 | 1.17 | 0.76 | 4.82 |
| 2007.6.17 (時刻比較実験) | 29 | 109337422.26 ± 1.00 | 1.00 | 0.67 | 4.09 |
| 2007.6.20 (時刻比較実験) | 37 | 109337421.45 ± 0.76 | 0.76 | 0.51 | 3.12 |
| 2 007.7.19 (Cs 実験) | 39 | 109337422.58 ± 1.26 | 1.26 | 0.92 | 5.14 |

5.6.5 まとめ

ガスセル型 Cs 発振器を用いて測地実験を行った結果、少なくとも設置環境の温度変化を ±1°C に押さえる限 りは、水素メーザ利用での測地 VLBI 実験と遜色ない精度で基線ベクトルを推定可能であることがわかった。借 用したガスセル型 Cs 発振器は汎用 PC と同程度の大きさ、重さであり、その可搬性を生かすことで測地 VLBI 実 験が実施できる範囲、条件を大きく広げることができると考えられる。今後、例えば発泡スチロール製の簡易恒 温槽などを用いた場合の精度評価を実施してガスセル型 Cs 発振器の適用限界を調べることが重要である。

謝辞 今回の評価実験に際し、快くレーザ励起ガスセル型セシウム原子発振器の使用を許可していただいたアン リツ株式会社および関係者ご一同様に感謝いたします。

(R.I. 記)

6 終わりに

鹿島 34m アンテナは、VLBI 観測を主目的とする大型アンテナとして日本で初めて建設された先駆的な観測装 置である。ここで培われた技術開発のノウハウは、国土交通省国土地理院が実施する測地 VLBI 観測の業務や、 自然科学研究機構国立天文台などが実施する電波天文研究に大いに活かされており、今日では国内に多様な観測 網が整備されて大きなコミュニティが形成されるに至っている。こういった技術移転は国内だけにとどまらず、 韓国の新しい測地観測用アンテナの設計への技術協力も進んでいる。また、高速ネットワークに早くから接続さ れていることや、多くの周波数帯で今なお国内屈指の観測感度を有することから、様々な研究開発や電波天文観 測にとって欠かせない重要なアンテナとしての位置付けがますます強くなっている。

一方、情報通信研究機構の自ら実施する研究開発でも、時空統合標準プロジェクトにおいて「リアルタイム地 球姿勢決定技術の研究開発」および「測位における距離基準を確立するための研究開発」を遂行する上で重要な役 割を担っている。このような多目的な観測システムを最高の状態で維持しつつ、長期にわたって安定した運用を 継続していくためには、計画的な保守・補修作業と個々のシステムの改善のための不断の努力とが不可欠である。

本報告書のような年次報告書を継続して発行し、毎年の運用状況や保守・補修作業の履歴をまとめることは、 現在のような安定した 34m アンテナシステムの運用を可能としている重要な活動の一つでもあると考えている。 この報告書が、鹿島 34m アンテナのみならず、全国の他機関等において、多くの大型観測施設の維持・運用の一 助として参考になれば幸いである。



A 鏡面測定法

背面構造部の補修は場合によっては該当個所のパネルを取り外してから補修を行い補修後にパネルを取り付け る作業を行うことがある。このとき、パネルを取り外し前の状態(高さ)に戻すことは、鏡面精度を保つために 重要である。パネルの取り外しを行わない補修においても補修の前後でパネル高の測定を行うことは鏡面精度を 保持するために重要である。34 mアンテナでは、図A.1 に示されるような方法で、該当するパネルと隣接パネル 間の相対高を補修前後で測定することにより、鏡面精度を保っている。具体的には、補修前に隣接パネル間の位 置合わせケガキ線8ヶ所(最外側のパネルでは6ヶ所)に沿って、パネル間の高さを読みとり精度0.01mmのデ プスマイクロメータ(図A.2)で測定する。補修後に再度パネル間の高さを計測し、ずれている場合はパネル高 を調整する。ただし、この方法では何度かの補修中に系統的誤差が蓄積していく可能性は排除できない。





図 A.2: パネル高測定 に使用するデプスマイ クロメータ。

B 受信機制御プログラムの概要

34m アンテナを制御する計算機およびネットワーク系統図を図 B.1 に示す。34m アンテナは2台の HP382 で 制御されている。1台は受信機の制御を行い、もう1台はアンテナ駆動制御を行う。これら2台の HP382とホス ト PC は GP-IB 経由でコマンドやデータのやりとりを行う。ここでは、受信機制御用 HP382 と各機器の接続状 況および、この HP382 上で動作する受信機制御プログラムのオフライン操作時の機能の概要を説明する。

受信機制御用 HP382 と各機器も GP-IB で接続されているが受信機制御プラグラムから見た接続機器の詳細を 図 B.2 に示す。

オフラインでの受信機制御はファンクションキーで行うが、ファンクションキーに設定されている機能は図 B.3 のとおりである。

(資料作成 K.S.)



34mアンテナ制御・モニター計算機等系統図(2007.12現在)

図 B.1: 34mアンテナ制御・モニター計算機等系統図 (2007.12 現在)。



図 B.2: 受信機制御プログラムの機器構成図。



図 B.3: 受信機制御プログラムの機器構成図。

C S/X 帯軸較正用電波源

S/X帯の軸較正観測に使用している電波源リストを Field Systemの取扱書から抜粋して表 C.1 に示す。

| Northern Sources | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|----------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|----------------------|-----------|-----|
| Sc | urco and | $\mathbf{P}_{\text{ogition}}$ (1050.0) | | Sizo* | Total Flux Densities | | |
| le | tter code | 1 05101011 | (1950.0) | DIZC | S-Band | X-Band | |
| a | 3C84 | $03\ 16\ 29.54$ | $+41 \ 19 \ 51.7$ | < 1" | 40 | 50 - 60 | VAR |
| b | 3C123 | $04 \ 33 \ 55.2$ | +29 34 14. | 20" | 32.9 | 10.1 | |
| с | 0521 - 365 | $05\ 21\ 13.2$ | -36 30 19. | 15" | 13.5 | 5.5 | |
| d | Taurus A | $05 \ 31 \ 31.$ | +21 59 00. | $3' \times 5'$ | 815 | 552 | |
| e | Orion A | $05 \ 32 \ 49.$ | -05 25 15. | 4' | 440 | 340 | |
| f | 3C147 | $05 \ 38 \ 43.52$ | +49 49 42.4 | < 1" | 15.6 | 4.9 | |
| g | 3C161 | $06\ 24\ 43.2$ | -05 51 12. | < 3" | 13.1 | 4.0 | |
| h | 3C218 | $09\ 15\ 41.2$ | -11 53 05. | 200" | 27.7 | 8.4 | |
| i | 3C273 | $12\ 26\ 33.25$ | +02 19 43.5 | < 20" | 30 | 30 - 40 | VAR |
| j | Virgo A | $12\ 28\ 17.57$ | +12 40 02.0 | $\operatorname{Core}/\operatorname{Halo}$ | 141 | 46 | |
| k | 3C279 | $12 \ 53 \ 35.83$ | -05 31 07.9 | < 1" | 10 | 10 | VAR |
| 1 | 3C286 | $13\ 28\ 49.66$ | +30 45 58.7 | < 1" | 11.6 | 5.2 | |
| m | 3C295 | $14 \ 09 \ 33.5$ | +52 26 13. | 4" | 14.4 | 3.4 | |
| n | 3C345 | $16\ 41\ 17.64$ | +39 54 11.0 | < 1" | 5 - 10 | 10 | VAR |
| 0 | 3C348 | $16\ 48\ 40.0$ | $+05 \ 04 \ 35.$ | 115" | 27.0 | 6.8 | |
| р | 3C353 | $17 \ 17 \ 53.3$ | $-00\ 55\ 50.$ | 150" | 39.9 | 13.6 | |
| q | 3C380 | $18\ 28\ 13.47$ | +48 42 41.0 | < 1" | 11. | 5.2 | |
| r | 3C391 | $18 \ 46 \ 48.5$ | -00 58 58. | 4.5' | 16. | 7.5 | |
| \mathbf{S} | 1921 - 293 | $19\ 21\ 42.18$ | $-29 \ 20 \ 24.9$ | < 1" | | 5 - 10 | VAR |
| \mathbf{t} | Cyg A | $19\ 57\ 44.4$ | +40 35 46. | 115" | 966 | 190 | |
| u | 2134 + 004 | $21 \ 34 \ 05.23$ | +00 28 25.0 | < 1" | 6 | 10 - 13 | VAR |
| v | 3C454.3 | $22\ 51\ 29.53$ | +15 52 54.2 | < 1" | 10 - 15 | 10 - 20 | VAR |
| w | ${\rm Cas}~{\rm A}^+$ | 23 21 09. | +58 32 30. | 3' | 1510^{+} | 528^{+} | |

表 C.1: S/X 帯の軸較正観測に使用する電波源

VAR The flux density of these sources varies with time. The value given is a rough average. * Sources larger than about 0.1 times the half-power beamwidth will be partially resolved, and their apparent peak flux densities will be less than the values in this table. Centroid positions will be nearly unaffected for these sources.

⁺ The flux density of Cas A is slowly decreasing. The values given here are for 1984.0. The S-Band flux density is decreasing by 0.86% per year, and the X-Band flux density is decreasing by 0.69% per year. The S-Band flux density was revised from 1397 to 1510 Jy as of September 1, 1993.

(Field System Documentation Antenna Performance より抜粋)

D IMT-2000

IMT-2000 は、International Mobile Telecommunication 2000 の略で ITU (国際電気通信連合)が定めた第3 世代移動体通信システム向けの規格である。Sバンドを中心に周波数が割り当てられており、近年、携帯電話基 地局からの電波が測地 VLBI 観測に及ぼす干渉問題が深刻化している。表 D.1 に IMT-2000 の日本での周波数割 り当て (Sバンド)を示す。表中、上りは携帯端末から基地局への回線、下りは基地局から携帯端末への回線を 意味する。

| 上り (MHz) | 下り (MHz) | キャリア | 備考 |
|-------------|-------------|----------------|----------------|
| 2010 - 2025 | 2010 - 2025 | | TDD(時分割複信)方式 |
| 1920 - 1925 | 2110 - 2115 | | PHS とのガードバンド |
| 1925 - 1940 | 2115 - 2130 | KDDI(au) | FDD(周波数分割複信)方式 |
| 1940 - 1960 | 2130 - 2150 | NTT ドコモ (FOMA) | FDD(周波数分割複信)方式 |
| 1960 - 1980 | 2150 - 2170 | SoftBank 3G | FDD(周波数分割複信)方式 |

表 D.1: 日本における IMT-2000 周波数割り当て(Sバンド)

E システム雑音温度の測定法

以下ではアンテナ系の雑音温度を T_A 、受信機の雑音温度を T_R 、システム雑音温度を $T_{sys}(=T_A+T_R)$ と表記する。

E.1 Y係数 (Y-factor)法

34m アンテナの L 帯や S 帯および X 帯受信機で採用されているシステム雑音温度計測方法である。物理温度 が既知である雑音源 (黒体) が 2 つ必要となる (図 E.1)。以下でその測定方法を述べる。



図 E.1: 34m アンテナ雑音温度計測系の模式図 (L帯,S帯,X帯)。

1. 受信機雑音温度 T_R を求める

導波管スイッチ1を雑音源側につなぎ、導波管スイッチ2を常温雑音源、低温雑音源それぞれにつないだ場 合の出力電力 *W_h、W_c* は、

$$W_h = k(T_h + T_R)GB$$

 $W_c = k(T_c + T_R)GB$
ここで $k: ボルツマン常数 (1.38 \times 10^{-23} \text{WHz}^{-1})$
 $G: 受信系の利得$
 $B: 受信系の帯域幅 (Hz)$

となる。

$$Y = W_h/W_c = \frac{T_h + T_R}{T_c + T_R}$$

とおいて整理すると、

$$T_R = \frac{T_h - Y \cdot T_c}{Y - 1}$$

となり、受信機雑音温度を求めることができる。

2. システム雑音温度 *T_{sys}* を求める

つぎに導波管スイッチ2を常温雑音源側につなぐ。導波管スイッチ1をアンテナ側と常温雑音源側それぞれ につないだ場合の出力電力 W_h、W_A は、

$$W_h = k(T_h + T_R)GB$$

 $W_A = k(T_A + T_R)GB$

$$Y' = W_h/W_A = \frac{T_h + T_R}{T_A + T_R} = \frac{T_h + T_R}{T_{sys}}$$

とおいて整理すると、

$$T_{sys} = \frac{T_h + T_F}{Y'}$$

となり、システム雑音温度を求めることができる。

E.2 R-Sky (room-sky)法

34m アンテナの 22GHz 帯などで採用されているシステム雑音温度計測方法である。物理温度がわかった雑音源 (黒体) が1つですむ簡易的な計測方法である。22GHz 帯では給電ホーンの開口面を常温の電波吸収体でおおったり外したりすることで R-Sky 法を実現している (図 E.2)。R-Sky 法で求められる修正システム雑音温度 T_{sys} は、大気の底で測ったシステム雑音温度 T_{sys} と等価の雑音源が大気外にあると定義したもので、以下のように表すことができる。

$$T^*_{sys}$$
 = $T_{sys} \cdot e^{ au}$ ここで au : 大気の光学的厚さ

以下でその測定方法を述べる。



図 E.2: 34m アンテナ雑音温度計測系の模式図 (22GHz 帯)。

1. 電波吸収体を外してアンテナが空をみたときの出力電力 W_{sky} を測定

$$W_{sky} = kT_{sys}GB = k[T_R + (1 - e^{-\tau})T_{atm}]$$

ここで T_{atm} : 大気の大気の物理温度
(地面の熱放射の影響は無視している)

2. 電波吸収体を給電ホーンにかぶせたときの出力電力 Wabs を測定

$$W_{abs} = k[T_R + T_{room}]$$

ここで T_{room} :電波吸収体の温度

3. T_{sys} を計算

$$T_{atm} = T_{room}$$
を仮定し、次のように比を取る。

$$y = \frac{W_{abs}}{W_{sky}} = \frac{T_R + T_{room}}{T_R + (1 - e^{-\tau})T_{atm}}$$
$$= 1 + \frac{e^{-\tau} \cdot T_{room}}{T_R + (1 - e^{-\tau})T_{atm}}$$

これに $T_{sys} = T_R + (1 - e^{-\tau})T_{atm}$ を代入して整理すると、

$$T_{sys} = \frac{e^{-\tau} \cdot T_{room}}{y - 1}$$

さらに、

$$T_{sys}^* = T_{sys} \cdot e^{\tau} = \frac{T_{room}}{y-1}$$

より T^*_{sys} を求めることができる。

(A.I. 記)

F 自然雑音電波(大気雑音)

天頂方向での大気雑音(地球大気による熱放射)および銀河電波雑音を図 F.1 に示す。



図 F.1: 地球大気による熱放射と銀河電波(出典: Kraus, RADIO ASTRONOMY, 2nd ed.)。

G SEFDとは

SEFD とは System Equivalent Flux Density (システム等価フラックス密度:単位はジャンスキー $(Jy=10^{-26}Wm^{-2}Hz^{-1}))$ のことで以下の式で表される。

SEFD =
$$\frac{2kT_{sys}}{A\eta}$$
 (G.1)
ここで k:ボルツマン常数 (1.38×10⁻²³WHz⁻¹)
 $T_{sys}: システム雑音温度 (K)$
A:アンテナ開口面積 (m²)
 $\eta: アンテナ開口効率$

ところで、2つのアンテナでフラックス密度 F(Jy)の電波星を受けたときのアンテナ温度の増加分をそれぞれ T_a , T'_a とし、システム雑音温度をそれぞれ T_{sys} , T'_{sys} とすると、規格化相関強度(フリンジ強度)は

$$\rho = \sqrt{\frac{T_a \cdot T'_a}{T_{sys} \cdot T'_{sys}}} \tag{G.2}$$

となる。ただし、電波星は分解されておらず、 $T_{sys} \gg T_a, T'_{sys} \gg T'_a$ とする。また電波星のフラックス密度とアンテナ温度の増加分の関係は

$$kT_a = \frac{1}{2}FA\eta$$

$$kT'_a = \frac{1}{2}FA'\eta'$$
(G.3)
(G.4)

で与えられる。ここで A', η' は 2 つ目のアンテナの開口面積および開口効率である。1/2 は一つの偏波しか受信 しないことを示している。式 (G.3)(G.4) から

$$\sqrt{T_a \cdot T_a'} = \frac{F\sqrt{A\eta \cdot A'\eta'}}{2k} \tag{G.5}$$

式 (G.1)(G.5) を使って規格化相関強度(フリンジ強度)を SEFD で表すと

1

$$\rho = \frac{F}{\sqrt{SEFD \cdot SEFD'}} \tag{G.6}$$

となる。ここで *SEFD*' は 2 つ目のアンテナの SEFD である。この式を使うと、 2 つのアンテナの SEFD および 電波星の強度から相関強度を見積もることができる。また式 (G.6) を変形すると

$$F = \rho \sqrt{SEFD \cdot SEFD'} \tag{G.7}$$

となる。つまり、規格化相関強度(フリンジ強度)に2つのアンテナの SEFD の幾何平均を掛けるとフラックス 密度単位になおすことができる。

H 略語集

本年次報告で使用する略語を以下に示す。

| ACU | Antenna Control Unit |
|----------|-----------------------------------------------------------------|
| ADC | Antenna Drive Cabinet |
| AOS | Acousto-Optical Spectrometer |
| APPS | Advanced Precise Positioning System |
| AZ | Azimuth |
| CARAVAN | Compact Antenna for Radio Astronomy VLBI Adapted for Network |
| CCW | Counter-Clockwise |
| CDDIS | Crustal Dynamics Data Information System |
| CONT05 | Continuous VLBI Campaign 2005 |
| CW | Clockwise |
| DCPA | Direct Current Power Amplifier |
| ESA | European Space Agency |
| EL | Elevation |
| ENC | Encoder |
| ETR | Elevation Tilting Room |
| FDD | Frequency Division Duplex |
| FS9 | Field System version 9 |
| GNSS | Global Navigation Satellite Systems |
| GPS | Global Positioning System |
| HALCA | Highly Advanced Laboratory for Communications and Astronomy |
| HTS | High-Temperature Superconductor |
| IGP | Instituto Geofisico del Peru |
| IGS | International GNSS Service (formerly International GPS Service) |
| IMT-2000 | International Mobile Telecommunications 2000 |
| IOC | Instantaneous Over Current |
| ITRF | International Terrestrial Reference Frame |
| IVS | International VLBI Service for Geodesy and Astrometry |
| J-BOX | Junction Box |
| JIVE | Joint Institute for VLBI in Europe |
| KSP | Key Stone Project |
| LVDT | Linear Variable Differential Transformer |
| MAC | Monitor And Control |
| MIT | Massachusetts Institute of Technology |
| NICT | National Institute of Information and Communications Technology |
| Pcal | Phase calibration |
| PIC | Peripheral Interface Controller |
| PICNIC | PIC Network Interface Card |
| PLO | Phase Locked Oscillator |
| RBW | Resolution Band Width |
| RIC | Receive-band Interchange Computer |
| RSD | Reference Signal Distributor |
| SCU | Subreflector Control Unit |
| SDC | Subreflector Drive Cabinet |

| SEFD | System Equivalent Flux Density |
|------|-----------------------------------------|
| SiO | Silicon Oxide |
| SNR | Signal to Noise Ratio |
| SRD | Step Recovery Diode |
| TDD | Time Division Duplex |
| Tlim | Travel Limit |
| ТР | Technical Power |
| VLBI | Very Long Baseline Interferometer |
| VERA | VLBI Exploration of Radio Astrometry |
| VSOP | VLBI Space Observatory Programme |
| VSSP | Versatile Scientific Sampling Processor |

I 時空統合標準プロジェクト鹿島 VLBI グループ成果論文(発表)リスト (2007年1月-12月)

原著論文

- Hobiger, T., T. Kondo, Y. Koyama, R. Ichikawa, and R. Weber, Effect of the Earth's oblateness on the estimation of global vertical total electron content maps, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L11113, doi:10.1029/2007GL029792, 2007.
- Hobiger, T., T. Kondo, Y. Koyama, K. Takashima, and H. Schuh, Using VLBI fringe-phase information from geodetic experiments for short-period ionospheric studies, *Journal of Geodesy*, 81, pp.389-401, DOI:10.1007/s00190-007-0142-4, 2007.
- Ichikawa R., M. Bevis, J. Foster, and N. Mannoji, Evaluation of the anisotropic mapping function using the JMA 10km spectral model, *Trans. Japan. Soc. Aero. Space Sci.*, 2007. (印刷中)
- Kawai, E., J. Nakajima, H. Takeuchi, H. Kuboki, T. Kondo, M. Suzuki, and K. Saito, RFI mitigation at a 2GHz band by using a wide-band high-temperature superconductor filter, *J. Geod. Soc. Japan*, 2007. (印刷中)
- Kiuchi, H., S. Okumura, J. Amagai, S. Iguchi, and T. Kondo, Directly controlled reference frequency wavefront clock method applied to 100-GHz radio interferometry and fringe simulator, *Radio Sci.*, 42, RS3012, doi:10.1029/2006RS003506, 2007.
- Koyama, Y., T. Kondo, M. Kimura, M. Hirabaru, and H. Takeuchi, Real-time high-volume data transfer and processing for e-VLBI, Advance in Geosciences, Vol.6: Hydrologocal Science, Eds. Namsik Park et al, pp.81–90, 2006.
- Nagayama, T., T. Omodaka, T. Handa, H. B. H. Iahak, T. Sawada, T. Miyaji, and Y. Koyama, A Complete Survey of the Central Molecular Zone in NH₃, *Publ. Astron. Soc. Jpn., Vol.59*, pp.869–887, 2007.
- Todorova, S., H. Schuh, T. Hobiger, and M. Hernandez-Pajares, Global models of the ionosphere obtained by integration of GNSS and satellite altimetry data, Vermessing und Geoinformation (VGI), Vol.92, pp.80–89, 2007.
- Todorova, S., **T. Hobiger**, and H. Schuh, Using the global navigation satellite system and satellite altimetry for combined global ionosphere maps, *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2007.08.024, 2007. (印刷中)

口頭発表・収録論文等

- 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, 1m 級アンテナを用い た比較基線場検定用 VLBI システムの開発, 第6回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2007/03/09.
- 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,1m 級アンテナを用 いた基線場検定用 VLBI システムの開発~広帯域測地 VLBI 実証実験~,日本地球惑星科学連合 2007 年大会,2007/05/19.

石井 敦利, 1m 級アンテナによる基線場検定用 VLBI システムの開発状況, 2007 年度 VLB I 懇談会シンポジウム, 2007/12/11.

- 石井 敦利,市川 隆一,瀧口 博士,久保木 裕充,関戸 衛,小山 泰弘,大内 裕司,レーザ励起 Cs ガスセル型原子発振器による 測地 VLBI 実験,日本測地学会 2007 年秋季(第 108 回)講演会, 2007/11/09.
- 市川 隆一, ホビガー・トーマス, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 改良破線追跡法と最近の気象庁数値予報データに基づく測位誤差シ ミュレーション, 第6回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2007/03/09.
- 市川 隆一, ホビガー・トーマス, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 新波線追跡法による大気伝搬遅延に起因する測位誤差の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/23.
- 市川 隆一, ホビガー・トーマス, 瀧口 博士, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 高速波線追跡ツール KARAT による大気遅延推定モデルの定量的評価, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2007/10/31.
- 市川 隆一, ホビガー・トーマス, 瀧口 博士, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 波線追跡計算ツール KARAT を用いた測位誤差シミュ レーション その2, 日本測地学会 2007 年秋季(第 108 回)講演会, 2007/11/08.
- 市川 隆一, ホビガー・トーマス, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 波線追跡計算ツール KARAT を用いた測位誤差評価, 2007 年度 V L B I 懇談会シンポジウム, 2007/12/11.
- 木村 守孝,小山 泰弘,小林 秀行,川口 則幸,小山 友明,三鷹 FX 相関器互換のソフトウェア相関処理システムの構築 2,日本 天文学会 2007 年春季年会, 2007/03/30.
- 木村 守孝,小山 泰弘,関戸 衛,小林 秀行,川口 則幸,小山 友明,原 哲也, PC-VLBI システムを用いた VERA 用相関処理系 の構築 3,2007 年度 VLBI 懇談会シンポジウム,2007/12/11.
- 小山 泰弘, 市川 隆一, 神崎 政之, 丹野 貴之, 西村 史睦, 熊 敏, 位置認証技術試験システムの開発, 第6回 IVS 技術開発セン ターシンポジウム, 2007/03/09.
- 小山 泰弘, 瀧口 博士, ホビガー・トーマス, 市川 隆一, 測地 V L B I 技術による高精度時刻比較, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/23.
- 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 市川 隆一, 関戸 衛, 川合 栄治, 広域電波強度分布測定技術の研究開発, 日本測地学会 2007 年秋季 (第 108 回)講演会, 2007/11/08.

66 I. 時空統合標準プロジェクト鹿島 VLBI グループ成果論文(発表)リスト (2007年1月-12月)

小山 泰弘, NICT 機関報告, 2007 年度 VLB I 懇談会シンポジウム, 2007/12/10.

- 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 市川 隆一, 関戸 衛, 川合 栄治, 広域電波強度分布測定技術の研究開発, 2007 年度 V L B I 懇談会シン ポジウム, 2007/12/11.
- 近藤 哲朗,小山 泰弘,市川 隆一,大久保 寛, NICT 開発の最新型電波干渉計用サンプラー (K5/VSSP32),第8回惑星圏研 究会, 2007/03/22.
- 近藤 哲朗, チャンネル毎にクロックオフセットが異なるVLBIデータのバンド幅合成処理, 日本地球惑星科学連合 2007 年 大会, 2007/05/22.
- 近藤 哲朗,小山 泰弘,市川 隆一,大久保 寛, VLBI サンプラーユニット K5/VSSP32の現状,日本測地学会 2007 年秋季(第 108回)講演会, 2007/11/08.

近藤 哲朗、USB+LSBデータのバンド幅合成、2007 年度VLBI懇談会シンポジウム、2007/12/11.

- 関戸 衛, 木村 守孝, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, 瀧口 博士, 原井 洋明, 池田 貴俊, 徐 蘇鋼, 平原 正樹, C. Ruszczyk, A. Whitney, JGN 2 シンポジウムでの e-VLBI 実験と日欧の UT1 高速計測実験計画, 第6回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2007/03/09.
- 関戸 衛,小山 泰弘,近藤 哲朗,木村 守孝,市川 隆一,藤咲 淳一,小門 研亮,高島 和宏,徐 蘇鋼,原井 洋明,池田 貴俊,平原 正樹, e-VLBIの応用 地球回転計測 ,日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/22.
- 関戸 衛, 小山 泰弘, 瀧口 博士, 近藤 哲朗, 市川 隆一, 原井 洋明, 栗原 忍, 小門 研亮, R. Haas, J. Ritakari, A. P. Mujunen, e-VLBI による日欧迅速 UT1 計測実験, 日本測地学会 2007 年秋季(第 108 回)講演会, 2007/11/08.
- 関戸 衛,小山 泰弘,瀧口 博士,近藤 哲朗,市川 隆一, R. Haas, J. Wagner, J. Ritakari, 原井 洋明, 栗原 忍, e-VLBI による 迅速 UT1 計測, GEMnet2 シンポジウム 2007, 2007/11/13.
- 関戸 衛,小山 泰弘,瀧口 博士,近藤 哲朗,市川 隆一,ホビガー・トーマス,栗原 忍,小門 研亮,谷本 大輔,町田 守人, R. Haas, J. Ritakari, J. Wanger, e-VLBI による迅速 UT1 計測~観測から 30 分で可能になった UT1 計測~, 2007 年度 V L B I 懇談会シンボジウム, 2007/12/11.
- 高羽浩, 若松謙一, 須藤広志, 川口則幸, 河野祐介, 小山友明, 高島和宏, 藤咲淳一, 小門研亮, 山内彩, 近藤哲朗, 小山泰弘, 関戸衛, 日置幸介, 竹内央, 22GHz帯測地 e-VLBIの開発, 日本測地学会 2007 年秋季(第108回)講演会, 2007/11/08.
- 瀧口 博士, ホビガー・トーマス, 石井 敦利, 市川 隆一, 小山 泰弘, VLBI による時刻比較, 第6回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2007/03/09.
- 瀧口 博士, ホビガー・トーマス, 大坪 俊通, 市川 隆一, 小山 泰弘, 福田 洋一, 大気荷重による半閉鎖的海域近傍の短周期位置 変動について, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/23.
- 瀧口 博士,小山 泰弘,市川 隆一,後藤 忠広,ホビガー・トーマス,石井 敦利,測地 VLBI 技術による高精度時刻比較 -第二 報-,日本測地学会 2007 年秋季(第 108 回)講演会, 2007/11/09.
- 谷本 大輔,小門 研亮,栗原 忍,町田 守人,関戸 衛,小山 泰弘,超高速データ転送による地球姿勢計測への取り組み,日本測地 学会 2007 年秋季(第 108 回)講演会, 2007/11/07.
- 中島 潤一, 井上 允, 大石 雅寿, L バンド電波望遠鏡と IMT-2000 システム間の周波数共用条件, 日本天文学会 2007 年秋季年 会, 2007/09/??. j===koko
- ホビガー・トーマス, 市川 隆一, 小山 泰弘, 近藤 哲朗, Fast ray-tracing through numerical weather models for real-time positioning applications, 第6回 IVS 技術開発センターシンポジウム, 2007/03/09.
- ホビガー・トーマス,市川 隆一,小山 泰弘,近藤 哲朗, Fast ray-tracing for real-time positioning applications using numerical weather models, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/23.
- ホビガー・トーマス,市川隆一,小山泰弘,近藤哲朗,畑中雄樹,湯通堂亨,岩下知真子,宮原伐折羅,波線追跡法による大 気遅延推定値のGEONET基線解析への適用,日本測地学会2007年秋季(第108回)講演会,2007/11/07.
- ホビガー・トーマス, 近藤 哲朗, 小山 泰弘, Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (CSART) a new and simple algorithm for ionospheric tomography, 日本地球惑星科学連合 2007 年大会, 2007/05/23.
- Behrend, D., J. Boehm, P. Charlot, T. Clark, B. Corey, J. Gipson, R. Haas, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, A. Niell, T. Nilsson, B. Petrachenko, A. Rogers, and G. Tuccari, VLBI2010, *IUGG XXIV General Assembly*, 2007/07/04.
- Harai, H., M. Sekido, Xu Sugang, T. Ikeda, M. Hirabaru, M. Kimura, and Y. Koyama, e-VLBI over GM-PLS/Lightpaths, 23rd APAN Meeting Network Engineering Workshop, 2007/01/24.
- Harai, H., S. Xu, and M. Sekido, Optical grid infrastructure: Establishing multiple end-to-end lightpaths in optical networks, *IEEE BROADNETS 2007*, 2007/09/13.
- Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo, Kashima Ray-Tracing Service (KARATS) Fast ray-tracing algorithms through numerical weather models for real-time positioning applications in East Asia, 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, 2007/04/13.
- Hobiger, T., T. Kondo, and Y. Koyama, MK3TOOLS & NetCDF storing VLBI data in a machine independent array oriented data format, 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, 2007/04/13.

Hobiger, T., T. Kondo, and Y. Koyama, Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (CSART) a new and simple algorithm for ionospheric tomography, *EGU General Assembly 2007*, 2007/04/19.

- Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Koyama, and T. Kondo, Kashima Ray-Tracing Service (KARATS) Fast ray-tracing through numerical weather models for real-time positioning applications, *IVS NICT-TDC News*, No.28, pp.16–19, Aug. 2007.
- Hobiger, T., R. Ichikawa, Y. Hatanaka, T. Yutsudo, C. Iwashita, B. Miyahara, Y. Koyama, and T. Kondo, Ray-traced tropospheric total slant delays for GNSS processing, *AGU Fall Meeting*, 2007/12/14.
- Ichikawa, R., M. Sekido, T. Hobiger, T. Kondo, and Y. Koyama, Analysis center at National Institute of Information and Communications Technology, IVS 2006 Annual Report, NASA/TP-2007-214151, pp.216–219, 2007.
- Ichikawa R., T. Hobiger, H. Takiguchi, Y. Koyama, and T. Kondo, An evaluation of geodetic positioning errors using fast ray tracing algorithms through the JMA mesoscale numerical weather data, *AOPOD2007, Korea*, 2007/05/29.
- Ichikawa R., T. Hobiger, Y. Koyama, and T. Kondo, An evaluation of geodetic positioning error simulated using the fast ray tracing algorithms through the JMA mesoscale numerical weather data algorithms through the JMA mesoscale numerical weather data, IUGG XXIV General Assembly 2007, 2007/07/06.
- Ichikawa, R., T. Hobiger, Y. Koyama, and T. Kondo, An evaluation of geodetic position error simulated using the fast ray tracing algorithms through the JMA mesoscale numerical weather data, *IVS NICT-TDC News*, No.28, pp.20–21, Aug. 2007.
- Ishii, A., R. Ichikawa, H. Takiguchi, H. Kuboki, M. Kimura, J. Nakajima, Y. Koyama, J. Fujisaku, and K. Takashima, Development of a compact VLBI system for a length examination of a reference baseline, *IVS NICT-TDC News, No.28*, pp.2–5, Aug. 2007.
- Kawai, E. and H. Kuboki, Kashima 34-m radio telescope, IVS 2006 Annual Report, NASA/TP-2007-214151, pp.51– 54, 2007.
- Kimura, M., Development of the software correlator for the VERA system II, *IVS NICT-TDC News, No.28*, pp.22–25, Aug. 2007.
- Kondo, T., Y. Koyama, R. Ichikawa, and M. Sekido, Technology development center at NICT, IVS 2006 Annual Report, NASA/TP-2007-214151, pp.259–262, 2007.
- Kondo, T., H. Ohkubo, R. Ichikawa, and Y. Koyama, Current status of K5/VSSP32 sampler, IVS NICT-TDC News, No.28, pp.30–33, Aug. 2007.
- Koyama, Y., Kashima and Koganei 11-m VLBI stations, IVS 2006 Annual Report, NASA/TP-2007-214151, pp.55–58, 2007.
- Koyama, Y., Data center at NICT, IVS 2006 Annual Report, NASA/TP-2007-214151, pp.168-171, 2007.
- Koyama, Y., R. Ichikawa, M. Kanzaki, T. Tanno, H. Nishimura, and X. Min, Developments of the evaluation system for the verified position service, *IVS NICT-TDC News*, *No.28*, pp.6–9, Aug. 2007.
- Koyama, Y., M. Sekido, H. Wada, S. Kurihara, R. Haas, A. Mujunen, and J. Ritakari, Ultra rapid dUT1 e-VLBI sessions with two Europe-Japan baselines, 6th International e-VLBI Workshop, 2007/09/18.
- Petrachenko, W., P. Charlot, A. Collioud, T. Hobiger, A. Niell, A study of VLBI2010 potential for source structure corrections, Journees 2007 "Systèmes de référence spatio-temporels" (JSR2007),17-19 September 2007, Paris Observatory, Paris, France, 2007.
- Poutanen, M., R. Haas, J. Wagner, J. Ritakari, A. Mujunen, M. Sekido, H. Takiguchi, Y. Koyama, and T. Kondo, Status report on the Fennoscandian-Japanese project for near real-time UT1-observations with e-VLBI, Journees "Systemes de reference spatio-temporels", 2007/09/17.
- Schuh, H., B. Johannes, R. Heinkelmann, T. Hobiger, P. J. Mendes Cerveira, A. Pany, E. Tanir, K. Teke, S. Todorova, and J. Wresnik, Vienna IGG special analysis center annual report 2006, *IVS 2006 Annual Report*, *NASA/TP-2007-214151*, pp.208–211, 2007.
- Sekido, M., T. Kondo, Y. Koyama, and M. Kimura, VLBI correlators in Kashima, *IVS 2006 Annual Report*, NASA/TP-2007-214151, pp.147–150, 2007.
- Sekido, M., Y. Koyama, H. Takiguchi, M. Kimura, H. Harai, and M. Hirabaru, e-VLBI activity in NICT, *PTB-BIPM workshop on the Impact of Information Technology in Metrology*, 2007/06/04.
- Sekido, M., M. Kimura, Y. Koyama, T. Kondo, H. Takiguchi, H. Harai, T. Ikeda, S. Xu, M. Hirabaru, C. Ruszczyk, and A. Whitney, e-VLBI demonstration in the JGN2 symposium, *IVS NICT-TDC News*, No.28, pp.26–29, Aug. 2007.
- Sekido, M., R. Ichikawa, M. Yoshikawa, H. Takeuchi, T. Kato, N. Mochizuki, Y. Murata, and T. Ichikawa, Evaluation of differential VLBI phase delay observable for spacecraft navigation –delta VLBI observation of Hayabusa at touchdown to Itokawa–, SICE Annual Conference 2007, 2007/09/20.

- Sekido, M., H. Takiguchi, Y. Koyama, T. Kondo, R. Haas, J. Wagner, J. Ritakari, Ultra-rapid UT1 measurement by e-VLBI, AGU Fall Meeting, 2007/12/13.
- Takiguchi, H., T. Hobiger, A. Ishii, R. Ichikawa, and Y. Koyama, Comparison with GPS time transfer and VLBI time transfer, *IVS NICT-TDC News, No.28*, pp.10–15, Aug. 2007.
- Takiguchi, H., Y. Koyama, R. Ichikawa, T. Goto, A. Ishii, and T. Hobiger, VLBI measurements for time transfer between time and frequency laboratories, AGU Fall Meeting, 2007/12/12.
- Xu, S., H. Harai, M. Sekido, T. Ikeda, M. Hirabaru, M. Kimura, Y. Koyama, Challenges of e-science applications with on-demand optical grid networks: e-VLBI over GMPLS based lightpath networks, *iPOP2007*, 2007/06/07.
鹿島 34m アンテナ 2007 年 年次報告書

2008 年 1 月 20 日発行 発行 独立行政法人 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター 光時空標準グループ URL http://www2.nict.go.jp/w/w114/stsi/index.html



独立行政法人 情報通信研究機構