

JVN Reports

大学VLBI 連携研究成果報告書

2009年12月1日 第2巻 第2号

目次

高萩/日立32メートル電波望遠鏡の立ち上げ状況(2) 米倉覚則(茨城大学・宇宙科学教育研究センター)	・・・	1
OCTAVE を用いたブラックホール候補天体 Cygnus X-1 の X 線天文衛星 SUZAKU との同時観測 永井洋 ¹ 、土居明広 ² 、秦和弘 ^{1,3} 、山田真也 ⁴ 、河野裕介 ¹ 、原哲也 ¹ 、 川口則幸 ¹ 、光結合 VLBI チーム、鍋谷絹代 ⁵ 、藤沢健太 ⁵ (1:国立天文台、2:宇宙航空研究開発機構、3:総合研究大学院大学、 4:東京大学、5:山口大学)	・・・	6
山口 32m 電波望遠鏡の K5/VSI システム 2 号機を用いた VLBI 観測 輪島清昭、藤澤健太(山口大学大学院理工学研究科)、 木村守孝、川合栄治(情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター)	・・・	11
編集担当者より	・・・	16

発行者 : 大学VLBI 連携観測事業
編集 : 山口大学

高萩／日立 3 2メートル電波望遠鏡の立ち上げ状況（2）

米倉覚則

（茨城大学・宇宙科学教育研究センター）

1. まずはインフラ整備から

4月にファーストライトに受信に成功したものの、天体を追尾する制御ソフトは無く、受信機も急場しのぎで寄せ集めたものであった。上半期（6月～9月）に建物の工事が行われ、その間3ヶ月はアンテナを使用できないとの連絡を受けていたため、じっくり腰を据えて準備を行う事にした。

茨城大学側は、5月1日に宇宙科学教育研究センターが、横沢センター長（兼任）、米倉（唯一の専任教員）という体制で発足した。6月29日には高萩現地に宇宙電波館が開所した。さらに8月からは茨城大学の職員が高萩に1名常駐する事になり、着々と環境整備が進んだ。

一方、アンテナ関係については、諸事情により建物の工事が始まったのは8月に入ってから。高萩局・日立局共通項目として、受信機キャビンに断熱材の貼付けおよび空調の設置、観測棟には、空調を設置するとともに、空調の効きをよくするための間仕切りを設置。そして何よりも大事なものは（?）、トイレなどの設置である。さらに高萩局観測棟内には、水素メーザーを設置するための小部屋を設置した（温度湿度調整機能付き）。工事が完了し、我々に引き渡されたのが11月13日（金）と、当初予定より大幅に遅れが生じた。

なお、本原稿の執筆時点では、電話およびインターネットは接続されていない（12月中旬開設予定）。



図1. 現地に開所した宇宙電波館

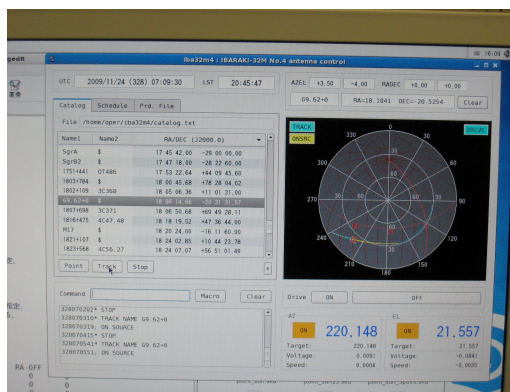


図2. 制御ソフトの動作画面

2. 日立アンテナのセカンドライト（?）を目指して

4月に既にファーストライトを達成しているため、どのような呼び方をするのがふさわしいかわからないが、再び受信機系を搭載して、太陽電波の受信を目指した。

引き渡しの翌週11月16日（月）17日（火）には、早速制御系の現地据え付け調整が行われ、無事天体の追尾ができるようになった。ただし、この時点では器差パラメータ

一は初期設定のまま、つまりポインティングがあっている保証は無い状態である。

1 1月18日(水)。まずは、太陽電波の受信を！と現地に向かう事にした。工事期間中、物品を別の建物や水戸に退避させていたため、水戸に退避してあった物品を車に載せて、現地に向かう事に。スペアナ、SG、ダウンコンバータ、ケーブル類。しかし、初段アンプが見つからない。はやる気持ちを抑えながらも検索するが、やはり見つからない。現地にあるだろうと信じて、出発した。

1 時間後、現地に着。荷物をおろすと…。スペアナと SG を1台ずつ持って来たはずが、なぜか SG が2台あったり、アンプ用の DC 電源も積み忘れていたり。がっかりしながらも、アンプの検索をする。しかし、見つからない。その日は早々に撤退した。

1 9日(木)。アンプの所在について大阪府立大学小川さんと議論。4月にファーストライトを受けた受信機類一式は、一旦大阪府大に送り返し、調整後再び水戸に送っていただいた。ここまでは記憶にある。その後、ポラライザ等が届き、そのポラライザも、水戸→大阪→水戸と移動した。ひょっとして、ポラライザと一緒に大阪に送ったままなのではないか？ と思ったが、メールなどの記録を探しても、アンプを大阪に送ったという記録が無い。やはり茨城(水戸あるいは現地)にあるはず、との結論に達したが、水戸でどれだけ探しても見つからない(居室が整理されていない事が原因なのは承知しております)。お昼前、「やはりアンプは現地にあるはず」と信じ、出発する事にした。今度はちゃんとスペアナと電源を積み込んだ。さらに、百瀬さんから借りたパワーメータも持参した。

1 時間後現地着。荷物置き場となっている部屋に置いてある段ボールを、片っ端から開けて確認する。でも、見つからない。それらしい箱は全て調べた。残るは、ホーンが入っている箱だけ。でも、ホーンが入っているのだから、他の物はいれないはずだけど…。と思いつつ1つ1つ開封。そして、空箱となっている箱の中から、ついにアンプを発見！ そうか、思い出した。アンテナに取り付けられているホーンが入っていた箱の中に、アンプ類一式を保管した事を！

午後3時過ぎ、作業開始。この時点で既に太陽の仰角は15度。やはり冬場の、しかも東日本の日没は早い。1段ずつリニアリティのチェックを行いながら、アンプ類を日立アンテナのホーン出力部につないでいく。ホーンは、メタノールメーザーの観測に備えて、6.7 GHz 帯用のものが搭載されている。アンテナを太陽に向けると、確かにパワーが15 dB程度強くなる。受信成功か？ と思いながらも、確証が得られないまま日没を迎えた(仰角 < 5度)。

20日(金)。午前は所用があったため、現地に着したのは、午後2時。太陽を用いた実験が可能な時間は、午後4時までの2時間しかない。アンテナを太陽に向けると、やはり15 dB程度電波強度が強くなった。これで間違い無い。

このままメタノールメーザー源にアンテナを向けたら、受信できるかも？ と淡い期待を抱いて、全天で最も強度の強い天体(G9.62+0.17)に向けたが、やはり、そんなに甘くは無かった。受からない。受信機系のリニアリティに問題があるのか、はたまたポインティングがずれているのか。周辺のマッピング観測を行えば良かったのかもしれないが、そのような指示書を作成する技量はまだ無かったため、断念。

再び太陽に向け、リニアリティのチェックを行うが、ここで日没。

3. 日立アンテナの分光ファーストライト

再び現地に行く事ができたのは、連休明けの24日(火)。ちなみに、22日および23日には、IEEE Milestone 授賞関連のイベントが行われた。22日に前夜祭と称して、一般向け講演会。23日は授賞式。国立天文台からは、福島副台長および小林所長が出席された。銘板は先日、高萩アンテナの脇に設置された。



図3. 高萩局前に設置された記念碑



図4. IEEE Milestone 銘板

24日は、9時に水戸をもち、10時に現地到着。リニアリティのチェックを済ませた後ダウンコンバータ(6.7 GHz → 512-1024 MHz)を接続し、IF信号を観測棟(地上)までおろす事に。制御用PCのすぐ隣に、パワーメータとスペアナを設置し、作業がより楽になった。これまでは、アンテナを動かす(追尾を止めるなど)ために観測棟まで降り、再び受信機室に戻って測定を行わなければならなかったため、非常に大変であった。

午後2時過ぎ、太陽の十字スキャンを開始した。と書くと、簡単なように思えるが、実は、そのような指示書を作ったのは、この時が初めて。指示書を作成している間に、指示書に記載されている時刻を過ぎてしまい、再び時刻を修正したり。あるいは、アンテナの移動が予想外に遅く(0.2度/秒)、アンテナが時間内に目的とする方向に向かなかつたり。試行錯誤しながら、ようやく使用に耐えうる指示書を作成できるようになった。

まずは、太陽中心からAz, El方向に30'ずつoffsetさせた上下左右の4方向にアンテナを向けてみた。今、落ち着いて考えれば、これは振り過ぎである事がすぐに分かる(太陽は、半径ではなく、直径が30'なので、15'程度振ればよい)のだが、慌てていたため、当時は気づかなかった。結果は、当然の事ながら、上下左右の4方向にアンテナを向けた際のパワーは、多少の違いはあったものの、ほぼ同レベル、すなわち、ビーム内には太陽が全く入っていなかった(=単にSKYを見ていただけであった)。

次に15' offsetさせた十字スキャンを行った。pointingがあつていれば、上下左右の4方向でのパワーが同程度になるはずであるが、かなり違う、つまり、pointingがズレている事が分かった。

ひきつづいて、1次元スキャンを行えばよかつたものの、欲を出して5'グリッドでマッピングをしてしまった。測定を始めて気づいたのだが、太陽の中心方向付近は、どこを見ても、ビーム全体が太陽を見てしまうため、出力パワーが変化しない。これも、落ち着いて考えれば当たり前の結果であるが、慌てているとそこまで頭が回らなかつた。数点観測した時点で、この事に気づき、マッピングを停止。

そこで、やはり王道の1次元スキャンを行う事にした。Az 方向に、5' 間隔で、+30' から -30' までスキャン。El 方向についても同様な測定を行った。これらの測定結果から、数分程度の精度で pointing offset 量を見積もった。さらに、この中心位置に対して±15' -19' Az, El 方向に offset した範囲を 1' 間隔でスキャンした (±20' の範囲を 1' 間隔でスキャンすると時間がかかるため)。その結果得られた値は、(ΔAz, ΔEl) = (+4, -4')。決定精度は 1' 程度であると思われる。ここまでの測定が終わった時点で、太陽仰角は6度。ギリギリ日没に間に合った。

この pointing offset を用いて、前述のメタノールメーザー源 G9.62+0.17 にアンテナを向けた。スペアナを見ると。。ん？ 何も見えない。それもそのはず、強度軸が初期設定の 10 dB/div になっていたためだ。0.5 dB/div まで拡大していき、average もすると、ノイズの中から次第に輝線らしきものが見えてきた！ その後、周波数軸を拡大したり。アンテナを別の方向に向けると、輝線が見えなくなる。本物だ！ついに分光ファーストライト (ただし試験用受信機+スペアナ) を迎える事ができた。

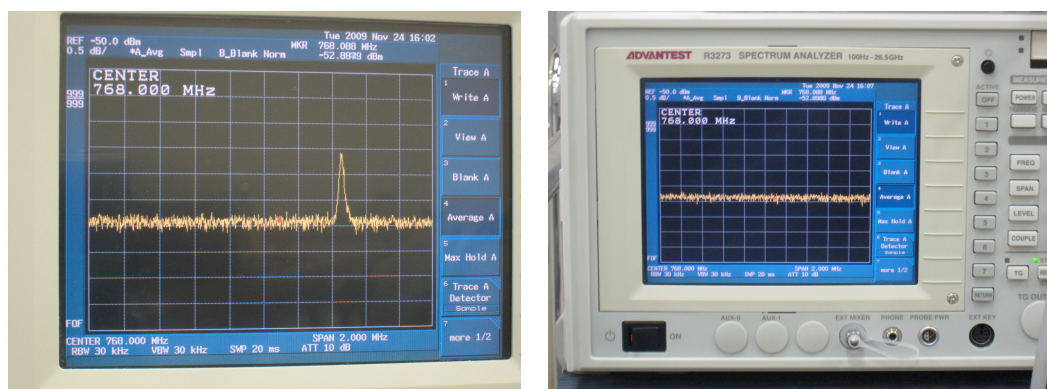


図5. 分光ファーストライト (G9.62+0.17 のメタノールメーザー輝線)
 (左) 追尾時、(右) アンテナを Az 方向に-5° 振った時のスペアナの画面

時刻はすでに16:30。17:30からの茨城局電話会議および18:30からの大学間連携電話会議に間に合わせるよう、急ぎつつも安全運転で水戸に掛け戻った。

会議では、藤沢さんより、4' も offset があるのはおかしい。との指摘があった。制御ソフトのバグか、それとも他の何かが原因かを切り分けるため、さまざまな Az, El において offset を求めるよう助言を受けた。

4. ポインティングパラメタのオフセット項の原因は

25日(水)は三鷹出張。26日(木)9時水戸発で現地に向かう。まずは制御用パソコンの時刻を確認。といっても電話は設置されていないため、携帯電話で。時報と比べて30秒程度遅れている！ 時刻が30秒遅れていると、7.5' 遅れた方向にアンテナは向いてしまう。先日の測定は、太陽が沈む時の測定である。つまりアンテナを Az はプラス方向に、El はマイナス方向に offset させた位置に、真の太陽が居たはず。これは測定結果と誤差の範囲で矛盾しない。よって、offset の原因は時計の遅れである可能性が高かった。

この時点でパソコンの時刻を直しても良かったのだが、念のため、もう一度太陽を用いたポインティングを行った。この時点で、太陽は南中少し前。Az offset が 7' 程度のプ

ラスに、El offset がかなり小さいプラスになる事が予想される。果たして結果は… … …
 … (ΔAz, ΔEl) = (+6.25′, +0.75′)。予想通りだ！

そこで、制御用パソコンの時刻を手動で時報に合わせて（現時点では internet には繋がっておらず、GPS も設置していないため）、再び太陽を用いたポインティング。結果は、
 (ΔAz, ΔEl) = (+0.5′, - 0.5′)！

pointing offset の問題も解決されたので、いろいろなメタノールメーザー源 (Pestalozzi et al. 2005) にアンテナを向け、どの程度の強度のものまで受信可能かを調べた。結果は次の通りである。

LB	name	Decl.	F6.7 (Jy)	図番	図の横幅	表 1. 強度の強いメタノールメーザー源に対する観測結果。「図の横幅」は、図 6 における表示範囲である。6.7 GHz 帯では、1 MHz は約 45 km/s に相当する。
9.62+0.19		- 20	5090	fig. (a)	100 kHz	
133.94+1.04	W3-IRS5	+61	3741	fig. (b)	200 kHz	
351.41+0.64	NGC6334F	- 35	3300	fig. (c)	100 kHz	
339.88- 1.25		- 46	1820	fig. (d)	1 MHz	
81.87+0.78	W75N	+42	1080	not detected		
49.49- 0.39	W51	+14	850	fig. (e)	200 kHz	
109.86+2.10	Cep A	+62	815	fig. (f)	200 kHz	
35.20- 1.74	W48	+01	560	not detected		
12.68- 0.18	W33B	- 18	544	fig. (g)	500 kHz	

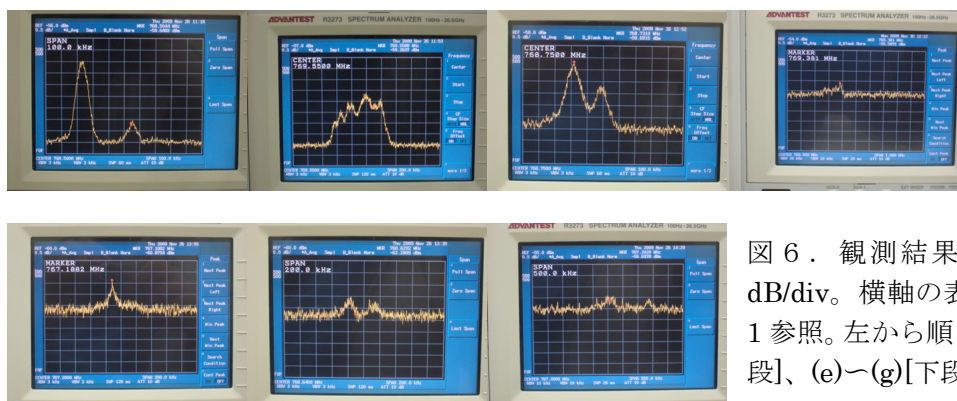


図 6. 観測結果。縦軸は 0.5 dB/div。横軸の表示範囲は、表 1 参照。左から順に (a)~(d) [上段]、(e)~(g)[下段]。

5. 今後の予定

日立局については、早急に（できれば年内に）単一鏡用分光計システムを整備し、詳細なポインティング測定を行う。並行して、光学的厚み、雑音温度、ビームパターン、スカイラインの測定、スプリアス調査なども行う。その後、(年度内に) 冷却受信機を搭載し、まずは 6.7 GHz 帯において本格的な観測を行いたい。高萩局については、制御系を早急に整備するよう努力している。日立局におけるノウハウを活かせば、高萩局の立ち上げは短期間で出来るものと考えている。

謝辞

高萩／日立電波望遠鏡の整備は、国立天文台はもとより、山口大学、大阪府立大学をはじめとした大学間連携 VLBI 参加機関の協力によって実現しつつあります。これまでのご支援に対して感謝いたします。そして、今後も引き続き、ご協力お願いいたします。

OCTAVEを用いたブラックホール候補天体 Cygnus X-1 の X線天文衛星SUZAKUとの同時観測

永井洋⁽¹⁾、土居明広⁽²⁾、秦和弘^(3,1)、山田真也⁽⁴⁾、河野裕介⁽¹⁾、原哲也⁽¹⁾、川口則幸⁽¹⁾、光結合VLBIチー
ム、鍋谷絹代⁽⁵⁾、藤澤健太⁽⁵⁾

1. 国立天文台、2. 宇宙航空研究開発機構、3. 総合研究大学院大学、4. 東京大学、5. 山口大学

0. 観測の経緯

X線天文衛星 SUZAKU を用いた最も有名なブラックホール候補天体 Cygnus X-1 の観測提案が日米から出され（日本側の P I は山田（東大・牧島研））、2009 年 4 月から 6 月にかけて約 1 週間おきに約 12 時間/1 回という非常に大規模な観測が実行された。Disk-Jet connection を探るためのデータを取得するまたとない好機であり、我々は OCTAVE/SUZAKU を用いた同時観測を行った。Intra-day のフラックス変動は、Ryle Telescope で過去に精力的に調査されているが、構造変化（VLBI の基線長が必要）についての調査は実質的には無く、我々はここを狙う。

1. 背景

X 線連星は一般に、ブラックホールもしくは中性子星などの高密度天体に伴星からの質量降着が起こり、高温のガス円盤が主星周りに形成されて、X 線を放射すると考えられている。また、しばしば相対論的に加速されたジェットの噴出を伴うことが知られている。このようなシステムは、活動銀河核を代表するクエーサーと良く似ていることから、“マイクロクエーサー”と呼ばれる。マイクロクエーサーの X 線放射は、クエーサーに比べて時間進化が速く、1 秒以下から年にいたる時間スケールで激しく変動する。このような特徴を生かし、X 線変動とジェットの噴出の様子を探る研究が盛んに行われていて、円盤状態とジェット噴出の関係 (Disk-Jet connection) の理解が近年進んでいる (e.g., Fender et al. 2004)。

Cygnus X-1 は、全天で最初に見つかった X 線連星である。X 線で非常に明るいため、0.1-1000 keV にわたる広い高エネルギー領域にわたるスペクトル変動が極めて高い S/N 比で観測・研究されており (図 1)、ブラックホール周辺の降着円盤を理解する上で鍵になってきた天体である。また最近では、SUZAKU を用いた詳細な研究から、円盤の幾何学形状や物理状態が明らかになってきた (Makishima et al. 2008)。このように、円盤の理解は進んできた一方で、電波で非常に暗いために、Disk-Jet Connection 解明のための研究ではこの天体を活かしきれていない。

数年間にわたる電波フラックスモニターは Ryle telescopes 干渉計でこれまで継続的に行われている。通常 (Cyg X-1 の場合 low/hard state)、電波フラックスは ~ 15 mJy で定常的である。Day-week-month のタイムスケールで radio/X 相関は明らかで、intermediate や high/soft state への遷移によって電波フレア (~ 30 mJy) が発生する (Fender et al. 2006: 図 2)。稀に >100 mJy のフレアが発生することもある。短時間 (min-hr) の radio/X 相関が見えたとする報告はあるが、ノイズでも統計的に作り出せるのでフェイクという結論になっており (Gleissner et al. 2004)、短時間での現象は明らかになっていない。

2. 観測のねらい

本観測のねらいは、空間分解・構造変化検出することである。イメージングの例は少ないが、MERLIN (図 3) と VLBA+Y27 (図 4) が過去におこなっており、空間分解されているが、

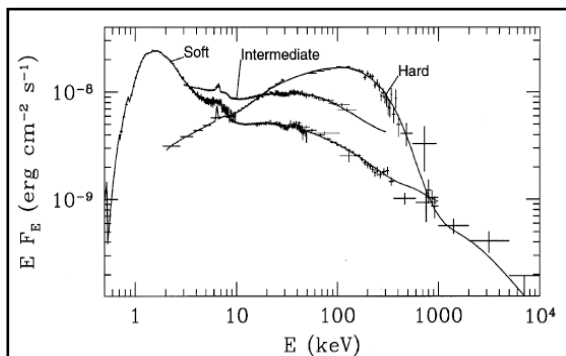


図 1 : Cygnus X-1 の高エネルギースペクトル

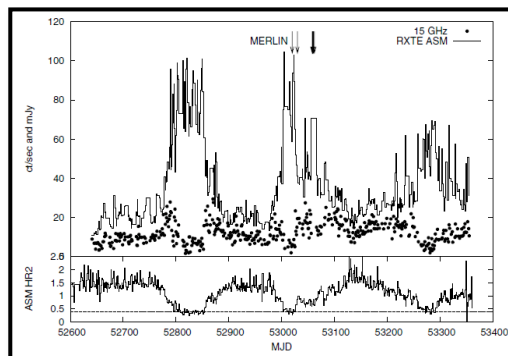


図 2 : Cygnus X-1 の高エネルギースペクトル

動画としては得られていない。数分の時間分解能での撮像には、感度が重要であり、OCTAVE が力を発揮する (OCTAVE@8GHz 7 σ 基線検出感度は約 10 mJy、4 分積分、32m 鏡ペア)。詳細な構造を明らかにすることはできないであろうが、単純な構造でモデル化し、ジェット塊発生の検知と弾道速度の測定をする。位相補償観測をすることによって、検出を担保するとともに、放射体の位置の動きを検出することを狙う (数十 mas/day のジェット運動が期待されている)。我々の OCTAVE 観測データは、SUZAKU で取得されるはずの高エネルギースペクトルの変化に対して物理的な解釈をおこなうための、決定的な情報を提供することになる。

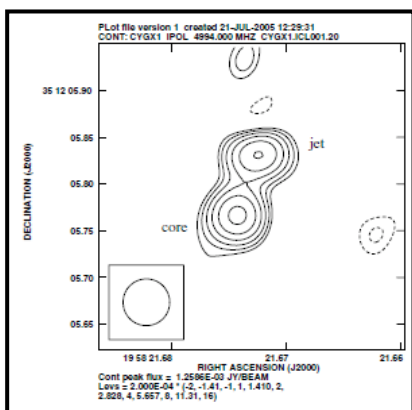


図 3 : MERLIN による Cygnus X-1 のイメージ(Fender+ 2006)

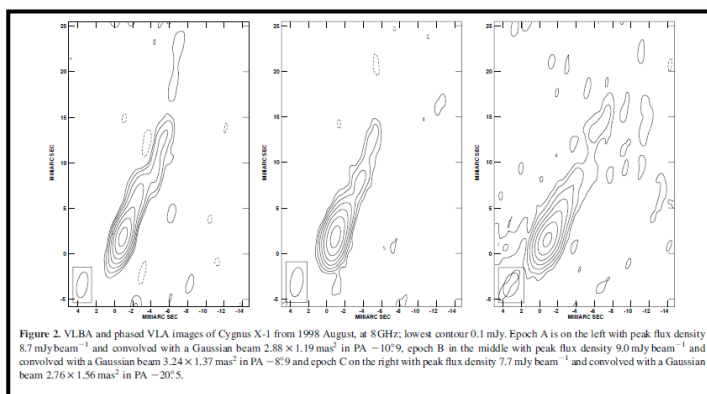


図 4 : VLBA による Cygnus X-1 のイメージ(Stirling+ 2001)

3. 観測・データ解析

4 月 27 日に第 1 回目に試験観測を行い、OCTAVE によって検出が可能であることが実証された。これを踏まえて、6 月初旬に 1 週間に渡るモニター観測を実行した。本レポートでは、4 月に行われた試験観測の結果についてレポートする。

観測は、JST 4/28 22:00- JST 4/29 11:00 に、鹿島、山口、つくばの 3 局 3 基線による 8 GHz 観測を行った。つくばは IVS 観測参加のため、途中 JST 4/29 2:00 からの参加となった。鹿島は、河野、土居、永井、山口は藤澤、鍋谷が運用を担当した。光結合相関器の運用は、鹿島か

らリモート操作で河野が担当した。途中、アメリカ出張中の原の助けを借りながらの相関器運用となった。各観測局で取得されたデータは、JGN/SINET 回線を通じて 2 Gbps のレートで国立天文台に集められ、実時間相関器によって相関処理が行われた。万が一、相関処理がうまくいかなかった場合に備えて、RVDB にデータ蓄積も行った。観測は、ターゲット天体 Cygnus X-1 とキャリブレーター J1957+33 を交互にスイッチングする位相補償観測を行った。スイッチング周期は基本 5 分としたが、山口局の駆動系ソフトウェアリミットの都合上、エレベーションに応じて適宜スイッチングサイクルを伸ばした（最大 10 分）。振幅較正のための R-sky 法による Tsys 測定を想定していたが、つくば運用担当者に連絡漏れがあり、つくば局だけ Tsys データが取得できなかった。

データ解析は、NRAO が提供する AIPS を用いた。現段階では位相補償解析は行わず、ターゲット天体自身でFRINGEサーチを行っている。Delay キャリブレーターとして 3C 345 を 2 時間起きに観測し、delay の“大ゲタ”を補正し、続いてターゲット天体でサーチウィンドウを絞ってFRINGEサーチを行った。3 基線ともに、エレベーション 30 度以上で S/N=4 以上でFRINGEを検出することができた。帯域補正は 3C 345 を用いて行った。

振幅の a-priori キャリブレーションは行わず、参照天体を用いた相対較正を行い、ゲイン変動だけを解いた（振幅の絶対値は解いていない）。J1957+33 は OCTAVE 基線では完全な点源であるので、相関強度の変化は SEFD の変化と考えることができる。ターゲット天体と J1957+33 の離角は 1.3 度と非常に近いので、J1957+33 から求めた SEFD 変化を、そのままターゲットに適用できると考えられる。J1957+33 の相関強度の時間変化を、天頂通過前後に分割して、多項式フィットを行った。こうして得られた多項式関数を使ってターゲット天体の相関強度を補正した。キャリブレーターの多項式フィットからの残差は、ランダム誤差と考える。この誤差と、FRINGEサーチ結果の S/N から導かれた誤差との RSS を取って、ターゲット天体の 1 データ点の誤差を評価した。

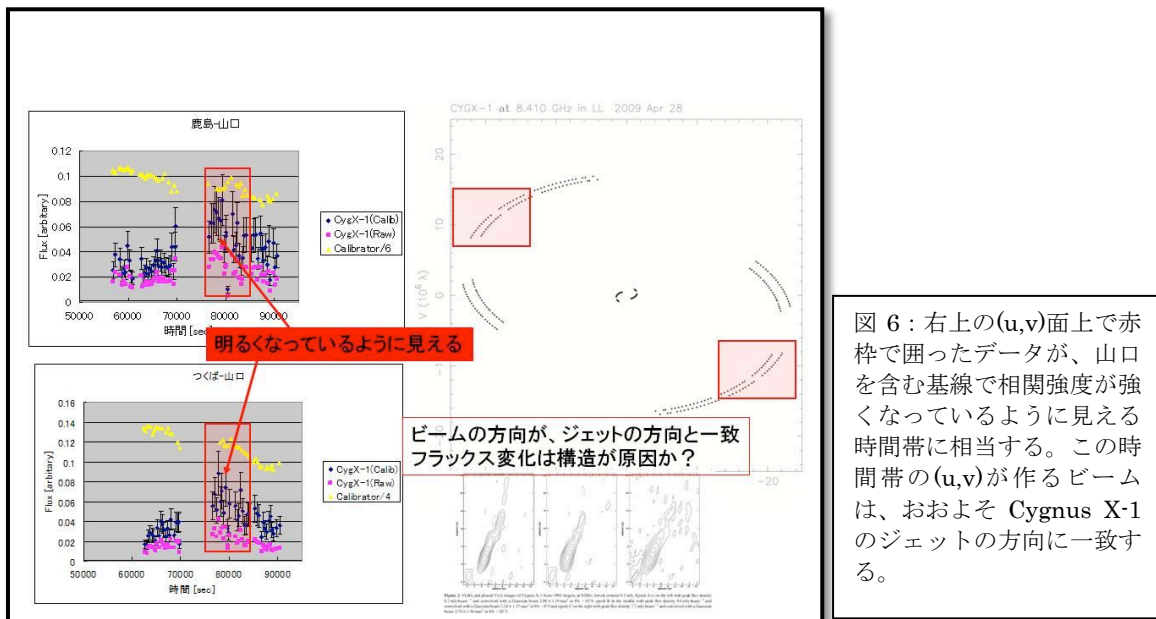
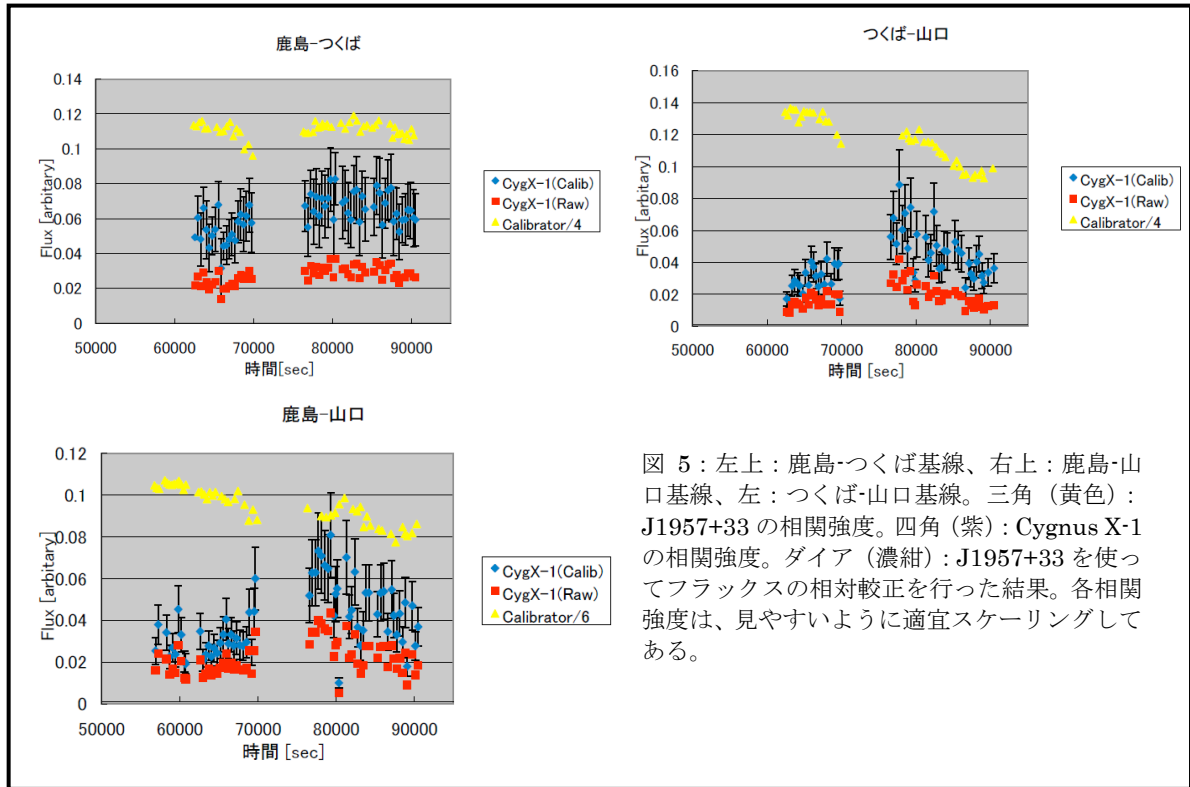
4.結果・考察

図 5 に各基線における相関強度の時間変化を示す。最短基線の鹿島-つくば間の相関強度には目立った時間変化は見られない。一方で、山口を含む長基線は、7700 秒から 8500 秒のあたりで明るくなっているように見える。この時間帯は、図 6 に示した(u,v)面上の赤枠で囲った部分に相当する。この(u,v)が作るビームは、おおよそ過去に報告されている Cygnus X-1 のジェットの向きと一致しており、ビームがジェットに並行に当たっていることが原因で、相関強度が増加している可能性がある。試しに、全時間帯のデータを使ってイメージングをしてみると、図 7 のような結果となった。Position angle~30 度方向に伸びる構造のようにも見えるが、ビームの長軸方向とも一致しているので、構造の有無はよくわからない。ガウシアン成分でモデルフィットをすると、ビーム長軸よりわずかに小さいガウシアン成分で良く表現され、空間分解できていると断言はできない。現時点では、山口を含む基線で見られる相関強度の増加は、天体固有の時間変動によるものか、天体の構造による効果かは、どちらとも言えない。

5.結論

今回の観測では、1 日以内の時間変動を有意に検出することができなかった。しかしながら、非常に微弱な Cygnus X-1 を検出できることが実証され、試験観測としては成功したと言えるだろう。今後は、位相補償も含めた解析を含めて、構造に変化がなかったかどうかを検証する。さらに 6 月のモニター観測についても解析を進める。X 線チームからの観測レポートによると、6 月に入って、high/soft 状態へ遷移しつつあることが報告されている。もし、low/hard から

high/soft 状態への遷移を見ているとすると、強いジェット噴出が期待される。この現場を Cygnus X-1 でとらえた例はなく、Disk-Jet connection の理解が大きく進むかもしれない。



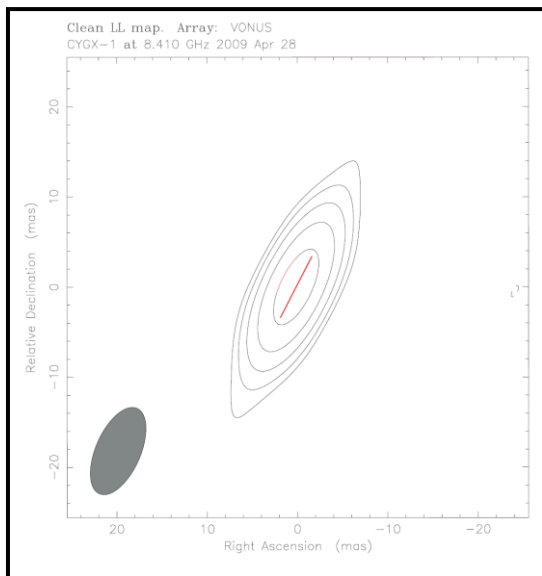


図 7 : 全時間帯のデータを用いて作成した Cygnus X-1 の CLEAN マップ。中心に赤線で示したのはベストフィットガウシアンモデル。

謝辞

本観測にあたって運用にご協力いただいたみなさまに感謝いたします。

参考文献

- Gleissner, T., et al. 2004, *A&A*, 425, 1061
 Fender, R. P., Belloni, T. M., & Gallo, E. 2004, *MNRAS*, 355, 1105
 Fender, R. P., Stirling, A. M., Spencer, R. E., Brown, I., Pooley, G. G., Muxlow, T. W. B., & Makishima, K., et al. 2008, *PASJ*, 60, 585
 Miller-Jones, J. C. A. 2006, *MNRAS*, 369, 603
 Stirling, A. M., Spencer, R. E., de la Force, C. J., Garrett, M. A., Fender, R. P., & Ogley, R. N. 2001, *MNRAS*, 327, 1273

山口 32 m 電波望遠鏡の K5/VSI システム 2号機を用いた VLBI 観測

輪島 清昭, 藤澤 健太 (山口大学大学院理工学研究科),
木村 守孝, 川合 栄治 (情報通信研究機構鹿島宇宙技術センター)

(2009 年 12 月 16 日投稿)

Abstract

山口 32 m 電波望遠鏡において、従来設置されていた K5/VSI 記録システムのハードウェアの更新を行い 2号機を 2009 年 3 月に導入した。この 2号機の動作性能を評価するための VLBI 観測を 2009 年 6 月に行った。観測は山口 32 m 電波望遠鏡および鹿島 11 m 電波望遠鏡の 2局を用い、周波数 8 GHz で実施した。データ記録速度 1 Gbps および 2 Gbps でキューサー 3C 273 および 3C 279 の観測を行い、いずれの観測においても相互相関フリンジの検出に成功した。また、積分時間を変化させた観測や各局のサンプリングビット数を 1 ビット (2 レベル) 同士、2 ビット (4 レベル) 同士、および 1 ビット (山口局) と 2 ビット (鹿島局) の混合方式に順次変化させた観測においても、理論的に予想されるのとほぼ同じフリンジ信号雑音比でフリンジを検出した。本稿では今回の観測結果を報告し、2008 年 6 月に実施した K5/VSI 試験観測結果と今回の観測結果との比較を行う。

1 はじめに

VLBI 観測における連続波天体の最小検出感度は観測帯域幅の $-1/2$ 乗に比例するため、高速サンプリング/データ記録技術の導入による観測帯域幅の拡張は VLBI 観測の感度向上の点で重要であり、今日世界の主要な VLBI ネットワークでは毎秒 1 ギガビット (1 Gbps) の記録速度での観測が定常的に行われている。

K5/VSI は情報通信研究機構鹿島宇宙技術センターのグループにより開発された観測データ記録システムで [1]、市販の PC の仕様で VLBI 標準インターフェイス (VSI) のフォーマットに準拠した観測信号を 1 Gbps 以上の速度でハードディスクに記録することを可能にしている。我々は K5/VSI システムを用いて山口 32 m 電波望遠鏡および鹿島 34 m 電波望遠鏡による VLBI 観測を 2008 年 6 月に実施し相互相関フリンジの検出に成功した [2]。

我々は将来の東アジア VLBI 観測網 (EAVN) での広帯域観測を目指し、K5/VSI システム用 PC の性能を大幅に拡充した 2号機を 2009 年 3 月に導入した。これの動作性能を実証するための試験観測を実施した

ので、その結果を報告する。また、今回の観測結果と 2008 年 6 月に実施した観測との比較についても併せて報告する。

2 山口局 K5/VSI 新規システムの導入

山口局に新規に導入した K5/VSI 2号機の写真を図 1 に、仕様を表 1 にそれぞれ示す。1号機に比べてメモリ容量が約 1.3 倍に、ハードディスク容量が約 8 倍にそれぞれ向上している。OS は CentOS 5.2 (1号機は CentOS 4.4) であり、K5/VSI システムの駆動に関して 1号機と同じ動作が実現されていることを確認している。

後述の VLBI 観測に先立ち K5/VSI 制御用各ソフトウェアの動作試験を行い、以下の 3 点が正常に機能することを確認した。

- ADS-1000 で生成される VSI-H の PDATA に記された時刻を K5/VSI の時刻として設定できることを確認した。

表 1: 山口局 K5/VSI 2号機の仕様

マザーボード	Super Micro X7DBE
CPU	Xeon E5410 (2.33 GHz) × 2
メモリ	4 GByte (2048 MByte × 2)
RAID カード	HighPoint RocketRAID 2340
ハードディスク	SATA 対応、1 TByte × 16
ネットワーク	GbE × 2
VSI-H	PC-VSI2000DIM インターフェイスカード
Linux OS	CentOS 5.2 x86-64

- ADS-1000 のテスト信号 (TVG) を K5/VSI で受信し、ビット配列が正常であることを確認した。
- K5/VSI を用いて ADS-1000 の出力信号を 1 Gbps (1 Gbps, 1 bit/sample) および 2 Gbps (1 Gbps, 2 bit/sample) で記録できることを確認した。また各サンプリングモードで帯域特性を確認した。



図 1: 山口局に新規に導入した K5/VSI 2号機 (PC の前面カバーを外した状態)。16 台のハードディスクで RAID を構成している。

3 観測

観測は 2009 年 6 月 26 日 (金)6:00 – 8:00 UT に実施した。観測局は山口 32 m 電波望遠鏡と鹿島 11 m 電波望遠鏡の 2 局である。システム雑音温度は山口局が 69 K、鹿島局が 134 K であった。総スキャン数は 180 回であり、1 スキャン当たりの観測時間は最短で 1 秒、最長で 10 秒である。上記以外の観測の概要は表 2 に示す通りである。

観測信号は 1 ビット (2 レベル) 量子化による 1 Gbps でのナイキストサンプリング、または 2 ビット (4 レベル) 量子化による 2 Gbps でのナイキストサンプリングを行っており、観測帯域幅は全てのスキャンで 512 MHz である。観測では以下の目的を達成するため、各局のサンプリングモードを観測時間中に順次変化させ記録した。

1. 各局 1 Gbps の記録 (以下「モード A」と呼ぶ) によるフリッジ検出
2. 各局 2 Gbps の記録 (以下「モード C」と呼ぶ) によるフリッジ検出
3. 1 ビットと 2 ビットとの混合相関 (以下「モード B」と呼ぶ) によるフリッジ検出

各局のサンプリングモードの設定を表 3 に示す。

4 結果

観測では鹿島局、山口局ともに全てのデータを欠損なくファイル記録することができた。相関処理は鹿島宇宙技術センターで開発されたソフトウェア相関処理プログラム 'gico3_corr' (ver.2.4.0) を用いて行った。全観測データのうち記録時間が 1, 3, 5 秒のデータの一部

表 2: K5/VSI 試験観測概要

観測日時	2009 年 6 月 26 日 (DOY 177)
	06:00 UT – 08:00 UT
観測局	山口 32 m、鹿島 11 m
観測周波数	8192 MHz – 8704 MHz (LSB)
偏波	右旋円偏波
観測天体	3C 273, 3C 279

表 3: 観測時の ADS-1000 サンプリングモード設定

記録時刻 (UT)	観測天体	鹿島局設定 *	山口局設定 *	モード記号	備考
06:05 – 06:20	3C 273	1024/32/1	1024/32/1	A	1024 Msps, 1 bit/sample
06:25 – 06:40	3C 273	1024/64/2	1024/32/1	B	1 bit/2 bit 混合
06:45 – 07:00	3C 273	1024/64/2	1024/64/2	C	1024 Msps, 2 bit/sample
07:05 – 07:20	3C 279	1024/64/2	1024/64/2	C	
07:25 – 07:40	3C 279	1024/64/2	1024/32/1	B	
07:45 – 08:00	3C 279	1024/32/1	1024/32/1	A	

*: ADS-1000 サンプラによるモード設定表示 (1 秒当たりサンプル数 [Msps]/クロック周波数 [MHz]/1 サンプル当たりビット数)

(合計 18 スキャン) について相関処理を行い、その全てで有意な相互相関フリンジを検出した。ただし、ポイントングその他によるフリンジ信号雑音比 (SNR) の変動の影響を抑えるため、全観測データのうち 06:47:00 に取得したデータ (観測天体 3C 273) および 07:07:00 に取得したデータ (観測天体 3C 279) の相関処理結果のみを後の議論で用いている。上記のデータはいずれも記録時間が 5 秒で、鹿島局、山口局ともに記録速度 1024 Msps, 1 サンプル当たり 2 ビットのモードで記録を行っている。これらのデータについて積分時間を 1, 3, 5 秒に変化させて相関処理を行うとともに、2 ビット量子化されたこれらのデータを相関処理プログラムにおいて 1 ビット量子化に相当するビットの重み付けに変換し、各局 1 ないし 2 ビット量子化による相互相関、および山口局 1 ビット、鹿島局 2 ビットの量子化による混合相関処理を行った。相関処理結果の概要を表 4 に示す。表 4 の 5 番目のコラムは 2008 年 6 月に K5/VSI 1 号機 (山口局) を用いて山口 32 m アンテナと鹿島 34 m アンテナとの間で VLBI 観測を行った時の結果である [2]。

また、それぞれの観測によるフリンジ SNR を積分時間、量子化効率、および 2008 年 6 月に実施した観測のフリンジ SNR に対してそれぞれ比較した結果を表 5 に示す。

5 考察

本章では今回の観測における各スキャンのフリンジ SNR および 2008 年 6 月に実施した VLBI 観測でのフリンジ SNR の比較を行う。

VLBI 観測のフリンジ SNR (R_{SN}) は式 (1) で与えられる。

$$R_{SN} = \frac{S_\nu \eta_Q}{2k_B} \sqrt{\frac{A_{e1} A_{e2}}{T_{sys1} T_{sys2}}} \sqrt{2\Delta B \tau} \quad (1)$$

ここに、 S_ν [Jy] は観測天体のフラックス密度、 η_Q は量子化効率、 k_B はボルツマン定数、 A_{en} [m²], T_{sysn} [K] はそれぞれ局 n の有効開口面積およびシステム雑音温度、 ΔB は観測帯域幅、 τ は積分時間である。フリンジ SNR は式 (1) に含まれるパラメタにより決まるが、それらのフリンジ SNR に対する効果はそれぞれ以下の通りである。

- 積分時間長:

フリンジ SNR は積分時間の 1/2 乗に比例するため、積分時間長による SNR の増加は 3 秒積分が 1 秒積分に対して 1.73 倍、5 秒積分が 1 秒積分に対して 2.24 倍となる。

- 量子化効率:

サンプラへの適正な入力電圧および理想的なしきい値電圧を仮定すると、1 ビット (2 レベル) およ

表 4: 相互相関処理結果

モード	積分時間 [sec]	SNR (3C 273)	SNR (3C 279)	SNR (2008 年の 3C 273)
A	1	80.2	59.9	439.3
A	3	132.5	102.9	737.2
A	5	186.6	128.9	979.8
B	1	99.8	66.4	481.7
B	3	181.3	115.7	888.9
B	5	241.1	135.9	1042.4
C	1	109.0	71.7	605.6
C	3	212.8	130.5	1054.1
C	5	275.8	156.3	1397.3

表 5: 各サンプリングモードおよび積分時間でのフリッジ SNR の比

モード	積分時間 [sec]	SNR の比 (3C 273)		SNR の比 (3C 279)		SNR の比 (3C 273)	SNR の比
		積分時間比	量子化効率比	積分時間比	量子化効率比	$R_{\text{SN},2008}/R_{\text{SN},2009}$	$R_{\text{SN},3C273}/R_{\text{SN},3C279}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
A	1	—	—	—	—	5.48	1.34
A	3	1.65	—	1.72	—	5.56	1.29
A	5	2.33	—	2.15	—	5.25	1.45
B	1	—	1.24	—	1.11	4.83	1.50
B	3	1.82	1.37	1.74	1.12	4.90	1.57
B	5	2.42	1.29	2.05	1.05	4.32	1.77
C	1	—	1.36	—	1.20	5.56	1.52
C	3	1.95	1.61	1.82	1.27	4.95	1.63
C	5	2.53	1.48	2.18	1.21	5.07	1.76

(1): サンプリングモード (本文第 3 章参照)

(2): 積分時間

(3), (5): 3C 273 (3) および 3C 279 (5) の観測における、同一サンプリングモードの 1 秒積分での SNR に対する比

(4), (6): 3C 273 (4) および 3C 279 (6) の観測における、同一積分時間の 1 ビット量子化相当の重みで相関処理した SNR に対する比

(7): 3C 273 における 2008 年 6 月の観測での SNR と今回の観測での SNR との比

(8): 今回の観測での 3C 273 と 3C 279 との SNR の比

び 2 ビット (4 レベル) での量子化効率はアナログ信号に対してそれぞれ約 64% および約 88% であり、1 ビットと 2 ビットの混合相関による量子化効率は約 75% である。よって、量子化効率を考慮した場合の SNR はモード B の結果がモード A に対して 1.17 倍、モード C の結果がモード A に対して 1.38 倍となる。

- 2008 年観測との比較:

2008 年 6 月に山口-鹿島基線で VLBI 観測 (観測天体は 3C 273) を実施したが、このとき鹿島局で使用したのは 34 m アンテナだった。鹿島アンテナの 8 GHz での開口能率 (34 m アンテナ, 11 m アンテナともに約 70%) およびシステム雑音温度 (34 m アンテナ: 50 K, 11 m アンテナ: 134 K)

を考慮すると、2008 年の観測と今回の観測との間のフリッジ SNR の比は 4.99 倍となる。

表 5 に示す各フリッジ SNR 比は上記の理論値を概ね再現しているが 10% 以上の差を持つ結果もあり、観測結果の詳細な吟味には残りの観測データの解析が必要である。

フリッジ SNR に対する観測天体のフラックス密度の効果を定量的に評価することは難しいが、今回の観測結果から以下のように推測される。

- 3C 273 と 3C 279 のフラックス密度の比較:

表 5 によれば、3C 273 と 3C 279 との SNR の比は 1.5 前後の値を取っている。式 (1) よりフリッジ SNR はフラックス密度に比例するため、今回の観測結果は両天体のフラックス密度の比が 1.5 程

度であることを示している。UMRAO データベース¹によれば、3C 273 および 3C 279 の 8 GHz で
の全フラックス密度のうち今回の観測の付近での
結果はそれぞれ約 36 Jy および約 14 Jy (いずれ
もグラフから目分量で読み取り) であり、両者の
比は約 2.6 である。

今回の観測の空間分解能は約 9 mas であった。
3C 273 は VLBI スケールで南西に 20 mas 程度
にまで広がったジェットを持ち、中心核成分以外
からの電波放射の寄与があるのに対し、3C 279 は
中心核からの放射が卓越しておりジェット成分を
含めた差し渡しのスケールが 8 mas 程度のコンパクトな構造を持っている。観測結果は両者の構造の
違いを反映しているのかも知れない。

6 まとめ

山口 32 m 電波望遠鏡に新規に導入した K5/VSI 2
号機を用いた VLBI 観測を鹿島 11 m 電波望遠鏡との
間で行い、1 Gbps 記録、2 Gbps 記録、1 ビット/2 ビット
混合記録の全てのモードで相互相関フリンジを検出
した。各モードでのフリンジの信号雑音比は積分時間

長、量子化効率に対する効果を概ね再現していた。また、2008 年 6 月に K5/VSI を用いて鹿島 34 m 電波望
遠鏡と山口 32 m 電波望遠鏡との間で実施した VLBI
観測との比較を行った結果、鹿島局アンテナの開口能
率やシステム等価雑音温度の違いをほぼ反映するフリ
ンジ SNR が得られた。以上より山口局の K5/VSI 2 号
機の信頼性を確認することができた。

謝辞

本試験観測を実施するに当たり、事前立ち上げ作業
への協力、望遠鏡時間の提供、および観測作業への対
応をして下さった情報通信研究機構鹿島宇宙技術セン
ターの皆様に深謝申し上げます。本研究は科学研究費
補助金 (基盤研究 (C)); 課題番号 20540233; 代表: 輪島
清昭) の支援を受けて行っています。

参考文献

- [1] Kimura, M., et al. 2003, IVS NICT Technology Development Center News, 23, 12
- [2] 輪島 清昭他 2008, JVN Reports, Vol.1, No.3, 4

¹<http://www.astro.lsa.umich.edu/Obs/radiotel/umrao.php>

JVN Reports（大学V L B I 連携研究成果報告書）原稿募集のお知らせ

（１） JVN Reports とは

大学V L B I 連携観測事業の一環として、定期的に発行する研究成果報告書が JVN Reports です。内容は研究報告、実験のメモ、開発メモ、対外的・政治的な取り組み、各種情報などです。この報告書の目的は、連携事業の成果を公表・共有・保存すること、研究内容を文書にすることで研究を促進すること、連携事業の活力を維持・発展させること、将来の展開の素地となることです。投稿資格者は大学V L B I 連携観測事業のメンバーです。査読は行いません。

（２） 原稿募集

JVN Reports は、連携の研究に参加する多くの方に寄稿されることで成立します。ぜひ、多くの方に原稿を書いていただきたいと思います。内容は、連携運用会議に出される資料の程度、またはそれ以上の内容であることとします。具体的な内容の例を挙げます。

- **研究報告** 連携の観測で行った研究に加え、他のアレイで行った研究も歓迎する。V L B I でなくても良い。観測提案にかかわる研究報告でも良い。論文のドラフトでも良い。
- **実験・開発メモ・各種情報** 連携に関連した各種実験や開発の報告、もっと小さなメモなどでも良い。
- **対外的・政治的な取り組み** V L B A問題など外部の情勢の報告、東アジア観測網の構築やV S O P- 2 対応などの取り組みに関する報告なども良い。

次回原稿締め切りは2010年4月7日です

JVN Report 原稿のスタイル

- 入稿：印刷可能状態の原稿、ファイル形式は基本としてPDFとする。
- 原稿サイズ：A4、横書き。上下左右には20mm以上の余白を作る。
- フォント：以下は例。およそこのようなスタイルとなっていれば良いとする。
 - タイトル=ゴシック、12ポイント
 - 著者名、所属、本文=明朝系、10ポイント
 - 章の表題=ゴシック、10ポイント
 - 段組、図=特に指定しない。カラーでも良いが、印刷は白黒。
- 章立て：以下の規則とする。
 - 先頭にタイトル、次の行に著者と所属、次に日付。それに続けて本文。
 - 本文の章立ては原則として任意。アブストラクト、謝辞などはあってもなくてもよい。

澤田-佐藤 聡子、中川亜紀治（編集担当）