

JVN Reports

大学VLBI連携研究成果報告書

2008年4月1日 第1巻 第1号

目次

JVN Reports の発行に寄せて 小林秀行 (国立天文台 水沢 VERA 観測所所長)	・・・	1
H ₂ O メーザーで探る大質量星形成領域 IRAS 06061+2151 の構造とガス運動 元木業人 (北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻)	・・・	3
OCTAVE による BAL クェーサーの観測 土居明広、浅田圭一 (ISAS/JAXA)、+光結合 VLBI チーム	・・・	9
光結合 VLBI による前主系列星からの非熱的連続波サーベイ観測 廣田朋也 (国立天文台水沢 VERA 観測所)	・・・	14
国土地理院つくば 32m 電波望遠鏡の 20GHz 帯観測システム 中井直正、瀬田益道、山内彩 (筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻 宇宙観測研究室)	・・・	18
編集担当者より	・・・	22

発行者 : 大学VLBI連携観測事業
編集 : 山口大学

JVN Reports の発行に寄せて

小林秀行（国立天文台 水沢 VERA 観測所所長）

2008/04/01

大学 VLBI 連携観測事業（以下、大学連携）は、2004 年末から試験観測を始め、2005 年度から国立天文台の特別教育研究経費が認められ、大学と共同利用研が連携して研究・教育事業を展開するという初めての事業が開始されました。事業は当初、国立天文台および北海道大学、岐阜大学、山口大学、鹿児島大学による 1 機関 4 大学の共同研究でした。2007 年度からこれに筑波大学が参加し、2008 年度からは、大阪府立大・茨城大学も加わる予定です。事業の目的は、大学および研究機関が連携し、各機関が所有・運用する電波望遠鏡を共同で利用して VLBI 観測を実施すること、それによる新たな研究領域の開拓を行い、さらに機器開発・ソフトウェア開発も連携して行うことです。また、研究だけでなく大学・研究機関間の教育の連携も重視されています。

大学連携に参加する電波望遠鏡と整備・運用に関する状況を以下にまとめます。国立天文台の VERA の 4 局はこの事業の観測における中心的な役割を果たしています。北海道大学・苫小牧 11m、および岐阜大学・岐阜 11m は大学が所有し、大学が運用するという真の大学の望遠鏡であり、それぞれ研究の拠点として重要な意義を持っています。山口大学・山口 32m は国立天文外が所有し、山口大学が運用を行っています。また次の 3 機関が大学連携の事業・研究協力し、宇宙航空研究開発機構・臼田 64m、国土地理院・つくば 32m、情報通信研究機構・鹿島 34m の大型望遠鏡 3 局が観測に利用されています。つくば 32m では筑波大学が 22 GHz 化を推進し、鹿島 34m では鹿児島大学の学生が観測運用・受信機開発などに大きな役割を果たしています。鹿児島大学は VERA 入来 20m の運用も実質的に担当しています。さらに、2007 年からは情報ネットワークを利用した世界最高速度のデータ速度を誇る実時間 VLBI 観測（光結合 VLBI）の研究とも協力関係を深め、科学研究の促進を狙っています。

観測は 8 GHz および 22 GHz で開始され、その後 6.7 GHz のメタノール・メーザの観測もできるようになっており、既に大学連携として行った観測は 50 回を超え、出版された論文が 4 編、その他投稿中の論文も複数あり、成果が出始めました。特に大学の修士課程の学生が、学術雑誌に論文を投稿していることが、将来の研究者を育成する上で注目されます。研究内容も、観測システムの研究、狭輝線セイファート 1 型 AGN、マイクロクエーサー Cyg X-3 のフレア、メタノール・メーザの VLBI サーベイ、晩期型星周囲のガスの運動、大質量星形成領域の水メーザなど、多岐にわたります。これらの研究・観測は、共同研究の組織に限定されたものではありませんが、プロポーザルを募集し、提案内容を審議した結果に基づいて実施されています。

国際情勢

大学連携の運用は、隔週で行われる電話会議が中心となっています。共同研究参加者はこの会

議に、研究成果や技術開発報告、実験結果などを報告します。これまでは、例えば共同研究の成果ですら大部分の関係者には会議資料という限定された形でしか見ることが出来ませんでした。また会議資料は一般に保存がよくないため、過去の実験記録なども所在や内容があいまいとなってしまうことなどの問題がありました。このたび大学連携の研究成果・各種報告を発表し、保存する媒体として **JVN Reports** が誕生したことで、このような問題が解決され、大学連携の事業・研究の推進において大変有用となることを期待しています。また、従来研究協力を進めてきました現在建設中の韓国 VLBI 観測網 (KVN) に加えて、中国 VLBI 観測網 (CVN) とも協力を進めるために 3 月に上海で東アジア VLBI ワークショップが開催されました。**JVN** がさらなる飛躍を遂げて、東アジア VLBI 観測網の中核的なネットワークとして役割が生まれてきました。**JVN Reports** をきっかけとして、東アジア VLBI 観測網の構築、**VSOP-2** 計画の推進、そして大学における VLBI 天文学の研究と教育がますます発展することを確信しています。

H₂O メーザーで探る大質量星形成領域 IRAS 06061+2151 の構造とガス運動

北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻 元木業人

1 はじめに

大質量星形成過程についての研究は、銀河系内の局所的星形成活動を考える上で非常に重要である。生まれたての大質量星、または未だ質量降着中の大質量恒星状天体 (Massive Young Stellar Object ; 以下 MYSO) が放つ強力な紫外光や恒星風、双極分子流等は母体となった分子雲に強く影響し、周辺の星形成に対してフィードバック作用をもたらすことが知られている。しかしながら、これらのフィードバック作用がどのような場合に星形成を促進、あるいは抑制するのかということについての定量的な評価は未だ不十分である。そのような評価を行うためには MYSO と母体分子雲の境界におけるガスの運動を直接的に観測することが望ましい。観測される MYSO の多くは距離が 500 pc 以上離れており、さらに分子雲深くに密集して形成される。そのため単一鏡の電波観測では観測者は複数の MYSO の影響が入り混じった複雑な結果を元にモデルを立て、現象を推定しなければならない。このようなモデル依存性の高い単一鏡観測に対し、超長基線干渉計 (VLBI) を用いた各種分子線メーザーの観測は 1 ミリ秒角 (1 mas) を超える高い空間分解能によって個々の MYSO 近傍の三次元的なガス運動を直接知ることができる非常に強力な手段である。特に H₂O メーザー (回転遷移 $J_{k_a k_b} 6_{16}-5_{23}$ 、波長 1.3 cm) は励起に必要とされる体積密度が 10^9 cm^{-3} と非常に

高密度であり、温度も 400 K と高いことから一般に強い衝撃波によって圧縮されたガス層で励起されると考えられている^[1]。したがって H₂O メーザー源の固有運動は衝撃波の伝播とそれによってはき集められるガス層の運動を反映していると考えられ、MYSO と周囲の分子雲との相互作用を探るのに最適のプローブだと言える。

2 JVN による IRAS 06061 + 2151 の観測

我々は 2005 年 5 月から 2007 年 10 月までの 6 回に渡り、大学 VLBI 連携観測網 (Japanese VLBI Network, JVN) を用いた大質量星形成領域 IRAS 06061+2151 に対する H₂O メーザーのマッピング観測を行った。同領域はふたご座 OB1 分子雲複合体の最北辺に位置し^[2]、太陽からの距離は 1.5 kpc である^[3]。3 つの超コンパクト電離水素 (UCHII) 領域^[5] と 5 つの B 型原始星^[6] が密集した非常に活発な大質量形成領域であり、観測された H₂O メーザー源は UCHII 領域の 1 つに付随していると考えられている。同 UCHII 領域は 2 つの B 型原始星に接した形で存在していることから、UCHII 領域と分子雲の相互作用が 2 つの原始星の誕生に寄与している可能性が示唆される。観測に使用した望遠鏡は国立天文台 VERA 20 m 鏡 (水沢、入来、小笠原、石垣)、情報通信研究機構鹿嶋 34 m 鏡、北海道大学苫小牧 11 m 鏡の全 6 局である。

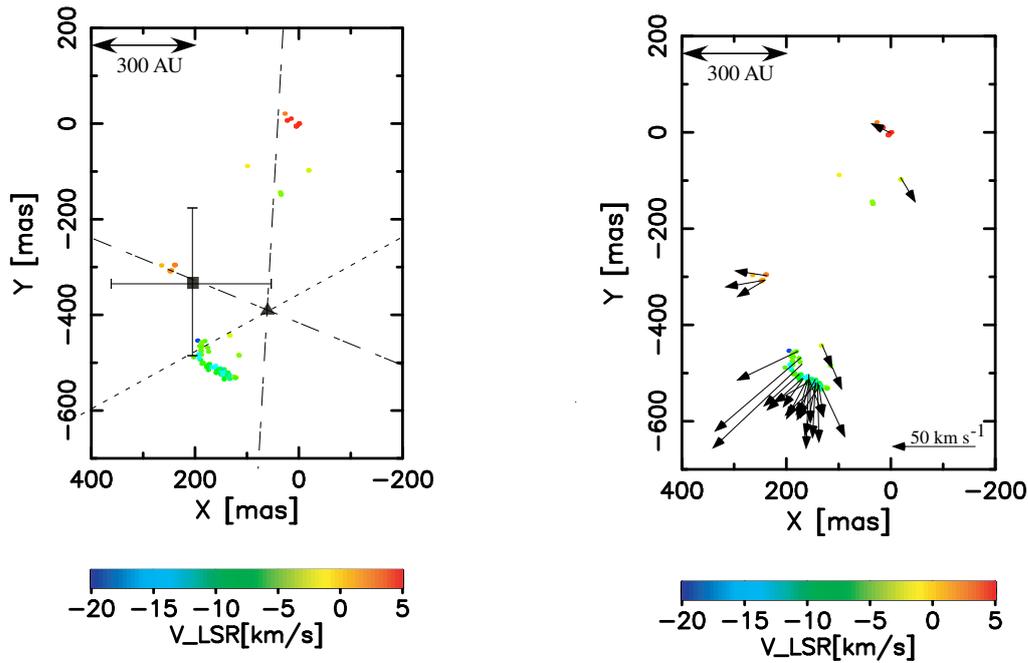


図 1: (左) メーザーフィーチャーの空間分布。点の色は局所静止系に対する視線速度に対応する。黒い四角は VLA 3.6 cm 連続波のピーク強度の位置。黒い三角、点線、破線はそれぞれモデルフィッティング (4 章参照) から得られた分子流の原点、軸、開き角を示している。(右) 位置参照メーザーフィーチャーに対する相対固有運動ベクトル。

典型的な角度分解能は 1 mas、速度分解能は 0.21 km s^{-1} である。この角度分解能は 1.5 kpc で 1.5 AU に相当し、典型的な H_2O メーザーのガスクラump (メーザーフィーチャー) の大きさと同程度である [6]。データ解析は NRAO のデータ解析ソフト Astronomical Imaging Processing System (AIPS) を用いて行った。

3 メーザーの空間分布と UCHII 領域の広がり

検出されたメーザーフィーチャーは 300 AU \times 600 AU の狭い範囲に密集しており (図 1 左)、系の視線速度 -1.0 km s^{-1} に対して赤方偏移した北側の成分と青方偏移した南側の成分に大別できた。またメーザー分布の絶対位置が電離ガスの指標となる 3.6 cm 連続波の分布 [4] とほぼ一致したことから、同メーザーは UCHII 領域を取り巻くように電離ガスと中性ガスの境界に分布

していると推定される。この場合メーザー分布から推定される UCHII 領域の大きさは $6.0 \times 10^{-3} \text{ pc}$ 以下となる。このことから同 UCHII 領域は誕生直後であり、励起源である MYSO も未だ質量降着段階にあると考えられる。

4 相対固有運動と双極分子流

図 1 右は位置参照メーザー源に対する相対固有運動ベクトルを示したものである。固有運動の大きさは最大で 100 km s^{-1} を超え、双極状の膨張運動を示している。このことから同メーザーが MYSO からの双極分子流によって励起されている可能性が示唆される。これに対し、我々の行った円錐状双極分子流モデル [7] を用いたモデルフィッティングの結果、非常に開き角の大きな ($> 50^\circ$) 分子流によって同メーザーの分布および運動が説明可能であるということが明らかになった。

また特筆すべき点は得られた円錐双極流の軸 (図 1 左) が $2.1 \mu\text{m}$ の水素分子線で観測された原始星ジェットの傾き [5] とよく一致していることである。このことは MYSO の自転軸に沿った高速のジェットと開き角の大きな大質量の双極分子流が非常に小さなスケールで独立に存在するという近年の MHD シミュレーション結果を支持する結果であると考えられる [8]。

また同領域における分子線の単一鏡観測からは大質量分子流の存在は確認されていないことから、分子流自身は MYSO とともに分子雲深くに埋もれており、高速のジェットのみが厚いガスを貫いて広がっているのではないかと推定される。さらに前述した 2 つの B 型原始星は同軸上に位置していることから、UCHII 領域の膨張に加えて MYSO からのジェットがこれらの原始星の形成に深く関わっていることが強く示唆される。

5 メーザーの速度勾配と密度構造

図 2 は領域の南側のメーザー分布を拡大したものである。図 2 からわかるように初期の観測において弧状に分布していたメーザーフィーチャーの配列が、時間とともに直線状の配列に変化してゆく様子がはっきりと見て取れる。このことは図で垂直に分布しているグループ (V-ウィング) と水平に分布しているグループ (H-ウィング) に大きな速度差があることを意味している。前述のように H_2O メーザーは圧縮ガス層で励起されるが、その放射方向はガス層にたいして平行な向き (すなわち衝撃波面に対して垂直な向き) に限られる。これはメーザー現象に必要な速度がコヒーレントな増幅経路が面に平行な場合のみ十分長くとれるためである。このためメーザーの配列はそのまま圧縮ガス層の輪郭を示していると

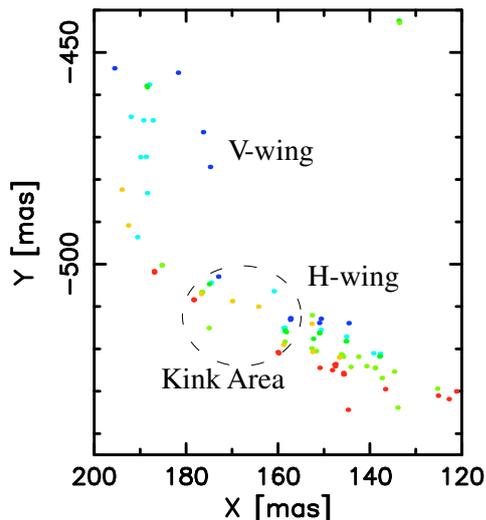


図 2: 南側のメーザー分布の拡大図。点の色は青、水色、緑、黄緑、黄、赤の順に観測期に対応している。

考えられる。したがって上記の結果は 1 枚の圧縮ガス層が非一様な速度を持っていることに他ならない。

図 3 は各ウィングの速度勾配を示した図である。この図からわかるように弧の折れ曲がり部分 (キンク) の速度が最も小さく、いずれのウィングもキンクから遠ざかるほど速度が増していることがわかる。また同時に V-ウィングが H-ウィングに比べてはるかに勾配がきついことも明らかである。我々はこのような明らかな傾向の違いが衝撃波によって圧縮される分子雲の密度構造に帰着されるのではないかと考え、単純な解析モデルによる検証を行った。

モデルでは MYSO からの双極分子流のラム圧によって分子雲が圧縮をうけると仮定する。圧縮を受ける分子雲を一樣密度のガス平面と考えた場合に、はき集められるガス層の単位面積あたりの運動方程式は以下のようなになる。

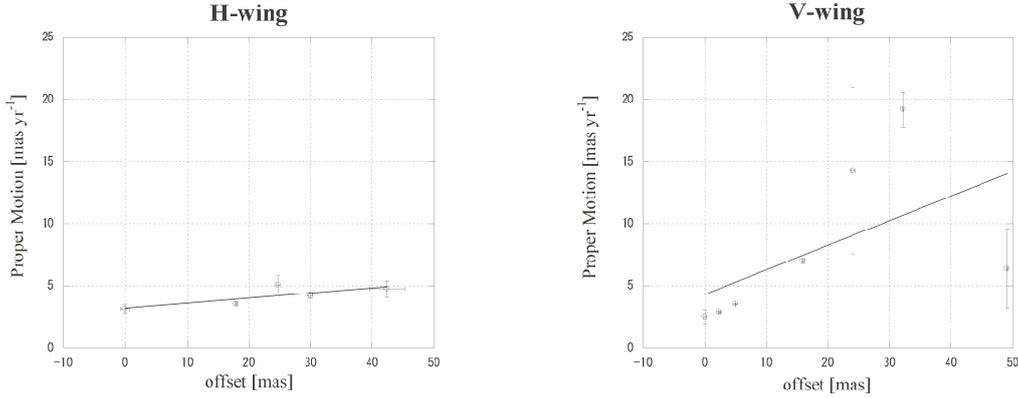


図 3: 各ウィングにおける速度勾配。横軸にキンクからの相対距離、縦軸に各位置での固有運動の平均値をプロットしたもの。1 mas yr⁻¹ はおよそ 7 km s⁻¹ に相当する。

$$\frac{d}{dt}(R\rho_{\text{cloud}}\dot{R}) = \rho_{\text{flow}}v_{\text{flow}}^2 \quad (1)$$

ここで ρ は体積密度、 v は速度、 R は圧縮された距離である。(1) の右辺は単位面積あたりの運動量の時間変化に相当し、左辺は分子流のラム圧である。今、分子雲の密度が一様と仮定しているため(1)から

$$\dot{R} = \left(\frac{n_{\text{flow}}}{n_{\text{cloud}}} v_{\text{flow}}^2 - R\ddot{R} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

が得られる。ここで n はガス粒子の個数密度である。さらに衝突直後においては R が十分小さいためガス層の初速度は、

$$\dot{R}_0 = \left(\frac{n_{\text{flow}}}{n_{\text{cloud}}} \right)^{\frac{1}{2}} v_{\text{flow}} \quad (3)$$

と与えられる。

この式はもし母体分子雲の密度に勾配がある場合、または分子流にムラがあった場合に、圧縮ガス層が速度勾配を持つことを示している。実際にはレーザー配列の空間スケールが 100 AU 程度であることを考慮すると、このような小さなスケールでラム圧が 1 桁以上変わるようなムラがあるということは考えがたい。また分子流のムラでは 2 つのウィングの勾配の違いを説明できないことから、南側ガス層に見られた速度

勾配は主に母体分子雲の密度勾配によるものと考えられる。一般に衝撃波による圧縮でレーザーを励起するために必要な母体分子雲の密度は 10^7 cm^{-3} 以上とされている^[1]。今回検出された H-ウィングと V-ウィングの速度比は最大で 5 倍に達しており、これは(3)から密度に換算して 25 倍に相当する。このことから数 100AU 程度の極小スケールで 10^7 cm^{-3} 程度の分子雲中に 10^8 cm^{-3} を超えるような非常に濃いクラumpが存在しているという密度構造が推定される(図 4)。

ではこのような極小の密度構造はどのようにして生まれるのだろうか? 最も有力なのは UCHII 領域の膨張による形成である。これは電離ガスの膨張にともなうラム圧の非等方性によって波面の凹凸に沿ったガス流が生じることで起こる一種の不安定性である。このような不安定性は電離領域と中性領域の境界の比較的小さなスケールに非常に強い密度勾配を形成することが近年の MHD シミュレーションによって明らかになっている^[9]。またこの他にも磁気圧や重力によっても同様の不安定性によって密度勾配を生じることが知られている。しかしながら、いずれも場合もこのような極小ス

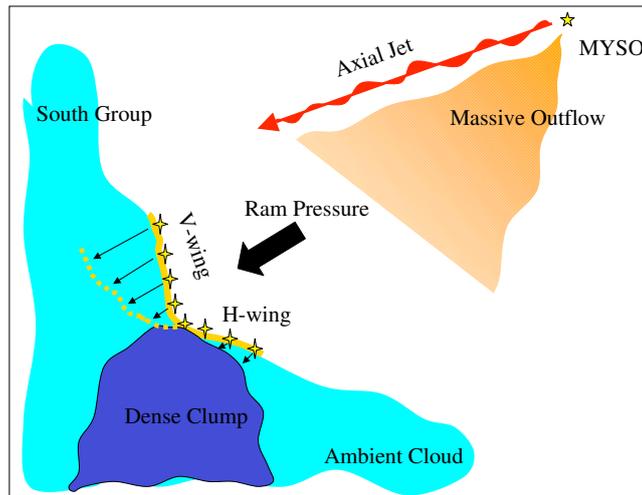


図 4: 南側のメーザーの模式図。圧縮ガス層の速度は密度の薄い場所ほど速くなる。

ケールを対象としたシミュレーションは存在していないため、さらなる高分解能のシミュレーションによる検証が望まれるところである。もちろん現時点では分子雲自身も元々そのような構造を有している可能性も十分に考えられるため、今後 ALMA などの高感度かつ高分解能の観測によってその起源を明らかにしたいと考えている。

6 まとめ

2年間にわたる IRAS06061+2151 に対する H₂O メーザーのマッピング観測の結果、メーザーの付随している UCHII 領域が非常に若く、励起星である MYSO からの双極分子流によってメーザーが励起されていることが強く示唆された。また MYSO 起源のジェットが隣接する2つの B 型原始星の形成に大きく関与していることも明らかになってきており、同領域は大質量星の集団的形成メカニズムを知る上で重要な研究対象であると考えられる。今後天体までの

正確な距離や UCHII 領域の形状などの決定によって定量的な議論がさらに進むことが期待される。またメーザーの固有運動から推定される圧縮ガス層の速度勾配は、数 100AU スケールの極小の密度構造の存在を反映していると考えられる。このような密度構造は UCHII 領域の膨張などによって形成されうると推定されるが、さらなる高分解能の観測および数値シミュレーションによる検証が必要である。

以上の結果は近日中に査読論文に投稿予定であり、詳細な説明と議論はそちらを参考にしていただければ幸いである。

本研究は大学 VLBI 連携の観測として実施され、渡邊祥正、徂徠和夫、羽部朝男、南谷哲宏(北海道大学)、本間希樹、小林秀行、柴田克典(国立天文台)、藤澤健太(山口大学)、面高俊宏、今井裕(鹿児島大学)、若松謙一、高羽浩、須藤浩志(岐阜大学)、村田泰宏(宇宙航空研究開発機構)、川合栄治、久保木裕允(情報通信研究機構)の各氏(敬称略)との共同で行われたものである。

参考文献

- [1] Elitzur, M. 1992, *Astronomical Masers*(Dordrecht:Kluwer)
- [2] Carpenter, J. M., Snell, R. L., & Schloerb, F. P. 1995, *ApJ*, 450, 201
- [3] Snell, R. L., Huang, Y. -L., Dickman, R. L., & Claussen, M. J. 1988, *ApJ*, 325, 853
- [4] Kurtz, S., Churchwell, E., & Wood, D. O. S. 1994, *ApJS*, 91, 659
- [5] Anandarao, B. G., Chakraborty, A., Ojha, D. K., & Testi, L. 2004, *A&A*, 421,1045
- [6] Reid, M. J., & Moran, M. 1981, *ARA&A*, 19, 231
- [7] Moscadelli, L., Cesaroni, R., & Rioja, M. J. 2000, *A&A*, 360, 660
- [8] Combet, C., Lery, T., & Murphy, G. C. 2006, *ApJ*, 637, 798
- [9] Franco, J., García-Segura, G., Kurtz, S. E., & Arthur, J. 2007, *ApJ*, 660, 1296

OCTAVE による BAL ケーサーの観測

土居明広、浅田圭一 (ISAS/JAXA)、+ 光結合 VLBI チーム

2008 年 3 月 1 日

概要

Broad Absorption Line (BAL) ケーサーに関する、世界で初めての VLBI による研究を開始した。光結合 VLBI 観測網 “OCTAVE” の非常に高い基線感度により、効率的な調査が初めて可能になった。23 天体のうち 21 天体を検出し、この AGN 種族にも非熱的ジェットが存在することが明らかになった。今回の調査によって、BAL ケーサーは VLBI の新たなターゲットとして確立した。

1. はじめに

Broad Absorption Line (BAL) ケーサーとは、主に UV 帯のスペクトルに青方偏移の高速度幅吸収線を持つケーサーの種族である。全ケーサーのうち 10-50%をも占めるともいわれており、決して珍しい存在ではない。活動銀河中心の降着円盤から発生するアウトフローガスによる吸収と考えられており、その速度は $1000\text{km/s} \sim 0.2c$ に相当する。このような強烈なアウトフローの存在は、降着現象の物理そのものだけでなく、ブラックホールの成長、母銀河星形成率の制御、銀河団ガスの加熱、といった天文学的問題におおいに関連する。アウトフローには、主に2つの解釈がなされており、論争となっている。

- (1) 「傾き説」: すべてのケーサーはアウトフローを持ち、アウトフローは「エッジオン」に近い方向に噴出している。たまたま我々がその方向から観測した場合、BAL として観測される。降着円盤の傾きが BAL ケーサーに見えるポイントである (e.g, Murray et al., 1995)。
- (2) 「進化説」: ケーサー進化の若い段階でアウトフローが発生し、BAL として観測される、という説。降着円盤の傾きは必ずしも重要ではなく、進化段階がポイントとなる (e.g, Becker et al., 2000; Gregg et al., 2000)。

現在、圧倒的に(1) が支持されている。降着円盤の観測によって降着円盤の傾きを知ることは

大変難しく、これまで確認できていない。そのため、これらの説には決着がつかない。

2. 電波でさぐる BAL ケーサー

BAL ケーサーは可視光～X 線分野の研究対象であり、また、この種族はほとんどが radio-quiet なので、電波帯での研究例はほとんどない。しかしながら、電波観測は BAL ケーサーの研究に決定的な貢献ができる可能性がある。

非熱的シンクロトン放射で光るジェットは細く絞りこまれており、降着円盤の軸方向に噴出していることは疑いようがない。ジェットの傾きは、ドップラービーミングの現象によってジェットが非対称に見えることを観測することにより、測定できる。VLBI のミリ秒角の空間分解能は、パーセクスケールに存在するジェットを直接撮像によって観測できる。BAL ケーサーの降着円盤の傾きを知ることができる、強力なツールである。また、電波帯の高い空間分解能では、ジェットの大きさを測定でき、間接的に年齢を推定することができる。すなわち、傾き説と進化説について、観測的な証拠を提供できるのである。

これまでの数少ない電波観測からは、電波強度変動を根拠にドップラーブーストの可能性を議論し、エッジオンから見ているという傾き説を否定したり (Zhou et al. 2006)、ある BAL 電波銀河のローブがドップラーブーストを受けずに対象的に見えていることから傾き説を肯定したりという例が

ある。またこれまで BAL ケーサーの VLBI 観測例は 4 天体しかなく (Jiang & Wang 2003, Kunert-Bajraszewska 2006)、電波源の大きさが 2kpc 程度であることから $\sim 10^4$ 歳の若さであることから進化説を示唆したり、という例がある。

3. 観測の戦略

ジェットの傾き、および、電波源の年齢を推定するべく、BAL ケーサーについての世界初の系統的 VLBI 観測研究を大学連携 VLBI 網 / OCTAVE へ提案した。これまでほとんど VLBI 観測されてこなかった種族であることから、

- (1) まずは電波を放射している BAL ケーサーを選び出し (サンプル選択)
- (2) それらの VLBI 基線長での検出性を調べ、詳細なイメージング観測に適した天体を抽出し (VLBI 検出試験)
- (3) 多周波・多エポックによる VLBI 詳細イメージングによる研究 (本格観測)

という段階を踏むことにする。現在は、(2) を開始したばかりの時点であり、初期の観測成果の報告をおこなう。(2)での作業は、多数の radio-quiet 天体の VLBI 検出試験であり、通常の VLBI イメージング網を用いていたら膨大な時間が必要になる。本研究では、OCTAVE の高感度を利用した効率的な多数天体サーベイという戦略を含んでいるところに特徴がある。

4. サンプル選択

Sloan Digital Sky Survey (SDSS) 3rd data release 中にカタログされているケーサー 46,420 天体のうち、BAL ケーサーは 4784 天体ある (Trump et al. 2006)。我々はそれらについて、VLA 20cm 電波 FIRST カタログと位置マッチング ($< 10''$)をおこなったところ、492 天体を同定した (> 1 mJy: 図1)。そのうち、上位 23 天体 (> 100

mJy) について、最初の調査を開始した。

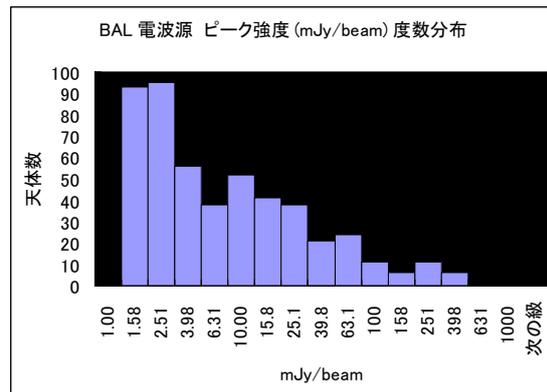


図1: SDSS 中の BAL ケーサーカタログと FIRST サーベイから同定された電波源の強度の度数分布。今回の研究では、強度上位 23 天体を対象とした。

5. OCTAVE 観測

2.4 Gbps の光ファイバーで接続された世界初のリアルタイム VLBI 観測網 OCTAVE (図 1)を用い、8.4 GHz (λ 3.6 cm) で VLBI 観測をおこなった。

- 2007年11月4日 (臼田 64m, 山口 32m, つくば 32m) 9 天体
- 2007年12月2日 (臼田 64m, 山口 32m, つくば 32m, 鹿島 34m) 7 天体
- 2008年2月9日 (臼田 64m, 山口 32m, つくば 32m) 7天体

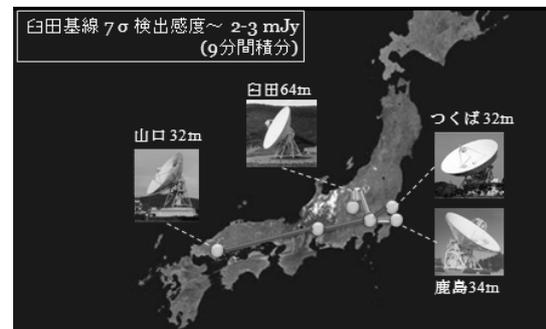


図2: OCTAVE 8.4GHz 観測網

解析は AIPS+DIFMAP にておこなった。ACCOR, FRING, BPASS, SNCOR で振幅スケー

ルファクター付与, SPLIT (以上 AIPS), Gaussian model-fit, radplot でビジビリティ振幅読み取り(以上 DIFMAP)という手順を踏んだ。フラックスキャリブレーションとして DA 193, NRAO 512 および OJ 287 を用い、山口 32m 単一鏡フラックス測定値を与えてフラックス校正した。

6. 観測結果

3観測日の観測の結果、21/23 天体が検出された(表1)。VLBI がこれまで向けられてこなかった AGN 種族ではあったが、非常に高い検出率となった。 $>10^{5-9}$ K の輝度温度で輝く成分の存在を意味する。1.4-8.4GHz のスペクトル指数は、1.4GHz VLA のビームサイズが圧倒的に大きいことから、指数が小さい側にバイアスする resolution effect が入る。それにも関わらず、指数が正 ($S_\nu \propto \nu^\alpha$; $\alpha > 0$) のものが4天体発見された。FIRST-OCTAVE 間の強度時間変動という可能性を除けば、電波源の本質的なスペクトルをあらわしているといえる。

7. 議論

本研究で特筆すべき成果とは、BAL ケーサーが VLBI で調査可能である天体であることが初めて明らかになったことである。1節で述べたとおり、BAL ケーサーの研究分野には、論争意中の大きな問題「高速度アウトフローはエッジオンに近い方向にのみ出ているのか、ある進化段階にだけ出ているのか」がある。判決にはパーセクスケールの直接撮像が必要であり、降着円盤に垂直に出るジェットの見方を測定できる電波の VLBI による研究が、実際に可能かどうかを占う意味が、本 OCTAVE 観測にはあった。弱電波源であったので、VLBI 検出性の調査には従来の感度の VLBI 網では膨大な時間が必要であることが推測されていたが、超高感度の

OCTAVE が効率的な調査を可能とした。本研究によって VLBI 検出性が確認されたことで、BAL ケーサーの謎は近い将来に解かれる可能性が高くなった。

今回の高い検出率は、ケーサーの高速度アウトフローが非熱的ジェットと確かに共存していることを意味している。このような現象を実現する降着円盤の理論モデルが要求されることになる。

また、スペクトル指数が正である天体も発見された。光学的に薄いジェットや電波ローブではなく、光学的に厚いコアが卓越している電波源であることを意味する。コア卓越型の電波源になるには、ドップラービーミングが効いていることを示唆しており、ジェット軸(すなわち円盤軸)と視線がほぼ平行であることを要請する。これは BAL ケーサーの降着円盤がエッジオンであるという説とは反する観測結果である。BAL ケーサーの研究分野において長い間信じられてきた定説が覆される可能性が出てきた。これを確かめるには、局数の多い VLBI 観測網により、多期間で多周波で詳細に観測し、ジェットの見方を測定することが必要である。

References:

- Murray et al. 1995, ApJ, 451, 498
- Becker et al. 2000, ApJ, 538, 72
- Gregg et al. 2000, ApJ, 544, 142
- Zhou et al. 2006, ApJ, 639, 716
- Jiang & Wang 2003, A&A, 397, L13
- Kunert-Bajraszewska 2006, A&A, 469, 437
- Trump et al. 2006, ApJS, 165, 1

表 1: Results of OCTAVE observations for 23 BAL quasars.

Source	$S_{8.4\text{GHz}}^{\text{cor}}$ (mJy)	B_{uv} (M λ)	$S_{8.4\text{GHz}}^{\text{fit}}$ (mJy)	$\phi_{\text{FWHM}}^{\text{fit}}$ (mas)	$\phi_{\text{FWHM}}^{\text{fit}}$ (pc)	$\log(T_{\text{B}})$ (K)	$I_{1.4\text{GHz}}^{\text{FIRST}}$ (mJy)	$\alpha(I_{1.4\text{GHz}}^{\text{FIRST}} - S_{8.4\text{GHz}}^{\text{cor-max}})$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
0043-001* ¹	<9.9 <3.4 <4.6 <2.6 <5.5 <7.4	1.5 4.3 5.8 17.4 21.5 22.9	...	...	...	...	103	...
0217-005* ²	43 <3.4 <4.6 <2.6 <5.5 <7.4	1.5 4.4 5.9 18.7 22.9 24.3	...	42-92	340-750	4.5-5.2	212	-0.9
0756+371	140 133 133	3.0 10.0 12.8	139 \pm 14	2.0 \pm 0.6	16 \pm 5	8.9	239	-0.3
0800+402* ¹	<3.4 <2.6 <5.5	3.3 11.2 14.2	...	...	...	...	190	...
0815+330	30 20 18	2.8 9.0 11.4	31 \pm 4	7.5 \pm 0.7	61 \pm 6	7.1	328	-1.3
0928+444	314 311 305	3.2 9.6 12.7	315 \pm 32	1.5 \pm 0.2	13 \pm 2	9.6	156	+0.4
1005+480* ³	16 21 20	3.4 10.3 13.6	...	<51	<420	>5.0	206	-1.3
1013+491	90 49 28	3.4 10.5 13.9	97 \pm 10	8.7 \pm 0.1	72 \pm 1	7.5	267	-0.6
1018+053	554 530 520	2.6 10.5 12.8	555 \pm 56	2.2 \pm 0.1	19 \pm 1	9.5	284	+0.4
1020+432	196 191 62	3.1 9.0 12.1	234 \pm 92	9.9 \pm 2.4	83 \pm 20	7.8	108	+0.3
1030+085	66 56 59	2.6 11.2 13.5	65 \pm 8	3.0 \pm 1.2	25 \pm 10	8.3	108	-0.3
1034+592	45 31 40	3.4 13.0 16.9	42 \pm 12	3.5 \pm 2.8	29 \pm 23	7.9	193	-0.8

Source	$S_{8.4\text{GHz}}^{\text{cor}}$ (mJy)	B_{uv} (M λ)	$S_{8.4\text{GHz}}^{\text{fit}}$ (mJy)	$\phi_{\text{FWHM}}^{\text{fit}}$ (mas)	$\phi_{\text{FWHM}}^{\text{fit}}$ (pc)	$\log(T_{\text{B}})$ (K)	$I_{1.4\text{GHz}}^{\text{FIRST}}$ (mJy)	$\alpha(I_{1.4\text{GHz}}^{\text{FIRST}} - S_{8.4\text{GHz}}^{\text{cor-max}})$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1042+074	131	2.6	133±18	7.2±0.5	58±4	7.8	374	-0.6
	62	10.5						
	50	12.8						
1057+032	23	2.8	23±3	5.8±0.8	42±6	7.2	138	-1.0
	15	11.2						
	15	13.8						
1103+023	71	2.8	72±7	4.7±0.3	38±3	7.9	163	-0.5
	56	10.9						
	52	13.4						
1119+600*4	102	3.9	...	< 21	< 170	>5.5	186	-0.3
						
						
1159+011	170	3.4	169±17	<0.7	<6	>9.9	267	-0.3
	168	13.3						
	170	16.5						
1223+503	102	3.5	105±15	<2.1	<15	>8.8	222	-0.4
	113	17.5						
	96	21.1						
1228-030	222	3.6	222±22	<2.0	<17	>9.2	144	+0.2
	224	13.9						
	224	17.4						
1405+405	179	2.8	182±24	<2.4	<20	>8.9	206	0.0
	193	15.6						
	170	18.4						
1432+410	45	2.9	46±5	5.3±0.1	45±1	7.6	257	-1.0
	26	15.6						
	21	18.4						
1510+595	18	3.8	19±3	<2.5	<21	>7.9	182	-1.2
	20	18.1						
	17	21.9						
1528+531*2	12	3.6	...	7.9-51	62-400	5.0-6.6	172	-1.5
	<2.6	17.4						
	<5.5	21.0						

Col. (1) Truncated name of target source; Col. (2) Correlated flux density; Col. (3) Baseline length; Col. (4) Fitted flux density of a Gaussian profile; Col. (5) Fitted FWHM size of a Gaussian profile; Col. (6) Fitted FWHM in pc; Col. (7) Brightness temperature; Col. (8) FIRST 1.4 GHz peak intensity; Col. (9) Spectral index between 1.4 and 8.4 GHz, calculated from the FIRST peak intensity and the maximum correlated flux density.

*1: Undetected at all baselines. Indicating a 7σ upper limit of the shortest baseline.

*2: Detected at only the shortest baseline.

*3: Complex visibility profile, cannot be fitted with a Gaussian.

*4: An only single baseline observation.

光結合 VLBI による前主系列星からの非熱的連続波サーベイ観測

廣田朋也 (国立天文台水沢 VERA 観測所)

2008年3月18日

(1) はじめに

近年、星形成領域での非熱的電波源の VLBI 観測が急速に進展している(Loinard et al. 2005, 2007; Torres et al. 2007; Forbrich et al. 2007; Sandstrom et al. 2007)。非熱的電波の放射機構は、主に T-Tauri 型星や原始星の磁場によるフレアが原因と考えられている。例えば、大質量星形成領域として有名なオリオン座分子雲では、Menten et al. (2007)が VLBA 8GH 帯の観測で 4 つの非熱的電波源を検出し、年周視差 2.415 ± 0.040 mas を得ている。これらの電波源は時間変動があり、0.9-29mJy の強度が報告されている。

オリオン座分子雲の距離決定については、VERA による Orion KL(source I)の水メーザー(2.29 ± 0.10 mas; Hirota et al. 2007)や SiO メーザー(2.39 ± 0.04 mas; Kim et al. 2008)の観測と異なる天体ではあるが、ほぼ一致している。メーザー源と非熱的連続波源は必ずしも同じ天体に付随しているわけではないため、VERA による位置天文観測の対象天体数を増やすことも期待でき、これらの観測が相補的な役割を果たすことも期待される。また、もし非熱的電波源がメーザー源と同一天体に付随しているならば、今までのメーザー源の観測では得られなかった中心星の位置が 1mas(1AU@1kpc)以上の高精度で得られるため、メーザーによってトレースされる原始星周辺の力学的状態がより精密に議論できるという意味でも重要である。

このような新しいサイエンスの可能性を秘めた星形成領域における非熱的連続波源の VLBI 観測であるが、星形成領域に特定したサーベイ観測としては Andre et al. (1992)が、星形成領域以外も含む観測では Lestrade et al. (1999)があるものの、現時点では VLBI による系統的なサーベイ観測はほとんど報告されていない。そこで、今回は大学連携 VLBI の光結合・位相補償能力を生かした高感度なサーベイ能力に着目し、星形成領域の前主系列星からの微弱な非熱的電波源の試験的な観測を試みた。

(2) 観測・解析

観測は 2008 年 3 月 8 日 UT07:40-8 日 15:00、14 日 UT22:39-15 日 UT06:00 に行った。3 月 8 日の観測は臼田 6 4 m、鹿島 3 4 m、つくば 3 2 m の 3 局、14-15 日の観測は臼田 6 4 m、鹿島 3 4 m、山口 3 2 m、つくば 3 2 m の 4 局が参加した。光結合 VLBI により、X バンド(8 GHz)帯の信号をリアルタイムでサンプリングし、相関処理を行った。記録帯域幅は 512 MHz(有効な帯域幅は 300 MHz)を達成し、テープ記録による大学連携 VLBI(16 MHz 帯域幅)に比べて 4-5 倍程度の高感度化を達成している。システム雑音温度と SEFD から、フリッジ検出感度は 60 秒積分で 4-6 mJy(7sigma、基線による)と予想される。

観測天体は、(1)VLA によって実際に偏波や時間変動が観測された星形成領域にある電波源(2) X 線の光度から強い非熱的電波の検出が期待される天体(Gudel 2002)、のうち、割り当てられた時間で観測可能なものを各観測 7 天体ずつ選択した。若い原始星から進化の進んだ T-Tauri 型星、近傍(140 pc)の小質量星から遠方(2kpc)の大質量星など、幅広い進化段階、質量の非熱的電波源候補を選択した。様々な文献から天体を選択したために無バイアスな系統的観測とは言えないものの、今後のサーベイ観測の指標とすることも可能になると期待される。位相補償観測のために、ターゲット天体でのスキャン 160 秒、アンテナ移動に 20 秒、離角(最大 3 度)の参照電波源のスキャン 100 秒、アンテナ移動に 20 秒、という5分周期のシークエンスでスイッチング観測を行った。1 天体あたり1 時間(約 10 回のスイッチング)の観測を行った。また、1 時間に1 回、天体切り替えの合間にキャリブレーションのスキャンとシステム雑音温度計測を行っている。また、フリッジ検出確認のため、す

に VLBI で検出されている V773-Tau (Lestrade et al. 1999)、GMR-12(Menten et al. 2007)のスキャンをそれぞれ 8 日、14-15 日の観測に 5 分含めている。

データは相関処理後ただちに FITS ファイルに変換され、解析は AIPS により行った。システム雑音温度と SEFD を用いた振幅較正、キャリブレーションによるクロックパラメータの補正、参照電波源によるFRINGEフィッティング(積分時間 1 分)、キャリブレーションによるバンドパス較正を行い、これらの結果をターゲット天体についても適用して、位相補償を行った。

(3) 結果と考察 : V773-Tau の検出

観測結果については、現在詳細な解析を行っている段階であり、検出、未検出の結論は得られていない。ただし、現時点ではFRINGEが検出されたターゲット天体は V773-Tau のみであり、位相補償を行っても他のターゲット天体については検出の兆候(相互相関関数、ビジビリティ位相・振幅、FRINGEサーチの結果などから判断)は得られていない。図 1 に、V773-Tau の相互相関関数を示した。V773-Tau は 1 分積分のFRINGEサーチにより、SNR=7-20 程度で有意に検出されている(図 2)。フラックスは約 8 mJy(図 3)となっており、予想される検出感度から矛盾しない程度の強度となっている。

V773-Tau(HD 283447)はおうし座分子雲にある弱輝線 T-Tauri 型星(Weak Line T-Tauri Star, WTTS)である。連星系を構成しており、ジャイロシンクロトロンによる非熱的電波放射(Phillips et al. 1996)や極めて強い X 線フレア(Tsuboi et al. 1998)を起こす、活発な磁気圏の活動性が知られている。VLBI による非熱的連続波観測による年周視差計測により、距離は 148pc と推定されている(Lestrade et al. 1999)。V773-Tau の電波強度は 52 日周期でフレアを起こすことが知られており(Massi et al. 2002)、そのフレアの予想日は 3 月 16 日となっている。8GHz 帯ではフレア前後数週間は 3-4 日おきの周期的フレアが起り、近星点通過時に最大になることが知られている。フレア時の強度は、これまでの観測では最大 35 mJy が予想されている。今回の光結合 VLBI では、広帯域観測による高い感度のため、微弱な非熱的連続波を 1 分程度の短い積分時間で有意に検出することに成功している。このことは、将来的に光結合 VLBI を用いた微弱な WTTS や連星系のイメージング観測による磁場構造の解明という新しいサイエンスを切り開く可能性を示している。また、光結合 VLBI によるリアルタイム相関処理により、観測 2 日後には結果を得ることも成功している。このようなリアルタイム性は、タイムスケールの短いフレア現象の観測的研究では本質的に重要であり、将来的には光結合 VLBI によるモニター観測⇒フレアの検出⇒フレア直後からのイメージング観測という流れにより、原始星磁気圏の空間構造や放射機構の解明、あるいは長期的モニターによる連星系の起動決定や年周視差計測というサイエンスにも発展することが可能になると期待される。

参考文献

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Andre et al. 1992, ApJ, 401, 667 | Loinard et al. 2007, ApJ, 671, 546 |
| Forbrich et al. 2007, A&A, 469, 985 | Massi et al. 2002, A&A, 382, 152 |
| Gudel 2002, ARAA, 40, 217 | Menten et al. 2007, A&A, 474, 515 |
| Hirota et al. 2007, PASJ, 59, 897 | Phillips et al. 1996, AJ, 111, 918 |
| Kim et al. 2008, in preparation | Sandstrom et al. 2007, ApJ, 667, 1161 |
| Lestrade et al. 1999, A&A, 344, 1014 | Torres et al. 2007, ApJ, 671, 1813 |
| Loinard et al. 2005, ApJL, 619, L179 | Tsuboi et al. 1998, ApJ, 503, 894 |

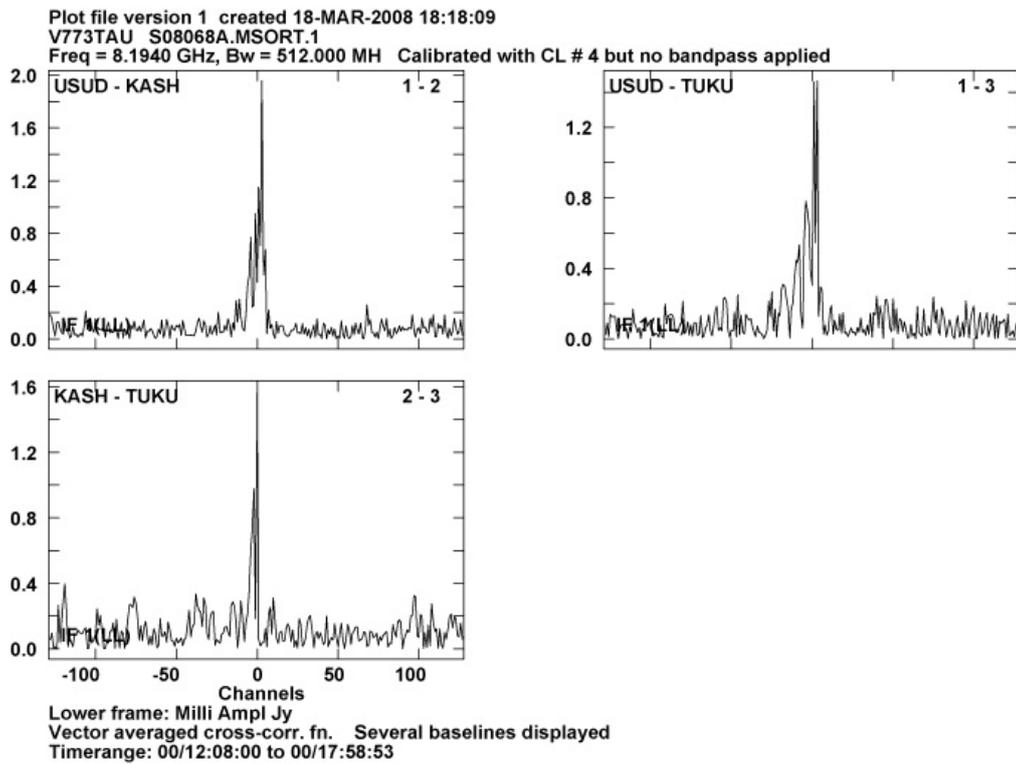


図 1. V773-Tau の相互相関関数。横軸は遅延、縦軸は強度。

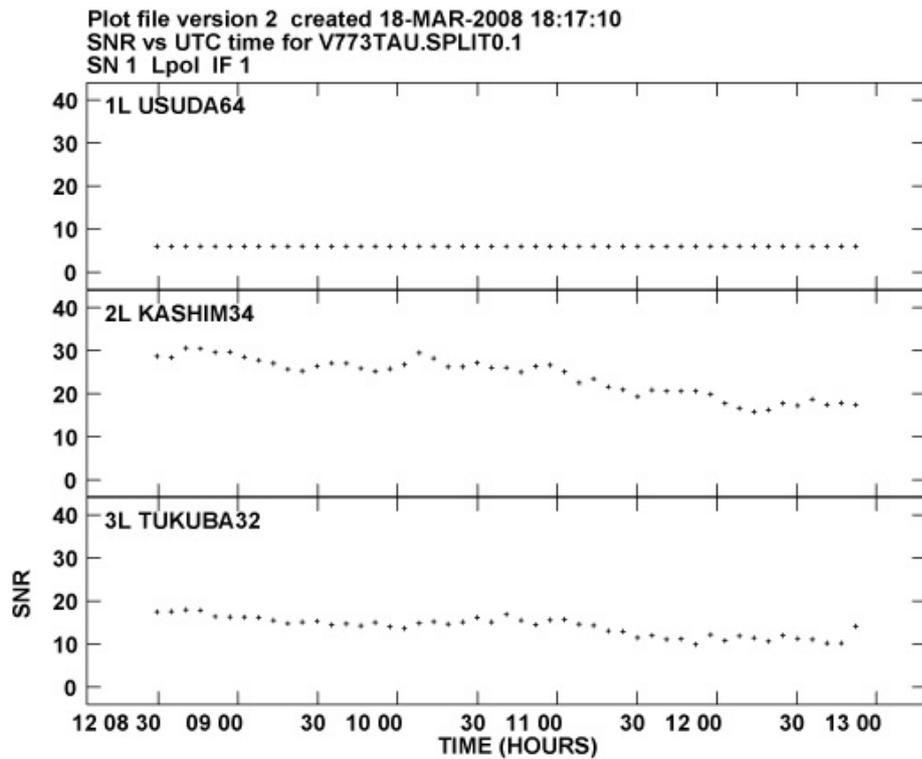


図 2. V773-Tau のフリッジサーチ結果(SNR, 1 分積分)。

Plot file version 1 created 18-MAR-2008 18:16:01
Amplitude vs UV dist for V773TAU.SPLIT0.1 Source:V773TAU
Ants * - * Stokes LL IF# 1 Chan# 1

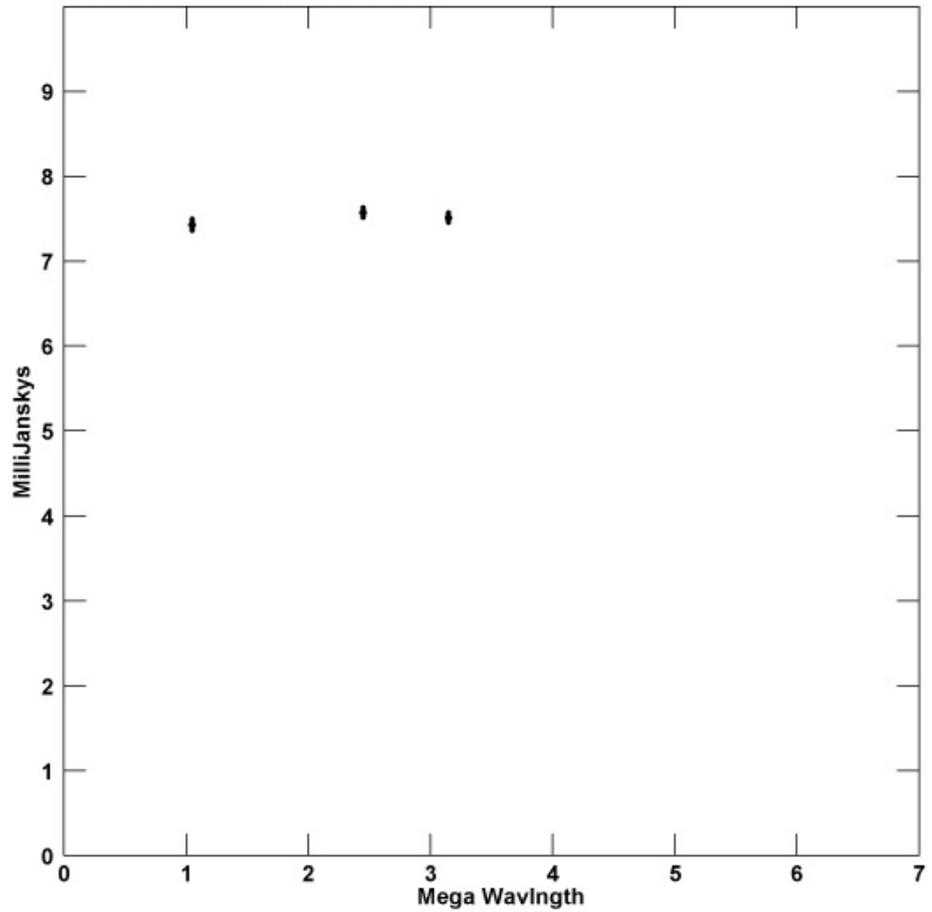


図 3. V773-Tau のビジビリティ振幅と基線長の関係。振幅較正は、キャリブレーション(J0530+1331)のフラックスが一定値(1 Jy)となるように適当なスケールリングファクターを与えた。ファクター2程度の不定性があると考えられる。厳密な振幅(フラックス)較正は今後の課題。

国土地理院つくば32m電波望遠鏡の20GHz帯観測システム

筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻 宇宙観測研究室
中井直正、瀬田益道、山内彩

1. システム概要

国土地理院つくば32m電波望遠鏡(図1)は、これまで2/8GHz帯のVLBI観測局として、測地観測(及び、大学VLBI連携による天文観測)に用いられていた。筑波大学宇宙観測研究室は国土地理院と共同研究協定を結び、32m鏡に冷却20GHz帯受信機を搭載し、また単一鏡としても天文観測に使用できるように整備を進めている。



図1 国土地理院つくば32m望遠鏡

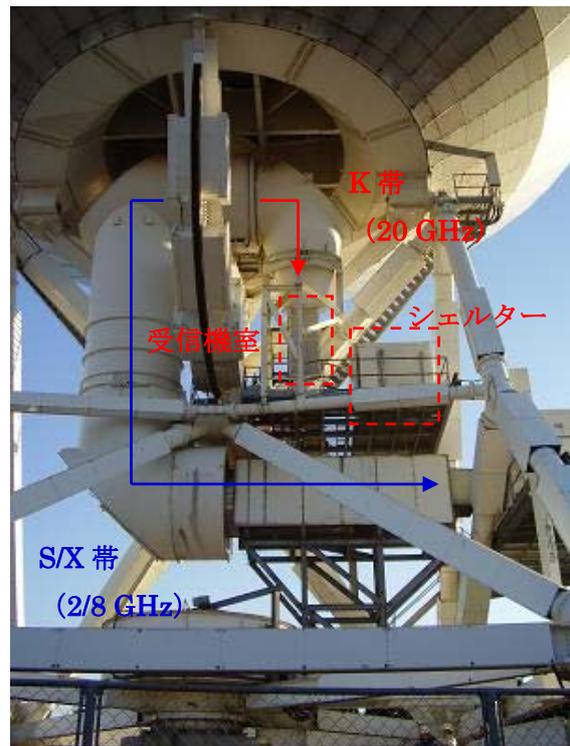


図2 32m鏡ビーム伝送系(背面より撮影)

32m鏡の主鏡は、20GHz帯での損失が許容できる0.5mmの設計鏡面精度が確保されている。主鏡・副鏡で反射した電波は、主鏡中央の雨よけカバーを通して、EL軸上に位置する第一斜鏡に入射する。この第一斜鏡の切り替えで、2/8GHz帯と20GHz帯のビーム伝送系を選択することが可能である(図2)。

20GHz帯受信観測システムは大きく分けて、電波強度較正装置、冷却増幅部、中間周波数変換部、バックエンドから成る。これらは、単一鏡観測制御システムから制御される。20GHz帯ビーム伝送系、給電部、受信機室等は32m鏡建設時に設置されており、これらの限られた空間に合うように電波強度較正装置、冷却増幅部の設計を行った。

- A) **電波強度較正装置** (図 3) : K 帯給電部 (ホーン) の直前に設置。吸収体 (直径 454 mm) を回転式に出し入れする。
- B) **冷却増幅部** (図 4) : K 帯受信機室内に設置。真空デュアー内においてポラライザーにより左右両円偏波に分離した後、12K 冷却 HEMT 増幅器によって 19.5 – 25.5 GHz の周波数が増幅される。デュアーの出口までは両偏波とも整備されているが、中間周波数部以降は、現在は左偏波受信側のみ接続されている。受信機室とシェルターの間 (約 2 m) は、セミリジッドケーブルで観測信号を伝送する。



図 3 強度較正装置と K 帯ホーン



図 4 K 帯受信機室内の冷却増幅部

- C) **第一中間周波数変換部** : K 帯シェルター内に設置。20 GHz 帯の信号を、ミクサーで中間周波数 4 – 8 GHz に変換する。観測中の周波数追尾は、第一ローカル用シンセサイザーの出力周波数を変化させて行う。シェルター内で 4 – 8 GHz アナログ信号を電気/光変換し、アンテナ隣の VLBI 観測棟へ伝送する。
- D) **第二中間周波数変換部** : VLBI 観測棟に設置。観測棟内で光/電気変換された 4 – 8 GHz アナログ信号を、検波器用 (4 – 8 GHz) /ハードウェア分光計用 (0 – 1 GHz) /ソフトウェア分光計・VLBI 用 (512 – 1024 MHz) に分配したのち、それぞれの入力周波数に合わせて周波数変換する。現在ハードウェア分光計は設置済み、他のバックエンドは設置準備中。第二ローカル用のシンセサイザーは、観測中は周波数固定で使用する。
- E) **ハードウェア分光計** : VLBI 観測棟に設置。Acqiris 社製 AC240 を使用している。8 ビット、周波数帯域幅 1 GHz、分光点数 16384 点、周波数分解能 61 kHz (23 GHz で速度分解能 0.8 km s^{-1}) のフーリエ変換型分光計である。分光計で取得した観測データは、観測後に FITS 形式に変換し、国立天文台野辺山 45m 鏡用のデータ解析ソフトウェア NewStar で読み込んでリダクションする。
- F) **単一鏡観測制御システム** : LAN、RS232C、GP-IB 等を介して、アンテナコントロールユニット (ACU)、気象測器、強度較正装置、冷却増幅部、中間周波数変換部、バックエンドと接続している。制御プログラムは、中央制御プログラム、個々の装置の制御プログラム、観測者インターフェイスプログラム、観測テーブル作成プログラムで構成される。中央制御プログラムで行う測心視位置と追尾周波数の計算には、野辺山

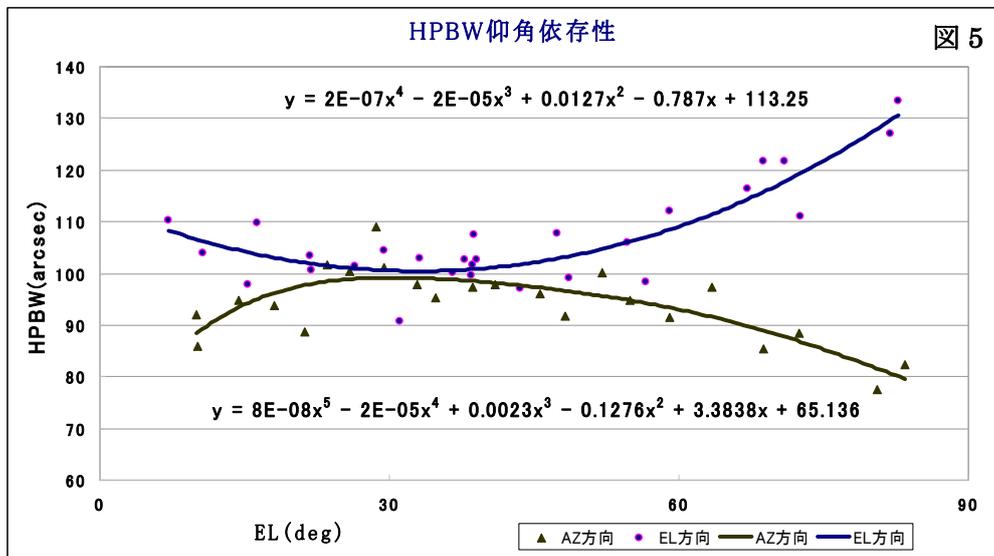
45m 鏡の観測制御システム COSMOS と同じ、富士通製の追尾計算ライブラリを用いて観測制御されている。観測者は、VLBI 観測棟に設置された観測者インターフェイスプログラムで観測を行う。

2/8 GHz 帯 VLBI 観測（測地観測、大学連携観測含む）は、Field System Version 9 を用いて観測制御されている。2/8 GHz 帯 VLBI 観測と 20 GHz 帯単一鏡観測の切り替えには、(1) FS9 計算機/単一鏡計算機の ACU 制御権（RS232C 手動切替器）の切り替え、(2) 第一斜鏡の切り替え、(3) 副鏡適正位置の切り替えが必要である。これらは全て、VLBI 観測棟で実行する。

2. 20 GHz 帯アンテナ性能

A) ビームサイズ

3C84 や、晩期型星からの水メーザーのような点状電波源を AZ 方向と EL 方向に十字的にマッピングし、強度が半分になる全幅 FWHM = HPBW を測定した（図 5）。



結果は EL 依存性があり、EL = 30 – 40° 付近ではほぼ円形であるものの、それより高いところと低いところで EL 方向に長くなる。特に高 EL で変形が大きくなる。しかし、

$$\text{幾何平均 HPBW} = (\text{AZ} \times \text{EL})^{(1/2)} = 100''$$

は EL にあまり依存せず、ほぼ一定となった。

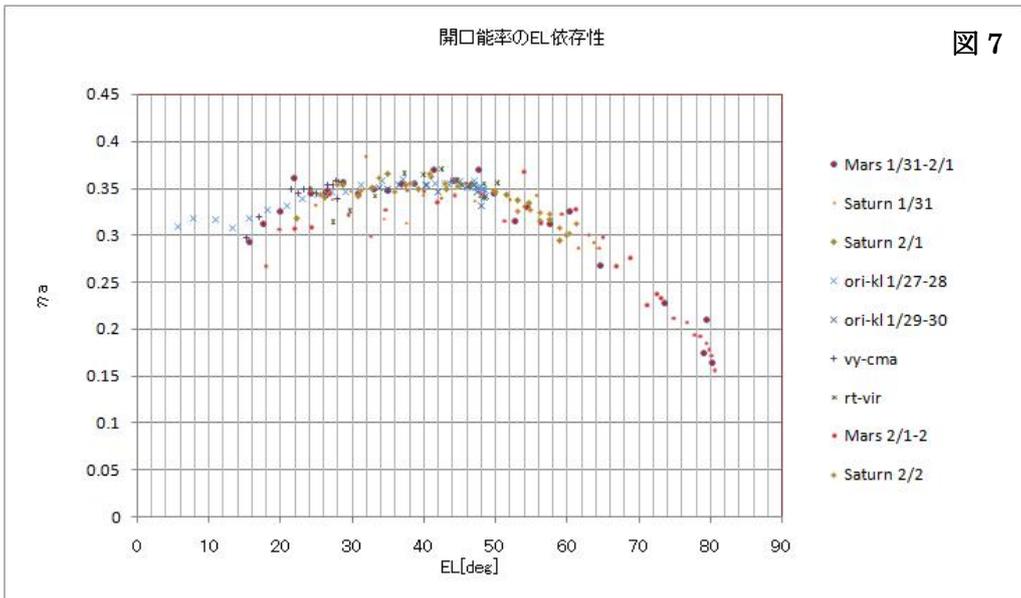
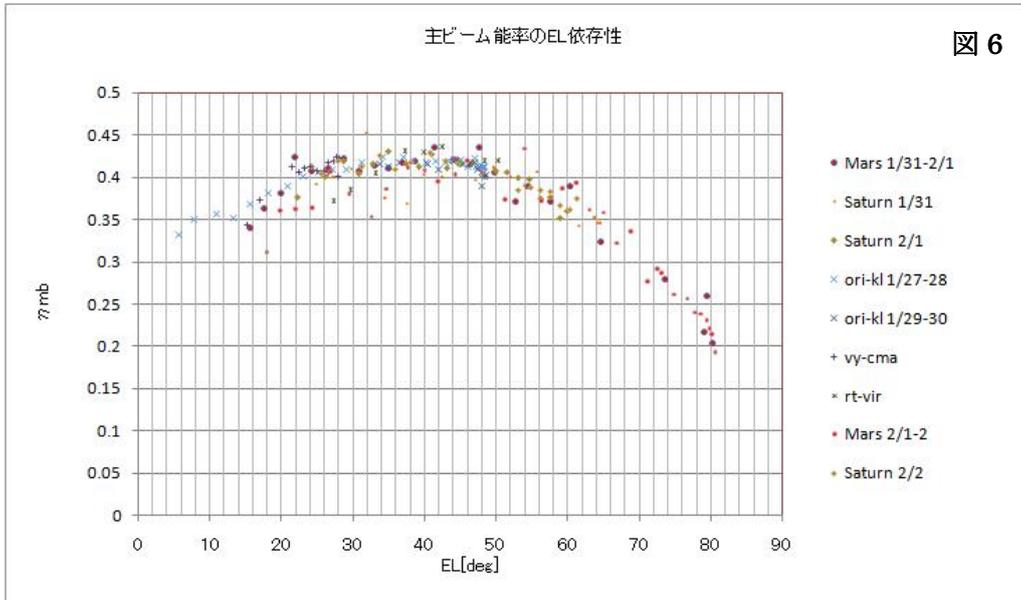
B) 主ビーム能率と開口能率

火星（22 GHz での輝度温度を $T_B = 216\text{K}$ と仮定）を使って主ビーム能率の絶対値を測定し、水メーザー源を用いて EL 依存性を測定した。

結果（図 6）は EL = 40° 前後で最大値（～43 %）を示し、それより低い EL と高い EL で低下する。特に EL が高いところで急激に低下する。開口能率（EL = 40° 付近

で 36%) も、同様な EL 依存性を示した (図 7)。高 EL で減少するのは、ビームサイズ (変形) の傾向と相関がある。

3 月~4 月に木星も観測して測定する予定である。



以上

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。発行は1年に4回、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。

次回の原稿締め切りは2008年6月1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。

藤沢健太、中川亜紀治（編集担当）