

水蒸気レーザー源の VLBI 観測 太陽系スケールで見える原始星周辺ガスの回転 降着運動

今井 裕

〈国立天文台 地球回転研究系 電波地球計測部門 〒023-0861 岩手県水沢市星ガ丘町 2-12〉

e-mail: imai@miz.nao.ac.jp

原始星 IRAS16293-2422 に付随する水蒸気レーザーを国内 VLBI (超長基線電波干渉法) 網を用いて観測したところ、原始星を中心とした太陽系スケールの空間で、分子ガスが星周円盤に向かって回転しながら降着している様子を見ることができました。本稿では、著者たちがこの結果を得るに至ったいきさつを交えて、水蒸気レーザー源観測に基づく星形成研究について紹介します。

1. 原始星のすぐそばを直接眺めたい

現在考えられている星形成のシナリオでは、星間分子ガスが自己重力によってある 1 点に向かって集積し、核融合反応ではまだ自ら光ることができない星の赤ちゃん (原始星) を形成するのですが、その前後のある時点から質量降着とともに、原始星へ降着してきたガスの一部が原始星から正反対の方向に勢い良く放出され、いわゆる双極分子流が形成される、ということになっています。その「ある時点」における降着ガスの運動を直接見ることが、星形成の研究にとって非常に重要となります¹⁾。このような段階にある原始星とそれを取り巻く降着ガスは、分子雲の奥深くの密度が非常に高い部分 (水素分子個数密度が 10^6 cm^{-3} 以上) にあります。著者たちは、水蒸気からの強力なレーザー放射、水レーザー、に注目して研究を進めています。この特殊な電波放射の発生源は、星が生まれる初期段階 (星が生まれる前後から 10^5 年以内だと推定されている²⁾) に限って、原始星から数 100 AU 以内に発生するのです。

2. 星周回転ガス円盤に付随する水蒸気レーザー

レーザーとは、レーザーの電波版で、(1) 多数の非常にコンパクトな領域、レーザースポット、から放射される、(2) ある特定の非熱平衡的物理状態にある環境でのみ励起される、などの特徴があります。水レーザーの場合、レーザースポットのサイズは典型的には 1 AU で、輝度温度は 10^{10} K 以上にもなります。このレーザー放射は、分厚い分子雲をすり抜けて、私たちの観測対象になり得るのです。また水レーザーは、温度が 400–1000 K、水素分子個数密度が 10^6 – 10^{10} cm^{-3} のガス中で励起されます。このような比較的高温かつ高密度の分子ガスが存在し、実際に水レーザーが観測されるのは、分子ガス塊同士がぶつかり合い圧縮される領域です³⁾。水レーザーを観測することによって、私たちは、原始星からすぐ近くの分子ガスの激しい運動の様子を眺めることになるのです。

1993 年に著者が東北大学天文学教室の学生として研究を始めた頃までは、HII 領域 (電離水素領域) を伴い進化が進んでしまった大質量星形成領域や、

中小質量原始星からの発達した双極分子流に付随した水メーザー源しか認識されていませんでした。降着運動する分子ガスに付随する水メーザーは、その強度が極端に弱いだけでなく、観測する度に水メーザースポット群の空間分布・視線速度分布がどんどん変化して、真の分子ガス運動を把握することがとても困難でした⁴⁾。

転機は、1996年にやってきました。D. Fiebig氏の研究グループは、米国の電波干渉計 Very Large Array (VLA)を用いて星形成領域 L1287 中の赤外線源 IRAS 00338+6312 に付随する水メーザーを2年間にわたって6回観測しました。そして、得られた6回観測分の水メーザースポット空間・視線速度分布を1枚のマップに重ね合わせたところ、原始星の周辺 35 AU 以内で自転しながら原始星に向かって収縮するガス円盤に付随した水メーザースポット群を確認しました⁵⁾。その後、1回の VLA 観測だけでも、降着運動は確認できないまでも、双極分子流ではなくその流れの垂直方向（星周ガス円盤が横たわっている方向）に広がって分布する水メーザー源が数個見つかりました⁶⁾。こうして、水メーザー源を観測すれば、星形成初期段階の原始星周辺の分子ガスの運動を直接眺めることができる、という見通しが立ちました。

3. 青春は VLBI とともに

著者が星形成研究において水メーザーにこだわるのは、これら水メーザースポットが、見かけ上1ミリ秒角程度以下にもかかわらず非常に強力な電波を放出し、VLBI (Very Long Baseline Interferometry, 超長基線電波干渉法) の驚異的空間分解能と位置測定能力の恩恵を受けて観測できるからです。原始星に降着していく分子ガスの運動を直接眺めるためには、0.1–0.001 秒角の空間分解能が必要です。複数の電波望遠鏡を数 100 km 以上離して配置し、同一天体を同時に観測することによって、このような高い視力を達成できます。また、観測周波数が 22.2 GHz と比較的高いために、十分に高い視線

速度（周波数）分解能を容易に得ることもできます（通常 0.1 km s⁻¹）。

しかし実際は、水メーザーのようなスペクトル線に対する VLBI 観測の実現に対しては、ハード的にもソフト的にも障壁が高いのです。特に、水メーザースポットが分布する数秒角の視野を、0.1 ミリ秒角のグリッドで、しかも数 100 速度チャンネルにまたがって像合成する様を見て、「最もマゾチスティックな研究分野だ」ともかつて評されました⁷⁾。国内の電波天文 VLBI は、欧米に遅れること 10 年経ってから急速に進展してきました。それは、日本独自の VLBI 観測装置の開発や、世界初のスペース VLBI 天文計画、VSOP、の実現などに見て取れます。一方で、このような急速な進展に付いていけない部分も多々ありました。その1つが、メーザー源観測データリダクションソフトの整備・開発でした。データ解析処理ソフトの開発は、当時野辺山宇宙電波観測所のポスドク研究員であった三好真氏一人に委ねられていました⁸⁾。著者の大学院生時代は、そういう背景もあって、リダクションソフトの整備・開発とその産物を用いたデータ解析に青春をかけた日々でした。

いきなり 1 ミリ秒角程度のグリッドで数秒角の視野に対して像合成を行うのは無茶です。著者が手掛けたソフトは、もっと低い空間分解能で全視野を短期間でカバーできる、フリッジレートマップピング法⁹⁾と呼ばれる手法を用いたメーザースポット位置推定用の解析ソフトでした。当時野辺山の大型汎用計算機でしか操作できなかった三好氏作成のソフトを、普通のワークステーション上でも効率良く操作でき、かつより高精度の解析を進められるように、著者が大改修を行いました。その結果、1996年中頃には、実効的な空間分解能が 10 ミリ秒角を達成する像合成ソフトを、ほぼ完成させることができました。また、1つの水メーザーマップを、最短では2週間で得られるようになりました。データ解析に必要な、10 G バイト以上の計算機ワークスペースも整備されました。こう

して、長期間テープ保管倉に眠っていた多くの観測データの解析に着手することになりました。

4. 原始星 IRAS 16293-2422 に付随する水蒸気メーザーの研究

1998年4月、著者は、本稿で紹介する原始星 IRAS 16293-2422 (連星系中の連続波 “A”¹⁰⁾) に付随する水メーザーの研究¹¹⁾に着手しました。最初にこの水メーザー源が KNIFE (鹿島-野辺山干渉計) を用いて観測されてから、実に7年の歳月が経っていました。

この研究は、もともと宇宙開発事業団の岩田隆浩氏によって進められていました。岩田氏が大学院生時代に所属していた名古屋大学理学部の電波天文グループ (A研) は、自前の4 m 及び野辺山45 m 電波望遠鏡を用いて、原始星候補天体である赤外線源からの CO 分子輝線を観測し、多くの双極分子流天体を発見してきました¹²⁾。その後、岩田氏は通信総合研究所鹿島に移籍し、その時発見したこの分子流天体に付随した水メーザーの VLBI 観測が、当時できたばかりの KNIFE と宇宙科学研究所臼田 64 m 電波望遠鏡を用いて行われました。

また、KNIFE が国立天文台水沢 10 m、鹿児島 6 m 電波望遠鏡を含めた国内 VLB 網 (J-Net) に拡張された後にも、2回観測されました。この水メーザー源は、低質量星形成領域のものの中では例外的に強いメーザー放射を持っているので、通常ならばメーザーマップが容易に得られるはずでした。しかし、前述したデータ解析ソフトが完成するのを待っている間に、岩田氏自身が月探査衛星打ち上げ計画 (SELENE) に従事することになり、VLBI データ解析に必要な時間をとれなくなってしまいました。

それからしばらくして、著者が解析を引き受けたいと申し出たのでした。その背景には、米国国立電波天文台の A. Wootten 氏らが VLBA (Very Long Baseline Array) を用いて同水メーザー源を短

期間で4回も観測し、カリフォルニア工科大学のポスドク研究員であった K. B. Marvel 氏のもとでデータ解析が進んでいたことがありました。今思えば、解析着手がもう半年遅れていたら、彼等の成果が世に先に発表され、本稿を書くことはなかったはずでした。データ解析は、2ヶ月で終わりました。しかし、「星周ガス円盤に向かって回転しながら降着していく分子ガス運動」という解釈を得るには、著者の博士論文執筆を挟んでさらに半年以上かかりました。

5. 分子ガスの回転降着運動が見えた!

先述したように、水メーザー源の観測からそれが付随する分子ガスの空間・速度構造を把握するのは、個々の水メーザースポットがクリスマス・ツリーのごとく数カ月で点いたり消えたりするために困難なことです。幸い IRAS 16293-2422 水メーザーの場合、2年間にわたってずっと同じ位置・視線速度に存在した水メーザースポットの集団を見つけることができ、それらを基準に3枚のメーザーマップを重ね合わせ、この領域の視線速度分布がおぼろげながらも明らかになりました。その水メーザーマップを、図1 (=表紙) に示しておきます。

それでも、得られた水メーザースポットの空間・視線速度分布の解釈にさらに時間を要したのは、その複雑な分布のためでした。この領域の分子流の流れがほぼ東西方向であるのに対し、水メーザースポットの分布は南北に伸びていました。これから、水メーザースポットが分子流と垂直に横たわる星周ガスに付随していることが想定されます。水メーザーが強力な放射を作るには、放射方向に長い増幅路が必要で、その方向が視線方向であるためには、このガス円盤も視線方向に沿って横たわって (エッジオンで) なければいけません。この場合、もし水メーザースポット群が、中心天

体からある特定の距離のリング上で回転運動をしていれば、図2のように、位置-視線速度図を描けば水メーザースポット群はある傾きを持った直線上に並ぶはずです。著者達が得た結果は、それとは全く似つかないものでした。特に、青方偏移した水メーザースポット群の視線速度分布が一定の視線速度勾配では表すことができません。また、南北方向の他に、東西方向にも微弱な水メーザースポットが存在します。これは、エッジオンガス円盤という描像に疑問を投げ掛けるものです。

そもそも、ガス円盤上の水メーザーはどうやって励起されるのが問題です。先述した通り、水メーザーの励起のためには、分子ガス塊同士の衝突を伴うような速度場を必要とします。周辺ガスと相互作用する双極分子流ならともかく、ガス円盤上でどうやってそのような運動が実現するのか、しばらくは良いアイデアが思い付きませんでした。

博士論文審査が終わっても免停を食らってスキーに出かけられず、わずかな暇を持って余っていた頃、その答えを見つけました。コピーをとったまましばらく読んでいなかった幾つかの論文の中に、またD. Fiebig氏の名前を見つけたのでした¹³⁾。彼は、先に見出したL1287水メーザーの空間・視線速度分布が、星周円盤に向かって回転しながら降着していく星周ガスエンベロープ中の分子ガスの速度場から想定されるものと良く合うと主張していたのでした。水メーザーは、そのような分子ガスが星周円盤と衝突する時に励起される、

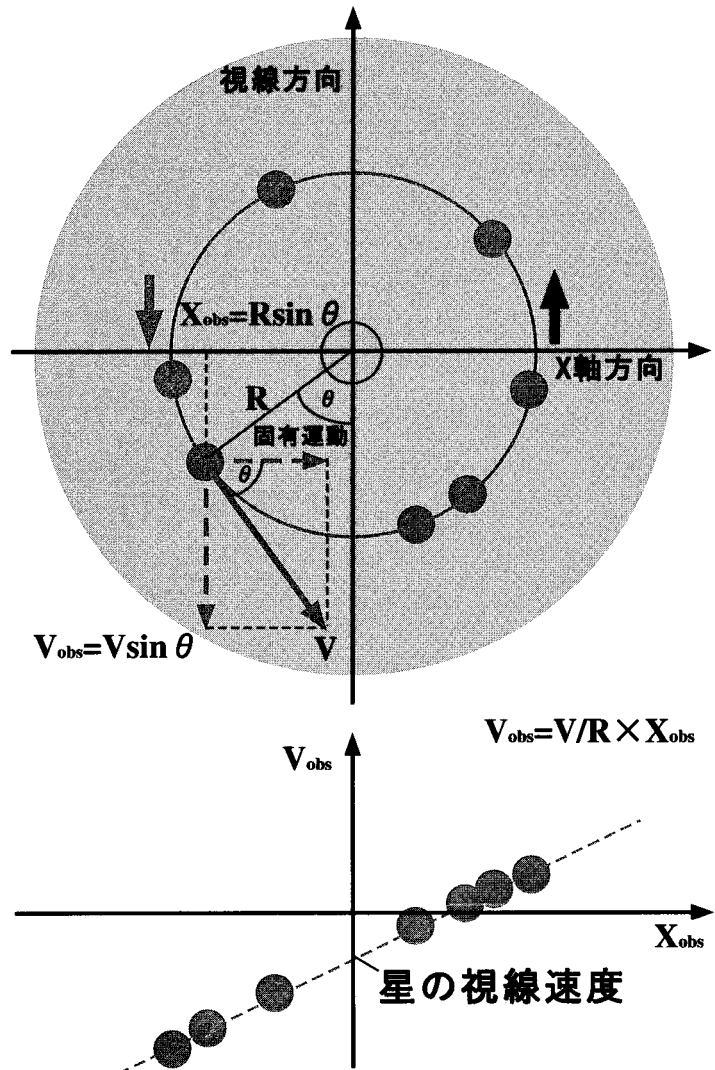


図2：上図) 回転ガス円盤とその上で中心星の周りを回転運動するメーザースポットを真上から見たときの、メーザースポットの位置と運動方向の関係。下図) 円盤上の同一半径円上で回転運動するメーザースポット群を、エッジオンで(円盤面を横から)見た時に得られる、メーザースポット群の位置・視線速度図。

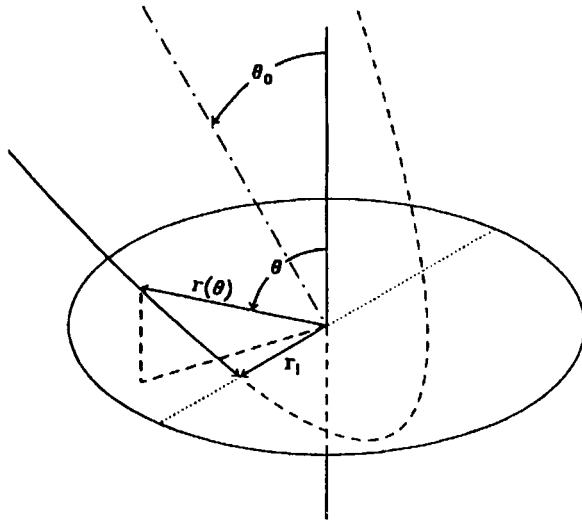


図3：ガス円盤上に向かって突っ込んでくる分子ガス塊が描く軌道。円盤回転軸に対して θ_0 の角度のついた面中を、放物線に沿ってガス塊が運動し、円盤中心にある原始星から距離 r_1 の地点で円盤と衝突する。その際、ガス塊は加熱・圧縮され、水メーザーを励起する物理条件を実現し、水メーザー放射が生み出される。図の出典は、Fiebig (1997)¹³である。

という提案です (図3)。

Fiebig氏が提案した分子ガス運動モデルの表式¹³が極めて簡単だったので、すぐにプログラムを作り、著者たちが得た水メーザーマップに良く合うモデルパラメータを探しました。その結果、図1に示す通り、複雑な水メーザースポットの空間・視線速度分布を良く再現するモデルを得ることができました。得られたモデルによると、円盤中心にある原始星の質量は0.3太陽質量程度、ガス円盤回転軸の天球面からの傾きは-55度、天球面内での方位角は80度程度になりました (原始星の系統視線速度は 4 km s^{-1} と仮定している¹⁴)。これらの結果は、双極分子流のほぼ東西方向の流れの向きや、他の分子輝線観測から推定された中心天体の質量とも、良くつじつまが合うものでした¹⁵。

見ているスケールは100 AU以下で、160 pc先の天体に対しても太陽系スケールの分子ガスの運動を直接眺めることになります。このようにして、著者たちは、水メーザー源では2例目、低質量原始星水メーザー源に対しては初めての質量降着運動の検出に成功しました。このようにして推定された、この領域での分子ガス運動の想像図を、図4に示しておきます。

6. 局所比角運動量一定の法則

著者たちとFiebig氏¹³の分子ガス降着運動モデルによると、原始星のごく近傍では、分子ガスは原始星から重力の影響のみを受けて自由落下していることになります。実はこれが、多くの低質量星形成領域で見い出されている分子ガ

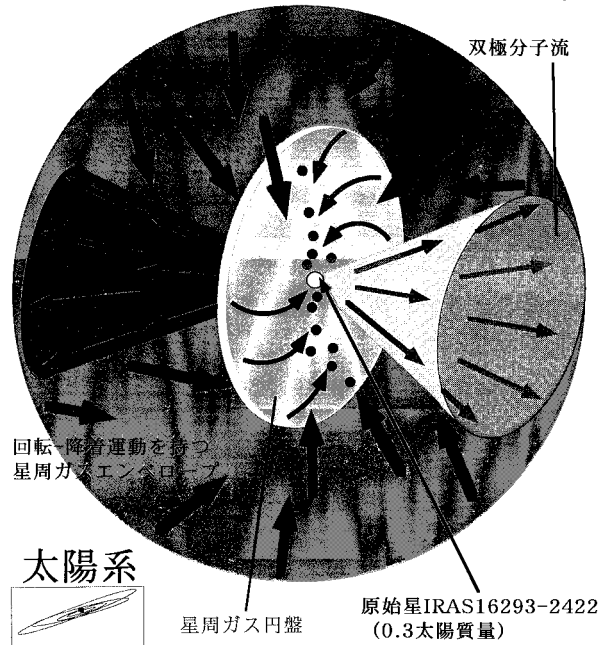
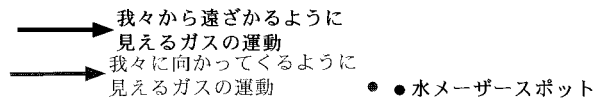


図4：原始星 IRAS 16293-2422 (A)を取り巻く、回転ガス円盤、星周ガスエンベロープ、双極分子流の想像図。

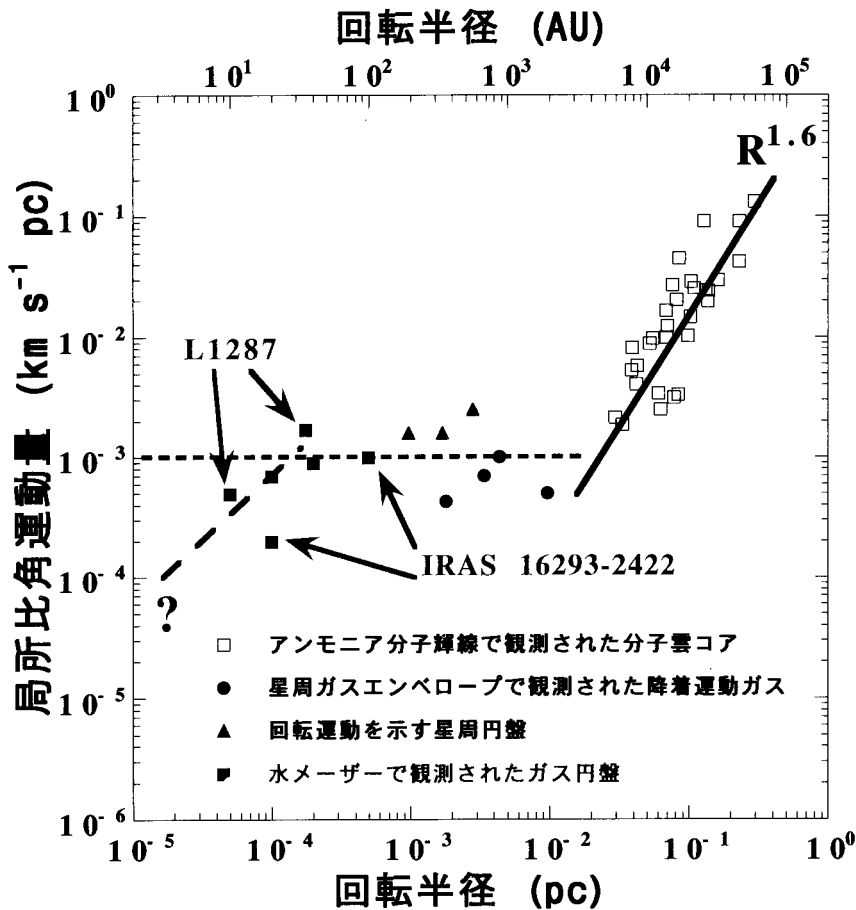


図5：様々な低質量原始星周辺分子ガスで推定された、分子ガスの局所比角運動量の原始星からの距離に対する依存性。アンモニア分子輝線で観測された分子雲コア，星周ガスエンベロープで観測された降着運動ガス，回転運動を示す星周ガス円盤に対するデータは，Ohashi et al. (1997)¹⁶を引用した。

ス円盤の運動に普遍的に当てはまるのではないかと考えられます。

著者たちのモデル提案の前に、台湾中央研究所の大橋永芳氏のグループは、おうし座領域の低質量原始星の星周ガス円盤及びその外側の星周ガスエンベロープの回転運動を統計的に調べ、原始星から半径0.03 pc以内では局所比角運動量（単位質量あたりの角運動量）が一定になる、という観測則を見つけていました（図5）。その原因として、彼らも星周エンベロープ中の分子ガスの自由落下を提案していました^{16),17)}。

水メーザーが付随する分子ガス円盤もその比角運動量一定の直線上に乗ることに最初に気付いたのは、国立天文台三鷹VSOP室の梅本智文氏でした。1998年7月に行われたNROユーザーズミーティング長期共同利用観測公聴会で、平野尚美、大橋永芳両氏のグループが、IRAS 16293-2422などを野辺山ミリ波干渉計を用いて観測することを提案してる最中でのことでした。「FiebigのL1287と君のρ Oph East (=IRAS 16293-2422) (の水メーザーで見えるガス円盤)も、specific angular momentum (=局所比角運動量)は10³ km s⁻¹ pc位なんだけどなあ」

と、眩いのでした。後日、モデルフィットの結果から計算すると、原始星から 100 AU 付近では、確かにそうなることが分かりました (図 5)。こうして、大橋氏らの見つけた比角運動量一定則は、原始星から数 10 AU から 0.03 pc の範囲では普遍的に成立しているらしいことが分かりました。ただし、著者たちが提案するモデルでは、観測される比角運動量は 100 AU の所から原始星に向かって徐々に小さくなることが予言されています。これからの観測で、原始星から 10 AU 以内での分子ガスの運動を直接眺めることができれば、星周ガス円盤や星周エンベロープから原始星に落ち込む分子ガスの運動を捉えることができ、原始星が育っていく過程を明らかにできるのではないかと、大いに期待しています。

7. 星が生まれる瞬間を見てみたい

原始星 IRAS 16293-2422 水メーザーの J-Net 観測結果は、1999 年 4 月に論文としてまとめられ¹¹⁾、レフェリー審査もサクッと通過しました。その直後の 6 月、名古屋大学で「Star Formation 1999」国際研究会が行われました。1 人 1 点というポスター掲示のルールのため、著者が掲示した別の研究ポスターの下に、「おまけの研究」としてこの研究のプレプリントを置いておきました。何の因果か、その隣に Wootten 氏たちが得た同水メーザー源の VLBA 観測結果が掲示されていました。彼らは、その短期間のモニター観測によって、個々の水メーザースポットの天球面上での運動 (固有運動) を検出していました。「水メーザースポットの固有運動を見ても、回転運動は見えないよ」と、Wootten 氏が早速反論しました。多分、回転降着ガスではなく双極分子流に付随した水メーザースポットが混じっていて、彼らはそのスポットの固有運動を測定したのではないかと、その時考えました。残念ながら、彼らの観測では固有運動を測定できた水メーザースポットが非常に少数で、著者たちが見つけた水メーザースポット群の固有運動まで測定できな

かったようです。

こうなると、さらに長期にわたって系統的な VLBI モニター観測を実行して、より詳しいこの領域の分子ガス運動を確認したくなります。興味深いことは、幾つかの水メーザースポットが原始星から 2, 3 AU 以内に存在して、分子ガスが原始星に堆積する様子を直接眺めることができるかもしれない、ということです。同水メーザー源に非常に高い関心を持つ総合研究大学院大学の古屋玲氏も、そうすべきだと激励してくれました。しかし著者としては、たとえ感度と分解能の高い VLBA を用いて何回観測しても、著者が期待するような成果が得られず、埒があかないだろうと思っています。観測する度に空間・視線速度がどんどん変化していく水メーザースポット集団から、真の分子ガス運動構造を 1 AU スケールで見い出すためには、得られたメーザーマップを同じ天球座標系上に 0.1 AU より良い精度で重ね合わせなければいけません。既存の VLBI 観測装置による通常の観測では、数 10 AU スケールの運動構造を把握するのが精一杯です。

現在著者は、このような星形成領域水メーザーの研究を継続しつつ、国立天文台が推進している VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry, 天文広域精査望遠鏡) 計画の実現に向けた基礎研究を行っています。VERA を用いて、位置基準となる遠方クエーサーと水メーザー源の同時観測を実行すれば、水メーザー源の絶対位置が 10 マイクロ秒角台の精度で測定できます。こうして、上記のようなより飛躍した水メーザー源の研究ができる、と大いに期待しています。

IRAS 16293-2422 自身は、良く発達した双極分子流が存在するので、いわゆる「クラス 0 天体」と言えども、既に進化が進んでしまった天体だと言えるでしょう。さらに水メーザー源のサーベイ観測と精密像合成観測を進め、将来「原始星が生まれる瞬間」を見てみたいものです。

謝 辞

本稿で紹介した原始星 IRAS 16293-2422 水メーザーの研究は、岩田隆浩氏（宇宙開発事業 SELENE プロジェクトチーム）、三好真氏（国立天文台 VERA 推進室）との共同研究です。両氏が行ってきた研究に私を加えていただき、貴重な経験を得ることができました。また、VLBI 観測では通信総合研究所鹿島宇宙電波応用研究室、国立天文台水沢及び野辺山 VLBI グループ、鹿児島大学 VLBI グループ、宇宙科学研究所 VSOP グループ、相関処理とデータ解析環境整備では国立天文台水沢計算機運用担当のみなさまからの多大な御協力を得ました。これらの方々に、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、大橋永芳, 1996, 天文月報 Vol. 89, No. 11, 492
- 2) 例えば, Genzel R., Downes D., 1977, A&AS 30, 145
- 3) Elitzur M., 1992, ARA&A 30, 75
- 4) Claussen M.J., et al., 1996, ApJS 106, 111
- 5) Fiebig D., et al., 1996, A&A 310, 199
- 6) 例えば, Torrelles J.M., et al., 1996, ApJ 457, L107
- 7) Diamond P.J., in Very Long Baseline Interferometry, eds. Felli M. and Spencer R.E. (Kluwer Academic Publishers, London) p.231
- 8) 三好 真, 1996, 天文月報 89, No. 1, 11
- 9) Walker R.C., 1981, AJ 86, 1323
- 10) Mundy L.G., et al., 1992, ApJ 385, 306
- 11) Imai H., Iwata T., Miyoshi M., 1999, PASJ 51, 473
- 12) Mizuno A., et al., 1990, ApJ 356, 184
- 13) Fiebig D., 1997, A&A 327, 758
- 14) Narayanan G., et al., 1998, ApJ 496, 292
- 15) Zhou S., 1995, ApJ 442, 685
- 16) Ohashi N., et al., 1997, ApJ 488, 317
- 17) 大橋永芳, 1998, 天文月報 91, No. 3, 99

Rotation-Infall Motion around a Protostar on the Solar-System Scale

Hiroshi IMAI

Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science

Division of Earth Rotation, National Astronomical Observatory, 2-12, Hoshigaoka, Mizusawa, Iwate 023-0861

Abstract: We have made VLBI observations of the water maser emission associated with a protostar, IRAS 16293-2422, using Japanese domestic VLBI network. Steady distribution of the water maser features was successfully modeled by a rotating-infalling disk with an outer radius of 100 AU around a central protostar. We found that the local specific angular momenta of circumstellar disks and envelopes are roughly constant on a scale of several 10 AU to 0.03 pc.