

水蒸気メーザー源の VLBI 観測 その 2 星形成フローの三次元運動を眺める

今井 裕

〈日本学術振興会特別研究員／国立天文台地球回転研究系電波地球計測研究部門

〒 023-0861 岩手県水沢市星ガ丘町 2-12〉

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

大質量星集団形成領域 W3 IRS5 に付随する水蒸気メーザースポット集団内の三次元運動（視線運動及び固有運動）を、米国の VLBI（超長基線電波干渉計）装置である VLBA を用いて詳細に調べました。これらの結果から、生まれたての大質量星集団中のどの星からフローを放出しているのかを、突き止めることができました。また、W3 IRS5 領域までの距離（ 1.83 ± 0.14 kpc）を、直接推定することもできました。

1. 三次元運動を眺めることができる天体とは？

計算機シミュレーションで再現される小宇宙を除くと、私達は、宇宙で起きている諸現象を立体的に把握することはほとんどなく、ほぼ平面（天球面）上で起きている現象だと錯覚してしまいます。宇宙の大構造などは、立体視できる宇宙の一例です。しかし、それらの三次元運動となると、膨張運動を除くと私達はその情報をほとんど得ることができません。

天体の視線方向内の運動は、線スペクトルのドップラー効果を用いれば、容易に測定することができます。一方、天体の三次元運動を把握するためには、天球面内での運動（固有運動）を計測しなければなりません。この計測には、1 ミリ秒角とか 1 マイクロ秒角という、極めて高い精度での位置計測を可能にする観測装置が必要です。しかしこのような装置を駆使しても、銀河系内の天体でさえも通常数ヶ月間から数年間かけて根気良く天体位置の変化を追跡しなければ、天体の三次元運

動は得られません。

その代わり、苦勞に見合うだけの成果を、必ず得ることができます。例えば、欧州宇宙開発機構（ESA）は、天体位置計測人工衛星ヒッパルコスを打ち上げ、10 万個以上の恒星に対して 3 年間の恒星位置計測を行いました。それによって、これらの恒星が銀河系の回転に乗って天球面上を流れていく様子を、鮮明に示すことができました。また、脈動変光星に見られる周期-光度関係の改訂に基づいて、宇宙距離尺度の検定なども行われました¹⁾。

本稿では、このような固有運動計測を星形成領域に付随する水蒸気メーザー（水メーザー）スポット集団に対して実施し、星形成段階で発生する分子ガス流（フロー）の三次元運動構造を明らかにしてきた、著者の研究を紹介します。

2. 水メーザースポット集団の相対固有運動の測定

水メーザーについての詳しい説明は、先の月報記事²⁾に載せてありますが、今回の話題で重要な点だけ述べておきます。1 ミリ秒角以上の空間分解能

を実現できる超長基線電波干渉法 (VLBI) を用いてこの水メーザー電波放射を観測すると、多数の非常にコンパクトなスポットの集団として見ることができます。水メーザーは、星形成領域、ミラ型変光星・OH/IR 星などの晩期型星、さらに特定の銀河中心核付近などで見られます³⁾。

1977 年から 1980 年にかけて、欧米の研究グループは、幾つかの大質量星形成領域に見られる水メーザー源に対して、VLBI を用いたモニター観測を実施しました^{4), 5), 6), 7), 8)}。これらが最初の、本格的な水メーザー源 VLBI モニター観測でした。これらの結果から、まず、生まれたての大質量星から広がっていく分子ガスフローの存在を、視覚的に確認できるようになりました。これらの領域で長期間にわたって観測された 1 つ 1 つの水メーザースポットは、このような領域にある分子ガスの運動に乗って移動することが分かったのです。見かけ上の位置変化は、典型的には 1-2 ミリ秒角/年です。さらに、それら星形成領域までの距離を、直接推定することができるようになりました。遠い天体までの距離を、いわゆる「距離梯子」を介さずに直接測定する方法は、今日幾つか実現しています。しかし、分子雲に深く埋もれてしまっている星形成領域の距離を直接推定できるのは、距離 100pc 程度の近傍星形成領域を除くと、今日でも水メーザーを用いた方法のみです。

水メーザー源の三次元運動が分かると、星形成アウトフローについて、随分いろいろな事が見えてきます。星形成の段階では、原始星に蓄積されたガスの一部が四方へ広がるフローあるいはある方向に絞られたジェットとなって再び星間空間へ吹き出されます。そのようなアウトフローがどうして、そしてどのように発生するのかは、天文学上で最も興味深い疑問の一つで、その謎を解くとなると、原始星のすぐ近くにあるガスの運動を正確に調べる必要があります。こうなると、厚い分子ガスの内部にあるこのようなコンパクトな領域を見通せ、かつ、電磁波放射領域そのものがコンパクトで上記

領域のカバー運動を精密に調べることができる、水メーザーに代表されるメーザー放射が、優れた観測対象になります。実際に観測される星形成領域では、数秒角、時には 1 秒角以下の狭い範囲に生まれたての星あるいは原始星が密集しています。ですから、三次元運動の把握は、そのような複雑な系内でもガスの運動の起源を理解するために不可欠となります。それら密集したの星々は、それぞれ進化段階も多少異なるでしょうし、それ故にアウトフローの発達段階と見かけ上の運動の様子も異なるでしょう。そういうアウトフローを 1 つ 1 つ調べていけば、アウトフローの発生と発達、そして消滅過程を時間経過を追って理解できる、と考えられます。

3. W3 IRS5 領域水メーザーの VLBI 観測

それでは、水メーザー源を観測して得られる生まれたての星からのフローとか、その結果を用いた天体距離の直接推定法とは、実際どんなものでしょうか？ その一例として本稿では、著者が研究してきた大質量星集団形成領域 W3 IRS5 に付随する水メーザーの三次元運動について紹介します。

著者達の研究グループは、1997 年春から 1998 年早春にかけて、米国国立宇宙電波天文台が所有する VLBA (Very Long Baseline Array) を用いて 3 回同水メーザー源の観測を行いました。VLBA は、大平洋ハワイ島から西インド諸島プエルトリコ島にまたがって直径 25 m の電波望遠鏡を 10 台展開した、VLBI 装置群のことです。著者達の観測では、空間分解能が約 0.35 ミリ秒角まで達成されました。そして、個々の水メーザースポットの合成像を得た後に、それらの相対位置を 10 マイクロ秒角の精度で測定することができました。これだけの像合成能力と位置決定精度があると、1 つ 1 つのスポットの形の変化や位置の変化 (固有運動) を追跡することができます。このようにして得られた

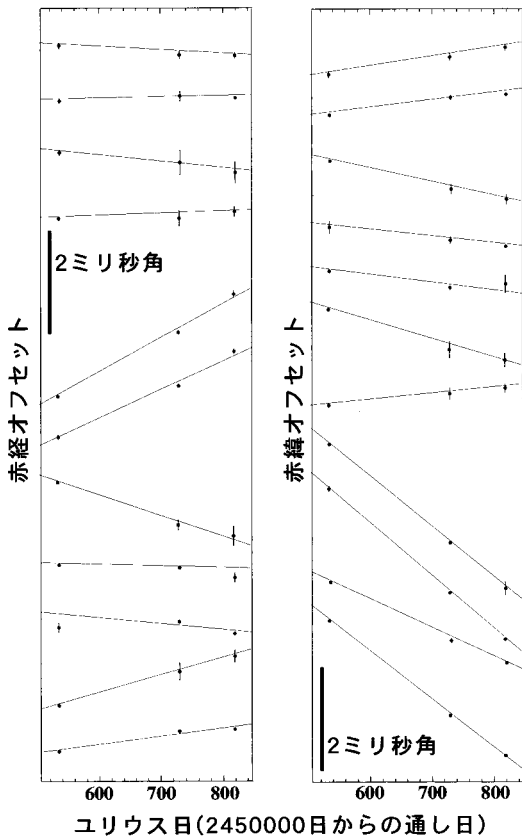


図1：VLBAを用いて3回観測して得られたW3 IRS5領域の水メーザースポットの固有運動。VLBA観測は、1997年3月26日、10月8日、1998年1月5日に実施された。

スポットの固有運動を、図1に示しておきます。

これらスポットの分布と三次元運動（視線速度+固有運動）を、図2に示します。W3 IRS5領域では、生まれたての大質量星の所在を示す見かけで0.2秒角程度の大きさを持つ連続波電波源⁹⁾の密集集団として観測されています。水メーザースポットが示す運動は、この領域のガスの運動そのものを示しています。この運動を良く調べると、少なくとも2つの地点から膨張しているフローが存在することが分かりました。しかもその地点のすぐそばには、上述した連続波電波源が必ず存在しており、これらの電波源からフローが吹き出ていることが推定されました。

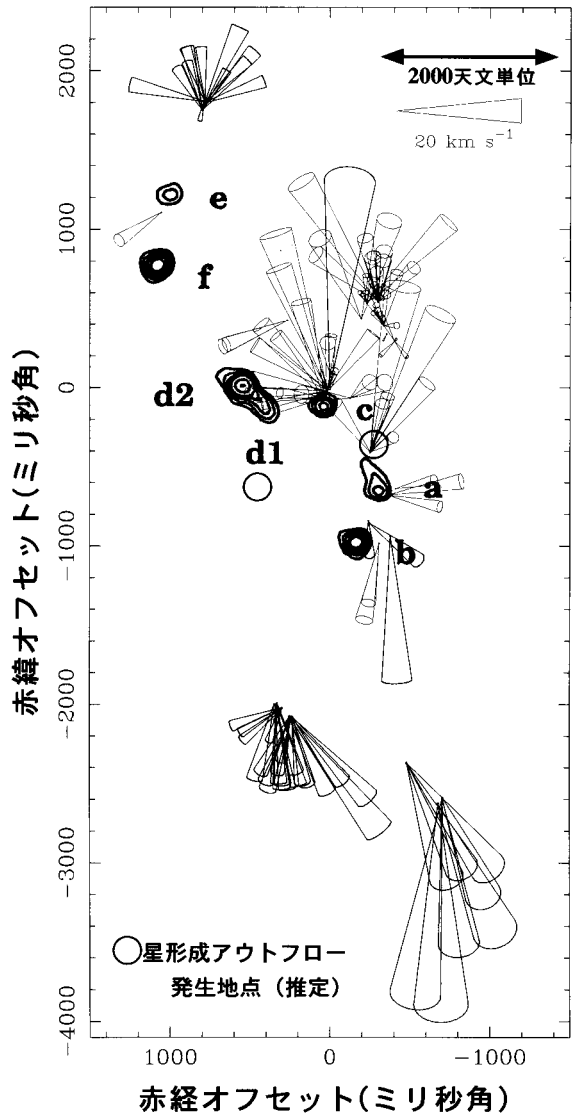


図2：W3 IRS5領域で観測された水メーザースポットの分布と固有運動。コーンの先端にスポットが存在し、コーンが伸びている方向にスポットが運動していることを示す（実際の運動を325倍に拡大してある）。黒色・青色のコーンは、それぞれスポットが私達から遠ざかる、あるいは近付いていることを示す。図中の等高線は、Claussen等⁹⁾が見出した15GHz帯連続波電波の強度分布で、生まれたての大質量星の周りで電離されたガスの存在を示す。

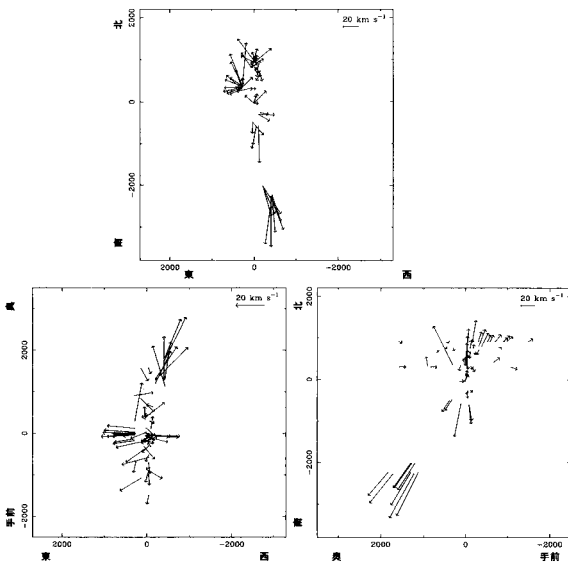


図3：W3 IRS5 領域の西側で確認されたアウトフロー A 内部の水メーザースポットの三次元運動。スポット視線方向内での位置は、モデル計算の結果から推定されたものである。

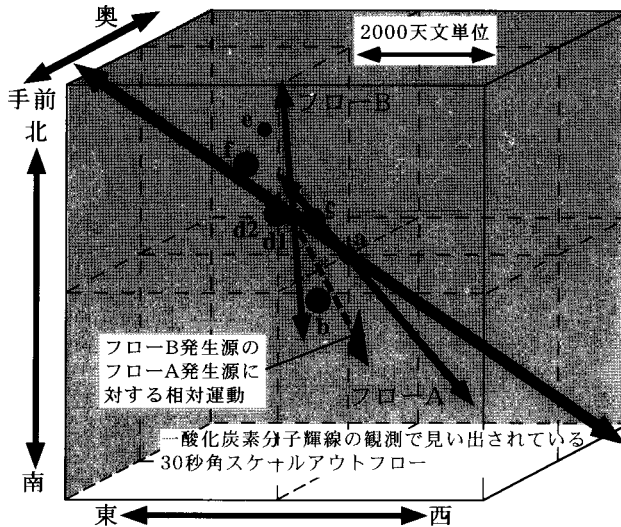


図4：W3 IRS5 領域の大質量星（連続波電波源）⁹⁾及び各種フローの向きの空間的な関係を示したポンチ絵。これらの前後の位置関係は不明。フロー A（多分発生源は電波源 “a”）はほぼ北北東手前から南南西奥の方向で、フロー B（多分発生源は電波源 “d1” か “d2”）は北北東から南南西で天球面に沿った方向で吹いている。一方、一酸化炭素分子輝線の観測で確認されているフロー¹¹⁾は、北東手前から南西奥の方向で吹いている。また、フロー B の発生源はフロー A の発生源に対して北手前から南奥の方向へ相対的に移動していることが推定された（点線矢印、速度は東西、南北、視線それぞれの方向へ $0.9 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$, $6.1 \pm 2.0 \text{ km s}^{-1}$, $6.1 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$ ）。

しかしこの時点では、スポットの三次元速度は把握できても、スポットの三次元空間中での位置が、まだ把握されていません。このような位置を把握するために、確認されたフローがその発生源から球対称的な速度場に従って膨張するモデルを仮定し、スポットの運動ベクトルからスポットのフロー発生源との三次元相対位置ベクトルを計算してみました。このモデルでは、これら2つのベクトルがほぼ平行になるはずですが、それらの結果のうち、W3 IRS5 中で西側に存在するフロー（フロー A）について得られたものを、図3に示しておきます。

図3のように、三次元空間の三方向からフローの運動を眺めてみると、次のようなことが分かります。まず、基本的に分子ガスは、発生源から四方八方に膨張しているのですが、特定の方向にのみより速度が大きく広がったフローを形成し、いわゆる「双極的フロー」を形成していることです。次に、必ずしも放射状の運動のみしている訳ではないことです。これは、このようなフローが周辺の分子ガスと激しくぶつかり合いももとの運動がかき乱されているからです。水メーザは、このような現場で励起されるのです²⁾。さらに、発生源から遠くなる程より高速度で動くスポットが混じってくることです。この現象は、分子雲の中をかき分けながら進むフローの中で見られる、見かけ上の加速現象です¹⁰⁾。

図3のような解析を W3 IRS5 で東側に存在するフロー（フロー B）についても実施し、W3 IRS5 領域のフローの位置や向きを図示したのが、図4です。これら2つのフローは、多少方向が異なるもののお互いにはほぼ平行で、既に見い出されている一酸化炭素分子輝線で見えるフロー¹¹⁾とも平行です。また、前者2つのフローの発生源は、

相対的にフローの向きに対してはほぼ垂直方向の運動を持っていることが分かりました。前者2つのフローに関するこれらの観測事実から、1つ重要な考察ができます。

星が集団で生まれてくることは観測的にも理論的にも良く知られていることですが、その形成過程における母胎の分子雲の収縮・回転の様子は、太陽近傍にあって観測的に研究が進んでいる中小質量星の形成に対してのみ明らかにされてきました。ところが、W3 IRS5 などの大質量星形成領域での星形成では、分子雲内部の静的な進化とは異なり、分子雲外部からの影響を大きく受けて異なる分子ガスの運動に作用されて、大質量星が形成されやすい高温・高密度の分子雲コアを作ることが言われてきました¹²⁾。今回の結果では、そのように星形成の初期条件は異なるものの、星が形成されるまでの母胎の分子雲コアの進化が、形成される星の質量に関係なく同じ経路を進むのではないかということが伺えます。つまり、まず分子雲コアの回転軸との垂直面に分子ガスが蓄積し、パンケーキのような構造になった分子雲コアがさらに分裂して星の集団を形成する、ということです¹³⁾。同時にアウトフローは、どの星からのものも、もともとの分子雲コアの回転軸とはほぼ平行に揃うことが、伺えるのです。

4. 星形成領域までの距離の直接推定

著者達の水メーザーの研究から、星形成領域 W3 IRS5 までの距離もまた直接推定することができました。図3を作成する段階で、距離を求めることができます。天球面上でのメーザースポット群の運動は、見かけの固有運動から天体の距離に比例して大きく見積もられます。球対称の速度場を仮定した時点で、視線速度と天球面速度の平均的な値（ここではフローの膨張速度がそれに相当する）が大きく異なるはずがないことになりますから、ある適当な距離を当てはめなければ球対称の速度場を再現できません。球対称の速度場を仮定する

ことの妥当性は、他の水メーザー源の VLBI 観測などから、既に示されています^{4), 7), 8)}。こうして得られた W3 IRS5 までの距離は、 1.83 ± 0.14 kpc となりました。1 kpc を超えて星形成領域までの距離を直接推定したのは、これで5例目です。銀河系の中で星形成領域は100以上確認されているのにも関わらず、他の領域までの距離は依然不確定性が大きいのです。距離推定において、銀河系のサイズや回転速度分布の仮定に基づいた手法（運動学的距離）や、その星形成領域のすぐそばにある星団の距離を代用したりする方法は、不確定性が大きいものです。私達は、星形成領域の分布から銀河系が渦を巻いていることを推定していますが、その描像はまだまだおぼろげなものと言わなくてはならないでしょう。

5. 水メーザー源の年周視差・内部加速運動を測定してみたい

1993年著者は、水メーザー源の VLBI 観測に基づく研究に感動しました。星の生まれる現場を知りつつ、私が最も興味を抱いていた銀河系を広く見渡すことができるということを知り、さらに、ひたすら位置を高精度で測定するという、その手法の単純且つ高い信頼性に感動したのでした^{7), 8)}。1年後、その手法を自分のものとすべく、本稿の研究に着手しました。今年、その一部が完結し、当初の目標を達成できました。

これから何をやろうかと考えたとき、やっぱり水メーザー源の研究はしばらくやめられそうにないと思うのでした。次に目指すのは、水メーザー源の年周視差・内部加速運動の測定です。本稿で紹介した固有運動測定では、ある特定のスポットを不動点とみなして他のスポットの位置変化を追跡する、という手法を採用してきました。しかし本当は、この特定スポットも運動しています。その運動には、星形成研究に関する重要な情報、星形成フローの加速運動やヘリカル運動、星周ガス円盤上の向心

力による加速運動が含まれているのです。天体距離測定も、10マイクロ秒角の測定精度があれば、10kpc先の天体までの距離も年周視差を使って一発で測定できるはずなのです。本稿での手法を脱却する有効な方法として、銀河系外の位置基準天体(QSO)とこれら水メーザー源をほぼ同時に観測し、これらの相対離角を精密に測定する手法が注目されています。この手法を実現すべく、国立天文台ではVERA(VLBI Exploration of Radio Astronomy, 天文広域精査望遠鏡)計画が、本格的にスタートしました。ハード・ソフト上での問題点を克服して、上記の測量を是非自分の手でやってみたいと思います。

謝辞

本稿で紹介した著者の研究は、国立天文台の亀谷 收, 笹尾哲夫, 三好 真, 出口修至, 堀内真司, 及び宇宙研の朝木義晴各氏との共同研究です。また、東北大学の関宗蔵教授の指導に基づいて、著者の博士論文の一部としてもまとめられました。データ解析におきましては、国立天文台水沢観測センターの石川利昭, 田村良明両氏と東北大学の学生諸君の御支援をいただきました。この場を借りまして、関係者のみなさまに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば, Feast M., Whitelock P., 1997, MNRAS 291, 683
- 2) 今井 裕, 2000, 天文月報 93, No. 1, 16
- 3) レビューとしては, Elitzur M., 1992, ARA&A 30, 75
- 4) Genzel R., Reid M.J., Moran J.M., et al., 1981, ApJ 244, 884
- 5) Genzel R., Downes D., Schneps M.H., et al., 1981, ApJ 247, 1039
- 6) Schneps M.H., et al., 1981, ApJ 249, 124
- 7) Ried M.J., et al., 1988, ApJ 330, 809
- 8) Gwinn C.R., Moran J.M., Reid M.J., 1992, ApJ 393, 149
- 9) Claussen M. J., et al., 1994, ApJ 424, L41
- 10) 例えば, Masson C. R., Chernin L. M., 1992, ApJ 387, L47
- 11) Mitchell G. F., Hasegawa T. I., Schella J., 1992, ApJ 386, 604
- 12) 例えば, Lada C.J., 1987, Star Forming Region, eds. Peimbert M., Jugaku J., IAU symposium 150, p.~1
- 13) 例えば, Nakamura F., Hanawa T., Nakano T., 1995, ApJ 444, 770

Three-Dimensional Motions of Outflows from Young Stellar Objects

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 measured the three-dimensional (radial and transverse) motions among water vapor maser spots associated with the massive-star forming region W3 IRS5. Using USA NRAO's Very Long Baseline Array (VLBA), we measured variation in the spatial positions of the maser spots with accuracy of 10 microarcseconds. We found at least two originating points of outflows from the independently-formed massive stars within a scale of 3" (6000 AU). We directly estimated a distance to the W3 IRS 5 region as 1.83 ± 0.14 kpc.