

大質量星形成領域からのアウトフローは磁気流体「2成分」モデルを支持するか？

堀内 真司

〈国立天文台 VSOP 室 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: horiuchi@hotaka.mtk.nao.ac.jp

星形成領域等で観測されるコリメートされたフローやジェットは、はたして中心星の回転と磁場の存在がなせるワザなのでしょうか。岡本さんは磁気流体 (MHD) 運動方程式の一つである Trans-field 方程式の厳密な議論をおこなった結果、回転星からの磁気遠心力風は、従来の説で言われていたようなそれ自身だけではコリメートできず、回転軸方向にコリメートする場合は必ず赤道面方向に拡がる別のフローを伴わなければならない、と主張しているようです¹⁾。本稿では岡本さんが自説「2成分モデル」をサポートする具体的な観測例として唯一引用している大質量星形成領域オリオン KL のアウトフロー²⁾について一般読者や MHD 理論家の方々に紹介し、はたしてモデルと本当に矛盾しないかどうか検証する手助けになればと思います。

1. オリオン KL の「円すい型」および「赤道面型」アウトフロー共存系

オリオン分子雲中にあるオリオン KL 領域は、太陽よりもはるかに重い星が生まれつつある領域の典型として、多くの研究がこれまでなされてきました。とくに距離が 450 パーセクと比較的近いことから、もっとも人気のある観測的研究のターゲットの一つとってよいでしょう。しかし、この領域には大変面白い若い星や原始星が存在するものの、厚いダストやガスに覆われているため、星のすぐまわりの環境がどうなっていて、星形成理論で論じられるような降着円盤や双極分子流と形成中の原始星が実際どうなっているのかを観測的に調べることは大変難しい問題です。幸い観測技術の進歩によって、ごく最近になって、ようやく様子がわかり始めつつあると言えるようになりました。

オリオン KL 領域は毎秒 5 万エルグ以上ものエネルギーを多様な分子輝線放射の形で放出しています。これらの分子輝線の観測からわかることは、活動の中心付近のまわりには大きさ 1 分角 (0.14

パーセク) の大規模スケールで二種類の双極分子流が存在していることです³⁾。一つは速度 18km/s ほどの低速成分で、中心付近から北東-南西方向に拡がっています。もう一つは速度が 30-100km/s 程度の高速成分で、低速成分とは直交する北西-南東方向に対称的にひろがっています。そしてこれらの二つの分子流の中心に位置し、活動の中心源になっていると考えられているのが、電波源 I とよばれる、厚いガスに覆われた連続波電波源で、多波長観測の結果は直径 60AU 程の H II 領域であることを示唆しています⁴⁾。それではこの電波源 I のすぐまわりはどうなっているのでしょうか? 原始惑星円盤のようなものは存在するのでしょうか?

実は電波源 I が中心活動源と認識されるよりも前に、この近くには半径 1 秒角以下 (約 500AU) という狭い領域に集中した、一酸化ケイ素レーザーと水レーザーのスポットのクラスターがあることが知られていました³⁾。星形成領域でのレーザー放射の性質については今井 裕氏の天文月報記事⁵⁾に紹介されているので詳しく論じませんが、ここでは一般的に言ってアウトフローに付随したものとデイス

クに付随したものと2種類に分類できるようであることを強調しておきたいと思います。Plambeckら⁶⁾は結合素子型電波干渉計の観測から、オリオンKL一酸化ケイ素メーザーの各スポットの分布は回転リング構造であることを示唆していました。しかし最近になってGreenhillら²⁾とDoelemanら⁷⁾はそれぞれ独立に、アメリカ国立電波天文台(NRAO)のVLBIアレイ(VLBA)による0.2ミリ秒角(0.1AU)の精度の観測から、実は一酸化ケイ素メーザー分布はラージスケールの高速度成分と同じ北西-南東方向の双極流構造であることを示しました。水メーザーのクラスターについては、それまで速度構造を示した例はありませんでしたが、Greenhillら²⁾は同じ論文の中でさらに、2エポックのNRAO超大型干渉計(VLA)観測結果から固有運動を測定し、水メーザーは低速度双極分子流の方向である北東-南西方向に20 km/s程度の速度で膨張していることを示しました。それらの結果から彼らは図1のような、一酸化ケイ素メーザーに象徴される「円すい型」および水メーザーに象徴される「赤道面型」の二つのアウトフローの共存系構造を示しました。中心付近の円すいに乗っかっているスポットが一酸化ケイ素メーザー、まわりにドーナツ状に広がるのが水メーザークラスターで、二つの円すいの頂点に位置するのが電波源Iです。これらの結果から彼らは、電波源Iがこの領域のアウトフローの駆動源であることを示唆しています。ただし「円すい型」の高速流が実際にどんな3次元運動をしているかは、マルチエポックでの一酸化ケイ素メーザーのVLBI観測結果を待たねばなりません。

余談ですが、Greenhillらの論文が出る1年半ほど前に私は電波源Iのまわりにある水メーザークラスターがはたして回転運動しているのか、そしてそれは降着運動しているのか膨張運動なのかに関心を持ち、共同研究者であるV. Migenes氏(当時、国立天文台客員研究員)がかつて観測した1989年のVLAデータと比較すべく、1983年のVLAのアーカイブデータ(観測後一定期間が経つと一般の

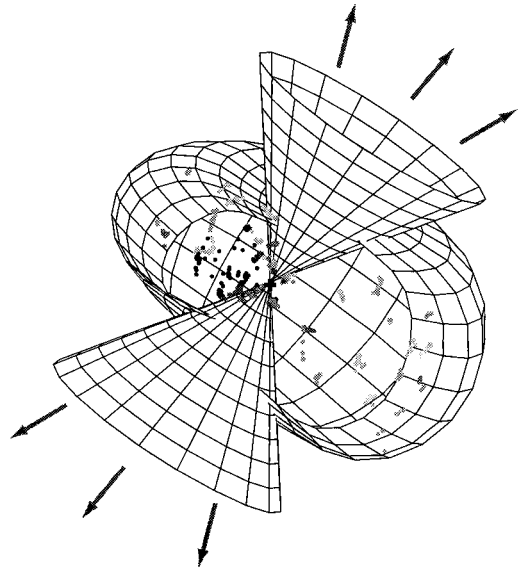


図1 オリオンKL領域の活動中心である電波源Iの周辺のメーザー分布と2成分アウトフローモデル(Greenhillら²⁾による)。二つの円すい形の表面に一酸化ケイ素メーザーが分布し、高速双極分子流をあらわし、ドーナツ型の表面に水メーザーが存在して「赤道面型」の低速分子流をあらわす。ドーナツは半径360AU、厚さ270-320AU程度と考えられ、わかりやすくするため断面が描かれている。二つの円すい形の外側の矢印はそれぞれ大規模スケールの高速分子流の向きにほぼ一致する。

天文学者に希望に応じて公開されるもの)をNRAOから取り寄せました。アーカイブデータを使用するときは礼儀としてその観測の観測提案者(PI)に承諾を得ることが慣例となっているので、1983年のオリオン観測のPIであるMark Read氏に国際会議で会ったときにその旨を告げると快く承諾してくれました。しかしNRAOから直接データが届いてしばらくすると、面識のないGreenhill氏からRead氏の観測の解析担当者と称してメールが届き、「アーカイブデータを欲しがったそうだけど、手元にDATテープがあるからまだ入手してなかったら送ろうか」といってきました。もちろんその時はすでにデータを入手していたので、その旨を告げて断りましたが、その後、解析していく過程でいろいろデータ上の不備が見つかり、何度か彼とデータについてメールをやり取りしました。水

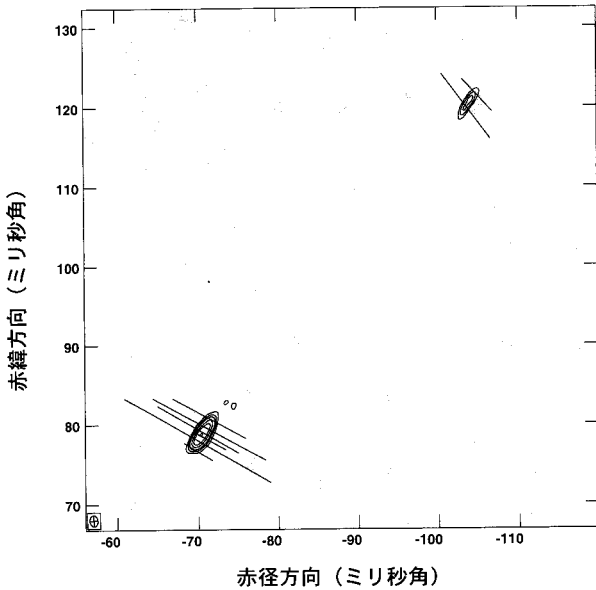


図2 オリオン KL 領域の隣接する水メーザースポットの偏波構造の例 (堀内ら⁸⁾による 1997 年 2 月の VLBA 観測結果から). 星間空間の水メーザーはヒモ状に分布することが多いが, このオリオン KL 領域の観測により隣り合うスポットの偏波プロファイルは似ていることが多いことがわかった. このことはメーザースポットが大局的な磁場に支配されていることを強く示唆している. 図は電波源 I から南西に約 6 秒角 (約 3000AU) ほど離れたメーザースポットのマップで, コントアはトータル強度, コントア上の棒線の長さ, 角度がそれぞれメーザー放射の直線偏波率, 偏波角をあらわす. トータル強度は 30 ジャンスキー以下と, この領域のメーザーには極めて微弱ながら, 偏波率はいずれも約 70% ほどで, 二つのうち下のスポットが, この観測の 10 ヶ月後にメーザーバースト現象を起したことが, バースト中の VLBI 観測との比較でわかった. メーザースポットの並びが図 1 の円すい形フローと同様, ラージスケール的高速双極分子流の方向と平行であることに注意.

メーザークラスターが膨張運動していることは, 約 6 年の間がある二つの観測データを自分で解析してみてもすぐわかり, 国内の研究室セミナーなどで話したりしました. しかし有意な回転構造はみられず, どう論文化しようかいろいろ考えているときに, Greenhill らの Nature 論文が現れ, 自分が使ったものと同じ観測のアーカイブデータを使ってメーザーの固有運動を示しているのを見てショックを受けました. あとあとと思うと, こっちがやろうとしていることは全部お見通し(筒抜け?)だったのかもしれない. 研究者社会の競争の厳しさを思い知られた苦々しい経験でした.

2. 磁場はどれだけ効いているか?

さて, 本題に戻ると, オリオン KL の「円すい型」および「赤道面型」アウトフロー共存系は岡本さんの MHD 流「2 成分モデル」を支持するものとなっているのでしょうか? まず, この系が MHD 的である, すなわちフローが磁氣的にカップルしているということが大前提になります. そのうえで, 磁場の形状がどうなっているのか知りたいところです.

星形成領域の水メーザーは多くの場合, 強く直線偏波していて, この原因が磁場にあるという解釈に立つと, これらの情報から数 AU から数百 AU スケールでの磁場構造についての情報を得ることが期待されます.

我々は 1997 年 2 月の VLBA 観測によりオリオン KL 領域の水メーザーの偏波マッピングを試みました⁸⁾. その結果, 低速成分のアウトフローに付随する広い領域に拡がったメーザーは強く偏波しているスポットが多く, 偏波している成分は隣り合うスポットどうし, 類似の偏波率, 偏波角を共有することがわかりました. このことはメーザー放射を起している個々の分子雲の塊(メーザースポット)が大局的な磁場に支配されていることを示唆しています. 図 2 に電波源 I から南西に約 6 秒角 (約 3000AU) ほど離れたメーザースポットの偏波マップを示します. これらのスポットは強度は微弱ながら, この観測中もっとも強い 70% ほどの偏波率を示していました. ここで興味深いのは, このスポット群のならば, および各スポットの広がり方向が図 1 のアウトフローと同様, 大規模ス

ケールの高速成分の双極分子流の方向に平行であることです。このメーザースポットの周辺には他にもいくつものスポットが集中していることから、おそらくこの領域のメーザーは、電波源 I がある中心付近から北東-南西方向にのびる低速度のアウトフローが、さらに外側にあるとされる大規模スケールの分子トラス構造の内壁にぶち当たった衝撃で励起されているのではないかと推測されます。

ちなみに、鹿児島大学にある 6 m 電波望遠鏡のグループは 1997 年暮れ、ある速度成分の強度が数ヶ月で二ケタ以上上昇するという水メーザーバースト現象を発見しました⁹⁾。その後、筆者らの研究で、図 2 の下のスポットが後にバーストするスポットであることがわかりました⁸⁾。このスポットの偏波特性はバーストのピークである 1998 年秋ごろより堀内と亀谷により国立天文台水沢観測センター 10 m 電波望遠鏡でモニターが続けられ、バースト後も強い偏波率を保ち続けながら弱くなっていくことが確認されました¹⁰⁾。

さて、強く直線偏波する水メーザースポットがたくさんある一方で、肝心の中心付近の電波源 I のすぐまわりの水メーザークラスターは、ほとんど偏波していないことが我々の観測からわかりました⁸⁾¹⁰⁾。このことはいったい何を意味するのでしょうか？これを説明するには、大きくは二通りの考え方ができると思います。一つ目は、水メーザーの偏波はメーザーの励起機構、増幅機構に密接に関係があって、電波源 I の周辺のメーザーと低速成分のアウトフローに付随するずっと外側のメーザーでしくみが異なるかもしれないということ。星形成領域では一酸化ケイ素メーザーというのはオリオン KL 以外にほとんど見られませんが、晩期型星では水と一酸化ケイ素のメーザーが混在するケースが多くあり、また晩期型星の水メーザーはほとんど偏波していないことから、電波源 I のまわりは晩期型星と類似の環境になっていることが考えられます。もう一つの考え方は、メーザースポットの近傍ではメーザー放射は強く偏波しているものの、伝搬過程で消

偏波を受け、観測ではわからないのかもしれないことです。このような効果が起こるためには、電波源 I の周辺だけ他の領域より電子密度が濃く、偏波角が波の伝搬とともに回転するファラデー回転効果が強いことが条件になります。実際、筆者らの研究によると、電波源 I の周辺の水メーザースポットは通常より大きくて形状もゆがんだものが多いことがわかり、星間空間の電子による散乱効果と類似の現象がおこっていることが想像されます。もし後者の解釈が正しいとすると、電波源 I の周辺が磁化されていてアウトフローが MHD 的に駆動されている例としてふさわしいかもしれません。しかし、メーザー偏波の起源を解明し、磁場構造を再現することは、いぜん今後の課題と言えるでしょう。

3. おわりに

以上、オリオン KL のアウトフローの 2 成分構造について自分の研究とからめて簡単に紹介してきました。最後にコメントしておきますと、忘れてはならないのは、オリオン KL のような例は星形成領域などではかなり特殊で短い進化段階の現象かもしれない、ということです。上にも述べましたが、このようなきれいな円すい形の一酸化ケイ素メーザーのアウトフローが存在する星形成領域は、他には知られていません。また水メーザーについては、原始惑星系円盤を示す構造がぞくぞく見つかり出ていますが(たとえば今井 裕氏の天文月報記事⁵⁾を参照)、いまのところ、そのほとんどはアウトフローではなく、降着ファイズにあるようです(ただしこれまで議論されているのはメーザースポットの 2 次元的な速度構造だけで、近い将来、高い分解能のマルチエポック観測により固有運動が計測されてオリオン KL のような赤道面アウトフローが見つかる可能性は残されている)。また、岡本さんの議論の枠組みは定常軸対称の仮定の下での回転磁化星からのアウトフローということですが、定常性という仮定を進化しつつある宇宙のなかでの現象にどれだけ適用してよいのか、ということも見過ごし

てはいけない問題だと思います。実際、銀河系外のクェーサーなどで観測されているジェット現象を見ると、ジェットがまっすぐきれいに伸びているのではなく、間欠的になっていたり、うねうねが見られるものが多くあります。たとえば活動銀河中心核 3C147 (赤方偏移 0.545) は強い電波を放出する電波クェーサーですが、数 10 pc 以下の小さいスケールから 500 pc 以上の大きなスケールまで同じ方向にジェットが噴出しているものの間欠的な構造になっている特徴があります (表紙の図参照)。これらの間欠性はジェットの中心駆動源である降着円盤の時間変動の激しいエネルギー供給に原因があるのかもしれません。なお、この天体では VLBA などの偏波観測から、ジェットの根元付近の磁場構造がジェットに垂直方向の向きを持っていることがわかっており¹¹⁾、相対論的な衝撃波が生じてジェットが明るく輝いていることが示唆されています。あるいは解釈のしようによっては、磁場によりジェットが絞り込まれているようなシナリオに合致するといえなくもありません。これらの現象を正しく理解するには、最終的には定常軸対称という制限を受けない理論形式が必要になるのかもしれません。今後、これらの多様な観測結果と折り合いをつけて、宇宙にあらゆるスケールで存在する強くコリメートされたジェットを統一的に説明することが、いまの MHD 理論に求められていることではないかと思えます。

Lynden-Bell 氏は最近、Magnetic activity in stars, discs and quasars というディスカッション会合を組織しました。そして、その収録では自身による冒頭レビュー¹²⁾の降着円盤風のコリメーション問題の節を "In a delightful swashbuckling samurai manner Okamoto (1999) has criticized everyone in sight over their proposed collimation mechanisms. 'How are jets collimated?' is still a live question." と結びました。これまでの理論をかたっぱしから斬り捨てる岡本さんのサムライ的な仕事を紹介して、この問題が未だ未解決であることを強調しています。私もかつて岡

本さんをはじめ多くの方が取り組んできたこの問題の理論的な側面に魅せられました身です。今回の天文月報での議論を期に、私も岡本さんとはまた異なる角度で、この問題の解決のためにささやかな貢献ができたかと決意をあらたにしました。最後にこのような機会が与えられたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡本 功, 2000, 天文月報, 93, 3, 134
- 2) Greenhill L.J., Gwinn C.R., Schwartz C., Moran J.M., Diamond P.I., 1998, Nature, 396, 650
- 3) Genzel R., Stutzki J., 1989, ARA&A, 27, 41
- 4) Plambeck R.L., Right M.C.H., Mundy L.G., Looney L.W., 1995, ApJ, 455, L189
- 5) 今井 裕, 2000, 天文月報, 93, 1, 16
- 6) Plambeck R.L., Right M.C.H., Carlstrom J.E., 1990, ApJ, 348, L65
- 7) Doeleman S.S., Lonsdale C.J., Perkey S., ApJ, 1999, 510, L55
- 8) Horiuchi S., Migenes V., Deguchi S., 2000, in Eds. Hirabayashi H., Edwards P.G., Murphy Q.W., Astrophysical Phenomena Revealed by Space VLBI, Institute of Space Astronautical Science, 105
- 9) Omodaka T., Maeda T., Mochiduki N., 1998, IAU Cir 6893
- 10) Horiuchi S., Kameya O., 2000, PASJ, 52, 545
- 11) Nan R.D., Zhang H.Y., Gabuzda D.C., Ping J.S., Schilizzi R.T., Tian W.W., Inoue M., 2000, A&A, 357, 891
- 12) Lynden-Bell D., 2000, Philosophical Transactions of the Royal Society, series A, 358, 635

Do outflows from the high-mass star-forming regions favor MHD two-component structure?

Shinji HORIUCHI

National Astronomical Observatory, Tokyo 181-8588

Abstract: Coexisting conical bipolar and equatorial outflows from the high-mass protostar in Orion-KL have recently been discovered. We discuss the argument by Professor Okamoto that this two-component outflow lends support to his claim that all previous MHD wind theories are wrong in suggesting self-collimating MHD flows.