

「星周ガスと原始星の進化」

齋藤正雄

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-13 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

e-mail: masao@nro.nao.ac.jp

2年間に渡り、野辺山宇宙電波観測所のミリ波干渉計を用いて太陽質量程度の原始星を10個観測しました。この観測の狙いは、原始星に付随する高密度星周ガスの性質と原始星の進化の関係をつかむことです。観測の結果、一口に原始星と呼ばれる天体の中にも様々な進化段階のものがあること、そしてその進化が進むにつれ分子流による散逸、質量降着などのプロセスによって高密度星周ガスを減少させるということをつきとめました。特に、原始星がまだまだこれから質量を増加させるものから、かなり最終的な質量に近いものへと進化を経るということを観測から示すことによって、原始星の進化シナリオは物理的に明解になりました。

1. はじめに

私たち人間はいつも自分の起源というものを本能的に追いつめていく生物という気がします。あるときは、宇宙の始まりであったり、銀河系の誕生であったり、星の誕生、地球の誕生、生命の誕生、人類の誕生などに対して好奇の目を向けています。そしてそれぞれの起源、誕生、進化といったものに対応した学問が多く研究者によって精力的に進められています。今回は、その中でも私たちの太陽の誕生と密接に関わる、生まれたばかりの星の進化についてお話しします。夜空を見上げると、様々な色、明るさの星が輝いています。これは宇宙には多様な星があるからです。ここではとても全ての種類の星について扱うのは無理なので、以下では太陽と同じくらいか、あるいはそれより少し軽い低質量星と呼ばれる星について述べます。これらの若い低質量星の研究は星の誕生、進化といった天体物理学の基本的課題というだけでなく、惑星系形成などとも大きく関わる地球物理学的にも興味深い分野です。

低質量星は宇宙に漂う暗黒星雲の中でも比較的

密度の高い領域、分子雲コア、で生成されると考えられていました。実際に、この分子雲コア方向に赤外線衛星や赤外線望遠鏡を向けてやると、可視光ではその姿を現すことのない、分子雲コア中に深く埋もれた赤外線源（原始星）が数多く見つかってきました。これまで取得された可視のデータと併せ、低質量星は周囲のガスを中心に降り積もらせて成長しつつある原始星（以後クラスI天体）と呼ばれる段階から周囲のガスを消失させた、可視光で見えるTタウ型星（以後クラスII天体）と呼ばれる段階へと進化すると考えられるようになりました¹⁾。また電波の観測からも、クラスI天体はクラスII天体に比べて多くの高密度ガスを付随させていることが確認され²⁾、この進化シナリオは広く受け入れられてきたわけです。ところが1993年に電波観測から、赤外線でも認識できないほど分子雲深く埋もれた冷たい天体、サブミリ波天体、が発見されました。発見したグループはこのサブミリ波源がこれまでの赤外線天体よりさらに若い早期原始星だろうと提案しました³⁾（以後クラス0天体）。その後もクラス0天体は数多く発見され、早期原始星の研究対象として注目を集めてきました。

しかしながら、クラス0とI天体は共に周囲のガスを集めつつ成長していく原始星という点で共通しており、その物理的相違は明確でないという批判がありました。さらに、どの波長域で認識されるかということは天体を取り巻く星周物質と観測者の幾何学的関係に大きく依存するため(円盤を真上から見るのと横から見るのでは視線方向の物質の量が違います)、赤外線天体、サブミリ波天体という区分を疑問視する研究者が少なくありませんでした⁴⁾。また原始星は周囲の物質を降着させ、自分自身の質量を増加させていきます。それでは、原始星はいつまで質量降着を行っているのでしょうか、どの段階で質量降着が終わるのでしょうか?このような基本的な問題も原始星に関する大きな謎として残されていました。

まとめると、既存の研究において低質量星の進化シナリオの大枠はできていたものの、原始星の進化を深く追求するような観測は空間分解能が不足しているなどの問題もあってこの研究以前は皆無に近いような状況でした。

2. 野辺山ミリ波干渉計による観測

それでは原始星の進化を調べるためにはどんな観測をすればいいのでしょうか。これまではどの波長(可視、赤外、電波)でどのくらいの強度の電磁波を放射しているか(Spectral Energy Distribution, 以後SEDと呼びます)という観点で調べられてきました。ところが、このSEDは天体と観測者の視線方向の物質に大きく依存するため、大雑把な分類はいいのですが、原始星の進化を追求するためには精度が足りません。そこで我々は視点を少し変えて、原始星の周りには星の材料である高密度ガスがどの程度付随しているか、言い換えると原始星はあとどの程度物質を集積することができるのかという観点から原始星を調べることにしました。そして、この観点に基づき、近傍の代表的な星形成領域の原始星の高密度ガス探査観測を野辺山ミリ波干渉計を用いて行いました。

この観測計画を立案する際に以下の点に注意し、これまでの観測にはない特徴を持たせました。

- 1) 我々は原始星に付随する高密度ガスを調べたいわけですが、従って高密度領域をトレースし、かつ分子雲コアの深部に埋もれた原始星周辺を見通せるようなプローブ(分子輝線)を使用しなければなりません。残念ながら星の主要構成物である水素分子(H_2)は電波で観測できませんので、電波領域で比較的強い放射を起こす一酸化炭素(CO)や一硫化炭素(CS)の分子輝線が H_2 の代わりとしてこれまで良く用いられてきました。ところがCOは比較的低密度領域(密度が $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$)で電波を放射し、CSは高密度領域(密度が $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)で電波を放射するものの分子雲コアの深部は見通せず、高密度ガスの表面を見てしまうという欠点があります。そこで我々のグループは高密度領域(密度が $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$)をトレースし、かつ分子雲コアの深部まで見通せるホルミルイオン($H^{13}CO^+$)という分子の放射する電波を使用して原始星周囲の高密度ガスの様子を調べることにしました。 $H^{13}CO^+$ は原始星誕生期で水素分子に対する存在比が変わらないという特徴も持っており、我々の研究を進めるのに都合のいいプローブであることもわかってきました⁵⁾。
- 2) 原始星に付随した高密度ガスの分布や構造を詳細に調べるためには、高い空間分解能が必要です。原始星に付随する高密度ガスは1000–10000 AU程度(1 AU $\sim 1.5 \times 10^8 \text{ km}$)とこれまでの観測からわかっていますので、最も近傍の低質量星生成領域の観測でも10"程度の角度分解能は欲しいところです。その点、野辺山ミリ波干渉計で観測を行えば、この10"以下という分解能は十分達成可能です。
- 3) 系統的な探査に基づき原始星の進化を調べることを目的とするため、赤外線天文衛星点源カタログのデータを利用し、牡牛座星生成領域の原始星候補天体17個を選び出し、そのうち明るいものから9個を観測天体として選択しました。なおこ

で選択した観測天体については高密度ガス CS(5-4) のサーベイ観測が行われており、原始星の進化を議論する上で貴重なデータになっています⁶⁾。なお、すでに質量降着が報告されている HL Tau という天体⁷⁾を比較のため観測天体に追加しました(表1参照)。

3. 原始星を取り巻く高密度ガス

図は今回観測した天体の $H^{13}CO^+$ 積分強度図、すなわち高密度ガスの分布を等高線図として表したものです。それぞれの星の明るさはそれほど変わら

ないにも関わらず、高密度ガスの分布や質量が多岐に渡っているのがわかります。HL Tau を加えた牡牛座領域の原始星 10 個のうち 6 天体で高密度ガスをトレースする $H^{13}CO^+$ 輝線を有意に検出しました。検出した天体について、 $H^{13}CO^+$ 輝線を受信した領域の大きさや質量は 2800–7400 AU, 1×10^{-3} –0.27 M_{\odot} ($1 M_{\odot}$ は太陽質量に相当) でした(表1)。

私は高密度ガスの質量は進化とともに減少する考え、観測天体を $H^{13}CO^+$ 輝線強度に基づきクラス A (L1551–IRS 5, L1551NE, L1527, IRAS04169), クラス B (L1489, TMR1), クラス C (TMC1A,

表 1: 野辺山ミリ波干渉計の観測結果

天体名	光度 ^{い)} (L_{\odot})	広がり (AU × AU)	質量 (M_{\odot})
L1551 IRS 5	19	5600 × 2800	0.27
L1551 NE	3.8	7400 × 2800	0.06
L1527	1.0	4500 × 2200	0.073
IRAS 04169	0.9	4900 × 1400	0.029
L1489 IRS	2.9	2800 × 1400	8.2×10^{-3}
TMR1	2.7	3200 × 1200	5.5×10^{-3}
IRAS 04113	1.0	---	1×10^{-3}
TMC1A	1.7	---	7×10^{-4}
IRAS 04239	1.1	---	$< 1 \times 10^{-3}$
HL Tau	5.9	---	$< 1.3 \times 10^{-3}$

注: い) 赤外線衛星のデータから見積もられた中心星の明るさ

表 2: 観測天体の性質

天体名	クラス	高速度成分 ^{い)}	母胎コアと原始星の位置 ^{ろ)}
L1551 IRS 5	A	はい	はい ^{は)}
L1551 NE	A	はい	---
L1527	A	はい	はい ^{は)}
IRAS 04169	A	はい	はい ^{は)}
L1489 IRS	B	はい	---
TMR1	B	はい	いいえ ^{に)}
IRAS 04113	C	いいえ	---
TMC1A	C	いいえ	いいえ ^{に)}
IRAS 04239	C	いいえ	---
HL Tau	C	---	---

注: い) CS(5-4)の高速度成分は存在するか?, Moriarty-Schieven et al. (1995), ろ) 母胎コアと原始星の位置は一致しているか?, は) Mizuno et al. (1994), に) 高桑 (1996)

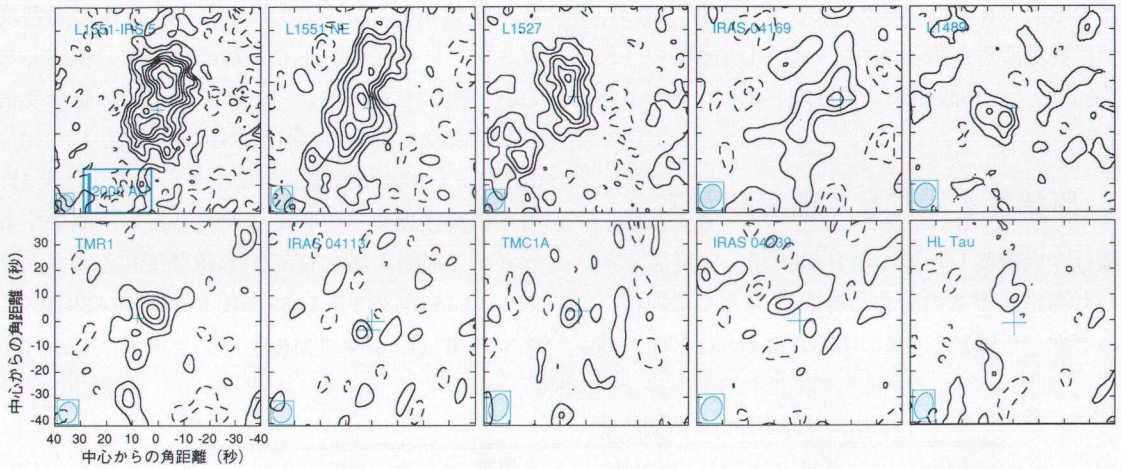


図 牡牛座領域の原始星候補天体の H^{13}CO^+ 積分強度図

IRAS04239, IRAS04113, HL Tau) の3つのグループに分類し、その物理的性質を調べました(表2)。なお、以下では便宜上、“母胎コア”を半径 ~ 20000 AU、質量が $\sim 2-3 M_{\odot}$ 程度の分子雲コア、“星周物質”を半径 ~ 1000 AU、質量を $\sim 0.01-0.1 M_{\odot}$ の原始星を取り巻く高密度ガスとして定義し使用することにします。

クラスA天体は強い H^{13}CO^+ 輝線伴う天体です。干渉計で検出した H^{13}CO^+ 輝線の分布はすでに知られている双極分子流に垂直なディスク構造を持つことから、中心星に付随する高密度星周物質起源と考えられます。例えば、クラスA天体L1551-IRS 5に付随する H^{13}CO^+ 輝線の分布は図の左上図に示されています。この図から中心星を取り巻く高密度ガスがディスク状の分布をしているのがわかります。また現在までの野辺山45m鏡の観測データ^{8), 9)}によって、L1551-IRS 5, L1527, IRAS04169については高密度分子雲コア(母胎コア)の中心とクラスA天体の位置が一致することがわかっています(L1551INEについてはデータがありません)。さらに、クラスAの全天体で、高密度ガスをトレースする

CS(5-4)ガスの高速度成分が検出されています。クラスB天体は H^{13}CO^+ (高密度星周物質)を伴いますが、高密度ガスの質量はクラスA天体に比べて小さく、顕著なディスク構造がない天体です。また母胎コア中心とクラスB天体の位置にはずれが存在し⁹⁾、母胎コアの質量もクラスAと比べると少ないことが確認されています。ただし、クラスBに分類された両天体ともCS(5-4)ガスの高速度成分が検出されています。クラスC天体は H^{13}CO^+ 輝線が有意に受からなかった天体です。これはもはや中心星を取り巻く高密度ガスがほとんどないことを示しています。ただし ^{13}CO でトレースできるような低密度星周物質はまだ星を取り巻いています。またクラスC天体はCS(5-4)ガスの高速度成分が検出されていません。

4. 原始星の進化

以上のようなクラス分けと観測事実から、低質量原始星候補天体は以下のような進化段階を経ると考えられます。分子雲コア(母胎コア)が重力的に不安定になり収縮をはじめとせばらくたつと、

中心の高密度領域で原始星が誕生します。原始星と母胎コアは重力的に束縛されている状態で、両者の位置が一致しています。従って、この時期、多くの質量を持つ母胎コアは中心星に付随する星周物質にガスを供給します。さらに星周物質から中心星への質量降着も活発で、中心星の質量が増加している段階でしょう。実際にこの段階の天体、L1551-IRS 5, L1527では高分解能観測によって質量降着が検出されています^{10), 11)}。また高密度ガスの高速度成分の存在から、中心星の誕生と同時に起こるであろう双極分子流は星を取り巻く母胎コアの高密度部分を吹き飛ばし、散逸させていると考えられます(クラスA天体)。この過程が進み、大部分の母胎コアが散逸すると、母胎コアの質量は減少し、もはや母胎コアと中心星は重力的に束縛していない状態になります(星との位置もずれます)。こうなると母胎コアから星周物質へのガスの供給も終了するため、星周物質の高密度ガスも減少するでしょう。中心星は付随する星周物質からの質量降着のみを行っており、大部分の質量は降着し終えていると考えられます。ただし母胎コアの吹き飛ばし、散逸はこの段階でも続いているため、なお高密度ガスの高速度成分は存在しているでしょう(クラスB天体)。さらに母胎コアをほぼ吹き飛ばし終わると中心星に付随するのは低密度の星周物質のみであり、もはや星周物質の高密度ガスや高密度ガスの高速度成分はない状態になります。この時期、中心星はほぼ最終的な質量に達しており、低密度星周物質から質量降着を起こしているに過ぎません(クラスC天体)。この星周物質も散逸すると可視光域で認識される古典的Tタウ型星(クラスII天体)へと進化します。

私たちはこの進化シナリオで原始星段階を重力的に束縛された母胎コアを持つ段階から、中心星が母胎コアと重力的に切り離された段階へと進むということを観測データに基づき初めて提唱しました。この母胎コアからの質量供給の停止過程は星の質量の決定という天文学的に重要な課題と密接

な関係を持つため今後の進展が期待されます。今回提案した進化シナリオはまた理論的なモデルからもよく説明できます。中野他¹²⁾は原始星の双極分子流によって母胎コアが大部分吹き飛ぶと、原始星と母胎コアが重力的に切り離され、母胎コアからの質量降着が止まるというモデルを提案しています。このモデルによると、原始星と母胎コアが重力的に切り離されるまでに、原始星がどれだけ質量を集積できるかということによって、星の質量が決まっています。これはまさに我々の観測結果が示す、重力的に束縛された母胎コアを持つ段階から、中心星が母胎コアと重力的に切り離された段階へと進むということを見事に説明しています。なおこれまでに提唱されているSEDに基づく進化パラメータ(天体と観測者の幾何学的な関係にかなり依存する場合は先に述べたとおりです)に比べて、今回提案した原始星の分類と進化は物理的な意味が明確であり、今後星形成の研究に大きなインパクトをもたらすものと考えています。

5. 終わりに

今回、野辺山ミリ波干渉計観測によって牡牛座領域に存在する比較的孤立した低質量星原始星の進化シナリオを新たに提案しました。しかし、このシナリオが、へびつかい座で見られるような一度に大量の星ができる場合にも当てはまるでしょうか?あるいはオリオン座で見られるような中、大質量星生成領域でも成り立つのでしょうか?しかしながら、現在までのところ私たちははっきりした答えを持っていません。今後の大きなテーマです。また、星の誕生という過程を調べるためには、星の誕生以前の段階の天体を詳しく調べる必要があります。これについては、現在私たちのグループが高空間、速度分解能観測をキーワードとして精力的に研究を押し進めています。近い将来に興味深い成果が得そうな気配です。しかし、我々はまだ道半ば(始まったばかりかな)で、まだまだ新たな謎を自然が投げかけてくることでしょう。そして、この謎

をこれを読んでいる若い世代の意欲ある研究者達が解明していくのでしょうか（私も一応若い世代の1人と思っています）。

本研究は、川辺良平（国立天文台野辺山）、北村良実（宇宙研）、砂田和良（国立天文台野辺山）との共同研究です。また研究を遂行する上で、百瀬宗武さん、長谷川哲夫博士、林正彦博士、大橋永芳博士からは貴重なコメントをいただきました。どうもありがとうございます。

参考文献

- 1) 観山正見, 林 正彦, 1992, 科学, 62(2), 84
- 2) Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., Ishiguro, M. 1991, AJ, 102, 2054
- 3) André, P., Ward-Thompson, D., Barsony, M. 1993, ApJ, 406, 122
- 4) Tamura, M., Ohashi, N., Hirano, N., Itoh, Y., Moriarty-Schieven, G. H. 1996, AJ, 112, 2076
- 5) 齋藤正雄, 1997, 東京大学博士論文
- 6) Moriarty-Schieven, G. H., Wannier, P. G., Mangum, J. G., Tamura, M., Olmsted, V. K. 1995a, ApJ, 455, 190
- 7) Hayashi, M., Ohashi, N., Miyama, S. M. 1993, ApJ, 418, L71
- 8) Mizuno, A., Onishi, T., Hayashi, M., Ohashi, N., Sunada, K., Hasegawa, T., Fukui, Y., 1994, Nature, 368, 719
- 9) 高桑繁久, 1996, 東京大学修士論文
- 10) Saito, M., Kawabe, R., Kitamura, Y., Sunada, K. 1996, ApJ, 473, 464
- 11) 大橋永芳, 1996, 天文月報 89(11), 492
- 12) Nakano, T., Hasegawa, T., Norman, C. 1995, ApJ, 450, 183

Evolution of the Dense Envelope Gas around Low-Mass Protostars

Masao SAITO

Nobeyama Radio Observatory

Abstract: The NMA survey of H^{13}CO^+ emission was carried out toward ten embedded sources in Taurus to investigate the low-mass protostellar evolution. Significant H^{13}CO^+ emission coming from dense envelope gas was detected toward six embedded sources. We investigate the relation between the dense envelope gas and the physical properties of central protostars and conclude that low-mass protostars evolve as accreting/dissipating dense envelope gas. The proposed evolution scenario of protostars is physically clearer than the widely accepted one based on the classification using the SED.