

原始星エンベロープの構造と進化の観測的研究

百瀬 宗武

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

E-mail: momose@nro.nao.ac.jp

野辺山ミリ波干渉計を用いた観測により、若い星に付随する星周ガスの観測を行いました。その結果、原始星 L1551 IRS5 に付随するエンベロープの詳細な構造を明らかにしました。また、原始星と早期 T タウリ型星の星周環境の比較から、原始星から T タウリ型星へと進化する過程で、エンベロープの中心集中度が低下していくことが示唆されました。

1. はじめに

宇宙における物質（暗黒物質は除く）の存在形態は大きく二つに分けられます。星と星間物質です。星形成はこの両者をつなぐ過程であり、宇宙における物質循環の重要な要素です。そのため、星形成の研究はさまざまな観点・手法により活発になされています。今回は、太陽程度の質量をもつ星（低質量星）が前主系列時代にどのように進化するかを、星の原材料となる分子ガスを高い解像度で観測することにより調べた結果を紹介します。

まず、低質量星が主系列星になるまでの進化の様子を概観しましょう。低質量星の形成場所は、「分子雲コア」と呼ばれる分子雲中の高密度領域です。その半径は一万 AU 程度です。この分子雲コアの中心部が重力により収縮し、小さな星の芯が形成されることで星は誕生します。その後の進化過程は、大きく以下の二段階に分けられます。

- (1) 原始星期：分子雲コアが動的収縮（フリーフォール）することにより中心星が成長する段階。
- (2) T タウリ型星期：原始星段階で起こっていた質量供給が終わり、中心星が準静的に収縮することで輝く段階。

T タウリ型星周囲には半径百 AU 程度の円盤が普遍的に付随しており、惑星系の母体となる円盤（原始惑星系円盤）だと考えられています。これら

前主系列星のうち、T タウリ型星の存在は可視光観測により古くから知られていました。一方、原始星は塵粒子を含んだ数千 AU スケールの高密度ガス（原始星エンベロープ）に周囲を覆われているため、可視光では観測ができません。実際、原始星と見られる天体が初めて数多く見つけれられたのは赤外線天文衛星 IRAS が 80 年代に行った遠赤外全天サーベイであり、比較的最近のことです。

IRAS の観測以降、原始星候補天体と T タウリ型星との星周環境の違いが調べられ、多くのことがわかってきました。まず電波で観測される分子雲コアとの位置関係を比較してみると、原始星候補天体はコアのほぼ中心に存在するのに対し、T タウリ型星はコアとの相関が良くありません¹⁾。また、原始惑星系円盤の質量を比較してみると、原始星候補天体は T タウリ型星に比べ小さいことがわかりました²⁾。以上のことから、原始星から T タウリ型星へと進化するにつれて、百 AU スケールの原始惑星系円盤は中心星とともに成長する一方、一万 AU スケールの分子雲コアは散逸していくことが示唆されます。このような描像は、原始星候補天体や T タウリ型星が示すエネルギー・スペクトル分布の解析からも支持されています³⁾。

しかし、原始星エンベロープの構造を詳しく調べる観測はこれまで不足していました。そのため、エンベロープの内部構造やそこでの質量降着率、

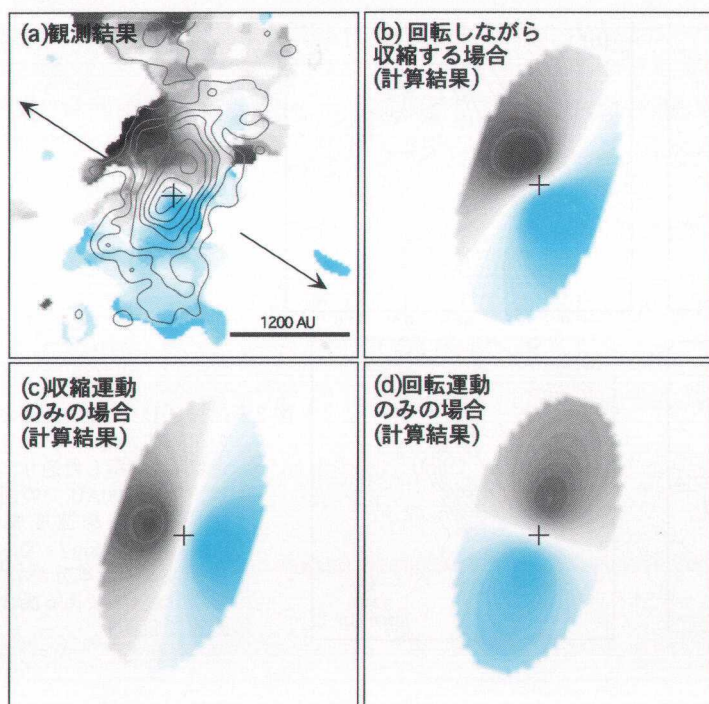


図1
 (a)の等高線は、野辺山ミリ波干渉計でとらえられた原始星 L1551 IRS5 周囲の $C^{18}O$ (1-0) 積分強度分布を表す。またカラーは観測された平均視線速度分布(a)、及び、いろいろな運動に対して予測される平均視線速度分布 (b-d) を示す。青の部分は星の視線速度を基準にして我々に近づいてくる領域を、グレーの部分は我々から遠ざかっていく領域を、それぞれ表す。色の濃さは速度の大きさを表す(濃いところほど速度大)。十字は星の位置を表す。

原始星期から T タウリ期への進化に伴うエンベロープ構造の変化や質量降着停止の原因については理解が進んでいませんでした(先ほどから「原始星候補天体」という言葉を使っているのも、原始星期を特徴づけている星周ガスの動的収縮が、多くの場合直接確認されてはいないからです)。これらの理解は、星・円盤系の成長過程や原始惑星系円盤の初期状態、さらに星の質量が最終的にどのように決定されるのか、といった点を考える上で非常に重要です。そこで私は、近傍の星形成領域である牡牛座分子雲中の原始星候補天体、及び進化段階早期にある T タウリ型星を対象に、その周囲に付随する分子ガスの構造を系統的に調べました。用いた装置は、分子ガス輝線の高空間分解能観測が可能な野辺山ミリ波干渉計 (NMA) です。

2. 原始星 L1551 IRS5 に付随するエンベロープの詳細観測

まず原始星エンベロープを詳しく調べた例として、L1551 IRS5 という天体の観測結果を紹介しましょう。L1551 IRS5 は、周囲のガスが動的収縮していることが過去の NMA 観測により確認されています^{4), 5)}。いわば、数少ない「真正銘の」原始星の一つと言えるでしょう。しかし、これらの観測では空間分解能が不足していたため、エンベロープ内域の構造を十分に明らかにできてはいませんでした。そこで今回は、これまでにない高い空間分解能(約 2.5 秒角、牡牛座分子雲の距離で 350AU に相当)で観測を行いました。観測に用いた分子輝線は、その強度がガスの柱密度を忠実に反映すると考えられる $C^{18}O$ (1-0) 輝線です。

その結果の概略を示したのが図 1 です。まず図 1a 中の等高線は、今回得られたガスの積分強度分布です。積分強度のピークは IRS5 の位置と一致し、

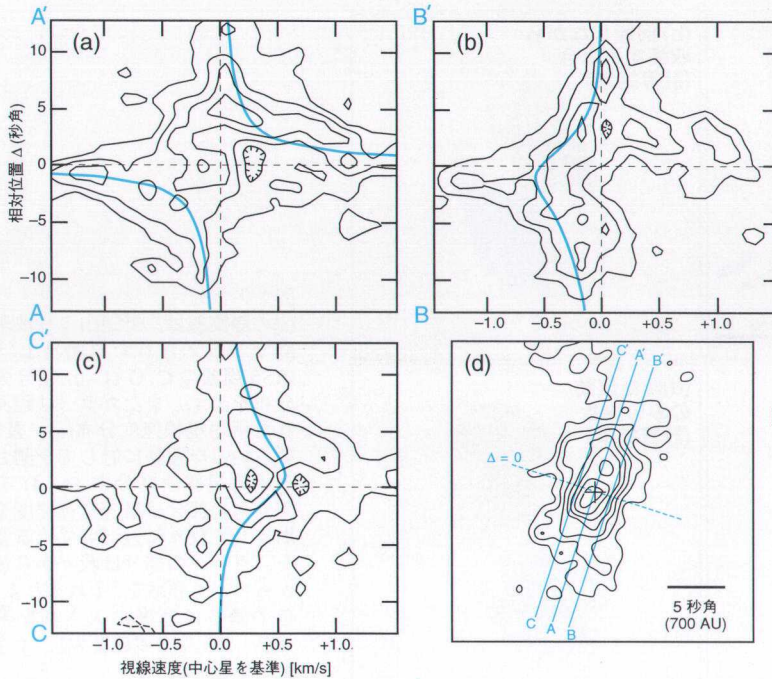


図2 (a-c) L1551 IRS5 周囲のガスの PV 図。それぞれのカットは (d) で示した通り。青線は、半径 700AU での回転速度成分、収縮速度成分が 0.24 km/s, 0.5 km/s で、半径依存性が回転成分が r^{-1} 、収縮成分が $r^{-0.5}$ である場合の視線速度を表す。

全体としては星から両極方向に放出されている分子流と直交する向きにのびた構造を示しています。これらのことからこの構造は、中心集中し、赤道面にそって円盤状に広がる原始星エンベロープをとらえたものとわかります。観測されたエンベロープの半径と質量は、それぞれ 1200AU, 0.062 太陽質量でした。ここで注意しておきますが、干涉計には空間的に広がった成分に対する応答がないという性質があります。したがって、上記の半径はエンベロープ全体の空間的広がりではなく、エンベロープ中で特に中心集中度の高い部分の広がりに対応すると考えて下さい。

次にエンベロープ内部の速度構造を表すため、各地点での平均視線速度を図 1a 中のカラーで示します。これを見ると、外側部分での速度勾配は円盤状ガスの短軸方向に沿っており、南西（右下）側で我々に近づく向きに、北東（左上）側で我々から遠ざかる向きに運動をしていることがわかります。しかし、星近傍に限ると速度勾配はむしろ長軸方向に沿っています。このような速度構造は、

純粋な収縮運動の場合（図 1c）や純粋な回転運動の場合（図 1d）では説明できず、ガスが収縮運動しながら回転速度が内側へいくほど顕著になるような場合（図 1b）で定性的に説明できます。

速度場を定量的に議論するには、位置速度図（PV 図）の解析が必要です。ここでは簡単のため、エンベロープが幾何学的に無限に薄い円盤だと仮定して解析しましょう。まず長軸上での PV 図（図 2a）は、ガスの運動のうち、回転速度成分が反映されています。図中の青線で示した通り、回転成分は半径 700AU で 0.24 km/s、半径依存性が r^{-1} だとしてうまく説明されます。一方、長軸からずらしたカットでの PV 図（図 2b, 2c）は、収縮成分と回転成分の重ね合わせで説明しなくてはなりません。回転成分は先に求めた通りだとすると、収縮成分は半径 700AU で 0.5 km/s、半径依存性は $r^{-0.5}$ だとして大部分の特徴は説明されます（青線）。収縮成分と回転成分の半径依存性の違いにより、回転速度が内側へいくほど顕著になることが分かります。

このような速度場は、エンベロープ中の物質が角運動量を保存しながら自由落下していく場合に実現されます。さらに得られた速度則から推定すると、ガスは半径約 150AU のところまで落ち込むと回転速度が落下速度と等しくなります。このような状況では中心星の重力と遠心力とがほぼ釣り合うため、物質がそれより内側に落ち込むことは（角運動量輸送が起こらない限り）ありません。すなわち、ガスは半径 150AU 程度で純粋な回転運動に移行していると予想されます。このことは、中心星周囲で原始惑星系円盤がまさに成長しつつあることを意味します。また、観測から求められた原始星エンベロープの質量と半径、収縮速度を使うと、星・円盤系への質量供給率を見積もることができます。今回の結果から求められた質量供給率は、一年あたり 6×10^{-6} 太陽質量となりました。

なお本稿では割愛しますが、投稿論文では以下の内容についてより深い議論を行っています⁶⁾。第一に、厚みも考慮に入れたより現実的なエンベロープ・モデルを構築し、それに対して計算される PV 図と観測結果を比較することで、エンベロープ内部の厚み方向の密度構造を議論しました。第二に、半径 200AU 以内では、上で求めた速度則から外挿される値に比べ、より高速な成分が観測されています（その傾向は図 2b, 2c でも確認できます）が、それが何を意味するかについて議論しました。第三に、中心星への質量降着が非定常的である可能性について議論しました。これらは、星・惑星系円盤形成の研究を今後進めていく上で興味深い結果なのですが、かなり専門的な話になってしまいます。興味のある方は、是非論文を読んでみてください。

今回の結果で最も重要な点は、原始星エンベロープの基本的な性質（内部の速度・密度構造、星・原始惑星系円盤の成長率）が観測から直接求められたことです。今後、他の原始星候補天体についても同様の観測を行う必要があるでしょう。そして、これらの結果と理論的予想を比較すること

で、星・原始惑星系円盤への質量供給の様子や、形成期における原始惑星系円盤の物理状態の理解に大きな進展がもたらされると期待されます。

3. 原始星と早期 T タウリ型星のエンベロープ構造の違い

L1551 IRS5 の場合ほど高い解像度ではありませんが、その他いくつかの原始星候補天体でも $C^{18}O$ (1-0) 干渉計観測が行われ、原始星エンベロープとみられる構造が検出されています。それを示したのが図 3 です。図 3 中の積分強度分布が共通して示す特徴は、そのピークが星の位置と一致することと、双極分子流と直交する方向にのびた構造を示すことの二点です。これらの結果から、原始星期におけるエンベロープは、中心集中した円盤状構造を普遍的にもっていることが示唆されます。

それでは中心星の進化に伴い、原始星エンベロープの構造はどのように変化するのでしょうか。この点は、原始星期で起こっている星への質量降着が停止する機構を考える上で非常に重要です。この節では、この問題点に迫る観測を紹介しましょう。その内容は、原始星から進化して間もない天体を対象に $C^{18}O$ (1-0) 干渉計観測を行い、原始星で得られた結果と比較してみたというものです。

結果を紹介する前に、原始星から進化して間もない天体は何かという問題についてふれておきましょう。T タウリ型星の中には、赤外波長域での放射超過が著しいものが一部存在し、「フラットスペクトル T タウリ型星」と呼ばれます。これらの多くが原始星から進化して間もない天体だと考えられる状況証拠が、最近次々に明らかになってきました。例えば HL Tau という天体周囲では、原始星エンベロープの名残と思われる部分が動的収縮していることが明らかになり⁷⁾、他方 T Tau という天体周囲では、母体となった分子雲コアが星風により吹き飛ばされつつあることが明らかになりました⁸⁾。このような状況は、まさに原始星から T タウリ型

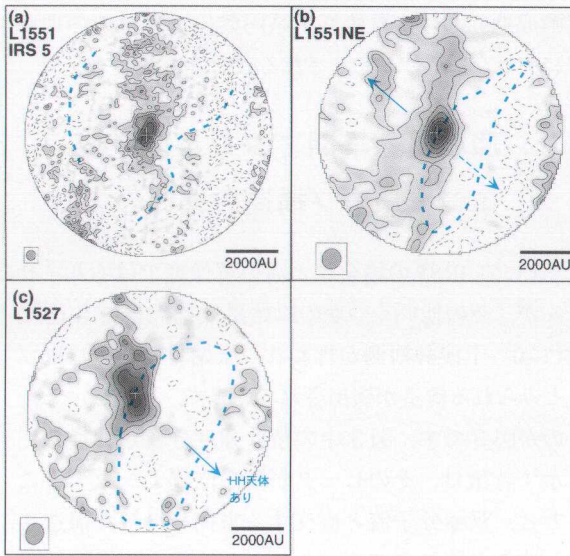


図3 NMAによって得られた原始星候補天体周囲での $C^{18}O$ (1-0) 積分強度図。青の矢印は双極分子流の向き(点線が青方偏移成分, 実線が赤方偏移成分)。十字は星の位置を表す。左下の楕円は各観測のビーム。NMA素子アンテナの主ビーム応答を補正してある。出典: (a) Momose et al. 1998, (b) 百瀬(博士論文), (c) Ohashi et al. 1997。

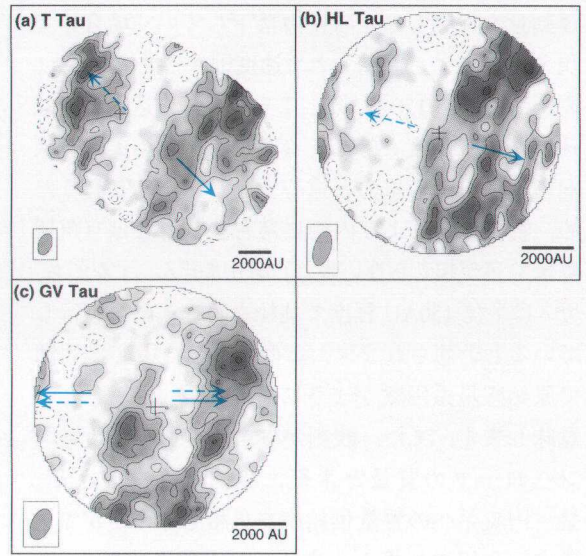


図4 NMAによって得られたフラットスペクトルTタウリ型星周囲での $C^{18}O$ (1-0) 積分強度図。青の矢印は双極分子流の向き(点線が青方偏移成分, 実線が赤方偏移成分)。十字は星の位置を表す。左下の楕円は各観測のビーム。NMA素子アンテナの主ビーム応答を補正してある。青の破線はローカル・ピークをつないだもの。出典: (a-c) 百瀬(博士論文)。

星へと進化する段階でおこると予想されていたことです。また、ごく最近の近赤外観測でも、フラットスペクトルTタウリ型星は一般的なTタウリ型星に比べ、原始惑星系円盤から星への質量降着が激しいことが示されています⁹⁾。そこで本研究では、フラットスペクトルTタウリ型星が原始星から進化して間もない天体であるとみなし、4天体についてNMAで観測を行いました。

その結果、3天体(T Tau, HL Tau, GV Tau)で有意な $C^{18}O$ (1-0) ガスを検出しました。その積分強度図を図4に示します。どれもが、数千AUに広がった構造を示していることがわかります。このガス成分の空間的広がり星誕生の場である分子雲コアの広がりに近いことから、これらは星の母体となったコアの残骸をとらえたものと自然に解釈されます。ちなみに通常のTタウリ型星の場合は、干渉計観測でガス成分が検出される場合でも、原

始惑星系円盤に付随するような数百AUのコンパクトな成分しか観測されず^{10), 11), 12)}、母体のコアは完全に散逸してしまっていると考えられます。今回の観測結果は、それとは極めて対照的です。フラットスペクトルTタウリ型星がTタウリ早期の天体であることが、この結果からも強く示唆されます。なお検出されたガスの質量は、T Tauの場合が約0.15太陽質量、他の2天体が約0.05太陽質量です。

さて、図4の結果を原始星の場合(図3)と比較してみましょう。すると、両者の間には著しい違いが見られます。原始星の場合は、すべてのケースで星とガス柱密度のピークが一致しています。それに対し、フラットスペクトルTタウリ型星の場合は中心星の位置には明瞭なピークが見られません。むしろ、周囲に強い成分が存在しています。図5は、NMAで得られた $C^{18}O$ (1-0) 輝度分布を、中心星からの角距離の関数として表したものです。

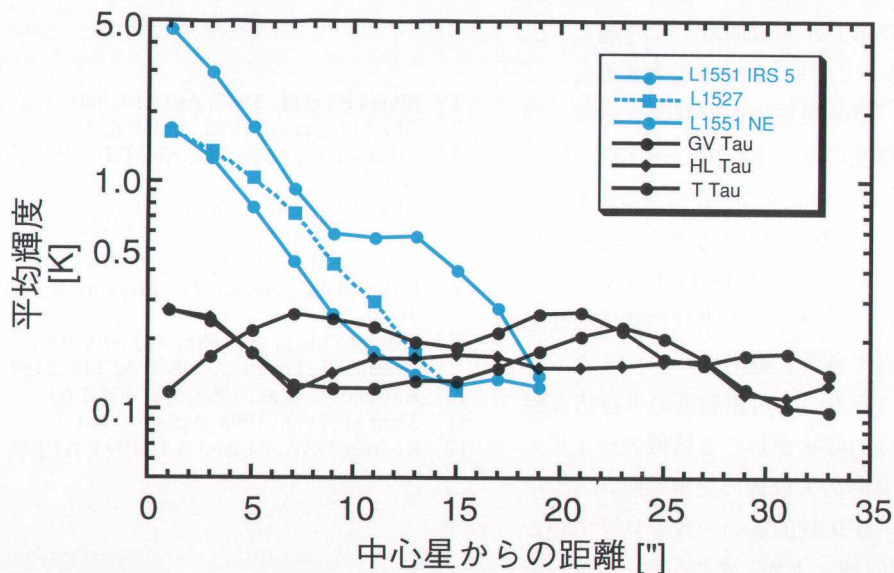


図5 NMA で得られた $C^{18}O$ (1-0) 積分強度図の、平均輝度分布。平均輝度は、星を中心とする幅2秒角の円環内で算出した。青が原始星、黒がフラットスペクトルTタウ型星。

原始星周囲のガスが顕著な中心集中を示しているのに対し、フラットスペクトルTタウ型星周囲のガスの場合は中心集中度が低いことが、このグラフからも読みとれます。また本稿では詳しく議論はしませんが、フラットスペクトルTタウ型星のガスが明瞭な速度構造をもたないことも原始星の場合との大きな違いです。

これらの観測事実から、原始星エンベロープは原始星期からTタウ型星へと進化する過程で、その中心集中度を下げていくことが示唆されます。その原因として一番自然な説明は、原始星期には分子雲コア内域部分から中心星へと激しく質量降着する一方、分子雲コア外域から内域への質量供給は十分でないためと考えられます。原始星と早期Tタウ型星に付随しているガスの千AUスケールでの構造の違いを明らかにし、それを元にエンベロープ進化を議論した点が、この観測の一番の特徴と言えるでしょう。

4. エンベロープ進化に対する仮説と今後の課題

それではフラットスペクトル型Tタウ型星で見られた分子雲コアの残骸は、実際どのような構造をしているのでしょうか。それが明らかになれば、原始星エンベロープの進化について、より具体的な描像を与え、質量降着停止の原因を探る上で大きな手がかりとなるはずですが、残念ながら現時点では、万人が納得するような結論は出せません。ここでは一つの可能性を紹介し、その問題点と今後の課題をまとめておくことにしましょう。

図4で強度のピークをつないでみると、HL TauとGV Tauの場合は分子流の方向と直交方向にのびたリング状構造を示すのに対し、T Tau周囲のガスは星を中心に比較的対称的なリング状構造を示しているように見えます(図4破線)。HL Tau, GV Tauが極軸と視線とがなす角が60度くらいであるのに対し、T Tauの場合は極軸と視線がほぼ平行であることが知られています。これらのことを考



慮すると、図4のガス構造は、半径4000AU程度の「中抜けトーラス」が赤道面近くに共通して広がっていることを示しているのかもしれませんが。これが正しければ、原始星期の円盤状エンベロープの内側4000AU程度のみが主に中心へと落ち込んだ結果にできたものと考えられます。やがて進化が進むと、これらのガスも中心に落ち込むか散逸するかして消えていくと予想されます。

このシナリオは、エンベロープ進化の具体的描像を与えるという点で非常に魅力的です。また、分子雲コア中のガスがもつ比角運動量の半径依存性から推測された動的収縮が起こる領域のサイズスケール(98年3月号の大橋氏の記事参照)と、中抜け構造のサイズが比較的良い一致を見せていることも興味深い点です。しかしその一方、このシナリオが観測事実から疑問の余地なく導かれるものとは現時点では言えません。今後、フラットスペクトルTタウリ型星周囲でとらえられたガス成分の存在形態を明らかにすることが大きな課題と言えます。これら天体に付随する双極分子流を詳細に観測して両者を相互比較するなど、より一層の観測が必要だと考えています。

本稿は、筆者の博士論文の内容をもとにまとめたものです。指導教官だった中野武宣教授に感謝します。また本研究は、大橋永芳氏、川辺良平氏、林正彦氏との共同研究です。

参考文献

- 1) Myers P., et al., 1987, ApJ 319, 340
- 2) Ohashi N., et al., 1996, ApJ 466, 317
- 3) Adams F.C., Lada C.J., Shu F.H., 1987, ApJ 312, 788
- 4) Ohashi N., et al., 1996, ApJ 466, 957
- 5) Saito M., et al., 1996, ApJ 473, 464
- 6) Momose M., et al., 1998, ApJ, 504, 314
- 7) Hayashi M., Ohashi N., Miyama S., 1993, ApJ 418, L71
- 8) Momose M., et al., 1996, ApJ 470, 1001
- 9) Green T.P., Lada C.J., 1997, AJ 114, 2157
- 10) Kawabe R., et al., 1993, ApJ 404, L63
- 11) Saito M., et al., 1995, ApJ 453, 384
- 12) Koerner D.W., Sargent A.I., 1995, AJ 109, 2138

An Observational Study of the Structure and Evolution of Protostellar Envelopes

Munetake MOMOSE

Nobeyama Radio Observatory, Nagano 384-1305

Abstract: We have made observations of circumstellar gas around young stellar objects with the Nobeyama Millimeter Array. The observations of the protostar L1551 IRS5 revealed the detailed structure of the envelope. The comparison of circumstellar environment between protostars and young T Tauri stars suggested that protostar envelopes become less centrally-condensed in the course of evolution from protostars to T Tauri stars.