

若い原始星 IRAM 04191+1522 における 分子雲コアとアウトフローの相互作用

高 桑 繁 久

〈Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 82 Pu'uohou Place, Suite 210, Hilo, HI 96720, U.S.A.〉
e-mail: stakakuwa@sma.hawaii.edu

我々は、メタノール分子輝線を用いた、若い原始星 IRAM 04191+1522 に附随した分子雲コアの観測を行い、分子雲コアと原始星からのアウトフローがぶつかり合い、相互作用している領域を発見しました。この相互作用領域は、これまでの分子雲コアとアウトフローの相互作用の研究でいわれてきたようなショック領域ではなく、“静かな”相互作用領域であることがわかりました。我々の研究は、このような分子雲コアとアウトフローの相互作用が原始星形成の初期段階から起こっており、生まれてくる星の質量の決定に大きな影響を及ぼしている可能性を示唆しました。

1. はじめに

1.1. 分子雲コアとアウトフロー

生まれてくる星の質量は何が決めているのでしょうか？ この問題は星形成研究の長年に渡る研究課題のひとつです。星間空間には「星間分子雲」とよばれる宇宙の“雲”が存在し、その中で特にガス密度の高い部分は「分子雲コア」と呼ばれています。これまでの研究から、この分子雲コアが重力収縮を起こし、新たな星「原始星」を生むことがわかってきました¹⁾。一方、分子雲コアの中で原始星が生まれると、原始星はその双極方向に質量放出現象「アウトフロー」をおこすことがこれまでの多くの観測から知られています。このアウトフローは、分子雲コアから原始星に供給された質量の一部を外に放出するとともに、分子雲コア自体にも大きな影響を及ぼし分子雲コアを散逸する働きがあると考えられます^{2), 3)}。すなわち、「分子雲コアとアウトフローの相互作用」は、生まれてくる星の質量は何が決めているのか？ という問題を考える上でひとつのキーになっていると考えられます。

1.2. 分子雲コアとアウトフローの相互作用

これまで L1157, L1448 など限られた原始星に対し、分子雲コアとアウトフローの相互作用についての研究が行われてきました^{4), 5)}。それらの研究によると、原始星からのアウトフローと分子雲コアがぶつかりあい相互作用していると考えられる領域で、一酸化硅素 (SiO)、メタノール (CH₃OH) などの分子からの電波放射 (分子輝線) が大きく増大していることが報告されています。さらに相互作用領域ではガス温度が 100 K 以上になっており、分子雲コアの温度 (~ 10–20 K) に比べて非常に高くなっていることもわかってきました⁶⁾。ガス温度が 100 K 以上になると、分子ガス中の固体微粒子 (ダスト) の上に凍りついていた硅素やメタノールが溶け出して気体となり、その結果、一酸化硅素やメタノールの気体ガス中の存在量「分子存在比」が大きくなることが期待されます⁷⁾。すなわちこれらの観測結果は、分子雲コアとアウトフローの相互作用によって「ショック」がおり、ガス温度が著しく上昇して一酸化硅素 (SiO)、メタノール (CH₃OH) などの分子輝線の強度が強くなっていると解釈できます。

しかし、このような分子雲コアとアウトフローの

相互作用の研究は、強いショックを伴ったごく限られた代表的な原始星でしかなされていませんでした。したがって分子雲コアとアウトフローの相互作用はどれくらい普遍的に起こっているのか、原始星形成のどの段階からはじまっているのか、また分子雲コアとアウトフローの相互作用はかならずショックを伴うものなのか、といった知見は全く得られていませんでした。特に最も近傍（距離 140 pc; 1 pc は 3.26 光年）の代表的な星形成領域であるおうし座分子雲領域の原始星については、これまで数多くの星形成研究がなされているにもかかわらず^{8), 9), 10)}、分子雲とアウトフローの相互作用という観点での研究は皆無でした。

2. 若い原始星 IRAM 04191+1522 におけるメタノール輝線の観測

そこで我々はこのような現状を打開すべく、野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡を用いて、おうし座分子雲中の原始星 IRAM 04191+1522 (以下 IRAM 04191 と略記) に附随する分子雲コアのメタノール輝線による観測を行いました。IRAM 04191 は 4 年ほど前に新たに発見されたおうし座分子雲中の原始星で、原始星の進化段階の指標であるボロメトリック温度が 18 K とこれまで発見された原始星の中でもっとも低いことなどから、これまで発見された原始星の中でもっとも進化段階の若い原始星であることが示唆されています¹¹⁾。IRAM 04191 は北東（赤方偏移; 我々から遠ざかる方向）から南西（青方偏移; 我々から近づく方向）にかけて、境界がはっきりしたアウトフローを伴っています（表紙の図参照）。したがって IRAM 04191 は、原始星形成の初期段階から分子雲コアとアウトフローの相互作用は始まっているのか、それはこれまで観測されてきたようなショックを伴うものなのか、といったことを調べるのに非常に適した天体です。一方メタノール輝線は、先に述べたように相互作用に伴うショックをよくトレースすると同時に、分子雲コア自体もよくトレースするこ

とがわかっています^{8), 9), 10)}。したがって、メタノール輝線は本研究の目的に適した分子輝線のプローブであると考えられます。

2.1. 原始星方向のラインプロファイル

図 1 に原始星 IRAM 04191 方向でのメタノール輝線のラインプロファイル（視線速度ごとの電波強度 = アンテナ温度）を示します。図 1 はメタノール輝線の複数の偏移 ($2_0-1_0 A^+$, $2_1-1_1 E$, $2_0-1_0 E$, $2_1-1_1 E$) および一硫化炭素の同位体の輝線 ($C^{34}S J=2-1$) の原始星方向のラインプロファイルです。これらの輝線は 45 m 望遠鏡を用いて、すべて同時に観測されています。メタノール輝線の異なった偏移は異なったエネルギーレベルを表し、それらの強度比から分子雲コアの温度、密度といった物理量を見積もることができます。

図 1 をみると、メタノール $2_1-1_1 E$ 輝線以外は十分な検出感度で検出されていることがわかります。ラインプロファイルの中心速度（図 1 に破線で示してある）は $\sim 6.7 \text{ km s}^{-1}$ で、これが原始星 IRAM 04191 に伴う分子雲コアの中心速度（以下システミック速度）であると考えられます。また、ラインプロファイルの速度幅は 0.5 km s^{-1} 程度で、分子雲コアの典型的な速度幅と同程度であるということもわかります。

2.2. メタノール輝線の空間的、速度的分布

次に IRAM 04191 でのメタノール輝線 ($2_0-1_0 A^+$) の空間的、速度的分布を詳しくみていくことにします。表紙にシステミック速度付近 ($6.5-6.9 \text{ km s}^{-1}$; 左上図) およびシステミック速度から青方偏移した視線速度 ($5.0-6.5 \text{ km s}^{-1}$; 左下図) でのメタノール輝線の分布と、ラインプロファイル (右) を示します。左側の図で、コントラストはメタノール輝線の強度分布を表し、十字印は原始星 IRAM 04191 の位置、黒の四角はより進化の進んだ別の原始星 IRAS 04191+1523 の位置、黒丸は観測点を表します。さらに青色と赤色のコントラストは、一酸化炭素分子輝

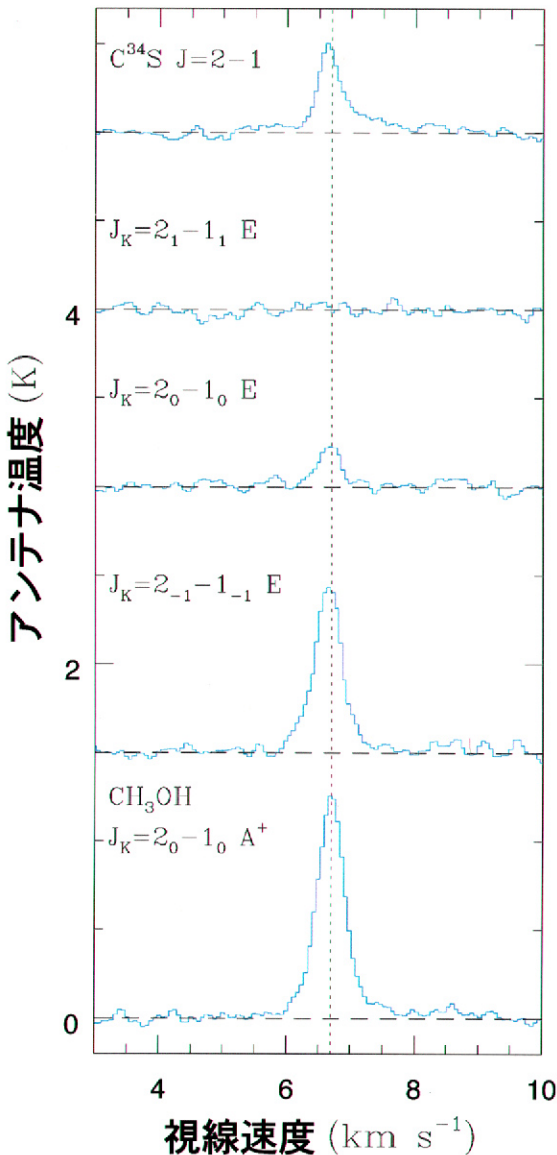


図1 IRAM 04191 方向におけるメタノール輝線の複数の遷移 ($2_0-1_0 A^+$, $2_1-1_1 E$, $2_0-1_0 E$, $2_1-1_1 E$), および同時に観測した一硫化炭素の同位体の輝線 ($C^{34}S J=2-1$) のラインプロファイル. 垂直方向の点線はシステムック速度 6.7 km s^{-1} を表す.

線により観測された, それぞれ青方偏移, 赤方偏移した IRAM 04191 からのアウトフローを示します¹¹⁾.

システムック速度付近 (左上図) では, 原始星に附随した分子雲コアの構造がメタノール輝線によくみられることが分かります. この分子雲コアはアウトフローの方向と垂直方向に伸びた構造をしています. その長軸×短軸方向のサイズは $0.07 \text{ pc} \times 0.04 \text{ pc}$ と見積もられました. 図1で示した原始星方向でのメタノール輝線のラインプロファイル (表紙右上図) はこの分子雲コアの構造をトレースしていると考えられ, 原始星方向のメタノール輝線の速度幅 0.5 km s^{-1} がこの分子雲コアの速度幅であると考えられます. 一方, ダスト連続波の観測¹²⁾ との比較から求めた原始星方向でのメタノール分子の分子存在比は 2.0×10^{-9} となりました. この分子存在比とメタノール輝線の強度から見積もった分子雲コアの質量は 2.3 太陽質量程度です. さらにこの分子雲コアは重力的に束縛されており, 内部のガス圧によっては散逸しないことも分かりました. これらの物理量, 物理的性質は典型的な分子雲コアのそれらと一致します. 以下, メタノール輝線で検出された IRAM 04191 に附随した分子雲コアの構造を「コア」と呼ぶことにします.

コアと青方偏移したアウトフローの分布を比べてみると, コアの南側に「くぼみ」がみられ, そのくぼみを青方偏移したアウトフローが通り抜けているようにみえます. あたかもアウトフローがコアの一部を剥ぎ取り, 押し出しているかのようです.

一方, システムック速度から青方偏移した視線速度でのメタノール輝線の分布は, システムック速度付近でのメタノール輝線の分布とは全く違った様相を示しています (表紙左下図), 原始星に附随するような構造はほとんど見られず, 原始星の南側に, 青方偏移したアウトフローを取り囲むようにふたつのコンパクト (サイズ $\sim 0.03 \text{ pc}$) なメタノール輝線の構造がみられます (以下, 強度の強い西側の構造を「ブルー1」, 東側の構造を「ブルー2」と呼

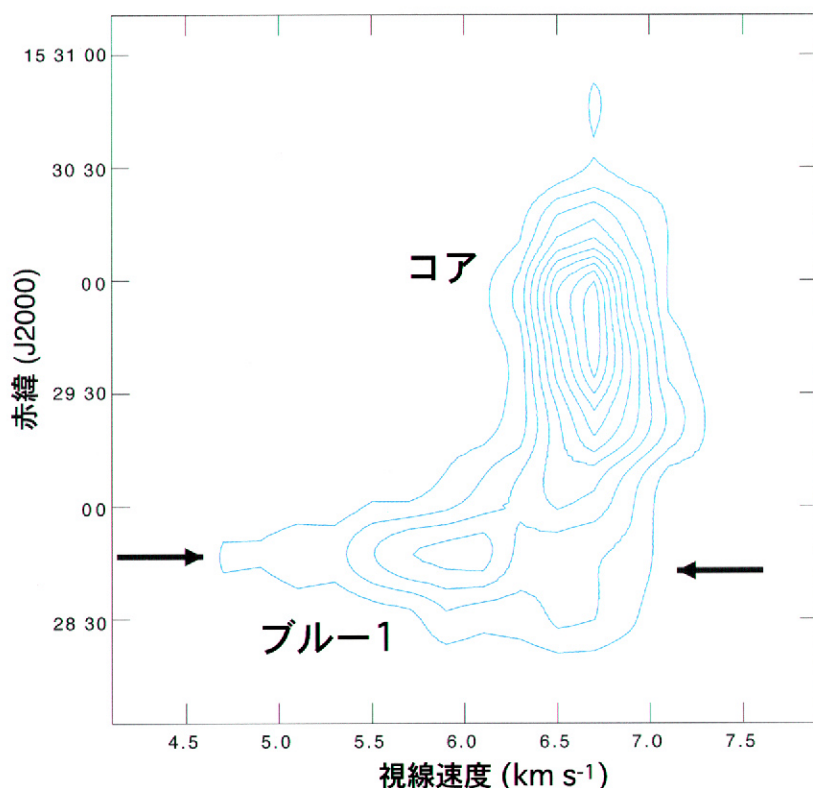


図2 表紙の図中の実線方向，すなわちコアからブルー1に向かう方向に切ったメタノール輝線の位置-速度図。横軸は速度方向，縦軸は赤緯方向を表す。コントアレベルは0.15 Kから0.10 Kおき。北側のコアでは速度幅が 0.5 km s^{-1} 程度であるのに対して，ブルー1にくると突然速度幅が 2.0 km s^{-1} 近くまで増大していることがわかる。

ぶ)。特に，ブルー1の場所は青方偏移したアウトフローのピークと隣りあっており，この地点でアウトフローが折れ曲がっているようにみえます。ブルー1，ブルー2の方向でのメタノール輝線のラインプロファイルは原始星方向のラインプロファイルと全く形が異なります(表紙右真中，右下図)。その速度幅は 2 km s^{-1} 近くで，原始星方向の速度幅 0.5 km s^{-1} に比べて著しく増大しています。また，ダスト連続波の観測¹²⁾との比較から求めたブルー1，ブルー2でのメタノール分子の分子存在比は，原始星方向でのメタノールの分子存在比にくらべて10倍程度大きくなっていることがわかりました。さらに，こ

の分子存在比とメタノール輝線の強度から見積もったブルー1，ブルー2の質量は0.07太陽質量程度でコアの質量に比べて一桁以上小さいこと，ブルー1，ブルー2は重力的に束縛されておらず，やがて散逸してしまふことも明らかになりました。

ブルー1の性質をより詳しくみるため，表紙の図中の実線方向，すなわちコアからブルー1に向かう方向に切った位置-速度図を図2に示します。図2で横軸は速度方向，縦軸は赤緯方向を表します。これを見ると，北側のコアでは速度幅が 0.5 km s^{-1} 程度であるのに対して，ブルー1にくると突然速度幅が 2.0 km s^{-1} 近くまで増大していることがわかります。

表1に，これまで述べてきたコア，ブルー1，ブルー2の物理的性質をまとめます。

3. 考察

3.1. ブルー1，ブルー2の起源

メタノール輝線を用いたIRAM04191の本観測は，原始星に附随したコアに加えて，青方偏移した視線速度にふたつの構造；ブルー1，ブルー2；を検出しました。ブルー1，ブルー2の物理的性質は，原始星に附随せず青方偏移したアウトフローの両側に位置していること，線幅が突然増

表1：コア、ブルー1、ブルー2の物理的性質

構造	サイズ (pc)	線幅 (km s^{-1})	質量(太陽質量)	重力的束縛	メタノールの存在比
コア	0.05	0.5	2.3	あり	2.0×10^{-9}
ブルー1	0.016	~1.5	0.064	なし	2.1×10^{-8}
ブルー2	0.030	~1.5	0.085	なし	1.1×10^{-8}

大していること、重力的に束縛されていないことなど、コアの性質と比べて明らかに異なっています。それではブルー1、ブルー2の起源はいったい何なのでしょうか？

みなさんもうお気付きの通り、ブルー1、ブルー2は分子雲コアとアウトフローがまさに相互作用している領域を表していると思われます。ブルー1、ブルー2はアウトフローによって剥ぎ取られた分子雲コアの一部だと考えられます。実際、ブルー1、ブルー2の運動量(質量×移動速度)はアウトフローの運動量(~ 0.12 太陽質量 $\cdot \text{km s}^{-1}$)と同程度であることがわかりました。これはアウトフローがブルー1、ブルー2を押し出していることを示しています。さらに、ブルー1、ブルー2の移動速度は IRAM 04191 の重力系から脱出できるほどに十分速いこともわかりました。

中野武宣教授らの理論的な研究¹³⁾によると、分子雲コアとアウトフローの相互作用によって分子雲コアが散逸してしまう過程が、最終的に生まれてくる星の質量を決めるのに大きな役割を果たすとされています。さきに述べたようにブルー1、ブルー2は重力的に束縛されておらず、やがては散逸してしまいます。その散逸にかかる時間はサイズ/速度幅でおおざっぱに見積もりことができ、5万年程度です。これは原始星形成の典型的な時間である10万年にくらべて短いので、ブルー1、ブルー2は原始星形成が終わる前に散逸してしまうこととなります。すなわち、ブルー1、ブルー2は、生まれてくる星の質量を決定するのに重要な役割を果たすと考えられる分子雲コアの散逸過程を反

映しているのです。

一方、ブルー1、ブルー2の全質量(~ 0.15 太陽質量)はコアの質量(2.3 太陽質量)の7%にすぎません。すなわち分子雲コアとアウトフローの相互作用によって散逸されつつあるガスの質量はまだそれほど大きくありません。先に述べたように IRAM 04191 はもともと若い原始星のひとつであると考えられています。すなわち、IRAM 04191 では分子雲コアとアウトフローの相互作用 — 生まれてくる星の質量をきめる重要なプロセス — がまさに始まったばかりであり、散逸されつつあるガスの質量もまだそれほど大きくないと推測されます。我々の観測は、原始星形成のごく初期段階から、このような分子雲コアとアウトフローの相互作用が始まっていることを初めて示したのです。

3.2. ブルー1、ブルー2における メタノールの分子存在比の増加

我々の観測結果の中でもうひとつ重要な結果は、ブルー1、ブルー2でメタノールの分子存在比が原始星方向と比べて10倍程度増大していることです。この分子存在比の増加は、以前の研究でいわれているように分子雲とアウトフローの相互作用に伴うショックが原因なのでしょう。

もしブルー1、ブルー2でのメタノールの分子存在比の増大がショックによるものであるとすれば、ブルー1、ブルー2のみで局所的に突然メタノールの存在比が増加しているはずですが、このことを調べるため、メタノール輝線の強度分布をダスト連続波の強度分布¹²⁾で割算することによって、

メタノール分子の存在比分布のマップを求めました (図3)。図3をみると、メタノール分子の存在比は原始星 IRAM 04191 および IRAS 04191 方向で極小となっており、原始星から距離が遠ざかるにつれて増大しています。ブルー1、ブルー2方向でのメタノール分子の存在比の増加はこの大局的な存在比の増大を反映していると考えられ、ショックから期待されるような局所的なものではありません (ブルー1についてはダスト連続波の信号/雑音比が悪いため、マップの境界の外になっている)。また、L1157 などショック領域でのメタノール分子の存在量の増加は400倍ともいわれています⁵⁾。これにくらべて IRAM 04191 のブルー1、ブルー2におけるメタノール分子の存在比の増加はせいぜい10倍程度で、ショックから期待されるほどの存在比増加ではありません。さらに我々は、ブルー1について JCMT を用いたサブミリ波メタノール輝線の観測も遂行し、ブルー1におけるガス温度を求めました。するとブルー1における温度は10 K と典型的な分子雲コアの温度と同じであることがわかり、ショックで期待されるような100 K 以上の温度上昇は全く確認できませんでした。以上の

ような結果から、ブルー1、ブルー2方向でのメタノール分子の存在比の増加はショックに起因したものではないと結論づけられます。

それではなぜこのような分子雲コア全体にわたっての大局的なメタノール分子の存在比の変化がみられるのでしょうか。これはまさに分子雲コアの化学進化を反映しています¹⁴⁾。相川祐理博士 (神戸大学) らによる分子雲コアの化学進化モデルの研究によると¹⁵⁾、一般に分子存在比は、分子雲コアの進化段階と分子雲コアに沿った半径の関数であるということが示唆されています。分子雲コアの中

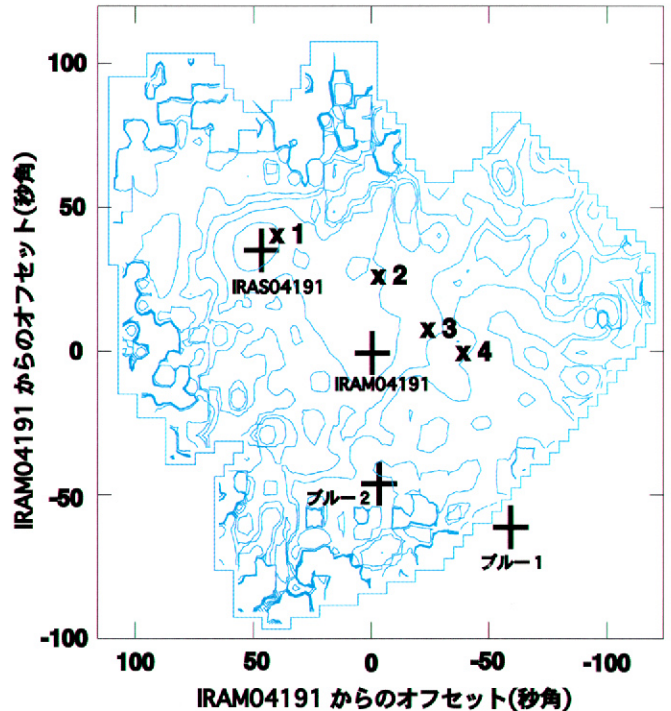


図3 メタノール輝線の強度分布をダスト連続波の強度分布¹²⁾で割算してやることによって求めた、IRAM 04191 におけるメタノールの分子存在比のマップ。最も内側のコンタはメタノールの分子存在比が 1.6×10^{-9} であることを示し、外側のコンタにいくにしたがって分子存在比が2倍、3倍、4倍、10倍と増加する。ブルー1の地点はダスト連続波の信号/雑音比が高いため、マップの境界の外側になっている。

心方向ではガスの密度が高く、そのため化学的進化が外側に比べて速く進みます。メタノールは前期型分子、すなわち化学進化の前期過程でその存在比がピークとなり、後期過程ではその存在比が減少してしまう分子であるということがわかっています^{8), 9), 16)}。したがって、メタノールの分子存在比は、ガス密度が高く化学進化が早く進む分子雲コアの中心方向では低く、ガス密度が低く化学進化が遅く進む外側では大きくなります。IRAM 04191 におけるメタノールの分子存在比の大局的な変化は、まさにこのような分子雲コアの化学進化を反映しているのです。

では最後に、なぜ IRAM 04191 では L1157 などの天体で見つかっているようなショックがおこっていないのでしょうか。分子雲コアとアウトフローの相互作用に伴うショックの詳しい理論的モデルによると^{17), 18)}、ショックによる温度上昇はアウトフローの流速に大きく依存し、ダスト上のメタノール分子が溶け出すような 100 K 以上の温度上昇を引き起こすためには 10 km s^{-1} 以上のアウトフローの流速が必要であることが示されています。L1157 などのショック領域のアウトフローの流速と IRAM 04191 のアウトフローの流速を比べてみると、ショック領域でのアウトフローの流速はすべて 20 km s^{-1} 以上であるのに対して、IRAM 04191 のそれは 10 km s^{-1} に満たないことがわかりました。このアウトフローの流速の違いがショックをとまなう相互作用か、あるいはショックを伴わない“静かな”相互作用かを決めていると思われる。これまではショックを伴う“派手な”天体についてのみ分子雲コアとアウトフローの相互作用の研究が行われてきました。しかし IRAM 04191 における本研究は、派手なショックを伴わなくても分子雲コアとアウトフローの相互作用は実際におこっていることを示しました。

本稿は、筆者と中華民国中央研究院の大橋永芳、平野尚美両博士との学術論文¹⁹⁾を、天文月報用に平易に書きあらためたものです。興味が湧かれた方は原著論文をお送りいたしますので、ぜひ筆者に御連絡ください。本稿を進めるにあたり、大橋、平野両博士はもちろんのこと、野辺山宇宙電波観測所の多くのスタッフの方々から御指導、御協力を頂きました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Benson P.J., Myers P.C., 1989, ApJS 71, 89
- 2) Momose M., Ohashi N., Kawabe R., Hayashi M., Nakano T., 1996, ApJ 470, 1001
- 3) Velusamy T., Langer W.D. 1998, Nature 392, 685
- 4) Dutrey A., Guilloteau S., Bachiller R., 1997, A&A 325, 758
- 5) Bachiller R., Pérez Cutiérrez, M., kumar M.S.N., Tafalla, M. 2001, A&A 372, 899
- 6) Avery L.W., Chiao M., 1996, ApJ 463, 642
- 7) Sandford S.A., Allamandola L.J., 1993, ApJ 417, 815
- 8) Takakuwa S., Mikami H., Saito M., 1998, ApJ 501, 723
- 9) Takakuwa S., Mikami H., Saito M., Hirano N., 2000, ApJ 542, 367
- 10) Takakuwa S., Kamazaki T., Saito M., Hirano N., 2003, ApJ 584, 818
- 11) AndréP., Motte F., Bacmann A., 1999, ApJ 513, L57
- 12) Motte F., AndréP., 2001, A&A 365, 440
- 13) Nakano T., Hasegawa T., Norman C., 1995, ApJ 450, 183
- 14) 高桑繁久, 2000, 天文月報 Vol 93 No10, 616
- 15) Aikawa Y., Ohashi N., Inutsuka S., Herbst E., Takakuwa S., 2001, ApJ 552, 639
- 16) Pratap P., et al., 1997, ApJ 486, 862
- 17) Kaufman M.J., Neufeld D.A., 1996a, ApJ 456, 250
- 18) Kaufman M.J., Neufeld D.A., 1996b, ApJ 456, 611
- 19) Takakuwa S., Ohashi N., Hirano N., 2003, ApJ, 590, 922

Interaction between the Outflow and the Core in IRAM 04191+1522

Shigehisa TAKAKUWA

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

Abstract: We have carried out mapping observations of the molecular cloud core associated with the young protostar, IRAM 04191+1522, in the CH₃OH line. We have discovered interaction regions between the core and the outflow from the protostar. The interaction regions in IRAM 04191+1522 are not shocked regions as found in the previous studies of interaction between cores and outflows, but "quiescent" interaction regions. Our observational studies have revealed that interaction between cores and outflows takes place at the very early stage of protostellar formation, and that such interaction could greatly affect the final stellar mass of the protostar.