

野辺山ミリ波干渉計および ASTE 望遠鏡を用いた双極分子流による誘発的星団形成領域の観測的研究



島 尻 芳 人

〈東京大学大学院理学研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: yoshito.shimajiri@nao.ac.jp

野辺山ミリ波干渉計・サブミリ波電波望遠鏡 ASTE のそれぞれの特徴を活かし、OMC-2/FIR 3,4 領域と呼ばれる集団的星形成領域の周辺環境を調べ、若い星（原始星）から高速で放出されているガス（双極分子流）が周辺ガスに衝突（相互作用）していることをガスの分布（形態学的証拠）、ガスの速度構造（運動学的証拠）、相互作用という物理過程を通じて生成される分子の検出（化学的証拠）という三つの観点から示すことができた。さらに、双極分子流と衝突をした高密度ガスは 11 個ものコア（密度の高いガスの塊）からなることを初めて明らかにした。これらのコアへの分裂が双極分子流との相互作用によって誘発されたか否か、さらには、これらのコアから星が生まれるかを明らかにするため、重力不安定性、関連する物理過程の時間、星形成の有無の観点から検証した。その結果、若い星から放出されたガスと周辺ガスとの衝突が、周辺ガス内に重力不安定性を引き起こし集団的星形成を誘発している可能性があることがわかった。

1. はじめに

星の生まれ方（星形成）には 2 種類の方法があることが知られている。一つ目は、密度の高い ($\geq 10^5 \text{ cm}^{-3}$) 分子ガスの塊（高密度ガス、分子雲コア；サイズ $\sim 0.1 \text{ pc} = 0.326 \text{ 光年}$ ）から、一つまたは二つの星が生まれる「孤立した星形成」である。過去十数年間、近傍（距離 $\sim 140 \text{ pc}$ ）に位置する孤立した星形成領域：おうし座分子雲に対して、精力的な観測的研究が行われてきた。これまでに、「高密度ガスの自発的重力収縮 \rightarrow 中心星への質量降着 \rightarrow 原始星から極方向に高速（数 km s^{-1} \sim 数百 km s^{-1} ）でガスを吹き飛ばす（双極分子流）」という進化シナリオが確立してきた^{1), 2), 3)}。

二つ目は、一つの分子雲コアから数十個もの星が集団的に生まれる「星団形成」である。銀河系

の星の 90% 以上はこの星団形成で生まれることが知られている⁴⁾。その重要性にもかかわらず、星団形成領域は狭い領域 ($\sim 0.1 \text{ pc} \times 0.1 \text{ pc}$) に原始星・双極分子流が多く存在し、広がった分子ガスの構造（数 $\text{ pc} \times$ 数 pc ）を併せ持つことから、天体の小さな構造を見分ける性能と、広い領域を観測することが要求されるため、星団形成領域の観測的研究は難しかった。そのため、星団形成領域の精力的な観測が不足し、星はなぜ集団的に生まれるのか？ といった問題が明らかにされていなかった。

2. 観測ターゲット

星団形成領域の周辺部には超新星爆発、大質量星が作り出す電離領域（HII 領域）、双極分子流といった現象（外的要因）が存在していることが知

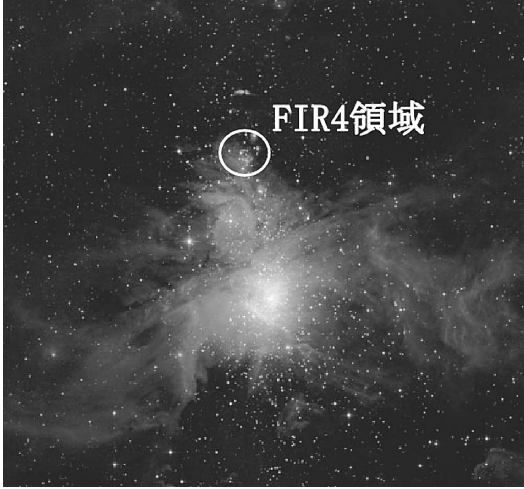


図1 オリオン座分子雲の近赤外線 (2MASS) の図。OMC-2/3 領域は HII 領域 M42, 43 の北部に位置する。本研究の観測ターゲットである FIR 4 領域の位置を示した。

られている。そのため、星団形成を引き起こすためには、このような外的要因が必要であると考えられている。そこで、本研究では星団形成を誘発する外的要因の一つとして、双極分子流に着目した。

この双極分子流が次世代の星形成を誘発するという観測的示唆が近年報告され始めている。たとえば、低質量星形成領域（質量の軽い星が生まれている領域）として有名なおうし座分子雲内にある L 1551 IRS 5 NE では若い星 (IRS 5) から放出された双極分子流が若い星 (NE) を取り巻く高密度ガスに衝突することで NE が形成されたと考えられている。この NE は IRS 5 の双極分子流の青方偏移*1した側に位置し、NE を取り巻く高密度ガスも青方偏移していることから相互作用を受けていると考えられ、さらに、NE の年齢と IRS 5 の双極分子流の力学的年齢（原始星の年齢の指標）を比較すると、NE は IRS 5 の分子流との衝突を受けた後に形成されたことを示唆する結果が出ている⁹⁾。また、多くの双極分子流が存在している

*1 われわれに近づいてくるガスはドップラー効果により波長が短くなる。

領域として有名な NGC1333 領域では、その双極分子流によって形成されたと考えられる空洞構造や周辺にガスが掃き集められているような構造（シェル構造）が多く発見されている。このシェル中にある SK-1 と呼ばれるコアはすでに星形成の兆候が見られることから、分子流によって誘発されたことが示唆されている⁶⁾。このように双極分子流が星団形成を誘発する可能性は観測的に示唆され始めているが、これらの多くはガスの分布のみの議論に大きく依存し、確たる証拠は得られていなかった。

そこで、このような状況を打破するため、われわれは最も近傍の巨大分子雲 (GMC) Orion A の北部に位置する Orion Molecular Cloud-2/3 (OMC-2/3) 領域にある星団形成領域 FIR 3, 4, 5 領域に着目した (図1)⁷⁾。OMC-2/3 領域は 1.3 mm ダスト連続波により 21 個の高密度コア⁸⁾、850 μ m ダスト連続波により 33 個の高密度コアが同定されている⁹⁾。さらに、これらの高密度コアに付随した双極分子流も 14 個検出されており、双極分子流が密集している¹⁰⁾。そのため、双極分子流と星団形成の関係を調べることに適した領域であると言える。なかでも FIR 4 は OMC-2 領域中でも最も強いダスト連続波源であり、赤外線の観測から星団形成領域であることが知られている。

3. 観測装置と観測輝線

双極分子流の高密度ガスへの影響を調べるためには、双極分子流と高密度ガスの詳細分布と速度構造を見ることが重要となる。そして、高密度ガス内部の構造と、そこでの星形成活動を明らかにするためには、星形成の現場となる密度が高い領域を詳細に見渡すことができる分子輝線を選択する必要がある。しかし、この双極分子流および高密度ガスに着目した観測のみでは、双極分子流の高密度ガスへの影響は「ガスの分布」と「速度構造の変化」といった間接的な影響しか見ることが



図2 左図は野辺山ミリ波干渉計の写真。野辺山ミリ波干渉計 (Nobeyama Millimeter Array; NMA) は口径 10 m の素子アンテナ 6 台から構成される電波干渉計である。6 台のアンテナは観測シーズン中に異なる三つのアンテナ配列に並び替えられる。これらの配列を組み合わせることで観測することにより、数秒角から 1 秒角の小さい天体の構造を見分けることができる電波画像を得ることができる。右図は Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) 望遠鏡と筆者。ASTE は南米チリのアタカマ砂漠の標高 4,800 m のパンパ・ラ・ボラにある口径 10 m のサブミリ波電波望遠鏡である。

できない。そのため、本研究の目的に直接迫るためには相互作用という物理過程を通じて生成される分子を検出することが重要となる。

詳細なガスの分布の情報が必要な観測では、より細かい構造を見分けることができる野辺山ミリ波干渉計 (NMA) を用いる (図 2)。また、広域のガス分布やサブミリ波の分子ガスの情報が必要な観測では、単一鏡のサブミリ波電波望遠鏡 Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) を用いる (図 2)。

観測する分子輝線は、まず星形成の現場である高密度ガスの分布・速度構造を明らかにするため、密度が高い領域を詳細に見渡すことができる H^{13}CO^+ ($J=1-0$) 分子輝線を用いた。次に双極分子流の詳細なガス分布および速度構造を明らかにするため、 ^{12}CO ($J=1-0$) 分子輝線を NMA を用いて観測を行った。また、双極分子流が高密度ガス (ダスト) に衝突することで生成される、衝撃波起源分子であるサブミリ波 CH_3OH ($J_K=7_K-6_K$; $K=0, 1, 2$) および SiO ($v=0, J=2-1$) 分子輝線を用いた。

*2 われわれから遠ざかるガスはドップラー効果により波長が長くなる。

4. 結 果

4.1 双極分子流の詳細分布を解明

図 3(a), (c) と図 3(b), (d) は ^{12}CO ($J=3-2, 1-0$) 分子の青方偏移 (われわれに近づいている成分) と赤方偏移*2 (われわれから遠ざかる成分) した高速度成分の分布を示している。 ^{12}CO 分子ガスの分布は原始星 FIR 3 の北東と南西にピークをもっている。これは FIR 3 が空の面に平行に近い状態で双極分子流を放出していることを示している。また、南西側の分子流は広がり (0.09 pc) は、北東側の分子流の広がり (0.19 pc) と比べて約 2 倍小さい。これは、南西側の分子流が、先端付近で何かにせき止められていることを示唆している。

また、ASTE (単一鏡) と NMA (干渉計) とで得られた ^{12}CO 分子の分布が異なる。これは干渉計によって得られたイメージは、広がった構造に感度がないためである (今回の NMA のデータでは 55 秒 (~ 0.12 pc) 以下の構造しか検出できない)。

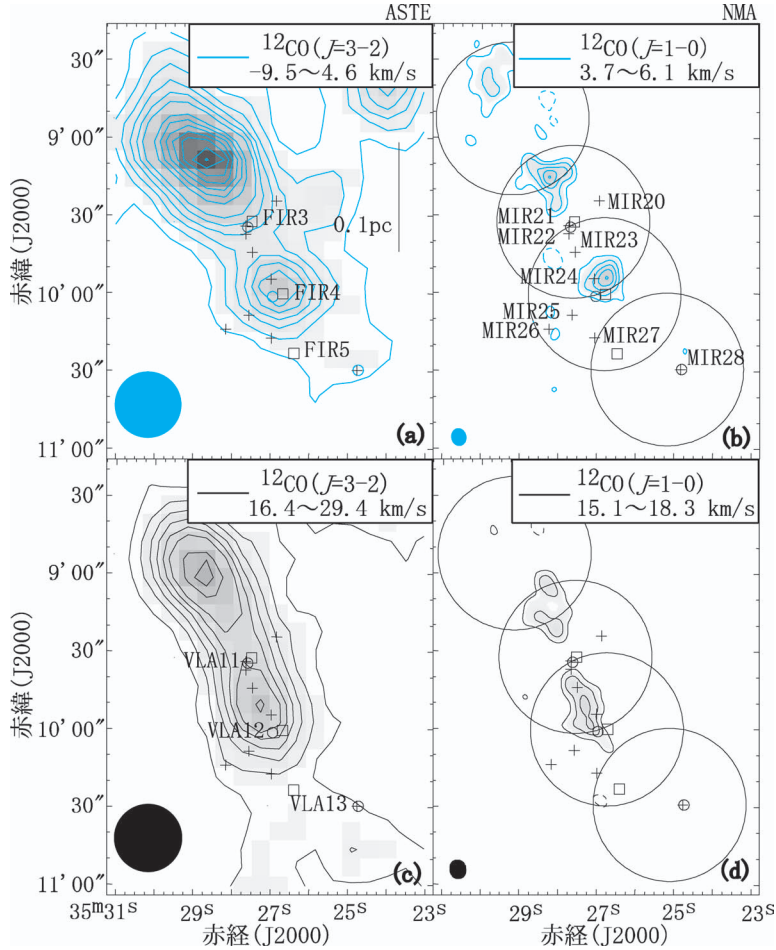


図3 $^{12}\text{CO}(J=3-2)$; 左図) 分子と $^{12}\text{CO}(J=1-0)$; 右図) 分子の青方偏移成分 (上段) と赤方偏移成分 (下段) の高速度成分の分布図. 図中の+印は中間赤外源の位置¹⁶⁾, □印は1.3 mm ダスト連続波源の位置⁷⁾, ○印は3.6 cm free-free 放射源の位置を示す¹¹⁾, ○印はNMAの視野を示す. また, 各図の左下の楕円はASTE, NMAの観測でどの程度小さい天体の構造を見分けることができるかを示している.

4.2 FIR 4 に付随した高密度ガス

図4(a)は $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ 分子輝線の積分強度図である. この図から, 原始星候補天体FIR 4に高密度ガスが付随していることが明らかになった. これは, 野辺山45 m宇宙電波望遠鏡の過去の観測の結果とほぼ一致する^{12), 13)}. さらに, 過去の観測と比べより細かい構造を見分けることができるNMAを用いた観測を行うことで, FIR 4に付随する高密度ガスはFIR 4の北東側にU字型の構造をもつことが明らかになった. 以後, この

高密度ガスの塊をFIR 4クランプと呼ぶ. このFIR 4クランプの速度幅は 1.1 km s^{-1} と, 他のOMC-2/3領域内の原始星候補天体の高密度コアの速度幅 0.8 km s^{-1} と比べて広い¹⁴⁾. 低質量星形成領域おうし座分子雲内のコアの速度幅 $\sim 0.5 \text{ km s}^{-1}$ と比べても優位に広い¹⁵⁾.

図4(b)は青方偏移成分と赤方偏移成分に分けて表示させたもので, 青方偏移成分は南北に, 赤方偏移成分は東西に広がった構造をもち, 分布に違いがある.

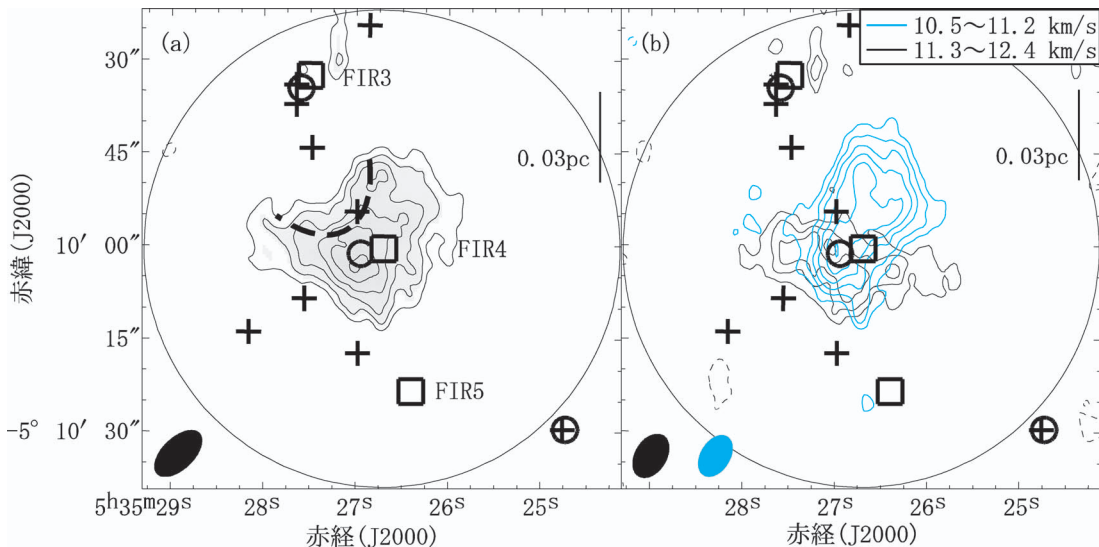


図4 (a)は H^{13}CO^+ ($J=1-0$) 分子輝線の積分強度図を示す. (b)は青方偏移成分を青のコンタア, 赤方偏移成分を赤のコンタアで示した図である. +, □, ○印は図3と同じ.

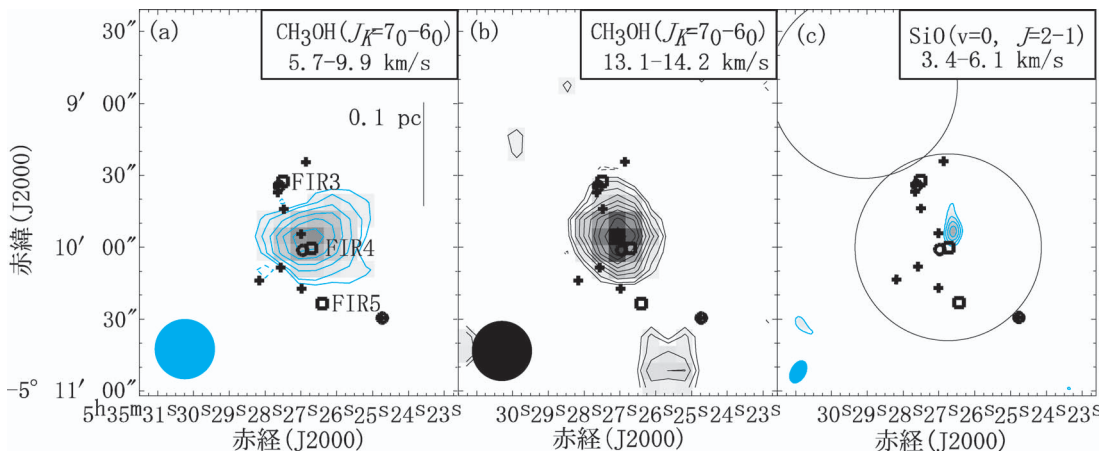


図5 (a)はサブミリ波 CH_3OH ($J_K=7_0-6_0$) の青方偏移成分, (b)は赤方偏移成分の分布を示す. (c)は SiO ($v=0, J=2-1$) 分子輝線の青方偏移成分の分布を示す. +, □, ○印は図3と同じ.

4.3 衝撃波の存在を示す分子の検出

図5(a)–(b)は双極分子流と周辺ガスとの相互作用によって、生成されることが知られている、 CH_3OH および SiO 分子輝線の観測の結果である。 CH_3OH , SiO ともに FIR 3 から放出された双極分子流の広がりを抑えて観測を行った。結果、どちらの分子も FIR 3 の南西方向の分子流の先端で検出された。

4.4 多数の高密度コアの検出

図6(a), (b)の左図, 右図とも同じデータから作成した3.3 mm 帯ダスト連続波の分布を示す。ただし、解析を行う際に右図の方がより天体の小さい構造を見分けることができるようにデータ解析を行った。

図6(a)を見ると、過去の単一鏡の1.3 mm ダスト連続波の観測 (~8秒程度の構造まで見分ける

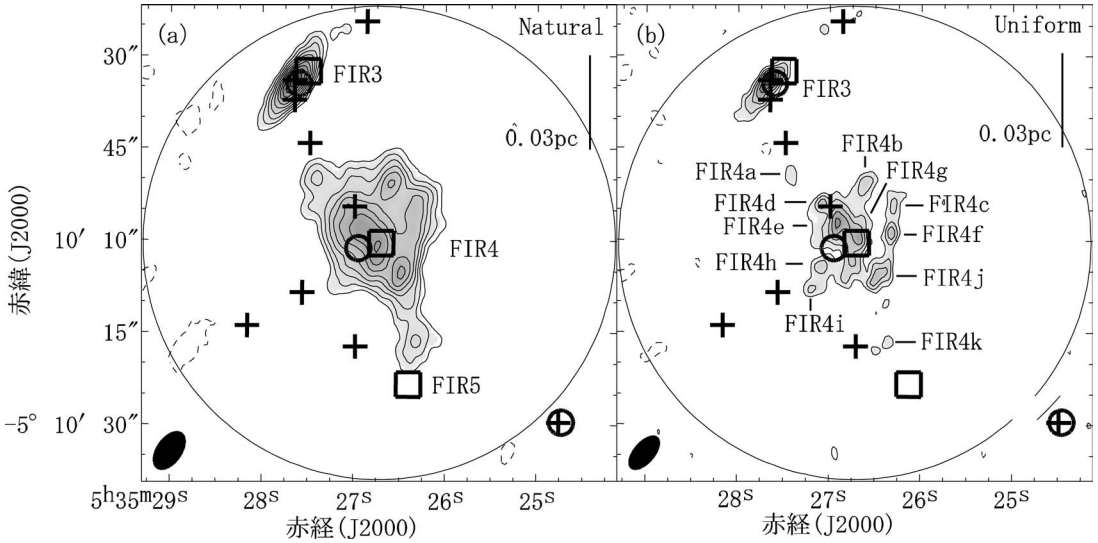


図6 3.3 mm ダスト連続波の観測結果を示す. (a) と (b) は同じデータから得られた図であるが, 右図はより小さい構造を見分けることができる手法 (uniform weight) で解析した図である. +, □, ○印は図3と同じ.

ことができる観測⁷⁾で同定されていた FIR 3 と FIR 4 (□印) に付随して 3.3 mm ダスト連続波の放射があることがわかる. しかし, FIR 5 に付随した 3.3 mm ダスト連続波は検出されなかった. さらに, 3.3 mm ダスト連続波の分布は北東-南西方向に伸び, FIR4 の北西方向に膨らんだ構造があり, 大局的には 1.3 mm ダスト連続波と良い相関がある.

FIR 3 に付随する 3.3 mm 帯ダスト連続波は赤外線源 MIR 21 とほぼ一致している. この MIR 21 は MIR 22 と離隔 ~ 3 秒 (1,400 AU^{*3}) の二重星だと考えられていた¹⁶⁾. しかし, われわれの観測は ~ 3 秒程度までの小さい構造を見分けることができるにもかかわらず分解できなかった. さらに, この FIR 3 はこの方向に双極分子流を放出していることから MIR 21, 22 はこの分子流の反射星雲ではないかと考えられる.

FIR 4 は過去の観測では一つの原始星候補天体であると考えられていた. しかしながら, NMA を用いて, より小さい天体の構造を見分けること

ができる観測を 3.3 mm 帯ダスト連続波で行ったところ, FIR4 は 11 個の高密度コアの集合体であることが明らかになった. これらのコアの典型的なサイズ, 質量, 密度は 5 秒 ($\sim 2,250$ AU), 0.78 太陽質量^{*4}, $1.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ である. ここで, この質量, 密度は干渉計の観測によって得られた結果であることに注意を払わなくてはならない. 干渉計の特性を考慮すると先ほど述べた質量は下限値となる.

5. 観測結果の解釈

5.1 双極分子流と高密度ガスとの相互作用

若い星 (原始星) から高速で放出されているガス (双極分子流) が周辺ガスに衝突 (相互作用) していることを以下のように, ガスの分布 (形態学的証拠), ガスの速度構造 (運動学的証拠), 相互作用という物理過程を通じて生成される分子の検出 (化学的証拠) という三つの観点から示すことができた.

*3 天文単位. 地球と太陽との平均的な距離. 1 AU = ~ 1.5 億 km.

*4 太陽の質量. 1 太陽質量 = 1.9884×10^{30} kg

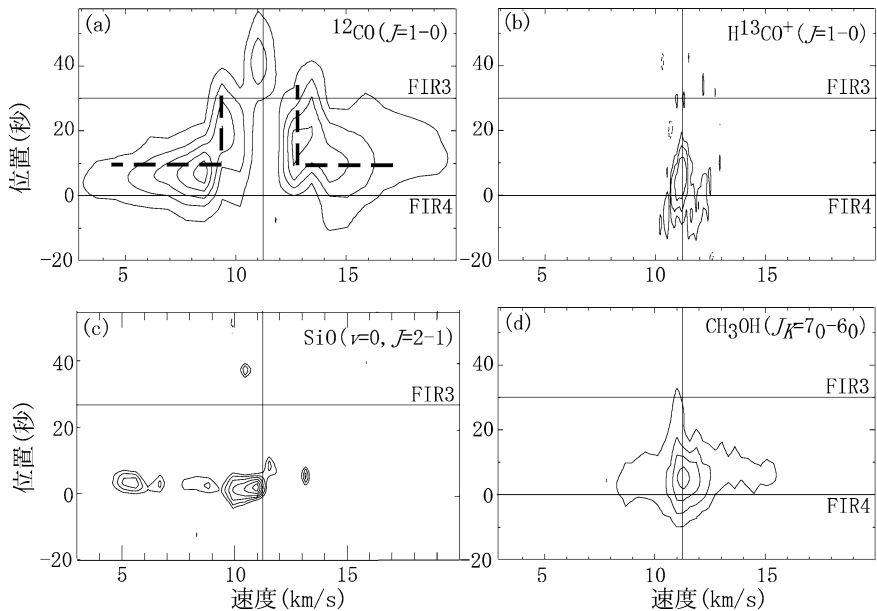


図7 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$; (a), $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$; (b), $\text{SiO}(v=0, J=2-1)$; (c), $\text{CH}_3\text{OH}(J_K=7_0-6_0)$; (d) 分子輝線の位置-速度図. この位置-速度図は FIR 3 から放出された双極分子流の軸に沿って作成した図である. 横軸は速度, 縦軸は位置を表す. 図中の2本の横線は FIR 3 と FIR 4 の位置を示す.

[相互作用の形態学的証拠]

$^{12}\text{CO}(J=3-2)$ 分子輝線の観測の結果, FIR 3 からの放出された南西方向の分子流の広がりには北西方向の分子流の広がりの約半分しかない. これは, 南西方向の分子流が何らかの要因によって進行を妨げられていると考えられる. 一方, NMA の $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$ 分子輝線の観測からは, FIR 4 の北東方向に U 字型に窪んだ構造をもつことが明らかになった. この U 字型の構造にぴったりはまるように FIR 3 の分子流が分布している. このことから, FIR 3 の分子流が FIR 4 クランプに衝突することで空洞構造を形成したと考えられる. 以後, この空洞構造がある領域を「相互作用領域」と呼ぶ.

[相互作用の運動学的証拠]

図7は $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$, $\text{SiO}(v=0, J=2-1)$, $\text{CH}_3\text{OH}(J_K=7_0-6_0)$ 分子輝線の, FIR 3 から放出された分子流の軸に沿った位置-速度図である. 縦軸が FIR 4 からの距離, 横軸が速度を示している.

$^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 分子輝線の位置-速度図 (a) は FIR 3 から FIR 4 に近づくにつれ, 速度幅が大きくなり, L 字型の分布をしている. このように, 位置-速度図における L 字型の分布は双極分子流と周辺ガスとの相互作用を示唆している¹⁷⁾. また, 他の分子輝線においても, FIR 3 から FIR 4 (相互作用領域) にかけて速度幅が増大している. これら結果は分子流, 高密度ガス, 衝撃波起源分子間に関係があることを示し, 分子流と高密度ガスとの相互作用の存在を示唆している.

[相互作用の化学的証拠]

ここまで議論したように, FIR 3 から放出された分子流と FIR 4 クランプとが相互作用をしている兆候がある. さらに衝撃波面でガスの相互作用という物理過程を通じて生成される分子の検出をすることで, 相互作用が起きていることのさらなる証拠となりうる.

CH_3OH , SiO 分子は分子流による加熱を伴う衝撃波によって塵 (ダスト) から蒸発し生成される分子であることが知られている^{18), 19)}. つまり, こ

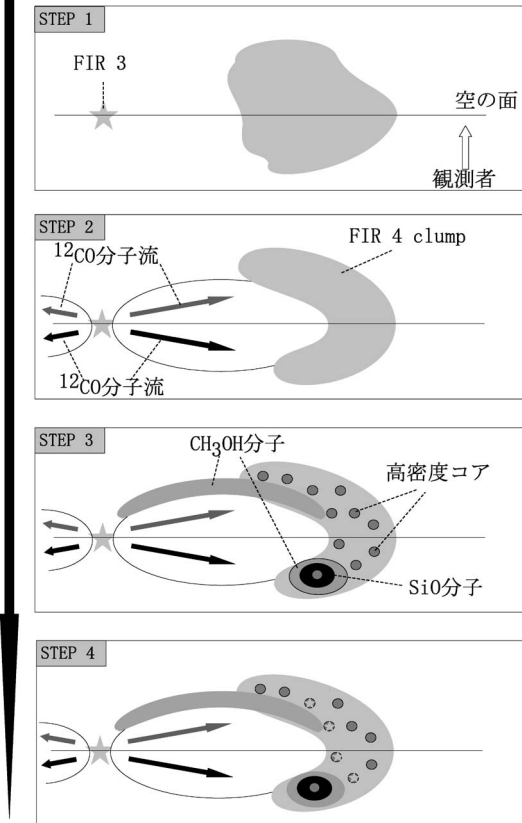


図8 FIR 4 領域における双極分子流における誘発的星団形成シナリオ.

これらの分子の検出は相互作用の化学的証拠となりうる。4.3節で示したように、FIR 3の南西方向の分子流とFIR 4クランプの間でのみ、 CH_3OH 、 SiO 分子を検出した。これにより、FIR 3の分子流とFIR 4クランプとの相互作用が化学的に裏づけられた。

5.2 双極分子流による誘発的星団形成

5.1節の議論からFIR 3の分子流とFIR 4クランプとが相互作用をしていることが明らかになった。一方、4.4節からはFIR 4クランプは11個ものコアからなることが明らかになっている。これらのことから、相互作用がFIR 4クランプを11個のコアへ分裂し、さらには次世代の星形成を誘発するのではないかと推測できる。そこで、われわれは重力不安定性、関連する物理過程の時間、

星形成の有無の観点から、この可能性について検証する。

まず、11個のコアが重力不安定性により分裂が起きたかを検証するため、11個のコア間の離隔と重力不安定性で起きたことを示唆するジーンズ長との比較を行った。FIR 4クランプ内に存在する11個のコア間の離隔は $\sim 5 \times 10^3$ AUであるのに対し、この領域のジーンズ長は $\sim 5 \times 10^3$ AUであった。つまり、コア間の離隔はジーンズ長とオーダーで一致し、コアへの分裂が重力不安定性によって引き起こされた可能性があることを示唆している。

次に、このコアへの分裂が相互作用前に起きたか否かを検証するため、分裂までにかかる時間と相互作用をしている時間を比較した。分裂するまでにかかる時間は、FIR 4クランプ内の分裂が音速の速さで進行していくと仮定して見積もると、 $\sim 3.8 \times 10^4$ 年となる。一方、相互作用をしている時間は、FIR 3の北東側の分子流（相互作用をしていない側）の力学的年齢とほぼ同じであると仮定すると、 $\sim 1.4 \times 10^4$ 年となる。分裂するまでにかかる時間と相互作用をしている時間はオーダーで一致し、コアへの分裂が相互作用後に起こった可能性があることを示唆している。

これまでの議論で、分子流が高密度ガスに衝突することによって、11個のコアへ分裂が誘発された可能性を示唆できた。最後に、この11個のコアから、星が生まれるか否かを判断するためにビリアル質量と塵（ダスト）から求めたガス質量との比較を行うことで、11個のコアが重力的に崩壊し、星形成の兆候が見られるかを検証する。分子雲に観測される分子線の速度幅は一般に熱運動による速度幅よりも数倍広く分子雲は乱流によって支えられていると考えられている。ビリアル質量は分子雲が外圧がなく、ガスの乱流運動によって重力平衡にあると仮定したときの質量である。そのため、ビリアル質量より重い質量をもつコアは重力的に崩壊し重力収縮をしている。結果、11個

すべてのコアは重力的に崩壊し星形成の兆候がある可能性があることがわかった。

これらのことから、まず、FIR 3 で星形成が始まり双極分子流が放出される [STEP 1], 次に FIR 3 から放出された双極分子流が FIR 4 クランプに衝突する [STEP 2], さらに、この衝突が FIR 4 クランプ内において重力不安定性を引き起こし、11 個のコアへの分裂を誘発する [STEP 3], そして最終的には、これら 11 個のコアから星が生まれる [STEP 4], というシナリオが考えられる。FIR 4 クランプ中には、MIPS の $24\mu\text{m}$ ソースが 1 天体存在していることから、FIR 4 クランプ中では星形成活動が起こり始めていると考えられる。そのため、現在は、STEP 3 から STEP 4 の間の進化段階であると考えられる。

6. ま と め

星団形成を引き起こす物理メカニズムを解明するため、周辺環境（外的要因）に着目し、より小さい天体の構造を見分けることができる野辺山ミリ波干渉計とサブミリ波観測が可能な ASTE 電波望遠鏡のそれぞれの特徴を活かし、OMC-2/FIR 4 領域の観測を行った。結果、FIR 3 から放出された分子流は FIR 4 に付随した高密度ガス（FIR 4 クランプ）と衝突していることが明らかになった。さらに、FIR 4 クランプは過去の観測では単一のコアだと思われていたが NMA によりより小さい天体の構造を見分けることができる観測を行うことで 11 個の高密度コアからなることを明らかにした。これらの高密度コア間の離隔は重力不安定性で分裂したことの指標となるジョーンズ長と同程度であることから、11 個のコアへの分裂は重力不安定性で引き起こされた可能性があることがわかった。また、分裂するまでにかかる時間と相互作用をしている時間との比較から、この重力不安定性による分裂は、相互作用後に起きた可能性があることがわかった。さらに、この 11 個の高密度コアは星形成の兆候があり、これから

星が生まれる可能性があることがわかった。これらのことから、FIR 3 の分子流と FIR 4 クランプとの相互作用は高密度ガス内に重力不安定性を引き起こし、さらには星形成を誘発している可能性があることがわかった。

これまで、星団形成の観測的研究は天体の小さな構造を見分ける性能と広い領域の観測が要求されていたため、難しかった。しかし、ミリ波・サブミリ波及び単一鏡・干渉計の特徴を活かした観測を行うことで、「双極分子流による誘発的星団形成」についてこれまでにない強い証拠を得ることができた。現在、チリのアタカマ砂漠に建設中の 80 台もパラボラアンテナを組み合わせた干渉計である Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) を用いれば、こういった観測がより容易により詳細に行うことができる。さらに、ALMA では NMA よりはるかに天体の小さな構造を見分けることができるため、誘発的星団形成領域で起きている現象をより詳細に解明されることが期待できる。

謝 辞

本研究は、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻における修士論文をもとにしており、ASIAA（台湾）の高橋智子氏、高桑繁久氏、国立天文台の齋藤正雄氏、そして指導教官である川辺良平氏らの丁寧な指導に心からお礼を申し上げます。また、研究室の先輩である塚越 崇氏、黒野泰隆氏、田村陽一氏には多くのアドバイスをいただき、研究を助けていただきました。当時、国立天文台に所属していた山田雅子氏（ASIAA）には理論的な立場からコメントをいただきたいへん心強い限りでした。観測実行にあたっては、NMA、ASTE チームの方々には観測初心者だった筆者を親切にサポートしていただき、深く感謝いたします。

参考文献

1) Myers P. C., Bachiller R., Caselli P., Fuller G. A., Mardones D., Tafalla M., Wilner D. J., 1995, ApJL 449, L65
 2) Saito M., Kawabe R., Kitamura Y., Sunada K., 1996, ApJ 473, 464
 3) Momose M., Ohashi N., Kawabe R., Nakano T., Hayashi M., 1998, ApJ 504, 314
 4) Lada, C. J., Lada E. A., 2003, ARA & A 41, 57
 5) Yokogawa S., Kitamura Y., Momose M., Kawabe R., 2003, ApJ 595, 266
 6) Sandell G., Knee L. B. G., 2001, ApJL 546, L49
 7) Chini R., Reipurth B., Ward-Thompson D., Bally J., Nyman L.-A., Sievers A., Billawala, Y., 1997, ApJL 474, L135
 8) Shimajiri Y., Takahashi S., Takakuwa S., Saito M., Kawabe R., 2008, ApJ 683, 255
 9) Johnstone D., Bally J., 1999, ApJL 510, L49
 10) Takahashi S., Saito M., Ohashi N., Kusakabe N., Takakuwa S., Shimajiri Y., Tamura M., Kawabe R., 2008, ApJ 688, 344
 11) Reipurth B., Rodríguez L. F., Chini R., 1999, AJ 118, 983
 12) Aso Y., Tatematsu K., Sekimoto Y., Nakano T., Umemoto T., Koyama K., Yamamoto S., 2000, ApJS 131, 465
 13) Ikeda N., Sunada K., Kitamura Y., 2007, ApJ 665, 1194
 14) 高橋, 2007, 年総合研究大学院大学博士論文
 15) Mizuno A., Onishi T., Hayashi M., Ohashi N., Sunada

K., Hasegawa T., Fukui Y., 1994, Nature 368, 719
 16) Nielbock M., Chini R., Müller S. A. H., 2003, A&A, 408, 245
 17) Takakuwa S., Ohashi N., Hirano N., 2003, ApJ 590, 932
 18) Avery L. W., Chiao, M., 1996, ApJ 463, 642
 19) Bachiller R., Pérez G., M., Kumar M. S. N., Tafalla M., 2001, A&A, 372, 899

Millimeter- and Submillimeter-Wave Observations of the OMC-2/3 Region. II. Observational Evidence for Outflow-Triggered Star Formation in the OMC-2 FIR 3/4 Region

Yoshito SHIMAJIRI

Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: We have observed the OMC-2 FIR 3/4 region with the NMA and ASTE telescope. Our results suggest that the presence of an interaction between the out flow driven by FIR 3 and the dense gas associated with FIR 4. Moreover we have first found that FIR 4 consists of 11 dusty cores at a scale of 2000 AU. We suggest that the interaction triggered the fragmentation into these dusty cores, and the next generation of the cluster formation in FIR 4.