

平成22年6月15日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20740113
 研究課題名（和文） なぜ星形成には孤立的と集団的の2つのモードがあるのか？
 研究課題名（英文） On the Origin of Two Modes of Star Formation: Isolated Formation vs. Clustered Formation

研究代表者

古屋 玲 (FURUYA Ray, S.)
 国立天文台・ハワイ観測所・研究員
 研究者番号：60455201

研究成果の概要（和文）：

分子雲コアが重力収縮する際の初期条件及び境界条件(まとめて環境条件)の違いに着目して、何が孤立的な星形成と集団的な星形成へ至る運命をわけているのかを調べた。本研究では、さまざまな質量の原始星及び原始星候補天体群について、その誕生前後の進化の様子を観測的に調べることに集中した。この結果、中心星への質量降着現象の多様性の起源について、環境条件の観点から理解を深めることができた。

研究成果の概要（英文）：

We studied the origin of two modes of star formation: "isolated" vs. "clustered"; the former mostly represents low-mass star formation and the latter high-mass. In this context, we searched for extremely young protostar(s) as well as cluster of such (proto)stars over a wide range of stellar masses, and investigated physical properties of their natal molecular gas, focusing on accretion onto central star(s).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：分子雲コア、重力収縮、環境条件、質量降着、原始星形成、回転トロイド、分裂過程、星団形成

1. 研究開始当初の背景

我々の銀河系内の90%以上の恒星は星団に属する。重要なことは、(1) 圧倒的大多数の中小質量星(太陽質量の約8倍以下の星)はオリオン星雲のような大質量星(太陽質量の約8倍以上の星)形成領域で生まれること、(2) 孤立

系で生まれる大質量星は皆無であることである。孤立系における中小質量星形成に関しては、進化シナリオの大枠が完成されており、研究計画書で述べた、我々の研究等によって初期条件及び境界条件 --- まとめて環境条件 --- が分かれば、そこで起こるのであろう、原始

星への収縮と降着過程はある程度予測できるようになっていた。しかし、何がそのような環境条件を与えるのかは未解決であり、原始星誕生前後の進化の様子が観測的には手つかずであった。大質量星の形成に関しては、形成前後の物理的特徴及び分裂過程と環境条件の関係すら理解されておらず、銀河系の基本構成要素である星と星団の多様性の起源の理解は十分と言える状況ではなかった。

2. 研究の目的

本研究では、さまざま質量の若い星から代表的な天体を選び、形成の素過程を詳細に調べるアプローチを採った。本研究の対極には、多数標本に基づく統計的研究がある。両者のアプローチは相補的であり、これらの結果を総合し、理論的研究との比較を行なうことで、上述の問題に対する理解を深められると考えた。具体的には、星形成の舞台である高密度分子ガス塊である(分子雲コア)が重力収縮する際の環境条件の違いに着目して、何が孤立的な星形成と大質量星形成を伴う集団的な星形成、さらには単独星あるいは連星系へ至る運命をわけているのかを観測的に調べる事を目的に設定した。

3. 研究の方法

分子雲コアの中心部は、水素分子密度にして $\sim 10^7 \text{cm}^{-3}$ を超える高密度な領域であるため、透過力の高いサブミリ波からセンチ波帯の連続波や臨界密度の高い分子輝線による観測を行った。殆どの観測は共同利用によるものであり、使用した望遠鏡は、国立天文台野辺山45m電波望遠鏡、同アタカマサブミリ波望遠鏡実験(ASTE)、8m光学赤外線望遠鏡「すばる」、カルテクサブミリ波天文台(CSO) 10.4m鏡、米国4大学連合によるミリ波干渉計(CARMA)、米国スミソニアン天文台等によるサブミリ波干渉計(SMA)、米国国立天文台電波天文台大型干渉計(VLA)、同超長基線大陸干渉計(VLBA)及び欧州大陸干渉計(EVN)による観測を行った。各望遠鏡で提供されているソフトウェアを用いてデータの較正処理を行った後、科学的目的に応じて解析プログラムを開発し、解析に取り組んだ。

4. 研究成果

大質量星は前主系列段階を持たず、中小質量星とは大きく異なる形成過程を辿る。このため、両者を分けて研究成果をまとめる。

(1) 中小質量星の形成過程の研究

① 質量降着過程の研究

分子流の噴出に至らないほど若い原始星を包含する分子雲コアを詳細に調べれば、星形成の初期条件を知ることができると考えた。なぜならば、このような分子雲コアは分子流

による散逸を受けていないため、環境条件を保持しているはずである。

そこで、星なし分子雲コアから原始星への進化の中間段階にあり、我々がこれまで集中的に観測してきた原始星GF9-2 (Furuya et al. 2006)の詳細観測を継続した。研究初年度には、同原始星へ落下するガスの運動を野辺山45m鏡とCSO 10.4m鏡を用いて詳細に調べた。

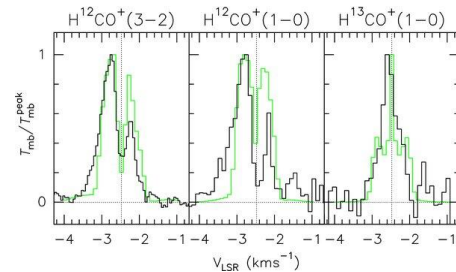


図1. 低質量原始星GF9-2で観測された、中心星への質量降着を示す輝線プロファイル(黒)とモデルスペクトル(緑) (Furuya et al. 2009a)。

その結果、質量降着現象に特徴的なスペクトルプロファイルと同分子雲コアのほぼ全域に渡って検出した(図1)。このことは、同分子雲コアを構成するガスが音速の数倍で全域に渡って落下していることを示す。この結果は、1969年以来議論されてきた、分子雲コアの収縮に関するシナリオのうち、暴走的収縮解の予測するところと良い一致を見た。実際、輻射輸送を解く数値モデルを併用して、質量降着率を推定した結果、GF9-2コアは重力的に不安定な状態から収縮を始めた、中心星(ファーストコア)形成後5000年にも満たない進化段階にあると絞り込むことができた。

② 分子雲コアの重力収縮の環境条件の研究

分子雲コアの重力収縮の初期条件と境界条件の解明は表裏をなす。このため、研究対象を、上述の①の研究のように、高密度分子ガスに限定すると本質を見失う恐れがある。

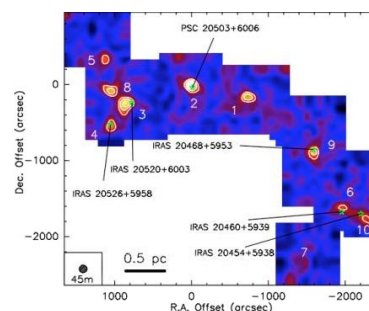


図2. 野辺山45m電波望遠鏡によるアンモニア輝線の観測で得られた、フィラメント状分子雲GF9における分子雲コアの分布。これらのコアの間隔と質量は、フィラメント状分子雲を構成する希薄ガスのJeans長とJeans質量と同程度のため、母体のフィラメントが分裂して形成されたと考えられる (Furuya et al. 2008b)。

そこで、野辺山45m鏡を用いて、前述のGF9-2分子雲コアの母体である、フィラメント状分子雲の物理状態を把握するための観測を行なった。まず、同フィラメントにおける分子雲コア形成の様子を探るため、アンモニア分子輝線を用いて、高密度コアの網羅的探査観測を行なった。次に、同フィラメントを構成する、低密度ガス(希薄ガス)の速度場を把握するための観測を行った。

後者の観測対象である低密度ガスは、前者の観測で検出された分子雲コアと分子雲コアの間の空間に広がって分布する。この2つの観測の結果を総合すると、同分子雲では約0.1pcのほぼ等間隔で分子雲コアが形成されていることがわかった(図2)。その間隔は、周囲の希薄ガスのジーンズ長程度であることから、フィラメントを構成するガスの重力不安定性が、これらのコアの形成の要因であると論じた。引き続き、周囲の希薄ガスの速度分散とサイズの関係性を調べるための観測を行い、希薄ガスの乱流運動の減衰の観点からデータを解析している。これまでに得られた結果は、GF9-2コアで進行中の重力収縮は、同コアの自己重力に抗して力学的に支えていた、外部のガスの乱流運動の散逸によって、引き起こされたことを強く支持する結果を得た。

この研究で対象とした、フィラメント状分子雲の形成機構と分子雲コア形成の条件を考察するため、赤外線天文衛星「あかり」で取得された遠赤外線広域マップの作成評価試験にも参加した。これは、JAXA宇宙科学研究所・北村良実准教授を代表とする、「あかり」遠赤外線広域マップ作成チームによる、星形成研究のためのプロジェクトである。最終的には、作成したマップから、フィラメント状分子雲と周囲の原子ガス雲を分離し、各々の柱密度分布を求める。これらのデータから乱流速度場及び密度場を求め、乱流のパワースペクトルを導出し、乱流の減衰と分子雲の形成及びコアへの分裂過程との関連を論じる。本科研費補助期間に開始した、この研究は2011年度内の完結を目指している。

③ 非常に低光度な原始星(VeLLO)のサブミリ波輝線観測

①で述べた、GF9-2よりもやや進化した段階にあると思われるが、大規模な分子流の駆動に星形成に至らない原始星、L1521Fのサブミリ波帯の輝線観測にも取り組んだ。L1521Fは、非常に低光度の原始星(VeLLO)の典型例として注目を集めている天体である。今回、CO J=7-6輝線(周波数807 GHz)などの高励起輝線のサブミリ波帯観測を、カルテクサブミリ波天文台(CSO)10.4m鏡を用いて行った。この結果、VeLLOにおいて一酸化炭素(CO) J=7-6及び6-5輝線の検出に成功した(図3)。VeLLOにおける、このような高励起輝線の検

出は初めてであり、驚きを持って迎えられた。高励起輝線を励起している環境としては、コンパクトな分子流の周囲の物質との相互作用領域に起因する可能性及び中心星への質量降着による衝撃波領域に起因する場合を論じた。さらに、上述のGF9-2との比較を行い、このような進化段階の物理的特徴を論じることができた。

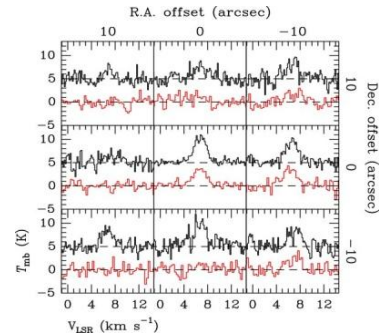


図3. 非常に低光度の原始星(VeLLO)、L1521Fで観測された一酸化炭素(CO) J=7-6(赤)及びJ=6-5(黒)輝線。スペクトルを表示する格子点は、カルテクサブミリ波天文台(CSO)10.4m鏡の807GHz帯のビームサイズである、10秒角間隔(Shinnaga et al. 2009)。

(2)大質量星形成過程の研究

① 大質量原始星候補天体周囲の高密度ガスの運動の研究

大質量の分子雲コア(クランプ)は、大質量星誕生の舞台であるだけでなく、星団形成の母体でもある。従って、輻射圧に打ち克ち質量降着する必要のある大質量星の形成過程だけでなく、星団メンバーへの分裂過程も併せて理解しなければならない。しかしながら、大質量星形成領域は一般的に遠方にあること、大質量星の進化は早く、中心星からの強力な輻射や活発な分子流の活動により、進化のヒステリシスが消去されてしまっているため、観測的研究は容易ではない。このような状況のなかで、2004年頃から(研究代表者のグループも含め)、いくつかのグループが大質量星周囲の円盤状ガス雲(トロイド)における回転運動の検出に相次いで成功した。これらの結果は、少なくともB型星の形成過程は、中小質量星のそれと少なからず類似点があることがわかってきた。

この仮説を検証するためには、大質量原始星候補天体へ落下するガスの運動を直接的に捉え、中心星からの輻射圧に打ち克ち、質量降着するメカニズムを明らかにする必要がある。なお、中小質量星では、中心星からの輻射圧は無視できるため、このようなメカニズムを考慮する必要はない。本研究開始時点で、中心星近傍1000 AUスケールで質量降着が報告されていた天体は、僅かに3例に過ぎ

なかった（うち、1例はイタリアのチームと研究代表者による）。

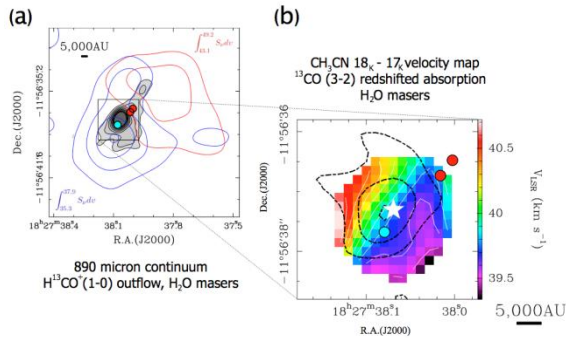


図4. 大質量星形成領域G19.61-0.23における、サブミリ波干渉計などによる観測結果。左パネル(a)のグレイスケールは890 μ m連続波の空間分布で高密度かつ大質量の分子雲コア群の存在を示す。青と赤の点は、水蒸気メーザー源の分布(右パネルも同様)。これらのメーザー源は、中心で形成されつつある若い星が駆動するジェットと分子雲コアの相互作用領域で励起されていると考えられる。青と赤のコントアは、もっとも重い原始星候補天体が噴出する高速度分子ガス流の分布。(a)の中心付近を拡大したものが(b)で、カラーはサブミリ波帯のメチルシアノイド輝線で観測された、高密度分子雲コア中心部の速度場で、原始星ジェットの主軸に対して回転するガスの存在を示す。点線の黒のコントアは、質量降着(infall)を示す特徴的なスペクトルが観測された領域(Furuya et al. 2010)。

そこで、アルチェトリ天文台(イタリア)のCesaroni博士らと分担して、2003年度から日米欧の4つのミリ波干渉計を用い、収縮と角運動量保存の帰結である回転トロイドの探査を行ってきた。本科研費の初年度は、このプロジェクトの最終年度に相当した(上述)。我々が選んだトレーサーはメチルシアノイド分子であり、そのK-ladder遷移を同時に観測し、速度場を精度よく求める手法を開発した。観測した全6天体において大局的スケールのCO分子流と直交する方向に速度勾配を検出した(図4)。これは数1000AUスケールで数100太陽質量と非常に重く、重力的に不安定な回転トロイドを見ていると解釈できる。一連の結果を総合すると、これらのトロイドは、(1)孤立した主星を取り囲んでいるのではなく"原始星団を囲むトロイド"(circumcluster toroids)であり、単独星や連星を産む中小質量星の原始星円盤(前述のGF9-2のそれ等)とは本質的に異なること、(2)多重分裂の初期段階にあり、星団形成の初期条件を探る格好の研究対象であることがわかった。

② メーザー放射の超高分解能観測による、大質量原始星候補天体近傍のガスの運動

上述の研究①は、サブミリ波干渉計などによる観測に基づくため、空間分解能は1秒角程度であった。このため、大質量原始星候補天体のごく近傍10AUスケールのガスの運動を調べるために水酸基、水蒸気及びメタノール分子のメーザー放射の超長基線干渉計(VLBI)技術による複数回の観測を行なった。メーザー放射するガスの運動を捉えることに成功した(図5)。

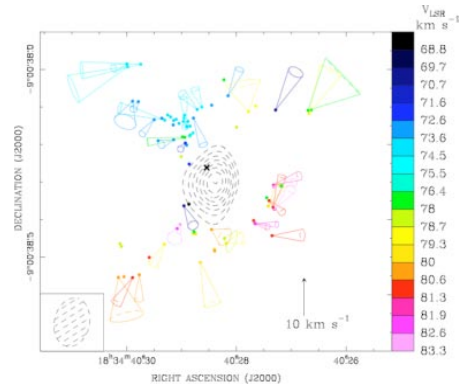


図5. 欧州大陸干渉計(EVN)で大質量原始星候補天体、G23.01-0.41(Furuya et al. 2008a)で観測されたメタノールメーザー源の分布と運動。カラーはメーザースポットの視線速度を表す。中心部の破線のコントアは、1.3cm連続波の分布で中心星の位置を示す。観測されたメタノールメーザー源の運動は、大質量原始星候補天体の周囲で回転する1000AUスケールのガスの運動と矛盾がないことがわかった(Sanna et al. 2010)。

解析の結果、水酸基及び水蒸気メーザー源の運動からは、若い星からのジェットの運動と加速運動の起源を論ずることができた。また、メタノールメーザーの観測は、大質量トロイド内部のガスの運動を捉え、トロイド内で形成されつつある、クラスターのメンバー星周囲のガスの運動を分解した。この結果は、回転と膨張を含む運動で説明でき、降着と回転円盤の相互作用領域を捉えた貴重な例である。なお、一連の結果はカリアリ大学(イタリア)のAlberto Sanna氏の博士論文の一部としてまとめられた。

③ オリオン大星雲中心部における高速分子流のOn-The-Flyマッピング観測

大質量星の形成を理解するためには、大質量星からの質量放出現象も併せて理解する必要がある。そこで、もっとも近傍の大質量星形成領域である、オリオン大星雲におけるCO J=7-6輝線の広域マッピングに取り組んだ。観測はCSO 10.4m鏡を使用した。800 GHz帯の観測は技術的な困難が多く、観測所スタッフの協力を得て、受信機調整や望遠鏡の指向精度の改善など、さまざまな問題を解決することから始めた。最終的には、天候にも恵まれ、image fidelityの高い広域マップを得る事が

できた(図6)。この結果に基づき、まず高速分子ガス流の力学的特徴を明らかにした。それを踏まえ、駆動源である大質量原始星候補天体の特徴を導き、理論モデルとの比較を行った。なお、このCO J=7-6データはOn-the-Fly法で取得されたものとしては、現時点で最高周波数のものである。

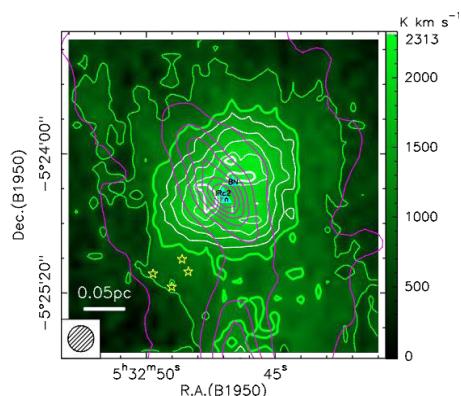


図 6. オリオン大星雲中心部で観測された、CO分子の回転遷移 J=7-6 輝線の空間分布。紫のコントアは、350 μ m 連続波の分布(Lis et al. 1998)。カルテクサブミリ波天文台 10.4m 鏡を使用し、On-The-Fly マッピングの手法で取得した(Furuya et al. 2009b)。

なお、研究最終年度に育児休業による研究の中断が4ヶ月と2週間あった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件、うち査読論文 10 件)

- ① Furuya, R. S., Cesaroni, R., & Shinnaga, H. “Infall, outflow, and rotation in the G19. 61-0. 23 hot molecular core”, 2010 年, 掲載確定 Astronomy & Astrophysics 査読あり
- ② Sanna, A., Moscadelli, L., Cesaroni, R., Tarchi, A., Furuya, R. S., & Gododi, C. “VLBI study of maser kinematics in high-mass SFRs. II. G23. 01-0. 41”, 2010 年, 印刷中, Astronomy & Astrophysics, 査読あり
- ③ Fontani, F., Cesaroni, R., & Furuya, R. S. “Class I and Class II methanol masers in high-mass star forming”, 2010 年, 印刷中,
- ④ Astronomy & Astrophysics, 査読あり

- ⑤ Sanna, A., Moscadelli, L., Cesaroni, R., Tarchi, A., Furuya, R. S., & Gododi, C. “VLBI study of maser kinematics in high-mass SFRs. I. G16. 59-0. 05”, 2010 年, 印刷中, Astronomy & Astrophysics, 査読あり
- ⑥ Codella, C., Cesaroni, R., López-Sepulcre, A., Beltrán, M. T., Furuya, R., & Testi, L. “Looking for high-mass young stellar objects: H₂O and OH masers in ammonia cores”, Astronomy & Astrophysics, 2010 年, 510 巻, A86 - A102, 査読あり
- ⑦ Shinnaga, Hiroko, Phillips, Thomas G., Furuya, Ray S., & Kitamura, Yoshimi, “Warm Extended Dense Gas at the Heart of a Cold Collapsing Dense Core”, Astrophysical Journal Letters, 2009 年, 706 巻, L226 - L229, 査読あり
- ⑧ Furuya, Ray S., & Shinnaga, Hiroko, “High-velocity Molecular Outflow in CO J = 7-6 Emission from the Orion Hot Core”, Astrophysical Journal, 2009 年, 703 巻, 1198 - 1201, 査読あり
- ⑨ Furuya, Ray S., Kitamura, Yoshimi, & Shinnaga, Hiroko, “Spectroscopic Evidence for Gas Infall in GF 9-2”, Astrophysical Journal Letters, 2009 年, 692 巻, L96 - L99, 査読あり
- ⑩ Shinnaga, Hiroko, Phillips, Thomas G., Furuya, Ray S., & Cesaroni, Riccardo, “Submillimeter Observations of the Isolated Massive Dense Clump IRAS 20126+4104”, Astrophysical Journal, 2008 年, 682 巻, 1103 - 1113, 査読あり
- ⑪ Furuya, Ray S., Kitamura, Yoshimi, & Shinnaga, Hiroko, “Low-Mass Star-Forming Cores in the GF9 Filament”, Pub. of the Astronomical Society of Japan, 2008 年, 60 巻, 421 - 428, 査読あり
- ⑫ 古屋玲, 「原始星 (ファーストコア) 誕生後数千年を捉えた!」、天文月報、日本天文学会、2008 年、p. 727 - p. 740、査読なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古屋 玲 (FURUYA Ray S.)
国立天文台・ハワイ観測所・研究員
研究者番号：60455201

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

北村 良実 (KITAMURA, Yoshimi)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所・准教授
研究者番号 30183792
新永 浩子 (SHINNAGA, Hiroko)
カリフォルニア工科大学
Caltech サブミリ波天文台 (U. S. A.)
Staff Scientist
チェザローニ リッカルド (CESARONI,
Riccardo),
Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio Astrofisico di Arcetri
(Italy)
Astronomo associato