

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 14 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540228

研究課題名（和文） 原始星アウトフローにより生成される超音速乱流とその星団形成への効果に関する研究

研究課題名（英文） Supersonic Turbulence Generated by Protostellar Outflows and Their Effects on Star Cluster Formation

研究代表者

中村 文隆 (NAKAMURA FUMITAKA)

国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号：20291354

研究成果の概要（和文）：観測によると、星団は高密度ガス塊（星団形成クランプ）から誕生する。本研究では、原始星アウトフローによる運動量供給により星団形成クランプ内の超音速乱流が維持され、クランプ内では高密度コアが乱流圧縮により形成されることを数値シミュレーションにより明らかにした。また、コアの自己重力よりも外圧が力学進化に大きく影響することが分かった。さらに、近傍の星団形成領域の観測と比較し、我々の星団形成モデルは、観測されるコアの物理的性質を再現することを見出した。

研究成果の概要（英文）：Recent observations have revealed that star clusters form in parsec-scale dense clumps of molecular clouds. The purpose of this study is to clarify how stars form in the dense clumps. From the 3D simulations, we found that protostellar outflows can inject enough momenta into the surrounding gas and thus the supersonic turbulence can maintain for a long time. The supplied turbulence tends to trigger the dense core formation by compressing the surrounding gas. The cores so formed are exerted by the strong external pressures and thus the core dynamical evolution is controlled by the external pressure, instead of the self-gravity. Comparing between our model and observations of nearby cluster-forming regions, we found that our model can reproduce the observed core properties.

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	700,000	210,000	910,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：理論天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：星形成、星団形成、磁気流体シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

星の大半は、星団内で誕生する。また銀河の進化に多大なる影響を及ぼす大質量星が誕生するのも星団内部である。したがって、宇宙の一般的な星形成過程を探る上で星団形成過程の解明は必要不可欠であるといえる。しかしながら、これまでの星形成の研究は太陽のような孤立した小質量星の形成過程に集中して行われてきた。そのため、星団内部で起こる星形成過程については理論的にも観測的にも良く分かっていない。また、星団形成の研究は、ALMAなどの次世代大型望遠鏡のターゲットの一つであるが、標準的な理論モデルがまだ存在しない。研究開始当初は次世代大望遠鏡 ALMA の稼働が数年後に迫っているときであり、星団形成の理論モデルを構築することが急務であった。

2. 研究の目的

観測によると、星団はパーセクスケールの高密度ガス塊（クランプ）から誕生する。クランプ内は超音速乱流状態にあり、また強い磁場も付随している。星団形成領域では、星が密集して生まれるため、孤立した小質量星の形成過程とは異なり、若い星からの原始星アウトフローが次世代の星形成に多大な影響を与えると予想される。そこで、本研究では、自己重力・超音速乱流・磁場・原始星アウトフローを考慮した大規模磁気流体力学シミュレーションを遂行し、クランプから星団が生まれる過程を解明することを大きな目的としている。

3. 研究の方法

星団が形成される高密度クランプには、自己重力・磁場・超音速乱流が複合的に働くため、その力学進化は非線形となる。そのため、本研究では、数値シミュレーションによる直接計算により、星団形成クランプ内の星形成過程を調べることにした。本研究を遂行する前から3次元磁気流体シミュレーションコードはすでに開発済みであったが、今回、新たに、adaptive mesh refinement 法による磁気流体コード ENZO も用いて、高空間分解能のシミュレーションも行った。

4. 研究成果

以下では主な研究成果について簡潔に紹介する。

孤立した環境下で起こる星形成の場合

(1) 超音速乱流場が卓越している星団形成クランプと孤立した環境で星形成が起こる場合（乱流場が弱く、磁場が強い環境）の星形成過程の違いを探るため、初期に強い磁場

で支えられている分子雲中での星形成過程を3次元 MHD シミュレーションにより調べ、強い磁場がある場合、乱流圧縮によって磁気拡散が加速され、雲の自由落下時間の数倍程度のタイムスケールで高密度コアを形成することが分かった（図1参照）。

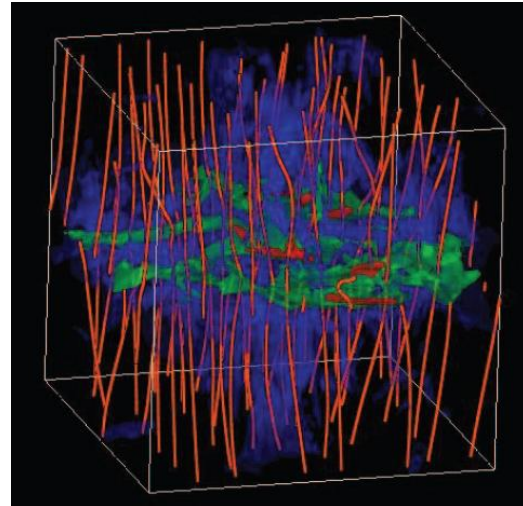


図1：初期に磁場で支えられた分子雲中で、乱流圧縮によって磁気拡散が加速され、高密度コア（赤い部分）が形成される様子。赤い線は磁力線。

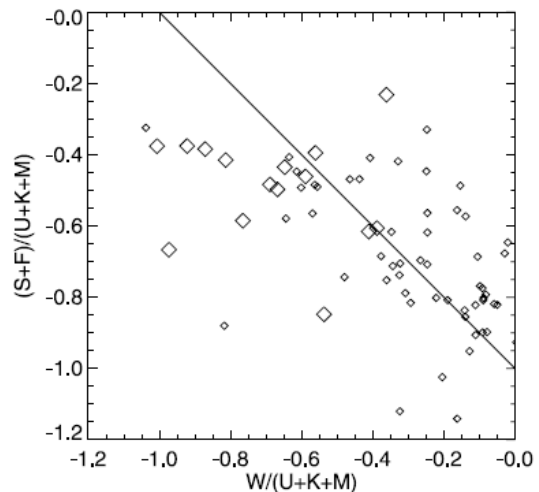


図2：図1のデータをもとに高密度コアを同定し、そのビリアル方程式の項を比べたもの。縦軸はコア表面の外圧項、横軸は自己重力項で、両方ともコアの内部のエネルギー項で規格化した値。直線はビリアル平衡を示す。大きな四角は平均質量よりも質量の大きなコア、小さな四角は質量の小さなコア。

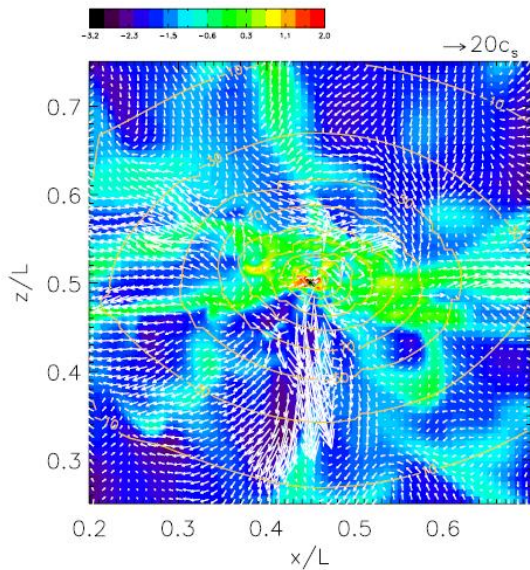


図3: 星団形成クランプの3次元MHDシミュレーションの結果。カラーは密度分布、等高線は重力ポテンシャルの分布、矢印は速度ベクトルを表す。重力ポテンシャルの底で大質量星が形成される。

(2) さらに、シミュレーションデータに観測データの解析で用いられるクランプファインド法を適用し、コアを同定し、そのコアの力学状態を調べたところ、完全にビリアル平衡のコアは存在しないが、ほとんどのコアはビリアル平衡からさほどずれていないことが分かった(図2)。ただし、孤立した環境で起こる星形成過程でも、コア表面に掛かる外圧項は無視できないことが分かった。

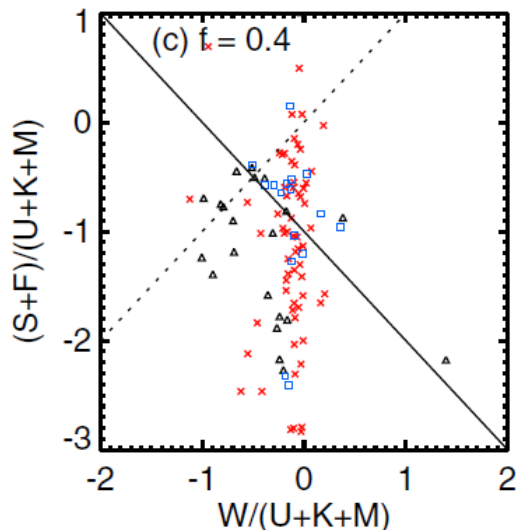


図4. 星団形成シミュレーションのデータをもとに高密度コアを同定し、ビリアル方程式の表面項と重力項を比べたもの。星団形成領域では、コア表面に掛かる外圧が自己重力よりも大きいことが分かる。

星団が形成される環境下での星形成

(3) 星団形成が起こる過程を3次元磁気流体シミュレーションで追跡し(図3)、星団形成が起こる場合でも、初期の磁場が強い場合のみ、形成されるコアの物理的性質がコアの観測的性質を良く再現できることが分かった。例えば、観測されるコアの内部運動は亜音速であるが、磁場が無い場合、コアの内部運動は超音速になってしまう。さらにビリアル定理を用いてコアの力学状態を調べたところ、自己重力よりも外圧の影響が大きいことが分かった。これは、星団形成領域ではコア形成は乱流圧縮によって誘発され、収縮の初期段階では、コアの自己重力はコアの進化に大きな影響を及ぼさないことが分かった(図4)。

(4) 近傍の星団形成領域である蛇使い座 ρ 分子雲のコアの観測的性質と比較したところ、我々のモデルのうち、磁場が比較的強いモデルが観測結果を良く再現することが分かった(図5)。

(5) さらに、星団形成領域で形成される最も質量の大きな星は、星団形成クランプの中心に形成され、質量降着はクランプ全体から起こることが分かった。クランプ内は小質量星からの原始星アウトフローによって励起された乱流場で満たされているが、この乱流場が中心へのガス供給量を制御していることがわかった。つまり、大質量星の形成は、周りで起こる小質量星の形成によって制御されているといえる。このモデルでは、大質量星の形成はクランプの力学進化の中期から後期段階まで掛かることが分かった。

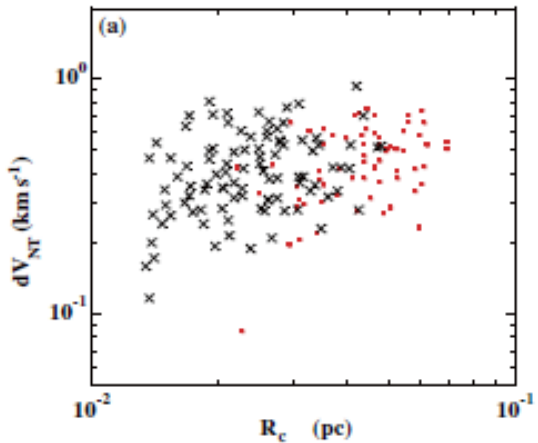


図5: 線幅-サイズ関係。×はシミュレーションから同定されたコア、赤丸は蛇使い座 ρ 分子雲のコア。

観測との比較・観測データの解析

(6) 形成初期段階にある星団形成クランプ Serpens South と進化中期段階と予想される星団形成クランプ蛇使い座 ρ 分子雲の2領域に対して、CO(3-2)およびCO(1-0)輝線を用い

て原始星アウトフローの同定を試みた。Serpens South 領域のアウトフローはすべて新発見のものであった。2 領域に対して、アウトフローの全エネルギーや運動量を見積もり、2 領域とも乱流散逸率とアウトフローによる運動量供給率が同程度であることを明らかにした。これは、我々の提唱する原始星アウトフローにより制御される星団形成モデルで予想されている性質の一つである。

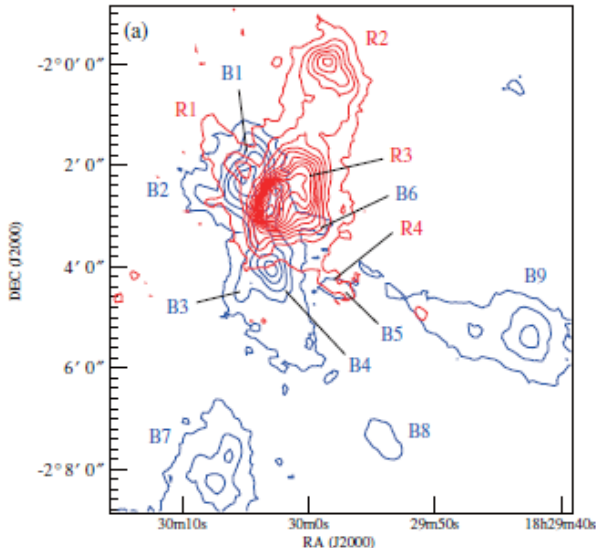


図 6 : Serpens South 星団形成領域で CO(3-2) 輝線観測から同定された原始星アウトフローローブ。赤と青のコントアはそれぞれ、高速度ガス成分でアウトフローを表す。

(7) オリオン座分子雲の星団形成領域の観測データの解析から、星団からの原始星アウトフロー等によって生成される大局的な膨張風（原始星団風）によってできたと推測されるシェル構造を発見し、簡単な理論モデルと比較した。このようなシェル構造は、分子雲内の星形成に多大な影響を及ぼしている可能性があることを指摘した。

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 14 件)

- ① Nakamura, F. 他 11 名, Evidence for Cloud-Cloud Collision and Parsec-scale Stellar Feedback within the L1641-N Region, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 746, 2012, 25(14pp)
DOI: 10.1088/0004-637X/746/1/25
- ② Zhao, B., Li, Z.-Y., Nakamura, F. 他 2 名, Magnetic Flux Expulsion in Star Formation, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 742, 2011, 10(8pp)
DOI: 10.1088/0004-637X/742/1/10
- ③ Kwon, J. 他 12 名 (Nakamura, F. 7 番目),

Complex Scattered Radiation Fields and Multiple Magnetic Fields in the Protostellar Cluster in NGC 2264, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 741, 2011, 35(30pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/741/1/35

- ④ Nakamura, F. and Li, Z.-Y., Clustered Star Formation in Magnetic Clouds: Properties of Dense Cores Formed in Outflow-driven Turbulence, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 740, 2011, 36(14pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/740/1/36

- ⑤ Nakamura, F., Sugitani, K. 他 9 名, Molecular Outflows from the Protocluster Serpens South, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 737, 2011, 5(17pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/737/2/56

- ⑥ Sugitani, K., Nakamura, F. 他 10 名, Near-infrared-imaging Polarimetry Toward Serpens South: Revealing the Importance of the Magnetic Field, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 734, 2011, 63(8pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/734/1/63

- ⑦ Nakamura, F. and Li, Z.-Y., Theory of Cluster Formation: Effects of Magnetic Fields, *Computational Star Formation*, 査読有, Vol 270, 2011, 115-122

DOI: 10.1017/S1743921311000263

- ⑧ Nakamura, F. 他 15 名, The Molecular Outflows in the rho Ophiuchi Main Cloud: Implications for Turbulence Generation, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol. 726, 2011, 46(15pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/726/1/46

- ⑨ Li, Z.-Y., Wang, P., Abel, T., and Nakamura, F., Lowering the Characteristic Mass of Cluster Stars by Magnetic Fields and Outflow Feedback, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol 720, 2010, L26-L30

DOI: 10.1088/2041-8205/720/1/L26

- ⑩ Sugitani, K., Nakamura, F., 他 8 名, Near-infrared Imaging Polarimetry of the Serpens Cloud Core: Magnetic Field Structure, Outflows, and Inflows in a Cluster Forming Clump, *The Astrophysical Journal*, 査読有, Vol 716, 2010, 299-314

DOI: 10.1088/0004-637X/716/1/299

- ⑪ Maruta, H., Nakamura, F., 他 3 名, Physical Properties of Dense Cores in the rho Ophiuchi Main Cloud and a Significant Role of External Pressures in Clustered Star Formation, *The*

Astrophysical Journal, 査読有, Vol 714, 2010, 680-698

DOI: 10.1088/0004-637X/714/1/680

- ⑫Wang, P., Li, Z.-Y., Abel, T., Nakamura, F., Outflow Feedback Regulated Massive Star Formation in Parsec-Scale Cluster-Forming Clumps, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol 709, 2010, 27-41

DOI: 10.1088/0004-637X/709/1/27

- ⑬Nakamura, F. and Li, Z.-Y., Magnetically Regulated Star Formation in Three Dimensions: The Case of the Taurus Molecular Cloud Complex, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol 687, 2008, 354-375

DOI: 10.1086/591641

- ⑭Saito, H., Saito, M., Yonekura, Y., Nakamura, F., High-Resolution Studies of the Multiple Core Systems toward Cluster-forming Regions Including Massive Stars, The Astrophysical Journal Supplement Series, 査読有, Vol 178, 2008, 302-329

DOI: 10.1086/590146

[学会発表] (計12件)

- ①Nakamura, F., A Burst of Molecular Outflows From the Serpens South Procluster, NRAO-NAASC 2012 Workshop: Outflows, Winds, and Jets: From Young Stars to Supermassive Black Holes, 2012.3.1, Charlottesville, VA, USA
- ②中村文隆, 12CO Mapping Observations Toward the L1641-N Region, 日本天文学会秋季年会, 2011.9.19, 鹿児島大学
- ③中村文隆, 野辺山 45m 鏡星形成レガシープロジェクト III: 蛇使い座 rho 分子雲のアウトフロー探査, 日本天文学会春季年会, 2011.3.16, 筑波大学
- ④Nakamura, F., Outflow Feedback Regulated Massive Star Formation in Parsec-Scale Cluster Forming Clumps, 2010.11.2, Taipei, Taiwan
- ⑤Nakamura, F., Effects of Magnetic Fields and Protostellar Outflow Feedback on the Characteristic Mass of the IMF, The Origin of Stellar Masses, 2010.10.18, Tenerife, Spain
- ⑥Nakamura, F., The Role of Magnetic Fields and Protostellar Outflows on Clustered Star Formation, Early Phase of Star Formation 2010, 2010.6.17, Ringberg, Germany
- ⑦Nakamura, F., Theory of Cluster Formation: Effects of Magnetic Fields, IAU Symposium 270: Computational Star

Formation, 2010.6.2, Barcelona, Spain

- ⑧Nakamura, F., Physical Properties of Dense Cores in Clustered Star Formation, Submillimeter and THz Astrochemistry, 2010.3.15, Univ. of Tokyo, Tokyo

- ⑨中村文隆, 星団形成クランプにおける星形成過程: 潮汐力と外圧の重要性について, 日本天文学会春季年会, 2010.3.26, 広島大学

- ⑩中村文隆, Magnetically Regulated Star Formation in 3D: The Case of Taurus Molecular Cloud Complex, 日本天文学会秋季年会, 2008.9.13, 岡山理科大学

- ⑪Nakamura, F., Magnetically Regulated Star Formation, The Case of Taurus Molecular Cloud Complex, From the Taurus to the Antenna, 2008.8.4, Sheffield, England

- ⑫Nakamura, F., Magnetically Regulated Star Formation in Low Mass Star Forming Regions, The Early Phase of Star Formation, 2008.7.29, Ringberg, Germany

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 文隆 (NAKAMURA FUMITAKA)

国立天文台・理論研究部・准教授

研究者番号: 20291354