

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02863

研究課題名(和文) 星団を形成する巨大クランプの初期構造の徹底解明

研究課題名(英文) Understanding the Initial Structures of Cluster Forming Clumps

研究代表者

土橋 一仁 (DOBASHI, Kazuhito)

東京学芸大学・教育学部・教授

研究者番号：20237176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、太陽のような恒星の集団である星団の形成過程の理解を深めるために、太陽の1000倍程度の質量をもつ巨大なガス塊である巨大クランプに対して、ミリ波分子輝線による観測、可視光近赤外線での偏光・減光量の測定、および磁気流体シミュレーションによる理論計算を遂行した。その結果、星団形成を引き起こす巨大クランプについて、星団形成初期に自己重力による中心方向への回転収縮運動が起きることや、星団を形成しない特異な化学組成をもつ巨大クランプが存在することなど、いくつかの新しい知見が得られた。理論計算との比較により、これらの巨大クランプ内での星団形成には、星間磁場が大きく関与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河系は、約2000億個もの恒星から成る。これらの恒星は孤立して誕生するものもあるが、多くの恒星(おそらく半数以上)は星団のメンバーとして誕生していることが明らかになりつつある。よって、本研究で得られた新しい知見は、単に星団形成のみならず銀河系全体の形成や進化に関する理解に直結するものであり、その学術的な意義は大きい。我々の母なる太陽も、太古の昔、どこかの星団の中で形成されたことが示唆されている。太陽系や地球の起源を考える上でも、星団形成に関する理解は重要な役割を果たすものと思われる。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the formation process of clusters of stars like the Sun, we have performed molecular-line observations in the millimeter wavelengths, measurements of polarization and extinction in the optical and infrared wavelengths, and numerical simulations based on the magnetohydrodynamics, to reveal the kinetics of massive gaseous clumps having ~1000 solar mass which often forms clusters. Results of our studies have revealed that such massive clumps often exhibit an infalling motion with rotation in the beginning of cluster formation due to contraction by the self-gravity, and also that there are some clumps which have curious chemical composition and do not form clusters. Comparison with theoretical simulations indicates that the interstellar magnetic field should strongly influence the dynamics of the clumps and also the nature of the cluster formation.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 データベース天文学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 星団を形成する巨大クランプ

恒星の集団である星団は、比較的大きな星間分子雲（以下、巨大クランプと呼ぶ）の中で誕生することが知られている。しかし、その形成過程については未知の部分が多い。十年ほど前より、ドップラー効果を利用したミリ波分子輝線による観測を通して、星団の母体である巨大クランプの内部には異なる複数の速度成分がしばしば存在することが指摘されていた。このような速度成分の起源は明らかではないが、有力な仮説として、より小さな複数のクランプが衝突・合体することにより巨大クランプを形成し、衝突時にガスを圧縮することにより星団が効率的に誕生する、というシナリオが提案されていた（例えば、Higuchi et al. 2009）。

#### (2) 回転を伴う収縮運動の発見

我々の初期の研究では、上記の異なる速度成分の個数は1つの巨大クランプにつき2つであり、巨大クランプの中心や形成途上の星団の位置に対して対称的に分布していることが示唆された。また、それらの速度差も高々1km/s程度であった。これらの速度成分が独立した小型クランプの衝突に起因するのであれば、空間的な対称性は無く、速度差もより広い範囲に分布するはずである。これは、複数の速度成分は小型クランプ同士の偶発的な衝突によるものではなく、単一の巨大クランプの系統的な力学的進化を反映するものであることを示唆している。

上記の発想の下、我々は巨大クランプを回転しながら自己重力で収縮する扁平楕円体（オブレート）状のガス塊としてモデル化し、観測データと比較した（Shimoikura et al. 2016）。その結果、観測される巨大クランプの速度構造は、この単純なモデルでよく説明できることがわかった。図1に、例として、若い星団を形成している巨大クランプ S235AB のガスの総量と温度の分布を示す。また、図2の上段に、天球上では楕円形に見えるこのクランプの長軸方向および短軸方向に沿って作成した位置・速度図を示す。図2の下段は、回転しながら収縮する扁平楕円体モデルでのガスの分布と位置・速度図である。この位置・速度図の特徴は、孤立した比較的小さな恒星（小質量星）が誕生するときに観測される周囲のガスの位置・速度図（Ohashi et al. 1997）に酷似している。唯一の違いは、星団形成の場合、母体となるクランプの質量やサイズが、小質量星の場合と比べてスケールアップされていることである。よって、従来よく研究されてきた小質量星の場合と同様に、巨大クランプも初期には自己重力による収縮が起き、その結果としてクランプの中心付近で星団が形成されることが予想された。

## 2. 研究の目的

### (1) 目的

研究開始当初、巨大クランプの進化やその内部での星団形成が上記のシナリオ通りに起きるか否かについては、まだ確証は得られていなかった。データが得られた巨大クランプのサンプル数が、ごく限られたものだったからである。そこで本研究では、巨大クランプの観測例を大幅に増やし、下記の3点を明らかにするための研究を遂行することにした。

図2に見られる回転を伴う収縮運動が一般的に見られる現象か否かを検証する。

そのような運動が巨大クランプのどの進化段階で見られる現象かを推定する。

巨大クランプの進化と星団形成の一般的なシナリオを提案する。

また、力学的進化とは別に、巨大クランプの化学組成の調査を行い、化学反応時間を利用した巨大クランプの進化についても考察する。さらに、磁気流体（MHD）シミュレーションも遂行し、巨大クランプの支持に大きな影響を与えるであろう磁場の役割についても考察する。

### (2) 意義

太陽のような恒星は、孤立して単独で生まれる場合もあるが、その多くは星団のメンバーとして誕生する。よって星団形成を理解することは、銀河系の構造や宇宙の進化を理解する上で本質的に重要である。

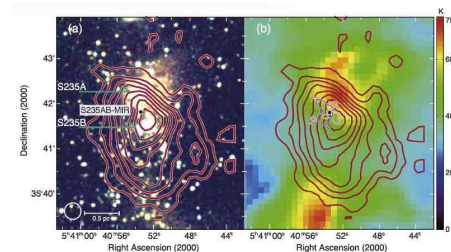


図1 S235AB のガスの分布を反映する

C<sup>18</sup>O 分子輝線の積分強度図（コンター）。

バックグラウンドは左図が近赤外線

（2MASS）のイメージ、右図は <sup>12</sup>CO 分子輝線から推定したガスの温度（Shimoikura et al. 2016）。

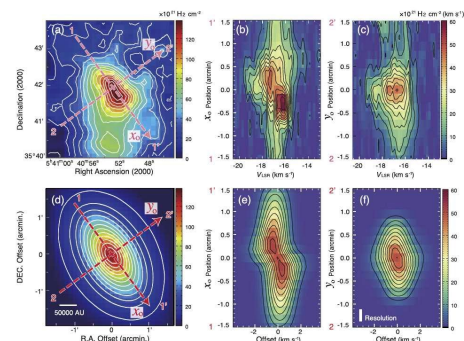


図2 (a) C<sup>18</sup>O 分子輝線から推定した分子

ガスの柱密度、(b) 長軸方向の位置・速度

図、(c) 短軸方向の位置・速度図。(d)~(f)

は、(a)~(c)を最もよく反映するモデル

（Shimoikura et al. 2016）。

### 3. 研究の方法

#### (1) 観測

本研究では、すでに星団を形成している巨大クラumpや、まだ星団形成の起きていない巨大クラumpのサンプルを30天体以上リストアップし、主に野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡を用いて観測した。これらの天体は、太陽系から概ね2kpc以内に位置し、その平均的な質量は太陽の1000倍である。観測には、分子ガスの総量を推定するのに便利な一酸化炭素( $^{12}\text{CO}$ )およびその同位体分子( $^{13}\text{CO}$ ・ $\text{C}^{18}\text{O}$ )による100GHz帯域の分子輝線他、CS・SO・CCS・HC<sub>3</sub>N等、化学組成の変化を追跡するのに必要なミリ波帯の分子輝線を観測した。また、野辺山45m電波望遠鏡で回転を伴う収縮運動が検出されたいくつかの天体については、ハワイ・マウナケア山頂のサブミリ波望遠鏡JCMTによる追加観測も行った。

#### (2) 化学モデルとシミュレーション

化学組成の進化を追跡するために、他の研究グループにより構築された化学反応モデルを利用した(Suzuki et al. 1992; Bergin & Langer 1997)。さらに、磁場の役割を調査するため、巨大クラumpのMHDシミュレーションを遂行した。

### 4. 研究成果

#### (1) 巨大クラumpの分類

得られたデータを解析し、各巨大クラumpのガスの分布を測定した。その結果、ガスと星団の位置的な関係から、観測した「巨大クラump+星団」のセットは、次のType 1からType 4に分類することが可能であることがわかった。

- Type 1: ガスは豊富にあるが、星団は無く、散発的な星形成のみが起きているもの
- Type 2: ガスは豊富にあり、中心付近で若い星団が形成されつつあるもの
- Type 3: ガスは希薄で散逸しつつあり、中心とは限らないが若い星団が付随しているもの
- Type 4: ガスはほとんど散逸しきっており、星団だけが見られるもの

星団は濃密なガス塊の内部で形成され、ガスはやがて散逸して星団だけが残るはずである。よって、Type 1~4は、この順序で星団形成の物理的進化段階を表しているものと考えられる。

#### (2) 回転を伴う収縮運動の普遍性の検証と巨大クラumpの力学的進化

各巨大クラumpは、天球上では概ね楕円形をしているものが多い。位置・速度図を作成して解析したところ、回転を伴う収縮運動を示すと考えられる巨大クラumpが10個程度検出された。図1・2のS235ABを含む典型的な例を、図3にまとめる。このような天体は、長軸方向の位置・速度に特徴的な「2つ目玉」が見られる。2つの目玉は、巨大クラumpの中心付近で回転と同時に収縮運動が起きているものに見られる。この特徴は、上記の分類ではType 2の巨大クラumpのみに見られた。はっきりとした2つ目玉が見られなくても、ほとんどのType 2の巨大クラumpには、長軸方向に回転運動を示唆する大きな速度勾配が見られた。一方、他のTypeの巨大クラumpには、そのように速度勾配や2つ目玉は見られなかった。これらの結果より、当初重力平衡にある巨大クラumpが何かのはずみで収縮に転じると、角運動量の保存則に従って回転しながら収縮し、中心部のガス密度を高め、星団を形成するものと考えられる。

#### (3) 化学的進化段階の分類とMHDシミュレーションからの示唆

クラumpの化学組成は、主にダスト表面上での化学反応により、時間とともに変化していく。よって、適当な化学反応モデルと比較すれば、観測データから巨大クラumpの化学的年齢を推定することができる。図4(a)は、HC<sub>3</sub>NとCCSの存在量の観測値を、モデル計算(Suzuki et al. 1992)と比較したものである。図のプロットは、反応時間とともに図の右上(10<sup>5</sup>年)から左下(10<sup>6</sup>年)

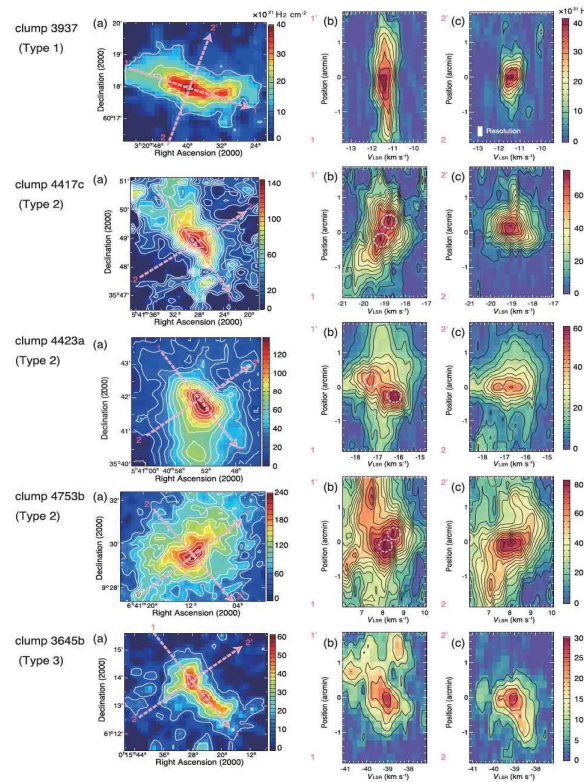


図3 様々な巨大クラumpのガスの分布(左列:  $\text{C}^{18}\text{O}$ 分子輝線の積分強度図)と長軸(中列)・短軸(右列)方向の位置・速度図。長軸の位置・速度図中の破線の白丸は、回転を伴う収縮運動が有る際に見られる「2つ目玉」である(Shimoikura et al. 2018)。



へ移動していくことが予想される。

驚くべきことに、図からは、物理的には最も若い Type 1 の巨大クランプが、化学反動的には最も古いことが示唆される。SO と CS を利用した図 4 (b) のモデル計算 (Bergin & Langer 1997) との比較でも、同様の結果が得られた。

Type 1 の巨大クランプは、何らかの理由で自己重力による収縮が起きないまま長期間安定に存在し、内部での化学反応のみが進行しているクランプであると考えられる。そのようなクランプの自己重力による収縮を妨げる有力な要因としては、星間磁場が考えられる。MHD シミュレーションの結果と比べると、太陽の 1000 倍の質量をもつ巨大クランプの場合、1 mG (ミリガウス) 程度の磁場があれば、クランプは長期間安定に存在し得る。磁場強度の計測は容易ではないが、観測された Type 1 のクランプは、磁場に支えられたクランプであることが予想される。このようなクランプでは散発的な星形成は起きるが、星団は形成されない。

化学的にも物理的にも若い真の意味での Type 1 のクランプは、本研究では見られなかった。これは、そのような巨大クランプの収縮時間 (自由落下時間) が非常に短く、発見することが難しいことによるものと思われる。もしそのような Type 1 のクランプがあれば、即座に Type 2 へと進化してしまうことが予想される。そのような Type 1 のクランプを検出することは、次のステップの研究課題である。

本研究で得られた知見をもとに得られた星団形成のシナリオを、図 5 にまとめる。

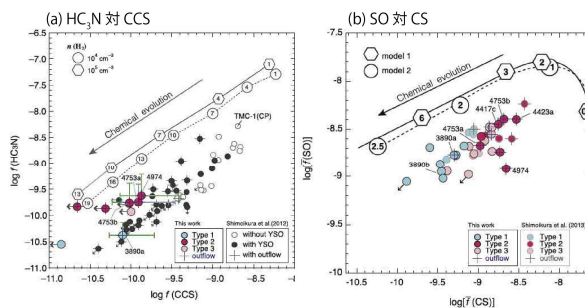


図 4 Type 1、2、3 のクランプでの特定の分子の存在量に関する観測値 (それぞれ、青、赤、ピンクの丸) とモデル計算 (実線および破線) の比較 (Shimoikura et al. 2018)。 (a) は HC<sub>3</sub>N 対 CCS、(b) は SO 対 CS。パネル左上の円や六角形は、ガス密度の初期値を表す。実線・破線上にある円や六角形の中の数字は 10<sup>5</sup> 年単位の反応時間。(a) の黒丸は他の分子雲での測定値 (文献値)。

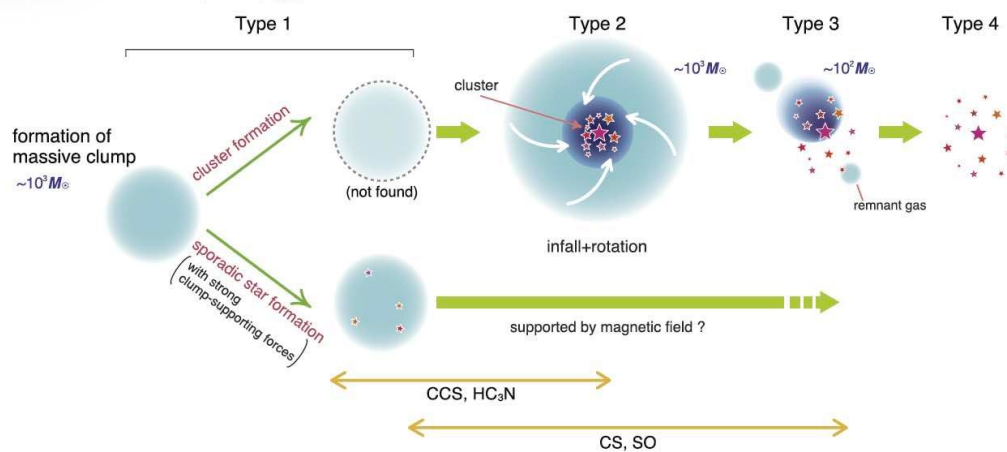


図 5 研究結果をもとに描いた星団形成のシナリオ (Shimoikura et al. 2018)。強い磁場に支えられた Type 1 のクランプは、散発的な星形成を起こすが星団は形成せず長期間安定に存在し、内部で化学反応だけが進行する。磁場が弱い場合、Type 1 のクランプは短時間で収縮して星団を形成し、Type 2 から Type 4 へ進化する。Type 2 のクランプでは、回転を伴う収縮運動が見られる。

#### < 引用文献 >

Higuchi, A. E., Kuroono, Y., Saito, M., & Kawabe, R. 2009, ApJ, 705, 468  
 Shimoikura, T., Dobashi, K., Matsumoto, T., & Nakamura, F. 2016, ApJ, 832, id. 205, 11 pp.  
 Ohashi, N., Hayashi, M., Ho, P. T. P., & Momose, M. 1997, ApJ, 475, 221  
 Suzuki, H., Yamamoto, S., Ohishi, M. et al. 1992, ApJ, 128, 1684  
 Bergin E. A., & Langer, W. D. 1997, ApJ, 486, 316  
 Shimoikura, T., Dobashi, K., Nakamura, F., Matsumoto, T., & Hirota, T. 2018, 855, id.45, 28 pp.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shimoikura Tomomi, Dobashi Kazuhito, Nakamura Fumitaka, Matsumoto Tomoaki, and Hirota Tomoya	4. 巻 855
2. 論文標題 A Statistical Study of Massive Cluster-forming Clumps	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.45, 28pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaaccd	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazuhito Dobashi, Tomomi Shimoikura, Fumitaka Nakamura, Seiji Kamenno, Izumi Mizuno, and Kotomi Taniguchi	4. 巻 864
2. 論文標題 Spectral Tomography for the Line-of-sight Structures of the Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.82, 12pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad62f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura Fumitaka, Ishii Shun, Dobashi Kazuhito et al.	4. 巻 71
2. 論文標題 Nobeyama 45 m mapping observations toward the nearby molecular clouds Orion A, Aquila Rift, and M17: Project overview	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.S3, 29pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomomi Shimoikura, Kazuhito Dobashi, Fumitaka Nakamura, Yoshito Shimajiri, and Koji Sugitani	4. 巻 71
2. 論文標題 Cluster formation in the W 40 and Serpens South complex triggered by the expanding H II region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.S4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuhito Dobashi, Tomomi Shimoikura, Shou Katakura, Fumitaka Nakamura, and Yoshito Shimajiri	4. 巻 71
2. 論文標題 Cloud-cloud collision in the DR 21 cloud as a trigger of massive star formation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.S12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計29件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Shimoikura, T., Dobashi, K., Shimoikura, T., Nakamura, F., Matsumoto, T. and Hirota, T.
2. 発表標題 A Statistical Study of Cluster Formation
3. 学会等名 The International Astronomical Union (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	中村 文隆  (NAKAMURA Fumitaka)  (20291354)	国立天文台・理論研究部・准教授    (62616)	
研究分担者	松本 倫明  (MATSUMOTO Tomoaki)  (60308004)	法政大学・人間環境学部・教授    (32675)	
連携研究者	下井倉 ともみ  (SHIMOIKURA Tomomi)  (30569760)	大妻女子大学・社会情報学部・准教授    (32604)	