

令和 6 年 4 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13962

研究課題名（和文）分子雲コア寿命の測定を通じた星団形成機構の解明

研究課題名（英文）Elucidation of Cluster Formation Mechanisms through Measurement of Molecular Cloud Core Lifetimes

研究代表者

徳田 一起（Tokuda, Kazuki）

九州大学・理学研究院・特任助教

研究者番号：60802139

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：星は主に集団として形成されるが、その形成機構に関しては単独の星と比べて大きく取り違れている。星団形成領域は文字通り様々な進化段階にある天体が密集しており、特に個別の星/連星系に至る直前の高密度ガス塊が特定されておらずその性質および形成要因が理解されていないことが要因の一つである。本研究では、太陽系から最も近傍にある星団形成領域の分子雲コアに埋め込まれている数1000 auの超高密度微細ガス塊をALMA望遠鏡の無バイアス広域観測により多数特定し、それらの性質を孤立した小質量星形成領域の研究で得られたものと比較する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：天体物理学の知識進展：分子雲コアの寿命と星団形成の役割を理解することで、星や銀河の形成・進化に関する理論やモデルに影響を与えます。

方法論の革新：新しい測定方法や技術の開発は、他の天文学の分野にも応用可能です。社会的意義：教育への影響：宇宙の理解を深めることで、科学技術への関心を高め、教育の向上につながります。技術革新への触発：天体物理学の研究で開発された技術は他の分野にも応用されることがあります。文化的・哲学的影響：宇宙に対する理解は人類の自己認識を変え、文化や哲学の議論に影響を与えます。

研究成果の概要（英文）：Stars primarily form in groups, but the mechanisms of their formation are significantly less understood compared to individual stars. Star-forming regions in clusters are literally dense with objects at various stages of evolution, and one reason for the lack of understanding is that high-density gas clumps that are on the verge of becoming individual stars or binary systems have not been specifically identified, and their properties and formation factors are not well understood. In this study, we identify numerous high-density clumps, spanning a few thousand AU, embedded in the molecular cloud cores of the nearest star-forming region to our solar system through unbiased wide-area observations with ALMA, and compare their properties with those obtained from studies of isolated low-mass star formation regions. In molecular cloud cores during cluster formation, turbulence predominates, and the gas clumps that can become seeds for stars are likely formed very dynamically.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 電波望遠鏡 分子雲コア ALMA 星団形成

### 1. 研究開始当初の背景

1970年代の先駆的理論研究(e.g., Larson 1969; Shu 1977)に始まり、その後発達した電波観測(e.g., Myers et al. 1983)等によって確立されつつある、孤立した系での小質量星形成シナリオは、分子雲コア(サイズは 0.1 pc 程度)と呼ばれる高密度( $>10^4\text{--}10^6\text{ cm}^{-3}$ )なガス塊が重力収縮し、原始惑星系円盤を伴った原始星を形成し、その後質量降着を経て主系列星になるといったものである。ただし、星の多くは集団で形成されることから(e.g., Lada & Lada 2003)、星誕生の一般的な理解に向けて星団形成は非常に重要なモードと位置付けられる。しかしながら、星団形成領域は 1 pc 以内のコンパクトな領域に数十~百個の原始星が含まれており、孤立した小質量星形成領域の分子雲コアと比べて極めて複雑である。両者の母体分子雲コアの定性的な違いはいくつか明らかになっているが、系全体を積分した比較や極めて限定的な領域の観測のみにより得られた兆候であり、例えば乱流の強弱がどのように影響を与えているかは詳しく理解されていない。分子雲内部において乱流が強ければ異なる速度を持ったガス同士の圧縮作用により局所的に密度が上昇し、それが原始星の種となりうるとされるが(e.g., Padoan & Nordlund 2002; Nakamura & Li 2005, 乱流分裂モデルとも呼ばれる)、このような部分は非常に圧力が強く、散逸してしまう可能性も理論的に提案されている(Lomax et al. 2016)ため、収縮し星に至るかどうかが自明ではない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、星団形成の母体となる分子雲コアで普遍的に見られる、超音速乱流に着眼し、局所的なガスの圧縮によって形成された高密度領域が散逸することなく、原始星に至る可能性を観測的に検証し、星団のメンバーとなる個別の大・小質量星(もしくはその連星系)の種となる分子ガス塊の形成と進化を探ることである。

### 3. 研究の方法

星団形成領域の分子雲コアの数 1000 au 規模の超微細構造を探るため、感度および空間分解能が最も高くできる太陽系から最も近い( $<200\text{ pc}$ )領域群が観測天体として有用である。数 1000 au という大きさは母体分子雲と比較すると非常にコンパクトではあるが、それでも原始星円盤のスケール(数 10~数 100 au)よりも大きく、空間的に広がっている。そこで本研究ではまず、日本が開発した Atacama Compact Array (ACA)のみを用いた広域観測で、6 秒角(1000 au)程度の空間解像度で分子雲コアの内部の密度構造をよく反映するミリ波・サブミリ波帯の連続波および、速度構造や化学的特徴を調べるための分子輝線観測を行う。また太陽系近傍分子雲の天体と比較するため、ALMA 12m array を用いた大小マゼラン雲等、系外銀河の観測も精力的に進める。

### 4. 研究成果

我々は ACA および ALMA を用いて以下のような研究を進めた。

- (1) 南のかんむり座領域の ACA 観測: この領域の分子雲を観測した結果、1000 au 程度のスケールを持つ Feather(羽)構造を多数検出した(Tachihara, Fukaya, Tokuda ApJ, in press.)。これは超音速乱流が作り出した構造と考えられ、その一部が星になることにより星団形成へと至る可能性を提案した。
- (2) 大マゼラン雲での超巨大星団初期形成クランプの観測: 大マゼラン雲 N159 領域において 10 万太陽質量に及ぶにもかかわらず 1 pc 以内に詰め込まれた非常に大質量のクランプの詳細な形成過程を提案した(図 1, Tokuda et al. 2022, ApJ)。12CO, 13CO でトレースされるより薄いガスや理論計算との結果、巨大ガスクランプはガス雲同士の衝突によってもたらされた可能性が高いことがわかった。このような大規模な現象が局所銀河郡の中でも比類の星団を形成する。

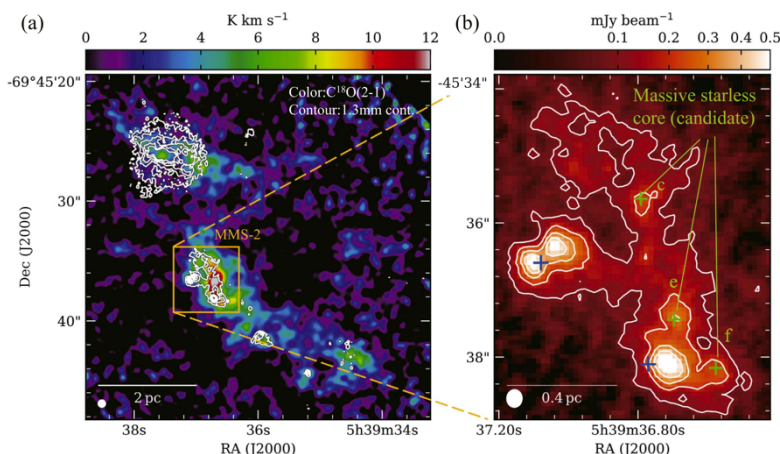


図 1: 大マゼラン雲 N159 領域で見出した 10 万太陽質量におよび巨大ガスクランプ

- (3) 大マゼラン雲の 30 天体規模のサーベイ観測のデータ解析を行った(図 2)。それによると非常に光度の高い( $5 \times 10^4$  太陽光度以上)大質量星を形成するようなハブフィラメント状分子雲(フィラメント状分子雲が複数集合したもの)は、母体分子雲の進化の後期段階に現れやすい傾向があることを初めて明らかにした(Tokuda et al. 2023, ApJ)。

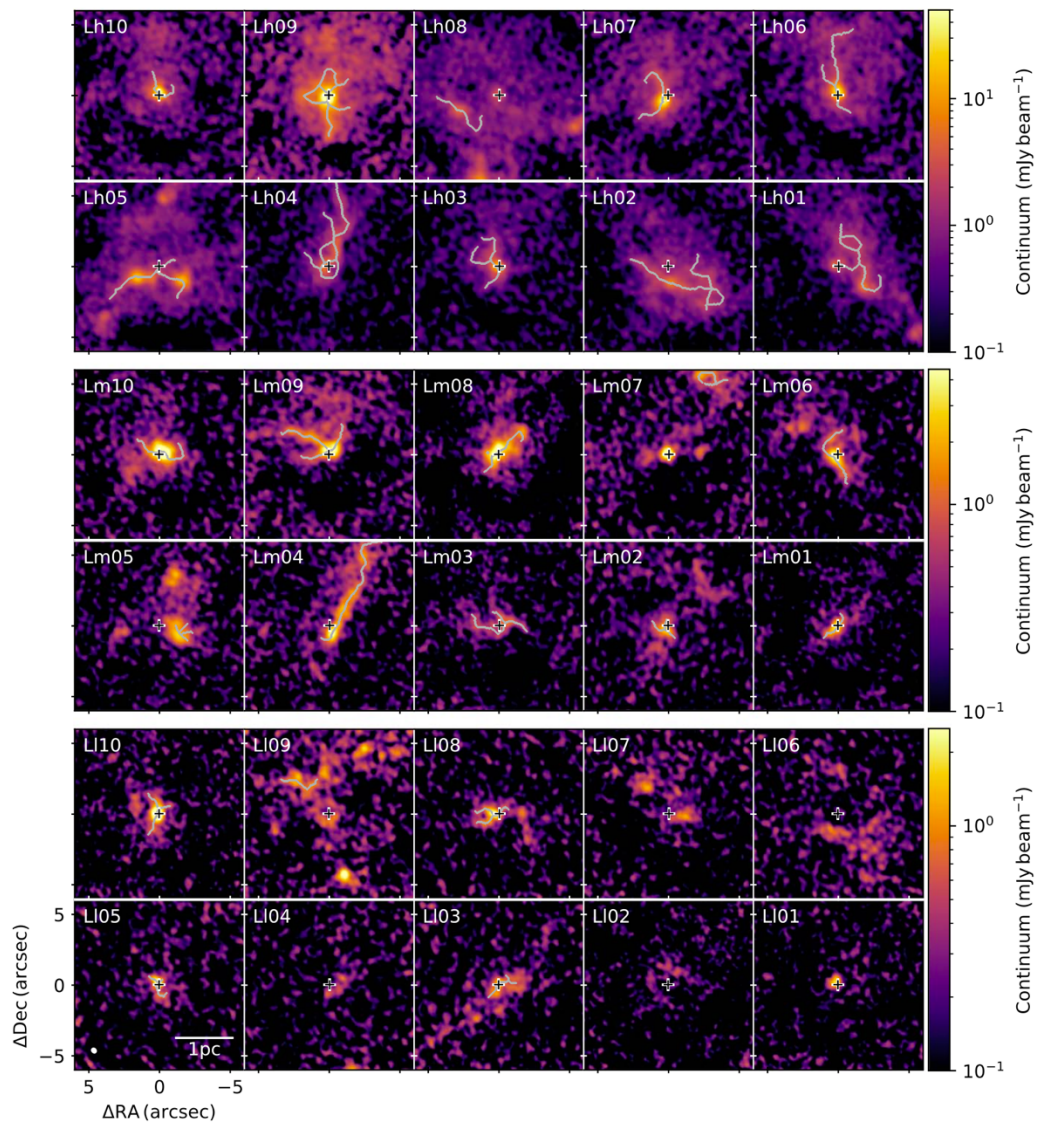


図 2: ALMA 望遠鏡で観測した大マゼラン雲におけるフィラメント状分子雲。0.87mm 連続波を表し、中心に大質量星原始星が存在する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Harada Naoto, Tokuda Kazuki, Yamasaki Hayao, Sato Asako, Omura Mitsuki, Hirano Shingo, Onishi Toshikazu, Tachihara Kengo, Machida Masahiro N.	4. 巻 945
2. 論文標題 Crescent-shaped Molecular Outflow from the Intermediate-mass Protostar DK Cha Revealed by ALMA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acb930	査読の有無 無
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 Tokuda Kazuki, Zahorecz Sarolta, Kunitoshi Yuri, Higashino Kosuke, Tanaka Kei E. I., Konishi Ayu, Suzuki Taisei, Kitano Naoya, Harada Naoto, Shimonishi Takashi, Neelankodan Naslim, Fukui Yasuo, Kawamura Akiko, Onishi Toshikazu, Machida Masahiro N.	4. 巻 936
2. 論文標題 The First Detection of a Protostellar CO Outflow in the Small Magellanic Cloud with ALMA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L6 ~ L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac81c1	査読の有無 無
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 Finn Molly K., Indebetouw Remy, Johnson Kelsey E., Costa Allison H., Chen C.-H. Rosie, Kawamura Akiko, Onishi Toshikazu, Ott Jurgen, Sewilo Marta, Tokuda Kazuki, Wong Tony, Zahorecz Sarolta	4. 巻 164
2. 論文標題 Structural and Dynamical Analysis of the Quiescent Molecular Ridge in the Large Magellanic Cloud	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 64 ~ 64
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ac7aa1	査読の有無 無
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 Tokuda Kazuki, et al.	4. 巻 933
2. 論文標題 An ALMA Study of the Massive Molecular Clump N159W-North in the Large Magellanic Cloud: A Possible Gas Flow Penetrating One of the Most Massive Protocluster Systems in the Local Group	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 20 ~ 20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6b3c	査読の有無 無
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 Wong Tony, et al.	4. 巻 932
2. 論文標題 The 30 Doradus Molecular Cloud at 0.4 pc Resolution with the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array: Physical Properties and the Boundedness of CO-emitting Structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 47 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac723a	査読の有無 無
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10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 徳田一起
2. 発表標題 ALMAによる大マゼラン雲大質量原始星に付随する高密度分子ガスの観測(2): 星団形成初期段階N159W-North大質量クランプの特徴
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深谷直史
2. 発表標題 Corona Australis分子雲IRS7領域における分子雲コアの性質と星団形成
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 深谷直史
2. 発表標題 星団形成領域Corona Australis分子雲内部のフィラメント状構造
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 深谷直史, 立原研悟, 西岡丈翔, 徳田一起, 山崎康正, 原田直人, 山崎駿, 町田正博, 深川美里
2. 発表標題 ALMA 高分解能データで探る星団形成領域 Corona Australis IRS7 における分子雲コアの分裂
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西岡丈翔, 立原研悟, 山崎康正, 徳田一起, 深谷直史, 大西利和, 金井昂大, 大朝由美子, 松下祐子, 西合一矢, 深川美里, 原田直人, 佐伯優, 柳玉華, 山崎駿, 町田正博, 深谷紗希
2. 発表標題 ALMA ACA サーベイで探る Corona Australis 領域の星形成 (4)
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西岡丈翔, 立原研悟, 山崎康正, 徳田一起, 大西利和, 金井昂大, 大朝由美子, 松下祐子, 西合一矢, 深川美里, 原田直人, 佐伯優, 柳玉華, 山崎駿, 町田正博, 深谷紗希子
2. 発表標題 ALMA ACA サーベイで探る Corona Australis 領域の星形成 (3)
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳田一起, 三杉佳明, 立原研悟, 犬塚修一郎, 大橋永芳, 鳥尻芳人, 大西利和
2. 発表標題 ALMA ACA サーベイで探る Taurus 領域分子雲コア進化の統計的研究 (6): 分子雲コア速度構造の進化とその起源
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南大晴, 近藤滉, 小西亜侑, 小西諒太郎, 鈴木大誠, 大西利和, 徳田一起, 柘植紀節, 立原研悟, 福井康雄, 南谷哲宏, 河村晶子
2. 発表標題 大マゼラン雲 N159W-North 領域の大質量クランプの性質と形成過程
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳田一起
2. 発表標題 巨大星団形成領域RCW38における分子雲コアおよび原始星のALMA観測
3. 学会等名 様々なスケールの衝突流による誘発的星形成 ~大質量星から超大質量星団まで~
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 徳田一起
2. 発表標題 Statistical properties of protostellar outflow revealed by survey-type observations
3. 学会等名 Cold Outflows near and far: crossroads of our current understandings
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------