

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月19日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05292

研究課題名(和文) 分子輝線観測による大質量星なしクラump内部での分子雲コア形成過程の解明

研究課題名(英文) Studies of Formation Mechanism of Dense Cores in High-Mass Clumps

研究代表者

酒井 剛 (Sakai, Takeshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：20469604

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、極低温大質量分子雲クラumpと極若い原始星周囲の化学組成に着目し、大質量星形成領域における星なしコア時代のタイムスケールについて調査することである。野辺山45m望遠鏡を用いた重水素化分子輝線のサーベイ観測から、極低温大質量分子雲クラumpの重水素濃縮度にばらつきがあることがわかった。さらに、ALMAを用いた観測によって、分子雲クラump内部の重水素化分子の詳細な分布も明らかにした。また、ALMAによる極若い原始星の観測から、原始星方向に重水素化分子が豊富に存在することもわかった。これらの結果は、大質量星形成の星なしコア時代のタイムスケールに多様性があることを示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大質量星は銀河の進化に重要な役割を果たしており、その形成過程を明らかにすることは、我々がどのような生まれしてきたのかといった根源的な問いにつながる重要な課題の一つである。大質量星の形成過程については、これまで小質量星とは異なることがわかってきたが、どのように異なるのか、また多様性があるのかといったことはわかっていなかった。本研究によって、大質量星なしコア時代のタイムスケールに多様性があることが示唆された。また、観測例が少ないため、今後より多くの天体を観測する必要があるが、本研究による成果は、今後につながる、重要な結果と言える。

研究成果の概要(英文)：We have observed cold high-mass clumps and very young protostars associated with infrared dark clouds (IRDCs), in order to investigate the duration time of starless phase in high-mass star formation. In the molecular line survey with Nobeyama 45 m telescope, we have found that there is a variation of the deuterium fractionation ratios among the cold high-mass clumps. In the high-angular resolution observations with ALMA, we have revealed the distributions of the deuterated molecules in cold high-mass clumps, and we have also found that the deuterated molecules are abundant toward the very young protostar associated with the IRDC. These results imply that there is a diversity in the duration time of starless phase of high-mass star formation.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 大質量星 分子雲 重水素 赤外線暗黒星雲

## 1. 研究開始当初の背景

大質量星(太陽の8倍以上の質量を持つ恒星)は、一生の最後に超新星爆発を起こし、莫大なエネルギーを星間空間に放出するとともに、様々な重元素を星間空間に撒き散らし、銀河の進化に重要な役割を果たしている。しかし、大質量星の形成過程は、小質量星の形成過程に比べ、明らかにされていない。大質量星は高い質量降着率で形成されると考えられており、大質量星形成を考える上で重要な課題は、高い降着率を実現するメカニズムの解明である。高い降着率を実現するモデルとして、core accretion model (McKee & Tan, 2003, ApJ, 585, 850) と competitive accretion model (Bonnell et al. 2002, MNRAS, 323, 785) の2つが提唱されている。これら二つのシナリオでは、大質量星を形成する分子雲コアの形成過程が大きく異なるため、大質量星形成を理解するには初期状態を明らかにすることが極めて重要である。

大質量星の初期状態を理解するための観測対象として、赤外線暗黒星雲(Infrared dark cloud: IRDC)が注目されてきた。しかし、これまでの研究では、赤外線暗黒星雲の中でも比較的進化の進んだ天体の観測が多く、温度 10 K 程度の極低温な赤外線暗黒星雲や、赤外線暗黒星雲内部の極若い星形成コアについての研究はほとんどされていなかった。そこで、本研究では、極低温な大質量分子雲クラumpを伴う赤外線暗黒星雲と、赤外線暗黒星雲に付随する極若い原始星周囲の化学組成をもとに大質量星形成の初期状態について調査する。

## 2. 研究の目的

先に述べたように、大質量星形成について提唱されている2つのシナリオでは分子雲コアの形成過程が大きく異なる。特に、分子雲コア形成のタイムスケールが大きく異なることが指摘されている(約5~10倍程、competitive accretion modelの方が早い; Tan et al. 2014, PPVI, 149)。そこで、本研究では、大質量分子雲クラumpの化学組成をもとに、大質量分子雲クラump内部でどのようなタイムスケールで、大質量星を産むコアが形成されるのか明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では、分子雲の化学組成、特に、分子の重水素濃縮度に着目する。分子の重水素濃縮度は、星形成前の低温時期において時間とともに増加していくことが、観測的、理論的に示されている(e.g. Hirota et al. 2001, ApJ, 547, 814; Sakai et al. 2015, ApJ, 803, 70)。さらに、この重水素濃縮度は、分子雲コアの収縮タイムスケールにも依存する(Kong et al. 2016, ApJ, 821, 94)。したがって、星形成前の低温大質量分子雲クラumpの重水素濃縮度から、コア形成のタイムスケールを見積もることが可能になる。本研究では、70ミクロンで暗い極低温な大質量分子雲クラumpに対し、重水素化分子輝線の観測を行う。

また、星形成による温度上昇後の重水素濃縮度は、分子ごとに異なる振る舞いをするともわかっている。星形成後、イオン分子は一酸化炭素などにより破壊され、重水素濃縮度が減少する。一方、中性分子は一酸化炭素とは反応せず、破壊のタイムスケールが長いいため、星形成後、重水素濃縮度はゆっくりと減少することになる。したがって、比較的高温な原始星コアにおける中性分子の重水素濃縮度は、星形成前の低温状態の時間、つまり星なしコア形成のタイムスケールに依存すると考えられる。本研究では、極若い原始星周囲の化学組成から、大質量星分子雲クラump内部でのコア形成のタイムスケールに関する情報を得る。

観測には、野辺山45m望遠鏡とALMAを用いる。野辺山45m望遠鏡では、低温大質量分子雲クラumpに対する重水素化分子輝線のサーベイ観測を行う。また、ALMAでは、低温大質量分子雲クラumpに対する重水素化分子輝線の高分解能観測を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 野辺山45m望遠鏡を用いた重水素化分子輝線サーベイ

Traficanteら(2015, MNRAS, 451, 3089)は、Herschel望遠鏡による銀河面サーベイのデータから、大質量星形成を起こす可能性が高く、かつ星形成を伴わないと考えられる分子雲クラump、171天体を同定した。我々は、それら分子雲クラumpから、距離が5kpc以内、質量 $> (1300(\text{半径}/\text{pc})1.33)M_{\text{sun}}$ の条件を満たす55天体を選び、野辺山45m望遠鏡を用い、DNC  $J=1-0$ 、 $\text{HN}^{13}\text{C } J=1-0$ 、 $\text{SiO } J=2-1$ 、 $\text{N}_2\text{D}^+ J=1-0$ 、 $\text{H}^{13}\text{CO}^+ J=1-0$ 、 $\text{H}^{13}\text{CN } J=1-0$ 輝線のサーベイ観測を行った。観測の結果、55天体中51天体で $\text{HN}^{13}\text{C}$ 輝線を検出し、32天体で $\text{SiO}$ 輝線を検出した。 $\text{SiO}$ が星形成に起因すると考えると、多くの低温大質量クラumpで既に星形成が起きていることを示唆している。さらに、DNC/ $\text{HN}^{13}\text{C}$ 比を見ると、同じような温度(10K)にある天体でも、その値に有意なばらつきがみられた(図1)。このばらつきの原因として、分子雲クラumpの形成タイムスケールの違いなどが考えられる。したがって、この結果は、分子雲クラump内部での高密度コア形成のタイムスケールに多様性があることを示唆する結果と言える。

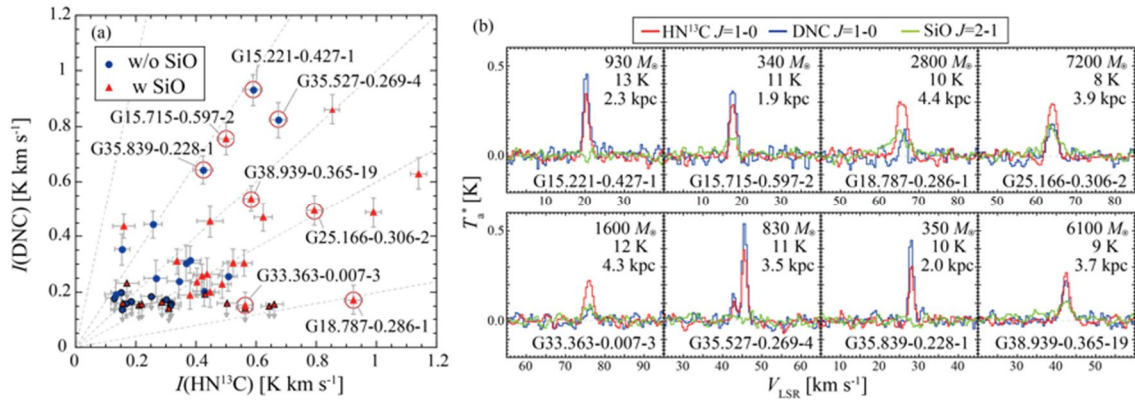


図 1. (a) 野辺山 45m 望遠鏡で取得した  $\text{HN}^{13}\text{C}$  輝線と DNC 輝線の積分強度の相関図。(b)  $\text{HN}^{13}\text{C}$  輝線、DNC 輝線、SiO 輝線のスペクトル。

### (2) 赤外線暗黒星雲内部の重水素化分子の分布

大質量星形成を理解するためには、まだ活発な星形成活動が起きていない極低温な大質量クラumpを観測することが重要である。アルマによる低温大質量クラumpに対する観測データを詳細に解析したところ、SiO 輝線が検出され(図 2b)、星形成が起きていないと思われていた分子雲クラump内部でもすでに活発な星形成活動が起きていることがわかった。さらに、星形成活動によって重水素化分子の存在量が変化し、その振る舞いが分子種によって異なることもわかった。例えば、 $\text{N}_2\text{D}^+$ と  $\text{DCO}^+$ は星形成によって減少するが、 $\text{N}_2\text{D}^+$ の方が減少の割合が大きい。この結果は、 $\text{N}_2\text{H}^+$ は高温領域では CO によって壊されるが、 $\text{DCO}^+$ は D と  $\text{HCO}^+$ との反応によって比較的高温でも生成されるためと考えられる。また、DCN は、逆に星形成によって増加していることがわかった。これは、星形成の加熱によりダストから蒸発するためと考えられる。モデル計算の結果と比較した結果、観測結果と同様の傾向が見られた。一方で、星形成がまだ起きていない領域においても  $\text{N}_2\text{D}^+$ と  $\text{DCO}^+$ の分布に違いが見られた。これは、分子雲コアが形成されてからの時間の違いによるものと考えられる。以上のように、重水素化分子が分子雲コアの進化を知る上で重要な手法となることを示すことができ、大質量分子雲クラump内部での星形成活動の様子を明らかにすることができた。

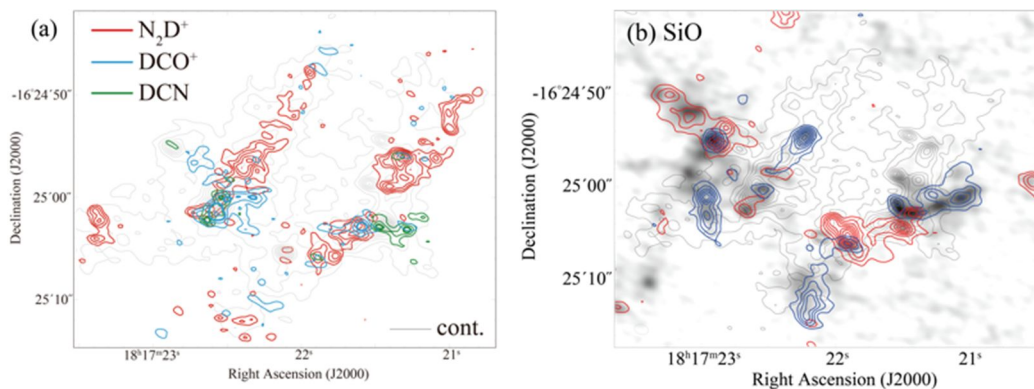


図 2. (a)大質量分子雲クラump G14.49 に対する  $\text{N}_2\text{D}^+$ 、 $\text{DCO}^+$ 、DCN 輝線の観測結果。(b) SiO 輝線の観測結果。赤のコントアが赤方偏移成分、青のコントアが青方偏移成分を示す。

### (3) 赤外線暗黒星雲に付随するホットコアの化学組成

赤外線暗黒星雲内部の極く若い原始星近傍の化学組成を、アルマ望遠鏡を用い詳細に調べた。観測した天体は、赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 である。観測の結果、原始星方向において複数の有機分子輝線と重水素化分子輝線を検出した(図 3a)。さらに、複雑な有機分子の存在量が、他の大質量星形成天体と同程度(図 3b)にもかかわらず、重水素化分子である  $\text{D}_2\text{CO}$ (と  $\text{CH}_3\text{OH}$  の比)が他の大質量星形成天体と比較して、有意に高いことがわかった(図 3c)。有機分子は、主に星形成後にダスト上で形成されると考えられており、他の大質量星形成天体と、有機分子の存在量が似ていることは、星形成後の環境が他の大質量星形成天体と似ていることを示唆している。一方、 $\text{D}_2\text{CO}$  は星形成前の低温期に生成され、星形成後も星形成前の値を保持すると考えられる分子である。したがって、G34.43+00.24 MM3 に付随する原始星の星なしコア時代のタイムスケールは他の大質量星形成領域に比べ、比較的長いことが示唆される。また、この結果は、大質量星形成の初期状態に多様性があることを示唆している。

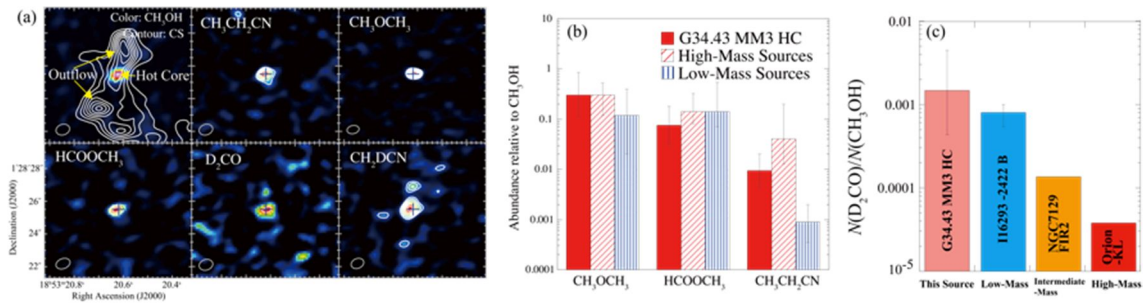


図 3. (a) 赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に対する ALMA による観測結果。(b) 複雑な有機分子の存在量について、G34.43+00.24 MM3 と他の大質量星形成領域及び小質量星形成領域との比較。(c) 様々な領域の  $D_2CO/CH_3OH$  比。

#### (4) 赤外線暗黒星雲に対するアンモニアメーザーの観測

赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に対する電波干渉系 VLA を用いたアンモニア輝線の観測データを解析したところ、 $NH_3 (J, K) = (3, 3)$  輝線のメーザーが検出された。アンモニアメーザーはショックで励起されると考えられているが、メーザー源はこれまでに認識されていた分子流とは異なる位置で検出された。これは、分子雲クランプ内部にこれまでに認識されてい無分子流が存在することを示唆している。また、このことは、アンモニアメーザーを観測することで、分子雲クランプ内部の星形成活動に関する新たな情報が得られることを示している。

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計1件)

1. Sakai Takeshi, Yanagida Takahiro, Furuya Kenji, Aikawa Yuri, Sanhueza Patricio, Sakai Nami, Hirota Tomoya, Jackson James M., Yamamoto Satoshi, "ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Complex Organic and Deuterated Molecules", 2018, The Astrophysical Journal, Volume 857, id. 35, 11 pp. (査読あり)

##### [学会発表](計7件)

1. Takeshi Sakai, "Chemical Compositions of Young Hot Cores Associated with Infrared Dark Clouds", Star formation with ALMA: Evolution from molecular clouds to protostars (Nagoya University), 2019/3/4-3/6 (査読なし)
2. 植松海, 酒井剛, "VLA を用いた赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 に対する  $NH_3$  輝線観測", 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学), 2018/9/19-9/21 (査読なし)
3. Takeshi Sakai, Patricio Sanhueza, Yanett Contreras, Kenji Furuya, Satoshi Ohashi, Andres Guzman, Fumitaka Nakamura, Ken'ichi Tatematsu, "ALMA Observations of the 70  $\mu m$  Dark Massive Clump G14.49-0.14", 日本天文学会 2018 年秋季年会 (兵庫県立大学), 2018/9/19-9/21 (査読なし)
4. Takeshi Sakai, Patricio Sanhueza, Yanett Contreras, Kenji Furuya, Satoshi Ohashi, Andres Guzman, Fumitaka Nakamura, Ken'ichi Tatematsu, "ALMA Observations of Infrared Dark Clouds", 50 th Anniversary International Symposium of Center for Space Science and Radio Engineering (SSRE) ~ Electromagnetic Environment Measurements and their application ~ (The University of Electro-Communications), 2018/6/25-26 (査読なし)
5. 齋藤敦, 酒井剛, Patricio Sanhueza, Xing Lu, "VLA と GBT を用いた IRDC G028.23-00.19 に対するアンモニア輝線観測", 日本天文学会 2017 年秋季年会 (北海道大学), 2017/9/11-9/13 (査読なし)
6. 酒井剛, 古家健次, 相川祐理, 坂井南美, 廣田朋也, 渡邊祥正, 山本智, "野辺山 45m 望遠鏡を用いた低温大質量クランプに対する分子輝線サーベイ", 日本天文学会 2016 年秋季年会 (愛媛大学), 2016/9/14-9/16 (査読なし)
7. T. Sakai, K. Furuya, P. Sanhueza, N. Sakai, T. Hirota, Y. Aikawa, Y. Watanabe, J. Foster, J. Jackson, S. Yamamoto, "Deuterium Fractionation in the Earliest Stages of High-Mass Star Formation", Workshop on Interstellar Matter 2016, Hokkaido University, 2016/10/19-21 (招待講演)(査読なし)

〔図書〕(計1件)

1. 酒井剛、“アルマ望遠鏡による赤外線暗黒星雲観測と大質量星形成”、天文月報 第100巻 第6号(2017年6月号)、379-385 (査読なし)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。