

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04025

研究課題名（和文）ALMAで探る大質量星形成領域における窒素を含む複雑な有機分子の起源

研究課題名（英文）Exploring the Origin of Nitrogen-Containing Complex Organic Molecules in High-Mass Star-Forming Regions with ALMA

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・教授

研究者番号：20469604

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：大質量星形成領域で観測される複雑な有機分子の起源を調べるため、アルマ望遠鏡を用いて、様々な進化段階にある大質量星形成領域の観測を行なった。重水素化分子輝線の観測の結果、大質量星形成の初期状態には多様性があること、また、小質量星形成の初期状態に比べ、温度が高くなり得ることがわかった。また、大質量星形成領域において、窒素を含む複雑な有機分子の存在量にはばらつきが見られたが、そのばらつきの起源は、星形成前の初期状態の違いではなく、星形成後の性質の違いである可能性が示唆された。大質量星形成領域における窒素を含む複雑な有機分子の起源には、ダストの加熱過程が関係していると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子雲内部で原始星が誕生し惑星が形成される過程で、物質がどのように進化してきたのか理解することは、我々がどのように誕生してきたかという根源的な問いに直結する重要な研究テーマである。複雑な有機分子の起源を明らかにすることは、アミノ酸など生命関連分子の生成過程の理解にもつながる。本研究では、大質量星形成領域における窒素を含む複雑な有機分子の存在量には、ダストの加熱過程が影響している可能性を示した。今後、さらに研究を進めることで、生命関連分子の生成過程の理解も進むと期待される。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate the origin of nitrogen-bearing complex organic molecules in high-mass star-forming regions, we observed high-mass star-forming regions at various evolutionary stages by using ALMA. The observations of the deuterated molecular lines revealed that there is diversity in the initial conditions of high-mass star formation and that the temperature of the initial conditions of high-mass star formation can be higher than that of low-mass star formation. In addition, it was found that the abundance of nitrogen-bearing complex organic molecules varies among the observed high-mass star-forming regions, and this variation is likely due to differences in the properties after star formation rather than differences in the initial conditions before star formation. It is suggested that the heating process of dust is related to the origin of nitrogen-containing complex organic molecules in high-mass star-forming regions.

研究分野：電波天文学

キーワード：大質量星 星間分子 有機分子 赤外線暗黒星雲 星形成 分子雲 重水素

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

分子雲内部で原始星が誕生し、原始惑星系円盤の中で惑星が形成される過程で、物質がどのように進化してきたのか理解することは、我々がどのように誕生してきたかという根源的な問いに直結する重要な研究テーマである。本研究では、惑星が形成される前、原始星周囲に存在する“複雑な(原子数6以上を意味する)”有機分子に着目し、ミリ波サブミリ波帯での電波観測から、その起源に迫る。

原始星周囲の高温(>100 K)領域をミリ波サブミリ波帯で観測すると様々な分子のスペクトル線が観測される。これは、ダスト上で生成された様々な分子が、高温領域でダストから昇華するためである。これまで、原始星周囲の化学組成は、小質量星形成領域と大質量星形成領域で異なることが知られていた。特に、大質量星形成領域では、窒素を含む複雑な有機分子(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CNなど)が、小質量星形成領域に比べ豊富に存在する。しかし、窒素を含む複雑な有機分子の起源はこれまで明らかにされていなかった。原始星周囲の化学組成の起源を知るには、様々な進化段階にある天体を観測する必要があるが、大質量星形成の初期段階にある天体の観測例が少なく、大質量星形成の初期状態が小質量星形成領域とどのように異なるのかや、大質量星形成の進化とともに原始星周囲の化学組成がどのように変化していくのかといったことが明らかにされていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、大質量星形成の極若い段階にある天体や、比較的進化の進んだ天体の化学組成を統計的に調べ、小質量星形成領域の結果と比較するなどし、大質量星形成領域における窒素を含む複雑な有機分子の起源を明らかにすることである。具体的には特に以下の2点に着目し、窒素を含む複雑な有機分子の起源に迫る。

1. 大質量星形成における初期状態に多様性はあるのか。あるとすれば初期状態の違いは複雑な有機分子の組成にどのように影響するのか。
2. 大質量星形成における原始星周囲の化学組成に多様性はあるのか。また、窒素を含む複雑な有機分子の存在量は大質量星の形成過程でどのように変化していくのか。

### 3. 研究の方法

大質量星の初期状態を明らかにするため、アルマ望遠鏡を用い重水素化分子輝線の観測を行う。窒素を含む複雑な有機分であるCH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CNは、ダスト上でC<sub>3</sub>NもしくはHC<sub>3</sub>Nに対する水素付加によって形成されると考えられている(e.g. Caselli et al. 1993, ApJ, 408, 548)。この反応は、原始星誕生前の低温時でも起こる可能性がある。したがって、生成過程を理解するためには、原始星誕生前の低温な状態の時間的な長さの違いも理解する必要がある。低温な期間の長さを理解するためには分子の重水素濃縮度を調べることが有効と考えられる。これは、分子の重水素濃縮度が温度に依存し、低温な時期が長いほど重水素濃縮度が高くなると考えられるためである。本研究では、大質量星形成の初期状態を明らかにするため、アルマ望遠鏡を用いた重水素化分子輝線の観測を行う。

また、大質量星形成において原始星周囲の化学組成が進化とともにどのように変化していくのかは未だ観測的に明らかにされていない。複雑な有機分子の生成にはダスト表面での反応が重要と考えられている。星形成後の加熱されたダスト上で窒素を含む複雑な有機分子が主に生成されているとすれば、進化段階によって窒素を含む複雑な有機分子に差が見られるかもしれない。本研究では、様々な進化段階の天体についてアルマ望遠鏡を用いた複雑な有機分子輝線の観測を行う。また、大質量星形成領域における原始星周囲の化学組成の多様性についても同時に調査する。

### 4. 研究成果

本研究でこれまでに得られた成果を以下に示す。

#### (1) 極初期段階における重水素化分子の存在量の起源

これまでに赤外線暗黒星雲 G14.492-00.139 において、重水素化分子輝線の分布を明らかにしていたが、DCO<sup>+</sup>/N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>比に着目し解析を行った。その結果、G14.492-00.139 では、DCO<sup>+</sup>/N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>比が、小質量星形成領域の星なしコアに比べ、有意に低いことがわかった(図1左)。また、モデル計算との比較から、観測された低いDCO<sup>+</sup>/N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>比は、ガスの温度が、一酸化炭素分子がダストから昇華する温度(~25 K)より低く、窒素分子がダストから昇華する温度(~20 K)より高い場合に説明できることがわかった(図1右)。したがって、大質量星形成の初期状態は、小質量星の初期状態より温度が高くなり得ることが示唆された。

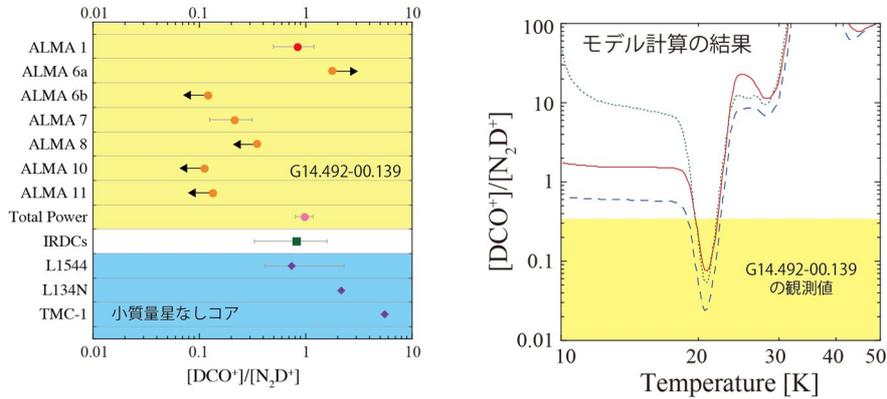


図 1(左) 赤外線暗黒星雲 G14.492-00.139 における  $\text{DCO}^+/\text{N}_2\text{H}^+$  比の観測結果と小質量星なしコアの観測結果の比較。(右)  $\text{DCO}^+/\text{N}_2\text{H}^+$  比の化学モデル計算の結果。

### (2) 大質量星形成領域におけるメタノールの重水素濃縮度

メタノール ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) はダスト上で CO に対する水素付加反応によって生成される。したがって、 $\text{CH}_3\text{OH}$  の重水素濃縮度 ( $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比) は、 $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{CH}_2\text{DOH}$  が生成された時のダスト上の D/H 比に依存すると考えられる。ダスト上の D/H 比は、低温な環境で増加するため、ダスト上の  $\text{CH}_3\text{OH}$  の重水素濃縮度も低温な環境で増加すると考えられる。星形成後、温度が 90 K 程度以上になると  $\text{CH}_3\text{OH}$ 、 $\text{CH}_2\text{DOH}$  がダストから昇華し、原始星周囲で観測される。このとき、 $\text{CH}_3\text{OH}$  の重水素濃縮度は、 $\text{CH}_3\text{OH}$  が形成された時の値を保持していると考えられる。したがって、星形成後の天体を観測することで、星形成前の低温時代の情報を得ることができる。アルマ望遠鏡で観測された大質量星形成領域 24 天体について  $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比を調べた結果、 $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比は現在の温度には依存せず、同程度の温度の天体であっても  $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比に一桁以上のばらつきが見られることがわかった(図 2 左)。化学モデル計算の結果、このばらつきの要因として、低温 (<10 K) 時代の長さの違いによる可能性が示唆された(図 2 右)。したがって、これらの結果から大質量星形成の初期状態には多様性があることが示唆された。

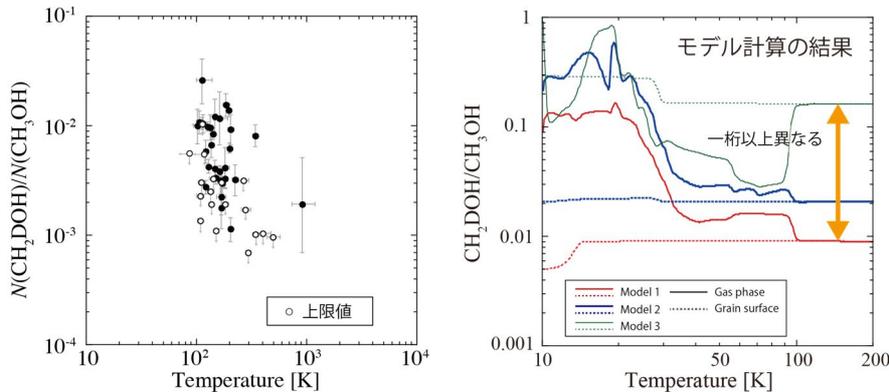


図 2. (左) 大質量星形成領域に対する  $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比の観測結果と  $^{13}\text{CH}_3\text{OH}$  輝線の観測結果から求めた温度のプロット。(右)  $\text{CH}_2\text{DOH}/\text{CH}_3\text{OH}$  比についての化学モデル計算の結果。Model 1 は、星なしコアの段階において自由落下時間で収縮する場合、Model 2 は自由落下時間の 3 倍、Model 3 は自由落下時間の 10 倍でそれぞれ収縮する場合。

### (3) 極若い大質量星形成領域における化学組成の調査

大質量星形成の極初期段階における、原始星周囲の複雑な有機分子の存在量についての観測例はこれまでに極わずかしか報告されていない。これまでに我々は赤外線暗黒星雲 G34.43+00.24 MM3 において、極若いにも関わらず、複雑な有機分子が豊富に存在する天体を見つけている (Sakai et al. 2018, ApJ) が、そのような天体が大質量星形成の初期段階として典型的なものであるのかどうか分かっていなかった。そこで、大質量な赤外線暗黒星雲に付随し、極若い分子流を伴う高密度分子雲コアに対して、アルマ望遠鏡を用いた高分解能観測を行なった。観測のノイズレベルは以前の G34.43+00.24 MM3 に対する観測と同程度である。観測データが得られた天体は 4 天体であったが、それらすべての天体で  $\text{CH}_3\text{OH}$  以外の複雑な有機分子輝線を検出することはできなかった。このことは、大質量星形成の極初期段階では、原始星周囲の複雑な有機分子の存在量は、小質量原始星と大きく変わらない可能性を示唆している。つまり、窒素を含む複雑な有機分子は比較的進化の進んだ大質量星形成領域で豊富になる可能性が示唆される。また、複雑な有機分子が豊富に存在する G34.43+00.24 MM3 は特異な天体であるか、あるいは進化の進んだ大質量星をコア内に含む連星系である可能性も示唆された。加えて、大質量星形成領域の極初期段階の化学組成をさらに詳細に調べるには、より高感度な観測が必要であることも分かった。

#### (4) 進化の進んだ大質量星形成領域における化学組成の調査

比較的進化の進んだ大質量星形成領域に対して、複雑な有機分子の存在量を調べた。その結果、酸素を含む複雑な有機分子の存在量は領域ごとに大きな差はないが、窒素を含む複雑な有機分子の存在量には領域ごとにばらつきが見られることがわかった。また、窒素を含む複雑な有機分子の存在量と  $\text{CH}_3\text{OH}$  の重水素濃縮度との間には、相関がないこともわかった。このことは、星形成前の低温時代の環境の違いは、窒素を含む複雑な有機分子の存在量に影響を与えないことを示唆している。

また、大質量星形成領域 G351 において、酸素を含む複雑な有機分子と窒素を含む複雑な有機分子の分布が明らかに異なることを発見した。窒素を含む複雑な有機分子は連続波のピーク付近で強くなっているが、酸素を含む複雑な有機分子は連続波源からずれた位置にピークが見られた。この違いは Orion-KL 領域でこれまでに見つかっている傾向と似ており、窒素を含む複雑な有機分子の方が、酸素を含む複雑な有機分子に比べ、より原始星に近い領域で豊富に存在することを示している。このことは、ダストの加熱が窒素を含む複雑な有機分子の生成に関係していることが示唆される。また、小質量星形成領域 [BHB2007]11 という天体に対するアルマ望遠鏡の観測結果から、窒素を含む複雑な有機分子の存在量が、大質量星形成領域に比べ有意に少ないことも確認している。小質量星形成領域では、ダストの加熱の影響が大質量星形成領域より少ないため、窒素を含む複雑な有機分子の存在量が少ないと考えることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Sakai Takeshi, Sanhueza Patricio, Furuya Kenji, Tatematsu Ken'ichi, Li Shanghuo, Aikawa Yuri, Lu Xing, Zhang Qizhou, Morii Kaho, Nakamura Fumitaka, Takemura Hideaki, Izumi Natsuko, Hirota Tomoya, Silva Andrea, Guzman Andres E., Sakai Nami, Yamamoto Satoshi | 4. 巻<br>925             |
| 2. 論文標題<br>The ALMA Survey of 70 $\mu$ m Dark High-mass Clumps in Early Stages (ASHES). V. Deuterated Molecules in the 70 $\mu$ m Dark IRDC G14.492-00.139   | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>144 ~ 144 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/ac3d2e   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Li Shanghuo, Sanhueza Patricio, Zhang Qizhou, Nakamura Fumitaka, Lu Xing, Wang Junzhi, Liu Tie, Tatematsu Ken'ichi, Jackson James M., Silva Andrea, Guzmán Andrés E., Sakai Takeshi, Izumi Natsuko, Tafuya Daniel, Li Fei, Contreras Yanett, Morii Kaho, Kim Kee-Tae | 4. 巻<br>903             |
| 2. 論文標題<br>The ALMA Survey of 70 $\mu$ m Dark High-mass Clumps in Early Stages (ASHES). II. Molecular Outflows in the Extreme Early Stages of Protocluster Formation   | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>The Astrophysical Journal  | 6. 最初と最後の頁<br>119 ~ 119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3847/1538-4357/abb81f   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Vastel C., Sakai T., Ceccarelli C., Jimenez-Serra I., Alves F., Balucani N., Bianchi E., Bouvier M., Caselli P., Chandler C. J., Charnley S., Codella C., De Simone M., Dulleu F., Evans L., Fontani F., Lefloch B., Loinard L., Menard F., Podio L., Sabatini G., Sakai N., Yamamoto S. | 4. 巻<br>684               |
| 2. 論文標題<br>FAUST   | 5. 発行年<br>2024年           |
| 3. 雑誌名<br>Astronomy & Astrophysics   | 6. 最初と最後の頁<br>A189 ~ A189 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1051/0004-6361/202348481  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>塩村信人、酒井剛（電気通信大学）、Patricio Sanhueza（国立天文台） |
| 2. 発表標題<br>ALMA を用いた大質量星形成領域に対する化学組成のサーベイ観測          |
| 3. 学会等名<br>日本天文学会2023年春季年会                           |
| 4. 発表年<br>2023年                                      |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|