

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20390

研究課題名（和文）分子輝線分布と主成分分析を活用した星・惑星系形成の最初期過程の解明

研究課題名（英文）Unraveling the Very Early Stage of Star and Planet Formation with the Aid of Molecular Distributions and Machine Learning

研究代表者

大小田 結貴（Okoda, Yuki）

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・基礎科学特別研究員

研究者番号：20963094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、初期円盤の内部構造、激しい活動性の起源、有機分子の生成と進化の解明である。これらに向けて3つの研究、「炭素鎖分子に恵まれる天体でホットコリノ」、原始星天体から噴出しているガス（アウトフロー構造）の分布と運動、温度構造、「円盤形成領域の重水素濃縮度の測定」を進めた。星・惑星系形成の最初期過程の解明を目指した研究を進め、論文または国内外での学会発表として成果を挙げている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この20年ほどの間に、5000以上の系外惑星が発見されてきた。それらは、連星系で形成されたものや、中心星の自転と逆向きに公転するものなど、様々であることが明らかになりつつある。このような惑星系多様性の起源は星形成後の後天的要因だけではなく、原始星の形成初期にもあるのではないかと考えられる。原始星は低温（数10-100 K）かつ母体となるガスに埋もれている。しかし、近年ALMAやJWSTなどの最新観測機器で、誕生したばかりの原始星の詳細を捉えることが可能になった。本研究は、惑星系多様性の起源、さらに太陽系の成り立ちの解明に大きな意義がある。

研究成果の概要（英文）：My research aim was to elucidate "Inner structure of early disk", "Origin of chaotic assembly", "Formation and evolution of complex organic molecules". During 2 years, I had been studying on the 3 themes: "Hot corino in Warm Carbon Chain Chemistry source", "Distribution, kinematics, and temperature structure in outflow", "Measuring deuterium fractionation in disk/envelope system". I successfully obtained the results to develop our understanding of young low-mass protostars. I presented them in international and domestic conferences. These studies except for the second were already published as a paper.

研究分野：星形成

キーワード：星形成 最初期 原始星 星間化学 ALMA

様式 C-19、F-19-1 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

この20年ほどの間に、多くの系外惑星が発見されてきた。それらは、連星系で形成されたものや、中心星の自転と逆向きに公転するものなど、様々であることが明らかになりつつある。私はこの惑星系の驚くべき多様性に興味を持ち、この多様性の起源は、星形成後の後天的要因だけではなく、原始星の最初期形成過程にもあるのではないかと考えた。

誕生したばかりの星(原始星)は低温でかつ母体となる厚いガスに埋もれている上、最初期過程は短く、その詳細を調べることは困難であった。しかし、ここ数年のALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)の本格稼働により、この状況は一変し、観測研究が進展しつつある。私は上記の興味から、最初期形成過程にある原始星天体をALMAで観測し、回転する円盤構造(原始星円盤)がすでに形成されていること、また、激しい活動性を伴うこと(アウトフローの大きな方向変化)を発見した。さらに、私は、原始星周りの有機分子分布が分子ごとに系統的に異なることを示し、この分布の違いを利用して、円盤に降着するガスが衝撃波を生じさせていることを見出した。これらの結果から、以下の3つの新たな「問い」が見えてきた。

(1)初期円盤はどのように形成されるのか?: 理論的には、初期の円盤は原始星誕生直後のFirst coreの一部が進化したものと考えられている<sup>3)</sup>。この詳細を観測的に検証する必要がある。(2)激しい活動性を引き起こす要因は何なのか?: これまで星形成は、一様な分布と運動を持つ母体ガス雲から始まると考えられてきたが、この活動性の発見は、不均一・不連続なガス降着を伴う星形成過程を示唆し、その詳細説明が求められる。(3)原始星周りの分子はどのように生成され惑星系にもたらされるのか?: 原始星周りで検出される分子のいくつかは、近年、小惑星や彗星でも検出され、原始星から惑星系への物質進化の一端が見え始めている。その化学過程の理解は太陽系の起源との関係でも注目されている。

私は、研究開始当初、これらの(1)~(3)の問いに迫ることで星・惑星系の最初期過程の理解を進めたいと考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、星・惑星系形成の最初期過程に切り込み、その固有の特徴と背景にある物理・化学過程を観測的に明らかにすることである。そのために、ALMAを用いて若い原始星天体の観測を進める。

## 3. 研究の方法

1で提示した(1)~(3)の問いに対して、それぞれ以下の方法で取り組むことを計画した。

(1) 初期円盤の内部構造: 原始星天体 IRAS 15398-3359 に対する高解像度観測 (15 au) により、すでに検出している初期円盤 (半径 40 au) の詳細を理解する。それには円盤構造をトレースする「分子マーカー」である SO 分子の輝線を用いる。初期円盤内部の速度構造を調べ円盤が圧力で支えられているか (First Core の名残)、遠心力で支えられているかを検証する。それをもとに原始星質量を再評価するとともに、Toomre Q 値を用いて円盤の安定性を検討する。初期の原始星は十分に成長していないため、形成される円盤は不安定である可能性があり、それを検証したい。これは原始星と円盤の共進化の実像を掴む上で重要な課題である。

(2) 激しい活動性の起源: アウトフローの向きは降着ガスの角運動量の方向で主に決まる。原始星を取り巻くガス(原始星コア)の密度分布が不均一で、その降着ガスの角運動量の方向が時間変化する場合、原始星の進化につれてアウトフローの方向変化が起こると考えられる。この可能性を検証するため、原始星コアの回転運動を異なるスケールで解析し、原始星コア内のそれぞれのスケールでの角運動量方向を調べる。IRAS 15398-3359 について、原始星コアの「分子マーカー」となる  $\text{H}^{13}\text{CO}^+$  を観測する。

(3) 有機分子の生成と進化: 複数の天体に対し、PCA を用いて数 10 au スケールにおける分子ごとの分布と速度構造を系統的に理解し、「分子マーカー」として分類する。また、分子のガス温度や柱密度を見積もり、天体における分子の存在量を求める。原始星の進化段階や光度などとも合わせ、それらを天体間で比較する。結果を化学モデル計算や分子科学の実験結果と比較し、

化学過程の理解を進める。

#### 4. 研究成果

採択された2年間、1で提示した(1)~(3)の問いの解明に向けて、私は3つの研究「①. 原始星天体から噴出しているガス(アウトフロー構造)の分布と運動、温度構造」、「②. 炭素鎖分子に恵まれる天体でホットコリノ」、「③. 円盤形成領域の重水素濃縮度の測定」を進めた。研究を進めていく上で、計画していた研究方法を見直しながら、星・惑星系形成の最初期過程の解明を目指した。以下にそれぞれについて説明する。

①. 原始星天体から噴出しているガス(アウトフロー構造)の分布と運動、温度構造: 原始星天体 IRAS 15398-3359 に対して JWST のデータと ALMA のデータ両方を用いてアウトフロー構造の理解を進めた。ALMA で観測される分子はアウトフローの Cavity を主に捉えるが、JWST はアウトフローの内側の高温ガスを捉える。このことを利用して、アウトフロー構造の全体像を調べた。JWST で観測した8本の  $H_2$  分子輝線からアウトフロー内側の温度を測定することに成功した。本研究は論文としてまとめている最中である。この研究は主に(2)の問いを調べる上で重要な成果と言える。また当初予定していた計画も同時に進めた。複数のアウトフロー構造の起源を探るための新たな観測を ALMA に提案し、PI として観測時間を確保することに成功した。

②. 炭素鎖分子に恵まれる天体でホットコリノを発見: また、上記の円盤構造における化学組成についても研究を進めた。一般的に、原始星天体の化学組成は多様性があり、その極端なケースが「有機分子が豊富な天体」と「不飽和炭素鎖分子が豊富な天体」である。近年 ALMA の高分解能観測により、2つのタイプの特徴を併せ持つ天体(Hybrid 天体)も報告されている。Hybrid 天体では、原始星近傍(数 10-100 au)では有機分子、原始星周り数 1000 au スケールでは炭素鎖分子が豊富である。原始星天体 IRAS 15398-3359 は代表的な「不飽和炭素鎖分子が豊富な天体」と考えられていた。私は、本天体に対して行われた高分解能(数 10 au)かつ高感度の観測データを解析し、原始星近傍にコンパクトに分布する3種類の有機分子( $CH_3OH$  の高励起線、 $CH_2DOH$ 、 $CH_3OCHO$ )を検出し、本天体が Hybrid な特徴を持つことを明らかにした。この結果は、円盤の詳細構造を調べる分子マーカーとしてこれらの分子が有効であることを示唆する。当初の予定とは別の視点から、(1)、(3)の問いの解明に繋がる成果を挙げた。

③. 円盤形成領域の重水素濃縮度の測定: 重水素濃縮度( $[CH_2DOH]/[CH_3OH]$ )は、原始星の進化過程や進化段階を反映する重要な指標である。一般的に、原始星誕生の舞台となる星なしコアでの重水素濃縮度は $\sim 0.1$ 程度で、原始星の進化に伴い下がることが知られる。私は、原始星天体 B335 について、 $CH_3OH$  の重水素化物  $CH_2DOH$ 、 $CHD_2OH$ 、 $CH_3OD$  を検出した。半径 24 au の円盤・エンベロープ構造で6点において重水素濃縮度を測定し、他の低質量原始星天体に比べて B335 の重水素濃縮度は星なしコアの値に近いことを示した。また、5 au の高分解能で円盤・エンベロープ構造内ではそれらがほとんど変化しない。原始星ごく近傍の重水素濃縮度を調べたことは新しく、本研究は惑星系にもたらされる重水素濃縮を理解する手がかりとなった。本研究は(3)の問いに繋がる。

このように、当初計画していた以上に、研究を進展させ、論文または国内外での学会発表として成果を挙げた。

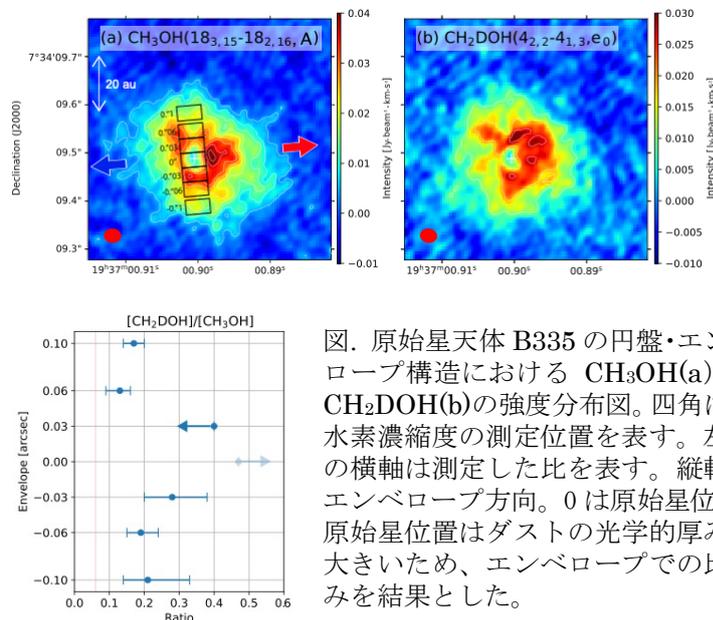


図. 原始星天体 B335 の円盤・エンベロープ構造における  $CH_3OH$ (a) と  $CH_2DOH$ (b) の強度分布図。四角は重水素濃縮度の測定位置を表す。左図の横軸は測定した比を表す。縦軸はエンベロープ方向。0 は原始星位置。原始星位置はダストの光学的厚みが大きいため、エンベロープでの比のみを結果とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okoda Yuki, Oya Yoko, Imai Muneaki, Sakai Nami, Watanabe Yoshimasa, Lopez-Sepulcre Ana, Saigo Kazuya, Yamamoto Satoshi	4. 巻 935
2. 論文標題 Chemical Differentiation and Temperature Distribution on a Few au Scale around the Protostellar Source B335	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7ff4	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 Okoda, Y., Oya, Y., Francis, L., et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 FAUST VII. Detection of A Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398-3359	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 大小田 結貴
2. 発表標題 低質量原始星B335 におけるCH <sub>3</sub> OHの重水素化物
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Deuterated CH <sub>3</sub> OH in the Low Mass Class 0 protostellar source B335
3. 学会等名 次世代アストロケミストリー2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Physics and Chemistry in the Beginning of Low-Mass Star Formation
3. 学会等名 241 st AAS meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Detection of A Hot Corino in the Prototypical Warm Carbon-Chain Chemistry Source IRAS 15398 - 3359
3. 学会等名 East Asia ALMA conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大小田 結貴
2. 発表標題 若い低質量原始星天体B335 周りの化学組成
3. 学会等名 次世代アストロケミストリー2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大小田 結貴
2. 発表標題 FAUST: 非常に若い低質量原始星 IRAS 15398 - 3359 の物理・化学構造
3. 学会等名 日本天文学会春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Kinematics of the Disk/Envelope System in the Low-Mass Protostellar Source B335
3. 学会等名 PVII (Protostars and Planets VII) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大小田 結貴
2. 発表標題 JWST とALMA を用いた原始星 IRAS 15398-3359 のアウトフローの解析
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Molecules in Outflow Shocked Regions: JWST meets ALMA
3. 学会等名 Workshop on interstellar matter 2023 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 ALMA's Revelations: Dynamic Structures at the Beginning of Low-Mass Star Formation
3. 学会等名 ALMA at 10 years: Past, Present, and Future (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuki Okoda
2. 発表標題 Chemical structure of the disk/envelope system in the low-mass protostellar source B335
3. 学会等名 Celebrating 30 years of protoplanetary disk chemistry: past, present, and future (招待講演) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------