

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14753

研究課題名（和文）硫黄関連分子でみる原始星円盤形成に伴う物理構造と化学進化

研究課題名（英文）Physical Structure and Chemical Evolution during the Disk-Formation Process Traced by Sulfur-Bearing Species

研究代表者

大屋 瑶子 (Oya, Yoko)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：00813908

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の目的は、太陽型原始星に対して、円盤形成領域における物理構造と化学組成分布、およびそれらの相互関係を高解像度で明らかにし、惑星系形成領域での物質進化の理解を大きく前進させることである。とくにその有効な切り口として、硫黄を含む分子（硫黄関連分子）に着目し、高い感度と空間解像度での電波観測実験を実施した。

観測された硫黄関連分子の輝線を解析し、原始星を取り巻く複雑な物理構造を切り分けた。これにより、物理構造の変化に伴い、硫黄関連分子の分布が急激に変化する様子を明らかにした。また、天体間での硫黄関連分子の組成の多様性を見出すとともに、その化学進化の統一的描像を提起した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

若い太陽型原始星まわりでの惑星系形成と、そこでの物質進化を探ることは、我々が住む地球のもつ豊かな環境の起源の理解に直結する重要な研究課題である。しかし、惑星系の母体である原始惑星系円盤が、原始星の周りに「いつ」「どのようにして」作られるのか、またそこでどのような物質進化が起きているのかについては、観測的にも理論的にも未開拓の領域として残されてきた。本研究課題では、太陽系内の彗星でも検出され注目を集める硫黄関連分子を軸に、惑星系形成領域における物理過程と物質進化の理解を前進させた。この成果は、惑星系形成領域と太陽系化学を結びつける端緒を与えると期待される。

研究成果の概要（英文）：This project aimed to understand the chemical evolution in planet-forming regions of Solar-type protostars by delineating the physical structures and chemical distributions in their disk-forming regions, including their mutual relation. To achieve this goal, we performed high sensitivity and high spatial-resolution radio observations, especially focusing on the sulfur-bearing species.

We delineated the complex physical structures in the vicinity of Solar-type protostellar sources with the molecular lines of various sulfur-bearing species. We found that the physical structure drastically changes from the envelope to the disk. Moreover, the sulfur-bearing species show chemical differentiation along with the change in the physical structure. We also found the diversity in the chemical compositions of sulfur-bearing species among Solar-type protostars. We suggested that this diversity can be originated from the initial gas and dust temperatures before the birth of protostars.

研究分野：天文学

キーワード：電波天文学 星形成 星間物質

### 1. 研究開始当初の背景

太陽程度の質量をもつ恒星(低質量星)と惑星系の形成過程は、星間分子雲の収縮に始まり、原始星の誕生とその周囲での原始惑星系円盤の形成、そして前主系列星段階における惑星系の形成の3段階に大別される(図1)。このうち、前半の星間分子雲の収縮から星形成までの過程、および後半の前主系列星段階の原始惑星系円盤については、電波や赤外線などの観測により急速に理解が進みつつある。一方、惑星系の母体である原始惑星系円盤が、原始星の周りに「いつ」「どのようにして」作られるのか、またそこでどのような物質進化が起きているのかについては、観測的にも理論的にも未開拓の領域として残されてきた。しかし、本研究課題の開始当初には、国際共同大型電波干渉計アルマ(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA)の登場により、このミッシングリンクを繋げるための観測的研究が可能になりつつあった。

一方で、本研究課題の開始当初、Rosetta 衛星による彗星 67P/Churyumov-Gerasimenko の分析によって、硫黄を含む様々な有機分子が発見されたことから、硫黄関連分子を軸に惑星系形成領域の化学と太陽系化学が結びつく可能性が見出された。

このような学術的背景から、本研究課題では、ALMA を用いた観測研究成果を半統計的数の原始星天体に拡張し、惑星系形成領域における物理過程と硫黄を軸にした物質進化の理解を格段に前進させることを目指した。

### 2. 研究の目的

若い太陽型原始星まわりでの惑星系形成と、そこでの物質進化を探ることは、我々が住む地球のもつ豊かな環境の起源の理解に直結する重要な研究課題である。ALMA を用いた電波分子スペクトル線観測では、ガスの速度構造とともに化学組成も知ることができる。「星形成過程において、星間物質がどのような変遷を経て惑星系にもたらされるのか」という問いを突き詰めることは、太陽系の物質環境の起源を理解する上で必須の課題である。本研究課題では、円盤形成領域の物理構造と化学組成分布を、ALMA の高解像度、高感度を最大限に活用して明らかにすることで、惑星系形成における物質進化の初期条件の包括的に規定し、上記の問いの核心に迫ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

申請者は、本研究課題の着手以前より、ALMA を用いた観測研究によって、この問題に正面から取り組んできた。その中で、原始星円盤形成過程において、原始星に落下するガスの化学組成が原始星付近で劇的に変化すること、また、化学組成自体が天体ごとに多様性をもつという、まったく新しい描像を明らかにしてきた。この研究過程において、硫黄関連分子が惑星系形成領域の特定の場所を選択的にトレースすることや、それらの存在量が天体間で大きく異なるという特徴を見出してきた。

本研究課題では、半統計的数(10-20個)の低質量原始星に対して、円盤形成領域における物理構造と化学組成分布、およびそれらの相互関係を高解像度で明らかにし、惑星系形成領域での物質進化の理解を大きく前進させることを目的とする。前述の研究背景を踏まえ、特にその有効な切り口として考えられる硫黄を含む分子(硫黄関連分子)に着目して研究を進めた。

### 4. 研究成果

上記の目的のため、ALMA がもつ高い感度と解像度を駆使した観測実験を実施した。本研究課題では、研究代表者が独自に取得した ALMA 観測データに加えて、欧・米との国際共同プロジェクト FAUST (Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars) を通して得られた膨大な観測データを活用した。データ解析のため、高性能の計算機を措置した。以下に、主な成果をまとめる。

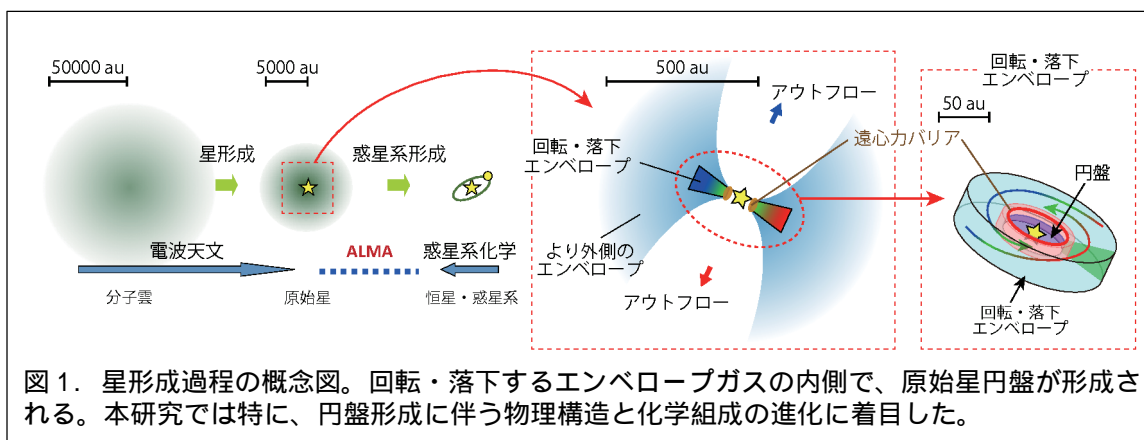


図1. 星形成過程の概念図。回転・落下するエンベロープガスの内側で、原始星円盤が形成される。本研究では特に、円盤形成に伴う物理構造と化学組成の進化に着目した。

#### 4.1 低質量 Class 0 原始星天体 IRAS 16293-2422

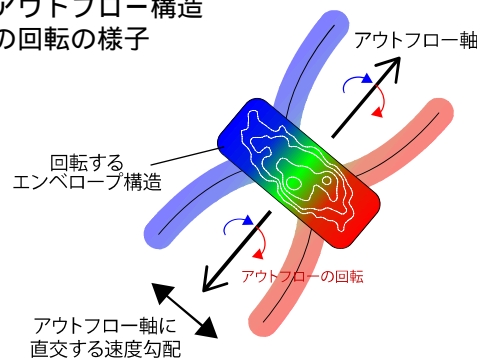
若い低質量原始星天体 IRAS 16293-2422 は、Source A と Source B からなる連星系である。さらに、Source A は非常に近接した連星系（原始星 A1, A2）である。この天体に対して、波長 1.3 mm および 3.1 mm での ALMA 観測を実施し、高い空間解像度と周波数分解能で、硫黄関連分子 ( $\text{H}_2\text{CS}$ ,  $\text{C}^{34}\text{S}$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{OCS}$ ) の輝線を捉えた。これらの分子輝線の速度構造を詳細に解析することで、Source A に付随する物理・化学構造を明らかにした。

観測された速度構造の解析から、Source A 全体を取り巻くエンベロープ構造の内側に、原始星 A1 のみに付随して回転する星周円盤構造が形成されていることを明らかにした。硫黄関連分子の分布を解析することで、 $\text{C}^{34}\text{S}$  輝線はエンベロープ構造のみを捉えるのに対し、 $\text{H}_2\text{CS}$  輝線はこれに加えて星周円盤も捉えることを示した。一方、 $\text{SO}$  輝線と  $\text{OCS}$  輝線は、Source A から吹き出すアウトフロー構造も捉えた。これらの分子はいずれも硫黄関連分子であるが、原始星近傍におけるそれらの分布は分子種によって大きく異なることを示した。加えて、複数の  $\text{H}_2\text{CS}$  輝線の解析から、星周円盤の縁でガスの温度が局所的に上昇していることが示唆された。これらの成果は、連星系における円盤構造形成に伴って、ガスの物理構造と化学組成が急激に進化していく様子を描き出している。

$\text{SO}$  輝線と  $\text{OCS}$  輝線を用いて、Source A から南東-北西方向に吹き出すアウトフローの速度構造を解析した。この構造が原始星 A1 に付随することを指摘した。さらに、このアウトフローが回転運動をもつことを、初めて明らかにした (図 2)。

異なる硫黄関連分子の輝線を活用することで、三つの物理構造（エンベロープ、星周円盤、アウトフロー）を選択的に捉えることに成功した。速度構造の詳細な解析により、これらの物理構造におけるガスの比角運動量を評価した。各構造間で比角運動量を比較することで、南東-北西方向に吹き出すアウトフローが、原始星 A1 の星周円盤構造から角運動量を抜き取る機構として働いている可能性を指摘した。この機構は、円盤構造から原始星に向かってガスが降着することを助け、原始星の成長を促す役割をもつと考えられる。

図 2. IRAS 16293-2422 Source A におけるアウトフロー構造の回転の様子



#### 4.2 低質量 Class I 原始星天体 Elias 29

低質量原始星天体 Elias 29 は、従来の観測結果から、その周囲で星形成が活発に起こっていることが知られている。本研究課題では、ALMA 観測の結果、この天体が硫黄関連分子 ( $\text{SO}$ ,  $\text{SO}_2$ ) に富むこと、反対に低質量原始星形成領域で一般的に見られる有機分子 ( $\text{CCH}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$  など) には乏しいことを明らかにした。さらに、 $\text{CS}$  分子輝線は原始星近傍で弱く検出され、原始星から離れた Ridge 構造で強く検出された。このことは、周囲の星からの輻射の影響で比較的暖くなった環境が、母体となった分子雲コアでの化学進化に影響しているためと考えられる。この観測結果と化学進化モデルとの比較から、星形成に伴う硫黄関連分子の進化が多様性をもつ可能性を報告した。

$\text{SO}$  分子輝線が、原始星に集中したコンパクトな回転構造に加えて、東西に広がるアウトフロー構造を捉えることを見出した。加えて、アウトフロー構造が Ridge 構造や周囲のガスと衝突していることが示唆された。このことは、原始星が周辺構造と相互作用しながら進化していることを示唆し、物理構造と化学組成進化について理解する上で、興味深い現象である。これまでの成果と併せ、天体を取り巻く温度環境と化学組成進化の関係について、硫黄関連分子と有機分子を含めて、統一的な描像を提起するに至った。

#### 4.3 機械学習を用いた硫黄関連分子輝線の分布の解析

機械学習の手法の一つである主成分分析 (Principal Component Analysis; PCA) を導入して、硫黄関連分子を含む複数の分子輝線分布の分類を行った。解析に用いたデータは、低質量原始星天体 IRAS 15398-3359 と L483 に対する ALMA 観測データである。PCA の結果、これらの天体では、 $\text{SO}$  分子輝線が原始星に集中したコンパクトな構造を主に捉えることが示された。

上記の成果に加えて、IRAS 15398-3359 では、従来知られていたアウトフロー構造とは大きく異なる方向に伸びる構造を、 $\text{SO}$  分子輝線によって初めて検出した。 $\text{SO}$  分子輝線は衝撃波領域をよく捉えることが知られていることから、この構造はかつて吹き出したアウトフローによる衝撃波領域の痕跡を捉えている可能性が考えられる。

以上の成果について、「5. 主な発表論文等」にまとめるように、国内外の学会で報告するとともに、一部はすでに学術論文として出版済みである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okoda Yuki, Oya Yoko, Sakai Nami, Watanabe Yoshimasa, Yamamoto Satoshi	4. 巻 900
2. 論文標題 Molecular Distributions of the Protostellar Envelope and the Outflow of IRAS 15398?3359: Principal Component Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 40 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba51e	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 該当する
1. 著者名 Okoda Yuki, Oya Yoko, Francis Logan, et al.	4. 巻 910
2. 論文標題 FAUST. II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398?3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abddb1	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 該当する
1. 著者名 Oya Yoko, Yamamoto Satoshi	4. 巻 904
2. 論文標題 Substructures in the Disk-forming Region of the Class 0 Low-mass Protostellar Source IRAS 16293?2422 Source A on a 10 au Scale	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 185 ~ 216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abbe14	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 Oya Yoko, Loez-Sepulcre Ana, Sakai Nami, Watanabe Yoshimasa, Higuchi Aya E., Hirota Tomoya, Aikawa Yuri, Sakai Takeshi, Ceccarelli Cecilia, Lefloch Bertrand, Caux Emmanuel, Vastel Charlotte, Kahane Claudine, Yamamoto Satoshi	4. 巻 881
2. 論文標題 Sulfur-bearing Species Tracing the Disk/Envelope System in the Class I Protostellar Source Elias 29	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 112 ~ 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2b97	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 該当する

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Oya, Y.
2. 発表標題 Circumultiple/circumstellar Structures and Outflow near its Launching Point: the IRAS 16293-2422 Source A Case
3. 学会等名 Five years after HL Tau: a new era in plane formation (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Oya, Y.
2. 発表標題 Circumultiple/Circumstellar Structures and Outflow near its Origin Point: the Multiple System IRAS 16293-2422 Source A Case
3. 学会等名 East Asian ALMA Science Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大屋瑠子, 山本智
2. 発表標題 Class 0低質量原始星天体IRAS 16293-2422 Source Aのアウトフロー構造
3. 学会等名 天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 雑賀恵理, 大屋瑠子, 山本智
2. 発表標題 ALMAによるClass I原始星Elias 29のアウトフローの詳細構造
3. 学会等名 天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大屋瑠子, 癸生川博文, 三宅祥太, 山本智
2. 発表標題 ALMA観測による高解像度3次元データ解析への機械学習の導入
3. 学会等名 天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大小田結貴, 阿部正太郎, 駒木彩乃, 大屋瑠子, 山本智
2. 発表標題 速度構造を含めた3次元データにおけるPrincipal Component Analysis
3. 学会等名 天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Saiga, E., Oya, Y., Miotello, A., Ceccarelli, C., Codella, C., Chandler, C., Sakai, N., Yamamoto, S., & FAUST Team Members
2. 発表標題 Star Formation Feedback to a Parent Cloud: The Elias 29 Case
3. 学会等名 天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大屋瑠子
2. 発表標題 連星系 IRAS 16293-2422 A を取り巻く円盤構造と原始星円盤、およびアウトフローの関係
3. 学会等名 惑星系形成若手研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Oya, & S. Yamamoto
2. 発表標題 Unified Picture of Chemical Differentiation in Disk-Forming Regions of Young Low-Mass Protostellar Sources
3. 学会等名 SPICA 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大屋瑠子、山本智
2. 発表標題 低質量原始星 IRAS16293-2422の 10 au スケールでの円盤/エンベロープ構造
3. 学会等名 天文学会 2019 年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Oya
2. 発表標題 Sub-mm Views of Disk-Forming Regions in Young Low-Mass Protostellar Sources
3. 学会等名 East Asian ALMA Development Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Oya
2. 発表標題 A 10 au Scale View of the Low-Mass Protostellar Source IRAS 16293-2422 Source A
3. 学会等名 East Asian ALMA Science Workshop 2019, Taipei (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大屋瑠子、山本智
2. 発表標題 Class 0 低質量原始星天体 IRAS 16293-2422 A の内部構造
3. 学会等名 天文学会 2020 年春季年会 (オンライン公開のみ)
4. 発表年 2020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