

令和元年6月19日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03964

研究課題名(和文) 原始星円盤における化学的多様性の全貌解明と円盤形成過程の探求

研究課題名(英文) Exploring Disk Formation and Chemical Diversity There by Survey Observation

研究代表者

坂井 南美 (Sakai, Nami)

国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・主任研究員

研究者番号：70533553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：ペルセウス座分子雲複合体の原始星天体について、単一口径望遠鏡により原始星周囲ガスの化学的多様性の統計的観測研究を推進するとともに、その結果をもとにALMA によって原始星近傍の100 AU スケールの領域、即ち、将来惑星系が形成される場所における化学的多様性を探求した。これまでわずか数天体しかなされてこなかった原始星円盤への化学進化の研究を、比較において意義の大きい同一領域内での統計的研究に発展させた。特に、飽和有機分子と不飽和有機分子を軸とした多様性の全貌を明らかにした一方、重水素濃縮度を軸とした多様性検証に置いては、多様性よりも原始星の温度(進化段階)の影響が大きいことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、同じような進化段階にある原始星の周囲のガスの化学組成は、特殊な場合を除き同様であるべきと考えられてきた。しかし、たとえ母体となる分子雲が同じでも、化学組成の多様性が存在し得ることが示された。これは、私たちの太陽系の化学的起源と宇宙の中での存在価値を知るうえで極めて重要な成果である。物理的には同じような惑星系でも、その形成初期の化学組成が惑星系によって大きく異なる可能性を明瞭に示したからである。一方、多様性の軸は1つではなく様々である可能性も明らかとなった。今後、具体的にどのような多様性が存在し得るのか、あるいはそれらがどのように惑星系に残されていくのかを調べることの重要性が示された。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded statistical study of chemical diversity among various protostellar envelopes located in the same region, Perseus molecular cloud complex. Diversity and its possible origins are shown especially for saturated and unsaturated organic species. We have also revealed that deuterium fractionation ratio reflect protostellar evolutionary stage rather than the chemical diversity. These statistical studies are also carried out by ALMA with the resolution of about 100 au, which enabled us to know chemical diversity in disk forming regions.

研究分野：電波天文学

キーワード：星間化学 星形成 惑星系形成 化学組成 有機分子 電波観測

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

太陽質量程度の恒星が形成される初期段階で、原始星近傍に付随するエンベロープガスの化学組成が天体ごとに大きく異なることが研究代表者らの研究で明らかになってきた。ある天体では飽和有機分子が非常に豊富である一方、別の天体では不飽和有機分子が豊富、といった化学的にみると全く異なる天体が存在することは当初想定外であり、その起源とともに全貌の解明が急がれた。この化学的多様性の探求は、太陽系の物質的起源とその普遍性・特殊性の理解においても極めて重要な意義を持つ。しかし、原始星円盤の化学進化の研究はこれまでわずかに数天体しかなされてこず、その全貌は全くの不明であった。

### 2. 研究の目的

ALMA を始めとする最先端電波望遠鏡を用いて、多くの原始星天体の化学組成を無バイアスでサーベイすることにより、統計的視点から化学的多様性の起源と進化を解明する。具体的には、ひとつの分子雲複合体に属する若い原始星(Class 0/I)ほぼすべてに化学的サーベイ観測を行い、研究を進める。

### 3. 研究の方法

- (1) 単一口径望遠鏡を用いた高感度観測により、原始星近傍の 1,000 au スケールでのガスの化学組成の多様性を統計的に調査し、ひとつの分子雲複合体に属する進化段階の近い原始星(Class 0/I)における化学的多様性の全貌を明らかにする。特に、飽和有機分子と不飽和有機分子を軸として合計 37 天体に対してサーベイ観測を行い、その多様性の全貌を明らかにする。
- (2) さらに、様々な分子のスペクトル線を同時観測し、他の多様性の軸がないかも検証する。
- (3) 分子雲内での天体の位置などに着目することで、多様性の起源についても探究し、どのような環境だとどのような化学組成の天体が形成されると期待されるのかを明らかにする。
- (4) また、アルマ望遠鏡を用いて、100 au スケールでの化学組成を調べ、エンベロープスケールでの化学組成の多様性が円盤形成領域、すなわち惑星系形成領域に伝播されているかどうかを明らかにする。

### 4. 研究成果

- (1) 単一口径望遠鏡を用いた化学的多様性の統計的研究においては、当初計画していた飽和有機分子と不飽和有機分子を軸とした多様性の全貌を明らかにし、論文として出版した[主要論文 4]。さらに不飽和有機分子に富む天体において行った無バイアス分子スペクトル線サーベイデータの解析をすすめ、化学組成の全貌を示す論文として出版した[主要論文 2]。また、飽和有機分子の生成過程を探るため、原始星からの影響がほとんどない星なし分子雲コアにおいて詳細な研究をすすめ、 $\text{CH}_3\text{OH}$  や  $\text{CH}_3\text{CHO}$ 、 $\text{HCOOCH}_3$  などが星間塵由来あるいは星間塵由来の  $\text{CH}_3\text{OH}$  を起源として生成されていることを確認した[主要論文 6]。
- (2) また、重水素濃縮度を軸とした多様性についても観測・解析・検証を行った。その結果、重水素濃縮度においては、多様性よりも原始星の温度(進化ステージ)のほうが影響が大きいことがあきらかとなった[主要論文 3]。しかし一方で、進化が進むと濃縮度がキャンセルし、有意に減少することを初めて観測的に示したことで、重水素濃縮度の原始惑星系への進化の理解に置いて極めて重要な成果が得られたと言える。地球など太陽系内惑星での濃縮度が星間塵より数桁も低いことは従来大きな謎であったが、この原因を紐解く大きな一助となったと言える。
- (3) (1) の研究において、不飽和有機分子に富む天体が、母体となる分子雲の端のほうに存在する傾向が若干であるがみられた。これは、分子雲のどこで星形成が起こるかによってその天体の化学組成が影響をうけている可能性を示唆しており、化学的多様性の起源の一つとして重要な知見を得ることができた[主要論文 4]。
- (4) アルマ望遠鏡を用いた化学的多様性の研究においては、3 つの観測ブロックに分かれていたうち 2 つのブロックについては有意義な質のデータが届けられ、解析を完了した(2017 年度採択課題、1 ブロックが 2017 年度に、もう 1 ブロックが 2018 年度に届けられた)。一方、残りの 1 ブロックに関しては、感度が十分でなかったため再観測提案を出したところ、最高ランクの優先順位で採択され、2018 年 12 月頃(本研究期間終了間際)に届けられた。このような状況であったため 3 ブロックすべての天体で同じ質で化学組成を比較した論文の出版は平成 30 年度内には完了できなかった(現在とりまとめている最中である)。しかし一方で、質の良いデータの得られた 2 ブロックの観測の中で、非常に興味深い天体を発見した。NGC1333IRAS4C という、すぐ近傍に飽和有機分子が豊富な天体があるにもかかわらず不飽和有機分子に富んだ天体が見つかった。さらに、この天体では、エンベロープとアウトフローの運動が不飽和有機分子でトレースされ、アウトフローの回転を明瞭に捉えることに成功した[主要論文 5]。また、研究の過程で思わぬ大きな発展もあった。不飽和有機分子に富む代表的天体 L1527 の詳細観測において、星間塵の分布を 20-30 天文単位スケールで描き出すことに成功し、さらに、その分布から、円盤の回転軸が、円盤の内側と外側でわずかにずれていることを発見した。太陽系のみならず、様々な系外惑星系でみられる惑星ごとの軌道の回転軸のずれの一つの原因が、円盤形成時のガスの角運動量の向きの時間変化にあった可能性を示唆しており、非常に大きな成果と言える[主要論文 1]。

以上、(1-4)の成果から、同じ分子雲領域にある似た物理進化段階の原始星であっても、そのエンベロープや円盤の化学組成が統計的に見ても大きく異なり得ること、雲の端のほうで形成された天体ほど不飽和有機分子に富んだ天体になりやすいこと、化学的多様性は、2 極化されているわけではなく、非常にバラエティに富んでいることなどを総合的に明らかにした。物理的進化過程のみならず化学的多様性をきちんと追うことが、私達の太陽系の起源を知る上でも極めて重要であることを明瞭に示した。また、初期円盤におけるワープ構造の存在の発見という、想定外の大きな成果も得られた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

- (1) \*[Sakai, N.](#), Hanawa, T., Zhang, Y., [Yamamoto, S.](#) (7/7 番目), et al. "A Warped disk around an infant protostar", 2019, Nature, 565, 206, reviewed
- (2) Yoshida K., \*[Sakai, N.](#), Nishimura Y., Tokudome T., Watanabe Y., Sakai T., Takano S., [Yamamoto, S.](#), "An unbiased spectral line survey observation toward the low-mass star-forming region L1527", 2019, PASJ, in press, 10.1093/pasj/psy136, reviewed
- (3) \*[Imai, M.](#), [Sakai, N.](#), Lopez-Sepulcre A., [Yamamoto, S.](#) (11/11 番目), et al., "Deuterium Fractionation Survey Toward Protostellar Sources in the Perseus Molecular Cloud: HNC Case", 2018, ApJ, 869, 51, 10.3847/1538-4357/aaeb21, reviewed
- (4) \*[Higuchi, A. E.](#), [Sakai, N.](#), Watanabe Y., [Yamamoto, S.](#) (15/15 番目), et al. "Chemical Survey toward Young Stellar Objects in the Perseus Molecular Cloud Complex", 2018, ApJS, 236, 52, 10.3847/1538-4365/aabfe9, reviewed
- (5) \*[Zhang, Y.](#), [Higuchi, A. E.](#), [Sakai, N.](#), [Yamamoto, S.](#) (11/11 番目), et al., "Rotation in the NGC 1333 IRAS 4C Outflow", 2018, ApJ, 864, 76, 10.3847/1538-4357/aad7ba, reviewed
- (6) [Soma, T.](#), \*[Sakai, N.](#), Watanabe Y., [Yamamoto, S.](#), "Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1", 2018, ApJ, 854, 116, 10.3847/1538-4357/aaa70c, reviewed

[学会発表] (計 17 件)

- (1) [Sakai, N.](#), "Physics and Chemistry of Disk Formation -Observational approach-", Astrochemistry -Past, Present, Future-, 2018, invited
- (2) [Sakai, N.](#), "Protostellar Disks -Observational approach-", Early Phase of Star Formation (EPOS), 2018, invited
- (3) [Sakai, N.](#), "Tracing chemistry toward protoplanetary disks by ALMA", The XXIV International Symposium on Free Radicals (ISFR2017), 2017, invited
- (4) [Sakai, N.](#), "Barriers (centrifugal) in disk formation and chemical signatures", Protoplanetary disk formation and evolution: setting the stage for planet formation, 2017, invited
- (5) [Sakai, N.](#), "Chemical Diversity in Protostellar Disks and Its Future", The Gordon Conference (GRC) on the Origins of Solar Systems: Making a Habitable Planet, 2017, invited

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：山本 智

ローマ字氏名：Yamamoto Satoshi

所属研究機関名：東京大学

部局名：理学（系）研究科（研究院）

職名：教授

研究者番号（8桁）：80182624

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：樋口 あや

ローマ字氏名：Higuchi Aya E.

（本研究費雇用研究員）

研究協力者氏名：今井 宗明

ローマ字氏名：Imai Muneaki

研究協力者氏名：イーチェン・チャン

ローマ字氏名：Yichen Zhang

研究協力者氏名：大屋 瑠子

ローマ字氏名：Oya Yoko

研究協力者氏名：相馬 達也

ローマ字氏名：Soma Tatsuya

研究協力者氏名：吉田 健人

ローマ字氏名：Yoshida Kento

研究協力者氏名：アナ・ロペスセプルクレ

ローマ字氏名：Ana Lopez-Sepulcre

研究協力者氏名：セシリア・セッカレーリ

ローマ字氏名：Cecilia Ceccarelli

研究協力者氏名：フランチェスコ・フォンターニ

ローマ字氏名：Fontani Francesco

研究協力者氏名：クラウディオ・コデッラ

ローマ字氏名：Claudio Codella

※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。