

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740142

研究課題名（和文） 原始星円盤から原始惑星系円盤への化学的多様性の伝播を探る

研究課題名（英文） Exploring an Evolution of Chemical Diversity from Protostellar disks to Protoplanetary disks

研究代表者

坂井 南美 (SAKAI NAMI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：70533553

研究成果の概要（和文）：

これまでの電波望遠鏡による観測により、Class 0段階にある太陽型原始星天体の化学組成は、その物理状態や進化段階が同じであっても大きく異なることが知られている。本研究では、そのような化学的多様性が、その後の原始星進化においてどのように伝播されるかを観測的に探求した。国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡、IRAM 30 m 電波望遠鏡などによる分子スペクトル線サーベイ観測の結果、炭素鎖分子に特異に恵まれる原始星天体（Warm Carbon-Chain Chemistry: WCCC 天体）の進化形と見られる低質量原始星 TMC-1A を発見した。このことは化学組成の多様性が Class I 段階にまで伝播していることを示している。一方、典型的 WCCC 天体 L1527 の原始星近傍における分子分布を ALMA (Atacama Millimeter/submillimeter Array) による観測で 1 秒角を切る高解像度で調べた。その結果、炭素鎖分子は回転しながら原始星に落下するガスに存在していることが明瞭に示された。また、炭素鎖分子は原始星近傍 100 AU スケールまで存在し、その内側で減少していることもわかった。この結果は、WCCC 天体の化学進化の理解において極めて重要な糸口を与えるものと言える。さらに、ドイツ・マックスプランク研究所の 100 m 電波望遠鏡を用いた観測により WCCC 天体を含む分子雲全体の CH 分子の分布を調べ、WCCC を引き起こす原因が短い星形成までのタイムスケールにある可能性を検証した。

研究成果の概要（英文）：

It is now established that low-mass Class 0 protostellar sources show significant chemical diversity. In this study, further evolution of such diversity toward protostellar disks and protoplanetary disks has been explored. Spectral line survey observations have been conducted toward various Class I sources with the Nobeyama 45 m telescope and the IRAM 30 m telescope, and TMC-1A has been identified as a Class I analog of the WCCC (warm carbon chain chemistry) source which is characterized by rich existence of carbon-chain molecules. In parallel, the evolution of the WCCC source has been studied by observing its prototype, L1527, with high spatial resolution of 1" or better by using ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array). Carbon-chain molecules are confirmed to exist in an infalling rotating envelope whose inner radius is about 100 AU, although they are deficient within it. This is an important clue to an understanding chemical evolution of the WCCC sources. Furthermore, large scale distribution of CH has been observed toward Heiles Cloud 2 in the Taurus molecular cloud by using the Max Planck Institute 100 m telescope in Germany in order to explore an origin of the WCCC phenomenon. On the basis of the result, I have critically tested a possibility that short timescale of star-formation in a parent cloud is responsible for the WCCC phenomenon.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：電波天文学

科研費の分科・細目：

キーワード：(1) 星形成 (2) 惑星系形成 (3) 星間物質 (4) 星間分子

1. 研究開始当初の背景

星形成から惑星系形成に至る化学進化の理解は、我々の太陽系の起源の理解に直結する重要なテーマである。これまでの電波望遠を用いた分子スペクトル線観測で、低質量原始星（太陽型原始星）天体の化学組成は、原始星の質量や進化段階がほぼ同じ（Class 0）であっても、大きく違い得ることがわかってきた。これまで、低質量原始星近傍ではギ酸メチル、ジメチルエーテル、シアン化エチルなどの飽和有機分子が豊富な天体（ホットコリノ天体）が知られてきたが、私は、炭素鎖分子などの不飽和有機分子に恵まれる WCCC (Warm Carbon Chain Chemistry) 天体を発見し、そのような化学的多様性の存在を示してきた。このような原始星天体の多様性が、原始星のその後の進化、即ち原始星円盤の形成から惑星系円盤の形成を経て惑星系の形成に至る一連の過程においてどのように伝播していくのかということは、天文学、惑星科学、および宇宙物理学の分野において注目されており、その解明は非常に重要な課題となっている。

2. 研究の目的

1 で述べた課題を観測的に解決するためには、WCCC 天体、ホットコリノ天体のそれぞれについて、原始星円盤形成から原始惑星系円盤への化学進化を詳細に調べる必要がある。本研究では、特に WCCC 天体の進化に着目して次の3つの観測研究を行った。第一は、単一口径望遠鏡を用いた、WCCC 天体の進化形と考えられる Class I 原始星の探索である。そのような原始星を見つけることができれば、原始星円盤がすでに形成されている Class I 段階まで化学的多様性が伝播していることを意味する重要な結果となる。第二は Class 0 段階にある WCCC 天体の高分解能観測である。ALMA などのミリ波干渉計によって原始星近傍 100 AU 程度を解像して分子分布を調べることで、WCCC 天体の進化の方向を読み取ることができる。第三は化学的多様性の起源の探求である。WCCC 天体、ホットコリノ天体の周囲環境の系統的な違いを調べることで、化学的多様性を作る外的要因（環境効果）を絞り込むことができると期

待される。本研究の目的は、これらの3つの研究を総合して、星形成から惑星系形成に至る化学進化の理解を各段に深めることにある。

3. 研究の方法

Class I 段階にある WCCC 天体を探索するために、国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡、国立天文台 ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡、IRAM 30 m 電波望遠鏡などの単一口径望遠鏡を駆使して、多くの原始星天体の化学組成をサーベイする観測を展開した。これにより炭素鎖分子に恵まれた Class I 天体を探した。一方、WCCC 天体の高分解能観測には国際共同大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) を用いた。これまでの研究成果を背景に、ALMA の初期観測公募 (Cycle 0) に応募し、10 倍を超える競争率を乗り越えて WCCC 天体 L1527 および IRAS 15398-3359 の観測時間を確保することができた。さらに、化学的多様性の起源の探求では、ドイツ・マックスプランク研究所 (ボン) の 100 m 望遠鏡、米国国立電波天文台の GBT 100 m 望遠鏡などを用い、WCCC 天体を含む母体分子雲の化学組成の広域観測を行った。

4. 研究成果

国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、Class I 段階にある WCCC 天体の探索を進めた。HC<sub>3</sub>N や cyclic C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> をはじめとする炭素鎖分子およびその構造異性体分子の高励起スペクトル線を用いてサーベイ観測を行った結果、その候補天体として TMC-1A を発見した。この原始星天体では、HC<sub>3</sub>N 分子の高励起輝線が原始星に集中して観測された。また、IRAM 30 m 望遠鏡によって、CCH 分子の N=1-0, 2-1, 3-2 のスペクトル線を観測したところ、HC<sub>3</sub>N で中心集中していた速度成分が N=1-0, 2-1, 3-2 と上位準位の励起エネルギーが上がるほど卓越してくることが確かめられた。この傾向は国立天文台 ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡による観測でも確かめられた。このことから、TMC-1A は原始星近傍の高密度で暖かい領域に炭素鎖分子を豊富に育んでいることが明らかになった。これはまさ

に WCCC 天体の特徴であり、TMC-1A は Class I 段階の WCCC 天体である可能性が非常に高いことが示された。TMC-1A は L1527 と同じおうし座の HCL2 (Heiles Cloud 2) 分子雲に含まれている。WCCC 現象は星なしコア時代の経過時間が短いことによって生じると考えられているが、上記の結果は、この分子雲全体での星形成がそのような特徴を持っている可能性を示唆する。

一方、L1527 の高分解能観測は ALMA を用いて行った。観測プロポーザルは 2011 年 9 月に採択されたが、観測データは最終的に 2013 年 3 月に届けられた。急遽解析を行ったところ、非常に重要な結果が得られた。ALMA による観測の分解能は 1.1 mm 帯および 0.8 mm 帯においてともに 1 秒を切るもので、この天体の距離で 100 AU 以下の構造を調べることができた。その結果、CCH などの炭素鎖分子は原始星近傍の 100 AU スケールまで存在していることがわかった。速度構造の詳細な解析とシミュレーションから、CCH は回転しながら原始星に落下しつつあるガスに含まれていることが明瞭に示された。一方で、原始星近傍 100 AU 未満の領域では、CCH の存在量は減少していることもわかった。この結果は WCCC 天体における化学進化を考える上で重要な基礎となると考えられる。詳細な解析が進行中である。

WCCC 天体周辺の化学環境の観測については、2つの重要な成果があった。一つは、WCCC 天体 IRAS15398-3359 の近傍に炭素鎖分子の豊富な星なしコア Lupus-1A を発見したことである。国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡や米国国立電波天文台 GBT 100 m 電波望遠鏡などによる観測で、この Lupus-1A は炭素鎖分子の柱密度がこれまで全天で最も炭素鎖分子が豊富とされているおうし座の TMC-1 に匹敵することを明らかにした。Lupus-1A は TMC-1 と同様に化学進化の進んでいない若い星なしコアと見られる。このような星なしコアが WCCC 天体の近くに存在する状況は、これはもう一つの WCCC 天体 L1527 にもまさに当てはまる。すなわち、L1527 近傍には同様の星なしコア TMC-1 が存在している。このことから、分子雲全体での星形成のタイムスケールが短いことが WCCC を引き起こす原因となっているという考えを支持する。

さらに、マックスプランク研究所 100 m 望遠鏡を用いて L1527 を含む HCL2 分子雲 CH 分子のスペクトル線の広域観測を行った。その分布を CO や炭素原子 (C) の分布と比較することにより、化学組成の明瞭な勾配が認識された。CH は炭素原子 (C) が CO に化学変化する際の間体であり、そのことを利用して、この分子雲が北部から南部にかけて重力収縮してきた様子を確認することができた。これは短い星形成のタイムスケールの原因を考え

る上で非常に重要な成果である。また、CH の観測はこれまであまり注目されてこなかったが、本研究の結果はその分子雲形成の理解における役割を改めて示すものとなった。今後、Lupus-1A 分子雲近傍でも同様の観測を行い、分子雲形成過程と WCCC 現象の関連性を探求していく計画である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

(1) 坂井南美, CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular, Astronomy and Astrophysics, 査読有、546 巻、2012、A103 (8pp)

DOI: 10.1051/0004-6361/201219106

(2) 坂井南美, Distribution of CH3OH in NGC1333 IRAS4B, Astrophysical Journal, 査読有、754 巻、2012、70 (8 pp)

DOI: 10.1088/0004-637X/754/1/70

(3) 坂井南美, Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527, Astrophysical Journal, 査読有、758 巻、2012、L4 (4pp)

DOI: 10.1088/2041-8205/758/1/L4

(4) 坂井南美, Observations of Complex Molecules in Low-Mass Protostars, Proceedings IAU Symposium, 査読無、280 巻、2011、43-52

DOI: 10.1017/S1743921311024859

(5) 坂井南美, Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions, EAS Publication Series, 査読無、52 巻、2011、235-238

<http://dx.doi.org/10.1051/eas/1152038>

(6) 坂井南美, 化学の目でみた星形成：星形成の多様性、日本惑星学会誌、査読有、20 巻、2011、1

[学会発表] (計 5 件)

① 坂井南美, Tentative Detection of Deuterated Methane toward Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527、日本天文学会 2013 年春季大会、2013 年 3 月 21 日、埼玉大学

② 坂井南美, Chemical Diversity of Low-Mass Star-Forming Cores: Class 0 to Class I, New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era、2012 年 12 月 5 日、ザ・プリンス箱根

③ 坂井南美, Distribution of 9 cm CH Emission in Heiles Cloud 2, 日本天文学会 2012 年春季年会、2012 年 3 月 20 日、龍谷大学・深草キャンパス

④ 坂井南美, 低質量星形成領域 L1527 におけ

る炭素鎖分子の高分解能観測、日本天文学会  
2011年秋季年会、2011年9月20日、鹿児島  
大学・郡元キャンパス

⑤ 坂井 南美、Observations of Complex  
Molecules in Low-Mass Protostars、IAU  
Symposium No. 280、2011年5月、Toledo,  
Spain

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坂井 南美 (SAKAI NAMI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：70533553

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：