

機関番号：12601

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：平成 21 年度～平成 22 年度

課題番号：21740132

研究課題名 (和文) 星形成領域の物理・化学的多様性とその惑星系円盤への伝播の解明

研究課題名 (英文) Physical and Chemical Diversity of Star-Forming Regions and Its Propagation 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)： 最近の研究で、低質量 Class 0 原始星近傍の化学組成に多様性があることがわかってきた。本研究では、その 1 つの典型である Warm Carbon-Chain Chemistry (WCCC) 天体に着目し、その起源と、Class I 段階への進化について観測的に調べた。主な結果は以下のとおりである。まず、WCCC 天体 IRAS15398-3359 の近傍に炭素鎖分子に恵まれる若い星なしコア Lupus-1A を発見した。もう一つの WCCC 天体 L1527 にも同様の星なしコア TMC-1 が存在することを考えると、この結果は WCCC が星形成時の速やかな収縮に起因していることを支持する。第 2 に、WCCC 天体 L1527 について、炭素鎖分子の分布を PdBI 干渉計によって高空間分解能観測で調べた。その結果、炭素鎖分子の分布は原始星近傍に集中しており、CH₄ の蒸発によって WCCC が引き起こされていることが確かめられた。さらに、原始星へ落ち込むガスの中にも炭素鎖分子が存在することがわかった。このことは、炭素鎖分子が原始惑星系円盤にもたらされる可能性を意味する。また、実際に進化の進んだ Class I 天体で、WCCC の進化形と考えられる天体を探したところ、実際にその候補を L1527 の近傍に見出すことができた。本研究により、WCCC 天体が原始惑星系円盤に向けてどのように進化するかという問題に対して、重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要 (英文)： Recently, it is recognized that the low-mass Class 0 sources shows significant chemical diversity. In this study, we have focused on one extreme case showing extraordinary richness of carbon-chain molecules in a lukewarm region near the protostar (Warm Carbon-Chain Chemistry; WCCC), and have observationally studied its origin and its evolution toward the Class I stage. The followings are major outcomes. First, we have newly found a young starless core with rich carbon-chain molecules, Lupus-1A, near the WCCC source IRAS15398-3359. The other WCCC source, L1527, is also located near the similar young starless core TMC-1. This result further supports our scenario that the WCCC originates from fast contraction of the parent core. Second, we have studied high-resolution distributions of carbon-chain molecules in L1527 with PdBI. Compact distributions of carbon-chain molecules support the WCCC mechanism triggered by the evaporation of CH₄ near the protostar. More importantly, carbon-chain molecules are found to reside even in the gas infalling to the protostar, suggesting that carbon-chain molecules will be brought into protoplanetary disks. We have searched for the Class 1 sources with the WCCC activities, and have indeed found such an example near L1527. In this study, we have obtained novel information on how the WCCC sources will be evolved toward protoplanetary disks.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	2,100,000	630,000	2,730,000
平成22年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

太陽質量程度の恒星の形成過程の重要な課題の一つは、原始星円盤から原始惑星系円盤への物理進化の理解である。星間分子雲コアの重力収縮により原始星が誕生する際、その周りに 1000 AU スケールのガス円盤が形成され動的降着源となる。この原始星円盤は進化とともに原始惑星系円盤に進化すると考えられており、現在活発な研究がなされている。一方で、原始星円盤から原始惑星系円盤への化学進化は、惑星環境や生命の起源などとも関連する重要なテーマでもある。

近年、太陽質量程度の原始星において、 HCOOCH_3 などの大型有機分子が電波観測によって検出された話題となった。このような分子は星形成に伴う温度上昇のために星間塵表面から蒸発してきたものと考えられる (Hot Corino Chemistry)。大型有機分子が原始星円盤で検出されたことは、それらがいずれは惑星系にもたらされる可能性を意味しており、原始惑星系円盤への物質進化の点で非常に重要である。そこで、申請者は別の非常に若い低質量原始星 (NGC1333 IRAS4B) で高感度観測を行い、それらの検出に成功した。この結果は、大型有機分子がより“一般的”に低質量星形成領域に存在することを示すだけでなく、原始星進化のごく初期段階で生成されていることを明らかにした点で大きな意義があった。これらの研究により、低質量原始星近傍の化学組成の一般的特徴が十分に把握されたかに思われた。

しかし、大型有機分子探査を他の様々な領域へ展開する過程で、意外な発見があった。国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて、おうし座の L1527 原始星の高感度探査を行ったところ、大型有機分子は全く検出されず、炭素鎖分子 C_4H_2 の高励起輝線が強く検出された。一般に、炭素鎖分子は星形成が始まる前

の若いコアで豊富に存在し、星形成領域では少なくなると考えられてきた。事実、 C_4H_2 は他の星形成領域で検出された例はなく、この検出は大変な驚きであった。直ちに国内外の大型電波望遠鏡による追観測を行った結果、L1527 ではこの他にも多種多様な炭素鎖分子が原始星に落下しつつある高密度で暖かいガスに豊富に存在していることが明らかになった。このことは、原始星周辺で炭素鎖分子が再生成している可能性を示唆する。そこで、申請者は次のようなメカニズムを提案した。星間塵の氷層には CH_4 が豊富に含まれている。 CH_4 の昇華温度は 30 K なので低温の分子雲 (10 K) では出てこないが、星形成周辺の暖かい領域で一挙に蒸発する。これにより一時的に気相に炭素が豊富な状態が作られ、炭素鎖分子が効率的に再生成される。これを Warm Carbon-Chain Chemistry (WCCC) と名付けた。この提案を受け、WCCC は化学モデル計算でも確かめられた。

L1572 での WCCC 発見の最も重要な点は、IRAS16293-2422 などの“典型的”原始星と化学組成が明らかに異なっていたことにある。これまで、星形成から惑星系形成に至る過程は統一的に理解され、その間の化学進化も天体による違いはないと信じられてきたが、その理解が覆える可能性がある。ここで問題となるのが、WCCC が L1527 でのみ起こる特殊な現象ではないか？という疑問である。そこで、炭素鎖分子のサーベイ観測により WCCC 天体の探索を行った。その結果、おおかみ座に L1527 と酷似した特徴を示す天体 (IRAS15398-3359) を発見した。この他にも、部分的に WCCC の兆候を示す天体がいくつかあり、WCCC は程度の差はあれ星形成領域での一般現象である可能性が出てきた。このような状況にあって、低質量星形成領域における化学的多様性の実態を把握し、その起源を探求することは、星形成と星間化学をつなぐ研

究の中心的問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、星形成領域の化学組成の多様性を確認し、その起源を解明すること、および、原始星円盤から原始惑星系円盤へ多様性が伝播されるかどうかを明らかにすることである。低質量星形成領域の化学組成の多様性は原始惑星系円盤にも伝播される可能性が高い。従って、本研究は、我々の住む太陽系の環境がどのような過程を経て作られたのかという重要な起源の解明ともつながり、非常に大きな意義がある。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、具体的には、i) 星形成領域における化学的多様性の確認とその起源の解明、および、ii) 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の検証、の2つの課題に取り組む。i) ではこれまでに見つかっている2つの WCCC 天体(おうし座の L1527 とおおかみ座の IRAS 15398-3359) の周辺環境を観測的に調べ、それらの共通項を探す。これにより、WCCC を出現させる環境効果の特定を目指す。ii) ではまず、これまでに発見した WCCC 天体に対して、干渉計を用いて数 100 AU スケールの高分解能観測を行い、原始星のどこまで近傍に炭素鎖分子が存在するのかを明らかにする。次に、より進化の進んだ Class I、II の原始星に対し、炭素鎖分子の高感度サーベイ観測を行う。これらにより、WCCC 現象が原始星進化に伴ってどのように伝播されるかを明らかにする。平成 21 年度は主に i)、および ii) の観測提案を行い、22 年度以降は干渉計観測の解析、および Class I、II 天体の高感度観測を行う。

4. 研究成果

研究期間内に、本研究で目的としていた i) 星形成領域における化学的多様性の確認とその起源の解明、および、ii) 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の検証、のそれぞれについて、大きな成果を挙げることができた。

まず、星形成領域における化学的多様性の起源の解明に関して、WCCC 天体に共通する周辺環境を特定することができた。WCCC 天体の

周辺環境を探るために、国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて、第二の WCCC 天体である IRAS15398-3359 の周囲を炭素鎖分子でマッピング観測を行った。その結果、IRAS 15398-3359 の北西側 3' のところに星なしコアを新たに見出した。このコアでは、炭素鎖分子の強度が非常に強いものに対して、 HN_2^+ は IRAS 15398-3359 方向よりも著しく弱い。このことから、このコアは化学進化の若い段階にあるとみられる。このコアを Lupus-1A と名付けた。

Lupus-1A の化学組成を詳細に調べるため、アメリカ国立電波天文台の GBT 100 m 電波望遠鏡による観測を行った。その結果、Lupus-1A では、長い炭素鎖分子 (C_6H , C_8H , HC_7N , HC_9N など) のスペクトルが強い強度で観測され、また、炭素鎖分子の負イオン (C_4H^- , C_6H^- , C_8H^-) も検出された。特に、 C_4H^- は星なしコアでは初めての検出である。これらの炭素鎖分子やその負イオンのスペクトル線の強度は、若い星なしコアの代表である TMC-1 を凌ぐものであった。また、それぞれの分子の柱密度を評価したところ、TMC-1 と非常に近い値であることがわかった。TMC-1 は炭素鎖分子が豊富な点では際立った天体であり、これまで星間化学の分野で最もよく観測されている天体である。TMC-1 のような天体を他にも探す試みはこれまでも数多くなされてきたが、見つかっていなかった。本研究で見出した Lupus-1A は、炭素鎖分子の柱密度から判断してまさに第2の TMC-1 と言えるものである。Lupus-1A と TMC-1 の相互比較から炭素鎖分子の形成機構について一層理解が深まるものと期待される。また、この新たなコアは、その炭素鎖分子のスペクトル線の強さから、今後南天の TMC-1 とも言うべき存在として、注目されるだろう。

一方、Lupus-1A の発見は WCCC の起源についても重要な情報を与えることになった。WCCC が起こる原因として、星なしコア時代の経過時間が短かったことが考えられる。これまで WCCC 天体は2つ見つかっているが、その一つの L1527 の近くには若い星なしコア TMC-1 が存在することが知られていた。本研究により、もう一方の IRAS 15398-3359 の近くにも TMC-1 と同様の若いコア Lupus-1A が存在することがわかったわけである。WCCC 天体も TMC-1 のような科学的に若いコアも非常に珍しいものなので、それらがペアになって存在していることには十分意味があると考えられる。即ち、2つの WCCC 天体のすぐ近くで、化学的に若い非常に類似したコアが発見されたことは、それぞれの領域の分子雲コアが速やかな収縮を起こしている可能性を示唆する。

次に、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については、L1527 における炭素鎖分子の高空間分解能観測、および、Class I 天体における炭素鎖分子の観測を進めた。

L1527 における炭素鎖分子の分布については、IRAM の PdBI 干渉計を用いて高分解能観測を行った。その結果、原始星から 500-1000 AU はなれた、温度が 25 K 程度の領域で炭素鎖分子のスペクトル線強度が非常に強くなっている現象を発見した。これは、 CH_4 が星間塵から蒸発して新たに炭素鎖分子が生成されるという WCCC のメカニズムと一致し、詳細分布から WCCC 現象を明らかにできたと言える。一方、炭素鎖分子の分布には中心の数 100 AU のスケールで「穴」が見られた。輻射輸送を考慮した強度シミュレーション計算の結果、原始星近傍において、炭素鎖分子の存在量が 1 ケタ程度減少している可能性があることがわかった。そのメカニズムとしては、星間塵への吸着や気相反応による破壊などが考えられる。しかし、重要なことは、原始星近傍においても炭素鎖分子は完全にはなくなっていないことである。上記の PdBI による観測データの速度構造を詳しく吟味したところ、中心に落ち込むガスの中に炭素鎖分子が含まれていることが確かめられた。このことから、WCCC によって形成した炭素鎖分子は、原始星円盤から原始惑星系円盤に持ち込まれている可能性があることがわかった。

WCCC 天体の将来を考えるには、上記のように WCCC 天体自体を調べることに同時に、その進化形と考えられる Class I 天体を見つけることが重要である。そこで、国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡を用いて、Class I 天体の化学組成を調べる観測を行った。原始星に付随する成分とエンベロープ成分の切り分けが難しかったが、高励起スペクトル線に着目した結果、そのような天体の候補として、おうし座の Class I 天体 TMC-1A を見出した。この天体は、 HC_3N の高励起スペクトルで見ると原始星まわりに中心集中を示す。また、IRAM 30 m 望遠鏡の観測により、CCH の高励起スペクトル線も同様な分布をしていることが示された。これらのことから、TMC-1A は WCCC 天体の進化形にあたる可能性が非常に高いと考えられる。確定するためには、干渉計によって高空間分解能で分布を調べる必要がある。2011 年度から始まる ALMA の初期運用の絶好のテーマとして、発展が期待される。

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 6 件)

Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Burton, M., and Yamamoto, S., “Discovery of the Second Warm Carbon-Chain Chemistry Source, IRAS 15398-3359 in Lupus”, *Astrophysical Journal*, 697, 769-786 (2009).

Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., “Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case”, *Astrophysical Journal*, 702, 1025-1035 (2009).

Sakai, N., Saruwatari, O., Sakai, T., Takano, S., and Yamamoto, S., “Abundance Anomaly of the ^{13}C Species of CCH”, *Astronomy & Astrophysics*, 512, A31 (2010).

Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., “Distributions of Carbon-Chain Molecules in L1527”, *Astrophysical Journal*, 722, 1633-1643 (2010).

Sakai, N., Shiino, T., Hirota, T., Sakai, T., and Yamamoto, S., “Long Carbon-Chain Molecules and Their Anions in the Starless Core, Lupus-1A”, *Astrophysical Journal*, 718, L49-L52 (2010).

坂井南美, 「化学の目で見た星形成: 星形成領域の多様性」日本惑星科学会誌、20, 52-60, (2011).

[学会発表] (計 7 件)

Sakai, N., “Chemical Composition of Low-Mass Star Forming Regions”, *Advancing Chemical Understanding through Astronomical Observations*, Green Bank, U. S. A. (2009 年 5 月).

Sakai, N., “Chemical Variation in Low-Mass Star-Forming Regions”, 第 9 回分子分光研究会、富山大学 (2009 年 5 月)

Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., and Yamamoto, S., “Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry”, 日本天文学会 2009 年秋季年会、山口大学 (2009 年 9 月)

Sakai, N., “Chemical Diversity of

Low-Mass Star Forming Regions”, Japan Geoscience Union Meeting 2010, 幕張 (2010年5月)

Sakai, N., “Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions; Peculiar Compositions in L1527 and IRAS 15398-3359”, The Early Phase of Star Formation EPoS 2010, Castle Ringberg, Germany (2010年6月)

Sakai, N., “Recent Progress of Carbon-Chain Chemistry in Molecular Clouds”, Workshop for Interstellar Matter 2010, 北海道大学 (2010年9月)

Sakai, N., “Peculiar Carbon-Chain Chemistry in Low-Mass Star Forming Regions”, The 5th Zermatt ISM Symposium, Zermatt, Switzerland (2010年9月)

[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：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂井南美 (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：