

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400223

研究課題名(和文)ALMAによる太陽型原始星の化学進化の探究

研究課題名(英文)Exploring Chemical Evolution in Solar-Type Protostars by ALMA

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・坂井星・惑星形成研究室・准主任研究員

研究者番号：70533553

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：アルマ望遠鏡などの最先端の装置を用いた電波天文観測により、太陽型原始星の形成現場における化学組成とその進化の解明に取り組んだ。高空間分解能観測により、おうし座のL1527原始星で回転落下エンベロープに遠心力バリアがあることを発見し、そこで化学組成が大きく変化していることを示した。遠心力バリアの内側では原始星円盤が形成されるため、円盤形成における化学進化の最前線を捉えたと言える。さらに、進化の進んだClass I原始星でも同様の現象を確認し、普遍性のある現象である可能性を示した。また、大きな分子雲複合体に含まれる原始星すべての化学組成を調べる統計的研究をスタートさせた。

研究成果の概要(英文)：By using the state-of the art telescope like ALMA, we explored chemical evolution in star forming regions. It has so far been believed that interstellar matter is smoothly brought into a gas disk forming a planetary system as it is. In the observation of the young protostar L1527 in Taurus, We have identified the radius of the centrifugal barrier of the infalling gas for the first time, and have discovered a drastic chemical change there. Since the centrifugal barrier can be regarded as the outermost boundary of the protostellar disk, the results clearly demonstrate that the infalling gas and dust are chemically processed when they go into the disk. We have also found that the more evolved protostar, TMC-1A, shows similar chemical change. Furthermore, we started unbiased chemical survey toward one large molecular cloud complex (Perseus). This will allow us to know how protostellar source shows chemical variety.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 星間分子 星形成 惑星起源

1. 研究開始当初の背景

ビッグバンからの宇宙の進化は、構造形成の歴史であるとともに、物質進化の歴史でもある。その総合的な理解は、「我々が住む地球のこの素晴らしい環境が、宇宙の中でどのように生まれてきたのか」を理解する上で、重要な基礎となるものである。言うまでもなく、宇宙における物質進化研究の一つの柱は、恒星の中での元素合成であり、これについてはこれまでも多くの研究がなされている。一方、もう一つの柱である「星間分子雲から星と惑星系が誕生する過程における分子進化(化学進化)の理解」については、ようやくその一端が解明されつつある段階と言える。

これまでに、電波望遠鏡、赤外線望遠鏡などによる観測の進展で、星間分子雲から星が形成されるまでの過程での化学進化については理解が着実に進んできた。炭素の主要な形態が星間分子雲の進化とともに C^+ , C , から CO に移るのに従い、炭素鎖分子のような炭素を多く含む分子が比較的「若い」星なしコアでは豊富である。一方で、 NH_3 や HN_2^+ などとは関係なく時間とともに増加する。さらに、星間塵への分子の吸着がこの傾向を加速する。この化学組成の系統的な進化は、星形成以前の星間分子雲の年齢の指標として広く用いられてきた。

一方、それから先、即ち星形成から惑星系形成に至る過程での化学進化のありようについても、その初期段階についてはこの10年間の間に急速に理解が進んできた。最も若い進化段階にある原始星(Class 0)について研究が始められており、原始星エンベロープ(1,000-10,000 AU スケール)がこれまで考えられてきた以上に様々な有機分子を育むことが明らかになってきた。しかも、その化学組成は天体ごとに異なっており、飽和有機分子($HCOOCH_3$, C_2H_5CN など)に恵まれる Hot Corino (ホットコリノ)天体と、不飽和有機分子(HC_5N , C_4H , C_6H , C_8H などの炭素鎖分子など)に恵まれる Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC)天体が存在していることがわかっている。前者はフランスのグループが、後者は研究代表者が発見したもので、このような多様性の存在は大きな驚きであった。しかし、これらの多様性が、原始星円盤やさらに進化の進んだ Class I 段階にどのようにもたらされるかについては、太陽系の物質的起源と直接つながる重要なテーマであるにもかかわらず、観測感度が足りないために研究は困難を極めていた。

2. 研究の目的

これまでの観測装置に比べて桁違いに高い感度と空間分解能を持つ大型ミリ波サブミリ波干渉計アルマ(Atacama Large Millimeter/sub

-millimeter Array) が2011年度から部分運用を開始し、2014年度に本格運用を開始した。また、既存の望遠鏡でも、超伝導受信機の低雑音化や超広帯域の電波分光計の装備が進み、広い周波数を高感度で観測して化学組成の特徴を短時間で明らかにできるようになりつつあった。そこで、本研究では、これらの最先端観測装置を駆使して、化学的多様性がどのほど普遍的に存在するのかを調べると共に、アルマ望遠鏡で、原始星進化と原始惑星系円盤形成に伴う物質進化(化学進化)を調べ、星・惑星系形成過程における有機分子の進化の道筋を辿った。

3. 研究の方法

原始星のごく近傍に形成される原始星円盤の様子を捉えるために、アルマ望遠鏡を用いた。また、化学的多様性の全貌を調べるために、野辺山45m電波望遠鏡、及び、欧州IRAM 30 m望遠鏡などを用いた。

4. 研究成果

4.1 初年度

初年度はアルマ望遠鏡の初期運用(Cycle 0)で取得した低質量原始星 L1527 と IRAS 15398-3359 のデータの解析を進めた。L1527 については、 $c-C_3H_2$ などの不飽和炭化水素分子および一酸化硫黄分子の原始星まわりの分布が $0.5-0.7''$ の空間分解能で明らかになった。その結果、不飽和炭化水素分子は、原始星の周りの回転しながら落下しているエンベロープに存在し、その運動の解析から、遠心力バリアの半径が明確に同定された。不飽和炭化水素分子は遠心力バリアよりも内側ではダストに吸着されるなどして気相には存在しないと見られる。一方、一酸化硫黄分子は遠心力バリアに張り付くようにリング状に分布していた。遠心力バリア付近では降着ガスによる弱い衝撃波が発生するので、それに伴いダストから SO が蒸発してきたと考えられる。遠心力バリアは原始星ディスクが形成される最前線である。この結果は、原始星ディスクの形成に伴って劇的な化学変化が起きていることを初めて示したもので、大きな意義がある。また、遠心力バリアの存在については、理論的に予想はされていたが、観測的に捉えられたのは初めてである。この成果は、原始星ディスクの形成に伴う化学進化の一大エポックを発見したのみならず、原始星ディスクの形成過程という星・惑星系形成の研究においても大きなインパクトを与えた。

4.2 次年度

L1527 において、 CCH , CS , H_2CO , CH_3OH 分布を詳細に調べ、遠心力バリアを境にして、化学組成がどのように変化するかを総合的かつ定量的に把握した。遠心力バリアの内側では原始星円盤が形成されると考えられるので、原始星円盤に至る化学進化の最前線を

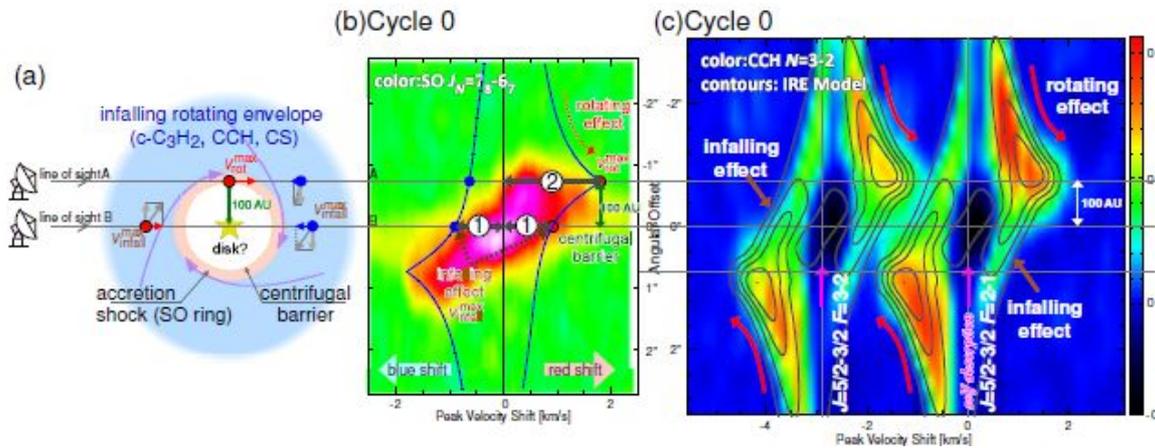


図1 . 回転落下円盤のイメージ図(a)と SO 分子・CCH 分子の位置速度図(b,c)。遠心力バリアの内側にそれぞれの分子からのエミッションがないことを仮定したモデル計算の結果が重ねてある。

捉えたと言える。これらの成果は、「我々が住む地球のこの素晴らしい環境が、宇宙の中でどのように生まれてきたか」という根源的問いかけに科学的に答える第一歩として、重要な学術的価値がある。

一方、このような遠心力バリアの存在が他の天体でも見られるかどうかについては非常に興味もたれる。そこで、おおかみ座の原始星 IRAS15398-3359 についても ALMA で取得した CCH, H₂CO のデータについて同様の解析を試みた。分子流の解析から、この原始星はエンベロープ/ディスクを横から見ている構造をとっていることを明らかにした。それにもかかわらず、中心 70 AU での運動速度が非常に小さいことがわかった。このことから、この原始星の質量の上限を与えることができた。

また、IRAM 30 m 望遠鏡、野辺山 45 m 望遠鏡などの単一口径電波望遠鏡を用いた原始星天体のスペクトル線サーベイを行い、特に WCCC (Warm Carbon Chain Chemistry) 天体 L1527 について、種々の炭素鎖分子が特異的に豊富に存在していることが明瞭に示され、原始星天体の化学的多様性の研究の重要性が改めて示された。この研究を発展させ、一つの分子雲複合体(ペルセウス座分子雲)に含まれる原始星の化学組成の統計的研究を IRAM 30 m 望遠鏡および野辺山 45 m 望遠鏡を用いてスタートさせた。

4.3 最終年度

IRAM30 m 望遠鏡、野辺山 45 m 望遠鏡などの単一口径電波望遠鏡を用いて、ペルセウス座分子雲複合体にある原始星 37 天体に対する化学サーベイを行った。その結果、炭素鎖分子が豊富に存在する WCCC (Warm-Carbon-Chain) 天体と飽和大型有機分子が豊富な Hot Corino 天体は、化学的多様性の両極端に位置する特徴の天体であることが明らかになった。ほとんどの天体はこれら両方の天体の化学組成を合わせた”中間的”天体であり、天体によってどちらのケースに近いかは大きく異なっていた。炭素鎖分

子と飽和大型有機分子の量の比で、天体によって 100 倍以上もの違いがあり、同じ分子雲の中でも非常に大きな化学的多様性があることを明らかにした。さらに、これらの 37 天体を、100 AU スケールの高空間分解能で調べる観測を ALMA 望遠鏡に提案し、採択された。

一方で、代表的 WCCC 天体 L1527 において原始星から 100AU の距離で発見された、遠心力バリアでの劇的変化について、他の原始星天体でも存在するかを調べた。その結果、進化の進んだ Class I 天体でありながら化学組成が L1527 と同様の TMC-1A で、遠心力バリアの存在を確認すると共に、そこでは同様の化学変化も起こっていることが明らかになった。遠心力バリア、およびそこでの化学変化が、より普遍的に起こりえる現象であることを示した。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, N., Furuya, R., Saruwatari, O., Yamamoto, S., The Role of SiO as a Tracer of Past Star-formation Events: The Case of the High-mass Protocluster NGC 2264-C, *The Astrophysical Journal*, refereed, 822, 2016, 85

DOI:10.3847/0004-637X/822/2/85

Sakai, N., Oya, Y., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535, *The Astrophysical Journal*, refereed, 820, 2016, L34

DOI:10.3847/2041-8205/820/2/L34

Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Ueda, J., Yamamoto, S., Molecular Distribution in the Spiral Arm of M51, *The Astrophysical Journal*, refereed, 819, 2016,

DOI:10.3847/0004-637X/819/2/144

Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., Spectral Line Survey toward Molecular Clouds in the Large Magellanic Cloud, *The Astrophysical Journal*, refereed, 818, 2016, 161

DOI:10.3847/0004-637X/818/2/161

Taniguchi, K., Ozeki, H., Saito, M., Sakai, N., Nakamura, F., Kamenno, S., Takano, S., Yamamoto, S., Implication of Formation Mechanisms of HC₅N in TMC-1 as Studied by ¹³C Isotopic Fractionation, *The Astrophysical Journal*, refereed, 817, 2016, 147

DOI:10.3847/0004-637X/817/2/147

Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Nishimura, Y., Yamamoto, S., Spectral Line Survey Toward Spiral Arm of M51, *Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year*, refereed, 499, 2015, 151

Shimajiri, Y., Sakai, T., Kitamura, Y., Tsukagoshi, T., Saito, M., Nakamura, F., Momose, M., Takakuwa, S., Yamaguchi, T., Sakai, N., Yamamoto, S., Kawabe, R., Spectral-line Survey at Millimeter and Submillimeter Wavelengths toward an Outflow-shocked Region, OMC 2-FIR 4, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, refereed, 221, 2015, 31

DOI:10.1088/0067-0049/221/2/31

Ebisawa, Y., Inokuma, H., Sakai, N., Menten, K. M., Maezawa, H., Yamamoto, S., OH 18 cm Transition as a Thermometer for Molecular Clouds, *The Astrophysical Journal*, refereed, 815, 2015, 13

DOI:10.1088/0004-637X/815/1/13

Lindberg, J. E., Jorgensen, J. K., Watanabe, Y., Bisschop, S. E., Sakai, N., Yamamoto, S., Probing the effects of external irradiation on low-mass protostars through unbiased line surveys, *Astronomy and Astrophysics*, refereed, 584, 2015, A28

DOI:10.1051/0004-6361/201526222

Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Yamamoto, S., Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-resolution Observation of CS, *The Astrophysical Journal*, refereed, 812, 2015, 59

DOI:10.1088/0004-637X/812/1/59

Watanabe, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Furuya, R., Sakai, T., Hirota, T., Liu, S.-Y., Su, Y.-N., Yamamoto, S., Spectral Line Survey toward the Young Massive

Protostar NGC 2264 CMM3 in the 4 mm, 3 mm, and 0.8 mm Bands, *The Astrophysical Journal*, refereed, 809, 2015, 162

DOI:10.1088/0004-637X/809/2/162

Yoshida, K., Sakai, N., Tokudome, T., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Takano, S., Lefloch, B., Ceccarelli, C., Bachiller, R., Caux, E., Vastel, C., Yamamoto, S., Abundance Anomaly of the ¹³C Isotopic Species of c-C₃H₂ in the Low-mass Star Formation Region L1527, *The Astrophysical Journal*, refereed, 807, 2015, 66

DOI:10.1088/0004-637X/807/1/66

Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Yamamoto, S., Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-1, *The Astrophysical Journal*, refereed, 802, 2015, 74

DOI:10.1088/0004-637X/802/2/74

Oya, Y., Sakai, N., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Lindberg, J. E., Bisschop, S. E., Jorgensen, J. K., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., A Substellar-mass Protostar and its Outflow of IRAS 15398-3359 Revealed by Subarcsecond-resolution Observations of H₂CO and CCH, *The Astrophysical Journal*, refereed, 795, 2014, 152

DOI:10.1088/0004-637X/795/2/152

Sakai, N., Oya, Y., Sakai, T., Watanabe, Y., Hirota, T., Ceccarelli, C., Kahane, C., Lopez-Sepulcre, A., Lefloch, B., Vastel, C., Bottinelli, S., Caux, E., Coutens, A., Aikawa, Y., Takakuwa, S., Ohashi, N., Yen, H.-W., Yamamoto, S., A Chemical View of Protostellar-disk Formation in L1527, *The Astrophysical Journal*, refereed, 791, 2014, L38

DOI:10.1088/2041-8205/791/2/L38

Watanabe, Y., Sakai, N., Sorai, K., Yamamoto, S., Spectral Line Survey toward the Spiral Arm of M51 in the 3 and 2 mm Bands, *The Astrophysical Journal*, refereed, 788, 2014, 4

DOI:10.1088/0004-637X/788/1/4

Sakai, N., Sakai, T., Hirota, T., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Kahane, C., Bottinelli, S., Caux, E., Demyk, K., Vastel, C., Coutens, A., Taquet, V., Ohashi, N., Takakuwa, S., Yen, H.-W., Aikawa, Y., Yamamoto, S., Change in the chemical composition of infalling gas forming a disk around a protostar, *Nature*, refereed, 507, 2014, 78-80

DOI:10.1038/nature13000

Sakai, N., Yamamoto, S., Warm Carbon-Chain Chemistry, *Chemical Reviews*, refereed, 113, 2013, 8981-9015

DOI:10.1021/cr4001308

Jorgensen, J. K., Visser, R., Sakai, N., Bergin, E. A., Brinch, C., Harsono, D., Lindberg, J. E., van Dishoeck, E. F., Yamamoto, S., Bisschop, S. E., Persson, M. V., A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry, *The Astrophysical Journal*, refereed, 779, 2013, L22

DOI:10.1088/2041-8205/779/2/L22

Sakai, N., Takano, S., Sakai, T., Shiba, S., Sumiyoshi, Y., Endo, Y., Yamamoto, S., Anomalous ¹³C Isotope Abundances in C3S and C4H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1, *Journal of Physical Chemistry A*, refereed, 117, 2013, 9831-9839

DOI:10.1021/jp3127913

【学会発表】(計 8 件)

国際会議

Sakai, N. and Oya, Y., Disk and Outflow System in Low-Mass Protostellar Sources, Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, 29th September-2nd October 2015, JAMSTEC, Yokohama, Japan, **Invited.**

Sakai, N., Observational Studies on Molecular Evolution in Star and Planet Forming Regions, 6th International Workshop on Electrostatic Storage Devices, 8-12th June 2015, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, **Invited.**

Sakai, N., Protostellar Disk Formation Traced by Chemistry, 3rd DTA Symposium, The Origin of Planetary Systems: from the Current View to New Horizons, 1-4th June 2015, NAOJ, Tokyo, Japan, **Invited.**

Sakai, N., Chemical Evolution in Star and Planet Formation, 6th RSC-CSJ Joint Symposium on Advanced Measurements for Chemistry, 27th March 2015, Nihon-University, Chiba, Japan, **Invited.**

Sakai, N., New Carbon-Chain Chemistry Found in Solar-Type Star-Forming Regions, 247th American Chemical Society National Meeting, 16 March 2014, Dallas, USA, **Invited**

Sakai, N., A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation, Workshop on Protoplanetary Disk, 21th August 2013, NAOJ, Tokyo, Japan, **Invited**

Sakai, N., Astrochemistry in Star/Planet Forming Regions, ALMA Development Workshop, July 9th 2013, NAOJ, Tokyo, Japan, **Invited**

Sakai, N., A Drastic Chemical Change in Protostellar Formation: IRAS04368+2557 in L1527, Annual Meeting of the Astronomical Society of Japan, 21th March 2014, ICU,

Tokyo, Japan, **Contributed.**

【図書】(計 1 件)

坂井南美 他、日本物理学会編、日本評論社、宇宙の物質はどのようにできたのか：素粒子から生命へ、2015、第六章

【その他】(計 1 件)

記者発表：生まれつつある原始惑星系円盤で劇的な化学変化：かつて太陽系も経験したか？ 2014年2月10日

6. 研究組織

(1) 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・

坂井星・惑星形成研究室・

准主任研究員

研究者番号：70533553

(2) 研究分担者

山本 智 (YAMAMOTO, Satoshi)

東京大学・

大学院理学系研究科・

教授

研究者番号：80182624