

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25108005

研究課題名(和文)原始惑星系の化学的多様性とその進化

研究課題名(英文)Chemical Diversity of Protoplanetary Systems and its Evolution

研究代表者

山本 智(Yamamoto, Satoshi)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・教授

研究者番号：80182624

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 183,700,000円

研究成果の概要(和文):星形成から惑星系形成に至る物質進化の理解は太陽系の物質的起源の理解に直結する重要な研究課題である。本研究では、ALMAをはじめとする最先端電波望遠鏡を駆使し、近傍の星形成領域の観測からこの問題に取り組んだ。その結果、分子雲に含まれる多数の星形成領域の無バイアス観測から、原始星天体の化学的多様性を明瞭に示すとともに、その多様性が惑星系形成領域まで伝播していることを明らかにした。また惑星系形成領域では、回転落下ガスの遠心力バリアを発見するとともに、その近傍で化学組成の劇的な変化が起きていることを見出した。これらは、これまでの惑星系形成時の物質進化の描像を一新する成果である。

研究成果の概要(英文):A thorough understanding of chemical evolution from star-forming cores to planet-forming regions is an important subject which is directly related to an understanding of the chemical origin of the Solar System. In this study, we have tackled this problem with the state-of-the-art radio telescopes including ALMA. The major results are as follows. (1) We have revealed chemical diversity of protostellar sources on the basis of the unbiased survey toward many sources in a single molecular cloud. (2) We have confirmed that the chemical diversity is indeed inherited to the planet forming scale. (3) We have discovered the centrifugal barrier of the infalling rotating envelope around a young protostar, and (4) found a drastic chemical change there. These are all important results completely renewing the conventional view of chemical processes occurring in the planet-forming region.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 惑星系形成 星間物質 電波天文学 星間化学

1. 研究開始当初の背景

星間物質と太陽系物質の間の関連を調べ、太陽系の物質的起源を解明することは、天文学、物理学、地球惑星科学、化学にまたがる学際的研究課題である。そのためには、現在まさに誕生しつつある原始星を実際に調べ、星間物質の進化を直接辿る天文観測からのアプローチが非常に重要である。

2000年代の観測研究の結果、太陽程度の質量を持つ原始星（低質量原始星）天体の化学組成は、進化段階がほぼ同じであっても多様性をもつことが明らかになった。その一つの極端なケースはホットコリノ天体と言われるもので、アルコールやエステルなどの飽和度の高い有機分子に富むものである。一方、逆の極端なケースとしては、WCCC (Warm Carbon Chain Chemistry)天体が知られている。そこでは、炭素鎖分子などの不飽和な有機分子が豊富に存在する。それまで、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、その理解は単純すぎるということが明らかになった。化学的に異なる低質量原始星天体がなぜ生じ、それぞれどのような化学組成を持つ惑星系を作るかに、関心が集まっている。

2. 研究の目的

本研究では、星間分子雲から星・惑星系に至る過程での化学進化を、最先端電波望遠鏡による観測で明らかにし、太陽系物質との関連を探求する。特に、上記で述べた化学的多様性の起源と進化に着目して研究を進める。そのために、次の2つの目標を置く。即ち、①原始星天体の統計的研究により化学組成の多様性の全貌とその起源を探求することと、②原始星天体の化学的多様性が原始惑星系円盤にどう伝播されるかを解明することである。

3. 研究の方法

研究には国内外の最先端電波望遠鏡を用いる。①の研究においては、国立天文台 ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡を用いた観測を想定していたが、望遠鏡の解像度や性能が必ずしも十分でないこともあり、フランス・ドイツが主体となって運用している IRAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡を併用して研究を進めた。化学組成の多様性と原始星の置かれている環境との関連を同一分子雲複合体に属する数 10 個の原始星を対象にして調べる。これにより環境効果が化学的多様性にどのような影響を与えているかを、先入観なしに明らかにする。

一方、②の研究においては、2011年から部分運用を開始した国際共同大型ミリ波サブミリ波干渉計 ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)をフル活用した。ALMAはそれまでの電波望遠鏡と比べて桁違いに高い解像度と感度を持つ。この望遠鏡によって、はじめて原始星近傍の惑星系が形成される領域における化学組成に切り込むことができる。ALMAを用いた観測研究を代表的

低質量星形成領域に対して展開し、原始星天体全体で見られていた化学的多様性がどのように惑星系形成領域、そして原始惑星系円盤へ伝播されるかを、観測的に解明する。

4. 研究成果

5年間の集中した観測研究を通して、上記の目標をほぼ達成することができた。ここではそのハイライトを紹介する。

4.1 ペルセウス座分子雲における化学組成の多様性の研究

ペルセウス座分子雲複合体に属する Class 0 および Class I 段階にある原始星 36 個に対して、IRAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて CCH 分子、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ 分子と CH_3OH 分子のサーベイ観測を行った。CCH と $c\text{-C}_3\text{H}_2$ は不飽和有機分子の代表、 CH_3OH は飽和有機分子の代表とみなすことができるので、両者の存在量比が化学組成の多様性の指標となる。

観測の結果、CCH/ CH_3OH 比は 2 桁ものばらつきを示すことがわかった (図 1)。 $c\text{-C}_3\text{H}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ 比も同様のばらつきを示した。一方、 $c\text{-C}_3\text{H}_2$ と CCH はよい相関を示す。このことから、ペルセウス座分子雲複合体における原始星天体に大きな化学的多様性が見られることがわかった。その原因を調べるために、CCH/ CH_3OH 比を原始星の光度、進化段階指標 (エンベロープ質量や Bolometric Temperature) と比較したところ、相関は見られなかった。一方、分子雲複合体の中での原始星の位置に着目すると、孤立した原始星や分子雲の外縁部にある原始星は CCH/ CH_3OH が高い傾向にあり、クラスター形成をおこなっている分子雲中心部では低いことが判明した。このように、原始星が形成された環境が化学組成に大きな影響を与えていることが初めて示された。

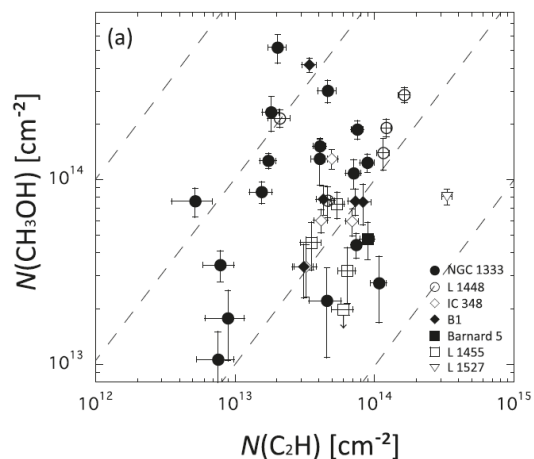


図 1 : ペルセウス座分子雲複合体の原始星天体における化学組成の多様性。

同様のサーベイ観測を HN^{13}C 分子と DNC 分子についても IRAM 30 m 電波望遠鏡および国立天文台野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて行った。その結果、DNC/ HN^{13}C 比 (重水素を含む割合) は天体ごとに数倍程度異なるが、上記の結果とは対照的に、その比は原始星の進化

段階指標 (Bolometric Temperature) と負の相関を示した。即ち、重水素を含む割合は、おもに原始星進化によって変化していくことがわかった。このように、化学組成の多様性を支配する要因は、環境効果と原始星進化にあり、どちらが卓越するかは分子種によって異なることが示された。

4.2 ASTE 望遠鏡を用いた低質量原始星における ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線の観測

本研究で開発した超伝導ホットエレクトロンボロメータ (HEB) ミクサ受信機をチリ・アタカマ砂漠にある国立天文台 ASTE 望遠鏡に搭載して、0.9 THz にある ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線の観測を行った。受信機は正常に動作し、低質量星形成領域 IRAS 16293-2433, RCrA IRS7B について同輝線の検出に成功した。特に RCrA IRS7B は近傍の星からの紫外線によって化学組成が影響を受けており、それが化学的多様性の一因となっていることが指摘されてきたが、その影響を ^{13}CO ($J=8-7$) 輝線と中性炭素原子 ($^3P-^3P$) 輝線の視線速度のずれから確認することができた。

4.3 低質量原始星 L1527 における遠心力バリアの発見

L1527 はおうし座にある代表的 Class 0 天体である。化学的には WCCC 天体の典型例として知られる。この原始星周りには回転落下する扁平なエンベロープが視線に対してほぼ Edge-on の向きに存在していることが知られている。我々は、ALMA の初回の観測公募において、その化学組成分布を調べる観測を提案し、採択された。観測の結果、南北に延びる回転落下エンベロープの構造が $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 、CCH、CS 輝線で詳細に明らかになった。その速度構造を解析したところ、回転落下エンベロープの遠心力バリア (落下ガスの近日点) が初めて明瞭に捉えられた。しかも、その遠心力バリアの位置で、化学組成が大きく変化していることがわかった。即ち、 $\text{c-C}_3\text{H}_2$ 、CCH、CS は回転落下エンベロープに存在するのに対し、SO 分子は遠心力バリア近傍にのみ集中して現れる。これは遠心力バリアにおいて弱い降

着衝撃波が生じるため、温度が上昇して星間塵マントルから SO が蒸発してきたものと見られる (図2)。一方、 H_2CO 分子はエンベロープ、遠心力バリアに加えて、その内側の原始星円盤にも存在する。このように、遠心力バリアにおいて、化学組成が劇的に変化する様子が初めて明らかになった。回転落下ガスの遠心力バリアの存在とそこでの劇的的化学組成変化は、これまで理論的にも観測的にも全く予想していなかったものであり、星・惑星系形成とそこでの物質進化の理解を大きく進める成果として、国際的に注目を集めた。

回転落下エンベロープの物理構造は、回転しながら自由落下する粒子を考えるモデルで非常によく説明できる。このようなモデルが成立するという事は、原始星に向かって落下する動圧が、ガスの静圧や磁気圧を上回っているためと考えられる。このことは、星形成の理論研究にも大きな示唆を与えるものと言える。

一方、遠心力バリアの内側には原始星円盤が形成され、やがては原始惑星系円盤に進化していくものと考えられる。円盤構造が形成されるためには、遠心力バリアまで落下したガスの少なくとも一部が、何らかのメカニズムによって角運動量を失う必要がある。そのメカニズムについてはまだよくわかっておらず、今後の重要な研究課題として残されている。それでも、その一つのヒントが我々の観測から得られている。

我々は、ALMA による高解像度 (0.2") 観測を行い、L1527 の遠心力バリア付近の詳細構造を調べた。その結果、回転落下ガスは遠心力バリアの前で激み、エンベロープ/円盤面の垂直方向に流れ出していることが示された。この流れが低速のアウトフローまたはディスクウインドとなって角運動量を逃がす役割を果たしている可能性がある。このような遠心力バリアからのアウトフローの可能性は、国外のグループによって他の天体でも指摘されるようになってきており、今後の発展が期待される。

4.4 低質量原始星 IRAS 16293-2422 における化学構造の解明

上で述べた L1527 は WCCC の化学的特徴を持つ天体である。回転落下エンベロープの遠心力バリアの存在とそこでの化学変化という物理・化学現象が他の低質量原始星でも見られるかどうかを確かめるため、IRAS 16293-2422 の ALMA アーカイブデータの解析を行った。この天体は、L1527 と対照的に、飽和有機分子に恵まれるホットコリノ天体の化学的特徴を持つ。また、この天体は Source A と Source B からなる連星系でもある。まず、我々はエンベロープ/円盤が視線に対して Edge-on に近い Source A の解析を行った。

どの分子種が回転落下エンベロープをトレースするかを調べるために、原始星周りの分子分布を調べた。その結果、OCS 分子が最も広がって分布していることがわかった。そこ

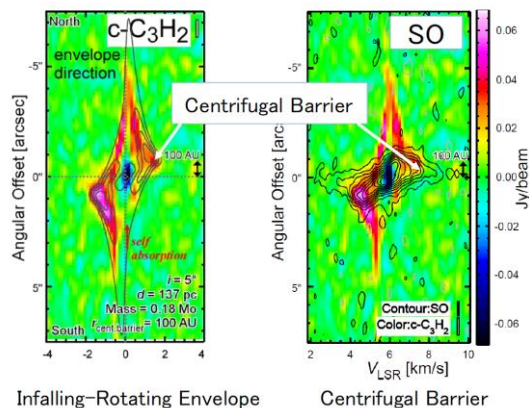


図2: L1527 におけるエンベロープ方向の位置速度図。左図で回転が途切れているところが遠心力バリアの位置。SO は遠心力バリア近傍に局在する。

で、この分子輝線の速度構造を詳しく調べたところ、それは回転落下エンベロープのモデルでよく説明できることが示された。そして、遠心力バリアの半径が、40 – 60 au と求められた。CH₃OH や HCOOCH₃ のような有機分子は、遠心力バリア近傍に局在していた。この分布は L1527 の SO 分子の場合と酷似している。一方、H₂CS 分子は、エンベロープ、遠心力バリア、およびその内側の原始星円盤に存在していることが示された。このように、IRAS 16293-2422 Source A においても、回転落下エンベロープ、遠心力バリア、原始星円盤という構造は L1527 と同様であるが、それぞれに特徴的に存在する分子種は、原始星天体全体の化学組成を反映して、大きく異なる。この結果は、原始星天体の化学組成の多様性が、惑星系形成領域にまでもたらされていることを初めて示したものであり、星・惑星系形成に伴う物質進化の理解において、非常に重要な結果である。

連星系のもう片方の Source B については、エンベロープ/円盤面が視線方向に正対する Face-on の配置にある。そのため、回転落下に伴う速度構造は小さくなるが、Source A における分子分布の特徴をもとにして丁寧な解析を進めた結果、回転構造を特定することができ、Source A と同様の物理構造と遠心力バリア近傍での化学組成変化を確認した。また、Face-on の配置にも拘らず、視線方向の落下運動が Inverse P Cygni プロファイルとして見られることから、原始星近傍の円盤構造は数 10 au 程度の厚みを持っていることを指摘した。

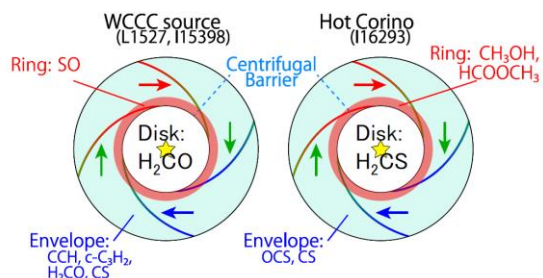


図 3 : 回転落下エンベロープ、遠心力バリア、原始星円盤の化学組成の特徴。WCCC 天体とホットコリノ天体で物理構造は同じだが、各部分をトレースする分子種は異なる。

4.5 WCCC 天体とホットコリノ天体の中間の化学的性質を持つ天体の発見

Aquila Rift 領域にある低質量原始星 L483 は、炭素鎖分子に比較的恵まれていることから WCCC 天体の候補と考えられてきた。我々は、この天体を ALMA で観測したところ、確かに数 100 au スケールで原始星に集中した CCH や c-C₃H₂ の分布が見られ、WCCC 天体の特徴が確認された。また CS 輝線では回転落下エンベロープと原始星円盤の両方が見られ、モデル解析から遠心力バリアの半径をおよそ 100 au 程度と見積もった。一方、驚いたことに、遠心力バリアあるいはその内側で、

ホットコリノ天体に特徴的な HCOOCH₃, NH₂CHO などの有機分子が検出された。このように、この天体では WCCC とホットコリノ化学が空間的に別々のところで起こっていることが明らかとなった。このような構造が確認されたのは、この天体がはじめてである。

我々は、ALMA の観測で同様の化学的特徴を持つ原始星天体をもう一つ見出した。それは低質量原始星 B335 である。この天体は孤立した環境にあり、星形成の物理過程の研究のよい検証対象として、これまで活発な研究が行われてきたが、その化学組成に着目した研究はほとんどなかった。我々はこの天体の観測で、ホットコリノ天体に特有な HCOOCH₃, NH₂CHO などの有機分子を初めて検出した。その分布は非常にコンパクトで、原始星方向に局在している。孤立した原始星天体でホットコリノ化学が確認されたのは初めてである。一方で、ALMA の ACA を用いて広がった分子分布を調べたところ、CCH や c-C₃H₂ が原始星に付随しつつも数 100 au のスケールで広がって存在していることも明らかになった。これはまさに WCCC 天体の特徴である。したがって、L483 と同様に、B335 も両方の化学的特徴が空間的に別々のところで起きている。

外側で WCCC、内側でホットコリノ化学という化学組成分布は、実は Aikawa ら(2008)の化学モデル計算で予想されている。原始星に向かって落下するガスは、原始星近傍の数 100 au 程度に近付くと温められ、25 K 程度で星間塵から CH₄ が蒸発する。その結果、一時的に炭素が豊富な状況が生まれ、WCCC が起こる。さらに、原始星に近付くと、今度は 100 K 程度で氷とともに種々の有機分子が蒸発する。これがホットコリノ化学である。L483 と B335 はこのような「標準的」状況にあるものと見られる。

一方、星間塵上の CH₄ や有機分子の存在量は星ができる前の環境によって大きく変わる。そのため、星間塵上に CH₄ が少なければ WCCC は起こらず、有機分子が少なければホットコリノ化学は起こらない。WCCC 天体とホットコリノ天体はそのような両極端のケースを見ているものと考えられる。4.1 節で述べた原始星天体の化学的多様性は、それを反映していると考えられる。

星間塵の化学組成を決める要因は、大きく言うと環境効果である。具体的な可能性としては、星間紫外線が遮断されてから、星形成が起こるまでの時間ではないかと考えている。この時間が、星間塵における分子組成を変化させるからである。この時間が短ければ CH₄ が多く生成し、WCCC 天体を生む傾向にある。逆に長ければ、CO の水素化を種として様々な有機分子が作られると考えられる。しかし、この検証はまだ道半ばである。

4.6 星なしコアにおける有機分子の検出

TMC-1 シアノポリインピーク (CP) はおうし座にある星なしコア (まだ原始星が生まれ

ていないコア)で、様々な炭素鎖分子に恵まれていることで知られる。米国国立電波天文台のGBT 100 m 電波望遠鏡、IRAM 30 m 電波望遠鏡でこの天体のCH₃OHの観測を高周波数分解能で行ったところ、そのスペクトル線プロファイルが、炭素鎖分子のものとは異なり大きく分かれたダブルピーク構造をしていることがわかった。このことは、CH₃OHの分布が炭素鎖分子の分布と異なることを示している。そこで、CH₃OHの分布を調べたところ、TMC-1(CP)から1'北西方向にそのピークがあることがわかった。その密度はTMC-1(CP)よりも低く、TMC-1(CP)の周辺の構造を捉えているとみられる。そのCH₃OHピークでHCOOCH₃や(CH₃)₂Oの輝線を検出した。星形成が始まる前にすでにこれらの有機分子が星間塵上で生成し、非熱的過程によって気相に放出されていると見られる。この結果は、有機分子がいつ形成されるかについて重要な知見と言える。

4.7 まとめ

以上のように、5年間の研究で星形成から惑星系形成領域に至る物質進化とその多様性についての理解が格段に深まった。多様性を生み出す原因、惑星系形成に伴う化学進化が残された課題であるが、それらについても重要な足掛かりを得た。したがって、本研究は当初目的を十分達成したと言える。

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 32 件)

① Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., Yamamoto, S., “Complex Organic Molecules in Taurus Molecular Cloud-1”, ApJ, 査読有、854, 2018, 116 (11pp)

DOI: 10.3847/1538-4357/aaa70c

② Oya, Y., Moriwaki, K., Onishi, S., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Favre, C., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Yamamoto, S., “Chemical and Physical Picture of IRAS 16293-2422 Source B at a Sub-arcsecond Scale Studied with ALMA”, ApJ, 査読有、854, 2018, 96 (19pp)

DOI: 10.3847/1538-4357/aaa6c7

③ Sakai, N., Oya, Y., Higuchi, A.E., Aikawa, Y., Hanawa, T., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Sakai, T., Hirota, T., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., “Vertical Structure of the Transition Zone from Infalling Rotating Envelope to Disc in the Class 0 Protostar, IRAS 04368+2557”, MNRAS, 査読有、467, 2017, L76-L80

DOI: 10.1093/mnrasl/slx002

④ Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A.E., Hirota, T., Lopez-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., “L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”, ApJ, 査読有、837, 2017, 174 (15pp)

DOI: 10.3847/1538-4357/aa6300

⑤ Oya, Y., Sakai, N., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Favre, C., Yamamoto, S., “Infalling-Rotating Motion and Associated Chemical Change in the Envelope of IRAS 16293-2422 Source A Studied with ALMA”, ApJ, 査読有、824, 2016, 88 (19pp)

DOI: 10.3847/0004-637X/824/2/88

⑥ Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., Yamamoto, S., “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, ApJL, 査読有、830, 2016, L37 (7pp)

DOI: 10.3847/2041-8205/830/2/L37

⑦ 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”, ApJ, 査読有、807, 2015, 66 (9pp)

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

⑧ Oya, Y., Sakai, N., Lefloch, B., Lopez-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., and Yamamoto, S., “Geometric and Kinematic Structure of the Outflow/Envelope System of L1527 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observation of CS”, Astrophysical Journal, 査読有、812, 2015, 59 (12pp)

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

⑨ Soma, T., Sakai, N., Watanabe, Y., and Yamamoto, S., “Methanol in the Starless Core, Taurus Molecular Cloud-”, ApJ, 査読有、802, 2015, 74 (9pp)

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

⑩ 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 L152”, ApJ, 査読有, 791, 2014, L38 (5pp)

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

⑪ 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, 査読有, 507, 2014, 78-80

DOI: 10.1038/nature13000

⑫ Sakai, N., & Yamamoto, S., “Warm Carbon-Chain Chemistry”, Chem. Rev., 査読有, 113, 2013, 8981-9015

DOI: 10.1021/cr4001308

[学会発表] (計 98 件)

① 山本 智, 「星間雲の階層構造と化学」、2017 年度「物質階層の原理を探索する統合的実験研究」研究報告会、2018

② 吉田 健人, 「星形成領域における H₂CO の ¹³C 同位体比の観測」、天文学会 2017 年秋季年会、2017

③ 大小田 結貴, 「Class 0 低質量原始星 IRAS 15398-3359 の円盤・エンベロープ構造」、天文学会 2017 年秋季年会、2017

④ Oya, Y., “Chemical Change in the Disk Forming Region of IRAS 16293-2422 Studied with ALMA”, IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, 2017

⑤ Yamamoto, S., “Chemical Tracers of Dynamics in Low-Mass Protostellar Objects”, IAU Symposium 332 Astrochemistry VII, 2017

⑥ Oya, Y., “Infalling-Rotating Envelopes and Disks around Low-Mass Protostars”, The Early Phase of Star Formation 2016, 2016

⑦ 今井 宗明, 「ALMA による低質量原始星天体 B335 の化学組成の研究 2」、天文学会 2016 年秋季年会、2016

⑧ 大屋 瑠子, 「Class 0 原始星天体 IRAS 16293-2422 Source B の回転構造の解析」、天文学会 2016 年秋季年会、2016

⑨ Satoshi Yamamoto & Nami Sakai “Carbon-Chain Molecules in Astrophysics”, Symposium on Advanced Molecular Spectroscopy, 2015

⑩ 大屋 瑠子, 「Class 0 原始星 IRAS 16293-2422 におけるエンベロープの速度構造解析」、天文学会 2015 年秋季年会、2015

⑪ 坂井 南美, 「Unbiased Chemical Survey of Protostellar Sources in Perseus」、天文学会 2015 年秋季年会、2015

⑫ Sakai, N., “A Drastic Chemical Change in Protostellar Disk Formation”, The

Early Phase of Star Formation, 2014

⑬ 相馬 達也, 「Detection of Complex Organic Molecules in Starless Core: TMC-1」、天文学会 2015 年春季年会、2014

⑭ Sakai, N., “New carbon-chain chemistry found in solar-type star-forming regions”, 247th American Chemical Society National Meeting 2014, 2014

⑮ 大屋 瑠子, 「ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測」、天文学会 2014 年春季年会、2014

[図書] (計 1 件)

① Yamamoto, S., Springer, Introduction to Astrochemistry, 2017, 286

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

・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・主任研究員

研究者番号: 70533553

・酒井 剛 (SAKAI, Takeshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 20469604

・渡邊 祥正 (WATANABE, Yoshimasa)

筑波大学・数理解物質系物理学域・助教

研究者番号: 20586929

・高野 秀路 (TAKANO, Shuro)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号: 00222084

・廣田 朋也 (HIROTA, Tomoya)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教

研究者番号: 10325764

・前澤 裕之 (MAEZAWA, Hiroyuki)

大阪府立大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 00377780

・小嶋 崇文 (KOJIMA, Takafumi)

国立天文台・先端技術センター・助教

研究者番号: 00617417