

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21224002

研究課題名(和文)多波長ラインサーベイによる星形成から惑星系形成に至る化学進化の解明

研究課題名(英文)Exploring Chemical Evolution from Star Forming Cores to Protoplanetary Disks by Multi-Wavelength Line Survey

研究代表者

山本 智(Yamamoto, Satoshi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80182624

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 133,400,000円、(間接経費) 40,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、低質量原始星まわりの円盤形成に伴う化学進化を電波観測で探求した。また、それに必要な高感度受信機を開発した。主な成果は次の通りである。(1)多波長スペクトル線サーベイ観測により、原始星エンベロープの化学的多様性を確立した。(2)原始星近傍の衝撃波領域でスペクトル線サーベイ観測により星間塵の化学組成の知見を得た。(3)低質量原始星L1527の高空間分解能観測を行い、原始星エンベロープの遠心力バリアの位置を初めて同定した。また、円盤形成に伴い化学組成が劇的に変化していることを見出した。(4)進化の進んだClass I段階の原始星、TMC-1A、で炭素鎖分子の消失を捉えた。

研究成果の概要(英文)：In this program, chemical evolution associated with formation of protostellar disk s around solar-type protostars has been studied with state-of-the-art radio telescopes. Sensitive receivers necessary for this purpose have also been developed and commissioned. The main outcomes are as follows .(1)Chemical diversity in protostellar envelopes has been established by spectral line survey observations .(2)Chemical compositions of grain mantle have been characterized by observing shocked regions caused by interactions between ambient gas and molecular outflows from protostars.(3)With subarcsecond observations with ALMA, the centrifugal barrier of infalling gas toward the protostar has been identified for the first time. Chemical compositions of the gas are found to change drastically at the centrifugal barrier.(4)In the Class I protostar TMC-1A, an asymmetric distribution of molecules, which is probably a remnant of the envelope, has been identified.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：電波天文学 宇宙物理学 星形成 惑星起源 星間化学 超伝導デバイス

### 1. 研究開始当初の背景

近年のミリ波・サブミリ波帯での観測技術の成熟の結果、星形成領域の化学の理解は大きな進展を遂げつつある。大口径電波望遠鏡を用いた高感度観測によって、低質量星(太陽程度の質量をもつ星)の形成現場で、これまで考えられていたよりもずっと複雑な分子まで原始星近傍に存在していることが明らかになってきた。

その第一は、フランスのグループによる複雑な有機分子(HCOOCH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>CNなど)の発見である(ホットコリノ化学)。これらの分子は星間塵から蒸発してきたものと見られ、大質量星形成領域のホットコアではよく知られている。それらが低質量原始星のごく近傍でも検出されたことは、生成された有機分子が原始惑星系円盤にもたらされる可能性があることを示唆しており、隕石に含まれる先太陽系起源の有機分子との関連で注目を集めた。

第二は、我々のグループが発見したWarm Carbon Chain Chemistry (WCCC)である。これまで、CCSやC<sub>4</sub>Hなどの炭素鎖分子は、星がまだ生まれていない若いコアで豊富であり、星形成領域では少ないことが示されてきた。しかし、我々は、おうし座の原始星L1527、おおかみ座の原始星IRAS 15398-3359で、種々の炭素鎖分子が特異的に存在していることを発見した。原始星近傍で星間塵からCH<sub>4</sub>が蒸発し、それが材料になって効率よく炭素鎖分子が生成されていると考えられる(WCCC)。

ホットコリノ天体、WCCC天体の存在は、スペクトルエネルギー分布では同じClass 0に分類される原始星でも、化学組成は異なり得ることを意味している。この化学組成の違いがなぜ生じ、惑星系形成にどのようにもたらされるのか、そして、わが太陽系はどちらのケースであったかなどについて、大きな関心が集まりつつある。

このように、低質量星形成領域の化学組成についての研究は、数年前では予想もつかなかった展開を見せている。その詳細を先入観なく明らかにするには、代表的な天体でのスペクトル線サーベイ観測(ラインサーベイ)が不可欠である。低質量星形成領域は豊かな化学を育んでいることは間違いなく、その全貌の解明が求められる。

### 2. 研究の目的

本研究では、原始星天体の化学組成とその進化を2つの方向で研究した。第一は多波長観測による化学組成の総合的把握である。そのために、国立天文台野辺山観測所の45 m電波望遠鏡によって波長3 mm帯(ミリ波帯)の観測を、国立天文台ASTE (Atacama Submillimeter Telescope Experiment) 10 m望遠鏡によって波長0.8 mm帯(サブミリ波帯)の観測を行う。さらに、ASTE望遠鏡により0.4 - 0.2 mm帯

(テラヘルツ帯)の観測も目指す。ミリ波帯では複雑な有機分子や炭素鎖分子のスペクトル線が、サブミリ波帯では基本的分子の高励起輝線が観測されるとともに、テラヘルツ帯ではCH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>D<sup>+</sup>, HD<sub>2</sub><sup>+</sup>などの化学反応の中で要となる分子のスペクトル線の検出が期待できる。サブミリ波、テラヘルツ帯の観測は、高温高密度で特徴付けられる原始星近傍のエンベロープや原始星円盤の化学組成を捉える上で重要である。このような「多波長サーベイ」により、幅広い物理状態に対応する化学組成を的確に捉えることを目指した。

第二の方向は原始星進化に伴う化学進化の研究である。まずは最も若い進化段階にあるClass 0原始星を対象としたが、観測をClass I天体に拡張した。また、高空間分解能観測でClass 0天体の近傍を観測することにより、原始星進化に伴う化学進化の方向性を探った。さらに、本研究推進中に稼働を開始した大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)も活用し、原始星円盤形成に伴う化学進化に切り込んだ。

以上の研究を総合して、星形成領域から原始惑星系円盤に至る化学進化の概要が明らかになってきた。星間分子雲の化学進化の概念は、我々が中心となって確立してきたものであり、現在では世界的に受け入れられている。本研究を通して、この概念を星形成から惑星系形成に向けて拡張することを目指した。

### 3. 研究の方法

本研究では、ミリ波、サブミリ波、テラヘルツ波の各領域で、代表的低質量原始星のラインサーベイ観測を行い、化学組成の多様性と、それを支配する基本分子の振舞いの関係を総合的に明らかにする。ミリ波帯の観測には国立天文台野辺山45 m電波望遠鏡を、サブミリ波帯、テラヘルツ波帯での観測にはチリ・アタカマ砂漠(標高4800 m)に設置されている国立天文台ASTE望遠鏡を用いる。望遠鏡に搭載されている既設の観測装置に加え、本研究で70 GHz帯の受信機、および、テラヘルツ帯(0.9-1.5 THz)の受信機を新たに製作して、観測に用いる。70 GHz帯の受信機により、DCN, DNC, DCO<sup>+</sup>などの重水素化分子の基本遷移(J=1-0)を捉えることができるようになり、重水素濃縮を指標とした化学進化段階の研究を大きく進展させることができる。また、テラヘルツ帯の受信機ではこの重水素濃縮の原因となっているH<sub>2</sub>D<sup>+</sup>やHD<sub>2</sub><sup>+</sup>の基本遷移を捉えることを目指す。テラヘルツ帯受信機のためのヘテロダイン素子には、本研究室で製作した超伝導 Hot Electron Bolometer (HEB)ミクスを用いる。

さらに、原始星周りの化学組成分布を高空間分解能で調べるために、フランスにあるPdBI (Plateau de Bure Interferometer) や

ALMA などのミリ波サブミリ波干渉計を用いる。原始星近傍の化学組成の探求は、原始星進化に伴う化学進化の理解のための重要な情報を与えると期待される。

#### 4. 研究成果

##### (1) 低質量原始星の化学的多様性の確立

本研究では、低質量原始星の原始星エンベロープの化学組成が天体によって異なることを確かめるために、Class 0 段階にある原始星天体 L1572 について、国立天文台野辺山観測所の 45 m 電波望遠鏡を用いて、RCrA IRS7B と Serpens SMM4 については国立天文台 ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡を用いて、ラインサーベイ観測を推進した。

L1572 は炭素鎖分子の存在量が異常に多い原始星である。この天体のスペクトルを 82-115 GHz の範囲で取得した。その結果、これまで典型的と考えられてきた低質量原始星 IRAS 16293-2422 のスペクトル(Caux et al. 2011) と比べて、明らかにパターンが異なることが示された。L1572 では、炭素鎖分子のスペクトルが著しく卓越している。一方で、IRAS16293-2422 では顕著な飽和有機分子のスペクトル線は検出されない。この2つの天体は物理的には同じ進化段階にあるが、化学組成では大きく異なることが確立した。

また、70 GHz 帯の重水素化分子(DCN, DNC, DCO<sup>+</sup>など)のスペクトル線観測を行い、重水素濃縮度を精密に評価した。その結果、L1572 では Hot Corino 天体で見られるような著しい重水素濃縮は起こっていないことが確認された。このことは、L1572 のような WCCC 天体が Hot Corino 天体と比べて速い収縮(短い星なしコア時代の時間)で形成されたとする我々の考えを改めて支持するものである。

R CrA IRS7B と Serpens SMM4 はともに IRAS 16293-2422 のように飽和有機分子に恵まれる原始星だと考えられてきた。しかし ASTE 望遠鏡を用いたラインサーベイ観測で、Serpens SMM4 は確かに IRAS 16293-2422 と化学組成が類似していることが示されたが、R CrA IRS7B は大きく異なっていることがわかった。CH<sub>3</sub>OH が有意に少なく、重水素濃縮度も低い。そのため、見かけ上 WCCC 天体に近い組成を示す。一方で、WCCC 天体に特有の長い炭素鎖分子(C<sub>4</sub>H など)は非常に少なく、WCCC 天体とも断定できない。この天体は、近傍に誕生した B 型星(R CrA)からの紫外線に晒されており、強い紫外線が原始星エンベロープの化学組成に影響を与えていると考えられる。このことは、原始星の化学組成は、我々が指摘していた WCCC 天体と Hot Corino 天体の存在だけでなく、環境効果によっても多様性を生んでいることを意味している。

##### (2) 原始星近傍の衝撃波領域の観測

原始星から双極状に吹き出すアウトフローは周囲のエンベロープガスに衝突し、その化学組成に影響を与える。そこで、低質量原始星に付随する衝撃波領域(L1157 B1 および

BHR71) の観測を進めた。L1157 B1 の観測においては国立天文台 45 m 電波望遠鏡を用いて 78 - 115 GHz 帯のラインサーベイを行った。その結果、CH<sub>3</sub>CHO, NH<sub>2</sub>CHO などの有機分子を検出した。これらの分子は星間塵で生成し、吸着していたものが、衝撃波領域での加熱・スパッタによって気相に放出されたと見られる。このことは、星形成領域の星間塵に、すでになりに複雑な有機分子が生成していることを示している。

さらに、L1157 B1 でのラインサーベイ観測で、低質量星形成領域で初めてリンを含む分子 PN の検出に成功した。衝撃波領域だけで観測されることから、星間塵上の PH<sub>3</sub> もしくは P 原子が衝撃波による加熱・スパッタで気相に放出され、気相反応によって PN が生成していると考えられる。リンは生体物質との関連で興味を持たれるが、その星間雲における化学的性質は未解明であり、今回の検出は、その理解の第一歩となるものである。

BHR71 の衝撃波領域のラインサーベイ観測は ASTE 望遠鏡を用いて 330 - 360 GHz 帯で行った。CH<sub>3</sub>OH のスペクトル線が卓越しており、L1157 B1 と同様にこの天体でも衝撃波による加熱・スパッタによって CH<sub>3</sub>OH が星間塵から放出されてきていると考えられる。

##### (3) 原始星近傍の化学組成分布

フランスの PdBI ミリ波干渉計を用いて L1572 原始星を高解像度で観測したところ、炭素鎖分子は原始星に付随しているものの、原始星から 500 AU (天文単位)のごく近傍では減少している様子が捉えられた。これは原始星進化とともに炭素鎖分子が気相からなくなっている兆候と考えられた。しかし、PdBI による観測の空間分解能は 3" (500 AU) 程度であったので、L1572 原始星近傍における炭素鎖分子の運命を特定するには至らなかった。そこで、ALMA の初期運用プログラム(Cycle 0 公募)に L1572 の観測提案を行い、認められて観測を行った。その結果、0.6" (100 AU) 程度の空間分解能で炭素鎖分子をはじめ様々な分子の分布を詳細に描き出すことができた。

L1572 の原始星エンベロープは扁平な構造を持ち、視線方向からはちょうど edge-on(側面を見る)の配置になっている。そのため、エンベロープの回転・落下運動はスペクトル線のドップラーシフトとして精密に観測できる。ALMA による c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> 分子(炭素鎖分子の異性体)のスペクトル線の観測から、この分子は回転しながら原始星に落下しつつあるエンベロープに存在していること、半径 100 AU よりも内側には存在していないことが明らかになった。この回転・落下運動を簡単な粒子モデルで解析したところ、c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> 分子がいなくなる半径 100 AU は、ちょうど遠心力バリアの半径にあたることがわかった。この遠心力バリアの半径とそこでの回転速度から原始星質量が 0.18 太陽質量と求められた。

回転しながら落下するガスは角運動量と

エネルギー保存のためにそのままでは遠心力バリアの内側に入ることができない。しかし、さらに降り積もるガスと衝突して弱い衝撃波領域を作る。その様子は我々が ALMA で同時観測した SO 分子のスペクトル線で示された。SO 分子は遠心力半径付近で存在量が増加し、その温度も c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> 分子の存在領域よりも高い。弱い衝撃波によって星間塵から SO 分子が蒸発してきたものと考えられる。遠心力バリアは、原始星エンベロープと形成しつつある原始星円盤（将来は原始惑星系円盤）の境界にあたるもので、それが観測で捉えられたことは、星形成過程の研究の上でも大きな意義がある。

遠心力バリアの内側の赤道面では、温度が再び下がるので、分子は星間塵に吸着されていく。そのため c-C<sub>3</sub>H<sub>2</sub> 分子は半径 100 AU より内側で消失していると理解できる。一方、SO 分子や H<sub>2</sub>CO 分子は半径 100 AU 以内にもある程度存在しており、その速度構造からケプラー回転する原始星円盤にも存在していると考えられる。本研究により、原始星近傍の化学組成は、遠心力バリアの近傍で劇的な変化を起こしていることが明らかになった。このような状況はこれまでまったく予想されていなかったものであり、原始星円盤形成に伴う化学進化の理解を大きく進めることができたと考えている。

上記の結果から、WCCC 天体の炭素鎖分子は原始星近傍の遠心力バリアまでは気相中に存在するが、その後は星間塵に吸着され主に固形物質として惑星系にもたらされると考えられる。このことが、他の原始星天体でも一般的に成り立つかについては興味を持たれる。今後、本格化してくる ALMA の観測によって、原始星エンベロープの化学組成の多様性の進化が明らかになるであろう。

#### (4) 原始星進化に伴う化学組成進化

本研究では主に原始星進化の中で最も若い Class 0 段階にある原始星について、ラインサーベイ観測を行ってきたが、より進んだ進化段階(Class 1)にある原始星についても観測に取り組んだ。一般に Class 1 天体は原始星に付随している成分の大きさが小さいので、原始星周辺の広がったガスからの輝線の寄与が相対的に大きくなる。そのために、単一口径望遠鏡での観測は困難を極めた。しかし、その中で、WCCC 天体の進化形と考えられる天体を同定することができた。それが TMC-1A である。国立天文台 45 m 電波望遠鏡、および、IRAM 30 m 電波望遠鏡を用いて、この天体を高感度観測したところ、炭素鎖分子 (CCH, HC<sub>3</sub>N) の高励起輝線を検出した。回転温度は 20 K-30 K と高く、しかも、高励起輝線ほど、原始星の系統速度よりやや青方偏移した成分が卓越してくることがわかった。

L1527 に対する ALMA による観測の結果から、この高励起輝線でトレースされているのは、遠心力バリア近傍に残った炭素鎖分子と考えられる。何らかの非対称のために、赤方偏

移成分はほとんど見えないのであろう。もしそうなら、WCCC 天体における炭素鎖分子はエンベロープの降着の終了とともにすべて星間塵に吸着され、その後の進化段階においては気相のスペクトル線に炭素鎖分子の特徴的存在を見ることはできないことになる。このことを確かめる観測をすでに ALMA Cycle 2 に提案し、実行が決まっている。この観測で、先の L1527 での ALMA 観測の結果と合わせ、原始星円盤形成に伴う WCCC 天体の化学進化をほぼ確定できるであろう。

#### (5) 関連する装置開発

このような観測研究と併行して、70 GHz 帯受信機を製作し、野辺山 45 m 望遠鏡に搭載した。この受信機のシステム雑音温度は 150 K 程度と、従来の受信機の 1/3 程度に低減され、観測時間ベースでの観測効率は 1 桁程度高まった。これにより DCN, DNC, DCO などの基本遷移の観測が容易となり重水素濃縮度の観測的研究を大きく進めることができた。

また、テラヘルツ帯 HEB ミクス受信機の開発についても大きな進展があった。計画当初、受信機雑音温度として 1000 K を切ることを目標としていたが、超伝導薄膜の改良などを通して、0.8 THz で 370 K、1.5 THz で 490 K という世界最高性能を達成した。この受信機を ASTE 望遠鏡に搭載し、平成 23 年 10 月にオリオン分子雲からの <sup>13</sup>CO スペクトル線の受信に成功した。その後、平成 24 年度、平成 25 年度にも ASTE 望遠鏡での搭載実験を行った。しかし、平成 24 年度の実験ではテラヘルツ帯受信機の搭載には成功したものの、望遠鏡の発電設備のトラブルで観測を行うことはできなかった。また、平成 25 年度についても、受信機自体のトラブルのため観測に至らなかった。このような事情で本格観測はできなかったが、ASTE 望遠鏡による地上テラヘルツ帯観測を実現し、定常運用に目途を付けたことは今後の THz 帯の観測展開にとって大きな意義がある。

#### 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 24 件)

(1)“Change in the Chemical Composition of Infalling Gas Forming a Disk around a Protostar”, N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, C. Ceccarelli, C. Kahane, S. Bottinelli, E. Caux, K. Demyk, C. Vastel, A. Coutens, V. Taquet, N. Ohashi, S. Takakuwa, H.-W. Yen, Y. Aikawa, and S. Yamamoto, *Nature*, 507, 78-80 (2014). (Refereed) DOI:10.1038/nature13000

(2)“Anomalous <sup>13</sup>C Isotope Abundances in C<sub>3</sub>S and C<sub>4</sub>H Observed toward the Cold Interstellar Cloud, Taurus Molecular Cloud-1”, N. Sakai, S. Takano, T. Sakai, S. Shiba, Y. Sumiyoshi, Y. Endo, and S. Yamamoto, *S. J. Phys. Chem. A*, 117, 9831-9839 (2013). (Refereed) DOI:10.1021/jp3127913

- (3) "Warm Carbon-Chain Chemistry", N. Sakai, and S. Yamamoto, *Chem. Rev.*, 113, 8981-9015 (2013). (Refereed) DOI:10.1021/cr4001308
- (4) "ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: Hot Core and Molecular Outflows" T. Sakai, N. Sakai, J.B. Foster, P. Sanhueza, J.M. Jackson, M. Kassis, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto, *ApJ*, 775, L31(4pp) (2013). (Refereed) DOI:10.1088/2041-8205/775/1/L31
- (5) "A Recent Accretion Burst in the Low-mass Protostar IRAS 15398-3359: ALMA Imaging of Its Related Chemistry", J.K. Jorgensen, R. Visser, N. Sakai, E. Bergin, C. Brinch, D. Harsono, J.E. Lindberg, E.F. van Dishoeck, S. Yamamoto, S. Bisschop, and M.V. Persson, *ApJ*, 779, L22 (4pp) (2013). (Refereed) DOI:10.1088/2041-8205/779/2/L22
- (6) "Distribution of CH<sub>3</sub>OH in NGC1333 IRAS4B", N. Sakai, C. Ceccarelli, S. Bottinelli, T. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* 754, 70 (8 pp)(2012). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/754/1/70
- (7) "Tentative Detection of Deuterated Methane toward the Low-Mass Protostar IRAS 04368+2557 in L1527", N. Sakai, Y. Shirley, T. Sakai, T. Hirota, Y. Watanabe, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* 758, L4 (4 pp) (2012). (Refereed). DOI:10.1088/2041-8205/758/1/L4
- (8) "CH Radio Emission from Heiles Cloud 2 As a Tracer of Molecular Cloud Evolution", N. Sakai, H. Maezawa, T. Sakai, K.M. Menten, and S. Yamamoto, *Astron. Astrophys.* 546, A103 (8 pp) (2012). (Refereed). DOI:10.1051/0004-6361/201219106
- (9) "The 3 mm Spectral Line Survey toward the L1157 B1 Shocked Region: I. Data", T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 64, 105 (45pp) (2012) (Refereed) .DOI:10.1093/pasj/64.5.105
- (10) "DNC/HNC Ratio of Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation", T. Sakai, N. Sakai, K. Furuya, Y. Aikawa, T. Hirota, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.*, 747, 140 (10 p) (2012).(Refereed)DOI:10.1088/0004-637X/747/2/140
- (11) "An Unbiased Spectral Line Survey toward R CrA IRS7B in the 345 GHz Window with ASTE", Y. Watanabe, N. Sakai, J.E. Lindberg, J.K. Jorgensen, S.E. Bisschop, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* 745, 126 (23 p) (2012). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/745/2/126
- (12) "3.1 THz Heterodyne Receiver Using an NbTiN Hot-Electron Bolometer Mixer and a Quantum Cascade Laser", S. Shiba, Y. Irimajiri, T. Yamakura, H. Maezawa, N. Sekine, I. Hosako, and S. Yamamoto, *IEEE Tran. Terahertz Sci. Tech.* 2, 22-28 (2012). (Refereed) DOI:10.1109/TTHZ.2011.2177704
- (13) "Detection of Phosphorous Nitride in the Lynds 1157 B1 Shocked Region", T. Yamaguchi, S. Takano, Y. Watanabe, N. Sakai, T. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, N. Hirano, S. Takakuwa, Y. Aikawa, H. Nomura, and S. Yamamoto, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63, L37-L41 (2011). (Refereed) DOI:10.1093/pasj/63.5.L37
- (14) "Detection of Two Carbon-Chain-Rich Cores: CB130-3 and L673 SMM4", T. Hirota, T. Sakai, N. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.* 736, 4 (8 p) (2011). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/736/1/4
- (15) "Compact Molecular Outflow from NGC2264 CMM3: A Candidate for Very Young High-Mass Protostar", O. Saruwatari, N. Sakai, S.-Y. Liu, Y.-N. Su, T. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.*, 729, 147 (7 p) (2011). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/729/2/147
- (16) "Early Results of the 3 mm Spectral Line Survey toward the Lynds 1157 B1 Shocked Region", M. Sugimura, T. Yamaguchi, T. Sakai, T. Umemoto, N. Sakai, S. Takano, Y. Aikawa, N. Hirano, S.-Y. Liu, T.J. Millar, H. Nomura, Y.-N. Su, S. Takakuwa, and S. Yamamoto, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 63, 459-472 (2011). (Refereed) DOI:10.1093/pasj/63.2.459
- (17) "Distribution of Carbon-Chain Molecules in L1527", N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.*, 722, 1633-1643 (2010). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/722/2/1633
- (18) "Depletion of CCS in a Candidate Warm-Carbon-Chain-Chemistry Source L483", T. Hirota, N. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.*, 720, 1370-1373 (2010). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/720/2/1370
- (19) "Long Carbon-Chain Molecules and their Anions in the Starless Core, Lupus-1A", N. Sakai, T. Shiino, T. Hirota, T. Sakai, and S. Yamamoto, *Astrophys. J.*, 718, L49-L52 (2010). (Refereed) DOI:10.1088/2041-8205/718/2/L49
- (20) "Abundance Anomaly of the <sup>13</sup>C species of CCH", N. Sakai, O. Saruwatari, T. Sakai, S. Takano, and S. Yamamoto, *Astron. Astrophys.*, 512, A31 (10 p) (2010). (Refereed) DOI:10.1051/0004-6361/200913098
- (21) "Development of 1.5 THz Waveguide NbTiN Superconducting Hot Electron Bolometer Mixers", L. Jiang, S. Shiba, T.

Shiino, K. Shimbo, N. Sakai, T. Yamakura, Y. Irimajiri, P.G. Ananthasubramanian, H. Maezawa, and S. Yamamoto, Supercond. Sci. Technol., 23, 045025 (6p) (2010). (Refereed) DOI: 10.1088/0953-2048/23/4/045025

(22) "Improvement of the Critical Temperature of Superconducting NbTiN and NbN Thin Films Using the AlN Buffer Layer", T. Shiino, S. Shiba, N. Sakai, T. Yamakura, L. Jiang, Y. Uzawa, H. Maezawa, and S. Yamamoto, Supercond. Sci. Technol., 23, 045004 (5 p) (2010). (Refereed) DOI: 10.1088/0953-2048/23/4/045004

(23) "A Survey of Molecular Lines toward Massive Clumps in Early Evolutionary Stages of High-Mass Star Formation", T. Sakai, N. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, Astrophys. J., 714, 1658-1671 (2010). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/714/2/1658

(24) "Deuterated Molecules in Warm Carbon Chain Chemistry: The L1527 Case", N. Sakai, T. Sakai, T. Hirota, and S. Yamamoto, Astrophys. J. 702, 1025-1035 (2009). (Refereed) DOI:10.1088/0004-637X/702/2/1025

〔学会発表〕(計 12 件)

(1)N. Sakai, "A Drastic Chemical Change in Protostellar-Disk Formation: IRAS 04368 +2557 in L1527", 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 21 日, 国際基督教大学(東京都)

(2)大屋 瑤子, "ALMA によるおおかみ座 Class 0 原始星 IRAS 15398-3359 の観測", 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 21 日, 国際基督教大学(東京都)

(3)相馬達也, "Non-thermal Desorption in the Cold Molecular Cloud: TMC-1", 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 21 日, 国際基督教大学(東京都)

2014 年 3 月 21 日, 国際基督教大学(東京都)

(4)猪熊宏士, "OH 基底状態遷移の吸収線の発券と統計平衡計算による解析", 日本天文学会 2014 年春季年会, 2014 年 3 月 21 日, 国際基督教大学(東京都)

(5)西村優里, "Systematic differences of excitation temperatures between DNC and HN13C", 日本天文学会 2013 年春季年会, 2013 年 3 月 21 日, 埼玉大学(埼玉県)

(6)徳留智矢, "L1527 におけるスペクトル線サーベイ(3)", 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012 年 9 月 19 日, 大分大学(大分県)

(7)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(京都府)

(8)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(鹿児島県)

(9)坂井南美, "Chemical Diversity of Low-Mass Star Forming Regions", 地球惑星連合大会, 2010 年 5 月 28 日, 幕張メッセ(千葉県)

(10)坂井南美, "星間分子雲における炭素鎖分子の  $^{13}\text{C}$  同位体異常", 分子分光研究会, 2010 年 5 月 15 日, 東京工業大学(東京都)

(11)椎野竜哉, "NbN/AlN 薄膜を用いた THz 帯超伝導 HEB ミクサの開発", 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 2010 年 3 月 19 日, 東海大学(神奈川県)

(12)坂井南美, "Deuterated Molecules in the Low-Mass Star Forming Region, L1527", 日本天文学会秋季年会, 2009 年 9 月 14 日, 山口大学(山口県)

〔その他〕ホームページ

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~submit/>

## 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: 8 0 1 8 2 6 2 4

### (2)研究分担者

高野 秀路 (TAKANO, Shuro)  
国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・助教  
研究者番号: 0 0 2 2 2 0 8 4

前澤 裕之 (MAEZAWA, Hiroyuki)  
大阪府立大学・理学研究科・准教授  
研究者番号: 0 0 3 7 7 7 8 0

廣田 朋也 (HIROTA, Tomoya)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号: 1 0 3 2 5 7 6 4

酒井 剛 (SAKAI, Takeshi)  
電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教  
研究者番号: 2 0 4 6 9 6 0 4

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: 7 0 5 3 3 5 5 3

### (3)研究協力者

椎野 竜哉 (SHIINO, Tatsuya)  
東京大学・大学院理学系研究科・大学院生  
徳留 智矢 (TOKUDOME, Tomoya)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生  
相馬 達也 (SOMA, Tatsuya)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生  
猪熊 宏士 (INOKUMA, Hiroshi)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生  
西村 優里 (NISHIMURA, Yuri)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生  
大屋 瑤子 (OYA, Yoko)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生