

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13967

研究課題名(和文)ダストの合体成長に伴う原始惑星系円盤の化学構造進化

研究課題名(英文)Chemical evolution of protoplanetary disks: the effect of dust evolution

研究代表者

古家 健次 (Kenji, Furuya)

国立天文台・科学研究部・特任助教

研究者番号：80783711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はダストの合体成長に伴う原始惑星系円盤の化学進化を明らかにすることを目的とした。具体的な成果として、原始惑星系円盤内のダスト沈殿、乱流による物質輸送、気相・固相化学反応を統合的に解くモデルを構築した。その結果、円盤ガスが百万年程度のタイムスケールで酸素・炭素に対し相対的に窒素に富んだ組成になること、ガス・ダストの輸送や化学反応のみでは観測されているような高いC/O比を持つ円盤ガスは実現されないことを明らかにした。後者は炭素質ダストの破壊によるガスへの炭素供給メカニズムが重要であることを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、原始惑星系円盤の元素組成が場所ごとに時間変化し、星間空間の元素組成とは大きく異なりうることを理論的に示した。このことは惑星の材料物質の元素組成が多様であり、かつ時間変化することを意味しており、惑星組成の理解が単純ではないことを示唆している。また本研究で構築した理論モデルはALMAなどによる原始惑星系円盤の分子輝線観測の解釈においても有用である。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to elucidate the chemical evolution of protoplanetary disks during the coalescence and growth evolution of dust. As specific results, we developed a model that consistently solves for dust precipitation in protoplanetary disks, gas and dust agitation effects due to turbulence, and gas- and solid-phase chemical reactions. The results show that the disk gas becomes relatively nitrogen-rich relative to oxygen and carbon on a timescale of about a million years, and that the observed high C/O ratio of the disk gas is not achieved by gas and dust transport and chemical reactions alone.

研究分野：星間化学、星惑星系形成

キーワード：星間化学 原始惑星系円盤

1. 研究開始当初の背景

地球のような惑星は原始惑星系円盤の中で固体粒子の合体成長・集積によって形成される。原始惑星系円盤の構成物質は3種に大別される:(i)水素分子ガス、(ii)固体微粒子(ダスト)、(iii)水素、炭素、窒素、酸素等から構成される揮発性物質(気相分子やダスト表面を覆う氷)。揮発性物質は円盤質量に占める割合は小さいが、炭素、酸素、窒素の主要な担い手であり、惑星系形成に重要な影響を与える。揮発性物質は円盤内の温度に応じて、気相あるいは固相(氷)に分配される。気相に存在すればガス惑星の大気組成に反映され、固相に存在すればダストの合体成長効率を上げ惑星の種である微惑星の材料となる。円盤の各領域における揮発性物質の分子組成及び気相・固相間の分配、すなわち原始惑星系円盤の化学構造の理解は、円盤で形成される惑星の表層組成やバルク組成を理解する上で必須であり、太陽系の物質的起源や我々の住む地球の起源に迫る上でも重要である。

従来、原始惑星系円盤は星間空間と同様な元素組成を持ち、その化学構造は局所的な化学反応で決まると考えられてきた(Bergin et al. 2007)。しかし近年の観測により、円盤外側領域において炭素と酸素の量が星間空間と比べ桁で少ないことが分かり(Zhang et al. 2019)、円盤内の元素組成分布は均一でないことが分かってきた。また ALMA による円盤ダストの詳細構造の発見を受け、円盤ダスト進化が円盤化学構造に与える影響の理解にも関心が集まっており、定常な円盤物理モデルの上で局所的な化学反応のみを解くという従来の理論モデルを超えた新たなモデルの構築が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究はダストの合体成長と乱流による物質輸送が原始惑星系円盤の元素組成、分子組成、同位体組成の時間進化に与える影響を理論面より明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

炭素、酸素、窒素及びそれらの安定同位体を含む原子・分子の円盤内鉛直分布の時間発展を気相・固相化学反応と乱流による物質輸送を考慮して数値計算する。

4. 研究成果

(1)円盤ガス元素組成の時間進化

従来、原始惑星系円盤は星間空間と同様な元素組成を持ち、その化学組成は局所的な化学反応で決まると考えられてきた。そのような描像に立つと、CO/H₂存在量比は10⁻⁴程度となるはずであり、円盤ガス質量をCO輝線の観測から推定する際もそのように仮定されてきた。しかし、ハーシェル宇宙望遠鏡によるHD輝線観測でTW Hya円盤のガス質量が精度よく推定されたことを皮切りに、CO/H₂比が10⁻⁴よりも桁で小さいことが分かった。他の分子の観測も合わせると、特定の分子ではなく、TW Hya円盤内の炭素と酸素の量が星間空間と比べ桁で少ないことが明らかになった。さらに最近の研究で、TW Hya円盤だけでなく他の円盤も同様な傾向を持つことが分かっている(Zhang et al. 2019, 2021)。

円盤ガスから炭素と酸素の量を減らす機構は主に二つある。第一に、炭素の多くが二酸化炭素(CO₂)などCOより揮発性が低くかつより酸素を多く含む分子に変化してダスト上の氷内に存在している可能性がある。第二に、円盤内の乱流によって円盤上空のガスが赤道面にもち込まれると、赤道面の低温ダストに分子が凍結する。つまり赤道面のダストが、分子をガス中から取り除くフィルターとして働く可能性がある(フィルター効果)。我々は、円盤ガス中での炭素・酸素に加

え、窒素の長期的な振る舞いを明らかにすることを目的に、赤道面のダストによるフィルター効果と化学反応の両方を考慮したモデルを世界に先駆けて構築した。その結果、炭素・酸素は百万年以内にガス中の存在量が1-2桁減少しうのに対し、窒素は揮発性が高くフィルター効果と表面化学反応が効きづらいため、その減少量は1桁以下であることを示した(図1)。つまり、円盤ガスは酸素・炭素に対し相対的に窒素に富んだ組成になることを明らかにした。この傾向はALMAによる円盤分子輝線観測(COとN₂H⁺; Anderson et al. 2019)と調和的である。

また、乱入による物質輸送や気相・固相反応のみでは、C/O比が1を超える円盤ガスは実現されないことを明らかにした。これまでの観測で、ガス中のC/O比が1を超える円盤がいくつかみつかり、そのような円盤では炭素質ダストの紫外線/X線による破壊により、ダストからガスへと炭素を供給するメカニズムなどが重要である可能性がある。

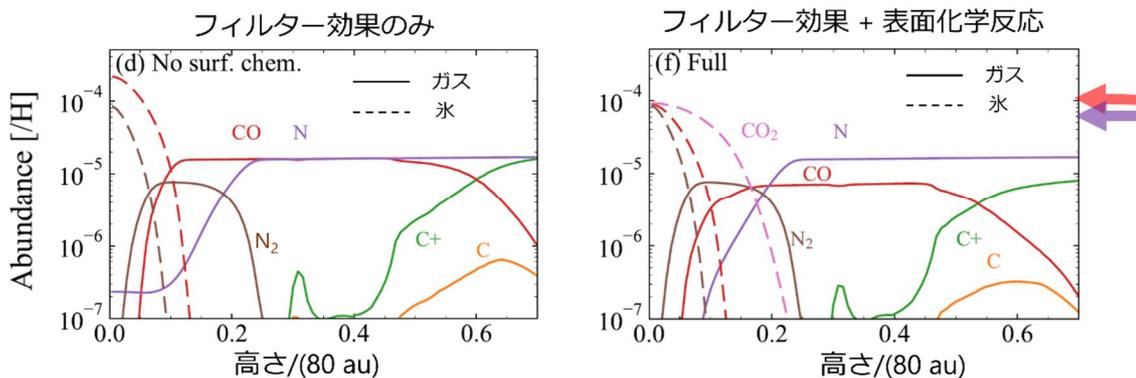


図1. 中心星から80auの位置における、計算開始から100万年後の原子・分子組成の鉛直分布。左図はフィルター効果と気相化学反応のみを考慮した場合。右図はさらに固体表面化学反応も考慮した場合 (Furuya et al. 2022, ApJ, 938, 29の図を改変)。

(2) 円盤赤道面氷の同位体組成進化

これまでのALMA観測により、中心星からのX線や紫外線にさらされる円盤表層ガスでは活発な揮発性元素(水素、炭素、窒素)の同位体分別が起きることが分かっている。一方、中心星放射が遮蔽された円盤赤道面では同位体分別は不活性と理論的に考えられている。そのため太陽系の始原的な固体物質(彗星・隕石)にみられる揮発性元素同位体分別は分子雲起源が有力とされてきた。しかし、円盤表層ガス中での同位体分別が乱流輸送により赤道面の固体物質へと伝わる可能性がある。この過程を定量的に評価し、太陽系始原物質の同位体比の起源を再考することを目的に、同位体化学を考慮できるように上述のモデルを拡張し、円盤上層物質の赤道面への輸送が円盤赤道面の水氷同位体組成に与える影響について解析を進めた。

その結果、円盤表層で駆動される同位体分別が赤道面の水氷の水素および酸素同位体比に与える影響は小さく、円盤内での同位体分別のみでは彗星氷で観測される水の同位体比を説明するのは困難であることが分かった。一方、分子雲形成段階の化学進化についても数値計算を行い、分子雲における同位体分別により彗星氷で観測される水分子の同位体比は容易に再現できることも分かった。以上のことから、円盤内における水分子の同位体比の変化は小さく、彗星氷の水は母体分子雲起源である可能性が高いことが分かった。

(3) 原始惑星系円盤における酸素同位体組成

ALMA観測により HC^{18}O^+ 分子を原始惑星系円盤で初検出した (図2)。それをを用いて円盤ガス中の一酸化炭素(CO)の酸素同位体組成を制約した。太陽系始原物質中の酸素同位体組成を説明する理論によれば円盤ガス中の一酸化炭素は重い同位体に枯渇しているはずであるが、我々の観測からはそのような兆候は見られなかった。酸素同位体分別には紫外線環境が重要な要因であることが示唆された。

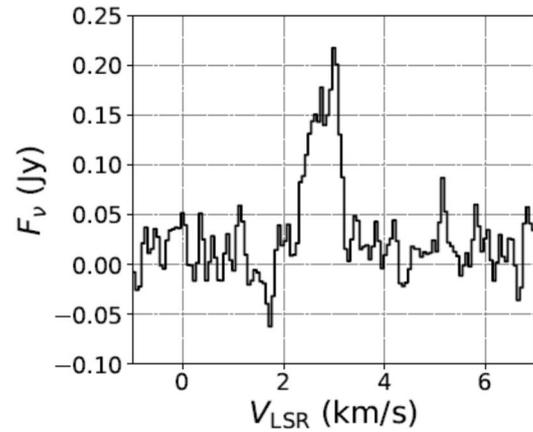


図2. TW Hya 周りの原始惑星系円盤で検出された HC^{18}O^+ 輝線 (Furuya et al. 2022, ApJ, 926, 148 の図を改変)

(4) 原始星アウトバースト天体における水のD/H比の観測

ALMA観測により、原始星アウトバースト天体周りの星周円盤についてスノーライン内側の水のD/H比を初めて測定した。得られたD/H比を彗星などの異なる進化段階の天体に含まれる水のD/H比と比較することで、彗星や円盤の水は星形成前の分子雲段階で作られたものであることが明らかになった。この観測結果は(2)の数値計算より得られた結果と調和出来である。

(5) 星間化学モデルにおける表面反応の不定性

星間化学モデルにおける表面反応の不定性が気相・固相上の化学種の存在量予測にどの程度不定性を与えるかを評価し、その結果を学術論文として出版した。10 K程度の低温であれば水素付加反応が卓越するためモデルの不定性は小さいが、数十Kではラジカル種の拡散速度の不定性が結果の不定性(特に有機分子の組成)に大きく影響することが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 7件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Furuya Kenji, Hama Tetsuya, Oba Yasuhiro, Kouchi Akira, Watanabe Naoki, Aikawa Yuri | 4. 巻 933 |
| 2. 論文標題 Diffusion Activation Energy and Desorption Activation Energy for Astrochemically Relevant Species on Water Ice Show No Clear Relation | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L16 ~ L16 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac78e9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Furuya Kenji, Tsukagoshi Takashi, Lee Seokho | 4. 巻 932 |
| 2. 論文標題 A New Method for Direct Measurement of Isotopologue Ratios in Protoplanetary Disks: A Case Study of the $^{12}\text{CO}/^{13}\text{CO}$ Ratio in the TW Hya Disk | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 126 ~ 126 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6efb | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Furuya Kenji, Lee Seokho, Nomura Hideko | 4. 巻 938 |
| 2. 論文標題 Different Degrees of Nitrogen and Carbon Depletion in the Warm Molecular Layers of Protoplanetary Disks | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 29 ~ 29 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9233 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Yoshida Tomohiro C., Nomura Hideko, Tsukagoshi Takashi, Furuya Kenji, Ueda Takahiro | 4. 巻 937 |
| 2. 論文標題 Discovery of Line Pressure Broadening and Direct Constraint on Gas Surface Density in a Protoplanetary Disk | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L14 ~ L14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac903a | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Tobin John J., van 't Hoff Merel L. R., Leemker Margot, van Dishoeck Ewine F., Paneque-Carreno Teresa, Furuya Kenji, Harsono Daniel, Persson Magnus V., Cleeves L. Ilseidore, Sheehan Patrick D., Cieza Lucas | 4. 巻 615 |
| 2. 論文標題 Deuterium-enriched water ties planet-forming disks to comets and protostars | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Nature | 6. 最初と最後の頁 227 ~ 230 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-022-05676-z | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Yamato Yoshihide, Furuya Kenji, Aikawa Yuri, Persson Magnus V., Tobin John J., Jorgensen Jes K., Kama Mihkel | 4. 巻 941 |
| 2. 論文標題 The First Interferometric Measurements of NH ₂ /NH ₃ Ratio in Hot Corinos | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 75 ~ 75 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9ea5 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Furuya Kenji, Tsukagoshi Takashi, Qi Chunhua, Nomura Hideko, Cleeves L. Ilseidore, Lee Seokho, Yoshida Tomohiro C. | 4. 巻 926 |
| 2. 論文標題 Detection of HC ₁₈₀₊ in a Protoplanetary Disk: Exploring Oxygen Isotope Fractionation of CO | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 148 ~ 148 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac45ff | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Furuya Kenji, Oba Yasuhiro, Shimonishi Takashi | 4. 巻 926 |
| 2. 論文標題 Quantifying the Chemical Desorption of H ₂ S and PH ₃ from Amorphous Water-ice Surfaces | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 171 ~ 171 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4260 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Aikawa Yuri, Cataldi Gianni, Yamato Yoshihide et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). XIII. HCO+ and Disk Ionization Structure | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 13~13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac143c | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------|
| 1. 著者名 Le Gal Romane, Oberg Karin I., Teague Richard et al. (et al. (including Kenji Furuya)) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). XII. Inferring the C/O and S/H Ratios in Protoplanetary Disks with Sulfur Molecules | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 12~12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac2583 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Cataldi Gianni, Yamato Yoshihide, Aikawa Yuri et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). X. Studying Deuteration at High Angular Resolution toward Protoplanetary Disks | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 10~10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac143d | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Bosman Arthur D., Alarcon Felipe, Bergin Edwin A et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). VII. Substellar O/H and C/H and Superstellar C/O in Planet-feeding Gas | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 7~7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1435 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Zhang Ke, Booth Alice S., Law Charles J. et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). V. CO Gas Distributions | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 5~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1580 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Law Charles J., Teague Richard, Loomis Ryan A. et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). IV. Emission Surfaces and Vertical Distribution of Molecules | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 4~4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1439 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Law Charles J., Loomis Ryan A., Teague Richard et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). III. Characteristics of Radial Chemical Substructures | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 3~3 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1434 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Oberg Karin I., Guzman Viviana V., Walsh Catherine et al. (including Kenji Furuya) | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Molecules with ALMA at Planet-forming Scales (MAPS). I. Program Overview and Highlights | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series | 6. 最初と最後の頁 1~1 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ac1432 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 古家健次、塚越崇、Chunhua Qi、野村英子、Ilse Cleeves、Seokho Lee、吉田有宏 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤におけるHC180+分子の初検出：円盤COガスの酸素同位体組成への制約 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 古家健次、Seokho Lee、野村英子 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤ガスにおけるC, N, O元素の枯渇 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古家健次 |
| 2. 発表標題 No clear relation between diffusion activation energy and desorption activation energy for astrochemically relevant species on amorphous water ice |
| 3. 学会等名 計算アストロバイオロジー2022（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古家健次、Seokho Lee、野村英子 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤ガスにおける炭素・窒素・酸素の非一様な枯渇 |
| 3. 学会等名 日本惑星科学会2022年秋季講演会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 古家健次 |
| 2. 発表標題 Chemistry and transport of volatiles in protoplanetary disks |
| 3. 学会等名 Dust-Ice-Gas (DIG) Astrochemistry (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 古家健次 |
| 2. 発表標題 Chemistry in protoplanetary disks: modeling perspective |
| 3. 学会等名 Molecules in Extreme Environments: Near and Far (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 古家健次、Seokho Lee、野村英子 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤ガスの揮発性元素枯渇 |
| 3. 学会等名 新学術領域「星・惑星形成」2022年度大研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 古家健次 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤の化学：MAPSプロジェクトの成果 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 古家健次 |
| 2. 発表標題 原始惑星系円盤におけるHC180+輝線の検出 |
| 3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kenji Furuya |
| 2. 発表標題 Detection of HC180+ in a protoplanetary disk: exploring oxygen isotope fractionation of CO |
| 3. 学会等名 East Asia ALMA Science Workshop 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenji Furuya |
| 2. 発表標題 Quantifying the chemical desorption of H2S and PH3 from water ice surface |
| 3. 学会等名 Workshop on interstellar matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|