

令和 4 年 4 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21887

研究課題名(和文)氷と非晶質ケイ酸塩の光化学反応による低温での含水ケイ酸塩生成

研究課題名(英文)Formation of hydrous silicate by photochemical reaction between ice and amorphous silicate at low temperatures

研究代表者

香内 晃(Kouchi, Akira)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：60161866

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：非晶質氷をまとった非晶質ケイ酸塩の超微粒子に紫外線を照射して、含水鉱物が生成されるかどうかを調べる実験を、冷却ホルダーのついた透過型電子顕微鏡を用いて10Kおよび82Kで行った。非晶質ケイ酸塩は、 Mg_2SiO_4 、 $MgSiO_3$ 、GEM組成の超微粒子を熱プラズマ法で作製した。 Mg_2SiO_4 微粒子を用いた82Kの実験のみで結晶の生成が確認され、それ以外の温度・物質では何の変化も観察されなかった。高分解能透過型電子顕微鏡を用いて生成物を詳細に観察したところ、生成物はカンラン石であることが分かった。カンラン石の生成には、氷に紫外線が照射されてできたOHラジカルが関与していることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原始惑星系における含水鉱物の生成は、地球型惑星の水の起源と関連するので、大変重要な課題である。これまでは非晶質珪酸塩と水蒸気の反応によって高温で含水鉱物が生成されると考えられてきた。今回の研究では、氷に紫外線を照射して生成されるOHラジカルによって、82Kという低温にもかかわらず非晶質珪酸塩が結晶化することが見出された。このことはOHラジカルと非晶質珪酸塩が反応して低温でも含水鉱物が生成される可能性があることを示したもので、今後の研究の展開に大きな期待を持たせる成果である。

研究成果の概要(英文)：To understand the formation mechanism of OH-bearing silicate at low temperatures, UV-irradiation experiments onto amorphous ice-covered amorphous silicate using a cryogenic transmission electron microscope. Three kind of amorphous silicate fine particles (Mg_2SiO_4 , $MgSiO_3$, and GEMS composition) were made by thermal plasma method. The formation of crystals was observed only when Mg_2SiO_4 particles were used at 82 K. None of formation was observed when $MgSiO_3$ and GEMS particles were used. Crystals formed from amorphous Mg_2SiO_4 particles was identified using another high-resolution transmission electron microscope to be forsterite. It has been suggested that OH radicals formed by the photolysis of water molecules plays an essential role on the formation of forsterite.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：非晶質珪酸塩 含水鉱物 氷 紫外線 低温 光化学反応 結晶化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

低温の星間分子雲から原始太陽系外縁部には、非晶質ケイ酸塩を核としそれを氷 (H_2O が主成分で他に、 CO 、 NH_3 等が不純物として含まれている) が覆っている微粒子が存在する。この氷には常に紫外線が照射されて分子の分解が起こっている。たとえば、 $\text{H}_2\text{O} + \text{UV} \rightarrow \text{OH} + \text{H}$ 。この OH はラジカル (遊離基) であり、不対電子を持っているので非常に反応性が高い。光分解で生成される OH ラジカルは非常に大きなエネルギーを持っている ($400 \text{ kJ/mol} = 5 \text{ eV} = 50,000 \text{ K}$)。いっぽう、非晶質ケイ酸塩と水蒸気との反応の活性化エネルギーは、 20 kJ/mol と推定されている。したがって、OH ラジカルは、 $10 \sim 150 \text{ K}$ 程度の低温でも、非晶質ケイ酸塩と反応して含水ケイ酸塩を作る可能性がある。

2. 研究の目的

本研究計画では、非晶質氷をまとった非晶質珪酸塩に紫外線を照射して、どのような反応が起こるかを実験的に調べる。この結果を基に、宇宙での含水ケイ酸塩生成の描像を抜本的に見直す。これまで氷とケイ酸塩の相互作用の研究は全くなく (誰も低温で氷とケイ酸塩が反応するとは考えていなかった)、非常に新規性の高い研究計画である。この結果は、地球型惑星の水の起源に関する議論に極めて大きな影響を与えるだろう。

3. 研究の方法

- ・非晶質ケイ酸塩の超微粒子 (Mg_2SiO_4 および MgSiO_3) を、熱プラズマ法で作製する。非晶質ケイ酸塩薄膜 (Mg_2SiO_4 および MgSiO_3) はマグネトロンスパッタリング法で作製する。
- ・低温に冷却した非晶質ケイ酸塩 (超微粒子および薄膜) の上に氷を作り、それに重水素ランプからの紫外線を照射する。紫外線照射温度は、星間分子雲を想定した 10 K と原始太陽系円盤を想定した 80 K とする。紫外線照射中の組織・構造の変化を超高真空透過型電子顕微鏡 (JEM-2100VL) で、また、赤外線吸収スペクトルの変化を高感度反射赤外線分光法で調べる。
- ・実験の結果を解釈し、非晶質珪酸塩と OH ラジカルとの反応機構を議論する。この結果を元に、宇宙 (星間分子雲及び原始太陽系円盤) での含水鉱物の生成過程を議論する。

4. 研究成果

4-1. 非晶質ケイ酸塩の超微粒子作製

非晶質ケイ酸塩の超微粒子を熱プラズマ法で作製した。作製した微粒子の組成は以下の通りである。 Mg_2SiO_4 、 MgSiO_3 、彗星塵に含まれる GEMS 類似組成 (図 1 参照)。さらに、2 種類の非晶質ケイ酸塩薄膜試料 (Mg_2SiO_4 、 MgSiO_3) を赤外線観察用の Al 基板の上にスパッタリング法で作製した。

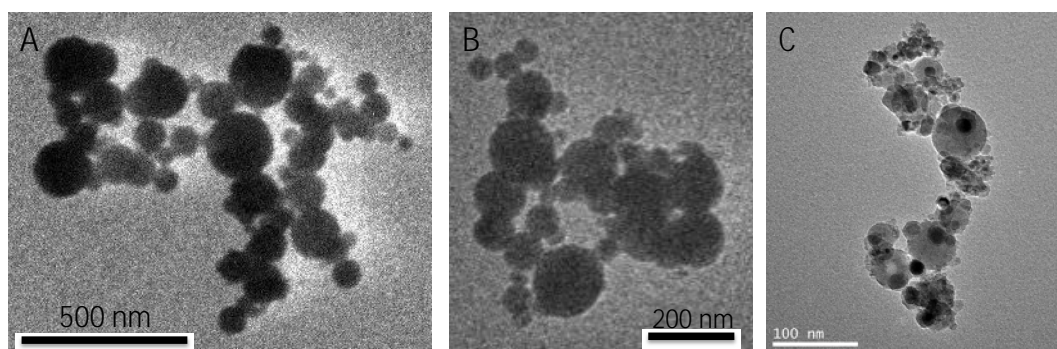


図 1. 熱プラズマ法で作製した非晶質珪酸塩微粒子。(A): Mg_2SiO_4 , (B): MgSiO_3 , (C): GEMS 組成

4-2. 超高真空透過型電子顕微鏡を用いた光照射過程のその場観察

超高真空透過型電子顕微鏡 (JEM-2100VL) の試料薄膜上に、非晶質ケイ酸塩超微粒子をのせ、それを 10 K または 80 K に冷却し、その上に氷を蒸着した。それに重水素ランプからの紫外線を照射し、非晶質ケイ酸塩超微粒子の構造変化をその場観察した。その結果、非晶質 MgSiO_3 および GEMS 組成試料では何の変化も観察されなかった。一方、非晶質 Mg_2SiO_4 では、 10 K では何の変化も観察されなかったが、 82 K では、最初是非晶質のみであったが、時間とともに結晶の回折斑点が増加し、結晶の生成を確認できた (図 2)。



図2 . 82 K で非晶質 Mg_2SiO_4 を非晶質氷を覆い、それに紫外線を照射している時の電子回折像の時間変化 .

4-3. 生成物の同定

4-2 の実験では生成物を同定できなかったので、同一試料を、高分解能透過型電子顕微鏡 (JEM-2100F) を用いて生成物を同定した (図3) . これは、超高真空透過型電子顕微鏡で用いた試料冷却ホルダーを、温度が常温に戻った後に、高分解能透過型電子顕微鏡でもそのまま用いることで実現した . 電子回折像から、生成された結晶 (強い電子回折斑点を与える結晶) は、brucite や serpentine などの含水鉱物ではなく、カンラン石 (forsterite) であることが判明した . 暗視野像から非晶質 Mg_2SiO_4 の表面だけが結晶化していることが明らかになった .

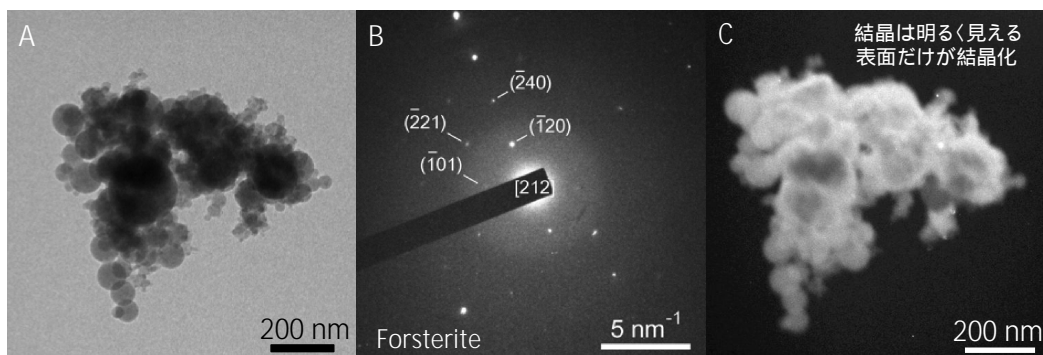
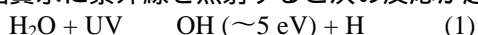


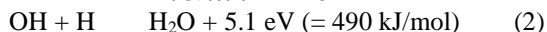
図3 . 常温で観察した試料の TEM 像 (A : 明視野像, C : 暗視野像) および電子回折像 (B) .

4-4. 反応機構

非晶質氷に紫外線を照射すると次の反応が起こる .



これらのラジカルが再結合する時には



となる . ラジカルが再結合する時の 5.1 eV で非晶質 Mg_2SiO_4 の結晶化が進行したと推定される . これは、これまで推定されてきた非晶質 Mg_2SiO_4 の結晶化の活性化エネルギー (300-400 kJ/mol) より大きく、結晶化を促進したと考えられる . 一方、非晶質 $MgSiO_3$ のおよび GEMS 組成試料の結晶化の活性化エネルギーは、それぞれ、 $\sim 900 \text{ kJ/mol}$ と $>900 \text{ kJ/mol}$ であり、結晶化が起こらないことを説明できる . さらに、10 K では反応が起きず、82 K だけで反応が起きたことは、OH ラジカルの動きやすさの温度依存性によって説明できる . すなわち、10 K では(2)の反応がほとんど進まないのに対して、82 K では(2)の反応が進行したと考えられる .

4-5. 薄膜を用いた実験

Al 基板の上にスパッタリング法で作製した非晶質ケイ酸塩薄膜試料 (Mg_2SiO_4 に近い組成) 上に非晶質氷を蒸着し、それに重水素ランプからの紫外線を照射し、赤外線吸収スペクトルの変化を観察する実験を 10 K でおこなった . この実験でも、非晶質ケイ酸塩の赤外線スペクトルの変化は観察されなかった .

4-6. まとめ

本研究では、含水鉱物生成の直接証拠を見出すことはできなかった . 透過型電子顕微鏡では検出できるのは 4 分子層以上の生成がある場合に限られるので、本研究結果をもって、含水鉱物の生成を否定するものではない . 今後、一分子層以下の検出感度を持つ分析手法で界面を分析する必要がある . また、結晶化を起こさない程度の低エネルギーの OH ラジカルを使うことも有効であろう .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 24件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 6件）

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 Kouchi A., Kimura Y., Kitajima K., Katsuno H., Hidaka H., Oba Y., Tsuge M., Yamazaki T., Fujita K., Hama T., Takahashi Y., Nakatsubo S., Watanabe N. | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 UV-Induced formation of ice XI observed using an ultra-high vacuum cryogenic transmission electron microscope and its implications for planetary science | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Chemistry | 6. 最初と最後の頁 799851(13pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fchem.2021.799851 | 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 Nguyen T., Oba Y., Sameera W. M. C., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 922 |
| 2. 論文標題 Successive H-atom addition to solid OCS on compact amorphous solid water | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 146(13pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac2238 | 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 - |
| 1. 著者名 Ishibashi A., Hidaka H., Oba Y., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 921 |
| 2. 論文標題 Efficient formation pathway of methyl formate: The role of OH radicals on ice dust | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L13(9pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac3005 | 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 Nguyen T., Oba Y., Sameera W. M. C., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 918 |
| 2. 論文標題 Experimental and computational studies on the physicochemical behavior of phosphine induced by reactions with H and D atoms on interstellar ice grains | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 73(15pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0cf4 | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Kouchi A., Tsuge M., Hama T., Oba Y., Okuzumi S., Sirono S., Momose M., Nakatani N., Furuya K., Shimonishi T., Yamazaki T., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Fujita K., Nakatsubo S., Tachibana S., Watanabe N. | 4. 巻 918 |
| 2. 論文標題 Transmission electron microscopy study of the morphology of ices composed of H ₂ O, CO ₂ , and CO on refractory grains | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 45(20pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0ae6 | 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 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Kouchi A., Tsuge M., Hama T., Niinomi H., Nakatani N., Shimonishi T., Oba Y., Kimura Y., Sirono S., Okuzumi S., Momose M., Furuya K., Watanabe N. | 4. 巻 505 |
| 2. 論文標題 Formation of chiral CO polyhedral crystals on icy interstellar grains | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 1530 ~ 1542 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stab1173 | 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 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Tsuge M., Namiyoshi T., Furuya K., Yamazaki T., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 908 |
| 2. 論文標題 Rapid ortho-to-para nuclear spin conversion of H ₂ on a silicate dust surface | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 234 (9pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd9c0 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Sameera W. M. C., Senevirathne B., Andersson S., Al-Ibadi M., Hidaka H., Kouchi A., Nyman G., Watanabe N. | 4. 巻 125 |
| 2. 論文標題 CH ₃ O radical binding on hexagonal water ice and amorphous solid water | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry A | 6. 最初と最後の頁 387-393 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpca.0c09111 | 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 Kitajima K., Nakai Y., Sameera W.M.C., Tsuge M., Miyazaki A., Hidaka H., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Delivery of electrons by proton-hole transfer in ice at 10 K: Role of surface OH radicals | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters | 6. 最初と最後の頁 704-710 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c03345 | 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 - |

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 Miyazaki A., Watanabe N., Sameera W. M. C., Nakai Y., Tsuge M., Hama T., Hidaka H., Kouchi A. | 4. 巻 102 |
| 2. 論文標題 Photostimulated desorption of OH radicals from amorphous solid water : Evidence for the interaction of visible light with an OH-ice complex | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 052822(10pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physreva.102.052822 | 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 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Tsuge M., Hidaka H., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 900 |
| 2. 論文標題 Diffusive hydrogenation reactions of CO embedded in amorphous solid water at elevated temperatures ~70K | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 187 (7pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abab9b | 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 - |

| | |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名 Tsuge M., Nguyen T., Oba Y., Hama T., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 760 |
| 2. 論文標題 UV-ray irradiation never causes amorphization of crystalline CO2: A transmission electron microscopy study | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 137999 (6pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpllett.2020.137999 | 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 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Hama T., Ishibashi A., Kouchi A., Watanabe N., Shioya N., Shimoaka T., Hasegawa T. | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Quantitative anisotropic analysis of molecular orientation in amorphous N2O at 6 K by infrared multiple-angle incidence resolution spectrometry | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters | 6. 最初と最後の頁 7857-7866 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c01585 | 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 - |

| | |
|--|----------------------------|
| 1. 著者名 Hama T., Kouchi A., Watanabe N., Shioya N., Shimoaka T., Hasegawa T. | 4. 巻 266 |
| 2. 論文標題 In vivo characterization of the structures of films of a fatty acid and an alcohol adsorbed on the skin surface | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Biophysical Chemistry | 6. 最初と最後の頁 106459(14pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bpc.2020.106459 | 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 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Nguyen T., Oba Y., Shimonishi T., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 898, |
| 2. 論文標題 An experimental study of chemical desorption for phosphine in interstellar ice | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L52(6pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aba695 | 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 Niinomi H., Yamazaki T., Nada H., Hama T., Kouchi A., Okada J.T., Nozawa J., Uda S., Kimura Y. | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 High-density liquid water at a water-ice interface | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters | 6. 最初と最後の頁 6779-6784 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.0c01907 | 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 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Nakano H., Hirakawa N., Matsubara Y., Yamashita S., Okuchi T., Asahina K., Tanaka R., Suzuki N., Naraoka H., Takano Y., Tachibana S., Hama T., Oba Y., Kimura Y., Watanabe N., Kouchi A. | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Precometary organic matter : A hidden reservoir of water inside the snow line | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Scientific Reports | 6. 最初と最後の頁 7755(13pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-64815-6 | 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 Kouchi A., Furuya K., Hama T., Chigai T., Kozasa T., Watanabe N. | 4. 巻 891 |
| 2. 論文標題 Direct measurements of activation energies for surface diffusion of CO and CO2 on amorphous solid water using in situ transmission electron microscopy | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L22(7pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab78a2 | 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 Takekoshi T., ..., Kouchi A., ..., Endo A. | 4. 巻 199 |
| 2. 論文標題 DESHIMA on ASTE: On-sky responsivity calibration of the integrated superconducting spectrometer | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics | 6. 最初と最後の頁 231-239 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-020-02338-0 | 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 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Watanabe N., Sameera W. M. C., Hidaka H., Miyazaki A., Kouchi A. | 4. 巻 737 |
| 2. 論文標題 Ultraviolet-photon exposure stimulates negative current conductivity in amorphous ice below 50 K | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Chemical Physics Letters | 6. 最初と最後の頁 136820(7pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2019.136820 | 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 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Endo A., ..., Kouchi A., ... Baselmans J. J. A. | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 First light demonstration of the integrated superconducting spectrometer | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature Astronomy | 6. 最初と最後の頁 989-996 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-019-0850-8 | 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 - |

| | |
|---|--------------------|
| 1. 著者名 Oba Y., Takano Y., Naraoka H., Watanabe N., Kouchi A. | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Nucleobase synthesis in interstellar ices | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Nature Communications | 6. 最初と最後の頁 4413 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-12404-1 | 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 Hama T., Seki K., Ishibashi A., Miyazaki A., Kouchi A., Watanabe N., Shimoaka T., Hasegawa T. | 4. 巻 60 |
| 2. 論文標題 Probing the molecular structure and orientation of the leaf surface of brassica oleracea L. by polarization modulation-infrared reflection-absorption spectroscopy | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Plant Cell Physiology | 6. 最初と最後の頁 1567-1580 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pcp/pcz063 | 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 - |

| | |
|--|------------------------|
| 1. 著者名 Oba Y., Tomaru T., Kouchi A., Watanabe N. | 4. 巻 874 |
| 2. 論文標題 Physico-chemical behavior of hydrogen sulfide induced by reactions with H and D atoms on different types of ice surfaces at low temperature | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 124(8pp) |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0961 | 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 - |

[学会発表] 計31件(うち招待講演 5件/うち国際学会 18件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tsuge M., Hidaka H., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Diffusive hydrogenation of CO embedded in amorphous solid water at temperature up to 70 K |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tsuge M., Namiyoshi T., Furuya K., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Ortho-to-para nuclear spin conversion of H ₂ on interstellar bare grain analogues |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nguyen T., Oba Y., Sameera W.M.C., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Experimental and computational studies on the physicochemical behavior of phosphine induced by reactions with H and D atoms on interstellar ice grains |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kitajima K., Nakai Y., Sameera W. M. C., Tsuge M., Miyazaki A., Hidaka H., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 A new electrochemical property of ice: negative charge transport triggered by reactions of surface OH radicals with electrons |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ishibashi A., Hidaka H., Oba Y., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Water-promoted formation of methyl formate from methanol via methoxymethanol on ice |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tsuge M., Kouchi A., Hama T., Oba Y., Okuzumi S., Sirono S., Momose M., Nakatani N., Furuya K., Shimonishi T., Yamazaki T., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Tachibana S., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Icy grains are not spherical nor ellipsoidal |
| 3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石橋篤季, 日高宏, 大場康弘, 香内晃, 渡部直樹 |
| 2. 発表標題 超高感度表面分析法による低温氷表面に吸着したメタノールからの効率的なギ酸メチル生成過程の解明 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 北島 謙生, 中井 陽一, 柘植 雅士, 日高 宏, 香内 晃, 渡部 直樹 |
| 2. 発表標題 極低温の氷と NH ₃ , H ₂ S 固体の界面における負電荷移動機構 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第46回年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 新家 寛正, 山崎 智也, 灘 浩樹, 羽馬 哲也, 香内 晃, 岡田 純平, 野澤 純, 宇田 聡, 木村 勇気 |
| 2. 発表標題 水中の氷III結晶表面に見られた新しい水 |
| 3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2021 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 石橋 篤季, 日高 宏, 大場 康弘, 香内 晃, 渡部 直樹 |
| 2. 発表標題 氷表面におけるメタノールの光化学反応生成物の高感度分析 |
| 3. 学会等名 第15回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮崎 彩音, 渡部 直樹, 柘植 雅士, W.M.C. Sameera, 日高 宏, 香内 晃 |
| 2. 発表標題 低温H ₂ O氷表面でのOHラジカルの拡散 |
| 3. 学会等名 第15回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 柘植 雅士, 宮崎 彩音, W.M.C. Sameera, 中井 陽一, 羽馬 哲也, 日高 宏, 香内 晃, 渡部 直樹 |
| 2. 発表標題 低温H ₂ O氷表面からのOHラジカルの可視光脱離過程 |
| 3. 学会等名 第15回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 羽馬 哲也, 石橋 篤季, 香内 晃, 渡部 直樹, 塩谷 暢貴, 下赤 卓史, 長谷川 健 |
| 2. 発表標題 赤外多角入射分解分光法によるアモルファス分子性固体の構造解析 |
| 3. 学会等名 第15回分子科学討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Oba Y., Tomaru T., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Laboratory studies on the hydrogen-deuterium substitute on of hydrogen sulfide on ice surfaces at low temperatures |
| 3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Oba Y., Takano Y., Naraoka H., Watanabe N., Kouchi A. |
| 2. 発表標題 Recent advances in analytical techniques for the identification of specific coms in photochemically-processed interstellar ice analogs |
| 3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly 2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Watanabe N., Tsuge M., Namiyoshi T., Kouchi A. |
| 2. 発表標題 Experimental approach to fast ortho to para nuclear spin conversion of hydrogen molecule on dust grain analogues |
| 3. 学会等名 43rd COSPAR Scientific Assembly 2020 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 香内 晃, 大場 康弘, 羽馬 哲也, 山崎 智也, 木村 勇気, 渡部 直樹, 橘 省吾, 城野 信一, 奥住 聡, 百瀬 宗武, 古家 健次 |
| 2. 発表標題 アモルファスH ₂ O, CO, CO ₂ の結晶化によるダスト上での不均質な多面体氷結晶の生成 |
| 3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石橋篤季, 日高宏, 大場康弘, 羽馬哲也, 香内晃, 渡部直樹 |
| 2. 発表標題 低温氷表面上に存在する微量ラジカルの非破壊検出装置の開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Miyazaki, A., Watanabe, N., Sameera, W.M.C., Hama, T., Hidaka, H., Kouchi, A. |
| 2. 発表標題 Surface diffusion of OH radical on amorphous solid water |
| 3. 学会等名 IAU Symposium 350 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hama T., Tachibana S., Kouchi A., Oba Y., Piani L., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Yurimoto H., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Liquid-like behavior of water ice induced by vacuum ultraviolet irradiation at low temperatures |
| 3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hama T., Seki K., Ishibashi A., Miyazaki A., Kouchi A., Watanabe N., Shimooka T., Hasegawa T. |
| 2. 発表標題 Probing the molecular structure of the intact leaf cuticle by polarization modulation-infrared reflection-absorption spectroscopy |
| 3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tsuge M., Hama T., Kimura Y., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 H ₂ formation on a low-temperature diamondlike carbon surface |
| 3. 学会等名 35th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Oba Y., Takano Y., Naraoka H., Watanabe N., Kouchi A. |
| 2. 発表標題 Synthesis of Nitrogen Heterocycles of Astrobiological Interest in Interstellar Ice Analogs |
| 3. 学会等名 2019 Astrobiology Science Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hidaka H., Yarnall Y., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Reactive desorption of methanol from amorphous solid water at 10K |
| 3. 学会等名 The 12th meeting on cosmic dust (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Oba Y., Takano Y., Naraoka H., Watanabe N., Kouchi A. |
| 2. 発表標題 Detection of nucleobases dipeptides in organic residues formed by photochemical reactions in interstellar ice analogs |
| 3. 学会等名 Goldschmidt 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ishibashi A., Oba Y., Hama T., Kouchi A., Watanabe N. |
| 2. 発表標題 Inversion of surface voltage on H ₂ O films affection sublimation of CO underlayer |
| 3. 学会等名 ACS National Meeting & Expo (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Miyazaki A., Watanabe N., Sameera W.M.C., Hama T., Hidaka H., Kouchi A. |
| 2. 発表標題 Activation energy of OH-radical diffusion on water ice surface |
| 3. 学会等名 ACS National Meeting & Expo (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 香内晃, 木村勇氣, 大場康弘, 羽馬哲也, 渡部直樹, 橘省吾, 土山明, 延寿里美, 大坪貴文 |
| 2. 発表標題 アモルファスMg ₂ SiO ₄ 微粒子を覆った氷の光化学反応によるフォルステライト結晶の生成 |
| 3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大場康弘, 高野淑識, 奈良岡浩, 渡部直樹, 香内晃 |
| 2. 発表標題 星間分子雲における化学進化: 単純分子から核酸塩基生成へ |
| 3. 学会等名 第37回有機地球化学シンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 石橋篤季, 日高宏, 大場康弘, 羽馬哲也, 香内晃, 渡部直樹 |
| 2. 発表標題 低温氷表面吸着物質の高感度非破壊質量分析装置の開発 |
| 3. 学会等名 原子衝突学会第 44 回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 大場 康弘, 高野 淑識, 奈良岡 浩, 渡部 直樹, 香内 晃 |
| 2. 発表標題 模擬星間塵氷の光化学反応による核酸塩基生成 |
| 3. 学会等名 日本地球化学会第66回年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙物質科学・宇宙雪氷学グループ
<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/index.html>

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 |
|---------|---------|