

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 4 月 25 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04072

研究課題名(和文) 星間アモルファス氷の普遍的な過冷却液体化の可能性とその物性

研究課題名(英文) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar amorphous ice and its physical properties

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) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：不純物分子を含むアモルファス氷は星間分子雲や原始惑星系円盤に最も大量に存在する固体物質である。それに紫外線が照射されると、アミノ酸、糖、核酸塩基などが生成されることが知られている。しかし、紫外線の照射を受けた氷の物性に関しては研究がなかった。そこで、本研究では、アモルファス氷に10Kで紫外線を照射し、それを加熱する際の変化を光学顕微鏡および透過型電子顕微鏡で観察した。その結果、不純物を含む氷では65～150Kで、アモルファスH₂O氷では50-140Kで、液体的挙動をすることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、アモルファス氷は固体であり、紫外線照射によって変化することはないと考えられてきた。しかし、本研究の発見によりこの常識は覆された。また、この結果は、液化した氷(水)中では光化学反応が格段に速く進むこと、これらの微粒子同士の付着成長が促進される可能性があることを示している。これまでの惑星科学の常識を見直す必要があることを示している。

研究成果の概要(英文)：Amorphous ices including impurity molecules is the most abundant solid component of interstellar molecular clouds and the outer cold part of protoplanetary disks. Ultraviolet (UV) photon irradiation of amorphous H₂O-dominated may play a key role in synthesizing complex organic matter, amino acids, sugars, and nucleobases. However, there has been no study on the physical properties of UV-irradiated ices. Therefore, we investigated the heating process of UV-irradiated ices using optical and electron microscopy. We found that UV-irradiated amorphous ices composed of H₂O, CH₃OH, and NH₃ and of pure H₂O show liquid-like behavior over the temperature ranges of 65 to 150 K and 50 to 140 K, respectively. This low-viscosity liquid-like ice may enhance the formation of organic compounds including prebiotic molecules and the accretion of icy grains to form icy planetesimals.

研究分野：地球惑星科学

キーワード：アモルファス氷 紫外線照射 液化 粘性

1. 研究開始当初の背景

「アモルファス氷」は、当然のことながら、「固体」であると認識されている。しかし、北大の研究グループ(橘, 香内ら)は、不純物を含むアモルファス氷($\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$)に10Kで紫外線を照射した試料を、その後、紫外線照射をやめて昇温させると、70-140Kで液体になっている可能性があることを発見した。しかし、これが、本当に液体なのか、また、氷の組成や紫外線照射の有無に関係なく起こる普遍的現象なのか、それとも紫外線照射をした特定の化学組成の場合だけに起こるのかは不明である。その理由は、液体であるかどうかを判断する際のツールとして、紫外線照射によって発生する H_2 気泡を用いただけで、物性をきちんと測定していないからである。

宇宙の条件で、 NH_3 や CH_3OH 等の不純物を含むアモルファス H_2O が固体なのか液体なのかを調べることは、本質的に重要である。それは、微粒子表面での化学反応や、微粒子の付着成長に決定的な影響を与えるからである。

2. 研究の目的

不純物を含むアモルファス氷($\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$)および純粋な H_2O だけからなるアモルファス氷に10Kで紫外線を照射し、その後の温度上昇過程で出現する可能性のある「液体」様の氷の諸物性(粘性、緩和時間、密度など)を測定し、それが液体かどうかを判断する際の情報を得る。

3. 研究の方法

超高真空中の金属基板上に10Kでアモルファス氷($\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$, 純粋な H_2O)を作製し、それに紫外線を照射する。紫外線照射を止め、氷の温度を上昇させる。この過程を種々の方法で調べ、目的に記載した諸物性を測定する。具体的には、光学顕微鏡+高速度ビデオ、透過型電子顕微鏡、および誘電率測定装置を用いる。

場合によっては、それぞれの測定方法を具体的に書く

(1) 光学顕微鏡観察

超高真空容器中の金属板を冷凍機で10Kに冷却する。 $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ を10:1:1に混合したガスを基板上に吹き付け、アモルファス氷を蒸着させる。蒸着と同時に重水素ランプからの紫外線を照射する。蒸着と紫外線照射の終了後、基板温度を上昇させる。この過程を、真空容器中の基板を高分解能で観察できる様に改造した光学顕微鏡で観察し、高速度ビデオで録画する。同時に、氷の赤外線吸収スペクトルの測定、氷から蒸発してくるガスの質量分析を行う。

(2) 透過型電子顕微鏡観察

超高真空極低温透過型電子顕微鏡を用いて、アモルファスSi薄膜上に3次元の島状のアモルファス氷を作製し、それに重水素ランプからの紫外線を照射する。紫外線照射の終了後、基板温度を上昇させ、島の形状および回折像の変化を観察する。

(3) 誘電測定

超高真空容器中に氷の薄膜を作製し、その誘電率の温度変化を測定できる装置を開発する。誘電率の周波数依存性を1m-1MHzで測定できることが望ましい。

4. 研究成果

(1) 光学顕微鏡観察

65Kでは、 $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ 氷にクラックが入る様子が観察され、固体であることが確認できた。

ところが、70K以上では、泡の発生が観察され(図1)、 $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ が液体的な挙動をすることが確認できた。泡の成分は水素分子からなっていることが、質量分析、赤外線吸収スペクトルの測定からわかった。高速度ビデオを用いた泡の成長速度の測定から粘性係数を測定すると、 10^{2-3} Pa sであり、ガラス転移温度(136 K)での値(10^{12} Pa s)と比べるとかなり小さいことがわかる。なお、この液体的挙動は、 NH_3 や CH_3OH の添加による融点降下ではない($\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$ 系の共融点は175K)。

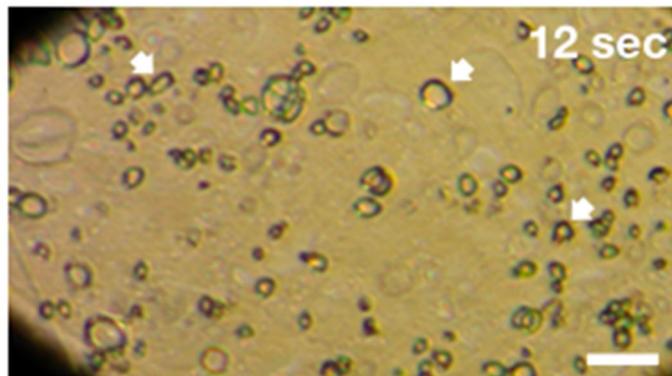


図1 紫外線照射した $\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_3:\text{CH}_3\text{OH}$ から H_2 の泡(矢印)が発生している様子。スケールは200 μm 。

(2) 透過型電子顕微鏡観察

図2に10Kで50分紫外線を照射したアモルファス氷(純粋な H_2O)の温度上昇にもなう島の形状変化を示す。この場合は、電子線照射の影響を避けるために、各温度で異なる場所を観察した。温度上昇に伴い、コントラストが一様になっていくことが

ら、島の形状が低くなり広がっていくことが分かる。島が固体であればこのような変化は観察されないはずであるが、島が液体であれば「濡れ」によって起こりうる現象である（図3）。

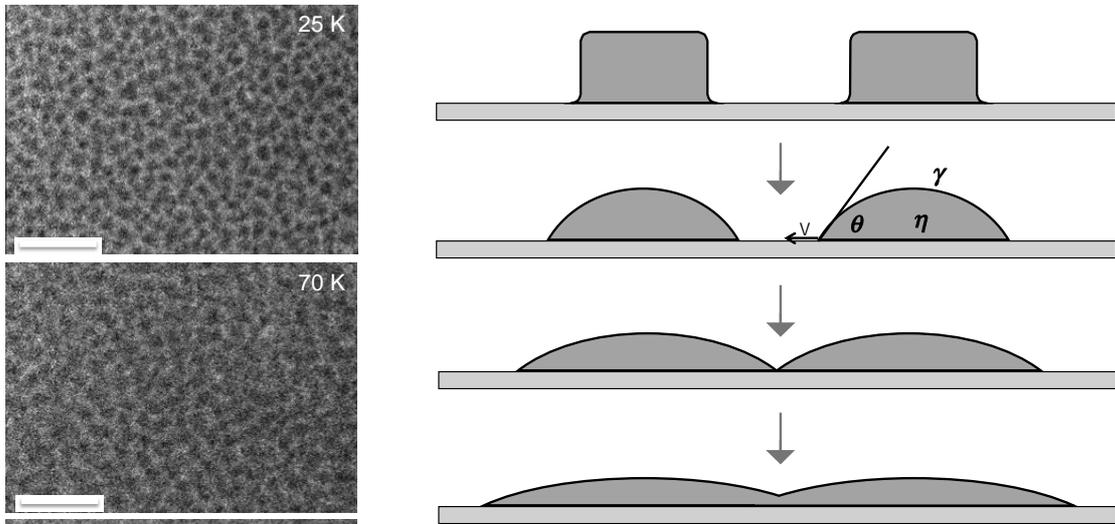


図3 濡れの進行の模式図

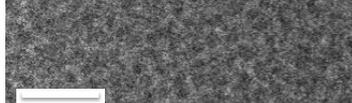


図2 紫外線照射を行なった島状のアモルファス氷が温度上昇により広がり、最終的に重なり合う様子を示す透過型電子顕微鏡像。スケールは500 nm。

紫外線を30分以上照射したアモルファス氷は50-140 Kで液体的挙動を示すことが観察されたが、10分照射の試料では液体的挙動は観察されなかった。このことから、液体的挙動を示すにはある程度の紫外線照射量が必要なことが分かった。

濡れの進行を解析することにより、粘性係数 η を見積もることができる。

$$\eta \sim \theta^3 \gamma / v$$

ここで、 θ は接触角、 γ は表面張力、 v は液滴の広がる速度である。得られた粘性係数は 10^7 Pa s程度であり非常に高粘度であるが、過冷却液体のガラス転移温度における値 10^{12} Pa sと比べると、5桁も小さい。

図4に紫外線照射をしたアモルファス氷の温度上昇にともなうd-spaceの変化を示した。この図には水蒸気の蒸着で作製したいわゆるAmorphous Solid Water (ASW)のd-spaceも示してある。この図から、液体的挙動を示している温度領域では、d-spaceがASWよりかなり小さくなっていることが分かる。液体の水あるいは過冷却水の密度とd-spaceの関係は分からないので、アモルファス氷の密度とd-spaceの関係を援用すると、液体様状態の密度は、50-90 Kでは高密度であり、90-140 Kでは低密度であるといえる。

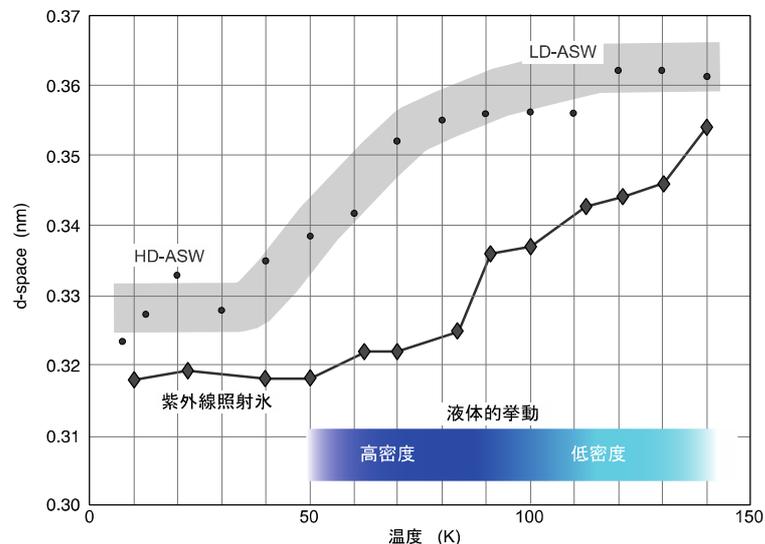


図4 紫外線照射をしたアモルファス氷の温度上昇にともなうd-spaceの変化

(3) 誘電率測定

図5に示す誘電率測定装置を製作し、安定に誘電率が測定できるようになった。しかし、誘電率の測定は1Hz以上の周波数に限られ、1Hz以下での測定には未だ実現できていない。今後、さらに試行錯誤を続けていく。

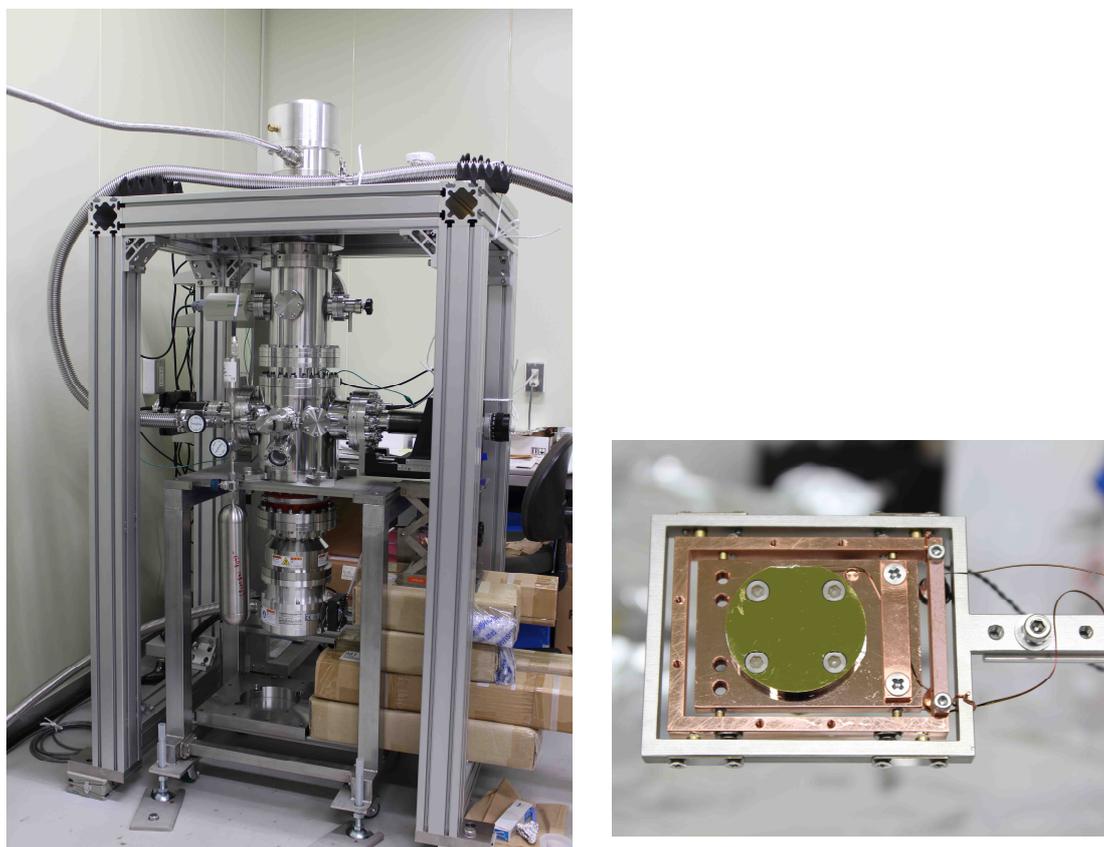


図5 製作した誘電率測定装置。左：全景，右：試料ホルダー。

(4) 惑星科学的意義

これまで、 NH_3 や CH_3OH 等の不純物を含むアモルファス H_2O は、当然のことではあるが、固体と考えられてきた。氷への紫外線照射によって種々の有機物が生成されるが、固体状態では反応速度は小さく、反応はさほど進行しないと考えられてきた。また、氷微粒子の衝突・付着の議論でも、当然固体状態を考えていた。しかし、本研究により、化学反応速度は非常に大きくなりうること、氷微粒子の付着成長がこれまでの考えよりはるかに急速に起こりうるということが指摘できる。今後の再検討が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 A. Kouchi, K. Furuya, T. Hama, T. Chigai, T. Kozasa, and N. Watanabe	4. 巻 891
2. 論文標題 Direct Measurements of Activation Energies for Surface Diffusion of CO and CO ₂ 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) https://doi.org/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 T. Takekoshi, ..., A. Kouchi, ..., Pieter J. de Visser	4. 巻 -
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 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/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 該当する
1. 著者名 N. Watanabe, W. M. C. Sameera, H. Hidaka, A. Miyazaki, A. Kouchi	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
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.cpllett.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 A. Endo, ..., A. Kouchi, ... J. A. Baselmans	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) https://doi.org/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 該当する

1. 著者名 Y. Oba, Y. Takano, H. Naraoka, N. Watanabe and A. Kouchi	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) https://doi.org/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 T. Hama, K. Seki, A. Ishibashi, A. Miyazaki, A. Kouchi, N. Watanabe, T. Shimoaka, T. Hasegawa	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) https://doi.org/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 Y. Oba, T. Tomaru, A. Kouchi, and N. Watanabe	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 Astrophys. J.	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) https://doi.org/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 -

1. 著者名 Y. Oba, T. Tomaru, A. Kouchi, N. Naoki	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 8 p p
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 オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Oshima, K. Ohtawara, T. Takekoshi ¹ , S. Ishii, N. Izumi, T. Izumi, M. Yamaguchi, S. Suzuki, K. Muraoka, A. Hirota, F. Saito, S. Nakatsubo, A. Kouchi, T. Ito, K. Uemizu, Y. Fujii, Y. Tamura, K. Kohno, R. Kawabe	4. 巻 193
2. 論文標題 Development of Multi-temperature Calibrator for the TES Bolometer Camera: Deployment at ASTE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 996-1002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-2009-x	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 T. Takekoshi, K. Ohtawara, T. Oshima, S. Ishii, N. Izumi, T. Izumi, M. Yamaguchi, S. Suzuki, K. Muraoka, A. Hirota, F. Saito, S. Nakatsubo, A. Kouchi, T. Ito, K. Uemizu, Y. Fujii, Y. Tamura, K. Kohno, R. Kawabe	4. 巻 193
2. 論文標題 Development of Multi-temperature Calibrator for the TES Bolometer Camera: System Design	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 1003-1009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10909-018-1916-1	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 Y. Kimura, M. Tsuge, V. Pirronello, A. Kouchi and N. Watanabe	4. 巻 858
2. 論文標題 Measurements of the Activation Energies for Atomic Hydrogen Diffusion on Pure Solid CO	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L23 (5pp),
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2014-8213/aac102	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 T. Hama, A. Kouchi, and N. Watanabe	4. 巻 857
2. 論文標題 The Ortho-to-para Ratio of Water Molecules Desorbed from Ice Made from Para-water Monomers at 11 K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L13 (6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aabc0c	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 Y. Oba, T. Tomaru, T. Lamberts, A. Kouchi, N. Watanabe	4. 巻 2
2. 論文標題 An infrared measurement of chemical desorption from interstellar ice analogues	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 228-232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-018-0380-9	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 香内晃, 日高宏, 羽馬哲也, 木村勇気, 渡部直樹, 中坪俊一, 藤田和之, 新堀邦夫, 池田正幸	4. 巻 80
2. 論文標題 超高真空極低温透過型電子顕微鏡の開発 氷のその場観察をめざして	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 雪氷	6. 最初と最後の頁 19-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Y. Oba, Y. Takano, H. Naraoka, A. Kouchi, N. Watanabe	4. 巻 849
2. 論文標題 Deuterium Fractionation upon the Formation of Hexamethylenetetramines through Photochemical Reactions of Interstellar Ice Analogs Containing Deuterated Methanol Isotopologues	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 9pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8ea5	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 T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe, S. Enami, T. Shimoaka, T. Hasegawa	4. 巻 121
2. 論文標題 In Situ Nondestructive Analysis of Kalanchoe pinnata Leaf Surface Structure by Polarization-Modulation Infrared Reflection-Absorption Spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry B	6. 最初と最後の頁 11124-11131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.7b09173	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 S. Tachibana, A. Kouchi, T. Hama, Y. Oba, L. Piani, I. Sugawara, Y. Endo, H. Hidaka, Y. Kimura, K. Murata, H. Yurimoto, and N. Watanabe	4. 巻 3
2. 論文標題 Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaao2538 (6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.aao2538	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 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内晃	4. 巻 59
2. 論文標題 星間塵表面における量子トンネル水素付加反応: その同位体効果と表面構造依存	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 触媒	6. 最初と最後の頁 242-248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 T. Hama, S. Ishizuka, T. Yamazaki, Y. Kimura, A. Kouchi, N. Watanabe, T. Sugimoto, V. Pirronello	4. 巻 19
2. 論文標題 Fast crystalline ice formation at extremely low temperature through water/ neon matrix sublimation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 17677-17684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C7CP03315J	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 R. Escribano, E. Artacho, A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, and N. Watanabe	4. 巻 19
2. 論文標題 Simulations and Spectra of Water in CO Matrices	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 7280-7287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C6CP08248C	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 L. Piani, S. Tachibana, T. Hama, H. Tanaka, Y. Endo, I. Sugawara, L. Dessimoulie, Y. Kimura, A. Miyake, J. Matsuno, A. Tsuchiyama, K. Fujita, S. Nakatsubo, H. Fukushi, S. Mori, T. Chigai, H. Yurimoto and A. Kouchi	4. 巻 837
2. 論文標題 Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa5ca6	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 Oba Y., Watanabe N., and Kouchi A.	4. 巻 662
2. 論文標題 Negative catalytic effect of water on the reactivity of hydrogen abstraction from the C-H bond of dimethyl ether by deuterium atoms through tunneling at low temperatures	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 14-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2016.07.058	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 羽馬哲也, 植田寛和, 渡部直樹, 香内晃	4. 巻 50
2. 論文標題 固体芳香族炭化水素への水素・重水素原子付加から探る星間塵表面反応の速度論と同位体分別	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 地球化学	6. 最初と最後の頁 33-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14934/chikyukagaku.50.33	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 A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, R. Escribano, N. Watanabe	4. 巻 658
2. 論文標題 Matrix sublimation method for the formation of high-density amorphous ice	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 287-292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2016.06.066	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 H.Ueta, N.Watanabe, T. Hama, and A. Kouchi	4. 巻 116
2. 論文標題 Surface Temperature Dependence of Hydrogen Ortho-Para Conversion on Amorphous Solid Water	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 253201(5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.116.253201	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29件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 21件)

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 IAUS 350: Laboratory Astrophysics: from Observations to Interpretation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 HAMA, Tetsuya; TACHIBANA, Shogo; KOUCHI, Akira; OBA, Yasuhiro; PIANI, Laurette; HIDAKA, Hiroshi; KIMURA, Yuki; MURATA, Ken-ichiro; YURIMOTO, Hisayoshi; WATANABE, Naoki
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 T.HAMA,K.SEKI, A.ISHIBASHI,A. MIYAZAKI, A.KOUCHI,N.WATANABE, T.SHIMOAKA, T.HASEGAWA
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, Masashi; HAMA, Tetsuya; KIMURA, Yuki; KOUCHI, Akira; WATANABE, Naoki
2 . 発表標題 H2 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 Y.Oba, Y.Takano, H.Naraoka, N.Watanabe, A.Kouchi
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 H.Hidaka, Y. Yarnall, A. Kouchi, N.Watanabe
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 Y.Oba, Y.Takano, H.Naraoka, N.Watanabe, A. Kouchi
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 Goldschmidt2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ishibashi, Y.Oba,T.Hama,A.kouchi,N.Watanabe
2. 発表標題 Inversion of surface voltage on H2O 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 A. Miyazaki, N.Watanabe, W. Sameera, T.Hama, H.Hidaka, A.Kouchi
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, 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

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 香内 晃, 木村 勇氣, 羽馬 哲也, 日高 宏, 田中 今日子, 渡部 直樹, 菅原 いよ, 橘 省吾, 小笹 隆司
2. 発表標題 超高真空透過型電子顕微鏡による氷の不均質核生成のその場観察
3. 学会等名 JpGU2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hama
2. 発表標題 Nuclear-spin dynamics of interstellar water:ice and gas
3. 学会等名 Workshop to discuss the future of gas phase research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hama
2. 発表標題 Surface physico-chemical processes on interstellar water ice
3. 学会等名 IMS symposium "Water at interfaces 2018" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Tachibana
2. 発表標題 Liquid like behavior of UV irradiated interstellar ice at low temperatures
3. 学会等名 METEORITES-Understanding the origin of planetodiversity (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S.Tachibana
2. 発表標題 Laboratory experiments on high and low temperature processes in the early Solar System
3. 学会等名 Workshop: Experiment and Modeling in Investigation of Extraterrestrial Material. 81st Annual Meeting of the Meteoritical Society (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kouchi
2. 発表標題 In Situ Observation of Amorphous Ices by Ultrahigh Vacuum TEM
3. 学会等名 2018 MRS Spring Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Kouchi, S. Tachibana, T. Hama, Y. Oba, L. Piani, I. Sugawara, Y. Endo, H. Hidaka, Y. Kimura, K. Murata, H. Yurimoto, and N. Watanabe
2. 発表標題 Observation of liquid-like behavior of UV-irradiated amorphous ices
3. 学会等名 Meeting on DIPPS (Dust and Ice Particles Spectroscopy and Scattering) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe
2. 発表標題 Ortho-to-para ratio of water desorbed from ice and its implications for astronomy and planetary science
3. 学会等名 ICPEAC 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 香内晃
2. 発表標題 分子雲での光化学反応による有機物の生成と原始惑星系円盤における進化
3. 学会等名 シンポジウム「ダスト形成から惑星の多様性へ：宇宙の物質進化における物理と化学のカップリング (招待講演)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, R. Escibano, and N. Watanabe
2 . 発表標題 Formation of high-density amorphous ice by matrix sublimation method
3 . 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. Hidaka, Y. Sugimoto, A. Kouchi, and N. Watanabe
2 . 発表標題 Measurements of surface profile of amorphous solid water by a non-contact atomic force microscope
3 . 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Y. Oba, N. Watanabe, and A. Kouchi
2 . 発表標題 Negative catalytic effect of amorphous solid water on the hydrogen abstraction from dimethyl ether with deuterium atoms at low temperatures
3 . 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 T. Hama, A. Kouchi, and N. Watanabe
2 . 発表標題 Nuclear spin isomers of photodesorbed water from ice at 10 K
3 . 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2016 (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1. 発表者名 H.Ueta, N. Watanabe, T. Hama, and A. Kouchi
2. 発表標題 Temperature dependence of ortho-to-para conversion of H ₂ on amorphous solid water at around 10 K
3. 学会等名 Workshop on Interstellar Matter 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Oba, N. Watanabe, A. Kouchi
2. 発表標題 Quantum-tunneling hydrogen abstraction from dimethyl ether-water complex solid at low temperatures: On the effect of complex formation
3. 学会等名 32nd Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/index.html 北海道大学低温科学研究所 宇宙物質科学宇宙雪氷学グループHP

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