

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01262

研究課題名(和文) 宇宙のパラ水素分子が引き起こす水分子のオルソ/パラ比異常

研究課題名(英文) Anomalous abundance ratios of nuclear-spin isomers of water induced by para hydrogen

研究代表者

羽馬 哲也 (Hama, Tetsuya)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：20579172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、宇宙に豊富に存在するパラ水素分子(H₂)を反応物とした化学反応によって生成した水分子(H₂O)のオルソ/パラ比を調べるための実験装置、ならびにH₂Oの核スピン状態を制御するための手法の開発をおこなった。開発した手法を用いて、H₂Oの核スピン状態をパラ状態のみに制御して氷を作製し、その氷から光脱離・熱脱離した分子のOPRを測定すること成功した。さらに超高真空・極低温環境で「多角入射分解赤外分光法」ができる装置を新たに開発し、星間塵の表面を覆うアモルファス(非晶質)氷の構造解析を行うことが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、氷内でH₂Oのオルソ-パラ転換は速やかにおきていることが初めて実験的に明らかになった。そのため「H₂Oのオルソ/パラ比は過去にH₂Oが星間塵で氷として生成したときから変わらず、星間塵の温度を反映している」という仮説は間違いであることが明確となった。そのため、これまでのH₂Oのオルソ/パラ比の観測研究の結果はすべて再解釈する必要がある。さらに本研究で開発した多角入射分解赤外分光法の実験装置によって、これまで不明であった星間塵を覆うアモルファス氷の構造を分子レベルで解明できる可能性が新たに開かれたことは特筆すべき成果である。

研究成果の概要(英文)：We measure the ortho-to-para ratios (OPRs) of water (H₂O) photodesorbed from ice made from para-H₂O monomers at 11 K. The photodesorbed H₂O molecules from the ice have the statistical OPR value of three. This result clearly shows the immediate nuclear-spin-state mixing of H₂O toward the statistical value of ice even at 11 K. The OPR of H₂O thermally desorbed from the ice also shows the expected statistical value. These results indicate that the OPR of H₂O desorbed from interstellar ice should be the statistical value regardless of the formation process of the ice, which cannot be used to deduce the ice-formation temperature. In addition, we developed an experimental setup for in situ infrared multiple-angle incidence resolution spectrometry in low temperature, ultrahigh-vacuum conditions. The intensity ratio between the in-plane and out-of-plane vibration spectra of amorphous N₂O at 6 K reveals an average molecular orientation angle of 65° from the surface normal.

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：核スピン温度 パラ水素 星間化学 彗星 原始惑星系円盤 赤外多角入射分解分光法 分子配向

1. 研究開始当初の背景

1986年のハレー彗星の観測以降、宇宙の水分子(H_2O)の核スピン異性体比(オルソ/パラ比, ortho-to-para ratio, 以下 OPR)について積極的に観測研究がおこなわれている。星間雲・原始惑星系円盤・彗星コマで観測される H_2O の OPR は統計重率比である3よりも低く(0.1-2.5), 核スピン温度に換算すると50 K以下であることが知られている(図1)。この核スピン温度は「過去に H_2O が星間塵で氷として生成したときの塵の温度を保存している(分子の生成温度計)」と解釈されており、例えば、彗星では30 K前後の値をとることから「彗星氷は46億年前に30 Kで生成した」と考えられてきた。しかし、近年の研究代表者の実験により「 H_2O の OPR からは氷生成時の環境を知ることができない」可能性が浮上した。そのため、宇宙の H_2O の OPR が3よりも小さい理由は、30年にわたる観測にもかかわらず不明である。

2. 研究の目的

本研究では「 H_2O の異常な OPR の起源は、パラ H_2 (核スピン0の水素分子) から H_2O が生成しているため」という新説を提案するための実験研究をおこなう。宇宙にはパラ H_2 が豊富に存在し、パラ H_2 の化学反応(例: $para\ H_2 + OH \rightarrow H + H_2O$) から H_2O が生成するとき、パラ状態の H_2O が多く生成する可能性が高い。本研究ではパラ H_2 を用いた H_2O 生成実験を行い、その OPR を直接測定し、宇宙の H_2O の異常な OPR について新しい起源を提示することを目的とする。

本研究では、パラ H_2 を反応物とした化学反応によって生成した分子の OPR を調べるための実験装置(パラ水素発生器など)の開発をおこなったとともに、 H_2O の核スピン状態を制御するための手法を模索したところ、パラ H_2O

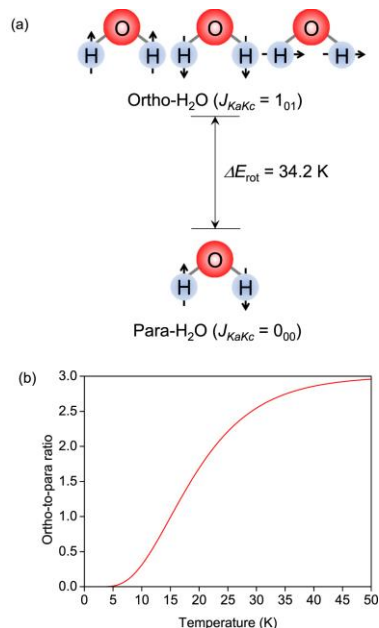


図1: (a) 気相のオルソ H_2O ($J_{KaKc} = 1_{01}$)とパラ H_2O ($J_{KaKc} = 0_{00}$). 気相における回転準位のエネルギー差(ΔE_{rot})は温度にして34.2 Kである。(b) H_2O の OPR と核スピン温度. Reprint from Hama et al., *Astrophys. J. Lett.*, 857, L13. Copyright 2018 the American Astronomical Society. Reproduced by permission of the AAS.

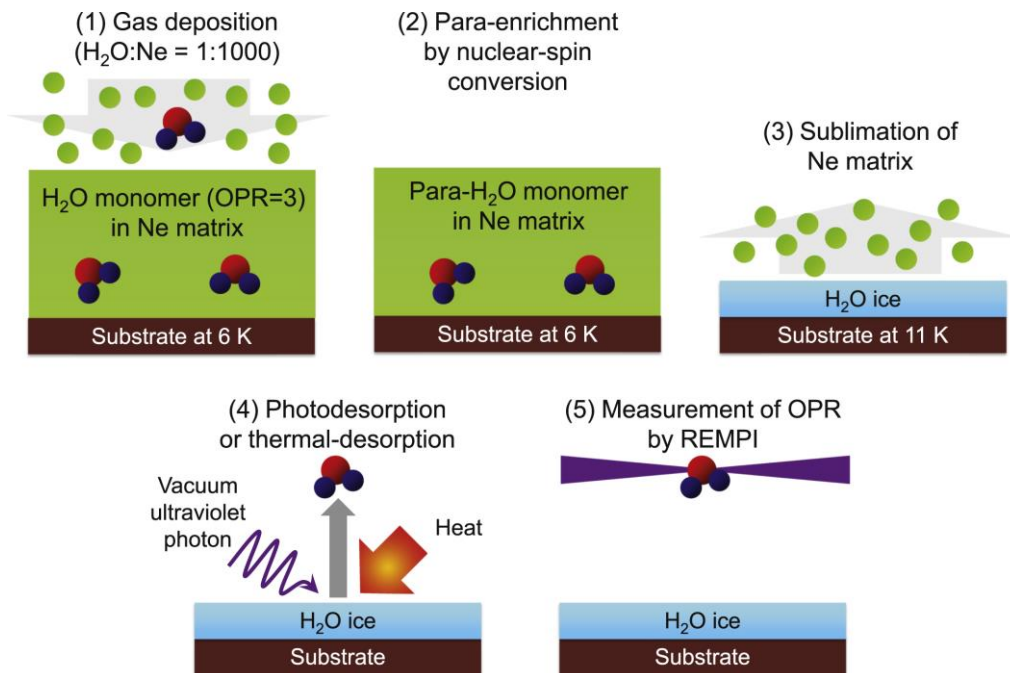


図2: パラ H_2O を用いて作製した氷から脱離した H_2O の OPR を測定する実験のイメージ図。6 Kの固体 Ne マトリックス内で単離された H_2O がオルソ-パラ転換をおこなうことでほぼ全てパラ H_2O になる。その後、11 Kに昇温することで Ne のみが昇華し、パラ H_2O が凝集して氷が生成する (Ne マトリックス昇華法)。得られた氷から光脱離(熱脱離)した H_2O の OPR を測定する。Reprint from Hama et al., *Astrophys. J. Lett.*, 857, L13. Copyright 2018 the American Astronomical Society. Reproduced by permission of the AAS.

のみを用いて氷を作製し、その氷から光脱離・熱脱離した分子の OPR を測定する手法の開発に成功したため、以下に「(1) パラ H₂O のみを用いた氷の生成と氷から脱離した H₂O のオルソ/パラ比の測定」として、ここに報告する。

また、研究代表者は 2020 年 1 月 1 日に北海道大学から東京大学へ異動となったため、異動の際に実験装置の解体、移設をおこなう必要が生じた。そこで、限られた時間の中で「パラ水素分子の化学反応」の実験装置を用いて予察的な研究をおこなったところ、非常に興味深い成果が得られたので、以下に「(2) 新規赤外分光法によるアモルファス氷の構造解析装置の開発」として、ここに報告する。

3. 研究の方法

(1) パラ H₂O のみを用いた氷の生成と氷から脱離した H₂O のオルソ/パラ比の測定

ヘリウム冷凍機によって 6 K に冷却したアルミニウム基板にネオン (Ne) と水 (H₂O) を 1000:1 で混合したガスを蒸着すると、ネオンの結晶の中に H₂O 分子 (単量体) が単離された状態の固体を作製することができる (Ne マトリックス)。この Ne マトリックスを 6 K のまま 8 時間ほど放置しておくと、Ne マトリックス内で H₂O 単量体のオルソ-パラ転換がおき、その OPR は核スピン統計重率比である 3 からほぼパラ H₂O のみ (OPR = 0.03) へと変化する。その後、Ne マトリックスを 6 K/min で 11 K まで加熱すると、Ne のみが昇華 (熱脱離) し、アルミニウム基板上に残されたパラ H₂O の単量体が凝集して氷が生成することがわかった (Ne マトリックス昇華法。図 2)。

(2) 新規赤外分光法によるアモルファス氷の構造解析装置の開発

パラ水素発生器のために必要なヘリウム冷凍機の冷却能力を確認するために、シリコン基板をヘリウム冷凍機に接続したのち真空チャンバー内に導入し、冷却試験をおこなったところ、シリコン基板を 6 K まで冷却できることを確認した。この 6 K にまで冷却されたシリコン基板にメタン (CH₄) や亜酸化窒素 (N₂O) のガスを蒸着すると、非晶質 (アモルファス) の薄膜 (厚さ: 1-100 nm) が生成する。そこで冷却されたシリコン基板を真空チャンバーごとフーリエ変換型赤外分光器に組み込むことで、透過法による赤外スペクトルを測定できるように改造した (図 4)。

さらに、入射赤外光の偏光角 ϕ はフーリエ変換型赤外分光器に内蔵されている偏光子によって

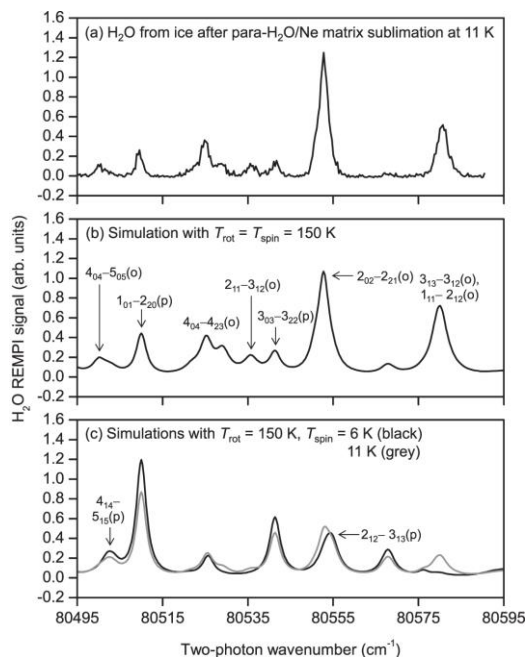


図 3: (a) パラ H₂O より作製した 11 K の氷に 157 nm レーザーを照射することで脱離した H₂O の共鳴多光子イオンスペクトル。(b) 回転温度 (T_{rot}) と核スピン温度 (T_{spin}) をともに 150 K (OPR = 3) としたときのスペクトルシミュレーション。(c) $T_{rot} = 150$ K, $T_{spin} = 6$ K (OPR = 0.03, 黒線), 11 K (OPR = 0.43, 灰色線) としたときのスペクトルシミュレーション。図の横軸は共鳴多光子イオン化に用いた色素レーザーを二光子吸収したときのエネルギーに対応する波数である。図中の J_{KaKc} (o or p) は H₂O の回転状態とオルソ・パラ状態を示している。Reprint from Hama et al., *Astrophys. J. Lett.*, 857, L13. Copyright 2018 the American Astronomical Society. Reproduced by permission of the AAS.

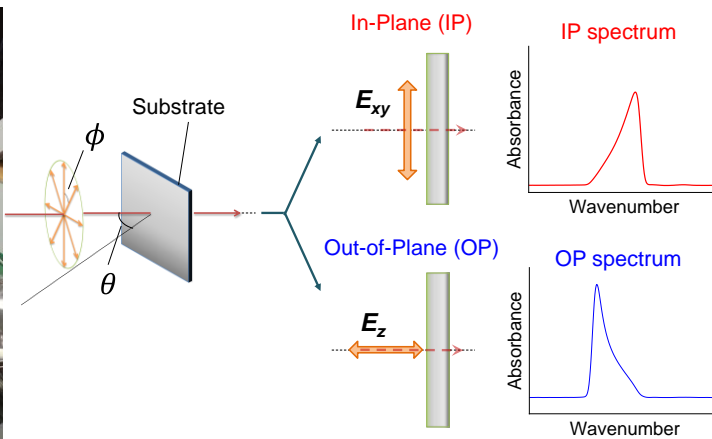
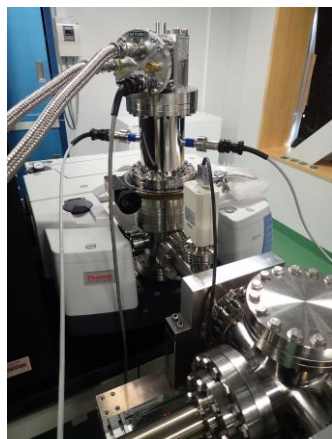


図 4: 本研究で開発した「超高真空・極低温多角入射分解赤外分光法」のための装置。

任意の角度に規定できる(図4). くわえて, 入射赤外光のシリコン基板に対する入射角 θ についても中空型の回転導入機をヘリウム冷凍機に接続することで任意の角度に規定できるようにした(図4). このように装置を改造することで, シリコン基板上に作製したアモルファス薄膜について, 新規赤外分光法である「多角入射分解赤外分光法」による測定を可能とした.

「多角入射分解赤外分光法」は, 多変量解析と赤外分光法を組み合わせた分析法である. 多角入射分解赤外分光法では, 数ナノから数百ナノメートルほどの厚さの薄膜について, まず複数の偏光角 ϕ と入射角 θ を用いて赤外スペクトル測定をおこなう. この複数の赤外スペクトルに対して多変量解析を用いることで, 薄膜内の分子の膜面内(in-plane; IP. 基板に平行な振動)方向の振動モードのみで表される赤外スペクトル(IPスペクトル)と膜面外(out-of-plane; OP. 基板に垂直な振動)方向の振動モードのみで表される赤外スペクトル(OPスペクトル)を定量的に得ることができる. これが多角入射分解赤外分光法の独特の利点である. このようにして, 多角入射分解赤外分光法によって得られたIPスペクトルとOPスペクトルの強度比から, 薄膜中での平均的な分子配向を定量的に解析することが可能である.

4. 研究成果

(1) パラ H₂O のみを用いた氷の生成と氷から脱離した H₂O のオルソ/パラ比の測定

「パラ H₂O を用いて作製した氷」に 157 nm エキシマーレーザーを照射することで氷から H₂O を光脱離させ, その OPR を共鳴多光子イオン化法により測定したところ, ほぼパラ H₂O のみ(OPR = 0.03)で氷を作製したにも関わらず, 脱離した H₂O の OPR は核スピン統計重率比である 3[核スピン温度(T_{spin})にして 150 K 以上]であることがわかった(図3). また「パラ H₂O を用いて作製した氷」を 145-160 K まで加熱し, 氷から熱脱離した H₂O の OPR を測定したところ, 光脱離と同様に OPR は 3 であることがわかった. 以上の実験結果は, 氷内で H₂O のオルソ-パラ転換は速やかにおきており, H₂O の OPR は氷内で核スピン統計重率比になっていることを示している. つまり, 「H₂O の OPR(T_{spin})は過去に H₂O が星間塵で氷として生成したときの塵の温度を保存している」という仮説は間違いであることが明確になり, これまでの観測研究の結果をすべて再解釈する必要があることが明らかとなった.

(2) 新規赤外分光法によるアモルファス氷の構造解析装置の開発

開発した装置を用いて 6 K のアモルファス CH₄ 薄膜とアモルファス N₂O 薄膜について, 多角入射分解赤外分光法による測定と分析を行い, IP スペクトルと OP スペクトルの強度比から薄膜内の分子配向を解析した. その結果, アモルファス CH₄ の場合は, CH₄ が等方的な分子構造をしているため, IP スペクトルと OP スペクトルの強度比は同じであった. いっぽう, アモルファス N₂O の場合は, IP スペクトルの強度が OP スペクトルよりも強くなる結果が得られた. スペクトルの詳細な解析から, N₂O 分子は基板法線から 65° という平均配向角を持っていることが明らかになった(図5). 一般的に, 長距離秩序構造を持たないアモルファスな物質では, 分子はランダムな方向を向いていると仮定されることが多いが, 本研究結果はアモルファス N₂O 薄膜内では N₂O 分子に配向秩序が存在することを意味している.

本研究で開発した実験装置によって, 星間塵を覆うアモルファス氷の構造を分子レベルで解明できる可能性が新たに開かれたことは特筆すべき成果である. 今後は, 多角入射分解赤外分光法を用いた実験研究を進展させ, アモルファス H₂O 薄膜についての構造解析研究をおこなう. また, 当初予定していた「パラ水素分子の化学反応」の研究については, 実験に必要な色素レーザーなどは北海道大学から東京大学に移設できたため, 継続して装置開発を進める予定である. また, 本研究により新しく発見したアプローチである「Ne マトリックス昇華法」を用いて, 核スピン状態が制御された分子を用いて固体を作製する手法が確立したので, この手法を用いて新しい研究ができないか模索する.

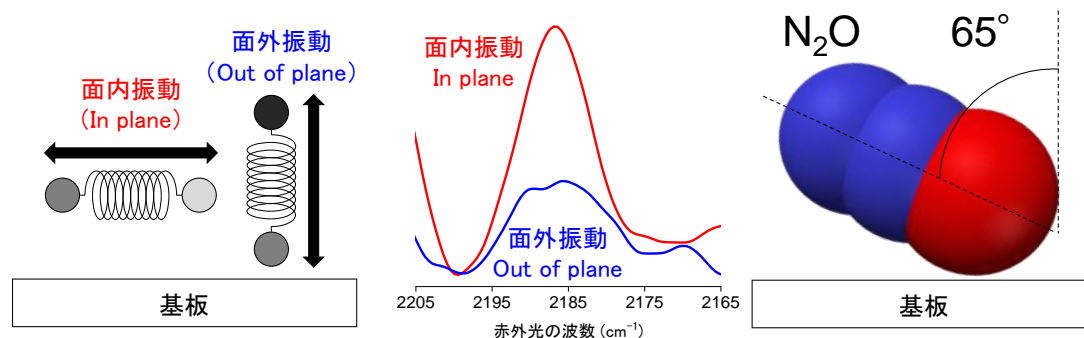


図5: (左図) 面内振動と面外振動のイメージ図。(中図) 多角入射分解赤外分光法で得られた 6 K のアモルファス N₂O 薄膜の面内振動(in-plane; IP)スペクトルと面外振動(out-of-plane; OP)スペクトル。(右図) IP スペクトルと OP スペクトルの強度比から明らかになったアモルファス N₂O 薄膜内の N₂O 分子の平均配向角(基板法線から 65°).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Okoda et al. (著者69人中、羽馬は27番目)	4. 巻 910
2. 論文標題 FAUST. II. Discovery of a Secondary Outflow in IRAS 15398?3359: Variability in Outflow Direction during the Earliest Stage of Star Formation?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11(13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abddb1	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 Nakano Hideyuki, Hirakawa Naoki, Matsubara Yasuhiro, Yamashita Shigeru, Okuchi Takuo, Asahina Kenta, Tanaka Ryo, Suzuki Noriyuki, Naraoka Hiroshi, Takano Yoshinori, Tachibana Shogo, Hama Tetsuya, Oba Yasuhiro, Kimura Yuki, Watanabe Naoki, Kouchi Akira	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 Niinomi Hiromasa, Yamazaki Tomoya, Nada Hiroki, Hama Tetsuya, Kouchi Akira, Okada Junpei T., Nozawa Jun, Uda Satoshi, Kimura Yuki	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 Hama Tetsuya, Ishibashi Atsuki, Kouchi Akira, Watanabe Naoki, Shioya Nobutaka, Shimoaka Takafumi, Hasegawa Takeshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Quantitative Anisotropic Analysis of Molecular Orientation in Amorphous N ₂ O 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 Bianchi et al. (著者66人中, 羽馬は30番目)	4. 巻 498
2. 論文標題 FAUST I. The hot corino at the heart of the prototypical Class I protostar L1551 IRS5	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters	6. 最初と最後の頁 L87 ~ L92
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnrasl/slaa130	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 Hama Tetsuya, Kouchi Akira, Watanabe Naoki, Shioya Nobutaka, Shimoaka Takafumi, Hasegawa Takeshi	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 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 Masashi, Nguyen Thanh, Oba Yasuhiro, Hama Tetsuya, Kouchi Akira, Watanabe Naoki	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.cplett.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 該当する

1. 著者名 Kouchi Akira, Furuya Kenji, Hama Tetsuya, Chigai Takeshi, Kozasa Takashi, Watanabe Naoki	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	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 Tetsuya, Seki Kousuke, Ishibashi Atsuki, Miyazaki Ayane, Kouchi Akira, Watanabe Naoki, Shimoaka Takafumi, Hasegawa Takeshi	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 and 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 Tsuge Masashi, Hama Tetsuya, Kimura Yuki, Kouchi Akira, Watanabe Naoki	4. 巻 878
2. 論文標題 Interactions of Atomic and Molecular Hydrogen with a Diamond-like Carbon Surface: H2 Formation and Desorption	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 23(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab1e4e	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 Furuya Kenji, Aikawa Yuri, Hama Tetsuya, Watanabe Naoki	4. 巻 882
2. 論文標題 H2 Ortho-Para Spin Conversion on Inhomogeneous Grain Surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 172(11p)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3790	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 Ishizuka Shinnosuke, Matsugi Akira, Hama Tetsuya, Enami Shinichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Interfacial Water Mediates Oligomerization Pathways of Monoterpene Carbocations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry Letters	6. 最初と最後の頁 67 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcllett.9b03110	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 Yuki Nagata, Tetsuya Hama, Ellen H. G. Backus, Markus Mezger, Daniel Bonn, Mischa Bonn, and Gen Sasaki	4. 巻 52
2. 論文標題 The Surface of Ice under Equilibrium and Nonequilibrium Conditions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Accounts of Chemical Research	6. 最初と最後の頁 1006-1015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.accounts.8b00615	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 Shinnosuke Ishizuka, Yuki Kimura, Jun Kawano, Rafael Escibano, Tomoya Yamazaki, Tetsuya Hama, and Rikako Sato	4. 巻 122
2. 論文標題 Immiscibility of Nucleating Aluminum Oxide Nanoparticles in Vapor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 25092-25101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b08355	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 Ken Nagashima, Gen Sasaki, Tetsuya Hama, Ken-ichiro Murata, and Yoshinori Furukawa	4. 巻 18
2. 論文標題 Uptake Mechanism of Atmospheric Hydrogen Chloride Gas in Ice Crystals via Hydrochloric Acid Droplets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Crystal Growth & Design	6. 最初と最後の頁 4117-4122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.8b00531	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 Tetsuya Hama, Akira Kouchi, and Naoki 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 Shinnosuke Ishizuka, Akira Matsugi, Tetsuya Hama, and Shinichi Enami	4. 巻 20
2. 論文標題 Chain-propagation, chain-transfer, and hydride-abstraction by cyclic carbocations on water surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 25256-25267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP04993A	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 Shinnosuke Ishizuka, Tomihide Fujii, Akira Matsugi, Yosuke Sakamoto, Tetsuya Hama, and Shinichi Enami	4. 巻 20
2. 論文標題 Controlling factors of oligomerization at the water surface: why is isoprene such a unique VOC?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Chemistry Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 15400-15410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/C8CP01551A	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21件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 沼館 直樹, 羽馬 哲也
2. 発表標題 液体界面の光化学反応におけるOHラジカル生成
3. 学会等名 原子衝突学会第45回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Hama
2. 発表標題 Surface physicochemical processes of hydrogen atom on interstellar dust
3. 学会等名 The 23rd East Asian Workshop on Chemical Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Hama, Akira Kouchi, Naoki Watanabe
2. 発表標題 Cold surface chemistry of atoms and radicals on interstellar dust
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Free Radicals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Hama, Kousuke Seki, Atsuki Ishibashi, Ayane Miyazaki, Akira Kouchi, Naoki Watanabe, Takafumi Shimoaka, Takeshi Hasegawa
2. 発表標題 PM-IRRAS as a tool for in vivo surface analysis of living specimens: the plant leaf cuticle as a case study
3. 学会等名 Frontier of Surface Analysis by Advanced Vibrational Spectroscopy, Annual Meeting of the Spectroscopical Society of Japan 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽馬 哲也
2. 発表標題 宇宙の氷の表面化学：量子トンネル効果，アモルファス表面，最近の試み
3. 学会等名 氷の分子科学 II (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽馬 哲也
2. 発表標題 宇宙の塵の表面化学における量子効果の重要性
3. 学会等名 2019年度 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会「宇宙量子エレクトロニクス」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Hama, Shogo Tachibana, Akira Kouchi, Yasuhiro Oba, Laurette Piani, Hiroshi Hidaka, Yuki Kimura, Ken-ichiro Murata, Hisayoshi Yurimoto, Naoki Watanabe
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 Ishizuka Shinnosuke, Matsugi Akira, Hama Tetsuya, Enami Shinichi
2. 発表標題 Interface-specific reaction pathways of monoterpene carbocations
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 Tetsuya Hama, Kousuke Seki, Atsuki Ishibashi, Ayane Miyazaki, Akira Kouchi, Naoki Watanabe, Takafumi Shimoaka, Takeshi 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 Masashi Tsuge, Tetsuya Hama, Yuki Kimura, Akira Kouchi, Naoki Watanabe
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 Tetsuya Hama
2. 発表標題 Liquid-like behavior of interstellar water ice at low temperatures
3. 学会等名 IMS symposium "Water at interfaces 2018" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 羽馬哲也
2. 発表標題 赤外分光法によるイネの葉のクチクラ外ワックスの非破壊分析
3. 学会等名 農学中手の会第4回研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長嶋 剣, 佐崎 元, 羽馬哲也, 村田憲一郎, 古川義純
2. 発表標題 気相成長する氷表面に与える酸性ガスの影響
3. 学会等名 第47回結晶成長国内会議
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽馬哲也, 香内 晃, 渡部直樹
2. 発表標題 パラH ₂ O分子を用いて作製した氷から光脱離したH ₂ O分子のオルソ/パラ比
3. 学会等名 第12回分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽馬哲也, 香内 晃, 渡部直樹
2. 発表標題 宇宙の水のオルソ/パラ比の理解に向けた実験研究
3. 学会等名 2018年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya 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 ヤーネル 由起子, 日高 宏, 大場康弘, 柘植雅士, 羽馬哲也, 香内 晃, 渡部直樹
2. 発表標題 低温メタノール固体への水素原子照射によるメタノール分子脱離過程
3. 学会等名 高分解能分子分光シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Nakatani, Tetsuya Hama, Takashi Shimonishi, Kenji Furuya
2. 発表標題 Adsorption energies of atoms and molecules on the low-temperature amorphous water ice: A systematic estimation from quantum chemistry calculations
3. 学会等名 42nd COSPAR Scientific Assembly (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村勇氣, 佐藤理佳子, 土山 明, 為則雄祐, 羽馬哲也, 渡部直樹, 香内 晃, 永原裕子
2. 発表標題 非晶質Mg-Feケイ酸塩基板上での水素と一酸化炭素の触媒反応効率
3. 学会等名 JpGU2018 (日本地球惑星科学連合2018年大会)
4. 発表年 2018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 (日本地球惑星科学連合2018年大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 羽馬哲也, 香内 晃, 渡部直樹
2. 発表標題 パラH ₂ Oの凝集によって生成した氷から脱離したH ₂ Oのオルソ/パラ比
3. 学会等名 JpGU2018 (日本地球惑星科学連合2018年大会)
4. 発表年 2018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
---------	---------