

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 5 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H04862

研究課題名(和文) 星間分子から隕石有機物へ：重水素存在度を指標とした分子進化プロセス解明

研究課題名(英文) From interstellar molecules to meteoritic organics: experimental studies on the pathways toward molecular complexities based on the degree of deuterium enrichment

研究代表者

大場 康弘 (Oba, Yasuhiro)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：00507535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,100,000円

研究成果の概要(和文)：本申請研究では、ヘキサメチレンテトラミン(HMT)という有機分子の水素同位体組成が、星間分子雲から太陽系形成までに経験するプロセスでどのように変化するか実験的に検証した。星間分子雲で生成するHMTの水素同位体組成を制約するパラメータとして、材料として用いるメタノールの水素同位体組成や反応基板温度が重要であるとわかった。光化学反応で生成したHMTは生成直後は重水素に富むが、太陽系形成後の小天体内での熱水反応によって水素同位体交換し、徐々に重水素を失うことがわかった。これらの結果は、隕石中有機物に見られる軽度の重水素濃集が、高度に重水素濃集した星間分子から形成可能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

生命誕生前の宇宙空間には有機化合物を含む様々な分子が存在するが、それらがどのようなプロセスを経験するのか、全く理解されていない。本研究では、小惑星リュウグウの破片にもその存在が期待される有機化合物、ヘキサメチレンテトラミン(HMT)に着目し、宇宙環境(星間分子雲、太陽系)での化学反応でどのように変化するか、模擬実験を中心としてその詳細を調べた。HMTは星間分子雲での紫外線を利用した光化学反応で生成し、太陽系形成後の小天体上での熱水プロセスによって多様に変化した。また、種々の炭素質隕石からHMTが世界で初めて検出され、本研究で検証したプロセスが実際の宇宙環境でも起こっていることが強く示唆された。

研究成果の概要(英文)：In the present study, in order to better understand molecular evolution in space, variations in the hydrogen isotopic composition of hexamethylenetetramine (HMT) through molecular clouds (MCs) to the solar system were experimentally investigated. Critical parameters to constrain the hydrogen isotopic composition of the HMT formed in MCs were that of methanol used for HMT formation and the temperature where photochemical reactions took place. After the formation by photochemical reactions, the deuterium enrichment of HMT was diluted via hydrogen isotopic exchanges with water, resulting in the formation of less deuterium-enriched HMT. These results suggest that moderately deuterium-enriched signature observed in meteoritic organic compounds can be reproduced from highly deuterium-enriched interstellar molecules.

研究分野：宇宙地球化学

キーワード：化学進化 星間分子雲 重水素濃集 隕石有機物 ヘキサメチレンテトラミン 光化学反応 熱水変質

## 1. 研究開始当初の背景

星や惑星系誕生の場である星間分子雲では、宇宙の重水素(D)存在度( $D/H \sim 10^{-5}$ )に比べて桁違いに高くD濃集する分子( $D/H > 10^{-2}$ )が多数発見されている。分子の水素同位体組成は化学的・物理的な変化に伴って特有の変化をするため、分子進化解析の良い指標となる。そのため星間分子のD濃集プロセスを理解することは、太陽系形成以前の化学進化解明に不可欠である。我々のグループではこれまでに、極低温( $\sim 10$  K)星間塵表面での量子トンネル効果を利用した、水( $H_2O$ )やメタノール( $CH_3OH$ )、ホルムアルデヒド( $H_2CO$ )など主要な星間分子の生成メカニズム・重水素濃集プロセスを実験的に明らかにし、星間分子雲での初期分子進化の大筋を理解することができた。低温で生成したDに富む星間分子は、ケイ酸塩や炭素質物質からなる星間塵とともに現在の太陽系形成の材料となったと考えられている。しかし、前述の星間分子雲に関する研究状況と比べると、太陽系形成までの具体的な分子進化プロセスに関する理解はきわめて乏しい。現状では、太陽系に存在する分子は、星間分子に比べて分子組成が多様、 $D/H$ が桁違いに低い( $\sim 10^{-4}$ )、という二点はよく知られている。この $D/H$ の大きな違いをもたらした原因について、もっとも始原的な地球外物質、炭素質隕石に含まれる高分子状有機物(IOM:太陽系有機物の中でも高 $D/H$ 成分として分類される。 $D/H \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ )の分析に基づいて、以下の2つのプロセスが提案されている:

- (1) $D/H$ の高い星間分子が起点となり、太陽系形成までの分子進化にともなって分子の $D/H$ が徐々に低下し、現在の $D/H$ になった( $D/H$ の星間分子起源説)
- (2)太陽系形成時に存在した有機分子の $D/H$ は星間分子の $D/H$ に関係なく宇宙存在度( $10^{-5}$ )に等しい。その後、低温領域で軽度に重水素濃集し、現在の $D/H$ になった( $D/H$ の太陽系起源説)

これらの太陽系有機物の $D/H$ の起源に関する説明は、星間分子の寄与の有無が焦点となり、分子進化解明の観点で興味深いが、現状ではいずれの主張も推測の域を出ない。なぜなら、これらの主張は隕石有機物の分析結果のみに基づいており、実験的な証拠が皆無に等しいためである。

本研究では、ヘキサメチレンテトラミン(HMT:  $C_6H_{12}N_4$ )という有機分子に着目し、星間分子雲から太陽系形成に至るまでのHMTの水素同位体組成の変化を模擬実験で明らかにする。HMTはこれまでに星間分子雲および炭素質隕石中など、あらゆる地球外環境・地球外物質中で検出された例はないが、星間分子雲における主要な分子進化プロセスの一つである、星間塵氷の光化学反応による主要生成物であるため、星間分子雲から太陽系形成までの主要な重水素キャリアとしての高いポテンシャルを秘めている。さらに、HMTは水とともに加熱すると、分解してアンモニアやホルムアルデヒドを生成すると考えられている。それらの揮発性分子は、アミノ酸など主要な隕石中有機分子の生成材料となりうるため、HMTの挙動を追跡することは、星間分子雲から太陽系形成までの分子組成・同位体組成の理解のために有用である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、星間分子雲及び隕石母天体環境を実験室内で再現し、同環境における化学反応を検証することで、隕石有機物の水素同位体組成の起源を解明し、太陽系形成までの分子進化の大筋を理解することである。

## 3. 研究の方法

本研究では、おもに3種の実験(光化学反応によるHMT生成、HMTの加熱による組成変化、隕石中HMTの検出)を遂行した。以下のその詳細を示す。

### 3 - 1. 模擬星間塵氷の光化学反応で生成するHMTの重水素濃集度の検証

星間塵氷を模擬した混合氷(水、一酸化炭素、アンモニア、メタノール)を真空反応装置内に設置した反応基板上( $10$  Kもしくは $77$  K)に作製し、そこに星間分子雲における普遍的なエネルギー源である真空紫外光を照射した。その際、種々の重水素置換メタノール( $CH_2DOH$ ,  $CHD_2OH$ ,  $CD_3OH$ ,  $CH_3OD$ :いずれも星間分子雲で観測例あり)を材料として用いた。紫外光照射後、反応基板を室温に戻し、基板に残った成分を抽出して、液体クロマトグラフ-オービトラップ型超高分解能質量分析計(LC/orbitrapHRMS)で分析した。

### 3 - 2. 隕石母天体での熱(水)プロセスによるHMTの元素・同位体組成変化

重水素置換HMT( $C_6D_{12}N_4$ : HMT- $d_{12}$ )を $H_2O$ に溶解させてHMT- $d_{12}$ 水溶液を作製した。それを純金製の反応容器に封入し、 $100^\circ C$ で最長31日間加熱し、隕石母天体上での熱水プロセスでHMTの水素同位体組成がどのように変化するか検証した。また、無水条件でHMTの標準試薬を最大 $300^\circ C$ で数日間加熱し、元素組成・同位体組成の変化を検証した。

### 3 - 3 . 炭素質隕石中 HMT の検出

アミノ酸など種々の有機化合物を含むことが知られる 3 種の炭素質隕石( マーチソン, タギッシュレイク, マレー) から, これまでに前例がない HMT 検出を試みた。隕石から有機化合物を抽出する一般的な手法では, 高濃度の塩酸や 100°C 程度の熱水が用いられてきたが, HMT は同条件では容易に分解してしまうため, 極めてマイルドな抽出条件を採用した。それぞれ 0.5-2g の隕石試料から超音波を用いて水抽出し, 陽イオン交換カラム処理によって夾雑物をできる限り除去した。その際, 隕石抽出物が高濃度の酸や高温を経験しないよう十分に配慮した。その後, 抽出液を 1ml に濃縮し, LC/orbitrapHRMS で分析した。

### 4 . 研究成果

【実験 3 - 1】光化学反応による生成物として, HMT の検出に成功した。材料として用いたガスに対する収率は, 炭素量換算で 10K での光化学反応では 5% 程度, 77K では 0.5% 程度だった。この温度依存性は, 高温(77K)では一酸化炭素が反応基板上で固体として存在できないため, HMT 生成反応に関与できなかったことが原因だと考えられる。

メタノール(CH<sub>3</sub>OH)の代わりにその重水素一置換体(CH<sub>3</sub>OD or CH<sub>2</sub>DOH)を反応材料として用いて同様の実験をおこなうと, それぞれ HMT の重水素置換体が検出された。HMT の重水素濃集度はメタノールの重水素置換体の種類によって異なり, CH<sub>2</sub>DOH を用いたときに顕著に HMT の D 濃縮が観測された(図 1)。一方で, CH<sub>3</sub>OD を材料としたときは生成する HMT の重水素存在度は低かった。これらの結果は, メタノールのメチル基に結合する水素が, 優先的に HMT に取り込まれることを意味する。また, 材料の組成が同一であれば, 反応基板温度が高いほうが, 生成する HMT の重水素存在度は高かった。これは, 共存する一酸化炭素が重水素と反応し, HMT とは異なる生成物となったためだと考えられる。低質量原始星 IRAS16293-1422 で観測されたメタノールの重水素置換体存在度(CH<sub>3</sub>OH:CH<sub>2</sub>DOH:CHD<sub>2</sub>OH:CD<sub>3</sub>OH:CH<sub>3</sub>OD = 100:30:6:1:2, Parise et al. 2006)を再現して同様の実験をおこなうと, 同様に高度の重水素濃集が見られた(図 1)。検出された HMT 中の重水素濃度は, 光化学反応に用いられた材料全体の重水素濃度よりも最大で 3 倍程度高かった。これらの結果は, HMT が星間分子雲から太陽系形成に至るまでの重要な重水素キャリアになることを強く示唆する。

同じ光化学反応実験で, HMT に加えて, 生命の遺伝情報を担う核酸の構成成分, 核酸塩基 6 種(アデニン, シトシン, チミン, ウラシル, キサンチン, ヒポキサンチン: 図 2)を検出することに成功した。これらの核酸塩基は先行研究でも検出が試みられてきたが, 反応材料としてピリミジンやプリン(図 2)を用いたときのみ検出されたにすぎず(Nuevo et al. 2014), 現実的な星間分子雲環境を再現した実験では生成可能かどうか不明であった。本研究における超高感度・高分解能分析および適切な試料の前処理の適用が, これら核酸塩基検出のカギとなったといえる。さらに, 核酸塩基に加えて, 同様に生体関連分子であるジペプチド(アミノ酸二量体)も同一サンプルから検出された。ジペプチドはアミノ酸よりも存在量が低かったため, 本実験ではアミノ酸の起源としての寄与は低いと考えられた。これらの成果は Nature Communications 誌にて発表された。

【実験 3 - 2】HMT-d<sub>12</sub> 水溶液を 100°C で加熱すると, 加熱時間増加とともに HMT の重水素一水素置換反応が進行した。31 日経過後, HMT-d<sub>12</sub> の重水素の 2 つが水素に置換された HMT-d<sub>10</sub> の存在度が最も高く, 微量ながら 8 つの重水素が水素に置換された HMT-d<sub>4</sub> も検出された(図 3)。これらの結果は, 隕石母天体上での熱水反応によって HMT が共存する水(あるいは含水鉱物由来の水)と水素交換可能であることを示す。炭素質隕石に

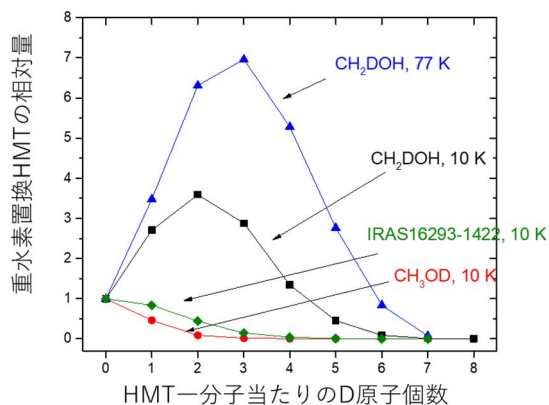


図 1 . 光化学反応で生成した重水素置換 HMT の相対存在量。ラベルはそれぞれ用いたメタノールの種類と反応基板温度を示す。IRAS16293-1422 は低質量原始星で観測されたメタノール重水素置換体の割合を再現した。

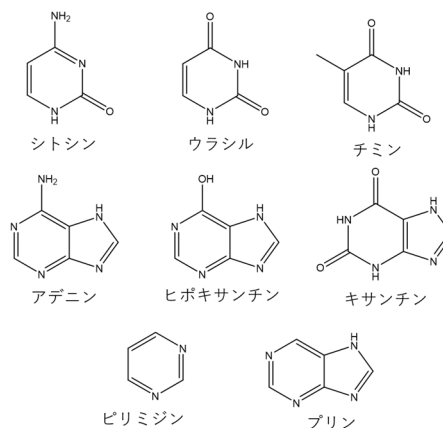


図 2 . 模擬星間塵水の光化学反応で生成した核酸塩基 6 種(シトシン, ウラシル, チミン, アデニン, ヒポキサンチン, キサンチン)とそれぞれの基本骨格となるピリミジン, プリンの分子構造。水やメタノールなど単純な分子を材料とした実験では, ピリミジンとプリンはほとんど生成しなかった。

存在する含水鉱物由来の水は重水素に乏しいため (Piani et al. 2018), 仮に HMT が星間分子雲での生成時に重水素に富んでいても, 隕石母天体での熱水プロセスによって星間分子雲起源の重水素が失われることとなるだろう。本成果は, 1. 研究背景で提唱した隕石中有機物の水素同位体組成に関する 2 つの説のうち, (1) の D/H の星間分子起源説を支持するものである。

【実験 3 - 3】3 種の炭素質隕石それぞれから, 隕石固有の HMT を検出することに世界で初めて成功した。隕石 1g あたりの HMT 存在量はマーチソン隕石, タギッシュレイク隕石, マレー隕石ではそれぞれ, 846ng, 671ng, 29ng であった。マーチソン隕石, タギッシュレイク隕石ではそれぞれのアミノ酸存在量に匹敵し, HMT が隕石中の主要な有機物であることが示唆された。これまでの隕石分析で検出例がなかったことは, 隕石の不均一性ならびに先行研究での分析手法が HMT 検出に適していなかったためだと考えられる。

隕石母天体は比較的温和な環境であり, HMT 分解の触媒の効果があると考えられているケイ酸塩鉱物が豊富に存在するため, HMT 生成には適さない環境であると考えられる。したがって, 隕石から検出された HMT は, 太陽系形成前の極低温環境で生成したと想定される, 極めて始原的な有機分子だといえる。

隕石中 HMT の重水素置換体の存在度は, 前述の模擬実験と比べ極めて低く, ピーク強度比で HMT-d<sub>1</sub> は HMT-d<sub>0</sub> に対して  $2.7 \times 10^{-4}$  であった。しかし, HMT-d<sub>1</sub> のピーク強度が非常に低かったため, 本分析手法では正確な重水素存在度を決定することは, 少なくとも現時点では現実的ではない。少なくとも模擬実験, あるいは星間分子雲における天文観測で見られるような極端な重水素濃集は, 隕石中 HMT には見られないことは確かである。本結果は, HMT が隕石母天体上での熱水プロセスによって重水素希釈されたことを示唆する。今後, ガスクロマトグラフ/同位体比質量分析計などを用いた, より正確な重水素存在度の決定が望まれる。隕石中 HMT の検出および熱水反応による重水素交換に関する成果 (実験 3 - 2) は, Nature Communications 誌にて公表された (前述の核酸塩基検出とは別の論文)。

本研究では星間分子雲から太陽系形成に至るまでの HMT を中心とした化学進化を, とくにその重水素存在度の変化を指標として詳細に検証し, 世界初の隕石中 HMT の検出や模擬実験サンプル中核酸塩基の検出など, 多くの目覚ましい成果を挙げることができた。今後, 小惑星探査機はやぶさ 2 によって回収されたリュウグウ試料や, NASA 主導による小惑星サンプルリターン計画, OSIRISREx による小惑星ベンヌ試料など, 極めて始原的な太陽系物質から HMT が検出される可能性がある。その場合には, それらの分析により, 宇宙における分子進化の理解が飛躍的に進むことが強く期待される。それらの研究のベンチマークとして, 本成果は大きなインパクトがあるだろう。

< 引用文献 > Parise et al. (2006) Astron. Astrophys., 453, 949-958. Nuevo et al. (2014) Astrophys. J., 793, 125 (7pp). Piani et al. (2018) Nat. Astron., 2, 317-323.

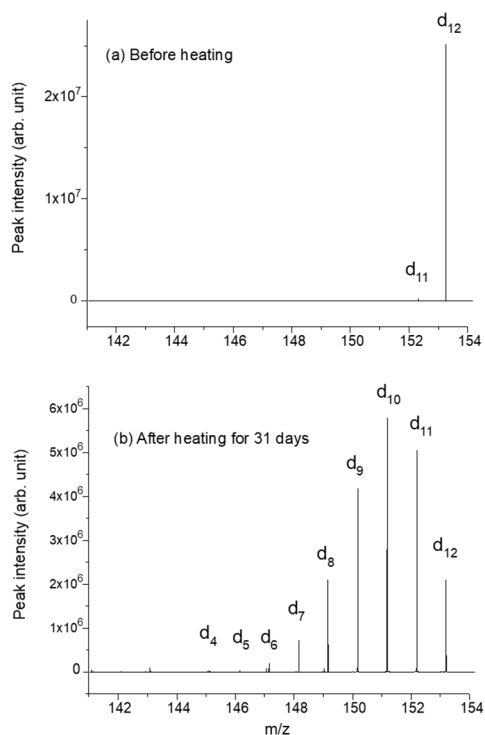


図 3 .HMT-d12 水溶液を 100 °C で 31 日間加熱した時のマスペクトルの変化。(a)加熱前, (b)加熱後。d<sub>n</sub> (n=4-12)は HMT の重水素 n 置換体を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Oba Yasuhiro, Takano Yoshinori, Naraoka Hiroshi, Watanabe Naoki, Kouchi Akira	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 1-8
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 Oba Yasuhiro, Tomaru Takuto, Kouchi Akira, Watanabe 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 124 ~ 124
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 -
1. 著者名 Oba Yasuhiro, Takano Yoshinori, Naraoka Hiroshi, Kouchi Akira, Watanabe Naoki	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 122 ~ 122
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 Tachibana Shogo, Kouchi Akira, Hama Tetsuya, Oba Yasuhiro, Piani Laurette, Sugawara Iyo, Endo Yukiko, Hidaka Hiroshi, Kimura Yuki, Murata Ken-ichiro, Yurimoto Hisayoshi, Watanabe Naoki	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
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 Oba Y., Tomaru T., Lamberts T., Kouchi A., Watanabe N.	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 Okoda Yuki, et al.	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 7755-7755
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 Oba Yasuhiro, Takano Yoshinori, Naraoka Hiroshi, Furukawa Yoshihiro, Glavin Daniel P., Dworkin Jason P., Tachibana Shogo	4. 巻 11
2. 論文標題 Extraterrestrial hexamethylenetetramine in meteorites-a precursor of prebiotic chemistry in the inner solar system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-20038-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 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 1-6
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 Bianchi E, et al.	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 Takano Yoshinori, Oba Yasuhiro, Furota Satoshi, Naraoka Hiroshi, Ogawa Nanako O., Blattmann Thomas M., Ohkouchi Naohiko	4. 巻 463
2. 論文標題 Analytical development of seamless procedures on cation-exchange chromatography and ion-pair chromatography with high-precision mass spectrometry for short-chain peptides	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Mass Spectrometry	6. 最初と最後の頁 116529 ~ 116529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijms.2021.116529	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 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 ~ 137999
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 Nguyen Thanh, Oba Yasuhiro, Shimonishi Takashi, Kouchi Akira, Watanabe Naoki	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	6. 最初と最後の頁 L52 ~ L52
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 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
2. 発表標題 Synthesis of nitrogen heterocycles of astrobiological interest in interstellar ice analogs
3. 学会等名 AbSciCon2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
2. 発表標題 Detection of nucleobases and 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 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 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 Yasuhiro Oba
2. 発表標題 H <sub>2</sub> S, why you no solid at 10 K? -Non thermal desorption from interstellar icy grains.
3. 学会等名 JPGU Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Takuto Tomaru, Akira Kouchi, Naoki Watanabe, Thanja Lamberts
2. 発表標題 Chemical desorption of hydrogen sulfide from the surface of amorphous solid water
3. 学会等名 The Olympian Symposium 2018 Gas and stars from milli- to mega- parsecs (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大場 康弘, 都丸 琢斗, 渡部 直樹, 香内 晃
2. 発表標題 なぜ極低温の星間分子雲で硫化水素はガスとして存在するのか?
3. 学会等名 日本地球化学会第65回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
2. 発表標題 Deuteration levels of amino acids formed by photolysis of interstellar ice analogs containing deuterated methanol
3. 学会等名 Evolution of Molecules in Space (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
2. 発表標題 Variations in the Deuterium Enrichment of Amino Acids Formed by Photolysis of Ice Mixtures Containing Mono-Deuterated Methanol at 10 K
3. 学会等名 Goldschmidt Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017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 宇宙での化学進化におけるヘキサメチレンテトラミンの役割
3. 学会等名 第35回有機地球化学シンポジウム
4. 発表年 2017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 疑似星間塵氷の光化学反応で生成するヘキサメチレンテトラミンの重水素存在度
3. 学会等名 2017年度 日本地球化学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
2. 発表標題 Formation of deuterated molecules by photolysis of interstellar ice analogs containing deuterated methanol isotopologs
3. 学会等名 Dust and Ice Particles Spectroscopy and Scattering (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大場 康弘
2. 発表標題 光化学反応による 星間分子の重水素濃集度の変化 -成果報告-
3. 学会等名 新学術領域「宇宙分子進化」全体集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba
2. 発表標題 Experimental studies on the surface reaction of hydrogen sulfide with deuterium atoms on amorphous solid water at 10 K
3. 学会等名 ACS National Meeting 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Takuto Tomaru, Akira Kouchi, Naoki Watanabe
2. 発表標題 Laboratory studies on the hydrogen-deuterium substitution of hydrogen sulfide on ice surfaces at low temperatures
3. 学会等名 COSPAR2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Oba, Yoshinori Takano, Hiroshi Naraoka, Naoki Watanabe, Akira Kouchi
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 COSPAR2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

所属研究室web page  
<http://www.lowtem.hokudai.ac.jp/astro/oba/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			
ドイツ	シュツツガルト大学			
米国	NASA			
フランス	グルノーブル大学			