

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00202

研究課題名(和文)小惑星リュウグウから探る太陽系有機化合物の進化

研究課題名(英文)Organic compounds in asteroid Ryugu and chemical evolution in the solar system

研究代表者

奈良岡 浩(Naraoka, Hiroshi)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：20198386

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,900,000円

研究成果の概要(和文)：小惑星リュウグウ物質や炭素質コンドライト隕石を水や有機溶媒で抽出し、高感度・高分解能のクロマトグラフィーや質量分析を用いて含まれる有機分子を分析した。その結果、炭素や水素、窒素、酸素、イオウなどの元素組成からなる約2万の分子組成を検出した。低分子のアミンやカルボン酸、アミノ酸、多環芳香族炭化水素、含窒素環状化合物などが含まれ、左右構造を持つアミノ酸はほぼ1:1のラセミ体で存在した。これらの有機化合物は摂動や衝突により小惑星表面から放出され、太陽系内を移動・運搬されると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素質小惑星の表面上に非常に多くの有機分子が存在することを証明した。地球生命が利用しているアミノ酸や核酸塩基、およびカルボン酸などが存在することは生命誕生に至る化学進化への理解につながる。また、太陽系外惑星における生命存在の可能性についても議論できる。さらに将来、人類が地球外で活動する場合に利用できる有機物資源の分布情報も提供した。

研究成果の概要(英文)：Asteroid Ryugu materials and carbonaceous chondrite meteorites were extracted with water and organic solvents. The extracted organic molecules were analyzed using high-sensitivity, high-resolution chromatography and mass spectrometry. As a result, about 20,000 molecular compositions consisting of carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen and sulfur were detected. Low-molecular-weight amines, carboxylic acids, amino acids, polycyclic aromatic hydrocarbons, and nitrogen-containing cyclic compounds were identified, and enantiomeric amino acids were present as nearly 1:1 racemic mixtures. These organic compounds are thought to be ejected from the surface of the asteroid by perturbation or impact, and to be transported through the solar system.

研究分野：有機宇宙地球化学

キーワード：小惑星リュウグウ サンプルリターン 炭素質隕石 有機化合物 化学進化 アミノ酸

## 1. 研究開始当初の背景

自然界では至る所に多くの種類の有機化合物が存在する。現在の地球上の有機化合物のほとんどは生物活動に由来するが、太陽系の他の天体および星間空間にも様々な有機化合物が存在する。特に原始太陽系に存在した有機化合物は地球での生命の誕生および環境進化に関わっている可能性が高く興味を持たれている。しかし、原始太陽系における有機化合物の分布および進化(反応メカニズムや変質)については未だほとんど分かっておらず、これらを解明することが本研究の核心をなす学問的問いである。

現在まで、地球外有機化合物のほとんどの研究は始原的隕石である炭素質コンドライトを用いて行われ、少なくとも数万の有機化合物が存在し、そのうち化学構造が明確なのは約2,000程度である。炭素質隕石はC型小惑星に由来すると考えられているが、その直接的な証拠は未だない。また、いくつかの種類が存在する炭素質コンドライトが、数多く存在するC型小惑星のタイプとどのような対応関係にあるかもわからない。また、根源的な問題として、炭素質小惑星には本当に有機化合物は存在するかを明らかにする必要がある。有機化合物の存在形態と地球生命の有機化合物との相違を解明することは地球生命の成り立ち、および地球外での生命体の化学構造を理解する上で貴重な情報を提供する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は小惑星リュウグウ試料の分析を通して、太陽系における有機化合物の分布と進化を明らかにすることである。本研究によって、初めて小惑星と隕石における有機化合物の直接的対応関係を明らかにできる。研究代表者は、はやぶさ2試料配布委員会(Hayabusa2 Sample Allocation Committee, HSAC)によって、有機化合物分析グループのリーダーに決まり、採取されたリュウグウ試料について有機化合物分析を行う。

さらに現在、OSIRIS-REx探査機により、B型炭素質小惑星ベンヌからのサンプルリターンも遂行中である。本計画の研究協力者にはベンヌ試料の分析を担当するNASA研究者(Dworkin博士)も含まれているので、本研究の成果は国際的に行われる将来の小惑星サンプルリターン物質の研究にも生かされる。また、人類が将来、地球外に進出した時に有機資源として利用できる炭素質小惑星を判別する実用性も持つ。

## 3. 研究の方法

リュウグウ試料及び炭素質隕石中の有機化合物を種々の手法によって分析した。九州大学に設置された有機化合物の分析専用のクリーンルーム中で、試料から有機化合物を溶媒によって可溶性有機物(Soluble Organic Matter, SOM)を抽出した。有機化合物の極性によって溶解する溶媒が変わるので、超純水、メタノール、ジクロロメタン、ヘキサンなどを用いた。それら抽出物を代表者(奈良岡)と分担者(浜瀬)、および研究協力者によって高感度・高分離・高質量分解能で総合的に解析した。

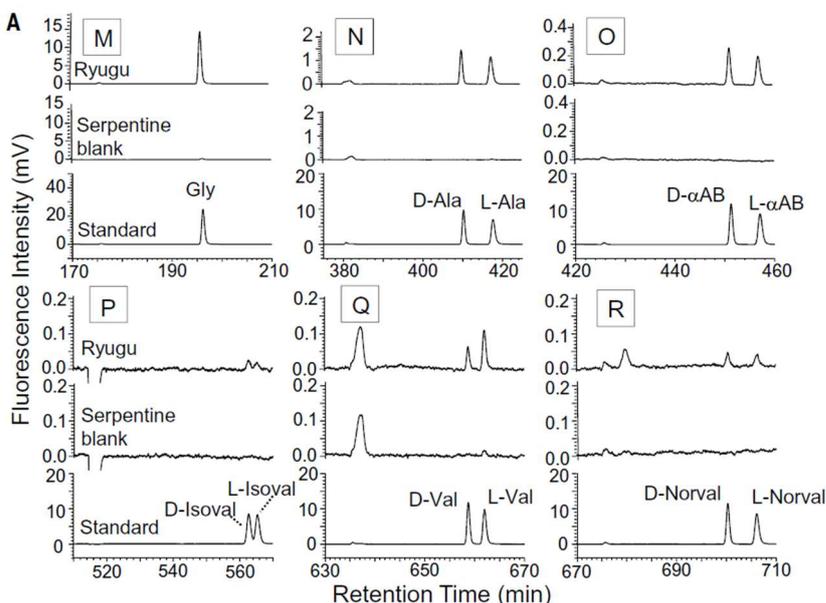
## 4. 研究成果

最初に有機物・水の特徴づける揮発性元素である炭素(C)、水素(H)、窒素(N)、イオウ(S)と熱分解性酸素(O)の量と同位体比を測定した。C=3.76±0.14 wt%, H=1.14±0.09 wt%, N=0.16±0.01 wt%, S=3.3±0.7 wt%, そして無水珪酸塩鉱物を除く熱分解性 O=12.9±0.42 wt%であった[1]。CHNSO 総

量は約 21.3 wt%であり、含水鉱物、炭酸塩、硫化物、および高分子不溶性有機物や SOM を含む有機物などとして存在している。C-H-N 含量の関係はリュウグウ物質が炭素質隕石と比較して C, N, H に若干富むことを示唆している。また、C, H, S の化学的特徴は、リュウグウ試料 ~20 mg を用いた化学チームの分析結果と一致し[2]、最も始原的な隕石である Ivuna タイプ(CI)の炭素質コンドライトと同様の特徴を示した。これらの元素の安定同位体比は  $\delta^{13}\text{C} = -0.58 \pm 2.0\%$ ,  $\delta\text{D} = +252 \pm 13\%$ ,  $\delta^{15}\text{N} = +43.0 \pm 9.0\%$ ,  $\delta^{34}\text{S} = -3.0 \pm 2.3\%$ ,  $\delta^{18}\text{O} = +12.6 \pm 2.0\%$ であった。同位体的に重い水素 (~+250‰) と窒素 (~+40‰) の特徴はこれまでの CI コンドライトの報告値に近い。

次にリュウグウ試料のメタノール抽出液を、フーリエ変換型イオンサイクロトロン共鳴質量分析(FT-ICR/MS)によって、エレクトロスプレーイオン化(ESI)と大気圧光イオン化(APPI)を用いて、超高感度・超高質量分解能での正イオンと負イオンの一斉分析を行った。質量電荷比  $m/z$  100 から 700 の間に数十万のイオン質量シグナルが検出され、小数点以下 5 桁の精密質量によって、C, H, N, O および S からなる約 2 万種の分子の化学組成に帰属された[3]。これらの多様性は、様々な炭素質隕石における先行研究と同様であり、地球外分子の化学的多様性は、地球上の生物有機分子と比較してはるかに大きい。それらは規則的かつ連続的な同族体として存在し、低分子から高分子、また無極性 (CH、多環芳香族炭化水素および分岐脂肪族) から官能基を持ったヘテロ原子の含有量が増加する極性分子 (CHO, CHN, CHS, CHNO, CHOS) までの炭素の酸化状態にも連続的な規則性がある。マススペクトルで最も強いシグナルは多イオウ分子に見られ、硫化物との水-岩石反応による酸化還元に伴うイオウ化学が特徴である。これらの分子の存在状態はメチル化、水和化、ヒドロキシル化、およびイオウ化における体系的な反応ネットワークを形成している。おそらく母天体での低温熱水反応を反映している。

さらに、リュウグウ試料の熱水抽出液の酸加水分解物から、液体クロマトグラフィーを用いて、約 20 種のアミノ酸が検出された[4]。グリシン、アラニン、バリンなどのタンパク性アミノ酸と、ベータアラニン、2-アミノ酪酸、ノルバリン、イソバリンなどの非タンパク性アミノ酸の両方が検出された (図1)。最も単純なアミノ酸であるグリシンが約 5 nmol/g で最も多く、これまでの CM2 炭素質隕石中のグリシンより少ないが、CI1 炭素質隕石中のグリシンに匹敵する。不斉炭素を持つアミノ酸は、サブナノモルからピコモルレベルの濃度で含まれていた。地球生命が L 型アミノ酸を用いているのに対して、バリン以外のアミノ酸は DL 型ほぼ 1 対 1 のラセミ混合物として存在した[5]。ピコモル程度の超微量なバリンは、分析に用いた溶媒や試薬中の地球上の L-バリンが寄与した可能性がある。



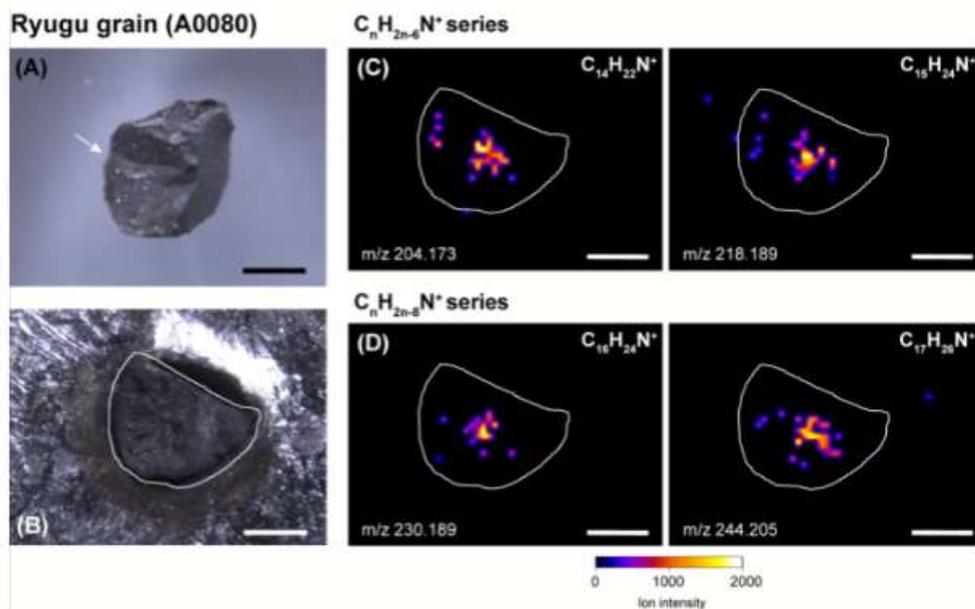
**図1** 三次元クロマトグラフィーによるリュウグウ試料の amino 酸の DL 体分析。上段がリュウグウ試料、中段が分析操作ブランク、下段が標準 amino 酸。(M)グリシン、(N)アラニン、(O)α amino 酪酸、(P)イソバリン、(Q)バリン、(R)ノルバリン。

また、熱水抽出物から脂肪族アミンとして、メチルアミンが最も多く、次いでエチルアミン、プロピルアミンが検出された[4]。遊離アミンは揮発性が高く、反応性が高いため（1気圧下での遊離メチルアミンの沸点-6.3℃に対し、メチルアミン塩酸塩の沸点~230℃）、これらのアミンはリュウグウ表面では塩として存在している可能性が高い。分岐鎖のイソプロピルアミンの存在量は直鎖のプロピルアミンよりも多く、分岐鎖分子の優位性は、分子生成に炭素ラジカル種の付加によるランダムな合成過程を示唆しているか、あるいは分岐鎖炭素化合物は直鎖炭素化合物に比べて熱力学的に安定であるため、熱水変質時の熱的過程を示しているのかもしれない。揮発性の高い酢酸なども検出され、リュウグウ表面ではやはり塩として存在したと考えられる。

多環芳香族炭化水素(PAH)は、有機溶媒抽出液にサブ ppm レベルで存在した。主な PAH は 4 環式のフルオランテンとピレン、それらがメチル化された化合物であった。2 環式のナフタレン、3 環式のフェナントレンやアントラセンなどは少なかった。フルオランテンとピレンは互いに構造異性体 ( $C_{10}H_{16}$ ) であり、一般の炭素質隕石にはほぼ同量存在する。しかし、リュウグウ試料では、フルオランテンはピレンよりも量が少なかった[6]。リュウグウの母天体の水質変質過程における水溶性の違いで分離したと考えられる（小惑星内でのクロマトグラフィー）。また、比較的多くのアルキルベンゼンも検出された。地球環境下では、ピレンに対するフルオランテンの減少やアルキルベンゼンの存在は地球上の熱水性石油でしばしば見られることから、リュウグウ母天体内での水質変成の影響を示唆している。さらに PAH の  $^{13}C$  置換体の分布からナフタレン、フルオランテンとピレンの起源は分子雲が示唆された[7]。

ナノ液体クロマトグラフィー／高分解能質量分析により、リュウグウ試料のメタノール抽出物から様々なアルキル化含窒素環状化合物が同定された[1]。これらには、ピリジン、ピペリジン、ピリミジン、イミダゾール、ピロールがコア構造として含まれる。また、核酸塩基のうち、ピリミジン骨格をもつウラシルやピリジカルボン酸であるニコチン酸なども検出された[8]。リュウグウ試料のアルキルピリジンの同族体 ( $C_nH_{2n-4}N^+$ ) は CM タイプの Murchison 隕石とは異なる分布パターンを示した。リュウグウ試料の炭素数は主に 11~22 範囲に分布し、17 に極大があるのに対し、Murchison 隕石の炭素数は主に 8~16 の範囲に分布して 11 に極大がある。この相対分布の違いは、リュウグウと Murchison 隕石の母天体との間に、異なる供給源、異なる熱水活動、あるいは異なる太陽放射や宇宙線照射の歴史があったことに起因すると考えられる。特に、含窒素環状化合物はアンモニアとホルムアルデヒドなどの単純なアルデヒドから共通の反応経路で合成されるため、CHN 化合物の優勢な出現は、過去にリュウグウ天体でアルデヒドとアンモニアの活動が活発であったことを示唆している。

リュウグウ試料の約 1mm サイズの粒子表面を荷電したメチルアルコールでスプレーすることにより、有機分子がどのように分布しているかを脱離エレクトロスプレーイオン化高分解能質量分析(DESI-HRMS)によって分析した。その結果、含窒素環状化合物は炭素数の違いや異なる化学組成に応じて、粒子中のマイクロメートルスケールで空間分布が異なることが判明した(図2)[9]。このような有機分子の空間分布の違いはリュウグウ母天体上で水流体と鉱物との作用時にこれらの分子が分離した可能性がある。



**図2** DESI-HRMS で得られたリュウグウ試料の表面での CHN 化合物の異なる空間分布（各画像のスケールバーはすべて 500 $\mu$ m）(A)分析に使用したリュウグウ粒子、(B)固定した粒子、とアルキルピリジン ( $C_nH_{2n-4}N^+$ ) の炭素数による存在量分布のリュウグウ(B)とマーチソン隕石(C)

C 型小惑星の表面が高真空条件下での宇宙線照射だけでなく、太陽放射による加熱や紫外線照射による過酷な環境にかかわらず、リュウグウ試料から検出された一連の有機分子は、炭素質小惑星の表面が生物関連分子を宿していることを証明した。リュウグウ試料の有機分子は、より多様で複雑な分子構造を持ち、太陽系の最も原始的な特徴を示唆していた。リュウグウの可溶性有機化合物の濃度は、多くの有機分子が報告されたマーチソン炭素質隕石よりも低かったが、通常の CI タイプの炭素質隕石に比較すると同程度であった。鉱物と結合した有機化合物は、衝突によって小惑星表面から放出され、惑星間塵粒子として太陽系内の天体に運搬されることが考えられる。

#### <引用した成果文献>

- [1] Naraoka, H. et al. (2023) *Science* **379**, eabn9033
- [2] Yokoyama, T. et al. (2023) *Science* **379**, eabn7850.
- [3] Schmitt-Kopplin, P. et al. (2023) *Nature Communications* **14**, 6525.
- [4] Parker, E. T. et al. (2023) *Geochimica et Cosmochimica Acta* **347**, 42-57.
- [5] Furusho, A. et al. (2024) *Journal of Chromatography Open* **5**, 100134.
- [6] Aponte, J. C. et al., (2023) *Earth, Planets and Space* **75**, 28.
- [7] Zeichner, S. S. et al. (2023) *Science* **382**, 1411-1416.
- [8] Oba, Y. et al. (2023) *Nature Communications* **14**, 1292.
- [9] Hashiguchi, M. et al. (2023) *Earth, Planets and Space* **75**, 73.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計31件（うち査読付論文 31件／うち国際共著 24件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Naraoka Hiroshi (115著者のうち1番目)、Takano Yoshinori、Dworkin Jason P.、Oba Yasuhiro、Hamase Kenji、Furusho Aogu、Ogawa Nanako O.、Hashiguchi Minako、Fukushima Kazuhiko、Aoki Dan、Schmitt-Kopplin Philippe、Aponte Jose C.、Parker Eric T.、Glavin Daniel P.、McLain Hannah L.、、、、 Tsuda Yuichi.	4. 巻 379
2. 論文標題 Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abn9033	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 Naraoka Hiroshi、Hashiguchi Minako、Okazaki Ryuji	4. 巻 7
2. 論文標題 Soluble Sulfur-Bearing Organic Compounds in Carbonaceous Meteorites: Implications for Chemical Evolution in Primitive Asteroids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 41 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.2c00157	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 Yokoyama Tetsuya、Nagashima Kazuhide、Nakai Izumi、Young Edward D.、Naraoka Hiroshi (149著者のうち72番目)、Tachibana Shogo、Yurimoto Hisayoshi.	4. 巻 379
2. 論文標題 Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abn7850	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 Nakamura T.、Matsumoto M.、Amano K.、Enokido Y.、Zolensky M. E.、Naraoka H. (221著者のうち151番目)、Watanabe S.、Tsuda Y.	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abn8671	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 Okazaki Ryuji, Marty Bernard, Busemann Henner, Hashizume Ko, Gilmour Jamie D., Meshik Alex, Yada Toru, 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (123著者のうち44番目)、 、 、 、 Watanabe Sei-ichiro, Tsuda Yuichi	4. 巻 379
2. 論文標題 Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abo0431	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 Yabuta Hikaru, Cody George D., Engrand Cecile, Kebukawa Yoko, De Gregorio Bradley, 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (130著者のうち42番目)、 、 、 、 Tachibana Shogo, Watanabe Sei-ichiro, Tsuda Yuichi	4. 巻 379
2. 論文標題 Macromolecular organic matter in samples of the asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	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) 10.1126/science.abn9057	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 Noguchi Takaaki, Matsumoto Toru, Miyake Akira, Igami Yohei, 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (139著者のうち135番目)、 、 、 Tachibana Shogo, Watanabe Sei-ichiro, Tsuda Yuichi	4. 巻 7
2. 論文標題 A dehydrated space-weathered skin cloaking the hydrated interior of Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 170-181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01841-6	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 該当する

1. 著者名 Oba Yasuhiro, Koga Toshiki, Takano Yoshinori, Ogawa Nanako O., Ohkouchi Naohiko, 、 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (33著者のうち10番目)、 、 、 、 、 Watanabe Sei-ichiro, Tsuda Yuichi, Hayabusa2-initial-analysis SOM team	4. 巻 14
2. 論文標題 Uracil in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-023-36904-3	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 Parker Eric T., McLain Hannah L., Glavin Daniel P., Dworkin Jason P., Elsila Jamie E., Aponte Jose C., Naraoka Hiroshi (30著者のうち7番目)、、、、、Tsuda Yuichi, Terui Fuyuto, Noguchi Takaaki, Okazaki Ryuji, Watanabe Sei-ichiro, Nakamura Tomoki	4. 巻 347
2. 論文標題 Extraterrestrial amino acids and amines identified in asteroid Ryugu samples returned by the Hayabusa2 mission	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 42 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2023.02.017	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 Aponte Jose C., Dworkin Jason P., Glavin Daniel P., Elsila Jamie E., Parker Eric T., McLain Hannah L., Naraoka Hiroshi (32著者のうち7番目)、、、、、Tsuda Yuichi, Watanabe Sei-ichiro, The Hayabusa2-initial-analysis SOM team, The Hayabusa2-initial-analysis core team	4. 巻 75
2. 論文標題 PAHs, hydrocarbons, and dimethylsulfides in Asteroid Ryugu samples A0106 and C0107 and the Orgueil (C11) meteorite	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-022-01758-4	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 Broadley M.W., Byrne D.J., Furi E., Zimmermann L., Marty B., Okazaki R.,、、、、Naraoka Hiroshi (64著者のうち15番目)、、、、、Nishiizumi K., Nagao K., Lee J.I., Kano A., Caffee M.W., Uemura R.	4. 巻 345
2. 論文標題 The noble gas and nitrogen relationship between Ryugu and carbonaceous chondrites	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 62 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gca.2023.01.020	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 Paquet Marine, Moynier Frederic, Yokoyama Tetsuya, Dai Wei, Hu Yan, Abe Yoshinari、、、、、、Naraoka Hiroshi (94著者のうち74番目)、、、、、Tsuda Yuichi, Watanabe Sei-ichiro, Yoshikawa Makoto, Tachibana Shogo, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Contribution of Ryugu-like material to Earth's volatile inventory by Cu and Zn isotopic analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 182 ~ 189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-022-01846-1	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 Kawasaki Noriyuki, Nagashima Kazuhide, Sakamoto Naoya, Matsumoto Toru, Bajo Ken-ichi, 、 、 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (94著者のうち75番目)、 、 、 、 、 、 Tsuda Yuichi, Watanabe Sei-ichiro, Yoshikawa Makoto, Tachibana Shogo, Yurimoto Hisayoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Oxygen isotopes of anhydrous primary minerals show kinship between asteroid Ryugu and comet 81P/Wild2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	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) 10.1126/sciadv.ade2067	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 Okazaki Ryuji, Miura Yayoi N., Takano Yoshinori, Sawada Hirotaka, Sakamoto Kanako, Yada Toru, 、 、 、 、 、 、 Naraoka Hiroshi (124著者のうち46番目)、 、 、 、 、 、 Ireland Trevor, Connolly Harold C., Laurretta Dante S., Tachibana Shogo	4. 巻 8
2. 論文標題 First asteroid gas sample delivered by the Hayabusa2 mission: A treasure box from Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	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) 10.1126/sciadv.abo7239	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 Noguchi Takaaki, Matsumoto Rikako, Yabuta Hikaru, Kobayashi Hanae, Miyake Akira, Naraoka Hiroshi, Okazaki Ryuji, Imae Naoya, Yamaguchi Akira, Kilcoyne A. L. David, Takeichi Yasuo, Takahashi Yoshio	4. 巻 57
2. 論文標題 Antarctic micrometeorite composed of CP and CS IDP like material: A micro breccia originated from a partially ice melted comet like small body	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Meteoritics & Planetary Science	6. 最初と最後の頁 2042 ~ 2062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13919	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 Koga Toshiki, Naraoka Hiroshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Synthesis of Amino Acids from Aldehydes and Ammonia: Implications for Organic Reactions in Carbonaceous Chondrite Parent Bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	6. 最初と最後の頁 1311 ~ 1320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsearthspacechem.2c00008	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 Tachibana S., Sawada H., Okazaki R., Takano Y., Sakamoto K., Miura Y. N., , , , , Naraoka H. (110著者のうち18番目), , , , , Tanaka S., Saiki T., Yoshikawa M., Watanabe S., Tsuda Y.	4. 巻 375
2. 論文標題 Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1011 ~ 1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abj8624	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 Yada Toru, Abe Masanao, Okada Tatsuaki, Nakato Aiko, Yogata Kasumi, Miyazaki Akiko, , , , , Naraoka Hiroshi (102著者のうち52番目), , , , , Yoshikawa Makoto, Watanabe Sei-ichiro, Tsuda Yuichi	4. 巻 6
2. 論文標題 Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 214 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01550-6	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 該当する

1. 著者名 Muneishi Keisuke, Naraoka Hiroshi	4. 巻 56
2. 論文標題 Interactions between organic compounds and olivine under aqueous conditions: A potential role for organic distribution in carbonaceous chondrites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 195 ~ 205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13614	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 Koga Toshiki, Parker Eric T., McLain Hannah L., Aponte Jose C., Elsilá Jamie E., Dworkin Jason P., Glavin Daniel P., Naraoka Hiroshi, Sandford Scott	4. 巻 56
2. 論文標題 Extraterrestrial hydroxy amino acids in CM and CR carbonaceous chondrites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 1005 ~ 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13661	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 Yada Toru, Abe Masanao, Okada Tatsuaki, Nakato Aiko, Yogata Kasumi, . . . , Naraoka Hiroshi (52番 目)	4. 巻 6
2. 論文標題 Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Astronomy	6. 最初と最後の頁 214 ~ 220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41550-021-01550-6	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 該当する

1. 著者名 Tachibana S., Sawada H., Okazaki R., Takano Y., Sakamoto K., Miura Y. N., Naraoka H. (18番目)	4. 巻 375
2. 論文標題 Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1011 ~ 1016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.abj8624	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, Furukawa Yoshihiro, Koga Toshiki, Glavin Daniel P., Dworkin Jason P., Naraoka Hiroshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Identifying the wide diversity of extraterrestrial purine and pyrimidine nucleobases in carbonaceous meteorites	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-022-29612-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 Koga Toshiki, Naraoka Hiroshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Synthesis of Amino Acids from Aldehydes and Ammonia: Implications for Organic Reactions in Carbonaceous Chondrite Parent Bodies	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Earth and Space Chemistry	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) 10.1021/acsearthspacechem.2c00008	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., Furukawa Y., Glavin Daniel P., Dworkin Jason P. and Tachibana S.	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 6243
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 Takano, Y., Oba, Y., Furota, S., Naraoka, H., Ogawa, N., Blattmann, T. M. and Ohkouchi, N.	4. 巻 462
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 Inter. J. Mass Spectrom.	6. 最初と最後の頁 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 該当する

1. 著者名 Muneishi, K. and Naraoka, H.	4. 巻 56
2. 論文標題 Interactions between organic compounds and olivine under aqueous conditions: A potential role for organic distribution in carbonaceous chondrites	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Meteoritics and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 195-205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/maps.13614	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 Yoshimura Toshihiro, Takano Yoshinori, Naraoka Hiroshi (44名中3番目)、Koga Toshiki, Hayabusa2-initial-analysis SOM team	4. 巻 14
2. 論文標題 Chemical evolution of primordial salts and organic sulfur molecules in the asteroid 162173 Ryugu	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-023-40871-0	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 Schmitt-Kopplin Philippe, Hertkorn Norbert, Harir Mourad, Moritz Franco, Lucio Marianna, Bonal Lydie, Quirico Eric, Takano Yoshinori, Dworkin Jason P., Naraoka Hiroshi (33名中10番目)、Tachibana Shogo, Oba Yasuhiro, Hayabusa2-initial-analysis SOM team	4. 巻 14
2. 論文標題 Soluble organic matter Molecular atlas of Ryugu reveals cold hydrothermalism on C-type asteroid parent body	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	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) 10.1038/s41467-023-42075-y	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 Zeichner Sarah S., Aponte Jose C., Bhattacharjee Surjyendu, Dong Guannan, Hofmann Amy E., Dworkin Jason P., Glavin Daniel P., Elsila Jamie E., Graham Heather V., Naraoka Hiroshi (77名中10番目)、Takano Yoshinori, Tachibana Shogo, Eiler John M.	4. 巻 382
2. 論文標題 Polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of Ryugu formed in the interstellar medium	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 1411 ~ 1416
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/science.adg6304	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 Furusho Aogu, Ishii Chiharu, Akita Takeyuki, Oyaide Mai, Mita Masashi, Naraoka Hiroshi (73名中6番目)、Takano Yoshinori, Dworkin Jason P., Oba Yasuhiro, Koga Toshiki, Hamase Kenji	4. 巻 5
2. 論文標題 Enantioselective three-dimensional high-performance liquid chromatographic determination of amino acids in the Hayabusa2 returned samples from the asteroid Ryugu	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Chromatography Open	6. 最初と最後の頁 100134 ~ 100134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcoa.2024.100134	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

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kenji HAMASE, Chiharu ISHII, Aogu FURUSHO, Takeyuki AKITA, Masashi MITA, Hiroshi NARAOKA
2. 発表標題 Multi-dimensional HPLC concepts integrating highly efficient enantioselective columns for the analysis of chiral amino acids in complicated real-world samples
3. 学会等名 51st International Symposium on High-Performance Liquid Phase Separations and Related Techniques (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aogu FURUSHO, Chiharu ISHII, Takeyuki AKITA, Hiroshi NARAOKA, Kenji HAMASE
2. 発表標題 Three dimensional HPLC determination of chiral amino acids in the Hayabusa2 return sample from Ryugu
3. 学会等名 International Symposium on High-Performance Liquid Phase Separations and Related Techniques (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浜瀬健司
2. 発表標題 生体・食品・宇宙試料におけるキラルアミノ酸の多次元HPLC分析
3. 学会等名 Symposium on Molecular Chirality 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浜瀬健司, 石井千晴, 秋田健行, 三田真史, 井手友美, 木村友則, 奈良岡 浩
2. 発表標題 生体・食品・宇宙試料におけるキラルアミノ酸ならびに類緑化合物の三次元・四次元HPLC分析
3. 学会等名 第35回バイオメディカル分析科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Naraoka Hiroshi, Takano Yoshinori, Dworkin Jason P.ら
2. 発表標題 Prebiotic organic compounds in a carbonaceous asteroid (162173) Ryugu
3. 学会等名 Astrobiology Science Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naraoka Hiroshi, Takano Yoshinori, Dworkin Jason P. 氏
2. 発表標題 Organic molecules in the returned samples from Ryugu by the Hayabusa2 mission
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 Naraoka Hiroshi
2. 発表標題 HCHO: A central role of molecular evolution in extraterrestrial materials
3. 学会等名 Symposium on Next Generation Astrochemistry
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naraoka Hiroshi, Yurimoto Hisayoshi
2. 発表標題 Hydrogen isotope distribution of hydrous minerals in carbonaceous chondrites determined by two-step pyrolysis coupled with chromium reduction
3. 学会等名 The 54th Lunar and Planetary Science Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hamase Kenji
2. 発表標題 Multi-dimensional HPLC analysis of chiral amino acids in complicated matrices including clinical, food and extraterrestrial samples
3. 学会等名 12th International symposium on drug analysis & 32nd International symposium on pharmaceutical and biomedical analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hamase Kenji
2. 発表標題 Multi-dimensional and enantioselective HPLC analysis of amino acids and related compounds -method development and application to real-world samples-
3. 学会等名 RSC Tokyo International Conference 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜瀬 健司
2. 発表標題 多次元HPLCを用いる宇宙試料中のキラルアミノ酸分析
3. 学会等名 国際アミノ酸協会 (ICAAS) 第34回アミノ酸セミナー (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浜瀬 健司
2. 発表標題 キラルアミノ酸の多次元HPLC分析法開発と生体・食品・宇宙試料における含量解析
3. 学会等名 新アミノ酸分析研究会第12回学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奈良岡 浩
2. 発表標題 地球外有機化合物の高分解能質量分析
3. 学会等名 第69回質量分析総合討論会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Naraoka, Y. Takano, J.P. Dworkin, et al.
2. 発表標題 Soluble organic matter (SOM) analysis of the Hayabusa2 samples: The first results
3. 学会等名 Hayabusa Symposium 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Naraoka, Y. Takano, J.P. Dworkin, et al.
2. 発表標題 Soluble organic compounds in Asteroid 162173 Ryugu
3. 学会等名 The 53th Lunar and Planetary Science Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋口未奈子, 奈良岡浩
2. 発表標題 炭素質隕石中のMgを含む有機化合物
3. 学会等名 日本地球化学会第67回オンライン年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古庄仰, 秋田健行, 三田真史, 奈良岡浩, 浜瀬健司
2. 発表標題 種々の地球外試料におけるキラルアミノ酸の三次元HPLC分析
3. 学会等名 第27回クロマトグラフィーシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

炭素質小惑星(162173)リュウグウの試料中の可溶性有機分子  
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/886>  
&#12073;惑星リュウグウに核酸塩基とビタミンが存在  
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/895>  
小惑星リュウグウ試料中の黒い固体有機物  
<https://www.kyushu-u.ac.jp/ja/researches/view/887>

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
研究分担者	濱瀬 健司  (Hamase Kenji)  (10284522)	九州大学・薬学研究院・教授    (17102)	

	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
研究協力者	高野 淑識  (Takano Yoshinori)	海洋研究開発機構・生物地球化学センター・上席研究員	
研究協力者	ドワーキン ジェイソン  (Dworkin Jason)	米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター・太陽系探査部門	
研究協力者	大場 康弘  (Oba Yasuhiro)	北海道大学・低温科学研究所・准教授	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	橋口 未奈子  (Hashiguchi Minako)	名古屋大学・環境学研究科・助教	
研究協力者	古賀 俊貴  (Koga Toshiki)	海洋研究開発機構・生物地球化学センター・研究員	

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			
米国	NASA Goddard Space Flight Center	California Institute of Technology		
ドイツ	Helmholtz Munich			
フランス	University Grenoble Alpes			