総合論文

小惑星リュウグウの物質化学：初生的な水と塩と有機物の実像

高　野　淑　識*

小惑星リュウグウ探査

小惑星リュウグウは，C 型小惑星に分類され，炭素質コンドライト隕石に類似した始原的な含水鉱物に富む天体である．2014 年 12 月に地球を飛び立った探査機「はやぶさ 2」は，2020 年 12 月にリュウグウ試料（約 5.4 g）を地球に帰還させた（Tachibana et al., 2022; Okazaki et al., 2022）．リュウグウの試料は，科学立案（Tachibana et al., 2014）を現実のものとして，私たちに特別な機会を与えた（Herd, 2023）．リュウグウは，太陽系誕生から 46 億年の有機分子とその化学進化の歴史が記録されており，地球が誕生する前の姿，とくに有機分子群の性状を直接記載することができた（e.g., Naraoka et al., 2023; Oba et al., 2023a; Takano et al., 2024）．仮に，地球外試料である炭素質隕石を「宇宙からの手紙」になぞらえれば，はやぶさ 2 プロジェクトは，「手紙の送り元」を訪問し，故郷（ふるさと）の原典情報を持ち帰ることと表現できる．本稿では，誌面の制約上，とくに可溶性の有機物と水質変成の相互作用の視点（図 1）でまとめた．

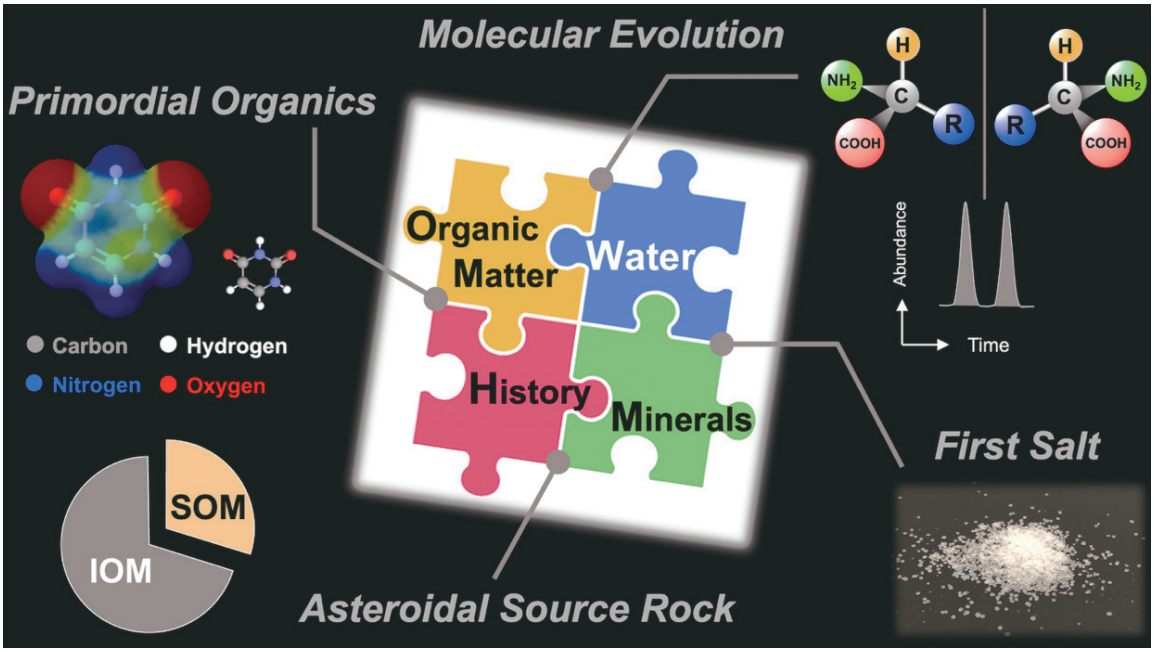


図 1　炭素質小惑星リュウグウにおける分子進化と水―有機物―鉱物相互作用を理解するための概念図．右上はアミノ酸の鏡像異性体とクロマトグラフィーによる分離評価（Naraoka et al., 2023），右下は「塩（Salt）」の形成と析出を示した（Yoshimura et al., 2023），左上は，炭素・水素・窒素・酸素から構成される核酸塩基（Oba et al., 2023b）などの始原的な有機分子．これらの多様な分子組成，立体化学，鉱物学的特徴を組み合わせ，水と鉱物の相互作用や水質変成に伴う有機分子群の生成・進化・保存過程を読み解くことで，太陽系初期の物質進化を理解する（Takano et al., 2024）．（高野作成）

*海洋研究開発機構　物質地球科学研究部門　部門長，生物地球化学センター　センター長

79 周年秋季講演会（令和 7 年 11 月 8 日）講演

リュウグウ：初生的な「分子進化」の実験室

リュウグウの試料は，私たちに何を語りかけるだろうか．まず，地球帰還したリュウグウ試料は，太陽系で最も始原的な物質であることが分かった（Yada et al., 2022）．初期分析チームは，小惑星リュウグウの 2 地点から採取された試料を用いて，初生的な有機分子群および水―鉱物―有機物の相互作用の性状を解析した（図 2）．太陽系の元素存在度や同位体組成について，基準値（＝標準物質）となる炭素（C），水素（H），窒素（N），酸素（O），イオウ（S）などの有機物を構成する元素が豊富に存在していた．分析の結果，最表層の試料（A0106）には，3.8wt% の C，1.1wt% の H，0.16wt% の N，3.3wt% の S，12.9wt% の熱分解性 O が含まれており，揮発性軽元素（CHNOS）の合計は約 21.3% に達することが明らかとなった（Naraoka et al., 2023）．リュウグウの地下試料を含む C0107 との 2 地点間の比較を図 3 に示した（Takano et al., 2024）．これらの含有量は，これまでに報告されている炭素質隕石の中でも比較的高く，リュウグウが揮発性元素に富む始原的性質を強く保持した天体であることを示している（Naraoka et al., 2023; Okazaki et al., 2023; Hashizume et al., 2024）．軽元素の同位体的特徴は，既知の隕石群の中では最も始原的とされる CI 型（Ivuna タイプ）炭素質コンドライトと類似していると評価された．この最表層の軽元素の存在量は，小惑星ベヌーの初期記載において，最初にクローズアップされた（Lauretta et al., 2024; Glavin et al., 2025）．

多様な親水性の有機分子群とアミノ酸の鏡像異性体の特徴

小惑星リュウグウは，「水，豊富な有機物，鉱物」×「46 億年」という時間積分も記録した分子進化の実験室と言える．リュウグウの親水性有機物を対象とした精密分析から判明したことを概観する．リュウグウの可溶性成分には，CH，

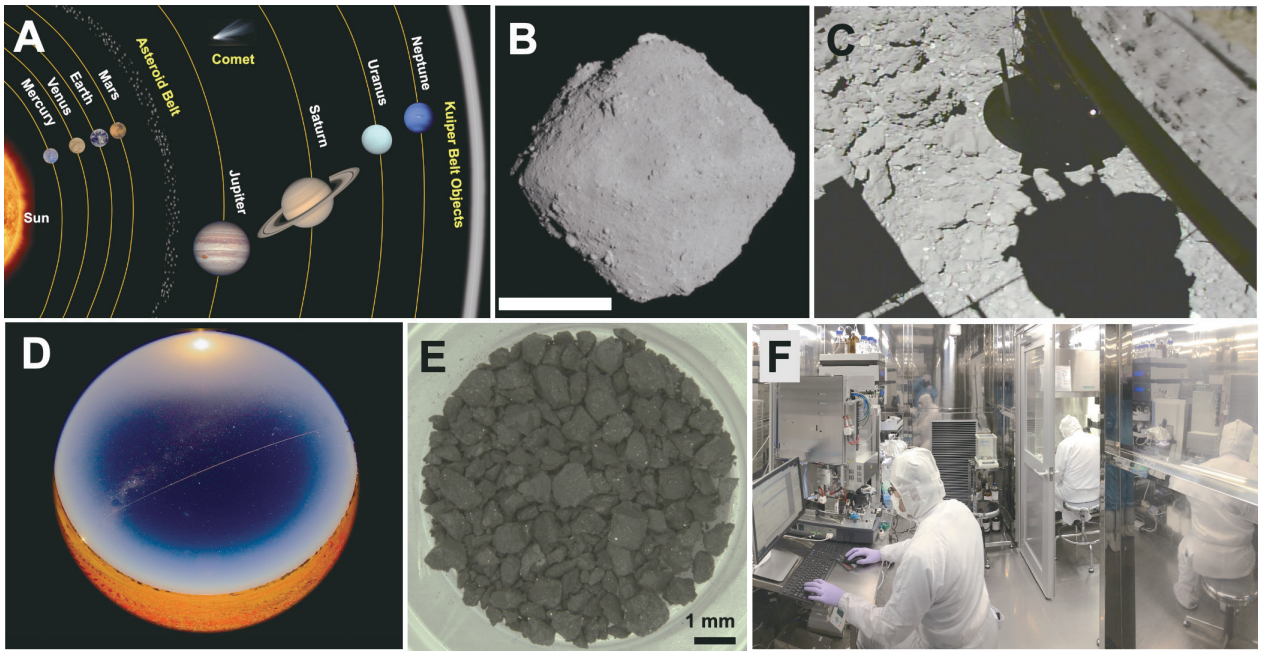


図 2　探査機「はやぶさ 2」による小惑星リュウグウの試料採取・地球帰還と有機分析の概要．（A）太陽系と小惑星帯の位置関係（高野作成）．（B）リュウグウの全体像（©JAXA/ 東大など）．（C）リュウグウ表面での試料採取時のタッチダウンの様子（©JAXA）：CAM-H イメージ 2019 年 2 月 22 日，07:28（JST），高度 4.1 m，既報（Tachibana et al., 2022）を参照．サンプラーチームの概要（Tachibana et al., 2022；橘ら，2014）および技術開発（Sawada et al., 2017; Okazaki et al., 2017; Takano et al., 2020; Sakamoto et al., 2022; Miura et al., 2022）は，既報の通り．（D）オーストラリアでの地球帰還カプセルの大気圏再突入の様子（©JAXA）．キュレーションスキームの概要は，既報（矢田ら，2022）に詳しい．（E）回収された黒色のリュウグウ試料（A0106: Naraoka et al., 2023）．スケールバーは 1 mm．（F）クリーンルーム内での試料分析の様子（© 九州大 /JAMSTEC/ 北海道大）．

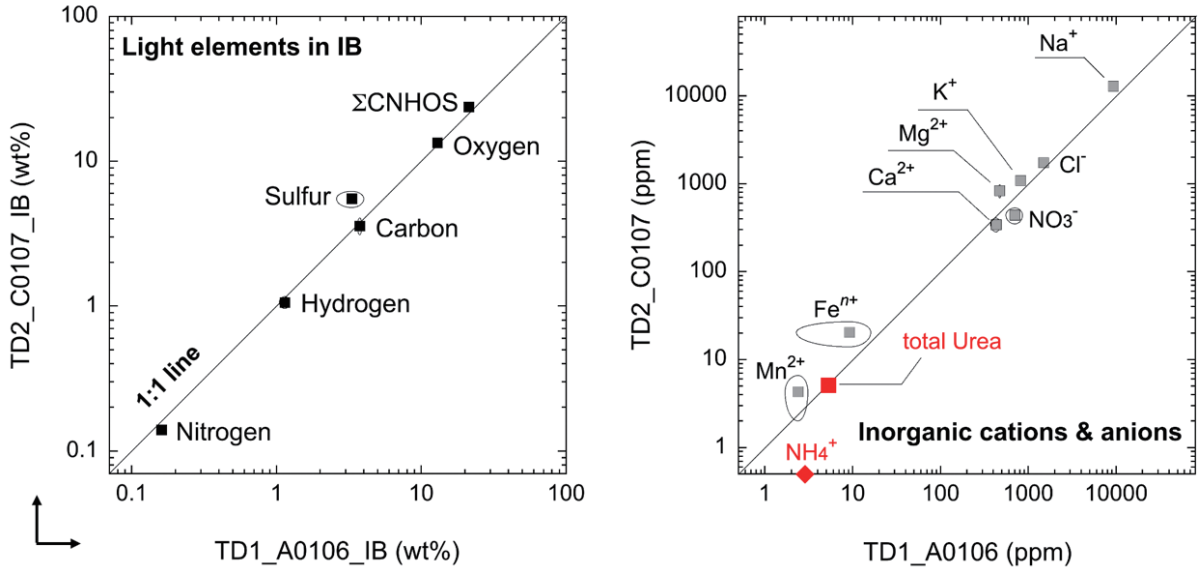


図 3　リュウグウの第 1 回採取試料 A0106（TD1）と第 2 回採取試料 C0107（TD2）の軽元素存在量（wt%）と主要な水溶性イオン成分の比較．横軸は A0106，縦軸は C0107 で，両軸は対数目盛，対角線は 1：1 ラインを表す．左のパネルは，バルク試料（IB）の C，N，H，S と熱分解で測定した O の含有量および合計（wt%）．右のパネルは，熱水抽出液中の無機イオン濃度と総尿素量（ppm）を示す．既報（Naraoka et al., 2023; Takano et al., 2024）に基づいて，作成．

CHO，CHN，CHS，CHNO，CHOS，CHNOS といった多様な元素組成を有する約 2 万種以上の有機分子群が含まれていた（Naraoka et al., 2023; Schmitt-Kopplin et al., 2023）．これらの多数の分子系列群は，メチル化や水酸化などの連続的な化学反応を経て生成された同族体を示している．

その中には，アミノ酸，核酸塩基，カルボン酸，アミンのような親水性の官能基を有する分子群（Oba et al., 2023b; Parker et al., 2023; Furusho et al., 2024; Takano et al., 2024; Koga et al., 2026）や炭化水素などのような非水溶性の分子群（Aponte et al., 2023; Zeichner et al., 2023）が含まれていた．α-アラニン，グリシン，バリンなどのタンパク質構成アミノ酸に加え，β-アラニン，アミノ酪酸，イソバリンなど，非タンパク質性アミノ酸を含め，多様なアミノ酸群を同定した．また，右型と左型の立体構造を持つアミノ酸は，ほぼ 1：1 の等量（ラセミ体）で存在していた（Naraoka et al., 2023; Parker et al., 2023; Furusho et al., 2024）．このラセミ体の存在と非タンパク質性アミノ酸の多様性は，宇宙空間における非生物的な化学プロセスによって合成された証拠である．直鎖構造を持つ β-や γ-アミノ酸が比較的多く検出されたことは，高度な水質変成を受けた炭素質隕石の特徴と合致している．熱水抽出物からはメチルアミン，エチルアミン，プロピルアミンなどの低分子アミンや，酢酸，ギ酸などのカルボン酸が検出された．カルボン酸やメチルアミンは，本来非常に揮発性が高い．リュウグウ試料中に残存していたことは，母天体において安定な「塩（Salt）」とのイオン結合の形態で存在していた可能性を示している（Yoshimura et al., 2023）．

有機分子指標からみたリュウグウの水質変成

放射性同位体の崩壊熱などによって天体内部の温度が上昇すると，氷が融解して液体の水が生じる．この液体の水が，天体を構成する岩石（無機鉱物）や初期の有機物と長期間にわたって反応するプロセスを「水質変成」と呼ぶ．Takano et al.（2024）では，リュウグウ試料（A0106 と C0107）について，シュウ酸，マロン酸，コハク酸などのジカルボン酸に加え，グリコール酸，乳酸，リンゴ酸など多様な親水性有機分子群を新たに 84 種類（有機酸 65 種，含窒素化合物等 19 種）同定し

た（図 4）．このような親水性の有機分子群は，母天体に存在した水と有機物の相互作用を記録している可能性がある．水質変成の分子指標として注目したのは，炭素数 3 のジカルボン酸，マロン酸（HOOC–CH_2–COOH）の相対存在度（mole%）である．この分子に特有な互変異性反応では，水が関わるプロトン移動によって，マロン酸は通常のカルボニル構造をもつケト形と，炭素―炭素二重結合をもつ反応性の高いエノール形の間で異性化を起こし，ビニルアルコール基特有の脆弱性により，さらに水の共存下では，脱炭酸を経て酢酸と二酸化炭素が生じ得る（図 5）．つまり，マロン酸がどれだけ残存しているかが，水の関与した反応履歴を推定する指標になる．

そこでシュウ酸を基準にジカルボン酸の組成を比較したところ，リュウグウのマロン酸の相対量は，CM 型隕石の Murchison や Murray より約一桁低く，この差を天体ごとの水質変成履歴の違いを示すものと評価した（Takano et al., 2024）．この水質変成による分子指標について，炭素質小惑星ベヌーの試料を含め，太陽系のレファレンス試（e.g., Glavin et al., 2024; Koga et al., 2024）との交差検証が進められている（Takano et al., 2025）．水質変成の過程では，鉱物成分が水に溶

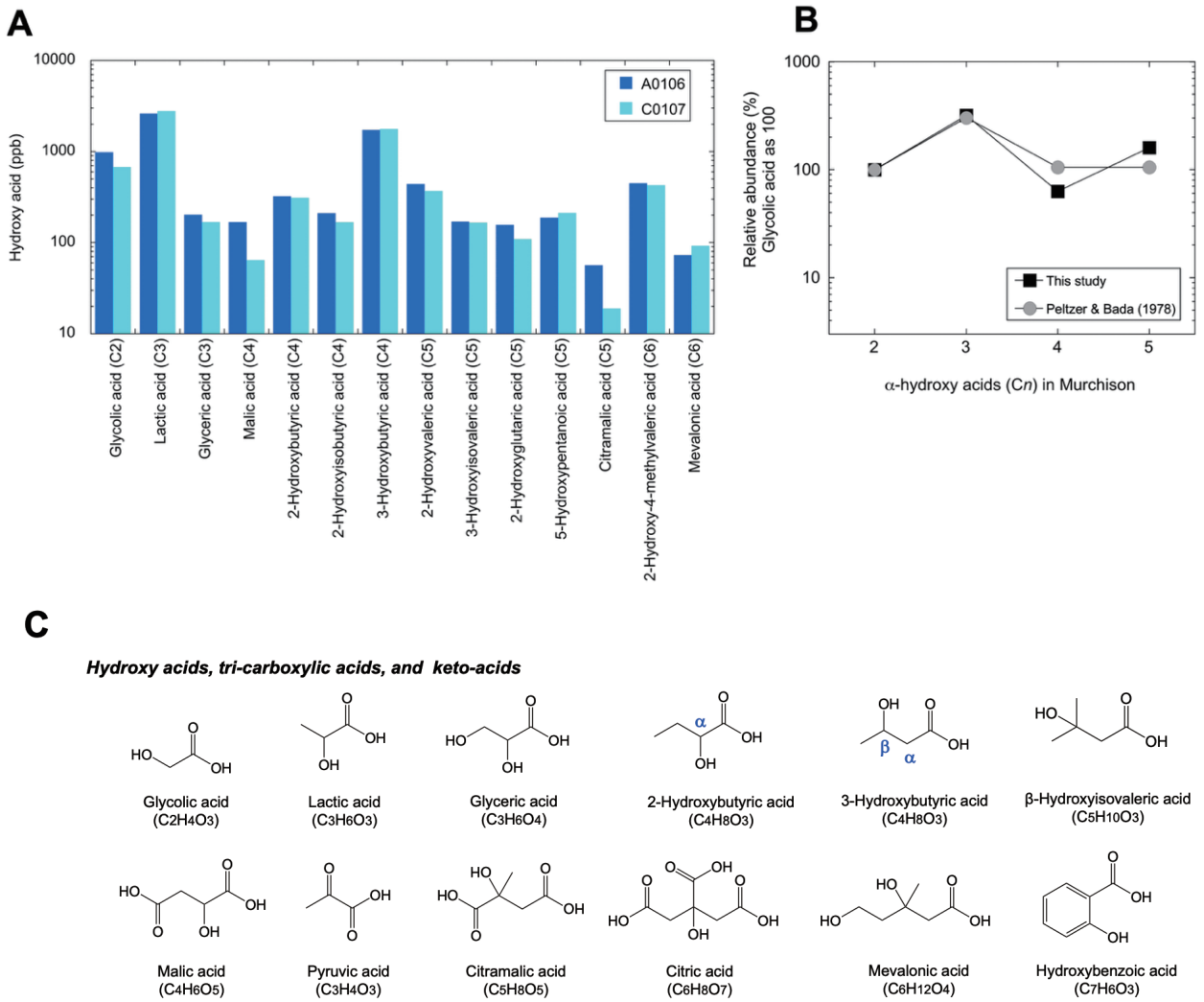


図 4　リュウグウ試料（A0106，C0107）に含まれるヒドロキシ酸の組成．（A）リュウグウ A0106（青）と C0107（水色）の濃度（ppb）．両試料では乳酸と 3- ヒドロキシ酪酸が多く，組成は概ね共通する．（B）マーチソン隕石の C_2～C_5 の α - ヒドロキシ酸：グリコール酸を 100 として規格化し，ここでの分析法（Takano et al., 2024）とレファレンス試料の既報値（Peltzer&Bada, 1978）を比較した．両パネルの縦軸は対数目盛．（C）リュウグウ試料から新たに 84 種同定されたリストのうち，主な親水性分子群（ヒドロキシ酸，トリカルボン酸，ケト酸）を既報（Takano et al., 2024）に基づいて例示した．

け出したり，水が有機物の化学反応を促進したりすることで，二次的な生成物や析出物が形成される（Yoshimura et al., 2024）．

有機硫黄分子群の同定と化学進化の軌跡

イオンクロマトグラフィー／高分解能質量分析の結果から，多様な「有機硫黄分子群」が新たに同定された（図 6）．検出されたリストには，無

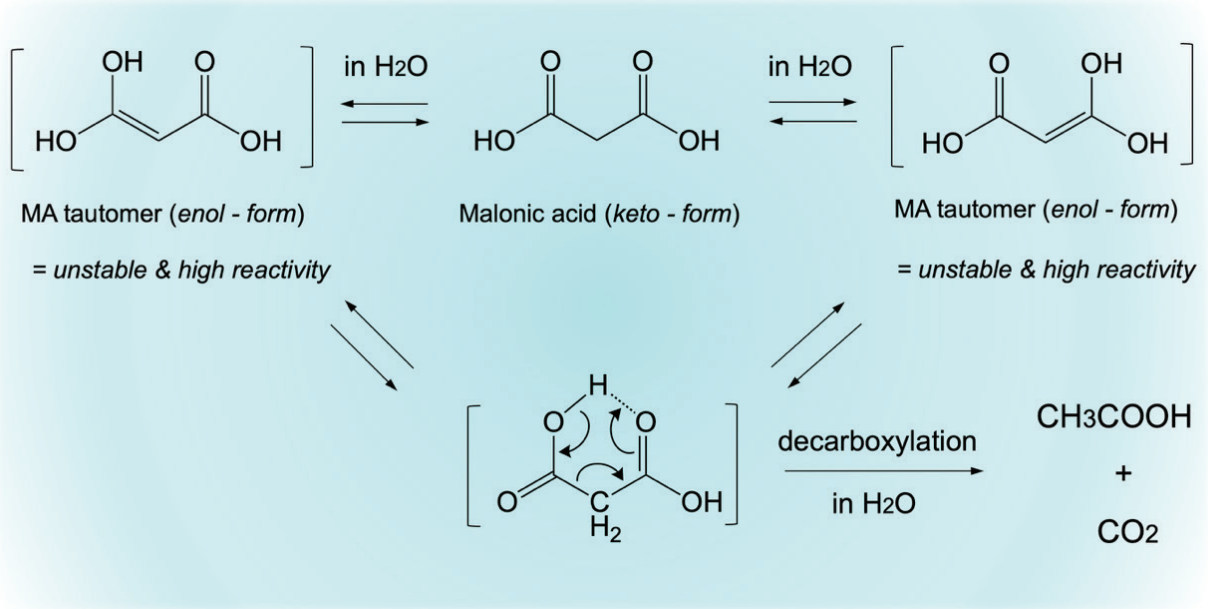


図 5　水の存在下におけるマロン酸のケト―エノール互変異性と脱炭酸反応の様式．中央のカルボニル型構造（ケト形）は，プロトン移動と結合の再配置によって，C＝C 結合とヒドロキシ基をもつエノール形へ可逆的に変化する．エノール形は，相対的に不安定であるため，遷移状態を介して脱炭酸する性質がある．水の存在に依存するこれらの反応は，水質変成環境におけるマロン酸の特異的な減少傾向を考察する基礎となる（高野・大河内，2010；Takano et al., 2024）．

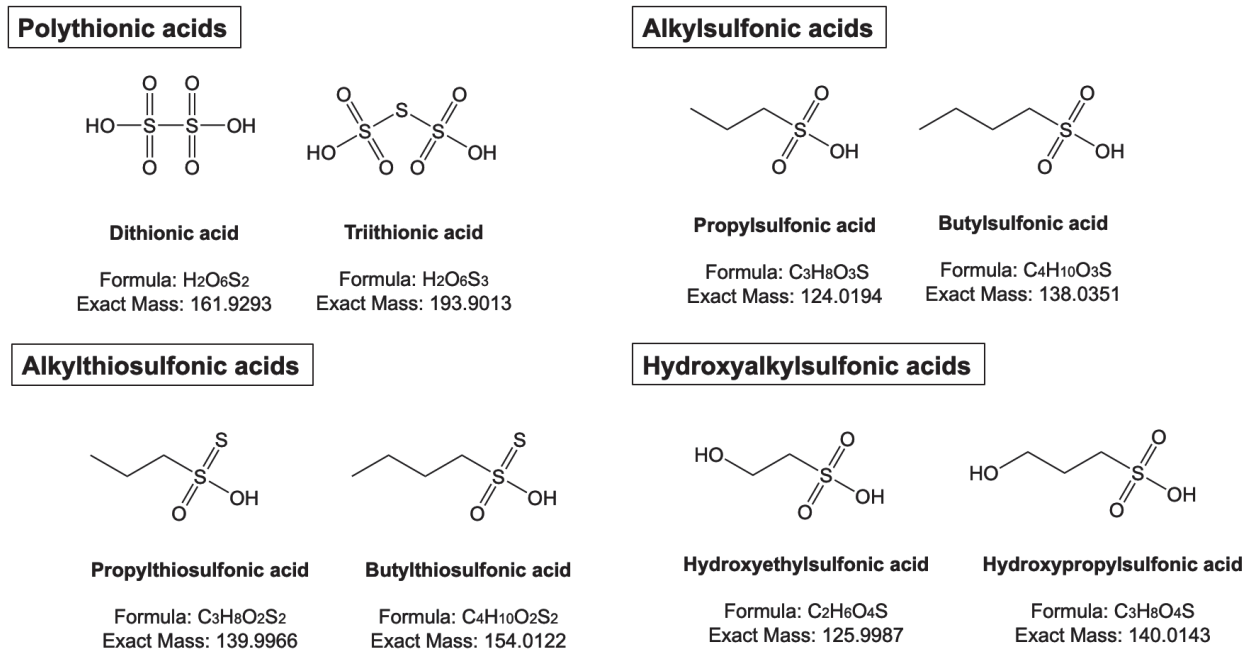


図 6　リュウグウ試料から同定された主な有機硫黄分子群の構造式・組成式およびその精密質量．既報（Yoshimura et al., 2023）に基づいて，ポリチオン酸類，アルキルスルホン酸類，アルキルチオスルホン酸類，ヒドロキシアルキルスルホン酸類を示し，硫黄原子数，炭素鎖長，官能基の違いによる構造の多様性を比較した．ここで示した精密質量は，中性分子のモノアイソトピック質量（Da）であり，高分解能質量分析法による含硫黄成分の分子式推定と構造候補の帰属に用いた．

機ポリチオン酸，アルキルスルホン酸，アルキルチオスルホン酸，ヒドロキシアルキルスルホン酸，ヒドロキシアルキルチオスルホン酸など，幅広い酸化数と複雑な分子構造を持つイオン種が見いだされた（Yoshimura et al., 2023）．初期の太陽系空間に漂っていた始原的な物質において，硫黄成分は主に鉄やニッケルと結びついた「還元的な硫化物（トロイライトなどの鉱物）」として存在していたが，リュウグウ母天体の内部で水質変成が始まると，これらの無機硫化物の一部が水中に溶け出し，水―鉱物―有機物の相互作用を経験した（Yoshimura et al., 2023）．この酸化還元状態の変化の過程で，単純な無機イオンが有機分子と結びつき（エステル化などの反応），親水性や両親媒性を持つ多種多様な有機硫黄分子群へと「化学進化」を遂げたと考えられる．酸化還元反応の生成物とも言える極めて安定で水に溶けない硫黄同素体（S_8）および反応経路の途上に位置する「準安定な親水性硫黄分子群」の存在も示されている（Aponte et al., 2023; Takano et al., 2024）．

卓越する遊離性「ナトリウムイオン」と始原的「塩（Salt）」の生成

最も溶解しやすい成分の化学組成をダイレクトに反映する「熱水抽出物」の陽イオンの組成比を比較したところ，マグネシウム（Mg^{2+}），カルシウム（Ca^{2+}），カリウム（K^{+}）などに比べて，ナトリウムイオン（Na^{+}）が圧倒的に高い濃度で存在していることが明らかになった（Yoshimura et al., 2023）．リュウグウと同じC型小惑星由来とされるCI型コンドライト（オルゲイユ隕石）や地球の蛇紋岩（水質変成を受けた岩石の代表）の熱水抽出液の陽イオン組成と比較したところ，リュウグウの抽出物はこれらの中で最も強いナトリウム過剰の傾向を示した．この現象は，リュウグウ母天体の内部で液体の水が循環していた際，水中に溶け出したナトリウムイオンが電解質として振る舞っていたことを意味する．ナトリウムイオンは，周囲の鉱物や有機物の表面電荷を中和し，化学的な安定化に寄与したと考えられる．さらに，天体内部の水が局所的に蒸発・凍結する（濃縮される）過程で，ナトリウムイオンは，前述のように一部の揮発性低分子有機酸や無機陰イオンとイオン結合を形成し，「ナトリウム塩（Salt）」として固体化・析出したと推測される．リュウグウ試料の二次元イメージングでは，ナトリウム付加の有機物の存在が，岩相の表面で不均質に分布する特徴があり，アステロイドクロマトグラフィーによる視点から大変興味深い（Hashiguchi et al., 2023）．つまり，小惑星での初生的な「塩」が生まれ，有機物や鉱物相と相互作用していた過程を捉えたと言える．

リュウグウの水質変成の最終ステージの復元

「水」の最も基礎的な化学指標の一つが，pH（水素イオン濃度）の観測である．ここでは，μL（マイクロリットル）といった極微少量スケールの水素イオン濃度（pH）計測を行った（Yoshimura et al., 2023）．小惑星リュウグウ由来の水抽出液は，タッチダウンサイト1（TD1）のA0106でpH＝3.95±0.01，同じく，サイト2（TD2）でpH＝4.19±0.01であり，いずれも弱酸性を示した．ちなみに，同一計測法で評価した小惑星ベヌーでは，弱アルカリ性（pH＝8.23±0.02）を示した（Furukawa et al., 2026）．さらに，小惑星ベヌーはアンモニアなどを含む窒素成分に富んでおり（Glavin et al., 2025），窒素複素環分子群の多様性（Oba et al., 2026a）も大きい．弱アルカリ性の水環境は，アルデヒド類から派生・連鎖するホルモース型反応による糖類生成を促進する潜在的因子として，分子進化および有機物の多様性に影響を与えた可能性がある．これらの「水」の基礎情報は，2つの炭素質小惑星の母岩が経験した水質変成の最終段階の水の性状を色濃く反映していると考えられる．南極産の炭素質隕石試料についても同じ計測法でデータ取得が行われ，分子進化との因果関係を考察している（Oba et al., 2026b）．新しい分析法（Hirakawa et al., 2025; 2026）によ

る有機リン分子群の探索について，水質変成の前後での分子進化の描像記載に期待が寄せられる．

リュウグウの微小鉱物「ブロイネル石」と化学進化

研究チームでは，リュウグウ試料のうち，最大サイズの一つ，C0002（図 7）から単離した「ブロイネル石（Breunnerite）」という極めて微小な炭酸塩鉱物に着目した（Yoshimura et al., 2024）．ブロイネル石とは，マグネシウムと鉄を含む炭酸塩鉱物（化学式：(Mg, Fe)CO_3）の一種である．レーザーラマン顕微分光法などの非破壊分析を用いてこの微粒子を同定し（図 7），さらに高精度同位体質量分析法による破壊分析を通して，マグネシウム同位体比を正確に測定した（Yoshimura et al., 2024）．環境の変化（温度低下や水分の減少など）に伴い，水中のマグネシウムは二次的な鉱物として析出していく．これらを読み解くことで，母岩から溶け出したイオンが，濃縮された「にがり」のような溶液を経て，最終的にマグネシウムや鉄を含む炭酸塩鉱物（ブロイネル石）として沈殿したという一連の化学進化のプロセスが裏付けられた．

新たな探査と探究へ

2026 年のノーベル化学賞は，長年に渡り，不斉自己増幅の反応経路を精選されてきた硤合憲三先生の授賞である．アミノ酸のような鏡像異性分子について，炭素質小惑星が，不斉源と光学的あるいは化学的な因果関係があったかどうか（e.g., Takano et al., 2007：高野，2023），そして，何らかの重要な鍵を握っている可能性を良く見極め，その仮説検証に挑んだプロジェクトでもあった（高野・大河内，2010；高野，2023）．当然，既報（e.g., Takano et al., 2007; Sugahara et al., 2018）では，Soai 反応の根源的な価値を重々に記載している．

ここに至るまでの有機分子レベルの高確度な計測法および極微少スケールでの精密な計測法の要素技術は，将来の探査プロジェクトへの標準化を

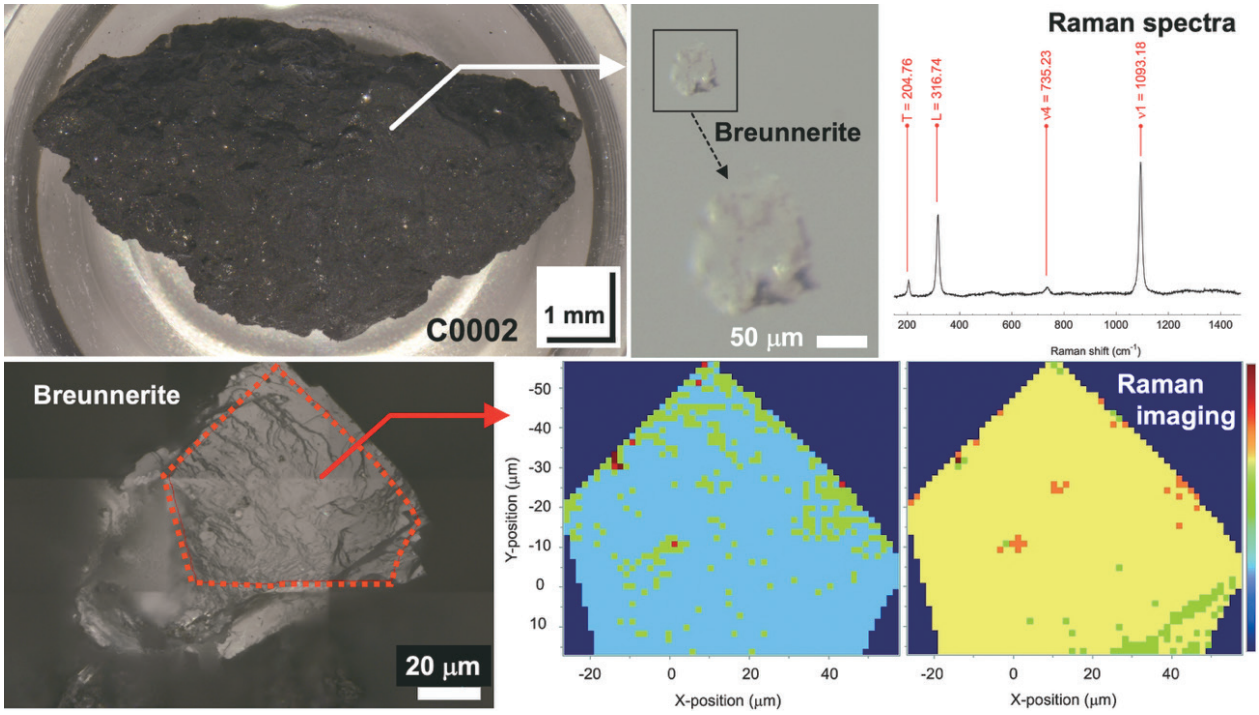


図 7　リュウグウ試料 C0002 から単離したブロイネル石の同定とレーザーラマンイメージング．物理的に単離した微小炭酸塩粒子の光学像およびラマンスペクトル（204.76，316.74，735.23，1093.18 cm^{-1} にピークが認められ，これらの特徴から Mg–Fe 炭酸塩のブロイネル石と同定）．下段左の赤破線は測定領域 ROI で，316.74 および 1093.18 cm^{-1} のラマン信号の空間イメージングを示す．既報（Yoshimura et al., 2024）に基づいて，両画像を光学像と対応させ，粒子内に広がる炭酸塩相を非破壊で可視化した．

含め，太陽系物質科学へのさらなる展開が期待される方法論である（高野ら，2025；大場ら，2025；Takano et al., 2026a）．現在，多角的なアプローチで小惑星ベヌーとの詳細な交差検証が進められている（e.g., Sekine, 2025; Takano et al., 2026b）．キュレーションファシリティの清浄度保証（Yada et al., 2023）の上，軽元素および安定同位体の正確な評価は，リュウグウレファレンスプロジェクト（RRP：Ryugu Reference Project）における太陽系の元素存在度と同位体組成に関する新たな国際標準を確立する上で重要である（Yokoyama et al., 2026）．

火星衛星フォボスを観測し，10 g 以上の表層試料を地球へ持ち帰る火星圏サンプルリターン計画 MMX（Martian Moons eXploration）は，2026 年 10 月 20 日に打上げに成功し，これから本格的な運用フェーズに入る．近い将来，地球帰還試料の元素・同位体・鉱物・有機物組成等の評価に基づいて，フォボスの起源（小惑星捕獲で形成されたのか，火星への巨大衝突で生じたのか）を検証する（Usui et al., 2020; Fujiya et al., 2021; Fukai et al., 2024）．これにより，火星圏の形成・進化史に加え，太陽系外側から地球型惑星領域へ水や有機物が輸送された仕組みを解明し，火星史の理解を深めることが期待されている．

謝辞

この度，表題の講演機会を頂いた公益財団法人 海洋化学研究所（Research Institute for Oceanochemistry Foundation）に謝意を付記する．本稿は，その講演内容をまとめたものである．海洋研究開発機構 物質地球科学研究部門 生物地球化学センター所属のはやぶさ 2 メンバー（敬称略：古賀俊貴，平川祐太，吉村寿紘，小川奈々子，大河内直彦，坂井三郎，伊佐純子）との元素レベルや分子レベルの化学進化と技術開発に関する日々の議論は，文字通り切磋琢磨の機会であり，大変貴重な経験値となった．アイディアの泉のような毎日は，非常に実りある自由闊達な研鑽の時間である．

最後に，はやぶさ 2 サンプラーチームメンバー，初期分析・可溶性有機分析チームメンバー，揮発性ガス分析チームメンバー，そして，はやぶさ 2 プロジェクトメンバー一同に深く感謝申し上げたい．

参考文献

Aponte, J.C., Dworkin, J.P., Glavin, D.P., Elsila, J.E., Parker, E.T., McLain, H.L., Naraoka, H. et al. (2023) PAHs, hydrocarbons, and dimethylsulfides in Asteroid Ryugu samples A0106 and C0107 and the Orgueil (CI1) meteorite. Earth, Planets and Space 75, Article number: 28.

Fujiya, W., Furukawa, Y., Sugahara, H., Koike, M., Bajo, K.-i., Chabot, N.L., Miura, Y.N. et al. (2021) Analytical Protocols for Phobos Regolith Samples Returned by the Martian Moons Exploration (MMX) Mission. Earth, Planets and Space 73, Article number: 120.

Fukai, R., Usui, T., Fujiya, W., Takano, Y., Bajo, K.-i., Beck, A., Bonato, E. et al. (2024) Curation protocol of Phobos sample returned by Martian Moons eXploration. Meteoritics & Planetary Science 59, 321–337.

Furukawa, Y., Sunami, S., Takano, Y., Koga, T., Hirakawa, Y., Oba, Y., Naraoka, H. et al. (2026) Bio-essential sugars in samples from asteroid Bennu. Nature Geoscience 19, 19–24.

Furusho, A., Ishii, C., Akita, T., Oyaide, M., Mita, M., Naraoka, H., Takano, Y. et al. (2024) Enantioselective three-dimensional high-performance liquid chromatographic determination of amino acids in the Hayabusa2 returned samples from the asteroid Ryugu. Journal of Chromatography Open 5, Article number: 100134.

Glavin, D.P., Eckley, S.A., Aponte, J.C., Berger,

E.L., Burton, A.S., Dworkin, J.P., Elsila, J.E. et al. (2024) Investigating the impact of x-ray computed tomography imaging on soluble organic matter in the Murchison meteorite: Implications for Bennu sample analyses. Meteoritics & Planetary Science 59, 105–133.

Glavin, D.P., Dworkin, J.P., Alexander, C.M.O.D., Aponte, J.C., Baczynski, A.A., Barnes, J.J., Bechtel, H.A. et al. (2025) Abundant ammonia and nitrogen-rich soluble organic matter in samples from asteroid (101955) Bennu. Nature Astronomy 9, 199–210.

Hashiguchi, M., Aoki, D., Fukushima, K., Naraoka, H., Takano, Y., Dworkin, J.P., Dworkin, K.E. et al. (2023) The spatial distribution of soluble organic matter and their relationship to minerals in the asteroid (162173) Ryugu. Earth, Planets and Space 75, Article number:73.

Hashizume, K., Ishida, A., Chiba, A., Okazaki, R., Yogata, K., Yada, T., Kitajima, F. et al. (2024) The Earth atmosphere-like bulk nitrogen isotope composition obtained by stepwise combustion analyses of Ryugu return samples. Meteoritics & Planetary Science 59, 2117–2133.

Herd, C.D. (2023) Analyzing asteroid Ryugu. Science 379, 784–785.

Hirakawa, Y., Koga, T., Suzuki, T., Ohkouchi, N., Takano, Y. (2025) Analytical development for detecting femto mole-level organophosphorus compounds in biogeochemical samples by ion chromatography/high-resolution mass spectrometry. ACS Omega 10, 42061–42067.

Hirakawa, Y., Takano, Y., Koga, T., Furukawa, Y., Oba, Y., Naraoka, H., Glavin, D.P. et al. (2026) Evidence of abiotic phosphorylation in samples from asteroid Bennu. Nature, in press.

Lauretta, D.S., Connolly Jr, H.C., Aebersold, J.E., Alexander, C.M.O.D., Ballouz, R.L., Barnes, J.J., Bates, H.C. et al. (2024) Asteroid (101955) Bennu in the laboratory: Properties of the sample collected by OSIRIS-REx. Meteoritics & Planetary Science 59, 2453–2486.

Naraoka, H., Takano, Y., Dworkin, J.P., Oba, Y., Hamase, K., Furusho, A., Ogawa, N.O. et al. (2023) Soluble organic molecules in samples of the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. Science 379, eabn9033.

Miura, Y.N., Okazaki, R., Takano, Y., Sakamoto, K., Tachibana, S., Yamada, K., Sakai, S., Sawada, H. (2022) The GAs Extraction and Analyses system (GAEA) for immediate extraction and measurements of volatiles in the Hayabusa2 sample container. Earth, Planets and Space 74, Article number: 76.

Koga, T., Takano, Y., Oba, Y., Naraoka, H., Ohkouchi, N. (2024) Abundant extraterrestrial purine nucleobases in the Murchison meteorite: Implications for a unified mechanism for purine synthesis in carbonaceous chondrite parent bodies. Geochimica et Cosmochimica Acta 365, 253–265.

Koga, T., Oba, Y., Takano, Y., Naraoka, H., Ogawa, N.O., Sasaki, K., Sato, H. et al. (2026) A complete set of canonical nucleobases in the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. Nature Astronomy 10, 655–663.

Oba, Y., Takano, Y., Dworkin, J.P., Naraoka, H. (2023a) Ryugu asteroid sample return provides a natural laboratory for primordial chemical evolution. Nature Communications 14, Article number: 3107.

Oba, Y., Koga, T., Takano, Y., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., Sasaki, K., Sato, H. et al. (2023b) Uracil in the carbonaceous asteroid

(162173) Ryugu. Nature Communications 14, Article number: 1292.

Oba, Y., Koga, T., Takano, Y., Naraoka, H., Hirakawa, Y., Sunami, S., Furukawa, Y. et al. (2026a) Distribution of extraterrestrial nucleobases, other N-heterocycles, and their precursors in a sample from asteroid Bennu. Communications Chemistry 9, Article number: 132.

Oba, Y., Tomaru, T., Koga, T., Furukawa, Y., Sunami, S., Yoshimura, T., Hirakawa, Y. et al. (2026b) Distribution of purine and pyrimidine bases in Antarctic carbonaceous meteorites. Geochimica et Cosmochimica Acta 427, 284–297.

大場康弘，古賀俊貴，高野淑識，古川善博，奈良岡浩，ジェイソン・ドワーキン，ダニエル・グラビン，ハロルド・コノリー・ジュニア，ダンテ・ローレッタ（2025）炭素質小惑星 Bennu 試料からのアミノ酸・核酸塩基検出とその意義．環境と測定技術，52（7），11–17.

Okazaki, R., Sawada, H., Yamanouchi, S., Tachibana, S., Miura, Y., Sakamoto, K., Takano, Y. et al. (2017) Hayabusa2 sample container: Metal-seal system for vacuum encapsulation of returned samples. Space Science Reviews 208, 107–124.

Okazaki, R., Miura, Y.N., Takano, Y., Sawada, H., Sakamoto, K., Yada, T., Yamada, K. et al. (2022) First asteroid gas sample delivered by the Hayabusa2 mission: A treasure box from Ryugu. Science Advances 8, Article number: eabo7239.

Okazaki, R., Marty, B., Busemann, H., Hashizume, K., Gilmour, J.D., Meshik, A., Yada, T. et al. (2023) Noble gases and nitrogen in samples of asteroid Ryugu record its volatile sources and recent surface evolution. Science 379, eabo0431.

Parker, E.T., McLain, H.L., Glavin, D.P., Dworkin, J.P., Elsila, J.E., Aponte, J.C., Naraoka, H. et al. (2023) Extraterrestrial amino acids and amines identified in asteroid Ryugu samples returned by the Hayabusa2 mission. Geochimica et Cosmochimica Acta 347, 42–57.

Peltzer, E.T., Bada, J.L. (1978) α-Hydroxycarboxylic acids in the Murchison meteorite. Nature 272, 443–444.

Sakamoto, K., Takano, Y., Sawada, H., Okazaki, R., Noguchi, T., Uesugi, M., Yano, H. et al. (2022) Environmental assessment in the prelaunch phase of Hayabusa2 for safety declaration of returned samples from the asteroid (162173) Ryugu: Background monitoring and risk management during development of the sampler system. Earth, Planets and Space 74, Article number: 76.

Sekine, Y. (2025) Asteroid Bennu contains salts from ancient brine. Nature 637, 1056–1058.

Sawada, H., Okazaki, R., Tachibana, S., Sakamoto, K., Takano, Y., Okamoto, C., Yano, H. et al. (2017) Hayabusa2 Sampler: Collection of asteroidal surface material. Space Science Reviews 208, 81–106.

Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N., Harir, M., Moritz, F., Lucio, M., Bonal, L., Quirico, E. et al. (2023) Soluble organic matter Molecular atlas of Ryugu reveals cold hydrothermalism on C-type asteroid parent body. Nature Communications 14, Article number: 6525.

Sugahara, H., Meinert, C., Nahon, L., Jones, N.C., Hoffmann, S.V., Hamase, K., Takano, Y., Meierhenrich, U. (2018) D-amino acids in molecular evolution in space: absolute asymmetric photolysis and synthesis of amino acids by circularly polarized light. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)

Proteins and Proteomics. 1866, 743–758.

Tachibana, S., Abe, M., Arakawa, M., Fujimoto, M., Iijima, Y., Ishiguro, M., Kitazato, K. et al. (2014) Hayabusa2: Scientific importance of samples returned from C-type near-Earth asteroid (162173) 1999 JU3. Geochemical Journal 48, 571–587.

Tachibana, S., Sawada, H., Okazaki, R., Takano, Y., Sakamoto, K., Miura, Y.N., Okamoto, C. et al. (2022) Pebbles and sand on asteroid (162173) Ryugu: In situ observation and particles returned to Earth. Science 375, 1011–1016.

橘省吾，澤田弘崇，岡崎隆司，高野淑識，はやぶさ２サンプラーチーム（2014）「はやぶさ2」サンプルリターン探査：太陽系始源天体探査における位置づけ．地球化学 48, 265–278.

Takano, Y., Takahashi, J.-i., Kaneko, T., Marumo, K., Kobayashi, K. (2007) Asymmetric synthesis of amino acid precursors in interstellar complex organics by circularly polarized light. Earth and Planetary Science Letters 254, 106–114.

Takano, Y., Yamada, K., Okamoto, C., Sawada, H., Okazaki, R., Sakamoto, K., Kebukawa, Y. et al. (2020) Chemical assessment of the explosive chamber in the projector system of Hayabusa2 for asteroid sampling. Earth, Planets and Space 72, Article number: 97.

Takano, Y., Naraoka, H., Dworkin, J.P., Koga, T., Sasaki, K., Sato, H., Oba, Y. et al. (2024) Primordial aqueous alteration recorded in water-soluble organic molecules from the carbonaceous asteroid (162173) Ryugu. Nature Communications 15, Article number: 5708.

Takano, Y., Naraoka, H., Hirakawa, Y., Koga, T., Oba, Y., Haenecour, P., Furukawa, Y. et al. (2025) Primordial aqueous alteration signatures in the carbonaceous asteroids Bennu and Ryugu: Insight from keto–enol tautomerism, Goldschmidt 2025 Conference. doi: 10.7185/gold2025.29671

Takano, Y., Chikaraishi, Y. and Blattmann, T.M. (2026a) Preface for article collection "*Earth, Isotopes and Organics*". Progress in Earth and Planetary Science 13, Article number: 50.

Takano, Y., Oba, Y., Furukawa, Y., Naraoka, H., Glavin, D.P. (2026b) Organic Synthesis and Molecular Evolution. Meteorites and the Early Solar System III workshop. Copenhagen.

高野淑識，大河内直彦（2010）有機分子で探る母天体の物質進化：特に水質変成と分子非対称性の共進化．日本惑星科学会誌 19，254–267.

高野淑識（2023）人新世の開港と太陽系大航海時代，岩波「科学」93，1033-1037.

高野淑識，小川奈々子，吉村寿紘，古賀俊貴，坂井三郎，大河内直彦，大場康弘，古川善博.（2025）炭素質小惑星リュウグウと太陽系物質科学：軽元素および分子レベル解析法の高度化と今後の展望．環境と測定技術 52（1），41–47.

Usui, T., Bajo, K.-i., Fujiya, W., Furukawa, Y., Koike, M., Miura, Y.N., Sugahara, H. et al. (2020) The Importance of Phobos Sample Return for Understanding the Mars-Moon System. Space Science Reviews 216, Article number: 49.

Yada, T., Abe, M., Okada, T., Nakato, A., Yogata, K., Miyazaki, A., Hatakeda, K. et al. (2022) Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu. Nature Astronomy 6, 214–220.

Yada, T., Abe, M., Nishimura, M., Sawada, H., Okazaki, R., Takano, Y., Sakamoto, K. et al. (2023) A curation for uncontaminated

Hayabusa2-returned samples in the extraterrestrial curation center of JAXA: from the beginning to present day. Earth, Planets and Space 75, Article number: 170.

矢田達，安部正真，岡田達明，中藤亜衣子，与賀田佳澄，宮崎明子，西村征洋ほか (2022)『火の鳥「はやぶさ」未来編』その 26〜リュウグウ帰還試料のキュレーション．日本惑星科学会誌 31，153–164.

Yokoyama, T., Avice, G., Busemann, H., Dauphas, N., Glavin, D.P., King, A.J., Kleine, T. et al. (2026) Ryugu Reference Project: Recommendations from the Measurement Definition Team. Meteoritics & Planetary Science 61, 819–848.

Yoshimura, T., Takano, Y., Naraoka, H., Koga, T., Araoka, D., Ogawa, N.O., Schmitt-Kopplin, P. et al. (2023) Chemical evolution of primordial salts and organic sulfur molecules in the asteroid 162173 Ryugu. Nature Communications 14, Article number: 5284.

Yoshimura, T., Araoka, D., Naraoka, H., Sakai, S., Ogawa, N.O., Yurimoto, H., Morita, M. et al. (2024) Breunnerite grain and magnesium isotope chemistry reveal cation partitioning during aqueous alteration of asteroid Ryugu. Nature Communications 15, Article number: 6809.

Zeichner, S.S., Aponte, J.C., Bhattacharjee, S., Dong, G., Hofmann, A.E., Dworkin, J.P., Glavin, D.P. et al. (2023) Polycyclic aromatic hydrocarbons in samples of Ryugu formed in the interstellar medium. Science 382, 1411–1416.