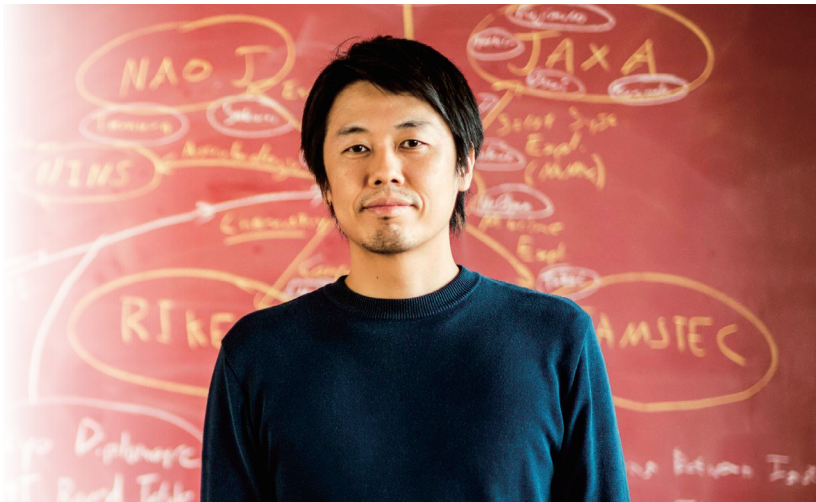


水惑星学の創成

Aqua planetology

[No.4]



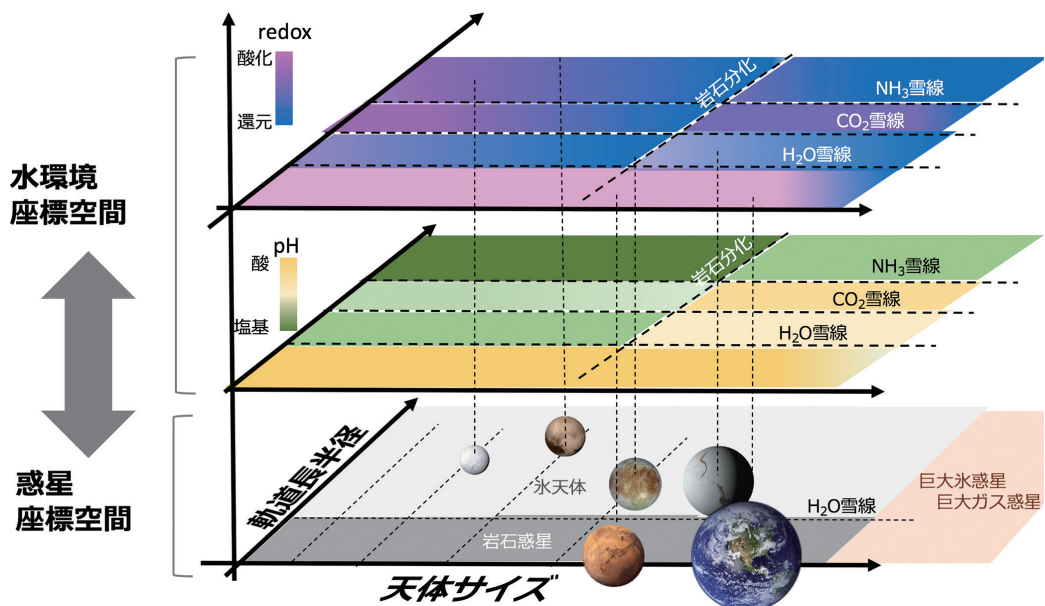


領域代表

関根 康人
kenkani@seisinc

本領域も4年目を終え、最終年度に突入しています。探査機「はやぶさ2」は、予想を上回るほどたくさんのサンプルを届けてくれました。帰還したサンプルの初期分析も始まり、水惑星学で蓄積した知見が総動員され、小惑星リュウグウ母天体の水環境が明らかになるとうとしています。火星や氷天体でのエネルギーに基づいた生命の議論も、日本だけでなく世界でもおこなわれつつあり、世界的な潮流の一端を本領域が担うことができたと考えています。その一つとして、国際誌「Minerals」には、本領域の特集号が組まれました。いくつかの研究成果につきましては、本号のHot Topicsにて紹介しております。また、世界最大の関連分野学会・米国地球物理学学会でも、我々の主催する「Aquaplanetology」セッションは広く認知され、領域メンバーのみならず世界中から研究者が参加・発表しています。是非これらもご注目、ご参加ください。

これまで惑星科学では、天体サイズや中心恒星からの距離といった物理パラメタに応じて、液体の水を持つ天体が出現するかが議論されてきました。本領域は、これら天体が持ちうる海洋の水環境（pHや酸化還元など）を個別に明らかにし、その理解を一般化することで、惑星物理パラメタ空間に水環境を射影することを可能にしました（下図参照）。水惑星に関する理解が、新しいステージに突入したとあってよいでしょう。それら多様な水環境に対して、どのような有機化合物が生成し、どのような生命が誕生しうるのか、有機化学的、あるいは生命科学的特点を惑星パラメタに射影することが、次なる目標となるでしょう。

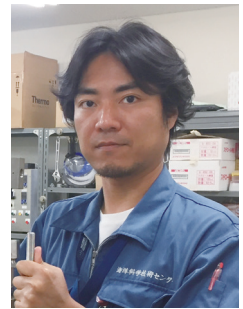


天体サイズと軌道長半径のパラメタに対する、惑星・衛星の種類と、それら天体の持つ海洋の水環境（pH、酸化還元）の関係図。各揮発性分子の雪線と岩石の分化が、水環境を決定する重要な要素となる。

A01 水-岩石反応班

班代表 渋谷 岳造 (海洋研究開発機構・主任研究員)

私たちの班では、太陽系の水を保持する天体の海底熱水活動や風化作用など様々な水-岩石反応プロセスを実験や熱力学モデリングによって再現しています。これまでは、新たに開発した実験装置なども駆使して、地球外の水環境において生命がエネルギー代謝に利用することができる酸化還元物質の濃度を推定してきました。その結果、2020年度は初期火星ゲールクレーターにおいて鉄酸化菌がエネルギー代謝を行うことができる水環境が存在していた可能性があったことを明らかにしました。今後は、他天体の水環境においてどのような代謝反応がエネルギー的に有利であるのかを明らかにしていきます。



A02 水-氷相互作用班

班代表 関根 康人 (東京工業大学・教授)

私たちの班では、天体表面の太陽光などに駆動された化学反応や、氷天体の氷物性を実験的に調べています。水惑星表面では、化学反応で生成する酸化物が表層環境を変化させ、氷物性に影響を与え、海や湖に供給されることで生命のエネルギー源にもなります。火星では、表層の酸化が大気組成進化と密接に関連していることがわかってきました。また、氷天体でも、元素の特性によって、表面物質の酸化反応効率に大きな違いがあることがわかりました。生命利用可能な酸化剤にも、元素の特性に応じた選択性があることが示唆されます。



A03 モデル班

班代表 玄田 英典 (東京工業大学・准教授)

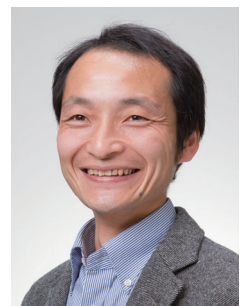
私たちの班では、太陽系における水・物質循環に関する実証可能な物理モデルを構築し、多様な水環境を有する太陽系天体が、いかにしてつくられたのかを明らかにする研究を行っています。これまでに、リュウグウ母天体を含む微惑星の熱史・衝突過程における水の振る舞いに注目した研究、実験データ・理論スペクトル計算・リモセンデータを組み合わせた小惑星母天体組成の推定に関する研究、地球型惑星への水供給プロセスおよび水量進化の研究、氷天体の形成と内部海維持機構に関する研究などを行っています。今後は、これまでに培った知見を総動員して、太陽系における普遍的な水惑星の形成理論の構築を他班と協働して目指します。



B01 分析班

班代表 福士 圭介 (金沢大学・教授)

私たちの班では、先端分析法を駆使することで惑星物質から地球化学的・鉱物学的情報をフルに引き出し、そこに記録された水環境の物理化学的条件(水惑星の水質)を定量的に復元する研究を行っています。2020年度は地球のアルカリ湖の調査に基づいた解析により、エンセラダス内部海の水質成分表の作成に成功しました。また、B01班メンバーが中心となり、大学学部生・大学院生向け教科書「分子地球化学」を作成いたしました(特集「分子地球化学」5ページ)。現在、リュウグウ試料の初期分析チームに参加し、軟X線顕微鏡による分析を行っています。これまでに培った分子地球化学的水質復元法を分析結果に適用することで、リュウグウ母天体の水環境の復元を進めていきます。



B02 探査班

班代表 臼井 寛裕 (宇宙航空研究開発機構・教授)

私たちの班では、小惑星探査機「はやぶさ2」による氷微惑星復元を足がかりに、火星・氷衛星の水環境システムを、探査データ・帰還試料を通じて実証的に解明していくことを目指しています。2020年度は、「はやぶさ2」のデータ解析が進み、対象天体リュウグウの軌道の進化の歴史が明らかになるだけでなく、最も原始的と考えられる岩塊を発見するに至りました。また、リュウグウ試料は2020年12月6日、無事に回収され、現在、多くの新学術メンバーが参加する初期分析チームによる解析が進んでいます。一方、B01班やA03班との融合研究により、準惑星セレスや火星の水環境の復元に一部、成功しました。



小惑星リュウグウの層序学から見えてきた軌道進化史

諸田 智克 (BO2班 分担研究者、東京大学・准教授)



2020年12月6日未明、小惑星探査機「はやぶさ2」は帰還カプセルを無事に地球に届け、そしてまた次の探査天体に向けて旅立っていった。帰還カプセルの中には炭素質小惑星リュウグウのものと思われる5g以上の粒子の存在が確認されている。2021年夏にはじまる初期分析によって、リュウグウとその母天体における水-岩石反応の解明が進むものと期待される。

一方、「はやぶさ2」リモートセンシングデータの解析については、これまでに多くの成果が得られているが(ニュースレター No.2、No.3参照)、昨年度はさらに降下運用の際に取得された高解像度画像データの解析が新たに進み、リュウグウの軌道進化^[1]や衝突破壊の歴史^[2]、始原的岩塊の発見^[3]に関する興味深い成果が発表されている。本稿では特にリュウグウの軌道進化に関する成果を紹介する。なお、始原的岩塊の発見については、本号Hot Topics (11ページ)に解説記事があるのでそちらを参照されたい。

2019年2月22日(日本時間)、「はやぶさ2」はリュウグウの試料採取を目的とした第1回の着陸(タッチダウン)に成功した。着陸の際に得られた高解像度画像から、試料採取のための弾丸発射と探査機上昇のためのガス噴射によって、リュウグウ表面から岩石とともに大量の赤黒い微粒子が舞い上がったことが分かった。飛ばされた岩石の多くは白く変化したことから、もともと赤黒い微粒子は岩石の表面や内部の隙間に付着していたと考えられる。

一方で、リュウグウの全球的な観測から、リュウグウ表面は中低緯度では赤黒く、両極では特に青白いことがわかってきた^[4]。さらに地形との層序関係を調べてみると、この赤黒物質と青白物質の分布は天体衝突によって作られたクレータ地形と関係があることがわかってきた。層序学的下位にある、つまり古い時代につくられたクレータの内部は赤い色を持つものに対して、最近につくられたクレータの内部は周囲よりも青くなっている(図1)。このことは、リュウグウの表面が過去に赤く変化するイベントがあったことを示唆している。その場合、内部が赤いクレータはリュウグウ表面の赤化が起きる前につくられたものであり、内部が青いクレータは表面の赤化が起こった後につくられ、地下の新鮮な青い物質を露出させたものであると解釈できる。

リュウグウ表面を赤くした原因は何であろうか? 赤く変化した領域が中低緯度帯であることから、太陽に起因した現象であると考えられる。また、赤いクレータと青いクレータが明瞭に二分されることから、表面赤化は短期間で起こったことを意味している。これらのことから、過去にリュウグウは一時的に太陽に接近した軌道にあり、その際にリュウグウ表面が太陽に焼かれる、または風化を受けることで表面赤化が起こったと推測される。実際に軌道シミュレーションによると、地球や火星などの内惑星との接近によって地球近傍にある小惑星の軌道は頻繁に変化することが知られており^[5]、今回の成果は、小惑星表面に残された地質記録から、そのような軌道進化を実証的に示したものと言えるだろう。

着陸で観測された赤黒い微粒子は、この太陽接近の際に変成を受けた物質が破碎されたものであると考えられる(図2)。帰還試料は変成をうけていない物質と変成を受けた物質の両方の物質が含まれていると期待される。これらの物質科学分析から、上述したリュウグウの進化シナリオが検証されるとともに、地球軌道に供給される炭素質物質の太陽加熱・風化作用の物質科学的解明が進むことを期待したい。

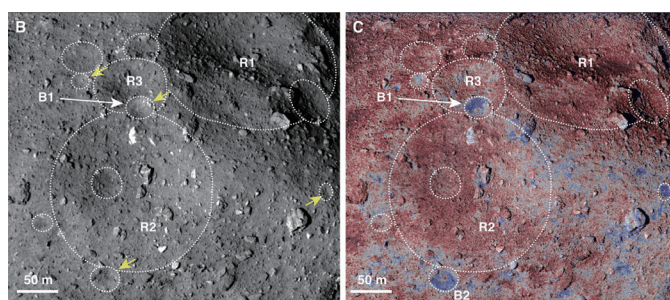


図1 リュウグウ表面のクレータと反射スペクトルの関係 [Morota et al. 2020より改変]。内部が青いB1やB2クレータは他のクレータよりも層序学的に上位にあることから若いクレータであることがわかる。

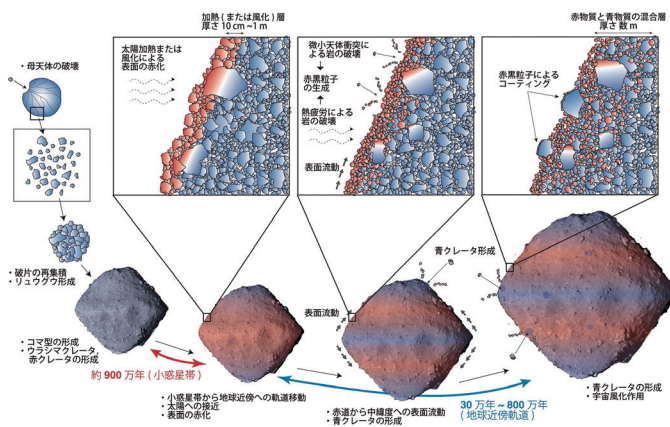


図2 推定されたリュウグウの進化史 [Morota et al. 2020より改変]。

参考文献

- [1] Morota, T. *et al.* (2020) *Science* 368, 654-659.
- [2] Tatsumi, E. *et al.* (2020) *Nature Astronomy* 5, 39-45.
- [3] Sakatani, N. *et al.* (2021) *Nature Astronomy*, doi:10.1038/s41550-021-01371-7.
- [4] Sugita, S. *et al.* (2019) *Science* 364, doi:10.1126/science.aaw0422.
- [5] Michel, P. and M. Delbo (2009) *Icarus* 209, 520-534.

ミクロから初めて見えるマクロの統一像

高橋嘉夫 (B01班)・柏原輝彦 (A01班・B01班)・田中雅人 (B01班)・板井啓明 (B01班)・関根康人 (A02班)・福士圭介 (B01班)

地球や惑星や生命は元素からできている。元素同士の相互作用の積み重ねで地球・惑星は進化し、物質循環が生じ、生命が育まれた。地球化学の役割は、宇宙に存在する物質の元素組成や同位体組成を明らかにすることと、元素間の相互作用を物理化学の法則に従って系統的に扱うことにある。地球化学の二つの役割のうち、前者は「分析化学的地球化学」と呼ぶことができ、高度な手法を駆使して試料を分析することは地球惑星科学において重要な要素である。これに対して、地球惑星の物質を物理化学的な視点から眺め、物理化学の法則に基づいて物質循環を系統的に理解する試みもやはり重要である。こうした「基礎的地球化学」、つまり原子・分子レベルの情報に基づいてあらゆる元素の挙動を系統的に理解しようとする分野が「分子地球化学」である。

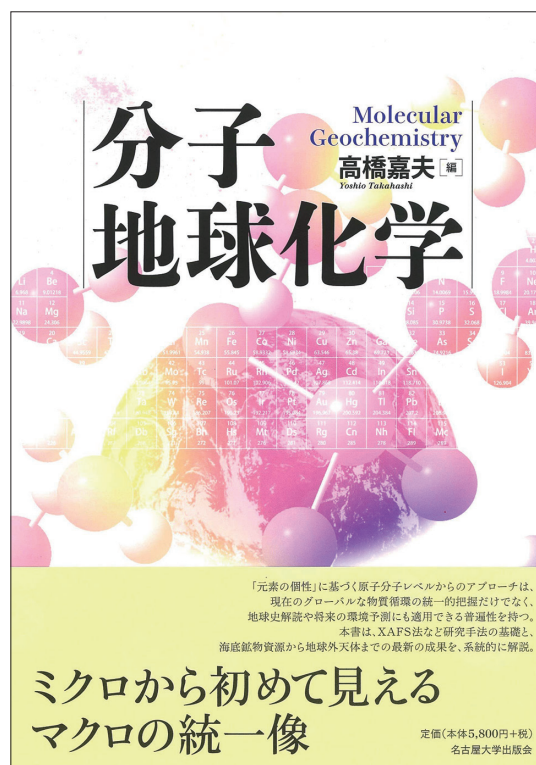
なぜいまさら、「基礎的地球化学」を「分子地球化学」と呼び直す必要があるのだろうか。古典的な「基礎的地球化学」は原子・分子レベルの情報を想像に頼っていた。これに対し、「分子地球化学」は原子レベルの化学反応を直接観察により決定する。元素間の相互作用を理解するための最も重要な物理化学法則に化学平衡論がある。たとえば大気と平衡にある水の水質（雨の水質）や風化帯における鉱物組み合わせは化学平衡論により定量的に予測することができる（Garrels, 1960）。地球科学プロセスを化学平衡論で理解する試みは、20世紀後半におけるもっとも重要な地球化学の研究トピックであったが、90年代に急速に勢いを失った。この原因は、当時展開された化学平衡論では低温かつ短い時間スケールで生じる化学プロセスや微量元素と鉱物の相互作用を適切に予測できなかったためである。化学平衡論の適用には該当する化学反応の想定が必要となる。一方、当時の科学技術では原子と原子の相互作用であるミクロスコピックな化学反応を直接観察することは困難であり、その本質は想像に頼られていた。想像が現実と乖離していた場合、化学反応に基づいた化学平衡論は誤った解釈をもたらすことになる。この状況は分析手法の発展により大きく変わりつつある。現在我々はICP質量分析計を用いることで微量元素の存在量を正確に測定することができ、X線吸収微細構造法を用いることにより、化学結合を直接観察することができる。現在我々は地球科学プロセスに関連する化学反応を制約するすべを身に付け、元素間の相互作用を物理化学の法則に従って扱う試みに挑むことができるのである。

原子・分子レベルの情報に基づき元素の循環を理解する分子地球化学には、岩石圏・水圏・大気圏・生物圏・地球外などの空間的な境界はない。また、過去・現在・未来といった時間的な境界もない。化学的にミクロな情報とマクロな地球・惑星の情報をつなぐ「分子地球化学」の重要性と面白さを伝えるために、B01班を中心とした本領域のメンバーにより教科書「分子地球化学」（高橋, 2021）が刊行された。本書は全3部から構成される。第I部では元素の循環を理解するための物理化学法則や手法（化学熱力学・表面錯体モデリング）と、ミクロな情報を得るための手法（XAFS・量子化学計算）を概説している。また地球化学そのものの必須事項として、地球惑星の進化や現在の環境と化学の関わりを元素の周期表から理解するための基礎を第1章で述べている。これらの基礎に基づき、最先端の分子地球化学的な研究を紹介したのが第II・III部である。このうち主に固液界面の現象の原子分子レベルの解析が地球史・環境などのマクロな現象へとつながるダイナミズムを持つ研究を解説したのが第II部である。また第III部では、生物圏・大気圏・太陽系天体への分子地球化学の応用に関する最近の研究を紹介している。

生命につながる太陽系天体の水・物質循環の理解を目的とする本領域にとって、分子地球化学は本質的に重要である。ぜひ多くの方々はこの分野にご参加いただきたい。

参考文献

Garrels, R.M. (1960) Mineral equilibria: at low temperature and pressure, Harper
高橋嘉夫 (2021) 分子地球化学, 名古屋大学出版会



氷衛星におけるメタンガスの循環を探る

工藤久志 (A02班 研究員、神戸大学・研究員)



氷衛星エンセラダスは、有機物を含んだ海氷粒子などで構成されるブルームがその表面から噴出していることから、地球外生命体が存在する可能性が着目されています。これまでのカッシーニ探査機による分析から、ブルームには水素分子 (H_2) や二酸化炭素 (CO_2)、メタン (CH_4)、炭化水素などが含まれる事が明らかにされてきました^[e.g. 1]。特に CH_4 は、 CH_4 生成菌による CH_4 生成反応など、微生物による生命活動の指標として重要視されています。しかし、エンセラダスにおける CH_4 の生成過程には、微生物由来の他にも初生の CH_4 や岩石での地質化学的な生成などもあることに加え、 CH_4 がブリュームとして放出されるまでに、氷衛星表層の氷地殻と内部海の境界に分布するクラスレートハイドレートによる影響があることも考えられます^[2]。このことから、 CH_4 の存在を検知するだけでは、微生物による生命活動があると言い切ることができません。したがって、近い将来行われる氷衛星の生命探査にあたり、氷衛星の条件下での CH_4 の生成過程や反応の素過程を室内実験により評価することが必須となってきます。これまでに、地球における CH_4 をはじめとした微量ガスの循環の解析は、主に安定同位体を用いて判断されてきました^[e.g. 3]。私は、安定同位体をツールとして、氷衛星における CH_4 の生成過程や反応に伴う素過程を定量的に推定する研究を提案してきました。

この背景を踏まえ、私は水惑星学の研究領域でA02 (水-氷) 班に所属し、クラスレートハイドレートの生成実験や同位体測定、内部海における CH_4 ガスの輸送過程のシミュレーションに取り組んでおります。一方で、地質化学的な CH_4 生成の寄与の見積もりに有用なデータを得るとの目的の下、A01 (水-岩石) 班との連携という形でJAMSTECにインターンシップをさせていただいており、エンセラダスの天体形成時における条件を模擬した CH_4 の生成実験も併せて進めております (実験には、図の熱水実験装置を用いています)。熱水実験で得られたデータと、内部海における CH_4 の輸送過程やクラスレートハイドレートによる影響評価に関するデータを組み合わせることにより、氷衛星における CH_4 の生成過程の推定がこれまでより細かくできるようになることが期待されます。

コロナ禍の影響や実験条件の検討にかなり手こずったりしたことなどから、実験をなかなか開始できずに苦労した場面が少なからずありましたが、その過程で惑星や隕石の形成過程など、新たに勉強した事柄も多く、視野を広げさせていただきました。

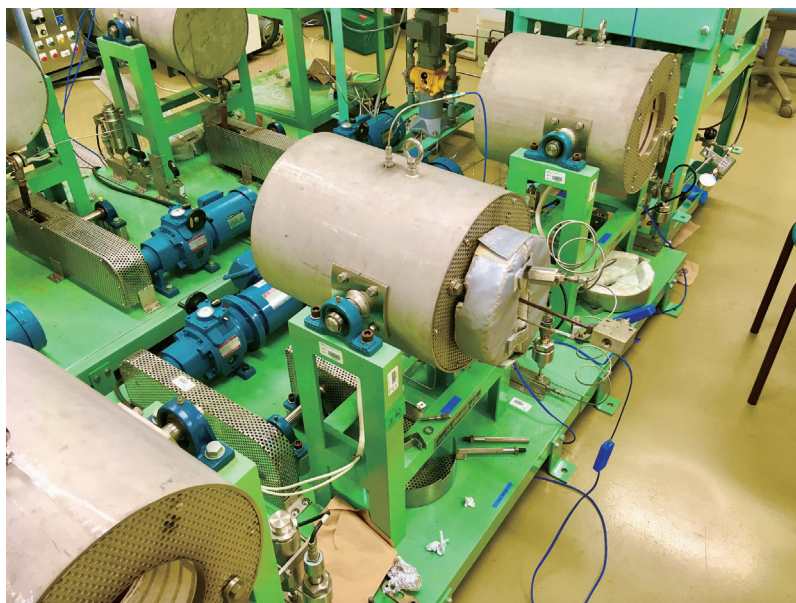


図 初期エンセラダスの条件の再現に用いている熱水実験装置

参考文献

- [1] Waite *et al.* Science 356, 155-159 (2017)
- [2] Kamata *et al.* Nature Geoscience, 12, 407-410 (2019)
- [3] Kudo *et al.* Journal of Oceanography, 74 (3), 305-317 (2018)

A01 水-岩石反応班

(代表)	渋谷 岳造	海洋研究開発機構・主任研究員		深海 雄介	学習院大学・助教
(分担)	廣瀬 丈洋	海洋研究開発機構・グループリーダー	(研究員)	菊池 早希子	海洋研究開発機構・ポストドクトラル研究員
	中村 謙太郎	東京大学・准教授		上田 修裕	海洋研究開発機構・ポストドクトラル研究員
	西澤 学	海洋研究開発機構・研究員			
	柏原 輝彦	海洋研究開発機構・研究員			
	高谷 雄太郎	早稲田大学・主任研究員/研究院准教授 (2021.4より東京大学・准教授)			

A02 水-氷相互作用班

(代表)	関根 康人	東京工業大学・教授	(協力)	丹 秀也	東京工業大学・研究員 (2021.4より)
(分担)	谷 篤史	神戸大学・准教授		鍵 裕之	東京大学・教授
	荒川 雅	九州大学・助教		片山 郁夫	広島大学・教授
	野口 直樹	徳島大学・助教		久保 友明	九州大学・教授
(研究員)	工藤 久志	神戸大学・研究員		数下 彰啓	九州大学・准教授
	遠藤 美朗	東京工業大学・研究員		寺崎 亨	九州大学・教授
	張 乃忠	東京工業大学・研究員			

A03 モデル班

(代表)	玄田 英典	東京工業大学・准教授	(研究員)	齊藤 大晶	北海道大学・研究員
(分担)	倉本 圭	北海道大学・教授	(協力)	荻原 正博	東京工業大学・研究員 (2021.4より)
	鎌田 俊一	北海道大学・准教授		濱野 景子	東京工業大学・研究員
	高橋 芳幸	神戸大学・准教授		東 真太郎	東京工業大学・助教
	黒川 宏之	東京工業大学・特任助教			

B01 分析班

(代表)	福土 圭介	金沢大学・教授	(協力)	若林 大佑	高エネルギー加速器研究機構・助教
(分担)	高橋 嘉夫	東京大学・教授		山下 翔平	高エネルギー加速器研究機構・助教
	木村 正雄	高エネルギー加速器研究機構・教授		菅 大暉	高輝度光科学研究センター・研究員
	武市 泰男	高エネルギー加速器研究機構・助教		小野 寛太	高エネルギー加速器研究機構・准教授
	中田 亮一	海洋研究開発機構・副主任研究員 (2021.7より主任研究員)		足立 伸一	高エネルギー加速器研究機構・教授
	癸生川 陽子	横浜国立大学・准教授		光延 聖	愛媛大学・准教授
	佐久間 博	物質・材料研究機構・主幹研究員		柏原 輝彦	海洋研究開発機構・研究員
				板井 啓明	東京大学・准教授

B02 探査班

(代表)	臼井 寛裕	宇宙航空研究開発機構・教授	(協力)	松岡 萌	宇宙航空研究開発機構・研究員
(分担)	渡邊 誠一郎	名古屋大学・教授		宮本 英昭	東京大学・教授
	荒川 政彦	神戸大学・教授		新原 隆史	東京大学・助教
	岡田 達明	宇宙航空研究開発機構・准教授		葛原 昌幸	アストロバイオロジーセンター・特任助教
	竝木 則行	国立天文台・教授		佐川 英夫	京都産業大学・准教授
	諸田 智克	東京大学・准教授		坂谷 尚哉	立教大学・助教
	中村 智樹	東北大学・教授		野口 里奈	宇宙航空研究開発機構・研究員 (2021.4より新潟大学・助教)
(研究員)	金丸 仁明	宇宙航空研究開発機構・研究員			
	庄司 大悟	宇宙航空研究開発機構・研究員			

公募研究班

「公募研究班 (前期: 2018年度~2019年度)」(当時の所属を記載)

(A01)	北台 紀夫	東京工業大学・研究員		中川 貴司	海洋研究開発機構・主任研究員 (2018.10より香港大学へ移転)
	末松 久幸	長岡技術科学大学・教授	(B01)	城野 信一	名古屋大学・准教授
	奥地 拓生	岡山大学・准教授		数田 ひかる	広島大学・教授
	須田 好	産業技術総合研究所・研究員		伊藤 元雄	海洋研究開発機構・グループリーダー代理
	鹿島 裕之	海洋研究開発機構・ポストドクトラル研究員	(B02)	中川 広務	東北大学・助教
(A02)	数下 彰啓	九州大学・准教授		藤谷 渉	茨城大学・助教
	黒澤 耕介	千葉工業大学・上席研究員			
(A03)	横山 哲也	東京工業大学・教授			

「公募研究班 (後期: 2020年度~2021年度)」

(A01)	Li Yamei	東京工業大学・特任助教	(B01)	吉田 二美	産業医科大学・助教
	牧田 寛子	東京海洋大学・准教授		数田 ひかる	広島大学・教授
	末松 久幸	長岡技術科学大学・教授	(B02)	中川 広務	東北大学・助教
	鈴木 志野	海洋研究開発機構・副主任研究員		長 勇一郎	東京大学・助教
(A02)	鈴木 昭夫	東北大学・准教授		横山 哲也	東京工業大学・教授
	数下 彰啓	九州大学・准教授		平田 直之	神戸大学・助教
(A03)	小河 正基	東京大学・准教授		牛久保 孝行	海洋研究開発機構・技術研究員
	小林 浩	名古屋大学・助教			

原始火星で鉄酸化菌は生存可能?:エネルギー代謝論から推定する火星のハビタビリティ

菊池 早希子 (AO1班、研究員、海洋研究開発機構) (写真)、渋谷 岳造 (AO1班、研究代表者)

火星探査車CuriosityによるGale craterの堆積物の鉱物分析、およびそれらのデータに基づいた実験やシミュレーションから、35~40億年前の火星には生命の生存に適した水(e.g., pHが中性の水)が存在していたことが明らかになった。一方で、このような環境に「どのような生命(微生物)が存在し得たか」という問いには未だに明確な答えがない。

本研究では、Gale craterの泥岩から見つかった酸化鉄(magnetite, hematite)に焦点を当て、これらの生成環境を水-岩石反応を考慮した熱力学計算から推定するとともに、鉄酸化反応から発生するエネルギー値を計算することで

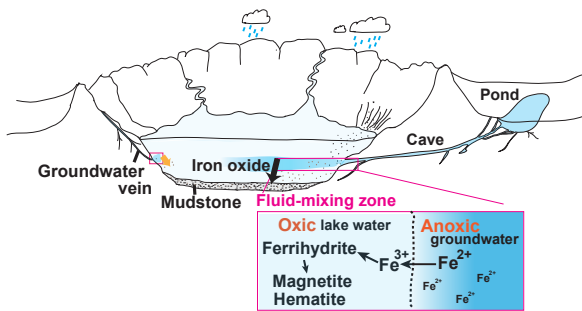
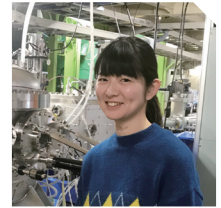


図 熱力学計算から予測したGale craterにおける酸化鉄(magnetite, hematite)の生成環境

火星における鉄酸化菌の存在可能性を考慮した。初期火星で起こりえた水-岩石反応を様々な大気組成、温度、水/岩石比で熱力学的に再現した結果、酸化鉄の生成は低温の酸化的な湖水と、 Fe^{2+} を含む還元的な地下水の混合で説明できることを明らかにした。さらに湖水-地下水混合域で鉄酸化反応によって生まれるエネルギーは、実際に鉄酸化菌が生きている現世の地球の地下水-湖水混合域で鉄酸化反応から得られるエネルギーに匹敵することを明らかにした。したがって、火星に生命が誕生していた場合には、Gale craterでは鉄酸化菌がエネルギー的には生息可能であったと考えられる。

火星には水素、メタン、マンガンなど、微生物が利用可能な酸化剤や還元剤の存在が確認されている。今後はより様々な代謝反応を考慮することで「どの代謝反応が火星でエネルギー的に優位か」など、エネルギー代謝論に基づいて火星のハビタビリティを理解できるだろう。

論文情報 題目: Thermodynamic constraints on smectite and iron oxide formation at Gale crater, Mars: Insights into potential free energy from aerobic Fe oxidation in lake water-groundwater mixing zone 著者: 菊池早希子、渋谷 岳造 論文誌: Minerals (2021) 11, 341.



海底熱水循環が駆動する原始水惑星での非生物学的アンモニア合成

西澤 学 (AO1班 分担研究者、海洋研究開発機構) (写真)、上田 修裕、渋谷 岳造

非生物学的な窒素固定(窒素分子 N_2 からアンモニア NH_3 の合成)は、不足しがちな細胞の窒素源を環境中に供給する重要な反応である。このため、非生物学的な窒素固定が冥王代や太古代の地球のどこで起きたのかが分かると、生命の誕生場が推定できる。これまで、 N_2 や CO_2 を主成分とする初期大気では放電反応により窒素酸化物が生成されることが実験的に示されてきた。一方で、窒素酸化物が水圏に沈着して生じる硝酸塩(NO_3^-)からアンモニアを安定的に合成する地球化学反応は特定されていなかった。そこで本研究では、硝酸塩とコマチアイト(火成岩)の高温高压反応に着目し、海底下の熱水環境を実験室で再現することで、初期地球の海底熱水循環によって熱水-海水混合域(熱水噴出孔)や海洋にアンモニアが定常的に供給されるかを検討した。

一連の実験の結果、コマチアイト-水-硝酸塩系の高温高压反応(温度 $250^{\circ}C$ および $350^{\circ}C$ 、圧力500気圧)でアンモニアが硝酸塩から収率10%で合成されることを発見した。またこの硝酸還元反応はコマチアイト中の二価鉄の酸化反応と共役した安定した化学反応であることが、流体化学組成と二次鉱物種から強く示唆された(図)。コマチアイトに付随する熱水噴出孔は初期地球で活発におきた海台型の熱水活動によって生じる環境で、アルカリ流体や水素分子に加えて、アンモニアが定常的に供給される場であることが強く示唆された。したがって、コマチアイト海底熱水噴出孔は化学進化、始原エネルギー代謝、ならびに有機窒素化合物の合成の点で、生

命の誕生や原始微生物生態系の維持に有利であったと本研究は結論した。

“海底”熱水活動は初期の火星におい

てもその存在が報告されているため(天体衝突型熱水活動)、これにともなって鉄酸化硝酸還元反応が起き、アンモニアが生成されていたことが予想される。この可能性は再現実験から検証可能であり、初期火星のハビタビリティについても重要な知見が得られると期待される。

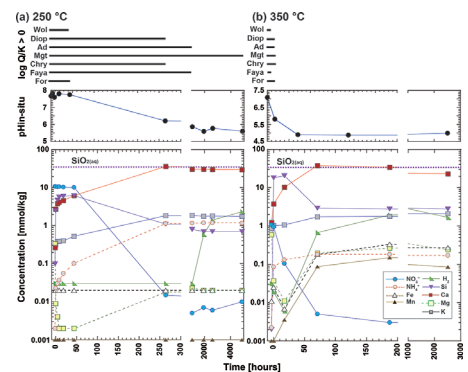


図 コマチアイト-水-硝酸塩系における鉱物の飽和指数、流体pH、および溶存成分濃度の時間変化

論文情報 題名: Stable abiotic production of ammonia from nitrate in komatiite-hosted hydrothermal systems in the Hadean and Archean oceans 著者: 西澤学、斎藤拓也、眞壁明子、上田修裕、斎藤誠史、渋谷岳造、高井研 出版日: 2021年3月19日 論文誌: Minerals, 11, 321



エウロパの内部海における海底熱水環境の存在を熱水実験から探る

丹 秀也 (A02班 研究員、東京工業大学) (写真)、関根 康人、渋谷 岳造、高橋 嘉夫

木星の第二衛星エウロパには、氷地殻の下に広大な内部海が存在していると考えられており、地球外生命の存在可能性の観点から注目を集めている。しかしその海の化学組成や、生命活動において重要となる海底熱水環境の有無、海底岩石の種類などは明らかとなっていない。こうした中、エウロパは火山活動が活発な木星の第一衛星イオから、大量の硫酸を表面に供給され続けている。この硫酸が氷地殻表面の地質的更新に伴い内部海に多量に流入することで、硫酸に富んだ組成の内部海となることが考えられる。一方で近年の大型望遠鏡観測からは、エウロパ表面には内部由来の物質として塩化物が主に存在し、硫酸の化合物は含まれていないことが示唆されている。そのため、内部海において外部由来の硫酸が除去されている可能性が考えられる。

本研究ではこのエウロパ内部における硫酸の循環の可能性に注目した。エウロパ内部海の海底圧力条件を模擬できる熱水反応装置を新規に構築し、内部海に供給された硫酸がどういった化学反応を経験するかを高温高圧反応実験により調べた。その結果、エウロパ海底に弱酸性から中性程度の低pHの高温熱水環境が存在する場合、海水中の硫酸は水素による還元反応を通して、硫化物として除去される可能性が示された。さらに熱力学平衡計算によって、こうした低pHで水素を含んだ熱水は玄武岩質の熱水環境であれば実現される可能性が示された。玄武岩質の海底岩石形成には内部岩石コアが溶

融を経験したことが必要である。したがって本研究で明らかとなった可能性から、エウロパ内部海の化学的状態および硫酸の循環には、内部岩石コアの熱進化が大きな寄与を与えることが考えられる。

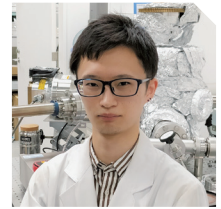


図 新規に構築した熱水反応装置。エウロパの海底熱水環境を模擬した300℃、1000気圧での反応を再現する。

論文情報 題名: The role of hydrothermal sulfate reduction in the sulfur cycles within Europa: Laboratory experiments on sulfate reduction at 100 MPa 著者: 丹秀也, 関根康人, 渋谷岳造, 宮本千尋, 高橋嘉夫 出版日: 2020年11月23日 (電子版) 論文誌: Icarus, vol. 357, 114222.

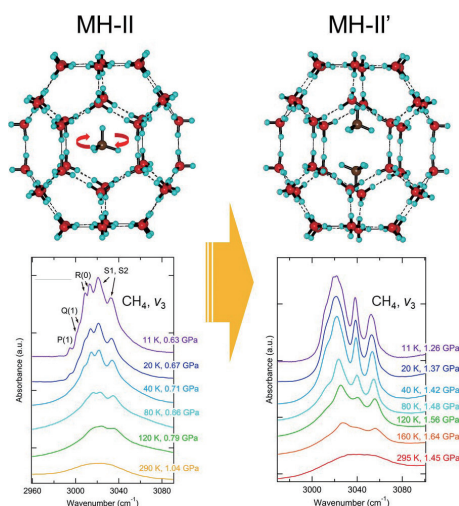
高圧下でもクルクル回転し続けるメタンハイドレート中のメタン

タイタンや冥王星などの大型氷天体内部にはメタンハイドレートが存在することが予想されている。メタンハイドレートは、それらの天体の主要構成物質である氷に比べると熱伝導率が低く、天体内部においては断熱材の役割を果たしているはずである。その低い熱伝導の起源は、水分子から成る籠の中でメタン分子が回転運動しており、それがフォノンを散乱することにある。高圧下におけるメタンハイドレートの熱伝導度は大型氷天体深部の温度構造を解明するうえで重要であるが、測定するのは困難であり、まだ定かではない。とくに高圧においては籠とメタン分子の相互作用が強くなるため、回転運動を続けるかどうか不明ではない。そこで本研究で

野口 直樹 (A02班 分担研究者、徳島大学)

は、赤外分光測定によって高圧力下でメタンハイドレート中のメタン分子が回転運動しているかどうかを明らかにした。

その結果、I相と高圧相のII相においては、少なくとも1.7 GPaまでは回転運動していること、それから、II'相では回転運動が凍結することが分かった(図)。II'相においては、籠の中で2つのメタン分子同士がダイマーを作るために、籠の中で回転するスペースがなくなるのではないかと考えている。本研究の結果は大型氷天体の氷マンツルの最深部に相当する圧力でも、メタンハイドレートの熱伝導率が低いことを示唆している。それが実際に氷天体内部に存在する場合、岩石核と氷マンツルの境界近傍における温度構造に大きな影響を与えることが示唆される。



論文情報 題名: Infrared and Raman spectroscopic study of methane clathrate hydrates at low temperatures and high pressures: Dynamics and cage occupancy of methane. 著者: 野口直樹, 米澤拓也, 横井優, 徳永友真, 森脇太郎, 池本夕佳, 岡村英一. 出版日: 2021年1月5日 (電子版). 論文誌: The Journal of Physical Chemistry C, vol. 125, 189 - 200.

理論モデルと探査データから探る準惑星セレスの表面鉱物組成

黒川 宏之 (AO3班 研究分担者、東京工業大学) (写真)、臼井 寛裕



準惑星セレスは太陽系の小惑星帯で最大の天体であり、小惑星帯の総質量の実に1/3を占める。地上望遠鏡やNASAの探査機Dawnの観測結果から、小惑星帯を起源とする隕石には見られない、アンモニアを層間に含む層状珪酸塩鉱物が発見されたことで、太陽系外縁部での形成と巨大惑星の影響による移動を経験した天体ではないかと着目されている。

セレスに関する未解決問題のひとつは、“暗い”光学特性の原因となっている表面鉱物の組成である。セレスが暗い原因は、上述のアンモニアを含む層状珪酸塩など他の鉱物の存在度の見積りにも影響を及ぼす。過去の研究では、Dawnがその場探査で取得した近赤外スペクトルをもとに、大量の炭

素もしくは酸化鉄が提案されていた。しかし、ガンマ線・中性子線検出器のデータから得られた元素組成は、それほど炭素・鉄に富んでいない。

本研究では、ありうる多様な鉱物組み合わせ・粒径について、スペクトルモデルを生成することで、近赤外スペクトルとガンマ線・中性子線データの両者の制約を満たす鉱物組み合わせについて、これまでの研究より包括的なパラメータ・サーチを行った。その結果、セレスの暗い光学特性は単一の成分ではなく、炭素質コンドライトのマトリックスに見られるような、微細な複数の成分によるものであることが示された。また、この暗い成分の素性の不定性を加味すると、アンモニアを含む層状珪酸塩の含有量は1-11質量パーセントという、従来考えられていたより大きな不定性を持つことが明らかとなった。この不定性を狭めるためには、さらなる観測・探査データの取得が必要であることが示唆された。

論文情報 題名: A Probabilistic Approach to Determination of Ceres' Average Surface Composition From Dawn Visible-Infrared Mapping Spectrometer and Gamma Ray and Neutron Detector Data 著者: 黒川宏之, B. L. Ehlmann, M. C. De Sanctis, M. G. A. Lapôtre, 臼井寛裕, N. T. Stein, T. H. Prettyman, A. Raponi, M. Ciarniello 出版日: 2020年12月14日 論文誌: Journal of Geophysical Research: Planets, 125, e2020JE006606 (2020)

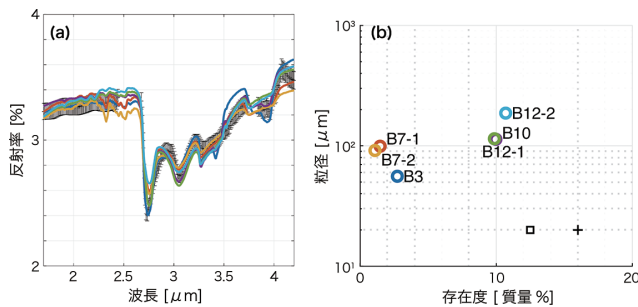


図 a: セレスの近赤外スペクトル (黒) を再現する複数のモデル (色線)。 b: aのモデルに対応するアンモニアを含む層状珪酸塩の存在度と粒径 (黒は先行研究)。

有機物を使って小惑星の熱履歴を推定する

桐生 健斗 (横浜国立大学・大学院生) (写真)、癸生川 陽子、渋谷 岳造

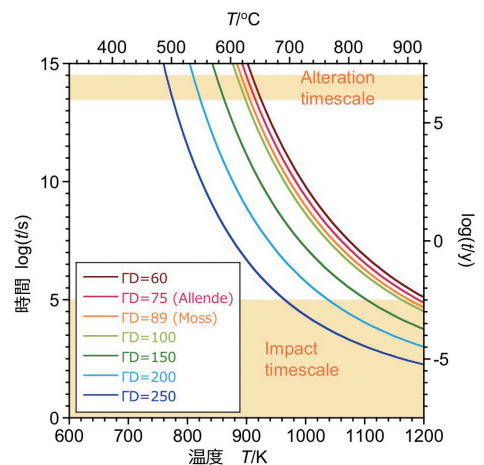


原始的な炭素質コンドライトと呼ばれる隕石には、1% (重量) 前後の有機物が含まれており、その大部分は複雑な高分子の固体有機物である。その厳密な分子構造はわかっていないが、芳香族骨格に様々な官能基が付いたものであることが知られている。コンドライト隕石には様々な経験温度を持つものがあり、これらに含まれる固体有機物の分析によると、もとは比較的芳香族が少なくそれ以外の官能基に富む構造をしていたものが、熱を受けることにより、徐々に官能基が失われ、芳香族に富む構造に変化したと推察される。したがって、熱による固体有機物の構造変化を定量的に評価すれば、これらの隕石の母天体が経験した熱履歴を見積もることができると考えられる。本研究では、ラマン分光法により固体有機物の加熱による構造変化の温度・時間スケールを求め、母天体での熱履歴の指標とすることを目指した。

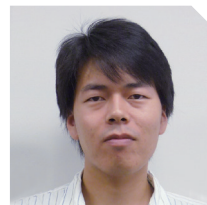
芳香族骨格を持つ有機物のラマンスペクトルは 1350cm^{-1} 付近にDバンド、 1590cm^{-1} 付近にGバンドのピークを持つ。これらのピーク位置、半値幅、強度比は、縮合環の大きさや置換基などに応じて変化するため、熱による芳香族化の進行の良い指標となる。本研究では、熱をほとんど受けていないMurchison隕石を用いて加熱実験を行い、各温度・加熱時間におけるラマンスペクトルからDバンド・Gバンドの各パラメータを得た。Dバンドの半値幅で最もよく加熱温度・時間

を反映した変化が見られたため、反応速度論を用いて解析し、温度と時間の関数として表した (図)。これにより、任意の隕石有機物のDバンド半値幅からその隕石の熱履歴を制約することができる。また、はやぶさ2リターンサンプルの分析からリュウグウの熱史の制約への応用も期待される。

論文情報 題名: Kinetics of thermal evolution of Raman spectra of chondritic organic matter to evaluate thermal history of their parent bodies 著者: 桐生健斗, 癸生川陽子, 伊規須素子, 渋谷岳造, M. E. Zolensky, 小林憲正 出版日: 2020年8月4日 論文誌: Meteoritics & Planetary Science, vol. 55, 1848-1864



40億年前の火星炭酸塩から探る水-岩石反応の痕跡



中田 亮一 (B01班 分担研究者、海洋研究開発機構) (写真)
白井 寛裕、横山 哲也、田辺 学・四垂 将志 (横山
研究室、学生 (当時))、梶谷 伊織 (白井研究室、学生 (当時))

現在の火星は寒冷・乾燥しているが、かつては液体の水が存在していたことが多くの研究から示唆されている。太古の火星に存在していた水の組成や、当時生じた水-岩石反応を明らかにすることは、火星古環境解明、ひいてはハビタビリティにも関連する重要な研究トピックである。約40億年前の火星古環境を反映する現状で唯一の実試料であるAllan Hills

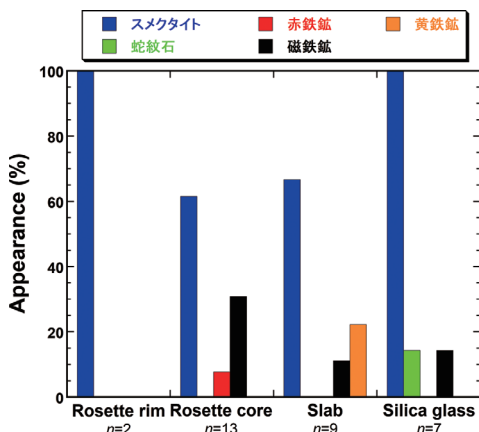


図 存在が示唆された炭酸塩以外の鉄を含む鉱物種。

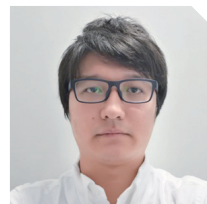
(ALH) 84001 隕石中に含まれる炭酸塩鉱物はこれまでも精力的に研究されており (ニュースレターNo.3では有機窒素化合物発見について記事があるの

で参照されたい)、先行研究では全岩と比べて炭酸塩中での水量が1桁以上多いことが示されている。通常、結晶化した炭酸塩に水が入る (OH基と結合を持つ) ことはないため、何らかの水酸化物が微量に混入している可能性が考えられる。そこで、 $\sim 1-2\mu\text{m}$ に集光したX線を用いた広域X線吸収微細構造 (EXAFS) 解析からALH84001隕石の炭酸塩に含まれる鉄化学種分析を行った。

解析の結果、スメクタイト族の粘土鉱物の存在が多くの分析点から示唆された。粘土鉱物の存在が炭酸塩から示唆されたのは初めての事であり、ALH炭酸塩が水に富む理由の説明となり得る。一方で、火星表面に比較的多く分布している緑泥石の存在は示唆されなかった。また、その他にも黄鉄鉱、磁鉄鉱、赤鉄鉱の存在が示唆されており、40億年前の火星では局所的に酸化還元状態が不均質であった可能性が提示された。

論文情報 題名: EXAFS Determination of Clay Minerals in Martian Meteorite Allan Hills 84001 and Its Implication for the Noachian Aqueous Environment 著者: 中田亮一、田辺学、梶谷伊織、白井寛裕、四垂将志、横山哲也 論文誌: Minerals, vol. 11, 176 (2021).

小惑星リュウグウ上で見つかった微惑星の破片



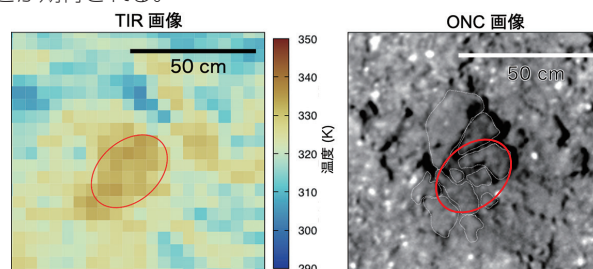
坂谷 尚哉 (B02班、立教大学) (写真)
岡田 達明、諸田 智克、鳶生 有理、野口 里奈、
松岡 萌、竝木 則行、荒川 政彦、渡邊 誠一郎

小惑星探査機「はやぶさ2」が小惑星リュウグウに到着したとき、大きな驚きの一つは熱慣性が低いにも関わらず表面が多くの岩塊に覆われていたことであった。岩塊の低い熱慣性は空隙率が高く断熱性が強いことに起因すると考えられており、ダスト集合体である微惑星が ^{26}Al を代表とする放射性元素による内部加熱、それに伴うダストの焼結、自己重力による圧縮を経験し、中途半端に圧密・固化した状態を反映しているものと考えられている。

本研究では、「はやぶさ2」の小惑星リュウグウへの接近運用中に取得された中間赤外カメラ (TIR) および光学航法カメラ (ONC) の高解像度画像を調査し、小さなクレーター中心付近に周囲よりも温度が高い10cm程度の黒い岩塊の集合体を発見した。熱慣性は $100\text{ J m}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{ s}^{-0.5}$ 以下、空隙率は70%以上と予測される。リュウグウはラブルパイル天体であるため、現在のリュウグウ表面の岩塊は母天体の様々な深さからサンプリングされたと思われるが、今回発見した超高空隙率岩塊は他の岩塊に比べて母天体の中でも変成温度および圧密度が低い表層付近に由来すると考えられる。すなわち、リュウグウ母天体、ひいては太陽系形成初期に誕生した微惑星の状態を最もよく保存した物質である。

更に、降下運用時の複数のTIRおよびONC画像を用いて、

その他の岩塊、および岩塊の少ない砂地の熱慣性・反射率・色の関係を調査した。その結果、砂地のデータは、大多数の普通の岩塊と今回発見した超高空隙率岩塊の混合によって説明できることが分かった。超高空隙率岩塊の細かな破片が砂地に含まれていることを示唆しており、タッチダウンによって採取された可能性がある。今後サンプルの中からこれらが見つければ、リュウグウの起源のみならず、微惑星形成・進化論に対して大きな実証的証拠をもたらすことが期待される。



論文情報 題目: Anomalous porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body 著者: 坂谷尚哉、他 論文誌: Nature Astronomy (2021) DOI: 10.1038/s41550-021-01371-7.

研究員紹介

荻原 正博 (おぎはら まさひろ)



計画研究班：A03班

出身：東京都

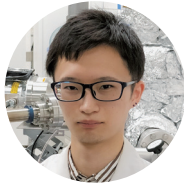
血液型：B型

これまでの研究：天体集積を追う重力N体計算を開発・実行し、太陽系惑星・系外惑星・衛星などの様々な系の形成過程の解明に取り組んできました。この計算は、軌道移動や相対論的効果などの複雑なプロセスを導入していることや、原始惑星系円盤の進化や惑星大気の降着・進化といった別の数値

計算コードと組み合わせていることが売りとなっています。**本領域での役割**：形成中および形成後の地球に「いつ」「どの程度」の水が供給されたのかをN体計算で調べています。「はやぶさ2」などによって制限された太陽系形成中の物質分布と繋ぎ合わせることで、より現実的な水輸送の議論を行うことを目指しています。

本領域への提案：色々な共同研究も行えたらと思っています。私が行うN体計算は他の研究と融合させやすいものだと思います。

丹 秀也 (たん しゅうや)



計画研究班：A02班

出身：広島

血液型：A型

これまでの研究：氷衛星エウロパの表層の物質環境を調べる研究を行ってきました。内部海について、海底での化学反応過程を高圧熱水実験や熱力学平衡計算により再現しました。また高エネルギー電子の降り注ぐ氷地殻の表面について、すばる望遠鏡を利用した観測と電子照射実験データを元に内部

由来と思われる塩物質の組成や粒径の制約を行いました。

本領域での役割：これまでエウロパ表層について複数の手法を用い多面的に調べてきた経験を生かして、他の太陽系内天体についても類似の現象や物質環境における物理化学的パラメータの制約を目指す研究に貢献していきたいと考えております。

本領域への提案：時勢柄難しい部分もあるかと思いますが、他の分野の皆さんと交流をもてる機会を大事にしていきたいと思っています。



2020年7月12日～16日

日本地球惑星科学連合2020年大会

場所：オンライン開催

「水惑星学セッション」

地 球を始めとする惑星や衛星の形成・進化に対して、液体の水が果たした役割を統一的に理解する「水惑星学」に関する研究発表（18件の口頭発表と21件のポスター発表）が行われました。特に、微惑星での水-鉱物化学反応、原始太陽系での水分分布と地球型惑星の水の起源、地球における水循環やその化学的性質の理解、火星の水環境復元、氷衛星における水の挙動と生命生存可能性、水を含む太陽系天体の探査、ハビタブル水惑星の形成・進化など、地球を基礎として太陽系外まで視野に入れた議論がなされました。

2020年12月11日

American Geophysical Union (AGU) Fall meeting

場所：オンライン開催

「Aquaplanetology」セッション

世 界から2万人を超える研究者が参加するAGU meetingにて、「Aquaplanetology: Aqueous Environments and Habitability in the Solar System」セッションを開催しました。本セッションでは、19件の発表が行われました。「水惑星学（Aquaplanetology）」に関して、世界中の様々な分野の研究者と議論および意見交換を行ってきました。

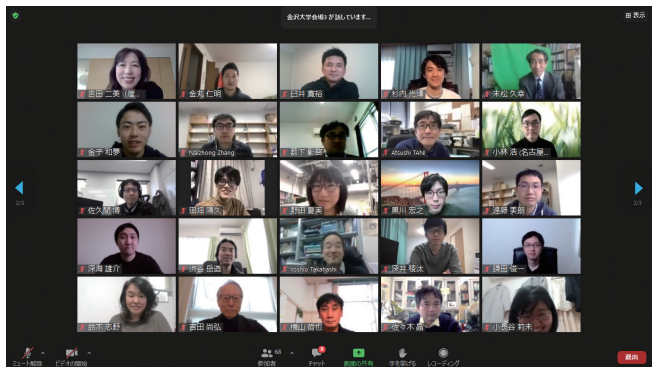
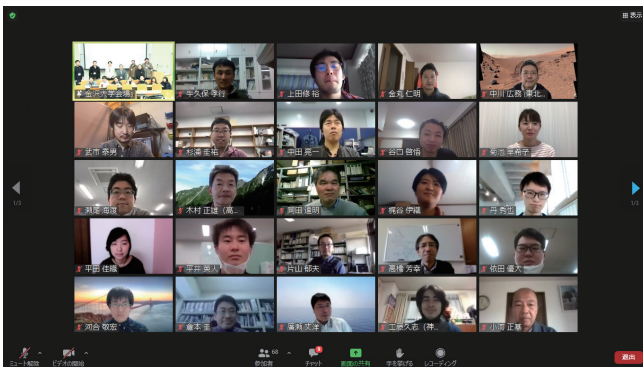
2021年3月8日～9日

全体会議

場所：金沢大学 & オンライン

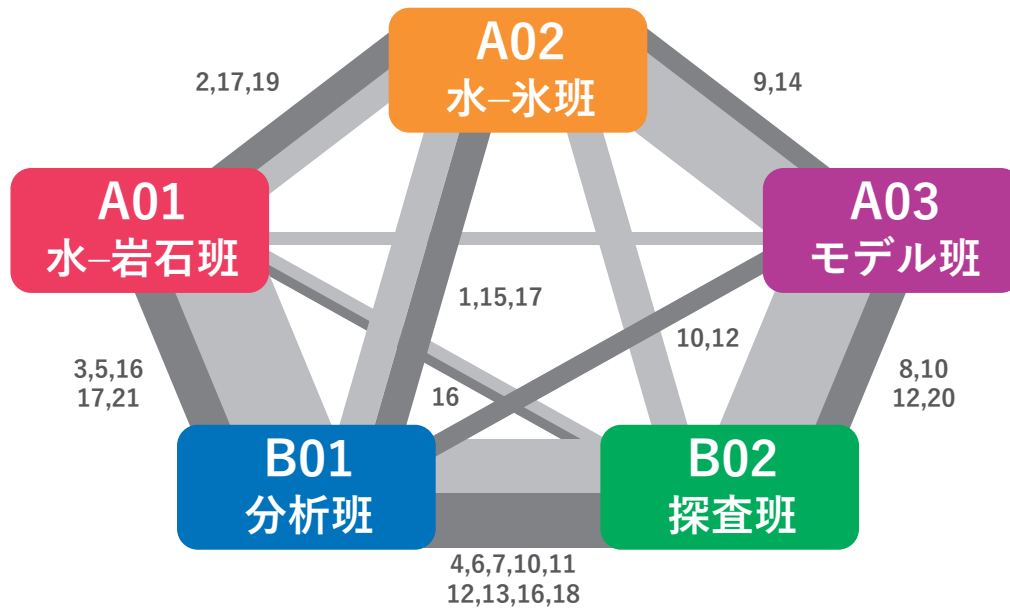
「第4回水惑星学全体会議」

□ ロナ禍ということもあり、現地（金沢大学）とオンラインのハイブリッド開催となりましたが、「水惑星学の創成」を目指した全体会議を、なんとか今年も開催することができました。参加者は60名近くへのぼり、各班の代表研究者よりロードマップを用いた進捗状況の報告、および、最終年度に向けた方針などが議論されました。今年も、すべての公募研究の代表者から、研究の現状を説明していただきました。



本新学術領域がスタートして以来、班をまたぐ多くの融合研究が開始され、学術論文として成果が出てきました。ニュースレターNo.2とNo.3で取り上げた40編の論文に加え、2020年度は、以下の21編の論文が発表されました。

ここでは、複数の班のメンバー（代表者、分担者、協力研究者、研究員、公募代表者）が著者として出版された学術論文（すべて査読あり）のみを対象としています。リスト中の著者の色は、図中の所属班の色に対応しています。図中の番号は、論文リストの番号に対応しています。薄い灰色はニュースレターNo.2とNo.3で取り上げた融合研究に相当します。



- [Fukushi, K.](#), E. Imai, [Y. Sekine](#) et al. (2020) In-situ formation of monohydrocalcite in alkaline saline lakes of the Valley of Gobi Lakes: Prediction of Mg, Ca, and total dissolved carbonate concentrations in Enceladus' ocean and alkaline-carbonate ocean worlds. *Minerals* 10, 669.
- Goto, K. et al. ([Y. Sekine](#), [T. Kashiwabara](#), [Y. Takaya](#)) (2021) Progressive ocean oxygenation at ~2.2 Ga inferred from geochemistry and molybdenum isotopes of the Nsuta Mn deposit, Ghana. *Chemical Geology* 567, 120116.
- Hao, W., [T. Kashiwabara](#), R. Jin, [Y. Takahashi](#), M. Gingras, D. Alessi, K. Konhauser (2020) Clay minerals as a source of cadmium to estuaries. *Scientific Reports* 10, 10417.
- Kikuchi, S. et al. ([S. Watanabe](#), [H. Yabuta](#), [T. Morota](#), [N. Hirata](#), [N. Sakatani](#), [T. Okada](#), [R. Noguchi](#), [T. Nakamura](#), [M. Matsuoka](#), [N. Namiki](#)) (2020) Hayabusa2 landing site selection: Surface topography of Ryugu and touchdown safety. *Space Science Reviews* 216, 116.
- Kiryu, K. et al. ([Y. Kebukawa](#), [T. Shibuya](#)) (2020) Kinetics in thermal evolution of Raman spectra of chondritic organic matter to evaluate thermal history of their parent bodies. *Meteoritics & Planetary Science* 55, 1848–1864.
- Kitazato, K. et al. ([T. Nakamura](#), [M. Matsuoka](#), [M. Arakawa](#), [T. Morota](#), [N. Sakatani](#), [N. Namiki](#), [T. Okada](#), [R. Noguchi](#), [N. Hirata](#), [H. Yabuta](#), [S. Watanabe](#)) (2021) Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu. *Nature Astronomy* 5, 246–250.
- Koike, M. et al. ([R. Nakada](#), [T. Usui](#)) (2020) In-situ preservation of nitrogen-bearing organics in Noachian Martian carbonates. *Nature Communications* 11, 1988.
- [Kurokawa, H.](#) et al. ([T. Usui](#)) (2020) A probabilistic approach to determination of Ceres' average surface composition from Dawn Visible-Infrared Mapping Spectrometer and Gamma Ray and Neutron Detector data. *Journal of Geophysical Research: Planets* 125, e2020JE006606.
- [Kurosawa, K.](#), [H. Genda](#), [S. Azuma](#), K. Okazaki (2021) The role of post-shock heating by plastic deformation during impact devolatilization of calcite (CaCO₃). *Geophysical Research Letters* 48, e2020GL091130.
- [Morota, T.](#) et al. ([M. Kanamaru](#), [N. Sakatani](#), [N. Hirata](#), [M. Matsuoka](#), [H. Miyamoto](#), [T. Nakamura](#), [H. Kobayashi](#), [H. Yabuta](#), [R. Noguchi](#), [N. Namiki](#), [M. Arakawa](#), [S. Watanabe](#)) (2020) Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution. *Science* 368, 654–659.
- [Nakada, R.](#), [T. Usui](#), M. Ushioda, [Y. Takahashi](#) (2020) Vanadium micro-XANES determination of oxygen fugacity in olivine-hosted glass inclusion and groundmass glasses of martian primitive shergottite Yamato 980459. *American Mineralogist* 105, 1695–1703.
- [Nakada, R.](#), G. Tanabe, I. Kajitani, [T. Usui](#), M. Shidare, [T. Yokoyama](#) (2021) EXAFS determination of clay minerals in Martian meteorite Allan Hills 84001 and its implication for the Noachian aqueous environment. *Minerals* 11, 176.
- [Okada, T.](#) et al. ([N. Sakatani](#), [N. Hirata](#), [N. Namiki](#), [M. Arakawa](#), [M. Matsuoka](#), [T. Morota](#), [R. Noguchi](#), [H. Yabuta](#), [S. Watanabe](#)) (2020) Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging. *Nature* 579, 518–522.
- Okamoto, T., [K. Kurosawa](#), [H. Genda](#), T. Matsui (2020) Impact ejecta near the impact point observed using ultra-high-speed imaging and SPH simulations, and a comparison of the two methods. *Journal of Geophysical Research: Planets* 125, e2019JE005943.
- [Sekine, Y.](#) et al. ([K. Fukushi](#)) (2020) Hydrogeochemical study on closed-basin lakes in cold and semi-arid climates of the Valley of the Gobi Lakes, Mongolia: Implications for hydrology and water chemistry of paleolakes on Mars. *Minerals* 10, 792.
- Takano, Y. et al. ([Y. Kebukawa](#), [T. Shibuya](#), [Hayabusa2 project team](#)) (2020) Chemical assessment of the explosive chamber in the projector system of Hayabusa2 for asteroid sampling. *Earth, Planets and Space* 72, 97(17pp).
- [Tan, S.](#), [Y. Sekine](#), [T. Shibuya](#), C. Miyamoto, [Y. Takahashi](#) (2021) The role of hydrothermal sulfate reduction in the sulfur cycles within Europa: Laboratory experiments on sulfate reduction at 100 MPa. *Icarus* 357, 114222(13pp).
- Tatsumi, E. et al. ([T. Nakamura](#), [T. Morota](#), [M. Matsuoka](#), [N. Sakatani](#), [N. Hirata](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), [M. Arakawa](#), [H. Yabuta](#), [S. Watanabe](#)) (2020) Collisional history of Ryugu's parent body from bright surface boulders. *Nature Astronomy* 5, 39–45.
- Taubner, R.-S. et al. ([Y. Sekine](#), [T. Shibuya](#)) (2020) Experimental and simulation efforts in the astrobiological exploration of exoceans. *Space Science Reviews* 216, 9.
- [Usui, T.](#) et al. ([W. Fujiya](#), [K. Kuramoto](#)) (2020) The importance of Phobos sample return for understanding the Mars-moon system. *Space Science Reviews* 216, 49.
- Yamada, S. et al. ([Y. Takahashi](#), [H. Suga](#), [T. Kashiwabara](#)) (2021) Broad-band high-energy resolution hard X-ray spectroscopy using transition edge sensors at SPring-8. *Review of Scientific Instruments* 1, 13103.

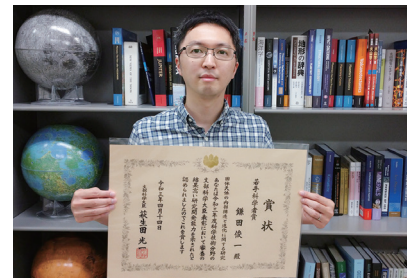
受賞

内閣総理大臣顕彰

本領域メンバーの多くが参画している「はやぶさ2プロジェクトチーム」が2020年12月17日に内閣総理大臣顕彰を受賞しました。はやぶさ2は2014年12月に打ち上げられ、小惑星「リュウグウ」への2度の着陸など数々の世界初の技術を実現させました。2021年12月6日にリュウグウで採取したサンプルの入ったカプセルが地球に帰還しました。現在、サンプルの分析が国内外にて精力的に進められており、本領域メンバーも分析に貢献しております。

令和3年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞

鎌田俊一氏（A03班分担研究者）が、固体天体の内部構造と進化に関する研究において、文科省の若手科学者賞を受賞しました。本賞は、萌芽的な研究、独創的視点に立った研究等、高度な研究開発能力を示す顕著な研究業績をあげた40歳未満の若手研究者に与えられます。



第22回日本鉱物科学会賞（2019年度）

奥地拓生氏（A01班公募研究）が2020年9月に、第22回日本鉱物科学会賞を受賞しました。本賞は、鉱物科学およびその関連分野で顕著な研究業績をあげた研究者に対して贈呈されます。奥地氏は、これまでの常識を覆すような発想で新たな実験技術を開発し、水素を含む地球惑星内部物質の構造と拡散に関する研究において世界最先端の研究をリードし、国際的に高く評価される成果を挙げてきました。これらの研究成果により本賞の受賞に至りました。



日本質量分析学会 同位体比部会 優秀口頭発表賞

重中美歩氏（B01班公募研究・藪田ひかる研究室学生）が、2020年11月24日に行われた日本質量分析学会同位体比部会にて優秀口頭発表賞を受賞しました。発表タイトルは、「地球惑星試料中の高分子有機物のアルカリ酸化銅分解とその生成物の高分解能質量分析」でした。



今後の活動

新型コロナウイルス感染拡大の影響を受けて、2020年度は、大規模な集会を現地にて開くことができませんでした。なんとか、毎年行っている「水惑星学全体会議」については、現地（金沢大学）とオンラインのハイブリッドで開催することができましたが、「水惑星学国際スクール」と「水惑星学国際ワークショップ」については、開催を断念しました。今後の活動については、感染が収束することを願いつつも、オンライン会議を有効活用しながら、本領域のアクティビティーを保っていきたいと思います。



<http://www.aquaplanetology.jp/>