

領域略称名：水惑星学

領域番号：2901

令和4年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「水惑星学の創成」

領域設定期間

平成29年度～令和3年度

令和4年6月

領域代表者 東京工業大学・地球生命研究所・教授・関根 康人

# 目 次

## **研究組織**

1 総括班・総括班以外の計画研究	2
2 公募研究	3

## **研究領域全体に係る事項**

3 交付決定額	6
4 研究領域の目的及び概要	7
5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	9
6 研究目的の達成度及び主な成果	11
7 研究発表の状況	16
8 研究組織の連携体制	21
9 研究費の使用状況	22
10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	24
11 若手研究者の育成に関する取組実績	25
12 総括班評価者による評価	26

**研究組織**

(令和4年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	17H06454 水惑星学の創成	平成29年度～ 令和3年度	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授	5
Y00 国	17H06455 水惑星学の国際展開	平成29年度～ 令和3年度	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授	5
A01 計	17H06455 太陽系天体における水-岩石反応	平成29年度～ 令和3年度	渋谷岳造	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・主任研究員	7
A02 計	17H06456 太陽系天体における水-氷相互作用	平成29年度～ 令和3年度	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授	4
A03 計	17H06457 太陽系天体における水・物質循環のモデリング	平成29年度～ 令和3年度	玄田英典	東京工業大学・地球生命研究所・准教授	5
B01 計	17H06458 水惑星学創成に向けた分子地球化学分析	平成29年度～ 令和3年度	福士圭介	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授	10
B02 計	17H06459 水惑星学創成に向けた太陽系探査	平成29年度～ 令和3年度	臼井寛裕	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授	7
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 7 件 (廃止を含む)</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
A01 公	18H04456 アミノ酸の吸着特性を利用し、生命の誕生をもたらさうる水惑星環境を特定する	平成30年度～ 令和元年度	北台紀夫	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・研究員	1
A01 公	18H04458 磁気圏内衛星の海洋光学探査のためのパルス電子線照射による色中心導入と回復挙動	平成30年度～ 令和元年度	末松久幸	長岡技術科学大学・工学研究科・教授	1
A01 公	18H04460 中性子準弾性散乱によるアモルファスケイ酸塩の吸水・貯水・脱水プロセス解析	平成30年度～ 令和元年度	奥地拓生	岡山大学・惑星物質研究所・准教授	1
A01 公	18H04465 ガスクロマトグラフィーによる低濃度試料中の揮発性脂肪酸分析法の確立	平成30年度～ 令和元年度	須田好	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員	1
A01 公	18H04466 太陽系氷衛星における海底下電子移動現象に基づく電気エネルギー生命圏の予測	平成30年度～ 令和元年度	鹿島裕之	国立研究開発法人海洋研究開発機構・深海・地殻内生物圏研究分野・ポストドクトラル研究員	1
A02 公	18H04463 真空紫外光照射による氷での酸化過程の理解	平成30年度～ 令和元年度	藪下彰啓	九州大学・総合理工学研究院・准教授	1
A02 公	18H04464 室内・数値衝突実験による氷天体衝突時のエネルギー分配・化学反応過程の解明	平成30年度～ 令和元年度	黒澤耕介	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員	1
A03 公	18H04457 隕石の超高精度 Mo 同位体分析による地球の水の起源に関する研究	平成30年度～ 令和元年度	横山哲也	東京工業大学・理学院・教授	1
A03 公	18H04467 (廃止) プレートダイナミクスに起因する氷天体・系外惑星における水・物質循環モデリング研究	平成30年度	中川貴司	国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理科学・先端技術研究分野・主任研究員	1
B01 公	18H04459 炭酸カルシウムコンクリーションから探る地球・火星の古環境	平成30年度～ 令和元年度	城野信一	名古屋大学・環境学研究科・准教授	1

B01 公	18H04461 微惑星上の水・有機反応を模擬した液体フローセル STXM によるその場反応追跡	平成 30 年度～ 令和元年度	藪田ひかる	広島大学・理学研究科・准教授	1
B01 公	18H04468 新しい小惑星試料の分析研究基盤の確立	平成 30 年度～ 令和元年度	伊藤元雄	国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コア研究所・グループリーダー代理	1
B02 公	18H04453 探査機観測データ解析と搭載機器開発による火星の水環境進化の解明	平成 30 年度～ 令和元年度	中川広務	東北大学・理学研究科・助教	1
B02 公	18H04454 含水微惑星の衝突年代から読み解く惑星への水の供給ダイナミクス	平成 30 年度～ 令和元年度	藤谷渉	茨城大学・理学部・助教	1
A01 公	20H04608 Geo-electrochemical Conversion of Amino Acids Induced by Aqueous Alteration in Carbonaceous Planetesimals	令和 2 年度～ 令和 3 年度	Li Yamei	東京工業大学・地球生命研究所・研究員	1
A01 公	20H04610 純鉄に駆動される生命圏の可能性	令和 2 年度～ 令和 3 年度	牧田 寛子	東京海洋大学・准教授	1
A01 公	20H04611 磁気圏衛星の非氷成分同定と線量測定のための氷中ナノ空孔からの光散乱測定	令和 2 年度～ 令和 3 年度	末松 久幸	長岡技術科学大学・工学系研・教授	1
A01 公	20H04620 氷衛星類似環境に生きる微生物の生命代謝とその制約	令和 2 年度～ 令和 3 年度	鈴木 志野	国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コアセンター・研究員	1
A02 公	20H04604 氷衛星内部海水の高圧下における粘度測定と内部海進化モデルの構築	令和 2 年度～ 令和 3 年度	鈴木 昭夫	東北大学・理学系・准教授	1
A02 公	20H04616 低エネルギー電子および紫外光によって誘起される氷での酸化反応の研究	令和 2 年度～ 令和 3 年度	藪下 彰啓	九州大学・総合理研・准教授	1
A03 公	20H04606 火星の内部・表層環境共進化のモデリング	令和 2 年度～ 令和 3 年度	小河 正基	東京大学・総合文化研究科・准教授	1

A03 公	20H04612 地球型惑星形成にともなう大気獲得とその組成進化についての理論的研究	令和2年度～ 令和3年度	小林 浩	名古屋大学・理学系研究科・助教	1
A03 公	20H04617 太陽系考古学：氷天体のサーベイ観測から太陽系の歴史を探る	令和2年度～ 令和3年度	吉田 二美	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員	1
B01 公	20H04615 地球外高分子有機物中の金属元素の探索とその化学形態に記録される母天体水質条件	令和2年度～ 令和3年度	藪田 ひかる	広島大学・理学系研究科・教授	1
B02 公	20H04605 火星大気における水環境進理解のための観測的実証研究	令和2年度～ 令和3年度	中川 広務	東北大学・理学系研究科・助教	1
B02 公	20H04607 水惑星表面の氷・含水鉱物・塩の計測を目指した小型レーザー発光分光装置の宇宙機開発	令和2年度～ 令和3年度	長 勇一郎	東京大学・理学系研究科・助教	1
B02 公	20H04609 小惑星リュウグウ帰還試料の微量元素濃度・同位体組成分析	令和2年度～ 令和3年度	横山 哲也	東京工業大学・理学院・教授	1
B02 公	20H04614 カッシーニ画像データ解析による土星中型氷衛星の熱進化史の解明	令和2年度～ 令和3年度	平田 直之	神戸大学・理学系研究科・助教	1
B02 公	20H04621 炭酸塩安定同位体から遠方形成小惑星の揮発性物質供給源を探る	令和2年度～ 令和3年度	牛久保 孝行	国立研究開発法人海洋研究開発機構・高知コアセンター・研究員	1
公募研究 計 29 件					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 29 年度	317,330,000 円	244,100,000 円	73,230,000 円
平成 30 年度	<del>299268</del> , <del>6450</del> , 000 円	<del>23006</del> , 500, 000 円	<del>691</del> , <del>1950</del> , 000 円
令和元年度	<del>27855</del> , <del>3520</del> , 000 円	<del>214196</del> , <del>3400</del> , 000 円	<del>6458</del> , <del>05920</del> , 000 円
令和 2 年度	<del>26409</del> , <del>1560</del> , 000 円	<del>203161</del> , 200, 000 円	<del>6048</del> , <del>9360</del> , 000 円
令和 3 年度	<del>243188</del> , <del>90890</del> , 000 円	<del>187145</del> , 300, 000 円	<del>5643</del> , <del>1590</del> , 000 円
合計	1, <del>402239</del> , <del>98550</del> , 000 円	<del>1, 079953</del> , <del>4500</del> , 000 円	<del>323286</del> , <del>58050</del> , 000 円

#### 4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

##### ●どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか

宇宙に生命はいるのだろうか——この誰しもが発する問いに対する答えが今世紀中に出されるかもしれない。こう期待される背景には、太陽系探査の進展により、地球以外の天体にも大量の液体の水が存在する(していた)証拠が続々と見つかったりしていることがある。地球上の生命は、その生活環のどこかで必ず水を必要としており、宇宙において生命を探すためにも、まずは液体の水を探す必要がある。火星に見つかる多くの河川地形や粘土鉱物は、かつて表面に大量の水、すなわち海が存在したことを示し、土星や木星の水衛星から噴出する間欠泉は、これら天体の地下に内部海が現存することを示す。我が国の探査機「はやぶさ2」は、太陽系初期に内部に水を含んでいたC型小惑星の探査を行い、2020年にサンプルを地球に持ち帰ってきた。これら探査が一般からも関心を集めるのは、宇宙における生命の探求が、“我々とは何者か”という究極の問いに答えようとする人類の挑戦だからに他ならない。

しかしながら、これら太陽系の水に迫る探査が行われれば、宇宙における生命に関する問いにすぐさま答えられるかといえそうではない。生命の生存に対する、惑星スケールでの水の役割は、化学反応を伴う物質循環を促して物質やエネルギーを供給する点にある(図1)。天体表層では、水や氷の光分解と水素の散逸により不可逆的な酸化が起きている。一方、水が岩石と触れ合う内部では、水-岩石反応により水素などの還元剤や金属イオンが水に供給され、内部から表面へ酸化還元勾配、pH勾配が形成される(図1)。天体上では、水を介したこれら物質の循環・混合により非平衡状態が生まれ、地球上の原始的な微生物は、このような周囲の場からエネルギーを取り出して生命活動を行っている。物理的な水の存否を超えて、宇宙における生命の問題に迫るためには、このような水に関する化学反応や物質循環を含めた、物理と化学が相互作用を行う水惑星の環境システムの理解が重要となる。これらの知見がなければ、どこに着陸し、どの深度まで掘削し、どんな物質を探すべきかがわからず、宇宙における生命探査を持続可能な実証的学問として発展させることはできない。

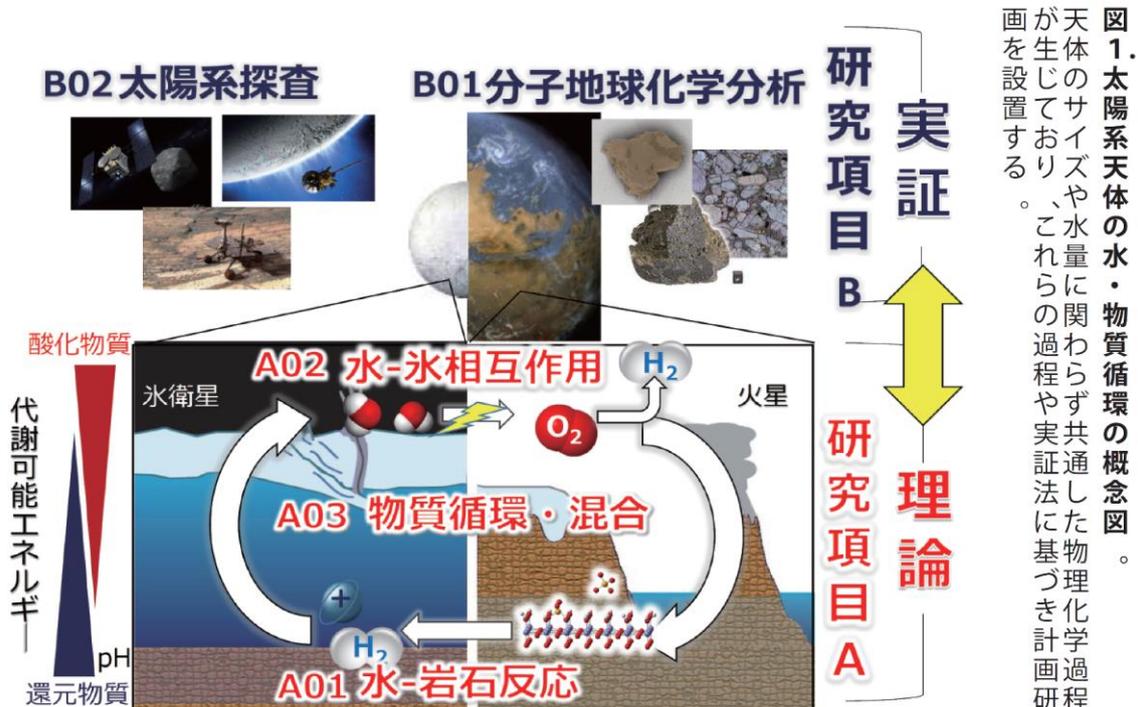


図1. 太陽系天体の水・物質循環の概念図。天体のサイズや水量に問わず共通した物理化学過程を設計しており、これらの過程や実証法に基づき計画が

本領域では、惑星科学(惑星天文学、惑星物理学、太陽系探査学)と地球科学(地質学、地球化学、生命圏科学)の若手中堅研究者が両者を有機的に融合することで、水を保持する太陽系天体——すなわち“水惑星たち”を、単なる水の存否の理解を超えて、水を介した化学反応や物質循環といった一段階上のレベルで統一的に理解する“水惑星学”を創成する。本領域は「はやぶさ2」という我が国が確立し、世界をリードするサンプルリターン探査において、微惑星における水の循環や反応の理解を通じて、その成果を最大化するものである。これにより、林忠四郎が切り開いた理論天文学に端を発する惑星形成論に

水の行方を組み込み、力学と質量成長を迫るだけであった惑星形成論を、物質と反応を含む“水惑星の形成論”に発展させることで、来たる系外地球型水惑星の探索時代にも我が国がトップを走り続けることを可能にする。さらに、我が国は火山や深海など多様な極限環境に恵まれ、そこでの生命圏を物質循環やエネルギー論で予測・実証する極限環境生物学においても世界トップ集団にいる。本領域はこの優位性を活かし、物質循環や化学に基づいたエネルギー論を宇宙に展開することで“水惑星の進化論”を構築し、日本独自の生命探査の実施や国際探査における我が国の存在感の発揮へとつなげる。欧米諸国では大型探査が行われてはいるが予算や研究者数が日本の数十倍と大きいため、探査間の横のつながりを持つとしても実は簡単にはできない。そのような中、小惑星に留まらず、火星、氷衛星、そして地球における水環境や生命を統一的視点で理解する本領域のような計画は世界的にも例を見ない。以上が、本領域が革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域であると考えられる点である。

### ●学術的背景（着想に至った経緯、応募時までの研究成果）

我が国の惑星科学分野では、理論天文学に端を発する惑星の形成進化論や、地球物理学から発展した水分配や惑星気候を記述するマクロスケールの惑星物理モデルを構築してきた。しかし、惑星科学が物理系学問から出発したことに加え、太陽系天体における水の化学的性質（pH、酸化還元など）が多様で、その反応過程や挙動がほとんど未解明のため、これまで惑星上での化学反応や物質循環の要素はほとんど排除されてきた。一方、地質学・地球化学に代表される地球科学分野では、地質試料の微小微量元素分析、極限環境を再現する室内実験、放射光施設を利用した化学種解析を駆使し、分子レベルからの積み上げによって、地球表層で生じる反応過程の解明や物質循環の解析を得意としてきた。これらは、地球環境の理解など多方面で成果を挙げてきたが、未開拓で豊かなフロンティアをその分野全体が求めている。これら半ば独立に発展した我が国の特徴ある先端研究を結合させれば、太陽系天体の水環境や生命存在可能性を一段階上のレベルで理解する研究の潮流を生み出せるのではないかと——これが本領域の着想に至った経緯である。

しかし、化学反応や物質循環を組み込んだ太陽系天体の水環境の理論が構築できたとしても、その実証なくしては学問として継続的に発展することはできない。特に、天体内の鉛直方向の物質輸送は、天体サイズ（重力）や水量に大きく依存する。このことは理論的には容易に予想されるが、その定量的影響を実証することは難しく、地球上の水循環をいくら精密に観測してもこれを明らかにすることは難しい。しかし幸運にも、他天体における水循環を調べることができる機会が今まさに訪れている。探査機「はやぶさ2」は、2018年に小惑星リュウグウ（直径 0.9 km）に到着して詳細なリモートセンシング（リモセン）観測を行い、複数点で得たサンプルを2020年に地球に持ち帰る。C型小惑星は、小重力、比較的少量の水、未分化な岩石といった点で、地球と対極をなす水環境であり、「はやぶさ2」はこのような水・物質循環の“天然の実験室”と呼べる天体を初めて精査する。この機会を利用すれば、太陽系天体における水・物質循環の理論を実証し、新しい学問分野として発展させることができるのではないかと——これが本領域の着想に至ったもう一つの経緯である。

### ●本領域の目的及び概要

本領域では「はやぶさ2」探査という千載一遇の機会を利用し、惑星科学と地球科学の有機的融合により、**研究項目 A「太陽系天体における水・物質循環の理論」と研究項目 B「実試料の分析・観測による水・物質循環の実証」を両輪**とすることで、“水惑星学”を創成することを目指す(図 1)。本領域では、研究項目、計画研究を天体に対してではなく、化学・物理プロセスに基づいて設置する(図 1)。すなわち、内部での水-岩石反応、表層での光-水-氷相互作用、循環・移流による物質の混合過程は、太陽系の水惑星群において共通であり、これらプロセスに着目することで従来の天体ごとの個別論から脱却し、水惑星の形成・進化を統一的に理解する俯瞰的視点を獲得する。

研究項目 A では、水-岩石反応（A01 水-岩石班）や水-氷相互作用（A02 水-氷班）に関して、地球外天体の極限環境を再現する室内装置群を開発し、各物理・化学過程を明らかにする。得られた熱力学や反応データを物理循環モデル（A03 モデル班）に組み込むことで、世界に無い水惑星の水・物質循環を記述するモデルを構築する。研究項目 B では、高度化した X 線顕微鏡（STXM）の専用ビームラインの構築をブレイクスルーとして、これを用いた地球内外試料の分子地球化学分析を行うとともに（B01 分析班）、「はやぶさ2」を始めとする太陽系探査データの解析（B02 探査班）から、水・物質循環を復元・実証可能なデータを取得する。これら装置・分析・解析に注力することで、水惑星学の創成に不可欠かつ全く新しいデータを獲得。本領域のテーマは、各関連学会のロードマップとも整合的であり、10～20 年で新学術が醸成する素地は十分整っている。領域・研究代表者を始め、本領域の中核となっているのは 40 歳前後（採択時）の研究者であり、長期的な分野発展のダイナモとして水惑星を統一的に理解する科学を主導する。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ●審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

審査結果においていただいた所見は、以下の通りである。

本研究領域は、生命の存在に必須である水・物質循環システムの形成・進化を、太陽系天体の測定や室内実験と理論的考察により明らかにすることを目的とし、小惑星探査機はやぶさ2によるサンプルリターン資料の分析や岩石と水の高温高压実験、水氷光化学実験、地球内部モデリングなどを通じて総合的に検討しようとするもので、独創性・新規性が認められる提案である。また、その目的および方法の妥当性が高く、我が国が国際的優位性をもつ惑星探査分野をより強固にするために必要であるだけでなく、惑星科学、基礎物理化学、鉱物学、高压物理学の連携により、幅広い分野へ波及効果を及ぼす可能性がある。また、はやぶさ2計画との連携や軟X線顕微鏡・高压反応装置群の開発により、今後の太陽系惑星探査への貢献も期待され、時宜を得た研究であると評価できる。研究組織は、理論と実証の5つの計画研究に実績のある若手研究者が多く参画する体制になっており、活発な連携のもとでの領域推進が期待できるとともに、今後の当該分野をリードする人材の育成が促進されると期待される。

一方で、惑星探査計画や大型加速器施設の遅れやトラブルに対するリスク管理については、より具体的な対応策の検討が必要である。

### 指摘を受けた事項への対応策：惑星探査や大型加速器施設のトラブルに対するリスク管理

「はやぶさ2」探査、ビームラインの構築については順調に進展・達成しており、重大な遅れやトラブルは回避できた。以下では、それぞれの大型計画におけるトラブルに対して、すでに行ってきた運用におけるリスク管理について対応策を述べる。

#### ➤ 「はやぶさ2」探査、惑星探査計画におけるリスク管理

「はやぶさ2」探査は極めて順調に推移した。一方で、研究期間中には、小惑星近傍探査および地球への帰還においてはリスクがあったため、その管理は重要事項と認識し対応してきた。機会が限られ、かつリスクの大きい太陽系探査では、国際連携によるリスク管理を行うのが一般的である。NASAのOSIRIS-RExは、2018年末にリュウグウと同じ広義のC型小惑星ベヌヌに到着し、探査を進めている。現在まで極めて順調にリモセン観測を行っており、2023年夏に地球に試料が帰還する予定である。詳細な形状観察の結果、ベヌヌは、リュウグウと同様に母天体の大規模な衝突破壊、破片の再集積で形成したラブルパイルと推定される。一方、表面物質はリュウグウに比べ含水量（含水鉱物量）が多く、スペクトルがより青い（短波長の反射率が高い）という違いが存在する。

ベヌヌの表面物質に関する探査データは、OSIRIS-RExの共同研究者である本領域の分担者(渡邊ら)を通じて、探査の初期段階で本領域メンバーとも共有されている。実際、OSIRIS-RExによるベヌヌの形状解析にも、「はやぶさ2」による探査データの解析経験が活かされている(Barnouin et al., 2019 *Nature Geosci.*)。帰還試料も同様に日本側にも配分されるため、これが「はやぶさ2」の試料が万一帰還不能となった場合の、本領域がすでに行ってきた具体的なリスク対応となっている。

このような協力関係は、長年の本領域メンバーを含む探査チームと米国側との交流によって可能となっている。例を挙げれば2017年12月に、JAXA宇宙研でOSIRIS-REx関係者を集めた国際ワークショップを開催するなど、本領域の進める国際活動支援がこの協力体制の構築にも貢献を果たしている。実際に行われた協力の具体例は非常に多くあるが、例えば、岩片で覆われたリュウグウ上の安全な着陸地点選定において、本領域の分担者(諸田ら)を中心として構築した選定方法や教訓は、OSIRIS-RExチームにも共有され、同様に岩片が多く安全な着陸地点の選定の難しいベヌヌへの着陸へと生かされている。

さらにこの小惑星サンプルリターン探査における日米間の連携を強化すべく、両探査計画に関連する研究者を一堂に集めた国際ワークショップを、本領域の支援のもと2019年11月に米国ツーソンにて開催した。ここでは、微惑星における水・物質循環に関する研究成果だけでなく、帰還試料の分析やお互いの探査におけるバックアップ案について話し合い、試料の分配や共有化について再確認を行うことで、リスクに対する補償を可能な限り高めた。その結果、万一「はやぶさ2」の帰還試料が得られなかった場合でも、ベヌヌの試料をOSIRIS-RExチームと共有し、本領域で構築したビームラインを使った分析を行うことで、リスクを軽減する予定になっていた。

## ▶ ビームラインの運営に関するリスク管理

高エネルギー加速器研究機構(KEK)、Photon Factory では、STXM 専用の高度化したビームラインが予定通り完成しており、審査時に受けた指摘であるビームライン施設における本質的な遅れやトラブルは生じなかった。施設前に行っていたリスク管理の具体策としては、惑星探査計画同様、国際連携によるリスクヘッジを行っていた。具体的には、スイス Paul Scherrer 研究所の Jörg Raabe ら、英国 Diamond 放射光の荒木ら、米国 Lawrence Berkeley 研究所の Mary Gilles、Matthew Marcus らとの協力関係を構築している。このような微量・局所領域での分析に関する国際分析ネットワークを構築することによって、日本での構築・施設に大きなトラブルが生じた場合は、国外の放射光施設での分析を行い、これを回避する予定であった。

## ● 中間評価結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況

中間評価においていただいた所見は以下の通りである。

本研究領域は、地球科学と惑星科学の有機的な融合を推進し、地球のような絶妙な水量を持つ惑星の起源や、太陽系内の水惑星の水環境や生命代謝可能エネルギーの定量化を行うものである。期待通りの進展がみられ、極限環境を再現する実験装置群の構築、それらの実験結果をモデルに組み込むことによる太陽系天体の水・物質循環モデルの構築、実試料の微小微量分析を可能にする高度化したビームラインの構築、はやぶさ2リモートセンシング・データを始めとする太陽系探査データの解析等の成果をあげた。これら成果は国際誌を初め専門誌へ掲載されるとともに適切なアウトリーチにおいて公表されている。研究組織は、計画研究と公募研究の研究者が相互に有機的な連絡が行われ、研究が効率的に進められるものとなっている。

今後は、得られたデータと理論モデルの整合を図りながら研究を進展させ、水生命に関わる惑星学の形成、および分野の融合における学際的な成果を期待したい。

## 指摘を受けた事項への対応策：データとモデルとの整合と学際的成果の創出

手法（観測とモデル）や分野（惑星天文学と地球化学・地質学）の融合とそれによる学際的な成果を創出するため、本領域では、年5～6回の頻度で計画研究班を超えたテーマ別の研究集会を開催するとともに、若手研究者を連携先に派遣・共同研究する分野インターンを行ってきた。これによって、中間評価でいただいた分野融合による学際的な成果を期待するというコメントに対応してきた。総括班の主導のもと、実験結果のモデルへの組み込みと理論構築を目的とした「理論連携会議(A01,A02,A03 班連携)」、実験と分析による水環境プロキシ開発を目的とした「プロキシ会議(A01,A02,B01 班連携)」、「はやぶさ2」観測データの解析結果と理論モデルを突き合わせて、水環境を推定することを目的とした「微惑星の水・物質循環会議(A01,A02,A03,B02 班連携)」を開催してきた。

その結果、これらの研究集会が豊かな土壌となり、「8. 研究組織・体制」で述べるように、観測と理論を直接的に整合させてC型小惑星の起源を推定した研究や、環境化学の知見を惑星探査に導入して火星における未解決問題であった水環境や生命利用可能エネルギーの定量化を行うといった学際的な成果が数多く生まれた(e.g., Fukushi et al., 2019 *Nature Comms.*; Kurokawa et al., 2022 *AGU Advances*; Noda et al., 2019 *JGR Planets*, Kikuchi and Shibuya, 2021, *Minerals*)。

中間評価段階では、総発表論文数254件に対して、融合研究（計画研究間の共同研究）による論文数は24件（全体に対して9%）に留まっていた。しかしながら、最終評価段階では、総論文数579編に対して、融合研究の論文は86件（全体に対して15%）と、融合研究の論文数は3倍以上、それが全体に占める割合も約1.7倍に増大した。このように定量的に見ても、中間審査時のコメントへの対応として、地道かつ継続的な融合への努力が継続され、学際的な研究成果が大きく花開いたといえる。

## 6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

### ●研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本領域の設定目的を領域全体が掲げるロードマップ(図2)に照らして説明する。

第1段階(平成29・30年度)の目的は、理論モデルと実証ツールの構築である。研究項目Aでは理論モデル構築を行い、特に、極限環境を再現する実験装置群の構築、及びそれらの実験結果をモデルに組み込むことで太陽系天体の水・物質循環モデルを構築する。研究項目Bでは実証ツールの構築を行い、実試料の微小微量分析を可能にする高度化したビームラインの構築、「はやぶさ2」リモセンデータを始めとする「太陽系探査データの解析」を行う。

第2段階(平成31・令和2年度)での目的は、研究項目AとBの融合・連携により、構築した理論モデル・実証ツールを使った太陽系天体の水・物質循環の推定を行うことである。まず、「はやぶさ2」による小惑星リュウグウの表面物質データを第1段階で構築したモデルで解釈し、母天体である「微惑星における水・物質循環」を推定する。さらに、微惑星における水-岩石反応の知見を火星、氷衛星へ展開する。「火星や氷衛星の水・物質循環モデル」を構築し、探査データを解釈することでこれらの環境進化を推定する。また、第1段階で構築したビームラインによる実験試料の分析に基づき、天然試料から水の温度、圧力、pH、酸化還元状態などの物理化学状態を読み解き、地球外天体の水環境を復元していく。

第3段階(令和3年度)では、以上の知見を統合して、水惑星の形成論と水惑星の進化論に発展させることを目的とする。水惑星の形成論については、「はやぶさ2」帰還試料に対して、開発した実証ツールに基づき分析し、「微惑星の水・物質循環を解明」とともに、惑星形成理論に物質進化を導入し、「地球の持つ水量の決定要因」を明らかにする。水惑星の進化論では、火星や氷衛星の水環境進化とエネルギー論に基づき、「火星・氷衛星生命圏モデル」を構築し、太陽系探査計画の提案を行う。

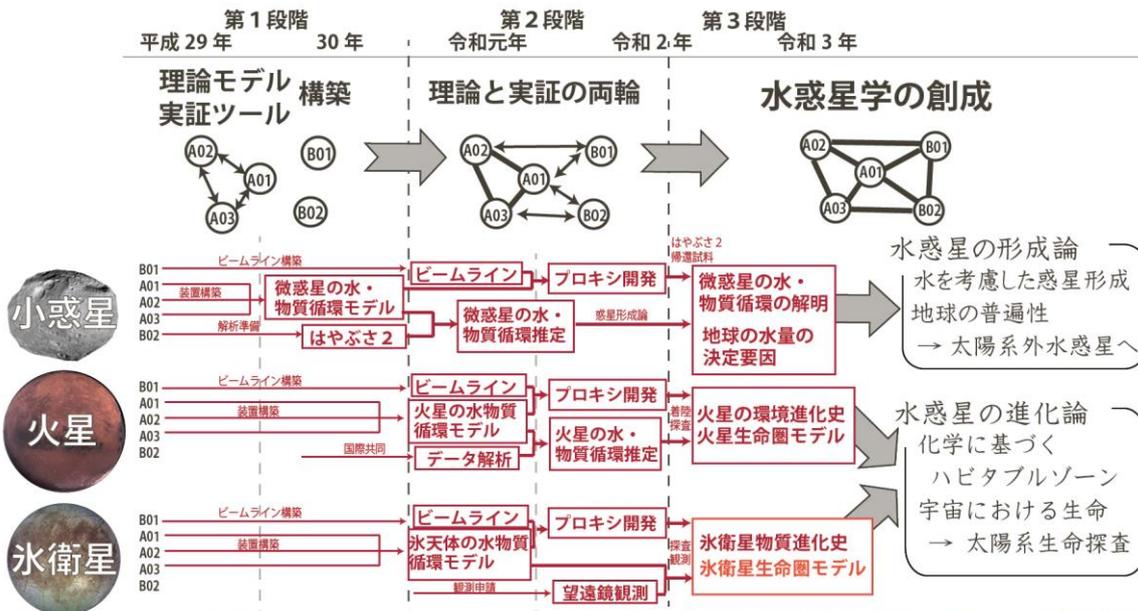


図2. 領域ロードマップと達成目標 報告書提出時(令和4年度6月)に赤字が達成済、オレンジ字が一部達成/着手中

図2の設定目的に対する、報告書提出時点での達成状況を図中の色で示す。赤字項目が提出時点(令和4年度6月末)で達成済、オレンジ字項目が一部達成済の項目である。ここで達成済の定義は、モデルや装置の構築、データ解析が終了し、論文化済あるいは投稿中のものとする。領域全体として、**第1・2段階の目標は順調に完了し、第3段階の設定目標についても大部分を達成**した。現在、唯一着手中として残るのは「氷衛星生命圏モデル」であるが、これはNASAのJames-Webb宇宙望遠鏡の打ち上げ遅延の影響がある。しかし本領域では、観測手段を「すばる望遠鏡」に切り替え、昨年までに十分なデータを取得した。現在「氷衛星生命圏モデル」成果は論文執筆中であり、今年度夏ごろには目標は全て達成される。

具体的な達成状況を研究項目ごとに見ていくと、研究項目Aでは、高圧熱水反応装置、氷物質照射装置などの極限環境を再現する装置群が予定通り全て完成している。水・物質循環を記述する物理モデルも開発が終了し、実験により得られた知見・データを組み込み、探査データを含めた観測を解釈している。特に、地球上で成立する温度圧力条件を超えた条件での水-岩石反応を再現する極限環境実験装置

群ができるなど、惑星における水環境を扱う世界トップの実験拠点が形成した。また、本領域で構築した理論モデルは世界にないものであり、関係研究者から注目された。その結果、第2段階以降、コロナ禍にも関わらず、これら実験装置やモデルを使った多くの国際共著論文が誕生し、世界の潮流を作り出した。

研究項目 B では、予定通り高エネルギー加速器研究機構(KEK)に新ビームライン BL-19 が建設され、そこに高度化された X 線顕微鏡 STXM を構築した。その結果、分析可能なエネルギー範囲が 150 eV から 2000 eV という世界にも稀なエネルギー範囲をカバーする STXM が立ち上がった。これにより、炭素、窒素、酸素、鉄、硫黄、ケイ素、ナトリウムなど、地球内外の試料の分析を通じて水惑星群の進化を探る上で世界トップレベルの実証ツールが完成した。また、各種報道にあるように、「はやぶさ 2」は挑戦的なミッションを完璧に達成し、小惑星リュウグウに水(含水鉱物)や有機物の存在を明らかにした。得られた画像が *Science* 誌の表紙(右図)を飾り、本領域メンバーが主著者・共著者となった論文が *Science*、*Nature* に 8 編掲載される(令和 4 年 6 月現在)など、華々しい成果をあげた。特筆すべきは、「はやぶさ 2」によるリュウグウからの帰還試料を、構築した STXM を用いて分析し、リュウグウ母天体の水環境・形成過程を明らかにしたことである。その結果、現在の小惑星帯の C 型小惑星の多くが木星以遠由来であることが示され、初期太陽系において水を含む物質の大移動が起きたという太陽系形成シナリオが実証された。



以下では、本領域が目指した第3段階終了時の目標の達成状況を述べる。

**地球の水の起源・水量の決定要因**：地球の水はどこから来たのだろうか。地球に生命あふれる環境が成立した重要な要因は、陸地がありつつも、海が全球規模に広がるという絶妙な地表面の水量にある。この地球の水量はどのように決定されたのであろうか。原始太陽系円盤では、微惑星から原始惑星、地球型惑星が形成する。地球型惑星の形成領域では、円盤温度が高いため水は凝縮できず、水に枯渇した惑星ができる。これより外では円盤が低温のため微惑星は水氷を含み、さらに遠方では二酸化炭素も氷として凝結する。これら氷物質は微惑星内の放射性元素の崩壊熱で融解し、水-岩石反応により含水鉱物や炭酸塩などの二次鉱物へと形を変える。これら二次鉱物は地球軌道でも熱的に安定なため、二次鉱物を含む微惑星の集積で地球に水が供給されたと考えられる。ところが、力学に基づく従来の惑星形成論では微惑星は質点で表現され、そこでの水-岩石反応による物質進化は考慮されていない。

本領域では、まず、地質学・地球化学と惑星科学を融合させることで、実験や実試料に基づいて、微惑星内の水・物質循環と二次鉱物の生成を予測する理論モデルを構築した(Kikuchi et al., 2022 *GCA*, Kurokawa et al., 2022 *AGU Advances* : **A01,A02,A03 融合研究**)。その結果、小さな微惑星内でも、酸化還元勾配や pH 勾配が生じて多様な二次鉱物の組み合わせが生じることがわかった。さらに、これら微惑星が持つ赤外スペクトルを計算し、小惑星帯の望遠鏡観測や「はやぶさ 2」のリモセン観測と比較した。さらに、「はやぶさ 2」によるリュウグウ帰還試料を、本領域で構築した X 線顕微鏡 STXM を始めとする先端装置で分析し、二次鉱物組み合わせを実証した。これらの結果、小惑星リュウグウを含む C 型小惑星群は、原始太陽系円盤の木星以遠で形成されたことを明らかにした(Kurokawa et al., 2022 **A01,A02,A03 融合研究**; Fujiya et al., 2019, *Nature Astronomy*; Nakamura et al., 2022 *Science* 査読中 **A03,B01,B02 融合研究**)。

これら木星以遠の遠方低温で形成した微惑星は、どのようにして現在の小惑星帯に供給され、どう地球の水の起源に影響するのだろうか。本領域では、さらに理論惑星天文学との融合し、上記の微惑星内の物質進化を考慮した惑星形成モデルを構築し、この円盤中での惑星形成と物質混合を調べた(Ogihara et al., 2022 論文投稿中 : **A02,A03 融合研究**)。その結果、円盤中で巨大ガス惑星である木星が形成・成長・移動することで、木星以遠の二次鉱物を含む微惑星の軌道が大きく乱され、これらが地球軌道にもたらされることが明らかになった。計算の結果、微惑星のサイズや木星の成長速度といった不確定要素に大きく依存せず、ある一定量の水や有機物が原始地球に供給され、この供給される水量は、現在の地球の地表面の水量とよく一致する。すなわち、地球の絶妙な水量を決定したのは、巨大な重力を誇る木星などのガス惑星の配置と現在の軌道に至る惑星移動であることが明らかになった。

**火星・氷衛星の水環境と生命利用可能エネルギー**：生命は、複雑な物質からなる自己を維持・複製するためにエネルギーを必要とする。天体の大気・表層では、太陽光による光化学反応と水素散逸で多様な酸化剤が作られる。一方、海底や地下の水-岩石反応では還元剤が生まれる。そして天体上の水・物質循環によりこれら酸化剤と還元剤は混合され、非平衡状態が生まれ、地球上の原始的な生命は、環境中に存在する非平衡状態からエネルギーを得ている。したがって、地球以外の天体において生命利用可能エネルギーに迫るには、これら酸化剤や還元剤の生成を含めた水環境や物質循環の理解が重要となる。

本研究では、水文学・地球化学・物理化学と太陽系探査学を融合させ、極限環境を再現する実験装置群を構築することで、火星や氷衛星における酸化剤や還元剤の生成反応の素過程や反応率を明らかにした(e.g., Noda et al., 2019 *JGR Planets*, **A02, B01 融合研究**, Noda et al., 2022 *Icarus*, **A01, A02, B01 融合研**

究、Tan et al., 2019, *Icarus*, **A01, A02 融合研究**)。さらに、地球上のアナログフィールド調査によって、水・物質循環のモデルと天然場との比較を行ってきた (Yoda et al., 2021 *JGR* **A02, B01 融合研究**, Sekine et al., 2020 *Minerals*, **A02, B01 融合研究**) これらに基づき、火星や氷衛星の水環境や利用可能エネルギーを定量化した (Fukushi et al., 2019 *Nature Comms* **A02, B01 融合研究**, Fukushi et al., 2020 *Minerals*, **A02, B01 融合研究**, Fukushi et al., 2022 *GCA*, **A02, B01 融合研究**; Kikuchi and Shibuya, 2021 *Minerals*)。特に、NASA の探査車キュリオシティが得た湖底堆積物の化学・鉱物組成データから、かつて存在していた火星の湖の水環境 (**pH (7 付近)、溶存種 (Na-Cl 型)、塩分濃度 (0.1–0.5 mM)、酸化還元状態**) を初めて定量的に明らかにし、それが実現される古気候・水循環を制約した。その結果、初期火星は凍結期と温暖期が繰り返り、凍結期に地表に蓄積した酸化剤と地下水に含まれる還元剤が、温暖期の水循環で混合され大きなエネルギーが解放されるという、気候と化学がリンクした動的環境進化という新しい火星像を得て、世界から注目を浴びた (Fukushi et al., 2019 *Nature Comms* **A02, B01 融合研究**)。さらに、そのような温暖期の火星では、地下水に含まれる溶存二価鉄の表層水に含まれる酸素による酸化が、最もエネルギーを得る反応であることを明らかにし、かつての火星の湖での利用可能なエネルギー(約 1 J/kg H<sub>2</sub>O)は、**鉄酸化菌が生息する現世地球の類似環境のエネルギー値に匹敵する**こともわかった (Kikuchi and Shibuya, 2021)。同様の酸化剤・還元剤の生成の定量化は氷衛星でも行われており (Tan et al., 2021 *Icarus* **A01, A02 融合研究**)、本領域によるこれら成果は、地球以外の天体においても、地球の極限環境と同様に、持続的な代謝可能エネルギー供給について、科学的に定量化でき、探査などで検証可能なことを示している。

### ●本領域により得られた成果

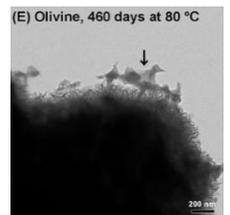
本研究課題によって得られた成果のハイライトについて、計画研究ごとに整理し、年次順で述べる。

#### ●研究項目 A. 太陽系天体における水・物質循環の理論

##### ➤ 計画研究 A01. 太陽系天体における水-岩石反応

###### [1] 微惑星内の初期変質プロセスの実験・観測的解明 (Kikuchi et al., 2022 *GCA*; Kurokawa et al., 2021 *AGU Advances*, **A01, A02, A03 融合研究**)

非平衡状態で進行する微惑星内初期低温変質プロセスを明らかにするために、25°C と 80°C、最長 460 日の水-合成コンドライト実験を行った。その結果、準安定相として最初に生成するアモルファスシリカからの再結晶化が、サポナイトの主要な生成プロセスであることを明らかにした(右図)。これは、変質度の低い炭素質コンドライトに見られる鉱物や組織とも調和的であり、熱力学的に解析が困難である低変質度の炭素質コンドライトの変質プロセスを推定する上で重要な指標となる。さらに、これら実験結果に基づき、微惑星内での二次鉱物生成過程をモデル化し、小惑星帯の観測スペクトルと比較した。



###### [2] 初期火星での熱水反応と Gale 湖のエネルギー論的ハビタビリティ (Kikuchi and Shibuya, 2021 *Minerals*; Noda et al., 2022 *Icarus*, **A01, A02, B01 融合研究**)

初期火星 Gale 湖周辺の水-岩石反応を、熱水実験および熱力学モデリングで再現した結果、多様な化学組成の水が Gale 湖に流入していたことが明らかになった。そして、湖水・地下水混合プロセスを熱力学モデリングにより再現した結果、Gale 湖の湖水・地下水混合域は現世地球の鉄酸化菌が生息する湖環境に匹敵するほど高い鉄酸化エネルギーが発生し得たことを明らかにした。太陽系天体について、「持続可能な代謝可能エネルギー供給」についても科学的に検証可能であることを実証した。

#### 公募研究 A01

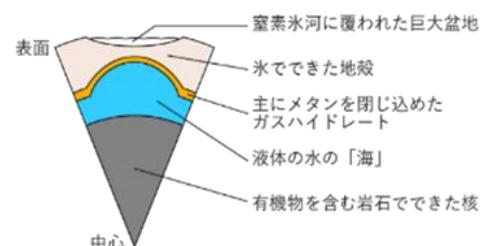
###### [3] 氷衛星類似環境での微生物代謝 (Bird et al., 2021, *Int. J. Sys. Evo. Micro.*; Cook et al., 2021, *JGR Biogeo.*)

氷衛星類似環境である蛇紋岩水系における生命代謝の駆動力と制約を明らかにするため、複数の蛇紋岩化水系の化学的、生物学的調査を行った。それらは化学的特性(塩濃度・硫酸濃度)やメタン起源などが異なり、同時に、蛇紋岩水系においても多様な代謝が可能であることが示された。また、蛇紋岩水系から分離培養された微生物を調べると、水素をエネルギー源、炭酸カルシウムを炭素固定基質として用いることが分かったが、それらの分類学的解析から、新属の微生物であることが明らかとなった。

##### ➤ 計画研究 A02. 太陽系天体における水-氷相互作用

###### [1] 冥王星に海ができる謎解明 (Kamata et al., 2019 *Nature Geosci.*: **A02, A03 融合研究**)

低温の太陽系外縁では、メタンや一酸化炭素なども凝結する。これら微量成分のクラスレートを考慮した氷天体モデル(右図)により、太陽系外縁の氷準惑星内部ではクラスレートの断熱材で内部海が維持される一方、地表は低温で巨大盆地構造も維持される。外側太陽系では、放射壊変熱が効果的に内部にとどめられ、海を持つ氷準惑星が広く存在することを示唆した。



[2] 初期火星の酸化過程の実態解明 (Noda et al., 2019 *JGR Planets*: A02,B01 融合研究; Tabata et al., 2021 *GCA*; Koyama et al., 2021, *ApJ*)

実験により水環境の酸化状態を復元する指標を開発し、火星探査車キュリオシティの堆積物データを解釈した。その結果、約 35 億年前の火星大気は現在の 100 倍の酸素を含んでいたことが示唆された。地球より 10 億年も早く、火星に酸素を含む大気が存在したという結果は、従来の火星進化の描像を塗り替えるものである。さらに、酸素生成過程として、火星表層水の光酸化と大気散逸をそれぞれ実験的・理論的に評価し、上記の酸化速度が妥当であることを示した。

[3] エウロパの内部海と表面観測 (Tan et al., 2021 *Icarus* A01,A02,B01 融合研究; 2022 *PSJ*; B02 融合研究)

氷衛星エウロパを「すばる望遠鏡」を用いてスリット分光観測し、その表面で生成される酸化剤の存在量をマッピングした。その結果、エウロパでの主たる酸化剤は硫酸であることがわかった。さらに、その硫酸が内部海に供給された際の岩石との反応を実験的に明らかにした。その結果、硫酸の行方は岩石組成によって異なり、玄武岩熱水環境がある場合、効率的に硫化水素や硫化鉄となることがわかった。これら硫化鉄などは、エウロパでの熱水環境存在の指標となり、将来のエウロパ探査に有用な情報を得た。

公募研究 A02.

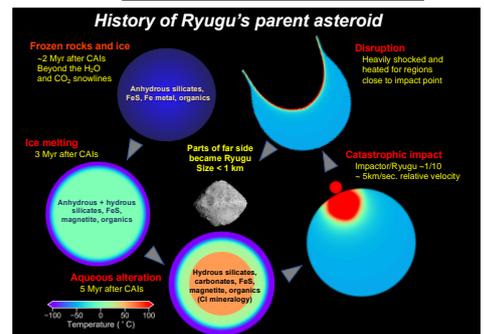
[4] 火星隕石の放出過程 (Kurosawa et al., 2018 *Icarus*: A02,A03 融合研究)

火星隕石は天体衝突により火星から飛び出し地球に飛来した。しかし、火星からの放出速度(>5 km/s)と隕石が経験した低衝撃圧(<50 GPa)を同時に達成するのは困難とされていた。衝突過程の詳細な解析により、深部が表層物質を押し出すことで、低衝撃のまま隕石が放出可能なことがわかった。このことは、天体間物質輸送が熱変成を伴わずに起き得ることを示唆する。

➤ 計画研究 A03. 太陽系天体における水・物質循環のモデリング

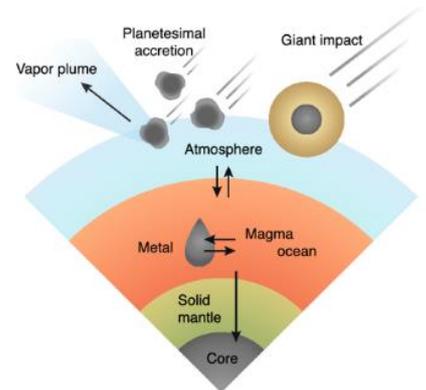
[1] 始原的微惑星の形成と進化の解明(Nakamura et al. 2022 *Science* 査読中:A03,B01,B02 融合研究, Kurosawa et al. 2022 *JGR*, A02A03 融合, Wakita & Genda, 2019 *Icarus*)

リュウグウサンプルの物性データを用いて、母天体の形成と進化に関する数値シミュレーション(熱史計算、衝突破壊計算)を行い、母天体が早期に形成され、全体が低温にて水質変成を起こしたがわかった(右図)。また、小惑星リュウグウを形成した母天体の衝突過程に関しては、衝突地点より離れた裏半球の物質からリュウグウが形成されたことがわかった。このほか、衝突による脱ガスや衝撃変成についても調べ、帰還サンプル分析に対する解釈を与えた。



[2] 地球の大気組成・水量の決定機構の解明 (Sakuraba et al. 2021 *Sci. Rep.* 2021, Ogihara et al. 2022 *EPSL* 査読中: A02,A03 融合研究)

地球大気のコンドライト(隕石)組成と異なることは今まで謎とされてきたが、地球形成時のコア・マントルへのこれら元素の分配、大気剥ぎ取り(右図)を通して、コンドライトの組成から現在の地球組成へと進化することを示した。また、地球の水量が、形成初期(原始惑星の状態)に、木星の形成および大移動に伴って、外惑星領域で形成された微惑星が地球形成領域に輸送され、現在の地球の海水の10倍程度の水が原始地球に供給されることがわかった。この10倍程度の水の90%はコアに分配され、地表には現在の海水量が残ることになる。



[3] 巨大衝突による衛星形成に関する統一的理論 (Arakawa et al., 2019 *Nature Astronomy*, Nakajima et al. 2022 *Nature Comms*, Kuramoto et al. 2022 *EPS*)

多くの天体は衛星を持っている。天体の形成時期には、衝突が頻繁に起きている。そこで、巨大天体衝突で、どのような衛星が形成されるのかを系統的に調べた。その結果、巨大衛星の形成については、天体の組成とサイズに依存し、系外惑星においてありふれているスーパーアースのような天体には、地球の月のような大きな衛星が形成されないことがわかった。一方で、太陽系外縁天体のような小さな天体においては、冥王星のカロンのような大きな衛星が形成される。今後、JAXAの火星衛星サンプルリターン計画などで、比較衛星学が発展する基礎が構築された。

●研究項目 B. 実試料に基づく太陽系天体の水・物質循環の実証

➤ 計画研究 B01. 水惑星学創成に向けた分子地球化学分析

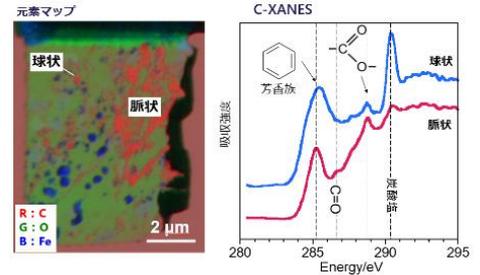
[1] 火星 Gale 湖の水質環境復元 (Fukushi et al., 2019 *Nature Comms.*; 2022 *GCA*, A02,B01 融合研究)

スメクタイトの層間陽イオン組成を利用し、火星 Gale 湖堆積物中に存在した間隙水の水質復元を行

った。その結果、後期続成流体の影響の少ない間隙水はやや塩分に富み、pH は中性、著しい酸化還元非平衡にあったことが推定された。酸化還元非平衡と pH 中性化は、寒冷期に雪氷中に蓄積された大気物質起源の酸化剤が、100 万年程度の温暖期に融解し、堆積物間隙中に拡散することで生じたと推測される。火星ではかつて動的に変化する気候変化に駆動されて環境進化が起きていたという描像が示唆される。

[2] 始原的隕石での普遍的な水質変成の解明 (Kebukawa et al., 2019 *Sci. Rep.*; Kebukawa et al., 2020 *GCA*)

STXM などを用い、Zag 隕石に捕獲された始原的クラストの詳細分析を行った。その結果、クラストには水質変成を受けた炭素質コンドライト隕石に含まれる有機物と類似していることが分かった(右図)。また同位体分析から、Zag 隕石に捕獲されたクラストは D 型(または P 型)小惑星起源であることが示唆された。本研究は、D 型や P 型のように極めて始原的な小惑星でも普遍的に水質変成を経験している可能性を示している。



[3] 構築した STXM ビームラインで「はやぶさ 2」探査、リュウグウ帰還試料を分析 (Takahashi et al., 2017 *Sci. Rep.*; Adachi et al., 2019 *PNAS*; Shiraishi et al., 2020 *GCA*; Noda et al., *Minerals* **A02,B02 融合研究**; Nakamura et al., 2020 *Science*, 査読中 **A03,B01,B02 融合研究**)

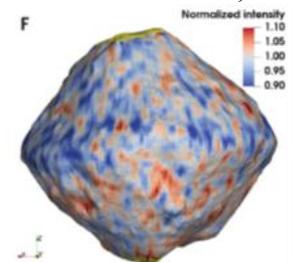
KEK の Photon Factory に BL-19 を建設し、STXM を移設・整備することで(右図)、水惑星学への応用を飛躍的に進め、最終的にはリュウグウ帰還試料の分析を行った。嫌気環境での測定環境を整備することで、地球環境の影響のない状態での始原的物質中の酸化還元状態の解明などに貢献した。また、本 STXM の地球惑星科学の幅広い分野への展開を進めるために、本領域独自の公募を行い、物質科学、水圏地球化学、大気化学、環境微生物学、土壌学などの幅広い分野に波及効果のある STXM 応用研究を実現した。



➤ **計画研究 B02. 水惑星学創成に向けた太陽系探査**

[1] 「はやぶさ 2」探査による小惑星リュウグウのリモートセンシング観測 (Watanabe et al., 2019 *Science*, Sugita et al., 2019 *Science*, Kitazato et al., 2019 *Science*, Morota et al. 2020 *Science*, Okada et al. 2020 *Nature*, Sakatani et al. 2021 *Nature Astronomy*, **A03,B01,B02 融合研究**)

「はやぶさ 2」に搭載された観測機器(レーザー高度計、可視・熱赤外カメラ、近赤外分光計)により、リュウグウの形状・空隙率・表面物質に関する情報を得た。近赤外分光から波長 2.72  $\mu\text{m}$  に Mg-OH に起因する吸収が、全域に分布していることが明らかになった(右図)。分光観測により、加熱を受けた炭素質隕石や小惑星帯内側の衝突族を伴う C 型小惑星とスペクトルの類似性が高いことが明らかとなった。



[2] 40 億年前の火星の有機物(Koike et al. 2020 *Nature Comms.* **B01,B02 融合研究**)

本研究では、B01 班との融合研究により大型放射光施設 SPring-8 を用いた高解像度・非破壊分析法を新たに開発し、直径 100 $\mu\text{m}$  ほどの微小な炭酸塩鉱物に含まれる窒素(N)の化学形態を調べた。開発した分析法を用い、40 億年前に形成された火星隕石 Allan Hills 84001 に含まれる炭酸塩鉱物から、火星由来の有機窒素化合物の検出に成功した。本研究結果は、当時の火星において、有機物が表層水または地下水を介して岩石に取り込まれ長期間保存されている可能性を示唆している。

**公募研究 B02**

[3] 初期太陽系での D 型小惑星移動 (Fujiya et al., 2019 *Nature Astronomy*)

タギシュ・レイク隕石中の炭酸塩鉱物の炭素同位体比を質量分析計で測定し、それらが一様に  $^{13}\text{C}$  に富む ( $\delta^{13}\text{C} \sim 70\%$ ) ことを明らかにした。この結果と炭酸塩鉱物の存在量から母天体に集積した  $\text{CO}_2$  量を見積もり、彗星と類似していることを示した。このことは小惑星帯に存在する小惑星の一部は外惑星領域の低温環境下で形成され、その後現在の軌道へ移動したことを示唆する。

[4] 「はやぶさ 2」探査による小惑星リュウグウ帰還試料の化学分析 (Yokoyama et al. 2022 *Science*)

はやぶさ 2 帰還試料の分析により、リュウグウが炭素質隕石の中でも始原的な CI コンドライト(イヴナ型)と類似していることが明らかとなった。その主な構成鉱物は、母天体中で水溶液から析出した二次鉱物であり、太陽系が誕生してから約 500 万年後形成され、その後、今日まで 100 $^{\circ}\text{C}$  以上に加熱されていない。これらの結果から、リュウグウ試料がこれまで人類が入手した試料中で最も始原的な特徴を持ち、新しい太陽系の標準試料となるポテンシャルを秘めていることを示している。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和4年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

●**研究発表論文**：これまで査読付き論文 579 件、うち学際的な融合研究による論文 86 件を発表している。特に、*Nature, Science*, その姉妹紙へ合計 62 件の論文発表があり、研究発表の質・量・学際性において、いずれもこれを極めて高いレベルで達成することができた。

### ➤ 計画研究 A01 (査読付き論文 137 件、学会発表 406 件より抜粋)

1. \*Kikuchi, S., T. Shibuya, et al. “Experimental chondrite-water reactions under reducing and low-temperature hydrothermal conditions: Implications for incipient aqueous alteration in planetesimals” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 319, 151–167, 2022
2. \*Fukami Y., T. Kashiwabara, H. Amakawa, T. Shibuya, et al. “Tellurium stable isotope composition in the surface layer of ferromanganese crusts from two seamounts in the Northwest Pacific Ocean” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 318, 179–291, 2022
3. \*Ueda H., T. Shibuya, et al. “Chemical nature of hydrothermal fluids generated by serpentinization and carbonation of komatiite: Implications for H<sub>2</sub>-rich hydrothermal system and ocean chemistry in the early Earth” *Geochem. Geophys. Geosy.*, 22, e2021GC009827, 2021
4. \*Nakamura K., et al. “Three-Dimensional Structural Analysis of Ferromanganese Nodules from the Western North Pacific Ocean Using X-ray Computed Tomography” *Minerals*, 11, 1100, 2021
5. \*Kikuchi S. and T. Shibuya “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” *Minerals*, 11, 341, 2021
6. \*Nishizawa, M., Y. Matsui, K. Suda, T. Saito, T. Shibuya, et al. “Experimental simulations of hypervelocity impact penetration of asteroids into the terrestrial ocean and benthic cratering” *J. Geophys. Res. Planets*, 125, e2019JE006291, 2020
7. Heuer, V., T. Hirose, \*K. Hinrichs, et al., “Temperature limits to deep seafloor life in the Nankai Trough subduction zone” *Science*, 370, 1230–1234, 2020
8. White, L.M., T. Shibuya, \*S. Vance, et al. “Simulating serpentinization as it could apply to the emergence of life using the JPL hydrothermal reactor” *Astrobiology*, 20, 307–326, 2020
9. \*Takahagi, W., K. Seo, T. Shibuya, et al. “Peptide synthesis under the alkaline hydrothermal conditions on Enceladus” *ACS Earth Space Chem.*, 3, 2559–2568, 2019
10. \*Okada, S., C. Chen, T. Watsuji, M. Nishizawa, et al. “The making of natural iron sulfide nanoparticles in a hot vent snail” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 116, 20376–20381, 2019
11. \*Hiraoka, S., M. Nishizawa, et al. (2019) “Microbial community and geochemical analyses of trans-trench sediments for understanding the roles of hadal environments” *The ISME Journal*, 14, 740–756, 2019
12. \*Takaya, Y., et al. “Unique environmental conditions required for dawsonite formation: Implications from dawsonite synthesis experiments under alkaline condition” *ACS Earth Space Chem.*, 3, 285–294, 2019
13. \*Shibuya T., et al. “Weak hydrothermal carbonation of the Ongeluk volcanics; evidence for low CO<sub>2</sub> concentrations in seawater and atmosphere during the Paleoproterozoic global glaciation” *Prog. Earth Planet. Sci.*, 4, 31, 2017

### 公募研究 A01 (査読付き論文 22 件、学会発表 45 件より抜粋)

14. \*Suda, K., et al. “The origin of methane in serpentinite-hosted hyperalkaline hot spring at Hakuba Happo, Japan: Radiocarbon, methane isotopologue and noble gas isotope approaches” *Earth Planet. Sci. Lett.*, 585, 117510, 2022
15. \*Kitadai, N., et al. “Metals likely promoted protometabolism in early ocean alkaline hydrothermal systems” *Science Adv.*, 5, eaav7848, 2019

### ➤ 計画研究 A02 (査読付き論文 66 件、学会発表 206 件より抜粋)

1. \*Noda, N., Y. Sekine, S. Tan, S. Kikuchi, T. Shibuya, Y. Takahashi, K. Fukushi, et al. “Characterization of groundwater chemistry beneath Gale Crater on early Mars by hydrothermal experiments” *Icarus*, in press, 2022
2. \*Tan, S., Y. Sekine, M. Kuzuhara “Spatially resolved observations of Europa's surface with Subaru/IRCS at 1.0–1.8 μm: Upper limits to the abundances of hydrated Cl-bearing salts” *Planet. Sci. J.*, 3:70, 1–18, 2022
3. \*Yoda, M., Y. Sekine, K. Fukushi, Y. Takahashi, et al. “Field investigations of chemical partitioning and aqueous

chemistry of freezing closed-basin lakes in Mongolia as analogs of subsurface brines on icy bodies” *J. Geophys. Res. Planets*, 126, e2021JE006972, 1–22, 2021

4. \*Tabata, H., Y. Sekine, et al. "An experimental study of photo-oxidation of Fe(II): Implications for the formation of Fe(III) (hydro)oxides on early Mars and Earth" *Geochim. Cosmochim. Acta*, 299, 35–51, 2021
5. \*Tan, S., Y. Sekine, T. Shibuya, C. Miyamoto, Y. Takahashi “The role of hydrothermal sulfate reduction in the sulfur reduction in the sulfur cycles within Europa: Laboratory experiments on sulfate reduction at 100 MPa” *Icarus*, 357, 114222, 1–13, 2021
6. \*Arakawa, M., \*A. Terasaki, et al. “Reaction of nitric oxide molecules on transition-metal-doped silver cluster cations: si-ze- and depant-dependent reaction pathway” *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 23, 22947–22956, 2021
7. \*Goto, K. T., Y. Sekine, T. Kashiwabara, Y. Takaya, et al. “Progressive ocean oxygenation at ~2.2 Ga inferred from geochemistry and molybdenum isotopes of the Nsuta Mn deposit, Ghana” *Chem. Geol.*, 567, 120116, 2021
8. \*Sekine, Y., K. Fukushi, et al. “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, 1–28, 2020
9. \*De Sanctis, M. C., G. Mitri, J. Castillo-Rigez, C. H. House, S. Marchi, C. A. Raymond, Y. Sekine “Relict ocean worlds: Ceres” *Space Science Review*, 216: 60, 1–33, 2020
10. \*Taubner, R.-S., Y. Sekine, T. Shibuya, et al. "Experimental and simulation efforts in the Astrobiological exploration of exoceans" *Space Science Review*, 216, 9, 1–41, 2020
11. \*Noguchi, N., T. Okuchi “Rheological property of H<sub>2</sub>O ice VI inferred from its self-diffusion: Implications for the mantle dynamics aof large icy bodies” *Icarus*, 335, 113401–1, 2020
12. Noda N., S. Imamura, \*Y. Sekine, K. Fukushi, Y. Takahashi, et al. “Highly oxidizing aqueous environments on early Mars inferred from scavenging pattern of trace metals on manganese oxides” *J. Geophys. Res. Planets*, 124, 1–14, 2019
13. \*Kamata, S., F. Nimmo, Y. Sekine, K. Kuramoto, N. Noguchi, J. Kimura, and A. Tani “Pluto’s ocean is capped and insulated by gas hydrates” *Nature Geosci.*, 12, 407–410, 2019
14. \*Sekine, Y. et al. “An experimental study on impact-induced alterations of planetary organic simulants” *Meteor. Planet. Sci.*, 53, 6, 1267–1282, 2018

公募研究 A02 (査読付き論文 5 件、学会発表 15 件より抜粋)

15. \*Kurosawa, K., T. Okamoto, H. Genda “Hydrocode modeling of the spallation process during hypervelocity impacts: Implications for the ejection of Martian meteorites” *Icarus*, 301, 219–234, 2018

➤ 計画研究 A03 (査読付き論文 80 件、学会発表 205 件より抜粋)

1. \*Nakajima, M., H. Genda, E. Asphaug, and S. Ida “Large planets may not form fractionally large moons” *Nature Comms.*, 13, 568, 2022
2. \*Kurokawa, H., T. Shibuya, Y. Sekine, et al. “Distant Formation and Differentiation of Outer Main Belt Asteroids and Carbonaceous Chondrite Parent Bodies” *AGU Advances*, 3, e2021AV000568, 2021
3. \*Sakuraba, H., H. Kurokawa, H. Genda, and K. Ohta “Numerous chondritic impactors and oxidized magma ocean set Earth’s volatile depletion” *Sci. Rep.*, 11, 20894, 2021
4. \*Sugiura, K., H. Kobayashi, S. Watanabe, H. Genda, et al. ”SPH simulations for shape deformation of rubble-pile asteroids through spinup: The challenge for making top-shaped asteroids Ryugu and Bennu” *Icarus*, 365, 114505, 2021
5. \*Hyodo, R., K. Kurosawa, H. Genda, T. Usui “Transport of impact ejecta from Mars to its moons as a means to reveal Martian history” *Sci. Rep.*, 9, 19833, 2019
6. \*Arakawa, S., R. Hyodo and H. Genda “Early formation of moons around large trans-Neptunian objects via giant impacts” *Nature Astronomy*, 3, 802–807, 2019
7. \*Wakita, S. and H. Genda “Fates of hydrous materials during planetesimal collisions” *Icarus*, 328, 58–68, 2019
8. \*Kashimura, H., Y. O. Takahashi et al. “Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer” *Nature Comms.*, 10, 23, 2019
9. \*Ito, T., K. Kuramoto, et al. “Extremely strong polarization of an active asteroid (3200) Phaethon” *Nature Comms*, 9, 2486, 2018
10. \*Kurokawa, H., J. Foriel, M. Laneuville, C. Houser and T. Usui “Subduction and atmospheric escape of Earth’s seawater constrained by hydrogen isotopes” *Earth Planet. Sci. Let.*, 497, 149–160, 2018
11. \*Kurosawa, K. and H. Genda “Effects of friction and plastic deformation in shock-comminuted damaged rocks

on impact heating” *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 620–626, 2018

12. \*Kamata, S. “One-dimensional convective thermal evolution calculation using a modified mixing length theory: Application to Saturnian icy satellites” *J. Geophys. Res. Planets*, **123**, 93–112, 2018
13. Genda, H., et al. “The terrestrial late veneer from core disruption of a lunar-sized impactor” *Earth Planet. Sci. Lett.*, **480**, 25–32, 2017
14. \*Saito, H. and K. Kuramoto “Formation of a hybrid-type proto-atmosphere on Mars accreting in the solar nebula” *Mon. Not. Royal Astron. Soc.*, **475**, 1274–1287, 2017

公募研究 A03 (査読付き論文 9 件、学会発表 12 件より抜粋)

15. \*Ohashi, S., Kobayashi, H., et al., “Ring formation by coagulation of dust aggregates in the early phase of disk evolution around a protostar”, *Astrophys. J.*, **907**, 80(12pp), 2021.

➤ 計画研究 B01 (査読付き論文 134 件、学会発表 287 件より抜粋)

1. \*Sakuma H., Y. Takahashi, K. Fukushi, Y. Sekine, et al. “Synthesis of Ferrian and Ferro-Saponites: Implications for the structure of (Fe,Mg)-smectites synthesized in reduced conditions” *Am. Mineral.*, in press, 2022.
2. \*Fukushi, K., Y. Sekine, E. B. Rampe “Reconstruction of pH, redox condition, and concentrations of major components in ancient liquid water from the Karasburg member, Murray formation, Gale Crater, Mars” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 325, 129-151, 2022.
3. \*Gankhurel, B., \*K. Fukushi, D. Davaasuren, E. Imai, Y. Sekine, Y. Takahashi, et al. “Arsenic and uranium contamination of Orog Lake in the Valley of Gobi Lakes, Mongolia: field evidence of conservative accumulation of U in an alkaline, closed-basin lake during evaporation” *J. Hazard. Mater.*, 436, 129017, 2022.
4. \*Kebukawa, Y., M.E. Zolensky, C.A. Goodrich, M. Ito, N.O. Ogawa, Y. Takano, T. Shibuya, et al. “Organic matter in carbonaceous chondrite lithologies of Almahata Sitta: Incorporation of previously unsampled carbonaceous chondrite lithologies into ureilitic regolith” *Meteorit Planet Sci*, 56, 1311-1327, 2021.
5. \*Wakabayashi, D., H. Tanaka, A. Toyoshima, S. Yamashita, Y. Takeichi “Photoelectron shield for the first mirror of a soft X-ray beamline” *J. Synchrotron Radiat.*, 28, 86-90, 2021
6. \*Suga H., K. Suzuki, T. Usui, A. Yamaguchi, O. Sekizawa, K. Nitta, Y. Takeichi, T. Ohigashi, Y. Takahashi “A New Constraint on the Physicochemical Condition of Mars Surface during the Amazonian Epoch Based on Chemical Speciation for Secondary Minerals in Martian Nakhilites” *Minerals*, 11, 514, 2021.
7. \*Fukushi, K., E. Imai, Y. Sekine, et al. “In situ formation of monohydrocalcite in alkaline saline lakes of the Valley of Gobi Lakes: prediction for Mg, Ca, and total dissolved carbonate concentrations in Enceladus' ocean and alkaline-carbonate ocean worlds” *Minerals*, 10, 669. 2020.
8. Kobayashi, Y., \*K. Fukushi, and S. Kosugi “A Robust Model for Prediction of U(VI) Adsorption onto Ferrihydrite Consistent with Spectroscopic Observations” *Environ. Sci. Technol.* 54, 2304-2313, 2020.
9. \*Fukushi, K., Y. Sekine, H. Sakuma, K. Morida, and R. Wordsworth “Semiarid climate and hyposaline lake on early Mars inferred from reconstructed water chemistry at Gale” *Nature Comms.*, 10, 4896, 2019.
10. \*Kebukawa Y., M. Ito, M.E. Zolensky, R.C. Greenwood, Z. Rahman, H. Suga, A. Nakato, Y. Takeichi, Y. Takahashi, et al. “A novel organic-rich meteoritic clast from the outer solar system” *Sci. Rep.*, 9, 3169, 2019
11. \*Kebukawa Y., et al. “Nanoscale infrared imaging analysis of carbonaceous chondrites to understand organic-mineral interactions during aqueous alteration” *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 116, 753-758, 2019
12. Uramoto G.-I., Y. Morono, N. Tomioka, S. Wakaki, R. Nakada, R. Wagai, K. Uesugi, A. Takeuchi, M. Hoshino, Y. Suzuki, F. Shiraishi, S. Mitsunobu, H. Suga, Y. Takeichi, Y. Takahashi, and \*F. Inagaki “Significant contribution of seafloor microparticles to the global manganese budget” *Nature Comms.*, 10, 400, 2019
13. \*Fukushi K., Y. Suzuki, J. Kawano, T. Ohno, Y. Takahashi et al. “Speciation of Magnesium in monohydrocalcite: XANES, ab initio and geochemical modeling” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 213, 457-474, 2017
14. \*Nakada R., M. Tanaka, M. Tanimizu, and Y. Takahashi “Aqueous speciation is likely to control the stable isotopic fractionation of cerium at varying pH” *Geochim. Cosmochim. Acta*, 218, 273–290, 2017

公募研究 B01 (査読付き論文 20 件、学会発表 22 件より抜粋)

15. Ito, M., T. Usui, S. Watanabe, et al., “A pristine record of outer Solar System materials from asteroid Ryugu's returned sample” *Nature Astronomy*, in press, 2021.

➤ 計画研究 B02 (査読付き論文 176 件、学会発表 410 件より抜粋)

1. \*Sakatani, N., T. Okada, N. Namiki, Arakawa, M., T. Morota, Watanabe, S., et al. “Anomalously porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body” *Nature Astronomy*, **5**, 766–774, 2021.

2. \*[Usui, T.](#), [W. Fujiya](#), [K. Kuramoto](#) et al. “The Importance of Phobos Sample Return for Understanding the Mars-moon System” *Space Science Reviews*, **216:49**, 1–18, 2020.
3. \*[Koike, M.](#), [R. Nakada](#), [I. Kajitani](#), [T. Usui](#), [Y. Tamenori](#), [H. Sugahara](#), [A. Kobayashi](#) “In-situ preservation of nitrogen-bearing organics in Noachian Martian carbonates” *Nature Comms.*, **11:1988**, 1–7, 2020.
4. \*[Okada, T.](#), [N. Namiki](#), [Arakawa, M.](#), [T. Morota](#), [Watanabe, S.](#), et al. “Highly porous nature of a primitive asteroid revealed by thermal imaging” *Nature*, **579**, 518–522, 2020.
5. \*[Morota, T.](#), [Arakawa, M.](#), [T. Nakamura](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), [S. Watanabe](#), et al. “Sample collection from asteroid (162173) Ryugu by Hayabusa2: Implications for surface evolution” *Science*, **368**, 654–659, 2020.
6. \*[Arakawa, M.](#), [T. Nakamura](#), [T. Morota](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), [Watanabe, S.](#), et al. “An artificial impact on the asteroid (162173) Ryugu formed a crater in the gravity-dominated regime” *Science*, **368**, 67–71, 2020.
7. \*[Watanabe, S.](#), [T. Nakamura](#), [T. Morota](#), [H. Miyamoto](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), et al. “Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile” *Science*, **364**, 268–272, 2019.
8. \*[Sugita, S.](#), [T. Morota](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), [T. Nakamura](#), [S. Watanabe](#), et al. “The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes” *Science*, **364**, 6437, 2019.
9. \*[Kitazato, K.](#), [T. Nakamura](#), [T. Okada](#), [T. Morota](#), [S. Watanabe](#), et al. “The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy” *Science*, **364**, 272–275, 2019
10. \*[Usui, T.](#) “Hydrogen reservoirs in Mars as revealed by Martian meteorites”, in *Volatiles in the Martian Crust* (Eds. Filiberoto J. and Schwenger S. P.), Elsevier, doi: 10.1016/B978-0-12-804191-8.00004-0, 2019.
11. \*[Barnouin, O.](#), [S. Watanabe](#), et al. “Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness”. *Nature Geosci.*, **12**, 247–252, doi: 10.1038/s41561-019-0330-x, 2019.
12. \*[Usui, T.](#) “Martian water stored underground”. *Nature*, **552**, 339-340, 2017.
13. \*[Watanabe, S.](#), [Y. Tsuda](#), et al., “Hayabusa2 Mission Overview”. *Space Science Review*, **208**, 3–16, 2017.

#### 公募研究 B02 (査読付き論文 17 件、学会発表 40 件より抜粋)

14. \*[Yokoyama, T.](#), [T. Usui](#), [T. Nakamura](#), [T. Morota](#), [T. Okada](#), [N. Namiki](#), [M. Arakawa](#), [S. Watanabe](#), \*[H. Yurimoto](#) et al. “Samples returned from the asteroid Ryugu are similar to Ivuna-type carbonaceous meteorites” *Science*. doi: 10.1126/science.abn7850, 2022.
15. \*[Fujiya, W.](#), [P. Hoppe](#), [T. Ushikubo](#), [M. Koike](#), et al. “Migration of D-type asteroids from the outer solar system inferred from carbonate in meteorites”. *Nature Astronomy* **3**, 910–915, 2019.

#### ●書籍

以下の 2 冊の英語教科書、2 冊の日本語教科書、1 冊の一般啓蒙書を執筆した。これによって、本領域の学問が発展していく基盤を構築すると共に、関連分野に得られた知見を社会にも還元している。特に書籍リスト 1、3 は代表者・分担者が編者となり、領域メンバーの多くが著者となっている。本年度には、終了領域の研究予算を使い、本領域の教科書「水惑星学」を日本語・英語で執筆出版予定である。

1. *Astrobiology—From the Origins of Life to the Search for Extraterrestrial Intelligence* (eds. A. Yamagishi, T. Kakegawa, and [T. Usui](#)) pp. 465, Springer, 2019. [Y. Sekine](#), [T. Usui](#), [T. Shibuya](#), [H. Genda](#), [H. Yabuta](#), [H. Nakagawa](#), [S. Kamata](#) が著者となった英語版のアストロバイオロジー教科書
2. *Volatiles in the Martian Crust* (eds. Filiberoto J. and Schwenger S. P.), 2019. [T. Usui](#) がチャプターの招待著者となった火星地殻に分布する水を含む揮発性成分の最新研究をまとめた英語版教科書
3. 分子地球化学 (高橋嘉夫編) 名古屋大学出版、[関根康人](#)、[福士圭介](#)、[高橋嘉夫](#)らが複数章を執筆。
4. 地球科学の事典 (鳥海光弘他編) 朝倉書店、[関根康人](#)、[渋谷岳造](#)が複数章を担当して執筆。
5. 火星の歩き方 光文社新書、[白井寛裕](#)、[野口里奈](#)、[庄司大悟](#)が執筆。野口、庄司は B02 班ポスドク。

#### ●ホームページとニュースレター

ホームページ・ニュースレター (年 1 回発行) により、研究進展状況を随時発信するとともに、計画研究／公募研究間の情報伝達を円滑化した。また、領域ホームページ内には領域が構築したビームラインの利用申請ページもあり、これを関連学会に広く周知することで、ホームページを通じた施設機器の運営を行っている。

水惑星学の創成  
Astrobiology [No.1]



#### ●主な主催シンポジウム・ワークショップ等

毎年の領域全体会議、2 度の国際スクールとシンポジウムの他、下記の大規模集会及び関連学会のセッションを開催し、領域内の連携や研究成果の発信を行った。3 回開催した国際シンポジウムにはそれぞれ 100 名以上の国内外からの参加者があった。

American Geophysical Union (AGU) Fall meeting (地球惑星科学分野の世界最大学会) 水惑星学セッション (サンフランシスコ等)、2019 年 12 月以降、毎年継続開催

日本地球惑星科学連合（地球惑星科学分野の国内最大学会） 水惑星学セッション（幕張メッセ等）、  
2018年5月以降、毎年継続開催

Astrobiology Science Conference 水惑星学セッション（アトランタ）2022年5月

惑星圏研究会（東北大学）、2018年2月以降、毎年継続開催

国際惑星科学シンポジウム（東北大学）2019年2月

国際マルチスケール・ワークショップ（JAXA 宇宙研）2017年12月

## ●国際学術誌・特集号

2021年、国際学術雑誌「*Minerals*」に本領域の特集号を組み、研究成果の発表、海外への領域のアピールを行った。特集号の論文のおよそ1/3が、NASAなど領域外の海外研究者による投稿であった。

## ●一般向けのアウトリーチ活動

本領域は一般の関心も高い分野であり、以下の領域代表者・計画班代表者のアウトリーチ活動を始め、多くの高校生講座・一般公開講演（140件以上）を行うことで中高生を中心に啓蒙活動を行った。

関根康人 一般講演「遠大な宇宙のロマン」2021年12月 日経フォーラム・日本橋三井ホール

関根康人 サイエンスカフェ「太陽系の最果てを探る」2020年9月 アストロノミーパブ

関根康人 高校生講座「宇宙に生命を探す」2019年6月 安田インターアクトクラブ

関根康人 海外向け配信「NASA Ask An Astrobiologist」2019年5月 NASA

関根康人 高校生講座「太陽系に生命を探す」2018年8月 東進スクール

関根康人 一般講演「木星と土星の探査最前線」2018年6月 六本木ヒルズ

関根康人 一般講演「宇宙に生命を探すー太陽系探査の最前線」2018年1月中央区郷土天文館、多数

玄田英典 一般講演「火星衛星サンプルリターン計画」2019年5月25日 葛飾区郷土と天文の博物館

玄田英典 高校生講座「ジャイアントインパクト」2017年12月28日 東京大学

福士圭介 高校生講座「本格的！水質調査」2018年8月7日 金沢大学

白井寛裕 一般講演「Mars」2019年5月23日 ASIJ Space Club

白井寛裕 高校生講座「火星の水と表層環境の進化史」2018年12月27日 東京大学

新聞報道、テレビ・ラジオ出演、博物館の監修、雑誌掲載により、領域研究の魅力を広く一般に発信した。特に、本領域メンバーによる「はやぶさ2」初期成果の論文発表時には、**テレビ主要局の総報道時間が80時間を超え、国内外の新聞にも2500件以上の記事が掲載**された。これ以外にも、例えば代表者の関根、はやぶさ2プロジェクトサイエンティストの渡邊は、領域の進める研究を一般に紹介するスポークスマンとして、以下のメディア等へ出演している。

関根康人 テレビ・ラジオ出演・雑誌・コラム：NHK BS「コズミック・フロントNEXT」、BSフジ「ガリレオX」、TBS ラジオ（爆笑問題の日曜サンデー、伊集院光とらじおと）、報道ステーション、三菱電機「DSPACE」連載コラム執筆、現代思想、ニュートン、パリティ、日経サイエンス、美術手帖、リクルート「Works」、東進タイムズ、朝日新聞、読売新聞、産経新聞、毎日新聞、日経新聞等

渡邊誠一郎 「はやぶさ2」科学成果論文のテレビ・新聞報道：NHK（おはよう日本、NHKスペシャル、ニュースウォッチ9）、日本テレビ（Oha!4、スッキリ、ZIP!、情報ライブミヤネ屋）、TBS（ビビット、サンデーモーニング）、フジテレビ（めざましテレビ、プライムニュース）、テレビ朝日（報道ステーション、ワイドスクランブル、読売新聞、朝日新聞、毎日新聞、産経新聞、日本経済新聞他）、多数

さらに、コロナ禍においては、YouTube やホームページを通じ、アウトリーチ活動に積極的に取り組んだ。例を挙げると、計画班代表・渋谷らによる「深海の石を切る」という YouTube 動画は再生1万回以上を達成するなど、コロナ禍を含む現代に即したアウトリーチ活動も行った。

●受賞：領域メンバーに対して、以下を含む23件の受賞があった。

はやぶさ2プロジェクトチーム（渡邊誠一郎プロジェクトサイエンティスト）：内閣総理大臣顕彰

鎌田俊一：Zeldovich Medal 2018（惑星科学の国際的若手賞。30年で1名しか日本人受賞はない）（下図）

鎌田俊一：2021年 文部科学大臣表彰若手科学者賞

鎌田俊一：日本惑星科学会 2017年度最優秀研究者賞

奥地拓生：第22回日本鉱物科学会賞

癸生川陽子：2021年 文部科学大臣表彰若手科学者賞

黒川宏之：日本惑星科学会 2018年度最優秀研究者賞

中田亮一：2018年度日本地球化学会奨励賞

北台紀夫：2018年度日本地球化学会奨励賞



## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

### ●領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制

本領域の研究項目A「太陽系天体の水・物質循環の理論」と研究項目B「太陽系天体の水・物質循環の実証」を構成する計画研究及び公募研究の関係を図3に示す。図3には本領域内の計画研究間の連携状況を示しており、報告書提出時(令和4年6月)において、論文として出版された融合研究の論文数を可視化したものである。各計画研究は、それぞれ基礎となる学問分野が異なっており、計画研究間の融合研究はそのまま分野融合の成果となっている。**本領域の総論文数 579 件に対して、計画班間の共同研究から成る学際融合研究の論文数は 86 件**であり、実に全体の**出版論文の 15% が融合研究**である。このことは、組織の連携が効果的に働いたかということを示す証左であろう。

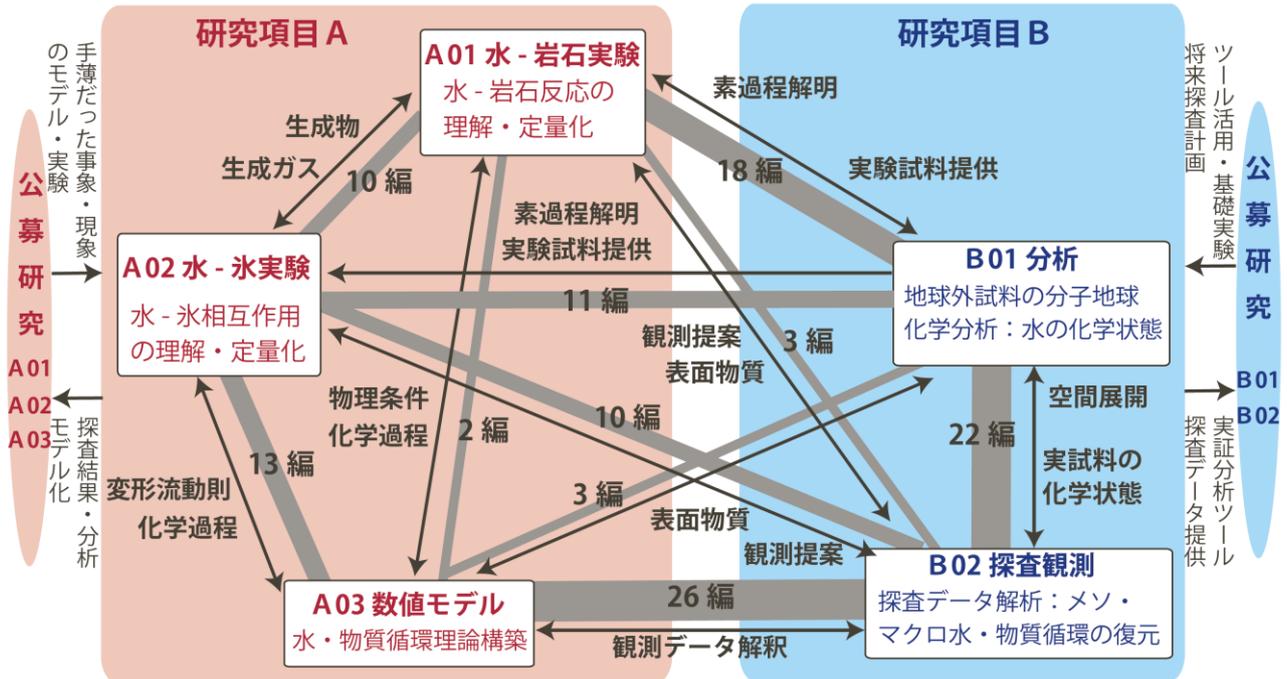


図3. 各計画研究間及び公募研究間の関係性、領域の組織図。灰色太線とその数字は計画班間の融合研究による論文数を表す。

研究項目Aでは、水-岩石反応(A01班)や水-氷相互作用(A02班)を室内実験に基づき定式化し、化学過程、生成物、変形流動則を数値モデル(A03班)に組み込む(図3)。またモデルは、実験に対して反応条件を与え、モデル化に必要なさらなる実験を依頼するというフィードバックを行う。このような融合・連携により、微惑星、火星、氷衛星での水・物質循環を予測する理論を構築した。

公募研究 A01,A02,A03 は、高エネルギー粒子照射、高速天体衝突、有機化学、電気化学に関する実験的研究、マントル対流などの内部進化理論研究を含み、計画研究のみでは手薄であった水惑星上の素過程や要素を公募研究で補う組織となっている。

研究項目Bでは、実試料の分析(B01班)や、探査データの解析(B02班)から、研究項目Aで構築した理論モデルを用いて観測・分析データを解釈した(図3)。高度化したビームラインを用いて(B01班)、制御された水環境条件で得られた室内実験試料(A01,A02班)を分析することで素反応過程を解明する。この連携によって、天体内にかつて存在した水の温度、圧力、pH、酸化還元状態といった物理化学状態を固体試料から読み解く指標(プロキシ)を開発した。また、太陽系探査(B02班)や試料分析(B01班)により得られた観測データを、理論モデル(A01,A02,A03班連携)に提供することでこれを解釈し、微惑星、火星、氷衛星の水・物質循環を推定した。この連携によって、太陽系の水惑星の水・物質循環の推定や生命圏モデルの構築を行った。

公募研究では、構築したビームラインを用いた有機化学や、他の微小微量分析装置との連携構築といった、本領域ではカバーしきれなかった部分を補う研究を含む。また、探査機搭載装置の開発、探査対象を選定するための地球外試料分析など、将来探査につながる研究が含まれている。これらは、計画研究が主導する分析や観測の多方面への展開のみならず、理論との連携強化をさらに進める組織となっている。

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### ●領域研究を行う上で設備等の活用状況

#### ➤ 高度化されたビームラインの活用・効果的使用

本領域の主要設備の一つは、高エネルギー加速器研究機構(KEK) Photon Factory に構築した、高度化したビームラインを用いた X 線顕微鏡 STXM である。STXM のハード面の整備と並行し、領域に関連した研究を実施するための S1 課題を KEK に対して提案・採択され、本学術領域研究が終了した1年後の令和4年度末まで STXM を利用した研究が安定的に推進可能な状況となった。

STXM の利用については、当初から謡っていた通り、幅広い分野への利用を進めるため、STXM 研究推進ボードの設立や領域 HP 内に利用公募ページ(<http://www.aquaplanetology.jp/stxm/index.html>)を立ち上げ、領域内外に対して利用公募を行った。STXM 研究推進ボードは、総括班メンバーと経験者から構成され、Photon Factory の協力も得つつ未経験者がアドバイスを受けながら利用できる体制を整えている。これにより B01 班の8テーマ以外にも、新規7テーマが領域内外の申請により採用されている。これら新規テーマの中には、隕石中の流体包有物の研究（隕石学）だけでなく、鉱物-有機物の相互作用に関する研究（有機化学）、粘土鉱物の吸着特性（鉱物学）なども含まれ、本領域のみではカバーしきれない研究が展開されている。このように、**STXM の立ち上げと広く門戸を開いた運用により、本領域のみならず周辺分野を含み日本の研究水準が向上する結果となったことは特筆に値する。**

構築した STXM は、「はやぶさ2」初期分析6班のうち「石の物質分析チーム」と「固体有機物分析チーム」の2班で活用され、2021年6月からリュウグウ試料の分析を重点的に行った。本 STXM が持つ 50 nm を切る空間分解能で、軟 X 線領域の幅広いエネルギーでの測定が可能な特徴を活かして、リュウグウ試料中の局所領域での鉄の価数の分析、有機物の官能基マッピング、マグネシウムの化学種分析による局所鉱物同定などで威力を発揮した。特に、鉄の分析ではリュウグウ試料を一度も大気に曝さずに分析をするために、専用の嫌気チャンバーを開発し、地球大気による酸化を防いだ分析を行った。今後始まるリュウグウ試料の公募研究においても、本 STXM を使った提案が採択され活用される見込みである。さらに、2024年度の打ち上げ予定の JAXA 火星衛星探査計画(MMX)や、NASA が主導する 2030 年代前半の国際火星サンプルリターン計画など、**将来の国内外の太陽系探査の帰還試料分析においても、日本の特色と実績のある武器の一つとして、本 STXM を最大限に活用していく予定である。**

#### ➤ 探査計画における研究費の活用・効果的使用

「はやぶさ2」において、本領域の研究費は主に探査のサイエンスを推進するポスドク研究員7名の雇用に使われた。これは、JAXA 経費は探査機の開発・運用に充てられ、サイエンス推進は研究者の科研究費等に委ねられているためである。本領域で雇用した若手研究員は、探査機が小惑星リュウグウに到着する前から機器データ処理・解析トレーニングや、着陸候補地点選定の統合訓練を行い、観測機器間や工学運用とサイエンス観測を結びつける役割を果たした。さらに表面物質の推定やリュウグウ形成に関するサイエンス成果を短時間で次々発表することに不可欠な役割を果たした。本領域による若手研究員の雇用は、「はやぶさ2」という千載一遇の探査機会を利用して科学を推進することに貢献している。

「はやぶさ2」において実践的に経験した探査の運用やデータ解析の経験は、日本が近い将来行おうとする火星衛星探査計画（MMX）、月探査計画（LUPEX）などにおいて生かされるものである。実際、本領域で雇用されたポスドク研究員は、現在、JAXA 宇宙科学研究所・産業技術総合研究所・東京大学で研究職を継続しており（計7名のうち4名は無期雇用契約およびテニュアトラック）、MMX および次期サンプルリターン計画の中核メンバーとして活躍している。このように、**本領域の若手雇用は、「はやぶさ2」という希少な機会を利用して、将来の我が国の太陽系探査を担う人材の実践的育成を行う効果を持つに至った。**

#### ➤ 極限環境を再現する実験装置群の活用・効果的使用

平成29年度に、高圧熱水環境下での摩擦実験を行うために変形透水システムを JAMSTEC に導入し、平成30年度には熱水環境下での溶液試料採取方法の開発を行なった。また、令和元年度から水惑星内での地震断層運動の再現実験を行う装置群を構築し、研究を行ってきた。これら装置は A01 班のみならず他の計画研究班も使用し、実験初期物質合成を領域全体で行っている。深海底下の高圧熱水環境を模擬する高圧反応装置、海底下の断層摩擦実験装置については、JAMSTEC が世界をリードする実験技術を保持している。**本領域により構築したさらなる極限環境を再現する実験装置は、この優位性を活かし**

つつ世界との差を大きく広げるものである。これら装置は、領域後も、地球の地下深部の断層や熱水の発生場所や活動度を推定するなどといった防災を含めた広い汎用・応用性もある。実際に、変形透水システムを導入した摩擦実験装置と、既存の静的水岩石反応実験装置（500気圧のDickson型実験装置）の両方を用いて、地震活動の動と静の水-岩石反応を実験的に再現して、その違いを防災（地震活動、断層破壊の物理的理解など）に役立てる計画も検討されている。

また、太陽系天体の氷模擬物質を使った光照射や物性測定、クラスター反応装置については、そもそも実験的研究例はほとんどなく、世界的にも独創的かつ重要性の高い実験装置である。低温での光照射や、高圧氷、クラスターは、化学においても新しい物性や反応性が期待される物質であり、これら装置の活用や使用は領域内の研究に留まらない波及効果を有する。

### ●総括班研究課題の活動状況：連携会議、国内・国際シンポジウムの開催、国際連携の強化

総括班は融合研究を進めるため、「理論連携会議」、「プロキシ会議」、「微惑星の水・物質循環会議」を開き、アイデアの創出、テーマ設定、結果・議論のフィードバックを活発に行ってきた。これが融合研究を効果的に推進し、独自の成果として結実している（「8. 研究組織の連携体制」を参照）。また、国内・国際シンポジウムを主催し、これら成果を世界に対して発信するとともに、国際派遣を通じて国際共同研究や若手育成を行ってきた（「11. 若手育成の取り組み」を参照）。得られた成果の集約および外部発信のため、ホームページ <http://www.aquaplanetology.jp/> や、ニューズレター「水惑星学の創成」の発行を行っている。2021年には、国際学術誌「*Minerals*」に本領域の特集号を組み、若手を含む成果発表の場を提供するだけでなく、国際的にも領域をアピールした。特集号の編集者には、領域代表・関根、計画班代表・福土に加えて、火星探査車キュリオシティの鉱物分析チームのリーダーであるNASAのRampe博士を迎えた。本特集号の論文投稿費は、総括班から捻出し、14編の論文（領域関係者9編、領域外の海外研究者5編）を発表した。出版後、本特集号の質の高さは各所で反響を呼び、アストロバイオロジー分野で世界最大の国際会議Astrobiology Science Conference 2022にて、特集号タイトルと同名のセッションが開催され、特集号の続編を期待されるなど好評を博した。

本領域では、3年目以降、新型コロナウイルスによって、国際スクール・シンポジウム等の開催が大きく制限された。このような事態に際しても、国内での連携会議やシンポジウム、全体会議は遠隔およびハイブリッド形式で開催を継続し、研究活動自体が停滞することのないように務めた。ハイブリッド開催の際には、専門の業者に依頼し、現地の議論に遠隔での出席者が参加しやすいような工夫を凝らした。また、海外との連携については、遠隔会議等で連絡を取りつつ、実験や野外調査ではRAや謝金で現地の人材を雇用して遠隔化可能な体制を整えるなど、コロナ禍においても、国際共同研究を可能な限り進めてきた。

### ●最終年度の繰越が承認された計画研究

本領域では、総括班及び計画班A02, A03, B02が、最終年度に繰越しを行い承認されている。その繰越理由の多くは、以下のように、主に新型コロナによる国際活動の制限に起因したものである。

総括班については、コロナ禍で行うことのできなかつた海外への若手研究者の派遣を、最終年度以降に行う予定である。上記のように、RAや謝金によって、実験や野外調査も可能な限り遠隔化してきたが、実験やデータ解析など、現地にて行うことが必須の研究内容については、否応なく行えない部分が生じてしまった。これらを解消するため、2022年度に中期の若手派遣を行う。これによって、国際的な研究ネットワークの中心に、再び我が国の研究者たちが位置できる下地を作る。

A02班では、元々、2020年度にNASAによるJames-Webb宇宙望遠鏡のデータを使い、氷衛星表面物質の同定を行う予定であった。ところが、この宇宙望遠鏡の打ち上げが2021年12月延期されてしまった。本領域では、宇宙望遠鏡に代わり、臨機応変に「すばる望遠鏡」を用いて、氷衛星エウロパ表面の酸化物の分布マッピングを行い、宇宙望遠鏡による観測の延期を補って余りあるデータを取得することができた(Tan et al., *PSJ*, 2022)。一方で、表面物質の観測自体が当初の計画より1年ほど遅れたため、2022年度に観測された酸化物の分布を解釈するための室内実験を行う必要が生じた。これにより、該当する研究計画を2022年度に実施することとなった。

A03班では、研究代表者・分担者・ポストドクが、各テーマ研究の成果を国内外で発表する予定であったが、コロナ禍において、特に海外で開催される学会への参加困難となってしまった。代わりに論文執筆などを先行して行い、海外での成果発表は2022年度に実施することとなった。

B02班では、2022年3月までに、火星氷分布探索のための地質図作成、火星氷分布に関する総合解釈を行い、解析結果の学会発表および情報収集を行う予定であった。しかし、コロナ禍において、海外で開催される学会への参加が困難となり、該当する研究計画を2022年度に実施することとなった。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本領域は応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」を選択している。本領域は、惑星科学と地球科学の融合を行っており、惑星科学は、天文学や地球物理学から発展し物理学を基礎とする一方、地球科学は、フィールドを基盤とする地質学や、化学に端を発する地球化学が中心となる。これらは共に地球を含む惑星を対象とするため、一見近い分野に見えるが、基礎学問体系が異なるため双方の研究基盤は隔離している。多様な太陽系の水惑星群を分野融合で実証的に解明できれば、系外惑星における生命や、地球生命の起源といった学問分野の枠に収まらない問題に対しても重要な知見を与えうる。これは化学、天文学、生物学のみではなしえない独創性である。

実際に、本領域は前述のように数多くの融合研究を生み出し、「地球の絶妙な水量の決定要因」や、「火星や氷衛星の水環境・エネルギー論」を理解するに至った（「6. 研究目的の達成度」を参照）。さらに構築したビームラインや極限環境を再現する装置群により、惑星における水の化学反応を扱う分野において、世界的な実験・分析拠点が日本に誕生するという貢献があった。ここでは、上記をさらに発展させた場合の、本領域の成果が持つ「地球生命の起源」と「系外惑星」へのインパクトや波及効果、将来展望の具体例について述べる。

**地球生命の起源への波及効果：**まず、「地球生命の起源」に対しては、なぜ地球生命はリンや窒素を材料として大量に使うに至ったのかという問いに対する示唆が得られつつある。現在の地球海洋では、リンや窒素は常に不足する生命必須元素であり、生物一次生産を律速している。特にリンは、太陽系元素存在度や現在の海洋溶存量に比して、地球生命を構成する分子（DNA, ATP, リン脂質など）に多く用いられていることが長年の謎である。生命がリンを大量用いるのは、初期地球の海洋や生命誕生の場では、これら元素に富んだ環境であったからかもしれないが、詳細な環境は不明である。実は、多様な水環境で水-岩石反応実験を行うと、リンや窒素に極めて富む水が実現することを、本領域は発見している。その条件とは、アルカリ性で還元的、かつ溶存二酸化炭素が極めて高い条件であり、そのような条件では、岩石中に含まれるリン酸塩がほとんど溶脱してリンが水に供給される。そのような海洋化学条件は、本領域の研究結果では、木星以遠の二酸化炭素の氷として凝結する外側太陽系の氷衛星では普遍的に成立する。

実際、カッシーニ探査機の質量分析計の未発表データを解析した結果、本領域の成果が予想した通り、土星衛星エンセラダスの内部海から噴出したプルーム中に、地球海洋の数千倍という異常に高濃度のリン酸が含まれることが明らかになり、現在、探査機チームと共同で論文を執筆中である。エンセラダスの内部海は、リンや窒素に富む地球生命誕生の場のアナログ環境かもしれない。そのような実験場で起きる有機化学を明らかにすることで、なぜ地球生命がリンや窒素を大量に必要とするのか、どのような場で地球生命が誕生したのかといった問いに、インパクトのある示唆が与えられるかもしれない。

**系外惑星への波及効果：**本領域の持つもう一つの波及効果として「系外惑星」に対するものがある。本領域の成果として、木星などの巨大ガス惑星の配置と移動が地球型惑星の水量を決定する要因であることが明らかになった。もし巨大ガス惑星が木星よりさらに遠方にできる太陽系外の惑星系があれば、地球型惑星の受け取る水量は地球の1000倍にも達する。水量が地球の1000倍ある場合、その海底での水-岩石反応は、現在の地球のものと大きく異なることが本領域で新しく得られた知見である。木星の巨大氷衛星ガニメデや土星最大の衛星タイタンの海底では、地球の海底の圧力の1000倍にもなる高圧条件で水-岩石反応が進行する。そのような場では、火山ガスも地球のような二酸化炭素ではなく、熱力学的に安定なメタンが主たる成分になりうる。すなわち、深い海を持つ系外水惑星では、大気が海底火山によって供給されるメタンに富み、有機物エアロゾルに覆われている可能性がある。一方で、巨大ガス惑星が存在しない系外惑星系では、地球型惑星には水は少量の水しか供給されない。水に乏しい系外水惑星の水・物質循環の理解の助けになるのは、火星である。かつて火星は限られた量の水が存在する陸惑星であり、その気候は寒冷で、表層氷に大気等でできた過酸化水素や酸素、オゾンなどの酸化剤が蓄積される。この場合、大気組成は二酸化炭素に上記の酸化剤を含む酸化的なものとなるだろう。

これら多様な地表の水量をもつ系外水惑星の大気成分は、将来の大型地上/宇宙望遠鏡（30メートル望遠鏡(TMT)やJames-Webb宇宙望遠鏡など）で観測可能となる。本領域は、太陽系の多様な水惑星群の知見を最大限活用し、近い将来得られるであろう系外惑星大気観測データから、見えざる惑星表層環境（水量・物質循環）を予測するための基盤であり、太陽系内外の惑星を実証データに基づき統一的に理解するという新しい潮流を生み出す発展性をもつ。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和4年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域は、「宇宙における生命」の課題に迫るものであり、これを持続的な学問に発展させるためには、既存の分野にとらわれず、新しい学問を創る若手の育成は不可欠である。これを実現するため、本領域では、学生や若手に異なる分野を学び、積極的に議論できる機会を多く提供し、実践的に分野横断力をつける育成を行ってきた。具体的には、以下のような育成に取り組み、若手の就職実績をあげてきた。

### ●若手研究者の就職実績

本領域における最もよい若手の就職実績例は、領域・計画班代表たちであろう。本領域採択時において、領域・計画班代表の平均年齢は40歳であり、若手研究者に属していた。その後、領域を運営する中で、現在では全員が大学や研究機関のテニユアの教授・主任研究者へと就職・昇進している。学際的な研究を中核となって推進した代表たちが、今では若手教授として学生たちと近い目線を持ちつつ、長期的な研究拠点を構えることができ、エネルギーに次世代を育成する立場となった。これによって、学生を主著とする多くの融合研究や国際共同研究が行われ、大きな教育効果をもたらした。

そのような環境で育成された学生たちは、分野の壁を壁と思わず、軽々と超えていける研究者に成長している。例を挙げると、領域代表・関根の学生であった野田は、A01-A02間の融合研究を行い、惑星科学で本領域の重要な成果を発表しているが(Noda et al., 2019, 2021, 2022)、現在は学振PDとして分子生物学の研究室で極限環境での有機合成実験を行っている。また、同研究室の依田は、A02-B01融合の核となり、惑星科学で学位を取りつつ(Yoda et al., 2021; Kurokawa et al., 2022)、地球上の反応条件を超えた領域での水-岩石反応の実績を買われ、環境問題を扱う企業へ研究就職している。このように結果的に、本領域で培った分野融合の環境が、博士課程学生に多彩なキャリアパスを提示することにつながった。これは若手が中核となった本領域ならではの、予想外ではあるが重要な育成成果である。これに加えて、本領域では専門をより深く究める研究者も多く育成している。例えば、本領域のX線顕微鏡STXMの構築に大きく貢献した菅(B01ポスドク)は、その技術を買われて放射光施設SPring8のテニユアポストへ就職した。また、「はやぶさ2」のリモセン解析に関わった本領域の若手(鳶木・坂谷・松岡・野口)は、次の火星衛星探査計画(MMX)の即戦力として、全てがテニユアあるいはテニユアトラックの研究職を大学やJAXAで得ている。

領域メンバーの若手41名(令和4年6月時点で39歳以下)が、大学教員や研究員などの常勤/非常勤研究職に就職・昇進し、うち14名は無期雇用及び4名テニユアトラックとなった。さらに、16件の関連学会(国際学会含む)における若手賞・学生賞の受賞もある。このことは、本領域の育成が順調に行われ、関連分野からも高く評価されている証左であり、この分野が発展する下地を作ることができた。

### ●国際スクール・分野インターン・海外派遣による育成実績

本領域では、次世代育成として世界をリードする研究者を招いた国際スクールを2回開催した。世界のトップランナーを講師として招聘し、若手・学生に対して、基礎から先端研究にわたる集中講義を行った。コロナ禍により、国際スクールは2回の開催に留まったが、世界最大の関連分野学会であるアメリカ地球物理学会(AGU)、および日本最大の関連学会である日本地球惑星科学連合大会(JpGU)において、本領域が主催するセッションを採択以降継続して開催している。そこでは、若手を優先的に口頭発表とし、世界に対して若手・学生のアピールの場を提供してきた。

また、本領域では、若手の分野インターンや海外派遣も行っている。例えば、分野インターンでは、A02班でクラスレート研究を行っていた若手が、ガス種の生成過程を理解するため、A01班の水-岩石反応実験を行うなど、実践的機會を使った分野横断力を持つ若手を育成してきた。海外派遣に関しては、コロナ禍前には、本領域の若手研究者5名を米国・英国などに派遣してきた。例えば、火星周回機の分光観測チームのあるカリフォルニア工科大に派遣した若手は、国際探査データの解析トレーニングを受け、帰国後、このノウハウを他の若手や学生へと伝えることで、火星観測チームと日本の若手・学生とのパイプ役となっている。このような若手を介した国際協働体制は、ビームラインを用いた分析研究でも同様に起きており、若手を国際共同研究の主役とすることで、将来にわたり国際協働力を持つ人材への育成を行っている。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### ●評価体制

本領域は、地球科学（地質学、地球化学、生命圏科学）と惑星科学（惑星天文学、惑星物理学、太陽系探査学）という複数の分野から構成される。特に、太陽系探査においては、国内のみならず、国際的な視点からの評価やコメントも極めて有用となる。そこで、それぞれの分野について世界的な権威からなる評価体制を組織し、本領域の活動について上記の研究分野の視点から、本領域の国際的な役割や重要性についても評価を得られるようにしている。

### ●評価コメント

#### ➤ 塚本 尚義 教授（北海道大学 大学院理学研究院）（専門：宇宙物質科学、宇宙化学）

本研究課題は、代表者の関根康人さんの強力なリーダーシップのもと、着実かつ迅速に当初計画を上回るペースで研究成果をあげた。特に、テーマごとに絞った融合研究会議と分野間インターンは、研究分担者の研究集中を促し、かつ、オン・ザ・ジョブ・トレーニングによる若手の人材育成に高い効果を発揮した。また、アメリカ地球物理学会大会・日本地球惑星科学連合大会における主催セッションの継続は、研究成果の世界発信に有効であるので、この新学術領域が世界から認知されるための重要な手段であった。融合研究により達成された、特に特筆すべき成果は、小さな微惑星内部の水・物質循環モデルを構築したことである。微惑星内部の水・岩石相互作用により生成する水素ガスの輸送・濃縮により、酸化還元状態の不均一性が生じ、微惑星内部のそれぞれの場所で多様な二次鉱物と有機物の様々な組合せが共存できる法則性を明らかにした。これにより、現在見られる天文学的な小惑星の多様性が、一つの微惑星の衝突破壊とその破片の部分的な再集積に由来することにより説明できる新しい説を提案したことは素晴らしい。もう一つの成果は、NASAの火星探査車キュリオシティの分析データを本研究課題の基礎実験結果とモデルを用いて解析した結果、火星の太古表層環境を一新する新しい火星像を提唱したことである。この研究指針を、将来の惑星探査機に搭載する分析装置開発の具体的な開発指針としても発展されることを期待したい。一方、本課題の目玉であるSTXM装置の開発も順調に進行し、実用化を通り越し共用段階にまで高めたことも素晴らしい。今後は、完成した装置を用いて、制御された水環境で合成した実験試料を分析することによりエネルギー変換の素反応過程をどんどん解明していかれることを期待する。以上より、本研究課題は、当初計画を超え、今後の展開を見通す、極めて高いレベルで課題を達成できたと評価する。

#### ➤ 吉田 尚弘 名誉教授（東京工業大学 物質理工学院）（専門：環境化学、地球化学、生命圏科学）

地球惑星科学の分野は、歴史的な背景の相違もあるが、対象とする時空間や研究手法の違いによって、なかなか実質的な分野融合や共同研究が進まないことが多い。本領域は、惑星天文学、惑星物理学、太陽系探査学、地質学、地球化学、生命圏科学という異分野間の壁を乗り越えて、新たな「水惑星学」の創成を目指したものである。

また、水の物理過程にとどまらず、化学的性質や物質循環などを組み込んだ、実験、隕石やはやぶさ2により持ち帰ったリュウグウ試料の観測などのエビデンスに基づいた惑星形成論に展開していこうとするものであり、時機を得た研究計画であった。

研究成果は質、量ともに相当、高いレベルに結実して、班ごとにそれぞれが高いうえ、相互の連携が実った共同研究の成果の割合が年度を追って高くなっていることも高く評価できる。計画通り、あるいは計画を越える成果を上げていて、唯一着手中として残る氷衛星生命圏モデルも、NASAのJames-Webb宇宙望遠鏡の打ち上げ遅延の影響によるものであり、はやぶさ2の論文発表が年度内に収まらなかったことも、まさに誤差範囲であって成果が未達ということがほとんどない。これは、各班、その連携の努力に加えて、代表者のリーダーシップによるものと評価できる。

融合研究や若手育成、そして国際活動も大変熱心に進められた。研究期間後半に加速されることが期待されたが、コロナ禍で全ては計画通り実施されず、一部が繰越となったことは残念であるが、真にやむ

を得ない事情であると理解できる。

地球外生命の研究に寄与する知見のさらなる取得と、そのための探査計画の提案を進めていくことを期待する。また、天体サイズ(重力)や水量に大きく依存して、天体内の鉛直方向の物質輸送、それに伴う物質循環は大きく変化しうる点については、本計画内のより詳細な解析とともに、今後の研究の中で明らかにしていくことを期待したい。

➤ **藤本 正樹 教授 (JAXA 宇宙科学研究所 副所長) (専門：惑星物理学、太陽系探査学)**

評価者は JAXA に所属する研究者であり、JAXA が推進する宇宙科学ミッションにより学問の発展が促されることに腐心する立場にある。中間評価の際に、以下のコメントをした：

「宇宙ミッションは、成果創出の大きな機会を提供するが、成果創出はミッションの価値を証明するためだけにあるのではなく、ミッションの枠を越えた、大きなサイエンス戦略を推進するものであることが望ましい。本領域は、「はやぶさ2」が惑星科学を駆動する潜在能力を評価しつつ、それを包み込むように大きな問題意識が配置されていることが高く評価でき、この評価の正しさは、今後出版される、「はやぶさ2」データに基づく論文や、「はやぶさ2」により育まれた若手メンバーが主導する月・火星・水衛星天体への将来探査計画の実現により証明されるだろう。」

最終報告書の時点において、まさに、この評価が正しかったことが証明されたと述べることができ、たいへん喜ばしいと感じている。「はやぶさ2」がそのサンプルを持ち帰った小惑星リュウグウ・サンプルの価値の高さ、特に「水輸送」という観点からのサンプルの価値が高かったことが成功の大きな要因だったという考え方もあり得るだろう。しかし、そのサンプルが帰ってくるのを単に待つのではなく、様々な科学的期待をしつつ準備を進めて待ち受けていたところに、素晴らしいサンプルが帰って来たという構図であったからこそ、大きな成果が次々とタイムリーに、かつ、広い分野にインパクトを与える形で発表されることに至ったのだと考える。若手がチャンスをつかみに行ったのだが、その際、チャンスを最大限に生かすべく準備もして臨んでいたこと、さらに、研究分野を大きく発展させるインパクトをもたらすことができるはずだと考えて研究に取り組んでいたことを強調したい。それが可能となる環境を提供し、結果として大きな成果をもたらした本領域の活動をきわめて高く評価する。

➤ **村上 隆 名誉教授 (東京大学 大学院理学系研究科 / 元・日本鉱物学会会長) (専門：鉱物学、地球化学、地質学)**

宇宙での(初期)生命の存在は、現在の自然科学における最大の課題の一つである。本領域は、この課題の第一歩である、惑星における水とそれを介した化学反応、物質循環を統一的に理解しようとした。物理的視点、化学的地球科学的視点のみならず、生物学的視点を交え、さらに理論的手法と実験・観測的手法を巧みに融合し、効果的な成果を上げ、水惑星の包括的理解を示したことは、今後、世界をリードする新たな学術分野を作ったと言える。また、研究の特質上、初期地球における生命・環境の進化研究の分野へも多大な貢献をした。研究成果もさることながら、若手研究者の育成に貢献したことの功績は大きい。

以上は全体的に見える成果である。私自身の専門(水-岩石-大気反応)から見て、主に火星に関係する研究の中に、数々の大きな成果が見える。火星の岩石から、かつての水の化学的性質を推定し、凍結期の酸化剤と還元剤が、温暖期の水循環で混合され、大きなエネルギーが解放されるというモデルを提唱した。また、鉄酸化菌が生息可能な高い鉄酸化エネルギー、酸素を含む大気の早期発生の発見は、初期火星での生命発生の可能性を示唆している。火星のみならず、水-岩石低温変質実験・観測から、微惑星内の低温変質プロセスが推定できるようになり、さらに二次鉱物の生成の理論モデルによるリュウグウ帰還試料との比較から、C型小惑星群が木星以遠で形成されたことを明らかにした。これらの研究成果は、初期地球を含む太陽系初期の生命活動を知るため今後重要となるであろう。