

機関番号：12608
 領域設定期間：平成29年度～令和3年度
 領域番号：2901
 研究領域名（和文）水惑星学の創成
 研究領域名（英文）Aqua planetology
 領域代表者
 関根 康人（SEKINE Yasuhito）
 東京工業大学・地球生命研究所・教授
 研究者番号：60431897
 交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,079,400,000円

研究成果の概要

最近の太陽系探査によって、地球以外の太陽系天体に液体の水が存在する（していた）証拠が続々と見つかっている。単なる水の存否を超えて、宇宙における生命の問題に迫るためには、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。本領域は、惑星科学と地球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、水を保持する水惑星群を、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し、生命存在可能性の議論にまで至る「水惑星学」の創成を目的とする。

本領域は、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」を両輪として、研究を推進する。研究項目Aでは、高圧熱水反応装置、氷物質光照射装置などの極限環境を再現する装置群が完成し、水・物質循環を記述する物理モデルに実験による知見・データを組み込み、探査データを解釈している。これにより、惑星における水環境を扱う世界トップの実験研究拠点が形成した。研究項目Bでは、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、炭素、窒素、酸素、鉄、硫黄、ケイ素、ナトリウムなど、地球内外の実試料の分析を通じて水惑星群の進化を探る世界トップレベルの実証ツールが完成した。また、「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。本領域メンバーが主著者・共著者となった論文が*Science*、*Nature*に複数掲載されるなど、華々しい成果をあげた。本領域では、これら2つの研究項目を融合し、従来の力学に基づく惑星形成論に、微惑星での水-岩石反応などの物質進化を本格的に組み込み、地球の持つ絶妙な水量を決定した要因が、原始太陽系での木星の形成位置と移動過程にあることを明らかにした。また、火星や氷衛星などでの酸化剤・還元剤の生成を実験的に明らかにし、探査結果に基づいて、例えば火星では鉄酸化反応が最もエネルギー的に効率のよい代謝反応になるなど、太陽系の水惑星群での生命利用可能エネルギーを定量化・予想することに成功した。太陽系探査や宇宙における生命に関する分野は一般からの注目も高く、これらの知見は活発なアウトリーチ活動によって、広く社会にも還元した。また、本領域の若手メンバー41名が研究職に就き、うち18名が常勤職・テニュアトラック職を得るなど、若手育成にも実績を上げた。

研究分野：地球惑星科学

キーワード：固体惑星・衛星・小惑星、地球惑星物質、宇宙・惑星化学

1. 研究開始当初の背景

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、土星や木星の氷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さまざ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。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。

2. 研究の目的

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、林忠一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、力学と質量成長を追う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。

3. 研究の方法

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(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・物質循環を還元・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得る。

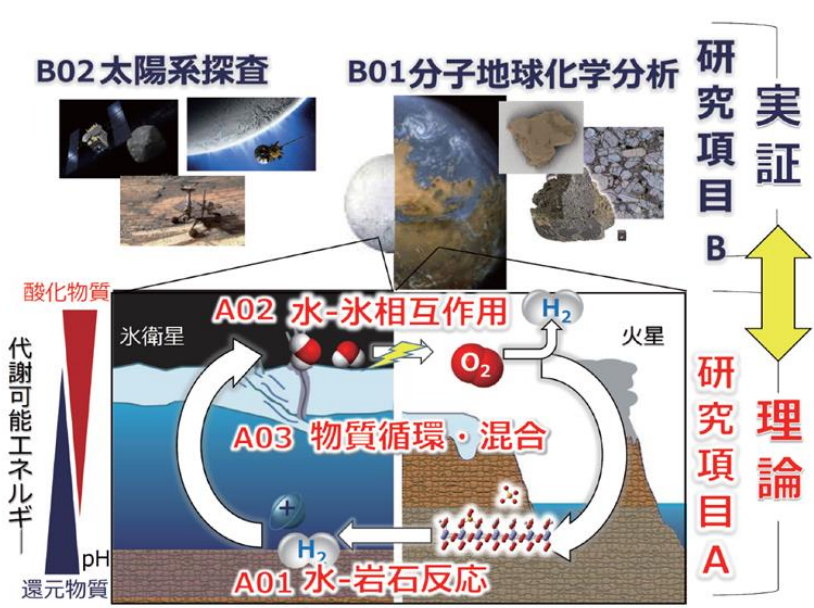


図1. 太陽系天体の水・物質循環の概念図。天体のサイズや水量に関する過程や実証法に基づき計画が設置する。

4. 研究の成果

図2に設定目的に対する、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。

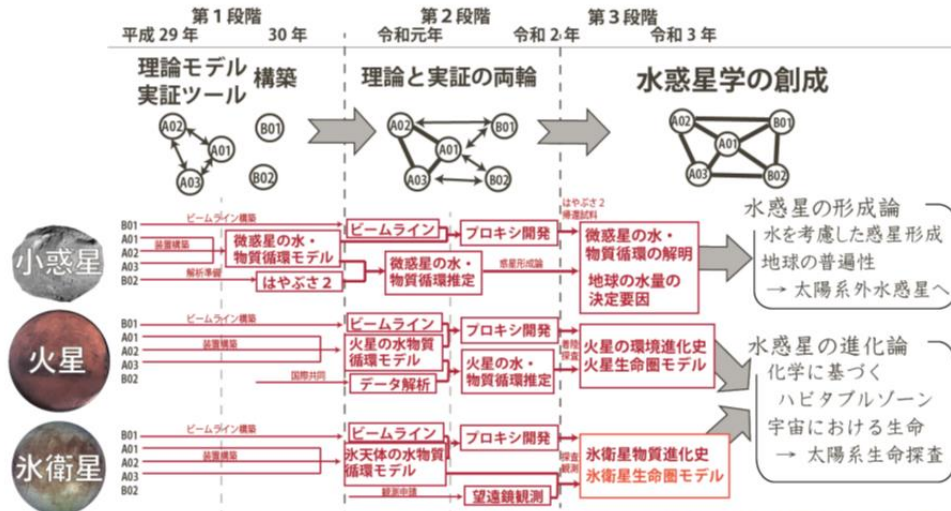


図2. 領域ロードマップと達成目標 報告書提出時（令和4年度6月）に赤字が達成済、オレンジ字が一部達成/着手中

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、水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段階終了時の目標に対する成果を述べる。

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、ここでの水-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、二次鋳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、木星以遠の二次鋳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, 2022)。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・鋳物組成データから、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し、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 H₂O)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。

5. 主な発表論文等(受賞等を含む)

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。以下に、本領域の発表論文から特に重要なものを抜粋する。

*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

*Nakajima, M., H. Genda, E. Asphaug, and S. Ida “Large planets may not form fractionally large moons” *Nature Comms.*, 13, 568, 2022

*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.

*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

- *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
- 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
- *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.
- *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.
- *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
- *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
- *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
- *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
- *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
- *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
- *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
- *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.
- *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.
- *Kitadai, N., et al. “Metals likely promoted protometabolism in early ocean alkaline hydrothermal systems” *Science Adv.*, **5**, eaav7848, 2019
- *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

また、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する基盤を構築すると共に、関連分野に得られた知見を還元している。

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

Volatiles in the Martian Crust (eds. Filiberoto J. and Schwenzer 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

分子地球化学 (高橋嘉夫編) 名古屋大学出版、関根康人、福土圭介、高橋嘉夫らが複数章を執筆。

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。

さらに、領域メンバーに対して、以下を含む 23 件の受賞があった。特に、これらのうち 16 件の若手研究者に対する表彰であり、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研究職に就職・昇進し、うち 14 名は無期雇用及び 4 名はテニユアトラックとなるなど、若手育成に関する実績もあげた。

はやぶさ 2 プロジェクトチーム(渡邊誠一郎)：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)

鎌田俊一：2021 年 文部科学大臣表彰若手科学者賞

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

ホームページ等

ホームページ・ニューズレターにより、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。領域ホームページのアドレスを以下に示す。

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