水惑星学の創成

領域番号 2901

平成 29 年度～令和 3 年度
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）
（新学術領域研究（研究領域提案型））
研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日

領域代表者　関根 康人
東京工業大学　地球生命研究所　教授

はじめに

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すぐさま答えられるかといえばそうではない。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。

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。

研究組織

領域代表者　　関根康人　　東京工業大学・地球生命研究所・教授

（総括班）

研究代表者	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授
研究分担者	渋谷岳造	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・主任研究員
研究分担者	玄田英典	東京工業大学・地球生命研究所・准教授
研究分担者	福士圭介	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究分担者	臼井寛裕	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

（国際活動支援班）

研究代表者	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授
研究分担者	渋谷岳造	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・主任研究員
研究分担者	玄田英典	東京工業大学・地球生命研究所・准教授
研究分担者	福士圭介	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究分担者	臼井寛裕	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

（計画研究 A01 班）

研究代表者	渋谷岳造	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・主任研究員
研究分担者	廣瀬丈洋	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・研究所長
研究分担者	中村謙太郎	東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究分担者	西澤学	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・副主任研究員
研究分担者	柏原輝彦	海洋研究開発機構・海洋機能利用部門・副主任研究員
研究分担者	高谷雄太郎	早稲田大学・理工学術院総合研究所 主任研究員
研究分担者	深海雄介	学習院大学・理学部・助教

（計画研究 A02 班）

研究代表者	関根康人	東京工業大学・地球生命研究所・教授
研究分担者	谷篤史	神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・准教授
研究分担者	荒川雅	九州大学・大学院理学研究院・助教
研究分担者	野口直樹	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部・助教

（計画研究 A03 班）

研究代表者	玄田英典	東京工業大学・地球生命研究所・准教授
研究分担者	倉本圭	北海道大学・大学院理学研究院・教授
研究分担者	鎌田俊一	北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究分担者	高橋芳幸	神戸大学・大学院理学研究科・准教授
研究分担者	黒川宏之	東京工業大学・地球生命研究所・特任准教授

（計画研究 B01 班）

研究代表者	福士圭介	金沢大学・環日本海域環境研究センター・教授
研究分担者	高橋嘉夫	東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究分担者	木村正雄	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教

		授
研究分担者	武市泰男	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教
研究分担者	中田亮一	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・副主任研究員
研究分担者	癸生川陽子	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究分担者	佐久間博	物質・材料研究機構・電子・光機能材料研究センター・主幹研究員
研究分担者	若林大佑	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別助教
研究分担者	山下翔平	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教
研究分担者	菅大暉	高輝度光科学研究センター・SPring-8・JASRI 研究員

（計画研究 B02 班）

研究代表者	臼井寛裕	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授
研究分担者	渡邊誠一郎	名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究分担者	荒川政彦	神戸大学・大学院理学研究科・教授
研究分担者	岡田達明	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授
研究分担者	竝木則行	国立天文台・RISE 月惑星探査検討室・教授
研究分担者	諸田智克	東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究分担者	中村智樹	東北大学・大学院理学研究科・教授

（公募研究）

研究代表者	北台紀夫	海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門・研究員
研究代表者	末松久幸	長岡技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究代表者	奥地拓生	岡山大学・惑星物質研究所・准教授
研究代表者	須田好	産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究員
研究代表者	鹿島裕之	海洋研究開発機構・深海・地殻内生物圏研究分野・研究員
研究代表者	藪下彰啓	九州大学・大学院総合理工学研究院・准教授
研究代表者	黒澤耕介	千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員
研究代表者	横山哲也	東京工業大学・大学院理学院・教授
研究代表者	中川貴司	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
研究代表者	城野信一	名古屋大学・大学院環境学研究科・准教授
研究代表者	薮田ひかる	広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究代表者	伊藤元雄	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
研究代表者	中川広務	東北大学・大学院理学研究科・助教
研究代表者	藤谷渉	茨城大学・大学院理工学研究科・助教
研究代表者	Li Yamei	東京工業大学・地球生命研究所・研究員

研究代表者　　牧田寛子　　東京海洋大学・大学院学術研究院・准教授
研究代表者　　鈴木志野　　海洋研究開発機構・高知コアセンター・研究員
研究代表者　　鈴木昭夫　　東北大学・大学院理学系研究科・准教授
研究代表者　　小河正基　　東京大学・大学院総合文化研究科・准教授
研究代表者　　小林浩　　名古屋大学・大学院理学系研究科・助教
研究代表者　　吉田二美　　千葉工業大学・惑星探査研究センター・研究員
研究代表者　　薮田ひかる　　広島大学・大学院理学系研究科・教授
研究代表者　　長勇一郎　　東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究代表者　　横山哲也　　東京工業大学・大学院理学院・教授
研究代表者　　平田直之　　神戸大学・大学院理学系研究科・助教
研究代表者　　牛久保孝行　　海洋研究開発機構・高知コアセンター・研究員

交付決定額（配分額）

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	268,450,000 円	206,500,000 円	61,950,000 円
令和元年度	255,320,000 円	196,400,000 円	58,920,000 円
令和 2 年度	209,560,000 円	161,200,000 円	48,360,000 円
令和 3 年度	188,890,000 円	145,300,000 円	43,590,000 円
合計	1,239,550,000 円	953,500,000 円	286,050,000 円

研究発表

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_2-rich hydrothermal system and ocean chemistry

in the early Earth" ***Geochem. Geophy. 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 subseafloor 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_2 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" ***Geochimi. 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 exooceans" ***Space Science Review***, 216, 9, 1–41, 2020
11. *Noguchi, N., T. Okuchi “Rheological property of H2O 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" ***Geophs. Res. Let.***, **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. Let.***, **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. Synchrotoron 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 Nakhlites” ***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 subseafloor 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 Schwenzer 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。

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 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
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、臼井寛裕、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ズレター

ホームページ・ニューズレター（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。

●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—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
臼井寛裕　一般講演「Mars」2019 年 5 月 23 日 ASIJ Space Club
臼井寛裕　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。

研究成果

　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。