

海底下メタンの行方と地球生命科学：15年来のブラックボックスの解明に向けて Sub-seafloor methane biogeochemistry and unseen archaeal methanotrophic processes

高野 淑識^{1*}
TAKANO, Yoshinori^{1*}

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

地球表層圏での炭素循環の主な形態は、最も酸化的な二酸化炭素 CO₂、最も還元的なメタン CH₄、そしてその中間である有機態炭素 C_n(H₂O)_m の3つに加え、グラファイトがある。第3の生物界「アーキア」は、ユーカリア（真核生物）、バクテリア（真正細菌）に次ぐ、地球炭素循環のミクロな担い手である。海洋炭素循環のうち、最も酸化的な形態である水柱の「二酸化炭素」の固定能を浮遊性アーキアは有している（e.g., Wuchter et al., 2003）。また、ユーリアーキオータ門の一部のアーキア群は、メタンの生産者（＝メタン生成菌）でもある。このアーキアによる生物起源メタン生成の基礎プロセスは、資源科学的にも注目されている。この観点から Kaneko et al. (2014) では、LC/ESI-MS/MS を用いて、オンライン分離後にトリプル四重極質量分析計による多重反応モニタリング法（Multiple Reaction Monitoring, MRM）を最適化し、0.1-1.0 femto mol（フェムトモル）オーダーの海底下のメタン生成に関わる補酵素分子の超高感度定量法を開発した。この技術開発では、微量湿式分析の「アキレス腱」ともいえる一連のマトリックス効果を克服し、メタン生成ポテンシャル評価の応用的展開に成功している。

一方、海底下および陸上の地下圏には、逆に、メタンを炭素源にする嫌氣的メタン酸化アーキア群が存在する。その ANME (ANAerobic MEthanotroph)-1, ANME-2, ANME-3 の系統分類群は、メタンを生化学的に分解し、「大気中への放出を面的に」防いでいる（e.g., Knittel and Boetius, 2009 and literatures therein）。メタンは、二酸化炭素よりも温室効果ガスとしての影響力が大きい。このため、海底下メタンの微生物学的分解は、地球惑星科学的にも極めて重要なプロセスであることが理解できる。その海底下で起きている嫌氣的メタン酸化プロセスが発見されて以降（e.g., Hinrichs et al., 1999; Elvert et al., 1999）、炭素同位体的に軽い ANME の膜脂質（Membrane lipids）に由来する炭素 13 に枯渇した値は、嫌氣的メタン酸化の証拠として世界中で報告されている。本セッションでは、海底下のメタン酸化に関わるアーキアの中央代謝経路からメタンの生物地球化学的プロセスを探ってみよう。15 年来のブラックボックスを開くヒントは、有機分子レベルのアプローチにありそうである。

【References】

Elvert et al., 1999. Anaerobic methane oxidation associated with marine gas hydrates: superlight C-isotopes from saturated and unsaturated C-20 and C-25 irregular isoprenoids. *Naturwissenschaften*, 86, 295-300.

Kaneko et al., 2014. Quantitative analysis of coenzyme F430 in environmental samples: a new diagnostic tool for methanogenesis and anaerobic methane oxidation. *Analytical Chemistry*, 86, 3633-3638.

Knittel, K., Boetius, A., 2009. Anaerobic oxidation of methane: progress with an unknown process. *Annual Review of Microbiology* 63, 311-334.

Hinrichs et al., 1999. Methane-consuming archaeobacteria in marine sediments. *Nature*, 398, 802-805.

Wuchter et al., 2003. Bicarbonate uptake by marine Crenarchaeota. *FEMS Microbiology Letters*, 219, 203-207.

キーワード: 海底下のメタン, 炭素循環, 第3の生物界「アーキア」, ANME (ANAerobic MEthanotroph)
Keywords: Sub-seafloor methane biogeochemistry, global methane cycle, Archaea, ANME (ANAerobic MEthanotroph)

科学海洋掘削による海底下生命圏とその限界の追究 Exploring life at its limits in the subseafloor biosphere through scientific ocean drilling

稲垣 史生^{1*}; Kai-Uwe Hinrichs²; Steven D'Hondt³; IODP Expeditions 329 and 337 Scientists⁴
INAGAKI, Fumio^{1*}; HINRICHS, Kai-uwe²; D'HONDT, Steven³; IODP, Expeditions 329 and 337 scientists⁴

¹ 海洋研究開発機構, ² ブレーメン大学, ³ ロードアイランド大学, ⁴ IODP Expedition 329 and 337 Scientists

¹ Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ² MARUM and Department of Geosciences, University of Bremen, ³ Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, ⁴ IODP Expedition 329 and 337 Scientists

Deep drilling of marine subsurface offers unique opportunities to explore how life persists and evolves in the Earth's interior ecosystems. There are very few natural environments on Earth's surface where life is absent; however, the limits to life are expected in the subsurface world. Processes that mediate genetic and functional evolutions of the deep life may be very different to those in the surface ecosystems on our planet. Previous studies of the subseafloor sedimentary biosphere have demonstrated that activity of microbial communities is generally extremely low, mainly because of the limit of nutrient and energy supply. However, the limits and habitability in deep subseafloor sediments have still remained largely unknown; subseafloor microbial biomass, activity and functional/taxonomic/physiological diversity are possibly constrained significantly by each or the combination of multiple geophysical and geochemical factors, such as temperature, pH, pressure, salinity, porosity, and availability of nutrient and energy. In addition, understanding of the limits and habitability of life in the deep subseafloor biosphere may hold the clue to the issue regarding the origins and evolution of subseafloor life and its ecological consequences in Earth's history.

The Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expeditions 329 and 337 were the microbiology and biogeochemistry-dedicated scientific ocean drilling, targeting on very distinct oceanographic settings; in 2010, using the *JOIDES Resolution*, Expedition 329 explored deep-water sediments (water depth: 3,740~5,695m, sediment depth: ~131m) down to the basement at 7 sites in the ultra-oligotrophic South Pacific Gyre. During Expedition 337 in 2012, the *Chikyu* explored ultra-deep sediments (water depth: 1,180m, sediment depth: ~2,466m) associated with deeply buried coalbeds in the northwestern Pacific coast. The samples and data collected during these drilling expeditions, as well as rapid technological developments, provided unprecedented opportunities to study the limits and habitability of life in the subseafloor sedimentary biosphere.

The number of microbial cells is measured by newly developed cell separation and fluorescent image-based cell count techniques, revealing that cell abundances in both ultra-oligotrophic and deep coalbed-associated sediment samples are several orders of magnitude lower than those previously observed in shallow sediments of the ocean margins. The finding of very small microbial populations under two distinct extreme subseafloor conditions leads to subsequent questions: What are the environmental constraints for habitability of subseafloor life? What are ecological roles of subseafloor microbial activity in biogeochemical carbon and other elemental cycles? What are genetic and metabolic functions and its diversity of microbial communities? How and why can they live in such deep and extremely energy-limited conditions?

キーワード: IODP, 海底下生命圏

Keywords: IODP, The deep subseafloor biosphere

月と火星の縦孔・地下空洞探査

Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration (UZUME)

春山 純一^{1*}; 河野 功¹; 岩田 隆浩¹; 山本 幸生¹; 西堀 俊幸¹; 石原 吉明¹; 山本 圭香¹; 永松 愛子¹;
 諸田 智克²; 西野 真木²; 佐伯 和人³; 橋爪 光³; 小林 憲正⁴; 横堀 伸一⁵; 長谷部 信行⁶;
 長谷中 利昭⁷; 宮本 英昭⁸; 清水 久芳⁸; 小松 吾郎⁹; 白尾 元理¹⁰; 押上 祥子¹¹; 道川 祐市¹²;
 山本 聡¹³; 横田 康弘¹³; 小林 敬生¹⁴; 道上 達広¹⁵

HARUYAMA, Junichi^{1*}; KAWANO, Isao¹; IWATA, Takahiro¹; YAMAMOTO, Yukio¹; NISHIBORI, Toshiyuki¹;
 ISHIHARA, Yoshiaki¹; YAMAMOTO, Keiko¹; NAGAMATSU, Aiko¹; MOROTA, Tomokatsu²; NISHINO, Masaki²;
 SAIKI, Kazuto³; HASHIZUME, Ko³; KOBAYASHI, Kensei⁴; YOKOBORI, Shin-ichi⁵; HASEBE, Nobuyuki⁶;
 HASENAKA, Toshiaki⁷; MIYAMOTO, Hideaki⁸; SHIMIZU, Hisayoshi⁸; KOMATSU, Goro⁹; SHIRAO, Motomaro¹⁰;
 OSHIGAMI, Shoko¹¹; MICHIKAWA, Yuichi¹²; YAMAMOTO, Satoru¹³; YOKOTA, Yasuhiro¹³;
 KOBAYASHI, Takao¹⁴; MICHIKAMI, Tatsuhiko¹⁵

¹ 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構, ² 名古屋大学, ³ 大阪大学, ⁴ 横浜国立大学, ⁵ 東京薬科大学, ⁶ 早稲田大学, ⁷ 熊本大学, ⁸ 東京大学, ⁹ イタリア ダヌンツィオ大学, ¹⁰ 惑星地質研究所, ¹¹ 国立天文台, ¹² 放射線医学総合研究所, ¹³ 国立環境科学研究所, ¹⁴ 韓国 地質資源研究院, ¹⁵ 近畿大学

¹ Japan Aerospace Exploration Agency, ² Nagoya University, ³ Osaka University, ⁴ Yokohama National University, ⁵ Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, ⁶ Waseda University, ⁷ Kumamoto University, ⁸ University of Tokyo, ⁹ Università d'Annunzio, ¹⁰ Institute of Planetary Geology, ¹¹ National Astronomical Observatory of Japan, ¹² National Institute of Radiological, ¹³ National Institute for Environmental Studies, ¹⁴ Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, ¹⁵ Kindai University

月には、通常の隕石衝突痕クレータより、直径に比して深い縦孔が存在する。月においては、2007年に日本が打ち上げた月探査機 SELENE (かぐや) に搭載された地形カメラが、数 10 m 直径・深さを持つ縦孔を初めて発見し、その後、米国 LRO 搭載カメラで新たに発見されている火星においても、月の縦孔に類似した縦孔が、アルシア山の麓などに見られる。これらの多くは溶岩チューブか、マグマ溜まりなどの火成活動に起因する地下空洞に開いた孔だと考えられる。

地球惑星生命科学研究にとって、月火星の縦孔・地下空洞構造探査は、多くの情報をもたらす。直接的に言えば、まずは、火星地下空洞探査における生命発見の可能性である。現在の火星表面は、太陽紫外線照射量が多く、生命が生存を図るには非常に困難な環境である。しかしながら、火星地下空洞内は、紫外線・放射線照射から免れており、生命前駆体分子が成長をとげることができる環境を与えている。火山性地域であることから地熱もおおいに期待出来る。溶岩チューブ形成終焉期においては、チューブ内部を通る溶岩流の終了とともにチューブ内部は急冷し、ガラス質皮膜が覆う。そのため、チューブ内は密閉性の高い空間となる。このことから、火星の溶岩チューブ内に過去において水が選択的に流れたことは容易に想像される。アルシア山を含むタルシス山々の東には、マリネリス峡谷が在り、その西端、アルシア山から見れば東端には、現代においても水が流れたとおぼしき RSL が見られる。すなわち、この地域の地下には現在でも地下における水の存在が期待される。この地域の水が溶岩チューブ内に、常に、とは言えずとも、突発的に供給されている可能性は高いだろう。こうした環境から考えて、火星の溶岩チューブ内には、生命が、現在ほとんどなく、少なくとも過去において、発現し、進化を遂げたことが期待される。チューブには幸い孔が開いている箇所をもつものがあり、そこを通して、そうした地下空洞へとアクセスが可能である。

月の縦孔・地下空洞の探査は、火星の縦孔・地下空洞内における生命探査のための科学的知見 (実際に溶岩チューブなのか、どのような形状・環境なのか) を得、また、技術を高めることに資される。一方で、月の縦孔地下空洞の探査は、他にも地球惑星生命科学研究に大いに資するデータをもたらす。それは、月の縦孔・地下空洞が特異な環境であることに関係する。月の縦孔・地下空洞は、地球生命の発現と進化にとって重要な因子であったであろう月-地球系への物質供給を知ることができる特異な場所なのである。天体の衝突は、月、そして地球の進化における、最大級の影響因子である。月は過去の衝突履歴を残すことで、その探査の意義は大きいわけだが、月の縦孔の壁に見られる露頭、地下の空洞内の壁や床は、新鮮なままであり、そこに、月-地球系への物質の供給 (水等揮発性物質の存在、同位体調査) や、過去の太陽活動 (捕獲太陽風物質調査) の情報を得ることができる。また、月の縦孔地下空洞は、月の内部構造の調査に最適な場所という点で、地球生命科学研究に重要な情報を与える。月のような大型衛星は、主惑星に強い潮汐力を働かせ、主惑星の進化、生命の発現に大きな影響を与えた可能性がある。この観点から、潮汐力がどの時点でどのように働いたかを知ることが重要だが、それには、月の内部構造、その形成初期から今日に至るまでの進化の過程を知る必要がある。縦孔底や、地下空洞内は、熱的に静謐な環境であり、そこにおいて、秤動・月震観測、温度、熱流量観測等を行えば、内部層構造、地下の放射線物質量を制約できる譲歩を得ることができよう。更に、縦孔壁露頭における磁場の計測は、過去のダイナモ磁場発生の有無の証拠を与え、内部進化に対しての強い制約を与えるであろう。SELENE が発見した 3 つの縦孔のうち、表側の 1 つは、マリウス丘にあり、PKT 領域の研究として最適な場所の一つであろう。また、静の海は、PKT 領域の外縁部であるが、PKT 中央部と同様にチタンに富む場所であり、内部構造の進化の理解に、研究が欠かせな

U04-03

会場:国際会議室

時間:5月27日 10:15-10:45

い場所である。このように、月と火星の縦孔・地下空洞は、地球惑星生命科学の研究を大いに進展させる情報を秘めていると考えられる。我々は、現在、月と火星の縦孔地下空洞を探索することを目指し、UZUME (Unprecedented Zipangu Underworld of the Moon/Mars Exploration:古今未曾有の日本の月／火星地下世界探査) 計画と名付けた活動を開始している。平成26年度は、宇宙工学委員会のもとのリサーチグループとして、ミッション構想、探査システム構想を検討してきている。今後、更に、研究・検討を進め、プロジェクト化へと進もうとしている。

キーワード: 月, 火星, 縦孔, 地下空洞, 生命探査, うずめ

Keywords: Moon, Mars, vertical hole, cavern, life exploration, UZUME

大陸地殻におけるウランの物質移行の長期変動予測 Challenges to Predict the Long-Term Uranium Migration in Deep Terrestrial Crust

幸塚 麻里子¹; 鈴木 庸平^{1*}
KOUDUKA, Mariko¹; SUZUKI, Yohey^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

Our understanding of uranium mobility in the near surface environment has been rapidly expanding in the past decades, especially due to problems associated with environmental remediation of U-contaminated sites. After Fukushima Daiichi nuclear disaster, it is becoming important to study the environmental behavior of U even in Japan, because meltdown debris mainly composed of UO₂ need to be disposed of in a deep geological repository. Recently, it has been demonstrated that our understanding of U in deep granitic rocks is limited, as exemplified by an unexpected finding of high concentrations of uranium in reducing deep granitic groundwater at a Swedish geological disposal site. As Japan is located at tectonically active plate boundaries, geological factors influencing the mobility of uranium remain to be clarified.

Biogeochemical processes mediated in the deep granitic aquifer at the Mizunami underground research laboratory (URL) were studied in details and published in Suzuki et al. (2014). Briefly, large extents of sulfur isotopic fractionation between sulfate and sulfide and zinc sulfide precipitation clearly indicate that the aquifer is under sulfate-reducing conditions. Groundwater concentrations of U were measured to be exceedingly low at the ppt level. To constrain factors determining the low U concentrations, fracture-filling minerals were investigated by scanning electron microscopy (SEM) coupled to energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) for focused ion beam (FIB) fabricated samples. At 300 meter below ground level (mbgl), pyrite and chlorite were associated with U-bearing loci. One of the samples was FIB fabricated for transmission electron microscopy coupled to EDS, and selected area electron diffraction (SAED) patterns, chemical compositions and spacings of lattice fringes were all indicative of the formation of a U(IV) silicate mineral called coffinite. High-resolution TEM observations also revealed that coffinite was crystalline. The solubility of crystalline coffinite was thermodynamically calculated by Phreeq C with our selected database and consistent with the U concentrations in the deep granitic aquifer. It is therefore concluded that U is stable as its reduced state and immobile in the present groundwater.

Tono uranium ore deposits are adjacent to the Mizunami URL, and geological settings of the two sites are almost the same. 10 Ma U mineralization occurred in the overlying sedimentary formation where lignite is a reducing agent for U(VI). It is well established that U is mobilized from granite under oxidizing conditions and transported to downstream ore bodies with abundant reductants such as organic matter and pyrite. However, the current redox state of granitic groundwater at the Mizunami ULR is under stably reducing conditions, and the established concept involving oxidizing groundwater appears not to be a case. As a significant transgression event is known to have occurred 10 Ma, there is the possibility that the intrusion of seawater into the freshwater aquifer might be important as suggested for the Swedish repository site after the last glacial maximum. We investigated the paragenesis of coffinite, pyrite and chlorite within calcite grains formed during the 10 Ma transgression by SEM-EDS, carbon and oxygen stable isotope measurements of microdrilled calcite and field emission elemental probe microanalysis (FE-EPMA). Results will be shown to discuss about the reconstruction of geological events and their influences on U migration in the deep granitic rock.

Suzuki, Y, Konno, U., Fukuda, A., Komatsu, D. D., Hirota, A., Watanabe, K., Togo, Y., Morikawa, N., Hagiwara, H., Aosai, D., Iwatsuki, T., Tsunogai, U., Nagao, S., Ito, K., Mizuno, T. (2014) Biogeochemical Signals from Deep Microbial Life in Terrestrial Crust, PloS one, 9(12), e113063.

サンゴの生物鉱化作用と古環境復元 Biomineralization of corals and paleoenvironmental studies

横山 祐典^{1*}; ベル 智子¹; 平林 頌子¹; 宮入 陽介¹; 窪田 薫¹; 関 有沙¹; 井口 亮²; 鈴木 淳³
YOKOYAMA, Yusuke^{1*}; BELL, Tomoko¹; HIRABAYASHI, Shoko¹; MIYAIRI, Yosuke¹; KUBOTA, Kaoru¹;
SEKI, Arisa¹; IGUCHI, Akira²; SUZUKI, Atsushi³

¹ 東京大学 大気海洋研究所, ² 沖縄工業高等専門学校 生物資源工学科, ³ 産業技術総合研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo, ² Department of Bioresources Engineering, Okinawa National College of Technology, ³ Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

サンゴ骨格は過去の環境の記録媒体として優れており、古気候および古海洋の分野で広く用いられている。炭酸カルシウムの骨格には過去の水温、塩分などの情報が残されており、分析化学的手法を併用することで、古環境の定量的な復元が可能となる。近年の分析装置の発展や生物情報学の進展などから、骨格に記録された環境指標の信頼度の精査なども行われ、過去の気候記録や炭素循環に関する知見および環境変動に対する生態系の適応性などについても議論が進められるようになってきた。本講演では、我々のグループで取りくんでいる研究について紹介するとともに、生物情報学などとの融合によって、温暖化の進行により引き起こされる海洋酸性化と生態系についての知見についても発表する。

キーワード: 生物鉱化作用, 地球化学, サンゴ, 古気候

Keywords: Biomineralization, Geochemistry, Coral, Paleoclimate

超高解像度古環境復元-シャコ貝殻から引きだされた日射量情報- Ultra-high resolution past environmental reconstruction-Insolation extracted from giant clam shells-

佐野 有司^{1*}
SANO, Yuji^{1*}

¹ 東京大学 大気海洋研究所

¹ Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

サンゴや二枚貝などの海洋生物は、成長する際の周囲の水温や塩分などの環境情報を記録しながら炭酸塩を主成分とする骨格や殻を作る。一度作られた炭酸塩骨格は死後も化石として長い間情報を保持する。生物起源の炭酸カルシウムの微量元素や同位体分析による古環境の復元は、測器による観測点がまばらで樹木年輪や氷床コアによるデータが乏しい熱帯や亜熱帯地域で威力を発揮し、IPCCなどの気候変動評価に大きく貢献した [1]。しかしこれまでの分析法での空間分解能はたかだか数十ミクロン、時間分解能に換算すると数日が限界であった。本プロジェクトでは、生物起源炭酸カルシウム骨格中の微量元素を従来とくらべて飛躍的に高い空間分解能で分析することにより、海洋生物が成長する際の水温、塩分など環境情報を最高レベルの高時間分解能で復元することを目的とした。具体的には、従来の分析手法と比較して非常に高い空間分解能で固体試料が分析可能な二次元高分解能二次イオン質量分析法 (NanoSIMS) を用いて生物起源炭酸塩を分析した。

本研究では、初めに NanoSIMS の高度なチューニング、標準試料の開発・作成、微量元素分析手法の確立を行った [2]。この分析手法を 2002 年から 2005 年にかけて沖縄県石垣島川平湾で飼育したシャコ貝 (ヒレナシ) の殻と同島白保海岸で 2007 年 8 月に採取した化石のシャコ貝 (オオシャコ) に応用した。飼育したシャコ貝殻では、低解像度の分析 (分解能 50 ミクロン) により Sr/Ca 比が夏に低く、冬に高い年周変動が計測された。また高解像度の分析 (分解能 2 ミクロン) では、Sr/Ca 比が昼に形成される部分で低く、夜には高くなる日周変動が計測された。データ解析の結果、これらの変動は日射量に応答することが解った [3]。化石シャコ貝殻の形成年代は、放射性炭素により約 5000 年前と推定された。成長速度から見積もった約 2 年分の試料を切り出し詳細に分析した。その結果、飼育した試料と同様の Sr/Ca 比の年周変動と日周変動が測定された。飼育試料の日射応答関数と冬に相当する部分の高解像度データから、2-3 時間の分解能で、約 5000 年前の日射量の変化が復元できることを示した [4]。

[参考文献]

[1] Henderson (2002) *Earth Planet. Sci. Lett.* **203**, 1-3. [2] Sano et al. (2005) *Anal. Sci.* **21**, 1091-1097. [3] Sano et al. (2012) *Nature Commun.* **3**, 761. [4] Hori et al. (2015) *Scientific Reports*, in press.

キーワード: 海洋古環境, 日射量, ナノシムス, シャコ貝殻

Keywords: past marine environment, insolation, NanoSIMS, giant clam shell

超深海海溝生命圏への挑戦 Full-Depth Biogeosciences for Profound Life in Ultradeep Terrain of Ocean (PLUTO)

高井 研^{1*}
TAKAI, Ken^{1*}

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

地球表面積の70%を占める海洋において、6000mより深い水深を有する「超深海域」は全海洋の面積のたった1-2%を占めるに過ぎず、ほぼ太平洋を取り囲む海溝域においてのみ存在する特殊な環境にすぎないと考えられてきた。しかし近年の地球物理学的観測や掘削科学に基づく物質科学的な証拠から、そのような超深海海溝域が海洋プレートの沈み込み帯における構造浸食という動的な地質作用によって形成される場であることがわかりつつある。一方、超深海海溝域は、長年その大水深という制約によって直接的な海洋学および海洋生態学的な観察や観測が制限されてきた。これまでの限られた研究成果に基づいて、「超深海海溝域は静的な水塊構造や堆積場と高水圧に制約された低生物生産性で多様性に乏しい極限環境(微)生物生態系で特徴付けられる地球規模のエネルギー・物質循環に対する影響が極めて小さい場である」と考えられてきた。

一方、我が国では、JAMSTECが1989年に水深6500mまで潜航可能な有人潜水船「しんかい6500」を開発し、6000m以深の超深海海溝域における直接観察・観測や試料採取を推進してきた。また1995年にはJAMSTECが無人潜水機「かいこう」(最大潜航水深=11000m)を開発し、1960年のトリエステ号での冒険調査以降初めて、世界最深部のマリアナ海溝チャレンジャー海淵の直接観察や試料採取に成功し、世界のすべての超深海海溝域の直接的な研究が可能となった。2002年の「かいこう」の喪失以降も、JAMSTECの「かいこう7000」(最大潜航水深=7000m)や「アビスモ」(最大潜航水深=11000m)やウッズホール海洋研究所の「ネレウス」(最大潜航水深=11000m、2014年ケルマデック海溝調査中に喪失)、あるいはフリーフォール式海底観測・試料採取装置などの調査機器が世界で開発され、超深海海溝域の研究調査が推進されてきた。これらの調査機器による最新の研究調査の成果から、動的な超深海海溝像が明らかになりつつある。

超深海海溝域における直接観察・観測や試料採取によって、日本近海の超深海海溝域の最深部の水塊および堆積物中に、独自の遺伝的かつ機能的な多様性を有する活動的な微生物生態系が形成されていることがわかりつつある。加えてその微生物生態系が、従来考えられてきたような(1)海洋表層での光合成一次生産による有機物の沈降・堆積プロセスや(2)地殻内での流体移流による海底下のエネルギーや物質のインプットだけでなく、(3)海溝斜面崩壊と海溝内水塊循環という地質・海洋物理現象によって制御されている可能性が示された。また、近年の生物学的調査によって、超深海海溝域には、多様な生物や大型動物が生息していることもわかってきた。さらに2011年の東北沖地震において巨大津波を引き起こした地殻変動の最大変動領域が日本海溝海溝軸であることが明らかになり、巨大地震に伴う地殻変動や流体移流というダイナミックな現象が超深海海溝の最深部で起きることが理解されるようになった。地震に伴う乱泥流や地滑りのような海溝斜面の崩壊が頻発し、海溝における水塊での微生物群集や底生生物群集、あるいは堆積構造に大きな影響を与えていることもわかりつつある。

これらの最新研究成果は、超深海海溝域への理解が「静的な水塊構造や堆積場に特徴付けられた、高水圧に適応した低生産性で多様性に乏しい極限環境(微)生物からなる、地球におけるエネルギー・物質循環に対する影響が極めて小さい地質・生態場」から、「動的な水塊構造や堆積プロセスに特徴付けられた、高水圧に適応した高生産性で多様性に富んだ極限環境(微)生物からなる、地球規模のエネルギー・物質循環に大きな影響を与えうる地質・生態場」へと劇的に変化する可能性を強く示唆する。つまり今まさに、超深海海溝域やそこに存在する生命圏に対する包括的かつ詳細な分野統合型の研究展開が強く望まれている状況である。このような我が国主導の研究調査の成果によって醸成されつつあるパラダイムシフトを目指し、演者を中心とした研究グループでは、多分野協働での分野統合型研究領域「フルデプス地球生命科学：動的な海溝環境と超深海海溝生命圏」を提案している。本研究では「超深海海溝域という場の地質学的ダイナミズムや海洋物理・化学・生物学的特性」が「地球で最も研究が進んでいない最後の生命圏フロンティア：超深海海溝生命圏の成り立ちとその生物地球化学・生態学的役割」にどのような関わり・影響を与えているかについて現場環境での調査・観測・観察・実験を通じた分野統合型研究展開を行うことを目指している。

キーワード: 超深海, テクトニックエロージョン, 沈み込み帯, 斜面崩壊, 地殻内流体, 有機物

Keywords: Hadal zone, tectonic erosion, subduction zone, slope decomposition, crustal fluid, organic matter

生命を育む環境を太陽系に探す Searching for habitable worlds in the solar system

関根 康人^{1*}
SEKINE, Yasuhito^{1*}

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
¹Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

New observations from spacecraft missions enable us to examine habitability in the solar system. The icy satellites with geological activity, Europa and Enceladus, are considered to possess subsurface liquid oceans beneath the icy crusts. Recent findings of water-rich plumes erupting from Enceladus would allow us to investigate biogeochemistry of the subsurface ocean. Mars is also highly likely to have been another habitable terrestrial planet in the first several hundred million years after its formation. The combinations of in-situ geological and geochemical analyses by the rovers and high-resolution remote sensing by the orbiters help us to understanding the drastic environmental changes on early Mars. Future explorations of these habitable worlds in the solar system would provide insights into understanding not only the possibility and variety of life in the universe but also the concrete pathways of chemical evolution toward life, which was occurred on early Earth. Here, I will review recent progresses in the search for habitable worlds in the solar system and discuss the scope for the assessment of planetary habitability by spacecraft missions.

キーワード: 火星, 氷衛星, 化学進化, 生命の起源, 惑星探査
Keywords: Mars, icy satellite, chemical evolution, origin of life, planetary exploration

海水/鉄マンガン酸化物界面における微量元素の化学反応：元素の個性に基づく海洋
環境・資源研究
Geochemistry of trace elements at the seawater/ferromanganese oxide interface

柏原 輝彦^{1*}
KASHIWABARA, Teruhiko^{1*}

¹ 海洋研究開発機構
¹JAMSTEC

Chemical reaction on the surface of ferromanganese oxides, which are widely present in a variety of forms such as crusts, nodules, and precipitate particles, strongly affects geochemical behaviors of trace elements in the marine environment. Accumulation of some valuable metals into ferromanganese oxides is closely related with the formation of mineral deposits including Co-rich crust, Mn nodules, and REY-rich mud, whereas scavenging of trace elements from seawater sometimes controls their concentrations and isotopic compositions in seawater. Molecular structures revealed by synchrotron X-ray analysis can explain the mechanisms of incorporation and isotopic fractionation of trace elements at the seawater/ferromanganese oxide interface. For example, the extreme enrichment of Te among oxyanions can be explained by structural substitution into Fe (oxyhydr)oxides via coprecipitation reaction because its molecular geometry is similar to Fe octahedron, in contrast to other oxyanions incorporated via adsorption reaction. In the adsorption reaction, on the other hand, the mode of attachment (inner- or outer-sphere) is an important factor, where the formation of inner-sphere complex causes the larger adsorption than outer-sphere complex, as observed in the case of Mo, W, As, Sb, and Se. We found the correlation between these molecular structures at the seawater/ferromanganese oxide interface and chemical properties of elements including pKa, and pKOH, which can lead to the systematic understanding of variable behaviors of elements. In this presentation, I will talk about the chemistry of trace elements at the seawater/ferromanganese oxide interface and its significance in the study of marine environment and submarine resources.

Reference

- [1] Hein, J.R., Koschinsky, A., Halliday, A.N. (2003) *GCA* **67**, 1117-1127.
- [2] Kashiwabara T., Oishi Y. Sakaguchi A., Sugiyama T., Usui A. and Takahashi Y. (2014), *GCA*, **131**, 150-163.
- [3] Kashiwabara T., Takahashi Y., Tanimizu M., and Usui A. (2011), *GCA*, **75**, 5762-5784.
- [4] Kashiwabara T., Takahashi Y., Marcus M. A., Uruga T., Tanida H. Terada Y., and Usui A. (2013), *GCA*, **106**, 364-378.

キーワード: 元素の個性, 固液界面, 鉄マンガン酸化物, 海底鉱物資源, 海洋環境

福島放射能土壌汚染の顕微解析 Microscopic analyses of radioactive contamination in Fukushima soil

向井 広樹^{1*}; 甕 聡子¹; 小暮 敏博¹
MUKAI, Hiroki^{1*}; MOTAI, Satoko¹; KOGURE, Toshihiro¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科

¹ Graduate School of Science, the University of Tokyo

2011年の福島第一原子力発電所における事故以来、放出された放射性物質、特に放射性セシウムの環境中での挙動について知ることが求められてきた。しかし、実際の汚染土壌における放射性セシウムの濃度は、問題となるような強い放射線量の土壌中でも極微量でしかなく、化学的に識別することは不可能に近い。昨年、我々は微細加工を施したイメージングプレート（IP）を用いたオートラジオグラフィにより実土壌中の放射性セシウムを吸着・固定した微粒子を特定することに成功し、電子顕微鏡を中心とした手法によりその物質を明らかにした (Mukai et al., 2014)。さらにこれらの微粒子中でセシウムがどのように存在しているかについて研究を行っている。本発表ではこれらの成果について話を予定である。

キーワード: 福島原発事故, 汚染土壌, 放射性セシウム, 電子顕微鏡

Keywords: Fukushima nuclear accident, Contaminated soil, Radioactive cesium, Electron microscope

ナノポーラスシリカへのイオン吸着に及ぼす間隙サイズの影響 Effect of pore size on ion adsorption properties of nanoporous silica

西山直毅^{1*}; 横山正²
NISHIYAMA, Naoki^{1*}; YOKOYAMA, Tadashi²

¹ 物質・材料研究機構, ² 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

¹National Institute for Materials Science, ²Osaka University, Graduate School of Science, Department of Earth and Space Science

鉱物表面のイオン吸着特性の理解は、資源や有毒元素の移動・濃集過程を考える上で不可欠である。表層環境では、ナノサイズの微小な間隙（ナノ間隙）がしばしば見られる。風化・熱水変質作用に起因するエッチピットや、微細な粘土鉱物や鉄酸化物の集合体はその例として挙げられる。ナノ間隙では、鉱物-水界面の電気二重層が十分に発達できないことが予想され、イオン吸着特性が間隙径によって変化する可能性がある。そこで本研究では、間隙径がイオン吸着特性に及ぼす影響を評価した。

試料には、間隙径の異なる2種類のナノポーラスシリカ粉末（CARiACT Q, Fuji Silysia）を用いた。間隙半径は25 nm（比表面積：72 m²/g）と、1 nm（比表面積：660 m²/g）である。まず、各半径の間隙の表面がどの程度帯電しているか（表面電荷密度）を調べるために、NaCl 1 mM 溶液中で酸/塩基滴定実験を行った。シリカの表面シラノール基は、pHが中性～アルカリ性の環境下で、H⁺の吸脱着反応： $>Si-OH \leftrightarrow >Si-O^- + H^+$ と、Na⁺の吸脱着反応： $>Si-OH + Na^+ \leftrightarrow >Si-O^- \cdots Na^+ + H^+$ が起こり、負に帯電する。半径25 nmと1 nmの間隙表面の電荷密度を比較したところ、間隙径が小さいものほど、表面電荷がゼロに近付いた。これは、細い間隙ほど、表面シラノール基がH⁺を脱離しにくい性質をもつことを意味している。

より細い間隙をもつシリカでは、表面電荷がゼロに近付くため、イオンの吸着量が減少することが予想される。このことを検証するために、半径25 nmと1 nmの間隙をもつシリカ粉末を用いてK⁺イオンの吸着実験を行った。NaCl 0.1 mM 溶液に0.006 mMのK⁺イオンとシリカ粉末を入れ、pHを4.0, 4.5, 5.6, 6.4, 7.3, 8.2に調整した後に約30分攪拌し、上澄み溶液を回収した。回収した溶液はフィルター（0.20 μm）にかけ、イオンクロマトグラフによりK⁺イオン濃度を測定した。その結果、半径1 nmの間隙表面へのK⁺の吸着量は、半径25 nmの間隙と比べて最大で2倍以上減少した。本研究の結果は、ナノ間隙をもつ鉱物へのイオン吸着を考える上で、間隙径の効果の重要性を示している。

キーワード: イオン吸着, 表面電荷, 電気二重層, シリカ, ナノ間隙

Keywords: Ion adsorption, Surface charge, Electric double layer, Silica, Nanopore