

# 岩石—流体反応が駆動する地圏環境システム

Geo-environmental systems driven by fluid-rock reactions



教授 岡本 敦  
Professor  
Atsushi Okamoto



助教 宇野 正起  
Assistant Professor  
Masaaki Uno



助教 ダンダル オトゴンバイヤル  
Assistant Professor  
Dandar Otgonbayar



Group Photo

固体地球のプロセスは、非常にゆっくりとしたものであるが、少量の流体が関与すると地殻内の化学反応や物質移動は劇的に加速し、私たちの人間社会にも大きな影響を与える。当研究室では、地殻やマントルにおける「流体」を介した岩石の反応やエネルギー・物質移動が駆動する、ナノスケールから地球規模まで様々なスケールの現象を対象とし、超臨界地熱資源や熱水性鉱床の形成過程と開発に向けた基礎研究、水や二酸化炭素の固定・循環プロセスとその有効利用、断層・亀裂での鉱物溶解・析出と地震との関係性などについての研究を進めている。さらに、多次元化学組成で複雑な空間構造（組織）を持つ岩石を対象として、データ駆動型アプローチやパターン形成の数値モデリングを通じて、地圏環境における動的システムの情報抽出を試みている。

The processes of solid earth are usually slow, but a subtle amount of geofluids dramatically accelerates chemical reactions and mass transfer in the crust, which has a great impact on human society. Our laboratory targets the various scale phenomena within the crust and mantle, driven by fluid-mediated reactions and energy/mass transport. We are conducting research on various water-rock interactions involving supercritical geothermal resources, hydrothermal ore deposits, global H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> cycles, and dissolution/precipitation processes within faults and fractures. Furthermore, we are trying to extract information on dynamic systems in the geo-environment based on data-driven approaches and numerical modeling of pattern formation for rocks with complex spatial patterns and multidimensional chemical compositions.

## 超臨界地熱資源の地化学および熱水性鉱床の形成

400°Cを超える超臨界地熱資源は有望な再生可能エネルギーとして開発が期待されている。このような地熱資源を開発するためには、スケールや腐食などの問題があり、地熱流体の性質を予測する必要がある。しかし、気相的な低密度領域については、溶存種の熱力学的データが存在しないという問題があった。この研究では、高温低密度条件下での長石の溶解平衡実験を行い、水の密度を用いた平衡定数の拡張が有効であること、また、低密度領域ではpHが上昇することを明らかにした。

高温地殻流体の減圧、または低密度化は、高過飽和状態を作り出し、海底のブラックスモーカーなどの熱水性鉱床を作り出す。黒鉄のチムニー近傍に存在する球状の黄鉄鉱や両錐形の石英粒子の微細組織の形状を解析し、バブル表面での核形成・成長メカニズムを明らかにした（ユトレヒト大学との共同研究；Fig.1）。さらに、超臨界条件下での流通式析出実験により、シリカ粒子が形成し、上昇しながら成長し、石英粒子へと変化する過程を明らかにした。

## Geochemistry of supercritical geothermal resources and formation of hydrothermal ore deposits

Supercritical geothermal resources exceeding 400 °C are expected to be promising renewable energies. For sustainable utilization of such high temperature fluids, it is necessary to evaluate the properties of the geothermal fluids for predicting scaling and corrosion problems. However, the thermodynamic data of aqueous species are lacking in vapor-like low-density regions. We conducted the hydrothermal experiments on feldspar solubility at such P-T conditions, clarifying that the extension of the equilibrium constant by using water density is possible and that the pH rises in the low-density regions.

Decompression of high-temperature crustal fluids produces high-supersaturation of minerals, resulting in the formation of hydrothermal ore deposits, such as black smokers at the seafloor. We analyzed the microstructures of spherical pyrite and bipyramidal quartz grains from the Kuroko deposits and revealed nucleation on the bubble and growth within the fluids (collaboration with Utrecht University; Fig.1). Based on the supercritical flow-through experiments, we showed the mechanism of the formation of silica particles and transformation to quartz during upwelling fluid flow.

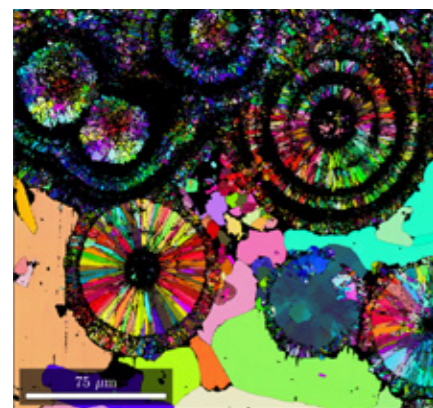


Fig.1 Electron back-scattered diffraction (EBSD) map of spherical pyrite in the Kuroko deposit.



Fig.2 Field excursion of the Oman ophiolite (Jan. 2020; Oman).

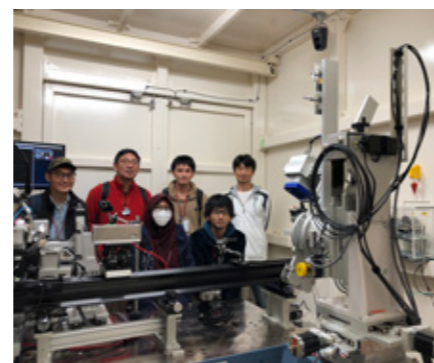


Fig.3 XAFS Analyses of serpentinites at KEK (Tsukuba).

## 海洋プレートにおける流体浸透プロセスと水素発生

海洋プレートに海水が浸透し、マントルと反応する加水（蛇紋岩化）作用は地球規模の水循環や地下生命圏への水素エネルギー供給を支配する重要なプロセスである。オマーン国に露出するオフィオライト（海洋プレート断面が露出したもの；Fig.2）の掘削コアの解析と、離散要素法を用いたシミュレーションにより、流体流動—化学—岩石破壊に関わるフィードバック機構について研究を進めた。また、実験的にも固体体積の膨張により岩石が破壊し、浸透率が增大する現象を初めて明らかにした。さらに、同様な岩石—流体反応によるき裂形成によって、沈み込み帯のマントルウェッジにおいてCO<sub>2</sub>固定化（炭酸塩化作用）が進行していることを明らかにした。

水素発生プロセスは、蛇紋岩化作用に伴うFe(II)の酸化によるものであり、水熱実験による磁鉄鉱形成プロセスや、放射光施設でのFe(III)/Fe(II)マッピングを実施し、局所的な酸化流体の流入を明らかにしつつある（Fig.3）。

[受賞] 吉田一貴（修士課程2年）日本鉱物科学会 研究発表優秀賞  
2020年9月18日（Fig.5）

## データ駆動型アプローチによる変成岩の物質移動解析

変質岩、変成岩、土壌などの全岩化学組成は、火成岩などの原岩と、流体による元素移動（化学組成の変更）の情報を含んでいる、複雑な多次元データである。本研究では、機械学習のアプローチである決定木と交差検証を用いて、大量の玄武岩化学組成データを学習させることにより、流体によって動きにくい元素（不動元素）の組み合わせによる原岩推定モデルを作り、海洋底変質岩や沈み込み帯変成岩の原岩と物質移動を解析する手法を構築した（Fig.4）。

[受賞] 松野哲士（修士課程1年）日本鉱物科学会 研究発表優秀賞  
2020年9月18日（Fig.5）

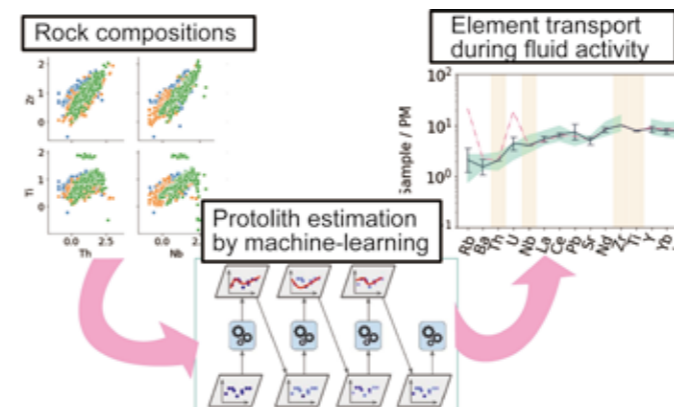


Fig.4 Analytical scheme based on machine-learning approaches for element transport of metamorphic rocks.

## Fluid infiltration through the oceanic plate and hydrogen generation

Infiltration of seawater and hydration of the mantle (serpentinization) play crucial roles in the global water cycle and the supply of hydrogen energy to the underground biosphere. Based on the analyses of the drilling core of the Oman ophiolite (Fig.2) and the distinct element method numerical simulations, we revealed the feedback processes of fluid flow-reaction-fracturing within the oceanic crust. In addition, the hydrothermal experiments of the analogue material showed the fracturing and permeability enhancement induced by fluid-rock reactions. Similar reaction-induced fracturing was found in serpentinite body which records the carbonation of the mantle wedge within the subduction zone.

The hydrogen generation occurs through oxidation of iron during serpentinization. We conducted the experiments on magnetite formation and Fe(III)/Fe(II) mapping by the Photon Factory (KEK, Tsukuba), showing the local fluid infiltration of the oxidizing fluids within the Oman ophiolite (Fig.3).

[Award] Kazuki Yoshida (M2), Best presentation award for students, Japan Association of Mineralogical Sciences, September 18<sup>th</sup>, 2020 (Fig.5)

## Mass transport analyses of metamorphic rocks based on the data-driven approaches

Bulk rock chemistry of altered rocks, metamorphic rocks, and soils represent complex, multidimensional data that contain information on protoliths, such as volcanic rocks, and fluid-mediated element transport. By learning huge geochemical data of basaltic samples, we created the predictive model of the protoliths based on the combination of the immobile elements and showed that the method is useful for analyzing the protolith and element transport of altered rocks at the seafloor and metamorphic rocks within the subduction zones (Fig.4).

[Award] Satoshi Matsuno (M1), Best presentation award for students, Japan Association of Mineralogical Sciences, September 18<sup>th</sup>, 2020 (Fig.5)

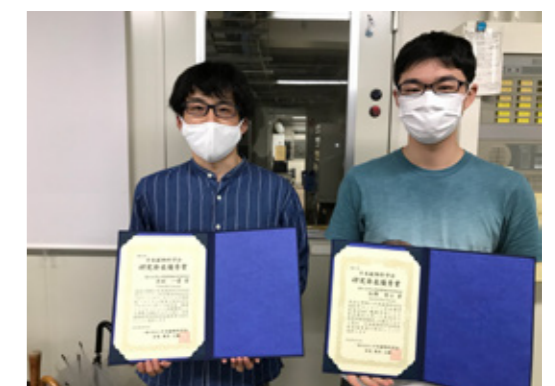


Fig.5 Best presentation award for students at Japan Association of Mineralogical Sciences (Sep. 2020, Online; Yoshida, Matsuno).