

# 流体が駆動する地圏環境のダイナミクス, 資源形成と脱炭素化プロセス

Fluid-driven dynamics of the geosphere: resource formation and decarbonization processes



教授 岡本 敦  
Professor  
Atsushi Okamoto

地圏環境における岩石-流体の反応やエネルギー・物質移動に着目し、地震と流体の関係、地熱資源、海底熱水性鉱床の形成メカニズムや、二酸化炭素鉱物固定化に関する研究を進めている。本年度は、マントルや大陸地殻の岩石から、短期間の流体流動の証拠を見出し、沈み込み帯や地殻の地震活動との関係を示唆した。また、二酸化炭素が岩石に固定化される際に岩石を破壊する現象を実験室で再現し、二酸化炭素の循環が沈み込み帯の摩擦挙動に大きく影響することを示唆した。超臨界地熱貯留層の岩石と室内実験から、岩石の熱水変質によって形成する空隙の役割を示した。さらに、海底熱水系の硫化物チムニーが半導体特性を持ち、海底での発電現象を引き起こす可能性を示した。

We specialize in investigating fluid-rock reactions and the transport of energy and materials within the geosphere. Our research encompasses the correlation between earthquakes and fluid dynamics, the mechanisms behind geothermal resource and seafloor hydrothermal deposit formation, and the mineralization of carbon dioxide. In the current year, our findings include the identification of evidence showcasing short-term fluid flow from rocks in both the mantle and continental crust, implying a connection between fluid activities and seismic events. Through successful laboratory experiments, we observed reaction-induced fracturing during the carbonation of natural rocks. Moreover, our research indicates that the circulation of carbon dioxide significantly influences the frictional behavior in subduction zones. We also demonstrated the crucial role of transient porosity resulting from the hydrothermal alteration of minerals in the development of geothermal reservoirs. Additionally, we highlighted the semiconductor properties of sulfide chimneys in seafloor hydrothermal systems, suggesting the potential for power generation phenomena on the seafloor.

## 地殻流体活動の時間スケールと地震現象

地殻や沈み込み帯には、「みず」が存在し、流体圧の上昇は地震を引き起こす引き金になると考えられてきたが、物的証拠はこれまでほとんどなかった。オマーン国に露出したマントル岩石に存在する鉱物脈（亀裂の化石）周りの反応帯を詳細に解析することで、沈み込み帯上盤のマントルにおいて数ヶ月という短期間で高速の流体流動が起こったことを示し、沈み込み帯で観測されるスロー地震との関係を示唆した (Fig. 1; プレスリリース 2023 年 4 月 6 日)。また、南極での大陸地殻岩石においても、短期間の流体流動の岩石学的証拠を見出し、地殻内地震のマグニチュードと地殻に供給される流体量との関係を議論した。

沈み込むプレートともに莫大な炭素が地球内部に持ち込まれている。沈み込み帯の地殻-マントル境界を再現する高温高压反応実験と熱力学的な計算を行い、プレート境界を弱くする滑石の生成に CO<sub>2</sub> が重要な役割を持つことを示し、表層環境と地球内部のダイナミクスをつなぐ物質循環について検討を行っている。(科研費基盤研究 (S))。

## Timescale of fluid activity within crust and its relation to seismicity

Although it has been believed that fluids exist in the crust and subduction zones and that increased fluid pressure triggers earthquakes, there has been little geological evidence to date. We analyzed the reaction zones around mineral veins (fracture fossils) in mantle rocks exposed in the Sultanate of Oman and showed that fast fluid flow occurred in the mantle wedge within the subduction zone in a short period of several months, suggesting a relationship with slow earthquakes observed in the subduction zones (Fig. 1; Press release April 6, 2023). We also found petrographic evidence of short-term fluid flow in continental crustal rocks in Antarctica and discussed the relationship between the magnitude of intra-crustal earthquakes and the amount of fluid supplied to the crust.

Enormous amounts of carbon are brought into the Earth's interior with plate subduction. Based on high-temperature and high-pressure reaction experiments and thermodynamic calculations that reproduce the crust-mantle boundary in subduction zones, we show that CO<sub>2</sub> plays an important role in the formation of talc that weakens the plate boundary, and we discuss the global carbon cycle that links the surface environment and the dynamics of the Earth's interior. (Grant-in-Aid for Scientific Research [S])

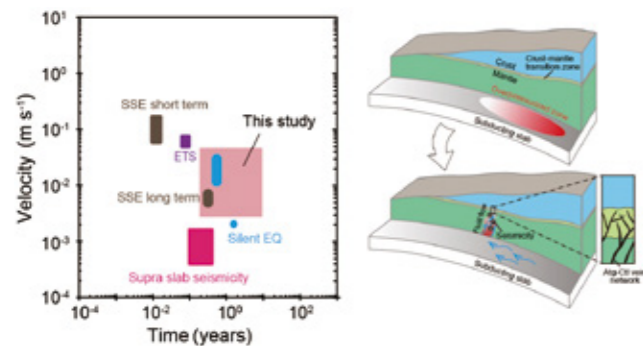


Fig. 1 Timescale and velocity for fluid-flow in mantle wedge and its relation to slow earthquakes.

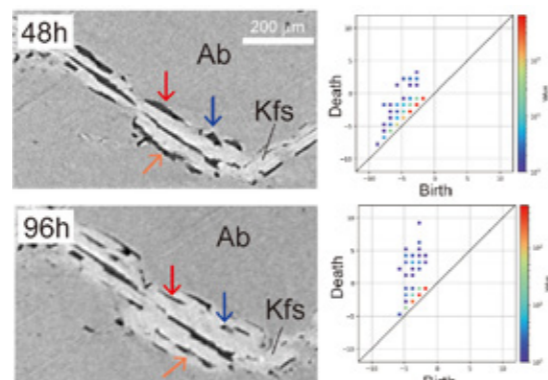


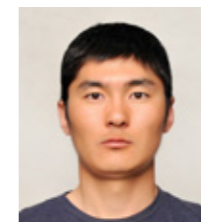
Fig. 2 X-ray CT images showing porosities produced during the feldspar alteration (left) and their topological analyses (right).



准教授 宇野 正起  
Associate Professor  
Masaaki Uno



助教  
アスティン ヌルディアナ  
Assistant Professor  
Astin Nurdiana



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



Group Photo

## 流体反応による岩石破壊と空隙生成: 地熱貯留層と二酸化炭素鉱物固定に対する役割

次世代型の再生可能エネルギーとして期待されている超臨界地熱資源を評価するために、葛根田地熱地帯の熱源である花崗岩のミクロな空隙の存在形態を X 線 CT で詳細に調べ、長石の熱水変質による空隙と、花崗岩結晶化時に形成されたファセット型の空隙が多量に存在していることを明らかにした。さらに、長石の変質による「うごく」空隙を実験室で観察することに成功し (Fig. 2)、その形状を位相幾何学のアプローチでキャラクター化している。

二酸化炭素を地中に鉱物固定するためには、固体体積が増加する反応でいかに流路を保持するかが最大の問題である。これまでアナログ物質でしか報告がなかった反応誘起破壊について、本年度は、変質マントル岩石 (蛇紋岩) を用いた反応実験を行い、不均質に炭酸塩化が進むことにより、天然岩石の破壊が起こることを実証した。モンゴル、アメリカ西海岸、四国などでの蛇紋岩体の調査も進めている。また、体積変化、応力、浸透率をその場計測する新たな反応装置を開発し、流体を吸収する体積膨張反応の進行が破壊と流体流動に与えるフィードバックの検討を進めた。(JST 創発的研究支援事業, 科研費基盤研究 (S))。

## 海底熱水系における熱起電力と水素生成

日本近海に数多く存在する海底熱水系は、レアメタルなどの重要な金属鉱床を作るとともに、特異な生態系を支えるエネルギー源としても注目されている。熱水噴出孔から採取したチムニーの構造と電気特性を調べ、硫化物の微粒子の多孔質な集合体が形成したのちに、内部の温度が上昇することで置換反応が進むことで、熱電性能が発現することを見出した。

また、海水がマントルに浸透して形成した蛇紋岩の Fe の化学状態について X 線分析による 2 次元イメージングに成功し、複数段階の反応によって鉄の酸化に伴う水素エネルギー発生が行っていることを明らかにした。

## Fracturing and Pore Formation in rocks induced by Fluid Reaction: Roles on Geothermal Reservoirs and Carbon Mineralization

To evaluate supercritical geothermal resources, we analyzed the morphology of microposities in the granite of the Kakkonda geothermal field by X-ray CT and revealed a large amount of voids due to the hydrothermal alteration of feldspar and faceted voids formed during granite crystallization. Furthermore, we have succeeded in observing transient porosities caused by feldspar alteration in laboratory experiments (Fig. 2) and characterize their shapes using a topological approach.

The biggest problem for the mineral fixation of carbon dioxide in the ground is how to maintain flow paths in reactions that increase solid volume. Reaction-induced fracture was demonstrated this year in reaction experiments using altered mantle rocks (serpentinite), showing that the heterogeneous progress of carbonation leads to fracturing. We conducted the field survey of serpentinite bodies in Mongolia, the western United States, and Shikoku. We developed a new reaction apparatus for the in-situ measurement of volume change, stress, and permeability to study the feedback of the progression of the fluid-absorbing volume expansion reaction on fracture and fluid flow. (JST FOREST, Grant-in-Aid for Scientific Research [S])

## Thermoelectromotive force and hydrogen production in submarine hydrothermal systems

Numerous submarine hydrothermal systems in the seas around Japan have attracted attention as a source of energy that supports unique ecosystems as well as creating important metal deposits such as rare metals. We investigated the structure and electrical properties of chimneys collected from hydrothermal vents and found that after a porous aggregate of sulfide particles is formed, a substitution reaction proceeds as the internal temperature rises, resulting in thermoelectric performance.

In addition, we succeeded in the two-dimensional imaging of the chemical state of Fe in serpentinite formed by seawater seepage into the mantle by X-ray analysis and revealed that hydrogen energy generation associated with the oxidation of Fe occurs through a multistep reaction.



Fig. 3 Field work of Bayonhonbor ophiolite in Mongolia (July 2023).

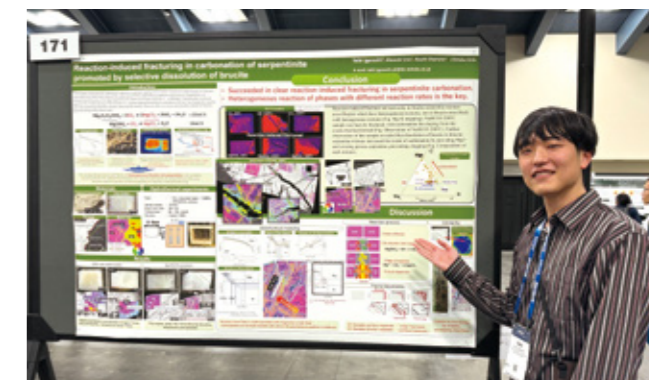


Fig. 4 Poster presentation at the annual meeting of American Geophysical Union, San Francisco, USA (Dec 2023).