

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

私たちの研究室は、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、二酸化炭素鉱物固定、超臨界地熱資源、天然水素、海底熱水系の発電現象など、地殻プロセスの理解と有効利用に関する様々な研究を進めている。本年度は、シリカ析出と地震による流体圧変化の関係性を明らかにする実験を進めるとともに、超臨界地熱システムにおけるシリカシール層の形成プロセスを明らかにしている。また、マントル岩石を対象に、鉄の化学状態分析に基づく水素エネルギーの発生分布を調べるとともに、岩石の破壊に伴いながら進行する二酸化炭素鉱物固定メカニズムの実験的検討を進めている。高温高圧実験と熱力学計算により、表層の炭素の沈み込みがプレート境界の摩擦挙動に大きく影響を与えることを示唆した。さらに、深海底熱水系で発達する硫化物チムニーの置換反応を実験室で再現し、チムニーの発達に伴い熱電変換性能が発現する可能性を示した。

Our research group focuses on rock-fluid reactions and the transfer of energy and materials in geospheres. We are conducting studies on a wide range of topics, aiming to deepen our understanding of and enhance the utilization of the crust, including the relationship between earthquakes and fluids, carbon dioxide (CO₂) mineral sequestration, supercritical geothermal resources, natural hydrogen, and submarine hydrothermal systems. We conducted hydrothermal experiments on the relationship between silica precipitation-fracture sealing related to earthquakes and on the formation of silica sealing layers in supercritical geothermal systems. By analyzing the chemical state of iron in ultramafic rocks, we investigate the spatial distribution of hydrogen energy generation. Additionally, we have elucidated the mechanisms of CO₂ mineral sequestration associated with reaction-induced rock fracturing through experiments and modeling. Furthermore, our experiments and thermodynamic calculations suggest that subducted carbon significantly influences the frictional behavior at the plate boundaries. We also conducted the experiments and analyses on replacement reactions of sulfide chimneys in submarine hydrothermal systems, demonstrating the potential emergence of thermoelectric conversion performance during chimney development.

地殻の岩石-流体相互作用：地震現象、超臨界地熱

地殻における地震現象は、流体圧の変化に強く影響される。このため、流体圧変化を引き起こす地殻内でのシリカ析出の重要性が示唆されてきたが、その関係を示す直接的な証拠はほとんどなかった。本年度、高温の地殻を再現した超臨界熱水流動条件での亀裂内のシリカ析出実験を行い、シリカによる亀裂閉塞と破壊の繰り返しによって流体圧振動が起こることを初めて実証した(図1)。この成果は、流体の移動を伴う地殻内地震の理解を大きく前進させると期待できる。また、超臨界地熱システムを模擬した亜臨界から超臨界状態の熱水流通実験により、深部地熱貯留層の直上において、シリカの溶解から析出への遷移が起こり、比較的厚さの薄い不透水層を形成することを示した。

Fluid-rock interaction within the crust: earthquake, supercritical geothermal systems

Changes in fluid pressure within the crust control the recurrence intervals of earthquakes. In particular, it has been suggested that silica precipitation plays a crucial role on the evolution of fluid pressure. We conducted hydrothermal flow-through experiments to precipitate silica within fractures under supercritical conditions. We demonstrated that silica precipitation can seal fractures and cause characteristic fluid pressure oscillations by repeated breaks of the sealed layer. This phenomenon is expected to significantly advance our understanding of crustal earthquakes associated with fluid migration.

Based on the hydrothermal flow experiments simulating subcritical and supercritical conditions in supercritical geothermal systems, we showed that a transition from silica dissolution to precipitation occurs just above the supercritical geothermal reservoir, forming a relatively thin impermeable sealing layer (Grant-in-Aid for Scientific Research (S))

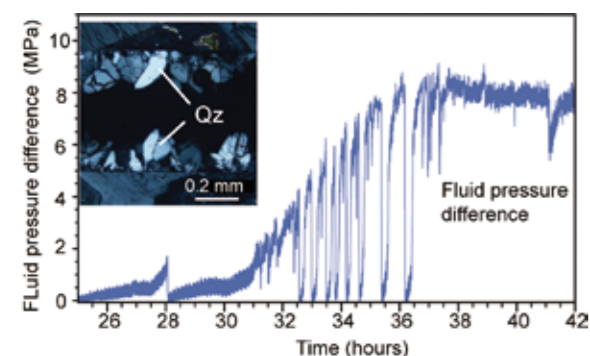


Fig. 1 Fluid-pressure oscillations caused by silica precipitation.

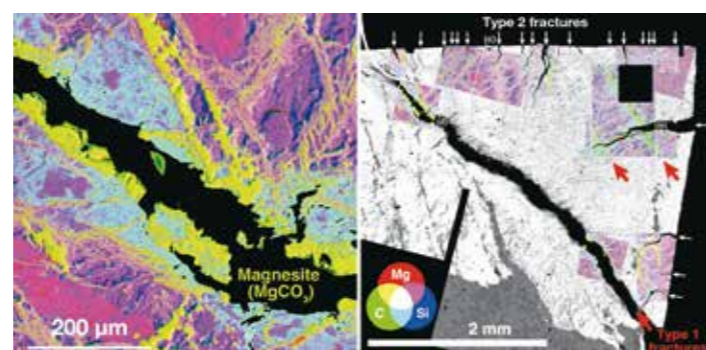


Fig. 2 X-ray CT images showing reaction-induced fracturing of MgO aggregate.



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 of the Okamoto-Uno Lab.

マントル岩石への二酸化炭素鉱物固定と亀裂形成

大気中のCO₂を削減するために大規模なCO₂鉱物固定を行うためには、継続的な流体移動経路の維持が不可欠である。天然の変質マントル岩石(蛇紋岩)を用いた炭酸塩化の反応実験を行い、反応によって岩石破壊が起こり(反応誘起破壊)、反応が持続的に進行することを実証した(図2)。また、反応-輸送の数値モデルにより、反応速度と物質移動速度の兼ね合いによる局所的な過飽和状態が反応誘起応力を生み出し、破壊につながることを示した。また、マントル岩石のアナログ物質であるMgO焼結体を用いた反応実験により、岩石-流体反応が初期は非常にゆっくり進行し、あるきっかけで連鎖的に反応-破壊-流体流動のフィードバックにより劇的に加速する可能性を示唆した。このような岩石-流体相互作用による亀裂や空隙パターンについてのトポロジカルな解析を進め、「かたち」から「うごき」を理解する研究を進めている。(基盤研究S、JST創発)

深海底における熱電変換と水素生成

深海底には200°Cを越す熱水が海洋底に噴出し、硫化物からなるチムニーを形成する。伊豆・小笠原海域から採取したチムニーの累帯構造に沿って、電気伝導度と熱起電力を精密に測定し、チムニー成長に伴う特定の時期に、CuやFeの硫化物からなる層が形成し、熱を電気に変換する熱電変換性能が発現することを見出した。さらに、硫化物の置換反応による導電性皮膜の形成がチムニーの電気特性に与える影響についての実験的検討を進めている(図3)。

マントル岩石が水と反応すると、鉄が酸化されると同時に、水を還元して水素を発生する。このような水素エネルギーは海底生命圏にとってもまた、資源としても期待されている。本年度は、複数のFeを含む鉱物からなる蛇紋岩についてX線吸収スペクトル解析によりFeの化学状態を評価する方法を確立し、中東のオマーン国の掘削試料をもとに海洋地殻断面のどこに鉄の3価が多く存在しているのか、すなわち、地殻の水素発生ポテンシャルを評価した。

CO₂ mineralization within mantle rocks

To proceed CO₂ mineralization, it is important to supply CO₂ fluids into the rock body continuously. We conducted carbonation experiments using natural serpentinite and demonstrated that reaction itself induces fracturing (reaction-induced fracturing; Fig. 2). Through numerical modeling of reaction-transport processes, we showed that the interplay between reaction and material transport rates generates local supersaturation, leading to reaction-induced stress. Additionally, reaction experiments using MgO sintered aggregate, an analog material, indicated that although fluid-rock reactions like carbonation may initially proceed very slowly, they can dramatically accelerate under certain conditions through feedback mechanisms involving reaction, fracturing, and fluid flow. We also applied the topological analyses to crack and porosity patterns formed through fluid-rock interactions for understanding “movement” from the “shape” of the rock textures (Scientific Research (S)).

Thermoelectric conversion and hydrogen generation at the deep-sea floor

On the deep-sea floor, hydrothermal fluids exceeding 200°C are discharged, forming chimneys composed of sulfides. By conducting measurements of electrical conductivity and the thermoelectric power of chimneys collected from the Izu-Ogasawara region, we found that during a specific period of chimney growth, layers composed of copper and iron sulfides are formed, exhibiting thermoelectric conversion properties that transform heat into electricity. Furthermore, we conducted the experimental studies on the effects of conductive film formation by sulfide replacement reactions on the electrical properties of the chimneys.

When mantle rocks react with water, iron is oxidized while water is reduced, generating hydrogen. This hydrogen energy holds promise both as a resource and for supporting seafloor biospheres. This year, a method for evaluating the chemical state of Fe in serpentinite, which comprises multiple Fe-bearing minerals, was established using the analyses of X-ray absorption near edge structure. Based on drilled samples from Oman ophiolite in the Middle East, the distribution of Fe(III) in the cross-section of the oceanic crust was clarified, enabling an assessment of the hydrogen-generation potential.

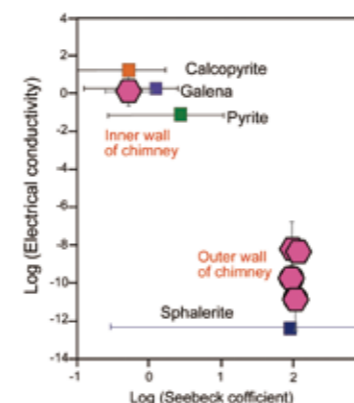


Fig. 3 Thermodynamic calculations of CO₂ storage and talc formation along the subduction zones.



Fig. 4 International symposium: Serpentine Days, Granada, Spain (Sep 2024).