

流体が駆動する反応性地殻： 資源形成と脱炭素化プロセス

**Fluid-driven reactive crust:
resource formation and decarbonization processes**



教授 岡本 敦
Professor
Atsushi Okamoto

私たちの研究室は、地圏環境で起こる様々な岩石-流体反応を軸に、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、「反応性地殻」の理解と有効利用に関する研究を進めている。本年度は、地震による流体圧変化に応答する石英脈形成、高温地殻における塩水によるシリカ析出・岩石変質プロセスに関する研究を進めるとともに、マンツルの超塩基性岩からの水素生成・回収増進方法の開発、岩石の特性を活かした二酸化炭素鉱物固定化メカニズムの実験的検討を進めている。また、高温高压の変形実験により、炭素を含む物質移動が、沈み込みプレート境界の摩擦挙動・地震活動に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鉱物組織と電気特性を分析し、熱を電気に変える深海の発電現象を引き起こす可能性を示した。

Our laboratory focuses on rock-fluid interactions in the geosphere to understand and effectively utilize the “reactive crust.” Our research themes encompass seismicity and fluids, CO₂ mineralization, supercritical geothermal resources, natural hydrogen, and power generation phenomena in seafloor hydrothermal systems. This year, we advanced research on quartz vein formation in response to fluid pressure changes caused by earthquakes as well as silica precipitation and rock alteration processes induced by brines in the high-temperature crust. We are developing methods for hydrogen production and enhanced recovery from mantle ultramafic rocks and conducting experimental investigations into CO₂ mineralization mechanisms that leverage specific rock properties. Additionally, through high-temperature and high-pressure deformation experiments, we suggested that carbon-bearing mass transfer influences frictional behavior and seismic activity at subduction plate boundaries. Furthermore, by analyzing the mineral textures and electrical properties of sulfide chimneys developed in deep-sea hydrothermal systems, we demonstrated the potential for deep-sea power generation phenomena that convert heat into electricity.

高温地殻の岩石-流体反応：地震現象・超臨界地熱

地殻における地震発生は、地下の流体の圧力に大きく影響される。地震発生帯の亀裂内に析出した石英結晶にはしばしば特徴的な累帯構造が観察され、地震サイクルによる流体圧変化の痕跡と解釈されてきた。本年度、超臨界条件で人工的に流体圧を振動させるシリカ析出実験を行い、流体圧変動に反応して実際に累帯構造が形成することを実証した(図1)。さらに、高温の地殻深部に存在すると考えられる塩水(NaClやMgCl₂水溶液)と岩石の開放系の反応実験により、浸透性の低い地殻でも、反応によって大きな元素移動と空隙形成を伴いながら、広範囲に変質が進行することを示した。これら成果は、地殻における地震発生と鉱床形成の繋がりが超臨界地熱資源発達の理解を大きく前進させる。また、地殻岩石の空隙や亀裂に対してトポロジカル解析により、その形の「特徴量」を抽出し、流体の流れやすさと繋げる研究を進めている。

Fluid-rock interactions in high-temperature crust: Link to earthquake, supercritical geothermal systems

Earthquake generation in the crust is significantly influenced by subsurface fluid pressure. Characteristic zonal structures are frequently observed in quartz crystals precipitated within fractures in the seismogenic zone; these have been interpreted as records of fluid pressure fluctuations associated with the seismic cycle. We conducted silica precipitation experiments involving artificially oscillating fluid pressure under supercritical conditions, demonstrating that zonal structures indeed form in response to fluid pressure fluctuations (Fig. 1).

Furthermore, through open-system reaction experiments between rocks and brines (NaCl and MgCl₂ solutions), we showed that extensive alteration proceeds even in low-permeability crust, accompanied by significant elemental mass transfer and porosity formation. These findings significantly advance our understanding of the link between crustal seismogenesis and ore deposit formation as well as the development of supercritical geothermal resources. Additionally, we are currently conducting research using topological analysis to extract geometric features of pores and fractures in crustal rocks, aiming to link these features to fluid transport properties.

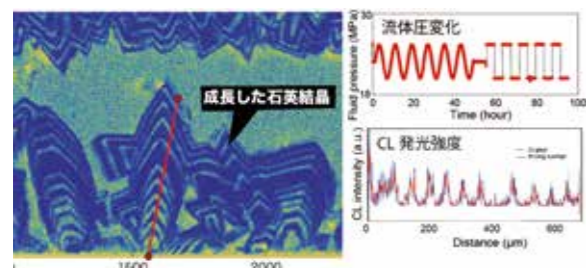


Fig. 1 Cathodoluminescence zoning of synthetic quartz grown in response to fluid pressure oscillation.

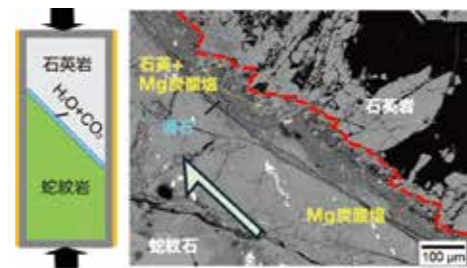


Fig. 2 Deformation experiment during carbonation of serpentinite-quartzite boundary at 500 °C and 1 GPa.



特任助教
ダンドル オトゴンバイル
Assistant Professor
Dandar Otgonbayar

マンツル岩石への二超塩基性岩への CO₂ 鉱物固定と天然水素

マンツルを構成する超塩基性岩は Mg や Fe を豊富に含み、表層の H₂O や CO₂ と最も高い反応性を持つ岩石である。かんらん岩が H₂O を吸収する反応(蛇紋岩化反応)では、岩石中の Fe が酸化されると同時に水素を発生し、近年では天然水素として開発可能かどうかのポテンシャル調査が始まっている。一方、かんらん岩が CO₂ を吸収する炭酸塩化は安定的な CO₂ 削減方法として期待されている。これらの特徴的な岩石反応について、国内、モンゴル、オマーンなどでの天然での産状を調査するとともに、その有効利用について実験的な研究を進めている。H₂O や CO₂ を吸収すると固体体積の膨張が起こり、目詰まりが起こることが大きな問題であったが、アナログ実験により反応-破壊-流体流動のフィードバックにより炭酸塩化や蛇紋岩化が効果的に進行することを示した。一方、条件によっては Mg や Fe などの元素が溶脱することで、石英や滑石などを作りながら体積膨張を抑えながら反応が進行するプロセスも起こることを明らかにした(図2)。この Mg や Fe の選択的要素溶脱を生分解性キレート剤によって劇的に促進させ、岩石への流通実験により浸透率が 100 倍以上上昇させることに成功した。さらに、かんらん岩よりも反応が遅いと考えられる蛇紋岩(変質したかんらん岩)においても、ブルース石の溶解が大きな役割を果たすことを明らかにした。

深海底における発電現象

深海底には 200 °C を越す熱水が海洋底に噴出し、硫酸塩や硫化物からなる構造物「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電気伝導度と熱起電力を精密に測定し、熱水流路の周辺に電子をキャリアとする n 型半導体である Cu や Fe の硫化物の膜が形成されることを見出した。この導電性皮膚の発達により、熱水と海水の酸化還元電位の差と、チムニー内外の温度差に起因する熱起電力によって、チムニー成長の特定の時期に深海底で発電する可能性を示唆した(図3)。

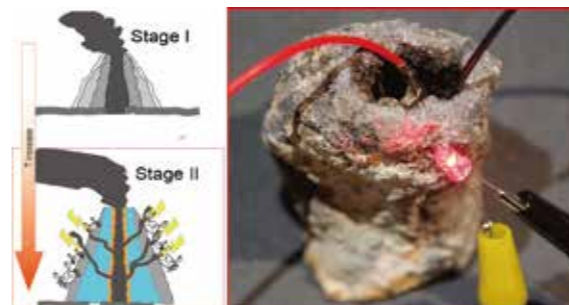


Fig. 3 Enhancement of electrical conductivity due to the development of zonal structures in seafloor chimney.



Group photo of the Okamoto-Ueno Lab.

CO₂ mineralization within ultramafic rocks and geological hydrogen

Ultramafic rocks, which constitute the Earth's mantle, are rich in magnesium (Mg) and iron (Fe) and exhibit the highest reactivity with surface water and CO₂. The hydration of peridotite (serpentinization) oxidizes ferrous iron within the rock while simultaneously generating hydrogen. Recently, investigations into the potential of this process for natural hydrogen resource development have begun. Meanwhile, the carbonation of peridotite via CO₂ absorption is anticipated to be a stable method for CO₂ sequestration. We are investigating the natural occurrences of these characteristic rock-fluid reactions through field surveys in Japan, Mongolia, and Oman while simultaneously conducting experimental research on their effective utilization. Although the volume expansion associated with H₂O and CO₂ uptake poses a significant risk of pore clogging, our analog experiments demonstrated that carbonation and serpentinization can proceed effectively through a “reaction-fracturing-fluid flow” feedback mechanism. Conversely, we also revealed that under certain conditions, the leaching of elements such as Mg and Fe can suppress volume expansion, allowing the reaction to continue. We succeeded in dramatically enhancing this selective leaching using biodegradable chelating agents; flow-through experiments demonstrated a more than 100-fold increase in rock permeability. Furthermore, we clarified that the dissolution of brucite plays a critical role even in serpentinite (altered peridotite), which is generally considered less reactive than fresh peridotite.

Natural Electricity generation on the Deep Seafloor

Hydrothermal fluids exceeding 200 °C discharge onto the deep seafloor, forming “chimneys” composed of sulfate and sulfide minerals. We precisely measured the electrical conductivity and thermoelectric power of chimneys collected from the Izu-Ogasawara area. Our findings revealed that layers of Cu and Fe sulfides, which act as n-type semiconductors, form around the hydrothermal fluid conduits. We suggest that the development of these conductive layers facilitates power generation on the deep seafloor during specific stages of chimney growth. This generation is driven by the redox potential difference between hydrothermal fluids and seawater as well as the thermoelectric power resulting from the temperature gradient.



Fig. 4 Post-conference field excursion of the Sanbagawa belt, The International Symposium on Slow to Fast Earthquakes, Shikoku (Sep 2025).