

【基盤研究（S）】

沈み込み帯のCO₂流体の発生とマントル炭酸塩化の実態



研究代表者 東北大学・環境科学研究所・教授

岡本 敦（おかもと あつし）

研究者番号: 40422092

研究課題
情報

課題番号: 22H04932

研究期間: 2022年度～2026年度

キーワード: CO₂固定、マントル、岩石-流体相互作用、沈み込み帯

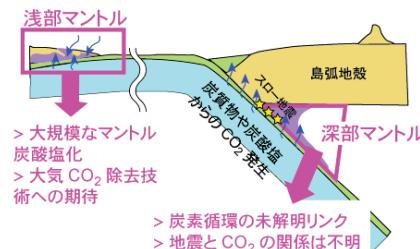
なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

● 研究の全体像

毎年1兆モルにも達する炭素が、プレートの沈み込みにより地球内部に持ち込まれる。この大規模な炭素循環は、地球表層環境やプレート境界に大きな影響を与える。中でも、固体地球の7割を占めるマントルはCO₂をスponジのように吸収できるため、地球温暖化の観点からも重要な岩石である。しかし、地表付近を除いて、マントルがどれほどCO₂を固定（炭酸塩化）するのかはよくわかつていない。私たちは、地質調査により地下深部30kmにおいてもマントルが炭酸塩化している証拠を見出した。この発見をもとに、表層(<5km)と深部(~20-50km)におけるCO₂流体-岩石の反応と、そのプレート境界への力学的影響を明らかにする本研究を構想した。本研究では、沈み込み帯起源の炭酸塩化・蛇紋岩化したマントル岩体の地質調査、および表層近傍と深部条件でのマントル炭酸塩化の実験を行う（図1）。溶液化学を軸に、破壊や物質移動を伴うマントルへのCO₂固定の本質的なメカニズムを明らかにするとともに、CO₂反応とのカップリングによる断層挙動の変化を読み解き、物質循環とプレート境界地震をつなぐ現象モデルを提案したい。

本質的な問い

1. 地球表層の炭素はどのようなメカニズムでマントル岩石に固定されるのか？
2. CO₂流体は、沈み込みプレート境界での反応・物質循環や地震現象にどのような影響を与えるか？



膨張 vs. 収縮

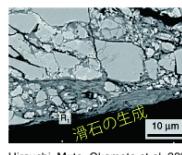


図1 研究全体のイメージ図

本研究の目的

沈み込み帯におけるCO₂流体発生とマントルへのCO₂貯蔵メカニズムと、そのプレート境界への力学的影響を明らかにする。

研究内容

深部マントル

[1] 沈み込み帯起源のマントルの地質調査

- (三波川帯ほか)
- CO₂流体の起源
- 炭酸塩化の程度・分布
- 反応-破壊様式

[2] In-situ 反応-変形実験

- 深部マントル-地殻境界の反応と物質移動
- CO₂固定化メカニズム
- CO₂反応による断層すべり挙動の変化とスロー地震の関係

[3] 反応-透水実験

- 体積膨張反応による破壊と浸透率変化
- 元素溶脱による体積収縮と空隙形成
- 上記のプロセスがCO₂固定化に与える影響

[4] 溶液化学・反応-破壊モデリング

最新の溶液化学による沈み込み帯に沿った流体組成の予測と動的なCO₂反応プロセスへの影響

溶液組成を軸に、表層から深部への物質輸送と沈み込み帯の力学プロセスを結ぶ動的な地球物質科学の方法論の構築

浅部マントル

表層近傍で炭酸塩化が進行したマントル岩体（オマーンオフィオライトなど）

[3] 反応-透水実験

- 体積膨張反応による破壊と浸透率変化
- 元素溶脱による体積収縮と空隙形成
- 上記のプロセスがCO₂固定化に与える影響

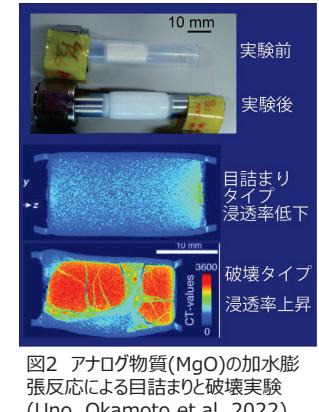
波及効果 自然に学ぶ効果的なCO₂地下固定化技術の探索

● 岩石へのCO₂固定化のパラドックス

マントルがCO₂を固定する反応には、流体が持続的に供給されることが不可欠である。しかし、CO₂を吸収すると岩石の体積が膨張するため、流路が目詰まりしてCO₂の供給が阻害されてしまう。私たちは、天然ではこれを2つの方法で解決しているという仮説をもっている。1つ目は体積膨張が応力不均質を生み出し、岩石を破壊して流路を形成する（図2）、2つ目はCO₂以外の元素溶脱により体積収縮が起り、新たな亀裂や空隙を形成するというものである。本課題では、天然、実験、モデリングの複数のアプローチで、このパラドックスの解明にチャレンジする。

● 沈み込みプレート境界での岩石-流体反応と断層プロセス

地震現象は主に断層の水圧や摩擦係数などの力学的要因のみで説明されてきた。本研究では、沈み込み帯のマントル-地殻境界で起こる、CO₂を含む流体を介した特徴的な化学反応に注目し、反応生成物によって、プレート境界の断層すべりがゆっくりになる（スロー地震との関連性）という仮説を検証する。



この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

● 沈み込み帯のマントルの炭酸塩化の実態の解明

オマーン国で見られるように表層近傍のマントル岩体は著しく炭酸塩化することが知られているが、沈み込み帯の島弧下の深部マントルでの炭酸塩化の程度や普遍性は、ほとんどわかっていない。本研究では、数多くの沈み込み帯起源のマントル岩体が産する三波川帯を調査し、炭酸塩化の進行度や、地殻-マントル境界での物質移動を評価するとともに、炭素と酸素の安定同位体に基づいてCO₂流体の起源を調べる（図3）。

● 亀裂や空隙形成を伴うマントルのCO₂固定化のメカニズムの解明

H₂OやCO₂流体が流通すると、マントル岩石は膨張するか、収縮するか？元素はどのように溶脱・固定されるか？亀裂形成は起こるか？このような問い合わせるために、反応による体積の時間変化を詳細にモニターしながら水熱条件下で反応-透水実験を行う装置を開発し、初期流体（pH、イオン、錯体）や反応させる岩石を変化させた系統的な実験を行い、マントル炭酸塩化のメカニズムに迫る（図4）。

● CO₂流体反応が断層のすべり挙動に与える影響の解明

沈み込み帯のマントルウェッジ条件を再現した反応-変形実験を行う。まず、地殻-マントル物質境界を設定して、H₂O-CO₂流体を介した反応・物質移動・体積変化を静岩圧の実験で明らかにする。その上で、差应力をかけた変形実験を行い、プレート境界断層においてH₂O-CO₂流体が関与する反応がすべり挙動に与える影響を調べ、天然の産状とも比較しながらCO₂流体反応がスロー地震の要因となり得るかを検討する。

● 沈み込み帯に沿った溶液組成のモデリングに基づく統合

最新の溶液化学データに基づいて表層から深部まで流体組成を計算する。流体組成を軸として、室内実験と天然の観察を統合して、元素移動・固定と地震現象をも結びつけるCO₂循環モデルを構築を目指す。

● 波及効果：天然の仕組みに学ぶCO₂地中固定技術への展開

天然でのマントル中のCO₂の鉱物への固定化の仕組み、特に亀裂・空隙形成メカニズムを理解することで、流体組成をコントロールして持続的なCO₂流体の供給と固定化反応を制御する、効果的なCO₂地中固定技術へと展開したい。



図3 沈み込み帯起源のマントル岩石の炭酸塩脈とその剪断変形

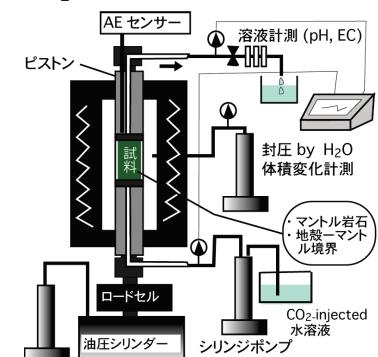


図4 新しく作成する反応-透水実験装置