

令和3年8月26日

国立大学法人 東北大学
国立研究開発法人 海洋研究開発機構 (JAMSTEC)
国立大学法人 新潟大学

**沈み込み帯における二酸化炭素の固定化が
マンツルの破壊を引き起こす**
— 炭素の循環とプレート境界での地震現象との関係性を示唆 —

【発表のポイント】

1. 沈み込み帯の変質マントル由来の岩体（蛇紋岩体）に、堆積物の炭質物を起源とする二酸化炭素から生成した炭酸塩脈が発達していることを発見。
2. 蛇紋岩体の炭酸塩化作用（二酸化炭素固定）は、固体体積の減少と流体圧上昇を伴って岩体の破壊を引き起こし、自己促進的に進むことを発見。
3. 地球内部の炭素循環と、沈み込みプレート境界での流体や地震とを結びつける新たな物質反応科学の確立が期待される。

【概要】

炭酸塩または有機物起源の炭質物として1兆トンを超える炭素が、毎年、プレートとともに沈み込んでいます。地球内部の炭素循環は、表層環境に大きな影響を与えますが、沈み込み帯付近でのその実態はよくわかっていません。

東北大学大学院環境科学研究科の岡本敦教授、宇野正起助教、大学院生の吉田一貴氏、海洋研究開発機構の大柳良介日本学術振興会特別研究員（現、国士舘大学講師）、新潟大学理学部のマドスーダン サティシュクマール教授、鹿島建設株式会社の清水浩之博士は、沈み込み帯のマントル起源である蛇紋岩体（マントルが水を吸収した岩体）に炭酸塩脈が発達していることを発見し、産状の観察、化学分析と熱力学的解析を行いました（図1, 2）。その結果、この岩体は均質に蛇紋岩化したのちに、破壊が起こりながら複数の炭酸塩鉱物（二酸化炭素を結晶内に含む鉱物）が析出していることを見出しました（図3）。さらに、この蛇紋岩の炭酸塩化は、固体体積が収縮しながら脱水する反応で、間隙水圧の上昇が起こるために、き裂形成・物質移動・反応が自己促進的に進行す

ることをつきとめました（図4）。この反応が起こる、沈み込み帯のマントルの最も浅い部分では、スロースリップなどの地震現象が起こっており、地球内部の炭素循環とプレート境界の流体化学と地震活動を結びつける新しい研究の解明が期待されます。

本成果は、2021年8月3日、英国 Nature Research 社が発行する科学誌 Communications Earth & Environment に掲載されました。

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科

教授 岡本 敦

E-mail: atsushi.okamoto.d4@tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科 情報広報室

助手 物部 朋子

E-mail: tomoko.monobe.d4@tohoku.ac.jp

【詳細な説明】

毎年、1兆トンを超える莫大な炭素が、炭酸塩または有機物起源の炭質物として、プレートとともに沈み込んでいます。地球内部の炭素循環は、表層環境に大きな影響を与えます。表層近傍では、マグネシウムを豊富に含むマントルかんらん岩は、大気中の二酸化炭素を固体として固定すること(炭酸塩化作用)がわかっています。しかし、マントルの炭酸塩化作用の研究は、表層近傍を対象としたものが多く、沈み込み帯の島弧地殻の下の「マントルウェッジ」(沈み込むプレート直上のくさび状のマントル)で炭酸塩化が起こるのかどうかはよくわかっておらず、炭素循環を考える上でのミッシングピースになっています。また、持ち込まれた炭素が沈み込むプレート境界の流体組成や地震活動にどのような影響を与えるかはよくわかっていません。

本研究では、白亜紀の沈み込み帯で形成された代表的な高压変成帯である、三波川変成帯のマントルウェッジ起源の蛇紋岩体(水を吸収して変質したマントル)の炭酸塩化について、地質調査、熱力学的解析、同位体分析、き裂パターンの解析を行い、沈み込み帯でのマントルの二酸化炭素固定と破壊現象について明らかにしました。

研究対象は、埼玉県長瀬町にある樋口蛇紋岩体です(図1)。この岩体では、マントル岩石が水と反応して高温型蛇紋石(アンチゴライト)が生成し、その後3種類の炭酸塩鉱物(マグネサイト、ドロマイト、または方解石)と滑石からなる鉱物脈ができています(図2a, b)。炭素と酸素の安定同位体組成から、固定された二酸化炭素の起源は、沈み込む堆積物中の炭質物であることがわかりました(図2c)。炭酸塩鉱物の組成から、およそ400°Cのマントルウェッジの条件でかんらん岩の炭酸塩化反応が起きたことがわかりました(図3)。熱力学モデルから、このような二酸化炭素に富む流体とマントル岩石の反応は酸化条件で起こりやすいこと、また二酸化炭素を吸収すると同時に、水とマグネシウムを放出する脱水反応であることがわかりました(図4a-c)。この性質により、炭酸塩化反応では固体体積が減少しながら、流体圧が上昇する特徴があり、観察されるき裂パターンや、鉱物の成長組織も、固体収縮のモデルとよく一致します(図4d)。

現在、地球温暖化の対策のために、二酸化炭素の地中貯留が提案されています。中でも、マントルかんらん岩は最も高い二酸化炭素を固定する能力を有しています。しかし、大きな問題は、岩石が二酸化炭素を固定する反応は固体体積を増加させ、反応することで二酸化炭素の通り道が閉塞してしまい、更なる反応が妨げられることでした。本研究の沈み込み帯の蛇紋岩は、二酸化炭素が加わる一方で、マグネシウムや水が抜ける反応であり、固体体積が減少することで破壊が起こり、自己促進的に反応が進行することを示しています。このような天然のメカニズムを応用することで、効果的な二酸化炭素固定ができる可能性があります。

近年、日本やアメリカの沈み込み帯などで、マントルウェッジの最も浅い先端部分では、特徴的な地震活動(スロースリップ)が観測されています。これまで、このスロースリップを引き起こす地質学的モデルが提案されていますが未だに議論が続いています。本研究の蛇紋岩化したマントルの炭酸塩化反応は、脱水による間隙水圧の上昇を伴

う破壊と、反応でできた滑石や炭酸塩の延性変形が繰り返し起こっており、地震現象と関係がある可能性があります。これまで、プレート境界の地震は、主に水 (H_2O) の影響が議論されてきましたが、沈み込む炭素を起源とする CO_2 流体と地震との関係を明らかにする新しい研究の展開が期待されます。

本研究は、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費助成事業 基盤研究 (B) (No. 17H02981)、基盤研究 (S) (No.16H06347)、国際共同加速基金 (国際共同研究強化 (A) 18KK0376、国際共同研究強化 (B) 20KK0081)、新学術領域研究 (15H05831)、東京大学地震研究所共同研究プログラム (2018-B-01, 2021-B-01) の支援を受けて実施されました。

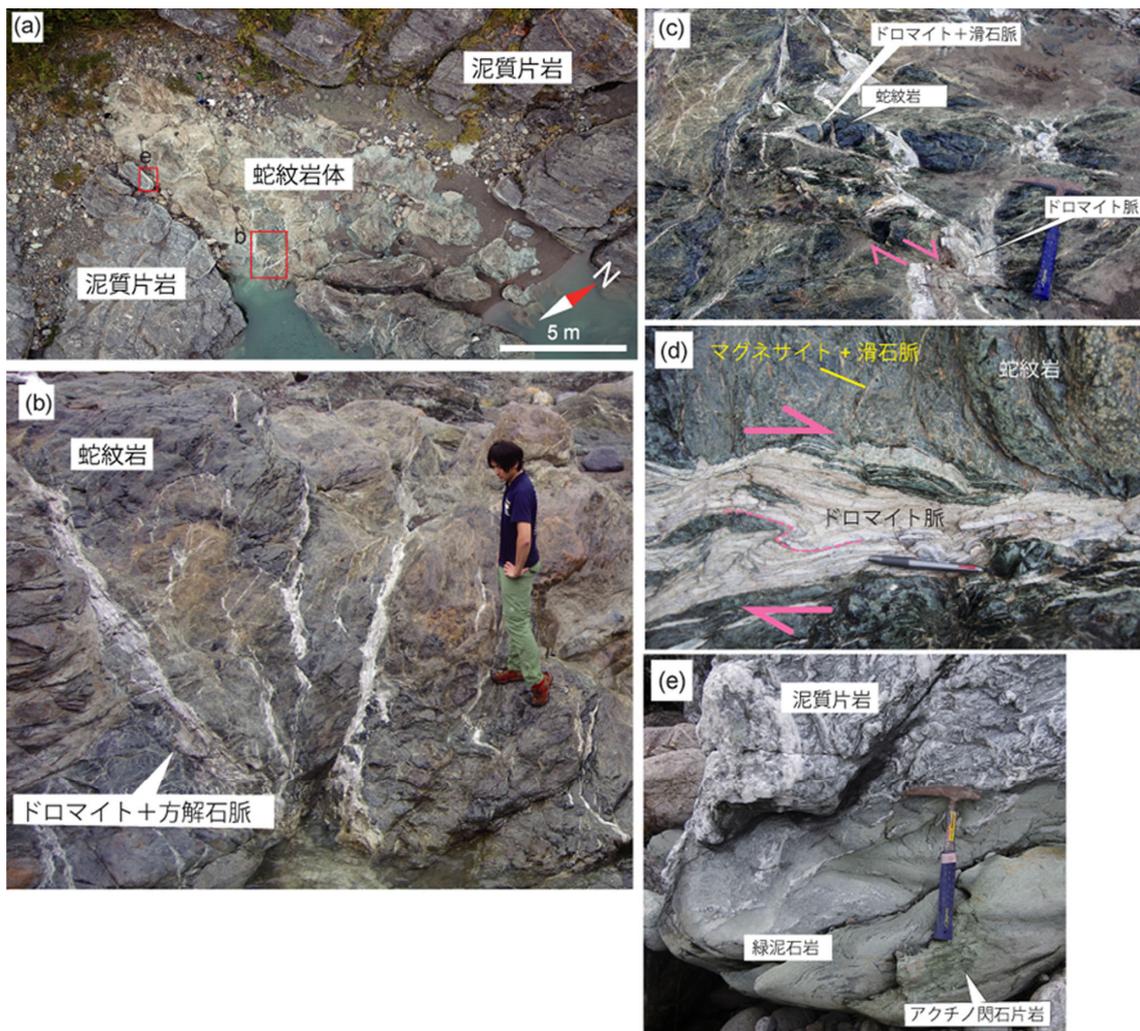


図1 露頭における樋口蛇紋岩体と炭酸塩脈(き裂を炭酸塩鉱物で充填されたもの)の産状。(a) 蛇紋岩体のドローン写真。(b-d) 蛇紋岩を切って発達する炭酸塩脈のネットワーク。(b) 脈の太い部分は主にドロマイト($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)や方解石(CaCO_3)からできており、(c) ドロマイト+滑石脈で切られた蛇紋岩部分はマグネサイト(MgCO_3) + 滑石の細かい脈が含まれている。(d) 炭酸塩脈の構造は脈形成後に剪断変形を受けていることを示している。(e) 蛇紋岩体の境界部分では、堆積物起源の変成岩(泥質片岩)が緑泥石岩に変化しており、蛇紋岩体からマグネシウムが放出されたことを示している。

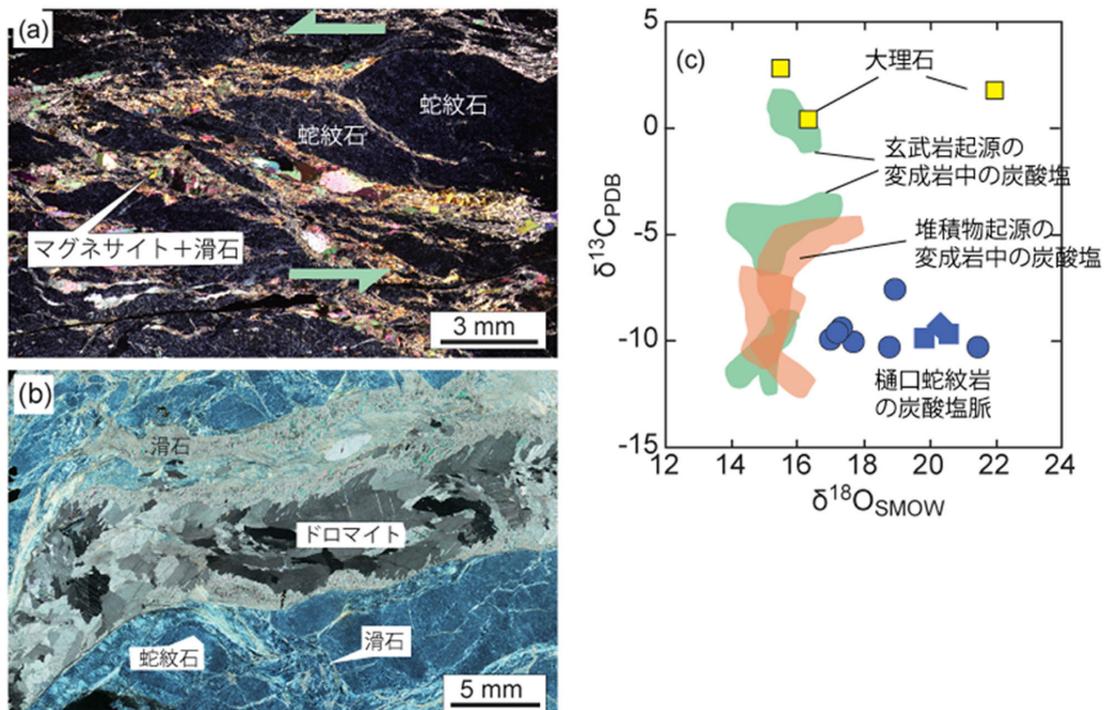


図2 樋口蛇紋岩体の炭酸塩脈の特徴。(a) 蛇紋石(アンチゴライト)のブロックを切るマグネサイト+滑石脈。蛇紋石ブロックの非対称の組織から剪断変形を受けていることがわかる。(b) ドロマイト+滑石脈。蛇紋石と二酸化炭素が反応する炭酸塩化反応では、シリカが放出されるために、シリカに富む層状ケイ酸塩鉱物である滑石ができる。滑石は変形しやすいやわらかい鉱物であり、プレート境界の性質を大きく変化させる。(c) 樋口蛇紋岩体の炭酸塩鉱物の炭素と酸素の安定同位体組成。三波川帯の中に出てくる大理石(海洋底で形成した炭酸塩が沈み込んだもの)とは大きく異なっている。蛇紋岩中の炭酸塩脈の炭素同位体は、堆積物起源の変成岩に含まれる炭酸塩とよく似ているが、酸素同位体はより高くなっており、堆積物中の炭素を起源とする二酸化炭素と蛇紋岩から脱水した水が混合したことを示唆している。

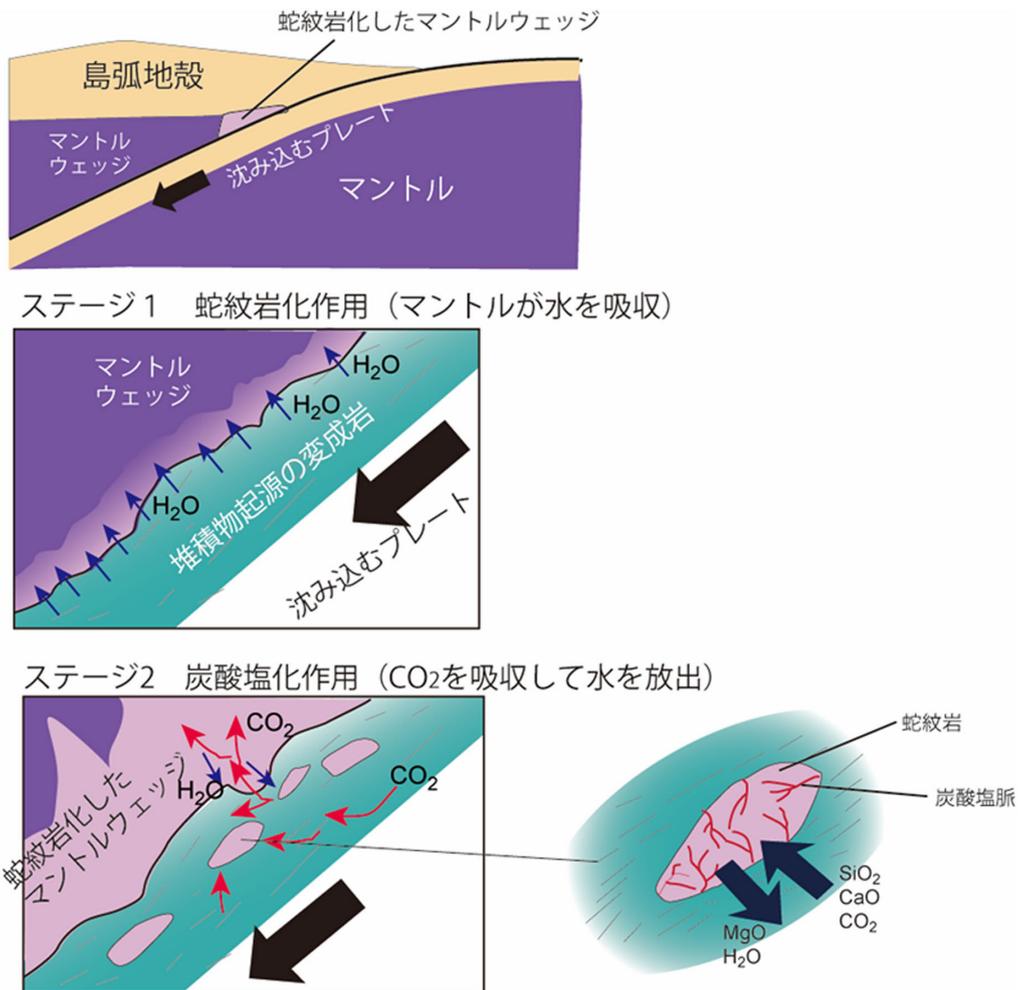


図3 沈み込み帯のマンタルでの炭酸塩化作用の模式図。沈み込むプレートとマンタルウェッジの先端は蛇紋岩化していると考えられている。

ステージ1 マンタルウェッジは堆積物や地殻が沈み込むことによって放出される水を吸収して蛇紋岩化作用が起こる。

ステージ2 蛇紋岩化したマンタルウェッジはCO₂流体が流入すると脱水しながら、局部的に炭酸塩化反応が進行する。この反応はき裂を作りながら自己促進的に進行する。マンタルウェッジの一部は変成岩の中に取り込まれ、樋口蛇紋岩体のように変成帯の一部として上昇する。

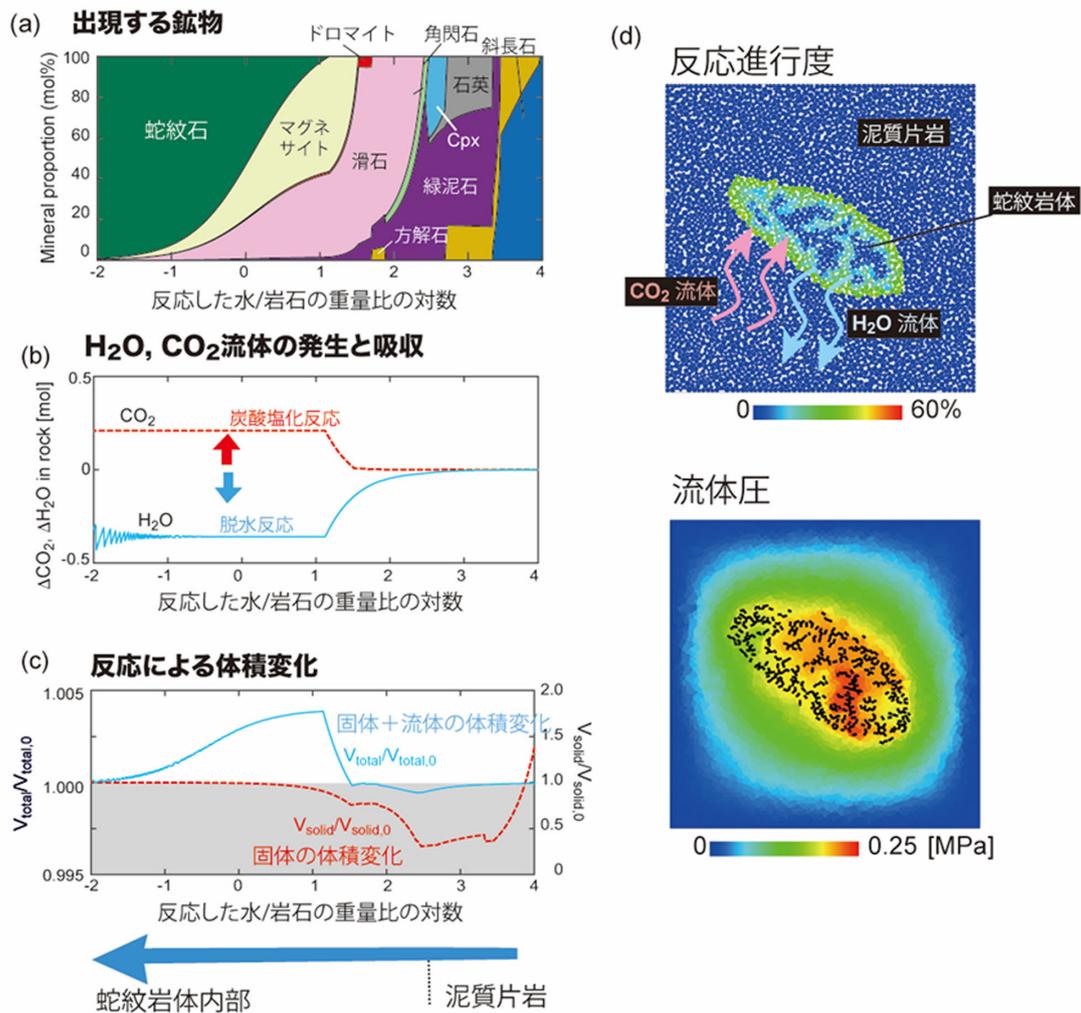


図4 マントルの炭酸塩化作用についてのモデル。(a-c) 岩石—流体平衡計算の結果。泥質片岩に平衡な流体と蛇紋岩を異なる割合で反応させるモデルであり、岩体の外側から内部に流体が流入することを模擬している。(a) 露頭で観察されるように炭酸塩鉱物と滑石が系統的に析出する。(b) 炭酸塩化反応は、CO₂ 流体を吸収し、H₂O を放出する反応である。(c) 炭酸塩化反応は、固体の体積を減少させる。一方で、固体と流体の総体積は増加するので、流体圧は上昇させることができる。(d) 離散要素法を用いた模式的な炭酸塩化反応によるき裂形成と流体圧の変化。反応が進行するにつれて、固体収縮のために岩体内部にき裂ネットワークが発達する(上図)。一方で、周囲から流体が逃げにくい場合、岩体内部での流体圧が上昇する(下図)。

【掲載論文】

タイトル : Rupture of wet mantle wedge by self-promoting carbonation

著者名 : Atsushi Okamoto^{1*}, Ryosuke Oyanagi^{2,3}, Kazuki Yoshida¹, Masaoki Uno¹, Hiroyuki Shimizu⁴, Madhusoodhan Satish-Kumar⁵

著者所属 : 1 国立大学法人 東北大学大学院環境科学研究科、2 国立研究開発法人 海洋研究開発機構、3. 国士舘大学 理工学部、4 鹿島建設、5 国立大学法人 新潟大学理学部

掲載雑誌 : Communications Earth & Environment (2021) 2:151

DOI : <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00224-5>