

超深海の変質したマントル岩石の内部で 炭素を含む海水が循環していることを明らかに

1. 発表のポイント

- ◆ 伊豆・小笠原海溝の水深 6,400 メートルの陸側岩盤を調査・分析した結果、炭素を含む海水が前弧マントル内を数万年以上かけて循環していたことが明らかとなった。
- ◆ 沈み込み帯浅部の前弧マントルは、数万年以上炭素を保持できる炭素貯蔵庫である可能性が示され、深海生命活動との関係解明が期待される。

2. 概要

国立研究開発法人海洋研究開発機構（理事長 松永 是）海域地震火山部門 火山地球内部研究センターの道林克禎 客員研究員および大柳良介 外来研究員は、名古屋大学、東北大学、新潟大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所と共同で、伊豆・小笠原海溝の水深 6,400 メートルの斜面から採取した炭酸塩を含むマントル由来の岩石を解析し、沈み込み帯浅部の炭素循環プロセスを明らかにしました。

地球表層に存在する炭素は、プレートの沈み込みに伴って地球深部まで持ち込まれたのち地表に戻る大循環をしています。最近の研究により、沈み込んだ炭素が比較的浅いところから地表に戻ってくる浅部炭素循環プロセスの重要性が指摘されていましたが、その循環の時間スケールについてはよくわかっていませんでした。

本研究では、伊豆・小笠原海溝の海亀海山(水深 6,400 メートル)から採取した前弧マントル岩石に含まれる炭酸塩鉱物脈を解析し、炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)が深海水と同様であることと放射性炭素濃度($\Delta^{14}\text{C}$)が低いことがわかりました。これは、炭酸塩が古い海水中の炭素を起源とし、地球内部に運び込まれた海水が、数万年以上の間、プレート上盤の前弧マントル内に滞留したことを示します。また、マントル岩石が破碎され、その流体が数十年以内の短期間で噴出することで炭酸塩が生成したことが明らかになりました。

この成果は、沈み込み帯浅部における炭素循環の新たな知見として、全地球の炭素循環の

理解を前進させるものです。また、我が国の排他的経済水域内でマントルの岩石に関連する冷湧水の痕跡が確認された初めての例であり、今後、生命活動との関係の解明も期待されます。

本成果は Nature Portfolio の論文誌「Communications Earth & Environment」に 12 月 3 日付け（日本時間）で掲載されました。なお、本研究の一部は JSPS 科研費（18J01649、19K14827、20KK0079、15H05831、18KK0376、16H06347）によって実施されました。

タイトル：

Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle

(DOI: 10.1038/s43247-021-00317-1)

(URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-021-00317-1>)

著者：大柳良介^{1,2}、岡本敦³、Madhusoodhan Satish-Kumar⁴、南雅代⁵、針金由美子⁶、道林克禎^{1,7}

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構
2. 学校法人国士舘大学理工学部
3. 国立大学法人東北大学大学院環境科学研究科
4. 国立大学法人新潟大学理学部
5. 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学宇宙地球環境研究所
6. 国立研究開発法人産業技術総合研究所
7. 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科

3. 背景

大気中の炭素は主に二酸化炭素やメタンとして存在し、それらは地球温暖化を引き起こす温室効果ガスとして知られています。しかし、地球に存在する炭素のうち大気中に存在する炭素はわずかで、90%以上は地球内部に存在しています。そのため、地球内部の炭素がどのように大気中に移動するのかを明らかにすることは、大気中の炭素濃度が将来どのように変化するのかの予測に役立ちます。地球表層に存在する炭素は、プレートの沈み込みに伴って地球内部へ持ち込まれます。炭素は地下 150 キロメートルまで潜ったのち浮上しはじめ、火山ガスとして排出されることで地球の大気に戻ると考えられています。これら沈み込み帯深部における炭素循環はおおよそ 1,000 万年もの時間をかけて行われ、その間、炭素を地中に貯蔵しています。近年、プレートの動きに伴って炭素が地下 30 キロメートルより浅い部分まで沈み込んだのち、地表に戻ってくる浅部炭素循環の存在が指摘されていました。しかし、その循環の時間スケールについてはわかっていませんでした。

2017 年 7 月、伊豆・小笠原海溝の陸側斜面の海底地質構造を明らかにするために、YK17-14 Leg2 航海（首席研究者：道林克禎）を行いました。有人潜水調査船「しんかい 6500」を用いて、伊豆・小笠原海溝陸側斜面（水深 6,400 メートル）の海亀海山（図 1）から岩石を採取した結

果、変質した前弧マントル岩石（蛇紋岩）が海底に露出していることがわかりました。また、蛇紋岩中に炭酸塩（アラゴナイト）が析出したき裂（炭酸塩脈）を発見しました（図 2a、b）。通常、水深約 6,400 メートルの深海では、炭酸塩鉱物は海水に溶解してしまうので、この炭酸塩脈は岩石と反応して生成した流体が湧水として噴出したことを示唆しています。本研究では、この炭酸塩鉱物の化学組成分析、同位体分析、鉱物組織解析を行い、炭素を含む流体の起源、流れ方を考察し、沈み込み帯浅部での炭素循環の実態把握を行いました。

4. 成果

採取した蛇紋岩には顕著な亀裂が発達しており、針状のアラゴナイト結晶が成長することで亀裂を充填していました（図 2a、b）。また、この炭酸塩脈の中には、しばしば蛇紋岩の破片が含まれていました。X線 CT により 3次元構造を観察すると、この岩石破片はお互いに接しておらず、炭酸塩の基質の中で浮いているように見えます（図 2c）。この特徴から、炭酸塩の析出には、高速の水の流れが関与したことがわかりました。

また、炭酸塩中の炭素と酸素の安定同位体組成や微量元素組成を測定しました。その結果、炭酸塩は海水に溶け込んだ炭素を起源とし、約 2°C の深海底の条件下で蛇紋岩と海水が反応したことによって析出したことがわかりました。これに加え、炭酸塩に含まれる放射性炭素の濃度（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）が超深海の海水と比べて非常に低いことを発見しました（図 3）。放射性炭素の濃度は放射壊変により時間とともに減少する性質をもっているため、炭素の年齢を推定するための指標になります。このような低い ^{14}C 濃度は、海水に溶け込んだ炭素が前弧マントル岩石内を数万年以上かけて循環したのち、炭酸塩鉱物として析出したことを示唆しています（図 4a、b）。

さらに、この析出のプロセスについて熱力学と流体力学の観点から数値解析を行った結果、海水がマントル岩石内から秒速 0.01 メートルから 0.1 メートルの速さで噴出し、長くても数十年間、噴出が続いたことがわかりました（図 4c）。この流体の噴出速度は、熱水噴出孔において流体が噴出する速さとよく似ています。これらのことから、海水が数万年以上かけて前弧マントルに滞留し、最終的には破碎により噴出が数十年以内の短期間継続したとの結論に至りました。

5. 今後の展望

本研究は、沈み込み帯浅部では炭素を含んだ海水が数万年以上かけて循環していることを明らかにしました。この研究成果は、従前知られていた深部炭素循環が約 1,000 万年の時間スケールであるのに対して、浅部炭素循環の時間スケールが 2桁以上短いことを意味します。つまり、浅部炭素循環は、沈み込んだ炭素が地表に戻ってくる「近道」になっている可能性があります。

また、本研究は、前弧マントルが海水と炭素を数万年間貯蔵できる可能性を示しています。そこではマントル岩石と海水の化学反応（蛇紋岩化作用）が起きることで、水素やメタンなどの生命活動に必要なエネルギーが生み出されている可能性があります。蛇紋岩化作用と生命活動を結びつける研究は、マリアナ海溝や大西洋中央海嶺の熱水・湧水帯（[2015年10月](#)

[23日既報](#))、カリフォルニア州の陸上泉 ([2017年7月21日既報](#)) などでも精力的に行われてきました。本研究は、我が国近海の伊豆・小笠原海溝に露出したマントル岩石から流体が噴出していたことを見出した初めての事例です。伊豆・小笠原海溝は、生命活動とマントル岩石の化学反応の相互作用を解明するための重要な調査地点になる可能性があります。

本調査地点（海亀海山）は、国際深海科学掘削計画（IODP）として実現を目指す「前弧マントル掘削計画」における掘削候補地点の一つです。本研究成果をふまえて、超深部探査船「ちきゅう」による前弧マントル掘削が実現されたならば、沈み込み帯浅部における炭素の固定・循環についてのより定量的な評価や浅部炭素循環の地下生命圏や深海生態系に対する影響の解明が可能になります。そして、地球表層における炭素量の将来予測の精緻化と工学的な応用に繋がる可能性があります。

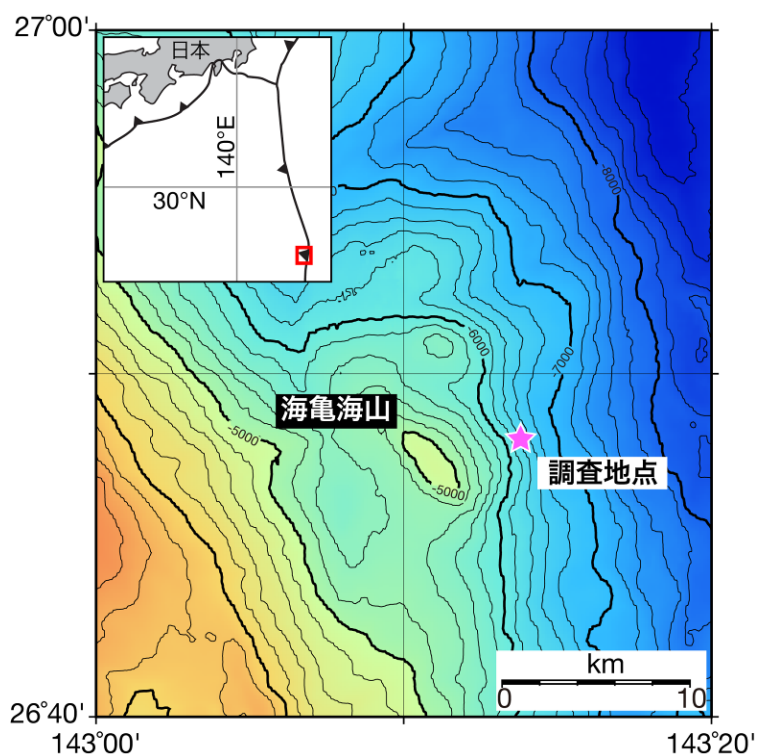


図1 調査地点（海亀海山）の位置。東京からの距離は直線距離で約1,000 km。

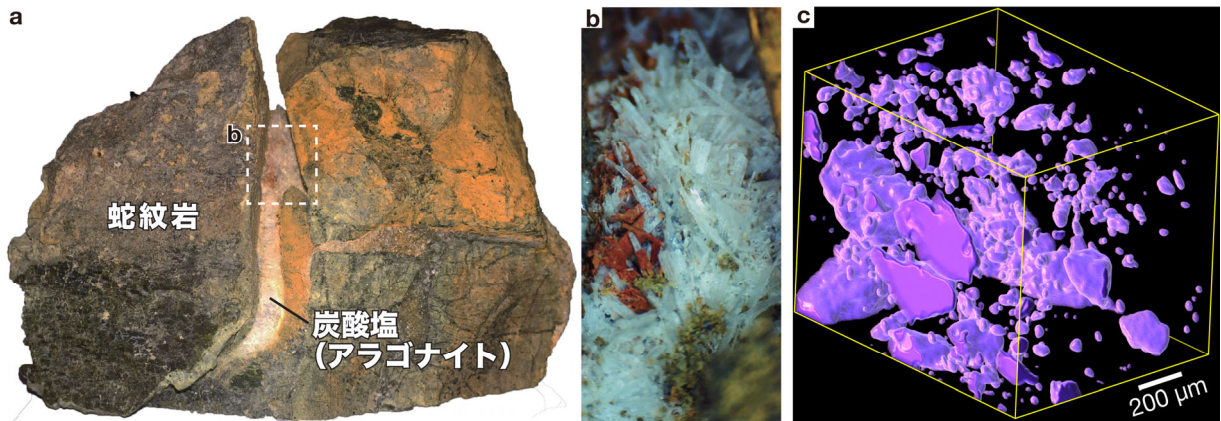


図2 (a) 炭酸塩 (アラゴナイト) の産状。海亀海山の水深約 6,400m から採取した、変質したマンタル岩石 (蛇紋岩) の割れ目に析出している。(b) 図 2 (a) の白い点線で囲った領域の拡大図。アラゴナイトは針状の形をしている。(c) アラゴナイト脈の X 線 CT 写真。アラゴナイト脈に含まれる蛇紋岩の破片の三次元分布を示している。蛇紋岩の破片はお互いに接しておらず、流体流動と化学反応の相互作用によって炭酸塩が析出したことが明らかになった。

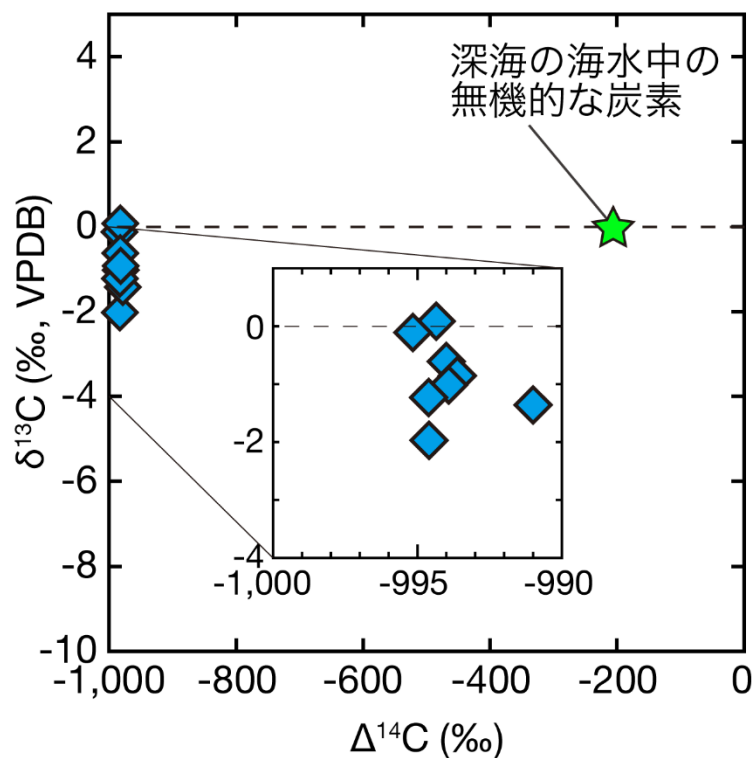


図3 炭酸塩の放射性炭素濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$) と炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) の関係を示した図。 $\delta^{13}\text{C}$ は国際的に決められた標準試料 (VPDB) の同位体比からのずれで示される。炭酸塩に含まれる炭素は、現代の海水に含まれる炭素とほぼ同じ $\delta^{13}\text{C}$ 値である。一方で、現代の海水に含まれる炭素よりも低い $\Delta^{14}\text{C}$ 値である。

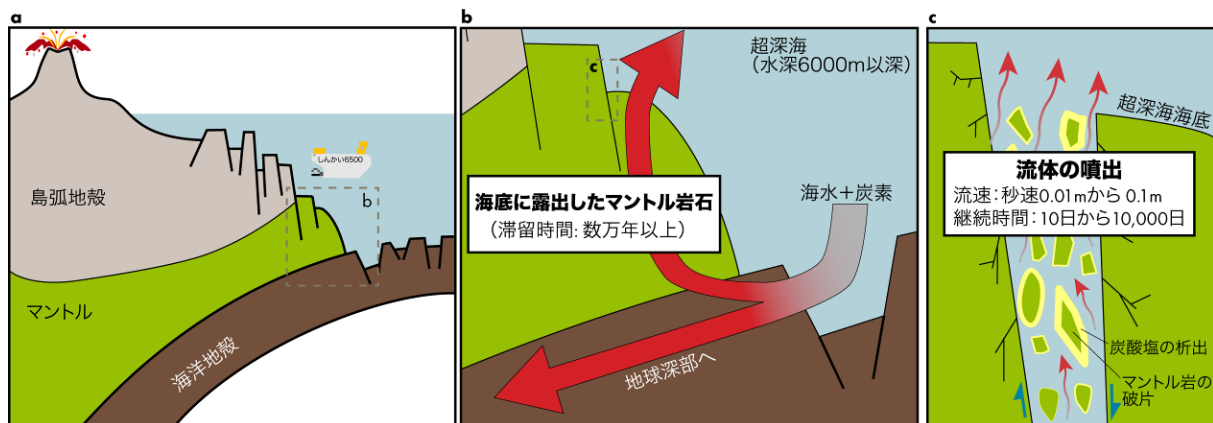


図4 本研究で明らかになった炭素循環の概念図

(a) 調査地点（海亀海山）の断面図。(b) 図4 (a)で点線の領域の炭素循環の概念図。海水に溶け込んだ炭素は地球深部へ運ばれる一方、一部はプレート上盤のマントル岩石へ放出され、数万年以上マントル岩石内に貯蔵される。(c) 図4(b)の点線の領域の拡大図。断層運動によりマントル岩石にき裂が生じ、貯蔵されていた海水が放出され、炭酸塩が析出する。海水の放出は10日から10,000日続いたことが明らかになった。