

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

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)}

本稿は 2021 年 12 月 3 日に行ったプレス発表 (https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2021/pr20211203/pr20211203.html) に一部加筆修正したものです。

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大柳良介 外来研究員および道林克禎客員研究員は、東北大学、新潟大学、名古屋大学、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、マントル岩石が破砕され、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。

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

1) 海洋研究開発機構

2) 国土館大学工学部

3) 東北大学大学院環境科学研究所

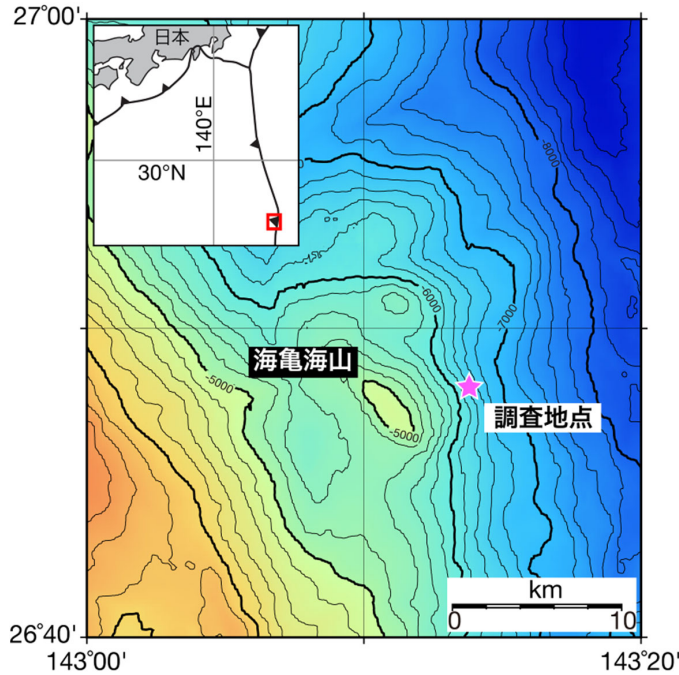
4) 新潟大学理学部

5) 名古屋大学宇宙地球環境研究所

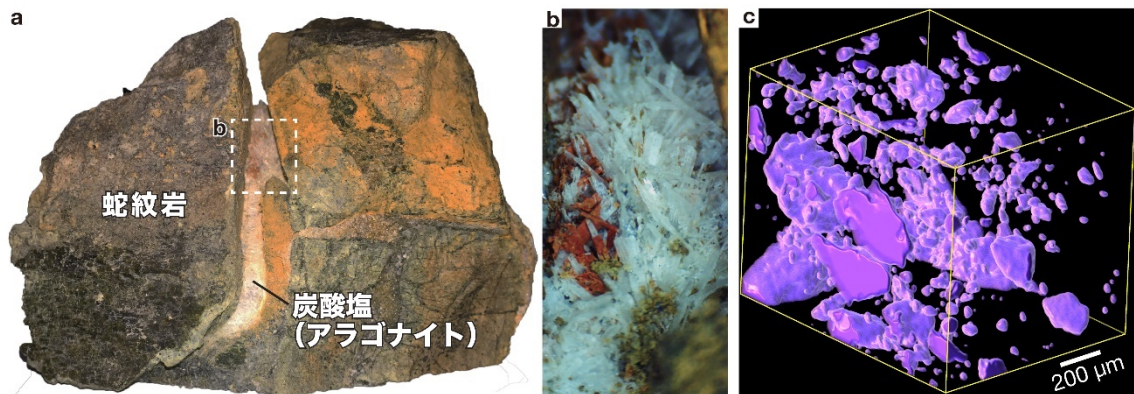
6) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

7) 名古屋大学大学院環境学研究所

キーワード：アラゴナイト、蛇紋岩化作用、かんらん岩、炭素循環プロセス、前弧マントル、伊豆・小笠原海溝、沈み込み帯



第1図 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。



第2図 (a) 炭酸塩(アラゴナイト)の産状。海亀海山の水深約6,400 mから採取した、変質したマントル岩石(蛇紋岩)の割れ目に析出している。(b) 第2図(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。

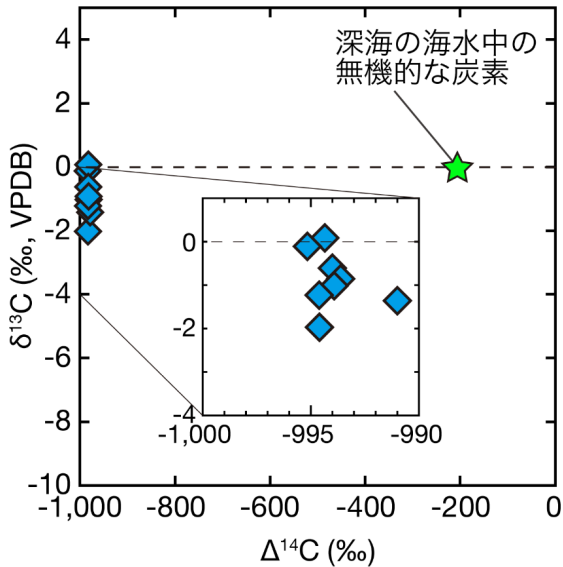
の時間スケールについてはわかっていませんでした。

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(第1図)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(第2図a, 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き裂が発達しており、針状のアラゴナイト結晶が成長することでき裂を充填していました(第2図a, b)。また、この炭酸塩脈の中には、しばしば



第3図 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。

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(第2図c)。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。

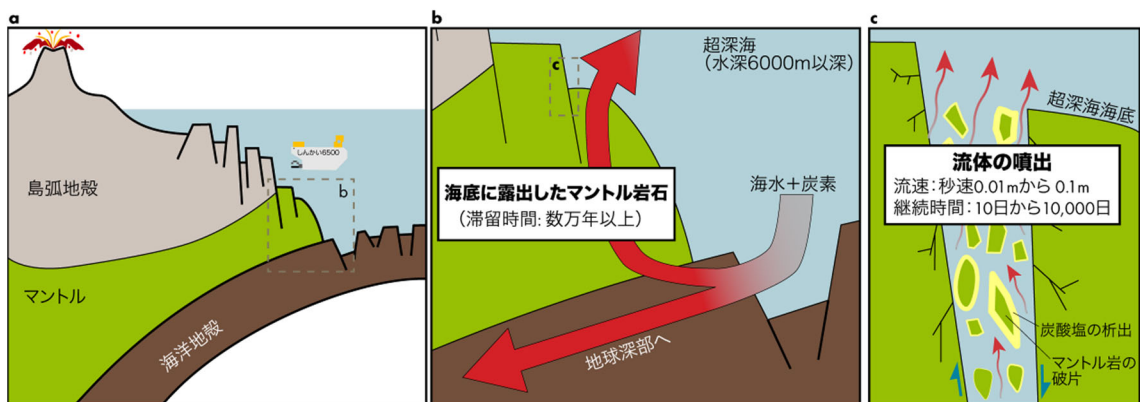
また、炭酸塩中の炭素と酸素の安定同位体組成や微量元素組成を測定しました。その結果、炭酸塩は海水に溶け込んだ炭素を起源とし、約2℃の深海底の条件下で蛇紋岩と

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(第3図)。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(第4図 a, 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(第4図 c)。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、最終的には破砕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。



第4図 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) 第4図(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、数年以上マントル岩石内に貯蔵される。(c) 第4図(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。

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(海洋研究開発機構, 2015), カリフォルニア州の陸上泉(海洋研究開発機構, 2017)などで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。

文 献

- 海洋研究開発機構(2015) 国際深海科学掘削計画(IODP) 第357次研究航海の開始について～北大西洋アトランティス岩体掘削による蛇紋岩化作用と海底下微生物活動との関連性の解明～. https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20151023/ (閲覧日: 2022年2月15日)
- 海洋研究開発機構(2017) 地下深部の超極限的な環境に「常識外れな微生物群」を発見～マントル岩石と生命との関わりや地球初期の生命進化の謎の解明に前進～. https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20170721_2/ (閲覧日: 2022年2月15日)
- Oyanagi, R., Okamoto, A., Satish-Kumar, M., Minami, M., Harigane, Y. and Michibayashi, K. (2021) Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle. *Communications Earth & Environment*, 2, 243. doi: 10.1038/s43247-021-00317-1

OYANAGI Ryosuke, OKAMOTO Atsushi, MADHUSOODHAN SATISH-KUMAR, MINAMI Masayo, HARIGANE Yumiko and MICHIBAYASHI Katsuyoshi (2022) Hadal aragonite records venting of stagnant paleoseawater in the hydrated forearc mantle.

(受付: 2022年2月15日)