

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01178

研究課題名（和文）海水起源の沈み込み帯流体によるマントルウェッジの蛇紋岩化・炭酸塩化作用

研究課題名（英文）Serpentinization and carbonation in the mantle wedge by seawater-originated subduction-zone fluids

研究代表者

川本 竜彦（Kawamoto, Tatsuhiko）

静岡大学・理学部・教授

研究者番号：00303800

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：プレートの沈み込みによる海水の供給によって島弧マントルは含水化とともに炭酸塩化するのではないだろうか。本研究では、海水起源流体とマントルウェッジの相互作用による水和と炭酸塩化を（1）蛇紋岩中の炭酸塩に含まれる流体包有物の化学組成と、（2）カンラン石または蛇紋石と単斜輝石と水-二酸化炭素の混合流体とを反応させる高温高压実験を行った。その結果、（1）マリアナ海溝の蛇紋岩海山の泥に含まれるカルサイトには海水に似た塩水が含まれる。（2）180MPaにおいて、350-400℃ではタルク、マグネサイトとドロマイトが安定で、300℃ではマグネサイト、石英とドロマイトが安定であると解釈した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地表の海域は文字通り海水に覆われている。海水自身は地球内部から火山活動などによって出てきた水に、地球表層の岩石の塩類が溶け込んだものである。その海水がプレートを水和、炭酸塩化して、海溝から沈み込むことによって地球内部に海水を戻していると提案する。これまでも岩石の希ガスの同位体存在度などに基づいて、海水がマントルに沈み込んでいると考える研究者はいた（Holland and Ballentine, 2006, Nature）が、海水起源流体とマントルウェッジの相互作用による水和と炭酸塩化を流体包有物に基づいて研究する例はなかった。

研究成果の概要（英文）：The supply of seawater by plate subduction can carbonate the mantle wedge along with hydration. In this study, hydration and carbonation due to interaction between seawater-origin fluids and mantle wedge are investigated by (1) chemical composition of fluid inclusions in carbonates in serpentinites and (2) high temperature and pressure experiments in which olivine or serpentinite and clinopyroxene react with water-carbon dioxide mixed fluids. The results show that (1) calcite in the muds of serpentinite seamounts in the Mariana Trench contains saline water similar to seawater. (2) At 180 MPa, talc, magnesite, and dolomite can be stable at 350-400 °C, while magnesite, quartz, and dolomite can be stable at 300 °C.

研究分野：固体地球科学

キーワード：海水 マントル 水岩石相互作用 流体包有物 高温高压実験 熱力学計算

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

海洋プレートの沈み込みにともない海水起源の塩水流体がマンツルカンラン岩を水和して島弧マグマを造り出す。研究代表者は島弧下マンツル捕獲岩中の塩水包有物を発見し、その塩水流体は海水を起源とすると提案したのが始まりである。塩水は、鉛などの微量成分元素を溶存し、島弧玄武岩の地球化学的特徴を説明するほか、真水と比べて炭酸塩イオンを大量に溶存することが知られている。その結果、海水起源流体仮説は、含水化したマンツルである蛇紋岩に付随する炭酸塩鉱物の存在をも合理的に説明できるかもしれない。つまり、プレートの沈み込みによる塩水の供給によって島弧マンツルは含水化とともに炭酸塩化するのではないだろうか。これまでも様々な岩石の全岩化学組成に基づいて、海水がマンツルに沈み込んでいると考える研究者はいた (Holland and Ballentine, 2006, Nature) が、海水起源流体とマンツルウェッジの相互作用による水和と炭酸塩化を流体包有物に基づいて研究する例はなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、海水起源流体とマンツルウェッジのカンラン岩の相互作用による化学反応を理解することである。本研究では、蛇紋岩に付随する炭酸塩鉱物の塩濃度を測定し、島弧下のマンツル捕獲岩や変成岩の流体包有物の塩濃度と比較する。さらに、高温高压条件でのマンツルカンラン岩や蛇紋岩の炭酸塩化実験を行い、海水起源流体とマンツルの相互作用を理解する。

## 3. 研究の方法

(1) 蛇紋岩試料にともなう炭酸塩鉱物中の流体包有物を観察し、ラマン分光法による流体包有物の化学種の同定、マイクロサーモメトリー法による塩濃度の推定、均質化温度の計測による流体密度の決定と温度圧力条件の推定を行う。

(2) 0.08 - 0.2GPa、200 - 400 の条件でマンツル岩 + シュウ酸 2 水和物 ± ディオプサイドを金パラジウムカプセルに封入し、水熱合成実験装置を用いて反応させた。実験終了時は圧力容器を電気炉から離し、圧縮空気で空冷した。その後、カプセルに穴を開け減った質量を流体中の CO<sub>2</sub> 量とし、その後オープンで乾燥させ流体中の H<sub>2</sub>O の量とした。研磨した実験生成物をラマン分光分析装置と電界放出型走査電子顕微鏡で観察した。

## 4. 研究成果

(1) IODP と ODP によって採取されたマリアナ前弧域の蛇紋岩海山の岩石試料を使用する (Ichiyama ほか, 2021, Lithos)。蛇紋岩の砂に混じって採取された炭酸塩 (カルサイト) 結晶には、水を主成分とする流体包有物が存在した。流体包有物のラマン分光法による化学種の同定、マイクロサーモメトリー法による塩濃度の推定と、均質化温度の計測を行った (図 1)。海溝からの距離と均質化温度の平均値の関係を図 2 に示す。

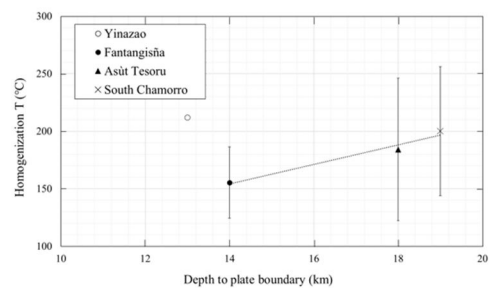
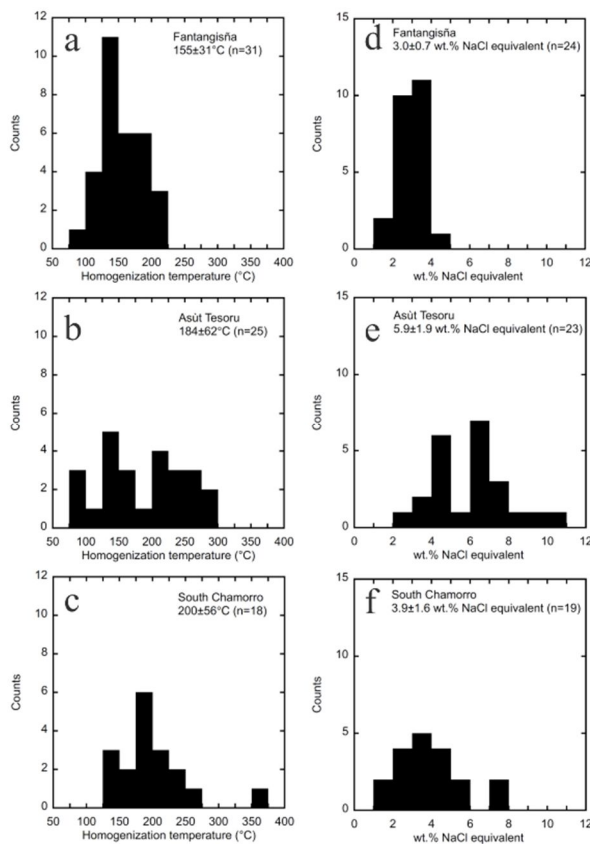


図2 均質化温度と海溝からの距離の関係。

図1 a, b, c, 流体包有物の均質化温度のヒストグラム。a から c に向かって、蛇紋岩海山は海溝から離れる位置にある。流体包有物に記録される塩濃度は、海溝からの距離にしたがって、一旦上昇して下降する。この原因は脱水分解反応の種類による可能性を考えている。

(2) 0.18G Pa 以下で 400、350、300 の実験を行った。高温ではタルク + マグネサイト + ドロマイトが安定で、300 の低温ではマグネサイト + 石英 + ディオプサイドが安定だと推定する。ただし、実験生成物には、出発物質 (カンラン石、アンティゴライト、ディオプサイド) が反応し残ることがあるほか、低温 300 において、マグネサイトとタルクに加えて、石英も共存する。高温でタルク + マグネサイト + ドロマイトが安定で、300 の低温でマグネサイト + 石英 + ディオプサイドが安定だとする推定は、Perple\_X を用いた熱力学計算や、MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 系での先行研究 [Johannes (1969) American Journal of Science, 267, 1083-1104] と温度条件以外は整合的である。ただし、本研究の実験では 300 でタルクと石英が共存し、タルクが非平衡であると考えないと矛盾する。350 でほとんど出現しない石英が 300 で出現することから、タルクが非平衡鉱物であろうと推定している。Johannes (1969) にも「すべての閉鎖系実験で準安定タルクが晶出する」と書かれている。

そのほか、カンラン石や蛇紋石の炭酸塩化反応は固体の体積膨張を伴うこと。蛇紋石の炭酸塩化は、脱水反応を伴うことを確認した。また、熱力学計算によると、カルサイトと蛇紋石の共存は水に対する二酸化炭素の割合が 10 モル% 以下でないと安定に存在しないことを確認した。

硝酸ナトリウムの融解温度を利用して温度較正実験を行なった。現時点では、実験温度 (熱電対温度) が実際の温度よりも低く出る可能性はないことは確認した (図3)。しかし、24 時間を超える長時間の実験において、熱電対温度が実際の温度よりも高く出る可能性は、まだ残っているので、温度較正実験を追加する必要がある。本研究による実験結果は、温度較正実験後に公表したい。非平衡なタルクの晶出は避けたいようであるので、本実験での温度条件を精確に決定できれば公表する価値はあると考える。

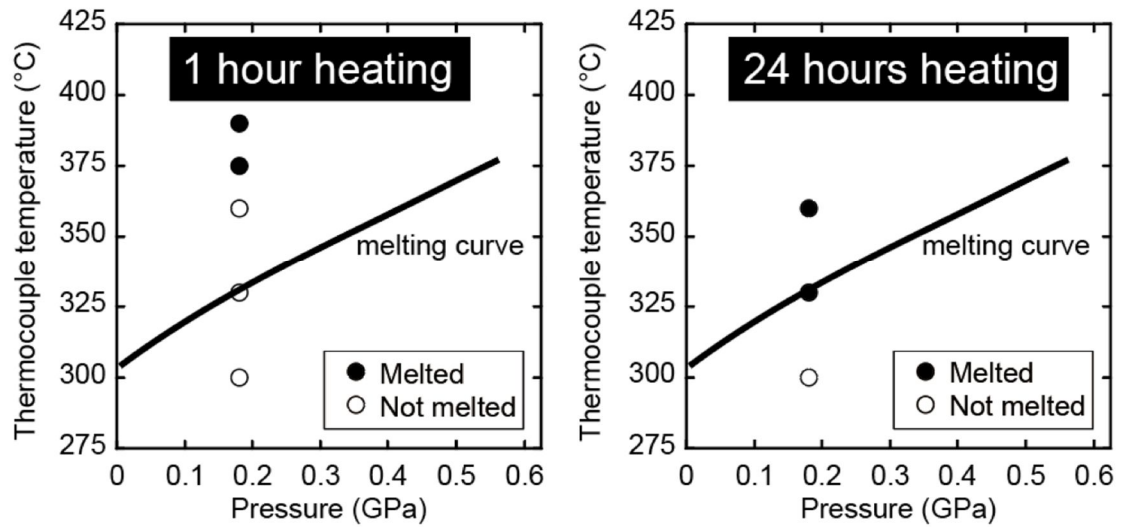


図3 硝酸ナトリウムの融解温度（実線）を圧力と熱電対温度の図に描いたもの。左は1時間の加熱後、右は24時間の加熱後、黒丸は融解を確認した条件で、白丸は融解が確認できなかった条件。加熱1時間では、実験室内の温度は熱電対温度に追いついていないことを示す。24時間ではほぼ実験室内の温度は熱電対温度に等しいと考える。これより長時間の実験を行うことによって、仮により低温度で融解すると、熱電対温度よりも実験室の温度は高温であった可能性を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsuchiyama Akira, Matsumoto Megumi, Matsuno Junya, Yasutake Masahiro, Nakamura Tomoki, Noguchi Takaaki, Miyake Akira, Uesugi Kentaro, Takeuchi Akihisa, Okumura Shota, Fujioka Yuri, Sun Mingqi, Takigawa Aki, Matsumoto Toru, Enju Satomi, Mitsukawa Itaru, Enokido Yuma, Kawamoto Tatsuhikoほか	4. 巻 -
2. 論文標題 Three-dimensional textures of Ryugu samples and their implications for the evolution of aqueous alteration in the Ryugu parent body	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geochimica et Cosmochimica Acta	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gca.2024.03.032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Taniuchi Hajime, Kawamoto Tatsuhiko, Nakatani Takayuki, Ishizuka Osamu, Suzuki Toshihiro, Tomiya Akihiko	4. 巻 179
2. 論文標題 Compositional evolution of slab-derived fluids during ascent: implications from trace-element partition between hydrous melts and Cl-free or Cl-rich aqueous fluids	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00410-024-02122-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Murase Iki, Kawamoto Tatsuhiko, Akizawa Norikatsu, Irie Takahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Rearing in strontium-enriched water induces vaterite otoliths in the Japanese rice fish, <i>Oryzias latipes</i>	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsos.230410	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Nakamura T. ほか	4. 巻 379
2. 論文標題 Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/science.abn8671	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Joachim-Mrosko Bastian, Kawamoto Tatsuhiko, Bureau H?l?ne	4. 巻 18
2. 論文標題 Experimental and Observational Constraints on Halogen Behavior at Depth	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Elements	6. 最初と最後の頁 35 ~ 40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/gselements.18.1.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Andrault Denis, Pison L., Morard G., Garbarino G., Mezouar M., Bouhifd M. A., Kawamoto T.	4. 巻 49
2. 論文標題 Comment on: Melting behavior of SiO <sub>2</sub> up to 120 GPa (Andrault et al. 2020), 6 pages	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physics and Chemistry of Minerals	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00269-021-01174-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Rose-Koga E.F., Bouvier A.-S., Gaetani G.A., Wallace P.J.ほか	4. 巻 570
2. 論文標題 Silicate melt inclusions in the new millennium: A review of recommended practices for preparation, analysis, and data presentation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 120145 ~ 120145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2021.120145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 栗原 圭佑、川本 竜彦、日原 彩、田阪 美樹、谷内 元
2. 発表標題 幌満かんらん岩体上部のかんらん岩とマフィック岩からなる対称性がよい露頭の鉱物化学組成に記録されるマンツルの再肥沃化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 犬飼 知宏、川本 竜彦、影田 樹哉、田阪 美樹、谷内 元、Koga Kenneth、Nicollet Christian、Rose-Koga Estelle、Debret Baptiste
2. 発表標題 流体包有物が記録する西アルプスピエモンテ帯に位置するかつての海洋コアコンプレックス中のオフィカーボネート形成流体の化学組成
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日原 彩、田阪 美樹、栗原 圭佑、川本 竜彦
2. 発表標題 北海道，幌満かんらん岩体の層状構造を明らかにするための構造岩石学的研究
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福島 奈桜、川本 竜彦、鈴木 陽己、岩田 拓真、中谷 貴之、鈴木 敏弘、東宮 昭彦、田中 明子
2. 発表標題 水・二酸化炭素混合流体によるマンテル岩の炭酸化反応に伴う体積増加は深部低周波微動とスロースリップを引き起こすか？
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuhiko Kawamoto, Tomohiro Inukai, Ryoya Ikuta
2. 発表標題 Pressure and temperature conditions of deep tremor in Nankai subduction zones and hydration and carbonation of the mantle wedge
3. 学会等名 17th Congress of Water-Rock Interaction (WRI17) and the 14th Applied Isotope Geochemistry (AIG14) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 犬飼 知宏、川本 竜彦、影田 樹哉、田阪 美樹、谷内 元、Kenneth Koga、Estelle Rose-Koga、Christian Nicollet、Baptiste Debret、Marguerite Godard
2. 発表標題 オマーンオフィオライトと西アルプスシュナイエ・ラゴネロオフィオライト蛇紋岩の多世代の炭酸塩脈中の流体包有物が記録する熱水流体
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 栗原 圭佑、川本 竜彦、日原 彩、田阪 美樹、谷内 元、栗谷 豪、松本 亜希子
2. 発表標題 幌満かんらん岩体上部のかんらん岩とマフィック岩からなる対称性がよい露頭の鉱物化学組成と全岩化学組成
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日原 彩、田阪 美樹、栗原 圭佑、川本 竜彦、谷内 元
2. 発表標題 北海道，幌満かんらん岩体の層状構造を明らかにするための構造岩石学的研究
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 武田 菜実、辻森 樹、川本 竜彦、板谷 徹丸
2. 発表標題 ドラマイラ岩体南部、超高压白色片岩中の藍晶石が包有するコース石の形態と残留応力について
3. 学会等名 日本鉱物科学会2023年年会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Tatsuhiko Kawamoto, Tomohiro Inukai, Ryoya Ikuta
2. 発表標題 Hydration and carbonation of the mantle wedge in pressure and temperature conditions of deep tremor in Nankai subduction zones
3. 学会等名 Cargese 2023 School on Subduction Zone Processes (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 犬飼知宏, 川本竜彦, 大井修吾, Godard Marguerite
2. 発表標題 オマーンオフィオライト・ワジディマ蛇紋岩炭酸塩脈中の流体包有物が記録する海洋底と大陸の変成流体
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島奈桜, 川本竜彦, 鈴木陽己, 岩田拓真
2. 発表標題 400 以下で使用するHPテクノス社製水熱合成装置の温度校正とマントル岩と水・二酸化炭素混合流体の反応
3. 学会等名 日本高圧力学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Kawamoto
2. 発表標題 Chemical Composition of Subduction-Zone Fluids: Carbon-Bearing Saline Fluids in Plate Boundaries and Mantle Wedge
3. 学会等名 International joint workshop on Slow-to-Fast earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 生田領野, 小林ゆい, 川本竜彦
2. 発表標題 震源の空間分布から見る南海トラフ深部微動の存在条件
3. 学会等名 日本地震学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 犬飼 知宏、川本 竜彦、Godard Marguerite
2. 発表標題 オマーンオフィオライト・ワジディマ蛇紋岩の炭酸塩中の流体包有物：海洋底と大陸での変成作用
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本 千早、釘宮 健人、石戸 慎也、川本 竜彦、市山 祐司
2. 発表標題 マリアナ前弧域の蛇紋岩泥海山岩石中のカルサイト中の流体包有物
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	市山 祐司  (Ichiyama Yuji)  (90625469)	千葉大学・大学院理学研究院・准教授    (12501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	オルレアン大学	クレルモン・オーベルニュ大学	パリ大学	
イタリア	ピサ大学			