

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04018

研究課題名(和文) 多相固体包有物を用いたプレート収斂域深部流体の組成復元

研究課題名(英文) Fluid compositions at deep parts of the convergent margins inferred from fossilized melts

研究代表者

清水 以知子 (Shimizu, Ichiko)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：40211966

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではプレート収束域に存在する流体・メルトに注目し、超高压変成岩に含まれる多相固体包有物の電子顕微鏡観察・X線CT観察を行なうとともに、高温高压下での均質化実験を行ない、カリウムに富む花崗岩質メルト組成の復元に成功した。沈み込み帯におけるH<sub>2</sub>O流体が地震発生過程や深部レオロジーに与える影響にも注目し、含水マントル岩(蛇紋岩)高温高压変形実験を行ない、脱水反応と断層形成が互いに促進しあう正のフィードバック効果があることを明らかにした。また、K-Ar年代測定法やラマン炭質物温度計をもちいて、深部流体の発生・移動場となる高压変成帯の構造やテクトニクスを明らかにする研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、沈み込み帯の深部にあって、これまでその実像がよく明らかにされてこなかった結晶粒子間の流体やメルトについて、実際に岩石がおかれた高温高压条件を実験室内で再現した実験を行ない、地下100 km以深に沈み込んだ地殻物質中に溶質に富んだ超臨界水が存在するという仮説や、含水マントル岩(蛇紋岩)の脱水反応が中深発地震の引き金になるという仮説を裏付ける結果を得ることができた。本研究は基礎研究として、日本列島のような沈み込み帯における火山の多様性や地震発生メカニズムの解明に近づくものであり、広い意味で自然災害の科学にも貢献する。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the roles of fluids and melts in the deep parts of the plate convergent margins, we made detailed studies on multiphase solid inclusions (MSIs) in ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic rocks and employed homogenization experiments of MSIs at the pressures and temperatures of their genesis. Glass inclusions of the potassium-rich granitic melt composition were successfully generated in the recovered sample. High-pressure and temperature deformation experiments of serpentinite showed drastic weakening and dehydration of serpentine at the fault shear zones. These results suggest close relationships between dehydration reaction and intermediate-depth earthquakes in the slab mantle. The peak metamorphic ages and temperatures of high-pressure metamorphic rocks were investigated and tectonic environments of fluid migration in subduction zones were discussed.

研究分野：岩石レオロジー、構造地質学

キーワード：深部流体 メルト 高温高压実験 多相固体包有物 沈み込み帯 マントル 脱水反応 高压変成帯

## 1. 研究開始当初の背景

プレート収斂域である沈み込み帯や大陸衝突帯の深部では、沈み込むプレート上部を構成する泥質堆積岩からの水の放出や、含水マントル岩(蛇紋岩)の沈み込みにもなう脱水反応により水流体が供給されていると考えられる。地震波の低速度異常や高電気伝導度領域の存在など、多くの地球物理学的な観測事実も、マントルウェッジ内の流体やメルトが存在することを示唆している。こうした流体は、日本列島のようなプレート沈み込み帯で生起する地震や島弧の火山活動においても重要な役割を果たしていると考えられている。岩石が地表に露われた岩石では鉱物粒界に存在した流体の多くが失われるため、その実態は明らかではなかった。一方、世界の主要な造山帯には、約 100 - 150 km 深度に相当する超高压変成岩が露出しており、そこには様々な温度で生成された深部流体やメルトが鉱物結晶中の多相固体包有物として保存されていることが報告されている。その中には、高い電気伝導度を示す塩水や、炭酸塩マグマに近い組成を示す包有物も見いだされている。しかし、これらの多相包有物はごく微小(通常 10  $\mu\text{m}$  以下)であるため分析が難しく、プレート収束帯深部のどのような温度圧力条件で、どのような流体が生成し、それらがどのように移動し、マグマの分化過程や地震発生過程に關与するかについては、未解明の課題が多かった。

## 2. 研究の目的

本研究では沈み込み帯深部に存在する流体・メルトに注目し、超高压変成岩に含まれる多相固体包有物の観察・分析を行うとともに、プレート収束域深部条件を模した高温高压下実験をおこない、流体の生成過程やプレート収束域におけるマグマ生成における化学的多様性を明らかにし、流体とスラブ内地震の発生過程の關係、 $\text{H}_2\text{O}$  流体が海洋地殻を構成する岩石の力学的挙動におよぼす影響を定量的に解明するとともに、流体の移動場となる沈み込み帯深部のテクトニックな環境を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### A. 均質化実験による多相固体包有物からの深部流体組成復元

超高压変成岩中の多相固体包有物は微小で分析が難しいことに加え、岩石薄片の 2 次元切断面での観察では構成鉱物の比率にバラツキが大きく、切断の影響と、もとの流体組成の多様性を区別することが難しかった。そこで多相固体包有物に保存されている深部流体の化学組成の情報を、室内実験により高温高压下の流体を多相固体包有物に保存されている深部流体の化学組成の情報を復元を試みた。岩石試料は、これまで蒐集してきた世界各地の超高压変成岩の中から選定した。実験の温度圧力条件を決めるために、ザクロ石 斜方輝石などの地質温度圧力計で母岩に含まれる高压鉱物の形成条件を制約し、マイクロ CT スキャナーを用いて多相固体包有物の 3 次元構造を観察したのち、ピストンシリンダー型高压発生装置をもちいて均質化実験を行なった。均質化実験は、多相固体包有物を含んだザクロ石やクロム鉄鉱を分離して集め、金もしくは白金カプセルに封入し、目的の温度で一定時間保持した後急冷することで、包有物を均質なガラスに変化させる手法である。実験回収試料は、走査型電子顕微鏡等で観察・分析した。

### B. 沈み込み帯の流体と変形の相互作用

沈み込みスラブや楔形マントルを構成する含水マントル岩(蛇紋岩)や、海洋地殻上面を構成する含水石英質細粒堆積岩の破壊・流動変形におよぼす  $\text{H}_2\text{O}$  流体の役割を明らかにするため、

高温高压変形実験を行う。実験には、マンツルの高压条件を達成可能な固体圧試験機（図1）を用い、封圧最大 1.7 GPa、軸圧最大 3.5 GPa、温度最大 1000 °C、の条件で、歪速度を  $10^{-4}$  /sec から  $10^{-6}$  /sec の範囲に変えて力学応答を見るとともに、回収試料を偏光顕微鏡、走査型電子顕微鏡、およびラマン分光顕微鏡で観察し、変形組織や反応・再結晶組織の特徴を調べる。

### C. 高压変成帯における流体移動過程

脱水流体が沈み込みプレート境界を上昇する経路となる高压変成帯について、野外地質調査と岩石試料採取を行い、K-Ar 法による年代測定や、炭質物ラマン分光法による最高被熱温度推定をもちいてテクトニックな環境を明らかにするとともに、鉱物脈に残された流体移動の過程を調べる。

## 4. 研究成果

### A. 多相固体包有物からの深部流体組成復元

チェコ共和国(ロンポドリピネム採石場)から産するザクロ石輝石岩のザクロ石中の多相固体包有物を走査型電子顕微鏡で観察した。試料の包有物の長径は 5–200 $\mu$ m であり、電子顕微鏡において直線的なザクロ石の自形面で囲まれていること、ミルメカイト様の組織が観察されることから、マグマから結晶化したことが示唆される。また珪長質マグマの急冷相であることが示唆される均質相も確認している。X線CT法による多相固体包有物の3次元組織観察も試みたが、多くの包有物(～数十ミクロン径)では分解能の限界により内部組織の明瞭な像が得られなかった。

多相固体包有物の形成過程を明らかにするためにピストンシリンダー装置をもちいた高温高压実験を3回実施した。ロンポドリピネム岩体のザクロ石輝石岩に見られる多相包有物の均質化実験は、含水条件を変えて2回行い、いずれの実験も試料を金カプセルに封入して、ザクロ石かんらん岩の温度圧力条件(3 GPa, 1000°C)で24時間保持した。無水条件ではザクロ石中の多相包有物がほぼ均質化され、約3~5 wt.%の K<sub>2</sub>O を含んだ花崗岩質メルトの急冷ガラスとなっていた。一方、ギブサイトを混ぜて含水条件にした実験ではザクロ石が分解してしまったため、均質化実験としては失敗した。プレシヨピチェかんらん岩のクロム鉄鉱中に見られる炭酸塩マグマの復元を目的とした実験では、クロム鉄鉱とカンラン石の混合物を白金カプセルに入れて2.5 GPa, 1300°Cで約30分間保持した。実験生成物を観察したところ、クロム鉄鉱の縁辺部が分解しているものの、中心部は残存していた。これまで観察した包有物はほとんど固体結晶の集合体となっており(図1)、ひきつづきメルト包有物を探索中である。

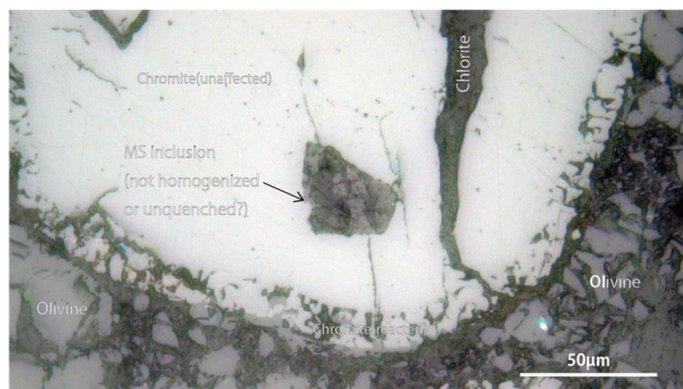


図1：プレシヨピチェかんらん岩の高温高压実験後のクロム鉄鉱の組織。

## B. 沈み込み帯の流体と変形の相互作用

沈み込み帯の H<sub>2</sub>O 流体の生成過程となる含水マントル岩（蛇紋岩）の脱水反応に注目し、固体圧式変形試験機による長崎変成帯に産するアンチゴライト蛇紋岩の高温高压変形実験を、封圧 1.7 GPa、温度 700 °C までの 6 通りの温度圧力条件で計 8 回行なうとともに、実験試料を回収し、反応生成物（フォルステライト + エンスタタイト）を、走査型電子顕微鏡やラマン分光顕微鏡で同定した。その結果、脱水反応が断層形成により大きく促進されるとともに、降伏応力の低下が脱水反応によって促進されるという正のフィードバック効果があることを見出した。後方電子散乱像（EBSD）による結晶方位解析も行ったが明瞭な像が得られず、反応生成物が極細粒であることが示唆された（奥出・清水ほか, 2022, JpGU）。今回の実験結果は、二重深発面における地震発生と蛇紋岩の脱水反応が密接にかかわることを示唆するものである。

海洋地殻の最上部を構成する堆積岩層においては、石英が水軟化により低温で塑性変形を起こし、流動強度を支配すると考えられる。そこで、H<sub>2</sub>O に富む石英の細粒多結晶体である瑪瑙をもちいて、高温高压下の変形実験を行った。Griggs 試験機などの固体圧試験機では、固体圧媒体による内部摩擦により差応力測定に大きな誤差が生じることが問題となっていた。そこで、上下にロードセルを配して内部摩擦を補正できる熊澤式試験機を用いて校正試験を行い、精密な応力計測を行う方法を確立した（Shimizu & Michibayashi, 2022）。さらに瑪瑙を出発物質として、封圧 1.7 GPa で温度・差応力・歪速度を様々に変えて 7 種類の定歪速度試験を行った（中小路・清水, 2023, 変成岩などシンポジウム）。実験の結果は石英の転位クリープ流動則に調和的だが、長時間試験を行った実験では流動応力が高く、試料からの脱水による硬化の可能性が示唆された。

## C. 高压変成帯における流体移動過程

深部流体の発生・移動場となる高压変成帯のテクトニクスを明らかにするため、関東山地の秩父-三波川帯において、泥質岩などの K-Ar 年代決定やイライト結晶度を調べるとともに、四国地域の既存データと比較し、三波川変成帯の沈み込みと温度履歴を明らかにするとともにナップモデルを提唱した（Lu et al., 2022）。北海道幌加内地域における神居古潭変成帯の青色片岩の形成温度を炭質物ラマン温度計で検討した結果、最高変成温度として 280 - 300 °C を得た（苗村ほか, 2022, JAMS）。このほか、モンゴルザフハン地域で見いだした高压変成岩に関する知見を論文として出版した（Naemura et al., 2020）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Shimizu Ichiko, Michibayashi Katsuyoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Steady-State Microstructures of Quartz Revisited: Evaluation of Stress States in Deformation Experiments Using a Solid-Medium Apparatus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 329 ~ 329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min12030329	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 Matsuzawa Toru, Shimizu Ichiko, Nishimura Takuya, Spiers Christopher J., Nakajima Junichi, Kawamoto Tatsuhiko	4. 巻 73
2. 論文標題 Special issue "Crustal dynamics: toward integrated view of island arc seismogenesis"	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	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) 10.1186/s40623-020-01337-5	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 Naemura Kosuke, Erdenejargal Choindonjamts, JavkhanTerbishinkhen O., Kato Takenori, Hirajima Takao	4. 巻 115
2. 論文標題 Geochronology and tectonic implications of the Urgamal eclogite, Western Mongolia	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 357 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.191126	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 Fukuda, J., Raimbourg, H., Shimizu, I., Neufeld, K., Stunitz, H.	4. 巻 10
2. 論文標題 Experimental grain growth of quartz aggregates under wet conditions and its application to deformation in nature	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Solid Earth	6. 最初と最後の頁 621-636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/se-10-621-2019	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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 奥出桜子・清水以知子
2. 発表標題 スラブマントル条件下におけるアンチゴライト蛇紋岩の脱水変形実験
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥出桜子・清水以知子・緒方 夢顕
2. 発表標題 スラブマントル条件下におけるアンチゴライト蛇紋岩の変形促進脱水反応
3. 学会等名 日本地質学会名古屋大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水以知子
2. 発表標題 沈み込んだ御荷鉾海山の変成年代と秩父-三波川帯の構造関係
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 苗村康輔・馬場康生
2. 発表標題 岩手県奥州市に露出する母体変成岩の変成温度見積もり
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥出桜子・清水以知子
2. 発表標題 固体圧式試験機による長崎蛇紋岩の脱水変形実験
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ichiko Shimizu
2. 発表標題 Monitoring internal friction in the solid-medium assembly
3. 学会等名 Workshop on experimental solid medium rock deformation (Orlean, France) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田 匡将・清水 以知子
2. 発表標題 三波川変成帯四国地域の石英の微細構造と misorientation 解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naemura K.osuke, Choindonjams Erdenejargal, Kato Takenori, Otgonkhuu Javkhlan and Michibayashi Katsuyoshi
2. 発表標題 Petrochemistry and age determination of the newly discovered eclogite in the Western Mongolia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naemura Kosuke and Otgonkhuu Javkhlan
2. 発表標題 Anticlockwise pressure-temperature path for the Zavkhan eclogite in the NW Mongolia
3. 学会等名 日本鉱物科学会2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩谷 輝・道林克禎・瀨瀬佑衣・平内健一・苗村康輔
2. 発表標題 静岡県西部三波川帯 ” 渋川超苦鉄質岩 ” の構造岩石学的研究
3. 学会等名 日本地質学会中部支部年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩谷輝・道林克禎・瀨瀬佑衣・平内健一・苗村康輔
2. 発表標題 静岡県西部三波川帯「渋川超苦鉄質岩」の構造岩石学的特徴とその起源
3. 学会等名 日本地質学会年会
4. 発表年 2019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	苗村 康輔  (Naemura Kosuke)  (50725299)	岩手大学・教育学部・准教授   (11201)	

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
---------	---------