

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2013～2016

課題番号：25257208

研究課題名(和文) 深部流体活動が超高压変成岩の形成に果たす役割の解明

研究課題名(英文) The role of deep fluid enhancing the exhumation of UHP rocks.

研究代表者

平島 崇男 (Hirajima, Takao)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：90181156

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、世界で最も冷たい超高压変成帯であるキルギス、最も温かい超高压変成帯であるチェコ、その中間型である中国東部に分布する超高压変成岩を対象とし、地下60-100kmでの流体活動の実態を明らかにし、超高压変成岩の上昇駆動に關与する深部流体の役割の解明を目指した。

超高压時の温度が1000Cを超えるチェコの研究では、超高压変成岩が上昇中に減圧部分溶融し浮力を獲得したことを見出した。超高压時の温度が800C以下のキルギスや中国では、超高压時でもローソン石・クロリトイド・Ca-Na角閃石等の含水珪酸塩が安定であり、ローソン石などは減圧時に脱水分解し周囲に水を供給していたことを見出した。

研究成果の概要(英文)：To elucidate the role of deep fluids whether they gave the driving force to ultra-high pressure metamorphic (UHPM) rocks from the mantle depth to the lower crustal level, the remnant of deep fluid activities and stability relationship of hydrous minerals at UHPM stage were investigated. In the UHPM terrain with the highest peak temperature (>1,000°C), e.g., the Bohemian Massif in Czech, the partial melting enhanced by the decompression was taken place in a UHPM eclogite, which can give the further buoyancy force to the exhumed UHPM unit. In the UHPM terrains with the moderate to lower peak temperature (<800°C), such as in Eastern China and Kyrgyzstan, hydrous minerals, such as lawsonite, chloritoid, Ca-Na amphibole and white mica were stable at UHPM stage. We detected the concrete evidence that lawsonite was decomposed during the early exhumation stage and supply significant amount of H₂O in the subduction channel in Kyrgyz sample and caused the decrease of total density of UHPM unit.

研究分野：変成岩岩石学

キーワード：超高压変成岩 地下深部流体 流体包有物 ボヘミア山塊 Makbal complex 大別蘇魯変成帯 ローソン石 Ca-Na 角閃石

1. 研究開始当初の背景

石英や石墨の高圧相であるコース石やダイヤモンドの出現によって特徴づけられる超高压変成岩は、1984年に世界で初めて発見された以降、現在までに世界の20数箇所から見出されるようになった。それらの地域の大半は、過去、並びに、現在の大陸衝突帯であり、超高压変成岩の形成は大陸衝突過程において一般的に起こっている事象として捉えることができるようになった。

超高压変成岩が世界各地から見出される様になるとともに、研究の先進地域では超高压変成岩が産出する空間的広がり、それらの形成条件や年代などのデータが集積するに伴って、超高压変成岩の研究も、次のステージに入った。すなわち、地下深部で密度が大きくなった超高压変成岩をどのようにして地表に回帰させるメカニズムの解析が大きな注目を集めるようになった。

その問題を解くために多数のモデルが提案された。例えば、超高压変成岩が延長1000kmに及ぶ広範な範囲に出現する地域(e.g., 中国東部の大別山-蘇魯変成帯やノルウェー西海岸片麻岩地域)では、変成帯の主体を花崗岩起源の片麻岩類が占めている。大陸衝突の際に沈み込んだ大陸地殻を先導する海洋プレートの破断によって、沈む込むための引張力が失われた際に、マントル物資や玄武岩起源の超高压エクロジイトより、花崗岩質片麻岩類の密度が小さいので、浮力として作用するという考え方が提唱された(e.g., Ernst, 1997)。その一方で、超高压変成岩が1kmにも満たない薄いナップ中のみ認められ、その上下をより低変成度の変成岩ナップに挟まれている場合は(e.g., 西アルプスの超高压変成岩)、新しく沈み込んできた物質の底付け作用に伴って発生した重力不安定により、応力環境が引張場に変化した際の上昇モデルが援用され(e.g., Platt, 1988)、より詳細なサブダクションチャンネル周辺での固体物質の循環モデルが提案されるようになった(e.g., Gerya, 2004)。

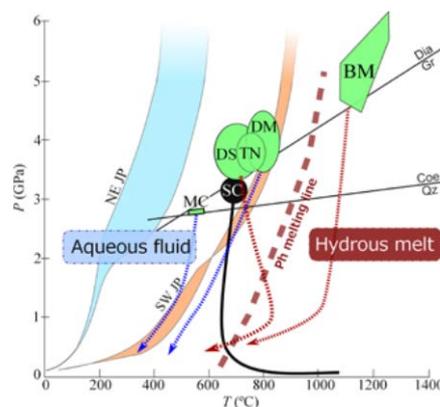
上記のように、密度の大きな超高压岩を上昇させるために、超高压変成岩帯の

密度を減少させる別のメカニズムとして、Vrana (1989)や Touret (2001)は中部ヨーロッパでの超高压変成帯での研究を下地として、超高压変成作用に伴うメルトや深部流体が超高压変成岩帯の密度を減少させ、上昇駆動力を生み出しているとの考えを提唱していた。

2. 研究の目的

本研究では、地下深部流体が超高压変成岩の構成鉱物を形成する過程と密度を下げる可能性について、天然の資料を用いた研究を開始した。

現在、世界各地から見出されている超高压変成岩の最高形成条件は550°C深度70km (at 2.5GPa; Makbal Complex, キルギス)~1100°C深度150km (at 5.0GPa; Nove



Dvory, Bohemia 山塊、チェコ)までの多様性を有する。この様な変成条件を被った岩石に含まれる流体活動を研究する際には、超高压時の流体に対しては、メルト(hydrous melt)とH₂O流体(aqueous fluid)が互いに混和してしまう超臨界条件(臨界終端点:前頁図のSC)の影響を、また、地下深部から地表に上昇する際には、減圧による部分熔融メルトの影響を考慮する必要がある(上図)。

本研究では、部分熔融メルトの影響を受けることなく超臨界流体の情報の獲得が期待できるキルギスのMakbal Complex(上図のMC)と、部分熔融メルトの影響を受けていることが予想される2地域としてチェコのBohemia 山塊(上図のBM)とノルウェー北部のトロムセ・ナップ(上図のTN)を重点対象として、日本列島の資料では得られないプレート収斂域のより高深度での深部流体の化学組成特性や活動時期を明らかにし、超高压変

成岩の上昇駆動力(Vrana, 1989; Touret, 2001)としての深部流体の役割の解明を目指すことにした。

3. 研究の方法

Makbal Complex では、最高変成時に多量のH₂O を含むローソン石が安定であるとされていた。(e.g., Tagiri et al., 2010)。

本研究では、手持ちの資料で流体活動時期を特定するための研究を開始し、Orozbaev et al. (2015)では、岩体の減圧上昇時の地下50km 付近でローソン石が脱水分解したとする新しい考えを提案した。その際の脱水流体を含む資料の採集のために、2016年夏にMakbal Complex での野外調査を実施し新たな試料を採集した。

室内実験では、試料にトラップされた流体包有物の獲得時期の確定を詳細な組織観察と加熱冷却実験で明らかにするとともに、後述するクライオFIBを用いて流体包有物の含有主要元素を分析する手法を開発した。

世界の多くの超高压変成岩は臨界終端点以上の温度圧力条件で形成された後、断熱的に減圧しており(前頁図)、超臨界流体・高压下のメルト(hydrous melt)・低压下の部分熔融メルトの識別が必要である。この目的のためにはBohemia 山塊の超高压変成岩が適している。Bohemia 山塊の研究は2002-2004年度に実施した「科研費・基盤研究B海外調査 14403013, チェコ・ボヘミア岩体の地質調査」で採集した試料から、hydrous melt の痕跡を見出しており(宮崎ほか, 2012)、2014年3月に、当該試料採集地周辺での精密地質調査と試料採集を実施し、それらの資料を構成する主要鉱物の微量元素濃度をICP-MS分析で決定した。

変成作用ピーク時でのH₂O 流体と超臨界流体の探索は、その最高変成条件が泥質岩の臨界終端点に近い北部ノルウェーのトロムセ・ナップの超高压変成岩(前頁図TN; 770°C, 3.5GPa; Janak et al., 2013)を主な研究対象とした。これらの研究で得られる深部流体の情報を母岩の温度圧力史に照合することにより、より温かい沈み込み場での流体活動の実態を解明することを目指した。

試料採集のための野外調査を Janak 博士等と、2014年6月26日~7月9日(と2015年6月20日~30日)で実施し、研究資料を採集し、室内実験を開始した。

その一方で Janak 博士等は 2015年4月2日~12日、2016年11月15日~26日に来日し、京都大学に置いてマイクロダイヤモンドや流体包有物の Raman 分光測定を行った。

中国の超高压変成岩については、手持ちの資料を用いて、超高压時に安定であった含水鉱物や流体包有物や多相固体包有物探索のための室内実験を行った。

また、分析可能な流体包有物・多相固体包有物・火山岩様組織包有物が見いだせた場合、主要・微量成分分析を実施した。さらに、後述する様に、X線CT、X線トモグラフィー、クライオFIBなどを用いて、流体包有物に関する新たな研究手法を開発・実践した。

4. 研究成果

本研究課題は H25 (2013) 年 10 月に採択されたため、積雪等の理由で、当該年度は、H26(2014)年 3 月にチェコの Bohemia 山塊での現地調査を実施した。この調査では、研究分担者である中村大輔たち 4 名が南ボヘミアでの野外調査に参画した。地球温暖化の影響で当該期間に積雪がなく、しかも下草が繁茂する前であったので、超高压エクロジヤイトやマントルかんらん岩と周囲の岩相との関係が詳細に観察できた。

H26年6-7月に、スウェーデン中部の Seve Nappe 地域からノルウェーの西海岸片麻岩地域において超高压変成岩とグラニュライトの資料採集を行った。

室内実験として、京都大学では、手持ちの超高压変成岩類についてラマン分光実験や EPMA 分析を実施した。

その結果、ノルウェー Tromso Nappe のザクロ石黒雲母片麻岩からマイクロダイヤモンド(Janák et al., 2013)の再確認と Seve Nappe 試料中のマイクロダイヤモンド同定に成功し、その意義を国際誌に報告した(Majka et al., 2014)。

キルギス地域の超高压変成岩を用いた深部流体の研究では、地下 100km 深度で

安定であったローソン石が、岩体が地下50–60km 深度まで上昇した際に、減圧分解し多量の H₂O 流体を系に放出する組織を見出した。この知見は非常に冷たい沈み込み場、例えば、現在の東北日本の地下に沈み込む太平洋プレートのような環境下では、地下深部から上昇する超高压変成岩が深部流体の供給源であることを示唆する。これは沈み込み帯ではこれまで顧みられなかった流体の新しい供給源であり、Lithos 誌に投稿・受理され公開した(Orozbaev et al., 2015)。

H27年の研究では、温かい(>850°C)超高压変成帯であるチェコ・ボヘミア山塊の試料において、超高压エクロジイトから見出した部分熔融部と基質に含まれるざくろ石と単斜輝石の微量成分組成を検討し、部分熔融メルトは母岩のエクロジイトそのものが供給源であるとの結論に達した(Miyazaki et al., 2016)。このことは、最高変成温度が1000°Cを超えるような温かい超高压変成帯においては、減圧時の初期に生じる部分熔融メルトが岩体の密度が減少させ、岩体の上昇速度を加速させる効果があることが示唆され、Vrana (1989)や Touret (2001)の先駆的提案を支持する結果を得た。

冷たい超高压変成帯の低温部(<300°C)の模擬物質として、ローソン石を産する日本の高压変成帯で研究を実施した。九州・黒瀬川帯の研究では、広域的な鉱物組み合わせの変化から、冷たい沈み込み帯の地下30km 付近までは、緑泥石を消費する吸水反応によってローソン石青色片岩が形成されたこと、また、上記のローソン石青色片岩は全岩の約5重量%に匹敵する量のH₂Oを含水鉱物として保持しており、マントル深部への水の運び手であることを天然の岩石を用いて明らかにした(Sato et al., 2016)。

H28年度は、温かい超高压変成帯であるチェコ・ボヘミア山塊において超高压エクロジイトを胚胎する高压グラニュライトの形成履歴の解析を行った。その結果、高压グラニュライトは中温条件下で最高圧力を経験した後、圧力低下時に最高温度を記録するという、これまで当該地域で知られていない形成履歴が復元で

きた(Usuki et al., 2017)。当該地域では、既に超高压エクロジイトが減圧時に部分熔融することを見出しており(Miyazaki et al., 2016)、当該地域の地下では、100km以深で形成された超高压変成岩類と地下30–60kmで形成された高压グラニュライトの混合過程を考える上で、新たな制約条件を与えた。

冷たい(<650°C)超高压変成帯であるキルギス・マクバル岩体において、平成28年8月に現地調査を実施した。この調査で採集したザクロ石泥質変成岩中の流体包有物に対して、クライオFIBとEDX検出器を組み合わせて、流体包有物の低温状態でのラマン分光測定と冷却ステージ上で凍結させた流体包有物の主要元素の定性分析を試み、この流体包有物は世界的にも稀なCa,Na,K,Clに富んだ高塩濃度H₂O流体であることを突き止めた。この成果は、Yoshida et al., (2018)とし

Geochemical Journal誌で公表した。その結果、天然の流体包有物は予想以上に多元素系であること実例で示し、シンプルな2元素系の相図に基づいた安易な流体組成の推定には大きな誤差が生じることに警鐘を鳴らした。

中国の蘇魯超高压変成帯の研究では、超高压時にCa-Na角閃石が安定であることを示し、超高压時の流体の存在を明らかにした。その成果をJMPS誌に投稿し、受理され現在、Yamazaki et al., として印刷中である。

上記の結果をまとめると、超高压時の変成温度が800°C以下の変成(キルギス・中国)では、最高圧力状況下でも多様な含水鉱物が安定に存在しており、それらの一部は減圧時に減圧・脱水分解し、岩石の密度を減少させ、さらなる上昇の駆動力となることが判明した。

超高压時の変成温度が800°C以上の変成帯においては、超高压変成岩が等温減圧する過程で岩石自身が部分熔融し、浮力を獲得していることが判明した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 4/18 件)

- Orozbaev, R., Hirajima, T., Bakirov, A., Takasu, A., Maki, K., Yoshida, K., Sakiev, K., Bakirov, A., Hirata, T., Tagiri, M., Togonbaeva, A.,** (2015), Trace element characteristics of clinzoisite pseudomorphs after lawsonite in talc-garnet-chloritoid schists from the Makbal UHP Complex, northern Kyrgyz Tian-Shan. *Lithos*, 226, 98-115. 10.1016/j.lithos.2014.10.008
- MIYAZAKI, T., NAKAMURA, D., TAMURA, A., SVOJTKA, M., ARAI, S., HIRAJIMA, T.** (2016) Evidence for partial melting of eclogite from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif, Czech Republic. *JMPS*, 111, 405-419.10.2465/jmps.151029c
- Usuki, T., Iizuka, Y., Hirajima, T., Svojtka, M., Lee, H.Y., Jahn, B.M.** (2017). Significance of Zr-in-rutile thermometry for deducing the decompression *P-T* path of a garnet-clinopyroxene granulite in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. *Journal of Petrology*, 58,1173-1198.Doi.org/10.1093/petrology/egx050,
- Yoshida, K., Orozbaev, R., Hirajima, T., Miyake, A., Tsuchiyama, A., Bakirov, A., Takasu, A., and Sakiev, K.** (2018) Micro-excavation and direct chemical analysis of individual fluid inclusion by cryo-FIB-SEM-EDS: application to the UHP talc-garnet-chloritoid schist from the Makbal Metamorphic Complex, Kyrgyz Tian-Shan. *Geochemical Journal*, 52, 59-67, doi:10.2343/geochemj.2.0502

〔学会発表〕 (計 12/ 45 件)

- Hirajima, T. Sato, E. Y.Fujimoto and K. Kamimura** (2015) Lawsonite-blueschist in the Hakoishi sub-unit, Kurosegawa belt, Kyushu, Japan, as a remnant of late Paleozoic Mariana type subduction, part 1: Geology and Tectonics. International eclogite conference. 2015 年 1 月 28 日 ~ 2 月 8 日 Dominica Republic.
- Yoshida, K., Hirajima, T., Miyake, A., Tsuchiyama, A., Ohi, S.,** (2015)

Three-dimensional morphological observation of the small fluid inclusion using FIB-XCT technique. International eclogite conference 2015 年 1 月 28 日 ~ 2 月 8 日 Dominica Republic.

- Yasumoto, A., Hirajima, T., Nakamura, D., & Svojtka, M.,** (2017) Origin of mm-scale layering structure in an ultra-high pressure eclogite from Nove Dvory, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. The 12th International Eclogite Conference in Are, Sweden
- Monta, Y., Hirajima, T., Kato, R., Sakata, S., Obayashi, O., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Hirata, T., Majka, J., M. Janak.** (2017) Zircon geochronology of a paragneiss from the TromsøNappe in the Scandinavian Caledonides. The 12th International Eclogite Conference in Are, Sweden
- Yoshida, K., Orozbaev, R., Hirajima, T., Miyake, A., Tsuchiyama, A., Bakirov, A., Takasu, A., and Sakiev, K.** (2017) Direct chemical analysis of individual fluid inclusion by cryo-FIB-SEM-EDS: an application to the UHP Tlc-Grt-Cld schist from the Makbal Complex, Kyrgyz. The 12th International Eclogite Conference in Are, Sweden
- Monta, Y., Hirajima, T., Kato, R., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, Sakata, T., Sakata, Janak, M.** (2017) Petrology and zircon geochronology of gneiss the TromsøNappe, the Scandinavian Caledonides. EGU, Vienna (国際学会)
- Sumino, H., Burgess, R., Kouketsu, Y., Mizukami, T., Endo, S., Yoshida, K., Hirajima, T., Wallis, S., and Ballentine, C.J.,** (2017) Water subduction processes constrained by halogens and noble gases in the Sanbagawa metamorphic rocks. Goldschmidt 2017 (国際学会)
- 山根創、中村大輔、平島崇男 (2017)中国東部蘇魯地域・榮成地区に産するエクロジヤイト. 日本鉱物科学会年会、松山
- 白杵直・飯塚義之・平島崇男・スフオイッカ マルチン・江博明 (2017)

Significance of Zr-in-rutile thermometry for deducing the decompression P-T path of a garnet-clinopyroxene granulite in the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif. 日本惑星科学会連合大会、幕張

吉田健太・Orozbaev Rustam・平島崇男・三宅亮・土山明・Bakirov Apas・高須晃・Sakiev Kadyrbe . (2017) Cryo-FIB-SEM-EDS を用いた流体包有物の個別化学組成分析：キルギス共和国マクバル岩体の超高压変成岩の例. 日本地質学会第 124 年学術大会 松山
藤瀬武尊・中村大輔・平島崇男 (2017) 低温超高压エクロジヤイト中の H₂O 含有量. 日本地質学会第 124 年学術大会 松山

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平島崇男 (HIRAJIMA, Takao)
京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号 9 0 1 8 1 1 5 6

(2) 研究分担者

中村大輔 (NAKAMU Daisuke)
岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号 5 0 3 7 8 5 7 7

河上哲生 (KAWAKAMI Testuo)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号 7 0 4 1 5 7 7 7

吉田健太 (YOSHIDA Kenta)
国立研究開発法人・海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野・ポストドクトラル研究員
研究者番号 8 0 7 5 9 9 1 0

苗村康介 (NAEMURA Kousuke)
名古屋大学・博物館・特任助教
研究者番号 5 0 3 7 8 5 7 7

(3) 連携研究者

大沢信二 (OSAWA Shinji)
京都大学・大学院理学研究科・教授
高須 晃 (TAKASU Akira)
島根大学・理工学部・教授
小林記之 (KOBAYASHI Tomoyuki)
名古屋学院大学・スポーツ健康科学科・准教授

(4) 研究協力者

臼杵 直 (USUKI Tadashi)
中国科学院地球科学研究所 (台湾)・研究員
安本篤 (YASUMOTO Atsushi)
京都大学・大学院理学研究科・大学院生、リーディング大学院奨学金受給者
Rustam Orozbaev,
キルギス科学アカデミー・研究員 (ビシュケク)
Martin Svojtka,
チェコ科学アカデミー・研究員 (プラハ)
Marian Janák,
スロバキア科学アカデミー・研究員 (ブラチスラバ)