

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540557

研究課題名(和文) 超高压变成岩の進化履歴の解明

研究課題名(英文) Elucidation of evolutionary path of ultrahigh-pressure metamorphic rocks

研究代表者

中村 大輔 (Nakamura, Daisuke)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：50378577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：超高压变成岩とは石英の高压相となるコース石が安定となる高压下で变成された岩石であり、主に大陸と大陸の衝突帯に産することが知られている。そうした大陸衝突の際に何が起きたかを解明するため、チェコ共和国と中国山東半島の超高压变成岩の研究を行なった。その結果の一つとして、チェコ共和国の超高压变成岩は地質学的には非常に短時間の加熱しか受けていないものだと分かってきた。

研究成果の概要(英文)：The ultrahigh-pressure metamorphic (UHP) rocks are those metamorphosed under high-pressure conditions where coesite (high-pressure phase of quartz) is stable, and they are known to occur mainly in collision belts between continent and continent. We performed studies of UHP metamorphic rocks from Czech Republic and Shangdong Peninsula of China in order to elucidate what happened during such continental collisions. As one of the results, we revealed that UHP metamorphic rocks from Czech Republic experienced geologically very short heating only.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：变成岩 超高压变成岩

1. 研究開始当初の背景

1984年に地殻物質起源の変成岩からコース石が発見された。その後、大陸衝突型造山帯で同様の変成岩が多数報告され、超高压変成岩と呼ばれるようになった。しかし、その超高压変成岩には未解明な問題が幾つかある。

(1) 超高压変成岩の最高変成圧力の問題

従来の地質圧力計で求められる最高変成圧力は3.5GPa程度であるのに対して、ザクロ石が保有していたメジャライト成分の量から7GPa程の変成圧力があつたとする考えがある。この圧力ギャップは何か？どちらが正しいか？などの疑問が残されている。仮により高压の7GPa程の圧力が正しいのであれば、軽い筈の地殻物質が地下200km程まで沈み込んだことを示唆している。

(2) カンラン岩とそれに伴うエクロジヤイトの履歴の問題

超高压変成帯には超高压下にあつたザクロ石カンラン岩体が点在し、苦鉄質高压変成岩のエクロジヤイトを伴うものもある。しかし、この2種類の岩石に地質温度圧力計を適用すると著しく異なる温度圧力条件が得られることがある。この温度圧力条件の不一致の原因を解明することが一つの課題である。

(3) 超高压変成岩の上昇時の温度圧力履歴

超高压変成岩の地表までの上昇時の温度圧力履歴は、その構造運動モデルを構築する上で重要な情報となる。多くの超高压変成岩の場合、等温減圧型の履歴かやや冷却を伴う減圧の履歴が推定されている。

2. 研究の目的

上記のように超高压変成岩は大陸-大陸衝突型の造山帯に主に産する変成岩であり、その進化履歴(変成温度圧力履歴等)の解明から、プレート収斂域の造山帯発達過程でどのような物質循環が起きていたのかを明らかにすることを目的とする。

特に、その進化履歴を解明する上でカギとなるのはザクロ石カンラン岩の存在である。本来、マントル物質であるザクロ石カンラン岩が他の岩石と同様に沈み込みを経験したものがどうか解明する必要がある。

3. 研究の方法

超高压変成岩の産するチェコ共和国のボヘミア山塊と中国の蘇魯地域から採集された試料(ザクロ石カンラン岩とエクロジヤイト)を扱う。それら超高压変成岩の偏光顕微鏡による詳細な観察とEPMAによる詳細な鉱物化学組成分析を行い、その結果を様々な地質温度圧力計に適用して、研究地域の超高压変成岩が経験した温度圧力履歴に制約を与える。以上の研究によって得られた情報を

基に大陸-大陸衝突時の地下深部岩石上昇メカニズム等を総合的に議論する。以下では、より具体的な研究方法について記述する。

(1) ボヘミア山塊のエクロジヤイトの研究

研究に用いたエクロジヤイトはザクロ石カンラン岩に伴って産するものである。これまでの研究では、それらのエクロジヤイトやザクロ石カンラン岩は著しい高温高压条件(1000°C, 4GPa以上)にあつたと推定されている(Medaris et al., 1990; Nakamura et al., 2004)。しかし、それらの温度圧力履歴は不明であり、その検討等を行なつた。申請時点での予察的研究で、エクロジヤイト試料中のザクロ石に“奇妙な”化学組成累帯構造があることを見出しており、その試料のより詳細な観察・分析および解析を行なつた。また、同試料をレーザーアブレーションICP-MSを用いた分析も行い、ザクロ石の微量元素・希土類元素の累帯構造を調べたが、未だその分析結果の解析は行なっていない。

また同研究地域のエクロジヤイト中には優白色の脈もしくはスポットのようなものを含む試料があり、その観察と分析も行なつた。その優白色部は元メルトであつた可能性があり、そのエクロジヤイトが一連の変成作用を受ける間に部分溶融を経験したことを示唆している。この試料についても、レーザーアブレーションICP-MSを用いた分析も行い、優白色部のザクロ石と単斜輝石、基質中のザクロ石と単斜輝石の微量元素・希土類元素の存在パターンの比較・検討した。

また、平成23年度には国際エクロジヤイト会議での巡検に参加し、同地域の岩石試料の採集を行ない、平成24年度にもチェコ科学アカデミーのMartin Svojtka博士らと伴に同地域および関連地域の地質調査と岩石試料採集を行なつた。

(2) ボヘミア山塊のカンラン岩の研究

研究に用いたカンラン岩は前述したエクロジヤイトと伴に産するザクロ石カンラン岩になる。同カンラン岩はこれまでザクロ石中にスピネルが存在しないことなどから、もともと地下深部にあつたものが地表まで上昇してきたものとされていた(e.g. Medaris et al., 1990)。しかし、申請時までの予察的研究でザクロ石中にスピネルが存在することを発見していた。そこで、本研究ではそのスピネル含有物を含むザクロ石カンラン岩試料(2試料)を詳細に観察・分析を行なつた。その鉱物化学組成分析と熱力学データベースを用いた解析、様々な地質温度圧力計の適用を行い、その温度圧力履歴を考察した。

(3) 中国の蘇魯地域のエクロジヤイトの研究

中国の蘇魯地域の超高压変成帯では南部の

東海地区に比較的“新鮮”で後退変成作用や風化作用をあまり受けていないエクロジャイトが多く産し、その温度圧力履歴等を研究するのに適した試料が採集できる。そこで、本研究では過去に採集され京都大学に保管されていた同地区のエクロジャイトを用いた。

それら保管されていた試料の薄片を偏光顕微鏡で観察を行い、特に“新鮮”な試料を選定して分析を行なった。本研究ではその温度圧力履歴を推定することを当初の目的としていたが、分析を進めていく過程で問題が生じてきた。得られた鉱物化学組成データからその変成温度を推定してみたところ、その推定温度が大きくばらつく結果となった。そのため、本研究では、その“見かけの”温度がばらつく原因を探ることとした。

4. 研究成果

本研究では、チェコ共和国のボヘミア山塊と中国の蘇魯地域から採集された試料（ザクロ石カンラン岩とエクロジャイト）の観察と分析から、それらの進化履歴に対する制約を与えることに成功したが、新たな問題等も明らかとなった。以下には「研究の方法」で記述した(1)から(3)の研究に対応する研究成果を記述する。

(1)ボヘミア山塊のエクロジャイト

このエクロジャイトは著しい高温高压条件（1000°C、4GPa以上）にあったと推定されており、通常、そのような高温下では元素拡散が活発になり、昇温時に形成された化学組成累帯構造はかき消されてしまふ。しかし、研究したエクロジャイトには昇温時に形成されたと考えられる化学組成累帯構造を保持しているザクロ石が存在していることが分かった。それは拳程度の大きさの岩石試料中でも場所によって、ザクロ石の化学組成累帯構造が顕著に異なるという観察結果である。その試料は、FeやTiに富む層とそれらに乏しい層に分かれており、前者の層ではFeに富むザクロ石が形成され、後者の層ではあFeに乏しいザクロ石が形成されていることが分かった。このザクロ石の化学組成の違いはもともとの原岩形成時の化学組成不均質を反映していると考えられる。また、ザクロ石の化学組成はその粒子の核において大きく異なるものの、粒子の周辺部（リム）ではどれも似た化学組成を示している。これは核形成時には異なる化学組成で形成されたザクロ石粒子が昇温と共に粒界拡散が活発になるにつれて互いに化学組成が近づいていったことを示唆している。つまり、それらの化学組成累帯構造は昇温期に形成されたものと考えられる。一方、そのエクロジャイトの最高到達温度をザクロ石-単斜輝石地質温

度計から推定すると1000°C程の高温条件が得られた。つまり、このような高温条件まで変成されているにも関わらず、昇温時の化学組成累帯構造が残存しており、その変成期間（加熱期間）が著しく短いものだったと考えられる。また、その加熱期間をモデル計算すると100万年以下という地質学的には非常に短いものであることが分かった。

また、研究地域のエクロジャイトにはまれに優白色の脈もしくはスポットを含むものがある。その優白色部は主に斜長石から構成され、石英を欠いている。また、優白色部にはザクロ石や単斜輝石が含まれ、直線的な外形を示す粒子が多い。一方、基質部のザクロ石や単斜輝石は他形の粒子が多い。このことは、その優白色部がもともとは自由空間となるメルトであったことを示唆している。EPMAによる主要元素分析およびレーザーアブレーションICP-MSを用いた微量元素分析を行なった結果、優白色部の単斜輝石は基質部の単斜輝石と似たような化学的特徴を持ち、優白色部は外部から流入したものではないと言える。よって、この斜長石の脈もしくはスポットはエクロジャイトが部分溶融して形成されたメルトであったと考えられる。エクロジャイトが部分溶融して形成されるメルトの化学組成については直接的な情報があまりなく、この発見は沈み込むスラブが融解する際にどのようなメルトが形成され得るかといった問題に対して重要な情報の一つとなる。

(2)ボヘミア山塊のカンラン岩

上述のエクロジャイトの研究から、それが昇温加圧を経験したものだと考えられる。よって、それに伴って産しているカンラン岩も昇温加圧を経験しているだろう。本研究では、それを支持する証拠としてカンラン岩中のザクロ石にスピネルが包有されていることを確認した。スピネルはザクロ石より低圧下で安定であるので、ザクロ石が安定化する前にスピネルが安定な低圧下にあったと言える。分析した鉱物化学組成データと熱力学モデル計算からスピネルが安定であった圧力は少なくとも3GPaより低いことが分かった。また、そのスピネル包有物を含む試料について、その最高変成温度圧力条件の最考察を行なった。特に、温度圧力推定において重要なザクロ石、斜方輝石と単斜輝石の化学組成を詳細に分析した。輝石の化学組成累帯構造はあまり顕著でなく、比較的均質であるが、ザクロ石は組成累帯構造があるものと無いものが確認された。累帯構造があるものの核の組成のほうがCaに富み、より高压型の化学組成を示しており、その化学組成を用いて温度圧力推定を行なった。計算にはザクロ石-単斜輝石地質温度計、ザクロ石-斜方輝石地

質温度計、両輝石地質温度計、ザクロ石-斜方輝石地質圧力計を用いた。その結果、950-1120°C, 4.5-6.0GPa といた温度圧力条件が得られた。これは Medaris et al. (1990) が推定したものと調和的な結果である。このような著しい高温高圧条件を記録している一方で、スピネルが包有物として残存していることは、このカンラン岩が少なからず加圧を経験していることを示している(ただし、両輝石温度計は 800-900°C 程の低温を与えており、その原因を探る必要がある)。

以上のことから、これらのカンラン岩体は沈み込みによる加圧(おそらく昇温も伴う)を受け、地下 150km 程に達し、その後、急速に地表まで上昇してきたものだと考えられる。またエクロジヤイトの研究から、その加熱期間は著しく短く、岩体の上昇速度も非常に速かった可能性がある。大陸-大陸衝突帯での上下方向の運動はこれまで考えられていたものより、ずっと速いものであるかもしれない。

(3)中国の蘇魯地域のエクロジヤイト
中国の蘇魯地域南部の東海地区に産するエクロジヤイトの観察、分析と解析を行なった。分析を行なったエクロジヤイト中の単斜輝石はヒスイ輝石成分を 50 モル%以上含んでいる。まず、予察的に分析したデータにザクロ石-単斜輝石温度計を適用したところ、1000°C 近くの著しい高温条件が得られた。これは同試料中に緑簾石やフェンジャイトといった含水鉱物が含まれていることを考えると高過ぎる値である。また単斜輝石は核から周辺部へヒスイ輝石成分が増えるような昇温型の累帯構造を保持しているものもあり、その変成温度が低いことを示唆している。そこで、ザクロ石と単斜輝石が直接接している箇所を丹念に探し、それらの組成を分析して、“見かけの”温度を計算してみた。すると、ヒスイ輝石成分を多く含む単斜輝石とそれに隣接するザクロ石のペアで得られた温度のほうが、ヒスイ輝石成分が比較的少ないもので得られた温度より高い傾向があることが分かった。こうした傾向があることは既に蘇魯地域の他の地区で確認されており、それを支持する結果となった。エクロジヤイトの変成温度を推定する際には、多くの場合、ザクロ石-単斜輝石温度計が使われるが、ヒスイ輝石成分を多く含む単斜輝石データで推定する際には十分な注意が必要だと言える。地区によって、多少の違いはあるが、蘇魯地域のエクロジヤイトの変成温度は 700-800°C 程度と考えられているが、上記の傾向を考えるともう少し低い温度の方が真の変成温度に近いのかもしれない。蘇魯地域に限らず、エクロジヤイトの変成温度圧力履歴は大きく最考察される必要があるかもしれ

れない。今後、このヒスイ輝石成分が地質温度計による変成温度推定に与える影響をより詳しく考察し、その温度推定の不確定性の軽減を目指す。

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1件)

苗村康輔、中村大輔、平島崇男、

超高压変成帯中のザクロ石橄欖岩およびエクロジヤイトの温度圧力履歴解析法：地質温度圧力計の概説と適用、

岩石鉱物科学、査読有、41 巻、2012、225-246、DOI: 10.2465/gkk.120531

[学会発表](計9件)

D. Nakamura, N. Shimobayashi, T. Usu-ki, T. Hirajima & M. Svojtka, Garnet zonings created under open-system environments and short-lived heating of Nové Dvory UHP-UHT eclogite, 10th International Eclogite Conference, 2013年9月4日、Courmayeur, Italy

A. Yasumoto, T. Hirajima, D. Nakamura, & M. Svojtka, Variation and significance of chemical zoning patterns of garnet in Nové Dvory eclogite, Moldanubian Zone of the Bohemian Massif, 10th International Eclogite Conference, 2013年9月4日、Courmayeur, Italy

安本篤史・平島崇男・中村大輔、ボヘミア山塊Moldanubian帯Nové Dvory産エクロジヤイト中のざくろ石組成累帯構造の多様性とその意義、日本地球惑星科学連合2013年大会、2013年5月21日、幕張メッセ国際会議場

中村大輔・福井康介・苗村康輔・平島崇

男・マルティン-スフォイッカ、チェコ共和国・ボヘミア山塊に産するザクロ石橄欖岩中のスピネルと温度圧力履歴、日本鉱物科学会、2012年9月20日、京都大学

宮崎貴弘・中村大輔・平島崇男・マルティン-スフォイッカ、チェコ共和国Nové Dvoryザクロ石橄欖岩体中に産するエクロジヤイト中のメルト、日本鉱物科学会、2012年9月20日、京都大学

中村大輔・下林典正・臼杵直・平島崇男・マルティン-スフォイッカ、チェコ共和国・ボヘミア山塊に産するザクロ石橄欖岩中のスピネルと温度圧力履歴、日本地質学会第118年学術大会、2011年9月11日、茨城大学

T. Usuki, C. Y. Lan, Y. Iizuka, D. Nakamura, M. Svojtka & T. Hirajima, Garnet-clinopyroxene barometry for high-pressure mafic granulites from southern part of the Bohemian Massif, Czech Republic, 9th International Eclogite Conference, 2011年8月6日、Mariánské Lázně, Czech Republic

D. Nakamura, N. Shimobayashi, T. Usuki, T. Hirajima & M. Svojtka, Conflicting garnet zonings preserved in UHP-UHT eclogite from the Moldanubian Zone (Nové Dvory, Czech Republic), 2011年8月7日、Mariánské Lázně, Czech Republic

T. Hirajima, T. Kobayashi, K. Naemura, D. Nakamura & M. Svojtka, Missing link between ultra-high pressure (UHP) and

ultra-high temperature metamorphism (UHT): A case study in the Bohemian Massif, 日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月23日、幕張メッセ国際会議場

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 大輔 (NAKAMURA DAISUKE)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 50378577

(2) 研究分担者

平島 崇男 (HIRAJIMA TAKAO)
京都大学・理学研究科・教授
研究者番号: 90181156