

平成 31 年 4 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05610

研究課題名(和文) ザクロ石-単斜輝石地質温度計の再構築

研究課題名(英文) Reconstruction of garnet-clinopyroxene geothermometer

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：大陸衝突帯には3 GPa以上の圧力下(地下100 km以深)まで沈み込んだ岩石が広く地表に露出している。そうした大陸衝突帯で起きている現象を解明することが大きな課題である。それには、そういった岩石が到達した温度圧力条件を正確に推定することが重要となる。ザクロ石-単斜輝石温度計はそうした推定手法の一つであるが、単斜輝石の熱力学的特性がまだよく知られていない。そこで、天然の岩石の解析や実験データの統計学的処理からより高精度の温度計の構築を目指した。また、それと並行して、中国東部に産する同様の岩石の分析から、それらは800、5 GPa程の温度圧力条件まで到達していたことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究でより高精度な温度計の構築を目指したが、天然物質からのデータと実験データが互いに反駁する結果を与え、最終的な構築には至っていない。一方、既存の地質温度圧力計と近年の熱力学的モデリング手法を上記した中国の岩石へ適用した結果、両者とも約800、5 GPaの条件を与えた。このことは少なくとも今回分析した岩石が地下150km以深まで沈み込み、再び地表まで上昇してきたことを表している。プレート収斂帯において厚くて軽い地殻は沈みにくいと考えられるが、そのような地殻でも地下深部まで沈み込み得ることを意味している。こうした地殻変動のプロセスの解明は大規模地震発生のメカニズム解明にもつながる研究である。

研究成果の概要(英文)：In continent collision zones, rocks which have subducted into pressures of 3 GPa or more (100 km depth or more below the surface) are widely exposed on the surface. It is a major task to clarify phenomena occurring in such continent collision zones. For that purpose, it is important to estimate precisely pressure-temperature (P-T) conditions which the rocks have reached. Garnet-clinopyroxene thermometer is one method for such estimation, but thermodynamic properties of clinopyroxene are not yet well known. Thereby, we aimed to construct more accurate thermometer by analyses of natural rocks and statistical processing of experimental data. At the same time, we revealed that some rocks occurring in eastern China reached P-T conditions of about 800 °C, 5 GPa by analyses of them.

研究分野：数物系科学

キーワード：変成岩 エクロジャイト 地質温度計 ザクロ石 単斜輝石

1. 研究開始当初の背景

コース石の安定条件となる約 3 GPa 以上の圧力下で変成された超高压変成岩は大陸-大陸衝突帯に広く分布することが明らかになっている。それら超高压変成岩の変成温度圧力条件を決定することはプレート収斂帯での構造発達史を考える上で重要な束縛条件となる。近年の鉱物熱力学データの整備と新たな地質温度圧力計の開発によって、超高压変成岩の変成温度圧力条件の定量的推定は可能になってきている。その中でもザクロ石-単斜輝石地質温度計はエクロジヤイトにもザクロ石カンラン岩にも適用可能な変成温度推定方法の一つであり、広く適用されてきている。しかし、この温度計をエクロジヤイトへ適用すると、見積もり温度が単斜輝石中のヒスイ輝石成分量に比例して高くなる場合があることが指摘されている (Hirajima, 1996)。また、単斜輝石中の Ca+Na 量が少なくなると見積もり温度が著しく高くなることもある (Nakamura et al., 2015)。このような単斜輝石のもつ非理想性が指摘されており、これらを再度検証する必要性がある。

2. 研究の目的

超高压変成帯はコース石安定条件下で変成されたエクロジヤイトの存在によって特徴付けられ、しばしばマントル物質であるザクロ石カンラン岩を伴う。そうしたエクロジヤイトやザクロ石カンラン岩の変成温度圧力条件を推定する試みは数多く行われているが、その解析手法やモデルによって大きく結果が異なっている場合が多い。本研究では、それらの変成温度推定に用いられているザクロ石-単斜輝石地質温度計の改良を行うことと並行して、中国の大別山-蘇魯超高压変成帯やヨーロッパのヴァリスカン造山帯のエクロジヤイト等の詳細な組織観察を行い、それらの変成温度圧力条件を再検討し、それらの持つ地質学的意義を議論する。

3. 研究の方法

まず、ザクロ石-単斜輝石地質温度計の基本となる Fe-Mg 分配係数と単斜輝石の化学組成の関係を超高压変成帯の一つとなる中国・蘇魯地域のエクロジヤイトの分析から議論した。特に、Hirajima (1996)で扱われた蘇魯地域の Yangkou 地区のエクロジヤイトを重点的に分析して、議論し、前記した単斜輝石のヒスイ輝石成分や Ca+Na 量が分配係数に与える影響を吟味し、単斜輝石に正則溶液モデルを適用して非理想性を補正した新たな地質温度計の作成を試みた。

また、それに加えて、エクロジヤイトを用いた既存の高温高压実験データを再度コンパイルして、それらのデータを用いて単斜輝石の持つ非理想性を吟味した。

上記の地質温度計の考察と並行して、中国の大別山-蘇魯超高压変成帯やヴァリスカン造山帯・ボヘミア山塊のエクロジヤイトやザクロ石カンラン岩の詳細な観察と分析を行い、それらの変成温度圧力条件等を再検討した。

4. 研究成果

まず、中国の Yangkou 地区のエクロジヤイトを分析・解析を行った結果をまとめる。この地区のエクロジヤイトには多数のコース石やその仮像が発見されており、明瞭な超高压変成岩が産している。分析に用いた試料は 1994 年と 1995 年に京都大学と中国科学院の共同研究プロジェクトで採集されたエクロジヤイトで、150-200m 程のスケールの海岸露頭から採集されている。これらの試料はそれらが採集された露頭のスケールから考えて、ほぼ同じ変成温度圧力条件を持つと考えられる。本研究では合計 12 枚の薄片試料を観察・分析を行った。試料の構成鉱物はザクロ石、単斜輝石、フェンジャイト、石英 (コース石も含む) ルチルで、部分的に単斜輝石がシンプレクタイトへ分解している。各試料について 5-6 か所、ザクロ石と単斜輝石が直接接している箇所を探し、それらを線状に分析して、ザクロ石と単斜輝石の組成累帯構造を一つ一つ確認した。そして、各鉱物粒子でグロシュラー含有量が最も多いザクロ石の化学組成とヒスイ輝石成分量が最も多い単斜輝石の化学組成を「対 (ペア)」にとって、地質温度計の考察に用いた。すると、ザクロ石 (Grt) と単斜輝石 (Cpx) の Fe-Mg 分配係数 $KD [= (Fe/Mg)_{Grt} / (Fe/Mg)_{Cpx}]$ は、単斜輝石中のヒスイ輝石成分量が増えるについて、減少する負の相関性を示した。その結果、ザクロ石-単斜輝石地質温度計から算出される温度と単斜輝石中のヒスイ輝石成分量には明瞭な正の相関が表れ、ヒスイ輝石成分量が 50mol% で 600 前後を示すのに対して、同成分量が 70mol% で 900 前後となった。これらは Hirajima (1996) で報告された結果とほぼ同じ結果である。しかし、単斜輝石にはヒスイ輝石成分量が増加するにつれて、 $Fe/(Fe+Mg)$ の値が増加する傾向もあり、ヒスイ輝石成分量のみが上記の推定温度の変動の原因とは限らない。そこで、単斜輝石の非理想性を考察するために、単斜輝石の活動度モデルとして、正則溶液モデルを採用して統計学的に上記のデータを処理した。なお、その計算において、Fe-Mg 交換反応のエンタルピー、エントロピー、モル体積のデータやザクロ石の非理想性については、Holland and Powell (1998) のデータとモデルを使用した。そして、単斜輝石の過剰相互作用係数

ラメーターの $WFeAl-WMgAl$, $WFeMg$ と温度は未知数として、最小二乗法を用いてそれらの値を決定し、新たな地質温度計の式を求めた。これによりヒスイ輝石成分量と算出温度の相関性はほぼ解消されたが、その温度計の式から得られる温度は 3 GPa で、460 前後となり、現実的な温度よりかなり低い結果となった。また、ここで得られた新たな温度計の式を他の蘇魯地域のエクロジャイトへ適用したところ、ヒスイ輝石成分量が増えるにつれて算出温度が減少する負の相関性が表れる結果となった。これは今回得られたヒスイ輝石成分量が与える非理想性の影響が過剰に強く見積もられてしまった結果かもしれない。

次に既存の高温高压実験データのコンパイルとその解析結果について、まとめる。本研究では合計 600 ペア程の実験データを収集し、まず、それらのデータを吟味した。実験データには使用する実験カプセルの違いや高温高压状態の保持時間の違いなどがある。特に単斜輝石中の三価の鉄の量を推定する問題があるため、還元的状態を保持できるグラファイトカプセルの使用が好まれる。また高温高压状態の保持時間も比較的低温の実験では重要となる。そのため、一つ一つの実験の実験時間や使用カプセル等を確認して、次の条件を満たす実験データを選択した：(1) グラファイトカプセルを用いた実験、(2) 高温高压状態の保持時間が 100 時間以上の実験、(3) 単斜輝石の化学組成式を計算した場合、その Fe^{3+}/Fe_{total} が -0.1 から +0.1 の範囲に入るデータ。以上の条件を満たす実験データは 44 ペアあり、それらを用いて単斜輝石の非理想性を考察した。 $Fe-Mg$ 交換反応のエントルピー、エントロピー、モル体積のデータは Holland and Powell (1998) のデータを用い、ザクロ石は正則溶液モデルで近似し、過剰相互作用パラメーターの値は既存の実験データを用いた。その結果、単斜輝石中の $Ca+Na$ 量が減るにつれて、算出温度が実験温度より高くなる傾向があることが確認された。これは Nakamura et al. (2015) が天然の試料のデータから指摘したことと調和的な結果である。一方、ヒスイ輝石成分量が増えるにつれて算出温度が高くなるといった傾向は認められなかった。しかし、実験データの単斜輝石の化学組成は $Ca+Na$ 量が 0.65-0.90 apfu ($O=6$) の範囲に分布しており、天然のエクロジャイトの化学組成 ($Ca+Na > 0.90$ apfu) と比較すると、その $Ca+Na$ 量が著しく低いものまでであることが分かる。高温高压実験は通常 1000 以上の著しい高温状態で行われており、この化学組成の違いは実験生成物と天然の岩石の間での生成温度圧力条件の違いを反映しているものと考えられる。1970 年代から提案されているザクロ石-単斜輝石地質温度計の式は、こうした高温条件での実験を直接用いてキャリブレーションが行われているが、実験生成物の単斜輝石の化学組成が天然の岩石のそれと大きく異ならないかを注意深く確認する必要があるだろう。今回、上記した (1) から (3) の条件を満たす実験データは 44 ペアのみで、さらにここから単斜輝石の $Ca+Na$ 量が 0.9 前後のもののみを残すとデータ数が著しく少なくなるため、最終的な温度計の式のキャリブレーションは行わなかった。

以上のように、今回の研究では未だ最終的なザクロ石-単斜輝石地質温度計の式の確立には至っていないが、既存の式 (Nakamura, 2009 など) を用いて、中国の大別山-蘇魯超高压変成帯やヴァリスカン造山帯・ボヘミア山塊のエクロジャイト等の変成温度圧力条件を推定する試みなどを行った。具体的には、蘇魯地域の栄成地区のエクロジャイトとザクロ石カンラン岩、同地域の東海地区のエクロジャイト、大別山地域の Bixiling 複合岩体のエクロジャイト、ボヘミア山塊の Nove Dvory 産エクロジャイトとザクロ石カンラン岩の研究を行った。ここでは、大別山地域の Bixiling 複合岩体のエクロジャイトについての研究成果をまとめる。Bixiling 複合岩体は超苦鉄質岩を伴う斑レイ岩起源のエクロジャイトからなり、研究に用いたエクロジャイト試料は、ザクロ石、単斜輝石、藍晶石、石英 (コース石を含む)、フェンジャイト、ルチル、タルク、ゾイサイトなどから構成される。この内、ゾイサイトは面構造を切るように成長しており、藍晶石や石英を伴って産している。こうした組織的特徴と鉱物の安定性を考えると、ゾイサイトは減圧期のローソン石分解生成物と考えられる。この試料の詳細な組織観察と鉱物組成分析データに上記で考察したような従来型地質温度圧力計と近年急速に発達してきたシュードセクション図を用いた解析を行った結果、最高変成温度圧力条件は 800 、5 GPa 程であることが明らかとなってきた (藤瀬他, 2018)。シュードセクション図を用いた解析は、与えられた全岩化学組成に対して、各々の温度圧力条件での安定な鉱物組合せと鉱物組成を算出する手法であり、強力な岩石の解析手法であるが、固溶体モデル等に依存して結果が変わってくるなどの問題も残っている。しかし、今回の研究では、従来型地質温度圧力計とほぼ同じ温度圧力条件を算出しており、相補的に正しい結果を与えていると考えられる。なお、この試料では上記したようなヒスイ輝石成分量が増えるにつれて、算出温度が高くなるといった傾向は認められなかった。大別山-蘇魯地域のエクロジャイトでは、今回得られたような 5 GPa といった圧力条件が得られている例は未だ少ないが、この地域でも一部のエクロジャイトは 5 GPa の圧力に相当する深さ (150 km 以深) まで沈み込んで再び地表まで上昇してきたのだろう。大陸衝突帯では少なくとも 150 km 程の垂直方向の循環が起きていたと言える。

< 引用文献 >

Hirajima, T., Effect of jadeite-content on the garnet-clinopyroxene geothermometer for an ultrahigh-pressure eclogite complex., Proceedings of the Japanese Academy, Series B, 72, 1996, 208-213.

- Nakamura, D., Okada, M. & Hirajima, T., Effect of clinopyroxene composition on Fe-Mg distribution coefficient between garnet and clinopyroxene., Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 110, 2015, 82-87.
- Holland, T. & Powell, R., An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest., Journal of Metamorphic Geology, 16, 1998, 309-343.
- Nakamura, D., A new formulation of garnet-clinopyroxene geothermometer based on accumulation and statistical analyses of a large experimental data set., Journal of Metamorphic Geology, 27, 2009, 495-508.
- 藤瀬 武尊・中村 大輔・平島 崇男、中国東部大別山地域 Bixiling 複合岩体の温度圧力履歴、日本地質学会第 125 年学術大会 北海道大学・札幌キャンパス、2018.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Yamasaki, S., Nakamura, D. & Hirajima, T., Amphibole in UHP eclogite from the Sulu region, eastern China., Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 査読有,113, 2018, 135-151.
DOI: 10.2465/jmps.170420

Miyazaki, T., Nakamura, D., Tamura, A. Svojtka, M., Arai, S. & Hirajima, T., Evidence for partial melting of eclogite from the Moldanubian Zone of the Bohemian Massif, Czech Republic., Journal of Mineralogical and Petrological Sciences, 査読有,111, 2016, 405-419.
DOI: 10.2465/jmps.151029c

〔学会発表〕(計 6 件)

藤瀬 武尊・中村 大輔・平島 崇男、中国東部大別山地域 Bixiling 複合岩体の温度圧力履歴、日本地質学会第 125 年学術大会 北海道大学・札幌キャンパス、2018.

苗村 康輔・オトコンコ ジャフハラン・中村 大輔、モンゴル国・湖水地域の超高压エクロジヤイト、日本鉱物科学会 2017 年年会 愛媛大学・城北キャンパス、2017.

山根 創・中村 大輔・平島 崇男、中国東部蘇魯地域・栄成地区に産するエクロジヤイトとザクロ石カンラン岩の推定圧力ギャップ、日本鉱物科学会 2017 年年会 愛媛大学・城北キャンパス、2017.

藤瀬 武尊・中村 大輔・平島 崇男、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 愛媛大学・城北キャンパス、2017.

山崎 聡・中村 大輔・平島 崇男、中国東部 Su-Lu 地域の超高压エクロジヤイト中の角閃石の安定性、日本鉱物科学会 2016 年年会 金沢大学・角間キャンパス、2016.

藤瀬 武尊・中村 大輔・平島 崇男、大別山地域に産する低温超高压エクロジヤイト、日本鉱物科学会 2016 年年会 金沢大学・角間キャンパス、2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名： 平島 崇男

ローマ字氏名： (HIRAJIMA, takao)

所属研究機関名： 京都大学

部局名： 大学院理学研究科

職名： 教授

研究者番号(8桁): 90181156

(2) 研究協力者

研究協力者氏名： 藤瀬 武尊

ローマ字氏名： (FUJISE, takeru)

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、研究者個人に帰属されます。