

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22654058

研究課題名（和文）

オンファス輝石地質速度計の実用化：ナノスケール微細組織解析による時間情報の抽出

研究課題名（英文）Development and application of omphacite geo-speedometer: An integrated study of natural omphacitic pyroxenes

研究代表者

辻森 樹 (Tatsuki Tsujimori)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：00436833

研究成果の概要（和文）：天然の低温高压型変成岩中に含まれるオンファス輝石質単斜輝石の微細組織について、先進的な高分解能組織解析装置を用いてその特徴を解析し、化学組成の不混和と結晶内の秩序-無秩序転移によって生じたナノスケール微細組織（反位相領域など）を系統的に解析した。そして、微細組織から得た知見に、岩石・鉱物学・年代学的手法を相補的に加えることで、秩序-無秩序転移カイネティクスを利用したオンファス輝石地質速度計の実用化が検証された。

研究成果の概要（英文）：Submicron-scale structures of natural omphacitic pyroxenes in high-grade blueschists and low-temperature hydrous eclogites were examined using high resolution microscopy and laser Raman spectroscopy. This study confirmed that the anti-phase domain size of undeformed omphacite within garnet porphyroblast had high potential for geospeedometer. However, in order to apply this method, further understanding of disequilibrium growth of omphacite and garnet in low-temperature metamorphic rocks are required.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	0	1,600,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,700,000	330,000	3,030,000

研究分野：変成岩岩石学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：オンファス輝石、ひすい輝石、エクロジャイト、微細構造、組成累帯構造、地質速度計

1. 研究開始当初の背景

地質学において地層や岩石に記録された「時間」情報の抽出は、過去の地質現象と物

質進化を解読するための根本である。層序区分や示準化石に基づく相対年代の推定に加え放射性同位体の壊変を利用した絶対年代

の数値化（放射年代測定）が地球史概観の理解に貢献してきた。地質年代学の進歩は質量分析法に関係した高精度分析機器の発達によるところが極めて大きい。10⁴~10⁸年（0.01~100Ma）という時間スケールの造山運動に関する固体地球プロセス解読のための変成岩地質年代学の分野でも、高質量分解能二次イオン質量分析計による微小ジルコン U-Pb 年代測定への依存度を増している。ところが、10⁶年以下の時間スケールの情報抽出には、変成岩に対して一般的に用いられてきた放射年代（U-Pb や K-Ar 系など）では、測定に適した鉱物存在度と親元素濃度の問題や閉止温度の問題など、抽出される時間スケールの解像度には様々な制限や限界がある。そこで本研究は『変成鉱物のカイネティクスを利用して10⁶年以下の時間スケールまで抽出可能な鉱物地質速度計の実用化』を提案した。

2. 研究の目的

変成鉱物に記録された「時間」情報を放射年代測定とは全く別の基軸で解読することは、変成岩を用いた造山運動のシームレスな時空変遷解析のための斬新的戦略であり、地質年代学の展開に欠かせない。本研究は低温高压型高压変成岩（特に含水鉱物を含む低温のエクログャイト相変成岩）に含まれるオンファス輝石質単斜輝石（以下、オンファス輝石）の秩序-無秩序転移によって生じたナノスケールの微細組織に注目し、カイネティクスを利用した地質速度計の実用化を目的とした。

Carpenter (1981a, b) は天然のオンファス輝石の秩序-無秩序転移について相転移実験と天然試料の観察を行い、ナノスケール微細組織として観察される反位相領域のサイズが温度と時間の関数で説明可能なことを提唱した。ところが、この鉱物時計の画期的な

アイデアは積極的に実用化されることなく、むしろ、後のオンファス輝石の変形実験や新たな微細組織の解析は、結晶成長後の変形による微細組織の焼鈍・重複を検討しない限り、時間情報を制約することが困難であることを示した。しかし逆に、これらの事実は変形を免れたオンファス輝石を選択することができれば、微細組織から時間情報を抽出することが可能であることを示す。本研究では変形を免れ、岩石学的手法で温度情報の制約が可能な条件を満たすオンファス輝石として、ざくろ石中のオンファス輝石に着目した。フィールドエミッション型電子顕微鏡と顕微レーザーラマン分光装置を用いたマッピング法によりサブミクロンスケールまでの組織記載を行いざくろ石に包有されたサブミクロンサイズのオンファス輝石の部位を切り出し、反位相領域組織を解析することで、「時間」情報の抽出を試みる。そして、オンファス輝石の微細組織情報に岩石学・鉱物学的に温度情報を与えることでオンファス輝石のカイネティクスを利用した鉱物時計（地質速度計）の実用化と地質学へ応用について検証する。

3. 研究の方法

オンファス輝石地質速度計の実用化に向けて、（1）ナノスケール微細組織観察のための天然試料の厳選と試料の地質学・岩石学的特徴付けを行い、（2）ナノスケール微細組織観察のためのオンファス包有物を岩石薄片上で選定する。そして、（3）フィールドエミッション型電子顕微鏡及び、顕微レーザーラマン分光装置を用いたサブミクロンスケールの元素・状態マッピングを行い詳細な微細組織の特徴を把握する。（4）複合型集束イオンビーム加工観察装置を用いて過程（2）で選定した包有物の部位を加工し、

フィールドエミッション型透過電子顕微鏡で反位相領域サイズを解析する。(5) 微細組織と地質パラメータとの関係を数値シミュレーションし、(6) 変成岩石学と放射年代測定の手法による変成史決定を行う。上述の過程で得られた全データを総合して、オンファス輝石の地質速度計の実用化について検証する。

4. 研究成果

本研究では、中米グアテマラ産エクロジャイトに加えて、北米フランシスカン帯、西南日本蓮華帯と三波川帯、アルプス-ヒマラヤ変成帯（イタリア、スイス、パキスタン）、中国大別山帯のエクロジャイト試料、北米コロラド大地のエクロジャイト捕獲岩試料について検討を行った。特に、天然の低温エクロジャイト試料に含まれるオンファス輝石質及びひすい輝石質単斜輝石のサブミクロンサイズの微細組織について、(1) フィールドエミッション型電子顕微鏡（波長分散型・エネルギー分散型分析付）による組織の特徴づけと固溶体組成決定、(2) 顕微レーザーラマン分光装置を用いたラマンマッピングによる微細組織、結晶構造の状態、サブミクロンの包有物（鉱物相・流体相）の同定を行った。また、(3) オンファス輝石を包有物として含むざくろ石について、二次イオン質量分析装置を用いた微量元素濃度とリチウム・酸素同位体組成の局所分析を千点以上実施した。そして、(4) 厳選したオンファス輝石包有物の反位相領域を観察した。(5) 年代測定については、193nm 波長の固体レーザーと誘導結合プラズマ質量分析装置を用いた U-Pb 年代測定法をルーチン化し、変成ジルコンに応用した。

本研究で得られたデータを総合的に解析した結果、速度計の実用・応用については、

条件を満たせば、極めて有効な手法であることが明確となった。その一方で、天然試料の非平衡の程度の定量化が極めて重要課題であることも明らかとなった。その判定材料として、ざくろ石が記録する微量元素組成及び、安定同位体組成の連続変化パターンが有効である。今後、ざくろ石中に保有されたオンファス輝石のカイネティクスを利用するためには、ざくろ石の結晶成長に伴う結晶成長カイネティクスを地球化学的に解く必要が急がれる。

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 13 件)

- (1) Stern R. J., Tsujimori T., Harlow G. E., Groat L. A., Plate tectonic gemstones. *Geology*, 2013, in press, doi:10.1130/G34204.1. [査読有]
- (2) Kim D., Katayama I., Michibayashi K., Tsujimori T., Rheological contrast between glaucophane and lawsonite in naturally deformed blueschist from Diablo Range, California. *The Island Arc*, v. 22, no. 1, p. 63-73, 2013, doi:10.1111/iar.12003.
- (3) Tsujimori T., Harlow G. E., Petrogenetic relationships between jadeitite and associated high-pressure and low-temperature metamorphic rocks in worldwide jadeitite localities: A review. *European Journal of Mineralogy*, v. 24, no. 2, p. 371-390, 2012, doi:10.1127/0935-1221/2012/0024-219

3. [査読有]
- (4) Harlow G. E., Tsujimori T., Sorensen S. S., Introduction - Jadeitite: new occurrences, new data, new interpretations -. *European Journal of Mineralogy*, v. 24, no. 2, p. 197-198, 2012, doi:10.1127/0935-1221/2012/0024-2196. [査読有]
- (5) Fukui S., Tsujimori T., Watanabe T., Itaya T., Tectono-metamorphic evolution of high P/T and low-P/T metamorphic rocks in the Tia complex, southern New England fold belt, eastern Australia: Insights from K-Ar chronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 59, no. 1, p. 62-69, 2012, doi:10.1016/j.jseaes.2012.05.022. [査読有]
- (6) Rehman H. U., Tsujimori T., Tsai C. H., Minerals, rocks, and mountains: Linking petrology, geochemistry, and geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 59, no. 1, p. 1-2, 2012, doi:10.1016/j.jseaes.2012.07.015.
- (7) Nakamura E., Makishima A., Moriguti T., Kobayashi K., Tanaka R., Kunihiro T., Tsujimori T., Sakaguchi C., Kitagawa H., Ota T., Yachi Y., Yada T., Abe M., Fujimura A., Ueno M., Mukai T., Yoshikawa M., Kawaguchi J., Space environment of an asteroid preserved on micro-grains returned by the Hayabusa spacecraft. *Proceedings of the National Academy of Science*, v. 109, no. 11, p. E624-E629, 2012, doi:10.1073/pnas.1116236.
- (8) Rehman H. U., Kobayashi K., Tsujimori T., Ota T., Yamamoto H., Nakamura E., Kaneko Y., Khan T., Sm-Nd and Lu-Hf isotope geochemistry of the Himalayan high- and ultrahigh-pressure eclogites, Kaghan valley, Pakistan. *in* Panagiotaras D., ed., *Geochemistry - Earth's System Processes*: Rijeka, Croatia, InTech, p. 105-126, 2012, doi:10.5772/32859.
- (9) Itaya T., Tsujimori T., Liou J. G., Evolution of the Sanbagawa and Shimanto high-pressure belts in SW Japan: Insights from K-Ar (Ar-Ar) geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 42, no. 6, p. 1075-1090, 2012, doi:10.1016/j.jseaes.2011.06.012. [査読有]
- (10) Brophy J. G., Ota T., Kunihiro T., Tsujimori T., Nakamura E., 2011, In situ ion-microprobe determination of trace element partition coefficients for hornblende, plagioclase, orthopyroxene and apatite in equilibrium with natural rhyolitic glass, Little Glass Mountain Rhyolite, California. *American Mineralogist*, v. 92, no. 11-12, p. 1838-1850, 2011, doi:10.2138/am.2011/3857. [査読有]
- (11) Fu B., Valley J. W., Kita N. T., Spicuzza M. J., Paton C., Tsujimori T., Bröcker M., Harlow G. E., Multiple origins of zircons in jadeitite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 159, no. 6, p. 769-780, 2010, 10.1007/s00410-009-0453-y.
- (12) 辻森 樹, 日本列島に記録された古生代高圧変成作用—新発見とこれから解決

すべき問題点－. 地学雑誌, v. 119, no. 2, p. 294-312, 2010, doi:10.5026/jgeography.119.294. [査読有]

- (13) 辻森 樹, 造山帯中の高圧低温変成岩を伴う蛇紋岩メランジュ. 月刊地球, v. 32, no. 3, p. 189-195, 2010. [査読無]

[学会発表] (計 11 件)

- (1) Tsujimori T., Harlow G.E., Petrogenetic relationships between jadeitite and associated high-pressure and low-temperature metamorphic rocks in worldwide jadeitite localities, 2011年12月7日, San Francisco (U.S.A.).
- (2) 宮下 敦, 辻森 樹 古生代前期深成岩－変成岩類の年代学的再検討, 日本地質学会第119年学術大会, 2012年9月16日, 大阪.
- (3) Tsujimori T., Kunihiro T., Kobayashi K., Tanaka R., Moriguti T., Ota T., Kitagawa H., Sakaguchi C., Makishima A., Nakamura E., Abe M., Fujimura A., Mukai T., 2011, Initial analysis of the Hayabusa recovery materials: Petrographical characterization: 日本地球惑星科学連合大会, 2011年5月25日. 千葉県幕張市.
- (4) Kim D., Katayama I., Michibayashi K., Tsujimori T., 2012, Relative strength between glaucophane and lawsonite in naturally deformed blueschist from Daiblo Range, California, 2011年12月7日, San Francisco (U.S.A.).
- (5) Pu X. F., Brophy J. G., Tsujimori T., 2011, Rare Earth Element - SiO₂

systematics of island arc lower crust amphibolite migmatite from Yakuno Ophiolite, SW Japan: a field evaluation of some model predictions. AGU Fall Meeting, 2011年12月7日, San Francisco (U.S.A.).

- (6) Rehman H. U., Kobayashi K., Tsujimori T., Ota T., Nakamura E., Hirajima T., Yoshida K., Terabayashi M., Zircon chronology and inclusions study: a case study from the Himalayan UHP eclogites, Kaghan Valley. 9th International Eclogite Conference, 2011年8月7日, Marianske Lazne (Czech Republic).
- (7) Sarbadhikari A.B., Tsujimori T., Moriguti T., Kunihiro T., Nakamura E., In-situ geochemistry of garnet peridotites of Lashaine, Tanzania craton: Re-fertilization in sub-cratonic lithospheric mantle, Goldschmidt Conference, 2010年6月15日, Tennessee, USA.
- (8) Kaneko Y., Maruyama S., Kadarusman A., Ota T., Ishikawa M., Tsujimori T., Ishikawa A., Okamoto K., Ongoing collision-type orogeny in Timor-Tanimbar island chain, eastern Indonesia. AGU Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月23日, Taipei, Taiwan
- (9) Rehman H. U., Kobayashi K., Tsujimori T., Nakamura E., Yamamoto H., Khan T., Ion microprobe U-Pb geochronology and trace element geochemistry of the zircon from the Himalayan high- and ultrahigh-pressure eclogites, Kaghan Valley of Pakistan. AGU Western

Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月23日, Taipei (Taiwan).

- (10) Tsujimori T., Hernandez-Pineda G. A., Eclogites and related metamorphism in the North America-Caribbean plate boundary: An example from the Motagua fault zone, Guatemala. AGU Fall Meeting, 2010年12月18日, San Francisco (U. S. A.).
- (11) 辻森 樹, Paleozoic subduction metamorphism in Japan: A review and

more. 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月23日. 千葉県幕張市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻森 樹 (Tatsuki Tsujimori)
岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号: 00436833