

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400511

研究課題名(和文) 低圧型変成帯の上昇速度の見積もり - 変成岩岩石学的研究手法の花崗岩体への応用 -

研究課題名(英文) Estimation of exhumation rate of low P/T type metamorphic belt using conventional geothermobarometry

研究代表者

榎並 正樹 (Enami, Masaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：20168793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 美濃帯に貫入する貝月山こう岩が記録している温度・圧力条件を見積もり、酸性マグマが冷却固結しつつ上昇し最終的に深度3.5-4km程度で定置した可能性を示唆した。また、灰長石成分が90%に達する斜長石が産することを記載し、酸性マグマの接触変成作用によって形成されたスカルンやその原岩である美濃帯由来の石灰岩が同化した痕跡である可能性が高いことを論じた。

(2) 中部地方領家帯を構成する変成岩類とそれに貫入する花こう岩類の記載岩石学的研究を行い、花こう岩類の中で最も古いとされる神原トータル岩は、形成条件が異なる少なくとも二つのグループに分けられることを示した。そして、領家帯の上昇速度について論じた。

研究成果の概要(英文)：Kaizuki-yama granite, which intruded into the Jurassic Mino terrane, were estimated using conventional geothermobarometers, and a possible cooling process of the body was proposed. Calcic plagioclase (up to An90) was commonly occurs in the granite, and is consider to show evidence for assimilation of limestone and/or skarn in country rocks during intrusion of acidic magma. (2) Exhumation rate of low-pressure/high-temperature type Ryoike belt was discussed based on petrological and mineralogical studies of granitoids and their surrounding metapelites. The "Kamihara tonalite", one of the oldest intrusive bodies, is separated into two groups considering their forming conditions.

研究分野：Metamorphic Petrology

キーワード：花こう岩類 変成岩類 地質温度計 地質圧力計 上昇速度 低圧型変成帯

1. 研究開始当初の背景

広域変成岩は、その深さは様々ではあるが、地殻表層にあった岩石が一旦地球深部に至り、その後地表まで上昇するというプロセスを経て形成される。このプロセスを特徴づけるものとして重要な情報が、温度-圧力履歴である。そのため、古典的な累進変成作用という概念と個々の岩石が辿った温度-圧力履歴を区別して論じることの重要性が認識され、1980年代以降、温度-圧力履歴を解析する様々な試みがなされてきた。また、圧力条件とはことなり温度条件の変化が再結晶条件として反映されまでには一般にタイム・ラグがあることなどから自明ではあったが、数値計算によって変成作用の継続時間が温度-圧力履歴に大きな影響を与えることが指摘されてから、温度-圧力-時間履歴を冠した研究が数多く発表された。しかし、それらの多くは、変成作用をいくつかのステージに区分し、それらの前後関係を時間と呼んだりしただけであったり、閉止温度の異なる年代測定法を組合せたいわゆる冷却速度の議論であった。そして、圧力条件と時間目盛をリンクさせた変成岩(変成帯)の上昇速度についての議論は、いくつかの例があるのみであり、しかも、それらの研究のほとんどは、超高压-高压変成岩に関係したものである。一方、低压高温型変成岩と花こう岩類からなるいわゆる低压型変成帯についても、温度-圧力-時間履歴を解析することの重要性は認識されてはいるものの、その研究はやはり冷却速度に関する議論であった。そして、変成帯の上昇機構を議論する上で重要な、深度と時間を組み合わせて直接上昇速度を推定する研究は行われていない。

2. 研究の目的

低压型変成帯の研究にとって主要な課題として、(1) その主要なメンバーである花こう岩体の固結深度の定量的な見積もりと、

(2) 花こう岩体の母岩である高温低压変成岩類の上昇速度の定量的見積もりを設定する。そのために、貫入時期が異なる多くの花こう岩体が産し、それぞれ相互の貫入関係が地質学的に明らかになっている(領家研究グループ, 1972, 地球科学, 26, 205-216)と同時に、個々の岩体の固結年代にほぼ相当すると考えられる CHIME (Chemical Th-U-total Pb isochron method) 年代が精度よく求められている、中部地方領家帯を研究対象とした研究をおこなう。

【花こう岩体の固結深度の定量的見積もり】

「巨大な深成岩体が現在の位置をどのようにして占めたのか？」その機構を論じる上で重要な情報のひとつは、岩体の定置深度である。花こう岩類に適用する圧力計として角閃石中のAl量を利用する方法がHammarstrom and Zen (1986, AM, 71, 1297-1313) によって提唱されて以来、多くの研究で用いられてきた。しかし、Al量は温度 (Anderson & Smith, 1995, AM, 80, 549-559) やMg/Fe値など角閃石の化学組成に依存することは自明であり、Al角閃石圧力計は、多くの不確かさを含んでいた。この角閃石圧力計とともに変成岩研究の分野で広く利用されているザクロ石温度圧力計(例えば, Hoisch, 1991, CMP, 108, 43-54)や白雲母圧力計 (Massonne and Schreyer, 1987, CMP, 96, 212-224) を領家花こう岩類に適用すると同時に、そのために必要な花こう岩類の岩石学的・鉱物学的記載を行う。

【花こう岩体の定置深度と固結年代のリンク】

見積もられた花こう岩体の貫入固結深度は、その時の周囲の変成岩類(母岩)が位置していた深度に等しいことに着目する。そして、変成岩類がその深さにあった時の年代は花こう岩類の固結年代より推定できることから、間接的に変成岩の深度に時間目盛を入れるこ

とを試みる．中部領家帯の主要な花こう岩体について，CHIME年代が測定されており，その年代幅は30 Maに達することが明らかになっている．花こう岩体の定置深度と固結年代のリンクさせることにより，30 Maの長期にわたる領家帯の上昇過程を議論する．

3．研究の方法

- (1) 領家帯の野外調査研究と試料採集
- (2) 従来の研究で欠落していた，花こう岩類と変成岩類の岩石学的・鉱物学的記載
- (3) 変成岩岩石学的手法の花こう岩類への適用と固結深度（圧力）の見積もり
- (4) 花こう岩類・変成岩類の年代測定
- (5) 変成岩類の変成条件の見積もり

4．研究成果

【貝月山花こう岩を対象としたケーススタディ】

<固結条件の見積もり> 変成岩岩石学的解析法を火成岩体に適応するための基礎的研究として，角閃石 (Amp) - 黒雲母 (Bt) - 斜長石 (Pl) - カリ長石 (Kfs) - 石英 (Qz) の系を用いて，美濃帯中に貫入する白亜紀花こう岩の固結条件についての見積もりを行った．その結果，詳細に調べた13試料を比較すると，それぞれが記録している圧力・温度条件は異なるものの，全体としてはおよそ0.50GPa/800 から

0.15-0.25GPa/680-700 までほぼ連続して変

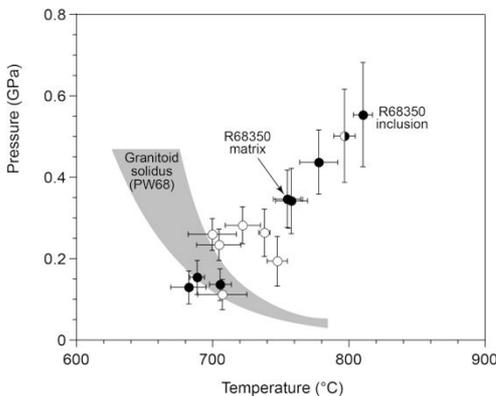


図1．貝月山花こう岩が記録する温度・圧力条件．

化する（図1）．そして，ひとつの試料における包有物および基質の両組成セットを用いた圧力・温度条件は，それぞれ0.55GPa/820 および0.35GPa/760 であり，それは13試料が示すトレンドと調和的である．また，圧力・温度見積もりの下限は，酸性マグマのソリダスにほぼ一致する．これらの点は，酸性マグマが冷却固結しつつ上昇し，最終的に深度3.5-4km程度で定置したことを示していると推測される．それは，岩体の分布や接触変成帯の特徴などの地質学的情報から同岩体が比較的浅所に貫入したと推定されていることと調和的である．

<Caに富む斜長石の産出> 主要鉱物の化学組成分析をおこなった13試料のうち6試料から，花こう岩類からは従来ほとんど報告されることがないCaに富むPl（灰長石成分 $An_{>70}$ ）の産出を確認した．そして，最もCaに富むものは An_{91} に達する．An成分に富む部分は，多くの場合結晶の中心部に認められるが（図2a），試料によっては，中心部のほかに周縁部との中間にも認められる（図2b）．そして，一般にAn成分に富む部分と乏しい部分の間は組成的に不連続である．

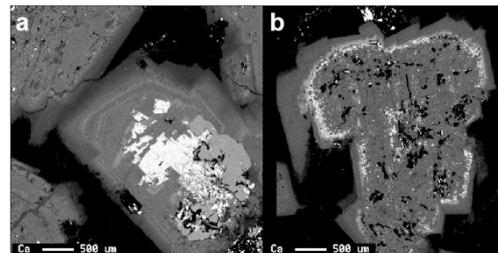


図2．An成分に富む（最も明るい）部分を含む斜長石のCa-X線マップ．

花こう岩類中に産するAn成分に著しく富むPlの成因としては，塩基性マグマの関与を想定するケースが多い．しかし，貝月山花こう岩体の場合，結晶分化作用の初期に形成された可能性のあるゼノリス状の塩基性岩は観察されない．また貝月山地域に多数存在する塩基性岩脈の貫入時期は，花こう岩よりも明らかに新しく，これら岩脈と同源のマグマとの混合を想定することも困難である．An成

分に富む斜長石の産状や見積もられるその形成温度から判断して、それは、酸性マグマが貫入した際に接触変成作用によって形成されたスカルンやその原岩である美濃帯由来の石灰岩の同化した痕跡である可能性が高い。

【領家帯】

<太田切含ザクロ石花こう岩> 中部地方・駒ヶ根地域領家帯には、ザクロ石 (Grt) と白雲母 (Ms) を特徴的に含む、太田切花こう岩が、独立した3つの岩体(北部, 中部および南部)として産する。太田切花こう岩は、変成岩類の片理にそって貫入、あるいは片理を切って岩脈状に貫入することもあるが、周囲の変成岩類に接触変成作用をあたえた明確な証拠は無い。三岩体から採取した試料は、いずれも主に Kfs, Pl, Bt, Ms, Qz および Grt からなる。Grtの多くは、結晶の最外縁部で局所的に Mn 量が増加し Fe および Mg が減少する以外は極めて均質な組成を有する。そして、北部岩体の Grt は、他の2岩体の者に比べて、CaO や MgO に富み MnO に乏しい組成を有する。Bt は、全岩体を通じてほぼ同じ Si 値であるが、Mg# [= Mg/(Mg + Fe)]値は、Grt と同様に、北部岩体試料は、中部岩体と南部岩体に比べると高い傾向にある。Pl は、全体として曹長石成分に富んでおり、結晶の中心部から周辺部にかけて An 成分が僅かに減少するいわゆる正累帯構造を示す。しかし、その中でも北部岩体の試料は、中部岩体や南部岩体に比べると An 成分に富んでいる。太田切花こう岩は、鉱物組み合わせや CHIME 年代値の類似から、同一のマグマがほぼ同時期に貫入固結したと考えられているが、上記の鉱物組成の特徴は、北部岩体のマグマの全岩組成は他の2岩体のマグマに比べると若干初生的であると推定される。また、推定された固結温度条件(およそ 640-680)は、ほぼ花こう岩類のソリダス温度に相当しており、今回求

めた温度・圧力条件はマグマの固結時の条件を示していると思なされる。得られた圧力条件の多くは、1.2~2.2 kbar であり、領家変成岩類で推定されている変成圧力条件に比べると有意に低い。太田切花こう岩は、領家花こう岩の中でも比較的新しい固結年代を示すことを考慮すると、領家帯全体が上昇を続け比較的浅部に到達した際に固結したと考えられる。

<神原トータル岩> 神原トータル岩は、主に, Amp, Bt, Pl, Kfs および Qz からなる。そして、中部地方に産する領家花こう岩類のうち最も古い CHIME 年代を示し、北東側から準に天竜, 下山および幡豆地域に産する。このうち、幡豆地域の試料には、普遍的にマグマ起源のゾイサイト (Zo)・緑れん石 (Ep) が産し、少なくとも 0.5 GPa 以上の比較的高圧条件下で形成されたと考えられる。そして、Amp 地質温度圧力計を用いて推定される圧力・温度条件は、およそ 0.4-0.6GPa/730-770 であり(図3), マグマ起源の緑れん石グループの産出と調和的である。これに対し、天竜・下山両地域に産し神原トータル岩とされている試料は、幡豆地域の試料に比べると有意に低圧で形成されている。したがって、これまで共通の岩体と考えられ一括して“神原岩体”と呼ばれていたトータル岩のうち、幡豆地域

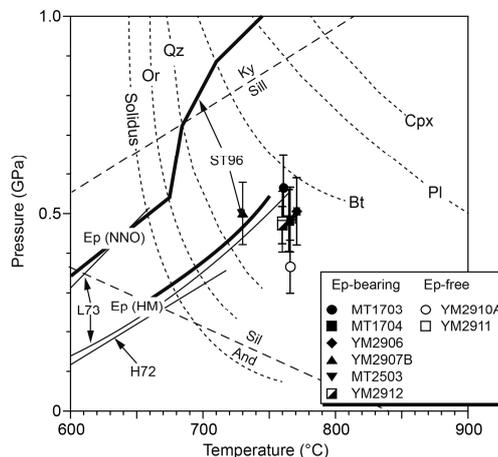


図3. 幡豆地域・“神原トータル岩”の形成条件の見積もり

のものは、その形成条件で見ると、他の2地域のものとは区別して議論されるべきである。このような違いが生じた理由としては、(1) 同源マグマではあるが、冷却速度の差などにより、記録している圧力・温度条件が異なった、もしくは(2) 本来貫入時期や起源とするマグマ自体が異なっている等が想定されるが、どちらがより確からしいについては、固結年代の再検討などによって検証する必要がある。

<三河地方の花こう岩類と変成岩類> 研究対象とした新城トータル岩、三都橋花こう閃緑岩、伊奈川花こう閃緑岩、清崎花こう閃緑岩と武節花こう岩は、基本的に Bt, Pl, Kfs および Qz からなり、武節試料は Grt と Ms, 三都橋試料は Amp, 新城試料は Grt もしくは Amp のいずれかを含む。また、およびそれらの母岩である変泥質岩は Grt + Bt + Ms + Pl + Qz の鉱物組合せを持つ。

花こう岩類中の Grt は、Prp および Alm 成分が結晶のリム部に向かって増加し、逆に Sps 成分は減少する逆累帯構造を示す。Amp は基本的に組成的に均質な Al に富むコア部を二次的に Al に乏しい Amp が置換する累帯構造を、Pl は結晶のリム部に向かって An 成分が漸減する累帯構造を示す。Grt を含む系の地質温度圧力計を適用すると新城トータル岩および武節花こう岩の固結条件は、それぞれ 0.35GPa/610 および 0.18-0.27GPa/590-610 と見積もられる。一方、Amp 系の地質温度圧力計を適用すると、三都橋および伊奈川花こう閃緑岩は、それぞれ 0.49-0.52GPa/710-730 および 0.23-0.29GPa/670-690 と、Grt を含む系よりも有意に高温条件を示す。その理由は明確ではないが、Amp は花こう岩類メルトのソリダス条件を示しているのではなく、メルトから晶出した初期の条件を保存していることによる可能性がある。新城および武節両試料か

らから求められる母岩である変成岩類の上昇速度はおよそ 0.5-0.67 km/Ma (0.5-0.7mm/year) である。

変泥質岩の Grt は累進累帯構造を示す試料と、逆累帯構造を示す網目状試料に大別される。見積もられる前者の再結晶条件は 0.62GPa/610 であり、後者は 0.27GPa/600 である。低圧の条件は、貫入した花こう類を熱源とする接触変成作用による再結晶を示している可能性がある。

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 (peer-reviewed)] (計 12 件)

1. Ye Kyaw Thu, Maw Maw Win, Enami, M., and Tsuboi, M. (2016, in press) Ti-rich biotite in spinel and quartz-bearing paragneiss and related rocks from the Mogok metamorphic belt, central Myanmar. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 111, doi: 10.2465/jmps/151020.
2. Maw Maw Win, Enami, M., and Kato, T. (2016) Metamorphic conditions and CHIME monazite ages of Late Eocene to Late Oligocene high-temperature Mogok metamorphic rocks in central Myanmar. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117, 304-316, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.11.023.
3. Nouri, F., Azizi, H., Golonka, J., Asahara, Y., Orihashi, Y., Yamamoto, K., Tsuboi, M., and Anma, R. (2016) Age and petrogenesis of Na-rich felsic rocks in western Iran: Evidence for closure of the southern branch of the Neo-Tethys in the Late Cretaceous. *Tectonophysics*, 671, 151-172, doi:10.1016/j.tecto.2015.12.014.
4. Azizi, H., Asahara, Y., and Tsuboi, M. (2014) Quaternary high-Nb basalts: existence of young oceanic crust under the

- Sanandaj-Sirjan Zone, NW Iran. *International Geology Review*, 56, 167-186, doi: 00206814.2013.821268.
5. Azizi, H., Asahara, Y., Tsuboi, M., Takemura, K., and Razyani, S. (2014) The role of heterogenetic mantle in the genesis of adakites northeast of Sanandaj, northwestern Iran. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 74, 87-97, doi: 10.1016/j.chemer.2013.09.008.
 6. Kato, T. and Suzuki, K. (2014) 'Background holes' in X-ray spectrometry using a pentaerythritol (PET) analyzing crystal. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 109, 151-155, doi: 10.2465/jmps.131010.
 7. Kouketsu, Y., Enami, M., Mouri, T., Okamura, M., and Sakurai, T. (2014) Composite metamorphic history recorded in garnet porphyroblasts of Sambagawa metasediments in the Besshi region, central Shikoku, Southwest Japan. *Island Arc*, 23, 263-280, doi: 10.1111/iar.12075.
 8. Kouketsu, Y., Nishiyama, T., Ikeda, T., and Enami, M. (2014) Evaluation of residual pressure in an inclusion-host system using negative frequency shift of quartz Raman spectra. *American Mineralogist*, 99, 433-442, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.11.023.
 9. Masumoto, Y., Enami, M., Tsuboi, M., and Houg, M. (2014) Magmatic zoisite and epidote in tonalite of Ryoke belt, central Japan. *European Journal of Mineralogy*, 26, 279-291, doi: 10.1016/j.jseaes.2015.11.023.
 10. Taguchi, T. and Enami, M. (2014) Compositional zoning and inclusions of garnet in Sanbagawa metapelites from the Asemi-gawa route, central Shikoku, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 109, 1-12. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.11.023.
 11. Taguchi, T. and Enami, M. (2014) Coexistence of jadeite and quartz in garnet of the Sanbagawa metapelite from the Asemi-gawa region, central Shikoku, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 109, 169-176, doi: 10.1111/iar.12075.
 12. Umeda, H. and Enami, M. (2014) Testing for robustness on estimation of graphitization degree by Raman spectroscopy. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 109, 279-285, doi: 10.1111/iar.12075.
- 〔学会発表〕(計1件)
1. 紅梅・榎並正樹・壺井基裕 (2014) 岐阜県西部・貝月山花崗岩中に産する Ca に富む斜長石. 日本鉱物科学会 2014 年年会, 熊本大学, 熊本市, 2014 年 9 月 19 日.
- 〔図書〕(計1件)
1. 榎並正樹 (2013) 岩石学, 共立出版, pp.254.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
榎並正樹 (ENAMI Masaki)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授
研究者番号: 20168793
 - (2) 研究分担者
加藤丈典 (KATO Takenori)
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授
研究者番号: 90293688
 - (3) 研究分担者
壺井基裕 (TSUBOI Motohiro)
関西学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 60411774