

高温変成作用継続時間の推定におけるジルコン中のメルト包有物の意義 - 領家変成帯の例

Significance of melt inclusions in Zrn in estimating the duration of high-T metamorphism - An example of the Ryoke belt

河上 哲生^{1*}, 山口 勇央¹, 三宅 亮¹, 牧 賢志¹, 柴田 知之², 横山 隆臣¹, 平田 岳史¹

KAWAKAMI, Tetsuo^{1*}, YAMAGUCHI, Isao¹, MIYAKE, Akira¹, MAKI, Kenshi¹, SHIBATA, Tomoyuki², Takaomi D. Yokoyama¹, HIRATA, Takafumi¹

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学大学院地球熱学施設

¹ Graduate School of Science, Kyoto Univ., ² Geothermal Research Lab, Kyoto Univ.

ジルコン中のメルト包有物は、ジルコンがメルト共存下で成長したことを示す重要な証拠であり、U-Pb ジルコン年代の意味を理解する上で重要な、ジルコンの成長時期制約に大きく貢献している。領家変成帯のミグマタイトに含まれるジルコン中から、メルト包有物が見いだされたので報告する。

領家変成帯青山高原地域には、角閃岩相高温部からグラニュライト相相当の変成度に達した砂泥質変成岩が広く露出しており、その岩相は北部 (Sil-Kfs 帯および Grt-Crd 帯低温部) で砂泥質片岩が卓越するが、南部 (Grt-Crd 帯中～高温部) ではミグマタイトが卓越する [1]。Grt-Crd 帯低温部の砂泥質片岩中に産するジルコンは、Grt-Crd 帯中～高温部に産するミグマタイト中のジルコンよりも粗粒なものが多い。LA-ICP-MS による U-Pb 年代測定の結果、これらはデトリタルなジルコンであり、リムにも領家変成作用に伴う変成ジルコンは成長していないことが分かった。

一方、Grt-Crd 帯高温部のミグマタイト中のジルコンは、BSE 像で白くみえる薄い帯状のコア・リム境界をもち、この白い帯に沿って数 μm の包有物が多数取り込まれている [c.f. 2]。この包有物を TEM 観察するとハローパターンが得られ、EDS 分析により Si、Al、K に富むガラスであることが分かった。このメルト (ガラス) 包有物の配列より内側のコアは、さまざまなデトリタル年代を与えるが、外側のリムは 93.1 ± 2.9 Ma の U-Pb コンコーディア年代を与えた。リムは $20\mu\text{m}$ 以上成長しており、その Th/U 比は 0.02 以下である。コア・リム境界におけるガラス包有物の存在により、リム成長時にメルトが共存したことが示唆されるから、このリムは領家変成作用時に、メルトとモナズ石存在下で成長したジルコンであると考えられる。本地域での砂泥質岩の部分溶融では、主に黒雲母・珪線石が消費されてザクロ石・堇青石が形成される反応が重要な役割を果たしているが [1]、黒雲母はジルコニウムの重要なホスト鉱物では無い [3]。従って黒雲母は多量のジルコン成長のためのジルコニウムの供給源とはなり得ず、本地域で新たな多量のジルコンを (再) 成長させるには既存のジルコンの溶解が必要である。この場合、メルト量の増加を伴いながらメルトをジルコン成分に飽和させるのは困難であるから、本地域のジルコンの若いリムは、部分溶融メルトが冷却固結する段階で、含水ソリダス付近で成長した可能性が高い。Grt-Crd 帯中温部のミグマタイト中のジルコンにも、高温部と同様、若く低い Th/U 比を持つリムが薄いながら成長しており、メルトの存在がジルコンの溶解再成長に重要な役割を果たしていることを示唆する [e.g. 4]。

Grt-Crd 帯低温部で全岩 Zr 濃度が特に高い傾向がないにもかかわらず、 $20\mu\text{m}$ 以上の粒径を持つジルコンのモードは Grt-Crd 帯低温部の方が高い。また SEM-EDS 観察では、粒径が $20\mu\text{m}$ 未満の小さなジルコンが Grt-Crd 帯中・高温部で多くなる傾向があり、高温部ではデトリタルコアを持たない $30\mu\text{m}$ 程度の若いジルコンが稀に見られる。これらのことから、Grt-Crd 帯中～高温部では、領家変成時にオーバーグロウスと並行して、細粒ジルコンの核形成が新たに進行したものと考えられる。

一方モナズ石は角閃岩相程度の変成度で成長し、メルトが存在してもその影響を受けて溶解・成長することは少ないようである [4]。従って、CHIME 年代測定によって 96.5 ± 1.9 Ma を与える、青山高原地域のモナズ石 [5] も昇温変成期に角閃岩相程度で形成されたと考えることができる。ジルコンとの成長時期の違いを用いることで、青山高原地域の角閃岩相以上の高温継続時間は 3.5 Ma 程度と見積もられる。

[1] Kawakami (2001) JMG 19, 61-75. [2] Cesare et al. (2003) CMP 146, 28-43. [3] Bea et al. (2006) Can Min 44, 693-714. [4] Rubatto et al. (2001) CMP 140, 458-468. [5] Kawakami & Suzuki (2011) Island Arc, 20, 439-453.

キーワード: ジルコン, ガラス包有物, ミグマタイト, LA-ICP-MS, 部分溶融

Keywords: zircon, glass inclusion, migmatite, LA-ICP-MS, partial melting

大陸衝突帯で見られるグラニュライト相における塩素に富む流体活動 The chlorine-rich fluid activity during granulite facies metamorphism in the continental collision zone

東野 文子^{1*}, 河上 哲生¹, Madhusoodhan Satish-Kumar², 石川 正弘³, 牧 賢志¹, 土屋 範芳⁴, Grantham Geoff⁵, 平田 岳史¹
HIGASHINO, Fumiko^{1*}, KAWAKAMI, Tetsuo¹, MADHUSOODHAN, Satish-Kumar², ISHIKAWA, Masahiro³, Kenshi Maki¹,
TSUCHIYA, Noriyoshi⁴, Geoff Grantham⁵, HIRATA, Takafumi¹

¹ 京都大学, ² 静岡大学, ³ 横浜国立大学, ⁴ 東北大学, ⁵ 南アフリカ地質調査所

¹ Kyoto University, ² Shizuoka University, ³ Yokohama National University, ⁴ Tohoku University, ⁵ Council for Geoscience

変成流体は、熱および物質の移動 (例えば Helgeson, 1964)、交代作用 (例えば Meyer & Hemley, 1967)、鉱物の安定領域の変化 (例えば Powell et al., 1991) などにおいて、重要な役割を果たす。グラニュライト相の変成岩中では、CO₂ に富む流体に関する研究は多く、重要視されている一方で、塩素に富む流体に関する研究は少ない。その理由の1つとして、塩水は、CO₂ に富む流体よりも、粘性およびぬれ角が小さいために、流体含有物として鉱物中に取り込まれにくいという性質 (Watson & Brenan, 1987) を持つことが挙げられる。しかし、塩水が高度変成岩中で果たす役割の大きさは、徐々に認識されつつある (Newton & Manning, 2010)。そこで本研究では、鉱物中の塩素濃度を用い、塩素に富む流体の下部地殻における活動と、それが果たす役割について制約を試みた。

東南極セールロンダーネ山地には、原生代後期からカンブリア紀にかけてのグラニュライトが広く分布する (Shiraishi et al., 2008)。本研究では、セールロンダーネ山地の南西部を除くほぼ全域にわたり、20 以上の泥質片麻岩を用いて、塩素に富む黒雲母の分布と産状を調べた。その結果、バルヒェン山に産する黒雲母 - ザクロ石 - 珪線石片麻岩を、塩素に富む流体活動を読み解く最適試料として選択した。この片麻岩中には、リンによる組成累帯構造を持つザクロ石斑状変晶 (粒径約 5-10 mm) が含まれる。ザクロ石斑状変晶は、振動累帯構造を呈するリンに富むコアと、コアの振動累帯構造を不連続に切り、再成長したリンに乏しいリムを持つ。ザクロ石斑状変晶のリンに富むコアには、塩素に乏しい黒雲母および燐灰石が含有され、リンに乏しいリムには、塩素に富む黒雲母および燐灰石が含有される。また、マトリクスの黒雲母と燐灰石は塩素に乏しい。さらに、特徴的な丸い粗粒ジルコン (粒径約 100 μm) が、ザクロ石斑状変晶のリムとマトリクスに分布する。

塩素に富む黒雲母がザクロ石のリムに含有された温度圧力条件は、ザクロ石 - 黒雲母地質温度計と GASP 地質圧力計 (Hodges & Spear, 1982) を用いて、約 800 °C、8 kbar と見積もられ、最高変成温度圧力条件は、同様に、約 850 °C、11 kbar と見積もられた。これらの温度圧力条件を用いて、それぞれの条件下に存在した黒雲母と燐灰石と共存する流体の f_{HCl} / f_{H_2O} を求めたところ (Selby & Nesbitt, 2000; Piccoli & Candela, 1994)、ザクロ石リムと共存する流体は、コアと共存する流体よりも f_{HCl} / f_{H_2O} が 10 倍以上大きいことが分かった。この結果は、ザクロ石のコアとリムの間で、塩素に富む流体が流入したことを示し、塩素に富む黒雲母と燐灰石は、塩素に富む流体の流入 (例えば Sisson, 1987) によって形成されたと考えられる。さらに、LA-ICPMS で測定したザクロ石のリムに含有される丸い粗粒ジルコンの U-Pb コンコーディア年代は、600 ± 13 Ma を示す。すなわち、塩素に富む流体は約 800 °C、8 kbar の条件下で、600 ± 13 Ma に流入したということが分かった。

塩素に富む黒雲母を含む泥質岩は、セールロンダーネ山地に広く、線状に分布する。その付近には延性せん断帯 (石川ほか, 2011) が存在する場合もあり、塩素に富む流体流入と、せん断帯は関連性がある可能性がある (例えば Kullerud et al., 2001)。セールロンダーネ山地で広域的にザクロ石に含有される塩素に富む黒雲母が確認されたことから、最高変成温度付近における塩素に富む流体活動は、他の大陸衝突帯でも起きている主要な現象の1つかもしれない。

キーワード: 塩素, 流体, 黒雲母, 燐灰石, セールロンダーネ山地

Keywords: chlorine, fluid, biotite, apatite, Sor Rondane Mountains

High-T metamorphic rocks and exhumation process of the Tseel terrane, SW Mongolia High-T metamorphic rocks and exhumation process of the Tseel terrane, SW Mongolia

Burenjargal Ulziiburen^{1*}, Atsushi Okamoto¹, Noriyoshi Tsuchiya¹
ULZIIBUREN, Burenjargal^{1*}, OKAMOTO, Atsushi¹, TSUCHIYA, Noriyoshi¹

¹Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

¹Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

Tseel area, Tseel metamorphic terrane, SW Mongolia is mainly composed of metapelitic gneisses, amphibolites (sillimanite zone) and intruded by ring structure of the granitoids (sillimanite zone) and covered by sediments. Three mineral zones in the pelitic gneisses determined based on the petrographic study and mineral assemblages of each zones as follows: (1) Biotite zone (Bt + Pl + Qtz + Ms + Chl + Cal) (2) Garnet zone (Grt + Bt + Pl + Qtz +/- Chl +/- Ru + Il + Cal) (3) Sillimanite zone (Grt + Bt + Pl + Qtz + Sil + Ms + Chl +/- Crd +/- St + Ru + Il + Cal +/- Fe-Mg Amp). Biotite zone observed in most area of southern and northern parts of Tseel area. Garnet zone is determined between biotite and sillimanite zones. The sillimanite zone is observed in the central parts of Tseel area. All mineral zones observed along the foliation from E to W trends at Tseel area.

We showed the characteristic features of chemical compositions of garnet, biotite and plagioclase in the pelitic gneisses and determine the P-T paths deduced from the garnet chemical zoning using thermodynamic equilibria in Tseel area as follows: Garnet in the pelitic gneisses shows almandine-rich compositions and some samples show clear compositional zoning. Based on the Ca (grossular) composition of garnet, the sillimanite zone is subdivided into sillimanite A and B zones. Garnet in the garnet zone shows relatively homogeneous compositions in the range of (530-600 °C and 6.0-10.0 kbar). The garnet chemical compositions in the sillimanite B zone show a homogeneous composition in a range of (620-750 °C and 1.8-6.0 kbar), and sometimes contain the retrograde rim produced by post-growth diffusion. The garnet chemical zoning in the sillimanite A zone typically is divided into three zones from core to rim: zone 1 (high Ca with homogeneous), zone 2 (decrease in Ca), and zone 3 (low Ca). The compositions of zones 1 and 2 correspond to those of garnet in the garnet and sillimanite B zones, respectively, and zone 3 indicate the effect of the post-growth diffusion. The P-T conditions during garnet growth were calculated by garnet-biotite geothermometry and garnet-biotite-plagioclase-quartz geobarometry. In application of geothermobarometry to garnet zonings, we calculated P-T conditions for four cases with highest and lowest XMg, Bt and XAn, Pl, that provide the possible P-T ranges for a given garnet composition and constrain roughly the shape of P-T path. The shapes of the P-T paths obtained for individual garnets are similar among the four cases, and the differences in pressure and temperature among the four cases are within 15 °C and 2.5 kbar, respectively. The P-T conditions estimated from the garnet zone are in a range of 530-600 °C and 6.0-10 kbar, that are located at the kyanite stability field. The P-T conditions estimated from the sillimanite B zone are in a range of (570-690 °C and 1.8-8.0 kbar). The longest P-T path is obtained from the samples in the sillimanite A zone, such as sample 3001, which shows a decompression from zone 1 (530-570 °C and 6.0-9.6 kbar) to zone 3 (570-620 °C and 2.0-4.0 kbar), corresponding with a change from the kyanite stability field to the sillimanite stability field. Zone 2 shows an increase in temperature by ~40 °C and a decrease in pressure by 4-6 kbar.

The intrusions of the granitoids occurred during the exhumation of the Tseel terrane, and produced the regional anticline structures and mineral zones. The high temperatures and homogeneous garnet zoning of the sillimanite B zone were resulted from the thermal effects from the granitoids. The sillimanite A and B zones experienced the P-T conditions of the kyanite stability field, that was similar to the garnet zone. The high temperature of the garnet zone cannot be explained solely by the contact metamorphism by granitoids, but the regional high geothermal gradient is expected in the subduction zones.

キーワード: Tseel terrane, garnet, P-T paths, exhumation process

Keywords: Tseel terrane, garnet, P-T paths, exhumation process

ベトナム北部・レッドリバー剪断帯の高温・高圧変成作用の時期: Paleogene vs. Permo-Triassic Timing of HP and HT-UHT metamorphism in the Red River shear zone, northern Vietnam: Paleogene vs. Permo-Triassic

中野 伸彦^{1*}, 小山内 康人¹
NAKANO, Nobuhiko^{1*}, OSANAI, Yasuhito¹

¹九州大学・比文
¹SCS., Kyushu Univ.

The Red River shear zone is left-lateral shear zone caused by collision of the India to the Eurasian continent at the Paleogene. Although most metamorphic rocks were reset by the deformation, recent U-Pb and Th-Pb in-situ chronological investigations have suggested complex ages from 262 to 25 Ma. In this presentation, we make clear the timing of the high-grade metamorphism using HP and HT-UHT granulites.

To realize the metamorphic conditions and timing of the high-grade event, we use the fluid inclusion technique in association with in-situ U-Pb zircon age. Abundant fluid inclusions are observed in garnet, corundum, staurolite, while are rare in quartz and zircon. Raman analysis shows that all fluid inclusions are composed of CO₂. Their average densities calculated from two Raman peaks are 1.00 +/- 0.06, 1.07 +/- 0.04, 1.09 +/- 0.03, 0.29 +/- 0.07, and 1.15 +/- 0.05 g/cm³ for garnet, corundum, staurolite, quartz, and zircon, respectively. The low-density CO₂ fluids in quartz imply that garnet and corundum have grown up at the different stage than quartz. The estimating pressure-temperature condition based on the mineral paragenesis (exclude quartz) and isochemical phase diagrams using whole rock chemistries of 3 rock types (garnet-corundum-sillimanite, garnet-spinel-sillimanite, and garnet-corundum-spinel granulites), former eclogite-facies (>2.0 GPa at 800 C) metamorphism and subsequent decompression under granulite-facies condition (>1000 C at 1.5 GPa) are identified.

U-Pb zircon ages show wide range from 265 to 36 Ma, however dark luminescent core of zircon containing high-density CO₂ inclusions yields a concordia age of 257 +/- 8 Ma, clearly indicating time of high-grade metamorphic event. This simple technique of combining Raman microscopy and U-Pb age could be easily and widely applicable to evaluate the zircon age and mineral associations in considering pressure-temperature-time evolution of multi-metamorphic events.

キーワード: in-situ U-Pb 年代測定, 流体包有物, 高度変成作用, レッドリバー剪断帯, ベトナム

Keywords: in-sith U-Pb dating, fluid inclusion, high-grade metamorphism, Red River shear zone, Vietnam

ボヘミア山塊南部 Lhenice shear zone に産する泥質片麻岩の Monazite 年代値とその意義

Monazite age of pelitic gneiss in the Lhenice shear zone (southern Bohemian Massif) and its significance

小林 記之^{1*}, サイモン ハーレー², 廣井 美邦¹, 平島 崇男³

KOBAYASHI, Tomoyuki^{1*}, Simon L. Harley², HIROI, Yoshikuni¹, HIRAJIMA, Takao³

¹ 千葉大学大学院理学研究科地球生命圏科学専攻地球科学コース, ² エジンバラ大学, ³ 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Chiba University, ²Department of Geology and Geophysics, University of Edinburgh, ³Department of Geology and Mineralogy, Graduate School of Science, Kyoto University

チェコ共和国のボヘミア地塊には、様々な高温・超高温変成岩が産している。ボヘミア地塊南部に位置する Lhenice shear zone には、粗粒のザクロ石を含む泥質片麻岩が産している。この泥質片麻岩は部分熔融を示唆する Patch 状あるいは、レンズ状の優白質部分 (leucosome) を多数含む。この泥質片麻岩のマトリクスの鉱物共生は、石英+カリ長石+堇青石+珪線石+黒雲母+ザクロ石±斜長石±スピネルである。マトリクスには、モナザイトが普遍的に産するが、ジルコンは非常に少ない。本岩石中に含まれる粗粒ザクロ石は Ca に富む中心部と Ca に乏しい縁辺部に区分でき、Ca は“シルクハット”状に均質な中心部から縁辺部へと減少している。この粗粒ザクロ石は、Kobayashi et al. (2011) の解析によって、リン (P) に乏しい自形の中心部 (コア)、P に富む外縁部 (リム)、P に乏しい最外縁部 (outermost リム) に区分されている。さらに、この粗粒ザクロ石の組成累帯構造を用いて、P に乏しい粗粒ザクロ石コア形成ステージ (Stage 1)、P に富むリム形成ステージ (Stage 2)、マトリクスステージ (Stage 3) が識別されている。Stage 1 は、700-900 °C で 1.5-2.3GPa の高压条件が見積もられ、Stage 2 (730-830 °C, 1.0-1.3GPa) から Stage 3 (740-850 °C, 0.6-0.8GPa) まで部分熔融を伴った等温減圧をした変成温度圧力条件が見積もられている (Kobayashi et al., 2011)。

今回、この含粗粒ザクロ石泥質片麻岩に含まれるモナザイトから、各 Stage における chemical Th-U-Pb isochron method (CHIME) 年代値を見積もった。

粗粒ザクロ石には、石英、カリ長石、斜長石、藍晶石、珪線石、黒雲母、モナザイト、アパタイト、チタン石、ジルコン、CO₂-N₂ 流体包有物などが包有されている。モナザイトは、粗粒ザクロ石の P に乏しいコア (Stage 1)、および、P に富むリム (Stage 2) 中に包有物として、さらに、マトリクス (Stage 3) にも単独粒子として産する。粗粒ザクロ石の P に乏しいコアに包有されているモナザイトのサイズは様々で、細粒 (約 10 μm) のものから、粗粒 (約 1mm) まで認められる。P に富むリム中に包有されるモナザイトは、細粒から中粒 (約 10 μm ~ 0.5mm) のものに限られる。マトリクスに存在するモナザイトは、中粒から粗粒 (約 0.5mm ~ 3mm) である。細粒なものを除く、すべてのモナザイトは中心部で Th にやや乏しく、縁辺部に Th に富む部分が確認される。P に乏しいコア (Stage 1) に包有されているモナザイトは、336 ± 11 Ma、P に富むリム (Stage 2) に包有されているモナザイトは、335.4 ± 7.2 Ma、マトリクス (Stage 3) に産するモナザイトからは 334.9 ± 3.9 Ma の年代値が得られた。また、各モナザイトの中心部は Th に富む縁辺部より若干ではあるが古い年代値を示した。得られた各 Stage の年代値は誤差の範囲内ではほぼ一致していた。以上のことから、本岩体は高压条件にまで沈み込んだ後、急速に上昇をしていたことが示唆される。

さらに、この泥質片麻岩を構成する粗粒ザクロ石の P に乏しいコアおよび、P に富むリム中には、廣井ほか (2011) で報告されているものと同様の、球晶状~グラノフリック状組織を有する、珪長質な火山岩様の包有物 (felsic volcanic rock-like inclusions 以下、FVRLI) が見出される。これらのことから、高压条件時の Stage 1 にはすでに部分熔融に伴うメルトが形成されていた可能性があり、その後の Stage 2 から Stage 3 まで部分熔融を伴った等温減圧をしていたと考えられる。このことは、本岩体は、高压条件 (Stage 1) から低压条件 (Stage 3) までの等温減圧と、その後、FVRLI に再結晶・粗粒化の暇を与えないほどの冷却過程が一連の事象として急速に展開したことを示している。

上記のような温度-圧力史を説明するテクトニック・モデルとしては、近年ヒマラヤやボヘミア山塊の研究から提唱されている “vertical extrusion and horizontal channel flow” モデル (例えば Schulmann et al., 2008) が、現段階において最も対応すると考えられる。

キーワード: ボヘミア山塊, モナザイト年代, 含粗粒ザクロ石泥質片麻岩, 部分熔融, 火山岩様包有物, 急冷

Keywords: Bohemian Massif, Monazite age, Grt-rich gneiss, Partial melting, Felsic volcanic rock-like inclusions (FVRLI), Rapid cooling

低圧型変成帯における温度圧力構造 -山口県東部領家帯を例にして- Thermobaric structure in low P/T type metamorphic belt -Case study of the Ryoike meta- morphic belt in the eastern Yamaguc

菅原 雄^{1*}, 池田 剛¹SUGAWARA, Yu^{1*}, IKEDA, Takeshi¹¹九州大学¹Kyushu University

現在の沈み込み帯の地殻~マントルには温度不均質が生じていることが、地震波トモグラフィー(例えば, Nakajima et al., 2009), または電気伝導度を用いた手法(例えば, Ogawa et al., 2001)からも予期され, さらに数値シミュレーション(例えば, Iwamori, 2000)からは温度圧力条件の時間変化を予測している。

一方で, 過去の地殻~マントル物質からも岩石学的手法から温度不均質構造が存在したことが見出され(Baker, 1987など), ギブス法(Spear, 1982)を適用することで, 温度圧力条件の時間変化が定量的に議論されるなど(Okamoto and Toriumi, 2001など), 前者の物理的な手法との対応が期待される。本研究は, 過去に沈み込み帯で形成された地殻物質である低圧型変成帯領家帯のうち, 山口県東部地域を対象とし, 鉱物組み合わせに基づく, 変成分帯と地質学的温度圧力計を適用する岩石学手法から, 温度不均質を提示し, その原因の解明を試みた。

泥質~砂質変成岩類の鉱物組み合わせから, 山口県下松~柳井地域は, 緑泥石帯, 緑泥石 黒雲母帯, 黒雲母帯, 白雲母-堇青石帯, カリ長石-堇青石帯, ザクロ石-堇青石帯, 珪線石-カリ長石帯に分帯される。Ikeda(1998)によって分帯された東部地域の帯のうち, カリ長石 堇青石帯, ザクロ石 堇青石帯, 珪線石 カリ長石帯は調査地域まで延長される。ザクロ石 堇青石帯は東部から西部にかけて狭くなり, 光市付近において消滅する。一方で, 珪線石 カリ長石帯は調査地域南部の室津半島から下松地域まで広く分布する。

上記の分帯のうち, 珪線石 カリ長石帯に属する計7つの泥質, 砂質変成岩とザクロ石-堇青石帯に属する3つの泥質, 砂質変成岩類に対して, SEM-EDSとEPMA-WDSを用いて組成を調べた。

ザクロ石は3試料を除いて, Coreの組成が均質で, RimがMnと富みFeとMgが乏しいという傾向を持つ(逆累帯構造)。これは高温条件で組成が拡散によって均質になった(Tracy(1982), Loomis(1983), Chakraborty & Ganguly(1991))後に, 縁辺部が冷却過程において周囲の鉱物と組成交換または, 鉱物生成反応に関わったために生じた(Ikeda, 1993など)と考え, Coreの部分をピーク時の組成を持つと考えた。

黒雲母は, 全ての試料において不均質である。この組成差は, 堇青石の分解組織周辺で起きている, $TiFe=MgMn$ の置換で説明される。また, 同様にザクロ石近辺では, $Ti_2=Al_2(FeMgMn)$ の置換で説明される(Ikeda, 1991)。ピークの組成は, またはTiが最も大きいもの, MgまたはMnが最も小さいものになるはずであり, ここではMgの値が最も小さいものをピークの組成とした。

斜長石は, 時にCaに富むCoreを持ち, 縁辺をNaに富む層が覆って累帯構造を呈している。この組織を温度低下時にNaに富む斜長石が成長していったと考え, ピーク時の組成は, Caに富むCoreの部分と考えた。

以上の試料に対して, ザクロ石 黒雲母温度計(Hodges and Spear, 1982)と相対地質温度圧力計(Ikeda, 2004)を適用した。その結果, 珪線石 カリ長石帯は $623 \sim 732$, $2 \sim 5$ Kbar, ザクロ石-堇青石帯は $671 \sim 880$, $2 \sim 6$ Kbarと広い温度圧力条件を示すことが分かった。

以上の結果に, Ikeda(2004)の結果を加えて, 温度圧力構造を推測した。温度は, 600 度~ 700 度の北西部から 700 度以上の南東部に向かって上昇していき, 東部にある柳井地域日積付近の限られた地域でのみ 800 以上になる。圧力は北西部では, $2 \sim 3$ Kbarを示し, 南東部の約 $5 \sim 6$ Kbarに向かって高くなっていく。推測した等温線と等圧線は斜交し, 等深度面に温度不均質があることが示される。

Miyazaki(2007)の数理モデルを適用すると, 東部の柳井地域日積付近, 南部の大島から室津, 西部の下松の順に, メルト配給レートが早く, また, メルト配給継続時間が短かったことが予測される。また, 見積もった圧力から東部と南部はほぼ等深度にあり, 狭い地域でメルト配給レートや継続時間に差が生じていたことを示唆する。このような, 狭い範囲におけるメルト配給の差異が生じる理由を考える必要がある。

キーワード: 変成岩, 低圧型変成帯, 領家帯, 沈み込み帯, 温度圧力構造, 黒雲母

Keywords: metamorphic rock, Low P/T metamorphic belt, Ryoike belt, subduction zone, Thermobaric structure, biotite

antigoriteの脱水分解とB-タイプ olivine CPOの形成 Dehydration breakdown of antigorite and the formation of b-type olivine CPO

永治 方敬^{1*}, Wallis Simon¹, 道林 克禎², 水上 知行³

NAGAYA, Takayoshi^{1*}, WALLIS, Simon¹, MICHIBAYASHI, Katsuyoshi², MIZUKAMI, Tomoyuki³

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻, ² 静岡大学理学部地球科学科, ³ 金沢大学理工学域自然システム学類地球学コース

¹Earth & Planetary Sci., Nagoya Univ., ²Instit. Geosci. Shizuoka Univ., ³Nat. Sci. Tech., Kanazawa Univ.

多くの沈み込み帯直上のマントルウェッジ (MW) での地震波の観測は、プレートの移動方向に垂直な方向に速い地震波を示している。この異方性の原因は、プレートの流れに平行な流れ方向に垂直に [1 0 0] 軸が集中した MW 内の b-Type olivine(Ol) CPO が存在するためと広く信じられている。

変形実験によって、b-type Ol CPO パターンは含水、高差応力の条件での転位クリープにより形成し得ることは確認された⁽¹⁾。熱物理モデリングによりは、Ol b-type CPO が形成されるのに必要な条件は、沈み込み境界近辺で満たされると示した⁽²⁾。

しかしながら、antigorite(Atg) を含む水和した前弧マントルに関する研究では、Atg の存在が、既に存在する CPO を弱め、強い CPO を発達するのを妨げることを示した⁽³⁾。これは、剪断が Atg 層で集中し、Atg と Ol の間で粒界すべりが起こることに起因すると考えられている。この結果は、プレート境界付近の Atg が安定な領域では、強い b-type Ol fabric が発達しにくいことを示唆する。

しかしながら、天然の岩石からも b-type Ol CPO が複数例報告されている。しかし、報告された b-type Ol CPO の形成条件をまとめると、中には比較的高温、低差応力下で形成したものがあり、それらは実験的な研究から予想される形成条件と合致しない。また転位クリープによって b-type Ol CPO が形成する場合に必要な c-slip の証拠も、天然のサンプルからは未だ報告されていない。

以上の議論から、天然の b-type Ol CPO の形成についてまだ完全に理解されていないことが判る。

今回私たちは、飛騨外縁帯の八方尾根で採取した試料から発見した Atg 片岩の Ol への topotaxial な成長によって形成した b-Type Ol CPO について報告する。脱水と Ol 形成の前に、すでに Atg は比較的低温、かつ水和条件下で変形し、CPO を持っていた。その後、Atg 片岩が接触変成作用を被り、脱水分解したことで、非変形の二次的な Ol が脈状に形成した⁽⁴⁾。

Ol 脈の CPO は、c 軸が鉱物 (伸長) 線構造に平行で、b 軸が面構造に垂直な特徴を持つ、強い b-type CPO を示す。Ol 脈と隣接する Atg の CPO は、面構造に高角な c 軸と線構造に平行な b 軸の強い集中を示す。最近の研究では、この Atg CPO は前弧 MW で幅広く分布すると考えられている。

Ol と Atg との間で topotaxial な成長の関係は 2 種類知られており、どちらの場合も [010]atg と [001]ol は平行であるが、[010]ol は [100]atg (type 1)、もしくは [001]atg (type 2) のどちらかと平行である⁽⁵⁾。今回観測された Ol CPO と Atg CPO との関係は、2 つの鉱物間において type 2 の topotaxial な関係があることを示している。

Atg を含むマントルは、前弧マントルで広範囲に分布していると予想される。この物質は、沈み込みスラブに引きずられ、沈み込んでいく際に、変形し面構造を持つと考えられる。脱水分解を経験するのに十分な高温、高圧状態に達すると、この面構造を持った Atg 片岩は、脱水分解するだろう。私たちの結果は、この脱水分解が起こるとき、新たに形成される Ol が b-type CPO を持つことを示唆する。この topotactic 成長に起因する Ol CPO は、沈み込み境界近傍の最も冷たい領域から離れた MW においても形成することができると考えられる。

今回明らかになった b-type Ol CPO 形成のメカニズムは、変形実験の結果と天然のサンプルで観測される特徴との相違点をうまく説明することができ、b-type Ol fabric が沈み込み帯に限定されることを説明できる。

[引用文献]

(1) Katayama, I. & Karato, S. 2006, Phys. Earth Planet. Inter. 157 (1-2), 33-45

(2) Kneller, E.A. et al. 2005, Earth Planet. Sci. Lett. 237, 781-976

(3) Wallis, S. R. et al. 2011, J. Geol. Soc. London, Special Publications 360, 113-127

(4) Nozaka, T. 2005, J. Metamorphic Geol. 23 711-723

(5) Boudier, F. et al. 2010, J. Petrol. 51, 495-512

キーワード: トポタキシー, オリビン, CPO, アンチゴライト, 地震波異方性

Keywords: topotaxy, olivine, CPO, antigorite, seismic anisotropy

蛇紋岩の高圧分解によるスピニフェックス様組織を持つカンラン石斜方輝石岩とクリノエンスタタイトの形成

Spinifex-textured olivine-enstatite rock and clinoenstatite formed by high pressure breakdown of antigorite

西山 忠男^{1*}, 恵口 響¹, 吉朝 朗¹, 杉山和正², 有馬 寛², 湯蓋邦夫²

NISHIYAMA, Tadao^{1*}, EGUCHI Hibiki¹, YOSHIASA Akira¹, SUGIYAMA Kazumasa², ARIMA Hiroshi², YUBUTA Kunio²

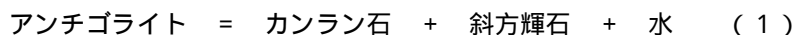
¹ 熊本大学自然科学研究科, ² 東北大学金属材料研究所

¹ Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, ² Institute for Materials Research, Tohoku University

(1) スピニフェックス様組織を持つカンラン石斜方輝石岩の成因

九州中部に分布する高温低圧型の肥後変成岩には、スピニフェックス様組織を有する変成カンラン岩（竹葉石）が分布することは良く知られており、水田（1978）による詳細な研究がある。この岩石は片麻岩の中に層状に分布しており、主として伸長したカンラン石と斜方輝石（エンスタタイト）からなる。カンラン石は定方向配列を示さない。カンラン石の大部分は蛇紋石に変質している。斜方輝石は多くの場合、変質を受けずに残存しているが、一部滑石に置換されているものもある。試料によっては少量のスピネル、トレモラ閃石、直閃石を含む。蛇紋石、滑石、トレモラ閃石、直閃石は2次鉱物と考えられ、この岩石は変成されたカンラン石斜方輝石岩ないしハルツバージャイトである。Trommsdorff et al.(1998) はスペインに分布するスピニフェックス様組織を示すカンラン石斜方輝石岩をその鉱物組合せと岩石組織から、アンチゴライトが高圧で分解して形成された岩石であると論じた。とくにカンラン石が[001]方向に伸長するスピニフェックス様組織は火成起源であれ変成作用によるものであれ、流体（メルトや変成流体）に富む環境で形成されるものだと論じ、スペインの岩石は、蛇紋石の脱水によって水に富む変成環境下で形成されたものと結論づけた。最近 Kendrick et al.(2011) はこの岩石の流体包有物を分析し、海水起源の希ガス組成と塩素に富む組成を保持していることを明らかにし、これらの特徴は、前弧におけるスラブベンディングにより浸入した海水によって蛇紋岩化したマントルが70km程度の深さで脱水分解したものであると論じた。

Trommsdorff et al.(1998) がスペインの岩石について論じたのと同様に、肥後変成岩中のカンラン石斜方輝石岩がほぼカンラン石と斜方輝石のみよりなること、ならびにカンラン石が顕著な伸長を示すこと、そのカンラン石は定向配列を示さないことを考えると、この岩石は次のようなアンチゴライトの脱水分解によって形成されたと考えるのが自然である。



この反応はおよそ 600 - 700 °C, 2 GPa 以上の圧力下で起こる。肥後変成岩の大半は白亜紀の高温低圧型変成作用の産物であるが、その中に高温低圧型変成作用とは異質な高圧条件を示す鉱物組合せが存在することはいくつかの研究によって示されている（Kano and Uruno, 1995; Karakida et al., 1989; Osanai et al., 1998; Maki et al., 2004; and Maki et al., 2009）。今回、変成カンラン石斜方輝石岩が、これまで知られている肥後変成岩の最高圧力（1 GPa）よりもはるかに高い圧力条件を示すことが明らかになった。

(2) クリノエンスタタイトの産状とその成因

変成カンラン石斜方輝石岩中の輝石は、En₉₀Fs₁₀ - En₉₅Fs₅ の組成を有し、CaO や Al₂O₃ にきわめて乏しい。単結晶 X 線回折実験 (Rigaku RAPID) ならびに透過電子顕微鏡観察 (TOPCON, EM-002B, at 200 kV) の結果、この輝石は単斜エンスタタイト (P₂₁/C) と斜方エンスタタイト (Pbca) のラメラから成ることが分かった。単斜エンスタタイトは斜方輝石とほぼ同じ組成を有し、組成的には区別できない場合が多い。しかし、試料によっては、母相よりもわずかに鉄に富み、組成から反射電子線像で明瞭に識別できるラメラも存在する。

単斜エンスタタイトと斜方輝石は、b 軸 c 軸方向が一致し、ラメラは a* に垂直方向にナノレベルから数十ミクロンの幅で観察される。ナノレベルのラメラ領域は、光学的に波状消光する。数十ミクロン幅の領域は、c 軸に対し斜消光する広いシングルドメインの領域を形成し単結晶構造解析に使用した。観測される消滅則と単斜晶と斜方晶の構造モデル解析から、両領域が空間群 P₂₁/C と Pbca エンスタタイトであることが確認できた。

地球上の岩石からのクリノエンスタタイトの報告は極めて限られている。最近、クリノエンスタタイト高圧相 (C2/c) の存在が実験によって明らかにされ (Gasparik, 1990 など)、天然のカンラン岩や輝岩に産するクリノエンスタタイトとの成因関係が議論されている。Zhang et al.(2002) は、中国の Dabie-Sulu 超高压変成帯のザクロ石輝岩中に広くクリノエンスタタイトが産することを報告し、この岩石の形成条件を 6.7 GPa, 750 °C 程度と見積もった。肥後変成岩の場合、アンチゴライトの脱水分解によるカンラン石・斜方輝石岩の形成条件は、上に述べたように 600 ? 700 °C, 2 GPa 程度であり、この条件はクリノエンスタタイト低圧相と斜方輝石 (オルソエンスタタイト) の相境界にきわめて近い。したがって、肥後変成岩のクリノエンスタタイトは、斜方輝石から剪断応力により形成されたものと考えるのが妥当であろうが、高圧相からの転移の可能性も捨てきれない。

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SMP46-08

会場:304

時間:5月25日 11:00-11:15

キーワード: 蛇紋岩, スピニフェックス組織, クリノエンスタタイト, 超高压変成岩, 肥後変成岩

Keywords: serpentinite, spinifex texture, clinoenstatite, ultra-high pressure metamorphic rock, Higo Metamorphic Rocks

三波川帯・五良津岩体のひすい輝石 藍晶石エクロジャイトの成因と意味 Petrogenesis and implications of jadeite-kyanite eclogite from the Iratsu body of the Sanbagawa belt, SW Japan

遠藤 俊祐^{1*}, 壺井 基裕²

ENDO, Shunsuke^{1*}, TSUBOI, Motohiro²

¹名古屋大学, ²関西学院大学

¹Nagoya University, ²Kwansei Gakuin University

Discovery of a new occurrence of jadeite- and kyanite-bearing eclogite from an outcrop within the Iratsu body of the subduction-type Sanbagawa belt, SW Japan, allows us to assess existing solid-solution models for clinopyroxene, and obtain insights into spatial variation in P-T conditions and/or H₂O activity during the eclogite-facies metamorphism of this region. The jadeite + kyanite assemblage is stable at higher P-T conditions or lower H₂O activity compared to paragonite. There is no significant difference in bulk rock composition between the newly found jadeite-kyanite eclogite and paragonite eclogite, which is the predominant eclogite type in the Iratsu body. The jadeite-kyanite eclogite is a medium-grained massive metagabbro consisting mainly of garnet, omphacite, kyanite, quartz, epidote, phengite, subcalcic amphibole and rutile. Pre-eclogitic relics of sodic augite (Jd₇₋₂₄Acm₆₋₁₆), actinolitic hornblende, Fe-rich garnet (Alm₆₂₋₇₁Grs₁₉₋₂₅Prp₅₋₁₃Sps₃₋₄) and magnetite are sporadically preserved. Eclogitic garnet (Alm₅₄₋₆₁Grs₁₆₋₂₀Prp₂₀₋₂₅Sps₁₋₂) optically shows a dusty appearance due to abundant microscopic inclusions of kyanite, quartz, epidote, phengite, omphacite (Jd₄₀₋₅₅Acm₇₋₁₃) and impure jadeite (Jd₆₂₋₈₆Acm₀₋₇). Jadeite is exclusively present as inclusions in garnet. The miscibility gap between the ordered omphacite (P2/n) and disordered impure jadeite (C2/c) progressively narrows during garnet growth, implying the temperature of the solvus apex coincides with the thermal peak of metamorphism. The observed compositional gap and the result of garnet-clinopyroxene Fe²⁺-Mg exchange thermometry are consistent with the phase diagram calculated in the pseudo-binary augite (Di₆₆Hd₁₄Acm₂₀)-jadeite system by using the newest solid-solution model of Deiner and Powell (2012), and the calculated apex of the omphacite-jadeite solvus is at 625 deg.C. However, calculated pseudosections with XRF-derived bulk rock composition and the solid-solution model have no jadeite stability field for any reasonable values of P, T, X_{Fe³⁺} and M_{H₂O}, although the matrix assemblage is satisfactorily reproduced. This may suggest effective bulk composition around growing garnet was significantly different from the XRF-derived bulk rock composition. The localized feature of eclogite-facies equilibration is also inferred from the observed microstructures such as Omp + Qz + Amp pseudomorphs (prograde symplectites) after igneous augite. We obtain the jadeite stability field in the calculated pseudosections by subtracting augite from the XRF-derived bulk composition. High chlorine contents of amphibole (<1.5 wt% Cl) and apatite (<7.0 wt% Cl) indicate that the eclogite-facies equilibration was triggered by an influx of saline fluids. Multi-equilibrium thermobarometry for the assemblage Grt + Omp + Ky + Ph + Ep + Qz gives metamorphic P-T conditions of around 2.3 GPa and 600 deg.C. The estimated high-P conditions are also supported by high residual pressure (max. delta omega-1 = 13.3 cm⁻¹, equivalent to 0.85 GPa) of quartz inclusions in garnet. These results imply the presence of a significant metamorphic pressure gradient within the Iratsu body, and detailed baric structure of this region will be revealed by further application of the quartz-in-garnet barometry (Enami et al. 2007).

Reference: Deiner and Powell (2012) *J Metam Geol* 30, 113-130; Enami et al. (2007) *Am Mineral* 93, 1303-1315.

キーワード: エクロジャイト, 五良津岩体, 変斑れい岩, ひすい輝石, オンファス輝石

Keywords: eclogite, Iratsu body, jadeite, metagabbro, omphacite

Metamorphism of garnet glaucophane schists from the Bizan area, Sambagawa metamorphic belt, eastern Shikoku, Japan

Metamorphism of garnet glaucophane schists from the Bizan area, Sambagawa metamorphic belt, eastern Shikoku, Japan

Kabir Md Fazle^{1*}, Takasu Akira¹, Nakamura Mayuko¹, Kondo Yuki¹, Kainuma Masaaki¹
Kabir Md Fazle^{1*}, Takasu Akira¹, Nakamura Mayuko¹, Kondo Yuki¹, Kainuma Masaaki¹

¹Department of Geoscience, Shimane University, Japan

¹Department of Geoscience, Shimane University, Japan

The Bizan area is located in the Tokushima Prefecture of eastern Shikoku, Japan and it is mainly composed of pelitic schists, basic schists and siliceous schists with minor garnet glaucophane schists. Faure (1983) suggested that there occur a melange with tectonic blocks of serpentinite, metagabbro and garnet-amphibolite (garnet glaucophane schists in this study) along the ductile shear zone between spotted and non-spotted zones in the Bizan area. Garnet glaucophane schists consist mainly of garnet, amphibole, epidote, phengite (Si 6.41-6.80 pfu), paragonite, chloritoid, chlorite, albite, rutile, titanite, ilmenite and quartz. A schistosity is defined by preferred orientation of glaucophane, phengite and chlorite.

Garnets are almandine-rich composition and display prograde growth zoning with decreasing X_{Sp} (0.18-0.01) and increasing X_{Alm} (0.54-0.70) from the core to the rim. The cores of garnet contain inclusions of chloritoid (X_{Mg} 0.08-0.23), chlorite, epidote, phengite (Si 6.41-6.55 pfu), paragonite, titanite and quartz and polyphase inclusions of phengite + paragonite + epidote + chloritoid + chlorite + quartz assemblage. The rims of garnet contain inclusions of amphiboles (glaucophane; zoned amphibole with barroisite core and glaucophane rim), epidote and quartz and polyphase inclusions of glaucophane + epidote. Garnets are partly replaced by chlorite. Glaucophanes in the matrix contain inclusions of phengite, epidote, chlorite, titanite and quartz. Some of them are partly replaced by Wnc, Brs, Mg-Ktp and Act at their rims and cracks. Phengites (Si 6.50-6.80 pfu) in the matrix are contain inclusions of glaucophane, epidote and chlorite. Some large grains of epidotes and chlorites contain inclusions of glaucophane, phengite, epidote, titanite and quartz.

Textural relationship, mineral assemblage and thermobarometric results suggest a polyphase tectonometamorphic evolution of the garnet glaucophane schists. The mineral assemblages of polyphase inclusions within the cores of the garnet such as barroisitic amphiboles, chloritoid, chlorite, epidote, phengite, paragonite and quartz constrain the $P-T$ conditions of a prograde stage at 450-500°C and 9-11 kbar (by THERMOCALC) at epidote-blueschist facies metamorphic conditions. The rims of the porphyroblastic garnets include inclusions of glaucophane, epidote, quartz and schistosity-forming matrix phengite suggesting the peak metamorphic mineral assemblages. THERMOCALC average $P-T$ calculation suggests a metamorphic condition of the eclogite facies metamorphism of 550-600°C and 17-19 kbar. Porphyroblastic garnets are partly replaced by chlorite at their rims, and matrix glaucophanes are replaced by Wnc, Brs, Mg-Ktp and Act along rims and cracks suggests a retrograde metamorphism took place at the epidote-amphibolite facies to follow a clockwise decompression path.

Large grains of epidotes and chlorites in the matrix which contain peak metamorphic mineral assemblages of glaucophane, phengite, epidote and quartz suggesting another high-pressure prograde metamorphism took place. This high-pressure metamorphism can be correlated with the Sambagawa metamorphism in the Besshi area, central Shikoku (Aoya, 2001; Kabir and Takasu, 2010a, b).

The eclogite facies metamorphism followed by another high-pressure metamorphism as the Sambagawa metamorphism is first described from the garnet glaucophane schists in the Bizan area, Sambagawa metamorphic belt. The metamorphic evolution is similar to that of the eclogites in the Besshi area, central Shikoku (Kabir and Takasu, 2010a, b). Eclogite in the Sambagawa belt occurs mainly in the Besshi area, central Shikoku and slightly in the Kotsu area, eastern Shikoku. This study revealed that the occurrence of eclogites now extend to the Bizan area in eastern Shikoku.

Reference:

Aoya (2001) *J Petrology*, 42, 1225-1248; Faure (1983) *J Geol Soc of Japan*, 89, 319-329. Kabir and Takasu (2010a) *J Meta Geol*, 28, 873-893; Kabir and Takasu (2010b) *Earth Sci*, 64, 183-192.

キーワード: Sambagawa metamorphic belt, garnet-glaucophane schist, eclogite, chloritoid, Bizan area, eastern Shikoku
Keywords: Sambagawa metamorphic belt, garnet-glaucophane schist, eclogite, chloritoid, Bizan area, eastern Shikoku

Metamorphic conditions of kyanite-garnet-chloritoid schists associated with eclogites in the Lake Zone, SW Mongolia

Metamorphic conditions of kyanite-garnet-chloritoid schists associated with eclogites in the Lake Zone, SW Mongolia

Javkhlan Otgonkhuu^{1*}, Akira Takasu¹, Batulzii Dash², Md. Fazle Kabir¹

OTGONKHUU, Javkhlan^{1*}, TAKASU, Akira¹, Batulzii Dash², Md. Fazle Kabir¹

¹Geoscience Dept. Shimane University, Japan, ²Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

¹Geoscience Dept. Shimane University, Japan, ²Mongolian University of Science and Technology, Mongolia

The kyanite-garnet-chloritoid schists associated with eclogites from the Alag Khadny metamorphic complex, Chandman district, Lake Zone, SW Mongolia, consist of garnet, chloritoid, muscovite, phengite, chlorite, paragonite, kyanite, rutile, ilmenite, zircon, quartz and carbonaceous matter. Garnets occur as subhedral to anhedral porphyroblast up to 5 mm across and they are almandine-rich variety in composition. The garnets are zoned with inclusion-rich cores and inclusion-poor rims. The garnets display a prograde pattern of compositional zoning, X_{SpS} decreasing and X_{Prp} increasing from core to rim. The cores contain inclusions of muscovite ($Si=6.06-6.29$ cations per formula unit, *pfu*), paragonite, chlorite, chloritoid and quartz. The rims contain inclusions of kyanite ($Fe_2O_3 < 1.24$ wt%; $Cr_2O_3 < 0.03$ wt%), phengite ($Si=6.40-6.63$ *pfu*), chloritoid ($X_{Mg} [Mg/(Fe+Mg)]=0.08-0.18$), chlorite ($X_{Mg} < 0.42$), and quartz. A well-developed schistosity is defined by preferred orientation of chloritoid ($X_{Mg} = 0.11-0.21$), chlorite ($X_{Mg} = 0.36-0.53$) and white micas [phengite ($Si=6.57-6.63$ *pfu*) and muscovite ($Si=6.23-6.34$ *pfu*)] in the matrix.

Based on the textural relationship and chemical composition of minerals, following metamorphic stages are distinguished in the kyanite-garnet-chloritoid schists, i.e. (i) pre-peak stage, (ii) peak metamorphic stage, and (iii) retrograde stage.

The porphyroblastic garnets represent a typical prograde zoning, X_{SpS} decreasing and X_{Prp} increasing from core to rim. The pre-peak stage (i) is defined by the mineral inclusions in the cores of the garnets. They are muscovite ($Si=6.06-6.29$ *pfu*), paragonite, chlorite, chloritoid ($X_{Mg}=0.08-0.13$) and quartz, and they indicate relatively low-pressure and low-temperature conditions such as the greenschist facies. The peak metamorphic stage (ii) is defined by the mineral assemblage of the inclusions in the rims ($X_{Prp} < 0.13$) of the garnets, i.e. kyanite, phengite ($Si=6.40-6.63$ *pfu*), chloritoid ($X_{Mg}=0.08-0.18$), chlorite ($X_{Mg}=0.42$), rutile and quartz, and schistosity forming minerals, i.e. chloritoid ($X_{Mg} = 0.11-0.21$), phengite ($Si=6.57-6.63$ *pfu*), and chlorite ($X_{Mg}=0.36-0.53$) coexisting with the rims of porphyroblastic garnet. THERMOCALC (V. 3.33) (Powell and Holland, 1994) calculations for the rim of the garnet coexisting minerals of kyanite, phengite, chloritoid, and chlorite yielded P-T conditions of $T=575-585^\circ C$ and $P=10-11$ kbar of high-pressure epidote-amphibolite to low-pressure eclogite facies conditions of the high-pressure intermediate type metamorphism which are distinctly lower in metamorphic pressure than accompanied eclogites ($T=590-610^\circ C$, $P=20-22.5$ kbar; Stipska et al., 2010) even though the similar temperature conditions. However, $^{40}Ar/^{39}Ar$ muscovite plateau ages of the eclogite (543 ± 3.9 Ma) and kyanite-garnet-chloritoid schist (537 ± 2.7 Ma) are similar (Stipska et al., 2010), indicating simultaneous exhumation of both metamorphic rocks to the crustal level. There is no evidence of high-pressure type metamorphic event similar to the eclogites in the kyanite-garnet-chloritoid schists. These fact suggest that subduction within low-geothermal gradient conditions to produce the eclogites occurred first, subsequently relatively high-geothermal gradient metamorphism for the kyanite-garnet-chloritoid schists took place, and then whole sequence of metamorphic rocks were exhume to the shallower levels at ~ 540 Ma.

Reference:

Powell, R. and Holland, T.J.B. (1994). Amer. Miner., 79, 120-133

Stipska, P., Schulmann, K., Lehmann, J., Corsini, J., Lexa, O. and Tomurhuu, D. (2010) J. of Meta. Geol., 28, 915-933

キーワード: Kyanite-garnet-chloritoid schist, Eclogite, Alag Khadny metamorphic complex, Lake Zone, Mongolia

Keywords: Kyanite-garnet-chloritoid schist, Eclogite, Alag Khadny metamorphic complex, Lake Zone, Mongolia

300-400 程度の石墨化度を示す炭質物のラマンスペクトルと反射率 Raman spectra and reflectances of carbonaceous matters showing graphitization temperatures at around 300 - 400 C

村田 雅美^{1*}, 佐藤 航¹, 星野 健一²
MURATA, Masami^{1*}, Wataru Sato¹, HOSHINO, Kenichi²

¹ 広島大学理学部, ² 広島大学大学院理学研究科
¹Fac. Sci., Hiroshima Univ., ²Grad. Sch. Sci., Hiroshima Univ.

The degree of graphitization of carbonaceous matter (CM) has long been investigated using X-ray diffraction analyses, optical (reflectance) studies and Raman spectroscopies to analyze thermal histories of sedimentary rocks. Hirota and Hoshino (2007) noted that the degree of graphitization may reveal much detailed thermal histories than those recorded in the mineral assemblages. Komorek and Morga (2003) also demonstrated that the reflectances of CMs increased by only several hours heating in an oven. Therefore, we may expect the CM geothermometers for analyses of short-range thermal events such as dike intrusion, vein formation and faulting.

However, the thermometer using Raman spectrum of CM proposed by Beyssac et al. (2002) can be applied to the temperature range from 640 to 330 C with poor correlations at low temperatures. On the other hand, the thermometers by reflectance of CM ('vitrinite reflectance') are probably limited below 300 C (e.g., Hashimoto et al, 2004). Therefore, we have studied detailed characteristics of Raman spectra and reflectances of CMs showing their graphitization temperatures at around 300 - 400 C to investigate a future possibility of the CM geothermometer as a tool for analyses of the short-range thermal events.

We collected pelitic rock samples of the Kuga formation of the Jurassic accretion complex from the Yasaka contact aureole, Yamaguchi Prefecture, where the Hiroshima-type granite of the Cretaceous age intruded. Takami et al. (1993) classified the contact aureole into the cordierite zone (ca. < 1 km from the contact) and the biotite zone (1 - 2 km wide). Takami and Nishimura (2000) mentioned that the apparent d002 of CM decreases sharply in the biotite zone at around 1 km from the contact.

Two types of CM can be identified under microscopic observations of the collected rock samples. Hereafter, we may call them temporarily as M-type and P-type CMs. The former shows visible reflection pleochroism as well as anisotropism, while the latter does non- or weak ones. Therefore, the P-type CM is probably collinite for so-called 'vitrinite reflectance' measurements. They can be identified clearly also by their Raman spectra. The G bands of the P-type CMs are broad, while those of the M-type are characteristically narrow and sharp. It is interesting that the P-type CM could not be observed in the samples collected from the vicinities of the contact with granite.

The R2 ratio of the Raman spectrum of the M-type CM shows a systematic change with a distance from the contact. It increases from 0.47 (= 430 C, estimated from the equation of Beyssac et al., 2002) at Loc. 03 (0.1 km away from the contact) to 0.60 (370 C) at Loc. 10 (2.4 km). On the other hand, although the ratio of the P-type CM is the highest as 0.77 (300 C) at Loc. 10, the ratio in the other samples closer to the contact does not vary with the distance and is stable as 0.75 (310 C), implying the lower limit of the ratio of the P-type CM.

The P-type CM from Loc. 10 shows the lowest reflectance as 3.8 % (= 320 C, from the equation of Barker, 1988), while those from the other localities are around 4.7 % (350 C) and show no significant variation with the distance, implying also the upper limit of the reflectance of the P-type CM. Although the reflectance of the M-type CM is slightly higher than that of the P-type CM in the sample from Loc. 10, no obvious difference between the two could be seen in the other samples.

It should be emphasized that there may be a size dependency of the M-type CM on its R2 ratio in the samples close to the boundary, that is, a smaller CM tends to show a higher temperature. Hence, it can be expected to apply the R2 ratio of the M-type CM not only as a thermometer but also as a 'chronometer' for short-range thermal events.

An estimation of a P-T condition of the vein-formation in the footwall of the Nobeoka thrust will be presented as an example of the analyses of the thermal events.

キーワード: 炭質物, ラマン, 反射率, 地質温度計

Keywords: carbonaceous matter, Raman, reflectance, geothermometer

負の残留圧力を保持するざくろ石中の石英: 石英ラマン圧力計の高温変成岩への適用

Study of negative residual pressure of quartz in garnet: Quartz Raman spectra of high-temperature metamorphic rocks

瀧 佑衣^{1*}, 榎並 正樹¹, 池田 剛²

KOUKETSU, Yui^{1*}, ENAMI, Masaki¹, IKEDA, Takeshi²

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹Graduated School of Environmental study, Nagoya University, ²Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University

変成作用によって成長したざくろ石に取り込まれた石英は、地表に至るまでの温度圧力の変化に伴って体積変化が起きる。取り込まれた石英の体積が、周りのざくろ石の体積よりも大きくなる場合は圧縮応力が、逆に石英の体積の方が小さくなる場合は伸長応力が石英にかかり、残留圧力が保持される。石英のラマンスペクトルのピーク位置は圧縮応力によって高波数側に、伸長応力によって低波数側にシフトする。Enami et al. (2007, AM, 92, 1303-1315) は、いくつかの異なる変成圧力下で形成されたサンプル中のざくろ石に包有されている石英のラマンスペクトルのピークシフト度 ($\Delta\nu_1$) を測定し、残留圧力を推定した。そして、残留圧力と変成圧力の間に正の相関があることを示した。数値計算モデルから、ざくろ石の化学組成や温度の依存性はほとんどないとされ、この手法は圧力計として使えることを提案した(石英ラマン圧力計)。熱力学モデルを用いた圧力計とは独立して圧力を見積もることが可能であるため、最近では、Kouketsu et al. (2010, JMPS, 105, 9-19) や Endo et al. (2012, JMG, in press) によって高压変成岩の圧力見積りの指標の一つとして適用されている。

近年、西山・相川 (2011, JGUM, SMP046-05) によって、負の残留圧力を示すざくろ石中の石英包有物が肥後変成岩から報告された。Enami et al. (2007) で用いられている簡単な弾性相互作用モデル (Van der Molen, 1981, Tectonophysics, 73, 323-342) を用いた場合、負の残留圧力を得る温度圧力範囲はほとんどない。そこで彼らは、石英が高温で安定な相の状態であるざくろ石に包有された後、地表に露出する過程で相に相転移したため、石英の体積が急激に減少し、負の残留圧力を獲得したと解釈した。

本研究では、従来の石英ラマン圧力計では評価されていない負の残留圧力を保持する石英包有物についてさらに詳しく調べるため、高 T/P 条件下で形成された柳井領家帯と東南極から採取された岩石について分析した。柳井領家帯変成岩については、Ikeda (2004, CMP, 146, 577-589) において詳細な温度圧力見積りがなされている 5 つの変成分帯 (Chl-Bt, Ms-Crd, Kfs-Crd, Sill-Kfs, Grt-Crd zone) で採取されたサンプルそれぞれについて分析した。Chl-Bt, Ms-Crd, Kfs-Crd 帯は - 石英が、Grt-Crd 帯は - 石英が安定で、Sill-Kfs 帯は - 相転移線の近傍である。東南極のサンプルは超高温変成作用を被っており相安定領域を経験している。

分析の結果、柳井領家帯変成岩のすべてのサンプル中のざくろ石に包有されている石英の残留圧力は同程度の負の残留圧力値 ($\Delta\nu_1 = -4 \sim -6 \text{ cm}^{-1}$) を示した。また、東南極の片麻岩中に含まれるざくろ石斑晶中には、非常に低い残留圧力値 ($\Delta\nu_1 = -12 \text{ cm}^{-1}$) を保持する石英が普遍的に含まれていた。この結果は、石英がざくろ石に取り込まれた状態が相でも相でも、負の残留圧力を保持することを意味する。すなわち、石英の負の残留圧力を相から相への相転移のためとした西山・相川 (2011) の解釈では不十分であることを意味する。そこで従来の弾性モデルについて再検討した結果、石英が取り込まれた時の変成圧力と残留圧力の関係式は、Van der Molen (1981) のモデルでは不適切であり、Zhang (1998, EPSL, 157, 209-222) のモデルがより適切であることが明らかとなった。さらに、体積弾性率の圧力依存性と熱膨張係数の温度依存性の変化を考慮してモデルを改良した。

新しいモデルによって、石英が負の残留圧力を持つ条件が定性的にはあるが再現できた。そして、相が安定な条件下でざくろ石に包有された石英であっても負の残留圧力を保持する場合があることが示された。また、東南極の超高温変成岩は柳井領家帯変成岩よりも有意に低い残留圧力値を保持する点も再現できた。

キーワード: 負の残留応力, 石英ラマン圧力計, 高温変成岩, 包有物 - ホスト系, 弾性モデル

Keywords: negative residual pressure, quartz Raman barometer, high temperature metamorphism, inclusion-host system, elastic model

中央構造線ボーリングコアの脆性小断層における鉱物組成の統計解析結果と応力履歴との比較

Correlation stress history with statistical analysis on mineral composition at small brittle fault in the borehole core

田中 伸明^{1*}, 藤本 光一郎¹, 重松 紀生²

TANAKA, Nobuaki^{1*}, FUJIMOTO, Koichiro¹, SHIGEMATSU, Norio²

¹ 東京学芸大学, ² 文部科学省

¹Tokyo Gakugei University, ²MEXT

日本の陸上で最大の断層である中央構造線(以下, MTL)は, 長い履歴を持ち, 延性領域から脆性領域までの異なる条件下で形成した断層岩が分布する。その解析は, 内陸地震や断層帯の発達史の解明につながる。

本研究が対象としている産総研の松阪飯高観測点の坑井(掘削長 600m)は, 東南海・南海地震予測のために掘削され, 掘削深度 473.9m で MTL を貫通し, 上盤に領家帯の花崗岩類, 下盤に三波川帯の変成岩が分布する。花崗岩類は, マイロナイト化の後, 正断層性の応力場(上下圧縮場及び南北展張場, 両者の順序は不明), 南北方向の圧縮場の順に, 脆性変形の応力場の変遷を経験し, 現在の応力場である東西方向の圧縮場へ至ったと推定されている(重松ほか, 日本地質学会第 117 年学術大会での講演, 2010)。しかしながら, 応力解析に用いられた脆性小断層 327 条のうち, 形成時の応力場が特定されているのは 153 条(上下圧縮場 52 条, 南北展張場 27 条, 南北圧縮場 37 条, 東西圧縮場 37 条)にとどまり, 残りのうち 127 条は候補となる応力場が 2 ないし 3 存在し, 47 条はいずれの応力場にも該当しなかった(田中ほか, 日本地質学会第 118 年学術大会での講演, 2011)。

本報告では, 形成時の応力場の候補が 2 ないし 3 存在する脆性小断層 127 条について, 断層物質の鉱物組成の統計解析を通じて応力場を特定することを試みた。

まず応力場が特定されている脆性小断層 129 条(上下圧縮場 44 条, 南北展張場 21 条, 南北圧縮場 35 条, 東西圧縮場 29 条)のすべり面から断層物質を採取し, X 線回折(以下, XRD)のピーク高さ比から導出された鉱物組成について多変量解析の一種である主成分分析を行なった。その結果, 断層物質の鉱物組成は「炭酸塩鉱物の析出を主体とする変質を被っているかいないか」でほぼ説明できることがわかり, その基準で各試料の鉱物組成に評価値(以下, 主成分得点)を与えたところ, 断層物質は石英及び長石の多い試料と炭酸塩鉱物の多い試料とに二分された。前者は脆性小断層周囲の岩石の粉砕物, 後者は脆性小断層形成後の熱水変質での生成物がそれぞれ卓越する試料であると考えられる。炭酸塩鉱物の多い試料を各応力場から排除した上で各応力場間の主成分得点を比較したところ, 年代が新しくなって隆起に伴う温度低下が進むにつれ, 脆性小断層周囲で炭酸塩鉱物が増加していることがわかった。また, 重松ほか(2010)で不明であった上下圧縮場と南北展張場との順序について, 鉱物組成において炭酸塩鉱物が少ない上下圧縮場のほうが古いと推察された。

次に応力場の候補が 2 ないし 3 存在する脆性小断層 113 条のすべり面から断層物質を採取し, XRD のピーク高さ比から鉱物組成を導出し, 多変量解析の一種である判別分析を行なった。各試料の主成分得点を導出し, 候補となる応力場の主成分得点とのマハラノビスの距離を求め, その距離が最も小さくなる応力場に属すると推定した。その結果, 新たに 78 条について応力場が 1 つに特定され, 合計で 231 条(上下圧縮場 74 条, 南北展張場 46 条, 南北圧縮場 55 条, 東西圧縮場 56 条)となった。それを用いて応力場ごとに脆性小断層のヒストグラム(深度 5m 刻み)を作成したところ, 年代が新しくなって隆起に伴う温度低下が進むにつれ, 深度 473.9m の物質境界を中軸面とする脆性変形帯が狭くなっていく可能性が示唆された。

キーワード: 中央構造線, 断層, ボーリングコア, 鉱物組成, 統計解析, 応力履歴

Keywords: Median Tectonic Line, fault, borehole core, mineral composition, statistical analysis, stress history