

EBSDとEPMAデータに基づくザクロ石に記録された変成履歴の解析 Analysis of metamorphic history recorded in garnet: A combined EBSD and EPMA study

榎並 正樹^{1*}; 永治 方敬²

ENAMI, Masaki^{1*}; NAGAYA, Takayoshi²

¹ 名古屋大学 年代測定総合研究センター, ² 名古屋大学 環境学研究科

¹Center for Chronological Research, Nagoya University, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

EBSD (電子線後方散乱回折) 法および EPMA (電子線微小領域分析装置) 情報を組み合わせて、ざくろ石に記録されている変成、変形履歴を解説することを試みた。研究事例として用いた試料は、沈み込み帯で形成された高 P/T 型三波川変泥質岩とミャンマーに産する Mogok 高温変泥質岩である。

三波川変泥質岩 (UKE04N07b)

四国別子地域のエクロジヤイトユニットから採取された試料。同ユニットの岩石は、エクロジヤイト相累進変成作用 (1.7-1.9GPa/470-530 °C) → 減圧・加水反応 → 緑れん石-角閃岩相累進変成作用 (~1.0-1.1GPa/600-630 °C) という、圧力-温度履歴を経験している (例えば, Kouketsu et al., 2014, IAR, 263-280)。基質を構成する主要鉱物は、ざくろ石、黒雲母、フェンジャイト、緑れん石、曹長石、石英および石墨である。ざくろ石は組成累帯構造によって、パラゴナイトや高残留圧力 (~0.8-0.9GPa) を保持する石英を包有しエクロジヤイト相で形成された内側領域 ($Alm_{67-73}Sps_{3-10}Prp_{4-10}Grs_{16-21}$: 他の試料ではオンファス輝石を含むこともある) とそれを組成的に不連続に取り囲んで成長し、より Mn に乏しく Ca に富み緑れん石-角閃岩相で形成された外側領域 ($Alm_{56-66}Sps_{0-10}Prp_{4-9}Grs_{26-36}$) からなる。そして、組成累帯構造の特徴から、ざくろ石は単結晶であるように見える。これに対し、EBSD 分析からは、このざくろ石が単結晶ではなく、結晶学的方位の異なる 4 つの領域 (各領域相互の不適合の程度は、少なくとも 40° -59°) からなることが明らかとなった。一方、境界を挟んで隣土の領域に包有される石英粒は、1° -6° の範囲内で共通する結晶学的方位を持つ例が多数観察される。なお、ざくろ石のそれぞれの領域はいずれもエクロジヤイト相および緑れん石-角閃岩相変成作用での成長を示す共通の変成履歴を保持している。これらの情報から、検討したざくろ石は、次の様な過程を経て形成されたと考えられる: エクロジヤイト相条件下で複数の結晶粒の集合体として成長を開始 → 集合体の周囲や境域境界に沿って部分的に加水分解 → 緑れん石-角閃岩相条件下での再成長。

Mogok 変泥質岩 (S22b)

ミャンマー・Mandalay 北西の Sagaing 断層沿いの上部角閃岩相 ~ グラニュライト相地域から採取された試料。基質を構成する主要鉱物は、ざくろ石、黒雲母、斜長石、カリ長石、石英、イルメナイト、および石墨である。また、ざくろ石の包有物として珪線石が認められる。それらの組成共生関係から見積もられる圧力温度条件はよそ 0.8GPa/800 °C である (Maw Maw Win, 2014 私信)。ざくろ石はより大きな粒が加水分解してできたと考えられる他形粒の集まりを形成しており、個々のざくろ石粒は組成的に均質なコア部と外側に向かって Mn および Fe が漸増し Mg が漸減するマントル部からなる累帯構造を示す ($Alm_{60-70}Sps_{1-3}Prp_{20-33}Grs_{5-7}$)。したがって、ざくろ石の加水分解は、ざくろ石内で元素拡散が進行する比較的高温条件下で起こったと考えられる。また、ざくろ石の粒界に産する黒雲母や斜長石の組成共生関係からざくろ石が加水分解した時期の圧力温度条件は、0.2-0.4GPa/580-630 °C 程度と見積もられる。一方、EBSD による分析によれば、これらざくろ石粒は互いに 3 本の結晶軸を全て共有している (不適合の度合いは最大でも 1-4°)。これらの点から、今回検討した試料は、ざくろ石の明瞭な回転を生ずるような変形作用を被ることなく、極めて静的な状態で少なくとも 6-12 km の深度から減圧上昇したと考えられる。

キーワード: EBSD, EPMA, ざくろ石, 変成履歴

Keywords: EBSD, EPMA, garnet, metamorphic history

Metamorphism of dolomite-bearing eclogite in the Seba eclogitic basic schists, Sambagawa belt, central Shikoku, Japan Metamorphism of dolomite-bearing eclogite in the Seba eclogitic basic schists, Sambagawa belt, central Shikoku, Japan

KABIR, Md Fazle^{1*}; TAKASU, Akira¹; KISHIRA, Naohito¹
KABIR, Md Fazle^{1*}; TAKASU, Akira¹; KISHIRA, Naohito¹

¹Shimane University

¹Shimane University

The Sebadani area is located in the Sambagawa metamorphic belt, Besshi district, central Shikoku. The Sebadani metagabbro mass and surrounding Seba basic schists (Seba eclogitic basic schists), and pelitic and siliceous schists occur in the area (Takasu and Makino, 1980; Takasu, 1984). Eclogitic mineral assemblages are sporadically preserved in both the Sebadani metagabbro mass and the Seba eclogitic basic schists (e.g. Takasu, 1984; Naohara and Aoya, 1997; Aoya, 2001). The Onodani eclogites are preserved within the Seba eclogitic basic schists, and they have a complex metamorphic history, with two different eclogitic metamorphic episodes (first eclogitic episode 530-590 °C/19-21 kbar; second eclogitic episode 630-680 °C/20-22 kbar) (Kabir and Takasu, 2010). The second eclogitic episode is similar to that of the Seba eclogitic basic schist of Aoya (2001) (610-640 °C and 12-24 kbar). The pelitic schists intercalated within the Seba eclogitic basic schists also underwent eclogite facies metamorphism of 520-550 °C and c. 18 kbar (Zaw Win Ko *et al.*, 2005; Kouketsu *et al.*, 2010).

The eclogites exposed in the northeastern part of the Seba eclogitic basic schists consist mainly of garnet, epidote, amphibole (glaucofanite, barroisite, taramite, Mg-taramite, Mg-katophorite, edenite), omphacite (X_{Jd} 0.27-0.43), phengite (Si 6.5-7.1 pfu). Minor amounts of albite, carbonates (mostly dolomite and few calcite), rutile, titanite, biotite, chlorite and quartz. The schistosity is defined by preferred orientation of phengite, amphibole and epidote. Garnets are almandine-rich in composition, with a compositional zoning of increasing almandine (X_{Alm} 0.54-0.60), pyrope (X_{Prp} 0.07-0.13) and decreasing spessartine (X_{Sprs} 0.10-0.03) from core to rim. They contain inclusions of epidote, omphacite (X_{Jd} 0.27-0.41), dolomite, titanite and quartz. They also contain symplectite aggregates of barroisite/Mg-katophorite and albite. Omphacites in the matrix are zoned from pale green cores to colorless rims (X_{Jd} 0.27-0.43) and contain inclusions of epidote, and they are partly replaced by amphibole (barroisite/magnesiokatophorite) + albite symplectite. Amphibole in the matrix are zoned, barroisite/Mg-katophorite cores to edenite rims. Dolomites in the matrix are up to 0.5 mm across and they contain inclusions of omphacite, amphibole (winchite, barroisite, magnesiokatophorite), epidote, albite, calcite, rutile and quartz. A chemical zoning in dolomite is well defined by a continuous core-to-rim Mg increasing and Fe and Mn decreasing. Dolomites have mutual contact with eclogitic minerals of garnet, omphacite, barroisitic amphibole and phengite in the matrix.

Texturally abundant dolomites in the Seba eclogitic basic schists exposed in the northeastern part suggest X_{CO_2} fluid might stable in the eclogitic facies conditions. Supposing the peak metamorphic conditions are the same as the second eclogitic metamorphic episode of the Onodani eclogites (630-680 °C and 20-22 kbar), considerable amounts of CO₂ (X_{CO_2} 0.02-0.05) were included in metamorphic fluid during the peak metamorphism.

Carbonates are major constituents of the altered oceanic crust and of the sedimentary materials entering the orogenic cycle. Extensive experimental work on phase relationships in carbon-bearing systems reveals that carbonates are extremely stable up to mantle pressures and the transfer of carbon to the mantle wedge at subduction zones is linked to the extent of decarbonation and/or dissolution in aqueous fluids, or to the attainment of a carbonatitic solidus if a thermal relaxation occurs, e.g., upon subduction stagnation. Dolomite is a very common rock-forming mineral still waiting for further exploration and for innovative applications to the reconstruction of dynamic processes in the Earth's interior.

キーワード: Sambagawa metamorphic belt, eclogite, omphacite, dolomite, Seba basic schists

Keywords: Sambagawa metamorphic belt, eclogite, omphacite, dolomite, Seba basic schists

四国中央部秩父帯北帯のユニット区分と変成条件 Unit division and metamorphic conditions of the Northern Chichibu belt in central Shikoku

遠藤 俊祐^{1*}

ENDO, Shunsuke^{1*}

¹産総研 地質情報研究部門

¹GSJ-AIST

秩父帯北帯の一部が三波川変成作用(白亜紀高圧型変成作用)を被っていることはよく知られているが、その範囲は確定していない。また、三波川帯プロパーは主に白亜紀後期付加体であり、より古い御荷鉢-秩父帯北帯の高圧型変成作用のテクトニックな意味を再考する必要がある。そのために、まず弱変成付加体のユニット区分と各ユニットの変成履歴の解明が重要である。四国中央部「本山」地域は、三波川帯-御荷鉢帯-秩父帯北帯が東西走向の帯状配列を示し、相互の構造関係解明に適したフィールドである。同地域の御荷鉢-秩父帯北帯のマッピングおよび、苦鉄質岩約200試料の変成鉱物の観察を行った結果を報告する。

「本山」地域の秩父帯北帯は岩相をもとに3つのユニットに区分でき、松岡ほか(1998 地質雑)の、柏木、上吉田、住居附ユニットに対比できる。見かけ下位から上位に向かって、柏木、上吉田、住居附ユニットの順に南傾斜の境界で重なり、御荷鉢緑色岩類は柏木ユニットのチャート卓越層に折り込まれている。これまでの年代・岩石学的研究から、少なくとも御荷鉢-柏木ユニットは三波川変成作用を受けていることは明らかである。また同ユニットから、変成アラゴナイトも報告されており(Suzuki & Ishizuka, 1998 JMG)、ピーク圧力は300℃で0.7 GPa以上に達したと考えられる。しかし石英と共存するアルカリ輝石の比較的低いひすい輝石成分量や、緑簾石と共存するNa角閃石が藍閃石成分に乏しいマグネシオリーベック閃石でありアクチノ閃石に被覆成長されること、などから主要な変成再結晶はより低圧条件で起こったことを示す。

変成反応進行度や変形構造から、変成度は見かけ上位(南方)ユニットほど低くなることは推察できるが、上吉田および住居附ユニットの変成条件はこれまで明らかでなかった。上吉田ユニットはマグネシオリーベック閃石+方解石+スティルプノメレンを変成鉱物として含むアルカリ玄武岩質の火山角礫岩によって特徴づけられる。御荷鉢-柏木ユニットと異なり、マグネシオリーベック閃石は緑簾石を伴わず、アクチノ閃石リムも認められない。また、マグネシオリーベック閃石を含まない試料中に、石英と共存しない組成的に純粋なひすい輝石を見出した。ひすい輝石からエジリンに移行する組成累帯構造が観察され、0.6-0.7 GPa, 300℃から0.4 GPa, 210-260℃の減圧時に主要な変成再結晶が起こったことを示す(Endo, 2015 JMPS)。

住居附ユニットの苦鉄質岩(塊状玄武岩溶岩, ドレライト)には、ぶどう石-パンペリー石-緑簾石-石英脈が頻繁に見られ、アルカリ輝石やNa角閃石は認められない。従って高圧型変成作用を受けていないようにみえるが、同ユニットから新たにローソン石-パンペリー石-石英脈を見出した。また、濁沸石仮像と考えられるローソン石-石英集合体がみられ、200-250℃で0.3 GPa以上への昇圧が示唆される。含ぶどう石脈の形成時期は明らかでないが、減圧期の可能性がある。

秩父帯北帯はジュラ紀~白亜紀最前期の付加以降も沈み込み帯上盤での長期間にわたる履歴をもち、秩父帯北帯の漸移的に見える三波川変成作用は白亜紀沈み込み帯上盤で新しい付加ユニットの底付に伴う上昇時に起こったと考えられる。

キーワード: 秩父帯北帯, 弱変成作用, 温度-圧力履歴, ひすい輝石, ローソン石

Keywords: Northern Chichibu belt, low-grade metamorphism, pressure-temperature history, jadeite, lawsonite

四国西部，中央構造線沿いに分布する断層群の地質構造と古第三紀の運動像の検討 Study of geological structure and Paleogene kinematic history of the Fault system along the MTL, the west Shikoku.

窪田 安打^{1*}; 竹下 徹¹
KUBOTA, Yasu'uchi^{1*}; TAKESHITA, Toru¹

¹ 北海道大学
¹ Hokkaido University

日本最大の断層である中央構造線 (MTL) は、古第三紀 (66-26 Ma) の断層運動は不明な点が多い。 Kubota and Takeshita (2008) は、古第三紀における MTL の運動時相は、63-58 Ma (Ichinokawa phase) と 45-25 Ma (Pre-Tobe phase) に区分できること、また、Pre-Tobe phase は、和泉層群の大規模な褶曲とスラストにより定義されると示した。 四国西部において、MTL の北側に分布する断層群は、岡村断層、川上断層、伊予断層等が挙げられる。 この断層群について、地質構造および断層破碎帯の変形構造を記載・解析した。

このうち岡村断層は活断層であり、運動センスは主に右横ずれとされている (愛媛県, 2001)。 また、断層沿いには左雁行配列する褶曲が分布する (青矢他, 2013)。 調査の結果、波長 500m 程度のマップスケールや、波長数 10m 規模の露頭スケールの褶曲からなることを把握した。 また、和泉層群の砂岩泥岩互層を原岩とする断層破碎帯を複数個所で確認した。 断層破碎帯の幅は約 25m であり、このうち幅約 15m のフォリエーションの発達した cataclasite ゾーンが分布する。 このフォリエーションの面構造を観察した結果、左横ずれと top to the south の逆断層成分を有する運動センスを把握した。 そのほか、角礫状~亀裂が密に分布する cataclasite ゾーンが分布する。 全体にフォリエーションやシアバンドの面構造の発達が弱く、層構造を残す箇所も分布する。 この南縁には、幅 30~45cm の断層ガウジが分布する。 このフォリエーションおよびシアバンドの面構造を観察した結果、右横ずれ主体の運動センスであることを把握した。 さらに、断層岩の顕微鏡観察により変形条件などを検討した。

そのほか、川上断層、伊予断層においても、断層に対して左雁行配列するマップスケールの褶曲群や、露頭スケールでの断層破碎帯の cataclasite ゾーンの左横ずれと top to the south の逆断層成分を有するせん断センスが認められる。 これは、この断層群が、左横ずれと top to the south の逆断層成分を有する運動センスをもって形成されたことを示している。 この運動時期は、MTL の北側に分布する他の断層群の年代測定結果 (柴田他, 1989) により古第三紀と推定され、MTL の Pre-Tobe phase の解明の重要な資料となる。

青矢睦月他, 2013. 新居浜地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 181p.; 愛媛県, 2001. 中央構造線断層帯に関する調査 成果報告書 (概要版), 54p.; Kubota, Y., Takeshita, T., 2008. Island Arc, vol. 17, p. 129-151.; 柴田 賢他, 1989. 地質調査所月報, 40, 12, p.661-671.

キーワード: 中央構造線, 古第三紀, 運動史

Keywords: Median Tectonic Line, Paleogene, kinematic history

変成岩の粒径やクラックのサイズ分布の時空間変動と確率同期 Spatio-temporal fluctuation of garnet and cracks

鳥海 光弘^{1*}; 福山 繭子²
TORIUMI, Mitsuhiro^{1*}; FUKUYAMA, Mayuko²

¹ 海洋研究開発機構, ² 秋田大学
¹JAMSTEC, ²Akita Univ.

In the previous papers of JpGU meeting (1), we studied the grain size distribution patterns of metamorphic garnet and albite in the banded metamorphic rocks with grain size grading. The average grain size increases with increasing distance across the banding but normalized distribution patterns of the grain sizes within the individual bands are very similar with each other. The banding structure should be derived from the unidirectional flow of metamorphic fluid with ionic diffusion, therefore suggesting that the growth conditions changed across the bands. It follows that the distribution patterns of grain size of garnet and albite display the summation of multiple simple distribution function such as Ostwald type or simply Gaussian, forming the lognormal to power law type.

In the plate boundary region, the metamorphic rocks also experienced frequent generation of small cracks with fluid and then occupied by minerals. However, the mechanical conditions controlling the crack formation and propagation must be fluctuated in terms of stresses, fluid pressure, temperature, and other parameters. Then, the observed frequency distribution of cracks filled with fluid and also minerals should show the summation of many simple distribution functions and it is approximately lognormal or power law. The fluctuation of the distribution patterns can be simply represented by drifts of mean and variant values with time and space.

In this paper, we would like to discuss the rapid growth of grains and cracks at the case of over - the critical fluctuations by drifts by means of stochastic resonance.

(1) Toriumi M. and M. Fukuyama, 2014, Grain size grading in the Liesegang banding of the plate boundary rocks. Proceeding of JpGU meeting 2014.

キーワード: サイズ分布, 平均と分散, 時空間変動, ざくろ石, クラック

Keywords: size distribution, average and variance, spatio-temporal fluctuation, garnet, crack

変成作用の継続時間と三波川変成コンプレックスのジルコン U-Pb 年代 — 四国西部 20 万分の 1 地質図幅「松山」地域の例 — Timescale of metamorphism and U-Pb ages of the Sanbagawa Metamorphic Complex

宮崎 一博^{1*}; 脇田 浩二²; 檀原 徹³; 岩野 英樹³; 平田 岳史⁴

MIYAZAKI, Kazuhiro^{1*}; WAKITA, Koji²; DANHARA, Tohru³; IWANO, Hideki³; HIRATA, Takafumi⁴

¹産総研 地質情報研究部門, ²山口大学 理学部, ³京都フィッシュントラック, ⁴京都大学 理学部

¹GSJ AIST, ²Yamaguchi Univ., ³Kyoto FT, ⁴Kyoto Univ.

高圧型変成岩の原岩が海溝付近で集積し、反応と変形が活発に起こる沈み込み帯深部(変成場)に持ち込まれ、そこから解放されるまでの時間スケールには不明な点が多い。特に、物質が変成場に持ち込まれて解放されるまでの時間スケール(変成作用の継続時間)は、沈み込み帯における物質循環及び流体フラックスを推定するために重要である。以下では、四国西部、20 万分の 1 地質図幅「松山」地域の三波川変成コンプレックスのジルコン U-Pb 年代から示唆される変成作用の継続時間について報告する。なお、碎屑性ジルコンの最も若い U-Pb 年代集団(t_{zrn-yc})とフェンジャイトの K-Ar 年代(t_{phn})の差が変成作用の継続時間の最大値を与えるとする。

ジルコン U-Pb 年代測定を行った試料は、三波川変成コンプレックス伊予ユニット上部と下部の砂泥質岩である。また、フェンジャイト K-Ar 年代の測定も行った。伊予ユニットは原岩岩相の違いにより、砂泥質岩からなる下部、主に苦鉄質岩からなる中部、泥質岩と苦鉄質岩からなる上部に細分できる。比較のため、より南方に分布する三波川変成コンプレックス大洲ユニットとその見かけ上位の弱変成南部秩父帯ジュラ紀付加コンプレックス斗賀野ユニット(N)、さらに南に分布する非変成の斗賀野ユニット(S)とその見かけ下位の四万十帯白垂紀付加コンプレックス半山ユニットの砂質岩のジルコン U-Pb 年代測定も行った。

斗賀野ユニット(N)と(S)の碎屑性ジルコン U-Pb 年代頻度分布パターン($H(t_{zrn})$)はほぼ同一であり、 t_{zrn-yc} は 174.7 ± 1.9 と 181.6 ± 1.4 Ma であった。伊予ユニット上部、大洲ユニット、半山ユニットの砂泥質岩の $H(t_{zrn})$ もほぼ同一であり、 t_{zrn-yc} は 111.2 ± 2.9 , 110.3 ± 4 , 111.3 ± 2.4 Ma であった。これら 3 試料の砂泥質岩は同時期にほぼ同じ環境で堆積したものと推定できる。一方、伊予ユニット下部は上記 3 試料の $H(t_{zrn})$ とパターンが異なり、 t_{zrn-yc} も 89 ± 1.0 Ma であった。伊予ユニット上部の t_{phn} は 83.8 ± 2.1 Ma、伊予ユニット下部は 86.9 ± 2.2 Ma であった。

以上の結果から求められる変成作用継続時間の最大値は、伊予ユニット上部で 27Myr、伊予ユニット下部で 2Myr となり、同一ユニット内で大きく異なる。伊予ユニット上部の試料では、碎屑性ジルコンの周囲に幅 10-30 ミクロンで Th/U 比の低い変成リムが生じている。この変成リムの U-Pb 年代は 94.4 ± 1.2 Ma である。変成リムは三波川変成作用ピーク時に生じたと仮定し、これとフェンジャイト K-Ar 年代の差が変成作用継続時間の最小値を与えるとすると、その値は 11Myr となる。従って、伊予ユニット上部は、11-27 Myr の時間スケールで、変成場に滞留していた可能性が指摘できる。これに対し、下部は 2Myr 以内である。

伊予ユニット上部はざくろ石帯の変成作用を被っており、伊予ユニット中部及び下部より高温高圧条件を経験している。変成場を粘性流体からなる一定の広がりを持った空間と考え、粘性流体シミュレーションを行うと、高温高圧下で反応が促進することで粘性率が低くなった部分が剪断変形により引き延ばされ、より浅部で変成場にもたらされたばかりの部分と接合することが予想される。今回得られた結果は、沈み込み帯深部の変成作用の継続時間は、同一と認識されるユニット内においても、見かけの上下により 2Myr 以内から 11-27Myr と大きく異なることを示している。

キーワード: 三波川, 変成作用, 変成岩, ジルコン, ウラン鉛年代

Keywords: Sanbagwa, metamorphism, metamorphic rock, zircon, U-Pb age

日高変成帯南部に記録された熱輸送について Heat transportation recorded in the southern part of the Hidaka metamorphic belt

坂田 龍玄^{1*}; 小澤 一仁¹
SAKATA, Ryugen^{1*}; OZAWA, Kazuhito¹

¹ 東京大学大学院理学系研究科
¹ School of Science, The University of Tokyo

大陸地殻に特有な岩石である花崗岩や安山岩は大陸地殻下の地殻—マントル境界を通して行われた熱・物質輸送によって形成されたものである。熱輸送の機構としては、熱伝導、固体物質流動、火成活動に大きく分けられ、それぞれ異なる時間・空間スケールを持つ。本研究では、日高変成帯南部のニカンベツ川に沿った変成岩類を対象とし、変成帯中に記録された様々な規模の加熱イベントを明らかにし、地殻浅部まで上昇したマントル物質を熱源とする地殻加熱機構の相対的な重要性を評価する。

日高変成体西縁には、マントル由来の橄欖岩体が点在し、最大の幌満橄欖岩体には、1GPa 以深では部分的に加熱イベントを経験しつつ上昇し、1GPa 以浅で急冷した上昇履歴が記録されている (Ozawa, 2004)。日高変成帯深部の地震波速度構造 (Kita et al., 2012) によれば、マントルが日高主衝上断層近傍の地殻浅部まで連続している。このことから、日高変成帯最深部を構成する橄欖岩体が地殻浅部までマントルとの連続性を保ちつつ持ち上げられることによって、地殻に熱的影響を与え、地殻の部分融解やメルトの輸送といった熱輸送を駆動した可能性が示唆される。先行研究では、地質・岩石・地球化学的データに基づいて日高変成岩中の部分融解や生成メルトの挙動について検討がなされている (Osanai et al., 1991; Owada et al., 2003; Tagiri et al., 1988; 志村他, 2006)。これらの研究では、地殻内で固化したマグマに諸現象の熱源を求めるに止まっており、本質的熱源である高温マントルの役割と、その熱の地殻への輸送機構については、検討されていない。

本研究では、北海道日高変成帯南部のニカンベツ川に沿って西から東に順に露出する橄欖岩体、変成岩類、トーナライト岩体を対象として調査を行った。ニカンベツ橄欖岩体とトーナライト岩体の間に分布する変成岩類は、主に縞状ザクロ石黒雲母片麻岩よりなり、多くの優白質脈を含有する厚さ数十メートル程度の角閃岩—グラニュライトの苦鉄質変成岩が挟在する。ザクロ石黒雲母片麻岩は、橄欖岩の近傍で面構造が弱くなるが、大きな剪断変形は確認されず、岩石分布から高角断層で橄欖岩と接していると考えられる。

縞状ザクロ石黒雲母片麻岩とザクロ石と黒雲母を含む優白色脈について biotite-garnet 温度計 (Ferry and Spear, 1978) を、優白色脈を伴う苦鉄質変成岩について orthopyroxene-clinopyroxene 温度計 (Lindsley, 1983) を適用して平均組成について温度を計算した。前者の温度は、ニカンベツ橄欖岩体近傍の西側からトーナライト岩体近傍の東側にかけて1km で~100 °C程度減少してゆく傾向にあると同時に、苦鉄質変成岩分布域において例外的に750 °Cの高温を示している。また、橄欖岩体に最も近い露頭で求めたザクロ石のコアとリム、黒雲母の平均組成から得られた温度は900 °C~750 °Cであり、縁でMnが富むザクロ石の累帯構造、正累帯構造を示す自形の斜長石、等方的岩石組織などから示唆される部分融解とそれに続く急速な冷却と調和する。斜方輝石温度は約1000~700 °Cと大きくばらつき、Wo#はコアからリムへと減少することから、高温からの急速な冷却を示唆している。

また、苦鉄質変成岩の母岩中に分布する様々な形態と化学組成を示す脈は、パッチ状の母岩の岩片の取り込み、浸透反応、内部での分化の証拠を持っており、母岩と反応しながらメルトが移動、冷却したと考えられる。これらの脈には分化が進んだものとそうでないものの二つのタイプが存在する。未分化の脈は、高温のメルトが未分化の状態またはわずかに分化した状態で直接深部から移動してきたものであると考えられる。優白質脈は一般に石英を含み、まれにカリ長石を含むことがある。そのようなトーナライト質岩脈は周囲の泥質片麻岩と酷似した化学組成を持つザクロ石を含み、泥質片麻岩の部分融解とその輸送を示唆する。苦鉄質変成岩分布域では、深部からの未分化メルトや地殻浅部で部分融解により生成したメルトの移動が変成岩の局所的な熱源として作用したと推察される。

以上の事から、ニカンベツ橄欖岩体とその東側に位置する変成岩に認められた $dT/dz \sim 100$ °C/km の加熱イベントの熱源となっている可能性が示唆される。数十mの苦鉄質変成岩分布域において、この温度勾配に重複して認められる $dT/dz \gg 100$ °C/km の加熱イベントは、マグマ輸送によるものであると考えられる。

キーワード: 日高変成帯, 泥質片麻岩, 橄欖岩, 熱源, 部分融解

Keywords: Hidaka metamorphic belt, pelitic gneiss, peridotite, heat source, partial melting

ネパール東部ダンクッタ地域 MCT ゾーンにおける H₂O 流体活動とヒマラヤ優白質
花崗岩形成に対する役割
Aqueous fluid activity in the MCT zone and its role in High Himalayan leucogranite for-
mation, Dhankuta, Eastern Nepal

河上 哲生^{1*}; 酒井 治孝¹; 佐藤 活志¹
KAWAKAMI, Tetsuo^{1*}; SAKAI, Harutaka¹; SATO, Katsushi¹

¹ 京都大学理学研究科

¹ Graduate School of Science, Kyoto University

Significant aqueous fluid activity during the prograde to retrograde metamorphism in the footwall side of the Main Central Thrust (MCT) is observed in the MCT zone around Dhankuta, Eastern Nepal. A term 'MCT zone' in this study is used to represent the garnet to the kyanite zones developed in the footwall side of the MCT, where inverted metamorphism is observed. In the MCT zone, several evidences of continuous fluid activities during metamorphism and their movement cutting the schistosity can be observed.

The first and most important is the abundant quartz veins. They are found as sheared lenses in the MCT zone, and asymmetric textures show top-to-the-S sense of shear indicating the deformation during the MCT movement. In the kyanite zone, quartz veins contain mm- to cm-sized crystals of kyanite and minor plagioclase. Garnet and kyanite are coarse-grained only at the vicinity of the quartz veins, and in the staurolite and garnet zones as well, garnet tends to be coarser-grained around the quartz veins. These observations suggest that the aqueous fluid infiltration that formed the quartz veins took place at the prograde to peak stage of the metamorphism in the MCT zone.

Meta-dolostone in the kyanite zone is also a good indicator of H₂O movement. It is commonly almost completely metamorphosed to tremolite schist. In such rocks, radiated aggregates of tremolite form a flat, oval-shaped aggregate are arranged parallel to define the schistosity. Locally, such a tremolite arrangement discordantly cut the schistosity like a vein. In some meta-dolostones, dolomites are still preserved, and veins of tremolite discordantly cut the schistosity as well as stem out parallel to the schistosity. These observations indicate that SiO₂-bearing aqueous fluid infiltrated into the dolostone and reacted with dolomite to form tremolite, calcite and CO₂ along the vein and schistosity.

Tourmaline (Tur) is an important sink mineral of incompatible element B, and thus is often abundant in the environment where water-rock interaction took place. Unusually abundant Tur is locally found in metapelites of the MCT zone. It is localized in aluminous, muscovite-rich layers and can be formed through the input of external B into the appropriate whole-rock composition for Tur growth. Such a B-bearing fluid infiltration continued from the prograde stage because garnet with prograde chemical zoning includes abundant Tur crystals. B-bearing aqueous fluid infiltration continued in the post-peak stage as suggested by the presence of Tur-rich vein cross-cutting the schistosity. In the kyanite zone, Tur veins are found cutting the schistosity and/or stem out parallel to the schistosity. In such samples, although the B-rich fluid infiltration postdates schistosity formation, staurolite includes or partly overgrows the Tur crystals formed simultaneously with the Tur-rich vein, suggesting that the Tur vein was formed under relatively high-temperature condition slightly after the peak metamorphism.

These aqueous fluids are likely to have moved upwards through the veins to the MCT and to the Higher Himalayan Crystallines (HHC) where P-T conditions above water-saturated solidus of muscovite-bearing pelitic rocks are estimated. In the hanging wall side of the MCT in the Dhankuta area, patches of Tur-bearing leucogranites are found in the migmatitic Grt-Ms-Bt gneisses. One of these leucogranite samples gave the U-Pb zircon age of 25.9 +/- 2.3 Ma, and other gneiss sample from the same area gave U-Pb zircon age of ca. 17 Ma (Sakai et al. 2014). These ages are well consistent with the ages of High Himalayan leucogranites (HHL, Searle et al. 2010), which is commonly tourmaline-bearing, so segregation and extraction of these B-bearing melts is a likely process of the HHL formation. Therefore, input of aqueous fluids released from or passed through the MCT zone into the HHC can be an important process for the formation of HHL (e.g., Le Fort et al., 1981).

Keywords: aqueous fluid, quartz veins, tourmaline, partial melting, leucogranite, Himalayas

角閃岩相高温部における塩水流入に伴うザクロ石一角閃石脈の形成と物質移動 Garnet-hornblende vein formation and mass transfer by brine infiltration during upper amphibolite facies metamorphism

東野 文子^{1*}; 河上 哲生¹; 土屋 範芳²; Satish-Kumar Madhusoodhan³; 石川 正弘⁴; Grantham Geoffrey⁵
HIGASHINO, Fumiko^{1*}; KAWAKAMI, Tetsuo¹; TSUCHIYA, Noriyoshi²; SATISH-KUMAR, Madhusoodhan³;
ISHIKAWA, Masahiro⁴; GRANTHAM, Geoffrey⁵

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

¹Kyoto University, ²Tohoku University, ³Niigata University, ⁴Yokohama National University, ⁵Council for Geoscience, South Africa

The importance of chloride brines during metamorphism is being increasingly recognized among various metamorphic fluids. This is because chloride brines can coexist with a CO₂-rich fluid under the granulite facies condition (Heinrich, 2007), has low a_{H_2O} , and acts as a powerful solvent not only for metals but also for various oxide and silicate minerals (Newton and Manning, 2010; Tropper et al., 2011). Therefore, chloride brines would play an important role in mass transfer especially when the pressure-temperature (P - T) conditions of metamorphism are around the wet solidus, because X_{H_2O} in the brine can control the melting/non-melting behavior of the rock (Aranovich et al., 2013).

In the Sør Rondane Mountains (SRM), East Antarctica where Late Proterozoic to Cambrian granulites are widely exposed, Cl-rich hornblende and biotite in mafic gneisses are locally but widely distributed for ca. 200 km (Higashino et al., under review). Formation mechanisms of these Cl-rich minerals can be different if the modes of occurrence of them are different. Therefore, this study deals with the Cl-rich hornblende-bearing garnet-hornblende (Grt-Hbl) vein which discordantly cuts the gneissose structure of a mafic gneiss in the Brattnipene area, and discuss the formation mechanism and mass transfer that accompanied the vein formation.

In the Grt-Hbl vein, Cl contents of hornblende and biotite, K content of hornblende, as well as the development of a Na-richer rim of plagioclase decrease with a distance from the vein center. Whole-rock composition analyses as a function of distance from the vein show mass imbalances around the vein, suggesting that the Grt-Hbl vein was formed through an open system process. Taking into account the possibility of partial melting, distribution of Cl between melt, aqueous fluid and minerals, and microstructural evidences of minerals, the Grt-Hbl vein was shown to have formed by the Cl-rich aqueous fluid infiltration. The Cl-rich aqueous fluid was possibly NaCl brine because whole-rock analyses showed that Na was added to the vein compared to the wall rock. We estimated that the Grt-Hbl vein was formed at ca. 700 °C and 0.70 GPa. This means that the NaCl brine infiltrated into the wall rock at the early stage of retrograde metamorphism in this area. The whole-rock analyses and fractional mass change values calculated according to Ague (2001) also revealed that the NaCl brine infiltration caused additions of Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, Li, Sc, V, Cu, Zn, Ge, Sr, Y, Ba, Pb, Bi, Th and U to the wall rock. These added elements are similar to those contained in previously reported brines which were present in mineral assemblages implying subduction metamorphism and implying metal segregation in hydrothermal systems (e.g., Heinrich et al., 1992; Philippot and Selverstone, 1991). The Grt-Hbl vein formed by the NaCl brine infiltration as shown in this study is a clear example that brine could move at least a few meters, and was playing a role in mass transfer at ca. 700 °C and 0.70 GPa in the lower crust of the continental collision setting.

キーワード: NaCl brine, trace elements, metasomatism, continental collision, Sor Rondane Mountains, Antarctica
Keywords: NaCl brine, trace elements, metasomatism, continental collision, Sor Rondane Mountains, Antarctica

東南極リュツォ・ホルム岩体の超塩基性片麻岩中のコロナ形成に関与した流体活動 Fluid activity during corona formation in ultramafic gneisses of Lutzow-Holm Complex, East Antarctica

池田 剛^{1*}; 島田 麻美¹
IKEDA, Takeshi^{1*}; SHIMADA, Asami¹

¹九州大学
¹Kyushu University

東南極リュツォ・ホルム岩体の超塩基性岩には、ザクロ石と角閃石の間にスピネル、斜方輝石、斜長石からなるコロナが普遍的に産する。この組織形成の反応を推定することによって、リュツォ・ホルム岩体が最高変成条件から減圧する時計廻りの履歴をもつことが明らかになっている。本研究では、ザクロ石の周囲に黒雲母と斜長石からなるコロナを発見し、その意義を検討した。

ザクロ石は凹凸に富み、一部融食した細粒粒子としてコロナ内部に孤立して産する。コロナを構成する黒雲母と斜長石は自形で、普遍的に産するスピネル、斜方輝石、斜長石のコロナがシンプレクタイトであることと対照的である。また、両鉱物はザクロ石からの距離によらず、ほぼ一定の化学組成の幅をもつ。特に黒雲母は対数正規に近似できる粒径分布を示す。また、コロナの全岩組成はザクロ石とマトリクスの斜長石に K_2O と H_2O を加えた組成にほぼ一致する。

これらの特徴は、コロナ形成に K_2O を含む H_2O 流体の流入があったことを示唆する。マトリクスに角閃石が産するにも拘わらず、普遍的なシンプレクタイトが形成されていないことから、それ以前に流体が流入したと考えられる。コロナ構成鉱物の形態や粒径分布は、これらの鉱物が過飽和度の減少するメルトから晶出した可能性を示している。つまり、リュツォ・ホルム岩体では最高変成条件から有意に減圧する前に、局所的に K_2O を含む H_2O 流体が流入し、超塩基性片麻岩が部分融解した。その後粒径分布を改変しない程度の速度で冷却したと考えられる。

キーワード: コロナ, 編成流体, リュツォ・ホルム岩体
Keywords: corona, metamorphic fluid, Lutzow-Holm Complex

不可逆反応と変形の連結現象；ロジン岩-蛇紋岩系における水圧破碎の事例 Interplay of irreversible reactions and deformation: a case of hydrofracturing in the system rodingite - serpentinite

西山 忠男^{1*}；吉田 知里¹；森 康²；重野 未来²

NISHIYAMA, Tadao^{1*}；YOSHIDA, Chisato¹；MORI, Yasushi²；SHIGENO, Miki²

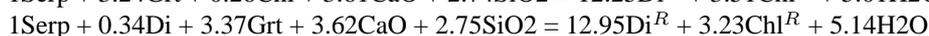
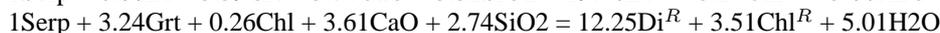
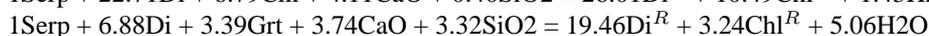
¹ 熊本大学自然科学研究科, ² 北九州市立自然史歴史博物館

¹Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, ²Kitakyushu Museum of Natural History and Human History

This paper examines hydrofracturing caused by reactions between rodingite and serpentinite during a regional metamorphism. Hydrofracturing is driven by rapid increment of fluid pressure, and therefore will be likely to occur in the contact metamorphic aureole due to rapid and irreversible reactions (Nishiyama, 1989). This paper aims to show the same type of hydrofracturing can occur even in the regional metamorphic terrane.

Rodingites occurs ubiquitously in serpentinite from the Nomo metamorphic rocks, western Kyushu, which is a Cretaceous accretionary complex of greenschist to epidote - amphibolite facies condition (Miyazaki and Nishiyama, 1989). Fukuyama et al. (2014) made geochemical and geochronological studies on these rodingites, and gave U-Pb age of zircons from the rodingites as 108 - 105 Ma. This study classified the rodingites into two types depending on the occurrence and the rock texture: vein type and dyke type. Mineralogy of both types of rodingites are almost the same, consisting of diopside, garnet (grandite), chlorite, vesuvianite and titanite with rare occurrence of epidote and pumpellyite. Both vein-type and dyke-type rodingites are associated with reaction zones between serpentinite. Tremolite veins commonly develop from the reaction zone into serpentinite, representing hydrofracturing associated with the formation of the reaction zone. A conspicuous feature is that perovskite occurs in some reaction zones consisting mainly of diopside and chlorite, whereas titanite is common in rodingites. The reaction perovskite + SiO₂ = titanite indicates the condition poorer in SiO₂ in the reaction zone. We investigated the reaction relation between rodingites and serpentinites using the singular value decomposition (SVD) technique (Fisher, 1989). Constant solid volume is assumed during the formation of the reaction zone because of lack of ductile deformation in the reaction zone. The condition of constant solid volume is incorporated into the SVD analysis as was firstly done by Yuguchi et al. (2015).

The seven component system CaO - SiO₂ - Al₂O₃ - Fe₂O₃ - FeO - MgO - H₂O is considered. Antigorite (serpentinite), diopside, garnet and chlorite (rodingite), and diopside^R and chlorite^R (reaction zone) are considered. The superscript R denotes minerals from the reaction zone, because they also occur in the rodingite but have different compositions. We took the following strategy to find the reaction relation. First we tried to find reaction relations which hold the conservation of pseudoquaternary components CaO - SiO₂ - AF (Al₂O₃ + Fe₂O₃) - FM (FeO + MgO) among the mineral assemblage, but we got no reaction relation. Next we omitted CaO as an inert component from the system, and consider reaction relations that hold conservation of pseudoternary SiO₂ - AF - FM components, then we got three reactions consuming CaO and evolving H₂O. This strongly suggests increment of fluid pressure associated with the progress of the reactions. We have further examined the system AF - FM, having the following reactions:



All of these reactions consumes SiO₂ and CaO, and evolves H₂O. This relation holds if we take any linear combination of above reactions. When we consider the perovskite formation from titanite in the reaction zone, reactions in the system AF-FM are preferable, because SiO₂ liberated by the titanite breakdown will be consumed by the above reactions in the system AF - FM.

キーワード: ロジン岩, 蛇紋岩, 水圧破碎, 不可逆反応, 特異値分解法

Keywords: rodingite, serpentinite, hydrofracturing, irreversible reactions, singular value decomposition

ザクロ石に含まれるアルミノケイ酸塩鉱物を用いたラマン地質温度圧力計の構築 Construction of Raman geothermobarometer using aluminosilicate minerals in garnet porphyroblast

瀧 佑衣^{1*}; 田口 知樹²

KOUKETSU, Yui^{1*}; TAGUCHI, Tomoki²

¹ 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設, ² 名古屋大学大学院環境学研究科

¹Geochemical research center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, ²Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

近年、ラマン分光法を用いた地質温度圧力計の開発が活発に行われており、従来の熱力学的手法を用いた地質温度圧力計では得られなかった情報が明らかになる例も報告されている。特に、ザクロ石に包有されている石英の残留圧力をラマン分光法で測定し、変成温度圧力条件を制約する石英ラマン圧力計は、三波川帯において目覚ましい成果を挙げている。一方石英は、超高压及び高温条件下では、コース石やβ石英に相転移するため、石英ラマン圧力計が適用できる地質帯は限られていた。本研究では、ザクロ石に包有されているアルミノケイ酸塩鉱物（珪線石と藍晶石）に着目し、石英包有物と同様にラマンスペクトルから温度圧力条件を制約できるか検討した。

まず、珪線石、藍晶石、及びザクロ石の弾性係数から、変成温度圧力条件と残留圧力の関係を数値計算によって調べた。その結果、ザクロ石中に含まれる珪線石の残留圧力値は、圧力条件にほぼ依存せず、温度条件によって決まる事が示された。一方、ザクロ石中の藍晶石の残留圧力値は、温度条件にはあまり依存せず、圧力条件によって変化する事が示された。次に天然の試料に含まれるザクロ石中の珪線石と藍晶石をラマン分光分析した。試料は、超高温変成岩である東南極 Lutzow-Holm Complex, Rundvagshetta の Garnet-Sillimanite gneiss と、高压変成岩である四国中央部三波川帯別子地域の Kyanite-Quartz eclogite を用いた。Garnet-Sillimanite gneiss のザクロ石に含まれる珪線石のラマンスペクトルは、 962 cm^{-1} と 1182 cm^{-1} 付近に特徴的なピークが見られ、 $4\sim 5\text{ cm}^{-1}$ 程度高波数側へのシフトが確認された。Kyanite-Quartz eclogite に含まれるザクロ石中の藍晶石のラマンスペクトルは、 325 cm^{-1} と 486 cm^{-1} 付近に特徴的なピークが見られ、 1 cm^{-1} 程度高波数側へのシフトが確認された。

先行研究の実験データを用いて、珪線石と藍晶石のラマンピークシフトを圧力に変換すると、珪線石は最大 0.8 GPa 程度、藍晶石は最大 0.3 GPa 程度の残留圧力を保持している事が明らかになった。数値計算の結果と比較すると、超高温変成岩中の珪線石包有物の残留圧力は、変成温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度の条件に制約され、先行研究の見積り温度と矛盾しない結果になった。一方、藍晶石包有物の残留圧力は、数値計算では高压になるほど負の値になる結果であったが、三波川帯の高压変成岩中で測定された残留圧力は正であった。これは、数値計算に用いた藍晶石の弾性係数に問題があると考えられるが、藍晶石の状態方程式を改良する事で解決できると期待される。上記の結果は、高压～超高压、及び高温～超高温領域において、アルミノケイ酸塩鉱物がラマン地質温度圧力計として有用である事を示唆している。

キーワード: ラマン地質温度圧力計, 珪線石, 藍晶石, ザクロ石, 高温変成岩, 超高压変成岩

Keywords: Raman geothermobarometer, sillimanite, kyanite, garnet, high-temperature metamorphic rock, ultrahigh-pressure metamorphic rock

ザクロ石中の SiO₂ 包有物の残留圧力から読み解く超高压変成岩の変成履歴 Metamorphic evolution of ultrahigh-pressure rock revealed by residual pressure of SiO₂ inclusion in garnet

田口 知樹^{1*}; 榎並 正樹²; 瀧 佑衣³
TAGUCHI, Tomoki^{1*}; ENAMI, Masaki²; KOUKETSU, Yui³

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科, ² 名古屋大学年代測定総合研究センター, ³ 東京大学大学院理学系研究科
¹Graduate School of Environmental studies, Nagoya Univ., ²Center for Chronological Research, Nagoya Univ., ³Graduate School of Science, The Univ. of Tokyo

変成作用時に成長したホスト鉱物と取り込まれた包有物の間には、それぞれの物性の違いによって残留圧力が発生する。その残留圧力を精密に読み取ることができれば、ホスト鉱物の結晶成長条件および変成岩の圧力温度 (P-T) 履歴の見積もりに対して有用な情報を提供する。Enami *et al.* (2007, AM, 1303-1315) は、ザクロ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合を測定し、残留圧力を推定する手法 (石英ラマン圧力計) を提案した。Kouketsu *et al.* (2014, AM, 433-442) では、ザクロ石中の石英が保持する残留圧力と α -石英安定下でのザクロ石成長時における P-T 条件との関係を数値計算し、変成条件を制約する新規な手法も提案された。石英ラマン圧力計は、従来の熱力学モデルに基づく地質温度圧力計および相平衡に依存しない。それゆえ、熱力学的解析では検出困難な場合が多い累進変成作用の解読に有効と考えられる。しかし、石英ラマン圧力計は、原理的に少なくとも石英が不安定になる圧力温度条件下で形成された超高压変成岩に適用することは出来ない。とは言うものの、石英安定条件下でザクロ石に取り込まれた石英は、累進変成作用初期に経験した情報を保存している可能性がある。そこで本研究は、ザクロ石中の石英の残留圧力から超高压変成岩の変成履歴を制約できるか検討した。

研究試料は、中国東部・蘇魯帯に属する楊庄地域のエクロジャイトを用いた。楊庄地域ではこれまでコース石の報告は無いが、コース石の石英仮像の記載および熱力学モデルによる解析によって、2.7-3.5 GPa/660-830 °C のピーク変成条件が見積もられている (Enami and Nagasaki, 1999, IAR, 459-474)。これは楊庄地域の試料に、石英からコース石安定下での累進 P-T 経路が記録されている可能性を示唆している。

ザクロ石はその化学組成から、Inner (Alm₄₉₋₅₄Prp₁₆₋₂₈Grs₂₁₋₂₉Sp_{s1}, X_{Mg} = 0.22-0.36) と Outer (Alm₄₅₋₅₂Prp₁₈₋₃₁Grs₂₃₋₂₉Sp_{s1}, X_{Mg} = 0.29-0.41) 部に区分され、その境界は Grs 成分の不連続変化によって定義された。Inner 部では SiO₂ 相全てが α -石英であり、コース石の仮像および石英包有物周囲に顕著なクラックは確認されなかった。石英は最高 0.9 GPa 程度の残留圧力値を示し、ザクロ石 Inner 部の結晶コアからマントル部に向かって、Grs 成分の減少に対応して系統的に残留圧力値が増加する傾向を示した。この残留圧力を、数値計算により変成圧力へ逆算すると、石英-コース石転移曲線付近の圧力条件を示した。Outer 部では、クラックが発達したコース石の仮像が認められるとともに、藍晶石包有物中に本地域では初となるコース石を確認した。本試料中のコース石の存在は、これまでに地質温度圧力計から見積もられている P-T 条件を支持する。上記の結果は、(1) Inner 部の石英はザクロ石に包有された後、コース石への相転移を免れ、そして現在も昇温変成作用初期の P-T 情報を保存すること、(2) Outer 部に認められる SiO₂ 相包有物は、コース石としてザクロ石へ包有されて、上昇時にそのほとんどが石英へ相転移し、残留圧力が開放されたことを示唆している。すなわち石英ラマン圧力計は、超高压変成岩の場合でさえも、石英安定条件下で包有された石英であれば、累進変成作用初期の P-T 条件を導出する上で有用な手法である事を示している。

キーワード: 石英, 残留圧力, 石英ラマン圧力計, 超高压変成岩, 蘇魯帯

Keywords: quartz, residual pressure, quartz-Raman barometry, ultrahigh-pressure rock, Sulu belt

レッサーヒマラヤの変成岩ナップの上昇過程の復原による高ヒマラヤ変成岩類の延性押し出しモデルの検討
Examination of extrusion model of Himalayan metamorphic belt by study of exhumation process of metamorphic nappe

酒井 治孝^{1*}; 岩野 英樹²; 檀原 徹²
SAKAI, Harutaka^{1*}; IWANO, Hideki²; DANHARA, Tohru²

¹ 京都大学理学研究科地質学鉱物学教室, ² 京都フィッショントラック (株)

¹Department of Geology, Kyoto University, ²Kyoto Fission-Track Co. Ltd.

A ductile extrusion model explains that metamorphic core of the Himalaya, called the Higher Himalayan Crystallines (HHC), was originated by ductile channel flow of partially melted mid-crust from beneath the Tibetan plateau. No definite evidence of the model has yet been documented that shows the melted mid-crust extruded to form the HHC though many numerical models were proposed and their simulation was performed.

We performed thermochronological study of the HHC nappe by means of zircon and apatite fission-track dating in order to examine the extrusion model on the basis of emplacement and cooling history of the HHC nappe, which extensively covers the Lesser Himalayan autochthon ranging in width of 80 to 120 km. As the results, we could have revealed the emplacement history of the nappe, which has strong constraints on the extrusion model: the HHC of more than 10 km thick extruded on the ground at 15-14 Ma, and advanced to the SSW with the rate of 3-4 cm/yr retaining hot condition more than 300 °C. The nappe finally terminated its movement at 11 Ma. Early Miocene foreland basin sediments on the top of the Lesser Himalayan autochthon have undergone weak metamorphism after covering of hot nappe at 11-10 Ma. Both metamorphic nappe and the underlying foreland basin sediments cooled down below 240 °C by 10 Ma and below 110 °C by 8 Ma. The metamorphic nappe laterally cooled down toward the NNE from its front at the rate of ca. 1cm/yr, and root zone area of the nappe reached 240 °C by 4 Ma and 110 °C by 1 Ma. One more constraint is that estimated P-T condition is consistent from the nappe front to the root zone: maximum temperature is around 750 °C and maximum pressure is 11-12kb.

Under these constraints, we examined the disposition of the HHC nappe before its extrusion, considering width of nappe as 80 km and inclination angle of metamorphic belt as 20 degree. After simple calculation of position of root zone of nappe under 12kb, it is concluded that root zone was located at 53 km to the north of the front of partially melted mid-crust of Tibet and seated 39 km in depth. It indicates that the HHC nappe must have been originated from partially melted mid-crust of Tibet.

キーワード: エクストルージョン, ナップ, フィッショントラック年代測定, ジルコン, ヒマラヤ変成帯, レッサーヒマラヤ
Keywords: extrusion, nappe, fission-track dating, zircon, Himalayan metamorphic belt, Lesser Himalaya

三波川帯エクロジヤイトユニットの白亜紀後期砕屑性ジルコン：上昇テクトニクスへの意味 Late Cretaceous detrital zircon from the Eclogite unit of the Sanbagawa belt: implications for exhumation tectonics

遠藤 俊祐^{1*}
ENDO, Shunsuke^{1*}

¹産総研 地質情報研究部門
¹GSJ-AIST

四国中央部三波川帯に分布するエクロジヤイト相変成岩類は粗粒の苦鉄質-超苦鉄質岩体（五良津岩体など）と、その周囲を取り巻く細粒の苦鉄質、泥質、珪質片岩類の二つのタイプに分けられる。前者は白亜紀前期（c. 116 Ma）の変成ステージから始まる長いタイムスケールの履歴をもつ一方、後者は白亜紀後期（c. 90 Ma）の短期間に単一の沈み込み-上昇サイクルで形成されたと考えられる（Wallis et al., 2009 JMG; Endo et al., 2012 Lithos; Aoya et al., 2013 Geology）。しかし、こうした履歴の違いを認めず三波川帯高変成度域全体が白亜紀前期（120-110 Ma）にピーク変成作用を受けた後、ゆっくりと上昇し白亜紀後期（90-80 Ma）に後退変成再結晶を被ったという考え（Okamoto et al. 2004 Terra Nova; Aoki et al., 2009 Lithos; Itaya et al., 2011 JAES）もある。この問題に決着をつけるため、細粒タイプのエクロジヤイト相泥質片岩に含まれる砕屑性ジルコンに着目した。砕屑性ジルコン最若年代は海溝での堆積年代の上限を制約する。泥質片岩試料は関川上流域の五良津岩体に北接する灰曹長石黒雲母帯と瀬場地域南東の銅山川河床の曹長石黒雲母帯から採集した。Mouri & Enami (2008 Geology) および Kouketsu & Enami (2010 IAR) に従えば、これらはエクロジヤイトユニットに含まれる。両試料から分離したジルコンは CL 像でオシラトリー累帯構造を示す砕屑性の火成コアと、極めて薄い変成リムからなる。LA-ICP-MS による砕屑性コアの U-Pb 年代（コンコーダントな $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代）の頻度分布は、最若グループが最大ピークを示し、その加重平均値が、関川および銅山川の試料において、それぞれ 101.7 ± 1.6 Ma (n=12, 最若粒子 94.4 ± 4.8 Ma) および 94.2 ± 1.9 Ma (n=9, 最若粒子 87.6 ± 4.6 Ma) であった。また変成リムの年代は、それぞれ 90.0 ± 4.1 Ma (n=4) および 86.9 ± 5.7 Ma (n=1) であり、細粒タイプの瀬場エクロジヤイトの Lu-Hf 年代 88.8 ± 0.6 Ma (Wallis et al., 2009) と一致する。以上の結果は、粗粒岩体を除くエクロジヤイト相変成域も白亜紀後期付加体であることを支持する。白亜紀後期の短期間に低密度な泥質片岩がエクロジヤイト相深度まで大量に沈み込み込んだことで、エクロジヤイトユニット（細粒+粗粒タイプ）の形成と直後の高速浮力上昇が引き起こされた考えられる。

キーワード: 三波川帯, エクロジヤイト, 泥質片岩, ジルコン, U-Pb 年代
Keywords: Sanbagawa belt, eclogite, pelitic schist, zircon, U-Pb age

スリランカの arrested チャーノックタイトの形成：全岩化学組成と物質移動 Metamorphic formation of arrested charnockite in Sri Lanka: significance of bulk composition and mass transformation

山崎 由貴子^{1*}; 池田 剛¹; 本吉 洋一²; 廣井 美邦³; プレーム バーナード⁴; 角替 敏昭⁵
YAMASAKI, Yukiko^{1*}; IKEDA, Takeshi¹; MOTOYOSHI, Yoichi²; HIROI, Yoshikuni³; PRAME, Bernard⁴; TSUNOGAE, Toshiaki⁵

¹九州大・院・理, ²国立極地研究所, ³千葉大・院・理, ⁴スリランカ地質調査所, ⁵筑波大・生命環境
¹Kyushu University, ²National Institute of Polar Research, ³Chiba University, ⁴Geological Survey of Sri Lanka, ⁵Tsukuba University

Arrested charnockite, that represents granulite facies mineral assemblage, occurs in several decimeters scale within amphibolite facies gneisses. The gneissosity in the gneiss becomes, in general, obscure toward center of charnockite. This suggests that the gneiss was metamorphosed into charnockite in local scale. The local charnockitization may be caused by fluid influx and/or partial melting or difference of local bulk composition (e.g. Newton et al., 1980; Hiroi et al., 1990; Burton and O'Nions, 1990; Ravindra Kumar, 2004; Endo et al., 2012, 2013). This study described mode of occurrence of arrested charnockite in Sri Lanka, and reveals cause of metamorphic formation of arrested charnockite. Mass transformation during charnockitization was also discussed.

Arrested charnockite in Sri Lanka occurs as a number of patches in Hbl-Bt gneiss. The modal abundance of minerals in both rocks indicates that the elements transformed between melanocratic and leucocratic parts. The elements constituent of Bt in leucocratic part moves to melanocratic part, and those of Pl, Ksp and Qtz of melanocratic part, instead, move to leucocratic part. The modal abundance of Bt of leucocratic part in Hbl-Bt gneiss decreases into the charnockite near the boundary. This suggests that mass transformation also be caused across the boundary.

The formation of Opx can be described by the following two reactions,

Ti-rich Bt + Qtz = Ti-poor Bt + opx + Ilm + Ksp + H₂O and

Ti-rich Hbl + Qtz = Ti-poor Hbl + Opx + Ilm + An + Ab + Ksp + H₂O.

These reactions suggest the possibility that the fluid influx and/or the partial melting produced arrested charnockite. However, similar chemical composition of apatite in both rocks implies that there is no positive evidence to support the above possibility. The pseudosection modeling of mineral assemblage in NCKFMASH system shows that the local difference of bulk composition is responsible for the local charnockitization.

キーワード: スリランカ, アレストッドチャーノックタイト, 普通角閃石-黒雲母片麻岩, 物質移動, シュードセクション
Keywords: Sri Lanka, Arrested charnockite, Hornblende-biotite gneiss, Mass transformation, Pseudosection

Metamorphism of garnet amphibolite from the Neldy Formation, Makbal area in the Kyrgyz Northern Tien-Shan, Kyrgyzstan Metamorphism of garnet amphibolite from the Neldy Formation, Makbal area in the Kyrgyz Northern Tien-Shan, Kyrgyzstan

KASYMBEKOV, Adil^{1*}; TAKASU, Akira¹; KABIR, Md fazle¹; BAKIROV, Apas²; SAKIEV, Kadyrbek²
KASYMBEKOV, Adil^{1*}; TAKASU, Akira¹; KABIR, Md fazle¹; BAKIROV, Apas²; SAKIEV, Kadyrbek²

¹Shimane University, Japan, ²Institute of Geology, Academy of Science, Kyrgyz Republic

¹Shimane University, Japan, ²Institute of Geology, Academy of Science, Kyrgyz Republic

The Makbal Complex in the Kyrgyz Northern Tien-Shan is one of several HP/UHP metamorphic complexes in the Tianshan orogenic belt located in the western segment of the CAOB. The metamorphic rocks exposed in the Makbal district are divided into the Akdzhon and the Scharkyrak Groups based on their metamorphic conditions (Tagiri and Bakirov, 1990). The metamorphic sequence of the Akdzhon Group in the Northern Tien-Shan is divided into two contrasting metamorphic formation the structurally lower Makbal Formation and the upper Neldy Formation. The Neldy Formation is mainly composed of pelitic schists (garnet chloritoid-bearing schist, garnet-phengite schist) and chlorite-carbonate rocks along with minor metaquartzites, marbles and amphibolites. Garnet amphibolites occur in the pelitic schists as lenses or blocks up to 50m across. Eclogites are preserved in the core of the garnet amphibolite bodies (Togonbaeva *et al.*, 2010).

The garnet amphibolites are crops out in the Neldy Formation is composed mainly of amphibole (Brs, Mhb, Act, Fprg, Fts, Ts), garnet and chlorite with small amounts of quartz, epidote and albite. Accessory minerals are biotite, paragonite, muscovite, oligoclase, titanite, ilmenite and calcite. A schistosity is defined by preferred orientation of amphibole (Brs, Mhb), chlorite and biotite. The garnets occur as porphyroblasts up to 1.4 mm in diameter, which show distinct compositional zoning, in which X_{SpS} (0.22-0.04) decreases, X_{Alm} (0.34-0.63) and X_{Grs} (0.30-0.64) increase, and slightly increases X_{Prp} (0.01-0.03) from the core to the rim. The core of garnet contains inclusions of epidote, titanite, ilmenite, calcite and quartz. The rim of the garnet contains inclusions of amphibole (Act, Mhb), chlorite (X_{Mg} 0.37-0.42), epidote (X_{Ps} 0.13-0.25), quartz and also contain polyphase inclusions of muscovite + chlorite + epidote and chlorite + paragonite + epidote + oligoclase ($An < 18$), although some of them are connected outside with cracks. Box-shaped polyphase inclusions of paragonite+epidote±chlorite±muscovite±oligoclase suggest a possibility of pseudomorphs after lawsonite. Porphyroblastic garnets are sometimes replaced by amphibole (Fprg, Ts), chlorite (X_{Mg} 0.46-0.52) and epidote (X_{Ps} 0.13-0.23) along rim and cracks. Amphiboles in the matrix show a zoning with Mg-hornblende and actinolite (Na_B 0.15-0.48 pfu) core, barroisite (Na_B 0.50-0.63 pfu) mantle, and Mg-hornblende and tschermakite (Na_B 0.18-0.46 pfu) rim. Amphiboles replacing the garnets have a zoning with barroisite (Na_B 0.62-0.65 pfu) core and ferrotschermakite, ferropargasite and Mg-hornblende (Na_B 0.11-0.48 pfu) rim.

Based on the texture and mineral composition, two metamorphic events have been distinguished from the garnet amphibolites. The prograde to peak stage of the first metamorphic event is characterized by core to rim of the porphyroblastic garnets and inclusion minerals therein (i.e. amphibole, epidote, chlorite, biotite, paragonite, titanite, ilmenite, calcite and quartz). The peak metamorphic conditions are probably stable in the epidote-amphibolite facies. The retrograde stage is characterized by chlorite, which replaces the porphyroblastic garnets. The prograde stage of the second metamorphic event is characterized by barroisite core of the amphiboles and epidote replacing the garnets. The peak stage is characterized by fracture connected inclusions of muscovite and oligoclase and tschermakite and ferropargasitic amphibole developed at the rim of the amphiboles replacing the garnets, probably suffered amphibolite facies metamorphic conditions. The retrograde stage is characterized by albite and quartz in the matrix.

The petrological study suggests that the garnet amphibolites probably suffered metamorphism events of (i) high-pressure epidote amphibolite facies and (ii) amphibolite facies. These metamorphic events are related to the tectonics of the oceanic plate subduction and subsequent continental collision.

キーワード: Garnet amphibolite, Makbal Complex, Neldy Formation, amphibolite facies, Kyrgyz Northern Tien-Shan
Keywords: Garnet amphibolite, Makbal Complex, Neldy Formation, amphibolite facies, Kyrgyz Northern Tien-Shan

Geothermobarometry of the Mogok pelitic gneisses from the Sagaing area, Central Myanmar Geothermobarometry of the Mogok pelitic gneisses from the Sagaing area, Central Myanmar

Maw Maw Win^{1*}; 榎並 正樹²; 加藤 丈典²
Maw Maw Win^{1*}; ENAMI, Masaki²; KATO, Takenori²

¹Graduate School of Environmental Studies, ²Center for Chronological Research

¹Graduate School of Environmental Studies, ²Center for Chronological Research

The amalgamation of continental blocks that drifted from the northeastern margin of Gondwanaland from Late Paleozoic to Cenozoic formed the present landmass of eastern and southeastern Asia (e.g., Metcalfe, 2011). Myanmar is tectonically divided into eastern and western provinces by the Sagaing Fault, which is a 1200-km-long right-lateral strike-slip fault. The eastern province consists of the Sibumasu (Shan-Thai) Block and the western province consists of the West Burma Block and the Indo-Burma ranges. Both the Sibumasu and West Burma Blocks belong to the Sundaland. For the present study, samples were collected from the Mogok metamorphic belt (MMB), which borders the eastern province along the western edge forming a sigmoidal structure. It is 50 km wide and extends southwards from the eastern Himalayan syntaxis in the north to over 1500 km, where it joins the high-grade metamorphic belts of northern Thailand.

Our study area is situated at the central part of the MMB, north of Sagaing, and is bound by two parallel N-S trending ridges — Sagaing Ridge in the east and Minwun Ridge in the west. These two-parallel ridges are separated by the Sagaing fault valley, which varies in width from 0.5 to 1 km. Metamorphic rocks exposed in this area include gneisses, marbles, calc-silicates, schists, and amphibolites. Detailed mineralogical and petrological studies were conducted on garnet-biotite gneisses taken from the Sagaing Ridge (S30a, S26, S22a & b, and S39 from north to south). CHIME monazite ages indicate three possible crystallization events during the Paleogene period: 48.0 ± 2.4 , 37.1 ± 0.8 and 27.6 ± 0.6 Ma (2-sigma level). The common mineral assemblages are garnet, biotite, plagioclase, and quartz with minor amounts of rutile, ilmenite, graphite, apatite, monazite, and zircon. Additionally, the sample S30a contains prismatic sillimanite in the matrix. In sample S26, garnets contain fibrolite inclusions and the matrix consists of prismatic sillimanite. The samples S22a and b contain fibrolite inclusions in garnet and K-feldspar matrix. In the sample S39, spinel occurs as inclusions in garnet. Garnet grains are mostly homogeneous and exhibited high Mn content and low Mg content locally at the grain boundaries: $\text{Alm}_{63-67}\text{Prp}_{28-30}\text{Sps}_3\text{Grs}_{4-5}$, $\text{Alm}_{55-72}\text{Prp}_{20-38}\text{Sps}_{1-5}\text{Grs}_{4-5}$, $\text{Alm}_{59-65}\text{Prp}_{30-35}\text{Sps}_{1-2}\text{Grs}_{5-7}$, $\text{Alm}_{58-63}\text{Prp}_{30-33}\text{Sps}_1\text{Grs}_{4-6}$, $\text{Alm}_{62-72}\text{Prp}_{17-28}\text{Sps}_{1-3}\text{Grs}_{6-10}$ in samples S30a, S26, S22a & b, and S39, respectively. Biotites were texturally categorized as (i) inclusions in garnet, (ii) isolated grains in matrix (iii) symplectitic aggregate with plagioclase around the garnet grains, and (iv) in veins through the garnet grains. Biotite inclusions and biotite content in matrix contain 5.6 wt% and 2.0 wt% of TiO_2 and F, respectively. Spinel contains 4.9 wt% ZnO and its X_{Mg} [$=\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$] and Y_{Al} [$=\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}^{3+}+\text{Cr})$] values are about 0.35 - 0.40 and 0.95, respectively.

The garnet-biotite geothermometer and two geobarometers characterized by garnet-biotite-plagioclase-quartz and garnet-plagioclase-sillimanite-quartz equilibria were employed for the pressure/temperature (P/T) estimations of the samples collected from Sagaing. Three groups of datasets were used for the calculations: (1) biotite and plagioclase inclusions and their garnet host, (2) garnet core along with biotite and plagioclase matrix, and (3) symplectite and garnet rim. The estimated equilibrium P/T conditions were 0.3 - 0.7 GPa/580 - 700 °C and 0.6 - 0.9 GPa/780 - 880 °C for the inclusion and matrix assemblages, respectively. Symplectitic assemblages around the garnets exhibit equilibrium conditions at 0.2 - 0.3 GPa/580 - 610 °C. The high TiO_2 content of the biotite grains coexisting with rutile and/or ilmenite indicate a temperature of crystallization of 800 °C, when the Ti content of biotite is used as the geothermometer as proposed by Henry et al. (2005).

キーワード: CHIME monazite ages, P-T conditions, pelitic gneisses, Mogok metamorphic belt, Myanmar
Keywords: CHIME monazite ages, P-T conditions, pelitic gneisses, Mogok metamorphic belt, Myanmar

Petrological studies of spinel and quartz-bearing paragneiss from Zayetkwin-Onzon area, central Myanmar

Petrological studies of spinel and quartz-bearing paragneiss from Zayetkwin-Onzon area, central Myanmar

Ye Kyaw Thu^{1*}; ENAMI, Masaki²

Ye Kyaw Thu^{1*}; ENAMI, Masaki²

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Center for Chronological Research

¹Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, ²Center for Chronological Research

The Mogok Metamorphic Belt (MMB) extends for over 1450 km, from the Andaman Sea to the eastern Himalayan syntaxis along the western margin of the Shan-Thai block. This belt is mainly composed of high-grade metamorphic rocks, from upper-amphibolite facies to granulite facies, and younger intrusions. Previous studies concluded that an assemblage of the high-grade metamorphic rocks formed during a Paleogene regional metamorphic event that was caused by collision or underthrusting of the Indian microcontinent with the Eurasian continent. The study area is situated in the middle part of the MMB, 100 km north of Mandalay, and is mainly composed of paragneisses overlain by marbles and calc-silicate rocks. These lithologies are intruded by quartz syenite, biotite-granite, and pegmatite. The marbles and calc-silicate rocks are mainly composed of diopside, forsterite, phlogopite, spinel, graphite, and chondrodite, which record upper amphibolite facies equilibria. Paragneisses are mainly garnet-biotite gneisses with intercalations of biotite gneisses and leucogneisses, and show general NE - SW foliation. Paragneiss samples studied are medium- to coarse-grained, well-banded, and show porphyroblastic and gneissose texture. Most of them contain garnet, biotite, plagioclase, quartz, sillimanite, and K-feldspar with a minor amount of graphite, ilmenite and monazite. Porphyroblastic garnet grains are 2 - 5 mm in diameter, and contain numerous inclusions of biotite, plagioclase, quartz, and sillimanite. Biotite grains occur as four-generation phases, an inclusion phase in garnet, an isolated phase in the matrix, a symplectitic aggregate around garnet, and a vein phase replacing cracks in the garnet.

Coexisting spinel and quartz are newly found in a garnet-biotite gneiss collected from the Zayetkwin-Onzon area. This sample contains porphyroblastic garnet and cordierite, and biotite, plagioclase, quartz, and graphite in the matrix. Spinel and sillimanite coexisting with quartz, plagioclase, biotite, and ilmenite occur only as inclusions in cordierite. Spinel is a Zn-poor spinel-hercynite solid solution with $X_{Mg} [= Mg/(Mg + Fe^{2+})] = 0.34 - 0.35$, $Y_{Al} [= Al/(Al + Fe^{3+})] = 0.97 - 0.99$, $TiO_2 = 0.0 - 0.2$ wt%, and $ZnO = 1.8 - 2.3$ wt%. The matrix assemblage gives pressure/temperature estimates of 0.7 - 0.8 GPa/780 - 840 °C using a garnet-biotite geothermometer and garnet-biotite-plagioclase-quartz geobarometer. Biotite grains in the spinel-bearing sample and associated paragneisses contain a distinctly high TiO_2 content of up to 6.9 wt% (0.39 per formula unit for O = 11), which probably progressed mainly because of the $Ti \diamond R_{-2}$ substitution (R is the sum of divalent cations and \diamond represents vacancy in the octahedral sites). The fluorine content is up to 2.0 wt%, and the chlorine content is less than 0.1 wt%. The Ti-rich biotite suggests temperatures of 800 °C or higher if Ti is employed in the biotite geothermometer, as proposed by Henry et al. (2005).

The occurrence of a spinel-quartz-cordierite-sillimanite assemblage in the Zayetkwin-Onzon sample and the high-temperature estimates of around 800 °C suggest granulite facies equilibrium of the Mogok metamorphic rocks. Orthopyroxene-bearing garnet-gneisses were reported from the Mogok area, about 80 km NE of the Zayetkwin-Onzon area (Yonemura et al., 2013). These data suggest wide distributions of granulite facies metamorphic rocks in the northern part of the MMB.

キーワード: spinel, paragneiss, P-T conditions, Mogok Metamorphic Belt, Myanmar

Keywords: spinel, paragneiss, P-T conditions, Mogok Metamorphic Belt, Myanmar

幌満かんらん岩中の巨晶かんらん石の産状 Olivine megacrysts in the Horoman Peridotite Complex, Hokkaido, northern Japan

南山 明里^{1*}; 曾田 祐介¹; 浜田 盛久²; 森下 知晃¹

MINAMIYAMA, Akari^{1*}; SODA, Yusuke¹; HAMADA, Morihisa²; MORISHITA, Tomoaki¹

¹ 金沢大学, ² 独立行政法人海洋研究開発機構

¹Kanazawa University, ²Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

上部マントルの結晶の粒径は、温度、圧力、応力で決まると考えられており、通常は1 cmを超えるような結晶は形成されない(Ave Lallemand et al., 1980; 唐戸, 2011 など)。しかし、実際の天然のかんらん岩には数 cm を超える粒径をもつ結晶(以下、巨晶とよぶ)が世界中で少なからず存在している(北海道の幌満かんらん岩、アメリカの San Carlos のかんらん岩捕獲岩、ノルウェー WGR のかんらん岩など)。予想を超える大きさの巨晶を含むかんらん岩が世界中で存在していることから、かんらん岩の中に巨晶を形成する過程があるのではないかと考えられる。もし、巨晶を形成するメカニズムが上部マントル条件下で存在するならば、マントル物質の流動や結晶境界が関与する物質移動、地震波速度構造に影響を及ぼしている可能性がある。1 cm を超える巨晶形成を実験室で再現するのは難しく、天然試料の解析に頼るしかない。このことから、天然の巨晶かんらん石を研究し、その特徴を明らかにすることは、上部マントルでの巨晶形成の可能性について検討する上で重要である。

そこで本研究では、北海道の幌満かんらん岩体に産する巨晶かんらん石に注目し、巨晶かんらん石の特徴と普通の粒径の部分との違いを明らかにし、その前後関係を検討することを目的とした。

本研究で用いた試料は、北海道の幌満かんらん岩体のかんらん岩で、Lower Zone の MHL 系列(Takahashi, 1991)で採取したものである。巨晶かんらん石は面構造にほぼ平行で、肉眼で観察すると、普通の粒径のかんらん石よりも濁って見える。普通の粒径の層(細粒部)はポーフィロクラスティック組織である。巨晶かんらん石とかんらん石ポーフィロクラストには亜粒界が発達している。巨晶かんらん石の縁に見られる亜粒界は、かんらん石ポーフィロクラストと同じ(100)に平行である。巨晶かんらん石中にはラメラが形成されており、スピネル、単斜輝石、角閃石で構成されている。

U-stage で測定した結晶方位と亜粒界の方位を元に、巨晶かんらん石の中央部と縁にそれぞれ [001](100) と [100](001) のすべり系が確認された。細粒部では、[100](010) のすべり系が卓越する A-type ファブリックが見られる(Jung et al., 2006)。また、巨晶かんらん石に接する細粒かんらん石の結晶方位は、巨晶かんらん石と細粒かんらん石の中間的なファブリックである。

巨晶かんらん石と細粒かんらん石について EPMA による定量分析を行ったが、Fo と Ni 含有量には顕著な差は見られなかった。また、FT-IR による水含有量の測定も試みたが、OH 基のピークは検出されなかった。

巨晶かんらん石に角閃石、単斜輝石、スピネルのラメラが見られることから、水の多い条件下でこれらの成分を固溶していたと考えられる。巨晶かんらん石の縁のすべり系と、縁に接する細粒かんらん石の CPO から、巨晶かんらん石は A-type ファブリックを形成する塑性変形を受ける前から存在していたと推定できる。A-type ファブリックが見られる幌満かんらん岩は、試料を採取した周辺で報告されており、幌満かんらん岩体が上部マントルから上昇する過程で形成されたものと解釈されている(Sawaguchi, 2004)。これより、巨晶かんらん石と細粒部は、上部マントル内を上昇する間に A-type ファブリックを形成したと考えられる。

以上のことから、巨晶かんらん石は上部マントル内に既に存在しており、水の多い条件下でラメラ成分はもともと固溶しており、幌満かんらん岩体が上部マントルから上昇する過程で、A-type ファブリックを形成する条件下で塑性変形を受けたと考えられる。

キーワード: 巨晶かんらん石, 幌満かんらん岩, CPO

Keywords: olivine megacrysts, Horoman peridotite, CPO

飛騨片麻岩の弾性波速度と岩石微細構造 Elastic wave velocity and microstructures of Hida gneisses

小池 寛太^{1*}; 渡辺 了¹
KOIKE, Kanta^{1*}; WATANABE, Tohru¹

¹ 富山大学地球科学教室

¹Department of Earth Sciences, University of Toyama

Seismic velocity is one of the most important sources of information about the Earth's interior. For its proper interpretation, we must have a thorough understanding of the dependence of seismic velocity on microstructural elements, including the modal composition, the crystal preferred orientation (CPO), the grain shape, the spatial distribution of mineral phases, etc. For its complexity, the influence of the spatial distribution of mineral phases has been poorly understood. In this study, we focus on a layered structure seen in gneisses. We are studying elastic wave velocities and microstructures in Hida gneisses.

Rock samples of Hida gneisses were collected at Kubusu River (Yatsuo, Toyama Pref.). A rectangular parallelepiped (the edge length~40 mm) was made from rock samples. Two faces are parallel to the foliation plane, and two faces perpendicular to the elongation direction. Preliminary velocity measurements were made at room conditions by the pulse transmission technique using Pb(Zr, Ti)O₃ transducers with the resonant frequency of 2 MHz. One compressional wave velocity and two shear wave velocities were measured in each of three orthogonal directions. Two shear waves propagating in one direction oscillate in mutually orthogonal directions. The fastest compressional wave velocity (5.91 km/s) was observed in the direction parallel to the elongation, while the slowest (5.51 km/s) perpendicular to the foliation. When a shear wave propagated along the foliation plane, it showed slightly higher velocity for oscillating along the foliation than for oscillating perpendicular to the foliation plane.

However, these velocity values cannot be compared with microstructures, because they must be affected by pores in rock samples. We are now conducting velocity measurements under confining pressures of up to 180 MPa to remove the influence of pores. The relationship between velocity under confining pressures and microstructures will be presented in our poster.

キーワード: 片麻岩, 地震波速度, 異方性, 微細構造, CPO

Keywords: gneiss, seismic velocity, anisotropy, microstructure, CPO

岐阜県瑞浪市のMIU-3号孔コアにおける月吉断層とマイクロクラック方位分布との関係 Relation of the Tsukiyoshi Fault and orientation distribution of microcracks in the borehole MIU-3 core in Mizunami City

大谷 具幸^{1*}; 横井 洗亮¹; 岡崎 一成¹; 西村 勇輝¹; 小嶋 智¹; 窪島 光志²; 笹尾 英嗣²
OHTANI, Tomoyuki^{1*}; YOKOI, Kosuke¹; OKAZAKI, Kazunari¹; NISHIMURA, Yuki¹; KOJIMA, Satoru¹; KUBOSHIMA, Koji²; SASAO, Eiji²

¹ 岐阜大学, ² 日本原子力研究開発機構
¹Gifu Univ., ²JAEA

断層近傍におけるマイクロクラックの方位分布の特徴を明らかにすることを目的に、断層を貫くボーリングコアを用いてマイクロクラックの方位測定を行った。対象としたボーリングコアは岐阜県瑞浪市で日本原子力研究開発機構が掘削したMIU-3号孔コアである。MIU-3号孔は深度約1014mまで掘削され、月吉断層とは深度707mで交差する。月吉断層の母岩は白亜紀後期の土岐花崗岩である。月吉断層の姿勢は、MIU-3号孔付近ではE-W走向70Sの姿勢を有する。せん断センスは中新世の瑞浪層群堆積後は逆断層とされているが、断層岩の組織解析により正断層センスとも報告されている(新里, 2003)。

MIU-3号孔のボーリングコアより7試料を採取して、マイクロクラックの方位測定を行った。対象とした深度は496m, 623m, 662m, 698m, 755m, 851m, 996mである。上盤側の4試料はいずれも粗粒花崗岩であり、下盤側の3試料は中粒花崗岩である。マイクロクラックの方位測定はVollbrecht et al. (1991)の方法に基づいて行った。すなわち、直交する3平面で岩石薄片を作成して、花こう岩に含まれる石英を対象として、それぞれの面でユニバーサルステージを用いてマイクロクラックの方位測定を行った。なお、測定はヒールドマイクロクラックとシールドマイクロクラックを対象として、オープンマイクロクラックは掘削に伴う人為的なクラックが含まれる恐れがあるために測定対象からは除外した。

マイクロクラックの観察結果より、ヒールドマイクロクラックはシールドマイクロクラックより前に形成されたと考えられる。また、方位測定の結果より、ヒールドマイクロクラックの卓越方位は全深度で水平から低角、N-S走向高角であり、深度496mを除いて中角傾斜が認められる。中角傾斜のマイクロクラックは深度623mではE-W走向、深度662mではN-S走向と卓越する走向は一致しない。シールドマイクロクラックの卓越方位は多くの深度で水平から低角、N-S走向高角、E-W~WNW-ESE走向高角であり、断層近傍の深度698m, 755mではN-S走向中角、E-W走向中角が発達する。

断層の近傍ではヒールドマイクロクラック、シールドマイクロクラックともに中角傾斜のマイクロクラックが出現する。Moore and Lockner (1995)は室内破壊実験よりマイクロクラックの発達について明らかにした。それによると、破壊面の形成が始まるまでは試料全体に軸圧方向と平行なマイクロクラックが発達し、破壊面の形成が始まると破壊面の近傍に軸圧方向と20°斜交(破壊面とは30°斜交)するマイクロクラックが形成される。MIU-3号孔コアのマイクロクラックは断層近傍のみ中角傾斜が出現することから、天然においても断層近傍でマイクロクラックの方位分布が変化することが明らかとなった。また、シールドマイクロクラックはヒールドマイクロクラックと比べて中角傾斜の分布範囲が小さい。これは、形成時期がより早いヒールドマイクロクラックは、花崗岩が非破壊の状態で形成され、形成範囲がより広がったためと考えられる。一方で、シールドマイクロクラックは断層がすでに形成されて破壊とシーリングを繰り返す中で形成され、弱化した断層近傍の狭い範囲に形成されたためと推定される。

Moore, D. E. and Lockner, D. A. (1995), "The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite," *Journal of Structural Geology*, 17, 95-114.

新里忠史 (2003), "東濃ウラン鉱床におけるナチュラルアナログ研究—ウラン鉱床分布域における月吉断層の活動履歴—," 日本地球惑星科学連合大会 2003年大会予稿集, G018-P004.

Vollbrecht, A., Rust, A. and Weber, K. (1991), "Development of microcracks in granites during cooling and uplift: examples from the Variscan basement in NE Bavaria, Germany," *Journal of Structural Geology*, 13, 787-799.

キーワード: マイクロクラック, 方位分布, 月吉断層, MIU-3号孔コア

Keywords: microcracks, orientation distribution, Tsukiyoshi Fault, borehole MIU-3 core

沈み込み帯ダイナミクスの数値モデル Numerical model for subduction zone dynamics

石井 和彦^{1*}
ISHII, Kazuhiko^{1*}

¹ 大阪府立大学大学院理学系研究科
¹ Graduate School of Sciences, Osaka Prefecture University

本発表では、沈み込み帯ダイナミクスの数値モデルを紹介する。このモデルは、上部・下部大陸地殻、上部・下部海洋地殻、マントルリソスフェア、アセノスフェア、堆積物、海水、大気から構成され、海洋プレートの沈み込みと変形、堆積物と海洋地殻の変成作用（結晶片岩化やエクロジャイト化とそれに伴う脱水）、メルトの形成と上昇、マントルウェッジの流動（温度、圧力、含水量、メルト分率、歪み速度依存）、流体による有効摩擦係数の低下、大陸地殻の変形、浸食・堆積などの過程を取り扱うことができる。

このモデルの目的は、1) 沈み込み境界の強度とカップリング深度、2) 変成岩の上昇機構、3) 付加体成長と構造浸食の過程とその条件、4) 弧大陸地殻の変形と応力分布などを理解することである。まだ、これらの過程について具体的な議論ができる段階ではないが、モデルの概要と課題について報告する。

キーワード: 沈み込み帯, 数値モデル, プレート境界強度, 変成岩の上昇, 地殻の変形と応力, 付加体成長と構造浸食
Keywords: subduction zones, numerical model, strength of plate interfaces, exhumation of metamorphic rocks, crustal deformation and stress, accretion and tectonic erosion

球殻テクトニクスにおける近藤理論 Kondo theory for spherical shells tectonics

菊地 和平^{1*}; 長濱 裕幸¹

KIKUCHI, Kazuhei^{1*}; NAGAHAMA, Hiroyuki¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of earth science, Tohoku University

沈み込み帯におけるリソスフェアの球殻座屈現象が、球殻テクトニクスにより研究されてきた。スラブの長さに関する Batdorf パラメータと正規化された静水圧との間に、線形関係が見出されている (Kikuchi and Nagahama, 2015)。このスラブの長さは、円弧の長さとしリソスフェアの厚さにほぼ比例している。しかし、球殻テクトニクスにおいて、リソスフェアの曲率を考慮した高次歪みを伴う座屈方程式の取扱いは与えられていない。一方、Kondo (1955) は湾曲した材料の曲げ及び座屈にリーマン幾何学の概念を使用している。この近藤理論から、リソスフェアの曲率を考慮した球殻座屈方程式を導出する。

Kikuchi, K. and H. Nagahama (2015) Batdorf parameter for the spherical shells tectonics, EGU General Assembly Conference Geophysical Research Abstracts Vol. 17.

Kondo, K. (1955) Theory of Metaphorical Plates and Shells, RAAG Memoirs Vol. I, (ed). K. Kondo, pp. 47- 60.

キーワード: 球殻テクトニクス, 近藤理論

Keywords: Spherical shells tectonics, Kondo theory

変成岩中の放射虫化石と変成鉱物の結晶成長 Radiolarian fossils and crystal growth of metamorphic minerals in low-grade metamorphic rocks

小野 晃^{1*}
ONO, Akira^{1*}

¹ なし

¹ None

関東山地の寄居-小川地域の秩父-三波川帯や跡倉ナツプについて、泥質変成岩や珪質変成岩などをルーペで観察すると、白いリング状組織(放射虫化石の痕跡)が普通に認められる。観察対象を更に広げて、高遠-塩尻地域の領家帯の泥質変成岩や伊那市長谷の泥質マイロナイトをルーペで調べてみると、これらにも放射虫化石の痕跡が一般的に存在する。この事実は3年前に報告されている[1]。ここでは、その後の調査もふまえて、放射虫化石の薄片中における産状や変成度との関連性などを報告する。

珪質スレート中の放射虫化石 チャート岩塊が寄居町谷津の跡倉ナツプに認められる。チャートに挟まっている珪質泥岩をルーペで見ると、リング状組織が多数認められる。薄片を光学顕微鏡で見ると、大きさが40~100 μ mほどの白色リングとその内部を埋める有色鉱物に富む泥質物質が確認できる(Figure A)。内部の泥質物質に有色鉱物が少ない場合、白色リングは不明瞭になる。有色鉱物の量はリング中心部で少ないことがある。この場合、有色鉱物に富む泥質物質は幅広い暗色のリングを作ることになる。以上のような微小の白色リング、暗色リングおよび有色鉱物に富む円形状組織は、秩父帯や領家帯の低変成度の細粒緻密な泥岩などにも一般的に認められ、それらは放射虫化石の痕跡と考えられる。

変成度と放射虫化石 領家帯東端部の高遠-塩尻地域では東に向かって変成温度が上昇し、緑泥石-黒雲母帯、黒雲母帯、シリマナイト帯に分帯されている。緑泥石-黒雲母帯では保存良好な放射虫化石が確認されているが、それよりも高温地帯では放射虫化石を確認できていなかった。しかし、黒雲母帯高温部の泥質片岩の切断面をルーペで観察すると、放射虫化石の痕跡である白色リングを確認できる。Figure Bはそのusbマイクロスコープの画像であり、Figure Cは光学顕微鏡写真である。放射虫化石の痕跡は画像を少し遠方からいろいろの方向から眺めると認識しやすい。黒雲母片岩の石英、長石、黒雲母、白雲母はかなり粗粒であるが、放射虫化石の輪郭は残存している。放射虫化石の内部には微細な炭質物(石墨)が非常に多く、炭質物の分布状況が化石の輪郭を保存している。一方、シリマナイトゾーンでは変成作用中の物質移動が顕著であり、炭質物もかなり大きく結晶成長している。しかもカリ長石が大量に形成されて、岩石組織が大きく変化している。そのため放射虫化石の痕跡は破壊されて、ほとんど残存していない。

変成鉱物の成長と放射虫化石 高遠のシリマナイトアイソグラッド付近の多くの泥質変成岩には、紅柱石、微細なシリマナイト(フィブロライト)とカリ長石が形成されている。大型のカリ長石の内部にはいろいろの鉱物が包有されている。包有物としては微小な炭質物が目立ち、それらはしばしば楕円形状に分布している。この形状は放射虫化石の形態を反映している可能性がある。

東秩父村居用の木呂子緑色岩メランジュには肥後-阿武隈帯起源の変成岩の岩塊が存在する。岩塊には泥質の珪質変成岩も存在し、それをルーペで見ると、放射虫化石と推定される白色リングが大量に認められる。光学顕微鏡で見ると、大きな粒径の鉱物はほぼすべて石英であり、その他に鑑定不能な微細な有色鉱物が石英の包有物として不規則に分布している。クロスニコルではリング状組織を確認しがたいが、オープンニコルでは微細な有色鉱物の多い部分がリング状や楕円形状に分布していることを認識できる。このリング状組織は石英が大きく成長していく際に石英に取り込まれたものと推定される。

放射虫化石の形状と変形作用 伊那市長谷中尾の三峰川沿いには細粒緻密な珪質や泥質の鹿塩マイロナイトが分布している。ウルトラマイロナイトと呼称されることもある細粒の岩石である。片理面とそれに直交する断面など複数の断面で放射虫化石の形状を観察してみたが、変形して著しく扁平になった放射虫化石は未だ見つからない。また、径1mmほどの長石、電気石、ザクロ石(一粒子のみ)の斑状結晶を観察したところ、斑状結晶の割れ目を石英が満たしている組織は認められなかった。プレッシャーシャドウの発達も非常に悪い。非常に強い剪断作用を示唆するデータは未だ得られていない。

[1] 小野, 2012, 日本地質学会第119年学術大会, R4-P-24, p.228.

キーワード: 放射虫化石, 変成温度, 再結晶作用

Keywords: Radiolarian fossil, Metamorphic temperature, Recrystallization

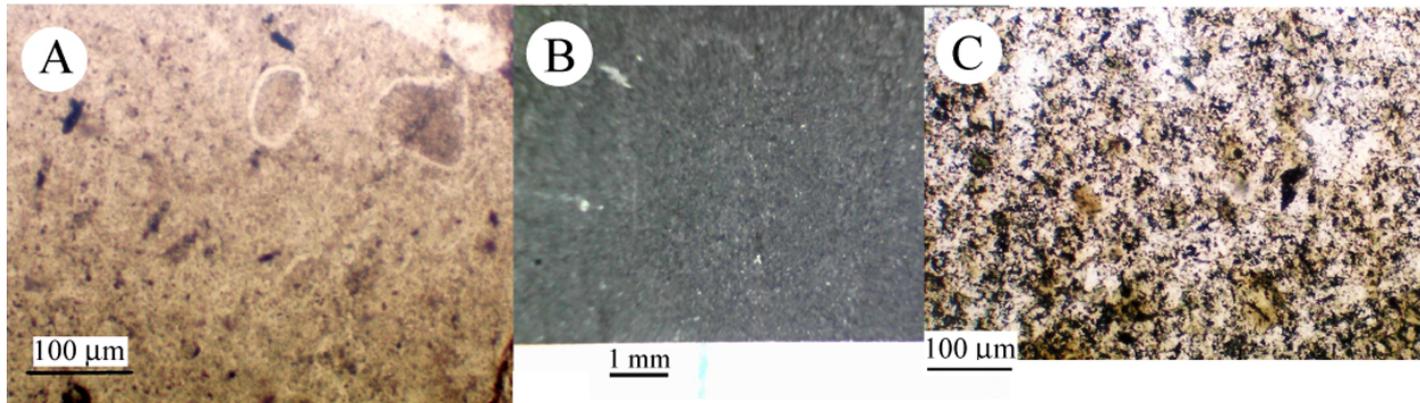
SMP43-P14

会場:コンベンションホール

時間:5月24日 18:15-19:30

A Siliceous slate

B and C Biotite-muscovite schist



別子地域三波川帯瀬場エクロジヤイト質塩基性片岩中の泥質片岩の変成 P-T 経路 Metamorphic P-T evolution of the eclogitic pelitic schists in the Sambagawa belt, central Shikoku, Japan

高須 晃^{1*}; Kabir M.F.¹
TAKASU, Akira^{1*}; KABIR, M.f.¹

¹ 島根大学
¹ Shimane University

別子地域三波川帯に分布する瀬場エクロジヤイト質塩基性片岩は大部分は塩基性片岩であるが、一部に泥質片岩及び珪質片岩の薄層を挟在する。塩基性片岩緑れん石角閃岩相の鉱物組み合わせを示すが、まれにエクロジヤイト相の鉱物組み合わせが認められる。エクロジヤイトの変成作用については、これまでに詳しく研究されてきた(例えば, Aoya, 2001; Kabir and Takasu, 2010)。Kabir and Takasu (2010) は、これらのうち大野谷地域に分布するエクロジヤイトについて、第1 高压変成作用(低温エクロジヤイト相)、第2 高压変成作用(高温エクロジヤイト相)、狭義の三波川帯変成作用の3 回の高圧変成作用を識別した。ECL 相のピーク温度圧力は、第1 高压変成作用が T: 530 - 590 °C, P: 19-21 kbar, 第2 高压変成作用が T: 630 - 680 °C, P: 20-22 kbar である。

今回の研究では瀬場エクロジヤイト質塩基性片岩中のエクロジヤイトと互層する泥質片岩の変成作用を明らかにした。組織と構成鉱物の化学組成より、この泥質片岩の変成作用は、1) 先駆的変成作用、2) 第1 高压変成作用、そして3) 第2 高压変成作用の3 回の変成イベントに区分できる。1) 先駆的変成作用イベントは斑状変晶ざくろ石のコアに含まれる包有物である Na-Ca~Ca 角閃石(タラマ閃石, パーガス閃石, Mg ホルンブレンドなど)、白雲母(Si: 6.05-6.13) で特徴づけられる。変成条件は緑れん石角閃岩相から角閃岩相が推定される。2) 第1 高压変成作用イベントの昇温期変成作用は緑れん石青色片岩相から緑れん石角閃岩相を経てエクロジヤイトに至る変成作用を示す。昇温~ピークの変成条件を明らかにするため、MnNCKFMASHO モデルシステムにおいてシュードセクションと組成等値線(Connolly, 1990, 2009) を計算し、昇温期の 460 °C, 8 kbar からピークの 600-640 °C, 19.5-21.5 kbar (エクロジヤイト相) の変成条件を明らかにした。ピーク後の降温期変成作用は NCKFMASHO モデルシステムを用い、角閃石と曹長石の等値線の交点より 510-520 °C, 9.5-10 kbar の条件が得られた。降温期変成作用はほぼ等温減圧の変成経路を示し、Aoya (2001) が示したような、圧力ピークの後、減圧しながらの温度上昇(温度ピーク) という変成経路は認められなかった。3) 第2 高压変成作用イベントは、コアが藍閃石、マントルがバロワ閃石、リムがエデン閃石である顕著な累帯構造を示す角閃石によって昇温、ピーク、降温の変成作用が特徴づけられる。また、コアの藍閃石がバロワ閃石と曹長石からなるシンプレクタイトを包有することは、藍閃石の晶出の前にエクロジヤイト変成イベントのオンファス輝石が降温変成によってシンプレクタイトを形成した後、藍閃石が形成されたと考えられる。

エクロジヤイト相変成作用の前の緑れん石角閃岩相から角閃岩相の先駆的変成作用は、サブダクションの開始時にまだ冷却されていないハンギング・ウォール側からの熱の供給によりおこったと考えられる。その後、サブダクションの継続に伴うハンギング・ウォールの冷却によるエクロジヤイト相に至る高压型変成作用(大野谷のエクロジヤイトには2 回のエクロジヤイト相変成作用が認められる)がおこった。最後に、エクロジヤイト岩体が一度地表近くにまで上昇した後、岩体周囲の岩石とともに狭義の三波川帯変成作用を受けたと考えられる。

キーワード: 三波川帯, エクロジヤイト, P-T シュードセクション, ざくろ石, 別子, 瀬場
Keywords: Sambagawa, eclogite, P-T pseudosection, garnet, Besshi, Seba

徳之島に産する角礫岩脈中の反応組織のEPMAおよびレーザーラマン分光分析 Electron Probe Microanalyser and Laser Raman analyses of reaction textures in breccia veins, Tokunoshima, SW Japan

貞包 健良^{1*}; 山本 啓司¹; 上田 修郎²; 寺林 優³

SADAKANE, Takeyoshi^{1*}; YAMAMOTO, Hiroshi¹; UEDA, Shuro²; TERABAYASHI, Masaru³

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科, ² 株式会社 ダイヤコンサルタント, ³ 香川大学工学部安全システム建設工学科

¹Graduate School of Science and Engineering Kagoshima University, ²Dia Consultants CO.,Ltd, ³Department of Safety Systems Construction Engineering, Kagawa University

西南諸島奄美群島、徳之島西岸の秋利神川沿いに露出する変成岩体からは暗色で脈状の貫入岩が発見されている(上田ほか, 2012)。この暗色脈は、断層運動に由来する角礫岩、微角礫岩、細粒の基質によって構成される。これらの基質には反射型顕微鏡において縁が円環状に輝く、不透明鉱物が含まれる。EPMAによる元素濃度分析は環状の部分はTiを多く含み、中心部分はCaが多いことが分かった。レーザーラマン分光顕微鏡を用いたマッピングではTi部分がanatase、Ca部分がcalciteであることが判明した。

この不透明環状鉱物は母岩である砂質・泥質片岩からは見つかっておらず、母岩でCaとTiを含むの鉱物はTitaniteのみである。よって、この不透明環状鉱物はTitaniteの分解反応によって生成したものと考えられ、脈の貫入時の温度は200℃かそれ以上であったと考えられる(Chakhmouradian, 2004 など)

Chakhmouradian, Anton R., 2004, *American Mineralogist*, 89, 1752-1762.

上田修郎, 山本啓司, 寺林優, 2012年, 日本地質学会第119年学術大会.

キーワード: ラマン分光法, 琉球弧, 徳之島, 鹿児島

Keywords: Laser Raman Spectroscopy, Ryukyu arc, Tokunoshima, Kagoshima Prefecture