

口頭講演 | R8：変成岩とテクトニクス

■ 2022年9月19日(月) 9:00 ~ 12:15 | 会場 B351 総合教育研究棟 B棟3F

R8：変成岩とテクトニクス

座長:中村 佳博(産総研)、苗村 康輔(岩手大学)

[座長]

中村佳博：R8-01~R8-06

苗村康輔：R8-07~R8-12

9:00 ~ 9:15

[R8-01] 脆性-塑性遷移領域における断層形成メカニズム

*安東 淳¹、樹神 洸寿¹、Das Kaushik¹、Sakar Dyuti Prakash¹、Ghosh Gautam³、富岡 尚敬² (1. 広島大、2. JAMSTEC・高知コア研、3. Presidency University)

9:15 ~ 9:30

[R8-02] 斑レイ岩の交代作用に起因するタルクを伴う断層の発達過程

*松永 健義¹、安東 淳¹、Kaushik Das¹ (1. 広島大・院理)

9:30 ~ 9:45

[R8-03] インド北西部ラジャスタン州Sarwar-Junia断層帯に露出する片麻岩のU-Pb年代と変成履歴:Aravalli-Delhi変動帯の変成変形過程

*岡崎 淳哉¹、Das Kaushik¹、Chattopadhyay Anupam²、安東 淳¹、Sarkar Arindam² (1. 広島大・院理、2. デリー大)

9:45 ~ 10:00

[R8-04] 九州黒瀬川構造帯・超高温変ハンレイ岩類の変成作用と変成年代

*小山内 康人¹、中野 伸彦¹、北野 一平²、大和田 正明³、Sinh Vuong Bui Thi⁴、Boldbaatar Dolzodmaa¹ (1. 九州大、2. 北大、3. 山口大、4. ベトナム科学技術アカデミー)

10:00 ~ 10:15

[R8-05] **Structural and chemical evolution of carbonaceous materials in Archean low to medium grade metasedimentary rocks***KIRAN Sasidharan¹、Nakamura Yoshihiro²、Satish-Kumar Madhusoodhan¹、Ohfuji Hiroaki³ (1. Niigata Uni., 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. Tohoku Uni.)

10:15 ~ 10:30

[R8-06] **Geodynamic cycle of carbon in the continental crust***M. Satish-Kumar¹ (1. Fac. Sci. Niigata Univ.)

10:30 ~ 10:45

[3Lecture-301-12-7add] 休憩

10:45 ~ 11:00

[R8-07] 深紫外顕微ラマン分光法を利用した新しい炭質物地質温度計

*中村 佳博¹、高橋 幸士¹、原 英俊¹ (1. 産総研)

11:00 ~ 11:15

[R8-08] ひすい輝石岩の時間スケール問題：どれくらい前弧域マントルウェッジ深部に滞留できるか？

*辻森 樹¹、古俣 利明¹、岡 紘希¹、常 青²、青木 翔吾³、青木 一勝⁴ (1. 東北大学、2. JAMSTEC、3. 秋田大学、4. 岡山理科大学)

11:15 ~ 11:30

[R8-09] ローソン石青色片岩垂相における輝石-角閃石間のAl-Fe³⁺分配に対する速度論的制約*藪田 渉¹、平島 崇男² (1. 無所属、2. 京都大学)

11:30 ~ 11:45

[R8-10] 飛騨帯産含かんらん石ドロマイト質大理石の安定同位体地球化学

「発表賞エントリー」

*原田 浩伸¹、辻森 樹¹、高柳 栄子¹、井龍 康文¹ (1. 東北大)

11:45 ~ 12:00

[R8-11] 東ネパールダンクッタ地域における高ヒマラヤ変成岩ナップの変成分帯と温度-圧力履歴

「発表賞エントリー」

*工藤 駿平¹、河上 哲生^{1,2}、中嶋 徹¹、酒井 治孝¹ (1. 京都大・院理、2. 原子力機構)

12:00 ~ 12:15

[R8-12] 後期新原生代-カンブリア紀の超高温変成岩体の熱源：ジルコン中の昇温期メルト包有物の化学組成からの制約

「発表賞エントリー」

*鈴木 康太¹、河上 哲生¹、小木曾 哲²、坂田 周平³ (1. 京都大・院理、2. 京都大・院人環、3. 東京大・地震研)

脆性-塑性遷移領域における断層形成メカニズム

安東淳一、樹神洸寿、Das Kaushik、Sakar Dyuti Prakash (広島大)
Gautam Ghosh (Presidency Univ.)、富岡尚敬 (JAMSTEC・高知コア研)

Fault formation mechanism in brittle-plastic transition regime

J. Ando*, H. Kotama, K. Das, D.P. Sakar (Hiroshima U.), G. Ghosh (Presidency U.), N. Tomioka (JAMSTEC)

【はじめに】 内陸地震は、石英が塑性変形する一方で長石が脆性変形する脆性-塑性遷移領域において発生する。断層岩の微細組織観察は、なぜ石英が塑性変形するような場において断層が形成されるのかという問題を解明しうる。

【研究対象】 北アルモラ衝上断層(NAT)に伴って露出する断層岩を対象とした。NAT はインド大陸とアジア大陸が衝突・収束した際に形成された大規模断層である主中央衝上断層の一部である。研究対象とした断層岩は、インド北部 Uttarakhand 州 Almora 北部に存在する NAT から南方約 15 km の北アルモラ衝上断層帯に属している。NAT の上盤と下盤の源岩はそれぞれ花崗岩と堆積岩であり、本研究では上盤の断層岩に着目した。この断層岩は、塑性変形した石英と黒雲母/白雲母といった層状珪酸塩鉱物、それと脆性変形した長石から主に構成されており、マイロナイト化している。マイロナイト化の程度は NAT に近づくほど大きくなる傾向が認められる。またマイロナイトの面構造と NAT の走向はほぼ平行であることから、マイロナイト化と NAT の運動は関係してことが分かる。

【研究手法】 系統的に採集した断層岩に対し、偏光顕微鏡、SEM、EBSD、TEM といった機器、及び ImageJ や MATLAB のオープンソース MTEX ツールボックスを用いて微細組織観察のキャラクタリゼーションを行った。これらのデータから、マイロナイト化の①温度と応力値、②歪場、③剪断方向、そして④マイロナイト化に与え

た層状珪酸塩鉱物の影響を明らかにした。そして NAT の形成過程を考察した。

【結果】 ①再結晶石英の微細組織から求めたマイロナイト化の温度は450-550 °C、応力値はNAT近傍では約65 MPa、離れると約40 MPaと小さくなる。②再結晶石英の形態から求めた歪場は、押しつぶしの場であった。③非対称組織と再結晶石英のc軸ファブリックから求めた剪断方向は、インド大陸の衝突・沈み込みに整合的なtop-to-southであったが、NAT近傍のみtop-to-northである。④断層岩中に占める層状珪酸塩鉱物の量と粒径は、NATに近づくにつれて増加・細粒化する。再結晶石英のc軸の集中度は層状珪酸塩鉱物の含有量と負の相関を示す。またNAT近傍では、層状珪酸塩鉱物は片理面に濃集し、片理面に平行に(001)面が配列する。石英と長石は明確に圧力溶解を受けている。層状珪酸塩鉱物には転位クリープで変形した証拠と共に、(001)面に平行な方向に引っ張りを受け破壊した痕跡が確認できる。

【考察】 上記ことからNATの近傍では、流体が強く関与してウルトラマイロナイト化し、変形のメカニズムが転位クリープから拡散クリープに変化した可能性が強い。その結果、NATの近傍の岩体の強度が小さくなり、応力集中が生じ、剪断方向が逆になったことが示唆される。またNAT近傍に存在するウルトラマイロナイトの層理面に濃集する層状珪酸塩鉱物中の破壊の痕跡は、応力集中により破壊の核が発生したことでNATが形成された可能性を示唆すると考えている。

Keywords: Fault, Mylonite, Brittle-plastic transition zone, Phyllosilicate mineral, Microstructure

Corresponding author: jando@hiroshima-u.ac.jp

斑レイ岩の交代作用に起因するタルクを伴う 断層の発達過程

松永健義*、安東淳一、DAS Kaushik (広島大・院先進理工)

Faulting process accompanied with talc concentration following metasomatism of gabbro

Takeyoshi Matsunaga*, Junichi Ando, DAS Kaushik

(Hiroshima Univ. Advanced Science and engineering)

【はじめに】 断層中にタルクが存在する場合、断層面の摩擦強度が低下し、クリープ性滑りが生じることが高速摩擦実験や自然界での地質学の実例から報告されている (Moore and Rymer, 2007、Moore and Lockner, 2011 など)。本研究では福岡県篠栗地域において角閃岩体中に発達する、断層面がタルクで構成された断層を発見し、その形成過程及び断層面の摩擦特性を明らかにすることを目的とした。本研究はクリープ性滑りを引き起こす可能性のある断層の形成過程に関して、新しい知見を与えるものと考えている。

【研究手法】 対象とする断層の調査を行い、必要に応じて岩石を採取した。その後、偏光顕微鏡と SEM を用いた微細組織観察、EPMA による化学組成分析、画像解析ソフト (ImageJ) を使用した鉱物モード比の算出、またガラスビード法での全岩組成分析を行った。

【結果】 研究対象とした断層は、角閃岩体中に発達し、断層面は緑泥石とタルクを主成分鉱物とする断層岩で構成されている。そして、断層面には非常に明瞭な鏡肌が形成されている。断層岩からは条線に平行に、滑り面に垂直な方向で岩石薄片を作成した。薄片の微細観察を行った結果、断層面から約 50 μm の領域はタルクが占めており、それより岩石内部はタルクと緑泥石が共存していた。更に微細組織に関して注目すると、断層面から約 1 mm を境に、断層面に近い側では鉱物の塑性変形が確認され、岩石内部側は未変形であった。また断層岩では鉱物の分布状況に特徴が見ら

れ、断層面に近づくにしたがって、タルクの占める割合が増加する傾向が認められた。断層岩と角閃岩の全岩組成分析の結果を比較すると、断層岩は角閃岩に対し、Mg と Ca に富み、Al と Na が欠損していた。

【考察】 以上の結果から断層の形成過程を考察する。1) 角閃岩相領域で斑レイ岩が角閃岩に変化した後、2) 緑色片岩相領域に推移し、流体を伴った交代作用の影響で、岩石間の元素の移動や鉱物反応が生じ、角閃岩中に緑泥石が晶出した。3) 緑泥石で主に構成された岩石中で断層が形成され、その際発生した摩擦発熱により緑泥石の脱水が起き、タルクが形成された。断層面に近いほど摩擦熱の影響でタルクが多く形成され、特に断層面から約 50 μm の範囲は緑泥石が完全に脱水し、タルクのみで構成された。断層運動時に発生した摩擦熱は、緑泥石の脱水温度である約 650 $^{\circ}\text{C}$ (Shimoda, 1971) 以上であったと推測される。また断層面から約 1 mm の範囲では、剪断応力により緑泥石とタルクが塑性変形した。このような断層面に沿った一定の幅を持つ塑性変形組織は、Smith et al. (2013) の高速摩擦実験の回収試料の組織と近似しており、断層滑りの際に生じたと考えられる。

今後は TEM や EBSD 装置を使用して、緑泥石とタルクの微細組織観察をすることで、上記した断層形成過程の検証を行う予定である。また原子間力顕微鏡を用い、すべり面の微細形状を調べ、摩擦係数との関係を議論したい。

Keywords: Gabbro, Talc, Metasomatism, Fault

Corresponding author: m213165@hiroshima-u.ac.jp

インド北西部ラジャスタン州 Sarwar-Junia 断層帯に露出する片麻岩の U-Pb 年代と変成履歴: Aravalli-Delhi 変動帯の変成変形過程

岡崎淳哉 (広島大), Das Kaushik (広島大), Chattopadhyay Anupam (デリー大),
安東淳一 (広島大), Sarkar Arindam (デリー大)

U-Pb geochronology and metamorphic history of gneissic rocks from Sarwar-Junia fault zone, Rajasthan, NW India: Implications for the tectonothermal evolution of the Aravalli-Delhi Mobile Belt

Jun-ya Okazaki* (Hiroshima Univ.), Kaushik Das (Hiroshima Univ.), Anupam Chattopadhyay (Delhi Univ.),
Jun-ichi Ando (Hiroshima Univ.), Arindam Sarkar (Delhi Univ.)

The gneisses of the Sarwar-Junia Fault Zone (SJFZ), belonging to Aravalli-Delhi Mobile Belt (ADMB) in northwest India, recorded two phases of metamorphism. From the geochronology, the first metamorphism (M_1) can be revealed the occurrence in the basement granitic gneiss at ca. 1740 Ma. Subsequently, the second metamorphism (M_2) occurred at ca. 950 Ma affecting both the granitic gneiss and the overlying pelitic gneiss. Estimation of the P-T condition and pseudosection modeling show that the M_2 peak stage condition reached ~ 850 °C temperature at ~ 7 kbar pressure and then that slow near-isobaric cooling occurred during the post-peak stage. Therefore, the possible subduction, associated with collision, ceased at 950 Ma in ADMB. The near-isobarically cooled and hydrated crust of the SJFZ records subsequent event(s) of brittle faulting as evident by the presence of pseudotachylyte veins and cataclastic grains. Such faulting is considered to have occurred between ca. 750 Ma and ca. 905 Ma.

中生代から新原生代にかけて、ロディニア超大陸では陸塊の集合と分裂が起こっており、その時、同時に造山運動が起こった。インド大陸はロディニア超大陸の一部であり、超大陸の集合・分裂に伴って形成された造山帯が多く存在する。このような造山帯の岩石には、多重で複雑な変成や変形が起こった証拠が残っており、広範囲のリニアメントや剪断帯として造山帯の中に存在する。このような岩石の変成や変形、またその年代を明らかにすることは、超大陸の全球的な地殻のダイナミクスを理解する上で重要である。本研究では、インド北西部の Aravalli-Delhi 変動帯 (ADMB) 中の Sarwar-Junia 断層帯 (SJFZ) に露出する泥質片麻岩を対象に、鉱物組み合わせや、鉱物の化学組成とシュードセクションからの変成の温度・圧力条件の推定から変成作用の特徴を明らかにし、加えて泥質片麻岩とその基盤岩である花こう片麻岩に対して年代測定を行い、変成が起こった年代を明らかにすることで、ADMB の構造進化を明らかにすることを目的とした。また、SJFZ には地震性断層運動の証拠となるシュードタキライトが片麻岩中に露出しており、年代測定から断層運動の年代を制約することも目的とした。

泥質片麻岩、花こう片麻岩のジルコンとモナザ

イトの年代測定から、SJFZ の片麻岩類は 2 度の変成を受けている。およそ 1740 Ma で、1 度目の変成 (M_1) が花こう片麻岩中で起き、その後、2 度目の変成 (M_2) が、およそ 950 Ma で、花こう片麻岩と泥質片麻岩の両方で起きていることが明らかとなった。泥質片麻岩の微細組織の観察と鉱物の化学組成から、 M_2 はピーク段階とその前後の 3 段階に分けられ、鉱物の化学組成を用いた温度・圧力条件の推定とシュードセクションの鉱物組み合わせから、ピーク段階ではおよそ 850°C、7 kbar の条件にあり、その後、等圧に近い条件下で徐冷されたことが明らかとなった。

これらの結果から SJFZ および ADMB では、およそ 1740 Ma の M_1 後に、花こう片麻岩を基盤とする泥質片麻岩の原岩が堆積し、沈み込みに関連する衝突による造山運動によって、花こう片麻岩、泥質片麻岩におよそ 950 Ma で M_2 が起こったことが示唆される。さらにピーク段階後の等圧に近い条件下での徐冷から、この時に衝突が停止したことが示唆される。またシュードタキライト脈は、両方の片麻岩中に発達しており、 M_2 によって形成された組織を切っているため、その形成は M_2 の後である。ジルコンとモナザイトの年代測定から、形成時期はおおよそ 750 Ma と 905 Ma の間である。

Keywords: Sarwa-Junia Fault Zone; Metamorphic history; Granitic and Pelitic gneisses; Tectonics of the Aravalli-Delhi Mobile belt;

Age of faulting

E-mail address: d202541@hiroshima-u.ac.jp

九州黒瀬川構造帯・超高温変ハンレイ岩類の変成作用と変成年代

小山内康人 (九州大)・中野伸彦 (九州大)・北野一平 (北大)・大和田正明 (山口大)・
Vuong Bui Thi Sinh (ベトナム科学技術アカデミー)・Boldbaatar Dolzodmaa (九州大)

Process and timing of ultrahigh-temperature metamorphism of metagabbro from the Kurosegawa tectonic belt in Kyushu

Osanai, Y.* (Kyushu Univ.), Nakano, N. (Kyushu Univ.), Kitano, I. (Hokkaido Univ.),
Owada, M. (Yamaguchi Univ.), Vuong Bui Thi Sinh (Vietnam Academy of Science and
Technology), Boldbaatar Dolzodmaa (Kyushu Univ.)

九州中央部を東西に横断する黒瀬川構造帯には蛇紋岩メランジュの広範な分布が知られており、変形した蛇紋岩に囲まれるブロック状～レンズ状岩体として多様な変成岩類および深成岩類が混在する (例えば、松本・勘米良, 1964; 唐木田, 1977; 斎藤ほか, 2005 など)。変成岩類では、緑色片岩相～緑簾石-藍閃石片岩相ないしローソン石-藍閃石片岩相の高温型変成岩類と、角閃岩相～高压グラニュライト相の高温型変成岩類が分布し (西山, 2010 など)、深成岩類では一部マイロナイト化した岩相を含め花崗岩類が主要な岩相である。

高温型変成岩類は主に苦鉄質火成岩類を原岩とするフェンジャイト-藍閃石片岩、ローソン石青色片岩、アルバイト-オンファス輝石岩、含ヒスイ輝石-藍閃石変ハンレイ岩などであり、約 250～350°C、5～11kbar の変成条件をしめす (Sato et al., 2016; Miyazoe et al., 2009 など)。一方、高温型変成岩類では、ホルンブレンド片麻岩、ザクロ石-黒雲母片麻岩や、苦鉄質火成岩起源のザクロ石角閃岩、単斜輝石角閃岩、ザクロ石-単斜輝石グラニュライトがみとめられる (斎藤ほか, 2005; Miyazoe et al., 2009; 唐木田, 1977; 小山内ほか, 2000 など)。九州東部・三重～本匠地域では、ザクロ石-単斜輝石グラニュライトの一部にザクロ石-単斜輝石-斜長石から構成される優白質ポッドがみとめられ、部分熔融が示唆されるとともに、ザクロ石の周囲には典型的な減圧過程で形成されたと考えられる斜方輝石-斜長石シンプレクタイト起源と見なしうるコロナ組織が発達する。この岩石では、ピーク変成作用の温度・圧力条件として 900～1050°C、10～12kbar の超高温変成条件が見積もられる。

岩石化学的・同位体年代学的解析から、高温型変ハンレイ岩の原岩は、約 500Ma に活動した海嶺玄武岩形成場の火成活動起源であり、高温型の変成作用を受けた変ハンレイ岩の原岩は、約 450Ma の活動的大陸縁における火山弧火成活動に由来することが明らかにされている (小山内ほか, 2014a,

2014b)。また、蛇紋岩メランジュ中に変成岩類と混在する三滝型花崗岩類は、高温型変成岩類の原岩形成年代と同時期の約 450Ma をしめす (吉本ほか, 2013; 小山内ほか, 2014a, 2014b)。変成作用年代としては、高压変成岩から K-Ar 年代あるいは Rb-Sr アイソクロン年代として 300-270Ma が得られている (吉本ほか, 2011; 上村ほか, 2012 など)。一方、高温型変成作用の年代としては、これまで 420～430Ma の変成年代が想定されてきた (小山内ほか, 2000; 宮下ほか, 2016) が、今回新たにザクロ石-単斜輝石グラニュライトの優白質ポッド中に産し、優白質ポッド形成時の部分熔融にともなうメルトから晶出したと見なしうる自形ジルコンから約 250Ma の LA-ICP-MS U-Pb 年代が得られた。この優白質ポッド中の単斜輝石やザクロ石の不定形包有ジルコンは約 450Ma の年代をしめす。したがって、オルドビス紀の火山弧火成活動場における地殻深部ではハンレイ岩が形成され、地殻浅部では同時期に花崗岩類が形成されたと見なすことができる。その後、地殻浅部の花崗岩類ではマイロナイト化をともないながら低変成度の変成作用が進行したが、地殻深部のハンレイ岩類では角閃岩相～グラニュライト相の変成作用が進行し、ペルム紀末 (約 250Ma) には最高変成条件下で部分熔融が進行したことが明らかになった。

高温型変成岩類についてのカンブリア紀の海洋底火成活動とペルム紀初期の変成作用、高温型変成岩類についてのオルドビス紀の火山弧火成活動およびペルム紀末の衝突型変成作用と部分熔融など、極めて多様で複雑な黒瀬川構造帯構成岩石の形成プロセスと蛇紋岩メランジュ形成テクトニクスを考えるうえで必要な情報が出そろってきた。黒瀬川構造帯の形成過程は、日本海拡大前のアジア大陸形成過程と密接な関連があることは明白であり、ペルム紀/トリアス紀境界に起こった南・北中国地塊の大陸衝突過程との関連を改めて再検討する必要がある。

Keywords: Kurosegawa tectonic belt, UHT metamorphism, Grt-Cpx granulite, Ordovician magmatism, Permo-Triassic metamorphism.

*Corresponding author: osanai@scs.kyushu-u.ac.jp

Structural and chemical evolution of carbonaceous materials in Archean low to medium grade metasedimentary rocks

Sasidharan Kiran (Grad. Sch. Sci. Tech., Niigata Univ.), Yoshihiro Nakamura (GSJ-AIST), Hiroaki Ohfuji (Grad. Sch. Sci. Tohoku Univ.) and Madhusoodhan Satish-Kumar (Fac. Sci. Niigata Univ.)

The term carbonaceous material (CM) is coined for the organic matter trapped in the sedimentary rocks that attain maturity during prograde metamorphism, which involves two main processes known as carbonization and graphitization (Franklin, 1950; Oberlin, 1984). During the primary stage of carbonization, the release of heteroatoms such as hydrogen, nitrogen, oxygen, and sulfur, and the degradation of aliphatic CH groups leads to the relative enrichment of aromatic structures in CM. Solid state reorganization takes place by the formation of basic structural units with the release of non-condensable gases (e.g., CH₄ and H₂) from the aromatic CH groups in the later stage (Oberlin et al., 1999). Graphitization is the process by which the aromatic structure is reorganized to form turbostratic to graphitic structure. Micro-Raman spectroscopy and HRTEM are being widely used to assess the thermal maturity and structural evolution of CM in sedimentary rocks in various tectonic settings (e.g., Pasteris and Wopenka, 1991; Buseck and Huang, 1985).

The maturity of the CM in the meta-carbonates of the Archean Chitradurga Schist Belt, Dharwar Craton has been evaluated and compared structural changes using micro-Raman spectroscopy with carbon isotope systematics. Following the Raman Spectra of CM thermometry (Beysac et al., 2002) and carbon isotope thermometry (Wada and Suzuki, 1983) a systematic increase in the metamorphic condition from upper greenschist facies to lower amphibolite facies was observed along the younger to older stratigraphic sequences respectively. The inconsistencies between the thermometry in one stratigraphic unit are considered due to the post-metamorphic hydrothermal infiltration evidenced by the cross-cutting quartz veins and associated alterations. To focus on the evolution of CMs under low thermal maturation further samples are considered from Archean (Tumbiana Formation, 2.7 Ga, Pilbara Craton; Malmani Subgroup, 2.5 Ga, Kaapvaal Craton) and Proterozoic (Duck Creek Formation, 1.8 Ga, Pilbara craton) terranes. Preliminary results indicate that the CM is metamorphosed under prehnite-pumpellyite to lower greenschist facies condition. The $\delta^{13}\text{C}$ value of the CM in the Tumbiana Formation stromatolite is between -39.6 to -47.3 ‰, which attained large attention in terms of record negative carbon isotope excursion related to methanogenesis (Thomazo et al., 2009; Lepot et al., 2019). Recently using deep UV Raman spectroscopy that avoids fluorescence, Quirico et al, (2020) distinguished immature terrestrial kerogens and coals from those of extraterrestrial kerogens extracted from type 1 and 2 primitive chondrites. Moreover, traces of organic molecules present in the CM can be identified due to the resonance effect of the deep UV laser (Bhartia et al., 2021). In this presentation, we will be comparing the visible and deep UV Raman spectra of CM along with HRTEM images in low to medium-grade rocks and attempt to understand the maturation process of Archean unicellular organisms and later evolved complex multicellular organisms.

References:

Beysac et al (2002) *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 859-871; Bhartia et al (2021) *Space Science Reviews*, 217:58; Franklin (1951) *Acta Crystallographica*, 3, 107-121; Kouketsu et al (2014) *Island Arc*, 23, 33-50; Lepot et al (2019) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 244, 522-547; Oberlin (1984) *Carbon*, 22, 521-541; Pasteris and Wopenka (1991) *Canadian Mineralogist*, 29, 1-9; Quirico et al (2020) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 282, 156-176; Sadezky et al (2005) *Carbon*, 43, 1731-1742. Thomazo et al (2009) *Earth and Planetary Science Letters*, 279, 65-75 Wada and Suzuki, (1983) *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 697-706

Keywords: Carbonaceous material, Micro-Raman spectroscopy, deep UV-Raman spectroscopy, Carbon isotope

Corresponding author: kiransasidharan.s@gmail.com

Geodynamic cycle of carbon in the continental crust

M. Satish-Kumar (Niigata Univ.)

The geodynamic cycle of carbon is of vital importance in controlling the Earth's carbon budget, ever since the biological process became active in the surface. Organic carbon in sediments and carbonate carbon are two important reservoirs that can act as a source or sink for carbon during plate subduction and continent building processes. It is important to understand the movement of carbon through different reservoirs in the Earth and carbon isotope geochemistry has served as a common and widely applied tool. In this presentation, a comprehensive synthesis is carried out on the forms of carbon, its movement among the various reservoirs and the evolution of carbon isotopes in the middle to lower continental crust, where large volumes of carbon can be stored as long-term sinks. Examples from the orogenic belts in India, Sri Lanka and Antarctica are used to demonstrate that metamorphism of sediments rich in organic material can preserve graphite as carbon sinks for hundreds of millions to several billions of years.

A detailed carbon isotope study of graphite was carried out in continental collisions zones. Based on the mode of occurrence, they were classified into three types, vein-type, disseminate flakes and coarse aggregates. In addition, graphite concentration is also observed along the contact between metacarbonate rocks and silicate rocks. In order to understand the source of carbon, the carbon isotope fractionation between calcite, graphite and carbon-bearing fluids (CO_2 or CH_4) during metamorphism was considered. For example, at the Skallevikshalsen locality in the Lützow Holm Complex, East Antarctica, all three forms of carbon-bearing phases were present. Field evidence suggest that carbon is being pooled at lithological contacts and deposited as graphite. Carbon isotopic composition of graphite and associated carbonates are consistent with graphite precipitation from CO_2 fluids released by decarbonation reactions.

The formation of vein-type graphite in Sri Lanka is considered to be a different process, as large volumes of highly crystalline graphite is deposited from fluids, possibly derived from mantle derived magmatic source. The CO_2 -rich fluids are observed in quartz pods within the graphite veins, recording compositional characteristics of fluids that deposited graphite veins. Carbon isotopic composition remain constant across the vein, with only minor variations observed with depth. Absence of methane in fluid inclusions suggest graphite deposition directly from CO_2 -rich fluids.

Across the regimes of high-temperature metamorphism and partial melting of graphite-bearing rocks graphite dissolves to form COH fluids, part of which, especially the lighter isotope-bearing fluids, escape the system causing a bulk ^{13}C enrichment. Based on field, textural and carbon isotope evidence, from a typical example from the Kerala Khondalite Belt, southern Indian granulite terrane, during biotite dehydration melting of graphite-bearing rocks graphite dissolution is enhanced by Fe^{3+} reduction, however during melt crystallization graphite will reprecipitate, resulting in carbon remobilization and carbon isotope reorganization. Thus, carbon is recycled and retained as graphite in the continental crust during high-grade metamorphism and anatexis, though its isotopic composition can be considerably modified. A comprehensive review of carbon isotopic composition of graphite in continental crust is presented in order to understand the role of graphite as "long-term sinks" of carbon.

Keywords: graphite, COH fluids, continental crust, partial melting, carbon isotopes

Corresponding author E-mail: satish@geo.sc.niigata-u.ac.jp

口頭講演

R8：変成岩とテクトニクス

座長:中村 佳博(産総研)、苗村 康輔(岩手大学)

2022年9月19日(月) 09:00 ~ 12:15 B351 (総合教育研究棟 B棟3F)

[座長]

中村佳博：R8-01～R8-06

苗村康輔：R8-07～R8-12

10:30 ~ 10:45

[3Lecture-301-12-7add]休憩

深紫外顕微ラマン分光法を利用した新しい炭質物地質温度計

New calibration of Raman spectra of Carbonaceous material thermometry using a deep UV micro-Raman spectroscopy

中村佳博*(産総研), 高橋幸士(産総研), 原英俊(産総研)

炭質物の結晶構造進化に基づく地質温度計は、簡便かつ高精度に変成温度を推定できるため広く利用されている。しかし本手法で正確な温度を決定するには、適切な炭質物粒子の選定と薄片作成時の研磨の影響を避ける必要がある。さらに低変成度になると炭質物から発生する自家蛍光によって顕微ラマン分光分析自体が困難になる。このような問題を解決するため、本研究では新しい深紫外顕微ラマン分光装置を開発した。深紫外領域(200~300 nm)では、蛍光がほとんど発生しない。そのため蛍光に左右されないSN比の高いラマンスペクトルを取得できる。本研究では266nmパルスレーザーを励起光源として利用し、一般的な50cmシングルモノクロメーターと前面照射型CCD検出器で顕微ラマン分光分析を行った。ラマン光学系には2枚のダイクロイックミラーを利用しレーザー及びラマン信号のスループットを大幅に向上させている。詳細はNakamura et al. (in press)に報告している。

本装置を利用すると蛍光の影響を無視できるため、100 °Cから400°Cの変成温度で形成された岩石片を処理せずそのまま分析した。100~230°Cにおける炭質物のラマンスペクトルは、D bandとG bandだけではなくT bandと呼ばれるSp³混成軌道に関連した振動モードが特徴的に出現する(Ferrari and Robertson, 2001)。D bandとT bandは変成温度が上昇するにつれ単調減少し、G bandのみの単一ピークへ変化する。この変化は、結晶構造内部の欠陥が連続的に減少していることを反映している。この時のG band半値幅(Full width at half maximum; FWHM)とRBS (wavenumber_{G-D bands})は、変成温度に対して強い線形関係(R² = 0.94, 0.85)を示す。以上のラマンスペクトル変化の観察からG band FWHM及びRBSが、100~400°Cの広い領域で地質温度計として有効な温度指標であることが示唆される。本発表では、より詳細な温度補正式に関して紹介する。

[引用文献]

Nakamura et al. (in press), JMPS. Ferrari and Robertson, (2001), Vo. 64, 075414.

ひすい輝石岩の時間スケール問題: どれくらい前弧域マントルウェッジ 深部に滞留できるか?

辻森 樹 (東北大)・古俣 利明 (東北大)・岡 紘希 (東北大)・常 青 (JAMSTEC)・
青木 翔吾 (秋田大)・青木 一勝 (岡山理大)

The time-scale conundrum of jadeitites: How long retained in forearc mantle wedge?

Tatsuki Tsujimori* (Tohoku Univ.), Toshiaki Komata (Tohoku Univ.), Hiroki Oka (Tohoku Univ.), Qing Chang (JAMSTEC), Shogo Aoki (Akita Univ.), Kazumasa Aoki (Okayama Univ. of Sci.)

Jadeitites form in the forearc mantle wedge, and the jadeitite-hosted mélange can stay within the mantle wedge for a considerable time. But how long are jadeitites retained in serpentinized mantle wedge environment? Osayama jadeitite (OSJ) contains primary rutile, zircon, grossular and paragonite and secondary titanite and rare Ca-rich amphibole. Although the hydrothermal zircons yield a U-Pb age of ~524 Ma, new age data of secondary amphibole gives K-Ar age of 292 Ma that overlaps phengite ages of HP rocks in the same mélange. The $\delta^7\text{Li}$ values of amphibole ($-0.2 \pm 0.8\%$) are significantly smaller than those of jadeite ($+4.6 \pm 1.4\%$, $n=10$), suggesting isotopic disequilibrium among those two phases. Our reevaluation of OSJ suggests the possibility that jadeitite-hosted serpentinized mantle wedge can be retained for ~200 m.y..

定常的な海洋プレートの沈み込み帯において、ひすい輝石岩の形成場となる前弧域マントルウェッジ深部はスラブとディカップリングしており、比較的低温の状態では蛇紋岩化したかんらん岩が滞留していると考えられている。スラブ物質を原岩とした高圧変成岩の放射年代に比べて、ひすい輝石岩のそれが有意な年代幅を持つなど、前弧域マントルウェッジ深部の静的な状態を示唆する観察事実は存在する。しかし、蛇紋岩を直接年代測定できないため前弧域マントルウェッジ深部がどの程度のタイムスケールで滞留できるのか、分かっていない。我々は中国山地の大佐山蛇紋岩メランジュ(OSM)に産するひすい輝石岩(OSJ)の年代学を再訪することで間接的に前弧域マントルウェッジ深部が停滞できる時間スケールの束縛を試みた。OSJの初生的なひすい輝石($\delta^7\text{Li}$ 平均値 $+4.6 \pm 1.4\%$)と共存する初生の副鉱物はジルコンの他、ルチル、グロシュラー、パラゴナイトである。鳥取県若桜や兵庫県大屋のひすい輝石岩と同様に、全岩化学組成のEu正異常が顕著で糸魚川産のひすい輝石岩とは区別が付く(ひすい輝石岩塊のブラックウォールも同様の特徴を持つ)。二次的鉱物にはチタン石やペクトライトなど様々な相が産出するが、まれにCa角閃石を含む。ジルコンはしばしばルチルとグロシュラーを包有し、低い酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$ [VSMOW]平均値 $+3.8 \pm 0.6\%$)で特徴付けられる。Ti含有量による温度

推定は $620 \pm 50^\circ\text{C}$ である。 523.5 ± 3.6 Ma の U-Pb 年代を示すが、酸素・ハフニウム同位体比が改変を被っている (Tsujimori *et al.*, 2006 IGR; Fu *et al.*, 2010 CMP; Tsujimori, 2017 JMPS)。ジルコンのクラックに沿って溶解再沈澱の組織があるが年代の若返りは確認できない。ジルコンは $10 \mu\text{g/g}$ 程度の Li を含み、 $\delta^7\text{Li}$ はコアの $+1\%$ からリム側に向かって -5% まで累帯する。Ca 角閃石 ($\delta^7\text{Li}$ 平均値 $-0.2 \pm 0.8\%$) はジルコンの U-Pb 年代よりも約 2 億年若い 292 ± 6.2 Ma の K-Ar 年代を示し、OSM 産の高圧変成岩類のフェンジャイト K-Ar 年代 (327–373 Ma) の範囲と重なる。Ca 角閃石はその組織から初生的なひすい輝石とは形成時期が異なると考えられる。一般に共存するオンファス輝石と藍閃石間の同位体比分別 ($\Delta^7\text{Li}_{\text{Omp-Gln}}$) が負の値をとるが OSJ のひすい輝石と角閃石は真逆の $\Delta^7\text{Li}$ 値の関係をもち、両者は非平衡と考えられる。OSJ は形成後、約 2 億年間、前弧域マントルウェッジ深部で蛇紋岩化したマントルかんらん岩と静的な状態を経験し、蓮華帯の結晶片岩が取り込まれて蛇紋岩メランジュを形成するタイミングで新しい交代作用を経験したと考えられる。前弧域マントルウェッジ深部は高圧変成帯の上昇のような非定常的な地質イベントが起こらない限り、静的な状態を 2 億年近く保てる可能性がある。

Keywords: Jadeitite, Forearc mantle wedge, Osayama Serpentinite Mélange, Ca-amphibole

*Corresponding author: tatsukix@tohoku.ac.jp

Kinetic control on Al-Fe³⁺ distribution between Na-amphibole and Na-pyroxene in the lawsonite blueschist facies

Wataru YABUTA* and Takao HIRAJIMA (Kyoto University)

Na pyroxene (Na-Px) and Na amphibole (Na-Amp) are two of the most common metamorphic minerals in metabasalts and metacherts, suffered lawsonite blueschist (LBS) sub-facies, in the Hakoishi sub-unit, Kyushu, Japan. In the area, Sato et al. (2016) proposed an westward upgrading in metamorphic conditions accompanied by hydration of metabasalts, based on the systematic variation of low-variant assemblages. However, X_{Jd} [= $^{VI}Al / (Ca+Fe^{3+}+Al)$] in Na-Px reaches its peak in the middle of the area.

Yabuta and Hirajima (2021, JAMS) pointed out that X_{Jd} is controlled by the coexisting Na-Al phases, i.e., X_{Jd} is lowered in the coexistence of Na-Amp, resulting in an apparent reversal in pressure estimation. Actually, the most X_{Jd} -rich sample located in the middle of the area is Amp-free and lower X_{Jd} sample in the western part of the area is Amp-bearing. This new finding brings a serious issue that the petrologists cannot simply use the Jd-Ab-Qtz geobarometer to the relevant grade rocks. In this report, we attempt to explain another determinant of the element distribution between coexisting Na-Px and Na-Amp by characterizing the pairs in LBS sub-facies.

In metabasalts, both Na-Px and Na-Amp occur throughout the Hakoishi sub-unit. Typically, Na-Px and Na-Amp replace relict augite and tremolite/hornblende, respectively. In metacherts, on the contrary, Na-Amp is more rare compared to Na-Px; Na-Amp mainly occurs in the western higher-grade part of the sub-unit while Na-Px is widespread. In coexistence, the two form mixed bands of acicular grains or intergrowth.

Al-Fe³⁺ partition between Na-Px and Na-Amp is investigated in terms of distribution coefficient [$K_D = (Al/Fe^{3+})_{Amp} / (Al/Fe^{3+})_{Px}$; Onuki and Ernst, 1969]. It is suggested that Al is distributed equally to both minerals in metacherts ($K_D = 0.5-2$; $K_D = 1$ in average), while Al is concentrated in Na-Amp in most metabasalts ($K_D = 2-8$; $K_D = 4$ in average). This could explain the lowered X_{Jd} in Na-Px of metabasalts. But K_D values near 1 are obtained for one exceptional metabasalt sample (OD112), where Na-Px and Na-Amp occur as vein-fillings. There the pair clearly shows a simultaneous crystallization from infiltrated fluid, like the cases in metacherts. This infers another factor to control K_D between Na-Px and Na-Amp.

Literature study of K_D in blueschist facies rocks also show two peaks at $K_D \sim 1$ and $K_D \sim 4$. Like Hakoishi metamorphic rocks, K_D is closely associated with rock texture: $K_D \sim 4$ obtained from less deformed rocks containing relict minerals, $K_D \sim 1$ from in well foliated (i.e., equilibrated) samples. For instance, blueschists in the Horokanai area of the Kamuikotan metamorphic belt, Hokkaido, where schistosity prevails and trace relict minerals are observed, K_D mostly equals 1. Furthermore, K_D approaches 1 in eclogite facies rocks, where better equilibrium state is expected.

Thus chemical compositions of Na-Px and Na-Amp in blueschist facies should be interpreted in light of kinetic control depending on rock texture. Al preferences of the two phases are controlled by their “seed” phases when replacement progresses.

Keywords: blueschist, Na pyroxene, Na amphibole, geobarometry

* Corresponding author: W. Yabuta yabuta.wataru.25n@kyoto-u.jp

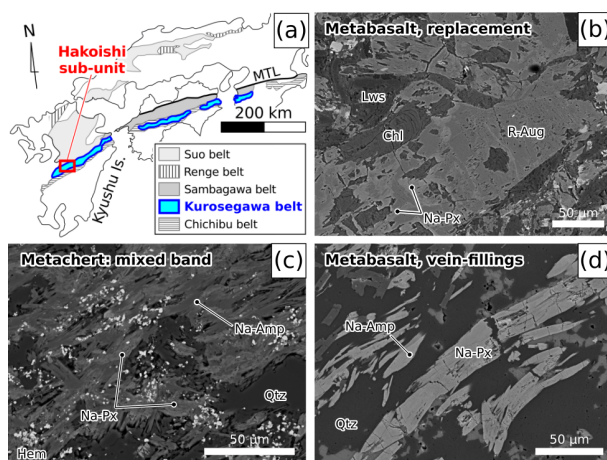


Fig. Map of the Hakoishi sub-unit and Na-Px/Na-Amp occurrences

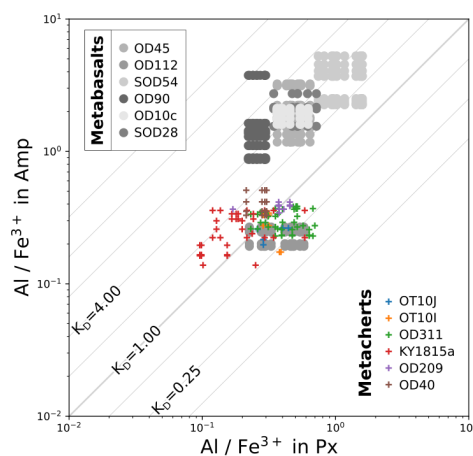


Fig. Al-Fe³⁺ distribution between Na-Px and Na-Amp

飛騨帯産含かんらん石ドロマイト質大理石の安定同位体地球化学

原田浩伸*, 辻森樹, 高柳栄子, 井龍康文 (東北大)

Stable isotope geochemistry of the olivine-bearing dolomitic marble in the Hida Belt, Japan

Hironobu Harada*, Tatsuki Tsujimori, Hideko Takayanagi, Yasufumi Iryu (Tohoku Univ.)

Marble, a metacarbonate rock, occurs in various orogenic belts throughout the Earth's history. We newly determined C–O isotope compositions of upper amphibolite-facies dolomitic marbles from the Hida Belt, Japan. The C–O isotope compositions of dolomitic marble are characterized by $\delta^{13}\text{C}[\text{VPDB}] = -3.3$ to $+2.8\%$, $\delta^{18}\text{O}[\text{SMOW}] = +8.6$ to $+20.0\%$ respectively; overall, calcite tends to show lower $\delta^{13}\text{C}$ values than dolomite. New data can be explained by the result of the olivine forming decarbonation reaction.

大陸縁の地殻断片を主体とする飛騨帯には正片麻岩に伴って変成炭酸塩岩が多量に産する。飛騨帯の変成炭酸塩岩の多くはドロマイトを含まず方解石から構成される大理石であるが、方解石とドロマイトが主の含かんらん石ドロマイト質大理石も稀に産する。本講演では大陸地殻中部の変成作用を被った変成炭酸塩岩の同位体組成に記録された地質情報を抽出する試みとして、飛騨帯のドロマイト質大理石の炭素(C)–酸素(O)同位体分析結果を示し、飛騨帯の変成炭酸塩岩に着目した同位体地球化学的研究による新知見について紹介する。

変成炭酸塩岩の同位体地球化学的研究は、その原岩や流体–岩石相互作用、脱炭酸反応反応などについての議論を可能にする。最近、Harada et al. (2021) は飛騨帯に産するドロマイトを含まない大理石及び石灰珪質岩についてマイクロサンプリングによる炭酸塩鉱物の C–O 微量同位体組成分析を行い、幅広い C–O 同位体組成を報告した ($\delta^{13}\text{C} = -4.4 \sim +4.2\%$ [VPDB]、 $\delta^{18}\text{O} = +1.6 \sim +20.8\%$ [VSMOW])。とりわけ、低い $\delta^{13}\text{C}$ ($\delta^{13}\text{C} = -4.4 \sim -2.9\%$) の石灰珪質岩は、炭酸塩鉱物と珪酸塩鉱物との間での脱炭酸反応による $\delta^{13}\text{C}$ 低下を示す。 $\delta^{18}\text{O}$ は炭酸塩堆積物に比べて

低く、水流体や珪酸塩鉱物との同位体交換を記録する。一方、本研究で着目したドロマイト質大理石は含 Mg 方解石 + ドロマイト + かんらん石(Fo_{93-94} ;一部蛇紋石化)の鉱物組み合わせを持ち、少量の金雲母やクリノヒューマイトなどを含む。このドロマイト質大理石の方解石 12 試料、ドロマイト 2 試料について炭素、酸素同位体組成分析を行った。かんらん石に富む部分が方解石、かんらん石をほとんど含まない部分がドロマイトであった。炭素、酸素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}[\% \text{VPDB}]$, $\delta^{18}\text{O}[\% \text{VSMOW}]$) の分析結果はそれぞれ、方解石が $\delta^{13}\text{C} = -3.3 \sim +2.8\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} = +8.6 \sim +17.3\%$ 、ドロマイトが $\delta^{13}\text{C} = +0.2, +0.8\%$ 、 $\delta^{18}\text{O} = +17.9, +20.0\%$ であった。方解石の $\delta^{13}\text{C}$ は 1 試料を除いて負の値を示し、ドロマイトよりも低い傾向にあった。これはドロマイトを消費し、かんらん石を形成する脱炭酸反応によるものであると考えられる。また、本研究で着目したドロマイト質大理石のかんらん石からは無機的に生成されたと考えられるメタンを含む流体包有物が発見されており (Harada et al., 2022 JpGU)、それについても簡単に紹介したい。

Keywords: Hida Belt, dolomitic marble, carbon isotope, oxygen isotope, abiotic methane synthesis

*Corresponding author: hironobu.harada.s7@dc.tohoku.ac.jp

東ネパール・ダンクッタ地域における高ヒマラヤ変成岩ナップの 変成分帯と温度-圧力履歴

工藤駿平^{1*}, 河上哲生¹, 中嶋徹^{1,2}, 酒井治孝¹ (1.京大, 2.JAEA)

Metamorphic zone mapping and a *P-T* path of metapelite of the Higher Himalayan crystalline nappe in Dhankuta, eastern Nepal

Shumpei Kudo^{1*}, Tetsuo Kawakami¹, Toru Nakajima^{1,2}, Harutaka Sakai¹ (1.Kyoto Univ., 2.JAEA)

ヒマラヤ造山帯には、高度変成岩類 Higher Himalayan Crystallines (HHC)が東西約 2000 km、南北約 100 km にわたって露出している。この HHC が地表に露出するに至るテクトニクスについては、現在も議論が続いており、数値計算による様々なモデルが提案されている[e.g.1]が、その検証には天然の岩石試料の温度-圧力-時間履歴 (*P-T-t* パス)の構築とその地理的分布を調べることが必要不可欠である。

従来の研究では、主として高ヒマラヤのルートゾーンで *P-T-t* パスの構築が進められてきた。HHC は構造的上位に位置するテチス堆積物との境界である South Tibetan Detachment System (STDS)と、構造的下位に位置するレッサーヒマラヤ堆積物との境界である Main Central Thrust (MCT)を上下の構造境界として上昇してきたと考えられてきた[e.g. 2]。しかし、近年の研究で HHC 内に存在する延性剪断帯である High Himal Thrust (HHT)も HHC の上昇において重要な役割を果たしたことが指摘されている[3]。HHC は HHT を境界として上位側を Upper HHC、下位側を Lower HHC と区別される。

一方で、ルートゾーンから南に張り出した HHC ナップでは藍晶石安定領域から珪線石安定領域にかけての時計回りの *P-T-t* パスが報告されているが[4]、研究例が少なく、HHC ナップの上昇のテクトニクスを議論する上ではさらに広域的に *P-T-t*パスを制約する必要がある。

そこで本研究では、ダンクッタ以北地域の HHC ナップから採取した変成岩類の *P-T-t* パスを構築し、その上昇機構の解明に寄与することを大目的としている。本研究ではこれまでに、採取した泥質変成岩の鉱物組み合わせに基づき変成分帯を行い、ダンクッタから北に向かって藍晶石アイソグラッド、珪線石アイソグラッド、白雲母消滅アイソグラッドを定義した[5]。

今回新たに藍晶石アイソグラッドよりも高変成度側に位置する Grt-Ky-Bt 片麻岩の *P-T* パスの構築を行った。同片麻岩の主要鉱物組み合わせは Grt+Bt+Ky+Sil+Qtz である。Grt は包有物の多いコア、マントル、包有物の少ないリムの 3 段階

に区別される。また、Grt リムは Bt+Sil+Qtz±Pl に部分的に置換される。基質の藍晶石は部分的に珪線石に置換される。Grt コアに包有される Rt に対して Zr-in-Rt 地質温度計[6]を、Qtz に対し Qtz-in-Grt 地質圧力計[7,8,9]を適用し、Grt コアの形成温度圧力を 690°C, 8.2 kbar と推定した。さらに Grt リムが Bt+Sil+Qtz±Pl に分解された組織に対して Grt-Bt 地質温度計[10]と GASP 地質圧力計[11]を適用し、後退変成時の *P-T*条件を 600°C, 6.0 kbar と推定した。このことから本試料は Grt コア形成段階から Grt の分解組織形成に至る減温減圧の *P-T* パスを経たことがわかる。

今回得られた *P-T*パスは、藍晶石安定領域から珪線石安定領域にかけての減温減圧パスである点で、白雲母消滅アイソグラッドよりも高変成度側の Grt-Ky-Bt 片麻岩ですでに構築した *P-T* パス[5]と類似する。また、本研究地域の北東に位置する Lower HHC で構築された *P-T-t* パス[12]と東に位置する Ilam ナップで構築された *P-T-t* パス[4]とも類似する。このことから、ルートゾーンの Lower HHC と HHC ナップは同様の上昇プロセスを経たことが示唆される。

引用文献: [1] Jamieson et al., 2004. JGR., 109, B06407. [2] Beaumont et al., 2001. Nature, 414, 738-742. [3] Imayama et al., 2018. Geol. Soc. London Sp. Pub., 481(1), 147-173. [4] Imayama et al., 2022. J. Asian Earth Sci., 105236. [5] 工藤ほか, 2022, 日本地球惑星科学連合 2022 大会講演要旨, SMP27-06. [6] Tomkins et al., 2007. JMG., 25(6), 703-713. [7] Angel et al., 2017. Contrib. Mineral. Petrol., 172(5), 1-15. [8] Angel et al., 2017. Am Mineral., 102(9), 1957-1960. [9] Schmidt & Ziemann, 2000. Am. Mineral., 85(11-12), 1725-1734. [10] Holdaway, 2000. Am. Min., 85(7-8), 881-892. [11] Holdaway, 2001. Am. Min., 86(10), 1117-1129. [12] Imayama et al., 2012. Lithos., 134-135, 1-22.

Key Words: Himalaya, Higher Himalayan crystalline nappe

*Corresponding author: kudo.shumpei.84x@st.kyoto-u.ac.jp

後期新原生代－カンブリア紀の超高温変成岩体の熱源：
ジルコン中の昇温期メルト包有物の化学組成からの制約
鈴木康太*、河上哲生、小木曾哲（京都大）、坂田周平（東京大）

Heat source of the late Neoproterozoic-Cambrian ultrahigh temperature terrane:
constraints from chemical composition of prograde melt inclusions in zircon

Kota Suzuki*, Tetsuo Kawakami, Tetsu Kogiso (Kyoto Univ.) & Shuhei Sakata (Tokyo Univ.)

It is controversial whether ultrahigh temperature (UHT) terranes were generated by radiogenic self-heating of the lower crusts [1] or by externally added heat from the upwelling mantle [2]. The radiogenic heat leads the lower crusts in collisional orogens to the UHT condition slowly (10's Myr after the onset of collision [3]), and granulite-UHT conditions are usually maintained for ~30-100 Myr [3]. Meanwhile, the mantle upwelling accompanied by the underplating/intraplating of mantle-derived magmas leads the lower crusts in back-arc settings and in collisional orogens to the UHT condition rapidly (>5 Myr after the underplating/intraplating [2]), and granulite-UHT conditions are usually short-lived (<10 Myr [3]). However, the poor understanding of prograde pressure-temperature-time (P - T - t) evolutions of almost all of the UHT terranes makes it difficult to reliably discuss the heat sources [3]. In this study, we discuss the heat source of a ~560-520 Ma UHT terrane (Rundvågshetta, Lützow-Holm Complex, East Antarctica) by using chemical composition of prograde melt inclusions in zircon (MI_{Zm}) in a UHT granulite.

The MI_{Zm} is included in the cathodoluminescence-dark mantle of zircon. Applying the Ti-in-zircon geothermometer [4] to the zircon mantle yielded 710-790 °C [5]. The weighted mean age of the zircon mantle was ~560 Ma [5]. MIs are also included in the P-poor core of garnet (MI_{Grt}). Applying the Zr-in-rutile geothermometer [6] to rutile inclusions in the garnet core yielded ~900 °C [5]. [5] interpreted that the MI_{Zm} and MI_{Grt} were formed in the prograde and near-peak UHT conditions, respectively. [5] also constrained the duration of anatexis to be at least ~40 Myr, by combining the previously-reported leucosome crystallization age of ~520 Ma [7].

In this study, we performed piston-cylinder remelting experiments of MI_{Zm} using separated zircon grains, and analyzed the rehomogenized glassy MI_{Zm} ($n = 4$) and primary glassy MI_{Grt} ($n = 5$) by SEM-EDS. The experiments were conducted at 900 °C/15 kbar for 24h. To prevent Na loss, the glass was analyzed with 15 kV acceleration voltage, 300 pA beam current, and 30 seconds live time. Because ZrO_2 of the host zircon was detected in the MI_{Zm} analysis due to its small size (<5 μ m), the glass composition was corrected by subtracting zircon component and normalized to 100 wt%. Both MI_{Grt} and MI_{Zm} were peraluminous ($ASI = 1.24$ - 1.33 for MI_{Grt} , 1.10 - 1.31 for MI_{Zm}) with high SiO_2 (76.2-77.2 wt% in MI_{Grt} , 74.1-76.5 wt% in MI_{Zm}) and low CaO (not detected in MI_{Grt} , 0.3-0.8 wt% in MI_{Zm}). Na_2O was high in MI_{Zm} (2.2-3.3 wt%) compared to MI_{Grt} (1.1-1.5 wt%), while K_2O was high in MI_{Grt} (7.5-8.0 wt%) compared to MI_{Zm} (5.9-7.9 wt%). In the Qz-Ab-Or normative diagram, the MI_{Grt} plots away from the haplogranite eutectic points for different P conditions and plots close to the Qz-Or axis. This is consistent with the MIs in garnet reported from the same lithology [8]. Meanwhile, the MI_{Zm} plots close to the eutectic point of 5 kbar and $a_{H_2O} = 0.07$ [9]. So far, neither the MI_{Grt} nor MI_{Zm} showed liner chemical trend in the diagram.

It is recently suggested that compositional homogeneity of prograde MIs reflects the rate of heating during prograde metamorphism [10]. [10] reported that composition of prograde MIs in garnet in an anatectic enclave show a liner trend parallel to the Qz-Ab axis in the Qz-Ab-Or normative diagram. This trend is confirmed in experimental glasses produced at high degree of T overstepping [11]. [11] interpreted, under the rapid heating conditions, that the sluggish diffusion of Si compared to the rapid diffusion of alkalis in melts results in the liner trend in the diagram. In fact, the enclave is interpreted to have experienced rapid prograde heating into the granulite facies condition by the underplating of mantle-derived magmas [12]. On the other hand, the prograde MI_{Zm} in this study shows no liner trend in the diagram. Therefore, the external heat from the mantle is unlikely involved in attaining the peak UHT condition, but rather the radiogenic self-heating may be the viable heat source in Rundvågshetta. This is supported by the long-lived anatexis (~40 Myr) [5] and the lack of syn-metamorphic igneous activities [13] in this region. Although the protolith ages of orthogneisses in this region are reported as ~2.5 Ga, only one intrusive rock and two quartzites yield ~600 Ma protolith and metamorphic ages, respectively [13]. It is pointed out that terranes once melted in a previous metamorphic event are less fertile and thus less latent heat is consumed by anatexis in next events [1]. Although no polymetamorphic evidence was found at least in the studied UHT granulite, the ~600 Ma event possibly helped this region to attain the UHT condition in the next ~560-520 Ma metamorphic event.

References: [1] Clark et al. (2015) *Gondwana Res.* [2] Gorczyk et al. (2015) *Geosci. Front.* [3] Harley (2021) *Encycl. Geology* [4] Ferry & Watson (2007) *CMP.* [5] Suzuki et al. (2022) *EGU2022 Abst.* [6] Tomkins et al. (2007) *JMG.* [7] Fraser et al. (2000) *JMG.* [8] Carvalho et al. (2021) *EGU2021 Abst.* [9] Becker et al. (1998) *CMP.* [10] Acosta-Vigil et al. (2017) *Lithos* [11] Acosta-Vigil et al. (2006) *CMP.* [12] Cesare & Maineri (1999) *CMP.* [13] Dunkley et al. (2021) *Polar Sci.* **Keywords:** melt inclusion, glassy inclusion, zircon, piston-cylinder, rare earth element. **Corresponding author:** suzuki.kouta.22u@st.kyoto-u.ac.jp