

平成22年 5月17日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006～2009
 課題番号：18204047
 研究課題名（和文）極限領域変成岩の極微細鉱物完全同定と微小領域精密年代測定による変成履歴解析
 研究課題名（英文）Detailed Micro-analyses of Metamorphic Evolution of Extreme Metamorphic Rocks
 研究代表者
 小山内 康人（OSANAI YASUHITO）
 九州大学・大学院比較社会文化研究院・教授
 研究者番号：80183771

研究成果の概要（和文）：本研究は、全地球史における様々な地質学的背景で形成された極限領域変成作用の精密な変成プロセスについて考察し、オロゲン（造山帯）深部における地質現象の明らかにするために、顕微レーザーラマン分光分析装置を駆使した極微小領域での包有鉱物の完全同定、微細流体包有物の組成解析により、微細包有鉱物を形成した局所の変成反応および造山運動下で進行した地球表層部とマントル間での物質循環過程を明らかにした。また、微小領域年代測定により局所の変成反応の年代を決定し、さまざまな造山帯（オロゲンシステム）における厳密な温度-圧力-時間経路（P-T-t path）を明らかにした。4年間の公表論文数は50件である。

研究成果の概要（英文）：The main target of this research program is to consider the details of various extreme metamorphic processes during the whole Earth's history and to understand the geological processes in deep portion of "Orogen". During the 4-years research, close microanalyses of very fine micro-inclusion minerals and fluid-inclusions, and also micro-geochronology were carried out. Results are published as 50 journal papers as analyses of micro-domain metamorphic process and detailed P-T-t paths of various orogenic systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	20,000,000	6,000,000	26,000,000
2007年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
総計	28,800,000	8,640,000	37,440,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：極限領域変成岩，超高温変成岩，超高压変成岩，微細包有鉱物，局所変成反応，顕微レーザーラマン分光分析，微小領域年代測定，オロゲン

1. 研究開始当初の背景

20世紀末以降、世界各地からマグマの温度にも匹敵する超高温条件（ $\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ）、あ

るいはダイヤモンドが安定に共存するような超高压条件（ $\sim 6\text{GPa}$ ）で形成された変成岩類の発見が相次ぎ、大陸地殻下部あるいは

大陸衝突帯深部の構成岩石として一般的に存在が認められるようになってきた。これらは、極限領域変成岩 (Extreme metamorphic rocks) と呼ばれ、人類が直接獲得できる岩石試料のうち最も高温・高圧の地球内部情報をもたらすものの一つとみなされる。しかもこのような変成岩類の多くは地球表層物質に由来することから、変成プロセスの精密な解析を行うことによって、複雑な岩石形成履歴に関する多量の情報を引き出すことが可能となる。極限領域変成岩類の岩石形成履歴を明らかにするためには、様々な地球変動 (オロゲン) システムにおける変成過程に精密な年代軸を与え、厳密な温度-圧力-時間経路 (P-T-t path) を解析することが緊急かつ重要な課題として残されていた。

2. 研究の目的

極限領域変成岩を含む一般的な広域変成岩類には、原岩形成から昇温期変成過程を経てピーク変成条件に達し、後退変成過程を経て地表に至るほぼすべての変成履歴が記録されている。一般に、超高温変成作用を特定するためにはザクロ石などに包有された極微細ダイヤモンド・コース石などを顕微ラマン分光によって識別し、岩石が経た最高圧力条件が推定されている。一方、超高温変成作用の指標としては、実験岩石学的に解析された相平衡図 (岩石成因論的グリッド) に基づく鉱物共生 (サフィリン+石英, ザクロ石+大隅石+石英など) がある。これらの多くは、光学顕微鏡や SEM 像観察および電子線マイクロプローブ (EPMA) 分析などにより記載・検討され、ピーク (最高温度) 変成条件と後退変成過程に関する解析がなされているが、超高温変成岩が経た最高圧力条件を解析した研究例は皆無に等しい。

そこで本研究では、南極・ナピア岩体やコンツム地塊などの太古代初期以降新生代に至るまでの様々な時代と地質背景の極限領域変成岩を対象に、以下のことを明らかにする。

(1) 本研究チームが所蔵する世界各地の超高温変成岩類の極微細包有鉱物に着目し、光学顕微鏡や走査型電子顕微鏡に加え、顕微レーザーラマン分光分析装置を駆使して岩石中に存在するあらゆる鉱物種を明らかにする。これにより、超高温変成岩の全変成過程における変成反応を精密に解析し、これまで研究例が皆無に等しい超高温変成岩が経た最高圧力条件の推定や、ピーク変成条件に至る昇温期変成過程の詳細を解析し、厳密な温度-圧力履歴を明らかにする。

(2) イオンプローブ (SHRIMP) や EMP 年代測定法を用いて、微小領域の精密な年代測定が可能でジルコン・モナザイトの組成累帯構造に基づく鉱物内年代マップを作成し、そこに包有される極微細鉱物との関係から、上記

1 で解析した温度-圧力履歴に時間軸を加え、厳密な P-T-t path を解析する。

(3) 上記 1, 2 の解析結果から、全地球史における様々な地質学的背景で形成された極限領域変成作用の精密な変成プロセスについて考察し、オロゲン (造山帯) 深部における地質現象の理解を飛躍的に進展させる。これらにより、新たなオロゲンシステムに関するモデルを構築する。

このような詳細かつ厳密な変成作用の解析は、世界各地の極限領域変成岩類を統一的な視点で研究してきた本研究チームによって初めて達成可能な研究課題である。本研究と同一の研究手法で、より低温・低圧の一般的な変成岩についても精密な研究を行うことは、変成岩岩石学を飛躍的に発展させることができると同時に、古くて新しい地球科学上の大命題である造山 (オロゲン) システムの真の理解に大きく貢献できるものである。

3. 研究の方法

本研究では、世界各地から収集・蓄積された膨大な極限領域変成岩試料について、これまでの基礎的な研究を発展させ、顕微レーザーラマン分光分析装置、高解像度光学顕微鏡、EPMA、SHRIMP、LA-ICP-MS などの先端分析装置を駆使して、極微細領域の鉱物完全相同定および微小領域年代測定を実施するために、以下のような各種室内実験・解析を行った。

(1) 九州大学および国立極地研究所には、極限領域変成岩試料として約 5000 点におよぶ岩石が所蔵されている。これらのうち本研究では、南極・ナピア岩体/リュッツォホルム岩体、ベトナム・コンツム地塊/レッドリバー剪断帯、スリランカ・ハイランド岩体、および国内の日高変成帯、黒瀬川構造帯の変成岩類を研究対象とした。各種変成岩類について新たに導入した高解像度光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡を使用して既存の研磨薄片試料を再精査し、研究対象となる微細包有鉱物を新たに見出すとともに岩石組織との関連を解析した。また、微細包有鉱物の分布を認識するため、九州大学および極地研究所において X 線マイクロアナライザーによる元素マッピングを実施した。

(2) 選択された最適試料について、本研究で導入した顕微レーザーラマン分光分析装置を駆使して、極微小領域での包有鉱物の完全相同定、および微細流体包有物の相同定を実施した。流体包有物の分析は、変成過程の厳密な解析を行う上で、変成作用の熱源特定や全変成プロセスにおける流体相の関与を解析するためにも不可欠の情報である。特に、年代測定対象となるジルコン、モナザイトについては、詳細な微小内部包有物の解析を行った。

(3) 微細包有鉱物のうち、組成分析が可能

と判断されるものについては、既存のX線マイクロアナライザーおよびイオンマイクロプローブを使用して、微量・希土類元素を含む化学組成を測定した。比較的大型の包有鉱物は、周囲の珪酸塩鉱物と合わせて、X線マイクロアナライザーにより微量元素を含む精密な元素分析を実施し、包有鉱物を形成した局所の変成反応を解析した。微細包有鉱物の化学組成が測定されている場合には、熱力学データベースを利用して反応の温度・圧力条件についても検討を行い、精密な温度-圧力変化経路を明らかにした。

(4) 微小領域の年代測定が可能なジルコンおよびモナザイト中の微細包有鉱物に着目し、ダイヤモンド、コース石、石英、アルミノ珪酸塩鉱物などの微細包有物が包有された年代を明らかにするために、イオンマイクロプローブ（2次イオン質量分析装置：SHRIMP）および化学年代測定用 EPMA、LA-ICP-MS 等を使用して、結晶内微小領域年代測定を実施した。当初予定では、結晶内年代マップの作成も予定したが、最適試料選定に至らず実施できなかった。

(5) 微細包有鉱物周囲の局所化学平衡を解析する上では、Ta, Nb, La などの微量元素・希土類元素についても解析することが不可欠であるため、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析装置を使用して、微小領域の微量元素・希土類元素を測定した。

(6) 微小領域年代測定結果と局所変成反応の解析による精密な温度-圧力変化経路を対比させ、さまざまな造山帯（オロゲンシステム）で起こった極限領域変成作用の真の変成過程について厳密な温度-圧力-時間経路（P-T-t path）を明らかにした。研究成果は、国内・国際学会で発表し、学術雑誌に公表してきた。

4. 研究成果

本研究は、全地球史における様々な地質学的背景で形成された極限領域変成作用の精密な変成プロセスについて考察し、オロゲン（造山帯）深部における地質現象の明らかにするために、以下の項目を実施し着実な成果を得た。

(1) 世界各地の極限領域変成岩類について、新たに導入した高分解能光学顕微鏡を使用して研磨薄片試料を再精査し、研究対象となる微細包有鉱物を新たに見出すとともに元素マッピングを駆使して岩石組織との関連を解析した。

(2) 顕微レーザーラマン分光装置を導入し、その起ち上げ時には既存の数千点に及ぶ文献検索から多種多様な鉱物についてラマンスペクトルを収集し、九州大学ラマンスペクトルデータベースを整備した。それをもとに、日高変成帯の高温変成岩や南極・ナピア岩体

／リュッツォホルム岩体、ベトナム・コンツム地塊／レッドリバー剪断帯、スリランカ・ハイランド岩体の極限領域変成岩について、極微小領域での包有鉱物の完全相同定について顕微レーザーラマン分光分析装置を駆使して行い、微細包有鉱物を形成した局所の変成反応の解析と変成履歴を検討した。

(3) ラマンスペクトル解析および鉱物の微小領域化学分析から、世界的に見てもこれまでに報告のないコランダム-ザクロ石-石英共生をもつ超高温変成岩の精密変成履歴解析を行い、光学顕微鏡や EPMA では同定不可能な極微小な含水鉱物が関与する微小領域の反応履歴を明らかにした。また、南極地域から超高温変成岩中の極微小包有鉱物として藍晶石や太陽石を見出した。

(4) 共焦点レーザー顕微鏡による3Dラマンスペクトル解析および鉱物の微小領域化学分析から、世界的に見てもこれまでに報告のない超高温変成岩中のザクロ石に包有されるSiC 鉱物（モアッサナイト）（図1, 2）や高温変成岩中のセクター累帯構造を示すザクロ石中の多量の炭酸塩包有鉱物の存在を確認し、衝突型造山運動下で進行した地球

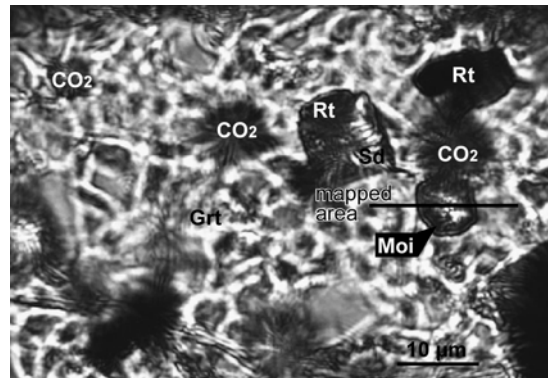


図1 ザクロ石中に微細包有鉱物として確認されたモアッサナイト。モアッサナイト周囲には、局所変成反応に関与した、ルチル、シデライト、CO₂が認められる。ラインは図2で示す3次元ラマンマッピングの測線をしめす。

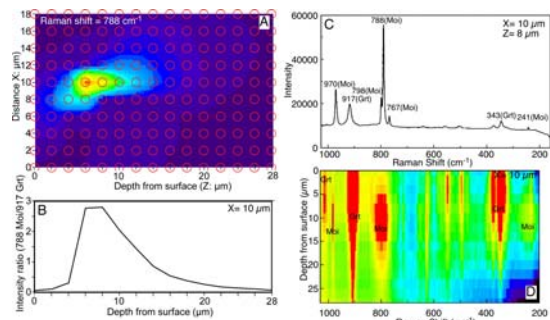


図2 ザクロ石中に存在するモアッサナイト微細包有鉱物の3次元ラマンマッピング。表層部とマントル間での物質循環過程を明らかにした。

(5) イオンマイクロプローブ (2次イオン質量分析装置: SHRIMP) および化学年代測定用 EPMA (CHIME 法) 等を使用して, 微細包有物 (ダイヤモンド, コース石など) が包有された年代を明らかにした. しかし, 研究期間全体を通して, 当初予定した結晶内微小領域年代マップ作成のための最適試料を得るに至らなかった. しかし, 最終年度において CHIME 法およびレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析法による微小領域年代測定システムを確立できたことにより, ラマンスペクトル解析と合わせて, 今後は局所領域の変成反応年代特定を実施する.

(6) 微小領域の局所的変成反応解析から, 各地の高温・超高温変成岩についてより厳密な温度-圧力-時間経路 (P-T-t path) を明らかにした. その結果, さまざまな造山帯 (オロゲンシステム) で起こった極限領域変成作用の真の変成過程が一層精密になった. 4年間の研究成果は国内関連研究も含め 50 編の原著論文として学術誌に公表した.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 50 件)

- ① Satish-Kumar, M., Hermann, J., Miyamoto, T. and Osanai, Y., (2010) Fingerprinting a multistage metamorphic fluid-rock history: Evidence from grain scale Sr, O and C isotopic and trace element variations in high-grade marbles from East Antarctica. *Lithos*, 114, 217-228. 査読有
- ② Nakano, N., Osanai, Y., Sajeew., K., Hayasaka, Y., Miyamoto, T., Minh, T.N., Owada, M. and Widley, B., (2010) Triassic eclogite from northern Vietnam: inferences and geological significance. *Jour. Metamorphic Geol.*, 28, 59-76. 査読有
- ③ Sajeew, K., Osanai, Y., Kon, Y. and Itaya, T., (2009) Stability of pargasite during ultrahigh-temperature metamorphism: A consequence of titanium and REE partitioning? *American Mineralogist*, 94, 535-545. 査読有
- ④ Nakano, N., Osanai, Y., Owada, M., Hayasaka, Y. and Tran Ngoc Nam, (2009) Permo-Triassic Barrovian metamorphism in the Kontum Massif, central Vietnam: constraints on continental collision tectonics in Southeast Asia. *Island Arc*, 18, 126-143. 査読有
- ⑤ Tsunogae, T., Santosh, M., Dubessy, J., Osanai, Y., Owada, M., Hokada, T. and Toyoshima, T., (2008) Carbonic fluids in ultrahigh-temperature metamorphism: evidence from Raman spectroscopic study of fluid inclusions in granulites from the Napier Complex, East Antarctica. In: *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection*, Geological Society of London, Special Publ., 308, 317-332. 査読有
- ⑥ Owada, M., Baba, S., Osanai, Y. and Kagami, H., (2008) Geochemistry of post-kinematic mafic dykes from central to eastern Dronning Maud Land, East Antarctica: evidence for a Pan-African suture in Dronning Maud Land. In: *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection*, Geological Society of London, Special Publ., 308, 235-252. 査読有
- ⑦ Toyoshima, T., Osanai, Y. and Nogi, Y., (2008) Macroscopic geological structures of the Napier and Rayner Complexes, East Antarctica. In: *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection*, Geological Society of London, Special Publ., 308, 139-146. 査読有
- ⑧ Kawasaki, T. and Osanai, Y., (2008) Empirical thermometer of TiO₂ in quartz for ultrahigh-temperature granulites of East Antarctica. In: *Geodynamic Evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection*, Geological Society of London, Special Publications, 308, 419-430. 査読有
- ⑨ Nakano, N., Osanai, Y., Owada, M., Hayasaka, Y. and Tran Ngoc Nam, (2008) Permo-Triassic Barrovian metamorphism in the Kontum Massif, central Vietnam: constraints on continental collision tectonics in Southeast Asia. *Island Arc*, 18, 126-143. 査読有
- ⑩ Osanai, Y., Nakano, N., Owada, M., Tran Ngoc Nam, Miyamoto, T., Nguyen Thi Minh, Nguyen Van Nam and Tran Van Tri, (2008) Collision zone metamorphism in Vietnam and adjacent South-eastern Asia: Proposition for Trans Vietnam Orogenic Belt. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, 103, 226-241. 査読有
- ⑪ Nakano, N., Osanai, Y., Minh, N.T., Miyamoto, T., Hayasaka, Y. and Owada, M., (2008) Discovery of high-pressure granulite-facies metamorphism in

northern Vietnam: Constraints on the Permo-Triassic Indochinese continental collision tectonics. *Comptes Rendus Geoscience*, 340, 127-138. 査読有

- ⑫ Nakano, N., Osanai, Y. and Owada, M., (2007) Multiple breakdown and chemical equilibrium of silicic clinopyroxene under extreme metamorphic conditions in the Kontum Massif, central Vietnam. *Am. Mineral.*, 92, 1844-1855. 査読有
- ⑬ Owada, M., Osanai, Y., Nakano, N., Matsushita, T., T. N. Nam, Tsunogae, T., Toyoshima, T., Pham Binh and Kagami, H., (2007) Crustal anatexis and formation of two types of granitic magmas in the Kontum massif, Vietnam: Implications for magma processes in collision zones. *Gondwana Res.*, 12, 428-437. 査読有
- ⑭ Osanai, Y., Sajeev, K., Owada, M., Kehel-pannala, K.V.W., Prame, W.K.B., Nakano, N. and Jayatileke, S., (2006) Metamorphic evolution of ultrahigh-temperature and high-pressure granulites from the Highland Complex, Sri Lanka. *Jour. Asian Earth Sci.*, 28, 20-37. 査読有
- ⑮ Osanai, Y., Owada, M., Kamei, A., Hamamoto, T., Kagami, H., Toyoshima, T., Nakano, N. and Tran Ngoc Nam, (2006) The Higo metamorphic complex in Kyushu, Japan as the fragment of Permo-Triassic metamorphic complexes in East Asia. *Gondwana Res.*, 9, 152-166. 査読有
- ⑯ 小山内康人・大和田正明・志村俊昭・中野伸彦・川浪聖志・小松正幸, 2006. 日高島弧(日高変成帯主帯)下部地殻における高度変成岩類の部分溶融. *地質雑*, 112, 623-638. 査読有

[学会発表] (計 81 件)

- ① Osanai, Y. et al. (2009) Permian-Triassic tectono-metamorphic processes in E- and SE- Asia for considering the pre-Cretaceous high-grade metamorphic rocks in SW Japan. 116th Annual Meeting of Geological Society of Japan, 2009.9.6, Okayama (Japan)
- ② Osanai, Y. et al., (2009) Tectono-metamorphic processes in Vietnam and adjacent SE- Asia. 59th General Meeting of Resource Geology, 2009.6.24, Tokyo (Japan)
- ③ Osanai, Y. et al., (2009) Tectono-metamorphic evolution of the Higo metamorphic terrane in Kyushu,

southwest Japan. 2009 Annual Meeting of JPGU, 2009.5.17, Chiba (Japan)

- ④ Osanai, Y., et al. (2008) Permo-Triassic collision zone metamorphism in Vietnam and South-east Asia. International Symposium on Geoscience Resources and Environments of Asian Terranes (GREAT 2008), 2008.11.25, Bangkok (Thailand).
- ⑤ Osanai, Y., et al. (2008) Trans Vietnam Orogenic Belt as an important continental collision boundary in Eastern Asia. 5th International Symposium on Gondwana to Asia, 2008.11.1, Seoul (South Korea).
- ⑥ Osanai, Y., et al. (2008) Pan-African collision metamorphism in the Sor Rondane Mountains, Eastern Dronning Maud Land, East Antarctica. *Gondwana* 13, 2008.9.16, Dali (China).
- ⑦ Osanai, Y., et al., (2007) Lower crustal processes of Trans Vietnam Orogenic Belt and its northern extension: evidences for Permo-Triassic collision metamorphism in Eastern Asia. 4th International Symposium on Gondwana to Asia. 2007.11.9, Fukuoka (Japan).
- ⑧ Osanai, Y., et al., (2007) UHT/UHP collision zone metamorphism in Vietnam and adjacent southeastern Asia: Proportion of Trans Vietnam Orogenic Belt. AOGS 2007 4th Annual Meeting, 2007.8.2, Bangkok (Thailand)
- ⑨ Osanai, Y., et al., (2006) Metamorphic evolution of the Permo-Triassic continental collision zones in Vietnam and adjacent southeastern Asia. 2006 Annual Convention of International association for Gondwana Research, 2006.12.11, Hong Kong (China).
- ⑩ Osanai, Y., et al., (2006) Collision zone metamorphism under extreme P-T condition in Vietnam and adjacent SE-Asia. 19th General Meeting of the International Mineralogical Association, 2006.7.24, Kobe (Japan).

[図書] (計 1 件)

- ① Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. and Shiraishi, K., Geological Society of London, Geodynamic Evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection, (2008), 456p.

6. 研究組織 (1) 研究代表者

小山内 康人 (OSANAI YASUHITO)
九州大学・比較社会文化研究院・教授
研究者番号：80183771

(2) 研究分担者

池田 剛 (IKEDA TAKESHI)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号：40243852
外田 智千 (HOKADA TOMOKAZU)
国立極地研究所・研究教育系・准教授
研究者番号：60370095
中野 伸彦 (NAKANO NOBUHIKO)
九州大学・比較社会文化研究院・助教
研究者番号：20452790

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

大和田正明
山口大学・理工学研究科・教授
Sajeev Krishnan
Indian Institute of Science・助教
Satish-Kumar, M.
静岡大学・理学部・准教授
川寄智佑
愛媛大学・理工学研究科・教授