

機関番号：12501
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20540462
 研究課題名（和文） 下部地殻の異種岩石間における部分融解連鎖反応に関する先導的研究
 研究課題名（英文） Leading study on the partial melting chain reactions between different rock types in the lower crust
 研究代表者
 廣井 美邦 (HIROI YOSHIKUNI)
 千葉大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号：40019427

研究成果の概要（和文）：大陸衝突型造山帯深部における岩石の部分融解に対する多様な岩石が混在することの効果について、おもに南極、昭和基地付近に産出する高温変成岩を対象にして解析した。その結果、泥質岩と大理石との境界部に発達する「スカルン」は大理石から放出された流体によって泥質岩が部分融解し、生成されたメルトが移動分離して大理石と反応することによって形成されたものと考えられる。また大理石中に産出し、渦巻成長丘を保持した石墨を含む Mg と Al に富むグラニュライト岩塊も大理石と反応して部分融解した可能性が高い。

研究成果の概要（英文）： The occurrence of various rock types in the deep crust of continental collision zones show definite mutual interactions during partial melting, as revealed by the case study of high-temperature metamorphic rocks occurring near the Syowa Station, Antarctica. The “skarns” developed between pelitic rocks and marble are considered to be the products of the reactions among marble and partial melts of pelitic rocks, which were formed by the infiltration of fluid from the marble. In addition, blocks of Mg-Al-rich granulite containing graphite with spiral growth steps may have experienced partial fusion by the interaction with surrounding marble.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：岩石学

科研費の分科・細目：地球惑星科学 岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：造山帯、下部地殻、グラニュライト、岩石の部分融解、流体、石墨、渦巻成長

1. 研究開始当初の背景

大陸どうしの衝突帯のような大規模の造山帯の深部では、下部地殻を構成する岩石が十分高温になり、部分融解することは自明である。しかし実際に部分融解している状態を直接に観察することは不可能であり、間接的な手法によるか、過去にそのような状態におかれたと考えられる岩石を解析するしかない。間接的な手法においても、地震波を用い

た観測と高温高压実験による部分融解現象の再現実験などの手法がある。後者においては、従来、一定の化学組成の岩石の挙動の解析が中心であり、天然の多様な岩石が混在した状態とは異なるものである。そのため、天然の過程にそのまま適用できるものではない。多様な岩石の混在は、高温での部分融解現象においても異種岩石間の相互作用が起こること示唆するが、本研究開始当初まで、

その種の研究はほとんどなされていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、多様な岩石が混在する実際の地質体の部分融解過程について詳細に解析し、異種岩石間での流体とメルトの移動による部分融解の相乗効果（連鎖反応）を確認・実証する。本研究で取り扱う地質体は、原生代末期～古生代初期の東西の Gondwana 陸塊衝突帯に相当するスリランカや南極昭和基地付近に産出するグラニュライト相の高温広域変成岩である。その中には、コンダライトと呼ばれる Fe と Al に富む泥質岩やドロマイト質大理石が含まれる。コンダライトでは昇温変成作用による脱水反応が完了しており、含水鉱物はほとんど含まれない。したがって、この岩石自体はもはや「脱水融解反応」する能力をもたないが、 H_2O を含む流体が互層する大理石層から導入されればただちに部分融解する性質（鉱物組成）をもっている。コンダライトの部分融解で生成したメルトが分離・集合し、移動して大理石と混合・反応すると、また新たな流体が生成される。それが付近のコンダライトに浸入するとさらに部分融解反応が起こる。これが本研究で最終的に検証しようとする異種岩石間の相互作用と「部分融解の連鎖反応」の一つのモデルである。同時に、大理石中に産出する多様な岩塊も詳細に解析し、それらの岩石でも大理石との相互作用によって部分融解が起こったかどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

研究代表者が第 46 次南極地域観測隊夏隊員として 2005 年月に現地調査し、採集した岩石試料を主要な研究対象とし、詳細に記載（多数の薄片を作成し、それらの偏光顕微鏡および走査電子顕微鏡による観察）するとともに、国立極地研究所において電子線マイクロプローブ分析装置やレーザーラマン分析装置を用いた分析を行った。また、静岡大学において炭酸塩鉱物と石墨の炭素と酸素の安定同位体比も求めた。

特に重点的な研究対象とした異種岩石対は次の 2 つである。

- (1) 泥質グラニュライト（コンダライト）とドロマイト質大理石およびそれらに発達した「スカルン」
- (2) ドロマイト質大理石とその中の Mg と Al に富むグラニュライト小岩塊

4. 研究成果

(1) 泥質グラニュライト（コンダライト）とドロマイト質大理石の境界部には、ほとんど常に両者の「反応」によって形成されたと考えられる「スカルン」が発達しているが、

それは時に泥質グラニュライトの成層構造に不調和的な「脈」としても産出し、部分融解が起こったことを強く示唆している。

「スカルン」では、単相あるいは少数相による規則的な累帯構造が見られることが多いが、本研究の対象物では、累帯構造はみられるものの、各帯は単相あるいは少数相によって構成された『鉱物帯』はなく、より多数の鉱物によって構成された通常の岩石であることは注目に値する。さらに、主要構成鉱物である斜長石とザクロ石に顕著な組成不均質性が見られることと、それが結晶粒の内部から外部に向かう同心円的な累帯構造構造ではなく、泥質グラニュライトとドロマイト質大理石との配列に直交するような組成勾配に対応するものであることも明らかになった（図 1 参照）。

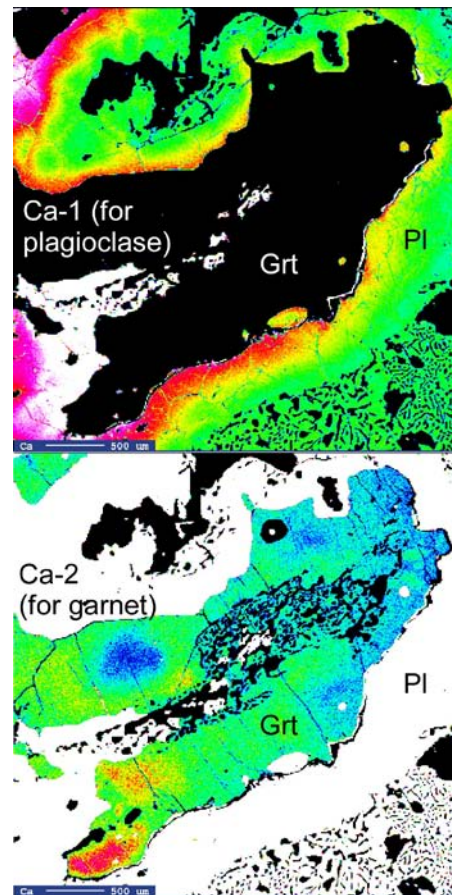


図 1 泥質グラニュライト（コンダライト）とドロマイト質大理石との間に発達した「スカルン」中の斜長石 (Pl) の示す Ca の濃度勾配とそこに出現するザクロ石 (Grt) 単結晶粒の示す Ca の非同心円的な累帯構造

このように、野外の産状ばかりでなく岩石や個々の構成鉱物の分析結果からも、異種岩石間の相互作用によって部分融解が促進されるとするモデルは支持されたが、「部分融解の連鎖反応」が進んだかどうかはまではかならずしも検証できなかった。

(2) ドロマイト質大理石中の小岩塊として産出するMgとAlに富むグラニュライトに極端に多種の鉱物(コランダム、サフィリン、スピネル、堇青石、灰長石、Naに富む斜長石、タルク、緑泥石、ホルンブレンド、フロゴサイト、ドロマイト、方解石、ルチル、ジルコン、燐灰石、石墨など)が生成されていることが明らかになった。特に注目になるのが、灰長石と堇青石あるいはタルクに直に接した一部の石墨結晶の表面に渦巻成長丘が保持されていることである(図2)。そのような石墨は低過飽和度の炭素を含む流体相あるいはメルト中で成長したことを示唆するが、特に灰長石と堇青石に直に接しているものはグラニュライト相の高温条件下で、またタルクと接しているものは比較的低温になった降温時に成長したことを示唆している。

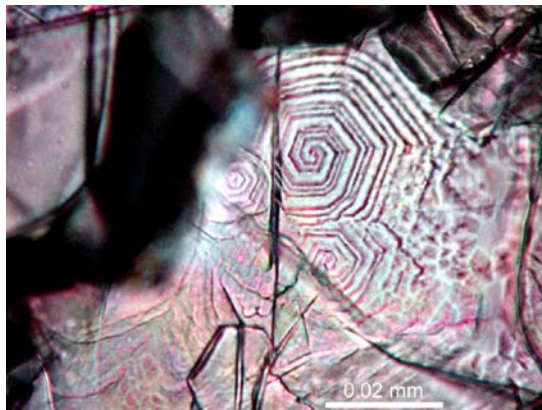


図2 グラニュライト中の高温ケイ酸塩鉱物に直に接する石墨結晶面上に、おそらく世界で初めて確認された渦巻成長丘

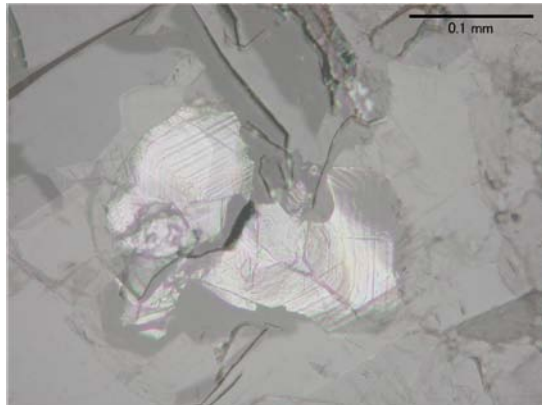


図3 渦巻成長丘を保持する石墨結晶に被さった灰長石(An)とMg堇青石(Crd)の反射顕微鏡写真と走査電子顕微鏡反射電子線(SEM-BSE)像を重ね合わせたもの

さらに注目になるのが図4に示したように、灰長石には自形的な内部構造が見られ、これも自由空間(おそらくメルト中)で成長したことを示していることである。また図5に示すように、多種の鉱物の共生関係にも規則性が見られ、岩塊中で局所的に化学組成が

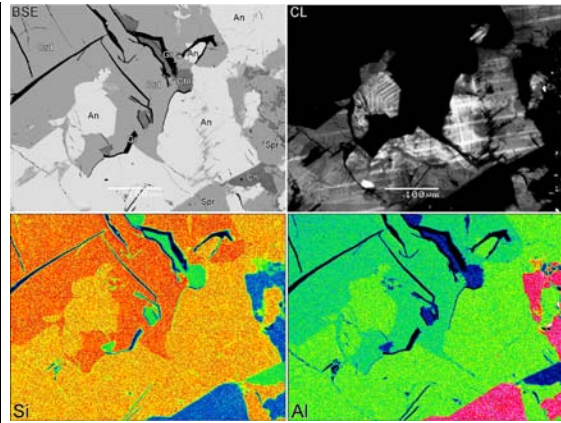
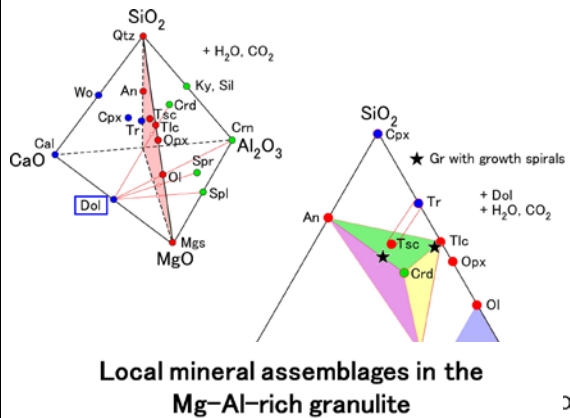


図4 渦巻成長丘を保持する石墨結晶に覆いかぶさる灰長石とMg堇青石のSEM-BSE、走査電子顕微鏡カソードルミネッセンス(SEM-CL)像、およびSiとAlの元素マップ



- Spr + Spl + Crd + Dol ± Phl

- Spr + Crd + An + Dol ± Phl

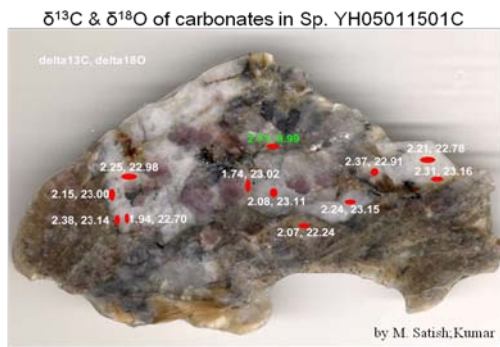
- Tlc + Crd + An + Dol ± Phl
- Tlc + Na-rich Pl + Crd + An + Dol ± Phl
- Hbl + Tlc + Crd + Dol ± An ± Phl
- Hbl + Dol ± Spl ± Ol ± Phl

Increase in SiO₂, alkalis, & H₂O

cf. dehydration melting reactions

図5 MgとAlに富むグラニュライトを構成する多種多様な鉱物群の共生関係。Siに乏しいものからSiに富むものまで3~4グループに区分される。

異なること(特にSiO₂とH₂Oの含有量)を示しているが、それらはSiO₂とH₂Oに乏しいものから順に高温部分融解時の融け残り鉱物群、その後の降温時の既存鉱物とSiO₂に富むメルトとの反応生成鉱物群、SiO₂に富むメルトからの晶出鉱物群、サブソリダスでの反応で形成された鉱物群と考えられる。石墨はグラニュライト相条件下ではメルトから、降温時にはメルトの固結によって放出された流体から析出したのであろう。



石墨と炭酸塩鉱物の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、それらの平衡関係と外部からの流体流入がなかったことを示唆（ Δ 値からは約650°C程度の温度を指示）

図6 MgとAlに富むグラニュライト中の炭酸塩鉱物の酸素と炭素の同位体比

MgとAlに富むグラニュライト中に産出する炭酸塩鉱物および石墨の炭素と酸素の安定同位体比からは（図6参照）、それらがほぼ化学平衡の関係にあることと外部からの流体の流入はなかったこと、すなわち CO_2 や H_2O などの流体構成成分はもともとMgとAlに富むグラニュライト中か周囲の大理石中に含まれていたものであることが示唆される。これも混在する異種岩石間での部分融解現象を含めた相互作用の具体例である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計5件）

- ① Tagiri, M., Dunkley, D. J., Adachi, T., Hiroi, Y. and Fanning, C. M., SHRIMP dating of magmatism in the Hitachi metamorphic terrane, Abukuma Belt, Japan: Evidence for a Cambrian volcanic arc, *Island Arc*, 査読有, 20, 2011, 印刷中
- ② Kato, M., Mitsui, H., Kobayashi, T., Hiroi, Y., Satish-Kumar, M., Dunkley, D. J. and Hokada, T., New finding of kyanite and andalusite in sillimanite-rich pelitic granulites from the Kerala Khondalite Belt, Southern India. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 105, 2010, 328-333.
- ③ Kobayashi, T., Hirajima, T., Hiroi, Y. and Svojtka, M., Determination of SiO_2 Raman spectrum indicating the transformation from coesite to quartz in Gföhl migmatitic gneisses in the Moldanubian Zone, Czech Republic. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 査読有, 103, 105-111, 2008.
- ④ 森田英彦、廣井美邦、古川 登、泥質変成岩の部分融解におけるアルカリ長石と斜長石の花崗岩質メルトへの溶解過程. 岩

石鉱物科学, 査読有, 37, 2008, 96-109.

- ⑤ Hiroi, Y., Motoyoshi, Y., Ishikawa, N., Hokada, T. and Shiraishi, K. (2008) Origin of xenocrystic garnet and kyanite in clinopyroxene-hornblende-bearing adakitic meta-tonalites from Cape Hinode, Prince Olav Coast, East Antarctica. In: *Geodynamic evolution of East Antarctica: a Key to the East-West Gondwana Connection*, eds. by Satish-Kumar, M., Motoyoshi, Y., Osanai, Y., Hiroi, Y. and Shiraishi, K., Geological Society of London Special Publications, 査読有, 308, 2008, 333-350.

〔学会発表〕（計13件）

- ① 廣井美邦：スリランカの超高温泥質グラニュライト中のザクロ石に含まれる“ナノ花崗岩類”、日本地質学会、2010年9月19日、富山
- ② 廣井美邦：南インド、ケララ・コンダライト帯の泥質グラニュライトから初めて確認された藍晶石、日本地球惑星科学連合大会、2010年5月23日、幕張
- ③ 廣井美邦：南極、昭和基地南方地域に産出するMg-Alに富むグラニュライト中の渦巻き成長した石墨、日本鉱物科学会、2009年9月8日、札幌
- ④ HIROI, Y., Current topics of high-temperature and ultrahigh-temperature metamorphism, Geological Society of Japan, 2009年9月6日、岡山
- ⑤ 廣井美邦：南極、昭和基地付近のグラニュライト相変成地域に産出する火成紅柱石、日本地質学会、2008年9月21日、秋田

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廣井 美邦 (HIROI YOSHIKUNI)
千葉大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40019427

(2) 連携研究者

古川 登 (FURUKAWA NOBORU)
千葉大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：40251194

(3) 研究協力者

外田 智千 (HOKADA TOMOKAZU)
国立極地研究所・准教授
研究者番号：60370095
サティッシュ クマール (SATISH KUMAR MADHUSOODHAN)
静岡大学・理学部・准教授
研究者番号：50313929