

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：62611

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03789

研究課題名(和文) 特異なメルト包有物による大陸衝突型造山帯深部構成岩類の上昇・冷却過程の研究

研究課題名(英文) Study on the processes of ascent and cooling of deep crustal rocks in continental collision orogens based on unusual melt inclusions

研究代表者

廣井 美邦 (Hiroi, Yoshikuni)

国立極地研究所・先端研究推進系・外来研究員

研究者番号：40019427

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：世界各地の様々な時代の大陸衝突型造山帯に産出する高温高压広域変成岩中のザクロ石結晶中から研究代表者らによって発見された特異なメルト包有物は斑状組織と樹枝状～球晶状の形態を示す石英を含むなど珪長質火山岩に類似した特徴を示し、珪長岩包有物と命名された。珪長岩包有物を様々な観察・分析機器を用いて詳細に解析するとともに再現実験を行って生成と保存の条件を限定した。またスリランカでの調査から地質学的な状況を明らかにした。その結果、大陸衝突型造山帯深部で形成された岩石の上昇・冷却過程に関する革新的なテクトニックモデルが必要であることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直接的な観察や試料採集が不可能な大陸地殻深部、特に大陸衝突型造山帯の深部での地質現象の解明を目指して、研究代表者らによって発見された特異なメルト包有物を詳細に解析した。大陸衝突型造山帯では巨大山脈が発達して様々な気象現象に影響するとともに、大地震などの大規模な自然災害が起きている。本研究の結果、この種の造山帯の深部では岩石が確実に部分融解することとそれが従来の想定よりもはるかに高速で上昇・冷却する可能性があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Felsite inclusions in garnet in high-temperature and high-pressure regional metamorphic rocks from continental collision orogens worldwide with various ages ranging from Archean to Phanerozoic are extraordinary melt inclusions. They show non-equilibrium crystallization textures, such as dendritic and spherulitic crystals of quartz and other minerals, as well as the porphyritic texture that are characteristic of hypabyssal and volcanic rocks. Detailed analyses and observations of the felsite inclusions using various methods, in addition to field survey in Sri Lanka, have revealed unexpected features of ascent and cooling processes of the host rocks, and require a revolutionary tectonic model.

研究分野：地球惑星科学分野の中の地質学、岩石学、鉱物学、地球化学

キーワード：メルト包有物 過冷却結晶成長組織 グラニュライト 大陸衝突型造山帯 部分融解 急速冷却

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

大陸衝突型造山帯の深部で形成された高温高压広域変成岩(グラニュライト)は部分融解していた可能性があるが、長年、決め手となる証拠が得られず、議論と混乱が続いていた。ところが近年、それを確証するものとして、グラニュライトを構成するザクロ石などの鉱物粒内にメルト包有物が見いだされた(Cesare et al., 2009)。それには固結してガラス化したものと細粒で等粒状の鉱物集合体になったものがあり、後者は「ナノ花崗岩 nanogranite」と呼ばれた。研究代表者はスリランカや南極など世界各地で採集したグラニュライトからメルト包有物の探査を開始し、ナノ花崗岩に加えて、斑状組織と樹枝状~球晶状結晶など過冷却結晶化を示唆する組織を特徴とする火山岩類似物質があることに気づき(図1と図2)、「珪長岩包有物 felsite inclusion」と命名してその産出のテクトニクスにおける重要性を指摘した(Hiroi et al., 2014)。しかしながら、火山岩が地下深部由来の岩石や鉱物を捕獲物として含有する事象は広く認知されているが、地下深部からゆっくりと上昇・冷却するとされてきたグラニュライト中の鉱物粒内に火山岩的な物質が含まれることはあまりにも想定外のためか、学界ではなかなか受け入れられなかった。

2. 研究の目的

- (1) 世界各地の太古代から顕生代に至る様々な時代の大陸衝突型造山帯で採集したグラニュライトからナノ花崗岩と珪長岩包有物を探査し、それらの産出がまれで例外的なことではないことをより確定的にする。
- (2) ナノ花崗岩と珪長岩包有物の組織・構造、鉱物構成、鉱物の化学的特徴などを詳細に明らかにし、その形成と保存の条件を絞り込む。
- (3) ナノ花崗岩と珪長岩包有物を含むグラニュライトの産出の地質学的な背景を明らかにし、それが造山帯深部から上昇する機構と過程の新しいモデルを構築するために必要な制約条件を集積する。

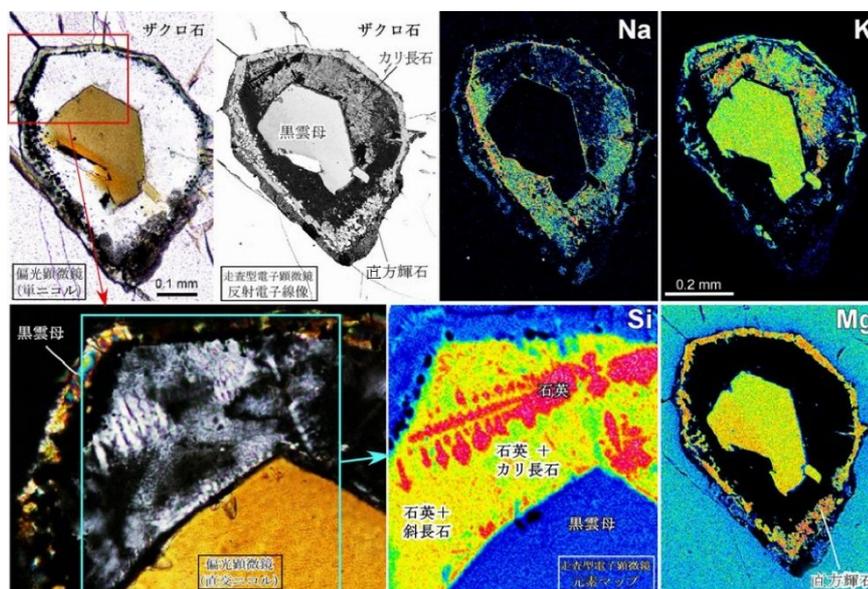


図1 珪長岩包有物を特徴づける自形・斑晶状の黒雲母と樹枝状の石英

3. 研究の方法

- (1) 様々な時代と場所の大陸衝突型造山帯から採集した多様な組成のグラニュライトの薄片を多数作成し、偏光顕微鏡と電子顕微鏡で徹底的に調べ、ナノ花崗岩と珪長岩包有物の有無を調べる。
- (2) ナノ花崗岩と珪長岩包有物を偏光顕微鏡、走査型電子顕微鏡 SEM、透過型電子顕微鏡 TEM、カソードルミネッセンス CL、電子線マイクロアナライザ-EPMA、ラマン分光分析機等を駆使して調べ、それらの組織・構造、鉱物構成、鉱物の化学的特徴を把握する。
- (3) 花崗岩質メルトの過冷却微細組織の再現実験によって固結条件を限定するとともに、それが保存される条件を限定するための実験も実施する。
- (4) 珪長岩包有物形成の地質学的な背景・枠組みの解明のために、スリランカで野外調査と試料採集を実施する。

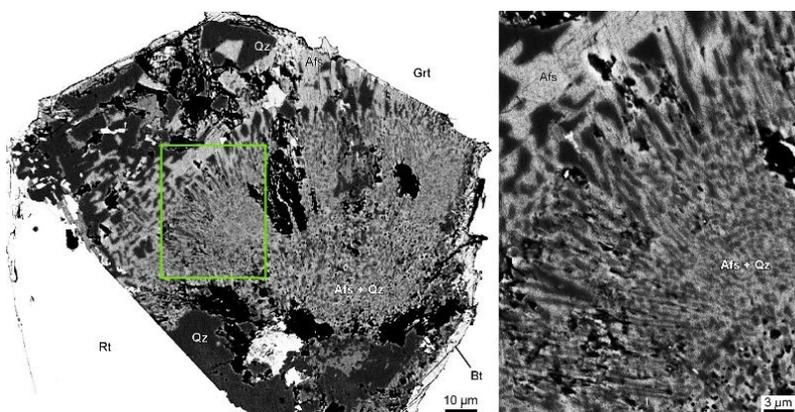


図2 珪長岩包有物に特徴的な石英とガリ長石の球晶状集合体

4. 研究成果

(1) 主として泥質～石英長石質グラニュライトを構成するザクロ石中のメルト包有物には、しばしば石英や長石、直方輝石などの樹枝状結晶や球晶状結晶(図1)が見られ、珪長岩包有物の出現はまれで例外的なことではないことが確認された。

(2) 主として泥質～石英長石質グラニュライト中のザクロ石中のメルト包有物には自形で斑晶状の黒雲母や石英が出現し(図1と図3)珪長岩包有物を特徴づけている。特に石英斑晶には、走査型電子顕微鏡カソードルミネッセンス法(SEMCL)で検出される累帯構造が見られることが多いが(図3)、それは主としてチタン(Ti)の含有量の違いを反映している。またナノ花崗岩中の他形の石英粒中に樹枝状の高Tiの高温型石英が保存されていることも明らかになった(図4)。チタンの含有量から石英が成長した時の温度の見積もりが可能である。また累帯構造の高Ti部分と低Ti部分との境界層の幅から高温条件の継続時間を見積もることができる。石英中のTiの拡散速度の値にはまだ幅があり確定的ではないが、見積もられた温度での高温継続時間はこれまでの想定より1～2桁も短く、数万年以下であった。

(3) ざくろ石と単斜輝石に富むマフィックグラニュライトからもナノ花崗岩や珪長岩包有物が見い出され、地殻深部での高温高压変成作用時にはマフィックグラニュライトも部分融解した

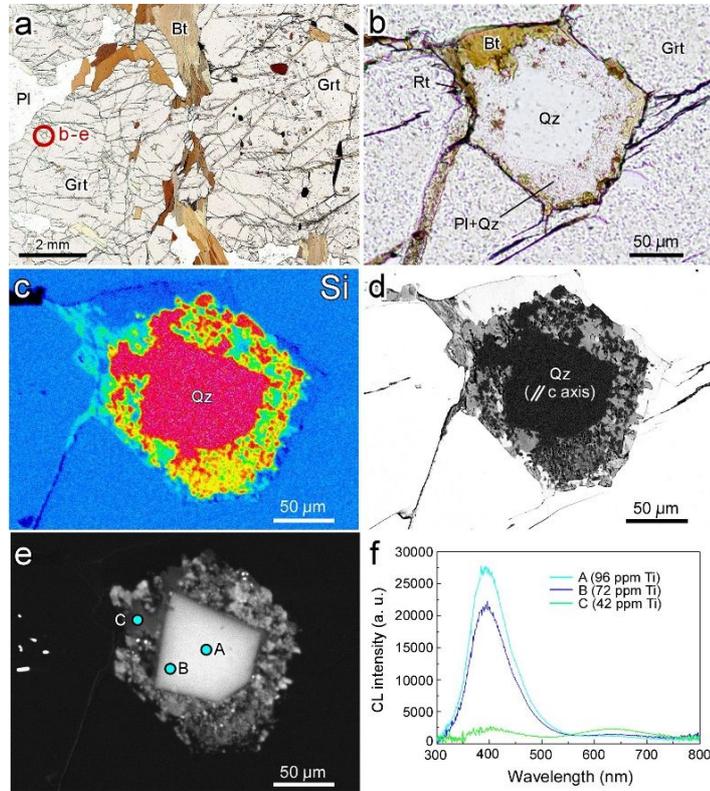


図3 珪長岩包有物中のチタン(Ti)の含有量の違いを反映した顕著な累帯構造を示す自形斑晶状の石英

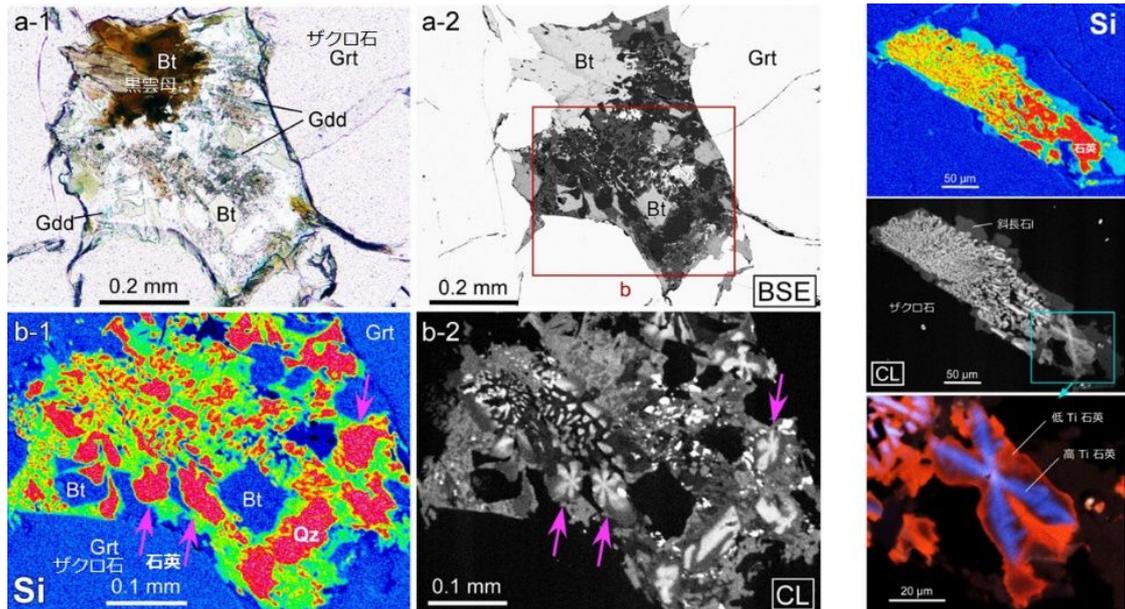


図4 他形の石英粒中に保存された高Tiで樹枝状の石英とグランディディエライト(Gdd)

ことが確認された。また世界で初めてマフィックグラニュライト中のナノ花崗岩中にグランディディエライト(無水のホウ素ケイ酸塩鉱物)が見出され、ホウ素が生成した液の方に濃集することなどその地球化学的な挙動が確認された。なお、グランディディエライトは泥質～石英長石質グラニュライト中のナノ花崗岩からも見出された(図4)。

(4) 本研究においても、Ferrero et al. (2016) や Wannhoff et al. (2022) がナノ花崗岩から発見・報告してきたクムディコライト(曹長石成分に富む斜長石の準安定相)とドミスタインベルガイト(灰長石の準安定相)がマフィックグラニュライトばかりでなく泥質～石英長石質のグラニュライト中のナノ花崗岩中からも確認された。

(5) 珪長岩包有物を特徴づける鉱物の微細組織(特に石英の樹枝状結晶および石英と長石の球

晶状集合体)の再現実験を多様な条件で実施し、形成条件と保存条件を限定した(表1、図5)

complete melting		cooling rate	isothermal heat treatment		dynamic isothermal crystallization experiment (P = 2 kbar)					
T (°C)	time (h)	°C/h	T (°C)	time (h)	run number (#) and H ₂ O content					
950	24	50	700	134	38# 2.43	39# 3.09	40# 3.56	41# 4.92	42# 10.68	
950	24	50	700	300	50# 2.45	51# 3.10	52# 3.59	53# 4.82	54# 10.99	
950	24	0.88	700	0	56# 2.56	57# 3.04	58# 3.49	59# 3.94	60# 4.72	
950	24	50	600	298	62# 2.62	63# 2.95	64# 3.41	65# 4.87	66# 5.58	
950	24	5	700	89	35# 2.52	36# 3.06				
950	24	500	700	138.5	43# 2.45		45# 3.39	46# 5.01	47# 6.42	
950	24	5	700	0	124# 2.44	125# 2.99	126# 3.54	127# 10.25		
950	24	50	500	216	135# 2.60	136# 2.83	137# 3.09	138# 3.48	139# 3.89	140# 4.86
950	24	50	550	492	141# 2.46	142# 2.93	143# 3.48			
950	24	50	700	1003	153# 2.35	154# 2.92	155# 3.46	156# 3.93	157# 4.48	158# 4.86
950	24	50	700	0	166# 2.49	167# 3.01	168# 3.74	169# 4.01	170# 4.51	171# 5.08

表1 珪長岩包有物を特徴づける微細組織の再現と保存の実験の一覧

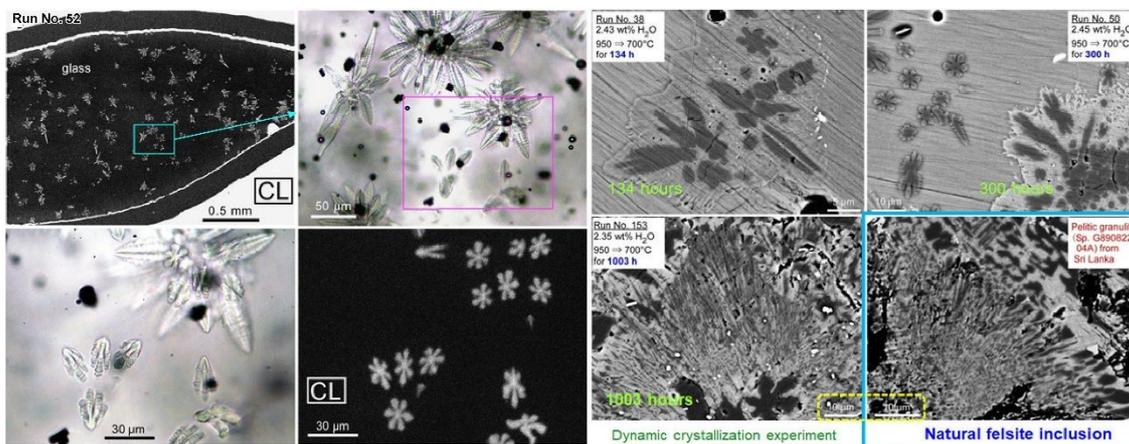


図5 珪長岩包有物を特徴づける鉱物の微細組織の再現実験の生成物(高温型石英の樹枝状結晶および石英とカリ長石の球晶状集合体) 石英とカリ長石の球晶状集合体は700で1000時間の等温加熱によって、天然の珪長岩包有物中のもの(右下端)よりも粗粒になった。

その結果、特に石英と長石の球晶状の集合体は700で1000時間の等温加熱によって天然の珪長岩包有物中の同等物よりも粗粒になったことは注目に値する。これは(2)で記述した石英中のシャープなTi累帯構造の保存とともにメルト包有物が固結後急速に冷却したことを強く示唆している。図6にナノ花崗岩や珪長岩包有物を含有するグラニュライトの辿った温度-圧力経路とその間のメルト包有物の固結・冷却の経過を模式的に示した。

(6) スリランカでは基盤の高温高压変成岩は変成度や原岩の形成時代の違いからワニ岩体、ハイランド岩体、ビジャン岩体の3地質体に区分されているが、2018年に実施した現地調査から、ナノ花崗岩と珪長岩包有物を含むグラニュライトの産出はハイランド岩体の縁部で、ワニ岩体とビジャン岩体の近傍に限定的であることがより確定的になった(図7)。(7) 研究代表者はこれまでに太古代のリンボゴ帯(南アフリカ)、原生代のグレンビル帯(カナダ)、古生代初頭の

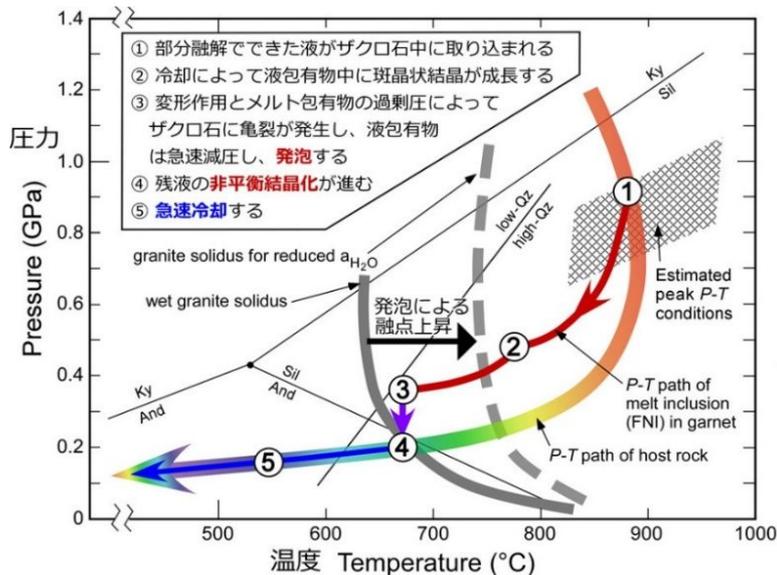


図6 珪長岩包有物とその母岩のグラニュライトの辿った温度-圧力経路 メルト包有物は発泡して過冷却状態になり、樹枝状結晶や球晶を生成した後、急冷してこれらの微細組織を保存した。

リュツォ・ホルム岩体(南極)、ハイランド岩体(スリランカ)、ケララコンダライト帯(インド)と古生代中期のボヘミア岩体(チェコ)のグラニュライトからナノ花崗岩と珪長岩包有物の産出を確認した(図8)。このように、ナノ花崗岩と珪長岩包有物の産出はけっしてまれで例外的な事象ではないことがより確実になった。

以上の新知見は従来のテクトニックモデルでは説明が不可能であるため、革新的なテクトニックモデルの構築が急務である。

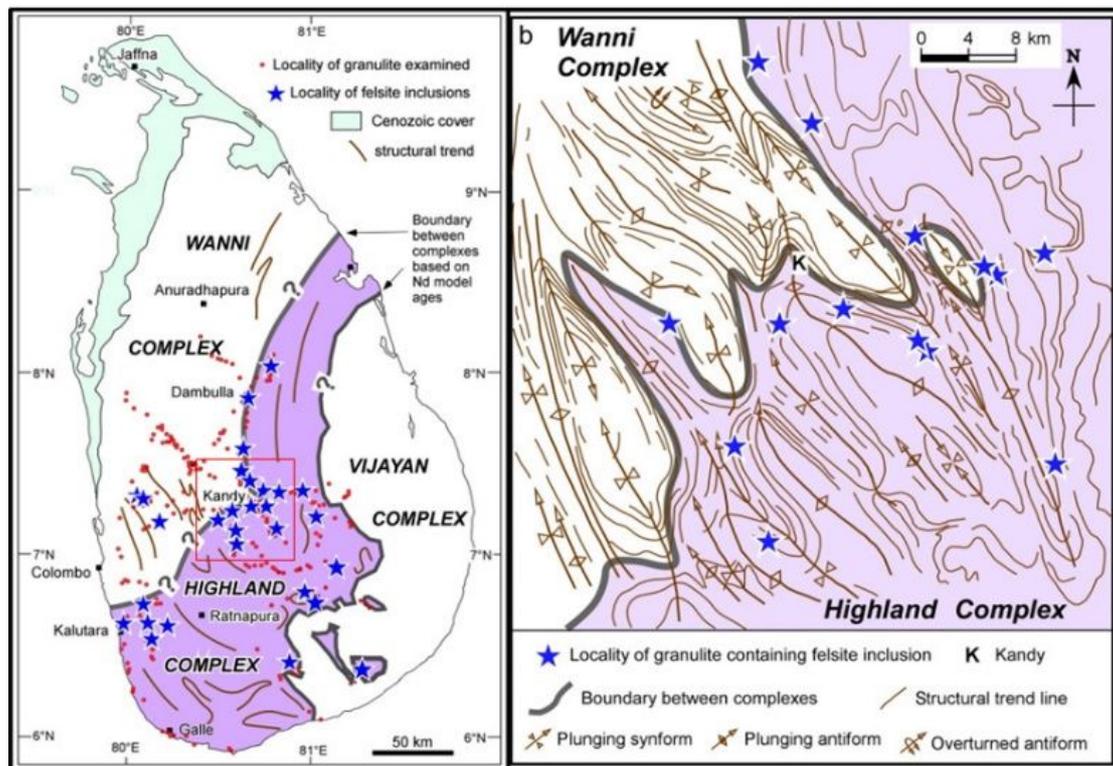
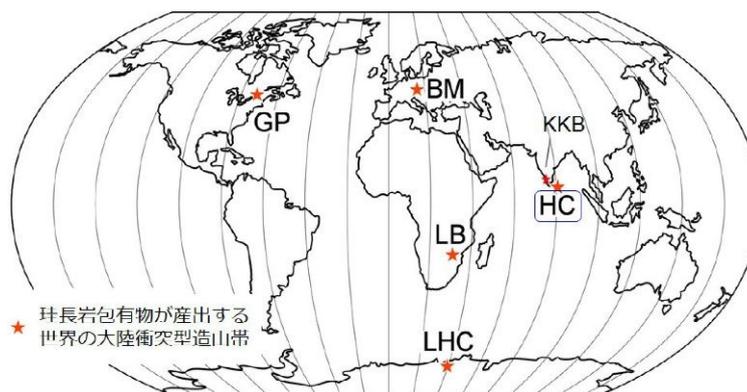


図7 スリランカにおける珪長岩包有物を含むグラニュライトの分布 それはハイランド岩体の周縁部に限定的であることを示唆している。

< 引用文献 >

Cesare, B., Ferrero, S., Salvioi-Mariani, E., Pedron, D., & Cavallo, A. (2009). "Nanogranite" and glassy inclusions: the anatexitic melt in migmatites and granulites. *Geology*, 37, 627–630.

Hiroi, Y., Yanagi, A., Kato, M., Kobayashi, T., Prame, B., Hokada, T., Satish-Kumar, M., Ishikawa, M., Adachi, T., Osanai, Y., Motoyoshi, Y., & Shiraishi, K. (2014). Supercooled melt inclusions in lower-crustal granulites as a consequence of rapid exhumation by channel flow. *Gondwana Research*, 25, 226–234.



BM = Bohemian Massif (430-300 Mya) GP = Grenville Province (1200-1000 Mya)
 HC = Highland Complex (600-500 Mya) LB = Limpopo Belt (>2000 Mya)
 LHC = Lützow-Holm Complex (600-500 Mya) KKB = Kerara khondalite Belt

図8 ナノ花崗岩と珪長岩包有物が確認された世界各地の様々な時代の大陸衝突型造山帯 本研究では初年度にスリランカのハイランド岩体(HC)の現地調査を実施した。また新たな産地として南インドのケララコンダライト帯(KKB)が加えられた。

Ferrero, S., Ziemann, M.A., Angel, R.J., O'Brien, P.J. and Wunder, P.J. (2016) Kumdykolite, kokchetavite, and cristobalite crystallized in nanogranites from felsic granulites, Orlica Snieznik Dome (Bohemian Massif): not evidence for ultrahigh pressure conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171, 3. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1220-x>

Wannhoff, I., Ferrero, S., Borghini, A., Darling, R., and O'Brien, P. J. (2022) First evidence of dmsteinbergite (CaAl₂Si₂O₈ polymorph) in high-grade metamorphic rocks. *American Mineralogist*, 107, 2315–2319.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hiroi Yoshikuni, Hokada Tomokazu, Adachi Tatsuro, Shiraishi Kazuyuki, Motoyoshi Yoichi, Grew Edward S.	4. 巻 118
2. 論文標題 Nanogranitoid inclusions with grandidierite in mafic granulite from Austhovde, Lutzow-Holm Complex, East Antarctica	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.221209	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroi Yoshikuni, Hokada Tomokazu, Kayama Masahiro, Miyake Akira, Adachi Tatsuro, Prame Bernard, Perera Keerthi, Satish-Kumar Madhusoodhan, Osanai Yasuhito, Motoyoshi Yoichi, Ellis David J., Shiraishi Kazuyuki	4. 巻 29
2. 論文標題 Zoned quartz phenocrysts in supercooled melt inclusions in granulites from continental collision orogens	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Island Arc	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/iar.12374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Dunkley Daniel J., Hokada Tomokazu, Shiraishi Kazuyuki, Hiroi Yoshikuni, Nogi Yoshifumi, Motoyoshi Yoichi	4. 巻 26
2. 論文標題 Geological subdivision of the Lutzow-Holm Complex in East Antarctica: From the Neoproterozoic to the Neoproterozoic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Polar Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.polar.2020.100606	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroi Yoshikuni	4. 巻 21
2. 論文標題 Remarkable petrographic features of Sri Lankan granulites; with special regard to unexpected occurrence of "felsite-nanogranite inclusions" in garnet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geological Society of Sri Lanka	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4038/jgssl.v21i1.34	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroi Yoshikuni, Hokada Tomokazu, Kato Mutsumi, Yanagi Ayahiko, Adachi Tatsuro, Osanai Yasuhito, Motoyoshi Yoichi, and Shiraishi Kazuyuki	4. 巻 114
2. 論文標題 Felsite-nanogranite inclusions and three Al ₂ SiO ₅ polymorphs in the same garnet in ultrahigh-temperature granulites from Rundvagshetta, Lutzow-Holm Complex, East Antarctica	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mineralogical and petrological sciences	6. 最初と最後の頁 60-78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.181118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroi Yoshikuni, Hokada Tomokazu, Adachi Tatsuro, Kamei Atsushi, Shiraishi Kazuyuki, Motoyoshi Yoichi	4. 巻 119:S001
2. 論文標題 Chlorine-rich potassic-ferro-pargasite with Cl-poor cummingtonite in mafic granulite from Austhovde, Lutzow-Holm Complex, East Antarctica	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.230329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshioka Takuro, Kanagawa Kyuichi, Hiroi Yoshikuni, Hirajima Takao, Svojtka Martin, Hokada Tomokazu, Wallis R. Simon, Nagaya Takayoshi, Miyake Akira	4. 巻 877
2. 論文標題 Deformation-induced, retrograde transformation of kyanite to andalusite: An example of felsic granulite in the southern Bohemian Massif	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2024.230293	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 廣井美邦
2. 発表標題 富山県宇奈月地域のインド石 十字石含有複変成ホルンフェルス ; 低圧高温熱変成後の急速冷却の証
3. 学会等名 日本地質学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣井美邦、外田智千、足立達朗
2. 発表標題 南極及びスリランカのグラニュライト中のナノ花崗岩中のdmisteinbergite等の準安定相
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshikuni Hiroi, Tomokazu Hokada, Tatsuro Adachi, Yasuhito Osanai, Yoichi Motoyoshi, Kazuyuki Shiraishi
2. 発表標題 Rapid UHT metamorphism and exhumation of the Lutzow-Holm Complex in Antarctica
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikuni Hiroi
2. 発表標題 Remarkable petrographic features of Sri Lankan granulites; with special regard to unexpected occurrence of “felsite-nanogranite inclusions” in garnet
3. 学会等名 Geological Society of Sri Lanka (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshikuni Hiroi, Tomokazu Hokada, Kazuyuki Shiraishi, Yoichi Motoyoshi, and Edward S. Grew
2. 発表標題 Evidence of partial melting and melt extraction in mafic granulites
3. 学会等名 The Ninth Symposium on Polar Science (第9回極域科学シンポジウム)(国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	メーン州立大学			
スリランカ	ペラデニヤ大学	地質調査所		
オーストラリア	Australian National University			
チェコ	Czech Academy of Sciences			