

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610154

研究課題名(和文)新しい粒子分解法とX線CTによる界面岩石学の創出

研究課題名(英文)Creation of Interface Petrology with a New Grain Liberation Method and X-ray CT Imaging

研究代表者

中村 美千彦(NAKAMURA, MICHHIKO)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70260528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：世界各地の上部マントル・下部地殻捕獲岩をX線CT法で観察するとともに、高電圧パルス衝撃分解法で粒子を分解し結晶表面を観察した。ほとんどの捕獲岩は、高温高压下で流体相に満たされていたと思われる空隙を含み、その体積分率は局所的に5%程度に達する。またその三次元形状は多面体～扁平楕円体であった。これによる地震波の縦波と横波速度の相対的な低下率(Rsp値)は最大で10%程度と見積もられる。マントル捕獲岩の結晶粒界に孤立して存在した流体の形状から得られた二面角は産地により異なり、鉱物組成から見積もられる平衡温度圧力を考え合わせると、マントルで試料中に存在した流体の二酸化炭素濃度を表していると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have investigated mafic and ultramafic xenoliths from lower continental crust and upper mantle from various localities in the world by using a high voltage pulse power fragmentation method and X-ray CT imaging. Most of the xenoliths samples included intergranular pores that should have been filled with aqueous fluids at high pressure and temperature. The local volume fraction of the pores was at most 5%. The three-dimensional shape of the pores were polyhedral - oblate spheroidal. Based on these volume fraction and shapes of the fluids, the relative decrease of $dlnVs$ to $dlnVp$, the Rsp value, was estimated to be 0.9. The dihedral angles between mantle xenoliths and isolated intergranular fluids were variable, dependent on the localities of the xenoliths samples. This means that shapes of the intergranular fluids may represent the carbon dioxide content in the fluids.

研究分野：岩石学，火山学

キーワード：超臨界流体 捕獲岩 上部マントル 下部地殻 二面角 粒界 地震波速度

1. 研究開始当初の背景

近年、世界各地の詳細な電気比抵抗観測から、沈み込み帯をはじめとする多くの地域で、大陸地殻とその下の最上部マントルが高い導電性を持つことが明らかとなり、連結した流体ネットワークの存在が強く示唆されている。代表者のグループは、X線CT法によって、一ノ目湯やアリゾナ州サンカルロスなど世界各地の上部マントル・下部地殻由来捕獲岩に、最大数十 μm サイズの明瞭な空隙(間隙流体)が存在することを発見した(2012年鉱物科学会・中村他)。これは、下部地殻や上部マントルに、従来考えられていたよりも普遍的にCHO系の超臨界水(以降、流体相と呼ぶ)が存在していることを示す。このような粒間流体が岩石の物性に及ぼす影響と、流体組成の見積りなどを通して、学際融合的な界面岩石学を創出する時期が熟している。

2. 研究の目的

- (1) 粒間流体の形状とその地震波速度に対する効果：高分解能X線CT観察により、流体の量(体積分率)と形状を求める。それを用いて、理論から、地震波速度の縦波と横波の相対的低下率 R_{sp} 値($=d\ln V_p / d\ln V_s$)を求める。
- (2) バルク流体相、および隣接する鉱物とコヒーレントに隣接している粒界面の微細形態観察から、水に富む条件での“wetな”粒界の結晶学的構造および、粒界移動の素過程に制約を与える。
- (3) マントルカンラン岩捕獲岩の粒界に保存された流体形状(鉱物との二面角)から、流体組成(特に $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比)を推定する。

3. 研究の方法

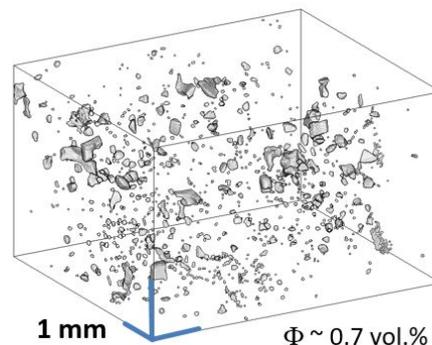
- (1) 世界9か所の産地の計約70試料のマントル・下部地殻起源捕獲岩について、X線CT撮影を行い、かつ薄片観察と鉱物組成分析、粒界面のマイクロトポグラフィ観察、および風化の影響を評価するための粒子エッチング実験を平行して進めた。X線CTの空間分解能(1 voxel サイズ)は、典型的には4~6 μm である。
- (2) 捕獲岩から自然に遊離した結晶、または高電圧パルス衝撃分解法により分離した、捕獲岩粒子の表面を電子顕微鏡および微分干渉顕微鏡により観察した。微分干渉顕微鏡は、高さ方向に数十オングストロームの分解能を持つ。記載岩石学的研究により、これらの岩石が流体相と平衡共存していた温度圧力条件を決定した。
- (3) サンカルロス・キルボーンホール(米国)、プレメルリ(豪)、ジローナ・ランザローテ島(スペイン)の5産地から、それぞれ岩石試料を1つずつ用意し、遊離結晶を用いて鉱物の表面観察を行った。試料はいずれもスピネルを含むかんらん岩捕獲岩である。これらの遊離結晶は、走査型電子顕微鏡の低真空モードを用い表面観察を行った結果、風化に

よる表面微細構造への影響が比較的少ない試料を選定したものである。カンラン岩捕獲岩の結晶粒界のうち、いわゆる三重点(結晶の稜部分)に分布していた流体の跡は、粒子の抜け落ち(ブラッキング)と客観的に区別をすることが難しい。そこで、カンラン石の二次元粒界(遊離したあとの表面)に、ゴルフボールのdimple状に存在していた流体の痕跡について、キーエンス デジタルマイクロスコープ VHX-D510 を用いていくつかの深度プロファイルを取得した。結晶面を基準として窪みの角度の測定を行った。向かい合った結晶は、最もモード組成の多いカンラン石であると仮定し、粒界面からdimple内部への俯角を二倍して二面角とした。

4. 研究成果

(1) 捕獲岩中の空隙は、量の大小こそあるものの、ほぼ全ての産地の全ての試料に明瞭に存在し、試料の風化・変質の程度とは無関係であった。上昇過程での減圧・冷却による粒界の緩みを画像処理によって除去した後の形態と分布は、高温高压下から急冷した組織平衡実験産物が持つ特徴を多数備える。またレールズライト中の空隙は、自形面を張るパーガス閃石で囲まれていることがある。これらの特徴は、捕獲岩中の空隙が地下深部における粒間流体の存在形態を良く保存していることを示す。

粒間流体の形状は多面体~扁平楕円体のことが多く、サイズは数10 μm から数100 μm に達する(下図：サンカルロス産レールズライトのX線CT像。流体体積分率0.7%)。



流体の体積分率は産地・岩石種により大きく異なるが、 R_{sp} 値は最小で0.9程度となる。粒間流体は、ほとんどの場合にCTの分解能の範囲では孤立しているものの、試料内で面状・帯状に偏在する場合には、体積分率は局所的には5%を超えることがあり、また連結度も高くなる。これらの観察結果は、電気伝導度を上げるのに有意な粒子スケールで均質な流体ネットワークは存在しないことを示す。

(2) 一ノ目湯産の角閃石を含む苦鉄質捕獲岩55個を偏光顕微鏡下で分類し、角閃石(パーガス閃石~チェルマク閃石・斜長石・磁鉄鉱・アパタイトを含む19試料中の7試料を選んで観察および鉱物組成のEPMA分析を行

った。対象サンプルは主に数 mm の粗粒な角閃石・斜長石で構成され、粒間に少量のガラスを含む。角閃石のコア組成に角閃石温度・圧力計を用いると、430 - 570 MPa, 900 - 920 が得られた。角閃石・斜長石温度計では、860 - 970 と算出された。これは、一般的な火山性島弧の地温勾配よりも 300-400 程度高温を示す。

以上の岩石組織の特徴と温度圧力条件から、角閃石斑レイ岩は、地殻に貫入したマグマから形成された集積岩であると考えられる。角閃石表面には、成長または溶解によると思われるステップやエッチピットが頻繁に観察された。よってこれらの組織は、地殻下部において固結しつつある高含水量の島弧苦鉄質マグマから分離した流体相からの成長・溶融により形成された可能性がある。一方で、酸性溶液による鉱物のエッチング実験でも同様の組織が形成されるという報告があり、地表への噴出後、火山活動に伴う酸性火口湖や雨水による溶解の可能性もあり、両者を明確に区別するにはなお検討が必要である。

新鮮なカンラン岩から遊離した粒子の表面には、下部地殻の角閃石表面に見られたようなステップ状構造・エッチピット構造は、微分干渉顕微鏡による観察でもほとんど見出されない。これは、鉱物の二次元粒界には、フィルム状のバルクの流体相は安定して存在していないという従来の考えと調和的である。

(3) サンカルロス、キルボーンホール、ジローナ産のものは Dimple が少ないが、ブレンメルリ、ランザローテ島産のものは非常に多いことがわかった。また、ブレンメルリ、ランザローテ島産のものは Dimple の形状にも明らかな違いが見られた。固液二面角を測定したところ、結晶面での表面自由エネルギーによる異方性の影響が大きい可能性があるものの、ブレンメルリ産のものは 90°、ランザローテ島産のものは 68° という結果が得られた。両輝石の固溶体組成から見積もった温度圧力条件と、二面角の流体組成依存性に関する高圧実験結果を比較した結果、これらの違いは流体中の CO₂ 分圧の違いによるものと考えられ、ブレンメルリでは CO₂ モル分率が 90% であり、一方ランザローテ島ではほぼ純粋な H₂O であることが考えられる。これらの結果は、捕獲岩産地のテクトニックセッティングと調和的な結果となっており、本研究手法が、上部マントルの揮発性成分組成を表す可能性が示された。

<引用文献>

Takei, Y., 2002, Effect of pore geometry on VP/VS: From equilibrium geometry to crack, *J. Geophys. Res.*, 107, B2, 2043, 10.1029/2001JB000522.

Ridolfi, F., Renzulli, A., 2012, Calcic amphiboles in calc-alkaline and

alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130 C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 163, 877-895.

Blundy, J. D., Holland, T. J. B., 1990, Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 111, 278-282.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

Abe, T., Kuribayashi, T., Nakamura, M., OH defects in synthetic xenotime (YP04), *European Journal of Mineralogy*, 巻未定, 2016(査読有)
DOI:10.1127/ejm/2016/0028-2526

T. Sano, M. Shirao, K. Tani, Y. Tsutsumi, S. Kiyokawa, T. Fujii, Progressive enrichment of arc magmas caused by the subduction of seamounts under Nishinoshima volcano, Izu-Bonin Arc, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31, 52-65, 2016(査読有)
DOI:10.1016/j.jvolgeores.2016.03.0047

宮崎敏雄, 山崎真一, 土屋範芳, 奥村聡, 中村美千彦, 長橋良隆, 吉田武義, 偏光光学系方式の EDXRF による火成岩全岩化学組成分析, *岩石鉱物科学*, 43, 47 - 53, 2014 (査読有)
doi.org/10.2465/gkk.131224

Isizuka, O., Tani, K., Reagan M.K., Izu-Bonin-Mariana Crust as a Modern Ophiolite Analogues, *Elements*, 10, 115 - 120, 2014 (査読無)
DOI:10.2113/gselements.10.2.115

⑤ Harigane, Y., Michibayashi, K., Morishita, T., Tani, K., Dick, H.J.B., Ishizuka O., The earliest mantle fabrics formed during subduction zone infancy, *Earth and Planetary Science Letters*, 377 - 378, 2013, 106 - 113(査読有)
DOI: 10.1016/j.epsl.2013.06.031

[学会発表](計16件)

Takeyasu Abe, Takahiro Kuribayashi, Michihiko Nakamura, OH defects in non-metamict xenotime, The 2015 MSA Annual Meeting at the Geological Society of America Annual Meeting, 2015年11月14日, ボルティモア, アメリカ

藤田和果奈, 中村美千彦, 多結晶体岩石における粒成長と流体分離のカップリング, 日本鉱物科学会 2015 年大会, 2015 年 9 月 25 - 27 日, 東京

Tani, K., S. Ishihara, K. Horie, D.J. Dunkley, 2015. Pulsed granitic crust formation revealed by comprehensive SHRIMP zircon dating of the SW Japan granitoids: Enhanced subduction of the Pacific Plate triggered the voluminous granitic magma formation? 8th Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, 2015 年 9 月 22 日, ブラジル

阿部 健康, 中村 美千彦, 栗林 貴弘, 水熱合成モナザイト(LaPO₄)及びゼノタイム(YPO₄)中の OH 欠陥, 地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 - 28 日, 幕張
⑤ Ohtani, M., Nakamura, M., Takeyoshi Yoshida, Eiichi Takahashi, Intergranular fluid compositions in mantle xenoliths inferred from direct observation of crystal surfaces, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 - 28 日, 幕張

小林 真大, 角野 浩史, 長尾 敬介, Ray Burgess, 石丸 聡子, 荒井 章司, 芳川 雅子, 川本 竜彦, 熊谷 仁孝, 小林 哲夫, 中村 美千彦, 高橋 栄一, Ar-Ar および I-Xe 年代測定法を応用したマントル捕獲岩のハロゲン分析, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 - 28 日, 幕張

谷健一郎, Gabo Jillian Aira S, 堀江憲路, 石塚 治, Padrones Jenielyn, Payot Betchaida, Tejada Maria Luisa, Faustino-Eslava Decibel V, 今井亮, 荒井章司, 外田智千, Yumul Jr. Graciano P, Dimalanta Carla B, 2015. Temporal constraints for the tectonic development of the Philippine ophiolite belts from new zircon U-Pb ages, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 24 - 28 日, 幕張

藤原恵美, 中村美千彦, 吉田武義, 星出隆志, 高橋栄一, 一の目淵マール下の地温勾配: マントル捕獲岩からの制約, 日本火山学会 2014 年秋季大会, 2014 年 11 月 2 - 4 日, 福岡

柳田康宏, 中村美千彦, 吉田武義, 一の目淵マールに産する角閃石斑レイ岩の起源, 日本火山学会 2014 年秋季大会, 2014 年 11 月 2 - 4 日, 福岡

山田稜, 岡本敦, 最首花恵, 中村美千彦, 奥村聡, 佐々木理, 土屋範芳, 地殻流体からのシリカ析出によるき裂閉塞: 水熱実験とモデリングからの考察, 日本鉱物科学会 2014

年大会, 2014 年 9 月 17 - 19 日, 東京

栗谷豪, 奥村聡, 横山哲也, 伊藤嘉紀, 中村美千彦, 魏海泉, 中国北東部・長白山華山におけるマントル含水量: 予察の検討, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 横浜

Nakamura, M., Okumura, S., Yoshida, T., Sasaki O., Takahashi, E., Geometry of intergranular fluids in the mantle xenoliths: Implications for the physical properties of upper mantle, 日本地球惑星科学連合大会, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 横浜

Nakatani, T. Nakamura, M., Experimental constraints on the serpentinization rate under the antigorite-stable P-T condition, 日本地球惑星科学連合大会, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 横浜

Abe, T., Nakamura, M., The structural water in hydrothermally synthesized monazite, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, 横浜

村田雅美, 植松勝之, 山本貴史, 谷健一郎, 宿野浩司, 水上知行, 森下知晃, マントル起源かんらん岩捕獲岩中の鉱物協会に発達する微細組織観察, 日本地球惑星科学連合大会 2014 年大会, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 横浜

Yamada, R., Okamoto, A., Saishu, H., Nakamura, M., Okumura, S., Sasaki, O., Tsuchiya, N., Evolution of porosity structures in a fracture during quartz formation, 日本地球惑星科学連合大会, 2014 年 4 月 28 日 - 5 月 2 日, 横浜

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 美千彦 (NAKAMURA, Michihiko)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 70260528

(2) 研究分担者

谷 健一郎 (TANI, Kenichirou)
国立科学博物館・研究員
研究者番号: 70359206

奥村 聡 (OKUMURA, Satoshi)
東北大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 40532213

(3) 連携研究者

吉田 武義 (YOSHIDA, Takeyoshi)
東北大学・大学院理学研究科・名誉教授

研究者番号： 80004505

佐々木 理 (SASAKI, Osamu)
東北大学・学術資源公開センター・准教授
研究者番号： 60222006