

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654160

研究課題名(和文) 高压発生装置を用いない高压実験法の開発

研究課題名(英文) Dislocation structure around fluid inclusions in olivine and orthopyroxene

研究代表者

山本 順司 (Yamamoto, Junji)

北海道大学・総合博物館・准教授

研究者番号：60378536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：転位はホスト鉱物の塑性変形特性を表す組織である。本研究では流体包有物周辺に見られる転位組織を様々な手法で観察した。マンツルの主要構成鉱物であるオリビンと斜方輝石では、流体包有物周辺の転位組織の発達に明瞭な違いが確認できた。これは両鉱物の降伏応力の違いを反映しており、流体包有物の流体圧力の差も説明できそうである。つまり、流体包有物周辺の転位の観察は、鉱物の流動特性を探るプローブとして機能することを確認できた。

研究成果の概要(英文)：Dislocations provide a direct proof of plastic deformation of minerals. We observed dislocation structure around fluid inclusions in olivine and orthopyroxene. For olivine, development of edge dislocations with loop shape whose size is analogous to that of an adjacent fluid inclusion indicate that the dislocations result from excess pressure of the fluid inclusion. The generation of loop dislocations would be controlled by yield strength of slip systems of olivine. For orthopyroxene, a few screw dislocations are identified in c-axis. The difference in dislocation density between both minerals suggests the higher yield strength of orthopyroxene. This is verified by the fact that expansion of a fluid inclusion in olivine estimated by dislocation structure can well explain difference in CO₂ fluid density between the minerals. The observation of dislocation structure around fluid inclusions in xenoliths is useful to assess relative strength of slip systems among minerals.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：転位 塑性変形 流体包有物 マンツル捕獲岩

1. 研究開始当初の背景

(1) 浅部マントル鉱物の歪速度データはなぜ少ないか。

高温高压実験技術は日進月歩の発展を遂げており、マントルの温度圧力環境を実験室で生み出すことにそれほど困難はない。最近では変形 DIA による鉱物変形実験の発展が凄まじく、近い将来、下部マントル環境を想定した鉱物の変形実験が盛んになるように思われる。ただ、高温高压下における鉱物変形実験の最近の成果は深部マントルに偏向している感がある。その一つの理由は浅部マントル起源の天然鉱物の存在ではなからうか。浅部マントル鉱物は採取が容易であるが故に高温高压実験に用いたくなるが、多様な化学組成を持つ天然鉱物の流動則は非常に複雑であるため成果に結びつき難く、カンラン石の流動則ですら議論の渦中にある。しかし、地球の動きをより精確に捉えるためには天然鉱物の流動則解明は不可避の課題である。

(2) 天然マントル鉱物から見つけた点応力源。

著者らが携わってきた「マントルに見られる流体包有物の残留圧力を利用した地質圧力計の開発」の研究過程でカンラン石を空气中で加熱したところ、密集した転位が流体包有物の周辺に現れた。これは流体包有物の過剰圧力によって発生した包有物周辺の結晶格子の歪みを示すものであり、天然マントル鉱物の塑性変形挙動を調べるためのマーカーになる可能性が見えてきた。

流体包有物周辺の差応力分布の計算結果によると、包有物直近の鉱物内にはパイエルス機構の変形領域に達する高い差応力が発生するが、包有物から離れるに連れて転位クリープや拡散クリープ領域に遷移していく。つまり、流体包有物周辺の鉱物内には差応力に応じて様々な変形機構が発現する可能性がある。特に転位クリープが卓越するため、転位と塑性変形に関する基本モデルであるオロワンの式に鑑み、包有物周辺の精密な転位密度測定や残留応力測定、流体密度変化の精密測定を行えば、鉱物変形機構の差応力依存性や塑性変形強度を一挙に究明できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、大型放射光施設も高压発生装置も用いることなく鉱物流動特性を測定する新手法の開発を目指した。鉱物の塑性変形強度は地球内部の対流や進化、地震発生機構などを研究する上で不可欠の要素である。しかし、地球深部鉱物の流動特性研究には大型放射光施設や高压発生装置を用いることが一般的であり、その敷居の高さからか特にマントル浅部に存在する鉱物の歪速度はカンラン石に関するわずか2例の報告に留まっている。本研究ではこの隘路を打ち破るべく鉱物中の流体圧力を差応力源とした鉱物の塑性変形強度測定法開発を目指した。流体を包

有する鉱物が加熱されると流体圧力が上昇し、鉱物内部に急峻な差応力勾配が発生するため、差応力分布に応じた様々な塑性変形機構の発現が予想される。それ故、マグマによって地表まで運び上げられたマントル由来の岩石(マントル捕獲岩)中の流体包有物周辺の転位を詳細に観察すれば、様々なマントル鉱物の流動特性を一挙に究明することが可能となるに違いない。

3. 研究の方法

(1) 塑性変形の可視化。

流体包有物周辺の転位観察と差応力分布を照らし合わせれば転位クリープが明瞭に生じた差応力、つまり降伏応力を決めることができる。ただし、転位を観察するには対象鉱物に応じた様々な工夫が必要になる。金属材料の転位観察においては電子線やエックス線をを用いた手法が普及しているが、比較的透明度が高い珪酸塩鉱物内の転位観察においては光学顕微鏡観察も有効な場合もある。そこで本研究では、転位が観察可能な下記手法を組み合わせ、多種類の鉱物の変形機構や降伏応力を比較することを試みた。

- ・酸化デコレーション法
- ・FE-SEM 観察
- ・TEM 観察

4. 研究成果

(1) 酸化デコレーション法

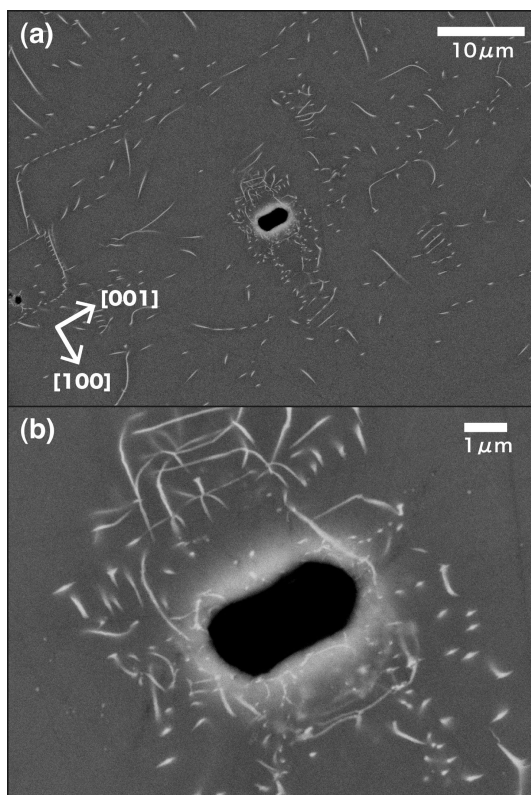
カンラン石を空气中で加熱すると鉱物表面だけでなく、転位や亜粒界も酸化され赤色に染まる。この作業は酸化デコレーション法と呼ばれ(Kohlstedt et al., 1976)、カンラン石の転位観察に有効な手法として用いられている。本研究でも当手法を用いてカンラン石内の転位組織を可視化させた。EBSD (Electron Backscatter Diffraction; 電子線後方散乱回折)法により転位の発達方位を調べたところ、a 軸方位に顕著な発達が確認された。このような転位分布は過去にも報告がある(Wanamaker and Evans, 1989)。無水のカンラン石の塑性変形はa 軸方向に卓越することが知られており(Durham and Goetze, 1977)、観察結果と調和的である。

酸化デコレーション法は最も簡便な転位可視化法の一つであるが、光学顕微鏡を用いた観察では転位組織の精緻な把握は困難である。特に流体包有物直近の転位を詳細に観察するには光学顕微鏡の解像度は不十分であるため、より波長が短い電磁波を用いなければならない。また酸化デコレーション法では輝石やスピネルの転位組織を可視化することはできないため、やはり別の転位可視化法を試す必要がある。

(2) FE-SEM 観察

FE-SEM (Field Emission-Scanning Electron Microscope; 電界放出型電子顕微鏡)は、電界放出された電子線が持つ高い輝度と小さ

いエネルギー幅のため、特に低加速電圧において試料の高分解能観察を可能にする。それゆえ、包有物直近に存在する転位の観察にも威力を発揮する可能性がある。図1はFE-SEMで観察したカンラン石内の流体包有物周辺の転位組織である。酸化デコレーション法で観察されたリング状の転位の断面が良く観察できる。リング状の転位の発達方向は酸化デコレーション観察の場合と同様にa軸方向であった。斜方輝石における流体包有物周辺の転位組織は良く観察できなかった。この原因は技術的な問題に因るものでなく、転位密度が小さいためであった。



(3) TEM 観察

図1. 電界放出型電子顕微鏡によるドイツで採取したマントル捕獲岩に見られるカンラン石の電子顕微鏡像。転位は白い筋として映っている。(b)は(a)の中心付近の拡大像。流体包有物(中心の黒色部)直近の転位組織も観察できている。図1と同様に転位は流体包有物からa軸方向への発達が顕著である。図1で観察されたリング状の転位の断面が2つの点のペアとして見えている。

TEM (Transmission Electron Microscope; 透過型電子顕微鏡)による試料観察では、観察対象に電子を当てて透過電子の干渉像を観察するため、対象試料をできるだけ薄く加工する必要がある。ただし、本研究ではその薄膜の中に流体包有物が含まれねばならないため、加工前に試料のどの部分を切り出すのか精密に決めねばならない。加工方法にはいくつか選択肢があるが、流体包有物周辺の転位組織の発達方向も議論するには試料の加工方向も重要である。このような目的に適し

た加工方法はFIB (Focused Ion Beam; 集束イオンビーム)を用いたイオンスパッタリングであると判断した。これは、ガリウム(Ga)イオンビームを試料に当て、試料表面の原子をはじき飛ばすことにより試料を削る手法である。本研究ではあらかじめ結晶方位をEBSD法によって同定し、流体包有物の中心を通る薄膜を望ましい結晶方位に添って切り出すことで、流体包有物周辺の転位組織の発達状態および方位を分析することにした。最終的に切り出した薄膜の厚さは約150 nmで、最大0.02 × 0.01 mm程度の大きさである。斜方輝石の透過電子顕微鏡観察では、いずれの薄膜でも流体包有物周辺に転位はほとんど見られなかった。同じマントル捕獲岩から取り出したカンラン石に見られるリング状転位の発達と比較すると、斜方輝石の塑性変形強度の方が高いと言える。

このように、鉱物に見られる流体包有物周辺の転位組織は、宿主鉱物の変形特性や降伏応力を明瞭に反映するプローブとして機能することが確認できた。

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9件)

1. Shitaoka Y., Miyoshi M., Yamamoto J., Shibata T., Nagatomo T. and Takemura K. (2013) Thermoluminescence age of quartz xenocrysts in basaltic lava from Oninomi monogenetic volcano, northern Kyushu, Japan. *Geochronometria*, in press, 査読有り

2. Miyoshi M., Shinmura T., Sumino H., Sano T., Miyabuchi Y., Mori Y., Inakura H., Furukawa K., Uno K., Hasenaka T., Nagao K., Arakawa Y. and Yamamoto J. (2013) Lateral magma intrusion from a caldera-forming magma chamber: Constraints from geochronology and geochemistry of volcanic products from lateral cones around the Aso caldera, SW Japan. *Chemical Geology* 352, 202–210, 査読有り

3. Yamamoto J., Nishimura K., Ishibashi H., Kagi H., Arai S. and Prikhod'ko V.S. (2012) Thermal structure beneath Far Eastern Russia inferred from geothermobarometric analyses of mantle xenoliths: direct evidence for high geothermal gradient in backarc lithosphere. *Tectonophysics* 554–557, 74–82, 査読有り

4. 山本順司, 石橋秀巳 (2012) マントルウエッジ炭素の起源を考える。地球化学 46, 243–255, 査読有り

5. Kobayashi T., Yamamoto J., Hirajima T., Ishibashi H., Hirano N., Lai Y., Prikhod'ko V.S. and Arai S. (2012) Accuracy and precision of CO₂ densimetry in CO₂ inclusions: microthermometry vs. micro-Raman densimetry. *Journal of Raman Spectroscopy* 43, 1126-1133, 査読有り

6. 山本順司, 徳永彩未, 下岡順直 (2012) 環境教育における地球深部炭素の教材性に関する研究. *環境教育* 21, 64-73, 査読有り

7. Toyama C., Muramatsu Y., Yamamoto J., Nakai S. and Kaneoka I. (2012) Sr and Nd isotope ratios and trace element concentrations in kimberlites from Shandong and Liaoning (China) and the Kimberley area (South Africa). *Geochem. J.* 46, 45-59, 査読有り

8. Ishibashi H., Arakawa M., Yamamoto J. and Kagi H. (2012) Precise determination of Mg/Fe ratios applicable to terrestrial olivine samples using Raman Spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy* 43, 331-337, 査読有り

9. Yamamoto J., Otsuka K., Ohjuji K., Ishibashi H., Hirano N. and Kagi H. (2011) Retentivity of CO₂ in fluid inclusions in mantle minerals. *European Journal of Mineralogy* 23, 805-815, 査読有り

〔学会発表〕(計10件)

1. 山本順司, 海の捕獲岩から探る海洋リソスフェア. 金沢オフィオライトシンポジウム, 2013年12月19日, 石川県金沢市(石川県四高記念文化交流館)

2. 山本順司, 大藤弘明, 石橋秀巳, 吉岡貴浩, 西原遊, 大内智博, 流体包有物を使った鉱物の変形強度解析. 本鉱物科学会年会, 2013年9月12日, 茨城県つくば市(筑波大学)

3. Yamamoto J., Hirano N., Kurz M.D., Noble gas isotopic compositions of newly discovered petit spot basalts. *DINGUE*, 2013年8月24日, University of Florence, Florence, Italy

4. 湯浅万紀子, 山本順司, 大学博物館と学校との連携 北海道大学総合博物館の現状と課題、そして可能性. 理科教育学会シンポジウム「理科教育から見た博物館利用の問題点を考える」, 2013年8月11日, 北海道札幌市(北海道大学総合博物館)

5. 山本順司, 平野直人, Curtice J., Kurz

M.D., チリ沖プチスポットの希ガス同位体組成. 質量分析学会同位体比部会, 2012年11月22日, 宮城県仙台市(秋保温泉 伝承千年の宿 佐勘)

6. 山本順司, プチスポット捕獲岩から探る海洋リソスフェアと海洋アセノスフェア. マントル掘削勉強会, 2012年11月19日, 東京都港区(JAMSTEC 東京事務所)

7. 山本順司, 背弧リソスフェアから推察する海洋リソスフェアの行く末. 研究集会「地球の選択」, 2012年11月17日, 兵庫県神戸市(神戸大学)

8. Yamamoto J., Kurz M.D., Ishibashi H. and Curtice J., Noble gas isotopic constraint on depth of layered mantle boundary. 質量分析学会同位体比部会, 2011年11月24日, 釜山, 大韓民国

9. 山本順司, Mark D. Kurz, 荒井章司, Vladimir S. Prikhod'ko, Big Mantle Wedge を通るスラブ由来流体の化学的探索. 日本鉱物科学会年会, 2011年9月10日, 茨城県水戸市

10. Yamamoto J., Kurz M.D., Ishibashi H. and Curtice J., Noble gas isotopic compositions of mantle xenoliths in a kimberlite. Goldschmidt conference, 2011年8月17日, Prague, Czech

〔図書〕(計0件)
なし.

〔産業財産権〕
なし.

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.museum.hokudai.ac.jp/jyama/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 順司 (YAMAMOTO Junji)

北海道大学・総合博物館・准教授

研究者番号: 60378536

(2) 研究分担者

鍵 裕之 (KAGI Hiroyuki)

東京大学・理学系研究科・教授

研究者番号: 70233666

大藤 弘明 (OHFUJI Hiroaki)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・准教授

研究者番号: 80403864

石橋 秀巳 (ISHIBASHI Hidemi)
静岡大学・理学部・講師
研究者番号：70456854