

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25800295

研究課題名(和文) X線位相イメージング法を用いた岩石中の部分溶融メルトの高温下その場観察

研究課題名(英文) Observing partial melting of rocks by x-ray phase-contrast imaging

研究代表者

佐藤 友子 (SATO, TOMOKO)

広島大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80553106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、X線位相イメージング法により、岩石の部分融解現象のその場三次元・時間分解観察を可能にすることにある。X線位相イメージング法は、通常のX線吸収イメージングでは判別し難い、母岩と部分溶融したメルトを観察できる可能性のある手法である。天然岩石試料のX線CT測定の結果得られた吸収像・位相シフト像・ビジビリティ像のうち、ビジビリティ像がもっとも良く鉱物間の粒界を描画しており、部分溶融現象のその場観察に有用である可能性が示唆された。

研究成果の概要(英文)：This study aims to observe partial melting of rocks by x-ray phase-contrast computed tomography (CT) imaging. It is difficult to distinguish host minerals and partial melts by the x-ray absorption imaging, which is a non-destructive imaging method commonly used in various fields of research, industry, and medicine, because of the small difference in the absorption coefficient. X-ray phase-contrast imaging can distinguish them because the difference in the phase shift is larger. We have conducted x-ray CT imaging experiments of natural rock samples and obtained images of absorption, phase shift, and visibility contrasts. Grain boundaries of crystals are well observed in visibility images. It is suggested that using visibility images for in-situ observation of partial melting of rocks may be useful.

研究分野：高圧鉱物物理学

キーワード：X線位相イメージング

1. 研究開始当初の背景

ケイ酸塩メルト (マグマ) の存在は、地球内部のダイナミックな挙動を理解する上で極めて重要である。岩石中に存在する部分熔融メルトは、岩石の弾性的性質だけでなく、塑性的性質や電氣的性質なども変化させる。それらの性質について考える上で、メルトの存在は少量であっても無視できず、量だけでなく存在形態も重要である。特に、メルトと結晶が共存する際の二面角は、存在形態との関連が深い。従来の測定は、回収試料を切断・研磨して光学顕微鏡・電子顕微鏡で観察する二次元的なものが主であるため、三次元の情報は断片的にししか得られない。また、高温・高圧・高差応力条件などから回収した試料を対象としているため、温度降下時の履歴・元素の移動による結晶およびメルトの組成の変化・高温鉱物の相転移などの影響が避けられないといった問題がある。これらの問題は、その場三次元観察で解決される。一般的に有用なのが X 線吸収トモグラフィーであり、金属素材・岩石等の非破壊観察に用いられる。しかし、吸収コントラストのつきにくい鉱物の区別・あるいは鉱物と部分熔融メルトの区別は困難である。

2. 研究の目的

吸収および位相シフトの相互作用断面積は、X 線の物質に対する屈折率を  $n=1-\delta+i\beta$  と書いた場合のそれぞれ  $\beta$  と  $\delta$  によって決まる。硬 X 線領域での主要なケイ酸塩鉱物の  $\delta$  は  $\beta$  に比べ約三桁大きい (Table 1), 位相シフトをコントラスト形成に利用する X 線位相トモグラフィーを岩石に適用すれば、吸収コントラストのつきにくい鉱物の区別も可能になると考えられる。本研究では、X 線位相トモグラフィーによる岩石観察、特に吸収コントラストのつきにくい鉱物およびメルトの三次元非破壊観察の可能性について検討することを目的とした。

Table 1. Typical density,  $\delta$ , and  $\beta$  of rock constituting minerals (at 28.8 keV)

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\delta$ (x10 <sup>-6</sup> )	$\beta$ (x10 <sup>-9</sup> )
花崗岩 granite			
andesine (plagioclase:Al <sub>55</sub> An <sub>45</sub> )	2.658	0.657	0.480
quartz	2.650	0.663	0.372
oligoclase (plagioclase:Al <sub>67</sub> An <sub>33</sub> )	2.617	0.646	0.373
orthoclase	2.530	0.628	0.565
橄欖岩 peridotite			
augite (clinopyroxene)	3.390	0.845	0.965
olivine (Mg <sub>0.88</sub> Fe <sub>0.12</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3.365	0.834	0.789
olivine (Mg <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.08</sub> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	3.332	0.827	0.674
enstatite (orthopyroxene)	3.247	0.808	0.610

$$\delta = \frac{\lambda^2 r_e N_A}{2\pi} \frac{\rho}{M_j} \sum (Z_j + f'_j)$$

$$\beta = \frac{\lambda^2 r_e N_A}{2\pi} \frac{\rho}{M_j} \sum f''_j$$

3. 研究の方法

試料には、 $\phi 1.5\text{mm}$  に加工した花崗岩とカンラン岩を用いた。岩石のトモグラフィー測定は、PF の BL-14 のビームをアテニューエータにより約 30keV を中心とするエネルギースペクトルを持つ白色光とし、X 線 Talbot 干渉計 (Fig. 1) を用いて実施した。空間分解能の点で有利な縞走査法を用いて、位相像・吸収像・ビジビリティ像を得た [1,2]。

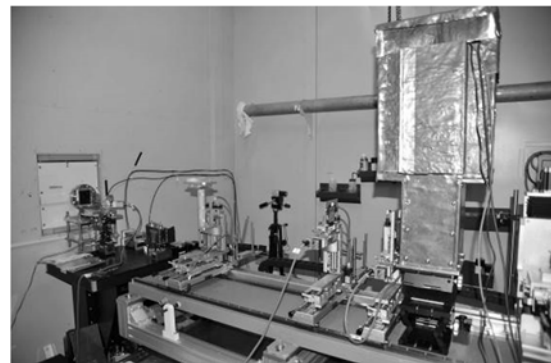


Fig.1 X-ray Talbot Interferometer

4. 研究成果

Fig. 2 に花崗岩の撮像結果を示す。吸収像と位相像にはコントラストの逆転している部位が見られた。カリ長石が吸収係数の大きいカリウムを含む比較的密度の低い鉱物であるため、周囲の鉱物と比べた際に、 $\beta$  と  $\delta$  が逆転していることを反映しているものと考えられる。カンラン岩については、主要構成鉱物であるカンラン石・斜方輝石・単斜輝石の  $\beta$  と  $\delta$  のコントラストが小さく、現在のところ、鉱物

の同定には至っていない。エッジにおける位相像のボケおよびビジビリティ像の強いコントラストは、解像できないスケールの位相の大きな段差が存在することによって生じている[3]。また、二つの試料ともに、ビジビリティ像にも明瞭なシグナルが見られ、粒界の構造を反映している。ビジビリティ像のシグナルは、極小角散乱に由来し、粒界に存在する部分溶融メルトの観察は十分可能であると期待される。

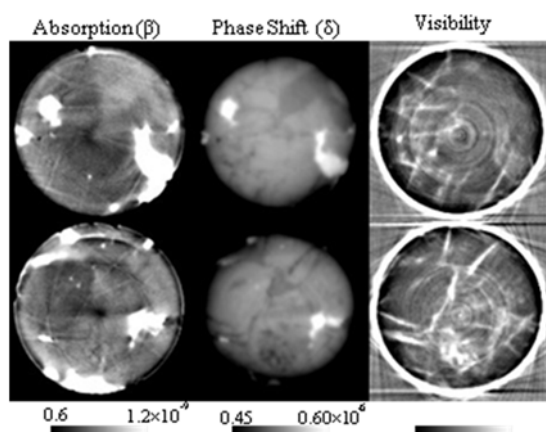


Fig. 2. X-ray tomography images of granite obtained with a Talbot interferometer. Two sets of slices are shown.

<引用文献>

[1] Momose et al., *Opt. Express* **19**, 8423 (2011).  
 [2] Kibayashi et al., *AIP Conf. Proc.* **1466**, 261 (2012).  
 [3] Yashiro and Momose, *Opt Express* **23**, 9233 (2015).

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 11 件)

[1] Y. Zhang, T. Sekine, J.-F. Lin, H. He, F. Liu, M. Zhang, T. Sato, W. Zhu, and Y. Yu, *Shock Compression and Melting of an Fe-Ni-Si Alloy: Implications for the Temperature Profile of the Earth's Core and the Heat Flux Across the Core-Mantle Boundary*. *Journal of Geophysical*

*Research: Solid Earth* **123**, 1314-1327, 2018. (査読有)

[2] 佐藤友子, 船守展正, *放射光による SiO<sub>2</sub> ガラスの構造と物性の高圧下その場観察*, *セラミックス* **52**, 352-356, 2017. (査読無)

[3] B. Albertazzi, N. Ozaki, V. Zhakhovsky, A. Faenov, H. Habara, M. Harmand, N.J. Hartley, D.K. Ilnitsky, N. Inogamov, Y. Inubushi, T. Ishikawa, T. Katayama, T. Koyama, M. Koenig, A. Krygier, T. Matsuoka, S. Matsuyama, E.E. McBride, K. Migdal, G. Morard, H. Ohashi, T. Okuchi, T. Pikuz, N. Purevjav, O. Sakata, Y. Sano, T. Sato, T. Sekine, Y. Seto, K. Takahashi, K. A. Tanaka, Y. Tange, T. Togashi, K. Tono, Y. Umeda, T. Vinci, M. Yabashi, T. Yabuuchi, K. Yamauchi, H. Yumoto and R. Kodama, *Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress*, *Sci. Adv.* **3**, e1602705, 2017. (査読有)

[4] N. J. Hartley, N. Ozaki, T. Matsuoka, B. Albertazzi, A. Faenov, Y. Fujimoto, H. Habara, M. Harmand, Y. Inubushi, T. Katayama, M. Koenig, A. Krygier, P. Mabey, Y. Matsumura, S. Matsuyama, E. E. McBride, K. Miyanishi, G. Morard, T. Okuchi, T. Pikuz, O. Sakata, Y. Sano, T. Sato, T. Sekine, Y. Seto, K. Takahashi, K. A. Tanaka, Y. Tange, T. Togashi, Y. Umeda, T. Vinci, M. Yabashi, T. Yabuuchi, K. Yamauchi, and R. Kodama, *Ultrafast observation of lattice dynamics in laser-irradiated gold foils*, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 071905, 2017. (査読有)

[5] T. A. Pikuz, A. Ya. Faenov, N. Ozaki, N. J. Hartley, B. Albertazzi, T. Matsuoka, K. Takahashi, H. Habara, Y. Tange, S. Matsuyama, K. Yamauchi, R. Ochante, K. Sueda, O. Sakata, T. Sekine, T. Sato, Y.

- Umeda, Y. Inubushi, T. Yabuuchi, T. Togashi, T. Katayama, M. Yabashi, M. Harmand, G. Morard, M. Koenig, V. Zhakhovsky, N. Inogamov, A. S. Safronova, A. Stafford, I. Yu. Skobelev, S. A. Pikuz, T. Okuchi, Y. Seto, K. A. Tanaka, T. Ishikawa, and R. Kodama, Indirect Monitoring Shot-to-shot Shock Waves Strength Reproducibility during Pump-probe Experiments, *J. Appl. Phys.* **120**, 035901, 2016. (査読有)
- [6] Y. Yoshimura, M. Shigemi, M. Takaku, M. Yamamura, T. Takekiyo, H. Abe, N. Hamaya, D. Wakabayashi, K. Nishida, N. Funamori, T. Sato, and T. Kikegawa, Stability of the liquid state of imidazolium-based ionic liquids under high pressure at room temperature, *J. Phys. Chem. B*, **119**, 8146-8153, 2015. (査読有)
- [7] N. Funamori, K. M. Kojima, D. Wakabayashi, T. Sato, T. Taniguchi, N. Nishiyama, T. Irifune, D. Tomono, T. Matsuzaki, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, and R. Kadono, Muonium in stishovite: Implications for the possible existence of neutral atomic hydrogen in the Earth's deep mantle, *Scientific Reports* **5**, 8437, 2015. (査読有)
- [8] D. Wakabayashi, N. Funamori, and T. Sato, Enhanced plasticity of silica glass at high pressure, *Physical Review B* **91**, 014106, 2015. (査読有)
- [9] D. Wakabayashi, N. Funamori, T. Sato, and T. Sekine, Equation of state for silicate melts: A comparison between static and shock compression, *Journal of Geophysical Research* **41**, 1-5, 2014. (査読有)
- [10] M. Matsui, T. Sato, and N. Funamori, Crystal structures and stabilities of cristobalite-helium phases at high pressures, *American Mineralogist* **99**, 184-189, 2014. (査読有)
- [11] T. Sato, N. Funamori, and T. Yagi, Differential strain and residual anisotropy in silica glass, *Journal of Applied Physics* **114**, 103509, 2013. (査読有)
- [学会発表] (計 17 件)
- [1] 佐藤友子, 丹下慶範, 瀬戸雄介, 関根利守, 尾崎典雅, 西川豊人, 松岡健之, 兒玉了祐, 衝撃圧縮下その場 X 線回折による石英の一軸圧縮下相転移の探索, 第 58 回高圧討論会, つくば, 2017.
- [2] 佐藤友子, 若林大佑, 船守展正, PF における開発的な研究とその将来: SiO<sub>2</sub> ガラスの高圧実験を例として, 第 57 回高圧討論会, つくば, 2016.
- [3] T. Sato, T. Sekine, Y. Tange, N. Ozaki, T. Matsuoka, H. Habara, T. Kenjiro, B. Albertazzi, T. Yabuuchi, K. Tanaka, T. Ogawa, R. Kodama, T. Okuchi, Y. Seto, S. Matsuyama, K. Yamauchi, Y. Imubushi, T. Togashi, M. Yabashi, In situ XRD observation of anomalous elastic response of quartz by XFEL, The 31st International Congress on High-speed Imaging and Photonics, Osaka, 2016.
- [4] T. SATO, T. SEKINE, Y. TANGE, N. OZAKI, T. MATSUOKA, H. HABARA, T. YABUUCHI, K. TANAKA, T. OGAWA, R. KODAMA, T. OKUCHI, Y. SETO, Y. INUBUSHI, T. TOGASHI, and M. YABASHI, X-ray diffraction observation of shock-compressed quartz, International Workshop on Warm Dense Matter, Kurashiki, 2015.
- [5] 佐藤友子, 関根利守, 丹下慶範, 尾崎典雅, 羽原英明, 高橋健次郎, ALBERTAZZI, 籾内俊毅, 田中和夫, 小川剛史, 兒玉了祐, 松山智至, 山内和人, 犬伏雄一, 富樫格, 矢橋

- 牧名, XFEL を用いた石英の異常弾性挙動のその場 X 線回折観察, 第 56 回高圧討論会, 広島, 2015.
- [6] 佐藤友子, 若林大佑, 重岡優希, 西田圭佑, 亀卦川卓美, 船守展正, PF BL-18C における高圧下その場小角 X 線散乱測定, 第 56 回高圧討論会, 広島, 2015
- [7] 佐藤友子, 若林大佑, 西田圭佑, 亀卦川卓美, 船守展正, BL-18C における高圧下その場 X 線小角散乱測定, 第 3 回物構研サイエンスフェスタ, つくば, 2015.
- [8] 佐藤友子, 関根利守, 丹下慶範, 尾崎典雅, 松岡健之, 近藤良彦, 羽原英明, 藪内俊毅, 田中和夫, 佐藤友哉, 池谷正太郎, 喜田美佳, 小川剛史, 兒玉了祐, 奥地拓生, 瀬戸雄介, 犬伏雄一, 富樫格, 矢橋牧名, XFEL を用いた石英の高歪速度圧縮下その場回折測定, 第 55 回高圧討論会, 徳島, 2014.
- [9] 佐藤友子, 若林大佑, 西田圭佑, 横井雄行, 亀卦川卓美, 船守展正, 高圧下その場 X 線小角散乱による相転移中間状態の観察, 第 55 回高圧討論会, 徳島, 2014.
- [10] T. Sato, Various interesting high-pressure behaviour of SiO<sub>2</sub> glass related to the intermediate-range structure, 7th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems, Barcelona, 2013.
- [11] 佐藤友子, 矢代航, Margie P. Olbinado, Patrik Vagovic, 名越健誠, 百生敦, 兵藤一行, 船守展正, 岩石の X 線位相イメージング, 第 54 回高圧討論会, 新潟市, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 友子 (Tomoko Sato)  
広島大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：80553106

### (2) 研究協力者

矢代 航 (Wataru Yashiro)  
東北大学・多元物質科学研究所・准教授  
研究者番号：10401233