

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：16301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2022

課題番号：19KK0093

研究課題名（和文）高圧X線トモグラフィーを活用した高圧下のマグマ研究の推進

研究課題名（英文）Studies of magmas under pressure by using high-pressure X-ray tomography

研究代表者

河野 義生（Kono, Yoshio）

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：20452683

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、アメリカの放射光X線施設Advanced Photon Sourceにおける3次元X線トモグラフィー測定、ガラスの動径分布関数測定と、日本のSPring-8における高圧下弾性波速度測定を用いた国際共同研究を行った。X線トモグラフィー測定により測定したかんらん岩中におけるメルトの形状・分布と、弾性波速度測定結果を組み合わせることにより、メルトが岩石の弾性波速度に与える影響を決定することに成功した。この成果は、地球内部もしくはその他星内部の地震波速度観測から、マグマの存在・分布を理解する上で重要な知識となると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部の高圧下におけるマグマの物理的性質と、さらにマグマがどのように岩石中に存在するかを理解することは、地球内部におけるマグマの状態・挙動を理解するという学術的意義だけでなく、マグマの上昇により引き起こされる火山噴火現象などの社会的課題の物質科学的理解のためにも重要である。本研究では、アメリカの放射光X線施設Advanced Photon Sourceの研究者と国際共同研究を推進することにより、(1)岩石中のメルトの形状・分布とそれが地震波速度へ与える影響の研究と、(2)高圧下におけるマグマの圧縮挙動についての研究、を行った。

研究成果の概要（英文）：We conducted international collaboration researches by using three-dimensional X-ray microtomography measurements of melt-bearing rock samples and pair distribution function measurements of glasses at the Advanced Photon Source in USA, and by using high-pressure elastic wave velocity measurement at the SPring-8 in Japan. X-ray microtomography measurement enabled us to understand geometry of melt in rock sample. By combining elastic wave velocity measurement with melt geometry analysis using X-ray microtomography measurement, we succeeded in discussing the effect of melt on elastic wave velocity. The results provide important knowledge to discuss existence of magmas in the Earth and planetary interiors from seismological observations.

研究分野：地球内部科学

キーワード：マグマ X線トモグラフィー 高圧 弾性波速度 メルト構造

1. 研究開始当初の背景

地球内部において発生するマグマの分布とその移動の理解や、マグマの上昇により引き起こされる火山噴火の理解など、地球内部における様々なマグマプロセスを理解する上で、高圧下におけるメルトの物性(特に粘性率、密度、弾性率)と、メルトが岩石中にどのような形状・分布で存在するかを理解することは重要な課題である。メルトの物性については、特に粘性率は高圧下における測定が近年進んでおり、ケイ酸塩組成マグマの高圧下における粘性率の理解が進んできていた。一方、メルトの密度・弾性率については、浮沈法、X線吸収法、X線トモグラフィー法、超音波法などにより、高圧下での実験が行われてはいるものの、未だデータが限られているのが現状であった。さらに、岩石中のメルトの形状・分布については、これまで高圧実験後回収試料の電子顕微鏡観察を基にした二面角測定により、岩石中のメルトの連結度についての議論はなされてきたが、それらの多くは二面角 60°を境にメルトが連結するか、連結しないかの議論にとどまっていた。一方、最近の一気圧下での放射光 X 線トモグラフィー測定では、かんらん岩中のメルトの 3 次元的な分布構造の解析が可能になっており、岩石中のメルトの浸透率などの詳細な議論がなされ始めていた。

2. 研究の目的

本国際共同研究では、3次元 X 線トモグラフィー測定と、さらに種々の高圧放射光 X 線実験を備えるアメリカの放射光 X 線施設 Advanced Photon Source(APS)において、Yanbin Wang 博士と国際共同研究を推進した。研究代表者の持つ先端高圧実験技術(パリ-エジンバラ型セルによるメルト・ガラスの高圧高温実験、高圧高温下弾性波速度測定)と、海外共同研究者の Yanbin Wang 博士が持つ 3次元 X 線トモグラフィー測定やその他放射光 X 線実験技術を有機的に組み合わせることにより、地球内部のマグマの状態・挙動の理解に必要な、(1)岩石中のメルトの形状・分布とそれが弾性波速度に与える影響の理解、(2)高圧下におけるマグマの密度変化と弾性率変化の理解、を目的とした国際共同共同研究を行った。

3. 研究の方法

本研究では、3次元 X 線トモグラフィー測定、高圧下弾性波速度測定、ガラスの X 線動径分布関数測定を用いることにより、(1)岩石中のメルトの形状・分布とそれが弾性波速度に与える影響、(2)高圧下におけるマグマの密度変化と弾性率変化、の研究を行った。

3次元 X 線トモグラフィー測定は、アメリカの放射光 X 線施設 APS の 13BMD ビームラインで行った(Rives and Wang, 2006)。ピンクビームを用いて X 線トモグラフィー測定を行った。ピンクビームは白色 X 線から白金加工のミラー(角度 2.5 mrad)と厚さ 4 mm のアルミニウムフィルターにより作成されている。X 線トモグラフィー測定では、0.05°おきに合計 3600 枚の画像を露光時間 0.08 秒で測定した。画像サイズは、1920×1200 ピクセルであり、ピクセルサイズは 1.09 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。3次元トモグラフィーデータの再構成は、13BMD ビームラインの標準プログラムを使用した。

高圧下弾性波速度測定は、日本の放射光 X 線施設 SPring-8 の BL04B1 ビームラインで行った(Kono et al., 2021)。高圧下弾性波速度測定は超音波法により行い、高圧下における試料長は X 線イメージングにより測定した。また、X 線回折測定により、岩石中における溶融開始のその場観察と実験圧力の決定を行った。

ガラスの X 線動径分布関数測定は、アメリカ APS の 16BMB ビームラインと、日本の SPring-8 の BL05XU、BL37XU ビームラインで行った。アメリカ APS の 16BMB ビームラインでは、白色 X 線を用いたマルチアングルエネルギー分散型 X 線回折測定を行った(Kono et al., 2014)。SPring-8 の BL05XU、BL37XU ビームラインでは、単色 X 線を用いた角度分散 X 線回折測定を行った(Kono et al., 2022)。

4. 研究成果

(1)高圧下における岩石中のメルトの 3 次元分布構造と弾性波速度変化の関係の理解を目的とし、日本の放射光 X 線施設 SPring-8 の BL04B1 ビームラインにおけるメルトを含むかんらん岩の高圧下弾性波速度測定と、アメリカの放射光 X 線施設 APS の 13BMD ビームラインにおける X 線トモグラフィー測定を行った。本研究期間では、新型コロナウイルスの影響により、直接渡米しての実験は困難であったが、海外共同研究者の Yanbin Wang 博士と Mark Rivers 博士と連携した国際共同研究を推進することにより、2020 年 9 月と 2021 年 2 月の 2 回の期間に Fe-S メルトを含むかんらん岩試料の X 線トモグラフィー測定を行い、かんらん中における Fe-S メルトの形状・分布の研究を推進した。

この研究においては、まず高圧高温下においてメルトを含むかんらん岩の弾性波速度測定を行うために、SPring-8 の BL04B1 ビームラインにおいて、高圧下における超音波測定、X 線イメージング測定、X 線回折測定の複合測定を連続かつ自動で行うシステムの開発を行った。複合測定に用いる超音波測定用オシロスコープ、パルス発生器、X 線イメージング測定用カメラ、X 線

回折測定用ゲルマニウム検出器と、さらに X 線サイズ調整用フリッパースリットを自動で制御するプログラムの開発により、連続自動測定を行うことに成功した(Kono et al., 2021)。この独自に開発した連続自動測定システムを用いることにより、加熱下において溶融した Fe-S メルトを含むかんらん岩の弾性波速度測定を連続的かつ自動で行うことが可能になった。

この開発したシステムを用い、Fe-S を 2.6 vol.%、4.6 vol.% 含む 2 種類のかんらん岩試料(それぞれ、Ol+2.6Fe-S、Ol+4.6Fe-S 試料とする)についての連続自動弾性波速度測定を行った。圧力約 8 GPa 条件下において、温度約 800-1600 K 範囲での弾性波速度測定を行った。図 1a, 1b にこれら 2 試料の P 波(V_p)、S 波(V_s)速度結果を示す。約 1200 K 以下の温度では、Ol+2.6Fe-S、Ol+4.6Fe-S 両試料の V_p 、 V_s は温度上昇と共に単調な低下を示す。一方、Ol+4.6Fe-S 試料では、温度 1255-1330 K において、約 4% の急激な V_s 低下が得られた(図 1b)。この温度条件下において、かんらん岩試料中の Fe-S の結晶ピークが消失していることがその場 X 線回折測定から分かっており、そのため温度 1255-1330 K における急激な V_s 低下は Fe-S の溶融によるものと考えられ、それ以上の高温下では Fe-S メルトを含むかんらん岩の V_p 、 V_s 結果を示していると考えられる。

かんらん岩中の Fe-S メルトが V_p 、 V_s に与える影響を決定するため、別の実験において Fe-S メルトを含まないかんらん岩の弾性波速度測定も行った。そして、同圧力温度条件下における Fe-S メルトを含まないかんらん岩と Fe-S メルトを含むかんらん岩の V_p 、 V_s の比較により、Fe-S メルトがかんらん岩の V_p 、 V_s に与える影響を決定した。図 1c に、Fe-S メルトがかんらん岩の V_p 、 V_s に与える影響(V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0})を示す。 V_{p0} 、 V_{s0} はそれぞれ Fe-S メルトを含まないかんらん岩の V_p 、 V_s を示す。Ol+2.6Fe-S、Ol+4.6Fe-S 両試料の V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0} は、最高温度までほぼ一定であり、加熱中にメルトの形状・分布の変化などが無いことを示している。Fe-S メルトがかんらん岩の V_p 、 V_s に与える影響として、2.6 vol.% の Fe-S メルトを含む Ol+2.6Fe-S 試料については $V_p/V_{p0}=0.956\pm 0.003$ 、 $V_s/V_{s0}=0.949\pm 0.004$ 、4.6 vol.% の Fe-S メルトを含む Ol+4.6Fe-S 試料については $V_p/V_{p0}=0.866\pm 0.005$ 、 $V_s/V_{s0}=0.776\pm 0.006$ を得た。

メルトを含む岩石の弾性波速度は、岩石中におけるメルトの形状に強く影響を受けることが理論研究により知られている(例えば、O'Connell and Budiansky, 1974; Takei, 2002)。これまでの研究によると、かんらん岩中の Fe-S メルトは 80°以上の大きい二面角を持つことが報告されている。実際、本研究の実験後試料の電子顕微鏡観察による二面角測定の結果、Ol+2.6Fe-S 試料では二面角 $97.1^\circ\pm 3.0^\circ$ 、Ol+4.6Fe-S 試料では二面角 $92.9^\circ\pm 3.2^\circ$ と、過去の研究同様の大きい二面角値が得られた。理論研究によると、このような大きい二面角を持つメルトでは、 V_p 、 V_s に与える影響は非常に小さいと考えられている。例えば、二面角 80°の Fe-S メルトが V_p 、 V_s に与える影響を equilibrium geometry モデル(Takei, 2002)により計算した結果、5 vol.% の Fe-S メルトはわずか 4.8% (V_p)、6.9% (V_s)の V_p 、 V_s 低下を起こす計算結果が得られた。一方、実際の Ol+4.6Fe-S の実験では、13% (V_p)、22% (V_s)もの遥かに大きい V_p 、 V_s 低下が得られており、二面角から予想される弾性波速度低下の理論計算結果は、実験結果と一致

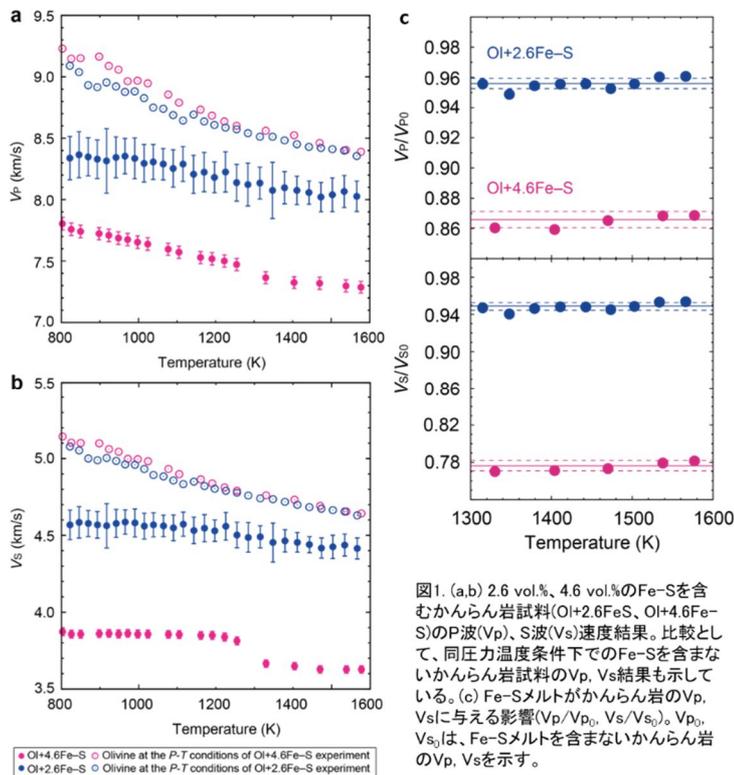


図1. (a,b) 2.6 vol.%、4.6 vol.%のFe-Sを含むかんらん岩試料(Ol+2.6Fe-S、Ol+4.6Fe-S)のP波(V_p)、S波(V_s)速度結果。比較として、同圧力温度条件下でのFe-Sを含まないかんらん岩試料の V_p 、 V_s 結果も示している。(c) Fe-Sメルトがかんらん岩の V_p 、 V_s に与える影響(V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0})。 V_{p0} 、 V_{s0} は、Fe-Sメルトを含まないかんらん岩の V_p 、 V_s を示す。

図2. 4.6 vol.%のFe-Sを含むかんらん岩試料(Ol+4.6Fe-S試料)の3次元X線トモグラフィー結果。(a)3次元X線トモグラフィー像の断面図。(b)Fe-Sメルトのアスペクト比のメルト体積依存性。(c)Fe-Sメルトのアスペクト比の体積比率分布。

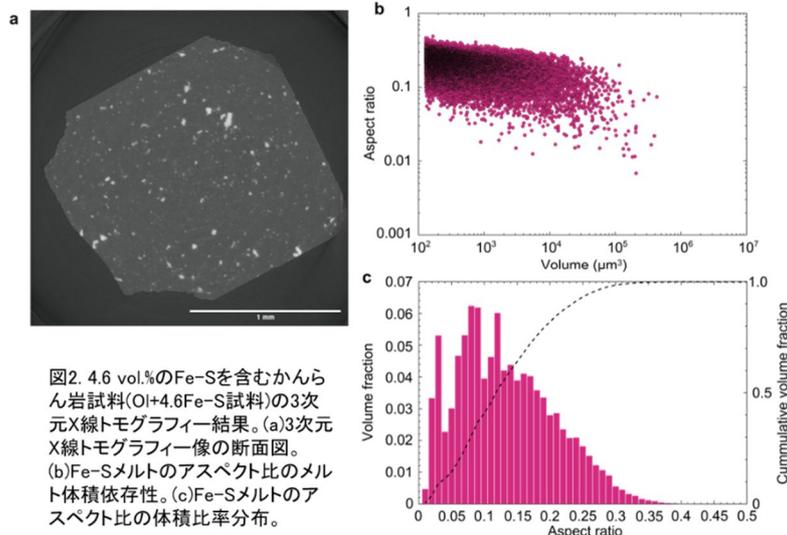


図2. 4.6 vol.%のFe-Sを含むかんらん岩試料(Ol+4.6Fe-S試料)の3次元X線トモグラフィー結果。(a)3次元X線トモグラフィー像の断面図。(b)Fe-Sメルトのアスペクト比のメルト体積依存性。(c)Fe-Sメルトのアスペクト比の体積比率分布。

しないことが明らかとなった。

二面角から推測される弾性波速度低下と実際の実験で得られた弾性波速度低下量の不一致の原因を理解するため、3次元X線トモグラフィー測定によるFe-Sメルトの形状解析を行った。その結果、かんらん岩中のFe-Sメルトの形状はそのサイズに大きく依存して変化していることが明らかとなった。Ol+4.6Fe-S試料の3次元トモグラフィー断面を見ると、小さいサイズのFe-Sメルトは球状をしているのに対し、大きいサイズのFe-Sメルトは伸長した形状をしている(図2a)。Fe-Sメルトの形状が回転楕円体であると仮定してアスペクト比を計算すると、Fe-Sメルトのサイズ増加とともにアスペクト比は低下することが明らかとなった(図2b)。小さいサイズのFe-Sメルトのアスペクト比は約0.1-0.4であり、これは二面角80°の形状として期待されるアスペクト比=約0.3と調和的である。そのため、電子顕微鏡観察を基にした一般的な二面角測定は、数の多い小さいサイズのメルトの分布を統計的にオーバーサンプリングしていることが考えられる。一方、大きいサイズのメルトの多くは0.1以下の小さいアスペクト比を持つ形状であり、非常に小さいアスペクト比0.01-0.03もかなりの量存在していることが明らかとなった(図2c)。体積的に中央値となるアスペクト比を決定した結果、それぞれ0.11(Ol+2.6Fe-S試料)、0.12(Ol+4.6Fe-S試料)の値が得られた。O'Connell and Budiansky (1974)のクラックモデルを用い、メルトのアスペクト比が V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0} に与える影響を計算した結果、アスペクト比=0.1から計算された V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0} 値は、Ol+2.6Fe-S実験の結果と調和的であることが分かった。一方、Ol+4.6Fe-S実験の結果は、アスペクト比0.03-0.05の V_p/V_{p0} 、 V_s/V_{s0} 値と調和的であった。Ol+4.6Fe-S試料のアスペクト比の中央値は0.12であるが、かなりの量存在する非常に小さいアスペクト比=0.01-0.02のFe-Sメルトが支配的な影響を与えている可能性が考えられる。

本研究において、3次元トモグラフィー測定を用いた岩石中のメルトの形状解析と高圧下弾性波速度測定を組み合わせた研究により、Fe-Sメルトはかんらん岩の V_p 、 V_s に強い影響を与えることが明らかになった。特に、これまで一般的にメルトの形状解析に用いられてきた電子顕微鏡観察からの二面角測定は、量の多い小さいサイズのメルトの形状をオーバーサンプルする可能性があり、岩石中のメルトの形状の正確な理解には3次元X線トモグラフィーによるメルトサイズを考慮した解析の重要性を示した。本研究で実験を行ったFe-Sメルトは、月のマントル最下部における地震波速度低速度異常の要因の一つと考えられており、本研究の結果を基にすると、4.3-5.0 vol.%のFe-Sメルトの存在により、月のマントル最下部における地震波速度低速度異常を説明可能であることが明らかとなった。この研究成果は、現在Earth and Planetary Science Letters誌に投稿中である。

(2)高圧下におけるマグマの密度変化と弾性率変化の理解を目指し、ケイ酸塩マグマのアナログ物質であるケイ酸塩ガラスの圧縮挙動の理解のために高圧下弾性波速度測定による研究を行った。これまでの研究において、SiO₂量が多いケイ酸塩ガラスでは、高圧下で異常な弾性率低下(=急激な圧縮、密度増加)が起こることが知られている。本研究では、この高圧下における異常な弾性率極小挙動が、Al₂O₃量変化によりどのように変化するかに焦点を当てて研究を行った。図3a、3bに、異なるAl₂O₃量比を持つSiO₂-Al₂O₃組成ガラスの高圧下弾性波速度測定結果を示す。SiO₂ガラスでは圧力上昇とともに弾性波速度は急激に低下し、圧力約3GPaにおいて最小値を持つことが知られている(Yokoyama et al., 2010)。一方、Al₂O₃量比の増加とともに、高圧下における弾性波速度の減少率は低下し、さらに弾性波速度極小圧力はより高い圧力側に变化することが明らかとなった。

これら高圧下弾性波速度データを基に、以下の式を用いて高圧下における密度変化を計算した。

$$\rho - \rho_0 = \int_{P_0}^P \gamma \frac{1}{Vp^2 - 4Vs^2/3} dP$$

ρ 、 ρ_0 はそれぞれ高圧下P、一気圧下P₀における密度と、 γ は等温体積弾性率と断熱体積弾性率の変換係数を示し、本研究では $\gamma=1$ と仮定した。図3cに得られた密度変化を示す。一気圧下では、Al₂O₃量の増加とともにSiO₂-Al₂O₃ガラスの密度は急激に増加することが知られている。一方、高圧下においては、その密度差は小さくなることが分かった。SiO₂ガラスやSiO₂に富むSiO₂-Al₂O₃ガラスでは、 V_p 、 V_s ともに非常に低い値であり、さらに圧力増加とともに V_p 、 V_s は急激に低下するため(図3a、3b)、SiO₂に富むSiO₂-Al₂O₃ガラスの圧縮率は非常に大きく、圧力上昇とともに急激に密度は増加する(図3c)。

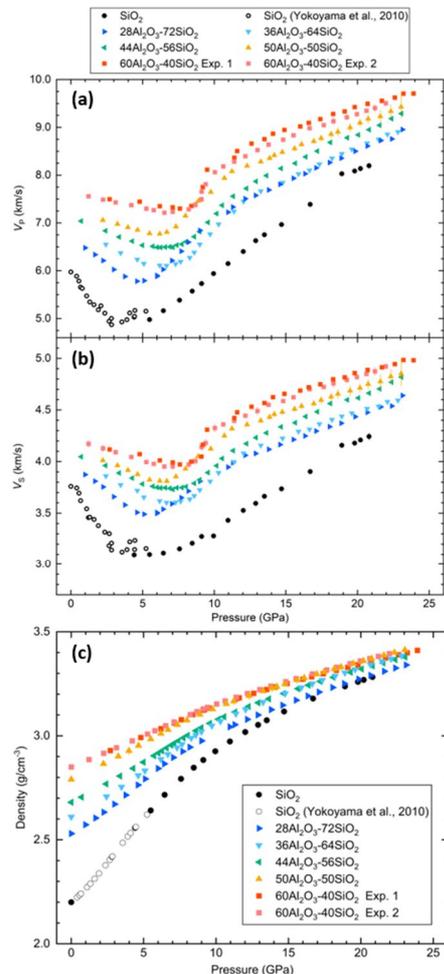


図3. (a,b) 高圧下におけるSiO₂-Al₂O₃組成ガラスのP波(V_p)、S波(V_s)速度変化。(c) 高圧下における V_p 、 V_s の変化結果から計算されたSiO₂-Al₂O₃ガラスの密度変化。

一方、 Al_2O_3 に富む $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ガラスでは、 V_p, V_s の値が高く、さらに高圧下での変化は小さいため、 Al_2O_3 に富む $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ガラスの圧縮率は比較的小さく、密度増加も緩やかになることが分かった。その結果、純粋な SiO_2 ガラスと Al_2O_3 に富む $60\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}40\text{SiO}_2$ ガラスの密度を比較すると、一気圧下では約 30%もの密度差があるのに対し、地球の上部マントルの最下部圧力 13.5GPa ではわずかに約 7%に密度差が縮小することが分かった。このような異なるマグマ組成での圧縮率の違いによる密度変化は、上部マントルにおけるマグマの密度変化を理解する上で非常に重要であると考えられる。

さらに、高圧下におけるガラスの異常弾性率極小・異常圧縮挙動のメカニズムを理解するために、アメリカ APS の 16-BM-B ビームラインと日本の SPring-8 の BL05XU, BL37XU ビームラインにおいて、高圧下におけるケイ酸塩ガラスの構造測定研究も行った。アメリカ APS の実験については、新型コロナウイルスの影響に直接渡米しての実験は困難であったが、APS・16BMB ビームラインの担当者である Rostislav Hrubyak 博士と連携して国際共同研究を行うことにより、リモートシステムを用いた高圧放射光 X 線実験を行うことに成功した。完全なりモート操作による高圧放射光 X 線実験は、アメリカ側グループにとっても初めての試みであり、我々日本側研究者グループが行った初リモート実験の成功は APS・HPCAT セクターの webpage でも取り上げられた (<https://hpcat.aps.anl.gov/technical-developments/2020-11/new-remote-controlled-large-volume-pressurization-system>)。このリモート実験技術を用いることにより、2020 年 11 月 4 日-7 日、2021 年 4 月 6 日-10 日、2021 年 7 月 10 日-12 日、2022 年 9 月 17 日-19 日、2023 年 4 月 11 日-14 日の 5 回の APS でのビームタイムにおいて、高圧放射光 X 線実験を行った。

SiO_2 ガラス、 CaSiO_3 ガラス、 CaAl_2O_4 ガラス、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ガラスについて、高圧下での構造変化の研究を行った。ケイ酸塩マグマのアナログ物質として最も単純な組成である SiO_2 ガラスにおいては、圧力約 3GPa の高圧下で体積弾性率が極小となる異常圧縮挙動の存在が知られている。その高圧条件下その場において SiO_2 ガラスの精密構造解析を行った結果、これまで理論研究において予測されながら実験的には捉えられていなかった SiO_2 ガラスにおける四面体的対称構造の存在と、その高圧下における崩壊を実験的に捉えることに世界で初めて成功した。この研究成果は、2022 年に高インパクトファクター雑誌である Nature Communications 誌に掲載された(Kono et al., 2022)。さらに、マントル深部の超高圧下において、Si-O 配位数変化を伴う SiO_2 ガラスの構造変化についての研究も行い、高インパクトファクター雑誌である Physical Review Letters 誌に掲載された(Kono et al., 2020)。また、 CaSiO_3 ガラスの構造測定も行い、これまで SiO_2 ガラスや MgSiO_3 ガラスなどのケイ酸塩ガラスで提案されていた Si-O-Si 角度の縮小による圧縮とは異なる圧縮メカニズムを新たに発見した。 CaSiO_3 ガラスにおいては、少なくとも 5.4GPa の圧力までは Si-O-Si 角度の縮小は起こらず、 $\text{CaO}_6\text{-SiO}_4$ 構造が頂点共有から稜共有へ変化することが分かった。このような CaSiO_3 ガラスにおける異なる高圧構造変化は、マグマの圧縮挙動にも影響を与えることが予想される。この CaSiO_3 ガラスの高圧構造変化の研究成果については、現在 American Mineralogist 誌に投稿中である。

以上のように、本研究では、研究代表者グループが持つ先端的な高圧下弾性波速度測定技術と、アメリカの放射光 X 線施設 APS の共同研究者が持つ高圧放射光 X 線実験技術(3 次元 X 線トモグラフィ測定、ガラスの動径分布関数測定)を組み合わせた国際共同研究を推進することにより、(1)かんらん岩中のメルト形状の 3 次元的理解と、そのメルトが弾性波速度に与える影響の理解、(2)マグマのアナログ物質であるケイ酸塩ガラスの高圧下における弾性率・密度の変化とその構造的起源の研究を大きく前進させることができた。本研究成果は、研究面のみでなく、アメリカ APS の共同研究者との連携による高圧マグマ研究基盤の構築の面でも重要な成果となったと考えている。特に、若手研究者の大平格と近藤望は、2021-2022 年度において、自ら APS のビームタイム申請を行い、主体的に実験を進めており、本課題による国際共同研究推進は若手研究者の国際的ネットワークの構築に大きく貢献したと考えている。

引用文献

- Kono, Y., Park, C., Kenney-Benson, C., Shen, G., Wang, Y. (2014) Toward comprehensive studies of liquids at high pressures and high temperatures: Combined structure, elastic wave velocity, and viscosity measurements in the Paris-Edinburgh cell. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 228, 269-280.; Kono, Y., Shu, Y., Kenney-Benson, C., Wang, Y., Shen, G. (2020) Structural evolution of SiO_2 glass with Si coordination number greater than 6. *Phys. Rev. Lett.*, 125, 205701.; Kono, Y., Higo, Y., Gréaux, S., Shibasaki, Y., Yamada, R., et al. (2021) Continuous measurement of ultrasonic elastic wave velocities, X-ray radiography and X-ray diffraction of $\text{Zr}_{50}\text{Cu}_{40}\text{Al}_{10}$ metallic glass at high pressure and high temperature conditions. *High Press. Res.*, 41, 219-232.; Kono, Y., Ohara, K., Kondo, N. M., Yamada, H., Hiroi, S., et al. (2022) Experimental evidence of tetrahedral symmetry breaking in SiO_2 glass under pressure. *Nature Commun.*, 13, 2292.; O'Connell, R.J., Budiansky, B. (1974) Seismic Velocities in Dry and Saturated Cracked Solids. *J. Geophys. Res.*, 79, 5412-5426.; Rivers, M.L., Wang, Y. (2006) Recent developments in microtomography at GeoSoilEnviroCARS. *Developments in X-ray tomography V*, 6318, 156-170.; Takei, Y. (2002) Effect of pore geometry on V_p/V_s : From equilibrium geometry to crack. *J. Geophys. Res.*, 107, 2043.; Yokoyama, A., Matsui, M., Higo, Y., Kono, Y., Irifune, T., Funakoshi, K. (2010) Elastic wave velocities of silica glass at high temperatures and high pressures. *J. Appl. Phys.*, 107, 123530-123535.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kono Yoshio, Higo Yuji, Greaux Steeve, Shibazaki Yuki, Yamada Rui, Kuwahara Hideharu, Kondo Nozomi	4. 巻 41
2. 論文標題 Continuous measurement of ultrasonic elastic wave velocities, X-ray radiography and X-ray diffraction of Zr ₅₀ Cu ₄₀ Al ₁₀ metallic glass at high pressure and high temperature conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 219 ~ 232
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/08957959.2021.1941000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kono Yoshio, Shu Yu, Kenney-Benson Curtis, Wang Yanbin, Shen Guoyin	4. 巻 125
2. 論文標題 Structural Evolution of SiO ₂ Glass with Si Coordination Number Greater than 6	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 205701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.205701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Y. Kono, K. Ohara, N. Kondo, H. Yamada, S. Hiroi, F. Noritake, K. Nitta, O. Sekizawa, Y. Higo, Y. Tange, H. Yumoto, T. Koyama, H. Yamazaki, Y. Senba, H. Ohashi, S. Goto, I. Inoue, Y. Hayashi, K. Tamasaku, T. Osaka, J. Yamada, M. Yabashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Experimental evidence of tetrahedral symmetry breaking in SiO ₂ glass under pressure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2292
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-30028-w	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 河野義生, 佐藤友子	4. 巻 35
2. 論文標題 高圧環境下その場におけるガラスの構造・物性研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 放射光	6. 最初と最後の頁 285-294
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 河野義生	4. 巻 27
2. 論文標題 高压下におけるSiO ₂ ガラスの四面体構造変化のその場測定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Spring-8/SACLA利用者情報	6. 最初と最後の頁 294-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Kono, Y., Ohira, I., Shu, Y., Wang, Y., Shen, G.
2. 発表標題 Structure measurement of silicate and oxide glasses under ultrahigh pressure conditions to >100 GPa
3. 学会等名 10th Asian Conference on High Pressure Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野義生
2. 発表標題 高温高压下における液体・非晶質物質のPDF解析
3. 学会等名 SPRING-8シンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野義生, SHU Yu, KENNEY-BENSON Curtis, WANG Yanbin, SHEN Guoyin
2. 発表標題 圧力最大120GPaにおけるSiO ₂ ガラスの超高压構造変化
3. 学会等名 第62回高压討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤望, 河野義生, 大平格, HRUBIAK Ross, 尾原幸治, 新田清文, 関澤央輝
2. 発表標題 MgSiO ₃ ガラスとCaSiO ₃ ガラスの高圧構造変化
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大平格, 河野義生, GREAUX Steeve, 近藤望, 桑原秀治, SHEN Guoyin
2. 発表標題 高圧下におけるSiO ₂ -Al ₂ O ₃ ガラスの構造と弾性波速度
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshio Kono
2. 発表標題 X-ray Research with PE press
3. 学会等名 Workshop 'Compact Synchrotron Sources and New X-ray Science Opportunities' (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Itaru Ohira
2. 発表標題 X-ray diffraction measurements on aluminosilicate glasses at ultrahigh-pressure conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union - American Geophysical Union Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野義生, 尾原幸治, 近藤望, 山田大貴, 廣井慧, 則竹史哉, 新田清文, 関澤央輝, 肥後祐司, 丹下慶範, 湯本博勝, 小山貴久, 山崎裕史, 仙波泰徳, 大橋治彦, 後藤俊治, 井上伊知郎, 林雄二郎, 玉作賢治, 大坂泰斗, 山田純平, 矢橋牧名
2. 発表標題 SiO ₂ ガラスにおける四面体構造の変化の高圧下その場放射光X線測定
3. 学会等名 第63回高圧討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤望, 河野義生, 大平格, Rostislay Hrubyak, 尾原幸治, 新田清文, 関澤央輝
2. 発表標題 MgSiO ₃ ガラスとCaSiO ₃ ガラスの異なる高圧構造変化
3. 学会等名 地球化学会 2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 I. Ohira, Y. Kono, S. Greaux, N. M. Kondo, R. Hrubyak, and Y. Higo
2. 発表標題 Structural study of silica-free calcium aluminate glass at high-pressures using the synchrotron X-ray facilities
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022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
研究分担者	近藤 望 (Kondo Nozomi) (70824275)	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・特定研究員 (16301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	桑原 秀治 (Kuwahara Hideharu) (50505394)	愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教 (16301)	
研究分担者	大平 格 (Ohira Itaru) (90873159)	学習院大学・理学部・助教 (32606)	

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