

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14013

研究課題名(和文) ケイ酸塩ガラスの超高圧その場弾性波速度測定から導く最下部マンツルのメルトの安定性

研究課題名(英文) Sound velocity measurements of silicate glasses under Mbar pressure: implication for the stability of silicate melts at the bottom of the mantle

研究代表者

増野 いづみ (Mashino, Izumi)

岡山大学・惑星物質研究所・特任助教

研究者番号：50822102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンドアンビルセル超高圧発生装置を用いた放射光非弾性X線散乱法(IXS)により、72 GPaまでの3価鉄を含むエンスタタイトガラスの弾性波速度測定を行うことができた。本研究では先行研究の実験圧力を大きく超える72 GPaまでIXSスペクトルを取得し、非常に良い精度での音速測定に成功している。特に常圧～低圧にかけては、P波速度(VP)だけではなくS波速度(VS)に由来するピークも精度よく分離することができた。加えて同試料の高圧その場メスバウアースペクトルを160 GPaまでの範囲で測定することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メルトは主に周囲の岩石との密度差に由来する正負の浮力によって移動する。したがってケイ酸塩メルト(マグマ)と結晶(岩石)の高圧下における重力的安定性は、地球のダイナミクスを理解する重要な手掛かりとなる。特に、マンツル深部のような超高圧下におけるケイ酸塩メルトの物性を実験的に明らかにすることは、大規模熔融したと考えられている地球の分化過程と内部構造を理解するためには必要不可欠である。ケイ酸塩ガラスは高温下におけるケイ酸塩メルトのアナログ物質であり、ケイ酸塩ガラスの物性を知ることが、地球深部でのメルトの挙動の解明につながる。

研究成果の概要(英文)：We have conducted high-pressure sound velocity measurements of Fe³⁺-bearing enstatite glass by inelastic X-ray scattering (IXS) at BL43LXU, SPring-8 in a diamond anvil cell. We have obtained the high-resolution IXS spectra up to 72 GPa and determined the sound velocity of the enstatite glass. Especially at ambient pressure and under low-pressure conditions, we succeeded in determining both P-wave (VP) and S-wave (VS) velocities of the enstatite glass. In addition, we have conducted high-pressure Mossbauer spectroscopic measurements of the enstatite glass by synchrotron radiation Mossbauer spectrometer at BL11XU, SPring-8 in a diamond anvil cell. We have obtained the Mossbauer spectra of the enstatite glass up to 160 GPa.

研究分野：地球惑星物性学

キーワード：超高圧実験 下部マンツル ダイヤモンドアンビルセル ケイ酸塩ガラス

1. 研究開始当初の背景

メルトは主に周囲の岩石との密度差に由来する正負の浮力によって移動する。したがってケイ酸塩メルト (マグマ) と結晶 (岩石) の高圧下における重力的安定性は、地球のダイナミクスを理解する重要な手掛かりとなる。特に、マントル深部のような超高压下におけるケイ酸塩メルトの物性を実験的に明らかにすることは、大規模溶融したと考えられている地球の分化過程と内部構造を理解するためには必要不可欠である。

初期地球において、現在の下部マントル以深まで大規模溶融したマグマオーシャンが形成され、この固化過程により、現在の地球の大局的な構造が形成された。常圧下においてはケイ酸塩メルトの密度は共存する岩石よりも小さいが、上部マントル以深の圧力条件下でメルトの密度が周囲の結晶の密度を上回る、いわゆる密度逆転を起こすということが、これまで示唆されてきた。この密度逆転が起こるとする仮定をもとに、高密度の重力的に安定なメルトが最下部マントルに存在する可能性が提案されている。地球のマントル深部、特に下部マントル最深部には低速領域 (LLSVP: Large low-shear-velocity provinces) や核マントル境界直上には超低速度層 (ULVZ: Ultra-Low Velocity Zone) が存在し、特に ULVZ の成因の有力候補として前述のケイ酸塩メルトの存在が示唆されている (図1)。

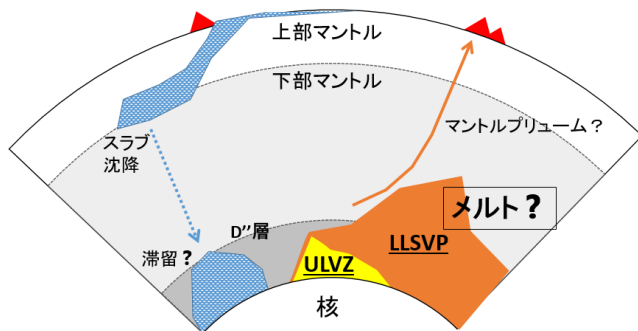


図1. 最下部マントルにおける地震波異常を模式的に示した地球の断面図

密度逆転の原因として、1) ケイ酸塩メルトの圧縮率が大きいこと、さらに2) ケイ酸塩メルト中に存在する鉄が圧力誘起スピン転移を起こすことで圧縮率に変化が生じること、が考えられてきた。しかしながら、下部マントル深部相当の圧力下で高温を発生し物性測定を行うことは技術的に困難であり、最下部マントルにおけるメルトの物性は、地球内部の重要な未解決問題のひとつである。一方で、高温下でのメルトの構造や密度が似通っているため、ケイ酸塩ガラスの物性を解明することは、地球物理学的に非常に重要である。それゆえ、メルトのアナログ物質としてガラスを実験対象とすることで、超高压下の物性測定が可能となる。特に、最も単純化したケイ酸塩メルトの組成である $MgSiO_3$ ガラスの物性 (密度、弾性波速度など) について近年精力的に調べられ始めている。ケイ酸塩メルトには2次元素として含有量が多い順から鉄 Fe、アルミニウム Al、カルシウム Ca などが挙げられるが、この中でも特に鉄の挙動は、ガラスの物性を大きく左右する。鉄が入ることだけでもケイ酸塩ガラスの密度が大きくなることが予想される。また、ケイ酸塩メルトやガラス中の鉄は超高压下において圧力誘起スピン転移を起こすと考えられており、スピン転移によってもケイ酸塩ガラスの物性は変化する。ケイ酸塩ガラス中の鉄は二価鉄 Fe^{2+} および三価鉄 Fe^{3+} として含まれており、 Fe^{2+} は5~6配位、 Fe^{3+} は5~6配位及び4配位を取ると考えられている。常圧下において Fe^{2+} および Fe^{3+} は高スピンを取るが、圧力が増加するに従い Fe^{2+} は中間スピンもしくは低スピンの状態に転移し、 Fe^{3+} については低スピンの状態に転移することが予想されている。マンタル鉱物のスピン転移と弾性的性質については、申請者の先行研究を含め (Mashino et al., 2014, *Am. Mineral.*)、今まで精力的に多くの研究が行われてきたが、鉄およびスピン転移がケイ酸塩ガラスの弾性的性質にどのような影響を与えるのか系統的に調べた研究はない。

2. 研究の目的

本研究では、放射光 X 線非弾性散乱 (IXS) およびメスバウアー分光を用いて、地球の下部マントル深部の圧力下までの鉄を含むガラスの弾性的性質を解明し、鉄がケイ酸塩ガラスにどのような影響を与えるか、鉄のスピン転移が起こることで弾性波速度にどのような影響を与えるか、鉄を含むメルトは最下部マントルに密度的に安定に存在し得るかという問いを明らかにする。

3. 研究の方法

鉄を含むケイ酸塩ガラスは岡山大学惑星研設置の電気炉を使用し合成を行った。また京都大学複合原子力科学研究所にて、合成した鉄を含むケイ酸塩ガラスの常圧メスバウアースペクトルを取得した。

鉄を含むケイ酸塩ガラスの高圧下における弾性波速度データを取得するため、超高压発生装置であるダイヤモンドアンビルセルを用いて、高圧その場放射光 IXS 実験を行った。加えて高

圧その場放射光メスbauer測定を行うことで、鉄のスピ状態の情報が得られる。10 GPa から最下部マントルに相当する圧力まで、約 5~10 GPa 刻みで網羅的に両者の測定を行った。

4. 研究成果

最終年度までに、高圧その場放射光 IXS 実験により 72 GPa までの 3 価鉄を含むエンスタタイトガラスの弾性波速度測定を行うことができた。放射光 IXS 実験は兵庫県 SPring-8, BL43LXU (理研量子ナノダイナミクスビームライン) にて行った。これまで IXS を用いたガラスの弾性波速度測定は、SiO₂ のアナログ物質である GeO₂ ガラスを対象とし、マントル遷移層に相当する 25 GPa までの圧力にとどまっていたが (Cunsolo et al., 2015)、本研究では使用するガスケットの検討 (低圧ではレニウムガスケット、高圧ではベリリウムガスケットを使用) や分解能関数の見直しを行うことで、現在までに先行研究の実験圧力を大きく超える 72 GPa まで、非常に良い精度での 3 価鉄を含むエンスタタイトガラスの音速測定に成功している (図 2)。特に常圧~低圧にかけては、P 波速度 (V_p) だけではなく S 波速度 (V_s) に由来するピークも精度よく分離することができた (図 3)。72 GPa までの圧力範囲では、ガラスの音速 V_p は圧力に対して単調に増加していた (図 4)。

加えて同試料の高圧その場放射光メスbauer測定を SPring-8, BL11XU (量子科学技術研究開発機構専用ビームライン) にて行い、3 価鉄を含むエンスタタイトガラスのメスbauerスペクトルを約 5~10 GPa 刻みで 160 GPa までの範囲で測定することができた。

今後得られた音速データから最下部マントルにおけるメルトの密度・重力的安定性に関する議論を行う予定である。

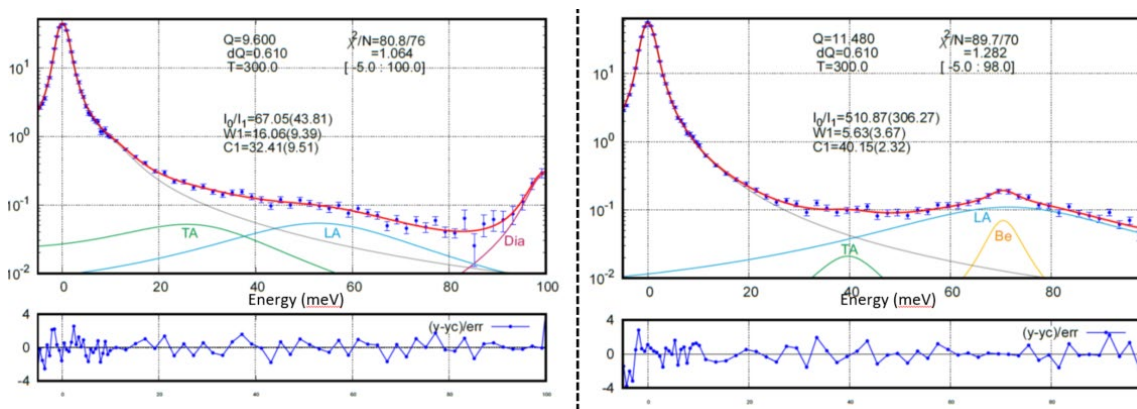


図 2. 鉄を含むエンスタタイトガラスの高圧 IXS スペクトル. 左はダイヤモンドアンビルを透して測定した 7 GPa におけるスペクトル ($Q=9.60$, $dQ=0.61$), 右はベリリウムガスケットを透して測定した 63 GPa におけるスペクトル ($Q=11.48$, $dQ=0.61$). LA: longitudinal acoustic (V_p), TA: transverse acoustic (V_s), Dia: diamond (ダイヤモンドアンビル), Be: beryllium (ベリリウムガスケット).

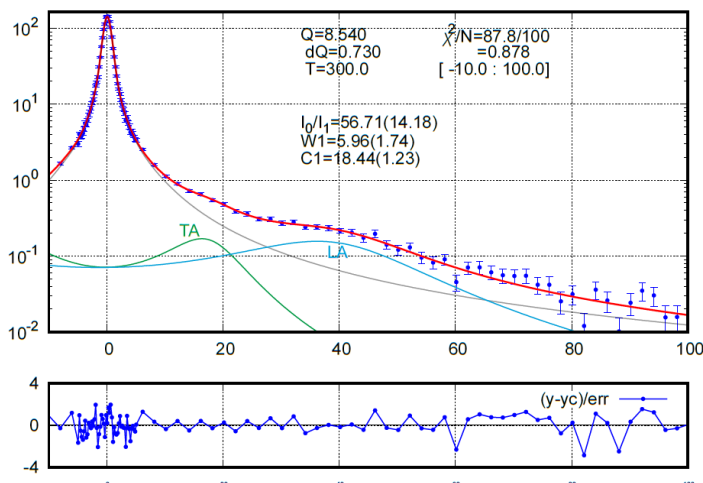


図 3. 常温常圧における鉄を含むエンスタタイトガラスの IXS スペクトル ($Q=8.54$, $dQ=0.73$). LA: longitudinal acoustic (V_p), TA: transverse acoustic (V_s),

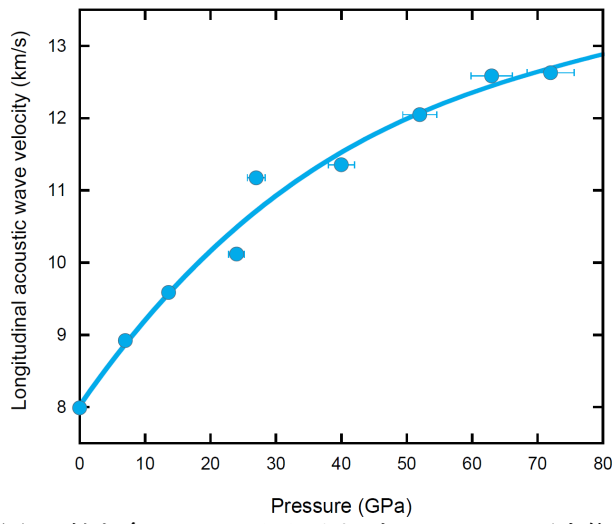


図 4. 鉄を含むエンスタタイトガラスの V_p の圧力依存性.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 I. Mashino, M. Murakami, N. Miyajima, S. Petitgirard	4. 巻 -
2. 論文標題 Experimental evidence for silica-enriched Earth's lower mantle with ferrous iron dominant bridgmanite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bayerisches Forschungsinstitut für Experimentelle Geochemie und Geophysik Universität Bayreuth, ANNUAL REPORT	6. 最初と最後の頁 28
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 該当する

1. 著者名 Mashino Izumi, Murakami Motohiko, Kitao Shinji, Mitsui Takaya, Masuda Ryo, Seto Makoto	4. 巻 49
2. 論文標題 Acoustic Wave Velocities of Ferrous Bearing MgSiO ₃ Glass up to 158 GPa With Implications for Dense Silicate Melts at the Base of the Earth's Mantle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2022GL098279
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2022GL098279	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 I. Mashino, M. Murakami, N. Miyajima, S. Petitgirard
2. 発表標題 Experimental evidence for Si-enriched Earth's lower mantle with ferrous iron dominant bridgmanite
3. 学会等名 Conference on Science at Extreme Conditions (CSEC-2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Izumi Mashino
2. 発表標題 Sound velocity measurement of iron-bearing enstatite glass under high pressure by inelastic X-ray scattering
3. 学会等名 角度分解散乱分光研究会2022年度研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増野いづみ
2. 発表標題 Acoustic wave velocities of ferrous-bearing MgSiO3 glass up to 158 GPa with implications for dense silicate melts at the base of the Earth's mantle
3. 学会等名 第9回愛媛大学先進超高压科学研究拠点 (PRIUS) シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Izumi Mashino, Motohiko Murakami, Shinji Kitao, Takaya Mitsui, Ryo Masuda, Makoto Seto
2. 発表標題 Acoustic wave velocities of ferrous-bearing MgSiO3 glass up to 158 GPa with implications for dense silicate melts at the base of the Earth's mantle
3. 学会等名 JpGU meeting 2022 (国際学会)
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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------