

大学院生提案型課題（長期型）報告

大規模S波低速度領域での地震波異方性の成因の理解に向けた フェロペリクレースの高温高压大歪変形実験

東京科学大学

理学院 地球惑星科学系 夏井文凜、東真太郎、太田健二

Abstract

地震波観測より、地球の下部マントルに広がる大規模S波低速度領域の縁部分では、地震波異方性が存在することが報告されている。この地震波異方性は、鉱物の結晶方位選択配向の発達によって生じている可能性がある。本研究では、回転式ダイヤモンドアンビルセルを用いて、下部マントル圧力条件下で高压大歪変形実験を行い、変形に伴うフェロペリクレースの結晶方位選択配向の発達を調査し、大規模S波低速度領域における地震波異方性との関係を明らかにすることを目的とした。実験の結果、フェロペリクレースにおいては、Feの含有量の違いやスピン転移の有無に関わらず、ペリクレースと同様に高压力でせん断方向と平行に{100}面が配向することが明らかになった。ただし、ペリクレースと比較すると、より低い温度圧力条件下で{100}面の配向が生じることが確認された。このフェロペリクレースの結果を、最下部マントルに横たわるスラブの状況に当てはめて考えた際には、S波速度が鉛直方向よりも水平方向で大きいという地震波異方性の観測結果と整合的であることが示された。

1. はじめに

地震波観測より、アフリカおよび南太平洋の地下には、下部マントル中部から最下部マントルにかけて広がるS波速度が遅い領域の存在が確認されている。この領域は大規模S波低速度領域（LLSVPs：Large Low Shear Velocity Provinces）と呼ばれ、その縁部分では地震波速度が地震波の進む方向によって異なる地震波異方性が報告されている。これは、鉱物の結晶軸が一定の方向に配列する結晶格子選択配向（CPO：Crystallographic Preferred Orientation）に由来すると考えられている。CPOの発達は、主に鉱物の塑性変形によって生じることから、沈み込んだスラブの核マントル境界での衝突やLLSVPs内部の物質上昇に伴うせん断変形によりCPOが発達し、LLSVPs縁部分で観測される地震波異方性と関連していると議論されている。

一方でLLSVPsが熱的な特徴によるものか、組成的な特徴によるものか、あるいはその両方に由来するのかは未だ不明であり、岩石・鉱物学的なことは、

ほとんど制約できていない。LLSVPsが組成的特徴に由来すると仮定した場合、マントル対流による攪拌に耐えてマントルの底に留まり続けるためには、周辺のマントルと比べて約10%高い密度を持つ組成である必要がある。このような高密度の組成の鉱物としてFeに富むフェロペリクレース（Mg,Fe）Oやブリッジマナイト（Mg,Fe）SiO₃が挙げられている。LLSVPsの成因を明らかにするには、これら鉱物のCPOの発達を含めた変形特性を実験的に明らかにする必要がある。しかし、下部マントルの温度圧力条件を実験的に再現することは技術的に非常に困難であり、これらの条件下で議論を行った先行研究は乏しい。さらに、Feを含むフェロペリクレースやブリッジマナイトは、高温高压下においてFeのスピン転移が生じることが報告されている。スピン転移はFeの原子半径を変化させるため、鉱物の物性に大きな影響を及ぼし、すべり系や粘性率などの変形特性を変化させる可能性がある。加えて、フェロペリクレースおよびブリッジマナイトは、それぞれ

Fe含有量によってスピン転移が生じる温度圧力条件が異なることが知られており、LLSVPsの成因の解明を困難かつ複雑にしている。

本研究では、LLSVPsにおける地震波異方性の成因の理解に向けて、その構成候補鉱物であるフェロペリクレースに対して、回転式ダイヤモンドアンビルセル（rDAC: Rotational diamond anvil cell）とSPring-8でのX線測定を組み合わせた定量的な高圧大歪変形実験を実施した。

2. SPring-8で実施した理由

これまで、下部マントルの圧力条件を実験的に再現して変形実験を行うことは技術的に非常に困難であった。そのため、下部マントル構成鉱物を下部マントルの温度圧力条件で定量的に変形させ、その変形特性について議論した研究は限られており、特に最下部マントル条件の変形実験は報告がなかった。近年開発されたrDACはこの状況を打破し、地球内部の全圧力条件における定量的な変形実験を可能にした。これまで、rDACは常温下で135 GPaまでの定量的な変形実験を行った実績がある^[1]。また、地球科学的議論を行ったものでは120 GPaまで行われたMgOの変形実験に基づきCPOの発達と地震波異方性の関係を議論したものがある^[2]。

rDACを用いた変形実験の試料は、厚さ30 μm 以

下、直径約100 μm の円盤状であり、中心に埋め込んだPt製の歪マーカースに至っては高さ30 μm 以下、長さ20 μm 以下、幅約5 μm の板状で非常に微小である。そのため、この微小領域からX線回折（XRD: X-Ray Diffraction）およびX線ラミノグラフィー（3Dイメージング）の有意なデータを得るには大強度のX線が必要不可欠である。さらに、試料の応力測定のため、変形実験中のその場XRD測定を行う必要がある。SPring-8のBL47XUはrDACにセットした試料中のPt製歪マーカースのX線ラミノグラフィーおよび多結晶試料の変形実験中のその場XRD測定を行った実績がある。加えて、BL10XUは微小試料の多角度XRD測定を行った実績がある。これらのビームラインの性能とデータクオリティの観点から、本研究の変形実験はSPring-8でなければ達成できなかった。

3. 実験

本研究で用いたrDACは静的な高圧発生装置のDACを応用した高圧ねじり変形装置である。対になったダイヤモンド製のアンビルの間に試料を挟み、上部のアンビルを回転させてねじりの変形を与えることで、高圧下での大歪変形実験が可能になる。試料には、Fe含有量の異なるフェロペリクレース（Mg,Fe）O（Fe=90, 40, 20 wt%）をそれぞれ用

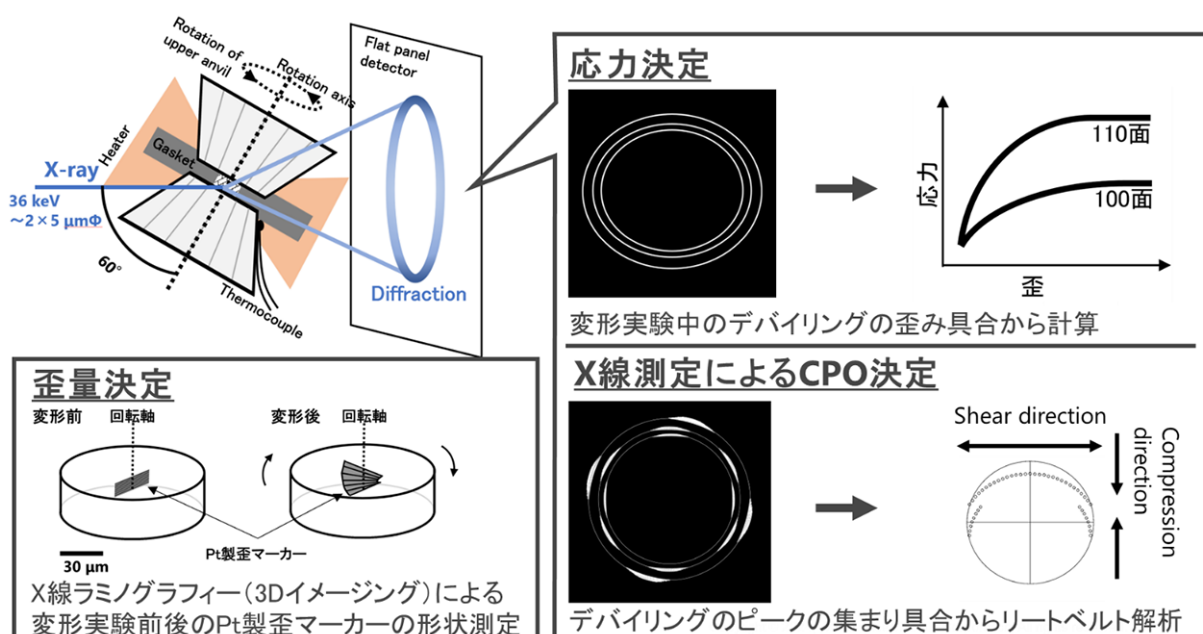


図1 SPring-8 BL47XUでのX線測定の模式図

いた。試料はタングステンまたはレニウム製の板に円盤状の穴を開けて作成した試料室へ配置した。さらに、試料の歪量の測定のため、集束イオンビーム (FIB : Focused ion beam) を用いて、変形時の回転軸に平行、ねじり方向に垂直になるようにPtを板状に蒸着し、その後rDACへセットした。

高温高压変形実験はBL47XUで実施した。実験前後でX線ラミノグラフィーを用いて歪マーカの観察を行った^[3,4] (図1)。ラミノグラフィー取得時のX線のエネルギーは、PtのL3吸収端よりやや高い12keVを用いた。実験前後の歪マーカ形状の変化を解析することで、試料の変形量を見積もった。実験条件は圧力10–126GPa、温度298–963K、歪速度一定で行った。高温条件は近赤外線集光加熱装置 (イメージ炉)^[5]により達成し、ダイヤモンドアンビルの酸化を防ぐため真空条件下 (<~100Pa)で行った。変形中にその場XRD測定とX線ラジオグラフィーによる試料撮像を実施した。XRD測定は36keVのX線エネルギー、カメラ長約150mmで行った。得られたデバイリングのリートベルト解析を行い、変形実験前後のCPOの解析をした。CPOが発達している場合、デバイリングの強度にむらが見られる。これは、結晶格子が特定の方向に配向することで、回折ピークが集中して現れるためである。この回折ピークの分布を解析することで、CPOを定量的に評価することができる。解析にはMaterial Analysis Using Diffraction (MAUD)を用いた。

BL47XUで取得した変形実験中のXRDは装置の配置の制約があり、試料の回転軸から60°傾けた一方向からの入射によって得られた。この単一方向

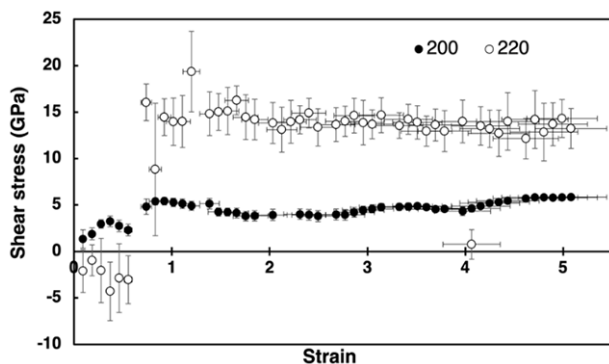


図2 変形実験中の応力-歪曲線^[6]
(Mg_{0.8}Fe_{0.2})O @ 67 GPa

のXRDデータを解析して、全球のポールフィギュアを計算により補完することでCPOを求めた。しかし、理論的には全球のポールフィギュアを得るには180°範囲でのデータ取得が必要である。そこで、BL47XUで得た結果の妥当性を検証するため、減圧回収後の試料についてBL10XUで多角度XRD測定を実施した。BL10XUでのXRD測定はX線のエネルギーは30keV、カメラ長約300mmで行った。試料のねじり変形の回転軸に対して-35~35°まで、70°の範囲をカバーする多角度XRD測定を行い、MAUDを用いてCPOの決定を行った。これにより、BL47XUの単一方向測定から得られた計算でポールフィギュアの大部分を補完しているCPOとの整合性を検証し、議論の正当性を確認した。

4. 結果

歪マーカの形状解析の結果、試料縁部での歪量は1.1–8.4、歪速度は 10^{-3} – 10^{-4} /sの範囲で変形実験が行われた。変形中の試料の応力は、フェロペリクレスの200面と220面の格子面間隔から計算した。得られた応力-歪曲線では、変形初期では、歪量の増加に伴ってせん断応力も増加し、弾性変形が生じていることが確認できた (図2)。その後、歪量が増加してもせん断応力は一定の値を保ち、試料は変形実験中に塑性変形による定常状態に移行したことが確認できた。さらに、ポールフィギュアの結果から、変形前後で、CPOの発達が確認できた。本研究では、フェロペリクレスにおいて下部マントル

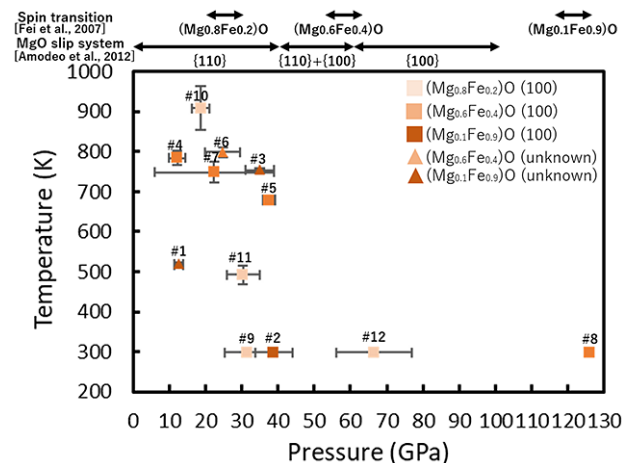


図3 (Mg, Fe)Oの剪断面に沿った結晶面、温度、圧力の関係

圧力条件で {100} 面がせん断方向に配列する CPO が発達することが明らかになった。ただし、Fe のスピン転移領域をまたがっても、CPO の傾向が変化することはない、スピン転移の影響はなかった。また、Fe の含有量が変化しても、CPO の傾向に大きな変化は見られなかった (図3)。

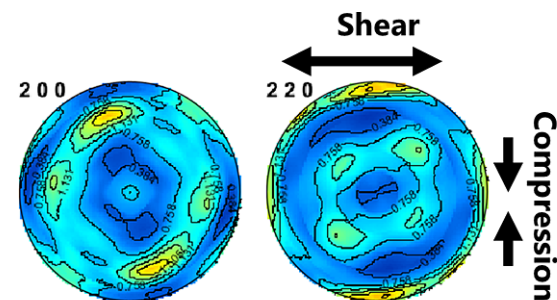
また、変形実験中の 1 角度 XRD 測定と減圧回収試料の多角度 XRD 測定から得られたポールフィギュアの結果は調和的であり、本研究における 1 角度 XRD 測定から得られるポールフィギュアは信頼性があることを確認出来た。この結果は、減圧回収時に試料が引張変形を受けていたとしても、その影響は実験中のせん断変形によって形成された CPO を上書きするほどは大きくなく、減圧回収試料は実験中のせん断変形の情報を保持していると考えられる。

5. 考察

Amodeo らは従来の対称型 DAC を用いた定性的な高圧下の軸圧縮変形実験より、ペリクレスでは温度と圧力の増加に伴い、支配的なすべり面が {110} 面から {100} 面へと変化することを報告した^[7]。本研究の結果はこの結果と整合的であり、フェロペリクレスでも、高圧力下において、{100} 面がせん断方向に平行に配向する結果が示された。これは下部マントルに沈み込みマントル底に横たわるスラブを想定した場合に、S 波速度が鉛直方向よりも水平方向の方が大きいという地震波異方性の観測結果と一致する。ただし、フェロペリクレスではペリクレスよりも低い圧力で {100} 面が配向した。例えば、常温下でペリクレスは約 60 GPa の圧力で {100} 面が配向するが、フェロペリクレスでは約 30 GPa の圧力で配向した。この違いは Fe が加わることによって、MgO と比較してフェロペリクレスのすべり面の臨界分解せん断応力の温度圧力依存性が変化し、{100} 面の配向がより低い圧力で生じる可能性が考えられる。

また、Fe90% という高い Fe 含有量かつ歪量 6.6 の実験では、得られた CPO は他の実験結果とは異なり、100 軸が同心円状に配向する特徴的な組織を示した (図4)。この組織は、同組成の歪量 2.2 の実験では観察されていない。この特異的な CPO は、

(Mg_{0.1} Fe_{0.9})O @35 GPa $\gamma > 6.6$



(Mg_{0.1} Fe_{0.9})O @39 GPa $\gamma = 2.2$

図4 変形実験後のポールフィギュア^[6]

Heidelberg ら Fe20% のフェロペリクレスのねじり変形実験で報告した組織とよく類似している。彼らの実験条件は本研究より低い圧力 (300 MPa) かつ高い歪量 (15.5) であった。彼らはこのような組織はひずみの蓄積による組織発達に起因し、2 つ以上のすべり系、例えば、{100} 面と {111} 面が同時に活性化するような変形が起こることで、このような組織発達が生じる可能性を提案している。これは Fe に富む試料の方が、Fe に乏しい試料よりも速く動力学的過程が進行するためだと考えられる。したがって、支配的なすべり系が大きく変化しなくても、発達するフェロペリクレスの組織は、Fe の含有量や歪量によって変化する可能性が示唆される。

謝辞

本研究を実施するにあたり協力してくださった高輝度光科学研究センターの上杉健太郎氏、安武正展氏、河口沙織氏、門林宏和氏、広島大学の岡崎啓史准教授、Eranga Gyanath Jayawickrama 氏、八木寿々歌氏、東京科学大学の長谷川暉氏、石森慧也氏、古賀亘氏、京都大学の野村龍一氏に感謝します。実験および X 線測定は、SPring-8 の BL10XU および BL47XU で行いました (課題番号 2023B0312、2023B0320、2024A0312、2024A0320、2024B0312、2024B0320)。

参考文献

- [1] R. Nomura *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **88** (2017) 044501.
- [2] Y. Park *et al.*: *GRL* **49** (2022) 21.
- [3] R. Nomura *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **87** (2016) 046105.
- [4] S. Azuma *et al.*: *High Press. Res.* **38** (2018) 23.
- [5] S. Azuma *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **95** (2024) 073907.
- [6] B. Natsui *et al.*: *PEPI* **366** (2025) 107392.
- [7] J. Amodeo, P. Carrez, P. Cordier : *Philosophical Magazine* **92** (2012) 1523-1541.
- [8] F. Heidelbach, I Stretton, F Langenhorst and S Mackwell : *GRL* **108** (2003) 2154.

夏井 文凜 NATSUI Bunrin

東京科学大学
理学院 地球惑星科学系
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 12-13
TEL : 03-5734-2334
e-mail : natsui.b.aa@gmail.com

東 真太郎 AZUMA Shintaro

東京科学大学
理学院 地球惑星科学系
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 12-8
TEL : 03-5734-3536
e-mail : azuma.shintaro@eps.sci.titech.ac.jp

太田 健二 OHTA Kenji

東京科学大学
理学院 地球惑星科学系
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 12-13
TEL : 03-5734-2590
e-mail : k-ohta@geo.titech.ac.jp