

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244087

研究課題名(和文) マントルの水マッピング：高温高压下の地震波減衰特性と電気伝導度からの制約

研究課題名(英文) Mapping water in the mantle: Constraints from seismic attenuation and electrical conductivity under high pressure and temperature

研究代表者

芳野 極 (Yoshino, Takashi)

岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授

研究者番号：30423338

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は地震波減衰を特徴付けるQ値、電気伝導度を水の量の関数として決定し、マントルに存在する水の量と分布を解明を試みた。短周期振動油圧システムの開発、導入を行い、その場X線ラジオグラフィ観察によって高温高压下の含水物質のQ値の決定が可能となった。上部マントル、マントル遷移層の主要鉱物であるオリビン、ワズレアイト、リングウッドイトの電気伝導度を水の関数として決定するため、単結晶の含水鉱物を合成してH-D相互拡散実験を行った。その結果、今まで測定が難しかった比較的高温の条件での電気伝導度の推定に成功し、マントル遷移層の平均の水の量は0.1wt.%であり、量に多様性があることも分かった。

研究成果の概要(英文)：To determine the amount and distribution of water in the mantle, we have tried to determine Q value characterizing the seismic attenuation and the electric conductivity as a function of the water content. The development and installation of the short-period oscillation hydraulic system was carried out to determine the Q value of the water-bearing materials under high temperature and high pressure by in situ X-ray radiography observation. In order to determine electrical conductivity of olivine, wadsleyite and ringwoodite as a function of water, H-D inter-diffusion experiments were conducted using the synthesized single crystal pair. These results enable us to estimate the electrical conductivity at relatively high temperatures. Based on the comparison with the geophysical data, the average amount of water in mantle transition zone is found to be 0.1 wt.%, and there is a wide lateral variation. Hydrous olivine cannot account for the high conductivity anomaly in the asthenosphere.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：マントル 水 地震波減衰 電気伝導度 水素拡散 単結晶

1. 研究開始当初の背景

水は地球内部物質の融点を大幅に下げ、岩石の強度を著しく低下させるなど物性を大きく変化させるので、マンツルの進化・ダイナミクスを考える上で、水の存在量を知ることは地球科学の第一級の問題である。マンツルを構成する主要な鉱物は、その結晶構造内に水を取り込むことができることは周知の事実である。しかし、水の最大固溶量が分かっても、実際の地球内部の水の量は分からない。従って、地球物理学的観測と物性の比較による含水量の推定が必要となる。水はマンツル鉱物の弾性的性質も変化させるが、観測可能なほど変化させるためには1000 ppm以上の水が必要となる。一方、マンツルの含水量はそれ以下である可能性が高く、弾性的手法では検出が困難である。最近、リソスフェア-アセノスフェア境界(LAB)が明瞭な地震学的不連続面であることが示され、その原因がアセノスフェアに存在している鉱物中の水なのかメルトなのかという議論が活発に行われている。しかし、観測と実際比較できる物性データが限定的なため、決定的な結論はない。極少量の水の存在を正確に決定するためには、水に敏感な物性を用いることが必要である。

少量の水を検出する点で、水の濃度に対して桁で変化する電気伝導度と地震波の減衰(非弾性効果, Q 値)は観測と直接比較のできる物性値として有力視されている。水のこれらの物性への効果は、粒界の水か粒内の水かによって異なるので、これらの物性からマンツル中の水のマッピングを行うには、各効果を1つ1つ解明することが重要となる。

アセノスフェアの高電気伝導度異常は無水のマンツル鉱物では説明できないため、オリビン中の水の電気伝導度への影響は、申請者を含むいくつかのグループによって測定されてきた[3,4]。申請者の結果に基づ

けば、低温では単結晶オリビン中の水の電気伝導度への影響は大きい、マンツルに相当する高温ではその影響が小さいことが分かった。一方、高温では“熱力学的”に粒間に分配される水が電気伝導度を著しく上昇させることも分かってきた[5]。つまり、高温では電気伝導度への粒界水の寄与が増加し、粒内の水の量を検出することは極めて難しくなる。

地震波の減衰の周波数依存性は粒内と粒間の水で大きく異なっている、2つの効果の選別が可能である。しかし、高圧下でのマンツル物質の減衰の研究は非常に測定が難しい実験であるために、オーストラリア国立大学とニューヨーク州立大学の2つのグループによる報告しかなかった。さらに含水系での地震波の減衰の研究は唯一 Jackson グループによるものがあるだけで、水の減衰への効果が大きいことは分かっているものの、水の量の関数として定量的に求められていない。したがって、減衰から水の量を決定できる段階にない。また、上記の実験は主に 1Hz 以下の低周波数帯域でしか行われていないが、粒内水によって起こる減衰は 10^{-1} 秒以上の短い緩和時間を持っているので、粒界効果と粒内効果を区別するためには幅広い周波数帯域での測定が必要である。

2. 研究の目的

本研究は高温高圧実験の手段を用いて、マンツル物質の地震波の減衰測定および水素拡散による電気伝導度の推定を行い、地球物理学的観測結果との比較に基づき、マンツルの水を定量的にマッピングすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、地震波の減衰測定と電気伝導度推定の2つのアプローチによりマンツル鉱物への水の影響を決定した。

(1) 地震波減衰測定

放射光その場観察によってマントル物質の幅広い周波数帯域における地震波の減衰特性を高温高压下で決定を放射光その場観察の手段で行う。実験の原理は、測定試料と標準物質（理想的には完全弾性体）を直列に配置し、特定の振動周波数における標準物質と試料のエネルギー散逸によって生じる歪の位相のずれと振幅の比を透過 X 線像その場観察により決定し、試料の Q 値と弾性（ヤング）率を決定するというものである[7]。

試料に高エネルギーの X 線を入射し、X 線透過像を観察する。これにより、振動している試料と標準物質の歪をその場観察することができる。標準物質には、塑性変形しにくく降伏応力の高いアルミナや単結晶フォルステライトを用いた。差動ラムから加えられた振動のエネルギー散逸を最小限にするために、試料部とアンビル間に配置する。P 波の減衰は、試料の 1 軸方向の歪み量を稼ぐため、試料および標準物質は細長い円筒状のものを使用し、標準物質と試料は金属箔を介して接触する。金属箔は試料の歪み量を測定するための歪マーカー (Au, Pt) である。試料の歪みは透過 X 線像で、連続的に観察する。含水試料周囲は、実験中に水が逃げないように AgPd のジャケットで覆う。Au や Pt に対して AgPd は比較的 X 線吸収が小さく、そのコントラストから X 線透過像で歪マーカーの観察が可能である。

高压周期振動実験は、SPring8 のビームライン BL04B1 に導入されている変形 DIA 型マルチアンビルプレスを用いた。周期振動を 15 秒以下での測定を実現するために 短周期振動油圧システムを開発した。この新システムでは、高速振動を可能にするために、モーターの正転反転を伴わない電磁石を用いて油圧ピストンを振動させる

ソレノイド型の振動油圧システムを採用した。この振動システムは、周期 0.2 から 100 秒までの正弦振動を実現し、ピストンの変位量も可変である。

周期振動実験は、圧力 1~3 GPa 程度、温度範囲 600-1200、振動周期 0.5 秒から 100 秒の範囲で行った。時間応答の歪みは X 線透過像で試料の両端および標準物質の両端の歪マーカーの変位を画像解析によって行った。この結果、1 ミリ程度の試料では、 10^{-4} レベルの微小歪みの観測が可能であることがわかった。

(2) 水素自己拡散係数に基づく電気伝導度推定

電気伝導度は結晶内に均質に水素が配置されている状況で起こるので、含水化による水素拡散係数の実験データを直接用いることはできない。つまり、事前に含水単結晶の合成が必要となる。さらに、自己拡散係数を求めるためにトレーサーとして 2H の同位体を用いるのが一般的である。このため、重水素をドーブした単結晶合成も行った。合成はマントルで支配的なオリビン、ワズレアイト、リングウッドイトについて行った。オリビンとワズレアイトについては異方性があるため、結晶軸を決定して、拡散対を作り、金カプセルに封入した。この拡散対をそれらの鉱物が安定に存在する条件でマルチアンビル高压装置を用いて、それぞれの結晶間における D/H の相互拡散実験を行った。

4. 研究成果

(1) 地震波減衰測定

地震波減衰測定は、粒内と粒界の影響をそれぞれ特定するために、オリビンの単結晶と多結晶体を試料に用いた。まず粒内の水の影響を調査する実験では、無水のフォルステライト単結晶の各結晶軸と天然の含水オリビンの単結晶の b 軸方向をそれぞれ直列に配置

した。b 軸方向で無水のフォルステライト単結晶と含水オリピンの単結晶の間での振動の位相差が確認され、含水試料は減衰していることが分かった。800 では周期 10 秒付近に減衰が極小になる部分が現れるが、温度が 1,000 に達すると極小値はなくなり、周期依存性はほとんど無くなる。また、これ以上昇温しても減衰の度合いの変化は見られない。a 軸方向では無水フォルステライトの b 軸方向が減衰を示し、高温になるほど減衰の度合いが小さくなった。c 軸方向は b 軸方向と同様の傾向が確認された。このことは、含水オリピンは 1 Hz より高い周波数でエネルギー散逸が起こっていることを示唆しており、粒界の水の効果による減衰は比較的高い周波数領域で生じていることを示している。

含水オリピンの粒界効果を調査するため、無水のフォルステライト単結晶の含水オリピンの多結晶をそれぞれ直列に配置した実験を行った。 Q^{-1} は周期とともに上昇する傾向があるが、周期 5 秒付近で減衰がやや極大化する傾向が認められた。このことは周期 5 秒から 10 秒にかけて緩和時間を持つ成分の存在を示す。顕著な温度効果は確認できないことは、測定中に脱水が起こったか、大きく粒成長が生じたことが原因として考えられる。本研究では、AgPd をカプセルとして使用したが、高温では脱水を避けることはできなかった。含水多結晶の測定にはさらなる測定法の改善が必要とされる。

(2) 水素自己拡散係数に基づく電気伝導度

重水素(D)と軽水素(H)をドーブした合成ワズレアイトとリングウッダイトの含水単結晶間の D/H の相互拡散プロファイルは鉄を含んでいる系では、対称な拡散プロファイルを得ることができた。ワズレアイトの水素の自己拡散係数は圧力 16 GPa で $D_H = 10^{-7.15} \exp(-106(\text{kJ/mol})/RT)$ 、リングウッダイトは圧力 21 GPa で $D_H =$

$10^{-7.15} \exp(-101(\text{kJ/mol})/RT)$ と決定された。この値はほぼ 2 つの鉱物間で同等である。HD 相互拡散係数はワズレアイト、リングウッダイトの方が概してオリピンより高い拡散係数を持つ。オリピンの拡散の温度依存性は 120 kJ/mol 程度の活性化エネルギーを持ち、(100) 結晶軸方向で拡散係数が大きい傾向がある。この水素自己拡散係数から Nernst-Einstein の関係を用いて電気伝導度を計算すると水の寄与は低温における電気伝導度測定の結果と比較して、水の効果は小さいことが分かった。

(3) 地球内部の水の量と分布の考察

本研究から、マンツルの水の量を推定すると、マンツル遷移層の平均的な水の量は 0.1 wt%程度と見積もられる。この結果は、電気伝導度測定から求められる値と同等である。さらに、スタグナントスラブ付近で観測される高電気伝導度異常は無水鉱物の含水化では説明できない。少量の流体の存在が必要である。上部マンツルの水の量と分布に関しては、減衰データから定量化を行なうことはまだ困難なレベルである。しかし、定性的には地震波 Q^{-1} は含水化にともなって地震波の周期レベルで大きな減衰が起こる可能性を示唆するが、細粒の場合はより大きな周期でその影響が現れることが分かった。H-D 相互拡散実験から求められるオリピンの電気伝導度への水の効果は、今まで考えられたより小さい。このことは、アセノスフェアで観測される電気伝導度異常は、オリピンの含水化では説明できず、部分溶融メルトの存在が必要であると結論される。

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 34 件)

1. T. Yoshino, S. Kamada, C. Zhao, E. Ohtani, N. Hirao, 2016. Electrical conductivity model of Al-bearing bridgmanite with implications for the

electrical structure of the Earth's lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **434**, 208-219. doi: 10.1016/j.epsl.2015.11.032 査読あり

2. W. Sun, T. Yoshino, N. Sakamoto, H. Yurimoto, 2015. H-D exchange in single crystal ringwoodite: Implications for water content and distribution in the mantle transition zone. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 6582–6589, doi:10.1002/2015GL064486. 査読あり

3. X. Guo, T. Yoshino, A. Shimojuku, 2015. Electrical conductivity of albite-(quartz)-water and albite-water-NaCl systems and its implication to the high conductivity anomalies in the continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **412**, 1-9. doi: 10.1016/j.epsl.2014.12.021 査読あり

4. 芳野極、山崎大輔、肥後佑司、舟越賢一、2014. 高温高圧力下における周期振動実験による地震波減衰測定 (Seismic attenuation measurement by cyclic loading under high pressure and temperature)、高圧力の科学と技術、**24**, 126-135. 査読あり

5. A. Shimojuku, T. Yoshino and D. Yamazaki, 2014. Electrical conductivity of brine-bearing quartzite at 1 GPa: implications for fluid content and salinity of the crust. *Earth, Planets and Space*, **66**: 2. doi: 10.1186/1880-5981-66-2 査読あり

6. X. Guo, and T. Yoshino, 2014. Pressure-induced enhancement of proton conduction in brucite. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 813-819. doi:10.1002/2013GL058627. 査読あり

7. T. Yoshino, A. Shimojuku, D. Li, 2014. Electrical conductivity of stishovite as a function of water content. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **227**, 48-54. doi: 10.1016/j.pepi.2013.12.003 査読あり

8. X. Guo, T. Yoshino, T. Okuchi, N. Tomioka, 2013. H-D interdiffusion in brucite at pressures up to 15 GPa. *Am. Mineral.*, **98**, 1919-1929. doi: 10.2138/am.2013.4550 査読あり

9. T. Yoshino, T. Katsura, 2013. Electrical

conductivity of mantle minerals: Role of water in conductivity anomalies. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **41**, 605-628. doi: 10.1146/annurev-earth-050212124022 査読あり

10. X. Guo, T. Yoshino, 2013. Electrical conductivity of dense hydrous magnesium silicates with implication for conductivity in the stagnant slab. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **369-370**, 239-247. doi: 10.1016/j.epsl.2013.03.026 査読あり

11. B. Zhang, T. Yoshino, X. Wu, T. Matsuzaki, S. Shan, T. Katsura, 2012. Electrical conductivity of enstatite as a function of water content: implications for the electrical structure in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **357-358**, 11-20. doi: 10.1016/j.epsl.2012.09.020 査読あり

12. T. Yoshino, A. Shimojuku, S. Shan, X. Guo, D. Yamazaki, E. Ito, Y. Higo, K. Funakoshi, 2012. Effect of temperature, pressure and iron content on the electrical conductivity of olivine and its high-pressure polymorphs. *J. Geophys. Res.*, **117**, B08205, doi:10.1029/2011JB008774. 査読あり

13. T. Yoshino, T. Katsura, 2012. Re-evaluation of electrical conductivity of anhydrous and hydrous wadsleyite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **337-338**, 56-67. doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.023 査読あり

〔学会発表〕(計 44 件)

1. 芳野極、D-DIA プレスの周期振動による Q 値測定、第 53 回高圧討論会、2012 年 11 月 7-9 日、大阪大学、大阪
2. 芳野極 (INVITED)、電気伝導度から見た地球内部の水、第 60 回日本地球化学会年会、2012 年 9 月 12 日、九州大学、福岡
3. T. Yoshino, Electrical conductivity of volatile-bearing partial molten peridotite, AOGS-AGU (WPGM) Joint Assembly, Singapore, 16th August, 2012
4. W. Sun, T. Yoshino, A. Shimojuku, X. Guo, H/D interdiffusion in Wadsleyite, 地球惑星科学

連合大会 2013 年会、2013 年 5 月 19 日、幕張国際会議場、千葉県

5. T. Yoshino, Electrical conductivity of stishovite: effects of Al_2O_3 and water, 地球惑星科学連合大会 2013 年会、2013 年 5 月 19 日、幕張国際会議場、千葉県

6. X. Guo, T. Yoshino, Electrical conductivity measurement of albite-quartz-water system under high P/T conditions, 地球惑星科学連合大会 2013 年会、2013 年 5 月 22 日、幕張国際会議場、千葉県

7. 芳野 極、山崎 大輔、米田 明、辻野 典秀、西原 遊、肥後 佑司、舟越 賢一、D-DIA 型プレスを用いた短周期振動油圧システムの開発、第 5 4 回高压討論会、新潟大学、2013 年 11 月 15 日

8. T. Yoshino, B. Zhang, Origin of conductivity anomalies in the asthenosphere, AGU fall meeting 2013, San Francisco, 11th December, 2013.

9. T. Yoshino, B. Zhang (*INVITED*), Electrical conductivity of partial molten peridotite: effects of volatile components and shear deformation, Geofluid 3: Nature and Dynamics of Fluids in Subduction Zones Symposium, Tokyo Tech, 1st March.

10. D. Yamazaki, T. Yoshino, Y. Higo, K. Funakoshi, Viscoelastic relaxation of antigorite at 1 GPa, Geofluid 3: Nature and Dynamic of Fluids in Subduction Zones Symposium, Tokyo Tech, 1st March.

11. 芳野 極・山崎大輔・肥後祐司・舟越賢一、高温高压下における周期振動実験による地震波減衰測定、JpGU meeting 2014, 2014/4/28-2014/5/2, 横浜パシフィコ、神奈川県

12. C. Zhao, T. Yoshino, Electrical conductivity of San Carlos clinopyroxene as a function of water content, JpGU meeting 2015, 2015/5/25, 幕張国際会議場、千葉

13. W. Sun, T. Yoshino, N. Sakamoto, H. Yurimoto, D/H exchange in wadsleyite and ringwoodite: Implications for electrical conductivity, JpGU meeting 2015, 2015/5/25, 幕張国際会議場、千葉

14. T. Yoshino, S. Kamada, E. Ohtani, N. Hirao, Electrical conductivity of Al-bearing bridgmanite, AGU fall meeting 2015, 2015/12/14, San Francisco

〔図書〕(計 1 件)

T. Katsura, T. Yoshino, 2015. Heterogeneity of electrical conductivity in the oceanic upper mantle. In *The Earth's Heterogeneous Mantle*, edited by A. Khan, F. Deschamps, Springer, Netherland. pp. 173-204. 査読あり
doi: 10.1007/978-3-319-15627-9_6

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳野 極 (YOSHINO, Takashi)
岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授
研究者番号 : 30423338

(2) 研究分担者

米田 明 (YONEDA, Akira)
岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授
研究者番号 : 10262841

西原 遊 (NISHIHARA, Yu)
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 : 10397036

山崎 大輔 (YAMAZAKI, Daisuke)
岡山大学・地球物質科学研究センター・准教授
研究者番号 : 90346693

(3) 連携研究者
なし