

平成21年6月30日現在

研究種目:若手研究(A)

研究期間:2006~2008

課題番号:18684030

研究課題名(和文) 下部マントル最下部に存在する地震波低速度層の起源の解明

研究課題名(英文) Study of origin of seismic ultra-low velocity zone at bottom of lower mantle

研究代表者

小野 重明(ONO SHIGEAKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・主任研究員

研究者番号:20313116

研究成果の概要：地震学的手法によって存在が示唆されている下部マントル最下部での地震波の低速度層に注目して、その起源を明らかにすることを目的とした。鉄化合物を合成して、高温高压その場測定を行い、それぞれの物性を決定した。その結果、固体の物性変化のみでは説明することが困難であり、低速度層の起源として、液体の存在が必要であることが導かれた。さらに、ケイ酸塩メルトより、鉄のメルトの方が観測結果をうまく説明できることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・岩石・鉱物・鉱床学

キーワード：地震波低速度層、コア、マントル、高温高压

1. 研究開始当初の背景

地球内部において、ケイ塩鉱物で構成されているマントルと鉄で構成されているコアは、全く異なった性質をもっている。その異なった物質が接している、コア・マントル境界で起こる現象は、地球の層構造形成や、熱及び物質化学進化に対して決定的な影響を与えることが予想される。そのため、コア・マントル境界で観測される種々の異常現象を理解することはきわめて重要である。その中で、成因がよくわかっていないものとして、マントル最下部での地震波の低速度層の存在がある。その成因として、これまでいくつ

かのモデルが提案されてきたが、どのモデルが妥当であるかということに対しては決着が付いていない。なぜならば、それぞれのモデルを検証するためには、マントル物質やコア物質の物性を正確に知り、予想される観測値を実際の観測値と比べることが不可欠であるが、我々はマントル物質やコア物質の正確な物性を知らないためである。そこで、高温高压実験の手法を用いて物質科学的側面から、下部マントル最下部での地震波の低速度層の成因を明らかにするために、下部マントル中に相当する温度圧力条件での基礎研究が不可欠であると考えられていた。

2. 研究の目的

マントル物質やコア物質の物性について、高温高压条件でのその場測定をすることを目的とした。これまで、X線を用いた測定により鉱物の形を取っている固体のマントル物質についての研究は、われわれを含めて数多くの研究がなされてきた。しかし、下部マントル最下部での地震波の低速度層の成因を考えるに際しては、液体の存在を無視できない。なぜならば、コア・マントル境界は温度境界層であるため、マントル側に比べてコア側の温度が非常に高いことが予想される。そのため、下部マントル最下部では一部が溶融している可能性がある。したがって、液体（メルト）の存在の可能性を考えることは不可欠である。そこで本研究では、固体の物性の精密測定を試みて、固体の物性変化のみで、低速度層の成因を説明しうるかどうかを検証した。高温高压実験によって下部マントルの条件を実現し、X線、ラマン、赤外分光測定法を使って固体のマントル物質の体積・密度・熱膨張率・圧縮率・熱伝導率などを見積もる。これらの複数の測定方法によって得られたデータを組み合わせることにより、過去の研究の問題点を明らかにし、地震波の低速度層の成因を明らかにすることを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、ダイヤモンドアンビル型高压発生装置とレーザー式加熱方法を組み合わせた実験方法を用いた。測定装置に関しては、X線回折実験は従来の方法がすぐに使用できたため、特別な準備は必要なかった。X線回折実験は放射光施設である Spring-8 とフォトンファクトリー(PF)で行った。ラマンおよび赤外測定装置に関しては、新たに実験装置を開発した。理由は、高温状態の試料は、分光測定にとってのノイズとなる輻射光が発生する。その影響を最小限にするための、特殊なフィルターを装備した装置を開発する必要があった。また、可視（ラマン）測定と赤外測定の同時測定により、信頼性の高いデータを得ることができた。初年度に、高温高压その場分光測定のための、実験および測定装置の開発を行い、マントル物質のアナログ物質である酸化物を用いて、これらの装置のパフォーマンスをチェックした。アナログ物質は、比較的低い圧力、低い温度で実験が行える物を選定した。なぜならば、低温条件では、分光測定のノイズとなる試料からの輻射光が弱いため、測定が比較的簡単であるためである。また、低压条件が有利な点としては、ダイヤモンドアンビルセルは圧力が高くなるに従い、すべての部品が小さくなる。例えば、マントル最下部に相当する140万気圧の条件では、試料室のサイズは、高さ10-20

ミクロン、直径50-80ミクロンである。すなわち、圧力が高くなるに従い、実験部品の加工が難しくなるからである。そして、次年度以降では、目的のマントル物質およびコア物質の測定を開始した。X線実験の空間分解能はせいぜい10-20ミクロン程度であるが、立ち上げた予定のラマン分光装置の空間分解能は2-3ミクロンであるので、X線で得られる情報よりは、精密なデータを得ることができた。一方、赤外分光装置の空間分解能は、赤外線の波長に依存するため、本研究で開発する装置では、せいぜい50ミクロンであった。しかし、赤外分光測定はラマン分光測定と比較して、相補的データを得ることができるので、空間分解能が低くても、興味深いデータを得ることができた。これらの相互のデータを比較することにより、総合的な物性の見積もりが可能になった。

4. 研究成果

本研究課題では、地震学的手法によって存在が示唆されている下部マントル最下部での地震波の低速度層に注目して、その起源を明らかにすることを目的とした。そのため、マントル物質とコア物質の弾性的な物性特性について、高温高压条件でのその場測定を行い、そのデータを考慮して、下部マントル最下部の層構造の決定を試みた。核・マントル境界では、外核を構成する流体鉄とマントルを構成するケイ酸塩鉱物が接しているため、これらの物質の反応物が、下部マントル最下部に存在している可能性がある。したがって、いくつかの鉄化合物を合成して、高温高压その場測定を行い、それぞれの物性を決定した。合成した鉄化合物は、酸化鉄、硫化鉄、珪化鉄、炭化鉄の4種類である。

酸化鉄においては、低温では歪んだB1型結晶構造が安定に存在することが判明した。従来、高温領域で安定であると報告されていたB8構造は、大きな安定領域を持たず、B1型構造が、地球マントル最下部に相当する温度圧力条件で安定であることがわかった。また、その際、鉄のスピン状態は、常圧条件のときとは異なり、低スピン状態が安定であることも判明した。

硫化鉄の研究では、二つの新鉱物を発見し、それぞれの鉱物において、興味深い意義を見出した。比較的低压で出現する新鉱物は、火星の内部の金属核の起源の研究において、きわめて重要な役割を果たしている可能性が導かれた。また、比較的高圧で出現した新鉱物は、地球内核の化学組成を見積もる上で、基礎的なデータを与えると思われる。

珪化鉄の研究では、マントル最下部に相当する温度圧力において、B2型結晶構造をとることが明らかになった。そして、その結晶構造では、珪化鉄の電子状態は、低スピン状

態であることが見積もられた。この鉱物から推定される地震波速度は、ケイ酸塩マントル物質より十分に小さく、マントル最下部の低速度層を説明することが可能であると考えられる。

炭化鉄においては、高圧条件でも構造相転移を起こさないことが確認された。一方、磁気相転移が起こることが判明し、下部マントルに相当する約50ギガパスカルで高スピン状態から、低スピン状態へ相転移することが判明した。

さらに、純鉄についても研究を行い、約60ギガパスカルで、反強磁性体から常磁性体への磁気相転移を確認し、この磁気相転移は、スピン相転移に伴って起こることがわかった。

これらの実験結果の信頼性を確認するため、第一原理計算により、物性を見積もりを行い、実験結果と比べることも行った。酸化鉄に関しては、過去のいくつかの理論計算結果は矛盾しており、過去の実験結果も大きな誤差を含み、問題がある。我々の研究結果は、メスバウアー測定で得られた結果と調和的であった。一方、シンクロトロン放射光を用いた過去のX線分光測定には、問題があることが示唆された。硫化鉄に関しては、第一原理計算による相図と、実験結果に基づいて決められた相図に間に、食い違いが見られた。相図の形は矛盾しないが、相境界の圧力が、実験と計算では、大きな矛盾が認められた。このことが起こる原因はよくわからず、今後の課題となった。珪化鉄に関しては、我々の実験結果は、過去の計算結果とほぼ一致していて、大きな問題はないように思われた。しかし、B2型相を一気圧で測定した所、過去の実験結果と有意な差が認められた。我々の実験データと理論計算結果が良い一致を示しているため、B2型相は、一気圧では準安定なため、過去の研究では、実験試料を回収する際に、部分的にアモルファス化が起きている可能性があり、このことが実験データの食い違いに現れているかもしれない。炭化鉄においては、我々の実験データと、我々の計算結果は、非常に良い一致を示しており、信頼しうるデータを得られたと自負している。純鉄に関しては、過去の理論計算でスピン相転移が予言されていたが、高圧実験でははっきりとしたことがわからなかった。我々の実験では、スピン相転移に伴う物性変化を明瞭に捉えることに成功し、そのスピン相転移圧力も、理論的な予言とほぼ一致した。本研究の目的のひとつに、従来の実験より、より精度の高いデータを得ることを目標としていたが、純鉄の研究において、この目標が達成されていることが示された。

それぞれの鉄および鉄化合物では、核・マントル境界に相当する圧力条件では、磁気相転移を起こし、1気圧下で測定されている物

性値とは大きく異なることが判明した。つまり、本研究で用いた手法である高温高圧その場測定を行わなければ、それぞれの物性値を正確に決定することはできないということである。

本研究から得られた結果を考察すると、下部マントル最下部での地震波の低速度層は、固体の物性変化のみでは説明することが困難である。これらのことから、低速度層の起源として、液体の存在が必要であることが導かれた。低速度に対する寄与としては、ケイ酸塩メルトより、鉄のメルトの方が大きく、少ない量で、低速度領域を形成することが可能である。一方、下部マントルに相当する温度では、温度が低すぎるため純鉄のメルトは固化してしまい、安定ではない。したがって、ある程度の軽元素が溶け込んだ鉄メルトであることが必要であることが導かれた。ケイ酸塩メルトの可能性については、ある程度の量のケイ酸塩メルトが存在すれば、低速度を説明できる。しかし、この場合、多量のメルトは浸透流により、上方へ移動していき、安定に存在することは難しい。可能性としては、固体よりも密度が大きいケイ酸塩メルトの存在が必要であることが判明した。現在、地球マントル最下部に存在しうるケイ酸塩メルトの密度に関する議論が盛んに行われ、周囲にマントルよりも思いメルトの存在を主張する研究も報告されている。なぜならば、高圧条件では、固体と液体では圧縮機構が異なり、液体の方が圧縮率が高くなるため、密度の逆転が起こる可能性があるからである。本研究により、液体の存在は不可欠であることが示されたが、鉄化合物メルトか、あるいはケイ酸塩メルトかという問題を明らかにするためには、液体の密度および、その存在に起因する地震波速度の低下を精密に見積もることが不可欠であることが導き出された。

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14件)

- ① S. Ono, J. P. Brodholt, G. D. Price, Phase transitions of BaCO₃ at high pressures, *Mineralogical Mag.*, 72, 659-665, 2008, 査読有
- ② S. Ono, J. P. Brodholt, D. Alfè, M. Alfredsson, G. D. Price, *Ab initio* molecular dynamics simulations for thermal equation of state of B2-type NaCl, *J. Appl. Phys.*, 103, 023510, 2008, 査読有
- ③ S. Ono, J. P. Brodholt, G. D. Price, Structural phase transitions in IrO₂ at high pressures, *J. Phys. Condens. Matter*, 20, 045202, 2008,

- 査読有
- ④ S. Ono, J. P. Brodholt, G. D. Price, First-principles simulation of high-pressure polymorphs in $MgAl_2O_4$, Phys. Chem. Minerals, 35, 381-386, 2008, 査読有
 - ⑤ S. Ono, A. R. Oganov, J. P. Brodholt, L. Vočadlo, I. G. Wood, A. Lyakhov, C. W. Glass, A. S. Côté, G. D. Price, High-pressure phase transformations of FeS: novel phases at conditions of planetary cores, Earth Planet. Sci. Lett., 272, 481-487, 2008, 査読有
 - ⑥ S. Ono, Experimental constraints on the temperature profile in the lower mantle, Phys. Earth Planet. Inter., 170, 267-273, 2008, 査読有
 - ⑦ S. Ono, High-Pressure Transition of $CaCO_3$, Am. Mineral., 92, 1246-1249, 2007, 査読有
 - ⑧ S. Ono, The Lehmann discontinuity due to dehydration of subducted sediment, The Open Mineralogy Journal, 1, 1-4, 2007, 査読有
 - ⑨ S. Ono, Static compression of high-pressure phase FeSi, Eur. J. Mineral, 19, 183-187, 2007, 査読有
 - ⑩ S. Ono, Y. Ohishi, T. Kikegawa, High-pressure study of rhombohedral iron oxide, FeO, at pressures between 41 and 142 GPa, J. Phys. Condens. Matter, 19, 036205, 2007, 査読有
 - ⑪ S. Ono, A. R. Oganov, T. Koyama, H. Shimizu, Stability and compressibility of the high-pressure phases of Al_2O_3 up to 200 GPa: implications for the electrical conductivity of the base of the lower mantle, Earth Planet. Sci. Lett., 246, 326-335, 2006, 査読有
 - ⑫ S. Ono, T. Kikegawa, Y. Ohishi, Structural properties of $CaIrO_3$ -type $MgSiO_3$ up to 144 GPa, Am. Mineral., 91, 475-478, 2006, 査読有
 - ⑬ S. Ono, T. Kikegawa, Y. Ohishi, Structural property of CsCl-type sodium chloride under pressure, Solid State Commun., 137, 517-522, 2006, 査読有
 - ⑭ S. Ono, T. Kikegawa, High-pressure study of FeS, between 20 and 120 GPa, using synchrotron X-ray powder diffraction, Am. Mineral., 91, 1941-1944, 2006, 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① Shigeaki Ono, Synergy Between High-pressure Experiment and First-principle Computation in Study of Earth's Deep Interior, AGU Fall Meeting, 2008年12月18日, サンフランシスコ
- ② 小野重明, 高压条件での鉄および鉄化合

- 物の磁気相転移、日本鉱物科学会年会、2008年9月20日、秋田
- ③ Shigeaki Ono, Pressure-induced phase transition of iron sulfide and iron carbide, EMPG2008, 2008年9月8日, インズブルック
 - ④ Shigeaki Ono, Magnetic transition and equation of state of iron carbide to 400 GPa, IUCr 2008, 2008年8月26日, 大阪
 - ⑤ 小野重明, 地球内部条件での炭酸塩鉄物の安定性、連合大会、2008年5月25日、幕張
 - ⑥ Shigeaki Ono, Lehmann discontinuity due to dehydration of phengite, AGU Fall Meeting 2007, 2007年12月14日, サンフランシスコ
 - ⑦ S. Ono, High-pressure syntheses of new carbonate phases, IUCr Workshop, Advances in High Pressure Crystallography at Large Scale Facilities, 2007年9月4日, オックスフォード
 - ⑧ Shigeaki Ono, Magnetic phase transition of FeS at high pressures, 24th European Crystallographic Meeting, 2007年8月25日, モロッコ
 - ⑨ S. Ono, Phase boundary of decomposition of kyanite at high P-T, Frontiers in Mineral Sciences 2007, 2007年6月26日, ケンブリッジ
 - ⑩ Shigeaki Ono, Phase transition of $CaCO_3$ up to 200 GPa and 2600 K, EGU Meeting, 2007年4月17日, ウィーン
 - ⑪ Shigeaki Ono, High-pressure studies of FeO, FeSi, and FeS, AGU Fall Meeting 2006, 2006年12月15日, サンフランシスコ
 - ⑫ Shigeaki Ono, Physics and chemistry of $CaIrO_3$ -type postperovskite phase, 16th Annual V.M. Goldschmidt Conference, 2006年8月28日, メルボルン

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小野 重明 (ONO SHIGEAKI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部変動研究センター・主任研究員

研究者番号：20313116

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし