

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16075206

研究課題名（和文） スラブ沈降・滞留過程の物質科学的モデリング

研究課題名（英文） Modeling of slab penetration and stagnation processes

研究代表者

西山 宣正 (NISHIYAMA NORIMASA)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教

研究者番号：10452682

研究成果の概要：

大型超高压発生装置を用いた高压技術、物性測定、放射光 X 線その場観察実験を結びつけ、特にマントル遷移層領域に対応する高温高压条件下で、マントルおよびスラブを構成する物質の弾性波速度、電気伝導度、密度、変形挙動などを明らかにした。このような実験データと観測データを対比させることにより、スラブが沈み込む場であるマントル遷移層の化学組成や水の存在量に重要な制約を与えるとともに、スラブ沈降および滞留過程の物質科学的モデルを提示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004 年度	29,000,000	0	29,000,000
2005 年度	50,100,000	0	50,100,000
2006 年度	41,700,000	0	41,700,000
2007 年度	33,000,000	0	33,000,000
2008 年度	21,100,000	0	21,100,000
総計	174,900,000	0	174,900,000

研究分野：地球内部物性

科研費の分科・細目：地球深部スラブ

キーワード：弾性波速度、放射光、マントル遷移層、超高压実験、レオロジー

1. 研究開始当初の背景

申請者らのグループは大型マルチアンビル装置を用いたマントル条件下での相転移実験において多大な実績があり、研究開始当初においては SPring-8 の高压地球科学ビームラインのヘビーユーザーとして、X 線その場観察実験にもとづくマントル物質の相転移境界の精密決定や密度変化の測定において世界をリードする研究を進めていた。一方

で高压下での弾性波速度、電気伝導度など物性測定技術の開発をおこないつつあったが、このような測定技術に放射光実験を組み合わせることにより、より高い精度の実験データが得られるものと予想されていた。

他方で我が国の観測・解析グループにより、上部マントル～マントル遷移層領域における地震波速度および電気伝導度分布が高い精度・分解能で決定されつつあった。このような観測データに対して実験データを照合

させ、この領域の物質構成およびスラブの挙動を明らかにするためには、高温高压下での物性測定と放射光 X 線その場観察技術を組み合わせた、より高い精度の物性データの提供が求められていた。

2. 研究の目的

- (1) 高温高压下での弾性波速度技術と放射光 X 線その場観察実験を組み合わせることにより、マントル遷移層領域で重要であるリングウッドイトやメージャライト、また沈み込むスラブの重要な構成要素である海洋地殻物質の弾性波速度を、マントル遷移層条件下で精密に決定する。得られた測定データを地震波速度モデルと比較することにより、マントル遷移層の化学組成とスラブの沈降・滞留のモデリングをおこなう。
- (2) 高温高压下での電気伝導度精密測定を、マントル遷移層条件下で上記と同様な主要高压相に対しておこなう。主に圧力の評価を目的に、必要に応じて放射光 X 線その場観察実験を併用する。特に電気伝導度に対する水の影響を定量的に評価するため、様々な含水量の試料に対して測定をおこなう。得られた実験データを、電気伝導度観測モデルと比較することにより、特にマントル遷移層領域の含水量に対して制約をおこなう。
- (3) 高温高压下でのスラブ構成物質のレオロジーを制約するために、上記と同様な主要高压相のマントル遷移層条件下での粒成長実験をおこなう。スラブ中の高压相の粒成長の温度依存性に関する実験データに基づき、沈み込むスラブの粘性率を見積もり、その沈降・滞留過程の動的モデリングをおこなう。
- (4) 含水スラブの挙動を明らかにするため、蛇紋石を用いた脱水分解反応の温度圧力依存性および脱水過程のカイネティクスを実験的に制約する。特に上部マントル条件においてスラブに想定される比較的低温条件下で、急冷回収実験および放射光 X 線を用いた時分割測定により、これらの観察をおこなう。また、このような比較的低い温度圧力条件下で高压下変形実験をおこない、スラブ中の地震発生メカニズムに対する検討をおこなう。

- (5) 放射光 X 線その場観察実験および弾性波速度精密測定に基づき、より信頼性の高い圧力スケールの開発をおこなう。スラブの滞留過程において、660km 地震学的不連続面の主要な原因であると考えられているスピネル・ポストスピネル相転移の、相転移圧力およびクラペイロン勾配の正確な決定は極めて重要である。このためには放射光 X 線その場観察時において不可欠な、正確な圧力スケールを確立する必要がある。大容量マルチアンビル装置の利点を生かし、新しい圧力スケールの導出をおこなう。

3. 研究の方法

高压装置としては主にマルチアンビル型超高压発生装置を用いる。合成ウオズレアイト、リングウッドイト、メージャライト、MORB、蛇紋石などを出発物質として用い、上部マントル～マントル遷移層に対応する約 20 万気圧程度までの条件下で、放射光 X 線その場観察実験と物性同時測定、あるいは相変化の時分割測定をおこない、様々な物性の精密測定をおこなう。一部の実験は主に急冷回収法によりおこない、得られた試料に対して X 線回折、ラマン・赤外分光、TEM 観察、SEM-EBSD 観察などをおこなう。

得られた物性データを、観測関係の計画研究班によりえられた地震波速度モデル、電気伝導度モデルなどと対比させ、上部マントル～マントル遷移層におけるスラブと周囲のマントルの化学組成や含水量の推定をおこなうとともに、スラブの流動特性に関してモデル化をおこなう。また、これらの実験データに基づき数値シミュレーション関係計画研究班の協力により、スラブの沈降・滞留過程のモデリングをおこなう。

4. 研究成果

研究成果は 3 編の Nature 誌論文、1 編の Science 誌論文を始めとした 179 編の原著論文、および 5 冊の著書として取りまとめられている。また多くの招待講演を含む 298 件の学会発表によっても、成果の発表がなされた。以下に特に重要な成果の要点を示す。

- (1) 大型マルチアンビル装置を用いた超音波測定と放射光 X 線その場観察を組み合わせることにより、世界で初めてマントル遷移層に対応する 20 万気圧 1500 度 C 領域の弾性波速度精密測定が可能になった。この

手法を用いて主要高圧相の弾性波速度測定をおこない、これをもとに地震波速度モデルと対比することによりマントル物質の化学組成を推定した。この結果、マントル遷移層はほぼパイロライトで説明可能であるが、従来のもう一つの説であるピクロジャイトに対しては否定的な結論を得た (Irifune et al., Nature, 2008)。また、マントル遷移層の最下部はパイロライトでは説明が困難であり、スラブの本体であるハルツバージャイトが広範に層をなして存在している可能性を指摘した。

- (2) マントル遷移層の主要高圧相である、ウオズレライトやリングウッドイトに対して、高温高圧下での電気伝導度測定が系統的におこなわれた (Yoshino et al., Nature, 2008)。特に従来“水”の貯蔵庫とみなされていたマントル遷移層領域において、どの程度の水が存在するのを見積もるために、含水条件下でのこのような測定が精密におこなわれ、観測に基づく電気伝導度モデルとの対比がなされた。この結果は、マントル遷移層に多量の水が存在するとする従来の考えに否定的であったが、本研究領域における電気伝導度観測の計画研究の最新のモデルとの対比によれば少量の水の存在は否定できないことも明らかになった。
- (3) かんらん石の相転移に伴うリングウッドイトの粒成長が極めて遅いことを明らかにし、低温のスラブの粘性が低い可能性を示した (Yamazaki et al., Earth Planet. Sci. Lett., 2007)。また、マントル遷移層におけるスラブのもう一つの重要な高圧相であるメージャライトに対しても、実験的研究に基づきその粒径変化とそれに伴う粘性変化に関して検討した。この結果、リングウッドイトがスラブ中で相転移に伴い大きく粒径が低下し、その後スラブの沈み込みの時間スケールであまり大きく成長しないのに対し、nucleation and growth による相転移とは異なる輝石のメージャライト転移では、粒径変化はほとんどみられない。これらの結果はメージャライトが主体の海洋地殻部分が、その下のハルツバージャイト的なスラブ物質より高粘性の可能性を示唆するものである。
- (4) 蛇紋石の脱水反応のカイネティクスを、X線その場観察実験による時分割測定により明らかにした。この結果、この脱水反応がスラブ上面に想定される温度 (~600–700

度 C) においても急激に進行することが明らかになるとともに、晶出する結晶のシーケンスは単純ではなく、生成する流体相の組成に大きく依存しているがわかった (Inoue et al., J. Mineral. Petrol. Sci., 2009)。一方で、蛇紋石を主体とする蛇紋岩の変形挙動に関する実験的研究もすすめられた。この結果、蛇紋石の(001)面のすべりが、蛇紋岩の変形に主要な影響を与えることが明らかになった。このような弱い結合面のすべりに起因する変形は比較的低温下でも生じ、歪みの蓄積とその急激な開放が起り、地震発生のメカニズムとして重要である可能性がある。

- (5) 焼結ダイヤモンドアンビルを用いた MgO の圧縮に関する新しい実験データに、従来得られている様々な実験データを組み合わせることにより、熱圧力係数の体積依存性を表す新たなモデルを構築し、これまでで最も信頼性の高い新しい圧力スケールを提案した (Tange et al., J. Geophys. Res., 2009)。また、一方で高温高圧下での MgO の弾性波速度データに基づき、これとは独立した新しい圧力スケールも導出した。これらの圧力スケールは互いに良い一致を示し、これに基づきスピネル-ポストスピネル境界の最決定を利用可能な実験データに基づいておこなった。この結果、この相転移は 660km 地震学的不連続に対応する圧力と比較し、やや (~0.5GPa) 低い圧力下で起こると結論づけられた。

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 179 件)

- ① T. Katsura, T. Yoshino, M.A. G. M. Manthilake and T. Matsuzaki, Thermal expansion of forsterite at high pressures determined by in situ X-ray diffraction: the adiabatic geotherm in the upper mantle, Phys. Earth Planet. Inter., in press, 2009, 査読有。
- ② T. Katsura, S. Yokoshi, K. Kawabe, A. Shatskiy, M.A. G. M. Manthilake, S.-M. Zhai, H. Fukui, A. C. I. H. Hegoda, Y. Yoshino, D. Yamazaki, T. Matsuzaki, A. Yoneda, E. Ito, M. Sugita, N. Tomioka, K. Hagiya, A. Nozawa and K. Funakoshi, P-V-T relations of MgSiO₃ perovskite determined by in situ X-ray diffraction

- using a large-volume high-pressure apparatus, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01305, 2009, 査読有.
- ③ T. Irifune, Y. Higo, T. Inoue, Y. Kono, H. Ohfuji and K. Funakoshi, Sound velocities of majorite garnet and the composition of the mantle transition region, *Nature*, 451, 814-817, 2008, 査読有.
- ④ Y. Higo, T. Inoue, T. Irifune, K. Funakoshi and B. Li, Elastic wave velocities of $(\text{Mg}_{0.91}\text{Fe}_{0.09})_2\text{SiO}_4$ ringwoodite under P-T conditions of the mantle transition region, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 166, 167-174, 2008, 査読有.
- ⑤ R. Han, T. Shimamoto, T. Hirose, J.H. Ree, J. Ando, Ultra-low friction of carbonate faults caused by thermal decomposition, *Science*, 316, 878-881, 2007, 査読有.
- ⑥ Y. Kono, Y. Higo, H. Ohfuji, T. Inoue and T. Irifune, Elastic wave velocities of garnetite with a MORB composition up to 14 GPa, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14308, 2007, 査読有.
- ⑦ T. Yoshino, T. Matsuzaki, S. Yamashita and T. Katsura, Hydrous olivine unable to account for conductivity anomaly at the top of the asthenosphere, *Nature*, 443, 973-976, 2006, 査読有.
- ⑧ J. Ando, Mechanism of the olivine-ringwoodite transformation in the presence of aqueous fluid, *Phys. Chem. Min.*, 33, 377-382, 2006, 査読有.
- ⑨ T. Inoue, T. Irifune, Y. Higo, T. Sanehira, Y. Sueda, A. Yamada, T. Shinmei, D. Yamazaki, J. Ando, K. Funakoshi and W. Utsumi, The phase boundary between wadsleyite and ringwoodite in Mg_2SiO_4 determined by in situ X-ray diffraction, *Phys. Chem. Minerals*, 33, 106-114, 2006, 査読有.
- ⑩ Y. Higo, T. Inoue, B. Li, T. Irifune, and R. C. Liebermann, The effect of iron on the elastic properties of ringwoodite at high pressure, *Phys. Earth Planet. Inter.* 159, 276-285, 2006, 査読有.
- ⑪ N. Nishiyama, Y. Wang, T. Uchida, T. Irifune, M. L. Rivers and S. R. Sutton, Pressure and strain dependence of the strength of sintered polycrystalline Mg_2SiO_4 ringwoodite, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L04307, 2005, 査読有.
- ⑫ D. Yamazaki, T. Inoue, M. Okamoto and T. Irifune, Grain growth of ringwoodite and its implication for rheology of the subducting slab, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 871-881, 2005, 査読有.
- [学会発表] (計 298 件)
- ① N. Nishiyama, T. Irifune, Y. Wang, T. Sanehira, M. L. Rivers, Deformation experiments of polycrystalline sintered diamond materials in the DDIA with HIMEDIA pistons, AGU FALL MEETING, 19 December, 2008, San Francisco, USA.
- ② D. Yamazaki, J. Ando, S. Karato, H. Ohfuji, A. Yoneda, T. Yoshino, Lattice preferred orientation of lower mantle materials and seismic anisotropy in the D" layer 5th Annual Meeting AOGS 2008, 16 Jun 2008, Busan, Korea.
- ③ T. Irifune, Y. Higo, Y. Kono, T. Inoue, K. Funakoshi, B. Li, Sound velocity measurements to 20 GPa and 1800K at SPring-8 and some applications, AGU 2008 Joint Assembly, 28 May 2008, Fort Lauderdale, USA.
- ④ T. Inoue, M. Katsuda, T. Irifune, H. Yurimoto, Partitioning of water in mantle minerals, EGU General Assembly 2008, 16 April, 2008, Vienna, Austria.
- ⑤ T. Irifune, Y. Higo, Y. Kono, T. Inoue, K. Funakoshi, Sound velocities of mantle and subducted slab lithologies: Constraints from combined in situ X-ray and ultrasonic measurements, AGU FALL MEETING, 14 December 2007, San Francisco, USA.
- ⑥ N. Nishiyama, Y. Wang, M. L. Rivers, S. R. Sutton, D. Cookson, Rheology of hcp-iron up to 19 GPa and 600 K in the D-DIA, AGU, Fall Meeting, 14 December 2007, San Francisco, USA.
- ⑦ Y. Tange, T. Irifune, K. Funakoshi, Equation of state of MgSiO_3 -perovskite, AGU Fall Meeting, 13 December 2007, San Francisco, USA.
- ⑧ T. Irifune, Chemical composition of the mantle transition region: constraints from sound velocity measurement at high pressure and high temperature, Wilhelm and Heraeus Seminar: Density, Temperature and Elastic Constants of Earth's Mantle II, 14 September 2007, Munich, Germany.
- ⑨ T. Irifune, Y. Higo, Y. Kono, T. Inoue, K. Funakoshi, Elastic wave velocities of pyrolite and MORB at P, T conditions of

the mantle transition region, IUGG2007, 6 July 2007, Perugia, Italy.

- ⑩ K. Funakoshi, A. Nozawa, and Y. Tange, Recent developments for high pressure research using large volume press at the SPring-8, 14 April 2007, SMEC2007, Miami, USA.

[図書] (計 5 件)

- ① T. Irifune and T. Tsuchiya, Phase transitions and mineralogy of the lower mantle, in Treatise on Geophysics 2, D. Price (ed.), Elsevier Sci. Publ., 33-62, 2007.
- ② T. Inoue, T. Ueda, Y. Higo, A. Yamada, T. Irifune and K. Funakoshi, High-pressure and high-temperature stability and equation of state of superhydrous phase B, In "Earth's deep water cycle, Geophysical monograph series 168", Steven D. Jacobsen and Suzan van der Lee (eds.), AGU, pp.147-157, 2006.
- ③ K. Funakoshi, H. Kaneko, High-Pressure Angle-Dispersive Powder Diffraction Using an Energy-Dispersive Setup and White Synchrotron Radiation, Y. Wang, T. Uchida, N. Nishiyama, R. VonDreele, A. Nozawa, K. Advances in High-Pressure Technology for Geophysical Applications, J. Chen, Y. Wang, T. Duffy, G. Shen, L. Dobrzhinetskaya (eds.), Elsevier Academic Press, 339-352, 2005.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西山 宣正 (NISHIYAMA NORIMASA)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教
研究者番号 10452682

入船 徹男 (IRIFUNE TETSUO)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・教授
研究者番号 80193704
(交替：平成 20 年 7 月 24 日まで)

(2) 研究分担者

大藤 弘明 (OHFUJI HIROAKI)
愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・助教
研究者番号 80403864

桂 智男 (KATSURA TOMOO)
岡山大学・地球物質科学研究センター・教授
研究者番号 40260666

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

安東 淳一 (ANDO JUNICHI)
広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号 50291480

舟越 賢一 (FUNAKOSHI KENICHI)
(財)高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・副主幹研究員
研究者番号 30344394

井上 徹 (INOUE TORU)
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 00291500
(辞退：平成 21 年 1 月 5 日)