

機関番号：15301  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2007～2010  
 課題番号：19204044  
 研究課題名（和文）複合体としてのマントル岩石物性：試料合成・弾性測定・モデリングによる実証的研究  
 研究課題名（英文）Physical properties of composite mantle rock: sample synthesis, elasticity measurement, and modeling

## 研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：ステショバイトの純良単結晶の合成に成功し、X線、FTIR、EPMA等で結晶評価を行った。プリセッションカメラにより結晶方位を確定し、200-500ミクロン長の直方体に整形した。高周波共振法で約20本のピークを確認し、弾性定数を決定した。マルチバッファレイヤーモデルを開発し、2次元多孔質体の空孔効果を系統的に解析し、その結果から、空孔率、空孔の扁平率、ポアソン比と実効弾性定数の間に極めてエレガントな解析式を見出すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：Single crystal stishovite was grown in the high pressure apparatus. Its quality was checked by X ray, FTIR, and EPMA techniques. Crystal orientation was determined by precession camera. It was shaped to a rectangle with 200-500 micron meters. By detecting 20 peaks in high frequency resonance ultrasound spectroscopy, crystal elastic constants were determined. Porosity effect was systematically analyzed by using the buffer layer model in FEM analysis. The result was formulated as an elegant function of Poisson ratio, asperity, and porosity.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費       | 間接経費       | 合計         |
|--------|------------|------------|------------|
| 2007年度 | 22,200,000 | 6,660,000  | 28,860,000 |
| 2008年度 | 10,800,000 | 3,240,000  | 14,040,000 |
| 2009年度 | 2,200,000  | 660,000    | 2,860,000  |
| 2010年度 | 2,200,000  | 660,000    | 2,860,000  |
| 年度     |            |            |            |
| 総計     | 37,400,000 | 11,220,000 | 48,620,000 |

研究分野：地球惑星科学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：複合弾性、有限要素法、共振法、マントル鉱物、ステショバイト

## 1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまで高圧相鉱物の弾性定数測定を主要なテーマとしてきた。構成鉱物の弾性

から鉱物集合体としての岩石の弾性を拘束することに関心があったが、既存の方法に不満を抱いていたので手をつけずに来た。複合物

質の平均弾性を推定する問題は1950年代からのものであり、Voigt-Reuss-Hill平均やHashin&Strikmann平均が著名である。1970年代には解析的手法に基づくクラックモデルが展開された。これらの方法は、局部的に異方性を持つ集合体が、全体としては等方的であるという“極限的”仮定から出発している。従って全体として異方性を持つ岩石の研究には適用できない。その他にも各種モデルが提案されているが、いずれも解析的に取り扱うために都合のよい仮定を置いている。あたかも応用数学の問題のようで現実性に乏しいと感じてきた。

申請者は申請時には有限要素法解析に習熟しており高温高圧発生技術に応用するようになった。有限要素法は偏微分方程式の数値解法の一つであり、特別な仮定なしに任意の物体の応力-歪関係や振動波動状態を実用上十分な精度で求めることができる。一方、電子顕微鏡技術の進歩により岩石を構成する鉱物の結晶配向が electron backscatter diffraction (EBSD) 法で詳細に測定できるようになった。有限要素法モデルシミュレーションと EBSD による結晶配向測定データを組み合わせることにより、異種鉱物集合体の巨視的物性を拘束できる。このような研究方法は材料工学の分野で行われていることであるが、岩石物性分野では世界的に見ても、まだ、普及していなかったため、この方向の研究を着手する意義があった。

## 2. 研究の目的

深部地球解明において地震波観測は最も解像度の高い観測データである。地震波トモグラフィなどの結果を物質科学的に理解するためには地球深部構成する各種鉱物の物性データが必要である。しかしながらマントル岩石は複数の鉱物の集合体であり、岩石全体としての物性はテクスチャーに強く依存する。構成鉱物の単結晶物性、集合体としての結晶配向・集合形態の精密観察、有限要素法によるモデルシミュレーション、を手段として鉱物集合体としてのマントル岩石物性を拘束することが本研究課題の目的である。

## 3. 研究の方法

以下に19年度実施した研究計画項目をリストアップする。地球深部物質科学の進歩において高温高圧実験技術開発は常に重要であるが、そちらは同時申請する萌芽研究のテーマであるので本研究計画からは割愛する。また下記の③の成果である“高圧相大型単結晶試料”による各種物性測定(電気伝導度など)

も重要な研究テーマであるが、メンバーの過去・現在の科研費でサポートされているので割愛する。

### ① EBSD結晶配向測定装置の導入(米田・山崎)

本研究計画による設備投資の目玉である。鉱物集合体としての岩石物性研究を行うためには構成鉱物の集合形態を観察することがすべての基礎となる。

### ② 緻密多結晶試料の高圧合成と巨視的弾性異方性の測定と解析(米田、芳野)

本項目のアイデアや方法はすでに記述済みである。

### ③ 高圧相大型単結晶の育成と単結晶弾性測定(シャツキー・桂・米田)

シャツキー博士(分担者)の努力により大型単結晶が合成できるようになった。申請者は合成単結晶を軸だし整形し、高周波共振法で弾性測定した。すでに東北大学、大阪市立大学から試料提供の申し込みがあったように大型単結晶のニーズは国内外で大きい。今後も高品質化、大型化、量産化に取り組んで行く必要がある。

## 4. 研究成果

研究成果を下記の4項目に纏めた。

(1) EBSD結晶配向測定装置の導入と流動実験の組織観察：平成19年度に本研究費で購入予定であったEBSD装置は予算減額のため購入を断念したが、幸い平成20年度採択の基盤研究S(代表者：桂智男)で新品のFE-SEMと一括で購入できた。蒸着装置など関連装置を本研究費で整備した。山崎・芳野を中心に流動組織観察で成果を出している。

(2) 有限要素法による複合弾性論の展開：2次元多孔質体の解析から始め、予想を越えて有用な結果を得ることが出来た。現在は2次元複合体と3次元多孔質体の解析を実施中である。比較的短期間で目標を達成できると考えている。

(3) 緻密多結晶試料の高圧合成と巨視的弾性異方性の測定と解析：CaIrO<sub>3</sub>の焼結体を作成しEBSD観察と弾性的異方性を測定し、D層の地震波速度異方性を考察する予定であったが、純良な焼結体作成に失敗し頓挫している。上記②と連携させて新たな展開を模索しているところである。

(4) 高圧相大型単結晶の育成と単結晶弾性測定：SiO<sub>2</sub>の高圧相であるスティショバイトの大型単結晶の合成に成功し、直方体試料に整形し結晶弾性定数測定に成功した。得られた結果は従来のブリュアン法によるものより

1-2%高い弾性波速度を示唆する結果を得た。上記に示したように基盤研究Aの諸課題が一区切りついたところである。最終年度前申請により基盤Sに採択されたので、最終年度で予定していた研究内容は基盤Sの計画に含まれることになった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(全て査読付、計 22 件)

- ①A. Shatskiy, K. Litasov, T. Matsuzaki, K. Shinoda, D. Yamazaki, A. Yoneda, E. Ito, T. Katsura Single Crystal Growth of Wadsleyite American Mineralogist, In press. 94 1130-1136 2010.
- ②T. Katsura, et al. Thermal expansion of forsterite at high pressures determined by in situ X-ray diffraction: the adiabatic geotherm in the upper mantle, Phys. Earth Planet. Int., in press. 174 86-92 2010.
- ③A. Yoneda, M. Osako, E. Ito Heat capacity measurement under high pressure: a finite element method assessment, Phys. Earth Planet. Int., 174 309-314 2009.
- ④D. Yamazaki, T. Yoshino, T. Matsuzaki, T. Katsura, A. Yoneda Texture of (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> perovskite and ferro-periclase aggregate: implications for rheology of the lower mantle, Phys. Earth Planet. Inter., 174 138-144 2009.
- ⑤T. Katsura, et al. P-V-T relations of wadsleyite determined by in situ X-ray diffraction in a large-volume high-pressure apparatus. Geophys. Res. Lett., 36 L11307 2009.
- ⑥T. Katsura, et al. P-V-T relations of MgSiO<sub>3</sub> perovskite determined by in situ X-ray diffraction using a large-volume high-pressure apparatus, Geophys. Res. Lett., 36 L01305 2009.
- ⑦E. Ito, T. Katsura, D. Yamazaki, A. Yoneda, M. Tado, T. Ochi, E. Nishibara, A new 6-axis apparatus to squeeze the Kawai-cell of sintered diamond cubes Phys. Earth Planet. Inter., 174 264-269 2009.
- ⑧Ito, E., Katsura, T., Yamazaki, D., Yoneda, A., Tado, M., Nishibara, E., Nakamura, A., Ochi, T. Manufacture of a New 6-axis Apparatus, The Review of High Pressure Science and Technology 18

208-213 2008.

- ⑨M. Sugahara, A. Yoshiasa, A. Yoneda, T. Hashimoto, S. Sakai, M. Okube, O. Ohtaka Single crystal X-ray diffraction study of CaIrO<sub>3</sub>, American Mineralogist, 93 1148-1152 2008.
- ⑩S. Zai, E. Ito, A. Yoneda Effects of pre-heated pyrophyllite gaskets on high-pressure generation in the Kawai-type multi-anvil experiments High Pressure Res. 28 265-271 2008.
- ⑪A. Kubo, A. Yoneda, T. Katsura, E. Ito Deviatoric stress and mean pressure in MgO compressed in a Kawai-type apparatus above 30 GPa: Evidence for reduction of deviatoric stress by annealing, J. Phys. Chem. Solids, 69 2261-2264 2008.
- ⑫H. Fukui, T. Katsura, T. Kuribayashi, T. Matsuzaki, A. Yoneda, E. Ito, Y. Kudoh, S. Tsutsui, A. Baro Precise determination of elastic constants by high-resolution inelastic X-ray scattering, Journal of Synchrotron Radiation 15 618-623 2008.
- ⑬Shatsky et al Growth of large (1 mm) MgSiO<sub>3</sub> perovskite single crystals: A thermal gradient method at ultrahigh pressure Am. Miner. 92 1744-1749 2007.
- ⑭Yoneda, A., Aizawa, Y., Rahman, Md. M., Sakai, S High Frequency Resonant Ultrasound Spectroscopy to 50 MHz: Experimental Developments and Analytical Refinement. Jpn J Appl Phys 46 7898-7903 2007.
- ⑮Yoshino et al. Complete wetting of olivine grain boundaries? by a hydrous melt near the mantle transition zone. Earth Planet. Sci. Lett. 256 466-472 2007.
- ⑯Yoshino and Yamazaki, Grain growth kinetics of CaIrO<sub>3</sub> perovskite and post-perovskite, with implications for rheology of D'' layer. Earth Planet. Sci. Lett. 255 485-493 2007.
- ⑰Yamazaki et al. Phase boundary between ilmenite and perovskite structures in MnGeO<sub>3</sub> determined by in situ X-ray diffraction. Phys. Chem. Minerals, 34 269-273 2007.
- ⑱Katura et al. Aluminum substitution mechanisms in perovskite-type MgSiO<sub>3</sub>: An investigation by Rietveld analysis.

Phys. Chem. Minerals. 34 257-267 2007.  
 ⑱ Katsura, T., et. al. Pressure dependence of electrical conductivity of (Mg,Fe)SiO<sub>3</sub> ilmenite. Phys. Chem Minerals 34 249-255 2007.  
 ⑳ Song, M.-S., Yoneda, A., Ito, E., Ultrasonic measurements of single-crystal gold under hydrostatic pressures up to 8 Gpa in a Kawai-type multi-anvil apparatus, Chinese Science Bulletin 52 1600-1606 2007.  
 ㉑ Katsura et al. Electrical conductivity measurements of brucite under crustal pressure and temperature conditions. Earth Planets Space 59 645-648 2007.  
 ㉒ Katsura, T., et. al. Electrical conductivity measurement of gneiss under mid- to lower crustal P-T conditions. Tectonophysics 424 93-101 2007.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 米田 明、Pore effect on macroscopic physical properties I: Composite elasticity determined using a two dimensional buffered layer FEM model, AIRAPT、2009/7/27、東京都
- ② 米田 明、有限要素法による扁平空孔系の巨視的弾性解析とクラック効果への応用、日本地球惑星科学連合 2009 年大会、2009/5/18、千葉市
- ③ 大迫正弘、米田 明、米原実秀、伊藤英司、タルクおよびジルコニアの高圧下の熱拡散率と熱伝導率、高圧力学会、2008/11/12-14、姫路市
- ④ 米田 明、芳野極、相澤義高、伊藤英司、大迫正弘、高圧地球科学における有限要素法解析の応用 I: 変動加熱場の履歴効果解析、高圧力学会、2008/11/12-14、姫路市
- ⑤ 米田 明、高圧地球科学における有限要素法解析の応用 II: 多孔質体の複合弾性論、高圧力学会、2008 年 11 月 12-14 日、姫路市
- ⑥ 米田 明、Porosity effects on macroscopic elasticity investigated by buffered multiple grid FEM model、COE-21 International Symposium, MISASA-III  
 “Origin, Evolution and Dynamics of the Earth”、2008/3/22、鳥取県倉三朝町
- ⑦ 米田 明、有限要素法による複合弾性論 I: 空孔効果の解析、高圧討論会、2007/11/21、鳥取県倉吉市
- ⑧ 米田 明、高圧地球科学における有限

要素法解析の応用、地球惑星科学合同大会、2007/5/22、千葉市

- ⑨ 米田 明、Heat capacity measurement under high pressure: a finite element method assessment、7th High Pressure Mineral Physics Seminar、2007/5/9、宮城県松島

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: トランスデューサ及びこのトランスデューサを備えた計測装置

発明者: 米田 明

権利者: 岡山大学

種類: 特許

番号: 特願 2007-521368

取得年月日: 平成 23 年 4 月 5 日特許査定

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ:

<http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/jp/>  
<http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/~hact/o/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

芳野 極 (YOSHINO TAKAYOSHI)

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

伊藤 英司 (ITOU EIJI)

岡山大学・地球物質科学研究センター・名誉教授

研究者番号: 00033259

アントン シャツキー (ANTON SHATSKIY)

岡山大学・地球物質科学研究センター・助手

研究者番号: 90379818

(3) 連携研究者