

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究（A）
研究期間：2007～2009
課題番号：19684019
研究課題名（和文） 高圧相転移カイネティクスの含水量依存性と沈み込む海洋プレートの非平衡ミネラロジー
研究課題名（英文） Effects of water on high-pressure transformation kinetics and the metastable mineralogy in subducting oceanic plates
研究代表者 久保友明（KUBO TOMOAKI） 九州大学・大学院理学研究院・准教授 研究者番号：40312540

研究成果の概要（和文）：海洋プレートはマントル対流の冷たい下降流として数百万年かけて地球深部に沈み込み、深さ 400-800km 付近のマントル遷移層において大変形を起こし、そこでは深発地震が発生する。本研究では、それらの地球深部現象に深く関わっているプレート物質の相転移と流動のプロセスについて、特に微量の水の効果に着目しながら実験的研究を行った。得られた実験結果に基づき、地球深部プレートの鉱物構成や密度、粘性、含水量を制約し、プレートの物性とマントル対流運動との関わりについて検討を行った。

研究成果の概要（英文）：Oceanic plates descend into the Earth's deep interior as cold currents of mantle convection, and largely deform in the mantle transition zone at 400-800 km depths. The present study was intended to experimentally reveal phase transformations and plastic deformation of the plate materials, those are key processes affecting the plate dynamics. Mineralogy, density, viscosity, and water content were constrained based on the experimental results obtained, and those effects on the mantle convection were discussed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2009 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

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：地球惑星物質、相転移、流動

## 1. 研究開始当初の背景

マントル遷移層に沈み込む海洋プレートの複雑なダイナミクスを理解することは、マントルの進化と物質循環の解明のために必要不可欠であり固体地球科学の最重要課題

の1つである。それを解くためには、構成鉱物のほぼ全てが高圧相転移を起こすマントル遷移層において、プレートの物性、特に密度とレオロジーがどのように変化するのかを理解しなければならない。そのためにはプ

レートの非平衡ミネラロジーを明らかにし、相転移のカイネティクスとそれともなう岩石の組織変化（結晶粒径変化）およびレオロジー変化のカップリングを統一的に解明することが必要不可欠である。

近年、マントルや沈み込むプレートに存在する水に関する研究が盛んに行われ、地球内部の水の分布や存在量が明らかになりつつある。水はカイネティクスやレオロジーに対して温度と同様に重要なパラメーターであり、その影響を定量的に明らかにして、沈み込む海洋プレートの非平衡ミネラロジーや密度、粘性変化を検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究ではプレートを構成する海洋地殻玄武岩とプレート本体のかんらん岩について、相転移カイネティクスを考慮した非平衡ミネラロジーを実験的に明らかにする。またプレートのレオロジーを支配する流動物性を明らかにする。特に、地球内部に存在する微量な水がカイネティクスやレオロジーに与える影響に着目した実験的研究を行う。それらを基に沈み込むプレートの密度変化とレオロジー変化を明らかにし、マントル遷移層におけるプレートのダイナミクスを議論する。

## 3. 研究の方法

(1) 試料急冷法および放射光X線その場観察法を用いた高温高压実験、回収試料の電子顕微鏡観察、FTIRを用いた含水量測定などを行い、海洋地殻玄武岩およびカンラン岩物質の相転移機構とカイネティクスを明らかにする。

(2) マントル遷移層鉱物の原子拡散実験および結晶粒成長実験を行い、その領域での塑性流動を検討する。

(3) 上記1および2の実験結果と地震学的観測、対流シミュレーションを相補的に用いて、沈み込む海洋プレートの非平衡ミネラロジーや含水量、レオロジー、また上下マントル地震不連続面の性質について検討する。

(4) 新たに放射光2次元X線回折時分割測定と変形マルチアンビルプレスを組み合わせて、相転移と塑性流動のカップリングを明らかにする実験手法を検討する。

## 4. 研究成果

(1) 海洋地殻物質のパイロキシン-ガーネット相転移が2段階のプロセスを経て進行することを見だし、それぞれのカイネティクスを含水量が約 1000 wt. ppm H<sub>2</sub>O 付近の条件で明らかにした(Nishi et al., 2008, 2009)。ポストガーネット相転移カイネティクスも考慮して沈み込む海洋地殻のマントル遷移層条件における非平衡ミネラロジー

と密度を考察し、これまで重いとされていた海洋地殻物質が遷移層上部や下部マントル最上部において正の浮力を受ける場合があることを見いだした(Kubo et al., 2008; Nishi et al. 投稿準備中)。またダイヤモンド包有物によって地球深部から運ばれる海洋地殻物質の相転移組織を実験的に再現しそのカイネティクスを明らかにすることによって、ダイヤモンドがキンバライトマグマによってマントル遷移層から直接運ばれた可能性を見いだした(Nishi et al., 2010)。

カンラン岩の相転移に関しては、比較的ドライな条件において、Feを含む系でのオリビン-リングウッダイト相転移の成長カイネティクス(Wang et al. 投稿準備中)、ポストスピネル相転移の核生成-成長のカイネティクス(Kubo et al. 投稿準備中)を新たに明らかにした。

(2) マントル遷移層鉱物であるウオズレイトおよびリングウッダイトの Si および O の原子拡散速度を明らかにし、Fe や H の効果を議論した。Si が流動律速原子となることが分かり、それに基づいて遷移層の deformation mechanism map を構築し、遷移層が主に転位クリープで流動している可能性ことを見いだした(Simojuku et al., 2009; Simojuku et al. 改訂中)。また下部マントル鉱物に関して原子拡散実験および結晶粒成長実験を行い予備的な結果を得た。進行中の実験を含めて総合的に検討することにより、マントル対流にとって非常に重要な上下マントル境界の粘性コントラストを明らかにすることができる。

(3) 高压実験結果と地震観測結果、対流シミュレーションを組み合わせることでマリアナプレートの非平衡相転移とレオロジーの詳細を議論した。地震学的に観測される深さ 630km までの準安定オリビンの存在領域は非常に低温でドライな環境であることが示唆された。また相転移カイネティクスを考慮してプレートのレオロジーを検討し、準安定オリビン直下や下部マントルに入ったプレートが軟化し、特に下部マントルにおいて大きく変形する可能性があることを示した(Kubo et al., 2009)。

(4) これまで行ってきた放射光X線エネルギー分散法による高压カイネティクス研究の欠点を克服するため、新たに角度分散法による2次元X線回折時分割測定を取り入れて、高压相転移の核生成と成長のカイネティクスを、多結晶試料の回折斑点の数と強度から直接定量的に測定する手法の開発を行った(Kubo et al. 2010; Kubo et al., 投稿準備中)。また変形高压プレスと組み合わせることにより、試料の応力、歪み、相転移率、結晶粒数の時間変化をその場観察しながら、相転移カイネティクスと塑性流動のカップ

リングを実験的に明らかにする研究手法の開発に取り組み、実際に斜長石の分解相転移に適用して予備的な結果を得た (Doi et al. 投稿準備中)。これらの手法の開発は、相転移するプレートの大変形や深発地震発生の解明にとって非常に重要であると期待される。

#### 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 11 件、全て査読付)

- 1) M. Nishi, T. Kubo, T. Kato, A. Tominaga, A. Shimojuku, N. Doi, K. Funakoshi, Y. Higo, Survival of majoritic garnet in diamond by direct kimberlite ascent from deep mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 37, doi:10.1029/2010GL042706, 2010
- 2) T. Kubo, M. Kimura, T. Kato, M. Nishi, A. Tominaga, T. Kikegawa, K. Funakoshi, Plagioclase breakdown as an indicator for shock conditions of meteorites, *Nature geoscience*, 3, 41-45, 2010
- 3) T. Kubo, T. Kondo, A. Shimojuku, T. Kuwabara, T. Kato, T. Kikegawa, N. Hirao, Y. Ohishi, Time-resolved two-dimensional X-ray diffraction measurements of kinetic properties in polycrystalline high-pressure ices, *J. Phys. Conf. Ser.*, 215, 012022, 2010
- 4) Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, H. Terasaki, N. Nishiyama, T. Kubo, A. Shimojuku and N. Tsujino, Stress measurement under high pressure using Kawai-type multi-anvil apparatus combined with synchrotron radiation, *Journal of Synchrotron Radiation*, 16, 757-761, 2009
- 5) T. Kubo, S. Kaneshima, Y. Torii, S. Yoshioka, Seismological and experimental constraints on metastable phase transformations and rheology of the Mariana slab, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 287, 12-23, 2009
- 6) A. Shimojuku, T. Kubo, E. Ohtani, T. Nakamura, R. Okazaki, R. Dohmen, S. Chakraborty, Si and O diffusion in  $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  wadsleyite and ringwoodite and its implications for the rheology of the mantle transition zone, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 284, 103-112, 2009
- 7) M. Nishi, T. Kubo, T. Kato, Metastable transformations of eclogite to

garnetite in subducting oceanic crust, *J. Mineral. Petrol. Sci.*, 104, 192-198, 2009.

- 8) A. Tominaga, T. Kato, T. Kubo and M. Kurosawa, Preliminary analysis on the mobility of trace incompatible elements during the basalt and peridotite reaction under uppermost mantle conditions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 174, 50-59, 2009
- 9) T. Kubo, E. Ohtani, T. Kato, T. Kondo, T. Hosoya, A. Sano, and T. Kikegawa, Kinetics of the post-garnet transformation: Implications for density and rheology of subducting slabs, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 170, 181-192, 2008
- 10) M. Nishi, T. Kato, T. Kubo, T. Kikegawa, Survival of pyropic garnet in subducting plates, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 170, 274-280, 2008
- 11) 久保友明, 地球マントル鉱物の高压相転移カインテイクス, 高压力の科学と技術, 17, 159-172, 2007

[学会発表] (計 50 件)

- 1) T. Kubo 他, Time-resolved 2D-XRD observations of grain nucleation and growth during high-pressure transformations, International conference on high pressure science and technology (AIRAPT-22), Tokyo, 2009
- 2) M. Nishi, T. Kubo 他, Mechanisms and kinetics of the back-transformation of majoritic garnet into low-pressure phases and implications for ultradeep diamond, International conference on high pressure science and technology (AIRAPT-22), Tokyo, 2009
- 3) Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, N. Tsujino, T. Kawazoe, T. Kubo 他, Stress relaxation test of olivine under Earth's deep upper mantle conditions, International conference on high pressure science and technology (AIRAPT-22), Tokyo, 2009
- 4) R. Shiraishi, E. Ohtani, N. Doi, A. Suzuki, T. Kubo 他, High pressure deformation experiments using deformation-Cubic Anvil, D-CAP 700, with synchrotron X rays, International conference on high pressure science and technology (AIRAPT-22), Tokyo, 2009
- 5) T. Kubo 他, Metastable phase transformations and water contents in cold subducting slabs, AGU Fall Meeting,

- San Francisco, 2009 (invited)
- 6) N. Doi, T. Kato, T. Kubo 他, Transformation experiment on sodium feldspar using deformation-Cubic Anvil, D-CAP 700, with synchrotron X rays, AGU fall meeting, San Francisco, 2009
  - 7) R. Shiraishi-Ohnuma, E. Ohtani, A. Suzuki, T. Kubo 他, Deformation experiment on fayalite using deformation-Cubic Anvil, D-CAP 700, with synchrotron X rays, AGU fall meeting, San Francisco, 2009
  - 8) 久保友明 他, Nucleation-controlled (N-type) post-spinel transformation and topography of the 660-km discontinuity by mantle flow, 日本地球惑星連合2009年度大会、千葉、2009
  - 9) 土井菜保子、加藤工、白石令、久保友明 他, An in-situ X-ray diffraction study on the high-pressure decomposition reaction of albite under differential stresses, 日本地球惑星連合2009年度大会、千葉、2009
  - 10) S. Kaneshima, T. Kubo 他, Origin of the depression of the 660 km discontinuity and the motion of the Tonga slab, 日本地球惑星連合2009年度大会、千葉、2009
  - 11) Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, N. Tsujino, T. Kawazoe, T. Kubo 他, Stress relaxation test of olivine under Earth's deep upper mantle conditions, 日本地球惑星連合2009年度大会、千葉、2009
  - 12) N. Atogami, T. Kubo 他, Preliminary experiments on two-phase grain growth kinetics in perovskite and periclase aggregates at lower mantle conditions, 日本地球惑星連合2009年度大会、千葉、2009
  - 13) 下宿彰、久保友明 他, 2次元回折X線時分割測定によるオリビン-ウォズリアイト相転移の核生成速度の測定、日本鉱物科学会 2009 年年会、札幌、2009
  - 14) 土井菜保子、加藤工、久保友明 他, 差応力下におけるアルバイトの高圧相転移実験、日本鉱物科学会 2009 年年会、札幌、2009
  - 15) 富永愛子、加藤工、久保友明 他, ウォズリアイト多結晶体中の不適合元素拡散、日本鉱物科学会 2009 年年会、札幌、2009
  - 16) 西真之、久保友明 他, メージャライトの back transformation カイネティクス～マントル遷移層からのダイヤモンド上昇履歴～、日本鉱物科学会 2009 年年会、札幌、2009
  - 17) 富永愛子、加藤工、久保友明 他, オリビンとウォズリアイト多結晶体の不適合元素拡散、日本地球化学会2009年年会、広島、2009
  - 18) T. Kubo, Kinetic and rheological properties of Earth and planetary materials studied by time-resolved X-ray diffraction, 物構研シンポジウム、つくば、2009 (invited)
  - 19) Y. Nishihara, K. Funakoshi, Y. Higo, N. Tsujino, T. Kawazoe, T. Kubo 他, High pressure stress measurement using Kawai-type multi-anvil apparatus combined with synchrotron radiation and its application to stress relaxation test of olivine under Earth's deep upper mantle conditions, Final SSP International Symposium "Deep slab and mantle dynamics", Kyoto, 2009
  - 20) T. Kubo 他, Formation of jadeite from plagioclase: Constraints on the P-T-t conditions of shocked meteorites, 71st Annual Meeting of the Meteoritical Society, Matsue, 2008
  - 21) S. Yoshioka, Y. Torii, T. Kubo 他, 2D temperature model in deep slabs incorporating kinetics of the 410-km and 660-km phase transformations -application to the Mariana slab-, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, Fall meeting, Tsukuba, 2008
  - 22) N. Doi, T. Kato, T. Kubo 他, Experimental study on eclogite formation from basaltic oceanic crust, Toward formation of The Asian Network in Deep Earth Mineralogy (TANDEM), Matsuyama, 2008
  - 23) T. Kubo 他, Seismological and experimental constraints on metastable phase transformations and rheology of the Mariana slab, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2008
  - 24) A. Tominaga, T. Kato, T. Kubo 他, Mobility of the trace incompatible elements under the uppermost mantle conditions, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2008
  - 25) A. Shimojuku, T. Kubo 他, Si and O diffusion in  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  wadsleyite and ringwoodite and its implications for rheology of the mantle transition zone, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2008
  - 26) M. Nishi, T. Kubo 他, Metastable transformations of eclogite to

- garnetite in subducting oceanic crust, AGU fall meeting, San Francisco, 2008
- 27) 久保友明 他、Time-resolved 2DXRD observations of grain nucleation and growth during the coesite-stishovite transformation、日本地球惑星連合2008年度大会、千葉、2008
  - 28) 土井菜保子、加藤工、久保友明 他、玄武岩質海洋地殻からのエクロジヤイト形成実験、日本地球惑星連合2008年度大会、千葉、2008
  - 29) 下宿彰、久保友明 他、ウォズレアイトとリングウッドイト中のSiとOの拡散、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008
  - 30) 下宿彰、久保友明 他、無水条件下におけるMg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>ウォズレアイト中のシリコン拡散、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008
  - 31) 長島僚子、久保友明 他、上部マントル条件でのざくろ石-かんらん石反応実験輝石～スピネルシンプレクタイト組織は形成されるか?～、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008
  - 32) 西真之、久保友明 他、Mechanisms and kinetics of the eclogite-garnetite transformation、日本地球惑星科学連合2008年大会、千葉、2008
  - 33) 久保友明 他、ポストスピネル相転移の核生成-成長カイネティクス、日本鉱物科学会2008年年会、秋田、2008
  - 34) 下宿彰、久保友明 他、ウォズレアイトとリングウッドイト中の原子拡散とマントル遷移層のレオロジーへの適用、日本鉱物科学会2008年年会、秋田、2008
  - 35) 富永愛子、加藤工、久保友明 他、オリビン多結晶体中の微量元素の移動メカニズム、日本鉱物科学会2008年度年会、秋田、2008
  - 36) 西真之、久保友明 他、マントル遷移層条件下における海洋地殻物質の非平衡相転移、日本鉱物科学会2008年度年会、秋田、2008
  - 37) 下宿彰、久保友明 他、オリビン-ウォズレアイト相転移カイネティクスの2次元回折時分割測定、第49回高圧討論会、姫路、2008
  - 38) 西真之、久保友明 他、沈み込む海洋地殻玄武岩層の非平衡相転移、第49回高圧討論会、姫路、2008
  - 39) T. Kubo 他、Amorphization and crystallization kinetics of plagioclase at high pressure and temperature, 7th High Pressure Mineral Physics Seminar, Matsushima, Japan, 2007 (invite)
  - 40) A. Shimojuku, T. Kubo 他、Si and O diffusivity in ringwoodite, 7th High Pressure Mineral Physics Seminar, Matsushima, Japan, 2007
  - 41) A. Tominaga, T. Kato, M. Kurosawa, T. Kubo 他、Diffusive transfer of trace lithophile elements in the upper mantle conditions, 7th High Pressure Mineral Physics Seminar, Matsushima, Japan, 2007
  - 42) T. Kubo 他、Experimental constraints on P-T-t conditions for plagioclase amorphization and crystallization of high-pressure phases in shocked meteorites, AGU Fall Meeting, San Francisco, 2007
  - 43) M. Nishi, T. Kubo 他、Experimental investigation on mechanisms and kinetics of the eclogite-garnetite transformation, Misasa the 3<sup>rd</sup> COE-21 international symposium, Misasa, Japan, March 2008
  - 44) A. Tominaga, T. Kato, T. Kubo 他、Mobilities of major and trace elements in the upper mantle conditions, Misasa the 3<sup>rd</sup> COE-21 international symposium, Misasa, Japan, March 2008
  - 45) A. Shimojuku, T. Kubo 他、Silicon and oxygen diffusion in ringwoodite, EASTEC Symposium 2007, Sendai, Japan
  - 46) 久保友明 他、斜長石の非晶質化と高圧相の結晶化に対する温度-圧力-時間条件の実験的制約：衝撃を受けた隕石への適用、日本鉱物科学会2007年度年会、東京、2007
  - 47) 富永愛子、加藤工、久保友明 他、高圧下におけるペリドタイト中の微量元素移動特性、日本鉱物科学会2007年度年会、東京、2007
  - 48) 久保友明 他、2次元検出器を用いた高圧下における結晶粒挙動のX線その場観察とカイネティクス研究、第48回高圧討論会、倉吉、2007
  - 49) 西真之、久保友明 他、沈み込むプレート内部における準安定な aluminous garnet の存在、第48回高圧討論会、倉吉、2007
  - 50) 久保友明 他、Seismological and experimental constraints on metastable phase transformations and rheology of the Mariana slab、日本地球惑星科学連合2007年大会、千葉、2007

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ

[http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/faculty2\\_j.cgi?ID=K002558](http://hyoka.ofc.kyushu-u.ac.jp/search/faculty2_j.cgi?ID=K002558)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保 友明 (KUBO TOMOAKI)

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：40312540

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：