

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654190

研究課題名(和文)相転移と流動のカップリングに関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental investigations of coupling behaviors between transformation and deformation at high pressure

研究代表者

久保 友明 (KUBO, TOMOAKI)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40312540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込んだ海洋プレートの構成鉱物のほとんどがマントル遷移層において相転移を起こす。そのカインेटクスとレオロジーのカップリング現象を物質科学的に解明することが、遷移層におけるプレート大变形と深発地震発生の謎を解く鍵である。本研究では地球内部においてマントル流にともなって起こる様々な相転移、反応に着目し、変形高圧装置や放射光単色X線、多端子 Acoustic Emission測定装置などを組み合わせた技術を開発することにより、高圧下における相転移カインेटクスおよびそのレオロジーとのカップリング現象を実験的に明らかにし、沈み込む海洋プレートの強度変化を考察した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand mechanisms of deep earthquakes and large deformations of subducting oceanic plates in mantle convective currents, we have investigated the coupling behaviors between transformation and deformation in mantle minerals at high pressures. Kinetics of various types of reaction occurred in convective mantle have been examined with and without deformation mainly by synchrotron radiation (SOR) in-situ X-ray observations. We succeeded to obtain both transformation-time (t-t) and stress-strain (s-s) curves by using deformation multi-anvil (D-DIA) apparatus. We also preliminarily combined the SOR D-DIA system with newly developed multiple acoustic emission (AE) measurement system, which enables to simultaneously observe reaction kinetics, creep behaviors, and shear instability. The in-situ s-s-t-t-AE observation system developed in this study will be a powerful tool to reveal complex behaviors of subducting plates in mantle transition zone.

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：相転移カインेटクス 変形 放射光X線 高温高圧実験 マントル対流 沈み込むプレート 深発地震

1. 研究開始当初の背景

沈み込んだ海洋プレートのダイナミクスを理解することは、地球内部の大規模な物質循環を理解する上で極めて重要である。地震観測で明らかになっている大きな特徴は、深さ 400-700km のマントル遷移層におけるプレートの大規模な変形とプレート内で局所的に起こる深発地震である。これらは地球内部ダイナミクスにおける大きな謎の一つである。

温度圧力変化に伴う反応によって岩石が軟化(reaction-induced weakening)することは変成岩の研究でよく知られた現象である。ほとんどの構成鉱物が相転移を起こすマントル遷移層においてもそれが起こっている可能性は十分に考えられ、しかもある限られた圧力-温度-時間(P-T-t)履歴を経験した局所的な領域が軟化し変形が集中(strain localization)する可能性が高い。そこでは相転移のカイネティクスに依存した組織変化が起こり、一方で応力場(変形場)がカイネティクスに影響を与えていると考えられる。このようなカイネティクスとレオロジーのカップリング現象を物質科学的に解明することが、遷移層におけるプレート大変形と深発地震発生の謎を解く鍵であると考えている。

2. 研究の目的

上記の背景をふまえて本研究では、地球内部においてマントル流にともなう起こる様々な相転移、反応に着目し、それらの高圧下における相転移カイネティクスおよびそのレオロジーとのカップリング現象を解明するための実験的研究を行う。マルチアンビル高圧装置と放射光 X 線を用いたカイネティクス実験に加え、変形高圧装置(Deformation-DIA, D-DIA)と放射光単色 X 線を組み合わせた相転移と流動のカップリング現象のその場観察実験、さらに多端子 Acoustic Emission (AE)測定による相転移断層検出技術の開発にも取り組む。

3. 研究の方法

1) カンラン岩および海洋地殻玄武岩の相転移カイネティクスとマントル流：高温高圧下における試料急冷法を用いたスピネル-ガーネットカンラン岩相転移カイネティクス実験と回収試料の電子顕微鏡観察から、天然の深部カンラン岩に見られるガーネット反応帯(コロナ)の形成メカニズムとカイネティクスを実験的に明らかにする。得られたカイネティクスを基に上部マントル流動とガーネットコロナの準安定性について検討する。また放射光白色 X 線エネルギー分散法による時分割測定およびガーネット中の Si-Al 相互拡散実験からマントル深部に沈み込む海洋地殻玄武岩中で起こる輝石-ガーネット反応カイネティクスを明らかにし、沈み込む海洋地殻の密度バランスを検討する。

2) シリカの高圧相転移プロセスの放射光 X 線回折時分割測定：川井型高圧装置と単色 X 線二次元回折時分割測定を組み合わせ、回折斑点挙動を利用してシリカのコーサイトーステシヨバイト相転移の核生成-成長プロセスをその場観察する。また川井型高圧装置と放射光白色 X 線エネルギー分散法を用いた時分割測定により準安定ザイフェルトタイトの形成条件と衝撃隕石の新しい P-T-t スケールを検討する。

3) 差応力下におけるオリビン-スピネル相転移実験：放射光単色 X 線と D-DIA を用いて差応力下におけるアナログオリビンのスピネルへの相転移実験を行い、相転移速度曲線とクリープ曲線を同時取得しカイネティクスとレオロジーの相互作用をその場観察する。

4) 共析反応と塑性流動の相互作用と下部マントルスラブの粘性変化：放射光単色 X 線と D-DIA を用いた差応力下におけるアルバイトの共析反応実験と回収試料の EBSD 解析から、共析反応と塑性流動の相互作用を明らかにする。またポストスピネル相転移のカイネティクスと地震観測結果も合わせて検討することにより、下部マントルに沈み込む海洋プレートの相転移の詳細および強度変化に制約を与える。

5) 放射光 X 線を用いた変形高圧実験における多点 AE 測定技術の開発：上記の放射光単色 X 線と D-DIA に新たに多端子 AE 測定システムを組み合わせ、高温高圧定歪み速度下において反応速度曲線、クリープ曲線、AE 活動度を同時その場観察する技術開発を開始する。

4. 研究成果

1) 天然の深部カンラン岩に見られるガーネットコロナに囲まれたスピネルコアについて、実験的にガーネットのコロナ形成を再現し、その成長機構とカイネティクス明らかにした。ガーネットコロナの成長速度は上部マントルの流動環境下においても十分に速く、天然かんらん岩で見られるガーネットコロナはスピネルコアと 2 相平衡共存している可能性が示唆された。一方で沈み込む海洋プレート内の低温部では未反応の準安定スピネルが残存している可能性が高い (J. Petr 改訂中)。また沈み込む海洋地殻玄武岩中では輝石-ガーネット相転移がカイネティックに抑制されることが実験的に明らかになり、それがマントル深部における冷たい海洋地殻の密度減少、滞留につながる可能性が示唆された (Nishi et al., PEPI2011, EPSL2013)。

2) コーサイトーステシヨバイト相転移の核生成と成長プロセスを二次元検出器に記録される回折斑点の数および強度変化を利用して個々の結晶粒の挙動をその場観察した。核生成にともなう斑点数の増加および成長にともなう斑点強度の増加を定量的にとらえることに成功し、相転移の組織変化をその場観察できる可能性を示した (投稿論文準備中)。一方、下部マントル最下部で安定な

シリカ高圧相ザイフェルタイトがクリストバライトを出発物質として用いたときに最低約 10GPa での加熱中に準安定に出現することを発見しそのカイネティクスを明らかにした。火星および月隕石に存在するザイフェルタイトの形成条件に新しい制約を与えた(投稿論文準備中)。

3) Ni_2SiO_4 および Fe_2SiO_4 を用いて定歪み速度下における相転移実験を行った。特に後者では相転移速度曲線とクリープ曲線の同時測定に成功し、比較的高温下では相転移による歪み硬化が起こることが明らかになった。より低温ではより大過剰圧下で相転移が進行したが、これまでのところ細粒化による相転移軟化は観察されなかった(投稿論文準備中)。

4) 母相アルバイト、その共析反応中、および反応後の共析コロニー、それぞれの段階で定歪み速度変形実験を行い、反応速度曲線とクリープ曲線を同時測定した。アルバイトは単結晶的な共析コロニーに相転移し、その転位クリープにより歪み硬化が起こる。さらに歪みを加えるとコロニーの細粒化が起こって粒径依存クリープによる軟化が観察された。これをポストスピネル相転移のアナログ反応として下部マントルスラブの粘性変化を考察し国際誌に論文を発表した(Doi et al., EPSL2014)。また実際のポストスピネル相転移カイネティクスデータと地震学的観測結果を合わせて考察し、スラブで起こるポストスピネル相転移の詳細を制約した(Kaneshima et al., PEPI2012)。

5) 上記の放射光変形相転移実験に使用した MA6-6 加圧装置のアンビル底面それぞれに圧電素子を装着し、高周波フィルター、プリアンプ、オシロスコープなどを組み合わせることにより、ビームラインハッチ内において反応、変形、剪断不安定現象を同時その場観察するシステム(放射光 AE6-6 システム)を立ち上げた。このシステムを用いたアンチゴライトの予備的な脱水変形実験にも成功し、(稍)深発地震発生に関する実験的研究を開始する目処がついた。

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 6 件)

- ① Doi N., Kato T., Kubo T., Noda M., Shiraishi R., Suzuki A., Ohtani E., Kikegawa T., Creep behavior during the eutectoid transformation of albite: Implications for the slab deformation in the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 388, 92-97, 2014 (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.09.009>
- ② M. Nishi, T. Kubo, H. Ohfuji, T. Kato,

Y. Nishihara, T. Irifune, Slow Si-Al interdiffusion in garnet and stagnation of subducting slabs, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 361, 44-49, 2013 (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.022>

- ③ S. Kaneshima, T. Kubo, S. Yoshioka, Geophysical and mineralogical constraints on the post-spinel transformation for the Tonga slab, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 196-197, 23-31, 2012 (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2012.02.009>
- ④ R. Shiraishi, E. Ohtani, T. Kubo, N. Doi, A. Suzuki, A. Shimojuku, T. Kato, T. Kikegawa, Deformation cubic anvil press and stress and strain measurements using monochromatic X-rays at high pressure and high temperature, *High Press. Res.*, 31, 399-406, 2011 (査読有)
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08951418.2011.614444>
- ⑤ M. Nishi, T. Kubo, T. Kato, A. Tominaga, K. Funakoshi, Y. Higo, Exsolution kinetics of majoritic garnet from clinopyroxene in subducting oceanic crust, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 189, 47-55, 2011 (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2011.07.002>
- ⑥ N. Doi, T. Kato, T. Kubo, M. Noda, R. Shiraishi, A. Suzuki, E. Ohtani, T. Kikegawa, High-pressure decomposition reaction of albite under differential stresses, *Photon Factory Activity Report 2010 #28 Part B*, 221, 2011 (査読無)
http://pfwww.kek.jp/acr2010pdf/part_b/pf10b221.pdf

[学会発表] (計 20 件)

- ① KUBO T., KONO M., KATO T., Experimental constraints on shock conditions of meteorites based on non-equilibrium behaviors of silica and plagioclase, 日本地球惑星連合2014年度大会、横浜、2014年4月28-5月2日(招待講演)
- ② 久保友明, 加藤工, 肥後祐司, 舟越賢一, 準安定なザイフェルタイトが生成する温度-圧力-時間条件の実験的制約, 日本鉱物科学会2013年年会, つくば, 2013年09月11-13日
- ③ 土井菜保子, 久保友明, 加藤工, 西原遊, 肥後祐司, 舟越賢一, ファイアライトのオリビン-スピネル相転移にともな

- うクリープ挙動変化, 日本鉱物科学会 2013年年会, つくば, 2013年09月11-13日
- ④ 土井菜保子, 加藤工, 久保友明, 野田真彦, 長興陽子, 今村公裕, 白石令, 鈴木昭夫, 大谷栄治, 西原遊, 亀掛川卓美, 肥後祐司, シンクロトロン放射光分析による鉱物の高圧相転移とレオロジーに関する研究, 日本地球惑星連合2013年度大会, 千葉, 2013年5月19-24日
- ⑤ 岩里拓弥, 久保友明, 肥後祐司, 土井菜保子, 加藤工, 金嶋聰, 上原誠一郎, 西原遊, 舟越賢一, 放射光X線とAE6-6システムを用いた反応、流動、剪断不安定その場同時観察手法の開発, 日本地球惑星連合2013年度大会, 千葉, 2013年5月19-24日
- ⑥ T. Kubo, N. Doi, T. Iwasato, T. Kato, T. Kikegawa, Y. Higo, K. Funakoshi, Toward a synchrotron radiation study of reaction-induced faulting and deep earthquakes, 10th International Workshop on WATER DYNAMICS, Deep Carbon Cycle and ICDP-Japan Beyond Brittle Project, Sendai, March 13-16, 2013
- ⑦ S. Wang, T. Kubo, J. Ning, Y. Higo, K. Funakoshi, In-situ XRD Study of the Olivine-Ringwoodite Phase Transformation Kinetics: Application for Effects of Water on Its Growth Kinetics, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 3-7, 2012
- ⑧ 土井菜保子・加藤工・久保友明・野田真彦・大谷栄治・亀掛川卓美、共析反応に伴う組織及び変形メカニズムの変化、第53回高圧討論会、大阪、2012年11月7-9日
- ⑨ 久保友明、次世代放射光源を用いた高圧下でのカインネティクス研究の模索、第53回高圧討論会、大阪、2012年11月7-9日
- ⑩ 金嶋聰, 久保友明, 吉岡祥一、地球物理学と物質科学に基づくポスト・スピネル転移に対する制約: トンガスラブの例, 日本地球惑星連合2012年度大会、千葉、2012年5月20-25日
- ⑪ T. Kubo, T. Kato, N. Doi, Y. Higo, Formation of metastable seifertite, Japan Geoscience Union meeting 2012, Makuhari, May 20-25, 2012
- ⑫ T. Kubo, N. Doi, T. Kato, Y. Higo, K. Funakoshi, Kinetics of the post-spinel transformation and mantle flow across the 660-km discontinuity, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 5-9, 2011
- ⑬ N. Doi, T. Kato, T. Kubo, M. Noda, R. Shiraishi Ohnuma, A. Suzuki, E. Ohtani, T. Kikegawa, Changes in flow strength induced by the decomposition of polycrystalline albite, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 5-9, 2011
- ⑭ M. Nagayoshi, T. Kubo, T. Kato, An experimental study on the transformation kinetics of spinel lherzolite to garnet lherzolite, AGU Fall Meeting, San Francisco, Dec. 5-9, 2011
- ⑮ 西真之、久保友明、加藤工、大藤弘明、西原遊、入船徹男、garnet中のSi-Al相互拡散と沈み込むスラブの密度進化、日本鉱物科学会2011年年会、水戸、2011/9/9-11
- ⑯ 土井菜保子、加藤工、久保友明、野田真彦、白石令、鈴木昭夫、大谷栄治、亀掛川卓美、アルバイト分解反応と塑性流動の相互作用、日本鉱物科学会2011年年会、水戸、2011/9/9-11
- ⑰ 永吉麻衣子、久保友明、加藤工、高温高圧実験によるスピネル-ガーネットかんらん岩相転移のメカニズムとカインネティクスに関する研究、日本鉱物科学会2011年年会、水戸、2011/9/9-11
- ⑱ 土井菜保子、加藤工、久保友明、野田真彦、白石令、鈴木昭夫、大谷栄治、下宿彰、亀掛川卓美、アルバイト分解反応における塑性強度変化、日本地球惑星連合2011年度大会、千葉、2011/5/22-28
- ⑲ M. Nishi, T. Kubo, H. Ohfuji, T. Kato, Y. Nishihara, T. Irifune, Si-Al interdiffusion in majoritic garnet, 日本地球惑星連合2011年度大会、千葉、2011/5/22-28
- ⑳ 永吉麻衣子、久保友明、加藤工、スピネル-ガーネットかんらん岩相転移メカニズムとカインネティクスに関する実験的研究、日本地球惑星連合2011年度大会、千葉、2011/5/22-28

[その他]

ホームページ等

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

加藤 工 (KATO, TAKUMI)
九州大学・大学院理学研究院・教授
研究者番号: 90214379