

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247089

研究課題名(和文) 高圧下における反応誘起の剪断不安定化に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental investigation of reaction-induced shear instability at high pressure

研究代表者

久保 友明 (KUBO, TOMOAKI)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40312540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,600,000円

研究成果の概要(和文)：沈み込む海洋プレートで深さ300km付近まで起こる稍深発地震は地球内部における未解明の謎の一つであり、その原因として蛇紋石の脱水反応が剪断不安定化を引き起こす可能性が指摘されてきた。本研究では放射光の単色X線、D-DIA型の高圧変形装置、多端子acoustic emission測定システムを組み合わせ、高圧下で反応と流動、剪断不安定現象を実験的に同時その場観察できる新規手法を開発した。そのシステムを用いて7GPa、600℃までの条件で蛇紋石の脱水変形実験を行ったところ、従来の予想とは異なり、蛇紋石の脱水反応が直接的に剪断不安定化を引き起こすわけではないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Serpentine dehydration has been one of the important candidates for triggering intermediate-depth earthquakes. In order to examine this topic, we developed an AE monitoring system for high-pressure reaction-deformation processes combined with Deformation-DIA apparatus and synchrotron monochromatic X-ray. We applied this technique to investigate shear instability during antigorite dehydration in pure shear up to ~7 GPa and ~600 °C. Almost no AEs were detected within the antigorite samples during deformation and syndeformational dehydration. Instead, we detected some AEs outside the sample at around the boundaries of cylindrical parts. Our results suggest that dehydration of antigorite do not directly trigger shear instability at high pressures at least in pure shear under drained condition.

研究分野：鉱物物理学

キーワード：深発地震 変形実験 高圧実験 AE測定 放射光X線その場観察 蛇紋石 脱水反応

## 1. 研究開始当初の背景

沈み込む海洋プレート(カンラン岩領域)内で起こる稍深発地震(Intermediate-depth earthquake、深さ約60km~300km)と深発地震(Deep earthquake、深さ約300km~700km)は、地球内部における未解明の謎の一つである。これまでの数多くの研究により、稍深発地震領域では脱水反応が、深発地震領域では高圧相転移が、剪断不安定化(shear instability)を誘起し地震を発生させるという説が有力とされている(それぞれdehydration embrittlement および transformation faulting と呼ばれる)。いずれも反応と塑性流動が相互作用することによって局所的に変形不安定化が促進されるという大変複雑な現象であるが、これまでの実験的研究は未だ不十分で相互に矛盾もあり未解決の重要課題となっている。特に沈み込むプレート条件下での非平衡反応と変形挙動の解明が必要不可欠であり、そのためにも高圧下での反応および剪断不安定現象を含む変形挙動を定量的にその場観察する技術開発が急務であった。

## 2. 研究の目的

上記の背景をふまえ本研究では、深部スラブの特徴である反応と流動、剪断不安定現象を実験的に同時その場観察できる新規手法(放射光X線AE6-6システム)を開発する。その技術をもとに、稍深発地震と蛇紋化したカンラン岩の脱水反応との関連性に焦点をあてた実験的研究を行う。またその手法の圧力領域を拡大させながら、深部低温スラブで起きるその他の多様な非平衡反応のカイネティクス、構成物質のレオロジー、それらの相互作用に関連した高圧変形実験を行い、地球内部で反応するスラブの力学的挙動について検討する。

## 3. 研究の方法

上記の目的をふまえ具体的には以下に示す9つのテーマについて研究を行った。

1) 放射光単色X線とDeformation-DIA(D-DIA)型高圧変形装置、多端子AE(acoustic emission)測定を組み合わせた、反応と流動、剪断不安定現象を実験的に同時その場観察できる新規手法(放射光X線AE6-6システム)の開発。

2) アンチゴライトの固相および脱水反応時における塑性流動と剪断不安定化に関する実験的研究。

3) アンチゴライトとカンラン石2相系について、固相および脱水反応時における塑性流動と剪断不安定化に関する実験的研究。

4) カンラン岩のスピネル-ガーネット相転移カイネティクス実験と沈み込むスラブ内部においてその非平衡反応が起こる可能性

についての検討。

5) シリカや斜長石など沈み込む海洋地殻物質の高圧下における準安定反応に関する実験的研究。

6) D-DIA型高圧変形装置の圧力条件の拡大と深部スラブ構成鉱物の低温下での転位すべりクリープの流動則構築のための実験的研究。

7) アナログ物質を用いたオリビン-スピネルおよびポストスピネル相転移と塑性流動の相互作用、特に反応誘起の軟化と剪断不安定化に関する実験的研究。

8) 稍深発地震および深発地震の震源分布とスラブの変形挙動、および深部スラブが起因するとされる地震波異方性や地震波散乱体に関する地震学的研究。

9) 天然に産する蛇紋石の産状および微細組織観察に関する研究。

## 4. 研究成果

1) D-DIA型高圧変形装置と放射光単色X線、多端子AE測定を組み合わせ、反応と流動、剪断不安定現象を高圧下において同時その場観察する実験技術(放射光X線AE6-6システム)を開発した。約14GPaまでの条件では反応(相転移速度曲線)と流動(応力-歪み曲線)の時刻データ、約7GPaまでの条件ではそれに加えてAE活動(震源位置、頻度、強度)を同時その場観察し剪断不安定化現象をとらえることが可能となった。AEの震源位置は200-300ミクロン程度の精度で決定することができ、AEが試料から発生したかどうかをより正確に議論できる。また九州大既存のDIA型高圧装置をD-DIA型高圧変形装置に改良し、高圧変形実験と多端子AE測定を行えるようにした。

2) 上記システムを用いて圧力最大7GPa、温度25-600°Cにおいてアンチゴライト単相多結晶を用いた一軸圧縮の変形脱水実験を行った。比較のために行ったフォルステライト焼結体を用いた実験では常温加圧時の特に比較的低圧条件下で試料から多数のAEが発生していることが確認できる。しかしアンチゴライト単相多結晶体では、常温加圧時、昇温時、変形時、変形脱水時のどの段階においても試料からのAEはほとんど観察されなかった。一方で実験セルの円柱ピストン周囲付近からはAEが発生しており、そこではスティックスリップ現象が起こっていると考えられる。この種の実験においては両者を区別できる震源位置決定精度が必要である。回収試料には25-200°Cでは圧力増加にともないbrittleからsemi-brittleへの変形様式の変化が観察された。400°Cでは塑性変形が卓越するが、2GPa付近では変形の局所化、5GPa付近では均質変形および試料全体に結晶方位選択配向がみら

れた。しかし顕著なAE活動の増加は見られず、400°Cでの変形の局所化がstable slipによるもので剪断不安定化につながるとは現段階では考えにくい(Kubo et al., in preparation)。

3) アンチゴライトが均質変形を示す圧力5-6GPa付近において、カンラン石-アンチゴライト2相系試料を用いた一軸圧縮の変形脱水実験を行った。固相領域ではカンラン石の量が増加するに伴い変形強度が増大する傾向が見られる。実験回数は限られるが固相変形時、脱水変形時ともにAEを伴うようなせん断不安定化に至る結果は得られていない。これまで我々が行ってきた開放系の一軸圧縮変形場では、単相系および二相系の固相変形、脱水変形ともに剪断不安定化につながるような現象は確認されていない(Kubo et al., in preparation)。一方でFerrand et al. (2017, Nature Comm.)は、1-3GPaのより低圧条件下の2相系において脱水起因の剪断不安定化を報告している。この違いは圧力の違いによるのかもしれない。稍深発地震の二重面下面は深さ約300km (圧力10GPa程度)まで観測されており(Wei et al., Science Adv. 2017)、その領域での脱水反応に起因した剪断不安定化を明らかにするには、一軸圧縮場だけでなく剪断変形による大歪みの影響も含め検討していく必要がある。

4) 上記の脱水反応以外にも沈み込むスラブ内部では、ほぼ全ての構成鉱物が関与して多様な反応や相転移が起こる。特に低温環境下特有の非平衡相転移プロセスとその組織変化はスラブの力学的性質に大きな影響を与える。スピネルカンラン岩がガーネットカンラン岩に相転移について、捕獲岩にみられるようなガーネットコロナの組織を再現し、その反応速度を実験的に検討した(Nagayoshi et al., 2016)。その結果、一般マントルの環境下では相転移はほぼ平衡に進行することが示唆された。つまり捕獲カンラン岩にみられるガーネットコロナは、非平衡反応ではなく二相共存領域での反応組織であることが示唆された。一方で沈み込むスラブ内部ではこの相転移は平衡に進行せずスピネルカンラン岩が準安定に沈み込んでいくことが予想された。

5) 沈み込むスラブの海洋地殻部分で主要構成鉱物となるシリカおよび斜長石に関して、高圧下での非平衡相転移、準安定な高圧相の形成プロセスやカイネティクスを明らかにした(Kubo et al., Science Adv. 2015; Kubo et al., PEPI in revision)。これは衝撃を受けた隕石に見られる高圧相転移の長年の謎の解明につながる結果であるとともに、沈み込む海洋地殻の地球深部での反応プロセスや変形強度を検討する上でも考慮すべき現象である。

6) 上記の放射光 X 線 AE6-6 システムを深発地震発生領域で活用していくために、D-DIA 型高圧変形装置の圧力発生領域を約 20GPa ま

で拡大し、深部スラブ構成鉱物であるリングウッドイトの 700°C 程度までの低温下で変形実験を行った。その変形強度はこれまでに報告および推定されているリングウッドイトの転位クリープ強度よりも大幅に小さく、転位すべりクリープによる変形が示唆された。その流動則は遷移層スラブの強度を検討する上で重要である(Imamura et al., in preparation)。これまでのところ変形中の剪断不安定現象は確認されていない。

7) 深発地震発生や深部スラブの大変形に関与していると指摘されているオリビン-スピネル相転移およびポストスピネル相転移について、圧力約 14GPa までの領域においてアナログ物質のファイヤライトやアルバイトを用いた変形相転移実験を行った(Kubo et al., in preparation; Doi et al., 2014)。AE の測定は行っていないが、反応速度曲線と応力歪み曲線の同時測定を行い、変形と多形相転移および共析相転移の相互作用を検討した。過去研究の予想とは異なり両相転移とも相転移細粒化による軟化プロセスはそれほどシンプルではない。ファイヤライトのオリビン-スピネル相転移に関しては特に低温大過剰圧条件下において剪断不安定化を示唆するような微小断層や変形ラメラが観察されており、10GPa を超える領域での AE の同時測定が望まれる。

8) トンガスラブ内部で起こる深発地震の詳細な震源位置と温度構造およびレオロジー構造のモデリングを組み合わせ、深発地震の発生は主に温度によって支配されていることを明らかにした(Kaneshima and Yoshioka, 2014)。また深発地震の詳細な波形解析から深部スラブ周辺の塑性流動に伴う地震波異方性(Kaneshima, 2014)や沈み込んだ海洋地殻物質に起因すると予想される地震波散乱体の分布(Kaneshima, 2013; 2016)を明らかにした。

9) 天然に産する蛇紋岩の TEM レベルまでの鉱物学的研究からカンラン岩の蛇紋岩化プロセスや特に低温型蛇紋石にみられる多形の微細構造の詳細を明らかにした。

## 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 9 件)

- 1) T. Nagaya, S. Wallis, Y. Seto, A. Miyake, Y. Soda, S. Uehara, M. Matsumoto, Minimizing and quantifying mis-indexing in electron backscatter diffraction (EBSD) determinations of antigorite crystal directions, Journal of Structural Geology, 95, 127-141, 2017

- 2) S. Kaneshima, Seismic scatters in the mid-lower mantle, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 257, 105-114, 2016
  - 3) M. Nagayoshi, T. Kubo, T. Kato, Experimental investigation of the kinetics of the spinel-to-garnet transformation in peridotite: a preliminary study, *American Mineralogist*, 101, 2020-2028, 2016
  - 4) T. Kubo, T. Kato, Y. Higo, K. Funakoshi, Curious kinetic behavior in silica polymorphs solves seifertite puzzle in shocked meteorite. *Sci. Adv.* 1, e1500075, 2015
  - 5) S. Kaneshima and S. Yoshioka, Dominant role of temperature on deep earthquake mechanics for the Tonga slab near the bottom of the upper mantle, *Earth Planets and Space*, 66, 138, 2014
  - 6) S. Kaneshima, Upper bounds of seismic anisotropy in the Tonga slab near deep earthquake foci and in the mid-lower mantle, *Geophys. J. Int.*, 197, 351-368, 2014
  - 7) A. Shimojuku, T. Kubo, T. Kato, T. Yoshino, M. Nishi, T. Nakamura, R. Okazaki, Y. Kakazu, Effects of pressure and temperature on the silicon diffusivity of pyrope-rich garnet, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 226, 28-38, 2014
  - 8) 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
  - 9) S. Kaneshima, Lower mantle seismic scatters below the subducting Tonga slab: evidence for entrainment of transition zone materials, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 222, 35-46, 2013
- [学会発表] (計 31 件)
- 1) M. Ikehara, T. Kubo, Shear deformation experiments of two-phase aggregates of antigorite and olivine at high pressure: A preliminary study, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, Makuhari, May 23, 2017
  - 2) T. Kubo, N. Doi, M. Imamura, T. Kato, Y. Higo, Y. Tange, Creep behavior and high-pressure faulting during the olivine-spinel transformation in fayalite, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, Makuhari, May 22, 2017
  - 3) T. Kubo, N. Doi, M. Imamura, T. Kato, Y. Higo and Y. Tange, In-situ X-ray observations of creep behavior during the olivine-spinel transformation in fayalite, *American Geophysical Union 2016 Fall Meeting*, San Francisco, December 13, 2016
  - 4) 久保友明, 河野真利, 今村公裕, 加藤工, 亀卦川卓実, 肥後祐司, 丹下慶範, 斜長石から準安定なLinguniteが生成する温度-圧力-時間条件の制約、第57回高压討論会、つくば、2016年10月28日
  - 5) 肥後祐司, 放射光X線高压実験用の新ヒーター材の探索、第57回高压討論会、つくば、2016年10月28日
  - 6) 西原遊, 久保友明, 芳野極, 大内智博, 山崎大輔, 鈴木昭夫, KEKでの大容量プレスを用いた高压変形実験、第57回高压討論会、つくば、2016年10月27日
  - 7) 今村公裕, 久保友明, 加藤工, 亀卦川卓美, 肥後祐司, 丹下慶範, 低温高压下におけるringwooditeの塑性変形強度、第57回高压討論会、つくば、2016年10月26日
  - 8) S. Enju, S. Uehara, Chrysotile and polygonal serpentine in serpentinites from kurosegawa belt Kyushu Japan, *Serpentine days 2016*, Sete France, September 25, 2016
  - 9) 久保友明, 岩里拓弥, 肥後祐司, 吉田雄祐, 今村公裕, 加藤工, 上原誠一郎, 丹下慶範, 高压下におけるアンチゴライトの強度と剪断不安定化、日本鉱物科学会2016年会、金沢、2016年9月23日
  - 10) 延寿里美, 猪尾晃生, 上原誠一郎, 九州黒瀬川帯の蛇紋岩中のchrysotile及びpolygonal serpentineの産状と分布、第60回粘土科学討論会、福岡、2016年09月15日
  - 11) T. Kubo, T. Iwasato, Y. Yoshida, Y. Higo, T. Kato, Creep behavior and AE activities in antigorite during syndeformational dehydration at high pressures, *Earth and Planetary Dynamics International Workshop: New Challenges in Volatile Cycling in the Deep Earth*, Sendai, July 4, 2016 (invited)
  - 12) 今村公裕, 久保友明, 加藤工, 亀卦川卓美, 肥後祐司, 丹下慶範, 低温条件におけるリングウッドイトの変形実験、日本地球惑星連合2016年大会、幕張、2016年05月23日
  - 13) 久保友明, 高温高压下での反応誘起の剪断不安定化現象の検出と深発地震、構造物性研究センタープロジェクト「P-V-T-dε/dt構造物性」キックオフ研究会、つくば、2016年1月18日 (invited)
  - 14) T. Kubo, T. Iwasato, Y. Higo, T. Kato, S. Uehara, S. Kaneshima, Y. Tange, Simultaneous observations of reaction kinetics, creep behavior, and AE activities during syndeformational antigorite dehydration at high

- pressures, American Geophysical Union 2015 Fall Meeting, San Francisco, December 14, 2015
- 15) 久保友明, 岩里拓弥, 肥後祐司, 中田大城, 加藤工, 金嶋聰, MA6-6加圧装置を用いたAE測定技術の開発, 第56回高压討論会, 広島, 2015年11月10日
  - 16) 久保友明, 岩里拓弥, 肥後祐司, 中田大城, 阿辺山健大, 今村公裕, 加藤工, 金嶋聰, 上原誠一郎, 丹下慶範, 高压下における反応誘起の剪断不安定化に関する実験的研究, 日本鉱物科学会2015年会、東京、2015年9月27
  - 17) 河野真利, 久保友明, 加藤工, 上原誠一郎, 近藤忠, 亀卦川卓実, 肥後祐司, 丹下慶範, Formation of metastable lingunite, 日本地球惑星連合2015年度大会、幕張、2015年5月28
  - 18) Iwasato, T. Kubo, T., Higo, Y., Kato, T., Kaneshima, S., Uehara, S., Tange, Y., Flow behaviors and AE activities during syndeformational antigorite dehydration at high pressures, Japan Geoscience Union meeting 2015, Makuhari, May 26, 2015
  - 19) 岩里拓弥, 久保友明, 肥後祐司, 加藤工, 金嶋聰, 上原誠一郎, 今村公裕, 高温高压下における antigoriteおよび forsteriteのAE発生条件の制約, 第55回高压討論会, 徳島, 2014年11月22日-2014年11月24日
  - 20) 久保友明, A synchrotron radiation study of reaction-induced faulting at high pressure, SPring-8シンポジウム2014 地球惑星科学研究会, 東京, 2014年9月13日 (invited)
  - 21) 岩里拓弥, 久保友明, 肥後祐司, 加藤工, 金嶋聰, 上原誠一郎, 今村公裕, 放射光単色X線とAE6-6システムを用いた高压下におけるantigoriteの脱水反応と変形挙動のその場同時観察, 日本地球惑星連合2014年度大会、横浜、2014年4月28-5月2日
  - 22) 久保友明, 河野真利, 加藤工, 高压下でのシリカおよび斜長石の非平衡相転移に基づく隕石の衝撃条件の制約, 日本地球惑星連合2014年度大会、横浜、2014年4月28-5月2日 (invited)
  - 23) 河野真利, 久保友明, 加藤工, 近藤忠, 衝撃を受けた隕石中のLingunite形成に関する実験的研究, 日本地球惑星連合2014年度大会、横浜、2014年4月28-5月2日
  - 24) 岩里拓弥, 久保友明, 肥後祐司, 加藤工, 金嶋聰, 上原誠一郎, 西原遊, 舟越賢一, 放射光単色X線と多端子Acoustic Emission測定を用いた高温高压下におけるantigoriteの変形挙動の解明, 第54回高压討論会, 新潟, 2013年11月14-16日
  - 25) 久保友明, 野口直樹, 野田真彦, 土井菜保子, 加藤工, 亀卦川卓美, W. Durham, 放射光単色X線を用いた高温高压下における氷VII相の塑性変形実験, 第54回高压討論会, 新潟, 2013年11月14-16日
  - 26) 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ブ挙動変化, 日本鉱物科学会2013年年会, つくば, 2013年09月11-13日
  - 27) 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
  - 28) 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、剪断不安定と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
  - 29) 土井菜保子, 加藤工, 久保友明, 野田真彦, 長與陽子, 今村公裕, 白石令, 鈴木昭夫, 大谷栄治, 西原遊, 亀卦川卓美, 肥後祐司, シンクロトロン放射光分析による鉱物の高压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
  - 30) 下宿彰, 久保友明, 加藤工, 西真之, 芳野極, 中村智樹, 岡崎隆司, 嘉数勇基, パイロープに富むガーネット中のSi拡散の温度と圧力依存性, 日本地球惑星連合2013年度大会、千葉、2013年5月19-24日
  - 31) T. Kubo, N. Noguchi, M. Noda, N. Doi, T. Kato, T. Kikegawa, W. Durham, Plastic deformation of ice VII in sub-Neptune-size icy planets, Japan Geoscience Union meeting 2013, Makuhari, May 19-24, 2013
- [その他]  
ホームページ等  
[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  
肥後祐司 (HIGO YUJI)  
高輝度光科学研究センター・利用研究促進部門・研究員  
研究者番号：10423435
  - (3) 研究分担者

上原 誠一郎 (UEHARA SEIICHIRO)  
九州大学・大学院理学研究院・助教  
研究者番号：70158773

(4)研究分担者

金嶋 聡 (KANESHIMA SATOSHI)  
九州大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号：80202018

(5)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