

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707040

研究課題名(和文)高温高压下その場観察実験による稍深発・深発地震発生メカニズムと前兆現象の解明

研究課題名(英文) In-situ observations on semi-brittle behavior of peridotite: Implications for the occurrence of intermediate earthquakes

研究代表者

大内 智博 (Ohuchi, Tomohiro)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・講師

研究者番号：60570504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、稍深発・深発地震発生場である沈み込むプレートの温度圧力条件下における断層の形成のプロセスを理解するとともに、大地震に至る前兆現象を鉱物物理学的観点から実験的に検証することである。そのために必要な実験技術である”その場”での歪・応力測定技術+アコースティック・エミッション(微小破壊音)検出技術を実用化することに成功した。現在のところ、同様の技術はフランス・アメリカの共同研究グループのみが成功しており、本研究の成果は世界でも2例目の快挙となる。これにより、スラブ内条件下における岩石変形・破壊実験を行うことにより、地震発生の素過程の解明をするための技術的な目途が立った。

研究成果の概要(英文)：The objective of this project is to understand the process of intermediate-depth and deep-focus earthquakes from the viewpoint of mineral physics. To evaluate the semi-brittle behavior of slab-forming rocks (i.e., harzburgite), acoustic emission monitoring is essential as well as measurements on strain and stress at high pressures and high temperatures. Such experimental techniques have been developed by Schubnel et al. (2013), who belong to a French-USA international research group. Our measurement system is now applicable to the semi-brittle behavior of rocks as well as the Schubnel's system. Using our measurement system, axial compression experiments on rocks are possible at high pressures and temperatures. Thus, the process of rock failure will be clarified by our group.

研究分野：高圧地球科学

キーワード：稍深発地震 深発地震 アコースティック・エミッション スラブ 地震発生の素過程 カンラン石

1. 研究開始当初の背景

地震は、日本をはじめとしたプレートの沈み込み帯において顕著に発生する自然災害である。特に2011年3月11日に発生した東日本大震災では甚大な被害をもたらしたのは記憶に新しい。地震がどのようにして発生するのかを解明する“地震発生のメカニズム”に関する研究は、根本的な地震予知を目指す上で必要不可欠である。稍深発・深発地震の発生メカニズムは、摩擦すべりの強い圧力依存性のため、摩擦すべりで起きえないことが知られている(Kohlstedt et al., 1995)。現在までに稍深発・深発地震の発生メカニズムを説明する仮説は多数提案されているものの、実験技術的な問題から証明されるには至っていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、稍深発・深発地震の発生メカニズムに関する下記3つの有力な仮説を実験的に検討し、観測結果と最も整合的な説を見出すことを目的とする。

仮説 : 「水による断層強度低下」

仮説 : 「カンラン石相転移による断層形成」

仮説 「不安定現象に伴う変形の局所化」

これらのうち仮説 は、沈み込むスラブに存在する含水鉱物が脱水分解することによって放出される水性流体が断層強度を低下させ、その結果地震が発生するというモデルである。仮説 は、深さ410-660kmにて起きる、カンラン石の圧力誘起相転移に伴う体積減少が原因となって地震を引き起こすというモデルである。ただしこの仮説は深発地震のみに適用可能である。仮説

は、動的再結晶(細粒化)が局所的に発生することがトリガーとなり、変形が局在化することで地震に至るというモデルである。

3. 研究の方法

本研究では、D-DIA型変形装置を用いて、上部マントル~マントル遷移層の温度圧力条件下(2-20 GPa, ≤ 1600)でのカンラン岩(ダナイト・ハルツバーガイト)の断層すべり実験及び変形実験を行った。試料中での微小破壊の有無を判定するために、アコースティック・エミッション(AE)測定システムを導入した。当システムは、高温高圧下での試料のどこで破壊が発生したのか(震源探査)及び発生した破壊の規模(マグニチュード測定)を“その場”で測定する。高温高圧下における試料の歪・応力測定は、大型放射光施設 SPring-8 のBL04B1に設置のD-DIA型変形装置を用いて、単色放射光X線を試料に照射することによって行った。

回収試料は切断・研磨を行い、走査型電子顕微鏡や透過型電子顕微鏡を用いて組織観察及び化学組成分析を行った。

4. 研究成果

以下では、本研究の成果を項目別に記述する。

1) AE測定システムの開発:

平成25-26年度ではD-DIA型変形装置に適用可能なAE測定システムの新規構築を行った。当システムは6チャンネルから構成され(3次元での震源位置標定が可能)、放射光施設へ搬入可能な設計となっている。特に、震源探査の可能なシステムの構築を目指したため、産業技術総合研究所所属の雷興林博士の開発したAE測定システムを参考にした。

石英の粗粒粉末を試料として用いたシステムの動作テストでは、2 GPa、室温から1000における温度圧力下にてAEの多くが試料を封入した円筒状カプセル内部(直径3.5mm、長さ5mm)から多く発生する

結果となった(試料は1辺11mmの立方体の圧媒体の中心に配置)。このことは、当AE測定システムを用いたAEの震源探査が適切に行えていることを示している。

2) 高圧下での断層すべり実験:

稍深発地震の原因の1つであると考えられる、断層すべりが地震を引き起こすかを検討するため、既存の断層(45°にプレカット)をもつ1対のアルミナピストンの摩擦すべり実験を行った。実験は2GPa、室温~600にて一定のすべり速度にて行った。その結果、既存の断層において安定すべりのみが進行し、AEは一切検出されなかった。この実験結果より、既存の断層におけるすべりでは不安定すべり(地震性すべり)を引き起こすのは難しいことが示唆された。

3) カンラン岩の一軸圧縮変形

沈み込むスラブ内の温度圧力条件下(1-3GPa, 600-1100)において、カンラン岩の一軸圧縮変形実験を行った。

無水条件下では、600-900の広い温度条件下にて高歪において強いAEの発生が多数確認された。一方、1000では高歪においても弱いAEのみが多数発生することが確認され、1100ではAEは殆ど確認されなかった。すなわち、カンラン岩の脆性-塑性遷移は1000-1100である結果が得られた。さらに、いずれの温度条件下においても、歪速度の増加とともにAEイベントの発生頻度が増加し、歪速度 $1E-5\text{ s}^{-1}$ を閾値として、脆性-塑性遷移することも明らかとなった。以上より、稍深発地震発生のためには、900以下の中温かつ $1E-5\text{ s}^{-1}$ 以上の歪速度である必要があるものと考えられる。

なお、AE発生に伴い、破断面(断層)が形成される様子を放射光X線「その場」

観察することに成功した。そのような断層面には、サブミクロンの破砕物からなるガウジ層が形成されていることも観察された。このことは、稍深発地震の発生においては、極細粒子が局所的に形成された結果として断層形成に至ったことを示唆する。すなわち、申請書に記載した仮説「不安定現象に伴う変形の局所化モデル」が有力な仮説であるものと考えられる。

なお、AE発生や断層形成における水の効果を実験的に検証するため、上記と同様の温度圧力条件下にて含水条件下におけるカンラン岩の一軸圧縮実験を行った。概ね、600-900の中温条件下にてAE発生や断層形成が確認されたものの、水によって塑性変形が促進された結果としてAEの発生頻度は無水の場合と比較して低下した。これらの結果より、水は決して微小破壊を促進するわけでは無いことが明らかになってきた。

4) カンラン岩の粒界すべり変形

本研究の計画に関連した課題である、カンラン石の塑性変形メカニズムの解明を行った。D-DIA型変形装置を用いて、1-7GPa, 1000-1200°においてダナイト試料を一軸圧縮変形させる実験を行った。その結果、上部マントルの流動を支配する変形メカニズムが粒界すべりであることを示し、約45年に渡り支持されてきた“転位クリープが上部マントルの流動を支配する”とする定説を覆す結果を示した。この成果は“*Dislocation-accommodated grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in the Earth's upper mantle*”のタイトルで米国科学振興協会(AAAS)の発行するサイエンス誌の姉妹誌である「**Science Advances**」誌に掲載された(平成27年10月2日掲載)。当論文では、この成果は愛媛大学とSPring-8・高輝度光科学研究セン

ターの共同でプレスリリースされたほか、10月3日にNHK、南海放送、及び愛媛新聞にて報道されるなどの大きな反響を得た。

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 8 件)

Kawazoe, T., Nishihara, Y., Ohuchi, T., Miyajima, N., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T., Creep strength of ringwoodite measured at pressure-temperature conditions of the lower part of the mantle transition zone using a deformation-DIA apparatus. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有、454、(2016)、10-19.

Ohuchi, T., Kawazoe, T., Higo, Y., Funakoshi, K., Suzuki, A., Kikegawa, T., Irifune, T., Dislocation-accommodated grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in the Earth's upper mantle. *Science Advances*, 査読有、1、(2015)、e1500360.

Ohuchi, T., Nishihara, Y., Seto, Y., Kawazoe, T., Nishi, M., Maruyama, G., Hashimoto, M., Higo, Y., Funakoshi, K., Suzuki, A., Kikegawa, T., Irifune, T., In situ observation of crystallographic preferred orientation of deforming olivine at high pressure and high temperature. *Phys. Earth Planet. Sci.*, 査読有、243、(2015)、1-21.

Ohuchi, T., Fujino, K., Kawazoe, T., Irifune, T., Crystallographic preferred orientation of wadsleyite and ringwoodite: Effects of phase transformation and water on seismic anisotropy in the mantle transition zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*,

査読有、397、(2014)、133-144.

Nishihara, Y., Ohuchi, T., Kawazoe, T., Spengler, D., Tasaka, M., Kikegawa, T., Suzuki, A., Ohtani, E., Rheology of fine-grained forsterite aggregate at deep upper mantle conditions. *J. Geophys. Res.*, 119、査読有、(2014)、253-273.

Ohuchi, T., Irifune, T., Crystallographic preferred orientation of olivine in the Earth's deep upper mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有、228、(2014)、220-231.

Kawazoe, T., Ohuchi, T., Nishihara, Y., Nishiyama, N., Fujino, K., Irifune, T., Seismic anisotropy in the mantle transition zone induced by shear deformation of wadsleyite. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 査読有、216、(2013)、91-98.

Ohuchi, T., Irifune, T., Development of A-type olivine fabric in water-rich deep upper mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有、362、(2013)、20-30.

[学会発表](計 11 件)

Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y., Irifune, T. Semibrittle flow of olivine aggregates under the conditions of subducting slab. Japan Geoscience Union Meeting 2016, S-IT04 Rheology of Earth's Interior, SCG20-12, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), May 24, 2016.

大内智博, 雷興林, 肥後祐司, 丹下慶範, 入船徹男, 上部マントルの温度圧力条件下におけるアコースティックエミッション測定に関する技術開発, 日本地球惑星連合 2016 年大会, SCG58-P013, 幕張メッセ(千葉県・千葉市), 5月22日, 2016年

Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y.,

Irifune, T. Technical developments on acoustic emissions monitoring under the upper mantle conditions. Misasa International Symposium 2016, S1-04, ブランナール三朝 (鳥取県・三朝町), March 9, 2016.

Ohuchi, T., Nishihara, Y., Seto, Y., Kawazoe, T., Nishi, M., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T. In situ observation of crystallographic preferred orientation of deforming olivine at high pressure and high temperature. American Geophysical Union Fall Meeting 2015, T33H-01, San Francisco (USA), Dec 16, 2015 (Invited).

大内智博, 川添貴章, 肥後祐司, 舟越賢一, 鈴木昭夫, 亀掛川卓美, 入船徹男, カンラン石の転位移動律速型粒界すべり: 上部マントルの流動を支配する変形メカニズム, 日本地質学会第122年学術大会, R12-O-11 (招待講演), 信州大学長野キャンパス (長野県・長野市), 9月11日, 2015年

Ohuchi, T., Kawazoe, Higo, Y., Funakoshi, K., Suzuki, A., Kikegawa, T., Irifune, T. Grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in Earth's upper mantle. Japan Geoscience Union Meeting 2015, S-IT04 Rheology of Earth's Interior, SIT04-10, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), May 28, 2015.

大内智博, 雷興林, 肥後祐司, 丹下慶範, 入船徹男, 高压条件下におけるアコースティックエミッション測定 of の技術開発, 日本地球惑星連合 2015 年大会, SCG59-P09, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 5月27日, 2015年

大内智博, 藤野清志, 入船徹男, ワズレアイト・リングウッドイトの結晶方位定向配列, 高压討論会 2014, 1A03, 徳

島大学常三島キャンパス (徳島県・徳島市), 11月22日, 2014年

大内智博, 西原遊, 瀬戸雄介, 川添貴章, 西真之, 丸山玄太, 橋本美華, 肥後祐司, 舟越賢一, 鈴木昭夫, 亀掛川卓美, 入船徹男. カンラン石の結晶方位定向配列発達の高温高压下その場観察実験: 上部マントルの地震波速度異方性の強度発達, 日本地球惑星連合 2014 年大会, SIT38-13, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市), 4月30日, 2014年

Ohuchi, T., Nishihara, Y., Seto, Y., Kawazoe, T., Nishi, M., Maruyama, G., Higo, Y., Funakoshi, K., Irifune, T. In-situ observation of crystallographic preferred orientation of olivine deformed in simple shear. 2013 Workshop of the IUCr Commission on High Pressure Advances in Static and Dynamic High-Pressure Crystallography, Hamburg (Germany), September 8-11, 2013.

大内智博, 西原遊, 瀬戸雄介, 川添貴明, 西真之, 丸山玄太, 肥後祐司, 舟越賢一, 入船徹男. カンラン石の結晶方位定向配列の高温高压下その場観察実験. 日本地球惑星連合 2013 年大会, SIT-38-P07, 幕張メッセ (千葉県・千葉市), 5月19-24日, 2013年

〔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〕

ホームページ等

<http://earth.sci.ehime-u.ac.jp/~ohuchi/ohuchi.htm>

6．研究組織

(1)研究代表者

大内 智博 (OHUCHI Tomohiro)

愛媛大学・地球深部ダイナミクス研究センター・講師

研究者番号：60570504

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

西原 遊 (NISHIHARA Yu)

雷 興林 (LEI Xinglin)