

令和 2 年 5 月 3 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18788

研究課題名（和文）マントル遷移層条件でのカンラン石破壊実験：深発地震発生メカニズム解明に向けた挑戦

研究課題名（英文）Semi-brittle behavior of olivine under the conditions of mantle transition zone

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） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：深発地震の多発するスラブ内深部の温度圧力条件下（700-1000、10-17 GPa）におけるカンラン石の破壊実験を行った。低温の条件下ではカンラン石の相転移がマイクロクラッキングを誘発したものの、断層すべりを引き起こす斜交クラックの形成は起きなかった。一方、脆性-塑性遷移の境界温度となる900℃では塑性変形に伴って斜交クラックが発達し、それに引き続いてラプチャーが誘発される場合には断層すべりに至ることが確認された。即ち深発地震はカンラン石の相転移と脆性-塑性遷移の両者が満たされた場合に引き起こされることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究にて行った、地球の深さ300-500kmに位置するスラブ深部の温度圧力条件下における岩石破壊実験は世界初の試みである。これまで、深発地震発生の素過程に関する研究分野をリードしてきたのは欧米の研究グループであった中、本研究の「マイクロAE測定システム」は世界で初めてスラブ深部の温度圧力条件下における微小破壊音測定を可能とした。これは当該分野にて世界をリードしていけるブレークスルーであり、当システムを用いた研究を今後も継続していくことは、我が国においては防災への応用といった観点からも非常に大きい意義をもつ。

研究成果の概要（英文）：To investigate the role of phase transformation of olivine on deep-focus earthquakes, I conducted uniaxial deformation experiments on dunite and at pressures 10-17 GPa and temperatures 700-1000 degC using a D-DIA apparatus. Acoustic emissions were monitored using the “micro-seismic monitoring system” which has been newly developed by this research program. Ductile deformation is dominant at temperatures exceeding 950 degC. Numerous mode-I microcracks occurred at lower temperatures (< 900 degC). Microcracking frequently occurred at higher pressures which allow phase transformation of olivine, suggesting that the phase transformation triggers microcracking. At 900 degC, corresponding to the threshold temperature for brittle-ductile transition of olivine, occurrence of a few faults was sometimes observed. Fault slip associated rupture. In summary, deep-focus earthquakes could be triggered when phase transformation of olivine proceeds at the temperatures of brittle-ductile transition.

研究分野：鉱物物理学

キーワード：深発地震 カンラン石 相転移 マイクロクラック 断層 アコースティックエミッション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本列島をはじめとした大陸プレートと海洋プレートの境界域においては、海洋域のプレートが地球深部へと沈み込んでいる。沈み込むプレート(スラブ)内にて地震が多発しており、その地震は発生深度によって稍深発地震(深さ 50-300 km)及び深発地震(深さ 300-700 km)に分類される。地震がどのようなプロセスを経て発生するのかを物質科学的観点から解明する「地震発生の素過程」に関する研究は、経験則に頼らない根本的な地震予測を目指す上で必要不可欠である。浅部で起きる地震の素過程に関してはこれまで比較的研究が進んでいた一方で、稍深発・深発地震発生の素過程については実験的な検討が困難であるため、謎に包まれてきた。

最近の実験技術の進歩により、近年では稍深発地震発生の素過程については理解がある程度進みつつある(例えば Ferrand et al., 2017 Nat. Comm.)。なお理論的には、断層の摩擦すべり強度が強い圧力依存性を持つため、稍深発・深発地震発生の素過程は断層すべりとは異なるものであると予想されている(Kohlstedt et al., 1995)。そこで代表者は2011年以降のこれまで間、稍深発地震発生の素過程を解明することを目指して研究を行ってきた。その結果、稍深発地震は岩石の一部に極度の变形エネルギーが集中する(剪断集中する)際に起きる温度上昇が岩石の部分熔融及び断層形成を引き起こし、稍深発地震発生に至ることを明らかとした(Ohuchi et al., 2017 Nat. Geo.)。これは、既存の断層がすべりを起こすことで起きる「浅発地震」の素過程とは大きく異なる。この成果より、稍深発地震よりもより深部にて発生する深発地震の素過程も「浅発地震」のものとは大きく異なることが予想される。

深発地震は、稍深発地震と比べると発生頻度は相対的に低いものの、2015年5月30日の小笠原諸島西方沖地震(震源深さ 631 km、マグニチュード 8.2)に代表されるように大地震の発生頻度が高い(Zhao & Tian, 2013)。以前より、スラブの主要構成鉱物であるカンラン石の圧力誘起相転移(結晶構造の変化)が深発地震の原因であると考えられてきた(Green & Burnley, 1989 Nature)。一般的に深さとともに地震の発生頻度は低下するにもかかわらず、カンラン石の相転移が起きる深さ 400-700km にて深発地震の発生頻度が高いことから(図1)、Green & Burnleyの仮説は強く支持されてきた。この仮説を検証するには、深発地震震源領域の温度圧力条件におけるカンラン石の一軸圧縮破壊実験が有効であるものの、これは技術的に困難であるために実験的に検証されてこなかった。

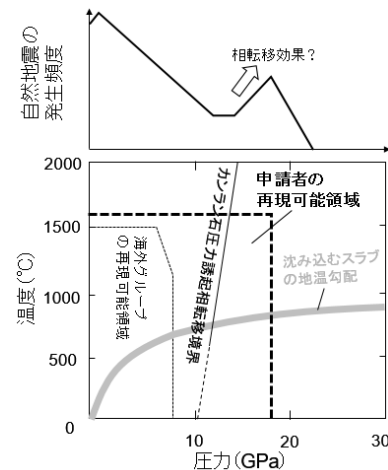


図1：地震の発生頻度の圧力依存性(上図)及び実験室にて破壊実験が可能な温度圧力範囲(下図)。

2. 研究の目的

そこで本研究では、深発地震の多発するスラブ内深部の温度圧力条件下(700-1000 °C、10-17 GPa)におけるカンラン石の破壊実験を行い、差応力下での圧力誘起相転移がカンラン石の破壊を誘発するのを実験的に検証した。実験を通して、どのような素過程を経てスラブ内深部において断層形成・地震発生に至るのかを明らかとすることを目的としてきた。本研究のような実験がこれまで技術的に困難であった理由としては、以下の2点が挙げられる：

- 1) マントル遷移層領域に相当する高圧力下(10-17 GPa)での岩石の一軸圧縮試験には高い技術力を要すること。
- 2) そのような高圧力下での試料サイズは微小(例えば直径 1mm、長さ 1.2mm)であるため、試料から発生するアコースティック・エミッション(AE: クラック伝搬の際に放出される弾性波)は微弱であり、かつ発生頻度が低いと予想される。そのような AE を検出する技術は未だに確立されていないこと。

上記1)について、応募者らのグループはマントル遷移層の温度圧力条件下(1200-1600 °C、15-18 GPa)にて岩石の一軸圧縮試験を行える技術を確立している(図1: Ohuchi et al., 2014)。これと同等の技術を有するのは、他には日本(広島大、岡山大)や米国(エール大)の研究グループに限られる。一方、2)の技術は世界のどの研究グループも未だに確立できていない。

岩石破壊実験に用いる試料(mm-cmオーダー)から発生するAEは、沈み込むスラブ(kmオーダー)内にて発生する地震に相当するといった“スケール則”が成り立つことが知られている。これは両者のスケールにおいても素過程が共通していることを意味する。そのため本研究では、まずマントル遷移層の温度圧力条件下にて一軸圧縮変形を被る微小試料から発生するAEを検出できる測定システム「マイクロAE測定システム」の開発を行った。続いて、スラブ内深部の温度圧力条件下におけるカンラン石の破壊に伴うAE測定実験を行った。実験を通して、圧力誘起相転移がカンラン石の破壊や断層形成を誘発するのかどうかを実験的に検証した。

3. 研究の方法

本研究では、まず「マイクロAE測定システム」の開発を行った。一般的に、試料から発生するAE信号は微弱であるため、1m程度の長さの同軸ケーブルを信号が経由しただけでも環境由来のノイズの影響を強く受ける。そのような環境由来ノイズの影響を最小化するには、AEセンサ

の直下に信号増幅器(プリアンプ)を設置することが理想となる。しかし高温高圧環境を再現するD-DIA型変形装置(後述)の内部に、通常のプリアンプを設置するのはスペースの観点から不可能である。そこで本研究では、ヘッドアンプ(超小型プリアンプ)搭載型のAEセンサを世界に先駆けて高圧実験に適用することにより、微弱なAE信号を検出できるようにした(図2、3)。また、微弱なAE波形よりAEの震源位置を高精度で決定するために、実験で得たAE波形を高速フーリエ変換に基づくフィルタ処理を行い、ノイズを除去するソフトを開発した。これによって、震源位置の決定誤差(±0.5mm未満)が試料サイズ(直径1mm)を十分下回るようになった。

続いて、マルチアンビル型超高压発生装置の一種である「D-DIA型変形装置」を用い、深発地震発生領域の温度圧力条件下(700-1000、10-17 GPa)にてカンラン石の一軸圧縮破壊実験を行った。実験ではSPRing-8の強力な放射光単色X線(60keV)を用いることで、変形を被るカンラン石試料の2次元X線回折パターン及びラジオグラフ像を撮影した。前者より封圧及び差応力を定量し、後者より試料の歪を定量した。AE発生はカンラン石の圧力誘起相転移によって活性化されるものと予想されるため、カンラン石多結晶体試料を一軸圧縮変形させつつ、カンラン石の圧力誘起相転移を同時進行させた。そのため試料の一軸圧縮試験の直前には、カンラン石の安定領域(9-11 GPa、1200)にて20分間のアニール処理を行うことで、試料内に高圧相が一切存在しないようにしつつ、試料内の欠陥構造(転位等)やマイクロクラックを可能な限り消滅させた。その後、任意の温度(700-1000)にて試料の一軸圧縮試験を行った。実験での温度圧力経路は、以下の3通りに大別される：

- ・ 経路1：1200 でアニール処理 任意の温度に降温 封圧を徐々に上昇させつつ一軸圧縮試験を開始
- ・ 経路2：1200 でアニール処理 600 へ降温 封圧を目標値まで上昇させる 任意の温度へ昇温 封圧一定にて一軸圧縮試験を開始

上記の「高温高圧X線その場観察」に加え、「マイクロAE測定システム」を用いることによって、変形/破壊するカンラン石試料より発生するAEを測定した。AE測定では、波形の最大振幅及び震源位置に特に着目した。

4. 研究成果

4-1) 実験結果と考察

温度が特に低い場合(700)には、カンラン石の相転移反応は全く進行しなかったにも関わらず、非常に多くのAEが試料より発生した。この結果は、AE発生は必ずしも相転移を前駆現象としていないことを示している。700で変形した試料には粒界割れが卓越していることから、それがAE震源となったものと考えられる。一方、900では圧力12GPa以上の場合には相転移反応が多少進行した(回収試料中の高圧相の割合は2vol.%未満)上、粒内クラック形成を伴う強いAEが多数発生した(図4)。ただし11GPa程度の低圧条件下ではAEはほぼ発生しなかったことから、900では相転移がマイクロクラック形成を促進しているものと考えられる。950以上の高温下ではAE発生をほとんど伴わない塑性変形が卓越した。950以上の実験での最高到達圧力が12GPaと比較的低いこともあり、相転移は殆ど進行しなかった(回収試料中の高圧相の割合は2vol.%未満)。

経路1では試料変形に伴うカンラン石の相転移は徐々に進行するものと予想される一方で、経路2の実験では試料変形開始直後から(比較的)急速に相転

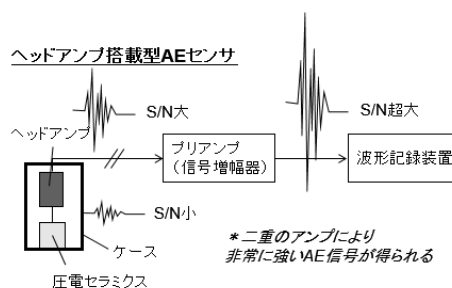


図2：マイクロAE測定システムを構成する、ヘッドアンプ搭載型AEセンサの概念図。

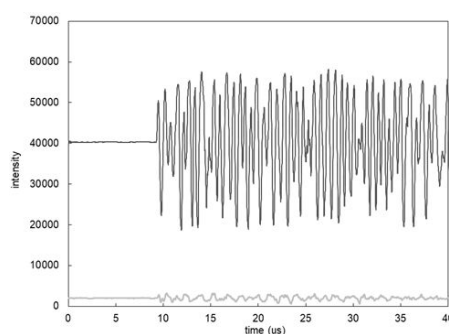


図3：ヘッドアンプ搭載型AEセンサで受信した波形(上側)と通常のAEセンサで受信した波形(下側)。振幅だけでなく、SN比が大幅に改善されている。

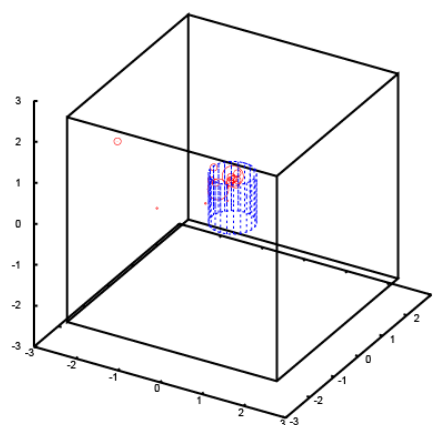


図4：15GPa、900にて一軸圧縮変形した試料(青円柱)及び圧力媒体(黒立方体)から発生したAE震源(赤丸)。なおこの試料にはモードIクラックが無数に形成されたものの、断層は形成されなかった。

移が進行するものと予想される。実際、経路2での実験ではAEが多発する傾向が見られたほか、回収試料中の高圧相の割合は約5vol.%に達した。経路2の実験では相転移に伴う細粒化がより進行したため、降伏強度が1.5GPa程度(900にて)に留まるといった“軟化”が確認された(経路1では900での強度は約2-2.5GPa)。

本研究では900においてのみ、試料を斜交する断層(モードIIIクラック)の形成や断層すべりに至るケースが確認された(図5)。そのような場合では試料中にて発生したAE件数は少なかった。特に断層すべりに至るケースでは、大きなAEが試料内外から連続して発生した(ラブチャー現象)。そのようなケースでは降伏強度が1.5GPa程度(900にて)と低いことから、塑性変形がある程度卓越することで試料内の破断面(断層)形成が抑制され、少数のモードIIIクラックが形成されたとともに、その破断面先端におけるラブチャーが進行したのかもしれない。微細組織観察より、断層ガウジはカンラン石及びその高圧相(ワズレアイトまたはリングウッド)のナノ粒子から構成されていることが確認された。ナノ粒子はラブチャーに伴う破砕で形成されたものと推定される。ナノ粒子からなるガウジでは粒径依存性クリープが卓越するため、ガウジへの剪断集中が引き起こされ、断層すべりに至ったものと考えられる。

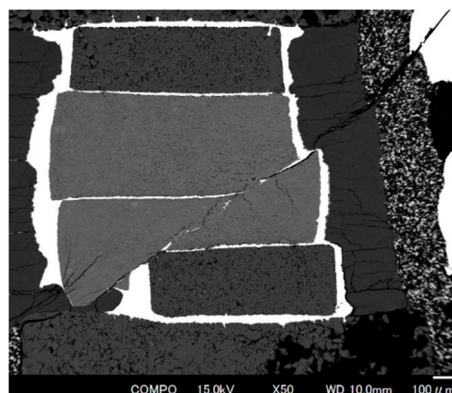


図5：13GPa、900にて、試料を斜交する断層の形成及びすべりが起きた例。

一方で、断層が形成されたものの顕著な断層すべりに至らなかったケースでは、試料外にてAEは殆ど発生しなかった。断層形成が起きなかった場合ほど試料内でのAE件数は多く、試料外にてAEは殆ど発生しなかった(ラブチャー無し)。そのような試料には、無数のモードIクラック(クラックの伸長方向//一軸圧縮方向)が形成されており、これがAE震源となっていたものと解釈される。無数のモードIクラック形成によって、剪断集中やラブチャーは阻害されるものと考えられる。

以上をまとめると、900ではカンラン石の相転移はマイクロクラッキングを誘発し、それが脆性破壊の必要条件となる。一方、950以上では塑性変形が卓越するため、カンラン石の相転移はマイクロクラッキングを誘発しなくなる。特に脆性-塑性遷移の境界温度となる900では、少数のモードIIIクラックが形成されることがあり、なおかつラブチャーが引き続き進行する場合には断層すべりに至るものと解釈される。

4-2) 成果の意義

以前より、カンラン石の相転移が深発地震を誘発するといった仮説(Green & Burnley, 1989 Nature)は広く支持されてきた。カンラン石のアナログ物質を用いた実験では、カンラン石の相転移に伴う細粒化(ナノ粒子の形成)が剪断集中を誘発し、断層すべりに至ることを示している(Schubnel et al., 2013 Science)。しかし実際のカンラン石を用いた本研究の結果は、相転移に伴う細粒化だけではナノ粒子は形成されないことを示しているほか、モードIIIクラックの形成やラブチャーに伴う破砕がナノ粒子形成のための必要条件であることを示している。さらに本研究の結果は、深発地震は脆性-塑性遷移の境界温度(特定の温度)でのみ発生することを示しており、観測結果と調和的である(Wiens et al., 1993)。本研究にて行った、スラブ深部の温度圧力条件下における岩石破壊実験は世界初の試みであるとともに、深発地震発生メカニズムに関する従来の仮説を覆す実験結果を得た意義は大きい。以上の成果は現在投稿準備中であり、その後は得られた成果を国際誌にて公表する予定である。

これまで、深発地震発生の素過程に関する研究分野をリードしてきたのはGreen(Green & Burnley, 1989 Nature)やSchubnel(Schubnel et al., 2013 Science)をはじめとした欧米の研究グループであり、日本の研究グループによる成果は皆無であった。そのような状況の中、本研究において開発した「マイクロAE測定システム」はスラブ深部の温度圧力条件下に対応した、世界でも唯一無二の技術力を誇る。これは当該分野にて世界をリードしていける下地を確立したことを意味するため、今後も「マイクロAE測定システム」を生かした研究を継続することは、地震災害の多い我が国においては防災への応用といった観点からも非常に大きい意義をもつ。

4-3) 追記

なお本研究に関連して、深さ30-300kmのスラブ内にて発生する稍深発地震発生メカニズムに関する論文が国際誌(Contrib. Mineral. Petrol)にて現在リバイス中である。この論文では、スラブ内における超臨界水が地震を抑制するといった現象を実験的に示している。

また当初の研究計画では、AE震源位置決定精度の向上を目的として、相対震源決定アルゴリズム(Waldhauser & Ellsworth, 2000)をAE震源決定用プログラムに应用することを計画していた。当アルゴリズムは自然地震の震源決定で一般的に用いられている手法であるものの、これを応用することでAE震源位置決定の誤差がミクロン~ナノオーダーにまで改善されうるとの報告がある(Wang et al., 2017 Sci. Adv.)。本研究でも当アルゴリズムを応用したAE震源決定

用プログラム開発を行ってきたものの、その開発は最終年度までに完了しなかった。今後も当プログラム開発を継続することによって、「マイクロ AE 測定システム」を用いた震源位置決定精度のさらなる向上を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohuchi Tomohiro, Lei Xinglin, Higo Yuji, Tange Yoshinori, Sakai Takeshi, Fujino Kiyoshi	4. 巻 173
2. 論文標題 Semi-brittle behavior of wet olivine aggregates: the role of aqueous fluid in faulting at upper mantle pressures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00410-018-1515-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件／うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y.
2. 発表標題 Faulting in deforming dunite under wet conditions: role of aqueous fluid in semi-brittle behavior of dunite
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kawakami, R., Ohuchi, T.
2. 発表標題 Deformation of quartz single crystals under the coesite-stable conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大内智博
2. 発表標題 High pressure generation up to 24 gigapascals using a D-DIA apparatus combined with jacketed anvils
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大内智博, 雷興林, 肥後祐司, 丹下慶範, 境毅
2. 発表標題 ハルツバータイトの半脆性流動と破壊における水の効果
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大内智博
2. 発表標題 高温高圧下における微小破壊音測定：稍深発・深発地震発生の素過程の解明を目指して
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y.
2. 発表標題 Semi-brittle flow in dunite and harzburgite at upper mantle pressures
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ohuchi, T., Lei, X., Higo, Y., Tange, Y. Sakai, T.
2. 発表標題 Faulting in deforming harzburgite under wet conditions
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naruse, Y., Ohuchi, T.
2. 発表標題 Semi-brittle behavior of olivine single crystals under the conditions of Earth's mantle transition zone.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Semba, M., Hirauchi, K., Ohuchi, T., Michibayashi, K.
2. 発表標題 High-pressure deformation experiments on peridotite gouges under hydrothermal conditions, using a deformation-DIA apparatus.
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsubokawa, Y., Ohuchi, T., Higo, Y., Tange, Y., Irifune, T.
2. 発表標題 Rheology of dry orthoenstatite deformed in the D-DIA under upper mantle conditions
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	雷 興林 (Lei Xinglin) (70358357)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・研究グループ長 (82626)	