

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成30年 6月12日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13596

研究課題名(和文) AEとECの複合測定を用いた高圧下における固液2相系の剪断不安定化に関する研究

研究課題名(英文) Shear instability in solid-liquid two-phase system at high pressure

研究代表者

久保 友明 (Tomoaki, Kubo)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：40312540

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)： 稍深発地震や深発月震の原因とされる脱水反応や部分融解など固液2相系の剪断不安定化プロセスを実験的に検討するために、高圧下で大歪みせん断変形場を実現し放射光X線その場観察および多端子AE測定を行う実験システムを開発し、カンラン石と少量の玄武岩メルトの系やカンラン石とアンチゴライト脱水系において実験を行った。特にカンラン石 アンチゴライト2相系においてはせん断変形場において変形が局所化していく様子がその場観察でき、せん断面には細粒のガウジ層も観測された。昇温脱水時にはせん断変形が激しくなり小規模のAEが多発する。変形が局所化したせん断面において脱水時には不安定なすべりが発生している可能性がある。

研究成果の概要(英文)： Intermediate-depth earthquakes and deep moonquakes are observed at more than 2 GPa where most rocks exhibit plastic deformation rather than brittle failure, owing to high pressures and temperatures. It has been suggested that antigorite dehydration and partial melting are may be responsible for these shear instability at high pressures. In order to assess this issue, we developed an AE monitoring system for high-pressure reaction-deformation processes in large shear strains combined with Deformation-DIA apparatus and synchrotron monochromatic X-ray. We observed shear localization during the shear deformation of olivine-antigorite two-phase system. When the material was dehydrating, acoustic emissions were detected. Such shear localization and AE activities were not observed in small strains and uniaxial compression. Large shear strain may trigger shear localization and shear instability of the dehydrating material.

研究分野： 鉱物物理

キーワード： 深発地震 高圧変形実験 AE測定 放射光実験

1. 研究開始当初の背景

地球の海洋プレートや月深部マントルでは、脆性-延性転移を超えた高圧下で稍深発地震 (IDE) および深発月震 (DMQ) が起こっている (e.g., Frohlich & Nakamura, PEPI2009)。特に二重面下面のプレート内部で起こる IDE は蛇紋化したかんらん岩の脱水脆性化が原因とされる。しかし脱水の体積変化が負となる 2 GPa 以上において高圧下での実験的研究は不十分である。一方で DMQ の圧力条件は IDE に相当する 3-4 GPa 付近だが月マントル深部のより高温条件で起こっている。潮汐力による応力場と相関があるがその大きさは不十分であり、震源域直下に存在するとされる部分熔融層由来の応力場と微量なメルトの存在が DMQ 発生に深く関わっていることが指摘されている (e.g., Khan et al., JGR 2014)。しかし高圧下において微量なメルトと剪断不安定化に関する実験的研究は行われていない。

2. 研究の目的

稍深発地震や深発月震の原因とされる脱水反応や部分融解など固液 2 相系の剪断不安定化プロセスを実験的に検討するために、これまでに開発した多端子 AE 測定技術 (AE6-6 システム) を改良し、部分熔融をとともなう高温下での AE 測定や高圧下で大歪みせん断変形場を実現する実験セルを開発する。それらと放射光単色 X 線その場観察技術を融合させ、カンラン石と少量の玄武岩メルトの系やカンラン石とアンチゴライト脱水系において、液相放出量や歪み量、変形強度、変形の局所化、AE 発生の関係性を明らかにする。そして稍深発地震や深発月震の発生にフルイドやメルトが関与しているのか否かを考察することを目指す。

当初は液相連結度をモニタする電気伝導度 (EC) 測定を新たに組み合わせることを検討していたが、研究の進展と予算の都合上、固液 2 相系の大歪みせん断変形場での変形挙動と AE の同時測定に集中して実験を行うこととした。

3. 研究の方法

(1) 部分熔融条件下での AE を用いた変形実験：これまで 700° C 程度であった AE6-6 システムの実験温度を、アンビル底面にとりつける PZT 素子のキュリー点や高温下での高周波の減衰に注意しながら約 1500° C まで拡大し、高圧下で部分熔融体の剪断不安定化がモニタできる実験システムを確立する。そして液相の濡れ角と固液 2 相系の変形挙動、脱水反応時、部分熔融時の体積変化および剪断不安定化にともなう AE の発生などに着目しながら、高圧下でカンラン石と少量の玄武岩メルトが共存する 2 相系においてせん断不安定化が起こる条件を検討する。

(2) 高圧下での大歪みせん断変形実験技術

の確立：やや深発地震、深発地震とも断層運動により地震が発生しており、これまでの一軸圧縮変形場でせん断不安定化条件の探索では不十分である。また単純せん断変形場では高圧相転移や脱水反応によって生じる細粒反応生成物やフルイドなどの弱線部の連結がより効率的に促進される可能性も指摘されている。そこで大歪みのせん断変形場において変形が局所化するプロセスを放射光その場観察できる実験セルの開発を行う。一軸圧縮変形セル、単純せん断変形セル、摩擦変形セルを用いた比較実験を行う。

(3) 大歪みせん断変形場におけるカンラン石-アンチゴライト 2 相系の変形および脱水実験：稍深発地震の原因として、蛇紋石の脱水脆性化が有力なメカニズムとして挙げられるが、矛盾する結果も多くまた圧力領域も脆性-塑性転移に近い条件に限られるため未だに高圧下での断層形成条件は明確になっていない。本研究では、約 300km 付近まで二重深発地震面が続いている現実のプレート内部環境をふまえ、過去の研究よりも高圧下において部分的に蛇紋岩化したかんらん岩の大歪み領域での変形挙動に着目し、アンチゴライトとオリビン二相系試料のせん断変形場での変形挙動を明らかにする。上記 2) で開発した実験セルをさらに改良し、これまでに用いてきた放射光 X 線 AE6-6 システムと組み合わせて実験を行い、変形が局所化する条件や AE が発生する条件を制約する。

4. 研究成果

(1) 部分熔融条件下での AE を用いた変形実験：九州大設置の D-DIA 型高圧変形装置 (MAX-90D) を用いて実験研究を進めた。6-6 型高圧装置と多端子 AE 測定を組み合わせた AE6-6 システムにおいて、これまで数 GPa、約 700° C 程度であった本システムの利用可能温度を、実験セルを改良することで約 1200° C まで拡大し、玄武岩の部分熔融実験に対応できるようにした。高圧下で変形を伴わない条件で部分熔融実験を行った結果、試料部ではなく試料周辺部から 10 回程度の AE が検出された。これは試料部の部分熔融による体積変化に起因するかもしれない。常圧下で行われた過去の研究では、花崗岩の融解および結晶化に起因する多数の AE 発生が報告されている。メルトの放出速度 (体積変化速度) を変えるために昇温速度をパラメータとして AE 発生条件を検討していく必要がある。

部分熔融時の変形挙動と深発月震の関連性に着目した実験について、カンラン石と少量の玄武岩メルト 2 相系の高圧下静的環境における組織観察を含めた焼結実験を行った。その結果、深発月震が起こっている圧力 3-4GPa では玄武岩メルトがカンラン石の粒界を濡らしていることが確認された。このような液相の連結に対する変形挙動への影響を明らかにするために、この試料を出発物質としてせん断変形実験をおこなうための実

験セルの改良を行った。加圧後昇温し変形直前の状態ですでに相当量のせん断歪みが試料に生じる問題があり、それがほぼ0になるようなセルの開発は完了した。しかし部分熔融状態での変形挙動の詳細は未だ明らかになっておらず今後の課題となっている。

(2) 高圧下での大歪みせん断変形実験技術の確立：実験はSPring-8のBL04B1設置のD-DIA型高圧変形装置に小型六方圧縮装置を組み込んだ6-6型システムを用いて行った。一軸圧縮変形セル、単純せん断変形セル、二軸摩擦変形セルの3種類の実験セルを用意し、50 keVの単色X線を入射光として2次元X線回折パターンとX線ラジオグラフィ像を約5分毎に時分割測定し、応力と歪みのデータを得た。せん断変形および摩擦変形セルに関しては1秒毎にラジオグラフィ像を得ることでスティックスリップの検出も試みた。3種類の実験セルとも常温加圧後に加熱し、圧力2.5～3 GPa、温度400～670°CにおいてD-DIA型高圧変形装置の上下アンビルを変位速度200～300 $\mu\text{m}/\text{h}$ で動かし変形実験を行った。高圧下のせん断変形実験ではピストンを45°にカットした実験セルが用いられることが多いが、その場合、一軸圧縮成分の寄与が避けられず、単純せん断変形場に比べ弱線部の連結組織に違いが生じることが指摘されている。また45°カットセルではデバイリングにおいて一軸圧縮成分とせん断変形成分の主応力軸が一致するため両者を分離することは困難である。本研究で試みた単純せん断変形セルでは一軸圧縮成分の寄与を減らしかつ両者の主応力軸を分離することが可能である。しかし現状ではせん断歪み量が未だ小さく、また一軸圧縮成分の寄与も大きい。目的の温度圧力条件においてアンビル変位が試料部に伝わるように、実験セル内部のアルミナピストンの空隙率を調整するなどの工夫が必要である。二軸摩擦変形セルではピストン-試料間でスリップし試料部がほとんど変形しなかった。これはピストンに溝加工を施さなかったことが原因かもしれない。本研究で試みたラジオグラフィ像の高速時分割測定によるスティックスリップの検出は、応力の高速時分割が困難な現状では、AE測定とともに高圧下で不安定すべりを検出する手段として期待される(久保他, SPring-8 Scientific Research Report 2018)。

(3) 大歪みせん断変形場におけるカンラン石-アンチゴライト2相系の変形および脱水実験：これまでの過去研究ではアンチゴライト単相を用いて比較的小さい歪み領域において変形実験を行った場合が多い。本研究では天然のアンチゴライトとカンラン石を任意の量比(10%, 30%, 50%)で混合し、3GPa、450°Cで焼き鈍した円盤状多結晶体を出発試料として用いる。それを斜め45度で切り出した二つのAl2O3ピストンで挟み込み、圧

力6GPa付近で変形開始時のせん断歪みをほぼ0の状態から、歪みが1を超えるような大歪みせん断変形実験を行った。二相系試料の固相領域では、変形初期段階に均質変形から局所変形が卓越していく様子がラジオグラフィでその場観察され、せん断歪み速度と局所変形面でのスリップ速度の測定も可能であった。回収試料には、せん断方向と平行に著しい局所変形が生じ断層が形成されていた。局所変形部ではアンチゴライト、オリビンともに激しい塑性変形を示しており、断層面には100nm以下の細粒物質が観察された。この挙動はアンチゴライトの量比が30-50%のときにより顕著となるが、AE活動や歪みマーカー時分割測定などからこのスリップは今回の条件では安定なものでせん断不安定化を引き起こすものではないと予想される。一方で、その後の昇温脱水時には剪断変形が激しくなり小規模のAEが多発する。脱水時には変形が局所化したせん断面において不安定なすべりが発生している可能性がある。オリビンおよびアンチゴライト単相では固相剪断変形においてB剪断面に近い局所化が起こるものの脱水時も含めてAEは発生せず安定すべりが卓越する。その場観察実験のデータは系統的にほぼ得られているので、今後、回収試料の変形脱水微細組織の観察、脱水速度曲線、応力-歪み曲線、AE活動の定量的解析を行い、変形の局所化と不安定化が起こるプロセスを詳細に検討して国内外の学会で発表し、その結果を論文にまとめる。

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1件)

- ① 久保友明、岩里拓弥、肥後祐司、今村公裕、D-DIA型高圧変形装置を用いたせん断変形および摩擦実験の試み、SPring-8 Scientific research report, in press (査読有)

[学会発表] (計5件)

- ① 池原舞、久保友明、アンチゴライト-オリビン二相系の高圧下における変形組織の観察、日本鉱物科学会2017年会、松山、2017年9月14日
- ② M. Ikehara, T. Kubo, Shear deformation experiments of two-phase aggregates of antigorite and olivine at high pressure: A preliminary study, Japan Geoscience Union meeting 2017, Makuhari, May 23, 2017
- ③ 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、高圧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

- ④ T. Kubo, T. Iwasato, Y. Higo, T. Kato, S. Uehara, S. Kaneshima, Y. Tange, Syndeformational dehydration experiments on antigorite and shear instability at high pressure, Misasa VI “Frontiers in Earth and Planetary Materials Research: Origin, Evolution and Dynamics”, Misasa, March 9, 2016
- ⑤ 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 日

[図書] (計 1 件)

鳥海光弘他、図説地球科学の事典、朝倉書店、2018 年 4 月 (3 章 12 節執筆)

[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・理学研究院・教授

研究者番号：40312540

(2) 研究分担者

加藤 工 (KATO, TAKUMI) (2017 年 7 月まで)

九州大学・理学研究院・教授

研究者番号：90214379

(3) 連携研究者

東 真太郎 (AZUMA, SHINTARO)

九州大学・大学院理学研究院・特別研究員 (PD)

研究者番号：60771293