

令和元年6月20日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05341

研究課題名(和文) 岩石の衝撃圧縮実験とシュードタキライト：深部地震震源過程の物質科学的研究

研究課題名(英文) shock compression experiment of olivine and pseudotachylyte: material science study on the seismo-mechanical processes of deep earthquakes

研究代表者

小畑 正明 (Obata, Masaaki)

京都大学・理学研究科・名誉教授

研究者番号：20126486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：カンラン石単結晶を用いて、火薬ガンを用いて衝撃圧縮実験を計5回行った。そのうち回収できた4ケのサンプルについて、光学顕微鏡、電子顕微鏡を用いて微細構造の観察と分析を行った。いずれの実験においても結晶内に多数の剪断面が生じ、面に沿って粉碎したことが確認できた。そのうち剪断面に溶融の証拠が見つかったのはc軸方向に30 GPaで圧縮した1サンプルのみである。ここでは剪断面において最初に粉碎が起こり、その後結晶粒界で溶融が起こったことが確認できた。これは地震発生のメカニズムと、地震の化石といわれるシュードタキライトの形成過程を制約する重要な研究成果で、現在論文を国際雑誌に投稿準備中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深部地震発生のメカニズムは地球科学上の第1級の課題である。本研究はかんらん石単結晶を用いた一連の衝撃圧縮実験と回収試料の解析により、地震断層面で摩擦溶融に先行して粉碎が起こることを明らかにした。0.5マイクロ秒という極端に短時間で、塑性変形、剪断粉碎、そして溶融という一連の過程が生じ、また衝撃圧縮下でも断層の先端部では引っ張り応力による破断が生じかんらん石組成のメルトの注入が起こったことが明らかになった。これらのことは学術上全く新しい知見であり、今後の深部地震のメカニズム解明に貢献する成果であるといえる。

研究成果の概要(英文)：In order to study mechanism of deep earthquakes, a series of shock compression experiments were performed, using a single crystal of forsterite and a powder gun. Many shear planes were generated in the crystal diagonally to the compression axis and, in one experiment, we observed a clear local melting occurred along shear planes. The microstructural observation of the shear planes revealed that plastically-deformed olivine was pulverized into a few hundred-nanometer size particles within a narrow zone from the shear plane and, locally along the shear plane, have partly melted. Moreover, injection veins filled with olivine melt were found in the fault wall. We interpret that a dynamic pulverization occurred at a running rupture front when the sample was compressed and that melting took place by the friction among the olivine nanoparticles. Pulverization before melting is considered to be a common process in co-seismic faulting and may play an important role in deep earthquakes.

研究分野：岩石学

キーワード：深部地震 マントル かんらん石 摩擦溶融 衝撃圧縮 シュードタキライト カタクラサイト 断層

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震波は地下深部で断層面の急速な拡大に伴うフラクチャー先端部でおこる急速な滑り（加速度的運動）によって励起される弾性波である。古典的な弾性波動論の扱いに比べて、断層面の高速高応力での物質の挙動についての物質科学的研究は著しく遅れているのが現状であった。地震においては断層面における熔融、及び、これによる摩擦減少による急速滑りが重要であることが研究者の間で広く認識されていた。実験的研究としては回転摩擦試験機による研究が主流であった。この状況にあつて筆者らは新しいアプローチとして過去数年に渡り熊本大学に設置された火薬銃とかんらん石単結晶とかんらん岩サンプルを用いて人工的に剪断面を作るべく、衝撃圧縮実験を繰り返し行ってきた。その中で、かんらん石単結晶を用いた衝撃圧縮によって生成した剪断面に沿って局所的に熔融が起こったことを初めて 2014 年に初めて見出した。本計画はこのユニークな実験的アプローチをさらに発展させようとするものである。

2. 研究の目的

究極の目的は震源過程の詳細とそのメカニズム、ダイナミクスを解明することである。本研究ではこの目的のために、火薬銃を用いた衝撃圧縮によって鉱物結晶内部に剪断面（小断層）を人工的に発生させ生じた断層面の微細構造を観察することで、急速なスリップ運動によって生じた物質変化を調べることを当面の目的とする。変形微細構造の結晶方位依存性も合わせて調べる。また天然の地震の化石とされるシュードタキライトとの比較研究を合わせ行うことで、震源過程の詳細とそのメカニズムに迫る。

3. 研究の方法

熊本大学のパルスパワー科学研究所にてかんらん石結晶を用いて衝撃圧縮回収実験を行う。1 段式及び 2 段式ガンを用いて 20GPa ~ 40GPa の間で圧力を制御して複数の衝撃圧縮実験を行う。また異なる結晶方位のディスクを作成し、衝撃圧縮による変形微細構造の方位依存性を調べる。回収した試料は光学顕微鏡、電子線マイクロプローブアナライザー、走査型電子顕微鏡、透過型電子顕微鏡を用いて変形微細構造を調べる。シュードタキライトについてはイタリアバルムチャで共同研究者と採取したサンプルについて分析研究を進め投稿論文を作成する。

4. 研究成果

期間中に衝撃圧縮実験は 1 段ガンを用いて 3 回 (Run#8, #9, #10)、2 段ガンを用いて 2 回 (Run#11, 12)、計 5 回行なった。いずれも同一種類のかんらん石単結晶（パキスタン産）を用いた回収実験である。これまでの c 軸垂直に加えて、Run#8 と Run#9 では b 軸と a 軸に垂直なディスク（直径 12mm 厚さ 3mm）を新たに一つずつ作成し実験に用いた。結晶方位決定には EBSD を用いた。2016 年 1 月に熊本大学パルスパワー科学研究所にて 3 つの衝撃圧縮実験を行なった (Run#8, #9, #10)。Run#8 は b 軸垂直なディスク、Run#9 は b 軸垂直なディスク、Run#10 は従来通りの c 軸垂直のディスクを用いた。Run#8, #9 は飛翔体のスピードは共に約 1.5km/s、算出された衝撃圧はそれぞれ 33GPa, 31.9GPa であった。Run#10 は飛翔体のスピードは約 1km/s、衝撃圧は前 2 者より格段に低く、4.3GPa であった。Run#10 はこれまでよりも圧力を低くおさえ、塑性変形様式と転位構造の変化を見ることを狙ったものである。実験はいずれも成功し、回収試料の光学顕微鏡、操作電子顕微鏡観察を行った結果、Run#8, #9 はこれまでと同様に整然とした剪断面が発達したのに対し、Run#10 では剪断面はできず、塑性変形だけであった。これらのサンプルは透過電子顕微鏡によるより詳しい微細構造観察のため研究分担者の元に送り、2019 年 6 月現在なお実験結果待ちである。

2017 年にはより高圧を目指して 2 段ガンを用いた実験を開始した。最初の実験 (Run#11) では衝撃実験自体は成功したが、衝撃圧縮時、カプセルの蓋が破壊、飛散し、サンプルが失われて回収に失敗したので、蓋のない 1 体型のより強固なカプセルを新たにデザインし、再度衝撃圧縮実験を行なったところ回収に成功した (Run# 12)。飛翔体のスピードは 1.74 km/s、第 1 波及び反射波の圧力は、それぞれ 36.9 GPa、50.2 GPa であった。この回収サンプルの SEM 観察により、断層面上に前回と同様の溶融した兆候を示すスポンジ状の組織が見出されたので現在広島大学の研究分担者にサンプルを送り透過電子顕微鏡による観察計画を立てているところである。

この間実験と並行して、最初の熔融が観察されて一度投稿してリジェクトされた論文の改訂作業を進め、再度投稿する準備をしているところである。この論文は衝撃圧縮を受けた0.5マイクロ秒という極端に短い時間に、かんらん石結晶に、塑性変形、剪断破砕、熔融、そして注入脈の形成という一連のプロセスが起こったことを報告するものである。これは衝撃圧縮実験によってかんらん石単結晶内に形成した剪断面に明瞭な熔融現象を見出した世界初の研究であり、地震発生のメカニズムと、シュードタキライトの形成過程を制約する重要な研究成果であるといえる。

イタリアのバルムチャかんらん岩の過去に起こった地震の痕跡とされる超マフィックシュードタキライトについては、共同研究者と分析研究と議論を推し進め、投稿論文にまとめあげ、今年 J. Geophysical Research に投稿した。現在査読後の改訂作業を論文共著者と共同で行なっているところである。この研究ではスピネルかんらん岩でマイロナイト、カタクラサイト、シュードタキライトの組織関係から、まず塑性流動変形が起こり、それが脆性破壊に転移し、摩擦熔融が起こったことが示すことができた。この研究では、塑性変形から、脆性破壊の転移が起こったのが地質温度計・圧力計を用いて、温度約 700 、圧力約 0.5GPa であることが特定できたことが重要な研究成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

小畑正明 (2015) 超マフィックシュードタキライト —上部マントル震源過程のロゼッタストーン—地学雑誌 *124* (3), 411-427.

Obata, M., Mashimo, T., Ando, J., Chen, L. and Yamamoto, T., High-pressure shock compression of olivine: dynamic pulverization and frictional melting (in preparation for a submission to Earth and Planetary Science Letters)

Ueda, T., Obata, M., Ozawa, K., Shimizu, I., The Transition from Ductile Shearing to Brittle Faulting Recorded in the Balmuccia Peridotite Body, Italy: Ambient Temperature for the Onset of Seismic Rupture in Mantle Rocks (submitted to Journal of Geophysical Research)

〔学会発表〕(計 9 件)

小畑正明 : ざくろ石のゾーニングからケリファイト化の反応速度を推定する試み (An attempt to estimate the kelyphitization rate of garnet from a zoning of garnet). 地球惑星科学連合 2018 年大会、2018 年 5 月 21 日千葉幕張

小畑正明・河上哲生 : ざくろ石のゾーニングからケリファイト化速度を求める試み-その 2 日本鉱物科学会 2018 年会, 2018 年 9 月 21 日 山形大学

小畑正明 : ざくろ石のケリファイト化はいかなる速さで起こるのか、ざくろ石累帯構造からの制約、日本鉱物科学会 2017 年会, 2017 年 9 月 26 日 愛媛大学

小畑正明 : ざくろ石のケリファイト化に伴う物質移動—その 2 : 内部応力によって生じた変成分化? 地球惑星科学連合 2016 年大会 2016 年 5 月 25 日千葉幕張

小畑正明 : ざくろ石のケリファイト化に伴う物質移動—その 3 : 応力下での変成分化のメカニズム再考、鉱物科学会 2016 年会 2016 年 9 月 金沢

小畑正明 : 日本鉱物学会賞受賞講演。日本鉱物科学会 2015 年会, 2015.9.26 東京

小畑正明・三宅亮・小澤一仁 : ざくろ石かんらん岩中のケリファイトに見出されたサフ

イリン多形。日本鉱物科学会 2015 年会，2015 年 9 月 27 日 東京

小畑 正明・真下 茂・安東 淳一・陳 黎亮・山本 貴史：オリピンの衝撃圧縮実験，特に
剪断面に沿っての粉碎と熔融。第 56 回高圧討論会，2015 年 11 月 12 日，広島

Obata, M., Mashimo, T., Ando, J., Chen, L., Yamamoto, T. : Shock compression
experiment of forsterite: pulverization and frictional melting in a shear regime.
American Geophysical Union, Fall Meeting 2015, abstract #MR33A-2636, 2015 年 12
月、San Francisco

〔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：
国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：安東淳一

ローマ字氏名：ANDO, Jun-ichi

所属研究機関名：広島大学大学院

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号 (8 桁): 50291480

(2)研究協力者

研究協力者氏名：真下茂

ローマ字氏名：MASHIMO, Tsutomu

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。