

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14816

研究課題名（和文）斜方輝石の動的再結晶に誘発される剪断集中プロセスの解明：高压変形実験による検証

研究課題名（英文）strain localization promoted by dynamic recrystallization of orthopyroxene studied by high-pressure deformation experiments

研究代表者

坪川 祐美子 (TSUBOKAWA, YUMIKO)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：40824280

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：プレート強度の弱化メカニズムについて説明するために、プレートの第二成分である斜方輝石に着目し高温高压変形実験を行った。斜方輝石は変形による再結晶の結果、~1ミクロンの細粒粒子を形成し変形は局所化した。得られた斜方輝石の再結晶粒子-応力関係から、斜方輝石の動的再結晶で形成された粒子は粒径依存性クリープで変形することが予想され、これが全体の強度を支配する場合には強度弱化に寄与する可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海洋プレートの最主要鉱物であるカンラン石の転位クリープ強度は非常に大きく、プレートが変形し沈み込むための理論強度を大幅に超過している。地球におけるこのようなプレートテクトニクスの矛盾を説明するために、本研究ではプレートの第二成分である斜方輝石が変形に誘発される細粒化（動的再結晶）の結果、一般的な転位クリープではなく粒径依存性を持つ変形メカニズムが強度を支配するようになり強度弱化する可能性を実験的に示した。

研究成果の概要（英文）：To explain weakening mechanism of subducting oceanic lithosphere in the Earth, high-pressure and high-temperature deformation experiments of orthopyroxene, which is the second dominant mineral in the oceanic lithosphere, were conducted. Recrystallization and localized deformation of orthopyroxene was occurred with recrystallized grain size of ~1 micron. Based on the relationship between recrystallized grain size and stress of orthopyroxene, grain size reduction by recrystallization would induce the transition of the dominant creep mechanism from dislocation creep to grain-size sensitive creep of orthopyroxene and would thus result in weakening.

研究分野：固体地球科学

キーワード：斜方輝石 海洋プレート 高温高压変形実験

## 1. 研究開始当初の背景

プレートテクトニクスは地球内部の物質循環や熱の輸送を支配する重要なプロセスである。地球においてプレートが変形・破壊しつつ離合集散するための理論強度は 150 MPa 以下と考えられているが (Richards et al., 2001; G3)、プレートの最主要鉱物であるカンラン石の強度は 500-600 MPa (ドライな状態) と非常に大きい (例えば Kohlstedt et al., 1995; JGR)。実際の地球においてプレートテクトニクスが生じていることを説明するためには、プレートの強度が何らかの理由により“弱化”している必要がある。

プレート内において断層や剪断集中帯のような“弱層”の存在を考えることで、プレートテクトニクスが可能であることを説明することができる。特に、数十ミクロン以下の微細粒子が卓越するマントル剪断集中帯では、一般的な転位クリープではなく、粒径依存性を持つ変形メカニズム【岩石強度 (粒径)<sup>-4 or -3</sup>】が強度を支配することで、周囲の岩石と比べて 2 桁程度その強度が低いことが予想される。ここで、斜方輝石はプレートにおいて 2 番目に多い鉱物であり、その強度はカンラン石よりも低いことが実験的に指摘されている (Ohuchi et al., 2011; PCM)。また天然のマントル剪断集中帯では、斜方輝石の動的再結晶 (変形に誘発される細粒化) の結果、斜方輝石の細粒粒子に変形が集中し弱帯が形成されている観察例が報告されている (Skemer and Karato, 2008; JGR)。このように斜方輝石の変形と動的再結晶、そしてその結果生じる弱帯形成は、地球におけるプレートテクトニクスの進行についての鍵となる可能性がある。

## 2. 研究の目的

上述の通り、プレートの最主要鉱物であるカンラン石の強度は非常に大きく、本来であればプレートは変形し沈み込むことができない。本研究ではプレートの第二成分である斜方輝石に着目し、沈み込むプレート内条件下における斜方輝石の変形実験から、斜方輝石の動的再結晶によりプレート強度が低下し、プレートの沈み込みが説明可能かどうかについて検討を行った。また、斜方輝石は周囲のマントルと比べ低温のスラブ (沈み込むプレート) 内では準安定的に残留し、深さ 200 km 付近で高压型単斜輝石へと相転移しマントル遷移層まで存在すると考えられる。そこで本研究では同時に、この高压型単斜輝石についての流動強度測定も行うことで、沈み込みマントル遷移層に至る一連のプレート強度に及ぼす斜方輝石の役割について統一的に評価することを目指した。

## 3. 研究の方法

出発物質に天然の斜方輝石単結晶 (タンザニア産) またはこれを粉砕して得た粉末を焼結して得た多結晶体を用い、沈み込むプレート内の温度圧力条件下 (2-10 GPa, 800-1200 ) における高温高压変形実験を行った。実験装置には、歪速度を一定に制御し精密な変形を行うことが可能な D-DIA 型高压発生装置を用いた。変形は試料の上下に円柱状ピストンを配置した一軸圧縮変形実験に加え、一部の実験ではより大歪みを達成することで斜方輝石の動的再結晶と局所変形を観察することを目指し、先端を 45° にカットしたピストンを用いて単純剪断変形場を設定した他、動的再結晶に誘発される変形の局所化を直接観察することを目指し、大型放射光施設にて強力な単色 X 線を用いた変形中試料の圧力・応力・試料歪のその場観察も合わせて行った。

実験後の回収試料は、走査型電子顕微鏡 (SEM) による微細組織観察・再結晶粒径の測定と、電子線広散乱回折 (EBSD) を用いた結晶方位解析を行った。また一部のオフライン実験では、斜方輝石に加えカンラン石の多結晶体を試料としてともに変形することで、カンラン石の転位密度-応力関係 (Jung and Karato, 2001; JSG) から実験の応力条件を推定した。

## 4. 研究成果

### (1) 斜方輝石の一軸圧縮変形実験および単純剪断変形実験

斜方輝石単結晶を用いた一軸圧縮変形実験の結果、変形後の斜方輝石には再結晶粒子が認められたものの、試料全体としては動的再結晶の進行は顕著には認められなかった。これは変形前の斜方輝石単結晶の方位による問題で、斜方輝石において主要なすべり系による変形の支配が起こらなかった可能性がある。次に、斜方輝石の動的再結晶による変形の局所化と強度弱화를直接観察するために、より大歪みの変形が可能かつ変形中試料の応力測定が可能その場観察単純剪断変形実験を行った。単純剪断変形実験の結果、試料の剪断歪は最大 80 % 以上を達成し、より速い歪速度 ( $\sim 1\text{E-4 s}^{-1}$ ) で変形した場合、または試料の剪断歪が 50 % 以上になるような場合において、試料中に  $\sim 1$  ミクロンの細粒粒子の集合体の存在と不均質な変形が認められた。その一方で、変形中試料での顕著な応力低下はその場観察されなかった。

斜方輝石は応力約 200-300 MPa にて粒径 1-2 ミクロン程度の極微細な粒子を形成したが、これは同じ応力下にて予想されるカンラン石の再結晶粒子の粒径の 1/5 以下である。本研究で得られた斜方輝石の再結晶粒子-応力関係に基づくと、斜方輝石の再結晶粒子が試料全体の強度を支配する場合、その強度を支配する変形メカニズムが転位クリープから粒径依存性クリープに

切り替わり、強度弱化する事が示唆された。また EBSD による結晶方位解析の結果、温度 1000-1200 °C で一軸圧縮変形した斜方輝石多結晶はすべり方向 [001] を有し、すべり面は (100) 面から (010) 面の間に分布していると考えられる。これは、これまで一般に主要とされてきた斜方輝石のすべり系 (100)[001] (例えば Raterron et al., 2016; *EPSL*) のみならず、プレート内条件下での斜方輝石の変形において支配的となるすべり系が存在すると推測される。

## (2) 高圧型単斜輝石の一軸圧縮変形実験

出発物質の斜方輝石多結晶は、昇圧後 (~10 GPa) の昇温過程において高圧型単斜輝石への相転移が完了することをその場観察した。高圧型単斜輝石の流動強度は温度 <1000 °C の範囲で弱い温度依存性 (~2-5 GPa 程度) が認められた一方で、温度 1000 °C 以上では顕著な応力低下 (<1GPa) を示した。これは、高圧型単斜輝石の主要な変形メカニズムがパイエルズ型クリープから転位クリープへと変化したためと考えられる。このうち低温側での流動強度は、先行研究で報告されるカンラン石やリングウッドイトがパイエルズ型クリープで変形した際の応力 (Ol: Mei et al., 2010; *JGR*, Rwd: Imamura, 2018; *Ph.D. thesis*) に近い値である一方、後者の高温側の流動強度は、転位クリープの圧力依存性を考慮すると、カンラン石や斜方輝石が転位クリープ変形した際の強度 (Ol: Hirth and Kohlstedt, 2003; *Geophys. Monogr.*, Opx: Ohuchi et al., 2011; *CMP*) と比べ低い値であると考えられる。なお本研究では変形中、試料歪の増加に伴い圧力が徐々に減少する傾向がみられた結果、高圧型単斜輝石の低圧相である低圧型単斜輝石または斜方輝石が出現したことによる実験の中断が相次いだ。そのため、高圧型単斜輝石の転位クリープおよびパイエルズ型クリープについてはその詳細を今後明らかにすることが重要と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Y. Tsubokawa, T. Kubo, Y. Higo, Y. Tange, Y. Nishihara, R. Honda
2. 発表標題 Uniaxial deformation and transformation of high-pressure clinoenstatite under mantle transition zone condition
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坪川祐美子、久保友明、丹下慶範、肥後祐司
2. 発表標題 沈み込むスラブ内条件下における高圧型単斜エンスタタイトの変形実験
3. 学会等名 第62回高圧討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坪川祐美子、大内智博、久保友明、肥後祐司、丹下慶範、入船徹男
2. 発表標題 上部マントル条件下における含水斜方輝石の変形実験
3. 学会等名 第61回高圧討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坪川祐美子、大内智博、肥後祐司、丹下慶範、入船徹男
2. 発表標題 Deformation of dry orthoenstatite under high P-T conditions and its implication for the variation in strength of oceanic plates
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 2020年大会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------