

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05679

研究課題名(和文) 中下部地殻・上部マントルで形成された破断面の直接観察

研究課題名(英文) Direct observation of the fractured surfaces of minerals produced at middle-low Crust and upper Mantle

研究代表者

増田 俊明 (Masuda, Toshiaki)

静岡大学・防災総合センター・客員教授

研究者番号：30126164

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：(1) マイクロブーディンの破断面の直接観察を大理石とメタチャート中の角閃石を用いて行った。大理石では方角閃石(草津の温泉：pH=1)を利用して方解石を溶かして取り出した角閃石の破断面をレーザー顕微鏡で観察した。メタチャートではFIB-SEMにより、破断面を含む部分をガリウムイオンで飛ばしながら観察する事が出来た。破断面には角閃石が新たに成長していたが、破断面自体は凹凸が少ない直線的な面である事を確認した。(2) 応力場で変成岩中に新たに生じる鉱物の結晶方位の異方性に付いて、核形成の活性化体積が垂直応力に依存する、というモデルを反応速度論の立場から構築した論文が国際誌に掲載された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(1) 角閃石マイクロブーディンの破断面の観察では、地下深部での破断のメカニズムを考察する上で基本的情報を提供した事になる。石英や方解石が流動するような温度圧力環境で微小に起こる角閃石の破断の実態を知ることによって、地下深部での岩石の変形への理解が進み、地震発生メカニズムの理解につながる基礎知識の一つを提供できたと考えている。(2) 核形成の活性化体積が応力に依存するというモデルは、応力場での結晶の異方的成長の新しい方向性を示しており、今後の変成鉱物の選択配向の議論が活性化する土台を築けたと考える。

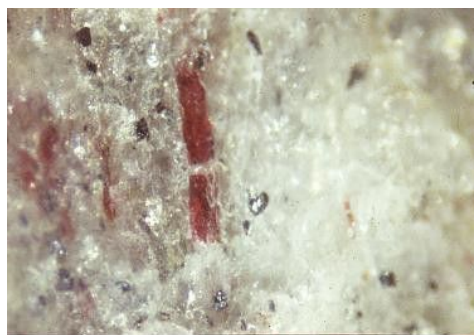
研究成果の概要(英文)：(1) Fractured surfaces of amphibole microboudins in a marble and a metachert were tentatively observed with a laser microscope and FIB-SEM, respectively. Although the fractured surfaces are partly concealed by newly overgrown amphibole grains on the fractured surfaces after the microboudinage, original fractured surfaces show smoothly undulated, not serrated morphology in most places. (2) I published a paper that proposes a new kinetic model of metamorphic minerals based on systematically changeable activation volume for the nucleation under the influence of normal stress in non-hydrostatic stress state in an international journal (Masuda, T. and Omori, Y., 2021. A kinetic model of oriented nucleation under nonhydrostatic stress: implications for the preferred orientation of columnar and platy minerals in metamorphic rocks. Journal of Structural Geology).

研究分野：構造岩石学

キーワード：マイクロブーディン構造 長柱状鉱物 破断面 レーザー顕微鏡 FIB&SEM 核形成 結晶成長

1. 研究開始当初の背景

下部地殻や上部マントルでの破断のメカニズムを知る事が出来れば、岩石変形現象の理解に大きな進展が期待できる。破断メカニズムの解明には破断面の直接観察が有効である事が知られており、直接破断面を観察することが有効な研究方法であると考えられる。一般に破断面は地下深部で形成後に、地表に至る過程で大きな変化が起こることが想定され、我々が観察できる破断面が本当に地下深部で形成されたままの状態であると信じられる証拠を見出すのは通常では困難であると思われる。しかし、下部地殻や上部マントルで形成されたと思われるマイクロブーディング構造(上は石英片岩中の紅簾石のマイクロブーディング構造の双眼顕微鏡写真。横幅約2mm。ピンク色の長柱状鉱物が紅簾石でその周囲の白い鉱物が石英。紅簾石中央部に割れて離れた部分に石英が侵入している。これがマイクロブーディング構造である。石英が流動している環境で割れ目が拡大することからその温度圧力が地下深部であることを示している)を利用すれば、直接地下深部で形成された破断面を観察できるかもしれない。その可能性を追求したのが本研究である。



2. 研究の目的

変成変形岩中に発達している長柱状鉱物(たとえば角閃石、電気石、緑簾石など)のマイクロブーディング構造は非常に特殊な構造で、周囲の鉱物がまだ流動性を保持している状態で形成されたものである。従って、温度圧力が高い下部地殻や上部マントルでの形成が保証されている構造である。本研究では、変成変形岩中に見られる長柱状鉱物のマイクロブーディング構造の破断面を詳細に観察し、その形状から破断のメカニズムをフラクトグラフィーの知識を利用して解析することで、地下深部で破断が起こった状態を考察することが主目的である。

3. 研究の方法

3種類の変成変形岩中に発達しているマイクロブーディング構造の破断面を直接観察した。メタチャート中の角閃石のマイクロブーディング構造はFIB-SEMによる段階研磨法により、破断面を直接電子顕微鏡で観察した。大理石中の角閃石のマイクロブーディング構造の破断面は、角閃石粒子の周りの方解石を溶解し除去することで破断面を露出させてレーザー顕微鏡で観察した。カンラン岩中のスピネルのマイクロブーディング構造は岩石表面で研磨・観察を繰り返すことにより通常の光学顕微鏡で観察した。

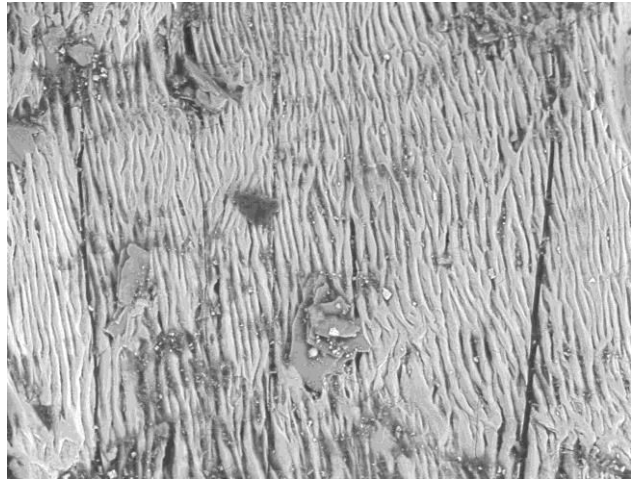
4. 研究成果

(1) 北海道のカムイコタン変成帯幌加内地域で採集したメタチャート中の角閃石の破断面をFIB-SEMで観察した結果、破断面は比較的直線的な面で構成されている事がわかったが、破断面の一部には破断・開口後に新たな角閃石と思われる鉱物が成長しており、破断面の全体の形状は完全には解明できなかった(右写真。色の濃い部分が石英、白っぽい部分が角閃石。マイクロブーディング開口部は中央左上から右下の石英の帯の部分で、破断部自体は緩やかな曲線状である。中央水平方向に伸びているやや不規則な幅の部分はマイクロブーディング破断部ではなく、結晶中の包有帯の様なものとおもわれる。中央上部の白線が約40ミクロン。この写真未公表)。破断自体が下部地殻~上部マントルレベルの深度で起こっており、破断後でも高温高



圧状態にさらされていることで、破断面が結晶成長の場となっていることがわかった。新たに形成された角閃石はマイクロブーディング構造を呈している角閃石(グロコフェン)とは違う化学組成をもっているため、マイクロブーディング破断面を識別することは可能で、現在までにわかったことは、破断面は比較的直線的な面であることがわかった。この方法では、新たに成長した角閃石がマイクロブーディング破断面の復元を困難にしていることを確認した。

(2) ギリシャのシロス島カンボスで採集した大理石中の角閃石の破断面を、万代鉱(草津温泉)の温泉水(pH ほぼ1の強酸性の液体)を用いてマトリクスの方解石を溶解させる方法でレーザー顕微鏡で観察した。破断面は入り組んだ形状をしており、破断・開口後に角閃石自体が地下深部で溶解したものと考えられ、破断面の全体の形状は複雑な凹凸を呈している。特筆すべきはパキスタンで採集された大理石中の角閃石のマイクロブーディン破断面である(上のSEM写真。横幅約300ミクロン。この写真未公表)。露天で販売されていた岩石を購入したものであるため産地

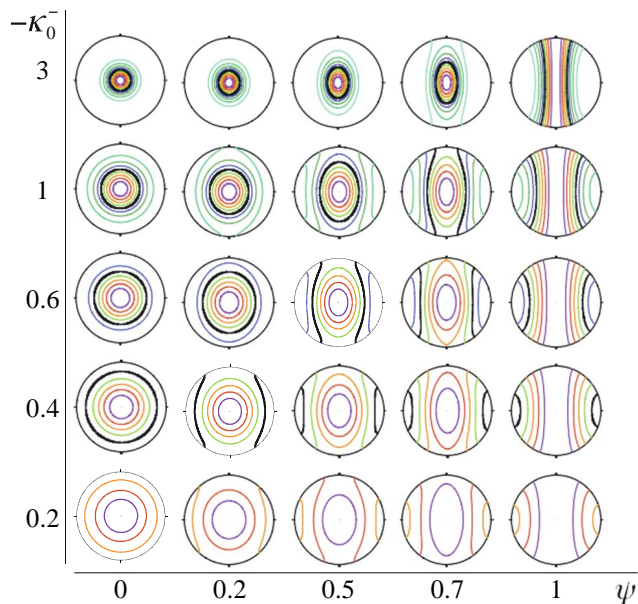


は不明であるが、ヒマラヤからのものと思われる。規則的な波状の形状を持つ破断面が見られた。このようなものはこの1例だけなので、このような破断面が普遍的かどうかはまだわからないが、破断メカニズムを検討する価値がある映像と思われる。今後更なる検討を経て有益な結果が期待できる。

上記(1)から(3)を通じて、マイクロブーディン構造の破断面が地下深部で形成されたままの状態を保持していることは、むしろ奇跡的かもしれないと感じた。多くのマイクロブーディン粒子は、破断後に新たな結晶が破断面に成長していたり、粒子自体が溶解していたりしており、変化が激しいことがわかった。ただし、非常に稀な状況では場合によっては破断した時点の破断面が残されているのかもしれない、と思われる面も確認できた(上の写真)ので、この方法での検討は、今後地道に継続する価値は

あると思われる。多数の粒子を観察すれば、地下深部で形成された破断面を保持している粒子に遭遇する可能性は期待できる。

(4) コロナ禍で野外調査・サンプリングが出来なかった時期に、応力場で結晶が核形成したときの結晶方位のプリファードオリエンテーションを予測するシミュレーションを実施した。粒子方位パターンは集中度と応力比によって表示出来ることを示した(右図。等高線を示しており、最大値が1、黒線で示した所が0.5の集中度。縦軸は集中度係数カッパ、横軸は応力比係数ブシー。Masuda and Omori (2021)のFig. 6を引用)。カッパとブシーの値の変化に応じてパターンが変化している様子が見取れる。



<引用文献>

Masuda, T., Omori, Y., 2023. A kinetic model of oriented nucleation under nonhydrostatic stress: implications for the preferred orientation of columnar and platy minerals in metamorphic rocks. *Journal of Structural Geology*, 146, 1-13.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Masuda Toshiaki, Omori Yasutomo	4. 巻 146
2. 論文標題 A kinetic model of oriented nucleation under nonhydrostatic stress: Implications for the preferred orientation of columnar and platy minerals in metamorphic rocks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 104275 ~ 104275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsg.2020.104275	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masuda Toshiaki, Omori Yasutomo, Sakurai Ryoko, Miyake Tomoya, Yamanouchi Mirai, Harigane Yumiko, Okamoto Atsushi, Michibayashi Katsuyoshi	4. 巻 117
2. 論文標題 Loop energy: A useful indicator of the hardness of minerals from depth-sensing indentation tests	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 96 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsg.2018.09.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsumura Tarojiro, Kuwatani Tatsu, Ando Yasunobu, Masuda Toshiaki	4. 巻 114
2. 論文標題 Application of the inverse Batschelet distribution to measuring the preferred orientation of tourmaline grains	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 288 ~ 293
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsg.2017.12.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Matsumura, T., Kuwatani, T., Masuda, T.	4. 巻 112
2. 論文標題 The relationship between the proportion of microboudinaged columnar grains and far-field differential stress: A numerical model for analyzing paleodifferential stress	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Mineralogical and Petrological Sciences	6. 最初と最後の頁 25-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2465/jmps.160711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 増田俊明、大森康智
2. 発表標題 応力場での変成鉱物の核形成モデル：板状鉱物及び柱状鉱物の選択配向の予測
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会（山口大会）
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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------