

脆性塑性遷移における石英多結晶体の剪断実験—変形組織からの塑性変形割合の推定
 Deformation Experiment on Quartz Aggregates in Brittle-Plastic Transition:
 Estimation of Contribution of Plastic Deformation from Deformation Texture

○宮副 真夢・野田 博之・岡崎 啓史

○Manamu MIYAZOE, Hiroyuki NODA, Keishi OKAZAKI

Brittle deformation is dominant and earthquakes can occur in the shallow crust. On the other hand, crystalline plastic deformation is dominant and earthquakes rarely occur in the deep crust. The transition between them is called the brittle-plastic transition (BPT). The BPT is important because it is the lower limit of the seismogenic zone and large earthquakes often initiate there. But the mechanism of rock deformation within faults in the BPT is not well understood. In this study, we conducted shear experiments for quartz aggregates under conditions across the BPT. S-C' structures of recovered samples were analyzed using a kinematic model of Noda (2021) to estimate, for the first time, the ratio of shear strain due to plastic deformation to the total strain ($\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$) in the fault zone. It increases towards 1 with temperature, successfully quantifying the BPT.

1. はじめに

断層のすべり挙動は深さ(温度・圧力)により変化する。地球浅部は低温であるため、脆性変形が卓越し、地震が発生しうる。一方で、地球深部は高温あるため、結晶塑性変形が卓越し、地震は発生しない。(例えば Sibson, 1977; Scholz, 1988) 脆性変形と結晶塑性変形の遷移が起こる領域(脆性-塑性遷移領域)は地震発生帯の下部にあたり、しばしば巨大地震の震源となる。(例えば Sibson, 1982) しかし、脆性-塑性遷移領域における岩石の変形メカニズムはよくわかっていない。脆性-塑性遷移領域における構成則を、定式化する試みが多く行われている。(例えば Reinen et al, 1992; Shimamoto and Noda, 2012; Chen and Spiers 2016; Noda, 2021 など) なかでも Noda (2021)では、断層内部の微細構造の変形に注目した理論モデルが提案されており、脆性-塑性遷移領域の断層内部における岩石の変形メカニズムを考える上で有効である。そこで本研究では、せん断実験終了後の回収試料の微細構造を測定し、その結果からこのモデルの妥当性について考察していく。また、微細構造の測定結果と断層帯全体の歪に占める塑性変形によるせん断歪の割合 ($\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$) の温度変化を見積る。これを天然の脆性-塑性遷移領域の断層岩とされる S-C'マイロナイト (Shimamoto and Kawamoto, 1989) に適用することで、微細構造から断層の塑性割合の定量的な推定が可能になることが期待さ

れる。

2. 手法

せん断実験は Griggs 型固体圧式高温高压三軸変形試験機(Griggs 型試験機、Tullis and Tullis, 1986)を使用し、せん断角 45° のプレカットで石英の多結晶体が層厚 1 mm になるように用いた。実験条件は封圧 1000 MPa、せん断歪速度 2.5×10^{-4} /s の一定にし、温度条件を石英の脆性-塑性遷移領域を含むとされる 400-900 °Cの範囲で行った。(Hirth & Tullis, 1994; Richter et al., 2018) 実験中には力学データを測定し、回収した試料は薄片に加工し(図1)、試料全体の歪量 (γ)、 R_1 面の角度 (φ)、石英粒子の長軸方向の角度 (θ) をそれぞれ測定し、Noda (2021)の定常状態を仮定したモデルと比較し、モデルの妥当性を考察する。また、これらのパラメータを、Noda (2021)で提案された運動学的制約に基づき、 $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ を計算する。本研究では、せん断前の粒子の長軸方向とアスペクト比を考慮した。

3. 結果

図2は実験ごとの最大せん断応力、摩擦係数を0.7-0.85としたときの摩擦則、実験で求められた石英の流動則(Tokle et al, 2019)、Shimamoto and Noda (2012)の脆性-塑性遷移領域における経験的な構成則をプロットした図である。この図から400-700 °Cの温度範囲では摩擦則に従っているよ

うに見える。また、図3は測定した R_1 面角度 (φ) を温度ごとにプロットした図である。この図から R_1 面角度 (φ) の温度依存性は無いように見える。なお、図4は $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ を温度ごとに計算した結果である。温度の上昇に伴い $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ は連続的に増加している。

4. 考察

Noda(2021)のモデルでは R_1 面角度 (φ) は、 τ/σ が最大となる角度であるため、 $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ が大きいと、高角になり、低いほど低角になるが、測定結果では R_1 面角度 (φ) の温度変化はほぼ見られず、モデルとの食い違いが見られる。また、長軸の角度 (θ) の測定結果より、すべての温度範囲で長軸方向の角度 (θ) の変化がみられるが、この原因については今後さらに調べていく必要がある。これらより 700 °C 以下では Y 面滑り+塑性変形を 800 °C 以上では R_1 面滑り+塑性変形の変形であると考えられる。さらに、この二種類の変形モデルから $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ を計算すると、Y 面滑り+塑性変形から R_1

面滑り+塑性変形へ遷移する際に、 $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ は大きく増加する結果が得られた。

5. 課題と展望

測定結果と Noda(2021)のモデルとの食い違いの理由については、定常状態の仮定の妥当性や、実験試料における変形の不均質性や端面効果などが考えられる。また、変形初期に形成した R_1 面が弱面としてはたらし、新たな低角のすべり面の形成を抑えている可能性がある。なお、低温の実験において、破碎流動で粒子の長軸の配列が形成される可能性がある。これらの点についてさらなる検証が必要である。

Noda (2021)では常に最適な面が滑り面として作用すると仮定している。実験及び天然のせん断帯においては、一度形成した滑り面が弱面としてはたらし、変形に応じてその向きが変化すると考えられる。天然試料から塑性変形割合を推定するためには、そのような影響を考慮したモデルの作製が必要であろう。

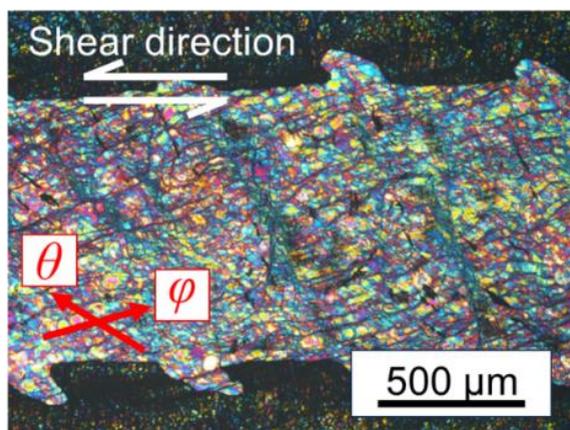


図1 600 °Cの薄片写真 (クロスポーラー)

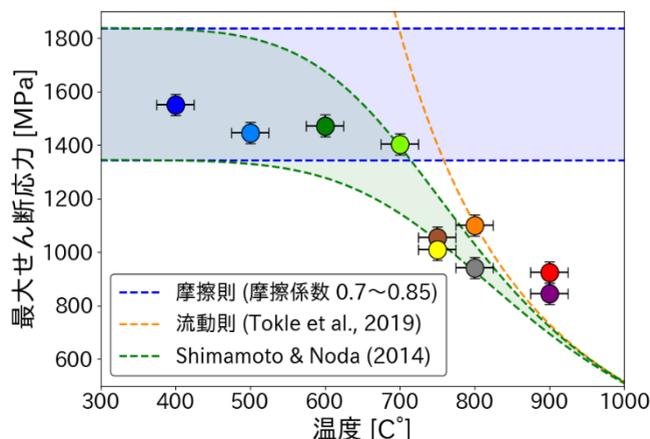


図2 最大せん断応力

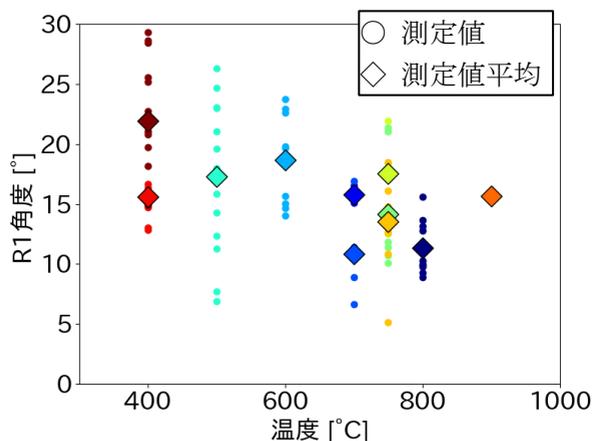


図3 R_1 面の角度(φ)の温度変化

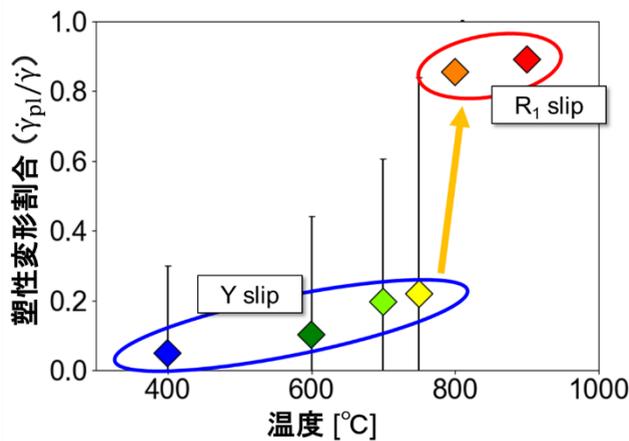


図4 $\dot{\gamma}_{pl}/\dot{\gamma}$ の温度変化