A202

石英多結晶体剪断実験の回収試料から用いた塑性変形割合の定量化
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・岡﨑　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. Microstructures 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 crystalline plasticity to the total strain (C_{pl}) in the fault zone. It increases towards 1 with increasing 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。地殻浅部では脆性破壊が、地殻深部では結晶塑性変形が卓越し、これらの変形機構の遷移は脆性-塑性遷移と呼ばれ、脆性破壊と塑性変形が混在する。脆性-塑性遷移領域は地震発生帯の下限部に相当し、しばしば大地震の震源となるため (e.g., Sibson, 1982; Scholz, 1988)、この領域におけるせん断帯の変形メカニズムを理解することは重要である。そこで、脆性-塑性遷移条件で剪断実験を行い、力学的挙動を調べる研究が多く行われている (e.g., Kawamoto and Shimamoto, 1997)。しかし、その原因となる剪断帯の微細構造の変形はよくわかっておらず、それに着目した研究も少ない。Noda (2021) は Shimamoto (1989) による実験で脆性-塑性遷移領域の剪断帯内に確認された微細構造 (S-C'構造) をもとに、定常状態において R_1 面のすべりと剪断帯全体にわたる塑性変形が共存する運動学的変形モデルを提案した。この変形モデルにより、実験的に確認された脆性-塑性遷移による滑らかな剪断応力の低下と微細構造を関連づけ、数値的に構成則を求めることを可能にした。本研究では、剪断実験を行い回収試料の微細構造から、変形モデルを使用して剪断帯全体の剪断歪速度に占める塑性変形による剪断歪速度の割合 (C_{pl}) の推定し、それによる変形モデルの実験的検証を目的としている。

2. 手法

剪断実験は Griggs 型試験機を使用した。試料には石英多結晶体を用いており、実験条件は封圧 1000 MPa、剪断歪速度 2.5×10^{-4} /s の一定で、温度を石英の脆性-塑性遷移領域を含むとされる 400-900℃の範囲とした（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、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) をそれぞれ測定した。これらのパラメータを Noda (2021) で提案された運動学的モデルに使用することで C_{pl} を定量化し、力学データおよび変形粒子のアスペクト比と比較することで、変形モデルの妥当性を検証する。ただし、本研究では変形モデルを実験試料に適用するために、二つの工夫を施している。一つ目は、Noda (2021) は歪楕円に関するモデルであったが、変形前における剪断帯の初期形状を考慮した点である。そして二つ目が、実験で確認された変形の不均一性を変形モデルに考慮した点である。これらの工夫により、より実験に近い条件でのモデル計算を実現した。

3. 結果・考察

結果として、我々は初めて C_{pl} の定量化に成功し、C_{pl} は 750-900℃ において、温度の上昇に伴い増加していた (fig. 1) 。これは力学データ (fig. 2) および回収試料のアスペクト比 (fig. 3) と定性

的に比較しても調和的である。力学データは750℃以上で剪断応力が小さくなっており、アスペクト比は 700℃以上で変形前 (Hot press 試料) よりも増加している。したがって、塑性変形の寄与が重要となるのは 700℃以上であると考えられ、これは C_{pl} の推定結果と一致する。これにより、変形モデルは実験に即していることが確認され、剪断実験における変形モデルの有効性を示すことができた。その一方で、 400-600℃ では脆性領域であるにも関わらず、長軸方位が変形前 (Hot press 試料) と比較して、わずかに変化しており (fig. 4)、正確な C_{pl} が測定できず、変形モデルを適用することができなかった。その原因として、Granular flow で結晶粒子が回転することによる、長軸方位の変化が考えられる。Noda (2021) では、長軸方位は塑性変形によってのみ変化すると仮定おり、それ以外の変形メカニズムで長軸が変化してしまうと、変形モデルを適用できない。また、この変形モデルでは、理想的には長軸方位の代わりにアスペクト比を使用することもできる。推定 C_{pl} と測定した R_1 方位および剪断歪量から、実験後のアスペクト比の分布をシミュレーションし、実際の測定分布と比較した。これにより、アスペクト比を C_{pl} の推定に使用可能か考察する。その結果、測定分布とシミュレーション分布の間に不一致が確認された。この原因として、アスペクト比の測定方法に問題があると考えられる。したがって、アスペクト比を C_{pl} の推定に使用することは理論上可能ではあるが、正確な測定値を得る手法を開発する必要がある。

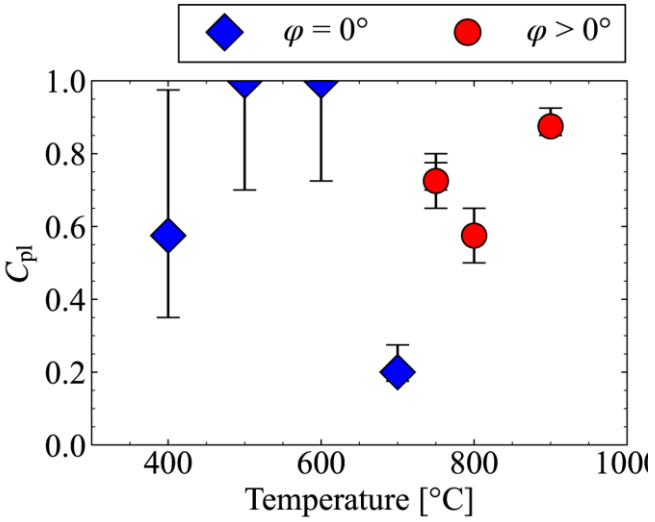

Fig.1　推定した C_{pl}。

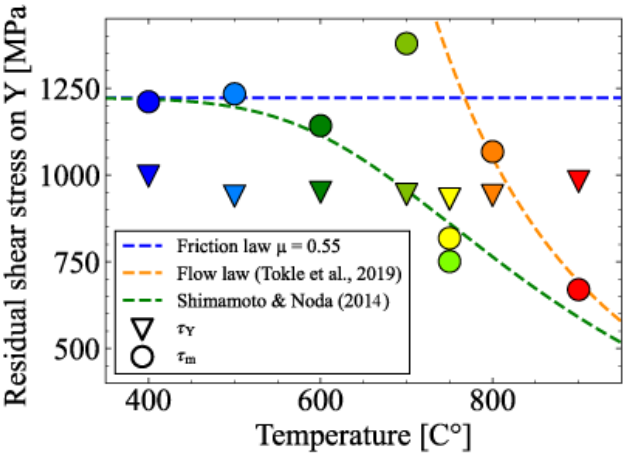

Fig.2 実験終了時の力学データ。緑点線は Shimamoto & Noda (2014) により提案された経験的な BPT における剪断強度。

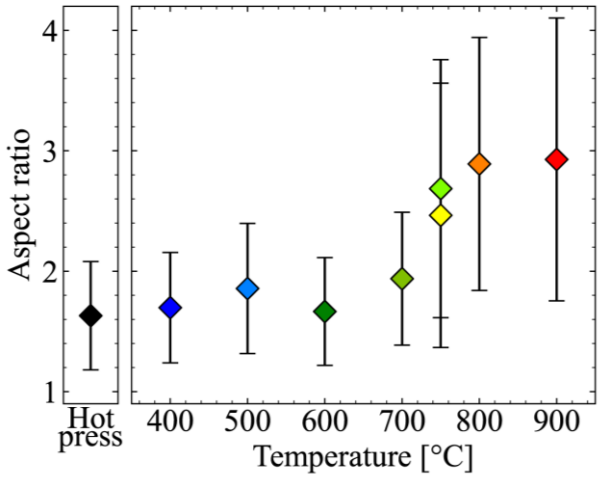

Fig.3 回収試料より測定したアスペクト比。

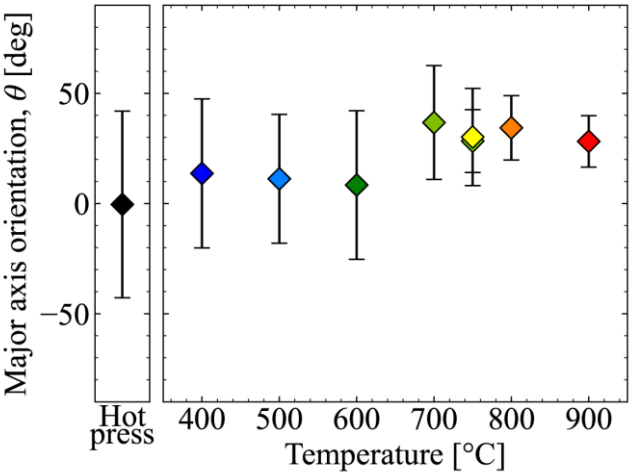

Fig.4　回収試料より測定した長軸方位。