

回転剪断摩擦実験による模擬断層ガウジの機械的非晶質化 Mechanical amorphization of synthetic fault gouges during rotary-shear friction experiments

○金木俊也・大橋聖和・廣野哲朗・野田博之

○Shunya KANEKI, Kiyokazu OOHASHI, Tetsuro HIRONO, Hiroyuki NODA

Although mechanical amorphization of fault rocks and its effects on frictional properties were reported in various faults, the relationship between slip processes and generation rate of amorphous materials remains unclear. We performed rotary-shear friction experiments on quartz and kaolinite gouges under normal stresses of 1 or 3 MPa, at slip velocities of 0.001 or 1 m s⁻¹, with displacements of 1–100 m. XRD measurements revealed that the amorphous content depends on mineralogy and total frictional work, not on the velocity. Therefore, the mechanical amorphization occurs during not only coseismic slip, but also aseismic slip. Only less than 1 % of the frictional work was used for the mechanical amorphization, and thus it plays a minor role in energetics. However, estimated high amorphous content indicates that mechanical amorphization may be important in dynamic fault-weakening mechanisms, such as thermo-chemical pressurization and fault lubrication by amorphous silica, in natural faults.

1. はじめに

摩擦滑りによって断層面およびその周辺では様々な物理化学反応が引き起こされる (Rowe & Griffith, 2015)。このような反応の代表的な例として、鉱物の非晶質化がある。非晶質化を引き起こす機構の中でも、機械的非晶質化は、天然および室内実験の断層岩において広く確認されており、地震時の断層の動的弱化や断層運動に影響を及ぼす可能性が指摘されている (例えば Hirono et al., 2013)。この影響を定量的に評価するためには、摩擦滑りによる鉱物の機械的な非晶質化量と滑り過程の関係を明らかにする必要がある。そこで本研究では、摩擦滑りを再現した回転剪断摩擦実験および実験前後試料中の非晶質量の定量解析を行い、模擬断層ガウジ中の機械的な非晶質量が摩擦滑りによってどのように変化するかを調べた。

2. 手法

回転剪断摩擦実験

実験には山口大学に設置の回転剪断型摩擦試験機を用いた。模擬断層ガウジとして、代表的な非粘土鉱物である石英の粉末試料 (粒径 75 μm 未満) および代表的な粘土鉱物であるカオリナイトの粉末試料 (粒径 75 μm 未満) を用意した。模擬断層ガウジを 2 つの円柱形斑れい岩ブロック (外径 25 mm) の間に挟み込み、垂直応力 1 もしくは 3 MPa、等価滑り速度 0.001 もしくは 1 m s⁻¹、等価

滑り距離 1–100 m、室温・大気乾燥条件下で回転剪断摩擦実験を行った。実験後、半径 6–12.5 mm の領域にある試料を回収し、非晶質定量分析を行った。実験時の力学データおよび回収した試料の質量から、単位重量あたりの摩擦仕事量、単位重量あたりの地震学的破壊エネルギー、単位重量あたりの摩擦仕事率を算出した。

非晶質量の定量評価

各鉱物について、結晶質および非晶質な試料を準備し、異なる割合で混合したいくつかの試料について X 線回折分析を行った。その結果、石英・カオリナイトどちらの鉱物においても、非晶質に由来するブロードなピーク (ハローピーク、 $2\theta = 20\text{--}30^\circ$) の面積が、試料の非晶質割合に対して線形に増加していくことが確認された。試料中の非晶質割合とハローピーク面積との関係を最小二乗法で直線近似することで、各鉱物における非晶質割合の検量線を得た。この検量線を用いて、摩擦実験による非晶質割合の変化を評価した。

3. 結果

石英・カオリナイトのどちらを用いた摩擦実験においても、いくつかの実験後試料では実験前と比較して非晶質量が増加していることが確認された。同じ滑り速度・同じ試料を用いた実験間で比較すると、滑り距離が長いほど非晶質量が多くな

る傾向が確認された。

4. 考察

各鉱物について単位重量あたりの摩擦仕事量と試料中の非晶質の重量割合をプロットした（下図）。どちらの鉱物においても、摩擦仕事量の増加に伴って非晶質割合が増加している。また滑り速度が異なる場合でも、非晶質割合-摩擦仕事量は同じトレンドに乗っていることがわかった。このことから、断層ガウジの機械的非晶質化は、断層ガウジの構成鉱物および断層運動時の摩擦仕事量に強く依存する一方、滑り速度には依存しないことがわかった。他の摩擦パラメータである破壊エネルギーおよび摩擦仕事率についても、非晶質割合との相関が確認された。しかしこれらの相関はみかけのものであり、物理的な意味を持たないと考えられる（詳細な議論はポスターにて）。

機械的非晶質化は滑り速度に依存しない機構であることが明らかとなった。よって本研究で確認された機械的非晶質化は、滑り速度が 10^{-1} – 10^1 m s⁻¹ オーダーの地震イベント時のみならず、スローリップや断層クリープのようなより低い滑り速度のイベント時にも引き起こされると考えられる。よって、断層ガウジ中の鉱物が機械的に非晶質化していることのみでは、その断層で地震イベントが発生しているかを判断することはできない。

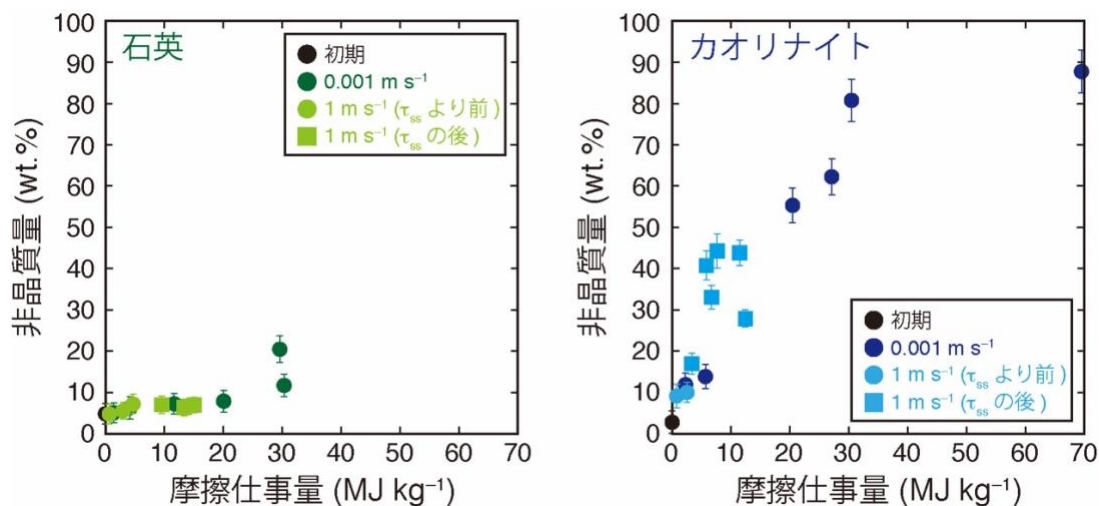
本研究において、石英およびカオリナイトが非晶質化する際に消費した仕事量は、摩擦仕事量の0.06%および1%未満であると計算された。先行研究では、石英およびカオリナイトが粉砕され、表面エネルギーとして蓄えられた仕事量は、摩擦仕事量と比較して無視できるほど小さいと報告さ

れている (Togo & Shimamoto, 2012; Sawai et al., 2012)。よって、摩擦滑りに伴う断層ガウジの内部エネルギーの変化量は、摩擦仕事量と比較して無視できることが示唆される。

本研究での摩擦実験における最大有効応力は3 MPaであり、一般的な地震発生帯（数十から数百 MPa）と比較するとかなり低い。よって鉱物の機械的非晶質化は、天然の断層運動によって幅広い深度で引き起こされると考えられる。摩擦滑りに伴う鉱物の機械的非晶質化は、(1) 鉱物の脱揮発化による流体供給に伴う有効応力の変化、(2) 非晶質シリカの生成に伴う摩擦係数の減少、に寄与していることが報告されている（例えば Goldsby & Tullis, 2002、Hirono et al., 2013）。よってこれらの機構を考える場合、鉱物の機械的非晶質化による影響を考慮することが必要となるかもしれない。

[参考文献]

- Goldsby, D. L., & Tullis, T. E. (2002). *Geophysical Research Letters*, 29, 1844.
- Hirono, T., Tanikawa, W., Honda, G., Kameda, J., Fukuda, J. I., & Ishikawa, T. (2013). *Geophysical Research Letters*, 40, 2988–2992.
- Sawai, M., Shimamoto, T., & Togo, T. (2012). *Journal of Structural Geology*, 38, 117–138.
- Togo, T., & Shimamoto, T. (2012). *Journal of Structural Geology*, 38, 139–155.
- Rowe, C. D., & Griffith, W. A. (2015). *Journal of Structural Geology*, 78, 1–26.



単位重量あたりの摩擦仕事量と非晶質割合との関係。(左) 石英、(右) カオリナイト。