

ピンオンディスク摩擦試験による石英非晶質化 Physical processes of quartz amorphization due to friction

武藤 潤^{1*}, 中村 悠¹, 長濱 裕幸¹, 清水 以知子², 三浦 崇³, 荒川 一郎³

MUTO, Jun^{1*}, NAKAMURA, Yu¹, NAGAHAMA, Hiroyuki¹, SHIMIZU, Ichiko², Takashi Miura³, Ichiro Arakawa³

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻, ³ 学習院大学理学部物理学科
¹Dept. Earth Sci., Tohoku Univ., ²Dept. Earth Planet. Sci., Tokyo Univ., ³Dept. Phys., Gakushuin Univ.

これまでに衝撃実験やインデンテーション・ダイヤモンドアンビルなどを用いた高圧実験から鉱物の非晶質化が生じることが知られている。花崗岩および珪岩を使った摩擦実験からも、摩擦により鉱物の非晶質化が起こることが TEM 分析により確認されており (Yund et al., 1990), 天然では高圧変成岩中の 石英 (Palmeri et al., 2009) やサンアンドレアス断層のコアサンプル (Janssen et al., 2010) 中において非晶質物質の生成が報告されている。石英岩を用いた Rotary shear 摩擦実験から、高速すべり時においてすべり・速度弱化的な挙動 (Di Toro et al., 2004) が明らかになり、生成したガウジは石英とアモルファスシリカから構成されていた。さらに断層表面上に水和したアモルファスシリカの生成が認められ、非晶質化に加え、この水和物のチキソトロピックな挙動が摩擦係数の低下を生じさせたと報告されている (Goldsby and Tullis, 2002; Hayashi and Tsutsumi, 2010)。従って、石英岩のすべり・速度弱化的機構を理解するためには非晶質化の物理過程の把握が重要である。

そこで本研究では石英岩のすべり・速度弱化的を引き起こす非晶質化機構を明らかにするため、ピンオンディスク摩擦実験 (Muto et al., 2007) を行った。石英単結晶を用いた高速摩擦実験から、摩擦係数の弱い速度依存弱化的が認められた。摩擦による非晶質化の物理過程および水和メカニズムの詳細を調べるため、摩擦痕・摩耗物質のラマン分光分析、赤外分光分析および電子顕微鏡観察を行った。

ディスクは人工および天然ブラジル産の単結晶石英を用い、ピンには天然ダイヤモンドおよび水晶 (曲率半径 0.5 mm ~ 1.5 mm) を用いた。荷重は 0.02 N ~ 1 N, すべり速度は 0.001 m/s ~ 2.6 m/s の範囲内で摩擦実験を行った。

ラマン散乱により分子の振動モードが得られるため、ラマン分光法を用いて摩擦による試料の非晶質化の程度を解析した。垂直応力 10 ~ 440 MPa, すべり速度 0.01 ~ 2.6 m/s, すべり距離 > 70 m で、石英ディスク上に生じた摩擦トラックのラマン分光測定 (励起波長 532.1 nm) から、石英の固有振動モード (A₁) である 464 cm⁻¹ の高波数側に新たなピーク 490 cm⁻¹ (非晶質シリカ 4 員環), 500 cm⁻¹ (モガナイト 4 員環), 515 cm⁻¹ (コーサイト 4 員環) および 606 cm⁻¹ (非晶質シリカ平面 3 員環) の存在が認められた。これは、摩擦に伴い SiO₄ 中距離構造が変化し、6 員環の結晶構造を持つ石英中に 3 および 4 員環が生じたことを示唆している。また石英高圧相であるコーサイトの存在は、摩擦痕内のアスペリティでは少なくとも 1.8 GPa 以上の高応力を被っていたことを示す。さらに石英ディスクの赤外分光マッピング分析を行った結果、2900 cm⁻¹ ~ 3600 cm⁻¹ に水分子中の OH 基の対称伸縮を示すブロードなピークが摩擦痕上のみを検出され、水和反応は摩擦痕内でのみ生じていることが明らかになった。また摩擦表面の電子顕微鏡による観察では、直径 200 nm 程度、長さ 5 ~ 16 μm からなるダクタイルな粘着性の針状摩耗物質 (roll) が認められた。ラマンおよび赤外分光分析、電子顕微鏡観察結果から、アスペリティ下での高応力により、6 員環からなる SiO₄ 中距離構造が変化し、平面 3 および 4 員環中の歪んだ Si-O 結合部から選択的に水和反応が進む (Gibbs et al., 2002; 2003) ことで、摩擦表面に非晶質シリカの水和物を生成したと考えられる。本発表では、以上の分析結果の報告に加え、摩擦に伴い生成した非晶質シリカ水和物が摩擦表面上でダクタイル物質として振舞い、速度弱化的を引き起こしたとする弱化的メカニズムを提唱する予定である。

キーワード: 石英非晶質化, 摩擦摩耗試験, 断層弱化的, ラマン分光分析

Keywords: quartz amorphization, friction experiment, fault weakening, raman spectroscopy