

岩石強度の時間依存性に対する水の影響

増田 幸治^{1*}

¹産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1中央第7)
*E-mail: koji.masuda@aist.go.jp

岩石の強度は、歪速度によって変化したり、クリーブ破壊現象にみられるように、時間に依存する。時間依存の性質は、岩盤の長期安定性評価や地震発生メカニズム解明にとって重要である。岩石強度の時間依存性のメカニズムは、「アスペリティ先端部での、ゆっくりしたクラック進展によって引き起こされるミクロな破壊である」というモデルを検証した。水の影響には、物理的効果（有効圧）と化学的効果があるが、このメカニズムが有効に働いているのなら、水の化学的影響が観測されるはずである。ゆっくり進行する現象を観察可能な速度で再現するために、実際の環境より高温状態で摩擦強度に対する水の影響を調べた。温度を上げることで現象を加速できる。その結果モデルを支持するデータを得た。

Key Words : rock strength, effect of water, stress-corrosion cracking, rock friction, creep

1. はじめに

岩石の強度は、歪速度によって変化し、また岩石のクリーブ破壊現象にみられるように、時間に依存する。地震学の分野では、断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られている。これらは岩石の物性、特に破壊強度や摩擦強度が時間に依存することを示している、このような岩石の時間依存の性質を理解することは、岩盤の長期安定性評価や地震発生メカニズム解明にとって重要である。

岩石強度に関する時間依存の性質について、我々が行った既存の実験データを改めて整理した。それらを統一的に説明するモデルを提唱する。このモデルでは、圧縮応力場における岩石の破壊強度は、応力腐食作用が関与するミクロな破壊の結果によるクラック進展によって支配され、岩石の摩擦現象も摩擦面が真に接触しているアスペリティ先端部での、ゆっくりしたクラック進展によって引き起こされるミクロな破壊がその本質であると考える。このモデルは、強度の時間変化は水の存在下で進行する化学反応が関係していることを示唆している。さらに、このモデルを検証する室内岩石実験を高温高压下で実施し、モデルを支持するデータを得た。

岩石破壊に伴う様々な現象（例えば、強度、ダイヤタンスー、地震波速度の減少、AE（アコースティック・エミッション）発生率など）が歪速度を変えると系統的に変化すること、さらにそれら時間依存の性質に対する水の影響を、Masuda et al.^{1,2)}はIntactな岩石試料を使って実験的に示した。ここでは、岩石強度に関する主な結果を図-1と図-2に示す。

室内実験では、均質な構造をもつ花崗岩および安山岩を試料として使用し、それぞれ同じ岩石ブロックの近くの部分から同じ方向にきりだし、十分な洗浄処理をおこなった。花崗岩試料については、封圧、0.1, 50, 100, 200 MPa、歪速度 10^{-4} から $10^{-8} s^{-1}$ 、安山岩試料については封圧、0.1, 50 MPa、歪速度 10^{-4} から $10^{-7} s^{-1}$ の範囲でそれぞれDryな試料と水を含ませたWetな試料で三軸圧縮破壊実験（封圧下の圧縮破壊実験）を行った。Dryな試料でも完全に無水状態ではなく破壊過程に影響を与える程度に蒸気圧成分は存在した。また、封圧50MPa下でDryな花崗岩試料のクリーブ破壊実験も行った。

すべての試料は歪速度が遅くなるのに従ってその対数に比例して強度が低下した（図-1, 図-2）。破壊強度を σ_F 、歪速度を $\dot{\epsilon}$ 、Cと σ_0 を定数とすると、破壊強度と歪速度の関係は、式(1)のように表すことができる。

$$\sigma_F = C \log \dot{\epsilon} + \sigma_0 \quad (1)$$

2. 岩石強度の時間依存性

図-1, 図-2には、測定データと式(1)から最小自乗法で計算した係数を示した。破壊強度の歪速度依存性は高い封

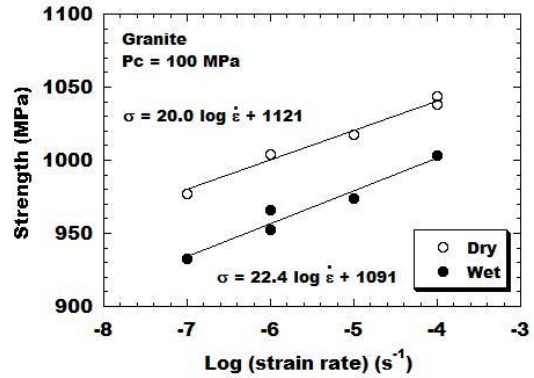
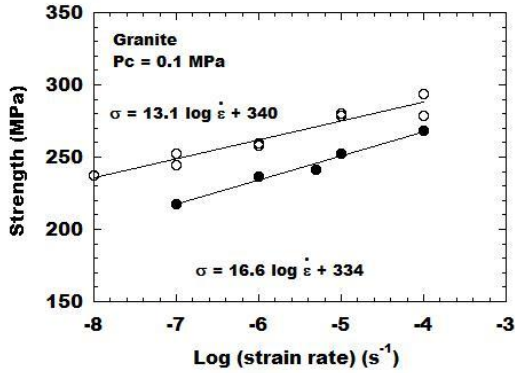


図-1 花崗岩試料の歪速度と破壊強度の関係

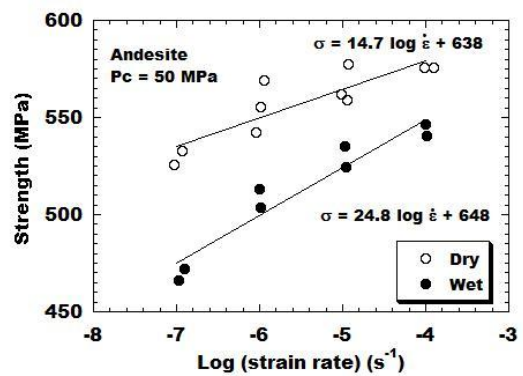
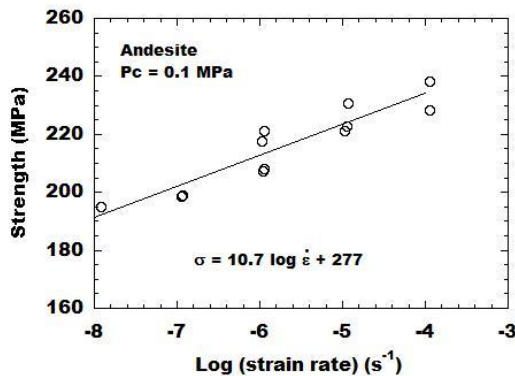


図-2 安山岩試料の歪速度と破壊強度の関係

圧下でより顕著であった。また強度の歪速度依存性は、Dryな試料でよりもWetな試料の方がより顕著であることがわかった。

クリープ破壊強度 (σ_c) は、破壊までの時間 (t_f) の対数が長いほど小さく、破壊までの時間の対数に比例する (図-3) ので、

$$\sigma_c = -D \log t_f + E \quad (2)$$

という関係がある。ここで、DとEは定数である。図3には測定データと式(2)から最小自乗法で係数DEを計算した係数を示した。

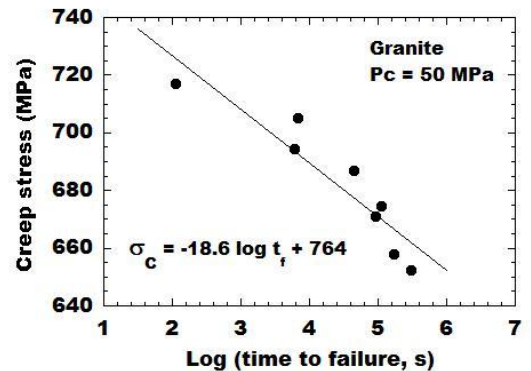


図-3 花崗岩試料のクリープ破壊までの時間とクリープ破壊強度の関係

3. 応力腐食作用によるクラック進展モデル

圧縮応力場における岩石の破壊強度は、応力腐食作用が関与するミクロな破壊の結果によるクラック進展によって支配されるというモデルを検証する。

このモデルは最初Mizutani et al.によって提唱された³⁴⁾。

Intactな岩石は圧縮応力を受けると圧縮軸方向に面をもつクラックが発達成長する。クラックは最初は独立にゆっ

くり成長するが、ある長さまで成長し相互の距離が近くなるとクラック間の相互作用によって、クラックが連結することで破壊面を形成し、ひいてはマクロな破壊に至る。

このモデルでは、破壊強度は、個々のクラックが連動・連結しはじめ不安定成長が始まる長さ到達した時の応力と考える。応力腐食作用で進展するクラックの成長速度 w は式 (3) であらわすことができる

$$v = AP^n_{H_2O} \exp\left(-\frac{U - fV^*\sigma}{RT}\right) \quad (3)$$

ここで、 A と n は定数、 P_{H_2O} は H_2O の分圧、 R はガス定数、 T は絶対温度、 U は応力腐食過程の活性化エネルギー、 V^* は活性化体積、 σ は応力を表す。

このモデルでは、クラックの長さがある値になると連動してマクロな破壊に至ると考える。その時の平均臨界クラック長を $\langle a_c \rangle$ とする。 $\langle a_c \rangle$ は一定の応力加圧率($\dot{\sigma}$)を仮定すると、式(3)を時間で積分したものとなるので、

$$\begin{aligned} \langle a_c \rangle &= \langle a_0 \rangle + \int v dt \\ &= \langle a_0 \rangle + \frac{1}{\dot{\sigma}} \int v(\sigma) d\sigma \end{aligned} \quad (4)$$

と表すことができる。ここで $\langle a_0 \rangle$ は、クラックの最初の平均長さとする。巨視的な弾性変形が保たれているとすると、 $\dot{\sigma}$ と $\dot{\varepsilon}$ は比例すると考えられる。したがって、歪速度一定で加圧した場合の破壊強度は、クラック長が $\langle a_c \rangle$ に達した時の応力 σ_F と解釈でき、式(5)の形で表すことができる。

$$\sigma_F = \frac{2.30RT}{fV^*} \left(\log \dot{\varepsilon} - n \log P_{H_2O} + B \right) \quad (5)$$

ここで B は歪速度や水には関係しない定数。この式(5)で表される歪速度と破壊強度の関係は、破壊強度の歪速度依存性を示すデータ(図-1, 図-2)と一致する。

一方、圧縮応力一定のクリープ試験の場合、式(3)はクラックの成長速度を表しているので、クリープ破壊が起こる時の平均臨界クラック長を $\langle a_c \rangle$ とすると

$$\begin{aligned} \langle a_c \rangle &= \langle a_0 \rangle + v t_f \\ &= \langle a_0 \rangle + AP^n_{H_2O} \exp\left(-\frac{U - fV^*\sigma_c}{RT}\right) t_f \end{aligned} \quad (6)$$

となるのがわかる。 $\langle a_0 \rangle$ はクラックの最初の平均長さ、 t_f はクリープ破壊までの時間を表す。クリープ試験を行う際の応力を σ_c とすると、破壊までの時間 t_f と σ_c の関係は

$$\sigma_c = \frac{2.30RT}{fV^*} \left(-\log t_f - n \log P_{H_2O} + B_1 \right) \quad (7)$$

と表される。ここで B_1 は水に関係しない定数。このモデルではクリープ破壊強度とクリープ破壊までの時間の対数が比例関係になることを示していて、室内実験による測定データ(図-3)で得られた関係と一致している。

4. モデルの検証実験

断層の摩擦強度は、実験室内で測定されている岩石の摩擦強度に比べて弱いことが地質学的・地球物理学的観測より知られている。地震発生サイクルは数百年から千年という長期間であるので、断層強度の長期的変化の全容は地球物理学的手法によるモニタリングでは直接観測することができないが、岩石の摩擦強度も時間に依存して変化していると考えられる。そこで、断層摩擦強度の長期的弱化メカニズムの本質は、断層面が真に接触しているアスペリティ先端部での、ゆっくりしたクラック進展によって引き起こされるマイクロな破壊であるというモデルで、摩擦強度の時間依存性も説明できると考え、それを検証する実験を行った。このモデルは、断層強度の長期的弱化は水の存在下で進行する化学反応が関係していることを示唆している。したがって、このメカニズムが有効に働いているのなら、断層強度の長期的弱化に対する水の影響が実験室で観測されるはずである。

自然界でゆっくり進行する現象を観察可能な速度で再現するために、実際の環境より高温状態で断層の摩擦強度に対する水の影響を調べた。化学反応の速度は式(8)のように温度の関数なので、温度を上げることによって現象を加速できる^{5,6)}。

$$Rate = A \exp\left(-\frac{H}{RT}\right) \quad (8)$$

ここで、 A は定数、 H は活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度を表す。円柱形に整形した岩石試料の圧縮破壊実験を行った。試料には福島県畑川破碎帯より採取したマイロナイトを用い、その際、円柱試料の軸方向が元のマイロナイトブロックの面構造と30度になるように切り出た。試料に圧縮応力を加えると面構造に沿った方向に破断面ができる。そのまま試料に圧縮応力を加え続けることによって、形成された破断面を滑らせ、摩擦強度を測定した(図-4)。実験では水のない場合(Dry)と水のある場合(Wet)それぞれについて、有効封圧を同じ(130MPa)にした状態で、温度を室温、200°C、400°C、600°Cとした⁵⁾。

その結果、水のない環境では摩擦強度は温度が上昇してもほとんど変わらないのに対して、水の存在下では摩擦強度は温度の上昇に伴って低下することがわかった。すなわち間隙水圧の上昇で強度低下を説明する有効封圧の法則で知られているような、物理メカニズムとは別のメカニズム(化学的効果)によると考えられる強度低下を示すデータを得た。

図-5に岩石の破壊面の摩擦が温度によってどうかわるかを示す。水が存在する環境では、断層の摩擦強度が温

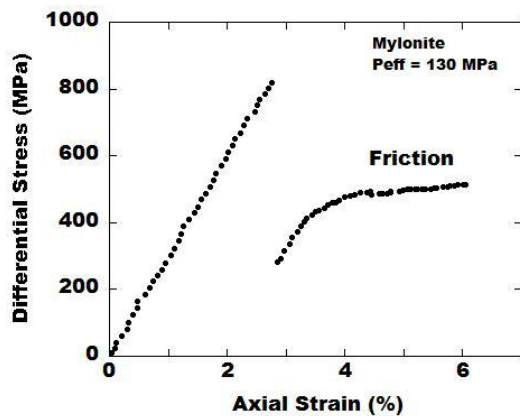


図4 高温高压下での三軸圧縮実験で得られた応力-歪曲線

度上昇に伴って低下することがわかった。自然界でゆっくり進行する現象のプロセスが化学反応に依存していると仮定できる場合、温度を上げて化学反応を促進させることで、現象が進行するスピードを速めるという効果に相当する⁹⁾。すなわち、温度を上昇させるというのは化学反応の速度を加速することに対応しているので、温度が高いほど長期的な現象を観察するという事に相当する。

断層の摩擦強度が長期的に低下していくメカニズムは、水が関与する化学反応に関係していることがわかった。これまで、水が断層強度を低下させるメカニズムは高い間隙水圧に関係するとして多くのモデルが作られてきたが、水は圧力が高くなくてもその存在によって化学反応プロセスを通して断層の強度変化に関与していることが示唆された。

5. 結論

時間依存性を説明するモデルを提唱した。岩石の破壊強度や摩擦強度の時間依存性は、真の接触部であるアスペリティ先端での化学反応によるミクロな破壊が本質的プロセスであるというモデルを支持する実験データをた。このプロセスは水の存在下でゆっくり進行する化学反応である。実験室の岩石破壊実験や摩擦すべり実験を通して、岩盤の長期安定性評価や自然地震の発生を理解しようとするれば、岩石破壊やすべり過程の時間・空間に

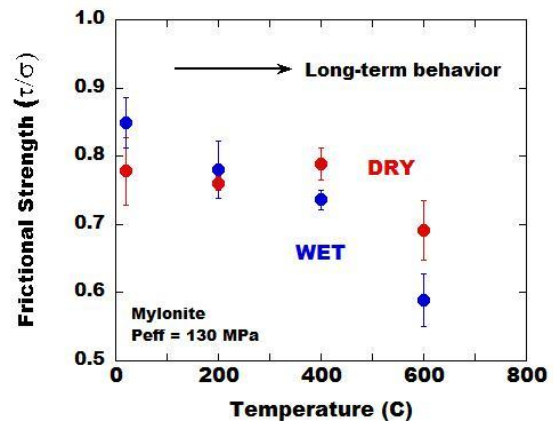


図5 岩石の摩擦強度と温度の関係に対する水の影響

関するスケーリング則を必要とする。時間に関するスケーリング則はこのようにミクロなプロセスを考えることで統一的に解釈できる可能性がある。

参考文献

- 1) Masuda, K., Mizutani, H., Yamada, I., and Imanishi, Y.: Effects of water on time-dependent behavior of granite, *J. Phys. Earth*, 36, 291-313, 1988.
- 2) Masuda, K.: Effects of water on rock strength in a brittle regime, *J. Struct. Geol.*, 23, 1653-1657, 2001.
- 3) Mizutani, H., Spetzler, H., Getting, I., Martin, R. J. III, Soga, N., : The effect of outgassing upon the closure of cracks and the strength of lunar analogues. *Proceedings of the 8th Lunar Science Conference* 1235-1248, 1977.
- 4) Mizutani, H., Spetzler, H., Murakami, H., : Brittle behavior of rocks at high pressure. In: Akimoto, S., Manghani, M. H. (Eds.), *High-Pressure Research in Geophysics, Advances in Earth and Planetary Sciences.*, Vol.12, Center for Academic publications Japan, Tokyo, 207-215, 1982.
- 5) Masuda, K., Arai, T., Fujimoto, K., Takahashi, M., and Shigematsu, N.: Effect of water on weakening preceding rupture of laboratory-scale faults: Implications for long-term weakening of crustal faults, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L01307, doi:10.1029/2011 GL050493, 2012.
- 6) Paterson, M.: Rock deformation experimentation. In: *Geophysical Monograph*, 56, American Geophysical Union, 187-194, 1990.

EFFECT OF WATER ON TIME-DEPENDENT ROCK STRENGTH

Koji MASUDA

We provide a conceptual model and laboratory evidence that support the view that time-dependence of fracture and frictional strength of rocks is caused by microfracturing at asperity contacts, which is a result of crack growth assisted by the stress corrosion mechanism at subcritical stress levels.

We conducted triaxial compression tests on rock samples at successively higher temperatures from room temperature to 600C to accelerate reaction processes so that they were observable at laboratory time-scales. Our results suggest that time-dependent rock strength are related to chemical reactions that take place in the presence of water.