

報 告

ガス圧式高温高圧変形実験装置を用いた破壊一摩擦実験

Experimental studies of fracture and friction with gas-medium high-pressure and high-temperature apparatus

増田幸治*・新井崇史**

Koji Masuda* and Takashi Arai**, **

Key Words : *gas-medium apparatus, fracture, friction, high-pressure, high-temperature*

はじめに

構造地質学分野では、室内実験にもとづいたアプローチにより、現象の理解を、より物理的基礎のしっかりした定量的なものとしていくことができる（唐戸, 2001）。また、地震発生域における、断層運動の解明のためには、実際に推定される地下深部の環境下で岩石を変形させたり、摩擦すべりをおこさせたりして力学特性を測定することで、より信頼性のあるモデルを構築することができる。現在観察できる断層帯の構造がどのような環境下でどのようなメカニズムで形成されたかを明らかにするためにも、制御された条件で現象を再現できる実験研究が必要である。さらに、地殻深部に相当する高温高圧環境で、水のある状態においては、まわりの岩石と流体との化学反応が、岩石の変形や摩擦といった力学特性に影響を与えていると考えられ、室内実験によってその素過程を明らかにできる可能性がある。

高温高圧環境を実験室内に実現するために、気体（不活性ガス）を圧媒体に使った高温高圧試験機が開発されている。圧力容器（密封容器）の中に高圧状態を実現するためには、固体もしくは流体を圧媒体として封入して使用するが、圧力を加えた状態で試料の変形を精度よく測定するためには、圧媒体に流体（液体、気体）を使用する必要がある。また、流体圧媒体を使って高圧かつ高温状態を再現する際、圧媒体に使っている流体のうち液体については、特殊なシリコンオイルを使っても到達可能な最高温度は500°Cくら

いである。従って、高圧下でそれよりさらに高温を実現するためには、アルゴンガスなどの不活性気体を圧媒体として使用する。また、圧力容器内部で試料に加えられている荷重を精確に計測するために、内部荷重計を備えたガス圧式試験機が開発されている（Paternoster, 1970, 1990など、変形実験方法については Tullis and Tullis, 1986など）。

日本では高压ガスを使った実験装置の開発が外国に比べて遅れていたが、最近京都大学嶋本研究室でガス圧式試験機が開発され、国内でガス圧式試験機が製作できる体制が整いつつある。産業技術総合研究所地質調査総合センター（Masuda et al., 2002）や東北大学でも、京都大学につづく2号機、3号機が製作され、現在、国内で3機のガス圧式試験機が稼動している。これらは、外国のガス圧式試験機に比べ、軸荷重・封圧・間隙圧などの制御性能においてすぐれている。

本報告では、最近の実験構造地質学における成果のうち、特にガス圧式試験機でしかできないような環境（高圧下でかつ500°C以上の温度条件）でのデータを含む、破壊一摩擦実験の成果に関するいくつかの論文と産業技術総合研究所における最近の成果を中心に紹介・解説する。

高温高圧下での破壊実験

断層帯の物質はその周囲に分布する岩石とは異なる物性を示す。断層帯や震源域における変形過程を評価するためには、まず、高温高圧下における断層構成物質の物理的・レオロジー的性質を知らなければならぬが、それらの実験データはあまり得られていない。強度、透水性、弾性波速度、電気伝導度、すべり過程などの物理的・レオロジー的性質のなかで、ここではガス圧式試験機で行った、高温高圧環境下の破壊実験から得られた断層岩の強度に関するデータを示す。

Masuda et al. (2003) は、高温高圧下でマイロナイトの圧縮変形破壊実験を行った。地表に露出している過去の震源域（福島県畠川破碎帶）より採取したマイロナイト試料を、直径16 mm 長さ40 mm の円柱形に整形して破壊実験に使用した。変形の歪速度は $10^{-5.5}/\text{s}$ 、温度範囲は室温から600°Cまで、水のある状態（Wet）と水のない状態（Dry）で圧縮変形破壊実験を行った。Dryな状態は封圧130 MPa、Wetな状態は封圧200 MPaでかつ間隙水圧70 MPaとし、両方の状態で有効封圧が同じになるようにした。断層面が形成される時の応力値に相当する、応力-ひずみ曲線におけるピーク応力をここでは強度とした。

第1図は温度に対するDry、Wetそれぞれの場合の強度データである。室温の時の強度データをみると、Dryな場合でもWetの場合でも、有効封圧は同じなので試料に加えられる圧力（封圧）の効果は同じとな

2004年5月31日受付。

* 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門

Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

** 現在：製品評価技術基盤機構 National Institute of Technology and Evaluation

り、両方の条件でほぼ同じ強度を示す。脆性強度は圧力が同じなら温度の影響は小さいことが知られており(例えば、唐戸, 1997), 第1図をみると、室温, 200°C, 400°Cの場合について、それぞれの強度は温度によってほとんど変わらない。また、Dryな場合とWetな場合では強度に差がない。しかし、温度が600°Cの場合には、Dryな状態の時の強度はそれ以下の温度の時とほぼ同じだが、Wetな状態で測定した強度はDryな状態の時に比べて30%近くも小さくなっている。

同じ有効圧下で測定したにもかかわらず、強度の結果には、高温下(600°C)で水がある場合(Wet)は、同じ温度で水がない場合(Dry)に比べて、著しい強度の低下がみられた。岩石の変形・破壊強度・摩擦に対する水の影響には、物理的な効果と化学的な効果の2つがある。物理的な効果はクラック内や空隙に存在する水により間隙水圧が上昇し、結果として岩石に加わっている封圧や応力を減少させるのと同じ効果をもたらすというものである。これは400°C以下の温度で有効圧の法則より予測される実験結果からえられたことからも認められる。化学的な効果は、水が存在することによって応力腐食作用に代表される化学反応がおこり、結果として岩石の強度が時間に依存するというものである。今回は、実験後の試料の薄片観察からも岩石の塑性変形がおこったとは考えにくいので、応力腐食作用に代表されるメカニズムが働き、岩石内の、特にクラック先端部の強度低下が岩石全体の強度低下をもたらしたと推定される(例えば、Anderson and Grew, 1977, Freiman, 1984)。これは化学反応過程なので、温度が高くなると促進され、また反応時間が十分長くなるとその結果がよく見える形で現れてくる(Masuda, 2001)。したがって、自然界のように、今回の実験の変形速度よりずっと変形速度が遅い場合、今回の実験で強度低下が観測された600°Cよりもっと低温下でも、このような化学反応の効果が観測される可

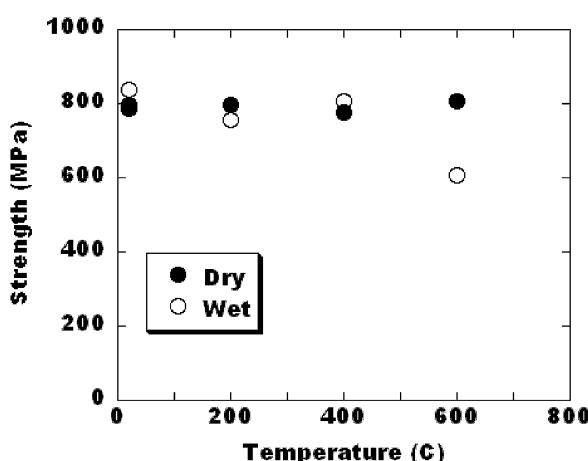


Fig. 1 Strength of mylonite samples as a function of temperature.

能性が高い。自然界の変形速度と同じ変形速度を実験室では再現できないので、実験室で実用上実験が可能なひずみ速度において、実際の場より高温とすることによって、力学特性に対する化学反応の効果を目に見える形にすることことができた例と解釈できる。実験結果を地球に外挿するためのスケーリング則(異なった時間スケールの現象を結び付ける法則)を確立することが実験構造地質学の重要な課題であり(唐戸, 2001), そのためにも、ガス圧式試験機による高圧下でかつ高温環境でのデータ蓄積が必要である。

高温高圧下での摩擦実験

内陸部で発生する大地震の震源は深さ約10–15 km付近にある。沈み込み帯で発生する地震の震源も地下深部にある。したがってこのような地下深部での断層帶の運動について詳しく理解するためには、地下深部の震源域の環境条件に相当する場における、断層帶構成物質の摩擦・すべり挙動を解明する必要がある。

ガス圧式試験機を用いた高温高圧下での摩擦実験として、よく引用されているのがBlanpied et al.(1995), Lockner et al. (1986) や Chester (1994) らの、花崗岩ガウジや石英ガウジを使用した実験である。これらはすべて、三軸圧縮試験機で行った摩擦実験である。摩擦には変位速度依存性があり(Dieterich, 1979, Ruina, 1983), 変位速度一定の摩擦実験では、摩擦係数がある定常な値に達した後変位速度をステップ状に変化させると、急激な変化に伴って摩擦係数が変化し(第2図でaと示されている部分), 一定時間の経過後にその変位速度での摩擦係数の値になる。その際、時間経過に伴って変化する量がbである。変位速度のステップ状の変化に伴う摩擦係数の変化から、その温度圧力条件下ですべりが安定か不安定かを示すパラメータa–b値を得る(Scholz, 1998, 2002など)。a–b値は、

$$a-b = \partial \mu_{ss} / \partial (\ln V)$$

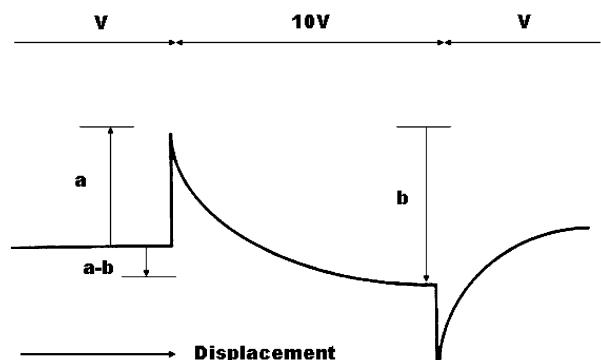


Fig. 2 The experimentally observed frictional response to a suddenly imposed increase and then decrease in sliding velocity (V). In this case, $a-b < 0$.

(μ_{ss} : 定常状態の摩擦係数, V : 変位速度)で定義され, この値が正の値の時は, 速度強化(velocity-strengthening)といい, 安定すべり挙動に対応する. この値が負の時は, 速度弱化(velocity-weakening)と呼ばれ, 不安定すべり挙動に対応する(第2図). a 値は変位速度の急激変化に対する瞬間的効果, b 値は定常状態へ移るための時間効果を表している.

Blanpied et al. (1995)によれば, 花崗岩ガウジを使った場合, Dryな条件では $a-b$ 値が常に正で安定領域, Wetな条件では, $a-b$ 値が負になる不安定領域が, 温度範囲約100°Cから300°Cのところで認められる. これは摩擦挙動が不安定(地震性)から安定(非地震性)へと変化することに対応していると考えられている(Scholz, 1998). このような変化がどういうメカニズムに対応するかについては, まだ完全に解明されていない(金川, 1998).

Chester (1994)は, 石英ガウジを使った摩擦すべり実験で, 摩擦強度の温度依存性が, 摩擦強度の変位速度依存性と, 同じようなただし逆センスの, 瞬間的および時間依存性の変化を示すことを実験的に観測し, 摩擦構成則に温度の効果を入れた式を提案している.

最近, Arai et al. (2003)は, 石英ガウジに加えて, 細粒の長石ガウジを使った摩擦実験を行い, 高温高圧下でしかも水のある状態での, 長石ガウジの摩擦特性を詳しく調べた. 第3図に, 摩擦実験を行う際の試料部分を示す. ここでは, セラミックス製の円柱部品を斜めにカットしたブロックを使った. 必要に応じて2つのブロック間に挟んだガウジに水を供給するために, セラミックスブロックに水をとおす孔を開ける. 切断面の間にガウジをはさんで全体を銅ジャケットの中に入れる. その後, 試料部を高温高圧にし, 必要な場合はピストンとスペーサーを通して水を供給して間隙圧を制御した状態で摩擦挙動を測定する. Araiらは実験データの詳しい解析途中ではあるが, 彼らの結果をいくつか紹介する. 第4図は, 長石ガウジ(Ab)の, b 値を温度に対してプロットしたものである. b 値は200°C以上の温度範囲で, 常に Wetな場合の方が Dryの時より大きな値になっている. Dieterich and Conrad (1984)によると, b 値がかかる摩擦強度の時間依存性は, わずかな水の存在で明瞭になるとされていて, この長石の摩擦強度のデータもその作用を明瞭にしめしている. 滑り面間あるいはガウジ粒子間の接触域が, 水の存在によって促進されるクリープによって増大すると解釈されている. 第5図は, Wetな環境における石英ガウジの $a-b$ 値を温度に対してプロットした図である. 石英ガウジについては, 300°C付近で値が最も小さく負の値を示し, 低温側と高温側へ行くに従って値が大きくなり, 花崗岩ガウジ試料で得られている結果(Blanpied et al., 1995)と同じ傾向を示している.

マクロな力学挙動として観測されている摩擦挙動の

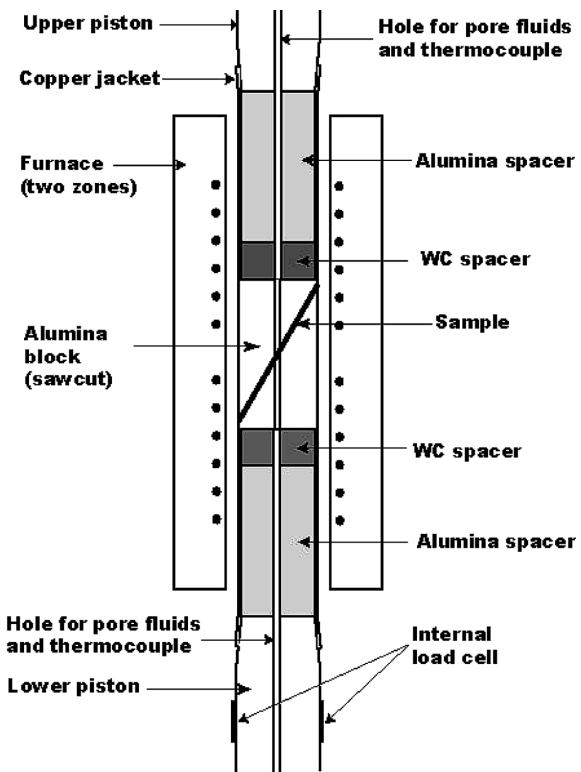


Fig. 3 Sample and furnace configuration for frictional experiments.

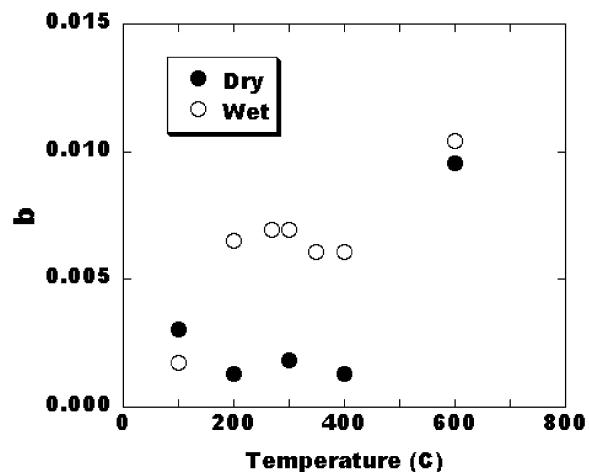


Fig. 4 The friction parameter b for dry and wet feldspar gouge. Sliding velocity was changed from 0.5 μm/s to 5.0 μm/s. Evolution effect b is sensitive to presence of water.

メカニズムを考察するために, 実験後の試料の微細構造観察を実施中である. 第6図に示すのは, Arai et al. (2003)による摩擦実験後に回収した細粒長石のガウジ層のSEM画像である. 第6図左は熱水条件(Wet)でおこなった長石ガウジの摩擦すべり実験後のSEM画像である. 実験条件は, 封圧200 MPa, 間隙水圧50 MPa, 温度600°Cで, 実験前の長石ガウジの粒子は角

張った形をしていたが、実験後の粒子の角は丸くなっていることがわかる。これは高温高圧下で水が長石粒子と化学反応して長石粒子の角が溶けはじめているためである。第6図右は封圧150 MPa、温度600°CのDryな場合の摩擦すべり実験の結果である。Dryな場合はWetの場合と比べて実験後の粒子が角ばっていること、粒子そのものが割れること、さらに細粒化された粒子が大きな粒子のまわりに集まっているということが観察できる。

今までに行われているガウジの高温高圧下での摩擦実験は、今回紹介したように三軸試験機でおこなわれており、その試料部の構成から(第3図)、断層面に沿ったすべり距離が短い(数mm)という制約がある。これには、変位量が小さいので変形の局所化が進んだ状態を調べられないという批判もある(嶋本ほか, 1996)。この問題は、熱水環境下での回転式せん断試験機による実験によって、今後解決されるべき課題である。

岩石の破壊と摩擦に対する熱水および化学反応の影響

今まで見てきたように、熱水条件(高温高圧でしか

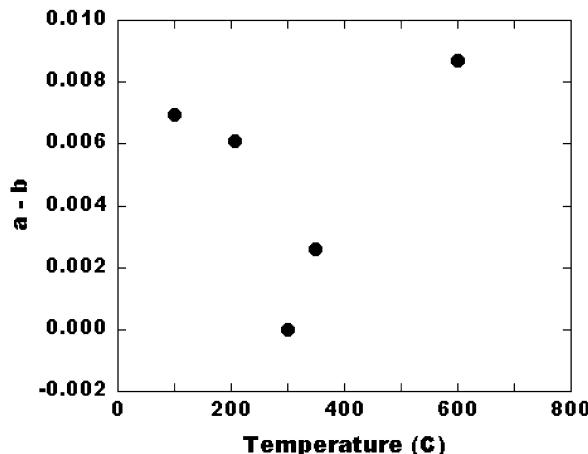


Fig. 5 The friction parameter (a-b) for wet quartz gouge plotted against temperature.

も水のある状態)では、岩石の強度や摩擦強度が低下するのが観察された。水のないDryな状態に比べて、水のあるWetな場合の摩擦挙動は複雑で解明されていない点も多い。さらに、熱水条件では圧力溶解のメカニズムが有効になり、この場合は、すべり面の癒着やガウジの固化により摩擦強度が増加する(Kanagawa et al., 2000, Karner et al., 1997など)。熱水条件での摩擦挙動に関しては、圧力溶解や摩擦強度の速度依存性のメカニズムについて、さらに実験事実を基に解明していく必要がある。また、石英や長石以外の構成鉱物や粘土鉱物などの摩擦特性を調べる必要がある。

ガス圧式試験機による流体移動の測定

最後に、ガス圧式試験機による流体移動特性の測定についてふれる。現在国内で稼動しているガス圧式試験機の1号機のある京都大学では、精力的に断層帶の透水性構造が測定されている(例えば、中央構造線の透水構造を示したWibberley and Shimamoto, 2003)。世界中を探してもこのようなデータは他にほとんどなく、野島断層のデータ(Lockner et al., 2000)とともに、その結果は、断層運動における摩擦発熱機構の計算に重要な役割を担っていて、世界の研究者より注目されている。例えば、Segall and Rice(2004)は、野島断層とMTLの透水構造データを使い、これらの断層が地震発生深度の断層を代表していると仮定すると、摩擦発熱は地震発生にとって重要な役割をはたしていない、と計算している。断層運動に対する、摩擦発熱の問題に関するモデル計算は、今後さらに実測データが増えていくにつれて、より現実的で、より信頼性のあるものになっていくはずである。

おわりに

摩擦の構成則や流动則などの、岩石の変形特性・レオロジーを研究するためには実験的研究を進めていく

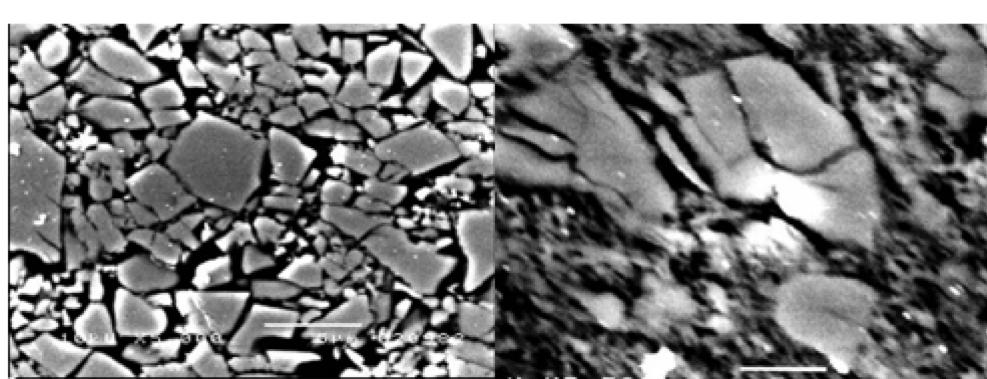


Fig. 6 SEM images for the feldspar gouge after the friction experiments at 600°C under the dry (right) and wet (left) conditions. Bar scales are 5μm.

必要があるが、日本では現在、構造地質学分野での変形実験研究が盛んであるとはいえない。また、地震発生過程を実験的に研究する分野においては、実際の断層帯や震源域の断層物質を扱っている構造地質学研究者の寄与が期待されている。国内の地質関連研究機関において、ガス圧式試験機が3機も稼動を始めた今、構造地質学分野の特に若手の世代の人たちによる、実験構造地質学分野への貢献を期待したい。

謝 辞

産業技術総合研究所地質調査総合センターのガス圧式高温高圧変形実験装置は、京都大学嶋本利彦教授の技術支援を受け、(株)エス・イー、(株)鷺宮製作所と産業技術総合研究所が共同開発したものである。

文 献

- Anderson, O. L. and Grew, P. C., 1977, Stress corrosion theory of crack propagation with applications to geophysics. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **15**, 77–104.
- Arai, T., Masuda, K., Takahashi, M., Fujimoto, K., Shigematsu, N., Sumii, T. and Okuyama, Y., 2003, Frictional properties of feldspar and quartz at the temperatures of seismogenic zone. *Eos. Trans. AGU*, 84 (46), Fall Meet. Suppl., Abstract S22A-0429.
- Blanpied, M., Byerlee, J. D. and Lockner, D. A., 1995, Frictional slip of granite at hydrothermal conditions. *J. Geophys. Res.*, **100**, 13045–13064.
- Chester, F. M., 1994, Effect of temperature on friction : Constitutive equations and experiments with quartz gouge. *J. Geophys. Res.*, **99**, 7247–7262.
- Dieterich, J. H., 1979, Modeling of rock friction. 1. Experimental results and constitutive equations. *J. Geophys. Res.*, **84**, 2161–2168.
- Dieterich, J. H. and Conrad, G., 1984, Effect of humidity on time- and velocity-dependent friction in rock. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4196–4202.
- Freiman, S. W., 1984, Effects of chemical environments on slow crack growth in glasses and ceramics. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4072–4076.
- 金川久一, 1998, 岩石の摩擦と流動に対する熱水および化学反応の影響 : 主要未解決問題, 地質学論集, **50**, 47–57.
- Kanagawa, K., Cox, S. F. and Zhang, S., 2000, Effects of dissolution-precipitation processes on the strength and mechanical behavior of quartz gouge at high-temperature hydrothermal conditions. *J. Geophys. Res.*, **105**, 11115–11126.
- Karner, S. L., Marone, C. and Evans, B., 1997, Laboratory study of fault healing and lithification in simulated fault gouge under hydrothermal conditions. *Tectonophysics*, **277**, 41–55.
- 唐戸俊一郎, 1997, 岩石の粘性流動. 岩波講座地球惑星科学, **8**, 239–291.
- 唐戸俊一郎, 2001, 実験構造地質学の最近の進歩. 構造地質, **45**, 1–7.
- Lockner, D. A., Summers, R. and Byerlee, J. D., 1986, Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite. *Pure Appl. Geophys.*, **24**, 445–469.
- Lockner, D., Naka, H., Tanaka, H., Ito, H. and Ikeda, R., 2000, Permeability and strength of core samples from the Nojima fault of the 1995 Kobe earthquake. 地質調査所速報, No. EQ/00/1, USGS Open-file Report 00-129, 147–152.
- Masuda, K., 2001, Effects of water on rock strength in a brittle regime. *J. Struct. Geol.*, **23**, 1653–1657.
- Masuda, K., Fujimoto, K. and Arai, T., 2002, A new gas-medium, high-pressure and high-temperature deformation apparatus at AIST, Japan. *Earth Planets Space*, **54**, 1091–1094.
- Masuda, K., Arai, T., Fujimoto, K. and Shigematsu, N., 2003, Frictional properties of mylonite under high pressure and high temperature. *Eos. Trans. AGU*, 84 (46), Fall Meet. Suppl., Abstract T41D-0255.
- 増田幸治, 新井崇史, 2003, 断層深部の環境下での破壊一摩擦実験, 地学雑誌, **112**, 953–960.
- Paterson, M. S., 1970, A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **7**, 517–526.
- Paterson, M. S., 1990, Rock deformation experimentation. In : The Brittle-Ductile Transition in Rocks, The Heard Volume, Geophysical Monograph 56, AGU, 187–194.
- Ruina, A., 1983, Slip instability and state variable friction laws. *J. Geophys. Res.*, **88**, 10359–10370.
- Scholz, C. H., 1998, Earthquakes and friction laws. *Nature*, **391**, 37–42.
- Scholz, C. H., 2002, The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge University Press, 2nd ed.
- Segall, P. and Rice, J., 2004, Earthquake nucleation : rate and state friction or shear heating ? *Eos. Trans. AGU*, 85 (17), Joint Assembly Suppl.,

Abstract S22A-04.

嶋本利彦, 堤 昭人, 川本英子, 高橋美紀, 青柳良輔,
大友幸子, 1996, 断層岩と断層のレオロジー : 研
究の歩みと展望. テクトニクスと変成作用 (原郁
夫先生退官記念論文集), 創文, 314-332.

Tullis, T. and Tulis, J., 1986, Experimental rock
deformation techniques. In : *Mineral and Rock*

Deformation : Laboratory Studies, Geophysical
Monograph **36**, AGU, 297-324.

Wibberley, C. A. J. and Shimamoto, T., 2003, Inter-
nal structure and permeability of major strike-
slip fault zones : the Median Tectonic Line in
Mie Prefecture, Southwest Japan. *J. Struct.
Geol.*, **25**, 59-78.