

報 告

## 京都大学の摩擦・変形・透水試験機

### Friction, deformation and fluid-flow apparatuses at Kyoto University

嶋本利彦\*・堤 昭人\*・廣瀬丈洋\*・相澤泰隆\*・曾根大貴\*・

上原真一\*\*・谷川 亘\*\*\*・野田博之\*・溝口一生\*\*\*\*

Toshihiko Shimamoto\*, Akito Tsutsumi\*, Takehiro Hirose\*,

Yasutaka Aizawa\*, Hiroki Sone\*, Shin-ichi Uehara\*\*, Wataru Tanikawa\*\*\*,

Hiroyuki Noda\* and Kazuo Mizoguchi\*\*\*\*

**Abstract :** This paper introduces and describes four deformation and fluid-flow apparatuses used at Kyoto University (see gravure of this issue for their photographs). (1) A high-temperature biaxial frictional testing machine was designed to get very sensitive friction data, free from O-ring friction, jacket strength and changing normal stress that cause error in triaxial machines. It is equipped with a furnace (up to about 1,000 degrees Celsius) and a gear-train loading system (0.03 mm/yr to 1.5 mm/s in slip rate). Total displacement is limited to 20 mm and we are developing a torsion apparatus to complement this machine. (2) A rotary-shear high-velocity friction apparatus is the only apparatus even at present that allows reproducing seismic slip rates of up to a few m/s and simultaneously measuring mechanical properties of simulated faults. This machine is not equipped with a controlling device for pore-water pressure, and there is a gap in slip rate between this and conventional testing machines. Thus we are now at a final stage of modifying and adjusting a second machine, a wide slip-rate (3 mm/yr to 10 m/s) hydrothermal friction apparatus that enables one to perform high-velocity friction experiments on faults with supercritical pore-water pressure. (3) A high-temperature high-pressure deformation and fluid-flow gas apparatus is the first gas-medium triaxial testing machine developed in Japan that goes to pressure to 220 MPa (limited to this pressure by government regulations). It is a standard gas apparatus, but equipped with a good servo-controlling system for pore pressure (either gas or liquid), which has been used for permeability measurements with oscillation method (0.001 to 10 Hz in oscillation period). We plan to develop a molybdenum furnace for this in the near future to attain temperature well above 1,000 degree Celcius. (4) An intra-vessel deformation and fluid-flow apparatus was developed to make a simple, economical, easy-to use and high-quality triaxial apparatus for deformation and fluid-flow studies (confining medium : oil, maximum confining pressure : 500 MPa, routine confining pressure : below 200 MPa). It is installed in a temperature-controlled chamber for safety and for achieving high accuracy with controlled temperature. Porosity can be measured at pressures using a simple pycnometer, and permeability can be measured with gas and water flow method very quickly and also with pulse-decay method with different proportion of upstream and downstream reservoir volumes. The machine is

---

2006年5月12日受付。

\* 京都大学大学院理学研究科

Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

\*\* 京都大学大学院工学研究科

Department of Urban and Environmental Engineering, Kyoto University, Kyoto 606-8501 Japan

\*\*\* 海洋研究開発機構高知コア研究所

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Kochi Institute for Core Sample Research, Kochi 783-8502, Japan

\*\*\*\* 防災科学技術研究所

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tsukuba 305-0006, Japan

extremely simple to use and more than 350 runs were made last year with more than 5,000 permeability/porosity values collected. A gas apparatus can be developed as an intravessel machine at a low cost in the future.

**Key words :** rock deformation, friction apparatus, gas-medium apparatus, frictional melting, permeability, porosity

## はじめに

構造地質研究会（構造研）が半世紀近い活動を経て、日本地質学会の構造地質部会に移行することになった。構造研の活動の多くは部会に引きつがれるが、会誌「構造地質」は本号が最終号となる。最終回を記念して「構造地質学における実験技術」と題する特集が組まれたのは、実験的研究と構造地質学の発展に対する特集号編集者の願いを反映しているのだと思う。

よく知られているように、岩石の本格的な変形実験は1911年にvon Kármánが三軸試験機を開発した時に始まる。その後いくつかの重要な研究はあったが、地球科学の1分野として岩石の変形実験が本格的に始まったのは、第二次世界大戦後にD. T. GriggsがUCLAで職についてからであった。Griggs, J. W. Handinらが先導した実験的研究は、1960年代に固体圧試験機(Griggs, 熊沢峰夫), ガス圧試験機(H. C. Heard, M. S. Paterson)が開発されて大きく開花した。その後約40年が経過し、現在では実験的研究は第2世代から第3, 4世代に引きつがれつつある。第1世代の人たちがもっていた試験機開発への強靭な精神は次第にうすれ、今では世界でも数機程度でしか試験機の開発がなされていない状況である。Patersonが30年以上かけて改良したガス圧装置は10以上の機関で購入されて、とくに高温高圧下での変形実験の研究レベルを一気に高めた。しかし、彼が引退した後、誰がガス圧試験機を維持・発展できるであろうか。

変形・反応・物質移動は地球内部の多くの現象の素過程であり、実験的研究の重要性が低下することは考えられない。上記のような現状は、視点を変えれば、我が国の研究者が世界の一線で活躍できるチャンスでもある。我が国では多額の研究費が設備に投入されているし、民間の技術者のレベルも世界最高に近い。しかし、銘記しておく必要があるのは、優れた試験機はほとんどの場合、研究の必要性から開発されることである。装置に要求される性能は、研究テーマから決まる。メーカーの技術者にはそのような動機がないし、実験結果が目的に対して十分かどうかの判断も難しい。一方、科学者は機械・電気の専門家ではないので、必要に迫られてもすぐに装置が作れるわけではない。結果として、科学者と技術者が熱意と信頼の固い絆で結ばれてはじめて、新しい装置の開発が可能になるの

である。実際これは大変な作業で、設計だけで1~2年以上、装置の問題点を解決するために少なくとも2~3年を要するのが普通である。

第一著者（嶋本）は、過去15年余り、主に「断層と地震」の研究を進めるために、試験機の開発を続けてきた。地震研究所に勤務した1989年から1998年までの9年間で6台、京都大学に転任後に1台の試験機を設計・製作した。いつも装置の開発とトラブル解消に追われてきたように感じる。何故7台も必要だったのか？ 趣味で骨身を削る装置開発などをするはずがない。発端は、30才代の半ばに一生の研究テーマについて考えたとき、「自然の断層に学ぶ」ことを研究テーマを探るヒントにした時に始まる。つまり、断層のレオロジーの研究は、自然の断層の研究を通して断層帯内部で起こっている変形・流体移動などのプロセスをまず明らかにし、それらを実験室で再現して断層の力学的・水理学的性質などを決めるべきだと考えたのである。自分でいくつかの断層を見て歩き、断層岩の文献を調べていくことで、断層岩に認められる変形のプロセスの多くは実験的にほとんど研究されていないことがわかった。7台の試験機は、そのようにして主要な未解決問題を解くために作ったのである。本稿では、それらの中でよく使われてきた4台の装置について紹介する（他の3台はまだ整備中）。試験機の写真は本誌口絵(Sone et al., 2006)に掲載されているので、合わせて参照されたい。

紙面と時間の都合で、各装置の歴史的位置づけ、装置としての問題点、将来のポテンシャルなどに関しては、本稿は不十分である。それらについては、各装置を報告した学術論文の中でふれたいと思う。最後に、「付録」として、本稿で紹介した試験機を使って書かれた論文のリストを掲載しておいた。本稿では、試験機の測定例を掲げることができなかったので、関心がある方はそれらの論文を参照していただきたい。

（嶋本）

## 試験機の概要と開発の意図

以下、各試験機の製作の意図と試験機の現状について簡単にまとめておく。紙面の都合上、他の類似の試験機との比較などは割愛する。

高温二軸摩擦試験機は、3つのブロックの中央をす

べらせることによって、三軸試験機のもつ欠点である O リングの摩擦、ジャケットの強度、垂直応力の変動の影響などを除外し、非常に感度の高い摩擦実験をおこなうために製作した。第一著者は三軸試験機を用いて多数の摩擦実験をおこなう中で、断層の摩擦がいかに微妙な性質をもっているかを体で感じていた。この試験機は、三軸試験機の欠点を補うものとして製作し、同時に高温の機能と年間 0.03 mm という超低速の機構を含めた。温度の機能を生かして脆性から塑性流動に移行する実験、感度を生かして粘土鉱物を含んだ断層の微妙な性質の測定に使ってきました。超低速の機能は、熱水圧力容器（製作済み）を使って圧力溶解のような非常に低速が要求されるプロセスを研究するために含めた（このテーマに挑戦したい人を募集中！）。ギア載荷式で装置が柔らかいこと、装置の要素間の接触の影響で、装置の硬さを完全に一定に保てないことが技術的な課題である。また、断層変位が 20 mm に限られるので、かなりの場合、断層の性質はすべりとともに変化し、この変位量では一定の性質が達成できない。この欠点を補うために作ったのが、ねじり剪断型の摩擦試験機である（調整中）。

回転式高速摩擦試験機は、シードタキライトに認められるような摩擦熔融現象を再現するために製作した（第一著者には最初の試験機）。2~3 m/s に達する地震性断層運動を再現でき、摩擦熔融と断層ガウジの高速摩擦挙動の実験などに使用してきた。製作後 15 年が経過したが、摩擦熔融をおこしながら断層の力学的性質が測定できるのはまだこの試験機のみである。最近では米国の V. Prakash が衝突実験によって摩擦熔融現象を調べ始めているが、非常に高度で難しい実験である。我々の試験機では 0.1 m/s 以下の遅い速度が出せないために、通常の試験機との間に速度領域のギャップがあること、間隙水圧を制御した条件下で高速摩擦実験ができないことが大きな欠点である。3 mm/yr~10 m/s の速度レンジをもち、超臨界条件下で摩擦実験が可能な 2 号機がほとんど調整を終わり、もう少しで稼働できる状態になっている。

ガス圧式高温高圧変形透水試験機は、高圧ガス保安法による規制が厳しい我が国でも、本格的なガス圧式三軸試験機を開発するべきだと考えて製作した。短期的には、高速摩擦で重要な摩擦熱による間隙圧の上昇 (thermal pressurization) の重要性を評価するために、断層帶の水理学的性質を測定することが目的であった。したがって、間隙圧（水またはガスが使用可能）をコンピュータで制御できる機能を充実させて、それを外国のガス圧試験機と競争するポイントとした。学生・PD の人たちなどの活躍で、この目的ははたすことができた。もう 1 つの重要な機能は、破壊を制御するために、200 Hz の応答性を載荷装置にもたらすことである。柔らかいギア載荷式試験機では不安定

すべりを消すことが難しく、とくに断層の遷移挙動に関する性質を決めることが難しい。本誌口絵 (Sone et al., 2006) の Fig. 8 b の上部にある横プレスは、圧力容器を外して高温二軸試験機として使用するために作ったものである。この意味で、本試験機は上記の高温二軸摩擦試験機を補完するものである。しかし、本載荷プレスの二軸試験機としての使用はこれからである。ガス圧試験機を高温下で岩石の流動変形に使う場合には、高速載荷装置を使う必要は全くない。将来のガス試験機は、次に述べる液圧式容器内試験機の構成で十分である。

最後に紹介する容器内変形透水試験機は、試験機として単純化の極限を追求し、安価で（基盤研究 B で買える値段で）、高精度で、非常に使いやすい試験機を作るため開発した。そのような試験機を作ることによって、変形透水実験を若手研究者の間に広めたいという願いをこめた。したがって、この試験機だけは、学問的な動機から全く新しい機能をもった試験機を作るのではなく、既存の試験機の大幅な改良（単純化）を意図して作った。まず、圧力容器の中に載荷部を組み込むことによって、全てを圧力容器内部でおこなうことが可能になった。また、容器を市販された環境槽（50 万円以下）に設置することによって、安全性とともに、温度変化を抑えて高精度を達成することができる。計測部としては浸透率と間隙率の測定部分を非常に充実させた。単純で使いやすい効果は抜群で、昨年 1 年間で 350 を超える実験がなされ、5,000 を越える浸透率・間隙率の測定データがとられた。これは上記のガス圧試験機の数倍に達する稼働数である。試験機は簡便で使いやすく作るべきことをあらためて認識した。この装置の弱点は容器の上部ナットに大きな力が働くために、低温下で激しい破壊実験をおこなうと、ナットが壊れる可能性があることである。しかし、高温流動変形ではまずその心配はないので、将来ガス圧試験機を作ろうと思っている人は、容器内試験機の方で検討されることをお奨めする。

（嶋本）

### 高温二軸摩擦試験機

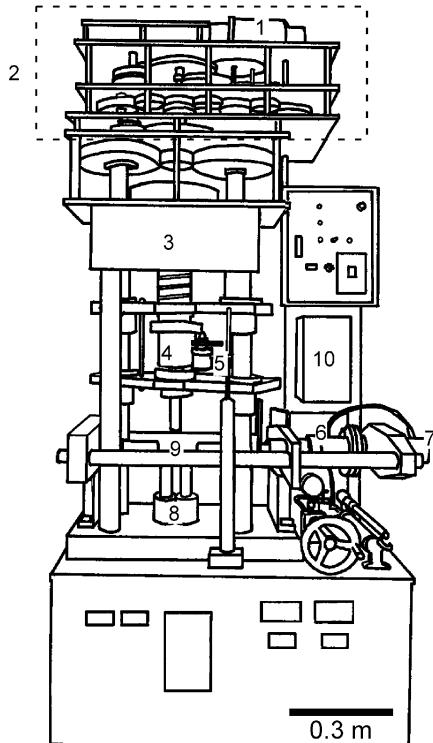
この試験機（1992 年 3 月製作、（株）マルイ MIS-0233-1-302 型）は、リソスフェアを横断する形で浅所の脆性領域から深所の完全塑性流動域まで、温度の影響も加えて連続的にカバーした断層の力学データを、精度良く取得することを目的として設計された試験機である。室温から 1,000°C 近い高温条件において、幅広い速度レンジと速度急変機構を備えている点、ジャケットを使わないとにより精度良い測定が出来ることなどが特徴である。一方で、封圧下にないことから母岩の一軸破壊強度により垂直応力が制限される点、

回転式の試験機に比べると、変位が最大でも 20 mm 程度と限られている点などが欠点である。

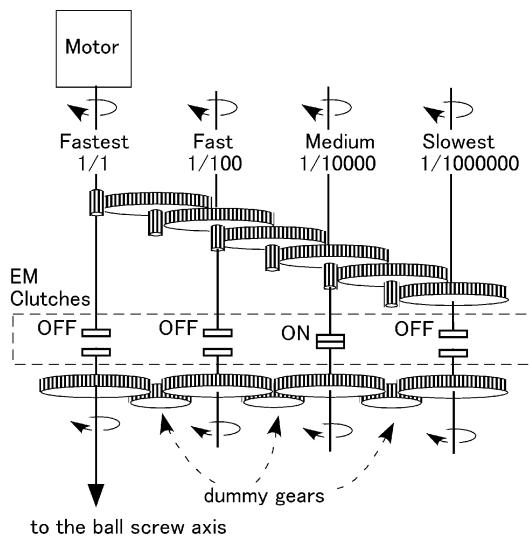
試験機の略図を Fig. 1 a に示した。この試験機では、直方体に加工した岩石ブロック 3 個を横方向のプレスにより押し付け（垂直荷重）、中央のブロックを両側のブロックに対して相対的に下方に変位させることで摩擦実験をおこなっている。岩石同士の摩擦を調べるために利用できるだけでなく、ブロックの間に例え

ばガウジを挟んだ剪断実験も可能である。剪断荷重（鉛直方向の荷重）の載荷にはモーターとギアシステムを用いており、ギアシステムにより様々な速度比で減速された回転運動を、ボールネジを用いて鉛直方向の往復運動に変換している。横方向のプレスで載荷することのできる垂直荷重は約 300 kN である。ただし、現在横方向の載荷軸に用いている荷重変換機の容量が 200 kN であるので、目下の最大載荷能力は 200 kN である。なお、前述したように、現状では岩石ブロックに封圧をかけることが出来ないので、岩石の一軸破壊強度を超えるような垂直応力を与える荷重は載荷できない。現在用いている試料では断層面の面積が  $20 \text{ cm}^2$  であるので、200 kN の最大荷重を載荷した場合の垂直応力は 100 MPa である。剪断荷重、すなわち中央のブロックを鉛直方向に押し下げる力は、ボールネジとその周りのボールベアリングからなる載荷軸の鉛直送り機構部分が支えることの出来る剪断荷重で、その上限が決められている。この装置に利用している製品の場合は約 700 kN が上限である。ただし、現在は荷重変換器の容量が 500 kN であるので実質の上限は荷重変換器の上限ということになる。

鉛直方向の載荷ピストンの移動速度は、サーボモーターの回転速度を変化させることに加えて、Fig. 1 b に示した 6 桁の回転速度範囲を持つギアシステムを利用することで、約  $1.5 \text{ mm/s}$ ～約  $0.03 \text{ mm/yr}$  ( $10^{-9} \text{ mm/s}$ ) の範囲にわたって変化させることができる（速度範囲は約 9 桁）。このギアシステムでは、 $1:10$  のギヤ比で次々と 6 段階にわたって回転が減速されている部分（gear-train）と、直結ラインを含む 4 種類の減速回転（直結ライン、中速ライン： $1/100$ 、低速ライン： $1/10,000$ 、超低速ライン： $1/1,000,000$ ）を取り出し、それぞれ電磁クラッチを介して最終ギアに導く部分から構成されている。Fig. 1 b に示した設定では、左から 3 番目の低速ラインの回転が電磁式クラッチを介して連結されている（矢印）。全てのギアは常に連結



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic sketches of the high-temperature biaxial frictional testing machine ; 1, motor ; 2, gear-train system ; 3, ball-bearing screw ; 4, axial force gage ; 5, displacement transducer ; 6, normal force gage ; 7, oil-driven actuator (oil cylinder) ; 8, water-circulating chamber for cooling of the pistons ; 9, specimen assembly ; 10, motor controller. (b) Schematic diagram of the gear-train system of the machine. Gears are divided into two parts by the electromagnetic clutches, the upper gear-train and the lower gear-train. All the gears of the both gear-trains rotate if the motor is rotating. One of the four of the rotation lines (fastest, fast, medium and slowest) is connected with the use of the electromagnetic clutches to the lower gear-train and eventually to the final rotation axis to rotate the ball screw axis. In the diagram, the medium speed line ( $1/10000$ ) is connected to the final line. Selected clutch connection can be changed instantaneously with an electric circuit system without stopping the rotation of the motor.

されており、電磁クラッチの連結と切断によって、モーターを停止することなく、ギア配置を瞬時に切りかえることができるよう設計されている。

本試験機は、試料周りに外熱式の炉をセットすることで、1,000°C程度までの高温下での実験をおこなうことができる。発熱体にはカンタル線を用いており、巻き線の間隔を調整することで、断層面近傍での温度勾配を、500°Cの条件下で約10%以内に抑えられている。

### 1. 装置の剛性と力学データ

岩石の摩擦試験時に、変位速度に正（負）のステップを与えると、摩擦係数に正（負）のピークが現れ、その後摩擦は定常状態に向かって徐々に減少（増加）する。このような遷移挙動は、断層の構成則を用いて経験的に記述する事が可能である（Dieterich, 1979, 1981；ほか）。摩擦の遷移的挙動を調べ、構成則のパラメータを決定するための手段としては、速度急変試験が有効である。上述のギア切替機能は、このような試験をおこなう上で有効である。今、変位速度を10倍変化させると、理想的に速度が急変した場合には、a, bというパラメータを用いて、初期ピークの高さは  $a \times \ln 10$ 、急変前後の定常状態の摩擦係数の差は  $(a-b) \times \ln 10$  で表わされ、新しい定常状態に漸近的に近づく際の特徴的長さスケールは  $d_c$  と呼ばれるパラメータで表現される。しかし、実際には試験機自体の弾性変形のため、理想的な速度ステップを断層面に与える事はできない。そのため、構成則のパラメータの個々の値を決定する際には、シミュレーションを行い、実験データのフィッティングを行わなければなら

ず、この際に試験機のばね定数を把握しておく必要がある。

Fig. 2 a, b に本試験機の構成模式図を示す。試験機のばね定数とは、具体的には、load point displacement を固定した時の、断層面の単位変位量あたりの荷重変化の事である。Fig. 2 a の模式図は Fig. 2 b の様に書き換える事ができる。試験機の変位計は図の位置に取り付けてあり、変位計より下部分のばね定数は断層変位がゼロの場合の載荷-除荷曲線から推定する事ができ、変位計より上部のばね定数はスティックスリップ試験時の変位-応力降下の関係から推定する事ができる。

Fig. 3 に断層の無い試料（斑レイ岩ブロック）をセットした時の載荷-除荷曲線を示す。明らかに、試験機が非弾性変形を起こしている事がわかる。また、サイクル数が多くなると近似的に弾性的な変形となるが、非常に非線形であるため、ばね定数は荷重に依存する事がわかる。荷重25kN付近での傾きを取ると、 $0.866 \sim 1.69 \times 10^8 \text{ N/m}$  であった。この誤差は明らかに系統誤差である（サイクルに伴って傾きが急になる）ため、標準偏差を取って誤差とすることはできない。実際の摩擦実験時にこのばね定数を同時に測る事はできないのでこのレンジを考慮に入れて解析する必要がある。次に Fig. 4 に、荷重25kN付近でおこなったスティックスリップ試験時の、各イベントでの変位-応力降下の関係を示す。原点を通る直線で近似したところ、傾きは  $2.03 \pm 0.02 \times 10^8 \text{ N/m}$  であった。これらが直列に組み合わさった試験機全体のばね定数は 0.605

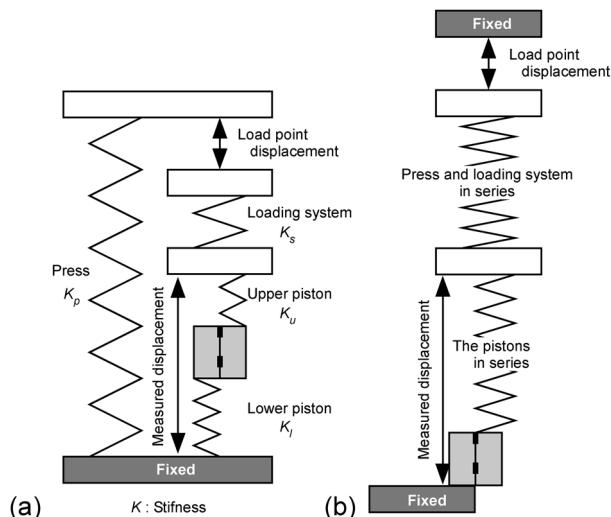


Fig. 2 Schematic diagram (a) and its interpretation (b) for the stiffness of the high-temperature biaxial frictional testing machine. Stiffness of the series of pistons can be measured in a loading experiment on an intact sample. Stiffness of the press and loading system in series can be calculated from stick-slip experiments.

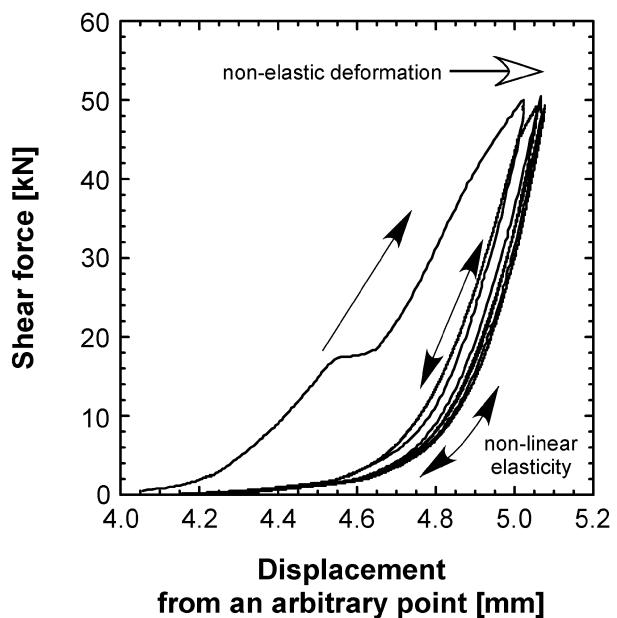


Fig. 3 Shear force versus displacement curve during a stiffness measurement on the series of pistons by loading cycles. Note the large amount of hystereses after the first shear load cycle.

$\sim 0.864 \times 10^8 \text{ N/m}$  と推定する事ができる。これらの誤差は、実験データのフィッティング時には、構成則パラメータの誤差となって現われる。この影響を軽減するためには、非常にばね定数の高い試験機の作成、もしくは試験機自体のレオロジーをより詳細に解析することが重要である。

(野田・堤)

### 回転式高速剪断摩擦試験機

この試験機(1991年3月製作、(株)マルイ MIS-233-1-HSTR90型)は、1 m/sec以上に達する高速すべりと10 mを超えるような大変位の条件下における岩石摩擦の性質と、高速断層運動時に発生する摩擦熱と間隙水圧の上昇の相互作用を調べるために設計・製作された試験機である(嶋本・堤, 1994)。本試験機では、円柱あるいは円筒状に整形した一対の岩石試料を軸方向に押し付けて、片側の試料を高速で回転させることで高速・大変位すべりを再現する。試料の回転は、7.5 kWのモーター(Fig. 5)からトルク・リミッタ、トルク変換機、電磁式クラッチを経て試料に伝達される。モーターの最高回転速度は1,500 rpm、定格トルクは約50 Nmである。一方、試料への載荷は装置右端に設置した最大載荷能力10 kNの空気圧式のアクチュエーターにて行っている。載荷量は、アクチュエーターに送り込むエアーコンプレッサーの圧力を、減圧弁で微調整することによってコントロールしている。試験機の詳細はすでに嶋本・堤(1994)で報告されて

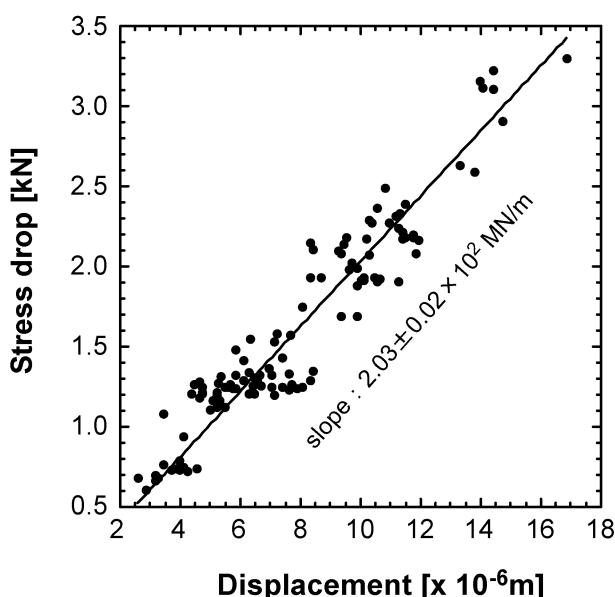


Fig. 4 Stiffness measurement of the press and loading system by stick-slip experiments. Each data point represents a single stick-slip event showing the stress drop over displacement.

いるので、本小論では1994年以降にこの試験機に加えた改良点、及び明らかとなってきた問題点を整理してみたい。

### 1. 実験条件の制約

この試験機の試料ホルダーは、外径が25 mmの試料と40 mmの試料用のものが準備されている。試料の外径と内径を変えることによって、この試験機で再現できる最大等価変位速度(嶋本・堤, 1994)と最大垂直応力は変わってくる。例えば外径25 mm、内径15 mmの円筒形試料に、モーターの最大回転速度1,500 rpm及びアクチュエーターの最大垂直荷重10 kNを載荷した場合、等価変位速度は1.6 m/s、垂直応力は31 MPaとなる。しかし、実際には以下に述べる2つの理由により実験可能な垂直応力の最大値が制限される。

第一は、モーターのトルクの上限からくる制限である。今、摩擦係数が変位速度に依存しないと仮定し、その値を0.8とすると、垂直応力が31 MPaの場合には、試料を回転させる、すなわち断層をすべらせるのに必要とされるトルクの値は約84 Nmとなり、モーターのトルク能力(約50 Nm)を超える。よって、実験可能な垂直応力は、モーターのトルク能力により約20 MPa程度に制限されることになる。第二は摩擦発熱に伴う岩石そのものの強度低下による制限である。高速摩擦実験では、摩擦発熱に伴い発生する熱クラックの影響で試料の強度が減少し破壊してしまうために、実験可能な垂直応力が低い(<3 MPa)。特に、花崗岩や珪岩などのように石英を含む岩石の場合にはこの熱破壊の影響が大きく、高速摩擦時の強度は、一軸圧縮強度に比して2桁以上低い値となる(大友・嶋本, 1994)。この熱破壊に伴う強度低下を避け、より高圧下での実験をおこなうためには試料周囲を金属ジャケットで覆うなどの工夫が必要となるが、その場合にはジャケット被覆の摩擦データへの影響を極力排除する必要があり、問題の解決はなかなか簡単ではない(後述)。また、試料を円筒状ではなく円柱状にすると、この強度低下が多少軽減されることが予想されるが、剪断応力などの力学データ取得を目的とするのであれば、断層面上でのすべり速度の変化を極力小さくするために、円筒状の試料を使うことが望ましい。摩擦融解現象を出来るだけ早く起こす場合には、垂直応力を上げられない代わりに変位速度を増加させる方法が考えられる。外径が40 mmの試料ホルダーはこのことを意図した実験に利用することができる。

### 2. 軸荷重応答性

高速摩擦実験では、磨耗や摩擦溶融による試料の短縮速度が低すべり速度域での摩擦実験に比べて大きいために、圧縮率の低い油圧式アクチュエーターを載荷に用いると、実験中の試料短縮の影響で垂直荷重が急変することが予想される。例えば、斑レイ岩を用いた、

垂直応力 1.6 MPa, すべり速度 1.6 m/s の条件での摩擦熔融実験では、約 0.05 mm/s の速さで試料が短縮する (Tsutsumi and Shimamoto, 1997)。このような油圧シリンダを用いた場合に予想される荷重変動を嫌う実験においては、通常、アクチュエータを接続することで油圧変動を吸収したり、あるいは空気式のシリンダを利用する方式がとられる。本試験機では、空気式のシリンダを載荷用アクチュエーターとして用いており、また、エアーコンプレッサーからシリンダ内への圧縮空気導入部に精密減圧弁を設置することで、シリンダ内部の圧力を一定の値にコントロールしている (Fig. 5)。さらに、空気圧シリンダに容量 10 L の空気ボトルを付加接続して、圧媒体の体積を増やすことによって、試料長さの変化に伴う圧変動を極力抑えるような工夫も試みている (Fig. 5)。

さて、ここで用いている減圧弁の感度は 31 Pa であるため、この空気圧に対応する軸力 6.3 N の変動はこのシステムでは原理的に制御することができない。また、この減圧弁が応答可能な流量が、約 0.02 m<sup>3</sup>/s 以下 (アクチュエーター内圧 0.15 MPa (荷重 2 kN) の場合) であるため、1.4 m/s を超える急速なピストンの移動が起こった場合には、軸荷重を一定に保つことはできない。以上の載荷システムにおいては、ピストンがよほど高速で移動しない限りは、実験中の軸力変動は、6.3 N 以下の小さい値に抑えられることが期待される。例えば、垂直応力をかなり高めの、15 MPa (荷

重 6 kN 相当) に設定した斑レイ岩の摩擦熔融実験時でも、その軸短縮速度は約 2 mm/s であるので、減圧弁の流量による制約は問題とならない。しかしながら、実際には、以下に述べるように、空気圧シリンダ内部のピストン周りのシール摩擦抵抗 (変形) の影響で、過渡的に 0.1 kN 程度の荷重変動が伴われる場合がある。Fig. 6c に示したのは、減圧弁の効果を確認することを目的としておこなった実験結果で、試料部に小型ジャッキを挟み、試料の長さ変化を模擬してジャッキを伸縮させたときの、変位量と軸荷重との関係を示している。この結果から、変位一荷重曲線は、一定の傾きで荷重が急激に変化する部分と、変位に依らずほぼ一定の荷重が保たれる部分、すなわち減圧弁が機能していると思われる部分とからなるループを描くことがわかる (Fig. 6c)。ジャッキが短縮から伸張に転じる際、あるいはその逆の時に、すなわち、空気圧シリンダ内のピストンの運動方向が逆転する際には、それぞれ 0.1 kN 程度以下の大きさの軸荷重低下もしくは軸荷重増加が伴われており、その後は、それ以上にジャッキ長さが変化しても軸荷重は変化しない。この軸荷重変動は、軸変位の開始直後の約 0.06 mm 以内の変位時におこっている。以上のことから、荷重変動幅の半分の大きさ (約 0.05 kN) が、0.5 kN 程度の荷重使用時のピストン周りのシール摩擦の大きさに相当し、また荷重が急激に変化する部分は、シール部の変形にともなう荷重変化を見ているものと考えら

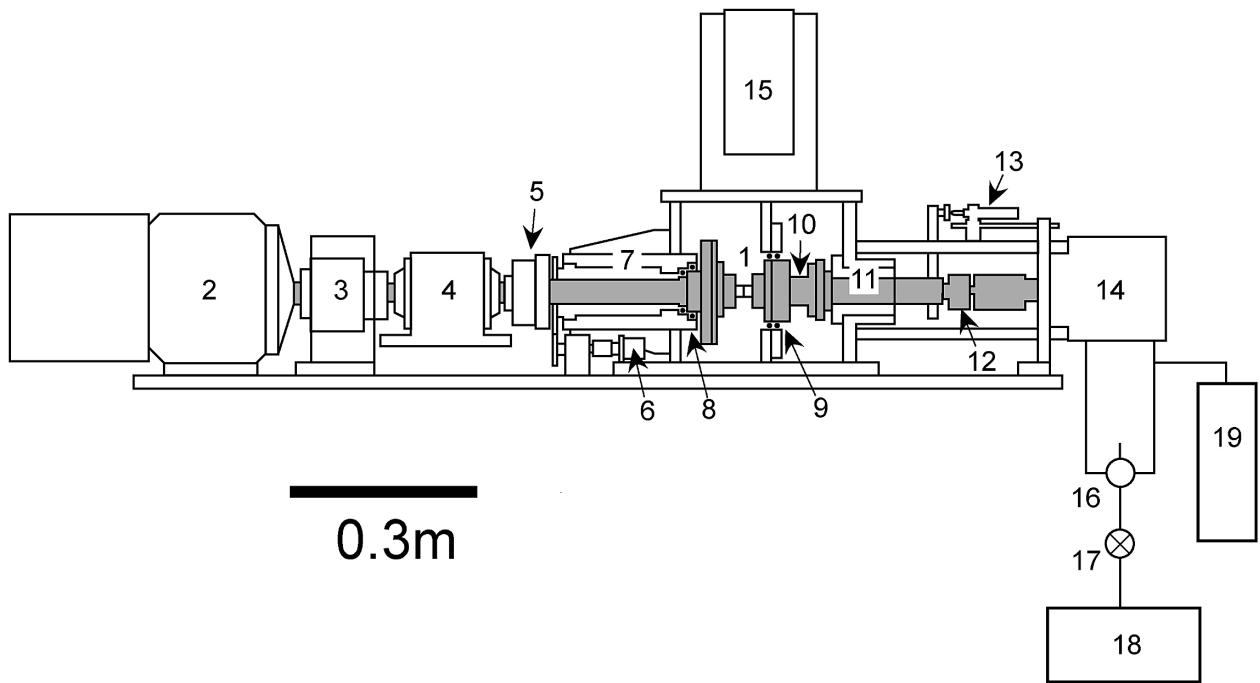


Fig. 5 Schematic sketches of the rotary shear high-velocity frictional testing machine. 1, specimen ; 2, motor ; 3, torque limiter ; 4, torque gauge ; 5, electromagnetic clutch ; 6, rotary encoder ; 7, rotary column ; 8, thrust ball bearing ; 9, ball bush ; 10, torque-axial force gauge ; 11, ball spline ; 12, axial force gauge ; 13, displacement transducer ; 14, air actuator ; 15, water reservoir ; 16, three directional valve ; 17 regulator ; 18, air compressor and 19, air bottle.

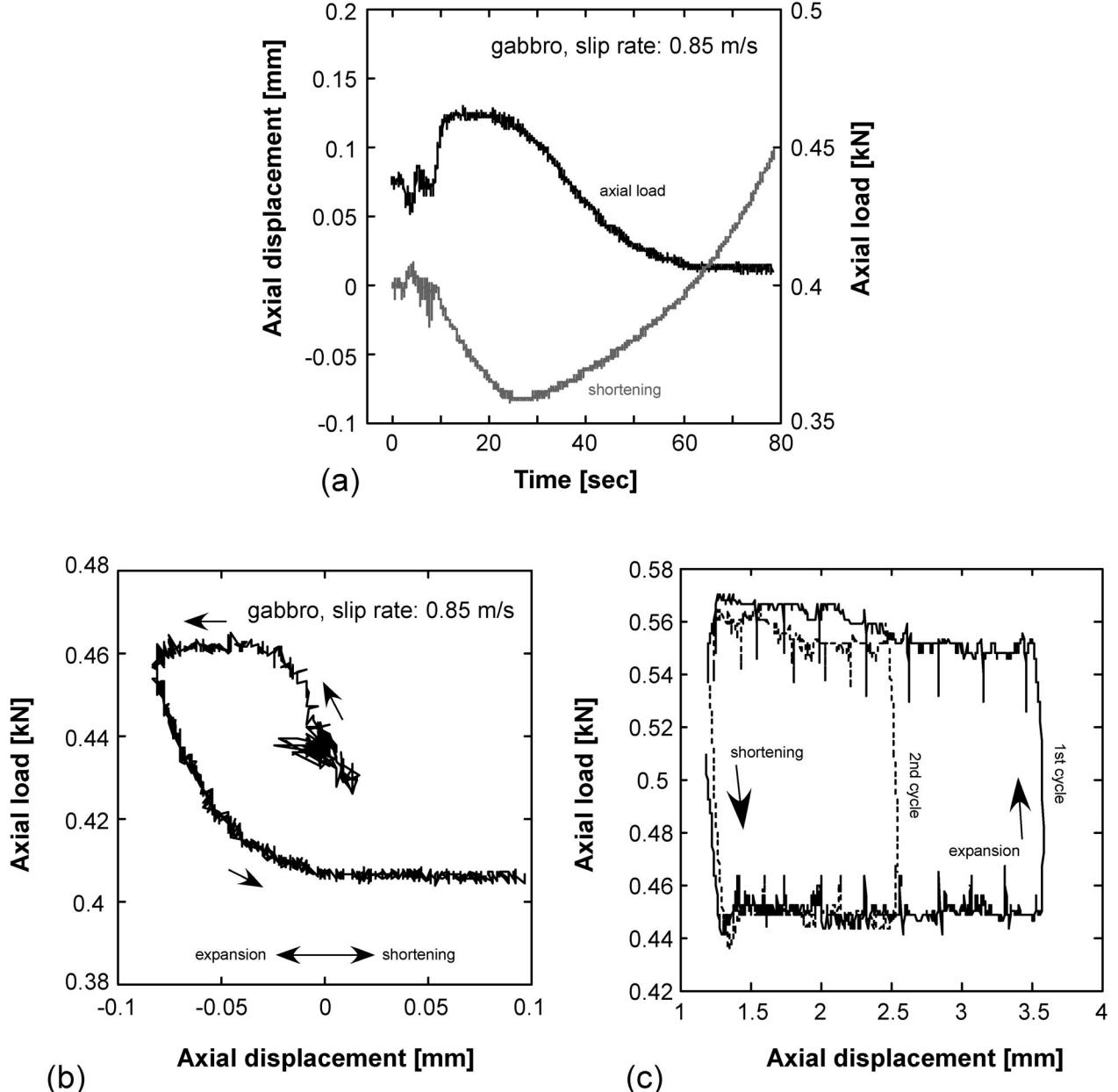


Fig. 6 (a) Axial shortening and axial load versus time curves form a frictional melting experiment of gabbro performed at a slip rate of 0.85 m/s and at an averaged normal stress of 1.4 MPa (Run number : HVR012). (b) Axial displacement versus axial load curve of the run HVR012. Arrows indicate the passage of time. Axial load initially increased firstly with a dilation of the sample, and then it decreased with the initiation of the shortening of the sample. (c) Axial displacement versus axial load curves from a loading test of a dummy sample (a jack), of which length can be change by hand (Run number HVR761). Spike-like noises of the records are artificial noises associated during the handling of the jack.

れる。ここに示した荷重変動は、ピストンの移動方向が逆転する際に伴われるものと解釈されるので、試料が膨張から短縮に転じるような挙動をするような実験においては、このような載荷システムに起因した荷重変動が伴われるものと予想される。その一例を Fig. 6 a, b に示した。Fig. 6 a に示した実験は、ハンレイ岩の摩擦熔融実験の典型例について、実験開始初期の軸力と軸短縮量を拡大表示して示したものである。実験を開始すると試料長さはいったん伸張（膨張）し、経過

時間 25 秒付近で短縮に転じている。一方軸力は、試料長さの変動に伴い増加から減少に転じている様子が伺える。ここに示した結果を変位一軸力曲線としてプロットしたのが Fig. 6 b である。時間経過は矢印で示されており、Fig. 6 c の場合と同様のループを描いていることがわかる。

### 3. トルク計の出力の軸力干渉

高速摩擦実験では、回転側と載荷ピストン側の 2 箇所でトルクを測定している (Fig. 5)。回転側のトルク

計は、軸荷重指示部と回転軸まわりの軸受け摩擦を含めて計測してしまうため、試料の摩擦の計測には適当ではない (Tsutsumi and Shimamoto, 1996). よって、トルクの測定は、載荷ピストン側に取り付けたトルク-軸力変換機を用いておこなっている (Fig. 5). トルク出力の電気的ノイズによる変動幅は、外径 25 mm、内径 15 mm の円筒形試料の場合約 0.07 Nm で、この幅は剪断応力 0.21 MPa に相当する。

さて、現在用いているトルク変換機の大きな問題は、軸荷重による干渉を受けることである。Fig. 7 に示したのは、載荷軸に静的に軸荷重を載荷-除荷したときのトルク出力の変動の様子である。ここに示すように、軸荷重の増減とともにトルク値は非常に複雑な挙動をしてしまう。よって、実験中における垂直荷重の変動は好ましくない。

前節で、アクチュエーター（空気圧シリンダー）内部ピストン周りのシール摩擦抵抗の影響で、試料が短縮（伸張）から伸張（短縮）に転じる際には、約 0.1 kN の軸荷重の変動が起こることを示した。Fig. 7 より、この 0.1 kN の軸荷重の変動によって、もっとも干渉の度合いが大きい場合には、トルク出力は 0.06 Nm シフトすることになる。この値は、前述の電気的なノイズによるトルクの周期的な変動とほぼ同じレベルである。このような解析から、試料長の変化に伴う垂直荷重の変動によってトルク値はほぼ変動しないと考えて、実験結果を解析している。トルク計の軸力干渉の問題は、例えばカンチレバー (cantilever) タイプのトルク計を製作することによって解決できるかもしれない

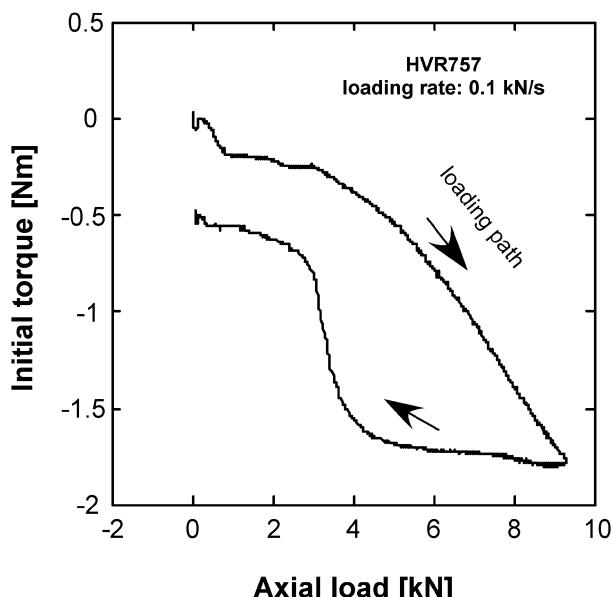


Fig. 7 Plot of axial load versus output of the torque sensor currently used in the high-velocity frictional testing machine from a loading-unloading cycle test. Interaction between the torque and axial load is serious if the amount of the axial load change is large.

い。

#### 4. 高垂直応力下での実験

従来の高速摩擦実験 (Tsutsumi and Shimamoto, 1997; Hirose and Shimamoto, 2005) では、熱破壊によって試料が壊れてしまうため大きな垂直応力 (>2 MPa) をかけて実験をすることが困難であった。そのため、花崗岩などの熔融温度が高い岩石の摩擦熔融挙動を調べることが出来なかった。この問題は、Fig. 8c のように円筒形試料の先端約 5 mm の径を 1.2 mm ほど小さくして、そこにアルミニウムのジャケットを被せることによって克服することができた。アルミニウムを用いたのは、その融点が 600°C と岩石の融点に比べて低いため、いったん岩石試料の摩擦熔融 (> 900°C) が起これば、アルミニウムメルトの強度は無視できるほど小さいであろうと考えたからである。しかし、予想に反してアルミニウムメルトの強度が大きく (摩擦係数に換算して 0.1)、またその力学的挙動が複雑であり、アルミニウムの摩擦の影響を補正が難しいことがわかつってきた。そこで現在は、試料の先端部約 1 mm にはアルミニウムジャケットを被覆させない試料 (Fig. 8d) を用いて摩擦熔融実験をおこない、ジャケット同士が接するまでの摩擦データを用いることにしており。また、外径 40 mm の円筒形試料の内側にアルミニウムのジャケットをはめ込むことによって、試料の径方向の速度変化の影響を小さくできる円筒形試料においても、高垂直応力下で実験をおこなうことが可能となっている。

#### 5. ガウジの高速摩擦実験

断層ガウジを外径 25 mm もしくは 40 mm の円柱形の試料に挟み、テフロンのリングでシールすることによって (Fig. 8e)，ガウジの高速摩擦挙動を調べることが可能である。ただし、垂直応力を 2 MPa 以上にするとのテフロンリングではガウジをシールすることが難しく、実験は成功していない。低荷重の実験では、実験データに対してテフロンの摩擦の影響が大きく出てしまうため、テフロン摩擦の影響を補正する必要がある。今後、耐熱性があり、かつ摩擦の小さな高速シールを開発・作製して、高垂直応力下でのガウジの高速摩擦実験をおこなう必要がある。また、外径 40 mm の円筒形試料の外側と内側をテフロンでシールすることによって、より高速で精度の高いガウジの高速摩擦実験も現在試みている。

#### 6. 不活性ガス雰囲気下での実験

岩石の摩擦の性質は、湿度などの断層面近傍の雰囲気によって影響を受けることが知られている。また、摩擦発熱によって断層面の温度が上昇すると、例えば大理石であれば炭酸カルシウムの分解反応が起こり、二酸化炭素が反応生成物として断層面から放出される。このように、湿度や化学反応の度合いを各種センサーでモニターして、断層の力学的挙動との対応関係

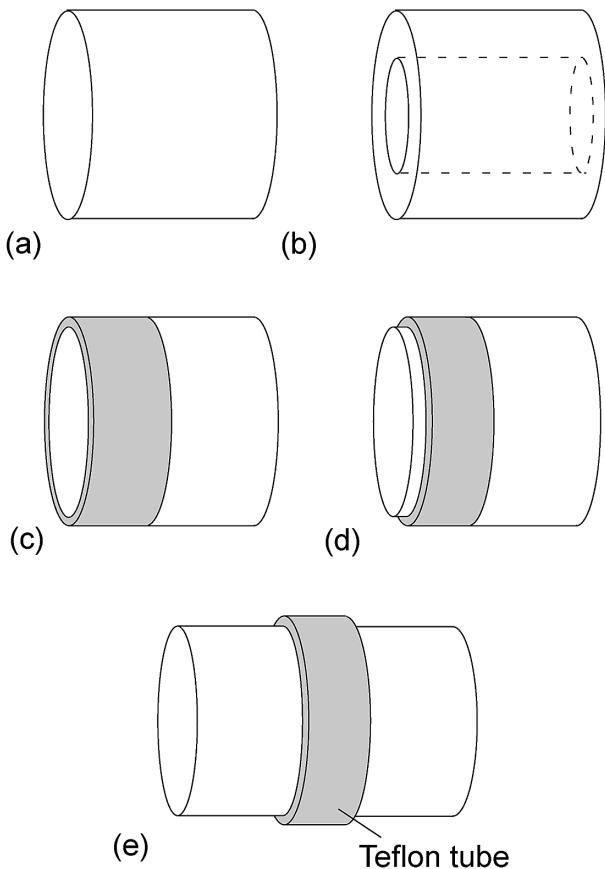


Fig. 8 Current specimen configurations used in high-velocity experiments. (a) solid specimen, (b) hollow specimen, (c, d) solid specimen with a metal ring, and (e) solid specimen with Teflon ring for gouge experiments. Diameter of specimen is either 25 mm or 40 mm, and length is about 25 mm.

を明らかにする高速摩擦実験もおこなっている。このような実験をおこなうためには、試料チャンバー内の空気を窒素ガスやアルゴンガスで置換する必要がある。この試験機では、一定の流量でガスをチャンバーに送りながら、チャンバー内の空気をほぼガスで置換することが可能である。置換されたかどうかは、チャンバー内に設置している酸素センサーで確認しており、置換後は酸素濃度が1%以下になる。このような環境下で、断層面近傍に各種センサーを配置して、例えば湿度の変化と断層の挙動の対応関係などを調べることが可能である。

このように高速摩擦試験機では、試料の形状を工夫して、より天然の地震断層運動に近い速度・圧力条件を再現したり、試料チャンバー内にさまざまなセンサーを配置することによって、摩擦挙動の変化をより定量的に議論したりすることができるようになってきている。

(廣瀬・溝口・堤)

### ガス圧式高温高圧変形透水試験機

本試験機は、サーボ式高速応答載荷システム（1994年2月製作、（株）鷺宮製作所 RT-50型）とガス圧式高温高圧変形拡散試験システム（1998年2月製作、（株）鷺宮製作所、（株）エス・イー、ARH-3000型）から構成されている。全体として、標準的な構成のガス圧式三軸変形試験機にいくつかの水理学的試験をおこなう機能を付加したシステムになっている（Fig. 9）。ガス圧式三軸変形試験機はAr, N<sub>2</sub>等の不活性ガスを圧媒体として使用するために、カンタル線内熱炉を用いることで1,000°C近い高温下での変形実験を安全におこなうことができる。有名なM. A. Patersonのガス圧式試験機ではモリブデン内熱炉を用いて約1,400°Cの達成しているが、我々も千葉大学の金川久一と共同で同様な内熱炉を製作中である。また気体を圧媒体としていることから、固体を圧媒体として利用する試験機に比べてピストン等の摺動部の摩擦が小さくなるために、変位、荷重等の測定を精度良くおこなうことができる。高温・高圧下で高精度の変形実験ができることが、固体圧や液圧式の三軸変形試験機と比べたときの、ガス圧式三軸変形試験機の最大の利点である。例えば液圧式の三軸変形試験機では、圧媒体として用いる油の使用可能温度で実験条件が約500°C以下に制限される。本試験機システムにおいては、後述のように数種類の方法で幅広い範囲の岩石の透水係数を測定でき、200 Hzに達する応答性の高い油圧サーボ装置によって軸力の制御が可能である。また、サーボ機構によって、0.001~10 Hzの幅広い周波数で間隙圧の振動制御が可能であり、それによって間隙圧振動法による浸透率の測定ができる点が大きな特徴である（嶋本ほか、1999）。

本試験機システムは、封圧と間隙圧を増加させる加圧部、間隙圧を制御する油圧サーボ式間隙圧発生制御装置、内部で変形試験、浸透試験をおこなう圧力容器、軸力を加える油圧サーボ式載荷プレスからなる（Fig. 9）。温度変化が浸透試験の結果に及ぼす影響を防ぐために、試験機本体は温度制御された耐圧壁の中に設置されている。以下、システムを構成している主な部分、システムの剛性、及びこのシステムを用いてできる浸透試験について説明する。

#### 1. 圧力容器

本試験機の圧力容器は内径60 mm、外径210 mmの円筒形で（Fig. 10）、ニッケル・クロム・モリブデン鋼（SNCM630）からなる。この材料の常温での降伏強度は885 MPa以上、引っ張り強度は1,080 MPa以上であるから、圧力容器内部の応力分布にTrescaの降伏条件を適用すると、封圧が406 MPaに達するあたりから容器の内壁が降伏をおこし始める（薄田・西原（1992）の10頁、(2.9)式を使用）。封圧がさらに増加

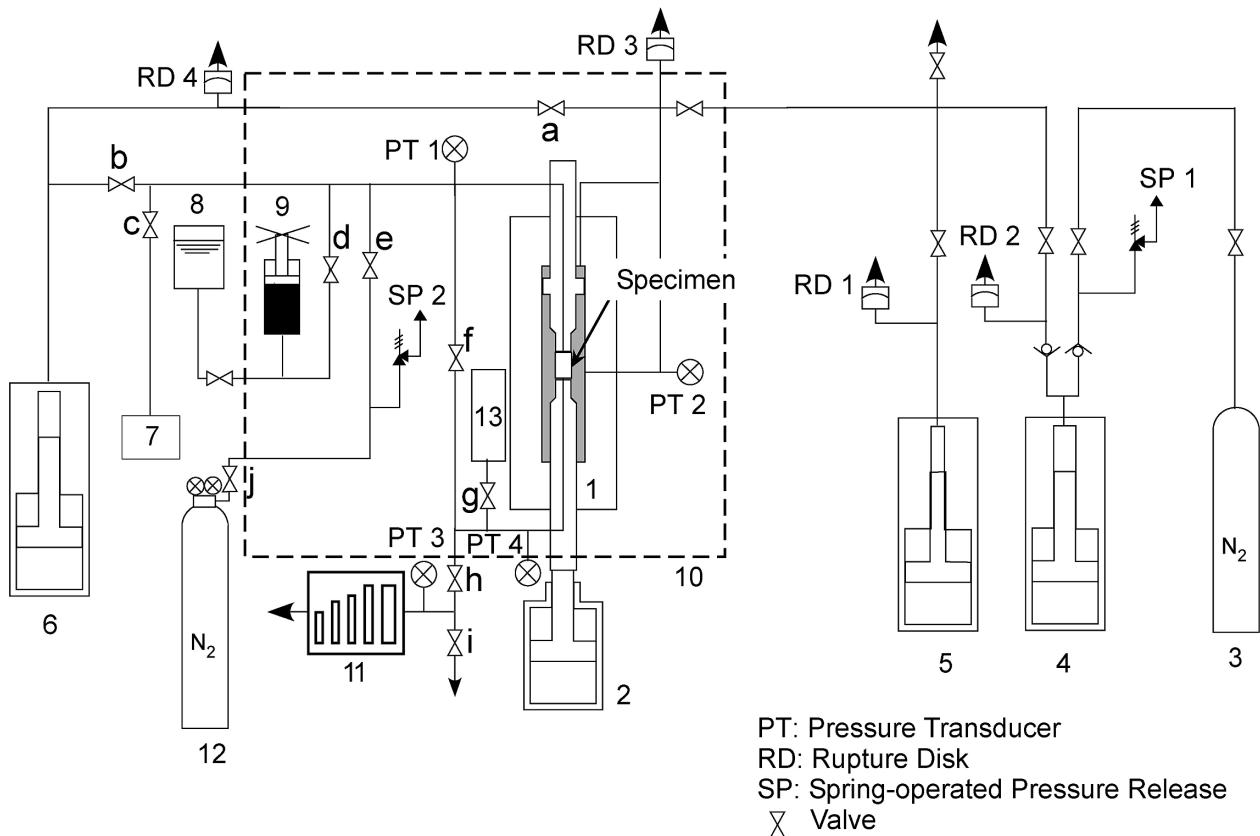


Fig. 9 Schematic diagram of the gas-medium high temperature high pressure tri-axial deformation fluid-flow apparatus : 1 Pressure vessel ; 2 axial load actuator ; 3, gas bottle ; 4 pressure generator ; 5 intensifier ; 6 pore pressure controller ; 7 vacuum pump ; 8 water tank ; 9 pore pressure generation system ; 10 temperature controlled chamber + safety shield ; 11 gas flow meters ; 12 gas bottle ; 13 extra pore pressure downstream reservoir.

すると、塑性領域は外側に広がり、外壁が降伏した時に容器全体が降伏することになる。塑性変形時に歪硬化が起こらない場合には、この全域降伏時の封圧はほぼ 1.1 GPa である（蒔田・西原（1992）の 12 頁、(2.15) 式を使用）。高圧ガス保安協会から認可を受けている本圧力容器の使用封圧は 220 MPa 以下である。したがって、本圧力容器は、内壁の降伏に対して 2 倍弱の安全率をもつことになる。ガス圧容器は使用圧の 1.5 倍の封圧下で耐圧試験をおこなうこと義務づけられているので、本試験機は実際には 330 MPa 以上に加圧できるように設計してある（その場合、破裂板などの安全装置を外す必要がある）。

圧力容器内には、内熱炉設置時は 20 mm 径の試料を設置できる。圧力容器内には、Paterson のガス圧式試験機と同様に、封圧によるピストンの押し出しの力を圧力容器内部で相殺する機構（補償室）を組み込んでいる（Fig. 10 の上部）。この補償室は封圧のラインにつながっており、その内部には封圧と同じガス圧がかかっている。補償室内部の載荷ピストンはヒダのように下が太くなっている、この余分な面積はサンプルの上の載荷ピストン（30 mm 径）の断面積と等しく作ってある。したがって、補償室内部のピストンは

[封圧] × [ピストン断面積] の力で圧力容器の内部に向かって押し込まれることになる。一方、サンプル径（20 mm）はサンプル上部の載荷ピストン径（30 mm）よりも小さいので、このピストンは封圧によって [封圧] × [(ピストン断面積) - (サンプル断面積)] の力で外に押し出される（封圧が 200 MPa の時には押出力は約 75 kN）。結果として、両方の力の差、つまり [封圧] × [サンプル断面積] の圧縮力が上部方向からサンプルに作用することになる。つまり、封圧が変化しても、サンプルは常に静水圧下におかれることになる。補償室がない場合には、封圧をかけるとサンプルは引き伸ばされてしまうので、サンプルに静水圧をかけるためには封圧の増加に対応して荷重をピストンに加える必要があり、実験が非常に面倒になる。このように、封圧（静水圧）とサンプルを変形させるための軸荷重を独立に制御できることが、補償室の最大のメリットである。また、載荷システムには封圧によるピストンの押出力が作用しないので、本試験機のように油圧サーボ式載荷用アクチュエータの容量が 500 kN と低い値に限られている場合には、補償室の採用は有利である。さらに、サンプルを変形させるためにピストンを押し込むと圧力容器内の容積は小さくなるが、逆に

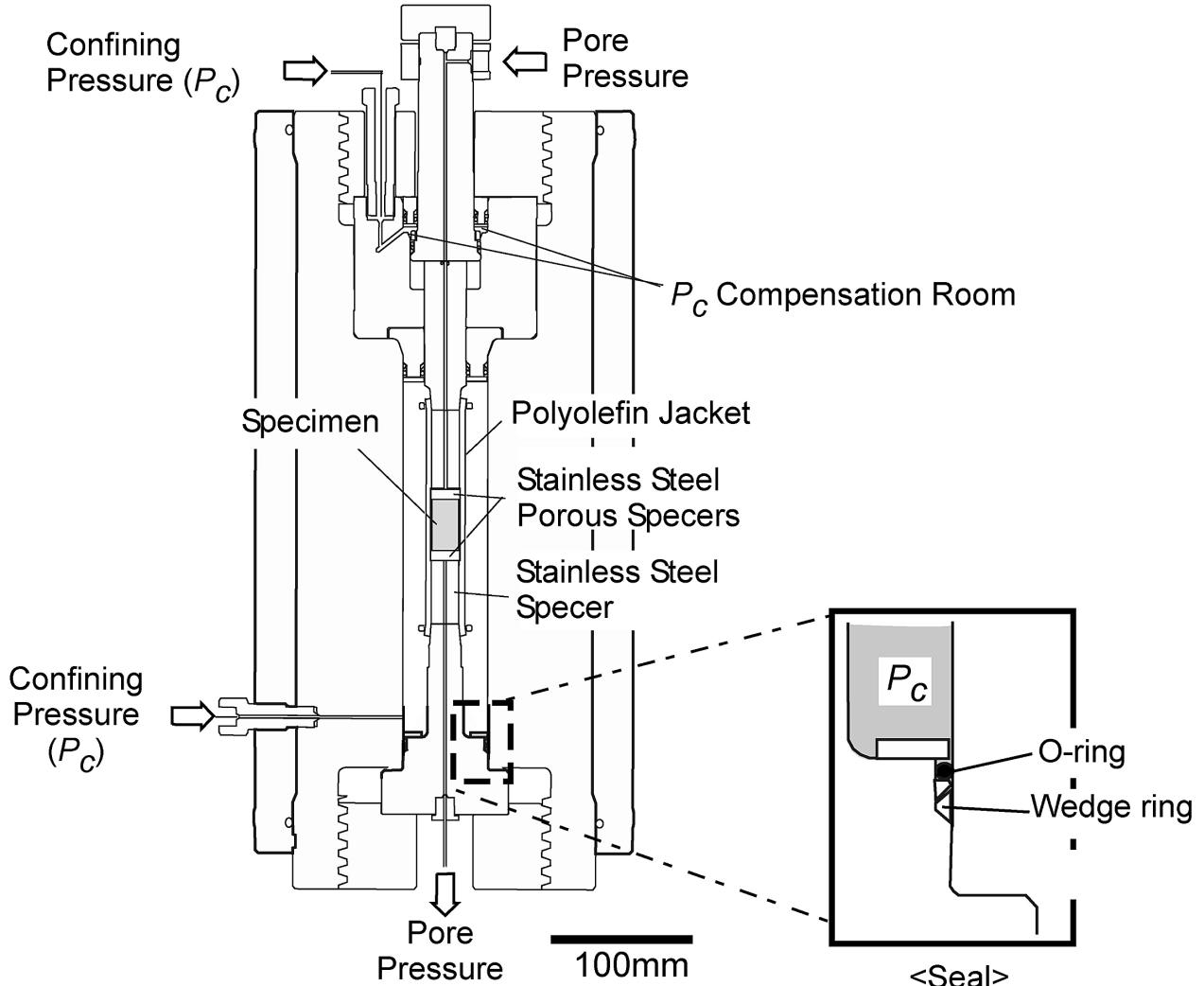


Fig. 10 Pressure vessel with sample assembly. Gas pressure inlet from the upper side of the vessel leads pressurized gas to the compensator room. O-ring and wedge-ring seals are used on the plugs.

補償室内部の容積は同じ量だけ増加するので、変形実験時に封圧の変化は自動的に小さく抑えられることになる。このように、補償室はヨークフレーム (Tullis and Tullis, 1986) の役割を果たしているのである。なお、補償室を設けることで、載荷用ラインには3つのOリングシールを使うことになり、当然ピストンがシールから受ける摩擦力は大きくなる。このため、補償機構を組み込む場合には、荷重は基本的には圧力容器内部で測るようにするべきである。

高圧ガス媒体のシール部分は基本的に、Oリングと、ピーク材製のウェッジリングで構成される (Fig. 10)。ウェッジリングは低圧部側 (Fig. 10右図中では下側) がくさび状 (テーパー) に加工されており、そのため高圧側から力を受けることによってこのくさび状の部分が隙間に押し込められ、その結果シール効果が増す。

## 2. 加圧システム

ガスは圧縮率が高いため、固体圧・液圧式に比べ昇圧機構に工夫が必要となる。本試験機の加圧システムは、加圧機 (Fig. 9の4), 増圧機 (Fig. 9の5) の2つからなり、それぞれを昇圧初期の低圧段階・高圧段階で使い分けることによって、効率よく昇圧することができる。

Fig. 11に一連の昇圧の手順と、増圧の過程を示した。まず、バルブ1と2の両方が開放の状態で、加圧機を用いて100 MPa程度まで高圧室を加圧する。加圧器内部、高圧部分の最大容積は $1.36 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  (1.36 l) であり、増圧比、即ち低圧側 (下部) と高圧側 (上部) のピストン断面積の比は2.47である。この加圧機は、ピストンが自動的に上下することで継続的に加圧をおこなう機構を備えている。加圧機高圧部の前後のガス配管には逆止弁が設置されているため、ピストンが下がって加圧機高圧部の圧が下がっても、システム側から加圧機にガスが流れてシステム側のガス圧は下

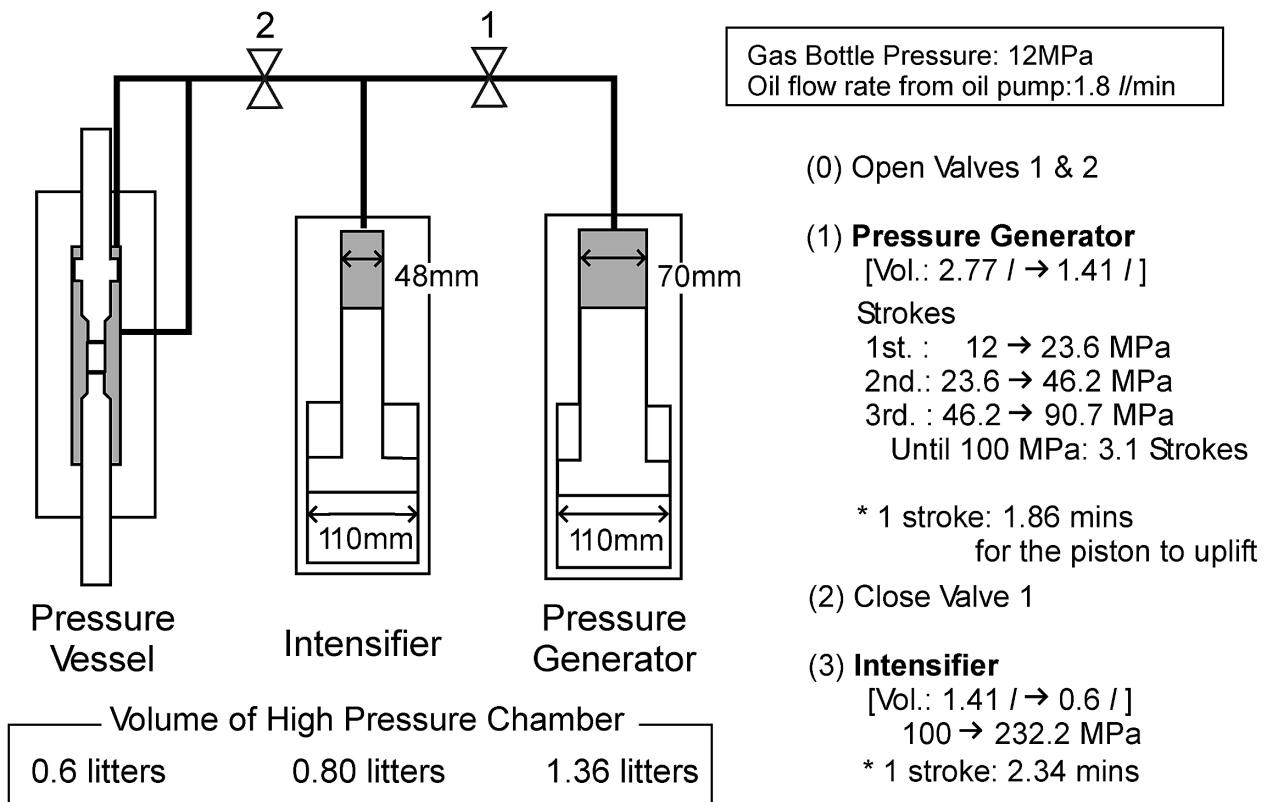


Fig. 11 Pressurization steps for confining pressure. Gas pressure of a commercially available gas bottle, about 12 MPa at the maximum, is used as an initial pressure for the pressurizing process. The pressure generator is used for the steps up to about 100 MPa and then the intensifier is used to raise the pressure up to 200 MPa.

がるということは起こらない。初期圧（ポンベ内のガス圧）が12 MPaの場合、100 MPaに達するのに3ストローク余りを必要とする。この間、ピストンが上昇するのに要する時間は約6分程度である。100 MPaからさらに加圧する際はバルブ1を閉め、増圧機を用いて加圧を続ける。増圧機の増圧比は5.25と加圧機のものより高く設計されている。増圧機を用いると、1ストロークで232 MPaまで加圧することが可能であり、昇圧に必要な時間は3分程度である。加圧器、増圧器の下部に油を送り込む油圧ポンプのモーターには、インバーターを利用した回転速度調整機能を付加しており、これにより、封圧の微調整が可能である。ピストンの動きが早く圧力変化が急激な場合、断熱体積変化によって発生した熱の移動によりガスの温度が変化するため、ピストンが停止した後も圧力が変化する。この変化を小さくするために、目的の圧に近づいたときにピストンの速度を緩めるといった工夫もこのインバーターを用いることで可能となる。

### 3. 安全装置

この加圧システムには、操作ミスやバルブ・逆止弁の故障によって配管内の各箇所での許容範囲を超えた昇圧が発生したときに備えて、3箇所にラプチャーディスク (Fig. 9のRD 1, 2, 3, 4), 2箇所にばね式

の安全弁 (Fig. 9のSP 1, 2) が設置されている。ラプチャーディスクは設定された圧力に達するとディスク自体が破裂することでガスをシステム外に逃がし、ばね式リリース弁は設定圧力を超えると、弁がばね力に抗って押し開かれ、ガスがリリースされる仕組みになっている。

### 4. 間隙圧発生制御装置

間隙圧発生制御装置 (Fig. 9の6) の高圧部の内径は30 mm、ストロークは $220 \pm 220$  mmであり、最大容積は $3.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  (0.311) である。この装置のピストン下部は油圧サーボポンプに接続されている。このサーボ機構によって、高速 (200 Hz) かつ多彩なパターンで間隙圧力を制御することができる。この機能によって、例えば間隙圧振動法 (後述) などといった多様な浸透試験が可能になっている。また、配管ラインのバルブの開閉設定により (Fig. 9のバルブbを開じてaを開ける)，本圧力制御装置を封圧の制御に使用することも可能である。これをを利用して封圧を制御した場合には、例えば垂直応力一定条件下での摩擦実験や、平均応力一定条件下での三軸変形試験など可能となる。

本システムでは、間隙圧を調節する機能として、手動ハンドル式の間隙圧発生制御機能を備えている

(Fig. 9 の 9). シリンダ内にハンドルでネジ式ピストンを出し入れすることによって高圧部の体積を変化させ、間隙圧を手動で微調整するというものである。ハンドル 1 回転あたりの体積変化は  $130 \text{ mm}^3$  ( $0.13 \text{ cc}$ ) であり、1 ストロークでハンドルは約 84.5 回転する。この間隙圧調整システムを利用すると、例えば封圧変化にともなう間隙圧の変化を、変化前の値に戻すように操作した際のハンドル回転数から、試料の間隙体積の変化を計測することが可能である。

## 5. フレーム剛性

本試験システムでは、フレーム中央部横板付近に設置された油圧シリンダにより試料アセンブリを圧力容器と共に持ち上げて、それらをフレーム上部天板に押し付けることで軸力を載荷している（本誌図解、Fig. 8c (Sone et al., 2006)）。荷重変換器は圧力容器の外側直下に位置し、変位は油圧シリンダ内のピストンの変位を計測している。このため、計測される変位記録は、試料の軸方向長さの変化量だけでなく、試験システムの変形も含んでいる。したがって、試験時における試料の変形量を評価するためには、試験機システムの剛性を把握し、変位記録から、試験機変形分を差し引く補正を施すことが必要である。

Fig. 12 は試験機システムをばねと剛体要素の集合体で模式的に表した図である。「Loading」と記した空白部分（ギャップ）は、本試験システムでは軸載荷用の油圧シリンダーへの油の流入に相当する。Fig. 12a は Fig. 12b のように書き換えることができて、結局、通常の載荷時においては、変位計は、油圧シリンダー内のピストンから上部に直列でつながるバネ要素

(Fig. 12b の A より上部；フレーム、ピストン、試料、荷重変換器) の変形を測定することになる。したがって、Fig. 12b の  $K_{loading frame}$  がわかれば、測定される軸荷重と軸変位の記録から、試料の軸方向変形量を求めることが可能となる。この  $K_{loading frame}$  は、試料部分のヤング率が既知であれば求められる。ここでは、試料として円柱状のステンレス鋼を用いて軸荷重を載荷した際の、計測された変位と荷重の関係から  $K_{loading frame}$  を求めている。Fig. 13 に校正実験結果を示す。この結果では、ステンレス試料（ヤング率  $200 \text{ GPa}$ ）の短縮量分を、計測された全体の変位量から差し引いている。この結果から、封圧によって若干のばらつきはあるが、 $K_{loading frame}$  はおよそ  $1.5 \times 10^8 \text{ N/m}$  ( $150 \text{ kN/mm}$ ) 程度であることがわかる。

ここで、この  $K_{loading frame}$  の値は、試料の破壊や摩擦挙動などの安定性の解析には使えないという点に注意する必要がある。そのような解析のためには、載荷アクチュエータ内の油の圧縮性 (Fig. 12b の  $K_{12}$ ) や、サーボシステムの応答性が見かけ上の剛性に与える影響などを詳しく解析して、試験機システム全体の剛性を評価する必要がある。

## 6. 浸透率の測定

間隙圧媒体としては気体または水を使用することを想定している。浸透率の測定法としては、(1)定差圧流量法、(2)定流量法、(3)間隙圧パルス減衰法、(4)間隙圧振動法などが可能である（堤ほか、2003）。

定差圧流量法では、フロート式流量計システム (Fig. 9 の 11) を間隙圧配管の下流部に接続し、流量を測定する。ここで用いている流量計システムは測定範囲の異なる 5 種類のフロート式ガス流量計からなり、これらの流量計を使い分けることによって約  $1 \text{ ml/min}$  から  $30 \text{ l/min}$  までの流量を測定することができる。精度は、それぞれのフルスケールの 1% である。しかしながら、試料の浸透率がある程度大きい場合システム内の圧力欠損の影響が無視できなくなり、結果的に測定浸透率値に上限が生じる。間隙流体配線の内径よりも大きな内径を持つ真鍮試料について本手法を用いたところ、見かけ上  $10^{-13} \text{ m}^2$  程度の浸透率が得られた。したがって、この程度の値が浸透率測定値の実質的な上限であると考えられる。

間隙圧振動法を用いる場合には、間隙圧発生制御装置で上流側の間隙圧を振動させ、それに対する下流側での応答を圧力計 (Fig. 9 の PT 4) で計測する。その応答性、すなわち上流側と下流側の圧力振動の振幅比と位相のずれから試料の浸透率と貯留係数を求めることになる。この手法については、例えば Kranz et al. (1990) や Fischer and Paterson (1992) において詳しく説明されている。間隙圧振動法においては、浸透率によって測定に適した周波数の領域が存在し、一般に浸透率が低いほど適切な周波数領域は低くなる。本試

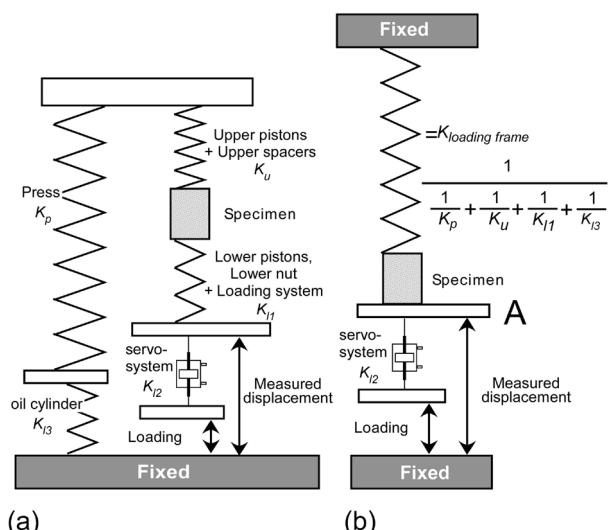


Fig. 12 (a) Schematic diagram and (b) its interpretation for the stiffness of the gas apparatus. Measured displacement is the sum of the deformation of a sample and the loading frame  $K_{loading frame}$ , which includes the press, pistons and some metal parts of the oil-cylinder.

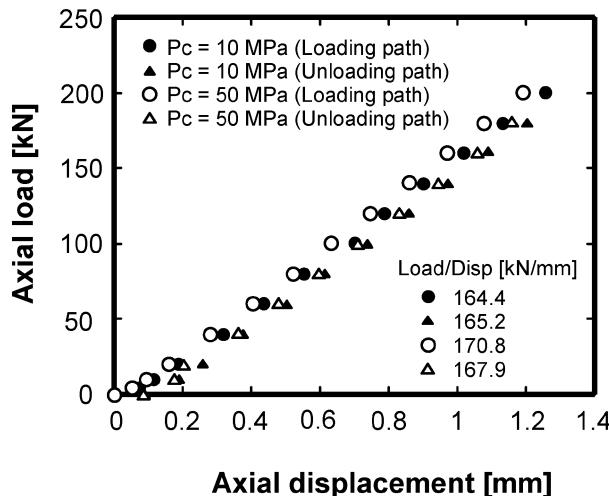


Fig. 13 Measured axial load as a function of measured axial displacement during loading cycles in a stiffness measurement. Stainless-steel was used as a sample in the test and the deformation of the sample has been subtracted from the measured displacement records for the plot.

試験機の間隙圧発生制御装置では  $10^{-3}$  から約 10 Hz の周波数領域での振動が可能である。下流側の圧力応答性は下流側の容積に依存し、容積が低いほどその感度は良くなる。そのため、浸透率の測定値下限界を下げるため、配管内にワイヤを入れるなどして下流部容積を減らすよう工夫をしている。逆に、測定値の上限を上げるために、バルブ (Fig. 9 の g) を開放して、別途用意した下流タンクを配管に接続することによって下流側の容積を増やすこともできる。本試験機における浸透率の測定値下限は、測定試料の大きさ（断面積と長さ）にもよるが、 $10^{-20}$  から  $10^{-21} \text{ m}^2$  程度のオーダーの値を測定可能である。間隙圧振動法では高速フーリエ変換 (FFT) によって波長と位相を決定すれば、間隙流体のリークや気温変化などによる傾動的なバイアスを除去できるので、浸透率の低い岩石でも精密に測定できる。

(上原・廣瀬・溝口・堤)

### 容器内変形透水試験機

本試験機は本体を 2002 年 1 月に製作し ((株) エス・イー IVDR-2002L 型), 2004 年から 2006 年にかけて、(株) マルイ製の軸力及び封圧用サーボシステムをつけ加えたものである。装置の模式図と全体及び計測部のシステム図を Fig. 14 に示す。通常の三軸試験機は、圧力容器、載荷プレス、油圧シリンダーなどの載荷システムから構成されるが、本試験機ではこれらの機能が全て圧力容器の内部に組み込まれていることが最大の特徴である。すなわち、圧力容器そのものが載荷プレスの役割をも果たし、容器下部に設けられた

加圧室とピストンを用いて変形用の軸荷重載荷をおこなう仕組みになっている (嶋本, 2003)。本試験機では圧媒体として油を用いており、最大封圧は 500 MPa であるが、しばらくは 200 MPa 以下で運転している。間隙流体は、水 (100 MPa 以下) またはガス (2.5 MPa 以下) が使用可能である。サンプル径は 20 mm, サンプル長は 50 mm 以下である。

三軸試験機をこのような構成とすることで、システム全体がコンパクトになり、小型環境槽内部に試験機を設置することが可能となった。後述のように、本試験機には水とガスに対応した浸透率、間隙率測定システムが接続されており、いくつかの手法で流体移動の性質に関する実験をおこなうことが可能である。浸透率の測定が長時間にわたる場合には測定システムの温度制御がデータ精度向上のための重要な課題であるが、本試験機システムにおいては、試験機全体が、温度制御された環境槽内部に設置されているため、装置の温度変化を 1°C 以下程度に抑えることができ、測定精度の向上を期待できる。

### 1. 圧力容器

本試験機の圧力容器は析出硬化系ステンレスである SUS630 から作っており、長さは 655 mm、外径は 200 mm、試料部の内径は 50 mm (肉厚は 75 mm) である。この材料はステンレスでは高級材料であり、高圧ガス保安協会から高圧ガス用機器に使用できる材料にも認定されている。耐水性に優れるが、高価で加工が難しいのが難点である。この材料の常温での降伏強度は 1,000～1,180 MPa、引っ張り強度は 1,070～1,310 MPa である (実際の値は焼き入れによって変わる)。降伏応力としてほぼ中央の値を用いてガス圧用圧力容器と同様な計算をすると、封圧が 515 MPa の時に圧力容器の内壁が降伏を始め、封圧が 1,530 MPa に達すると圧力容器全体が降伏することになる。内壁が降伏するとたちに容器が破裂するわけではないので、この容器には 500 MPa 用の圧力計をとりつけている (ミネベア製)。

封圧は手動オイルポンプ (最大油圧 70 MPa) またはサーボシステム (最大油圧 20 MPa: 詳細については後述) を用いて加圧と圧力調整をおこなう (切替可能)。どちらも単独で高封圧まで昇圧する機能をもっていないため、圧力容器と封圧ラインの間に加圧器を設置して増圧している (Fig. 14)。軸荷重は、載荷時の下部ピストンの歪をピストン内部に埋め込んだ変位計 (LVDT; Fig. 14 の 6) で測定し、あらかじめおこなった較正にもとづき、その歪を荷重に変換することによって測定している。変位は外部変位計 (歪ゲージ式, Fig. 14 の 10) を用いて計測している。

### 2. サーボ制御システム

本試験機のサーボ制御システム (Fig. 14) では、封圧制御と載荷制御をそれぞれ独立しておこなうことが

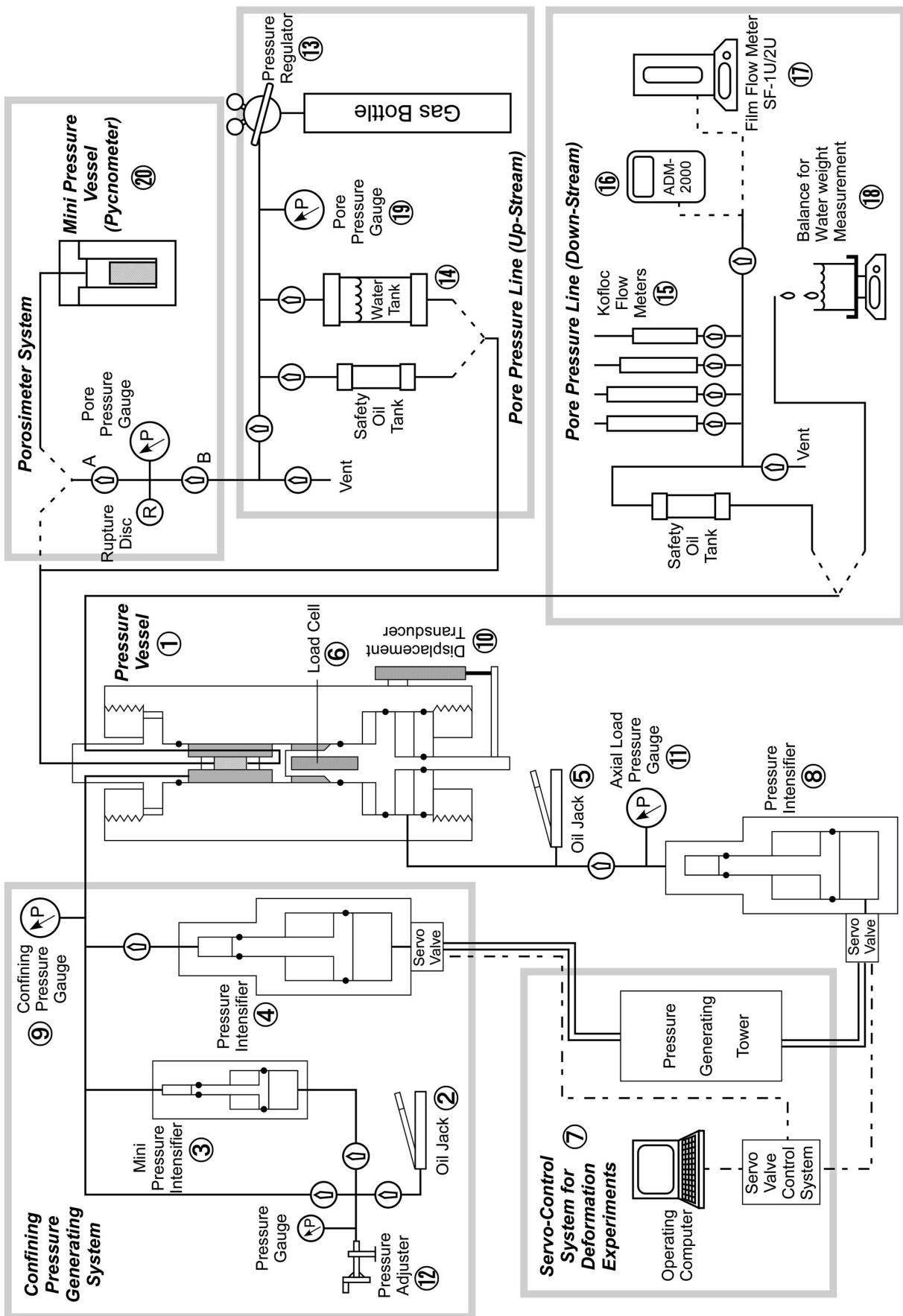


Fig. 14 Outline of the intra-vessel deformation fluid-flow apparatus. Note that load frame and load actuating system are both assembled as a part of the pressure vessel; axial load is applied by the lower moving piston and the vessel cylinder and the nuts on both sides of the cylinder support the axial load.

できる。本サーボ制御装置は最大 20 MPa の油圧までしか制御できないため、封圧ライン及び載荷ラインに加圧器（ピストン径上側 60 mm, 下側 120 mm, 増圧比 4; Fig. 14 の 4 と 8) を挟むことにより、間接的に大きな油圧を制御している。

封圧の制御においては、圧力変換器の電圧出力を制御信号として使って、(1)封圧一定条件、及び(2)一定速度での増圧・減圧といった制御が可能である。載荷制御方式では、外部変位計出力を制御信号として(1)変位一定、及び(2)変位速度一定の条件での実験が可能となっている。さらに荷重変換機として利用している変位計 (LVDT) 出力、もしくは載荷油圧ラインに接続している圧力変換器の出力を制御信号として、(1)荷重一定、または(2)載荷圧速度一定といった条件下での実験もおこなうことができる。

本試験機を設計した時の単純なミスは、圧力容器下側の載荷部を作るときに、油圧ポンプで発生できる最大 70 MPa の油圧を想定したことである。通常のサーボポンプは 20 MPa が加圧限界なので、軸荷重をサーボ制御するために、Fig. 14 の 8 で示したサーボ式加圧器を余分に作ることになった。これによって余分な経費が必要になったばかりか、軸荷重が載荷側のみの制御になってしまい、応答性も低下することになった。つまり、本来は載荷装置の載荷側と除荷側にサーボ弁を使って油を送り込むのであるが、現状では圧力発生器で載荷側にしか油を送ることができない。除荷は圧力容器内の軸荷重を使って押し戻すことになっているのである。サーボ式の容器内試験機を作るときには、より大きい受圧面積をもつ圧力容器を作り、変形実験用のより高圧用の圧力容器と接続する必要がある。容器が 2 つに分かれるデメリットはあるが、予算が不足した場合には、まず圧力容器 (Fig. 14 の圧力容器の上側) を作って封圧下での測定をおこない、後で載荷用のシリンダーを作つて両者を連結できるメリットもある。ガス圧式試験機を含めて、同様な試験機を考えている人には、覚えていてほしい単純なミスである。

サーボ制御がその威力を發揮するのは、プレカットした模擬断層を滑らす実験や、試料に貼り付けた歪ゲージを制御信号として実験をおこなう場合であろう。前者は岩石を滑らせている間、断層面にかかる垂直応力と剪断応力を常に一定に制御するように命令を与える。一方、後者は土質力学の分野で一般的に行われている一軸圧密実験（変形中の側方歪が常に 0 になるように封圧を制御）を圧力容器内でおこなう場合にあたる。

### 3. 間隙圧発生システム

間隙流体に気体を使う場合は、市販されているガスボンベを圧力調整器で 2.5 MPa 以下に減圧して使用している。間隙流体に水などの液体を用いる場合に

は、貯水タンク（耐圧 8 MPa, Fig. 14 の 14) 中の液体をガスの圧力（最大 2.5 MPa）を用いて加圧する方式を採用している。さらに、水を利用する場合には、間隙圧ラインを高圧用に切り換え、手動ハンドル式の加圧調整器を用いることで、最大 100 MPa までの間隙圧を加えることができる。

### 4. 浸透率測定法

本試験機で可能な浸透率測定法は、定差圧流量法、間隙圧パルス減衰法である。定差圧流量法を用いたガス流量法を用いる場合には、測定条件（ガスの種類、流量のレンジ）に応じて流量計を使い分けている。フロート式流量計 (Fig. 14 の 15, Koflok, RK1450) では微少流量から大流量までのレンジ (1~5,000 ml/min) をカバーすることができる。しかし、測定可能な気体種は窒素とアルゴンガスに限られている。ダイアフラム式流量計 (Fig. 14 の 16, Aglient, ADM 2000) と膜流量計 (Fig. 14 の 17, 堀場エステック, SF-1U/2U) では、さらに微少な流量を測定することが可能であり、それぞれの流量レンジは 0.1~1,000 ml/min, 0.2~100 ml/min である。後者 2 つの流量計の特徴として、パソコンとリンクさせてリアルタイムでモニターすることができる点や、腐食性・可燃性ではないほとんどのガスに対して使用することができる点があげられる。液体を間隙流体として利用する場合には、試料を通過してきた液体の質量を電子天秤 (Fig. 14 の 18) により連続的に計測し、時間で割ることにより流量を求めている。

定差圧流量法による実験において浸透率 [ $m^2$ ] は、サンプルの断面積 [ $m^2$ ], サンプル端面間の間隙圧勾配 [Pa/m], 流体の流量 [ $m^3/s$ ], 及び間隙流体の粘性率 [Pa·s] により算出される。サンプルの最大・最小寸法、間隙圧の加圧能力、及び流量計の測定レンジなどを考慮すると、気体と水を駆使することにより（両者は粘性係数が約 2 衍違う）、浸透率がおよそ  $10^{-12}$  ~  $10^{-20} m^2$  のサンプルを測定することが可能である。各測定機器（ノギス、圧力計、流量計）の精度（各 1% 以内）を考慮すると、浸透率の測定誤差は測定値の 5% 以内には抑えられているものと考えられる。

しかしこれはサンプルを除いた間隙圧ライン内で、流体の流れによる間隙圧勾配の損失が無視出来るほど小さい場合である。即ち、特に浸透率が高いサンプルの測定において流量が大きい場合、サンプル端面間の圧力差は厳密には、圧力計に表示される値よりもわずかに低い圧力となることが予想される。複雑に配線された間隙圧ラインによる圧力損失を厳密に計算することは容易では無いが、現在のところ、気体を利用した測定で流量が約 1,000 ml/min を越えると、上記の影響が結果に支障をきたし始めることが確認されている。よって現実的には、測定し得る浸透率の上限は  $10^{-14} m^2$  付近となる。今後より詳細な検討を行い、高

流量時には損失分の圧力勾配を差し引く補正を加える必要がある。浸透率がこれ以上になると、水を用いた流量法を使用することができる。

### 5. 間隙率測定法

間隙率測定においては、試料の寸法を計測した後、ピクノメーターで鉱物部分だけの体積をまず求める。測定方法は気相置換法を用いる。この基本原理はボイルの法則に基づき、圧力と体積の関係から鉱物部分の体積を算出するというものである (Fig. 15)。具体的な手順としては、既知の体積を持つ、バルブにより二分された部屋の中に試料を入れ、サンプル側には大気圧、他方には圧縮したガスを充填する。そして再び二つの空間を結合する。圧力変化が無くなり平衡状態に達したら、測定終了となる。バルブを開放して二つの部屋を結合すれば、圧力は、試料の体積に応じた値へと落ち着く。本システムによる気相置換法の特性は、置換媒体が気体である事と、間隙圧が平衡状態に達するまで無限に待てることである。鉱物部分の体積測定後は試料をピストンにセットし、圧力容器内に挿入する。目的の封圧を加えた後、気相置換法を用いたピクノメーターと同様の原理で間隙体積を求め、その値と試料体積（鉱物体積+間隙体積）の比から間隙率を求ることになる。

間隙率の測定に用いられる気相置換法において最も大切なことは、測定する鉱物・間隙体積に合わせて、サンプル室と置換流体を圧縮・貯留する部屋（以下、気体圧縮室と呼ぶ）の体積を最適化することである。気相置換法において実際に測定されるのは気体圧であるため、当然、圧力の読み取り解像度を高めることも精度向上には重要である。しかし各部屋（サンプル室・気体）の容器内体積が適当でなければ、測定機器の能力がフルに発揮されない。本試験機で用いられるサンプルの最大・最小寸法を考慮すると、現実的に想定される鉱物、間隙体積はそれぞれおおよそ 2~20 ml, 0.1~5 ml の範囲内と考えられる (Fig. 16)。これを受け、気相置換法に用いられる気体圧縮室に相当する間隙流体ライン (Fig. 14 のバルブ A と B の間) は数 ml に調節されており、また極小型圧力容器（ピクノメータ）の容積は 9~22 ml の間で変化させられるように設計してある。このようなシステムで、歪ゲージ式圧力計の電圧出力を有効数字 5 桁で測ることにより、鉱物・間隙体積とともに 0.05% 以下の高い測定感度が実現されている。同一サンプルの繰り返し測定から、最終的に鉱物・間隙体積の測定誤差は 0.1% 以内と確認されている。

一方で、上記の見積もりは、気相置換法の基となるボイルの法則の前提として、温度が一定であることを忘れてはならない。本測定システムは高感度であるがゆえに、温度変化の影響を如実に受け、システム全体の温度を安定に保つ努力を要する。測定システムの大

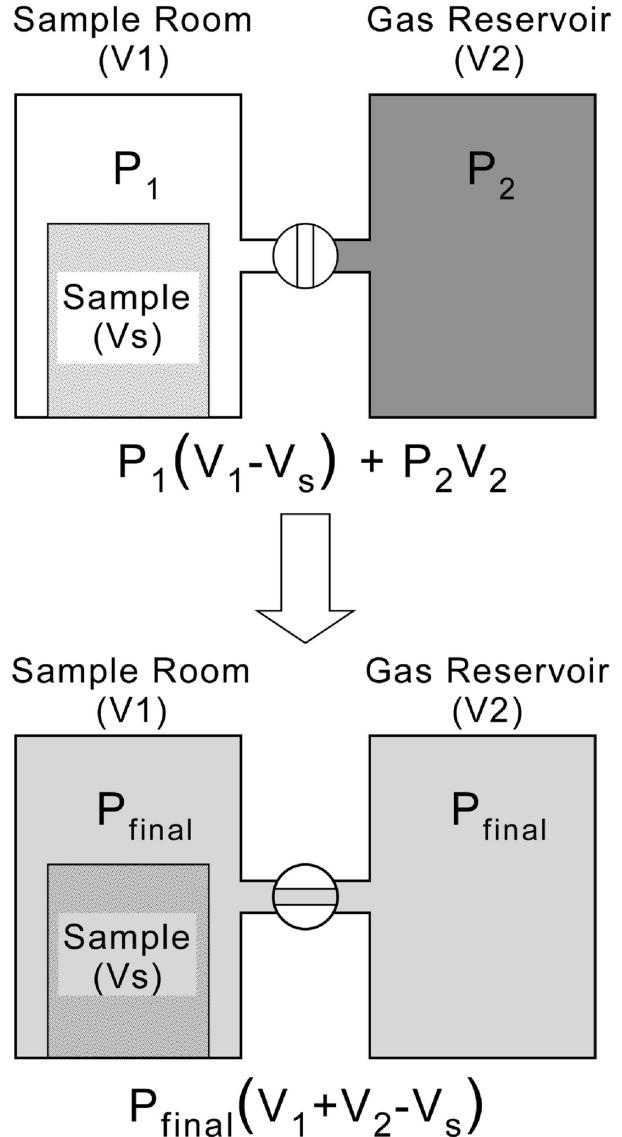
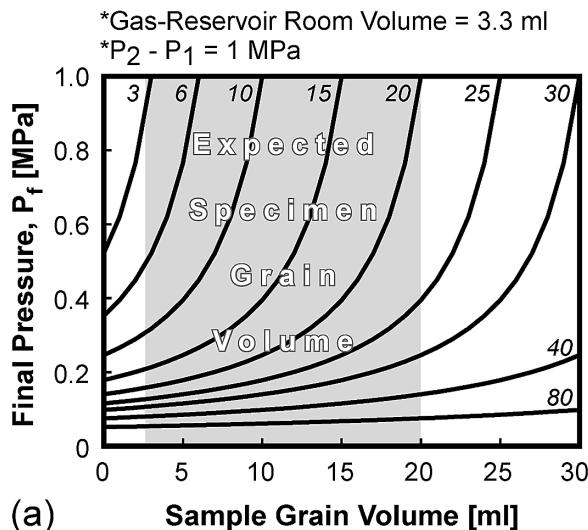
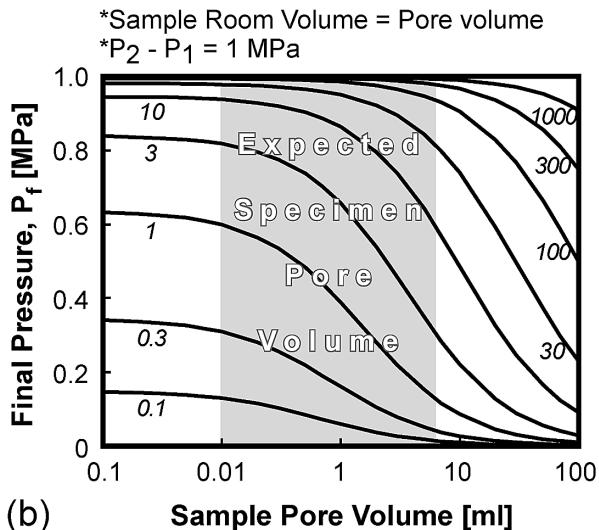


Fig. 15 Schematic diagram showing procedures in a volume measurement by gas pycnometer method. Standard process for the measurement is as follows; Firstly, open all of the valve and vents of the system to depressurize both reservoirs so that the gage-pressure inside the reservoirs become zero. Input sample to the sample room and close the valve between the reservoirs and pressurize the gas reservoir. Next open the valve to equilibrate the pressure of the system. Since the initial volume of the reservoirs are known, volume of the sample can be calculated from the pressure record. In this system, three volume-calibrated spacers are used to adjust the internal volume of the pycnometer, so that the maximum resolution is obtained for each measurement.

部分は環境槽内に収められているものの、数日間に及ぶ圧力測定を行なうと、温度変動に起因すると思われる一日サイクルで数%の間隙圧の変動が観測される。即ち、浸透率が低く、バルブ開放後の圧力が安定するのに時間がかかるサンプルについては、測定誤差は数%に膨れ上がることになる。現在、封圧及び軸荷重系統のサーボ制御システムを組むことで、変形実験時の



(a) Sample Grain Volume [ml]



(b) Sample Pore Volume [ml]

Fig. 16 (a) Comparing resolutions of grain volume measurements with different sample room volume (internal volume of pycnometer). (b) Comparing resolutions of pore volume measurements with different gas-reservoir room volume. Curves show the relationship between final pressure and sample grain/pore volume. Each curve represents the relation when (a) the sample room volume, in ml, is equivalent to the adjacent italic numbers, (b) the gas reservoir room volume, in ml, is equivalent to the adjacent italic numbers. The slopes of the curves represent the volume sensitivity of the final pressure, so the resolution of each volume measurements is higher when the slope is steeper. Values expected for sample grain and pore volumes fall in between 2-20 ml and 0.01-5 ml, respectively. Thus the optimum sample room volume and gas reservoir room volume for these situations become approximately 10-20 ml and 1-5 ml, respectively.

封圧保持、載荷速度の制御など、より多様なタイプの実験をおこなうことができるよう改良を加えているところである。

(相澤・谷川・曾根・堤)

### あとがき

本格的な実験的研究は、日本の構造地質学の分野ではまだ育っているとは言えない。とくに、若い人たちの間で関心が薄い、もっと正確には関心はあるのだろうけども自分でやろうとはしないことが、大変気なることである。構造地質学をやる人が減っているためとも思わない。1995年兵庫県南部地震の後には断層岩への関心が高まり、構造地質学と地震学の分野の研究者の交流が深まった。最近では、次世代の掘削船「ちきゅう」の建造とIODP（統合国際深海掘削計画）の発足にともなって、付加体中の断層と沈み込み帯の地震への関心が急速に高まっている。この数年間の地球惑星科学関連同学会、今年から始まる日本地球惑星科学連合大会においても、学会期間ほとんど毎日「断層と地震」、「変形と流体移動」などに関連した一連の学際的セッションが開かれている。多くの地質学、構造地質学の関係者が学際的セッションで発表をしていて、それ自体は大変喜ばしい状況である。しかし、全体としてみると、地質関係者の研究は野外調査、組織解析、物質解析に著しく偏重しているという印象をもつ。それらが重要であることは言うまでもないが、物質・組織解析だけで大きな目標として掲げられている

「地震の発生機構の解明」はできないことも明白である。よく宣伝されるIODPの震源域掘削計画においても、地震発生帯の掘削からどのような道筋で沈み込み帯の地震の発生機構を解明するかが具体的に説明されていない。断層物質から断層の性質を決め、その性質を使って断層・プレート境界の挙動を解かない限り地震の発生機構はわからないと思うけども、断層の性質を決めるための実験的研究の重要性が強調されることはほとんどない。IODPで深部掘削コアを1m採取するには500万円の経費がかかると聞いたことがあるが、これは簡単な試験機が作れる金額である。実験的研究が学界全体として育っていないことが、総合的プロジェクトのバランスを欠く大きな要因になっている。

本稿の第一著者（嶋本）は、構造地質学の発展のためにはフィールド・実験・理論のバランスのとれた研究が不可欠と考えて、とくに実験的研究を広めることに微力を注いできた。京都大学では変形透水試験機の設計の講義と実習を過去7年間カリキュラムに含め、学外者を対象に設計セミナーを7回開いてきた（4回は英語で外国人を対象）。研究室の学生の人たちには講義を2~3回受講してもらい、最後は実習のTAをやってもらってひと通りの訓練を終えることになっている。それぞれの講義の最後には、設計の発表会を開いている。回を重ねるごとに、また実験の経験を積むごとに図面は顕著に改善していく。その後、学振の研究員とか助手になった人々は、自分の科研費を使って自分で設計した小さな実験システムを作っている。

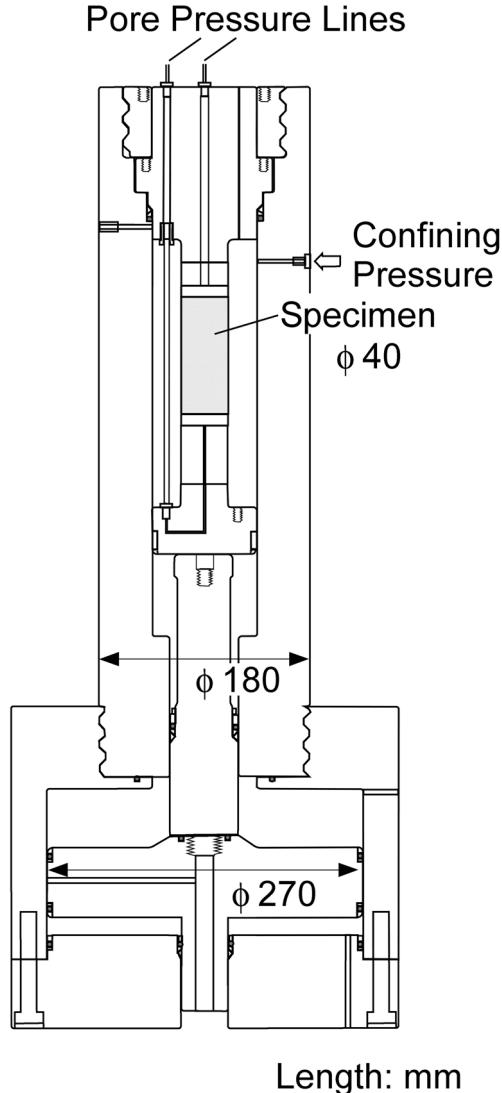


Fig. 17 Schematic diagram of an intra-vessel deformation and fluid flow apparatus. The design is almost the same as the intra-vessel deformation fluid-flow apparatus in Fig. 14. In this apparatus, actuator is connected to the vessel at the bottom with a screw. Cross sectional area of the plate inside the actuator is designed larger than that of the actuator shown in Fig. 14 to create a higher axial loading ability for this apparatus.

Fig. 17 は、本稿著者の一人である上原真一が製作中の油圧サーボ式複容器内変形透水試験機の図面である。Fig. 14 の容器内試験機は載荷装置の受圧面積が小さくて、最大油圧が 20 MPa しか出せないサーボポンプでは、高圧下での変形試験に必要な荷重が発生できなかった。Fig. 14 ではこの欠点をおぎない、かつ岩石中の破断面が水理学的性質に与える影響を調べるために、大きい試料が使えるように変えてある。容器を 2 つ連結する方式であれば、軸力と封圧にサーボ制御方式を採用するとしても、1,000 万円前後で試験機を作ることが可能である（科研費の基盤研究（B）で製作可能）。本文中で述べたように、圧力容器と試料部を変

更し、ガスの圧縮装置を作れば、同じ方式でガス圧式高温高圧変形試験機作ることができる。「こんな簡単なもの……」と思ってもらえば、著者としては望外の幸運、試験機は単純なほどよいのだ。

第一著者は、常日頃から、フィールドをしっかりとやっている人こそ優れた実験屋になれると話している。その人たちには「答え」を知っているからである。実験だけをやると、よく知られた問題を繰り返し取り上げることになりがちで、自然の観察からくる新鮮な動機をもちにくい。優れたフィールド・ワークをやっている研究室の人たちは、「これが自分たちの強いところだからこれで勝負する」という判断が根底にあるように感じる。これはもっともな考え方ではあるが、実験・理論的研究を導入することで、研究は質的な発展をとげるものである。指導者の方々には、学問分野のバランスを考え、「自分を手伝う者ではなくて、自分をおぎなう人」を採用してほしいと思う。本稿で紹介した試験機は、数年内に、フィールドができる研究室に移管し、広く活用してもらえることを心から願っている。また、フィールドで問題にぶつかった若い人たちは、どのような形であれ、装置を使いにぜひ京都におこし下さい。

（嶋本）

## 謝 辞

本稿は第一著者（嶋本）が多忙で時間がとれないために、堤を中心、各装置を使ってきた人たちが急遽まとめたものである。編集担当の清水以知子氏と石井和彦氏が締め切りを延ばし、非査読論説扱いにして下さったおかげで本稿は救われた。また、清水氏は短時間で原稿を詳しく読んで改善点を指摘して下さった。お二人には心から感謝の意を表したい。また、高温二軸摩擦試験機、高速摩擦試験機と容器内変形透水試験機のサーボシステムを作って下さった〔株〕マルイ（とくに中其 毅氏、山村 敦氏、細川健治氏（退職））、高速応答サーボ式載荷装置と間隙圧制御装置を製作して下さった〔株〕鷺宮製作所（とくに宇野 博氏（退職）、山田雅夫氏、新山恒夫氏）、我が国初の本格的なガス圧式試験機の開発に挑戦して下さった〔株〕エス・イー（とくに井料兼一氏（現〔有〕プレテック））の方々には、多大な時間をさいて貧しい研究者の夢を実現して下さった。お礼の言葉が見つからないほど、感謝の気持ちでいっぱいである。最後に、試験機の開発と製作を支援し、容器内試験機以外の全ての試験機の京都大学への移管を認めていただいた地震研究所に心からお礼を申し上げたい。

## 文 献

- Dieterich, J.H., 1979, Modeling of rock friction, 1. Experimental results and constitutive equations. *Jour. Geophys. Res.*, **84**, 2161–2168.
- Dieterich, J.H., 1981, Constitutive properties of faults with simulated gouge. In Carter, N.L., Friedman, M., Logan, J.L. and Stearns, D., eds., *Mechanical Behavior of crustal rocks*, *Geophys. Monogr.*, **24**, AGU, Washington, D.C., 103–120.
- Fischer, G.J. and Paterson, M.S., 1992, Measurement of permeability and storage capacity in rocks during deformation at high temperature and pressure. In Evans, B. and Wong, T.F., eds., *Fault mechanics and transport properties of rocks*, Academic Press, 213–252.
- Hirose, T. and Shimamoto, T., 2005, Slip-weakening distance of faults during frictional melting as inferred from experimental and natural pseudotachylites. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **95**, 1666–1673, doi 10.1785/0120040131.
- Kranz, R.L., Saltzman, J.S. and Blacic, J.D., 1990, Hydraulic diffusivity measurements on laboratory rock samples using an oscillating pore pressure method. *Int. Jour. Rock Mech., Min., Sci., Geomech., Abs.*, **27**, 345–352.
- 蒔田 董・西原正夫 編著, 1992, 高圧流体技術. 丸善, 354 p.
- 大友幸子・嶋本利彦, 1994, 高速断層運動時の断層破碎物形成過程における熱クラックの重要性: 実験的検証. 構造地質, no. 39, 135–144.
- 嶋本利彦, 2003, 容器内変形透水試験機「容子」の誕生. 日本地質学会第110年学術大会講演要旨, 115.
- 嶋本利彦・堤 昭人, 1994, 新しい回転式高速断層摩擦試験機: その基本設計と研究目的. 構造地質, no. 39, 65–78.
- 嶋本利彦・宇野 博・山田雅夫・新山恒夫・加藤宏和, 1999, 新しいガス圧式高温高圧変形・透水試験システムの開発, 日本地質学会第106回学術大会講演要旨, 72.
- Sone, H., Hirose, T., Uehara, S., Noda, H., Aizawa, Y., Mizoguchi, K., Tanikawa, W., Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 2006, Rock deformation apparatuses at Kyoto University. *Japan. Jour. Struct., Geol.*, no. 49, v–viii.
- 堤 昭人・廣瀬丈洋・溝口一生・佐藤慶治・上原真一・嶋本利彦, 2003, 間隙圧振動法及び定差圧流量法による岩石の気体浸透率測定—掛川層群シルト岩の測定例—. 資源と素材, **119**, 514–518.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 1996, Frictional properties of monzodiorite and gabbro during seismogenic fault motion. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **102**, 240–248.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 1997, High-velocity frictional properties of gabbro. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 699–702.
- Tullis, T.E. and Tullis, J., 1986, Experimental rock deformation techniques. In Hobbs, B.E. and Heard, H.C., eds., *Mineral and rock deformation: laboratory studies*, *Geophys. Monogr.*, **36**, AGU, Washington, D.C., 297–324.

## 付録：各試験機を使って得られた成果

## 高温二軸摩擦試験機

Enomoto, Y., Akai, M., Hashimoto, H., Shimamoto, T., Tsutsumi, A., Mori, S., Asabe, Y. and Sakurai, T., 1995, Studies of source mechanism for seismic electromagnetic anomalies by means of charged particle's measurements, In Fujinawa, Y., ed., *Electromagnetic field changes as a precursory phenomenon of earthquakes and volcanic eruptions*, *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, **196**, 45–60.

Enomoto, Y., Shimamoto, T., Tsutsumi, A. and Hashimoto, H., 1995, Transient electric signals prior to rock fracturing: potential use as an immediate earthquake precursor, In Hayakawa, M. and Fujinawa, Y., eds., *Phenomena Related to Earthquake Prediction*, TERRAPUB, Tokyo, 253–259.

Hiraga, S., Morimoto, A. and Shimamoto, T., 2002, Stress effect on thermoluminescence intensities of quartz grains — for the establishment of a fault dating method. *Bull. Nara Univ. Educ.*, **51**, 17–24.

平賀章三・吉本晃子・嶋本利彦, 2004, 摩擦すべりに伴う細粒石英ガウジのTL信号強度変化—剪断応力から期待される完全ゼロイング深度—. 奈良教育大学紀要, **53**, 2, 17–29.

Kawamoto, E. and Shimamoto, T., 1997, Mechanical behavior of halite and calcite shear zones from brittle to fully-plastic deformation and a revised fault model. *Proceedings of the 30th International Geological Congress, Beijing*, **14**, 89–105.

Kawamoto, E. and Shimamoto, T., 1998, The strength profile for bimineralic shear zones: an insight from high-temperature shearing ex-

- periments on calcite-halite mixtures. *Tectono-physics*, **295**, 1–14.
- 川本英子・嶋本利彦, 1994, 岩塙の高温剪断実験によるリソスフェアの強度断面の決定. 月刊地球, **12**, 778–782.
- 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.
- 回転式高速剪断摩擦試験機**
- Di Toro, G., Hirose, T., Nielsen, S., Pennacchioni, G. and Shimamoto, T., 2006, Natural and experimental evidence of melt lubrication of faults during earthquakes. *Science*, **311**, 647–649.
- 福地龍郎・溝口一生・嶋本利彦・林 愛明, 2002, ESR 解析による断層摩擦発熱温度の推定—野島断層と高速剪断実験結果を例として—. 地球(号外), no. 36, 82–89.
- Hirose, T. and Shimamoto, T., 2003, Fractal dimension of molten surfaces as a possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylytes. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 1569–1574.
- Hirose, T. and Shimamoto, T., 2005, Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. *Jour. Geophys. Res.*, **110**, B05202, doi 10.1029/2004JBO03207.
- 林 愛明・嶋本利彦, 1994, 実験的に形成されたショードタキライトの化学組成. 構造地質, no. 39, 85–101.
- Lin, A. and Shimamoto, T., 1998, Selective melting processes as inferred from experimentally generated pseudotachylytes. *Jour. Asian Earth Sci.*, **16**, 533–545.
- Nakamura, N., Hirose, T. and Borradaile, G. J., 2002, Laboratory verification of submicron magnetite production in pseudotachylytes: relevance for paleointensity studies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **201**, 13–18.
- 嶋本利彦・廣瀬丈洋・溝口一生・野田博之, 2003, 断層の高速摩擦と地震の発生過程, 現状と展望. 地学雑誌, **112**, 979–999.
- 嶋本利彦・林 愛明, 1994, 摩擦熔融は平衡熔融か, それとも非平衡熔融か? 構造地質, no. 39, 79–84.
- 嶋本利彦・林 愛明・堤 昭人・大友幸子・南 朝生, 1992, 地震の化石・ショードタキライト. 地質雑誌, **98**, XVII–XVIII.
- 堤 昭人, 1994, 高速摩擦実験によって形成したショードタキライト中の破碎岩片の粒径分布. 構造地質, no. 39, 125–133.
- Tsutsumi, A., 1999, Size distribution of clasts in experimentally produced pseudotachylytes. *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 305–312.
- 堤 昭人・嶋本利彦, 1994, 高速断層運動時に生成した岩石の摩擦熔融物の温度を測定する試み. 構造地質, no. 39, 103–114.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 1997, Temperature measurements along simulated faults during seismogenic fault motion. *Proceedings of the 30th IGC Beijing*, **5**, 223–232.
- ガス圧式高温高压三軸変形・透水試験機**
- 廣瀬丈洋・早坂康隆, 2005, 西南日本内帯先白亜系のナップ境界断層帯の内部構造と透水性—丹波帯—超丹波帯境界における解析例—. 地質雑誌, **111**, 300–307.
- 溝口一生・廣瀬丈洋・嶋本利彦, 2000, 野島断層の透水性構造—兵庫県津名郡北淡町舟木露頭の解析—. 月刊地球, **31**, 58–65.
- Noda, H. and Shimamoto, T., 2005, Thermal pressurization and slip - weakening distance of a fault : an example of the Hanaore fault, Southwest Japan. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **95**, 1224–1233, doi 10.1785/0120040089.
- 佐藤慶治・堤 昭人, 2003, 柳ヶ瀬断層の内部構造と透水性構造. 構造地質, no. 47, 49–56.
- Tsutsumi, A., Nishino, S., Mizoguchi, K., Hirose, T., Uehara, S., Sato, K., Tanikawa, W. and Shimamoto, T., 2004, Principal fault zone width and permeability of the active Neodani fault, Nobi fault system, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **379**, 93–108.
- Uehara, S. and Shimamoto, T., 2004, Gas permeability evolution of cataclasite and fault gouge in tri-axial compression and its implications for changes in permeability structures of fault during earthquake cycle. *Tectonophysics*, **378**, 3–4, 183–195.
- Uehara, S. and Shimamoto, T., Permeability of fault rocks from the Median Tectonic Line in Ohshima-mura, Nagano, Japan as studied by pressure-cycling tests, *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, in press.
- Wibberley, C. A. J. and Shimamoto, T., 2003, Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones : the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 59–78.
- Wibberley, C. A. J. and Shimamoto, T., 2005, Earthquake slip weakening and asperities explained

by thermal pressurization. *Nature*, **436**, 689–692,  
doi 10.1038.

#### 圧力容器内精密変形透水試験機

Shimamoto, T., Noda, H., Tanikawa, W., Wibberley, C.A.J. and Uehara, S., 2004, Fault-zone permeability structures and their implications for earthquake mechanisms and geo-engineering problems, In Ohnishi, Y. and Aoki, K., eds., *Contribution of Rock Mechanics to the New Century. Proceedings of the Third Asian Rock Mechanics Symposium, 2004, Kyoto, Japan*, Millpress, Rotterdam, 1021–1026.

谷川 巨・嶋本利彦, 第三紀堆積岩を用いたガスと水の浸透係数の比較と Klinkenberg 効果, 応用地

質, 印刷中.

- 谷川 巨・嶋本利彦・W.-K. Wey・W.-Y. Wu・C.-W. Lin・W.-C. Lai, 2003, 1999 集集地震震源域の浸透率構造と異常間隙圧発生メカニズムの推定. 地学雑誌, **112**, 939–952.
- Tanikawa, W., Shimamoto, T., Wey, W.-K., Wu, W.-Y., Lin, C.-W. and Lai, W.-C., 2004, Sedimentation and generation of abnormal fluid pressure in the focal area of 1999 Taiwan Chi-Chi earthquake. In Ohnishi, Y. and Aoki, K., eds., *Contribution of Rock Mechanics to the New Century, Proceedings of the Third Asian Rock Mechanics Symposium, 2004, Kyoto, Japan*, Millpress, Rotterdam, 553–557.