

新しい回転式高速剪断摩擦試験機： その基本設計と研究目的

A New Rotary-Shear High-Speed Frictional Testing Machine: Its Basic Design and Scope of Research

嶋本利彦*・堤 昭人*

Toshihiko Shimamoto* and Akito Tsutsumi*

Abstract: A new rotary-shear high-speed frictional testing machine (MARUI Co Ltd., MIS-233-1-HSTR-90) was installed at Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, in order to study the fault constitutive properties at fast slip rates and various processes, including frictional melting, that occur within a fault zone during and immediately after seismogenic fault motion. This paper describes the basic design of the machine and outlines current research projects. An axial force to 10 kN (about 1 ton) can be applied to a pair of solid- or hollow-cylindrical specimens with outer diameter of 25 mm or 40 mm, using an air-driven actuator. One side of the specimens is kept stationary, and the other side is rotated with a 7.5 kw servo-motor at revolution rates to 1,500 rpm. The torque and axial force are measured with a combined torque and axial-force gauge that is placed next to the stationary side of the specimens. The machine is capable of producing slip rates to 1.6 m/s and normal stresses to about 30 MPa for hollow-cylindrical specimens with outer and inner diameters of 25 mm and 15 mm, respectively, and an unlimited displacement. The machine is equipped with a pore-pressure system for studying interaction between frictional heating and pore-pressure generation, although this system has not been tested fully as yet. So far, the frictional melting processes have been studied fairly thoroughly with the machine, producing melt products that are quite similar to natural pseudotachylytes with respect to the chemical composition of fine-grained or glassy matrix and the size distribution of clasts contained in the matrix. Preliminary measurements of friction has revealed substantial weakening of fault and velocity-weakening property at fast slip rates, perhaps due to frictional heating. However, small misalignment of the facing specimens causes small, by undesired distortion of the force gauge, and this problem must be eliminated in the future for collecting reliable mechanical data.

1994年3月17日受付. 1994年3月30日受理.

*東京大学地震研究所,

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

はじめに

プレートの相対変位速度はせいぜい1年間に100mm程度であり、日本列島内陸部のA級活断層でも平均変位速度は数mm/yr程度である。しかも、断層のクリープは極めてまれなので、ほとんどのプレート境界と活断層は、地震がおこってから次の地震がおこるまでの間はほとんど静止した状態にある。一方、大地震時の断層の相対変位速度は1m/s程度にまで達する(Abe, 1975; 参照)。したがって、地震の発生を含むプレート境界と活断層(以下、単に断層と略記)の挙動を力学的に解くためには、10桁を超える非常に幅広い変位速度のもとで断層のレオロジー的性質を決めなければならない。

断層の性質を調べるために様々な試験機が使われてきているが、これまでの試験機でほとんど調べることができなかったのが、大地震発生時に断層が高速で大変位をする時の性質である。ふつうの試験機で達成できる変位速度は数mm/s程度であり、これでは地震の発生に至るまでのプロセスを再現できるにすぎない。また、断層の地震性の挙動(不安定すべり、またはスティック・スリップ)は実験室で簡単におこすことができ、不安定すべりがおこる時の断層の相対変位速度は数100mm/sの高変位速度に達している(Johnson & Scholz, 1976; Shimamoto et al., 1980)。しかしそのような実験では、1回の不安定すべりで1mmを超えるような変位をおこすことはできない。汎用の高温三軸試験機によって断層の不安定すべりに伴う摩擦熔融物が局所的に形成された例はあるが(Friedman et al., 1974)、高速・大変位のもとでのより大規模な摩擦熔融、断層面の加熱に伴う断層のレオロジー的性質の変化などは、そのような汎用試験機では体系的に調べることはできない。

最近、Spray (1987, 1988)は摩擦熔接機(frictional welding machine)を用いて、興味深い岩石の摩擦熔融実験をおこなった。これは、2本の鉄パイプなどを押しつけて片方を高速回転させ、摩擦熱でそれらを熔融させて熔接する機械である。この装置は高速・大変位が達成で

きるものの、断層の力学的性質が正確に測定できるようには設計されていないようである。またKennedy & Spray (1992)は、ボーリング掘削に伴って熔融した岩石を記載・分析しているが、この方法でも断層の性質を測定することはできない。

そこで、嶋本は、[株]圓井製作所の技術者と共同で、(1)地震発生時に断層帯内部でおこる変形様式(摩擦発熱と摩擦熔融を含む)の研究、(2)高速領域における断層のレオロジー的性質の測定、(3)地震時の摩擦発熱と間隙水圧の相互作用、などを総合的に調べる試験機を1991年に設計・製作した。堤は、試験機の調整と計測システムの整備を中心になっておこなってきた。本稿では、試験機の設計の概要・現在の稼働状況・今後改良すべき課題について述べるとともに、この試験機を用いて進められているプロジェクトを簡単に紹介しておきたい。なお、試験機の概要と進行中のプロジェクトは、Tsutsumi & Shimamoto (1992)、Shimamoto (1992)、Lin et al. (1992)によって国内・国外の研究者に紹介された。

実験の方式と既存の試験機

本高速摩擦試験機の設計の目標は、(1)なるべく地下深部の高い圧力(垂直応力)のもとで、(2)大地震発生時の1m/s以上に達する高速断層運動と(3)10mを超えるような大変位を達成することであった。さらに、(4)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ことも、試験機製作の大きな目的の一つであった。(4)は、以前からその重要性が指摘されながら、体系的な研究がなされてこなかった問題である(Sibson, 1973; Raleigh & Evernden, 1981; 参照)。これは、地震時の高速断層運動に伴う摩擦熱で間隙水圧が高くなり、断層の摩擦抵抗が減って、大地震時には全応力降下(total stress drop)すらおこっているかもしれない、という議論である。摩擦抵抗が減れば摩擦発熱も小さくなるので、これは明らかに非線形な相互作用の問題である。さらに、

間隙水圧が地震がおこっている間の短時間にどれだけ上昇するかは、断層帯内部の発熱部と間隙水の間の熱交換の速度と効率、断層帯と周辺部における透水性にも関係している。

試験機を手ごろな価格で製作するためには、小さい試料を使わざるを得ない。小さい試料に大変位をおこす方式としては、回転式剪断摩擦試験が適している。つまり、一組の円柱または円筒形試料に軸力(断層面上の垂直応力)を加え、一方を固定して他方を回転させる方式である(Fig. 1)。別の方式としては、板状試料に試料を押しつけて往復運動させることも可能であり、その方が変位速度が場所毎に変わらないという利点もある。しかし、断層沿いの剪断変形のセンスが交互に変わるのは好ましくないし、摩擦面の温度が平板側と移動試料側で違いすぎるのも問題を複雑にする。したがって、我々は円筒・円柱形試料の回転式試験方式を採用することにした。

断層帯内部の変形様式は断層の変位の増加とともに大きく変わり、これに伴って断層のレオロジー的性質も変わってくる(Shimamoto, 1989; 参照)。回転式剪断摩擦試験(rotary-shear friction experiment)は、このような大変位のもとで深部断層のレオロジー的性質を調べるのに適している。しかし、この種の剪断試験は古く Bridgman (1936, 1937), Griggs et al., (1960), Handin et al. (1960, 1967)などで試みられたものの、汎用試験機としてそれほど多くの実験に使用されるにはいたらなかった。勿論、これら

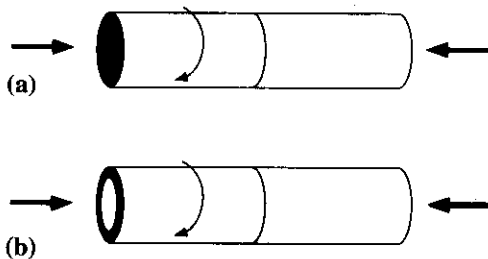


Fig. 1 Schematic diagrams showing (a) solid cylindrical specimens and (b) hollow cylindrical specimens, under an axial load and torque.

の試験機は、本研究で目標にしている高速断層運動を再現するためには設計されていない。

ESR年代測定法に関連した基礎研究をおこなうために、比較的最近、電力中央研究所にリング剪断試験機が設置された(田中, 1987)。この試験機を用いると、リング剪断容器(外形100mm, 内径80mm)中の試料に3.5MPa以下の垂直応力を加え、0.03~0.3m/sの変位速度のもとで剪断試験をおこなうことができる。回転式なので変位量には制限はない。この試験機は、地表付近の断層運動を実験室で再現するように設計されているので、我々が望むような、なるべく地下深部の高圧条件下での実験に使用することはできない。

最後に、我々の知る限りでは、高速断層運動時の摩擦発熱と間隙水圧の相互作用を調べることのできる試験機はまだ製作されていない。

試験機の概要と構成

回転式高速剪断摩擦試験機([株]圓井製作所, MIS-233-1-HSTR-90型)の全体図と写真をFigs. 2, 3に示した。試験機は、中央上部・やや右寄りの試料(Fig. 2の1)をはさんで、左側の試料に高速回転を与える部分と右側の試料に垂直荷重を加える部分から構成されている。Fig. 4は試料部の拡大写真である。以下、Fig. 2中の番号を用いて試験機の構成を説明する。

回転側の試料(Fig. 4の左側の試料)は回転軸に直接取り付けられており、試料の回転は、7.5kwのサーボモータ(図の2; 日立製作所, V²-7.5M)からトルクリミッタ(3; 三木プーリ, TT-4X-01)・トルク変換器(4; 共和電業, TP-10KMCB)・電磁クラッチ(5)・回転主軸(6)を経て、試料に伝わるように設計されている。図の7はサーボモータのコントローラ、8はモータの回転方向の設定と回転速度の表示をするモータのオペレータである。このモータの最高回転速度は1,500rpm、定格トルクは約50N・mである。試料の回転速度と総回転数の測定は、エンコーダ(図の9, オムロン,

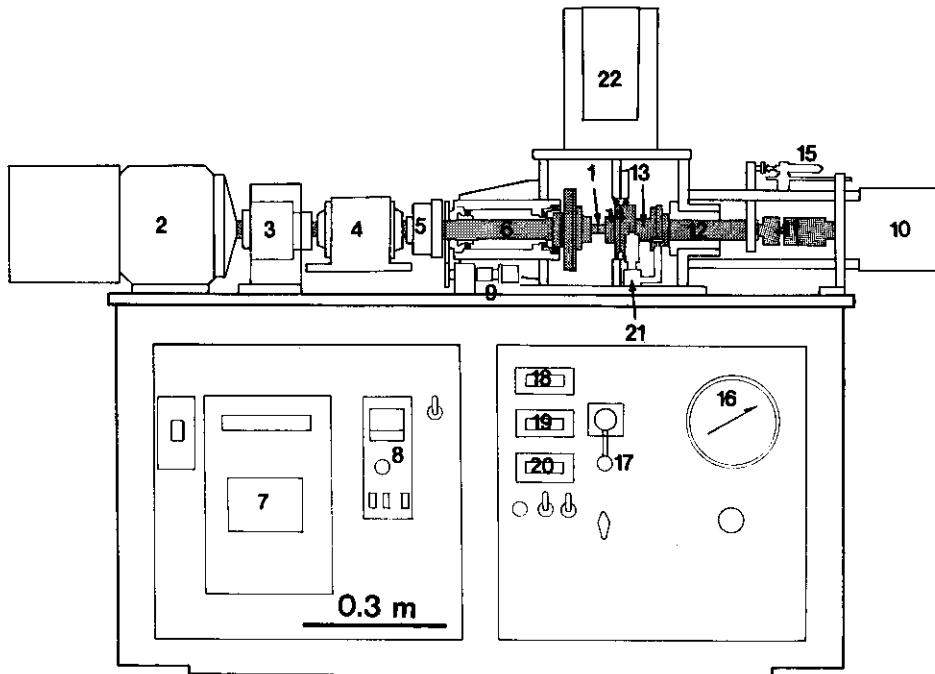


Fig. 2 A schematic diagram showing the rotary-shear high-speed frictional testing machine. 1: specimens, 2: servo-motor, 3: torque limiter, 4: torque gauge, 5: electromagnetic clutch, 6: rotary column, 7: controller of the servo-motor, 8: operator of the servo-motor, 9: rotary encoder, 10: air compressor, 11: axial force gauge, 12: ball spline, 13: torque-axial force gauge, 14: specimen holder, 15: displacement transducer, 16: air pressure gauge, 17: valve, 18~20: displays for the axial force, axial shortening and torque, 21: pressure gauge for measuring pore water pressure, 22: water reservoir.

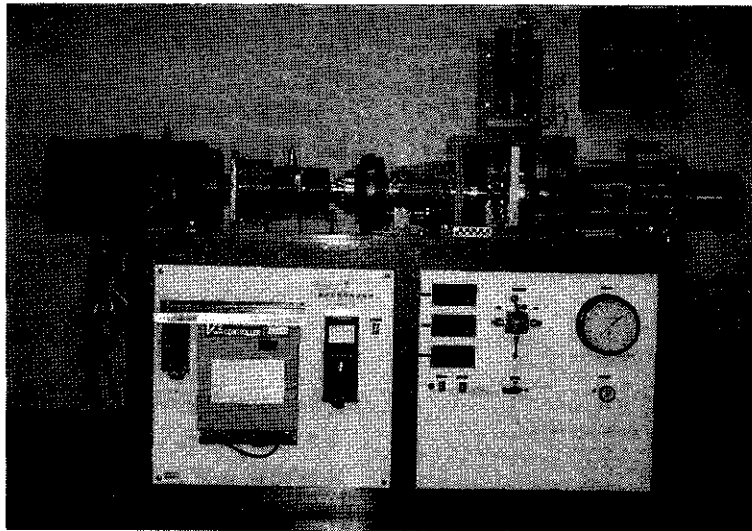


Fig. 3 A photograph of the rotary-shear high-speed frictional testing machine.

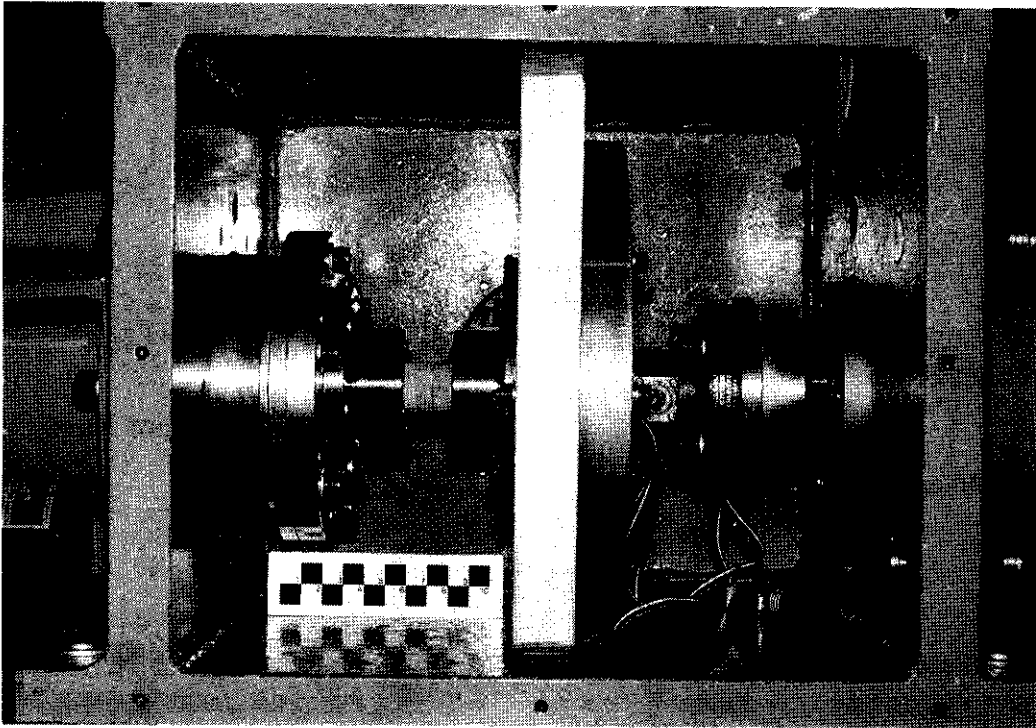


Fig. 4 A close-up of the specimen and specimen holder and the torque-axial force gauge.

E6D-CWZIE)に2台のカウンタを接続しておこなっている。トルクリミッタは、試料の破損などによって回転が強制的に止められた場合にモータと装置を切り離す役割をはたす。また、電磁クラッチは、モータが設定回転速度に達するまでに数秒かかることから、モータが一定の回転速度に達してから高速摩擦実験を開始するために取り付けた。トルク変換器は、偏芯・偏角などの軸方向のミスアラインメントを吸収するために、両側の要素とはフレキシブル・カップリングで接続されている。

軸荷重は、エアコンプレッサー(富士コンプレッサー製作所, SH-04)に接続した復動型ベロフラムシリンダ(10; 藤倉ゴム工業, BFDA-140-62)を用いて10kN(約1トン)まで加えることができる。この軸荷重は、ロードセル(11; 東京測器, CLP-2000KA)・ボールスプライン軸(12)・トルク・軸力変換器(14; 昭和測器, MUF-5-215)・試料取付ホルダ(14)を

通して試料に加えられる。この軸力は、回転主軸(図の6)右端の肩部を受けるボールベアリングで支えられている。固定側の試料の回転はボールスプラインで止められている。摩擦熔融がおこると試料は短縮するが、このボールスプラインと試料取付ホルダを外側から固定したりニアプッシュが、試料の軸方向の低摩擦短縮を可能にしている。この試料の短縮量は、図の15の変位計(東京測器, CDP-10)で測定している。図の16は空気圧を測定する圧力計、17は載荷方向を決める空気圧の三方弁、18~20は軸荷重・軸方向変位・トルクの指示計である。

図の21と22は、間隙水圧測定用の圧力計(共和電業, PG-10KU, 測定レンジは1MPa以下)と貯水槽である。Fig. 5に間隙水圧計測システム図を示した。このシステムは、高速・大変位のもとでの摩擦発熱と間隙水圧の相互作用を調べるために設計されている。実験には、回転側と固定側にそれぞれ透水性の悪い岩石の円柱

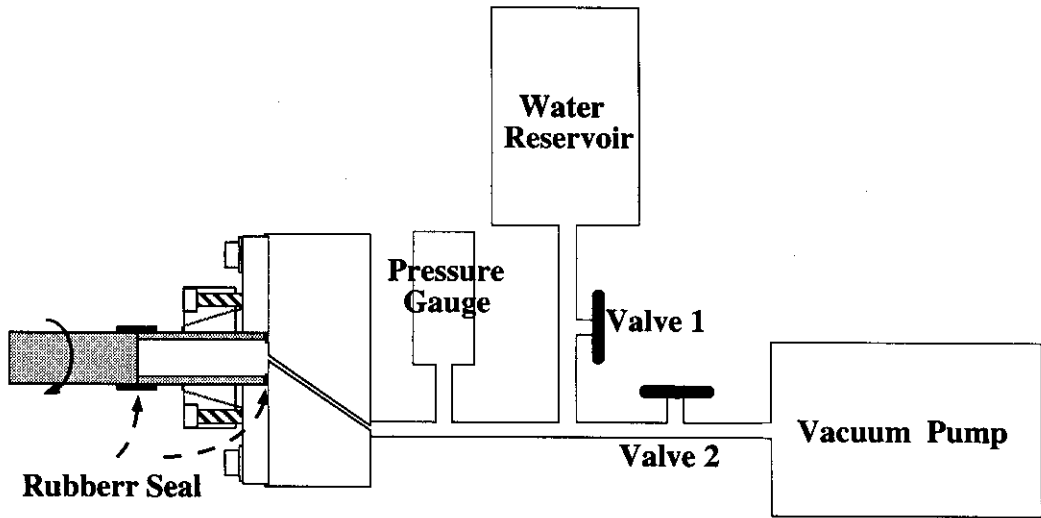


Fig. 5 Schematic sketch showing the pore pressure system (see text for explanation).

形・円筒形試料を用い、両者の接触部と円筒形試料の取付底部を幅の広いゴムバンドとゴム板などでそれぞれシールしておく。固定側円筒形試料の内部が、パイプ・圧力計・水槽とつながって間隙水圧システムをなしている。実験では、圧力弁を開いて水槽をシステムから遮断し、三方弁を開いて、真空ポンプでシステム内をなるべく真空に近くする。三方弁を閉じて圧力弁を開くと、システム内は水で満たされるはずである(水圧を加えることはできない)。そして、圧力弁を閉じてシステムを閉鎖し、高速摩擦実験を開始する。摩擦発熱によって間隙水圧が上昇すれば、圧力計で検出できるはずである。水圧が上がれば当然摩擦面から水(または蒸気)がぬけて出るはずであるが、この水がぬける速さ・間隙水圧の上昇・摩擦抵抗の変化の間の相互作用を調べるのが、このシステムを作った目的である。なお、間隙水圧を一定に保つシステムをつくることもできるが、その場合には水が断層面から常に“たれ流し”になってしまう。

等価変位速度

回転式剪断摩擦試験機に共通する欠点は、試

料の内側と外側で変位速度が違うことである。摩擦と変位速度の関係は地震の発生機構を考える上で非常に重要なので、この欠点は切実である。この欠点を少しでも補うために円筒形試料を用いているが、大友・嶋本(1994)、堤・嶋本(1994)らが採用した外径25mm・内径15mmの試料でも、回転速度が1,500rpmの時に、外周部および内周部の変位速度はそれぞれ約2.0m/s, 1.25m/sになるのである。しかし、他の型の試験機では、高速・大変位を実験室で再現することは、巨額な予算を使用しないかぎり不可能である。大変位が容易に達成できる点に関しては、回転式剪断試験機は他の試験機にかえがたい利点をもっている。

さて、変位速度が場所ごとに違う時に、どの場所の変位速度をもって代表的な変位速度とするべきであろうか。我々は、物理的に意味をもつ変位速度として、以下に定義する等価変位速度を用いることを提唱したい。物理的に意味をもつ量として、単位時間内に摩擦によってなされる仕事を考えてみよう。

円筒形試料の内周半径および外周半径をそれぞれ r_1 , r_2 とし、回転速度を R とする。半径 r の位置の変位速度 v は $2\pi Rr$ 、半径が r から r

+drの間の面積はdsは $2\pi r dr$ で、それぞれ与えられる。剪断応力を τ とすると、単位時間内にこの微小面積内で摩擦によってなされる仕事dwは

$$dw = v\tau ds = 4\pi^2 r^2 \tau R dr \quad (1)$$

で与えられる。剪断応力は変位速度とともにそれほど大きくは変わらないので(Dieterich, 1978, 1981; などを参照), 摩擦面上で τ は一定と仮定すると、単位時間内に摩擦によってなされる全仕事量Wは次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W &= \int_{r_1}^{r_2} dw = 4\pi^2 R \tau \int_{r_1}^{r_2} r^2 dr \\ &= \frac{4}{3} \pi^2 R \tau (r_2^3 - r_1^3) \end{aligned} \quad (2)$$

なお、摩擦面の面積Sは

$$S = \pi (r_2^2 - r_1^2) \quad (3)$$

で与えられるので、等価変位速度 v_{eq} を

$$W = \tau v_{eq} S \quad (4)$$

と定義すると、 v_{eq} は次式で与えられる。

$$v_{eq} = \frac{4\pi R (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{3(r_1 + r_2)} \quad (5)$$

円筒形の試料の場合には、 $r_1 = 0$ だから

$$v_{eq} = \frac{4}{3} \pi R r_2$$

が得られる。

回転速度が1,500rpmの時の v_{eq} は、外径が25mm・内径が15mmの円筒形試料で約1.6m/s、外径が25mmの円柱形試料で約1.3m/sである。以下、変位速度はこの等価変位速度であらわすものとしよう。なお、上記の式は τ が一定であるとして導いたが、 τ が一定でなくとも変位速度との関係がわかっているならば、同様に等価変位速度を定義することができる。

試験機の稼働状況と問題点

回転式高速剪断摩擦試験機は、原理的には極めて単純な試験機である。しかし、実際には予想よりも遥かに難しい試験機であった。以下、

試験機の現状と主要な問題点をまとめておこう。残念ながら、間隙水圧システムを用いた実験は、まだおこなっていない。

困った熱破壊

本試験機は、なるべく高い圧力下で高速摩擦実験をおこなうために、岩石の一軸圧縮破壊強度に近い垂直応力を加えることができるように設計していた。前節で述べた変位速度の勾配を減らすには、大きい試料を用いる方が有利である。しかし、25mmという試料の外形は、大学で簡単に使用できる電源(三相200V, 60~100A)で使用できる最大規模のモータの出力と岩石の摩擦の大きさから決まったものである。

ところが、約1kNの軸荷重のもとで円柱形の花崗岩を使って実際に実験してみると、試料の軸方向に加わる応力は約2MPaだから破壊するはずはないのに、試料は実験開始後すぐに破壊してしまった。高速断層運動に伴う摩擦発熱によって10秒以内で摩擦熔融がおこるくらいの温度に達するので(堤・嶋本, 1994; 林・嶋本, 1994), 熱破壊によって著しく強度が低下しても不思議ではないのである。大友・嶋本(1994)は、高速断層運動時の強度低下は2~3桁に及ぶことを示した。

熱破壊の重要性は、高速断層運動時の断層のレオロジー的性質と断層帯内部および周辺部の変形機構を考える上で新たな問題を提起したが、本来の実験目標から考えると悩み多き問題である。しかし、これは岩石のもつ性質によるのだから、解決は難しい。熱破壊の影響はクラックが閉じる高圧下では大きくない可能性があり、これがおそらく、本試験機を用いた実験結果を地下深部に適用する際の最大の問題点かもしれない。封圧下で高速断層運動時に精度の高い力学的測定ができる試験機をつくることは、将来の大きな課題である。現状では、たとえば摩擦発熱と間隙水圧の相互作用のように熱破壊で試料が壊れると困るような実験では、金属などの熱破壊のおこりにくい試料を使うしかない。岩石試料の場合は高い垂直応力を加えることができないので、現在では40mm径の試料も

使えるような試料ホルダを製作している。これによって、2.8m/sに達する等価変位速度が出来るようになった。

試料ホルダ

本試験機の設計開始当初から苦労させられているのが、試料のホルダである。最初のホルダでは、試験機の回転軸と試料の中心軸を合わせることができるように、試料ホルダの外側4方向からボルトで試料の固定と位置調整をおこなっていた。しかし、狭い試料室空間での中心軸合わせは容易ではなかった。

そこで採用したのが、アイセル製のメカロックを用いる方式である。このメカロックは、スリットを入れたテーパ状の内輪を外輪とロックボルトで締めることによって、円柱状物体を締結することができる。トルクと軸力の伝達能力が高いことと、円柱の中心をメカロックの中心に合わせて固定しやすいこと、などの利点もっている。外輪と内輪にスリットが入っている場合には、両輪をロックボルトで締めつけるに従って、外輪は広がり、内輪は縮んで、試料を円筒形試料ホルダの内部に固定することが

できる(Fig. 6a)。この方式は便利で、嶋本・林(1994)と林・嶋本(1994)の実験で用いた。しかし、試験機製作後にホルダ部を変更したために、試料どうしが摩擦熔融によって接合した状態では、試料ホルダを試験機から取り外すことができなかった。したがって、大半の実験ではメルトが固化する前に軸荷重を下げ、回転側と固定側の試料を分離して実験を終了しなければならなかった。

そこで採用したのが内輪だけにスリットの入ったメカロックで、この場合には、メカロックの内部に試料を固定できる。試験機に取り付けができるように特注で製作したホルダ(アイセル製)が、Fig. 6bに示してある。このホルダが現在もっとも簡便なので、最近の実験ではこれを使用している。試験機の回転軸と試料の中心軸合わせは、試料ホルダを取り付ける円盤状金具の中心を試験機の回転軸の中心に合わせてボルトで固定することによっておこなっている(Fig. 6bの下端部)。この金具には、試料ホルダを取り付けるガイドが作っており、一度調整すればその後は簡単に試料の取り付けができる。

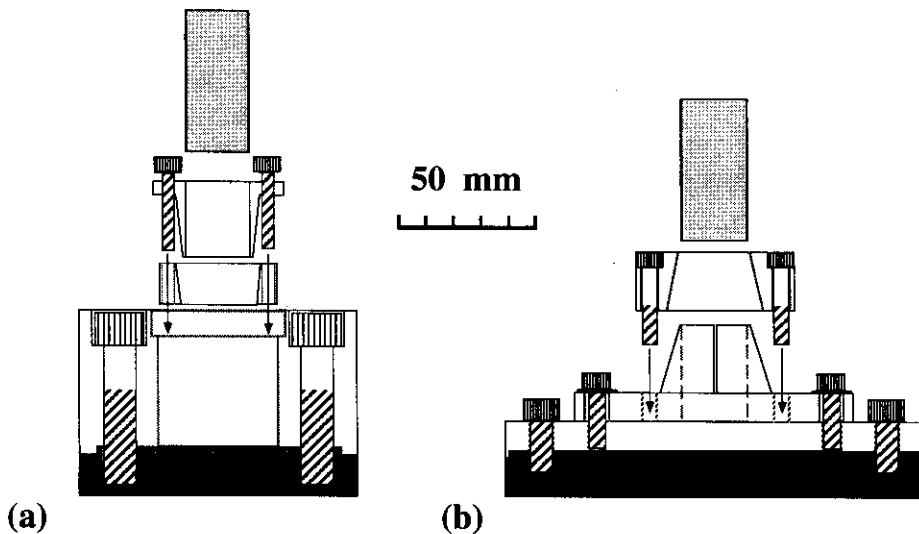


Fig. 6 Schematic drawings of specimen holders: (a) the holder used in early experiments and (b) the one in use at present.

上述の試料ホルダは使い易いが、まだ後に述べるような問題が残されている。

計測システムと実験結果の例

本節では、試験機の計測システムについて概略を説明し、ノイズと試料の片当りの問題(後述)に対して現在おこなわれている対策についても触れたい。軸力・トルク・試料の軸方向の短縮量・軸回転速度に関する変換器からの電圧出力は、チャート記録計およびデジタル記録計(TEAC-DRF1)に収録されている。

変換器からの出力信号には、各種の高周波ノイズが重なっている。ノイズ源は様々であるが、とくにサーボモーターのコントローラーから発生する約5 kHzの高周波ノイズが大きく影響する。このノイズ対策として、現在では各変換器からの出力をデジタル化する前に、アナログ低域通過型フィルター(パワースペクトル特性(最大平坦性)を有するVCVS型3次フィルター、カットオフ周波数1 kHz)でこの高周波ノイズを除去している。

Fig. 7aにトルク変換器(Fig. 2の4)からのトルクの出力の時間変化を示した。トルクはほぼ周期的な上がり下がりを繰り返しており、そ

の周期(約21Hz)は、モーターの回転速度(1秒間に約21回転)に対応している。この1回転ごとのトルクの変動は、明らかに試料の片当りからきている(次節)。この変動を、上記のノイズと同様に、アナログフィルターで除去することも可能である。しかしそのようにして記録したデジタルデータだけでは、1回転ごとのトルクの変化を示すデータが全て失われてしまう。そこで現在では、デジタルデータの解析プログラムに低域通過型フィルター(移動平均)を組み込むことによって、源信号の1回転毎の変動を取り除いている。Fig. 7bはFig. 7aのデータにフィルター処理(この場合は0.15秒の移動平均)をほどこした結果である。このデジタルフィルターにより、試料の片当りからくるデータの変動はほとんど除去されている。

以上のような計測システムで得られた実験結果の一例をFig. 8に示した。この実験では円柱状のハンレイ岩試料(直径25mm)を用いて、軸力が一定(1 kN)の条件下で摩擦面に一定の等価変位速度(1.1m/sec)を与えている。実験開始直後にはトルクに激しい変動が見られる。その後変位の進行に伴って摩擦面の温度が上昇し、試験開始後約10秒(外周総変位量約17m)で連続

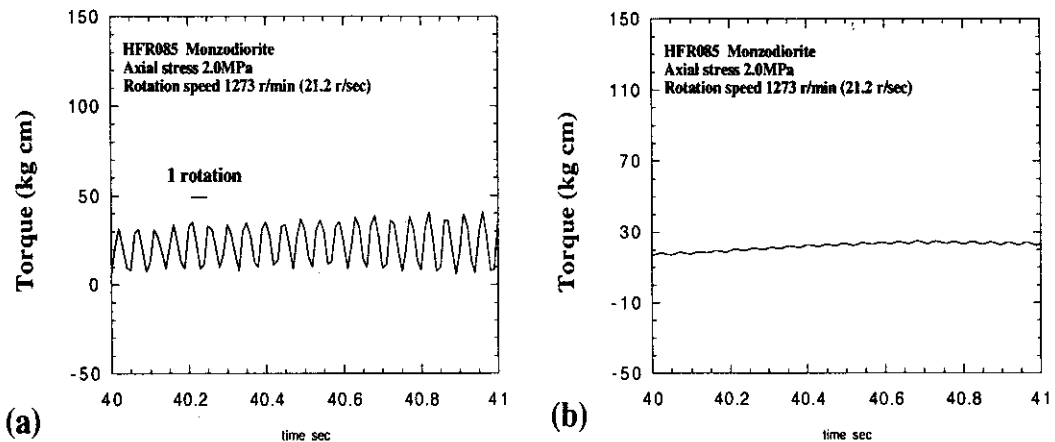


Fig. 7 Torque as measured with the torque gauge (4 in Fig.2), plotted against time from a high-speed friction experiment. (a) Original data from the digital recorder which shows periodic fluctuation at each revolution. (b) Torque versus time curve after the operation of digital low pass filtering (moving average).

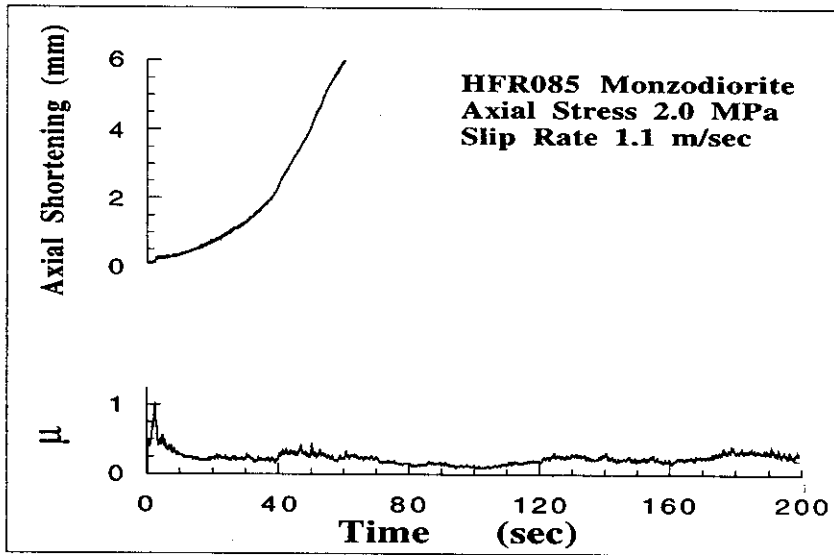


Fig. 8 Axial shortening and torque versus time record from a high-speed friction experiment. Frictional melting initiated in about 10 seconds after a circumferential displacement reached about 17m. Torque is initially high and variable, but it tends to decrease with the onset of frictional melting and approaches a steady-state value. The rate of axial shortening increases markedly with the onset of the frictional melting.

的な摩擦熔融が認められるようになると、トルクは低下した。一方、軸方向の短縮速度は摩擦熔融の開始に伴い徐々に増加し、約 $125 \mu\text{m}/\text{sec}$ に達した。高速摩擦実験後の試料の一例をFig. 9に示した(詳しい記載は、本特集号の林・嶋本, 堤・嶋本, 堤などの論文を参照されたい)。

試料の片当たりの問題

回転式剪断摩擦試験機においておそらく最も難しいのが、試料の片当たりの問題である。いかに精度良く試料を作っても、両側の試料の摩擦面を完全に平行にすることはできない。とくに我々は円筒研削盤をもっていないので、試料の工作精度は良くない。実際に実験をおこなうと、1回転毎に、試料の出っ張った側どうしと出っ張り側と引っ込み側が交互に擦れ合い、軸荷重とトルクはそれにつれて増減を繰り返す。前節で述べたように、現在はフィルターでこの1回転毎の増減を平坦化しているが、これに

よって摩擦のより詳細な変化は見れなくなっている。

我々は、この片当たり問題を解消するためにフレキシブル・ホールダを製作した。これは、アイセル製の積層板バネ型カップリング(Aカップ)を軸力にも耐えるように改良を加えたものである。つまり、軸力が加わった状態でも、試料ホールダは薄い板バネによって断層面の片当たりを解消するように方向が変わるようにしたのである。この試みそのものは成功であったが、柔らかいバネが系に加わることによって断層の不安定すべりがおこり始め、その衝撃で試料が破壊してしまった。

片当たりの問題を完全に解消するには、軸荷重にも耐え、「剛」でなおかつフレキシブルなカップリングを開発しなければならない。これは、高速摩擦試験機に限らず、回転式剪断摩擦試験機に共通した課題である。

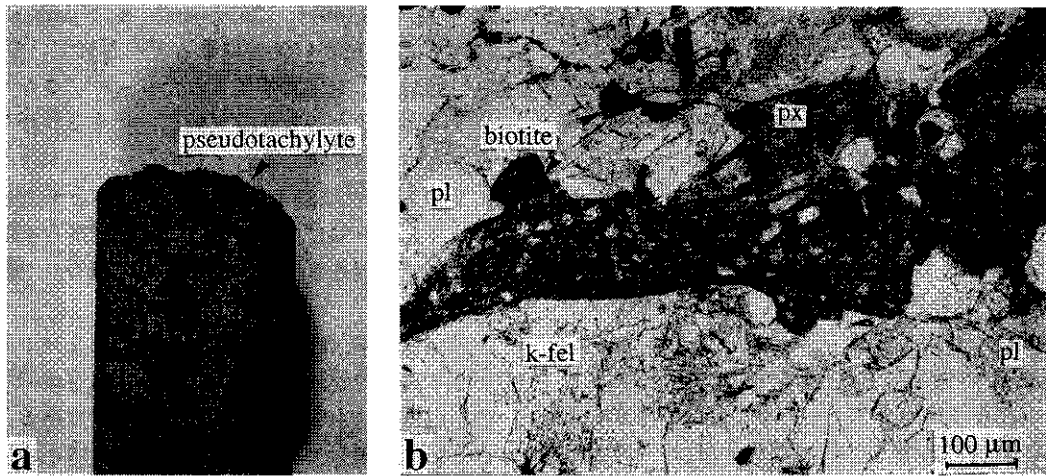


Fig. 9 (a) Deformed specimen of monzodiorite under the normal stress of 0.8 MPa, the equivalent slip rate of 1.3 m/s and the circumferential displacement of about 192 m (Run # HFR068 in Tsutsumi & Shimamoto (this special issue)). (b) is a photomicrograph under plane-polarized light showing the experimental pseudotachylyte in (a). Note that a fragment of the facing country rock is left on the very top part of (a). pl: plagioclase, px: pyroxene, and k-fel: potassium feldspar.

トルク・軸力荷重変換器の問題

Fig. 2を見て、トルクと軸荷重がそれぞれ二重に測定されていることに気づかれたことであろう。試験機の製作当初は、トルクと軸力は図の4と11の変換器でそれぞれ計測されていた。図の4の位置では軸荷重を受けるボールベアリングの摩擦を含めて測ってしまうので、試料の摩擦の計測には適当ではない。しかし、試験機の設計時には軸力とトルクを同時に計測できる変換器(または軸力に耐えるトルク変換器)を見つけることができなかつた。しかしその後、トルク・軸力変換器が昭和測器の特注品として製作されていることがわかったので、図の13の位置に変換器を取り付けた。

これによってボールベアリングの摩擦からくる問題は解消したが、前節で述べた試料の片当たりからくる新たな問題が発生した。現在使用している変換器では、中心軸にトルクと軸力を計測するための歪ゲージが貼られている。問題は、この中心軸がトルクと軸力以外の力にも反応して見かけの出力を出すことである。本試験

機の場合には、固定側試料ホルダとそれを固定したりニアブッシュの間にはわずかに「遊び」がある。試料の片当たりとこの「遊び」のために、もともと変形しやすく作ってある変換器の中心軸は、1回転毎にわずかだが曲げられてしまっている可能性がある。このような曲げは、軸力でもトルクでもないのである。したがって、トルク・軸力変換器の出力の中には、トルクと軸力以外の力による出力も含まれているのである。

この問題を解消するには、トルクと軸力以外には反応しない変換器を製作する必要がある。最近では、一般的な載荷状態で力を6成分に分解して計測する変換器も製作され始めている。その基本原理は、変換器を計測したい成分以外には「剛」にすること、および他の成分の力で計測部が歪んだ場合には出力がでないように歪ゲージでブリッジを組むことである。このような方式によるトルク・軸力変換器を、本試験機用に現在製作中である。

研究の現状と課題

本高速摩擦試験機を用いてなされた研究結果は、中間報告的なものも含めて、本特集号に報告されている。一般に岩石のレオロジーの研究は、(1)自然界で見られるのと同じ変形を実験室で再現し、(2)そのような変形がおこる時の岩石のレオロジー的性質を実験によって決定し、(3)その性質に基づいて地球・惑星科学上の重要な問題を解く、という順序で進められる。地震時の断層の高速運動を象徴するのが、シュードタキライトというやや稀な断層岩である。研究の現状を一言で要約すれば、「本試験機によって、シュードタキライトに非常に良く似た岩石はほぼ完全に再現できた、断層破砕物形成過程についても面白い結果が得られつつある、しかし本格的な断層のレオロジー的性質の測定はこれから」ということになろう。

シュードタキライトは細粒マトリックスと大小様々な粉碎岩片から構成されている。最近の研究によって、典型的なシュードタキライトの細粒マトリックス部は摩擦熔融によって形成されたメルトが急冷・固化して形成されたことが確実になりつつある(嶋本・長濱, 1991; Shimamoto & Nagahama, 1992; Lin, 1994; 林・戈, 1994; など)。嶋本・林(1994)は、この摩擦熔融が非平衡熔融であることを実験的に検証した。また、林・嶋本(1994)は摩擦熔融時には低融点鉱物が選択的に熔融し、それが熔融ガラスの化学組成に反映していることを示した。例えば、融点の高い石英を含む岩石では熔融ガラスがシリカに乏しくなり、この点に関しては、天然のシュードタキライトと実験で作られた熔融ガラスの特徴はほぼ定量的に一致している。堤・嶋本(1994)は摩擦熔融がおこっている時の断層帯の温度を初めて測定し、平均的な温度が1,100°C前後に達していることを示した。これは、断層が高速で大変位をしている状態での初めての温度測定であった。

シュードタキライト中に散在する粉碎岩片がフラクタル的または修正フラクタル的な粒径分布をもつことが、岡本・北村(1990, 1994)、嶋

本・長濱(1991)、Shimamoto & Nagahama(1992)、長濱ほか(1994)によって示されている。堤(1994)は、実験で形成されたシュードタキライト中の岩片がこれと定量的に一致する粒径分布をもつことを示した。天然のシュードタキライト中の岩片はおそらくメルトによる融食によって丸みをおびているが、この形態的な特徴も実験で再現されている(林・嶋本, 1994; 堤, 1994)。

大友・嶋本(1994)の実験結果は、シュードタキライト中の粉碎岩片だけでなく、断層破砕物の形成機構において熱クラックが重要であることを強く示唆している。自然の断層のほとんどは地震性の動きをしているのだから、断層破砕帯の進化を決める断層沿いの摩擦の過程を調べる際には、熱破壊が重要な条件下で問題を検討する必要がある。長濱・中村(1994)で総括された岩石の摩擦法則も、今後は熱破壊の影響を加えて(またはその影響をはっきりと区別して)より詳しく検討する必要がある。

断層の高速運動時の力学的性質に関しては、velocity weakeningの性質(高速ほど定常的な摩擦が小さくなる性質)が初めて確認されたことが大きい。これまでは、velocity weakeningを示す岩石も変位速度が0.1mm/sに近づくとほぼ一定になり(Dieterich, 1978)、さらに速度が増えたとvelocity strengthening(高速ほど摩擦抵抗が増える、つまり断層運動が加速されにくくなる性質)に変わることが示されていた(Shimamoto, 1986; Blanpied et al., 1987)。さらに速度が大きくなり、変位量も増えたと、摩擦発熱の影響などで当然摩擦抵抗も減ることが予想されていたが、今回それが岩石について初めて確かめられた。これは、地震発生の全過程を明らかにする上で重要であり、今後のより詳しい測定が望まれる。

最後に、地震時の摩擦発熱と間隙水圧の相互作用も本試験機でぜひとも調べなくてはならない問題である。

謝辞: 本試験機は、嶋本と[株]圓井製作所の中其 毅氏・細川健治氏が1年近く検討を加えて

設計を完了した。両氏と圓井製作所および[株]マルイの他の方々の誠意に満ちたご協力に、心から感謝いたします。本試験機は、平成2~3年度文部省科学研究費補助金を使用して製作した(一般研究B, 02452068, 研究代表者: 嶋本利彦)。

文 献

- Abe, K., 1975, Static and dynamic fault parameters of the Saitama earthquake of July 1, 1968. *Tectonophysics*, **27**, 223-238.
- Blanpied, M. L., Tullis, T. E. and Weeks, J. D., 1987, Frictional behavior of granite at low and high sliding velocities. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 554-557.
- Bridgman, P. W., 1936, Shearing phenomenon at high pressure of possible importance to geology. *Jour. Geol.*, **44**, 653-669.
- Bridgman, P. W., 1937, Shearing phenomena at high pressures, particularly in inorganic compounds. *Am. Acad. Arts Sci. Proc.*, **71**, 387-460.
- Dieterich, J. H., 1978, Time-dependent friction and the mechanics of stick-slip. *Pure & Appl. Geophys.*, **116**, 790-806.
- Dieterich, J. H., 1981, Constitutive properties of faults with simulated gouge. *Am. Geophys. Un., Geophys. Monogr.*, **24**, 103-120.
- Friedman, M., Logan, J. M. and Rigert, J. A., 1974, Glass-indurated quartz gouge in sliding-friction experiments on sandstone. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**, 937-942.
- Griggs, D. T., Turner, F. J. and Heard, H. C., 1960, Deformation of rocks at 500° to 800°C. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **79**, 39-104.
- Handin, J., Higgs, D. V. and O'Brien, J. K., 1960, Tortion of Yule marble under confining pressure. *Geol. Soc. Am. Memoir*, **79**, 245-274.
- Handin, J., Heard, H. C. and Magouirk, J. N., 1967, Effects of the intermediate principal stress on the failure of limestone, dolomite and glass at different temperatures and strain rates. *Jour. Geophys. Res.*, **72**, 611-640.
- Johnson, T. L. and Scholz, C. H., 1976, Dynamic properties of stick-slip friction of rocks. *Jour. Geophys. Res.*, **81**, 881-888.
- Kennedy, L. A. and Spray, J. G., 1992, Frictional melting of sedimentary rock during high-speed diamond drilling: an analytical SEM and TEM investigation. *Tectonophysics*, **204**, 323-337.
- Lin, A., 1994, Glassy pseudotachylyte veins from the Fuyun fault zone, northwest China. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 71-83.
- Lin, A., Shimamoto, T. and Iwamori, H., 1992, Experimentally-generated pseudotachylytes. 29th IGC, Kyoto, Abstract, 167.
- 林 愛明・戈澍漠, 1994, 中国北西部富蘊断層沿いに産するガラス質シュードタキライト, 本特集号.
- 林 愛明・嶋本利彦, 1994, 実験的に形成されたシュードタキライトの化学組成, 本特集号.
- 長濱裕幸・中村教博, 1994, 岩石の摩耗特性について: 次元解析の応用, 本特集号.
- 長濱裕幸・嶋本利彦・大友幸子・Lochhead, A., 1994, シュードタキライト中に含まれる破砕岩片の粒径分布の再検討, 本特集号.
- 岡本康宏・北村雅夫, 1990, スコットランド産シュードタキライトの鉱物学的研究, 日本鉱物学会講演予稿集, 47頁.
- 岡本康宏・北村雅夫, 1994, 北西スコットランド産花崗岩質片麻岩中のシュードタキライトの熔融過程, 本特集号.
- 大友幸子・嶋本利彦, 1994, 高速断層運動時の断層破砕物形成過程における熱クラッ

- ク的重要性：実験的検証，本特集号。
- Raleigh, B. and Evernden, J., 1981, Case for low deviatoric stress in the lithosphere. *Geophys. Monogr.*, The Handin Volume, AGU, **24**, 173-186.
- Shimamoto, T., 1986, Transition between frictional slip and ductile flow for halite shear zones at room temperature. *Science*, **231**, 711-714.
- Shimamoto, T., 1989, The origin of S-C mylonites and a new fault-zone model. *Jour. Struct. Geol.*, **11**, 51-64.
- Shimamoto, T., 1992, The origin of pseudotachylytes and the state-of-stress problem. 29th IGC, Kyoto, Abstract, 168.
- 嶋本利彦・長濱裕幸, 1991, シュードタキライトの起源と地殻応力問題, 月刊地球, **13**, 416-427.
- Shimamoto, T. and Nagahama, H., 1992, An argument against the crush origin of pseudotachylytes based on the analysis of clast-size distribution. *Jour. Struct. Geol.*, **14**, 999-1006.
- 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? 本特集号.
- Shimamoto, T., Handin, J. and Logan, J. M., 1980, Specimen-apparatus interaction during stick-slip in a triaxial compression machine: a decoupled two-degree-of-freedom model. *Tectonophysics*, **67**, 175-205.
- Sibson, R. H., 1973, Interactions between temperature and pore-fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief. *Nature*, **243**, 66-68.
- Sibson, R. H., 1975, Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting. *Geophys. J. Royal astro. Soc.*, **43**, 775-794.
- Spray, J. G., 1987, Artificial generation of pseudotachylyte using friction welding apparatus: simulation of melting on a fault plane. *Jour. Struct. Geol.*, **9**, 49-60.
- Spray, J. G., 1988, Generation and crystallization of an amphibolite shear melt: an investigation using radial friction welding apparatus. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 464-475.
- 田中和広, 1987, 電子スピン共鳴 (ESR) 年代測定法による断層の活動時期の検討——断層活動時における格子欠陥のゼロセットに関する研究, 電力中央研究所報告, U87039, 18頁.
- 堤昭人, 1994, 高速摩擦実験によって形成したシュードタキライト中の破碎岩片の粒径分布, 本特集号.
- Tsutsumi, A. and Shimamoto, T., 1992, A new high-speed frictional testing machine. 29th IGC, Kyoto, Abstract, 170.
- 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, 本特集号.