

岩石模擬物質の透視変形実験

See-Through Deformation Experiments of Rock Analogues

大藤 茂*

Shigeru Otoh*

Abstract: I give a brief review of see-through deformation experiments of rock analogues during these 20 years and try to show future trends of this kind of experiments. Most of the experiments in the past were carried out to clarify cyclic changes of microstructures (e.g. grain size, grain aspect ratio, dislocation density, grain boundary motion, and lattice preferred orientation) during mechanical steady-state flow. Future experiments, on the other hand, will be devoted to show the causes of mechanical instability in sheared rocks.

Following the review, a deformation behaviour is described of two-phase analogue mylonite sheared in ductile conditions to shear strains of more than 30. The analogue is a mixture of octachloropropane (OCP, C_3Cl_8) and camphor ($C_{10}H_{16}O$), deformed in an *in situ* torsional ring shear apparatus. The experiments were performed at room temperature under constant strain rates of $1.8 \times 10^{-5} s^{-1}$, $1.1 \times 10^{-4} s^{-1}$, and $3.6 \times 10^{-3} s^{-1}$; and during each experiment the load history and microstructural evolution were recorded. Typical two-phase aggregate showed initial hardening followed by two phases of softening: initial drastic softening and later gradual softening. The initial drastic softening started at an average shear strain of 0.1 and the later gradual softening commenced at an average shear strain of about 0.6.

Tracking of the microstructures using time lapse cinematography and digital video microscopy revealed that shear localization adjacent to a frosted grip coincided with the initial drastic softening. During the later gradual softening a compositional banding developed, which was defined by elongate polycrystalline domains of OCP and camphor. These domains were initially broad and oriented at 35° to the shear zone boundaries. With accumulated strain they gradually elongate with the long dimension parallel to the shear zone boundaries, forming a well developed compositional banding. Measurement of these compositional domains or bands suggests that they have grown through mechanical elongation.

The above observation strongly suggests that the formation of a mechanical compositional banding is an important and long lasting softening mechanism in

1992年7月2日受付, 1994年2月7日受理.

*富山大学理学部地球科学教室.

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Toyama University, Toyama 930, Japan.

two-phase mylonites. It is very likely that two-phase mylonites do not gain mechanical steady-state and steady-state foliation until a later stage of shear deformation.

はじめに

1991年12月の構造地質研究会シンポジウム(於東京大学地震研究所)で、筆者は、岩石模擬物質の透視変形実験に関するレビューを行なった。その際、筆者自身が行ないつつある実験や、筆者が個人的に知り得た最近の研究動向についても紹介するつもりであったが、時間の関係でなし得なかった。本論は、それらの紹介を主目的とする。透視変形実験全般のレビューに関しては、ここでは簡単に触れるだけにとどめておく。すでにMeans (1989)のすぐれたレビュー論文があるので、興味を持たれた方は、そちらをご参照願いたい。

岩石模擬物質の透視変形実験とは？

ここで扱う実験は、厚さ100 μ m程度の薄い試料を変形させながら、透過偏光顕微鏡で微細構造の変化を観察する変形実験である。構造地質学の実験なので、本来、天然の岩石を変形試料とするのが理想的である。しかし、岩石の変形過程を上のように鏡下で観察するとなると、試料に高温高压を与えられ、かつ変形過程が観察できる様な大がかりな機械が必要となり、また時間がかかる。そこで、岩石との違いには目をつぶり、より低温で延性変形する鉱物または有機化合物の結晶を変形試料として用いる。本実験は、後述する様にいくつもの問題点を抱えてはいるが、世界のあちこちで、実際の岩石を用いた透視変形実験がもっと手軽にできるようになるまでの、つなぎとしての意義は持つであろう。

この手の実験を構造地質学者が始めたのは、ここ20年程のことである。おそらく、構造地質学者の手になる最初の論文は、Means (1977)で

あろう。しかしそれ以前に、鉱物学や雪氷学の分野では、同様の実験が行なわれていた。特に、雪氷学者たちは、氷床流動時の氷の再結晶を理解するために、盛んに氷の透視変形・再結晶実験を行なっている(Steinmann, 1958; Rigsby, 1960; 若浜, 1962a, 1962b, 1962c, 1962d, 1964; 鈴木, 1969, 1970a, 1970b)。本論で触れる余裕はないが、これらの研究成果の中には、構造地質学者の参考になることも多く含まれている。

実験の手法

透視変形実験の実験装置は、一般に2枚のガラス板の間に薄い試料を挟んで変形させる方式をとる。2枚のガラス板を直線的に相対移動させる直線状変形装置と、回転させるリングシア-変形装置とがある。直線状のものは、Means (1989)に解説されているので、詳しくは述べない。

リングシア-変形装置は、試料を上下2枚の円盤状ガラス板に挟んで、片方のガラス板を回転させることにより試料を剪断変形させる方式のものである(Fig. 1 ; Fig.6-1)。2枚のガラス円盤の片側は円周側が、もう片側は中心付近が曇りガラスになっている。試料はこの曇りガラスの部分に固定されており、片側のガラスを回転させると、ガラス面に直交した円形の剪断帯が形成される(Fig. 1 A)。下盤側のガラス円盤は、変形装置の土台に固定されており、上盤側は金属円盤(Fig. 1 BのCap)に埋め込まれて、下盤側のガラス円盤の上に重ねられる。これら、試料変形部の外側には、モーターと連動した回転リング(Fig. 1 BのRotation Ring)が取り付けられており、回転リングから突出した金属片が金属円盤に固定された突起を押すことで、金属円盤が回転するようになっている。

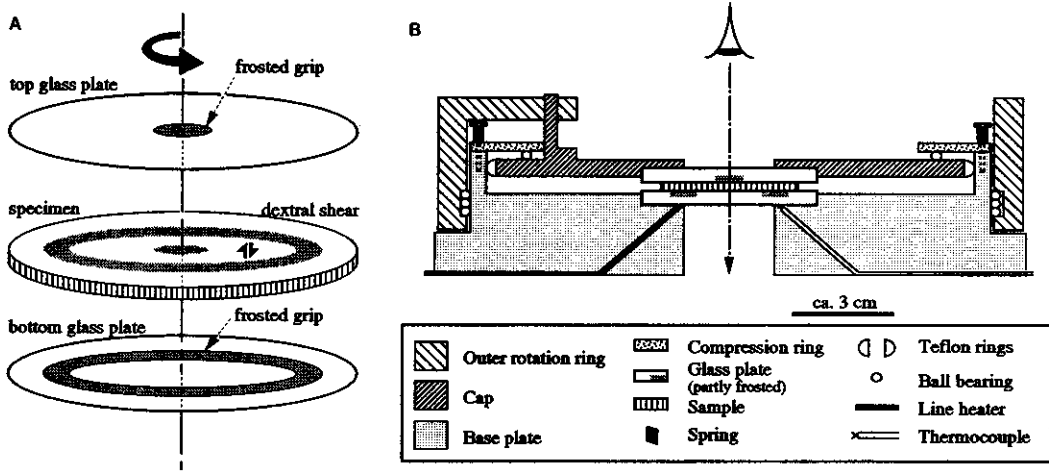


Fig. 1 Schematic diagrams showing the structure of the torsional ring shear apparatus used in TP22. A. Principle, B. A cross section.

変形物理条件の測定や調節は、以下の様に行っている。(1)温度：温度は実験装置中のヒーターで与え、銅-コンスタンタン熱電対で測定する。また、ヒーターと熱電対とはパソコンで制御されており、実験中の試料温度は、室温～200℃の範囲で一定に保つことができる。(2)歪・歪速度：歪や歪速度を測定する際には、試料中にマーカー物質となる微粒(10 μ m以下)のアランダム等を入れる。変形に伴うマーカー位置の相対変化から、試料の歪量や歪速度を測定する。透視変形実験の利点から、歪や歪速度の時間を追った変化や、場所による不均質性が克明に記載できる。(3)応力・荷重：リングシア変形装置では、試料内の応力分布が不均質になるので、応力測定は難しい。試料中に弾性体の小円盤を混入させれば、不均質な応力がある程度測定できると思われるが、筆者はまだ試していない。今の所、回転リングの金属片につけた歪ゲージで、金属円盤の回転に要する荷重をはかっているだけである。もう一つの問題は、試料とガラス面の間の摩擦である。摩擦が大きいと、試料中にガラス面に平行な剪断帯ができてしまい、観察に適さない。また、変形時の力学データがとれなくなる。有機化合物を変形試料とするときには、ガラス面に極薄いシリコン

オイルの膜を作ってやるだけで、この問題は解決する。極薄い油膜では、試料を溶かすことがないし、油膜は短時間で乾くこともない。

変形試料としては、様々な低融点化合物が用いられている(Table 1)。代表的な例は、有機化合物では、オクタクロプロペン、パラジクロロベンゼン、樟腦(カンファー)、無機化合物では、ビショファイト、カーナライト、および氷である。いずれも、室温、1気圧、歪速度 10^{-5} s $^{-1}$ の条件下で、10MPa程の差応力で流動する(Fontein, 1990 MS)。

試料調整は、以下の様に行なう。まず、適量の化合物をガラス板の上ののせ、剃刀等で細粒にする。変形時に試料各部分の歪を測定したいときには、マーカー物質を極微量混入させて、十分に混ぜる。次に、細粒にした試料を平らなガラス板などで挟み、適当な温度で温める。この過程で、十分に成長した結晶をもち、厚さが均一な試料ができる。この過程を怠ると、変形時に試料が粒界で壊れ易くなる。結晶が十分に成長したら、試料を実験装置に装填する。有機化合物を変形試料とするときは、試料装填の際、実験装置のガラス面にシリコンオイルをごく薄く塗る。これは前述の様に、試料とガラス面の間の摩擦を最小限にとどめるためである。

Table 1 List of mineral analogues used in see-through deformation experiments (modified from Fontein, 1990 MS).

	NAME	CHEMISTRY	CRYSTAL	Tm	REMARKS
Minerals	Bischofite	MgCl ₂ 6H ₂ O	Monoclinic		
	Carnalite	KMgCl ₃ 6H ₂ O	Orthorhombic		
	Ice	H ₂ O	Hexagonal	0°C	
	Nitratite (Sodium nitrate)	NaNO ₃	Rhombohedral	306°C	Similar to Calcite
Organic compounds	Adamantane		Cubic	210°C	
	Biphenyl	C ₆ H ₅ C ₆ H ₅	Monoclinic	70°C	
	Bromocamphor	C ₁₀ H ₁₅ BrO	Orthorhombic	76°C	
	Camphor	C ₁₀ H ₁₆ O	Cubic >92°C	179°C	
			Rhombohedral <92°C		
	Chlorophenyl sulfone	(ClC ₆ H ₄) ₂ SO ₂	Monoclinic	145°C	
	para-Dichlorobenzene	C ₆ H ₄ Cl ₂	Triclinic >31°C	51°C	
			Monoclinic <31°C		
	Dimethylurea	(CH ₃ NH) ₂ CO	Orthorhombic	108°C	
	Ferrocene	(C ₅ H ₅) ₂ Fe	Monoclinic	173°C	
	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	Orthorhombic	116°C	
	Hexachlorobenzene	C ₆ Cl ₆	Hexagonal	227°C	Cancer suspect agent
	Naphtalene	C ₁₀ H ₈	Monoclinic	80°C	
	Norbornane	C ₇ H ₁₂	Cubic	87°C	
	Norcamphor	C ₇ H ₁₀ O	Hexagonal	95°C	Similar to quartz
	Octachloropropane	C ₃ Cl ₈	Hexagonal	160°C	Similar to quartz
Thymol	C ₃ H ₇ C ₆ H ₃ CH ₃ OH	Hexagonal	52°C		
Triphenylmethane	(C ₆ H ₅) ₃ CH	Orthorhombic	94°C		
Urea	(NH ₂) ₂ CO	Tetragonal	135°C		

実験の特長と問題点

上記の様な、岩石模擬物質の透視変形実験がどのような目的に向いているかを考えるために、この実験が持つ特長と問題点とを整理してみる。

特長

岩石模擬物質の透視変形実験には、以下の特長がある：(1)変形による試料の顕微鏡的な変化の過程を観察できる点、(2)試料に大きな歪、特に剪断歪を与えることができる点、および(3)手軽な装置で実験ができる点の3点である。上の3つの特長をもう少し詳しく解説する。

(1)変形過程の観察：従来の変形実験では、岩石の変形過程を追って、直接観察することは

できなかった。従来は、(a)同じ物理条件下で、様々な歪量変形した試料を作り、(b)それらの試料を歪量の小さい順に並べて、(c)累進的な変形を仮定して、変形過程を推定した。しかし、累進の変形過程はあくまでも仮定であって、実際に歪量の大きな試料が、歪量の小さな試料の(歪量以外の)状態を経過してできた保証はない。累進の変形の過程が正しいとすれば、従来の手法でも、岩石の変形微細組織の全体的な変化を把握することはできるが、各変形段階の間に生じた現象を推定するのは困難な場合がある。特に、①試料中の個々の粒子の形態や結晶方位の変化や、②試料中の歪や歪速度の連続的な変化や、③個々の剪断帯の発達過程などを観察することは、従来不可能であった。その点透視変形実験は、ひとつの試料の変形の過程が連続

的に観察できるという大きな特長を持つ。

(2)試料の幅広い部分に大きな剪断歪を与えられる点：従来の変形実験は、岩石の一軸/三軸圧縮実験が主流であった。この手法で与えられる歪は高々数十%で、それ以上の歪を与えるのは大変なことであった。またこの手法では、試料に延性剪断歪を与えることが困難であった。近年、圧縮軸に斜交した平面で切ったピストンの間に試料を挟んで、試料に大きな延性剪断歪を与えることに成功しつつある(Schmid et al., 1987; Jordan, 1987; Ross et al., 1987; Hiraga & Shimamoto, 1987; Dell'Angelo & Tullis, 1989 など)。しかしその手法でも、剪断帯の幅は高々1 mm 強である。透過変形実験装置、特にリングシア変形装置では、試料内に幅広い剪断帯を形成し、原理的には無限大の剪断歪を与えることができる。

(3)手軽な装置で実験できる点：この点に関して、特に説明を加える必要はあるまい。手軽であることは、教育用器具としても有用であるということである。

問題点

岩石模擬物質の透視変形実験には、上記の特長と裏腹な多くの問題点がある。それらを整理すると、以下の様になる。

(1)実際の岩石を使わないことに起因する問題点：前述の実験装置では、強度の高い天然の岩石を変形させることができない。従って変形試料としては、軟らかい岩石模擬物質を使わざるを得ず、変形試料に起因するいくつもの問題点が出てくる。特に、変形微細構造を研究する際には、模擬物質の歪速度と粒界移動速度とのバランスや結晶系が、実際の岩石ないしは造岩鉱物のそれらを十分に再現しているかを検討する必要がある。

(2)試料の大きさからくる問題点：これは多くの変形実験に共通することだが、小さな試料の変形実験結果を大きなスケールの現象に適用しようとする場合、様々な問題が生じる可能性がある。

(3)信頼できる力学データがとれないという

問題点：これは、固体圧の高圧実験装置にも当てはまる問題であるが、実験装置(高圧実験装置の場合は圧力媒体)と試料との間の摩擦が、試料にかかる応力の測定を困難にしている。参考のため、円周側の曇りガラス面に触れないようにした OCP の試料を用いて摩擦を測定し、OCP 変形時の荷重と比較した(Fig. 2)。実験には、後述の TP22 で用いた実験装置ではなく、現在富山大学にある変形装置を用いた。富山大学の変形装置も、Fig. 1 の装置と基本的構造は同じである。実験条件は、摩擦実験、変形実験ともに、温度を60℃、ガラス円盤の回転速度を約15⁷/hr とした。摩擦・変形荷重ともに、30分の実験を3回行い、それぞれ同様な測定結果を得た。この実験結果を見る限り、摩擦の影響は変形荷重の20%程と、さほど大きくないように見える。しかし、変形装置・荷重の計測装置ともに、さほど精密なものではないし、試料の厚さの違いや、試料を挟む力によって、測定する荷重が微妙に変わることがあるので注意を要する。透視変形実験装置での荷重の値は、大体の目安としてとらえて、意味のある応力値は、透視型ではない、別個の変形装置で測定するのが

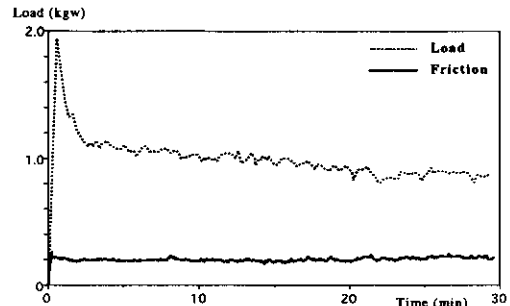


Fig. 2 A measurement of friction between a glass plate and a circular plate of octachloropropane (solid line) compared with load of deformation. The torsional ring shear apparatus used in these experiments are similar to, but different from the one shown in Fig. 1; we cannot compare the data directly with Fig. 5. The friction was measured by confining a platy sample only to the inner frosted grip of the apparatus. Condition of experiments: $T=60^{\circ}\text{C}$, $d\omega/dt\approx 15^7/\text{hr}$.

理想的である。

(4) 試料調整の際、試料中の結晶の光学的方位にある程度の定向性ができてしまうという問題点：である。例えばオクタクロプロペインや樟脳の場合、試料調整時の圧縮によって、結晶のC軸が、試料の平坦面の法線を軸とする小円を描くようになってしまう。従って、岩石模擬物質が延性変形する際の結晶の定向配列を研究する際には、この初生的な定向配列がなるべく生じないように工夫する必要がある。もちろん、初生的定向配列が、変形の際どの様に変化するのを見たい場合は別であるが。

実験の目的

前節に示した様な特長を活かして、岩石模擬物質の透視変形実験は、主に2つの方向に流れつつあると筆者は考えている。それは、(1)岩石の動的再結晶の過程と機構の解明という問題

と、(2)剪断帯での流動の不安定性と、それに伴う微細構造の発達という問題である (Fig. 3)。この2つの問題は、対照的な側面を持つ：すなわち、前者は岩石の力学的定常流動の研究の延長線上にあるのに対し、後者は、歪速度の時空変化や変形の局在化といった、系全体の中での力学的非定常状態の発生を研究する手法のひとつとなっているからである。

本実験の目的として、初めから大きく取り上げられてきたのは、動的再結晶によってどのような微細構造がどの様に岩石中に形成されるのか、逆に天然の岩石中でどのような微細構造が動的再結晶の寄与を示唆するのか、といった問題の解明であった。この背景として挙げられるのは、次の2点である：すなわち、1970年代になって、マイロナイトなどの形成に再結晶が重要な意味を持つことが強調され始めたこと (Bell & Etheridge, 1973)、および変形時の歪硬化の影響を相殺して定常流動を起こさせる軟化機構と

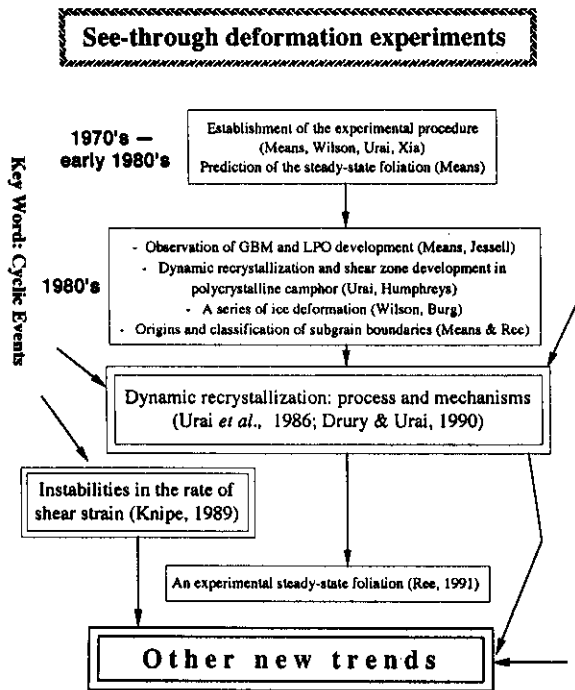


Fig. 3 A flow chart showing the trends of research of see-through deformation experiments.

して動的再結晶が注目されてきたこと、の2点である。動的再結晶問題に対する透視実験の成果は、あらかた出尽くした感がある。そして、それらの研究成果は、Means (1983), Urai et al. (1986), Drury & Urai (1990)などに集約されているので、それらを参照されたい。左記論文にも示されていることだが、動的再結晶時には、定常流動が起こっていても、岩石を構成する個々の結晶の性質は周期的に変化するらしい。すなわち、転位密度が高くなったり低くなったり、あるいは粒径が大きくなったり小さくなったり、といった変化が起こっているらしい。ところが、岩石全体としての平均転位密度や平均粒径がほぼ一定に保たれているため、岩石全体としての微細構造は、時間に依存した変化を示さない。Means (1981)の予測した steady-state foliation や、増田 (1982)の steady-state microstructure といったものが、実際に存在することが証明されたのである。この系列の研究は、Ree (1991)で一段落ついたようである。

透視変形実験のもう一つの流れとしては、特に剪断変形における、岩石の力学的不安定性の発生原因と発生機構との研究が挙げられる。この種の実験は、Knipe (1989)により始められて以来、公表された研究は非常に少ないが、水面下で着々と研究は進んでいるらしい。今後の研究の進展が待たれる分野である。

実験の一例：2相の岩石模擬物質の延性剪断変形実験

本節では、透視変形実験の一例として、筆者たちの行ないつつある実験を紹介する。それは、前述のリングシア変形装置で、2相の試料に大きな延性剪断歪を与える実験である (Otoh et al., 1991)。実験の目標は、延性剪断変形時の岩石流動の力学的不安定性と、それに伴う微細構造の記載をすることであり、以下の様な動機に基づいている。

従来岩石の力学的挙動は、単一鉱物からなる岩石の一軸/三軸圧縮実験の結果をもとに語られることが多かった。ところが、(1)現実に地

殻や上部マントルを構成している岩石は、2種以上の鉱物からなり、単一鉱物からなる岩石とは違った力学的挙動をとる可能性が考えられる。また(2)自然界では、圧縮変形と同等以上に剪断変形が起こっていると考えられるのに、剪断変形時の岩石の力学的挙動に関してわれわれは多くの情報を有していない。さらに、(3)いくつかの先駆的な研究があるものの (Burg et al., 1986; Schmid et al., 1987; Jordan, 1987; Ross et al., 1987; Hiraga & Shimamoto, 1987; Ree, 1991など)、剪断変形に伴う微細構造の発達について、まだ十分な研究がなされているとはいえない。以上が、本研究を開始した動機である。

そこで筆者らは、オクタクロプロペイン(以後OCPとする)と樟脳との混合物を、リングシア変形装置で延性剪断変形させた。OCPと樟脳とでは、OCPの方がやや軟らかい。Fig. 4 (Bons & Urai, unpublished data)は、両化合物を三軸圧縮した際の歪速度と差応力との関係である。この図よりわかるように、同じ歪速度では、樟脳の流動応力の方がOCPのそれより2倍程大きい。

実験はまだ端緒についたばかりであるが、ここではTP22という実験について簡単に紹介する。この実験は、OCPと樟脳とを等量混合し、室温下、 $1.8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ という歪速度で変形させたものである。変形前の試料は、平均粒径

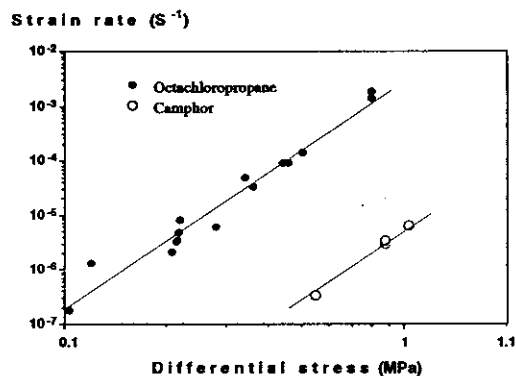


Fig. 4 Log stress vs. log strain-rate plot from triaxial compressional experiments of octachloropropane and camphor (Bons & Urai, 1990 MS).

100 μm 程の結晶の集合体で、OCP、樟脳とも、それぞれ数個の結晶からなる径5mm前後の“島”をなしている(Fig.6-2a)。TP22では、等歪速度変形時に試料にかかる荷重の変化と、微細構造の変化との対応についてモニターした。

Fig. 5 aは、TP22での変形の進行に伴う荷重の変化を示したグラフである。このグラフを見ると、試料は変形初期に硬化を見せた後、2段階の軟化を示していることがわかる。最初の軟化は剪断歪約0.1で始まり、剪断歪0.6までの急速な荷重低下で特徴づけられる。軟化の第2段階は、剪断歪0.6から20位までゆっくりと続き、最終的な荷重はピーク時の荷重の10%程になる。剪断歪20から後では、荷重の低下は有意に緩和され、変形は定常流動に近付いたといえる。

荷重変化に伴う試料の微細構造の変化は、次のようになる(Fig. 5 a; Fig.6-2)。最初の急激な軟化の際には、試料の内側の曇りガラス部の周辺に歪が集中し、剪断帯が形成される(Fig.6-2b)。剪断帯は幅1.5mm程度で、剪断

帯内では、OCP、樟脳とも粒径が数 μm になっている。軟化の第2段階では、初めに形成された剪断帯の周囲に、OCPと樟脳の“島”が伸長してできた縞状構造が徐々に発達する(Fig.6-2c)。縞状構造の方位は、初めは剪断帯と40°の角度をなすが、次第に剪断帯と平行に近くなっていく。この観察結果から推測すると、第2段階の軟化は、縞状構造の発達とともに、縞に平行なすべりが起こり易くなった結果であると考えられる。

2相からなる岩石模擬物質の同様な挙動は、すでにRoss et al. (1987)により報告されている。Ross et al. (1987)は、岩塩と硬石膏を6:4の比率で混合した試料を、剪断変形させた。その結果、試料は初め一時的な定常流動を示したが、後に流動応力が急に低下し、その後試料は最初より低い応力レベルでの定常流動をするようになった(Fig. 5 b)。Ross et al. (1987)は、変形試料の微細構造の鏡下観察より、上の応力低下の原因は縞状構造の発達と、岩塩への歪集中であると結論づけている。2相の岩石模擬物質の力学的挙動には、縞状構造の発達が一役かっ

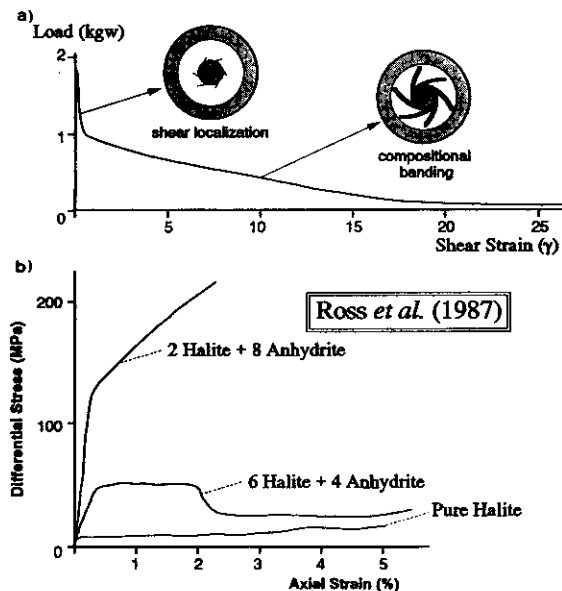


Fig. 5 Load-strain curve of a large strain ductile shear experiment of an octachloropropane-camphor mixture (a) compared with the stress-strain curve of shear experiments of halite-anhydrite mixtures (b: Ross et al., 1987).

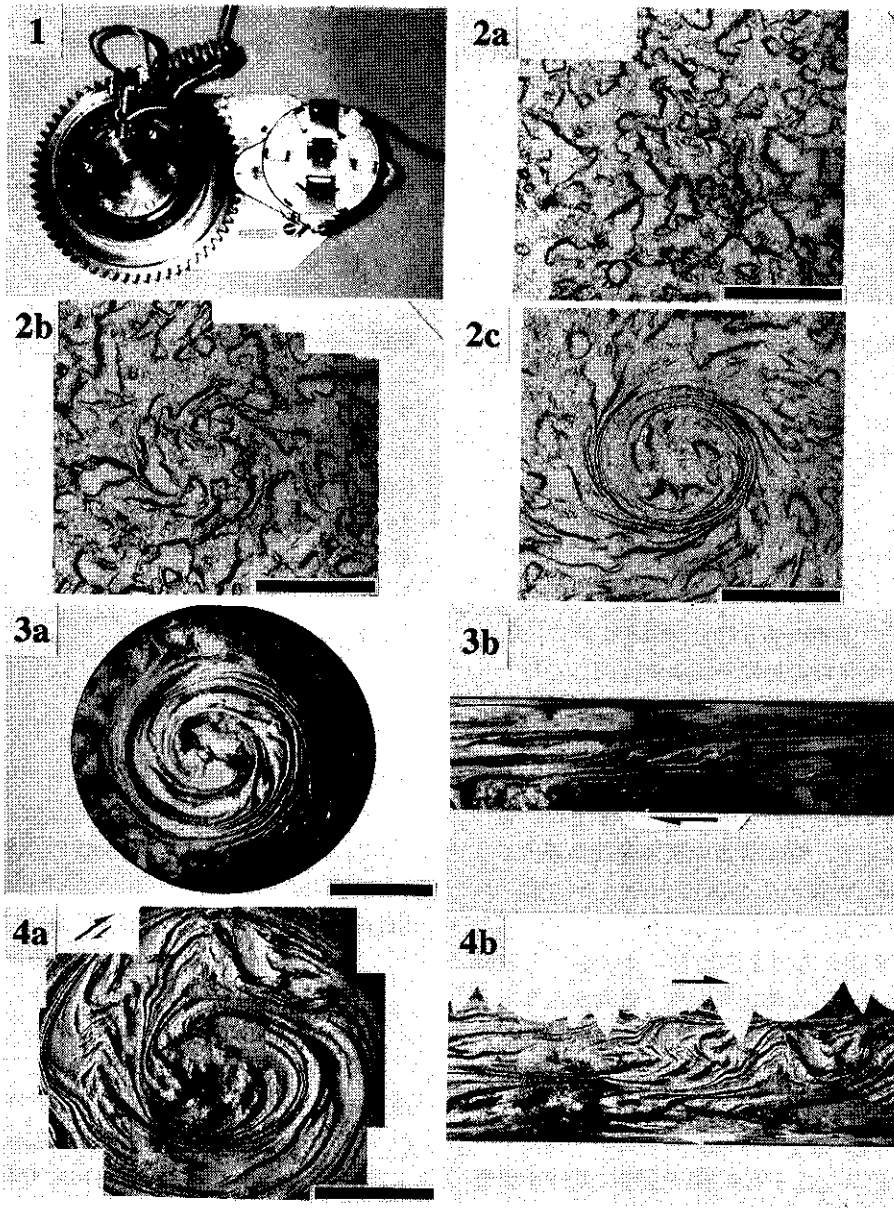


Fig. 6 1. A ring-shear apparatus shown from the top. 2. Microstructural change of the specimen TP22 sheared on the ring shear apparatus (Fig. 1) at room temperature to shear strain of more than 25 (scale bars = 3mm); 2a: starting material ($\gamma = 0$), 2b: average $\gamma = 0.5$, 2c: average $\gamma = 12$. 3. The microstructure of the specimen TP10 sheared at 70°C to average $\gamma = 10$; 3a: normal photomicrograph, open nicol (scale bar = 3mm), 3b: unwrapped image of Fig. 6-3a using a computer. 4. The microstructure of the specimen TP4 (room temperature, 10^{-4}s^{-1} strain rate, $\gamma = 19$); 4a: normal photomicrograph, open nicol (scale bar = 3mm), 4b: unwrapped image of Fig. 6-4a.

ているらしい。

同様の実験をより高温下で行なうと、変形は室温時より均質に近くなる傾向がある。Fig.6-3は、70℃(=0.8T_m)での実験結果である。室温時と異なり、内側と外側の曇りガラスの間に、比較的均質に縞状構造が発達している様子が見られる。これはすなわち、樟脳の“島”が、曇りガラスの間に均質に歪んだことを示すものと見られる。また、稀にはあるが、縞状構造が褶曲することがある(Fig.6-4)。これら、剪断変形に伴う様々な現象に関して、まだ一般化したことが言える段階にはなっていない。今後の研究で、明らかにしていく必要があるだろう。

最近の動向

最後に、筆者の知り得た情報をもとに、最近の透視変形実験の動向を箇条書に記しておく。

(1) 延性剪断帯のレオロジーと微細構造：筆者の研究と同様に、岩石模擬物質を ring shear apparatus で変形させて変形に要する荷重を測定することにより、延性剪断帯のレオロジーを推定し、微細構造の発達過程を調べようとする研究が進みつつある(モナッシュ大、ユトレヒト大)。

(2) 多相からなる岩石のレオロジーと微細構造：多相からなる岩石と単一鉱物からなる岩石とは、レオロジカルにどの様な違いがあるのか、そしてその違いはどの様に微細構造に反映されているのかを調べる研究が進んでいる(ユトレヒト大、ニューブルンズウィック大)。

(3) 化学反応や相転移が変形に及ぼす影響：パラジクロロベンゼンや ammonium thiocyanate の相転移や、液相が関与した反応系の変形実験は既に始められている。固相—固相反応(わずかな水の存在は認める)をする化合物の変形も試みられてはいるが、反応速度が変形速度に比べて著しく遅いため、地質現象に応用可能な実験は未だなされていない(ニューヨーク州立大、モナッシュ大)。

(4) 変形岩の粒径問題：変形岩の粒径はど

んな物理条件に左右されるか？ 逆に、変形岩の粒径から、変形時の物理条件がどの程度推定できそうか？ といった研究も、多くの研究機関で進められている。

(5) Annealing の問題：Annealing の微細構造から一般性を見だし、何か情報を引きだそうとする試みが始まりつつある(ニューヨーク州立大、リーズ大)。

謝辞：本研究を進めるにあたって、アメリカ、ニューヨーク州立大学の Win Means 教授、オーストラリア、モナッシュ大学の Mark Jessell 博士、およびオランダ、ユトレヒト大学の Paul Bons 博士には、種々御議論・御教示いただいた。また本研究には、文部省科学研究費(課題番号04740435および05740314)の一部と、田村科学財団の研究助成金を使用させていただいた。記して感謝いたします。

文 献

- Bell, T.H. and Etheridge, M.A., 1973, Microstructure of mylonites and their descriptive terminology. *Lithos*, **6**, 337-348.
- Burg, J.P., Wilson, C.J.L. and Mitchell, J.C., 1986, Dynamic recrystallization and fabric development during simple shear deformation of ice. *J. Struct. Geol.*, **8**, 857-870.
- Dell'Angelo, L.N. and Tullis, J., 1989, Fabric development in experimentally sheared quartzites. *Tectonophysics*, **169**, 1-21.
- Drury, M.R. and Urai, J.L., 1990, Deformation-related recrystallization processes. *Tectonophysics*, **172**, 235-253.
- Fontein, W.F., 1990 MS, *Analogue materials*. Unpublished thesis of the University of Utrecht, Utrecht, 37p.
- Hiraga, H. and Shimamoto, T., 1987, Textures of sheared halite and their implications for the seismogenic slip of deep faults.

- Tectonophysics*, **144**, 69-86.
- Jordan, P.G., 1987, The deformational behaviour of biminerale limestone-halite aggregates. *Tectonophysics*, **135**, 185-197.
- Knipe, R.J., 1989, Deformation mechanisms — recognition from natural tectonites. *J. Struct. Geol.*, **11**, 127-146.
- 増田俊明, 1982, Steady state flow と steady state microstructure —特に石英の場合について—. 日本地質学会第89年学術大会講演要旨集, 523.
- Means, W.D., 1977, A deformation experiment in transmitted light. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **35**, 169-179.
- Means, W.D., 1981, The concept of steady-state foliation. *Tectonophysics*, **78**, 179-199.
- Means, W.D., 1983, Microstructure and micro-motion in recrystallization flow of octachloropropane: a first look. *Geol. Rund.*, **72**, 511-528.
- Means, W.D., 1989, Synkinematic microscopy of transparent polycrystals. *J. Struct. Geol.*, **11**, 163-174.
- Otoh, S., Jessell, M.W. and Bons, P.D., 1991, Large-strain ductile shear deformation of two-phase rock analogues. *Terra Nova*, **3**, Suppl. 5, 29.
- Ree, J.-H., 1991, An experimental steady-state foliation. *J. Struct. Geol.*, **13**, 1001-1011.
- Rigsby, G.P., 1960, Crystal orientation in glaciers and experimentally deformed ice. *J. Glaciol.*, **3**, 589-606.
- Ross, J.V., Bauer, S.J. and Hansen, F.D., 1987, Textural evolution of synthetic anhydrite-halite mylonites. *Tectonophysics*, **140**, 307-326.
- Schmid, S.M., Panozzo, R. and Bauer, S.J., 1987, Simple shear experiments on calcite rocks: rheology and microfabric. *J. Struct. Geol.*, **9**, 747-778.
- Steinmann, S. von, 1958, Experimentelle untersuchung zur plastizität von eis. *Beit. zur Geol. der Schweiz, Hydrologie*, **10**, 4-72.
- 鈴木重尚, 1969, 氷の微結晶の粗粒化に関する研究 (I). 低温科学, 物理篇, **27**, 53-75.
- 鈴木重尚, 1970a, 氷の微結晶の粗粒化に関する研究 (II). 低温科学, 物理篇, **28**, 33-45.
- 鈴木重尚, 1970b, 氷の微結晶の粗粒化に関する研究 (III). 低温科学, 物理篇, **28**, 47-61.
- Urai, J.L., Means, W.D. and Lister, G.S., 1986, Dynamic recrystallization of minerals. In Heard, H.C. and Hobbs, B.E. eds., *Mineral and Rock Deformation: Laboratory Studies — The Paterson Volume. Am. Geophys. Un. Geophys. Monogr.*, **36**, 161-199.
- 若浜五郎, 1962a, 氷の塑性変形について I, 単結晶氷の塑性変形と転位網. 低温科学, 物理篇, **20**, 57-75.
- 若浜五郎, 1962b, 氷の塑性変形について II, 単結晶氷の塑性変形の転位論的解釈. 低温科学, 物理篇, **20**, 77-100.
- 若浜五郎, 1962c, 氷の塑性変形について III, 氷の応力緩和. 低温科学, 物理篇, **20**, 101-116.
- 若浜五郎, 1962d, 氷の塑性変形について IV, 氷のフランク・リード源の長さ, 氷の層構造, 氷の加工軟化. 低温科学, 物理篇, **20**, 117-130.
- 若浜五郎, 1964, 氷の塑性変形について V, 多結晶氷の塑性変形. 低温科学, 物理篇, **22**, 1-24.