

## 三軸試験における岩石の極脆性および脆性破壊

著者	安武 由充, 岩松 暉
雑誌名	鹿児島大学理学部紀要. 地学・生物学
巻	19
ページ	133-147
別言語のタイトル	Very Brittle and Brittle Fractures of Experimentally Deformed Rocks
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10232/00001716">http://hdl.handle.net/10232/00001716</a>

## 三軸試験における岩石の極脆性および脆性破壊

安武 由充\*・岩松 暉\*\*

(1986年9月11日受理)

Very Brittle and Brittle Fractures of Experimentally Deformed Rocks

Yoshimichi YASUTAKE\* and Akira IWAMATSU\*\*

### Abstract

The brittle fractures of experimentally deformed rocks are studied in detail under the microscope in order to discuss the faulting process. Experiments are carried out under confining pressure of 1, 50, 100 and 200 MPa at room temperature with strain rate of  $10^{-4}$ /sec. Cretaceous coarse-grained sandstones from Amakusa are used for the test specimens in the experiments.

In uniaxial compression tests, extension fractures parallel to the loading axis are formed. Microcracks occur at the grain-by-grain contacts by the stress concentration.

In triaxial compression tests, macroscopic shear fractures or faults are formed after the generation of microcracks. They are composed of three types; such as (1) microscopic feather fractures, (2) microcracks formed by stress concentration and (3) grain-boundary cracks and their related cracks. Most of them are oblique to the loading axis and show zig-zag pattern. Major faults are produced by the extension of latter two types of microcracks which act a part of Griffith cracks during faulting.

Sheared zones are formed by fracturing between two or more parallel and/or anastomosing faults. And congruous fracture steps are produced on the main fault planes in the experiments.

### はじめに

構造地質学の分野では、近年定性的な議論からより定量的な議論をする方向へと変わってきた。岩石力学はその代表的な手法の一つであり、それによって得られたデータ、例えば強度やダクティリティーなどを野外調査の結果と合わせることによって、より確実な議論が可能になってきた。また、岩石力学は、自然界に見られる構造のモデル実験としても有効であり、野外で実際に見られる地質構造のメカニズム解明に大きな役割を果たしている。

岩石破壊過程の研究もその一つであり、特に断層の形成過程に関連付けたいくつかの研究が行なわれてきた。

例えば、FRIEDMAN, PERKINS and GREEN (1970) は、花崗岩と石灰岩を使用した実験により巨視的な剪断破壊の形成過程を論じた。すなわち、まず、エシェロン状に配列した粒界や劈開に沿っ

\* 熊本県立水俣高校 Minamata High School, Minamata, 867 Japan.

\*\* 鹿児島大学理学部地学教室 Institute of Earth Sciences, Faculty of Science, Kagoshima University, Kagoshima, 890 Japan.

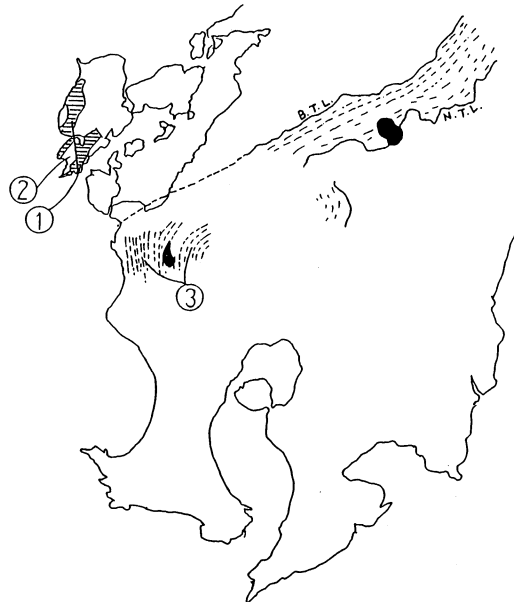
て滑りが発生する。さらに、その滑りに伴って $\sigma_1$ 方向の伸張割れ目が形成され、それが先の滑り面を連結することによって巨視的な破壊面が形成されるとした。また、小出・星野(1967)、KOIDE(1971)は粗粒砂岩の実験に基づき、エシェロン状に配列した微小割れ目の先端部に伸張割れ目が生じ、それによってさらに応力が集中し、変形帯が形成され、巨視的な剪断破壊が生じると考えた。一方、TAPPONNIER and BRACE(1976)は花崗岩による実験で、破壊を規制するのは、 $\sigma_1$ 方向と高角度をなした、異なった物理的特性をもつ鉱物同士の境界から生じる伸張破壊であると論じた。さらに、永広・大槻・北村(1974)は頁岩による実験に基づき、エシェロン状に配列した剪断性の割れ目が、 $\sigma_1$ 方向に対しより大きい角度をなす方向に成長・連結することによって、巨視的な剪断帯に発展すると考えた。

これらの報告により、破壊のメカニズムが次第に明かになってきた。しかしながら、それぞれの報告は、見解が異なっている部分も多い。したがって、今回それらの問題点を検討するために、基礎的なフラクトグラフィの記載を行なった。

実験は、鹿児島大学型三軸圧縮試験機(岩松・中其, 1980)を使用し、常温下で歪速度 $10^{-4}/\text{sec}$ 、封圧1, 500, 1000, 2000 kg/cm<sup>2</sup>一部3000 kg/cm<sup>2</sup>で行なった。主に乾燥試料を用いたが、一部間隙水圧試験も実施した。試料として、天草下島南部地域の白亜系および古第三系砂岩、北薩地方四万十帯の白亜系砂岩、セラミックを使用した。この中でも砂岩、特に天草白亜系粗粒砂岩について詳細な研究を行ない、他は参考にとどめた(第1図)。

供試体の形状は、直径19.5mm、長さ39.0mmの円柱形であり、その両端面の平行度が500分の1となるように整形してある。

観察は、破壊した試料内に生じた最終破断面と直角方向に作製した薄片、または破壊が起こる直前に永久歪が生じた時点で除荷した試料の薄片について行なった。

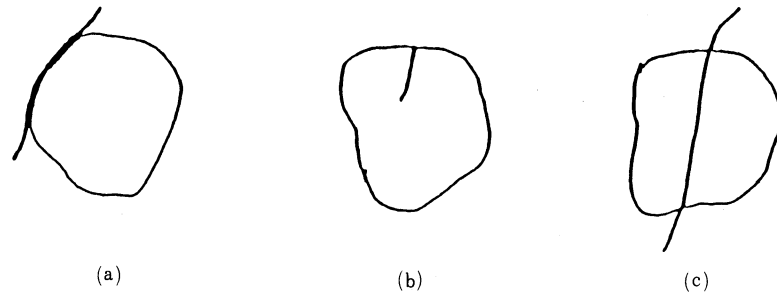


第1図 試料採取地点

- ① 天草白亜系砂岩
- ② 天草古第三系砂岩
- ③ 四万十帯白亜系砂岩

なお、ここで本論文で使用する微小割れ目の用語について定義しておく。本実験で観察された微小割れ目には、形態だけから分類して第2図に示す3種類がある。(a)は粒子と粒子、または粒子と基質あるいはセメントとの境界に入る割れ目である。(b)は粒子の内部に生じている割れ目である。(c)は粒子を貫いている割れ目である。それぞれ、粒界割れ目 (grain boundary crack), 粒子内割れ目 (intragranular crack), 粒子を切る割れ目 (transgranular crack) と呼ぶことにする。その他にも、粒子間の基質およびセメントに入る場合も見られる。

試料中には、もともと存在する割れ目も見られる。しかしながら、それらは極めて細いものや、開口部がセメント物質で充填されているものであり、数も少ない。また、それ以外に healed microfracture (伸張割れ目の痕跡) も多く見られる。これらの割れ目は観察から除外した。



第2図 微小割れ目の形態

- (a) 粒界割れ目 (grain boundary crack)
- (b) 粒内割れ目 (intragranular crack)
- (c) 粒子を切る割れ目 (transgranular crack)

## 観察・測定結果

岩石に荷重を加えた場合、極脆性および脆性破壊では、最終的に1ないし数本の巨視的な割れ目が入る。第3図は、破壊した岩石から作成した薄片のスケッチである。第4図は、第3図で示した試料の応力-歪線図である。第3図から明らかのように、封圧を加えた場合と加えない場合では、割れ方に明瞭な違いがみられる。一般に封圧下において破壊した試料では、1ないし多くても2の荷重軸と斜め方向の剪断割れ目が特徴的である。それに対し、封圧を加えない場合、伸張割れ目の発達为主であり、割れ目の数も多くなっていく。また、第4図を見ればわかるように、岩質に関係なく封圧が高い場合ほど強度が大きくなっている。さらに、歪の量も封圧に比例し、その増加にしたがって大きくなる。

以下に、封圧を加えない場合 (一軸試験) と封圧を加えた場合 (三軸試験) に分けて、それぞれの割れ方について観察および測定結果を述べる。

### 1. 一軸試験

岩質によって多少の違いが見られるが、破壊を特徴付けているのは荷重軸に平行な割れ目である。これは、その方向および割れ目の面に対して垂直方向の変位を伴っていることから、伸張割れ目であることがわかる。

第3図の(A)~(C)は一軸圧縮下で破壊した砂岩の薄片スケッチである。(A)と(C)は粗粒、(B)は細粒



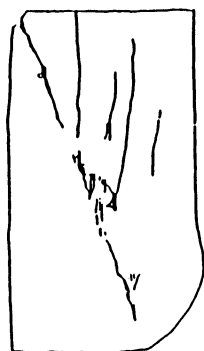
(A) M5-2



(B) M2-2



(C) M1-2

(A)~(C)  $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 

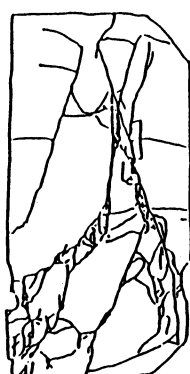
(D) M5-10

 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 

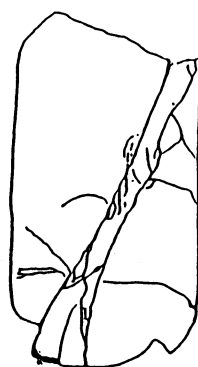
(E) M5-3

 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 

(F) M4-4

 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ 

(G) CE-1

 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ 

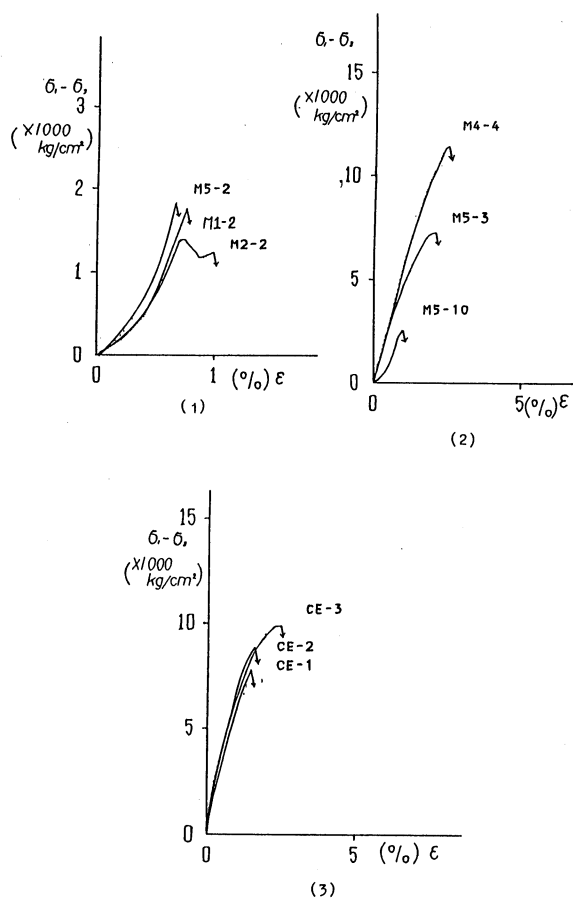
(H) CE-2

 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ 

(I) CE-3

 $3000\text{kg}/\text{cm}^2$ 

第3図 破壊した試料の薄片スケッチ  
 (A)~(F)砂岩 (G)~(I)セラミック  
 試料の下の数字は封圧を示す



第4図 第3図に示した試料の応力-歪線図

砂岩である。

細粒砂岩の場合 (第3図(B)), くさび型を呈し試料全体を貫くような長い伸張割れ目が特徴的である。それは試料中に平行して2~3入り, 試料の下端付近では次第に荷重軸と斜交するように向きを変えていく。

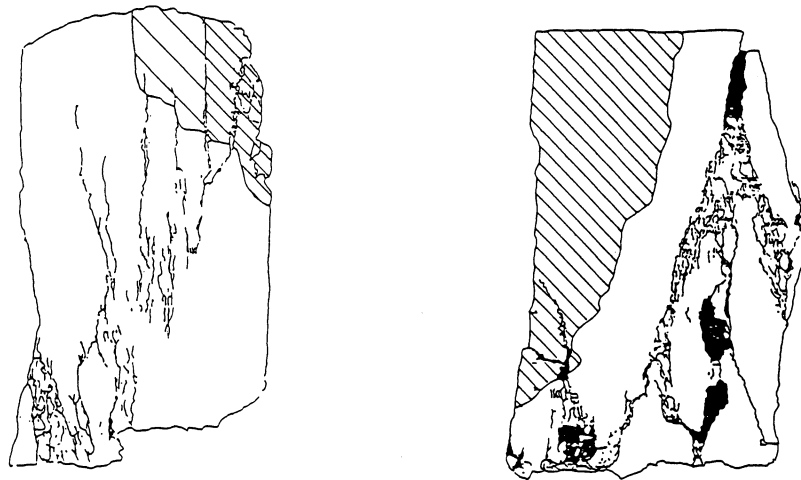
粗粒砂岩の場合 (第3図(A), (C)), 細粒砂岩と比べ開口が小さく短い割れ目の比率が高くなる。また, 第3図(C)のように, 荷重軸と斜交する単一の割れ目を伴っていることも多い。この斜め方向の割れ目は, 面に沿う変位が見られることから剪断割れ目であることがわかる。剪断割れ目沿いでは特に破壊が著しく, 後述する三軸圧縮下のそれと比べ面自体が判然としない場合が多い。また, 第3図(A)のように, 対角線上に伸張割れ目が配列して入る場合も見られる。

微視的に見た場合, 割れ目は応力集中点である粒子同士の接触部に入っていることが多い。図版I-(A)はその代表的な形態を示している。粒界の影響を受けながら, 複数の粒子の応力集中点をつらねて荷重軸とほぼ平行な割れ目が入っている。それらの割れ目は, 面に垂直の変位が見られる伸張割れ目である。後述する三軸試験下において断層沿いに見られる微小割れ目に, 割れ目の方向および性質が類似している。ただし, 三軸試験で見られる割れ目は, 長さや開口が著しく小さい。その他, 面に沿う変位が見られる割れ目も存在する。割れ目の形態は一本の直線状を呈するものが多いが, ジグザグ型を呈する割れ目も見られる。また, 双晶や劈開または包有物の影




響を受け、それらの異方性に沿って割れ目が入っている場合も見られる。石英粒子内においては、healed microfractureの影響を受け、それに沿って割れていることもある。しかしながら、これらは、三軸試験下の場合ほど顕著ではない。

基質及びセメントの違いによって、割れ目の入り方にやや違いが見られる。第5図は、一軸圧縮下で破壊した試料の薄片スケッチである。図の密な斜線部分は、9割以上が緑泥石セメントであり、わずかに方解石セメントが入っている。疎の斜線部分では、緑泥石セメントが3割以下に減少し、代わりに方解石セメントが多くなっている。白抜きの部分では9割以上が方解石セメントで占められ、緑泥石セメントはわずかに点在するに過ぎない。両試料を通じて、破壊は方解石セメント部で著しく緑泥石セメント部では少ない。図版I-(A)は、方解石セメント部の破壊形態である。このように粒子と粒子の間が方解石セメントでこう結されている場合、応力集中による伸張割れ目が、方解石セメントをも貫いて入っていることが多い。一方、緑泥石セメント部では、粒子内および粒子を切る割れ目が方解石セメント部に比べ少ない。しかしながら、荷重軸と斜め方向の粒界にそって割れ目がみられることがあり、そのなかのあるものは割れ目の延長方向のセメント内にまで伸びている。ただし、三軸試験下のそれに比べ数は少ない。これらのセメントや基質の違いは、破壊強度に影響を与えている可能性がある。

鉱物種による割れ目の入りやすさに目だつた傾向はあまりなく、わずかに石英中に比較的多いような傾向がみられる。しかしながら、観察しやすさの関係もあり、あまり判然としない。ある地点から採集した試料で、同一地点の試料が示す破壊強度の98%で除荷した試料について観察すると、既存の荷重軸と平行な石英脈にそって割れ目が入っている他は割れ目は見られない。しかしながら、同一地点の試料でも強度が著しく異なることがあり、また、顕微鏡の分解能力も関係しているため、まったく割れ目が存在しないとは断定できない。



第5図 セメントの分布状態

-  緑泥石セメント9割以上
-  方解石セメントと緑泥石セメント 約7:3
-  方解石セメント9割以上

## 2. 三軸試験

封圧下における試験では、岩質に関係なく試料中に1ないし2の荷重軸と斜交した巨視的な割れ目が形成される(第3図)。これは、その方向および割れ目の面に沿う変位が見られることから、剪断割れ目、すなわち断層であることがわかる。ただし、それから荷重軸と垂直方向に分岐している割れ目も見られるが、それは除荷作用に伴う伸張割れ目である。

砂岩の場合、封圧の大きさにより多少割れ方に違いが見られる。より封圧が低い場合(第3図(D)封圧 $500\text{kg}/\text{cm}^2$ )、断層面から分岐し荷重軸方向に伸びていく割れ目が多い。これは、割れ目の面と垂直方向の変位を持つ伸張割れ目であり、そのなかには試料の端まで達している長いものもある。この割れ目は、一軸試験下の割れ目と同様、粒界の影響を受けながら粒子同士の接触部を貫いている。封圧が大きくなるにしたがって(第3図(E)封圧 $1000\text{kg}/\text{cm}^2$ , (F)封圧 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ )、巨視的な破壊は、断層部のみかあるいはその近傍に集中し、それらの分岐した割れ目は少なくなる。

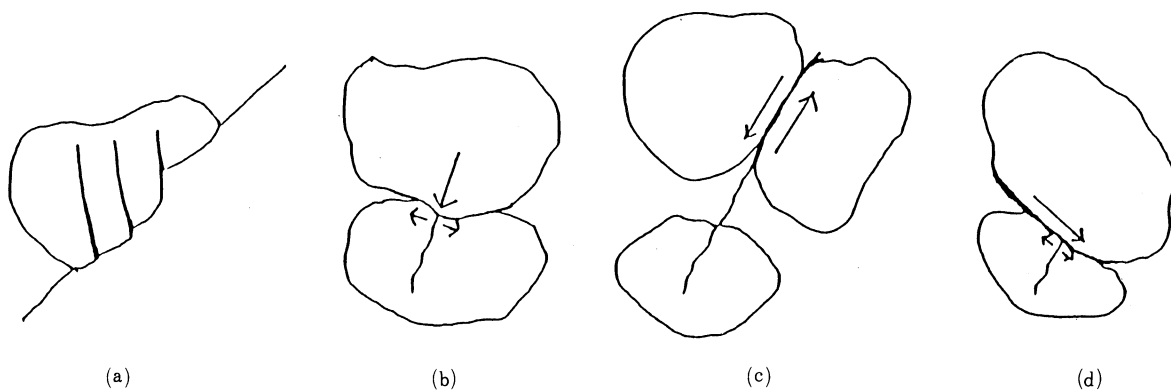
三軸試験の場合、破壊した試料内に見られる微小割れ目には大きく分けて3種類のものがある。

(1) 断層沿いのみ見られる割れ目(第6図(a), 図版I-(B))

他の微小割れ目に比べてやや開口の程度が大きく、くさび形を呈する。荷重軸に対し断層と反対方向にわずかに傾斜しているなどの特徴を持っている。この割れ目は、断層に接するかあるいはその近傍にのみ存在し、特に、変位が大きく破碎帯が形成されているような断層沿いに顕著である。したがって、変位が小さい断層や断層が形成される前に除荷した試料内には見られない。

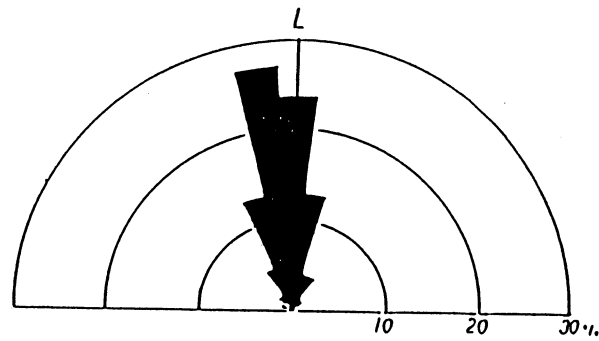
(2) 試料全体に見られる割れ目

a) 粒子同士の接触部である応力集中点に入る割れ目(第6図(b), 図版I-(C))。一軸試験のそれと比べ、開口が小さく荷重軸に対して斜め方向を示すものが多い(第7図)。第7図は、破壊した試料内において測定した微小割れ目の方向別頻度を、一軸試験と三軸試験(封圧 $2000\text{kg}/\text{cm}^2$ )に分けて示したものである。ただし、一軸試験の場合その性質上長い割れ目が多いが、この場合顕微鏡の視野内における平均的な方向を測定した。また、三軸試験では、上記の(1), (2)aの割れ目と共に、後述する(2)bの中の粒子内に入る割れ目も含んでいる。測定は、鏡下で試料の長軸方向に直交する $5\text{mm}$ 間隔の測線にかかる割れ目について行なった。測定数は、一軸試験と三軸試験で、それぞれ143と114であり、 $10^\circ$ 間隔毎に図に示した。図で示す通り、一軸試験の場合、その60%以上が荷重軸方向をはさんで $\pm 15^\circ$ 以内に集中している。それに対し、三軸試験の場合、

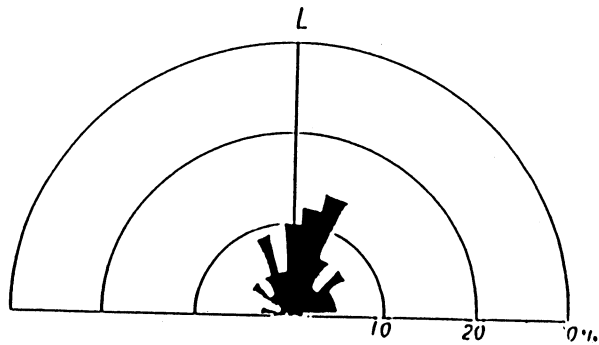


第6図 三軸試験で観察される微小割れ目





(a) 一軸試験

(b) 封圧2000kg/cm<sup>2</sup>

第7図 微小割れ目の方向別頻度測定結果は10°毎に示す

方向の分散が大きく、荷重軸に対して斜め方向の微小割れ目の割合が多くなっている。両者とも荷重に対して一方に偏りが見られるが、それは前述の(1)の割れ目が反映していることによる。

より微視的にみた場合、この割れ目は2方向からなるジグザグ型を示している。応力集中によって生じたこの割れ目は、後述するように単純な伸張割れ目ではなく、剪断破壊を伴っている可能性がある。

b) 荷重軸に対して斜め方向の粒界に入っている粒界割れ目(第6図(c), 図版I-(D))。この割れ目は、その一般的な方向および小規模だが破碎帯を伴うことから、剪断性のものであることがわかる。なお、それが同方向の延長部にある粒子や基質、セメントにまで延長することもある(図版I-(E), (F))。また、粒界割れ目から荷重軸方向に分岐する粒子内割れ目も見られることがある(図I-(G), (H))。これら粒界割れ目の延長部の割れ目、および粒界割れ目から分岐した割れ目は、応力集中によって生じた割れ目同様2方向からなるジグザグ型を示している。このジグザグ型は、荷重軸方向およびそれと斜め方向の成分からなっている。ただし、(2)aの割れ目に関しては、局所的な $\sigma_1$ の影響を受けている傾向がある。

一方、破壊直前、すなわち断層が形成される前に除荷した試料について観察すると、上述の(2)aおよび(2)bの割れ目が見られる。(1)の割れ目に関しては、断層沿いのみ見られ、断層が生じる以前の試料には認められない。

断層は粒子を切ることもあるが、粒界に沿って走っていることが多い。また、断層の変位が小さく断層面の構造が保存されている試料について、図版II-(A), (B)のような形態が観察された。

それは、断層が、粒界を通り荷重軸方向と斜め方向をなす割れ目と、粒子またはセメントを切り荷重軸とほぼ平行な割れ目が、交互に連続することによって形成されている。変位が小さいためはっきりしないことが多いが、荷重軸方向と斜めをなす割れ目において、面に沿う変位が見られる部分が存在する。また、荷重軸方向と平行する割れ目では、面に垂直方向の変位が見られる。これらのことから、前者は剪断割れ目であり、後者は伸張割れ目であることがわかる。

断層が生じた場合、その変位の進行に伴って破碎帯が発達する。今回の実験でも、上述のように断層がほとんど1本の線で近以できるものから、1 mm以上の破碎帯を伴うものまで様々な形態が見られた。図版Ⅲ-(A)ではその一例であるが、一定の幅をもった帯状部分において、著しい破壊が生じている。一方図版Ⅲ-(B), (C)では、断層が2本の平行した断層に分岐あるいは結合した形態を示し、その間の破壊は前のものほど著しくない。他の場合も、断層が2あるいはそれ以上に分岐もしくは結合した形態を示し、程度の差はあるがその間で破壊が生じている。また、破碎帯の幅は封圧の大きさによって変化する。第1表は、封圧および岩質別に破碎帯の最大幅を測定しその平均値を示したものである。ただし、一般に破碎帯は試料の上下端で急激に拡大するので、それ以外の部分で測定した。この表に示すように、天草砂岩、四万十砂岩、セラミックとも、封圧の増大につれて明らかに破碎帯の幅が大きくなっている。

表1 破碎帯の幅

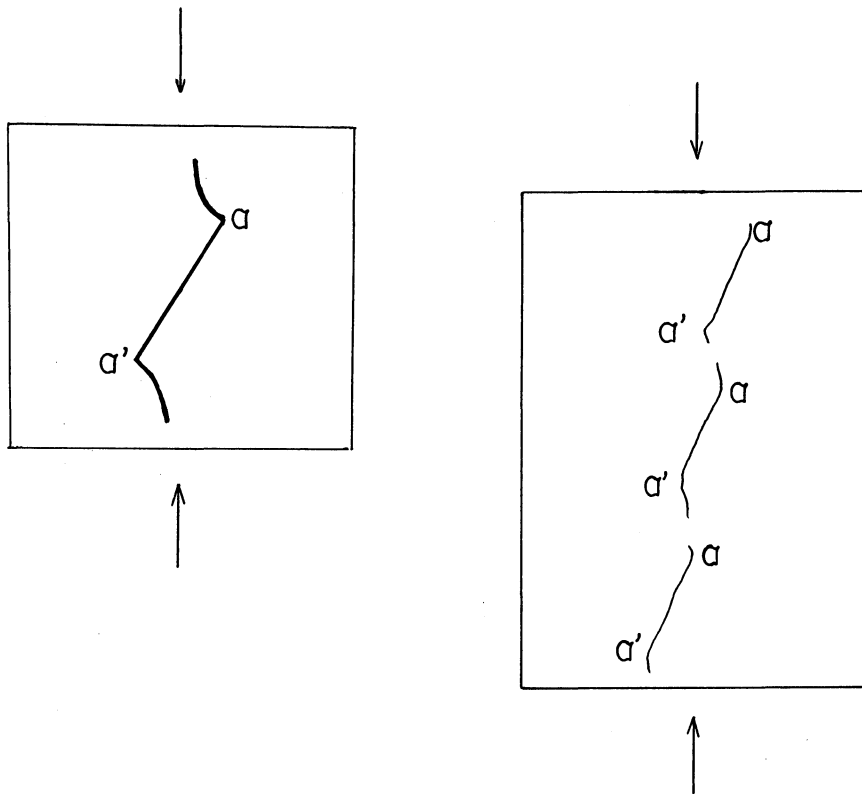
封 圧 試 料	500 kg/cm <sup>2</sup> (mm)	1000 kg/cm <sup>2</sup> (mm)	2000 kg/cm <sup>2</sup> (mm)	3000 kg/cm <sup>2</sup> (mm)
天草砂岩	0.35	0.59	0.93	—
四万十砂岩	0.21	0.5	0.85	—
セラミック	—	0.15	0.6	1.6

## 考 察

### 1. 断層の形成過程

今回の実験において、封圧下において破壊した試料では、巨視的な剪断破壊面、すなわち断層が生じる。前述のように、岩石の剪断破壊についてはいくつかの報告がなされており、それぞれ見解が異なる部分も見られる。その代表的なものを挙げる。まず、破壊に先だてて生じる微小割れ目の発生場所は粒界かそれとも粒子内かということ。次に、それらの微小割れ目は、伸張性のものかそれとも剪断性のものか。さらに、それらの微小割れ目がどのように発展することによって、巨視的な剪断破壊、すなわち断層に移行するのか、という点である。以下に、今回得られた結果より、これらの点も含めて考察を行なう。

BRACE and BOMBOLAKIS (1963, 第8図) はその実験より、あらかじめ作った単一のクラックに圧縮荷重を加えた場合、最も活動しやすいのは荷重方向から30°ほど傾いたクラックであると示した。また、その面に沿う滑りによって、湾曲しながら荷重方向に成長する2次的な伸張割れ目



第8図 割れ目の成長 (BRACE and BOMBOLAKIS, 1963)

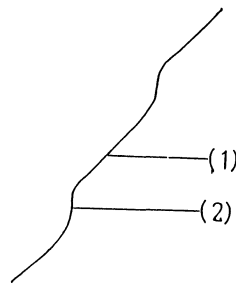
が生じている。巨視的な割れ目に移行するには、さらに複数のクラック同士の干渉作用が必要であることを強調している。一方、今回の実験結果によると、断層は、荷重方向と斜交し主に粒界に沿って入っている剪断割れ目と、荷重方向にほぼ平行であり主に粒子やセメントに入っている伸張割れ目とからなっている。これらの形態やそれぞれの割れ目の性質は、BRACEらの実験結果と非常に類似しており、同じようなメカニズムで形成されたものと考えられる。また、破壊直前、すなわち断層が形成される前に除荷した試料について観察すると、前述の第6図、(b)、(c)、(d)の微小割れ目が見られる。これらの微小割れ目もまた、断層同様2方向の成分からなるジグザグ型を呈していることは前に述べた。この割れ目について、ジグザグ型を形成する荷重軸方向の成分が伸張破壊、それと斜めをなす成分が剪断破壊であると仮定すると、BRACEの実験結果を適用できるものと考えられる。この場合、荷重方向と斜めをなす成分は、粒界（潜在的な弱面）に相当する結晶学的な異方性の影響を受けている可能性が考えられる。

以上のことから、前述の問題点を考えてみる。まず、初期の微小割れ目が発生する場所である。破壊前に取り出した試料から明かなように、粒界にも粒子内にも割れ目は入っている。したがって、今回の実験結果からだけでは、どちらだとは断言できない。次に、微小割れ目の性質である。粒界に入る場合、前述のように、荷重方向と斜交していること、小規模だが破碎帯を伴うこと、および間接的な証拠であるが、剪断によって生じる伸張割れ目（第8図のaおよびa'から発生する割れ目）を伴う場合があることから剪断割れ目であると考えられる。また、粒子内に入るものも、前述のように単純な伸張割れ目ではなく、剪断部分を伴っていると考えられる。巨視的な剪断破壊、すなわち断層に至る過程の問題については、いままで述べてきたことも含め次にまと

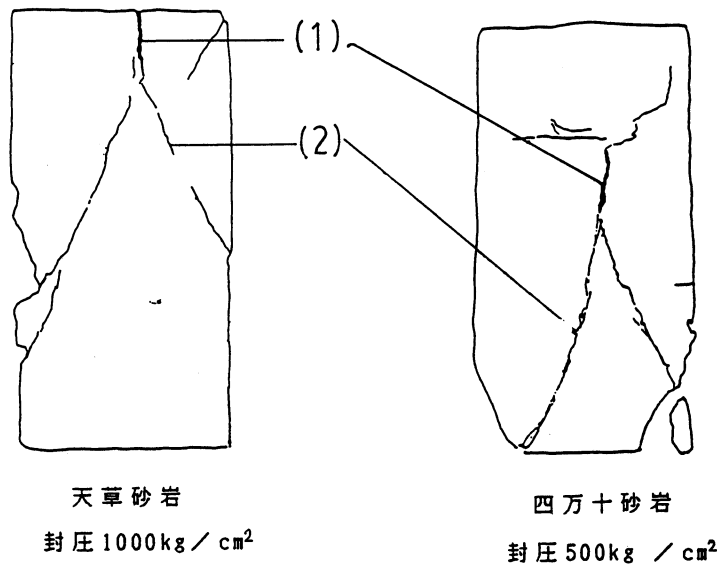
めてみる。

今回の実験における断層の形成過程は、以下の通りである。

岩石に荷重を加えた場合、破壊強度に近づくと、粒子接触部の応力集中により粒子内に割れ目が生じる。また、それと共に、潜在的なクラック (griffith crack) である粒界のなかで、適当な方向をもつものが活動を始める。両者とも荷重軸方向と斜交しているものが多い。また、後者の活動により、その延長方向の粒子や基質、セメント内に割れ目が入ってくる。これらの、griffith crack である粒界、および2次的に形成された griffith crack であるその他の微小割れ目が、第8図の a a' として成長するものと考えられる。さらに、試料中に散在するこれらの微小割れ目が、互いに干渉し相互作用を及ぼし合うことによって断層が形成されると考えられる。つまり、第9図の(1)の部分が、粒界割れ目およびそれに伴う割れ目、または応力集中によって生じた適当な方向を持つ割れ目であり、それらが活動 (滑る) することによって(2)である割れ目が生じて連結し、断層へ移行すると考えられる。ただし、(2)の部分は、(1)と同様弱面である粒界やその他の割れ目、あるいは他の異方性、例えば劈開や healed microfracture などに影響されることは



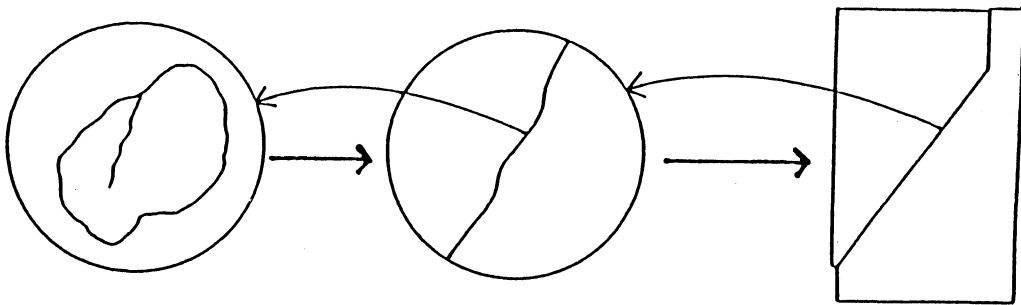
第9図 模式的な断層図  
(1) 剪断部 (2) 伸張部



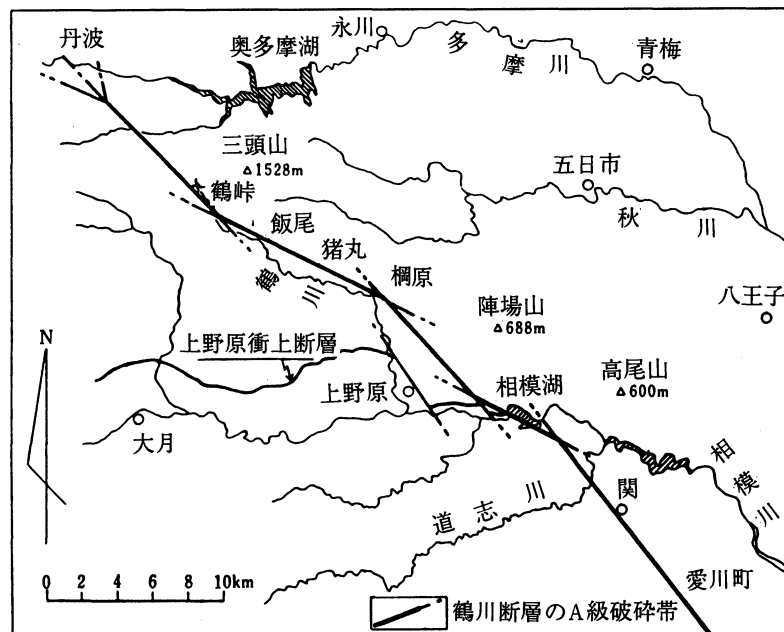
第10図 薄片スケッチ  
荷重軸に対して斜交する割れ目と平行する割れ目が連結している

十分に考えられる。

さらに、第10図を見るとわかるように、このようにして形成された断層もまた、試料全体で見ただけの場合ジグザグ型を形成する1成分となっている。つまり、断層がよりオーダーの大きい場合の剪断部（第10図(2)）の役割を果たしており、第8図同様その先端で伸張割れ目（第10図(1)）が生じている。また、微視的に見た場合、粒子内に見られる微小割れ目もまたジグザグ型をしており、それが断層形成の際、剪断部分の役割をするということは前に述べた。これらのことから考えると、断層は、小規模なものから大規模なものへと、伸張および剪断の2つの成分からなるジグザグ型の割れ目が、よりオーダーの大きい場合の剪断部分の役割を果たしながら発展していく過程で形成されると考えられる（第11図）。第12図は破碎帯を追跡することによって得られた鶴川断層のトレースである（吉田・木村, 1975, 1976; YOSHIDA, 1986）。図からわかるように、形態だけから見たら今回の実験結果に非常に類似している。仮に、今回の実験結果が適用できると仮定したら、この断層は、より小さい断層が成長した結果生じた、さらに大きいオーダーの断層であるという可能性も考えることができる。



第11図 異なったオーダーの断層



第12図 鶴川断層分布図 (吉田・木村, 1976)

参考までに、試料中の石英内に見られる healed microfracture にも、ジグザグ型を示すものがあることを付け加えておく (図版Ⅱ-(C))。さらに、図版Ⅱ-(D)では異なった形態を示す2つの healed microfracture が見られ、一方はジグザグ型であり他方はほぼ直線状を呈している。それらは別の方向性を示し、おそらく、過去において条件および方向の異なる破壊が少なくとも2度生じたものであろうことが推定される。

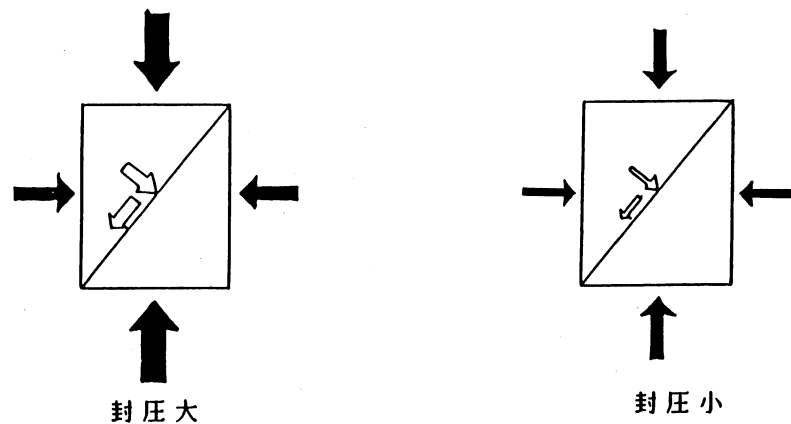
## 2. 破碎帯

KOIDE (1971) は、エシェロン状に配列した微小割れ目の先端部で伸張割れ目が生じ、それによってこの部分全体が応力に対して弱くなり変形帯が形成されると述べている。ただし KOIDE によると、破碎帯は変形帯の一種だとしている。しかしながら、断層の形成過程で述べたように、その初生的な状態において断層は近似的に1本の線状をなしており、変形帯が断層に移行した証拠は認められない。また、前述の変位が進んだ断層の近傍に見られる微小割れ目の多くは、その特徴から判断して、FRIEDMAN and LOGAN (1970), CONRAD and FRIEDMAN (1976) における microscopic feather fracture であると思われる。したがって、断層に先だって生じたものではなく、断層運動によって2次的に生成されたものであると考えられる。これらのことから、今回の実験結果においては、KOIDE の考え方をそのまま当てはめることはできない。

観察で述べたように、2あるいはそれ以上の平行した断層が分岐、または結合し、その間の部分で破壊が生じている。これらが発展し、破壊がさらに進行することによって、破碎帯が形成されるものと考えられる。分岐あるいは結合する様式として、初生的な断層の剪断部分が同方向に延長し分岐する、剪断部分から荷重方向に分岐する、もしくは別の断層が結合する、の3つの可能性を第13図に示す。また、封圧の違いによる破碎帯の幅の相違については、前述のように今回の実験では KOIDE の結果と反対であり、封圧が大きい場合ほど破碎帯の幅は大きくなっている (第3図, 第1表)。これは、封圧が大きくなるにつれて強度が大きくなることに関係している。強度が大きくなるにしたがって、断層面が形成される瞬間にその剪断面にかかる垂直応力および剪断応力が増大する (第14図)。この垂直応力および特に剪断応力の増大と、前述の分岐あるいは結合する断層の十分な成長と破壊が関係し、これらのことが破碎帯の幅を規制していると考えられる。つまり、剪断応力の増大により、2あるいはそれ以上の断層が十分に成長し、完全に分岐・結合する。また、垂直応力の増大により、その間の部分の破壊が十分に進行する。例えば図版Ⅲ



第13図 破碎帯の形状  
分岐・結合する断層の例



第14図 断層面にかかる垂直・剪断応力

一(C)のように、封圧が低い場合、断層が平行して入っているが、その結合が充分ではなく、また完全な破壊に至っていない。これらのことから、断層面にかかる剪断応力および垂直応力が大きい状態、すなわち封圧が大きい場合程、破碎帯の幅は大きくなるものと考えられる。ただし、野外においては、封圧のみではなく、岩質・間隙水圧・歪速度その他の諸条件が影響してくるものと思われる。

### 3. Slickenstep

従来、野外において断層のセンスを知るうえで、粗滑法則は多いに活用されてきた。しかしながら、近年この法則に対する疑問が挙げられており、多くの実験研究がこの問題をめぐって行なわれてきた。

植村 (1977) はこれらの研究をまとめ、断層運動の発展段階と対比しながら粗滑法則の有効性について論じている。

断層の鏡肌に見られるステップ構造には、直接硬い岩石を刻んでできる fracture step と、断層ガウジや2次鉱物の成長によって形成される accretion step の2つに大別され、それぞれさらに細分される。植村のまとめによると、この中で常に粗滑法則が成り立つ(適合する)のは、accretion step の1つであり2次鉱物の成長によって形成される crystal fibre step のみである。他のものは、同じく accretion step に属し、その中の gouge type の1つである剥ぎ取り型 (strip type) が多くの場合成り立っている。しかしながら、それ以外はほとんど全てが成り立たない。

Fracture step に関して言えば、植村は現在までの剪断面の形成機構に関する説から推定すると、粗滑法則が成り立たないものがほとんどすべてであることを指摘している。ただし、LAJITAI and LAJITAI (1974) の場合のみ適否いずれも判定し難い中立的な構造を呈している(小出・星野, 1967; KOIDE, 1971; 永広他, 1974; LAJITAI and LAJITAI, 1974; UI, 1973)。しかしながら、今回の実験では、明らかに粗滑法則が成り立つ結果が得られた(図版Ⅱ-(A), (E))。写真に見るように、断層面に対してより高角をなすステップ (riser) が、反対側のブロックの移動方向に面している。このことは、粗粒滑法則が成り立つことを示している。

また、今回の実験では、accretion step に属する gouge type の1つである摘み取り型 (pluck tupe) のものが観察された。図版Ⅱ-(F), (G)にその代表的な例を示す。これに関する理論的な考察は、GAY (1970) に詳しく解説されている。

## ま と め

これまで、今回行なった実験結果から、岩石の極脆性および脆性破壊、特に断層の形成過程について論じてきた。そして、得られた結果のなかには、過去の実験結果と一致することもあれば、全く異なっていることもあった。しかしながら、岩石の破壊は、個々の試料の物性や試験条件によって左右され、それが強度や破壊過程に大きく影響してくる。したがって、現段階では、さらにいろいろな物性・条件下における実験をすすめる、基礎的なデータを集めることが必要であると思われる。

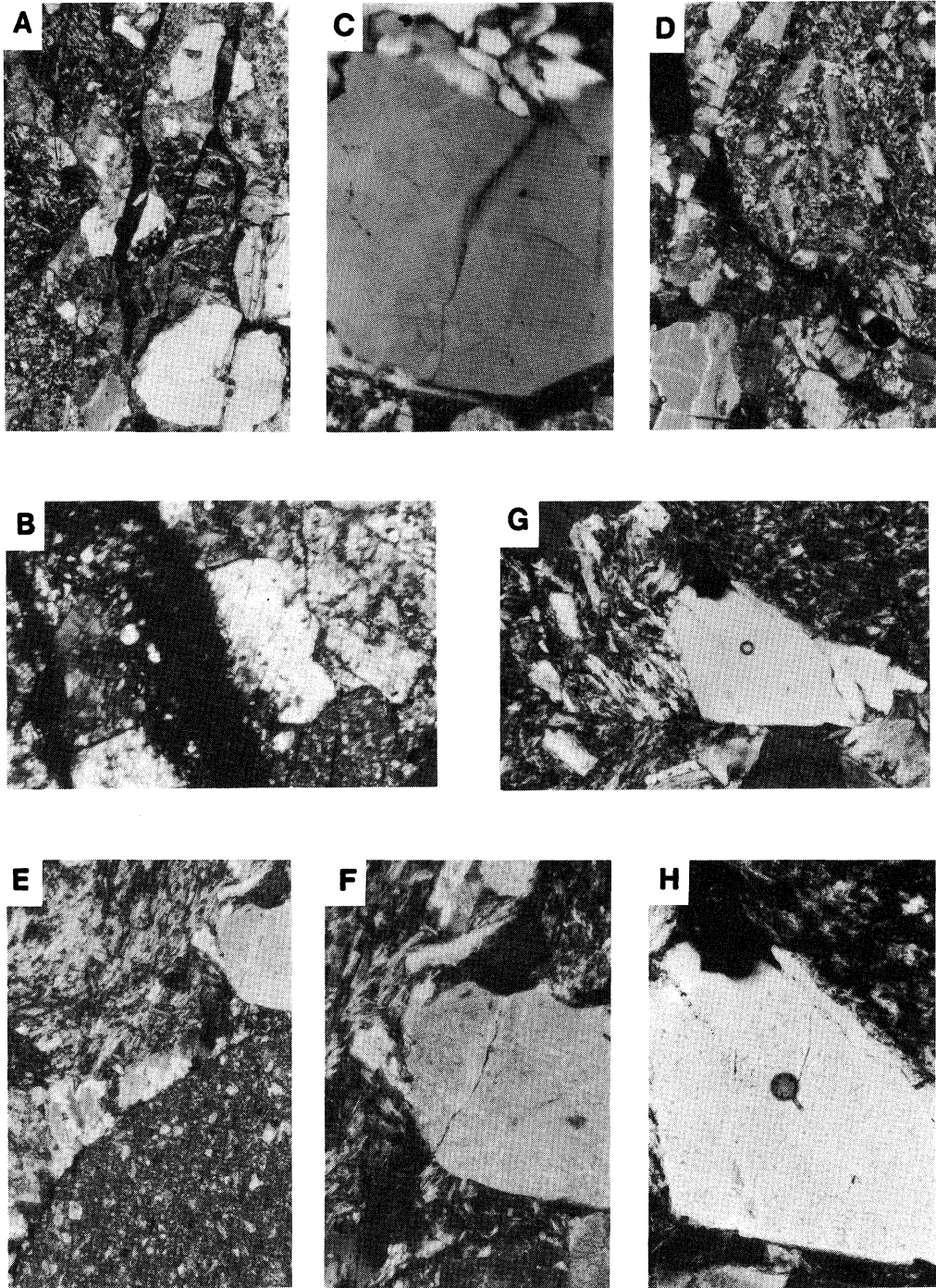
今回の実験により分かったことを、以下に述べる。

1. 断層は、初生的に、剪断部と伸張部の2つのタイプの割れ目によって構成される。また、このようにして形成された断層が、よりオーダーの大きい断層の剪断部分となりながら、断層は大きなものへと発展していく。
2. 破碎帯は、2またはそれ以上の断層が分岐あるいは結合し、その間の部分が破壊されることによって形成される。
3. 今回の実験結果から得られた fracture step では、明かに粗滑法則が成り立つ。

## 引 用 文 献

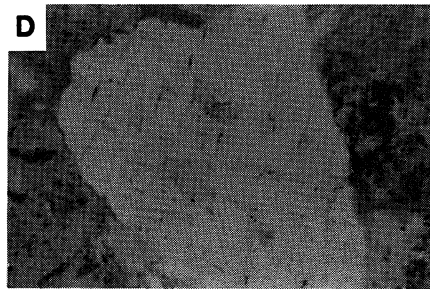
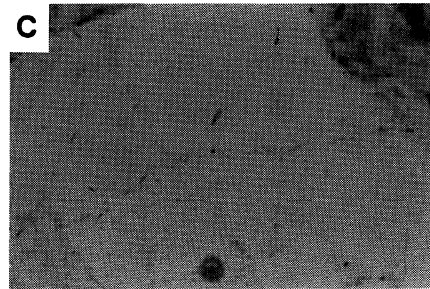
- BRACE, W. F. and BOMBOLAKIS, E. G. (1963) : A note on brittle crack growth in compression. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 68, no. 12, p. 3709-3713.
- CONRAD, R. E. II and FRIEDMAN, M. (1976) : Microscopic feather fracture in the faulting system. *Tectonophysics*, vol. 33, p. 187-198.
- 永広昌之・大槻憲四郎・北村信 (1974) : 高封圧下における岩石の割れ目の形態とその発達過程. *地質雑*, vol. 80, p. 555-558.
- FRIEDMAN, M. and LOGAN, J. M. (1970) : Microscopic feather fracture. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 81, p. 3417-3420.
- FRIEDMAN, M., PERKINS, R. D. and GREEN, S. J. (1970) : Observation of brittle-deformation features at the maximum stress of Westerly Granite and Solenhofen Limestone. *Int. J. Rock Mech. Sci.*, vol. 7, p. 297-306.
- GAY, N. C. (1970) : The formation of step structures on slickensided shear surface. *Jour. Geol.*, vol. 78, p. 523-532.
- 岩松暉・中其毅 (1980) : 鹿児島大学型岩石用高压三軸試験機的设计・製作. *鹿大理紀要 (地学・生物)*, no. 13, p. 77-90.
- KOIDE, H. (1971) : Fractures aligned en echelon and fracture patterns. *Soc. Mining Geol. Japan, Spec. Issue*, vol. 3, p. 107-114.
- 小出仁・星野一男 (1967) : 三軸変形下の岩石中の微小割れ目の発達について序報. *地震*, (2), vol. 20, p. 85-97.
- LAJITAI, E. Z. and LAJITAI, V. N. (1974) : The evolution of brittle fracture in rocks. *Jour. Geol. Soc. London*, vol. 130, p. 1-18.
- TAPPONNIER, P. and BRACE, W. F. (1976) : Development of stress-induced microcracks in Westerly Granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 13, p. 103-112.
- 植村武 (1977) : 断層面の構造と断層運動の進展過程—「粗滑法則」の再検討—. *地質雑*, vol. 83, p. 811-820.
- UI, H. (1973) : Mechanical properties and fault plane features of Sidara sandstone in uniaxial compression tests. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, vol. 21, p. 59-71.
- 吉田鎮男・木村敏雄 (1975) : 断層に沿う破碎の強弱と地すべり—鶴川断層の例—. 第12回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, p. 135-136.
- (1976) : 鶴川断層破碎帯の地質—1976年6月15日山梨県東部地震との関連—. 第13回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, p. 97-98.
- YOSHIDA, S. (1986) : Mode of fracturing along the Tsurukawa fault, west of Tokyo. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II*, vol. 21, no. 2, p. 101-114.





- (A) 一軸試験伸張割れ目 天草白亜系粗粒砂岩  
牛深市内の原東方 45×
- (B) 断層近傍の割れ目 天草白亜系粗粒砂岩  
封圧2000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市深海町東南方 90×
- (C) 応力集中点に生じる割れ目 天草白亜系粗粒砂岩  
封圧2000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市内の原東方 90×
- (D) 粒界割れ目 (45×)
- (E) 粒界割れ目の延長 (45×)

- (F) (E)の拡大 (90×)
- (D), (E), (F)天草白亜系粗粒砂岩  
封圧2000kg/cm<sup>2</sup> 牛根市内の原東方
- (G) 粒界割れ目から荷重方向に分岐する割れ目 (90×)
- (H) (G)の拡大 (180×)
- (G), (H)天草白亜系粗粒砂岩  
封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 間隙水圧500kg/cm<sup>2</sup> 牛根市内の原東南方



- (A) 断層の初生的な形態 平行ニコル  
 (B) (A)と同じ 直行ニコル  
 (A), (B)天草白亜系粗粒砂岩  
 封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 牛根市内の原東方 45×  
 (C) healed microfracture (180×)  
 (D) (C)と同じ (90×)  
 天草白亜系粗粒砂岩  
 封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 間隙水圧500kg/cm<sup>2</sup>  
 牛根市内の原東南方

- (E) fracture step 天草古第三系中粒～細粒砂岩  
 封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市魚貫町 45×  
 (F) accretion step (pluck type) 天草古第三系中粒～細粒砂岩  
 封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市内の原西南方 45×  
 (G) accretion step (pluck type) 天草白亜系粗粒砂岩  
 封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市内の原東方 45×



- (A) 破碎帯 天草古第三系中粒～細粒砂岩  
封圧1000kg/cm<sup>2</sup> 牛深市魚貫町 90×
- (B) 破碎帯 四万十対白亜砂岩  
封圧500kg/cm<sup>2</sup> 鹿児島県鶴田町平江 45×
- (C) 破碎帯 天草白亜系粗粒砂岩  
封圧500kg/cm<sup>2</sup> 牛深市内の原東方 45×