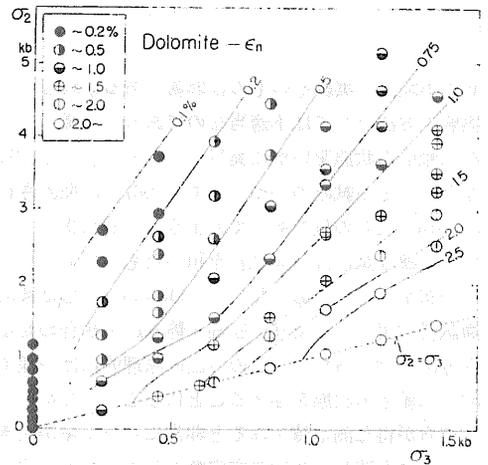


第4図 破壊のときの応力 (σ_1) を σ_2 と σ_3 の函数として示したもの

いうことは、延性の割合が減少すること、つまり脆くなるということである。

第4図 は破壊応力 (σ_1) が σ_2 と σ_3 と共にどう変わるかを示したもので、 σ_3 のみならず σ_2 と共に顕著に変わるものであることがわかる。この図で 破線で示した $\sigma_2 = \sigma_3$ の線上の値が、従来の三軸試験から知られていたものであるが、それは、全体のごく特殊な状態にあたってはいるもので、一般的な場合を伺い知るにはいかに不十分な情報であったかがわかる。

第5図 は延性の割合を示すものとして、破壊までの非弾性変形の大きさ (E_n) をとって、それが σ_2 と σ_3 と共にどう変わるかを示したものである。これによって、脆性から延性への遷移が、 σ_3 のみならず σ_2 によって著しい影響をうけるものであることがわかる。特に、延性度は σ_3 と共に増加するのに、 σ_2 と共に減少するものであるということが重要である。従って、「延性度は平均応力と共に増大するものである」というような従来の結果は正しくないものである。



第5図 破壊までの非弾性変形の大きさ E_n (延性の程度をあらわす) を σ_2 と σ_3 の函数として示したもの

このように、一般的な応力場での実験によって、これまで未知であった多くの諸問題が解明される可能性がある。とくに、脆性破壊の破壊論は未解決の大きな問題であるが、それは、特殊な応力状態でのわずかなデータをもとにあれこれと摸索してきたという感があったが、この問題も大きく前進することが期待される。

以上、三軸試験の基本的な問題についてわれわれの最近の研究を紹介したが、その他にも、破壊振動など、いろいろの興味ある問題があることをつけ加えておこう。

(筆者は東京大学地震研究所)

割れ目の発達過程①

割れ目のパターンと発達過程

小出 仁

鉱床は直接的ないし間接的に割れ目に規制されることが多い。とくに、鉱脈・鉱床の探査には割れ目の形態を知ることが必要である。McKinstry (1948) は経験的知識を簡単な理論をもとに整理して、割れ目パ

ーンの理論をつくった。この理論は鉱床の探査に応用され非常に成功をおさめた。その原因は彼の豊かな経験に基づくものであろう。McKinstry が割れ目の理論を単純化して使用したのは、経験法則をまとめるためにはそれで十分であったためであろう。しかし、材料科学が発達している現在、より正確でくわしいもののできるはずである。McKinstry は、自説を確かめるために実験は行なわなかったが、割れ目のようにきわめてふくざつな現象は、野外における観察・実験・理論の三者を総合して研究する必要がある。

割れ目の生じ方についての先駆的なモデル実験が寺田寅彦・宮部直巳・藤原映平らによっておこなわれた。

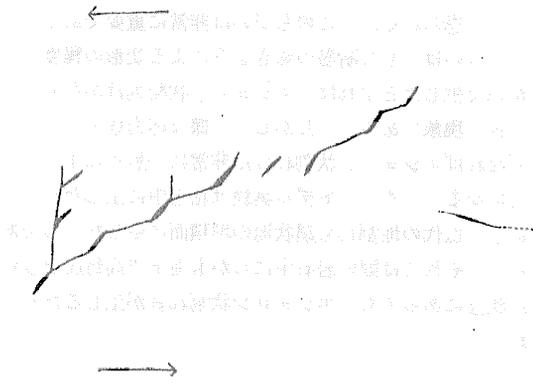
寺田らの研究は 平田森三らの割れ目の伝播についての研究へと発展した。寺尾 (1968) にこの解説がされている。平田らはおもに衝撃による割れ目の伝播を研究したので きわめておそい変形によって生じたと思われる地かく中の割れ目には直接はあてはまらないかもしれない。しかし 割れ目が発生してから伝播する過程を実験によって観察する方法は 割れ目のパターンの研究にも応用できる。なぜなら 割れ目のパターンは割れ目が発達してきた過程を知ることによってのみ 正しく理解できるからである。

実験としては 岩石を実さいの地かくにおける条件と同じ条件で変形させることがもっともよい。しかし地かく内と完全に同じ条件にすることは もちろんできないし 試料の大きさの制約もあるので モデル実験・数値実験・理論によっておぎなうことが必要になる。とくに モデル実験は比較的簡単な装置で行なうことができるので むかしからしばしばおこなわれている。

筆者が試みた粘土モデルによる実験の結果を説明しよう。実験方法は古典的なもので 第1図のように二枚の鉄板の上に粘土層をのせ その二枚の鉄板をモーターによって 一定速度でたがいに逆方向にずらせる (今井 小出 1963)。

この実験は 固い基盤中にある断層が横ずれ運動をお

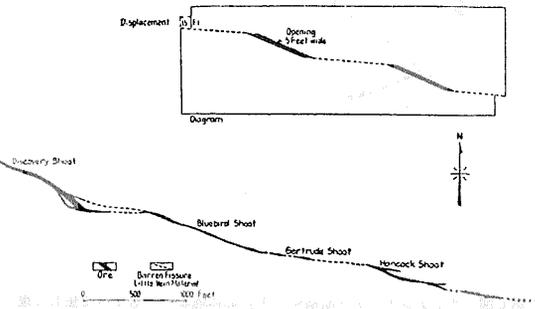
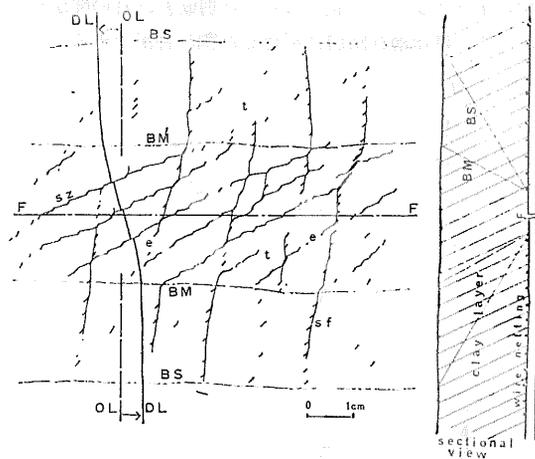
第1図
粘土モデル上に生じた割れ目のパターン
右側は断面図で 二枚の網をはった鉄板の上に 粘土層をのせてある。左側は平面図で 鎖線Fで接している二枚の鉄板をFにそって たがいに逆方向にずらせると 粘土の表面に図のような 割れ目ができる。粘土の表面に最初に引いておいた直線OLは 変形後DLのようにまがる。破線BMの間は 特に変形の強いはんい。破線BSの間は小さいが変形のあるはんい。
Fと約45°をなす 短い太い割れ目が 引張り割れ目で最初にあらわれる。引張り割れ目がエシュロン状にならび (e) さらにその間が二次的につながって ジグザグ状(sz) ないし羽毛状(sf)の剪断割れ目をつくる。境界BMの内側ではFの方向に近い程度の系統が多く BMの外側では それと共役な80°程度をなす系統が多い。このためエシュロン状引張り割れ目帯あるいは剪断割れ目もエシュロン状の配列をする。



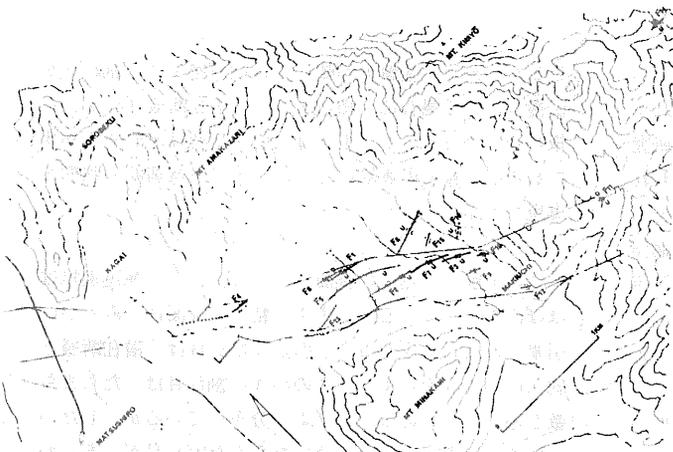
第2図 粘土モデル実験における割れ目のスケッチ太い短かい引張り割れ目が エシュロン状にならびその間の二次的な割れ目のつながり方によって ジグザグ状 あるいは羽毛 状の割れ目ができる様子がわかる。

こしたために 基盤上の軟らかい堆積層中に 割れ目が伝播していく場合に 相当する。潜在断層(つまり鉄板の合わせ目)のすぐ上では 応力状態はきわめて複雑であるが 粘土の表層付近では ほぼ単純剪断の状態が実現される。

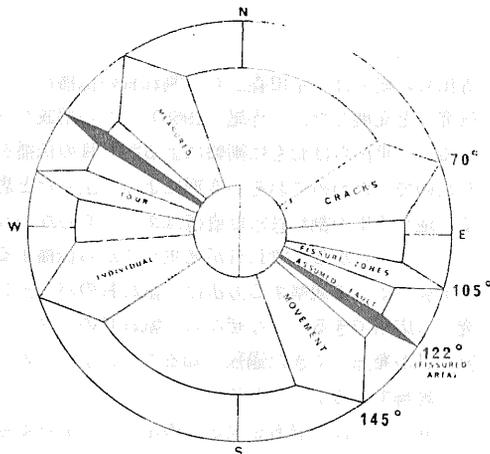
この実験で 粘土の表面に生じる割れ目の発達過程は ほぼ次のようになる。まず 粘土の表面に みじかい引張り割れ目が生じる。引張り割れ目は 潜在断層と約45°の方向をなす。この小さな割れ目は たちまち数を増し はじめはランダムに分布しているが しいだいにいくつかのエシュロン状にならんだ割れ目が あらわれてくる。このエシュロン状割れ目のならんでいる方向は 潜在断層と約20°ないし80°の角度をなす。変形がすすむとともに ますますはつきりした長いエシュロン状配列ができ 引張り割れ目のほとんどが エシュロン状配列をしているようになる。このエシュロン状引張り割れ目は 互にとなりあう割れ目の間に二次的割れ目を生じて つながるようになる。このつながり方によって ジグザグ状あるいは羽毛状になり ずれをともなう剪断割れ目になる(第2図)。このあたりの段階での粘土表面での割れ目の状態を やや模式的に図示した



第3図 ジグザグ状の断脈の例。引張り割れ目であった部分では断脈が大きく富鉱部になる。Camp Bird Vein, Colorado (McKinstry 1948より)



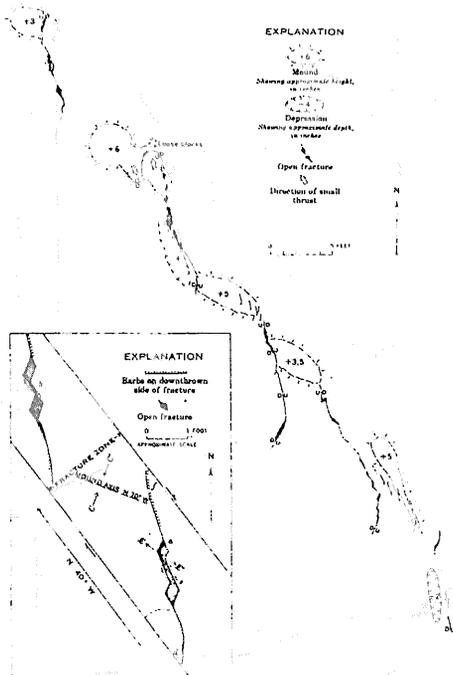
第4図 松代で群発地震の震源域の中心部にあらわれた地割れ群(中村・恒石1967より) 太い線 F₁~F₁₆ が割れ目帯で これらはさらに小さいエシュロン状割れ目からなる。二つの線ではさまれた帯状の部分がモデル実験のBM線の間に相当すると思われる。



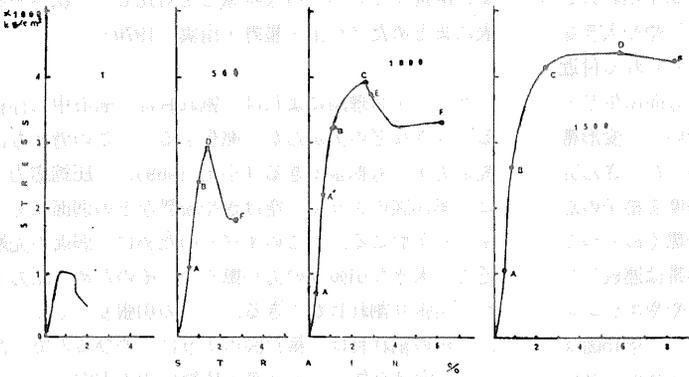
第5図 松代における地割れの方向(中村・恒石 1966より) 最初に生じた4つの割れ目帯(F₁~F₄)の方向 それを構成する個々の割れ目の方向 推定される潜在断層の方向 測定された割れ目帯の開口の方向がしめされている。

のが第1図である。ずれの向きは第1図のように潜在断層が左ずれである場合は 20°方向の剪断割れ目は左ずれであり 80°方向の剪断割れ目は右ずれ 引張り割れ目はもちろんずれがない。しかし 変形がすすむとともに割れ目の方向は変形によって変化し ずれの向きもまちまちになり 時には上下ずれさえあらわれる。剪断割れ目ないしエシュロン状割れ目帯も 第1図にみられるようにエシュロン状に配列する。さらに鉄板をずらすとエシュロン状にならんだ剪断割れ目の間がつながって ほぼ潜在断層に平行した割れ目ができる。

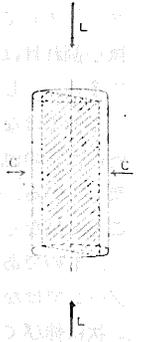
松代群発地震中に 震源域の中央付近で観察された地割れの発達過程は 粘土実験で観察されたものとほとんど同一であった(中村 恒石 1966 1967)。この場合も 引張り割れ目が最初に生じ その引張り割れ目がエシュロン状に配列して割れ目帯になり その割れ目帯がさらにエシュロン状に配列して 二重のエシュロン状配列をした(第4図 第5図)。二重のエシュロン状配列はサンアンドレアス断層上の地表に 地震にともなって発生した地割れにも見られる(第6図)。これらのことから 松代のおもな地割れ群は 潜在する横ずれ断層あるいは断層帯の 横ずれあるいは横ずれに近い運動によって生じたのではないかと考えられる。このように剪断割れ目ないし割れ目帯がエシュロン状に配列した原因としては 潜在断層の直上部で変形がもつともはげしく その外側では変形が小さいことが考えられる。しかし引張り割れ目がエシュロン状に配列する原因は 断層の直上部で変形がはげしいことでは説明できない。なぜなら エシュロン帯の方向と変形の強いゾーンの方向とは斜交しているからである。引張り割れ目のエシュロン状配列は一樣な応力場のもとでも生じるのではないかと思われる。このちがいは非常に重要である。というのは もし断層の影きょうによる変形の程度がちがいで生じたとすれば エシュロン状配列はかなりかぎられた現象である。しかし 一樣な応力場でも生じるとなればエシュロン状割れ目は非常に一般的に生じることになる。また モデル実験は粘土中に生じたものであり 松代の地割れも扇状地の堆積面に生じたものである。それでは固い岩石中にしかも地下で高封圧をうけた状態であっても エシュロン状割れ目が生じるだろうか。



第6図 サンアンドレアス断層帯の地表部に地震にともなって生じた地割れ Parkfield Cholame, California (Brown ら1967より) エシュロン状引張り割れ目から生じたとみられる。ジグザグ状の割れ目が さらにエシュロン状にならぶ もり上がりが見られていることに注意。



第7図
変形の stage
北九州産砂岩XCの応力-歪曲線
線で図中の数字は封圧の大きさ(気圧)。



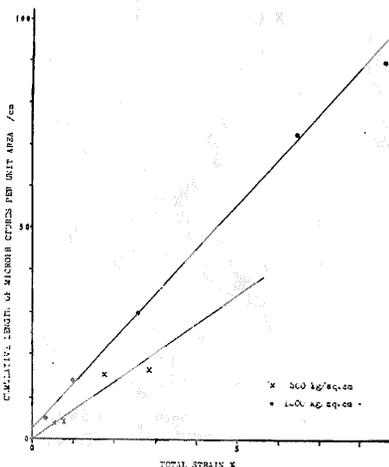
第8図
変形後の岩石円柱試料から円柱の軸をふくむような面の薄片(ハッチした面)をつくり顕微鏡で観察した。変形中は周囲から油圧によって封圧がかかり上下からはピストンおよびスペーサーをおして軸圧Lがかられる。通常の実験ではCよりLの方が大きな圧縮力がかかるので、円柱の軸方向が最大圧縮応力の方向になる。写真・図等はすべて円柱軸の方向を上下方向にしてある。

地下における岩石の破壊の様子を研究するには高压岩石変形実験を行なう必要がある。この実験については別に解説があるのでここでは省略する。この実験は一般に非常に小さい岩石試料(地質調査所の試験機では約2cm径×4cmの円柱)についてしかできないのでこれを大きな断層や粘土実験の結果と比較することは問題がある。しかし初期にできる割れ目の大きさによってその後の割れ目の大きさはほぼきまってくるので割れ目のパターンのみを問題にしているかぎりでは割れ目の絶対的な大きさはあまり問題にしくなくてもよい(相似条件に関しては後の機会に論じる)。

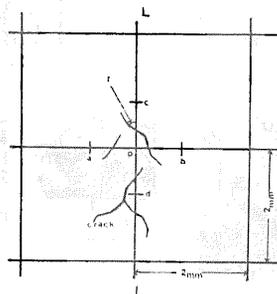
高压岩石変形試験機は特殊鋼製の压力容器の中に岩石試料を入れて実験をするので連続的に割れ目の発達を追跡することはできない。そこであらかじめ同一種類の数個の試料を用意しておいて最初の試料は最終的に破壊するまで変形させるがその他の試料は途中のいろいろな段階で変形をとめた。実験に使用した岩石は北九州崎戸松島炭田大島産の中粒砂岩(実験記号XC前篇第一表参照)である。斑晶はほとんど石英でそ

のまわりを石灰質の石基がうめている。変形をとめた各 stage は第7図に図示した。変形の程度によってA~Fまで記号をつけてある。実験はきわめてゆっくりと荷重をかけ1時間で約1%程度の速度でちぢむようにした(弾性領域での変形速度は約 10^{-6} /sec)これは実験としてはおそい速度であるがもちろんじっさいの造構造運動における変形速度はこれより桁ちがいにおそい。変形後の試料は第8図のように薄片にし顕微鏡で観察した。

顕微鏡でみると応力-歪曲線からはほとんど弾性的といえるAあるいはB stageですすでに微小割れ目が発生していることがわかる。微小割れ目の平均密度と変形量の関係をプロットしたのが第9図である。微小割れ目の単位面積あたりの総延長がほぼ変形量と比例している(第10図のように薄片上に基盤目状のたて・よこの線を考えてその線とまじわる割れ目の数をかぞえた。この数から割れ目と線との角度によって補正すると単位面積あたりの割れ目の総延長がもとめられる)。ただし総延長がのびるといっても一本の割れ目がまっすぐのびていくわけではない。これは写真をみてもわかるが多くの割れ目は長さ0.01~0.03mm程度の微小割れ目がジグザグにつながったように見える。このジグザグを構成する直線部分の長さを調べたものが第11図である。



第9図
微小割れ目の密度(単位面積あたりの総延長 cm/cm²)と歪(%)の関係



第10図
割れ目の密度の測定法たてよこの線に割れ目交わる数とその角度を測定する角度によって補正して密度を計算する

これでわかるように変形とともに密度がますのは割れ目の長さがどんだんのびるのではなくて微小割れ目の数がますことである。薄片上の各場所の密度をもとめてこれをもとに第12図のような等密度線図がかけられる。微小な割れ目は変形がすすむと試料全体に増加するのではなく次第にあるゾーンに密集するようになる。

このゾーンをわれわれは変形帯(deformation band)とよぶことにした。第13図にはやや大きな微小割れ目をスケッチして変形帯との関係を示した。やや大きな微小割れ目は変形帯付近ないしその延長とみられる付近で多い。しかし必ずしも変形帯と同じ方向に生じているのではなくむしろエシュロン状に近い。変形帯内にはこの他にさらに小さい微小割れ目がたくさん分布している。第14図は微小割れ目の密度を格子の点ごとではなく連続的に調べて多い部分を黒くぬりつぶしたものである。この図でみると変形帯は連続したゾーンではなくて割れ目の高密度部がややエシュロン状に伸びているのではないかと思いたい。第15図はもっと変形を進めてほぼ完全に破壊させた後の試料であるがジグザグ状の割れ目が見える。

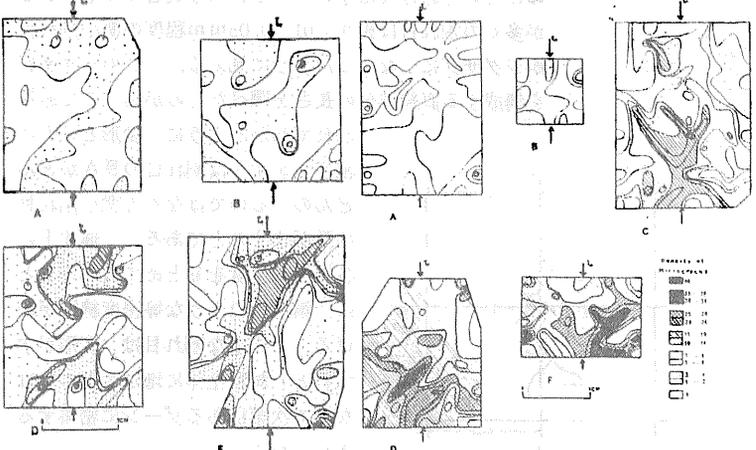
これらの実験や観察の結果から地中の割れ目は一つの割れ目がまっすぐにのびていって大きな断層をつくるというような簡単なものではないことがわかる。小さい割れ目が多数発生しそれらが集まって高密度になって変形帯がつくられときにはそれら的高密度部がさらにエシュロン状にならぶというようにしてしだいに大きな割れ目に成長していくことがわかる。わ

れわれはこのような割れ目の発達過程と変形との関係また関連するいろいろな現象とを対比して次ページの表にまとめた(小出・星野・南雲 1970)。

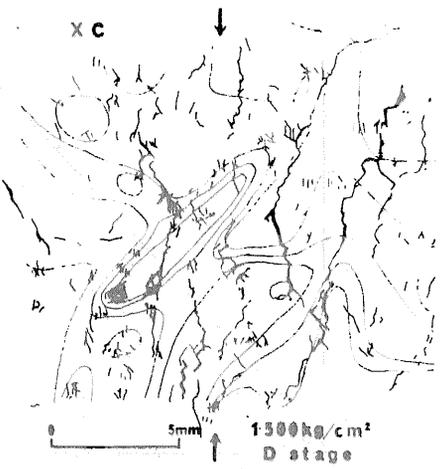
グリフィス理論によれば割れ目は岩石中に存在する空げきなどの欠かんから発生する。この考え方は圧縮応力下へも拡張できる(小出 1969)。圧縮応力下では第16図のように空げきや粒界などの弱面にそってすべりがおこる。このすべりのために弱面の先端付近で大きな引張りの力が働く。そのため圧力下でも引張り割れ目ができる。この引張りによってできた枝の割れ目は第17図のようにのびるので割れ目の方向は全体としては最大圧縮応力の方向に近づく。こうなると最初の弱面によるすべりの効果は弱められるので現在のびつつある割れ目の先端(C. P.)における引張りの応力は小さくなる。そのため圧縮応力下では割れ目はある程度以上のびない。封圧が小さいうちは先端部に生じる引張り応力をうちけす



第11図 微小割れ目を構成する直線部分(単位微小割れ目)の長さ



第12図 微小割れ目の密度の薄片面上での分布



第13図 やや大きな微小割れ目のスケッチ

表 岩石中の割れ目の発達 (小出・星野・南雲 1970)

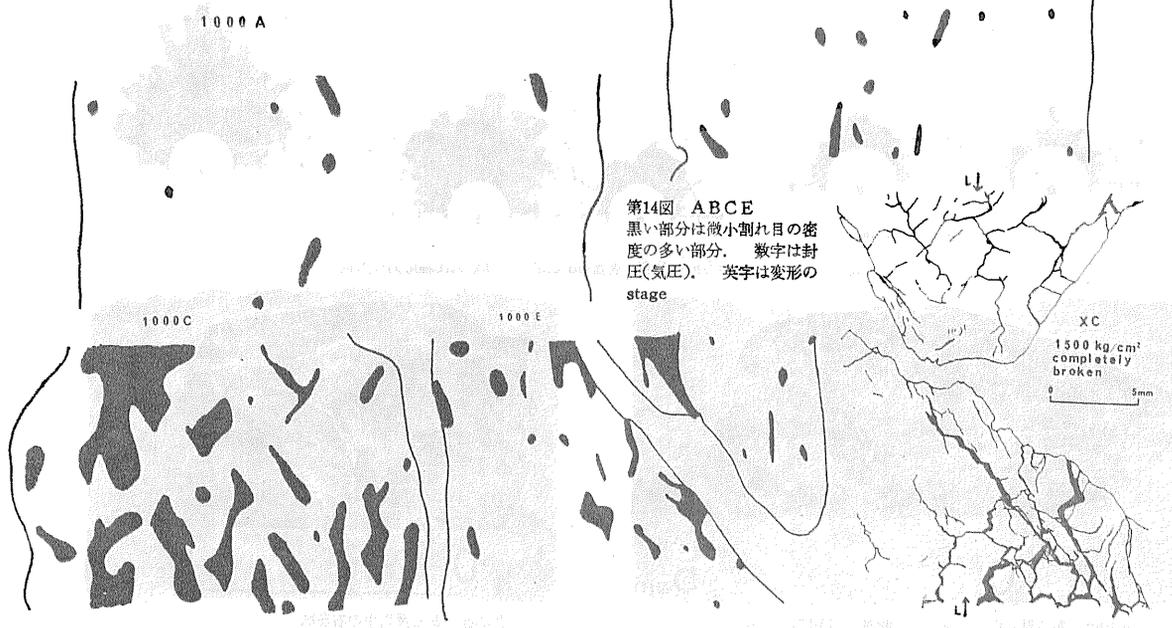
Principal phases	Elementally process		Theoretical bases			Related phenomena		
	Microscopic fractures	Micro-shocks	Fracture density ρ	Fracture velocity v	Strain rate $\dot{\epsilon}$	Stress-strain relation	Geological structure	Earthquake
micro-yielding	generation of fractures	with generation	$\Delta\rho \propto \Delta\epsilon$	$v=0$		almost linear	minor fracture	micro-earthquake
macro-yielding	growth of fractures	without generation	$\Delta\rho \neq 0$	high speed	$\dot{\epsilon} \leq v$	flattening	fold	swarm
	active (1)extension, opening (2)concentration, linkage formation of deformation bands							
macro-fracturing	bursting linkage of deformation bands	principal shock		unstable bursting		stress drop	fault	main-shock

力がよわいので、枝の引張り割れ目は わりあい長くのびる。しかし封圧が大きくなれば、枝の引張り割れ目は だんだん短かくしかのびなくなる。このような関係は微小割れ目の方向分布にあらわれている (第18図)。微小割れ目の方向は初期の stage では 弱面の方向に影きょうされて やや不規則だが、しだいに30°~45°方向と最大圧縮応力の方向の割れ目が多くなる。封圧500気圧の場合の方が最大応縮応力の方向の割れ目 すなわち枝の引張り割れ目の密度が大きい。

このように圧縮応力下では 割れ目は ある程度以上

はのびられないで 変形とともに数がふえる。変形帯は微小割れ目が密集しているのので、他の部分より弱くここに変形が集中する。このような相互干渉により変形帯自体が成長して行くのであろう。

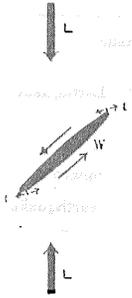
このような変形帯やエシュロン構造の例は じっさい



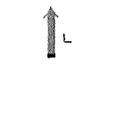
第14図 ABCE
黒い部分は微小割れ目の密度の多い部分。数字は封圧(気圧)、英字は変形の stage

第15図 やや大きな微小割れ目のスケッチ

第16図
圧縮力(L)が加えられた時の弱面(W)のまわりの力のくわり方。弱面にそうすべりによって弱面の先端付近に強い引張り力が働く。



第17図
枝割れ目のび方
前図の局所的な引張り力によって枝割れ目(b.f.)ができる。枝割れ目はまがりながら最大圧縮応力(L)の方向へのびる。



の地質構造中にもしばしばみられる。第19図および第20図は、頁岩中の小さな石英脈であるがエシュロン構造の部分、羽毛状の部分、断層の部分が見られる。石英脈のまわりが細長く他の部分より白くなっているのは、肉眼では見えない小さい割れ目がたくさん入っているため、変形帯のはんいがわかる。

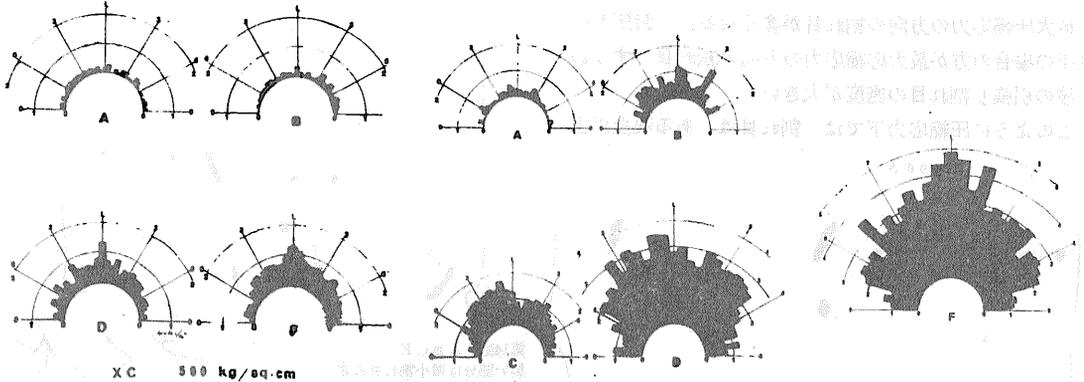
エシュロン構造は、鉱脈にもしばしば見出されている。第21・22図の例は、第19・20図の石英脈の構造とよく似ている。日本でも、今井秀喜(1966)によって、豊羽鉱山・宮城県大谷鉱山等でエシュロン状の鉱脈が見出

されている。一本の鉱脈として採掘されている場合でもよくみると小鉱脈のあつまりからなっている場合は非常に多い。このような場合、鉱脈の中の構造として鍾の内とよばれることがある。第23図は京都府大谷鉱山の鉱脈の図で、二重のエシュロン構造がみられる。

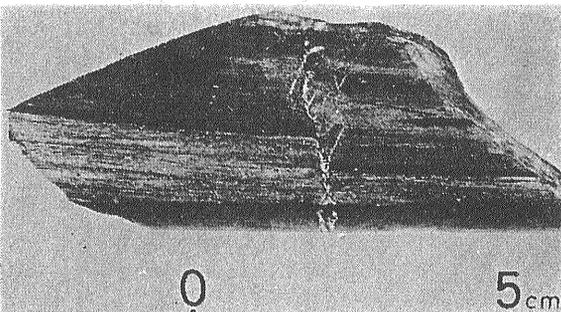
(筆者は鉱石課)

参考文献

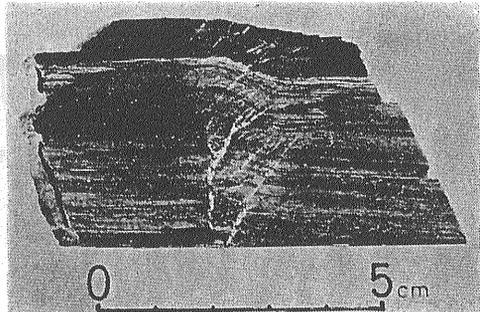
- (1) McKinstry, H. E., (1948): Mining Geology
- (2) 寺尾宣三 (1968): 破壊の秘密 法政大学出版局
- (3) 今井秀喜・小出仁 (1963): 割れ目の構造解析 日本鉱業会誌79巻 717-724ページ
- (4) 中村一明・恒石幸正: 横ずれ断層によると考えられる松代の地割れ群 I 1966震研い報44巻1371-1384ページ II 1967 震研い報45巻417-471ページ
- (5) 小出仁・星野一男 (1967): 三軸変形下の微小割れ目の発達について 序報 地震 第20巻 85-97ページ
- (6) 小出仁・星野一男・南雲昭三郎 (1967): 三軸実験による岩石破壊の進行について 岩の力学国内シンポジウム講演集 51-56ページ
- (7) 小出仁・星野一男・南雲昭三郎 (1970): Microscopic mechanism of the development of rock failure, in Rock Mechanics in Japan.
- (8) 小出仁 (1969): 岩石中の割れ目の発生と発達について——圧縮応力下における割れ目発生源——岩石物性研究会会報 no. 7 1-16ページ
- (9) 今井秀喜 (1966): 鉱床と構造地質学 地質学雑誌 第72巻 131-141ページ



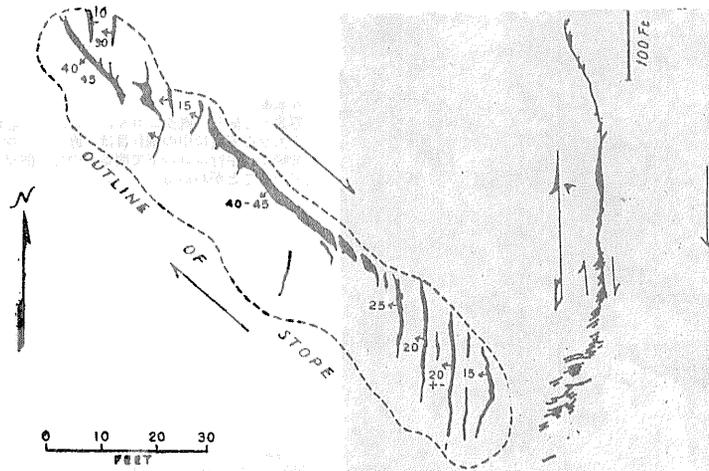
第18図 微小割れ目の方向の分布(密度 cm/cm^2) Lは最大圧縮応力の方向



第19図 ある頁岩中の石英脈 断層と羽毛状の石英脈



第20図 ある頁岩中の石英脈 羽毛状の石英脈と エシュロン状の石英脈



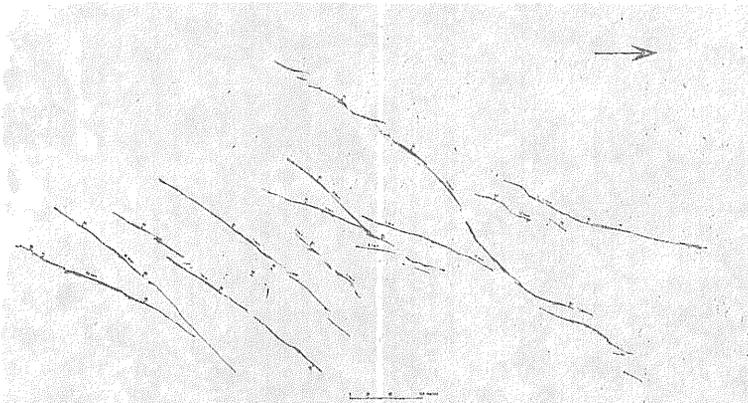
第21図



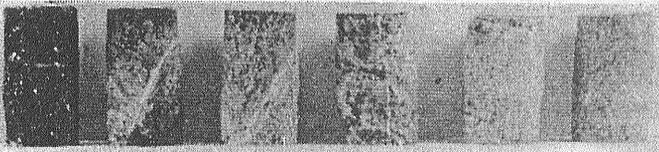
第22図

第21図
剪断割れ目とエシュロン割れ目との移行関係
Canadian Malartic Mine(McKinstry 1948より)

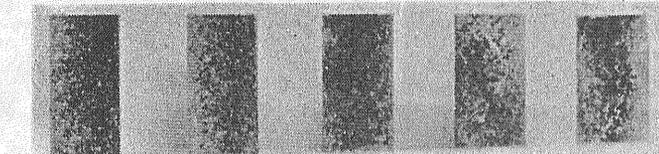
第22図
剪断割れ目・羽毛状割れ目・エシュロン割れ目の移
行関係 Siscoe Mine (McKinstry 1940より)



第23図
京都府大谷鉄山の鉱脈図 母岩は花崗岩
(金杖栄原図)



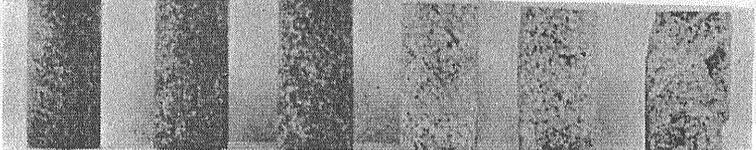
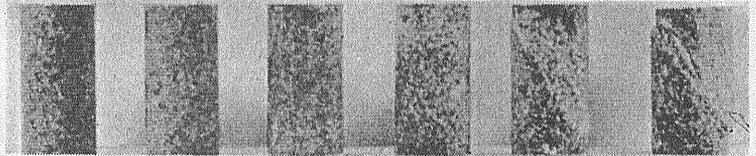
写真①
左よりそれぞれ 封圧1気圧 500気圧 1000気圧
1,500気圧 2,000気圧 2,500気圧のもとで破壊させた
砂岩 (XC) 試料 第24図参照
高封圧下で破壊した試料ほど 色が白くみえる。色が
白く見えるのは 試料中に生じた微小割れ目による乱反
射のためと 考えられる。これから高封圧下で破壊し
た試料ほど 微小割れ目が密に入っていることが推測さ
れる。

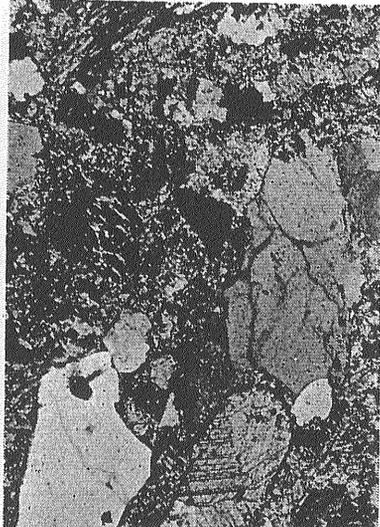


写真②
封圧500気圧で いろいろな stage まで変形
させた 砂岩 (XC) 試料。左からそれぞれ
未変形のもの A B D F 各 stage

写真③
封圧1000気圧で いろいろな stage
まで変形させた 砂岩 (XC) 試料。左
から A A' B C E F 各 stage

写真④
封圧1500気圧で いろいろな stage まで
変形させた 砂岩 (XC) 試料。左から
A B C D F F' (応力低下がおきてから
も さらに長い間変形させたもの)各stage
写真2~4をみると 変形がすすむほど
色が白くなることわかる。特に 高封
圧下ほど この傾向がはっきりする。こ
れは第9図からもわかるように 変形とと
もに 微小割れ目の密度が増加するためと
考えられる。





←
写真6) 写真5と同じ。直交ニコルにした時、右側の大きな石英粒中の割れ目は直交ニコル下で暗く、平行ニコル下で明るいので、開口していることがわかる。

写真5) 顕微鏡写真 500気圧 A stage まで変形させた砂岩 (XC) 試料の、最大圧縮方向に平行な薄片。最大圧縮方向は上下方向。以下、写真10まで砂岩 (XC) の薄片の顕微鏡写真は、方向・縮尺を同じにしてある。平行ニコル。

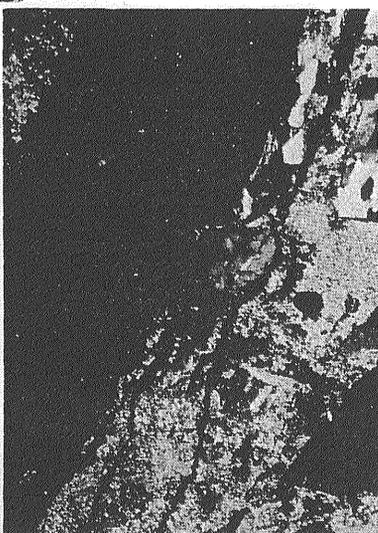
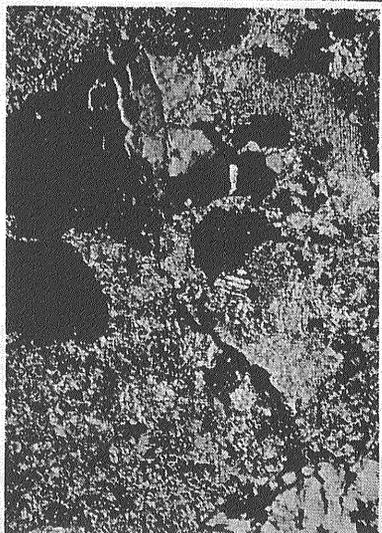


写真7) 砂岩 (XC) 500気圧 D stage 直交ニコル。ジグザグ状の割れ目が、石英粒中に入りこんでいる。

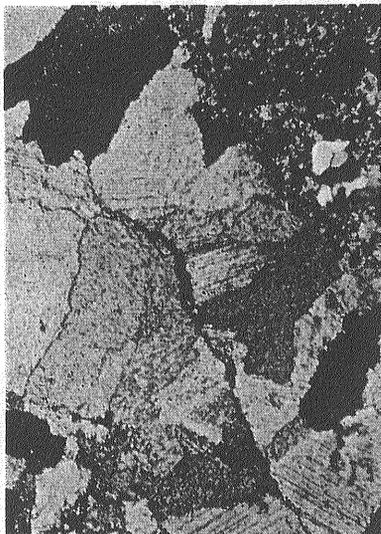


写真9) 砂岩 (XC) 1500気圧 C stage 直交ニコル。方解石の粒界にそって割れ目ができている

写真10) 砂岩 (XC) 1500気圧 D stage 直交ニコル。変形帯中の割れ目。石基の部分にも斑晶中にも、たくさん割れ目が見られる。特に粒界に割れ目が多い。

写真11) 大理石 (TM) 帝釈産 300 気圧 平行ニコル。変形帯中にエシロン状に割れ目ができている。この割れ目は剪断割れ目でよく見ると、それ自体もふくぎつな割れ目からなる。(写真の横幅約 2 cm)