

Fractography について

姫路工業大学 砂 田 久 吉*

1. はじめに

構造物の破損或いは破壊の原因を明らかにすることは、その設計製作に際し重要であるにも拘わらず、まだそのき裂の発生・進展の機構は明らかにされていないのが現状である。破損した部材の破壊の原因およびその経過を知るには、その使用状況を調べるとともに、それに併せてその破面もよく観察することが必要であろう。このことは経験的に破面観察は事故調査のための有力な資料と考え、よく行なわれている。例えば肉眼或いは低倍率のレンズによる破面のマクロな観察から、その破面が貝殻状をしていれば、その破壊の原因は疲労によるものとし、しばしば結論されてきている。そこでこの破面をさらにミクロ的に観察を行ない、その微細な特徴を握んでゆけば、その事故原因究明に際し何らかの手がかりを得られるかも知れない。

金属破面のミクロな観察を光学顕微鏡を用いて組織的に行なったものに Zapffe らによる Microfractography がある。その後光学顕微鏡に代わって電子顕微鏡を用いてミクロな破面観察を行なう Electron Microfractography が Zapffe, Crusard らによって一つの体系に形づけられ発展して来ている。この場合破損した大きな構造物の破面の状況を如何にして顕微鏡のもとに持ち込んでくるか、即ち試料の作製をどのようにするかの問題がある。また衝撃のような短時間の破壊は別にして、疲労などのような長時間にわたって破壊現象が進行するときには相対する破面が摺り合って、破面本来の縞様を示さないのではないかと考えられる。この点に関しては現在までに得られている資料からは引張衝撃などによって生じた破面はそれぞれの応力条件特有の縞様をしていることが認められて来ている。それ故 Electronfractography は破損原因の解析の有力な方法として、特に米国の航空機業界において利用されてきて以来、現在ではハンド・ブック (“Electron Fractography Handfork” by A. Phillpset, al) まで作られる段階にまで達している。

さて破面の電子顕微鏡観察には直接観察法と間接観察

法がある。普通間接観察法即ちレプリカ法がよく用いられるので本文では主としてこの方法について述べる。

2. 試料の作製

電子顕微鏡（観察）による破面観察では破面を直接に見ることは困難であるため、破面を転写した試料即ちレプリカ (Replica) を作製して、その陰影を間接的に検鏡することになる。この試料の作製には(1)2段カーボンレプリカ法、(2)1段カーボンレプリカ法、(3)酸化膜法、(4)コロジオン被膜法、(5)抽出レプリカ法などがある。これらのうち現在よく用いられているのは2段カーボンレプリカ法 (Twostep replica method) である。

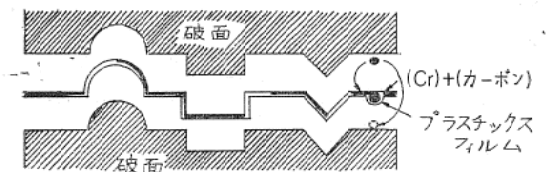


図1 2段レプリカ法

図1はこの方法の原理を示したものである。まず問題とする破面にプラスチック膜（アセチルセルロース・フィルム）を密着させたのち、この薄膜に金属（主としてCrが使用される。）を真空蒸着する。これを Shadowing と呼んでいる。その後さらに補強用カーボンを蒸着させ、プラスチック薄膜を溶解除去したのち、このレプリカの陰影を検鏡する。

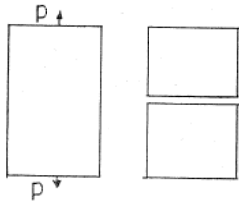
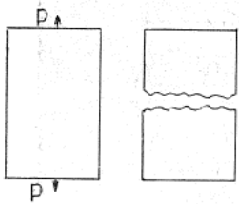
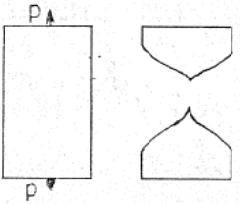
この2段レプリカ法の特徴は事故現場から直接その破断面を実験室に持ち込むことが不可能な場合でも、転写したプラスチック薄膜さえ持ち帰ればよいので便利なことである。

3. 破壊の分類

破壊はクラックの伝播速度が速くて塑性変形を殆んど生じない脆性破壊 (Brittle fracture), 十分な塑性変形を生じたのち破壊する即ちクラックの伝播速度の遅い延性破壊 (Ductile fracture) およびこの両者の中間の領域に属する破壊とに分けられる。これを図表化したのが表1である。以下この分類法によって種々の破面について

* 姫路市書写

表

		I	II	III
				
破壊の種類	破壊の様式	(脆性破壊)		(延性破壊)
	応力状態	衝撃疲労		(静的な) 過大応力
	結晶	粒内破壊 (粒界破壊)		粒界破壊
	破壊の形態	劈開 (Cleavage)	擬劈開 (Quisai-clearvage) 空洞 (Micro-void)	じり (Slip, Glide)
	環境	応力腐食 (Stress coirosion) 水素脆化 (Hgdrogen craking).		
破面の模様	Cleavage pattern River, Tangu, Wallner, Striation (brittle, ductile) Tire track.		Quasi-Cleavage pattern. Dimple (equiaxed, shear, tear)	Dimple, Serpetine.

述べて行きたいと思う。

この破壊を結晶面から分けると、結晶性材料の変形破壊は特定の面および方向に沿ったじりによって起る。単結晶体では、原子密度の大きな結晶面に沿って劈開 (Cleavage) を生じるが、多結晶体では各結晶粒が、それぞれ任意の方向を向いているので、その破面は粒状 (Granular) になる。後者の場合破壊の進行が結晶粒界 (Grain boundary) に沿って進行する粒界破壊 (Intergranular fracture) と結晶粒内を横切って進行する粒内破壊 (Transgranular fracture) とに分けられる。一般に脆性破壊は後者を、延性破壊は前者による破壊をすることが多い。

また破壊の進行速度或いは応力状態から分ければ、衝撃破壊は脆性破壊に、クリーブ破壊は延性破壊に、静的な引張破壊はその中間領域とになる。なお疲労による破壊はその破面の橋様が脆性破壊に類似した点が多いので表では脆性破壊のグループに含めてある。

この他破壊に影響する因子としては雰囲気 (水素脆性 応力腐食)、温度などがあげられる。

4. 破面の模様

4-1 脆性破面

単結晶体の変形は特定の面 (劈開面) で特定の方向に

沿って生じ易いため、その破面は平面的になる。この破面橋様を劈開 Cleavage pattern と呼んでいる。



—5μ—

図2-1 脆性破面 (Cleavage pattern)

図2-1 は多結晶合金の Cleavage pattern を示したもので、一結晶粒内でも劈開面は階段状になっていて、単結晶のような一義的な劈開面は見当たらない。

図2-2 は Al 合金の脆性破面を示したもので、この写真は両破面を対応させて示した Matching 写真で、この破面模様を River pattern と呼んでいる。この模様は脆性破面特有のもので、き裂の進行方向は上より下方向に向かっている。

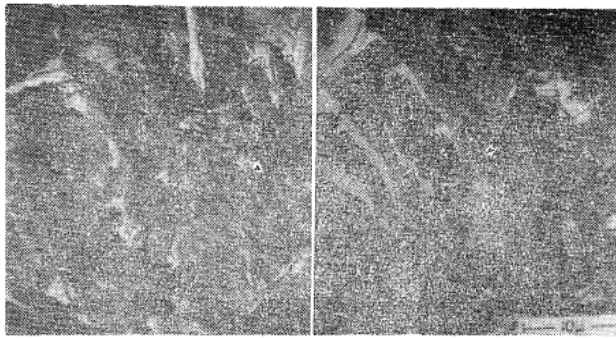
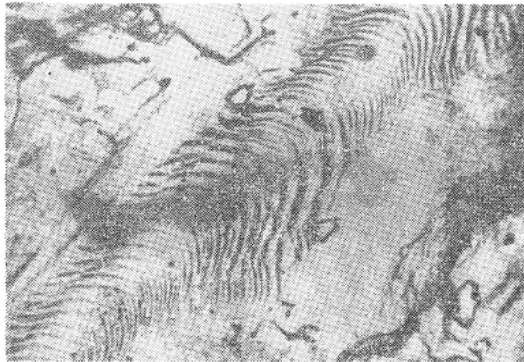


図2-2 脆性破面 (River pattern)



—2μ—

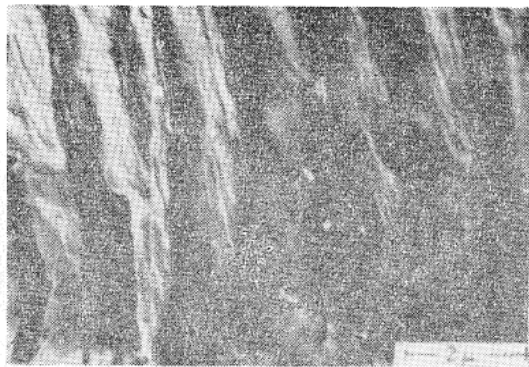
図2-3 脆性破面 (Wallner line)

図2-3 も脆性破壊したものによく認められるもので Wallner line 或いは Herringbone pattern と云っている。劈開面が図1-1のような step にならず、傾斜面をなして高低をつけている。付図1はこれらの模様を模式的に示したもので、写真と対応させて想像して頂きたい。

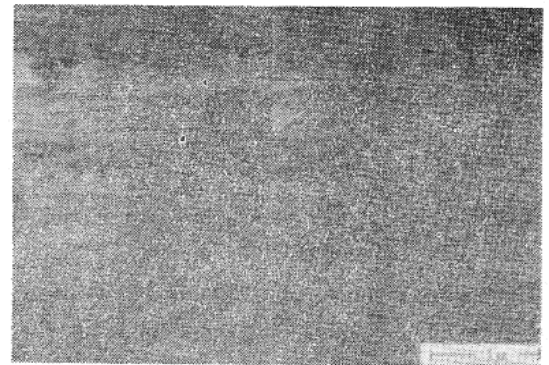
この他に特に脆性破面に見られる模様は Tange pattern がある。なおこれらの pattern は疲労破面にもよく観察される。

4-2 疲労破面

機械部品の破壊の大半は上に述べた衝撃或いは低温雰囲気を生ずる脆性破壊ではなくて、その寿命中に受ける繰返し変動応力によって起る破壊、いわゆる疲労によると言われている。この疲労による破壊はその破面が作用応力と直角で、一見脆性破面とよく似た破面 (Cleavage, River, Tange など) が観察される。しかしこの破面の特色は図3に示す波打ったような層状破面(これを Striation と言う)を呈することである。図3-1はAlの疲労破面の Matching 写真を示したもので、繰返し応力の速度の影響を示したもので、繰返し応力の速度の影響を示したもので、高サイクルの方が Striation の間隔は狭くなっている。また Striation の間隔が繰返し応力のレベルに1対1で対応する即ち応力1サイクル毎に巨視的な

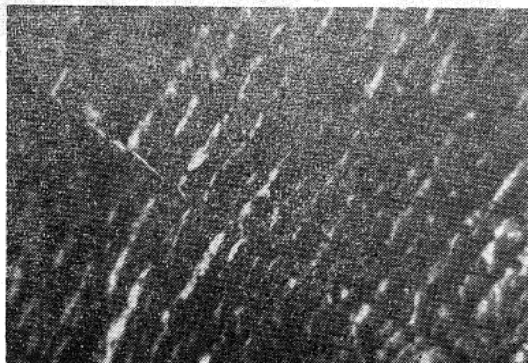


(高サイクル)



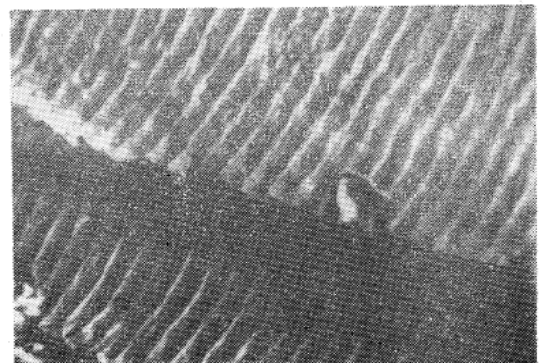
(低サイクル)

図3-1 疲労破面 (Striation)



—2μ—

(脆性破壊による)



—5μ—

(延性破壊による)

図3-2 疲労破面 (Striation)

き裂が進行するものと以前は考えられていたが、現在では1対1に対応しないとする考え方が有力である。

この Striation にも延性破壊によるものと脆性破壊によるものがあり、図3-2は Al 合金の脆性破壊による Brittle striation を示す。き裂の進展する面は劈断面に沿って進むため、破面はギザギザした感じを与える。同図右は Ductile striation で、一本の Striation の中断しているところが粒界に相当する。付図2はこれら Striation の生じた破面の断面図を模式的に示したもので、凡そその破面の形状は想像頂けると思う。

疲労限近くの応力で破断した場合 Striation の間隔は一樣であるが高応力になるとその間隔が広がる他かに、

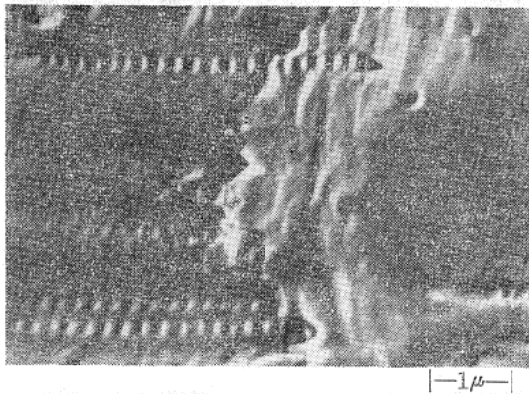


図3-3 疲労破面 (Tire tracks pattern)

図3-3に示すタイヤの跡形のような模様が見られる場合がある。これを Tire track 言って、き裂の進行方向はこの pattern の直交した方向に進む。

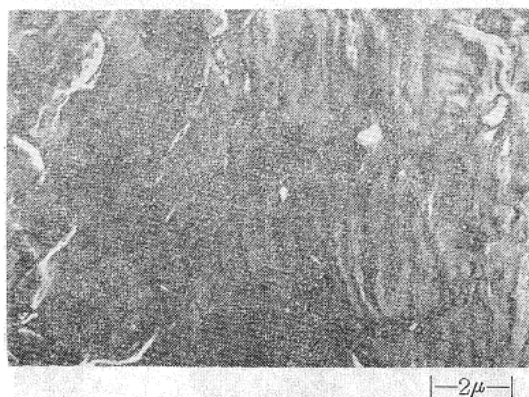


図3-4 疲労破面 (Striation + Dimple)

図3-4は鋼の疲労破面を示したもので、Striation の他に後述の Dimple が混在した例を示す。普通見られる疲労破面は Striation の他に Dimple, Tangle 或いは River pattern などがよく認められ、脆性破面と似かよったところがある。

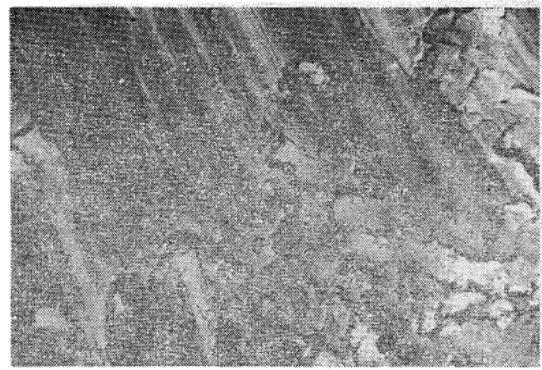


図3-5 疲労破面 (Rub mark)

図3-5は疲労破壊によって分離した相対する破面が摺り合った例で疲労破面の特徴をつかみにくい。このような場合その原因推測が誤り易くなる。なおこの破面模様を Rub Mark と言っている。

4-3 過大応力による破面

ある部材が降伏強さ以上の応力を受けて、ある方向に塑性変形が増加して行くと、微小な空洞が発生し、この空洞が (Void) 集合してき裂に成長して行き、さらに応力方向と 45° 方向に進展して破断に至ると考えられている。例えば軟鋼を引張試験すると Cup and Cone 型の破断をすることはよく知られている。この cup 部の破面には Void が発生集合結合するため、凸凹がはげしく、前述の Cleavage, river pattern などが共存する quasi Cleavage pattern の他に、独特の模様を Dimple pattern 示す。

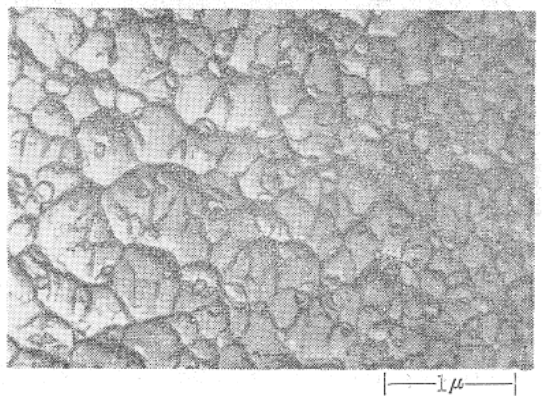


図4-1 引張破断面 (Equiaxed dimple pattern)

図4-1は引張応力によって破断した Al 合金の破面の模様を示したもので、これを equiaxed dimple と言う。この場合両破面の模様は一致する。付図3は、これら dimple の破面両側の模様を図形的に示したものである。

図4-2はステンレス鋼が剪断応力によって破断したときの破面で、この模様を Shear dimple と呼ぶ。分離した両破面の向きは反対であるから、dimple も両破面で逆向きになっている。なお写真下部は quasi-cleavage-

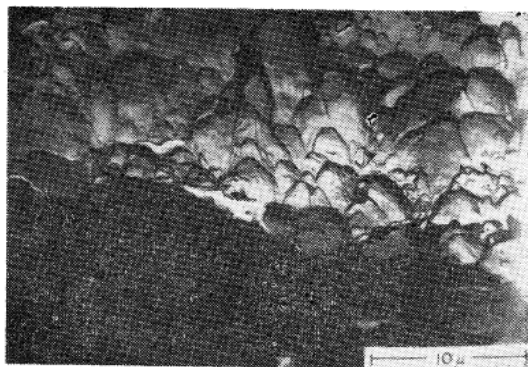


図4-2 剪断破面 (Shear dimple)

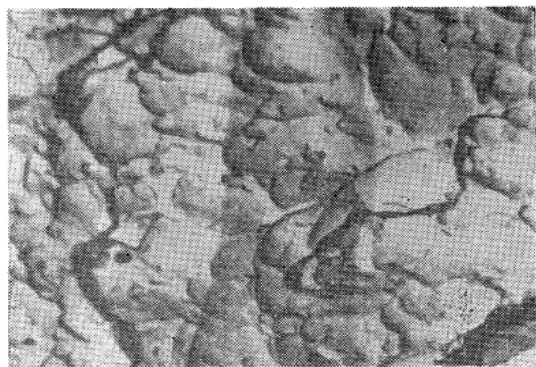
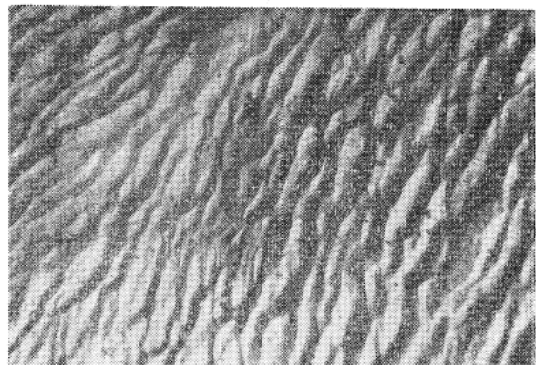


図4-3 引裂破面 (Tear dimple)



(軟鋼)



(銅)

図5 延性破面 (Dimple, Serpentine)



(水素脆性による)



(応力腐食による)

図6 種々の環境下の破面

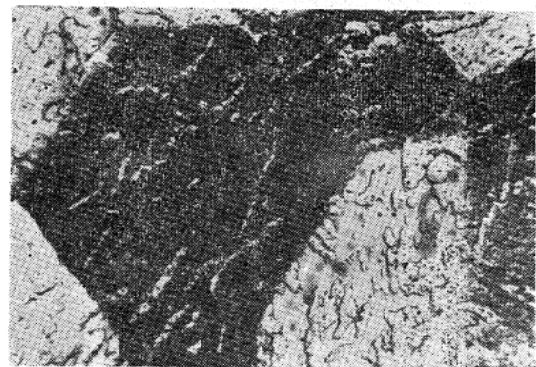
ge pattern をしている。

図4-3は引き裂れたときの破面を示し、この破面模様を Tear dimple と呼んでいる。この場合付図3でも明らかなる如く、応力状態は引張に似ているので、両破面の dimple は一致する。

これら dimple の大きさに影響する因子には Void が形成されるまでの塑性変形量および Void の大きさなどが考えられる。前者は析出物介在物の分布によって、後者はこの大きさによって左右される。

4-4 延性破面

軟鋼の引張試験において Cup 部に発生・成長したき



(応力腐食による)

||—5μ—||

裂は応力方向と45°方向に進み、Cone部を形成して破断に至る。この変形破壊は迂り状態で進むので Shear rupture という。この延性破面に見られる模様を示したのが図5である。

同図左は軟鋼で dimple pattern を、右は銅の場合でこれを特に Serpentine pattern と呼んでいる。

4-5 環境による影響

図6-1は鋼の水素脆化による破面を示したもので、図2-1に認められた step をなす Cleavage pattern, さらに dimple もある quisai-cleavage pattern を示している。

図6-2は鋼の応力腐食による破面を示したもので、粒界破壊した例である。

図6-3は高張力鋼の流水による応力腐食で粒界破し壊した例で、数多くの認められる。

以上表にもとづいて代表的な破面を示して来たが、これらを総括する意味で炭素鋼の炭素量と降伏強さを座標軸に取り、破断したときに観察されるであろう破面模様を示したのが図7である。炭素量の少ない軟鋼は quisai-cleavage と dimple の共存した模様、硬鋼では Cleavage pattern 粒内破壊を起し易い。

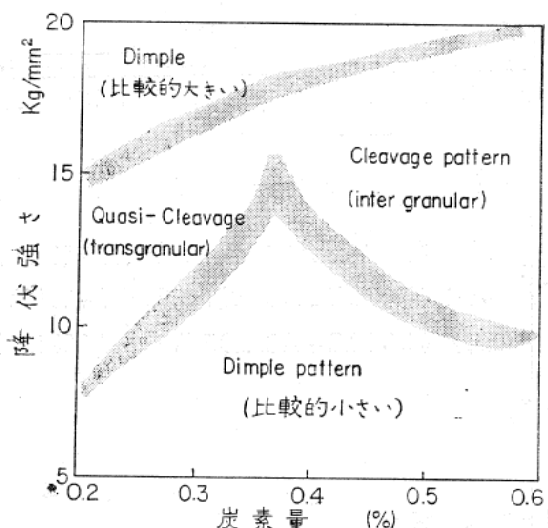
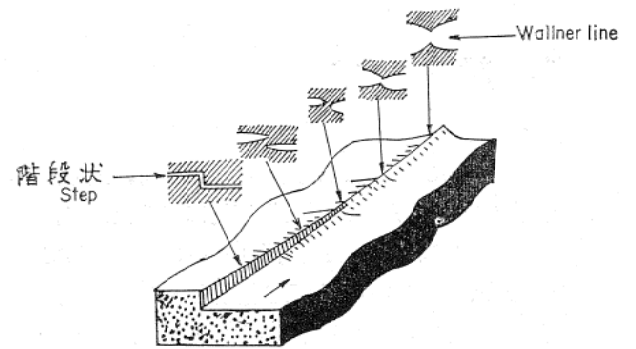


図7

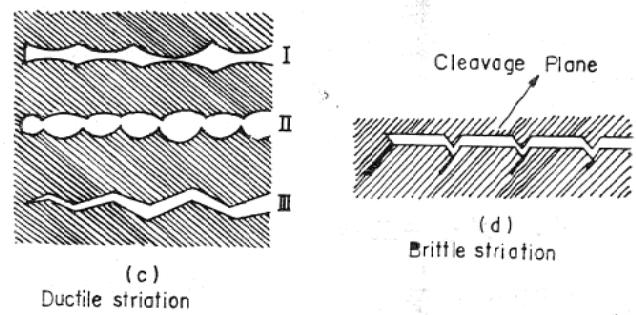
5. むすび

以上米国で航空機部品の破損原因の解析方法の一つとして初まり発展して来たマイクロな破面観察法 Fractography について述べて来たが、この解析法は未だ学問的

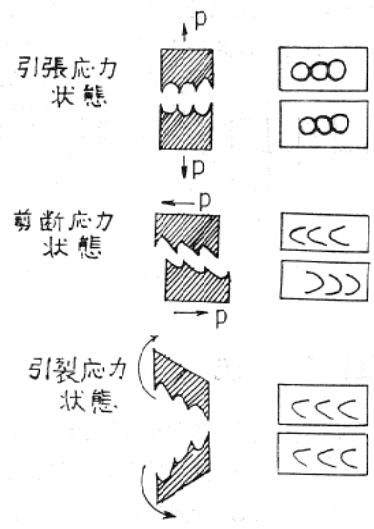
な体系を形成するまでの段階には達していない。しかし実験室で色々な環境のもとでの破面模様の特色を把握して、実際に破壊を起こした部品の破面と比較対照することによって、その破壊原因を追求検討することが出来るであろう。それ故、この解析方法は特に現場的には有力な方法として将来発展することが期待される。



付図1 Quasi-cleavage 面の模型図



付図2 Striation の破面図



付図3 Dimple の種類