

# 疲れき裂の研究における二三の問題 (その 1)

——疲れき裂の認知方法とその基準について——

北 川 英 夫

疲れき裂の実体の認知はその測定・検出方法への依存度が大きい。従来の諸方法を整理し、その功罪を検討した結果、多角的な研究と対象の限定を必要と感じる。まず一つの試みとして、材料力学の立場から“有効き裂”を提案する。

## 1. 序 言

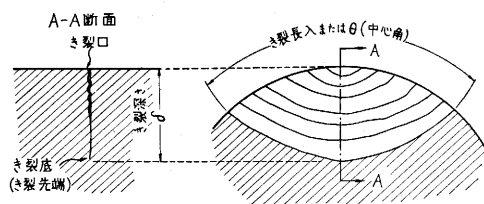
疲れによる破断がき裂の準備・発生・成長を経て材料の最終的分離に至ることは現在ではむしろ常識になっているが、以前は平滑試験片の巨視的疲れき裂が破断直前でないと検出できずかつ疲れ限度が主として問題になっていたためか、き裂の発生はすなわち破壊であると考えられることが多かったようである。ところが最近に至って事情が異なってきた。たとえば、疲れ限度以上での材料の使用条件すなわち有限の疲れ寿命が注目を浴びてきた。また圧入軸や切欠き材または腐食疲れ材がき裂を含んだまま実際に長年月の使用に堪えていることは周知の事実となり、このき裂がいかなる挙動を示すかにとくに関心が持たれている。最近における非破壊検査技術の発達はいき裂の早期検出を実用的にも可能にしつつあるので、検出されたき裂の危険度を判定するための知識が必要になっている。また材料使用の効率化や保守の立場から、最初から微小き裂を持った溶接材や欠陥材を棄てないでそのまま使用する条件を求めたいという要求もある。このような実用上の種々の要求に加えて、学術上でも、疲れの現象論的な整理や実験式による記述から一歩進んで疲れ破壊の機構に直接ふれようとする試みが、世界的な傾向となってきたようで、電子顕微鏡その他測定技術の発達、転移論や応力・ひずみ解析方法の発達に伴って、最近における“疲れき裂”の研究は目覚ましいものがある。1950 年代に入ってから以後、特にここ数年間に、疲れに関する国際会議または国内での発表論文で直接または間接にき裂にふれているものがきわめて多い。

このようにき裂の知識についてはかなりの要求があるにもかかわらず、疲れき裂一般について記述されたものがきわめて少ないのは、この日進月歩の開発のゆえであろう。疲れき裂全般についての総括はもとより筆者などのよくするところではないが、かかる現状にかんがみ、現在までの疲れき裂研究の方法およびその結果について、き裂材としての腐食疲れ材に関心を持つ筆者の立場から気付いた若干の問題を整理してみようと思う。今回はまず、疲れき裂の実体の把握について述べる。

## 2. 疲れき裂の実体は観察方法に依存する

“き裂 (亀裂)” は “われ”, “ひびわれ”, 古くは “裂け

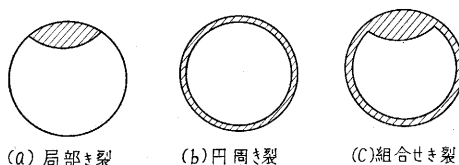
目”, “割れ目”, “破隙” ともいい、英語では一般に crack で, fissure, crevice 等と呼ぶこともある。ここで問題にするのは、金属の疲れに基因するものである。疲れき裂は第 1 図に示すように、元来連続していた材料が、繰返し応力を受けたために見るべき永久変形を伴わずに完



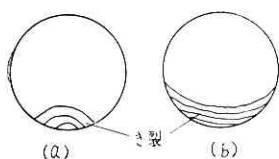
第 1 図 き裂面とき裂断面の図式表示

全または不完全に分離した個所または現象であるが、われわれが通常問題にするのはこの図のようにまだ分離し切っていないで、しかも分離によって新しく発生した相対する境界が互いにきわめて接近または密着しているようなものである。このように一応定義してみると、き裂とは何であるかが常識的にもきわめて明確かつ簡単であるかのように見える。しかしながら、実際には“き裂”の実体は今なおきわめて不明確であり、同じき裂の語を用いて多くの論議がなされていても実はその対象は各研究者ごとに異なっている。すなわち、何をき裂と呼ぶかはまったく各研究者の自由な選択に任せられている。この点はき裂の研究結果を見る上で注意を要する問題であると思われる。

まず最も基本的と考えられるき裂の位置・寸法・形状等について考えてみる。き裂の力学的な研究には理想化されたモデルを考え、き裂を二三の簡単な平面図形で置き換えることが多く、これを“き裂面”という。たとえば回転曲げ全周切欠き材では、この平面図形は河本・木村両氏<sup>1)</sup>によれば第 2 図に示すような 3 種に分類されてお

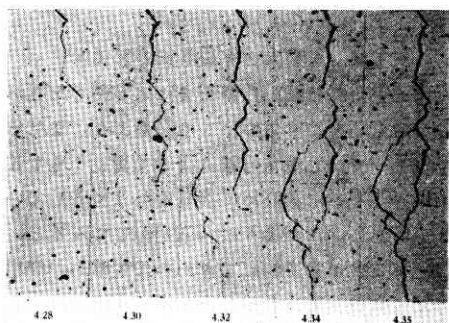


第 2 図 き裂面の分類 (河本・木村)



り、平滑材については石橋<sup>2)</sup>により第3図のように2種の典型があげられている。かかるモデル

による記述はき裂研究の第3図 き裂面の分類(石橋) ための有力な方法の一つであるが、き裂の実体が平滑かつ単純な平面でなく、多くの場合き裂の進行がジグザグ経路を取ることもまたすでに周知の事実で、これが統計的に集積された結果として最大主応力に直角な面内を進行するのであると McClintock<sup>3)</sup>はいつている。電子顕微鏡で見たき裂面には砂上を走るキャタピラの跡と類似な模様その他規則的・不規則的な各種の様相が観察されるとのことである。巨視的にも適当な照明により美しい年輪状模様が破断面に見られるし、き裂面の平滑度はき裂の進行速度を見る基準とすることができる<sup>4)</sup>ほどである。また最近のかなり信頼できる観測<sup>5), 6)</sup>によれば、き裂が一つの連続した境界を有するとは断定できないようである。主たるき裂の進行に先行してき裂端付近に小き裂を発生しこれを併呑(呑)しつつ進行する場合や、第4図<sup>6)</sup>に示すように、あ



第4図 アルミニウム合金中のき裂の成長。き裂の分岐・結合、主き裂端の先行き裂を示す。数字は繰返し数 ( $\times 10^6$ )。(Hunter & Fricke, レプリカ法)

る障害物に遭遇してき裂の進展が停滞しても進行すべき予定の位置に先行き裂が現われ、これと主き裂が障害物を迂回するごとく互いに連結しつつ進行する場合もある。また一方き裂面の端末も明確でない。河本・鈞・中川三氏<sup>7)</sup>の電子顕微鏡による観察によれば、低倍率で洞窟状に見えるき裂の屈曲部にはさらに微細なき裂があり、これをさらに高倍率で拡大すれば主き裂と分離している場合もある。Bullen, Head および Wood<sup>8)</sup>の実験におけるように、単なる観察だけではすべり線の集積点としか見えなかった個所が静的に引張った後に開口したので初めてき裂だと確認できた例もある。き裂面を大体平面と考えても上記の諸事情は変わらないのであるが、巨視的に見ても立体的にかなり複雑な配置を取る場合もあり、これは注意深く準備された単結晶についてのGoughら<sup>9), 10)</sup>の多くの実験結果その他より明らかである。

材料表面とき裂面との交線の長さをき裂長、表面と交

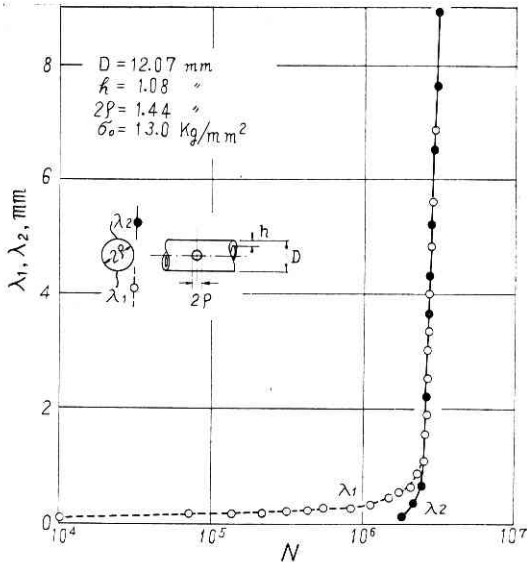
又するある平面とき裂面との交線の長さをき裂深さといひ、これを第1図のようにそれぞれ  $\lambda$  (または弧の中心角  $\theta$ ) と  $\delta$  で表わすことにする。この  $\lambda, \delta$  を基準量として、ある繰返し数  $n$  におけるき裂の大きさ、き裂の進行速度  $d\lambda/dn$ , き裂の発生時期すなわち  $\lambda=0$  における  $n$  等々が決定され、多くの測定結果や理論が提出されているし、進行速度におよぼす寸法効果や切欠き底のき裂の停留現象等々が論議されているのが現状である。しかるに、この  $\lambda$  または  $\delta$  の決定の基になったき裂面が既述のごときものであるから、この  $\lambda, \delta$ , またはそれから派生的に決定された諸量にはかなりの任意性を含んでいるといわねばならない。観察に用いた倍率を肉眼に対して1倍、100倍、500倍、1000倍等に限定するならば、研究目的や実験条件によってはき裂面を単純なモデルに置くことがかなり妥当である場合も多いのであるが、後に述べるように、実際に  $\lambda$  や  $\delta$  を求める段階ともなると、実験技術の差からきわめて多くの要素が介入してくる。したがって、観察・測定・検出方法に適切な選択・規定・説明が伴わないと論議が進めにくくなる。既述の“各研究者ごとに異なる”との極言はかかる諸事情によるものであって、き裂の実体は観察・測定方法と測定精度に依存すると考えたい。き裂についての議論がすでにかかなりの細部におよびつつある現在、議論の対称とするき裂の規定が意識的に強調されてもよい段階であるように思われる。

### 3. 従来の検出・観察・測定方法とその功罪

疲れき裂の検出・観察・測定については従来きわめて多くの実験結果または応用面での実施例がある。その目的も、疲れき裂を直接の研究対象とする場合から、他の疲れ特性の補助的説明のためや、機械・構造物の製作や保守の必要等に至るまで多岐にわたるので、これを同列に並べて功罪を論ずることは各研究者の意図するものを害する恐れがあるが、既述の意味から比較検討を試みておくことにする。疲れき裂の観察と測定は、き裂の進行速度と進行経路、き裂の発生に関して行なわれたものが多いのでこれを念頭において述べる。

#### (1) 破断面の観察

技術的に容易なためか、歴史的にはまず破断面の観察より始まったように思われる。その多くは肉眼または数倍程度の拡大によったものであり、Bacon<sup>11), 12)</sup>, Peter-son<sup>13)</sup>等のかなり組織的な研究結果がある。破断前のある特定の繰返し数におけるき裂面を簡単な平面図形に置くこと、およびその形を簡単な実験式で表わす試みはこの頃から始まった。この観察の結果が示すものは当然最終的破断にあずかった危険断面の最終き裂のみであるが、この破断面に残る模様から過去のき裂面形状を直接に見ることができるので、さらに進んだ各種の観察や測定も、かかる種類の観察から得られた知識がかなりのよ



第 5 図 回転曲げ、管状試験片のき裂の成長の測定結果 (石橋)

りどころとなっている。しかし第 5 図<sup>14)</sup>の例より見られるように、き裂が破断面全体のかなりの部分を占めるようになるのは多くの場合き裂の進行過程の最終段階であり、き裂の成長の大部分の期間ではきわめて浅いき裂が緩慢に成長しているのであって、破断面の全体的観察の対象となったき裂はいわばもう手の施しようもなくなった後のき裂である。

## (2) 顕微鏡等による表面または断面観察

さらに精密な測定は多くの場合光学顕微鏡またはコンパレータによって行なわれ、最近では電子顕微鏡も併用される。その場合、従来の多くの疲れ試験が丸棒形試験片の曲げまたは振りによって行なわれ、き裂の進行は少なくとも 2 次元的存在であるのに、観察は表面に沿ってのき裂の進行、または試験片を切断したある断面に現われたある時期のき裂についてのみである。この方法により同一き裂の成長を連続観察するには、試験片を破壊しない表面観察に限るという制約を受ける。また表面観察、切断面観察はともにき裂の一断面の観察に過ぎないから、これからき裂の最大深さ、平均深さなどを決定するには一般にはき裂面形状を仮定しなければならない。しかも平滑材では発生き裂が 1 個にとどまるという保証がない<sup>5), 6), 15)~17)</sup>のであるから、危険であると思われる最大のき裂は見落としなく観察できることが必要となる。対象を“表面またはある切断面に現われたある一つのき裂”と限ってしまえばいかようにも議論できるのであるが、ただ 1 個でも危険なき裂があればその部材・部品全体の疲れ強さ・疲れ寿命はこれによって決定されるので、少なくとも疲れ特性との関連においてなされる観察ならば上記の考慮が必要となる。実際に報告された多くのき裂写真にはその切断面の位置、方向、最大深さまたはき



(a) アルミニウム、海水中

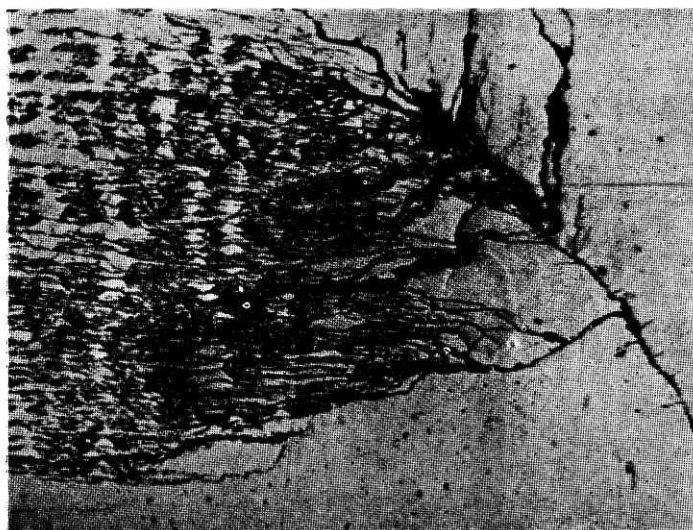


(b) 軟鉄、海水中

第 6 図 腐食疲れき裂の断面写真 (P. Ludwik)

裂面全体との関係、その他のき裂との関係について説明されている例はきわめて少ない。かかる説明を十分に行なうのは実はきわめて困難なことではあるが、この点の考慮の不十分さのために現象の理解が不十分になる場合があるのである。たとえば、腐食疲れき裂の進行経路についての代表的文献と思われる Gough<sup>18)</sup>の論文は多くの断面写真(たとえば第 6 図)を引用して貫粒き裂が支配的であることを結論している。その結論自体にとくに反対はないけれども、これら引用されたき裂写真はいかなるき裂面のいかなる部分のいかなる方向の断面を表わしているかは明瞭でない。かりに最初のき裂が粒界に沿っていたとしても十分な繰返し応力下ではやがて粒内進行に移ることはほぼ間違いないから、引用された写真がき裂発生点を含む断面に関するものであることが保証されなければ上記の結論は導きえないはずである。また同じく Gough<sup>10)</sup>の第 7 図のような断面写真を腐食疲れき裂の一つの代表として引用されることがしばしばあり、引用者の意図とは別に、腐食作用の共働によってき裂端がこのような網状化するかのような誤解を招くことがあるが、実はこの網状き裂は試験片深部における試験片横断面に現われたき裂であり、この部分は腐食作用を受けないのであるから、かかる種類のき裂の成立は主として応力条件によるもので、特に腐食がなくても再現が可能であると思われるのである。

このほか、顕微鏡等による観察には実験技術上の種々の困難がある。たとえば、き裂が浅く 0.1mm 以下で相対するき裂面がよく密着していると、通常の研磨状態では光学顕微鏡で 2000 倍程度に拡大してもき裂の存在を

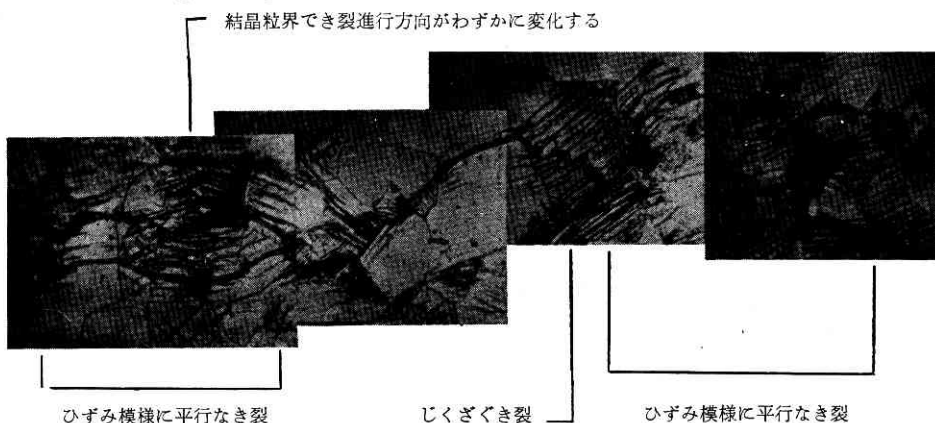


第7図 アルミニウム単結晶の純水中ねじり腐食疲れ試験片の断面に見られた網状き裂 (Gough & Sopwith)



第8図 軟鋼の腐食疲れき裂の断面  
(応力  $25\text{kg/mm}^2$ , 繰返し数約  $3 \times 10^5$ )

確認できない場合がある。この場合は適当な研磨とエッチングを施すことにより第8図<sup>19)</sup>のようなき裂を確認できるが、エッチング等の程度によりき裂の形状、寸法が多少異なってくる。もし表面からの観察ならば、研磨とエッチングにより試験片



ひずみ模様に平行なき裂

じくざぐき裂

ひずみ模様に平行なき裂

第9図 電解研磨した軟鋼線の回転曲げ食塩水腐食疲れで現われたき裂とひずみ模様 (Whitwham & Evans)

表面の条件は観察前と異なってくるので、その後のき裂の挙動がこれにどの程度影響を受けるかを別に検討しなければならない。特に浅いき裂ではこれが問題になる。試験機運転開始前に表面に1種の電解研磨を行なって成功した Whitwham, Evans 両氏<sup>20)</sup>の実験もあるが、電解研磨を行なうと、き裂の発生応力が下がることがあるので、この結果はあくまでもかかる表面を持った材料のき裂ということに限定されてその一般性が保証されない。また表面き裂の切断面写真はそのほとんどが  $0.05 \sim 0.10\text{mm}$  以上の深さのき裂に関するものである。これは周知のように、材料表面と切断面との間の稜線をまったく失うことなく、研磨された切断面を得ることが非常に困難であることによるものと思われる。また切断面に現われるき裂は再研磨または再エッチングによりかなり異なった様相を呈する場合もある。これは既述のようなき裂面の複雑な立体的配置と主き裂周辺の微小分布き裂の存在および仕上げ時のダレによるものと思われるが、こ

のことから、実際に写真として得られたき裂断面は常にかかる多様性をもつ断面の一つに過ぎないと考えたい。このほか最大の問題点は、観察された対象がき裂であるか、すべり線、きず、介在物、その他であるかの識別、どこまでがき裂であるかの判断がまったく観察者の自由に任せられていることであり、これは既述のき裂面の実体よりくる当然の帰結である。

以上のように諸問題点があるにかかわらず、この観察方法は直接に測定できること、第9図<sup>20)</sup>のように金属組織やすべり線と合わせ観察できること、その他各種の利点があり、少なくともき裂の発生の確認は現状ではこれによるのが最も確かである。また他の方法によって得られた測定結果の最終的検討はこの方法によるほかはない。したがって従来最も多く使用された観察・測定方法であり、すでに前項 2. 等で述べたき裂の細部についての知識は多くこの方法により得られたものである。周知の deForest<sup>15)</sup>, Bennett<sup>16)</sup>, Moore<sup>21)</sup>, McClintock および

Ryan<sup>22)</sup>, 大内田久氏<sup>23)</sup>による進行速度の測定や、単結晶または少数大結晶についての Gough ら<sup>9), 10), 24), 25), 26)</sup>の観察、停留き裂に関する Phillips および Frost<sup>27), 28), 29), 30)</sup>, 石橋正氏<sup>31), 32)</sup>の観察等もこの方法で単独にまたは後述の非破壊検査的方法と併用して行なわれた。したがってこの方法は今後もますます数多く使用されることと思われるが、既述の諸問題を含むので、少なくとも疲れ特性との関連において採用する場合は、既述の諸考慮はもとより、そのき裂についての他の角度からの実験や、多くの断面観察結果を総合して結論が導かれることが必要であると考えられる。

現在この種研究で最も優れたものと思われるのは Hunter および Fricke<sup>5), 6)</sup>によるレプリカの連続転写によるものと、Wood<sup>34), 35)</sup>によるメッキ試験片の傾斜切断によるものであるが、それでもなお前者の方法に関しては、微細な密着き裂をいかに忠実に転写および解読できるかに疑問があり、後者の方法に関しては、き裂口とき裂底の位置差による誤差を複雑なき裂面で有効に修正しうるや否やに多少の心配がある。

### (3) き裂深さの連続測定法

既述の方法では試験片内部のき裂の進展を継続測定することができない。このため考案されたのがまず第一に酸化着色法であり、Bacon<sup>11), 12), 36)</sup>, Rogers<sup>37)</sup>, 石橋氏等<sup>2)</sup>および高橋氏<sup>70)</sup>によって試みられている。これはき裂の進行のある段階で試験片を加熱してき裂面を着色し、破断後これを測定してき裂面の変化を測定するのである。この着色は酸化皮膜による干渉色であるから、十分に密着し、かろうじて連続しているき裂先端がはたして着色されるか否か、テンパーカラーを与えるに必要な 200° ないし 400°C の加熱で、き裂の特性がまったく影響を受けないものかどうか、一度形成された酸化皮膜が破壊されないで保存されるかどうかなどの問題が考えられる。上記第2点については、かつて Peterson<sup>40)</sup>が検討を試みたが、今日のき裂の知識より見ればこの検討はきわめて不十分であったと思われる。上記諸問題は高橋氏<sup>70)</sup>により各種の方法で検討が試みられているので、近い将来には安心して使える有力な方法になるものと考えられる。しかしながら筆者の若干の経験によれば、ある種の疲れき裂のようにき裂口が腐食生成物等で覆われている場合や、きわめて浅いき裂の場合はこの方法の適用は困難であった。

つぎに、同様な目的で採用されたのは、撓みの変化から間接的にき裂の大きさを推定する方法で、Frost および Phillips<sup>17), 29)</sup>, 石橋氏等<sup>38), 39)</sup>によって利用されている。既述のようにき裂面の形状は必ずしも単純でないから、この方法は大体の見当をつけるのに用いられるのが普通である。特に平滑試験片の場合はき裂数が1個とは限らないので、これらき裂のすべてが曲げ剛性によら

ず変化を包括して測定することになるので最大き裂のみを選別することができない。筆者の実験<sup>19), 41)</sup>によれば、浅いき裂ではたとえき裂数が多くても試験機固有の“ガタ”の範囲内で撓み変化を検出することは不可能であったから、この方法によるき裂寸法の推定はき裂面が大きい単純な形状である場合に限ると考えてよいのである。その他星野氏<sup>4)</sup>は試験機の振動や荷重の変化からき裂の発生を検出しておられるが、これは試験機の構造や試験片寸法によってはかかる方法が使用できることを示すものと考えられる。

また他の有力な方法としては、Gassner<sup>42), 43)</sup>および星野・新井両氏<sup>4), 44)</sup>が採用されたプログラミングロードによるき裂の進行の測定法がある。これは応力が高い場合にできたき裂面は粗面を呈し、応力が低い場合は平滑面を呈する特性を利用して、たとえばき裂進行の途中適時荷重を下げた平滑帯を作り破断後の破面よりき裂面の変化を測定する方法である。この方法によればき裂面の変化をかなりよく再現することができ、とくに星野氏らの場合のように大型試験片(直径 125 mm)による実験では測定精度が高い。しかしながら、低応力を繰り返すことによりいわゆるコーキング効果で、き裂先端の材質が強化され、その後のき裂進行速度に影響を及ぼすことがありうること、粗面帯と平滑帯との境界は必ずしも分明でないから浅いき裂の場合は実用化が困難であろうと思われること、2個以上のき裂が合成されて破断面を形成する場合、き裂の発生、き裂間の協力が複雑な場合は破面の解読が困難となることなどの諸欠点もある。

以上の諸測定方法のほか、き裂深さの連続観察の基本的な対策として、幅に比して厚さのかなり小さい平板状の試験片を用いる方法が最近かなり行なわれる。この場合は、き裂は試験片表面に沿って進むと考えてよいので、近似的ではあるがき裂深さ  $\delta$  はそのままき裂長  $\lambda$  として直接観察される。この場合、Frost, Dugdale および Phillips<sup>30), 45), 46)</sup>, Weibull<sup>47), 48), 49), 50)</sup>, Illg および McEvily, Jr.<sup>51)</sup>, Giddings<sup>52)</sup>, Wilson および Burke<sup>53)</sup>, 瓜生氏<sup>54)</sup>等の実験に見られるように、必然的に荷重は1軸方向の引圧を用い、き裂の発生点は切欠きによって指定されていることになる。したがって薄板に曲げを生ずることなく正確に引圧荷重を与えるために、試験機や試験片には特別の考慮を必要とする。多くの場合は部分片振れ引張荷重によりこの点を一応解決しているが、両振れや特に圧縮の平均応力が卓越している場合は不可能ではないがかなりの困難がある。この点が解決されれば、高い精度で連続観察が可能となるから有力な方法である。もちろんこの場合も、薄板の引圧荷重という制限された条件下の実験であり、かかる荷重の下で薄板のき裂強さが特に低いこと<sup>29)</sup>, き裂前縁が必ずしも試験片表面に直角にならないこと<sup>46), 55)</sup>などが知られているからこの実



験の一般性については検討を要する。

以上は1本の試験片で連続観察する方法であるが、多数の試験片を使って平均的に進行を測る方法としては、Brumfield<sup>56)</sup>の提案したサルファープリント法がある。これは任意の繰返し数までき裂を進行させた試験片を腐食してき裂の位置に腐食溝を作り、この腐食溝のサルファープリントを作る。表面から数段階に切除しつつこの操作を繰り返せば、き裂の立体構造を近似的に求めることができる。この実験は分布き裂の立体構造を調べた点では唯一のものと思われるが、この方法の実施にはかなりの時間と熟練を必要とするばかりでなく、腐食溝がどのようなき裂をどの程度忠実に再現しているかに疑問がある。

#### (4) 非破壊検査の方法

以上述べたところは多くは実験室向きに工夫された諸方法であるが、このほかに主として現場でのき裂検出のために多くの方法が考案されており、今日非破壊検査法と呼ばれるものは多くこの目的に使用できる。この方法についてはすでに専門書<sup>57), 58)</sup>があるので詳細は省略し、その大要のみ述べる。

主として表面またはこれに近いき裂の分布、位置、き裂長を検出する方法としては磁粉探傷法、浸透探傷法がある。いずれも熟練すればかなり浅いき裂でも検出できる。しかし、材料表面が平滑でない場合、き裂以外の欠陥がある場合、き裂中に腐食生成物等が含まれる場合等は良好な指示を与えないことが多い。またき裂の全体構造を正確に知することは現在不可能であるばかりでなく、表面におけるき裂も多くは拡大された近似的なものである。磁粉探傷法の磁粉の代わりに、漏えい磁束をリサーチングコイル<sup>4), 59)</sup>や一種の磁気テープ<sup>60)</sup>で検出することもレーン等に対して実施されているが、これによる測定値からき裂形状を再現することは将来は有望と思われるが現状ではできない。

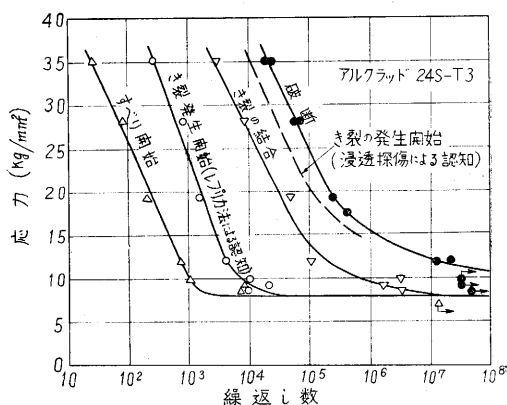
深部き裂を検出するには超音波探傷が有力であり、最近では深さ1mm以下の表面き裂も検出が可能になりつつある<sup>61)</sup>。しかし、エコーは材料中に含まれる全欠陥によって左右されるから、検出されたき裂の細部決定はやはり他の方法の併用によらねばならないものと思われる。

き裂による材料の不連続を材料表面の電位差分布として取り出す方法<sup>62)</sup>はRisstiefenmesserなる市販測定器もあって実用化されておりき裂深さを測る方法として有望であるが、これが広くかつ精度高く使用できるのはまだ今後の問題に属するものと思われる。渦電流を用いる方法<sup>60)</sup>、表面の接触抵抗による方法も同様である。要するにこの種非破壊検査の諸方法はまだき裂の有無の検出の段階であり、微小き裂の細部の測定は現在なお開発中と云ってもよい。

#### (5) 従来の方法の功罪の総括

以上を要するに、現在までに提案され試みられた方法は多数にのぼり、研究用にも現場用にも、目的さえ限定すればかなり有力な方法もある。しかしまた、個々単独では全般的に完全といえるものがほとんどなく、一般にはつぎのような点が問題であり、多角的な併用を必要とするように思われる。

(a) 各種方法の間で測定感度の差が著しい。しかるにこの点に断わりなく“き裂の有無”“き裂の発生”“き裂の大きさ”などの語が用いられ各種の論議がされることがある。第10図に示す一測定例<sup>5)</sup>を見ればこの危険は明らかである。



第10図 アルクラッド 24S-T3 平板繰返し曲げ疲れ試験のき裂。き裂発生時期が検出方法によってきわめて異なる例 (Hunter, Fricke)。

(b) 観察・測定・検出結果と対象となった実体との関連が明確でない。これについてはすでに述べたところより明らかであろう。

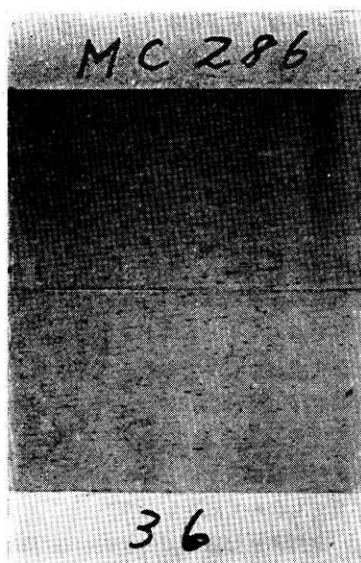
(c) 用いられた各検出・観測・測定方法が、材料のいかなる力学的特性をどのように左右するき裂を対象としているかが明らかでない。採用された方法いかににより確認される実体に差があるのであるから目的に沿うような方法が選ばれるべきは当然であるが、現状は必ずしもこの点が合理的でない場合もあるように思われる。

(d) 日常用いられるかなり多くの方法が、研究面でも応用面でも感度不足である。

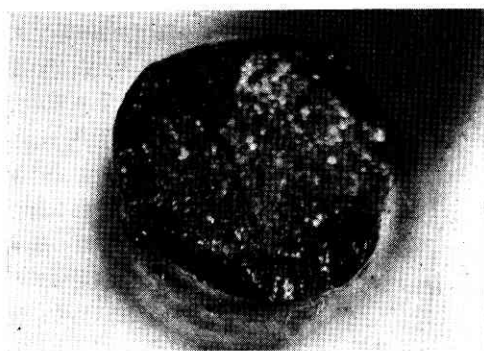
(e) 微小な多数分布き裂、汚染または粗面化した材料表面の小さき裂を調べるに適する方法はきわめて少ない。

#### 4. 一つの試案——有効き裂

実際の使用条件下でのき裂の発生は切欠き部および圧入部に多い。しかし破断事故を生ずる個所の形状係数が分岐点<sup>1), 2), 4)</sup>の形状係数より小さい場合も多く、かつ実際の使用条件下では部材・部品が湿潤なふん囲気に触れることもあるのでこの場合は平坦部はもとより切欠き部でも多数の分布き裂を生ずる。また実際の使用条件下では部材・部品の表面が一般腐食・漬食・フレッチング・コロージョン・摩耗・打こん・塗膜の劣化その他で粗面



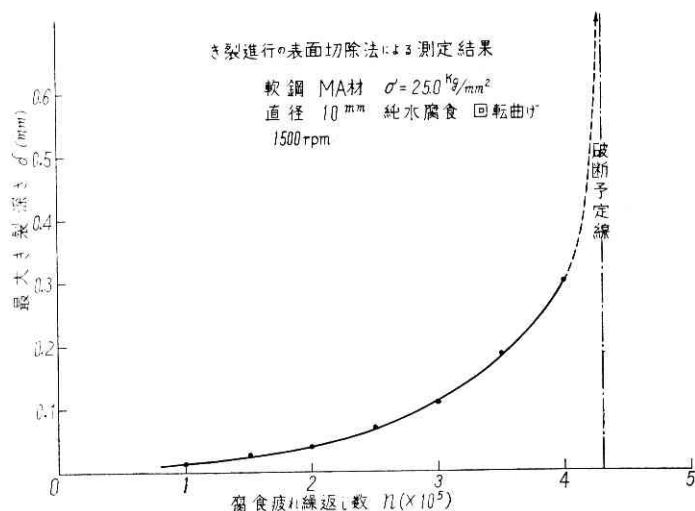
第 11 図 磁粉探傷によって得られた  
微小分布き裂の指示模様  
(セロテープ転写): 最大深さ  
0.12~0.14 mm



第 12 図

化されていることが多いが、かかる個所で発生したき裂は多数の分布き裂であることが多い。このようなき裂群は一般に低応力下で強制的に発生せしめられたものなので、長期間微小なままで停留または進行すること多い。このように実際の破断事故に寄与する切欠き、腐食疲れまたはこれに類する場合は、き裂の発生時期が疲れ寿命の初期段階にあり、したがって後に示す第 13 図より分かるように疲れ寿命の大部分は微小なき裂の比較的緩慢な進行期で占められる。したがって既述のごとき従来の諸方法ないしは考え方は、実際使用されている機械・構造物の保守や、その基礎となる研究のためには、そのままでは必ずしも適当でないことになる。かかる現状に対して非破壊検査の方面では、得られた指示の判定の標準化が現在進みつつあり、一方指示と材料強度との関係も注目され始めるようになった<sup>63), 64)</sup>。ここでは基礎研究の立場からの一つの提案を試みておく。

それは“有効き裂”という考え方である。これについ



第 13 図 表面切除法による最大最深き裂深さの測定結果

て腐食疲れの見地からすでに述べてきた<sup>19), 41), 65), 66), 67)</sup>が、これを一般的立場から要約すればつぎのようになる。

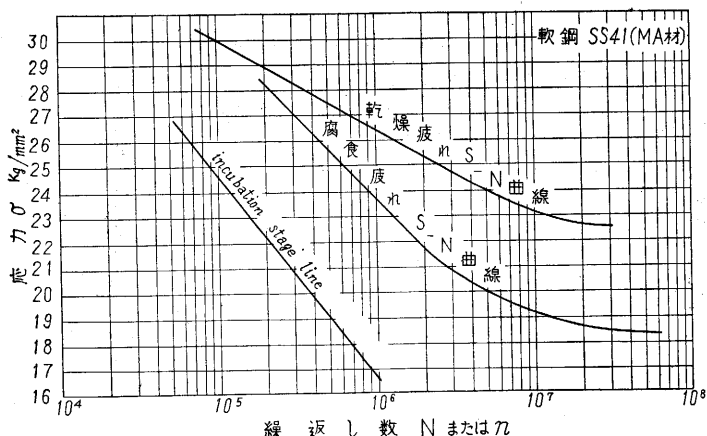
材料力学的に見て無視できないようなき裂、換言すれば、通常の材料試験によって得られる材料の強さまたは寿命に影響を与える程度のき裂のみを考えて、これを“有効き裂” (effective crack) と称し、当面对象をこれに限定するのである。最小有効き裂に至る以前の電子顕微鏡的な微視的き裂や、転移論で考えるようなまたはしばしば通常の damage の説明に使われるような超微視的き裂は、一応対象から除いて後にまた別の見地より扱うことにする。き裂の寸法を表わす尺度は、問題とする危険箇所における最大き裂の最大深さである。き裂長は一般にはき裂面を確認した上でき裂深さに対応した副次的尺度とし、特別な場合のみ別個に独立した尺度とする。

このように対象を制限すると、筆者が構造用鋼材について調べた限りではつぎのような利点があり、材料力学的見地よりの疲れき裂の扱いと現用の測定・観察方法の規定された用法とをかなりよく調整することができるものと思われる。また、分布き裂に対しても適用できる。

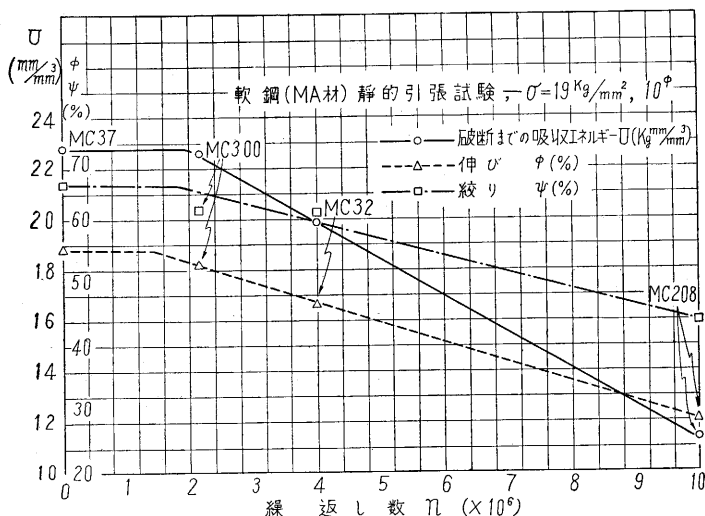
(a) この程度のき裂ならば従来の材料試験関係者間で一般に疲れき裂と呼ばれてきたものの範囲と矛盾しない。

(b) 最小有効き裂は 0.01 ないし 0.02 mm 程度と推定されるから、これは現在ないし近い将来の非破壊検査技術で実用的にも検出可能である。粗面化された場合を考えると現在市販されている検査器械では磁気探傷のみが実用に堪えるものと考えられる。第 11 図にその測定例<sup>69)</sup>を示す。

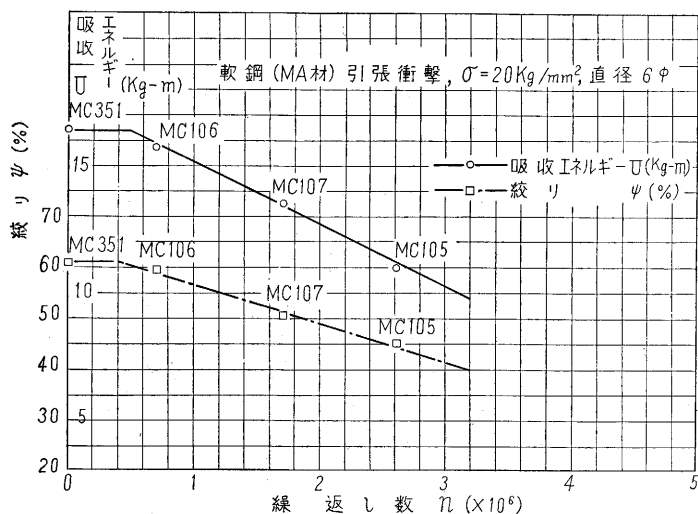
(c) 有効き裂は 1000 倍程度までの光学顕微鏡で適当な注意の下で観察できるき裂とはほぼ一致する。すでに示した第 8 図はその 1 例で深さ約 0.12 mm である。この断面写真の製作は、まづき裂を有する試験片を静的引



第 14 図 軟鋼回転曲げ純水腐食疲れ S-N 曲線と incubation stage line



第 15 図 回転曲げ (応力 19 kg/mm², 約 1500 rpm) で純水腐食疲れを与えて作ったき裂材の静的引張試験結果



第 16 図 回転曲げ (応力 20 kg/mm², 約 1500 rpm) で純水腐食疲れを与えて作ったき裂材のシャルピー引張衝撃試験結果

張, 衝撃引張および 2 段重複繰返し荷重で切断して定義された意味でのき裂面の近似形状を第 12 図のように決定する。つぎに同一仕上げの平滑試験片は同一形式荷重・同一応力の同一繰返し数では最大き裂が相似き裂面を持つとの前提に立って, 材料表面より最深位置を求めて材料表面に直交する面でき裂断面を作る。断面の仕上げは, 通常の金属組織検鏡試料の作製に伴いやすいダレ等を避けて主としてと石を用い, エッチングを施したものである。この断面よりき裂深さ  $\delta$  を決定するに当たっては, 数 100 倍程度で容易に確認できるものならば, 主き裂先端の多少孤立したかに見える微小き裂をも含めて測定した。

(d) 定義された意味でのき裂の進行速度または現在寸法は, 当然通常材料試験機によって種々の方法で求めることができる。その 1 例は次の表面切除法である。任意の繰返し数  $n$  まで, き裂が進行した試験片を適当な深さまで一様に表面切除して再び疲れ試験を行ない, その再試験での疲れ寿命があらかじめ知られているき裂寿命を超えなければ, 最大き裂の深さが切除厚以上であったことが分かる。この方法による軟鋼の回転曲げ純水腐食疲れき裂の進行の測定例を第 13 図<sup>(41)</sup>に示す。この結果は (c) に述べた断面写真による測定結果とよく一致した。この表面切除法以外に, 後述の第 15 図ないし第 17 図に例示する実験もこの目的に使用できる場合がある。

(e) 第 13 図より明らかなように腐食疲れでは, また一般に鋭い切欠き材でも<sup>(33), 68)</sup>, 疲れ寿命の初期段階で有効き裂が発生 (成立) する。したがって疲れ寿命のパラッキの程度を考えると, 疲れ寿命をき裂進行期間に置き代えることができる。しかも腐食疲れでは, 有効き裂発生時期が第 14 図に示すような直線 (incubation stage line) を中心とするかなり狭い帯域内に入り, しかもこの i. s. line は S-N 曲線の傾斜直線部にはほぼ平行である。しかも有効き裂の進行はその発生前と異なって実際に確率現象として扱う必要がないものと考えられる。したがってかなり簡単な線型化された計算式を用いて十分の精度で S-N 曲線, 疲れ限度線図等を算出したりその他の計算を行ないうる可能性を含んでいる<sup>(19), (41), (66), (67)</sup>。



(f) 有効き裂の i.s. line の位置をきめる際には、最終的破断に使用した荷重方式の差がき裂感度に対してほとんど影響しない。たとえば荷重繰返し数に対する腐食疲れ材の材料特性値の変化を、第 15 図より第 17 図にそれぞれ静的引張荷重、衝撃引張荷重、繰返し荷重に対するものを例示すれば、各図における直線降下特性への移行点がそれに当たり、すべて同じ i.s. band の中に入る。

(g) この第 15 図ないし第 17 図と第 13 図を合わせて考えると、この場合腐食疲れの進行は、すなわちき裂の進行を意味するから、材料の諸特性値が最大き裂の最大深さといふ対応をしていることが分かる。

(h) 諸種の実験結果を総合すると、有効き裂とは引張と圧縮の荷重に対して異なった応力集中を生ずるような材料境界の形（非対称な stress raiser）で、かつその応力集中のおよぶ範囲が材料の巨視的な破壊形式に著しい影響を与えるようなものと考えてもよいと思われる。

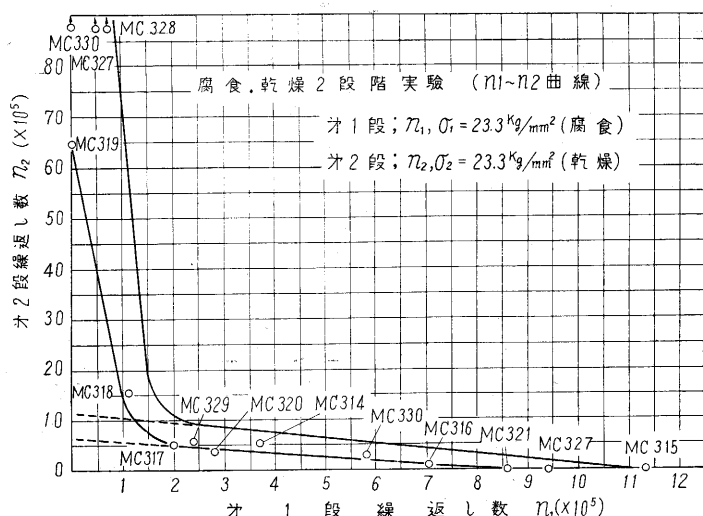
かかる取り扱い、明確にはされないが従来もある程度行なわれてきたと考えてよいかも知れない。しかし、これを明確にしておくことは現段階ではやはり必要であると考え、かかる考えに基づいて今後の議論を進めたいと思う。き裂の実体およびその力学的特性の詳細がまだ明らかでなく、日進月歩の今日であるから、近い将来この扱いや考え方はさらに補正ないし改新が加えられることをむしろ望むものである。

疲れき裂についての諸知識の収集は当初より九大石橋正先生のご助言、ご援助を受けた。引用した諸実験結果を得るに当たっては、全般にわたって生研岡本舜三、大井光四郎両先生の、顕微鏡による研究については西川精一先生のご指導、ご協力を受けた。ここに深く謝意を表する次第である。

(1960. 11. 12)

## 文 献

- 1) 河本実・木村一成 “金属の疲れにおける停留き裂について” 機論, 25, 155 (1959. 7), 552.
- 2) 石橋正 “金属の疲労と破壊の防止” (養賢堂), 279.
- 3) F.A. McClintock “On the Direction of Fatigue Cracks in Polycrystalline Ingot Iron” J. App. Mech., 19, 1(1952. 3), 54.
- 4) 星野次郎 “大形疲れ試験の結果について (第 2 報 平滑試験片のき裂進行)” 機論, 26, 164(1960. 4), 567.
- 5) M.S. Hunter, Wm.G. Fricke, Jr. “Metallographic Aspects of Fatigue” Proc. ASTM., 54(1954), 717.
- 6) M.S. Hunter, Wm.G. Fricke, Jr. “Fatigue Crack Propagation in Aluminium Alloys,” Proc. ASTM, 56 (1956), 1038.
- 7) 河本実・鈎三郎・中川隆夫 “鋼の疲労破壊の電子顕微鏡による考察” 第 2 回材料試験連合講演会前刷第 1 部, 13,
- 8) F.P. Bullen, A.K. Head, W.A. Wood “Structural



第 17 図 回転曲げ (応力  $25 \text{ kg/mm}^2$ , 約 1500 rpm) で純水腐食・乾燥同応力 2 段階実験結果

Changes during the Fatigue of Metals” Proc. Roy. Soc. Ser. A, 216, 1126 (1953. 2), 332.

- 9) H.J. Gough, D.G. Sopwith “Corrosion Fatigue Test on Aluminium Crystal” ARC, R. and M., 1433.
- 10) H.J. Gough, D.G. Sopwith “The Behaviour of a Single Crystal of Aluminium under Alternating Torsional Stress while Immersed in a Slow Stress of Tap Water” Proc. Roy. Soc. Ser. A, 135, 827(1932. 3), 392.
- 11) F. Bacon “Cracking and Fracture in Rotating Bending Tests” Engg., 134(1932. 9), 372.
- 12) F. Bacon “Fatigue and Corrosion Fatigue with Special Reference to Service Breakages”, Proc. IME, 124(1933. 6), 685.
- 13) R.E. Peterson “Stress-Concentration Phenomena in Fatigue of Metals”, Trans. ASME, 55(1933), 157.
- 14) 石橋正 “疲労亀裂の伝播に関する最近の問題” 機械の研究, 10, 5(1958. 5), 1.
- 15) A.V. deForest “The Rate of Growth of Fatigue Cracks” J. App. Mech., 3, 1(1936. 3), A-23.
- 16) J.A. Bennett, “A Study of the Damaging Effect of Fatigue Stressing on X 4130 Steel” Proc. ASTM, 46 (1946), 693.
- 17) N.E. Frost, C.E. Phillips “The Fatigue Strength of Specimens Containing Cracks”, Proc. IME, 170, 21 (1956), 713.
- 18) H.J. Gough “Corrosion-Fatigue of Metals” J. Inst. Metals, 49, 2(1932. 12), 17.
- 19) 岡本舜三・北川英夫 “腐食疲れに関する一考察”, 機誌, 62, 481(1959. 2), 204.
- 20) D. Whitwham, U.R. Evans “Corrosion Fatigue-The Influence of Disarranged Metal” J. Iron Steel Inst., 165 (1950), 72.
- 21) H.F. Moore “A Study of Fatigue Cracks in Car Axles” Bull. Eng. Exp. Sta. Univ. Illinois, 165(1927, 6), 20.
- 22) F.A. McClintock, F.J. Ryan “On the Rate of Growth of Fatigue Crack” J. App. Mech., 21(1954. 9), 296.
- 23) 大内田久 “鋼材の疲れ強さにおよぼす法効果” 機誌, 62, 484(1959. 5), 722.
- 24) H.J. Gough “Fatigue Phenomena with Special Reference to Single Crystals” J. Roy. Soc. Arts, 76, (1928), 1025, 1045, 1065, 1085, 1117.

- 25) H.J. Gough, H.L. Cox, D.G. Sopwith "A Study of the Influence of the Intercrystalline Boundary on Fatigue Characteristics" J. Inst. Met., 54, 1(1934), 193.
- 26) H.J. Gough, G. Forrest, "A Study of the Fatigue Characteristics of Three Aluminium Specimens Each Containing from Four to Six Large Crystals" J. Inst. Met., 58, 1(1936), 97.
- 27) N.E. Frost "Crack Formation and Stress Concentration Effects in Direct Stress Fatigue", Engineer, 200, 5201(1955.9), 464, 5202(1955.10), 501.
- 28) C.E. Phillips "Some Observations on the Propagation of Fatigue Cracks" Colloq. on Fatigue, IUTAM, 1955, Stockholm (1956), 210.
- 29) C.E. Phillips "Fatigue Cracks as Stress Raisers and Their Response to Cyclic Loading" Proc. Intern. Conf. Fatigue in Aircraft Structures, Columbia, 1956, (Academic Press Inc. New York)(1956.2), 104.
- 30) N.E. Frost, C.E. Phillips "Studies in the Formation and Propagation of Cracks in Fatigue Specimens" Proc. Inter. Conf. Fatigue of Metals, 1956, 520.
- 31) 石橋正 "銅の切欠係数に現われる分岐点について", 機論, 22, 115(1956.3), 144.
- 32) T. Isibasi "On the Branch Point of Notched Fatigue Specimen" Proc. 6th Jap. Nat. Cong. App. Mech (1956), 71.
- 33) M.S. Hunter, Wm. G. Fricke, Jr. "Cracking of Notch Fatigue Specimens" Proc. ASTM, 57 (1957), 643.
- 34) W.A. Wood "Formation of Fatigue Cracks" Philo. Mag. 3, 31 (1958.7), 692.
- 35) W.A. Wood "Some Basic Studies of Fatigue in Metals" Fracture(Technology Press & Wiley), (1959)412
- 36) J.S. Caswell "Discussion on the Frost and Phillip's Paper-The Fatigue Strength of Specimens Containing Cracks" Proc. IME, 170, 21(1956), 738.
- 37) "The Micrographic Study of Failures by Fatigue" Engineering, 82(1906.12), 842.
- 38) 石橋正・瓜生恒美・佐藤栄一 "円周亀裂を持つ炭素鋼試験片の疲れ強さ" 機誌, 19, 87(1953), 34.
- 39) 石橋正・瓜生恒美 "Fatigue Strength of Carbon Steel Bars with Round-Crack" 九大応研報告, II, 6(1953)65
- 40) R.E. Peterson "Discussion on the deForests' Paper (1936)-The Rate of Growth of Fatigue", J. App. Mech, 3 (1936), A-115.
- 41) 岡本舜三・北川英夫 "Some Behaviors of Structural Steel Subjected to Corrosion Fatigue (The 2nd Report) Proc. 8th Japan Nat. Cong. App. Mech., (1958), (1959.3), 187.
- 42) E. Gassner "Betriebsfestigkeit Eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit Statistisch Wechselnden Betriebsbeanspruchungen" Konstruktion, 6, 3, 97.
- 43) T. Haas "Discussion on the Frost and Phillip's Paper" The Fatigue Strength of Specimens Containing Cracks (1956)
- 44) 星野次郎 "大形疲れ試験の結果について (第4報, 段付試験片のき裂進行)" 日本機械学会前刷, 17 (1960.4), 87.
- 45) N.E. Frost, D.S. Dugdale "Fatigue Test on Notched Mild Steel Plates with Measurements of Fatigue Cracks" J. Mech. Phys. Solids, 5, 3 (1957), 182.
- 46) N.E. Frost, D.S. Dugdale "The Propagation of Fatigue Cracks in Sheet Specimens" J. Mech. Phys. Solids, 6, 2 (1958), 92.
- 47) W. Weibull "The Propagation of Fatigue Cracks in Light-Alloy Plates" SAAB T.N. Sweden, 25 (1954.6)
- 48) W. Weibull "Basic Aspects of Fatigue" Colloquium on Fatigue, 1955, Stockholm (Springer V-1)(1956) 289.
- 49) W. Weibull "Effect of Crack Length and Stress Amplitude on Growth of Fatigue Cracks" FFA Report, Aero. Res. Inst. Sweden, 65 (1965)
- 50) W. Weibull "Discussion on the Phillip's paper(1956)-Fatigue Cracks as stress Raisers and Their Response to Cyclic Loading" Fatigue in Aircraft Structure (1956), Academic Press Inc. New York (1956), 119.
- 51) W. Illg, A.J. McEvily, Jr. "The Rate of Fatigue-Cracks Propagation for Two Aluminum Alloys under Completely Reversed Loading" NASA T.N., D-52 (1959.10), 1.
- 52) H. Giddings "Discussion on Frost and Phillip's Paper (1956) -The fatigue Strength of Specimens Containing Cracks" Proc. IME, 170, 21 (1956), 735.
- 53) W.M. Wilson, J.L. Burke "Rate of Propagation of Fatigue Cracks in 12-by 3/4-In. Steel Plates with Severe Geometrical Stress-Raisers, J. Am. Weld. Soc., Res. Suppl, 27, 8 (1948.8), 405-S.
- 54) T. Uryu "The Rate of Fatigue-Crack Propagation in Mild Steel", Proc. 3rd. Jap. Cong. Test. Mat., 1959 (1960), 43
- 55) 遠藤吉郎・永井欣一・有崎慶治 "腐食疲れを受けた鋼材のき裂深さと低温ぜい性について" 機械学会講演会前刷集 32 (1960.11), 59.
- 56) R.C. Brumfield "A Sulphur Plint Method for the Study of Crack Growth in the Corrosion-Fatigue of Metals" Proc. ASTM, 45 (1945), 544.
- 57) 日本非破壊検査協会編 "非破壊検査の実際" (オーム社) (1957.6)
- 58) 日本非破壊検査協会編 "非破壊検査"
- 59) 中村林二郎 "軌条探傷車における傷と波形との関係" 非破壊検査, 3, 2 (1954), 72.
- 60) F. Förster "電磁気的破壊検査による品質管理" 非破壊検査, 6, 5 (1957.9-10), 217.
- 61) 日本鉄道技術協会 "超音波による車両部品疲労判定方法の研究報告書" (1960.3).
- 62) 中村林二郎 "傷の深さ測定法に関する一実験" 非破壊検査 5, 1 (1956), 30.
- 63) Jap. Nat. Commit. Session 1 (H. Kihara etc) "Relation Between Results of Nondestructive Testing of Materials and Their Mechanical Strength" 3rd. Intern. Conf. on Nondestructive Testing, Japan, 1960.
- 64) G.H. Tenney "Relation Between Results of Nondestructive Testing of Materials and Their Mechanical Strength" 3rd. Intern. Conf. on Nondestructive Testing, Japan (1960.3).
- 65) 北川英夫 "Some Behaviors of Structural Steel Subjected to Corrosion Fatigue (The 3rd Report) -The Influence of Mean Stress and Corrosion Fatigue of Rail Steel-" Proc. 9th Japan Nat. Cong. App. Mech., 1959 (1960.3), 153.
- 66) 北川英夫・佐藤操 "Apparent Brittleness of Steel by Corrosion Fatigue" Proc. 9th Jap. Cong. Test. Mat., 1960.
- 67) 北川英夫・諸橋恒夫 "Some Behaviors of Structural Steel Subjected to Corrosion Fatigue(The 4th Report) -Influence of Mean Stress-" Proc. 10th Nat. Cong. App. Mech., 1960.
- 68) A.J. Fenner, N.B. Owen, C.E. Phillips "The Fatigue Crack as A Stress-Raiser" Engg., 171(1951.5), 637
- 69) 岡本舜三・北川英夫, 他 "古橋桁耐久強度の基礎的研究報告書" 国鉄昭 32 年度委託研究報告書 (1958.3)
- 70) 高橋幸伯 "造船用鋼材の高応力疲れ試験第1報" 造船協会論文集, 108 (1961.1), 1 に掲載の予定.