



研究ノート

疲労き裂進展を支配するき裂閉口現象

小 倉 敬 二*

1. はじめに

近年、航空機構造をはじめ、重要機器の強度設計に対し、損傷許容設計(Damage tolerance design)が採り入れられるようになってきた。すなわち従来の安全寿命設計(Safe life design)の前提となっているきずのない材料を用い、きずのないように製作し、しかも全使用寿命中に全くきずが生じない構造という条件が現実にはほとんど不可能との認識から、むしろある程度の傷が存在してもなお安全のように構造設計をしようとするいわゆるフェールセーフ設計の考え方である。

多くの機械構造物は繰返し荷重を受けるが、このような繰返し荷重の下におけるき裂進展を疲労き裂進展といっている。非常に小さな長さ a_i のき裂が徐々に進展し、ついにある限界寸法 a_c に達して決定的破壊を引き起こす。荷重の繰返し数 N とともにき裂長さが a_i から a_c に到達する過程は図1に示すようにいろいろな場合がある。このような疲労き裂の進展の様子を定量的に記述するにはき裂進展則が必要であり、その確立は損傷許容設計の基本となる重要な課題である。

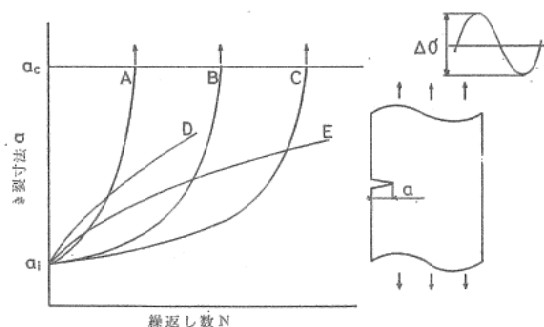


図1 疲労き裂の進展過程

*小倉敬二 (Keiji OGURA), 大阪大学, 基礎工学部, 機械工学科, 教授, 工学博士

疲労き裂進展則としては次のような Paris 則と呼ばれるものが広く受け入れられている。

$$da/dN = C \Delta K^m$$

ここに da/dN は負荷の1サイクル毎のき裂進展量でありき裂進展速度と呼ばれている。 ΔK はき裂先端の力学状態を代表する応力拡大係数幅と呼ばれる破壊力学パラメータであり、負荷応力の変化幅 $\Delta\sigma$ とき裂長さ a の $1/2$ 乗の積に比例する。 C , m は材料定数であり、 m の値は2~8と幅広い。なお Paris 則は ΔK の値が下限値と呼ばれる ΔK_{th} 以上で適用可能である。 ΔK が ΔK_{th} 以下ではき裂は全く進展しない。図1の $a-N$ 関係は Paris 則を積分することにより得られる。

Paris 則は疲労き裂進展則として広く受け入れられる一方、これではその進展挙動を予測できない場合も多い。特にき裂進展が非定期的な場合にその傾向が強い。

この矛盾を解明し、疲労き裂進展則の確立に大きな役割を果たしたのがき裂閉口現象(Crack closure)の発見であった。この現象は1970年に発見されたが、その後の疲労き裂の研究の中心的検討課題となったのである。

2. き裂閉口現象

『疲労き裂は引張り負荷荷重を受けると同時に開口するのではなく、ある大きさの負荷荷重までは閉口している。』というのがき裂閉口現象であり、1970年 Elber によって発見された。この発見は疲労き裂は荷重0を境に引張りであれば開き、圧縮であれば閉じるとする常識を打ち破る発見であった。疲労き裂はその先端に塑性変形を繰返しながらその中をつき進んでいく。すなわち履歴を持っているわけであるから、履歴のないスリットとは異なって当然であったわけである。その後の研究が引張り側で

裂閉口が生じていると同時に逆に圧縮側においてもき裂が開いている場合もあり、これらのき裂開閉口現象がき裂の進展挙動を支配していることがわかっている。

Paris 則を適用する場合、見かけのき裂開閉口ではなく、真の開閉口に基づき開口している間の応力拡大係数の変化幅（これを有効応力拡大係数幅とっている）、 ΔK_{eff} を ΔK の代りに用いた修正進展則 $da/dN=C'(\Delta K_{\text{eff}})^{m'}$ は非定常なき裂進展をも含め広い範囲のき裂進展を記述できる進展則となることがわかっている。ただき裂の真の開閉口は多くの因子の影響を受けるようであり、その予測はあまり簡単でないことから、 ΔK_{eff} により記述されたき裂進展則は広く使われるには至っていない。

疲労き裂の開閉現象は究極的にはき裂の履歴効果のため、除荷の状態でき裂面に圧縮残留応力があり、これによってき裂面が押されているため引張り負荷を受けてもすぐには開口しない。しかし逆にき裂面に引張りの残留応力が生じる場合もあり、この場合は逆に圧縮負荷応力下でき裂が開くことになる。Elber の指摘したき裂閉口現象およびその機構は現在塑性誘起き裂閉口(Plasticity-induced crack closure)と呼ばれているものであり、き裂進展とともにき裂面に残される残留塑性変形がき裂閉口を早め、またこれにより誘起される除荷時のき裂面上圧縮残留応力が開口を遅らせるというものである(図2参照)。塑性誘起き裂閉口は最も基本的なき裂閉口機構ではあるが、実際にはこれに重畳する閉口あるいは閉口機構が存在し、複雑な開閉口挙動を示すことが多い。

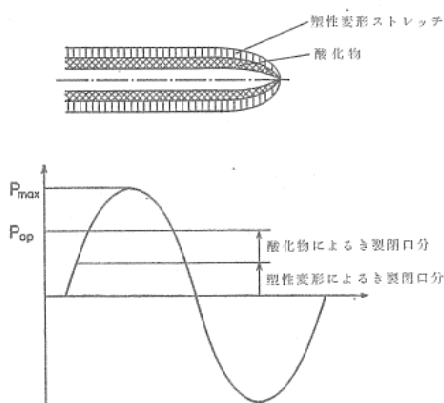


図2 塑性誘起き裂閉口と酸化物誘起き裂閉口

酸化物誘起き裂閉口(Oxide-induced crack closure)は最近提唱されている基本的なき裂閉口機構の一つである。き裂面上に付着する酸化物は通常極く薄く $1\mu\text{m}$ 以下である。き裂進展の下限界近傍では開口変位の絶対値も非常に小さいのでこの厚さが問題になる。き裂面上に余分の酸化物が付く(図2参照)ので、き裂閉口レベルは上昇し、き裂進展下限界ではほとんどき裂の開口がなくなってしまうことがわかっている。高温環境中では高温酸化物が破面上に付着すると考えられるのでき裂閉口がより顕著に起こることが予想される。軟鋼では確かにそのような傾向が認められるが、全体の開口変位が増大するためか塑性誘起き裂閉口が顕著でなくなり、き裂閉口レベルの絶対値は下限界近傍でもさほど上昇しない。

破面あらし誘起き裂閉口(Roughness-induced crack closure)も指摘されている一つなき裂閉口機構である。材料組織の代表寸法が大きい場合には疲労破面はあらかくなり、破面の不整合が生じやすくなってき裂閉口レベルが上昇するというのが基本的な考えであるが、著者らの最近の研究によればこの機構はさほど重要でないように思われる¹⁾。

最近多くの疲労き裂進展問題がき裂開閉口現象と大きく関与していることが明らかになりつつある。次にこれらのうち切欠底からのき裂進展問題と微小き裂の問題におけるき裂開閉口現象の寄与について簡単に述べる。

3. 切欠底からのき裂進展

切欠底から生じた疲労き裂の進展挙動は図3に示すように複雑である。すなわち発生直後のき裂の進展速度は大きく、その後急速に減少した後極小値を示し、その後再び速度を増して行くという特徴的な挙動を示す。速度を減じて行く過程で進展を停止していわゆる停滞き裂となる場合も多い。

このようなき裂進展挙動は、以下のようなき裂開閉口の変化に起因したものと考えられる。切欠底では負荷の繰り返しによりまず小さな塑性変形域が生じ、その中にき裂が発生・進展していく。き裂はこの塑性変形域を進展する間は

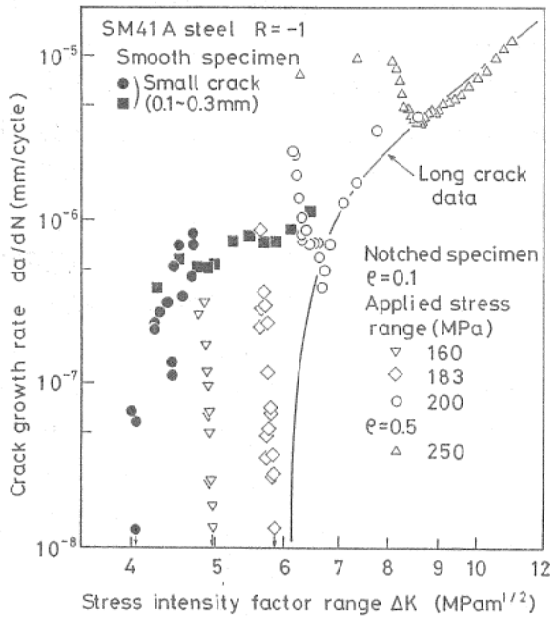


図3 切欠底からのき裂と微小き裂の進展挙動

これにより誘起される残留応力によって通常のき裂とは異なる開閉口挙動を示す。塑性誘起き裂閉口の特別の場合と考えられるが、負荷荷重が引張り一圧縮の場合には切欠底近傍に引張り残留応力が誘起されき裂開口は顕著となり、圧縮側で開口が生じるようになる。このためき裂進展速度はき裂の短い間は非常に大となって上記のような特徴的な変化を示すようになる。き

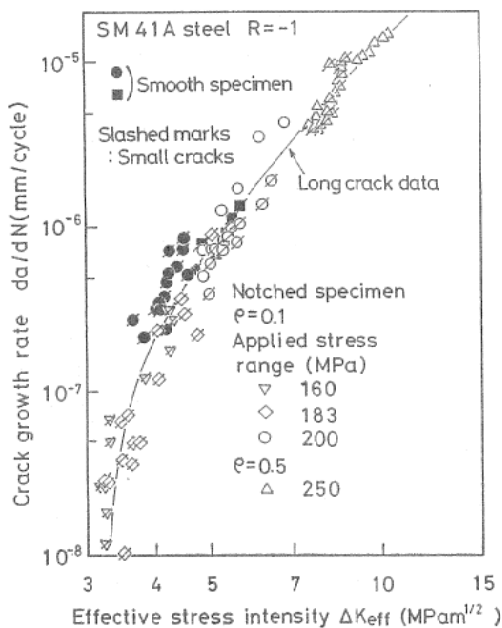


図4 き裂進展速度と有効応力拡大係数幅の関係

裂開閉口を実測し、これにもとづく有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} でき裂進展速度を整理すると図4に示すように通常の長いき裂のそれと完全に一致する²⁾。

なお切欠底の小寸法き裂の開口原因にはここで述べた切欠塑性効果の他に、き裂寸法の絶対値が小さいことによる開口効果が含まれている。これについては後述する。また停留するき裂では酸化物誘起き裂開口による閉口機構の寄与が大きい。

4. 微小き裂

近年絶対寸法の小さい疲労き裂の進展則は長いき裂のそれと異なることが指摘され、微小き裂問題として研究されている。1 mm 程度の大きさのある限界寸法以下の小さなき裂では、き裂進展速度は Paris 則から予測される進展速度よりはるかに大きな進展速度で進展し、また長いき裂の進展下限界以下の ΔK でもき裂が進展することが明らかにされている。このことは長いき裂の進展則を短いき裂にそのまま適用すると危険側の予測を与えることになり工学的にも重要である。

最近の研究によれば、微小き裂の問題もき裂開閉口に関係していることが明らかになりつつある³⁾。一例のみであるが、図3中に平滑材に生じた微小き裂の進展速度と ΔK の関係を示してある。この $da/dN-\Delta K$ 関係では挙動が同じ図中にある長いき裂のそれと異なっているが、図4中に示してあるように、き裂の開閉口を計測して ΔK_{eff} を算出し $da/dN-\Delta K_{eff}$ 関係でみると両者は全く一致する。

微小き裂としての特徴的な挙動を示す限界寸法はどの材料でも同一ではなく、材料により大きく異なる。

$$a_0 = (1/\pi) \cdot (\Delta K_{eth}/\Delta\sigma_w)^2$$

なる a_0 はこの限界寸法の一つの基本的な値として提案されているが、上式は実験式であり、なぜこの寸法より小さいき裂が顕著な開口を示すようになるかについては明確でない。

き裂が十分進展していないので、残留塑性変形あるいは酸化物がき裂面に十分形成されていない。き裂寸法がき裂先端塑性域寸法に比べ相

対的に小さくなって、これが十分大きい長いき裂とは異なってくることに起因する力学的条件の相違、結晶粒径など組織の影響が現れてくるなど、いくつかの考えがあるが明確にはなっていない。

5. おわりに

き裂開閉口が疲労き裂進展を支配していることは明確になりつつあるが、すでに述べたようにその予測は現段階では困難である。第一近似として、全開口であると考えてき裂進展速度を

Paris 則により推測することも考えられる。これは進展速度を大きく予測するので、安全側の推測ではあるが、実際には過度に安全側の推測となり実用的ではない。ある程度はき裂開閉口挙動の予測が必要であり、これをどうするかは今後の課題である。

参考文献

- 1) 小倉・三好・西川, 機論, 52—473 (1986), 89.
- 2) 小倉・三好・西川, 機論, 52—474 (1986), 275.
- 3) 田中, 材料, 33—371 (1980), 961.

