研究ノート

実機の残存寿命評価および安全保証と破壊力学

大 路 清 嗣*

1. は じ め に

実機の強度保証体系の中で，き裂に対する考え方が最近大きく変りつつある．セーフ・ライフ設計と呼ばれる従来の強度設計法では，予定寿命内の機器には，き裂の存在は一切許さないというのが基本姿勢であった．

ところが最近のように機器の性能向上が強く求められ，しかもそれを性能一ぱいまで使いこなす技術が要求されると，負荷は一層きびしくなり，き裂の発生を全く許さないという考え方を貫くことは次第に困難となっている．その上非破壊検査技術の向上で，ずいぶん小さいき裂状欠陥まで検出されるようになると，「き裂は発生もしないし，存在もしない」ことを全寿命にわたり保証することが事実上困難になっている．その上に事故防止という至上命令が加わる．

このような状況下では，考え方を改め，き裂は存在すると考え，そのようなき裂を監視し，制御して系の安全を確保するのが，より確かな実際的方法となる．このような考え方を損傷許容設計概念と呼び，高度の安全性を必要とする機器・構造物の安全保証体系の中心的考え方となりつつある．

2. き裂材の強度評価と安全保証

このようなき裂管理による安全保証の基本原理は，ある検査時に発見可能な寸法以下であったき裂を次の検査時までに，その構造に不安定破壊を起こす臨界き裂長さ a_f にまで成長させないようにすることである．そのためには与えられた負荷条件下でそのき裂伝ぱ寿命を推定し，検査間隔をそれ以下に設定すればよい．き裂伝ぱ寿命の推定のためにはき裂伝ぱと不安定破壊発生に関する材料特性が必要となる．

き裂がない部材の強度評価には，普通，応力が用いられる．この場合応力は着目する強度現象に対する駆動力，強度はそれに対する極限抵抗値という関係にある．応力は点の力学状態を代表する量であるから，強度評価では最も危険な点の値がとられる．

ところでき裂材が有限の負荷をうけたときの最危険点はき裂先端であり，その点の応力は無限大となる．このため，き裂材も実体としてはある有限の強度をもっているにもかかわらず，応力を駆動力としてはその強度を普遍的に定量化することができない．き裂材の強度を定量的に評価するためには，き裂先端領域の力学状態を代表する，無限大にならない，適切な力学量を見つけ出す必要がある．

破壊力学はき裂材の強度評価のための工学体系であって，駆動力を求めるき裂の力学と，それを用いた強度評価体系とから成っている．

破壊力学では，き裂先端をかこむ先端近傍領域の力学状態を代表する量として，応力拡大係数 K と J 積分 J が最も広く用いられている．それらの量の意味を，破壊力学特有の「特異応力場」の概念に基づいて，簡単に説明しておこう．

き裂材の破壊現象に決定的な役割を果してい

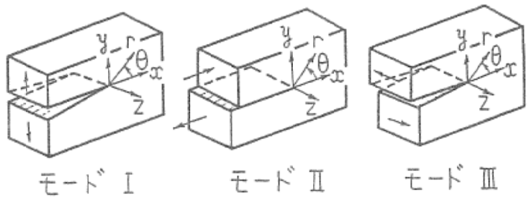

図1　き裂変形の3基本型

*大路清嗣（Kiyotsugu OHJI），大阪大学，工学部，産業機械工学科，教授，工学博士，機械工学

るのは，き裂先端をかこむ，き裂先端のごく近傍の領域内の力学状態に違いない．そこでその領域の応力場を固有応力関数を用い，級数展開してみる．線形弾性体の場合，図１に示すき裂変形の三つの基本型の各々に対し，き裂先端に原点をおく（r，θ）座標を用いると，各応力成分は形式的に，$r^{(n-2)/2}$(n＝１，２，３，…)に関する次のような級数で表わされる．

$$\sigma_{ij}=\frac{K}{\sqrt{2\pi r}}f_{ij1}(\theta)+C_2$$
$$+C_3 r^{1/2}f_{ij3}(\theta)+\cdots\cdots \qquad \cdots\cdots\cdots(1)$$

き裂先端のごく近傍のみに注目するものとして，式(１)で $r\to 0$ とすると，右辺の第一項が圧倒的に優勢となり，その領域内の応力は

$$\sigma_{ij}=\frac{K}{\sqrt{2\pi r}}f_{ij1}(\theta) \qquad \cdots\cdots(2)$$

で近似される．ここで $f_{ij1}(\theta)$ は応力の θ に対する固有の分布形を与える関数で，図１の基本型と応力成分（σ_x，σ_y，τ_{xy} など）を指定すると，あるきまった関数形をとる．K は応力拡大係数と呼ばれ，境界条件が与えられると各モードごとに値が定まる．

式(２)から明らかなように，き裂先端のごく近傍では，r，θ に関して固有の分布形をもち，そのレベルが K で表わされる応力が支配的となる領域が存在する．このような，き裂先端で r に関して特異性をもった応力場を特異応力場と呼ぶ．特異応力場が支配的な領域内では，K を与えれば応力をはじめとするあらゆる力学状態量が一義的に定まり，従ってその領域内の力学状態は K によって完全に代表されることになる．そこでこの K を駆動力として用いれば精度よいき裂材の強度評価ができる可能性がある．

実在の材料では，き裂先端を含むある領域で応力が降伏条件をこえ，降伏域が生ずるが，その寸法が特異応力場の支配的な領域のひろがりに比べ十分小さく，特異応力場の中に閉じ込められているなら，き裂先端近傍の力学状態は依然として K で代表され，論理的に K を駆動力とする強度評価が可能である．このような状態を小規模降伏状態と呼び，線形弾性理論に基づく破壊力学の適用条件を決める重要な概念である．

全ひずみ理論に従う弾塑性体の場合にも，き裂先端のごく近傍に次式で表わされるような特異応力場が現われることが知られている．

$$\sigma_{ij}=\left[\frac{J}{A\,I_n\,r}\right]^{1/(n+1)}\tilde{\sigma}_{ij}(\theta) \qquad \cdots\cdots(3)$$

ここで A，n は塑性域における応力－ひずみ関係式 $\varepsilon=A\sigma^n$ 中の材料定数，I_n は n に依存する係数，$\tilde{\sigma}_{ij}(\theta)$ は式(２)の $f_{ij1}(\theta)$ に相当する，応力の θ に関する分布形を与える固有関数，また J は J 積分と呼ばれる破壊力学量である．式(２)の場合と全く同じ論理で，き裂先端近傍の力学状態は J で代表されることになる．小規模降伏状態の場合には，K と J の間に一対一の対応関係がある．

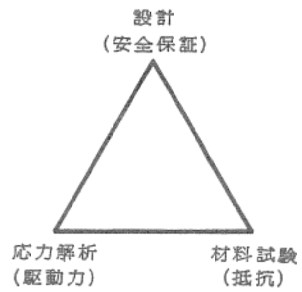

図２　機器の設計・安全保証体系

さて K または J を用いて，材料試験により，き裂材の強度評価を行うと，図２に示すように，応力解析により，与えられた負荷に対する実機の K または J を求め，両者を総合することにより設計，寿命および強度評価，安全保証などを行うことができる．この体系は論理的には，応力を用いた無き裂材に対する体系と同一である．

例として実機の疲労き裂伝ぱ寿命評価の過程を説明しよう．この場合必要な材料試験データは材料の疲労き裂伝ぱ特性と不安定破壊発生に対する抵抗値，すなわち破壊じん性値である．小規模降伏状態にあり，駆動力として K が使用できるものとしよう．

疲労き裂伝ぱ特性を得るには，き裂試験片に図３に示すような繰返し応力を加え，そのとき

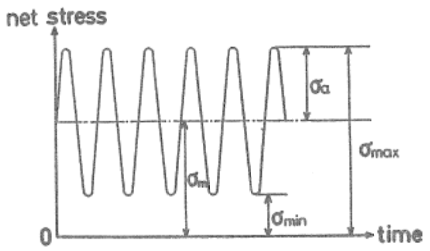

図3　繰返し応力

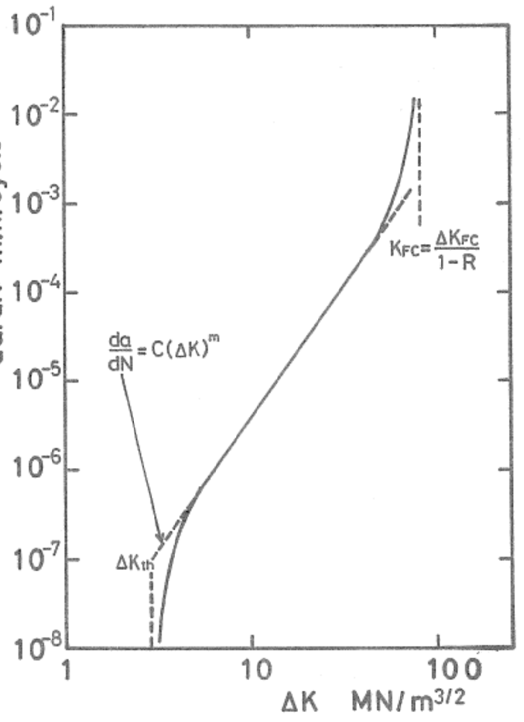

図4　非侵食性環境下の疲労き裂伝ぱ特性（概念図）

の繰返し数 N に関するき裂伝ぱ速度 da/dN を測定する．疲労の場合現象の第一支配因子は負荷の変動幅である．そこで図3の $\sigma_{max}-\sigma_{min}=\Delta\sigma$ に対応する K の変動幅 ΔK に対し測定値を表示すると，応力比 $R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ をパラメータとして，図4のような関係が求まる．き裂伝ぱ特性の上限は K_{max}が材料の破壊じん性 K_{FC} に達したとき生ずる不安定破壊により打切られ，一方下限はき裂伝ぱがほとんど起こらなくなる ΔK 値，すなわち ΔK_{th} で決る．その中間でほぼ $(\Delta K)^m$ に比例する伝ぱ速度が現われる．ΔK_{th} も含め，この伝ぱ特性は形式的に，R をパラメータとして，次のように表わされる．

$$da/dN=f(\Delta K,R) \qquad \cdots\cdots(4)$$

破壊じん性 K_{FC} は不安定破壊が生じたときの K_{max} の値で表わされる．

実機の疲労き裂伝ぱ寿命は，初期き裂長さを a_0，負荷から計算される実機の K 値と K_{FC} とから定まる，実機の不安定破壊発生時の臨界き裂長さを a_f とすると，次式で計算される．

$$N=\int_{a_0}^{a_f} da/f(\Delta K,R) \quad , \qquad \Delta K>\Delta K_{th} \qquad \cdots\cdots(5)$$

$\Delta K<\Delta K_{th}$ のときはき裂は伝ぱしない．

a_0 を与えれば実機の残存寿命が推定できる．また a_0を検査で確実に発見できるき裂長さにとり，機器の点検間隔を式（5）で計算される Nに対し，余裕をもって設定すれば，点検と補修，すなわちき裂管理により機器の安全を保証することが可能となる．

臨界き裂長さに達するまでにき裂が安定的に成長する現象は，疲労のほかにも，腐食や溶存水素などの環境下，あるいはクリープが顕著になる高温下の，静および繰返し荷重下でも観察される．その場合のき裂伝ぱ特性（条件に応じ da/dN または da/dt，t：時間）を材料試験で評価しておけば，式（5）と同様の手順で，繰返し数または時間で表わされた寿命が評価できる．

3．おわりに

すでに予定の紙数は尽きている．破壊力学に基づく実機の安全保証と残存寿命評価のためには，まだまだ未解決の研究課題が多い．筆者の研究室では，断層法（Computer Tomography）を使った，新しい，き裂の非破壊検査法の開発，K，J など破壊力学状態値の数値解析ならびに簡便評価法の開発，疲労き裂伝ぱ，高温における疲労・クリープ重畳条件下のき裂伝ぱ，腐食環境下の微小疲労き裂伝ぱなどの諸特性評価などの問題に，破壊力学の実際問題に対する応用を目指して，取組んでいること，また産業界が直面している関連諸問題の中からも常に研究の種を求め，双方に役立つ共同研究を積極的に取上げて行きたいと考えていることをつけ加え，筆をおく．