

プラント機器の余寿命評価技術

—疲労余寿命評価—

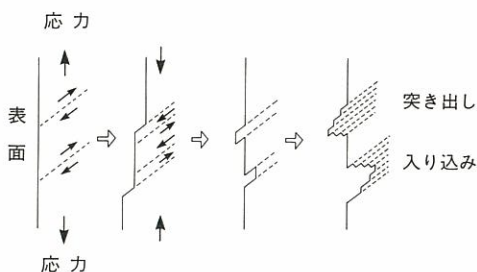
プラント機器に使用される材料の損傷形態は、疲労、クリープ、腐食、ぜい化などに分類されている。タービンのローターやケーシング、エンジン部品、各種配管類などは運転時の繰返し応力、振動応力、熱応力などにより疲労損傷を受ける事例が多い。これらの機器を安全かつ合理的に運用するためには、特に疲労に対する余寿命評価が重要である。ここでは前報のプラント機器のクリープ余寿命評価に引続いて疲労余寿命評価に用いられるいろいろな技術を紹介する。



疲労の損傷過程

疲労の余寿命評価とは疲労による損傷を定量的な方法を用いて計測し、疲労寿命比(消費率)を推定することである。したがって疲労による損傷過程や機構を理解することは大変重要である。金属材料が疲労により破壊する過程は、疲労き裂が発生するまでの過程と、そのき裂が進展する過程に分けられ、寿命は両者の和となる。

き裂の発生過程



第1図 疲労き裂発生モデル

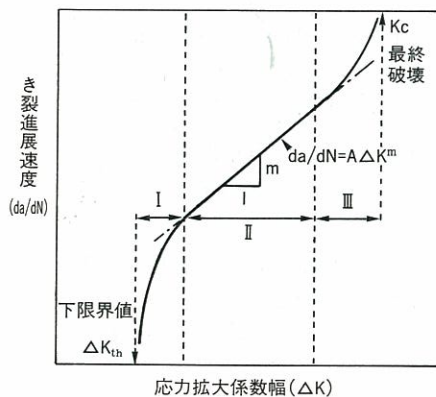
第1図に疲労き裂の発生モデルを示す¹⁾。

疲労の初期段階では、繰返し応力により、すべりが特定の領域に集中することにより、試料表面に固執すべり帯と呼ばれる領域が形成されることが知られている。この固執すべり帯が繰返し応力により成長して、入り込みおよび突き出しと呼ばれる表面の凹凸を作り、その入り込みの先端に微視き裂が発生すると考えられている。

このように、疲労損傷が累積される過程には、すべりの繰返しによる材料表面の微視形態の変化や、材料内部の微視組織(とくに転位構造)の変化をとまなっている。したがって疲労損傷の計測法としては、このような損傷機構に敏感に対応できる方法が必要になる。現時点では、き裂発生までの実用的な損傷計測法は確立されていないが、いくつかの有望な手法が非破壊試験法により検討されつつあり、後述する。

き裂の進展過程

疲労き裂の進展過程は、前報²⁾で紹介したように、自由表面からすべり帯に沿って発生したき裂が、せん断方向に進む第1段階と、それに続いて引張応力に対して垂直な面を進展する第2段階に分けられる。



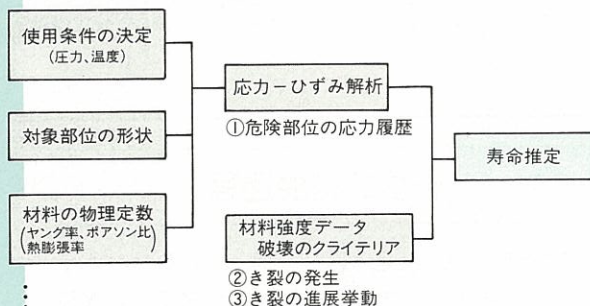
第2図 疲労き裂進展速度曲線

第2段階では第2図に示す疲労き裂進展曲線のI~IIIの三つの領域に対応してき裂が進展する。き裂進展速度(da/dN)はき裂先端の応力拡大係数幅(ΔK)が大きくなるにしたがって早くなるが、 ΔK の大きさによってその速度は変化する。すなわち、組織、応力、環境の影響を受ける初期のI領域と、これらに影響を受けず ΔK のみに比例して早くなるII領域、さらに ΔK が大きくなると静的破壊に近づくIII領域に分けられる。このうちII領域では、ストライエーションと呼ばれる疲労特有の縞状破面を形成しつつ、き裂は進展し、 da/dN と ΔK の間には指数関係(Paris則)が成立する。疲労損傷はき裂の大きさに対応することから、き裂進展過程ではこのような材料の da/dN を用いて、破壊力学的な手法により寿命評価する方法がきわめて有効である。

- 1) W. A. Wood: ASTM STP 675 (1979), p.106
- 2) コベルコ科研: こべるにくす, Vol. 2 (1993) Apr., p. 1

余寿命評価法としては一般に①解析法、②非破壊試験法、③破壊試験法の3種類の方法があり、適宜組合されて用いられることが多い。疲労余寿命評価については①、②が主に用いられる。

解析法

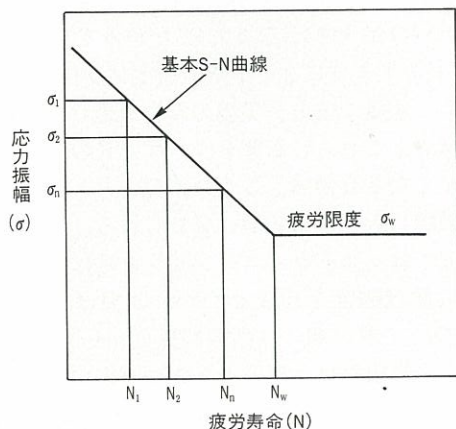


第3図 解析法による余寿命評価の手順

解析法による余寿命評価の手順を第3図に示す。まず、寿命診断対象部位の形状、運転履歴および使用材料の物性値から危険部位の応力履歴を有限要素法により解析する。つぎにこの解析結果とS-N線図(応力振幅と繰返し数の関係図)、き裂進展速度などの材料強度データを用いて計算的手法により余寿命を診断する。解析法は使用状態、運転履歴、材料特性などの多くの情報を必要とし、繁雑であるなどの短所もあるが、実機で重要な応力集中部の損傷蓄積状態と余寿命のいずれも評価できるという、他の方法にはない大きな長所がある。また、き裂進展寿命評価は解析法によってのみ可能である。

① 累積損傷則による方法

S-N線図は通常、一定応力振幅の疲労試験に



第4図 S-N線図

より作成されるが、これをもとに変動荷重を受ける実機部材の疲労寿命を予測する方法である。第4図のようにS-N曲線の $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_n$ の応力振幅に対応する疲労寿命を $N_1, N_2 \dots N_n$ とする。実機部材に $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_n$ の応力振幅の作用が $n_1, n_2 \dots n_n$ 回繰返されるとすると、疲労による累積損傷率 ϕ_f は次式で求められる。

$$\phi_f = n_1/N_1 + n_2/N_2 + \dots + n_n/N_n = \sum n_i/N_i \dots \dots \dots (1)$$

(1)式は線型累積損傷則または線型Miner則と呼ばれ、累積損傷量を簡便に測定できるため、広く用いられている。

② き裂進展則による方法

寿命診断時には通常浸透探傷法あるいは磁気探傷法などにより欠陥検査が行われるが、疲労き裂もしくはそれに類似する欠陥が検出された場合、余寿命(き裂進展寿命)は以下のように予測できる。き裂進展速度 da/dN 、応力拡大係数幅 ΔK は次式であたえられる。

$$da/dN = A \Delta K^m \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta K = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ は応力範囲、 a はき裂寸法、 N は繰返し数、 A, m, α は定数である。

(2)式に(3)式を代入し積分すると、次式が得られる。

$$\Delta \sigma^m N_c = 1/A \cdot \int_{a_0}^{a_c} (\alpha \sqrt{\pi a})^{-m} da = \frac{2}{(m-2)A\alpha^m \pi^{m/2}} \left\{ \frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(m-2)/2}} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 a_0, a_c はそれぞれ初期($N=0$)、ならびに最終破壊($N=N_c$:余寿命)に対応するき裂寸法であり、 $\Delta \sigma$ が一定であると仮定している。

(4)式は余寿命のS-N曲線をあたえる。 $a_0 \ll a_c$ と仮定すれば、右辺第2項が無視できるので、余寿命 N_c は最終的に次式となる。

$$N_c = 2 a_0 / (m-2) A \Delta K_0^m \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $\Delta K_0 = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a_0}$ は、き裂進展が開始する際の ΔK であり、 $\Delta K_0 < \Delta K_{th}$ (下限界応力拡大係数幅)であれば、き裂は進展しない。

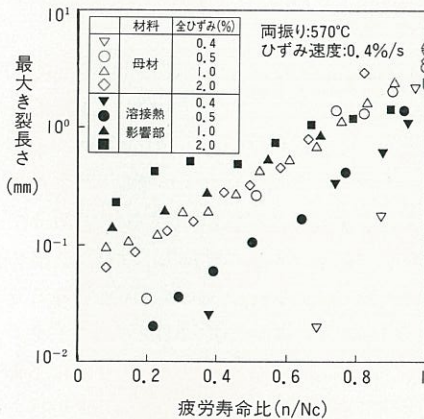
非破壊試験法

寿命診断時に疲労き裂が検出された場合には前述のように、解析法による余寿命評価が有効である。しかし構造物は一般に使用中に疲労き裂が発生しない程度に余裕をみて設計されており、診断時にき裂が確認される例は少ないことから、解析法による余寿命評価を適用することはむずかしい場合が多い。

非破壊試験法は疲労損傷の進行にともなう材料の組織変化、物性変化を非破壊検査手法で検出し、寿命評価する方法である。この方法では疲労試験により、疲労損傷量(疲労寿命比)と非破壊検査データの関係をあらかじめ調べておくことが必要であるが、とくに疲労初期の損傷量をかなり定量的にかつ短時間で評価できる長所がある。またこの方法では損傷位置が確定している試験片レベルでは評価できるが、実機レベルでは正確に疲労損傷を生じる位置を探すことがむずかしいという問題があり、今後課題が残されている。代表的な非破壊試験法の概要を以下に説明する。

① レプリカ法

レプリカ法は診断の対象となる部位を、レプリカ膜(アセチルセルロースフィルム)上に転写する方法である。疲労き裂はこのレプリカ上に転写されるから、これを顕微鏡で拡大観察することによって、き裂の長さを測定できる。

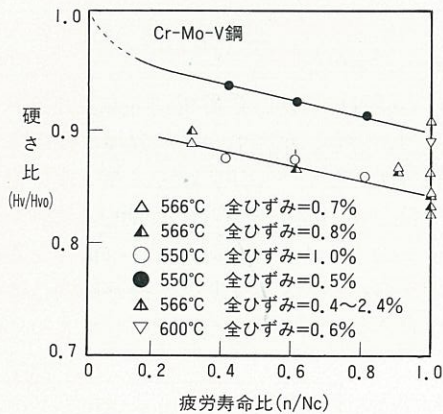


第5図 最大き裂長さと疲労寿命比の関係

第5図に570°Cで疲労試験した2¼Cr-1Mo鋼のレプリカ法による疲労余寿命評価例を示す³⁾。横軸は疲労寿命比(n/N_c)、縦軸は表面微視き裂長さを示す。両者の間には良好な相関性が認められる。実機で測定する場合には、極値統計法を用いることによって、対象面積中の最大き裂長さを求め、疲労寿命を求めることが多い。

② 硬さ測定法

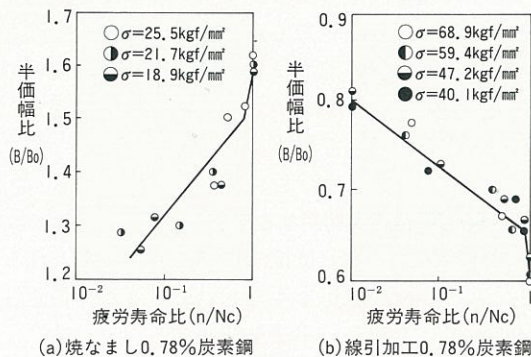
この方法は簡便で実用的であり、クリープの場合と同様に疲労余寿命評価に適用されている。第6図にCr-Mo-V鋼の高温低サイクル疲労試験において疲労寿命比(n/N_c)と硬さ比(H_v/H_{v0})の関係を調査した例⁴⁾を示す。ここで n はひずみ繰返し数、 N_c は破壊時のひずみ繰返し数、 H_v はひずみ繰返し数 n での硬さ、 H_{v0} は試験片つかみ部の硬さで、初期硬さにほぼ対応する。両者の間にはひずみ範囲や試験温度の条件が同じであれば、良好な相関が認められる。硬さ測定法は火力発電用の蒸気タービンローターについて実用されており、実機ではショア、エコーチップ、マイクロビッカースなどによる硬さ測定が適宜採用される。



第6図 硬さ比と疲労寿命比の関係

③ X線回折法

この方法は残留応力の測定に広く用いられているBraggの回折条件を用いて、結晶ひずみの変化を測定する方法である。したがって転位の増殖から転位網の形成、さらにはセルの形成へと変化する微視組織の変化過程と疲労過程との相関性が期待されており、古くからその応用が試みられている。第7図には高炭素鋼の疲労試験における疲労寿命比とX線半価幅比(試験前の半価幅 B_0 に対する試験後の半価幅 B の比)の関係を示す⁵⁾。半価幅



第7図 X線半価幅比と疲労寿命比の関係

- 3) 山中敏雄ほか：日立評論, Vol.69, (1987), p.736
- 4) 藤山一成ほか：日本機械学会第954回講演会、材料力学講演概要集 No.880-7 (1988), p.15
- 5) 平修二ほか：日本機械学会論文集, Vol.32 (1966), p.389

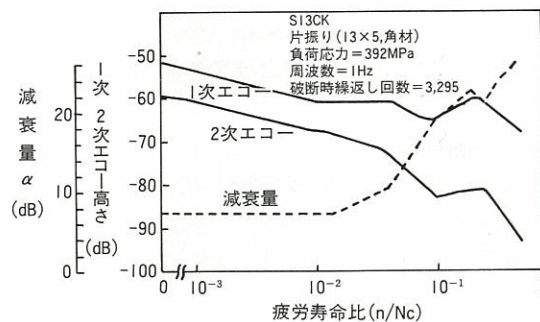
比の変化が応力に対して依存性が少なく、疲労寿命比に対してよい対応を示すことから、疲労損傷を定量的に評価することができる。なお、同図(a)の焼なまし材では疲労の進行とともに半価幅比は増加するが、同図(b)の線引加工材では逆に半価幅比は低下しており、それぞれ加工硬化および軟化に対応していると考えられる。

X線を細束に絞込みにより、特定の結晶からの情報を得る細束X線法を用いた研究も行われており、低炭素鋼の疲労試験におけるサブセル形成過程をこの方法により検出できるとされている⁶⁾。

X線回折法を実機部品に適用する場合、X線の入射角度および反射角度の制約上、複雑形状の部品に対しては測定できないことが多い。

④ 超音波探傷法

この方法は反射法、透過法による超音波エコーを用いて、割れ、ポイドなどの欠陥を検出する非破壊検査法としてよく知られている。疲労損傷に対しては超音波エコー以外に超音波の減衰率、周波数依存性、音速変化を測定して損傷量を評価することが多い。第8図は低炭素鋼(S13CK)の疲労試験に超音波反射法を適用した例である⁷⁾。



第8図 超音波エコー高さ、減衰量と疲労寿命比の関係

超音波反射の1次エコーおよび2次エコーは疲労寿命比が 10^{-2} というごく初期から変化し、最終的には10dB以上も変化することが認められる。このように超音波探傷法は疲労初期の損傷を検出するには有効な方法であるが、前記のX線回折法と同様に複雑形状の部品に対しては、超音波情報の検出がむずかしい場合が多く、その形状に適した装置の開発が必要である。

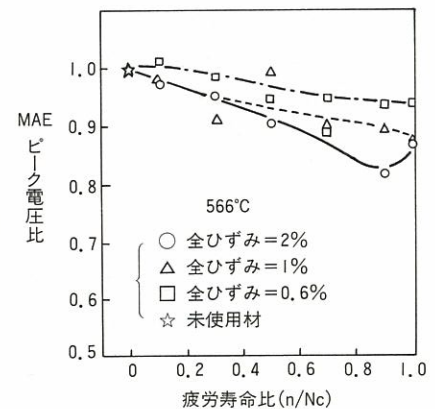
⑤ 電磁気特性を利用する方法

渦流探傷法、電気抵抗法、バルクハウゼン法などの非破壊検査法がよく知られているが、最近注目されている新しい手法を紹介する。

① MAE法

MAE (Magnetomechanical Acoustic Emis-

sion)法は、強磁性体の磁化過程において内部に存在するミクロ的な磁区構造が変化することにより発生するMAE信号やバルクハウゼン信号を利用するものである。この方法は強磁性材料に交番磁界を印加すると、材料内のミクロ的な磁壁が回転するが、この回転は不連続に起り、それにともって起るひずみエネルギーの変化による弾性振動をAE (Acoustic Emission) センサーで検出する方法である。それらのMAE信号は転位、介在物、結晶粒界、き裂などのミクロ組織の影響を受ける。MAE法を蒸気タービンローター (Cr-Mo-V鋼) の高温低サイクル疲労試験材に適用した例を、第9図に示す⁸⁾。MAEピーク電圧比は疲労寿命比の増加とともに低下し、またひずみが大きいほど低下する傾向が明らかであり、今後、実機への適用が期待されている。



第9図 MAEピーク電圧比と疲労寿命比の関係

② 陽電子消滅法

金属に注入された陽電子は数100ピコ秒の間に電子と反応して消滅するが、その際に比較的正確なエネルギーレベル (約0.511MeV) を持つ γ 線を放出する。陽電子消滅法はこの γ 線のエネルギー分布、 γ 線発生までの時間遅れ (陽電子消滅までの寿命) 分布などの特性を計測して材料の損傷程度を推定する方法である。陽電子が消滅することに関連するこれらの特性は、原子空孔、マイクロポイド、転位などに影響されることが知られており、塑性変形や疲労損傷との相関性に期待が持たれている⁹⁾。

疲労損傷による余寿命評価技術について概要を説明した。プラント機器では疲労とクリープあるいは腐食が複合するクリープ疲労、腐食疲労による損傷事例も多い。これらの余寿命評価については、紙面の都合上省略した。十分な説明ができなかったことをお詫びする。

[受託研究本部 材料研究部 本間克彦]

6) S. Taira : Experimental Mechanics, Vol.13 (1973), p.449

7) 岡崎章三ほか : 機械設計, Vol.32(1988)No. 8, p.54

8) T. Hirasawa, et al. : The 10th International Acoustic Emission Symposium, Sendai, Japan, Oct. (1990), p.544

9) A. E. Hughes : Eurotest Conference "New Trends in NDT" ref. SV 1-4 (1982)