2つの疲労破壊モードが競合する場合の寿命データ活用法に関する一考察†

金子 真* 中村 孝** 野口 徹**

A Study of Method Utilizing Fatigue Life Data on Two Competing Fracture Modes

by

Makoto KANEKO *, Takashi NAKAMURA ** and Toru NOGUCHI **

Many high strength materials, including high strength steels and high strength titanium alloys, show the complex characteristics of fatigue life distribution in the high cycle region. It is caused by the two competing fracture modes, fractures from surface and from interior of the specimen. A method to describe such a complex fatigue life data was proposed based on the competing-risk model. The characteristics of fatigue life distributions and S-N relations of each mode were successfully separated and extracted from whole data. These separated data was analyzed and the complex fatigue life distributions was well described by the competing-risk model. The method is helpful to understand the fatigue mechanisms because the fatigue life distribution of different two modes results from and reflects the fatigue mechanism of each mode.

Key words: Fatigue, Fatigue life distribution, Statistical treatment, Competing-risk model, Fatigue mode, High strength material, High cycle fatigue

1 緒 言

高強度鋼，チタン合金をはじめとする多くの高強度金属材料の高サイクル疲労では，疲労き裂の起点が材料表面の場合と内部の場合で，破壊する応力レベルおよび破壊寿命が異なる．その結果として寿命が長短に分離して複雑な寿命分布形状となり，かつ S-N 曲線が2段に折れ曲がるなどの特異な形状を示す.^{1)~10)}

これらは近年広く認識されるようになったもので，その評価法の確立が求められている．西川ら¹¹⁾は，上述の複雑な寿命分布特性を，混合分布モデルを用いて評価する方法を提案している．

一方，著者らのこれまでの研究によれば，材料表面を起点とするき裂と，内部を起点とするき裂はお互いに独立に発生および進展していると考えられ，何れか早く試験片を破断に導いた方が，破壊起点として観察される．このことは，寿命分布や S-N 曲線の複雑な特性が表面起点型破壊モードと内部起点型破壊モードの競合により生じると解釈できることを示す.^{4), 6)}

本研究では，著者らが以前にオーステンパ球状黒鉛鋳鉄の高サイクル疲労寿命分布の解析⁷⁾に用いた手法を一般化し，2つの破壊モードが競合している場合の寿命分布および S-N 線図について，統計的に評価する方法を提案した．これにより，注目する破壊モードの疲労寿命特性を分離抽出して評価することが可能となった．

加えて，寿命分布を破壊機構の解明に援用する方法ならびに加速試験・疲労強度向上法などの工学的応用につ

いて考察した．さらに，高強度鋼の疲労試験データに対して本手法の適用を試みた．

2 疲労寿命分布の記述

2・1 競合リスクモデル

2つの破壊モードをモード A および B とする．この2つの破壊モードが，(1) お互いに独立で，(2) どちらか早く試験片を破断に導いたものが破壊モードとして観察される，という条件を満たしている場合，2つの破壊モードは競合している．

破壊モード A および B が競合している場合の破壊寿命分布は，モード A および B に対する寿命分布が競合したものとなる．したがって，モード A, B の寿命分布をそれぞれ $F_A(N)$, $F_B(N)$ とすれば，寿命分布 $F(N)$ は次のように表される.¹²⁾

$$\begin{aligned} F(N) &= 1 - (1 - F_A(N))(1 - F_B(N)) \\ &= F_A(N) + F_B(N) - F_A(N)F_B(N) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで， $F_A(N)$ および $F_B(N)$ はそれぞれモード A および B の破壊モードに対応する分布形を用いる．一般には両者は同じ分布形をとるとは限らない．分布形は，破壊機構にしたがって理論的に求められるもの，あるいは経験的に当てはめ性がよいとされるものを用いる．

2・2 混合モデルによる近似表現

前節では，2つの破壊モードが競合している場合の直接的な記述法を述べた．一方，2つの破壊モードが競合していても実質的に混合分布を用いて表せる場合もある．

† 原稿受理 平成 10 年 3 月 9 日 Received Mar. 9, 1998

* 学生会員 北海道大学大学院 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8, Graduate Student, Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo, 060-8628

** 正会員 北海道大学工学研究科機械科学専攻 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8, Dept. of Mech. Sci., Hokkaido Univ., Kita-ku Sapporo, 060-8628

ここでは、モード A がモード B に比べて明らかに短い寿命で破壊し、モード A の寿命分布が飽和する場合について考える。

$F_A(N)$ が破壊確率の飽和を示す場合、一般に以下のように表せる。

$$F_A(N) = P_1 F_1(N) + (1 - P_1) H(N - \infty) \quad (2)$$

ここで、 P_1 は飽和破壊確率、 $F_1(N)$ は任意の分布関数、 H はステップ関数である。そこで、

$$F_B(N) = F_2(N) \quad (3)$$

とすれば式 (1) より、

$$\begin{aligned} F(N) &= F_A(N) + F_B(N) - F_A(N)F_B(N) \\ &= P_1 F_1(N) + (1 - P_1) F_2(N) \\ &\quad + P_1(1 - F_1(N))F_2(N) + (1 - P_1)(1 - F_2(N))H(N - \infty) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $N \neq \infty$ で $H(N - \infty) = 0$ 、 $N = \infty$ で $F_2(N) = 1$ なので、右辺第 4 項は 0 である。さらに、モード A がモード B に比べて明らかに短い寿命で破壊し、確率密度がほとんどオーバーラップしないならば、 $(1 - F_1(N))F_2(N) = 0$ 、すなわち右辺第 3 項を 0 と見なせる。したがって、次式のように混合分布¹³⁾で表せる。ここで、 $P_1 + P_2 = 1$ である。

$$\begin{aligned} F(N) &= P_1 F_1(N) + (1 - P_1) F_2(N) \\ &= P_1 F_1(N) + P_2 F_2(N) \end{aligned} \quad (5)$$

このように 2 つのモードが競合している寿命分布を近似的に混合モデルで表現できる場合もあるが、本研究では、寿命分布の成因を考えて式 (1) による整理を行う。

3 S-N 線図の評価法

疲労寿命分布を基に、S-N 線図の評価を行う。

3.1 破壊モード別 S-N 線図

$F_A(N)$ 、 $F_B(N)$ それぞれの代表値（期待値、中央値、最頻値、代表パラメータ値など）を求めて結ぶ。これにより、S-N 関係を破壊モード別に分離抽出して評価できる。

代表値の結び方は直線補間が適当と考える。もしも理論的または経験的に、応力-代表値間の適切な関数形があるのならば、その関数に当てはめてもよいと考えられる。

3.2 水平部の評価法

S-N 曲線が水平部を持つことは、寿命分布が破壊確率の飽和を示すことと原理的に同じである。これを基に、水平部の評価を行う。破壊モードが単一である場合には、この水平部は疲労限を意味する。

$F_A(N)$ が破壊確率の飽和を示す場合、その飽和値の分布 $P_A(\sigma)$ の代表値を求める。この分布形は、 $F_A(N)$ が飽和する理由に則したもの、あるいは経験的に当てはめ性がよいとされるものを用いる。 $F_B(N)$ についても同様である。 $F_A(N)$ 、 $F_B(N)$ とともに破壊確率の飽和傾向を示す場合でも、その分布形が同じとは限らない。

3.3 長寿命側への外挿

S-N 曲線が、水平部を持つならばその応力レベルを延長する。持たないならば、応力と寿命分布の代表値との関係を延長する。もし適切な関数形があるのならば、そ

の関数に当てはめてもよいと考えられる。

このとき、工学的見地からは、長寿命側で危険となる破壊モードを延長するべきである。

4 寿命データの整理法

4.1 破壊確率値の算出

寿命データを破壊モード別に分類する。たとえば破面観察に基づき表面起点型と内部起点型に分類する。

破壊モードが競合しているとき、別の破壊モードで破壊した試験片は、その時点までは注目する破壊モードでは破壊しなかったという情報を持っている。そこで、各破壊モード毎に、別の破壊モードを中途打ち切りと見なし、破壊確率を算出する。

以下に代表例としてジョンソン法¹⁴⁾を用いた計算法を示す。打ち切りを含めて i 番目のデータの順位数 j は、

$$j = j_0 + \frac{(n+1) - j_0}{(n+1) - (i-1)} \quad (6)$$

ここで、 j_0 は 1 つ前の故障データに対する順位数、 n は総データ数である。破壊確率 $F(N)$ は、たとえば平均ランク法を用いて、次式で求められる。

$$F(N) = \frac{j}{n+1} \quad (7)$$

4.2 飽和破壊確率

破壊確率の飽和傾向が観察された場合、その飽和確率値の計算法はいくつか考えられる。ここでは一例として文献¹⁵⁾の時間強度算出の際の計算法にならって次式を示す。 P_A は $F_A(N)$ の飽和破壊確率、 j_{Alast} はモード A で最後に破壊したデータの順位数である。

$$P_A = \frac{j_{Alast}}{n} \quad (8)$$

モード B で破壊確率の飽和が見られた場合も同様である。

5 疲労機構の解析への寿命分布特性の援用

5.1 単一の破壊モード

5.1.1 寿命分布特性と疲労機構 疲労寿命のばらつきは、実験・測定の誤差によるものではなく、疲労破壊本来の特性であり、その分布形は疲労機構を反映している。これは、分布形状から疲労機構の推定ができる可能性を示唆する。

たとえば、ワイブル分布などの極値分布では最弱部から破壊が生じることが予想される。また、正規分布では、平均的に損傷が生じるか、損傷の平均化が、対数正規分布はこれに速度過程など寿命の対数特性が加わることなどが予想される。

さらに、統計的によく用いられている分布以外でも、想定した疲労機構に基づいて寿命分布の導出を行い、試験結果と比較する方法が考えられる。

5.1.2 破壊確率の飽和と S-N 曲線の水平部（疲労限） 破壊確率の飽和傾向が見られた場合、これを疲労機構解析の手掛かりとして使える可能性がある。

破壊確率の飽和の意味は、個々のケースによって異なるが、1 つの可能性として、疲労破壊に対する何等かの感度分布が、しきい値で仕切られることによって決まる

場合が考えられる。

たとえば、しきい値の条件が材料表面の欠陥から発生したき裂の停留の場合、感度分布は発生したき裂が停留するか否かの確率に相当し、材料と負荷応力が同じならば、欠陥の寸法によって決められる。これから、しきい値となる寸法以上の欠陥が1つも存在しない確率が、発生したき裂がすべて停留にいたる非破壊確率（飽和破壊確率の補数）を意味する。

破壊確率の飽和が見られた場合、この感度分布としきい値の物理的意味を解明することが、疲労機構の解明に有用である。

破壊確率が飽和傾向を示すことと、S-N曲線が長寿命になるにつれて水平部（疲労限）を示すことは、原理的に同じである。これから、破壊確率の飽和とS-N曲線の水平部（疲労限）の物理的意味も同じであると考えられる。

5.2 モードが競合する場合

全体の寿命分布特性を破壊モード別に分けることで、分布を支配している疲労機構が単純かつ明りようになり、疲労機構の解析に対して寿命分布をより有効に使える^{*1}。すなわち、破壊モード毎に寿命分布特性を分離抽出し、各々について前節の方法を適用することにより破壊機構の推定を行うことができる。

5.3 工学的応用について

前述の方法を用いることにより、非常に長時間（ 10^{10} 回など）かけて1つのデータをとるよりも、ある程度の長時間（ 10^8 回打ち切りなど）で多数データをとる方が情報の価値としては高い場合もある。特に繰返し数 $10^7 \sim 10^8$ 回を超える超高サイクル疲労ではS-N曲線が水平になる傾向（疲労限傾向）の有無は重要なので、破壊確率の飽和をもとにして短い時間でそれを調べられれば非常に有効である。これは、加速試験法の一つといえる。もちろん、実験する応力・寿命範囲と予測する範囲で破壊機構（破壊モード）が異なる場合には適用できない。これは一般の加速試験法と同じである。

破壊機構の解明により、材料の疲労強度向上法の考察ができる。この場合、向上を図る応力レベル・寿命領域での疲労機構を明りようにすることが必要なので、破壊モード別に寿命分布を分離抽出して考察することが重要である。

破壊モード別に分離抽出し、注目する破壊モードが破壊確率の飽和傾向を示すかどうかを調べる。飽和傾向を示す場合、破面および表面の観察などから、破壊確率の飽和の物理的意味を考察する。5.1.2項で述べたような感度分布としきい値が分かれば、感度分布を低くするかしきい値を上げることが疲労強度向上の指針となる。また、飽和傾向を示さない場合この方法は使えないので、寿命を長くする方法を検討するべきである。

このようにしてある破壊モードの強度を上げると、も

う一方、または異なる破壊モードが現れ、問題となるかもしれない。その時は、その破壊モードに対して同様の手法を用いて疲労強度の向上を図る。

6 高強度鋼の疲労試験結果への適用

第2～5章の手法を、著者らの行ったSCM435H 低溫焼戻し材の高サイクル疲労試験結果^{8),9)}に適用する。

6.1 実験および結果の概要

実験は、エメリ研摩（G材）およびエメリ研磨後電解研磨（E材）の2種類の仕上げ状態で行った。試験結果のS-N線図をFig.1に示す。同図中の破線、一点鎖線、および実線については6.2節で後述する。

E材は表面が充分平滑に仕上げられているため、基本的に内部を起点として破壊し、S-N線図の形状が直線的だった。これに対してG材は、表面に熱処理時の塩浴でできたピットが残っているため、比較的低い応力レベル

Fig. 1. S-N diagram.

でも表面を起点として破壊する場合があります。内部起点型破壊と表面起点型破壊で寿命が長短に分離した。その結果、G材では寿命特性の評価が難しい。

6.2 寿命データの整理および寿命特性の評価

G材のデータについて、4章の方法を用いて、表面起点破壊と内部起点破壊の寿命特性を分離して評価する。表面および内部起点型破壊をそれぞれモードAおよびBとし中途打ち切りの順位算出はジョンソン法、ランク法は平均ランク法、飽和破壊確率値の計算は式(8)を用いた。

表面起点型破壊の確率分布 $F_A(N)$ に3母数ワイブル分布に飽和破壊確率値を乗じたもの¹⁶⁾

$$F_A(N) = P_A \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N - \gamma}{\beta} \right)^\alpha \right\} \right] + (1 - P_A) H(N - \infty) \quad (9)$$

内部起点型破壊の確率分布 $F_B(N)$ に2母数ワイブル分布、

$$F_B(N) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N}{\beta} \right)^\alpha \right\} \quad (10)$$

飽和破壊確率値分布 $P_A(\sigma_{max})$ に正規分布を仮定した。

S-N線図評価の際の $F_A(N)$ および $F_B(N)$ の代表値として尺度母数 β と位置母数 γ の和を、 $P_A(\sigma_{max})$ の代表値として中央値を用いた。母数推定法は、 $F_A(N)$ および

*1 2破壊モードが競合している寿命分布に前節の推定法を直接適用することもできるが、分布を支配している因子が複雑になり、疲労機構の解析が容易ではなくなる。

Fig. 2. Weibull plots of specimen G ($\sigma_{max} = 1170\text{MPa}$).

$F_B(N)$ には相関係数法¹⁷⁾を, $P_A(\sigma_{max})$ には重み付きプロビット法¹⁵⁾を用いた.

具体例として, $\sigma_{max} = 1170\text{MPa}$ のデータについて, モード A, B および全体の寿命データをワイブルプロットしたものを, Fig. 2 (a), (b) および (c) に示す. 同図 (a) および (b) の実線は, データを式 (9) および (10) に当てはめたものである. モード A の寿命分布が飽和するのに対して, モード B の寿命分布は飽和を示さない. この 2つのモードを式 (1) の競合リスクモデルを用いてまとめ

Fig. 3. Weibull plots of specimen G.

たものが同図 (c) の実線である. 同図は, 逆 S 字形状の寿命分布特性をよく説明している.

$\sigma_{max} = 1270, 1180, 1170$ および 1110MPa の全体のワイブルプロットを Fig. 3 に示す. 各応力レベルともに寿命分布をよく説明できている.

Fig. 1 の S-N 線図中, 破線, 一点鎖線, および実線はそれぞれ, $F_A(N)$, $P_A(\sigma_{max})$ および $F_B(N)$ の代表値を結んだものである. 同図は, G 材における S-N 曲線の 2 段折れ曲がりをよく表している.

E 材の結果は表面起点型破壊の強度レベルによらない本供試材本来の特性と考えられる⁹⁾. Fig. 1 の G 材内部起点型 S-N 曲線 (実線) は, E 材の S-N 関係とほぼ一致し, 表面性状の相違による表面起点型破壊の強度レベルの違いにかかわらず, 内部起点型破壊の寿命特性をよく抽出している.

加えて, Fig. 3 のワイブルプロットから, 低応力レベル $\sigma_{max} = 1110\text{MPa}$ でも, 内部起点型の分布 $F_B(N)$ が飽和する傾向は見られない ($\sigma_{max} = 1110\text{MPa}$ では表面起点型破壊が観察されなかったため, $F(N) = F_B(N)$ である). これより, 本実験の結果の範囲内では, 内部起点型 S-N 曲線の水平部が確認できないと判断される. 破断繰返し数 $10^9, 10^{10}$ 回といった領域で, 水平部を持つかどうかについては分からないため, さらに長寿命域へ保守的に外挿をするならば, その S-N 関係を右下へ直線的に延長するべきと考える.

6・3 寿命分布特性の支配要因

モード A の表面起点型破壊は, 高強度鋼に限らない鉄鋼材料の通常の破壊形態なので, その破壊確率の飽和は疲労限と同様, 表面き裂の停留に対応すると考えられる.

それに比べて, $\sigma_{max} = 1110\text{MPa}$ でも内部起点型の分布が飽和する傾向は見られない. このことから, 内部でも表面と同様に, き裂の停留と破壊確率の飽和が対応するものとすれば, 破断繰返し数 10^8 回程度までの領域において, 材料内部では, き裂の停留が寿命特性の支配要因ではないことが示唆される.

7 結 言

2つの疲労破壊モードが競合している疲労寿命データを, 競合リスクモデルを用いて整理する方法を提案した.

具体的には, (1) 注目する破壊モードの破壊確率を求める際に他の破壊モードを中途打ち切りデータとして取り扱い, (2) 各々のモードに対して, 独立に破壊確率を算出して寿命分布特性を整理・評価し, (3) 各々のモードの寿命分布の代表値を基にして, $S-N$ 線図を評価すること, を行った. この方法により, 注目する破壊モードの疲労寿命特性を分離抽出して評価することが可能となった. また, 疲労寿命分布特性を破壊機構推定へ活用する方法について検討し, 破壊確率の飽和と物理現象の対応に注目することにより, 破壊機構を効率的に推定できる可能性を述べた. さらに, 本手法を高強度鋼の高サイクル疲労試験データへ適用し, その妥当性について検討した. その結果, 表面起点型および内部起点型破壊の異なる2つの寿命特性を分離して整理・評価できること, $S-N$ 曲線の2段折れ曲がりや複雑な寿命分布特性をよく説明できることが明らかとなり, 本手法の有用性が確かめられた.

本研究により, 破壊モードが競合している疲労寿命データを有効に活用する方法の一つを示すことができたと考ええる.

参 考 文 献

- 1) 江村秀樹, 浅見克敏, 日本機械学会論文集, A-55, 45 (1989).
- 2) 金属材料技術研究所, 金属材料技術研究所疲れデータシート, No.9 (1979).
- 3) 清水真佐男, 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集(I), No.930-9, 753 (1993).
- 4) 中村 孝, 金子 真, 信原直幸, 野口 徹, 日本機械学会北海道支部第37回講演会講演論文集, No.972-1, 53 (1997).
- 5) 中村 孝, 東郷善之, 神保勝久, 永井文雄, 日本機械学会論文集, A-59, 2487 (1993).
- 6) 中村 孝, 菅野明弘, 神保勝久, 永井文雄, 日本機械学会論文集, A-59, 2817 (1993).
- 7) 東地広明, 中村 孝, 神保勝久, 永井文雄, 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集(II), No.940-10, 854 (1994).
- 8) 江坂武浩, 神保勝久, 林 巖, 岩附信行, 金子 真, 中村 孝, 野口 徹, 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集(II), No.96-1, 452 (1996).
- 9) 中村 孝, 金子 真, 野口 徹, 神保勝久, 日本機械学会論文集, A-64, 1820 (1998).
- 10) 日本機械学会, RC130 高サイクル疲労に関する調査研究分科会研究報告書 (1996).
- 11) 西川 出, 岡田憲司, 酒井達雄, 後藤真宏, 西島 敏, 日本機械学会論文集, A-62, 632 (1996).
- 12) 市川昌弘, “信頼性工学”, p.163 (1990) 裳華房.
- 13) 市川昌弘, “信頼性工学”, p.160 (1990) 裳華房.
- 14) 市川昌弘, “信頼性工学”, p.51 (1990) 裳華房.
- 15) 日本機械学会, 日本機械学会基準統計的疲労試験方法, JSME S002-1981, p.24 (1981).
- 16) 酒井達雄, 田中道七, 材料, 30, 1211 (1981).
- 17) 酒井達雄, 田中道七, 材料, 29, 17 (1980).