

2-1-3-1 はじめに

金属材料に繰返して負荷を与えると,最大応力が巨視的な 降伏応力以下でも破断することがあります.この現象は金属 疲労と呼ばれ,摩耗や腐食と並んで金属材料の代表的な損傷 です.実用に耐えうる信頼性を検証するためには疲労試験を 実施し,その材料の疲労特性を把握することが不可欠です. 本項では種々の疲労の概要を述べたのち,室温・大気中にお ける高サイクル疲労および低サイクル疲労の試験方法,一般 的なデータの整理方法を基礎から説明するとともに,疲労試 験後の試験片の観察・解析例について紹介いたします.

2-1-3-2 種々の環境下における疲労

疲労試験は典型的には室温・大気中の条件で行なわれます が、疲労特性は周囲環境などの種々の要因の影響を受けま す.本項では説明は省略いたしますが、温度、腐食環境、摩 擦などの影響も幅広く確認されています.クリープが生じる ような高温環境における疲労は高温疲労と呼ばれます⁽¹⁾⁽²⁾. 高温での疲労では、疲労損傷、クリープ損傷、表面酸化など が複雑に関与することになります.また、部材が拘束されて いると熱膨張にともなって材料に熱応力が作用します.温度 の上昇と下降が繰返されると、熱疲労が生じます⁽³⁾⁽⁴⁾.腐食 性環境中における疲労は腐食疲労と呼ばれます⁽⁵⁾⁽⁶⁾.表面に 作用する摩擦も疲労特性に影響を及ぼします.フレッティン グとは接触する2つの表面に接線力が繰返して作用する際 に生じる損傷で⁽⁷⁾、その結果疲労特性が低下することはフレ ッティング疲労⁽⁸⁾と呼ばれます.

本項で取り扱う疲労試験は室温・大気中での試験を前提と いたします.高温疲労や熱疲労などについては日本産業規格 (JIS)で試験方法等が示されています.例えば「金属材料の 高温低サイクル疲労試験方法」JIS Z2279,「金属材料の熱 疲労試験方法」JIS Z2278,「金属材料の高温回転曲げ疲労 試験方法」JIS Z2286などを参照してください.

2-1-3-3 疲労試験の分類

室温・大気中における疲労試験は、目的に応じて高サイク ル疲労試験(High-cycle fatigue test)と低サイクル疲労試験 (Low-cycle fatigue test)に分類されます.高サイクル疲労 試験は、破断までの繰返し数が10⁴サイクル程度以上となる ものが相当します.負荷する繰返し応力の最大値は静的な引 張試験で得られる降伏応力付近かそれ以下であることが多い です.ただし、疲労破壊する試験片では微視的には不可逆的 な過程が生じていることになります.高サイクル疲労試験で は応力振幅が一定となる条件で比較的速い繰返し周波数にお いて実施されます.

それに対し低サイクル疲労試験では、10⁴サイクル程度以 下で生じる疲労の現象を取り扱うことになります. 応力の最 大値は降伏応力を超えることが多く,試験片には巨視的な塑 性変形が生じ,応力-ひずみ線図上ではヒステリシスループ が描かれます. 短いサイクル数での疲労現象を取り扱うので 遅い繰返し周波数で実施されることが一般的です. 高サイク ル疲労試験では応力振幅が一定であるのに対し,低サイクル 疲労試験ではひずみ振幅一定の条件がしばしば利用されます.

2-1-3-4 高サイクル疲労

かつては JIS Z2273「金属材料の疲れ試験方法通則」に室 温.大気中における金属材料の高サイクル疲労試験の標準的 な実験方法やデータ整理について示されていました.しかし

Keywords: fatigue, S-N curve, Weibull distribution, cyclic deformation, fractography, persistent slip band 2023年3月17日受理[doi:10.2320/materia.62.527]

^{*} 大阪公立大学大学院工学研究科機械系専攻; 教授(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Experimental Guides for Metallic Materials: 2. Measurement and Evaluation of Material Properties: 2–1 Mechanical Properties: 2–1–3 Fatigue Test; Yoshihisa Kaneko (Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka Metropolitan University, Osaka)

ながら,国内にニーズがなくなったとの理由からこの通則は 2021年に廃止されました.以下には室温・大気中における 一般的な試験方法とその特徴について述べます.

(1) 単軸の引張-圧縮疲労試験

疲労特性には力学的,金属学的,環境的要因が関与する非 常に複雑な現象です.どの要因が疲労特性に対し強い影響を 及ぼすのかを調査していくためには,力学的条件はできるだ け単純化させることが望まれます.したがって高サイクル疲 労試験では,単軸方向に引張と圧縮の垂直荷重を交互に作用 させる方法が採用されることが多いです.疲労試験には,油 圧サーボ型疲労試験機や電磁サーボ型疲労試験機が用いられ ます.疲労試験機の構造の例を図1に示します.試験片には ピストンを介して引張や圧縮の荷重が負荷されます.この例 ではアクチュエーターが試験片の下側に設置されています が,クロスヘッドの上側に設置されているものもあります. ネジ駆動式の万能試験機は,負荷速度の問題や歯車の隙間 (バックラッシ)に起因する反転時のクロスヘッド移動の遅れ の問題から負荷方向が頻繁に変化する疲労試験では通常使わ れません.

図2は単軸引張-圧縮試験で用いられる代表的な試験片形状です.図2(a)は円柱型の試験片で,試験片の中央部付近に断面が減少した平行部(ゲージ部)を有しています.両端のつかみ部およびゲージ部の断面は円形です.軸方向の荷重を P,ケージ部の直径を ¢d とすると,作用する垂直応力は σ=4P/(πd²)となります.ゲージ長さ L は少なくとも 3d が 望まれます⁽⁹⁾.ただし,ゲージ部が長く縦横比が高くなる と,圧縮負荷時に座屈しやすいので注意が必要です.正方 形・長方形断面とは異なり表面のどの位置でも形状は同じな ので,断面隅部の影響を受けないという特徴があります.

図2(b)はいわゆる砂時計型試験片と呼ばれます.基本的 には円柱型ですが,試験片表面に平行部がなく,緩やかな曲 率を有し,中央部で断面が最も細くなっています.最も細い 位置での直径をdとすると,曲率半径Rは少なくとも8dが 望まれます⁽⁹⁾.試験片に作用する応力は最も細い位置での断 面積を基準に算出します.この形状は平行部を有していない ので,圧縮負荷時の座屈が生じにくいという特徴がありま す.円柱型に比べ高い応力が作用する領域が少なく,き裂発 生可能な表面部が相対的に減少するので注意が必要です.

図 2(c)は幅 w で厚さ t の長方形の断面を有する角柱型試験片です.ゲージ部に作用する応力は $\sigma = P/wt$ となります.幅wと厚さtの差が大きい(幅厚比が高い)と同じ断面積でも断面二次モーメントが低下し,圧縮時に座屈しやすくなるので注意が必要です.角柱型試験片の利点は平坦な表面を有していることです.表面が平坦である場合,2-1-3-6節で説明する精密な研磨が可能で電解研磨などを組み合わせると鏡状の表面を得ることができます.試験片表面にはすべり帯や微小き裂など疲労により引き起こされる様々な痕跡が現れます.表面を精密に研磨した角柱状試験片では,疲労試験後にそのような痕跡を詳しく観察することができます.



図1 疲労試験機の構造例.



図2 単軸引張-圧縮用疲労試験片の形状.



(2) 平面曲げ疲労試験

実用において繰返し曲げが作用する板材の疲労特性は、し ばしば平面曲げ疲労試験で評価されます.図3は平面曲げ疲 労試験の概略図です.板状の試験片の両端を固定し、繰返し て曲げモーメントMを与えることにより、試験片に疲労負 荷を与えます.曲げ試験なので、板表面に引張応力が作用す る状況では板裏面では逆に圧縮応力が作用します.正負のモ ーメントを繰返し与えることにより、板の表裏面には引張と 圧縮応力が交互に作用します.板の最も細い部分の幅をw、 厚さをtとすると、曲げモーメントMによって板表面に作 用する引張応力は $\sigma = 6M/wt^2$ で算出されます. なお,曲げ 疲労試験には適用される規格「金属平板の平面曲げ疲れ試験 方法」(JIS Z2275)があり、試験片形状や結果の取り扱いな どが記載されています.

(3) 回転曲げ疲労試験

回転曲げ疲労試験は、円柱材の半径方向に荷重が負荷され かつ回転する軸の疲労を想定した試験方法です.図4は回転 曲げ疲労試験の概略図です.中央の細い円柱軸が試験片で, 両端を回転できる軸に固定されます.軸はモーターによって 回転させます.軸には軸受けを介して半径方向に荷重が負荷 されます.図の例では4点曲げと同じ原理で円柱試験片に 曲げモーメントが作用します.曲げモーメントによって,円 柱試験片の下部および上部表面近傍には引張と圧縮応力がそ れぞれ作用します.図5は軸の回転にともなう表面近傍での 応力の変化を示しています.曲げモーメントが作用した状態 で軸を1/4回転させると、最初は圧縮応力を受けていた上 部表面には応力が作用しなくなります. さらに, 1/4 回転す ると引張応力を受けることになります.したがって、軸を回 転させることで図5(b)のように試験片表面は引張と圧縮の 対象な応力を交互に受けることになります. 直径 d の試験 片に曲げモーメント M が作用すると, 試験片表面に作用す る引張応力の最大値は $\sigma=32M/\pi d^2$ となります. なお,回 転曲げ疲労試験には適用される規格「金属材料の回転曲げ疲 れ試験方法」(JIS Z2274)があります.







回転曲げで作用する応力.

(4) 単軸疲労試験の荷重波形

図6(a)は単軸疲労試験において試験片に作用する応力と 時間との関係を表しています. この例では応力波形は正弦波 です. 正弦荷重波は油圧サーボ型疲労試験機では 10 Hz 程 度の繰返し周波数でも比較的安定して負荷できるので、高サ イクル疲労試験で標準的に採用されます.他には低周波数で の疲労試験などで三角波が採用されます. 三角波では応力の 変化速度が一定という特徴があります.図6(a)に示すよう に、平均応力 σ_{mean} は最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} との平 均値で,応力振幅 σ_aは最大応力と平均応力との差であり, それぞれ以下の式で与えられます.

$$\sigma_{\text{mean}} = \frac{\sigma_{\text{max}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \tag{1}$$

$$\sigma_{a} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \qquad (2)$$

疲労試験における荷重比Rは $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ として定義され ます. 例えば図 6(b) に示すような引張側と圧縮側を対称に 負荷する両振り疲労試験では *R* = −1 となります.最大と最 小応力の両方が正となる片振り疲労試験では荷重比Rは0 以上1未満の値になります.図6(c)の例ではR=0です. 試験片に塑性加工の影響がなければ、R=−1の両振り疲労 では繰返し数が増加しても試験片の平均ひずみは原則変化し ませんが、応力振幅が高い片振り疲労では塑性変形の蓄積に よって平均ひずみは増加します.

(5) S-N 線図

高サイクル疲労試験では種々の応力振幅条件で破断まで繰



返し数を測定し,調査対象の材料の応力振幅と破断までの繰 返し数(疲労寿命)との関係を得ます.実験結果は縦軸=応力 振幅(Stress amplitude), 横軸=破断までの繰返し数(Number of cycles to failure)としたグラフ上に表示します. この グラフは S-N 線図(または Wöhler 線図)と呼ばれ、材料の 疲労強度特性を示す最も基本的な関係となります. S-N線 図では実験結果は片対数もしくは両対数グラフ上にプロット します. 図7はS-N線図の例です. 一般的な金属材料で は、応力振幅の低下にともない破断までの繰返し数は増大し ます.低応力振幅の高サイクル疲労試験では,破断までの繰 返し数が非常に多くなる場合があります. 10 Hzの速度で 107サイクルまで繰返し荷重を与えると一度の試験でおよそ 12日間の実験期間を要します.したがって、繰返し数を増 加させても破断しない場合は途中で疲労試験を中断します. 中断する繰返し数は107サイクルなどがよく採用されます. 図内の「→」は既定サイクル数で破断しなかった結果を示し ています. S-N線図の凡例説明では「run out」と表記され ます.図7の材料Aの短寿命域では応力振幅は破断までの 繰返し数とともに減少しますが, 高寿命域では応力振幅は低 下しなくなります.このような S-N 線図の屈曲は鉄鋼材料 でしばしば現れます. 屈曲が生じる応力振幅以下では疲労破 壊しないので、この応力振幅が疲労強度と見なされます. た だし、超音波試験機を用いた109~1010サイクルまで行う疲 労試験(超高サイクル疲労試験)では⁽¹⁰⁾, 107を超えるサイク ル数でも材料内部を起点に疲労破壊することが報告されてお り、回転する軸などの負荷の繰返し数が多い部材では注意が 必要です. 材料Bでも応力振幅が低下するにしたがって破 断までの繰返し数は増加しますが、材料Aとは異なりS-N 線図に明確な屈曲が存在しません. このような明確な疲労強 度を示さない S-N 線図はアルミニウムなどの非鉄金属でし ばしば見られます.

(6) 同じ応力振幅条件での破断確率⁽¹¹⁾

疲労き裂の核となる表面微小欠陥や内部介在物があると, 同じ応力振幅で疲労試験を実施した場合でも破断までの繰返 し数にはばらつきが生じます.破断までの繰返し数 $N_{\rm f}$ は確 率変数と考えることができ,確率的な特性は分布関数 $F(N_{\rm f})$



で表現されます.同じ応力振幅での疲労試験での破断確率を示すためにワイブル分布がしばしば利用されます.3 母数ワイブル分布の分布関数 *P*(*x*)は次式で与えられます.

$$P(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^{c}\right\}$$
(3)

ここでxは確率変数であり、aは形状母数、bは尺度母数、cは位置母数と呼ばれます.ただし $a \le x$ です.c=0となる分布関数は、2 母数ワイブル分布と呼ばれます.繰返し数と破断確率との関係においては、繰返し数がxとなります.

例として、ある一定の応力振幅で疲労試験10回行なうこ とで得られる疲労寿命からワイブル分布を作成してみます. ある範囲で乱数を発生させることで得られたばらつきのある 破断までの繰返し数を表1に示します.表1には10個の破 断までの繰返し数を短い順に並べ替えています. ワイブル確 率紙にデータを記載する際は、 x_i に対する累積確率 P_i の代 表値にはメディアンランクもしくはミーンランクが用いられ ます.メディアンランク \tilde{Fi} については,標本数nが十分大 きい場合は $\tilde{F}_{i}=(i-0.3)/(n+0.4)$ の近似式が用いられるこ とが多いです.ただし最小値と最大値については、それぞれ $ilde{F}_1 = 1 - 0.5^{1/n}$ と $ilde{F}_n = 0.5^{1/n}$ となります.表1に順位数と標 本数から算出されたメディアンランクを百分率の形式で示し ます. 順位数が1と10ではそれぞれ6.7%,93.3%となりま す. メディアンランクの最小値は $\tilde{F}_1=1-0.5^{1/n}$ であるので, $P_{\min} \ge \tilde{F}_1$ の破断確率が必要な場合は少なくとも $n = \ln 0.5/$ $\ln(1-P_{\min})$ の標本数が必要となります.

図8はワイブル確率紙に表1に示すメディアンランクと

表1 ワイブル分布におけるメディアンランクの計算例.

順位数	1	2	3	4	5
疲労寿命(cycle)	10,741	19,821	38,624	50,435	56,258
メディアンランク(%)	6.7	16.3	26	35.6	45.2
順位数	6	7	8	9	10
疲労寿命(cycle)	73,838	84,626	87,554	96,159	104,455
メディアンランク(%)	54.8	64.4	74	83.7	93.3



図8 ワイブル確率紙上にプロットした破壊確率.



図9 ワイブル確率紙上にプロットした異なる応力振幅にお ける破壊確率の模式図.

疲労寿命との関係をプロットしたものです. 繰返し数が増加 すると破断確率もほぼ線形的に増加しています. 横軸は対数 スケールですが, 縦軸はやや複雑でプロット上の位置は $Y = \text{LnLn}\{1/(1-P)\}$ で与えられます. 最近は確率紙ではな く,パーソナルコンピューターを用いて図8のようなワイ ブル分布を直接描画できます. グラフ作成ソフトで軸にワイ ブルが用意されているものもあり,容易に作成することがで きます.

破壊を確率的に検討する疲労試験では,異なる応力振幅ご とに複数の疲労試験を実施することになります.それぞれの 応力振幅で得られるワイブル分布をまとめた模式図を図9に 示します.短寿命である高応力振幅ではグラフの左側,長寿 命である低応力振幅では右側にそれぞれ破断確率が現れるこ とになります.

(7) P-N-S 線図と時間強度分布

図9に示されるように,ある応力振幅における疲労寿命 はそれぞれの破断確率P(N)によって統計的に推測すること ができます.S-N線図上に破壊確率を等高線として表示さ れたものはP-S-N曲線と呼ばれます.図10は異なる応力振 幅での破壊確率をもとに作成されたP-S-N曲線です.図10 の左上に応力振幅 σ_{a1} における10%,50%,90%の破断確 率となる繰返し数を黒丸で示しています.白丸は黒丸の繰返 し数を縦軸に沿って応力振幅 σ_{a1} の横軸上に移動させたもの で,グラフ上のその位置が応力振幅 σ_{a1} におけるそれぞれの 破断確率になる繰返し数を表しています.図10では σ_{a2} と σ_{a3} についても同様にそれらの確率になる繰返し数を白丸で 示してします.同じ破断確率の白丸を滑らかな曲線で繋ぐこ とで,その破断確率の等高線を得ることができます.

図8のワイブル分布はある応力振幅での繰返し数と破断 確率を与えますが、ある繰返し数での応力振幅と破断確率と の関係は時間強度分布と呼ばれます.図11(a)は P-S-N線 図の例ですが、繰返し数 N_1 の位置に縦軸と平行に点線を引 いています.その点線と破断確率のそれぞれ等高線との交点 が繰返し数 N_1 における当該等高線の破断確率となる応力振 幅になります.図11(a)には、例えば確率50%の応力振幅は σ_{a50} として示しています.図11(b)は、破断確率をそれらの 応力振幅に対して正規確率紙上にプロットした繰返し数 N_1







図11 繰返し数 N1 における時間強度分布.

での時間強度分布になります.

2-1-3-5 低サイクル疲労

(1) 単軸引張-圧縮試験での応力-ひずみ応答

図12は高サイクル疲労試験と低サイクル疲労試験における 典型的な応力-ひずみ応答を示しています.高サイクル疲労 試験は,多くの場合巨視的な降伏応力以下の最大応力で負荷 されますので,応力-ひずみ関係は図12(a)のように線形と なります.一方,塑性変形が生じる低サイクル疲労では図 12(b)のようなヒステリシスループを描きます.材料が同じ 場合,高サイクル疲労に比べ応力振幅は高くなりますが,ピ ーク応力付近の応力-ひずみ線図の傾きは低下します.焼鈍 された金属などの延性の高い材料ではあまり硬化せず塑性変 形が進むため,荷重制御の疲労試験では動作が不安定になる ことがあります.また疲労初期に塑性ひずみが生じるような



図12 高サイクル疲労と低サイクル疲労の応力-ひずみ応答.

負荷条件でも、応力振幅一定の疲労試験では繰返し硬化が進 むにつれて塑性ひずみが減少するので、高サイクル疲労のよ うに弾性変形が支配的な応力-ひずみ応答になってしまいま す.このような理由から、低サイクル疲労試験では全ひずみ 振幅一定(または塑性ひずみ振幅一定)の条件が採用されるこ とが多いです.

(2) ひずみの測定

ひずみ振幅一定の条件で低サイクル疲労試験を実施するた めには,試験片のひずみを試験中に計測する必要がありま す.試験片のひずみは,伸び計(Extensometer)やひずみゲ ージなどで計測します.伸び計を用いた計測では試験片ゲー ジ部の2箇所の標点を設け,そこに伸び計を取り付けま す.標点間伸びを標点間距離で除した値がひずみとなりま す.この計測方法では伸び計をゲージ部に取り付ける必要が あるため,ゲージ部がある程度長い試験片形状を採用する必 要があります.ひずみゲージを用いた計測では,直接ゲージ 部にひずみゲージを貼付します.ただし,ひずみゲージを貼 り付けた位置で疲労き裂が発生・成長するとひずみが正しく 測れず,ひずみ振幅一定の試験条件が成り立たなくなりま す.ひずみゲージによる計測は,ひずみ振幅一定条件での低 サイクル疲労の初期から中期にかけての繰返し硬化・軟化挙 動の調査に適しています.

(3) 荷重軸の軸合わせ

試験機の上下の荷重軸の位置にオフセット(ずれ)がある場合, 試験片を試験機に取り付ける際に曲げやそれに起因する 軸方向以外の残留応力が発生してしまいます.このようなず れは試験結果に影響を及ぼします.また,荷重軸の位置にオ フセットがあると圧縮時に座屈が発生しやすくなります.こ のような残留応力発生や圧縮時の座屈を防ぐためには,荷重 軸の軸合わせが必要になります.荷重軸のオフセットを低減 させるためには,ひずみゲージを複数貼付した検査用の試験 片を用いて軸の水平位置を調整する方法などがあります.安 価でかつ比較的容易に実現できる軸合わせには,例えば図13 に示すような低融点合金を利用した方法があります⁽¹²⁾.図





 $2\varepsilon_{a,pl}(\Delta\varepsilon_{pl})$

の例は、下部のグリップとその下の荷重軸とを低融点合金を 用いて連結させています.下側の荷重軸には低融点合金を溜 めるポットが設置されています.低融点合金には融点が 100℃以下のウッド合金などが用いられます.まず下側のピ ストンを下げた状態で,電熱式ヒーターによって低融点合金 を溶解させます.その後、ピストンを上方に移動させ、下部 グリップを融解した合金に浸漬させます.グリップを冷却し 低融点合金を凝固させることで,荷重軸方向以外の残留応力 が低い状態で試験片を取り付けることができます.ただし, この方法は高温疲労試験には不向きで,また低融点合金の強 度を超えるような負荷はできないという制約があります.

(4) ヒステリシスループ

図14は延性金属材料の低サイクル疲労で得られるヒステリ シスループの典型的な形状です。全ひずみ振幅 $\epsilon_{a,t}$ は引張ピ ーク応力時と圧縮ピーク応力時とのひずみの差(全ひずみ幅 $\Delta \epsilon_t$)の半分で、 $\epsilon_{a,t} = \Delta \epsilon_t/2$ となります。全ひずみは弾性ひず み成分と塑性ひずみ成分から構成されます.全ひずみ振幅から弾性ひずみ振幅を減じたものが塑性ひずみ振幅 $\epsilon_{a, pl}$ となります.すなわち,図14に示すように引張と圧縮ピーク応力のそれぞれの位置から弾性線と平行に引いた2本の線の水平方向の距離が塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_{pl}$ となり,その半分が塑性ひずみ振幅 $\epsilon_{a, pl}$ (= $\Delta \epsilon_{pl}/2$)となります.

ひずみ振幅一定条件の低サイクル疲労試験における応力振 幅は,弾性率とひずみ硬化に依存します.ひずみ硬化の程度 は繰返し変形によって発達する微視的組織の影響を強く受け るので,繰返し数によって変化します.図15(a)はよく焼鈍 しされた金属材料を全ひずみ振幅一定の条件で低サイクル疲 労させた場合に見られるヒステリシスループ形状の変化例を 示しています.少ない繰返し数では転位密度が低いため応力 振幅も低いですが,繰返し数が多くなると転位増殖によって 硬化します.応力振幅が高くなると全ひずみ振幅に占める弾 性ひずみ振幅の比率が増加します.したがって,図15(a)に 示されるように硬化すると塑性ひずみ振幅は減少してしまい ます.転位の自己組織化を含む微視的構造の発達は,弾性ひ ずみ振幅ではなく塑性ひずみ振幅の影響を受けます.図15



 $2\varepsilon_{a,t}(\Delta\varepsilon_t)$

(b)塑性ひずみ一定



図15 全ひずみ振幅一定と塑性ひずみ振幅一定条件での低サ イクル疲労におけるループ形状の変化.

(b)は塑性ひずみ振幅一定の条件で行なった低サイクル疲労 におけるヒステリシスループ形状の変化を示しています.全 ひずみ振幅一定条件と同様に繰返し数の増加とともに試験片 は硬化しますが、この条件では全ひずみ振幅が増加します. このような塑性ひずみ振幅一定の低サイクル疲労試験は、パ ーソナルコンピューターを利用して半サイクルごとに塑性ひ ずみ振幅を見積もり、それが一定となるように試験機に設定 する全ひずみ振幅を逐次修正していくことで実現できます. 具体的には、引張側の塑性ひずみ振幅は $\epsilon_{a, pl} = \epsilon_{a,t} - \sigma_a / E$ で 算出できます.ヤング率Eは低サイクル疲労試験開始前に 低応力振幅で疲労負荷を与えることにより決定できます.応 力振幅 σ_a は疲労試験中に半サイクルごとに求めます.

図15のように、ひずみ振幅を制御した低サイクル疲労試 験ではヒステリシスループ形状が変化するので、荷重とひず みの信号は試験中記録しておきます.ロードセルアンプやひ ずみアンプから出力されるアナログ信号をデータロガーなど に記録することで、試験後に応力振幅の変化などを解析でき ます.

(5) 繰返し硬化曲線

低サイクル疲労試験で記録された応力-ひずみ応答を解析 することで、繰返し数の増加にともなう応力振幅の変化を得 ることができます.この関係は繰返し硬化曲線(もしくは繰 返し軟化曲線)と呼ばれます.繰返し硬化曲線の例を図16に 黒線で示します. 横軸には繰返し数 N の他に累積塑性ひず み Epl. cum も用いられます.対称な引張-圧縮の低サイクル疲 労では、 $\varepsilon_{pl, cum} = 4 N \varepsilon_{a, pl}$ となります.よく焼鈍され初期転 位密度が低い金属材料では繰返し塑性変形により転位密度が 増加するので、疲労初期では急速にひずみ振幅が増加しま す. その後,転位の自己組織化が進み微視的構造が安定する と,応力振幅は飽和します.この応力振幅は飽和応力振幅 $\sigma_{a \, sat}$ と呼ばれます. 飽和応力振幅はひずみ振幅に依存しま す. なお, Cu-Al 合金⁽¹³⁾やオーステナイト系ステンレス 鋼(14)などの積層欠陥エネルギーが低い材料では、焼鈍材で も初期の急速繰返し硬化を示さない場合があります.また, 材料や疲労試験条件によっては比較的早期に疲労き裂が発







図17 塑性ひずみ振幅一定条件でのループ形状の変化.

生・進展する場合もあり、その場合は飽和挙動を示さずに応 力振幅が低下しはじめます.

強い塑性加工を施された材料では疲労試験前ですでに転位 密度が高くなっています.高転位密度の材料に繰返し変形を 与えると増殖している転位同士で対消滅します.そのような 試験片における低サイクル疲労では図16の灰色線のよう に,転位密度の低下にともなって疲労の初期から繰返し軟化 を示します.

(6) 繰返し応力-ひずみ曲線

図17は塑性ひずみ振幅と飽和応力振幅との関係の模式図で す. この線図は繰返し応力-ひずみ線図(Cyclic stress-strain curve: CSSC)と呼ばれます.多結晶材料では典型的には図 の黒線のように塑性ひずみ振幅の増加にともない飽和応力振 幅が増加します(15).一方,単一すべり方位を有する単結晶 材料では,灰色線のように CSSC はいくつかの領域に分か れており、飽和応力振幅が塑性ひずみ振幅に依存せず一定と なる領域(Plateau 領域)が現れます⁽¹⁶⁾. CSSC における各領 域は材料内部で発達する転位構造と密接に関連しており、例 えば Plateau 領域では疲労き裂の核となる固執すべり帯 (Persistent Slip Band: PSB)が形成されることが知られてい ます.このように、CSSC は延性金属材料の繰返し応力-ひ ずみ応答と内部で発達する構造とを関連付ける目的で用いら れています. なお、単結晶材料では、縦軸にシュミット因子 から算出した飽和せん断応力振幅, 横軸に塑性せん断ひずみ 振幅が用いられることが多いです.

2-1-3-6 疲労試験後の材料の観察

高・低サイクル疲労試験では対象とした材料の疲労強度や 繰返し応力-ひずみ応答を調査し,得られた結果は機械部品 などの設計指針に反映させることができます.一方で,疲労 に対しより優れた特性を示す材料を開発していくためには, 疲労の原因を明らかにしていくことが必要となります.疲労 損傷評価や破壊原因の探求を目的とした疲労試験後の材料の 観察・解析は、疲労試験の一部と見なすことができます.

疲労破断後の材料の観察は,走査型電子顕微鏡法(Scanning electron microscopy: SEM)とともに発達した破断面の 観察が主流でした.最近では,転位構造の発達や結晶方位の 変化など様々な視点から疲労損傷が検討されています.本稿 では試験片の準備方法や代表的な観察・解析方法を説明しま す.

(1) 表面仕上げ

代表的な疲労損傷に表面でのすべり帯の発達があります. 疲労で形成されるすべり帯では表面に突出し、入込みが発達 するので,疲労き裂の核になり得ます.このような表面損傷 を SEM 観察したり,原子間力顕微鏡法(Atomic Force Microscopy: AFM)で凹凸を評価⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾したりするために は,疲労試験前に平滑に表面仕上げしておく必要がありま す.また,疲労試験後に後方散乱電子回折法(Electron Backscatter Diffraction: EBSD)で結晶方位を解析する場合 も同様な表面仕上げが必要になります.

まず,平滑な表面仕上げのためには角柱型試験片(図2 (c))を用います.円柱型では後述の電解研磨による表面仕上 げのみが可能です.機械加工後の表面は,まずは複数種のエ メリ紙を用いて機械研磨します.研磨では砥粒の大きさを順 に細かくし,最終的に#1500~#3000程度まで研磨します. その後,ダイヤモンド砥粒やコロイダルシリカを用いた研磨 で鏡面状の表面を得ます.最近では研磨時に試験片に作用す る力を精密調整できる研磨装置もあります.

機械研磨では十分な平滑性が得られなかったり表面に加工 層が残ったりする場合は,さらに電解研磨を施します.電解 研磨では図18のような電気化学装置を用いて金属材料表面を 電気分解します.試験片をアノード電極とし,直流安定化電 源から電力を供給することで,表面層が除去されます.機械 的な力が作用しないので,機械加工層が形成されること無く 研磨できます.鉄系および銅系の材料の電解研磨に使用され る電解液の組成の例を表2に示します.電解研磨の条件につ いては種々の金属材料についても数多く報告されており,詳 しくは参考図書⁽¹⁹⁾を参照してください.



表2 鉄系および銅系材料の電解研磨に用いる電解液の例.

Sample	Component	Concentration(vol%)
Iron,	Acetic acid, CH ₃ COOH	90
alloy	Perchloric acid (60%), $HClO_4$	10
Copper, Cu-based - alloy	Phosphoric acid, H_3PO_4	70
	Ethanol, C ₂ H ₅ OH	30

(2) SEM 観察⁽²⁰⁾⁽²¹⁾

SEM は光学顕微鏡に比べて高倍率の観察が可能でかつ焦 点深度も深いため、疲労破断した金属材料の観察には最もよ く用いられています.図19は疲労破壊した二相ステンレス鋼 の破面です.図19(a)は疲労き裂伝ばした領域の破面で,平 行な線状の形態や破面から分岐した微小き裂などが確認され ます.線状形態は結晶が繰返しせん断変形によって分離した 痕跡,もしくは疲労き裂先端線の痕跡(ストライエーション) と解釈されています.図19(b)は同じ試料の最終破断部で す.この位置では疲労破壊というより延性的に破断してお り、破面にはディンプルの形成が確認できます。このような 破面形熊観察から,き裂発生箇所や伝ば方向などを推測する ことができます.図20は表面に形成されたすべり帯のSEM 像です.すべり帯の傾斜が領域ごとに異なっていますがそれ らは結晶粒に対応しており、同じ試料でもすべり帯が優先的 に形成される結晶があることが分かります. 試験前に表面を 平滑に仕上げているので, すべり帯の形成箇所の同定やすべ り帯の密度なども測定できます.

(3) 転位構造の観察

初期転位密度が低い金属材料が繰返し変形を受けると、転 位密度が増加するとともに、転位が動的に安定な構造に自己 組織化します. すべり帯の発達には転位の自己組織化が関連 するので,転位構造の発達は疲労損傷の一種と見なすことが できます.疲労した金属材料の転位構造は透過型電子顕微鏡 法(Transmission Electron Microscopy: TEM)で観察するこ とができます. TEM は高倍率で観察できる反面, 電子線が 透過可能な薄膜に加工する必要があり、観察できる範囲も限 られてしまいます. 一方, 1990年代から発達してきた Electron Channeling Contrast Imaging(ECCI)法⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾は SEM を用いるので、表面近傍の転位組織を広範囲に観察すること ができます. ECCI 法では,反射電子の強度が入射電子線と 格子面との角度が Bragg 角付近で急激に変化することを利 用し、転位によるわずかな格子ひずみを画像化します. 図21 は疲労させた銅を ECCI 法で観察した例です.原理上,高い 転位密度領域が明るい像として画像化されています. 疲労に よって形成される PSB に特有なはしご状転位構造を確認す ることができます.

(4) **EBSD**法⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾

すべり帯形成(図20)や転位構造の自己組織化(図21)から





(b) 最終破断部



図19 二相ステンレス鋼の疲労破面.



図20 疲労させたオーステナイト系ステンレス鋼表面に形成 されたすべり帯.



図21 ECCI法で観察した銅で発達した転位構造.



図22 疲労破壊した純鉄の破面近傍の IPF マップ. 方位に対応する色は右側の標準ステレオグラフに記載.

も明らかなように,疲労損傷には転位運動が関与しており, 微視的には結晶方位の影響を強く受けることになります.疲 労負荷を受けた材料の構成結晶の方位は EBSD 法によって 取得することができます. EBSD 法を利用すれば,疲労き 裂が優先的に発生する結晶や粒界の結晶学的な情報を詳しく 調査することができます. 図22は EBSD 解析によって得ら れた疲労破壊した純鉄破面近傍の逆極点方位(Inverse Pole Figure: IPF)マップです. この試料では破面近傍を保護する ために破面をニッケルめっきしており,破面である白い破線 より下の部分はニッケルです.破面近傍では疲労き裂伝ばの 痕跡としてわずかに格子回転したり,小角粒界が形成された りしています.ただし,一方向変形における破面に比べて, 格子回転の程度は低いです.このような破面近傍の情報から 破壊の要因を検討することもできます.

2-1-3-7 おわりに

本項では,高サイクル疲労および低サイクル疲労の試験方 法,データの整理方法,および疲労試験後の試料観察・解析 について説明しました.疲労試験自体は古くからある試験で すが,新たに開発された材料の信頼性を検証するためには欠 かせない試験でもあります.最近では EBSD 法などの新し い解析技術を組み合わせることで疲労損傷に関する新たな知 見が得られるようになっております.筆者も疲労損傷の評価 技術やその解釈は今後さらに発展が期待される分野と考えて おります.本項の内容が皆様の金属疲労や材料開発の研究に 役立つことを願います.

文 献

(1)大谷隆一:鉄と鋼,66(1980),2106-2118.
(2)大谷隆一:日本金属学会会報,22(1983),190-196.
(3)鵜戸口英善:溶接学会誌,37(1968),573-585.
(4)戸田裕之,小林正和:軽金属,59(2009),312-319.
(5)遠藤吉郎:防食技術,26(1977),583-592.
(6)駒井謙治郎:鉄と鋼,69(1983),728-736.

- (7) 佐藤準一:日本機械学会誌(C編), 64(1998), 4109-4114.
- (8) 武藤睦治:材料,46(1997),1233-1241.
- (9) P. P. Milella: Fatigue and Corrosion in Metals, Springer, (2013), 109–191.
- (10) 酒井達雄, 上野 明:日本マリンエンジニアリング学会誌, 44(2009),48-54.
- (11) 西谷弘信:疲労強度学,オーム社, (1985),281-316.
- (12) C. E. Feltner and R. Michell: Manual on Low Cycle Fatigue Testing ASTM STP465, American Society for Testing and Materials, (1969), 27–66.
- (13) B. D. Yan, A. S. Cheng, L. Buchinger, S. Stanzl and C. Laird: Mater. Sci. Eng., 80(1986), 129–142.
- (14) J. Polak, K. Obrtlik and M. Hajek: Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 17(1994), 773–782.
- (15) P. Lukáŝ and L. Kunz: Mater. Sci. Eng., 74(1985), L1-L5.
- (16) H. Mughrabi: Mater. Sci. Eng., 33(1978), 207-223.
- (17) J. Man, K. Obrtlik and J. Polak: Mater. Sci. Eng. A, 351 (2003), 123–132.
- (18) A. Schwab, O. Meissner and C. Holste: Phil. Mag. Lett., 77 (1998), 23–31.
- (19) Gunter Petzow: 組織学とエッチングマニュアル,日刊工業新 間社,(1997),66-201.
- (20) 徳永智春:まてりあ, 60(2021), 225-233.
- (21) 徳永智春:まてりあ, 60(2021), 351-358.
- (22) A. J. Wilkinson and P. B. Hirsch: Micron, **28**(1997), 279–308.
- (23) 兼子佳久,橋本 敏:日本金属学会誌, 66 (2002), 1297-1303.
- (24) A. Weidner and H. Biermann: Philos. Mag., 95 (2015), 759– 793.
- (25) 横江大作:まてりあ, 60(2021), 645-652.
- (26) 横江大作:まてりあ, 60(2021), 793-799.



1996年3月 京都大学大学院工学研究科機械物理工学 専攻博士後期課程中途退学
1996年4月 金沢大学工学部機能機械工学科助手
1999年4月 大阪市立大学工学部知的材料工学科助手
2014年4月 大阪市立大学工学研究科機械物理系専攻 教授
2022年4月-現職

専門分野:材料工学,機械材料,走査型電子顕微鏡法 ◎金属疲労やナノ構造金属材料の力学的特性に従事. 金属疲労にともなう転位構造の自己組織化や電気め っき法を用いたナノ多層膜の成膜・強度評価を中心 に活動.
