

鉄鋼材料の長寿命領域疲労破面の定量評価

山 際 謙 太^{*1} 本 田 尚^{*1} 佐々木 哲 也^{*1}

破面から破断したときの荷重を推定する手法については、事故調査の分野では重要な役割をなしている。特に、疲労破面からの荷重推定は重要である。疲労破面に観察されるストライエーションの幅から作用応力の振幅は推定できる。一方、ストライエーションのアスペクト比（高さ／幅）は応力比と関係があるが、高さはサブミクロンであり、計測が困難である。本研究では、レーザー顕微鏡を用いてストライエーションの3次元形状を計測し、幅とアスペクト比を評価する手法を提案する。レーザー顕微鏡は非接触で表面形状が計測できることから、従来の切断した破面の断面観察よりは正確にストライエーションの高さを計測することができる。本研究では、ストライエーションの形状に周波数分析を適用することで、破面の周期性を調べ、ストライエーションの幅を目視ではなくて定量的に評価する手法について検討した。また、 ΔK 一定の条件下で実施されたアルミニウム合金の疲労試験破面に本手法を適用し、妥当性の評価を行った。その結果、応力比とストライエーションのアスペクト比（高さ／幅）に相関が見いだすことができた。

キーワード：フラクトグラフィ、金属疲労、レーザー顕微鏡、3次元形状、周波数分析

1 緒言

機械構造物の破壊事故が起きた時に、破面には事故の過程が残っていることから、破面は事故の直接的証拠である。また、事故原因の70～80%は疲労破壊¹⁾であることを考えると、疲労破面から実働荷重を推定することは重要である。疲労破面にはストライエーションと呼ばれる縞状模様が観察されることが多く、ストライエーションは荷重の1サイクルに対応して1本が形成される。従来よりストライエーション幅 s は巨視的なき裂進展速度（ ad/dN ）を与えることが明らかにされており、多くの形成機構が提案されている²⁾。また、古川らはストライエーションの高さ（ H ）と s の比（ H/s ）から応力比 R を推定する方法を提案し、それが材料に依存しないことを示した。しかし、 s が約0.1～2.0 μm 、 H が s に対して約10～40%の微小形状である^{3,4)}。また、破面はストライエーションより周期の大きい凹凸を含むため、 H/s はその影響を受ける。これを避けるため、測定箇所は平坦な面を選択する必要がある、 H/s の測定は経験的に行われるのが現状である。さらに、同じ R であっても H/s の値はばらつきが大きく、必ずしも精度よく R を推定することができるとはいえない³⁾。

本研究では、破面を切断することなく非破壊で調査を行うために共焦点レーザー顕微鏡を使用してストライエーションの断面形状（プロファイル）を計測した。プロファイルの解析に、高速フーリエ変換（FFT）を用いて周波数分析⁵⁾を行った。その結果、凹凸の影響は無く、ストライエーションの幅を波長 λ 、高さをパワースペクトル（PS.）により同定することが可能であった。また、周波数分析は目視により解析を行うより効率的に解析できることから、より多くのプロファイルを解析でき、またより客観性の高い結果を導くことができた。

2 レーザー顕微鏡を用いたストライエーションの三次元定量解析方法

ストライエーションの三次元定量解析をするために、レーザー顕微鏡で明瞭かつ、き裂進展方向（CGD）にほぼ垂直なストライエーションを観察する。一般的なレーザー顕微鏡の観察は、観察視野全体に対して最適な光量となるようにゲインを調整する。しかし、凹凸やうねりを含む疲労破面では、ストライエーション断面の凸部でレーザー光が飽和状態となり、 H が求められない。凹部ではレーザー光が到達しない場合がある。したがって、観察視野全体ではなく、各ストライエーション断面形状で最適なゲインに調整し、データの信頼性を向上させる必要がある。得られた断面形状にはメディアンフィルタと1次の傾き補正を行った。

次に、断面形状にFFTを適用し、周波数とPS.の関係を求めた。本研究では、ストライエーションと比較するため、空間周波数の逆数をとった波長 λ とPS.の関係を求めた。このとき、PS.が最も高くなる時の $\lambda(\lambda_{\text{max}})$ は s と等しく、また、PS.の最大値（PS.max）はストライエーション高さと相関があると考えられる。そして、これらの値と R との関係を求めた。

3 試験片及び試験・解析方法

1) 試験片

試験片材料はストライエーションが形成されやすいアルミニウム合金2024-T3を用いた。試験片は板厚12.5mm、板幅50mm、予き裂10mmのCT試験片（図1(a)）であり、き裂を負荷方向と垂直に進展させるため、サイドグループを付加した。試験片の採取方向はLT（図1(b)）である。

2) 試験条件

疲労試験機は、容量100kNの電気油圧サーボ式疲労試験機（INSTRON製型式8516、図2）を使用した。初めに、レーザー顕微鏡とFFTを用いて、ストライエー

*1 機械システム安全研究グループ

シオン断面形状の定量化可能範囲を検討するため、 ΔK 漸増試験を行った。試験は応力比 R を 0.1, 0.3, 0.5, 試験開始時の応力拡大係数範囲 ΔK を $7\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ とし、繰返し速度 10Hz, 常温大気中にて破断するまで行った。き裂長さの測定は読取顕微鏡を用いた。次に PS. と R の関係について検討するため、除荷コンプライアンス法に基づき、 $R = 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, \Delta K = 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 一定試験を行った。繰返し速度は 0.5~1Hz, 常温大気中にてき裂長さが 45mm になるまで行った。

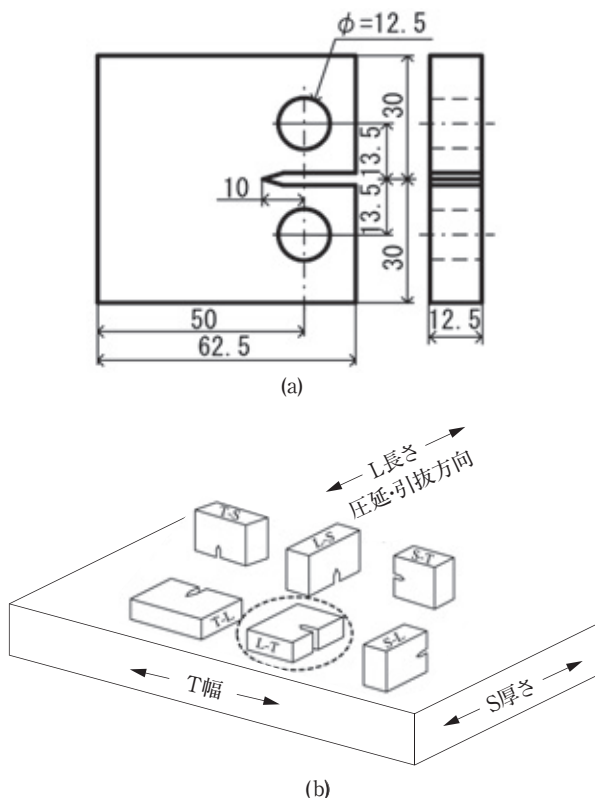


図1 試験片形状(a)と採取方法(b)



図2 疲労試験機

3) 断面形状の観察・解析方法

破面の観察とストライエーションの測定には共焦点

レーザー顕微鏡 (KEYENCE 製 VK-9510, 図 3), 100 倍の長距離レンズを使用した。サンプリング間隔は z 方向を $0.01\mu\text{m}$, x, y 方向を $0.023\mu\text{m}$ とした。図 4 に破面の測定方法を示す。測定部は図 4 (a) に示すように、破面中央部で ΔK 漸増試験ではき裂進展過程における第 2b 段階の領域, ΔK 一定試験では試験データに基づいた裂進展速度が一定である $a/W = 0.3 \sim 0.6$ の領域とした。断面形状は CGD にほぼ垂直なストライエーションに対し、図 4 (b) で示すように 3 本測定した。また、これを $\Delta K, R$ が同一条件の破面で 3 箇所、合計 9 本の断面形状を測定した。

次に、断面形状に FFT を適用し、複素数の絶対値の二乗をとった PS. とストライエーションとを比較するために λ を片対数グラフにとって比較した。このとき、サンプリングデータ数 $N = 512$ とし、同一条件で測定した 9 本の断面形状の PS. はアンサンプル平均を行った。さらに、 ΔK 一定試験から得た PS. と断面形状から目視で測定した H/s を比較した。

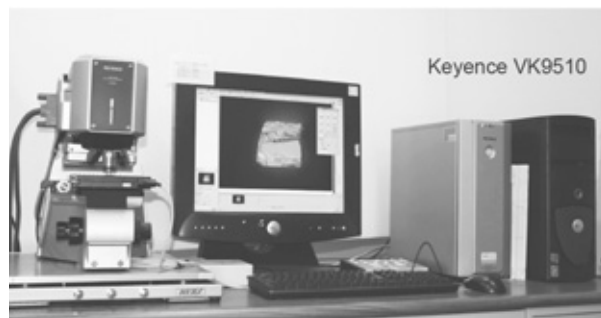


図3 計測に用いたレーザー顕微鏡

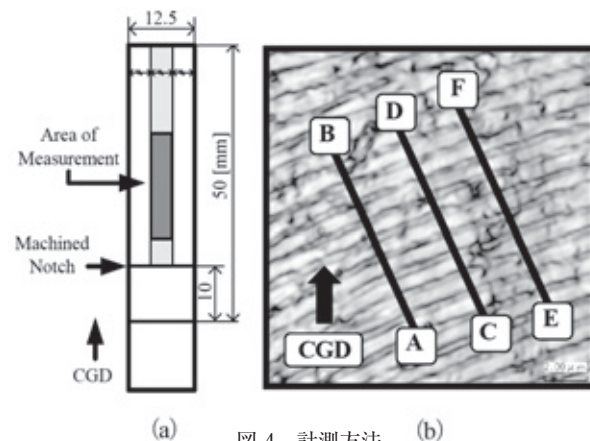


図4 計測方法

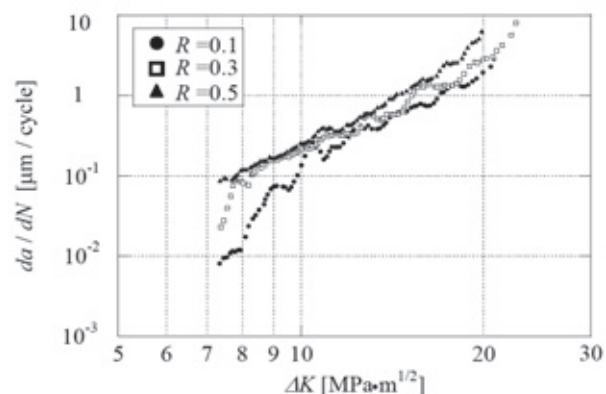


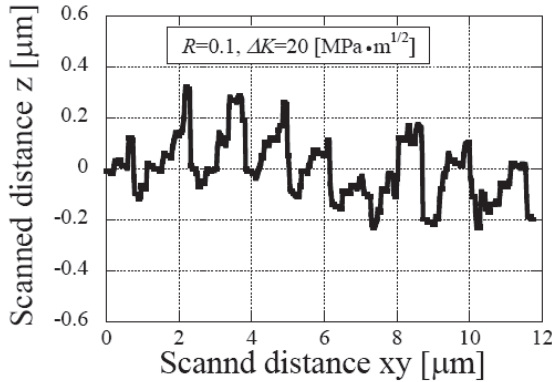
図5 応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係

4 断面形状の解析結果及び考察

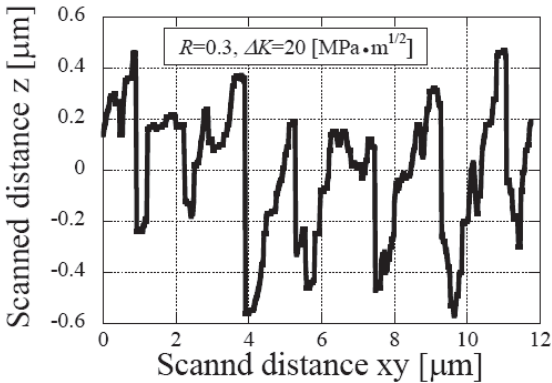
1) き裂進展速度と断面形状の関係

図5に応力拡大係数範囲 ΔK とき裂進展速度 da/dN の関係に対する応力比 R の依存性を示す。同じ ΔK では R が増加するにつれて da/dN が増加する。

これまでの研究から、断面形状の定量化には一つのストライエーション幅に対し、サンプリング数が10点以上必要である⁶⁾。x, y方向のサンプリング間隔は0.023 μm であるため、サンプリング数が10点以上⁶⁾となる $da/dN = 0.3 \mu\text{m}/\text{cycle}$ 以上の領域であれば、FFTの適用が可能である。しかし、実際にはストライエーション幅が0.5 μm 以下の領域になると、断面形状が測定できない場合が多い。これはz方向のサンプリング間隔が0.01 μm であるのに対し、ストライエーション高さ H は0.1 μm 程度^{3,4)} であり、レーザー顕微鏡のサンプリング数が少ないためと考えられる。



(a)



(b)

図6 レーザー顕微鏡で観察したA2024-T3疲労破面上のストライエーションのプロファイルの例

図6に $\Delta K = 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ における断面形状の R 依存性を示す。(b)は(a)と比べると明らかにz方向に伸びており、 R が大きくなるとストライエーションの高さは高くなるのがわかる。

2) パワースペクトルと応力比の関係

ΔK 一定試験の破面を用いて、ストライエーション断面形状にFFTを適用した結果からPS.と R の関係を比

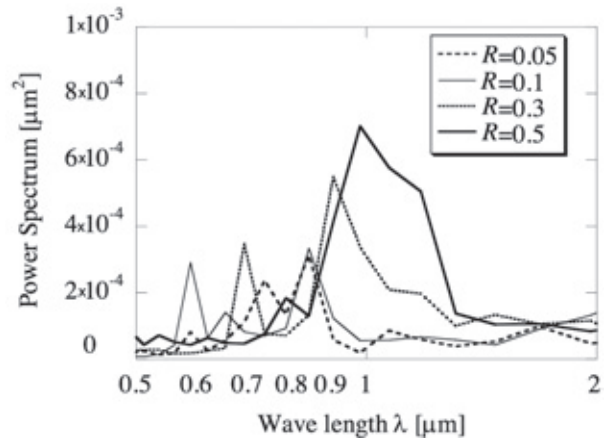


図7 ストライエーションのプロファイルに対し周波数分析を行った結果

表1 周波数分析により求めたストライエーションの幅と、目視により求めたストライエーションの幅の関係

R	Wave length λ [μm]	Striation length s [μm]
0.05	0.71	0.73
0.1	0.70	0.77
0.3	0.87	0.87
0.5	1.03	1.00

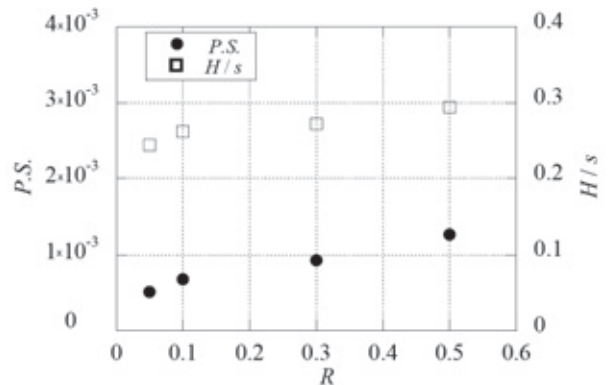


図8 応力比とパワースペクトル, H/s の関係

較した。図7に R とPS. の関係を示す。表1にFFT結果から得た λ と破面から目視で測定した s を示す。それによると、 R が大きくなるにつれて λ , s が大きくなる。同様に、 R が大きくなるにつれてPS.maxも大きくなっている。

図8にPS.及びストライエーション断面形状の H/s と R の関係を示す。PS.と H/s は両方とも R が高くなるにつれて大きくなり、同様の傾向を示す。除荷行程におけるき裂先端の閉口は、周囲の弾性部分からくる圧縮応力によって起こる。この圧縮応力の大小によりストライエーションの形態が変化する²⁾。 R の増加に伴い荷重の最小値は増加し、圧縮応力が小さくなると、き裂先端の閉口は不完全になる。したがって、 R が増加すると、 H/s とPS.の値が増加すると考えられる。

以上の結果から、A2024-T3では $\Delta K = 15 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ の時、ストライエーション断面形状にFFTを適用し、PS.を用いてより客観性の高い R の推定ができる。

5 結言

アルミニウム合金 2024-T3 の疲労破面からレーザー顕微鏡を用いて三次元形状を計測した。次にこの形状に FFT を適用して、ストライエーションの定量化を試みた。

その結果、パワースペクトルが最も強くなる波長はストライエーションの間隔と等しく、パワースペクトルは R と相関があることがわかった。これを活用することで、疲労破面から非破壊で R の推定が可能である。

参 考 文 献

- 1) M. Jono, Fractography, (2000) , pp.134-135, Maruzen.
- 2) R. Koterazawa, Fractography (3) , The society of materials science, Vol.23, No.250, (1974) , pp.593-601.
- 3) K. Furukawa, Y. Murakami, S. Nishida, A method for predicting service load from the height of Striation, The society of materials science, Vol.45, No.3 (1996) , pp.340-345.
- 4) K. Furukawa, Method for estimating service load from striation width and height, Materials Science and Engineering A, Vol.285 (2000) , pp.80-84.
- 5) C. Masuda, S. Nishijima, H. Sumiyoshi, E. Nakatani, An Accessible Method for Automatic Evaluation of Fatigue Striation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.51, No.461 (1985) , pp.136-141.
- 6) M. Masayuki, H. Tsuji, T. Sasaki, T. Honda, K. Yamagiwa, Three-Dimensional Quantitative Analysis of Aluminum Alloy Fatigue Fracture Surface Using a Laser Microscope, lecture transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers M&M (CD-ROM), Vol.2009, pp.OS0702.

(平成 22 年 9 月 27 日受理)