ストライエーションから実働荷重を推定する方法について[†]

古 川 勝 明* 村 上 敬 宜** 西 田 新 一***

A Method for Predicting Service Load from the Width and Height of Striation

by

Katsuaki FURUKAWA*, Yukitaka MURAKAMI** and Shin-ichi NISHIDA***

In order to predict service load from fatigue fracture surface, the use of striation spacing (s) and the ratio of striation height (H) to s , H/s is proposed. It is well known that s is correlated with the crack growth rate da/dN . However, since the crack growth curve $da/dN-\Delta K$ depends on the stress ratio R ($=P_{\min}/P_{\max}=K_{\min}/K_{\max}$), it is not possible to determine the minimum service load $P_{\min}$ and the maximum service load $P_{\max}$ only from $da/dN-\Delta K$ or $s-\Delta K$ relationship. In the previous paper, the authors found that there existed one-to-one correspondence between H/s and the stress ratio R for 2017-T4 aluminum alloy and SUS304. Thus, the key to evaluate the stress ratio R in service load is an accurate determination of H/s . The method used in the previous paper to measure H of striations is composed of several procedures such as cutting, embedding in plastics and finally sectioning specimens by a microtome (a special cutting machine). In this paper, an improved method of sectioning the fracture surface directly by the microtome is developed. By the new method, an increased number of accurate data of H/s become available and the histogram indicating the scatter of H/s values specific to a definite R ratio can be obtained. Three materials, 2017-T4 aluminum alloy, SUS304 and a high Mn steel, were investigated in order to study the effect of material properties on the relationship between H/s and R . It was found that the mean value of the upper twenty data of 100 measured values of H/s was a unique function of R for all three materials. This result implies, with a high degree of plausibility, the existence of one-to-one correspondence between H/s and R regardless of materials. Thus, the master curve ($H/s-R$ relationship) obtained in this study may be used for the failure analysis of various structures of different materials.

Key words : Fatigue, Fracture surface, Striation, Stress ratio, Service load

1 緒 言

機械構造物の破壊事故は、その原因の 80 % 以上が疲労破壊によると言われている。そのため、事故の損傷破面を解析し、事故原因の究明とともにその損傷時に作用していた荷重を推定することは事故の再発防止という点から極めて重要である。また、1995 年 7 月 1 日から施行される製造物責任法と関連して事故原因の究明が社会的にも重要な課題となることが予想され、特に事故後の破面解析は原因究明上重要な役割を担うことになる。

一般に、疲労破壊においては破面にストライエーションが観察されることが多く、かつそれらの大部分は応力サイクルと対応している。また、き裂伝ば速度 (da/dN) とストライエーション間隔 (s) は良く一致することが知られている。さらに、 da/dN および s と応力拡大係数幅 ΔK ($=K_{\max}-K_{\min}$) あるいは有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} との関係は Paris 則に類似の式を満足するので、破面に残されたストライエーション幅 (s) から実働荷重を推定しようという試みがなされてきた^{1)~11)}。しかしながら、実際の事故時に作用した最大荷重 $P_{\max}$ と最小荷重 $P_{\min}$ は da/dN または s と ΔK の関係からは求めることは

できない^{6)~11)}。なぜならば ΔK が同じでも $P_{\max}$ と $P_{\min}$ が異なれば (すなわち応力比 $R=P_{\min}/P_{\max}$ が異なれば) $da/dN-\Delta K$ の関係は全く異なったものになるからである。したがって、重要なことは破面に現れたストライエーションの形状と寸法から応力比 R を決定できるかどうかである。これまで、破面から稼働時の R を推定することは困難とされていたが、著者らは 2017-T4Al 合金および SUS304 を用い、 R の違いが主としてストライエーションの形状の違い、特にその高さ H と幅 s の比の違いにあらわれることを見いだした^{12),13)}。その結果ストライエーションの高さ H と幅 s の比 (H/s) と応力比 R との間にはほぼ 1 対 1 の対応関係があること、さらに SUS304 の H/s と R の関係は 2017-T4Al 合金のそれとほとんど変わらないことを明らかにした。しかし実際には、応力比 R が一定でも破面に現れる多くのストライエーションの H/s の値はある値の範囲にばらついているので、 R を精度よく推定するには H/s の測定データをもっと詳細に分析する必要がある。そのためには、できるだけ多くのストライエーションについて H/s の測定を行い、ばらつきの傾向を調べる必要がある。 H

[†] 原稿受理 平成 7 年 4 月 3 日 Received Apr. 3, 1995

* 正 会 員 科学警察研究所 〒102 東京都千代田区三番町, National Res. Int. of Police Sci., Chiyoda-ku, Tokyo, 102

** 正 会 員 九州大学工学部機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Mech. Sci. & Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

*** 正 会 員 佐賀大学工学部生産機械工学科 〒840 佐賀市本庄町, Dept. of Mech. Eng., Saga Univ., Honjyo-cho, Saga, 840

/s の測定はストライエーションの山を斜めにスライスする方法が基本であるが、切断面がシャープでなければ有効な H/s を求めることはできない。そこで、本報では前報で使用方法をさらに改良して有効な測定データを大幅に増加する方法を開発した。これによって、荷重推定の信頼性を高め、実際の事故解析に応用できるようにしたので、それについて報告する。

2 使用材料、試験片の形状および実験方法

2・1 使用材料および試験片形状

使用材料は 2017-T4Al 合金、SUS304 および高マンガン鋼である。Table I に機械的性質、Table II に化学成分を示す。Fig. 1 に CT 試験片、Fig. 2 に中央切欠き試験片の形状を示す。疲労試験は油圧サーボ式疲労試験機を用い、 R と荷重 P の種々の組合わせについて、き裂伝ば試験を行った。このようにして形成された疲労破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) によって観察し、ストライエーション間隔 s および形状 H/s を測定した。

2・2 ストライエーション形状の測定法

観察されるストライエーションはその幅が $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度、高さはさらに小さな値をとるため、測定はきわめて困難であるが、この困難を解決することが問題解決の鍵となる。

著者らはストライエーション断面形状の高精度測定方法として、前報で「(1) 樹脂に埋め込んで研磨する方法」を提案した。しかしこの方法は研磨により端面がだれる欠点があった。そこで、次に「(2) 樹脂に埋め込んだ試料をマイクロトームで切断する方法」を提案した。これらの方法はストライエーションを斜めにある角度で切断することによって、特にストライエーションの高さを誇張し、高さの測定を容易にしようというものである。このときストライエーションの切断方法の良否が断面形状の

Fig. 1. CT specimen.

Fig. 2. Center notched specimen.

測定精度に影響を与える。しかしながら、この方法は樹脂に埋め込んだ試料を切断する過程を経るため、破面が損傷し、有効な測定値が少ない欠点があった。そこで、本研究では「(3) 樹脂に埋め込まないで直接マイクロトームにより切断する方法」を試みたところ、この欠点を克

Fig. 3. Flowchart of the improved method.

Fig. 4. SEM specimen cut from fatigue specimen.

Table I. Mechanical properties of materials used.

	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ψ (%)
A2017-T4	270	435	23.8
SUS304	371	650	72.0
High Mn Steel	350	947	58.0

$\sigma_{0.2}$: 0.2% proof stress.

σ_B : Ultimate tensile stress.

ψ : Reduction of area.

Table II. Chemical compositions of materials used.
A2017-T4

Cu	Mg	Mn	Si
3.7	0.6	0.4	0.4

SUS304

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
0.06	0.47	0.89	0.028	0.005	8.59	18.28	0.118	0.022

High Mn Steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al
0.53	0.44	18.88	0.018	0.005	1.31	2.66	0.011

Fig. 5. Method of sectioning.

Fig. 6. Sectioning of striations on 2017-T4 Al alloy by the improved method (ΔK : $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

服することができた。以下に、この改良された方法について説明する。

Fig. 3 に改良された方法のフローチャートを示す。Fig. 4 に示すように、CT 試験片および中央切欠き試験片より疲労破面 B を持った部分を切りだす。そして Fig. 5 のように、その試料を破面に対して切断面が 20 度～45 度の角度になるように傾けて樹脂に固定する。さらにこの試料を直接マイクロトームを用いてスライスする。

最後に、マイクロトームでスライスした面にイオンスパッタにより金蒸着を約 50 Å ほどこして観察試料とした。

なお、マイクロトームによる切断に際して、以下のような点に留意して試料を作成した。(1) マイクロトームの刃が切断開始時から試料の破面全体に当たると切断不能となりやすいので、刃に対して約 45 度の角度をなすように試料を取り付ける。(2) マイクロトームの刃の送りは、刃がストライエーションの山の方から当たるようにする。その理由は、マイクロトームの刃が最後に破面に到達するように切断すると、切屑のかえりの発生のためストライエーションの断面が見えにくくなるからである。このように試験片を直接マイクロトームで切断することにより、樹脂に埋め込んで切断する前報の方法に比べ破面の損傷を防ぐことができる。その結果、測定信頼性が向上し、

Fig. 7. Sectioning of striations on SUS304 by the improved method (ΔK : $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

有効な H/s が得られるストライエーションの数が約 100 例と格段に増えた。これによって、 H/s 測定値のばらつきの傾向が明確になった。

3 実験結果および考察

3・1 新しい破面切断方法による H/s の測定結果

Fig. 6～8 は種々の応力比 R におけるストライエーションの断面形状写真である。

これらの写真に見られるように、2017-T4Al 合金、SUS304 および高マンガン鋼においてそれぞれの応力比 R に対する H/s はある程度のばらつきがある。そこで、これらのデータを縦軸に頻度(%), 横軸に H/s の値を取ってヒストグラムを作成した。その結果を Fig. 9 に示す。

Fig. 9 に示すように、全体的な傾向としては、それぞれの応力比において、 H/s の値は分布の重なりがあるものの、 H/s の分布のピーク位置は材料に依存せず応力比 R が大きくなるほど大きくなっていることがわかる。しかし、同じ応力比においても H/s の値はかなりばらついているので、応力比を正確に判断するには数十個のデータが必要であると考えられる。

3・2 ストライエーションの高さ／ストライエーションの幅 (H/s) に及ぼす R の影響

本研究では、まず全体の傾向を把握するために試料数

を約 100 個程度取り、その値のばらつきの傾向を調べた。その結果は先に述べたようにかなりばらつきがある (Fig. 9)。また、 H/s の値が小さいストライエーションの測定精度が低下することは否定できない。そこで、 H/s の値が大きい方が測定も容易であり、精度も良いことを考慮して、 H/s の測定値約 100 個から大きい方のデータ 20 個を抽出したものの平均値を比較してみた。

Table III に、その結果を数値で示し、Fig. 10 に数値をプロットしたものを示す。

この図で明らかのように、2017-T4Al 合金、SUS304 および高マンガン鋼の H/s の値に及ぼす応力比 R の影響はほとんど等しく、材料による差は認められない。このことは本法の応用上極めて重要である。また、 H/s の値は前報で得られた値とほぼ一致していることがわかる。

本法の結果は、前法の結果からばらつきを解消したものと解釈できる。また、3つの材料の一致の傾向も見られるので、本法の方法が実用的には信頼が高いものと考えられる。 H/s の値が大きい方がストライエーションであるとの判断がしやすく、測定も容易であるので、上記のように測定データ 100 個程度のうち上位 20 データを比較する方法は主観が入りにくく実用上有効である。

材料が 3 種類の結果であるから、このことから一般的

Fig. 8. Sectioning of striations on High Mn Steel by the improved method (ΔK : $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Table III. Average values of H/s (striation height and width ratio) obtained by the upper 20 of 100 data.

R	$R=-1$	$R=0$	$R=0.3$	$R=0.5$
Material				
2017 Al alloy	0.14	0.20	0.23	0.28
SUS304	0.14	0.20	0.25	0.29
High Mn steel	0.16	0.21	0.23	0.28

な結論を導くことはまだ危険かもしれないが, Table III と Fig. 10 の結果は, 材質がかなり変化しても H/s と R の関係が変わらないことをかなりの確度で示唆するもので, 実用的には極めて重要な意味を持っていると考える。

4 結 言

疲労破面の状態から実働荷重を推定することは, 破壊の原因や破壊事故時の状況などを知るうえで實際上重要な意味をもっている。き裂伝ば速度 da/dN またはストライエーション幅 s と応力拡大係数幅 ΔK との関係は寿命推定においてよく用いられるが, 応力比 R はその関係に決定的な影響を及ぼす。しかし, これまでは R を疲労破面から推定するのは困難とされてきた。本研究では, 前報に引続きストライエーション形状から実働荷

重を推定する一つの方法を提案した。それはストライエーションの幅がき裂伝ば速度と対応し, ストライエーションの高さと幅の比が応力比 R と一義的な関係にあることに注目したものである。

得られた結論をまとめると次のようになる。

(1) Al 合金などのように軟らかい金属だけでなく SUS304 および高マンガン鋼に対しても, 樹脂に埋め込まずに直接マイクロームにより明瞭な SEM 観察用断面を作成することが可能である。本報ではその具体的方法を示した。この方法によれば, 同一試験片からの有効測定数 (ストライエーションの高さ H /幅 s) を約 100 個と大幅に増やすことができ, 前報の方法より測定精度および信頼性が向上する。

(2) H/s の大きい方が測定も容易で正確であるので, 100 個程度のデータのうち上位 20 データだけを選んでその平均値から応力比 R の決定を行うのが具体的に有効な方法として推薦できる。

2017-T4Al 合金, SUS304 および高マンガン鋼において, いずれの応力比 R ($=-1, 0, 0.3, 0.5$) の場合でも H/s のデータ 100 例中上位 20 個の平均値は材料によらない値となる。

(3) 本研究で使用した材料は 3 種類だけであるが, 2017-T4Al 合金, SUS304, 高マンガン鋼では機械的性

Fig. 9. Distribution of H/s obtained from the fracture surface of 2017-T4 Al alloy, SUS304 and High Mn steel under various stress ratios.

Fig. 10. Relationship between stress ratio R and H/s (striation height and width ratio) obtained by the upper 20 of 100 data (Dotted line indicated the scatter band of measurement by the previous method).

質は大きく異なるから、本研究の結論は材質が変化しても H/s と R の関係が変わらないことを示唆するもので、疲労破面から実働荷重を推定する際、実用的に重要な意味をもつものと考ええる。

(平成6年11月24日 日本材料学会第22回疲労シンポジウムにて講演)

参考文献

- 1) 日本機械学会フラクトグラフィ分科会報告, 日本機械学会誌, **76**, 1203 (1973).
- 2) 小寺沢良一, 材料, **23**, 803 (1974).
- 3) A. Madeyski and L. Albertin, ASTM STP645, B. M. Strauss and W. H. Cullen Jr., 73 (1978).
- 4) 橋内良雄, 材料, **32**, 355 (1983).
- 5) 橋内良雄, 前田 豊, 材料, **36**, 431 (1987).
- 6) J. C. McMillan and R. M. N. Pelloux, ASTM STP415, 505 (1967).
- 7) 小寺沢良一, 材料, **23**, 593 (1974).
- 8) 小寺沢良一, 本上 勉, 材料, **23**, 730 (1974).
- 9) A. J. Krasowsky and V. A. Stepanenko, Int. J. Fract., **15**, 203 (1979).
- 10) R. W. Herzberg and E. F. Von Euw, Metallurgical Transactions, **4**, 887 (1973).
- 11) 北川英夫, 小寺沢良一, “フラクトグラフィ”, p. 112 (1977) 培風館.
- 12) 村上敬宜, 古川勝明, 白石暢彦, 材料, **39**, 443 (1990).
- 13) 村上敬宜, 金縄勝幸, 古川勝明, 西田新一, 白石暢彦, 材料, **40**, 706 (1991).
- 14) C. Laird, ASTM STP415, 131 (1967).
- 15) R. M. N. Pelloux, Engng. Frac. Mech., **1**, 697 (1970).
- 16) C. G. Bowles and D. Broek, Int. J. Fract. Mech., **8**, 75 (1972).