き裂伝ば速度のばらつきと微小き裂伝ば則の関係[†]

後藤 真 宏* 皮籠石 紀 雄** 西 谷 弘 信***
宮 川 浩 臣**** 尾 田 安 司*****

Relation Between Scatter in Crack Growth Rate and Small Crack Growth Law

by

Masahiro GOTO*, Norio KAWAGOISHI**, Hironobu NISITANI***

Hiroomi MIYAGAWA**** and Yasuji ODA*****

In order to investigate the scatter characteristic of growth rate for small cracks, rotating bending fatigue tests of smooth specimens were carried out using a normalized 0.21% carbon steel. Fifteen specimens were fatigued at each stress range, and the growth rate of major cracks was calculated from the smoothed growth curve for all the specimens. The growth rate obtained was analyzed statistically. The results show that the growth rate for each crack length can be expressed by three- or two-parameter Weibull distribution. The CV, coefficient of variance, for crack growth rate distribution was calculated, and by using the CV the scatter characteristic of growth rate was investigated. Furthermore, the relation between the average growth rate calculated from the smoothed growth curve and the real growth rate determined from the raw growth data was studied, and the applicability of small crack growth law to the microstructurally small crack was discussed.

Key words: Fatigue, Crack growth rate, Small crack growth law, Statistical treatment, Weibull distribution, Microstructure, Carbon steel

1 緒 言

過酷な条件のもとで使用される機械・構造物では、疲労寿命を予測しその信頼性を定量化することが設計上重要である。平滑材では、一般に疲労寿命の大部分が微小き裂の伝ば寿命で占められるので、疲労寿命を予測するには微小き裂の伝ば挙動を把握する必要がある。一方、疲労寿命は通常大きくばらつくことが知られており、このことは微小き裂の伝ば寿命が大きくばらつくことと対応している。微小き裂の伝ば挙動で特にばらつきが大きいのは、微視組織に影響される領域(き裂が特に小さい領域)^{1)~8)}においてである。微小き裂の挙動を考察する際、力学的因子に支配される力学的微小き裂と組織的因子に支配される微視組織的微小き裂とに分けることがあるが、本研究でも平均結晶粒径の10倍程度以下(約0.2 mm以下)を微視組織的微小き裂とみなし、その挙動を詳細に検討する。これによって微視組織的微小き裂のばらつき特性が明らかになり、したがって力学的微小き裂を含めた微小き裂全体のばらつきが分かり、最終的に疲労寿命そのもの

のばらつき特性が分かることになる。要するに本研究は、疲労寿命のばらつき特性に対して重要な役割を果たしている、微視組織的微小き裂の伝ば速度のばらつき特性を詳細に検討し、それによって疲労寿命そのもののばらつき特性を明らかにし、疲労寿命予測の信頼性を定量化するための根拠を与えようとするものである。

以上の目的のため、本研究ではS20C平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして、各応力ごとに15本の試験片を破断させ、主き裂(破断に導いた最大寸法のき裂)の伝ば速度を測定した。ワイブル分布による統計処理結果に基づいて微小き裂伝ば速度のばらつき特性の検討を行い、それらデータの微小き裂伝ば則による整理を行った。また、微視組織との関係からき裂伝ば速度の変動を調べ、それと微小き裂伝ば則の関係調べた。比較的長い寸法のき裂では、これまでもパリス則の定数のばらつきを調べた研究、さらにそれに基づいた伝ば寿命の分布特性の推定等が行われている。⁹⁾

† 原稿受理 平成5年11月8日 Received Nov. 8, 1993

* 正 会 員 大分大学工学部生産システム工学科 〒870-11 大分市旦野原, Dept. of Production Systems Eng., Oita Univ., Dannoharu, Oita, 870-11

** 正 会 員 鹿児島大学工学部機械工学科 〒890 鹿児島市郡元, Dept. of Mech. Eng., Kagoshima Univ., Koorimoto, Kagoshima, 890

*** 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. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

**** 大分大学工学部生産システム工学科 〒870-11 大分市旦野原, Dept. of Production Systems Eng., Oita Univ., Dannoharu, Oita, 870-11

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

2 材料・試験片および実験方法

素材は, Table I に示す化学成分をもつ市販の S20C 圧延丸棒 (直径約 22 mm) である. それを 885 °C (1 hr) で焼ならしてから試験片を製作した. Table II に熱処理後の機械的性質を, Fig. 1 に組織写真をそれぞれ示す (本材料のフェライト粒径 d は, 約 25 μm である).

Table I. Chemical composition (wt. %).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.21	0.21	0.47	0.014	0.017	0.21	0.06	0.09

Table II. Mechanical property.

(MPa)			(%)	Hv*
σ_{B1}	σ_{B}	σ_{T}	ϕ	
324	498	978	63.2	146

* Vickers hardness (Load: 9.8N).

Fig. 1. Microstructure of the material.

Fig. 2 に試験片形状を示す. (a) は伝ば速度のばらつき特性を調べた試験片, (b) は, 主き裂の伝ば速度の変動を微視組織との関係から調べるために用いた試験片である. (b) の中央部表面には (c) に示す浅い部分切欠きが加工してある. いずれも試験片製作後, 600°C (1 hr 保持) の応力除去焼なましを行い, さらに電解研磨により表面を直径で約 50 μm 程度取除いてから実験を行った.

使用した試験機は, 小野式回転曲げ疲労試験機 (容量: 14.7 Nm, 回転速度: 50 Hz) である. 表面の疲労被害の観察およびき裂長さの測定はレプリカ法により金属顕微鏡 ($\times 400$) にて行った. き裂長さ ℓ は試験片表面の円周方向の長さを取り, 応力 σ_a は最小断面部の公称曲げ応力振幅である.

3 実験結果および考察

3.1 き裂伝ば速度のばらつき特性

ここでは, 微小き裂の伝ば速度のばらつき特性を検討するために, 疲労限度 σ_w の約 6 % 増しおよび約

Fig. 2. Shape of the specimens (in mm).

22 % 増しの応力のもとで疲労試験を行った. 試験片は Fig. 2 (a) に示すものを使用した. 各応力ごとに 15 本の試験片を破断させ, すべての試験片表面に発生した主き裂の発生・伝ば挙動を調べた.

Fig. 3 に, $S-N$ 曲線を示す. 図中の曲線はそれぞれの応力下の平均寿命を通して引いたものである. 疲労寿命 N_f のばらつきは応力が疲労限度に近づくにつれ大きくなる傾向にある. また, 疲労限度 σ_w は

Fig. 3. $S-N$ curve for specimens shown in Fig. 2 (a).

(a) Case of $\sigma_a = 260$ MPa. (b) Case of $\sigma_a = 300$ MPa.

Fig. 4. Crack propagation curves.

245 MPa であり、 σ_w を 10^7 回繰返した後の表面には複数個の微視的停留き裂が認められ、その中で最大のものは $\ell = 60 \mu\text{m}$ であった。

Fig. 4 にき裂伝ば曲線を示す。これから分かるように、き裂伝ば曲線のばらつきはき裂長さ 0.2 mm までの範囲で特に大きく、その後の伝ば曲線のばらつきはそれほど大きくない。このときの 0.2 mm は結晶粒径の約 8 倍である。伝ば曲線のばらつきが結晶粒径の 8 倍程度以下のき裂長さの範囲で特に大きいことは、フェライト粒径を変えた他の実験でも認められた⁶⁾。

Fig. 5 に、平均的き裂伝ば曲線 (Fig. 4 に示したき裂伝ば曲線の各プロット点を平均的に通る滑らかな曲線で近似したもの) から求めたき裂伝ば速度とフェライト粒径 d を基準としたき裂長さとの関係を示す。以後、平均的き裂伝ば曲線から求めたき裂伝ば速度を平均的き裂伝ば速度 $\overline{d\ell/dN}$ と呼ぶ。ここで $d\ell/dN$ を測定したき裂長さ ℓ は、 $\ell = 4d, 8d, 12d$ および $18d$ である。図の実線は各き裂長さにおける伝ば速度の平均値を通るように引いている。いずれの場合も、 $\overline{d\ell/dN}$ のばらつきは応力が小さくき裂が短い程大きい。例えば、 $\ell = 4d$ の場合、小応力下 ($\sigma_a \approx 1.06\sigma_w$) では最大と最小の $\overline{d\ell/dN}$ は 10 倍程度異なる。

Fig. 5. $\overline{d\ell/dN}$ versus crack length, represented by ferrite grain size, relation.

以下では伝ば速度のばらつきの定量的評価を行うため、まずき裂伝ば速度の統計的性質を明らかにする。

疲労寿命やき裂伝ば速度の統計的性質について調べた研究は数多く、対数正規分布やワイブル分布がよく適合することが示されている⁶⁾⁻¹⁵⁾。対数正規分布関数および 3 母数ワイブル分布関数はそれぞれ次式で定義される。

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi} s \xi} \exp\left\{-\left(\frac{\ln \xi - \mu}{2s^2}\right)^2\right\} d\xi \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x - \gamma}{\eta}\right)^m\right\} \quad (2)$$

本研究では主としてワイブル分布による整理を行い、微視的き裂の伝ば速度のばらつき特性を検討する。なお、式 (2) の m, η, γ はそれぞれ形状母数、尺度母数および位置母数である。これら母数の決定は相関係数法により行った。

Fig. 6 に、 $\sigma_a \approx 1.06\sigma_w$ における平均的き裂伝ば速度をワイブル確率紙にプロットしたものを示す。平均的き裂伝ば速度は、き裂長さが小さい場合は近似的に 2 母数ワイブル分布 ($\gamma = 0$) で整理される傾向にあるが、ある程度長いき裂 ($\ell > 8d$) では 3 母数ワイブル分布でないと整理できない。

Fig. 6. Weibull plot for $\overline{d\ell/dN}$ at each constant crack length.

Fig. 7. Log-normal plot for $d\ell/dN$.

Fig. 7 に, Fig. 6 を対数正規確率紙に整理し直したものを示す。 $d\ell/dN$ の分布は対数正規分布にも十分適合しているが, Fig. 6 と比較すればワイブル分布の方が適合度が多少良いようである。

つぎに, 変動係数 $CV (=s/\mu, s: \text{標準偏差}, \mu: \text{平均値})$ を用いて, 平均的き裂伝ば速度のばらつき特性の検討を行う。

Fig. 8 は, 平均的き裂伝ば速度分布の変動係数と粒径を基準としたき裂長さの関係を調べたものである。いずれの場合もき裂長さの増加とともに CV は減少し, 応力の小さい方が減少の程度は大きい。また, き裂長さが大きくなれば CV は飽和する傾向が認められ, そのときの CV の値は約 0.3 である。 $d\ell/dN$ の CV の値がき裂長さの大きい範囲で 0.3 に漸近する傾向は, 焼なまし材¹⁷⁾や調質材⁸⁾でも得られている。き裂伝ば初期におけるき裂伝ば速度のばらつきは, 主として微視組織に起因している。平均的き裂伝ば曲線から求めた伝ば速度が大きくばらつくき裂長さは応力レベルにより異なり, $\sigma_a = 260 \text{ MPa} (\cong 1.06\sigma_w)$ では結晶粒径の 12 倍程度, $\sigma_a = 300 \text{ MPa} (\cong 1.22\sigma_w)$ では 5 倍程度であると思われる。

Fig. 8. CV versus ℓ/d relation.

Table III. Weibull parameter and statistical distribution data.

σ_a (MPa)	ℓ	m	$\times 10^{-6} (\text{mm/c})$			CV	R
			η	γ	μ		
260	4d	1.55	0.63	0.00	0.57	0.658	0.981
	8d	1.15	0.89	0.39	1.24	0.602	0.984
	12d	1.70	1.49	0.94	2.27	0.357	0.990
	18d	1.37	1.80	2.51	4.16	0.285	0.926
300	4d	2.77	3.08	0.00	2.73	0.391	0.985
	8d	1.78	4.13	2.19	5.86	0.365	0.985
	12d	1.21	5.43	4.82	9.92	0.423	0.991
	18d	3.15	19.65	0.01	17.59	0.333	0.977

Table III に, 平均的き裂伝ば速度分布におけるワイブル 3 母数 m, η, γ と各種統計量 μ, CV, R (R : 相関係数) の値を示す。

3・2 き裂伝ば速度の変動と微小き裂伝ば則

つぎに, 主き裂の伝ば挙動と組織との関係をき裂発生段階から詳細に調べるため, 浅い部分切欠きを有する試験片 (Fig. 2(b)) を用いて実験を行った。

Fig. 9 に, き裂伝ば速度 $d\ell_1/dN, d\ell_2/dN$ とき裂発生点を原点としたき裂長さ ℓ_1, ℓ_2 の関係を示す。図には, き裂成長経路と結晶粒界との位置関係を明らかにするためのスケッチも示している。き裂が短いときに起こる伝ば速度の停滞は, き裂が粒界およびパーライトに達したときに起こっており, き裂伝ば速度の変動が微視組織に起因した現象であることが分かる。

Fig. 9. Influence of microstructure on crack growth.

Fig. 10. Crack growth rate dl/dN , measured value, and dl/dN , average value, versus l relation.

しかし、き裂がある程度大きくなれば、伝ば速度の急激な低下は見られなくなり安定的な成長を示す。

Fig. 10 に、き裂寸法の大きいところも含めたき裂伝ば過程の全域におけるき裂伝ば速度とき裂長さの関係を示す。図中○印が実測値を基に求めたき裂伝ば速度 dl/dN である。点線は、実測値を平均的に通るように引いた滑らかな伝ば曲線から求めた平均的き裂伝ば速度 $\overline{dl/dN}$ を示す。 $\overline{dl/dN} > 10^{-6}$ mm/c の範囲では、 $\overline{dl/dN} \propto l$ の関係が成り立つ。また、この平均的き裂伝ば速度は、伝ば挙動が主として力学的因子により支配され伝ば速度の変動の小さい小穴材の結果を、き裂長さの小さい領域まで外挿した値とはほぼ一致する。このことは、実際の伝ば速度が粒界や相境界において大きく変動する微視的オーダーのき裂でも、平均的伝ば速度を用いれば、それが 10^{-6} mm/c を十分越える範囲では、 $\overline{dl/dN}$ はき裂長さに比例し、微小き裂伝ば則^{18), 19)}

$$\frac{dl}{dN} = C_1 \sigma_a^n l \quad (3)$$

により評価できることを意味する。

Fig. 5 に示した各き裂長さに対する $\overline{dl/dN}$ の 15 本の試験片における平均値 $\overline{dl/dN}$ を、材質の影響を一部考慮した微小き裂伝ば則^{20)~22)}

$$\frac{dl}{dN} = C_3 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_B} \right)^n l \quad (4)$$

Fig. 11. dl/dN versus $(\sigma_a/\sigma_B)^n l$ relation for cracks with dimension of order of the microstructure ($l=4d \sim 18d$).

により整理したものを Fig. 11 に示す (σ_B : 引張強さ)。ここで、伝ば則の定数 n の値 ($n=9.17$) は炭素鋼焼ならし材で既に得られている次式により決定した。^{20), 21)}

$$n = -7.9 \times 10^{-3} \sigma_B + 13.1 \quad (5)$$

多少のばらつきは認められるが、 $\overline{dl/dN} > 10^{-6}$ mm/c であれば $\overline{dl/dN}$ は式 (4) により整理できる。 $\overline{dl/dN} < 10^{-6}$ mm/c では大規模降伏条件下でも、既に報告したように微小き裂伝ば則成立の前提であるき裂先端の開口比一定の条件が満足され難くなるので、式 (4) による整理は意味をもたなくなる。先に、平滑材の微小き裂の $\overline{dl/dN}-l$ 関係が、試験片ごとにばらつきは大きいものの長いき裂の $dl/dN-l$ 関係のほぼ延長上にあると見なせることを示した。⁵⁾ 図には、点線で伝ば挙動が主として力学的因子により支配される小穴材から得られた微小き裂の $dl/dN-(\sigma_a/\sigma_B)^n l$ 関係 ($l > 0.3$ mm) を示す。任意の長さにおける 15 本の主き裂の $\overline{dl/dN}$ の平均値 $\overline{dl/dN}$ を式 (4) で整理したものは、 $\overline{dl/dN} > 10^{-6}$ mm/c であれば長いき裂の関係とはほぼ重なる。すなわち、長いき裂の $dl/dN-(\sigma_a/\sigma_B)^n l$ 関係から微視的き裂の $\overline{dl/dN}$ を評価できる。

以上のように、微視組織オーダーのき裂の伝ば寿命は、組織の影響のより刻々と大きく変動する実際の伝ば速度を考慮しなくても、長いき裂 (力学的因子により支配されるき裂) の $dl/dN-l$ 関係の延長上にある平均的伝ば速度を用いることによりほぼ評価できる。したがって、平均的伝ば曲線から測定した伝ば速度のばらつき特性を検討する意味は大きい。

4 結 論

微小き裂の伝ば速度のばらつきと微小き裂伝ば則の

関係を検討するため, S20C 平滑材の回転曲げ疲労試験を行った。そして, 各応力ごとに 15 本の試験片を破断させ, すべての試験片について主き裂の平均的き裂伝ば速度 $d\ell/dN$ (き裂伝ば曲線のプロット点を平均的に通るように引いた滑らかな伝ば曲線から測定した伝ば速度) を求めた。また, 伝ば挙動と微視組織との関係を調べる実験も行った。以下に得られた主な結論を示す。

(1) き裂伝ば速度のばらつきは大きく, 応力が小さい程またき裂長さが短い程ばらつきは大きい。

(2) それぞれのき裂長さにおける $d\ell/dN$ は, き裂が特に短い場合は 2 母数, ある程度長いき裂では 3 母数ワイブル分布により整理される。

(3) $d\ell/dN$ の変動係数 CV の値は応力が大きい程, き裂が長い程小さく, き裂長さがある程度長くなれば $CV=0.3$ に漸近する傾向にある。また, CV が 0.3 に漸近するときのき裂長さは, 応力が大きい程短い。

(4) 任意のき裂長さにおける $d\ell/dN$ の平均値 $\overline{d\ell/dN}$ を微小き裂伝ば則により整理したものは, $d\ell/dN > 10^{-6} \text{ mm/c}$ であれば長いき裂の $d\ell/dN - (\sigma_a/\sigma_B)^m \ell$ 関係とほぼ一致する。すなわち, 長いき裂の結果から微視的き裂の $d\ell/dN$ を評価できる。

(5) 微視的き裂の伝ば寿命は, 組織の影響を受け刻々と大きく変動する実際の伝ば速度を考慮しなくても, 長いき裂の $d\ell/dN - \ell$ 関係の延長上にある平均的き裂伝ば速度を用いることによりほぼ評価できる。このことは, 平均的き裂伝ば曲線から測定した伝ば速度のばらつき特性を検討することの重要性を示唆している。

(平成 6 年 5 月 24 日 日本材料学会第 43 期学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 戸梶恵郎, 小川武史, 原田行雄, 安藤善司, 材料, **34**, 1160 (1985).
- 2) K. Tanaka, Y. Akiniwa and E. Matsui, Fatigue-87, 361 (1987).
- 3) 田中啓介, 日本機械学会論文集, A-54, 1 (1988).
- 4) 佐々木茂美, 越智保雄, 石井 明, 安部浩文, 日本機械学会論文集, A-54, 426 (1988).
- 5) 皮籠石紀雄, 西谷弘信, 豊廣利信, 日本機械学会論文集, A-57, 1043 (1991).
- 6) M. Goto, Fatigue Eng. Mat. Struct., **15**, 953 (1992).
- 7) 後藤真宏, 福島 茂, 西谷弘信, 材料, **41**, 1449 (1992).
- 8) M. Goto, Fatigue Eng. Mat. Struct., **16**, 795 (1993).
- 9) 材料強度確率モデル研究会, “材料強度の統計的性質”, 108 (1992) 養賢堂
- 10) 田中道七, 藤井 勉, 材料, **25**, 909 (1976).
- 11) 酒井達雄, 安井秀明, 田中道七, 材料, **36**, 915 (1987).
- 12) 戸梶恵郎, 安藤善司, 杉本幹哉, 中野典彦, 材料, **30**, 15 (1981).
- 13) 越智保雄, 佐々木茂美, 平沢泰治, 材料, **31**, 559 (1981).
- 14) 権 在 度, 中曾根祐司, 北川英夫, 材料, **36**, 927 (1987).
- 15) 後藤真宏, 三浦篤義, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-59, 1413 (1993).
- 16) 酒井達雄, 田中道七, 材料, **29**, 17 (1980).
- 17) 後藤真宏, 西谷弘信, 皮籠石紀雄, 宮川浩臣, 尾田安司, 日本機械学会論文集, A-60, 17 (1994).
- 18) H. Nisitani, Mechanics of Fatigue-AMD, **47**, 151, ASME (1981).
- 19) H. Nisitani and M. Goto, The Behaviour of Short Fatigue Cracks, EGF-1 (edited by K. J. Miller and E. R. de los Rios), 461 (1986).
- 20) 後藤真宏, 西谷弘信, 日本機械学会論文集, A-56, 1938 (1990).
- 21) H. Nisitani, M. Goto and N. Kawagoshi, Eng. Fract. Mech., **41**, 499 (1992).
- 22) M. Goto and H. Nisitani, Fatigue Eng. Mat. Struct., **17**, 171 (1994).