S 50 C 焼入れ・焼もどし材における Paris 則の有効性*
(回転曲げによる検討)

西 谷 弘 信**, 後 藤 真 宏***

The Validity of Paris's Rule for a Heat-Treated 0.54% C Steel
Specimen under Rotating Bending Fatigue

by Hironobu NISITANI and Masahiro GOTO

Although many papers have suggested that the growth rate of small cracks can not be determined by linear fracture mechanics, there are a few reports indicating that linear fracture mechanics can be approximately applied to determine small crack propagation. In the hard materials, it seems to be easy to satisfy the condition of small scale yielding. This means that the growth rate of small cracks in such materials can be approximately expressed as a function of the stress intensity factor. In this paper, using a heat-treated 0.54 % C steel, the rotating bending fatigue tests of plain specimens with a small hole are carried out under a wide range of stress amplitudes, and the validity of Paris's rule is investigated.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Carbon Steel, Heat-Treatment, Plain Specimen, Small Crack, Crack Growth Law, Stress Intensity Factor

1. 緒 言

小規模降伏の条件が満たされ難い微小き裂の問題は、線形破壊力学による取扱いが困難となることを指摘した研究は数多くある⁽¹⁾。一方、Paris 則⁽²⁾が従来適用対象外と考えられた小さなき裂の成長特性に関しても、ある程度適用できることを示唆する研究⁽³⁾もある。

著者らは、先に S 45 C 焼なまし材の両振り引張圧縮試験⁽⁴⁾において、応力が相対的に小さければ ($\sigma_a/\sigma_s \leq 0.5$, σ_a : 応力振幅, σ_s : 降伏応力),

$$\frac{dl}{dN} = C \Delta K^m \dots \dots \dots (1)$$

が成り立ち ($m \cong 4$), 応力が相対的に大きければ ($\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$) ΔK では整理されず,

$$\frac{dl}{dN} = C_1 \sigma_a^n l \dots \dots \dots (2)$$

の関係^{(5)~(7)}が成り立つ ($n \cong 8$, l : き裂長さ) ことを示した。 n の値は、焼なまし材では一般に 7.5~8.5 程度である⁽⁸⁾。

一方、き裂閉口現象⁽⁹⁾が起こり難い硬い材料では、式(1)における m の値が 2 に近い傾向にあることを示す研究⁽¹⁰⁾もある。さらに、このような材料では、式(2)の n が小さくなる⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。式(1), 式(2)で $m=2$, $n=2$ であれば両者の間に形式上の矛盾はなくなる。

これらのことから、高硬さ鋼では焼なまし材のように式(1), 式(2)を応力レベルによって使い分ける意味が不明りようとなり、Paris 則⁽²⁾だけで整理するほうが実用的とも考えられる。したがって、高硬さ鋼において小規模降伏が成り立つ範囲から、成り立たない範囲までの伝ば挙動を式(1)によって評価し、その有効性を定量的に検討することは有益であると思われるが、そのような例はほとんど認められない。

本研究では、以上の点を考慮して S 50 C 焼入れ・焼もどし材(平滑材)の回転曲げ疲労試験を行い、高硬さ鋼の全長 2 mm 以下の表面き裂についてき裂伝ば則を広い範囲の応力のもとで調べ、Paris 則の有効性の検討を行った。

2. 使用材料, 試験片および実験方法

素材は市販の S 50 C 圧延丸棒(直径約 22 mm)である。それを直径約 11 mm に施削後 830°C で焼ならし、810°C で焼入れ、480°C で焼もどした後試験片を製

* 昭和 60 年 12 月 4 日 第 935 回講演会において講演、原稿受付 昭和 60 年 4 月 30 日。

** 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員、大分大学工学部 (〒870-11 大分市旦野原 700)。

作した。本材料の化学成分および熱処理後の機械的性質を表 1, 表 2 にそれぞれ示す。図 1 に試験片形状を示す。試験片製作後表面を直径で約 40 μm 程度電解研磨により取り除き、試験片最小断面部(直径 5 mm の部分)表面に図 2 に示す形状の微小穴(穴径・穴深さともに 0.1 mm)をあけ実験を行った。

用いた試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量: 14.7 N $\cdot$ m)で、回転数は毎分約 3 000 回転である。

き裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカについて金属顕微鏡($\times 400$)により行った。き裂長さとしては、穴径を含む試験片表面の円周方向の長さを取り、応力は微小穴の存在を無視した試験片最小断面部における公称応力で表した。また、以下では σ_a で応力振幅を、 $\Delta\sigma (=2\sigma_a)$ で応力幅を表す。

3. 実験結果および考察

3.1 焼入れ・焼もどし材の微小き裂伝ば特性 ここでは、微小穴材の結果を中心に示し、必要に応じて予き裂材($\sigma_a=350$ MPa)の結果も含め、 $0.3 \leq \sigma_a/\sigma_s \leq 0.9$ (σ_s : 0.2% 耐力 $\sigma_{0.2}$)の広い応力レベルのもと

表 1 化学成分(wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ni+Cr
0.54	0.28	0.77	0.017	0.016	0.06	0.017	0.07

表 2 熱処理後の機械的性質

MPa			%		H _V
$\sigma_{0.2}$	σ_B	σ_T	ψ		
1161	1243	1225	52.8		382

$\sigma_{0.2}$: Proof stress, σ_B : Ultimate tensile strength
 σ_T : Actual breaking strength, ψ : Reduction of area
 H_V : Vickers hardness measured on the specimen surface of 5.5 mm in diameter after electro-polishing (Load is 9.8 N)

図 1 試験片の形状および寸法(中央部表面に図 2 に示す直径・深さともに 0.1 mm の微小穴を有する)

で、疲労寿命の大部分を占める微小き裂の伝ば挙動を検討する。

図 3 に微小穴材の S-N 曲線を示す。図中●印は、本実験と同じ材料の平滑材(浅い部分切欠きを有するが実質的には平滑材とみなせる)の結果⁽¹²⁾である。有限寿命域において、両者の S-N 曲線は応力が小さくなるにつれ多少離れる傾向にはあるが、全体としてみればほぼ一致している。しかしながら、疲労限度の応力には大きな差が認められ、微小穴材の疲労限度は平滑材より 20% 程度小さい。

図 4 にき裂伝ば曲線を示す。図 5 は、図 4 をき裂長さの対数 $\log l$ と破断繰返し数 N_f を基準とした相対繰返し数 N/N_f の関係に書き直したものである。これより、0.1 mm の微小穴材の場合でも 1 mm 以下の微小き裂の伝ばがかなりの部分(60~70%)を占めていることがわかる。また、 $\log l-N/N_f$ の関係は応力レベルに依存し、 $\Delta\sigma \geq 1400$ MPa($\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$)の範囲では $\Delta\sigma$ に無関係にいずれの場合もほぼ 1 本の直線で近似できるが、応力が小さければ下に凸の曲線となる。これは、き裂伝ば速度のき裂長さ依存性が応力レベルにより異なることを意味する。

き裂伝ば曲線から求めたき裂伝ば速度 dl/dN のき裂長さ依存性を 1 mm 以下のき裂について調べたところ、 $\Delta\sigma \geq 1400$ MPa($\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$)の範囲では、いずれの場合も両者の関係は傾き 1 の直線で表せ、 dl/dN

図 2 穴形状および寸法

図 3 微小穴材の S-N 曲線(比較のため部分切欠材⁽¹²⁾の結果を●印で示す)

$\propto l$ の関係が成り立つが、応力が小さくなるにつれ直線の傾きは大きくなり、 $\Delta\sigma \leq 900 \text{ MPa} (\sigma_a/\sigma_s \leq 0.4)$ の範囲では $dl/dN \propto l^2$ の関係が成り立つようになる。

一方、 $dl/dN \propto l$ の関係が成り立つ $\Delta\sigma \geq 1400 \text{ MPa}$ の範囲について dl/dN の応力振幅依存性を調べたところ、き裂長さ一定のもとではき裂長さに無関係に $dl/dN \propto \sigma_a^n$ の関係が成り立ち、 n の値は本材料では約 5 である。すなわち、 $\Delta\sigma \geq 1400 \text{ MPa} (\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6)$ の範囲ではき裂伝ば則として $dl/dN \propto \sigma_a^5 l$ が成り立つことになる。

図 6 (a) に $dl/dN - \sigma_a^5 l$ 関係を示す。応力が相対的に大きければ ($\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$)、 dl/dN は $\sigma_a^5 l$ により一義

的に決まる。応力が小さければ、 dl/dN は $\sigma_a^5 l$ では決まらない。

図 6 (b) は、 dl/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を両対数で示したものである。図 6 (a) で、 dl/dN が $\sigma_a^5 l$ により決まらない $\Delta\sigma \leq 900 \text{ MPa} (\sigma_a/\sigma_s \leq 0.4)$ の範囲は、 ΔK により dl/dN が一義的に決まる。このとき両者の関係は傾き $\cong 4$ の直線で表せ、本材料でも Paris⁽¹²⁾ による四乗則が近似的に成り立っている。回転曲げでは多くの材料でき裂面形状が材質・応力レベルにほとんど影響されず⁽¹³⁾、 $b/l \cong 0.4$ (b : き裂深さ) の関係⁽¹⁴⁾ がほぼ成り立つ。本研究の応力拡大係数は、この関係から任意の長さのき裂に対するき裂深さ

図 4 焼入れ・焼もどし材のき裂伝ば曲線 (微小穴材の回転曲げ)

図 5 き裂長さと破断寿命 N_f を基準とした相対繰返し数の関係

(a) $dl/dN - \sigma_a^5 l$ の関係 (応力が大きければ $\sigma_a^5 l$ で整理される)

(b) $dl/dN - \Delta K$ の関係 [(a) の $\sigma_a^5 l$ で整理されない範囲は ΔK で整理される]

図 6 焼入れ・焼もどし材の dl/dN と ΔK または $\sigma_a^5 l$ との関係 (σ_a : 応力振幅, $\Delta\sigma (=2\sigma_a)$: 応力幅, l : き裂長さ)

を決定し、さらに最近西谷らにより計算された丸棒の半円状表面き裂の引張り⁽¹⁵⁾および曲げ⁽¹⁶⁾の結果を用いて求めた。

以上のように、焼入れ・焼もどし材でも焼なまし材同様、小応力下 ($\sigma_a/\sigma_s \leq 0.4$) では式(1)、大応力下 ($\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$) では式(2)が成り立つ。

3.2 回転曲げと引張圧縮における応力レベルと伝ば則の比較 これまでにも、き裂伝ばに関する研究は種々な条件のもとで行われている。その中で、引張圧縮荷重による実験は数多いが、巨視的き裂（言い換えれば ΔK で整理される）に関する研究が大部分を占めている。一方、回転曲げ荷重のもとでは一般に ΔK による整理が困難な小さいき裂を対象としたものが多い。ここでは、公称応力で整理したとき回転曲げと引

張圧縮とで、式(1)、式(2)の適用範囲にどのような影響が現れるかを検討する。

図7、図8にそれぞれ先に報告した S 45 C 焼なまし平滑材（き裂の起点としての微小穴または予き裂をもつ）の回転曲げ⁽¹⁷⁾と両振り引張圧縮⁽⁴⁾の $dl/dN-\Delta K$ 関係および $dl/dN-\sigma_a^7 l$ 関係を示す。回転曲げと引張圧縮の小応力下と大応力下の位置関係は、式(1)、式(2)いずれの整理法でも全体として同様な傾向を示している〔図7(a)と図8(a)、図7(b)と図8(b)の比較〕。また、いずれの荷重形式の場合も近似的に $\sigma_a/\sigma_s \leq 0.5$ の範囲 (σ_s : 下降伏点 σ_{sl}) では式(1)が、 $\sigma_a/\sigma_s \geq 0.6$ の範囲では式(2)が成り立つ。すなわち、公称応力を用いているため絶対値は異なるが、両者の伝ば特性はほぼ同じと考えることができる。幅中ら⁽¹⁸⁾は、

(a) $dl/dN-\Delta K$ の関係

(b) $dl/dN-\sigma_a^{7.5} l$ の関係

図7 S 45 C 焼なまし材の回転曲げ⁽¹⁷⁾における $dl/dN-\Delta K$ および $dl/dN-\sigma_a^{7.5} l$ の関係

(a) $dl/dN-\Delta K$ の関係

(b) $dl/dN-\sigma_a^8 l$ の関係

図8 S 45 C 焼なまし材の両振り引張圧縮⁽⁴⁾における $dl/dN-\Delta K$ および $dl/dN-\sigma_a^8 l$ の関係

真応力で整理すれば、回転曲げ下の疲労寿命が両振り引張圧縮下のそれとほぼ一致することを指摘している。

なお、図 7, 8 におけるもう一つの重要な特徴は、正しい K 値⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾を用いれば $dl/dN-\Delta K$ 関係が引張圧縮と回転曲げとでほぼ一致することである。

3.3 Paris 則の有効性 小さいき裂を有限な速度(例えば、 10^{-6} mm/cycle 以上)で伝ばさせるためには、き裂を含む領域の応力を大きくせねばならず、必然的に小規模降伏の条件は成り立たなくなり、式(1)による整理は困難となる[図 7(a), 8(a)]。しかし、硬い材料では軟かい材料に比べて相対的に小規模降伏は満たされやすい。

北川ら⁽³⁾は、80 キロ級高張力鋼 HT 80 を用いて平滑試験片(き裂の起点としての微小穴を有する)の引張圧縮試験を行い、150 μ m 程度以上のき裂であれば dl/dN と ΔK とが両対数上でほぼ 1 本の直線で表すことができることを報告している(このとき、 $0.14 \leq \sigma_a/\sigma_s \leq 0.41$)。加藤ら⁽¹⁹⁾は、SCM 435 鋼焼入れ・焼もどし平滑材の回転曲げ試験を行い、 $0.54 \leq \sigma_a/\sigma_s \leq 0.67$ の範囲の dl/dN が ΔK によりほぼ整理できることを示している。

本実験の焼入れ・焼もどし材[図 6(b)]と先に行われた焼なまし材[図 7(a)]の $dl/dN-\Delta K$ 関係を同時に示したのが図 9 である。両者を比較すれば以下の

とおりである。

いま、1 mm 程度のき裂を 10^{-5} mm/cycle の速度で伝ばさせることを考える。そのときの σ_a/σ_s の値は、図 9 からわかるように、焼なまし材では 0.7 程度であるのに対し、焼入れ・焼もどし材では 0.4 以下である。一方、式(1)が成立するための σ_a/σ_s の上限値は両者でほぼ等しく約 0.5 である(表 3)。これらのことから、同じ速度で伝ばする同一寸法のき裂を対象とした場合、焼入れ・焼もどし材のほうが容易に小規模降伏の条件を満たすことがわかる。このために、一般に硬い材料においては、微小き裂の範囲まで ΔK による整理が可能となる。

図 9 からいえるもう一つのことは、焼入れ・焼もどし材では、小規模降伏の条件が満たされない範囲($\sigma_a/\sigma_s > 0.6$)においても、 dl/dN が ΔK と大体一対一に対応していることである。これは、焼入れ・焼もどし材において、式(1)の m と式(2)の n が似ていることによる($m \cong 4, n \cong 5$)。

以上二つの理由によって、硬い材料では多くの場合 dl/dN が広い範囲にわたって ΔK によってほぼ一意的に決まることになる。

表 3 に負荷形式・熱処理条件が異なる炭素鋼(S 45 C または S 50 C)の式(1)、式(2)の成立範囲を示す。いずれの場合も、 $\sigma_a \leq 0.5\sigma_s$ ($\sigma_s: \sigma_{sl}$ または $\sigma_{0.2}$) の範囲は式(1)、 $\sigma_a \geq 0.6\sigma_s$ の範囲は式(2)が成り立つ。ここでは、小規模降伏の条件が満足されるか否か(言い換えれば、 ΔK で整理できるか否か)を表現する手段として σ_{sl} または $\sigma_{0.2}$ を使用したが、実際には繰返し応力下の降伏応力を取るほうがより合理的と考えられる。しかし、表 3 の結果からそれが近似的に σ_{sl} または $\sigma_{0.2}$ で代用できるようである。

4. 結 論

S 50 C 焼入れ・焼もどし材の平滑試験片(表面にき

図 9 焼入れ・焼もどし材と焼なまし材⁽¹⁷⁾の回転曲げにおける $dl/dN-\Delta K$ 関係の比較

表 3 炭素鋼(S 45 C, S 50 C)の各種条件下における式(1)、式(2)の成立範囲

Material	Load σ_s MPa	Range of σ_a	
		Eq.(1) holds	Eq.(2) holds
S45C, Ref.(4) Annealed	T-C 364	$\leq 0.50\sigma_s$	$\geq 0.60\sigma_s$
S45C, Ref.(20) Pre-strained	T-C 550	$\leq 0.50\sigma_s$	$\geq 0.60\sigma_s$
S45C, Ref.(17) Annealed	R-B 364	$\leq 0.55\sigma_s$	$\geq 0.65\sigma_s$
S50C Heat-treated	R-B 1161	$\leq 0.45\sigma_s$	$\geq 0.60\sigma_s$

T-C: Tension compression, R-B: Rotating bending
 σ_s : Lower yield point (σ_{sl}) or Proof stress ($\sigma_{0.2}$)

裂の起点としての穴径・穴深さとも 0.1 mm の微小穴を有する)を用いて、回転曲げ試験を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 応力が相対的に小さければ、き裂伝ば則として式(1)すなわち $dl/dN = C\Delta K^m$ が成り立つ ($m \cong 4$)。応力が相対的に大きければ、式(2)すなわち $dl/dN = C_1\sigma_a^n l$ が成り立ち、本材料では $n \cong 5$ である。

(2) 回転曲げと両振り引張圧縮のき裂伝ば挙動を比較した結果、負荷形式の差はき裂伝ば特性に本質的な影響を与えないことが示された。

(3) (1)で示した二つの伝ば則を使用するのが本質的ではあるが、硬い材料では一般に微小き裂の伝ばに関してもある程度線形破壊力学が適用できる。これは、同一寸法のき裂を同一速度で伝ばさせるのに必要な応力の相対値 σ_a/σ_s が硬い材料ほど小さいこと、および硬い材料では m の値が n の値に近いことによる。

(4) 中炭素鋼では負荷形式(回転曲げ・引張圧縮)・熱処理に無関係に、 $\sigma_a \leq 0.5\sigma_s$ ($\sigma_s: \sigma_{sl}$ または $\sigma_{0.2}$) の範囲では式(1)が、 $\sigma_a \geq 0.6\sigma_s$ の範囲では式(2)がほぼ成り立ち、小規模降伏の条件を表現する手段として σ_{sl} , $\sigma_{0.2}$ が代用できる。

文 献

- (1) 例えば, Kobayashi, H. and Nakazawa, H., *Proc. Inter. Conf. Mech. Beha. Mat.*, II, (1972), 199; Kitagawa, H. ほか 3 名, *ASTM STP*, 675 (1979), 420; El Haddad, M. H., ほか 3 名, *Int. J. Fract.*, 16-1 (1980), 15.
- (2) Paris, P. C. and Erdogan, F., *Trans. ASME, Ser. D*, 85-4 (1963), 528.
- (3) 北川・高橋, 機論, 45-399, A (昭 54), 1289.
- (4) 西谷・ほか 2 名, 機論, 50-449, A (昭 59), 23.
- (5) 西谷・森光, 機論, 42-354 (昭 51), 325.
- (6) 広瀬・ほか 3 名, 機論, 45-400, A (昭 54), 1496.
- (7) Nisitani, H (Mura, T., 編), *Mechanics of Fatigue-AMD*, 47 (1981), 151, ASME.
- (8) 西谷・後藤, 機論, 51-462, A (昭 60), 332.
- (9) Elber, W., *Eng. Fract. Mech.*, 2-37 (1970), 37.
- (10) Gurney, T. R., *Weld. Inst. Res. Report*, E 18/12/68, (1968).
- (11) 西谷・皮龍石, 機論, No. 840-10 (昭 59-10), 186.
- (12) 西谷・後藤, 機論, 49-440, A (昭 58), 424.
- (13) 西谷・河野, 機論, No. 700-12 (昭 45-10), 41.
- (14) 西谷・皮龍石, 機論, 49-440, A (昭 58), 431.
- (15) 西谷・陳, 機論, 50-453, A (昭 59), 1077.
- (16) 未発表.
- (17) 西谷・後藤, 機論, 49-443, A (昭 58), 779.
- (18) 緒中・藤岡, 機論, 50-459, A (昭 59), 1795.
- (19) 加藤・ほか 2 名, 機論, 51-464, A (昭 60), 1161.
- (20) 西谷・後藤, 機論, 51-465, A (昭 60), 1430.