

平滑材表面の微小疲労き裂の発生・成長挙動の 破壊力学的研究(第1報)

Fracture Mechanics Approach to the Initiation and Propagation Behavior of
Micro-Fatigue-Cracks on Smooth Specimen (The First Report)

北川 英夫*・結城 良治*・徐 昌敏*
Hideo KITAGAWA, Ryoji YUUKI and Chang-Min SUH

1. ま え が き

各種の機器・構造物の疲労破壊防止を目的として、現在まで種々の観点からの金属材料の疲労現象に関する膨大な研究が蓄積されている。疲労現象を巨視的および力学的に取り扱った研究についても、大別すると平滑材の疲れ強さに着目した、いわゆる低サイクル疲労的アプローチとき裂材の疲労き裂成長挙動に着目した破壊力学的アプローチとに分類される。特に後者の研究は最近急速に進歩し、各種材料の貫通大き裂の成長挙動に関しては多数のデータが報告され、材料選択のみならず、構造物中に検出された欠陥の評価および残存寿命の予測などに適用され、成果を挙げつつある。¹⁾

しかし構造物中で検出され問題となるのは、微小表面き裂であり、しかもそれらが高密度で分布する場合が多く、さらに疲労寿命の大部分は、これらの微小表面き裂の成長過程に費やされることから、最近平滑材表面の微小き裂の成長²⁾や疲労き裂の初期成長に関する研究³⁾の重要性が認識されつつあるが、この種の研究は、実験技術上および解析上の困難から研究例が少なく、定量的評価法も確立していないのが現状であろう。

本研究は、平滑材表面に発生・成長する微小疲労き裂に着目し、その定量的解析を目的とするものである。本報ではその基礎的研究として、軟鋼平滑材の回転曲げ疲労実験を行い、試験片表面に発生・成長する多数の微小疲労き裂を詳細に観察し、き裂の分布密度、長さの分布、成長挙動などに関する基本特性を明らかにするとともに特に重要と思われる最大き裂の成長特性の定量的評価を試みたものである。微小表面き裂の成長速度の破壊力学的解析については次報以降順次報告する予定である。このような研究が成功裡に進めば、平滑材の低サイクル疲労概念と破壊力学的概念とを結合し、疲労現象を両側面から統一的に理解して、検査や寿命予測における諸問題の解決に一つの基礎を与えることができるかと思われる。

2. 供試材および試験方法

供試材は熱間圧延鋼板 SB-22 (A 材とする) (ボイラー用圧延鋼板と推定される) であり、これを 930°C で 60 時間加熱した後、炉冷を施した。その化学成分と静的引張試験により求めた機械的性質を表 1 に示す。熱処理を施した供試材の平均結晶粒径は 20 μ 程度 (ASTM 粒度番号 8) である。試験片は、上記熱処理の後、機械加工により成型し、その形状を図 1 に示す。試験片中央の平行部 (長さ 15 mm) は、機械加工後紙やすりで 2000[#] まで研磨し、酸化クロム粉末でバフ仕上げした後、粒界、すべり線および微小き裂の観察を容易にするため 5% 硝酸溶液で軽くエッチングしたが、この処理は疲労寿命に影響を与えないことを確認している。

疲労試験は小野式回転曲げ疲労試験機 (回転速度 1450 rpm) を用い、一定曲げモーメント負荷による両振り荷重制御疲労試験を実施した。本実験に際し、応力振幅-破断繰返し数特性 (S-N 曲線) を得るとともに各応

表 1 化学成分と機械的性質

Chemical composition, wt, %				
C	Mn	Si	P	S
0.20	0.65	0.373	0.021	0.026
Mechanical properties*				
yield point kg/mm ²	tensile strength kg/mm ²	elongation %	hardness Hv	
28.5	44.9	35.3	127	

* JIS 10 type tensile specimen

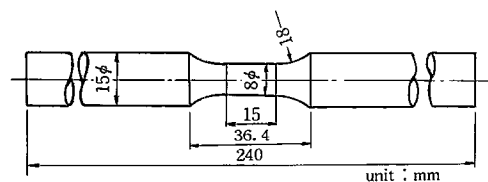


図 1 回転曲げ疲労試験片

* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研究速報

力レベル毎に試験片表面の微小き裂の観察を行った。

試験片表面の微小疲労き裂の観察は、疲労寿命 (N_f) の2~5%毎に試験機を一時停止して、試験機に取り付けた光学顕微鏡による写真撮影と表面レプリカ法を併用し、試験片表面の現象記録を採取した。それらを整理・保存し、試験片破断後、注目するき裂あるいは最大き裂(最終破断に至ったき裂)を疲労寿命の後期から初期に向けて逆に追跡し、光学顕微鏡を用いて、そのき裂長さの変化や、合体による成長挙動を精度よく測定すると共に、疲労寿命の各段階における分布き裂の密度およびその長さの分布などについても詳細に調べた。

3. 実験結果と考察

3.1 応力-荷重繰返し数特性 ($S-N$ 特性)

図2に本実験で得られた応力-荷重繰返し数特性を示す。この図は、各応力レベルに対する破断疲労寿命 N_f 、き裂発生時の繰返し数 N_i と試験片表面の最大き裂がある一定値に達した時の繰返し数 $N(a=const)$ の変化を同時に示したものである(後述)。図中の()内の数字は測定時の最大き裂の表面き裂長さ $2a$ (単位 mm) である。 $S-N_f$ 曲線から本供試材の疲労限は 10^7 回基準強度で 23 kg/mm^2 となる。

疲労寿命の初期に発生するすべり線ないしは微小き裂は表面からの観察では判別が困難であるので、き裂あるいはき裂らしい線が結晶粒界を通過して隣接粒内まで成長した時、き裂であるとした。図2に示した $S-N_i$ 線図は、このようにしてき裂の発生を定義して求めたものである。この図から微小疲労き裂は疲労寿命の極めて初期 ($N_i/N_f \approx 0.1 \sim 0.2$) に発生し、疲労寿命の大半はこの微小疲労き裂の成長過程に費やされることが分かる。

3.2 微小疲労き裂の成長挙動

微小疲労き裂の成長挙動を明らかにするため、前述の方法で各応力レベル、繰返し数毎に十分な精度で試験片表面の微小疲労き裂を観察し、測定した。図3は、高応力レベル 34 kg/mm^2 での平滑表面に発生・成長した分

布き裂の例を示す。これは前述の方法で記録・保存した表面レプリカを光学顕微鏡で撮影し、その写真を連続的に貼り合わせ、トレースした図である。この図からき裂は不規則に分布し、その分布密度は繰返し数の増加とともに増加すること、すべてのき裂はほぼ主応力軸に垂直な方向に成長していることが分かる。図中矢印で示したき裂は最終的破断に至らした“最大き裂”である。このき裂に着目して見ると、他のき裂を連結、合体しつつ急速に成長して行く様子が分かる。

3.3 分布微小き裂の統計的諸元

試験片表面の分布微小き裂の個数およびその長さの分布を詳細に調べ、繰返し数比 N/N_f に対して図4に示す。き裂長さはじくごく成長するき裂を主応力軸に垂直な方向へ投影した表面長さ $2a$ で定義し、前述の連結する疲労き裂は合体後一つのき裂として長さを測り、個数を数えた。図4-a, bは各々 34 kg/mm^2 , 30 kg/mm^2 の応力レベルにつき、繰返し数比毎にき裂長さの階級値毎のき裂個数を調べ、その対数累積確率を示したものである。図4から、き裂長さの分布は対数確率紙上で直線となり、この直線群は N/N_f の増加と共に、傾斜が小さくなり、き裂長さが大きくなる方へ移行することが分かる。これはある法則に従い、大きいき裂が速く、小さいき裂が遅く成長することを意味する。

上記データを用いて、平均疲労き裂長さ $2a_m$ とき裂密度 δ を求め、それらの繰返し数比に対する変化を図5に示す。ただし、応力 34 kg/mm^2 では、連結・合体が著しいので、数個のき裂を合体したき裂を一つと数えて計算した密度を□印で示し、合体したき裂を別々の数個のき裂として求めた密度を■印で示した。図5から、き裂密度 δ は N/N_f とともに増加し、疲労寿命後期では、応力レベルにより N_f , $2a_m$ が著しく異なるにもかかわらず、 34 , 30 kg/mm^2 の両応力レベルではほぼ同一な傾向となり、特に合体したき裂を別々に数えた 34 kg/mm^2 のデータと合体の少ない 30 kg/mm^2 のデータとは良く一致した。結局破断直前では 1 cm^2 当たり、き裂の個数は数百個から千個にも達し、このデータには平均結晶粒径 20μ 以下の微小き裂ないしすべり線は含まれていないことを考え合わせると、極めて高密度のき裂が平滑材表面に出現すると思われる。

図5の $2a_m - N/N_f$ 線図から、平均き裂長さ $2a_m$ は N/N_f の増加と共に直線的に増加し、応力が高いほど平均き裂長さが大きいことが分かる。また破断時期 ($N \approx N_f$) においても、 $2a_m$ は 34 kg/mm^2 で 0.25 mm 以下であり、 30 kg/mm^2 で 0.15 mm 以下である点が注目される。これは、図3, 4からも分かるように寿命後期においても微小なき裂が過半数を占め、極く少数のき裂のみ

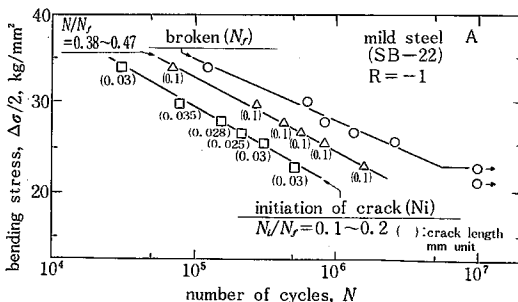


図2 応力-荷重繰返し数特性 ($S-N$ 曲線)

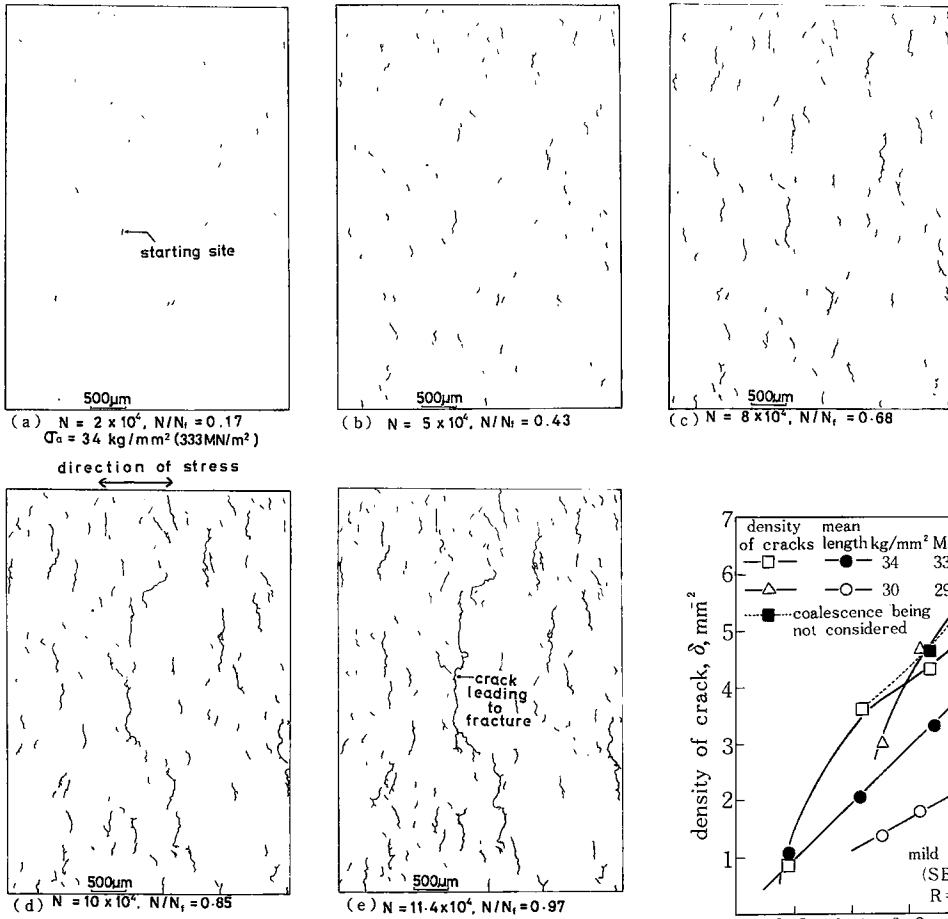


図3 平滑試験片表面に発生・成長する分布き裂
(mild steel A (SB-22) R=-1)

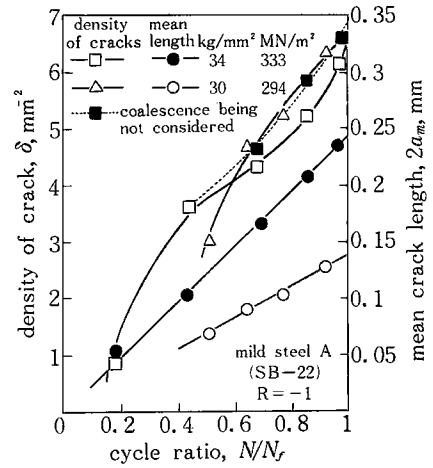
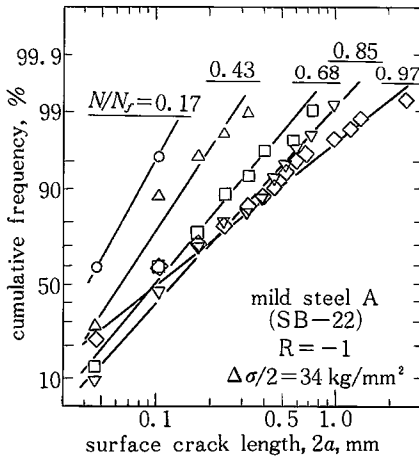
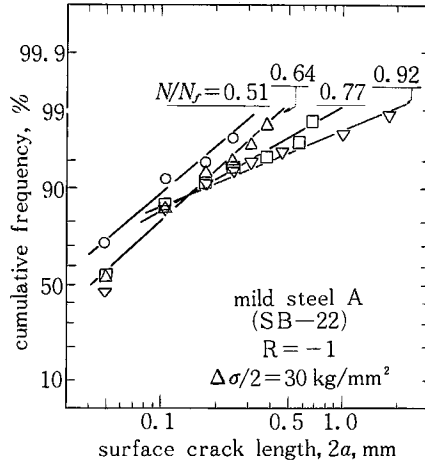


図5 き裂密度 δ と平均疲労き裂長さ $2a_m$ の特性



(a)



(b)

図4 き裂長さの対数累積確率

研究速報

が加速的に成長し破断に導くと考えられる現象に対して、すべてのき裂個数でき裂長さを平均化したためであると解釈される。

このような分布き裂の統計的諸元を入力として、破壊力学的手法およびモンテカルロシミュレーションによる分布き裂の干渉・合体成長過程の解析法を開発し、腐食疲労破壊現象に適用した研究⁴⁾もあるが、一般にはこの種の定量的な解析は困難である。前述のごとく破断に導く最大き裂の成長挙動が特に平滑材の疲労破壊過程の解明に重要と思われるので、本研究では最大き裂の成長挙動に着目し、以下にその成長特性について論じる。

3.4 最大き裂の成長特性

前述のように試験片表面のレプリカおよび顕微鏡写真を保存し、試験片破断後逆に追跡し、破断に導いた最大表面き裂の長さ $2a_{max}$ の繰返し数比 (N/N_f) に対する変化を調べ、図6に示す。最大き裂は疲労寿命の10%~20%に発生し、加速しつつ連続的に成長する。疲労寿命の後期の $N/N_f = 0.8 \sim 0.9$ においても最大き裂長さ $2a_{max}$ は2mm以下であるので、最終破断時には高密度で発生・成長した他のき裂と連結・合体を繰返しつつ、急速に成長して破断するものと考えられる。

図6の $2a_{max} - N/N_f$ 特性は、若干応力レベルの高い方が、加速側にきている傾向があるが、応力レベルの異なるデータが比較的狭い分散帯内に集まっている。しかも、図6中実線で示したように他の軟鋼材 (S15C) の成長特性⁵⁾とも、ほぼ一致する傾向を得た。 $2a_{max} - N/N_f$ 特性が応力レベルにあまり依存しないことと、図2に示した等最大き裂長曲線が $S - N_f$ 曲線とはほぼ平行になることは対応するものである。またこれらの結果は、最大き裂成長特性の破壊力学的評価の可能性をも示唆するものと考えられる。

4. ま と め

軟鋼平滑材の回転曲げ疲労試験を実施し、試験片表面に発生・成長する微小表面き裂を全寿命にわたって十分な精度で観察・測定し、その定量的特性を調べた。その結果、微小疲労き裂は寿命の10~20%の極めて早期に発生し、疲労寿命の大半はこのき裂の成長過程に費やされることが明らかとなった。また平滑材表面には微小疲労き裂が高密度で発生・成長し、そのうちの極く少数の

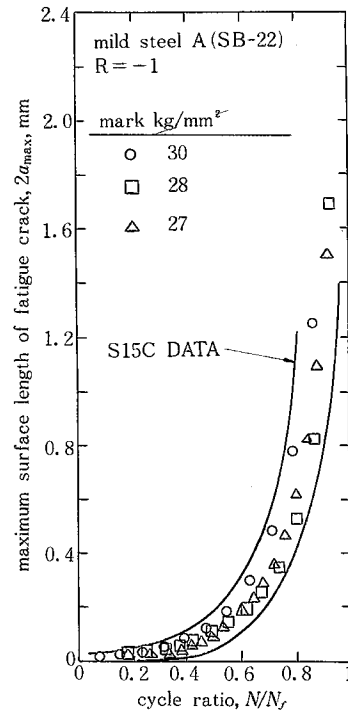


図6 最大疲労表面き裂の成長特性 ($2a_{max} - N/N_f$ 特性)

き裂が他のき裂との干渉・合体を繰返しつつ加速的に成長する過程が明らかとなった。さらに最終破断に至る最大き裂の成長特性を見だし、その成長特性の破壊力学的解析への道を開いた。(1979年10月23日受理)

参考文献

- 1) たとえば ASME Boiler and Pressure Vessel Code SEC. XI, Appendix A (1977).
- 2) 北川, 結城, 高橋, 徐; 日本機械学会講演論文集 (第16回疲労シンポジウム), 790-9, 1979, p. 25.
- 3) P. J. E. Forsyth; ACTA Metallurgica, vol. 11 1963, p. 703.
- 4) H. Kitagawa, T. Fujita and K. Miyazawa; Corrosion Fatigue Technology, ASTM STP 642, 1978, p. 28.
- 5) 北川, 徐; 日本材料学会第13回疲労シンポジウム講演前刷集 1979, p. 10.