

圧延ロールのスポーリング破壊事故防止のための基礎的研究

神戸大学 工学部 機械工学科

助教授 中井善一

(平成5年度研究開発助成 AF-93001)

1. 研究目的

近年、ロール組み替え周期を長期化するとともに、圧延比を高くすることによって、圧延機の操業効率の向上化が計られている。このため圧延ロールは非常に苛酷な条件で使用されるようになり、その破壊事故防止が緊急の課題となっている。そこで著者らは、ロール破壊事故の原因の大半を占めるスポーリング破壊機構を解明するための基礎的な研究を行った。

スポーリングは、熱衝撃あるいは転がり疲労によるき裂の発生と進展によるはく離現象であるが、本研究では、後者の要因について明らかにするため、金属材料の疲労破壊機構について、詳細な観察を行うとともに、余寿命評価法について検討した。

さて、金属材料の疲労破壊過程は、微小なき裂の発生過程とその進展過程、および最終的な不安定破壊過程に分けることができる。これらのうち、き裂発生過程と微小き裂進展過程が、金属材料の疲労寿命の大部分を占めるため、特に重要である。そこで、本研究では、まず、走査型原子間力顕微鏡を用いて、疲労き裂発生までの試験片表面状態の変化を詳細に調べ、疲労き裂発生メカニズムを調べた。それを利用して、疲労余寿命の非破壊検査法を開発するため、レーザ・スペckル法を利用した。微小疲労き裂に対しては、これまでの研究で、破壊力学的取扱いの確立している長いき裂の伝ば挙動との相違は、き裂開閉口挙動の相違、および弾塑性状態に起因することが明らかになっているが、微小な疲労き裂の開閉変位を測定する方法がなかったため、定量的な検討が十分ではなかった。そこで、本研究ではレーザ干渉変位計を開発し、それを用いて、微小な疲労き裂の伝ば挙動の評価を行った。

2. 実験方法

本研究で主として用いた材料は、構造用低炭素鋼 KA32 平板である。その化学成分(mass%)は、0.15C, 0.15Si, 1.10Mn, 0.011P, 0.0004S, 0.01Cu, 0.02Ni, 0.02Cr, 0.01Mo, 0.25Al, bal. Fe である。また、力学的性質は、降伏応力: 401MPa, 引張り強さ: 502MPa,

伸び: 25%である。

表面観察に使用した原子間力顕微鏡はプローブステーション(セイコー電子工業(株))に、AFMユニットを接続したものである。本研究では、表面形状の観察には、最大走査範囲 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ (面内) のスキャナを用い、表面粗さの測定には、最大走査範囲 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ (面内) のスキャナを用いた。スキャナの制御及び得られた画像の表示処理は一括してプローブステーションで行った。

レーザスペckルの観測のため、図1のような測定装置を開発した。光源としては、出力 5mW の He-Ne レーザを用い、スクリーンには、磨りガラスを使用した。スクリーンに投影されたレーザの反射

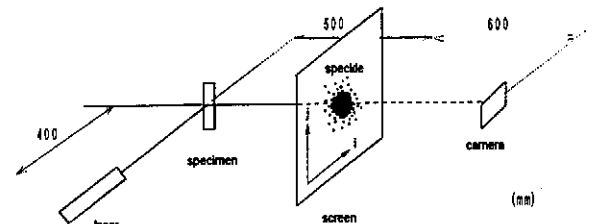


図1. レーザスペckル測定システム。

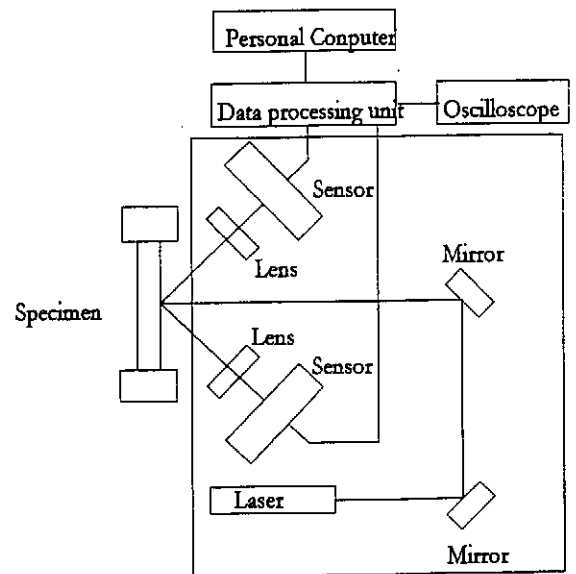


図2. レーザ干渉法による変位計測システム。

光の中央付近における光度をフォト・トランジスタによって測定するとともに、そのパターンをデジタルカメラで撮影した。その画像をパーソナルコンピュータに取り込み、データ処理を行った。

本研究のために製作したレーザ干渉変位計測システムの概略を図2に示した。き裂の上下にマイクロビッカース圧痕を一つずつ付け、それらにレーザ光を照射すると、圧痕面より反射してきたレーザ光が干渉を起こし、上下、左右に干渉縞をつくる。本装置は、干渉縞のピーク位置の移動量より圧痕間の相対変位を測定するものである。図3(a)は、き裂を観察するために、電気油圧式疲労試験機に固定した金属顕微鏡であり、図3(b)は試験機に取付けた変位計測装置である。図3(a)のパソコンのCRT上には、観察された微小き裂およびビッカース圧痕(33 μm ×33 μm)が写っている。これらの装置を用いて、き裂開口変位の測定およびき裂進展挙動の観察を行った。これらの結果をもとに、微小な疲労き裂の伝ば速度と応力拡大係数範囲 ΔK 、有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} 、およびJ積分範囲 ΔJ の関係を調べ、それらの関係が長いき裂の関係とどのような関係にあるかを調べた。

引張り試験および疲労試験は、主として電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて、荷重制御下で行ったが、一部の疲労試験には、共振型平面曲げ疲労試験機を用いた。

3. 実験結果および考察

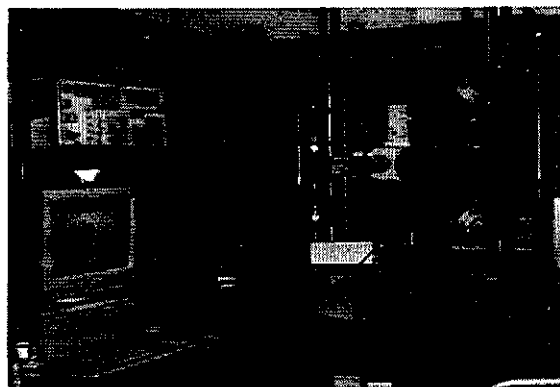
3.1 S-N曲線

応力振幅と破断繰返し数の関係を図4に示した。本材料の疲労限度は約235 MPaである。

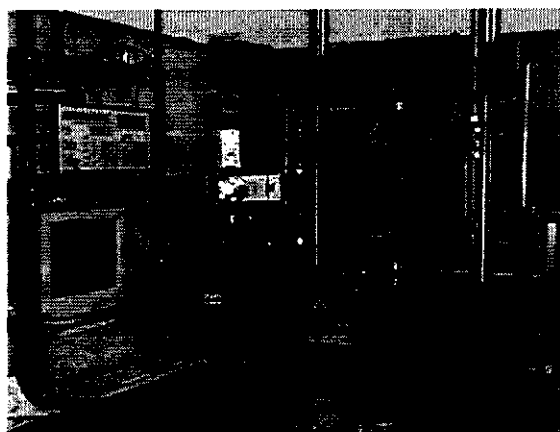
3.2 走査型原子間力顕微鏡による観察^{(1)~(3)}

(1) 引張り試験 引張り試験中に形成されたすべり帯の例を図5(a)に示した。表示色が明るくなるほど位置が高いことを示している。カードを滑らせたような形態となっている。

(2) 疲労試験 疲労限以下の応力振幅 $\sigma_a = 216$ MPaで 3.00×10^6 回繰返し荷重を負荷した場合に形成されたすべり帯の例を図5(b)および図5(c)に示した。引張り試験とは異なり、山脈状の突き出しが見られる。図5(b)に示したすべり帯は荷重軸方向から約50°傾いており、図5(c)に示したすべり帯は荷重軸方向から約82°傾いている。いずれの図でも、すべり帯が発生している結晶粒とそうでない結晶粒が明瞭に区別できる。図5(b)の場合、すべり線の稜線と表面間の段差は約250 nmであり、図5(c)の場合、段差は約400 nmである。表面上での荷重軸との角度



(a) 金属顕微鏡による観察。



(b) レーザ干渉変位計による測定。

図3 疲労試験機および測定装置。

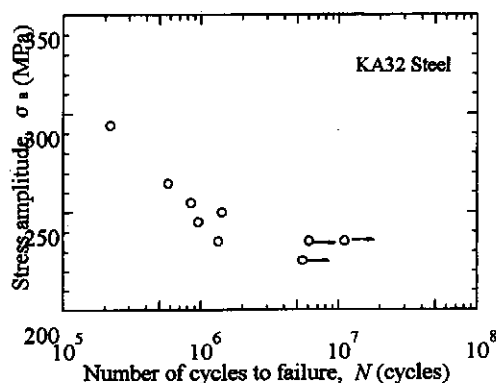
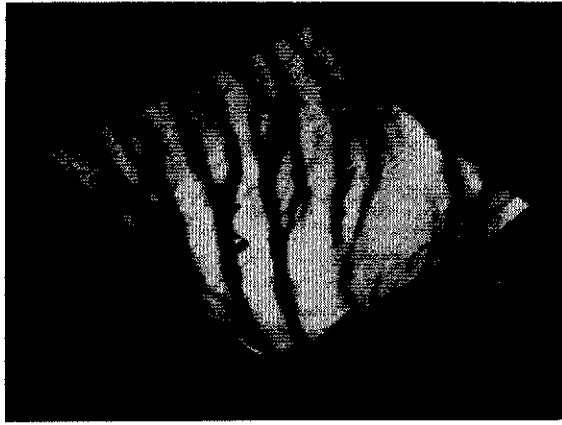


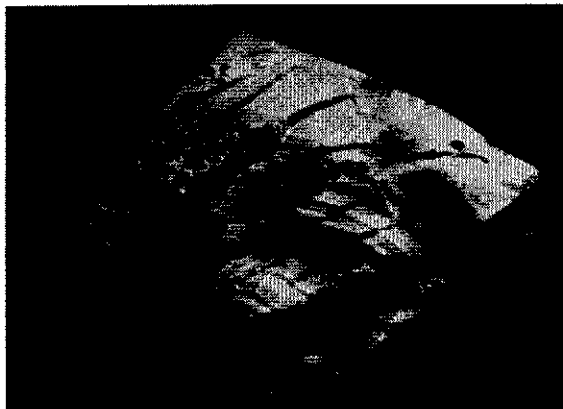
図4 S-N曲線。

が45°に近く、面内すべりが支配的であるすべり帯よりも、表面上での荷重軸との角度が90°に近く、面外すべりが支配的であるすべり帯のほうが表面における凹凸が激しい。

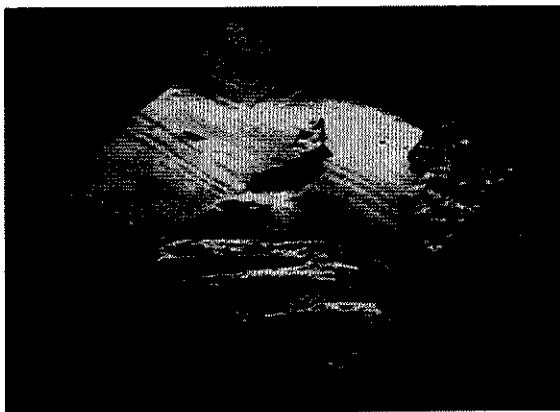
以上より、疲労き裂は試験片表面において表面上での荷重軸との角度が90°に近いすべり帯において発生し易い可能性があるものと考えられる。しかしながら、実際には発生直後のき裂面は、分解せん断応力が最大の方角とはなっているものの、表面上



(a) 引張り試験



(b) 疲労試験



(c) 疲労試験

図5 AFMによって観察した試験片表面。
(観察領域: $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$)

での荷重軸との角度は必ずしも 90° に近くはなっていない。したがって、表面での凹凸の増大による応力集中が原因となって疲労き裂が発生するとは考えられない。また、従来観察されてきたように、入込み(intrusion)と突出し(extrusion)は対になって現れるのではなく、本観察結果では、突出しのみで入込

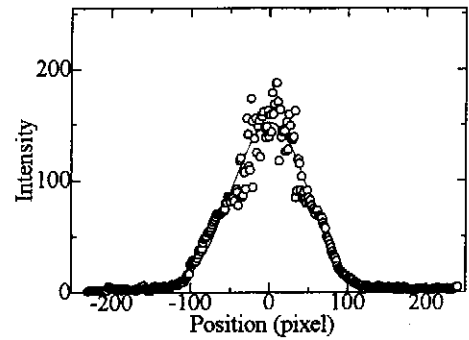


図6 レーザ・スペckル・パターン例。
(引張り試験, $\epsilon_p = 3.35\%$, i 方向)

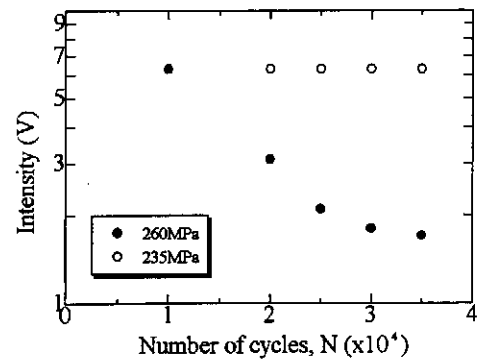


図7 中央近傍における反射光の光度と繰返し数の関係。

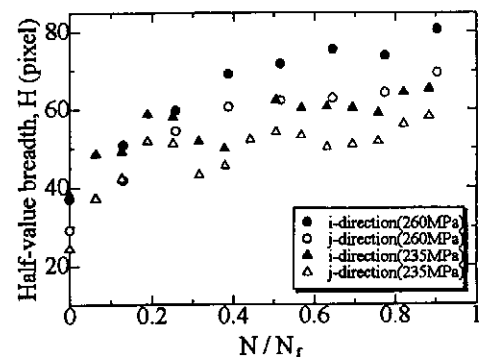


図8 疲労過程での半価幅の変化。

みは見られない。

3.3 レーザスペckル観察^{(4),(5)}

図6は例として引張り試験時の $\epsilon_p = 3.35\%$ のときの i 方向におけるレーザ反射光の分布を示したものである。中央部付近でバラツキが大きくピーク値を決めにくいので、図中の実線で示すような正規分布で近似し、それより半価幅を計算した。

疲労試験を、応力振幅 $\sigma_a = 260\ \text{MPa}$ および $235\ \text{MPa}$ で実施し、5000回の繰返しごとにレーザ・スベ

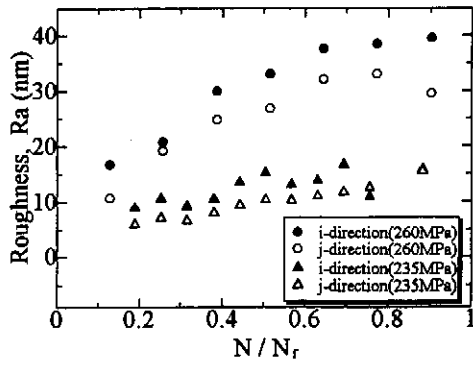


図9 疲労過程での表面粗さの変化。

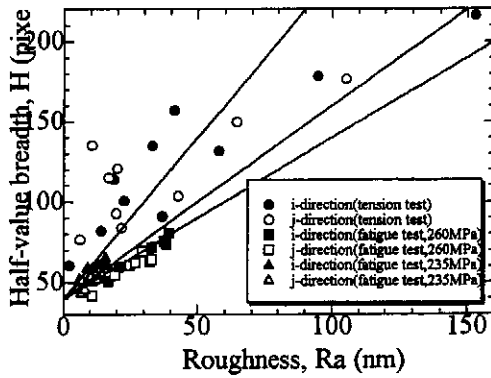


図10 表面粗さと半価幅の関係。

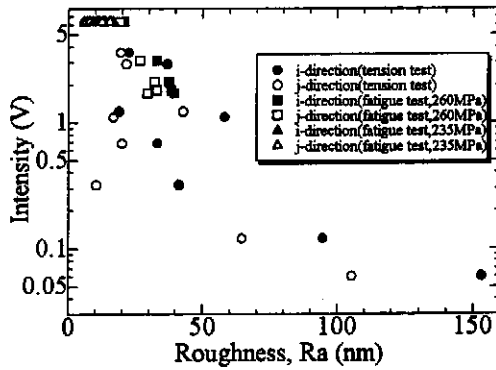
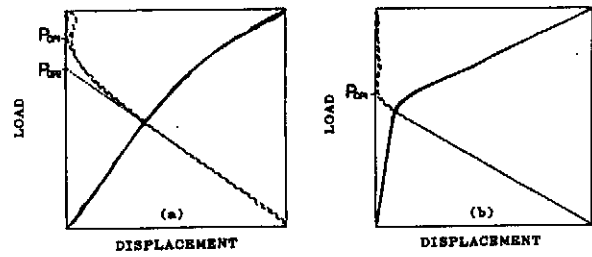


図11 中央付近の反射光の光度と表面粗さの関係。

ックルおよび AFM の観察を行った。破断繰返し数は、それぞれ 3.87×10^4 回および 7.92×10^4 回であった。

$\sigma_a = 260$ MPa におけるレーザスペckルパターンの変化を図7および図8に示した。図7はフォト・トランジスタにより測定したピーク位置近傍における反射光の光度の値と、繰返し数 N との関係である。 $\sigma_a = 260$ MPa の場合、 N の増加に伴ってピーク位置近傍における反射光の光度は、初期には直線的に減少し、やがて、一定値に漸近していく。しかしながら、 $\sigma_a = 235$ MPa の場合、ピーク位置近傍における



(a) $a=0.14$ mm, $\sigma_a=335$ MPa (b) $a=0.40$ mm, $\sigma_a=484$ MPa
図12 S N C M 439 鋼における荷重-変位曲線。

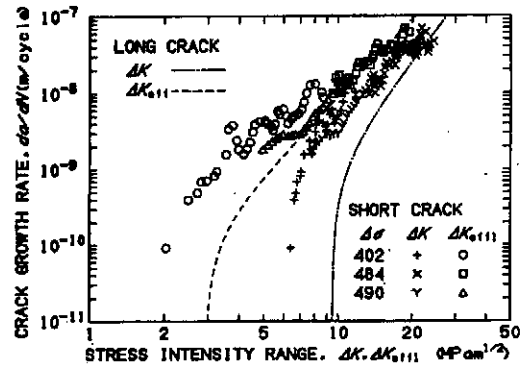


図13 S N C M 439 鋼における微小き裂の伝ば速度と応力拡大係数範囲および有効応力拡大係数範囲の関係。

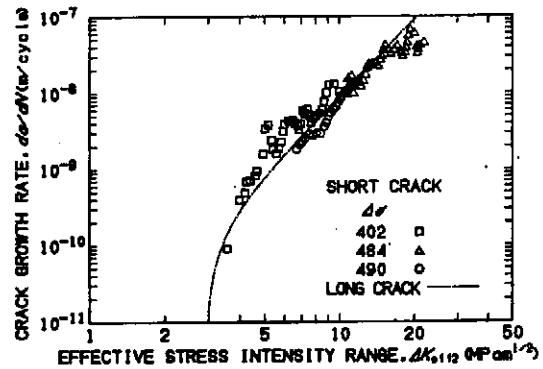


図14 S N C M 439 鋼における微小き裂の伝ば速度と有効応力拡大係数範囲の関係。

反射光の強度はほとんど変化しない。

図8は、半価幅 H と N/N_f の関係である。ここで、 N_f は破断繰返し数である。 N の増加に伴って H が増加する傾向がある。また、 i 方向よりも j 方向の方が半価幅は小さい。いずれの応力振幅においても、疲労初期は、 N/N_f の増加に伴って、半価幅 H は増加するが、疲労中期においては、 H はほとんど増加しない。また、破断直前に H は再び増加する。

AFM によって測定した表面粗さ R_a と N/N_f の関係を図9に示した。この場合も、荷重軸方向とそれに垂直な板幅方向では、表面粗さが異なっており、ま

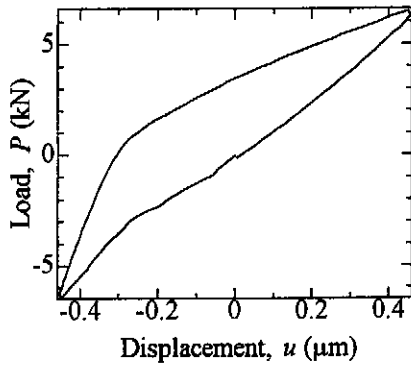


図 15 KA32 鋼における荷重-変位曲線。
($\sigma_a = 203 \text{ MPa}$, $a = 0.142 \text{ mm}$)

た、 NN_f の増加とともに R_a も大きくなっている。この場合も、 i 方向(板幅方向)のほうが、 j 方向(荷重軸方向)よりも表面粗さが大きい。さらに、同一 NN_f に対して、260MPaの方が、235MPaのものよりも H が大きい。

AFMにより測定した表面粗さ R_a とスペckルパターンの半価幅 H の関係を図10に示した。負荷方向(j 方向)の R_a と H との関係をopen mark, 試験片板幅方向(i 方向)の R_a と H との関係をsolid markで示している。前述のように、同一ひずみ、あるいは繰返し数に対して、 i 方向と j 方向の半価幅は異なったが、 H と R_a の関係は方向には依存しておらず、引張り試験および疲労試験ともにスペckルパターンの半価幅は、表面粗さとよく対応していることが分かる。また、 R_a と H の関係は、疲労試験の場合、応力振幅にほとんど依存しないようであるが、引張り試験における半価幅は、同一の R_a に対して、疲労試験よりも大きくなっている。

R_a と中央付近の反射光の光度の関係を図11に示した。この場合も、 R_a と反射光の強度の関係は、疲労試験の場合、応力振幅にほとんど依存しないようであるが、引張り試験における光度変化は、疲労試験よりも大きい。

図5に、AFMによって観察した疲労試験及び引張り試験におけるすべり帯を示したが、両者の形状は、かなり異なっているため、同一の表面粗さであっても、引張り試験と疲労試験では、レーザ光の反射あるいは干渉の仕方は異なっているものと考えられる。

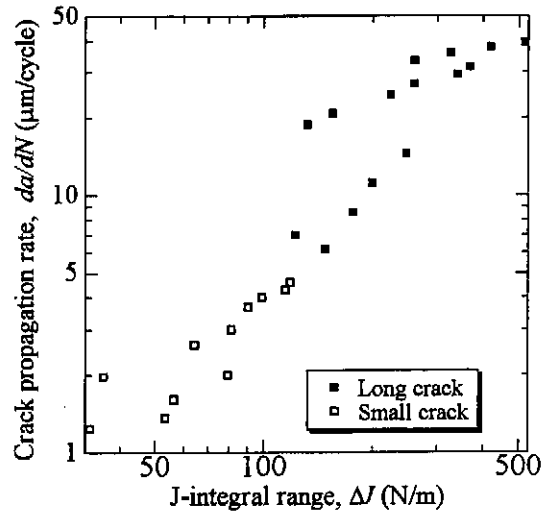


図 16 KA32 鋼における微小き裂の伝ば速度とJ積分範囲の関係。

3.4 微小な疲労き裂の伝ば挙動^{(6)~(9)}

疲労き裂は、小規模降伏状態を逸脱しやすく、弾塑性状態となっている場合が多い。そこで、本研究では、まず、降伏応力が高い高強度低合金鋼 SNCM439(mass%: 0.42C, 0.24Si, 0.90Mn, 0.019P, 0.008S, 1.77Ni, 0.78Cr, 0.10Mo), 600°C焼もどし材(降伏応力: 839 MPa, 引張り強さ: 934 MPa, 両振り疲労限: 438 MPa)を用いて微小な疲労き裂の伝ば挙動を調べた。

図12中の実線は、レーザ干渉変位計によって測定した荷重-変位線図の例であり、破線は、線形性からのズレを拡大したものである。ヒステリシスループは描かず、小規模降伏状態となっていることがわかる。き裂がある程度以上長くなれば、(b)のように折れ曲りは明確になり、き裂開口点(図中、 P_{OP1} で示した位置)を容易に決定することができる。一方、(a)に示したように、き裂が短い場合、荷重-変位曲線の折れ曲りは明確ではなく、以下では、図中に、 P_{OP1} で示した点と、 P_{OP2} で示した点について検討した。

図13は、微小な疲労き裂の伝ば速度を、応力拡大係数範囲 ΔK および P_{OP1} より求めた有効応力拡大係数範囲 ΔK_{em} で整理した結果である。小規模降伏状態であるにもかかわらず、いずれのパラメータで整理しても、き裂伝ば速度 da/dN は応力振幅に依存し、一面的な関数関係が得られておらず、その関係は、長いき裂の関係とも異なっている。一方、図14に示したように、き裂伝ば速度 da/dN と、 P_{OP2} より求めた有効応力拡大係数範囲 ΔK_{em2} の関係は、応力振幅に依存しておらず、また、その関係は長いき裂の関

係と一致している。

図 15 は、KA32 鋼において発生した微小なき裂の荷重-変位曲線を、レーザ干渉変位計によって測定した例である。SNCM439 鋼の場合とは異なり、ヒステリシスが現れており、小規模降伏条件を満足していないことが分る。図 16 は、この微小なき裂の伝ば速度と弾塑性破壊力学パラメータである J 積分範囲 ΔJ の関係である。ここで、 ΔJ は、レーザ干渉変位計によって測定した微小なき裂中央の開口変位より評価した。現段階では、まだ十分なデータは得られていないが、長いなき裂と微小なき裂の関係はほぼ同一であると考えられる。

4. 結 論

本研究では、主として構造用低炭素鋼 KA32 を用いて、疲労き裂発生過程と微小疲労き裂の成長過程を詳細に観察し、それに基づいた疲労余寿命評価手法を開発した。得られた結果を以下に要約する。

(1) 走査型原子間力顕微鏡を用いて、疲労き裂発生過程を観察したところ、突出しは見られたが、入込みは見られなかった。その突出しの高さは、試験片表面上でのすべり帯の方向が、荷重軸直角方向に近いほど、高くなっていた。

(2) 走査型原子間力顕微鏡によって測定した試験片表面粗さは、疲労の進行とともに増加した。また、レーザスペックルパターンの広がりも疲労の進行とともに大きくなり、両者は対応していた。このことから、レーザスペックル法によって、疲労余寿命推定が可能になると考えられる。

(3) 本研究で開発したレーザ干渉変位計によって、微小なき裂の開口変位測定が可能となった。これにより、微小疲労き裂の開閉口挙動、および J 積分範囲 ΔJ を測定することが可能となり、疲労微小なき裂伝ばの破壊力学的解明が可能となった。

参考文献

- (1) 中井善一, 福原誠一郎, 大西健司, 「走査型原子間力顕微鏡による疲労破壊の微視的観察」, 日本機械学会関西支部第 71 期定時総会講演会・講演論文集, No.964-1, pp.665-666 (1996).
- (2) 中井善一, 福原誠一郎, 大西健司, 「走査型原子間力顕微鏡による疲労すべり帯および疲労き裂の観察」, 日本機械学会第 73 期通常総会講演会・講演論文集, No.96-1, Vol. 2, pp.418-419 (1996).
- (3) Yoshikazu Nakai, Seiichirou Fukuhara, and Kenji Ohnishi, "Observation of fatigue damage in structural steel by scanning atomic-force microscopy", *International Journal of Fatigue* に掲載予定 (1997).
- (4) 中井善一, 老田政憲, 加藤俊哉, 「レーザスペックル法と AFM を併用した金属表面の損傷評価」, 日本機械学会関西支部第 72 期定時総会講演会・講演論文集, No.974-1, 5-47 (1997).
- (5) 中井善一, 老田政憲, 加藤俊哉, 「低炭素鋼の引張り及び疲労試験におけるレーザスペックルパターンと AFM で観察した表面形状の関係」, 日本材料学会第 9 回破壊力学シンポジウム(彦根)講演論文集に掲載予定 (1997).
- (6) 中井善一, 大路清嗣, 牧 宏, 「レーザ干渉法による微小疲労き裂開閉口の測定」, 日本機械学会講演論文集, Vol.A, No.900-14, pp.10-12 (1990).
- (7) Y. Nakai and K. Ohji, "Predictions of Growth Rate and Closure of Short Fatigue Cracks", "Short Fatigue Cracks" (ESIS 13), K.J.Miller and E.D.Los Rios, eds., Mechanical Engineering Publications, London, pp.169-189 (1992).
- (8) 清水 進, 「レーザ干渉変位計による微小疲労き裂開閉口の測定」, 神戸大学工学部・卒業論文 (1994).
- (9) 趙 濤, 「レーザ干渉法による微小疲労き裂開閉口挙動の測定に関する研究」, 神戸大学大学院・自然科学研究科修士論文 (1997).