炭素鋼の疲労過程における疲労被害と X 線半価幅の関係*

西谷 弘 信^{*1}, 藤村 顕 世^{*2}
福田 幸 雄^{*2}, 福田 孝 之^{*2}Relation between Fatigue Damage and Half-Value Breadth of X-Ray
Diffraction Lines in Fatigue Processes of Carbon SteelsHironobu NISITANI, Kensei FUJIMURA,
Satio FUKUDA, and Takayuki FUKUDA

For annealed and prestrained carbon steels, the relation between the change in fatigue damage of the specimen surface and the value of half breadth of X-ray diffraction lines in the fatigue processes has been investigated. The place observed by a microscope is included in the area irradiated by X-ray. For annealed carbon steels the half-value breadth increases remarkably in the early period of stress cycles, while for prestrained steels, it decreases remarkably. The period of abrupt change in the half-value breadth corresponds to the period of abrupt change in the density of slip lines in both steels. In the process of the initiation and propagation of microcracks, the change in the half-value breadth is not marked.

Key Words: Fatigue, Fatigue Damage, Rotating Bending, Carbon Steel, Successive Observation, X-Ray, Half-Value Breadth

1. は じ め に

X 線を用いた金属材料の疲労に関する研究は、細束 X 線によるものも含めて、数多く行われている^{(1)~(12)}。このことは、X 線回折法が疲労現象に特有のすべり線の発生や微視的き裂の発生などの結晶変形に起因する局所的な現象に敏感であり、そのような局所領域での情報を得るのに適していると考えられているためであろう。平らは一連の研究の中で、炭素鋼焼なまし材における X 線回折線半価幅の変化が、3 段階の増加過程から成ることを示すとともに、それらが加工硬化過程、微視的き裂の発生成長の過程、巨視的き裂の発生成長の過程にそれぞれ対応するとしている。また炭素鋼加工材の疲労過程における半価幅は、破壊に至るまでに 3 段階の減少過程を経るが、それらの過程は微視的応力の回復によるものとしている。さらに破壊直前の半価幅の値は、負荷応力値、応力履歴に関係なく、ほぼ等しいことを示し、半価幅の変化比と応力繰返し数比の関係による疲労被害の非破壊的検出の可能性を

示唆している^{(1)~(3)}。

ところでこのような X 線による情報は、かなり局所的なものではあるが、一方ある大きさをもつ X 線ビームの中に含まれる情報の平均値でもある。このような意味での平均的な情報である X 線半価幅と、すべり線の発生、き裂の発生あるいはき裂先端の塑性域といった極めて局所的な疲労現象との関係を明確にすることは、疲労現象の物理的な側面を明らかにするとともに、過去の半価幅測定の意味を理解するのに役立つものと思われる。

このような観点から、本報は、これまで著者の一人が多くの研究で用いてきた手法⁽¹³⁾により試験片表面を連続観察しながら、同時に X 線半価幅を測定し X 線照射域内の表面の被害の状態と X 線半価幅の関係を明らかにしようとするものである。

2. 使用材料、試験片および実験方法

使用した材料は市販の S 25 C 材(直径 22 mm, 長さ約 5.5 m)で、これを約 210 mm の長さに切断して、880°C で 1 h 間保持後炉冷したのち、焼なまし試験片は、図 1 に示す形状に機械加工後、600°C, 50 min 間の真空焼なましを行い、さらに表面層を 60 μ m 電解研磨により取り除いてから実験に供した。一方、予びずみ

* 昭和 63 年 10 月 19 日 第 66 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 3 月 25 日。

^{*1} 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*2} 正員、佐世保工業高等専門学校 (〒857-11 佐世保市沖新町 1-1)。

材試験片は、上記 880°C、1 h の焼なまし後、図 2 に示す形状に加工して 10 % の引張ひずみを与え、さらにこの試験片に 200°C、1 h の時効処理を施してから、図 1 に示す形状に機械加工した。その後、焼なまし材と同様、表面層を約 60 μm 電解研磨により除去した後、実験に供した。

あらかじめ 60 μm の電解研磨直前の同一形状の試験片について、電解研磨量と X 線半価幅の関係を焼なまし材と予ひずみ材について求めたものが図 3 であ

図 1 疲労試験片形状

図 2 予ひずみ材荒仕上試験片

図 3 X線半価幅と電解研磨量

図 4 マイクロビッカース硬さと電解研磨量

る。図 4 はその際の電解研磨量と硬さの関係である。

図 3 において B は電解研磨後の半価幅であり、 B_0 は電解研磨開始直前のそれぞれの半価幅である。図 3 より表面層を約 60 μm 以上除去すれば、X 線半価幅比 B/B_0 の値はほぼ一定になること、すなわち加工層の影響をほぼ完全に除去できることがわかる。図 4 の硬さと電解研磨量の関係も、図 3 とほぼ同じ傾向を示しており、硬さと X 線半価幅はほぼ対応しているといえる。なお電解研磨液はりん酸 1 000 g に酢酸 30 cm^3 を溶かしたものを用了。

素材の化学成分を表 1 に、焼なまし材および時効処理後の予ひずみ材の機械的性質を表 2 に示す。

用いた試験機は小野式回転曲げ疲労試験機で、回転数は 3 500 回/min である。

X 線半価幅の測定は、所定の繰返し数ごとに試験片を試験機から取りはずして行った。X 線測定装置は計数管による平行ビーム方式で、X 線照射条件は表 3 に示すとおりである。所定の繰返し数ごとの半価幅測定箇所の設定は、同一場所を照射するように、ビッカース硬度計でつけた圧こんを目標にして、装置に固定した光学顕微鏡を用いて特に注意して行った。照射位置は浅い切欠のほぼ中央である。き裂はおおむねこの照射領域内から発生した。なお 4、5 回の測定値の平均をもってその繰返し数における値とした。

半価幅の測定法については、焼なまし材と予ひずみ材では図 5 (a)、(b) のように回折プロファイルが異なるために、焼なまし材では図 5 (a) のように回折強度

表 1 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.23	0.25	0.43	0.019	0.007

表 2 機械的性質 (MPa, %)

	σ_s	σ_t	ϕ	ψ
Annealed	462	292	32.8	39.7
Pre-strained	528	521	24.7	32.7

表 3 X線照射条件

X-ray	Cr K α
Diffraction Plane	(211)
Tube Voltage	25 Kv
Tube Current	6 mA
Incident Slit	ϕ 0.8
Scanning Speed	1 %/min
Detector	S.C

分布曲線の全面積 A を求め、これを $K\alpha_1$ 線および $K\alpha_2$ 線の回折強度の最大値 h_1, h_2 で割って、 $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線の半価幅の和を求めてこれを半価幅値 B とした。一方、予ひずみ材では図 5 (b) のような方法で半価幅値 B を求めた⁽³⁾。これらの処理はすべて装置に直結したパーソナルコンピュータ処理によって行った。

一方、試験片表面の疲労被害の観察およびき裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに試験機を止め、切欠部分から採取したレプリカについて光学顕微鏡 ($\times 200$) により行った。また必要に応じて試験機から試験片を取りはずし、直接表面を観察した。

3. 実験結果

本研究に用いた焼なまし材および予ひずみ材の $S-N$ 線図を図 6 に示す。予ひずみ材のほうが時間寿命はやや長く、また疲労限度も焼なまし材 $\sigma_{w0}=200$ MPa に対して、予ひずみ材は $\sigma_{w0}=210$ MPa で、予ひずみ材のほうが高い。しかし $S-N$ 曲線はほぼ平行である。

図 7 は繰返し数 N と X 線半価幅比 B/B_0 (B : 繰返し数 N のときの半価幅, B_0 : $N=0$ すなわち疲労試験直前の半価幅) の関係を示す。X 線半価幅は、焼なまし材では疲労限度の応力を除いて単調な漸増過程を示し、予ひずみ材では漸減過程を示している。そして負荷応力が大きいほど変化は大きい。この傾向は平らによる結果と同様である⁽¹⁾⁽⁴⁾。

図 8 は繰返し数比 N/N_f (N_f : 破断繰返し数, 疲労限

度以下の応力では $N_f=10^7$) と半価幅比の関係である。焼なまし材の疲労過程における半価幅の変化は繰返し初期の急増過程とその後の破壊までの漸増過程がみられるが、初期の急増は疲労限度の応力も含めて、い

図 6 S-N 曲線

図 7 繰返し数と半価幅比の関係

図 5 X 線回折線プロファイル

図 8 繰返し数比と半価幅比の関係

れの応力振幅でも全寿命の 20 % 以下の繰返し数比で生じている。

図 9 は横軸に繰返し数比をとったき裂伝ば曲線である。同じ応力、同じ繰返し数比では予ひずみ材よりも焼なまし材のほうがき裂長さは大きく、またき裂の発生も早い。さらに同じ焼なまし材では応力が高いほうが、同一のき裂長さにたいしては繰返し数比が小さい。すなわち応力が高いほうが、繰返し数比が同じならき裂長さは大きい⁽¹⁴⁾。

図 10 は疲労限度の応力繰返しに伴う試験片表面のレプリカ写真である。

図 11, 12 は疲労限度以上の応力繰返しに伴う試験片表面の写真とそのレプリカ写真を対比させたものである。

4. 考 察

4.1 焼なまし材と予ひずみ材の半価幅変化とすべり線の発生について 図 7 および図 8 から疲労過程の半価幅変化は焼なまし材で漸増、予ひずみ材では漸減の過程を示している。また焼なまし材、予ひずみ材ともおのおの応力が高いほど半価幅の変化も大きい。

焼なまし材の場合、いずれの応力レベルにおいても繰返しのごく初期に半価幅は急増している。図 11 の疲労限度以上の応力を繰返す場合の試験片表面状態の写真からもわかるように、この時期は表面にすべり線が発生し、それがすべり帯となって黒さと幅を増してゆ

く時期と良く対応している。また、この時期はすべり面上で形成された転位がすべり面上を移動し、加工硬化をおこす。平らは、焼なまし材の繰返し初期の半価幅の急増はこの加工硬化によることを指摘している⁽¹⁴⁾。半価幅はこの急増後、漸増の状態からついには破壊に至るが、この間に表面の状態は約 $0.3N_f$ 前後の繰返し数ですべり線はほぼ飽和状態に達している〔図 11(a) はたまたまき裂の発生箇所を含んでいたために $0.3N_f$ 以後もすべり帯の発生が認められるが、他の部分では $0.3N_f$ 前後でほぼ飽和していた〕。すなわち半価幅の急増が終わったあとで表面のすべり線の状態はほ

図 9 き裂伝ば曲線 ($l = N/N_f$)

図 10 疲労限度の応力繰返しに伴う表面状態の変化

(a) 試験片表面の状態 ($\sigma=260$ MPa, $N_f=36.6 \times 10^4$)

図 11 焼なまし材の表面状態の変化

(a) 試験片表面の状態 ($\sigma=260$ MPa, $N_f=44.7 \times 10^4$)

図-12 予ひずみ材の表面状態の変化

は飽和しているが、その後も半価幅は漸増していることから考えると、なおわずかな結晶の微細化が進んでいると推察される。

予ひずみ材の場合は、焼なまし材とは逆に、繰返しのごく初期に半価幅は急減し、その後はあまり変化しない。予ひずみ材はもともと予ひずみのために内部にひずみが蓄積されており、これが応力の繰返しによって解放されるため半価幅が減少するものと思われる。すなわち初期の半価幅の急減は内部ひずみの解放がこの期間に主に行われることを示している。図 12 の試験片表面状態の写真をみると、すべり線の出方は焼なまし材の場合とはかなり異なっていて非常に局所的である。これは予ひずみ材に生じるすべり帯は加工軟化を伴うため、その後の繰返しによってもすでに生じているすべり帯にのみ被害が集中するためであろう。半価幅が N が $0.3N_f$ より大きい所であまり減少しないのもこのためと考えられる。

疲労限度の応力繰返しに伴う半価幅変化は初期の急増（焼なまし材）、急減（予ひずみ材）後はあまり変化していない。図 10(a) の表面のレプリカ写真からも焼なまし材の表面状態の変化はあまり認められず、 10^7 回の繰返しにおいてわずかに粒界き裂と思われるものが認められる程度である。予ひずみ材の場合は $N=10^6$ 回までに生じたすべり線のほぼ同じ位置で、その後の繰返しによってわずかに数と濃さを増して 10^7 回に至っている。このように疲労限度の応力の繰返しではすべり線の発生やその後の増加は場所が限定され、また被害の程度もあまり大きくないために、半価幅も初期の変化以降は大きな変化がないものと思われる。

4.2 き裂の発生および伝ばと半価幅の関係について 図 9 のき裂伝ば曲線からわかるように、本実験の結果では応力が高いほうが同じ繰返し数比に対するき裂長さは大きく、また焼なまし材のほうが予ひずみ材よりも大きい傾向にあるが、レプリカによる連続観察の結果によれば 1 結晶粒程度のき裂が発生するのは、早い場合で $0.2N_f$ 程度であった。 $0.2N_f$ では半価幅の変化はすでに飽和に近い漸増の時期に入っており、したがってき裂の発生と半価幅変化の間には特に関係は認め難い。図 11 のレプリカ写真においても、これまで著者の一人が指摘してきたように、1 結晶粒程度の将来き裂となるべき領域は表面における長さをほ

とんど増すことなく、濃さのみを増し、この領域が全体として応力繰返しとともに徐々にき裂に近づき、最終的にき裂となる様子がみられる⁽¹³⁾。疲労被害を受ける材料の全体としての微視的变化（すべり線の発生や副結晶粒の形成、内部ひずみの変化など）が X 線半価幅に影響を及ぼすといわれているから、き裂の発生や伝ばといった局所的形状変化は 2 mm^2 程度の領域における半価幅の変化としては現れ難いものとおもわれる。

5. 結 論

表面を電解研磨した S 25 C の焼なまし材と予ひずみ材について回転曲げ疲労試験を行い、 2 mm^2 程度の領域における X 線半価幅の変化と試験片表面の状態すなわちすべり線の発生、き裂の発生などとの関係について実験を行った結果、次のことが明らかとなった。

(1) 疲労過程における X 線半価幅の変化は焼なまし材で漸増、予ひずみ材で漸減の過程を経ることを確認した。そして焼なまし材においては繰返し初期の半価幅の急増は試験片表面のすべり線の急増とほぼ対応し、また予ひずみ材においても初期の急減の時期はすべり線が急増する時期とほぼ一致している。

(2) 微小き裂の発生や伝ばの過程では X 線半価幅には特に変化はみられない。これはき裂の発生や伝ばといった局所的形状変化は半価幅の変化としては現れ難いためである。

文 献

- (1) 平・本田, 機論, 26-167 (昭 35), 926.
- (2) 平・本田, 機論, 27-179 (昭 36), 1066.
- (3) 平・本田, 機論, 28-188 (昭 37), 452.
- (4) 平・ほか 2 名, 機論, 28-194 (昭 37), 1335.
- (5) 平・ほか 2 名, 機論, 31-221 (昭 40), 39.
- (6) 平・ほか 2 名, 機論, 31-226 (昭 40), 891.
- (7) 藤村・真武, 機講論, No. 818-2 (昭 56-5), 14.
- (8) 平・林, 機論, 32-235 (昭 41), 389.
- (9) 平・林, 機論, 33-245 (昭 42), 1.
- (10) 平・ほか 2 名, 機論, 38-316 (昭 47), 3067.
- (11) 平・ほか 2 名, 機論, 38-316 (昭 47), 3075.
- (12) 真武・ほか 2 名, 機講論, No. 768-3 (昭 51-11), 22.
- (13) 例えば, 西谷・高尾, 機論, 40-340 (昭 49), 3254.
- (14) 西谷, 機論, 34-258 (昭 43), 220.