

炭素鋼の切欠材の疲労強度に及ぼす  
フェライト・パーライト組織の影響\*野田 尚 昭\*<sup>1</sup>, 西谷 弘 信\*<sup>2</sup>  
原田 昭 治\*<sup>1</sup>, 高瀬 康\*<sup>3</sup>Effect of Microstructures on the Fatigue Strength  
of Notched Specimen in Ferritic-Pearlitic SteelsNao-Aki NODA, Hironobu NISITANI,  
Shoji HARADA and Yasushi TAKASE

Rotating bending fatigue tests were carried out on the circumferential notched specimen of three kinds of carbon steel with nearly equal ferrite grain sizes of 20  $\mu\text{m}$  but different volume fractions of pearlite. Fatigue tests were also carried out for 0.15% carbon steel with ferrite grain size of 50  $\mu\text{m}$  and 0.45% carbon steel with ferrite grain size of 5  $\mu\text{m}$ . The effect of microstructures on the fatigue strengths  $\sigma_{ws}$  (the limit stress for slip band),  $\sigma_{w1}$  (the limit stress for macrocrack initiation), and  $\sigma_{w2}$  (the limit stress for fracture) is discussed by comparing these values between three kinds of carbon steel. The main results are as follows: (1) Since  $\sigma_{ws}$  is localized to a highly specified region, variation of  $K_t\sigma_{ws}$  is small irrespective of notch root radius. (2) If the grain size of ferrite is nearly equal, variation of  $\sigma_{w1}$  is small irrespective of pearlite volume fraction under the certain amount of pearlite. (3) In medium carbon steel,  $\sigma_{w2}$  increases with increasing grain size of ferrite. (4) Notch root radius at the branch point  $\rho_0$  varies with the grain size of ferrite.

**Key Words:** Fatigue, Notch, Bending, Carbon Steel, Grain Size, Fatigue Strength, Ferrite, Pearlite

## 1. 結 言

フェライト・パーライト組織からなる炭素鋼では、弱いフェライトに発生したき裂が停留する限界条件により、その平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  が決まっている。したがって、フェライト粒径やパーライトの役割に関する研究は重要視され、これまでも数多くなされている。同一化学成分の炭素鋼においてフェライト粒径を変化させた場合、フェライト粒径が小さいほど  $\sigma_{w0}$  は上昇し、その関係は Hall-petch 形になるといわれている<sup>(1)(2)</sup>。また、炭素含有量の異なる炭素鋼のフェライト粒径を揃えて、疲労強度におけるパーライトの役割を考察した研究もいくつか行われており<sup>(2)(3)</sup>、山田、国尾らはフェライト粒径が同一の低、中炭素鋼の疲労限度にはパーライトバンドがない場合にパーライト体積率はあまり影響しないことを述べている<sup>(2)(4)</sup>。また、西谷らはすべり発生限界応力  $\sigma_{ws}$  はほとんどパーライトの影響を受けないが、平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  はパー

ライト体積率があるしきい値を越えると、フェライト粒径が同じでも大きく変わることを示している<sup>(3)</sup>。

本論文では実用上問題となる切欠材の疲労限度  $\sigma_w$  へ及ぼす組織の影響を考察する。切欠材の  $\sigma_w$  は、き裂発生に基づく疲労限度  $\sigma_{w1}$  と破断に基づく疲労限度  $\sigma_{w2}$  のいずれか一方によって決まるため、両者を区別して取扱う必要がある。両者は、切欠底に停留き裂が存在するか否かの分岐点において、切欠半径  $\rho_0$  が材料定数となること<sup>(5)</sup> から、 $\rho \geq \rho_0$  か  $\rho < \rho_0$  かによって決まる。図1は、 $\sigma_w$  と応力集中係数  $K_t$  の関係を示した図である。一般に引張強さ  $\sigma_B$  の大きな材料ほど  $\sigma_w$  は大きくなるが、平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  や  $\sigma_{w1}$  の上昇に比べて  $\sigma_{w2}$  はさほど変化しない。すなわち、 $\sigma_B$  の上昇に伴って分岐点は右に移動するため  $\rho_0$  は小さくなる。一般に炭素量の増加とともに  $\sigma_B$  は増加するが、その際フェライト粒径の減少やパーライトバンドの形成等も同時に起こるので、フェライト・パーライト組織のどのような要素が  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$ ,  $\rho_0$  に影響しているかこれまでのところ明確ではない。

そこで、本研究では炭素含有量の異なる3種類の炭素鋼(S 15 C, S 35 C, S 45 C)において熱処理によりフェライト粒径を変化させ、フェライト粒径  $d_f$  を 20  $\mu\text{m}$  程度に揃えてパーライトの影響を取り出せるよう

\* 平成5年11月20日 鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 平成6年1月7日。

\*<sup>1</sup> 正員, 九州工業大学工学部 (〒804 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

\*<sup>2</sup> 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

\*<sup>3</sup> 准員, 九州工業大学工学部。

にして、平滑材、切欠材( $\rho=1.0, 0.6, 0.3, 0.1$ )の回転曲げ疲労試験を行う。また、S15CとS45Cはそれぞれ $d_f=50\mu\text{m}$ と $d_f=5\mu\text{m}$ についても実験する。そして、各材料の $\sigma_{ws}$ ,  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$ を比較し、切欠効果について考察するとともに、疲労限度における停留き裂の状態を観察することにより、疲労強度に及ぼす組織の影響を明らかにする。

2. 材料、試験片および実験方法

素材は、S15C, S35C, S45Cの3種類の圧延丸棒

表1 化学成分 [%]

	C	Si	Mn	P	S	Al
S15C	0.16	0.22	0.50	0.017	0.006	0.037
S35C	0.36	0.23	0.76	0.021	0.022	0.001
S45C	0.46	0.20	0.73	0.029	0.017	0.018

表2 熱処理温度と機械的性質

Material	Heat Treatment	Mechanical Properties (MPa)				$d_f$ ( $\mu\text{m}$ )	$V_{fp}$ (%)
		$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\psi$ (%)		
S15C	1000°C 2hr-A.C.	231	422	923	68.8	20	19
	1050°C 2hr-F.C.	187	412	776	60.6	50	
S35C	900°C 2hr-F.C.	303	558	906	48.2	20	42
S45C	1000°C 2hr-F.C.	352	631	979	45.2	20	57
	844°C 2hr-F.C.	399	653	1088	51.4	5	

$d_f$ : Ferrite grain size  
 $V_{fp}$ : Volume fraction of pearlite

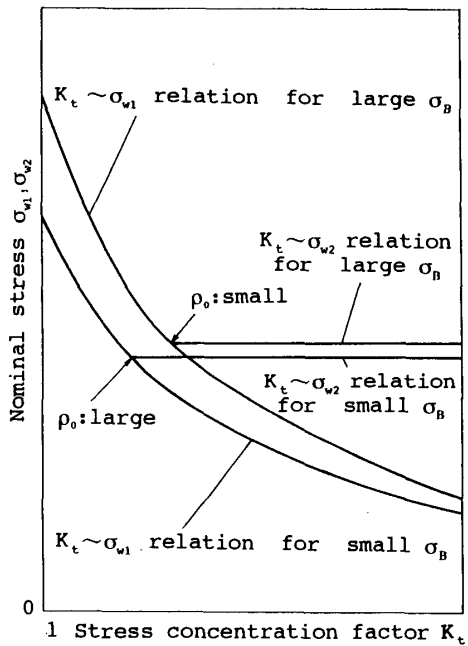


図1 異なる引張強さをもつ材料の $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$ と $K_t$ の関係

(直径 20 mm)である。素材の化学成分を表1に示す。これらの素材を表2に示す熱処理によりフェライト粒径 $d_f$ を約 $20\mu\text{m}$ に揃えた。フェライトのビッカース硬さは荷重10gで典型的なフェライト五つを選び、その中心にビッカース圧子を打ち込んで測定した。その平均値はS15Cで $124H_v$ , S35Cで $125H_v$ , S45Cで $125H_v$ であった。また、S15Cは $d_f=50\mu\text{m}$ , S45Cは $d_f=5\mu\text{m}$ の粒径についても実験を行った。その条件での組織写真( $\times 200$ )を図2に、機械的性質を表2に示す。熱処理後、NC旋盤により試験片を製

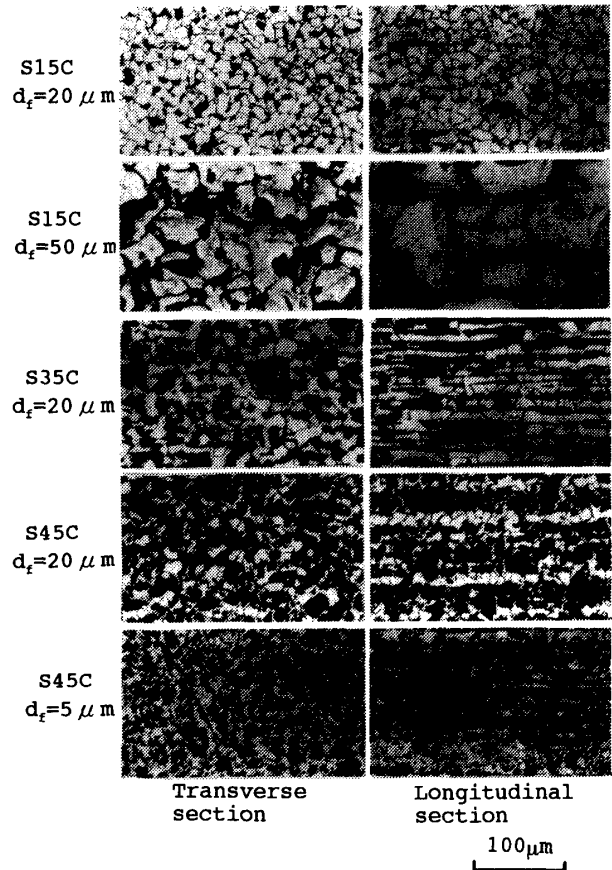


図2 組織写真

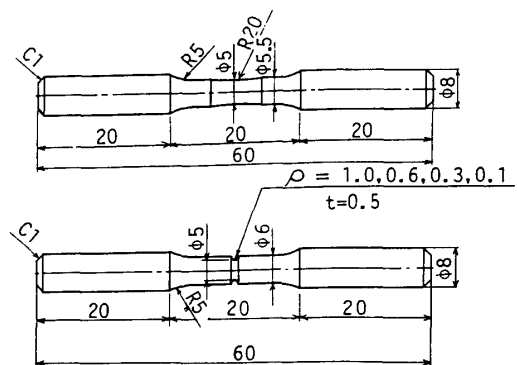


図3 試験片形状

作した。試験片形状を図3に示す。NC旋盤加工後、切欠部については切欠形状に仕上げた切削用バイトを用いて加工した。切欠深さは、0.5 mmで切欠きの形状は60° V形である。その後、すべての試験片について650°C、2 hの真空焼なましを行い、さらに表面を電解研磨により切欠底で10 μm程度取り除いた後、実験に供した。試験機は、小野式回転曲げ試験機 H5型(容量：15 N・m、回転数：2700 rpm)を使用した。応力は最小断面の公称曲げ応力である。

10<sup>7</sup>回の繰返し後、金属顕微鏡を用いて、試験片表面を観察した。S15CとS45Cのd<sub>f</sub>=20 μmの材料については、すべりを生じない最大応力σ<sub>ws</sub>を調べた。また、σ<sub>w1</sub>の決定は、切欠底に観察される疲労被害が平滑材の疲労限度σ<sub>w0</sub>と同程度に生じた応力レベルとして行った。なお、応力のきざみは5 MPaとした。

表3 フェライト粒径を揃えた平滑材の降伏応力、引張強さ、疲労限度 [( )はS15Cとの比]

	σ <sub>Y</sub> (MPa)	σ <sub>B</sub> (MPa)	σ <sub>w0</sub> (MPa)
S15C	231 (1.00)	422 (1.00)	215 (1.00)
S35C	303 (1.31)	558 (1.32)	225 (1.05)
S45C	352 (1.52)	631 (1.50)	260 (1.21)

3. 実験結果および考察

3.1 フェライト粒径を揃えた平滑材の降伏応力 σ<sub>Y</sub>・引張強さ σ<sub>B</sub>・疲労限度 σ<sub>w0</sub> 表3に、フェライト粒径 d<sub>f</sub>を20 μm程度に揃えた場合の降伏応力 σ<sub>Y</sub>、引張強さ σ<sub>B</sub>および平滑材の疲労限度 σ<sub>w0</sub>をまとめて示す。炭素量の増加とともにσ<sub>Y</sub>とσ<sub>B</sub>は増加している。一方、表3より、フェライト粒径を揃えた場合の平滑材での疲労限度σ<sub>w0</sub>は、S15CとS35Cであまり変化しないが、S45Cにおいてパーライトの影響が大きく現れることがわかる。すなわち、西谷らがすでに指摘しているように<sup>(3)</sup>、パーライト体積率があるしきい値(V<sub>fph</sub>≅50%)を越えるとフェライト粒径が同じでもσ<sub>w0</sub>は大きく変化する。これは、組織の平均的性

表4 切欠形状とσ<sub>ws</sub>

Material	ρ (mm)	K <sub>t</sub>	σ <sub>ws</sub> (MPa)
S15C	∞	1.00	160
	0.3	2.38	70
	0.1	3.77	50
S45C	∞	1.00	175
	0.3	2.38	80
	0.1	3.77	55

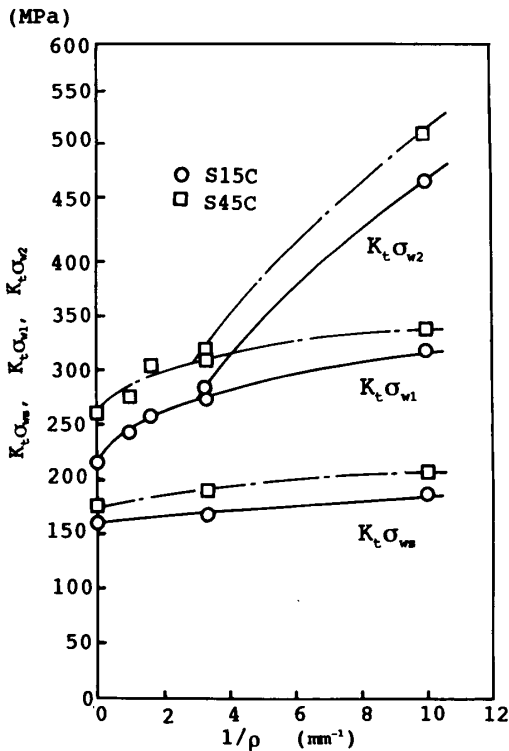


図4 K<sub>t</sub>・σ<sub>ws</sub>, K<sub>t</sub>・σ<sub>w1</sub>, K<sub>t</sub>・σ<sub>w2</sub>と1/ρの関係

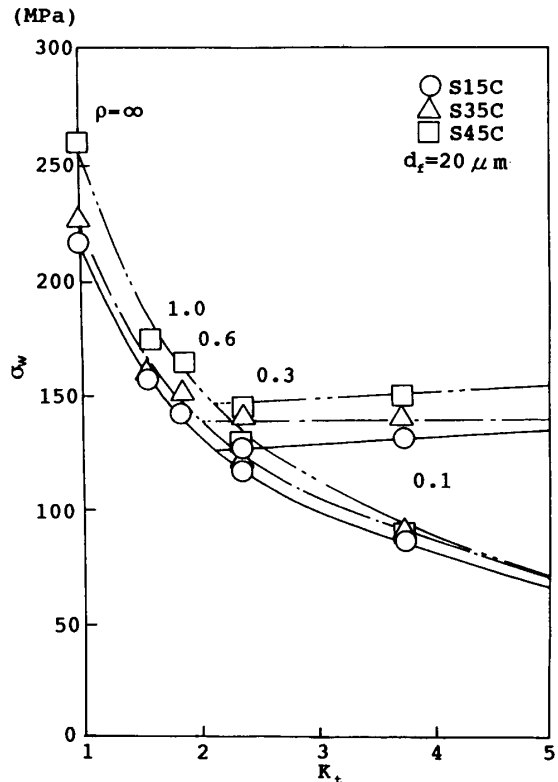


図5 フェライト粒径を揃えた場合のσ<sub>w1</sub>, σ<sub>w2</sub>と応力集中係数の関係

質によって決まる  $\sigma_B$  や  $\sigma_Y$  とは異なり,  $\sigma_{w0}$  がフェライトから発生した微視的き裂の伝ば限界条件で決まっているため, 微視的停留き裂の寸法程度の領域が  $\sigma_{w0}$  に関係しているためと考えられる。

**3・2 フェライト粒径を揃えた場合のすべり発生限界  $\sigma_{ws}$  とその切欠感度** 表4に  $\sigma_{ws}$  についての実験結果を示す。図4は, フェライト粒径を揃えた場合の最大応力  $K_t \cdot \sigma_w$  を  $1/\rho$  によって整理したものである。S15CとS45Cの結果を比較すると, すべり発生に關与する範囲は局所的であるため, すべり発生限界応力  $\sigma_{ws}$  へのパーライトの影響は,  $\sigma_{w0}$  へのパーライ

トの影響よりも小さい<sup>(3)</sup>。また, すべり発生限界の最大応力  $K_t \cdot \sigma_{ws}$  は  $\rho$  が小さくなるにつれ応力こう配が大となるためわずかに増加するが  $K_t \cdot \sigma_{w1}$  や  $K_t \cdot \sigma_{w2}$  の増加と比較すると増加量は小さいことがわかる。これは,  $\sigma_{ws}$  の決定に關係する領域が  $\sigma_{w1}$  の決定に關係する領域よりも狭いことによると思われる。

**3・3 切欠材の  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$  および分岐点の切欠半径  $\rho_0$  に及ぼす組織の影響** 実験により得た切欠材の結果を表5に示す。なお, 応力集中係数  $K_t$  の値は, 高精度の値<sup>(6)</sup>を用いている。

図5は,  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$  と  $K_t$  の關係を示す。炭素量の増加に伴い  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$  ともに増加している。図5によれば,  $\sigma_{w2}$  もパーライト体積率の増加とともにかなり上昇しており, その結果, フェライト粒径を揃えた3種類の炭素鋼で  $\rho_0$  はほぼ等しく0.4 mm程度となった。すなわち, フェライト粒径を揃えた場合(図5)の  $\sigma_{w2}$  に及ぼすパーライト体積率の影響は, フェライト粒径を揃えない従来の炭素鋼の結果(図1)よりも顕著に現れている。

表5 切欠形状と  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$

Material	$\rho$ (mm)	$K_t$	$\sigma_{w1}$ (MPa)	$\sigma_{w2}$ (MPa)	$d_f$ ( $\mu\text{m}$ )
S15C	$\infty$	1.00	215	-	20
	1.0	1.59	155	-	
	0.6	1.87	140	-	
	0.3	2.39	115	125	
	0.1	3.77	85	130	
S15C	$\infty$	1.00	180	-	50
	0.3	2.39	100	125	
	0.1	3.77	70	125	
S35C	$\infty$	1.00	225	-	20
	1.0	1.59	160	-	
	0.6	1.87	150	-	
	0.3	2.39	120	140	
	0.1	3.77	90	140	
S45C	$\infty$	1.00	260	-	20
	1.0	1.59	175	-	
	0.6	1.87	165	-	
	0.3	2.39	130	145	
	0.1	3.77	90	150	
S45C	$\infty$	1.00	280	-	5
	0.3	2.39	145	-	
	0.1	3.77	100	140	

表6 分岐点の切欠半径  $\rho_0$  とフェライト粒径  $d_f$

	Previous Result	Present Result	
S15C	( $d_f=?$ ) 0.6	( $d_f=20\mu\text{m}$ ) 0.4	( $d_f=50\mu\text{m}$ ) 0.6
S35C	( $d_f=?$ ) 0.4	( $d_f=20\mu\text{m}$ ) 0.4	
S45C	( $d_f=?$ ) 0.25	( $d_f=20\mu\text{m}$ ) 0.4	( $d_f=5\mu\text{m}$ ) 0.25

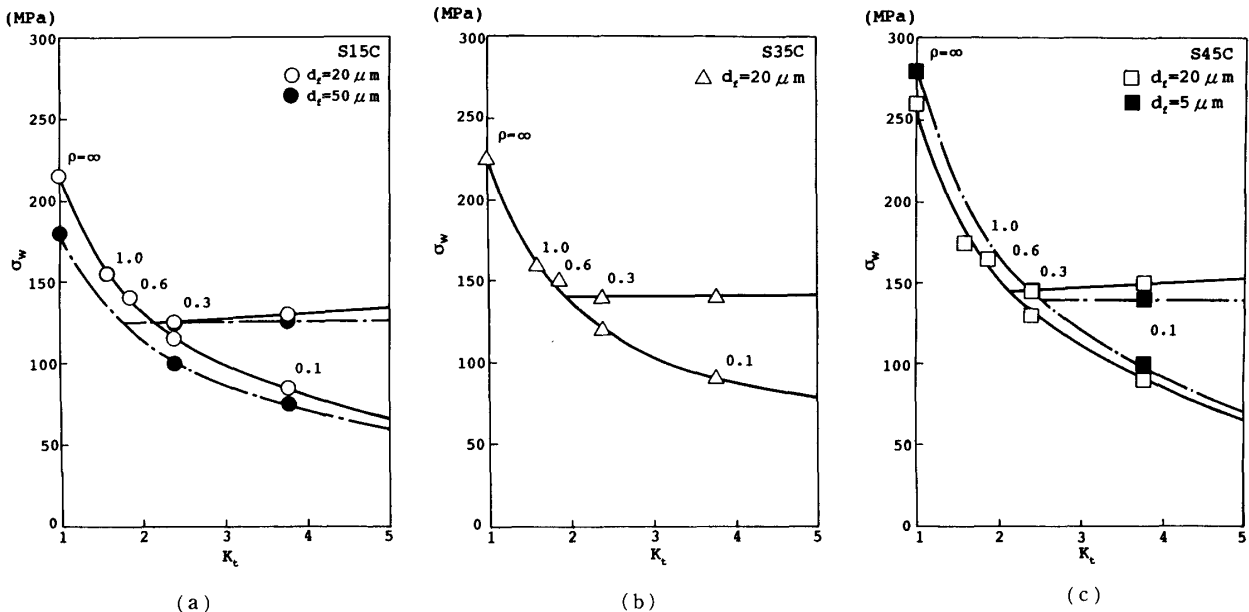


図6  $\sigma_{w1}$ ,  $\sigma_{w2}$  と応力集中係数の關係

その確認のため、S 15 Cではフェライト粒径  $d_f=50 \mu\text{m}$ 、S 45 Cでは  $d_f=5 \mu\text{m}$  となるように熱処理を行い得られた結果を図 6 に●、■印で示す。表 6 は、本実験で得られた切欠半径  $\rho_0$  とフェライト粒径  $d_f$  を表にまとめたものである。西谷らの通常の熱処理によって得た結果と本実験結果をあわせて示している。表 6 からわかるように S 15 C の  $d_f=50 \mu\text{m}$  の結果と、S 45 C の  $d_f=5 \mu\text{m}$  の結果は西谷らの結果とよく一致

している。

図 6 (c) に示すように、 $\sigma_{w2}$  へ及ぼすフェライト粒径の影響は、 $\sigma_{w0}$ 、 $\sigma_{w1}$  への影響とまったく異なり粒径が大きくなると上昇する。この原因を探るため停留き裂の状態を調べた。図 7 は S 45 C のフェライト粒径  $d_f=20 \mu\text{m}$  と  $d_f=5 \mu\text{m}$  の  $\rho=0.1 \text{ mm}$  での  $\sigma_{w2}$  の停留き裂を  $400^\circ\text{C}$  で焼なまし着色した後破断させた試験片の破面写真 ( $\times 100$ ) である。図 7 (a) と (b) を比較すれば (a) のほうがき裂前線の凸凹が激しい。これは、 $d_f$  が大きいほうが  $d_p$  (パーライト粒径) も大きく (図 8 参照)、また、き裂前線の凸凹の大小が結晶粒径の大小と対応していることによると思われる。また、図 8 は  $\sigma_{w2}$  の停留き裂を圧延方向に切断し SEM で観察したものである。図 8 より、 $d_f=20 \mu\text{m}$  では停留き裂がジグザグに進展していることが明らかにわかる。これらの写真から  $d_f=20 \mu\text{m}$  の  $\sigma_{w2}$  がフェライト粒径の影響を大きく受けていることがわかる。つまり、フェライト粒径を大きくした場合、 $\sigma_{w2}$  付近では巨視的停留き裂がジグザグに進展する傾向があるためき裂進展に必要なエネルギーが大となり停留しやすい状態にあるものと考えられる。

図 9 に、き裂発生限界  $\sigma_{w1}$  において切欠底に繰返される最大応力  $K_t \cdot \sigma_{w1}$  を平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  で無次元化してまとめたものを示す。図 9 には、過去に行わ

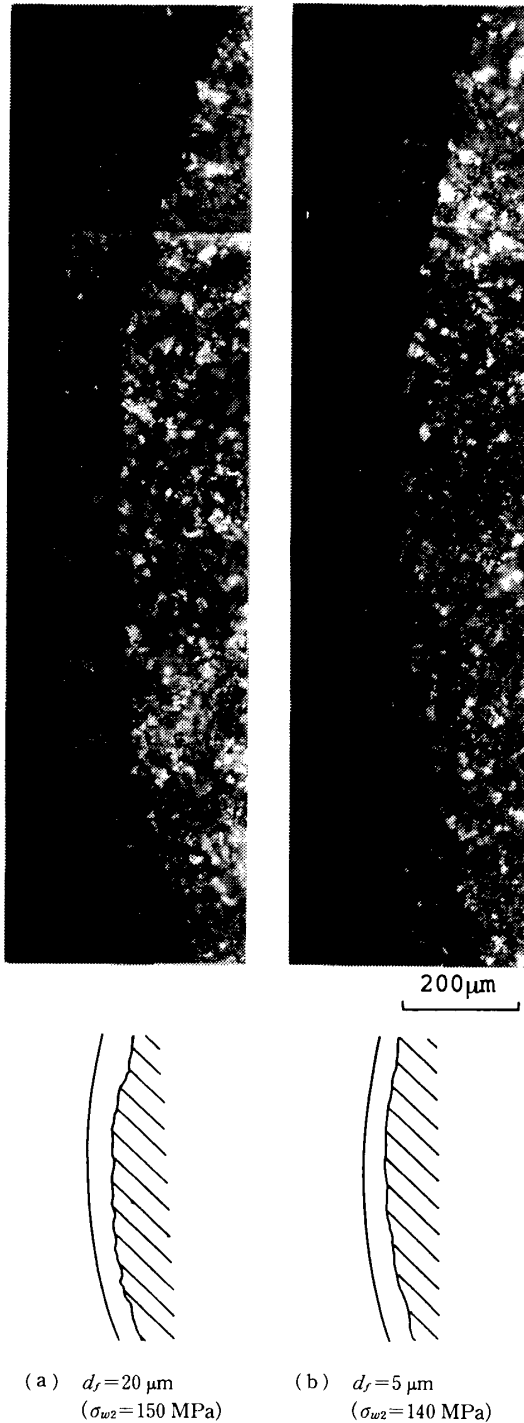


図 7 停留き裂の形状 (S 45 C) ( $\times 100$ ,  $\rho=0.1$ )

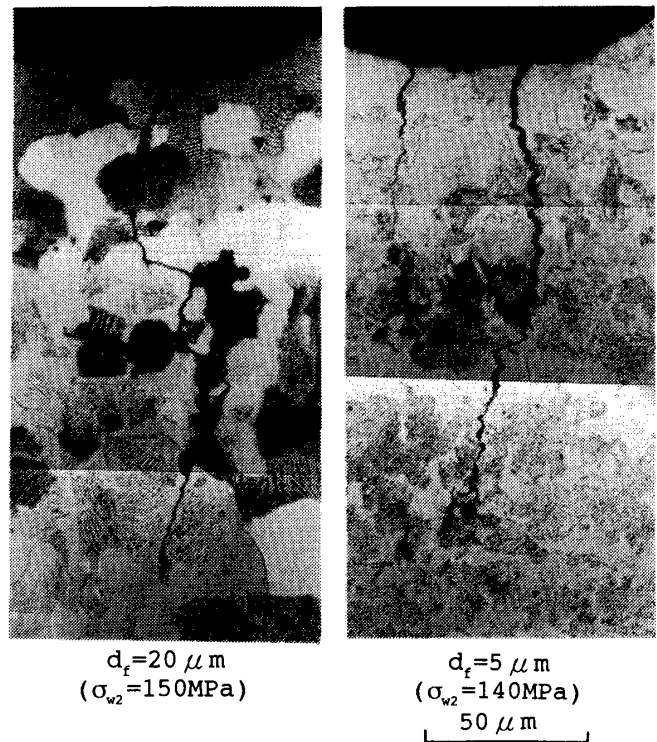


図 8 停留き裂写真 (S 45 C) ( $\times 1000$ ,  $\rho=0.1$ )

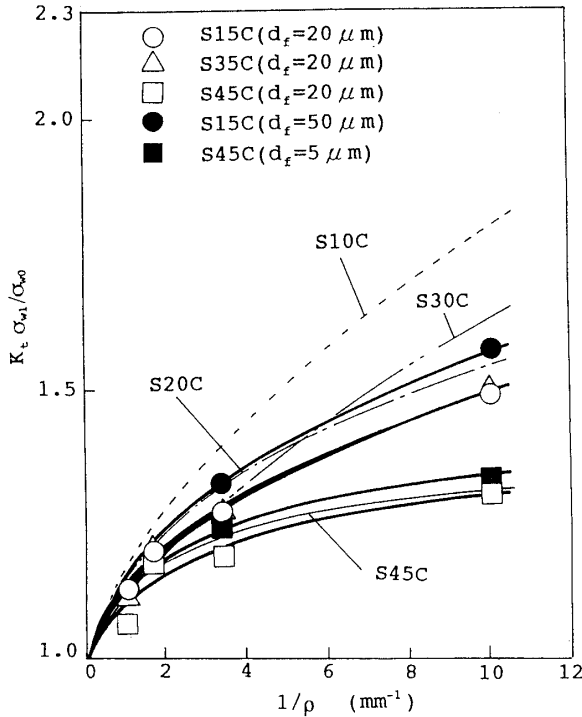


図9  $K_t \cdot \sigma_{w1} / \sigma_{w0}$  と  $1/\rho$  の関係 [過去の研究結果との比較(S10C<sup>(8)</sup>, S20C<sup>(5)</sup>, S30C<sup>(9)</sup>, S45C<sup>(7)</sup>)]

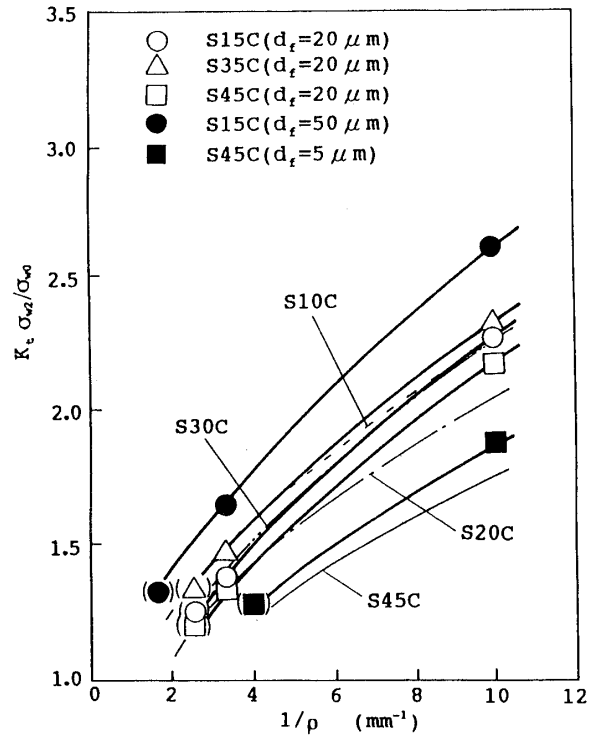


図10  $K_t \cdot \sigma_{w2} / \sigma_{w0}$  と  $1/\rho$  の関係 [過去の研究結果との比較(S10C<sup>(8)</sup>, S20C<sup>(5)</sup>, S30C<sup>(9)</sup>, S45C<sup>(7)</sup>)]

れた実験結果<sup>(5)(7)~(9)</sup>を正しい  $K_t$  で整理したものも比較のため示している。フェライト粒径を揃えた場合、本実験結果の S15C と S35C の切欠感度はほぼ同程度であるが、S45C ではパーライトの影響が現れて切欠きに敏感になっていることがわかる。このように  $\sigma_{w1}$  の切欠感度に及ぼすパーライトの影響は  $\sigma_{w0}$  に及ぼすパーライトの影響とよく似ている。図10は破断に基づく疲労限度  $\sigma_{w2}$  において切欠底に繰返される最大応力  $K_t \cdot \sigma_{w2}$  を平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  で無次元化してまとめたものを、過去に行われた炭素鋼の実験結果<sup>(5)(7)~(9)</sup>を正しい  $K_t$  で整理したものと比較して示した図である。図9, 10に示すようにフェライト粒径が異なると炭素量が同じでも切欠感度は変化する。

#### 4. 結 言

フェライト粒径を 20  $\mu\text{m}$  程度に揃えた3種類の炭素鋼 S15C, S35C, S45C の平滑試験片, 切欠試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い, 次の結論を得た。

(1) すべり発生限界応力  $\sigma_{ws}$  は, ほとんどパーライト体積率の影響を受けない。また, すべり発生限界での切欠底における最大応力  $K_t \cdot \sigma_{ws}$  は切欠きが鋭い場合にもあまり上昇しない。これらはすべり発生限界に関する領域がき裂発生等と比べ局所的であること

によるものと考えられる。

(2) 平滑材の疲労限度  $\sigma_{w0}$  および切欠材のき裂発生に基づく疲労限度  $\sigma_{w1}$  は, パーライト体積率がある一定量以下ではパーライトの影響をほとんど受けない。しかし, パーライト体積率がそのしきい値 ( $V_{p1h} \cong 50\%$ ) を越えれば, フェライト粒径が同じでも  $\sigma_{w0}$ ,  $\sigma_{w1}$  は大きく変わる。

(3) 中炭素鋼の切欠材の破断に基づく疲労限度  $\sigma_{w2}$  は, フェライト粒径に依存し粒径が大きくなるにつれて上昇する。これは, フェライト粒径を大きくすると停留き裂がジグザグに進展する傾向があるために,  $\sigma_{w2}$  が上昇することによるものと思われる。

(4) 炭素含有量の等しい炭素鋼において分岐点における切欠半径  $\rho_0$  はフェライト粒径に依存して変化する。これは  $\sigma_{w1}$  と  $\sigma_{w2}$  が粒径の変化に対して異なる依存性を示すことによる。

実験を手伝っていただいた卒論生苗村潤氏に深謝する。また, 本研究の一部は科研費総合研究(A)課題番号 04302026(研究代表: 西谷弘信教授)の援助を受けたことを記し謝意を表す。

#### 文 献

- (1) 横堀, *Tech. Rep. Tohoku Univ.*, 28-1(1963).
- (2) 山田・山田・国尾, *機論*, 52-474, A(1986), 412.

- (3) 西谷・堀尾・野口, 機論, 56-524, A(1990), 687.                      (7) 西谷・遠藤, 機論, 51-463, A(1985), 784.  
(4) 田村・山田・清水・国尾, 機論, 49-447, A(1983), 1378.                      (8) 西谷・西田, 機論, 35-280, (1969), 2310.  
(5) 西谷, 機論, 34-259, (1968), 371.    (9) 西谷・野口・内堀・中江, 機論, 54-503, A(1988), 1293.  
(6) 野田・世良・高瀬, 機論, 60-570, A(1994), 586.
-