

# フェライト-パーライト熱延鋼板の疲労特性に及ぼす 強化機構の影響

栗田 真人\*・外山 和男\*

Effects of Strengthening Mechanisms on Fatigue Properties  
of Ferrite-Pearlite Hot-Rolled Sheet Steel

Masato KURITA and Kazuo TOYAMA

**Synopsis :** In order to develop hot-rolled sheet steel with excellent formability and fatigue properties, the effects of strengthening mechanisms on the fatigue properties of ferrite-pearlite hot-rolled sheet steels were studied. Tests were conducted on the hot-rolled steels having tensile strength 500 to 600 MPa which were strengthened by solid solution, precipitation, increasing dislocation density and pearlite volume fraction and grain-refining. The following results are obtained :

(1) Fatigue limit and endurance ratio depend on strengthening mechanism. Endurance ratio is increased by solid-solution and precipitation strengthening, while not by increasing dislocation density and increasing pearlite volume fraction.

(2) Fatigue limit of the strengthened material can be related with the fatigue limit of base material, strengthening mechanism, and the increment of tensile strength by each strengthening mechanism.

(3) Though the stress amplitude at strain-controlled fatigue test, that is the resistance of material against cyclic deformation, is dependent on strengthening mechanisms, it is linearly related with fatigue limit independent of strengthening mechanisms.

(4) This fact suggests that the resistance of ferrite phase against crack initiation is proportional to its resistance against cyclic movement of dislocation, and that, therefore it is more effective to use the strengthening mechanisms which prevent the dislocation movement in ferrite phase under cyclic deformation for improving fatigue strength.

**Key words :** fatigue limit ; endurance ratio ; hot-rolled sheet steel ; strengthening mechanisms ; solid-solution ; precipitation ; dislocation ; pearlite ; grain size ; strain range.

## 1. 緒言

近年、燃費向上の理由により自動車を軽量化しようとする動きが活発化しており、多くの強度部材について使用鋼板の薄肉化による軽量化が検討されている。特に疲労強度の観点から高強度鋼板の適用が検討されているが、一般的には高強度化は延性の低下をもたらすため、成形性・加工性の確保のためにはできるだけ強度の増加量を抑えつつ疲労強度を向上することが望まれている。つまり耐久比の高い材料の開発が重要な課題となる。

引張強度が同じ材料でも添加元素あるいは組織により疲労特性が異なることはよく知られている。西岡らは構造用炭素鋼を用いて疲労強度に及ぼすC<sup>1)</sup>, Si, Mn, P, Cu<sup>2)3)</sup>, N, B<sup>4)</sup>, Ni, Cr, Mo<sup>5)</sup>添加の影響を調査し、添加量による疲労強度の回帰式を求め、疲労限度は降伏強度及び上記添加元素の添加量で表せることを示した。Sherman<sup>6)</sup>はV, Nb等の析出元素を添加したHSLA (high strength-low alloy)

鋼がHRLC (hot rolled-low carbon) 鋼と同等以上の疲労特性を持つことを示した。またKrauseら<sup>7)</sup>は冷間圧延した低炭素鋼、リン添加鋼、窒素添加鋼、複合組織鋼の疲労特性を調査し、複合組織鋼及びリン添加鋼が繰返し変形抵抗(同一歪量の変形に対する応力振幅)が高いことを示した。また阿部ら<sup>8)</sup>は各種強化方法の疲労限度上昇率(疲労限度上昇量/降伏強度上昇量)を調査し、固溶及び析出強化の疲労限度上昇率が他の強化方法に比べ高いことを示した。また水井ら<sup>9)</sup>は複合組織強化鋼とNb析出強化鋼を用いて有限寿命域の疲労損傷過程を調査し、繰返し変形抵抗は前者が高いことを示した。しかし熱延鋼板の疲労強度を効果的に改善するという観点から、疲労特性に及ぼす強化機構(強化方法)の影響を体系的に調べたものは少ない<sup>10)</sup>。

そこで本研究では、自動車用強度部材に最も多く使用されているフェライト-パーライト熱延鋼板を、析出、固溶、転位、細粒、パーライトにより強化し、疲労強度及び繰返し変形挙動と強化機構の関係を考察した。

Table 1. Chemical composition of steels used. (mass%)

Steel		Cooling Condition			C	Si	Mn	P	S	Al	N	
Base		FT 1093	AC →	CT 873	0.14	0.05	1.19	0.02	0.002	0.04	0.003	
Solid Solution	0.5%Si 1.0%Si P N	FT 1093	AC →	CT 873	0.15	0.54	1.22	0.02	0.002	0.04	0.002	
					0.14	0.93	1.20	0.02	0.002	0.04	0.002	
					0.14	0.05	1.19	0.07	0.002	0.03	0.003	
Precipitation	VN Nb(CN) TiC	FT 1093	AC →	CT 873	0.15	0.05	1.22	0.02	0.002	0.03	0.019	V:0.10
					0.14	0.05	1.20	0.02	0.002	0.04	0.004	Nb:0.040
					0.15	0.05	1.17	0.02	0.002	0.03	0.002	Ti:0.049
Dislocation		FT 973	AC →	CT 873	0.14	0.05	1.19	0.02	0.002	0.04	0.003	
Grain Size	Fine	FT 1093	WS →	CT 873	0.14	0.05	1.19	0.02	0.002	0.04	0.003	
	Coarse	1193	AC →	873	0.14	0.05	1.19	0.02	0.002	0.04	0.003	
Pearlite	High·C	FT 1093	AC →	CT 873	0.25	0.05	1.20	0.02	0.002	0.03	0.003	
	Low·C				0.05	0.05	1.21	0.02	0.002	0.03	0.003	

FT:Final rolling temperature(K) AC:Air cooling  
CT:Coiling temperature(K) WS:Water spray

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材は素材厚さ 6 mm の低炭素フェライト-パーライト熱延鋼板である。引張強度約 450 MPa の 0.15C%-1.2%Mn 鋼をベースとし、引張強度の増加量 100~150 MPa を目標に各種の方法で強化した 12 種類の供試材を用意した。固溶強化としては Si (0.5% 及び 1.0%), P (0.04%), N (270 ppm) の固溶により強化した。析出強化としては VN, Nb(CN), TiC の析出により強化した。転位強化としては A<sub>1</sub> 線以下の温度で最終圧延しフェライト相の転位密度を高くして強化した。細粒強化としては巻取り温度まで水冷し細粒化により強化した。比較のため最終圧延温度を高くした粗粒材も

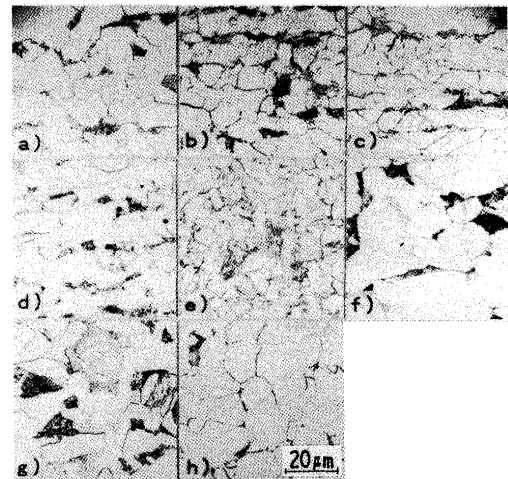


Fig. 1. Microstructure of test steels.

(a)Base (b)Si solid solution (c)Ti precipitation (d)Dislocation (e)Grain size (fine) (f)Grain size (coarse) (g)Pearlite (high C) (h)Pearlite (low C)

Table 2. Mechanical properties and grain size of steels used.

Steel		$\sigma_y$	$\sigma_b$	El.	R.W.	d
Base		304	444	39.3	30.7	13.8
Solid Solution	0.5%Si	366	532	31.9	26.7	11.7
	1.0%Si	402	564	30.5	25.9	11.0
	P	320	476	34.2	26.7	15.7
	N	413	549	27.7	25.1	11.5
Precipitation	VN	474	601	25.2	23.7	9.6
	Nb(CN)	416	543	27.1	17.9	7.9
	TiC	440	543	29.3	20.3	8.8
Dislocation		363	509	25.9	18.7	9.7
Grain Size	Fine	306	460	33.1	29.3	7.6
	Coarse	287	441	37.1	30.4	23.9
Pearlite	High·C	335	511	33.0	26.7	15.2
	Low·C	279	402	39.9	34.7	13.6

$\sigma_y$  (MPa) : yield strength El. (%) : elongation  
 $\sigma_b$  (MPa) : tensile strength R.W. (%) : reduction of width  
d ( $\mu$ m) : average diameter of ferrite grain

用意した。パーライト強化としては C 量を上げパーライト量を増加させたものと、C 量を下げパーライト量を少なくしたものを比較のため用意した。以上はすべて熱間圧延のままのフェライト-パーライト鋼である。

供試材の化学成分及び冷却条件を Table 1 に、機械的性質及び平均結晶粒径を Table 2 に示す。なお R.W. は幅絞りすなわち板幅の減少率である。光学顕微鏡組織を Fig. 1 に示す。固溶強化材、析出強化材は各々 1.0% Si 添加材及び Ti 添加材の光学顕微鏡組織を代表として示した。他の添加材も同様である。析出強化材はいずれも粒径は小さく 10  $\mu$ m 以下である。

### 2.2 疲労試験片

Fig. 2 に示す試験片を、長手方向が圧延方向と平行になるよう採取した。試験に際しては平行部を #700 のエメリ紙で軸方向に研磨し、表層の影響を除去した。

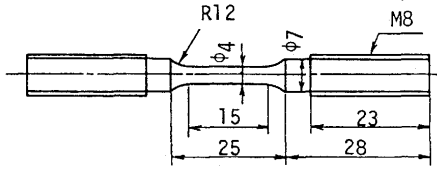


Fig. 2. Shape and size of fatigue test specimen.

2・3 疲労試験

繰返し応力-歪線図を求めるためインクリメンタルステップ (I-S) 試験 (振幅変動試験) を, 疲労強度を求めるため荷重制御疲労試験を, また特定の歪量における繰返し変形抵抗及び繰返しによるその変化を求めるため歪制御疲労試験を行った。

2・3・1 インクリメンタルステップ試験

試験は電気油圧式サーボ試験機により軸方向歪制御完全両振り波形にて歪振幅1.0%までを7段階に上昇させたのち, 同様に7段階で0%まで下降させたものを1ブロックとし破断までこのブロックを繰返した。

2・3・2 荷重制御疲労試験

同上試験機により繰返し速度15~20Hzの正弦波にて軸方向荷重制御完全両振り疲労試験を行った。

2・3・3 歪制御疲労試験

同上試験機により繰返し速度2~4 Hzの正弦波にて軸方向歪制御完全片振り疲労試験を行った。なお両振り歪制御疲労試験を行うと, 0.2%耐力以上の圧縮応力が負荷され座屈するおそれがある。このため片振りで行った。

3. 実験結果

3・1 インクリメンタルステップ試験

ヒステリシスループがほぼ安定するNf/2ブロック (Nf: 破断繰返しブロック数) にて得られたヒステリシスループの先端をなめらかに結び繰返し応力-歪線図を作図し,

$$\sigma = K^1 \epsilon^{n^1} \dots \dots \dots (1)$$

とおき,  $K^1, n^1$  を求めた。これより繰返し0.2%耐力  $\sigma_Y^1$  の値を求め, Table 3 に示す。  $\sigma_Y^1$  は  $\sigma_Y$  とほぼ等しいが, 転位強化材では  $\sigma_Y^1$  は  $\sigma_Y$  より約20%低い。

3・2 荷重制御疲労試験

応力振幅と破断繰返し数の関係をFig. 3 に示す。ここでは破断繰返し数Nf=10<sup>7</sup>となる応力振幅を疲労限度  $\sigma_w$  とした。  $\sigma_w$  及び耐久比をTable 3 に, 引張強度  $\sigma_B$  と  $\sigma_w$  の関係をFig. 4 に示す。

析出強化材はいずれも耐久比が高く, 約0.55である。固溶強化材の耐久比は添加元素及びその添加量によって決まり,  $\sigma_B$  が高いほど耐久比は高くなる。  $\sigma_B$  の最も高い1.0%Si固溶強化材の耐久比は析出強化材の耐久比とほぼ等しい。P固溶強化材は固溶強化材の中では最も耐久比が低く, 約0.5

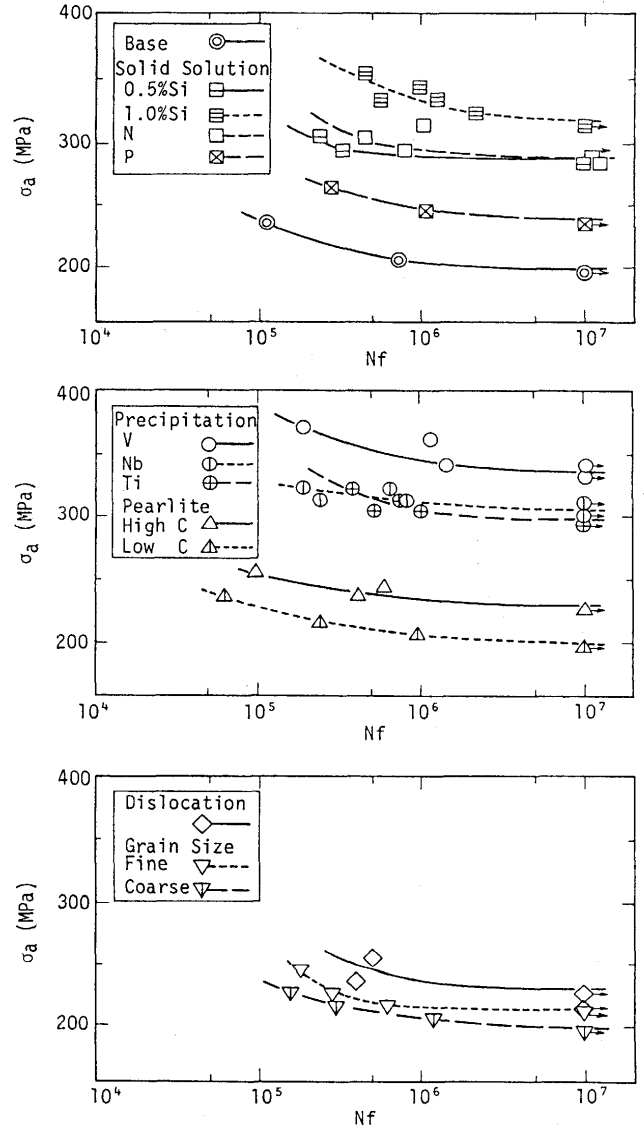


Fig. 3. Relationship between stress amplitude  $\sigma_a$  and number of cycles to failure Nf.

Table 3. Result of fatigue test.

		$\sigma_Y^1$	$\sigma_w$	$\sigma_w/\sigma_Y$	$\sigma_w/\sigma_B$
Base		282	198	0.65	0.45
Solid Solution	0.5%Si	364	285	0.78	0.54
	1.0%Si	424	314	0.78	0.56
	P	328	235	0.73	0.49
	N	395	288	0.70	0.53
Precipitation	VN	441	340	0.72	0.57
	Nb(CN)	411	304	0.73	0.56
	TiC	407	296	0.67	0.55
Dislocation		287	219	0.60	0.43
Grain Size	Fine	290	211	0.70	0.45
	Coarse	280	202	0.70	0.46
Pearlite	High·C	340	225	0.67	0.44
	Low·C	282	204	0.73	0.51

$\sigma_Y^1$  (MPa): cyclic yield strength  
 $\sigma_w$  (MPa): fatigue limit  
 $\sigma_Y$  (MPa): yield strength  
 $\sigma_B$  (MPa): tensile strength

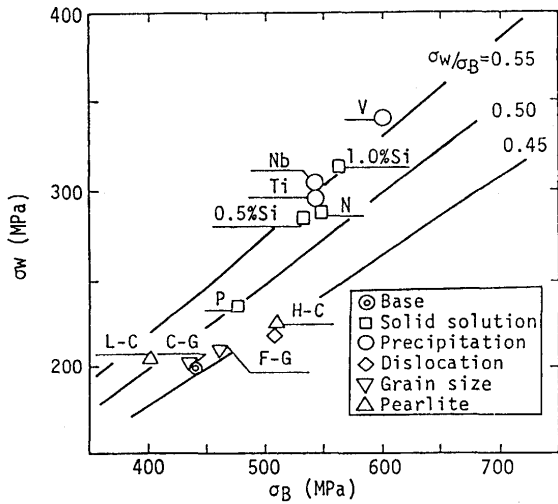


Fig. 4. Relationship between tensile strength  $\sigma_B$  and fatigue limit  $\sigma_w$ .

であるが、これは細粒強化材(細粒)、パーライト強化材(高C)および転位強化材の0.45に比べ高い。パーライト強化材(低C)はベース材よりも  $\sigma_B$  は低いが  $\sigma_w$  はほぼ等しい。細粒強化材(粗粒)は  $\sigma_B$ ,  $\sigma_w$  とともにベース材とほぼ等しい。

3.3 歪制御疲労試験

ヒステリシスループの解析法をFig. 5に示す。試験結果はヒステリシスループがほぼ安定する  $N = N_f/2$  時のヒステリシスループより弾性歪量  $\Delta\epsilon_e$ , 塑性歪量  $\Delta\epsilon_p$  を求めて整理した。

全歪量  $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$  の応力振幅  $\sigma_a$  の繰返しにともなう変化をFig. 6に示す。本実験での最大全歪量  $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$  において、いずれの供試材も繰返し初期に  $\sigma_a$  は低下し、軟化することがわかる。Si固溶強化材は  $\sigma_B$  がほぼ等しいNb, Ti析出強化材に比べ、初期の  $\sigma_a$  は小さく、繰返しにともなう軟化量も小さい。これに対し転位強化材は軟化量は大きい。全歪量  $\Delta\epsilon_t = 0.3\%$  の繰返しにおいては、 $\sigma_B$  が500MPa未満のものは初期に緩やかに軟化し、 $\sigma_B$  が500MPa以上のものは破断までほぼ一定である傾向にあった。なおいずれの  $\Delta\epsilon_t$  の試験でも繰返しにともない応力緩和を生じ、平均応力は0に近くなる。

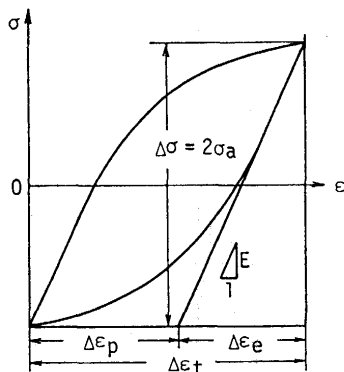


Fig. 5. Analysis method of hysteresis loop.

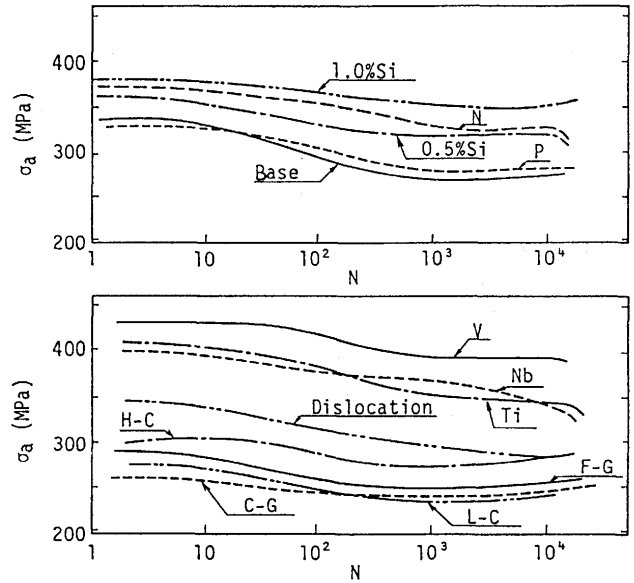


Fig. 6. Stress response curves at low cycle fatigue test. ( $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$ )

4. 考察

4.1 疲労強度に及ぼす強化機構の影響

Fig. 4に示したように同じSi固溶強化材でも添加量により耐久比が異なるので、各強化機構の影響を評価する方法として、ベース材からの引張強度変化量  $\Delta\sigma_B$  と疲労限度変化量  $\Delta\sigma_w$  の比を用いた。 $\Delta\sigma_B$  と  $\Delta\sigma_w$  の関係をFig. 7に示す。析出強化元素であるV, Nb, Tiの  $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$  はほぼ等しく、平均して0.97、固溶強化についても各供試材の傾きはほぼ等しく0.91、細粒強化は0.59、転位強化は0.32、パーライト強化は0.21である。熱延鋼板の耐久比改善には析出及び固溶強化が添加元素によらず効果的である。これに対し転位、パーライト強化は効果的でないことがわかる。以上の結果より、低炭素フェライト-パーライト熱延鋼板(疲労限

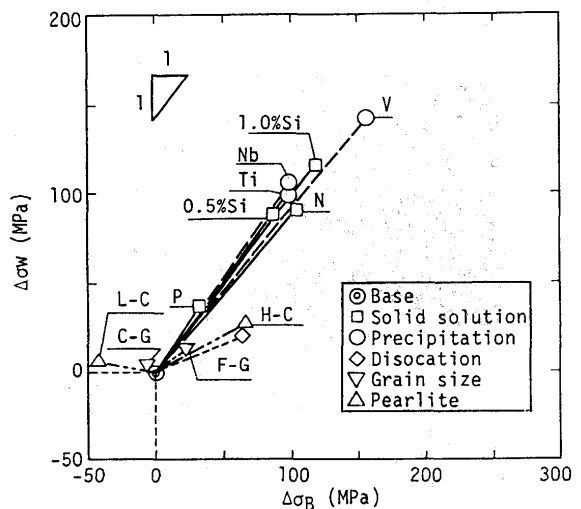


Fig. 7. Relationship between increase of tensile strength  $\sigma_B$  and that of fatigue limit  $\sigma_w$ .

度 $\sigma_{w0}$ )をある強化方法で $\Delta\sigma_B$ だけ上昇させた場合、疲労限度 $\sigma_w$ は、式(2)により推定できることがわかる。

$$\sigma_w = \sigma_{w0} + A \cdot \Delta\sigma_B \dots\dots\dots(2)$$

ここで定数Aは、すでに述べた各強化機構における $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ の値である。

強化機構により耐久比が異なることは疲労き裂発生に対する抵抗が強化機構に依存することを示している。疲労き裂先端近傍にはセルなどの繰返し変形特有の転位構造が形成され、疲労き裂発生は転位の運動と密接に関係していることが知られている<sup>10)</sup>。Fig. 8には試験後の試験片表面のSEM観察結果を示す。Si固溶強化材、Ti析出強化材ともフェライト相内でき裂が生じていることがわかる。転位強化材、パーライト強化材においてもフェライト相内でき裂が生じていた。このようにき裂がフェライト相内で生じること、Fig. 4の $\Delta$ 印で示したようにパーライト量が疲労限度に及ぼす影響は小さいことから強化機構により耐久比が異なるのは、フェライト相での疲労き裂発生のしやすさが異なるためであり、パーライトの影響は小さい、と考えられる。

固溶、析出、転位強化はいずれもフェライト相の強度を高める方法である。転位強化が他二者に比べ $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ の値が小さいのは、転位の繰返し運動に対する抵抗が安定でないためと考えられる。予歪付与も転位強化の一種であるが、0.2%耐力や引張強度は上昇しても疲労強度は必ずしも上昇しないことが知られている<sup>11)</sup>。歪制御疲労試験にて予歪材では繰返しにより応力振幅が大きく低下し、繰返し安定期の応力振幅は圧延まま材とあまり変わらないこと<sup>12)</sup>から、予歪による高密度の転位は繰返しにより再配列し繰返し抵抗は

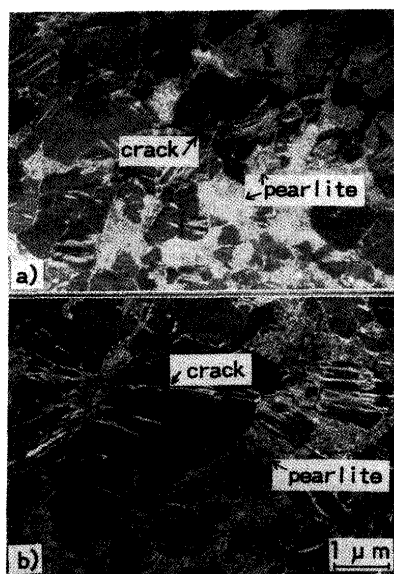


Fig. 8. SEM micrographs of the surfaces after cyclic deformation.  
 a) Si(1%) solid solution  
 $\sigma_a = 353(\text{MPa})$   $N_f = 1.50 \cdot 10^5$   
 b) Ti precipitation  
 $\sigma_a = 323(\text{MPa})$   $N_f = 8.20 \cdot 10^4$

小さくなると考えられる。本試験における転位強化材の耐久比が低いのは、予歪の場合と同様、繰返しにより転位が再配列するためと考えられる。

細粒強化はパーライト強化同様フェライト相自身は強化されていないため転位の繰返し運動に対するフェライト相内の抵抗はベース材のそれと変わらないが、粒界が転位の運動の障害となり疲労強度の向上に寄与すると考えられる。しかしFig. 4に示すように、その寄与は小さい。これは細粒化といっても本試験で用いた供試材の粒径の差が小さいためと考えられる。例えば立花ら<sup>13)</sup>は構造用炭素鋼丸棒材を用いて疲労限度と粒径の関係を、

$$\sigma_w = \sigma_0 + A \cdot d^{-0.5} \dots\dots\dots(3)$$

で表わせることを示しているが、この式を用いて本実験結果を整理すると、疲労限度の差は細粒材と粗粒材で約25MPaとなり非常に小さい。本試験における細粒材及び粗粒材の粒径はそれぞれフェライト-パーライト熱延鋼板として製造可能な粒径の下限値及び上限値に近く、細粒化によって疲労限度を大幅に改善することは困難と考えられる。なお析出強化材では粒径が小さく細粒強化も兼ねていると考えられるが、以上に述べたように疲労限度に対する細粒化の寄与は小さく、耐久比向上には主として析出強化が寄与していると考えられる。

以上より熱延鋼板の耐久比を改善するにはパーライトを低減し、析出あるいは固溶強化元素を添加することが効果的であると結論づけられる。

#### 4・2 繰返し変形抵抗に及ぼす強化機構の影響及び疲労強度との関係

歪制御下の応力振幅 $\sigma_a$ は繰返し変形抵抗すなわち転位の繰返し運動に対する抵抗を示すものである。強化機構の影響を明らかにするため、 $\sigma_B$ と $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$ 及び $\Delta\epsilon_t = 0.3\%$ における $\sigma_a$ との関係を調べた。これをFig. 9に示す。いずれの場合も $\sigma_B$ とともに $\sigma_a$ は上昇する傾向にあるが同一の $\sigma_B$ に対し $\sigma_a$ は強化機構により異なり、析出及び固溶強化材では高く他の強化材では低い。転位の繰返し運動は軟質なフェライト相の塑性変形を意味しており、き裂の発生抵抗と同様にフェライト相の強化機構に依存すると考えられる。

次にフェライト相のき裂発生抵抗のパラメータである $\sigma_w$ と $\sigma_a$ との関係をFig.10に示す。いずれの $\Delta\epsilon_t$ でも $\sigma_w$ と $\sigma_a$ との相関は $\sigma_B$ と $\sigma_a$ との相関より高く、下記の式で表されることがわかる。

$$\sigma_w = \alpha \cdot \sigma_a + \beta \dots\dots\dots(4)$$

ここで $\alpha$ 、 $\beta$ は強化機構によらず $\Delta\epsilon_t$ のみの関数である。 $\sigma_w$ と $\sigma_a$ の相関は $\sigma_w$ の場合と同様、相関は高い。相関係数は $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$ の場合、 $\sigma_B$ 、0.2%耐力 $\sigma_Y$ ではそれぞれ0.91、0.93であるが、 $\sigma_w$ 、 $\sigma_Y$ ではそれぞれ0.97、0.98である。また多数試験片法により得られた繰返し0.2%耐力も $\sigma_w$ と相関がある

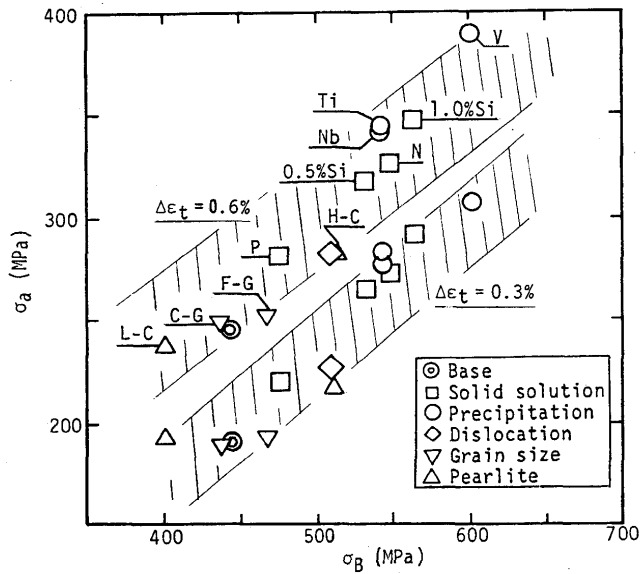


Fig. 9. Relationship between tensile strength  $\sigma_B$  and stress amplitude  $\sigma_a$  at low cycle fatigue test.

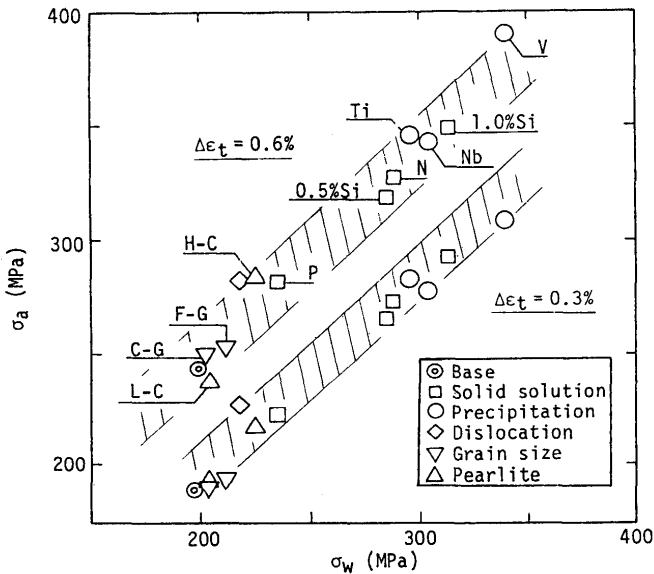


Fig. 10. Relationship between fatigue limit  $\sigma_w$  and stress amplitude  $\sigma_a$  at low cycle fatigue test.

ことが知られており<sup>14)</sup>、本報の結果とあわせて転位の繰返し運動に対する抵抗がき裂の発生に対する抵抗と基本的に同じものであることを示している。これより疲労強度の改善には、転位の繰返し運動に対する抵抗が大きい強化機構を選択して強化した方が有効であることがわかる。

### 5. 結言

各種の強化機構により強化した400~600MPa級低炭素フ

ェライト-パーライト熱延鋼板の疲労試験を行い、以下の知見を得た。

1) 疲労き裂発生限度応力を示す疲労限度及び耐久比はフェライト相の強化機構により決まる。耐久比改善には析出及び固溶強化が効果的であり、転位、パーライト強化は効果的でない。このように強化機構により疲労限度が異なるのはフェライト相でのき裂発生のしやすさが異なるためである。

2) 疲労限度が $\sigma_{w0}$ である低炭素フェライト-パーライト熱延鋼板を、ある強化機構により引張強度を $\Delta\sigma_B$ 上昇させた場合、その疲労限度 $\sigma_w$ は、以下の式により推定できる。

$$\sigma_w = \sigma_{w0} + A \cdot \Delta\sigma_B$$

ここでAは強化方法により異なる定数であり、析出強化では0.97、固溶強化では0.91、細粒強化では0.59、転位強化では0.32、パーライト強化では0.21である。

3) 繰返し変形下の変形抵抗を示す歪制御疲労試験時の応力振幅 $\sigma_a$ 及び繰返しにともなう $\sigma_a$ の変化は強化機構により異なる。 $\sigma_a$ は同一の引張強度に対し析出強化、固溶強化では高く、他の強化では小さい。

4)  $\sigma_w$ と歪制御疲労試験時の同一歪量に対する $\sigma_a$ は強化機構にかかわらず下記の式により関係づけられる。

$$\sigma_w = \alpha \cdot \sigma_a + \beta$$

ここで $\alpha, \beta$ は強化機構によらない歪制御試験時の全歪量のみ関数である。

5) このことは転位の繰返し運動に対する抵抗が大きい強化機構を選択して強化した方が疲労強度の改善に有効であることを示している。

最後に、供試材の材料設計に協力いただき多くのご助言をいただいた住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所国重和俊博士、鹿島製鉄所野村茂樹氏に深く感謝の意を表します。

### 文 献

- 1) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **38** (1972), p.915
- 2) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), p.3230
- 3) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), p.3237
- 4) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), p.3244
- 5) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), p.3249
- 6) A.M.Sherman: Metall. Trans. A, **6A** (1975), p.1035
- 7) A.R.Krause, R.W.Landgraf and B.T.Crandall: SAE Paper No.790461, (1979)
- 8) 阿部 隆, 三瓶哲也, 大鈴弘忠, 小指軍夫: 鉄と鋼, **70** (1984), p.1462
- 9) 水井正也, 武智 弘, 関根知雄: 鉄と鋼, **76** (1990), p.414
- 10) 粟谷丈夫, 片桐一宗, 白石哲朗: 材料, **25** (1976), p.145
- 11) 長江守康, 加藤昭彦, 香川裕之, 栗原正好, 岩崎紀夫, 稲垣裕輔: 鉄と鋼, **68** (1982), p.1430
- 12) 水井正也, 秋末 治: 材料, **39** (1990), p.602
- 13) 立花俊一, 川地俊一, 山田邦博, 国尾 武: 日本機械学会論文集 (A編), **54** (1988), p.1956
- 14) 水井正也, 高橋 学: 材料とプロセス, **5** (1992), p.1867