

複合組織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*・野村 茂樹*²・国重 和俊*

Effect of Strengthening Mechanism on Fatigue Properties of Dual Phase Sheet Steel

Masato KURITA, Kazuo TOYAMA, Shigeki NOMURA and Kazutoshi KUNISHIGE

Synopsis : This study is made to clarify the effect of strengthening mechanism of dual phase (ferrite plus martensite phase ; DP) steels on the fatigue properties in comparison with ferrite pearlite steels. Several DP steels were obtained to change the kind of strengthening mechanism by adding various alloying elements to the low C-Mn-Cr-Mo DP steel. The strain-controlled and load-controlled fatigue tests were performed. Main results were as follows :

(1) Solid solution strengthening elements, such as silicon and phosphorus, and precipitation strengthening elements, such as niobium and titanium, exhibited a significant increase in fatigue limit. Increasing the carbon content, however, contributed to the fatigue limit to a very small extent.

(2) Considering the fact that the fatigue cracks initiated at the ferrite matrix, not in the second hard phase martensite, the experimental results are explained by strengthening of ferrite matrix being more effective to obtain a high fatigue limit than that of hard phase as well as in ferrite pearlite steels.

Key words : dual phase sheet steel ; alloying element ; strengthening mechanism ; fatigue limit ; endurance ratio ; ferrite matrix ; volume fraction of martensite ; fatigue crack.

1. 緒言

軟質のフェライトと少量の硬質第二相(マルテンサイト)からなる複合組織鋼(DP鋼)は、降伏比が低く伸びが良好であるため、プレス成形性に優れている¹⁾。DP鋼の主な用途は厳しい加工性が要求されるホイール等自動車足回り部品用鋼板である。これらの部品は重要保安部品であると同時に繰返し荷重が作用するため、成形性ととも高い疲労強度が要求されている。

DP鋼の疲労特性は主としてマルテンサイト体積率^{2)~4)}およびマルテンサイトの分布状態⁵⁾⁶⁾の影響に注目して明らかにされつつある。一方著者らは、各種合金元素を添加しフェライトの強度およびパーライト体積率を変化させたフェライト-パーライト鋼(以下F+P鋼と表示)を用いた実験にて、疲労限度および耐久比は軟質なフェライト地の強化機構により決定され、硬質なパーライトの影響は小さいこと⁷⁾を明らかにした。DP鋼でも、疲労き裂がフェライト粒内あるいはマルテンサイトとフェライトの粒界から発生する⁸⁾⁹⁾ため、同様な傾向を有すると予想される。したがってDP鋼の疲労特性の向上にはフェライト地を強化することが重要であると思われるが、これまでの研究は既に述べたようにマルテンサイトによるき裂進展阻止の効果を対象に調査したものが多く¹⁰⁾、フェライト地を強化する合金元素の影響に

ついてはほとんど報告がない¹¹⁾。そこで本報では、DP鋼の疲労特性に及ぼす合金元素の影響を、F+P鋼と対比しながら明らかにすることを目的として、種々の合金元素を添加したDP鋼を作製し疲労試験を行い、強化機構と疲労限度の関係を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材の機械的性質のばらつきを極力小さくするため、空冷でもDP組織が得られるCr, Mo系鋼種をベースとして選定した¹²⁾。供試材の化学成分をTable 1に示す。供試材Aをベースとし、B, C, D, E, FはそれぞれC, Si, P, Nb, Tiを添加あるいは増量し強化したものである。小型真空溶接炉で溶製したインゴットを30mm厚さの素材に鍛造した後、

Table 1. Chemical compositions of steels tested.
(mass%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Others
A (the base)	0.05	0.51	1.55	0.021	0.001	0.70	0.26	
B (carbon)	0.10	0.50	1.51	0.020	0.001	0.69	0.25	
C (silicon)	0.05	1.50	1.52	0.019	0.001	0.71	0.26	
D (phosphorus)	0.05	0.51	1.54	0.077	0.001	0.72	0.26	
E (niobium)	0.05	0.49	1.46	0.019	0.002	0.70	0.25	Nb:0.024
F (titanium)	0.05	0.51	1.47	0.018	0.001	0.69	0.25	Ti:0.050

平成7年6月5日受付 平成7年7月24日受理 (Received on June 5, 1995; Accepted on July 24, 1995)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research and Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660)

* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

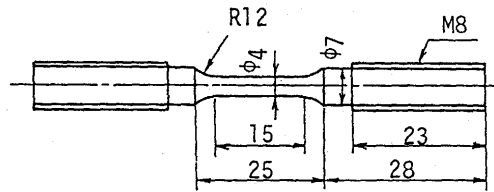


Fig. 1. Shape and size of fatigue test specimen.

加熱温度1473K, 仕上げ温度を1153Kにて板厚6mmまで熱間圧延を行い, その後室温まで空冷した。

2・2 疲労試験

試験片形状をFig. 1に示す。素材鋼板から圧延方向に平行に板厚中心部から試験片を採取した。

疲労限度を求めるために軸荷重制御疲労試験を行った。また特に低寿命域での繰返し加工硬化・軟化挙動を調べるため軸ひずみ制御疲労試験を行った。いずれも油圧サーボ式試験機を用いて行った。

軸荷重制御疲労試験は, 応力比-1, 繰返し速度は10~15 Hzにて行った。破断しない場合, 繰返し数 1×10^7 回にて試験を打ち切った。

軸ひずみ制御疲労試験は, ひずみ比0, 全ひずみ量を0.6%とし, 繰返し速度は0.5~2.0Hzで行った。特定の繰返し数において応力-ひずみヒステリシスループを記録し, 繰返しにともなう応力範囲の変化を調査した。

3. 実験結果

3・1 供試材の機械的性質と顕微鏡組織

供試材の機械的性質をTable 2に, 光学顕微鏡組織をFig. 2に, また組織の定量調査結果をTable 3に示す。フェライト粒径はいずれの供試材でもほぼ等しく, 約 $7 \mu\text{m}$ である。マルテンサイト体積率は供試材により異なり, C量の高い供試材Bでは高く, TiCが析出する供試材Fでは低い。

3・2 荷重制御疲労試験結果

応力振幅と破断繰返し数の関係をFig. 3に示す。これより疲労限度を読み取りTable 4に示す。耐久比(疲労限度/引張強度)は供試材により0.41~0.60と大きく異なる。特にCを増量した供試材Bではベースの供試材Aに対し引張強度は向上しているが疲労限度の向上量は小さく耐久比は大きく低

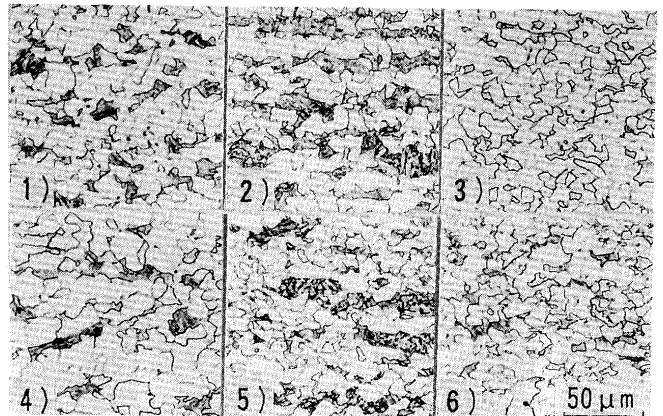


Fig. 2. Microstructure of steels tested. (1)A(base) (2)B(carbon) (3)C(silicon) (4)D(phosphorus)(5)E(niobium)(6)F(titanium)

Table 3. Microstructural characteristics of steels tested.

Steel	Grain size (μm)	Volume fraction of martensite (%)
A	5.6	17
B	6.5	34
C	6.3	13
D	6.1	16
E	5.8	14
F	6.3	9

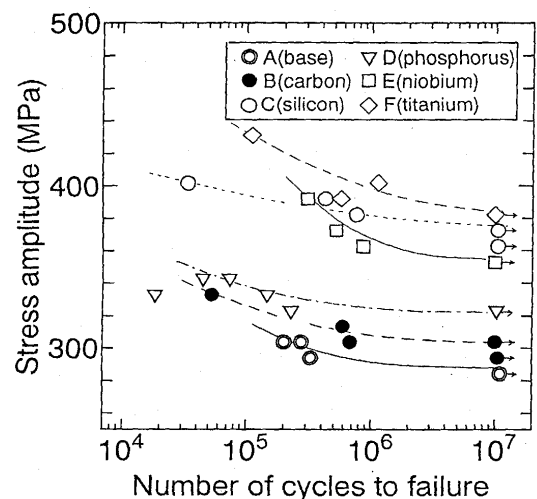


Fig. 3. Relationship between stress amplitude and number of cycles to failure.

Table 2. Mechanical properties of steels tested.

Steel	Yield strength σ_y (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation ϵ_t (%)
A	297	581	28.3
B	379	736	22.2
C	338	647	27.3
D	302	603	27.8
E	410	652	26.9
F	427	649	25.0

Table 4. Fatigue limit of steels tested.

Steel	Fatigue limit σ_w (MPa)	$\frac{\sigma_w}{\sigma_B}$
A	289	0.50
B	304	0.41
C	378	0.58
D	323	0.54
E	358	0.55
F	387	0.60

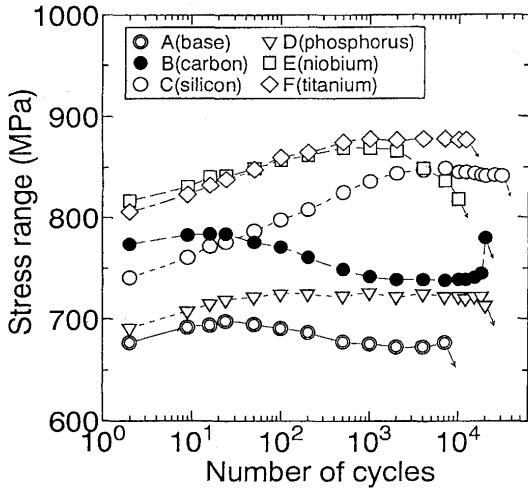


Fig. 4. Variation of stress range ($\Delta\epsilon_t=0.6\%$).

下している。したがってDP鋼にて耐久比を向上させるには、フェライト地を固溶強化あるいは析出強化するSi, P, Nb, Tiの添加が好ましく、マルテンサイトの体積率を増加させるCの増量は好ましくないことがわかる。

3・3 ひずみ制御疲労試験結果

繰返しによる応力範囲 $\Delta\sigma$ の変化をFig. 4に示す。その挙動は供試材により大きく異なることがわかる。ベースの供試材AとC増量で強化した供試材B以外ではいずれも繰返し加工硬化し、特にSiを増量した供試材Cでは繰返し加工硬化量が大きい。また安定期(繰返し数 $N=1/2N_f$, N_f :破断繰返し数)の $\Delta\sigma$ は、供試材F, C, Eの順に高い。

4. 考察

4・1 疲労き裂の発生位置

疲労き裂発生位置を調べるため、マルテンサイト体積率の高い供試材Bおよびその他の鋼種の代表として供試材Eについて疲労試験後試験片の表面をSEMにて観察した。

Fig. 5にSEM反射電子像による表面観察結果を示す。いずれの供試材でもき裂はフェライト地にて生じていること、供試材Bではき裂はフェライト中を選択的に進展していることがわかる。マルテンサイト体積率の高い供試材Bでは耐久

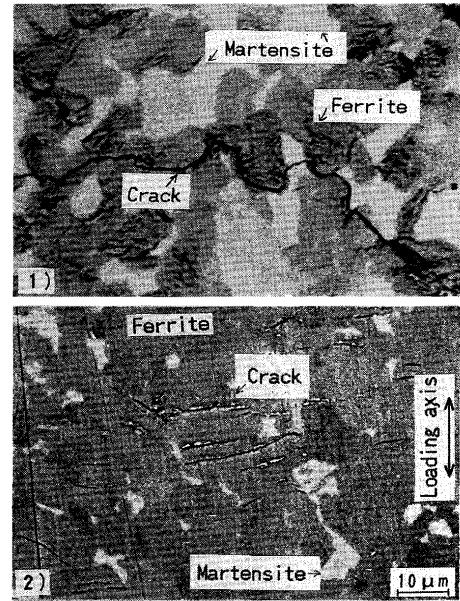


Fig. 5. SEM micrographs of surfaces of test steels after fatigue test. (1)B(carbon, $\sigma_a=333\text{MPa}$, $N_f=8.2\times 10^4$) (2)E(niobium, $\Delta\epsilon_t=0.6\%$, $N_f=1.1\times 10^4$)

比が低いこととあわせて考えると、マルテンサイト自体による疲労き裂進展抑制効果は小さく、疲労限度を主に支配している因子はF+P鋼の場合と同様フェライト地での疲労き裂発生抵抗であると判断される。

4・2 繰返し変形による下部組織の変化

繰返し変形によるフェライト下部組織の変化は疲労き裂の発生と関連しており、また繰返し変形により形成される転位構造は強化機構と関連がある¹³⁾。そこで全ひずみ量0.6%の繰返しを行った試験片の下部組織をTEM観察した。観察に当たっては、試験片平行部から薄板を切り出し、機械研磨後酢酸一過塩素酸水溶液で電解研磨を行い観察用試料とした。

Fig. 6に繰返し後の下部組織を示す。供試材A, B, Cでは明瞭なcellおよび転位wallが形成されている。これに対し供試材Fでは明瞭なcell状組織が観察されない。Fig. 6の他、供試材Dではcellが観察されるが供試材Eでは観察されなかった。このようにベース鋼あるいは固溶強化鋼の場合、フ

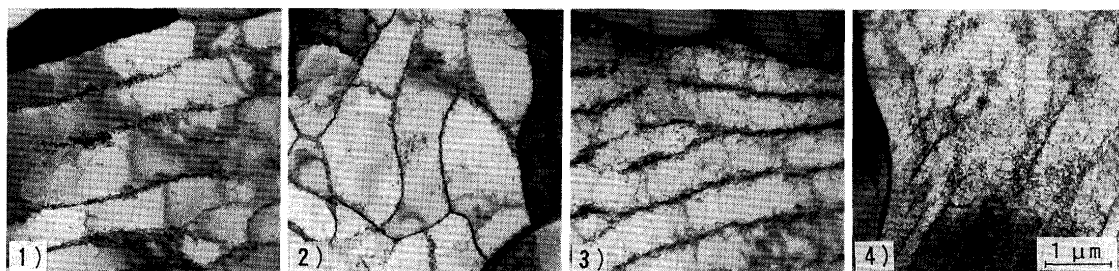


Fig. 6. TEM micrographs of the steels after fatigue test($\Delta\epsilon_t=0.6\%$). (1)A(base, $N_f=8.5\times 10^3$) (2)B(carbon, $N_f=2.1\times 10^4$) (3)C(silicon, $N_f=3.4\times 10^4$) (4)F(titanium, $N_f=1.4\times 10^4$)

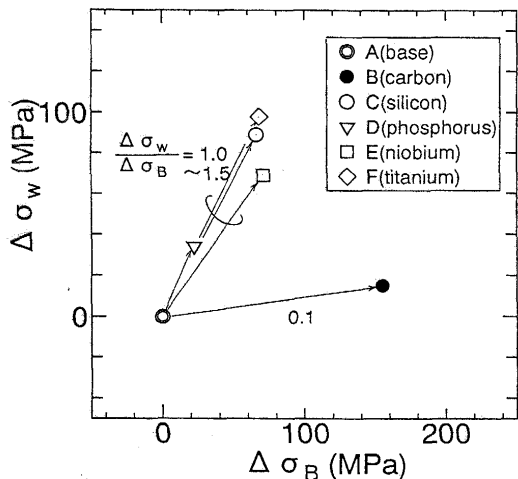


Fig. 7. Relationship between increase in tensile strength and that in fatigue limit.

フェライト地には転位が堆積した明瞭なcellや転位wallが形成されるのに対し、析出強化鋼ではこれらの転位組織は形成されにくい。この傾向はF+P鋼の場合と同じ¹⁴⁾であり、フェライト地に形成される転位構造は硬質第二相の種類によらないと判断される。

4・3 疲労強度に及ぼす合金元素の影響

合金元素による引張強度上昇量 $\Delta\sigma_B$ と疲労限度上昇量 $\Delta\sigma_w$ の関係をFig. 7に示す。 $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ は、Si増量(供試材C)、P増量(供試材D)、Nb添加(供試材E)、Ti添加(供試材F)では1.0~1.5と大きく、それに対しC増量(供試材B)では0.1と小さい。前述したように疲労き裂は軟質なフェライト地で生ずるため、Si、P増量による固溶強化やNb、Ti添加による析出強化によりフェライト地を強化することが耐久比の向上に非常に効果的であり、C増量によるマルテンサイト体積率(Vf(M))増加による強化は σ_B 向上には効果があっても、 σ_w 向上には効果的でないことがわかる。なおF+P鋼の場合、固溶および析出強化による $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ はそれぞれ0.91、0.97であり、DP鋼と定量的にもほぼ等しい。これは、 $\Delta\sigma_w/\Delta\sigma_B$ が合金元素の種類のみならず、硬質第二相の種類にも依存しないことを示している。

4・4 引張強度および疲労限度に対する強化機構の寄与

4・4・1 引張強度に対する強化機構の寄与の定量評価

Table 3に示したように供試材B以外の供試材でも、合金元素によりVf(M)が異なっており、必ずしも析出・固溶強化元素がフェライト地の強化のみに寄与しているわけではない。そこで合金元素の効果を強化機構に分離して疲労限度上昇への各種強化機構の寄与を算定した。

まず最初に引張強度に関して述べる。引張強度に及ぼす合金元素の効果は、①フェライトの強化、②マルテンサイトの強化、③Vf(M)増加による強化、の3つに分類することができる。①はさらにフェライト粒の細粒強化とフェライト粒内の固溶・析出強化に分けることができる。しかしTable 3に示したように供試材間のフェライト粒径の差は小

さいためフェライトの強化①はフェライト粒内の固溶・析出強化のみに基づくと仮定した。この強化量を $\Delta\sigma_{B,F}$ とした。次に②、③の強化について考える。供試材Bでは、空冷によって得たDP組織鋼なので、C増量による強化はVf(M)の変化のみにより生じ、C増量によるフェライト地の固溶強化はないと仮定した¹²⁾。マルテンサイトの強度は主としてCの濃度により決まることから、ここではいずれも空冷によりDP組織を得ているので、解析に当たっては②の寄与は無視できる¹²⁾。また、さらに②の寄与について付言すると、例えばH.C.Chenらの式¹⁵⁾を用いて推定すれば、供試材C、D、E、Fで前述の方法で求めた値と最大で8 MPaとわずかな相違にすぎず、今回の試験結果については②の寄与を無視しても差し支えないと判断した。したがって σ_B の変化はVf(M)の変化に比例すると仮定し、供試材AおよびBの σ_B 、Vf(M)の変化を基準に他鋼種の③による寄与(これを $\Delta\sigma_{B,M}$ とおく)を計算した。これをTable 5に示す。そこで引張強度上昇量 $\Delta\sigma_B$ を、次式で示すように①の寄与と②の寄与の和として与えられると考えると、

$$\Delta\sigma_B = \Delta\sigma_{B,F} + \Delta\sigma_{B,M} \dots\dots\dots (1)$$

Table 2から求めた $\Delta\sigma_B$ と前述の $\Delta\sigma_{B,M}$ より $\Delta\sigma_{B,F}$ を求めることができる。これをTable 5に示す。なお、Vf(M)が減少する場合には $\Delta\sigma_{B,M}$ は負の値になる。

4・4・2 疲労限度に対する各種強化機構の寄与の定量評価

次に疲労限度に及ぼす合金元素の効果にも同様な考え方を適用し、フェライトのき裂発生抵抗に相当する①による強化量を $\Delta\sigma_{w,F}$ 、き裂進展の阻止に相当する③による強化量を $\Delta\sigma_{w,M}$ とおく。ここでマルテンサイトからき裂は発生しないので②の寄与は無いと仮定した。そこで疲労限度上昇量 $\Delta\sigma_w$ についても、次式で示すように①と②による強化量の和で与えられると考える。

$$\Delta\sigma_w = \Delta\sigma_{w,F} + \Delta\sigma_{w,M} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $\Delta\sigma_w$ は既知である。 $\Delta\sigma_{w,M}$ は、前述の $\Delta\sigma_{B,M}$ と同じく供試材BとAの実験結果を基準にVf(M)の上昇量と σ_w の上昇量が単純に比例的に寄与すると仮定し求めた。これをTable 5に示す。この結果、C増量(供試材B)以外の供試材では、いずれもVf(M)の変化が少ないため $\Delta\sigma_{w,M}$ の絶対値は10MPa以下と小さい。Fig. 4に示すように、Vf(M)が高い場合(供

Table 5. Decomposition of effects of strengthening factors on tensile strength and fatigue limit.

Steel	$\Delta\sigma_{B,M}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{B,F}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w,M}$ (MPa)	$\Delta\sigma_{w,F}$ (MPa)	$\frac{\Delta\sigma_{w,F}}{\Delta\sigma_{B,F}}$
B	155.0	0.0	15.0	0.0	—
C	-33.9	99.9	-3.3	92.3	0.92
D	-5.3	27.3	-0.5	34.5	1.26
E	-29.4	100.4	-2.8	71.8	0.72
F	-70.4	138.4	-6.8	104.8	0.76

試材B)でもき裂はフェライト中を選択的に進むことから、この計算された $\Delta\sigma_{w-M}$ は小さい値であるが妥当な値と考えられる。式(2)と $\Delta\sigma_w$, $\Delta\sigma_{w-M}$ より $\Delta\sigma_{w-F}$ を求めた。

式(1), 式(2)は, $\Delta\sigma_B$ および $\Delta\sigma_w$ が①と②+③の寄与の和として表わせるという考えを示すもので, これを模式的に示したのがFig. 8である。上記の方法で計算された $\Delta\sigma_{B-F}$ と $\Delta\sigma_{w-F}$ の関係をFig. 9に示す。Fig. 9およびTable 5からわかるように, フェライト強化による $\Delta\sigma_{w-F}/\Delta\sigma_{B-F}$ は, 0.72から1.26の範囲(平均0.92)にあり, F+P鋼の場合とほぼ等しい値となることがわかる。

以上の結果をもとに, 固溶あるいは析出強化による比 $\Delta\sigma_{w-F}/\Delta\sigma_{B-F}$ は元素の種類には依存せず0.92になると見なし, またVf(M)上昇による比 $\Delta\sigma_{w-M}/\Delta\sigma_{B-M}$ は0.10と見なせば, DP鋼の合金元素添加による疲労限度上昇量 $\Delta\sigma_w$ は, 次のように各強化機構による引張強度向上量と関連づけられる。

$$\Delta\sigma_w = 0.92 \cdot \Delta\sigma_{B-F} + 0.10 \cdot \Delta\sigma_{B-M} \dots\dots\dots (3)$$

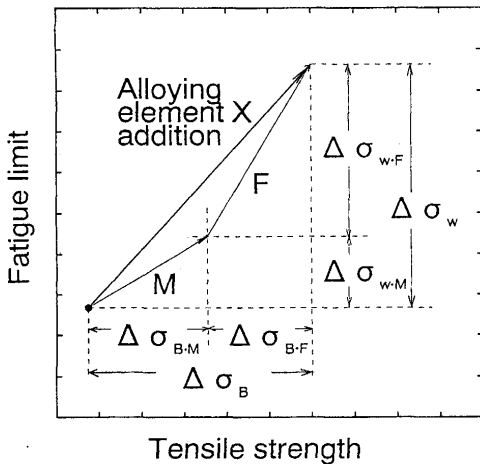


Fig. 8. Analysis of increase in fatigue limit by alloying element through strengthening mechanism.

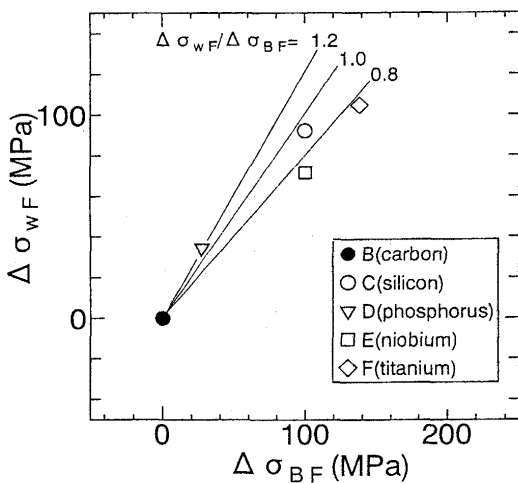


Fig. 9. Relationship between increase in tensile strength and that in fatigue limit due to strengthening ferrite matrix.

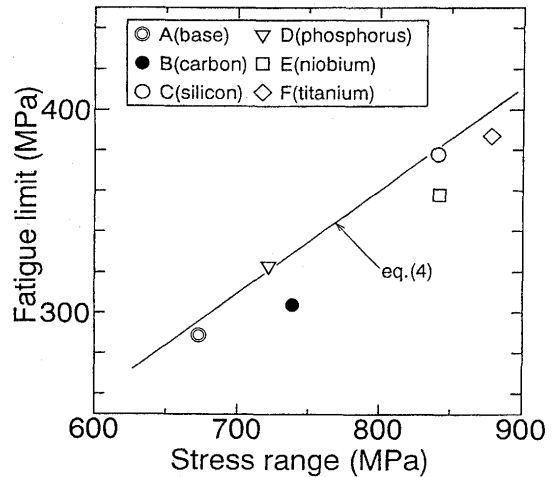


Fig. 10. Relationship between stress range under strain controll ($\Delta\epsilon_t = 0.6\%$) and fatigue limit.

疲労限度の基準として供試材Aの値を, またTable 5中の $\Delta\sigma_{B-F}$, $\Delta\sigma_{B-M}$ を用いて供試材C, D, E, Fの σ_w の推定値を求め, 実験値と比較した。その相違は高々20MPaであり, 比較的精度よく σ_w を推定することが確認された。

4.5 疲労限度と繰返し変形抵抗の関係

F+P鋼では, 強化機構にかかわらず疲労限度 σ_w と, 繰返し変形抵抗に対応するひずみ制御疲労試験時($\Delta\epsilon_t = 0.6\%$)の応力範囲 $\Delta\sigma$ ($N = 1/2N_f$ 時)とに, 次式の関係が成り立つ。

$$\sigma_w = 0.515\Delta\sigma - 53 \dots\dots\dots (4)$$

ここではDP鋼にて式(4)と同様の関係が成り立つか調査した。

Fig.10に, 本報での $\Delta\epsilon_t = 0.6\%$ のひずみ制御疲労試験における $\Delta\sigma$ と σ_w の関係を示す。これより, $\Delta\sigma$ と σ_w はほぼ比例関係にあること, またその関係はF+P鋼の場合と定量的に等しくなることがわかる。これは疲労限度が強化機構によらずフェライト内の転位の繰返し運動に対する抵抗と比例すること, さらにその関係が硬質第二相の種類に依存しないことを示している。

5. 結言

0.05C-0.5Si-1.5Mn-0.7Cr-0.25Moをベースとし, これに各種合金元素を添加して得たDP鋼を用いて疲労試験を行い, 以下の結論を得た。

1) 疲労限度向上には, フェライト地を固溶あるいは析出強化する元素(Si, P, Nb, Ti)の添加が効果的である。これに対し硬質第二相(マルテンサイト)の体積率を増加するCの増量は効果が少ない。前者が効果的なのは, 疲労き裂発生位置である軟質なフェライト地を強化するからである。

2) 合金元素添加による疲労限度上昇量 $\Delta\sigma_w$ は, その元素によらずフェライト地強化による引張強度上昇量 $\Delta\sigma_{B-F}$ および

マルテンサイト体積率増加による引張強度上昇量 $\Delta\sigma_{B.M}$ と次式のように関連づけられる。

$$\Delta\sigma_w = 0.92 \cdot \Delta\sigma_{B.F} + 0.10 \cdot \Delta\sigma_{B.M}$$

ここで $\Delta\sigma_{B.F}$ の係数はF+P鋼の場合とほぼ等しい。

3) 疲労限度 σ_w とフェライト内転位の繰返し運動に対する抵抗に相当するひずみ制御疲労試験時($\Delta\varepsilon_t = 0.6\%$)の応力範囲 $\Delta\sigma$ ($N = 1/2N_f$ 時)は, 比例関係にあり, F+P鋼と同様, 次式

$$\sigma_w = 0.515\Delta\sigma - 53 \quad (\text{単位: MPa})$$

はDP鋼でも成立する。すなわち, この式は硬質第二相の種類によらずに成立すると結言できる。

文 献

- 1) 高橋政司, 国重和俊, 岡本篤樹: 日本金属学会会報, **19** (1980), p.10
- 2) H.W.Hayden and S.Floreen: Met.Trans., **41** (1973), p.561
- 3) Z.Wang, G.Wang, W.Ke and H. He: Mat. Sci. and Eng., **91** (1987), p.39
- 4) 横幕俊典, 杵渕雅男, 三村和弘, 養方康郎: 日本材料学会第40期学術講演会前刷, (1991), p.16
- 5) 皮籠石紀雄, 西谷弘信, 豊廣利信: 日本機械学会論文集, **57A** (1991), p.2866
- 6) 黒木 孝, 山田邦博: 日本機械学会論文集, **60A** (1994), p.1498
- 7) 栗田真人, 外山和男: 鉄と鋼, **80** (1994), p.66
- 8) 山元 茂, 中山英明, 田中道七: 材料, **37** (1988), p.637
- 9) 末吉秀一, 西谷弘信, 皮籠石紀雄, 道山慎一: 日本機械学会論文集, **56A** (1990), p.129
- 10) 水井正也, 武智 弘, 関根知雄: 材料, **38** (1989), p.589
- 11) 黒澤伸隆, 森田正彦, 加藤俊之, 東野建夫, 青柳信男, 阪上隆夫: 材料とプロセス, **7** (1994), p.1663
- 12) 国重和俊, 高橋政司, 杉澤精一, 増井淑郎: 鉄と鋼, **65** (1979), p.1916
- 13) K.Toyama and M.Kurita: Impact of Improved Material Quality on Properties, Product Performance and Design, ASME MD-Vol. **28** (1991), p.185
- 14) 栗田真人, 外山和男: 材料とプロセス, **3** (1990), p.748
- 15) H.C.Chen and G.H.Cheng: J. of Mat. Sci., **24** (1989), p.1991