

# フェライトを主相とする熱延鋼板の 疲労特性に及ぼす各種強化機構の効果

河野 治\*・脇田 淳一\*・中村 隆彰\*・萩原 行人\*

Effects of Strengthening Mechanisms on Fatigue Properties  
in Hot-Rolled Sheet Steels with Ferrite Matrix

Osamu KAWANO, Jun-ichi WAKITA, Takaaki NAKAMURA and Yukito HAGIWARA

**Synopsis :** This study was carried out with a search for hot-rolled high strength sheet steels having excellent formability and fatigue properties as background. The effects of strengthening mechanisms on fatigue and tensile properties were investigated using hot-rolled TS280~880MPa class sheet steels composed of ferrite matrix and harder second phases. The following results were obtained. The improvement of fatigue limit (FL) associated with an increase from 21% to 27% of volume fraction of harder second phases ( $V_2$ ) is small compared with that of tensile strength (TS). The effect of an increase from 260 points to 480 points of the second phase micro-vickers hardness ( $H_2$ ) on FL is also small compared with that on TS. The endurance ratio (FL/TS) has a tendency to decrease as  $H_2$  increases. The changes in  $TS \times El$  and  $FL \times El$  values with  $V_2$  variation are small. The change in  $TS \times El$  values with  $H_2$  variation is small.  $FL \times El$  values, on the other hand, have a tendency to decrease with the increase of  $H_2$ . FL/TS and FL/YS (yield stress) increase as the volume fraction of ferrite increases from 73% to 100%. The following empirical formula are proposed from a least squares analysis to estimate FL.  $FL \text{ (MPa)} = 10.4 \times d^{-1/2} + 51 \times (\%Si) + 16 \times (\%Mn) + 80$

**Key words :** fatigue limit ; endurance ratio ; tensile strength ; yield stress ; elongation ; strengthening mechanism ; grain size ; volume fraction ; hardness ; hot-rolled product ; steels.

## 1. 緒言

熱延鋼板に求められる材質として、疲労特性は引張特性と並んで重要な性質であり、引張特性値との相関<sup>1)</sup>、各種添加元素の影響<sup>2-5)</sup>、各種強化機構の寄与<sup>6-11)</sup>、マイクロ組織の形状・分布状態の影響<sup>12-21)</sup>、予加工・切欠き・表面処理による特性変化<sup>1,22-25)</sup>等について従来多数の研究結果が報告されている。特に昨今の燃費向上・地球環境問題を背景としたハイテン化による軽量化(薄肉化)の要求に対しては疲労特性の良否がその鍵を握るため、ハイテンの材料開発において、その支配要因を明確にすることがますます重要となっている。しかしながら、従来の報告はTS(引張強さ)590MPa級以下を主体としたものであり、さらなるハイテン化の要求に応えるためにはTS780, 880MPa級をも含めた検討が必要である。また、ハイテン化に際してはプレス成形が可能であることが大前提であり、伸び特性の劣化を最小限にすることが望まれるが、従来報告は疲労特性のみに焦点を当てたものが主体である。実使用の観点からはこれでは不十分であり、疲労限、静的強度、伸びのバランスを考慮した

検討が必要である。本報では良好なプレス成形性を得るという観点からフェライトを主相とし変態生成物を島状に分散させた熱延鋼板を対象として、TS280~880MPaレベルの広範な静的強度にわたって疲労特性に及ぼす各種強化機構の効果について検討するとともに、いわゆるDP鋼(フェライト・マルテンサイト)、フェライト・ベイナイト鋼で代表されるような昨今のハイテン化で多用されている変態生成物を利用した複相組織による強化が疲労特性および疲労特性と伸び特性のバランスに及ぼす効果を検討し、疲労限、静的強度、伸びのバランスに優れたマイクロ組織・強化機構について探った結果について報告する。

## 2. 実験方法

化学成分の異なるA~Gの7種の鋼から、マイクロ組織の異なるA-1~Gの9種の熱延鋼板を実生産設備において製造して、引張試験と疲労試験に供した。

供試鋼の化学成分をTable 1に示す。強化機構として固溶強化の影響を検討するため、固溶強化元素であるSiとMnの

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

Steel	C	Si	Mn	Others
A	0.09	2.16	1.91	Cr:0.09 Nb:0.011
B	0.09	2.20	2.04	Cr:0.10 Nb:0.013
C	0.09	2.30	1.54	Cr:0.09
D	0.08	0.96	1.19	Cr:0.08
E	0.10	0.10	1.12	
F	0.05	0.01	0.37	
G	0.002	0.01	0.09	

Table 2. Microstructures of steels used.

steel	Phase	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	d
A-1	F+M	79%	21%	3.5 $\mu$ m
A-2	F+M	73%	27%	3.4 $\mu$ m
B-1	F+M	78%	22%	3.1 $\mu$ m
B-2	F+P	83%	17%	3.9 $\mu$ m
C	F+M	81%	19%	4.2 $\mu$ m
D	F+M	87%	13%	4.0 $\mu$ m
E	F+P+B	76%	24%	8.8 $\mu$ m
F	F+P	97%	3%	8.6 $\mu$ m
G	F	100%	0%	28.5 $\mu$ m

Phase : Ferrite (F) Pearlite (P)  
 Bainite (B) Martensite (M)  
 V<sub>1</sub> : Volume fraction of ferrite  
 V<sub>2</sub> : Volume fraction of the second phase  
 d : Mean grain diameter

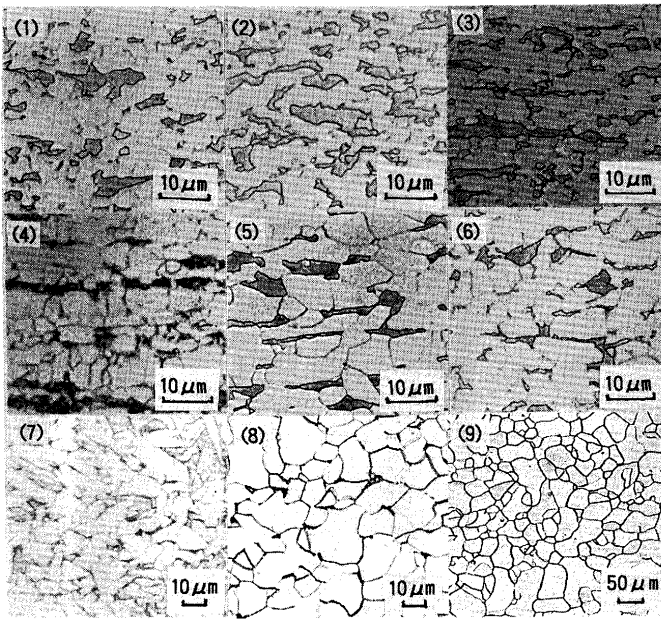


Fig. 1. Optical micrographs of steels used.  
 (1)Steel A-1 (2)Steel A-2 (3)Steel B-1  
 (4)Steel B-2 (5)Steel C (6)Steel D  
 (7)Steel E (8)Steel F (9)Steel G

添加範囲を広範に変化させた(Si=0.01~2.30%, Mn=0.09~2.04%)。さらに、A~D鋼はマルテンサイトを得やすくするという観点から、微量のCrを添加し<sup>26)</sup>、さらにA~B鋼は細粒化を図るという観点から微量のNbを添加した<sup>27)</sup>。また、脱酸元素として、微量のAl(0.01~0.05%)を添加するとともに、成形性と溶接性を向上させる観点から、P含有量を0.02%以下、S含有量をA~D鋼については0.003%以下、E~G鋼については0.01%以下とした。

供試鋼板の光学顕微鏡写真をFig. 1に、ミクロ組織の特徴(特殊腐食<sup>28)</sup>後の光学顕微鏡観察による相の同定、画像処理による占積率及び結晶粒径の定量)をTable 2に示す。フェライト占積率(V<sub>1</sub>)が73~100%、第2相占積率(V<sub>2</sub>)が0~27%であり、いずれの鋼板もフェライトを主相とし、第2相変態生成物であるパーライト(P)、ベイナイト(B)、マルテンサイト(M)は島状に分散している。結晶粒径(d)は3.1~28.5 $\mu$ mである。A-1材とA-2材は第2相をMとし、dをほぼ一定として、V<sub>2</sub>のみ変化させたものである。B-1

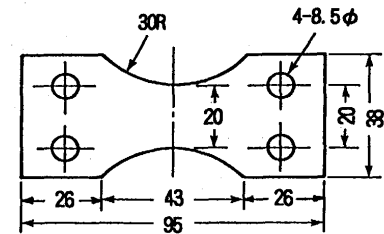


Fig. 2. Shape of fatigue specimens. (dimensions in mm)

材とB-2材は第2相の種類を変化させる(MとP)ことに主眼を置いたものである。C材~G材はSi, Mn, dを広く変化させたものである。

引張特性は圧延方向に平行(L方向)および垂直(T方向)に採取したJIS 5号試験片(標点距離50mm)を室温において試験速度10mm/minにて引張り、TS, YS(降伏応力; 0.2%耐力ないしは下降伏点), YR(降伏比=100 $\times$ YS/TS), El(全伸び)を求めて評価した。疲労特性はL方向およびT方向に採取したFig. 2に示す形状の受け入れまま表面を有する試験片を用い、室温大気中で試験サイクル3300cpmにて完全両振りの平面曲げ疲労試験を実施し、FL(疲労限; 500万回で破断しない応力), FL/TS, FL/YSを求めて評価した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 引張試験結果

A-1~Gの9種の熱延鋼板の引張試験結果をTable 3に示す。TS=275~880MPa, YS=175~626MPaと広範な静的強度を示す。また、El=25~55%, YR=63~80%である。

#### 3.2 平面曲げ疲労試験結果

A-1~Gの9種の熱延鋼板の平面曲げ疲労試験結果をTable 4に示す。FL=152~431MPaと広範な疲労強度を示す。また、FLはTS, YSの増加に伴い、増大する傾向を示すものの、疲労限度比(FL/TS)=0.44~0.59, FL/YS=0.63~0.87と変化しており、TSやYSのみでは一義的に整理

Table 3. Tensile properties of steels used. (L-direction/T-direction)

steel	TS (MPa)	YS (MPa)	YR (%)	El (%)	Thickness (mm)
A-1	834/836	576/572	69/68	27.0/26.2	3.3
A-2	871/873	596/602	68/69	26.4/24.5	3.3
B-1	868/880	615/626	71/71	26.1/24.5	3.3
B-2	676/692	538/548	80/79	31.9/31.8	3.0
C	773/780	505/504	65/65	28.3/26.8	3.4
D	644/644	427/423	66/66	32.1/29.5	2.8
E	471/468	334/341	71/73	39.9/40.0	3.5
F	337/—	243/—	72/—	47.9/—	2.0
G	275/280	175/177	64/63	53.0/54.9	2.0

L-direction : Longitudinal direction  
T-direction : Transverse direction

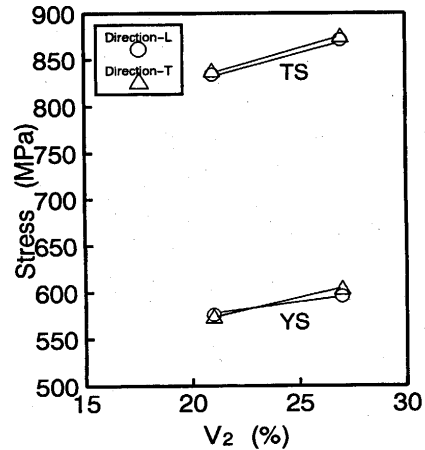


Fig. 3. Effect of volume fraction of the second phase (V<sub>2</sub>) on tensile strength (TS) and yield stress (YS).

Table 4. Fatigue properties of steels used. (L-direction/T-direction)

steel	FL (MPa)	FL/TS	FL/YS	Thickness (mm)
A-1	378/378	0.45/0.45	0.66/0.66	3.3
A-2	382/392	0.44/0.45	0.64/0.65	3.3
B-1	431/422	0.50/0.48	0.70/0.67	3.3
B-2	392/407	0.58/0.59	0.73/0.74	3.0
C	392/382	0.51/0.49	0.78/0.76	3.4
D	338/329	0.53/0.51	0.79/0.78	2.8
E	211/216	0.45/0.46	0.63/0.63	3.5
F	181/—	0.54/—	0.74/—	2.0
G	152/152	0.55/0.54	0.87/0.86	2.0

L-direction : Longitudinal direction  
T-direction : Transverse direction

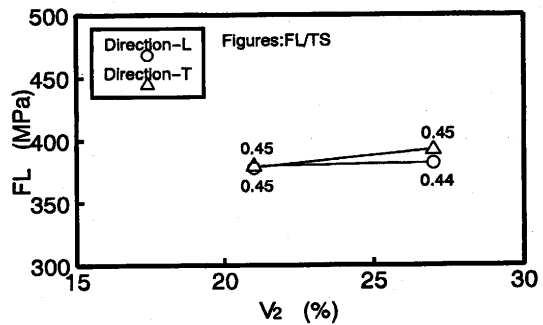


Fig. 4. Effect of volume fraction of the second phase (V<sub>2</sub>) on fatigue limit (FL) and FL/TS.

できない。

## 4. 考察

### 4・1 疲労特性に及ぼす複相組織強化の効果

#### 4・1・1 疲労特性に及ぼす変態組織占積率の影響

フェライトを主相とし第2相変態組織がマルテンサイトであるA-1材とA-2材を対象として、TS、YSおよびFLに及ぼす第2相変態組織占積率(V<sub>2</sub>)の影響を各々Fig. 3, Fig. 4に示す。Table 1およびTable 2に示したようにA-1材とA-2材は化学成分が同一であり、かつ、マイクロ組織の結晶粒径(d)が同等であるため、それらのTS、YS、FLの差はV<sub>2</sub>に起因すると見なせる。21%から27%へのV<sub>2</sub>の増加に伴い、TS、YSは増大する傾向が認められるが、FLの変化は小さく、沖ら<sup>18)</sup>、横幕ら<sup>10)</sup>の報告と同様の傾向を示している。定量的に整理すると、V<sub>2</sub>の増加に伴うTSの増分(ΔTS)はL方向とT方向の平均で37MPa、同じくYSの増分(ΔYS)は25MPa、同じくFLの増分(ΔFL)は9MPaとなり、ΔTS>ΔYS>ΔFLである。疲労特性に及ぼすV<sub>2</sub>の寄与はΔFL/ΔTS=0.24となり、栗田ら<sup>8,9)</sup>がマルテンサイト強化やパーライト強化によるFLへの寄与として報告しているΔFL/ΔTS=0.10~0.21とほぼ同等レベルの寄与率である。また、友田ら<sup>12)</sup>はFe-Cr-Ni系二相合金で硬質相の占積率とFLの

間には3つのステージが存在し、硬質相が0~30%の間ではFLはほとんど変化しないことを知見しているが、本実験結果はこれらの知見とも符合している。V<sub>2</sub>がFLに影響を与えない理由として、疲労限やその直上レベルの応力においては亀裂が軟質相であるフェライトにのみ発生し、その進展に際してもV<sub>2</sub>が小さく、かつ、その分布状態が島状に孤立して分散しているため、疲労亀裂進展経路に大差がなく、V<sub>2</sub>の変化に伴うFLの変化は顕著に認められないと解釈することができる。なお、V<sub>2</sub>が0~30%であってもネットワーク状に存在する場合はFLの向上が期待されるが(中林ら<sup>17)</sup>)、その場合は伸びの低下が懸念されるため(金ら<sup>29)</sup>)、実使用上、良好なプレス成形性との両立を念頭におくと、ネットワーク状に存在する硬質第2相によるFL向上効果の活用には、伸び特性とのバランスを含めた総合的な検討が必要と考えられる。

#### 4・1・2 疲労特性に及ぼす変態組織の種類の影響

フェライトを主相とし第2相である変態組織がマルテンサイトであるB-1材とパーライトであるB-2材を対象として、TS、YSおよびFLに及ぼす変態組織の種類の影響を変態組織硬さ(H<sub>2</sub>; 荷重10gのマイクロビッカースによる)をパ

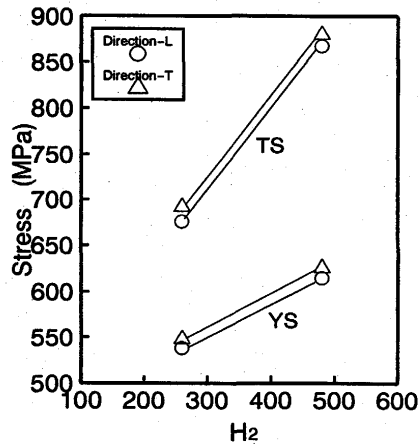


Fig. 5. Effect of micro-vickers hardness of the second phase ( $H_2$ ) on tensile strength (TS) and yield stress (YS).

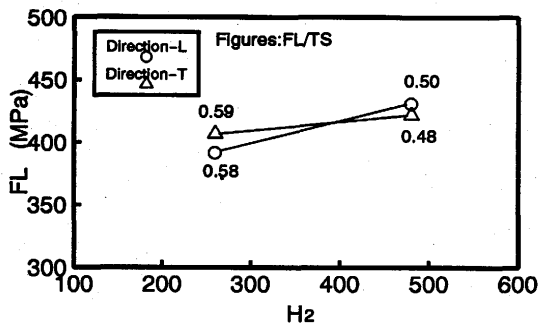


Fig. 6. Effect of micro-vickers hardness of the second phase ( $H_2$ ) on fatigue limit (FL) and FL/TS.

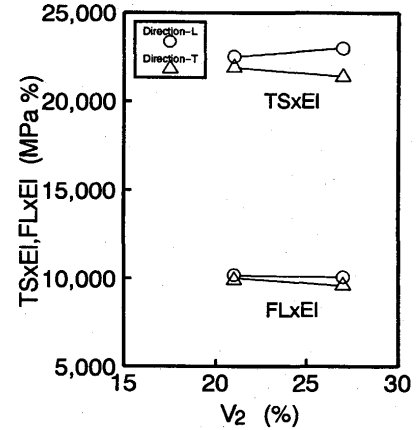


Fig. 7. Effect of volume fraction of the second phase ( $V_2$ ) on FL $\times$ El and TS $\times$ El.

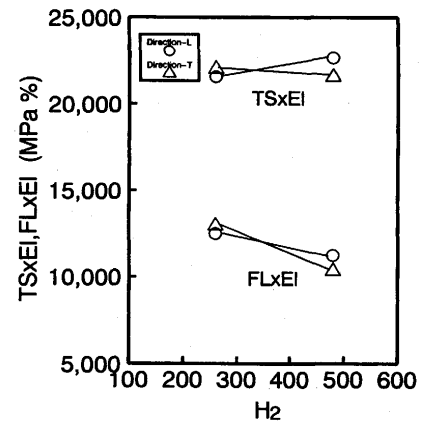


Fig. 8. Effect of micro-vickers hardness of the second phase ( $H_2$ ) on FL $\times$ El and TS $\times$ El.

ラメータとして、各々Fig. 5, Fig. 6に示す。Table 1およびTable 2に示したようにB-1材とB-2材は化学成分が同一であり、かつ、 $V_2$ も同等である。260ポイントから480ポイントへの $H_2$ の増加に伴うTS, YS, FLの変化はL方向とT方向の平均で $\Delta TS=190\text{MPa}$ ,  $\Delta YS=78\text{MPa}$ ,  $\Delta FL=27\text{MPa}$ であり、TS, YSは増大するが、FLの変化は小さく、FL/TSに換算すると、約0.1低下する。ただし、 $d$ はB-1材の方が若干細かいため、B-2材に対するB-1材のTS増加( $\Delta TS$ ), YS増加( $\Delta YS$ )およびFL増加( $\Delta FL$ )は $H_2$ の硬化による効果と $d$ の細粒化による効果が重畳している。 $\Delta FL/\Delta TS=27/190=0.14$ であり、 $d$ の細粒化による効果を差し引くと $H_2$ の増加によるFLへの寄与はさらに小さくなる。その理由は上記4・1・1と同様に解釈され、沖ら<sup>18)</sup>、友田ら<sup>12)</sup>の報告と同様な結果となっている。

#### 4・2 疲労限、静的強度、伸びのバランスに及ぼす複相組織強化の効果

##### 4・2・1 TS $\times$ El, FL $\times$ Elに及ぼす複相組織強化の効果

上記4・1で疲労特性に及ぼす複相組織強化の効果を検討した鋼板を対象として、伸び特性の観点から検討を加える。前述したように実使用の観点からは疲労特性と伸び特

性のバランスを考慮することが重要である。静的強度とElのバランスの指標としてTS $\times$ Elが使用されていることになり、FLとElの積をその指標として用い、議論を進める。TS $\times$ El, FL $\times$ Elに及ぼす $V_2$ および $H_2$ の影響を各々Fig. 7, Fig. 8に示す。 $V_2$ の増加に伴うTS $\times$ El, FL $\times$ Elの変化は小さい。また、 $H_2$ の増加に伴い、TS $\times$ Elは変化しないが、FL $\times$ Elは劣化する。以上より、フェライト主体のマイクロ組織において、第2相による複相組織強化は静的強度と伸びのバランスの観点からはTS $\times$ Elを維持しつつ、TSを増加させることができる有効な強化機構であるが、疲労限と伸びのバランスの観点からはFL $\times$ Elを低下させる場合があり、あまり有効な強化機構とはいえない。換言すると、疲労限と伸びのバランスの観点からは、第1相であるフェライトの強化を図ることが有効である。

##### 4・2・2 FL/TS, FL/YSに及ぼす複相組織強化の効果

4・1で述べたように複相組織強化のTS, YS, FLへの寄与はTS $>$ YS $>$ FLであるが、これは換言すると後者ほどフェライトの影響が支配的となることを意味すると考えることができる。TSとFLのバランス、YSとFLのバランスに

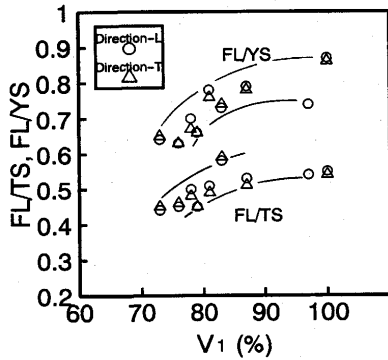


Fig. 9. Relation between FL/TS, FL/YS and volume fraction of ferrite ( $V_1$ ).

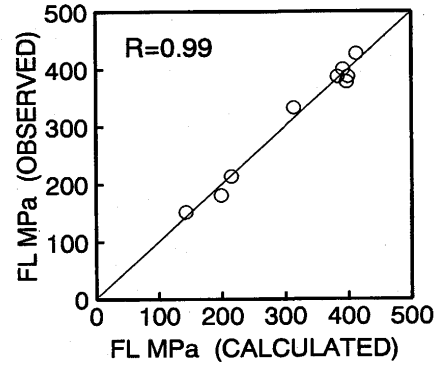


Fig. 10. Comparison between observed and calculated fatigue limit by equation (1).

及ぼす複相組織強化の効果を表すパラメータとして、フェライト占積率( $V_1$ )を用いて、Fig. 9にFL/TS, FL/YSと $V_1$ の関係を示す。

$V_1$ の増加によりFL/TS, FL/YSは増加する傾向を示す。すなわち、同一TSないしは同一YSでより高いFLを得るためには第2相による複相組織強化はあまり有効な強化機構とはいえ、第1相であるフェライトの強化を図ることが有効である。

4・3 疲労限に及ぼす細粒強化, 固溶強化の効果

上記4・1より複相組織強化がFLに及ぼす効果は小さいことが判明したので、本供試鋼板に利用されている複相組織強化以外の強化機構、すなわち、細粒強化, 固溶強化の影響に絞って、以下に検討を加える。A-1~Gの9種の鋼板を対象として、細粒強化の説明因子として $d^{-1/2}$ ( $\text{mm}^{-1/2}$ ), 固溶強化の説明因子としてSi(%), Mn(%)を取り上げ、最小二乗法により、FL(L方向とT方向の平均値)に及ぼす影響を定量化した。得られた結果を(1)式に示す。

$$FL(\text{MPa}) = 10.4 \times d^{-1/2} + 51 \times \text{Si} + 16 \times \text{Mn} + 80 \dots (1)$$

(1)式による計算値と実験値の対応をFig.10に示す。添加量の小さいCr, Nbについてはその効果を見逃したにもかかわらず、両者は約150~430MPaの広い範囲にわたって、よく一致しており、重相関係数 $R=0.99$ である。

$d^{-1/2}$ , Si, MnのFLへの寄与に関する従来知見<sup>4,6,8,10,11,32-34</sup>の要約をTable 5に示す。(1)式で得られた $d^{-1/2}$ の寄与は $K_G=10.4$ であり、従来知見( $K_G=2.4\sim 12.6$ )の上限に近く、Si, Mnの寄与およびSiとMnの寄与の比( $K_S=51$ ,  $K_M=16$ ,  $K_M/K_S=16/51=0.31$ )は従来知見( $K_S=74\sim 99$ ,  $K_M=27\sim 57$ ,  $K_M/K_S=0.33\sim 0.57$ )の下限に近い。また、(1)式に $d^{-1/2}=0$ ,  $\text{Si}=0$ ,  $\text{Mn}=0$ を代入し外挿して得られる定数項=80は純鉄単結晶のFLと見なすこともできるが、従来報告されている純鉄降伏強度のHall-Petch式における定数項=75<sup>30</sup>)に近い。4・3より純鉄単結晶ではFL/YSが0.9~1程度であることが予想されることを加味すると、定数項=80は純鉄単結晶のFLに近接した値ということができ、前記

Table 5. Summary of analyses for the effect of grain refinement and solid solutions on fatigue limit.

Reference	Grain refinement $K_G \times d^{-1/2}$ MPa/ $\text{mm}^{-1/2}$	Solid solutions $K_S \times \text{Si}$ , $K_M \times \text{Mn}$ MPa/mass%			Applicable range for TS :MPa
	$K_G$	$K_S$	$K_M$	$K_M/K_S$	
Grozier <sup>11)</sup>	2.4	99	57	0.57	360~680
Nishioka <sup>4)</sup>	—	82	27	0.33	450~600
Abe <sup>6)</sup>	7.5	92	42	0.46	290~640
Kurita <sup>8)</sup>	—	74	—	—	400~600
Yokobori <sup>34)</sup>	12.2	—	—	—	—
Yokomaku <sup>10)</sup>	9.5~12.6	—	—	—	390~450
Tachibana <sup>32)</sup>	5.6	—	—	—	353~563
Kage <sup>33)</sup>	5.4	—	—	—	460~470

(1)式の有効性を示唆している。ただし、本実験の範囲ではこれらの係数を独立に定めるには実験データが不十分であり、これら係数についてはさらなる検討が必要であり、今後の課題である。

4・4 疲労限, 静的強度, 伸びのバランスに優れたマイクロ組織・強化機構について

本実験結果及び従来知見を踏まえ、FL, TS, EIのバランスに優れたマイクロ組織・強化機構について、以下に検討を加える。

FLとEIのバランスを良好とする(FL×EIを増加させる)ためには、本実験結果より、「第2相占積率=21~27%では変化は小さいこと」、「第2相硬さを低減すること(480→260ポイント)」が知見された。

また、TSとFLのバランスを良好とする(FL/TSを増加させる)ためには、本実験より、「第2相占積率を低減し、フェライト占積率を増加させること」、「第2相硬さを低減すること」が知見された。従来知見である「固溶・析出強化による $\Delta FL/\Delta TS$ が細粒強化によるそれより大きいこと<sup>8)</sup>を加味すると、FL/TSを増加させ、かつ、TSを増加させるためにはフェライトの強化が必要であり、フェライト強化手段としては細粒強化より固溶・析出強化が有効であることが示唆される。

さらにTSとEIのバランスの観点では、本実験結果より、「第2相占積率=21~27%では変化は小さいこと」、「第2相硬さの影響は小さいこと」が知見され、従来報告にて、「析出強化より固溶強化が有効であること」<sup>31)</sup>が知られている。

以上より、FL, TS, EIのバランスに優れたマイクロ組織・強化機構として、「固溶強化したフェライトを主相」とし、必要TSに応じて、細粒強化、フェライトと硬度差の小さい第2相の少量分散による複相組織強化、微量の析出強化でTSを補うことが望ましいと考えることができる。ただし、EIに及ぼす各種マイクロ組織・強化機構の効果については定式化されるに至っておらず、定量的検討が今後の課題である。

## 5. 結論

フェライトを主相とする熱延まのの実機熱延鋼板を対象として、複相組織強化が疲労特性及び疲労特性と伸び特性のバランスに及ぼす効果を検討するとともに、TS280~880 MPaレベルの広範な静的強度にわたって疲労特性に及ぼす各種強化機構の効果について検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 変態組織占積率( $V_2$ )の増加(21→27%)による疲労限(FL)の向上は小さく、 $V_2$ の増加によるTSへの寄与を1とするとそのFLへの寄与は0.2程度である。

(2) 変態組織硬さ( $H_2$ )の増加(260→480ポイント)によるFLの向上は小さく、 $H_2$ の増加によるTSへの寄与を1とするとそのFLへの寄与はたかだか0.1程度である。

(3) 変態組織硬さ( $H_2$ )の増加により、疲労限度比(FL/TS)は劣化する。

(4)  $V_2$ の増加に伴うTS×EI, FL×EIの変化は小さい。

(5)  $H_2$ の増加に伴い、TS×EIは変化せず、FL×EIは劣化する。

(6) フェライト占積率( $V_1$ )の増加(73→100%)に伴い、FL/TS, FL/YSは増加する傾向を示す。

(7) FLの実験式として下式を得た。

$$FL \text{ (MPa)} = 10.4 \times d^{-1/2} + 51 \times (\%Si) + 16 \times (\%Mn) + 80$$

## 文 献

- 1) 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), 1430.
- 2) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **38** (1972), 915.
- 3) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), 3230.
- 4) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), 3244.
- 5) 西岡邦夫, 西川富雄: 日本機械学会論文集, **39** (1973), 3249.
- 6) 阿部 隆, 三瓶哲也, 大鈴弘忠, 小指軍夫: 鉄と鋼, **70** (1984), 1459.
- 7) 水井正也, 武智 弘, 関根知雄: 鉄と鋼, **76** (1990), 414.
- 8) 栗田真人, 外山和男: 鉄と鋼, **80** (1994), 66.
- 9) 栗田真人, 外山和男, 野村茂樹, 国重和俊: 鉄と鋼, **81** (1995), 1091.
- 10) 横幕俊典, 杵淵雅男, 藁方康郎: 材料, **40** (1991), 1415.
- 11) J.D.Grozier and J.H.Bucher: Journal of Materials, **2** (1967), 393.
- 12) 友田 陽, 立花信好, 田名部菊次郎, 黒木剛司郎: 鉄と鋼, **63** (1977), 962.
- 13) 皮籠石紀雄, 西谷弘信, 豊廣利信: 日本機械学会論文集 (A編), **57** (1991), 2866.
- 14) 黒木 孝, 山田邦博: 日本機械学会論文集 (A編), **60** (1994), 1498.
- 15) 石原 豪: 日本機械学会論文集 (A編), **46** (1980), 1023.
- 16) 酒本義嗣, 続木 茂, 清水真佐男, 国尾 武: 日本機械学会論文集 (A編), **47** (1981), 1257.
- 17) 中林弘充, 山田邦博, 清水真佐男, 国尾 武: 日本機械学会講演論文集, **790-13** (1979), 81.
- 18) 沖 幸男, 小川清六, 岡林邦夫, 庄司啓一郎: 日本金属学会誌, **44** (1980), 239.
- 19) 西谷弘信, 堀尾英明, 野口博司: 日本機械学会論文集 (A編), **56** (1990), 687.
- 20) 田村 優, 山田邦博, 清水真佐男, 国尾 武: 日本機械学会論文集 (A編), **49** (1983), 1378.
- 21) 西田新一, 服部信祐, 久保田浩史, 西谷弘信: 日本機械学会論文集 (A編), **61** (1995), 2134.
- 22) 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), 1663.
- 23) 西谷弘信: 日本機械学会論文集 (A編), **45** (1979), 1353.
- 24) 村上敬宣, 遠藤正浩: 材料, **35** (1986), 911.
- 25) 岡本正三: 鉄鋼材料 (標準金属工学講座 3), コロナ社, (1963), 296.
- 26) 花井 諭, 渡辺國男, 江坂一彬: 鉄と鋼, **68** (1982), 1306.
- 27) 田 稔: 第74・75回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1981), 32.
- 28) 岩下幸博, 太田達雄, 坂本研哉, 野村 豊: 特公昭63-39674.
- 29) 金 楨圭, 蛭澤秀樹, 山田邦博, 清水真佐男, 国尾 武: 日本機械学会論文集 (A編), **45** (1979), 415.
- 30) 鉄鋼材料 (講座・現代の金属材料編 4), 日本金属学会編, 丸善, (1985), 52.
- 31) K.Esaka, K.Koyama, Y.Matsumura and M.Tashiro: Proc. of Int. Conf. on HSLA Steels'85, Beijing, (1985), 959.
- 32) 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), 1956.
- 33) 鹿毛正治, 西谷弘信: 日本機械学会論文集 (A編), **51** (1985), 3.
- 34) 横堀武夫: 材料強度学, 岩波書店, (1974), 299.