

(論文)

フェライト・パーライト型非調質鋼の疲労特性に及ぼす組織因子の影響

家口 浩(工博)*・土田武広*・松島義武**・安部 聡**・岩崎克浩**・稲田 淳**

*技術開発本部・材料研究所 **鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・条鋼技術部

Effect of Microstructures on the Fatigue Behavior of V-added Ferrite-pearlite Type Microalloyed Steels

Dr. Hiroshi Yaguchi・Takehiro Tsuchida・Yoshitake Matsushima・Satoshi Abe・Katsuhiko Iwasaki・Atsushi Inada

The effect of microstructures on the fatigue behavior of V-added ferrite-pearlite type microalloyed steels was studied. It was found that fatigue cracks initiated from ferrite, and that crack initiation life had a great influence on fatigue limit. These results have indicated that the fatigue limit ratio could be improved by maximizing ferrite strength and optimizing ferrite volume fraction.

まえがき = 近年、自動車のエンジン部品や足廻り部品に熱処理工程の省略によってコスト削減が可能なる非調質鋼の適用が進んできている¹⁾。いっぽう、世界的に環境問題への関心が高まるなか、さらなる部品軽量化の要求は強く、非調質鋼においても高強度化、とくに信頼性の面から高疲労強度化のニーズは大きくなっている。ただし、低コスト化の観点から最低限の被削性を確保することが必要条件となっている。それらのニーズに対応するために、被削性の観点から引張強度を一定レベルに制限しつつ疲労寿命を向上させること、すなわち疲労限度比を向上させることが重要な技術課題となっている。

一般に、疲労強度は静的な引張強度に比例することが知られているが、フェライト・パーライトのような複合組織を有する材料の場合には、必ずしもその限りではなく、複雑な疲労挙動を示すことが予想される²⁾。とくに、V添加によって強化されたフェライト・パーライト鋼については十分な研究がなされていない。

本研究では、Vを添加したフェライト・パーライト型非調質鋼の疲労破壊挙動を詳細に調査した。とくに、実部品を想定した切欠き材を中心に疲労限度比に及ぼす組織因子の影響について検討した結果を報告する。また、疲労限度比を改善した材料の開発例についても簡単に紹介する。

1. 実験方法

フェライト・パーライト型非調質鋼として、第1表に示す試料(Steel-1)をもちい、1250℃に加熱して50mmに熱間鍛造し、大気中で放冷した。丸棒より試験片を切り出し、引張試験および疲労試験を実施した。疲労試験は、平滑材および自動車足廻り部品を想定した切欠き材(応力集中係数1.9)をもちい、電解研磨を施した後小野式回転曲げでおこなった。また、各応力レベルにおいて、破断以前の繰返し数でのき裂発生状況を調べることにより、き裂発生寿命を調べた。さらに、微視的なき裂発生挙動を調べるために、疲労試験後の試料表面を再度電解研磨処理し、SEM観察を実施した。

疲労挙動に及ぼす組織形態の影響を調べるために、Steel-1をもちいて第2表に示す条件の鍛造および熱処理によって組織形態を変化させた。Steel-AはSteel-1と同一試料、Steel-Bは、Steel-1を25mmまで熱間鍛造して大気中で放冷したもの、Steel-CはSteel-1を700×15min加熱して放冷したものである。各試料について引張試験および疲労試験を実施した。疲労試験は、切欠き材の小野式回転曲げ試験とした。

また、各添加元素の影響について調べるため、第3表に示すようにC, Si, V量を種々変化させた材料を溶製し、引張試験、疲労試験(平滑材)、ピッカース硬さ測定(荷重2g, フェライト部およびパーライト部)を実施した。

第1表 疲労挙動評価用試料(Steel-1)の化学成分組成

Table 1 Chemical compositions of steel for investigating fatigue behavior

	mass%					
	C	Si	Mn	S	Cr	V
Steel-1	0.33	0.26	1.18	0.023	0.38	0.296

第2表 組織の影響評価用試料の鍛造および熱処理条件組成

Table 2 Forging and heat treatment conditions of steels for investigating the effect of microstructures

	Heat Treatment
Steel-A	Forged to 50mm and Air Cooled
Steel-B	Forged to 25mm and Air Cooled
Steel-C	Annealed at 700 for 15min

第3表 添加元素の影響調査用試料の化学成分組成

Table 3 Chemical compositions of steels for investigating the effect of additive elements

	mass%					
	C	Si	Mn	S	Cr	V
0.2	0.25					0.0
~0.5	~3.0	1.20	0.02	0.35		~0.4

2. 結果および考察

2.1 疲労破壊挙動

Steel-1の光学顕微鏡写真を写真1に示す。組織はフェライト・パーライト組織であった。また、疲労および

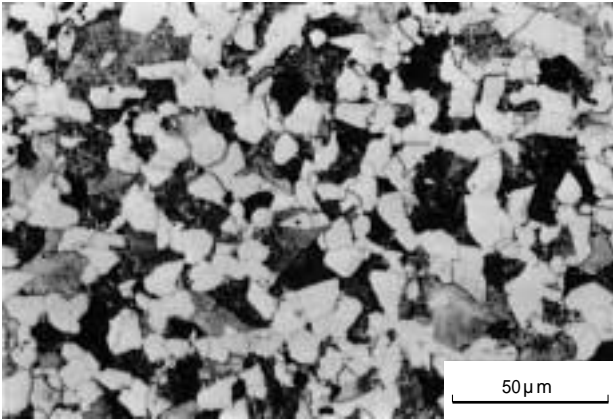


写真1 Steel-1の光学顕微鏡写真
Photo 1 Microstructure of Steel-1

第4表 Steel-1の機械的性質
Table 4 Mechanical properties of Steel-1

	Tensile Strength N/mm ²	Fatigue Limit (Notched) N/mm ²	Fatigue Limit (Flat) N/mm ²
Steel-1	922	227	441

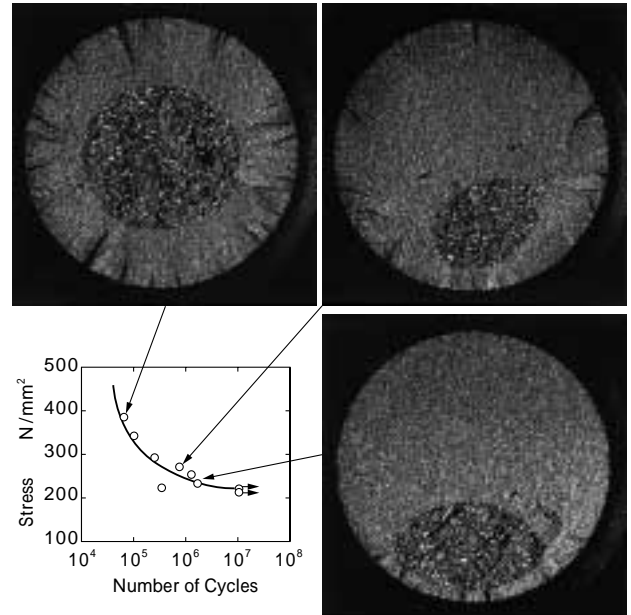
引張試験結果を第4表に示す。

Steel-1 切欠き材の疲労試験後の破面とSN曲線に対応させたものを第1図に示す。破面においてラチェットマークで区切られた領域の数が、き裂の起点の数に対応すると考えられる。これらより低応力で破断したサンプルの破面においては、き裂の起点の数は少数であり、応力が高くなるとその数が増加することが観察された。すなわち、切欠き材の疲労試験での寿命に対しては、低応力では、き裂発生寿命が重要であり、高応力では、き裂進展寿命が重要である。

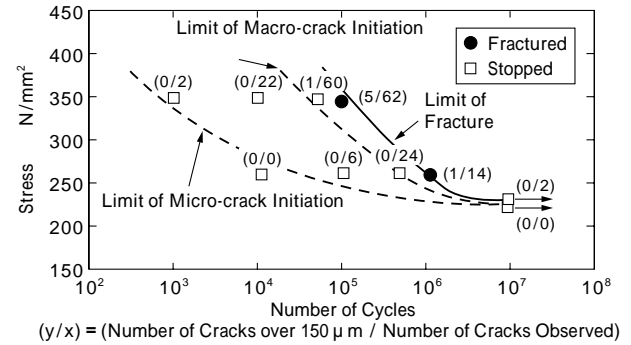
第2図にSteel-1 切欠き材のSN曲線およびき裂発生限界応力を示す。150 μm以上のものを巨視き裂(macro crack)、それ以下のものを微視き裂(micro crack)と定義した。図中の数字は分母が一定視野内に観察されたき裂の全数であり、分子はそのうちの巨視き裂の数である。10⁵回時間強度に相当する350 N/mm²では、寿命の1%程度の繰り返し回数でき裂はすでに発生しており、その後徐々に増加するが、繰り返し数が増えても長さ150 μm以上のき裂はわずかであった。このことから、き裂は初期から発生するが進展は緩慢であることが推定された。いっぽう、疲労限度応力に対応する230 N/mm²では、10⁷回後にも微小なき裂が2本みられたのみであり、220 N/mm²では1本も確認できなかった。すなわち、疲労限度とき裂発生限界応力がほぼ一致すると推定される。

以上の疲労試験の結果から、V添加によって強化されたフェライト・パーライト鋼では、切欠き材の疲労寿命に対しては、き裂発生寿命が支配的であるといえる。従来からフェライト・パーライト鋼の切欠き材では、き裂進展が重要であると考えられているが^(3)A)、V添加によっていちじるしくフェライトが強化された材料においては、むしろき裂発生が重要であるという結果になった。

写真2にSteel-1 平滑材の疲労試験後における試料表面のSEM写真を示す。フェライト粒内に多数のすべり



第1図 Steel-1 切欠き材のSN曲線および破面
Fig. 1 SN-curve and fracture surface of notched Steel 1



第2図 Steel-1 切欠き材のSN曲線およびき裂発生限界応力
Fig. 2 SN-curve and critical stress for crack initiation in notched Steel-1

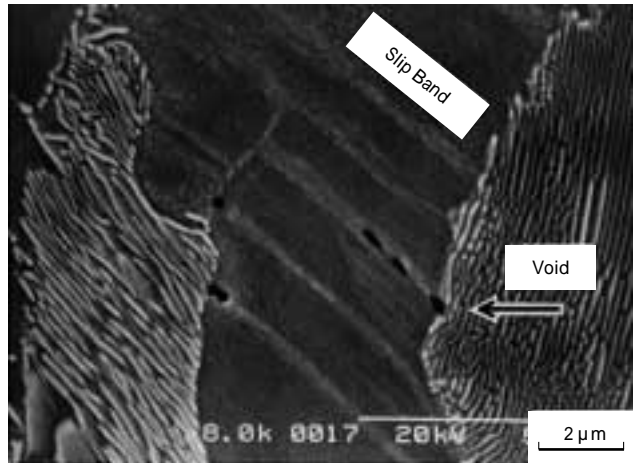


写真2 Steel-1 平滑材の疲労試験後の表面SEM写真
Photo 2 SEM photograph on surface of fatigued Steel-1

帯が観察され、すべり帯上には点列状にポイドが確認された。ポイドはフェライト・パーライト粒界とすべり帯との交点に多く観察され、フェライト・パーライトの境界近傍のフェライト部に歪みが集中していることを示唆している。これより、き裂発生機構は、フェライトにおけるすべり帯の形成 ポイドの発生 き裂発生という過程によるものと推定された。切欠き材についても、同様なすべり帯が観察されており、同様の機構でき裂が発生

していると考えられる。

また、疲労試験後のノッチ底のき裂観察の結果、き裂は、フェライト粒内またはフェライト・パーライト粒界を主に進展することがわかった（写真3）

以上の結果から、V添加型高強度非調質鋼の疲労破壊は、次のように起こるものと結論づけた。

- 1) フェライト部におけるすべりの集中によるすべり帯の生成
- 2) フェライト・パーライト界面付近のフェライト部でのポイドの発生
- 3) ポイドの成長によるき裂発生
- 4) フェライト部を優先とするき裂進展

したがって、この材料の疲労破壊を抑制するためには、何よりもフェライト部を強化してき裂発生を抑制することが重要であると予想される。この点については、次節で検証する。

2.2 疲労強度に及ぼす組織因子の影響

第2表の鍛造および熱処理を施した試料の機械的性質を第5表に示す。また、第3図は、フェライト硬さ・パーライト硬さおよびそれらの分率と疲労強度・引張強度疲労限度比との関係を示したものである。疲労強度に対して、フェライト硬さ H_f の影響が大きく、疲労強度の改善のためには、フェライトの強化がもっとも重要であることが示唆される。いっぽう、引張強度は、フェライト硬さとパーライト硬さおよびそれぞれの分率（ $H_f V_f + H_p V_p$ ）に比例する。したがって疲労限度比は $H_f / (H_f V_f + H_p V_p)$ に比例すると考えられる。

さらに、式を下のように変形することにより、疲労限度比の向上には、(1) フェライトの強化、(2) フェライト分率の増加、(3) パーライト/フェライト強度比の低減が有効であることが予想される。

$$\text{疲労限度比} = \frac{H_f}{(H_f V_f + H_p V_p)} \cdot \frac{1}{1 + \left[\frac{H_p}{H_f} \right] \left(\frac{V_p}{V_f} \right)}$$

ただし、 H_f ：フェライト硬さ、 H_p ：パーライト硬さ
 V_f ：フェライト分率、 V_p ：パーライト分率

Steel-Bは、フェライト強度を増加させるとともにパーライト/フェライト強度比が低減した結果として、疲

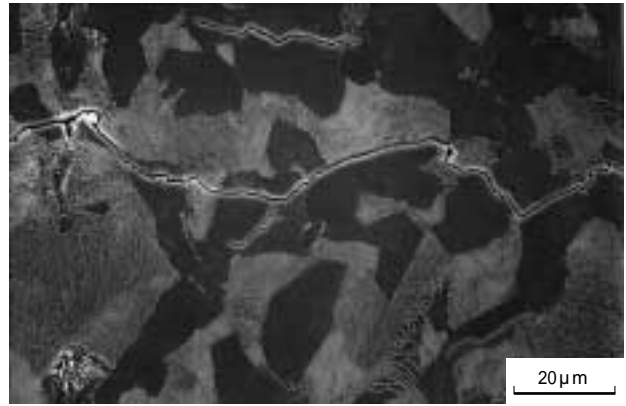
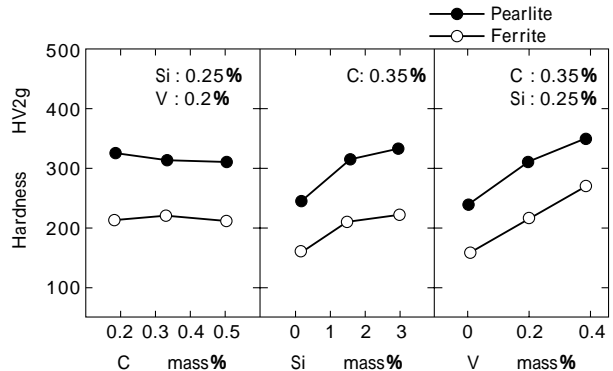


写真3 疲労試験後のSteel-1のき裂進展状況

Photo 3 SEM photograph showing crack propagation of fatigued Steel-1



第4図 C, Si, V添加量とフェライト硬さ、パーライト硬さの関係
 Fig. 4 Relations between C, Si, and V contents and Vickers hardness

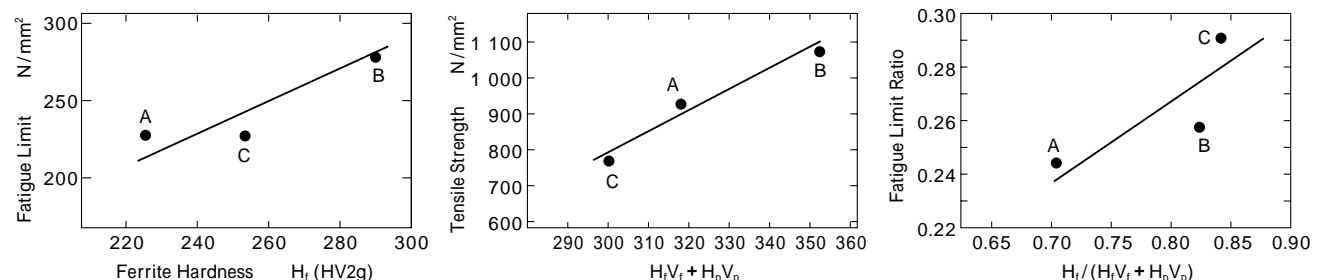
労限度比が向上したものである。またSteel-Cは、A1変態点直下における焼戻しによってパーライト組織の崩壊が生じて硬さが低下しており、その結果、パーライト/フェライト強度比が低減されて疲労限度比が向上したものと解釈できる。

次に、上述の組織設計指針にもとづき、成分設計による疲労限度比向上を検討した結果を述べる⁵⁾。まず第一にフェライトを強化することに主眼を置いてVおよびSiの影響についてを調べた結果を第4図に示す。炭化物を析出させてフェライトを強化するVについては、添加量が増えるとフェライト硬さ、パーライト硬さとも

第5表 Steel A, B, Cの機械的性質

Table 5 Mechanical properties of steel-A, -B, and -C

	Tensile Strength N/mm ²	Fatigue Limit (Notched) N/mm ²	Fatigue Limit Ratio	Vickers Hardness of Ferrite H_f HV2g	Vickers Hardness of Pearlite H_p HV2g	H_p / H_f	Ferrite Fraction V_f %
Steel-A	922	227	0.244	225	395	1.756	44.7
Steel-B	1067	274	0.257	290	373	1.286	24.7
Steel-C	766	225	0.290	253	340	1.344	44.7



第3図 Steel-A, -B, -Cのフェライト硬さ、パーライト硬さおよび分率と疲労限度・引張強度・疲労限度比の関係

Fig. 3 Relations between microstructural parameters and mechanical properties for steels-A, -B, and -C

に上昇した。固溶強化によってフェライトを強化する Si の添加量についても同様の傾向であるが、同一添加量では V 添加の効果のほうが大きかった。

また、V および Si 添加による引張強度の上昇を相殺するために、C 添加量低減の影響について調べた結果、C 添加量のフェライト硬さおよびパーライト硬さへの影響は小さいことがわかった。

疲労試験の結果、疲労強度は、V および Si 添加によるフェライト部の硬さ上昇に対応して向上し、疲労限度比は低 C、高 V、高 Si とすることによって向上した（第 5 図）。これは、フェライト強化によって疲労強度が向上し、なおかつフェライト分率の増加によって引張強度の上昇が抑制された結果えられたものである。これらは平滑材の結果であるが、切欠き材においても同様の結果が予想される。

また、V については微細な V 炭化物の析出によってフェライト部を強化することから、高温のオーステナイト域での析出よりも、できるだけ低温のフェライト域での析出が望ましい。そのためには、低 C、高 V の方向が有利であることが熱力学計算ソフト「Thermo-Calc」をもちいた計算からも推測された。

以上のように、V を添加したフェライト パーライト型非調質鋼において、疲労限度比を向上させる組織設計指針として、(1) フェライトの強化、(2) フェライト分率の増加、(3) パーライト/フェライト強度比の低減が挙げられ、具体的な成分設計としては従来からの低 C、高 V、高 Si 化が有効であることが明らかになった。

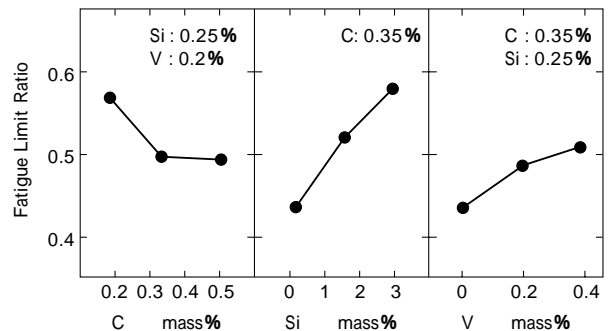
3. 開発例

上述の知見をもとに材料設計をおこない、疲労限度比を向上させた開発例として、第 6 表に成分、第 7 表に機械的性質を示す。Steel-D、E はそれぞれ 900N/mm² 級および 1000N/mm² 級として開発したもので、切欠き材としては、従来の非調質鋼や焼入れ焼戻し鋼とくらべて非常に高い疲労限度比を示し、耐力も大幅に向上している。また、KNF33M は、実際に部品に採用されている鋼種で、被削性・製造コストを考慮して Si および V 量を若干減らしたものである。

これら高強度非調質鋼は、中炭素鋼に少量の V を添加した非調質鋼をもちいて製造されている部品の小型・軽量化や、合金鋼をもちいて焼入れ・焼戻し処理して製造されている部品への適用が期待できる。すでに、高疲労強度、高耐力が要求されるナックルなどの足廻り部品で実用化されており、今後も適用が拡大すると期待される。

むすび=V を添加したフェライト パーライト型非調質鋼の疲労破壊挙動を明らかにし、疲労限度比を向上させるための材料設計指針を示した。すなわち、上記切欠き材の疲労破壊は、

1) フェライト部におけるすべり帯の生成



第 5 図 C、Si、V 添加量と疲労限度比との関係

Fig. 5 Relations between C, Si, and V contents and fatigue limit ratio

第 6 表 疲労限度比改善材の化学成分組成

Table 6 Chemical compositions of developed and conventional steels

	mass%					
Steel	C	Si	Mn	S	Cr	V
D	0.21	0.70	1.49	0.052	0.50	0.40
E	0.26	1.31	1.53	0.053	0.50	0.41
KNF33M	0.32	0.22	1.17	0.059	0.38	0.21
Conventional Microalloyed Steel	0.44	0.22	0.82	0.021	0.11	0.094
JIS S55C	0.56	0.25	0.74	0.019	0.11	—

第 7 表 疲労限度比改善材と従来材の機械的性質

Table 7 Mechanical properties of developed and conventional steels

Steel	Proof Strength N/mm ²	Tensile Strength N/mm ²	Fatigue Limit(Notched) N/mm ²	Fatigue Limit Ratio
D	636	872	245	0.281
E	738	991	274	0.276
KNF33M	676	911	236	0.259
Conventional Microalloyed Steel	554	847	201	0.237
JIS S55C	465	818	202	0.247

2) フェライト パーライト界面付近のフェライト部でのボイドの発生

3) ボイドの成長によるき裂発生

4) フェライト部を優先とする急速なき裂進展

という過程で起こる。

したがって、疲労限度比を向上させるためには、(1) フェライトの強化、(2) フェライト分率の増加、(3) パーライト/フェライト強度比の低減が有効である。

さらに、成分設計による疲労限度比向上について検討した結果、低 C、高 V、高 Si 化が有効であった。

今後、各種自動車部品をはじめ、疲労強度が要求される用途への適用を進めていく。

参考文献

- 1) 前島敬一ほか：鍛造技報，Vol.53 (1993)，p.4.
- 2) 友田陽ほか：鉄と鋼，Vol.63，No.6 (1977)，p.962.
- 3) 西谷弘信ほか：日本機械学会論文集第一部，Vol.40，No.329 (1974)，p.41.
- 4) 西谷弘信ほか：日本材料強度学会誌，Vol.5，No.3 (1970)，p.84.
- 5) 松島義武ほか：材料とプロセス，Vol.5 (1992)，p.781.