

無方向性電磁鋼板の微粒子ピーニング加工と疲労特性

横浜国立大学 大学院工学研究院システムの創生部門

教授 梅澤 修

(平成 19 年度一般研究開発助成 AF-2007016)

キーワード：高サイクル疲労，微粒子ピーニング，電磁鋼板，可動転位，電子線後方散乱回折

1. 研究の目的と背景

高強度鋼のギガサイクル疲労や、強加工を用いた微細粒組織によって高強度化した材料の疲労破壊などにおいて、内部疲労き裂発生（微視組織依存型き裂）を呈して高サイクル疲労強度が低下し、高強度化に見合った高サイクル疲労強度の上昇が得られない例が近年報告されている。同様な事例は、極低温下のように高強度で変形異方性が顕著となる場合、より低サイクル数（低寿命）側で微視組織依存型の疲労き裂発生を検出しやすく、チタン合金を中心にその機構検討が進んできた¹⁾。

すなわち、不均一変形が顕著なチタン合金（HCP）及びオーステナイト鋼（FCC）を用い、(1)結晶方位をランダム化して有効結晶粒径を微細化し、疲労強度を改善、(2)部分再結晶により可動転位源を均一分散して優先すべり系の結晶方位依存性を低め、ひずみ不整合を低下して微視組織依存型の疲労破壊を抑制、(3)部分再結晶により混粒組織（再結晶組織+変形組織）として疲労軟化を促進し疲労強度を改善、からなる実験的検証を行った²⁾。また、マクロな降伏応力以下での繰返し変形により局所的に形成された下部転位組織を対象に、電子線後方散乱回折（EBSD）を利用した半定量な可視化解析によって局所的に結晶界面でひずみ不整合（応力集中）が生じていることを示した。以上より、界面への応力集中の低減は高サイクル疲労強度改善に有効であるが、微視組織依存型の疲労破壊を回避するには十分でないことを明らかにした。したがって、微小塑性変形のマクロな均一化を得て、ひずみ不整合を低めることが必須であるが、可動転位源の均一分散は材料全体に前損傷を与えるに等しく、低サイクル疲労強度などの特性低下や損傷に敏感な機能特性の劣化を招くと考えられる。

モーターコアなどに用いる無方向性電磁鋼薄板（多結晶 3mass%Si 鋼）は、平面すべりを呈する典型的な BCC 合金として知られている³⁾。しかし、き裂形成機構の詳細や高疲労強度化の金属組織設計の整理には至っていない。また、薄板の疲労変形では、その応力状態は平面応力に近似されると考えられる。それ故、平面すべりを呈する BCC 合金の疲労変形・破壊挙動は、結晶粒径や表面近傍での塑性変形状態の影響を強く受けると予想され、結晶粒界におけるひずみ不整合の形成についてモデル化に相当である。そこで、塑性変形が生じやすい試験片表面近傍に変形組織を導入して塑性変形の均一化をもたらす、隣接結

晶粒における疲労変形の状況変化について着目する。

本研究では、無方向性電磁鋼薄板に微粒子ピーニング⁴⁾を施し、結晶粒径の影響⁵⁾を区別して疲労特性について検討する。そして、ひずみ不整合と結晶組織を反映した応力集中の状況や変形の状況について解析し⁶⁾、き裂発生挙動の関係について考察することを目的とする。

2. 実験方法

2-1 供試材

2-1-1 試験片

冷間圧延により 0.5mm 厚に成形した 3mass%Si 鋼板を 800°C (No.1), 900°C (No.2), 1000°C (No.3), 1100°C (No.4) で最終焼鈍し、平均結晶粒径をそれぞれ 45, 70, 105, 273 μm に調整した 4 種類の供試材（未加工材）を用いた。それら未加工材に微粒子ピーニング加工を施し（加工材）、薄板表層に多軸・多方向加工により残留圧縮応力を導入した。微粒子ピーニング加工条件は、投射材：ハイス、投射圧力：0.5MPa、カバレッジ：100%である。

2-1-2 残留応力

30mm×30mm の薄板を用い、RD 方向（圧延方向）、TD 方向（板面圧延垂直方向）それぞれの残留応力の測定を行った。鋼板に直径約 1mm 程度の穴を徐々に開け、測定深さ毎にその面に X 線を照射するという手法で行なった。

ピーニングにより最大 600~700MPa 程度の圧縮残留応力が試料に付与され、結晶粒径が小さいほど圧縮残留応力の印加量は大きかった。また、板表面からの深さとともに圧縮残留応力は減少し、100 μm 付近ではほぼ 0 となった。

また、TD 断面について、マイクロビッカース試験機を用いて硬さを測定した（測定荷重 0.098N、保持時間 20sec）。表面から板厚中心に向かって RD 方向と 45° の角度に沿って測定を行った。微粒子ピーニングの効果は約 100 μm 深さまで認められ、No.4 を除き、表面近傍では 50HV 程度の硬さ上昇が得られた。

2-1-3 集合組織

30mm×30mm の薄板を用い、表面の X 線集合組織測定と級数展開法による ODF 解析を行った。X 線は Co ターゲットで 40kV-40mA であり、 γ 揺動を与えた。

全ての試料において集合組織の発達は弱く、ピーニング処理の有無、結晶粒径に係らず似た方位を示したが、未処理材に比

ペーニング材はMax強度が小さかった。特に容易磁化方向である(hk0)[100]近傍の集合組織が減少していた。

2-1-4 鉄損および磁束密度

メトロン技研製単板試験測定装置を用い、電磁鋼板単板磁気特性試験方法(JIS C 2556)に準じた。すなわち、測定棒：55mm単板試験棒、項目：W15/50(励磁磁束密度1.5T、周波数50Hzでの鉄損)、B50(磁化力5000A/m、周波数50Hzでの磁束密度)により鉄損および磁束密度を評価した。

加工材は未加工材に比べ、鉄損が2W/kg程度増加、磁束密度が0.2T程度低下した。鉄損劣化の主な原因としては、ピーニングにより導入された圧縮残留応力に原因があると考えられる。

2-2 引張試験および疲労試験

未加工材および加工材の引張試験と高サイクル疲労試験を室温・大気中で実施した。引張試験(変位速度0.5mm/min)では、試験片に伸び系を装着して変位測定を行った。疲労試験条件は、単軸荷重制御、応力比(最小応力 σ_{min} /最大応力 σ_{max}) $R=0.01$ 、周波数は最大20Hzで行った。また、 10^7 回を超えて未破断の試験は中断した。図1に疲労試験片の形状を示す。

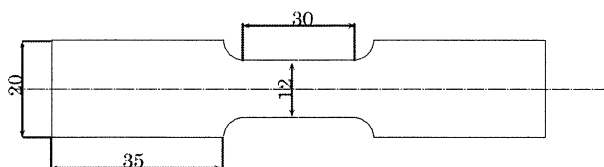


図1 疲労試験片形状

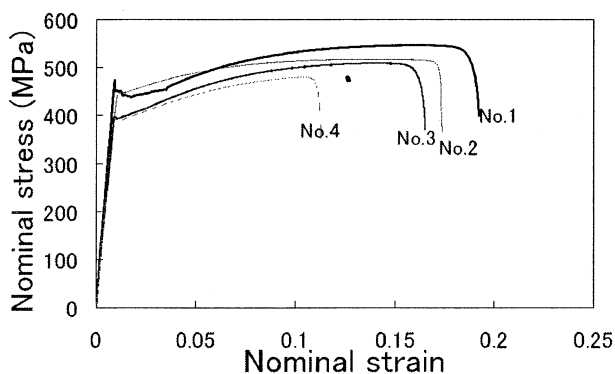
2-3 組織解析

走査型電子顕微鏡により疲労破面の観察を行った。疲労変形組織はEBSD法とTEMを用いて解析を行った。

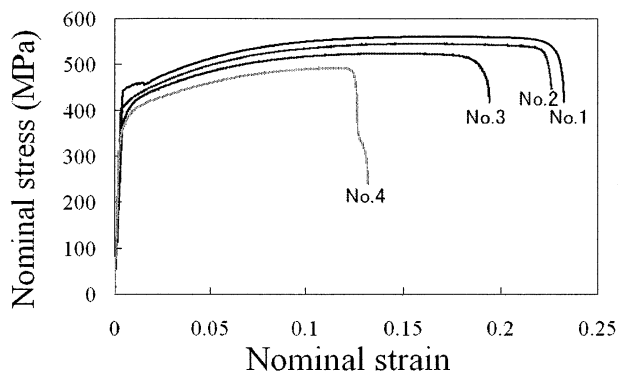
3. 実験結果

3-1 引張特性

図2に供試材の応力-ひずみ曲線を示す。結晶粒径の小さい材料ほど引張強度 σ_B が大きい。加工材と未加工材の強度に大きな違いは認められないが、加工材は延性に優れる。



(a)

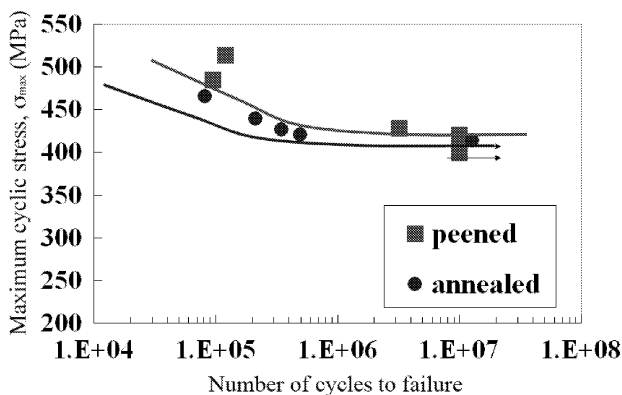


(b)

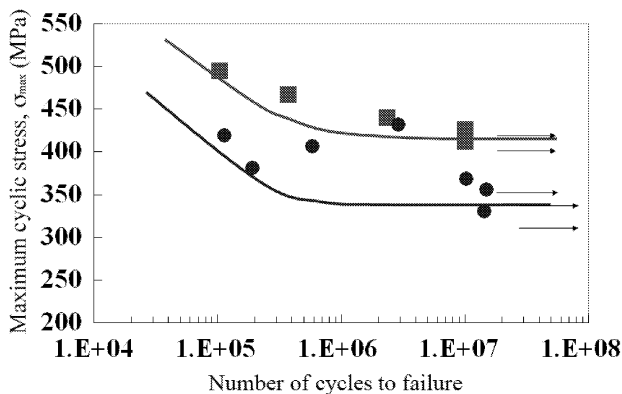
図2 供試材の応力-ひずみ線図：(a)未加工材、(b)加工材

3-2 疲労特性

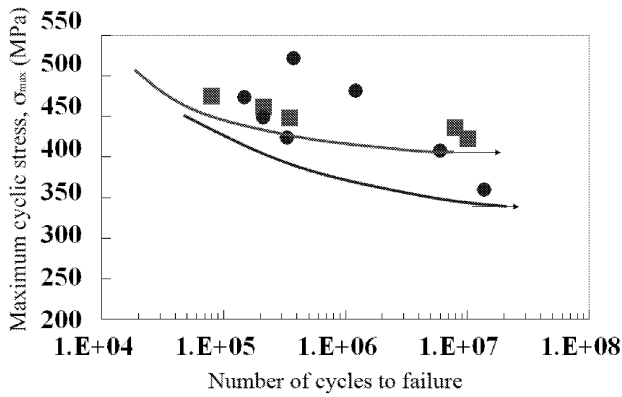
図3に供試材のS-N線図を示す。未加工材、加工材ともに、結晶粒径の小さい方が高い 10^7 回疲労強度を示す。ピーニング加工に注目すると、平均結晶粒径60 μ m以上の試料において14%程度の疲労限の上昇が見られた。しかし、No.1材ではその効果はわずかであった。その結果、No.2およびNo.3加工材の 10^7 回疲労強度は、ほぼNo.1加工材の 10^7 回疲労強度と同等である。したがって、ピーニング加工による疲労強度向上は、残留圧縮応力の効果以上に、表層に導入された変形(可動転位)の影響について考慮する必要がある。



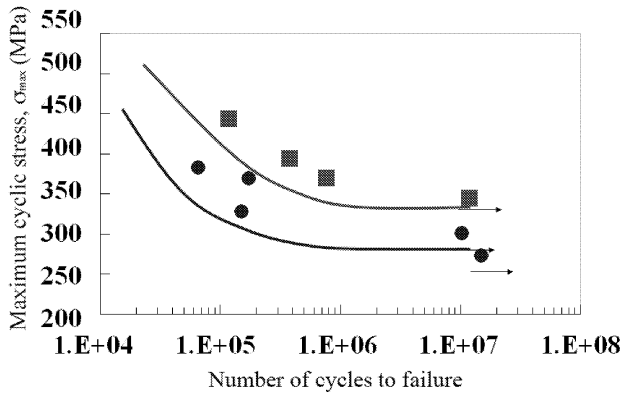
(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3



(d) No. 4

図3 S-N線図

3.3 疲労損傷

引張破断面は結晶粒径サイズにより大きく異なった。粒径の大きいNo. 3 およびNo. 4 試料では擬へき開破面が混在した。疲労破面においても同様な傾向が認められた。図4に示すように、微細粒 (No. 1) では試験片端部に生じたファセット (矢印) がき裂発生源を与え (Stage I)、き裂伝播 (Stage II) 領域と急速破壊 (Stage III) 領域とが明瞭に認められる。最終破断部には延性破面も認められ、引張破面に類似している。一方、粗大粒 (No. 4) では、脆性的な破面様相を呈する。加工材ではき裂発生源が試験片内部に生じる傾向が認められた。すべての試料において、未加工材と加工材の破面上の大きな差異は認められなかった。

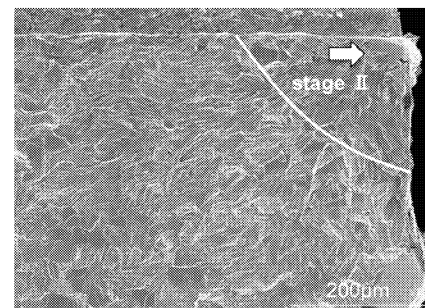
No. 1~No. 3 では、未加工材と加工材ともに表層 50 μm 深さまでの領域に疲労損傷が検出された。すなわち、EBSD パターンの取得が得られず、均一な塑性変形組織が形成して、内部組織との明瞭な差異が得られた (図5 (a))。一方、No. 4 においても表層近傍に同様な領域の存在が認められるが顕著ではない。代わって、結晶粒界近傍での結晶回転や粒内のすべり帯に対応すると考えられる局所的な平面状の損傷が認められる (図5 (b))。

ピーニングにより疲労強度向上が顕著であったNo.3加工材の疲労組織には、表層の疲労損傷に隣接して結晶方位回転が顕著に認められる (図6)。すなわち、可動転位の活動がより均一な塑性変形につながり、不均一変形による粒界近傍での応力集中を低減して、耐き裂発生抵抗を高めたと考えられる。

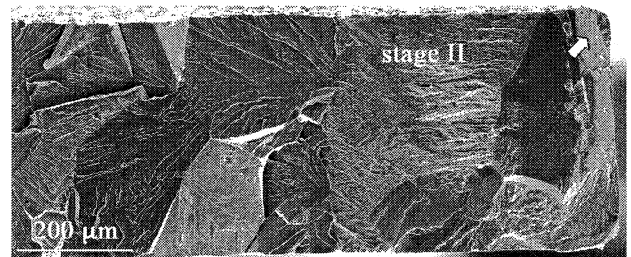
透過型電子顕微鏡による観察の結果、加工材の表層から深さ 1 μm 程度までの領域で、折り畳み組織が確認された (図7 (a))。この加工層には、約 200 nm 径の亜結晶粒と転位が認められた。しかし、高サイクル疲労試験後の試料表層部ではこの組織は消失し、1 μm 程度の凹凸が確認された (図7 (b))。疲労過程において転位組織の再配列 (疲労軟化) が生じたものと考えられる。



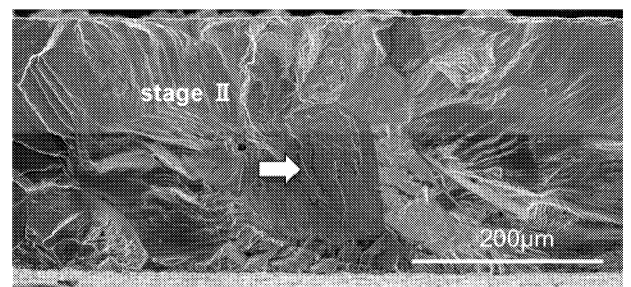
(a) No. 1 未加工材 ($\sigma_{\text{max}}/\sigma_B=0.77$, $N_f=497,844$ 回)



(b) No. 1 加工材 ($\sigma_{\text{max}}/\sigma_B=0.69$, $N_f=151,954$ 回)

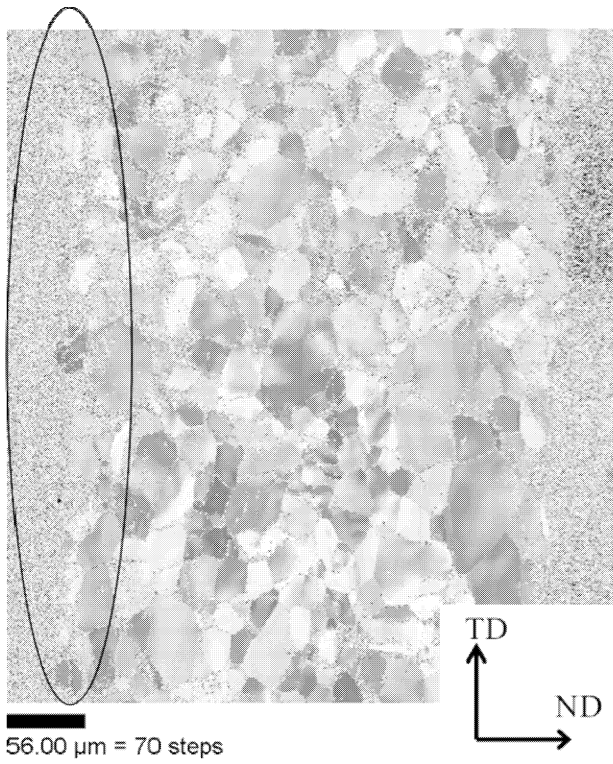


(c) No. 4 未加工材 ($\sigma_{\text{max}}/\sigma_B=0.69$, $N_f=151,954$ 回)

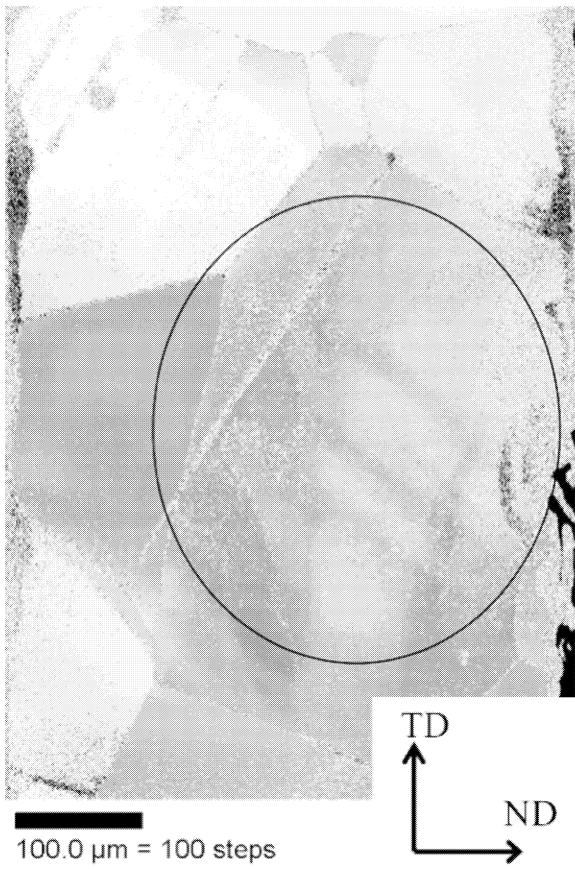


(d) No. 4 加工材 ($\sigma_{\text{max}}/\sigma_B=0.75$, $N_f=760,381$ 回)

図4 疲労破面



(a) No.1 未加工材 ($\sigma_{\max}=427\text{MPa}$, $N_f=345,943$ 回)



(b) No.4 未加工材 ($\sigma_{\max}=369\text{MPa}$, $N_f=172,781$ 回)

図5 疲労した未加工材の結晶方位マップ

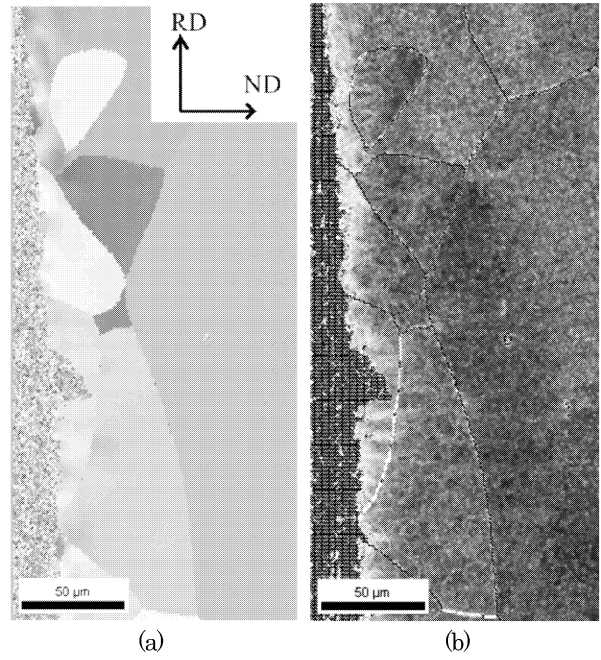


図6 疲労した加工材の結晶方位マップ(a)と局所方位差マップ(b) (No.3 加工材, $\sigma_{\max}=422.4\text{MPa}$, $N_f=10,100,621$ 回)

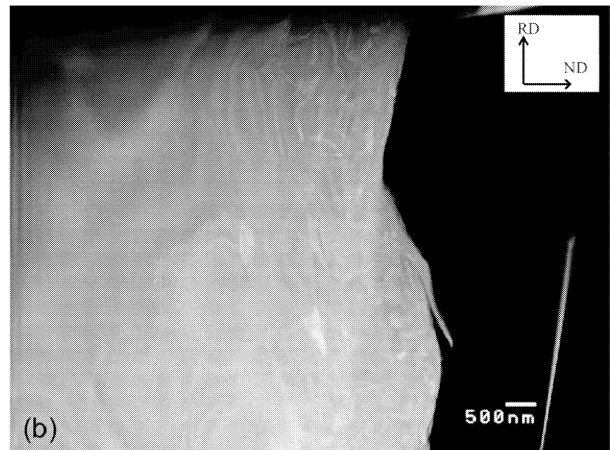
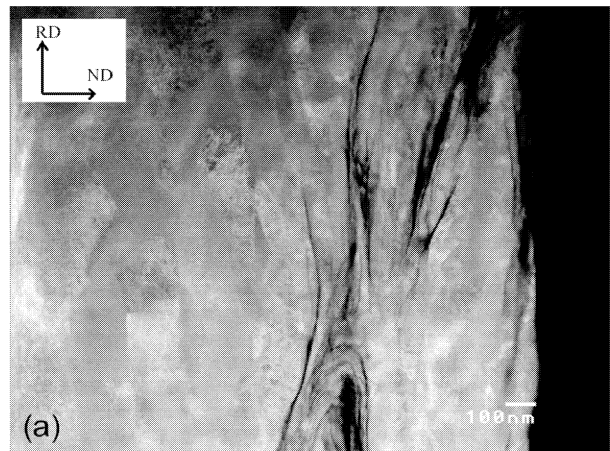


図7 No.1 加工材の表面近傍 (TD 断面) の HAADF 像: (a) 疲労前, (b) 疲労後 ($\sigma_b=0.775$, $N_f=1,020,108$ 回)

モーターコアなどに用いられる無方向性電磁鋼板において、電磁特性に加え疲労特性の向上を求めることは困難である。すなわち、結晶粒径を大きくする、Si含有量を増やす、板厚を薄くすることは、疲労強度特性や加工性を低める。しかし、微粒子ピーニング加工をうまく利用して表層結晶粒への二次すべり変形導入を促進し、初期き裂形成における局所的応力集中の緩和を図れば、両特性をバランスできる組織制御方針を得る可能性がある。

4. 結論

Fe-3mass%Si 鋼薄板の疲労特性に及ぼす微粒子ピーニングと結晶粒サイズの影響について検討した。結晶粒微細化では引張強度および 10^7 回疲労強度の増大が得られた。微粒子ピーニングでは、結晶粒径が $60\ \mu\text{m}$ 以上の粗大粒組織において 10^7 回疲労強度は14%程度の向上が認められたが、微細粒材（結晶粒径が $45\ \mu\text{m}$ ）ではその効果はわずかであった。微細粒材では、試験片表面近傍の塑性変形が顕著かつ均一に生じることから、試験片表層に導入した可動転位による均一な塑性変形導入の効果が得られないためである。疲労後の加工材では、表層近傍の均一な塑性変形領域に隣接して結晶粒内の方位回転が生じており、微粒子ピーニングによって導入された可動転位が表層部の不均一変形を緩和する働きを有し、粗大粒内の変形帯形成や粒界に生じるひずみ不整合を緩和することから、疲労強度の向上が得ら

れると考えられる。

謝辞

本研究は、(財)天田金属加工機械技術振興財団平成19年度一般研究開発助成により行われたものであり、ここに謝意を表す。微粒子ピーニングは(株)不二ダビュルピーシー、X線集合組織測定は(株)リガク、X線残留応力測定は神奈川県産業技術センター、実験は野崎貴行君と大野克仁君の協力をいただいた。ここに感謝する。

参考文献

- 1) O. Umezawa and K. Nagai: ISIJ Inter., 37 (1997), 1170.
- 2) O. Umezawa: Metall. Mater. Trans. A, 35A (2004), 543.
- 3) S.S. Chakravathula and Y. Qiao: Inter. J. of Fatigue, 27 (2005), 1210.
- 4) 高木眞一: 熱処理, 47 (2007), 107.
- 5) K. Ohno, T. Okamura, T. Miyazaki and O. Umezawa: CAMP-ISIJ, 20 (2007), 1224.
- 6) T. Nozaki and O. Umezawa: Proc. 3rd Inter. Workshop on New Method of Damage and Failure Analysis of Structural Parts, Ostrava, (2008), 105.