

軸受用鋼の転動疲労過程での組織、材質変化挙動

Change in Microstructure and Properties in the Rolling Contact Fatigue of Bearing Steels

越智達朗^{*(1)} 大木光一^{*(2)} 蟹澤秀雄^{*(3)} 草野祥昌^{*(4)}
 Tatsuro OCHI Kouichi OOKI Hideo KANISAWA Yoshiaki KUSANO

抄 録

軸受用鋼は近年、飛躍的な高 cleanliness とそれによる高寿命化が図られてきている。それに伴って、高面圧下で使われるようになると、特異組織の生成が課題になっている。このような特異組織の生成挙動を調査し次の点を明らかにした。転動疲労過程で、転動面下の剪断応力が最大となる深さで板状組織、白色帯、筋状組織が生成する。白色帯はフェライト、板状組織と筋状組織は擬似パーライト組織である。疲労過程で生成した特異組織の位置でのX線回折ピークの半価幅は顕著な減少を示した。以上の現象は、剪断歪の集中とそれに伴う発熱によると推察される。発熱温度はマクロには300℃程度、白色帯形成領域では局所的に600℃以上と推定される。

Abstract

Bearing steels have recently made rapid progress in high cleanliness and therefore longevity. As a result, application under high contact stress has been promoted and has generated the issue of occurrence of microstructural changes. This study researched on such behavior of microstructure to show the following: in the rolling contact fatigue, there occur board structures, white etching bands and muscular structure at the depth of the biggest shear stress under rolling contact. The white etching bands has ferrite and the board and muscular structures have quasi-pearlite structure. Remarkable decrease is observed in half value width at the peak of x-ray analysis in the microstructural changes which occur in fatigue. The above phenomena is presumably due to the concentration of shear strain and its accompanying heat. It is estimated that the reached temperature is around 300°C overall and over 600°C locally in the white etching bands area.

1. 緒 言

軸受部品は自動車、産業機械などに使用される主要な機械部品の一つであり、その必要特性は転動疲労特性である。近年、特に地球環境保全の問題から自動車の軽量化、低燃費化が大きな課題となっており、軸受部品についてもその高寿命化の要求が強い。軸受部品の転動疲労破壊は非金属介在物が起点になるので、これまで主として低酸素化による非金属介在物低減により高寿命化が図られてきた。

ところが、ここ数年来の軸受鋼の飛躍的な高 cleanliness とそれによる高寿命化に伴って、軸受部品がより厳しい高面圧下の条件で使われるようになると、転動疲労過程で図1に示した特異組織が生成し、この特異組織が破壊の伝播経路になる現象が起きている。これらの特異組織は、“dark etching region”、“white etching areas”、あるいは非金属介在物の周辺で生成するものは“バタフライ”として知られ、種々の調査が行われている¹⁻⁴⁾。しかし、その成因やマクロな材質との関連等、まだ明らかになっていない点が多い。

このような軸受用鋼の転動疲労過程での特異組織の生成挙動と、それに伴う材質変化挙動について調査、解析した。

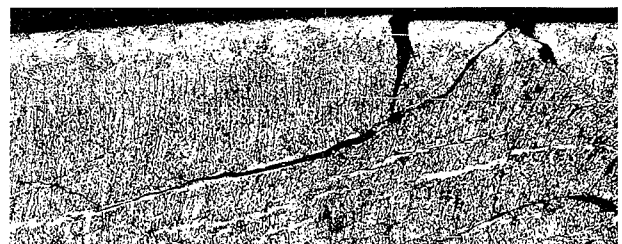


図1 転動疲労過程で生成した特異組織と停留き裂

2. 実験方法

供試材として、浸炭鋼SCr420及び軸受鋼SUJ2を用いた。化学成分を表1に示す。浸炭鋼を用いたのはSUJ2のように球状炭化物が存在すると組織変化の解析が困難になる可能性があるためである。それぞれ酸素量は9ppm、6ppmである。浸炭鋼は、炭素ポテンシャル0.8%で浸炭し、焼入れ、180℃×2時間の条件で焼戻しを

^{*(1)} 室蘭技術研究部 主任研究員 工博
 北海道室蘭市仲町12 ☎050-0087 ☎(0143)47-2666
^{*(2)} 名古屋支店 自動車棒線グループ マネジャー

^{*(3)} 室蘭技術研究部 条綱総括 主任研究員 工博
^{*(4)} 室蘭技術研究部 部長 主幹研究員

表1 供試鋼の化学成分 (wt%)(*ppm)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	N	O
SCr420	0.19	0.24	0.85	0.006	0.010	1.14	0.046	0.020	9*
SUJ2	0.96	0.20	0.35	0.007	0.007	1.34	0.035	0.008	6*

行った。硬化層の硬さHV780、芯部硬さHV350、有効硬化層深さ1.3mm、残留オーステナイト量30%である。また、SUJ2は840℃×30分加熱焼入れ、170℃×2時間の条件で焼戻しを行った。

次に、転動疲労試験は直径12mm、長さ22mmの円柱試験片を用い、点接触型転動疲労試験機により行った。鋼球直径は19.1mmである。荷重負荷はラジアル方向であり、ヘルツ最大接触応力は600kgf/mm²、応力負荷回数46 200 cpmの条件で行った。潤滑油は56番タービン油、その温度は約85℃である。

微細炭化物組織の解析には、オージェ電子分光分析装置(AES)、走査型電子顕微鏡(SEM)及び透過型電子顕微鏡(TEM)を用いた。ミクロ組織はSPEED法⁵⁾による電解腐食により現出させた。

残留応力、残留オーステナイト量、X線回折ピークの半価幅の測定は、微小部X線応力測定装置を用い、Cr管球を使用した。残留応力、半価幅の測定はフェライトの(211)面の回折ピークを用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 転動疲労過程で生成する特異組織の解析

SUJ2では球状炭化物に邪魔されて組織変化の解析が困難なために、まず浸炭材を用いて検討を行った。図2に浸炭材の素材及び1.5×10⁸回転動疲労後の転動面直下の断面組織を示す。素材ではほぼ均一な高炭素マルテンサイト組織であるが、これに対して1.5×10⁸回転動疲労後は、転動面から約0.15mmの深さで、荷重移動方向と約20度の角度をなす白い帯と約90度の角度をなす縦縞組織が生成している。本研究では、白い帯を白色帯、縦縞組織を板状組織と呼ぶことにする。次に約0.25mmの深さで、荷重移動方向と約30度の角度をなす、ここでは筋状組織と呼ぶ一種の白い帯が現れている。

図2の右の図は剪断応力 τ_{st} の転動面直下の深さ方向の分布である。 τ_{st} は転動面と45度の方向に作用する剪断応力である。剪断応力が最大となる深さにおいて組織変化が最も顕著である。これからこれらの特異組織の形成は歪集中とそれに伴う発熱が原因と考えられる。

図2は円柱状試験片の半径方向断面(C断面)写真であるが、これの転動面と平行な面、つまり表面からの各深さにおけるZ断面を観

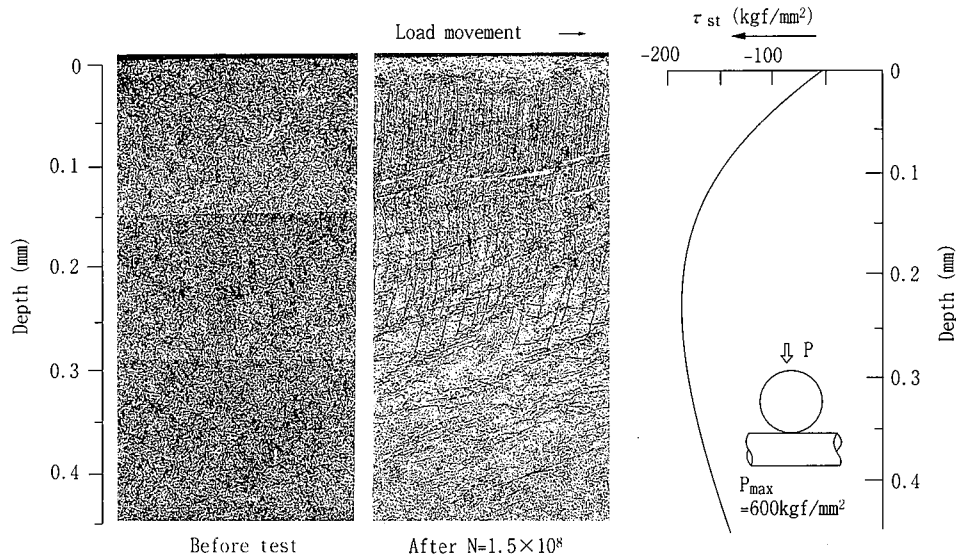


図2 転動疲労過程での組織変化の様相と剪断応力分布の関係

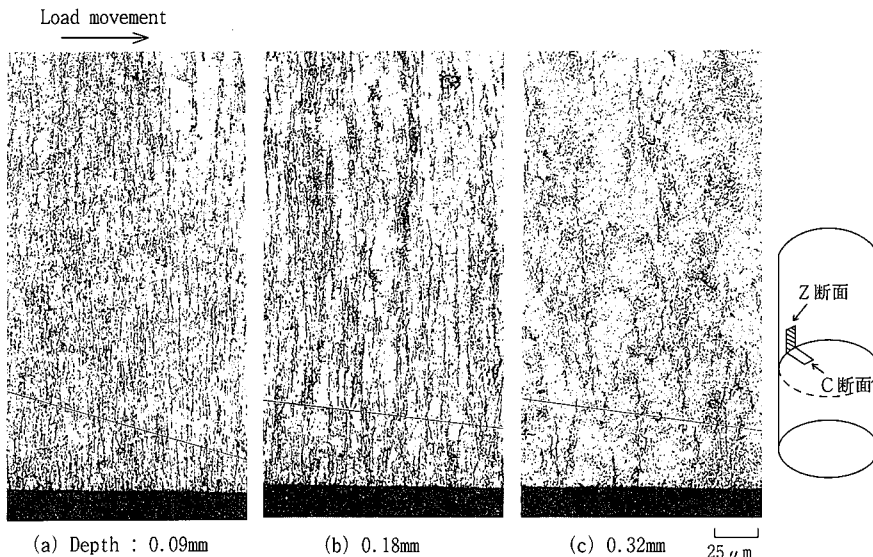


図3 転動面直下の転動面と平行な面(Z断面)での組織

察したのが図3である。図3の右に示してある試験片の模式図の斜線部の面が観察面である。図3から、いずれの深さでも特異組織は荷重移動方向に垂直に帯状にあり、三次元的にはいずれも板状であることがわかる。

図4は図2と同じ転動面直下の断面について、SPEED法により電解エッチングをした時のSEM写真である。板状組織、筋状組織、及び白色帯の近傍にはいずれも微細な析出物が認められる。一例として板状組織部の拡大写真を図5に示す。谷部と山部からなるが、山の部分で微細な析出物が観察される。これをAESで分析するとFeとCが検出され、谷部に比べて山部でC量が多いことから、この析出物は炭化物であると考えられる。

図6は、図5の領域の析出物を抽出レプリカ法によりTEMで観察した結果である。電子線回折の結果、 Fe_3C により指数付けができ、つまり、これらの微細析出物はセメンタイトである。以上から、板状組織、筋状組織はセメンタイトの析出を伴う一種の擬似パーライト相であると言える。なお、図6のようにセメンタイトが析出していることから、転動面直下では300℃以上に発熱していることが示唆される。

次に白色帯の成因について調べた。図7(a)の写真は光学顕微鏡写真、(b)は(a)の場所でEPMAを用いてCの分布を調査した結果である。(b)の写真の×印が(a)の写真のピッカース硬さ計の圧痕に相当する。大きな白色帯が3本あるが、ちょうど白色帯のところでC濃度が低下していることがわかる。(c)は(a)のA-B間でC濃度を線分析した結果である。マトリクスではC量は0.8%であるが、白色帯では0.1%以下まで低下している。

図8は、白色帯近傍の硬さを調べた結果である。上の写真のA-Bラインの硬さを下段の図に示すが、マトリクスの硬さはHVで約750に対して、白色帯の硬さは約600と軟らかくなっている。以上から白色帯は、炭素が抜けて生成したフェライト相であると考えられる。なお、フェライトの割には高硬度であるが、これは、歪集中による加工硬化によると考えられる。

3.2 転動疲労過程での組織、材質の経時的な変化

SUJ2を用いて組織、材質の経時的な変化について調べた。図9に転動疲労試験前及び転動疲労試験の各段階での転動面直下の組織

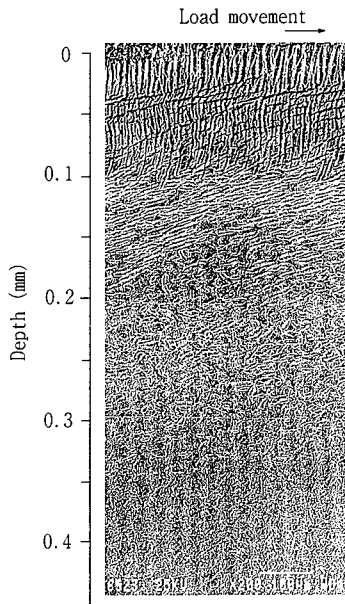


図4 電解腐食により現出させた転動面直下のSEM組織 (荷重繰り返し数 $N=1.5 \times 10^6$)

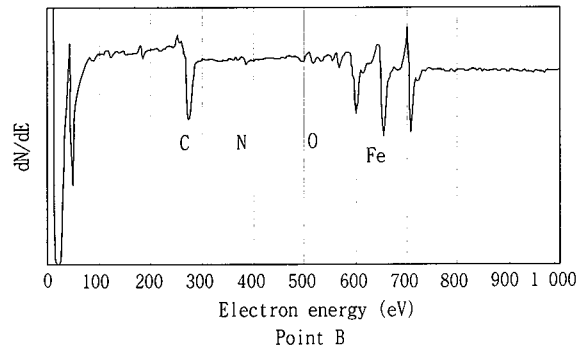
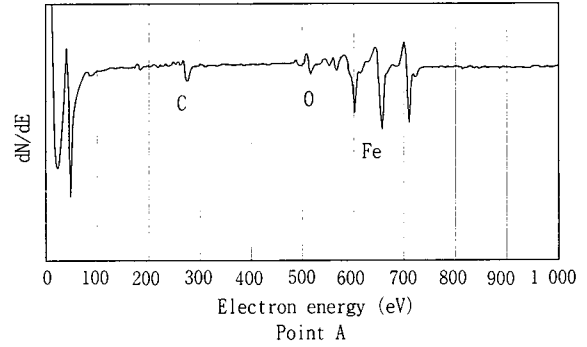
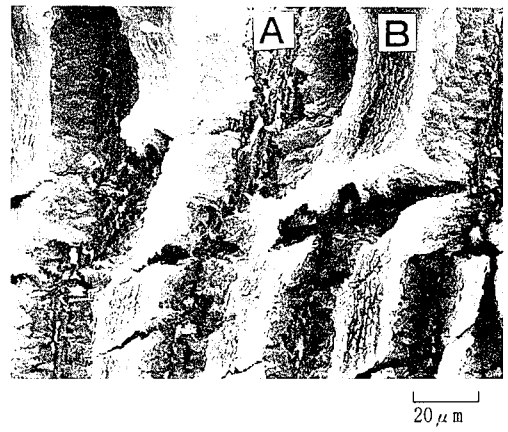


図5 転動面直下深さ0.08mmの特異組織のAESスペクトル

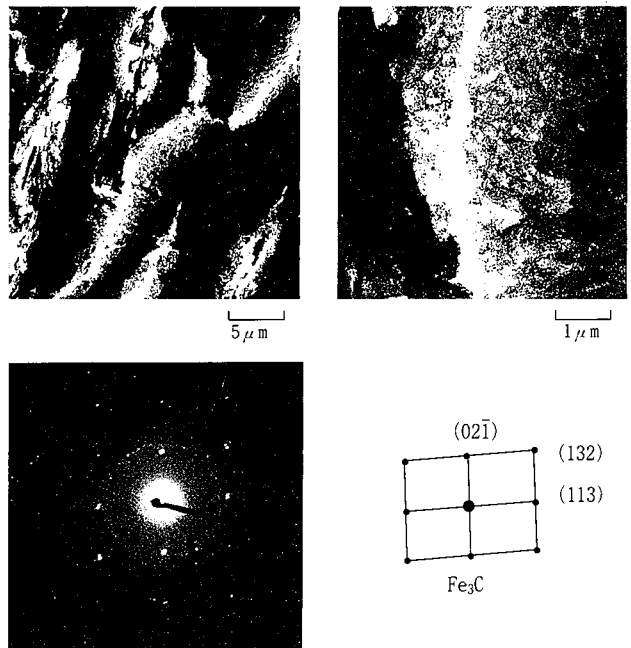


図6 特異組織部の微細析出物のTEM写真と電子線回折パターン

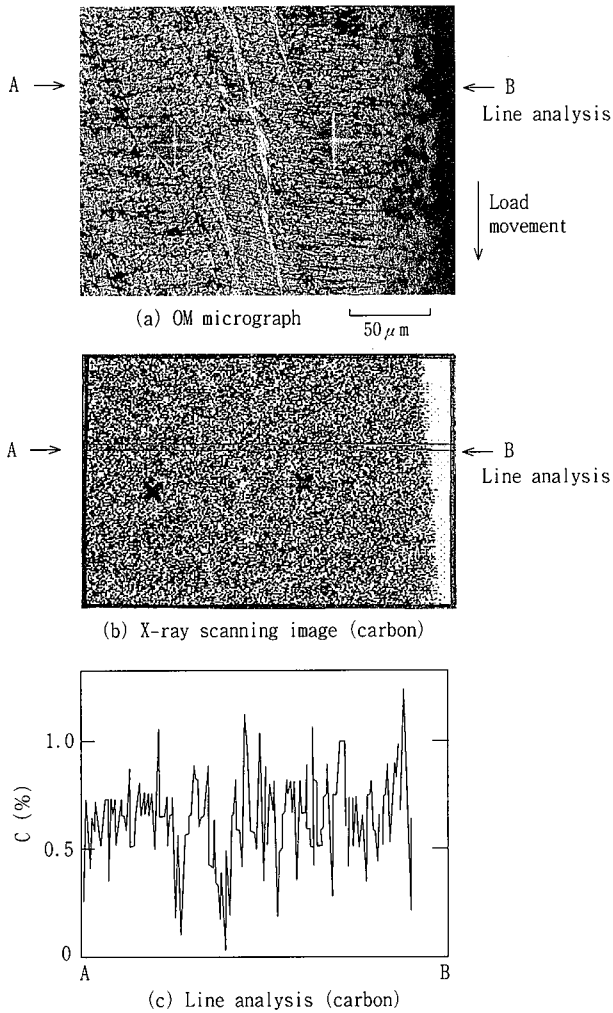


図7 白色帯近傍のEPMAによる炭素濃度分布の解析

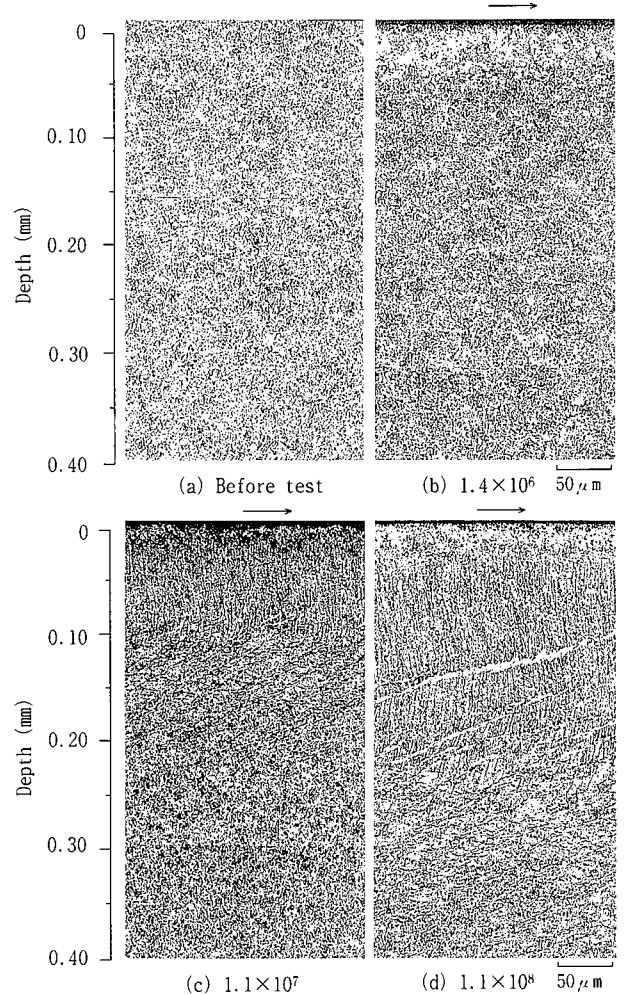


図9 繰り返し数と転動面直下の組織の関係

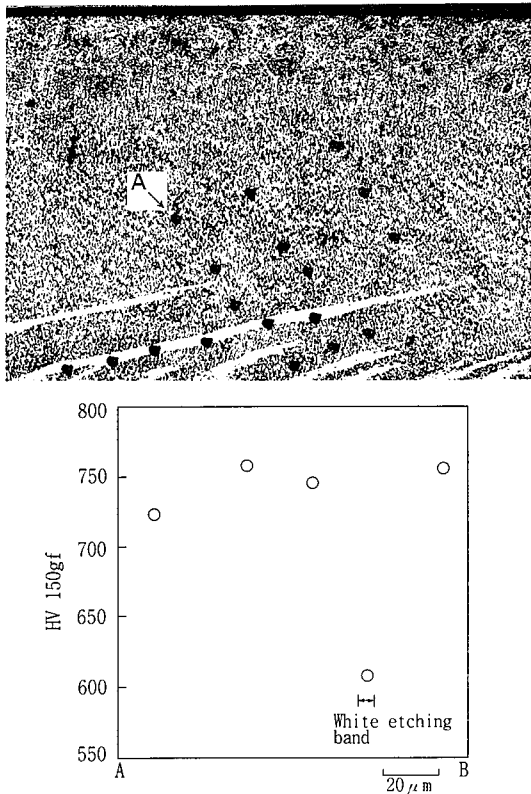


図8 白色帯近傍の硬さ分布

を示す。 10^6 回の繰り返しでは若干組織が黒くなっているものの、転動疲労試験前の組織と大きな差はなく、明確な組織変化は認められない。 10^7 回の繰り返しでは、深さ0.1mmまでに荷重移動方向と約90度の角度をなす板状組織、深さ0.2mmまでに荷重移動方向と約30度の角度をなす筋状組織が現れる。さらに 10^8 回の繰り返しでは、板状組織が深くまで発達し、深さ0.2mmまでの筋状組織は白色帯に発達し、傾きが約20度に傾いてくる。さらに、より深い深さ0.3mmあたりの位置で、 10^7 回の繰り返しにおいて深さ0.2mmまでにみられた筋状組織が現れる。

以上から、剪断歪の集中とそれに伴う発熱により、まず疑似パーライト相である筋状組織が生成し、次に炭素が逃散してフェライトのバンドが発達することにより白色帯が形成されると考えられる。なお、 10^8 回転動疲労後の組織は先に示した浸炭材と同様な組織を呈しており、浸炭材と軸受鋼SUJ2で組織変化に差異はない。

次に、SUJ2を用いてマクロな材質特性の経時的な変化について調べた。図10は、試験片のC断面で測定した硬さ分布である。試験前の硬さは深さ方向ではほぼ一定であり、HVで約800である。これに対して転動疲労試験を行うと、剪断応力が最大になる深さ0.2mmあたりで、 10^6 回繰り返しで一旦硬くなり、その後はかえって低下する。 10^6 回繰り返しで一旦硬くなるのは、残留オーステナイトの分解と、炭化物の微細析出による析出硬化によるものと推定される。

正味の硬さの指標として、転位密度の大小に対応するX線回折

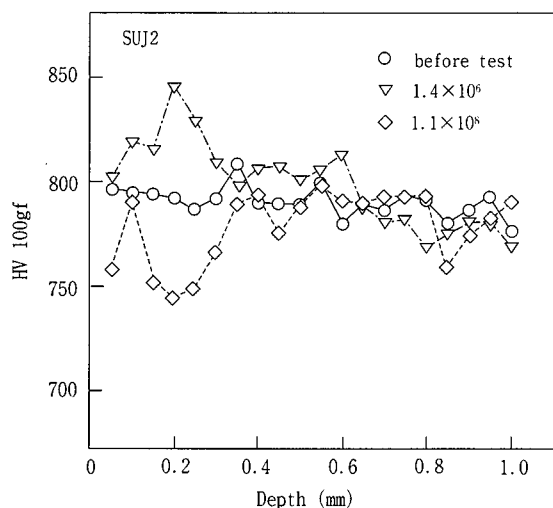


図10 転動疲労過程での硬さ分布の変化

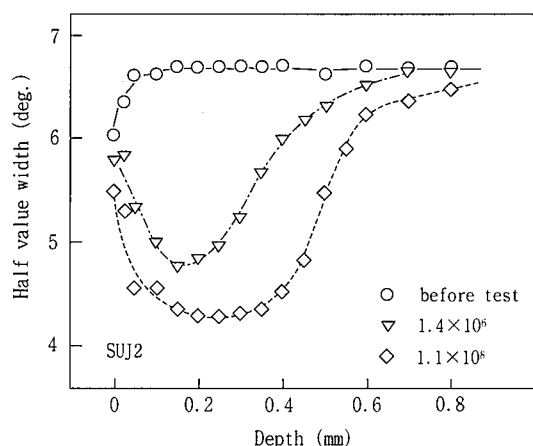


図11 転動疲労過程でのX線回折ピークの半価幅分布の変化

ピークの半価幅を測定した結果を図11に示す。この半価幅の経時変化も転動面から約0.2mmの深さで最も顕著であるが、硬さとは異なり疲労過程で単調に減少する。このように半価幅は正味の硬さに対応する筈であるが、その経時変化は若干異なる。硬さには残留応力の影響も含まれるために、正味の材質特性は硬さよりもこの半価幅で代表されると推察される。

残留応力 σ_R 、残留オーステナイト量 γ_R の深さ方向の分布を図12に示す。転動疲労過程で、剪断応力が最大になる深さ0.2mmあたりで大きな圧縮残留応力が発生している。また、残留オーステナイト量もこの同じ位置で顕著に減少する。但し、SUJ2の残留オーステナイト量は試験前で4%程度と少ない。

3.3 転動疲労過程での発熱の推定

図11に示した半価幅を指標として、転動疲労過程で何度程度まで昇温したかについて検討した。図13は、各温度で繰り返し数 10^6 回に相当する0.5時間、 10^8 回に相当する40時間保定して焼戻した材料について、X線回折ピークの半価幅を求め、焼戻し温度で整理したものである。丸印が0.5時間保定であるが、焼鈍温度の上昇に伴い半価幅は単調に低下する。さらに40時間保定では、同じ焼戻し温度でも0.5時間保定に比べて0.5~1度低下する。図13と図11から、深さ方向の各位置での到達温度を推定した。例えば、図11から 10^8 回繰り返し材の深さ0.2mmでの半価幅は4.3度であるが、 10^8 回に相当する40時間保定の焼戻しで半価幅が4.3度になるのは、図13

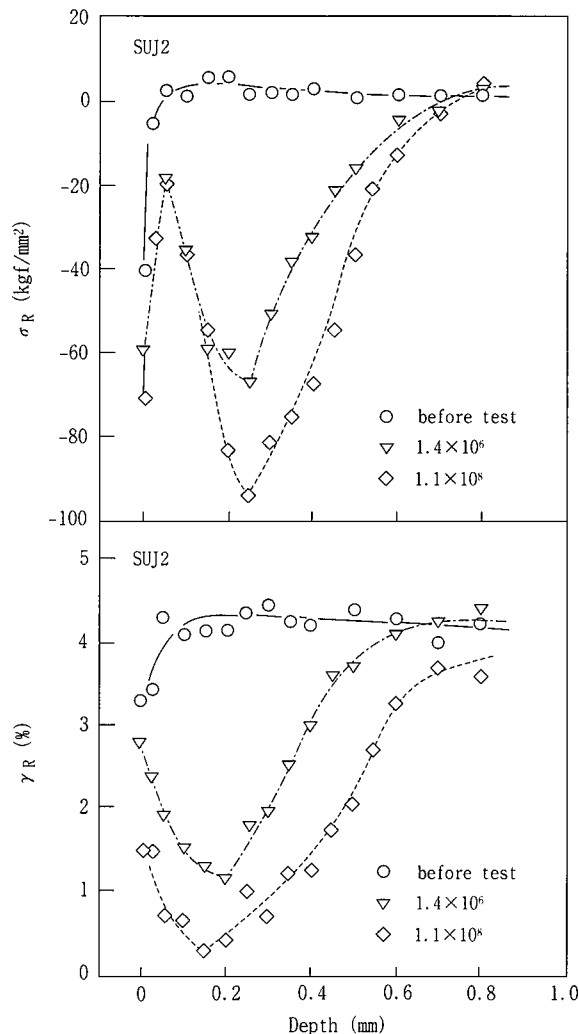


図12 転動疲労過程での残留応力、残留オーステナイト量分布の変化

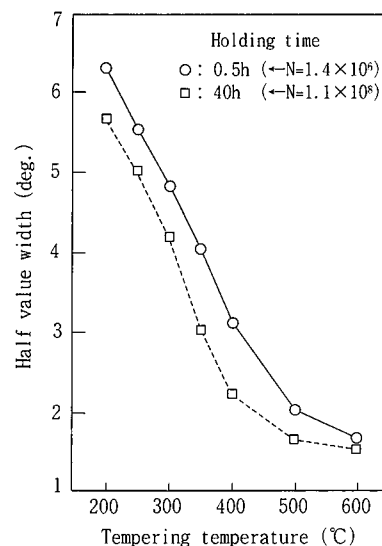


図13 SUJ2における焼戻し温度とX線回折ピークの半価幅の関係

から焼戻し温度が300°Cの時である。従って、この場合の到達温度は300°Cと推定される。

以上の要領で、同一半価幅となる焼戻し相当温度から到達温度を推定した。その結果、マクロな温度分布は図14のようになり、剪断応力が最大になる深さ0.2mmあたりで300°C程度まで温度が上がっている。なお、これはマクロな領域での到達温度の推定であ

り、局所的には300℃以上に昇温していることを意味している。このことは特異組織がセメントタイトの析出を伴っているとの実験事実と一致する。

次に、白色帯生成領域では局所的には何度まで温度が上がっているかについて検討した。図15に転動疲労過程での転動面直下の深さ0.25mmにおける特異組織と、種々の温度、時間で焼戻しを行った組織を対比して示す。転動疲労過程では、 10^7 回の繰返しで筋状組織が現れ、さらに 10^8 回の繰返しで筋状組織が白色帯に発達する。これに対して、300℃で 10^7 回の繰返し相当の4時間、 10^8 回の繰返し相当の40時間保定しても、ほとんど組織の変化は認めら

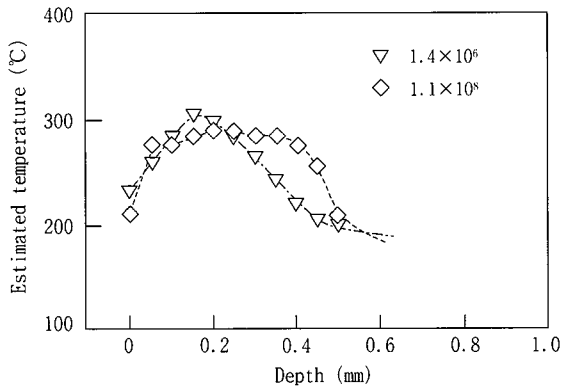


図14 半価幅より推定された転動面直下の温度分布

れない。温度を600℃まで上げて40時間保定すると、白いフェライト相が明瞭に現れてくる。以上から、マクロ的な到達温度は先に示したように約300℃であるが、局所的には600℃以上に昇温し白色帯が形成されるものと考えられる。

4. 結 言

軸受用鋼の転動疲労過程での特異組織の生成挙動とそれに伴う材質変化について調査、解析し、以下の点を明らかにした。

- (1) 転動疲労過程において転動面下の剪断応力が最大となる深さで、荷重移動方向と約90度の角度をなす板状組織、約30度の角度をなす白色帯、筋状組織が生成する。白色帯はフェライト、板状組織と筋状組織はセメントタイトを伴う擬似パーライト組織である。転動疲労過程で筋状組織が発達して白色帯へ遷移する。
- (2) 正味の硬さに相当するX線回折ピークの半価幅は、剪断応力が最大となる深さにおいて疲労過程で顕著に減少する。
- (3) 以上の疲労過程での組織、材質変化は、剪断歪の集中とそれに伴う発熱によると推察される。到達温度はマクロには300℃程度、白色帯形成領域では局所的に600℃以上と推定される。

軸受部品の使用環境は、高面圧に加えて、異物混入(ごみ入り)環境や高温環境のように一層厳しくなり、転動寿命に及ぼす組織変化挙動の影響は益々大きくなることが予想される。今後、組織変化挙動に着目した高寿命化への取り組みが重要になってくる。

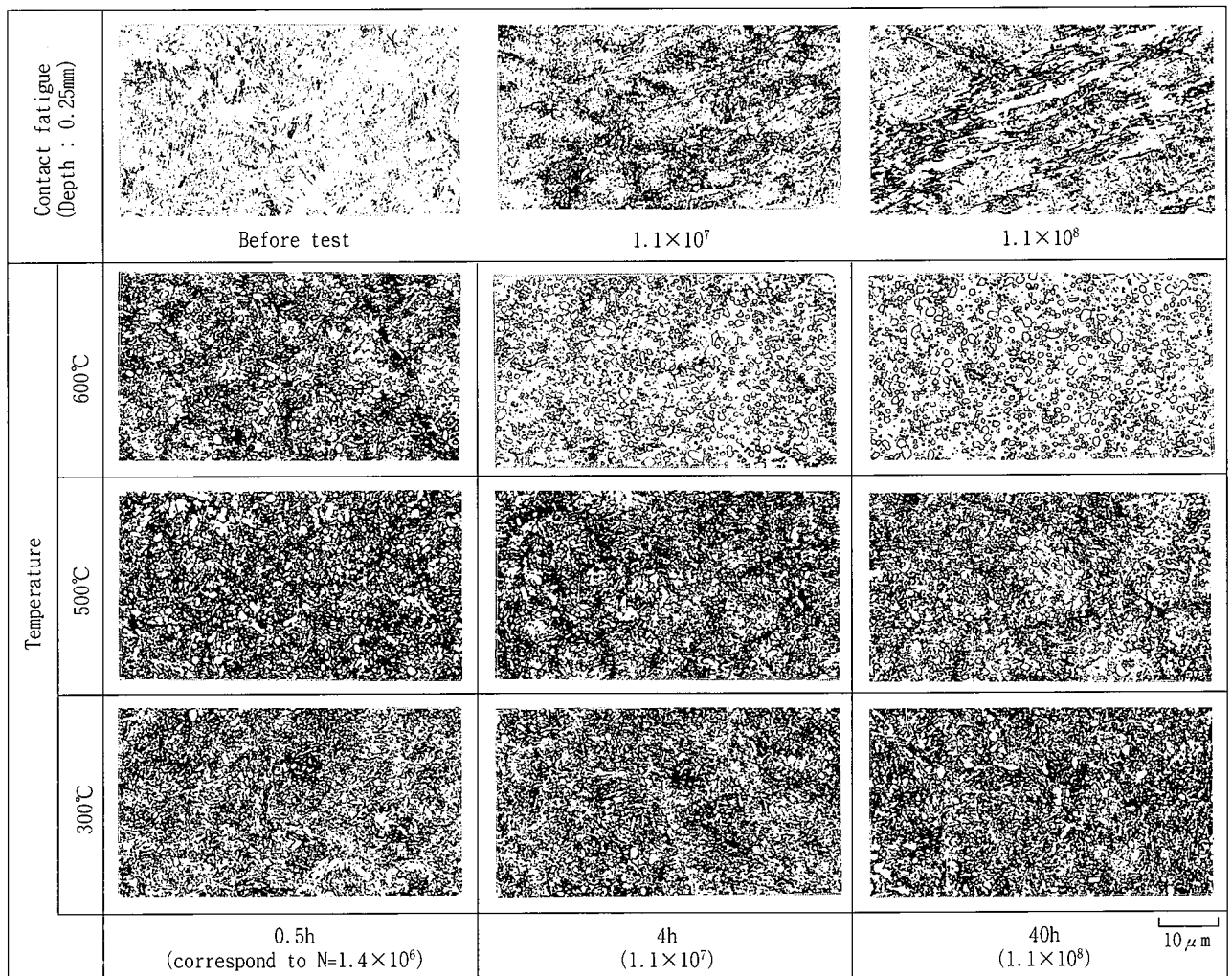


図15 転動疲労過程及び焼戻し過程での組織変化挙動の比較

参考文献

- 1) Sugino, K. et al. : Trans. ISIJ. 10, 98(1970)
- 2) Swahn, H. et al. : Metall. Trans. A. 7A, 1099(1976)
- 3) Maeda, K. et al. : Proc. Japan Inter. Tribology Conf. 1990, p.791
- 4) 村上保夫 ほか : NSK Technical Journal. (656), 1(1993)
- 5) Saeki, M. et al. : Trans. ISIJ. 26, 1017(1986)