

「機械構造用鋼表面硬化部材の疲労損傷」シンポジウム

材料の組織と特性部会 ミクロ偏析の組織形成に及ぼす影響と特性発現のためのプロセス因子フォーラム

自動車向け駆動部品に使用する機械構造用鋼では、部品表面を硬化させて疲労強度の向上を図るのが一般的です。この疲労損傷に関する課題は、旧来より多くの研究開発が継続されてきた分野ですが、近年の厳しい特性要求と分析手法の高度化を踏まえ、材料学に基づく理解と結びつけた議論を深めていくことが重要と考えます。本シンポジウムでは、機械構造用鋼を対象に、ショットピーニングによるき裂の無害化、窒化化合物層の影響、き裂面の摺動を伴う転がり疲労やピッチング損傷を取り上げ、現状の理解について整理を試みます。耐疲労設計を考える評価結果を事例として、鉄鋼材料の組織制御と材料設計を考えるきっかけにしたいと考えております。多数の方々にご参加頂き、活発な討論となることを期待しております。

日時： 2016 年 3 月 23 日(水) 9:00～17:00

場所： 日本鉄鋼協会第 171 回春季講演大会 第 6 会場
東京理科大学葛飾キャンパス講義棟 5 階 507 号室

プログラム：

(座長) 高木眞一 (神奈川産技セ)

- 9:00～ 9:10 開会挨拶 梅澤 修 (横国大)
9:10～ 9:30 ショットピーニングによるばね鋼の疲労強度向上とき裂状表面欠陥の無害化 ―平面曲げ疲労―
高橋宏治, 安田順 (横国大), 岡田秀樹 (日本発条)
9:30～ 9:50 ショットピーニングによるばね鋼の疲労強度向上とき裂状表面欠陥の無害化 ―ねじり疲労―
岡田秀樹, 竹田和也 (日本発条), 中川真樹子, 古池仁暢,
高橋宏治 (横国大), 倉本 剛 (キグチテクニクス)

(座長) 高橋宏治 (横国大)

- 10:00～10:30 窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響 ―軸疲労―
高木眞一, 殿塚易行, 星川 潔 (神奈川産技セ), 伊藤経教 (オーネックス)
10:30～10:50 窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響 ―回転曲げ疲労―
久保田剛 (ヤマハ発動機), 野崎精彦 (UD トラックス), 高木眞一 (神奈川産技セ)
10:50～11:10 窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響 ―ねじり疲労―
山田明徳, 衛藤洋仁 (いすゞ自動車), 倉本 剛 (キグチテクニクス)
11:10～11:30 窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響 ―転がり疲労―
定森友也, 古池仁暢, 高橋宏治 (横国大), 久保田剛 (ヤマハ発動機)
11:30～11:50 純窒化した極低炭素鋼の疲労き裂形成挙動に及ぼす化合物層の影響
齋藤 晋, 古賀紀之, 梅澤 修 (横国大)
11:50～12:00 総合討論

(座長) 梅澤 修

- 13:00～13:20 転がり疲労における繰返し接触応力とき裂の関係 木田勝之 (富山大)
13:20～13:40 歯車のピッチング損傷に関する従来知見 川原正明 (日野自動車)
13:40～14:00 重錘式ローラーピッチング試験機の機差について
早乙女尚史 (ニッコークリエート), 堀本雅之 (新日鐵住金),
杉浦孝佳 (愛知製鋼), 川原正明 (日野自動車), 深沢剣吾 (高周波熱錬)
14:00～14:20 すべり率およびサブゼロ処理がピッチング疲労損傷に与える影響
杉浦孝佳 (愛知製鋼), 杉本 剛 (日産)
14:20～14:40 ピッチング疲労損傷に至るき裂の発生・進展過程 1
渡里宏二, 堀本雅之 (新日鐵住金), 藤本 充 (本田技研)
14:40～15:00 ピッチング疲労損傷に至るき裂の発生・進展過程 2
深沢剣吾 (高周波熱錬), 藤本 充 (本田技研)

(座長) 木田勝之 (富山大)

15:10～15:30 SCM420 浸炭鋼の高面圧下ピッチングにおけるき裂形成

實方潤一, 古賀紀之, 梅澤 修 (横国大), 野崎精彦, 鏈 恵介 (UD トラックス)

15:30～15:50 ピッチング疲労損傷における内部せん断応力の影響

丸山貴史, 常陰典正 (山陽特殊製鋼)

15:50～16:10 転がり疲労における材料表面に及ぼすトランスミッションフルードの影響 1

鏈 恵介, 平川和宏, 野崎精彦 (UD トラックス), 砂川洋二 (出光興産), 梅澤 修 (横国大)

転がり疲労における材料表面に及ぼすトランスミッションフルードの影響 2

砂川洋二 (出光興産)

16:10～16:30 浸炭鋼の転がり疲労による組織変化

相川文明, 橋本 翔, 小俣弘樹, 植田光司 (日本精工)

16:30～16:50 総合討論

16:50～17:00 閉会挨拶

渡邊陽一 (パーカー熱処理工業)

ショットピーニングによるばね鋼の疲労強度向上とき裂状表面欠陥の無害化 —平面曲げ疲労—

Improvement of fatigue strength of spring steel and rendering crack-like surface defect by shot peening
-Plane bending fatigue-

横国大院 高橋宏治 安田 順
日本発条 岡田秀樹

1.緒言

近年、ショットピーニング(SP)により鋼の疲労限度を向上させるだけでなく、表面欠陥を強度上無害化できることが明らかとなっている。機械部品は幅広い応力比(R)での使用が想定される。これまでの研究では、ばね鋼において、 $R=0^{1)}$ および $R=0.4^{2)}$ の場合には、深さ0.2mmの半円スリット欠陥をSPにより無害化できることが明らかとなっている。しかし、応力比が負($R<0$)の場合には、無害化可能な表面欠陥寸法は未解明である。そこで本研究では、ばね鋼を用いて応力比が負の疲労試験を行い、SPにより無害化可能な表面欠陥寸法に及ぼす負の応力比の影響を明らかにすることを目的とする。

2.実験方法

ばね鋼 SUP9A の試験片に、き裂状表面欠陥を模擬した深さ0.1~0.3mmの半円スリットを放電加工により導入した。焼入れ・焼戻しにより硬さを470HVにした後、SPを実施した。室温大気中、応力比 $R=-1$ 、周波数20Hzの条件で平面曲げ疲労試験を行った。また、 10^7 回の繰り返しに耐えた最大の応力振幅を疲労限度とした。

3.結果

Fig.1に、スリット深さと応力振幅の関係を示す。スリット深さが0.2mm以下であれば、SPにより平滑材と同等まで疲労限度が向上し、破壊起点がスリット部以外となった。よって、深さ0.2mm以下のスリットを無害化できた。 $R=0^{1)}$ および $R=0.4^{2)}$ でも深さ0.2mm以下のスリットを無害化できており、実験を行った範囲では、応力比が無害化可能な表面欠陥寸法に及ぼす影響は小さかった。SPにより最大で700MPaの圧縮残留応力が導入されたが、試験後に残留応力の減衰が確認できた。疲労強度向上と表面欠陥の無害化は、SPにより導入された圧縮残留応力により達成されたと考えられる。

Fig.2は、半円き裂の応力拡大係数範囲 ΔK_T とき裂深さの関係を示す。 ΔK_T は作用応力による K_{max} と疲労試験後の残留応力による K_r の和である。 ΔK_T と下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の交点が無害化可能な裂寸法である。Fig.2より、 $R=-1$ では深さ0.28mmまで無害化可能と予測される。予測結果と実験結果は整合しており、減衰後の圧縮残留応力に着目することで無害化可能な欠陥寸法を予測できた。 $R=0$ および $R=0.4$ では、それぞれ0.24mmおよび0.22mmと予測できており、応力比によらず無害化可能な欠陥を予測できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 高橋宏治, 他4名, 材料, 58 (2009) 1030-1036.
- 2) J. Yasuda, K. Takahashi, H. Okada, International Journal of Structural Integrity 5 (2014) 45-59..

Koji Takahashi (Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501)

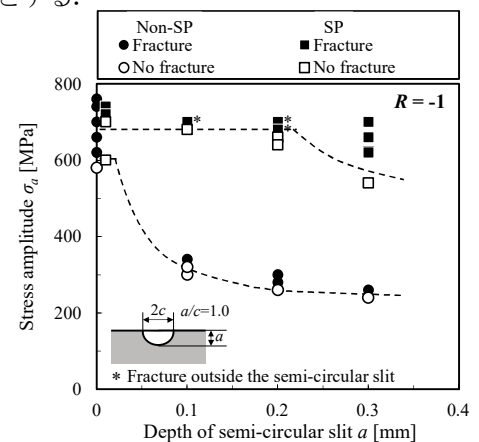


Fig. 1 Relationship between stress amplitude and depth of the semi-circular slit.

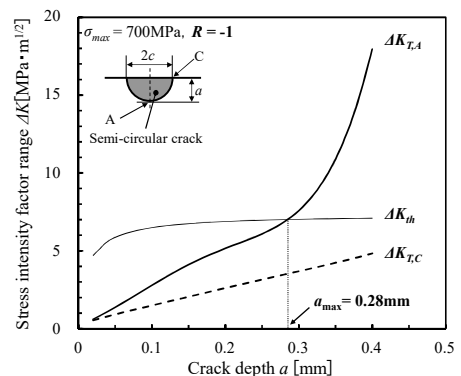


Fig. 2 Estimation of acceptance semi-circular slit size.

ショットピーニングによるばね鋼の疲労強度向上とき裂状表面欠陥の無害化 －ねじり疲労－

Improvement of fatigue strength of spring steel and rendering crack-like surface defect by shot peening
-Torsional fatigue-

日本発条 岡田秀樹 竹田和也
横国大院 中川真樹子 古池仁暢 高橋宏治
キグチテクニクス 倉本 剛

1. 緒言

近年、ショットピーニング(SP)により鋼の疲労限度を向上させるだけでなく、表面欠陥を強度上無害化できることが明らかとなっている。これまでの研究では、ばね鋼の平面曲げ疲労において、 $R=0$ および $R=0.4$ の場合には、深さ 0.2mm の半円スリット欠陥を SP により無害化できることが明らかとなっている。しかし、ねじり疲労の場合には、無害化可能な表面欠陥寸法は未解明である。そこで本研究では、ばね鋼を用いて応力比 $R=-1$ および $R=0$ のねじり疲労試験を行い、ねじり疲労強度向上と無害化可能な表面欠陥寸に及ぼす SP の効果を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

ばね鋼 SUP7 のねじり試験片を作製後、焼入れ・焼戻しにより硬さを 460HV、540HV および 670HV にした後、SP を実施した。 $R=-1$ 用の試験片では、熱処理前にき裂状表面欠陥を模擬した深さ 0.15~0.3mm の半円スリットを放電加工により導入した。応力比 $R=-1$ および $R=0$ において、周波数をそれぞれ 7 または 20Hz として室温大気中においてねじり疲労試験を行った。また、 3×10^6 回または 10^7 回の繰り返しに耐えた最大のせん断応力振幅をねじり疲労限度とした。

3. 結果

Fig.1に、各硬さの試験片のねじり疲労限度線図を示す。SPの有無および応力比の違いによらず同じプロットとした。各疲労限度線図と横軸の交点における平均応力として引張強さを用いた。また、SP材では、横軸の平均応力の値として、疲労試験後の表面における圧縮残留応力と疲労試験時の平均応力の和を用いた。硬さおよびSP有無に関わらず平均応力で整理すると同じ傾きで評価できることが明らかになった。

Fig.2に示すように、硬さが460HVの試験片において、半円き裂のスリット深さが0.15mm以下であれば、SPにより、同じSPを行った平滑材と同等までねじり疲労限度が向上した。この傾向は硬さが540HV、670HVでも同じであり、深さ0.15mm以下のスリットを疲労強度上無害化できた。また破壊力学を用いて無害化可能なスリット深さ(a_{max})を予測した結果も合わせてFig.2に示す。疲労試験後の残留応力を用いた場合には深さ0.19mmまで、疲労試験前の残留応力を用いた場合には深さ0.34mmまでの半円スリットをSPにより無害化可能と予想された。実験結果は0.15mmであり、疲労試験後の圧縮残留応力に着目した予想が実験結果により近い結果であった。

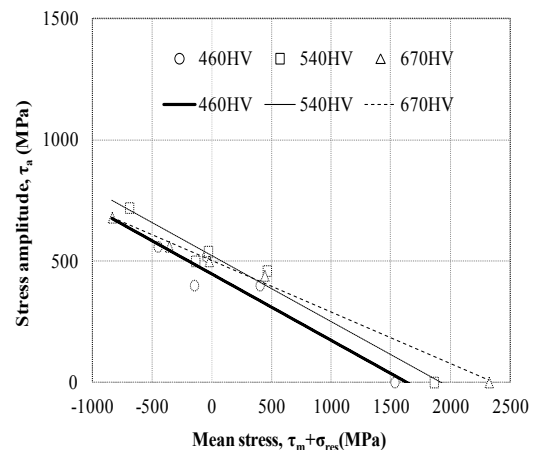


Fig. 1 Fatigue limit diagram for torsional fatigue test.

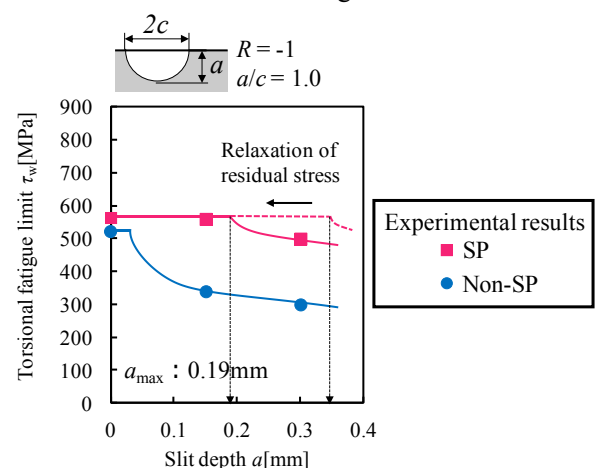


Fig.2 Fatigue test results and estimation of acceptance semi-circular slit size.

窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響－軸疲労－

Influence of Crystal Structures in Compound Layer on Fatigue Strength of Nitrided Steel –Axial Fatigue–

神奈川産技セ 高木眞一, 殿塚易行, 星川 潔
オーネックス 伊藤経教

1. 諸言

窒化処理は鉄母相が α 相の温度域における表面硬化処理であるため、処理に伴う変形がマルテンサイト変態を伴う硬化処理と比較して格段に小さいことが長所である。最近になって水素センサーを用いて炉内の窒化ポテンシャルを制御するガス窒化処理が導入されつつある。これにより表面に生成する窒化化合物層の結晶構造や厚さ、ポーラス構造の体積比率などの制御が可能になり、窒化部品の高強度化が期待されている。本報告では窒化化合物層の結晶構造が軸疲労強度に及ぼす影響について述べる。

2. 実験方法

供試材は調質処理(焼戻し温度 590 °C)した SCM435 鋼 (0.35%C-0.19%Si-0.72%Mn-0.016%P-0.012%S-1.03%Cr-0.15%Mo) の丸棒である。この丸棒から応力集中係数が 2.54 の 60°V 型ノッチを有する切欠疲労試験片および組織評価用の円盤状試験片を加工し窒化処理に供した。本シンポジウムでは、共通の窒化処理条件で処理した試験片を用いて、軸、回転曲げ、ねじり、転がりの各疲労試験の結果について順に報告する。適用した窒化処理条件、窒化化合物層の結晶構造、実施した疲労試験を Table 1 に示す。窒化処理は水素センサーによる窒化ポテンシャル (K_N) 制御機能を備えたピット型ガス(軟)窒化炉を用いて実施し、窒化化合物層の表面側で γ' 相(Fe_4N)あるいは ε 相($\text{Fe}_{2.3}\text{N}$)が主相になるようにそれぞれ調整した。窒化後の N_2 ガス雰囲気での冷却速度は、金属レトルトをピット内に格納したままの炉冷と、引上げてファン空冷する方法の二種類を実施した。また、比較材として従来型のガス軟窒化処理を施した試験片および窒化処理後に化合物層を機械的に除去した試験片も準備した。以下、これらの各試験片の名称は、窒化化合物層の主相と冷却速度等で表現した Table1 記載の略記号を用いる。軸疲労試験は油圧サーボ型の疲労試験機を用いて室温にて応力比 $R=0$ および $R=-1$ で実施した。また、窒化処理後の組織観察、EBSD による相分布測定、窒素拡散層の硬さ分布、X 線による残留応力測定を実施した。

3. 結果

Fig.1 に EBSD 法により窒化化合物層の相構成を解析した結果を示す。 γ'_{FUR} および γ'_{FAN} では表面側に γ' 相が生成し母相との界面側は ε 相が生成している。両者を比較すると冷却速度の違い γ'_{FUR} の方が γ' 相の体積率が高い。一方、 ε_{FAN} および $\varepsilon_{\text{FAN-P}}$ では若干の γ' 相を含有するもののほぼ ε 相単相である。Fig.2 に応力比 $R=0$ の軸疲労試験で得た $S-N$ 線図を示す。縦軸の応力振幅値は応力集中係数を乗じない公称応力で示してあ

Table 1 Condition of nitriding or nitrocarburizing, microstructure of compound layers, and conducted fatigue test

specimen	Symbol	Process	Temp. (°C)	Time (hr.)	Nitriding potential K_N	Cooling method ^{※1}	CLT ^{※2} (μm)	Phases of compound layer	Porosity content rate	Conducted fatigue test				
										Axial	Rotating bending	Torsional	Rolling contact	
A	γ'_{FUR}	Nitriding	570	5	0.35	Furnaces cool	5-10	outer γ' inner ε	very low	✓				
B	γ'_{FAN}				0.35	Fan cool	5-10	outer γ' inner ε	very low	✓	✓	✓	✓	
C	ε_{FAN}	Nitro- carburizing			0.29		10	ε	low	✓	✓	✓	✓	
D ^{※3}	$\varepsilon_{\text{FAN-P}}$			570	3.5	Not controlled		15	ε	high		✓		
E	$\gamma'_{\text{FAN-R}}$	Removing compound layer from specimen “B (γ'_{FAN})”									✓		✓	
F	$\varepsilon_{\text{FAN-R}}$	Removing compound layer from specimen “C (ε_{FAN})”									✓		✓	

※1 Cooling after the processing in N_2 atmosphere ※2 CLT: Compound Layer Thickness

※3 Conventional gas nitrocarburizing process

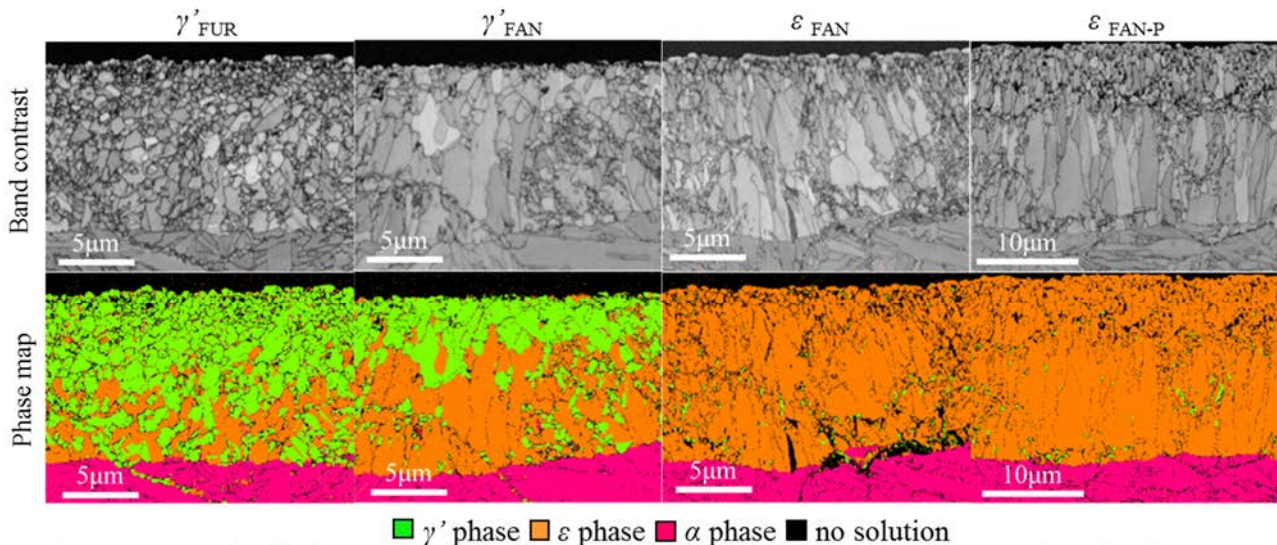


Fig. 1 Cross-sectional microstructures of surface compound layer of each specimens. Upper shows band contrast and lower shows phase map by SEM-EBSD.

る。また、図中の矢印は未破断のまま試験を中断したことを示す。窒化材の $S-N$ 線図はいずれも折れ線状の形状を示し、低サイクル側では未窒化の調質材よりも時間強度が劣るが、応力振幅が特定の値を下回ると破断までの繰返し数は 10^4 回のオーダーから 10^6 回以上へと格段に向上する。したがってこの折れ曲がりを示す応力振幅値が高い値であるほど疲労限度が高くなる。 ε_{FAN} と比較して、表面側に γ' 相が多く分布する γ'_{FUR} および γ'_{FAN} の方が折れ曲がりを示す応力振幅値が格段に高く、高い疲労限度を示した。このことから窒化材の疲労強度は化合物層の破壊強度に依存することが示唆される。

破面観察の結果、破壊開始はいずれも切欠底表面と判断されたが明瞭な起点は認められなかった。 ε_{FAN} では、 10^6 サイクル以上まで未破断の試験片に、化合物層を横断し直下の母相で停留するき裂が観察された。また、応力比 $R=0$ と $R=-1$ の疲労限度を最大引張応力に換算するとほぼ同じ応力値となった。よって、 ε 化合物層が脆性的に破壊してき裂が生成し、これが母相の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} を超えて進展し破断に至ると考えられる。一方、 γ'_{FUR} および γ'_{FAN} では、破断面の外周部に旧 γ 粒界と粒内での破壊が混在する脆性破面が明瞭に観察された。 γ'_{FAN} に対して応力振幅 325MPa で周波数が 0.5Hz の疲労試験を実施し、わずか 12 サイクルで明確に音を発してき裂を生じた試験片の断面を観察した結果、化合物層を横断し深さ 193 μ m まで達するき裂が観察された。よって、 ε 相よりも破壊応力の高い γ' 相では、その破断により生ずるき裂先端での応力拡大係数が母相の破壊靱性値を超えて、き裂が瞬時に内部まで進展すると考えられる。

窒化化合物層を除去した γ'_{FAN-R} 、 ε_{FAN-R} は、 $R=0$ においては、 γ'_{FUR} および γ'_{FAN} よりもさらに高い疲労強度を示し、低サイクル側の時間強度も向上している。 $R=-1$ の場合には γ'_{FUR} および γ'_{FAN} よりも疲労強度がやや劣る傾向を示した。化合物層の無いこれらの試験片においても破面外周部に明瞭な脆性破面領域が観察されることから、窒素の拡散による硬化領域における特徴的破面形態であると判断される。

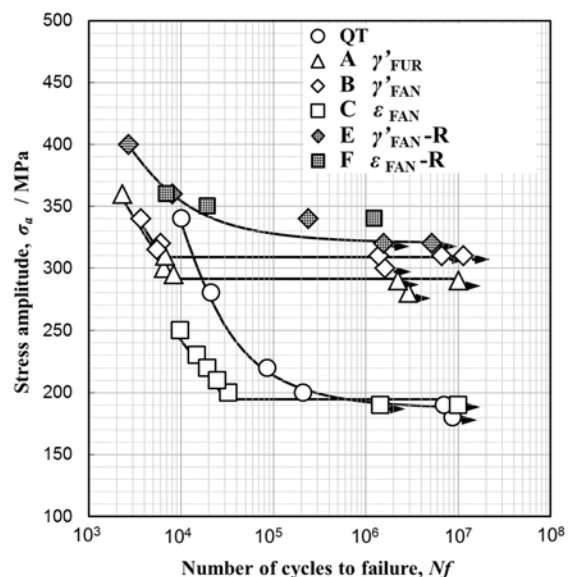


Fig. 2 S-N diagram

窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響—回転曲げ疲労—

Influence of Crystal Structure in Compound Layer on Fatigue Strength of Nitrided Steel

- Rotating Bending Fatigue -

ヤマハ発動機

UD トラックス

神奈川産技セ

久保田剛

野崎精彦

高木眞一

1.緒言

自動車を始めとした輸送機器用のドライブトレイン部品の静粛化要求に対し、表面硬化手法として一般的な浸炭焼入れを、歪が少ないガス窒化・ガス軟窒化に置き換えることが有効である。その際の課題は、主に曲げ疲労強度、耐摩耗性、耐ピッチング性である。本報では、窒化化合物層の結晶構造が曲げ疲労強度に及ぼす影響について述べる。

2.実験方法

材料として、SCM435H (Table 1) を Table 2 に示す条件で焼入れ焼戻し、窒化ポテンシャルを制御しながら窒化処理した。比較対象として、窒化処理無し (SCM435H 焼入れ焼戻し) と、浸炭焼入れ (SCM420H 浸炭焼入れ焼戻し、550HV 有効硬化層深さ 0.5mm) を準備した。これらを、小野式回転曲げ疲労試験により評価した。表面硬化部の強度を明確にするため、試験片の試験部に半径 1mm の切欠きを設けた。応力集中係数の計算値は 1.78 である。また、フィッシャーHM2000LT により、化合物層を含む

Table 1 Chemical composition. (wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM435H	0.36	0.31	0.76	0.019	0.017	1.03	0.17

Table 2 Heat treatment conditions.

Symbol	Quench (°C)	Temper (°C)	Process	Porosity content rate
B γ'_{FAN}	850	590	Nitriding	Very low
C ϵ_{FAN}			Nitro-carburizing	Low
D ϵ_{FAN-P}			Carburizing	High

深さ方向硬さ分布を測定した。ビッカース圧子を用い、押し込み荷重は 10mN とした。インデンテーション硬さをビッカース硬さに換算し、3 回測定した平均値を示した。

3.結果

疲労強度試験結果を Fig.1 に示す。 γ'_{FAN} の疲れ限度は 610MPa となり、浸炭焼入れの疲れ限度 (555MPa) より約 10%高かった。化合物層を含む深さ方向硬さ分布を Fig.2 に示す。また、Table 3 に、各試験品の疲れ限度と、化合物層 (表面から 1 μ m) および拡散層 (化合物層直下 3 μ m) の硬さ一覧を示す。疲れ限度は、拡散層の硬さとは相関が見られないが、化合物層の硬さと相関があることが推測される。

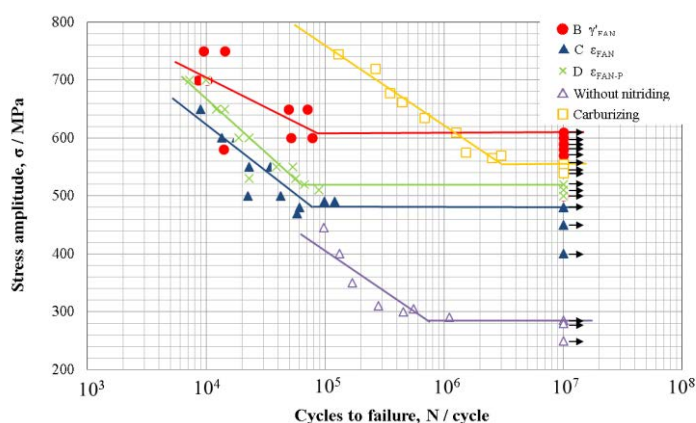


Fig.1 Results of fatigue strength test.

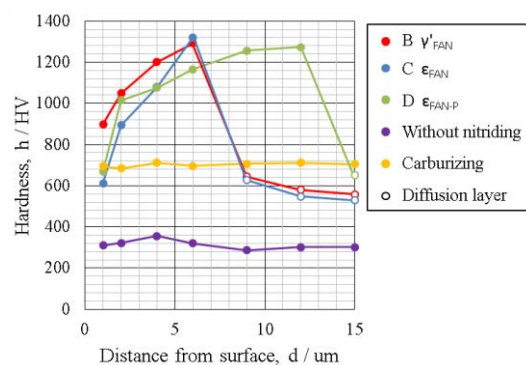


Fig.2 Hardness.

Table 3 Comparison of fatigue strength with hardness.

	Fatigue strength (Mpa)	Hardness at 1μm of depth from surface (HV)	Hardness of diffusion layer at 3μm from compound layer (HV)
B γ'_{FAN}	610	899	645
C ϵ_{FAN}	480	613	628
D ϵ_{FAN-P}	520	669	651
Without nitriding	285	310	-
Carburizing	555	695	-

Tsuyoshi Kubota (Yamaha Motor Co., Ltd., 3001-10 Kuno, Fukuroi, Shizuoka 437-0061, Japan)

窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響－ねじり疲労－

Influence of Crystals Structures in Compound Layer on Fatigue Strength of Nitrided Steel

-Torsion fatigue-

いすゞ自動車(株) 山田明徳 衛藤洋仁
(株)キグチテクニクス 倉本 剛

1.緒言

近年、商用車は低燃費化や積載量増大を目的に、各コンポーネントのダウンサイジングが進められている。エンジンのダウンサイジングを達成するには高出力化が必要であり、これに伴いエンジン構成部品のクランクシャフトには高強度化が求められている。クランクシャフトの必要特性として曲げ／ねじり疲労強度、耐摩耗性、曲げ矯正性がある。本研究では窒化化合物層の結晶構造がねじり疲労強度に及ぼす影響に着目し検証した。

2.実験方法

試験片はφ15 mmのSCM435(Table1)をTable 2の条件で調質処理後に機械加工、Kn制御窒化処理を行い作製した。この試験片を用いて、室温大気中、応力比=-1、周波数20Hzでのねじり疲労試験、試験片の各種材質特性調査、及び破面解析を行った。

3.結果

ねじり疲労試験の結果(Fig.1)より、化合物層の結晶構造(γ' または ϵ)、及び化合物層の有無に関わらず疲労限度は同等であった。一方、低サイクル側($\sim 10^5$ 回)の疲労強度は、化合物層有り品に対して除去品は低い強度であった。

材質特性の結果(Table3)より、各試験片の硬さに大きな差は無かったが、化合物層除去品の最大圧縮残留応力は化合物層有り品に比べて大きな値であった。この差がねじり疲労限度に影響しなかったのは、最大圧縮残留応力が除去加工による影響で最表面に発生しており、Mode IIからMode Iへのき裂の遷移に影響していなかったためと推測する。

また、低サイクル側で化合物層有り品の時間強度が除去品に比べて大きいのは、Mode IIき裂長さ(Fig.2)に違いがあることより、化合物層にMode IIき裂の抑制効果があったためと推測する。

Table1. Chemical composition of SCM435 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SCM435	0.35	0.23	0.70	0.021	0.017	0.08	1.07	0.18

Table2. Nitriding & Nitrocarburizing conditions

Specimen	Symbol	Quench	Temper	process	Removed compound layer
B	γ' FAN	850°C 30min Oil cool	590°C 10min Water cool	Nitriding	not
C	ϵ FAN			Nitrocarburizing	not
E	γ' FAN-R			Nitriding	do
F	ϵ FAN-R			Nitrocarburizing	do

Table3. The material properties of TP

Specimen	Hardness of compound layer (HV)	Surface hardness of diffusion layer (HV)	Max. compressive residual stress (MPa)
B	790	568	343
C	724	561	281
E	layer removed	577	430
F	layer removed	567	600

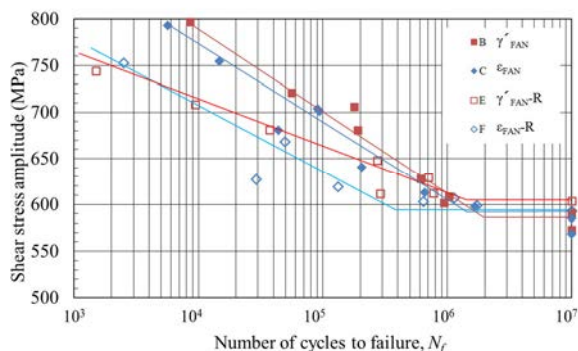
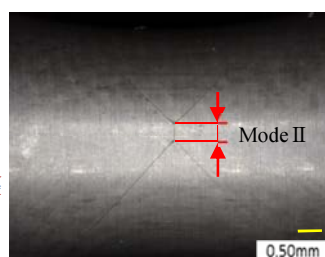
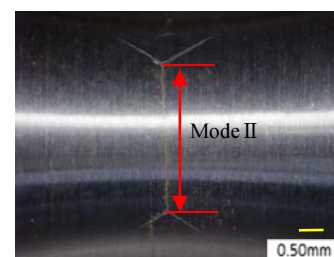


Fig.1 S-N diagram



Specimen B $\tau = 721\text{MPa}$



Specimen E $\tau = 744\text{MPa}$

Fig.2 Specimen surface

山田明徳 (Isuzu Motors Limited, 8 Tsuchidana, Fujisawa-shi, 252-0881)

窒化化合物層の結晶構造が疲労強度に及ぼす影響 —転がり疲労—

Influence of Crystal Structures in Compound Layer on Fatigue Strength of Nitrided Steel

-Rolling Contact Fatigue-

横国大院 定森 友也

横国大工 古池 仁暢, 高橋 宏治

ヤマハ発動機 久保田 剛

1. 緒言

近年の二輪車の変速機歯車に対するニーズとしては、長寿命化の他に、高精度化による低騒音化などがある。鋼の表面硬化熱処理である窒化処理は、処理温度が低いため、処理による変形を抑制できるとともに、鋼材表面に高硬度かつ耐磨耗性に優れる窒化化合物層を生成できる¹⁾したがって、さきに述べたようなニーズに沿った理想的な熱処理と言える。一方で、その化合物層は靱性が低く、高面圧や潤滑油中の異物の噛み込みを生じる環境では、十分な性能を発揮できない可能性がある。そのため、本研究においては、窒化処理材の潤滑油中の異物噛み込みに起因する転がり疲労現象の観察と寿命評価を行い、その疲労メカニズムの考察を行った。

2. 実験方法

試験片として、SCM435 に対して K_n 制御窒化処理を行った 2 種の円盤状試験片 $\gamma'_{FAN}(B)$, $\epsilon_{FAN}(C)$ を作製した。試験片の化合物層厚さは γ'_{FAN} が 12 μm , ϵ_{FAN} が 6 μm であり、拡散層の硬さ分布は Fig.1 に示すとおり ϵ_{FAN} の方が高硬度であった。これらの試験片に対し $\phi 60$ -100 μm の高速度鋼製異物を混入したオイルバス中で、転動体に $\phi 9.5mm$ の SUJ2 球を 3 球用い、500rpm でスラスト式転がり疲労試験を実施した。この際、試験片の軌道面上に剥離を生じるまでの接触繰返し数を寿命と定義した。

3. 結果

転がり疲労試験の結果を Fig.2 に示す。異物混入潤滑下における転がり疲労寿命は、いずれの最大面圧 (P_{max}) においても ϵ_{FAN} が長寿命であった。また、両試験片共に、剥離は軌道輪の内側の縁に沿った位置に発生していた。球の通過方向に対し平行な軌道輪断面を観察したところ、化合物層には球や異物との接触応力に起因する深さ 10 μm 前後の表面き裂が複数存在し、これを起点に深さ方向へき裂が進展していた。このような接触応力に起因するき裂に対する化合物層の強度を測るため、試験片表面に対して球圧子の圧入試験を行い、接触面縁にき裂が発生する P_{max} を比較した。球圧子には疲労試験に用いたものと同寸法の SUJ2 球を用い、き裂発生は AE センサで検知した。両試験片 8 回ずつ測定し、き裂が発生する P_{max} の平均値は γ'_{FAN} で 5.72 GPa, ϵ_{FAN} で 4.98 GPa となり、化合物層は γ'_{FAN} の方が高強度であった。これは、異物混入潤滑下における転動疲労寿命の違いは化合物層の強度ではなく、拡散層の強度に依存することを示唆している。疲労試験で用いた異物サイズが窒化処理材の化合物層厚に対して大きかったため、試験開始直後、圧痕形成と同時にその周囲に拡散層に達するき裂が発生したことで、化合物層の強度が寿命に影響しなかったと考えられる。以上より、大きな接触面圧や異物の影響を受ける環境下においては、窒化材の化合物層よりも、拡散層の硬さが非常に重要であると推測される。

参考文献

- 1) 宮本吾郎 監訳 鉄の窒化と軟窒化；アグネ技術センター (2011)

Tomoya Sadamori (Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501)

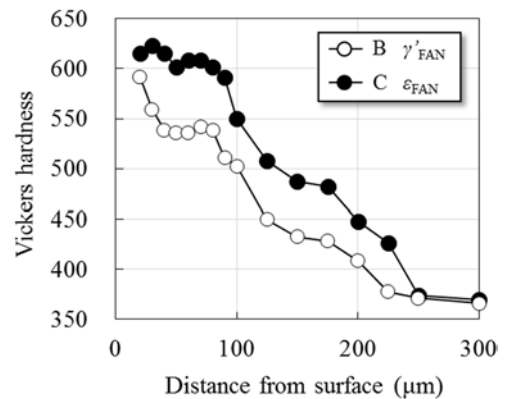


Fig. 1 Distribution of Vickers hardness

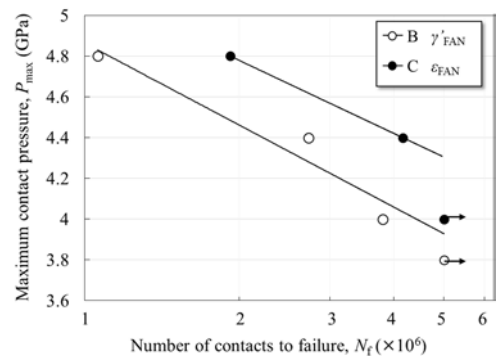


Fig. 2 Relationship between maximum contact pressure and fatigue life

純窒化した極低炭素鋼の疲労き裂形成挙動に及ぼす化合物層の影響

Influence of Compound Layer on Fatigue Crack Generation in Nitrided Ultra Low Carbon Steel.

横国大院

齋藤 晋

横国大工

古賀紀光 梅澤修

1. 緒言

鋼の窒化処理は、耐摩耗性、耐食性、耐疲労性の向上に有効な表面処理法である。窒化処理で形成する表面化合物層は、主として $\text{Fe}_{2-3}\text{N}(\epsilon)$ 相であるが多数の空隙からなるポーラス層が同時に形成し、疲労特性を低下させる傾向がある¹⁾。一方、近年では炉雰囲気内の窒化ポテンシャル制御を用いた純窒化処理により、表層にポーラス層が存在しない均一な $\text{Fe}_4\text{N}(\gamma')$ 化合物層の形成が可能である。本窒化処理を施した鋼も疲労特性は向上することが報告されている²⁾。しかし、それらは γ' 化合物層の形成と同時に下地である拡散相の強度も上昇しており、化合物層の存在が疲労き裂形成に与える影響については必ずしも明確ではない。そこで、本研究では、窒化処理を施した極低炭素鋼を用いて γ' 化合物層が疲労き裂形成挙動に与える影響を調査した。

2. 実験方法

供試材には、極低炭素鋼(0.008 mass%C)を用い、厚さ 2 mm の薄板試験片を RD 方向に平行に採取した。供試材を窒化ポテンシャル $K_N=0.35$ 、843 K・5 h の条件でガス窒化処理を施し、ファン空冷を行った。窒化処理前後の試験片において、引張試験を初期ひずみ速度：0.00028 /s の条件で、疲労試験を試験力制御 (0.5 kN/s) ・応力比 0.1 の条件で行い、走査型電子顕微鏡 (SEM) および電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を用いて破断後の平行部に形成したき裂を解析した。

3. 結果

窒化処理を施した極低炭素鋼の試料表面には、均一な γ' 化合物層が厚さ約 6 μm で形成していた。引張試験後の側面を観察した結果を Fig. 1 に示す。 γ' 化合物層内の粒界・粒内において多数のき裂が観察されており、き裂形成起点は拡散層(α)/ γ' 化合物層界面であると考えられる。一方、疲労試験後の側面を観察した結果を Fig.2 に示す。引張試験同様に γ' 化合物層内の粒界・粒内において、多数のき裂が観察されたが、き裂形成起点は γ' 化合物表面であると考えられる。また、 γ' 化合物層で形成したき裂は、 α 粒内のへき開面 {001} に沿って進展していることが観察された。つまり、 γ' 化合物層内のき裂と α 相のへき開面の角度差が小さい領域において優先的にき裂が進展すると考えられる。

参考文献

- 1) 宮本吾郎監訳：鉄の窒化と軟窒化, 2011, アグネ技術センター
- 2) 小林厚ら：自動車技術会学術講演会前刷集, No.14-14 (2014), pp.21-26

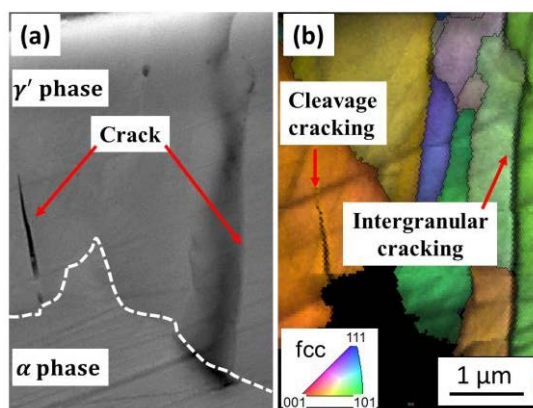


Fig. 1 SEM image (a), Inverse pole figure mapping with image quality mapping (b), in the cross section of nitrided layer on ultra-low carbon steel after tensile test.

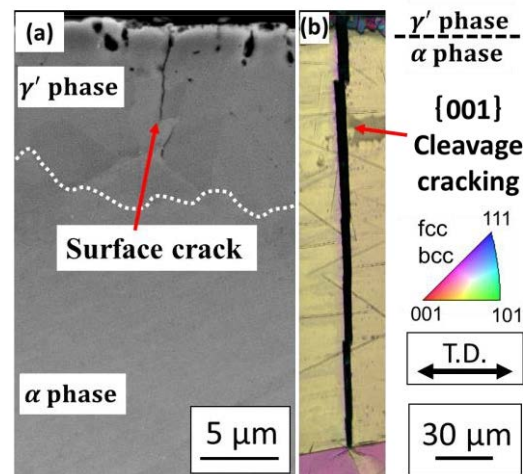


Fig. 2 SEM image (a), Inverse pole figure mapping with image quality mapping (b), in the cross section of nitrided layer on ultra-low carbon steel after fatigue test.

転がり疲労における繰返し接触応力とき裂の関係

Crack Growth and Cyclic Stress under Rolling Contact Fatigue

富山大

木田勝之

1. 緒言

軸受や圧延ロールなどの損傷を理解するには、接触応力特有の分布形態、潤滑油の力学効果、モードII型き裂に対する材料の強度指標などが必要となる。しかし、統計的な観点からの実験的研究は多いものの、破壊力学が適用できるようなデータの蓄積が少ないのが現状である。本稿では、応力とき裂の関係に注目した研究から、その破壊力学的取り組みをまとめる。

2. き裂評価モデル

表面き裂の進展を実験的に観察した研究は、Way¹⁾に始まる。Wayは潤滑条件下で表面き裂を発生させた試験片を、無潤滑下で転がり疲労させると、き裂は進展しないことを発見した。この結果をもとに、Dawson²⁾は接触面での摩擦の方向と荷重の移動方向の関係から、接触対を従動・駆動と区別し、これらとき裂の発生・進展の関係を示した。その後、摩擦力の存在（その方向）とき裂内への潤滑油の浸入が力学的に重要な役割を果たしていることが注目された研究が始まる。特に、き裂内に浸入した潤滑油が進展に及ぼす力学的影響として、くさび効果がモデルに取り入れられている。このモデルでは、き裂のモードI進展特性が評価される (Fig. 1)。

一方、内部では、介在物からき裂が発生することが知られている。ここで参考になるのは、Néliasらによる観察³⁾である。彼らは、き裂の発生が従来説が予測するよりも早く起こり(10^5 オーダー)、また、その多くは微小き裂として発生した後、進展せずに停留していることを報告している。また、力学的な観点からは、Fig. 2のように、介在物をき裂とみなした場合の応力拡大係数が解析されている。この解析方法をもとに、どの深さに位置する介在物がはく離源となる可能性が高いかを検討した結果、き裂面間の摩擦係数の増加にともない、発生位置が浅くなる傾向が得られている⁴⁾。

3. まとめ

表面き裂、内部き裂に限らず、はく離にいたる過程では、き裂先端は必ず内部を進展する。その評価は困難であるが、多くの研究が支持している通り、き裂が安定して進展していることは事実である。せん断応力に対する材料の強度評価をはじめ、データの蓄積が待たれるが、ポイントは、「接触応力分布」と「き裂面の抵抗」を結び付けたうえで、材料がもつ強度との整合性を示すことと思われる。

参考文献

- 1) S. Way, "Pitting Duo to Rolling Contact," Trans. ASME, J. Applied Mechanics, 2, pp. A49-A58 (1935).
- 2) P. H. Dawson, "Rolling Contact Fatigue Crack Initiation in a 0.3% Carbon Steel," Proc. Inst. Mech. Eng., 1831, pp. 75-83 (1968).
- 3) D. Nélias, et al, "Role of Inclusions, Surface Roughness and Operating Conditions on Rolling Contact Fatigue," Trans. ASME, J. Trib., 121, pp. 240-251(1999).
- 4) 木田勝之ら, "浸炭した SCM415 鋼の長寿命転がり疲労特性とき裂発生深さ," 材料, 53-5, pp.487-492, (2004).

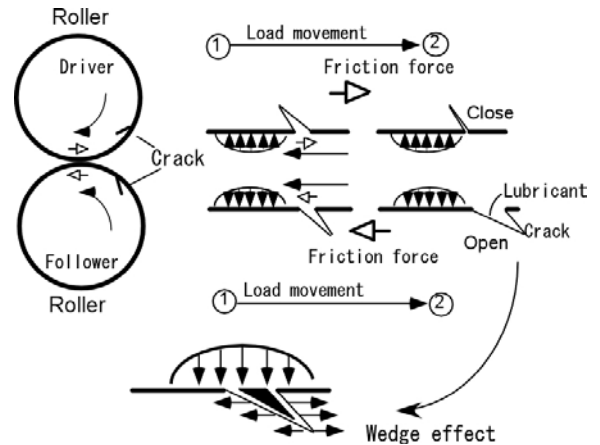


Fig. 1 Surface crack growth model.

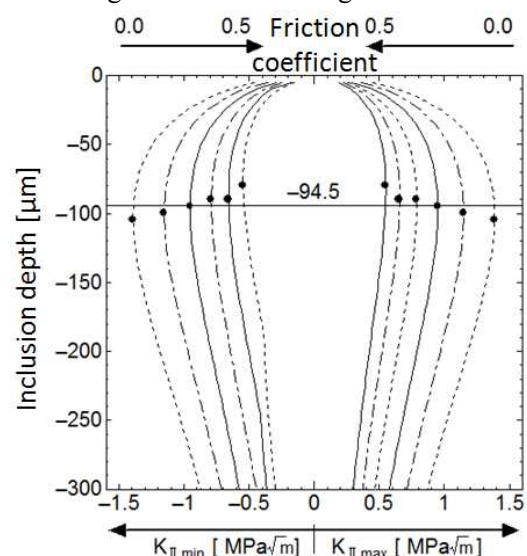


Fig. 2 Distribution of $K_{II,max}$ and $K_{II,min}$.

歯車のピッチング損傷に関する従来知見

Existing Knowledge about Pitting of Gear

日野自動車株式会社 川原正明

1.はじめに

地球温暖化や大気汚染の話題が注目される昨今，自動車をはじめとし，低燃費，低公害技術の研究・開発が盛んに行われている．その中で動力伝達に使用される歯車には高容量化や小型軽量化が要求されており，強度向上が重要課題の一つとなっている．

歯車に発生する損傷は表面疲労，折損，摩耗，塑性変形などあるが，近年では高強度鋼やショットピーニングの採用により折損に対する強度が向上したことや，潤滑油の極圧性能が向上し焼付きなどの摩耗損傷が起きにくくなったため，歯車の寿命は表面疲労，特にピッチングと呼ばれる損傷に支配されるようになってきた．ピッチング損傷については古くから研究されているが，その機構については未だ不明確な点が多い．本報では従来知見から，ピッチング損傷に及ぼす影響因子を整理すると共に，ピッチングの評価方法についても述べる．

2.ピッチング損傷に及ぼす影響因子

ピッチング損傷はすべりを伴いながら，転がり接触を繰り返す表面に生じる損傷の代表的なものをいう．歯車のピッチングは主にピッチ点より歯元側に発生しやすい特徴があり，これは幾何学的視点ではピッチ点より歯元側は転がりとすべり方向が異なることが要因の一つと考えられる．

歯面の強度設計や破損モデル¹⁾，材料因子などの報告から影響因子をまとめると，動力伝達による面圧やすべりなどの負荷，油膜や摩擦係数などのトライボ特性，硬さや組織，残留応力などの材料特性などが挙げられる．さらにこれら負荷や特性は運転中の発熱や摩耗の進行などにより変化することが示されている．これら影響因子とその制御因子に分け整理すると図1のようになる．これからピッチング損傷は様々な因子が複雑に影響しあう現象であることがわかる．

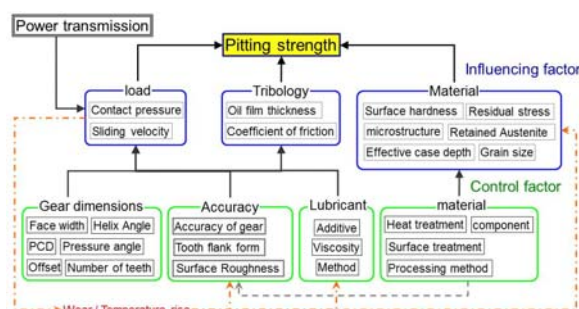


Fig.1 Influence factor on pitting strength

3.ピッチング損傷の評価方法

歯車のピッチング損傷の評価には歯車を用いた FZG (Forschungsstelle für Zahnrad und Getriebebau) 試験などと 2 円筒を用いたローラーピッチング試験などが用いられる．

FZG 試験は ISO や DIN 規格に採用されており，実機との相関が良いメリットがある．しかし歯面精度など多くの因子を含んだ評価になるため，各因子の影響を明確にするのは困難である．また歯車のピッチングは発生しても直ちに機能不具合となることが少ないため，ある程度の発生を許容している場合が多くピッチング損傷と判断する基準は様々である．

ローラーピッチング試験は 2 円筒を油潤滑下にて一定荷重で押し付け，速度差を与えながら回転させることにより転がりとすべりを繰り返して負荷し，ピッチング発生までの繰返し数 N を評価する方法である．試験片形状が簡易であるため，各因子の影響を明確にできる利点がある．評価結果を歯車へ適用する場合，歯車とは潤滑状態に大きな違いがあるため，発生温度や摩耗の進行が異なる．さらに RP 試験では面圧を大きくするために試験面にクラウニングを設ける場合が多く，試験中の摩耗の進行により面圧が大きく減少する点に留意する必要がある．

参考文献

- 1) 滝晨彦 トライボロジーの解析と対策；テクノシステム (2003)

Masaaki Kawahara (Hino Motors, Ltd, 3-1-1, Hino-dai, Hino-shi, Tokyo, 191-8660)

重錘式ローラーピッチング試験機の機差について

Data scattering in deadweight type roller pitting test machines

ニコークリエイト 早乙女尚史

愛知製鋼 杉浦 孝佳

高周波熱錬 深沢 剣吾

新日鐵住金 堀本 雅之

日野自動車 川原 正明

1.緒言

転動 WG の一次試験を実施する前段階として、使用する試験機のカロスチェックを実施した結果、試験機毎に試験結果の偏りが見られた。試験装置の違いによる試験結果の偏りの発生原因を調査した。Fig.1 試験繰り返し回数は $3.21 \times 10^5 \sim 5.39 \times 10^5$ の範囲で試験装置ごとに試験結果の偏りが見られた。

2.調査方法

試験結果に影響を与える条件のうち、すべり率及び回転数と面圧に影響のある荷重を調査した。

2-1 すべり率及び回転数：装置にセットされていたすべり率設定ギヤ比を確認する。試験機の回転数を回転計で測定した。

2-2 試験荷重：装置の小ローラーを取り外し、大ローラーの下に荷重計を設置して、設定荷重に対する実荷重を測定した。

3.結果

3-1 すべり率設定ギヤ比の実すべりは -39.34%を確認し各装置間に相違はなかった。試験機の回転数を回転計で測定し、装置の基準値 $1500 \pm 10 \text{ rpm}$ 以内だった。

3-2 測定した荷重を元にクロスチェック時のウェイトから実際に試験片にかかっていた荷重を算出、面圧を再計算した。

Table 1 Converting actual load to pressure

Table 1 より荷重で $0.08 \sim 0.83 \text{ kN}$ 、最大ヘルツ面圧では 0.04 GPa の範囲でばらつきがある。各試験機の検査結果は本試験機の性能基準範囲内だった。

Machine	Load kN	Weight kg	Pressure GPa
A	18.38	15.5	3.61
B	18.47	15.7	3.61
C	18.64	15.5	3.62
D	19.13	15.5	3.65

試験機の荷重は、装置の内部でリンク機構を構成しており、各部品の公差範囲で $-0.31 \sim 0.60 \text{ kN}$ のばらつきが出る。Fig. 2 から荷重と比例して試験繰り返し回数が増加している傾向が確認できる。

面圧に比例して試験繰り返し回数の増加がある場合は、接触面の摩耗による面圧低下の可能性があり、面圧の高い条件では早期に摩耗が発生し、面圧が低下した場合は試験繰り返し回数が増加する場合もある。しかし、試験後の小ローラー表面形状からは摩耗差の傾向は見られなかった。

※装置間に荷重の違いがある事がわかった。面圧の違いにより、試験結果がばらついた可能性はあるが、原因と断定はできない。

4.課題

- ・面圧を統一して試験を実施したい。
- ・試験片の破損状況に違いがみられるため、初期のピッチング剥離から、全周剥離に進展するまでの試験回数を調査したい。
- ・試験機がピッチング剥離による振動を検出して停止するまでの時間に違いがあるようなので、試験機の固有振動と加速度を測定し、検出時間のばらつきについて調査したい。

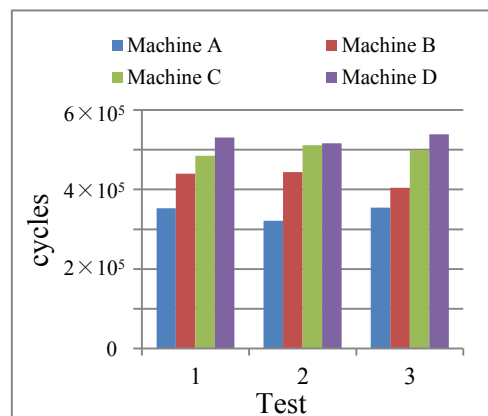


Fig.1 Cross-compatibility test

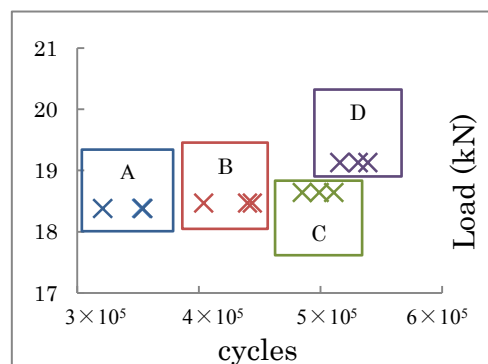


Fig. 2 Fatigue data on actual load

すべり率およびサブゼロ処理がピッチング疲労損傷に与える影響

Effect of Slip Ratio and Subzero Treatment in the Pitting Fatigue Failure

愛知製鋼 杉浦 孝佳

日産自動車 杉本 剛

1. 緒言

自動車のトランスミッションに用いられる歯車には、燃費向上を目的とした車両の小型、軽量化に伴う、高負荷化が進んでおり、歯車の高強度化のニーズが強い。歯車の損傷は歯元折損とピッチング疲労損傷に大別されるが、近年では歯面のピッチング疲労損傷による歯車の破損が増えてきており、歯車の高強度化にはピッチング疲労損傷メカニズムを解明することが重要となっている。今回、横浜国立大学を中心にピッチング疲労損傷メカニズム調査の一環として、すべり率およびサブゼロ処理がピッチング損傷に与える影響を調査した。得られたSN線図や破壊形態、内質調査結果等について報告する。

2. 実験方法

供試材には JIS SCM420 を用い、試験片作製のため $\phi 35\text{mm}$ の丸棒に熱間鍛造した。その後、 $925^{\circ}\text{C} \times 2\text{hr}$ の焼鈍を施し、機械加工にて $\phi 26\text{mm}$ のローラーピッチング試験片を作製した。試験片加工後、 950°C にて $\text{Cp}0.8$ の真空浸炭を施し、 860°C で 40min 保持後、 80°C にて油焼入れを行った。その後 $180^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$ の焼戻しを施した試験片と、浸炭後に $-80^{\circ}\text{C} \times 1\text{hr}$ のサブゼロ処理を行い、その後焼戻しを施した試験片の 2 種類を作製した (Fig1)。供試材の化学成分を Table1 に示す。ローラーピッチング試験はすべり率 0%、-40% の 2 水準で行い、小ローラー回転数 1500rpm、潤滑油 ATF (出光興産 ZEPRO ATF ECO)、油温 90°C にて実施した。相手材には $\phi 130\text{mm}$ 、クラウニング R150 を有した SUJ2 焼入焼戻材を用いた。

Table.1 Chemical compositions of SCM420(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SCM420	0.22	0.26	0.86	0.009	0.020	0.01	0.02	1.21	0.20

Table.2 Chemical compositions of SUJ2(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SUJ2	1.01	0.27	0.43	0.012	0.006	0.12	0.07	1.38

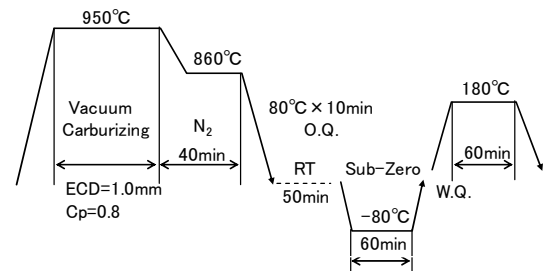


Fig.1 Conditions of carburizing treatment

3. 結果

Fig2 にすべり率 0%の供試結果を、Fig3 にすべり率-40%の供試結果を示す。本試験において、すべり率 0%、すべり率-40%ともにサブゼロ処理ありとサブゼロ処理なしのピッチング疲労強度の差は 100MPa 程度であり、顕著な差は確認できなかった。また、サブゼロ処理有無に関わらず、すべり率 0%供試結果のほうが、すべり率-40%供試結果と比較し、ピッチング疲労強度が向上した結果が得られた。

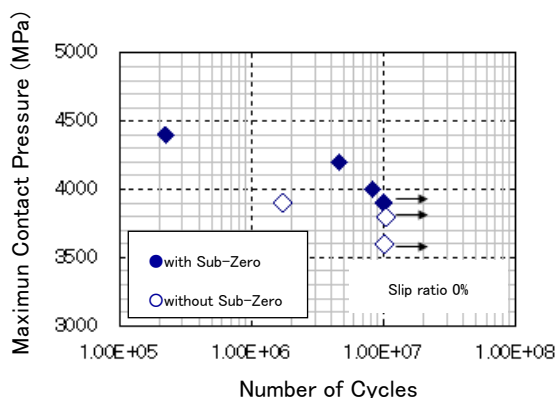


Fig.2 S-N Data (slip ratio 0%)

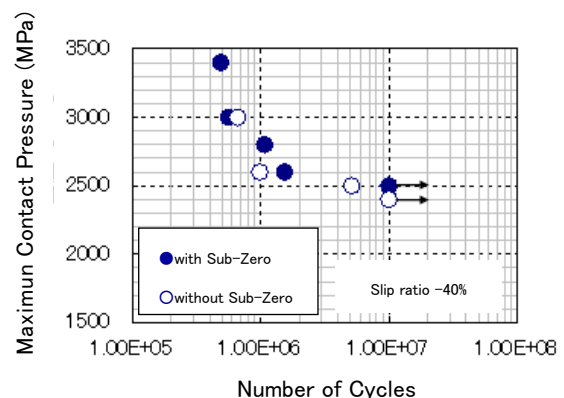


Fig.3 S-N Data (slip ratio -40%)

ピッチング疲労損傷に至るき裂の発生・進展過程 1

Crack Initiation and Propagation in the Pitting Fatigue Failure - I

新日鐵住金 渡里 宏二, 堀本 雅之
本田技研 藤本 充

1. 緒言

近年, 歯車が高トルク, 高接触面圧下で使用される傾向にあり, 歯車の寿命が接触面の剥離, いわゆるピッチングによって決定され, この高寿命化が課題となっている. 本検討では, SCM420 鋼を真空浸炭し, その後サブゼロ処理した材料について, ローラーピッチング試験を実施, そのピッチング疲労寿命に至るまでのき裂の形成過程について, 途中止め実験を繰り返し調査した. その結果について報告する.

2. 実験方法

供試材として SCM420 鋼を使用し, ローラーピッチング試験の小ローラーを加工するために, その圧延材を $\phi 35$ に熱間鍛造した後, 925°C で 2 時間の焼準処理を実施した. 本鋼材から所定試験片形状へ粗加工し, 真空浸炭焼入れ後に, -80°C で 1 時間のサブゼロ処理を実施した. その後, 180°C で 1 時間の焼戻し処理を施し, 仕上げ加工によって所定の小ローラーの形状に整えた. 大ローラーは, SUJ2 の焼入れ焼戻し材を使用し, クラウニングが 150R のものを使用した. ローラーピッチング疲労試験の条件は, 滑り率が -40%, 小ローラーの回転数は 1500rpm として, 最大接触面圧を 2.4~3.4GPa の範囲で疲労試験を実施した. 使用した潤滑油は出光興産製の ATF 油で, その油温は 90°C , 油量は 2L/min とした.

3. 結果

ローラーピッチング疲労試験結果を Fig.1 に示す. サブゼロ処理をしていない場合と比較しているが, サブゼロ処理によるピッチング疲労の優位差は見られなかった. このき裂進展過程を調査するために, 2.5GPa の最大接触面圧において 5.0×10^5 回で途中止めした試験片について, その表面と断面のミクロ組織を観察した. 小ローラー摺動領域全体に Fig.2 に示すような多数の微小き裂が観察された. Fig.3 にこの断面の SEM 像を示す. 表面観察で認められた微小き裂は, 表層から $5 \mu\text{m}$ 深さまで進展していることが判明した. このき裂発生と表層の組織形態と関連づけるために, 電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を用いて組織解析を実施した. その結晶方位マップを Fig.4 に示す. き裂の発生していた表層から数 μm 深さでは, 微細粒化していることが判明した. このことは, 摺動中に極表層に生じたせん断応力による強加工で表層が変形し, 微細組織を形成することで, その組織内部もしくは界面にき裂が発生しやすい環境になっていると考えられる. この微細き裂とピッチングとの因果関係の明確化には, 更に精緻な検討が必要である.

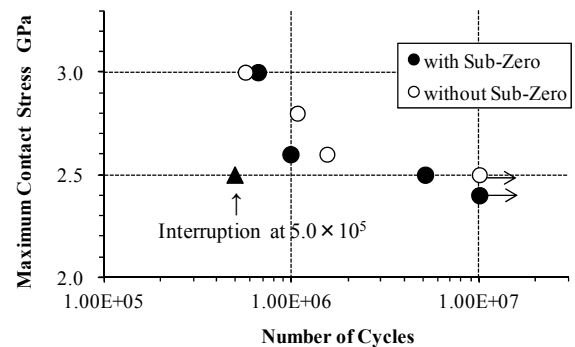


Fig.1 S-N diagram under -40% slip ratio

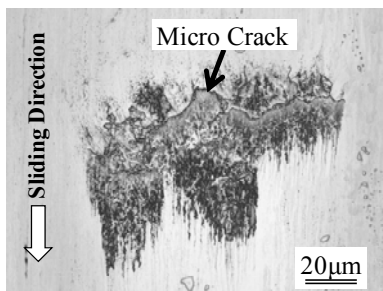


Fig.2 Sliding surface of small roller after 5.0×10^5 cycles

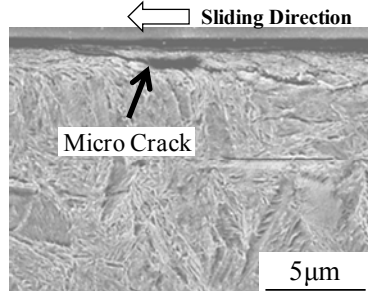


Fig.3 SEM image of cross section near the surface of small roller

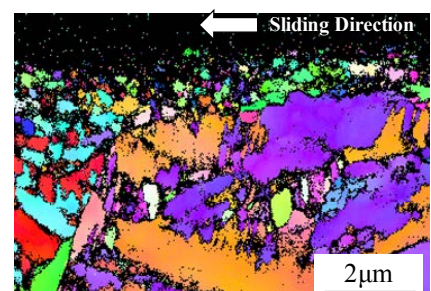


Fig.4 Inverse pole figure map of cross section near the surface of small roller

ピッチング疲労損傷に至るき裂の発生・進展過程 2

Observation of crack initiation and propagation in the pitting fatigue failure - II

高周波熱錬 深沢 剣吾
本田技研 藤本 充

1.緒言

高面圧下でのピッチング疲労損傷を把握するために、真空浸炭焼入れした SCM420 鋼のローラーピッチング試験を実施した。さらに、ピッチング疲労寿命に至る微小き裂の逐次観察を通して、ピッチング疲労損傷の実験評価を行った。

2.実験方法

ローラーピッチング試験用の小ローラーには真空浸炭焼入れした SCM420 鋼を、大ローラーには焼入焼戻した SUJ2 鋼を使用した。小ローラーについては、真空浸炭焼入れした後にサブゼロ処理 (-80℃ × 1h.) した試験片も準備した。また、ピッチング寿命に及ぼすすべりの影響を調べるために、すべり率 0%と-40%で試験を実施した。その後、ピッチング寿命に至った面圧下でのピッチング疲労損傷を観察するために、ピッチング寿命より少ない繰返し数 (ピッチング寿命に対して約 10 分の 1、6 分の 1、3 分の 1 の計 3 条件) で試験を止めた中断試験片を用意して、表面の微小き裂の有無の観察などを行った。

3.結果

ローラーピッチング試験結果を図 1 に示す。すべり率が大きいほどピッチング疲労寿命は低下するものの、サブゼロ処理の有無でピッチング疲労寿命に有意差は見られなかった。次に、最大面圧 3900MPa (すべり率 0%) でのピッチング疲労の逐次観察を行った。図 2 に示すとおり、ピッチング寿命に対して約 10 分の 1、6 分の 1 の繰返し数では、微小き裂は発生しているものの、大きく進展はしていない。ピッチング寿命に対して約 3 分の 1 の繰返し数では、初期き裂となりうるようなマイクロピッチング・凹みが摺動面各所で観察された。このことから、ピッチングに至る過程の表面微小き裂は、繰返し数の早い段階で発生しているものの大きく進展しておらず、その後、ある繰返し数経たのちに大きく進展している可能性が示唆される。

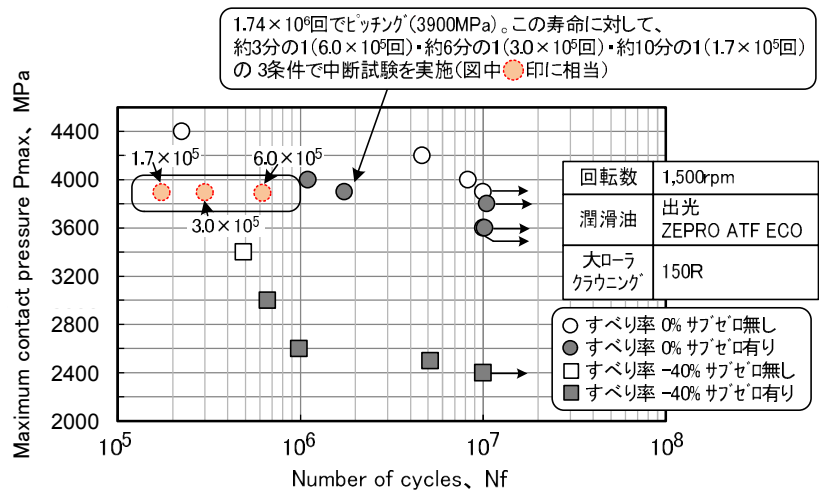


Fig.1 Pitting fatigue test results

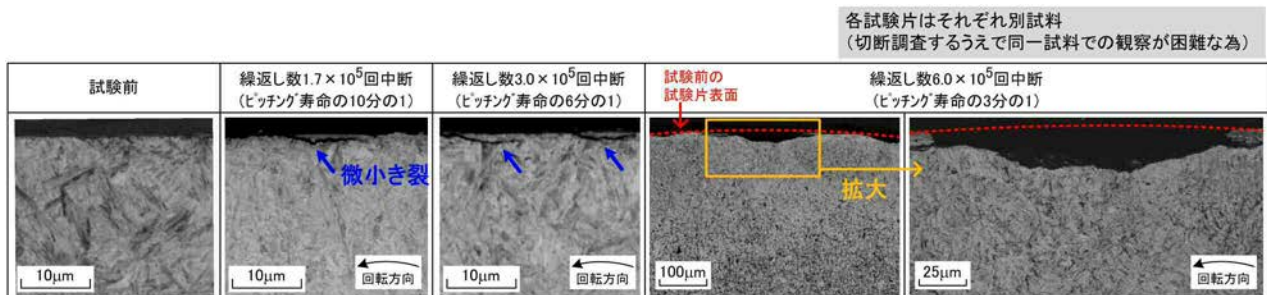


Fig.2 Cross-sectional micrographs of the interrupted test specimens

Kengo Fukazawa (NETUREN CO., LTD. 7-4-10 Tamura, Hiratsuka-city, Kanagawa, 254-0013, JAPAN)

SCM420 浸炭鋼の高面圧下におけるピッチングき裂形成

Fatigue Cracks Generated by High Pressure Roller Pitting Test in Carburized SCM420 Steel

横国大院 実方潤一

横国大工 古賀紀光 梅澤 修

1. 緒言

歯車等に求められる転動疲労特性は、すべり率や接触応力の影響が大である。すべり率や接触応力の変化は接線力や内部応力分布に影響を与えるため、転動疲労損傷の破壊形態と密接な関係にある⁽¹⁾。本研究では、高面圧下の転動疲労試験において、それら試験条件の変化が表面き裂形成と金属組織に与える影響について検討した。

2. 実験方法

供試材は SCM420 (C:0.22, Si:0.26, Mn:0.86, Cr:1.21, Mo:0.20 (mass%))であり、ローラーピッチング疲労試験用小ローラー(外径 $\phi 26$)に粗加工を行った。浸炭深さ ECD=1.0 mm, カーボンポテンシャル $C_p=0.8$ の条件にて 950 °C 真空浸炭処理後、860 °C-40min 保持し、80 °C 油に冷却した。なお、大ローラー(クラウニング 150R)は SUJ2 焼入焼戻材である。ローラーピッチング試験条件は、回転数 1500 rpm、すべり率 0%~40%、最大面圧 3.5 GPa~3.9 GPa で実施した。潤滑油は ATF (出光興産 ZEPRO ATF ECO) および MTF (Shell Spirax S6 GVME) であり、油温 90 °C、供給量 2 l/min (吐き出し側) である。電界放出形走査型電子顕微鏡(FE-SEM)及び電子線後方散乱回折(EBSD)法を用いて組織解析を行った。

3. 結果

Fig.1 に(a)面圧 3.9 GPa-すべり率 0%、(b)面圧 3.5 GPa-すべり率-20%、(c)面圧 3.7 GPa-すべり率-40%の試料表面付近の SEM 組織を示す。試験片の回転方向を図中に矢印で示す。(a)、(b)、(c)すべての摺動表面に微小き裂が存在していた。摺動距離約 2 mm の領域内に存在する微小き裂を調査したところ、(a)では平均長さ 7.3 μm の微小き裂が摺動表面に対して平均 18.3 ° の角度をなして 34.0 個/mm 存在していた。(b)では平均長さ 20 μm の微小き裂が摺動表面に対して平均 36 ° の角度をなして 30.87 個/mm 存在していた。(c)では平均長さ 8.5 μm の微小き裂が摺動表面に対して平均 44 ° の角度をなして 2.99 個/mm 存在していた。これらの違いはすべり率の差異に伴う接線力変化によると考えられる。

Fig.2 に面圧 3.5 GPa-すべり率-20%材の(a)非接触部と(b)接触部の KAM マップおよび同領域の深さ方向の平均 KAM 値プロファイルを示す。Fig.2 より表面下組織の KAM 値は非接触部より接触部の方が高く、表面からの深さが約 240 μm ~約 310 μm の領域で最大値を示す。つまり、試料内部により大きなひずみが導入されていることを示唆している。これは、接触表面下の応力分布において、せん断応力最大となる領域が試料内部に存在することに起因している。

参考文献

1) 鈴木智博, 小川一義, 堀田昇次, 横川光義: 日本機械学会論文集C編, 65 (1999), 3751-3757.

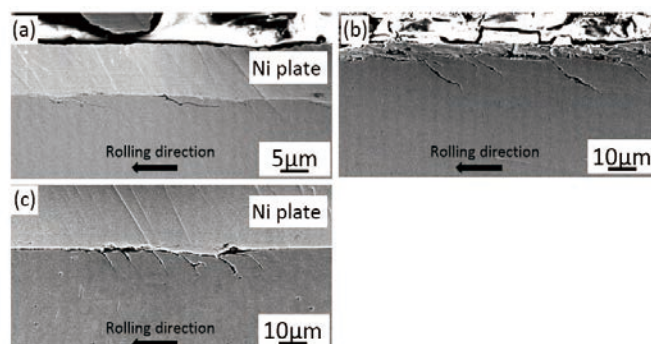


Fig.1 SEM images in the cross section beneath the contact trail of the samples: (a) pressure 3.9 GPa, slip ratio 0%, (b) pressure 3.5 GPa, slip ratio -20% and (c) pressure 3.7 GPa, slip ratio -40%.

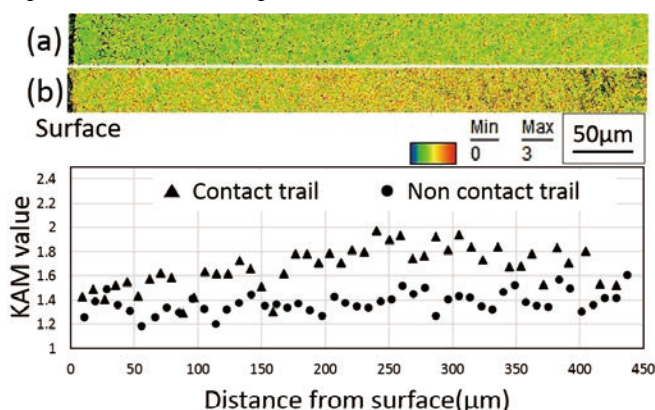


Fig.2 Misorientation (KAM) maps in the cross section beneath the non-contact trail (a) and contact trail (b) of the sample (pressure 3.5 GPa, slip ratio -20%), and relationship between KAM value and distance from the surface.

ピッチング疲労損傷における内部せん断応力の影響

Influence of Internal Shear Stress in the Pitting Fatigue Failure

山特 研・開 丸山 貴史, 常陰 典正

1. 諸言

ピッチング現象は軸受の様な純転がりと比較すると、内部せん断応力に加えて、表面における金属すべりによる摩擦力が影響するため、複雑な破壊現象と言える。内部せん断応力について、CAE 解析等を用いて分布や大きさについて計算が行われているが、表面摩耗による経時的な変化や摩擦力の影響を解析に反映することは困難であるのが現状である。そこで、本報告ではドリル穴を付与した試験片を用いてピッチング損傷における内部せん断応力の影響を調査した。

2. 実験方法

小ローラーは、Table1 に示す成分の SCM420 鋼を用い、 $\phi 32$ に鍛伸し、 925°C 焼ならし後に $\phi 26$ の試験片形状に粗加工し、その後、摺動部中央に 1 個所 $\phi 300\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 深さを狙ったドリル穴加工材とドリル穴加工無材を作製し、両材を真空浸炭焼入焼戻し (950°C 真空浸炭 $\rightarrow 860^{\circ}\text{C}$ 焼入れ $\rightarrow 180^{\circ}\text{C}$ 焼戻し) を施して作製した。大ローラーについては、SUJ2 を用いて粗加工後に、焼入焼戻し (840°C 焼入れ $\rightarrow 160^{\circ}\text{C}$ 焼戻し) を実施し、最後にクラウニング量を 150R として仕上げ加工を行って作製した。作製した大小ローラーを用いて、ローラーピッチング試験を実施した。

Table1 Chemical compositions of specimen (mass%)							
鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM420	0.20	0.30	0.80	0.008	0.015	1.10	0.15

3. 実験結果

3.1 ドリル穴無加工材におけるローラーピッチング試験

ピッチング疲労損傷における内部せん断応力の影響を考えるために、まずはドリル穴加工を実施していない小ローラーを用いて、最大面圧 3.4GPa 、すべり率 0、 -40% の 2 条件でローラーピッチング試験を実施した。その結果を Fig.1 に示す。また、試験後に摺動部の摩耗量を測定した結果についても図中に示す。

すべり率を -40% から 0% とすることではく離寿命は 10 倍以上まで長寿命化し、疲労限である 1.0×10^7 サイクルまではく離しなかった。試験における摩耗量が小さくなっていることから、これは摩擦力の影響が小さくなり、表面におけるき裂生成が抑制されたためであると考えられる。

すべり率 -40% におけるローラーピッチング試験後に試験片長手方向に垂直な断面にてはく離部のミクロ組織観察を実施した結果を Fig.2 に示す。なお、回転方向は図中の左から右である。すべり率 -40% 材のはく離部は、最大深さは $350\mu\text{m}$ 程度であり、同深さ位置において円周状に広き裂が伝ばしている。一方、すべり率 0% 材では最表面に数 μm 程度のき裂やマイクロピッチングが認められるのみであった。

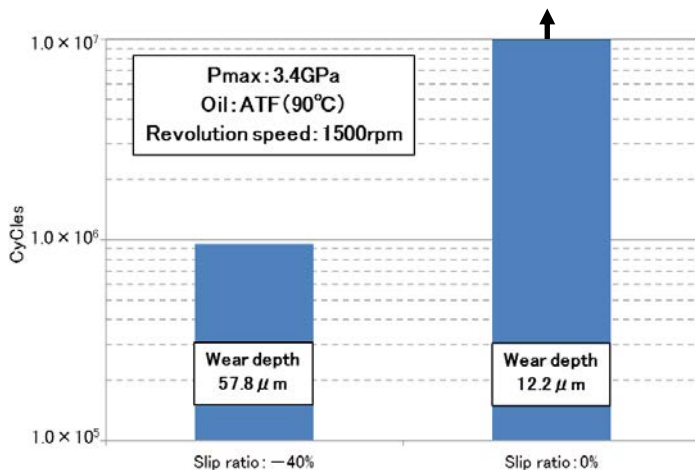


Fig.1 Roller pitting test result (Plain specimen)

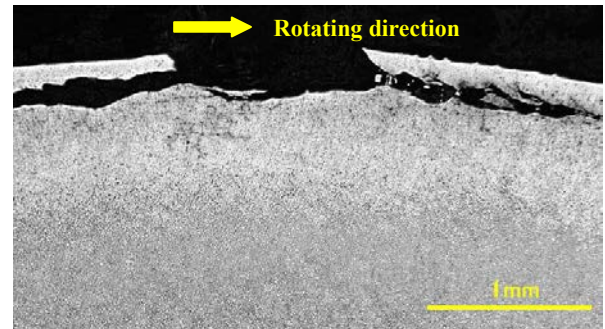


Fig.2 Cross-sectional micrograph at the pitting part (Slip ratio: 40%, 9.5×10^5 Cycles)

3.2 ドリル穴加工材におけるローラーピッチング試験

ドリル穴加工を施した小ローラーを用いて同様に最大面圧 3.4GPa、すべり率 0、-40%の2条件でローラーピッチング試験を実施した結果および摩耗量測定結果を Fig.3 に示す。ドリル穴加工材においてもすべり率を-40%から0%とすることで摩耗量は減少しているが寿命はせいぜい2倍程度の上昇であり、ドリル穴加工無材の場合と比較してすべり率が寿命に及ぼす影響は小さい。これは、ドリル穴を付与したことで摩擦力による表面からのき裂生成を起点とするはく離から内部におけるせん断応力によるき裂生成を起点としたはく離へと変化したためであると推定される。

すべり率 0、-40%におけるローラーピッチング試験後に試験片長手方向に垂直な断面においてドリル穴の最大径近傍のミクロ組織観察を実施した結果を Fig.4 に示す。すべり率 0、-40%ともにドリル穴を起点に、回転方向と逆向きにき裂が伝ば後にはく離しているのが分かる。また、最表面から 400 μ m 深さにおいてドリル穴からはく離き裂が発生しており、Fig.2 におけるはく離深さと同等であった。

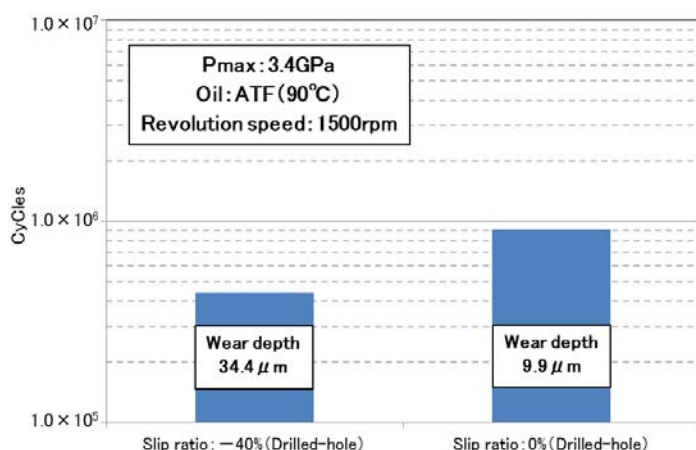


Fig.3 Roller pitting test result (Drilled-hole specimen)

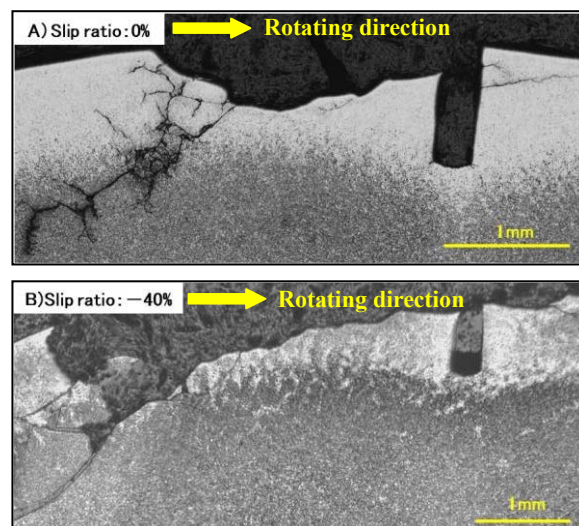


Fig.4 Cross-sectional micrograph around the drilled-hole
(A: Slip ratio: -40%, 4.4×10^5 Cycles,
B: Slip ratio: 0%, 9.1×10^5 Cycles)

3.3 ドリル穴加工材を用いた途中止め試験によるき裂観察

ドリル穴加工材を用いて最大面圧 3.4GPa、すべり率 -40%においてローラーピッチング試験を実施し、Fig.3 のはく離寿命の 60% (2.6×10^5 サイクル) で途中止めを行い、ドリル穴最大径近傍においてき裂の観察を行った結果を Fig.5 に示す。最表面から 200~400 μ m 深さにき裂が認められ、最大き裂は 350 μ m 深さに存在していた。

以上の結果から、本試験条件 (3.4GPa、すべり率 40%) における最大せん断応力深さは 350 μ m 程度であると推定され、これは Fig.2 におけるはく離深さに概ね対応する結果である。

4. 結言

ドリル穴加工無材においてはすべり率を0%とすることで大幅にはく離寿命が向上しており、摩擦力の影響ははく離寿命に及ぼす影響が非常に大きい結果となった。一方でドリル穴加工材ではすべり率によらずはく離寿命の差は小さく、かつ短寿命であることから、ピッチングにおける内部せん断応力に摩擦力 (すべり率) が及ぼす影響は小さいと考えられる。よって、通常のピッチング損傷におけるはく離過程においては、先ず摩擦力により表面から生成したき裂が、最大せん断応力深さである 350 μ m 程度まで伝ばした後に内部せん断応力により水平に伝ばし、最終的にはく離に至ると推定される。

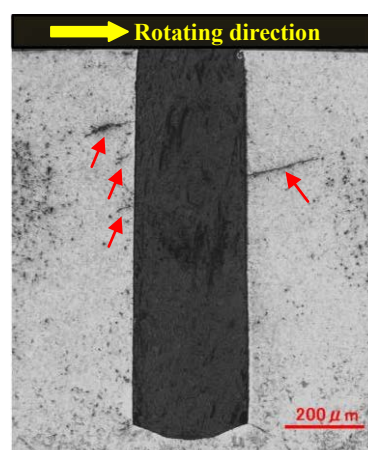


Fig.5 Cross-sectional micrograph around the drilled-hole.
(Slip ratio: -40%, 2.6×10^5 Cycles)

転がり疲労における材料表面に及ぼすトランスミッションフルードの影響 1

Impact of Transmission Fluids on Material Surface with Rolling Fatigue -I

UDトラックス 鏑 恵介 平川和宏 野崎精彦

出光興産 砂川洋二

横国大 梅澤 修

1.緒言

近年、重量車において、燃料消費削減のためにエンジンの高トルク化（ダウンサイジング）や低回転化が進んでおり、それによりトランスミッションギヤの高強度化、転がり疲労強度の向上が求められている。転がり疲労によるピッチング損傷においては、トランスミッションギヤの材料特性や形状等だけでなく、トランスミッションフルードの性状や潤滑状態等、多くの影響因子が関係していることから非常に複雑であり、特に材料とトランスミッションフルードの転がり疲労における関連性は、まだ十分な理解がされていない。本研究は、2 種類のトランスミッションフルードを用いてローラーピッチング試験を行い、それらの材料表面の状態、性質を調査することで、トランスミッションフルードが材料表面にどのような影響を及ぼすかについて検討した。

2.実験方法

ローラーピッチング試験で用いる大小のローラーとして、一般的にトランスミッションギヤに使われているガス浸炭された材質 SCM420H の材料（表層で約 700HV）を用いた、またトランスミッションフルードは、異なる性状を持つ Fluid A と Fluid B を使用した。ローラーピッチング試験は、直径 20mm と 88mm のローラーで回転速度 2000rpm、滑り率-40%、フルード温度 90℃で 2.0L/min、そして面圧 3.0GPa で行った。

3.結果

Fluid A は繰返し数 3.2×10^6 でピッチング損傷が起こり、一方 Fluid B は繰返し数 50.0×10^6 でもピッチング損傷は起こらなかった。それらの材料表面の観察から、Fluid A は典型的な表面起点によるピッチングの形態を示し、その底の深さはヘルツ接触における接触表面下の直交せん断応力、主面に対して 45 度の面に働くせん断応力が最大となる深さにおよそ一致していた。一方で Fluid B は微小亀裂も無い状態であった。また、材料表面特性としては、塑性流動の有無、表面粗さ変化、残留オーステナイト量の変化に対し、両者に顕著な差が見られた。

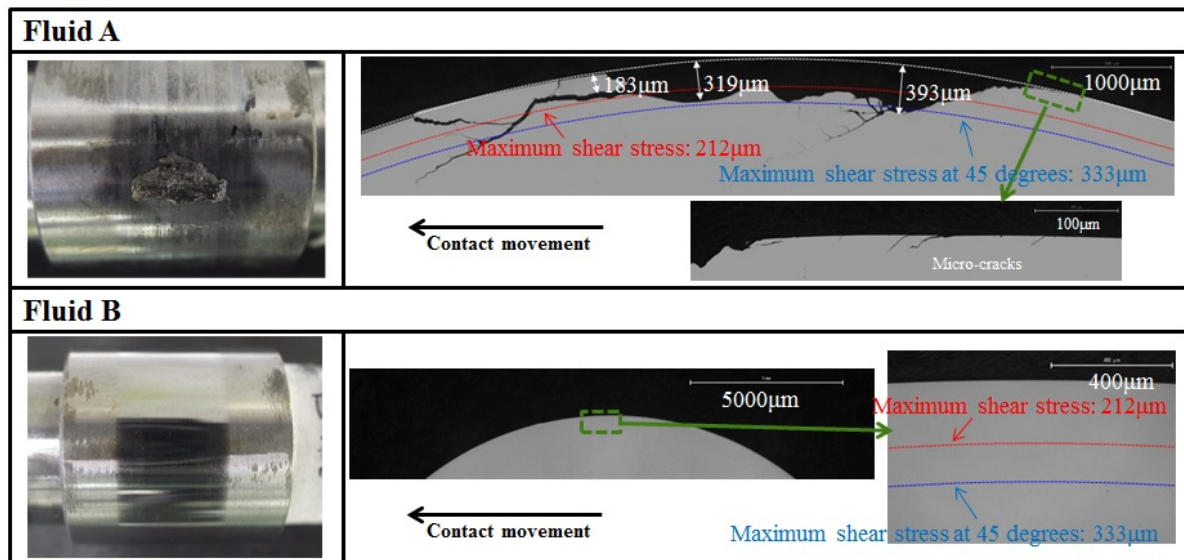


Fig.1 Overview pictures of small rollers after roller pitting tests by Fluid A and Fluid B, and these cross-sections with rolling fatigue.

参考文献 1) 吉田彰, “トライボ設計のための転がり疲れ寿命と面圧強さ”, 日本理工出版会 (2012).

Keisuke Yari (UD Trucks Corporation, 1-1 Ageo-shi, Saitama, 262-8501)

転がり疲労における材料表面に及ぼすトランスミッションフルードの影響 2

Impact of Transmission Fluids on Material Surface with Rolling Fatigue - II

出光興産 砂川洋二

1. 緒言

省燃費ニーズの高まりから潤滑油の粘度は依然低下傾向にあり、疲労寿命と潤滑油の関係について精力的に研究が行われている。一般に歯車におけるピッチング寿命や面圧強さは、材料強さの指標となる硬さや潤滑状態の厳しさを指標となる D 値¹⁾により影響される²⁾。しかしながら、潤滑油の粘度が低い条件 (例えば D 値 >10) においては、D 値だけでは潤滑油の影響を考慮し切れておらず、潤滑油の添加剤組成がより支配的であると考えられる。第 1 報で、添加剤組成の異なる 2 種類のトランスミッションフルードを用いてローラーピッチング試験を行い、ピッチング発生時間に大きく差が出たことを報告した。第 2 報では、トランスミッションフルードが金属材料表面にどのような影響を及ぼすかについて更に検討した。

2. 実験方法

トランスミッションフルードの性状を Table 1 に示す。

トランスミッションフルードの潤滑被膜形成能を比較するために、通電四球試験を実施した。通電四球試験は、JIS K2519 記載の曾田式四球試験機において、固定球と回転球の間の絶縁率を測定するものである。回転球の回転速度 500 rpm、油温 90 °C、最大接触面圧 1.5 GPa から 0.5 GPa 刻みで 3.0 GPa まで、各面圧において 3 分間試験を実施した。

Table 1 Properties of transmission fluids at roller pitting condition

Fluid code	Fluid A (ZEPRO ATF ECO)	Fluid B
Kinematic Viscosity at 90°C, mm ² /s	7.41	11.3
Density at 90°C, g/cm ³	0.800	0.797
D value	70	56
Sulfur content, mass%	0.04	0.98
Phosphorus content, mass%	0.03	0.10

3. 結果

通電四球試験結果 (Fig. 1) より、Fluid A は最大接触面圧 2.5 GPa で絶縁率が低下し完全に絶縁が破断したのに対し、Fluid B はローラーピッチング実施条件である 3.0 GPa まで絶縁性を保持した。このことから、ローラーピッチング試験においても、Fluid B は Fluid A に比べ厚い潤滑被膜を形成することが示唆された。この潤滑被膜の影響で、ピッチング発生時間に明確な差が現れたと考える。

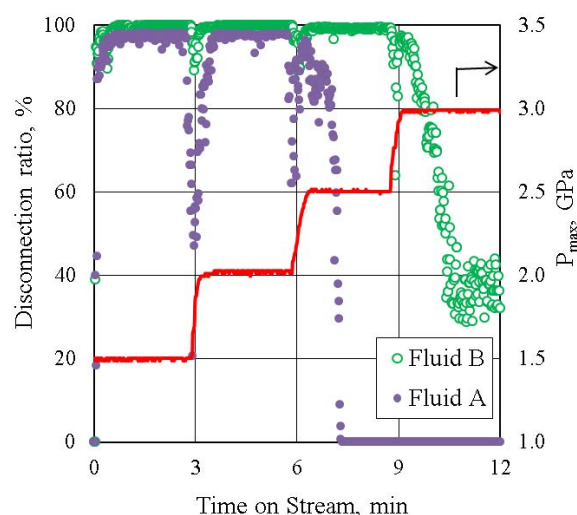


Fig. 1 Results of four ball test

参考文献

- 1) P. H. Dawson: *J. Mech. Eng. Sci.*, **4**(1962), 16.
- 2) A. Yoshida: *J. Jpn. Soc. Tribologists*, **53**(2008), 665.

Yoji Sunagawa (Idemitsu Kosan Co.,Ltd., 24-4 Anesaki-kaigan, Ichihara, Chiba, 299-0107)

浸炭鋼の転がり疲労による組織変化

Microstructural Change in Carburized Steel During Rolling Contact Fatigue

日本精工 相川文明 橋本翔 小俣弘樹 植田光司

1. 緒言

転がり軸受に繰返しせん断応力が作用すると、疲労の進行に伴い、DEC (Dark Etching Constituent), WEC (White Etching Constituent)と呼ばれる組織変化が生じることが知られている^{1,2)}。しかし、組織変化とはく離のプロセス(き裂の発生・進展)の関係は明確にはなっていない。また、これらの研究は、主として軸受鋼を扱ったものである。そこで本研究では、浸炭鋼 SCM420 の転がり疲労による組織変化過程の観察を行った。

2. 実験方法

供試材には、SCM420 を使用した。φ70 mm の素材を機械加工した後、真空浸炭焼入れを行った。試験片の一部を-80℃でサブゼロ処理を行った後、180℃で焼戻しを施した。熱処理後に仕上加工を行い、φ60 mm、厚さ6 mmの試験片を製作した。これらの試験片を用いてスラスト型疲労試験機により転がり疲労試験を行った。試験片と転動体の最大接触面圧は $P_{max} = 4.4 \sim 6.2$ GPa、回転速度は 1000 min^{-1} とし、潤滑油にはATF (ZEPRO ATF ECO)を用いた。疲労試験終了後、転走部断面の金属組織を、光学顕微鏡および走査型電子顕微鏡を用いて観察した。観察断面は荷重移動方向に平行な断面とした。また、X線回折装置を用いて転走部のマルテンサイト半価幅(FWHM: Full Width at Half Maximum, B)を測定した。

3. 結果

3.1 転がり疲労による組織変化過程の観察

サブゼロの有無で疲労寿命に大きな差は認められなかった。また組織観察の結果、はく離した試験片では、最大せん断応力深さ近傍で、軸受鋼と類似の組織変化(DEC)が認められた。転がり疲労に伴う組織変化過程を調べるため、 $P_{max} = 5.5$ GPaとして、はく離寿命の10~70%で試験を中断した試験片を作製した。Fig. 1に、中断試験片の組織観察結果を示す。光学顕微鏡による観察では、はく離寿命の50%までは明確な組織変化は認められないが、SEM観察の結果、局所的に針状を呈する組織が認められた。はく離試験片に見られたDECは、針状の組織が広範囲に生成した状態である。

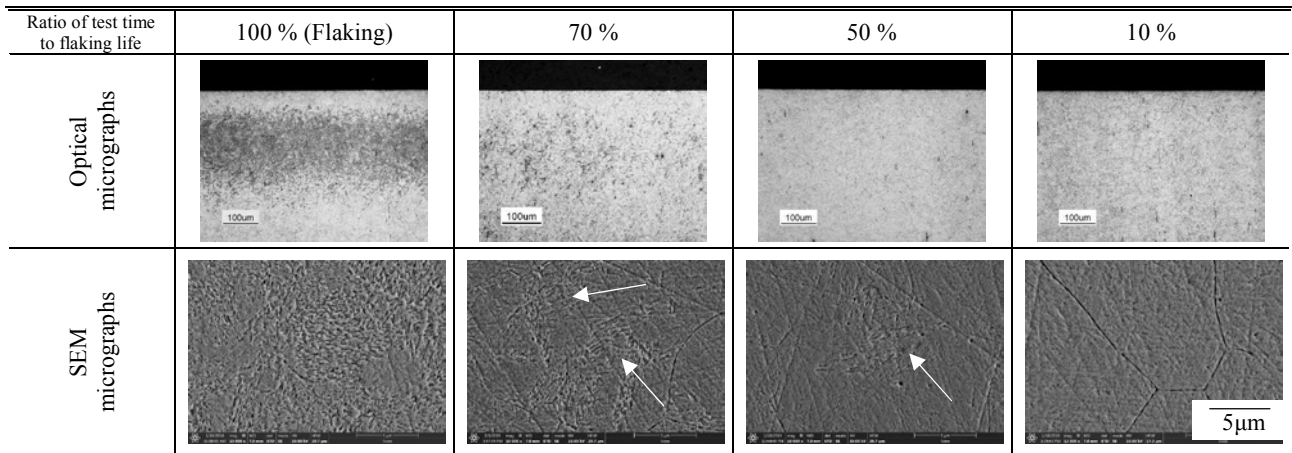


Fig. 1 Cross sectional micrographs of the fatigued specimens.

3.2 X線測定結果

Fig. 2に、X線測定結果を示す。測定は、電解研磨しながら深さ方向に実施した。なお、Fig. 2には、試験片内部に働くせん断応力の深さ方向分布を合わせて示している。半価幅は、繰返し数の増加に伴って減少し、せん断応力分布との相関が認められた。

4. まとめ

浸炭鋼においても、転がり疲労の進行に伴い、軸受鋼と類似の組織変化(DEC)が生じる。DECは、針状の組織が広範囲に生成した状態である。一方で、はく離に至るまでWECの生成は認められなかった。また、組織変化部ではマルテンサイト半価幅の減少が起こり、繰返し数の増加に伴って減少量は大きくなった。

参考文献

- 1) N. Mitamura et al., Material Science Forum, Vols. 539-543 (2007) pp. 4255-4260.
- 2) 平岡 和彦, 鉄と鋼, Vol. 94, No. 12, pp. 636-643.

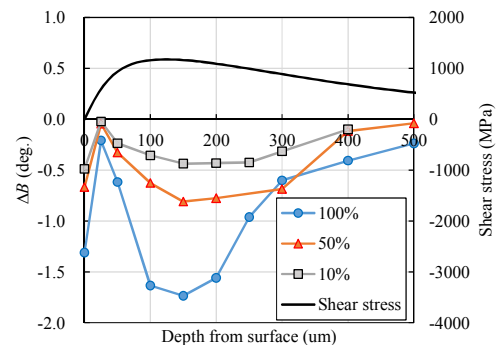


Fig. 2 Variation of FWHM(B) due to rolling contact fatigue. ($\Delta B = B_f - B_0$, B_0 : FWHM of no fatigued specimen, B_f : FWHM of fatigued specimens)

書名 「機械構造用鋼表面硬化部材の疲労損傷」シンポジウムテキスト
非売品
発行日 平成28年 3月23日
編集 一般社団法人 日本鉄鋼協会 学会部門 材料の組織と特性部会
ミクロ偏析の組織形成に及ぼす影響と特性発現のためのプロセス因子フォーラム
発行者 一般社団法人 日本鉄鋼協会 専務理事 脇本真也
発行所 一般社団法人 日本鉄鋼協会
〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-2-10 鉄鋼会館5階
印刷所 株式会社 クリエイト横浜
〒231-0033 横浜市中区長者町4-11-8 第三大場ビル1F

著作権者の許可なく、転載およびコピーを禁じます。