

© 1986 ISIJ

# 高温・高速回転荷重下における軸受鋼のころがり疲れ挙動

論 文

高 島 和 希\*・上 野 學\*<sup>2</sup>

## Rolling Contact Fatigue Behaviors of Bearing Steels under High Temperature and High Speed Loading Conditions

Kazuki TAKASHIMA and Manabu UENO

## Synopsis :

Rolling contact fatigue behavior in SUJ-2 and AISI M50 steels was investigated using a thrust type testing under the conditions; shaft speed of 8 760 rpm, maximum Hertz stress of 476 kgf/mm<sup>2</sup>, and temperatures of 50°C and 150°C. The Weibull distribution of fatigue life at 50°C presented approximately linear line, while the complex Weibull distribution was obtained at 150°C in both SUJ-2 and M50 specimens. The rolling fatigue life of M50 was much longer than that of SUJ-2 at both 50°C and 150°C. The mean fatigue life of SUJ-2 at 150°C was shorter than that at 50°C, whereas the mean life of M50 at 150°C represented to a greater extension compared with the life at 50°C. These results were explained in terms of no hardness decrement on the track in M50 during high temperature rolling contact. Scanning electron microscopy of a flaking on the rolling surface and of a cross section revealed that the flaking in both SUJ-2 and M50 was initiated at plate-like carbides developed during cyclic stressing in rolling contact.

### 1. 緒 言

軸受は今日の産業機械には欠くことのできない機械要素の一つであるが、近年、航空機などの高速度交通機関の発達、さらには宇宙開発により軸受が使用される環境はより高速かつ高温へとますます苛酷なものになりつつあり、その耐久性、信頼性はますます重要な問題となつている。高温用の軸受用材料としては、高温においても硬さの低下が小さいことが必要であり、使用温度が 400°C 程度までは高速度鋼が主として使用されている。そのなかでも AISI M 50 鋼は航空機タービン・エンジンのメイン・シャフト用を始めとして、使用温度が 150°C 程度となる軸受に最も広く使用されている材料である。この M 50 鋼の常温におけるころがり疲れ寿命に関しては、種々の条件下で多くの研究がなされているが<sup>1)~3)</sup>、高速、高温荷重下におけるころがり寿命あるいはその疲れ過程を調べた研究は少ない<sup>4)</sup>。そのため、高温荷重条件下における軸受のころがり疲れ挙動が、常温に対していかなる挙動を示すかは明確には知られていない。

そこで本研究では、一般軸受鋼 SUJ 2 と高温用軸受鋼 M50 を用い、常用温度 (50°C) と高温 (150°C) において高速回転ころがり疲れ試験を行い、それらの寿命

分布を調べるとともに、寿命に至るまでの過程が常温における結果と比較していかなる挙動を示すかを調べた。また転動面下の微視組織観察を行い、寿命に至るまでの過程を考察した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試材

実験に供した材料は、一般用軸受鋼である SUJ 2 と高温軸受鋼である M 50 の 2 種類である。これらの材料はいずれも直径 35 mm の棒鋼として受け入れたものである。なお SUJ 2 は電気炉による大気溶解後真空脱ガス処理したものを、また M 50 は真空アーク再溶解したものをを用いた。それぞれの化学組成を Table 1 に示す。SUJ 2 は 830°C で 30 min オーステナイト化後油焼入れし、その後 150°C、2 h の焼もどし処理を行つた。M 50 は 830°C、10 min の予備加熱の後、1120°C で 2 min 炭化物固溶処理を行つた後、油中へ焼入れ、その後

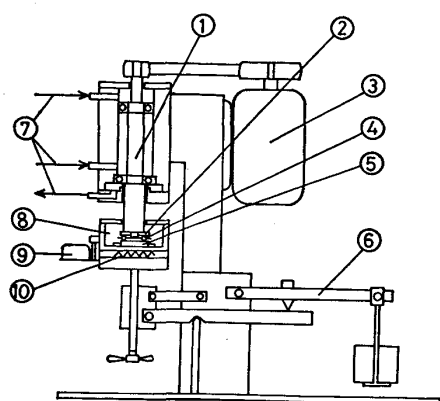
Table 1. Chemical compositions (mass%).

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
SUJ-2	1.03	0.31	0.38	0.012	0.018	1.40	0.01	0.29
M50	0.80	0.17	0.30	0.020	0.003	4.02	4.19	0.95

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 8 月 5 日受付(Received Aug. 5, 1985)

\* 熊本大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami Kumamoto 860)

\*<sup>2</sup> 長岡技術科学大学 工博 (The Technological University of Nagaoka)



1. Main shaft 2. Upper race 3. Motor 4. Ball  
5. Specimen 6. Loading system 7. Oil inlet and  
outlet 8. Lubricant 9. Vibra-switch 10. Heater

Fig. 1. Thrust type rolling contact fatigue testing machine.

サブゼロ処理をはさんで  $550^{\circ}\text{C}$ , 1 h の焼もどし処理を 2 回行つた。熱処理後の硬さは SUJ 2, M 50 とともに  $\text{HV} \sim 845 \pm 10$  であつた。

## 2.2 ころがり疲れ試験

熱処理後の試料から、外径 30 mm, 内径 18 mm, 厚さ 3 mm の円板状スラスト試験片を切り出し、鋼球との接触面の表面最大粗さが  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ , 中心線平均粗さが  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  になるまで #3000 の乾式エメリー紙で仕上げ研磨したものをころがり疲れ試験に供した。このとき試験片切り出し方向は転動面が圧延方向に対して直角方向となる。

このようにして作製した試験片を、スラスト型ころがり疲れ試験機を用いて試験した。スラスト型ころがり疲れ試験は試験片の作製が容易で、かつ実機の軸受で得られる寿命との対応関係もあるため、軸受鋼の寿命試験には比較的良好に用いられている<sup>6)</sup>。本試験機の構成を Fig. 1 に示す。固定された試験片の上を  $4.76 \text{ mm}$  ( $3/16''$ ) の M 50 製鋼球 3 個が、保持器により一定間隔を保ちながら回転する構造になつている。鋼球の上側には SUJ 2 製 #51103 スラスト軸受のレースが主軸に取り付けられており、これがモーターにより 8760 rpm の高速で回転する。荷重は試験片取り付け部の下方からこを利用して負荷される。このときの最大くり返しヘルツ応力は  $476 \text{ kgf/mm}^2$  に設定した。

またこの試験片取り付け部はヒーターにより加熱可能となつており、その中の潤滑油温度を  $200^{\circ}\text{C}$  まで上げることができる。本研究では潤滑油温度を常温 ( $50^{\circ}\text{C}$ )、高温 ( $150^{\circ}\text{C}$ ) の 2 通りに変えて試験を行つた。そのときの潤滑油としては、常温試験時には #60 のスピンドル油を、高温試験時には  $150^{\circ}\text{C}$  における粘度が  $50^{\circ}\text{C}$

での #60 のスピンドル油の粘度 ( $7.5 \text{ cSt}$ ) と等しくなるように調整したパラフィン系の鉱物油をそれぞれ用いた。

軸受試験片の寿命は試験片取り付け部の振動加速度を検知することによつて決定しており、定常時  $19 \text{ m/s}^2$  の振動加速度が転動面のはく離が発生したときの平均値である  $28 \text{ m/s}^2$  に達したときに寿命と判断した。ころがり疲れの寿命は通常転動面のはく離が発生するまでの寿命と定義されるが、本研究においては寿命分布を考える上で、転動面の荒れやピッチングも含めて上記の振動加速度に達したときは寿命と判定した。これは実機で用いられるころがり軸受では、はく離で寿命に至るものより、荒れやピッチングによつて故障を起こす場合が多いためである。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ころがり疲れ寿命分布

軸受のころがり疲れ寿命はたとえ同一処理材から作製した試験片を用いても、一般に大きくばらつくことが知られており、設計基準となる軸受の寿命予測の観点からもこの寿命分布を知ることは重要である。ところで軸受は一部でも損傷を受けるとそれ以後機能を果たさなくなる。このような性質をもつた寿命の統計的解析手法としては、最弱リンク説に基づいたワイブル分布が適当である<sup>7)</sup>。またワイブル分布はその分布形状により、損傷過程を分類することも可能であり<sup>8)</sup>、本研究ではワイブル分布により軸受のころがり疲れ寿命過程を検討した。

Fig. 2 に SUJ 2 の常温ならびに高温試験時のころがり疲れ寿命をワイブルプロットした結果を示す。常温における寿命は、ワイブルプロット上で直線性を示した。このときのワイブル分布の勾配 ( $m$  値: 形状パラメータ) は 0.48 であった。 $m$  値は 1 を境にして、それより

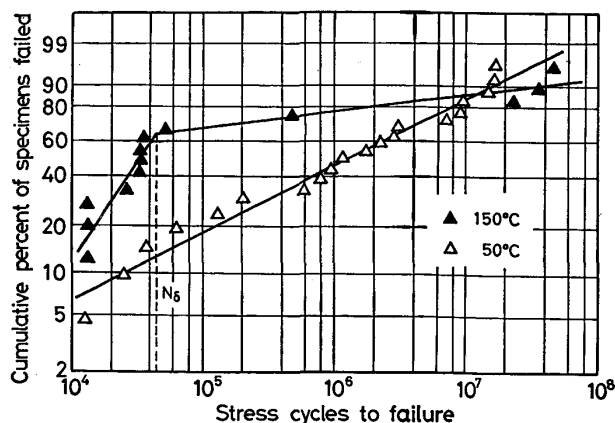


Fig. 2. Weibull plots of Rolling contact fatigue lives at  $50^{\circ}\text{C}$  and  $150^{\circ}\text{C}$  for SUJ-2.

Table 2. Weibull parameters and mean time between failures (MTBF) for SUJ-2 and M50.

Steel	Temp. (°C)	$\alpha$	$m$	MTBF (cycles)
SUJ-2	50	$1.4 \times 10^3$	0.48	$7.2 \times 10^6$
	150 (< $N_b$ )	$3.9 \times 10^6$	1.44	$3.4 \times 10^4$
	150 (> $N_b$ )	5.8	0.13	$1.6 \times 10^{10}$
M50	50	$1.1 \times 10^6$	0.82	$2.5 \times 10^7$
	150 (< $N_b$ )	$1.6 \times 10^{6.6}$	8.33	$8.3 \times 10^7$
	150 (> $N_b$ )	$8.7 \times 10^{11}$	1.47	$1.2 \times 10^8$

小さいときは破壊故障型、大きいときは摩耗故障型の分布に分類できる<sup>8)</sup>。したがって、この場合の常温試験の結果は破壊故障型の分布に分類できる。一方、150°Cの高温における寿命はワイブル分布上において、応力くり返し数  $N_b \sim 4.3 \times 10^4$  cycles を境に分布の形状が異なる複合ワイブル分布となつた。おのおのの  $m$  値は  $N_b$  より寿命の短い低サイクル側で 1.44 と摩耗故障型、 $N_b$  より寿命が長い高サイクル側で 0.13 と破壊故障型に分類された。ワイブル分布のパラメータである  $m$  値、 $\alpha$  値 (尺度パラメータ) および平均寿命 (MTBF) を Table 2 に示す。なお平均寿命値は(1)式により算出した。

$$MTBF = \alpha^{1/m} \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 3 は高温用軸受鋼である M50 の常温ならびに高温におけるころがり疲れ寿命をワイブルプロットした結果である。SUJ 2 と同じく常温ではワイブル分布が直線性を示したが、高温ではやはり複合ワイブル分布となつた。M50 におけるワイブルパラメータおよび平均寿命を SUJ 2 と同じく Table 2 に示す。常温における  $m$  値は 0.82 であり、破壊故障型の分布であることを示していたが、 $m$  値は SUJ 2 の常温の  $m$  値 0.48 より大きく寿命のばらつきは小さくなつている。また M50 の常温における平均寿命は応力くり返し数で  $2.5 \times 10^7$  cycles と、SUJ 2 の常温試験時の  $7.2 \times 10^6$  cycles と

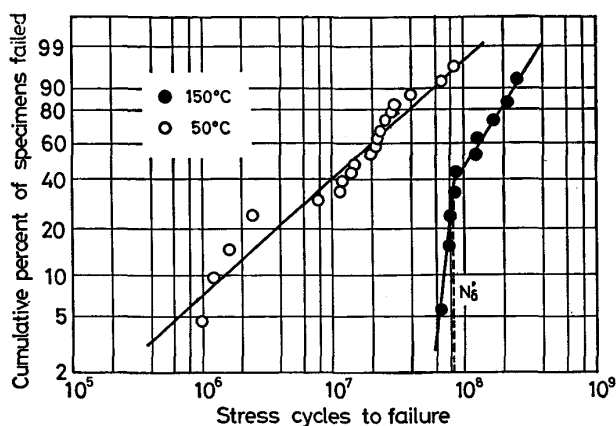


Fig. 3. Weibull plots of Rolling contact fatigue lives at 50°C and 150°C for M50.

比較して、約 3 倍の伸びを示した。

M50 の高温における寿命分布は SUJ 2 の高温試験時と同じく、 $N_b \sim 8 \times 10^7$  cycles を境にして  $m$  値の異なる複合ワイブル分布となつた。このとき  $m$  値は低サイクル側で 8.3、高サイクル側で 1.5 とどちらも摩耗故障型の分布となつたが、ころがり疲れに至る過程はそれぞれ異なつていると考えられる。またここで注目されることは、高温における平均寿命が常温における寿命より、かなり伸びていることであり、寿命のばらつきも非常に小さくなつている。ここで高温試験時の試験片数が 10 個と常温試験時の  $1/2$  となつているが、これは最大寿命値と最小寿命値の差が常温試験に比べて格段に小さいため試験片数も少なくしたためである。

上述した寿命分布の特徴をよく現すものに信頼度曲線がある。Fig. 4 は以上の結果を信頼度曲線としてまとめたものである。軸受では信頼度 90% の寿命を基本定格寿命と呼んでおり、この寿命値が大きいほど信頼度が高いことになる。明らかに M50 の高温における信頼度が最も高く、あとは M50 の常温、SUJ 2 の常温、

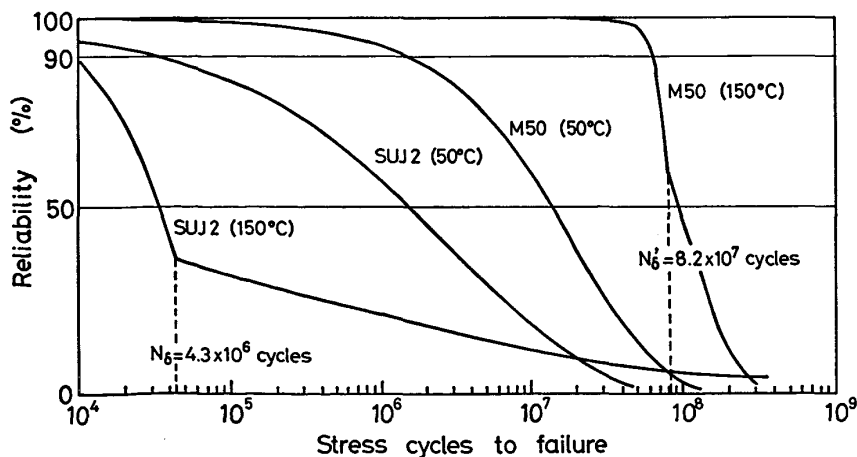


Fig. 4. Reliability curves of SUJ-2 and M50 at 50°C and 150°C.

Table 3. Non-metallic inclusion in steels used.

Inclusion Type	Index of cleanliness (%)	
	SUJ-2	M50
A	0.020	0.012
B+C	0.011	0.004
A+B+C	0.031	0.016

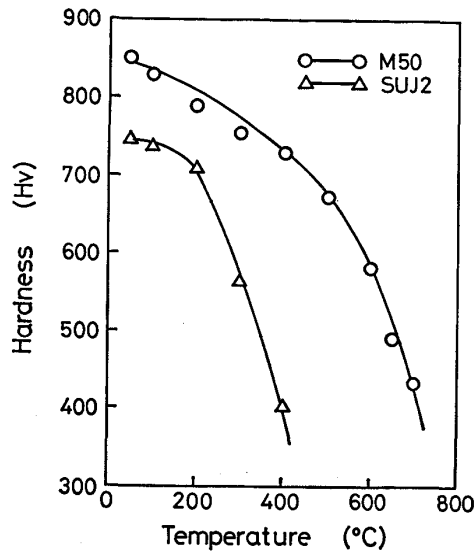


Fig. 5. Temperature dependence of the hardness for SUJ-2 and M50.

SUJ2 の高温という順で信頼度が低下している。これはそのまま平均寿命値の長い順である。また曲線がなだらかなものほど、ばらつきが大きいことを示している。また高温試験のものでは  $N_b$ ,  $N'_b$  の寿命値を境に信頼度曲線が変化している。以上のころがり疲れ寿命試験結果より、M50 は常温、高温とも SUJ 2 より格段に優れた寿命形態を示した。

Table 3 は本研究に用いた SUJ 2 と M 50 の非金属介在物の量を、点算法により測定した結果である。M 50 の方が全般的に非金属介在物の量が少なく、特に軸受の寿命に影響をおよぼすとされている B系、C系の介在物<sup>9)</sup>の量が 0.004% と非常に少なくなっていた。これは SUJ 2 が大気溶解後真空脱ガス処理、M 50 が真空再溶解処理と溶解条件の差によるものである。また Fig. 5 は M 50 と SUJ 2 の高温硬さの変化を調べたものである。軌道面の温度は鋼球とのころがり接触熱のため、潤滑油温度よりはるかに高くなっていると思われる。ここで SUJ 2 が 200°C を越えると温度の上昇とともに硬さが急激に低下するのに対し、M 50 は焼もどし 2 次硬化処理を施しているため硬さの低下の割合が小さく、高い高温硬さを保持している。以上の結果より M 50 が清浄度の高い鋼であり、試料表面付近に存

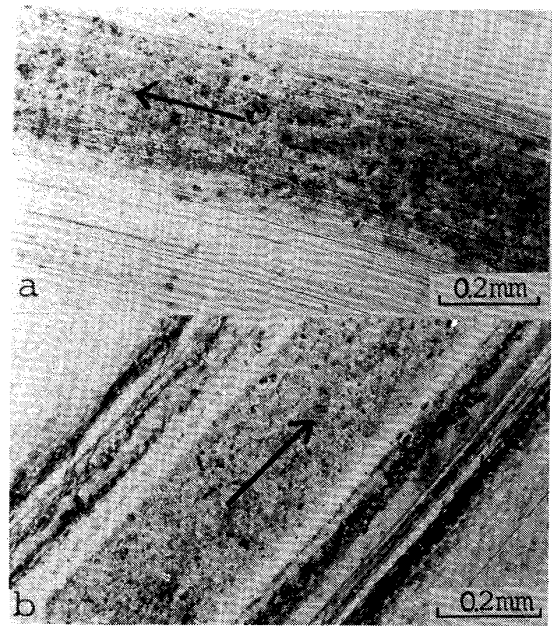
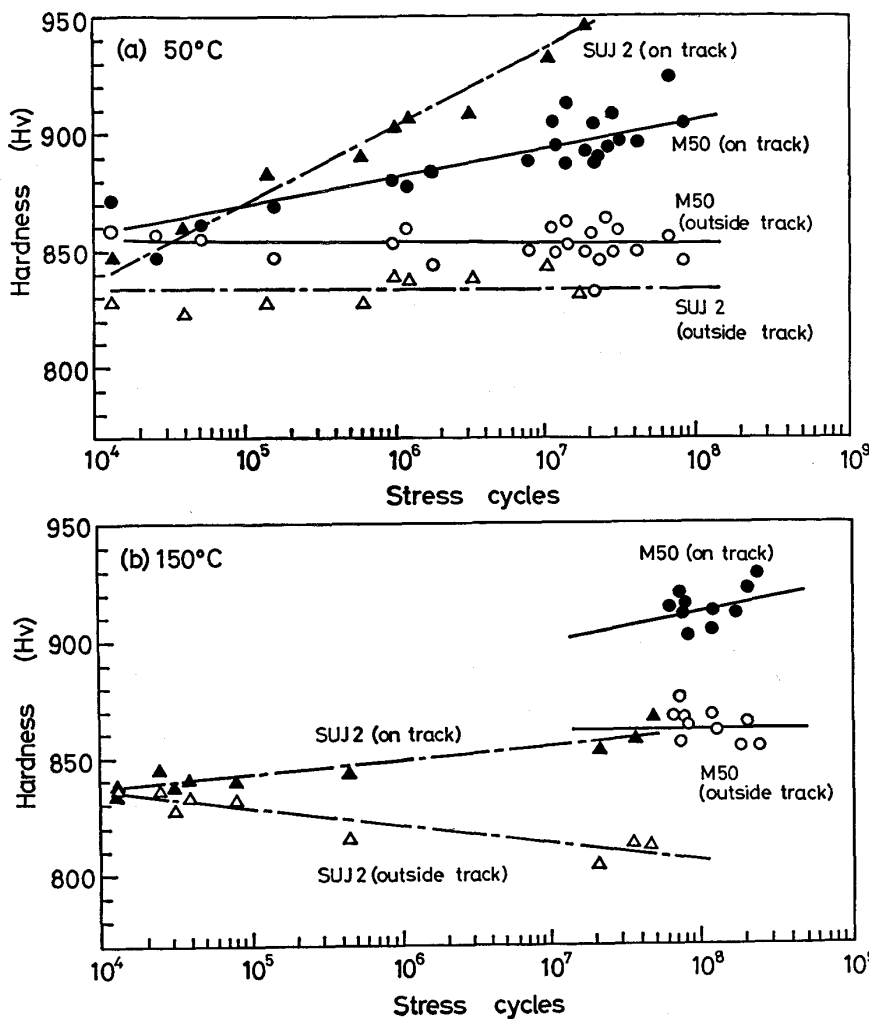
(a)  $1.4 \times 10^7$  cycles (b)  $1.6 \times 10^8$  cycles

Photo. 1. Rolling track surface appearances of M50 tested at 150°C. Arrows indicate the rolling direction.

在する非金属介在物などの寿命に悪影響をおよぼす欠陥が少ないこと、また高温においても硬さが低下しないことから SUJ 2 より寿命が常温、高温両者において伸びているものと考えられる。

### 3.2 寿命分布形態ところがり疲れ過程

前節の結果より SUJ 2, M 50 とともに常温と高温で寿命形態が異なること、また高温において M 50 のころがり疲れ寿命が常温における寿命より伸びることが明らかとなった。そこでまず、高温において寿命分布が複合ワイブル分布となる理由について考察する。Photo. 1 (a) (b) は M 50 の高温試験後の軌道面の典型的な様相を示したものである。(a) は寿命が短かった試験片の軌道面であるが、これは (b) の長寿命の試験片の軌道面より荒れている。しかしピットの数は (b) の長寿命の方が逆に増加している。本研究の場合、EHL (Elasto-Hydrodynamic Lubrication) 理論から算出した油膜パラメータ<sup>10)</sup>は約 0.9 程度であり、一般に軸受が使用される境界潤滑領域の下限になっているが<sup>11)</sup>、本研究のような高荷重、高速回転のもとでは、部分的に金属接触が生じていると考えられる。そのため試験初期において軌道が明瞭に形成されるまでの間に表面が急激に摩耗する。このとき軌道の表面状態が悪い場合や、表面下に欠陥が多い場合はそのまま寿命に達したと考えられ、このため寿命の短い試験片では軌道がより荒れていたものと考えられる。一方、表面下の欠陥が少なく、寿命に至らなかった試験片では



(a) 50°C (b) 150°C

Fig. 6. Relations between hardness (on track and outside of track) and stress cycles to failure.

Table 4. Average depth and breadth of the rolling track after fatigue testing.

	SUJ-2		M50	
	Depth (μm)	Breadth (mm)	Depth (μm)	Breadth (mm)
Room temp. (30°C)	3.7	0.40	2.1	0.39
High temp. (150°C)	5.2	0.51	3.2	0.38

軌道が明確に形成され定常運転状態になるため、表面の荒れが削りとられ、軌道面が再び平坦になり境界潤滑領域に戻るものと考えられる。そのため高温で長寿命の試験片ほど表面の荒れが少なく、その後のピットの発生によつて最終的に軌道面のはく離に至るものと考えられる。この現象は常温においても生じていたが、高温の方が軌道面の軟化とあいまつて、より顕著になつたものと考えられる。したがつて、低サイクル側で寿命に至つた試片は表面の荒れにより、また高サイクル側で寿命に至つた試片でははく離により寿命に達するという、この損傷過程の違いがワイブル分布に現れたのではないかと思われる。しかしながら、高温試験で使した潤滑油は常

温で使した #60 のスピンドル油と粘度だけは揃えてあるがその他の特性は同一ではないため、このことが寿命過程に影響を及ぼしている可能性もあり、この点についてはさらに検討が必要である。

次に M 50 鋼においてだけ高温における寿命が常温の寿命より長くなつた原因について考察する。Fig. 6 (a) (b) はころがり疲れ試験前後における軌道面上ならびに軌道外側のころがり変形を受けていない部分の硬さの変化を、寿命値に対してプロットしたものである。常温における軌道上の硬さは Fig. 6 (a) に示すように、SUJ 2, M 50 とも応力くり返し数の増加とともに、加工硬化のため軌道外側の硬さより上昇している。一方、高温においても Fig. 6 (b) に示すごとく、SUJ 2 の軌道面上の硬さは加工硬化のため増加しているが、常温試験の場合より増加の割合は大きく低下していた。これに対して M 50 の軌道面上の硬さは高温試験時においても、常温試験時とはほぼ同程度の硬さを保持していた。

また、そのときのころがり軌道の幅ならびに深さを測定した結果を Table 4 に示す。なおこの軌道幅ならび

に深さは寿命値が異なつてもほとんど一定であつたので、各試験条件下での全試験片についての平均値で示した。SUJ 2 では Fig. 5 から明らかなように、200°C 以上で硬さの急激な低下がみられる。そのため常温試験に比べて高温試験時に軌道面が軟化するため、軌道幅、軌道深さとも高温試験結果の方が増加していた。また M 50 でも軌道深さが常温試験時に比べ高温試験時の方が増加していたが、増加の程度は SUJ 2 よりも小さい値を示した。

以上の結果から、M 50 が高温においても硬さの低下がほとんどみられず、さらに軌道面の面積がわずかに増加したため、ヘルツ応力が実質的に低下し寿命が伸びたと考えられる。

**3.3 ころがり軌道面のはく離の微視的観察**

本研究においては、実機の軸受との関連から軌道面の荒れやピットの発生による寿命も考慮に入れて寿命解析を行つたが、そのような場合においてもさらに試験を続行させると、最終的にはころがり疲れによつて軌道面上のはく離が生じる。このはく離は故障とは異なり、いかに

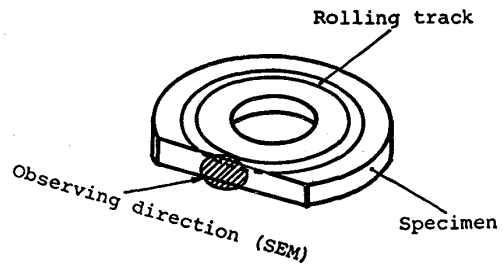
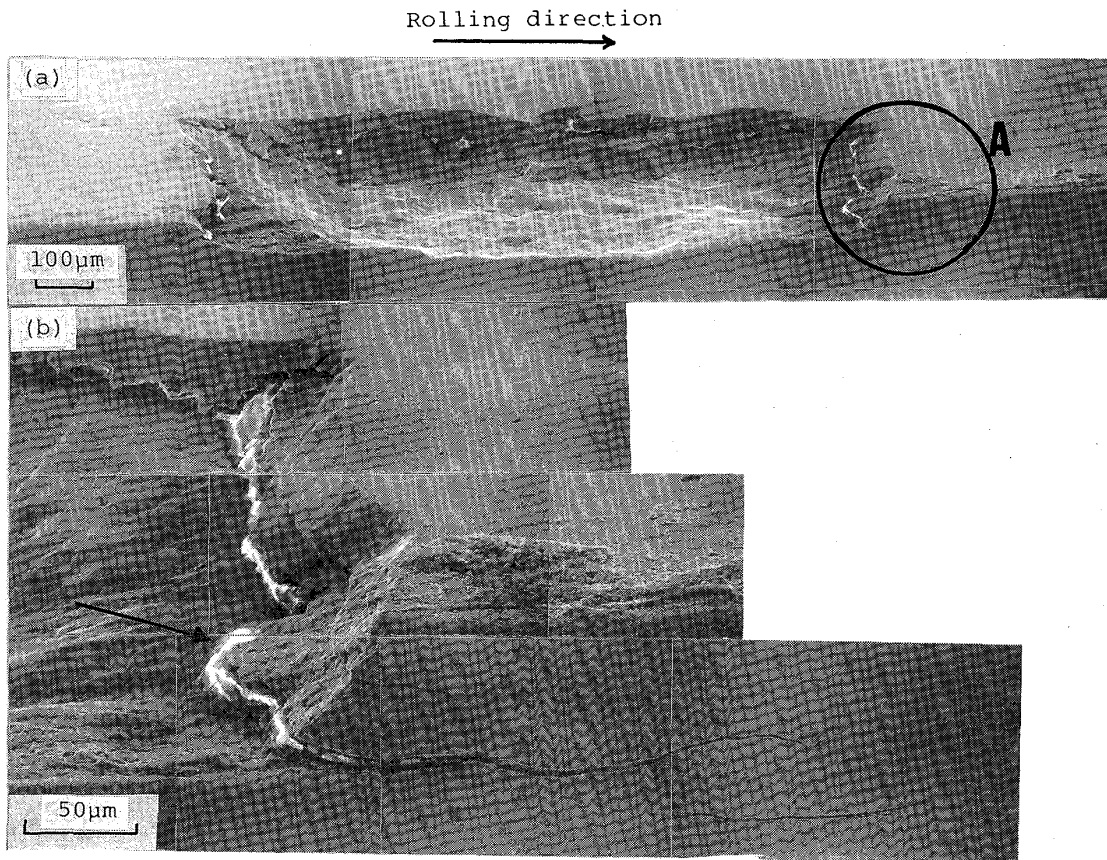


Fig. 7. Method of scanning electron microscopic observation of both flaking surface and cross section.

に軸受を正常に動作させていても、いつかは到達する寿命である。したがつて、このはく離の発生機構の解明はころがり疲れ強さ改善に対して重要な課題となつている。従来よりはく離は転動面近傍に存在する酸化物系の介在物が応力集中部を形成し、そこを起点として発生すると考えられてきている<sup>12)13)</sup>。しかし溶解法の改良により介在物の量をかなり減少させても、はく離そのものの現象は存在することから、転動面下の組織的な変化もはく離の起点を形成するのではないかと考えられてい



(a) General view of flaking  
 (b) Magnification of circled position in (a)  
 Arrow indicates a plate carbide developed parallel to the rolling surface

Photo. 2. Scanning electron micrographs of flaking in the rolling track of SUJ-2 at  $3.9 \times 10^6$  cycles, 50°C.

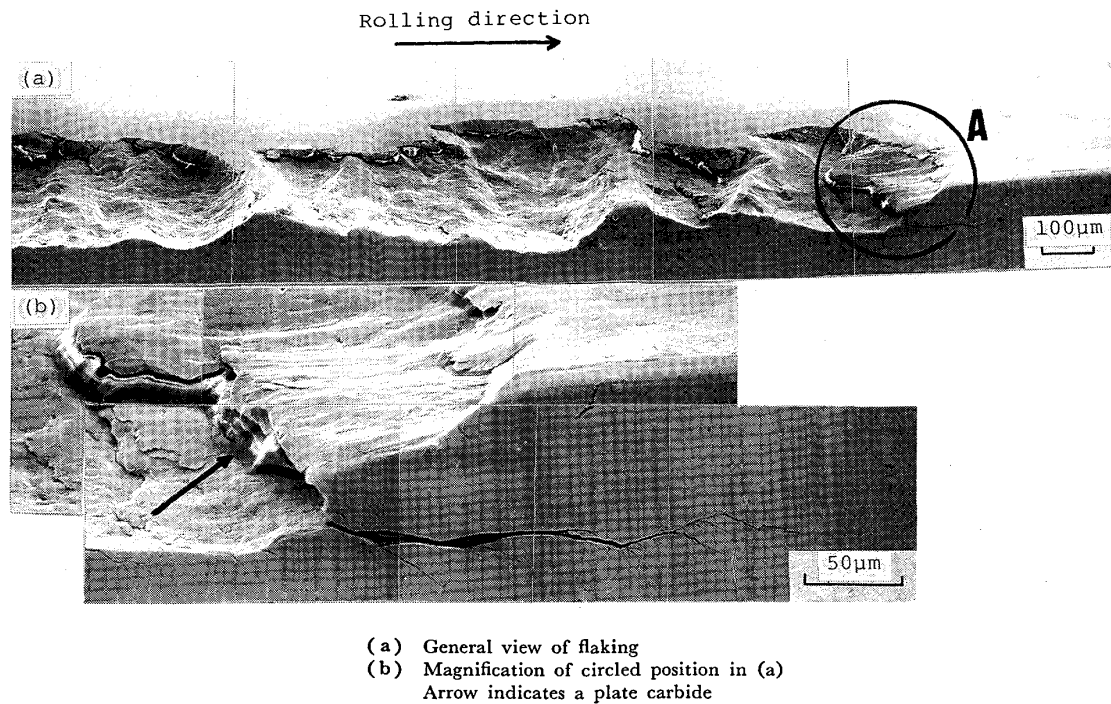


Photo. 3. Scanning electron micrographs of flaking in the rolling track of M50 at  $2.1 \times 10^7$  cycles,  $50^\circ\text{C}$ .

る<sup>6)14)15)</sup>。しかしながら、それらの関係は十分に解明されてはいない。坪田<sup>16)</sup>は SUJ 2 を用いて転動面下の組織変化とはく離に関して詳細な検討を行つた結果、板状炭化物がはく離直下に生成されることを見出し、板状炭化物がはく離の起点になっていると報告している。また古村<sup>17)</sup>も同様な形状をした炭化物が SUJ 2 のころがり疲れ試験中に生成することを認めている。しかしながら、現在までの観察方法では、はく離上面からの走査電顕観察、あるいは断面の組織観察が行われているのみで、その対応はまだまだ明確ではない。

本研究では、はく離と転動面下の組織とをより直接的に対応づけて調べるため、次のような観察方法を用いた。まずはく離が生じている試験片から、Fig. 7 に示すようにはく離が生じている部分のみを切り出し、はく離部分を樹脂で保護しエメリー紙を用いて、ちょうどはく離の中央部のところまで削り落とした後、断面部分をナイタールで軽く腐食する。次にはく離部分を傷つけないように樹脂を取り除き、さらにはく離部分に残つた樹脂を完全に除去するため、アセトン中で 30 min 超音波洗浄を行つた。その後走査電顕を用いて Fig. 7 の矢印に示した方向より観察することによつて、はく離部分と断面を同時に観察した。

Photo. 2 (a) は SUJ 2 の常温での疲れ試験時に生じたはく離部分を上述の方法で観察した結果である。はく離が生じている部分にはいくつかの介在物も見られ、さ

らに断面には A で囲んである箇所に微視き裂が見られる。この A の部分を拡大したものが Photo. 2 (b) である。転動面下  $50\text{--}60\ \mu\text{m}$  付近の矢印で示した部分に層状になつた生成物が存在し、これがき裂の開始点になっているのが明瞭に認められる。この生成物を EPMA 分析した結果、 $\text{C}\sim 6\%$  で、その他 Fe および Cr も検出された。したがつてこの生成物は、坪田により報告されている板状炭化物と同一のものではないかと考えられる<sup>18)</sup>。また、この炭化物の生成位置は、ころがり接触による動的最大せん断応力作用位置（本研究の場合は  $53\ \mu\text{m}$ ）とほぼ一致していた。また Photo. 2 は常温における結果であるが、高温試験時に発生したはく離にも同様の炭化物が観察された。

Photo. 3 (a) は M 50 の常温での疲れ試験で生じたはく離部について同様の観察を行つた結果である。M 50 については介在物はほとんど見られず、転動面下  $50\text{--}60\ \mu\text{m}$  付近に多数の生成物が認められた。A 部のき裂の起点部分を拡大したものが Photo. 3 (b) である。SUJ 2 と同様にき裂の開始点に層状の生成物が存在している。EPMA 分析の結果、これも SUJ 2 の場合と同様な  $\text{C}\sim 6\%$  の炭化物であつた。また M 50 の場合も常温および高温試験の両者においてこの炭化物が観察された。

### 3.4 はく離の形成過程

前節の観察結果より、炭化物の形成がはく離の起点と

なっていることが明瞭に示された。この炭化物の形成を含む転動面下の組織変化は、比較的低速回転で試験された場合にも見い出されており、これらはすべてころがり接触の発熱により形成されたと考えられている。炭化物の生成過程には、次に示す2つの過程が考えられる。1つはころがり発熱により組織の一部が瞬間的にオーステナイト域まで加熱され、炭化物が一度固溶した後、せん断応力との相互作用により層状の炭化物が析出してくるという考えで、もう一つはマトリックスである焼もどしマルテンサイトが発熱によりさらに焼もどしを受け、その分解過程においてせん断応力との相互作用により、ある特定の位置にのみ炭素の拡散が生じ、層状の炭化物が析出してくるという考えである。本研究においてはころがり回転数が約9000rpmと非常に高速であるが、ころがり接触熱だけで700°C以上の高温が達成されるとは考え難いため、おそらく後者の機構により炭化物が形成されたと考えられる。そしてこのようにして形成された炭化物が、応力の集中部になり、そこから微視き裂が発生し、最終的にはく離が生じるものと考えられる。ところで坪田は板状炭化物の生成機構として、最大せん断応力作用位置付近に存在する酸化系介在物間の応力集中域に、ころがり接触応力によつて拡散した炭素が捕捉され析出する過程を考えているが、本研究のM50の場合、く離が発生した部分に介在物の存在は認められず(Photo. 3 (b)), 介在物との相互作用により析出したとは考え難い。また高温のほうが炭素の拡散が速いため、板状炭化物が形成されやすく、ころがり疲れ寿命も短くなると考えられる。これはSUJ2に関してはよくあてはまるようであるが、炭素量が0.8%と少ないM50鋼については、高温において硬さの低下がほとんどみられず、そのため寿命が伸びたと考えられる。

#### 4. 結 論

一般軸受鋼SUJ2ならびに高温用軸受鋼M50の常温(50°C)および高温(150°C)において高速回転ころがり疲れ試験を行い以下の結論を得た。

1) ころがり疲れ寿命分布はSUJ2, M50ともワイブルプロットにおいて常温(30°C)で直線性を示し、高温(150°C)では複合ワイブル分布となつた。

2) 高温におけるころがり疲れ寿命はSUJ2の場合常温に比べ短くなるのに対して、M50では高温の方が常温に比べて大きな伸びを示した。これはM50が高温において硬さの低下が小さいためであつた。

3) ころがり疲れにより生じるく離はSUJ2では非金属介在物および試験中に形成された板状炭化物を、M50では主として板状炭化物を起点として発生していることが確認された。

本研究を行うにあたり、実験に御協力頂いた長岡技術科学大学大学院 中沢 茂氏(現(株)長野計器製作所)ならびに吉崎 聡氏(現(株)ブリヂストン)に深く感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) J. L. CHEVALIER, E. V. ZARETSKY and R. J. PARKER: Trans. ASME, J. Lub. Tech., 95 (1975), p. 287
- 2) R. J. PARKER and R. S. HODDER: Trans. ASME, J. Lub. Tech., 100 (1978), p. 226
- 3) A. H. NAHM: Trans. ASME, J. Lub. Tech., 104 (1982), p. 330
- 4) E. V. ZARETSKY and W. J. ANDERSON: NASA TN D-5002 (1982)
- 5) 上野 學, 中島宏興, 池田定雄: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 344
- 6) 古村恭三郎, 平川 清: NSK Bearing Journal (1979) 638, p. 1
- 7) W. WEIBULL: J. Appl. Mech., 18 (1951), p. 293
- 8) 真壁 肇: ワイブル確率紙の使い方 (1982), p. 23 [日本規格協会]
- 9) 岡本一生, 仕幸三郎: 製鉄研究, 273 (1971), p. 108
- 10) 転がり軸受工学(転がり軸受工学編集委員会編) (1975), p. 178 [養賢堂]
- 11) T. A. HARRIS: Rolling Bearing Analysis (1966), p. 318 [Wiley]
- 12) R. F. JOHNSON and J. F. SEWELL: JISI, 196 (1960), p. 414
- 13) 黒田昌夫: 日本機械学会論文集(第3部), 26 (1960), p. 1258
- 14) J. A. MARTIN, S. F. BORGESE and A. D. EBERHARDT: Trans. ASME, J. Basic Eng., 88 (1966), p. 555
- 15) K. SUGINO, K. MIYAMOTO, M. NAGUMO and K. AOKI: Trans. ISIJ, 10 (1970), p. 98
- 16) 坪田一一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1046
- 17) 古村恭三郎, 城田伸一, 平川 清: 電気製鋼, 46 (1975), p. 163
- 18) 坪田一一: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 853