

© 1983 ISJ

# 軸受鋼のころがり疲れにおける板状炭化物の生成に及ぼす接触応力と基地炭素量の影響

論文

坪 田 一 一\*

## Effect of Rolling Contact Stress and Carbon Content in Matrix on the Formation of Platelike Carbides during Rolling Contact Fatigue of Bearing Steel

Kazuichi Tsubota

## Synopsis :

Platelike carbides form immediately under flakings during rolling fatigue tests in the ball/washer thrust type fatigue testing rig.

Carbon content in the matrix and shear stress in the thrust type test specimens were studied in this report which influence the formation of the platelike carbides closely related to bearing life.

It has been revealed for the formation of the platelike carbides that carbon content of approx. 0.25% and a hertzian stress of approx. 60 kgf/mm<sup>2</sup> are necessary and also a minimum required stress cycle varies depending on the product of these two factors (carbon content × shear stress). It has also been confirmed that the same critical conditions can apply to industrial bearings to produce the platelike carbides.

Another investigation made in relation to diffusion frequency of carbon and nitrogen at 120-deg. has shown that it is difficult for the platelike carbides to form when the diffusion frequency of these elements gets too large.

We have made an overall conclusion from the above mentioned results together with those obtained in the previous experiments that oxide inclusions as sources of stress concentration must be reduced down to as small an amount as possible and carbon content had better be lowered in the matrix to extend bearing life as long as a proper hardness is maintained.

### 1. 緒 言

スラスト型ころがり疲れ試験機（以下スラスト試験機，その試験片をスラスト試験片と記す）によつて軸受鋼のころがり疲れ試験を行うと，その試験片に生ずるはく離の大部分は転動面下に生成した板状炭化物を起点として生ずる<sup>1)</sup>。

板状炭化物は転動面下に存在する酸化物系介在物間の応力集中域に生成し<sup>2)</sup>，セメントイトまたはε炭化物に相当する二種類の炭化物<sup>3)</sup>である。転動面下にこのような炭化物が生成することは基地中のCとNの拡散がころがり応力のくり返しによりかなり促進されることを意味する。またCとNの拡散は基地中のこれらの元素の含有量が高い場合やころがり応力が高い場合には加速されると考えられる。マイクロ組織的に観察されうる程度の大きさを有する板状炭化物が生成するためにはある程度以上のころがり応力のくり返しが必要であらう。

最大ヘルツ圧縮応力が 500 kgf/mm<sup>2</sup> の場合には真空脱ガス鋼において約 10<sup>6</sup> 回の応力くり返しで板状炭化物

が生成することはすでに報告した<sup>2)</sup>が，本実験ではマイクロ組織的に観察されうる程度の大きさの板状炭化物の生成に要する最小ヘルツ圧縮応力と最少ころがり応力くり返し数の関係を求めた。それとともに，スラスト試験機において求めたこのような関係が妥当なものであることを実体軸受およびスラスト試験機用上部レースのはく離部のマイクロ組織観察によつて確認した。

一方板状炭化物の生成には基地中の炭素量も大きな影響を及ぼすと考えられる。それゆえ焼もどしによつて基地中の炭素量を調整したスラスト試験片における板状炭化物の生成率を求め，それによつて板状炭化物の生成に必要な最少炭素量を明らかにした。

さらに板状炭化物の生成に及ぼすCとNの拡散速度の影響を調査するため，潤滑油の温度を 120°C にしてスラスト試験を行い，生成したはく離下の板状炭化物の観察を行った。

以下の記述では次の略記号を用いる。

最大ヘルツ圧縮応力 (kgf/mm<sup>2</sup>) :  $P_{max}$

静的せん断応力 (kgf/mm<sup>2</sup>) :  $\tau_{st}$

昭和 54 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 8 月 25 日受付 (Received Aug. 25, 1982)

\* 山陽特殊製鋼(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sanyo Special Steel Co., Ltd., 3007 Nakajima Shikama-ku Himeji 672)

動的せん断応力 ( $\text{kgf/mm}^2$ ):  $\tau_{zy}$   
 ころがり応力くり返し数 (cycles):  $n$   
 基地中の炭素濃度 (wt%):  $C_M$   
 静的最大せん断応力作用位置  
 (転動面からの深さ, mm):  $z_1$   
 動的最大せん断応力作用位置  
 (転動面からの深さ, mm):  $z_0$   
 板状炭化物の生成に要する最小  $P_{\max}$ :  $P_0$   
 板状炭化物の生成に要する最少ころがり応力  
 くり返し数 (cycles):  $n_0$   
 板状炭化物の生成に要する基地中の  
 最少炭素量 (wt%):  $C_0$   
 板状炭化物の生成に要する最小  $\tau_{st}$  ( $\text{kgf/mm}^2$ ):  $\tau_c$

## 2. 供試材および実験方法

### 2.1 供試材

板状炭化物の生成における  $\tau_c$  と  $n_0$  の関係を求めるために用いたスラスト試験片は  $830^\circ\text{C}$  で焼入後  $180^\circ\text{C}$  で焼もどしをして HRC 62~63 に調整した 1.0%C-1.4%Cr 鋼および 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr 鋼である。またスラスト試験片について求めた  $\tau_c$  の妥当性を確認する調査も別の試片について実施した。それらはスラスト試験用上レース (#51305 スラスト軸受のレース) と乗用車用ころがり軸受 (#6206 相当ラジアル玉軸受) である。さらに板状炭化物の生成に及ぼす基地中の C 量の影響を調査したスラスト試験片は 1.0%C-1.4%Cr 鋼で、その熱処理は Table 1 に示してある。また  $120^\circ\text{C}$  で行つた高温スラスト試験片は  $830^\circ\text{C}$  で焼入後  $180^\circ\text{C}$  で焼もどしをした 1.0%C-1.4%Cr 鋼である。これらはいずれも真空脱ガス鋼である。

### 2.2 ころがり疲れ試験

ころがり疲れ試験をすべてスラスト試験機<sup>4)</sup> によつて行つた。本実験での公称  $P_{\max}$  はすべて  $500 \text{ kgf/mm}^2$  であるが、焼もどし温度の調整により基地中の炭素量を調整して  $C_0$  を求めるための実験と高温スラスト試験では試験片のかたさが低下して転動軌跡に凹みが生じ真面圧が低下するので、特にこれらの実験では軌跡の凹みに応じて真面圧を計算によつて求めた。なお同一熱処理条件のスラスト試験片では真面圧はほぼ同一であり、高温スラスト試験片の場合も同様であつた。

また  $120^\circ\text{C}$  での高温スラスト試験の場合、常温試験で用いた #60 スピンドル油では粘度が不足するため #140 タービン油を潤滑油として用いた。他の場合は #60 スピンドル油で潤滑し、また油温は  $30\sim 31^\circ\text{C}$  である。なお、ころがり応力くり返し速度は、 $1800 \text{ cpm}$

である。

### 2.3 基地中の炭素量の調整

$C_0$  を求める実験では  $-60^\circ\text{C}$  でのサブゼロと  $160\sim 400^\circ\text{C}$  での焼もどし温度の調整により  $C_M$  を変化させた。具体的な熱処理条件は Table 1 に示してある。

本実験では各熱処理条件における  $C_M$  を滝本<sup>5)</sup>らによる非水溶媒系電解液定電位電解抽出分離定量法によつて求めた。

### 2.4 ミクロ組織観察

スラスト試験片のはく離周辺のみクロ組織観察をすでに示した切断位置<sup>1)</sup> において適宜行つた。また上部スラストレースおよび乗用車用軸受の場合は、文献 1) の Fig. 2 の (3) に相当する切断を行い、研磨後マイクロ腐食液としてピクラルを用いたが、生成したマイクロ組織変化が板状炭化物であることを確認するためにはピクリン酸ソーダによる腐食<sup>3)</sup> を行つた。

本実験の場合通常のみクロ組織観察を光学顕微鏡により 400 倍で行い、必要に応じて電子顕微鏡観察も行つた。したがつて本実験にいう板状炭化物とは 400 倍で光学顕微鏡により確認できるものをいう。

## 3. 実験結果

### 3.1 板状炭化物の生成に要する最小静的せん断応力ところがり応力くり返し数の関係

板状炭化物の生成には酸化物系介在物<sup>2)</sup> ところがり接触応力による C と N の拡散<sup>3)</sup> の促進という 2 つの要因が影響を及ぼす。一般的には酸化物系介在物が多くかつ大きいほど、さらにはころがり接触応力が高いほど板状炭化物は生成しやすいであろう。また真空脱ガス鋼においては  $P_{\max}$  が  $500 \text{ kgf/mm}^2$  の場合には  $n$  が  $10^6$  回程度で板状炭化物が生成しはじめるが<sup>2)</sup>、 $P_{\max}$  と  $n$  とは相互に何らかの関連を持つて板状炭化物の生成に影響を及ぼすと考えられる。

さて、転動面下には二種類のせん断応力が生ずる。一つは転動面と  $45^\circ$  をなす  $\tau_{st}$  であり、他は転動面に平行な  $\tau_{zy}$  である<sup>6)</sup>。  $P_{\max} = 500 \text{ kgf/mm}^2$  および任意の  $P_{\max}$  におけるスラスト試験片内の深さ方向の各位置に生ずる  $\tau_{st}$  と  $\tau_{zy}$  の最大値の分布を Fig. 1 に示す。  $\tau_{st}$  の最大値は上にある 3/8" 鋼球とスラスト試験片との接触面 (円) の中心線上に存在するが、 $\tau_{zy}$  の最大値は接触円内にはあるが接触円の中心線からややずれた転動軌跡の中心線上にあり、スラスト試験片上を鋼球が走行すると接触面中心の前後に正負の最大値が生ずる。

Fig. 1 には 1%C-1.4%Cr 鋼および 1.0%C-1.0%Mn-1.4%Cr 鋼における二種類の生成形態を有する板

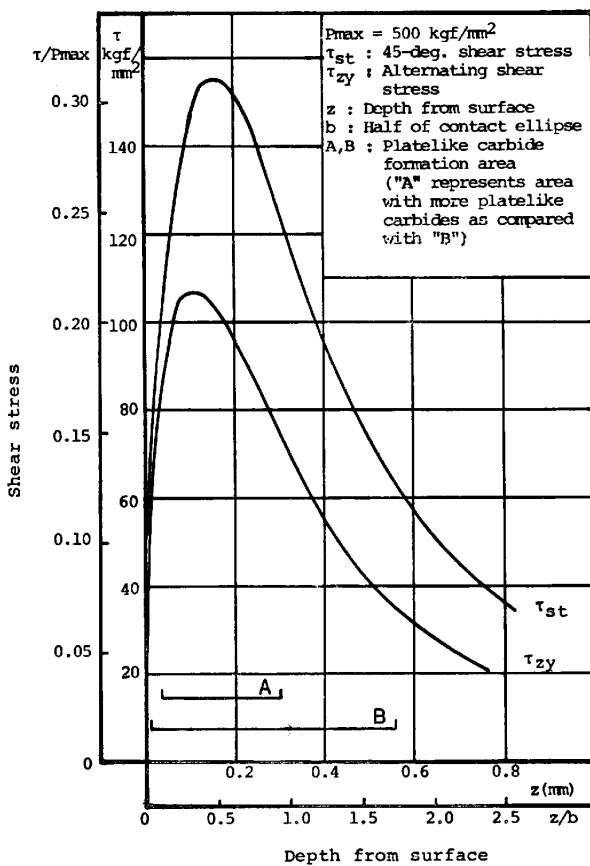


Fig. 1. Shear stress distribution under contact surface (Specimen: 1% C-1.4% Cr, 1% C-1% Mn-1.4% Cr steel).

状炭化物<sup>2)</sup>のうち転動方向と転動面に対してもに直角に生成するものの生成頻度の高い範囲Aと、板状炭化物の転動面に最も近いものと遠い(深い)ものが従来観察された範囲Bとを示した。生成頻度の高い範囲内の板状炭化物の中心の転動面からの平均深さは約0.14 mmであった。

通常ころがり疲れ強さ(以下寿命と記す)は $\tau_{zy}$ に依存するというのが定説であるが<sup>7)</sup>、スラスト試験における寿命を支配する板状炭化物<sup>1)</sup>の生成位置はFig. 1に示したようにどちらかという $\tau_{st}$ の分布とよく一致しているように思われる。すなわち板状炭化物の生成位置は $(\tau_{st})_{max}$ の付近に多く、その中心位置は $z_0$ より $z_1$ により一致している。Fig. 1のBに示したように現在判明している板状炭化物の生成限界位置である転動面下0.01 mmと0.56 mmの位置での $\tau_{st}$ はともに約60 kgf/mm<sup>2</sup>で等しい。また $\tau_{zy}$ の場合、これらの位置での数値はかなり異なっている。このような事実から考えると板状炭化物の生成は $\tau_{st}$ に依存するよう思われる。

したがって $P_{max}=500$  kgf/mm<sup>2</sup>の場合、 $\tau_c$ は前述のように転動面から0.01 mmと0.56 mmの位置での $\tau_{st}$

に相当し、Fig. 1からわかるように約60 kgf/mm<sup>2</sup>となる。一方スラスト試験のように板と鋼球との接触の場合、 $P_{max}=196$  kgf/mm<sup>2</sup>のとき $(\tau_{st})_{max}$ は60 kgf/mm<sup>2</sup>となる。 $\tau_{st}$ が60 kgf/mm<sup>2</sup>以上であれば板状炭化物が生成する可能性があるから、このときの $P_{max}$ (196 kgf/mm<sup>2</sup>)が $P_0$ となる。

以上はスラスト試験片内に生成した板状炭化物の調査から求めた $\tau_c$ である。しかし現有のスラスト試験機において、 $P_{max}=196$  kgf/mm<sup>2</sup>で試験することはその機構上不可能なので、ころがり疲れを受ける他の部品において上述の $\tau_c$ の値の妥当性を証明する必要がある。

そこで196 kgf/mm<sup>2</sup>以上の面圧を受ける部品の例としてスラスト試験用上部レース<sup>1)</sup>と乗用車ころがり軸受を選び、これらのはく離部における板状炭化物の生成の有無を調査した。

スラスト試験片の $P_{max}$ が500 kgf/mm<sup>2</sup>のときスラスト試験用上部レースの $P_{max}$ は約216 kgf/mm<sup>2</sup>、 $(\tau_{st})_{max}$ は約69 kgf/mm<sup>2</sup>であり、上述の $\tau_c$ より若干高いせん断応力が作用している。このレースは $P_{max}$ がかなり低い $n$ のため、スラスト試験中にはく離することはほとんどないが、まれにはく離を起こす。 $n$ が約 $2 \times 10^7$ 回のときに上レースのはく離部周辺に観察された板状炭化物をPhoto. 1に示す。 $P_{max}$ が低い $n$ のためこの板状炭化物はあまり大きなものではないが上述の $\tau_c$ の妥当性を示す例証の一つである。

一方産業用機械や自動車等で使用されるころがり軸受において板状炭化物が観察された例はまだ見出されていなかった<sup>1)</sup>が、最近排気量1600 ccの乗用車に使用されている#6206相当のころがり軸受においてそれが観察された。

Photo. 2にそのマイクロ組織を示す。この軸受の $P_{max}$ は約227 kgf/mm<sup>2</sup>、 $(\tau_{st})_{max}$ は約74 kgf/mm<sup>2</sup>であり $n$ は走行距離から計算すると約 $5 \times 10^7$ であった。これ

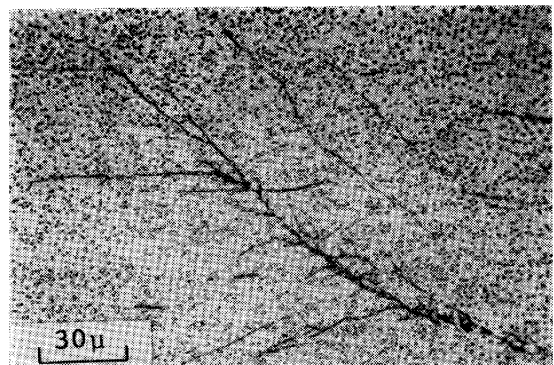


Photo. 1. Platelike carbides developed in upper thrust race.

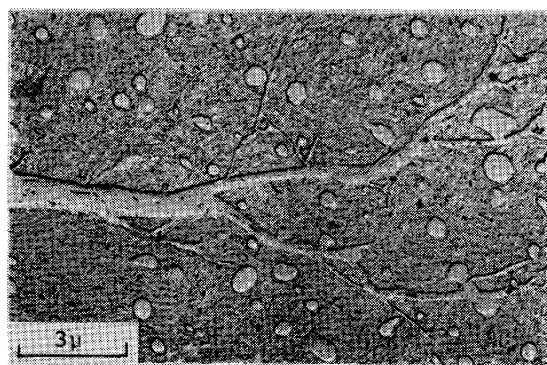
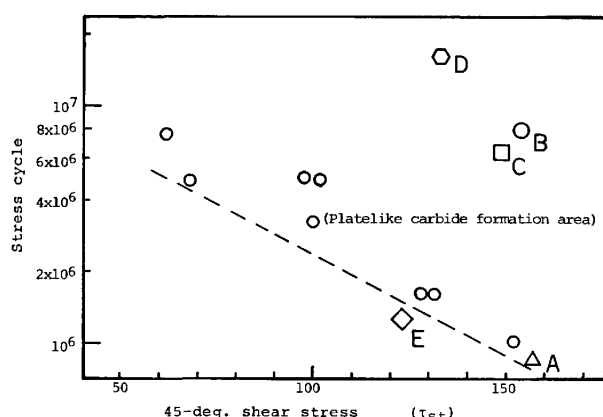


Photo. 2. Platelike carbides developed in ball bearing for automobile.



(A~E correspond to the conditions in Table 1.)  
(Platelike carbides did not develop at E.)

Fig. 2. Relation between  $\tau_{st}$  and  $n$  in formation of platelike carbide.

も上述の  $\tau_c$  の妥当性を示す例証の一つである。実用軸受において板状炭化物が見出されたという報告は従来ないようであるが、今後機械の小型化や高能率化にともなつて板状炭化物を起点とするはく離が増加する可能性はある。

以上のように  $\tau_c$  より若干高い  $\tau_{st}$  を受ける軸受において板状炭化物が観察されたことにより  $\tau_c = 60 \text{ kgf/mm}^2$  の妥当性が確認できたと考える。

一方応力くり返し数自体も板状炭化物の生成に  $\tau_{st}$  とともに影響を及ぼすはずである。Fig. 2 は  $P_{\max} = 500$

kgf/mm<sup>2</sup> におけるさまざまな位置に生成した板状炭化物について、その生成位置での  $\tau_{st}$  と  $n$  の関係を示したものである。この図によると  $\tau_{st}$  が  $155 \text{ kgf/mm}^2$  では約  $10^6$  回以上、 $\tau_{st}$  が  $60 \text{ kgf/mm}^2$  では約  $5 \times 10^6$  回以上の  $n$  によつて板状炭化物が生成することがわかる。この結果は真空脱ガス鋼に関するものであり、非脱ガス鋼のように酸化物系介在物が多い場合には Fig. 2 の板状炭化物の生成限界線が若干低  $\tau_{st}$ 、低  $n$  側へずれると考えられる。

以上のように板状炭化物の生成には  $\tau_{st}$  と  $n$  が相互に関連して影響することが明らかとなつた。

なおスラスト試験から求めた  $\tau_c$  は  $C_M$  が約 0.53% の場合についてのものである。しかし実際に使用されている軸受中の  $C_M$  もこの程度であり、これを大きく上回ることはない。また後述するように  $\tau_{st}$  と  $C_M$  は板状炭化物の生成に対し相互に関連があり、 $C_M$  が減少すると  $\tau_{st}$  が増さねばならないが、 $C_M$  が減少しても  $\tau_{st}$  が上述の  $\tau_c$  を上回らなければ板状炭化物が生成しないという意味において、 $\tau_c = 60 \text{ kgf/mm}^2$  は  $C_M$  の多少にかかわらず板状炭化物が生成するための最少の数値である。

### 3.2 基地中の炭素量と板状炭化物の生成との関係

板状炭化物はセメントタイトまたは  $\epsilon$  炭化物<sup>3)</sup> であり、そのCまたはN量は基地中のそれよりかなり高い。また板状炭化物はころがり疲れ試験中に生成するから鋼中で相当量のCとNの拡散が起こっているはずである。同一条件で単位時間当たり拡散する原子数は  $C_M$  が高いほど多くなるから  $C_M$  も板状炭化物の生成に大きく影響すると思われる。そこで  $C_M$  を焼もどし処理によつて調整したスラスト試験片を作成し、板状炭化物の生成率(スラスト試験片のはく離のうち板状炭化物を起点として起こるものの割合)と  $C_M$  との関係を調査した。スラスト試験片の熱処理条件、スラスト試験結果などを Table 1 に示す。

ここで Table 1 のころがり疲れ試験条件が板状炭化物の生成条件を満たしているかどうかを検討する。まず

Table 1. Relation between platelike carbide formation rate and carbon content in matrix.

Condition	Heat treatment	Hardness of specimen HRC	$P_{\max}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$(\tau_{zy})_{\max}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	$(\tau_{st})_{\max}$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Life(n) · × 10 <sup>6</sup>		Carbon content in matrix (%)	P.L.C. formation ratio (%)
						L <sub>10</sub>	L <sub>50</sub>		
A	840°C × 20' O.Q., -60°C × 2h A.C., 160°C × 60' A.C.	64.2	482	104	157	3.0	13.0	0.57	71.4
B	830°C × 20' O.Q., 180°C × 60' A.C.	62.5	473	103	154	12.0	35.0	0.53	78.6
C	830°C × 20' O.Q., 210°C × 60' A.C.	60.8	454	101	149	9.7	30.0	0.46	63.6
D	830°C × 20' O.Q., 300°C × 60' A.C.	56.0	395	91	133	21.0	>50	0.29	50.0
E	830°C × 20' O.Q., 400°C × 60' A.C.	50.9	368	87	123	1.25	20.0	0.18	0

P.L.C. : platelike carbide, O.Q. : Oil quenched, A.C. : Air cooled

せん断応力の最も低い HRC 50 水準の試験片の場合  $(\tau_{st})_{max}$  は  $123 \text{ kgf/mm}^2$  であり、これは前述の  $\tau_c$  をこえているとともに、Fig. 1 では板状炭化物が多く生成する応力範囲に入っている。また  $(\tau_{st})_{max}$  が  $123 \text{ kgf/mm}^2$  の場合、Fig. 2 では  $n$  がおよそ  $1.6 \times 10^6$  回以上で板状炭化物が生成することが示されているから、HRC 50 水準のスラスト試験片でも  $C_M$  が高ければ、およそその  $L_{10}$  寿命 (90% 残存確率寿命,  $1.25 \times 10^6$  回) 以上の  $n$  で板状炭化物が生成する可能性があるはずである。

また Fig. 1 と Fig. 2 からわかるように、板状炭化物は  $\tau_{st}$  が低下すると生成しなくなるか、あるいは生成に多くの  $n$  を必要とするようになる。しかし従来からの多くの観察によれば、Fig. 1 の生成範囲 A のように、 $\tau_{st}$  がおよそ  $100 \text{ kgf/mm}^2$  をこえると板状炭化物がしばしば生成することがわかっている。この範囲の  $\tau_{st}$  が作用する場合には、 $\tau_{st}$  の大小によつてその生成に要する  $n$  が変化することがあるとしても、 $C_M$  が高ければ板状炭化物が生成する可能性があると考えてよい。このほかの試験条件も板状炭化物の生成条件を満たしており、それらの  $\tau_{st}$  は HRC 50 水準のものより高く、Fig. 1 の A の範囲内に相当する応力水準にあるから、Table 1 の C, D でも  $C_M$  が高ければ板状炭化物が多数生成するはずである。したがって Table 1 の C, D で板状炭化物の生成率が低下しているのは  $C_M$  が少ないことによるものである。

以上の結果から  $\tau_{st}$  が前述の臨界条件を満たしていても、 $C_M$  が約 0.25% (厳密には 0.29% と 0.18% の間である) 以下になると板状炭化物は生成しなくなることがわかった。したがってこれが  $C_0$  である。なお板状炭化物の認められなかった試験片のはく離原因はおそらく表面キズとか、軌跡の凹みの増大による接線力の増加によつて生ずる表面き裂などであると考えられる。

結局板状炭化物の生成を抑制してころがり寿命を向上させるためには、試験片のかたさを適切に保持しつつ  $C_M$  をなるべく下げるの必要があり、一方では球状化セメントを極力微細化して応力集中<sup>9)10)</sup>を防止し、さらに酸化物系介在物を減少させる必要がある。

### 3.3 高温スラスト試験結果

以上のように板状炭化物の生成には  $C_M$ ,  $\tau_{st}$ , および  $n$  が相互に関係することが明らかとなった。また C の拡散量が多いほど板状炭化物は生成しやすいと考えられるので、C の拡散が盛んになる高温でスラスト試験を行い、C の拡散と板状炭化物生成の関係を明らかにすることとした。

本実験では試験温度として寿命が最高になる<sup>11)</sup>といわれており、かつ本スラスト試験機で実験可能な上限とも考えられる  $120^\circ\text{C}$  を選んだ。

供試材の常温 ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ) での  $L_{10}$  寿命は  $6.1 \times 10^6$  回であつたが、 $120^\circ\text{C}$  での  $L_{10}$  寿命は  $1.2 \times 10^7$  回となつた。これは面圧の低下による寿命の延長を 9 乗則<sup>12)</sup>によつて補正しても  $7.3 \times 10^6$  回となり、 $120^\circ\text{C}$  では常温より長寿命を示すとみてよい。なお  $120^\circ\text{C}$  での試験には常温での試験片の裏面を用いた。

#140 タービン油の  $120^\circ\text{C}$  での粘度は約 5 cst であり、 $30^\circ\text{C}$  での #60 スピンドル油のそれは約 12 cst である<sup>13)</sup>から、#60 スピンドル油の方が高粘度である。潤滑油の粘度と寿命の関係<sup>14)15)</sup>から考えると #60 スピンドル油潤滑による寿命の方が長寿命でなければならない。また拡散が盛んになる  $120^\circ\text{C}$  の方が板状炭化物が生成しやすく短寿命になるはずである。ちなみに  $30^\circ\text{C}$  と  $120^\circ\text{C}$  での C のジャンプ頻度は、文献(16)の式 ( $f_m = 4 \times 10^{13} \exp(-Q/kT)$ ) を用いて応力の影響はないとして計算すると約 1:1500 となる。そこで  $120^\circ\text{C}$  でのスラスト試験片のはく離の原因を調査するためにはく離下のミクロ組織を観察した。

Photo. 3 は  $120^\circ\text{C}$  でのスラスト試験片のはく離部の直下で観察された板状炭化物の一例である。本実験では板状炭化物以外の組織変化は見出せなかつた。このような板状炭化物が 20 枚のスラスト試験片中はく離を起こした 7 枚の試験片のすべてにおいて観察され、 $120^\circ\text{C}$  のスラスト試験でも板状炭化物が生成することが確認された。このように常温での寿命より  $120^\circ\text{C}$  での寿命が長い理由は後述するように、C と N の拡散が通常のスラスト試験の場合より活発すぎるため、特定の位置での板状炭化物の生成が常温の場合より遅れる (多くの応力くり返し数を必要とする) ためであると考えられる。

しかしあまり高温になるとマトリックスの軟化により寿命はかえつて低下する。もし  $120^\circ\text{C}$  が最高の寿命を示す温度<sup>11)</sup>であれば、この  $120^\circ\text{C}$  という温度は C と N の拡散が盛んになり転位によるそれらの捕捉が困難となつて板状炭化物が生成しにくくなると同時に、マトリックスの強度が適当な値に保持されているため、最も良好な寿命が得られる好都合な温度に相当するのかもしれない。

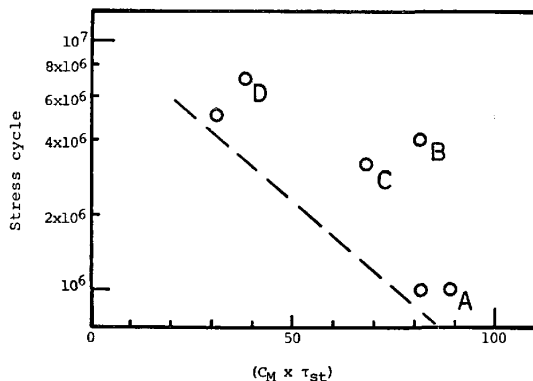
## 4. 考 察

### 4.1 板状炭化物の生成に及ぼす基地炭素量およびせん断応力の影響

前章において板状炭化物の生成に必要な最低限の  $C_M$



Photo. 3. Platelike carbides developed in thrust specimen tested at 120°C.



(A~E correspond to the conditions in Table 1.)

Fig. 3. Relation between  $(C_M \times \tau_{st})$  and  $n$  in formation of platelike carbide.

と  $\tau_{st}$  を求めた。しかし一般的には  $C_M$  と  $\tau_{st}$  が高いほど  $n_0$  は減少し、これらの間には相互関係があると考えられる。そこで本実験の Table 1 の結果およびすでに報告した結果<sup>2)</sup> を用いて板状炭化物の生成における  $C_M \cdot \tau_{st} \cdot n$  の関係を検討した。

まず Table 1 において同一条件で製造されたスラスト試験片における  $n_0$  が当該試料の  $L_{10}$  寿命の約 1/3 であるという関係<sup>2)</sup> を用いて Table 1 の各種熱処理条件の試料の  $n_0$  を求める。

つぎに  $C_M$  と  $\tau_{st}$  はともに大きいほど  $n_0$  は減少するのであろうが、 $\tau_{st}$  が大きい場合は  $C_M$  が低くとも板状炭化物は生成するのであろうし、その逆もありうると考えられるので  $(C_M \times \tau_{st})$  と  $n$  の関係を求めることとした。

Fig. 3 に Table 1 とすでに得られている結果とから求めた  $n_0 \sim (C_M \times \tau_{st})$  の相関図を示す。図中の破線は板状炭化物の生成限界線を示すものでこの破線の下側(低  $n$  側)では板状炭化物が生成する可能性がない。Fig. 3 はデータポイントが少なくあまり正確なものとはいえないが、この関係を用いれば  $C_M$  と  $\tau_{st}$  から板状炭化物が生成する大略の限界応力くり返し数  $n_0$  を求めることができる。Table 1 の A~D 条件はすべて板状炭化物の生成条件を満たしている。また、前述のスラスト試験用上部レースと乗用車用軸受における  $C_M \cdot \tau_{st} \cdot n$  の関係も Fig. 3 の破線の上側にあり、ともに板状炭化物の生成条件を満たしている。

なお Fig. 3 において Table 1 の E をプロットしていないのは、E では応力くり返し数に関係なく板状炭化物が生成していないためである。この場合  $(C_M \times \tau_{st})$  は 22.14 となるから Fig. 3 によれば  $6 \times 10^6$  回以上の  $n$  で板状炭化物が生成するはずであるが、 $L_{50}$  寿命である  $2 \times 10^7$  回以上の場合にも生成していない。したがって E で板状炭化物が生成しないのは  $(C_M \times \tau_{st})$  の大小関係よりは前述したように  $C_M$  が低すぎることによると思われる。

#### 4.2 板状炭化物の生成について

板状炭化物はころがり疲れ試験中に生成するものであるから、ころがり接触によつて内部に生ずるせん断応力、あるいは圧縮応力がその生成原因である。また板状炭化物はセメントイトまたは  $\epsilon$  炭化物<sup>3)</sup> であり、その C と N の含有量は基地のそれより多いから、その生成にはころがり接触による C と N の特定の位置への拡散の促進が必要である。したがって上述のいずれかの応力によつて C と N の拡散が促進されることになる。

まずいずれの応力が板状炭化物の生成に関与するかを検討する。

圧縮応力は接触表面で最大であり、内部に向かつて単調に減少するので、もし板状炭化物の生成が圧縮応力と関連があるとすれば表面域ほど多く生成せねばならず、Fig. 1 の実際の板状炭化物の生成位置と一致しない。したがって圧縮応力は板状炭化物の生成とは関連がなく、せん断応力がその生成に関連していると考えられる。

Fig. 1 に示したように 2 種類のせん断応力の応力分布と板状炭化物の生成位置とを対比してみると、 $\tau_{st}$  の応力分布が板状炭化物の生成位置とよく対応していることがわかる。このことから板状炭化物は  $\tau_{st}$  によつて生成すると考えられる。

板状炭化物は  $r_1$  付近の酸化物系介在物間の応力集中

域に生成<sup>2)</sup>する。このような位置では  $\tau_{st}$  と酸化物系介在物への応力集中により局部的なすべり帯が生成し、高転位密度域が形成されるであろう。スラスト試験の場合、応力くり返し速度が 1800 cpm と速いから、断続的に  $r_1$  付近に加えられる  $\tau_{st}$  によつて生ずるひずみエネルギーはそのかなりの部分が断熱的に熱に変換され、これによつて  $r_1$  付近に局部的な温度上昇が起こり、これによつて C と N の拡散が促進されると考えられる。このようにして拡散した C と N が上述の高転位密度域で炭化物として析出し、板状炭化物を形成すると考えられる。なお転動面下に局部的な昇温が起こることは、スラスト試験片に生じた Dark etching constituent の観察において認められている<sup>17)</sup>。

このように板状炭化物は C と N の拡散が盛んであるほど生成しやすいはずであるが、120°C での寿命は常温でのそれより長くなつており、このことは 120°C での板状炭化物の生成が常温の場合より遅れることを示すものと考えられる。この理由は、120°C では C や N のランダムな拡散が盛んになり、転位がこれらによつて固着されるためすべり帯が発達しにくく、酸化物系介在物の間に高転位密度域が形成されにくくなるためであろう。

以上の結果から寿命を改善するには板状炭化物の析出サイトとなる酸化物系介在物を減少させるとともに、軸受として必要なかたさが維持できる範囲で  $C_M$  を減少させた方がよいことがわかつた。

## 5. 結 論

本実験の結果次の結論が得られた。

- 1) 板状炭化物の生成に必要な  $C_M$  は約 0.25% であり  $\tau_c$  は 60 kgf/mm<sup>2</sup> である。
- 2)  $(\tau_{st} \times C_M)$  によつて板状炭化物が生成する限界応力くり返し数が増加する。
- 3) 120°C でスラスト試験を行うと常温の場合より寿命が向上する。このことから考えると C と N の拡散が活発になりすぎるとかえつて板状炭化物が生成しにくく

なるようである。

4) 実用軸受でも本実験で明らかとなつた臨界生成条件を満たしておれば板状炭化物が生成する。

5) 寿命の向上には応力集中源となる酸化物系介在物を減少させるとともに、かたさを維持できる範囲で  $C_M$  を下げた方がよい。

6) 板状炭化物は  $\tau_{st}$  によつて生ずる  $r_1$  付近の局部的な昇温による C と N の拡散の促進と、 $r_1$  付近の酸化物系介在物周辺での C と N の転位による捕捉によつて生成する。

最後に本研究に対し多大の御支援、御指導をいただいた当社副社長上杉年一博士、専務取締役小柳 明博士、技術研究所前所長石原晟好氏、同所長多田 強氏、同次長坂上高志氏、および本研究の遂行に当たり多大の御協力をいただいた方々に厚く感謝いたします。

## 文 献

- 1) 坪田一一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1046
- 2) 坪田一一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2037
- 3) 坪田一一: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 853
- 4) 上野 学, 中島宏興, 池田定雄: 鉄と鋼, 46 (1960), p. 344
- 5) 滝本憲一, 田口 勇, 松本龍太郎: 日本金属学会誌, 40 (1976), p. 834
- 6) 転がり軸受工学 (転がり軸受工学編集委員会編 (代表 上野正弘)) (1978), p. 168 [養賢堂]
- 7) 6): p. 171
- 8) 曾田範宗: 軸受 (1964), p. 164 [岩波書店]
- 9) 門間改三, 丸田良平, 山本俊郎, 脇門恵洋: 日本金属学会誌, 32 (1968), p. 1198
- 10) J.L. CHEVALIER and E.V. ZARETSKY: NASA, TN-D6835 (1972)
- 11) H. MURO and N. TSUSHIMA: Wear, 15 (1970), p. 309
- 12) 8): p. 125
- 13) 6): p. 212
- 14) 8): p. 162
- 15) F.T. BARWELL and D. SCOTT: Engineering, 182 (1956) 6, p. 9
- 16) 新版転位輪—その金属学への応用— (日本金属学会編) (1971), p. 280 [丸善]
- 17) 仕幸三郎, 岡本一生, 渡辺章三: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1353