

# 転がり滑り接触面における初期損傷量と摩耗速度の関係

## Relationship between Initial Damage Amount and Wear Rate on Rolling Sliding Contact

名工大（学）\*光岡 良将 名工大（学）野田 隆悟

名工大（正）糸魚川 文広 名工大（正）前川 寛 名工大（正）劉 曉旭

Ryosuke Mitsuka\*, Ryugo Noda\*, Fumihiro Itoigawa\*, Satoru Maegawa \*, Xiaoxu LIU\*

\*Nagoya Institute of Technology

### 1. 緒言

歯車や転がり軸受などの転がり滑り接触部では、その過酷な接触状態に起因して著しい摩耗やマイクロピッチングなどの疲労損傷が生じることがある。マイクロピッチングの発生メカニズムの一説に、なじみ過程で塑性変形する際に粗さ突起側面へ導入された亀裂が、摩耗の進行に伴い、最表面に露出し、接触を繰り返すことでマイクロピッチングに至るというモデルが提案されている。これらの表面損傷を抑制するために、リン系の極圧添加剤が処方された潤滑油を使用することが多いが、その作用メカニズムの詳細は未だ明らかになっていない。

そこで本研究では、表面粗さオーダのネジ状テクスチャ（モデル粗さ）を有する試験片を対象に、基油にリン系添加剤を添加した潤滑油を用いて転がり滑り試験を実施した。モデル粗さを用いるメリットは、表面損傷の進行にともなう接触状態の変化を粗さ突起毎に異なる接触面圧のランダム性を排除して取り扱うことができる点と突起ごとに変形量を正確に計測できる点である。具体的には、なじみ過程において初期損傷量が摩耗速度に及ぼす影響を、四円筒試験機を用いた転がりすべり試験によって調査した。

### 2. 実験装置および実験方法

Figure 1 に四円筒試験機の概略図を示す。本装置は接触面観察および分析のための試験片脱着が容易に可能である。観察対象である試験ローラは、非破壊分析のための解析装置が有する非検査体サイズ上限に収まりやすくするように直径 10 mm と非常に小さく設計している。また、小径のローラでも試験荷重によるアライメントのずれが生じない四円筒方式を採用している。

実験は Table 1 に示す条件で行った。試験ローラと駆動ローラの平均周速が 3.3 m/s になるように試験ローラの回転数は 6000 rpm、駆動ローラの回転数は 1184 rpm でサーボモータにより制御されている。また、任意のすべりを与えることができ、転がり滑り接触を再現できる。一方、二つの支持ローラは試験ローラに連れまわる純転がり接触である。また、支持ローラは幅 3 mm の溝を切り二股にすることで、試験ローラと支持ローラの接触領域が試験ローラと駆動ローラの接触領域と重ならないようにした。

試験ローラおよび駆動ローラは材質がそれぞれ SCM420, SUJ2 でありロックウェル硬さ HRC で 63, 61 である。駆動ローラの表面はエメリー紙で周方向に研磨して二乗平均平方根粗さ  $R_q$  で約  $0.2 \mu\text{m}$  になるように調整してある。試験ローラには、cBN 切削工具を用いて切削速度 3.3 m/min、送り 0.180 mm/rev 及び 0.089 mm/rev、切り込み量 0.010 mm で旋削加工することで、周期的かつ突起高さのそろったネジ状の加工目を付与した。

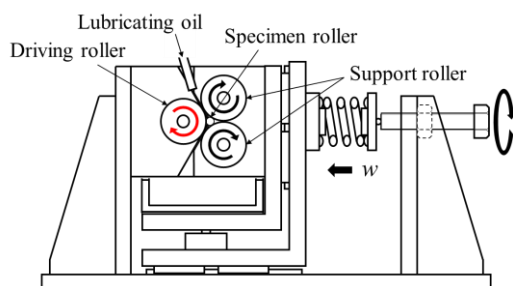


Fig. 1 Four-disk friction tester

Table 1 Experimental conditions

Lubricating oil	ATF	
Feed Speed, mm/rev	0.180	0.089
Minimum oil film thickness, $\mu\text{m}$	0.055	
Film parameter	0.16	
Slide-roll ratio, %	-10	
Load, N	1000	
Oil temperature	80	

### 3. 実験結果および考察

試験ローラと駆動ローラの任意の累計接触回数（以下、繰り返し数）ごとに試験を中断して試験ローラを取り外し、触針式粗さ計を用いた断面曲線の測定、EDS を用いた原子数濃度の測定を実施した。その後巨視的なピッチングが発生し振動が増大するまで試験を行った。Figure 2 に各条件（試験片仕上時の切削送り 0.180 mm/rev, 0.089 mm/rev）における運転期間毎の断面プロファイルを示す。この結果より、いずれも凸部初期形状は初期は尖がっていたものが丸みを帯びた形状へ変化しており、このことから、接触初期に大きな塑性変形により弾性接触が主となる形状へ変化したと考えられる。

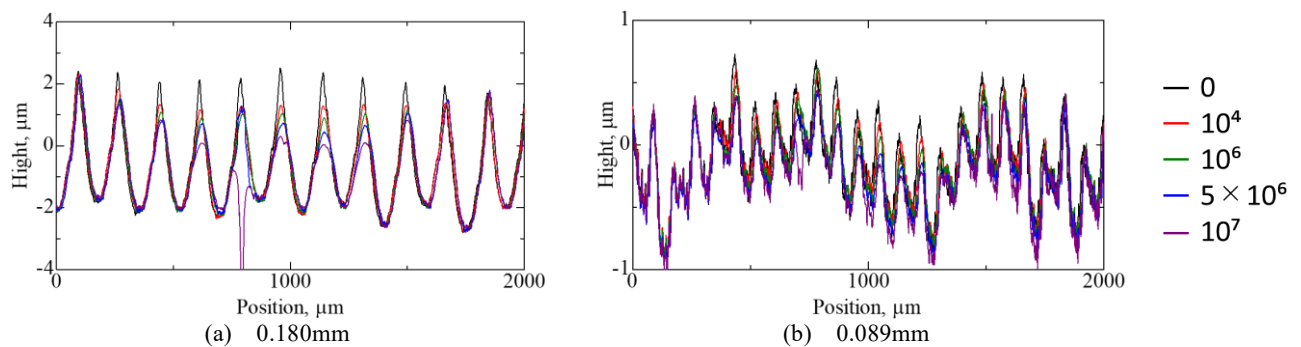


Fig. 2 Cross-sectional profiles

これらの結果から、主に荷重を支えている凸部の平均摩耗速度を次のように算出した。1) Fig. 2 に示した断面プロファイルの連続する運転期間の差分を各凸部について積分し摩耗断面積を得る。2) それを接触長さで除することでその運転期間の摩耗深さを見積る。3) その期間の繰り返し接触回数で除して摩耗速度とする。Figure 3 には横軸に各凸部の  $0 \sim 10^4$  までの平均摩耗深さと、縦軸に上記で算出した各運転期間の摩耗速度をプロットした。横軸は先に述べたように、初期塑性変形量に相当し、突起高さ、表面のうねり、および相手面の形状により決まる初期押し込み深さに相当する。送り 0.180mm の試験片で得られた結果は円形のプロット、送り 0.089mm の試験片は四角形のプロットとした。摩耗速度が減少している運転期間（繰り返し数  $3 \times 10^6$ ）は運転経過に併せて白色、灰色、黒色のプロットで表した。摩耗速度が増加に転じた以降（ $3 \times 10^6$  以降）は運転経過に併せて白色、赤色で表した。

Figure 3 より、摩耗速度が減少する運転期間では、バラツキはあるものの摩耗速度は横軸の塑性変形量（初期押し込み量）に比例している。今、相手面である円弧形状を基準としてとれば、初期押し込み量の大小は相対突起高さ  $h$  である。摩耗速度はこの  $h$  の時間変化とみなせるから、Fig. 3 の摩耗速度が減少する運転期間の摩耗速度は、

$$\frac{dh}{dt} = -kh$$

と表される。初期の突起高さを  $h_0$  とすれば、この微分方程式の解は  $h = h_0 e^{-kt}$  であるから、結局、摩耗速度は  $e^{-kt}$  に常に比例することとなり、Fig. 3 上で時間と共に下方方向に平行移動することとなる。一方、赤色でプロットした運転期間では摩耗速度は横軸の値の小さい側（送り 0.089mm 試験片）で増加が著しい。摩耗速度が増加に転じたタイミングは突起の大きい送り 0.18mm 試験片では凡そ  $1 \times 10^7$ 、突起の小さい送り 0.089mm 試験片では  $3 \times 10^6$  であった。その時の表面を Fig. 4 に示す。いずれも突起幅サイズのマイクロピッチングが観察された。

このことから、今回の運転条件においてはマイクロピッチングが発生するまでは、粗さ突起の大小によらず、また摩耗量の多寡によらず同じ摩耗メカニズムで摩耗は進行したと考えられる。また、マイクロピッチングの発生タイミングは、摩耗量の小さい領域が早く、これは表面下の浅い領域に欠陥が導入され、かつ摩耗速度が小さければ、疲労蓄積深さの変化がなく、早期に表面へ亀裂が現出するという事に相当すると考えられる。

結局、リン系添加剤は接触が厳しいと考えられる粗さ突起部の接触状態を早期に弾性接触に移行させ突起高さの相互差を緩和していると推察される。

#### 4. 結言

本研究では、真実接触部位置が固定でき、変形量が正確に計測できるような切削仕上げモデル粗さ試験ローラを用いて、リン系添加剤処方油による潤滑条件で転がり滑り試験を実施した。同一個所の摩耗の時間経過を詳細に調べた結果、運転初期からマイクロピッチングが発生するタイミングまで、粗さ突起の高さによらず一様な摩耗メカニズムで摩耗が進展したことが分かった。リン系添加剤はこのような摩耗環境を作り出すことに寄与していると考えられる。

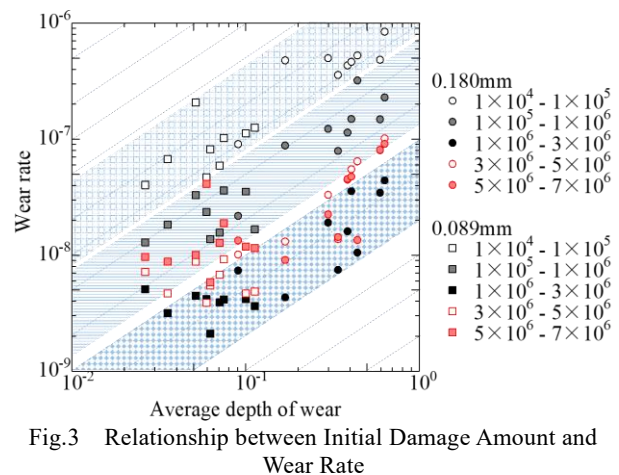
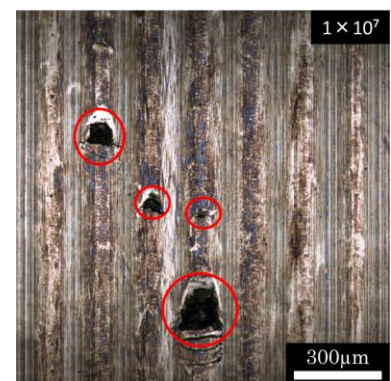
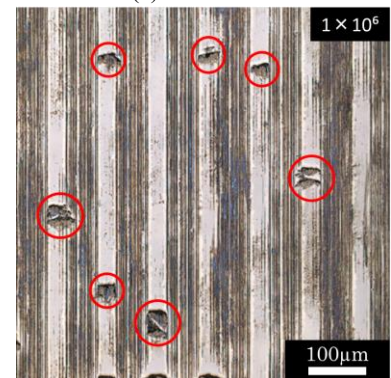


Fig.3 Relationship between Initial Damage Amount and Wear Rate



(a) 0.180mm



(b) 0.089mm

Fig. 4 Observed images with laser microscope