研 究

ポリエチレンローラの表面損傷過程*

木 村 廣 文** 吉 澤 高 志**

Failure Processes in High Density Polyethylene Rollers

Hirobumi KIMURA and Takashi YOSHIZAWA

This paper describes failure processes in plastic rollers that undergo rolling contact, and the effect of initial surface roughness upon wear and rolling fatigue. Experiments were performed with mating cylindrical rollers of high density polyethylene (PE rollers) and chrome-plated cylindrical driving rollers. Surface roughness of the PE roller is affected by three successive transition processes. In the first period, the amount of wear can hardly be measured, although a reduction of surface rough-

ness is noted. During the second period, wear occurs in proportion to the initial surface roughness. In the third period, wear becomes independent of the initial surface roughness, and increases in a manner exponential to load. At the end of this period, small cracks appear randomly, and grow into pits. Roller fatigue life, defined by the time when cracks appear, is shown by an S-N curve. It is found that fatigue limiting stress, represented by Hertz stresses, is about 10^7 Pa.

Key words: high density molecular polyethylene roller, crack, rolling contact, surface roughness, S-N curve, wear.

1. 緒 言

プラスチックは軽量で、自己潤滑性、吸振性などに優れているため、情報処理機器の転がり滑り部品として近年広く用いられている。しかしその摩耗特性や寿命評価法については不明な点が多く、特に純転がり接触における表面損傷の研究はほとんど見当たらず、ナイロンローラの転がり滑り接触における表面損傷についてわずかに研究されているだけである¹⁾²⁾。一方、金属同士の純転がり接触における表面損傷は、表面粗さに依存することが知られており、表面の突起間干渉による塑性変形とピッチング発生に関する研究³⁾や表面粗さの相違による接線力変化と疲れに関する研究⁴⁾等が行われている。また転がり接触に特有の表面近傍の前進塑性流動を損傷と結びつけ、累積する塑性ひずみを微小き裂の発生原因とみなす研究も行われている⁵⁾。しかしながらヤング率が約2けた異なるプラスチックローラと金属ローラとの接触では、接触変形の大部分がプラスチックローラのみが生じており、転がり接触であっても接触面内のマイクロスリップは大きいと考えられる。

本研究では、プラスチックのうち化学的に安定であり、加工が容易で、滑り接触時の耐摩耗性が優れている高密度ポリエチレンを基材としてとりあげ、歯車、転がり軸受、カムなどの主要な運動形態である転がり接触により

生じる転がり疲れに注目した部品の寿命評価法を明らかにすることを狙いとしている。著者らは、転がり接触において金属ローラと組み合わせた高密度ポリエチレンローラに顕著な摩耗が生じ、その摩耗特性に荷重依存性があることを示した⁶⁾。そこで本報告では、各ローラの表面粗さを変えて転がり試験を行い、4つの表面粗さパラメータの遷移に注目した表面損傷過程と転動による疲労特性とを明らかにすることを目的とした。なお、表面粗さパラメータとしては、中心線平均粗さ R_a 、最大粗さ R_{max} 、ピーク間平均長さ S_m 、ひずみ度 R_{Sk} の4種類を用いた。

2. 実験装置と実験方法

図1に実験機の概略を示す。表面粗さの異なる3個のクロムめっきを施したS55C製金属ローラ（以下Mローラと略す）を駆動軸に取り付け、各Mローラには負荷用コイルばねを介して4個の高密度ポリエチレンローラ（以下PEローラと略す）を軸対称に取り付けてある。したがって、12個のPEローラを最大6段階の荷重において同時に実験できる。また、PEローラ保持用アームの回転中心を転がり接触点の接線上に設けることにより、接触部に垂直荷重だけが作用する構造とした。PEローラの保持方法としては、外径50mm、内径36mm、幅25mmの円筒形状をしたPEローラを金属軸に圧入し、PEローラ両端面を側板で圧着固定とした。その際側板の固定により生じる圧縮変形が接触部へ影響しないよう、PEローラ転動面の両端に幅2mm、深さ1mmの段差を設けた。なおMローラの外径を200mmとしたので、

* 原稿受付 昭和55年3月21日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会（昭和54年3月30日）にて発表。

** 正会員 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所（武蔵野市緑町3-9-11）

図1 実験機の概略

表1 実験条件

荷重 (N)	79, 157, 255, 372, 529, 745
PE ローラ回転速度 (rpm)	1560
環境	温度 23~30°C, 湿度 35~75% RH

PE ローラと M ローラの回転数比は 4 対 1 である。

表 1 に実験条件を示す。情報処理機器におけるプラスチックギアやローラの使用条件を考慮して、表面損傷の主要因と考えられる荷重は 79 N から 745 N まで変え、回転速度は 1560 rpm とした。転動時の PE ローラの温度上昇は、荷重 745 N、回転速度 1560 rpm の場合でも約 10°C であり、30°C の室温下でも PE ローラの温度は材料の熱変形温度 85°C よりも十分小さいので、材料特性をほぼ一定とみなした。

転動状態での PE ローラの荷重変位特性とヘルツ理論曲線とを照合させて求めた PE ローラの等価的なヤング率は、およそ $7.5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ であった。PE ローラと M ローラのヤング率が約 2 けた異なるので、接触面内の局所的な変形の大部分は PE ローラ転動面に生じている。この PE ローラ転動面の半径方向に変形する接触変形深さは、荷重 255 N のときでほぼ $8 \mu\text{m}$ 程度である。

PE ローラは、比重 0.95、分子量約 15 万の高密度ポリ

エチレン丸棒材を用いて切削加工したものである。その表面粗さは、接触変形深さを考慮して切削条件を変えて表 2 に示す 5 水準とした。一方、M ローラの表面粗さは、研削用砥石の表面粗さを変えることにより表 2 に示す 3 水準とした。なお、M ローラの表面には防食のためハードクロムめっきを施した。

PE ローラおよび M ローラの表面粗さは、円筒面を 120° ごとに 3 か所、軸方向に走査して測定した。測定には先端幅約 $5 \mu\text{m}$ の四角すい形状のスタイラスを用い、測定荷重は約 10^{-3} N であった。表面粗さパラメータ R_a , R_{max} , S_m , R_{SK} のうち、 S_m は粗さ断面曲線の中心線を正から負または負から正へ横切る間隔の平均値であり、隣り合う突起と突起の平均間隔に相当する値である。また、 R_{SK} は粗さ形状が中心線からどの程度偏っているかを示す値であり、同じ値の R_a に対し正の R_{SK} は断面曲線に鋭い突起が多いことを意味し、負の R_{SK} は鋭い凹みが多いことを意味する。

PE ローラの摩耗量は、転動開始直前と転動停止直後の PE ローラ質量変化から測定した。また、実験環境下に放置した未使用 PE ローラの質量を基準として、ポリエチレンの吸湿による質量変化を補正した。

PE ローラの試料数は、同一実験条件に対して 4 個とした。測定結果は平均値を示し、図には標準偏差も表示した。

3. 結果と考察

3.1 表面粗さの遷移

図 2 には初期表面粗さが M ローラの表面粗さより小さい a 水準 PE ローラの表面粗さの遷移（以下粗さ遷移曲線と呼ぶ）および代表的な表面の断面曲線を示す。転動数 2×10^3 回までの粗さ遷移曲線を見ると、PE ローラの表面粗さ R_a および R_{max} は、M ローラの表面粗さより小さいにもかかわらず、減少している。また、 R_{SK} はゼロ近傍になり、 S_m は増加している。これらのことは、最初鋭かった突起が次第に圧縮され、凹凸がほぼ等しくなってきたことを意味しており、図 2(a) に示す転動数 2×10^3 回での断面曲線にも認められる。転動数を更に増加させると R_a , R_{max} および S_m は少しずつ増加し、 R_{SK} は負となる。この遷移は 10^5 回の断面曲線の例に見られるように、突起の小さくなった PE ローラ表面に新たに鋭い凹みが生じ始めていることを意味している。 6×10^5 回を越えたあたりから R_a は $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$, R_{max} は $3 \sim 4$

表2 供試ローラの表面粗さ

ローラ 表面粗さ	PE ローラ					M ローラ		
	a	b	c	d	e	M-1	M-2	M-3
$R_a (\mu\text{m})$	0.293	0.600	1.70	3.71	5.50	0.134	0.272	1.07
$R_{\text{max}} (\mu\text{m})$	1.96	3.15	8.44	13.9	19.2	1.48	1.83	7.00
$S_m (\mu\text{m})$	47.0	53.2	92.6	198	248	147	132	143
R_{SK}	0.52	0.29	-0.72	0.52	0.40	-1.0	-0.22	0.26

μm の値となる。また、 R_{SK} は正負に変動した後再び正となり、 S_m は増大している。これらのことは、PE ローラ表面に一旦生じた鋭い凹みが再び次第に鋭い突起状態に変化し、その突起間隔は長くなっていることを意味している。この時期のPE ローラ表面には、 1.4×10^7 回の断面曲線の例に見られるように、初期の断面曲線とはまったく異なる剝離によって生じたと考えられる比較的鋭い突起が認められる。

次に初期表面粗さがMローラの表面粗さより大きいd水準PEローラの粗さ遷移曲線と代表的な断面曲線を図3に示す。表面粗さ R_a と R_{max} は 2×10^3 回を過ぎててもまだ減少し続け、 R_{SK} は 10^4 から 5×10^4 回の間でゼロとなる。また、 S_m は変化していない。これらのことは、図3(a)の 2×10^3 回での断面曲線に見られるように、比較的鋭い突起が次第に圧縮されて凹凸が等しい形状になってきたことを意味している。転動数が 5×10^4 回を過ぎたあたりから R_a と R_{max} の変化は小さくなり、 R_{SK} は負となる。また、 S_m は変化しない。これらのことは、凸部分が次第に平らになり、凹部分が鋭くなってきたことを意味しており、 2×10^5 回の断面曲線にも認められる。転動数が 7×10^5 回を過ぎたあたりから R_a は $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 、 R_{max} は $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の値へ漸近する。また、 R_{SK} はゼロ近傍で変動したのち正となり、 S_m は 2×10^6 回を越えたあたりから減少し始める。これらのことは、 1.4×10^7 回の断面曲線の例に見られるように、規則的な凹凸が消滅して比較的鋭い突起が多くなったことを意味している。

図4はPEローラとMローラの表面粗さが、粗さ遷移曲線に及ぼす影響を R_{max} を例にとって示したものである。粗さ遷移曲線は、 10^7 回前後の転動数でPEローラの初期表面粗さに無関係に $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の大きさに収束し、その後再び拡散の傾向を示す。また、この大きさはMローラの表面粗さとは対応していない。一方、Mローラの表面粗さを大きくすると粗さ遷移曲線の変化も大きくなる。

以上述べたPEローラの表面粗さの遷移過程をまとめると、初めに表面の凹凸が一様に圧縮される過程(I期)、次に表面粗さの小さくなった表面に比較的鋭い凹みが部分的に生じる過程(II期)、最後にPEローラとMローラの表面粗さに無関係に、比較的鋭い突起がほぼ一定の大

(a) 断面曲線

(b) 粗さ遷移曲線

A: 初期値

図2 a水準PEローラの表面粗さの遷移

(a) 断面曲線

(b) 粗さ遷移曲線

A: 初期値

図3 d水準PEローラの表面粗さの遷移

図4 表面粗さ $R_{\max}$ の遷移曲線

きさで生じる過程(III期)に分割できる。このような表面粗さの遷移過程は他の水準のPEローラにも認められた。

図5に各PEローラの初期表面粗さに対するI期からII期へ移る前期遷移転動数とII期からIII期へ移る後期遷移転動数をまとめて示す。図から前期遷移転動数の対数はPEローラの初期表面粗さにほぼ比例している。また、遷移時点での表面粗さの減少量は、初期表面粗さに正比例していた。すなわち、初期表面粗さの小さいPEローラほど表面粗さの減少量が小さく、突起押込みによると考えられる凹みは少ない転動数で生じやすい。一方、後期遷移転動数は、PEローラの初期表面粗さに依存せず、ほぼ一定である。

3.2 摩耗と表面粗さの関係

図6にM-3ローラと組み合わせたaからe水準PEローラの摩耗進行曲線を示す。0.1mgの摩耗が生じる転動数は、表面粗さの一番小さいa水準PEローラの場合に最も少なく、約 10^4 回である。その転動数は表面粗さが大きくなるに従い増加する。このことは粗さ遷移曲線の前期遷移転動数が、初期表面粗さに依存していることと対応している。一方、摩耗進行曲線の傾きが変わる転動数は 7×10^5 回前後であり、後期遷移転動数に対応している。したがって、転動数 7×10^5 回以前の摩耗進行曲線は粗さ遷移曲線のII期に、この転動数以後の摩耗進行曲線はIII期に対応している。

図6を見るとII期及びIII期におけるPEローラの摩耗量 w と転動数 N の関係は $w \propto N^\alpha$ で表されることが分かる。このことから、摩耗の速さを示す測度として α を用いることが妥当である。そこで以下ではこれを摩耗速度と呼び、その大きさについて述べる。II期の摩耗速度 α_{II} はa水準の場合0.34であり、表面粗さが大きくなるに従って α_{II} も大きくなってe水準の場合では2.1とな

図5 初期表面粗さと遷移転動数の関係

図6 摩耗進行曲線

る。一方、III期の摩耗速度 α_{III} はa水準の場合0.58となり、e水準の場合でも0.70である。そこで摩耗量 α とPEローラの初期表面粗さ R_{a0} の関係は、図7に示すように、II期においては $\alpha_{II} \propto R_{a0}^{0.6}$ であり、III期においては $\alpha_{III} \propto R_{a0}^{0.04}$ である。すなわち、II期の摩耗速度はPEローラの初期表面粗さに依存し、一方、III期の摩耗速度はほとんど依存していないことが分かる。図8にIIとIII期に生じた代表的な摩耗粉を示す。II期で生じた摩耗粉は細かい鱗片状であり、飛散しやすい。一方、III期での摩耗粉は薄いフィルム状であり、塊になってMローラ表面に付着している。

次にMローラとPEローラの表面粗さが摩耗進行曲線に及ぼす影響を図9と図10に示す。a水準PEローラの場合、図9に示すようにMローラの表面粗さが大きくなるほど摩耗が発生する転動数は小さくなる。また、摩耗速度はII期ではMローラの表面粗さを変えてもほ

図7 初期表面粗さと摩耗速度の関係

II期に生じた摩耗粉

III期に生じた摩耗粉

図8 摩 耗 粉

ほぼ同じであるが、III期では一定の関係にない。図10に示すd水準の場合も同様の関係にある。

一方、PEローラに加える荷重を変えてもII期とIII期の摩耗速度は各々ほぼ一定の値であった。そこで、III期における荷重 F と摩耗量 w の関係を求めると、図11に示すごとく $w \propto 10^{0.05F}$ の関係で示される。

以上のことから、I期において生じたPEローラ表面粗さの減少を圧縮塑性変形とみなした。II期においては、PEローラとMローラの弾性率の大きな相違によって接触部に生じたマイクロスリップとこれを防げる方向の接線力との大きさが、PEローラ表面粗さの大きさによって異なるために、摩耗速度および鱗片状摩耗粉の発生開始回転数は、PEローラ表面粗さの影響を受けたものとする。また、Mローラの表面粗さに対して、摩耗速度が変わらずに摩耗量だけ変わるの、1回当たりの

図9 a水準PEローラの摩耗進行曲線

図10 d水準PEローラの摩耗進行曲線

図11 摩耗の荷重依存性

接触でPEローラ表面から剝離される量が異なるためであろう。このことは、図4に示すようにMローラの表面粗さが大きいほど、粗さ遷移曲線の変化が大きになっていることから推測される。最後に、III期において

図12 PEローラ表面に生じたき裂の一例

図13 高密度ポリエチレンローラの疲労曲線

は、マイクロスリップおよびこれを防げる方向の接線力が、表面粗さの効果を無視できる大ききでPEローラ表面に作用したものと考える。

3.3 き裂の発生

III期の最後において、表面粗さが一旦ほぼ一定の値に収束する傾向を示したのちに大きく変化したPEローラ表面には、金属ローラや歯車で観察されるピッチングに似たき裂を生じている。図12にa水準PEローラで生じた割れの一例を示す。図の中央に馬蹄形状をした黒く見える部分は、ねじれた剝離片である。き裂の大きさは数十 μm から数百 μm 、深さは数 μm から数十 μm のもまであり、き裂の方向はおおよそ回転方向と同じである。き裂の発生する転動数は表面粗さに依存せず、荷重の大きさに依存している。したがって、き裂の発生は、繰返し応力を加えられたことによる材料固有の疲労破壊とみなせる。そこで、図13に最大接触応力とき裂の発生する転動数との関係、すなわち疲労曲線を示す。図からPEローラの疲労限度は約 10^7 Paである。

4. 結 言

PEローラとMローラの組合せで転がり試験を行い、

以下の点を明らかにした。

- (1) PEローラの表面損傷過程は、4つの表面粗さパラメータ ($R_a, R_{\max}, S_m, R_{SK}$) の遷移曲線と摩耗進行曲線に注目すると、PEローラとMローラとの各表面粗さの大小に関係なく圧縮塑性変形を生じる過程(I期)、次に各ローラの表面粗さに依存した摩耗を伴って、表面粗さの凸部が平らになり比較的鋭い凹みが生じる過程(II期)、最後に初期表面粗さに依存せず、荷重に依存した摩耗を伴って、一定の大ききの表面粗さに収束する傾向を示した後、き裂が発生する過程(III期)に分割できる。
- (2) 転がり接触によりPEローラに生じる摩耗量 w は、転動数 N に対し $w \propto N^\alpha$ の関係で表される。この α を摩耗速度と呼ぶ。II期における摩耗には、PEローラの初期表面粗さを小さくすると摩耗速度は小さくなり、少ない転動数から摩耗し始める特徴がある。また、Mローラの表面粗さを変えても摩耗速度はほとんど変化しない。III期において、PEローラの初期表面粗さを変えても摩耗速度および摩耗量に著しい変化は認められない。また、Mローラの表面粗さを変えても摩耗速度に一定の関係は認められない。一方、摩耗量の対数は接触荷重に比例している。
- (3) き裂の発生する転動数は、PEローラとMローラ双方の表面粗さに依存せず、接触部に加わる応力に依存し、その関係を疲労曲線として表せる。転がり接触におけるPEローラの疲労限度は、ヘルツの最大接触応力で表すと約 10^7 Paであった。

最後に、本研究の遂行にあたり、終始御指導いただいた電電公社武蔵野電気通信研究所電子装置研究部ファイル記憶研究室・伊藤前室長、小野室長、その他関係各位に深く感謝いたします。

文 献

- 1) M. Clerico: A Study of the Friction and Wear of Nylon against Metal, *Wear*, 13, (1969) 183.
- 2) 武士侯貞助, 正村修身, 岩井 実: ナイロン6の転がり滑り摩耗に関する研究, *潤滑*, 2, 5 (1976) 317.
- 3) 市丸和徳, 中島 晃, 平野富士夫: 表面あらさの突起間干渉による転がり疲れ機構について, *潤滑*, 22, 10 (1977) 655.
- 4) 曾田範宗, 山本隆司: 歯車のピッチング発生における接線力の役割, *潤滑*, 20, 4 (1975) 268.
- 5) J. E. Merwin & K. L. Johnson: An Analysis of Plastic Deformation in Rolling Contact, *Proc. Mech. Engrs.*, 177, 25, (1963) 676.
- 6) 小野京石, 木村廣文, 吉沢高志: プラスチックローラにおける摩耗損傷の検討, 昭和53年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1978) 443.