転がり疲れに及ぼす粗さ組合せとなじみの影響* (軸方向研削された鋼ローラの場合)

中 島 晃*¹, 馬 渡 俊 文*¹

Effects of Combination of Surface Roughness and Running-in on Rolling Contact Fatigue (In the Case of Axially Ground Steel Rollers)

Akira NAKAJIMA and Toshifumi MAWATARI

Using axially ground steel rollers with a hardness of about 320 H_v or 440 H_v , the authors examined the effect of roughness combination of two mating surfaces on the occurrence of pitting in the case of almost the same hardness combination. As a result, it was shown clearly that pitting is apt to occur on the smoother surface but is restrained on the rougher mating surface when two rollers with a large difference in roughness are combined under pure rolling conditions. Consequently, the pitting life is generally short when the faster roller is rough and the slower roller is smooth, while the life is extremely long when the roughness combination is reversed in rolling with sliding conditions. On the other hand, when two surfaces are equally rough, the roughness has a tendency to diminish on both sides and the pitting life is prolonged in pure rolling conditions. In rolling with sliding conditions, however, pitting occurs at an earlier stage of operation corresponding to the severity of asperity interactions. This is in contrast with the case of cylindrically ground rollers.

Key Words: Machine Element, Gear, Lubrication, Surface Roughness, Running-in, Pitting, Rolling Contact Fatigue, Two Roller Test, Grinding

1. 緒 言

転がり疲れの発生が、相対する2面の表面粗さと油膜厚さの大小関係を示すDawsonのD値⁽¹⁾やTallianの膜厚比 Λ ⁽²⁾に依存することはよく知られているが、歯車材のピッチングに対しては、初期粗さのみならず運転に伴うその変化、すなわちなじみの影響も極めて重要な因子である。例えば、相対する面に硬さ差があれば高硬さ側の表面粗さが支配的役割を果たすこと、同一硬さであれば2面のなじみが同時に進行するので、低硬度材においては運転前の粗さがかなりあっても負荷能力が高いこと⁽³⁾、しかし材質が硬くなるに従ってなじみにくくなり、初期粗さの影響が大きくなること⁽⁴⁾などが明らかにされている。また、先に報告したようにS45C調質材およびSCM440焼入れ焼戻し材の2円筒を用いた著者らの実験において、同一硬さの組合せであっても2面の粗さが異なる場合に、ピッチング発生状況に明らかな差異の生じることが見出されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、同様な結果は、 $R_{max}=1\mu m$ と $10\mu m$ の中硬度材(SCM435)同士を組合せた有浦らのローラ実験でも得られている⁽⁷⁾。ただし、これ

らはいずれも周方向に加工目をもつ通常の円筒研削面につき得られた知見であり、加工法などにより表面粗さ特性が異なる他の仕上げ面についても検討する必要がある。特に歯車歯面においては、加工目が接触線の移動方向と交差する方向につけられているのが一般的である。そこで本研究では軸方向に研削された鋼ローラを用い、同一硬さ対における接触面なじみと転

図1 試験機の主要部

* 原稿受付 平成4年10月13日。

*¹ 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

がり疲れ発生に及ぼす2面の粗さ組合せの影響を、純転がり条件下および転がり-滑り条件下で調べた。

2. 実験方法

2.1 試験機および試験円筒 図1に用いた中心距離60mmの2円筒転がり-滑り試験機の主要部を示す。純転がり接触(実験A, B)では、被動軸の継手をはずしてF円筒をD円筒によって摩擦駆動し、転

がり-滑り接触(実験C, D)では、両円筒を歯数比27/29の歯車で強制駆動し、F円筒側に $s=-7.4\%$ の滑りを与えた。回転速度はD円筒側で 3583 ± 10 rpm、荷重はコイルばねによりかけられる。試験円筒の外径はともに60mm、有効接触幅が10mmの線接触をなす。接触面である外周面は、工具研削盤でカップ形砥石を用いた軸方向研削により周方向粗さが $R_{\max}=3\sim8\mu\text{m}$ といくぶん粗くなるように仕上げたほか、円

表1 主な実験の概要と結果

Exp. No.		Hardness Hv	Roughness $R_{\max}, \mu\text{m}$		Hertz stress P_H, GPa	Slip ratio $s, \%$	Coeffi. of friction f	$h_{\min}, \mu\text{m}$ (45°C)	ΔH_v	Number of cycles $N, \times 10^4$	Weight loss g	Number of pits L: $\phi 3.0$ M: $\phi 2.0\sim 3.0$ S: $\phi 0.5\sim 2.0$
			Before	After								
A-1	D	322	5.0	4.0	1.2	~ 0.0	~ 0.004	1.33 (1.38)	21 46	2000	0.00 0.02	D: 0 F: M1, S5
	F	323	0.2	0.2								
A-2	D	316	7.0	0.5	1.3	~ 0.0	~ 0.003	1.17 (1.35)	17 17	2000	0.00 0.02	D: 0 F: 0
	F	321	7.0	4.0								
A-3	D	330	5.0	2.0	1.4	~ 0.0	~ 0.003	1.03 (1.33)	0 35	71	0.02 0.14	D: 0 F: L3, S many
	F	327	0.2	0.2								
A-4	D	318	5.0	3.0	1.4	~ 0.0	~ 0.003	1.07 (1.33)	6 20	89	0.01 0.14	D: M1 F: L4, S many
	F	308	5.0	0.2								
B-1	D	456	0.2	0.2	1.4	~ 0.0	~ 0.003	1.01 (1.33)	13 11	191	0.04 0.03	D: S2, micro pitting F: M1, S2
	F	452	5.0	0.5								
B-2	D	447	7.0	3.0	1.4	~ 0.0	~ 0.003	1.07 (1.33)	19 19	1100	0.01 0.10	D: 0 F: L2, S2
	F	442	5.0	2.0								
B-3	D	441	3.0	2.5	1.5	~ 0.0	~ 0.003	1.08 (1.30)	3 10	1870	0.01 0.03	D: S1 F: M2, S5
	F	446	0.2	0.1								
B-4	D	434	5.0	3.0	1.6	~ 0.0	~ 0.001	0.97 (1.28)	18 11	66	0.01 0.14	D: S2 F: L1, S8
	F	436	5.0	2.0								
C-1	D	322	5.0	3.0	1.0	-7.4	0.044 ~ 0.033	0.75 (1.41)	22 85	2000	0.00 0.03	D: 0 F: M2, S5
	F	323	0.2	0.3								
C-2	D	326	0.2	0.3	1.0	-7.4	0.046 ~ 0.034	0.73 (1.41)	120 7	2000	0.00 0.00	D: 0 F: 0
	F	323	5.0	3.0								
C-3	D	332	8.0	4.0	1.2	-7.4	0.050 ~ 0.038	0.67 (1.35)	18 73	39	0.01 0.11	D: 0 F: L2, M1, S many
	F	327	0.2	1.0								
C-4	D	325	0.2	0.5	1.2	-7.4	0.047 ~ 0.043	0.64 (1.35)	78 11	267	0.02 0.11	D: 0 F: L3, M1
	F	323	4.0	3.0								
C-5	D	331	3.0	2.5	1.2	-7.4	0.043 ~ 0.034	0.78 (1.35)	12 19	61	0.02 0.09	D: 0 F: M7, S many
	F	333	3.0	1.0								
D-1	D	445	3.0	2.0	1.2	-7.4	0.048 ~ 0.041	0.77 (1.35)	15 95	1918	0.04 0.06	D: 0 F: M2, S many
	F	441	0.2	0.5								
D-2	D	444	5.0	4.0	1.2	-7.4	0.049 ~ 0.046	0.65 (1.35)	11 61	37	0.01 0.21	D: 0 F: M many
	F	441	0.2	0.5								
D-3	D	436	0.2	1.0	1.2	-7.4	0.052 ~ 0.044	0.71 (1.35)	135 10	1331	0.00 0.21	D: 0 F: M3, S many
	F	441	5.0	8.0								
D-4	D	447	3.0	2.0	1.2	-7.4	0.045 ~ 0.044	0.73 (1.35)	7 1	24	0.01 0.04	D: 0 F: S many
	F	443	3.0	2.0								
D-5	D	453	5.0	4.0	1.4	-7.4	0.051 ~ 0.048	0.51 (1.29)	53 67	7	0.00 0.07	D: 0 F: M2, S many
	F	458	0.2	0.5								
D-6	D	450	0.2	0.5	1.4	-7.4	0.052 ~ 0.046	0.53 (1.29)	78 59	161	0.00 0.04	D: 0 F: L1, M3, S3
	F	450	5.0	2.0								
D-7	D	442	5.0	4.0	1.4	-7.4	0.048 ~ 0.047	0.53 (1.29)	2 13	6	0.01 0.12	D: 0 F: M many
	F	443	5.0	3.0

図 2 代表的損傷例

筒研削盤による精密研削により軸方向粗さが $R_{\max} = 0.2 \mu\text{m}$ 程度の平滑な面にも仕上げた。円筒材料としては、S 45 C 調質材 ($Hv \approx 320$) または SCM 440 焼入れ焼戻し材 ($Hv \approx 440$) を用いた。

2・2 実験条件 行った主な実験の概要を表 1 にまとめて示してある。実験 A, C は S 45 C 調質材同士、実験 B, D は SCM 440 焼入れ焼戻し材同士の実験であり、それぞれ粗面同士あるいは粗面と平滑面を組合せ、純転がり条件下および転がり-滑り条件下で転がり疲れ試験を行った。表面硬さは表 1 に示すように多少ばらついているけれども、D, F 円筒対はなるべく硬さの近いものを選んで組合せた。

加えたヘルツ最大接触応力 P_H は $1.0 \sim 1.6 \text{ GPa}$ と全般に高負荷な条件を設定した。潤滑油には極圧剤無添加のギヤ油 (粘度 313 K : $66.3 \text{ mm}^2/\text{s}$, 373 K : $8.9 \text{ mm}^2/\text{s}$, 比重 288 K : 0.877) を用い、油温 318 K, 油量 $15 \text{ cm}^3/\text{s}$ の割合で接触部入口側に強制給油した。表 1 に示す理論 EHL 膜厚 $h_{\min}$ は実験中測定した円筒表面温度における粘度を用い計算したものであり、参考までに給油温度 318 K (45°C) に対しての値を () 内に示しているが、いずれにせよ今回の実験における 2 面の初期粗さの和 $\Sigma R_{\max}$ は理論膜厚 $h_{\min}$ よりかなり大きく、少なくとも運転初期には厳しい突起間干渉が繰返される条件となっている。

3. 実験結果と考察

3・1 ピッチング発生状況 表 1 に示す繰返し数 N は、異常振動検出器が作動し試験機が自動停止するまでのピッチング発生側円筒の総回転数であり、自動停止に至らない場合には $N = 2 \times 10^7$ 回で運転を打ち切った。表 1 に発生したピットの数を 3 mm 以上の大ピット L , $2 \sim 3 \text{ mm}$ の中ピット M , $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ の小ピット S に分けて示すとともに、図 2 に代表的損傷例が見られる運転後 F 円筒接触面の写真をいくつか示す。今回の軸方向研削ローラを用いた実験では、まず接触面のあちこちに散在して発生する大小さまざまなピットとともに、実験 A-4 や実験 B-2 に見られるような接触面両端部近くに集中する小〜微小ピットが

図 3 接触面の軸方向断面曲線 (運転後)

特に純転がり条件の実験において特徴的であった。周方向に加工目をもつ円筒研削面 (周方向研削ローラ) の実験⁽⁵⁾⁽⁶⁾ においては、このような現象は顕著には現れておらず、軸方向加工目における潤滑油の側方もれにより接触面端部の接触状態が過酷になったことに起因するのではないかと推察される。

図 3 には接触面の運転後の軸方向断面曲線を示すが、S 45 C 調質材の実験 A-4 では両端部が引込み、相対的に接触面が中高となるような変形を見せているが、SCM 440 焼入れ焼戻し材とさらに硬い実験 B-2 では、端面近くがえぐられたように摩耗しており、接触状態が厳しかったことがうかがえる。

純転がり接触の実験 A, 実験 B において、まず粗面同士の組合せの場合、非常に高負荷であり $5 \mu\text{m}$ 同士の実験 A-4 ($P_H = 1.4 \text{ GPa}$) や実験 B-4 ($P_H = 1.6 \text{ GPa}$) では早期にピッチングが発生したが、ヘルツ応力が 1.3 GPa とやや低い実験 A-2 ($7 \mu\text{m}$ 同士) では $N = 2 \times 10^7$ 回までピットの発生は全くなき、 1.4 GPa の実験 B-2 ($7 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$) では寿命が $N = 1.1 \times 10^7$ とかなり長かった。これに対し、粗面と平滑面の組合せの場合、ヘルツ応力が 1.2 GPa とやや低い実験 A-1 ($5 \mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$) では、 $N = 2 \times 10^7$ 回まで運転できたものの滑らかな F 円筒面にピットが発生しており、 1.4 GPa の実験 A-3 ($5 \mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$) や実験 B-1 ($0.2 \mu\text{m}/5 \mu\text{m}$) では早

期に平滑面側にピットが発生し寿命に達した。

滑り率 $s = -7.4\%$ の転がり-滑りの実験 C, 実験 D において発生したピットはすべて低速側の F 円筒面であった。まず, $3\mu\text{m}$ 同士で 1.2GPa の実験 C-5 や実験 D-4, $5\mu\text{m}$ 同士で 1.4GPa の実験 D-7 のピッチング寿命はいずれも極めて短く, 周方向 (滑り方向) に加工目をもつ円筒研削面と比較し, 滑り方向と加工目方向が直交する軸方向研削面では相対滑りによる突起間干渉状態が厳しくなること⁽⁸⁾⁽⁹⁾ を如実に示している。次に, 2面の粗さが大きく異なる粗面と平滑面の組合せでは, 滑らかなほうの面を高速側にもってくるか低速側にもってくるかでピッチング寿命に著しい差が生じている。すなわち, 実験 C-3 と C-4, 実験 D-2 と D-3, 実験 D-5 と D-6 などと比較してわかるように, 高速側の面が粗く低速側の面が滑らかな場合には早期にピッチングが発生しやすく, 逆に高速側の面が滑らかで低速側の面が粗い場合にはその発生が抑制されかなり長寿命となっている。ヘルツ応力が 1.0GPa と今回の実験中最も低い実験 C-1 ($5\mu\text{m}/0.2\mu\text{m}$) と実験 C-2 ($0.2\mu\text{m}/5\mu\text{m}$) では, どちらも自動停止には至らず $N=2\times 10^7$ 回までの運転ができていたけれども, 平滑面を高速側とした後者の実験でピットの発生がまったくなかったのに対し, 組合せを逆にした前者の実験では低速側の平滑面に中～小サイズのピットが数個発生している。

3.2 表面性状の変化

表 1 に運転による D, F 円筒表面の硬さ上昇値 ΔHv を示している。表面硬さの測定にはピッカース微小硬さ試験機を用い, 試験荷重 4.9N で接触面を軸方向に 19 点測り, その平均値で比較した。まず, 転がり-滑りの実験 C, D において, 2面の粗さが大きく異なる場合に, 高速側か低速側かに関係なく滑らかなほうの面の加工硬化が著しく, 粗いほうの面の硬さ上昇の小さいのが注目される。粗面同士の実験では, 運転時間が極めて短いことにもよると思われるが双方の面における硬さ上昇はわずかである。純転がりの実験 A, B における表面の加工硬化は, 転がり-滑りの実験の場合ほど顕著ではないが, 例えば粗面同士の実験 A-2 や実験 B-2 での硬さ上昇 ΔHv が 17~19 程度にとどまっているのに対し, 粗面と平滑面を組合せた実験 A-1 や実験 A-3 などでは平滑面側の硬さ上昇がそれぞれ 46, 35 でやはり粗面側の値を上回っている。

図 4 に円筒接触面の運転前後の周方向断面曲線を示しているが, いずれも運転によってかなりなじみ (突起の変形) が進行しているのがわかる。特に実験 B-2 (純転がり条件) や実験 D-4 (転がり-滑り条件) は粗面同士の組合せであるが, D, F 両面の粗さ突起がともに鈍化し, 運転後の突起先端部は平滑化が進んでいる。一方, 粗面と平滑面の組合せにおいては, 転がり-滑り条件の実験 C-2 や実験 D-5 の例に見られるよう

図 4 接触面の周方向断面曲線

図 5 接触面の 3 次元プロフィール

に、粗面側突起先端部は相手面との接触によりいくぶん丸みをおびてきているが、その変化は比較的小さく谷の部分はまだ十分に残った状態となっている。

図 5 に D, F 円筒接触面の 3 次元プロフィールを示している。接触面中央部の幅方向（軸方向）に 3 mm、回転方向（周方向）に 1.5 mm の長方形区画内を測定したものである。2 面が同程度になじんでいる実験 B-2 に対し、実験 C-2 や実験 D-5 のような粗面と平滑面の接触においては、粗面側での接触は突起先端部に限られ、相手面が滑らかであるので相手突起によるミクロな塑性変形の繰返しは少ないと思われる。他方、平滑面側では、粗い相手面突起の押込みによる塑性変形がまんべんなく繰返されることになる。このことが、滑らかなほうの面において加工硬化が著しくかつピッチングが発生しやすい理由だと考えられる。

3.3 摩擦係数の変化と油膜形成状態 2 円筒間の摩擦係数は、駆動軸のねじりモーメントをひずみゲージにより検出し求めた。転がり-滑りの実験において、摩擦係数は運転開始直後に高く、なじみの進行とともに徐々に低下し、 $N=2 \times 10^5$ 回付近ではほぼ落ち着く傾向にあったが、表 1 に各実験における代表値（最高値～定常値）を記すとともに、その変化のようす

図 6 摩擦係数の変化

を示す代表例を図 6 に示した。運転初期において摩擦係数の値が高い実験 C-3、実験 C-4 は、D/F 2 面の初期粗さがそれぞれ $8 \mu\text{m}/0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}/4 \mu\text{m}$ の場合であり、 $3 \mu\text{m}$ 同士の試験 C-5 が比較的低い値を示すなど、2 面の粗さが大きく異なるときの摩擦係数が、粗面同士の組合せの場合より概して高い値となっている。なお、先に報告した周方向研削ローラの場合⁽⁵⁾⁽⁶⁾においても同様な傾向が見られたが、軸方向研削ロー

図 7 2円筒間平均電圧の変化
(0 mV: 接触, 15 mV: 完全分離)

ラのほうの摩擦係数が全般的に低い値を示している。

図 6 は接触面における油膜形成状態を電気抵抗法によって測定した例である。測定回路は以前と同じであり⁽⁶⁾、2円筒間平均電圧 $E_{ab}=15$ mV が油膜による完全分離、0 mV が金属接触を示す。いずれもなじみの進行により次第に油膜が形成され、電圧も徐々に上昇しているが、純転がり条件で同じヘルツ応力の実験 B-1 ($0.2\text{ }\mu\text{m}/5\text{ }\mu\text{m}$) と実験 B-2 ($7\text{ }\mu\text{m}/5\text{ }\mu\text{m}$) を比較すれば、前者の立上りがかなり遅い。転がり-滑りの実験においては、純転がりの場合に比べ全般的になじみの進行が早く、しかも粗面同士の実験 D-4 ($3\text{ }\mu\text{m}$ 同士) より平滑面/粗面の実験 D-3 ($0.2\text{ }\mu\text{m}/5\text{ }\mu\text{m}$) のほうの電圧上昇が著しいが、一方、高速側と低速側の粗さ組合せが逆の実験 D-2 ($5\text{ }\mu\text{m}/0.2\text{ }\mu\text{m}$) では、油膜形成状態は悪く、早期にピッチング寿命に達したのに対応づ

けられる。

4. 結 言

軸方向研削加工された S45C 調質材および SCM440 焼入れ焼戻し材のローラ (2円筒) を、同種材同士で純転がりまたは転がり-滑り接触させ、転がり疲れ発生に及ぼす 2面の粗さ組合せとなじみの影響を検討した。得られた知見は以下のである。

(1) 2面の粗さが大きく異なる場合、純転がり条件下ではピッチングは平滑側面に集中しやすい。転がり-滑り条件下ではピッチングが発生しやすい平滑面を高速側に、粗面を低速側に配置すればその発生が抑制され、逆に平滑面を低速側に、粗面を高速側に配置すれば促進される。

(2) 粗面同士の場合、純転がり条件下では割合長寿命であったけれども、転がり-滑り条件下では極めて早期にピッチングが発生し、周方向研削ローラの場合と大きく異なる。

(3) 軸方向研削加工面では、接触面両端部付近に集中して発生する微小ピットが特に純転がり接触の場合に顕著であり、潤滑油の側方もれによる影響が考えられる。

(4) S45C 調質材に比較し、SCM440 焼入れ焼戻し材は硬くなじみにくいため、粗さ組合せの影響はより顕著に現れた。

(5) 粗さ組合せによる接触面のなじみと突起間のミクロな接触状態の違いは、表面の加工硬化、油膜形成状態や摩擦係数にも差異を生じさせることが確認された。

文 献

- (1) Dawson, P. H., *J. Mech. Eng. Sci.*, 4-1 (1962), 16.
- (2) Tallian, T. E., *ASLE Trans.*, 10-4 (1967), 418.
- (3) 石橋・横手, 機論, 35-277 (1969), 1929.
- (4) 上野・ほか 3 名, 機論, 45-394, C (1979), 718.
- (5) 中島, 機論, 54-499, C (1988), 679.
- (6) 中島・角田, 機論, 57-541, C (1991), 3002.
- (7) 有浦・ほか 2 名, 機論, 55-512, C (1989), 1004.
- (8) 中島・ほか 2 名, 潤滑, 22-4 (1977), 255.
- (9) Ichimaru, K., Nakajima, A. and Hirano, F., *Trans. ASME, J. of Mech. Design*, 103-2 (1981), 482.