リップリング損傷と潤滑油について*

野原 稔^{*1}, 永村 和照^{*2}
池条 清隆^{*2}, 松尾 浩平^{*3}

Effect of Lubricating Oil on Prevention of Rippling Failure

Minoru NOHARA^{*4}, Kazuteru NAGAMURA,
Kiyotaka IKEJO and Kouhei MATSUO^{**} Department of Mechanical Engineering, Kure National College of Technology,
2-2-11 Agaminami, Kure-shi Hiroshima, 737-8506 Japan

Rippling failure occurring on rollers and gears is well known as one of the phenomena resulting from plastic flow of the surface layer caused by repeated sliding-rolling contact. We have already reported some experimental results on the rippling failure. The rippling failure is closely related to lubricant. In this paper, we considered how lubricants influence the rippling failure. In particular, the effects of additives of lubricating oils were investigated in detail by roller test. The oils added several additives to automotive gear oils were used as lubricant. Consequently, the following becomes clear in this paper. The coefficient of friction is related to the occurrence of rippling, and the gear oil which has higher coefficient of friction is easier to generate the rippling. For the automotive S-P type gear oil, to add the borate (dipotassium tetraborate tetrahydrate) is effective to prevent the occurrence of rippling failure.

Key Words: Gear, Tribology, Case-Hardened Roller, Rippling Failure, Wear, Hardness, Hertzian Contact Stress, Specific Sliding, Lubricating Oil, Oil Additive

1. 緒 言

歯車の歯面損傷には、疲労を原因として生じるピッチング、スポーリングおよび歯面の焼き付きによるスコアリングがあり、これらの研究成果は多数報告されている。また、これら以外の歯面損傷にも種々の形態のものがあるが、リップリングもその一つである。リップリングは、低速度、高荷重の条件において、滑り率が正の面に発生する塑性変形であり、接触の繰返しにより接触面に波状模様を発生する現象である⁽¹⁾⁽²⁾。著者らは先に、動力循環式歯車試験機を使用して比較的低速、高荷重の運転条件で歯車のリップリング試験を行い⁽³⁾、また、アムスラー型摩耗試験機を使用して、試験ローラのリップリング実験を行い、リップリングの発生経過、リップリングの波長と振幅、リップリングの発生領域、また、ローラの材質や硬度の違い、周速度や相対的接触位置の違いがリップリングの発生に

及ぼす影響などについて報告した^{(4)~(7)}。

本論文では、著者らは、リップリングの発生を防止する一方法として潤滑油に着目した。API品質グレードGL-1で、粘度グレードがSAE 90およびSAE 75W-90の二つの自動車用ギヤ油(以後、ギヤ油と呼ぶ)を基油として、これらの基油に極圧剤、清浄分散剤、粘度指数向上剤等の添加剤を配合し、これらの添加剤をどのようにバランスよく配合すれば、リップリングの発生を防止できる潤滑油を合成できるか、それを調べるためにアムスラー型摩耗試験機を使用して試験ローラのリップリング実験を行った。以下、その結果について報告する。

2. 試験ローラと潤滑油

2・1 試験ローラ ローラの材質はSCM 415 Hでその化学成分を表1に示す。また、ローラは機械加工後、浸炭焼入れを施した後、研削を行った。研削後

Table 1 Chemical composition of test roller material

SCM415H								(%)
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.18	0.23	0.83	0.024	0.017	0.10	0.07	1.13	0.17

* 原稿受付 2001年7月19日。

^{*1} 正員, 呉工業高等専門学校機械工学科(〒737-8506 呉市阿賀南2-2-11)。^{*2} 正員, 広島大学大学院工学研究科(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。^{*3} 住鉦潤滑剤(株)三重工場(〒511-0207 三重県員弁郡員弁町上笠田)。

E-mail: nohara@kure-nct.ac.jp

のローラの表面粗さは約 $2\text{ }\mu\text{m}$ R_{max} , 表面硬度は $H_v = 690 \sim 840$ である。図1はローラの形状と寸法を示す(高速側ローラをHローラ, 低速側ローラをLローラと呼ぶ)。二つのローラは, Lローラの6mmの幅がHローラの幅10mmの中央に位置するように試験機の各軸に取付けた。

2.2 潤滑油の種類 実験に使用した潤滑油の性状を表2に示す。潤滑油は, API品質グレードGL-1, 粘度グレードSAE 90の自動車用ギヤ油を基油とした。これに添加剤を加えGL-5(SAE 90)の油とし, 添加剤の量および種類の違いによりそれぞれA油, B油, C油, D油, F油およびG油とした。A油, B油およびC油は, 硫黄系およびリン系極圧剤などを含んだS-P系のギヤ油である。D油は, 硫黄系およびリン系極圧剤などを含んだS-P系のギヤ油にB(ほう素)を添加した油である。通常, Bはボレートといわれている。ボレートとは, 無機のほう素化合物(ほう酸カリウム塩・水和物)を分散剤を使用して潤滑油中に分散させたもので, 平均直径 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ の球形粒子である。また, A油, B油中の元素にもBが含まれているが, これはほう素化こはく酸イミドを清浄分散剤として入れたためである。F油はA油, B油, C油およ

びD油と同様, GL-5(SAE 90)に相当する油でS-P系の添加剤を加えた油である。さらに, G油はF油にボレートを分散させた油で, F油とG油を使用した実験結果を比較することによりボレートの添加の影響が明らかとなる。もう一つの基油は, GL-1に粘度指数向上剤を加えてSAE 75 W-90の粘度グレードを満足させた油(以後, EB油と呼ぶ)である。E油は, このEB油に主添加剤として硫黄系およびリン系(S-P系)極圧剤を添加し, また, 補助的添加剤としてZnDTPとCa系清浄剤およびほう素化こはく酸イミドを加えてGL-5(SAE 75 W-90)とした油である。以上, 9種類のギヤ油についてリップリング損傷実験を行った。潤滑油は, ローラのかみ込み側に取付けたノズルから約 1 l/min を強制給油し, 潤滑油の温度を $373 \pm 2\text{ K}$ に制御した。

3. 実験装置および実験方法

図2はリップリング実験に使用したアムスラー型摩擦試験機を示す。試験ローラ⑨, ⑩は, 圧縮コイルばね⑪と, ローラ⑩の軸受と一体になった負荷アームによって負荷される。可変速電動機①よりプーリで減速して入力軸②を駆動し, 入力軸②に取付けられた歯車③と遊星枠④で支持された歯車⑤がかみあう。この歯車と同軸の歯車⑥が遊星歯車装置の内歯車⑦を回転させ, 内歯車軸⑧に下側のローラ⑨(高速側のHローラ)が取付けられる。一方, 低速側の動力は歯車③より歯車⑭に伝わり, 軸⑮を経て歯車⑯, ⑬により軸⑫が駆動され, 軸⑫に上側のローラ⑩(低速側のLローラ)が取付く。替歯車対⑯, ⑬を種々の歯数の歯車に交換して, Hローラの滑り率 $\sigma_1 = (V_1 - V_2)/V_1$, V_1 : Hローラ周速度, V_2 : Lローラ周速度)を41.7%, 55.1%, 76.7%に変化させて実験を行った。

Fig. 1 Size and shape of test rollers

Table 2 Properties of test lubricating oils

Item	Test oils	Base oil	Oil A	Oil B	Oil C	Oil D	Oil F	Oil G	Oil EB (Base oil)	Oil E
Density	g/cm^3 (288K)	0.8925	0.9016	0.8998	0.9025	0.9037	0.8977	0.8997	0.8782	0.8909
Kinematic viscosity	(313K)	217.8	201.0	200.0	202.8	193.1	185.6	185.9	71.67	76.09
	mm^2/s (373K)	18.82	17.99	17.95	17.92	17.74	17.1	18.13	13.71	13.79
Viscosity index		97	98	98	96	100	98	107	198	188
Total acid number	mgKOH/g	0.01>	1.20	1.66	1.66	0.76	1.25	1.32	0.01	2.31
Saponification number	mgKOH/g	0.01>	1.05	1.02	1.26	4.04				1.73
S mass%		0.53	1.95	2.05	2.88	1.70	2.00	2.00	0.08	2.14
N mass%		0.01	0.06	0.06	0.07	0.05	0.03	0.04	0.01>	0.08
P ppm			930	960	1190	440	510	510		1710
B ppm			70	40		2010		630		170
Ca ppm						40				140
K ppm						2310		800		
Zn ppm										790

Fig. 2 Amsler type abrasion testing machine

試験ローラへの負荷は、H ローラが所定の回転数($n_1 = 100$ rpm)になった後に行い、H ローラの負荷繰返し数 N を基準にとって、それが所定の負荷繰返し数になれば除荷して停止した後、ローラの表面形状、摩耗量、接触面の硬度測定および写真撮影を行った。摩耗量は、定感量形直示天秤を使用して、所定の回転前と回転後の試験ローラの重量差を測定し、摩耗量とした。摩擦係数は、試験ローラの接触面間に発生する摩擦トルクをアムスラー型摩耗試験機に付属の記録ドラムに記録し、この摩擦トルクより算出した。硬度は、マイクロビッカース硬度計を使用して試験ローラの接触面を 10 箇所測定し、その平均値を硬度とした。また、ローラ表面の肉眼観察を試験機の停止の都度行い、接触面の状態に変化が見られなくなれば実験を終了した。表 3 はおもな実験条件を示したもので、その条件におけるリップリングの発生状況を表 3 の Rippled region の欄に示している。欄中の One side の文字は H ローラの接触幅の片端部に、Middle of width は H ローラの幅中央(接触幅全面)にリップリングが発生したことを示す。リップリングが発生する場合、 $N = 1.0 \times 10^4$ 付近で高速側ローラの接触面上にリップリングの兆候が現れ、さらに続けて実験を行い $N = 2.5 \times 10^5$ 付近になるとリップリングが明確になるが、これ以上繰返し数が増加してもリップリングの形態に

Table 3 Experimental conditions and generating state of rippling

Test oils	Test number	Specific sliding of H roller σ_1 %	Sliding velocity V_s mm/s	Hertzian contact stress σ_H GPa	Number of stress cycles $N \times 10^5$	Rippled region
Base oil	1	41.7	85.1	1.96	1.5	—
	2	41.7	85.1	2.16	2.5	All width
	3	41.7	85.1	2.45	2.5	All width
	4	55.1	112.6	1.96	1.5	All width
	5	55.1	112.6	2.16	2.5	All width
	6	55.1	112.6	2.45	2.5	All width
	7	76.7	156.3	1.96	2.5	All width
Oil A	8	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	9	41.7	85.1	2.45	2.5	—
	10	55.1	112.6	1.96	2.5	—
	11	55.1	112.6	2.16	2.5	One side
	12	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	13	76.7	156.3	1.96	2.5	—
Oil B	14	41.7	85.1	1.96	2.5	—
	15	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	16	41.7	85.1	2.45	2.5	—
	17	55.1	112.6	1.96	2.5	—
	18	55.1	112.6	2.16	2.5	—
	19	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	20	76.7	156.3	1.96	2.5	—
Oil C	21	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	22	41.7	85.1	2.45	2.5	—
	23	55.1	112.6	1.96	2.5	All width
	24	55.1	112.6	2.16	2.5	One side
	25	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	26	76.7	156.3	1.96	2.5	—
Oil D	27	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	28	41.7	85.1	2.45	2.5	—
	29	55.1	112.6	1.96	2.5	—
	30	55.1	112.6	2.16	2.5	—
	31	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	32	76.7	156.3	1.96	2.5	—
	33	76.7	156.3	2.16	2.5	—
Oil F	34	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	35	55.1	112.6	1.96	2.5	—
	36	55.1	112.6	2.16	2.5	Middle of width
	37	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	38	76.7	156.3	2.16	2.5	—
Oil G	39	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	40	55.1	112.6	1.96	2.5	—
	41	55.1	112.6	2.16	2.5	—
	42	55.1	112.6	2.45	2.5	—
	43	76.7	156.3	2.16	2.5	—
Oil EB (Base oil)	44	41.7	85.1	1.96	2.5	—
	45	55.1	112.6	1.96	2.5	All width
	46	76.7	156.3	1.96	2.5	—
Oil E	47	41.7	85.1	1.96	2.5	—
	48	41.7	85.1	2.16	2.5	—
	49	55.1	112.6	1.96	2.5	—

は変化がみられない。そのため、 $N = 2.5 \times 10^5$ をリップリング発生の最終の繰返し数とした。H ローラのも最終負荷繰返し数を Number of stress cycles の欄に示す。なお、 V_s は両ローラの滑り速度 ($V_s = V_1 - V_2$)、 σ_H はヘルツの接触応力を表す。

4. 実験結果および考察

4.1 リップリングの発生領域 基油、A 油、B 油、C 油、D 油、F 油、G 油、EB 油および E 油を使用した場合のリップリングの発生状況を検討するため、タービン油を使用した場合のリップリング発生領域(発生条件)⁽⁶⁾を考慮して実験を行った。図 3 は、横軸

に滑り速度 V_s 、縦軸にヘルツの接触応力 σ_H をとって表したリップリングの発生領域を示す。なお、この発生領域の決定にあたっては、負荷繰返し数の増加によって生じた摩耗量の大きさ、H ローラおよびL ローラの硬度変化、接触面の表面形状の変化などを総合的に検討して行った。基油を使用した場合、図3の斜線で囲む領域においてH ローラにリップリングが発生した。いま一例として、リップリングが発生した実験番号3($\sigma_H=2.45$ GPa, $\sigma_1=41.7\%$)の場合について、負荷繰返し数 $N=2.5 \times 10^5$ のときのH ローラ表面のリップリング写真を図4に示す。また、H ローラの回転方向(円周方向)に表面粗さ計で測定した、負荷繰返し数の増加によるローラ円周方向の表面形状の変化を図5に示す。図5(a)から明らかなように、負荷繰返し数 $N=0.2 \times 10^5$ 付近においてH ローラの表面に凹凸ができ始め、さらに負荷繰返し数が増加することによってリップリングの形成が明確になっていくことがわかる。一方、図5(b)のH ローラの場合には、摩耗により表面が滑らかになるのみでリップリングは発生しない。

Fig. 3 Generating region of rippling

 Fig. 4 Surface microscopic photograph of H roller (Base oil, $\sigma_H=2.45$ GPa, $\sigma_1=41.7\%$)

4.2 潤滑油による円周方向の表面形状の違い

図6は、 $\sigma_H=2.16$ GPa, $\sigma_1=55.1\%$ の条件で基油、A油、B油、C油、D油、F油、G油を使用した場合、そして $\sigma_H=1.96$ GPa, $\sigma_1=55.1\%$ の条件でEB油、E油を使用した場合の、負荷繰返し数 $N=2.5 \times 10^5$ におけるH ローラとL ローラの円周方向の表面形状を示している。図6に示すように、基油、A油、C油、F油およびEB油を使用した場合のH ローラの表面は、リップリングに特有な波状の形状を示しているが、B油、D油、G油およびE油を使用した場合の表面形状は滑らかで、リップリングの発生は見られない。また、L ローラの円周方向の表面形状は比較的滑らかで、いずれもL ローラにはリップリングの発生は認められない。このようにリップリングが発生する場合、本実験においてもリップリングはH ローラにおいてのみ発生し、L ローラには発生しないが、その理由については既報⁽⁷⁾に述べている。

4.3 ローラ表面の硬度変化と摩耗量の変化 著者らがいままでに行った実験⁽⁶⁾⁽⁷⁾から、リップリングが発生する場合には負荷繰返し数の増加に伴って両ローラの接触面間に硬度差が発生し、またローラ表面は適度に摩耗もされており、このような硬度差の発生や摩耗がリップリングの発生と密接に関係していることがわかっている。いま一例として、 $\sigma_H=2.45$ GPa, $\sigma_1=55.1\%$ の条件で基油、A油、B油、C油、D油、F油、G油を使用した場合、および $\sigma_H=1.96$ GPa, $\sigma_1=$

(a) H roller

(b) L roller

 Fig. 5 Change in surface roughness (Base oil, $\sigma_H=2.45$ GPa, $\sigma_1=41.7\%$)

55.1%の条件でEB油とE油を使用した場合の、ローラ接触面の硬度変化および摩耗量の変化について述べる。図7(a), (b)は、負荷繰返し数の増加による硬度変化を示している。図7(a)に示すように、リップリングの発生した基油の場合、Lローラの硬度は負荷繰返し数の増加とともに高くなり、 $N=2.5 \times 10^5$ におけるHローラとLローラの硬度差はおおよそ $Hv \approx 100$ にもなっている。一方、リップリングの発生しないA油、B油、C油、D油、F油およびG油の場合、負荷繰返し数が増加しても硬度はほとんど上昇せず、またHローラとLローラの硬度差もほとんどみられない。図7(b)は、EB油およびE油を使用した場合の硬度変化を示している。図7(b)に示すように、EB油を使用した場合、負荷繰返し数の増加とともにHローラとLローラに硬度差が発生し、リップリングを発生

した。一方、E油を使用した場合には両ローラの硬度差はほとんどなく、リップリングの発生もみられない。

図8(a), (b)は、負荷繰返し数の増加による摩耗量の変化を示している。図8(a)に示すように、基油を使用しリップリングが発生した場合のローラの摩耗量は、負荷繰返し数が大きくなるに従って大きく増加している。また、Lローラの摩耗量はHローラの摩耗量よりも多くなっているが、リップリングが発生しないA油、B油、C油、D油、F油およびG油の場合の両ローラの摩耗量は少なく、ほとんど同じである。図8(b)は、EB油およびE油を使用した場合の摩耗量の変化を示している。EB油を使用するとリップリングが発生し、そのとき両ローラの摩耗量は負荷繰返し

(a) H roller

(b) L roller

Fig. 6 Change in surface roughness

(a) Base oil, oil A, oil B, oil C, oil D, oil F and oil G

(b) Oil EB and oil E

Fig. 7 Change in surface hardness of roller

し数の増加とともに増大している。一方、E油を使用した場合にはリップリングが発生せず、両ローラの摩擦耗量も少ないことがわかる。なお、図7、8と異なった他の接触応力、滑り率の条件で行った実験の場合も、ローラの硬度と摩擦耗量の変化はこれらの図とほぼ同様な傾向を示すことがわかっている。

4.4 ローラ接触面の摩擦係数に及ぼす添加剤の影響
添加剤を加えた各種潤滑油がローラ接触面の摩擦係数に及ぼす影響や、摩擦係数とリップリング発生との関係を調べるために摩擦係数を測定した。図9(a)は、基油、A油、B油、C油およびD油を使用し接触応力 σ_H 、滑り率 σ_1 を変化させて得られた試験終了直前の摩擦係数 μ を示している。実験条件 $\sigma_H=1.96$ GPa、 $\sigma_1=41.7\%$ の場合には、いずれの油にもリップリングの発生は認められないが、他の実験条件ではリッ

プリングが発生する条件がある。リップリングが発生する場合の基油の摩擦係数は、A油、B油、C油およびD油のそれらと比較して大きい、ほぼ同程度の値となっている。一方、 $\sigma_H=2.16$ GPa、 $\sigma_1=55.1\%$ におけるA油およびC油の摩擦係数は基油のそれと比較して大きく、そしてA油、C油で発生したリップリングはローラ接触幅全面ではなく、いずれも接触幅の片端部に認められた。

これらの実験結果から、A油およびC油の場合、この実験条件では、他の実験条件に比べ、摩擦面における極圧被膜の生成状態が不安定かつ不均一であることが示唆される。

また、A油、B油およびC油は、いずれも同一品質グレード品(S-P系自動車用ギヤ油、GL-5, SAE 90)であるが、B油では、いずれの実験条件下でもリップリングの発生は認められない。3種類のギヤ油に含まれる、硫黄系やリン系極圧剤の組成や配合割合は異なることから、リップリングの発生には、表2に示す硫黄量やリン量よりも、むしろ使用添加剤の組成や組合

(a) Base oil, oil A, oil B, oil C, oil D, oil F and oil G

(b) Oil EB and oil E

Fig. 8 Change in wear quantity

(a) Base oil, oil A, oil B, oil C and oil D

(b) Oil F, oil G, oil EB and oil E

Fig. 9 Change in coefficient of friction due to specific sliding and Hertzian contact stress

せのほうが深く関与していると考えられる。また、D油を使用したときもB油の場合と同様にリップリングの発生は全く認められない。図9(b)は、EB油、E油、F油、G油を使用した場合の摩擦係数 μ を示す。この図の $\sigma_H=1.96$ GPaにおいてEB油とE油の結果を比較すると、E油の摩擦係数はEB油のそれよりやや小さく、そして $\sigma_1=55.1\%$ ではEB油を使用するとリップリングが発生するのに対してE油の場合にはリップリングの発生は認められない。これは、E油に添加した硫黄-リン系(S-P系)極圧剤などの効果によるものと考えられる。次に、F油とG油を使用した場合の結果を比較すると、ボレートを添加したG油の摩擦係数は、F油のそれと比較して小さく、全くリップリングの発生が認められない。一方、ボレートを添加しないF油では、 $\sigma_H=2.16$ GPa、 $\sigma_1=55.1\%$ の条件において、Hローラの接触面幅中央部にリップリングの発生が認められた。ボレートの極圧被膜は、おもに摩擦面への物理吸着や付着によるもので、しゅう動面は電荷を持つことが知られている。電荷を持つボレート粒子は電気的にしゅう動面の金属表面に吸着されて被膜を形成し、金属と金属の直接接触を防止する作用をしていると考えられる⁽⁶⁾。

5. 結 言

各種の自動車用ギヤ油を用い、リップリングの発生などに及ぼす使用添加剤の影響を調べた結果を要約すると次のようになる。

(1) 摩擦係数の大小はリップリングの発生と関係があり、摩擦係数の高いギヤ油はリップリングが発生しやすい。

(2) 自動車用S-P系ギヤ油において、ボレート(ほう酸カリウム塩)の添加は、リップリングの発生防止に有効である。

(3) 自動車用S-P系ギヤ油において、リップリングの発生を防止するには、含まれる硫黄量やリン量など、すなわち使用した添加剤の添加量より、むしろ使用添加剤の種類、組成および組合せに着目し、ギヤ油の摩擦・摩耗特性を検討する必要がある。

文 献

- (1) *AGMA Standard*, 110 (1977), 10.
- (2) *DIN*, 3979 (1976), 9.
- (3) 寺内喜男・ほか2名, 機論, 52-480, C(1986), 2213-2220.
- (4) 寺内喜男・ほか4名, 機論, 53-488, C(1987), 972-979.
- (5) 寺内喜男・ほか3名, 機論, 55-517, C(1989), 2446-2453.
- (6) 寺内喜男・ほか2名, 機論, 56-524, C(1990), 971-978.
- (7) 野原稔・ほか2名, 機論, 67-661, C(2001), 2969-2975.
- (8) Adams, J. H. and Godfrey, D., *Lubrication Eng.*, 37-1 (1981), 16-21.