ローラ試験によるマイクロピッチングの実験的研究*

吉田信義^{*1}, 馬場健之^{*2}
渡邊吉弘^{*3}, 滝 晨彦^{*4}

Experimental Research of Micropitting by Roller Testing

Nobuyoshi YOSHIDA^{*5}, Takeshi BABA,
Yoshihiro WATANABE and Tokihiko TAKI^{*5} Department of Mechanical Engineering, Okayama University of Science,
1-1 Ridai-cho, Okayama-shi, Okayama, 700-0005 Japan

Spalling and Scuffing are well known as the failure pattern of case-carburized gear. Micropitting was recently recognized as a failure too and already became a problem. Micropitting is very small failure on the contact surface. Despite of its size, it can lead, by accumulating, to several failures such as frosting or fatigue scuffing. In this study, the authors investigated the occurrence of micropitting and its tendency to increase in quantity. A disk machine with rolling and sliding was used. Fatigue tests were carried out with carburized SCM420 steel rollers and SCM420 steel rollers shot peened by two different methods; ultrasonic shot peening and air shot peening. Micropitting was generated by load around 1/4 of the load that causes spalling. Quantity of micropitting increased as the number of cycles increased. Micropitting was observed in the faster test roller and its amount was less than the slower side. S-N curve was obtained from the fatigue life, which is assumed as the number of cycles in which the micropitting area reaches 5%. As a result, the influence of the surface roughness seems to be large in the fatigue life of the micropitting.

Key Words: Gear, Micropitting, Pitting, Shot Peening, Fatigue Life

1. 結 言

歯車の面圧強度は、歯面に浸炭や窒化といった表面硬化処理を導入することにより、大幅に増大させることに成功した^(1,2)。これにより、ピッチングの問題は解決し、代わってスポーリングやスカuffingといった損傷形態が面圧強度の対象とされるようになった^(3,4)。しかし、Dudleyにより負荷繰返し数 10^{10} を超してから歯の折損に至った報告がなされ、マイクロピッチングの存在が問題化するきっかけとなった⁽⁵⁾。その後、歯車におけるマイクロピッチングの発生、フロスティングの観察などが精力的になされた⁽⁶⁾。しかし、現象などの観察はされたものの、その設計面での対応はいまだ進んでいない。

マイクロピッチングの焦点をぼかしているのは、歯車の破壊に至る形態としてマイクロピッチング単独ではなく、フロスティング、スカuffing、フレーキングといった別の形で表面化し、その後歯の折損に至

って最終事象になるという複雑な変遷をたどることである^(7,8)。そして設計的に懸念される最大の問題点は、スポーリングやスカuffingで期待される面圧強度の半分以下といった低荷重域で往々にしてトラブルが発生し⁽⁹⁾、その原因としてマイクロピッチングの関与が否定できないことである。

こうしたマイクロピッチングそのものの性格はまだ不明な点が多い。そこで、面圧強度が高いとされている浸炭研削したローラ、ならびに更なる負荷容量増加を目的として施工が試みられているショットピーニング処理を施したローラを用いて、マイクロピッチングの発生ならびにその量の増加状況について実験的に明らかにした。

2. 試験片および試験方法

2・1 試験ローラ 試験ローラの形状は図1に示すように外径60mm、有効接触幅5mmの円筒で、高速側ローラの接触面幅は8mmと広く取ってある。材質はクロムモリブデン鋼SCM420で、丸棒素材を旋削加工後浸炭処理し、さらに旋削加工し、焼入れ焼戻しを行った。その後研削し、所定の形状に仕上げた。

またショットピーニングについてもその効果を把握するために、代表的な従来型のエア式ショットピ

* 原稿受付 2006年9月4日。

^{*1} 准員、岡山理科大学大学院工学研究科(〒700-0005 岡山市理大町1-1)。^{*2} (株)浅野歯車(〒589-0004 大阪狭山市東池尻4-1402-1)。^{*3} 東洋精鋼(株)(〒490-1412 愛知県海部郡十四山村馬ヶ地3-195-1)。^{*4} 正員、岡山理科大学工学部。

E-mail: yoshida@mech.ous.ac.jp

Slower Roller Faster Roller
Fig.1 Shapes and Dimensions of test rollers

Table1 Shot peening processing conditions

Shot peening method	Ultrasonic type shot-peening unit	Air type shot-peening unit
Abrasives	SUJ2 $\phi 0.82$ mm	RCW08PS $\phi 0.81$ mm
Weight of shot grain injections	1.4 g	4.75 kg
Projection distance	30 mm	150 mm
Sonotrode amplitude	90 μ m	---
Projection pressure	---	0.25 MPa
Revolutions per minutes for work	6 rpm	12 rpm
Blasting time	360 sec	30 sec

ーニングと超音波式ショットピーニングの2種類を採用した。これらのショットピーニング処理は最終加工の研削後に行い、その主要な処理条件を表1に示す。したがって、面圧強度試験はショットピーニング未処理試験片（以降 UNP と称する）、エア式ショットピーニング処理試験片（以降 ASP と称する）、超音波式ショットピーニング処理試験片（以降 USP と称する）の3種類のローラ試験片について行う。

試験ローラ接触面の表面粗さ R_z の測定結果を図2に示す。測定条件は基準長さ0.25mm、評価長さ1.25mmで、ローラの軸方向に測定した。図には各仕上げ法に全試験片の平均値とその標準偏差が示されており、ASP試験片の表面粗さが他の仕上げ法に比べて有意に粗くなっている。なお、試験ローラの接触面硬さは、ピッカース硬さにおいて UNP 試験片が756HV、USP試験片が915HV、ASP試験片が884HVであった。また、試験片の残留応力の深さ方向への分布を図3に示す。残留応力の測定は、X線回折法を用いてローラの円周方向に行い、表面から内部への応力分布は表面層を電解研磨で除去しながら測定した。

2.2 試験機と試験条件 試験は図4に示すばね負荷式二円筒転がり滑り試験機で行った。上下のローラ軸に取り付けられた2ローラと、それらローラ軸

Fig.2 Measurements of surface roughness

Fig.3 Residual stress distributions of test specimen

Fig.4 Schematic drawing of testing machine

の回転数を一定割合で変える歯車対とで動力循環方式の形態を構成させ、そのサークルに15kWの可変モータで動力を供給している。なお、モータと下側高速ローラ軸との間にトルク計を設置し、動力循環中の損失動力を測定し、無負荷時と負荷時のトルク差から接触ローラ間の摩擦力を算出している。低速側の上側ローラ軸には下側ローラ軸の歯車を通して減速された回転数で回転し、低速軸を支持しているレバーにばねにより負荷をかける。

潤滑油は極圧鉄道ギアオイル 3090 (粘度:206.3cSt, 311K) を、給油温度 318 ± 5 K、給油量 4.17 ml/s で真上から強制給油した。試験中のローラ表面温度は、試験片のしゅう動面に熱電対を押し付ける方法によって測定した。実験は高速側ローラ回転数 1500 rpm、低速側ローラ回転数 1291 rpm、低速側ローラの滑り率 -16.2% の一定速度で行い、荷重はヘルツ応力 $p_{max} = 1.0$ GPa か

Fig.5 Measurements of damage ratio ($p_{max}=2.0\text{GPa}$)

ら 2.0GPa の範囲で行った。試験中は負荷繰返し数 2.0×10^6 回ごとに試験機を停止し、しゅう動面の損傷状況を観察、記録した。なお、滑り率は対象とするローラ回転数と相手ローラ回転数の差を対象としているローラ回転数の値で除して、百分率表示したものである。

3. 結果と考察

3・1 試験ローラの損傷状況 しゅう動面に発生するマイクロピッチングはきわめて小さく、肉眼での観察が困難であり、従来観察対象から除外されていた。本試験ローラの面圧強度も、従来はスポーリングやスカuffingが対象となり、2.0GPa 以上の面圧が議論されてきた^(9,10)。本研究においても、2.0GPa にてマイクロピッチング以外の損傷が発生することはなかった。しかしマイクロピッチングは、接触荷重でその 1/4、ヘルツ応力でその 1/2 の 1.0GPa でも発生した。

マイクロピッチングは、個々の面積がきわめて小さい代わりにその発生個数はきわめて多い。これら接触面に発生したマイクロピッチングの損傷量を求める手段として、従来のピッチング試験でしばしば採用されている、カーボンによる転写法を採用することとした。これは、マイクロピッチングの穴にカーボン粉末を埋め込み、それをテープに転写し、写し取られたカーボ

Fig.6 Measurements of damage ratio ($p_{max}=1.0\text{GPa}$)

ンを拡大して観察する方法で、転写されたカーボンの付着面積をパソコンの画像処理ソフトを用いて測定した。この方法で測定した損傷面積が、しゅう動面の有効接触面積に占める面積の割合を損傷率として定義し、マイクロピッチングの発生量の指標とした。また、この方法では接触面にカーボンを塗りつけた後、脱脂綿を用いてカーボンをふき取っており、こうすることでカーボンは損傷部分のみに残る。ショットピーニング処理による圧痕にはカーボンは残らず、未試験状態のローラの損傷率を測定した結果では、試験片の種類によらず、損傷率は 0% であった。

試験では、運転中の潤滑状態を把握するために接触面の損失動力を測定した。これより算出された摩擦係数はいずれの試験でもほぼ 0.010～0.015 の範囲であり、運転中の摩擦係数の経時変化、あるいは試験片の仕上げ法や試験条件による顕著な違いは認められなかった。ここで得られた摩擦係数は、この種の試験で一般的な摩擦係数である 0.03～0.07 に比べてかなり小さいものとなっているが、これは、接触面の損失動力を直接測定しておらず、試験軸の軸受損失も含めた損失動力を測定し、無負荷時の軸受損失を差し引いてもとめており、そこから来る誤差を含んでいるためと考えている。また、膜厚比⁽¹¹⁾の値はすべての試験で 3 以下の値を示しており、一部の低負荷における試験を除くと、ほと

多くの試験で膜厚比が1以下であることから、潤滑状態が混合潤滑、あるいは境界潤滑状態であることが分かる。こうしたことを樹案しても、接触面の潤滑状態は良好で、転がり疲労損傷の実験に好ましい状況にあるといえる。

3・2 損傷率の経時変化 マイクロピッチングは個々の損傷が微細であるため、単独で問題になることはまれであり、その発生量が多くなるにつれて歯車の正常な運転を阻害する確率が高くなり、問題視されるようになる。そこで、マイクロピッチングの発生量の経時変化を追った。

マイクロピッチングの発生量の経時変化の一例として、図5にヘルツ応力2.0GPaの場合を、図6にヘルツ応力1.0GPaの場合を示す。これらの図から、次のような特徴的現象が指摘できる。(1)損傷率は繰返し数と共に増加している。低荷重においても高荷重と同様な傾向にあり、繰返し数が増加しても新たな損傷発生量が漸減するという、ピッチングにおけるなじみ現象はこの範囲でまた認められない。(2)高速側ローラも低速側ローラ同様に損傷し、ピッチングと際立った違いを見せている。このことは歯車での実験でも確認されている⁽¹²⁾。(3)ショットピーニング処理を施すことによる表面状態の違いが損傷率の大小の差になって現れている。(4)高い接触圧の場合、損傷率の増加傾向が途中で変化する傾向にある。損傷率が3%を超す頃から、ショットピーニングの有無や種類にかかわらずほぼ一定の増加傾向を示すが、それより損傷率の低い運転初期の状態では、試験片の種類によって増加傾向が一定になるまでの差が見られる。これは、マイクロピッチングが疲労現象であるため、発生し始めるのに一定の時間を要するためであると考えられる。こうした傾向は1.6GPa以上で明瞭に見られるが、それ以下の応力では明瞭ではなかった。

3・3 面圧強度 面圧強度は歯車など、その対象物の使用限界強さを論ずるときに用いるものである。しかし、マイクロピッチングについてはこの点を論ずるまでに至っておらず、今後の課題となっている。この原因として主に2つのことが考えられる。一つはマイクロピッチングが多発することに伴うフロスティンクとの関連で、その進行につれ変化する歯形変化に主眼が置かれ、振動問題や動的荷重の増加と合わせて論じられることになる。もう一つは小さいながらも亀裂が確実に発生し、応力集中の要因となりうることである。歯車の歯は接触応力のみならず曲げ応力も極めて高く、材料強度的には過酷な条件下に置かれている。近年、歯車においてはフレーキングなどの表面損傷を

Fig.7 Number of cycles at damage ratio reaches 5%

Fig.8 Relation between modified Hertzian contact stress and fatigue life

起点として歯の折損に至る事例が報告されており、このフレーキングの発生原因としてマイクロピッチングの存在が無視できない。こうした点を明らかにし、マイクロピッチングの限界発生量を決定する必要がある。

こうした面圧強度を論ずる場合、マイクロピッチングが繰返し数と共に単調に増加する性質をとらえ、いずれの損傷形態にも適用できるよう、損傷率でまとめておくのが適当と考える。寿命としての損傷率の限界値は、実験的に確認しやすく、ピッチングの場合でも多く採用されている1~10%の範囲が実用的と考えられることから、本研究では中間の5%を採用する。また、寿命はその低い側のローラで規制されることから、低速側ローラ試験片の寿命を取り上げる。

図7に応力-寿命曲線を示す。応力は試験ヘルツ応力を用いた。寿命は損傷率が5%に達したときの負荷繰返し数とし、損傷率が5%に達しない試験を終了したときは、図5あるいは図6のように試験の結果から得られた損傷率増加曲線から求めた。3種類の試験片の応力-寿命曲線は同じ勾配を示しているが、ASP試験片の寿命が際立って低く、UNP試験片とUSP試験片の寿命はほぼ同じであることがわかる。これら、試験片の種類による寿命の長短の関係は、試験片の表面粗さの大小の関係とよく似ていることから、表面粗さの影響を考慮することを試みる。マイクロピッチン

Fig.9 Observations of roller surface in UNP roller

Fig.10 Observations of roller surface in USP roller

Fig.11 Observations of roller surface in ASP roller

グに対する表面粗さの影響は定かではないが、ピッチングと類似しているものと仮定する。歯車のピッチング強度における粗さの影響は(1)式⁽¹³⁾で表される。

$$S_1 = p_{max} \cdot D^{0.2} \quad \dots (1)$$

ここに、 S_1 は修正応力、 D は接触する2面間の表面粗さ R_z の和を最小油膜厚さ h_{min} で除した値である。なお、表面粗さは文献(13)に従い、実験前の値である。最小油膜厚さ h_{min} はDowson-Higginsonの式⁽¹⁴⁾から算出した。最小油膜厚さの算出に用いた潤滑油粘度の値は、試験中に計測したローラ接触面温度から求めた。これより求めた修正応力と5%損傷寿命の関係を図8に示す。この結果、3種類の試験片の応力-寿命曲線はかなり近づくが、まだ一致するに至らない。式(1)における D の指数0.2は、なじみ性のよい調質鋼製の歯車による実験データから求められたものであり、本実験で用いたなじみ性の低い浸炭鋼製のローラの場合、運転による D 値の低下が少ないため、 D の指数がもう少し大きい可能性がある。それにより3者のデータはさらに近づくが、すべてを一致させることはできない。この違いがショットピーニング処理によるものである可能性がある。

3・4 試験後ローラの表面観察 試験前後の試験片表面の光学顕微鏡写真を図9～図11に示す。各図の(b)は試験の結果、マイクロピッチングの最も多

Fig.12 SEM micrograph of UNP slower roller

Fig.13 SEM micrograph of USP slower roller

Fig.14 SEM micrograph of ASP slower roller

Fig.15 SEM micrograph of UNP faster roller

Fig.16 SEM micrograph of USP faster roller

Fig.17 SEM micrograph of ASP faster roller

く発生したヘルツ応力 2.0GPa において繰り返し数 1.0×10^7 回経過時の低速側ローラで、(a)はその試験前の状態である。試験後の表面はおびただしいマイクロピッチングの発生のため、運転前の状態で確認できる

Fig.18 Weibull plot of crack propagation angle

金属光沢が見られず、表面が荒れた感じとなっている。特に接触面端部が一様にかけ崩れのように浅く脱落している。

ローラ中央部のマイクロピッチングの SEM による観察結果を低速側ローラについて図 12～図 14 に、高速側ローラについて図 15～図 17 に示す。各図の(a)に接触面中央部の表面観察写真を、(b)は接触面中央部を円周方向に切斷し、断面観察を行った結果を示す。観察試料は図 9～図 11 と同様、ヘルツ応力 2.0GPa で試験を行ったものである。なお、ローラの転がり方向は、(a)の場合は下から上に向かっており、(b)の場合は図中に示してある。

低速側、高速側ともに(a)の試験片中央部ではマイクロピッチングが発生している。(b)の断面写真では低速側、高速側とも亀裂の発生が確認できる。亀裂は接触面から発生し内部へと進展しており、進展方向は低速側試験片では転がり方向、高速側試験片では反転がり方向であった。これより、表面から発生した亀裂が進展し、表面が剥離したことでマイクロピッチングが発生したものと考えられる。

マイクロピッチングは、接触する 2 面間の表面粗さの突起部同士が接触する際に発生する高い摩擦係数のため、通常接触面に存在する最大せん断応力が接触面に移動し、その応力値も高いため、亀裂の発生に至ると考えられる。これより表面粗さの突起部に発生した亀裂がその突起の頂部が終わる谷部で表面に抜けてピットを完成させる。これよりマイクロピッチングはピッチングにおける亀裂進展に必要な S. Way の油進入説⁽¹⁵⁾に重点を置かなくとも説明できるが、これは油進入説を否定するものではなく、図 5、図 6 で観察されるように、低速側のほうが高速側よりも多くマイクロピッチングが発生するのは油進入効果の現れであると考えられる。

マイクロピッチングの発生機構を考える場合、亀裂

の進入方向は重要な情報となる。図 12～図 17 で見られるように、亀裂の進入方向と接触面とのなす角度は必ずしも一致していない。そこで、ヘルツ応力 2.0GPa で試験した低速側ローラ試験片に発生した、亀裂の進入角度を調べた。測定はローラ幅中央部の任意の位置で円周方向に試験片を切斷し、円周長さ 19mm の間に発生したすべての亀裂について行った。図 18 はそうした測定データをワイブル確率紙にプロットしたものである。この結果、ASP および UNP の 2 つの試験片はほぼ同じ角度分布であるのに対し、USP 試験片は約 10 度程度大きな角度を示している。なお、図で注目されることは、亀裂の進入角度が 10 度から 90 度まで幅広く観察されていることである。このことは、ピッチング試験で 20～40 度と指摘されているデータ^(16,17)と大きな違いを見せている。各試験片における角度分布の平均値は、UNP 試験片が 35 度、USP 試験片が 45 度、ASP 試験片が 31 度であった。

4. 結 言

歯車のマイクロピッチングを設計にどう取り込むかを主眼に、ローラ試験機を用いて調べた。その結果以下のことがわかった。

- (1) マイクロピッチングは従来問題とされていたスポーリング損傷を発生させる荷重の 1/4 程度の低荷重でも発生する。
- (2) マイクロピッチングの発生量は、負荷繰返し数に比例して増加する。
- (3) 損傷率 5%を寿命としたときの応力-寿命曲線を求めることが出来た。ショットピーニングの効果を見ると、表面粗さが大きい ASP 試験片が他の 2 種類の試験片に比べて短寿命であり、ショットピーニングによる残留応力の変化などよりも表面粗さの影響が大きいように思われる。
- (4) 高速側ローラにもマイクロピッチングが発生し、その発生量は低速側ローラよりも幾分少なくなっていた。この結果は、歯車で見られる現象と一致している。
- (5) ローラ試験片に発生した亀裂の進展角度を測定した結果、亀裂の分布は 10～90 度の範囲を示した。これは、類似の損傷であるピッチングと大きく異なる特徴である。

文 献

- (1) Yoshida, M. et al, A Study on the Pitting Fatigue Strength of Carburized Gears, *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.27, No.2, April 1996, pp.125-130.

- (2) Abe, S. and Ikeda, M., High Pitting Strength Steels based on Super-carburizing, *Kobe Steel Engineering Reports*, Vol.54, No.3, Dec. 2004, pp.21-24.
- (3) Fujita, K. et al., The Surface Durability of the Case-Hardened Ni-Cr Steel and Its Optimum case depth in Japanese, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.42, No.358 (1976), pp.1916-1924.
- (4) Yoshida, A., Effect of Specific Sliding on Surface Durability of Case-Hardened Chromium-Molybdenum Steel Roller, *Bulletin of the JSME*, Vol.23, No.178 (1980), pp.595-602.
- (5) Dudley, D.W., Gear Wear, in *Wear Control Handbook*, The American Society of Mechanical Engineering, New York (1980), pp.755-830.
- (6) Taki, T., Study on the wear phenomena in the case-carburized gear surface, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.25, No.9 (1980), pp.632-636.
- (7) MacPherson, P.B. and Cameron, A., Fatigue Scoring A New Form of Lubricant Failure, *ASLE Transactions*, Vol.16, No.1 (1973)
- (8) The Japan Society of Mechanical Engineers ed., Gear Failure -A Pictorial Guide- (2006), The Japan Society of Mechanical Engineers, pp.155-210.
- (9) Takeuchi, T. et al., Surface Durability of Case-Carburized Gears (Influence of Hardening Profile on Change of Rolling-Sliding Contact Surface), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.70, No.697 (2004), pp.2774-2779.
- (10) Haizuka, S. et al., Studies of Tooth Surface Strength and Wear of Case Hardened Spur Gears (Influence of Tooth Forms, Circumferential Velocities and Surface Treatments), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.68, No.667 (2002), pp.941-948.
- (11) Tallian, T.E., On Competing Failure Modes in Rolling Contacts, *ASLE Transactions*, Vol.10, No.4 (1967), pp.418-439.
- (12) Ariura, A. et al., Load-Carrying Capacities of Case-Hardened Gears (Gray-Staining on the Tooth Surface of Carburized Gears), *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.24, No.10 (1979), pp.662-669.
- (13) Taki, T., Effect of gear material and hardness on pitting durability in Japanese, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Series C, Vol.52, No.474 (1986), pp.542-548.
- (14) Dowson, D. and Higginson, G.R., *Elasto-hydrodynamic Lubrication*, Pergamon Press, (1966).
- (15) Way, S., Pitting due to rolling contact, *J. App. Mech.*, Vol.2 (1935), pp.A49-A58.
- (16) Fujita, K. et al., A Study on the Effect of Roller Width on Pitting of Thermally Refined Roller, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.29, No.7 (1984), pp.515-521.
- (17) Miyoshi, H., Study on Pitting in Rolling Sliding Contact (1), *Journal of Japanese Society of Tribologists*, Vol.20, No.12 (1975), pp.843-851.