鋼ローラの転がり疲れに及ぼす表面改質処理の影響* (純転がり接触の場合)

吉田 彰^{*1}, 藤井正浩^{*1}, 中嶋 宏^{*2}

Influence of Surface Modification on Rolling Contact Fatigue of Steel Rollers (In Case of Pure Rolling Contact Condition)

Akira YOSHIDA, Masahiro FUJII^{*3} and Hiroshi NAKAJIMA

^{*3} Okayama University, Dept. of Mechanical Engineering,
3-1-1, Tsushima-naka, Okayama, 700-8530 Japan

Surface modified rollers by electroless Ni-P alloy plating and sulfurizing were fatigue-tested under a pure rolling contact condition. The fatigue lives of both surface modified rollers were longer than that of the non-coated rollers and the fatigue strength of the sulfurized rollers was the highest. The influence of elastic modulus of a plated layer on the contact pressure and the subsurface stresses was examined with numerical analyses. The contact pressure and the subsurface stresses of a roller covered with a plated layer, whose elastic modulus was smaller than that of the substrate, were smaller than those of a non-coated roller, especially at the edge of the contact width. The conformity by the wear of the plated layer led to the reduction of the contact pressure and the subsurface stresses at the edge of the contact width. The reason why the fatigue strength of the surface modified rollers were greater than that of the non-coated rollers could be due to the smaller contact pressure and the smaller subsurface stresses.

Key Words: Tribology, Rolling Contact Fatigue, Surface Modification, Stress Analyses, Electroless Ni-P Alloy Plating, Sulfurizing, Two-Cylinder Test

1. 緒 言

機械を構成する機械要素には滑り・転がり接触を行う歯車や軸受などがあり、これらは動力伝達に欠くことができない。近年、歯車や軸受などの機械要素部品は高速・高負荷下による過酷な負荷条件ならびに潤滑条件で使用されることが多くなり、ピッチングやスポーリングなどの表面損傷が問題となっている。機械要素部品の表面強度向上を目的として、浸炭、窒化、高周波焼入れなどの表面硬化処理が一般に用いられているほか、材料表面を物理的、化学的に改質させる種々の表面改質法の適用も進められている。表面改質法は硬質皮膜から軟質皮膜まで多種多様なものがあり、用途に応じて最適改質法をいかに選択するかが大きな課題である。

著者らは前報⁽¹⁾で滑り転がり接触におけるNi-Pめっきローラおよび浸硫処理ローラの転がり疲れ強さを調べ、これらの表面改質処理は摩擦係数の低減効果およびなじみ効果を有しており、転がり疲れ強さが向上す

ることを示した。本報ではこれら表面改質ローラの純転がり接触条件下における転がり疲れ強さを調べる。滑り転がり接触の場合と異なり純転がり接触条件では摩擦係数の影響は無視し得る。母材と異なる機械的性質を有す表面改質層が接触応力および表面下応力に及ぼす影響を解析的に検討し、転がり疲れ強さに及ぼす表面改質の影響を明らかにする。

2. 試験ローラ

図1は、転がり疲れ試験に用いたローラの形状および寸法を示す。試験片材はクロム・モリブデン鋼SCM415である。試験片材は、直径60.2mmの丸棒の状態で浸炭され、図1に示された寸法、形状に切削加工された後、焼入れ・焼戻しされている。ローラ表面は研削仕上げされ、研削仕上げ後の表面硬さは約760HV、有効硬化層深さは約1mmである。軸方向表面あらさは約0.1~0.2 μ mRaである。

無電解Ni-P合金めっき処理（以後、Ni-Pめっきと称す）および浸硫処理は、研削仕上げ後のローラに施され、その処理条件は前報⁽¹⁾と同様である。Ni-Pめっき層の厚さは約8 μ m、浸硫層の厚さは位置によりばらつきがあるが、平均9 μ m程度である。軸芯に対する面角

* 原稿受付 1999年7月12日。

^{*1} 正員、岡山大学工学部(☎700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

^{*2} 准員、日本電気硝子(株)(☎520-8639 大津市晴嵐2-7-1)。

E-mail: akira-y@mech.okayama-u.ac.jp

Fig.1 Shapes and dimensions of test rollers

度 68° の三角錐圧子を用いて薄膜硬度計により測定された改質層のダイナミック硬さHUTは、Ni-Pめっき処理で約HUT500、浸硫処理で約HUT75である。なお、薄膜硬度計により測定された硬度と従来のピッカース硬度などとの対応については現在のところ明かにされていないが、参考のため未処理ローラの表面から約3mmの芯部位置で測定されたダイナミック硬さを示すと、約HV390⁽¹⁾に対して約HUT400である。表面改質後の試験ローラの軸方向表面あらさは、Ni-Pめっきローラで約 $0.1\sim 0.2\mu\text{mRa}$ 、浸硫処理ローラで $0.3\sim 0.7\mu\text{mRa}$ である。

3. 実験方法

転がり疲れ試験は、ばね負荷式ローラ試験機⁽¹⁾を用いて行われた。10mm幅のローラを駆動側、接触幅4mmのローラを従動側とし、純転がり接触状態で試験された。駆動側ローラの回転速度は1432rpmであった。試験機には振動感受スイッチが取付けられており、試験ローラの損傷により自動停止するように調整された。この自動停止時の繰返し数を寿命とした。

本実験で用いた潤滑油は前報⁽¹⁾と同じ#83タービン油である。潤滑油は $313\pm 5\text{K}$ に制御され、ローラかみ込み側から毎分1500mLの割合で圧力給油された。

4. 実験結果

図2は、本実験により得られたヘルツ接触圧力 p_{max} と転がり疲れ寿命 N の関係を示す。後述するように、損傷は全て従動側ローラに生じ、表面下のき裂発生に起因するスポーリング損傷である。また、図2中には比較のため前報⁽¹⁾の滑り転がり接触条件下での試験で得られた $p_{\text{max}}-N$ 曲線も示す。Ni-Pめっきローラにおいてスポーリング損傷発生前にめっき層がはく離した

Fig.2 Relation between maximum Hertzian pressure p_{max} and fatigue life N

ものについては p 印を付している。図2中の $p_{\text{max}}-N$ 曲線は損傷がスポーリングであったものについて最小自乗近似で求められている。なお、滑り転がり接触下での試験ではNi-Pめっき層のはく離により試験を停止したものはなかったが、本実験の純転がり接触条件下では、試験を行った p_{max} 全域においてNi-Pめっきのはく離が生じている。

浸硫処理ローラおよび未処理ローラでは、純転がり接触条件での転がり疲れ強さは、滑り転がり接触条件の場合より大きい。特に浸硫処理ローラでは純転がり接触条件における転がり疲れ強さの向上が著しく、多くの場合で $N=10^7$ まで損傷が発生していない。一方、Ni-Pめっきローラの転がり疲れ強さは、純転がり接触条件と滑り転がり接触条件で差が小さい。しかし、純転がりおよび滑り転がりのいずれの接触条件においても、Ni-Pめっきローラの転がり疲れ強さは未処理ローラより大きい。

図3は、純転がり接触条件における損傷ローラの軸直角断面写真を示す。(a)、(b)のNi-Pめっきローラの場合、ローラ表面にほぼ平行に形成されたき裂が表面下に明瞭に観察される。このき裂の深さは、Ni-Pめっき厚さ約 $8\mu\text{m}$ と比較してはるかに大きい。(c)の浸硫処理ローラの場合、Ni-Pめっきローラのように明瞭な表面下のき裂は観察できないが、損傷の深さはNi-Pめっきローラの場合と同様に浸硫層の厚さよりはるかに大きく $100\mu\text{m}$ を越えている。未処理ローラおよび表面改質ローラのいずれの場合も、転がり疲れ過程においてローラ表面にピットは観察されることなく、比較的大規模なスポーリング損傷を生じ、その損傷の外観には

Fig.3 Observations of cross section of failed rollers

Fig.4 Appearance of failed rollers

表面改質による差は見られなかった。図3の損傷形態から判断して、本実験の場合の損傷はローラ表面下のき裂発生に起因するスポーリング損傷であると考えら

れる。なお、図4に示すように損傷は従動側ローラの幅4mm全体に生じ、損傷の起点がローラ幅の中央付近であるか端部付近であるかの特定は困難である。

図5は、駆動側ローラの断面曲線の変化の一例を示す。未処理ローラでは摩耗は非常に小さく、スポーリング損傷発生直前までの摩耗は $1\mu\text{m}$ 程度である。また、Ni-Pめっきローラの場合めっき層のはく離が $N=10^6$ で生じているが、それ以前では未処理ローラと同様摩耗は小さい。一方、浸硫処理ローラでは初期段階から摩耗が進行しており、 $N=10^6$ での摩耗深さは改質層厚さをほぼ越えている。

図6は、表面改質ローラの駆動側ローラの摩耗深さと駆動側および従動側両ローラの中心線平均粗さ Ra の変化を示す。Ni-Pめっきローラの場合、Ni-Pめっき層がはく離する前では駆動側ローラの摩耗深さは $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度であり、摩耗はめっき層内にとどまっている。 $p_{\max}=2.5\text{GPa}$ ではスポーリング損傷が生じた時点でもNi-Pめっき層は残存している。一方、浸硫処理ローラの場合、いずれの $p_{\max}$ においても駆動側ローラの摩耗深さは大きく、スポーリング損傷が生じた繰り返し数では接触面に浸硫層はほとんど残っていないと判断できる。また、摩耗の小さいNi-Pめっきローラの Ra の変化は小さいが、浸硫処理ローラでは浸硫層の摩耗に伴い Ra が低下しており、なじみによる粗さの減少が

Fig.5 Profile curves of drive rollers

Fig.6 Center line average height Ra and depth of wear trace of drive roller

認められる。

5. 考 察

前報の滑り転がり接触条件下においても損傷は本実験の場合と同様の表面下き裂発生に起因するスポーリング損傷であった。また、スポーリング損傷の深さは、表面改質の有無によらずSmithらの解析的方法⁽²⁾により求めた直交せん断応力と硬さの比の振幅が最大となる深さと関係があった。本実験の純転がり接触条件では、多くの場合で、損傷部に負荷されたまま試験機が自動停止したことにより損傷部に塑性変形が生じ、損傷深さの測定が困難であった。しかし、図3に示した断面写真の場合のように、損傷の深さを測定できた場合のき裂の深さあるいは損傷の深さは、滑り転がり接触条件下の場合と同様、直交せん断応力と硬さの比の振幅が最大となる深さと関係があった。

ところで、表面改質層の機械的性質は母材のそれと異なる。線接触における表面下のせん断応力の解析にはSmithらの解析的方法があるが、この方法では母材と異なった機械的性質を持つ表面改質層で覆われたローラの応力解析はできない。本研究では、有限幅の線接触状態における接触応力および表面下のせん断応力に及ぼす表面改質層の影響を数値解析により3次元的に検討した。解析は接触弾性体を半無限体近似した境界要素法⁽³⁾により行った。線形三角形要素を用い、接触面を1936接点、3698要素に分割した。改質層は一樣厚さの薄膜として取扱った。図7は解析に用いたモデルの概念図を示す。ローラの幅方向に x 座標、円周方向に y 座標、半径方向に z 座標が取られ、接触の中央位置を原点 O とした。両ローラの改質層厚さ h_1 は同じであるとし、改質層の弾性係数とポアソン比はそれぞれ E_1, ν_1 とした。 E_0, ν_0 は母材の弾性係数とポアソン比である。

従来、めっきなどの薄膜の弾性係数の測定は困難であったが、近年では薄膜硬度計を用いた弾性係数測定方法が提案されている⁽⁴⁾。図8は、薄膜硬度計を用いて求めたNi-Pめっき層、浸硫層および母材(SCM415)芯部の換算弾性係数 E_r を示す。 E_r は除荷時の荷重-圧子押し込み深さ曲線の傾きから求めた剛性 S および圧子の接触面積 A を用いて次式⁽⁵⁾で求めた。

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Fig.7 Schema of analyzed model

Fig.8 Reduced elastic modulus E_r

ここで、 E, ν はそれぞれ弾性係数とポアソン比、 E_i, ν_i は三角錐圧子の値である。なお、 $E \ll E_i$ の場合、(2)式の右辺第2項は無視できる。

図8に示した薄膜硬度計による E_r の測定結果にはばらつきがあるが、その分布範囲は浸硫層、Ni-Pめっき層の順に大きく、そのいずれの場合も母材の E_r より小さい。平均値から求めた E_r はNi-Pめっき層で133GPa、浸硫層で44.5GPa、母材で208GPaである。式(2)に示したように E_r には弾性係数だけでなくポアソン比も含まれているが、弾性係数とポアソン比を個別に求めそれぞれの影響について検討することは困難であるため、以下の解析ではポアソン比を0.3とし、弾性係数の影響のみ検討する。

図9は、接触圧力 p_0 、直交せん断応力 τ_{yz} 、最大せん断応力 $\tau_{\max}$ およびミーゼス応力 σ_{Mises} と硬さ HV の比の振幅の最大値 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ 、 $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ に及ぼす改質層の弾性係数 E_1 および改質層厚さ h_1 の影響を示す。図中の添字0および1はそれ

Fig.9 Influence of elastic modulus E_1 and thickness h_1 of modified layer on $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$, $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$, and $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$

ぞれ未処理ローラおよび表面改質ローラの値であることを示す。解析ではローラ接触幅を4mm、摩擦係数を零、法線荷重を6.67kN ($p_{\max}=2\text{GPa}$)とした。本研究の転がり疲れ試験のような線接触の場合、ローラの接触端に大きな接触圧力を生じる。そこで図9には接触幅中央 $x=0$ および接触端 $x=2$ の yz 平面における値を示した。接触幅中央および接触端のいずれの場合も改質層の弾性係数 E_1 が小さいほど、また、改質層厚さ h_1 が大きいほど、表面改質ローラの $(p_0)_{\max}$ 、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ 、 $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ は小さい。ローラ幅中央 $x=0$ では改質層による $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ の低下は $E_1/E_0=0.1$ の場合でさえ数%にすぎないが、接触端 $x=2$ では E_1 の小さい改質層による $\{(p_0)_{\max}\}_1$ 、 $\{A(\tau_{yz}/HV)_{\max}\}_1$ 、 $\{A(\tau_{\max}/HV)_{\max}\}_1$ および $\{A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}\}_1$ の低下は顕著であり、数 μm の膜厚であっても効果が大きい。

図9の解析結果は、ローラの摩耗がない場合を想定して行われたが、図5、6に示したように浸硫処理ローラの場合には改質層の摩耗が生じた。そこで、ローラの摩耗が接触圧力と表面下応力に及ぼす影響を図10に

示すモデルについて検討する。図10中の δ は両ローラの zx 平面($y=0$)における初期間隙である。形状Aは摩耗がない場合、形状Bは摩耗が生じた場合である。形状Bは、断面曲線の測定結果から決定され、摩耗深さは $10\mu\text{m}$ である。浸硫処理の場合、従動側ローラの軸方向の摩耗は同様であったため、形状Bの決定には駆動側ローラの摩耗形状のみを考慮した。なお、本モデルは表面改質層が一樣に摩耗した場合を想定しているため、図11に示す結果は改質層がない場合について解析した。図6に示したように浸硫処理ローラでは運転初期段階から摩耗が生じており、スポーリング損傷発生時点では改質層の大部分が摩耗除去されていた。このため接触部では改質層がないものとして解析しても妥当な結果が得られるものとする。

図11は、 p_0 、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ 、 $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ に及ぼすローラの摩耗形状の影響を示す。 $p_{\max}$ はヘルツの式により求めた最大接触圧力である。接触幅中央付近ではローラの摩耗による p_0 、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ 、 $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ の変化はほとんどない。一方、表面改質層の摩耗に

Fig.10 Initial gap δ of roller model

Fig.11 Influence of wear of modified layer on contact pressure and subsurface stress

より駆動側ローラの摩耗形状が従動側ローラの形状と一致した場合、接触幅端部では接触圧力が低下し、それに伴い接触端 $x=2$ 近傍での $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$, $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ の値が小さくなっている。とくに接触端圧力の影響が大きい $A(\tau_{\max}/HV)_{\max}$ および $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)_{\max}$ の値の減少が顕著である。

図12は、図11に示した応力と硬さの比の振幅 $A(\tau, \sigma/HV)$ が最大となる深さを示す。 $A(\tau, \sigma/HV)$ が最大となる深さは、 $A(\tau, \sigma/HV)_{\max}$ が最大値をとる位置で概ね最も浅い。また、 $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)$ が最大となる深さは、 $A(\tau_{\max}/HV)$ が最大となる深さとほとんど同じである。 $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)$ および $A(\tau_{\max}/HV)$ が最大となる深さ

Fig.12 Depth below surface of $A(\tau, \sigma/HV)_{\max}$

は、接触幅中央付近では $A(\tau_{yz}/HV)$ が最大となる深さより深い、大きな接触圧力が生じる接触端部では浅い。特に形状Aの場合の $A(\sigma_{\text{Mises}}/HV)$ および $A(\tau_{\max}/HV)$ が最大となる深さは接触端部では表面近傍である。応力と硬さの比の振幅の最大値 $A(\tau, \sigma/HV)_{\max}$ が損傷の発生および進展に関係するならば、接触端部付近の損傷深さは、形状Aすなわち未処理ローラおよびNi-Pめっきローラでは浅く、形状Bすなわち浸硫処理ローラでは深いとも考えられる。しかし、図4に示したようにいずれのローラでも損傷の外観に顕著な違いはなく、接触端部の損傷深さも大差なかった。本実験では損傷の起点となるき裂の発生個所は特定できていないが、損傷は全て幅4mmの従動側ローラに生じたことから、ローラ端部の影響は無視できないと考えられる。

図9の解析結果より弾性係数の小さい表面改質処理により接触端でのローラの接触圧力および表面下応力が小さくなる。また、浸硫処理ローラのように比較的摩耗が大きい表面改質処理の場合には、図11に示したように表面改質層の摩耗に伴う両ローラの形状の一致により、接触端における接触圧力の低下が期待できる。ポアソン比の影響を無視すれば、図8よりNi-Pめっきおよび浸硫処理の場合の E_1/E_0 の値はそれぞれ約0.6および約0.2であり、接触端の接触圧力と表面下応力の低下は浸硫処理の場合で大きく、このことは図2に示した純転がり接触条件下における浸硫処理円筒の転がり疲れ強さ向上の実験結果と対応している。また、比較的摩耗の大きい浸硫処理の場合、摩耗に伴う接触端

部の接触圧力の減少が期待でき、このことも転がり疲れ強さ向上の要因となったと考えられる。一方、Ni-Pめっきローラの場合滑り転がり接触条件では摩擦係数が小さいことなどにより浸硫処理ローラより転がり疲れ強さは大きかった⁽¹⁾が、摩擦係数の影響はほとんど無視できる本実験の純転がり接触条件では転がり疲れ強さはそれほど大きくなかった。Ni-Pめっきローラの弾性係数が浸硫処理ほど小さくないことに加えて、めっき層の摩耗が小さいため両ローラの形状の一致性が小さく、接触端部の接触圧力が浸硫処理の場合より高かったためと考えられる。

浸硫処理のように弾性係数の小さい表面改質処理では、わずか数 μm の改質層厚さであっても接触端での応力の低減効果が大きい。また、実際の機械要素への適用を考えたとき、運転初期のなじみ段階での応力の低減および組付け誤差などにより生じ得る端荷重の低減効果も期待できる。従来、表面き裂発生に起因するピッチング強さの向上のため、摩擦係数の低減を主目的として固体潤滑剤の焼成膜などが一部の自動車用変速機歯車に適用されているが、適切な表面改質法の適用によりピッチング強さの向上のみならず、内部き裂発生に起因するスポーリングに対しても有効であることが示された。

6. 結 言

転がり疲れ強さに及ぼす表面改質処理の影響を明らかにするため、無電解Ni-P合金めっき処理および浸硫処理されたローラの転がり疲れ試験が、純転がり接触条件で行われた。接触応力および表面下の応力に及ぼす表面改質層の影響を境界要素法により検討し、転がり疲れ強さに及ぼす表面改質処理の影響を調べた。得

られた結果は下記のとおりである。

(1) 純転がり接触条件では、無電解Ni-P合金めっきローラおよび浸硫処理ローラの転がり疲れ強さは未処理ローラより大きく、浸硫処理ローラの転がり疲れ強さが最高であった。

(2) いずれの表面改質ローラの場合も、損傷は表面下のき裂発生に起因するスポーリング損傷であった。

(4) 弾性係数の小さい表面改質層で覆われたローラの接触応力および表面下の応力は、未処理ローラの場合より小さい。特に接触端部で顕著である。

(5) 改質層の摩耗による相手ローラとの形状一致性がある場合、接触端部の接触応力が減少し、それに伴い表面下の応力も減少する。

(6) 純転がり接触条件における表面改質ローラの転がり疲れ強さの向上は、主として接触端部の接触圧力の低下と表面下応力の減少によるものと考えられた。

本研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたことを付記し、謝意を表する。

文 献

- (1) 吉田彰・藤井正浩・原野智哉・木村哲也、邵惠江・三浦健蔵、日本機械学会論文集(C編)，64-621 (1998)，1801-1807.
- (2) J. O. SMITH & C. K. LIU, Trans. ASME, *J. Appl. Mech.*, 75 (1953), 157-166.
- (3) 梶井邦彦、日本機械学会論文集(A編)，53-492 (1987)，1631-1637.
- (4) M. E. O'Hern, R. H. Parish, & W. L. Oliver, *Thin Solid Films*, 181 (1989), 157-166.
- (5) M. Z. Hug & J. P. Celis, *Wear*, 225-229 (1999) 53-64.