表面改質ローラの転がり疲れとスカuffing* (無電解 Ni-P 合金めっきローラと浸硫処理ローラの場合)

吉田 彰^{*1}, 藤井正浩^{*1}, 原野智哉^{*2}
木村哲也^{*3}, 邵 惠 江^{*4}, 三浦健藏^{*5}

Rolling Contact Fatigue and Scuffing of Surface Modified Rollers (In Case of Electroless Ni-P Alloy Plated Rollers and Sulfurized Rollers)

Akira YOSHIDA, Masahiro FUJII, Tomoki HARANO,
Tetsuya KIMURA, Huijiang SHAO and Kenzo MIURA

The influence of the surface modification treatment on the rolling contact fatigue and the scuffing capacity of rollers was examined by two cylinder test under oil lubrication. The surfaces of test rollers were modified by the electroless Ni-P alloy plating and the sulfurizing. The rolling contact fatigue strength and the scuffing capacity of the surface modified rollers were larger than those of the non-coated rollers. In the fatigue test the failure mode of both the surface modified rollers and the non-coated rollers was the spalling caused by subsurface cracking. The friction coefficient of the Ni-P plated rollers was smaller than that of the non-coated rollers, and the surface roughnesses of the modified rollers were decreased with increasing wear of modified layers. The small friction coefficient and the small roughness contribute to the improvement of the scuffing capacity, and moreover they might reduce the surface contact stresses and the rolling contact fatigue strength might be improved.

Key Words: Tribology, Surface Modification, Rolling Contact Fatigue, Scuffing, Wear, Friction

1. 緒 言

近年, 諸機械の発達に伴い, 歯車や軸受などの機械要素部品は高速・高負荷下での使用が増している。また, 自動車の伝動装置に見られるように軽量・コンパクト化が推進されるに伴い, 機械要素の負荷条件ならびに潤滑条件は激しくなるすう勢にある。高い耐久性および信頼性が要求される歯車や軸受には, 転がり疲れ強さや耐スカuffing性などの表面強度の向上が求められる。表面強度向上の一方法として, 材料に表面改質を行い, 母材の表面損傷を軽減・防止する試みが行われている⁽¹⁾⁽²⁾。本研究では, 従来の熱処理による表面硬化処理に加えて, 表面改質処理による複合表面処理を施し, 歯車をはじめとする滑り・転がり機械要素の疲れ強さならびに耐スカuffing能の向上を図る。本研究で取上げる表面改質処理は, 無電解 Ni-P 合金めっき処理および浸硫処理である。これらは, 主として耐摩耗性, 耐腐食性の向上を目的として行わ

れる表面改質法であり, 油潤滑下での耐スカuffing性向上の可能性のある表面改質法として注目されているが, その転がり疲れ強さに及ぼす影響は明らかでない。

本研究では, 二円筒試験機を用いて, 熱処理後に無電解 Ni-P 合金めっき処理および浸硫処理を施したローラの転がり疲れ試験ならびにスカuffing試験を行い, 転がり疲れ強さおよびスカuffing強さに及ぼす表面改質の影響を実験的に明らかにした。

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 SCM 415 である。ローラ側面からの浸炭の影響を除くため, 試験片材は, 直径 60.2 mm 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, 焼入れ・焼戻し後, 研削仕上げされた。図2は, 転がり疲れ試験に用いたローラの硬さ分布の一例を示す。仕上げ後の表面硬さは約 760 HV, 有効硬化層深さは約 1 mm, 軸方向表面粗さは約 0.3 μmRa であった。

図3は, スカuffing試験に用いた試験ローラの形状および寸法を示す。高速側ローラの軸方向に半径 60 mm のクラウニングが施された。試験片の材質は

* 原稿受付 1997年5月23日。

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

*² 正員, 岡山大学大学院。

*³ (株)村田製作所 (☎ 617-0824 長岡京市天神 2-26-10)。

*⁴ 奥村鍛工(株) (☎ 709-0432 岡山県和気郡和気町大中山 1765)。

*⁵ 正員, 三井造船(株) (☎ 706-0014 玉野市玉原 3-16-1)。

Fig. 1 Shapes and dimensions of rollers in fatigue test

Fig. 2 Hardness distribution of roller in fatigue test

Fig. 3 Shapes and dimensions of rollers in scuffing test

高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 である。試験片は焼入れ・焼戻し後、研削仕上げされた。研削後の表面硬さは約 800 HV、高・低速側ローラの軸方向表面粗さは、それぞれ約 $0.2 \mu\text{mRa}$ および約 $0.1 \mu\text{mRa}$ であった。なお、スカフティング試験に用いたローラの材質および熱処理は、転がり疲れ試験に用いたローラの場合と異なる。スカフティングに及ぼすローラ材質の影響を調べた結果では、S 45 C ずぶ焼入れローラ (約 700 HV) と SNCM 420 浸炭焼入れローラ (約 900 HV) の場合で、スカフティング強さに有意差はなかった⁽³⁾。この

(a) SCM 415

(b) SUJ 2

Fig. 4 Observations of cross section and EPMA analyses of test rollers

ことから、本実験の SUJ 2 ローラと SCM 415 ローラの場合においても、未処理の場合のスカフティング強さの差は小さいと考えられたため、耐スカフティング能に及ぼす表面改質の影響は SUJ 2 ローラを用いて調べられた。

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た。Ni-P めっき処理は、研削仕上げ後のローラを脱脂、酸洗い後、Ni 92 mass%, P 8 mass% の溶液中で行われ、めっき後に耐食性皮膜生成のためのクロメート処理が行われた。浸硫処理は、ローラを脱脂、酸洗い、水洗後、 $190 \pm 5^\circ\text{C}$ の熔融塩中に浸漬保持して行われた。本浸硫処理は、低温処理であり、拡散層の生成は期待できないが、熱処理を施された機械部品の寸法精度および機械的性質を損なわないことに特徴を有している。

図 4 は、試験前の表面改質されたローラの軸方向断面写真と半径方向の EPMA 線分析結果を示す。Ni-P めっきの厚さは約 $8 \mu\text{m}$ 、浸硫層の厚さは位置によりばらつきがあり、平均 $9 \mu\text{m}$ 程度である。薄膜硬度計により測定された改質層の三角錐硬さ (ダイナミック硬さ) は、Ni-P めっき処理で約 300 DH、浸硫処理で約 70 DH であった。なお、同様に測定した、転がり疲れ試験に用いた未処理ローラの表面硬さは約 910 DH であった。表面改質後の転がり疲れ試験用ローラの軸方向表面粗さは、Ni-P めっき処理で約 $0.15 \mu\text{mRa}$ 、浸硫処理で約 $0.3 \mu\text{mRa}$ 、スカフティング試験

Table 1 Properties of #83 turbine oil

Specific gravity,	288/277 K	0.8820
Flash point,	K	543
Pour point,	K	258
Kinematic	313 K	84.19
viscosity, mm ² /s	373 K	10.03
Viscosity index		99
Total acid number, mgKOH/g		0.17

用ローラの軸方向表面粗さは、高・低速側それぞれ、Ni-P めっき処理で約 0.3 μmRa と約 0.1 μmRa 、浸硫処理で約 0.3 μmRa と約 0.2 μmRa であった。

表 1 は、本実験で用いた試料油 #83 タービン油の性状を示す。スカuffing 試験の場合、試料油は 313 ± 1 K に制御され、ローラかみ込み側から毎分 300 ml の割合で圧力給油された。転がり疲れ試験の場合、試料油は 313 ± 5 K に制御され、ローラかみ込み側から毎分 1500 ml の割合で圧力給油された。

3. 実験方法

3.1 転がり疲れ試験 転がり疲れ試験は、ばね負荷式二円筒試験機⁽⁴⁾を用いて行われた。高・低速ローラの回転速度と円周速度は、それぞれ 1800 rpm, 5.65 m/s, および 1432 rpm, 4.50 m/s であり、滑り率は、高速ローラで +20.5%, 低速ローラで -25.7% である。転がり疲れ試験機には振動感受スイッチが取り付けられており、試験ローラの損傷による振動の増大により、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。

3.2 スカuffing 試験 スカuffing 試験は、高速二円筒試験機を用いて、無負荷で高・低速両ローラ回転速度を所定の回転速度に設定した後、荷重を段階的に増加させるステップロード法で行われた⁽⁵⁾。高・低速両ローラ回転速度は、平均転がり速度を 1000 rpm 一定とし、高速側ローラ滑り率 σ_h が 40~90% になるように設定された。二円筒間の法線荷重 P_h は、図 3 の形状のローラにおいて、ヘルツの最大接触圧力 $p_{\max}$ が所定の値になるように加えられた。初期荷重での $p_{\max}$ は 0.8 GPa とし、 $\sigma_h=40\sim60\%$ において $p_{\max}\leq 2.0$ GPa の範囲では 0.2 GPa ずつ、 $p_{\max}>2.0$ GPa の範囲では 0.1 GPa ずつ増加させた。また、 $\sigma_h=70\sim90\%$ においては $p_{\max}$ を 0.1 GPa ずつ増加させた。各荷重段階での運転時間は 300 秒とされた。スカuffing の発生はトルクおよびローラ外周面バルク温度の上昇により判定され、スカuffing が発生すると同時に試験機を停止した。なお、高・低速両ローラの外周面バルク温度は、接触表面下 1 mm,

Fig. 5 Relation between maximum Hertzian pressure $p_{\max}$ and fatigue life N

接触幅中央の位置に設置した線径 0.3 mm のクロメル・アルメル熱電対により測定された。

4. 実験結果

4.1 転がり疲れ強さ 図 5 は、本実験により得られたヘルツ応力 $p_{\max}$ と転がり疲れ寿命 N の関係を示す。未処理ローラの場合も表面処理ローラの場合も、損傷はすべて低速側ローラに生じたため、 N は低速側ローラの繰返し数である。後述するように、損傷はすべて表面下のき裂発生に起因するスポーリングであった。未処理ローラに比べて 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が大きく、Ni-P めっきローラの場合が最高である。また、低速側ローラのみ Ni-P めっきローラを用いた結果 (Ni-P/Non-coating) と高速側ローラにのみ Ni-P めっきローラを用いた結果 (Non-coating/Ni-P) のいずれの場合も、高・低速側ローラに Ni-P めっきローラを用いた場合より転がり疲れ強さは小さく、損傷ローラが未処理ローラである後者の場合では、転がり疲れ強さは未処理ローラ同士の組合せの場合とほぼ同程度である。

図 6 は、損傷ローラの軸直角断面写真を示す。転がり疲れ過程においてローラ表面にピットなどは観察されず、図 6 のような大規模な離損傷を生じ、寿命に至った。図 6(a) の Ni-P めっきローラと図 6(b) の浸硫処理ローラのいずれも、図 6(c) の未処理ローラの場合と同様に、ローラ表面にほぼ平行に形成されたき裂が表面下に観察される。また、表面改質を施していない SCM 415 浸炭ローラを用いた以前の実験においても、生じた損傷はすべて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り⁽⁶⁾、その損傷の外観は、表面改質ローラも含めて本実験の場合と同様

Fig. 6 Observations of cross section of failed rollers

であった。巨視的にみた損傷の外観に表面改質による差はなく、本実験の場合の損傷形態は、すべて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った。

4.2 スカuffィング強さ 図7は、高速ローラの滑り率 σ_h と、スカuffィング発生時のヘルツ応力 $(p_{\max})_s$ 、法線荷重 $(P_n)_s$ 、摩擦係数 μ_s および膜厚比 Λ_s の関係を示す。なお、 $\Lambda_s = h_{\min}/R_{\text{rms}}$ により与えられる。ここで、 $h_{\min}$ は Hamrock-Dowson の式⁽⁷⁾ により求めた最小油膜厚さ、 R_{rms} はスカuffィング発生後の非スカuffィング面の表面粗さから求めるべきであるが、本実験の場合、スカuffィングは接触幅のほぼ全域に及んだため、スカuffィング発生後には非スカuffィング面の表面粗さの測定はできなかった。 $\sigma_h=40\%$ では Ni-P めっきローラも未処理ローラも、本試験機の最大荷重においてスカuffィングは発生しなかった。Ni-P めっきローラの $(p_{\max})_s$ は、比較的低滑り率の $\sigma_h=50\%$ では未処理ローラの場合と同じであったが、60%以上の σ_h では未処理ローラの場合に比べて高く、高滑り率ほどスカuffィング荷重に及ぼす Ni-P めっき処理の効果が大きい。また、 Λ_s から判定して、Ni-P めっき処理を施すことにより、高い滑り率においても、より厳しい潤滑状態まで運転可能であったといえる。 μ_s は、未処理ローラでは高滑り率ほど大きい、Ni-P めっきローラでは約 0.07 で小さく、滑り率によらずほぼ

Fig. 7 Relation between specific sliding σ_h and maximum Hertzian pressure $(p_{\max})_s$, normal load $(P_n)_s$, friction coefficient μ_s and film parameter Λ_s at scuffing occurrence

一定である。

次に、浸硫処理ローラの場合、全般に未処理ローラの場合より高い $(p_{\max})_s$ までスカuffィングが発生しなかったが、両者の差は小さい。また、浸硫処理ローラの μ_s は、未処理ローラの場合より若干小さいが、 Λ_s に両者の差はほとんどない。浸硫処理ローラの耐スカuffィング能は、未処理ローラよりやや大きい、Ni-P めっきローラと比較すると小さい。

図8は σ_h とスカuffィング直前のローラ外周面バルク温度 $(T_b)_s$ の関係を示す。図8中の $(T_b)_s$ は高・低速ローラの高いほうの温度である。なお、スカuffィング発生前の荷重(スカuffィングOK 荷重)の T_b がスカuffィング発生時の T_b より高かった場合にはその温度もプロットし、OK 印を付した。 $\sigma_h=50\%$ では、Ni-P めっきローラと未処理ローラでは、同じ $p_{\max}$ でスカuffィングが発生しているが、 μ_s が小さかった Ni-P めっきローラの $(T_b)_s$ は、未処理ローラの場合より約 40 K 低い。一方、 $\sigma_h=60\sim90\%$ の範囲

Fig. 8 Relation between σ_h and bulk temperature of outer surface $(T_b)_s$ just before scuffing

Fig. 9 Profile curves of rollers in fatigue test

では、Ni-P めっきローラのほうが高い T_b までスカuffing が発生していない。浸硫処理ローラの $(T_b)_s$ は、 $(p_{\max})_s$ の場合と同様に、未処理ローラの場合より若干高く、 T_b で評価したスカuffing 能もわずかに向上している。

5. 考 察

図 9 は、転がり疲れ試験に用いた高速側ローラの断面曲線の変化の一例を示す。未処理ローラの場合、摩擦もほとんどなく表面粗さの変化も小さいのに対して、Ni-P めっきローラと浸硫処理ローラのいずれも、比較的小さい繰返し数から表面改質層の摩耗が進行している。 $N=1.6 \times 10^6$ の繰返し数において、摩耗深さは、Ni-P めっきローラで $6 \mu\text{m}$ 程度、浸硫処理ローラで $9 \mu\text{m}$ 程度あり、浸硫処理ローラでは改質層の厚さにほぼ等しい。摩耗底部の表面粗さに注目すると、Ni-P めっきローラおよび浸硫処理ローラのいずれの場合も未処理ローラより滑らかになっており、改質層の摩耗に伴う表面粗さの減少が認められる。

図 10 は、スポーリング損傷後のローラの非損傷部表面の軸方向 EPMA 線分析結果を示す。Ni-P め

(a) Ni-P, $p_{\max}=2.4 \text{ GPa}$, $N=4.79 \times 10^6$

(b) Sulfurizing, $p_{\max}=2.25 \text{ GPa}$, $N=3.21 \times 10^6$

Fig. 10 EPMA line analyses of rollers in fatigue test

(a) Ni-P, $\sigma_h=40\%$, $p_{\max}=3.0 \text{ GPa}$

(b) Sulfurizing, $\sigma_h=50\%$, $p_{\max}=3.0 \text{ GPa}$

Fig. 11 EPMA line analyses of rollers in scuffing test

きローラの接触面には局所的に Ni および P が検出され、スポーリングが発生するまで Ni-P めっきは残存していた。一方、浸硫処理ローラの場合、接触面に S はほとんど検出されず、浸硫層はほとんど摩耗脱落していた。

スカuffing 試験に用いたローラの場合も改質層の摩耗状況は、図 9 の転がり疲れ試験に用いたローラの場合と同様であり、スカuffing 発生前の摩耗深さは、Ni-P めっきローラではめっき層内にとどまっていた、浸硫処理ローラでは改質層厚さとほぼ等しかった。図 11 は、 $p_{\max}=3.0 \text{ GPa}$ でスカuffing が発

Fig. 12 Friction coefficient μ in fatigue test

生しなかった場合の低速側ローラ接触面軸方向のEPMA線分析結果を示す。図11(a)のNi-Pめっきローラの場合、接触面にはNiおよびPが残存している。また、図11(b)の浸硫処理ローラの場合、接触面にSはほとんど検出されないことから、浸硫層は摩耗脱落していたことが確認された。また、Oの分析結果から、非接触面の浸硫層にもOが検出される一方、浸硫層が摩耗脱落している接触面にもOが検出された。この接触面のOは、耐スカuffing能向上に寄与する酸化膜の形成を示唆するものである。以上のように、スカuffing試験の場合、Ni-Pめっきローラではスカuffing損傷直前でも残存していたNi-Pの効果で摩擦係数が小さかったことが、また、浸硫処理ローラでは浸硫層の摩耗に伴い表面粗さが低下したことが、スカuffing強さの向上に影響を及ぼしたと考えられる。

図12は、転がり疲れ試験に用いたローラの摩擦係数 μ を示す。摩擦係数の測定は、図4に示した転がり疲れ試験とは別に、一組のローラを用いて順次荷重を増加させる方法で行われた。Ni-Pめっきローラ同士の場合と、Ni-Pローラと未処理ローラの組合せで低速側ローラにNi-Pローラを用いた場合で、 μ はほとんど差がなく、低速側に未処理ローラを用いた場合および未処理ローラ同士の場合に比べて小さい。また、浸硫処理ローラの場合、図9に示したように小さい繰返し数で摩耗が進行したため、 μ は未処理ローラの場合と大差ない。そこで、図12中には、低速側ローラにNi-Pローラを用いた場合の μ の近似曲線を実線で、その他の組合せの場合の μ の近似曲線を破線で示した。

図13は、 $p_{\max}$ と測定したスポーリング損傷深さの関係を示す。図13には、一つのはく離損傷において

Fig. 13 Relation between $p_{\max}$ and spalling depth of failed rollers

数箇所測定した最大値と最小値の範囲を示した。また、Smithらの解析結果⁽⁸⁾に基づいて、図12の実線および破線で示した μ の値を用いて計算された、最大せん断応力 τ_{45° と硬さHVの比の振幅 $A(\tau_{45^\circ}/HV)$ および直交せん断応力 τ_{yz} とHVの比の振幅 $A(\tau_{yz}/HV)$ が最大となる深さを実線および破線で示した。損傷深さには100 μm から600 μm の範囲でばらつきがあるが、ほぼ $A(\tau_{yz}/HV)$ が最大となる深さを中心に分布しており、また、表面改質の有無による明確な差は認められない。このことは、表面改質の有無によらず、スポーリングき裂発生が、直交せん断応力に関係していることを示唆する。

鋼ローラの転がり疲れ強さに関し、損傷がスポーリングであった場合、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ の値が小さいほど寿命は増大し、この値が同じであれば寿命も同じであるとされた⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。また、Smithらの解析結果によれば、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ の値に及ぼす接線力の影響は小さく、図13に示したように本実験程度の μ の差が $A(\tau_{yz}/HV)$ の値が最大になる深さに及ぼす影響も小さい。しかし、本実験のNi-Pめっきローラおよび浸硫処理ローラの場合、 $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ の値が同じであっても未処理ローラの場合より寿命は大きかった。図9に示したように、Ni-Pめっきローラと浸硫処理ローラのいずれも、改質層の塑性変形および摩耗に伴って未処理ローラより接触面の粗さは小さくなった。また、Ni-Pめっきローラの場合、スポーリングおよびスカuffing損傷前の接触面では、Ni-Pは局所的

に残存しており、摩擦係数は未処理ローラの場合より小さかった。先に述べたように、摩擦係数の大小が $A(\tau_{yz}/HV)_{\max}$ の値に及ぼす影響は小さいものの、摩擦係数が小さいほど τ_{yz} の最大値は小さい。加えて、摩擦係数が小さければ、ローラの温度上昇が小さく、このことにより、ローラの硬度低下が小さい。これらにより、本実験の表面改質ローラの場合、転がり疲れ強さが未処理ローラの場合より向上したと考えられる。

以上、表面改質処理が転がり疲れ強さに及ぼす影響を実験的に明らかにし、考察を加えたが、現段階では定量的に表面改質ローラの転がり疲れ強さが向上した理由を説明できていない。ところで、接触応力は表面粗さにより増大するが、母材より硬度の低い表面層が存在するとき、粗さにより生じる接触応力は減少する⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。表面近傍の応力の大小は、直接的にスポーリングき裂発生に影響を及ぼさないが、表面下に生じたき裂の表面への進展に影響を及ぼすことも考えられ、表面下のき裂が表面に進展し、はく離に至る破壊力学的解析を、表面改質層が存在する場合について行う必要があると考えられる。今後の課題として、これらの点について詳細に検討したいと考えている。

6. 結 言

無電解 Ni-P 合金めっき処理および浸硫処理を施したローラの転がり疲れ強さとスカuffing強さを二円筒試験により調べた。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 無電解 Ni-P めっきローラのスカuffing強さおよび転がり疲れ強さは、未処理ローラの場合より大きかった。スカuffing強さの向上は、特に高滑り率で顕著であった。

(2) 浸硫層の摩耗が速かった浸硫処理ローラの場合、未処理ローラの場合と比較して、スカuffing強さは若干大きい程度であったが、転がり疲れ強さは向上した。しかし、それらは無電解 Ni-P めっきローラの場合より小さかった。

(3) 転がり疲れ試験において生じた表面損傷は、表面改質の有無によらず、すべて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った。スポーリング損傷の深さに及ぼす表面改質の影響は認められなかった。

(4) 無電解 Ni-P 合金めっき層は損傷発生直前にも残存しており、摩擦係数は小さかった。一方、浸硫層は、比較的小さい繰返し数で摩耗脱落し、損傷発生直前の接触面には残存していなかった。いずれの表面改質の場合も、改質層の摩耗にともない接触面の表面粗さが低下した。

(5) 無電解 Ni-P 合金めっきでは摩擦係数が小さいことが、浸硫処理では改質層の摩耗に伴う表面粗さの低下が、耐スカuffing能の向上ならびに転がり疲れ強さの向上に寄与したと考えられた。

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) 羽島正・君島孝尚・成田豊伸, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, (1992), 613-616.
- (2) HUSHENG, G., HAICHENG, G. and HUIJIU, Z., *Wear*, 142 (1991), 291-301.
- (3) 小幡文雄・藤田公明・藤井正浩, 潤滑, 32-9 (1987), 679-686.
- (4) 藤田公明・吉田彰・山本敏夫, 潤滑, 21-4 (1976), 256-263.
- (5) 吉田彰・藤井正浩・鴨川秀幸・松尾浩平・宮西希一, 日本潤滑学会トライボロジー会議予稿集, (1992), 615-618.
- (6) 吉田彰・藤田公明・王秀琦・赤沢正久・片山昌, 機論, 51-467, C (1985), 1532-1540.
- (7) HAMROCK, B. J. and DOWSON, D., *Trans. ASME, Ser. F*, 99-2 (1977), 264-276.
- (8) SMITH, J. O. and LIU, C. K., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 75 (1953), 157-166.
- (9) 藤田公明・吉田彰, 機論 (第3部), 43-372 (1977), 3150-3159.
- (10) 藤田公明・吉田彰, 機論, 45-396, C (1979), 936-944.
- (11) MERRIMAN, T. and KANNEL, J., *Trans. ASME, J. Tribol.*, 111 (1989), 87-94.
- (12) COLE, S. J. and SAYLES, R. S., *Trans. ASME, J. Tribol.*, 114 (1992), 334-340.