

りん酸マンガン被膜処理による耐ピーリング軸受

浅井康夫 本橋信綱 榊 齊亮

Anti-Peeling Rolling Bearing with Manganese Phosphate Treatment

Y. ASAI N. MOTOHASHI Y. SAKAKI

Peeling occurs on rolling bearing raceway contacts with the rough companion surfaces under poor lubricating conditions. Manganese phosphate treatment which cost is relatively cheap was selected for preventing contact surface from peeling. Anti-peeling rolling bearings with special manganese phosphate treatment have been developed. In this report, it has been confirmed by the result of rolling fatigue tests that the manganese phosphate coating can prevent raceways from peeling, and its effect is induced by the roughness truncation and the increase of oil film formation.

1. はじめに
2. 開発の考え方
3. 耐ピーリング表面
 - 3.1 りん酸マンガン被膜の適用
 - 3.2 耐ピーリング性能
4. ピーリング抑制効果
 - 4.1 耐ピーリング表面の油膜形成
 - 4.2 駆動円筒の粗さの経時変化
 - 4.3 粗さ突起半径の影響
5. 転がり軸受への適用
6. おわりに

1. はじめに

近年の環境への負荷軽減の配慮から、自動車のパワートレイン系オイルの交換頻度削減、メンテナンスフリー化、あるいは低粘度オイルへの移行が指向されている。潤滑状態はますます厳しくなり、さまざまな表面損傷が発生しやすくなる。金属表面の高性能化、高信頼性が求められるが、一方でコストの制約も厳しい。

ピーリングは表面起点型疲労損傷の一つであり、大きさが0.1mm以内で深さ10 μ m以下の微小はくりの密集した状態をいう¹⁾。相手材が粗く潤滑油膜が不十分な状態で平滑な側に発生し、自動車エンジンカム用ローラフォロア軸受のカムとの接触面、針状ころ軸受のローラなどでしばしば問題となる損傷である。

厳しい潤滑条件下において表面損傷を防止し、かつ、コストについても配慮した耐ピーリング軸受を開発したので報告する。

2. 開発の考え方

潤滑状態の過酷度を示すパラメータとして膜厚

比 h_0 が一般に使用される。値は通常中央油膜厚さ h_0 と接触する2面の合成粗さの比で定義される。値が小さくなると転がり寿命は短くなり²⁾、損傷の形態は内部起点型から表面起点型に移行する。また、油膜の破断による焼付きや異常摩耗の発生程度も 値と関係すると考えられる。ピーリングも含めて表面で発生する損傷を防止するには潤滑状態を改善する必要がある。動粘度の大きい潤滑油を使用するか表面粗さを小さくすれば 値を大きくできるが、この場合には、自動車の燃費やコスト上昇を伴うという問題が生じる。

一般に、機械部品が組み合わされて実動運転に入る前に、より軽い条件の下でなじみ運転されて接触状態を改善するということが行われている。なじみによってごく初期におけるミクロ的な接触粗さが改善される。平野は機械部品の表面品質を高くするには、高精度加工や材料改善はコスト面で限界があり、なじみ運転技術の適正化により解決できる余地が大きいと述べている³⁾。各種の表面損傷の防止手段として、このなじみ作用を積極的に利用することも検討すべき課題の1つである。

りん酸マンガン被膜は、初期なじみ、油保持性などの性質をもつことからギヤ、カムなどの鉄系

しゅう動部材に広く用いられているが、処理後の粗さ増大、被膜ばらつき、被膜脱落などの問題から高精度を要求される転がり軸受への適用は困難であった。しかし、近年は被膜結晶粒の制御技術の向上により上記課題が克服されつつあり⁴⁾、また、湿式で一度に多量の処理が可能のため低コストであるという利点がある。こういったことから、今回、りん酸マンガンを被膜のなじみ効果に着目し、ピーリングなどの表面損傷の防止を目的として転がり接触面への適用を検討した。

3. 耐ピーリング表面

3.1 りん酸マンガンを被膜の適用

りん酸マンガンを被膜を転がり接触面へ適用するためには、被膜/下地を最適化する必要がある。りん酸マンガンを被膜は薬液(表面調整剤、処理液)・処理条件の組み合わせで種々の被膜/下地ができるので、さまざまな被膜表面を試作し、転がり接触条件下で耐ピーリング評価を行って、特殊なりん酸マンガンを被膜処理を施した表面を開発した。

開発した耐ピーリング表面の模式図を図1に示す。表面は被膜で覆われており、黒色無光沢を呈している。薄膜タイプ処理仕様で被膜厚さは1~4 μmである。結晶粒径が小さいので、従来のりん酸マンガンを被膜より粗さは小さい。りん酸マンガンを被膜生成過程で下地の鉄は液中に溶出し、下地にはピットが形成される。このピットは適度な大きさ、深さ、密度で配置されている。



図1 りん酸マンガンを被膜表面

Schematic diagram of manganese phosphate coating

また、実際の転がり軸受への適用にあたっては、処理過程の鉄溶出による寸法精度の変化、運転中の被膜脱落による過大スキマの発生などがあるので、この点についても配慮している。

3.2 耐ピーリング性能

開発した耐ピーリング表面について2円筒型転がり疲労試験機を用いて20時間運転でのピーリング評価を行なった。表1に試験条件を、試験装置の概略構造を図2に示す。ピーリング評価結果を図3、4ならびに図5に示す。

負荷はコイルばねで与え、潤滑油は試験機上側から無添加タービン油を3 ml/min.滴下した。駆動円筒、従動円筒ともに外径は60mmである。駆動円筒はR30の副曲率を持ち、従動円筒は平坦である。両円筒とも材料は高炭素クロム鋼JIS・SUJ2を用い、熱処理にて硬度を700~750HVにした。駆動円筒の粗さは研削仕上げによって大きく、従動円筒の粗さはラップ仕上げによって小さくしている。従動円筒を母材として、特殊なりん酸マンガンを被膜処理を施した耐ピーリング表面の場合と無処理の場合を試料として試験を行った。

表1 試験条件

Test conditions

最大接触面圧, GPa	2.25
回転数, min ⁻¹	1 000
運転時間, h	20
膜厚比(値)	0.55

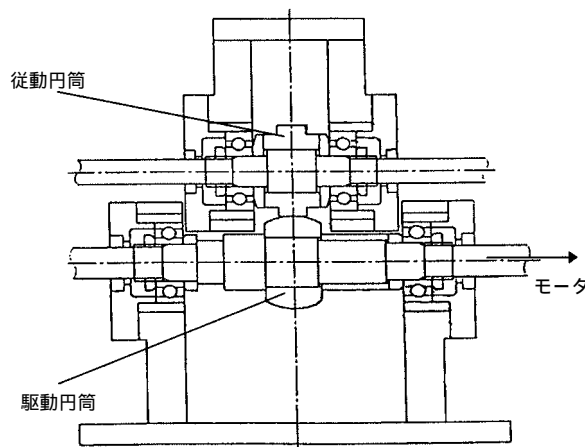


図2 試験機概略

Test equipment

試験後の表面様相を図3に示す。無処理の場合、二股の表面亀裂⁵⁾を伴ったピーリングが発生している。被膜処理を行なった場合は、表面の被膜が脱落して下地のピットが観察されているが、形状が不定形でありピーリングの微小なはくりとは異なる。また、MnおよびPについての表面をEPMA面分析した結果、図4に示すようにピット内にはりん酸マンガンを残留しており、このピットがピーリングの微小なはくりではないことが確認された。

図5は試験後の表面をレーザー顕微鏡で観察し画像処理によりピーリング面積率を求めた結果である。耐ピーリング表面ではピーリングの発生はなかったが、無処理表面では13.5~36%のピーリング面積率となった。

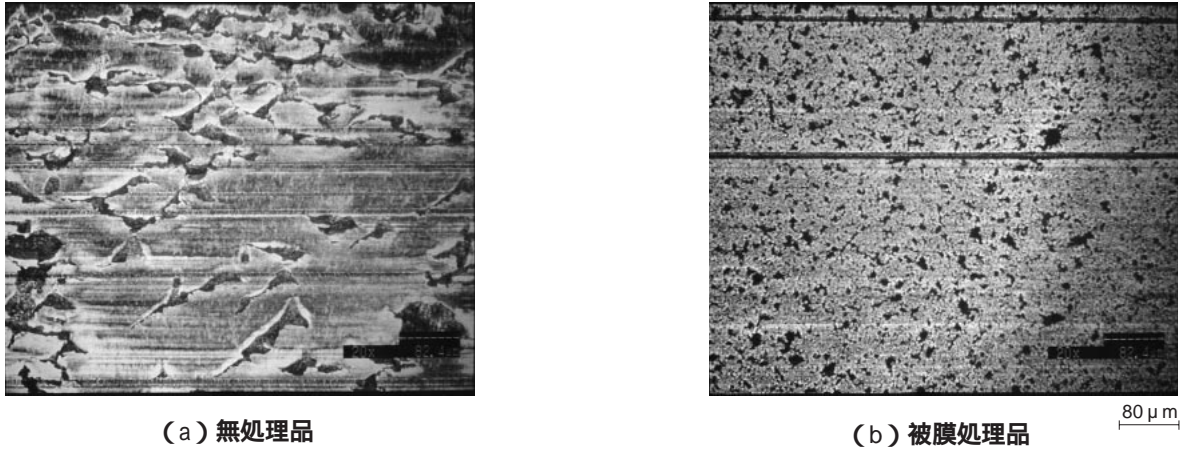


図3 試験後の表面様相
Appearance of surface after running

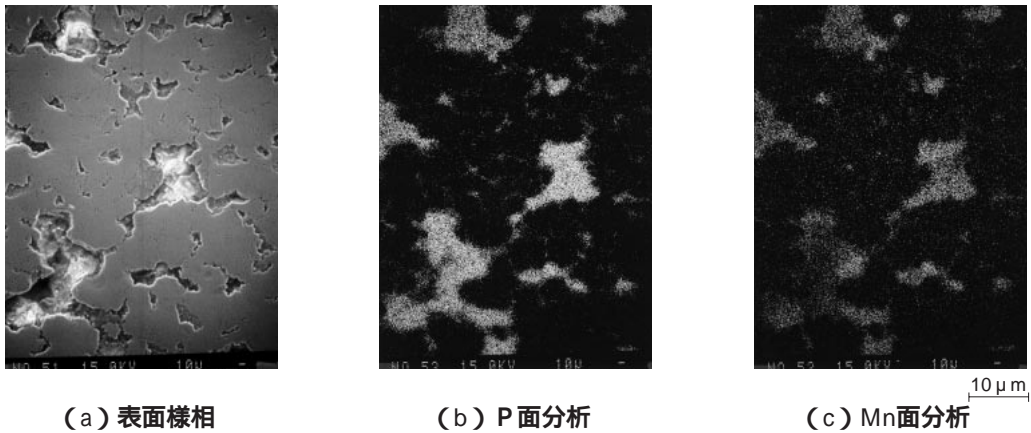


図4 被膜処理品の表面元素分析結果(EPMAを用いた)
EPMA image and schematic drawing

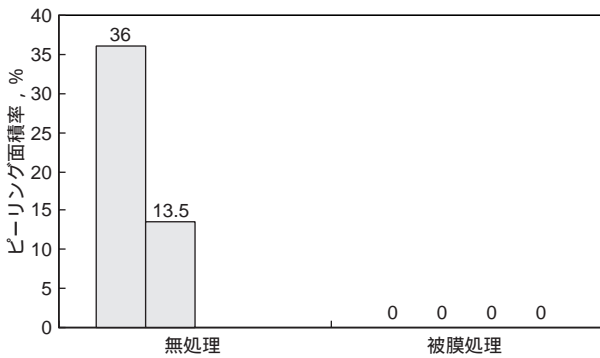


図5 被膜処理とピーリング面積率の関係
Relationship between coating and peeling damage

4. ピーリング抑制効果

4.1 耐ピーリング表面の油膜形成

上記の試験装置においては支持軸受にセラミック玉軸受を用いており、両円筒軸を電氣的に分離させて、2円筒間の分離電圧の経時変化を測定することができる。上記試験中の分離電圧を測定した結果を図6に示す。測定は電気抵抗法により行い、0.1Vの電圧を印加している。図中で0Vは完

全接触、0.1Vは完全分離の状態を表わしている。無処理表面の場合、分離電圧は試験の間ほとんど接触状態に近い側で推移しているのに対して、耐ピーリング表面では運転初期は完全接触状態であるものの30分ころより分離電圧が上昇し分離側に推移している。このことは、耐ピーリング表面の方が無処理表面よりも油膜形成能力が大きいことを示しており、これによってピーリングの発生が抑制されていることが分かる。

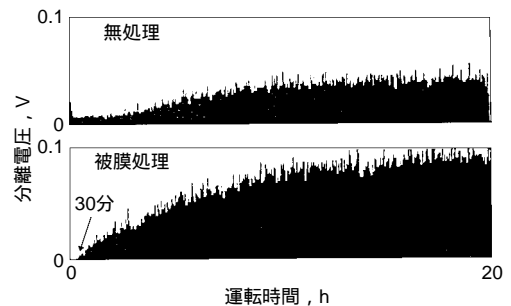


図6 分離電圧の経時変化
Change of voltage by separation of two surfaces

4.2 駆動円筒の粗さ経時変化

耐ピーリング表面の分離電圧が大きく、ピーリングの発生を抑制する理由を駆動円筒の粗さに着目して検討した。

上記2円筒型転がり疲労試験機を用いて、従動円筒が耐ピーリング表面と無処理表面の場合について相手面駆動円筒の運転初期の粗さ変化を追跡、比較した。試験条件を表2に示す。

表2 試験条件
Test conditions

最大接触面圧, GPa	2.25
回転数, min ⁻¹	1 000
駆動円筒初期粗さRq, μm	0.84
膜厚比(値)	0.45

図7に相手面駆動円筒の粗さ変化の代表例を示す。従動円筒が無処理の場合には、運転開始3分後、1時間後で、粗さ振幅が初期粗さよりも小さくなっているのが分かる。一方被膜処理を行った場合には、粗さ振幅の減少に加えて、粗さ突起先端が丸みを帯びているのが分かる。

追跡した駆動円筒の粗さ曲線について、粗さ突起先端の曲率半径RをMcCool⁶⁾の方法(次式)によって求めた。ここで、 m_4 は粗さ曲線の4次スペクトルモーメントである。

$$R = 0.375(\pi/m_4)^2 \quad (1)$$

運転開始から1時間までの粗さRqと突起先端曲率半径(以下突起半径と称す)の経時変化を図8に示す。被膜処理を施すと、無処理に比べて、粗さ振幅が早期に小さくなり、また突起半径も大きくなっていることがわかる。これは、なじみに伴う截頭作用(truncation)によるものである。りん酸マンガン被膜処理を行なうことにより、相手面粗さの減少と粗さ突起の平滑化を促し、いわゆる“なじみ性”が向上することが確認された。

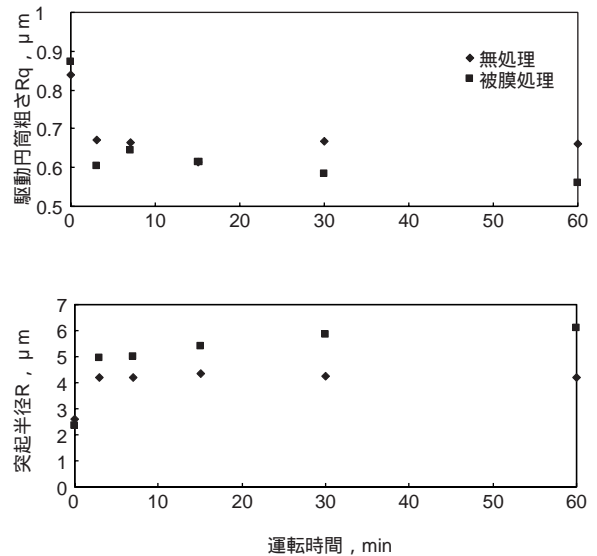


図8 駆動円筒粗さと突起半径の経時変化
Change of roughness Rq and asperity curvature radius

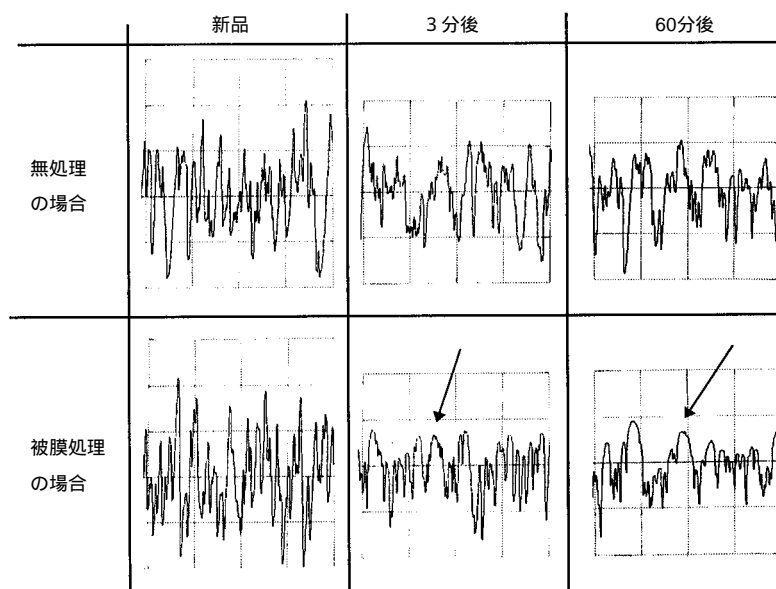


図7 駆動円筒粗さの変化
Change of roughness on driven roller

4.3 粗さ突起半径の影響

塑性指数 は粗さ突起接触状態の過酷度を代表する指数で、Greenwood⁷⁾らはそれを次式のように定義した。塑性指数 は粗さ突起半径Rの1/2乗に逆比例する関係にある。

$$\phi = \frac{E^* \sqrt{\sigma}}{H \sqrt{R}} \quad (2)$$

ここで、E*は等価弾性定数、Hは材料硬さ、はRMS粗さである。また、混合潤滑状態下の全圧力にしめる粗さ突起の圧力分担⁸⁾や軸受寿命にも突起半径が影響すると考えられている⁹⁾。

そこで、前項で確認されたなじみによる突起半径の変化がピーリングの損傷程度にどのように影響を及ぼすか試験を行った。

試験条件を表3に示す。用いた装置は前出の2円筒型転がり疲労試験機である。あらかじめ予備回転によりなじみを行って、種々の突起半径をもつ駆動円筒を用意し、その中から、粗さ(Rq値)が同程度のものを選択して試験に供した。従動円筒はすべてラップ仕上げ品で無処理品である。ピーリングの損傷程度はピーリング面積率で評価した。

結果を図9に示す。駆動円筒の粗さ突起半径とピーリング面積率の間には相関が認められ、ピーリングの損傷程度は突起半径が大きくなるにしたがって小さくなるのが分かる。

表3 試験条件

Test conditions

最大接触面圧, GPa	2.25
回転数, min ⁻¹	1 000
運転時間, h	20
膜厚比(値)	0.68

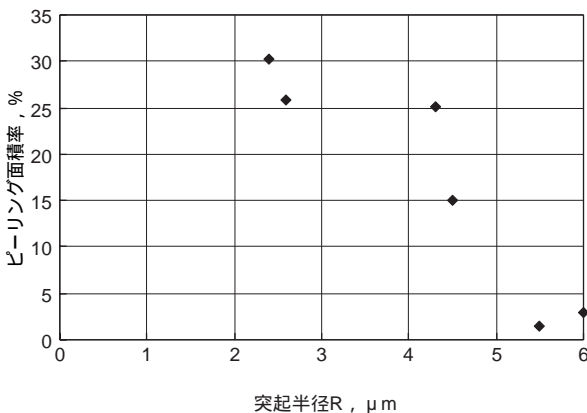


図9 突起半径とピーリング面積率の関係

Relationship between asperity curvature radius and peeling damage

以上のことからリン酸マンガン被膜は相手面をなじませ、粗さ突起先端を平滑化することによって、ピーリングの発生が抑制されると考えられた。また、被膜そのものは回転初期の粗さ突起干渉を緩和することや被膜脱落后もピットに残留するリン酸マンガンの油保持性による油供給効果も寄与していると推定される。

5. 転がり軸受への適用

ピーリングが問題となるエンジンカム用ローラフォロア軸受を対象にして、上記リン酸マンガン被膜処理を適用した耐ピーリング軸受について評価を行なった。

試験機の概略を図10に、試験条件を表4に示す。相手部品には実機カムを用いた。試料軸受にはニードルローラタイプのローラフォロア軸受NAPO817(外径 17, 巾9, 動定格荷重11.1kN)を使用した。カムリフトによって生じる軸受荷重が実機エンジンと同一になるようにばね力を調整した。潤滑はエンジン油10-W30で行い、油温は130 とした。被膜処理はカムと接触する試料軸受の外輪に施し、無処理の製品と比較した。無処理品の外輪は超仕上げ加工をしたものである。

表4 カムフォロア試験での条件

Test conditions

最大接触面圧, GPa	1.0
回転数, min ⁻¹	3 000
潤滑油	エンジン油10W30
潤滑油量, ml / min.	60
油温,	130
運転時間, h	200

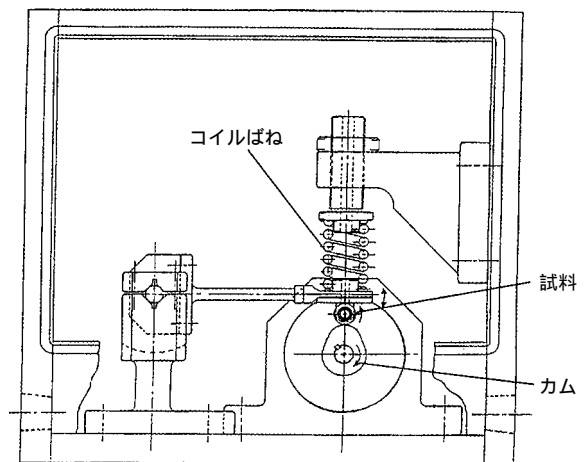


図10 カムフォロア試験機概略

Cam follower test equipment

試験結果を図11に、試験後の外観を図12に示す。無処理品は運転50時間後で薄く一皮むけたピーリングが目視で確認された。耐ピーリング軸受では200時間後で光沢表面になっていたがピーリングの発生は認められず、製品においても十分な耐ピーリング性を有することが認められた。また、相手カム面についても異常摩耗などはなかった。

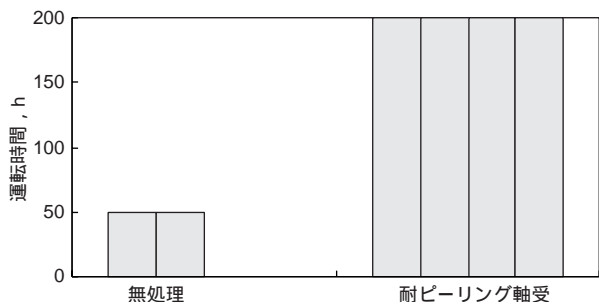
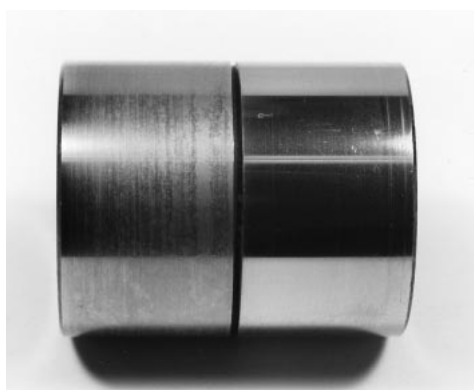


図11 試験結果

Test results



(a) 無処理品 (b) 耐ピーリング軸受

図12 試験品の外観

Appearance of specimen after running

光沢表面について母線形状の測定を行なった結果、これは摩耗によるものではなく、被膜が脱落した結果であることを確認した。被膜は脱落しても薄いので精度上の問題はない。また、エンジンの摺動部材へのりん酸マンガンを被膜の適用は十分使用実績があるので、脱落したりん酸マンガンを他の部品に悪影響を及ぼすことない。

6. おわりに

- 1) りん酸マンガンを被膜処理を施し、被膜/下地を最適化した耐ピーリング表面を開発した。
- 2) りん酸マンガンを被膜がピーリングを抑制する理由は以下のように考えられる。
 - (1) りん酸マンガンを被膜は相手面をなじませ、転がり接触面間の分離電圧を増大させる。
 - (2) 粗さ突起半径はピーリングの損傷程度に影響を与え、なじみによって突起半径が大きくなる。
- 3) りん酸マンガンを被膜を適用した耐ピーリング軸受は、実機を用いた耐久試験でも十分な耐ピーリング性が確認され、実機部品への攻撃性も無いことが確認された。

最後に、本軸受を開発するにあたり、試料製作等協力頂いた日本パーカライジング株式会社殿に謝意を表します。

参考文献

- 1) 赤松良信：トライボロジスト vol.37, no.7 (1992) 533.
- 2) J. C. Skurka : Trans. ASME, J. Lub. Tech. (1971) 28.
- 3) 平野富士夫：潤滑 vol.30, no.5 (1985) 377.
- 4) 川口 純：表面技術 vol.49, no.8 (1998) 805.
- 5) 室 博, 山本隆司：トライボロジー会議予稿集, 盛岡 (1992-10) 785.
- 6) J. I. McCool : Trans. ASME, JOT. vol.109 (1987) 264.
- 7) J. A. Greenwood and J. B. P. Williamson : Proc. Roy. Soc. London, A295 (1966) 300.
- 8) K. L. Johnson, J. A. Greenwood, S. Y. Poon : Wear vol.19 (1972) 91.
- 9) J. Y. Li, J. J. Kauzlarich and W. E. Jamison : Trans. ASME, J. Lub. Tech. (1976) 530.

筆 者



浅井康夫*
Y. ASAI



本橋信綱**
N. MOTOHASHI



榊 音亮**
Y. SAKAKI

* 総合技術研究所 電子システム研究所
自動車ユニット技術開発部

** 軸受事業本部 自動車技術センター
自動車軸受技術部