

リン酸マンガン皮膜が無添加基油および完全配合油の潤滑下において 浸炭焼入れ鋼の摩擦摩耗特性に与える影響

The effects of manganese phosphate coating on friction and wear properties of case-carburized steel lubricated with additive-free base oil or fully formulated oil

コマツ、東工大・院（正）*山田 健太郎、東工大（正）田中 真二、（非）菊池 雅男、

（名誉）益子 正文、コマツ（正）田村 幸雄、（正）松本 圭司、

Kentaro Yamada*,**, Shinji Tanaka**, Masao Kikuchi**,

Masabumi Masuko**, Yukio Tamura* and Keiji Matsumoto*

*Komatsu Ltd., **Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

近年、環境的な観点から建設機械の燃費向上が求められており、動力伝達を担う各種パワートレインおよび主要構成部品である歯車の小型化による重量低減が必要となる。こうした歯車の小型化はしゅう動面の負荷を従来以上に増大させ、しゅう動面の転動疲労に対する損傷リスクを高めることから、しゅう動面の耐久性向上が求められている。

リン酸マンガン皮膜（以後、MnP 皮膜）は、転動疲労損傷の抑制効果を有する代表的な皮膜処理として知られている[1]。こうした転動疲労損傷の抑制は、元々の粗いしゅう動面に対してしゅう動が繰り返されることで平滑な接触部を作る、いわゆる初期なじみ性に優れることにより、しゅう動面の潤滑状態が改善されることによってもたらされると考えられている[2]。著者らの研究チームでも、歯車に特有の、高負荷かつ転がりすべり接触の条件において、浸炭焼き入れ鋼にリン酸マンガン処理を施すことで摩擦係数が低減し、転動疲労損傷につながる初期現象である、疲労き裂の発生に差が生じることをこれまでに報告している[3]。また、リン酸マンガン処理材は無処理材よりも皮膜剥離後に露出した鋼接触部の摩耗量が多く、特にしゅう動開始後数 10 分程度のしゅう動初期段階において、顕著に鋼接触部が摩耗することも報告している[4]。こうした結果から、MnP 皮膜の存在により、しゅう動初期の鋼接触部の穏やかな摩耗が促進され、上述の摩擦低減および転動疲労損傷の抑制につながっているものと想定している。こうした摩耗の効果は、トライボロジー特性に大きく影響しうる油中添加剤との相乗効果が考えられるものの、摩耗特性に及ぼす油中添加剤の効果はわかっていない。そこで本研究では、転動疲労寿命の向上に寄与するために重要と想定される、MnP 皮膜存在下特有の初期なじみ性、特に初期の摩耗特性が、油中添加剤の有無によりどのように変化するかを実験的に明らかにすることで、MnP 皮膜存在下の初期なじみ性に対する指針を得ることを目的とし、高負荷かつ転がりすべり接触の条件下でしゅう動試験を実施した。

2. 実験

2.1 しゅう動試験

しゅう動試験には、歯車のしゅう動面で生じる転がりすべり接触を模擬可能なボールオンディスク試験機を使用した。試験片には浸炭焼入れ後に研削処理を施した SCM420H 鋼からなるボール（Φ19 mm）、ディスク（Φ32 mm）をそれぞれ使用した。研削処理後の各試験片表面における算術平均高さ S_a は、それぞれボール 0.30 μm 、ディスク 0.20 μm であった。試験は印加荷重 350 N（最大ヘルツ接触面圧: 2.12 GPa 相当）、平均速度 709 mm s^{-1} 、すべり率 -33.4%（ディスク基準）、油温 90 °C の条件で行った。試験油には $99.68 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ @40 °C, $11.4 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ @100 °C の粘度特性を有し、トライボロジー特性に大きく影響する以下の主要添加剤を含む実用作動油（以後、FFO）および、それらの添加剤を含まない無添加基油（以後、BO）を用いた。FFO に含まれる主要添加剤は、耐摩耗添加剤 ZnDTP（0.08 mass%P, prim-/sec-混合物）、無灰分散剤（コハク酸イミド系ビスタイプ）、金属系清浄剤（0.38 mass%Ca、過塩基性カルシウムスルホネート/フェネート混合物）である。

2.2 ディスク試験片

評価対象であるディスク側には研削処理後、後述の表面処理を施した。一般的に鋼にリン酸マンガン処理を施すと、処理中に鋼と皮膜の界面がエッティングにより荒らされ、鋼の下地形状が変化することが報告されている[2]。この下地形状の違いは摩擦係数などの摺動特性にも影響を与える [3,4]。そこで本研究では処理された皮膜のみが摺動特性に与える影響を評価するため、下地形状の影響を排除した以下の 2 種類のディスクを使用した。すなわち、それぞれ ① 研削処理後に MnP 皮膜処理を施したディスク（以後、MnP），② MnP 処理されたディスク上の MnP 皮膜のみを化学的に除去[2]して下地形状のみを残した鋼ディスク（以後、MnP-Removed）である。本実験に使用した MnP 皮膜の膜厚は約 1.0~2.0 μm であった。また MnP-Removed の算術平均高さ S_a は 0.58 μm であり、上述のようにリン酸マンガン処理において鋼の下地形状が変化していることが確認された。

2.3 評価方法

MnP および MnP-removed を対象に、FFO 潤滑下および BO 潤滑下でそれぞれしゅう動試験を実施した（以後、それぞれ MnP(FFO), MnP(BO), MnP-removed(FFO), MnP-removed(BO)）。しゅう動試験はディスクの総接触回数が 3×10^4

回になるまで実施した。摩耗の推移を評価するために、Table 1 に”✓”で示す回数でしゅう動試験を一時停止して試験片を取り出し、走査型レーザー顕微鏡で都度同一箇所の観察を実施した。得られたしゅう動面の形状情報を元に以下の定義に従い、しゅう動部摩耗量を算出した。すなわち、著者らの研究チームが開発した手法により得られた高さデータを補正した後、しゅう動部の観察領域における高さ情報から得られる負荷曲線において、最も緩い傾斜となる割線を基にして定められる一般的な突出谷部パラメータ (*Smr2*) を使用し、接触部および接触に寄与しない谷部との閾値を得た[4]。しゅう動部摩耗量は、こうして得られた接触部の高さ情報のみを抽出し、未しゅう動部との平均高さの差をとって算出した。このしゅう動部摩耗量は、長さ 960 mm × 幅 350 mm の観察領域 3か所の平均値を使用して算出されている。

3. 結果と考察

しゅう動試験中の MnP-removed におけるしゅう動部摩耗量の推移を Fig.1 に示す。Figure 1 の結果から、MnP-removed では、接触回数 1×10^2 回までのしゅう動において、油種によらず 0.2 μm 程度の大きな摩耗が生じていることがわかる。しかしながら、MnP-removed(FFO)において接触回数 3.0×10^4 回までで確認された摩耗量の 2/3 程度が、このわずかな期間に生じているとは考えづらい。そこでこの摩耗が生じた要因を確認するため、摩耗算出領域における負荷曲線を比較した。

Figure 2 に MnP-Removed(FFO)の試験前、接触回数 1.0×10^2 回および 8.0×10^2 回における負荷曲線の推移を、Fig.3 に MnP(FFO)および MnP-removed(FFO)の試験前および 1.0×10^2 回しゅう動後の顕微鏡観察結果をそれぞれ示す。Figure 2 で示した各負荷曲線は、試験前の負荷曲線において負荷面積率が *Smr2* となるときの高さを便宜上 10 μm とし、しゅう動による高さ変化が生じていないと考えられる、各負荷曲線の突出谷部が一致するように高さを合わせている。Figure 2 より、接触回数 1.0×10^2 回までのしゅう動間に、約 65 %未満の負荷面積率を示す領域においては、しゅう動により高さの減少が認められた一方で、約 65 %以上の負荷面積率を示す領域においては、逆に高さの増大が認められた。こうした高さ変化を考慮すると、MnP-Removed で見られた接触回数 1.0×10^2 回までの高さ変化は、主に摩耗ではなく鋼突起部の塑性変形によるものであると考えられる。この塑性変形の様相は、Fig.3 で示した顕微鏡像において、 1.0×10^2 回摺動後の MnP-Removed(FFO)における鋼突起部が押し潰されたように見えることからも類推できる。一方、Fig.1 および Fig.2 から、MnP-Removed(FFO)の接触回数 1.0×10^2 回から 8.0×10^2 回の間ではほとんど高さ変化が生じていないことが分かる。したがって、こうした鋼突起部の塑性変形は、接触回数 1.0×10^2 回までのごく短期間で生じていると想定される。

他方 MnP は、 1.0×10^2 回しゅう動時点では皮膜が磨滅し、Fig.3 で示した顕微鏡像において白色を呈して見える鋼突起部が露出していることがわかる。 1.0×10^2 回しゅう動時点での、MnP における鋼突起部露出の確からしさは、電子線プローブマイクロアナライザを用いた下地鋼露出部同定手法[3]により別途確認した。こうして 1.0×10^2 回しゅう動時点で露出した MnP の下地鋼は、MnP-removed と比較して押し潰されていないように見える。MnP では、MnP 皮膜の存在によりこの間の塑性変形の程度を上述した負荷曲線の比較により議論することは難しいが、Fig.3 の観察結果から、MnP-removed ほどの急激な塑性変形を生じていないことが推測される。MnP におけるこの塑性変形の抑制傾向は、突出谷部における残存した MnP 皮膜の存在により、露出した鋼突起部の

Table 1 Test disk type and number of stopped test cycles

Disk type	Manganese Phosphate coating	Test oil	Numer of contact cycles				
			1.0×10^2	8.0×10^2	1.6×10^3	5.0×10^3	1.0×10^4
MnP (FFO)	✓	FFO	✓	✓	✓	✓	✓
MnP (BO)	✓	BO	✓	✓	✓	✓	✓
MnP-removed (FFO)		FFO	✓		✓		✓
MnP-removed (BO)		BO	✓		✓		✓

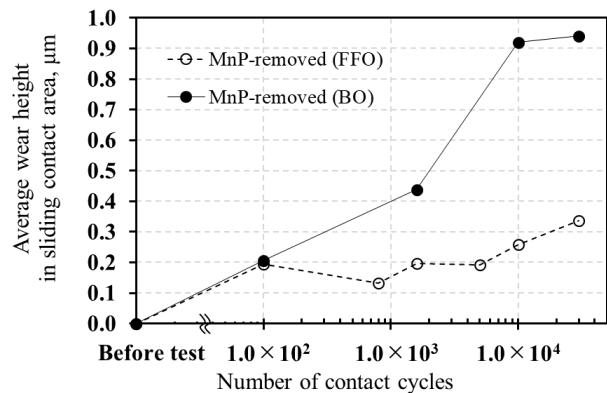


Fig.1 Average wear height in sliding contact area

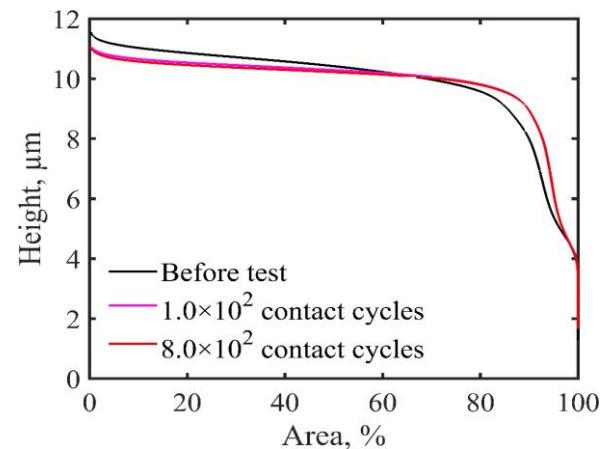


Fig.2 Bearing curve in sliding contact area of MnP-removed(FFO)

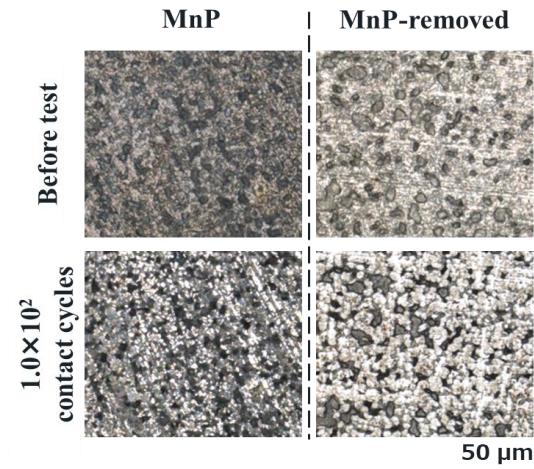


Fig.3 Surface morphologies by laser microscopy (left : MnP, right : MnP-removed)

変形が制限されたためと考えている。

そこで以下では、接触回数 1.0×10^2 回以降、すなわち MnP-removedにおいて鋼突起部の塑性変形が生じた後かつ、MnPにおいて皮膜が磨滅し鋼突起部が露出した後の、各条件における鋼突起部の摩耗傾向について論じる。Figure 4 に 1.0×10^2 回しゅう動時点を基準とした、各条件のしゅう動部摩耗量推移を示す。Figure 4 の結果より、MnP, MnP-removed のいずれの条件でも、接触回数 3.0×10^4 回でのしゅう動部摩耗量が FFO 潤滑下に比べ BO 潤滑下で多くなっている。著者らの研究チームにおけるこれまでの分析結果から、本 FFO 潤滑下では、しゅう動中に油中の ZnDTP や金属系清浄剤と露出した下地鋼とが反応し、リン酸塩を主体とした耐摩耗性を有するトライボフィルムを形成することが分かっている[3]。したがって、今回実施した試験においても、FFO 潤滑下では、こうした耐摩耗性トライボフィルムの形成により摩耗が抑制されていると考えられる。

次に油中添加剤の有無による摩耗特性の違いについて示す。MnP と MnP-removed では油中添加剤の有無により、異なる摩耗傾向を示すことが分かる。すなわち、MnPにおいては、接触回数 1.6×10^3 回までは添加剤の有無によらず同程度の摩耗量を示し、その後のしゅう動では MnP(FFO)の摩耗速度が低下する。一方で MnP-removed の場合、油中添加剤が関与しない BO 潤滑下ではしゅう動に伴い摩耗が進行するものの、油中添加剤により耐摩耗トライボフィルムを形成しうる FFO 潤滑下では、MnP 皮膜存在下よりも早い接触回数 1.0×10^2 回から 5.0×10^3 回までの期間において、ほとんど摩耗が進行していない。こうした MnP 皮膜の有無によるしゅう動初期の摩耗特性の違いは、以下のように想定される。MnP 皮膜存在下よりも早期に摩耗特性に違いが生じた MnP-removed の場合、上述のように 1×10^2 回までのしゅう動において、鋼突起部に大きな塑性変形が生じていたことから、この期間で鋼突起部同士の激しい接触が生じていると考えられる。一般に耐摩耗性トライボフィルムは圧力や温度などを形成の駆動力とするため、高負荷下ほどトライボフィルムの形成速度が速いことが報告されている[5]。したがって、MnP-removed(FFO)では、接触回数 1×10^2 回までの短期間で耐摩耗性トライボフィルムが形成することにより、 5.0×10^3 回までの期間で鋼接触部の摩耗が抑制されたと想定される。一方で MnP 皮膜存在下では、接触回数 1×10^2 回以前のしゅう動時は MnP 皮膜の存在により、鋼接触部同士の接触は生じづらい。また MnP 皮膜の磨滅後も突出谷部の MnP 皮膜の存在により急激な塑性変形は生じず、耐摩耗性トライボフィルムの形成による耐摩耗効果が優位になるまでの期間、鋼接触部の負荷に応じた穏やかな摩耗が促進されると考えられる。以上の効果により、MnP 皮膜存在下では、しゅう動初期において鋼接触部の穏やかな摩耗が促進されていると考えられる。今後、しゅう動表面の化学分析により、こうした考察の妥当性を明らかにするとともに、MnP 皮膜存在下において今回明らかになった初期の摩耗特性の違いが、転動疲労損傷につながる初期現象である、疲労き裂の発生に与える影響について研究を進める。

文献

- 1) Y. Chen, A. Yamamoto, K. Omori : Improvement of Contact Fatigue Strength of Gears by Tooth surface Modification Processing, 12th IFTOMM World Congress, Besançon (France), June 18-21 (2007)
- 2) 川口：トライボロジー分野へのリン酸マンガン処理の適用、表面技術、61巻、3号（2010）239。
- 3) Y. Tamura, K. Kobayashi, K. Aratani, S. Tanaka M. Kikuchi, M. Masuko & N. Ohtake : Influence of Wear Surface Morphology and Phosphorus-Containing Tribofilm on Crack Initiation of Manganese Phosphate Coated Steel under Rolling-Sliding Contact, Tribology Online, 15 (2020) 154.
- 4) 永橋、益子、山本、菊池、田中：軟質皮膜処理面に露出した下地鋼粗さ突起の微小摩耗測定法の開発、トライボロジスト、67巻、12号（2022）879。
- 5) N. N. Gosvami, J. A. Bares, F. Mangolini, A. R. Konicek, D. G. Yablon, R. W. Carpick : Mechanisms of antiwear tribofilm growth revealed in situ by single-asperity sliding contacts, Science, 348 (2015) 102.

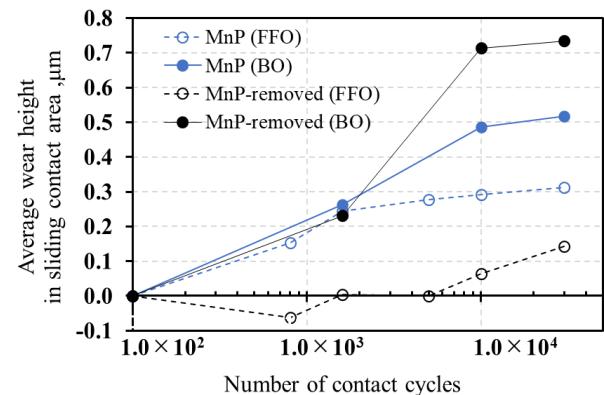


Fig.4 Average wear height in sliding contact area
From 1.0×10^2 contact cycles