

ギヤ油潤滑下における固体潤滑剤含有リン酸マンガン皮膜の耐スコーリング性能評価  
Evaluation of the Anti-scurffing Properties of Manganese Phosphate Coatings  
Containing Solid Lubricants under Lubrication with Gear Oil

Science Tokyo・院（学）\*長谷川 真優 Science Tokyo（正）青木 才子  
コマツ（正）松本 圭司 （正）山本 浩  
Mayu Hasegawa\*, Saiko Aoki\*, Keiji Matsumoto\*\*, Hiroshi Yamamoto\*\*  
\*Institute of Science Tokyo, \*\*KOMATSU Ltd.

1. はじめに

カーボンニュートラル実現のため、大型建設機械ギヤ部品の小型化に寄与する耐久性の向上が求められている。小型化に伴う接触面圧の上昇や潤滑油量の減少に伴い、摩擦係数が上昇し発熱することによってスコーリングと呼ばれる歯車の歯面全体に及ぶ凝着摩耗が発生することが問題となっている<sup>1)</sup>。耐スコーリング性向上を達成するために、二硫化モリブデン (MoS<sub>2</sub>, Molybdenum Disulfide) など固体潤滑剤を含有するリン酸マンガン (MnP, Phosphate Manganese) 皮膜の適用が検討されている。MnP 皮膜はなじみ過程において母材鋼同士の直接接触を防止しながら、表面の平滑化を促進させるために、母材鋼の耐摩耗性の向上が期待できる。一方、ギヤ油添加剤であるジアルキルジチオリン酸亜鉛 (ZnDTP, Zinc dialkyldithiophosphate) は、摩擦により鋼表面にポリリン酸塩を主体とする反応被膜 (トライボフィルム) を形成し耐摩耗性を改善することが可能であるが、MnP 皮膜処理により母材鋼とは異なる物性や構造を有する表面となることから、固体潤滑皮膜の耐スコーリング性を評価するためには、ギヤ油潤滑下における固体潤滑皮膜処理鋼の摩擦摩耗特性を明らかにする必要がある。本研究では、2 種類の固体潤滑皮膜をそれぞれ施した鋼試験片と未皮膜の鋼試験片を用いて、ZnDTP を含む完全配合ギヤ油潤滑下における摩擦試験を行い、スコーリングが発生する条件を探索した。また、摩擦試験後の各試験片の摩耗痕において種々の表面分析を実施し、添加剤由来のトライボフィルムの形成状態および皮膜の残存状態とスコーリング発生の有無の関連性を明らかにして、固体潤滑皮膜の耐スコーリング性能を評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 試料油と試験片

試料油には建設機械で実際に用いられている粘度 99.7 mm<sup>2</sup>/s@40°C, 11.4 mm<sup>2</sup>/s@100°C の完全配合ギヤ油を使用した。基油には API Group I 鉱油が用いられており、主要な添加剤として ZnDTP (0.086 mass%P<sub>prime</sub>-/sec-混合物), 金属系清浄剤 (過塩基性カルシウムスルホネート/過塩基性カルシウムフェネート混合物, 0.38 mass%Ca) が含まれる。試験片としてバレル型のピン (φ17.5 mm) とディスク (φ46 mm×6.1 mm) を用いて摩擦試験を行った。鋼材には浸炭焼入処理を施したクロムモリブデン鋼 (SCM420H) を使用した。ディスクのみ表面を鏡面研磨した後、皮膜処理を行った。未皮膜 (PO), MnP 皮膜 (MnP), および MnP 皮膜の上に MoS<sub>2</sub> 含有固体潤滑皮膜 (MnP+MoS<sub>2</sub>) をそれぞれ施した 3 種類のディスクを用いた。

2.2 摩擦試験

ピンおよびディスク試験片は試験前にトルエンによる超音波洗浄を 15 min 行い、乾燥後 UV オゾンクリーナによる乾式洗浄を行った。摩擦試験の条件を Table2 に示す。MTM2 (Mini Traction Machine 2, PCS Instrument) を用いて摩擦試験を行った。上部のピンと下部のディスクを接触させ、上部ピンに荷重をかけて両試験片を逆方向に回転させることで、幅広いすべり速度での試験が可能である。はじめに、慣らし運転を荷重 10 N で 600 秒行い、次に本試験として 30 秒ごとにすべり速度を増加させた。すべり速度を 6000 mm/s まで上昇させた後に荷重を増加し、再びすべり速度を 300 mm/s から上昇させる試験を行い、荷重を 20N, 40N, 60N の順に増加させて 3 回繰り返した。スコーリングが発生した時点で試験を終了した。本試験における巻込み速度は 100 mm/s, 200 mm/s の 2 種類行った。摩擦試験後、摩擦面

Table 2 conditions for friction test

	Running in stage	Main test stage1	Main test stage2
Nomal load , N	600	30 (1step)	30 (1step)
Sliding velocity , mm/s	100	300-6000	300-6000
Entrainment velocity , mm/s	40	100	200
Duration , s	120	20→40→60	20→40→60
Mean contact pressure , GPa	1.04	1.31→1.66→1.90	1.31→1.66→1.90
Maximum contact pressure , GPa	1.56	1.97→2.49→2.85	1.97→2.49→2.85

の元素分布を測定するため、電界放出型電子線マイクロアナライザ（Field Emission Electron Probe Micro Analysis, FE-EPMA）分析を実施した。

### 3. 結果および考察

Figure 1 は摩擦試験で設定したすべり速度と巻込み速度 100 mm/s における摩擦係数との経時変化を示す。摩擦係数が急激に上昇し、摩擦力が 10 N を超えた時点でスクーリングが発生したと判断する。PO および MnP+MoS<sub>2</sub> は巻込み速度 100 mm/s および 200mm/s の両方でスクーリングが発生し、MnP は 100mm/s のみスクーリングが発生した。スクーリングが発生した場合に特徴的な三角の摩耗痕が確認された。スクーリングの指標の一つである摩擦力強度（FIP, Friction Power Intensity）を平均接触圧に対してプロットしたものを Fig.2 に示す。FPI は、スクーリングが発生したすべり速度、平均接触圧、スクーリング発生直前の摩擦係数の積であり、FPI が高いほど耐スクーリング性能が高いことを示す。PO に比べて MnP および MnP+MoS<sub>2</sub> は高い数値を示し、皮膜処理により耐スクーリング性能が大幅に向上したと考えられる。

スクーリングが発生した PO, MnP, MnP+MoS<sub>2</sub>, スクーリングが発生しなかった MnP について、FE-EPMA による元素分析を行い、ZnDTP 由来の亜鉛（Zn）、硫黄（S）、皮膜由来のマンガン（Mn）、モリブデン（Mo）の元素マッピング画像を作成した。Figure 3 および 4 は、巻込み速度 100 mm/s で試験した MnP でのスクーリング発生（Scuffing）、巻込み速度 200 mm/s で試験した MnP でのスクーリング未発生（No scuffing）、MnP+MoS<sub>2</sub>のスクーリング発生および未発生各試験片より得られた元素マッピング画像を示す。MnP および MnP+MoS<sub>2</sub>ともに、スクーリング発生の場合は摩耗痕上から Mn が殆ど検出されなかったことから、摩擦試験後に MnP 皮膜が残存することがスクーリング発生の防止に有効である可能性が示唆された。Zn, P, S について、スクーリング未発生の場合は摩耗痕中央部に高強度の分布が観察された。また、Fig. 4 より、スクーリング発生の有無に関わらず、Mo は検出されなかったことから、S は ZnDTP 由来のものと考えられる。以上から、摩耗痕上に MnP 皮膜が大なり小なり残存したと同時に、ZnDTP 由来のトライボフィルムが形成されたことがスクーリングの未発生に起因したと考えられる。

### 4. おわりに

- 1) PO に比べ、表面に皮膜処理を施したものは耐スクーリング性能が向上した。
- 2) スクーリングが発生しなかった試験片での高い耐スクーリング性能は、MnP 被膜が残存したことに加え、ZnDTP 由来のトライボフィルムが形成されたことによるものだと考えられる。

### 5. 文献

- 1) Rafael Wilmer Contreras Urgiles, Javier Ech'avarri Otero, Enrique Chac'on Tanarro, Francisco Franco Martínez, Martí Cortada-García, "A test for evaluation of the scuffing performance of fully-formulated lubricants" Tribology International 187, 2023, 108693

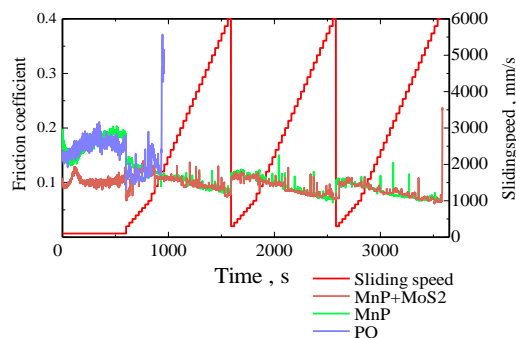


Fig. 1 Change in friction coefficient (entrainment velocity=100 mm/s)

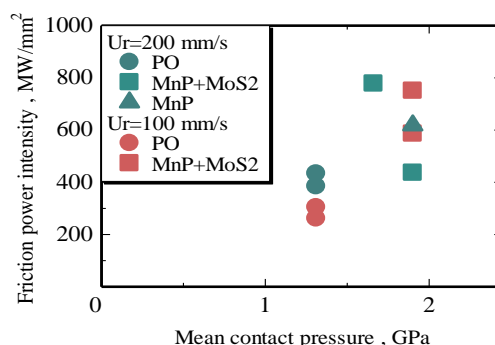


Fig. 2 Friction power intensity

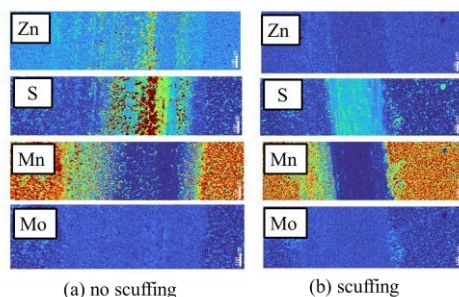


Fig. 3 Elemental mapping of the wear track of MnP disk (a) no scuffing (Ur=200 mm/s), (b) scuffing (Ur=100 mm/s)

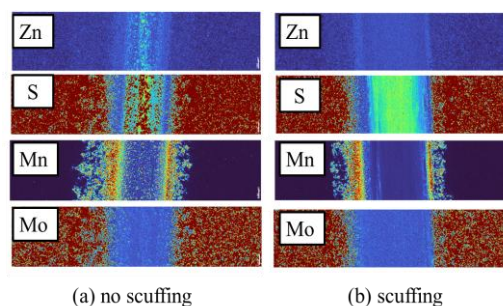


Fig. 4 Elemental mapping of the wear track of MnP+MoS<sub>2</sub> disk (a) no scuffing (Ur=200 mm/s), (b) scuffing (Ur=200 mm/s)