

高真空下におけるリン系極圧剤を添加した PAO の潤滑性能

Lubrication performance of PAO with phosphorus-based extreme pressure additives under high vacuum

東工大・院（学）*田中 龍之介 東工大（正）青木 才子 JAXA（正）横山 崇

Ryunosuke Tanaka*, Saiko Aoki*, Takashi Yokoyama**

*Tokyo Institute of Technology, **Japan Aerospace Exploration Agency

1. はじめに

宇宙は地上と異なり、高真空状態かつ広い温度域という過酷な環境であるため、液体潤滑剤は厳しい宇宙環境に耐えう必要がある。現在、宇宙用液体潤滑剤として、MAC(Multiply Alkylated Cyclopentane)および MAC に添加剤を調整した潤滑油が用いられている。MAC は炭化水素系の液体潤滑油であり、優れた低蒸気圧性を有しているが、高粘度であり、高負荷において十分な摩擦低減効果や耐摩耗性能が得られないことや非常に高額であるなどの課題もある。特に、近年では民間企業やベンチャー企業が宇宙開発への参入を始めており、民間主導の宇宙開発産業の拡大に向けて、将来的にはより安価でより手軽な宇宙開発を進めていくことが必要であり、トライボロジー分野においても高価な潤滑油を使用しない宇宙用潤滑剤を開発し潤滑効果を確立することが求められている。本研究では、MAC に代わる宇宙用液体潤滑剤としての適用可能性を検討することを目的として、地上で使用されている低粘度基油として PAO(ポリ- α -オレフィン)に着目した。PAO は直鎖状の α -オレフィンを低重合し水素化精製した炭化水素系合成基油であり、硫黄等の不純物を含まないため化学的安定性が高く添加剤効果が大きいことが特徴として挙げられる。MAC ほどの低蒸気圧性は望めない一方で MAC より安価であり利便性が高いことから、宇宙用液体潤滑剤の基油としての適用を目指すためには、用途や使用環境の検討はもちろんのこと、添加剤効果が最大限に発揮できるように高真空下における各種添加剤の摩擦摩耗低減効果を明らかにし、添加剤の併用効果を踏まえたフォーミュレーションを達成する必要がある。そこで本研究では、無添加基油 PAO とリン系極圧剤など複数の添加剤をそれぞれ調整した試料油を用いて、微量塗布条件における高真空下での摩擦摩耗特性を調査することにより、高真空下における基油 PAO と各種添加剤の潤滑性能を評価した。

2. 実験方法

2.1 試料油

無添加基油には PAO4 および MAC を用いた。40 °C における動粘度は、MAC は 108 mm²/s²であり、PAO4 は 18.4 mm²/s である。添加剤にはリン系極圧剤であるリン酸トリクレジル(TCP, Tricresyl phosphate)とリン酸トリブチル(TBP, Tributyl phosphate)を使用し、リン濃度が 0.1 mass%になるようにそれぞれ PAO4 に添加して調製した。

2.2 試験片

摩擦試験の供試材として、ボール試験片には軸受鋼球 (SUJ2, ϕ 9.525 mm)、ディスク試験片には軸受用コロ (SUJ2, ϕ 15×15 mm) を用いた。ディスク試験片は研磨機により鏡面研磨を施した。研磨版を鋳鉄、銅、錫、羽布の順番に変えて研磨し、研磨剤として油性のダイヤモンドスラリーを用いた。それぞれの研磨版に対するダイヤモンドスラリーの平均粒径は 9 μ m, 3 μ m, 1 μ m, 0.25 μ m とした。研磨時間は鋳鉄、銅、錫では 30 分間、羽布では 5 分間とし試験前の表面粗さを統一した。

2.3 摩擦試験・分析条件

真空 Ball-on-Disk 摩擦試験機を用いて各試料油の潤滑特性を評価した。両試験片ともに試験前にトルエンによる 15 min の超音波洗浄を行い、UV オゾンクリーナーにより乾式洗浄を行った。ディスク表面に 0.15 g の試料油を塗布した後、試験機チャンバ内に設置し、ロータリーポンプとターボ分子ポンプを用いて真空度が 6.0×10^{-6} Pa になるまで 24 時間減圧を行った。Figure 1 に試験片上に塗布された試料油の様子を示す。摩擦試験は室温下で荷重を 100 N、すべり速度を 20.43 mm/s とし試験時間を 4 時間とした。試験終了直前 100 秒間の摩擦係数から算出した平均摩擦係数と試験球の摩耗量から潤滑性能を評価した。摩擦試験後のディスク試験片に対して、トルエンですすぎ洗った後、摩耗痕内に形成されたトライボフィルムの元素分布を調査するために、電子線マイクロアナライザ(EPMA, Electron probe microanalyzer)分析を実施した。



Fig. 1 Sample oil applied

3. 結果と考察

Figure 2 および Figure 3 に、摩擦試験で得られた各試料油の平均摩擦係数と摩耗量の結果をそれぞれに示す。Figure 2 より、MAC に比べて PAO4 の方が高い平均摩擦係数となり、リン系極圧剤を添加することで PAO4 よりも僅かに摩擦係数は増加した。また、Figure 3 より、摩耗量においても MAC に比べて PAO4 の方が大きな値を示したが、TBP の

添加では摩耗量は減少した一方で、TCP の添加では増大した結果となった。Figure 4 にボール試験片の摩耗痕画像を示す。Figure 4 より、MAC, PAO4, TBP では、すべり方向に沿って平行な線状痕が観察され凝着的な摩耗が生じていることが推察されるが、TCP では線状痕ではなく光沢の平滑面が観察されたことから腐食的な摩耗が進行していることが伺える。そこで、デシケータ内で大気圧下よりも 0.1 MPa 程度減圧した雰囲気下で、ディスク試験片上に塗布された 0.15 g の試料油を 4 時間放置した際の残存率を求めた簡易的な蒸発量試験を実施し、その結果を Fig. 5 に示す。Figure 5 より、MAC のみならず PAO4 を用いた試料も 96 %以上が 4 時間後も残存していることが分かった。また、摩擦試験前後のディスク試験片の観察により、PAO4 は摩擦試験中に蒸発していないことも確認しており、これらの結果より、PAO4 は高真空中においても摩擦面に残存し摩擦摩耗の低減に寄与していたことが考えられる。一方、PAO の摩耗量が MAC よりも増大した原因として、MAC に比べて動粘度が低いために粘性による荷重支持効果が十分に得られずに直接接触の頻度が増加したことが挙げられる。ところで、TBP と TCP の添加により PAO4 から摩耗量が増減するという正反対の挙動を示した。この理由について、EPMA による摩擦面の元素分布から考察する。Figure 6 に EPMA より得られたリンおよび酸素の元素マッピングを示す。Figure 6 より、TBP では酸素強度の確認できる位置でリン強度も確認できるため、HSAB 理論に則り、新生面が露出する前の酸化被膜中の Fe^{3+} と PO_4^{3-} の反応が進行しリン酸鉄由来のフィルムが形成され、耐摩耗性を発揮したことが考えられる。一方、TCP では摩耗痕の端面のみにリンおよび酸素が存在し中央部ではほとんど検出されていないことから腐食的な摩耗によるものと言える。これらの結果より、炭素鎖がブチル基である TBP よりもベンゼン環を含む TCP の方が真空下では反応が進行しやすく、添加剤の反応性の差異により真空下の潤滑性能が異なることが推察される。

4. まとめ

- 1) 高真空中の摩擦試験後においても PAO4 は摩擦面に残存し潤滑剤として摩擦摩耗低減に寄与する。
- 2) リン系極圧剤の反応性により耐摩耗性能に差異が生じ、TBP は TCP に比べて反応性が低いことが耐摩耗効果に起因したことが考えられる。

5. 参考文献

- 1) M.Masuko, K.Kishi, A.Suzuki, S. Obara : The lifetime of boundary lubrication performance of small-quantity-applied liquid lubricants for space mechanisms evaluated with a vacuum reciprocating tribometer , Tribology Trans, 53(2010), 75-83
- 2) Kürten D, Khader I, Kailer A : Tribochemical degradation of vacuumstable lubricants: A comparative study between multialkylated cyclopentane and perfluoropolyether in a vacuum ball-on-disc and full-bearing tests, Lubrication Science, 32(2020), 183-191

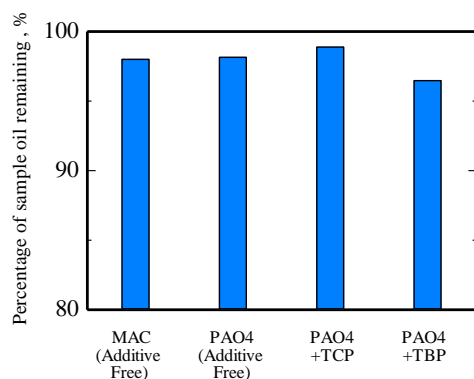


Fig. 5 Percentage of sample oil remaining

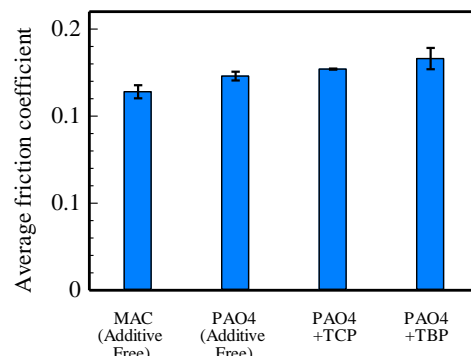


Fig. 2 Comparison of average friction coefficient

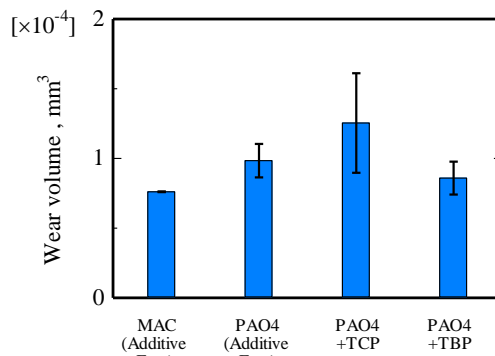


Fig. 3 Comparison of wear volume

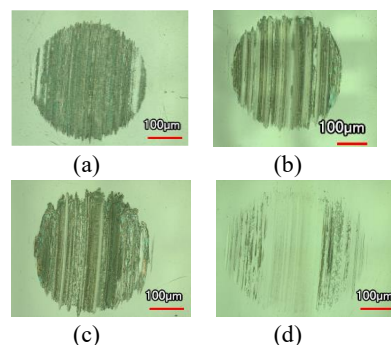


Fig. 4 Optical image of wear track of ball (a)MAC, (b)PAO4, (c)PAO4+TBP, (d)PAO4+TCP

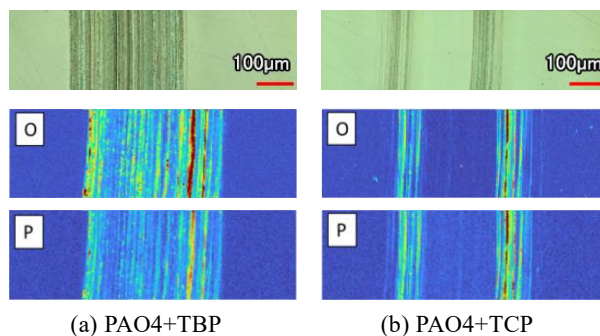


Fig. 6 Optical image of wear track of disk and elemental mapping (a)PAO4+TBP, (b)PAO4+TCP