

宇宙適用に向けたイオン液体潤滑油の防錆性および耐摩耗性能の改善

Improvement of Anti-corrosive and Anti-wear Properties
of the Ionic Liquid Lubricants for Spacecraft

JAXA (正) *横山 崇 (正) 間庭 和聡 (正) 松本 康司 (正) 小原 新吾

出光興産 (正) 中西 祐輔 (正) 吉田 幸生

Takashi Yokoyama*, Kazuaki Maniwa*, Koji Matsumoto*, Shingo Obara*, Yusuke Nakanishi**, Yukio Yoshida**

*Japan Aerospace Exploration Agency, **Idemitsu Kosan Co., Ltd

1. はじめに

月面有人探査計画など宇宙ミッションの多様化により、宇宙機器の大型化、高速駆動化と、それに伴う機器しゅう動部の高負荷化が予想される。しかし、従来の宇宙機器に使用されているシクロペンタン油 (Multiply-alkylated cyclopentane, MAC) またはフッ素油 (Perfluoropolyether, PFPE) では高負荷なしゅう動に対し耐摩耗性能等が不足するため、新しい潤滑油の実現が不可欠となっている。

そこで本研究では、真空中で優れた耐摩耗性が報告されているイオン液体潤滑油の宇宙適用を目指す。イオン液体は低蒸気圧で優れた熱安定性と潤滑特性を有することから潤滑油への適用を目指した研究が数多く行われてきたが、その化学的特性から発錆が課題となり実用化の障壁となっている¹⁾。本研究では、防錆剤と耐摩耗剤を添加することで発錆の抑制と耐摩耗性能向上を図ったイオン液体潤滑油試料の性能を評価した。

2. 試料油

イオン液体試料油として、疎水性の高い含窒素系イオン液体を基油とし、イオン液体用防錆剤としてカルボン酸ナトリウム塩、耐摩耗剤としてリン酸塩、増粘剤としてポリマーを添加した配合油を調製した。また比較対象として、宇宙で最もよく使用される MAC 油 (Nye2001A) と PFPE 油 (Brayco815Z) を評価した。

3. 試験方法・分析方法

3.1 防錆性

試料油の防錆性を評価するため、耐腐食抑制能試験および恒温恒湿腐食試験を実施した。耐腐食抑制能試験は常温下にてステンレス板 (SUS440C) を試料油と同量の水の混合液に 2 週間浸し、発錆状態を評価した。恒温恒湿腐食試験は往復動摩擦試験後のステンレス板 (SUS440C) を温度 70℃、湿度 70% の環境下で 2 週間置き、発錆状態を評価した。なお、往復動摩擦試験の条件は温度 100℃、荷重 20 N、最大接触面圧 1.3 GPa、しゅう動速度 15 m/s、しゅう動回数 3000 回とした。

3.2 蒸発特性

試料油の耐蒸発性を評価するため、ASTM E595 相当のアウトガス試験を実施した。約 50 mg の試料油を入れた金属容器を 3 つ真空チャンバに置き、125±1℃、7.0 × 10⁻³ Pa 以下の条件下で 24 時間静置し、試験前後の質量減少率 (Total Mass Loss, TML) および試料近傍の 23±2℃ の冷却板への凝縮率 (Collected Volatile Condensable Materials, CVCM) を計測した。これら結果は 3 容器の平均値として算出した。

3.3 すべり摩擦における摩擦摩耗特性

Ball-on-disk 摩擦試験機を用い、真空中の摩擦摩耗特性を評価し MAC 油と比較した。試験条件はすべり速度 0.5 m/s、最大接触面圧 1.3 GPa、しゅう動時間 6 時間、温度は常温および 80℃とし、試料油はディスク表面に塗布しスピンコートさせた。ボールおよびディスク試験片にはステンレス鋼 (SUS440C) を用いた。

摩擦試験後の摩耗痕をマイクロ스코プおよび電子プローブマイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer, EPMA)、X 線光電子分光分析 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) で分析した。

3.4 転がりすべり摩擦における摩擦摩耗特性

二円筒試験機を用い、真空中の転がりすべり摩擦特性を評価した。トラクション係数が約 0.35 を超過するまでの期間を評価する寿命試験と、複数のしゅう動条件にて 3 分間しゅう動させ、しゅう動終了前の 2 分間の平均トラクション係数を計測する試験を実施した。寿命試験の試験条件は平均速度 0.1 m/s、すべり率 10%、温度は常温、雰囲気圧力は 10⁻⁴ Pa 台の高真空条件とし、MAC 油と比較した。トラクション係数計測試験は平均速度 0.02~0.1 m/s、最大接触面圧 0.7~1.1 GPa、すべり率 0.3~20%、常温、雰囲気圧力 10⁻⁴ Pa 台とし、MAC 油および PFPE 油と比較した。試験片には外径 40 mm のディスクを用い、片当たり防止の為に片方のディスクは円柱形状、もう一方のディスクは側面に 50 mm の曲率を施した形状とした。材質はステンレス (SUS440C) とした。試料油を 5 μL 塗布して試験実施した。試験後の摩耗痕状態をマイクロ스코プにより観察した。

4. 試験分析結果・考察

4.1 防錆性

耐腐食抑制能試験および恒温恒湿腐食試験のいずれも、防錆剤を含まない場合には発錆が認められたが、防錆剤を含有した場合には発錆は認められず、高い防錆性能が確認された。

4.2 蒸発特性

Table 1 に IL 油のアウトガス試験の結果と、MAC 油および PFPE 油の文献値²⁾を示す。一般に宇宙用材料の選定として TML 1.0 %以下、CVCM 0.1 %以下が目安とされており、本イオン液体潤滑油は実用に対し十分に高い耐蒸発性を有すると言える。また、MAC 油と比較して優れた耐蒸発性を有することがわかった。

4.3 すべり摩擦における摩擦摩耗特性

Ball-on-disk 試験により得た摩耗量の結果を Table 2 に、摩擦係数の経時変化を Fig. 1 に示す。MAC 油と比較し、高い耐摩耗性を確認した。試験前後で発錆は確認されなかった。

試験後の摩耗痕の EPMA 分析により硫黄を主としたトライボフィルム形成を確認した。また、XPS 分析によりリン酸被膜形成を確認した。情報深さが深い EPMA にて硫黄が、情報深さが浅く被膜最表面の情報が取得できる XPS にてリン酸が検出されたことから、硫黄を主成分としたバルク被膜の最表層にリン酸被膜が形成されている構造が推測された。

真空中摩擦では表面酸化鉄が摩耗で除去され、新生面が露出しやすく、硫黄系トライボフィルムの形成が促進されたことで耐摩耗性能を発揮したと考えられる。この結果は HSAB 則 (Hard and Soft Acid and Base principle) において単体鉄と硫黄組成とが反応しやすいことと合致する。

また、IL 油ではしゅう動初期に 0.05 程度の低摩擦現象の発現が確認された。低摩擦発現中に摩擦試験を中断ししゅう動痕を XPS 分析したところ、Na 1s スペクトルにてカルボン酸ナトリウムが検出された。防錆剤として添加したカルボン酸ナトリウム塩がトライボフィルム最表面に吸着し、油性効果を発揮したと考えられる。

4.4 転がりすべり摩擦における摩擦摩耗特性

二円筒試験により得た転がりすべり摩擦条件下の寿命試験の結果を Fig. 2 に示す。IL 油では MAC 油の 2 倍以上の寿命を確認した。試験前後で発錆は確認されなかった。試験後のしゅう動痕を Fig. 3 に示す。MAC 油ではしゅう動痕中央部にピッチング状の摩耗が確認されたが、IL 油では確認されず、IL 油の高い耐摩耗性能が発揮された結果と推測された。

また、複数の荷重、すべり率条件におけるトラクション係数の計測により、IL 油では荷重およびすべり率に対するトラクション係数の変化が小さい特徴が確認された。

5. まとめ

イオン液体潤滑油の実用化に向けて、防錆剤および耐摩耗剤を添加した潤滑油試料を評価し、しゅう動中を含め発錆が無いこと、および従来の宇宙用潤滑油と比較して優れた耐蒸発性と耐摩耗性を有することを確認した。表面化学分析の結果、硫黄系のバルク被膜と表層のリン酸被膜からなるトライボフィルムが耐摩耗性能を発揮し、さらにトライボフィルム表面への防錆剤吸着が油性効果を発揮し低摩擦を発現したメカニズムを確認した。

文献

- 1) 近藤・小山・佐々木：新規潤滑剤としてのイオン液体，J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 56, No. 3 (2013)
- 2) 宇宙用有機材料アウトガスデータ集，宇宙航空研究開発機構
- 3) R. G. Pearson, Ludwik Komorowski: Chemical Hardness, STRUCTURE AND BONDING 80 Springer Verlag

Table 1 Results of outgassing tests

	IL	MAC ²⁾	PFPE ²⁾
TML, %	0.099	0.21	0.06
CVCM, %	0.026	0.05	0.02

Table 2 Wear volume of balls obtained by the ball-on-disk tests.

$\times 10^{-6}, \text{mm}^3$	IL	MAC
Room temperature	0.073	29
80 °C	0.60	23

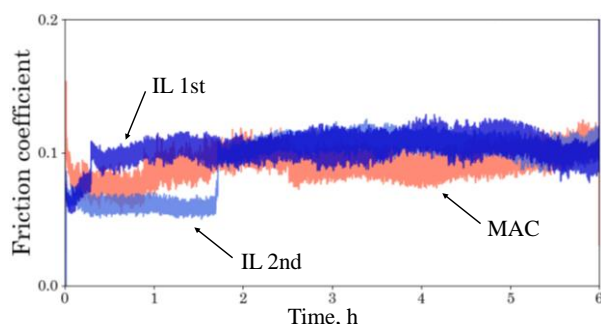


Fig. 1 Friction characteristics of IL and MAC obtained by the ball-on-disk tests.

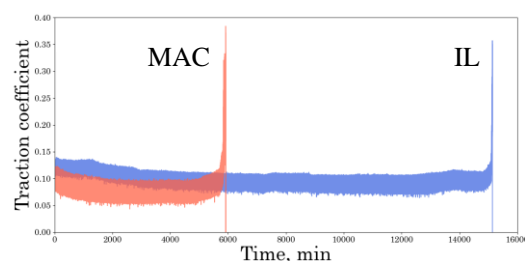


Fig. 2 Traction characteristics of IL and MAC obtained by the rolling sliding tests.

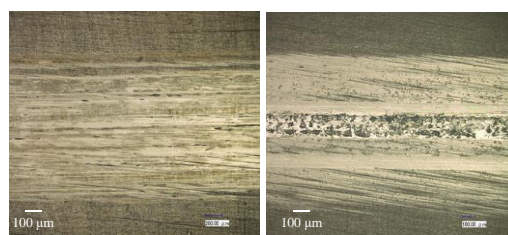


Fig. 3 Wear tracks obtained by microscopy after the duration tests. (Left) IL, (Right) MAC.