

月面有人と圧ローバ用トランスミッションオイルの開発（第二報）

Development of the Transmission Oil for the Human Pressurized Lunar Rover, Part II

JAXA（正）*横山 崇，（正）剣持 伸朗，（正）松本 康司，（正）小原 新吾

トヨタ（正）佐野 敏成， 豊田中研（正）高橋 直子， ENEOS（正）多田 亜喜良

Takashi Yokoyama*, Nobuo Kenmochi*, Koji Matsumoto*, Shingo Obara*

Toshinari Sano**, Naoko Takahashi***, Akira Tada****

*Japan Aerospace Exploration Agency, **Toyota Motor Corporation, *** Toyota Central R&D Labs.,inc.,

**** ENEOS Corporation

1. はじめに

月面の広域活動を可能とする月面有人と圧ローバの技術検討を進めている。このローバは 10,000 km 以上、約 10 年間の長距離・長時間走行可能な性能を有し、乗員が宇宙服無しで活動可能な与圧室を有する大型のものである。これまでにアメリカ、ソ連、中国で月面を走行する無人または曝露有人ローバの開発運用実績があるが、走行距離は長くても 30~40 km 程度であり¹⁾、本ローバはその 200 倍を超える長距離走行、寿命を達成する挑戦的な計画である。

この計画を実現するためには、月面の過酷環境で駆動系を適切に潤滑する必要がある。特にピッチング等の摩耗が進行するギヤ歯面では確実にオイルの摩耗防止効果を発揮させなければならない。

宇宙における従来の液体潤滑では低蒸気圧油 MAC (Multiply Alkylated Cyclopentane) 等を用いた微量潤滑が使用されてきた²⁾。宇宙機の電力・擾乱振動の制約が厳しいため、部材をコーティングする程度の極微量の潤滑油を塗布して潤滑し、低く安定したトルクを実現している。一方、地上の自動車の駆動系では大量のオイルをポンプで濾過、循環させて摺動部に流しかける強制潤滑方式が取られている。オイルには燃費向上のため低粘度の基油が用いられ、摩耗防止剤等の化学的な機能を有する添加剤を加えることで高負荷、長期間駆動を実現している。

本研究では自動車で培われた潤滑技術を宇宙に適用し、宇宙ではほとんど例の無い多量油潤滑を採用するとともに、添加剤の化学的効果により摩耗防止等の機能を付与することで月面での駆動系潤滑の技術的成立性を検討している³⁾。第一報⁴⁾では宇宙用潤滑油 MAC に自動車用潤滑油添加剤を加えた試料油の蒸発特性、トライボ特性を評価した結果を報告したが、真空中で添加剤の一部組成の蒸発が示唆されており、性能向上の余地があると考えられた。また、強制潤滑のためのオイルポンプが十分な吐出性能を得るためには MAC 油は粘度が高く⁵⁾、低粘度化が必要である。そこで本稿では、基油の低粘度化および添加剤の耐蒸発性向上のために処方改良を行った試作油の蒸発特性、トライボ特性を評価し、トライボ化学的メカニズムを調査した結果を報告する。

2. 試料油

Table 1 に用意した 4 種の試料油を示す。いずれも PAO (Poly- α -olefin) に自動車用 ATF 添加剤を元に配合した添加剤を加えたものである。Oil A には P 系および SP 系摩耗抑制剤が含まれるが、Oil B には P 系のみが含まれている。また、添加剤には摩耗防止剤の他に清浄分散剤、金属不活性剤等が含まれており、鉱油により希釈されたものを用いた。MAC 油と同程度の粘度の試料油 (Oil A-1, B-1) と、低粘度化した試料油 (Oil A-2, B-2) を用意した。

3. 試験方法・分析方法

3.1 アウトガス評価試験

試料油の真空中での蒸発特性を把握するため、内径約 30 mm のガラスシャーレに約 10 g の試料油を入れて 80℃ まで加熱した後に真空チャンバ内に 4 時間静置し、試験前後の質量変化と真空度の推移から蒸発特性を評価した。チャンバ内のガスのマススペクトルを QMS (四重極形質量分析計) により取得し、試験前後の油中の添加剤構成元素の存在量を分析した。ホウ素、リン、カルシウムを誘導結合プラズマ発行分析 (ICP) により、窒素を化学発光法により、硫黄を紫外蛍光法により計測した。

3.2 摩擦試験および表面化学分析

真空中で Ball-on-disk 摩擦試験を実施し摩擦摩耗特性を評価した。試験条件はすべり速度 0.5 m/s、荷重 5 N、試験時間 6 h とし、オイルバスに約 60 mL のオイルを注ぎ入れ、しゅう動部を浸漬した条件で実施した。ボールは直径 4.76 mm のものを用い、ボール、ディスク共にギヤ材として使用されるクロムモリブデン鋼 (SCM420) とした。

摩擦試験後、潤滑メカニズムの把握を目的にしゅう動面の表面化学分析を実施した。大型放射光施設 SPring-8 BL16XU (サンビーム) による HAXPES (硬 X 線光電子分光) 分析、あいしんクロトロン光センター BL6N1 による NEXAFS (硬 X 線吸収微細構造) 分析、および TEM (透過型電子顕微鏡) による観察と、EDX (エネルギー分散型 X 線分光) 分析を実施し、しゅう動面に形成された被膜 (トライボフィルム) の化学組成を調査した。

Table 1 Sample oils

	Oil A-1	Oil A-2	Oil B-1	Oil B-2
Base oil	PAO14	PAO4	PAO14	PAO4
Kinetic viscosity mm ² /s (40°C)	102.4	15.8	97.8	15.8
Kinetic viscosity mm ² /s (100°C)	14.1	3.8	13.6	3.8
Additives	SP type anti-wear additive P type anti-wear additive etc.		P type anti-wear additive etc.	

4. 実験結果・分析結果

4.1 蒸発特性・摩擦摩耗特性

ほとんどの添加剤構成元素が試験後に 100% 残存していたが、Oil A の硫黄のみ残存量はおおよそ半量であり、蒸発が示唆された。また、Fig. 1 にチャンバ雰囲気のマススペクトルの結果を示す。図中矢印で示した通り、Oil A のスペクトルのみに現れたピークが見て取れる。SP 系摩耗抑制剤の分子構造との比較より、分子開裂によって硫黄を含むフラグメントが蒸発したことがわかった。

Figure 2 に摩擦試験後のボール摩耗量の結果を示す。ここではリファレンスとして MAC 油の摩擦試験結果を併記している。なお、MAC 油の結果は、従来の潤滑方式を模擬してディスクにオイルを塗布した条件で実施した結果である。

まず、MAC 油の結果と比較すると、試料油は高い耐摩耗性能を発揮したことがわかる。試料油の結果を比較すると、Oil A は真空中で耐摩耗性能が低下することがわかる。

4.2 摺動痕の化学分析

HAXPES 分析および NEXAFS 分析により、試験条件によらず、しゅう動面にリン酸カルシウム、リン酸鉄、および硫化鉄、硫酸鉄の形成が認められた。ただし、Oil A の真空条件ではリン化鉄が検出された。また、TEM/EDX 分析により、いずれの試験条件でもリン酸塩はトライボフィルムのバルク部に、硫黄化合物はトライボフィルムと母材の境界部分に形成されていることがわかった。

5. 考察

試験条件によらず似た化学組成のトライボフィルムが形成されたにも関わらず、Oil A では真空条件で耐摩耗性能が低下した。真空中で加熱されて分子開裂した SP 系摩耗抑制剤から硫黄成分が蒸発したことから、リンを含む原子団は油中に残存したと推測され、この分子は HSAB (Hard and Soft Acid and Base) 則の軟らかい塩基であった可能性がある。よって、軟らかい酸である新生面に対して作用し、リン化鉄を形成したと推測される。新生面に対して硫黄化合物が作用せずリン化合物が作用したこと、リン化鉄は硫黄化合物と比較して新生面同士のしゅう動において応力緩和しにくいことが耐摩耗性能低下の要因と考えられる。

6. まとめ

真空中での耐蒸発性、耐摩耗性能を向上するための組成改良を行い、低粘度でも高い耐摩耗性能を有する改良品を実現した。さらに、高温真空中では添加剤分子の開裂により一部組成が蒸発し、耐摩耗性能に影響を与えるトライボ化学的メカニズムを明らかにした。

謝辞 TEM/STEM/EDX 分析は(株)豊田中央研究所 大石敬一郎様のご支援により実施致しました。御礼申し上げます。
文献

- 1) Saverio F. Morea: THE LUNAR ROVING VEHICLE-N93-14008 HISTORICAL PERSPECTIVE, 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities
- 2) 小原新吾: スペーストライボロジー, 表面科学 33, 12 (2012) 694-699
- 3) 横山崇, 剣持伸朗, 松本康司, 小原新吾, 佐野敏成, 宮川政典, 角田有史, 新吉隆利, 多田亜喜良: 月面有人と圧ローバ用トランスミッションの研究開発, 第 65 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3J02
- 4) 横山崇, 剣持伸朗, 松本康司, 小原新吾, 佐野敏成, 藤川雅人, 多田亜喜良, 高橋直子: 月面有人と圧ローバ用トランスミッションオイルの開発, トライボロジー会議 2021 秋 松江 予稿集
- 5) 松本康司, 小原新吾, 剣持伸朗, 横山崇, 降旗弘城, 池田直史, 熊谷厚法, 藤川雅人, 橋本洋人, 竹中秀祐: 月面有人と圧ローバの開発における機構潤滑技術の課題と取り組み, 第 65 回宇宙科学連合講演会講演集, 3J01

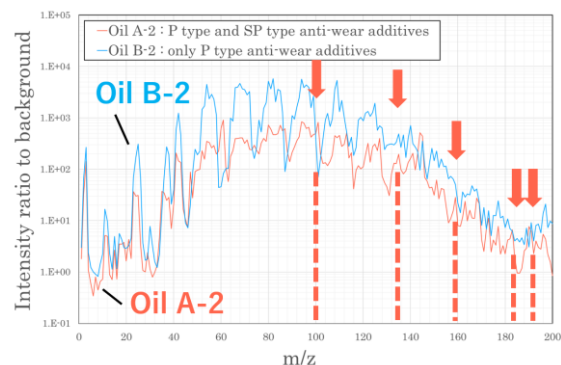


Fig. 1 Mass spectrum during outgassing test obtained from QMS

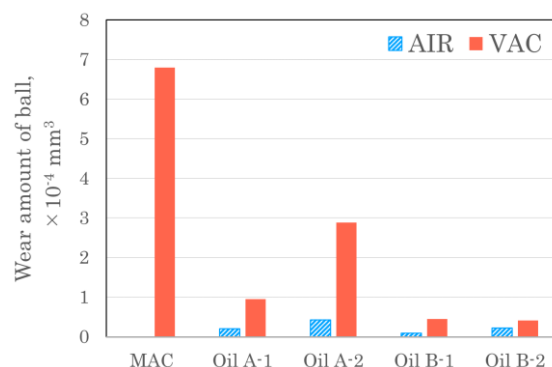


Fig. 2 Wear amount of balls measured after sliding test