

月面有人と圧ローバ駆動系減速ギヤの疲労寿命に及ぼす真空環境の影響

The Impact of Vacuum Environment on the Fatigue Life of Drive System Reduction Gears in Human Pressurized Lunar Rover

トヨタ（正）*佐野 敏成，（非）岩見 雅弘， 豊田中研（正）高橋 直子，（非）小坂 悟，（非）大石 敬一郎，

ENEOS（正）金子 博之， JAXA（正）横山 崇，（正）間庭 和聡，（正）松本 康司

Toshinari Sano*, Masahiro Iwami*, Naoko Takahashi**, Satoru Kosaka**, Keiichiro Oh-ishi**,

Hiroyuki Kaneko***, Takashi Yokoyama****, Kazuaki Maniwa****, Koji Matsumoto****,

*Toyota Motor Corporation, **Toyota Central R&D Labs.inc.,

*** ENEOS Corporation, ****Japan Aerospace Exploration Agency

1. はじめに

月面探査活動用のモビリティである有人と圧ローバの開発を進めている。従来月面を走行した無人または曝露有人ローバの運用実績では、走行距離は長くても30～40 km程度である¹⁾。これに対して、アルテミス計画における本プロジェクトでは、2名のクルーが宇宙服なしで快適に過ごすことが出来る大型キャビンを搭載した車両を10,000km、10年もの期間で運用する予定である。このため走行駆動系のモータ・ギヤへの負荷は厳しく、地上車と同様のオイル潤滑冷却機構が必要となる。潤滑冷却用のオイルポンプを搭載した宇宙用トランスアクスルユニットはシールで密閉し、運用期間中のオイル散逸を極小とするシステムを検討している²⁻³⁾。この場合、内圧の真空度が高くなったとしてもオイルの飽和蒸気圧以下にはならず、超真空環境の月面においてもオイル潤滑での運用走行が可能である。トランスアクスル内要素の摺動面にはオイル添加剤由来の被膜を生成させ、保護機能を持たせることで耐摩耗性、耐焼付き性および耐疲労性の確保を試みる。これまでボールオンディスクなどのラボ試験検討によって耐蒸発性・耐摩耗性に優れた添加剤処方オイルを開発してきた⁴⁻⁸⁾。本稿ではギヤボックスを用いた連続一定高負荷の疲労寿命試験を行い、真空環境がギヤ疲労寿命に及ぼす影響を調査した結果を報告する。

2. 試験装置

使用した真空ギヤボックス試験装置を Fig.1 に示す。ギヤボックスは真空チャンパーの中にあり、チャンパーの真空度をギヤボックス（8～15Pa）より低く設定することで外部からギヤボックスへの酸素（大気）流入を防止した。ギヤボックス内に潤滑ポンプを配し、ギヤと軸受には常に十分な油量を供給した。

本試験では月面用に開発した添加剤処方で合成油ベースの低粘度オイルを用い、試験油温は 80～120℃の範囲で設定した。ギヤはユニットと同等諸元の浸炭鋼の平歯車を用い、入力回転数 1456rpm、最大面圧 2GPa 以上で試験を行った。

3. 試験結果と歯面内部の組織観察

歯面の接触計算応力分布と、剥離が発生したギヤ歯面写真の例を Fig.2 に示す。剥離の位置は、応力が高くピッチラインのやや歯元側で滑りが発生する剥離予想部位と一致した。剥離部を詳細に観察すると、深く大きな剥離が見られ、一般的に表面起点剥離に見られるような扇状の剥離進行が見られなかった。剥離に至る繰り返し応力数については、大気環境では 1.0×10^8 回に到達しても問題が認められなかった条件で、真空環境ではこれに到達する前に剥離破損に至った。

破損に至ったギヤから剥離しなかった歯を切り出して中央部を切断、エッチング腐食後に組織観察をしたところ、剥離が発生した当該位置付近の内部に白色組織（白層）が観察された（Fig.3）。なお、材料硬度には軟化などの問題は見受けられなかった。

4. 考察

早期剥離については強せん断による影響など幾つかの要因が考えられるが、白層の生成については文献⁹⁾でも述べられているように、歯面の金属接触による新生面が触媒作用を促しオイルから水素が発生、鋼中に

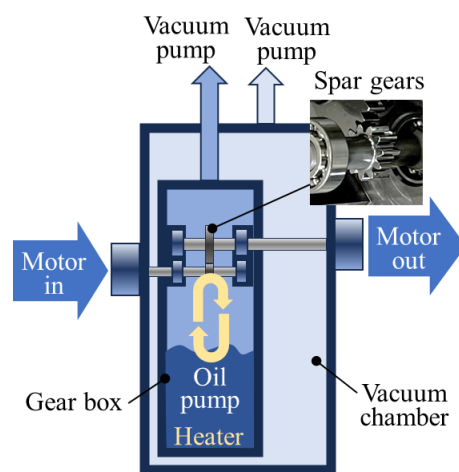


Fig.1 Vacuum gearbox apparatus

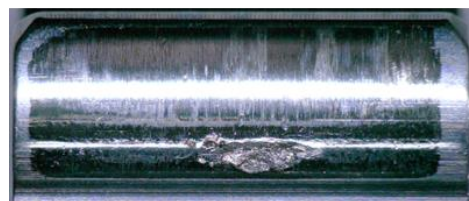
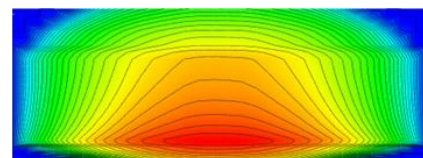


Fig.2 Calculated stress distribution and flaking photo of tooth surface.

侵入し高応力部位にトラップされることで水素脆化を起こし、発生した亀裂はそののち白色組織を形成しつつ進展し、最終的には剥離に関与したと考えられる。しかし同一負荷条件の大気環境では発生しなかったことから、真空環境では発生しやすくなると推察された。

真空条件下における添加剤の被膜形成能を確認するため、大気環境と真空環境で同一低負荷条件の途中止め試験を実施し、歯面の HAXPES (硬 X 線光電子分光) 分析により化学組成を調査した。Figure.4 に被膜の元素組成比の比較を示す。大気条件と比較して、真空条件下では酸素、リンの元素組成比が減少し、硫黄の割合が増加していることが判明した。また、検出された鉄元素は主として基材であり、すなわち鉄組成比が大きく増加した真空条件下では被膜量そのものが少なくなって基材を検出したことが伺える。更にリンの HAXPES スペクトル (P1s) を Fig.5 にて比較すると、真空条件下でのみリン化合物の生成が認められた。リン化鉄であれば高温で生成されると考えられ、摺動面温度が高く厳しい摺動状態であることも推察される。すなわち、真空条件下で白層が生成されやすい要因として、金属接触を抑制するリン酸被膜や酸化膜が生成されにくく水素脆化が進みやすい環境であることが考えられた。

本試験で実施したのは疲労寿命を検証するための連続一定高負荷の試験条件であり、実際に月面走行で運用される負荷や時間的パターン運転とは異なる。そこで負荷面圧を下げて長期間の疲労寿命試験を行ったところ、白層を伴う剥離は見られなくなった。更に被膜形成能を検証するため、黒染め処理 (四三酸化鉄メッキ) をギヤ表面に施して連続一定高負荷試験を実施したところ、被膜量が回復して白層を伴う剥離が見られなくなった。これは黒染めが大気条件における酸化膜を模することで被膜形成能が向上、もしくは酸素供給源として作用したこと等が考えられる。

5. まとめ

真空環境における連続一定高負荷のギヤ疲労寿命試験にて発生した白層を伴う剥離要因は、主として被膜形成能の変化によると推察された。但し実際の月面走行条件 (低負荷・インターバルあり) では発生しないことを確認した。

文献

- 1) Saverio F. Morea: THE LUNAR ROVING VEHICLE-N93-14008 HISTORICAL PERSPECTIVE, 2nd Conference on Lunar Bases and Space Activities
- 2) 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予稿集 (2021)
- 3) 横山崇, 剣持伸朗, 松本康司, 小原新吾, 佐野敏成, 橋本洋人, 熊谷厚法, 高橋直子, 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2報), 第66回宇宙科学技術連合講演会予稿集 (2022)
- 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) 横山崇, 剣持伸朗, 松本康司, 小原新吾, 佐野敏成, 高橋直子, 多田亜喜良: 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), トライボロジー会議2022 秋福井予稿集
- 6) Takashi Yokoyama, Koji Matsumoto, Nobuo Kenmochi, Takatoshi Shinyoshi, Toshinari Sano, Akira Tada, Naoko Takahashi: Tribological Properties of Lubricants for Gearbox of Human Pressurized Lunar Rover, WTC2022
- 7) Takashi Yokoyama, Nobuo Kenmochi, Koji Matsumoto, Shingo Obara, Toshinari Sano, Akira Tada, Mayumi Sumiya, Naoko Takahashi, Keiichiro Oh-ishi: Antiwear and Antiseizure Properties of Gearbox Lubricants for the Human Pressurized Lunar Rover, ITC Fukuoka (2023)
- 8) 高橋直子, 小坂悟, 磯村典武, 大石敬一郎, 佐野敏成, 横山崇, 松本康司, 剣持伸朗, 小原新吾, 多田亜喜良, 角谷真夕子, 金子博之: 月面有人と圧ローバトランスミッション開発における放射光利用, 第21回SPRING-8産業利用報告会 (2023)
- 9) 高崎大裕, 祐谷将人, 根石豊, 小坂誠, 崎山裕嗣, 大村朋彦, 河野佳織: 浸炭軸受鋼の転動疲労における白色組織変化を伴うはく離プロセス, 鉄と鋼, 110(14), 1150-1164(2024)

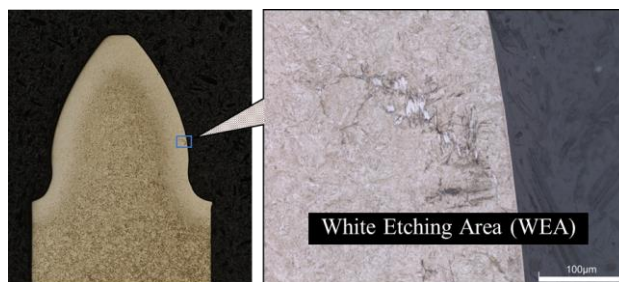


Fig.3 Microstructural observation of gear cross section

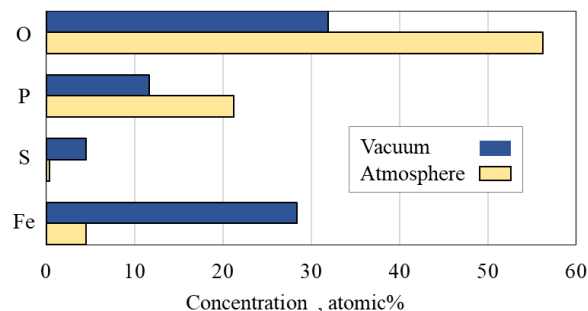


Fig.4 Atomic concentrations in tribo film

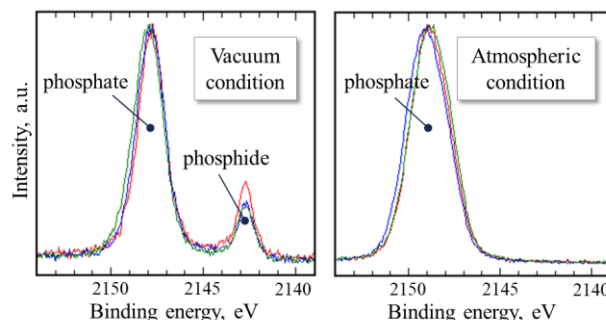


Fig.5 HAXPES spectrums (P1s)