

連携記事

宇宙用機構部品の液体潤滑に関する最近の動向

Recent Progress in Liquid Lubrication for Space Mechanisms

塩見 裕

Hiroshi Shiomi

宇宙航空研究開発機構
研究開発部門第二研究ユニット
主任研究開発員

1 はじめに

宇宙での活動が地球の周回軌道や月、惑星、小惑星などと拡大する中で、機構部品が動作する環境や使用条件は多岐に渡り、それぞれに適した潤滑剤の選定が重要となっている。宇宙用の潤滑剤としては、蒸発が問題にならない固体潤滑が選定されることも多いが、低蒸気圧の潤滑油が開発されて以降、液体潤滑が選定される機器が増えている。一般に長寿命のものには液体潤滑を、分離機構など短寿命のものには固体潤滑剤が採用されることが多い。また、 -40°C 以下の低温や 100°C 以上の高温では液体潤滑剤の利用は困難で、固体潤滑剤が採用される。地球周回の人工衛星で使用される機構部品で液体潤滑剤と固体潤滑剤がどのように使い分けられているかについては既報を参照いただきたい¹⁾。

地球周回の人工衛星用機構部品における液体潤滑の適用例を見ると、リアクションホイールやジャイロの高速回転で駆動する玉軸受では油潤滑が、太陽電池パドル駆動機構・アンテナ駆動機構の低速回転で駆動する転がり軸受、歯車などでは油潤滑あるいはグリース潤滑が採用されることが多い。それらで使用される低蒸気圧の潤滑油としては、フッ素系合成油のPFPE (Perfluoropolyether) と合成炭化水素油のMAC (Multiply alkylated Cyclopentane) の2種類が主である。耐摩耗性や耐劣化性はMACが優れており、使用できる温度範囲はPFPEの方が広く、使用条件によって両者が使い分けられている。これら二つの潤滑油を用いることで、地球周回の人工衛星の機構要素は10年を超える長寿命を達成している。それらは金属疲労など部材の損耗による寿命ではなく、潤滑剤の消失や劣化に伴う潤滑不良で寿命に至り、潤滑法の改善などにより更なる長寿命化の研究が行われている。また、10年以上の寿命を人工衛星の開発期間内(5年程度)で保証する寿命評価手法や異常発生時の潤滑状態把握、異常からの回復方法などが現在の研究対象となっている。

近年では月面や月周回軌道で動作する機器に関する研究が多く行われており Fig.1に示すような月面を走る有人と圧ローバの開発²⁾などが進められている。人類は過去に月面を走行しているが、その走行距離は数十km程度であり、車体も小さく軽量である。一方で現在検討されている有人と圧ローバは乗員が宇宙服なしで居住可能な与圧部を有することで質量が10t程度と重く、走行距離も10,000km以上を目標としており、挑戦的な開発である。機構部品を見ても人工衛星用の機構部品とは異なり、高面圧で動作するしゅう動面が多く、転がり軸受や減速歯車などの潤滑方法を大幅に変更する必要がある³⁾。また月面にはレゴリスと呼ばれる細粒物が存在することも、軌道上の人工衛星とは大きく異なる点で粉塵シールの開発も重要である。有人と圧ローバ一つを見ても研究課題が数多あり、宇宙機構部品の研究は軌道上の人工衛星のものから探査などに移りつつある。

本稿では、まず人工衛星用機構部品の液体潤滑において技術課題となっている長寿命化や潤滑状態推定法、異常からの回復手法について、玉軸受を例にとり紹介する。次に有人と圧ローバの機構部品のうち液体潤滑の採用が見込まれるもの

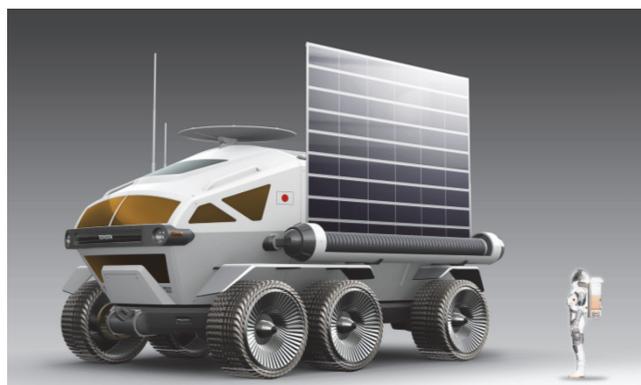


Fig.1 Schematic illustration of a crewed pressurized rover³⁾. (Online version in color.)

の技術課題とそれに対する近年の取組みについて紹介する。

2 人工衛星の機構部品の潤滑技術と最近の技術動向

液体潤滑が採用されている人工衛星の機構要素としては、転がり軸受や歯車が主である。宇宙用の歯車としては波動歯車が良く利用されており、近年ではグリース潤滑の波動歯車に対して長寿命化に関する研究が行われ、表面処理を行うことで潤滑寿命を大幅に延ばすことに成功している⁴⁾。波動歯車の潤滑技術については既報を参照いただきたい⁵⁾。転がり軸受のうちで最も使用されているのが玉軸受であり、これまでも長寿命化技術や高速用途の玉軸受での保持器の安定性などについて研究が進められている。保持器の安定性については既報⁶⁾を参照いただき、ここでは玉軸受の長寿命化技術や状態推定法、異常からの回復手法に関する近年の動向を紹介する。

2.1 液体潤滑玉軸受の長寿命化

人工衛星に用いられている転がり軸受はホイールやジャイロの玉軸受のような高速回転 (3,000~10,000rpm) で動作するものと太陽電池駆動パドルやアンテナの駆動機構に用いられる低速回転 (0~100rpm) で動作する転がり軸受に大別される。前者は高速領域でも低摩擦トルクを要求されるため、50mgにも満たない極めて少量の潤滑油で潤滑されており、潤滑油の損失が寿命を決めると推定されている。後者は潤滑油やグリースで潤滑されており、低速では接触域に生じる油膜厚さが薄く、固体接触を生じる潤滑状態となり、潤滑油の劣化が主な寿命要因となると考えられている。玉軸受の長寿命化を目指す上では、高速用途では潤滑油の保持が重要であり、低速用途では潤滑油の劣化を防ぐ必要がある。

高速用途の玉軸受では、玉、内外輪にコーティングの様に薄く塗布された潤滑油と保持器に含浸された潤滑油をバリアコーティングなどで転動面近傍に保持することで10年以上の寿命が実現されている。更なる長寿命化を目指すためには、軸受内の潤滑油量を増やすことが必要であり、グリース潤滑への変更が考えられるが、摩擦トルクが油潤滑に比べて大きくなるのが欠点である。近年ではグリースから基油だけを分離させ、軌道面に供給する方法が検討されている⁷⁾。Fig.2にManiwaらが構築した軸受ユニットと潤滑油の移動経路の概略図を示す。軸受ユニットは2つの玉軸受と油の表面張力を利用した受動給油構造 (以下、受動給油構造) で構成されている。受動給油構造は、潤滑油を含浸させた多孔質体とグリースで構成される。多孔質体から玉軸受の保持器に潤滑油が移り、多孔質体の油量が減少するとグリースから潤滑

滑油のみが多孔質体へと供給される。玉と保持器が接触する際に潤滑油が玉に供給され、玉と接触する内外輪へと広がる。この軸受ユニットに対して内輪回転速度100rpmで回転試験を実施したところ、Fig.3のようにグリース潤滑よりも摩擦トルクが低減することが示されている。試験中の摩擦トルクが時間推移と共に変化していないことから、リザーバからの供給量と軌道面での消費量がバランスしていることが伺え、低摩擦と長寿命の両立が実証されると期待される。

低速用途の玉軸受では潤滑剤の劣化の把握が重要である。MACの劣化は、金属表面の酸化膜が摩擦などで除去されることで生成する新生面での潤滑油分子の分解や重合といった化学反応に起因する。潤滑油分子が分解することで低分子量生成物⁸⁾が、それ以外の分解生成物同士が重合することで高

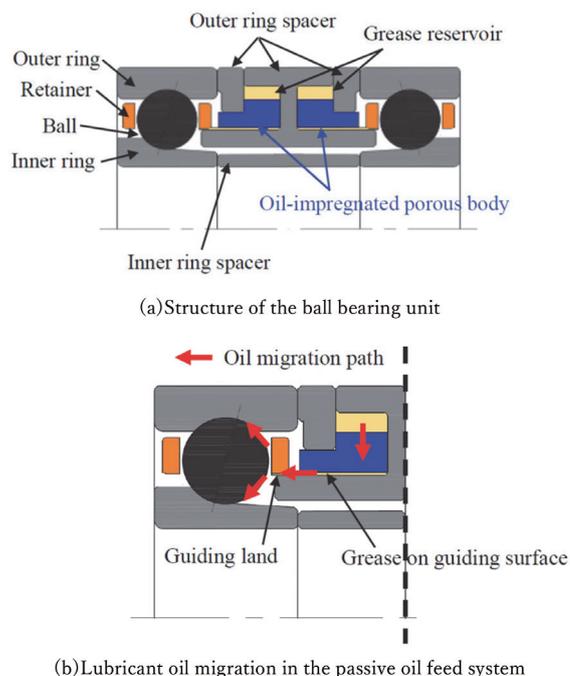


Fig.2 Schematic illustration of ball bearing unit with the passive oil feed system⁷⁾. (Online version in color.)

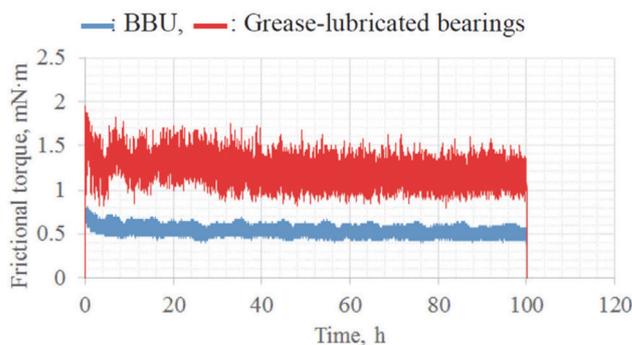


Fig.3 Trend in frictional torque of the ball bearing unit and grease-lubricated bearings⁹⁾. (Online version in color.)

分子量生成物⁹⁾が、それぞれ生じることが知られている。分解により生じた低分子量生成物は蒸発するため、油量の減少につながる。高分子量成分は接触域近傍に蓄積し、粘度増加により接触域への潤滑油供給が減少し、油量不足による潤滑不良を引き起こすと推定されている¹⁰⁾。このようなMACの劣化はすべり距離（接触二面間の速度差×時間）の影響を強く受けるため、接触二面間の速度差が小さい玉軸受では劣化の程度は小さいと考えられている。PFPEの劣化としては、玉と内外輪の接触部で受ける応力や鋼材表面で生じる金属フッ化物の自己触媒作用により潤滑油分子が切断され、蒸気圧の悪化や永久粘度低下が生じることが知られている¹¹⁾。PFPEの化学劣化のうち、接触域の応力での分子鎖の切断については、接触面圧を軽減することで回避が可能とされている。接触域の高圧下での潤滑油の状態が液体領域であれば粘度低下は起こらず、弾塑性固体の領域では発生することが報告¹¹⁾されており、多くの機器で接触面圧が0.7GPa以下になるように設計することが推奨されている¹²⁾。金属フッ化物生成による自己触媒作用による分子の分解への対策としては、金属表面での反応を抑えるために、玉の表面に炭化チタン（TiC）コーティングを施すことが挙げられ、潤滑寿命が延びることが報告されている¹³⁾。また添加剤を付与し金属フッ化物の生成を抑えることで、潤滑性を損なうことなく耐劣化性を向上させたPFPEが近年開発され¹⁴⁾、低温で動作する火星探査機の機構部品などに使用されている。

2.2 玉軸受の潤滑状態推定法

ホイール用玉軸受の潤滑状態については、ホイール加減速時のモータ電流の変化から概算される玉軸受の摩擦トルクの速度に対する推移を用いて推定されている。Fig.4に概略図を示す。摩擦トルクは固体同士の接触で生じるクーロン摩擦による摩擦トルクと液体の粘性により生じる摩擦トルクの合計であると考えられている。前者は速度に依存せずほぼ一定で、後者は速度の増加に伴い変化し、低速の挙動は油量などにより異なるが、高速域では速度増加に伴いトルクは増加し、速度に対する勾配は粘度が高いほど大きくなる。Dube

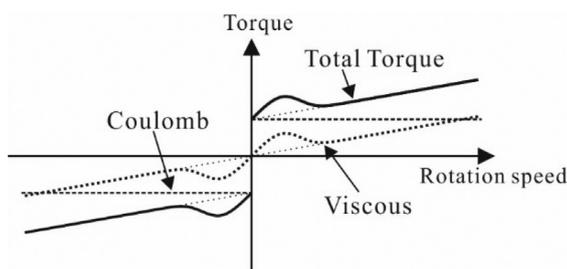


Fig.4 A Frictional torque model used in condition monitoring of ball bearing.

らは、玉軸受の摩擦トルクをクーロン成分と粘性成分に分け、それぞれの寿命試験における経時変化を観察し、寿命直前に粘性成分が急に減少し、クーロン成分が急増することを明らかにしている¹⁵⁾。粘性成分が減少することは油量の減少か粘度の低下により生じると考えられ、Dubeらが用いた潤滑剤がMACであることを考慮すると粘度低下の可能性は低く、油量の減少が主因と推定される。

玉軸受の油量推定法としては、内外輪間の熱コンダクタンスから油量の変化を推定する手法が提案されている¹⁶⁾。ここで熱コンダクタンスとは熱抵抗の逆数であり、熱の伝わりやすさを示すパラメータである。この手法は玉軸受の玉と内外輪間に生じる液架橋の大きさにより、熱コンダクタンスが変化することを利用している。液架橋とは、二つの固体間に液体が存在する場合に形成される両固体をつなぐ液体の架橋である。無潤滑状態では、熱が通過する面積はヘルツ接触の面積のみであるが、液架橋が存在すると熱が通過する面積は液架橋の面積分増加することになり、熱が通過しやすくなる。Fig.5に示した概略図のように玉や内外輪の表面に存在する油量が多くなり、油膜厚さが t_1 から t_2 に増加すると、玉／内外輪間のヘルツ接触部の周辺に生じる液架橋の大きさは R_1 から R_2 へと大きくなり、玉軸受の内外輪間の熱コンダクタンスが大きくなる。Takeuchiらはこの手法を用いて、玉軸受を高速回転させた場合、総回転数の増加に伴い、静止時の玉と内外輪間の熱コンダクタンスが減少することを確認し、接触域周辺の油量が遠心力により減少すると推定している¹⁷⁾。

2.3 潤滑異常からの回復法

人工衛星の修復を行う軌道上サービスなどが検討されつつあるものの、現状では人工衛星は一度打ち上げられるとメンテナンスフリーでミッション期間を動作する必要がある。しかし、異常が生じた場合に何も対策を取らずにミッションを諦めるということではなく、異常からの回復が試みられる。2.2で述べたように液体で潤滑された玉軸受の玉／内外輪の接触

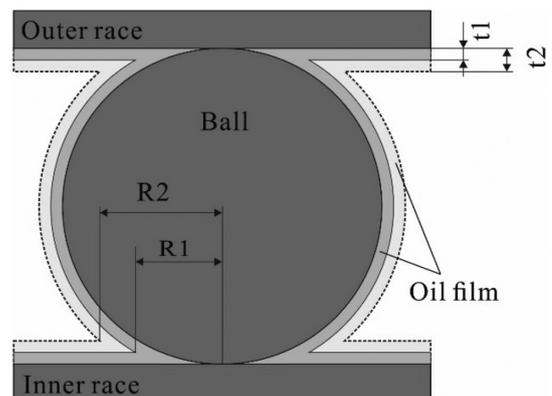


Fig.5 Schematic illustration of liquid bridge in ball bearing.

部には液架橋が生じる。液架橋と周辺の潤滑油膜が連続している場合、玉軸受を静止させると液架橋のメニスカスの表面張力などにより、周辺の潤滑油膜から液架橋に潤滑油が移動し、液架橋が成長することが知られている¹⁸⁾。Takeuchiらが熱コンダクタンスから推定したところ、この成長は4ヶ月にも亘り継続する¹⁶⁾。この液架橋の成長は周囲から潤滑油を潤滑面に集める作用と考えられ、潤滑油の枯渇により潤滑不良に至った玉軸受の状態回復手法として期待される。Dubeらはモータ寿命試験で異常が生じた玉軸受に対して、30日程度の回転停止期間をおくことで、異常から回復する可能性があることを報告している¹⁵⁾。液架橋の成長は、軸受表面にコーティングのように付与された潤滑油の薄膜の分布や流動性と密接に関係しており¹⁸⁾、それらを詳細に把握することで、より確実な復旧手法の構築が望まれる。

3 有人と圧ローバ開発に向けた取組み

有人と圧ローバと人工衛星の使用環境で大きく異なる点は、地球の1/6程度の重力や粉塵に晒されることである。機構部品への影響としては、接触面圧の増加や粉塵の混入が考えられる。粉塵に対しては、シールにより内部に侵入させないことが重要である。粉塵シールは超高真空の月面環境に曝露されることから固体潤滑剤の利用が検討されている。有人と圧ローバの構成要素のうち、パワートレインやシャシ系の機構部品には液体潤滑剤の採用が検討されているが、解決すべき課題が多い。それらの中でもFig.6示すようなトランスミッションでは高温下で高荷重を受ける歯車の潤滑やモータなどの冷却のため潤滑油の循環・封止・蒸発防止が、シャシでは低温・高温下で高荷重を受ける転がり軸受の潤滑が、それぞれ重要な課題と認識され、研究開発が進められている³⁾。

高荷重下による面圧の増加は、接触部の焼付きや摩耗増加などにつながり、それらに基油のみで対応するのは難しく、添加剤の開発などが必要である。PFPEは接触面圧によって粘度低下を起こす可能性が示されている点や溶解する添加剤

がほとんどない点で基油の候補からは外れ、MACをはじめとする炭化水素系の潤滑油が候補となっている。地上の自動車の駆動系では大量の潤滑油をポンプで循環し、フィルターなどを用いて摩耗粉などの異物を除去したものを、しゅう動部に供給する潤滑方式が用いられている。ポンプで循環させるためには、低粘度油を用いると効率がよいが、一般的に低粘度油は分子量が小さく、蒸気圧が高い。多量の潤滑油を用いることである程度の蒸発を許容し、潤滑油封入部であるギヤボックスの気密性をあげてボックス内を潤滑油の飽和蒸気圧に保つなどの蒸発を軽減する対策を講じながら、低粘度油の利用が検討されている。そのために必要な技術としてはオイルシールが挙げられる。

ここでは、トランスミッション用潤滑油とオイルシールを開発について紹介する。

3.1 トランスミッション用潤滑油の開発

MACに用いる添加剤については、多くの研究が行われてきた。その中でリン酸エステル系の添加剤が、金属表面との化学反応により優れた潤滑性能が報告されている¹⁹⁾。また、リン酸エステル系の優れた潤滑性の発現にはしゅう動面の構成材表面に存在する酸化被膜が重要であり、厚い酸化被膜が存在する金属を用いることが推奨されている²⁰⁾。近年では、MACに地上の自動車に用いられる潤滑油用の添加剤を加えた試料油に対し、潤滑性や揮発性による効果の維持などの評価が行われ、蒸発により添加剤の一部組成が減少することが示唆され、添加剤の揮発性についての検討が必要とされている²¹⁾。有人と圧ローバではポンプにより潤滑油を循環・供給する強制潤滑の採用が検討されていることから、低粘度油の採用が必要である。炭化水素系合成油であるPAO (Poly- α -Olefin) の低粘度油を基油に用い、地上の自動車用ATF添加剤を元に耐蒸発性を改善した添加剤を加えた潤滑油の開発が進められている。大気中と真空中で評価された耐摩耗性を比較すると、大気中の方が真空中よりも耐摩耗性が良いものの、真空中においても十分に効果が期待できることがボール・オン・ディスク試験や歯車試験などで示されている²²⁾。

3.2 オイルシールの開発

多量の潤滑油を用いて歯車の潤滑やモータの冷却などを行うために、潤滑油を封入する技術は重要である。ギヤボックスの回転軸シールにはリップシールやメカニカルシールの採用が検討されている。シールからの潤滑油の漏れとしては、液体としての漏れと蒸発による漏れが考えられる。産業用のメカニカルシールでは、液体としての漏れの抑制と低摩擦を同時に成立される技術が確立されている。この技術では、漏れ側に流出する液体を潤滑面で生じる周囲圧よりも

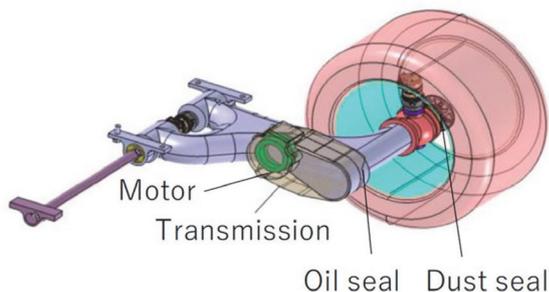


Fig.6 A draft layout of mechanical components for a crewed pressurized rover²²⁾. (Online version in color.)

圧力が低い領域（以下、負圧部）で引き戻すことで漏れが抑制される²³⁾。この負圧部では、液体が負圧に耐えられず破断し、液体中に気泡（空洞）ができることが多い。この現象はキャビテーションと呼ばれる。真空中と大気中では、キャビテーションの発生領域の大きさが異なることが報告されており^{24,25)}、真空中の方がキャビテーション領域は大きく、周囲圧とキャビテーション領域の圧力の差が小さくなると推察されている。そのため、真空中で用いるシールについては、大気中の設計技術を真空用に修正する必要があり、キャビテーション領域の取扱いなどを中心に検討が進められている。低摩擦を要求されない場合は、シール面に油膜を極力形成させないように設計すれば液体としての漏れはある程度抑制することが可能である。そのように設計されたリップシールを用いたギャボックスでの試験を行い、漏れ量を評価した場合も、漏れ側の真空チャンバーの内壁に潤滑油の付着が見られることが報告されており³⁾、蒸発による漏れについてシールを二段にするなど別途検討が必要となると考えられる。

4 おわりに

人工衛星や有人圧ローバの液体潤滑が採用される機構部品の課題や研究動向について紹介した。宇宙用の機構部品では微量の潤滑油での潤滑から多量の潤滑油での潤滑に研究対象が移行している。一方で、産業用機構部品では低摩擦化や廃油の削減などを目的に、潤滑油の使用量を減らす試みが行われている。宇宙用と産業用で技術の推移が逆になっているのは興味深い。宇宙用機構部品で培われた技術を産業用に、産業用で培われた技術を宇宙用に、相互に利用することができれば、両者の技術進展が効率的に進むように思う。そのような協力体制を築くためには、大気中と真空中での潤滑に関する諸現象がどのように違うかを明確にする必要があり、それは科学的視点でも興味深い。産学官がうまく連携し、宇宙用・産業用の潤滑技術が効率的に発展することを期待する。

参考文献

- 1) 鈴木峰男, 小原新吾, 野木高: 表面技術, 57 (2006) 9, 630.
- 2) 降笹弘城, 池田直史, 有人圧ローバ検討チーム: 第64回宇宙科学技術連合会講演集, (2020), JSASS-2020-4692.
- 3) 松本康司, 小原新吾, 剣持伸朗, 横山崇, 降笹弘城, 池田直史, 熊谷厚法, 藤川雅人, 橋本洋人, 竹中秀裕: 第65回宇宙科学技術連合講演会講演集, (2021), 3J01.
- 4) K.Maniwa, Y.Mizoguchi, A.Orita and S.Obara: Proc. 18th ESMATS 2019, (2019).
- 5) 小原新吾: 月刊トライボロジー, 6 (2022), 1.
- 6) 間庭和聡, 野木高: トライボロジスト, 58 (2013) 12, 855.
- 7) K.Maniwa, T.Nogi, S.Obara, K.Kitamura, K.Yamakawa and A.Koyama: Proc. 17th ESMATS 2017, (2017).
- 8) R.Lu, I.Minami, H.Nanao and S.Mori: Tribol. Lett., 27 (2007), 25.
- 9) M.Masuko, H.Mizuno, A.Suzuki and S.Obara: Trib. Trans., 53 (2010), 75.
- 10) 塩見裕: トライボロジスト, 65 (2020) 9, 563.
- 11) S.Mia, H.Komiya, S.Hayashi, S.Morita, N.Ohno and S.Obara: Tribology Online, 2 (2007) 2, 54.
- 12) M.Buttery, L.Gaillard, S.Rajala, E.Roberts, T.Rohr and A.Merstallinger: Proc. 15th ESMATS 2013, (2013).
- 13) W.R.J., Jr., M.J.Jansen, L.H.Helmick, Q.G.Nguyen, D.R.Wheeler and H.J.Boving: NASA-TM 1999-209055
- 14) A.W.Stubbs and J.T.Galary: Proc. 46th AMS, (2022).
- 15) M.J.Dube, J.Fisher, S.Loewenthal and P.Ward: Proc. 45th AMS, (2020), 277.
- 16) Y.R.Takeuchi, P.P.Frantz and M.R.Hiton: Proc. 42nd AMS, (5-2014), 113.
- 17) Y.R.Takeuchi, J.T.Dickey, S.M.Demsky, K.K.Lue, J.J.Kirsch and P.P.Frantz: Proc. 15th Annual TFAWS, (2004), TFAWS-04-1008.
- 18) P.Frantz, J.Helt and S.Didziulis: Proc. 45th AMS, (2020), 287.
- 19) W.R.Jones, Jr., A.K.Poslowski, B.A.Shogrin, P.Herrera-Fierro and M.J.Jansen: Trib. Trans., 42 (1999), 317.
- 20) 飯島茂, 益子正文, 鈴木章仁, 野木高, 小原新吾: トライボロジスト, 56 (2011) 5, 320.
- 21) 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: トライボロジー会議予稿集, 松江, (2021).
- 22) 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: 第66回宇宙科学技術連合講演会講演集, (2022), 3B17.
- 23) 徳永雄一郎, 杉村丈一, 山本雄二: トライボロジスト, 60 (2015) 5, 322.
- 24) 大津健史: トライボロジスト, 60 (2015) 2, 111.
- 25) 松岡範子, 塩見裕, 小原新吾: トライボロジー会議予稿集, 東京, (2017), D2.

(2022年12月20日受付)