

宇宙用潤滑剤のトライボロジー特性評価
Evaluation of Tribological Characteristics of Space Lubricants

宇宙先進技術研究グループ 宇宙潤滑サブグループ 鈴木峰男、松本康司、野木 高
Mineo Suzuki, Koji Matsumoto and Takashi Nogi
Advanced Space Technology Research Group, Space Tribology Subgroup

Abstract

In order to provide reliable, long-term performance of moving mechanical assemblies for space mechanisms, it is very important to accumulate data on tribological characteristics of conventional space lubricants as well as to enhance their performance. Basic research on new lubricants and lubrication methods, which will be needed in advanced space systems such as future reusable spacecraft and lunar/planetary exploration vehicle, is also important. In this paper, tribological characteristics of some (conventional and new) lubricants, materials (substrates) and lubrication methods are evaluated under various conditions. Contents include: tribological characteristics of bonded MoS₂ films on a titanium alloy substrate, performance evaluation of bonded PTFE films, adhesion measurement of space materials, friction and wear of bonded MoS₂ films exposed to the space environment, Effectiveness of transfer film lubrication at 800 degC in low-vacuum.

1. はじめに

宇宙機構部品のしゅう動部の信頼性向上、長寿命化、低コスト化、性能向上を実現するためには、最適な設計の指針となるトライボロジー特性のデータの蓄積、試験法の確立、解析法の確立とともに、固体潤滑剤・潤滑油の性能向上が必要である。また、宇宙開発の多様化に伴い、再使用宇宙機・ロケット、月・惑星探査などの高度な技術・科学ミッションに対応できる潤滑システムの先行的研究が求められている。このような要求をふまえて筆者らは、宇宙用潤滑剤のトライボロジー特性の評価・解析、高性能潤滑剤の探求、将来型宇宙機器の潤滑システムに関する基礎研究を行っている。

2. 研究の概要

平成15年度は以下の項目について研究を行った。

(1) MoS₂ 焼成膜／チタン合金下地のトライボロジー特性

宇宙機器では、軽量化のために構造材としてチタン合金の採用される場合がある。ロケットエンジンの伸展ノズル駆動機構では、チタン合金のボールねじ、リニアガイドの使用が検討されている。宇宙用の固体潤滑剤としてはMoS₂（二硫化モリブデン）が広く使用されているが、MoS₂被膜のトライボロジー特性については、これまでステンレス鋼を下地とした場合を中心にデータが蓄積され、チタン合金を下地とした場合の研究が十分に行われていない。本研究では、ステンレス鋼が下地の場合に長寿命が得られたMoS₂焼成膜について、チタン合金を下地とし、トライボロジー特性に大きく影響する温度と接触圧力（面圧）を変化させて寿命試験を行った [1]。また、ボールねじ、リニアガイドへの適用を想定し、転がりすべり接触において寿命に及ぼす面圧、すべり率の影響を調べた [2]。さらに、接触応

力の数値解析を行い、S-N（応力－繰返し数）線図による寿命予測の可能性について検討した。

（2）PTFE 系潤滑剤の性能評価

PTFE（ポリテトラフルオロエチレン）系潤滑剤が優れたトライボロジー特性を示すことはよく知られているが、宇宙用としての使用実績が少なく、高真空中のトライボロジー特性について必ずしも十分なデータが得られていない。PTFEに比べてMoS₂は広く使用されているが、MoS₂が使用できないミッションもある。例えば、MUSES-Cプロジェクトには小惑星の土壌サンプルを持ち帰るというミッションが含まれ、サンプル採取装置しゅう動部の摩耗粉がサンプルへ混入した場合を想定し、小惑星由来の物質との判別が困難なMoS₂は忌避され、天然に存在しないと考えられる高分子材料のPTFE系潤滑剤のうち、宇宙で実績のあるPTFE含浸膜が選定された。本研究では、PTFE系潤滑剤の高真空中でのトライボロジー特性をピン／ディスク摩擦試験によって評価した。平成14年度の摩擦回数2000回までの試験でPTFE含浸膜、PTFEスパッタ膜に比べて優れた特性を示したPTFE焼成膜2種について、代表的な宇宙用金属材料であるステンレス鋼、ジュラルミン、チタン合金を下地とし、摩擦回数150万回までの寿命試験を行い、宇宙適用性を検討した。

（3）宇宙用材料の凝着性評価

超高真空中で清浄な金属表面を接触させると凝着することはよく知られているが、実用的には表面を覆った酸化物や吸着物質が一種の潤滑剤として作用するため、接触させただけでは凝着しにくい。しかし、接触面にしゅう動が加わると酸化物や吸着物質が除去されて清浄な表面が現れるため、凝着しやすくなる。振動による微小なしゅう動が原因で凝着が生じ、不具合につながったと推定される事例がいくつか報告されている。そこで、本研究では、ステンレス鋼、ジュラルミン、チタン合金について、高真空中で往復しゅう動後に凝着が発生するかを調べた。

（4）MoS₂ 焼成膜への低地球軌道環境の影響評価

代表的な宇宙用潤滑剤である MoS₂ は耐酸化性に難があり、雰囲気の大半を原子状酸素が占める低地球軌道環境の影響が問題視されている。また、宇宙環境では大気による紫外線の吸収がないため、MoS₂ 焼成膜の結合材の変質が懸念されている。本研究では、ISS（国際宇宙ステーション）のロシア SM（サービス・モジュール）で実際の宇宙環境に曝露した MoS₂ 焼成膜のトライボロジー特性を往復動すべり摩擦試験で評価した。

（5）宇宙用高性能潤滑剤の探求

先進宇宙機器の潤滑問題の究極の解決法は新しい高性能潤滑剤の発見・開発であり、地上用として開発された新潤滑剤の宇宙適用性を評価・検証し、宇宙用潤滑剤の選択範囲を広げることは重要である。平成15年度は、大気中で良好なトライボロジー特性の得られることが報告されている MoS₂ ショット処理に着目し、その宇宙適用性を種々の雰囲気中でのボール／ディスク摩擦試験、真空中での二円筒転がりすべり摩擦試験により評価した。簡便なショット処理が宇宙機器にも適用可能であれば利点は多いと思われる。

（6）再使用宇宙機の高温潤滑

再使用宇宙機の空力舵面の潤滑部は、大気圏突入時に高温での動作を要求される。高温条件で有効な潤滑法としては、移着膜潤滑が提案されており、高真空中では、その有効性が確認されている [4, 5]。本研究では、大気圏突入時の高温・低真空条件における移着膜潤滑の有効性を検証するために、ピン／平板タイプの摩擦試験で、800℃・1300Pa の雰囲気における自己潤滑性複合材の移着膜のトライボロジー特性を評価した。

3. 成果の概要

(1) MoS₂ 焼成膜／チタン合金下地のトライボロジー特性

結合材の異なる2種の MoS₂ 焼成膜を試験した。

MoS₂ 焼成膜を付けたディスクに、被膜なしのピンを押し付けてディスクを回転させ、摩擦係数が0.3を超えるまでの回転回数を寿命とした。ピンとディスクの材料はTi-6Al-4Vである。試験は 10^{-4} ～ 10^{-5} Paの真空中で、温度と面圧を変えて行った。温度についてはヒータを用い、面圧については押し付け荷重とピン半径を変えて制御した。Fig. 1に、有機系結合材の場合の寿命マップを示す。図中の面圧は被膜の影響を無視して算出した値である。面圧が大きくなると寿命が短くなる傾向は顕著であるが、温度の影響は明確でない。逆に、無機系結合材の場合には、面圧の影響が小さく、温度上昇とともに寿命が短くなるという結果が得られている。ステンレス鋼下地・相手材の場合と比較すると、無機結合材の場合にはチタン合金で寿命が極端に短くなったが、有機結合材の場合には下地・相手材の影響は小さかった。

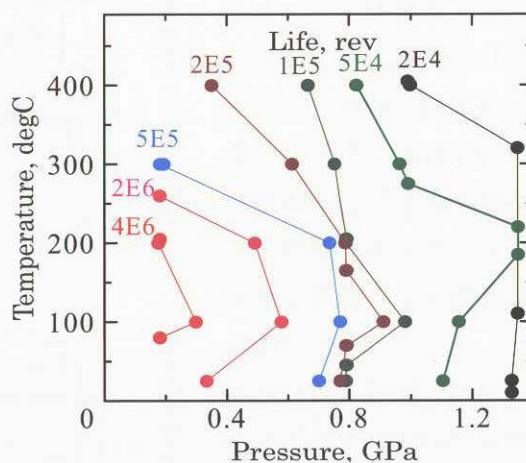


Fig. 1 Life map of a bonded MoS₂ film.

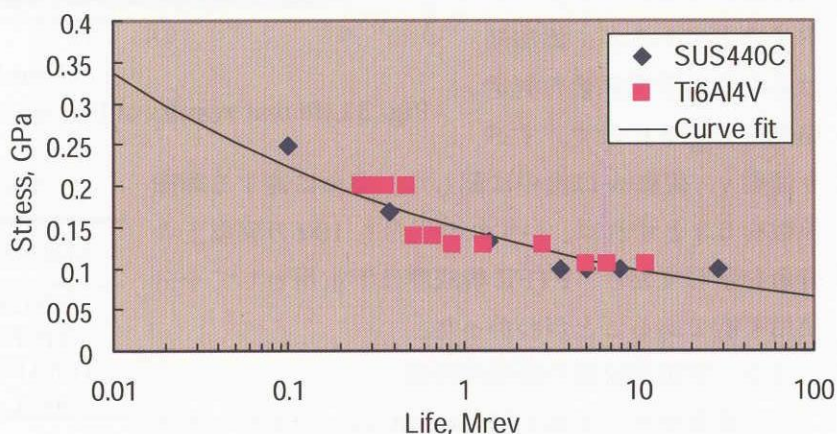


Fig. 2 Relation between life of a bonded MoS₂ film and computed von Mises stress at the film/substrate interface.

転がりすべり接触における寿命を、二円筒の側面を接触させて回転するタイプの試験によって調べた。結合材は有機系で、被膜は両方の円筒に付けた。摩擦係数が0.15を超えた時点をも寿命とし、 10^{-4} ～ 10^{-5} Paの真空中で、Ti-6Al-4Vとステンレス鋼 SUS440C 下地の場合を、すべり率（二円筒の回転速度差と高速側回転速度の比）と面圧（荷重）を変化させて試験した。その結果、面圧が大きくなると明らかに寿命は短くなったが、すべり率の影響は小さく、ピン／ディスク試験（すべり率 100%）と同程度の寿命であった。寿命に達するメカニズムを明らかにするために、寿命に達する直前で試験を停止して接触面の観察と断面形状測定を行ったところ、 μm オーダの厚さの被膜のはく離が被膜／下地界面の近傍で生じていることがわかった（試験前の膜厚は約 $10\mu\text{m}$ ）。そこで、被膜／下地界面の被膜のミーゼス応力を FFT（高速フーリエ変換）法[6]を用いて数値計算した。Fig. 2 はすべり率 1%と 10%の結果で、同じ被膜を他所で試験した結果も同時に示している。なお、数値計算では、被膜の機械的特性に結合材の値を用い、摩擦と表面粗さを無視している。同図からわかるように、寿命は被膜のミーゼス応力で整理でき、はく離の原因は下地との界面における被膜の疲労と推定される。今回の試験では、すべり摩擦と転がりすべり摩擦の寿命が同程度であったが、寿命に至るメカニズムが同じであったとは限らない。すべり摩擦では、はく離ではなく摩擦で寿命の決まる可能性が高く、特に無機系結合材は、ピン／ディスク試験における荷重依存性が小さく、摩擦と相手材への移着の度合いが寿命に大きく影響していたと考えられる。

(2) PTFE 系潤滑剤の性能評価

PTFE 焼成膜 2 種について、下地をステンレス鋼 SUS440C、超ジュラルミン A2024、超々ジュラルミン A7075、チタン合金 Ti-6Al-4V とし、高真空中のピン/ディスク試験における摩擦係数の推移を測定した。ピンの先端半径は 50mm で、被膜を付けたのはディスクのみである。PTFE 焼成膜 A と B の結合材は共に有機系のポリアミドイミドであるが、添加剤は異なる。摩擦係数の測定結果を Fig. 3 に示す。すべ

り速度 v 、荷重 w は図中に記した。寿命に達する摩擦係数を 0.3 とすれば、いずれの場合も 100 万回以上の寿命を示しており、PTFE 焼成膜は宇宙用として十分使用可能であることがわかった。

(3) 宇宙用材料の凝着性評価

高真空中で先端半径 50mm のピンをディスクに押し付け、往復しゅう動後に、ピンを引き離すのに要する力を凝着力として測定する装置を製作して試験を行った。静的に荷重を負荷しただけで試験を行っても凝着力は測定できなかったが、往復しゅう動後には凝着の生ずる場合があった。測定された凝着力の最大値を Table 1 に示す。測定値のばらつきは大きく、最大値は数 N のオーダーであった。また、往復しゅう動時の荷重の影響が小さいのに比べて材料依存性は大きく、SUS440C では凝着しないという結果であった。

(4) MoS₂ 焼成膜への低地球軌道環境の影響評価

摩擦係数の測定結果を Fig. 4 に示す。宇宙環境曝露試料の摩擦係数は、未曝露試料に比べて、1 回目のしゅう動では大きく、2 回目以降は小さかった。別途行った表面分析では、曝露試料の表面から

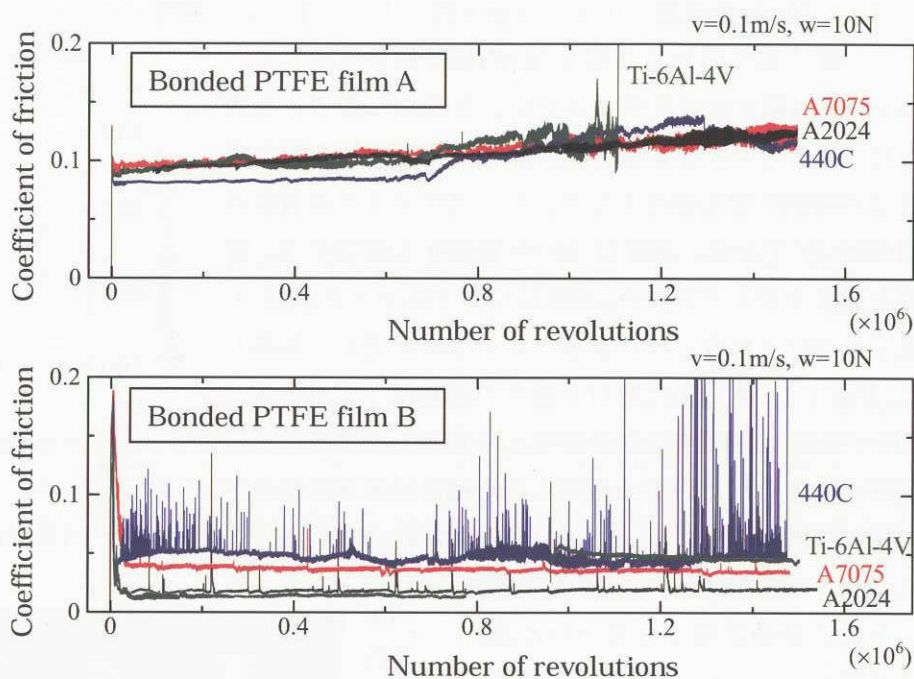


Fig. 3 Life test results of bonded PTFE films on various substrates.

Table 1 Measured adhesion force.

Material	Load		
	10N	20N	30N
A2024	1.39 N	1.37 N	—
A7075	0.43 N	1.70 N	0.57 N
Ti-6Al-4V	0.71 N	4.03 N	3.06 N
440C	0 N	0 N	0 N

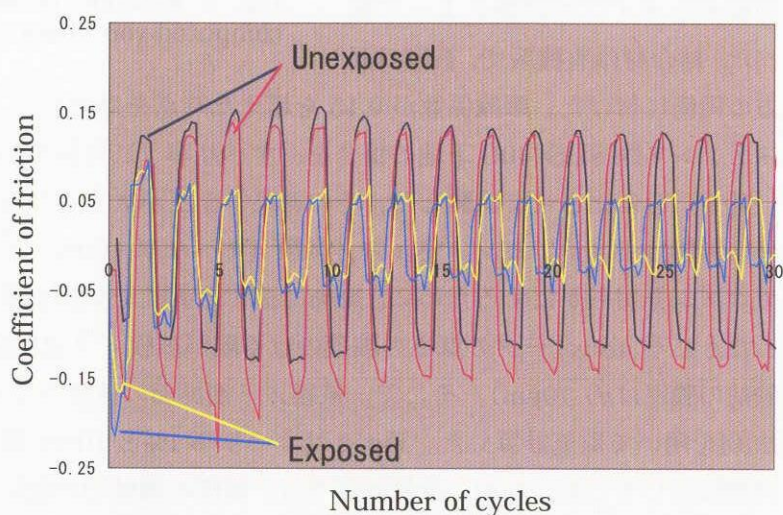


Fig. 4 Coefficient of friction during reciprocation.

シリコンが検出されている。

(5) 宇宙用高性能潤滑剤の探求

MoS₂ ショット処理は、固体潤滑剤 MoS₂ の微粒子を表面に向けて高速で噴射し、潤滑性を向上させる処理である。この処理を行ったディスクと無処理の SUS440C ボール（直径 7.93mm）の摩擦試験で得られた摩擦係数の推移を Fig. 5 に示す。荷重 W とすべり速度 v は図中に記した。真空中および湿度 50% の大気中では摩擦係数が大きく、大気中で低摩擦が得られるという従来の報告と一致しなかった。この原因は面圧の相違にあると考えられ、真空中でも低面圧であれば低摩擦を示す可能性がある。窒素中では低摩擦を示したが、従来の MoS₂ 被膜に比べて寿命は短かった。真空中で二円筒タイプの転がりすべり摩擦試験も行ったが、摩擦係数は大きく、すべり率 1% で約 0.3 である。摩耗については、MoS₂ ショット処理を行った表面の摩耗量が小さく、耐摩耗性の向上は確認された。ただし、無処理の相手材は大きく摩耗するという結果であった。

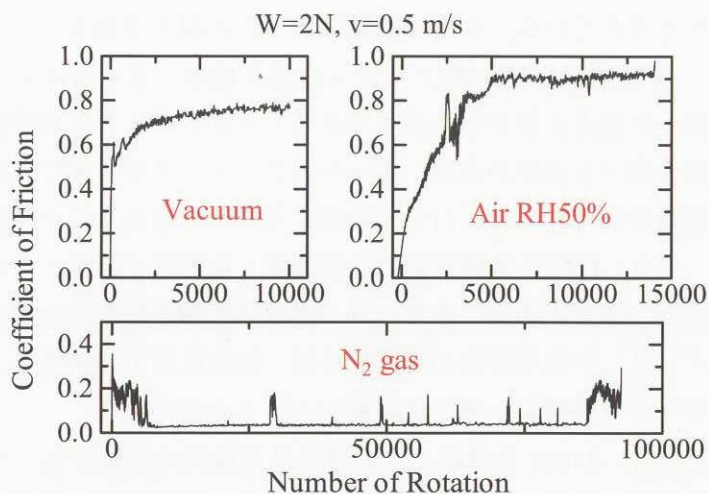


Fig. 5 Coefficient of friction in various atmospheres.

(6) 再使用宇宙機の高温潤滑

Fig. 6 に示すように、クリーンルーム環境を模擬した湿度 50% の大気中で Ni 基自己潤滑性複合材のピンとセラミックスの平板をしゅう動させ、移着膜を形成した。その後、大気圏突入時の高温を想定した 800℃、高度 30km に相当する圧力 1300Pa で、

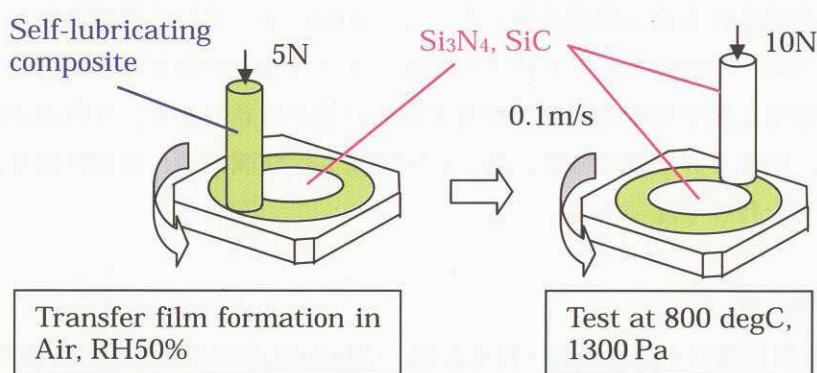


Fig. 6 Configuration of transfer film lubrication test.

平板と同じセラミックスのピン（先端半径 50mm）を用いて摩擦試験を行い、トライボロジー特性を評価した。荷重、すべり速度は図中に記した。試験後の Si₃N₄ のピンと平板の断面形状の表面粗さ計による測定結果を Fig. 7 に示す。同図からわかるように、無潤滑の場合に比べて摩耗量が大幅に減少しており、常温大気中で生成させた移着膜に、低真空・800℃で摩耗を防ぐ効果のあることがわかる。一方、SiC については移着膜があまり形成されず、この潤滑法はあまり有効でなかった。ただし、無潤滑でも摩耗は比較的少なかった。

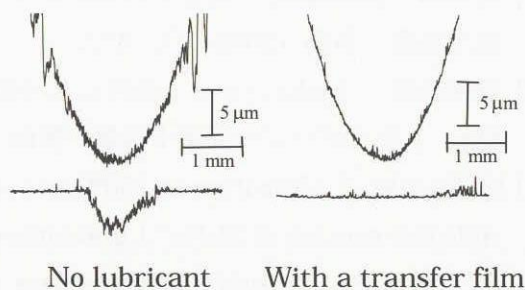


Fig. 7 Surface profiles after test.

4. まとめ

筆者らが平成 15 年度に行った研究を紹介した。宇宙機器の固体潤滑について有用なデータが得られ

たと考えている。今後の課題は以下のとおりである。

(1) MoS₂ 焼成膜／チタン合金下地のトライボロジー特性：ロケットエンジンの伸展ノズル駆動機構への適用を想定したボールねじ、リニアガイドでの試験を行い、ピン／ディスク、二円筒試験との相関を調べる必要がある。ボールねじ、リニアガイドでの試験はコストがかかるため、応力解析のような理論的研究を同時に行い、効率よく研究を進めることが望ましい。

(2) PTFE 系潤滑剤の性能評価：低面圧でのデータが不足しているため、すべり軸受タイプの試験を行う必要がある。また、月・惑星探査機を想定した粉塵環境での評価が必要である。

(3) 宇宙用材料の凝着性評価：加振後および温度を上げた際の凝着力を評価するとともに、凝着力データの整理法・解析法の検討を行う必要がある。

(4) MoS₂ 焼成膜への低地球軌道環境の影響評価：宇宙環境曝露による摩擦係数変化のメカニズムの検討、地上対照評価試料による個々の影響因子の評価、さらに長期間曝露した場合の影響評価が必要である。

(5) 宇宙用高性能潤滑剤の探求：MoS₂ ショット処理を低面圧のすべり軸受タイプの試験で評価する必要がある。

(6) 再使用宇宙機の高温潤滑：再使用宇宙機開発の目途が出た時点で、軸受として評価する必要がある。

平成15年度は固体潤滑の研究を行ったが、油潤滑の研究も重要である。油潤滑では、二面間に油膜が形成される流体潤滑状態において、0.001 オーダの低摩擦係数が得られ、摩耗もほとんどなくなることから、宇宙用としてもホイールやジャイロなどの精密機器に適用されている。宇宙用の潤滑油、油潤滑軸受に関する研究開発は欧米を中心に進められており、国内の実験データ、理論的研究は非常に少ない。平成16年度以降は、新しい宇宙用高性能潤滑油、油潤滑軸受の設計に寄与する理論解析に関する研究を行う予定である。

参考文献

- [1] 松本康司・鈴木峰男・青木由雄, 「MoS₂ 焼成膜の真空下での寿命に及ぼす温度と面圧の影響」, トライボロジー会議予稿集 新潟 (2003-11), 469.
- [2] 野木高・鈴木峰男, 「真空中の転がりすべり摩擦における MoS₂ 焼成膜の寿命」, トライボロジー会議予稿集 新潟 (2003-11), 471.
- [3] 鈴木峰男, 「MoS₂ ショット処理した 440C ステンレス鋼の各種雰囲気中におけるトライボロジー特性」, トライボロジー会議予稿集 新潟 (2003-11), 467.
- [4] M. Suzuki, "Lubrication at 750°C in vacuum by a transfer film from a MoS₂-based composite for roll/slide contact of Si₃N₄," Lubrication Science, 15-3 (2003), 199.
- [5] M. Suzuki & Y. Aoki, "Effectiveness of transfer film lubrication for ceramic pairs in sliding contact at 800°C in vacuum," Proc. of 10th European Space Mechanisms & Tribology Symposium, (ESA SP-524, 2003), 307.
- [6] T. Nogi & T. Kato, "Influence of a hard surface layer on the limit of elastic contact - part I: analysis using a real surface model," ASME J. Tribology, 119 (1997), 493.