

液体金属の境界潤滑下での摩擦特性

Friction Characteristics of Liquid Metal in Boundary Lubrication

九州大（学）*鶴 貴哉 九州大（正）八木 和行 九州大（非）田中将己

キャノン電子管デバイス株式会社（非）東恩納誠 キャノン電子管デバイス株式会社（非）手塚正彦

キャノン電子管デバイス株式会社（非）吉田靖史

Takaya Tsuru*, Kazuyuki Yagi*, Masaki Tanaka*, Makoto Higashionna**, Masahiko Tezuka**, Yasufumi Yosida**

*Kyushu University, **Canon Electron Tubes & Devices Co. Ltd.

1. はじめに

宇宙環境などの高負荷環境下での機械作業において、潤滑性能の向上は極めて重要である。真空条件下では通常の潤滑油が蒸発して使用できないため、飽和蒸気圧が低く、優れた熱安定性を持つ液体金属が注目されている¹⁾。これにより、真空中などの高負荷環境でも蒸発せずに利用が可能となる。しかし、液体金属の高い表面エネルギーによる濡れ性の低さや、反応性の高さによって表面に新たな化合物が形成され、摩擦特性の予測が難しいという課題が存在する²⁾。そこで本研究では、境界潤滑下における液体金属の摩擦特性の詳細な調査を行った。具体的には、雰囲気制御型摩擦試験機を用い、大気中および不活性ガスであるアルゴン雰囲気下での摩擦特性を比較することで、液体金属の潤滑性能を評価した。さらに、摩擦係数の時間経過や摩耗進行の観察を通じて、液体金属の摩擦摩耗特性を調べた。

2. 実験方法

Figure 1 に本研究で使用した雰囲気制御型摩擦試験機の模式図を示す。摩擦面は静止側ピンと回転ディスクによって構成される。実験装置全体はアクリル製容器に囲まれており、雰囲気ガスを空気のほか任意気体に置換することが可能である。本研究では雰囲気気体には空気または不活性ガスであるアルゴンを使用した。実験の際にはステンレス製ハウジングで囲まれた平滑ディスク上にガリウム系液体金属を 1.2 ml 滴下し、ピンが液体金属に浸されるようにした。摩擦面の材質にはピン、ディスクともに合金工具鋼の SKD11 を用いた。摩擦面の表面粗さ Ra は両表面とも 0.4 μm 程度である。ピン先端には 12.7 mm の曲率を付け、接触状態が点接触になるようにした。実験条件については荷重を 50 N（最大ヘルツ圧力 0.93 GPa）、ディスクのしゅう速度を 100 mm/s、液体金属の温度を 70 $^{\circ}\text{C}$ に設定した。

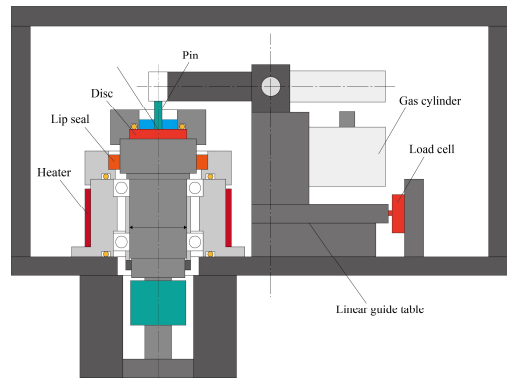


Fig. 1 Schematic of test rig

3. 結果と考察

Figure 2 に 60 分間実験した際の摩擦係数の測定結果を示す。図中の凡例である Air, Argon はそれぞれの雰囲気での無潤滑実験, Air/LM, Argon/LM はそれぞれの雰囲気気体中で液体金属を用いた実験のことを指す。無潤滑と液体金属の実験結果を比較するとどちらも液体金属潤滑条件の方が摩擦係数が下がっていることがわかる。Argon/LM では実験開始 10 分以降、摩擦係数が継続的に上昇していった一方、Air/LM は開始 10 分から 30 分あたりまで摩擦係数が安定し、その後摩擦係数が上昇していった。

Figure 3 に空気・液体金属潤滑の際の実験中と実験後のようす(a), アルゴン・液体金属潤滑の際の実験中と実験後のようす(b)を示す。Fig. 3 (a)からわかるように空気での実験中は表面に液体金属の主成分であるガリウムが酸化したものができ、時間が進むにつれて酸化物の量が増えていった。最終的には液体金属の酸化物が遠心力によってディスクから飛び出し、油不足となった。一方アルゴン中での実験では Fig. 3 (b)のように実験中と実験後でほとんど変化はなかった。Fig. 1 と Fig. 3 の結果から、空気・液体金属潤滑において 35 分あたりまで摩擦係数が最も低減したのは、液体金属が酸化して高粘度化し、潤滑性が向上したからではないかと考えた。

この仮説を調べるために最初に空気中で 10 分間、その後アルゴンに置換して 50 分間の摩擦試験を連続で行った。このときの摩擦係数の推移を Fig. 1 中の Air to argon/LM, 実験のようすを時間順に左から並べたものを Fig. 4 に示す。

Figure 1 中の Air to argon/LM では開始 30 分間は Air/LM と同じ遷移であるが、それ以降は Air/LM, Argon/LM のような急激な上昇は見られなかった。Fig. 4 (a)に示すように空気中で酸化物が生成したが、アルゴンに雰囲気切り替えると酸化物は完全に液体金属中に沈みこんだ。実験中と実験後のようすは Argon/LM の Fig. 3 (b)と似たものになった。しかし、その後表面の液体金属を除去するとディスクに液体金属とその酸化物が混合してペースト状になったものが付着していた。この粘度の高い酸化物が表面上にあることによって摩擦係数を低減させていたと考えられる。

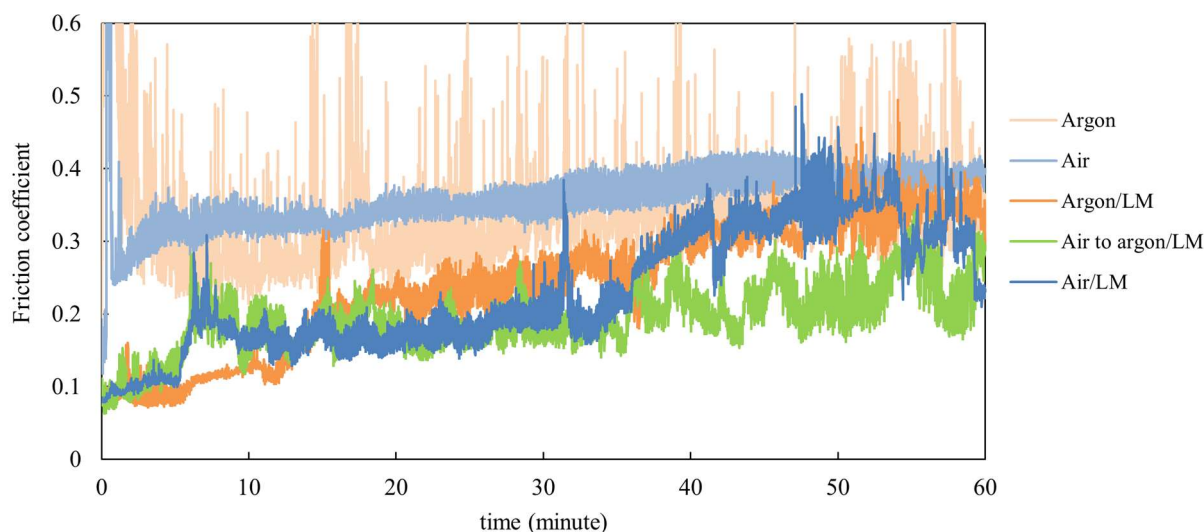


Fig. 2 Variations in friction coefficient with time for different gases



Fig. 3 Comparison in liquid metal conditions during and after tests with liquid metal lubrication in air (a) and argon (b)

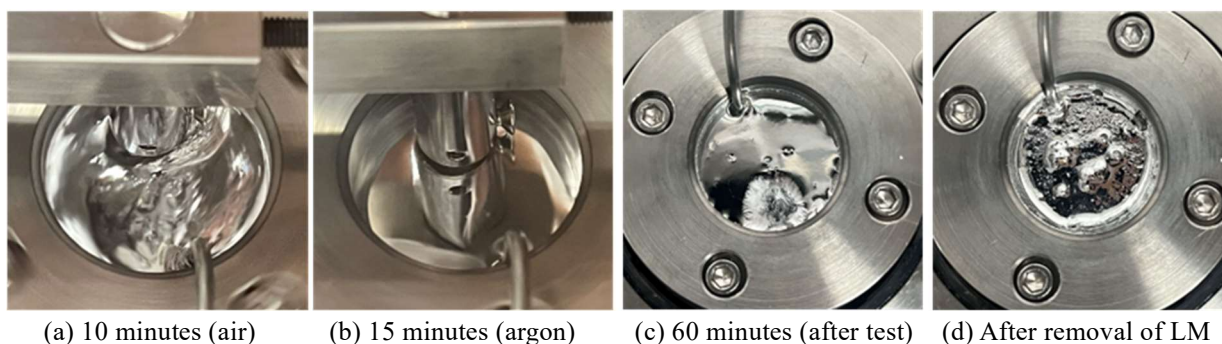


Fig. 4 Transitions in liquid metal conditions when atmospheric gas was replaced by argon from air

4. おわりに

本研究ではガリウムベースの液体金属を用いて境界潤滑下での摩擦特性を調べた結果、以下のことがわかった。

空気中およびアルゴン雰囲気下での摩擦試験において、液体金属潤滑条件は無潤滑条件に比べて摩擦係数が低く、潤滑効果を示した。空気中では液体金属の主成分であるガリウムが酸化し、生成された酸化物が液体金属と混ざり合うことで粘度が上昇し、摩擦係数の低減に寄与した。アルゴン雰囲気下では酸化物の生成が抑制されたため、空気中で見られた液体金属の高粘度化は起こらなかったが無潤滑状態よりは摩擦係数が低下した。空気中での酸化物生成後にアルゴン雰囲気に切り替えることで、酸化物が液体金属中に引き込まれ、摩擦係数の低減に寄与した。

文献

- 1) Yi Li, Songwei Zhang, Qi Ding, Dapeng Feng, Baofeng Qin, Litian Hu: Liquid metal as novel lubricant in a wide temperature range from -10 to 800 °C, *Materials Letters*, 215, 3 (2018) 140-143.
- 2) Mingming Fu, Yifeng Shen, Hao Zhou, Xiaojia Liu, Wenjun Chen, Xing Ma: Gallium-based liquid metal micro/nanoparticles for photothermal cancer therapy, *Journal of Materials Science & Technology*, 142, 4 (2023) 22-33.