

摩擦発電ストライベック曲線による潤滑状態モニタリング
Monitoring of Lubrication Behavior using Triboelectric Stribeck Curve

都市大・理工(院) *木村 駿介 東大・工(院) 楊 致遠 都市大・理工(正) 崔 竣豪
Shunsuke Kimura*, Yang Zhiyuan**, Junho Choi*
*Tokyo City University, **The University of Tokyo

1. はじめに

機械の効率的かつ安全な運転を維持するためには、最適な潤滑状態を保つことが不可欠である。従来、ストライベック曲線を用いて、さまざまな摩擦条件下における摩擦力を測定することにより潤滑状態を記述してきたが、そのためには摩擦トルクを取得するための外部センサーが必要であり、実用的な応用には限界がある。

本研究では、商用のすべり軸受に摩擦発電原理を適用し、軸受の構造を変更することなく、自己発電型で潤滑状態をモニタリングできるシステムの開発を目的に研究を行った。そのために、まず、低摩擦特性を有し、負の帯電材として用いることが可能なフッ素添加ダイヤモンドライクカーボン (F-DLC) 膜について、膜の組成や内部構造による摩擦特性や摩擦発電特性の最適化を行った。最適化した F-DLC 膜を軸表面に成膜し、軸受内面の樹脂材と摩擦発電機を構成した。軸受への荷重、軸の回転速度を変化させ、摩擦電流と摩擦係数を同時に計測することで、摩擦発電ストライベック曲線を新たに提案し、摩擦発電信号により潤滑状態のモニタリングを行うことを研究の最終目標とする。

2. すべり軸受への摩擦発電機の応用および発電メカニズム

Figure 1 は摩擦発電機を組み込んだ金属-ポリマーすべり軸受 (Triboelectric metal polymer sliding bearing, 以後 T-MPSB) の構造と動作原理を示す。主な構造には、金属-ポリマーすべり軸受 (MPSB) と、負の帯電材として用いる F-DLC 膜を被覆したスチールシャフトが含まれる。市販の MPSB にはポリホルムアルデヒド (POM) 樹脂層があり、F-DLC 膜に比べて正の摩擦帯電列を示すため、正の帯電材として用いることができる。Figure1(a)に示すようにスチールシャフトに F-DLC 膜を 90 度ごとに成膜し、F-DLC 膜の間にギャップを設けることで電荷を変化させ、すべり型の単電極モード摩擦発電機 (Single electrode mode triboelectric nanogenerator) を形成した。T-MPSB の摩擦発電原理は Figure1(b)に示す。

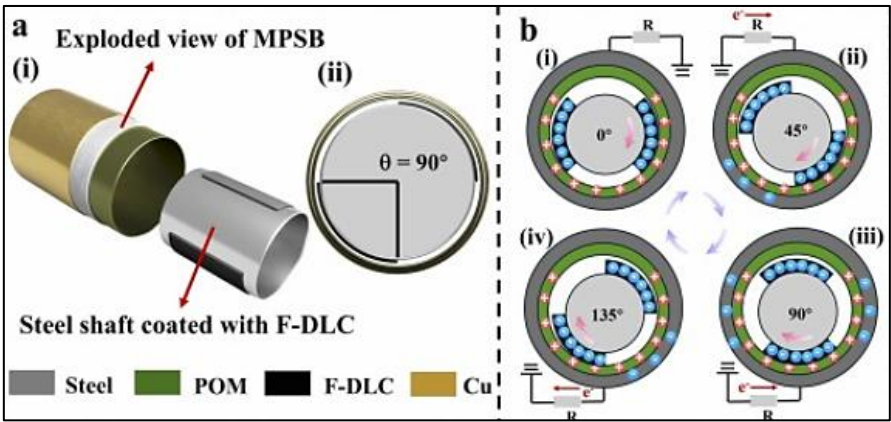


Fig.1 Structure and operating principle of T-MPSB: (a) Exploded view of T-MPSB, (b) Charge variation in one cycle

3. 実験方法

Figure 2 は本研究で用いた軸受試験機を示す。摩擦力の測定はハウジングにトルクアームが取り付け、2 軸ロードセルを用いて測定した。摩擦発電測定部には電流波形を測定するオシロスコープが接続されており、摩擦測定と摩擦電気信号の同時測定が可能となっている。摩擦試験条件の詳細は Table 1 に示す。なお、潤滑油としてはシリコンオイルを用いた。

Table 1 Experimental conditions

	Load (N)	Speed (rpm)	Model lubricant
a	10	30-360	Silicone oil (50cSt)
b	20	30-360	
c	40	60-420	

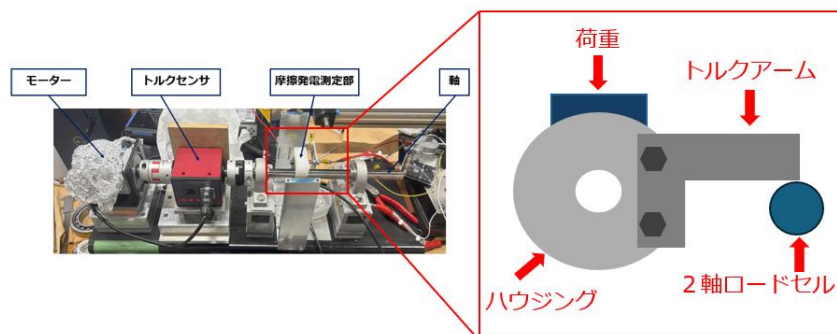


Fig.2 Bearing testing rig

4. 実験結果と考察

Figure 3(a)に、荷重 10N、回転速度 30~360 rpm の摩擦条件で得られた摩擦係数および摩擦発電電流の結果を示す。180 rpm までは 10 rpm ごと、その後は 20 rpm ごとに摩擦係数および摩擦発電出力の結果を記録した。図に示すように、軸の回転速度の増加に伴い、境界潤滑→混合潤滑→流体潤滑と潤滑領域の遷移が見られる。摩擦係数は 130-150 rpm 付近で最も低い値を示し、混合潤滑から流体潤滑へ潤滑挙動が遷移していることがわかる。一方、摩擦発電の出力電流は 150 rpm 付近で最も高い値を示しており、体潤滑領域に潤滑挙動が遷移する速度付近で摩擦発電の出力も極大を示すことが見てとれる。Figure 3(b)に荷重 20N で行った実験の結果を示す。回転速度 170-180 rpm 付近で潤滑領域の遷移が起きており、10N の場合に比べて面圧の増加により潤滑領域の遷移が高い回転速度で起きていることがわかる。また、10N の場合と同様、潤滑領域が流体潤滑領域に遷移する速度 170 rpm で摩擦発電の電流信号も極大を示すことがわかる。前述の挙動は、荷重をさらに 40N に増加させた場合も類似な結果を示す (Fig.3(c))。摩擦係数と摩擦発電の電流信号が逆の特性を示すのは次のように説明できる。摩擦係数は回転速度の増加とともに油膜の厚さが増えることで、潤滑挙動は境界→混合→流体潤滑に遷移することはよく知られている。一方、摩擦電流の信号は、低い回転速度では、固体接触による接触帯電現象から電荷が生じて電流が流れる。回転速度の上昇に従い固体接触が減少することで接触帯電による電荷は減少する。一方、境界潤滑と混合潤滑領域における油膜厚さが潤滑油として用いたシリコンオイルのデバイ長 (数 μm)²⁾ より小さく、非極性潤滑油分子の分極によって POM 表面には正電荷が誘導されるため、POM 表面上の電荷を補う。さらに、回転速度が速くなると電荷の充電量が増えるため電流出力は軸の回転速度とともに増加する。一方、流体潤滑領域では油膜厚さがシリコンオイルのデバイ長を超えるため、電荷が部分的に遮断され、POM 表面の電荷は減少することで発電電流は減少に転じる。したがって、T-MPSB の電流出力は速度の増加に伴って増加し、流体潤滑領域への潤滑領域の遷移に伴い減少する傾向を示す。

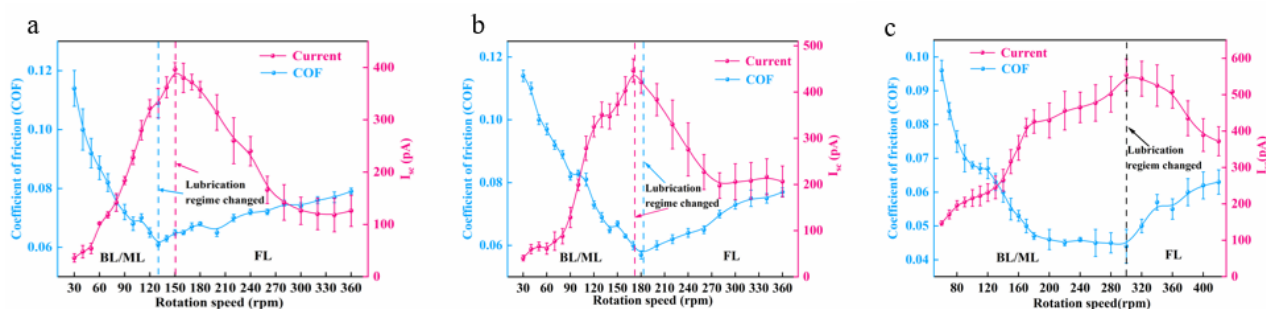


Fig. 3 The Stribeck curve and current curve of T-MPSB for lubrication state monitoring under (a) 10 N, (b) 20 N, and (c) 40 N.

5. おわりに

本研究ではすべり軸受に摩擦発電原理を適用し、自己発電型の潤滑状態モニタリングを実現するための研究を行った。軸の回転速度に対する摩擦係数および摩擦発電電流のストライベック曲線から両者が真逆の傾向を示すことが明らかになり、摩擦発電信号を「摩擦発電ストライベック曲線」として潤滑状態のモニタリングを可能にすることができると見出した。さらに、潤滑状態の違いによる摩擦発電の出力変化メカニズムを潤滑油のデバイ長の概念を用いることで説明することが可能になった。

参考文献

- 1) S. Akbarzadeh, & M. M. Khonsari : Effect of surface pattern on Stribeck curve, Tribology Letters, 37(2) (2010) 477-486.
- 2) J. Chung, S. -H. Chung, Z.-H. Lin, Y. Jin, J. Hong & S. Lee : Dielectric liquid-based self-operating switch triboelectric nanogenerator for current amplification via regulating air breakdown. Nano Energy, 88 (2021) 106292.