

## 混合潤滑特性に着目した平面スラスト軸受の安定化に関する研究

Study on Stabilization of Flat Thrust Bearings Focusing on Mixed Lubrication Characteristics

名工大（学）\*川上 ひかり 名工大（正）前川 覚 名工大（正）劉 曜旭 名工大（正）糸魚川 文広

Hikari Kawakami\*, Satoru Maegawa\*, Xiaoxu Liu\*, Fumihiro Itoigawa\*

\*Nagoya Institute of Technology

### 1. はじめに

使用する潤滑油や摺動面の材質が同じであっても、表面粗さや形状のほんのわずかな差が摩擦特性に大きく影響する場合がある。例えば、工作機械のすべり案内面では、なじみ処理の良し悪しで摩擦特性は大きく変化する。荷重やすべり速度などのなじみ条件や初期粗さをうまく選択すれば、理想的なトランケート表面が形成され広い速度範囲にわたり低摩擦特性が得られる一方で、なじみ条件を誤ると意図したなじみ面を形成することができず期待した摩擦低減効果が得られない。そこで本研究では、なじみにともなう表面の粗さの変化やうねり（粗さの不均一分布）の有無が摩擦特性に及ぼす影響を調査することで、なじみの良し悪しが生じるメカニズムを検討するとともに、なじみにともなう粗さ変化やうねりの有無がすべり案内面の低摩擦化と摺動面の安定性に及ぼす影響について考察する。

### 2. 実験装置および実験方法

前報と同様にスラスト平面軸受を模擬した Ring-on-Ring 型摩擦試験機を使用した<sup>(1)</sup>。実験装置および試験片の概略図をそれぞれ Fig. 1 と Fig. 2 に示す。Fig. 1 に示すように実験装置は Ring-on-Ring 型となっている。材質は両試験片とともに SUJ2 である。潤滑油として、鉛油（粘度 VG68）にすべり案内面用潤滑油の一般的な添加剤であるオレイル酸性リン酸エステル（OLAP）を 1.0 wt% 添加したものを用いた。オイルバス内の様子を Fig. 3 に示す。接触部の片当たりを防ぐために下試験片は鋼球によってピボット支持されている。

初期粗さは十点平均粗さ（Rzjis）で 3.5  $\mu\text{m}$  程度の粗さを均一に付与した。その後、すべり速度 10 mm/s、時間 63 h で一定方向になじみ運転を行った。次に、速度を 1 mm/s から 1000 mm/s まで段階的に速度を増加させながらストライベック線図を取得した。その後、上試験片の摺動面に Fig. 4 に示したように斑点模様のマスクを使用して 8 パッド中一個おきの 4 パッドにサンドブラスト加工を施した（うねりの付与）。次に、時間 15 h の短めのなじみ運転を行った後にストライベック線図を取得した。最後に、時間 63 h のなじみ運転を行った後にストライベック線図を取得した。

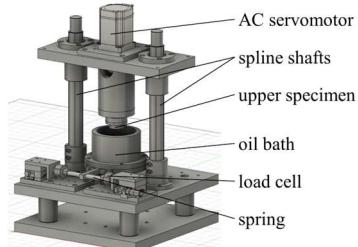


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

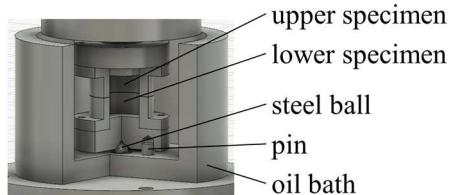


Fig. 3 Magnified view of contact region

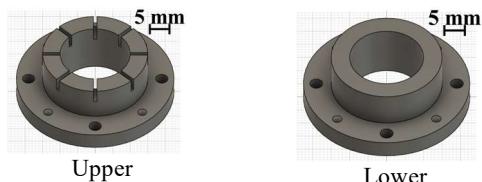


Fig. 2 Shape of upper and lower specimen

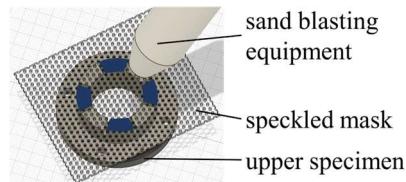


Fig. 4 Sand blasting process method

### 3. 実験結果および考察

なじみに伴うストライベック線図の変化を Fig. 5 に示す。なお、同図の「Forward」は、なじみ運転でのすべり方向と同じ方向に摺動して摩擦係数を測った場合、「Reverse」はなじみ運転でのすべり方向と逆方向に摺動した場合の結果である。また、各ストライベック取得時における上部試験片の表面プロファイルを Fig. 6 に示す。なお、図中の青帯部はサンドブラストにより局所的に粗さを塗布した領域である。

まず、初期状態からなじみ 63 h 後の【Situation A】に着目する。なじみと同じ方向に摺動する場合、全速度域で正勾配となる特異な結果（明確な混合潤滑域が現れない）となっている。逆方向の場合では、正勾配は境界潤滑域のみに限られ、速度 10 mm/s から 30 mm/s 付近で混合潤滑域、30 mm/s 以上では流体潤滑域になっている。この理由は下記の

通りであると考えられる。極低速度条件では、OLAP 由来の高粘度な粘性境界膜が発現し、境界膜の粘性起因の強い正勾配が発現する<sup>(2)</sup>。なじみと同じ方向に摺動させた場合、摺動面内での接触応力は非常に均一化されているため、速度の増加にともない粘性境界膜が破断することなく、その結果、摩擦係数はゆっくりと増加する。その後、30 mm/s 以上になるとなじみによって形成されたクラウニング形状に起因して、いわゆる流体潤滑作用が発現する。その結果、全速度域において正勾配が発現する。一方、なじみと逆方向に摺動させる場合、なじみによる接触応力の均一化が不十分であり（例えば摩擦によるモーメントが摺動部を変形させることでなじみ後のクラウニング形状に非対称性が生じることに起因する）、速度の増加にともない粘性境界膜は破断する。その結果、1 mm/s から 4 mm/s まで摩擦係数が増加したのちに、10 mm/s 以上ではクラウニング形状に基づく流体潤滑作用に従い混合潤滑域、流体潤滑域へと遷移する。以上より、なじみ面においては、すべり方向の違いにより摩擦特性が大きく変化することがわかる。

次に、8 パッド中 4 パッドにサンドブラストにより部分的な粗さ（うねり）を付与した後、短めのなじみ（15 h）行った【Situation B】に着目すると、なじみと同じ方向でも全域での正勾配特性が失われ混合潤滑域が生じていることがわかる。なお、同条件における 1 mm/s から 3 mm/s の範囲では、摩擦計測中に摩擦力が安定せず値を同定することはできなかった。Fig. 6 からも明らかなように【Situation B】では完全なトランケート表面が形成されておらず、トランケート面から飛び出す局所粗さが残っている。この結果、極低速度では粘性境界膜が破断し摩擦係数が増加したものと考えられる。また、特徴的な点として、【Situation B】の流体潤滑域での摩擦係数は【Situation A】での値よりも小さくなっている。加えて、【Situation A】と異なり【Situation B】では、摺動方向の違いによる流体潤滑域の摩擦係数の差は小さい。このことから、【Situation B】ではサンドブラスト加工付与により形成された表面のうねりが流体負荷容量を向上させたものと考えられる。平行平面軸受は原理的には負荷容量を発現することはなく、なじみによるクラウニング形状やうねりの形成が負荷容量を発生させていると考えられるが、他にもマイクロ EHL 効果による負荷容量発現機構なども提唱されており今後の考察が必要である。

最後に、うねり付与後に十分のなじみ運転を行った【Situation C】に着目する。すべり方向の違いに依存せず同様の摩擦特性が生じている。1 mm/s から徐々に摩擦が増加し、5 mm/s 付近で上に凸の結果となっているものの比較的広い範囲で正勾配が発現している。サンドブラスト処理後のなじみ時間を増やすことで、うねりを付与した上で良好なトランケート面が達成された結果、粘性境界膜が破断しづらくなり、また巨視的なクラウニング形状ではなくうねり形状が負荷容量発現を決定するため、なじみ方向とすべり方向の違いに依存しない摩擦特性になったものと考えられる。

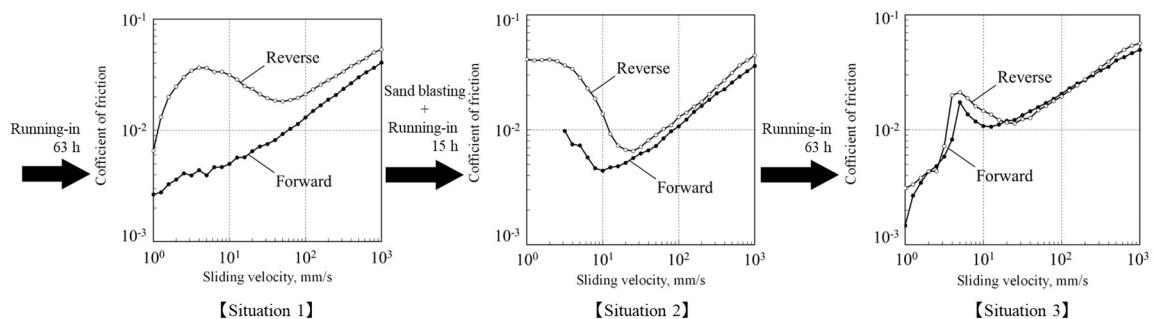


Fig. 5 Effect of running-in processes of Stribeck curve properties

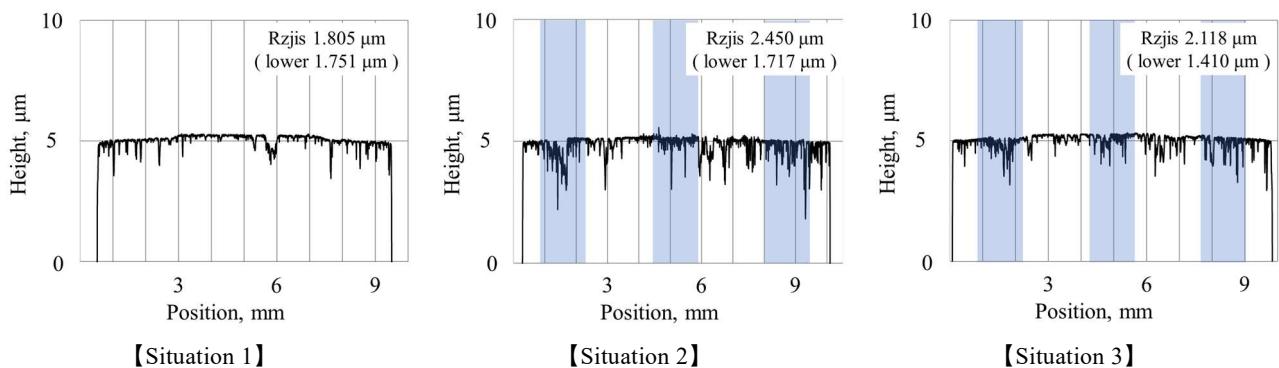


Fig. 6 Changes in surface profiles

#### 4. まとめ

すべり案内面を模擬した平行平板軸受を対象として、なじみにともなう低摩擦化と安定化について考察した。摩擦係数の速度依存性を正勾配にすること、すべり方向の変化によらず摩擦係数が変化しないことを安定性が高いと定義するならば、摺動面へのうねりの付与は安定性向上に向けて有効な手段と言える。ただし、例えば本報での実験とは異なり、ストライベック線図を取得時に高速度側から低速度側の順に摩擦係数を取得するといった違いにおいても、摩擦特性の結果は大きく変化することが明らかとなっている。また、OLAP 由来の境界粘性膜の有無は摩擦特性の結

果に強く依存すると考えられる。うなり付与による安定性向上の定量化についてはより詳細な検討が必要である。

## 文献

- 1) 川上, 前川, 劉, 糸魚川, :異なる2種類の仕上げ面からなるパターニング摺動面のなじみ特性について, トライボロジー会議予稿集 (東京 2022)
- 2) 則久, 糸魚川, 中村:低面圧滑り案内の低速度域における摩擦の過渡応答, トライボロジスト, 53, 10 (2008) 682-689