

混合潤滑コンフォーマル接触下における表面テクスチャの摩擦低減効果

Friction Reduction Effect of Surface Texture under Mixed Lubrication in Conformal Contact

京大・工（学）*西田 涼人 京大・工（正）平山 朋子 京大・工（正）波多野 直也

コマツ（非）古谷 玲 コマツ（非）井関 利幸 コマツ（非）佐藤 正彦

Ryoto Nishida*, Tomoko Hirayama*, Naoya Hatano*, Rei Furuya**, Toshiyuki Iseki** and Masahiko Sato**

*Kyoto University, **Komatsu Ltd.

1. はじめに

気候変動や化石燃料の枯渇が解決すべき社会課題となっている中、省エネルギー化のために摺動部の摩擦低減技術は重要性を増している。摩擦低減のための表面改質技術のうち最も基本的なものが摺動表面に微細な形状を加工する表面テクスチャリングであるが、これに関して境界潤滑や混合潤滑における研究は流体潤滑に比べて少数であり、いまだ解明されていない部分が多い。そこで、本研究では混合潤滑下における表面テクスチャリングについて、特にジャーナル滑り軸受に代表されるコンフォーマル接触下での摩擦低減効果の調査を目的とする。なお、当研究室における先行研究¹⁾ではテクスチャによる摩擦低減効果と摺動面におけるキャビテーションの発生状況に相関があることが確認されている。本研究では縦横比や面積率が異なる表面テクスチャを対象とし、その摩擦低減メカニズムの解明に向け、摩擦係数の測定と摺動面の蛍光観察、数値解析による圧力分布の計算を行った。

2. 試験片とテクスチャ形状

本研究では往復摺動試験機を用いて、上側試験片の側面を下側試験片上で往復摺動させた。上側試験片は浸炭焼き入れ鋼製の円盤状試験片となっており、外径 118 mm、内径 40 mm、厚さ 5 mm である。下側試験片は凹円筒面の摺動領域をもち、その幅は 15mm×2.5mm、R は 59.5mm である。下側試験片は摩擦試験では特殊高力黄銅製、蛍光観察ではアクリル製のものを使用した。また、蛍光観察では試験機下部の蛍光顕微鏡を用いて摺動面の観察を行った。

表面テクスチャは上側試験片の側面（厚み部分）にレーザ加工により施した。本研究では、縦横比による影響を比較するためのテクスチャ 5 種を加工したものと、面積率による影響を比較するためのテクスチャ 4 種を加工したものの 2 つの上側試験片を用いた。縦横比比較用のテクスチャを Fig. 1 に示す。1 番の円形テクスチャの直径は 30 μm であり、2-5 番のテクスチャは面積を保ったまま縦横比をそれぞれ 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 に変更した。いずれのテクスチャも深さ 3 μm 、ピッチ（図中の矢印部分の長さ）90 μm 、面積率 10% である。面積率比較用のテクスチャは、縦横比比較用で用いた円形テクスチャと、それを基準にして寸法・配置はそのままにピッチを変えることで面積率 5%, 20%, 30% に変更したテクスチャを用いた。

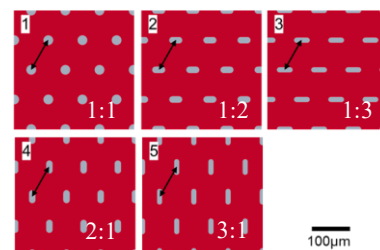


Fig. 1 Texture shapes

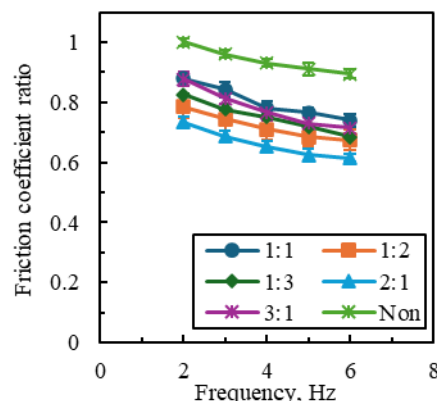


Fig. 2 Comparison of friction coefficients by aspect ratio

3. 実験結果

3.1 摩擦試験による摩擦低減効果の評価

摩擦試験では潤滑油として SAE10W を用いて、荷重 200 N、往復振動数 2-6 Hz の条件下で 30 秒間摺動させて摩擦係数を測定した。グラフに示す摩擦係数は同じテクスチャについて 3 回測定してその平均をとったものであり、エラーバーは標準誤差である。

縦横比ごとの摩擦係数について、無加工、振動数 2 Hz の値を 1 とした比を Fig. 2 に示す。いずれのテクスチャにおいても無加工の部分と比較して有意に摩擦係数が低減された。縦横比 1:2 や 2:1 の短い棒、縦横比 1:3 や 3:1 の長い棒、円の順に摩擦低減効果が大きく、縦と横のどちらが長い点という点より縦と横の長さにとれど差があるかという点が摩擦低減効果により大きな影響を及ぼした。テクスチャ面積率ごとの摩擦係数について、無加工、振動数 2 Hz の値を 1 とした比を Fig. 3 に示す。振動数 2-3 Hz では面積率 30% のテクスチャについてほとんど摩擦低減効果が見られなかったが、それ以外のすべてのテクスチャおよび条件において無加工の部分と比較して有意に摩擦係数が低減された。面積率 10% のテクスチャが最も摩擦係数が低く、そこから離れるほど摩擦係数が高くなっていった。

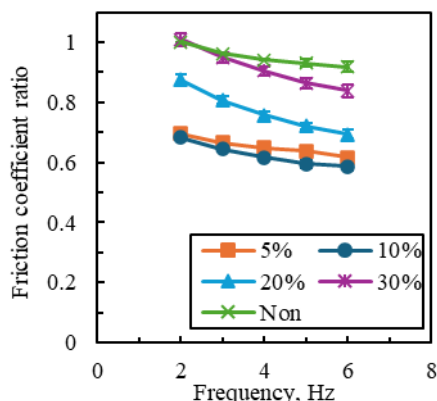


Fig. 3 Comparison of friction coefficients by area ratio

3.2 蛍光観察による摺動面可視化

蛍光観察ではエステル油（ユニスター 327R、日油）に蛍光分子の Nile Red を溶かしたものを潤滑油として用いて、荷重 15 N、往復振動数 2 Hz の条件下で摺動させて摺動面に生じるキャビテーションを撮影した。キャビテーションは接触領域直下ではなく、試験片の回転方向に応じてその左右に交互に発生した。そこで、摺動領域右側に発生したキャビテーションについて、摺動速度最大時に撮影されたものの面積をテクスチャごとに比較した。グラフに示す面積は 3 回測定してその平均をとったものであり、エラーバーは標準誤差である。

縦横比ごとのキャビテーション面積を Fig. 4 の青色棒グラフに示す。キャビテーション面積は縦横比が 1:1 に近づくほど大きい結果となった。また、縦と横のどちらが長いかにによる有意な差はみられなかった。面積率ごとのキャビテーション面積を Fig. 5 の青色棒グラフに示す。面積率 5% と 10% ではキャビテーション面積がほとんど同じ値をとったが、20%、30% と面積率が増加するにつれキャビテーション面積が減少した。

3.3 数値解析による圧力分布の計算

数値解析では、それぞれのテクスチャ形状・面積率における摺動面間の圧力分布についてレイノルズ方程式を用いて計算した。摺動速度は往復振動数 2 Hz での平均速度に設定し、潤滑油の粘性係数は SAE10W のものを用いた。蛍光観察において接触領域の外側にキャビテーションが見られたため、解析領域は接触領域の右端から右側に 5.0 mm、奥行き 2.5 mm の範囲とした。油膜厚さは接触領域で 50 nm と設定し、その外側では試験片の弾性変形も考慮したコンフォーマル接触系のすきま長さを計算して用いた。

縦横比ごとの負圧部の面積を Fig. 4 の橙色棒グラフに示す。負圧部の面積はテクスチャの縦横比が 1:1 に近づくほど大きく、縦と横のどちらが長いかはほとんど影響しなかった。面積率ごとの負圧部の面積を Fig. 5 の橙色棒グラフに示す。負圧部の面積はテクスチャ面積率が小さいほど大きくなった。

形状比較・面積率比較の両方に関して、テクスチャごとの負圧部の面積の大小は蛍光観察におけるキャビテーション面積の大小と一致しており、蛍光観察の結果が数値解析と整合していることが確認できた。

4. 考察

本研究で観察されたキャビテーションは接触領域の外側に位置していた。これは接触形態がコンフォーマル接触であるために流路全体が外側に向かって末広がりになっており、くさび膜効果により圧力が低下して発生したものと考えられる。本研究の結果を見ると、キャビテーションの発生しやすいテクスチャほど総じて摩擦低減効果が高いと言える。この試験機ではキャビテーションの発生位置が接触領域外であったが、そのようなキャビテーションが摩擦低減に寄与しているメカニズムとして、キャビテーションによって生じた気泡が回ってきたテクスチャに入り込み、テクスチャ内にあった潤滑油をせき止める働きをすることで、接触部を持ち上げる方向に圧力が働いて油膜厚さが増大するといったものが考えられる。

本研究ではキャビテーションの面積が大きいにもかかわらず摩擦低減効果がすぐれないテクスチャが存在した。これについて考えられる理由を以下に挙げる。縦横比の比較では、数値解析での負圧部の面積と蛍光観察で測定されたキャビテーション面積の両方で円が最も大きくなったが、摩擦試験では棒状テクスチャと比較して摩擦低減効果が低い結果となった。この理由として、テクスチャの周長さが大きいほどキャビテーションの気泡を外から取り入れやすいため、周長さの短い円ではテクスチャ内部に十分気泡が入らなかったのではないかと考えられる。また、面積率の比較では 5% が数値解析での負圧部の面積が最も大きく、蛍光観察で測定されたキャビテーション面積も 10% と並んで最も大きかったが、摩擦試験では 10% よりも高い摩擦係数を示した。これは、面積率が低かったことでテクスチャ内の潤滑油の総量が少なかったためと考えられる。面積率を高くするとテクスチャ内の潤滑油の総量も増えるが、キャビテーションは生成しづらくなっていくため、面積率 10% が両方のバランスが取れた最適値であると考えられる。

5. 結論

往復摺動試験機を用いた摩擦試験により縦横比や面積率の異なる表面テクスチャの摩擦低減効果を比較した結果、縦横比 2:1 もしくは 1:2、面積率 10% のテクスチャが高い摩擦低減効果を示した。また、蛍光観察においては接触領域外側にキャビテーションが観察された。テクスチャごとのその大小は数値解析における負圧部面積の大小と一致しており、一部のテクスチャを除いて摩擦低減効果との関連が見られた。

【参考文献】

- 1) 酒井, 平山ら: レーザ誘起蛍光法による混合潤滑領域下でのディンプル周りの油膜挙動の観察, トライボ会議 2023 春予稿集。

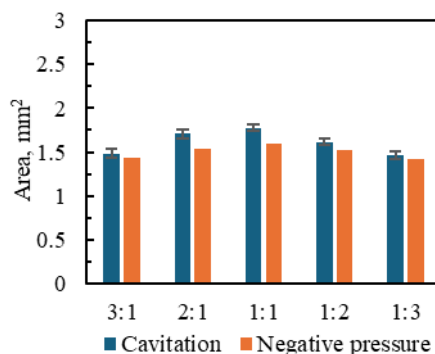


Fig. 4 Comparison of cavitation/negative pressure area by aspect ratio

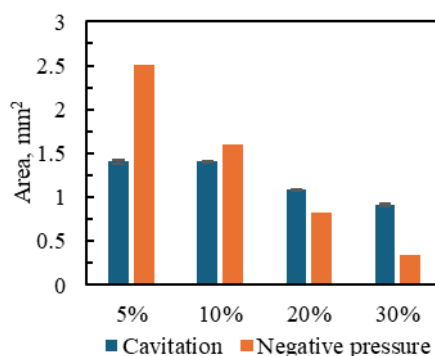


Fig. 5 Comparison of cavitation/negative pressure area by area ratio