

流体潤滑状態におけるマイクロディンプルによる圧力場の制御

Control of pressure field in hydrodynamic lubrication by micro-dimple applied on sliding surface

- 伊藤絢哉, 大同大学大学院, 愛知県名古屋市南区滝春町 10 番地 3
坪井涼, 大同大学, 愛知県名古屋市南区滝春町 10 番地 3, E-mail: r-tsuboi@daido-it.ac.jp
Shunya ITOU, Graduate school of Daido University, 10-3 Minami-ku, Nagoya, Aichi 457-8530
Ryo TSUBOI, Daido University, 10-3 Minami-ku, Nagoya, Aichi 457-8530

Surface texturing is used as a surface modification technique for the sliding parts. In surface texturing, tiling processing which is one of cutting process has ability to create dimples having complicated shapes which could not be produced by laser- or etching-processing. Researches on numerical analysis about surface texturing has been reported. In the studies, simple dimple shape is attached to explain the mechanism of hydrodynamic pressure effect by two-dimensional analysis. In addition, the load capacity is thought to increase due to the cavitation phenomenon in which the liquid changes into a gas due to the generation of negative pressure. However, the detail conditions for the occurrence have not been discovered. In this research, we report tribological properties under hydrodynamic lubrication on the textured surface by use of computational fluid dynamics and the effective use of the cavitation phenomenon to improve the load capacity.

1. 緒言

自動車の内燃機関のエネルギー収支のうち、仕事として活用することができるエネルギーは発生した熱エネルギーの 30%ほどであり、残りの 70%はエネルギー損失である。中でも機械損失の原因である摩擦や摩耗は、ときには機械部品の故障の原因である焼き付きが発生するひとつの要因となる。摩擦の低減や摩耗の発生を抑制することで機械部品の寿命を延ばすことができ、機械損失を改善することで仕事として活用することができるエネルギーを増加させることが可能である。

表面テクスチャリングは表面改質技術のひとつであり、シンプルで有効性の高い表面処理プロセスである。表面に付与する幾何形状はディンプルが最も単純な形状で、切削、レーザー、エッチングなどを用いて加工される。切削加工のひとつであるタイリング加工は、今までの切削加工よりも高速で高精度なディンプルの作成が可能であり、形状の変更をしやすのが特徴である。しかし、タイリング加工にて付与された独特なディンプル形状は一般に切削加工で付与されるディンプルよりも小さくマイクロディンプルと呼ばれ、その摺動特性の評価は少ない。また、表面テクスチャリングを用いた摺動表面の評価のひとつとして流体潤滑における負荷容量の増加がある。これはテクスチャ表面にて発生する流体動圧によるものだが、テクスチャの形状や分布によってその変化は異なる。流体潤滑膜は非常に薄いため実験的な手法での可視化が困難で、古くから数値解析による研究が進められてきた。近年では数値流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) などを用いたシミュレーションによって圧力分布などの可視化が進められてきたが、圧力変化やその分布について潤滑液の流れの変化に着目し議論された研究はまだ少ない。

本研究では、タイリング加工による特徴的な形状をしたディンプル形状を表面テクスチャリングに導入した際の、流体潤滑下における摺動特性とその改善について CFD を用いて調査を行い、流体動圧の発生による摺動面の圧力分布の変化とタイリング加工によるディンプルの形状や配置との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 三次元モデルでのディンプルの性能シミュレーション

3D-CAD を用いて摺動面間のモデルを製作し、ADINA9.4

(ADINA R&D, Inc., US) を用いて潤滑液の流動解析を行った。図 1 は 3D 計算モデルの概略図である。計算条件を表 1 に示す。摺動面の片側に付与するテクスチャ形状には、円柱、四角柱、球、タイリングによって加工される形状などを用い、2 つのディンプルを配置する場合には、摺動方向に対するディンプル角度やディンプル間の距離を変更した。シミュレーションは、形状の変更で 8 パターン、角度の変更で 5 パターン、ディンプル間の距離の変更で 4 パターンに対して実施した。摺動面にはたらく圧力分布やディンプル近傍の潤滑液の流体挙動の解析を行い、比較を行った。

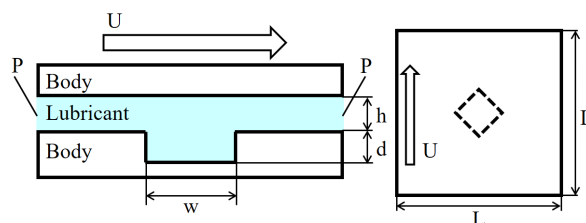


Fig. 1 Schematic of simulations.

Table. 1 Computational condition

Sliding Speed	$U = 1.0 \text{ m/s}$	Computational Region	$L = 1000 \mu\text{m}$
Boundary Pressure	$P = 100 \text{ kPa}$	Working Fluid	PAO10
Film Thickness	$h = 5.0 \mu\text{m}$	Viscosity	$\eta = 8.40 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
Dimple Width	$w = 200 \mu\text{m}$	Density	$\rho = 840 \text{ kg/m}^3$
Dimple Depth	$d = 5.0 \mu\text{m}$		

図 2 は、四角柱ディンプルを用いた場合のシミュレーション結果を示し、摺動面間に流れる潤滑液を上側 (すべり速度を与えた平面側) から見た場合の圧力と流線の分布である。摺動面の負荷容量を向上させると考えられる圧力の増加は、ディンプルにより潤滑液の流れが変化して一点に集まる箇所に発生し、圧力の減少は潤滑液の流れがディンプルに巻き込まれる箇所に発生していることが分かる。

図 3 は、タイリングで加工された半月形のディンプルを二つ配

置した時の摺動面の圧力と流線の分布を示している。図2に示す四角柱ディンプルと比較して高い正圧と低い負圧が広い領域に発生しているのがわかる。

図4はディンプル形状と角度を変更した場合の負荷容量を表している。ディンプルを複数配置し、ディンプル同士の相互作用によって高い正圧を発生させ、大きな負圧を発生させないようにすることで負荷容量を増加させることができると考えられる。

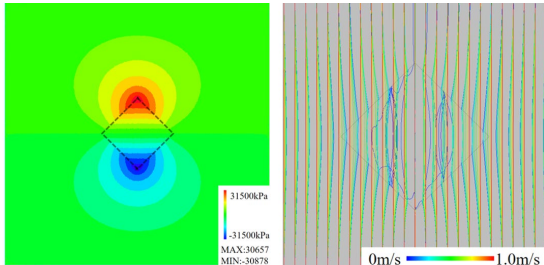


Fig. 2 Pressure distribution (left) and streamline (right) in case of square dimple.

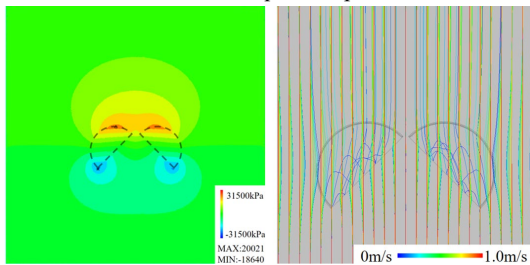


Fig. 3 Pressure distribution (left) and streamline (right) in case of half-moon dimple.

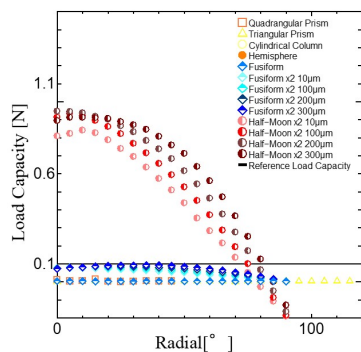


Fig. 4 Relationship of load capacity.

3. 二次元モデルでのキャビテーションを導入した解析

2D-CAD を用いて摺動面間のモデルを製作し、ANSYS Fluent 2019 R1 (ANSYS .Inc., US) を用いて潤滑液の流動解析を行った。図5は2D計算モデルの概略図である。計算条件を表2に示す。ディンプル形状は四角形を用いた。シミュレーションは、キャビテーションを導入し、膜厚やくさび角の方向を変更したパターンに対して実施した。ディンプル周辺に発生するキャビテーションの挙動の解析およびその結果の比較を行った。

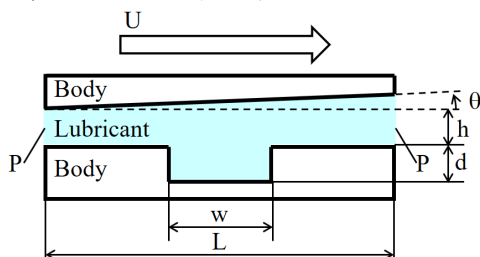


Fig. 5 Schematic of simulations.

Table. 2 Computational condition.

Sliding Speed	U = 1.0 m/s	Working Fluid	H ₂ O
Boundary Pressure	P = 100 kPa	Fluid Viscosity	$\eta = 1.003 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
Minimum Film Thickness	h = 0.1, 1.0 μm	Fluid Density	$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$
Dimple Width	w = 200 μm	Gas Viscosity	$\eta = 0.013 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
Dimple Depth	d = 5.0 μm	Gas Density	$\rho = 0.5542 \text{ kg/m}^3$
Computational Region	L = 1000 μm	Vapor Pressure	P ₁ = 3540 Pa
Wedge Angle	$\theta = -0.001, 0.001^\circ$		

図6は膜厚が0.1 μm と 1.0 μm のくさび角の方向を変更した場合の圧力の分布の比較である。どちらもディンプルが圧力場に影響を与えているが、膜厚が0.1 μm の場合はくさび効果が大きく影響し、ディンプルによる圧力変化の効果を相対的に小さくしてしまっている。

図7は膜厚が0.1 μm で負圧が発生する方向にくさびがついた場合の気相の分布である。くさび効果によって正圧が大きく発生する方向と負圧が大きく発生する方向があるが、負圧が大きく発生する方向でのみキャビテーションの発生を確認した。流路の広がるディンプル下部で定常的にキャビテーションが発生し、ディンプル上部で非定常的なキャビテーションが発生した。ディンプルによる圧力変化のみではキャビテーションは発生せず、ディンプルを配置することで負圧の発生位置すなわちキャビテーションの発生位置を操作することができると考えられる。

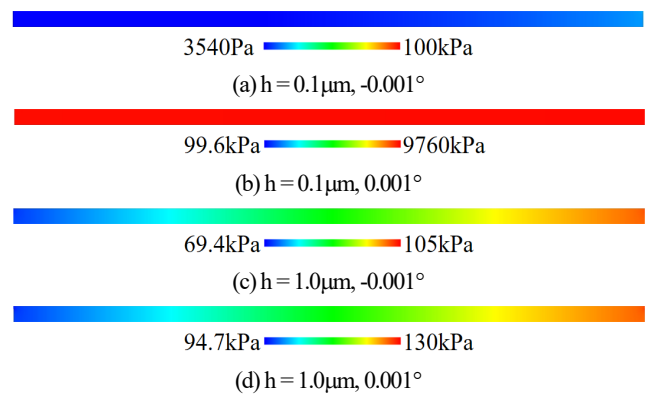


Fig. 6 Pressure Distribution around the dimple.

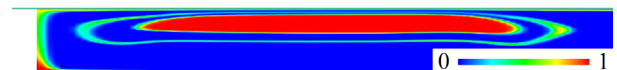


Fig. 7 Void fraction distribution in case of cavitation model.

4. まとめ

摺動面にディンプルを配置することによって圧力場を操作することができ、摺動面が接触しやすい箇所にディンプルを配置し負荷容量を増加させることで、摩擦や摩耗を改善することが可能であると考えられる。また、キャビテーションの発生によって摺動特性が変化することが知られており、今後はキャビテーションやくさびを考慮した各ディンプル形状や配置におけるディンプルの性能を圧力の分布や負荷容量、潤滑液の流れをもとに評価していく予定である。