

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32704

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03842

研究課題名（和文）流体潤滑下でのマイクロディンプル間相互作用の解明と超高性能流体軸受設計への応用

研究課題名（英文）Study of interactions between micro-dimples under fluid lubrication and its application for design of ultra-high performance fluid bearings

研究代表者

宮永 宜典（Miyanaga, Norifumi）

関東学院大学・理工学部・教授

研究者番号：00547060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、マイクロディンプル周りの潤滑油流れ、流体潤滑特性に及ぼすディンプル同士の相互作用に注目し、低摩擦・高負荷容量・高剛性を有する流体軸受の実現に向けたさまざまな検討を行った。特に、同じディンプルが等間隔で並んでいるようなテクスチャ表面においても、各ディンプルでキャビテーション気泡の発生形態が異なり、このことにより、静特性が大きく変化することを見出した。これらのことは、単に理想的なモデルで油膜力が大きく、低摩擦な条件を一例のみ提示するだけでなく、個々のディンプルにおける流体潤滑特性のばらつきや相互作用を考慮した理論を構築し、それを流体軸受設計に応用する必要があることを意味している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ディンプルや溝などをしゅう動面に施した、軸受やシールなどの機械要素は、それらのテクスチャの効果によって性能向上が期待されている。しかし、理論的背景が十分ではなく、個々の条件に応じた設計方法を明らかにすることは容易ではない。そのため、個々のディンプルにおける流体潤滑特性のばらつきや相互作用を考慮した理論を構築することが重要である。このことは、単に理想的な条件のみでなく、より現実的な条件を想定した実験と解析により得られた知見を流体軸受設計に応用することを意味し、産業応用を一層拡大することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on the interaction between dimples on lubricant flow around dimples and hydrodynamic fluid lubrication characteristics, and investigated various possibilities to realize a fluid dynamic bearing with low friction, high load capacity, and high rigidity. In particular, we found that even on a textured surface with equally spaced dimples, cavitation bubbles are generated differently on each dimple, and this causes a significant change in the static characteristics. These findings mean that it is necessary to construct a theory that takes into account the variation and interaction of fluid lubrication characteristics at individual dimples and apply it to fluid dynamic bearing design, rather than simply presenting an ideal model with high oil film force and low friction conditions as only one example.

研究分野：流体潤滑

キーワード：すべり軸受 流体潤滑 ディンプル キャビテーション

1. 研究開始当初の背景

ディンプルなどをパターニングされた表面は、さまざまな潤滑条件下において効果が指摘されており、しゅう動面のトライボロジー特性を改善するための有効な手段として、期待されている。特に、流体潤滑下では、必要な個所に、必要な厚さで、必要な剛性を有する油膜を形成できるテクスチャ表面の設計が求められている。しかしながら、これまでの論文などで報告されている流体潤滑解析やそれに基づくテクスチャ表面の最適設計問題などは、それらのほとんどが、一つないしは二つのディンプルが含まれるセルを切り出したモデルを対象としており、ディンプル同士の間隔や相互作用が必ずしも正確に捉えられているとはいえないと考えられる。例えば、あるマイクロディンプルを有する表面で生じる油膜破断について観察すると、気泡がリング状になっている箇所や気泡が近接する2、3個の気泡とのみ連結している箇所など、場所によって様子が異なる。また、ディンプルが10個配置された軸受を対象にして、油膜破断の個数と発生する力の関係を調べると、ディンプル一つに油膜破断が生じると油膜力を10倍しても、軸受の負荷容量と一致しないことがわかっている。さらに、各ディンプル内の気泡が隣接するそれと合体すると、油膜力が大きく低下することもわかっているが、このような実験的事実を説明できる理論体系にはなっていない。このように、テクスチャ表面の流体潤滑特性については、未だに実験と理論に整合性がなく、定量的な評価法の確立は未だ不十分である。そのため、前述のような、実験的事実を考慮に入れた流体潤滑理論を構築する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、マクロディンプルを有するスラスト軸受を対象として、その流体潤滑特性に及ぼすディンプルの影響を明らかにすることを目的とした。これまでも述べてきたとおり、テクスチャ表面の各ディンプルで生じる油膜破断は必ずしも均一ではなく、またディンプル同士で相互に影響するため、軸受設計において極めて重大な問題である。軸受は、ディンプル一つひとつで油膜力を得ているため、各ディンプルが想定通りに機能しなかった場合には、設計者の意図した潤滑特性が得られないばかりでなく、場合によっては焼付きや振動により、装置の破損や人命への影響といった想定外の問題も懸念される。自動車や印刷機などで生じる摩擦エネルギー損失の6~7割は流体潤滑によるとの試算もあり、流体潤滑面の低摩擦化はすぐにでも取組むべき課題である。本研究は、その代表例ともいえる流体軸受への応用までを視野に入れており、単に理想的なモデルで油膜力や剛性の大きなテクスチャの一例を提示するだけではなく、ディンプルの間隔や相互作用を考慮した流体潤滑理論を提案し、それにより低摩擦、高負荷容量、高動剛性な流体軸受を実現できることを意味し、産業応用を一層拡大し、持続可能社会に貢献することができる。

3. 研究の方法

本研究では、一般的な潤滑計算に加えて、潤滑分野ではあまり利用が進んでいない、PIV (Particle Image Velocimetry) 法や CFD (Computational Fluid Dynamics) などの流体工学分野の手法を利用し、

- 1) ディンプル周りの流れの可視化
- 2) 実験によるディンプル軸受の性能評価
- 3) 潤滑計算および CFD によるディンプル軸受の性能評価

を行った。図1に実験装置の概略を示す。本装置では、油膜厚さ、回転数および潤滑油温度を一定値に制御し、油膜力および摩擦トルクを測定する。試験軸受は、回転板と固定試験片とで構成される。ガラス製の回転板は、空気軸受で保持されたシャフトを介して回転し、固定試験片はペルチェ装置上のオイルカップに固定されている。潤滑油の温度は、ペルチェ装置によって設定温度に対して $\pm 0.1\text{K}$ で保つことができる。回転板と固定試験片との間の油膜厚さと潤滑油の温度を一定に保ち、設定した回転数の下で、各試験片における油膜力および摩擦トルクを測定した。

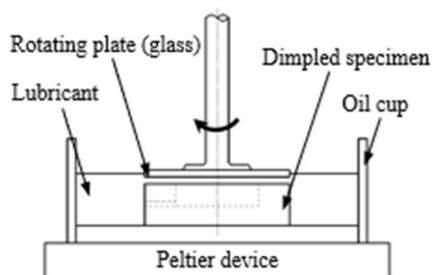


図1 軸受すきま(油膜厚さ)を一定に保持することのできる試験装置

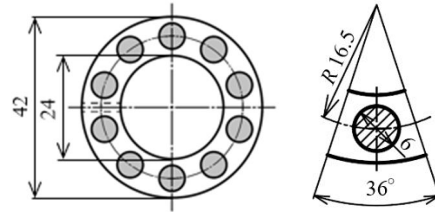


図2 試験片の詳細

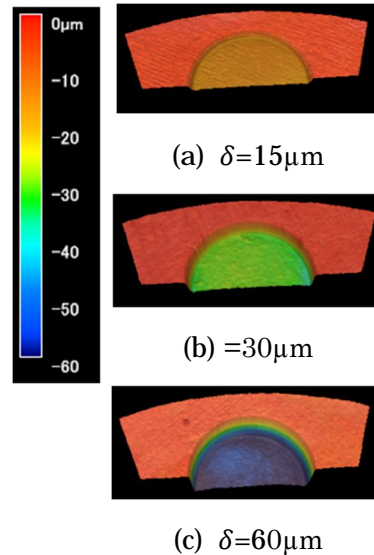


図3 ディンプルの詳細

試験片の概要は図2の通りである。本研究で使用した円形ディンプルの詳細を図3に示す。試験片は黄銅製で、外径42mm、内径24mmのしゅう動面にディンプルを施すことができる。Fig. 3は深さが異なるディンプルの断面プロファイルである。ディンプルはいずれもφ6mmの円形である。いずれもディンプル個数は10個で、ディンプル密度が30%となっている。

4. 研究成果

図4は油膜力と回転数の関係である。油膜厚さは $h=30\mu\text{m}$ である。ディンプルのないPlane試験片の油膜力と比較して、ディンプルは油膜力を生じさせ、回転数が上昇すると徐々に増加した。 $\delta=30\mu\text{m}$ のディンプルで油膜力が最も大きかった。 $\delta=60\mu\text{m}$ のディンプルでは、回転数 600min^{-1} において油膜力が大きく減少し、かつ不安定になった。図5は、回転数 600min^{-1} でのしゅう動面の観察結果である。 $\delta=15\mu\text{m}$ および $30\mu\text{m}$ のディンプルでは、ディンプルの逆くさび部で、キャビテーション気泡があらわれ、キャビテーション領域と油膜領域との境界が明確に存在している。 $\delta=60\mu\text{m}$ ではディンプルがキャビテーションで満たされ、隣のディンプルで生じたキャビテーションとつながったり、離れたりする現象が断続的に生じた。この現象により、キャビテーション領域が拡大し、ディンプル出口部でのくさび効果が抑制されたと考えられる。図6では、実験結果とCFD解析での、無次元油膜力と無次元膜厚さの関係を比較している。無次元油膜厚さ H 、および無次元負荷容量 W は式(1)と(2)で求めた。式中の ω は角速度、 b はしゅう動面幅、 r_d はディンプル半径、 r_m は平均半径、 w は油膜力である。図6より、実験結果およびCFD解析結果はいずれも、無次元油膜厚さが大きくなるにつれ、無次元負荷容量が大きくなった。両結果を比較すると、 $H=2$ 程度までは近い値を示したが、無次元膜厚さが大きくなると解析結果の方が大きくなった。この結果は、解析で仮定した $P_{\text{cav}}=30\text{kPa}(\text{abs})$ が、無次元油膜厚さによって変化したためであると推定される。

$$H = \frac{\delta + h}{h} \quad (1)$$

$W = \frac{h\delta}{2\pi\mu\omega b r_d r_m^2} w \quad (2)$	
---	--

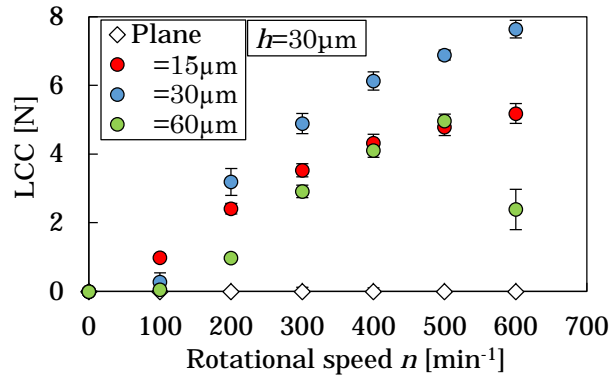
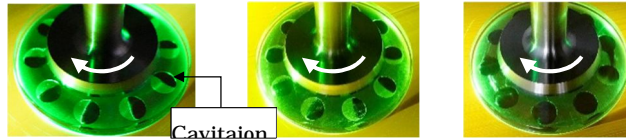


図4 負荷容量 (LCC) と回転数の関係



(a) $\delta=15\mu\text{m}$ (b) $\delta=30\mu\text{m}$ (c) $\delta=60\mu\text{m}$

図5 600min⁻¹でのキャビテーション気泡の様子

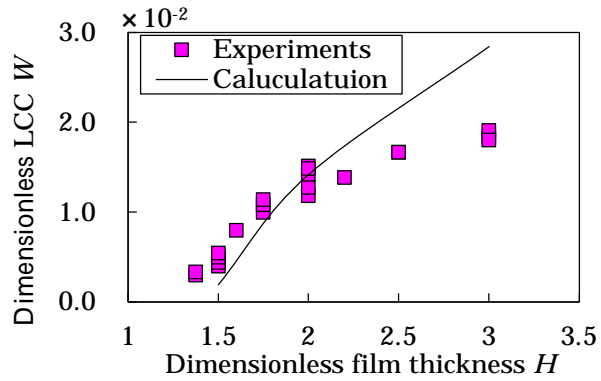


図6 実験結果と計算結果 (CFD) の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 三和 怜央、宮永 宜典、辻森 淳、富岡 淳	4. 巻 57
2. 論文標題 油膜厚さ一定下および荷重一定下での実験によるディンプルを有するシール型スラスト軸受の潤滑特性の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 設計工学	6. 最初と最後の頁 621 ~ 636
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14953/jjsde.2022.2967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Reo Miwa, Norifumi Miyanaga, Jun Tomioka	4. 巻 14
2. 論文標題 Appearance of Hysteresis Phenomena on Hydrodynamic Lubrication in a Seal-Type Thrust Bearing with Dimples	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 5222-5222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Reo Miwa, Norifumi Miyanaga, Atsushi, Tsujimori, Jun Tomioka
2. 発表標題 Effects of Diameter and Depth of Dimples on Lubrication Characteristics of Seal-type Thrust Bearings
3. 学会等名 The 9th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石井亮太, 三和怜央, 宮永宜典, 富岡 淳
2. 発表標題 実験と数値解析との比較によるスラスト軸受のディンプル部で生じるキャピテーション圧力の推定
3. 学会等名 日本設計工学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三和怜央, 石井亮太, 宮永宜典, 富岡淳
2. 発表標題 シール型スラスト軸受におけるディンプルが 流体潤滑特性に及ぼす影響
3. 学会等名 トライボロジー会議2021 秋 松江
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富岡淳, 宮岡麟太郎, 三鍋諒, 宮永宜典
2. 発表標題 平行円板スクイズ軸受における油膜破断の検討
3. 学会等名 日本設計工学会 2021年度 秋季大会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	富岡 淳 (Tomioka Jun) (40217526)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------