

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05779

研究課題名(和文) 超高真空中における動圧流体軸受の特性評価とキャビテーションの可視化観察

研究課題名(英文) Characteristic evaluation of hydrodynamic bearing and in-situ observation of cavitation under ultra-high vacuum

研究代表者

塩見 裕 (Shiomi, Hiroshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：20578794

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：動圧流体軸受は転がり軸受に比べ、静粛性・疲労寿命の観点で優れている。しかし、真空環境での特性は不明瞭である。本研究では、真空中におけるテクスチャ付動圧流体軸受の特性を評価し、それを予測する数値計算手法を構築することを目的とし、真空中でテクスチャ付動圧流体軸受試験とキャビテーションのその場観察を行った。その結果、真空中でもテクスチャの摩擦低減効果が得られ、無給油で継続することを確認した。また、従来の数値計算法で予測されるキャビテーション領域が真空中では実験結果と一致しないことがわかった。表面張力を考慮した新たな計算手法を考案し、定性的な傾向が実験結果と一致することを示した。

研究成果の概要(英文)：Hydrodynamic bearings are superior to ball bearing in terms of vibration and fatigue life. However, the characteristics of hydrodynamic bearing in vacuum are not obviously. Aims of this study are to evaluate the characteristics of textured hydrodynamic bearing in vacuum and to construct of the numerical method which predicts those. The bearing tests in vacuum were conducted and cavitation region was observed simultaneously.

The experimental results indicate that friction reduction of surface texture is obtained in vacuum and the effect is continuously maintained under no oil supply condition. The cavitation region calculated by conventional numerical method was not corresponded to experimental results in vacuum. A new numerical approach considering surface tension is presented and a qualitative agreement is found between the numerical solutions and experimental results.

研究分野：トライボロジー

キーワード：真空 キャビテーション 動圧流体軸受 表面張力

1. 研究開始当初の背景

人工衛星の姿勢制御に用いられるフライホイールには、低摩擦や低摩耗（長寿命）、低擾乱などが要求される。現状、フライホイールの軸受には転がり軸受が用いられているが、長寿命化や低擾乱化には限界がある。その解決策として期待されるのが、転がり軸受に比べて、静粛性に優れ、長寿命化も期待できる動圧流体軸受のフライホイールへの適用である。動圧流体軸受を軌道上で用いるためには、真空中での駆動が必要となるが、真空中における動圧流体軸受の諸特性に関する報告はほとんどない。

歯車などの機構要素で大気中と超高真空中の潤滑状態の差異について調査されており、寿命が大気中に比べて真空中で短くなることなどが報告されている。これらの結果から動圧流体軸受においても、大気中と超高真空中で、軸受特性（油膜形成・圧力分布など）に差異が生じると考えられ、超高真空中での評価が必要不可欠である。

工業用の動圧流体軸受に対しては多くの研究が行われ、設計方法なども確立されつつある。現在では、さらなる高精度化を目指し、低摩擦や高剛性、高負荷能力を目指したグループなどの形状の最適化や、非再現振れの低減を目指したキャビテーションを考慮した数値解析手法の検討などの研究が行われている。後者のキャビテーションを考慮した数値解析については、Elrod や池内らが提案したアルゴリズムなどを用いることで一定の成果を得ている。しかし、これらの解析手法では、周囲圧力とのキャビテーション圧力の差圧により生じる圧力流れにより決まるキャビテーション領域の大きさが実験値と一致するようにキャビテーション圧力を決定する必要がある。そのため、実験値との比較が必須であり、得られるキャビテーション圧力を理論的に説明できない。これはキャビテーション圧力の妥当性が不明瞭であり、差圧以外にキャビテーション領域に影響する要因があることが示唆している。真空中では、周囲圧力が小さいことから、キャビテーション圧力をゼロと仮定しても圧力流れは非常に小さい。そのため、真空中でキャビテーション現象を観察することで、差圧以外による影響を選択して観察することができ、キャビテーション現象をより深く理解することができる。と期待される。

上記を踏まえると、動圧流体軸受のしゅう動特性を取得し、同時にキャビテーション現象を観察することは、宇宙開発、工業、学術に対して大きな意義をもつ。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、①真空中におけるテクスチャ付動圧流体軸受の無給での成立性確認と軸受特性の評価、②大気中・真空中のキャビテーション現象の観察③真空用動圧流体軸受の数値解析手法の構築の3点である。

具体的には、大気中・真空中においてテクスチャ付動圧流体軸受の軸受特性評価試験を行い、摩擦トルクを取得する。また、真空中でのキャビテーション現象を観察し、キャビテーション現象への影響因子を特定する。さらに特定した影響因子を考慮した真空中での新たな数値解析手法の構築を試みる。

3. 研究の方法

①実験方法

実験には Fig. 1 に示すスラスト軸受のしゅう動面を顕微鏡により光学観察可能な軸受試験装置を用いた。試験軸受はテクスチャ付リング試験片と石英ガラスディスクで構成されるスラスト軸受である。リング試験片の上面にはテクスチャとして、Fig. 2 に示す直径3mm、深さ5 μ mのディンプル（以下、ディンプル）または両脇に幅および深さ0.1mmの溝を付与したディンプル（以下、溝付ディンプル）を円周等配に12個加工している。石英ガラスディスクは、ACサーボモータに接続した回転軸先端に固定する。しゅう動面とガラスディスク面の平行度を確保するため、リング試験片はウェーブスプリングを介して固定し、その反力でしゅう動面に5N程度の荷重を与える。この状態でガラスディスクを回転させた際にリング試験片へかかる力をロードセルにより計測し、軸受しゅう動面に生ずる摩擦トルクとした。潤滑油にはMAC (Multiply Alkylated Cyclopentane) とPFPE (Perfluoropolyether) を用いた。

本実験は、大気又は10⁻¹Pa台の真空中においてすべり速度0-50rpm (0-0.073m/s) で試験を行い、トルク測定と顕微鏡による油潤滑のスラストしゅう動面の場観察を行った。潤滑油は試験前に塗布し、その後は無給油である。真空中の実験ではしゅう動面に潤滑油を塗布後、ガラスディスクを固定しない状態で脱気した後にガラスディスクを固定し、再び真空引きを行い、真空度を10⁻¹Pa台としてから実験を行った。

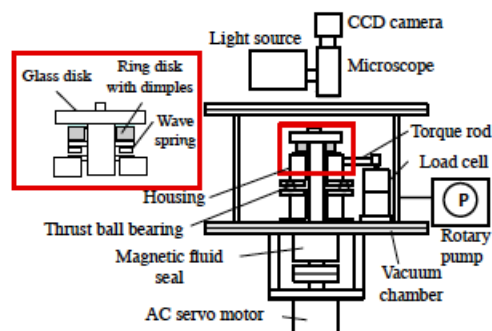


Fig. 1 試験機概略図

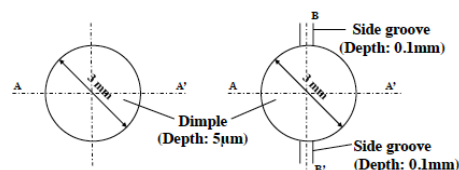


Fig. 2 テクスチャ形状

②解析方法

Figure 3 に解析モデルを示す. 解析領域は $5 \times 6 \text{ mm}$ の長方形領域に直径 $D=3 \text{ mm}$, 深さ $h_d=5 \mu\text{m}$ のディンプルを1個設けた流れ場とした. 流体は非圧縮と仮定し, 油膜厚さと軸受隙間の比 θ を含む式 (1) の Reynolds 方程式を緩和法により解くことで流れ場の圧力分布を求めた. 油膜形成領域 ($\theta=1$) と油膜破断領域 ($0 < \theta < 1$) の間で流量保存を考慮するため, Elrod アルゴリズムを用いた.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right\} = 6\eta U \frac{\partial(\theta h)}{\partial x} \quad (1)$$

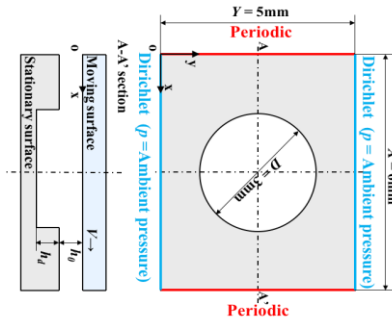


Fig. 3 解析モデル

油膜破断領域の境界は $p=p_{cav}$ かつ $\theta > 0$ となる格子点では $\theta=1$ として圧力を再計算し, $\theta=1$ かつ $p < p_{cav}$ となる格子点では $p=p_{cav}$ として θ を再計算する. 計算格子数は 120 (x 方向) \times 100 (y 方向) とし, 流体の粘度は $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 上面のしゅう動速度は $0\text{--}0.06 \text{ m/s}$, 荷重は 5 N を用いた. 圧力境界条件は, $x=0, 6 \text{ mm}$ では周期境界条件を, $y=0, 5 \text{ mm}$ では圧力を周囲圧力とするディリクレ条件を与えた. 周囲圧力はキャビテーション圧力を下回らないと仮定し, 真空中についての解析では周囲圧力を 0.01 MPa (-0.9 atmG) とした.

4. 研究成果

①各雰囲気におけるテクスチャの摩擦トルクへの効果

Figure 4 に大気中・真空中で行った軸受試験により測定した各テクスチャを用いた場合の摩擦トルクの ηV (粘度 \times 速度, mN/m) に対する推移を示す. 用いたテクスチャは, ディンプルと溝付ディンプルの2種類である. 真空中・大気中ともにテクスチャの種類によらず, 摩擦トルクが低減しており, 真空中でも大気中と同様にテクスチャの摩擦低減効

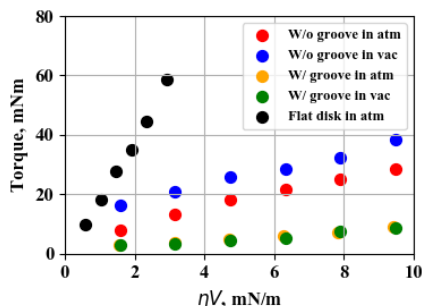


Fig. 4 摩擦トルクの測定結果

果が確認された. 雰囲気の影響を見ると, ディンプルを用いた場合は真空中の方が大気中よりも摩擦トルクが高く, 溝付テクスチャを用いた場合では, 大気中と真空中で有意差は見られない. これらは真空中用にテクスチャを設計する上で重要な知見である.

②キャビテーションの観察結果

Figure 5 にキャビテーション観察結果の例 (20 mm/s) を示す. ディンプルの場合は, 真空中の方が大気中よりもキャビテーションの発生領域が大きい. 一方で, 溝付ディンプルの場合はキャビテーション領域の大きさに雰囲気による有意差は見られない. これらより, テクスチャ形状の選択により真空中でも大気中と同様に無給油で動圧流体軸受が成立することがわかる. 大気中ではキャビテーション部の圧力が周囲圧よりも低いことで, 圧力流れにより周囲から油を引き込み, 油領域がディンプル内に生じると考えられている. 真空中では周囲圧力が 10^{-4} Pa 程度であり, キャビテーション圧力が 0 Pa であっても圧力流れはほとんど生じない. しかし, 真空中でも大気中と同様に油領域がディンプル内に生じていることから, ディンプル内への油の流入は周囲圧力とキャビテーション圧力の差圧以外の力によって生じることが示唆された.

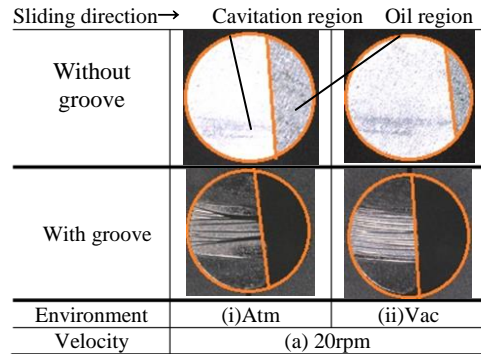


Fig. 5 キャビテーションの観察例

③潤滑油種の影響

差圧以外に油をディンプル内に引き込む力として表面張力が考えられる. そこで, MAC に比べて表面張力が小さい PFPE を用いて軸受試験を行い, 同一条件 ($\eta V=18$) で行った際のキャビテーション領域の観察結果を Fig. 6 に示す. MAC に比べ表面張力が小さい PFPE の場合に油領域が小さく, 油をディンプル内に戻す流れが小さいことがわかる. この結果より, 表面張力が油をディンプル内に再流入させる要因であると考えられる.



(a) MAC

(b) PFPE

Fig. 6 表面張力の影響

④従来の手法での数値解析結果

3章②項で説明した従来の解析手法を用いて、Fig. 5と同条件で数値計算した結果を以下にFig. 7に示す。図中に紫で示されている箇所がキャビテーションの発生箇所である。キャビテーション領域の大きさが大気中では概ね一致している。一方で真空中ではディンプル全域がキャビテーション領域となり実験と一致しないことがわかる。圧力流れが最大となるキャビテーション圧力 $p_{cav}=0$ Pa の条件で計算した場合でも、実験結果と一致しなかった。

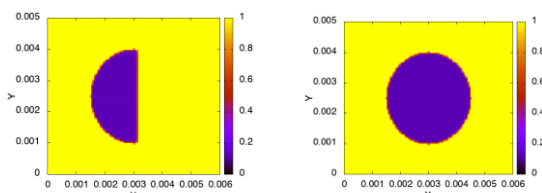


Fig. 7 従来の解析手法による検討

⑤表面張力を考慮した数値解析手法の提案

4章③で述べたように、表面張力がキャビテーション領域に影響を与えることから、表面張力を考慮した数値計算手法を検討した。Figure 8aに本解析に使用したキャビテーションモデルを示す。キャビテーション界面の液体の圧力を p およびキャビテーション圧力を p_{cav} 、表面張力 γ により発生するラプラス圧を p_s とすると、 $p_{cav}=p+p_s$ の関係が成り立つ。数値計算で得られる液相部の圧力 p に負の値を許すことで、真空中でも周囲から流体を引き込む圧力流れを発生させることが可能となる。油膜破断領域の境界は $p=p_{cav}-p_s$ かつ $\theta > 0$ となる格子点では $\theta=1$ として圧力を再計算し、 $\theta=1$ かつ $p < p_{cav}-p_s$ なる格子点では $p=p_{cav}$ として θ を再計算する。キャビテーション領域をFig. 8bに示すような形状と仮定し、曲率半径を油膜破断領域中の θ の平均値から算出されるキャビテーション厚さの半分である r_1 、ディンプル方向の半径である r_2 とした。このとき $r_1 < r_2$ であることから、式(2)に示すYoung-Laplaceの式により表面張力による圧力差 p_s が算出される。

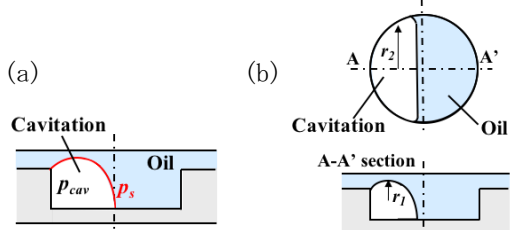


Fig. 8 キャビテーションモデル

$$p_s = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \cong \frac{\gamma}{r_1} = \frac{2\gamma}{(1-\theta)h} \quad (2)$$

Figure 9 に数値計算により求めた ηV に対するディンプル内のキャビテーション領域

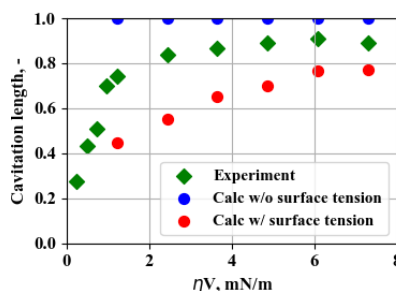


Fig. 9 表面張力を考慮した計算結果

が占める割合の変化を示す。表面張力を考慮しない場合は、 ηV の値に拠らずディンプル全域がキャビテーションで満たされる結果となる。一方で、表面張力を考慮した場合は、 ηV の増加に伴い、キャビテーション領域が広がっており、実験結果と定性的な傾向が一致している。しかしながら、定量的には一致していないことから、表面張力を算出するモデルについては、引き続き検討が必要である。

⑥成果のまとめ

本研究では、真空中におけるテクスチャ付動圧流体軸受の無給油での成立性を確認し、その摩擦トルク特性を取得した。また、真空でのキャビテーション現象を観察し、それに影響を及ぼす因子として表面張力挙げられることを示した。さらに表面張力を考慮した真空中における動圧流体軸受の数値計算手法を提案した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

① Tribological Characteristics of Dimple-Textured Thrust Bearings Operated in Vacuum, Noriko Matsuoka, Hiroshi Shiomi and Shingo Obara, 45th Leeds-Lyon symposium synopsis[2018/9/4-7, Leeds Trinity University]

② 表面張力を考慮した真空中におけるディンプル内のキャビテーション領域の予測 (第2報), 松岡範子, 塩見裕, 小原新吾, トライボロジー会議 2018 春東京予稿集 (2018) [2018/5/21, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)]

③ 表面張力を考慮した真空中におけるディンプル内のキャビテーション領域の予測, 松岡範子, 塩見裕, 小原新吾, トライボロジー会議 2017 秋高松予稿集 (2017) [2017/11/15, サポートホール高松 (香川)]

④ ディンプルにおけるキャビテーションのその場観察と油の再流動に関する考察, 松岡範子, 塩見裕, 野木高, トライボロジー会議 2017 春東京予稿集 (2017) [2017/5/15, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都)]

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩見 裕 (SHIOMI, Hiroshi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

研究開発部門 研究開発員

研究者番号：20578794

(2) 研究分担者

松岡 範子 (MATSUOKA, Noriko)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

研究開発部門 研究開発員

研究者番号：20747795

野木 高 (NOGI, Takashi)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

研究開発部部門 主任研究開発員

研究者番号：30371107

(3) 連携研究者

大津 健史 (OTSU, Takehumi)

大分大学 理工学部 助教

研究者番号：10634488

平山 朋子 (HIRAYAMA, Tomoko)

同志社大学 理工学部 教授

研究者番号：00340505