

高速・高精度水潤滑軸受に関する研究

Study on High-Speed, High-Precision Water-Lubricated Bearings

東理大・工（正）*宮武 正明 東理大・工（院）*皆川 祐輝 東理大・工（院）*神宮司 晃

Masaaki Miyatake*, Yuki Minagawa**, Ko Jinguji **

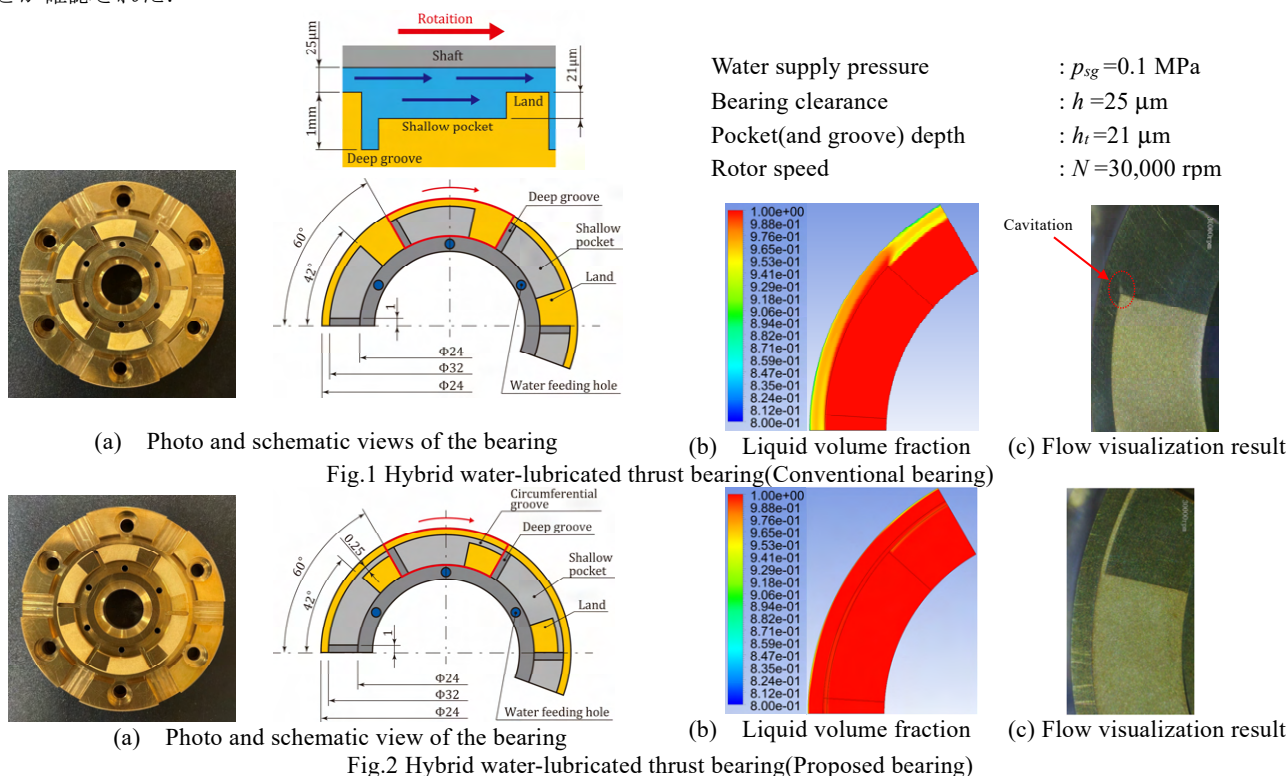
*Tokyo University of Science, **Graduate school of Tokyo University of Science

1. はじめに

近年、工作機械用の加工機スピンドルや案内面の軸受として水潤滑軸受が注目されている。本講演では高速水潤滑ハイブリッド軸受におけるキャビテーション発生およびその抑制法¹⁾、可変絞り機構を用いた高精度の水潤滑静圧軸受²⁾の研究事例を紹介する。

2. 高速水潤滑ハイブリッドスラスト軸受におけるキャビテーション発生およびその抑制法

加工機用スピンドルには高剛性化、高速化が求められているが、従来の軸受では高速回転と高剛性化の両立は非常に困難である。そこで、ハイブリッド（静圧・動圧）水潤滑軸受が注目されている。さて、ハイブリッド水潤滑スラスト軸受としては、図 1(a)に示すように、給水溝、ポケット、ランド部により構成されるのが一般的であるが、図 1(b)に示すように、汎用の数値流体力学（CFD）ソフトウェア ANSYS CFX を用いた軸受内流れの気液二相流解析や可視化実験により、高速回転においては、ハイブリッド軸受のポケットの角部からランド部の境界において、キャビテーション発生することが明らかとなった。そこで本研究では図 2(a)に示すように、ランドにポケットと同じ深さの円周溝を設けることにより、キャビテーション発生を抑制する軸受構造を提案し、数値解析とキャビテーション可視化実験の両面から、円周溝によるキャビテーション抑制効果を検証した。図 2(b)および(c)に、円周溝付き軸受における軸受内の液相体積分率の数値計算結果と可視化実験結果を示す。図に示すように、円周溝を設けた軸受では、ポケットの角部における液相体積分率はおよそ 1 であり、可視化実験においても、キャビテーションの発生が抑制されていることが確認された。



3. 可変絞り機構を用いた高精度の水潤滑静圧軸受

超精密加工機などに用いられる静圧軸受の剛性を高める手法として、軸受に供給する潤滑剤流量を自動的に調節する可変絞り機構が提案されている。近年工作機械に用いられる静圧軸受においては、環境負荷低減を目的として、潤滑流体に水を用いることが検討されているが、油と比べて粘度の低い水を潤滑流体として用いることが、可変絞り機構を使用した静圧軸受の軸受特性に与える影響に関しては十分に検証が行われていない。そこで本研究では、弾性ヒンジ VCM を用いたアクティブ制御型の可変絞り機構を水潤滑静圧ジャーナル軸受に適用し、その軸受特性を実験的

に評価した．図 3 に，本研究で用いたアクティブ制御型水静圧ジャーナル軸受の概略図を示す．本研究では 4 パッド静圧ジャーナル軸受(内径および幅 40mm，ポケット比 0.7，軸受すきま $h_1=23\text{mm}$)を使用しており，水平および鉛直方向それぞれに，弾性ヒンジを用いたアクティブ制御型可変絞り機構と毛細管絞り ($\phi 0.4\times 4\text{mm}$)を対向した構成となっている．図 4 に，弾性ヒンジを用いた可変絞り機構の概要を示す．弾性ヒンジ(ヒンジ剛性 1.6N/mm)は両端を土台に固定されており，ヒンジ中央部には土台との間に流量調整すきま $h_2=30\text{mm}$ が設けられている．潤滑水は，ヒンジ中央部の流量調整すきま h_2 を通過して，静圧ジャーナル軸受に供給され，軸受すきま h_1 を通り軸受外部へ排出される．図 4(b) および図 4(c) に示すように，軸に負荷荷重が作用した場合，軸受すきま h_1 および軸受内圧力が変化する．その結果，軸受ヒンジ中央部分の表裏両面に加わる流体圧力差と，弾性ヒンジの変形による復元力が釣り合うようにヒンジ中央部分が変位し，流量調整すきま h_2 が変化する．軸に加わる荷重に応じて，軸受への供給流量を受動的に調節することで，軸受内圧力を補償し，軸受すきま h_1 の変動を極めて小さくすることが可能となる．さらに，この可変絞り機構を能動的に機能させて，より高い軸受剛性を得るために，可変絞り機構にムービングコイルタイプの VCM を組み合わせた構造としている．軸の変位に応じて，VCM のコイルへの入力電流を調節し，流量調整すきま h_2 を能動的に変化させることで，荷重変動に対する軸受すきま h_1 の変動を極めて小さくするとともに，軸受すきま h_1 を精密に制御することを可能となっている．

図 5 に示す可変絞り機構を用いた水潤滑静圧軸受を搭載したスピンドルにおいて，軸を 100，500 rpm で回転させた場合の軸先端部における振れ量を図 6 示す．図より VCM による制御無の場合においても軸の回転振れは $1\mu\text{m}$ 以下であるが，VCM による制御有の場合は，各回転数にて回転振れが減少しており，軸の振れ量を動的に制御が可能であると分かる．ここで 100 rpm に着目し，X(水平)方向において制御の有無を比較すると 15%程度に振れを抑制可能であり，Y(鉛直)方向において制御の有無を比較すると 40%程度に振れを抑えられることが確認できた．また 500 rpm においても同様のことが言え，X 方向において 35%程度，Y 方向においても 60%程度に振れを抑制可能であることを確認した．

4. まとめ

本講演では高速水潤滑ハイブリッド軸受におけるキャビテーション発生およびその抑制法，可変絞り機構を用いた高精度の水潤滑静圧軸受の研究事例を紹介した．油潤滑の静圧軸受，ハイブリッド軸受においては，比較的歴史が古く，工作機械においても実用的に幅広く用いられているが，水を潤滑剤として使用することに関しては，様々な研究課題が残っており実用化まで先は長い．著者らの研究グループでは，引き続き，高速・高精度の水潤滑軸受に関する研究を実施していく予定である．

文献

- 1) Minagawa・Nawa・Kawada・Miyatake: Abstract of the 49th Leeds-Lyon Symposium on Tribology(2024)
- 2) 上田・宮武：アクティブ制御型水潤滑静圧ジャーナル軸受を用いた回転軸の振れ制御に関する研究，2023 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集

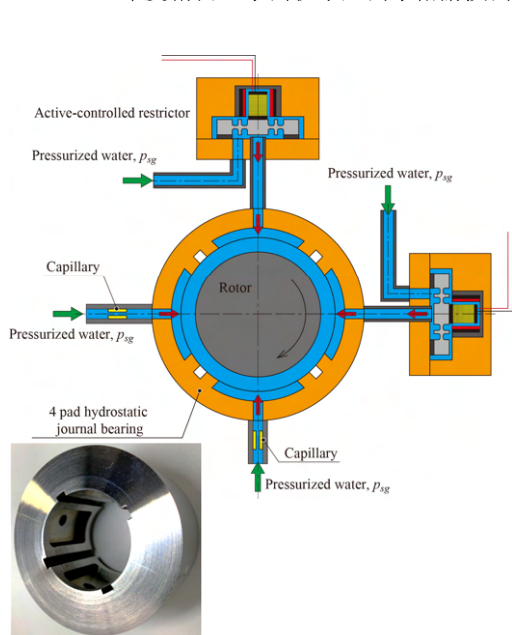


Fig.3 Hydrostatic journal bearing with active-controlled restrictors

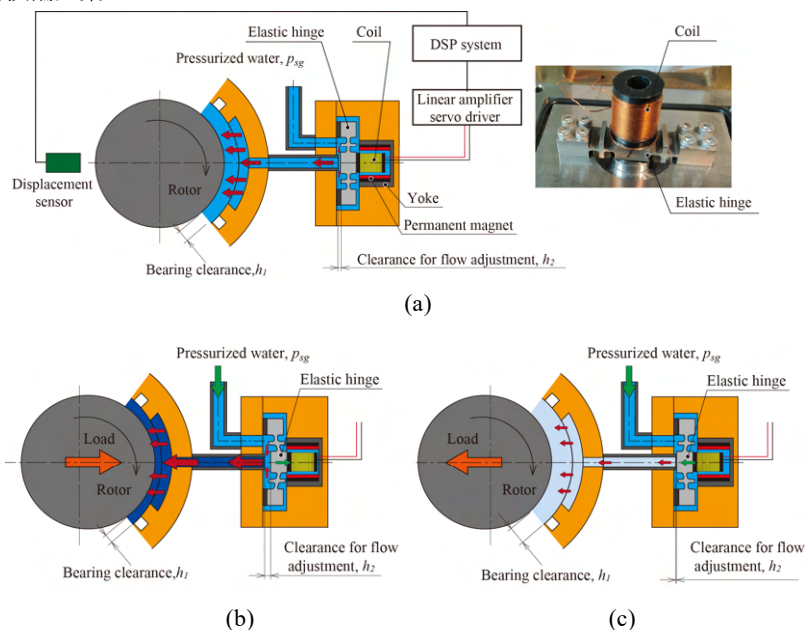


Fig.4 Schematic diagram of the actively controlled restrictor with elastic hinge

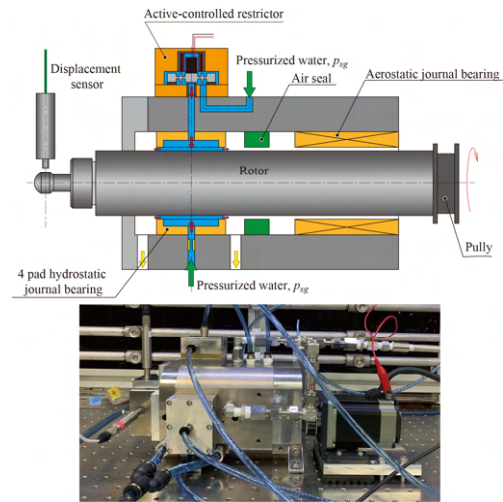


Fig.5 Schematic diagram of the experimental apparatus

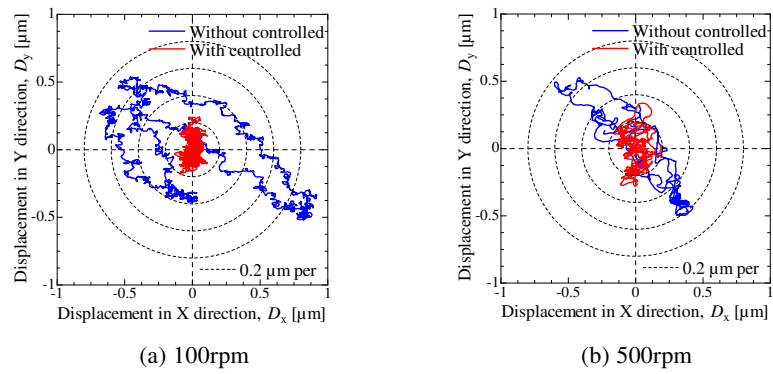


Fig.6 Runout at the shaft tip during shaft rotation