

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17961

研究課題名(和文)低粘度潤滑流体を用いた静圧軸受の高剛性化に関する研究

研究課題名(英文)Study on High Stiffness of Hydrostatic Bearings using Low Viscosity Fluid

研究代表者

宮武 正明(Miyatake, Masaaki)

東京理科大学・工学部機械工学科・准教授

研究者番号：70434032

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)：本研究においては、超精密加工機や測定器に用いられる静圧軸受の作動流体として、水などの低粘度潤滑流体を用いた際の性能を向上させるため、新規軸受構造として(i)高負荷容量・高剛性を実現するための多孔質ランド部を設けた軸受構造、(ii)高剛性化を実現するための小型・高速流量調整機構、(iii)軸受消費動力低減のための新規構造(リセス内循環路)の3点を提案し、その有用性の検討を行った。本研究の成果により、水などの低粘度流体を用いた静圧軸受の、負荷容量、剛性の向上、消費動力低減が可能であることが、数値計算と実験の両面から明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, in order to improve characteristics of hydrostatic bearings with a low viscosity lubricating fluid such as water, new bearing structures, (i) bearing structure provided with porous land region for achieving high load capacity (ii) a compact and high response flow regulating mechanism for realizing high bearing stiffness, (iii) a novel structure for reducing bearing consumption power, were proposed, and its usefulness was investigated experimentally and numerically. Based on the results of this research, it was consequently found that the consumption power can be reduced by about 20% while improving the load capacity and stiffness of hydrostatic bearings using low viscosity fluid such as water.

研究分野：機械要素およびトライボロジー関連

キーワード：流体潤滑軸受 静圧軸受 水潤滑軸受 高剛性化 消費動力低減

1. 研究開始当初の背景

工作機械においては、被加工物や工具が取り付けられた回転軸およびその支持軸受、直動テーブルおよびその支持軸受を備えた装置が多く使用されているが、工作機械の中でも特に高い精度で加工を行う超精密加工機の軸受には、軸受外部から加圧された潤滑油を軸受すきまに供給し、その潤滑油膜によって非接触で回転軸を支持する静圧軸受が広く使用されている。さて、近年、様々な機械において環境負荷や消費動力の低減が求められているが、超精密加工機においても同様の要求があり、油潤滑静圧軸受に代わって、水や低粘度油を潤滑剤とした静圧軸受の使用が検討されている。この検討の中で、軸受構造を従来と同じとし、単に潤滑剤を低粘度油に変更するというも行われたが、従来の構造を用いては、油潤滑軸受と同等の軸受剛性が得られず、低粘度流体を潤滑剤として使用するには、従来の油潤滑静圧軸受と比較して軸受剛性(荷重変動に対する剛性)を向上させる必要があることが明らかとなった。この剛性不足が、超精密加工機や測定器に対して、低粘度流体静圧軸受の適用を妨げる原因の一つとなっていた。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、水などの低粘度潤滑流体を用いた静圧軸受の高剛性化を実現するための新規軸受構造の提案と性能検証を実施した。具体的な提案内容として、(i) 高負荷容量・高剛性を実現するための多孔質ランド部を設けた軸受構造、(ii) 超高剛性化を実現するための弾性ヒンジを用いた小型・高速流量制御機構である。また、(i)、(ii)に加えて、軸受の消費動力(摩擦損失)低減についても検討した。摩擦損失低減については、低粘度流体を使用することで実現可能であるが、更なる損失削減のため、(iii)軸受消費動力低減のための新規構造の提案とその数値的・実験的検証も行った。

3. 研究の方法

3.1 高負荷容量・高剛性を実現するための多孔質ランド部を設けた軸受構造

静圧軸受の構造としては、図 1(a)のようにポケット型のものや、図 1(b)のように全面に多孔質材を用いたものがあるが、本研究では、両者の特性を組み合わせた構造として、ポケット型軸受のランド部を多孔質材とする軸受構造を提案する。リセスに加え、多孔質ランド部からも加圧流体を供給することで、従来の静圧軸受より、高い負荷容量および剛性が得ることを目的とする。本研究では、数値計算と実験の両面から、提案する構造の有効性を確認した。

3.2 弾性ヒンジを用いた可変絞り機構(小型・高速流量制御機構)

油潤滑静圧軸受の超高剛性化を実現する手法として、軸受に加わる荷重変動に応じて

自動的に流量を制御する可変絞りが種々提案されている。本研究では、高剛性と高応答性を実現するため、図 2 に示すような、弾性ヒンジを用いた小型の可変絞り機構(可変流量制御機構)を提案する。本研究においては、この可変絞り機構の静的荷重に対する特性に加えて、加工機実機を想定した動的荷重に対する特性に関して、実験的・数値的検討を行い、提案する構造が、工作機械に必要とされる性能を有することを確認する。

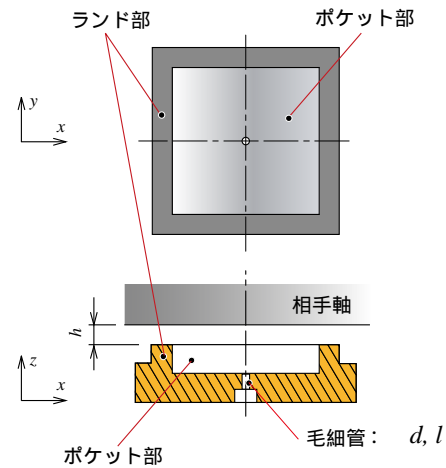


図 1(a) 一般的なポケット型静圧軸受

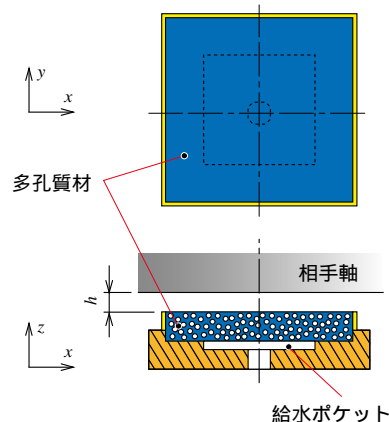


図 1(b) 一般的な全面多孔質静圧軸受

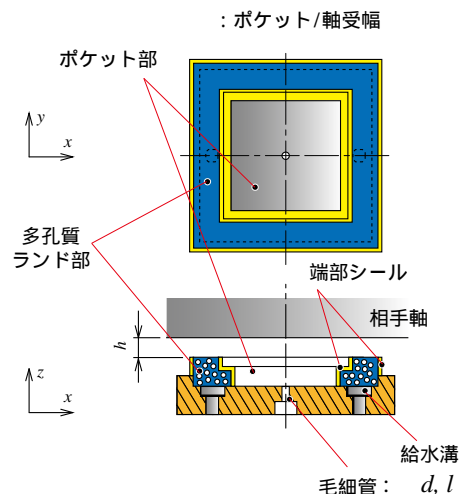


図 1(c) 提案する静圧軸受構造

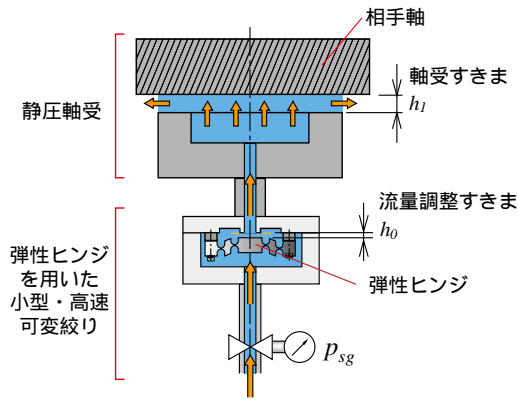


図2 弾性ヒンジを用いた可変絞り機構

3.3 軸受の消費動力(摩擦損失)低減法

図3(a)にポケット型静圧軸受の概略図を示す。静圧軸受の摩擦損失(消費動力)は、主に軸受すきまの小さいランド部における流体膜のせん断摩擦により生じると考えられているが、実際の加工機用スピンドルにおいては、数値的予測の2倍程度の消費動力が発生する場合があります。これはポケット内での潤滑流体の流れによる影響と考えられている。そこで本研究では、図3(b)に示すように、ポケット型静圧軸受のポケット内に仕切り板を取り付けて循環路を設ける構造を提案する。この循環路により、ポケット内での流体膜のせん断摩擦が低減され、消費動力が低減

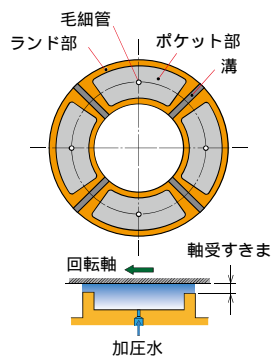


図3(a) 一般的なポケット型静圧スラスト軸受

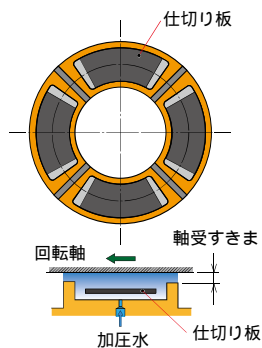


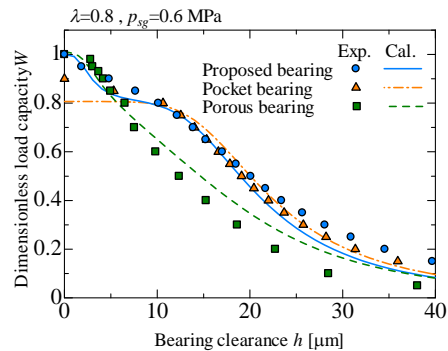
図3(b) ポケット内循環路を設けた
ポケット型静圧スラスト軸受

されることが期待される。本研究では、数値計算による検討に加えて、軸受実機を製作し、実験により提案する構造の有効性を確認するとともに、従来の軸受と比較して、20%程度の消費動力低減を目標とした

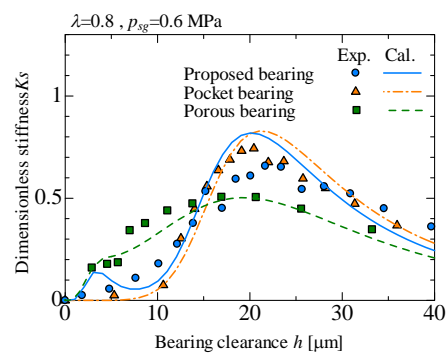
4. 研究成果

4.1 高負荷容量・高剛性を実現するための多孔質ランド部を設けた軸受構造

図4に、軸受の静的特性に関して、提案する軸受と従来の軸受構造の軸受特性を比較した結果を示す。図に示すように、提案する軸受は、軸受すきま $10\mu\text{m}$ 以下にて全面多孔質軸受と同程度の負荷容量を示し、軸受静剛性については、軸受すきま $20\mu\text{m}$ 近傍で最大となりポケット型軸受と同等の値を示す。このように、提案する軸受は、ポケット型軸受と全面多孔質軸受の両軸受の優れた部分をあわせ持つことが、実験的、数値的に確認された。



(a) 無次元負荷容量



(b) 無次元軸受静剛性

図4 軸受静特性の比較結果

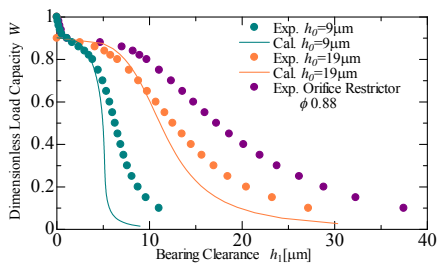
(多孔質ランド部を設けた軸受構造)

4.2 弾性ヒンジを用いた可変絞り機構 (小型・高速 流量制御機構)

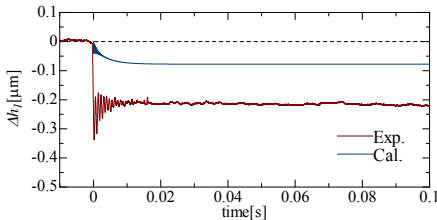
図5(a)に静特性試験における軸受すきま h_1 と無次元負荷容量 W の関係を示す。初期流量調節すきま h_0 が $9\mu\text{m}$, $19\mu\text{m}$ の何れの場合においても、実験結果と計算結果との傾向は一致しており、一般的な静圧軸受である、オリフィス絞りを有する軸受と比較して、本研究

で提案する可変絞り機構は高い静剛性(負荷容量の変化に対する軸受すきまの変化量)が得られることが確認された。

図 5(b)および図 5(c)に初期流量調節すきま h_0 が $9\mu\text{m}$, $19\mu\text{m}$ の場合の, 動的特性(軸に 29.4N のステップ荷重を付加した際の軸受すきまの時間変化)の結果を示す。 $h_0 = 9\mu\text{m}$ において実験結果と計算結果の間に差異は見られるが, 何れの結果においても, 29.4N のステップ荷重に対する軸受すきまの変動量の最終偏差は $1\mu\text{m}$ 未満であり, 高い軸受剛性を有することがわかる。また, ステップ荷重付加後の, 軸受すきまの変動の整定時間については, いずれの条件においても 0.02ms 以下であり, 提案する弾性ヒンジを用いた可変絞り機構は, 高い応答性を有することが確認された。

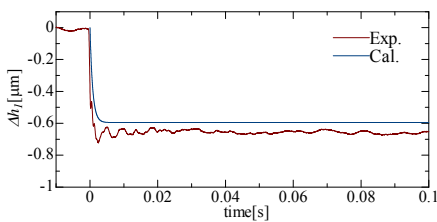


(a) 無次元負荷容量



(b) 動特性(ステップ荷重 29.4N)

$h_0 = 9\mu\text{m}, W = 0.5$



(c) 動特性(ステップ荷重 29.4N)

$h_0 = 19\mu\text{m}, W = 0.5$

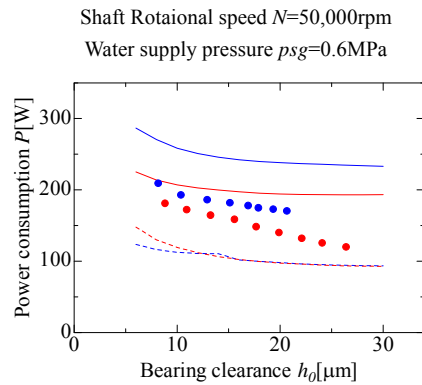
図 4 軸受特性の比較結果

(弾性ヒンジを用いた可変絞り機構)

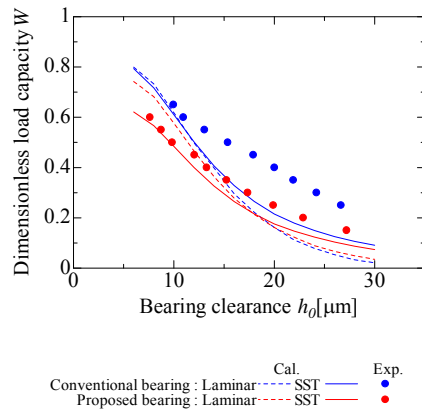
4.3 軸受の消費動力(摩擦損失)低減法

図 5 に, 軸回転数 $N = 50,000\text{rpm}$ における, 軸受消費動力および負荷容量に関して, 提案する軸受構造と従来の軸受構造を比較した結果を示す。図より, 消費動力の実験値は, 層流モデルを用いた数値解析結果と乱流モデル(SST モデル)を用いた数値解析結果の中間の値となっている。Type A, Type B 共に一

般的な軸受と比較して, 実験値では最も削減が低い軸受すきま $11\mu\text{m}$ で約 11%程度, 最も削減が高い軸受すきま $20\mu\text{m}$ で約 20%程度の削減が見られている。無次元負荷容量に関しては, 従来の軸受の実験結果は, 数値計算結果と比較して高い値を示しており, その差異の原因については今後検証が必要である。しかし, 数値計算結果により負荷容量を比較すると, 提案する軸受の負荷容量は, 一般的な軸受構造よりわずかに低い値を示すが, おおむね同程度の性能であることがわかる。以上の結果により, 提案する軸受構造により, 軸受負荷はおおむね同等で, 軸受消費動力を 10 ~ 20 程度低減可能であることが明らかとなった。



(a) 軸受消費動力



(b) 軸受負荷容量

図 5 軸受特性の比較結果

(ポケット内循環による消費動力低減法)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

Hanawa Naoki, Kuniyoshi Masanori, Miyatake Masaaki, Yoshimoto Shigeka, Static characteristics of a water-lubricated hydrostatic thrust bearing with a porous land region and a capillary restrictor, Precision

Engineering、査読有 Vol.50 pp293-307 ,
2017年8月
DOI:https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.06.002

〔学会発表〕(計6件)

Yusuke ASAKAWA, Masaaki MIYATAKE,
Shigeka YOSHIMOTO , Study on a
reduction method of power consumption of
water lubricated hydrostatic thrust bearings ,
6th World Tribology Congress, WTC2017
China Beijing(2017年9月)
Ryosuke MAKINO, Hiroki HOHUKU,
Masaaki MIYATAKE, Shigeka
YOSHIMOTO , Study on characteristics of
high speed water-lubricated bearings for
micro fabrication , 6th World Tribology
Congress, WTC2017 China Beijing(2017年
9月)
Koichi JOTAKI, Kazuki FUKUYAMA,
Masaaki MIYATAKE, Shigeka
YOSHIMOTO , Static and dynamic
characteristics of a self-controlled
water-lubricated hydrostatic thrust bearing
using an elastic hinge , 6th World
Tribology Congress, WTC2017 China
Beijing(2017年9月)
牧野 亮介, 保福 優樹, 宮武 正明,
吉本 成香, 超微細加工用高速回転水潤
滑軸受に関する研究, 日本機械学会 第
11回 生産加工・工作機械部門講演会
(2016年10月)
福山 一樹, 宮武 正明, 吉本 成香,
超微細加工用高速回転水潤滑軸受に関す
る研究, 日本機械学会 第11回 生産加
工・工作機械部門講演会(2016年10月)
浅川 雄祐, 宮武 正明, 吉本 成香, 水潤
滑静圧スラスト軸受の消費動力削減法に
関する研究 , トライボロジー会議 2016
春 東京 (2016年5月)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)
なし

取得状況(計0件)
なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rs.tus.ac.jp/m-miyatake/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮武 正明 (Masaaki MIYATAKE)
東京理科大学・工学部機械工学科・准教授
研究者番号: 70434032

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし