

報告日 2013年(平成25年) 5月28日

報告者 東京工業大学 精密工学研究所 助教

澤野 宏

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名

高剛性油を用いた高性能油静圧軸受

(2) 研究者氏名

澤野 宏 東京工業大学 精密工学研究所 助教

(3) 研究概要

油静圧軸受は高剛性、高減衰性を有しており、工作機械に広く用いられている。近年、精密機器に要求される性能の向上に伴い、その主要な構成要素である軸受に対しても、高い性能が要求されるようになってきている。軸受の性能を向上させるためには圧縮性の小さい作動油を用いることが重要である。これに対して、近年、非常に低い圧縮性を持つ高剛性油が開発されている。本研究では高剛性油の適用により高い性能を持つ油静圧軸受を提案した。提案する油静圧軸受の性能を評価するために軸受性能評価装置を構築し、軸受の静特性と動特性について、従来の軸受と性能を比較した。その結果、提案する高剛性油を用いた油静圧軸受が高い性能を持つことを明らかにした。

(4) キーワード

油静圧軸受, 高剛性油, 圧縮性, 剛性

(英文)

(1) Research title

A newly developed high performance hydrostatic bearing with oily high bulk modulus fluid

(2) Name of researcher with title of position

Hiroshi Sawano, Assistant Professor, Tokyo Institute of Technology

(3) Summary

Hydrostatic bearing systems have been used in machine tools due to high damping capacity and high stiffness. Demands for higher performance bearing system have recently increased in various industrial sectors. In order to achieve higher performance of the bearing system, the working fluid with lower compressibility should be used. High bulk modulus fluid with very low compressibility has been recently developed. This study proposed a hydrostatic

bearing system using high bulk modulus fluid. Static and dynamic characteristics of the bearing system were evaluated and compared with that of a conventional hydrostatic bearing. Experimental results confirmed that the high bulk modulus fluid enhances the performance of the hydrostatic bearing.

(4) Key Words

Hydrostatic Bearing, High Bulk Modulus Fluid, Compressibility, Stiffness

2. 本研究の意義・特色

油静圧軸受の性能を向上させる上で、作動油に溶存している空気が問題となる。特に油静圧軸受において軸と軸受間に相対運動が生じた際、動圧効果によって部分的に負圧が発生し、この負圧により、作動油に溶存していた空気が気泡を生じさせる。この気泡は作動油に圧縮性を生じさせる原因となり、剛性低下等、軸受の性能の低下を引き起こす。このような問題に対して、軸受すきまにおける気泡の発生が軸受特性に及ぼす影響を調べた研究はあるが、作動油の圧縮性を制御することにより軸受性能の向上を目指した研究は少ない。

これに対して本研究は、作動油の圧縮性に着目し、非常に低い圧縮性を持つ高剛性油を用いることにより軸受性能の飛躍的な向上を実現するものであり、工作機械のみならず、広い産業分野において高い工業有用性を有する。さらに、本研究は作動油の特性と油静圧軸受の性能との関係を明らかにするものであり、学術的にも高い意義を持つ研究である。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

3.1 緒言

油静圧軸受は高剛性、高減衰性を有しており、工作機械に広く用いられている。近年、精密機器に要求される性能の向上に伴い、その主要な構成要素である軸受に対しても、高い性能が要求されるようになってきている。

しかしながら、油静圧軸受において、作動油に溶存している空気が問題となる。特に油静圧軸受において軸と軸受間に相対運動が生じた際、図 1 に示すように動圧効果によって部分的に負圧が発生し、この負圧により、作動油に溶存していた空気が気泡を生じさせる。この気泡は作動油に圧縮性を生じさせる原因となり、剛性低下等、軸受の性能の低下を引き起こす。このような問題に対して、軸受すきまにおける気泡の発生が軸受特性に及ぼす影響を調べた研究¹⁾はあるが、作動油の圧縮性を制御することにより軸受性能の向上を目指した研究は少ない。

近年、油圧システムに高剛性油と呼ばれる、従来の作動油と比較して分子のすきまが

小さく、圧縮による体積収縮が小さい作動油を油圧システムに用いることにより、ポンプ性能の増加や圧力応答の改善を実現した例が報告されている^{[2], [3]}。さらに、高剛性油は図 2 に示すように空気の溶存量が少ないため、高剛性油を油静圧軸受に適用することにより、軸受の性能の向上が期待できる。

そこで、本研究では、高剛性油の適用による高性能油静圧軸受の実現を目的として、高剛性油を用いた油静圧軸受の性能の解析をおこない、さらに高剛性油を用いた油静圧軸受特性評価装置の構築および特性評価をおこなった。

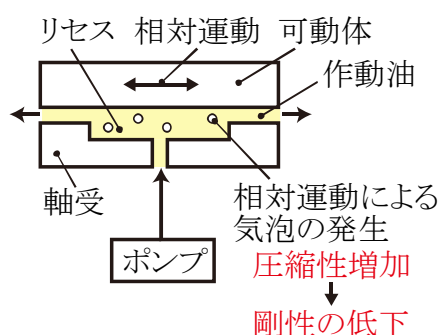


図 1 油静圧軸受における溶存空気の問題

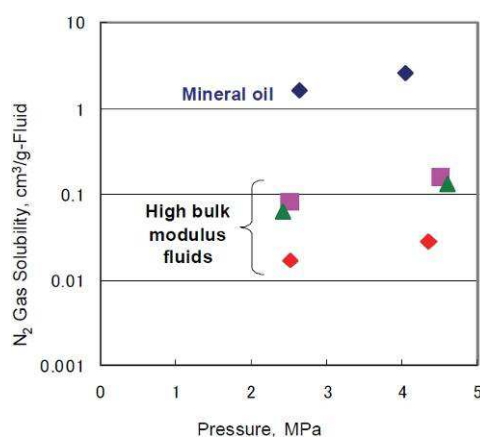


図 2 鉱物油と高剛性油のガス溶存量の比較^[2]

3.2 油静圧軸受特性評価システム

提案する高剛性油を用いた油静圧軸受システムの特性を評価するため、油静圧軸受特性評価システムを構築した。評価システムの構成を図 3 に示す。ポンプで加圧された作動油は油温制御装置で温度、レギュレータで圧力をそれぞれ調整されたのち、流体絞りを経て軸受へと供給される。軸受の手前に圧力センサを設置することで、軸受への供給圧力を計測する。このとき、軸受に作用する荷重は、軸受すきまの油膜の静的な圧力によって支えられる。軸受すきまを通過した作動油は油たまりから油タンクへと回収され、再利用される。

構築したシステムの外観を図 4 に、軸受面の様子を図 5 に示す。本研究では荷重を加えるために台形ねじを用い、テーブルの手前に挿入した力センサにより荷重を計測する。また、力センサの手前にピエゾアクチュエータを設置し、ねじにより静的負荷をかけた状態でアクチュエータに正弦波状の駆動指令を与えることでテーブルに動的負荷を加えることができる。また、テーブルには変位センサが取り付けられており、荷重をかけた際のテーブルの変位から軸受すきまの変化を求めることができ、さらに荷重と軸受すきまの変化から軸受剛性を算出することが可能である。

軸受面には 4 つのランドとリセスの組み合わせからなるパッドを製作した。作動油がランドとテーブルの隙間を通過する際に圧力を生じてテーブルの負荷を支える構造とな

っている。

比較のため、軸受の作動油として、高剛性油と従来の（スーパーハイランド 32）を用いて油静圧軸受の特性を調べた。高剛性油と従来の作動油の外観を図 6 に、それぞれの作動油の物性を表 1 に示す。高剛性油は従来の作動油と比較して、密度が高く、空気溶解度と動粘度が低い特徴を持つ。

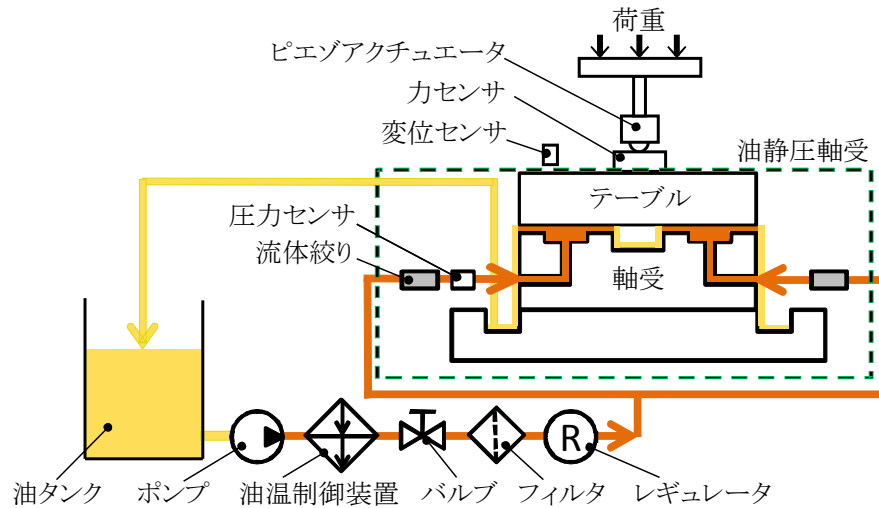


図 3 油静圧軸受特性評価システムの構成

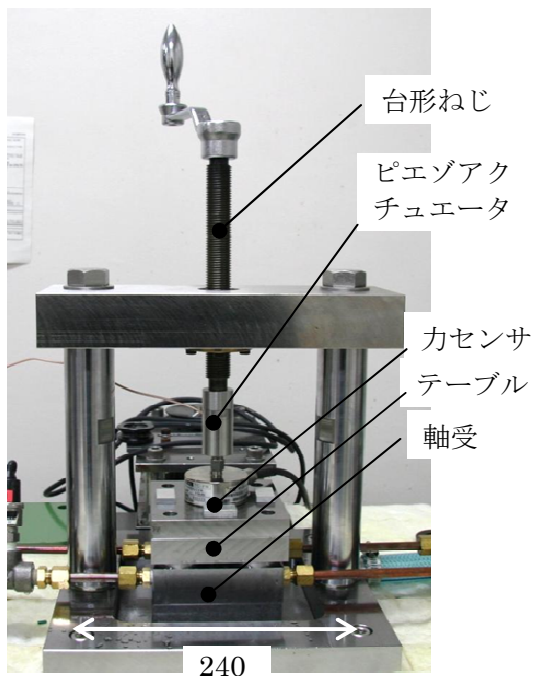


図 4 油静圧軸受特性評価システムの外観

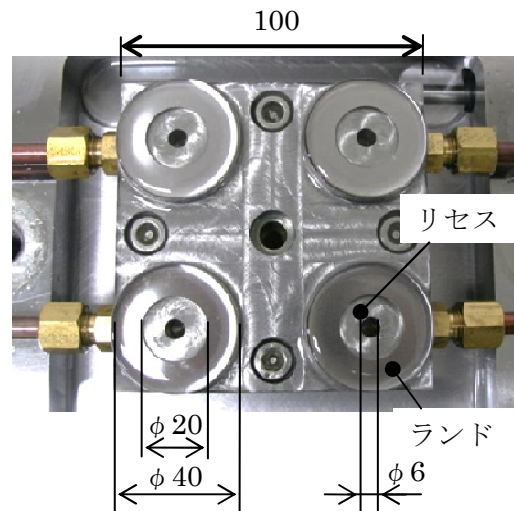


図 5 軸受面の様子

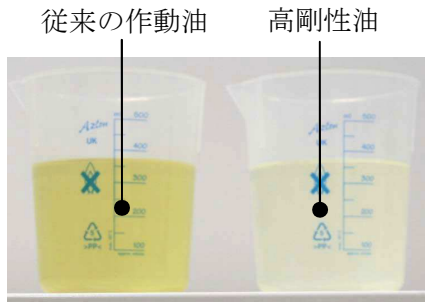


図 6 作動油の外観

表 1 作動油の物性

	従来作動油	高剛性油
空気溶解度 [vol%]	2.71	1.44
密度(15°C) [kg/m ³]	869	1166
動粘度(40°C) [m ² /s]	3.26×10^{-5}	2.72×10^{-5}
動粘度(100°C) [m ² /s]	5.49×10^{-6}	4.01×10^{-6}

3.3 油静圧軸受特性の評価

提案する油静圧軸受の特性を評価するために、高剛性油と従来の作動油を用いた場合についてそれぞれ油静圧軸受の静特性および動特性を計測、比較した。

軸受への作動油の供給圧力 1.0MPa および 1.5MPa における軸受の静特性を調べた。台形ねじを回してテーブルに荷重を加え、このときの荷重と軸受すきまの値を測定することで、負荷容量と軸受すきまの関係を調べた、さらに、負荷容量と軸受すきまの関係に関する近似曲線を求め、軸受すきまで式を微分することで剛性を算出した。図 7 および図 8 に、上述の方法で得た負荷容量および剛性を示す。

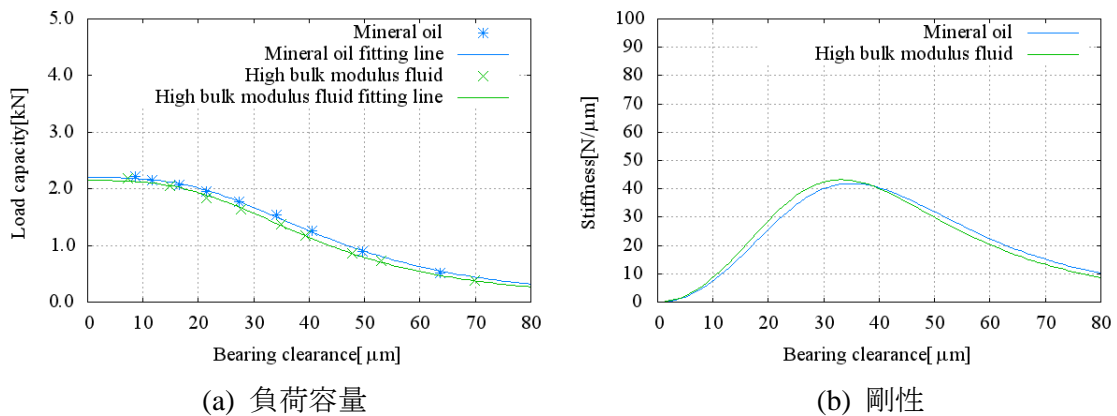


図 7 供給圧力 1.0MPa における軸受の静特性

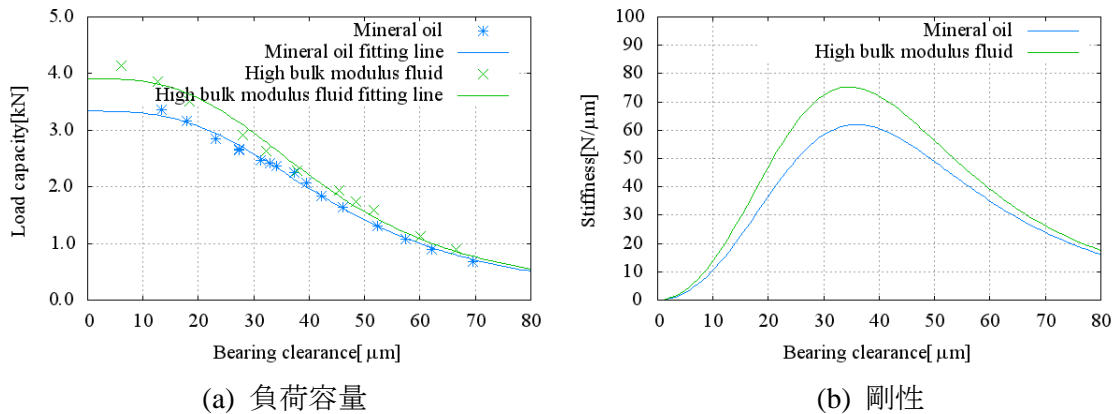


図 8 供給圧力 1.5MPa における軸受の静特性

負荷容量については、供給圧力 1.0MPa では従来の作動油、1.5MPa では高剛性油の方が大きい結果が得られており、作動油の違いによる明確な特性の変化はみられなかった。一方、剛性については、双方の供給圧力において高剛性油を使うことで最大剛性の向上が確認できた。

次に、軸受への作動油の供給圧力 1.0MPa および 1.5MPa における軸受の動特性を調べた。軸受すきまが 30 μm となるように台形ねじを用いて荷重をかけた状態で台形ねじの先端に設置されたピエゾアクチュエータを用いて片振幅 1.8 μm 、周波数 1~100Hz の正弦波状の振動を与え、その際の荷重と変位の応答から動剛性と位相を調べた。図 9 および図 10 に軸受の動剛性の計測結果を示す。

供給圧力 1.0MPa、1.5MPa のいずれの場合においても、1~60Hz の範囲において、高剛性油を利用することで、従来の作動油を用いた場合と比較して動剛性の明確な増加がみられた。特に周波数 30Hz 付近において高剛性油の利用による動剛性の増加率が大きく、供給圧力 1.0MPa では約 150%、供給圧力 1.5MPa では約 60%の増加がみられた。一方、60Hz~100Hz の範囲においては、高剛性油を使うことにより動剛性が低下する結果が得られた。これについて明確な原因が分かっておらず、原因の究明と解決方法の検討が今後の課題である。

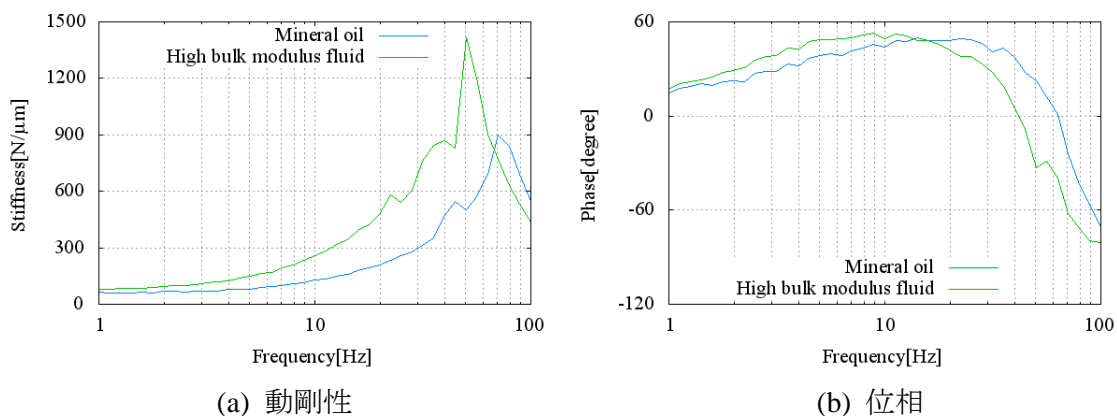


図 9 供給圧力 1.0MPa における軸受の動特性

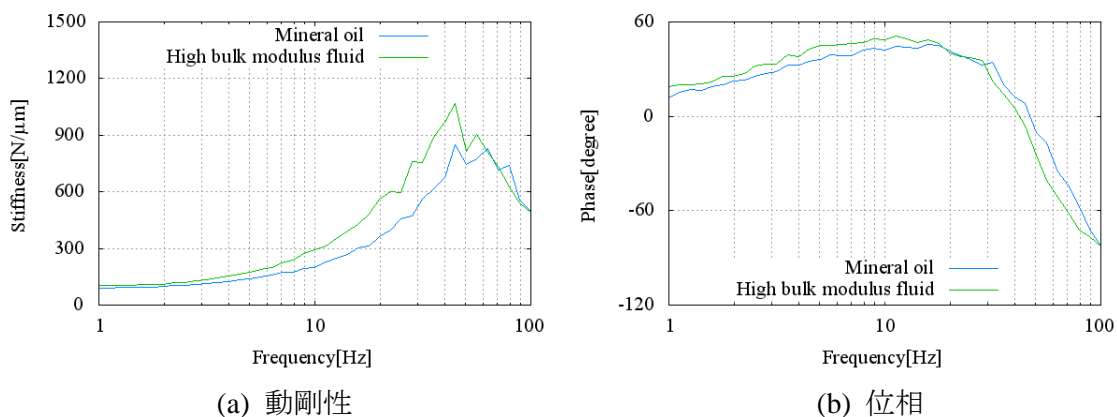


図 10 供給圧力 1.5MPa における軸受の動特性

位相については、作動油の違いによる明確な特性の変化はみられなかった。

以上の結果より、高剛性油を利用することにより、静剛性の最大値の向上、ならびに1～60Hzの範囲における動剛性の向上が実現できることが明らかとなった。

3.4 結言

本研究では、高い性能を持つ油静圧軸受の実現を目的として、作動油として高剛性油を用いた油静圧軸受を提案した。油静圧軸受特性評価システムを構築し、高剛性油および従来の作動油を用いた場合における油静圧軸受の特性を評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 作動油として高剛性油を利用した、高い特性を持つ油静圧軸受を提案した。
- (2) 提案する油静圧軸受の静特性を評価した結果、高剛性油を利用することにより、最大静剛性の向上が実現できることを示した。したがって、高剛性油を利用し、軸受すきまを適切に設定することにより、油静圧軸受の静特性の向上が実現できる。
- (3) 提案する油静圧軸受の動特性を評価した結果、1～60Hzの範囲における動剛性の向上が実現できることが明らかとなった。一方、60Hz～100Hzの範囲においては、高剛性油を使うことにより動剛性が低下する結果が得られた。これについて明確な原因が分かっておらず、原因の究明と解決方法の検討が今後の課題である。

以上の結果より、高剛性油を利用した油静圧軸受が、軸受の静特性と動特性双方の向上に対して有効であることを明らかにした。

参考文献

- [1] 青山藤詞郎, 稲崎一郎, 米津栄: 静圧スラスト軸受における気ほうの発生限界, 精密機械, 47 (1981), pp.411-417.
- [2] Toshiyuki Tsubouchi, Jitsuo Shinoda: Characterization of oily high bulk modulus fluid”, Tribology Online, 5-5 (2010), pp.230-234.
- [3] 坪内俊之, 篠田実男: 高剛性油による油圧システムの性能向上検討, 2010年度 トライボロジー会議講演論文集, (2010).

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

新野 秀憲・東京工業大学・教授
吉岡 勇人・東京工業大学・准教授
澤野 宏 ・東京工業大学・助教

5. 研究実施時期

2012年（平成24年）1月1日から 2013年（平成25年）3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

- [1] Kensuke Kuze, Hiroshi Sawano, Hayato Yoshioka, Hidenori Shinno: Hydrostatic bearing with high bulk modulus fluid, Emerging Technology in Precision Engineering XIV, pp.532-537, 2012. (14th International Conference on Precision Engineering)

7. 内外における関連研究の状況

近年では、精密位置決めに適した空気静圧軸受と比較して、油静圧軸受の研究が大幅に減少している。しかしながら、特に難削材の超精密切削加工に代表されるように、精密加工の分野において軸受に高い剛性が要求されるようになっており、今後、空気静圧軸受よりも高い剛性を持ち、かつ転がり案内等の接触案内と比較して良好な摺動性能を持つ油静圧軸受の適用が必要になることが予想される。したがって、現段階で油静圧軸受の特性向上に関する基礎研究を進めておくことが望まれる。

8. 今後の発展に対する希望

本研究では高剛性油を油静圧軸受に適用することにより高い軸受特性が得られることを示した。一方、研究代表者らは作動油中に溶存している空気を脱気することや、軸受の形状を工夫することで油静圧軸受の特性を向上させる研究を進めている。これらの方法は組合せることが可能であり、高剛性油を脱気する方法や、軸受の形状を工夫した上で高剛性油を作動油として用いる方法により、さらなる軸受特性の向上が期待できる。今後、油静圧軸受について幅広く詳細な検討を加えることにより、超精密加工等の分野に応用可能な極めて高い特性を持つ油静圧軸受の実現を目指す。