

ワカゾノ ヨシオ

氏 名 若園 賀生

学位の種類 博士 (工学)

学位記番号 博第1067号

学位授与の日付 平成29年3月23日

学位授与の条件 学位規則第4条第1項該当 課程博士

学位論文題目 ダイアフラムを用いた可変絞り形静圧案内面の研究
(Hydrostatic Bearings with Self-Controlled Restrictors Using a Diaphragm)

論文審査委員 主査 教授 中村 隆
教授 萩原 正弥
教授 糸魚川 文広
教授 社本 英二
(名古屋大学)

論文内容の要旨

本研究は、工作機械のしゅう動案内に静圧軸受を用いるときの軸受剛性を高めることのできる、ダイアフラムを用いた可変絞りを活用する技術の開発に関するものである。ダイアフラム可変絞りは軸受パッド内の圧力をフィードバックすることで剛性を高めることが可能なことは知られているが、これまでは軸受単体での研究など基礎的なものしかなく、実用機械への適用を前提とした開発研究は行われていない。また実用条件では作動流体の流量と軸受内圧力とは非線形特性となるが、解析の困難さからこれまではその一部を線形問題として解いてきた。そこで本研究では軸受の非線形特性を直接解析に取り入れ、また製作上の問題となるダイアフラム可変絞り部の製造誤差が軸受特性に与える影響を詳細に調べた。さらに、作動油に僅かに混入する気泡、および工作機械製造上不可避な作動油配管の長さが軸受特性に与える影響も詳細に調べた。本研究は以下の内容で構成されている。

まず、ダイアフラム可変絞り形静圧軸受の特性を調べるために、基礎研究として軸受単体での試験装置を作製し、静特性、動特性の数値解析と実験検証を行った。従来のオリフィス固定絞りによる静圧軸受の特性と比較し、試作したダイアフラム可変絞り形静圧軸受の軸受剛性および応答性において優位性が示された。また絞り部における作動油の流れを非線形として扱い、油中の気泡および配管の弾性変形を考慮した数値解析結果は、軸受単

体での試験装置の特性を良くあらわすものとなった。動剛性を高く保つためには、油中の気泡は限りなく少なくし、配管の長さは極力短くする必要があるが、いずれもゼロとすることはできないため、これらを考慮した解析が必要なことも明らかとなった。

次に、カムシャフトや、クランクシャフト研削盤の砥石台を想定した質量と大きさのステージに複数のダイアフラム可変絞り形静圧軸受を配置した実用試験装置を試作し、その特性を調査した。この種の研削盤では生産性向上のために高剛性でかつ、高速で高精度な移動性能が必要となっている。ここではオリフィス固定絞りでは案内面を6面拘束としていたものをダイアフラム可変絞りでは4面拘束とし、また軸受面積を1/3に減少して静特性、動特性を調べた。基礎研究で再現性が確認された解析手法に実用試験装置の諸元を適用し、最適な軸受特性が得られるダイアフラム寸法等を決定して製作した軸受は、案内面を簡素化しかつ軸受面積を1/3としたにも拘らず、オリフィス固定絞りの従来機と同等以上の静剛性と動特性を示した。また、ステージを往復移動させたときの運動精度を測定した結果、可変絞りでは従来固定絞りと比べ運動誤差が少ないことがわかった。これらの結果は、ダイアフラム可変絞りを採用することにより研削盤の性能向上と同時に製造コスト削減にも寄与することを示している。

円筒研削では工作物を回転させる主軸があり、次にこの主軸の回転軸受にダイアフラム可変絞り形静圧軸受を適用した。ここでは軸受面積を従来型のオリフィス固定絞りとはほぼ同じとし、むしろ軸受剛性を高め加工精度の向上を狙った。円筒研削では主軸の剛性が製品精度に直接影響するためである。数値解析で最適化された設計諸元に基づき試作した主軸は、従来型と比べ1.5~3倍の静剛性を、また動剛性ではラジアル方向は30 Hz以下、アキシャル方向は15 Hz以下で従来型よりも高剛性となった。試作した主軸台で円筒研削を行い製品の真円度を測定した結果、真円度は0.37 μm となり、従来の主軸台での真円度0.48 μm よりも高精度な加工が実現できた。

最後に、ダイアフラム可変絞りの設計諸元が軸受性能に及ぼす影響を、数値解析で詳細に調べた。軸受性能に影響する因子は多数あるが、静剛性には可変絞りクリアランス、ダイアフラム厚さ、供給油圧が強く影響し、動剛性にはさらに油中の気泡量、配管長さが強く影響することが明らかとなった。ダイアフラム可変絞りでは、設計諸元を変えることで無限大剛性の軸受を作ることにも可能である。しかし僅かな設計諸元からのずれ、使用中の変動により負剛性に陥り、ハンチングやオーバーシュートが発生する可能性がある。工作機械は長期間にわたり使用されること、またダイアフラム等の製造加工誤差を考慮し、オリフィス固定絞りの2倍程度の静剛性に留めることが肝要であることも、数値解析の結果明らかとなった。これらの研究成果は、ダイアフラム可変絞りを静圧軸受に適用し、様々なしゅう動案内面、軸受に利用する際の適切な設計指針となり得る。

論文審査結果の要旨

本研究は、工作機械のしゅう動案内に静圧軸受を用いるときの軸受剛性を高めることのできる、ダイアフラムを用いた可変絞りを活用する技術の開発に関するものである。ダイアフラム可変絞りは軸受パッド内の圧力をフィードバックすることで剛性を高めることが可能なことは知られているが、これまでは軸受単体での研究など基礎的なものしかなく、実用機械への適用を前提とした開発研究は行われていない。また実用条件では作動流体の流量と軸受パッド内圧力とは非線形特性となるが、解析の困難さからこれまではその一部を線形問題として解いてきた。そこで本研究では軸受の非線形特性を直接解析に取り入れ、また製作上の問題となるダイアフラム可変絞り部の製造誤差が軸受特性に与える影響を詳細に調べた。さらに、作動油に僅かに混入する気泡、および工作機械製造上不可避な作動油配管の長さが軸受特性に与える影響も詳細に調べた。本研究は以下の内容で構成されている。

まず、ダイアフラム可変絞り形静圧軸受の特性を調べるために、基礎研究として軸受単体での試験装置を製作し、静特性、動特性の数値解析と実験検証を行った。従来のオリフィス固定絞りによる静圧軸受の特性と比較し、試作したダイアフラム可変絞り形静圧軸受の軸受剛性および応答性において優位性が示された。また絞り部における作動油の流れを非線形として扱い、油中の気泡および配管の弾性変形を考慮した数値解析結果は、軸受単体での試験装置の特性を良く表すものとなった。動剛性を高く保つためには、油中の気泡は限りなく少なくし、配管の長さは極力短くする必要があるが、いずれもゼロとすることはできないため、これらを考慮した解析が必要なことも明らかとなった。

次に、内燃機関のバルブを押し上げるカムやクランクシャフトの円筒部の仕上げ加工を行う研削盤の砥石台を想定し、それと同じ質量と大きさのステージに複数のダイアフラム可変絞り形静圧軸受を配置した実用試験装置を試作し、その特性を調査した。この種の研削盤では砥石台に高い剛性が求められるのと同時に生産性向上のために高速かつ高精度な移動性能が必要となってきた。ここではオリフィス固定絞りでは案内面を6面拘束としていたものをダイアフラム可変絞りでは4面拘束とし、また軸受面積を1/3に減少して静特性、動特性を調べた。基礎研究で再現性が確認された解析手法に実用試験装置の諸元を適用し、最適な軸受特性が得られるダイアフラム寸法等を決定して製作した軸受は、案内面を簡素化しかつ軸受面積を1/3としたにも拘らず、オリフィス固定絞りの従来機と同等以上の静剛性と動特性を示した。同時に軸受面積を1/3とすることで、ステージ移動のしゅう動抵抗は1/3に削減することができ、高い応答性が実現できた。またステージを往復移動させたときの運動精度を測定した結果、ダイアフラム可変絞りは従来のオリフィス固定絞りと比べ運動誤差が少ないことがわかった。これらの結果は、ダイアフラム可変絞りを採用することにより研削盤の性能向上と同時に製造コスト削減にも寄与することを示している。

円筒研削では工作物を回転させる主軸があり、次にはこの主軸の回転軸受にダイアフラム可変絞り形静圧軸受を適用した。ここでは軸受面積を従来型のオリフィス固定絞りとはほぼ同じとし、むしろ軸受剛性を高め加工精度の向上を狙った。円筒研削では主軸の剛性が製品精度に直接影響するためである。数値解析で最適化された設計諸元に基づき試作した主軸は、従来型と比べ1.5~3倍の静剛性を、また動剛性ではラジアル方向は30 Hz以下、アキシャル方向は15 Hz以下で従来型よりも高剛性となった。試作した主軸台で円筒研削を行い製品の真円度を測定した結果、真円度は0.37 μm となり、従来の主軸台での真円度0.48 μm よりも高精度な加工が実現できた。

最後に、ダイアフラム可変絞りの設計諸元が軸受性能に及ぼす影響を、数値解析で詳細に調べた。軸受性能に影響する因子は多数あるが、静剛性には可変絞りクリアランス、ダイアフラム厚さ、供給油圧が強く影響し、動剛性にはさらに油中の気泡量、配管長さが強く影響することが明らかとなった。ダイアフラム可変絞りでは、設計諸元を変えることで無限大剛性の軸受を作ることにも可能である。しかし僅かな設計諸元からのずれ、使用中の変動により負剛性に陥り、ハンチングやオーバーシュートが発生する可能性がある。工作機械は長期間にわたり使用されること、またダイアフラム等の製造加工誤差を考慮し、オリフィス固定絞りの2倍程度の静剛性に留めることが肝要であることも、数値解析の結果明らかとなった。これらの研究成果は、ダイアフラム可変絞りを静圧軸受に適用し、様々なしゅう動案内面、軸受に利用する際の適切な設計指針となり得る。