

博士学位論文審査要旨

2009年9月8日

論文題目： 小型流体軸受における軸受端テーパシールからの油漏れに関する基礎研究

学位申請者： 菱田 典明

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 工学研究科 教授 平田 勝哉

副査： 工学研究科 教授 高岡 正憲

要 旨：

近年の情報機器のデジタル化に伴い、電子デバイスと、精密機構の高度な進化が要求されるようになった。精密機構において、回転機構については高回転速度、高回転精度、静音性、高信頼性などが必要となり、これらを具現化するために、軸受は従来のボールベアリングに代わり、現在では流体軸受が主流になった。

流体軸受は、軸（シャフト）と軸受（スリーブ）によって構成され、これらのすきまには流体（潤滑油）が充たされている。流体軸受は、両者が相対的に回転運動したときに、流体に圧力が発生し、圧力によって負荷を支持するものである。しかし、このような非接触構造が優れた性能を生み出す一方で、開口端から流体が漏洩するという課題が残されている。

一般的な流体機器は、オイルシール、メカニカルシールなどによって流体の漏洩を防止しているが、流体軸受は非接触であることが条件であり、このようなシール類は使用できず、通常は表面張力を利用したテーパシールが使用されている。しかし、テーパシールに関する基礎研究はほとんどなされておらず、文献および論文も皆無に近い。市場では製品レベルにおける実機評価が行われているにすぎず、現実に漏洩が発生し、データ破壊、回転不能などの事故が発生している。

本論文では、テーパシールの作動原理を明確にし、定量的にシール性能を示す指標値を提案したうえで、回転による流体现象について理論解析を行い、漏洩を誘引する要因を分析している。これより、漏洩を生じる限界回転速度を求める解析手法を提案し、解析例を示している。また、表面張力の特徴を考慮した精密な実験装置を製作し、流体の挙動、漏洩現象について観察および測定を行っている。その結果、理論値と実験データは良好な近似が得られており、さらに、特徴的な流体现象を詳細に調査することにより、実際の漏洩現象を明らかにしている。

本論文は6章から構成されており、1章では本論文の概要および研究背景や目的について述べている。

2章では、テーパシール部を解析領域とし、流れ場と界面形状の2段階で解析を行っている。第1段階はNavier-Stokesの運動方程式より基礎式を導き、これを差分化し、境界条件を設定して、SIMPLER法によって数値解析を行い、3つの速度場と、圧力場を求めている。第2段階はLaplaceの式とFrenet-Serretの式を連立し、これに、第1段階で得られた圧力場の値を適用し、撥油剤被膜の有無によって境界条件を設定し、界面形状の数値解析を行っている。これらは3章および4章の解析に必要な基礎解析である。

3章では、両端にテーパ形状を有する管に流体を充たした解析モデルを用い、漏洩する作用と、保持する作用について力学的な解析を行っている。特に、両テーパの中間部に仮想ピストンを設け、これを、軸受精度や外部要因による漏洩力と、圧力分布および表面張力による保持力、の作用点と考えることにより、テーパシールの作動原理を明確にしている。この作動原理より、単位体積の流体が移動しようとしたときの保持力を用いて、シール性能を示す指標値として提案し、テーパシールのシール性能を定量的に評価している。また具体的な解析例として、テーパ角度および液面高さの組合せによる指標値を、撥油剤の有無、静止/回転の場合についてグラフ化している。

4章では、実機のテーパシールを想定し、回転させた場合の漏洩特性について述べている。シール部に流体を充たし、スリーブの回転速度を変化させた場合のシール内部および界面における流体现象より、漏洩を誘引する要因を分析している。これより3つの基本要因、すなわち、①界面の壁面における接触角度の限界、②界面曲率による界面形成の限界、③負圧によるキャビテーション発生、を見出している。そして、テーパ角度および液面高さの組合せにより、合成油と水について、漏洩を生じる限界回転速度をグラフ化している。この結果より、解析の範囲においては、すべて①の要因によって漏洩が生じることが判明し、また、水は合成油よりも高速回転に耐え、シール性能は遠心力による漏洩作用を誘発する密度よりも、保持力を生み出す表面張力の作用が支配的であることを示している。さらに、解析結果をまとめることにより、漏洩限界回転速度は界面の面積とほぼ直線関係であることを示している。

5章では、実験による流体现象および漏洩現象について述べている。表面張力の作用を含む実験に必要な条件を明確にし、これらを満足する実験装置を考案、製作し、諸問題を考慮して実験を行っている。実験内容は、スリーブを回転させた状態の、超深度レーザ顕微鏡による界面形状の測定、高速度カメラによる流体挙動の観察および漏洩限界回転速度の測定である。理論値と実験値の比較は、界面形状および界面最低位置は良好な近似が得られており、漏洩限界回転速度は、水については良い近似を示したが、合成油については、実験値は理論値より小さい値を示した。また、漏洩前後の特徴的な流体の挙動に着目し、詳細な観察と、これに関する考察および確認実験を行っている。この

結果より、高速回転において不安定状態に移行する現象を分析することにより、実際の漏洩誘引の限界を見出している。

6章では、得られた結果を総括し、今後の展望について述べている。

本論文は、小型流体軸受に使用されるテーパシールについて、その作動原理を明確にし、シール性能を定量的に示している。また実際の軸受に適用した場合の、回転に対する漏洩性能の解析手法を示している。

このような知見は、工学的のみならず、工業的にも応用展開しうるものであり、機械要素のシール部門において学術的にも高く評価されうるものである。

よって、本論文は博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

総合試験結果の要旨

2009年9月8日

論文題目： 小型流体軸受における軸受端テーパシールからの油漏れに関する基礎研究

学位申請者： 菱田 典明

審査委員：

主査： 工学研究科 教授 松岡 敬

副査： 工学研究科 教授 平田 勝哉

副査： 工学研究科 教授 高岡 正憲

要 旨：

本論文提出者は、1970年3月立命館大学理工学部機械工学科を卒業後、神鋼電機株式会社に入社、その後、日本電産株式会社、Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.の勤務を経て、2002年よりスピンドルデバイス研究所を設立し、現在に至っている。2006年4月より同志社大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に社会人学生として入学し、現在も在学中である。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集C編に1編が掲載されており、また、International Journal of Surface Science and Engineering (Inderscience Publishers)に1編が受理され公表の予定である。

2009年8月19日午後3時より約2時間にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、いずれも十分な学力を有することが確認できた。なお、ドイツ語に関しては十分な能力を有すると認定されている。また、英語に関しては英語の資格試験に合格しており、さらに英語による論文発表、ならびに国際会議における研究発表も行っており、十分な語学力を有しているものと認められる。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目：小型流体軸受における軸受端テーパシールからの油漏れに
関する基礎研究

氏名：菱田典明

要旨：

近年の技術・産業の情報化を支えているコンピュータ，および周辺機器としてのハードディスクや光ディスク，レーザプリンタ等々については，情報の処理，表示，保存等の作業に対して，より高い質，量，速度および多様性が求められている。

これらの精密小型機器の機能を支配する基盤技術の1つは回転支持機構であり，高回転速度，高回転精度，静音性，高信頼性などが要求されている。回転支持機構としての軸受については，従来は転がり軸受が用いられていた。要求される諸特性を満たすために，転がり軸受では構成部品の精度を向上させることによって対応してきたが，金属部品が接触している構造上，精度の向上にも限界がある。そこで，近年，これに代わる軸受として流体軸受が採用されるようになった。

流体軸受は，軸（シャフト）と軸受（スリーブ）によって構成され，これらのすきまには流体（潤滑油）を満たし，両者の相対運動に伴う動圧効果によって負荷を支持する。流体軸受は固体接触箇所がなく，部品精度の影響が少ないので高回転精度，高速回転速度，その他の優れた特性を有する。

一方，流体軸受には流体の漏洩という課題を残している。流体が漏洩すると，装置の致命的な故障の原因となる。一般的な流体機器では漏洩を防止するためのシール，例えばメカニカルシールやオイルシールが使用されている。しかし，小型精密機器用流体軸受では固体接触部品の付加は許されず，従来のシールは使用できない。優秀な特性を導くための非接触構造が，逆に致命的な問題を引き起こすという潜在的な課題を持っている。

現在，流体軸受では，流体の漏洩を防止するためにテーパシールが広く使用されている。テーパシールはスリーブの端部を 20° 前後のテーパ形状とし，ここに流体の界面を位置させ，表面張力の作用によってシール作用を得るものである。このような構造の場合，流体は開放端より外部に通じており，何らかの限界以上の力が作用すると流体は漏洩する。

ところで，一般的な機械要素の場合，その特性を求めるための理論解析や設計手法はほぼ確立されており，工業的にも仕様や規格などが明確になっている。他方，テーパシールに関しては，基礎理論に関する論文や資料は見当たらない。

このような状況において，テーパシールを使用した流体軸受では，流体の漏洩による事故が継続して生じているのが実状である。テーパシールの特性や評価は，実機による評価程度であり，基礎理論にもとづく研究・調査は皆無といえる。また，設計手法については，技術参考書などにも記述されていない。

そこで，本論文では，精密小型流体軸受に使用されているテーパシールを対象とし，テーパシールのシール作用の基本メカニズムを明確にし，シール性能を評価するための基礎概念を確立することを研究の目的とする。具体的には，テーパシールのシール機能を理論的に評価するための指標値の提案とその解析，テーパシールからの流体漏洩現象に関する理論解析と実験的検討，流体漏洩限界回転速度の概念の提示，等である。本論文で得られ

たテーパシールのシール特性に関する研究成果は、テーパシールのみにとどまらず、精密小型機器全体の品質向上や、さらなる小型化・高性能化などの要素技術に繋がるものである。

本論文の構成は以下のものである。

第1章では、本研究の背景、目的、意義等と本論文の構成について述べている。

第2章では、第3章でのテーパシールの作動原理およびシール性能の指標値の解析、第4章での流体漏洩限界速度の解析に先立ち、両者で共通となる基礎理論について述べている。

解析は2つのステップから成っている。第1のステップはテーパシールすきま内の流れ場の解析であって、Navier-Stokes の式をもとに流れ場解析のための基礎方程式と境界条件を誘導し、SIMPLER [Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Revised] 法によってこれを解く際の離散化式および求解のアルゴリズムについて説明している。

第2のステップは流体界面形状の解析である。表面張力、界面曲率と界面を介しての圧力差の関係を規定する Laplace の式、および空間曲面の曲率を与える Frenet-Serret の式をもとに、シールすきま内の流体の界面形状を規定する基礎式を誘導するとともに、関連する境界条件を明確にし、第1のステップで得られた圧力分布を用いて流体界面形状を解析する手順について述べている。また、具体的な計算結果として、スリーブ回転速度を変化させた場合の界面直下での圧力分布と、これに対応する流体界面形状を例示している。

第3章では両端にテーパシールを有する軸受系を対象として、テーパシールのシール機能のメカニズムを明らかにした上で、シール機能を評価するための指標値について述べている。

テーパシールに繋がる軸受すきま部の流体に、何らかの外的要因によって流体を軸方向に駆動するような力が作用し、流体が移動したときの現象を「仮想ピストンモデル」を導入することによって量的な評価ができるようにしている。すなわち、軸受すきま部に仮想ピストンを配し、軸受すきま内の流体を軸方向に移動させる、言い換えれば仮想ピストンを変位させるときを考えれば、上下テーパシールすきま内ではそれぞれ界面の形状変化が生じ、その結果、表面張力による流体圧力差が生じ、これが仮想ピストンの変位に抗する力となる。このときの仮想ピストンに作用する推力がテーパシールの流体保持力と同義である。

このような概念によって、テーパシールのシール作用のメカニズムを説明するとともに、軸受すきま内流体の移動量に対する仮想ピストンに作用する推力の比をテーパシールのシール特性指標値とし、これによってシール性能を定量的に評価することを提案している。

具体的な計算例として、テーパシールのスリーブ壁面傾斜角度および液面高さをパラメータとし、スリーブ壁面への撥油剤被膜処理の有無、およびスリーブロータ静止・回転のそれぞれの組み合わせを考慮して、シール指標値の解析結果を示している。そして、解析結果より、撥油剤被膜処理がシール機能に対して有用な手法であることを定量的に示すとともに、撥油剤被膜処理がない場合は、シール指標値は、スリーブ壁面傾斜角が微小な状

態で極大となること等を述べている。

第4章では、スリーブ回転に伴う流体漏洩限界の理論解析について述べている。スリーブ回転速度の上昇に伴ってシール内の圧力分布が変化し、これに対応する界面形状や流体現象を解析することにより、漏洩を生じる誘引要因を分析している。そして、①スリーブ壁面において表面張力による流体保持が限界となった場合、②形成された界面の一箇所で局所的な流体保持が限界となった場合、③シールすきま内流体の減圧によって、流体に溶解していた気体が過飽和となりキャビテーションが生じた場合、の3つの漏洩誘引要因を導き、それぞれについて漏洩が生じる限界回転速度の解析の定式化を行っている。そしてこの中の少なくとも一つの漏洩誘引が現出する状態に至ることを判定基準とし、種々のシール仕様・諸元と2種類の作動流体を想定して、スリーブロータの流体漏洩限界回転速度の解析結果を示している。

第5章では、実験により、テーパシールからの流体漏洩現象の実際を確認するとともに、第4章で得られた理論解析を検証した結果について述べている。実験装置の製作にあたり、表面張力の作用を含む実験を行う装置設計のための、構造、大きさ、精度、測定機器などの必要条件および検討内容を説明し、できる限り、これらの諸条件を満たすように考案した実験装置について説明している。実験に際しての技術課題と、その対処方法について検討し、予備実験の結果を述べ、本実験の適用範囲を明確にしている。

実験内容は、スリーブロータの回転速度を変化させた場合の、超深度レーザ顕微鏡によるテーパシールすきま内流体の界面形状の測定、高速度カメラによる流体の漏洩が生じるスリーブロータの回転速度の測定ならびに流体漏洩の瞬間の観察である。これらの測定データと第4章で得た理論解析結果〔これを「上の漏洩限界回転速度」と呼んでいる〕を比較するとともに、スリーブ回転速度が大きくなった場合のシールすきま内流体の特徴的な流体現象の観察結果より、界面の不安定現象を簡略化して考慮し、それをもとに「下の漏洩限界回転速度」の概念を提示している。そして、特に作動流体を蒸留水とした場合は、漏洩が生じるスリーブ回転速度は、大略、「上の漏洩限界回転速度」と「下の漏洩限界回転速度」から推定できることを明らかにしている。

第6章では、本論文で得られた成果についてまとめている。

以上