

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	空気静圧スピンドルの熱解析と空気圧制御法の研究
Title(English)	Study on Thermal Analysis and Pneumatic Control Method of Aerostatic Spindle
著者(和文)	武石桐生
Author(English)	Hisami Takeisi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第256号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:肖鋒,青木 尊之,末包 哲也,大西 領,因幡 和晃,門永 雅史
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第256号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

## 論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第	号	学位申請者氏名	武石 桐生	
論文審査 審査員		氏名	職名	氏名	職名
	主査	肖 鋒	教授	因幡 和晃	教授
	審査員	青木 尊之	教授	門永 雅史	特任教授
		末包 哲也	教授		
	大西 領	教授			

### 論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「空気静圧スピンドルの熱解析と空気圧制御法の研究」と題し、5章で構成されている。

第1章「序論」では、研究の背景を概説し、飛躍的に進化している精密加工技術における微細加工分野では、高精度・高速回転スピンドルが不可欠な要素となっていることを述べている。従来のスピンドルには転がり軸受が広く使用されてきたが、高速回転時には摩耗が加工品質の維持やスピンドルの寿命に直接的な影響を与え、問題となっていることを指摘している。空気静圧軸受は固体の転動体の代わりに圧縮空気を利用する軸受であり、固体間が非接触であるため摩擦劣化が極めて少なく、長時間の連続加工や高精度加工において非常に有効であると述べている。一方で、高速回転時にはせん断流による発熱を考慮した設計が必要になることや、主軸位置を高精度に制御することが難しいという問題点を指摘している。そこで、軸受内のせん断発熱および主軸位置精度に注目した数値解析を行うことにより、問題の解決を図ることが本研究の目的であると述べている。

第2章「解析手法」では、本研究で用いた解析手法を述べている。空気静圧軸受内の流動とせん断発熱量および温度分布を解析するため、数値流体解析のオープンソース・ソフトウェアである「OpenFOAM」を用い、圧縮性流体におけるせん断発熱を計算するための改良について述べている。さらに、軸受内の圧力分布を求めめるために圧縮性のレイノルズ方程式を導出し、摂動法を用いて線形化することで、空気静圧軸受の剛性係数および減衰係数を求める方法を提案している。

第3章「空気静圧軸受のせん断発熱解析」では、高速回転するスピンドルの熱流体解析について述べている。空気静圧軸受の設計における熱解析に対して、計算コストの低い1次元解析モデルと計算コストの高い3次元解析モデルのどちらを選択するかを基準がこれまで明確ではなかった。本研究では軸受内流れの3次元性を評価する無次元数H(軸方向流速と主軸周速の比)を提案し、様々なHについてせん断発熱解析に1次元解析モデルが適用できる範囲を調べ、Hの値が0.6以下の値であれば1次元解析でも十分な精度が得られるが、それを超える場合には3次元解析が必要になることを明らかにしている。これにより、高速回転時の空気静圧軸受の設計効率の向上に大きく寄与すると述べている。

第4章「空気静圧スピンドルの位置制御」では、空気静圧スピンドルの高速化に伴いジャイロ効果およびくさび効果による振動を補償する位置制御が必要であることを述べている。その補償を実現するためのノズルフラップと空気圧パイロット弁を用いた新たな空気圧制御回路を提案している。まず、提案する空気圧制御回路を用いた空気静圧スピンドルの数値モデルを開発し、提案する回路を用いた制御手法がジャイロ効果の補償に有効で、より高精度な主軸の位置制御を達成できることを確認している。次に、上記数値モデルを改良し、くさび効果や空気圧制御回路の応答遅れを考慮できる数値モデルを作成している。実験との比較を行うことで改良モデルの精度を確認したうえで、それを用いて主軸位置がより高精度であるように解析を行っている。その結果、提案制御手法を用いることでジャイロ効果およびくさび効果を補償可能であり、主軸の位置精度を向上できることを確認している。

第5章「結論」では、本論文の成果および今後の課題をまとめている。

以上を要するに、本論文は空気静圧スピンドルの熱解析および空気圧を用いたスピンドルの位置制御に関する数値解析を行うことで高精度・高速スピンドルの設計に寄与するものであり、工学上および工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)論文として十分な価値を有すると認められる。