

京都大学	博士 (工学)	氏名	山 崎 拓
論文題目	高速・高剛性主軸の開発とその剛性評価法に関する研究		
(論文内容の要旨) 工作機械の主軸は切削性能を支配する機械ユニットであり、その研究開発は長い歴史を持っているが、主軸の高速・高剛性化については現在においても重要な課題である。本論文は、粗加工に必要な高剛性と仕上加工に必要な高速性を兼ね備えた工作機械主軸の開発および回転中の主軸剛性の評価法に関して行った研究を体系的にまとめたものであり、全7章からなる。 第1章は緒論であり、複雑形状を持つ難削加工部品の加工における工作機械主軸への要求項目をまとめるとともに、モータ、軸受潤滑、軸受予圧技術の観点から主軸の高速・高剛性化の動向を概観し、本論文で開発する主軸の性能目標（最高回転数、dN 値、加減速時間、コンパクト化）について述べている。また、生産性の観点と加工機の知能化の観点から回転中の主軸の剛性の評価が重要であることを指摘し、その測定法の必要性について述べている。 第2章では、最高回転数 50000/分、dN 値 300 万の目標性能を達成するための高効率モータ、軸受予圧方式、軸受潤滑方式の開発方法と評価結果について報告している。モータについては、磁気回路設計によりロータサイズを小さくしながら、ロータ内径を大きくして、モータの低慣性化と主軸の高剛性化を両立した。また、ロータのコアの薄板化を行って鉄損を抑制し、モータの効率を向上して高速化を可能にした。さらに、オイルエア潤滑を発展させた極微量直噴潤滑により、転動体と軌道の接触面へ潤滑油を到達させて軸受温度上昇を抑制し、回転数に応じた予圧制御により軸受焼き付き防止と剛性のバランスを図った。以上の技術を基礎評価実験で検証した後主軸を試作して加減速実験と加工実験を行い、目標の仕様を満足できることを示している。 第3章では、主軸剛性の評価に関する過去の研究・開発においては接触方式と非接触方式による負荷方法があり、接触方式では主軸回転数の制約、非接触方式では負荷量の制約があることを指摘し、これらの問題を解決する非接触式荷重発生装置を提案している。具体的には、主軸に装着した疑似工具を大型の電磁コイルで発生させた磁気力で吸引する荷重発生装置を開発し、疑似工具と電磁コイルの吸引面のエアギャップと主軸回転数を変化させてコイル電流と吸引力の関係を調査し、負荷実験に有効なエアギャップを決定している。また、回転数の増加に伴う吸引力の低下および疑似工具の温度上昇が生じることを明らかにしている。 第4章では、第3章で述べた吸引力の低下や疑似工具の温度上昇の原因として渦電流の発生の可能性を指摘し、これを FEM (Finite Element Method) による 3 次元電磁場解析により検証している。従来、渦電流抑制法として、磁束回路を構成する磁性体の積層化が用いられるが、回転しながら高負荷が作用する疑似工具に応用すると破損の危険がある。この問題を解決するために、渦電流が表皮に集中することを利用して、疑似工具表面に溝パターンを施す方法を考案し、電磁場解析によって、溝寸法の詳細設計を行い、実際に工具を製作して実験でその効果（吸引力の回復）を確認している。			

第 5 章では、第 3 章で開発した荷重発生装置と第 4 章で設計した疑似工具を用いた定位置予圧方式主軸の非接触剛性測定結果について述べている。主軸回転数と負荷位置を変化させた実験を行って、それぞれの負荷－変位特性を測定し、主軸回転数と負荷量が主軸剛性に与える影響を明らかにした。また、この結果を主軸系の力学モデルを用いたシミュレーション結果と比較することで、負荷増加に伴う剛性低下が予圧抜けによるものであることを示した。さらに、主軸端とホルダ端の両方で剛性の測定を行って両者を比較し、回転数変化やモーメント荷重にともなう主軸－ホルダ端の接触状態変化の可能性があることを示した。同様の測定法を用いて、主軸を連続運転して主軸温度を増加させた場合の主軸端およびホルダ端での主軸剛性の評価を行い、温度上昇による剛性の変化を定量化した。

第 6 章は、第 2 章で述べた開発主軸に対して、前章までに述べた剛性測定法を応用し、負荷電流-変位を評価した結果についてまとめている。予圧切替に伴う半径方向の剛性変化を測定データから計算し、力学シミュレーションを用いた計算結果と比較している。この結果、シミュレーション計算で予想した結果と測定結果がほぼ一致し、開発した主軸の剛性設計が有効に行えたことを示した。

第 7 章は本論文の結論であり、得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、粗加工に必要な高剛性と仕上加工に必要な高速性を兼ね備えた工作機械主軸の開発および回転中の主軸剛性の評価法に関して行った研究を体系的にまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 最高回転数 50000/分、dN 値 300 万の高速・高剛性主軸の開発目標を達成するために、モーターロータの低慣性化設計および積層鋼板の薄板化による鉄損抑制設計、極微量直噴潤滑による軸受温度上昇の抑制法、回転数に応じた予圧変更により軸受焼き付きを防止して低速域での剛性を確保する設計法を考案し、これらの方法を用いて開発したモータと軸受を単体実験で評価した後、主軸を試作して運転実験と加工実験を行い、提案した設計が有効であることを示した。
- (2) 主軸剛性の評価のために、主軸に装着した疑似工具を電磁コイルの磁気力で吸引する荷重発生装置を開発し、疑似工具と電磁コイルの吸引面のエアギャップや主軸回転数を変化させてコイル電流と吸引力の関係を調査して、磁気特性を明らかにした。
- (3) 回転中の疑似工具を電磁コイルで吸引する時に発生する渦電流を FEM (Finite Element Method) により 3 次元電磁場解析し、その分布を明らかにした。また、渦電流抑制のために疑似工具表面に溝パターンを施す方法を考案し、電磁場解析によって、その詳細設計を行い、実際に工具を製作して実験でその効果（吸引力の回復）を示した。
- (4) 開発した荷重発生装置と疑似工具を用いて定位置予圧方式主軸の非接触剛性測定を行い、主軸系の力学モデルを用いたシミュレーション結果と比較することで、負荷増加に伴う剛性低下が予圧抜けによるものであることを示した。また、主軸端とホルダ端の測定結果の比較を行い、回転数変化、モーメント荷重、主軸温度にともなう主軸－ホルダ端の接触状態変化があることを示した。
- (5) 開発した主軸に対して、提案した剛性測定法を用いて、予圧切替に伴う半径方向の剛性変化を測定データから計算し、力学シミュレーションを用いた計算結果と比較し、両者がほぼ等しくなるという結果を示し、主軸の剛性設計が有効に行えたことを明らかにした。

以上のように本論文は、最高性能を持つ工作機械主軸の構成要素の開発方法と評価方法、新規性のある主軸剛性測定法の開発と実際の主軸に応用した場合の評価結果について述べており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平 23 年 8 月 19 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。