

## 加工状態監視機能を有する超高速 マイクロエアタービンスピンドルの開発

研究報告者 村上 洋

### プロフィール



最終学歴 平成20年3月  
九州大学大学院工学府  
知能機械システム専攻博士後期課程 修了

専門分野 加工計測

学 位 博士(工学)

所属団体 北九州市立大学  
国際環境工学部 機械システム工学科

役 職 名 准教授

### 今後の抱負

エアタービンスピンドルとマイクロフォン、圧力センサ、AEセンサ等の各種センサを組み合わせることで、微小径ドリル加工の際の切り屑詰まりや折損、工具摩耗、ベアリングの異常などをリアルタイムに検出することが可能な空気静圧軸受エアタービンスピンドルを設計・製作し、センシング手法の各種性能試験を実施しました。今後は、実用化に向けた信号処理技術（外部ノイズの分離、摩耗・切削液・切りくず付着等に関する信号分離）や制御技術の開発に取り組み、リアルタイムに工具摩耗等の異常を検出できるシステムの開発を進めていきたいと考えています。

## 1. はじめに

近年の精密微細加工技術の進歩に伴い、自動車燃料噴射ノズル穴等直径が0.1 mm以下の微小径穴加工の重要性は増加している。微小径穴の加工方法としてドリル加工が多く用いられるが、微小径ドリルの場合、工具径が小さいため剛性が低く折損しやすいという問題がある。ドリルが折損すると、破損したドリルが工作物の穴に詰まり、その結果工作物が使用できなくなる恐れがある。また、詰まったドリルを除去するのに多大な時間を要して加工の歩留まり低下を生じ、大きな問題となる。

ドリルの折損検出法として様々な方法が提案されているが、直径が0.1 mm以下の微小径ドリルの折損や工具摩耗には対応できず、実用化には至っていないのが現状である。そこで本研究では、エアータービンスピンドルとマイクロフォン、圧力センサ、AEセンサ等の各種センサを組み合わせることで、微小径ドリル加工の際の切り屑詰まりや折損、工具摩耗、ベアリングの異常などをリアルタイムに検出することが可能な空気静圧軸受エアータービンスピンドルの開発を目的とする。

## 2. スピンドルの構造

図1にスピンドルの外観および断面図を示す。図1に示すタービン給気孔より圧縮空気を供給し、中央のタービンを回転させる。主軸内部にはAEセンサを内蔵しており、AEセンサの信号は非接触で上部のセンサ信号受信部に送信することで加工の際スピンドル側に発生するAE信号を検知する。また、タービン排気口付近にマイクロフォン、タービン内部圧力を測定する圧力センサを設置している。

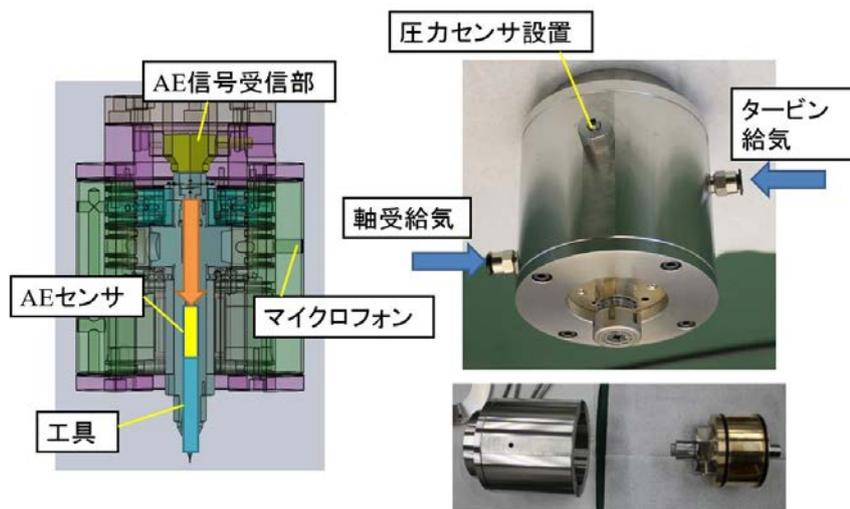


図1 スピンドルの構造

本研究で開発中のスピンドルはエアタービン駆動であるため、加工の際にトルクが生じるとスピンドル回転数が低下する。したがって、スピンドル回転数を監視することで小径ドリルの折損や工具摩耗の際のトルク変動を検出することが可能となる。本研究では、回転数の検出にマイクロフォンを用いる。マイクロフォンには、20～16000 Hzの周波数帯域で平坦な感度特性を持つ無指向性のコンデンサマイクロフォンを使用した。図1に示すようにマイクロフォンをエアタービンスピンドルの空気排出口付近に設置し、空気排出の際に生じる音を記録する。この音にはスピンドルの回転数とタービンの羽根の数の積の周波数成分が含まれている。そこで、記録信号をFFT解析し、最大振幅の周波数を求め、タービンの羽根の数でこの周波数を割ることで、回転数を算出することが可能となる。また、図1に示すようにスピンドルにはマイクロフォンの他にタービン羽根部の圧力を測定するために圧力センサを設置している。AEセンサ、圧力センサの信号は、回転数の計測以外に、タービン主軸固有振動数付近の周波数や圧力の変動を常時監視することで工具の摩耗や折損に伴う様々な異常検知に用いることを想定している。マイクロフォン、AEセンサおよび圧力センサからの信号は、アンプ・A/D変換ボードを介してパソコンに入力する。

前記手法によりエアタービンスピンドル回転数変動を検出可能であることを確認するための基礎実験を実施した。マイクロフォンとの比較測定のため、主軸近傍に光電センサを設置し、スピンドルの回転数を測定した。図2にマイクロフォン記録信号のFFT結果および回転数の算出結果を示す。最初に、マイクロフォンの記録信号をFFT解析し、最大振幅の周波数を求める。この周波数を羽の数で割ることでスピンドル回転数を算出した。算出結果は光電センサによる実測値(11682rpm)とよく一致していることを確認した。周波数間隔を狭めることで誤差の低減は可能である。また、図3に示すように、スピンドル主軸へ微小トルク (0.1 N・cm) (小径ドリルの摩耗や折損に伴うトルク変化に相当) を付加した際の回転数変動も検出可能であることも基礎実験により確認した。

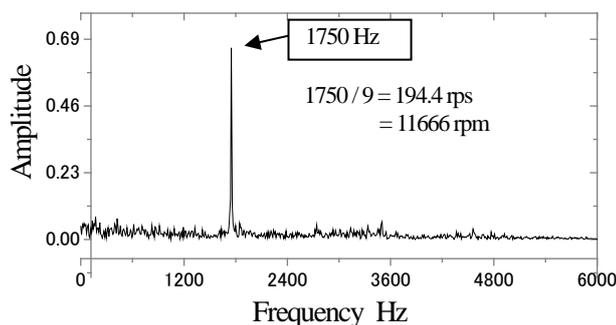


図2 マイクロフォン記録信号のFFT結果および回転数の算出結果

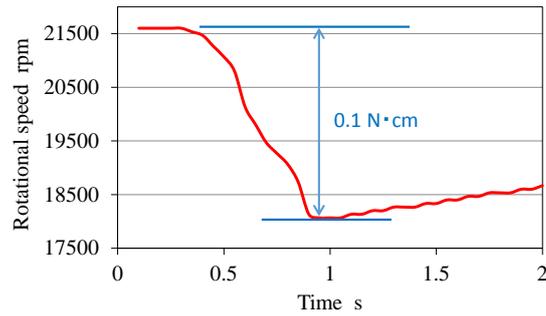


図3 スピンドル主軸へ微小トルクを付加した際の回転数変動

### 3. スピンドルの剛性

空気静圧軸受の場合、軸受の隙間や供給される圧力などにより剛性や負荷容量が決まる。図4および図5にラジアル方向およびスラスト方向の剛性を示す。図中の記号dは軸受部ノズルの直径を示す。今回は直径0.3 mmで製作した。また、軸受隙間は10  $\mu\text{m}$ であることから、理論的な剛性はラジアル方向が約5 N/ $\mu\text{m}$ 、スラスト方向が約120 N/ $\mu\text{m}$ 、となる。

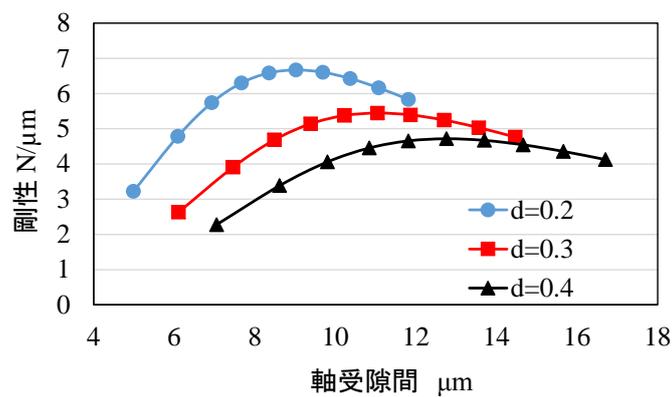


図4 ラジアル方向の剛性

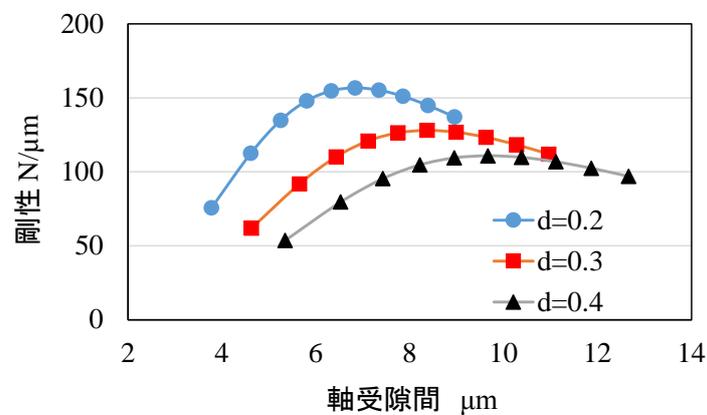


図5 スラスト方向の剛性

#### 4. AEセンサの校正

AEセンサの感度校正はスピンドルに設置したシャープペン芯を折損させることで実施する。図6右に折損した瞬間のAE信号の変化を示す。

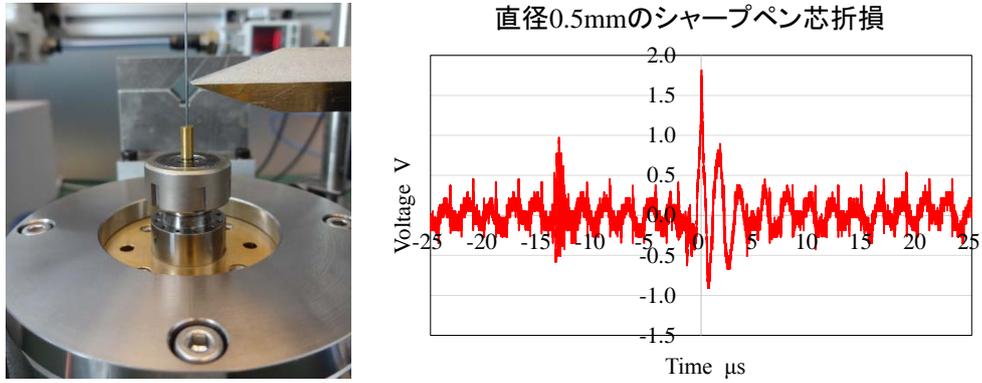


図6 AEセンサの校正

#### 5. 小径ドリル折損実験

AEセンサを用いて実際に小径ドリル（直径200μm）の折損が検出可能であるか実験を行った。図7に折損時のAEセンサの出力を示す。折損時に大きく出力が変動しており、折損を検出できているのが確認できる。

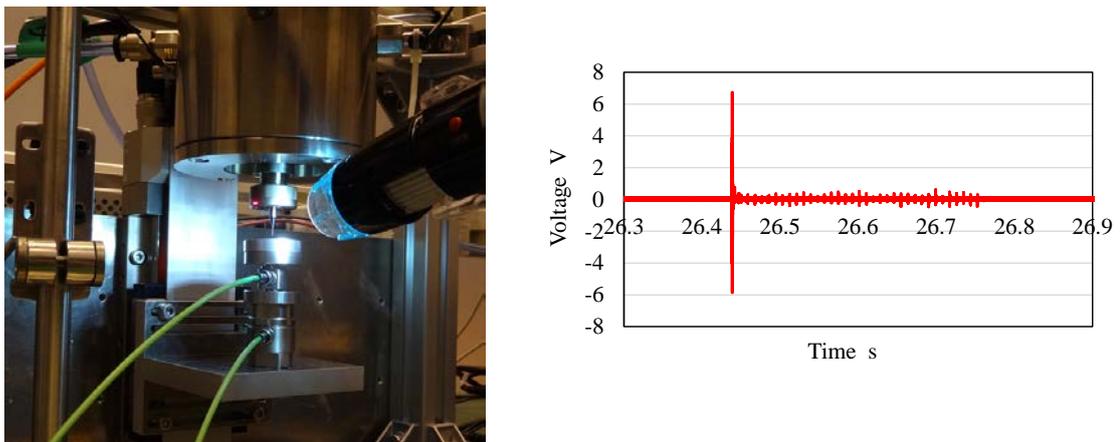


図7 折損時のAEセンサ出力の変動

## 6. まとめ

本研究では、マイクロフォン、圧力センサ、AEセンサ等の各種センサを内蔵したエアータービンスピンドルを設計および製作した。また、マイクロフォンの信号をFFT解析することでドリル摩耗・折損に伴うトルクの微小変化を検出可能であること、AEセンサを用いることで微小径ドリルの折損を検出可能であることを確認した。現状はセンシング手法は確立できたので、今後は信号処理技術（外部ノイズの分離、摩耗・切削液・切りくず付着等に関する信号分離）や摩耗・折損に伴うタービン内部の圧力変動の理論解析および検証実験などを実施する予定である。信号処理技術確立後は制御技術を検討し、リアルタイムに工具摩耗等の異常を検出できるシステムを構築した。期待される研究・開発の成果として、本スピンドルが実用化されることで以下の成果が期待できる。

- ①工具が折損する前に工具交換することが可能…工具が折損してしまうと、折損した工具を工作物から除去するのに多大な労力と時間を要する。折損した工具を除去できない場合はその工作物は廃棄となる。また、穴加工の場合、数100～数1000の穴を長時間かけて加工することも多いが、加工後に工具折損に気づくとそれまでに加工時間が無駄となり多大な損失となってしまう。
- ②工具の省コスト化が可能…現状は安全をみて、ある一定数の穴を加工すると工具を交換しているが、工具が摩耗した適切な時期に交換できるようになることで、工具コストが低減可能となる。
- ③加工時間の短縮が可能…切り屑詰まりが発生した場合のみ工具を穴入口部付近まで戻すステップ加工することで加工時間の短縮が可能となる。
- ④加工の高精度化が可能

## 7. 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団による研究助成により実施されたことを記し、謝意を表す。