

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420099

研究課題名(和文) 40万回転を超える微細精密加工用空気静圧スピンドルの開発

研究課題名(英文) Development of an aerostatic spindle with more than 40 million rpm for ultraprecision machine tools

研究代表者

吉本 成香 (Yoshimoto, Shigeka)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：80096718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：情報、医療製品用超小型部品の金型加工には、精度とともに、加工コスト、加工時間の低減が求められている。この要求を満たすためには、研削加工に代わり、小径エンドミルを用いて金型加工を行うことが有効であるが、最適な刃先周速を得るには、数十万rpmの超高速回転スピンドルの実現が必要となる。本研究では、40万rpm以上の超高速回転を実現できる空気静圧スピンドル構造を提案し、各種切削条件に対する加工精度を実験的に測定し、提案した超高速回転スピンドルの有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Recently, high-speed micro-milling has attracted considerable attention for effectively manufacturing fine and precise machine components with lower cutting resistance. However, as the tool diameter is reduced, higher rotational speeds of the spindle become necessary for machining components at the optimal cutting speed. We propose a new machining method in which an end mill cutter is directly supported by aerostatic journal and thrust bearings, and driven by air turbines to achieve high rotational speeds. We found that the proposed micro end mill spindle with a 4 mm shank could rotate at 40,000 min⁻¹ and cut grooves with depths of 30 μm to 40 μm on an aluminum alloy surface.

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：高速ミーリング マイクロエンドミル 空気静圧軸受 スピンドル

1. 研究開始当初の背景

近年、情報端末機器や医療機器、家電製品などに用いられる機械部品においては、小型化や高機能化への要求に加え、部品加工効率の向上による生産コスト削減の要望が強くなってきている。このような小型高機能機械部品を低コストで量産するための手法の一つとして、精密金型を用いた生産方法がある。このような金型では、微細かつ高い形状精度が必要とされる上、前述のように生産コストを抑える必要もある。小型高精度金型の製作には、一般的には、切削による荒加工後、研削加工やラップ加工により仕上げ加工を行う方法がとられてきた。しかし仕上げ加工に使用される研削加工やラップ加工は、加工能率の点で問題があり、より能率的な加工法の開発が必要となっていた。微小径エンドミルを用いた微細・精密切削加工は、微小径エンドミルを数十万 rpm という高速で回転させ、エンドミルの送り方向と直角方向の送り間隔および切り込み量を変化させることで、荒加工から仕上げ加工まで、同一のエンドミルを用いて能率的に加工できる手法であり、近年、注目されている。小径エンドミルを用いた加工法では、エンドミルの回転数を高めるにしたがい、同じテーブルの送り速度であれば、一歯が一回転あたりに除去する切りくずは少なくなってくる。したがってエンドミル回転数に応じてテーブルの送り速度を速くすることで、切削能率を高めることができる。また通常、切り込みを浅くし、1刃当たりの切りくず量を小さくすることで工具や軸受に加わる負荷を小さく抑えることができる。

このような加工法において、小径軸の駆動方法および高速回転している小径軸にエンドミルを把持する方法の確立は非常に重要である。現在、高速回転軸におけるエンドミルの把持方法は、コレットチャック自体をスピンドルとして回転させ、それを直接流体潤滑軸受によって支持する方法が主流である。このためスピンドル径がφ10mm前後と必然的に大きくなってしまふことから、20万rpm以上の高速回転を実現するためには、かなりの困難を伴うのが現状である。よって刃直径が1mm以下のエンドミル加工において最適な切削速度に到達しているとは言い難い状況にあり、20万rpmを超える高速回転が小径エンドミル加工では必要とされている。

2. 研究の目的

本研究においては、1mm以下の微小径エンドミルカッタにおいて、最適な歯先切削速度を実現するために、直径4mmのエンドミルシャンクを回転主軸として、静圧空気軸受により直接支持する方法を提案した。把持方法として、従来のようにコレットチャックを用いる方法をとらないため、必然的にスピンドル直径が小さくなり、高速回転を実現することが可能となる。そこで本研究では、以下

の各項目を研究目的とした。

(1) エンドミルシャンクを回転スピンドルとし、40万rpm以上の回転数を目標とした構造の空気静圧スピンドルを試作し、回転可能速度を確認すること。

(2) 小径スピンドルにおいてスピンドルの回転振れを抑制するための不つりあい除去手順を確立すること。

(3) 試作した空気静圧スピンドルを用いて、テーブル送り速度、回転数、エンドミルの削れ角などを変化させ加工実験を行うことにより、40万rpm以上の超高速回転スピンドルによるマイクロミリングに最適な加工方法および条件について検討し、提案するスピンドルの有用性を確認すること。

3. 研究の方法

(1) 空気静圧スピンドルの製作

図1に空気静圧軸受で直接指示する小径エンドミルカッタと回転させるためのタービンバケットを持つ円形部品を示す。また図2には、提案するスピンドル構造の概略図を示す。本研究においては40万rpmを超える高速回転を実現するために、シャンク直径4mmの超硬ボールエンドミルのシャンク部分を、計7個の空気静圧ジャーナル軸受で直接支持する構造とする。回転軸のスラスト方向についてはエアタービンの上下面を空気静圧スラスト軸受によって支持する。また、エンドミルシャンクを圧入したエアタービンの円周面上に設けたタービンバケットにタービンノズルからの噴流を衝突させることでエンドミルを駆動する。

図3に、エンドミルシャンクを支持する空気静圧軸受の構造概略図を示す。ジャーナル・スラスト共に軸受は円周方向に等間隔に給気孔を配置し、ジャーナル軸受については、給気孔出口部に10μmの浅い円周溝を設けた複合絞り型軸受である。浅い円周溝により給気孔間の圧力低下を防ぐことで負荷容量・剛性を向上させている。表1に軸受の主要寸法を示す。なお、回転軸は7個の空気静圧ジャーナル軸受によりラジアル方向を支持されているが、一次共振時にエンドミルシャンクと空気静圧ジャーナル軸受との接触を防ぐために後側①の軸受すきまは大きく、加工時のエンドミル先端の振れを低減するために前側⑦の軸受すきまは小さくしている。



Fig.1 A micro end-mill cutter and air turbine buckets

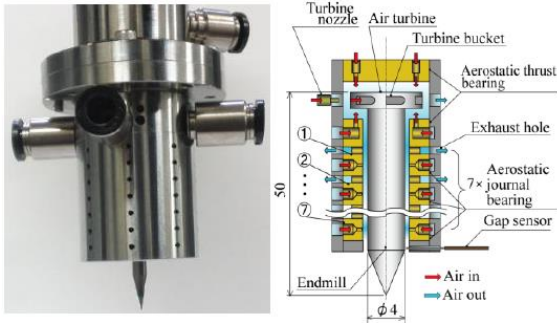


Fig. 2 Proposed spindles using a micro end-mill

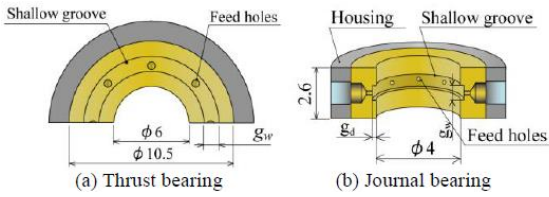


Fig. 3 Geometrical configuration of an aerostatic bearing for a micro milling spindle

(2) 実験方法および実験条件

切削実験に用いるボールエンドミルは先端半径 0.2mm の多種材加工用の MSBH230 と先端半径 0.3mm のアルミ加工用の ALB225 の 2 種類(シャンク径 4mm, 2 枚刃 超硬合金製, NSTOOL CO. LTD.)を用いた. また, エアタービン部の不つりあい量を除去することにより 40 万 rpm における軸振幅を $\pm 2\mu\text{m}$ 以下とした.

実際の切削加工に際しては、図 4 に示すように、被削材を一軸の空気静圧案内テーブル上に固定するとともに、スピンドルを移動テーブルに対する角度（倒れ角）および距離を調節できる移動テーブル上に固定した。スピンドルの倒れ角の設定、被削材との平行度の確認を行った後、目標回転数までスピンドルを回転、ゼロ点合わせをし切り込み深さを設定した。最後に送り速度を設定し、 x 軸（送り方向）に自動送りすることにより切削を行った。

図 5 に加工方法の概略図を示す。図のように送り方向に x 軸をとったときの y 軸回りの角度をピッチ角 α 、 z 軸回りの角度をヨー角 β としてエンドミル倒れ角を設定する。ヨー角 β を 90 度とし、 x 軸の正方向にテーブルを送るとアップカットに、負方向に送るとダウンカットとなる。被削材アルミニウム(A2017)および送り速度 100 mm/min, 切り込み深さ 5 μm , ピッチ角 $\alpha=30\text{ deg}$ を条件として固定し、エンドミルの種類, 回転数, ヨー角 β を変えて実験を行い、加工面粗さが最小となる最適な加工方法を検討した。なお、ピッチ角 $\alpha=30$ 度とするのは、ボールエンドミル頂点（刃先周速がゼロとなる点）での加工を避け

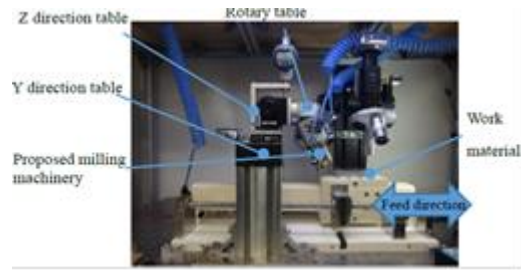


Fig. 4 Experimental apparatus using an aerostatic guideway for cutting a workpiece

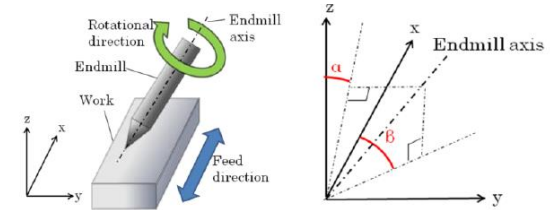


Fig. 5 Tilt angles of a micro end-mill cutter to the feed direction

るためである。また加工溝の形状測定にはレーザ顕微鏡を用いるが、粗さを測定する際には、加工溝底部の長さ 200 μm 程度に対して測定を行った。

4. 研究成果

(1) 小径スピンドルにおける不釣合い除去手順の確立

製作した小径スピンドルでの不つり合い測定実験の実験結果を示す。本実験は、スラスト給気圧, ジャーナル給気圧 0.6 MPa の条件でタービンノズル給気圧力を上昇させていくことで回転数を上昇させていく。40 万 rpm(6666Hz)まで回転させ測定し、動釣り合い測定装置により不釣合い位置と不釣合い量を測定した。その後、直径 $\phi 0.5\text{mm}$ のドリルを用いてエンドミルシャンクに圧入したアルミニウム製バケットを削り動つり合いを取った。不釣合い量除去加工に際しては、ドリル穴深さを除去量から算出し、0.01 mm の深さ精度で穴加工を行うことにより、精度の高い不釣合い除去を行える加工手順を確立した。

図 6 に不つり合い除去前後のエンドミル先端部の振れ回りをそれぞれ示す。図から明らかなように、不釣合い量除去を行う前には ± 5

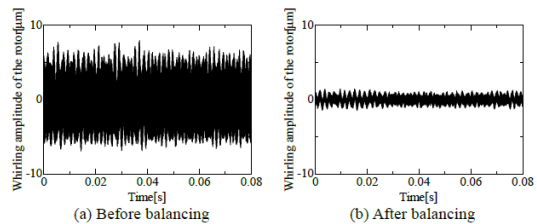


Fig. 6 Whirling amplitude of the rotor before and after balancing

μm 以上あった振れまわりが、 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以下に改善されていることが分かる。

(2) 製作した高速回転スピンドルを用いた加工実験と加工表面粗さの測定
加工実験に際しては、加工中の軸変位および加工溝の粗さ、断面形状の測定を行った。

① 被削材が黄銅の場合

主回転数を 42 万 rpm とし、設定切込み深さ： $5 \mu\text{m}$ ，加工法 1 ピッチ角度 $\alpha : 30 \text{ deg}$ ，ヨー角度 $\beta : 0 \text{ deg}$ などの加工条件を固定し。送り速度 200 mm/min, 1000 mm/min, 5000 mm/min として送り速度を変化させ、加工粗さへの影響を調べた。図 7 に Ra：算術平均粗さと Rz：最大高さとの関係を示した。図 8～図 11 に、送り速度 5000 mm/min における加工溝の写真，溝底部送り方向プロファイル、切削中の軸変位とその振動スペクトルを示した。

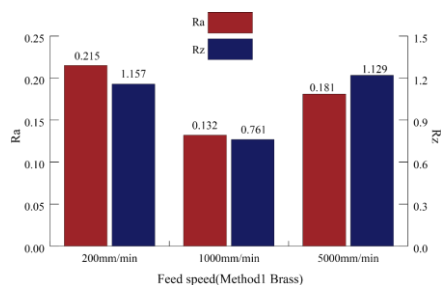


Fig. 7 Relationship between feed speed and surface roughness



Fig. 8 Machined groove (1000mm/min)

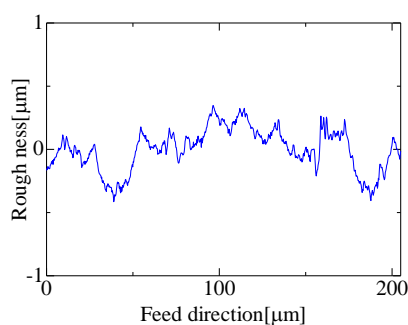


Fig. 9 Roughness of feed direction (1000 mm/min)

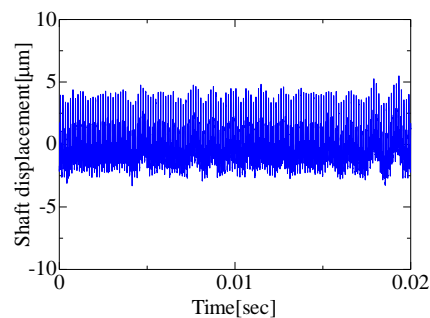


Fig. 10 Displacement of the shaft during cutting (1000mm/min)

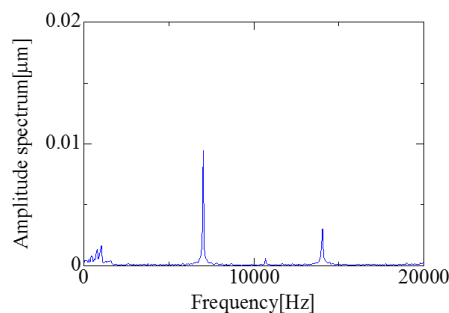


Fig. 11 Frequency spectrum during cutting (1000mm/min)

② 加工法の影響

本研究で用いるエンドミルスピンドルでのマイクロミーリング加工を行う際の加工方法による検討を行うため以下の条件で溝加工を行う。

主回転数 42 万 rpm，設定切込み深さ： $5 \mu\text{m}$ ，送り速度：1000mm/min を一定とし，加工方法と加工粗さの関係を図 12 示す。加工方法 1 は、送り方向にスピンドルを 30 度傾けた場合、加工方法 2 は、送り方向に直角な方向にスピンドルを 30 度傾け、Up cut とした場合と Down cut とした場合である。溝底部の表面粗さは、加工法 2 で Up cut を行った場合が、最も良好な値となった。

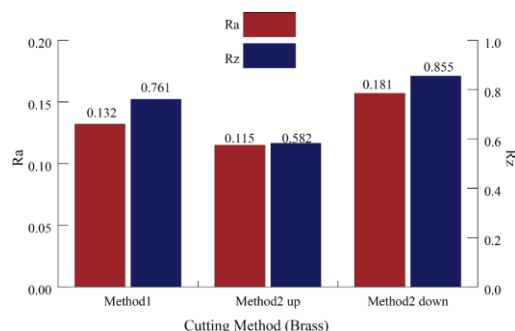


Fig. 12 Relationship between feed speed and roughness (1000mm/min)

③ 被削材をアルミニウムとした場合

図 13 に Ra : 算術平均粗さと Rz : 最大高さ
と送り速度との関係を示した. 図 14~図 17
に、送り速度 5000 mm/min における加工溝の
写真, 溝底部送り方向プロファイル, 切削中
の軸変位とその振動スペクトルを示した.

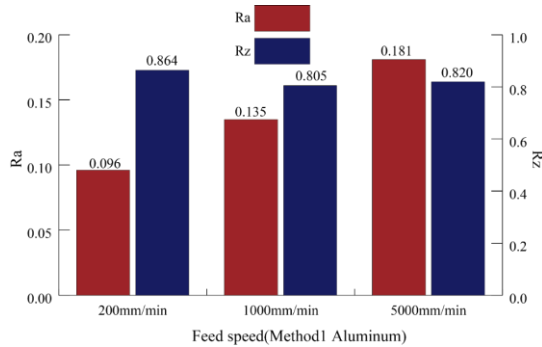


Fig. 13 Relationship between feed speed and roughness

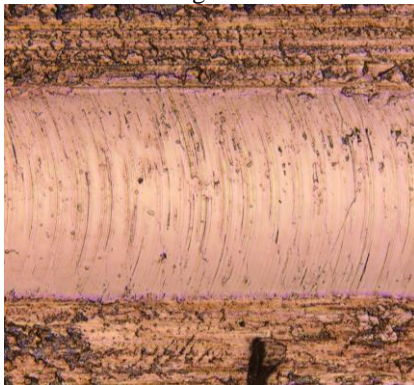


Fig. 14 Machined groove (5000mm/min)

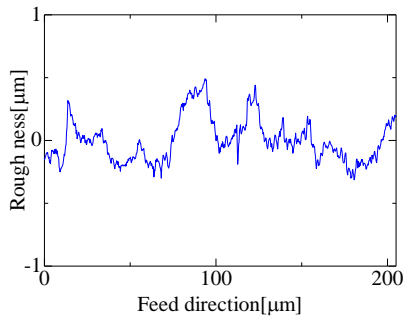


Fig. 15 Roughness of feed direction (1000mm/min)

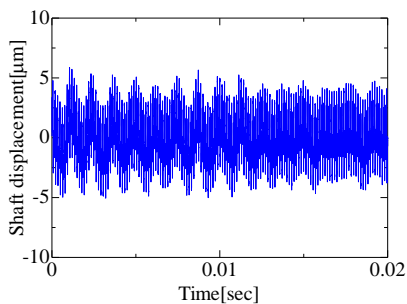


Fig. 16 Displacement of the shaft during cutting (5000mm/min)

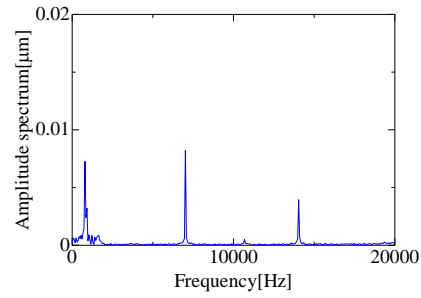


Fig. 17 Frequency spectrum during cutting (5000mm/min)

④ 加工方法の影響

加工方法と加工粗さの関係を図 18 示す.
被削材が黄銅の場合と同様, 加工法 2 Up
cut での加工が, 最も良い表面荒を示した.

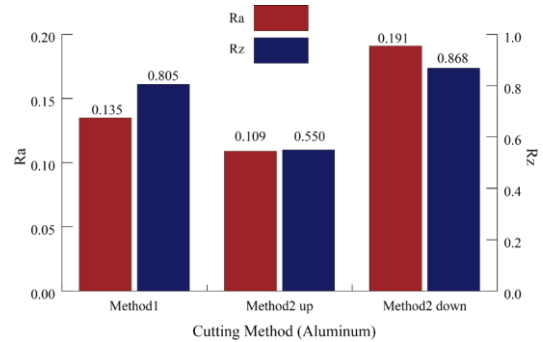


Fig. 18 Relationship between feed speed and roughness (1000mm/min)

⑤ 空気静圧案内の効果

今回, 空気静圧案内を用いることにより送
りによる外部振動の低減効果を, 市販の転が
り案内を用いた加工実験の結果と比較する
ことで確認した. 図 19 に、これらの案内を
用いて加工を行った際の溝底部の表面粗さ
を比較して示した. 図から明らかなように,
空気静圧案内を用いることで表面粗さを転
がり案内の 1/4 以下まで低減できることが確
認された.

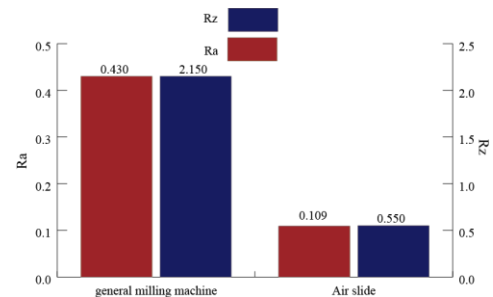


Fig. 19 Comparison roughness of general milling machine and Air slide (Up-cut 1000mm/min)

⑥ まとめ

本研究では, ボールエンドミルシャック部
を直接静圧空気軸受で支持する構造のスピ
ンドルを用いて加工を行い, その有用性の確
認を行った. 結果として、以下に示すような

成果が得られた。

1. 小径のエンドミルシャンクを、直接、空気静圧ジャーナル軸受で支持する構造とすることで、42万 rpm で回転可能なスピンドルを実現することができた。

2. 小径のボールエンドミルを用いて、黄銅およびアルミニウムの溝加工を行った結果、製作したスピンドルによって直線的な溝加工が行えることがわかった。また直線的に加工した溝の端部には、バリなどは見られず、良好な切削状態であることが実験的に確認できた。

3. 加工した溝の表面粗さを低減するためには、スピンドルを送り方向と直角な方向に30度傾け、Up cut を行うことが有効であることが実験的に確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 0 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉本成香 (YOSHIMOTO Shigeka)

東京理科大学工学部第一部機械工学科・教授

研究者番号：80096718