

エンドミル直接支持型超高速静圧空気軸受スピンドルに関する研究

Study on End Mill Directly Supported Type Ultra-High Speed Aerostatic Bearing Spindle

東理大・工（学）*佐々木 峻 東理大・工（非）佐々木 大樹 関西大・理工（正）川田 将平

東理大（正）宮武 正明 東理大（正）吉本 茂香

Ryo Sasaki*, Hiroki Sasaki*, Shouhei Kawada**, Masaaki Miyatake*, Shigeka Yoshimoto*

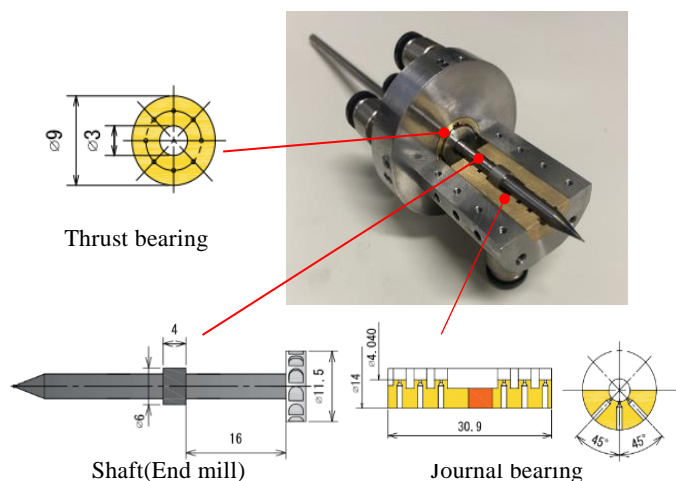
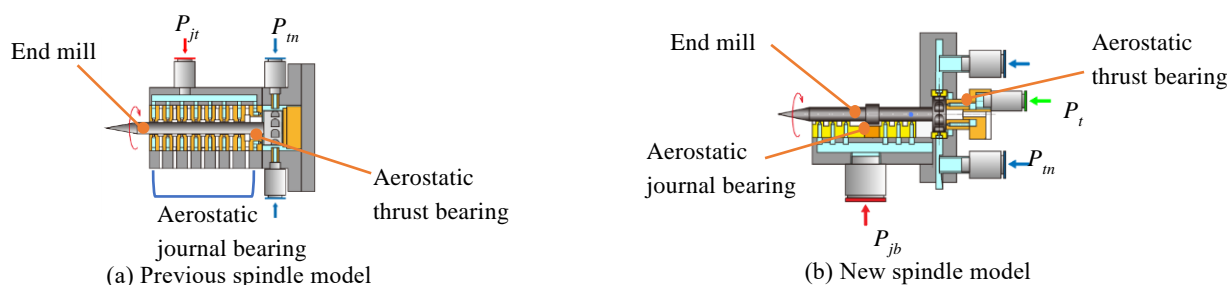
*Tokyo University of Science, **Kansai University

1. はじめに

近年、情報関連機器や医療機器などの幅広い分野において、製品小型化や大量生産化により、それらを製作する際に用いられる金型の加工精度の向上に加え、加工コストや加工時間の低減が求められている。そこで、研削加工に代わる仕上げ加工法として、小径エンドミルを用いた高速ミーリング（浅切り込み、高送り加工）が注目されている。先行研究においては、小径エンドミルのシャンク部を直接静圧空気軸受で支持するスピンドル構造を提案^[1]し、40万rpm以上の超高速回転を実現したが、このスピンドルは、エンドミルの交換に際して、装置の分解が必須であり、実用上の問題があった。そこで本研究では、エンドミル交換作業の簡易化のため、半円筒状のジャーナル軸受と永久磁石による吸引力により直接エンドミルを支持するスピンドルによる、送り速度、切削方法等の様々な条件下において実際に切削実験を行い、加工精度の評価を検証する。

2. 本研究で提案する超高速回転・小型静圧空気スピンドル

図1に本研究で使用するスピンドル構造の概略図を示す。図1(a)が先行研究において提案したスピンドル、図1(b)が本研究で提案するスピンドルであり、何れもシャンク径4mmのTiAlNコーティング超硬ボールエンドミル（日進工具MSBH-230、刃先R0.2mm、全長50mm）のシャンク部分を静圧空気ジャーナル軸受で直接支持する構造となっている。今回提案するスピンドルは、ジャーナル方向の支持は、半円筒形状の点状給気型静圧ジャーナル軸受の気体膜反力と、エンドミル中央部に取り付けた、SUS420J2製のリングに作用する磁気吸引力を釣り合わせる構造となっている。また、エンドミルの後端には、アルミ合金製のタービンを圧入し、エアタービンによる回転を行う。回転軸のスラスト方向の支持に関しては、エアタービン部に設けた、静圧空気スラスト軸受の気体膜反力と、真空発生器による吸引力を釣り合わせる構造としている。このような構造とすることで、スピンドルを分解することなく、エンドミルの交換が可能となっている。



(b) Proposed aerostatic spindle structure used in this study

Fig.1 schematic views of the aerostatic spindle used in this study

3. 加工条件および加工方法

図2に加工装置の概要を、図3に加工法(スピンドル設置法)の概略図を示す。加工法1では送り方向と同方向(ピッチング方向)に30度の倒れ角を設定し、半円筒の軸受面の向きを図3(a)のように設定する。加工法2,3では送り方向と直角(ローリング方向)に30度の倒れ角を設定し、半円筒の軸受面の向きを(b), (c)のように設定する。なお、軸の回転方向は工具後端から見たときに時計回りになっているので、図2の左方向にテーブルを送ると up cut, 右方向に送ると down cut となる。切削実験においては、固定治具と回転テーブルより、加工法1~3となるようにスピンドルを取り付ける。次に被削材の平面度をダイヤルゲージで確認後、30万 rpm までスピンドルを回転させる。最後に、z 軸テーブルを用いて、切り込み深さを調整し、送り速度を設定して切削加工を行う。被削材はプラスチック用の金型材である NAK55 (プリハードン鋼) とした。切り込み深さは $5\mu\text{m}$ 程度とし、加工方法、加工方向、送り速度を変えて実験し、最適な加工方法を検討した。潤滑方法はオイルミスト潤滑とする。また、加工溝の形状測定にはレーザー顕微鏡 (Keyence corp. VK-X150) を用いた。

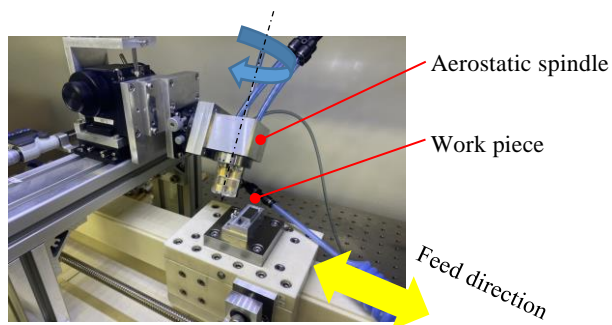
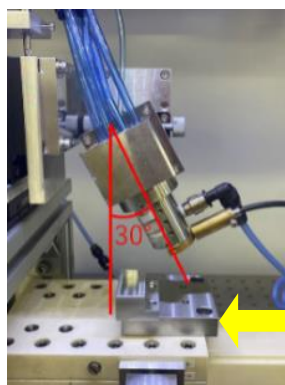
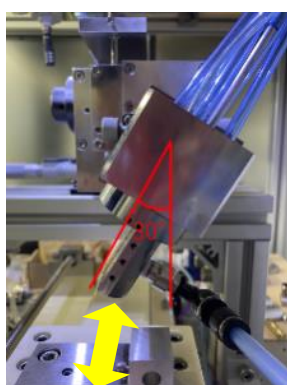


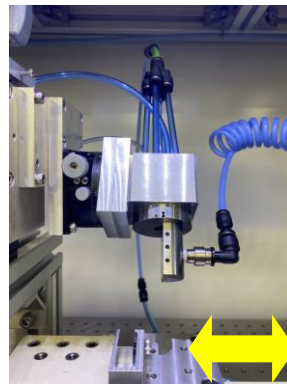
Fig.2 Photo of the milling machine used in this study



(a) Method 1



(b) Method 2



(c) Method 3

Fig.3 Slant angle of the spindle examined in this study

4. 実験結果

加工実験結果の例として、加工法3, 送り速度 $V_f=1000\text{ mm/min}$ に関して、図4(a)に up cut, 図4(b)に down cut における切削溝の拡大写真と断面プロファイルを示す。また、図5には、切削溝の長手方向 $250\mu\text{m}$ 程度の断面プロファイルから算出した表面粗さ R_a と R_z を示す。なお、図5には、加工法2の結果が示されていないが、加工法2においては、切削加工時の軸振動が大きく、目視で視認が可能なほど加工精度が悪かったため、データの記載を省いている。

図4に示すように、加工溝の長手方向には、数十 μm 程度のピッチで加工溝深さが変化しており、これは、図4(a) up cut においてより顕著に確認できる。この周期的な加工溝深さの変化が、図5に示す R_z の大きさに影響しているが、これは、加工時の切削力とスピンドル剛性に起因する回転軸の振動が原因であると考えられる。今回のスピンドルは、半円筒形状のジャーナル軸受を用いているため、切削荷重が加わった際の回転軸の変位方向に対して、異方的な軸受特性を持っていると考える。このことが、切削方向(アップカット、ダウンカット)による加工精度や、スピンドルの倒れ角により加工精度が大きく異なる原因となっていると考える。今回の加工実験の結果を見ると、今回提案するスピンドルにおいては、送り方向と直角(ローリング方向)に30度の倒れ角を設定し、半円筒ジャーナル軸受の半割面と垂直方向に送りを与える加工法3が最も加工精度が高くなり、その中でも、被削材を掘り下げる方向に加工する down cut が、最も加工精度が高い加工法であることが確認された。

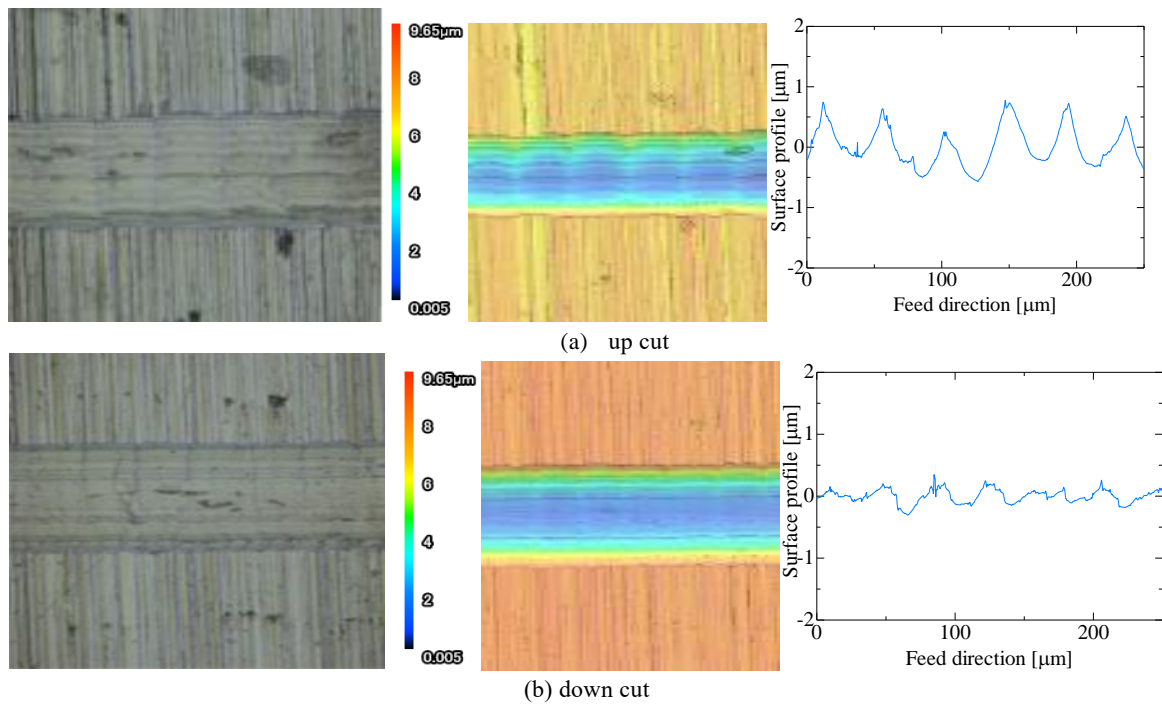


Fig.4 Photo of machined surface and cross-sectional profiles
(Method 3 $V_f=1000$ mm/min)

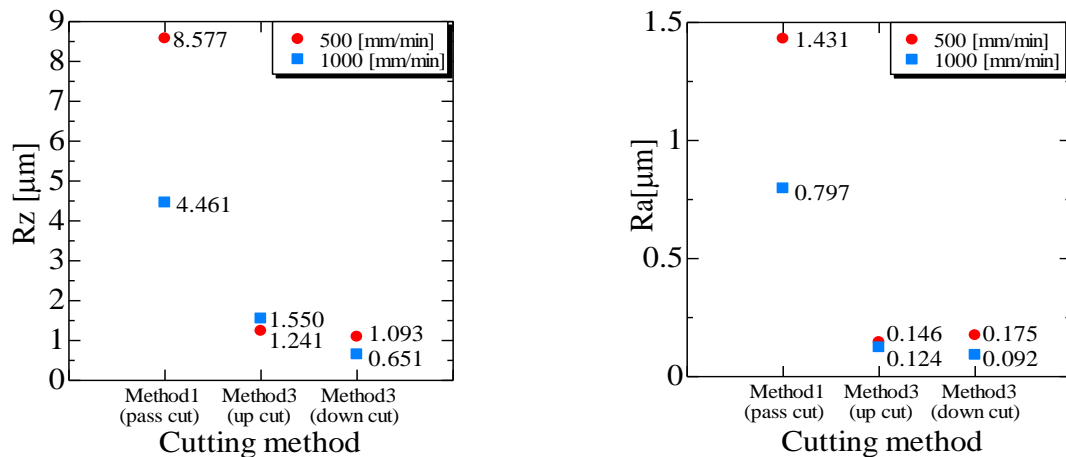


Fig.5 Measured maximum roughness related to cutting method

5. 結言

本研究では、半円筒状のジャーナル軸受を用いたエンドミル支持型の高速静圧空気スピンドルを用いて、種々の条件において実際に回転数 30 万 rpm で切削実験を行った結果、被削材 NAK55 に対して、以下の知見を得ることができた。

- (1) 半円筒軸受面が切削方向に対して直角（加工法 2）に傾けると、軸が大きくぶれてしまい切削が困難である。
- (2) 加工法 3 で送り速度 1000 mm/min のダウンカット加工することにより、 $\text{Ra}0.092\mu\text{m}$ の加工が実現できた。
- (3) スラスト方向の振動が原因で、Rz にばらつきが出てしまう。そのため、スラスト方向の把持力を大きくするなど、構造の改良が必要である。

6. 参考文献

- [1] F.Nishikawa, S.Yoshimoto and K.Somaya, "Ultrahigh-Speed Micro-Milling End Mill with Shank Directly Supported by Aerostatic Bearings", Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing 6(6):979-988