

静圧空気スピンドルを用いたエンドミル加工時の回転軸振れおよび加工精度に関する研究

Study on the rotational and machining accuracy of an end-milling process with spindles supported by aerostatic bearings

東理大・工（学）*中村 朋哉 東理大・院（非）下八川 侑真 東理大（正）宮武 正明

Tomoya Nakamura*, Yuma Shimoyakawa**, Masaaki Miyatake*

*Tokyo University of Science, **Graduate School of Tokyo University of Science

1. 緒言

静圧空気軸受を用いたスピンドルは、1 対の静圧空気スラスト軸受と複数の静圧空気ジャーナル軸受により構成されている。静圧空気スピンドルの回転精度は、個々の軸受の性能や配置により大きく左右されるが、軸受の配置を考慮した研究は、柴原⁽¹⁾が行ったように実験的検討が主で、試作機の時間・コストの面から多くは行われていない。そのため、数値計算と実験の両観点の研究が必要とされている。そこで先行研究において嶋田らは⁽²⁾、エンドミル加工時の静圧空気スピンドルの回転軸の振れ量を数値的に求める手法を提案し、軸受配置がエンドミル加工時の静圧空気スピンドルの回転精度に与える影響を数値的に求めた。さて、静圧空気スピンドルを用いた精密加工においては、直径 2~3mm 以下の小径エンドミルを用いて加工を行うことが多いが、このような小径エンドミルを用いた加工においては、エンドミルに作用する切削反力によりエンドミルが変形することが知られている⁽³⁾。そこで下八川らは、西田ら⁽⁴⁾が構築したモデルを参考に、嶋田らの先行研究で使用した数値計算プログラムをエンドミルのたわみを考慮したプログラムに修正し、先行研究よりも高精度に、エンドミル加工時の静圧空気スピンドルの回転精度を求める手法を提案した。本研究では、下八川らが開発した数値解析手法の妥当性を検証するための基礎的実験データを取得することを目的として、エンドミル径 1mm および 2mm の 2 種類のエンドミルを用いて、エンドミル加工時の回転軸振れ量および被削材の加工精度に関する実験的検討を行った。

2. 静圧空気スピンドルの概要

図 1 に、本研究で取り扱う静圧スピンドルの概要を示す。回転軸は、3 個の 2 列円周溝付き静圧空気ジャーナル軸受（軸受径 22mm、軸受幅 20mm、軸受すきま 15 μ m、円周溝深さ 15 μ m、給気孔径 0.4mm \times 6）と 1 対の静圧スラスト軸受（外径 40mm、内径 25mm、軸受すきま 15 μ m、給気孔径 0.4mm \times 6）によって支持されている。軸の片側端部に刃先径が異なる 2 種類のスクエアエンドミル（日進工具 MX240-1：刃先直径 $D=1$ mm, MX240-2：刃先直径 $D=2$ mm）と、それを固定するチャックを装着した。軸の回転はブラシレス DC モータにより行った。

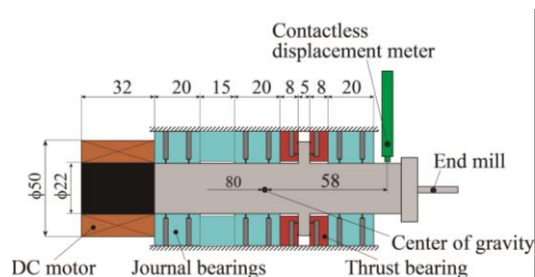


Fig. 1 Experimental equipment layout

3. 実験方法

図 2 に、実験装置の概要を示す。静圧空気スピンドルは縦置きに設置、下部に 1 軸のスライダが設置されている。スライダに固定した被削材を、電動アクチュエータにより水平方向に V_f [mm/min] で送ることで、スクエアエンドミルを用いた被削材の側面ダウンカットを行う。その際の回転軸の振れ量を、図 3 に示すように、2 個の静電容量型非接触変位計 (MicroSense 5830) により測定した。そして、図 4 に示すように、切削時の軸振幅（工具振幅, amplitude）と、エンドミルの中心の半径方向変位量（工具変位, displacement）を求めた。被削材は NAK55 材を用い、セミドライミスト給油装置を用いて潤滑し、軸受に 0.6MPa で給気した。半径方向切り込み量 $R_d=0.05, 0.1$ mm、軸方向切込量 $A_d=0.10$ mm、スライダの送り速度を $V_f=600, 900$ mm/min とした。これをエンドミル直径 $\phi 1$ mm（日進工具 MX240-1, 刃径 1mm, 刃長 4mm）と $\phi 2$ mm（日進工具 MX240-2, 刃径 2mm, 刃長 8mm）の 2 種類のスクエアエンドミルについてそれぞれ測定した。本研究では、被削材と工具の比切削抵抗値を切削動力の実験値から求め、その値を使用することで、数値的にエンドミル加工時の静圧空気スピンドルの回転精度を求めるが、切削動力の測定は、神奈川県立産業技術総合研究所に依頼を行い、縦型マシニングセンター（牧野フライス V33）、切削動力計（KISTLER 9257BU07）を用いて、測定を行った。切削動力の測定においては、工具、被削材、加工条件は、図 3 の装置を用いた加工実験と同じとした。また、切削後の被削材の表面形状を、レーザー顕微鏡（KEYENCE VK-X150）により測定した。

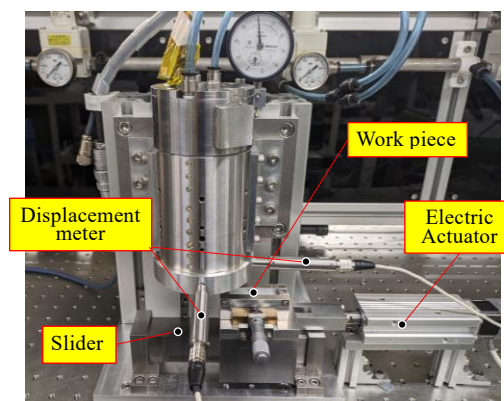


Fig. 2 Experimental apparatus

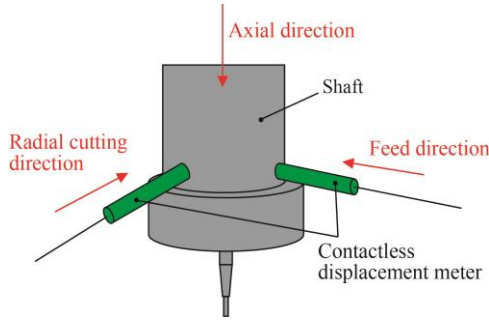


Fig. 3 Image diagram of how to measure

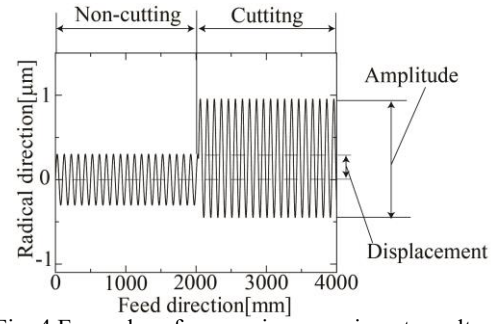


Fig. 4 Examples of processing experiment result

4. 結果

4.1 工具・被削材間の比切削抵抗

図5に示すように、工具 x , y , z 方向に生じる力 F_x , F_y , F_z [N] をモデル化し、接線、半径、軸方向の比切削抵抗値 K_t , K_r , K_a [MPa] を用いて以下の式から計算した。

$$\begin{cases} F_x = (K_t \sin \theta - K_r \cos \theta) f_t \sin \theta A_d \\ F_y = (-K_t \cos \theta - K_r \sin \theta) f_t \sin \theta A_d \quad (\pi - \alpha < \theta < \pi) \\ F_z = K_a f_t \sin \theta A_d \end{cases} \quad (1)$$

この時、 f_t : 1 刃当たりの送り速度 [mm/rev], θ : エンドミルの刃の回転角 [rad], α : エンドミルの刃の切込角 [rad] である。

この式から、最大値 F_{xmax} , F_{ymax} , F_{zmax} [N] は以下になる。

$$\begin{cases} F_{xmax} = f_t A_d (K_t \sin^2 \alpha - K_r \sin \alpha \cos \alpha) \\ F_{ymax} = f_t A_d (K_t \sin \alpha \cos \alpha + K_r \sin^2 \alpha) \\ F_{zmax} = K_a f_t A_d \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

本研究では、被削材と工具の比切削抵抗値を求めるため、種々の条件で x , y , z 方向の切削動力の測定を依頼した。切削動力の測定結果を図7に示す。この結果から、3 方向それぞれの切削時の切削力の最大値を求め式(2)に代入し、1 刃当たりの送り速度 f_t , 軸方向切込み深さ A_d を用いて、それぞれの加工条件における比切削抵抗値を実験的に求めた。

$$t_{max} = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - 2f_t \sqrt{DR_d - R_d^2} + f_t^2} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

そして更に、工具のたわみを考慮すると、比切削抵抗値 K は、エンドミル回転角 θ , 軸方向の座標 z に依存したパラメータとして考えられ、式(4)のように書き直せる。この時、 $K(\theta, z)$: 比切削抵抗値 [MPa], K_e : 比切削抵抗定数部 [MPa], K_c : 比切削抵抗変数部 [MPa/mm], $h(\theta, z)$: 実切り込み深さ [mm], $\delta(\theta, z)$: 工具のたわみ [mm] である。これを様々な実験条件の結果を連立して比切削抵抗値を導出、数値計算に使用した。

$$K(\theta, z) = K_e + h(\theta, z)K_c = K_e + \{R_d - \delta(\theta, z)\}K_c \quad (4)$$

4.2 エンドミル加工時の軸振れ量

図8では、工具径 $\phi 1\text{mm}$ と $\phi 2\text{mm}$, 送り速度 V_f , および切り込み深さ R_d を変化させたときの軸振幅と変位の実験結果と数値解析結果を比較している。実験値と解析結果には $1\mu\text{m}$ ほどの差があるが、定性的な傾向は同じである。回転数が $15,000 \sim 20,000 \text{ rpm}$ まで上昇すると振幅が減少、 $25,000 \text{ rpm}$ 以上では増加する。定量的な差異は、切削抵抗による振幅の減少と、動不釣り合いによる振幅の増加によるものと考えられる。また、新しい解析方法(以後、提案手法)は、従来のエンドミル過去のもの(以後、従来手法)よりも実験結果に近い値を示すことが分かる。変位の傾向も同様であり、絶対値は $0.1 \sim 0.4\mu\text{m}$ 程度異なる。この差異は、本研究ではエンドミルのたわみとねじれ角の影響を考慮するに際して、エンドミル刃先部を円柱形状でモデル化した。実際のエンドミル刃先部には螺旋溝が施されており円柱形状より剛性が低いこと、本研究ではスラスト方向の荷重について考慮していないことが、このような誤差の要因として考えられる。

4.3 被削材の表面形状

図にレーザー顕微鏡による被削材の表面形状の測定結果の例を示す。図9に示すように、被削材の側面切削面の形

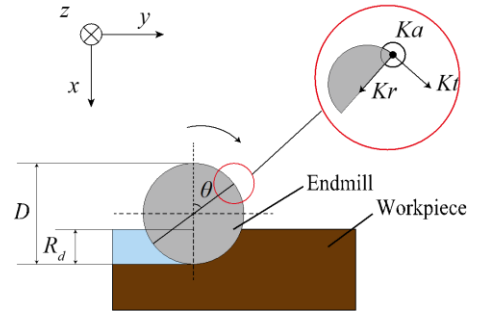


Fig. 5 Schematic image of specific cutting force

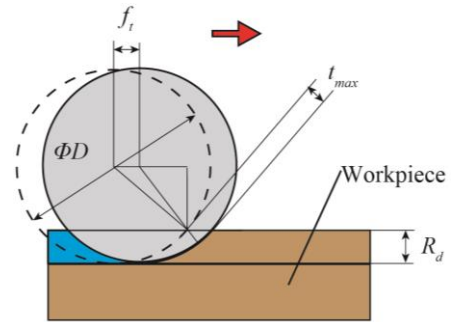


Fig. 6 Schematic image of the maximum chip thickness

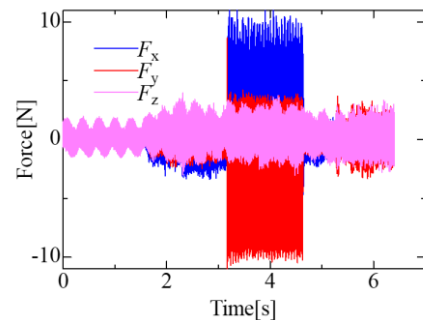


Fig. 7 Sample data of cutting force

状は垂直ではなく、傾斜していることが分かる。これはエンドミル刃先が切削時に切削抵抗を受け、回転軸が傾斜することに加え、エンドミルに変形が生じていたことが原因と考えられる。図 10 にレーザー顕微鏡による測定結果から算出した、被削材の側面切削面傾斜度 θ_w を示す。図に示すように、 $\phi 2 \text{ mm}$ の場合の θ_w は回転数によらず 20 度程度であるが、 $\phi 1 \text{ mm}$ の場合の θ_w は、回転数の増加にともない増加する。これは回転数の増加にともない、エンドミルのたわみ量が増加していることが原因であると考えられる。 $\phi 2 \text{ mm}$ では回転数による影響は少ないが、これは $\phi 1 \text{ mm}$ に比べエンドミルのたわみが小さく、切削反力による軸の傾斜が切削面傾斜の主な要因であるためであると考えられる。

5. 結言

本研究では、複数の静圧気体ジャーナル軸受と 1 対の静圧気体スラスト軸受により構成される静圧空気スピンドルを対象として、エンドミル加工時の工具振幅と工具変位に関して、実験的に検討し、加工精度に関して、以下の知見を得た。

- (1) 工具振幅、工具変位ともに、数値計算値と実験値の定性的な傾向は一致する。誤差の原因として、スラスト方向荷重を考慮していない等が考えられる。
- (2) 本研究で作成した、工具のたわみ、ねじれ角を考慮した提案する解析方法は従来の手法と比較して、より実験値に近い結果が得られ、提案数値解析手法の有用性および妥当性が示された。
- (3) 側面切削時にエンドミルは切削抵抗により回転軸の傾斜とエンドミルのたわみが生じ、被削材の側面切削面には傾斜が生じる。傾斜角度に関しては、 $\phi 1 \text{ mm}$ は回転数の影響が大きく、 $\phi 2 \text{ mm}$ では切削反力の軸の傾斜の影響が大きい。

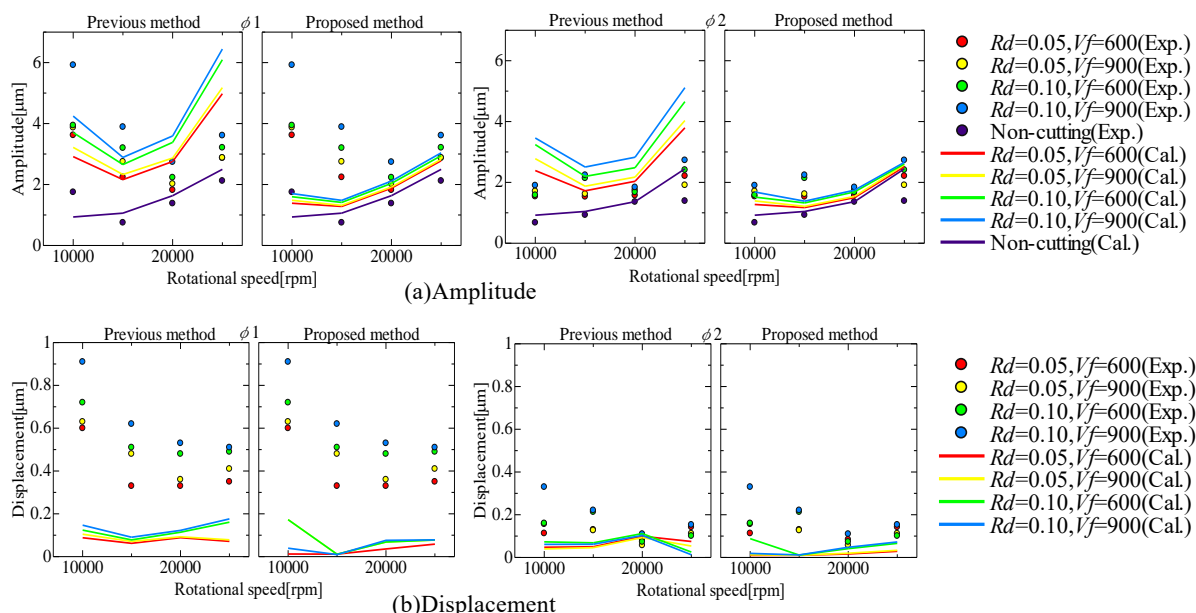


Fig. 8 Rotor amplitude and displacement during cutting operations including roundness measurement results [μm] ($\phi 1$, $\phi 2$)

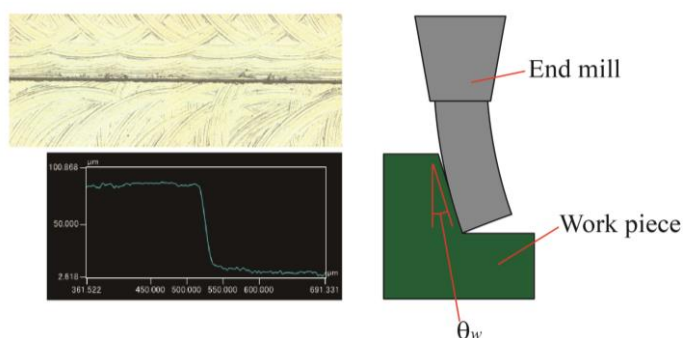


Fig. 9 Surface profile measurement

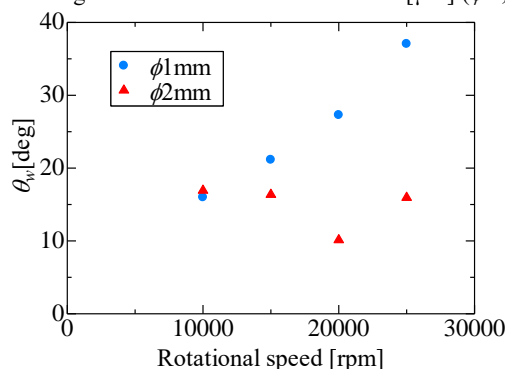


Fig. 10 Comparison of θ_w ($V_f=900$, $R_d=0.05$)

文献

- 1) 柴原豪紀：微小径エンドミル加工における精度向上の一方 砥粒加工学会誌, 54(9), pp.551–556, (2010)
- 2) Shimada K, Wakabayashi D, Shimoyakawa Y, Kawada S, Miyatake M, Yoshimoto S. Numerical study on the rotational and machining accuracy of an end-milling process with spindles supported by aerostatic bearings. Mechanical Engineering Science. 2022;236(20):10541-10553
- 3) 西田勇 他: ボクセルモデルを用いた切削シミュレーションにおける微小時間および微小空間解析の高速処理手法精密工学会誌, 2017