

高精度ボールエンドミル加工のための工具姿勢制御手法の提案

北九州高専 ○寺井久宣, 浅尾晃通, 九州工業大学工学部 吉川浩一

要旨

これまでに任意の工具姿勢におけるボールエンドミル加工による加工誤差が切削断面積の幾何解析結果を用いて定性的に予測可能であることを明らかにした。ただし、実験用に設定した平面形状でのみの検証であった。そこで、本研究では実際の3DCADで作成した形状データから工具経路上の加工誤差を予測するソフトウェアを新たに開発し、高精度化のための工具姿勢制御手法を提案する。

1. はじめに

ボールエンドミル加工では工具系の弾性変形による加工誤差が問題となっているが、切削機構に基づいた高精度化への検討は未だなされていない。ボールエンドミルは切れ刃が3次元曲線であり、工具一回転の間に切れ刃各位置における切削速度、軌跡、取り厚さ、切削長さが全て異なる。そのため、その他の切削加工方法に比べて複雑で特徴的な幾何的切削機構を有している¹⁾⁻⁶⁾。これまでに任意の切れ刃位置と工具回転角度における取り厚さを幾何的に求める手法を開発し、工具姿勢の違いで加工面を創成する瞬間の切削断面積(A_g)が大きくなることを明らかにした¹⁾。さらに、切削実験により加工誤差と A_g との関係も明らかにし、加工誤差を評価できる幾何的に求められる加工誤差評価指標の有効性を明らかにした²⁾。本報告では、以上の幾何的取り厚さ解析を基に、任意の三次元形状における加工誤差評価指標の算出が可能なプログラムを開発したので紹介する。

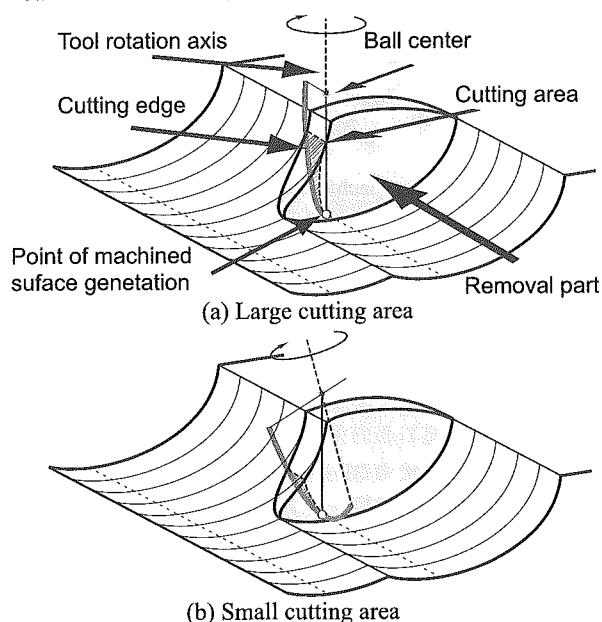


Fig.1 Relationship between tool orientation and cutting area

2. 工具姿勢と切削断面

図1にボールエンドミルで平面を加工している途中の様子を示す。切削条件と工具形状が同一であれば、切れ刃一回転での除去体積は同一である。しかしながらボールエンドミル加工では、「工具姿勢」が切れ刃と被削材との干涉の様子を大きく変化させている。切れ刃と被削材の干涉は工具姿勢によって図1のように異なる。図1の(a)と(b)とはボール中心の位置は同一であるが工具回転軸の方向すなわち工具姿勢が異なっている。工具回転軸の向きによって切れ刃が除去部分を掃引する向きが異なる。ボールエンドミル加工で最終的に

に製品の面として残るのはボール中心から被削材の降ろした垂線の近傍のみである。本研究では、この垂線の足を「加工面創成点」と呼ぶ。したがって加工精度を考えるときは、切れ刃がこの加工面創成点を通過する瞬間の切れ刃と被削材との関係を明らかにする必要がある。工具姿勢によって切れ刃が加工面創成点を通過する瞬間の断面積(A_g)は図1(a)のように大きくなる場合や図1(b)のように小さくなる場合が発生する。一般に切削抵抗は切削断面積にはほぼ比例すると考えてよく、さらに切削抵抗が大きいとボールエンドミルの弾性変形も大きくなり加工誤差も大きくなると考えられる。したがって、 A_g と加工精度との関係が明らかになれば加工誤差を予測できる事になる。

3. ボールエンドミル加工の加工誤差モデル

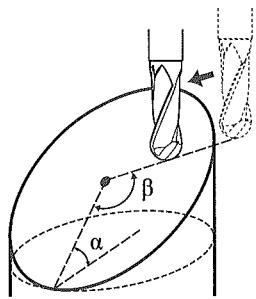
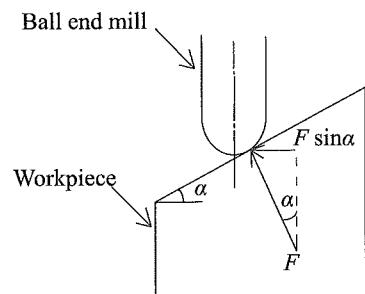
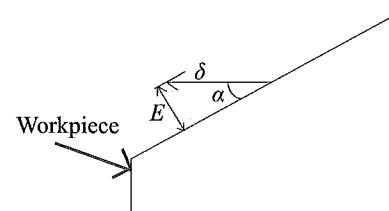


Fig.2 Inclination angle α and feed direction angle β



(a) The model of cutting force



(b) The model of elastic deformation

Fig. 3 Elastic deformation model at the top of the ball end mill

既に、3軸制御の工作機械を使った任意の工具姿勢での加工を実現できる切削実験方法を開発しており、本手法の考え方を図2に示す。被削材傾斜角 α 傾けた面を有する丸棒をテーブルに取り付け、その面上を送り方向角 β の方向へ工具を送る。今回の実験では α を $\pi/4, \pi/6, \pi/12$ rad.とし、 β を0rad.から $7\pi/4$ rad.まで $\pi/12$ rad.刻みで24種類設定した。

工作機械は牧野フライス社製立型マシニングセンタV33、加工面形状測定は三鷹光器社製レーザ非接触三次元測定装置NH-3N(深さ方向分解能10nm)を使用した。切削条件は、ボール半径R=5mm、1回転当たり送り量f=0.1mm/rev、切込み(法線方向)a=0.5mm、主軸回転数N=5000rpmである。被削材はSKD、工具材は超硬で直刃を用いた^{7,8)}。

図3は本研究で提案しているボールエンドミルの弾性変形によって発生する加工誤差のモデルである。図3(a)に示すように傾斜角 α の斜面を加工しているとき、加工点における背分力Fによるボールエンドミルの先端の変形は、 $F \sin \alpha$ に比例すると考えられる。主分力は加工面に平行な方向であるため加工誤差への影響は極めて小さい。図3(b)に示すように工具先端の弾性変形量が δ であれば、発生する加工誤差Eは $\delta \sin \alpha$ となる。 δ は $F \sin \alpha$ に比例し、さらにFは A_g に比例する。したがって、加工誤差Eは $A_g \sin^2 \alpha$ に比例すると見なすことができる。本研究では $A_g \sin^2 \alpha$ を「加工誤差評価指標」と呼ぶ事とする。

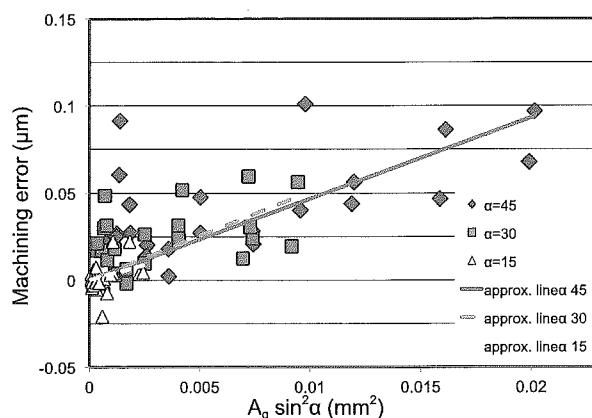


Fig. 4 Comparing machining error with $A_g \sin^2 \alpha$ ⁸⁾

上記実験で測定された各工具姿勢における加工誤差と加工誤差評価指標の関係を図4に示す。図中の直線は傾斜角 α 毎の近似直線である。全ての近似直線が一直線に揃っており、傾斜角に関わらず加工誤差評価指標は加工誤差の傾向と合うと考えられる。加工誤差評価指標が小さい部分で加工誤差が大きい値があるが、これはボールエンドミル加工において工具の弾性変形以外の原因によるものが含まれていると考えができる。また、加工誤差評価指標が大きい範囲では近似直線より下の値は少ないことが分かる。すなわち、少なくとも加工誤差評価指標が大きくなるような工具姿勢を避けねば、加工誤差を小さくできる。言い換えれば、高精度加工するためには少なくとも加工誤差評価指標は小さくなければならぬ⁸⁾。

4. 加工誤差評価指標解析

図5(a)に示す三次元形状を3D-CAD(SolidWorks)で作成し、これを基に図5(b)のようにz-mapを作成した後、工具経路に沿って加工誤差評価指標を解析するプログラムを開発した。加工誤差評価指標(M_e)の解析結果を図6に示す。形状の一部に M_e の値の大きい部分があるのが確認できる。実際の加工ではこの部分で M_e が小さくなる工具姿勢に変更する事で高精度化を図れる

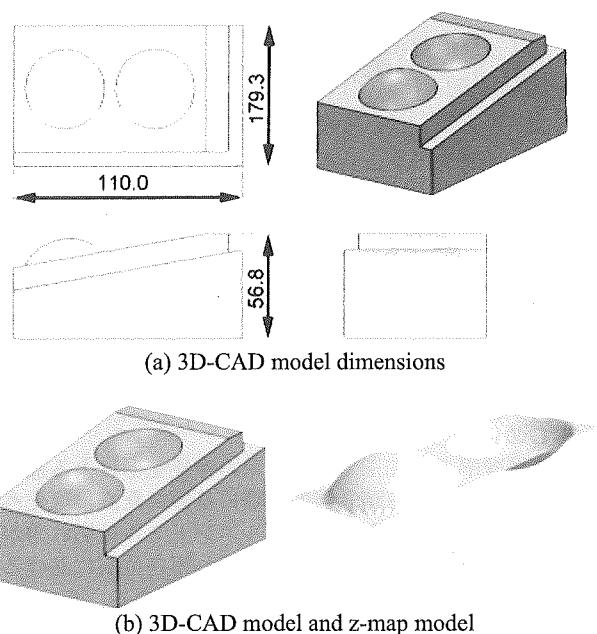


Fig. 5 The analysis model for the machining error estimation index

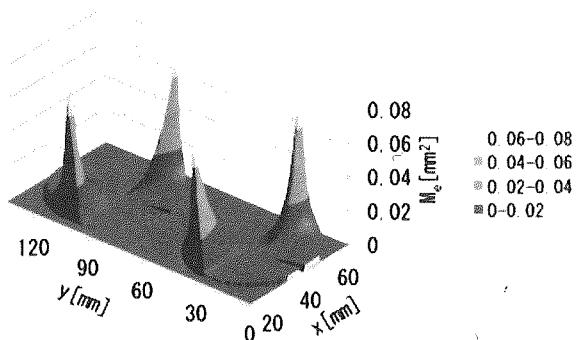


Fig. 6 The analysis of the machining error estimation index M_e

5. まとめ

高精度ボールエンドミル加工の実現を目指し、切取り厚さの幾何解析と切削実験を基に以下の知見を得た。

- 1) 工具の弾性変形モデルから導き出した「加工誤差評価指標」が、実際の加工誤差との関係から有用である事を明らかにした。
- 2) 任意の三次元形状の3D-CADモデルから、工具経路上の「加工誤差評価指標」を算出できる解析手法を開発した。
- 3) 「加工誤差評価指標」は小さくなるように工具姿勢を制御する事で工具の弾性変形による加工誤差を低減し、高精度加工が可能である事を示す事ができた。

参考文献

- 1) 寺井, Hao, 吉川, 水垣: 機論C, 67, 654(2001) 553-558.
- 2) 寺井, Hao, 吉川, 水垣: 機論C, 68, 672(2002) 2457-2463.
- 3) Hao, 浅尾, 寺井, 水垣: 精密工学会誌, 65, 10(1999) 1476-1480.
- 4) Hao, 寺井, 吉川, 水垣: 精密工学会誌, 66, 7(2000) 1150-1154.
- 5) 吉川, 水垣, Hao, 寺井: 精密工学会誌, 69, 3(2003) 407-411.
- 6) Terai, Hao, Kikkawa, Mizugaki: JSME Int. J. C, 47, 1(2004) 2-7.
- 7) Terai, Asao and Mizugaki: Int. J. Machining and Machinability of Materials, 6, 1/2 (2009) 83-94.
- 8) Terai, Asao et al.: Proc. 14th ESAFORM,(2011) 573-578.