

エンドミル加工における加工面情報に基づく工具剛性の同定

茨城大学 工学部 機械システム工学科 ○柳田 航太, ◎金子 和暉, 清水 淳, 周 立波, 小貫 哲平, 尾畷 裕隆

エンドミル加工において、加工精度について切削条件を最適化するうえで加工誤差のシミュレーションが有効であるが、シミュレーションに必要な工具剛性を加工現場で同定することは困難である。そこで、加工面形状から工具剛性を簡便に同定する方法を提案する。本研究では加工誤差シミュレーションを行い、事前に設定した工具剛性を、加工面形状から提案方法により導出可能か検証した。

1. 緒言

加工法の一つである切削加工は加工精度について優れているため、広く利用されている。切削加工における工具として、汎用性の高さからエンドミルが多用されているが、エンドミル加工において目標精度を実現するためには、工具の回転速度や送り速度といった加工条件を適切に設定することが必要である。加工誤差シミュレーションすることで、適切な切削条件を見出すことは可能であるが^[1]、工具の剛性の設定が必須である。しかし剛性を加工現場で同定することは容易ではないことから、シミュレーション技術が現場に普及していない。

そこで本研究では、工具剛性を簡便に同定する方法を提案する。加工現場でも工具剛性を同定可能な方法として、加工面形状から同定する方法を提案する。提案方法では加工によって得られる加工面の誤差からパラメータ同定を行う。工具たわみによる加工誤差を対象とし、まず、送り方向の切削力と切削トルクから切削係数を同定する。次に、同定した切削係数に基づき計算される切削力による工具たわみから得られる加工誤差と、実測される加工誤差が一致するように剛性を繰り返し計算により決定する。本研究では、任意の剛性を設定した状態で加工誤差シミュレーションを実行し、シミュレーションから得られる加工誤差から、提案方法により設定した工具剛性を推定可能か検証した。

2. 切削力の予測方法

加工誤差シミュレーションにおいて、エンドミルは図1のように微小薄板要素の積み重ねで表現され、各要素に作用する微小切削力は瞬間切削力モデルに基づき式(1)のように計算される^[2]。

$$\begin{aligned} dF_t &= [K_{tc} \cdot h + K_{te}] dz \\ dF_r &= [K_{rc} \cdot h + K_{re}] dz \\ dF_a &= [K_{ac} \cdot h + K_{ae}] dz \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 K_{tc} 、 K_{te} 、 K_{rc} 、 K_{re} 、 K_{ac} 、 K_{ae} は切削係数と呼ばれる定数であり、 h は図2に示した実切込み厚さ、 dz は工具軸方向に分割した微小薄板要素の厚さである。 dF_t 、 dF_r 、 dF_a は薄板要素1枚に作用する切れ刃の接線方向、半径方向、工具軸方向の微小切削力である。これらの切削力は式(2)によって幾何学的にワーク座標系の成分 dF_x 、 dF_y 、 dF_z に変換できる。

$$\begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ -\cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{pmatrix} \quad (2)$$

本研究では dF_y を工具の送り方向、 dF_z を工具軸方向、 dF_x は dF_y と dF_z に垂直な方向とした。これらの微小な切削力を薄板要素ごとに足し合わせることで、切削力波形が得られる。

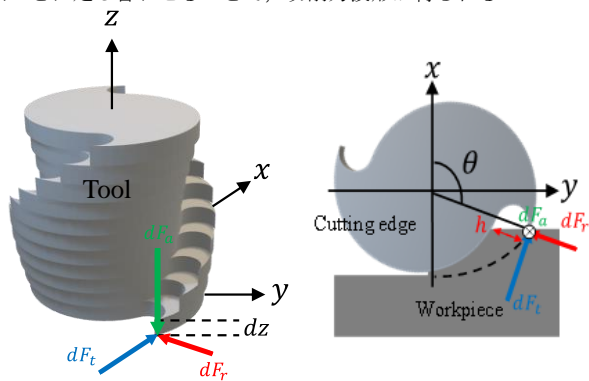


Fig.1 End mill represented by minute disk elements

Fig.2 Uncut chip thickness

3. 加工誤差シミュレーション

計算される切削力が、分布荷重として工具に作用することで工具がたわみ、加工誤差が発生する。このとき工具を片持ち梁としてモデル化することで工具先端からの距離が a の位置にある薄板に作用する微小切削力による、ホルダによって固定された点からの距離 b におけるたわみ δ を計算した^{[3][4]}。

$$\delta = \frac{dF_{x,y}}{EI_z} \left(\frac{(l-a)b^2}{2} - \frac{b^3}{6} \right) \quad (3)$$

$$\delta = \frac{dF_{x,y}(l-a)^3}{3EI_z} + \frac{F_{x,y}(l-a)^2}{2EI_z} (b-l+a) \quad (4)$$

E はヤング率、 I_z は断面二次モーメント、 l は工具長である。式(3)は $b < l-a$ であるとき、式(4)は $b > l-a$ であるときの式である。またヤング率は250GPaである。そして工具たわみが、加工面に転写されることで、図3に示したシミュレーションにおいて加工誤差が発生する。

シミュレーション上の被削材はボクセルと呼ばれる微小な立方体の集合で離散的に表現される。ボクセルの一辺の大きさは $10\mu\text{m}$ とした。表1の条件で被削材を切削した際の切削力とトルク、加工面 ($y = 1.0$ の xz 平面)における加工誤差のシミュレーション結果を図4から図9に示す。横軸は加工誤差であり、縦軸は切削された被削材の加工面の底面からの高さである。

Table.1 Cutting conditions for machining error simulation

| | | Φ8 Square end mill | |
|-----------------------|--|--------------------|--|
| Tool | Helix angle deg. | 30 | |
| | Number of flutes | 2 | |
| | Length | 35 | |
| | Young module GPa | 250 | |
| | Cross-sectional secondary moment mm^4 | 201.06 | |
| Cutting Condition | Cutting direction | Down cut | |
| | Axial depth of cut mm | 12 | |
| | Radial depth of cut mm | 1.6 | |
| | Spindle rpm | 2200 | |
| | Feed rate mm/min | 260, 360, 460 | |
| | K_{tc} | 1000 | |
| | K_{rc} | 700 | |
| | K_{ac} | 100 | |
| | K_{te} | 10 | |
| | K_{re} | 5 | |
| K_{ae} | 0 | | |
| Simulation conditions | Time Interval ms | 0.1 | |
| | Voxel size μm | 10 | |

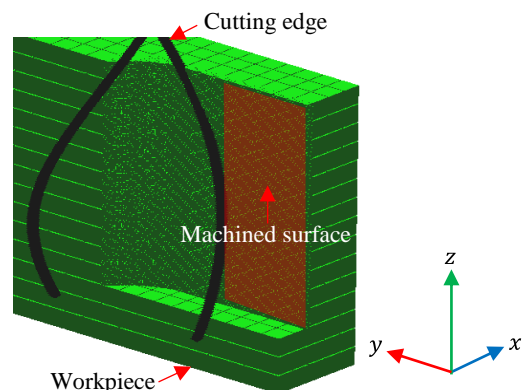


Fig.3 Machining error simulation

4.加工誤差に基づく工具剛性の同定

まず、切削力の計算に用いられる切削係数の同定から行う。そして、同定した切削係数に基づき予測される切削力によって発生する工具たわみによる加工誤差と加工誤差シミュレーションによって得られた加工面情報が一致するような工具剛性の同定を行った。切削係数及び剛性の同定には勾配降下法⁵⁾を用いた。加工誤差シミュレーションから3通りの送り速度による工具一回転あたりの平均切削トルクが図4,6,8に示したように3つ得られる。トルク T は式(5)によって与えられる。このとき、 R は工具半径である。

$$T = R \cdot \int [K_{tc} \cdot h + K_{te}] dz \quad (5)$$

加工誤差シミュレーションによる3つの平均切削トルクの値と式(5)に任意の切削係数 K_{tc} 、 K_{te} を入力することで得られる平均トルクの誤差の二乗和が最小になるような切削係数 K_{tc} 、 K_{te} を求めた。次に、加工誤差シミュレーションから3通りの送り速度による工具一回転あたりの平均送り方向切削力も同様に3つ得られる。この3つの数値と、式(1)に任意の切削係数 K_{rc} 、 K_{re} を入力することで得られる平均切削力の誤差の二乗和が最小になるような切削係数 K_{rc} 、 K_{re} を求めた。このとき式(1)に用いる切削係数 K_{tc} 、 K_{te} は勾配降下法によって同定した値を用いる。切削トルク、そして切削力の送り方向成分の平均値を利用する理由は、加工現場でも比較的容易にモニタリングできるためである⁶⁾。また本研究では工具たわみを起こす力を工具の x 、 y 方向のみとしているため、残り2つの工具軸方向に作用する切削係数 K_{ac} 、 K_{ae} の同定は行わなかった。4つの切削係数を用い

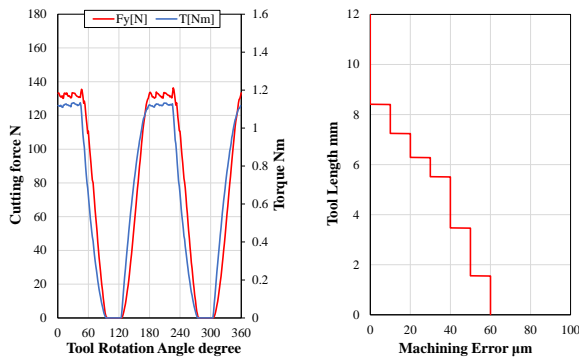


Fig.4 Cutting force waveform feed rate 360mm/min

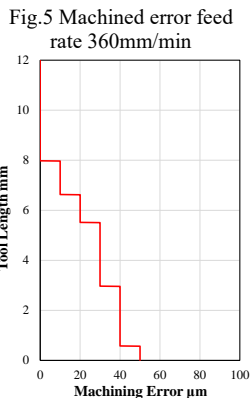


Fig.6 Cutting force waveform feed rate 260mm/min

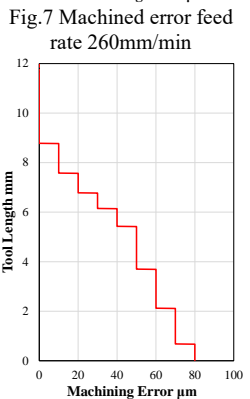


Fig.8 Cutting force waveform feed rate 460mm/min

Fig.9 Machined error feed rate 460mm/min

て、加工誤差シミュレーションを行い、任意の工具剛性を決定することで工具たわみが求められる。この工具たわみが、図5、図7、図9の加工面と一致するような剛性を求めた。図10、図11は勾配降下法によって収束させた切削係数と加工誤差シミュレーションで決定した数値との比較を棒グラフにしたものであり、図12は収束した切削係数によって同定した工具剛性と正しい値との比較を棒グラフにしたものである。表2は今回同定したパラメータの誤差をまとめたものである。加工誤差シミュレーション結果から剛性を誤差10%以内で同定することが出来た。

5.結言

加工誤差シミュレーションによる切削トルク、そして切削力の送り方向成分から切削係数の同定を行い、同定された切削係数からあらかじめ設定した剛性を誤差10%以内で同定した。後は実際の加工機を用いて加工した加工面の情報から、同定と同じ方法が適用可能か検証を行う。

参考文献

[1]長谷川 輝人, 佐藤 隆太, 白瀬 敬一: 被削材のボクセルモデルを用いたエンドミル加工の切削力シミュレーションと切削力の予測結果に基づく適応制御, 精密工学会, Vol.82, No.5, p.467-468(2016).
 [2]金子 和暉, 西田 勇, 佐藤 隆太, 白瀬 敬一: Instantaneous rigid force model based on oblique cutting to predict milling force, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.856, p.2-5 (2017)
 [3]臺丸谷 政志, 小林 秀敏: 基礎から学ぶ材料力学(第2版), 森北出版, p.88-91 (2004)
 [4]藤井 義也, 岩部 洋育: ねじれ刃エンドミルの断面形状と曲げ剛性, 精密機械, Vol.49, No.6, p.47-50 (1983)
 [5]戸川 隼人: 新しい応用の数学 共役勾配法, 教育出版, p.5-10 (2004).
 [6]柿沼 康弘: センサレス切削力計測技術とその応用: 精密工学会誌, Vol.83, No.3, p.210-213 (2017)

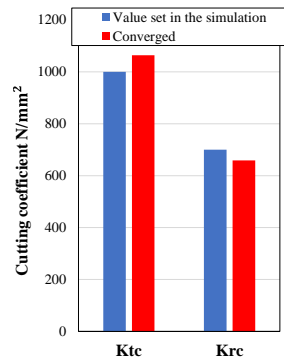


Fig.10 Convergence of cutting coefficients

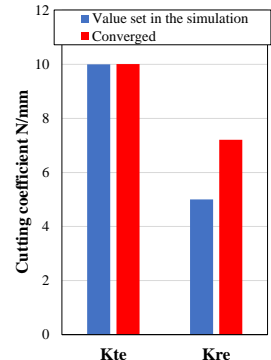
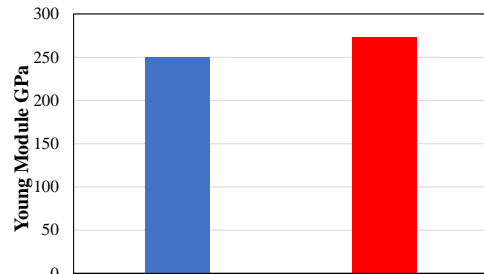


Fig.11 Convergence of cutting coefficients



Value set in the simulation Converged
 Fig.12 Convergence of Young Module

Table.2 Error of identified parameters

| | Value set in the simulation | Converged value | Error % |
|----------|-----------------------------|-----------------|---------|
| K_{tc} | 1000 | 1063.86 | 6.4 |
| K_{te} | 10 | 10.01 | 1 |
| K_{rc} | 700 | 658.99 | 6.2 |
| K_{re} | 5 | 7.21 | 44.2 |
| E | 250 | 273.0 | 8.4 |