エンドミル精密加工支援システムの開発*

仙波 卓 弥^{*1}, 佐久間 敬三^{*2}, 穂 積 豊^{*3}Computer-Aided Precision Machining System
for the Finishing Process of End Milling

Takuya SENBA, Keizo SAKUMA and Yutaka HOZUMI

A computer-aided precision machining system which gives optimum tool design and cutting conditions for finishing process of end milling is developed. The system is composed of 3 modules. The input module evaluates the bending rigidity and the cutting performance of the end mill even if the capacity of the machine tool and the work materials are varied. A simulation module can analyze the instantaneous cutting force and the surface profile error produced by the machine-tool deflection. Also, the optimum design unit selects the optimum tool specification and the cutting conditions which can satisfy the expected accuracy and the removal rate. It is shown that the precision machining system can select the optimum cutting conditions that can realize the expected accuracy with maximum removal rate by means of existing machine tools and the end mill. It is also verified through the numerical experiment that the system has the faculty to design tool specifications for exclusive use in which the work material, finished work profiles and the machine tool are previously applied.

Key Words: Computer-Aided Manufacturing, Cutting, Cutting Tool, End Mill, Precision Machining, Milling

1. 緒 言

エンドミル加工では工作機械への工具の取付け方法が片持ち支持であると同時に切削の様式が断続であるため、高精度な加工を行うことは極めて困難である。また被削材種や加工形状が同じであったとしても加工条件に関する互換性は乏しく、使用する工作機械や工具の仕様が異なると誤差の形状や値が変化する。したがって加工技術や工具技術とも、従来は仕上げ加工の高精度化よりはむしろ荒加工の高能率が指向されてきたように判断される。

一方プラスチック金型や航空機用部材のエンドミル加工では、荒加工の高能率化にも増して仕上げ加工の高精度化が重要視されつつある。この高精度なエンドミル加工を実現するに際しては機械要素技術、制御技術や工具技術など、いわゆるハード面で解決しなければならない多くの問題を抱えている。またソフト面でも所定の精度を最も高能率に達成し得る、工作機械/工具仕様/加工条件の組合せを決めることが可能であるような、システム技術としてのソフト開発が必要

であると考えられる。

前報ではエンドミルのたわみに基づく加工の誤差を減らす目的で、仕上げ加工の高精度化のみを指向した工具技術の開発を行った⁽¹⁾⁽²⁾。本論文では被削材種や加工形状が与えられたとして、①現有の工具で所定の精度を得るためにはどのような加工条件を選定すればよいかといった加工技術、②所定の精度を最も高能率に得るためにはどのような工具を設計すればよいかといった工具技術、等の2点に関して有益な指針を与え得る精密加工支援システムの開発を行った。

2. 主な使用記号

N_i : 同時切削刃数

N_f : 切れ刃の刃数

R : 工具半径

S_t : 一刃当たりの送り量

V_r : 加工能率

β : 切れ刃のねじれ角

$\delta_{\max}$: 加工面の最大誤差

δ_y : 形状誤差

ΔZ : 軸方向切込み

ΔR : 半径方向切込み

* 原稿受付 平成3年7月1日。

^{*1} 正員, 福岡工業大学 (〒811-02 福岡市東区和白東 3-30-1)。

^{*2} 正員, 九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

^{*3} 正員, 東芝タンガロイ(株) (〒210 川崎市幸区塚越 1-7)。

3. 精密加工支援システム

3.1 システムの概要 新たに開発した精密加工支援システムの概要を図1に示す。システムは

① 工具支持系の曲げ剛性やエンドミル切れ刃の切削性能を求めると同時に、得られた情報を蓄積しておく加工環境の設定部

② 所定の工作機械/被削材種/加工形状の組合せに対して、工具の仕様や加工条件を種々変化させた場合に生じる加工の誤差を演算する数値解析部

③ ②の項目で得られた解析の結果をもとに、所定の精度を最も高効率に得ることができる工具の仕様や加工条件を求める最適設計部

等の三つの部分から構成されている。

3.2 工具支持系の曲げ剛性 工作機械への工具の取付け方法を図2(a)に示す。コレットやチャックを含めた工具支持系の曲げ剛性は使用する工作機械や工具の組合せが異なることによって変化する⁽³⁾。しかし加工の誤差が主として工作機械主軸と工具のたわみによって生成されていると考えれば、工具先端に集中荷重 W を負荷した場合に生じる工具中心軸のたわみ δ_y は

$$\delta_y(W, z) = W \cdot z^3 / (6 \cdot E \cdot I) - W \cdot l^2 \cdot z / (2 \cdot E \cdot I)$$

図1 エンドミル精密加工支援システムの概要

$$+ W \cdot l^3 / (3 \cdot E \cdot I) + C_m \cdot W \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる。工作機械主軸の半径方向コンプライアンスを C_m 、エンドミルの弾性定数を E 、断面二次モーメントを I 、実質工具突出し長さを l 、工具下端からの距離を z と表した。

刃形の成形を行った実際の工具では測定点の個数に制限があるため、同径、同じ材質の丸棒に対して曲げ実験を行うと図2(b)に丸印で示すような測定の結果を得る。また得られた測定点を z に関する三次の多項式

$$\delta_y = a \cdot z^3 + b \cdot z + c \dots\dots\dots (2)$$

で最小二乗近似すると、図2(b)に太線で示す結果を得る。測定点が上へ移動するに従い δ_y は非線形に減少するが、必ずしも零にはならないことが特徴である。

工具下端に荷重を負荷したことによって生じる工具径の変化を無視すると同時に、図2(b)のたわみ曲線で

$$d\delta_y/dz = 0 \dots\dots\dots (3)$$

を満たす点を工具支持端と定義すれば、式(1)と式(2)との対応から実質工具突出し長さ l は

$$l = \{-b/(3 \cdot a)\}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

工作機械主軸の半径方向コンプライアンスは

$$C_m = (\delta_y)_{z=l} / W = \delta_0 / W \dots\dots\dots (5)$$

工具の弾性定数と断面二次モーメントとの積は

$$E \cdot I = \alpha \cdot W / (6 \cdot a) \dots\dots\dots (6)$$

と求めることができる。丸棒の断面二次モーメントを I_0 とすれば

$$\alpha = I/I_0 \dots\dots\dots (7)$$

であるとしている。なおここでは α の値が0.85程度の先に開発した高剛性精密仕上げエンドミル⁽¹⁾を用いた仕上げ加工を想定しているため、 α の異方性⁽⁴⁾⁽⁵⁾については考慮していない。

(a) 曲げ試験の概要

(b) 曲げ特性

図2 工具支持系の曲げ剛性

同様にして j 番めの切れ刃に作用する切削抵抗によって P_i 点に生じるたわみを $(\delta_y)_{ij}$ と表せば、

$Z_{Pi} > Z_{Qj}$ の場合

$$(\delta_y)_{ij} = (G_y)_j \cdot Z_{ij}^3 / (6 \cdot EI) - (G_y)_j \cdot l_j^2 \cdot Z_{ij} / (2 \cdot EI) + (G_y)_j \cdot l_j^3 / (3 \cdot EI) + C_m \cdot (G_y)_j \quad \dots\dots\dots (19)$$

$Z_{Pi} < Z_{Qj}$ の場合

$$(\delta_y)_{ij} = (G_y)_j \cdot l_j^2 (2 \cdot l_j - 3 \cdot Z_{ij}) / (6 \cdot EI) + C_m \cdot (G_y)_j \quad \dots\dots\dots (20)$$

と求めることができる。したがって複数の切れ刃が同時に切削に関与していることによって P_i に生じるたわみは

$$(\delta_y)_i = \sum_{j=1}^n (\delta_y)_{ij} \quad \dots\dots\dots (21)$$

と求められる。なお Z_{ij} は P_i と Q_j の間隔で、

$$Z_{ij} = Z_{Pi} - Z_{Qj} = R(\theta_i - \theta_j + \phi) / \tan \beta \quad \dots\dots (22)$$

と表される。分布荷重を集中荷重に置き換えていることで誤差の値を過大評価することは避けられないが、誤差の形状が変化することはない。

4. 精密加工支援システムの工具設計への応用

4.1 最適加工条件 軸方向切込み ΔZ が 10 mm であるような、快削黄銅の側面仕上げ切削を想定する。工具の半径方向に生成される加工の誤差 δ_y と半

径方向切込み ΔR との関係性を求めると図 5 の結果を得る。表 1 のように得ることが可能であった工具支持系の曲げ剛性や切れ刃の切削性能を、式(21)に代入することによって得た解析の結果である。なお工具半径 R は 5 mm、切れ刃のねじれ角 β は 30 度、エンドミル一刃当たりの送り量 S_t は 50 μm / 刃と設定した。

ΔR を変化させた各場合とも、被削材の下端で零であった加工の誤差 δ_y は下端からの高さが

$$Z = R \cdot \phi / \tan \beta = R \cdot \cos^{-1}(1 - \Delta R / R) / \tan \beta \quad \dots\dots\dots (23)$$

と表される位置で最大になった後、減少する性質を持っている。この δ_y の最大値を $\delta_{\max}$ と表せば、 $\delta_{\max}$ と ΔR との関係は図 6 に太線で示すように得ることができる。 S_t を変化させた場合に得られた同様の関係を図 6 に細線で付記した。 ΔR の最大値が 0.1 mm であるような加工の範囲に限定すれば、 $\delta_{\max}$ は ΔR が増すに従い増加していることがわかる。

図 6 のように得られた結果をもとに、例えば $\delta_{\max}$ が 6 μm になるような S_t と ΔR との組合せを求めると図 7 の結果を得る。縦軸には

$$V_r = \Delta R \cdot S_t \cdot N_f \cdot N_s \cdot \Delta Z \quad \dots\dots\dots (24)$$

と計算される単位時間当たりの切りくずの排除体積、

表 1 解析条件

Machine tool : Mazak, AJV-18 Tool holder : Kyushu kogu, BT40-MS20-105	Bending rigidity $\rho = 41.9 \text{ mm}$ $EI = 48 \text{ MN} \cdot \text{mm}^2$ $C_m = 0.254 \text{ } \mu\text{m/N}$ $\alpha = 0.85$
End mill Material: Sintered alloy Cutter radius R : 5 mm Number of flutes N_f : 4 Helix angle : 30 deg. Rake angle : 5 deg. Relief angle : 15 deg. Margin width : 20 μm Applied overhang : 27.5 mm	Cutting performance $K_e = 1.287 \text{ GPa}$ $\alpha_e = 0.311$ — $\epsilon_e = 0.307$ — $K_p = 327.2 \text{ MPa}$ $\epsilon_p = 1.58$ —
Work material : 60/40 brass

図 5 加工誤差の形状と半径方向切込み ΔR との関係

図 6 最大加工誤差 $\delta_{\max}$ と ΔR との関係

図 7 $\delta_{\max}$ が 6 μm になる ΔR と S_t との組合せ

いわゆる加工能率を用いた。 N_f は切れ刃の刃数, N_s は工作機械主軸の回転数である。 S_t と ΔR との組合せが異なることによって V_r は変化している。この結果は工具支持系の曲げ剛性や切れ刃の切削性能を事前に把握しておけば、現有の工作機械やエンドミルで所定の精度を所定の能率で得ることができる加工条件を選択することが可能であることを表している。

4.2 最適工具設計 図5と同様の解析を切れ刃のねじれ角 β を零度から80度の範囲で変化させた各場合について行い、 $\delta_{\max}$ と β ならびに ΔR との関係を求めると図8の結果を得る。 ΔZ を10 mm, S_t を50 $\mu\text{m}/\text{tooth}$ と設定した場合の結果である。なお切れ刃の切削性能には、 β を10度刻みで零度から80度まで変化させた前報⁽⁶⁾の実験で得られた測定の結果を使用した。 ΔR を変化させた各場合とも、 β が増すことによって切れ刃の同時切削刃数が増えるため、 $\delta_{\max}$ は階段状に増加している。

この $\delta_{\max}$ が増加し始める β の値は加工条件が異なることによって変化するが、切れ刃の同時切削刃数を N_i と表せば

$$\beta = \tan^{-1}\{2\pi \cdot R \cdot (N_i - 1) / (N_f \cdot \Delta Z)\} \cdots \cdots (25)$$

と表すことができる。すなわち図9に模式図を示したとおり、例えば N_i が2枚の場合には被削材の下端を

図8 $\delta_{\max}$ と β ならびに ΔR との関係

(a) 展開面

(b) 切削力波形

図9 切削に関与している切れ刃の位置関係

切削する現行刃の回転角が δ に達したときに後続刃が切削を開始するような β の値で $\delta_{\max}$ は増加する性質を持っている。

図8のように得られた結果をもとに、例えば $\delta_{\max}$ が6 μm になるような β と ΔR との組合せを求めると図8に太線で示した結果を得る。これと同様の数値実験を刃数 N_f を変化させた場合について行い、式(24)のように計算される V_r と β ならびに N_f との関係を求めると図10の結果を得る。刃数を変化させた各場合とも、最も高能率に $\delta_{\max}$ を6 μm にすることができる β と ΔR との組合せが1組存在していることがわかる。

この V_r を最大にすることができる一組の β と N_f の組合せのみに着目すると、それらの関係は図11のように整理される。目標の形状精度を最も高能率に得ることができる β の値は N_f が変化することによって変化するが、 β が46度、 N_f が3枚の場合に V_r は最大になっていることがわかる。図11と同様の数値実験を ΔZ を30 mmと設定した場合について行い、 V_r と β ならびに N_f との関係を求めると図12の結果を得

図10 $\delta_{\max}$ が6 μm になる β と N_f との組合せ

図11 最も高能率に $\delta_{\max}$ を6 μm にし得る β と N_f との組合せ($\Delta Z=10\text{ mm}$)

る。先に図11のように得られた結果とは異なり、 N_f が増加するに従い β は階段状に減少していることがわかる。

図11ならびに図12のように得られた解析の結果を理解する目的で、式(25)の関係を満たす N_f と β との組合せに対してのみ再度 $\delta_{\max}$ が $6\mu\text{m}$ になるような ΔR を求め、 V_r と β ならびに N_f との関係を求めた。図11と同様、 ΔZ を10mm、 S_t を $50\mu\text{m/刃}$ と設定した場合に得られた解析の結果を図13に示す。パラメータには N_i を用いた。図13に太線で示したとおり、 N_f を変化させた各場合とも V_r は N_i が2枚の場合に最大になっている。同様の計算を ΔZ が30mmの場合について行くと図14の結果を得る。 V_r を最大にし得る N_i の値は N_f や β が増すに従い変化していることがわかる。また図14の結果は図11と完全に一致している。

したがって ΔZ を10mmと設定した図11の場合には、 N_f を変化させたとしても V_r を最大にし得る N_i に変化がなかったために、一様連続な β と N_f と

の関係が得られたと考察される。一方 ΔZ を30mmと設定した図11の場合には、 V_r を最大にし得る N_i の値が N_f が異なることによって変化したために、階段状の β と N_f との関係が得られたと考察される。

図13、図14と同様の解析を ΔZ を変化させた場合について行い、最も高能率に目標の形状精度を達成することができる β と ΔZ との関係を求めると図15の結果を得る。縦軸には式(24)のように計算される V_r 、参考のために式(25)より得られる β と ΔZ との関係を同図に破線で付記した。 β の値は ΔZ が異なることによって複雑に変化しているように見えるが、その変化は式(25)の法則に従っていることがわかる。図15と同様の整理を N_f に関して行った結果を図16に示した。

このように工具支持系の曲げ剛性や切れ刃の切削性能を事前に把握しておけば、所定の加工形状に対して現有の工作機械で目標の加工精度を最も高能率に得ることができる工具の仕様を決定することが可能である。すなわち専用工具の設計が可能である。なお図15や図16と同様の工具設計は、工具径が異なる場合に

図12 最も高能率に $\delta_{\max}$ を $6\mu\text{m}$ にし得る β と N_f との組合せ($\Delta Z=30\text{mm}$)

図14 式(25)を満たす β 、 N_f と V_r との関係($\Delta Z=30\text{mm}$)

図13 式(25)を満たす β 、 N_f と V_r との関係($\Delta Z=10\text{mm}$)

図15 最も高能率に $\delta_{\max}$ を $6\mu\text{m}$ にすることができる β と ΔZ との組合せ

についても行うことが可能である。

4.3 最適工具の切削性能 図15と図16の結果より、 R が5mmのエンドミルで ΔZ が10mmであるような快削黄銅の側面切削を行う場合、最も高能率に $\delta_{\max}$ を6 μm にすることができる β の値は46度、 N_f は3枚であると推定された。このように選択された工具を用い、再度 $\delta_{\max}$ と ΔR との関係を求めると図17の結果を得る。パラメータには S_t を用いた。先に β を30度、 N_f を4枚と設定した場合に図6のように得られた解析の結果に比べると、 $\delta_{\max}$ は全体的に30%程度減少していることがわかる。

図17のように得られた結果をもとに、 $\delta_{\max}$ を6 μm にすることができる加工条件と加工能率との関係を求めると図18の結果を得る。同じ工具径のエンドミルを用いた場合に図7のように得られていた結果に比べると、 S_t が大きな領域で V_r は2倍程度大きくなっていることが明らかである。このように加工形状に最も適した工具を選択することによって、既存の工具を用いた場合に比較して目標の精度を得るに際しての加工能率を大幅に向上させることが可能である。すなわち本論文で開発した精密加工支援システムが持つ、工具仕

様の選択機能と加工条件の選択機能とを組合せて用いることによって、最適工具仕様と加工条件との組合せを同時に求めることができる。

5. 考 察

5.1 最適化手法 最適値問題を線形計画法や非線形計画法などの数理計画法⁽⁷⁾を用いて解析しようとする場合、評価関数や制約条件は事前に数学的に陽な形で定式化されている必要がある。一方本論文で取扱った問題の場合、最適値問題では状態変数⁽⁸⁾とみなすことができる加工面の最大誤差 $\delta_{\max}$ を事前に数学的に陽な形で求めておくことが無理であるため、既に提案されているような数理計画法を直ちに適用することは困難であると判断した。その代わりに最適解の探索法として知られている1変数探索を制御変数を変化させた各場合について逐次行うことによって、最適値を求めるという操作を行った。

図8～図11の結果に即して言えば、制御変数として考えている切れ刃のねじれ角 β と刃数 N_f のうち N_f を4枚と固定すると、 $\Delta R < 0.1\text{mm}$ 、 $\beta < 60^\circ$ 、 $\delta_{\max} = 6\mu\text{m}$ という制約条件を満たす β の値は図8の太線、上記の制約条件を満たす評価関数 V_r の値は図10の折れ線、図10の結果をもとに評価関数を最大にする β の値を1個求めることができる。これは1変数探索を行った場合に極値が1個求まったことに相当する。そこで次に新しい探索方向として制御変数として用いている N_f を順次変化させ、図8と同様の1変数探索を行った結果が図10、1変数探索を行った場合に得られた極値のみをまとめた結果が図11であるといえる。したがって図11の最大値を満たす1組の N_f と β の組合せは、すべての制約条件を満たすと同時に評価関数を最大にする制御変数の組合せであるといえることができる。

図16 最も高能率に $\delta_{\max}$ を6 μm にすることができる N_f と ΔZ との組合せ

図17 最大加工誤差 $\delta_{\max}$ と ΔR との関係

図18 $\delta_{\max}$ が6 μm になる ΔR と S_t との組合せ

5.2 工具の曲げ剛性 本論文では

① 工具の断面積率⁽⁹⁾が0.9程度、式(7)のように定義した α の値が0.85程度の高剛性な刃形であれば、1枚刃ならびに2枚刃エンドミルで曲げ剛性に異方性が生じたとしてもその度合は軽微である。

② 仕上げ加工専用的高剛性なエンドミルを新たに開発しようとする場合、 N_f や β を変化させたとしても α の値が一定になるような工具を設計することは必ずしも不可能ではない。

と考え、工具の最適仕様を求めるに際して α の値を変化させていない。

一方市販のエンドミルでは、工具径が同じでも切れ刃の刃数 N_f やねじれ角 β が異なることによって曲げ剛性の値は変化している。また1枚刃ならびに2枚刃エンドミルには曲げ剛性に無視し得ない程度の異方性がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。したがって本論文で開発した最適設計の手法、とくに最適加工条件の選択法を市販の工具に対して適用するに際しては、現有の工具に対して事前に α の値を測定しておく必要がある。また1枚刃ならびに2枚刃エンドミルでは、式(19)ならびに式(20)の解析を工具の異方性主軸に対して行った後、得られた結果の y 方向成分のみを重ね合わせといった加工面誤差の解析⁽⁵⁾を行う必要がある。このように現有の工具に即した加工環境の設定や加工面誤差の解析を行う必要はあるが、最適化の手法は直ちに適用することが可能である。

6. 結 言

高精度なエンドミル加工を実現するに際しては機械要素技術や工具技術のほかに所定の精度を高能率に得ることができる、工作機械/工具仕様/加工条件の組合

せを選択することが可能であるようなソフト技術の開発が必要であると考え、エンドミル精密加工用の支援システムを開発した。本論文で得た主要な結論は以下のように整理される。

1) 工作機械/工具仕様の組合せが異なることによって工具支持系の曲げ剛性は変化するが、工作機械主軸の半径方向コンプライアンスと工具の曲げ剛性に分離してこれを定量評価することが可能である。

2) 工具仕様/被削材種の組合せが異なることによって切れ刃の切削性能は変化するが、切れ刃に作用する切削抵抗を切削力と押しならし力に分離してそれらを定量評価することが可能である。

3) 工具支持系の曲げ剛性や切れ刃の切削性能を事前に把握しておけば、現有の工作機械やエンドミルで所定の加工精度を最も高能率に得るための加工条件を選択することが可能である。

4) 本論文で開発した支援システムは加工条件の自動選択だけでなく、所定の加工形状に対して現有の工作機械で目標の加工精度を最も高能率に得ることができる最適工具の設計にも適用することができる。

文 献

- (1) 仙波・佐久間・田口・内山, 機論, 55-511, C(1989), 787.
- (2) 仙波・佐久間・下浦, 機論, 56-521, C(1990), 195.
- (3) 白瀬・稲村・安井, 精密工学会誌, 52-4(1986), 119.
- (4) 藤井・岩部, 精密機械, 49-6(1983), 45.
- (5) 松原・山本・水木, 精密工学会誌, 52-4(1986), 667.
- (6) 仙波・田口・佐久間・穂積, 機論, 57-533, C(1991), 313.
- (7) 岩田・沖野・佐田・橋本・室津・大場, 精密工学講座13, 生産システム工学, (1982), 35, コロナ社.
- (8) 田中・中村, コンピュータによる構造工学講座II-7-B, 建築構造物の自動設計と最適設計, (1973), 64, 培風館.
- (9) ツールエンジニア編集部, 機械技能ブックス②, エンドミルのすべて, (1988), 62, 大河出版.