エンドミル加工精度に関する研究 (第2報)*

—側面切削実験における加工精度—

松原 十三生** 山本 久隆** 水本 洋**

Study on the Accuracy in End Mill Operations (2nd Report)
—Machining Accuracy in Side Cutting Tests—

Tomio MATSUBARA, Hisataka YAMAMOTO and Hiroshi MIZUMOTO

This paper deals with the experimental analysis of the machining accuracy in end mill operations. The accuracy expected by the theory, which is defined by both the static stiffness of an end mill and the instantaneous cutting force, is verified by a series of side cutting tests. The results obtained are as follows: (1) The static stiffness of an end mill analyzed by transfer matrix method, the instantaneous cutting force estimated in a simple cutting model, and the accuracy determined by these are fairly in accord with the experimental results. (2) The accuracy lowers with increasing feed, width of cut and helix angle, while depth of cut hardly influences it in usual operations. (3) The shape of the cross sections of the workpiece produced in the side cutting can be estimated by the cutting force component F_y (normal to the cut surface).

Key words: machining accuracy, stiffness of end mill, instantaneous cutting force, helical end mill, end mill operation

1. 緒 言

前報¹⁾では、エンドミルの側面切削における加工精度の系統的な理論解析について詳しく述べた。その解析の特徴は、(1) 断面形状の複雑なねじれ刃エンドミルの静剛性を、伝達マトリクス法により計算した。(2) 加工中に刻々変化する瞬間切削力を、任意の加工条件に対して定式化した。(3) その瞬間切削力とエンドミルの静剛性によって、エンドミルの瞬間たわみを決定し、加工精度に及ぼす種々の条件の影響を明らかにしたことである。

そこで本報では、この理論解析で得られた瞬間切削力および加工精度の結果を、送り、切込み、切削幅などをパラメータにした側面切削実験により検証し、本解析法の妥当性を検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。使用したエンドミルはストレートシャンクの2枚刃エンドミル(直径15 mm, 高速度鋼SKH 9相当)で、ねじれ角の異なる4

種類($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ および 40°)を準備した。これを立フライス盤の主軸にチャックを介して取り付けた。このときのエンドミルの振れは約 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ であったが、瞬間切削力、あるいは加工面のツースマークに2枚の切れ刃による違いは見られなかったので、切削時にはその影響はほとんどないと考えられる。また、被削材(SS 41, $\text{HV} = 162$)をテーブルに固定された動力計に取り付け、テーブルの左右送りによって湿式側面切削を行った。

切削力を測定するとき動力計のねじれの影響がでないよう、また切込み方向と送り方向の切削力が独立に

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

* 原稿受付 昭和60年6月29日, 5th ICPE (昭和59年7月9日)にて発表

** 正会員 鳥取大学工学部(鳥取市湖山町南4-101)

検出できるように、動力計の円筒状検出部に2組のひずみゲージを貼り付けた。加工中、周期的に作用する切削力の周波数（最高で約30 Hz）に対して、動力計の固有振動数が約700 Hzと十分高くなるように設計して共振を防いだ。

被削材は、固定端から切削力作用点までの距離が常に一定（10 mm）になるように、アクリル板とともに固定した。また、アクリル板はあらかじめ設定切込み面まで微小切込みによって仕上げ、加工精度の測定基準面とした。アクリル板切削時に生じる切削力は被削材切削時の1/10以下で、しかも微小切込みであるから、加工されたアクリル板端面を加工精度測定時の基準面とみなすことができる。そこで本研究では、切削終了後、この基準面と被削材加工面との段差を電気マイクロメータによってエンドミル軸方向の数箇所（理論解析で加工誤差が最大になる箇所を含む）において測定し、それらの最大値を加工精度とした。

3. 実験結果および考察

3.1 エンドミルおよびその他の部分の剛性

エンドミル加工における加工精度は、種々の要因に支配されていると考えられる。このうち、切削熱の影響は本実験のように短時間（約20 s）で、しかも十分な切削油を用いた断続切削の場合には考慮する必要がなく、また実験後の工具摩耗は工具顕微鏡で測定できない程度であったので、その影響も無視できると考えられる。そこで本研究では、エンドミル、その支持系および被削材支持系の剛性によって加工精度が決まるものとする。

まず、エンドミルを含む工具支持系のコンプライアンスについて述べる。エンドミルの切れ刃部に力が作用したとき生じるたわみは、チャックおよびコレットの変位と傾き（これらの部分はその形状から推測できるように、それら自身の曲がりは無視できるとする）、そしてエンドミルのたわみに依存すると考えられるので、藤井ら²⁾と同様の実験によってそれらの影響を分離した。直径15 mm（ねじれ角30°、突出し80 mm）のエンドミルの場合、切れ刃部下端におけるたわみの内訳は、エンドミル自身の曲げによるたわみが約84%、コレットの変位と傾きによるものが4%、そしてチャック部のそれらによるものが約12%であった（これは静荷重を切れ刃の方向にかけたときの結果であるが、それと直角な方向においてもほぼ同様の結果が得られた）。藤井らの結果に比べてエンドミル自身によるたわみの割合が大きいが、これは使用したエンドミルの突出し長さが直径に比較してかなり長いこと

Fig. 2 Geometry of a helical end mill

が主な原因と思われる。この実験から得られた各部のコンプライアンスは、エンドミル自身で $0.42 \mu\text{m/N}$ 、コレットで $0.02 \mu\text{m/N}$ 、そしてチャックで $0.06 \mu\text{m/N}$ であった。

次に、被削材支持系のコンプライアンスについて調べた。これは被削材を保持している動力計のコンプライアンスで決定され则认为られるが、ここでは動力計を取り付けているテーブルのコンプライアンスも測定した。その結果、加工精度に影響を及ぼす切込み方向のコンプライアンスは、動力計で $0.015 \mu\text{m/N}$ 、テーブルで $0.003 \mu\text{m/N}$ となった。これらの値もエンドミルのコンプライアンスに比べて非常に小さいことがわかる。しかし、コレット、チャック、動力計およびテーブルのコンプライアンスの和は約 $0.1 \mu\text{m/N}$ になり、エンドミル ($0.42 \mu\text{m/N}$) に対して無視できない。そこで、3.3節以後で述べる理論加工精度を計算する際には、エンドミルのたわみにこれら各部のたわみを重量しなければならない。

以上の実験によって、加工精度に及ぼすエンドミル以外の各部の影響がわかったので、次にエンドミル自身の切削力作用点における静剛性について述べる。一般によく用いられる2枚刃エンドミルの模式図を図2に示す。右図は切削力作用点の断面を表しており、IおよびII軸は静剛性が最小および最大になる方向である（曲げの主軸）。また、 θ はその曲げの主軸と基準軸（ ξ, η 軸）のなす角である。前報で述べた伝達マトリクス法を用いると、エンドミル軸まわりの任意の方向の静剛性が計算できる。表1は直径の異なる3種類のエンドミルに対する曲げの主軸の方向、および基準軸方向の静剛性の計算結果と実験結果を比較したものである。なお、この表の実験値は、上述の方法によって他の部分の影響を取り除いたエンドミル自身の静剛性である。ここで、曲げの主軸方向の静剛性ではなく、基準軸方向の静剛性を上げたのは、実験において荷重を正確に加えることができるからである。この表よ

Table 1 Stiffness of helical end mill ($L_0=3.5$ mm, $\gamma=30^\circ$)

D mm	L_1 mm	L_2 mm	θ° (Th.)	K_x MN/m		K_y MN/m	
				(Th.)	(Ex.)	(Th.)	(Ex.)
15	31.0	45.5	-15.2	2.26	2.38	2.53	2.48
12	25.0	33.5	1.1	2.20	2.12	2.49	2.10
10	12.0	31.5	-24.5	1.71	1.72	1.93	1.63

り、伝達マトリクス法で計算した基準軸方向の静剛性は、直径 12 mm と 10 mm の K_y 以外は測定値と $\pm 5\%$ 程度の誤差しかなく、非常によく一致していることがわかる。ねじれた切れ刃をもつエンドミルのような複雑な形状に対して伝達マトリクス法を適用する場合、計算精度の点で最も重要なのは部材の分割数である。本報での分割数は一様断面のシャンク部で 3 分割、断面が一様でない切れ刃部で 20 分割であるが、表 1 に示されるように、この程度の分割数を用いれば実用上十分な精度で静剛性が得られ、前報で述べた手法は妥当であると言える。

3.2 エンドミルに作用する瞬間切削力

これまで、ねじれ刃エンドミル（あるいはフライス）加工において時々刻々変化する切削力を調べた研究はいくつかある。これらの中には、瞬間切削力を実験的に求めた例もあるが³⁾⁴⁾、切削にかかわっている切れ刃（以後、これを干渉切れ刃と呼ぶ）各部における瞬間切込み深さを考慮して瞬間切削力を計算した例は非常に少ない⁵⁾⁶⁾。ここでは、前報で述べたような簡略化した方法によって、瞬間切削力を計算した。すなわち、まず前回と今回の切削における切れ刃軌跡から瞬間切込み深さを求め、次に切れ刃の微小要素は 2 次元切削を行うものとして、一つの要素に作用する切削力を瞬間切込み深さから計算する。このようにして求めた切削力を干渉切れ刃全体について積分すれば、ある時刻における瞬間切削力が求まることになる。

図 3 に瞬間切削力の計算値（上図）と実験値（下図）を示す。これは 2 枚刃エンドミル（ねじれ角 30° ）の例であるが、図中に示された条件の下では 2 枚の切れ刃が同時に切削にかかわることはなく、1 枚の切れ刃による 1 回の切削を表している。上向き削り、下向き削りは記号 U, D で表す。また、送り方向および切込み方向の切削分力は、それぞれ F_x と F_y で表している。両図から、理論解析で予測された切削力の変化の様子は、実験結果と良い対応を示していることがわかる。また、切削分力 F_y は上向き削りの場合、切削前半でエンドミルが被削材から遠ざかる方向に、後半では食い込む方向に作用していること、あるいは下向き削りの F_y の方が上向き削りの場合より大きいことも、実験結果

Cutter diameter 15 mm Depth of cut 2 mm
Feed 0.179 mm/tooth Width of cut 5 mm
Helix angle 30°

Fig. 3 Instantaneous cutting force **Fig. 4** Influence of feed on accuracy

から確認できる。このような計算結果と実験結果の良い一致は、前報で述べた解析法の妥当性を表していると言える。

3.3 送りの影響

3.1 節で既に述べたように、エンドミル加工における加工精度を正確に求めるためには、エンドミル自身のたわみ以外に工具支持系や被削材支持系のたわみも考慮する必要がある。図 4 には加工精度に及ぼす送りの影響が示されているが、図中の実線と一点鎖線は上述の考え方による加工精度の計算結果である。また、

Fig. 5 Influence of depth of cut on cutting force

●印と○印はそれぞれ上向き削りと下向き削りにおける実験値である。計算結果は送りの増加とともに加工精度が直線的に悪くなることを示しており、実験値もほぼそれに近い結果となった。

さらに、上向き削りの方が下向き削りより加工精度が良いことが実験的にも明らかであり、下向き削りで得られる加工誤差は上向き削りの3~4倍にも達している。これは切込み方向の切削力の最大値についてみた場合、下向き削りの切削力は上向き削りの約5倍であるということと対応している。ただし、送りを変化させる場合のように、最大切削力と加工面として残る部分を切削しているときの切削力がほぼ比例する場合にのみ、この対応関係が成り立つ。

3.4 切込みの影響

最大切削力に及ぼす切込みの影響を図5に示す。これは上向き削りの例で、3種類の理論曲線と実験値は非常に良い対応を示している。この実験結果でも、ある切込み以上では、加工精度を決定づける F_{y1} の値は一定値になることがわかる。一方、下向き削りでは、理論計算と同様に切込みの増加にはほぼ比例して F_y が大きくなった。

図6は加工精度に及ぼす切込みの影響を示す。実験値は下向き削りのとき、特に切込みが小さい場合、計算結果と一致していないが、切込みを増加させても、さほど精度は悪化していない。一方、上向き削りでは切込みが大きくなると、むしろ精度が少し良くなっている。また、図4(送りの影響)と同様に、上向き削りの方が下向き削りより精度よく加工されていることがわかる。

3.5 切削幅の影響

Fig. 6 Influence of depth of cut on accuracy

Fig. 7 Influence of width of cut on accuracy

図7に加工精度と切削幅の関係を示す。上向き削りの場合には、ある程度切削幅が大きくなると、加工誤差は増加しないことが実験結果でもわかる。しかし、下向き削りでは、ほぼ2次関数的に精度が悪くなっている。

図4,6および7では、加工面のエンドミル軸方向における加工誤差の最大値が、切削条件によってどのように影響を受けるのか述べてきたが、加工後の被削材断面形状も非常に重要な問題と考えられるので、それについても調べてみた。図8に被削材断面形状の計算結果と実測値を示す。基準面と加工面の段差は被削材上下方向に1mm間隔で測定した。図中の一点鎖線が設定切込み面、○印が実験値、破線が計算値を表している。まず、上向き削りの場合には、理論的には被削材上端で最も精度が悪くなるはずであるが、実際の断面形状は下端から5~6mmの箇所でも最も悪い凸形に生成されているのがわかる。さらに、被削材下部では、計算で得られなかった負の加工誤差、すなわち過切削になっている。一方、下向き削りでは実験値は計算結

Fig. 8 Cross sections of workpiece

Table 2 Stiffness of helical end mill
($D=15$ mm, $L_1=21.0$ mm,
 $L_2=19.5$ mm)

γ°	L_s mm	θ°	K_ϵ MN/m	K_γ MN/m
0	3.5	-36.8	9.27	9.45
15	6.5	-75.5	20.55	17.85
30	29.5	74.2	20.70	18.96
40	31.5	34.4	17.56	18.65

果と良く一致しており、被削材下端で加工誤差が大きい傾斜形に生成されている。このように理論解析で求めた被削材断面形状は、上向き削りにおいて多少の違いも見られるが、実験結果とかなり良い対応を示すことがわかる。

3.6 ねじれ角の影響

前報でも加工精度に及ぼすねじれ角の影響について述べたが、そこではねじれ角の変化による切れ刃各部の切込み深さ、言い換えれば瞬間切削力の大きさとその方向の影響を調べるために、エンドミルの剛性を一定とみなして解析を行った。しかし、市販のエンドミルの断面形状や切れ刃長さは、ねじれ角により異なっているため剛性も同じではない。本実験でもそのような異なる4種類のエンドミル($\gamma=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 40^\circ$)しか入手できなかったため、それらの断面形状を測定し、静剛性を計算することによって加工精度を理論的に求めた。また、切削実験ではエンドミルの突出し長さを一定($L_1+L_2=40.5$ mm)にして、各ねじれ角での加工精度を比較した。このときの各エンドミルの静剛性の計算結果を表2に示す。

まず、切削力に及ぼすねじれ角の影響を調べた結果、上向き削り、下向き削りにかかわらず、ねじれ角が大きくなれば F_x, F_y とともに緩やかに減少することが明らかになった。これは計算結果と一致している。

図9に加工精度の実験結果を示す。なお、図中の理論曲線は、実際に使用した4種類のエンドミルの計算値をなめらかに結んだものである。この図で $\gamma=0^\circ$ の

Fig. 9 Influence of helix angle on accuracy

場合、計算値に比べ実験値は非常に大きく、精度が悪い。この差はエンドミルの静剛性の計算値と実測値の違いでは説明できないほど大きく、切れ刃全体が同時に切削を開始するためにエンドミルに衝撃力が作用し、その振動によってこのような大きな差が生じたものと考えられる。また、 $\gamma=30^\circ, 40^\circ$ では上向き削りの場合、計算結果と一致しているが、下向き削りのときには計算値よりもかなり大きな加工誤差になった。この原因としては、エンドミルの剛性が計算と実験で少し違っていること、あるいはエンドミルの突出し長さがチャック・コレットの剛性測定時より短いために、切削中のエンドミルの支持状態が変わっていることが考えられる。しかし、上向き削りでは実験値と計算値が非常によく一致していることを考えると、これは下向き削りに固有の原因と思われる。下向き削りでは切込み深さが急激に増加するため、切削初期に大きな切削力が作用しやすく、静的な力だけを考慮した場合に比べて大きな加工誤差を生じる可能性があり、上記の差はこれに起因するものと思われる。このような切削状態の場合には、エンドミルの動的挙動も考慮して精度を計算する必要がある。これは今後、検討しなければならない重要な問題である。

4. 結 言

エンドミルの側面加工時における加工精度は、エンドミルおよびその他の支持系の静剛性と、加工中生じる瞬間切削力によって決定されたと考え、理論的加工精度を求めた。これを種々の切削実験により検証した結果、次のような結論が得られた。

- (1) ねじれ刃エンドミルの静剛性は、伝達マトリクス法を用いることによって、実用上十分な精度で

計算できる。

- (2) 前報で提案した比較的簡単な切削モデルによって得られる瞬間切削力は、実験結果と良く一致した。
- (3) 加工面として残る領域を切削しているときの F_y から推定された被削材断面形状は、実験結果とかなり対応していた。
- (4) 加工精度の実験結果は、送り、切削幅および切込みの変化に対して計算結果と定量的な一致がみられ、理論の妥当性が示されたと言える。しかし、下向き削りの切込み、ねじれ角については差がみられ、特に、ねじれ角が小さいとき非常に大きな差になった。したがって、ある程度大きな衝撃力が作用してエンドミルが振動するような実験条件では、エンドミルの動的挙動も考慮しなければならないと考えられる。

謝 辞

終わりに、本研究の実験等に協力された鳥取大学工

学部岡村進技官、学生宗森精一氏、宮本誠司氏および永見浩司氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 松原十三生, 山本久隆, 水本 洋: エンドミル加工精度に関する研究(第1報)——エンドミルの剛性と側面切削における加工精度, 精密工学会誌, **52**, 4 (1986) 667.
- 2) 藤井義也, 岩部洋育: ねじれ刃エンドミルのたわみに及ぼすチャックおよびコレットの影響と加工精度, 精密工学会誌, **52**, 2 (1986) 273.
- 3) 加藤 仁, 藤井 洋, 山田寿勝, 石野好胤: ねじれ刃平フライス削りについて, 日本機械学会論文集, **34**, 265 (1968) 1601.
- 4) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係(第1報)——加工誤差生成機構, 精密機械, **43**, 7 (1977) 807.
- 5) 広田明彦, 臼井英治: 平フライス切削における切削抵抗の解析的予測, 精密機械, **44**, 4 (1978) 508.
- 6) 藤井義也, 岩部洋育: ねじれ刃エンドミルの切削機構, 昭和55年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1980) 888.

通産省「マッハ25」調査研究

通産省は、米英両国が計画中の大気圏外を音速の25倍で飛行する極超音速機の調査研究に、62年度の新政策として取り組む方針を固めた。同省では亜音速次期民間輸送機（ボーイング）に続くプロジェクトとして位置づける一方、宇宙環境利用への方向性を模索する。開発では米国NASA（航空宇宙局）の新オリエント・エクスプレス、英国のHOTOL計画のいずれかと国際共同開発を目指すものである。研究機関として日本航空宇宙工業会に「宇宙空間特設委員会」（仮称）の設置を計画している。

通産省が研究を開始する極超音速輸送機はターボジェットと超音速を利用して空気を圧縮するスクラムジェットの二本立てによる推進力を利用、宇宙空間を25マッハ以下の極超音速で飛行する。英仏共同開発のコンコルドが2.2マッハであり、けたはずれの猛スピードで東京-ワシントン間をわずか2時間でとび越える。米国が

打ち出した新オリエント・エクスプレス計画に呼応したもののだが、英国は米国に先立ってHOTOL計画を進めている。

この極超音速機はスペースシャトルに取って代わる性能を持っているため、当面、軍事利用が優先する可能性もある。ただ宇宙環境利用が進めば民間利用のニーズが広がるだけに、わが国としても参画したいところである。

開発には両計画とも30億ドルを超える開発費が必要と見られ、国際共同開発に発展すると見られる。同省としては来年度に日本航空宇宙工業会に宇宙空間輸送機特設委員会を設け、研究を開始することになった。

（服部 敏夫）

注）HOTOLはHorizontal Take-Off and Landingの略で水平離着陸方式を採用した宇宙空間輸送機