

エンドミルによる高速加工に関する研究* (輪郭加工による加工精度と誤差要因)

岩部 洋育*¹, 竹本 和博*², 今井 純一*³

Study on High-Speed Machining by End Mill (Accuracy by Contouring and Error Factors)

Hiroyasu IWABE, Kazuhiro TAKEMOTO and Junichi IMAI

This paper deals with the accuracy of high-speed machining by an end mill on a circular and square workpiece and the error factors involved. The results are as follows. (1) In the steady region of cutting conditions, the profile error generation is related to the following: (a) the tool mark, (b) the cutting force, (c) the cutter radius, (d) the run-out of the cutter and (e) the droop. (2) However, in the transitional region, the following errors were generated at the periphery of the workpiece: (f) the notch-type error at the outset of the machining, (g) the overshoot error and (h) the gap-type and projection-type errors at the boundary point of the quadrant. (3) The error due to run-out of the cutter increased to the square of the angular velocity of the spindle in machining. (4) The error factors of the dimensional error of the workpiece machined to be circular are classified into (a), (b), (c), (d) and (e) listed above. Also, the predicted value calculated by adding all of the above error components effected on the dimensional error is almost coincidental to the experimental value.

Key Words: High-Speed Machining, Accuracy, Contouring, Error Factors, End Mill, Circular Workpiece, Square Workpiece

1. 緒 言

近年主軸回転数が毎分数万回転の高速主軸を搭載したNCフライス盤ならびにマシニングセンタが開発されており、送り速度も毎分数十mを実現している⁽¹⁾。この種の工作機械を用いるとSchulz・森脇の分類による高速加工⁽²⁾が可能となり、生産性を大きく改善することが期待でき、その効果も報告されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

しかし、主軸回転数を高くすると工具の偏心により遠心力が発生し、角速度の二乗に比例して工具の振れが増大する。また送り速度の増加により輪郭加工時にはドループと呼ばれる制御系の追従誤差が発生し、同様に送り速度の二乗に比例する。その結果として切削中に工具と工作物の相対変位が正しく維持できなくなり、加工誤差の原因となることが容易に予想される。

しかし、上記の工作機械はまだあまり普及していないため、垣野らによる報告⁽⁵⁾があるものの、高速加工における輪郭加工精度問題に関して十分明らかにされ

ていないのが現状である。

そこで本研究は、上記の高速加工機による輪郭加工誤差ならびに加工誤差要因を把握することを目的とする。しかし、切削中における工具と工作機械の挙動を計測することは容易ではない。そこで工作物には、切削中における両者の挙動が加工面に転写しやすいアルミニウム合金を用いて実験を行った。輪郭形状は測定が容易な正形状と真円形状で代表し、加工面に転写された加工誤差の分類を行うとともに、真円形状については円運動精度の測定結果との比較も行った。また、各誤差要因に基づく誤差を求め、それらの和による寸法誤差の推定値と実験値を比較することにより、誤差要因の分類と誤差の計算方法の妥当性を示している。

2. 実験条件および方法

2・1 実験条件 実験には2台の工作機械を使用し、おもな仕様は表1に示すとおりである。機械Aは(株)牧野フライス製作所、A55、横形マシニングセンタであり、機械Aによる実験は同社のR&Dセンタにて行った。機械Bは大阪機工(株)、MHA-350、立形NCフライス盤であり、機械Bによる実験は聖和精機(株)、BT50-TD17B、増速アタッチメントを用

* 原稿受付 1996年10月16日。

¹ 正員、新潟大学工学部(〒950 21 新潟市五十嵐2の町8050)。

² YKK(株)(〒938 黒部市吉田200)。

³ 新潟大学工学部。

いて主轴の回転数を6倍にし、簡易的な高速加工を試みている。

実験に使用した工具および工作物は次のとおりである。

- 工具：直径10 mm, 4枚刃, ねじれ角30°, 超硬ソリッドエンドミル, (AL, Ti)Nコーティング
- 工作物：アルミニウム合金(A5052s), 200×200×50 mm(図1, 2参照)

おもな切削条件は表2, 3に示すとおりである。

2.2 実験方法 実験は図1, 2に示す形状の工作物を治具を用いてテーブルに固定し、図3に示す工具経路により正方形形状および真円形状の外周面の輪郭加工を行った。正方形形状の加工においては、図3(a)に

示すように点P1より矢印に沿ってP6までを同一の切削条件とし、点P6よりP1までを別の条件で加工している。したがって一辺の長さが40, 80および120 mmの正方形をピラミッド形状に積み重ねた1個の工作物で6種類の実験を行うことができる。一方円加工においては、図3(b)に示すように工具は点Q1より接線方向から工作物に侵入し、点Q2より時計方向

Table 1 Machine tools used

	machine A	machine B
machine	machining center horizontal type	NC milling machine vertical type
spindle revolution	120 ~ 20000 min ⁻¹	240 ~ 15000 min ⁻¹
feed	1 ~ 16000 mm/min	1 ~ 5000 mm/min
controller	FANUC 0-MC	MELDAS 325M-V

Table 2 Cutting conditions for straight machining [(): Machine B]

(a) In case of constant spindle revolution

feed	F mm/min	16000	12000	8000	4000	2000	1000
	f mm/tooth	0.2	0.15	0.1	0.05	0.025	0.0125
spindle revolution	N min ⁻¹	20000 (10000)					
cutting speed	V m/min	628.3 (314.2)					
depth of cut	mm	radial:0.2, axial:7.0					

(b) In case of constant feed per tooth

feed	F mm/min	16000	12000	8000	4000	2000	1000
	f mm/tooth		0.2 (0.1)				
spindle revolution	N min ⁻¹	20000	15000	10000	5000	2500	1250
cutting speed	V m/min	628.3	471.2	314.2	157.1	78.5	39.3
depth of cut	mm	radial:0.2, axial:7.0					

Table 3 Cutting conditions for circular machining [(): Machine B]

feed	F mm/min	16000	12000	8000	4000
	f mm/tooth		0.2	0.15	0.1
spindle revolution	N min ⁻¹	20000 (10000)			
cutting speed	V m/min	628.3 (314.2)			
depth of cut	mm	radial:0.2, axial:7.0			

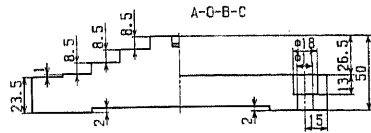
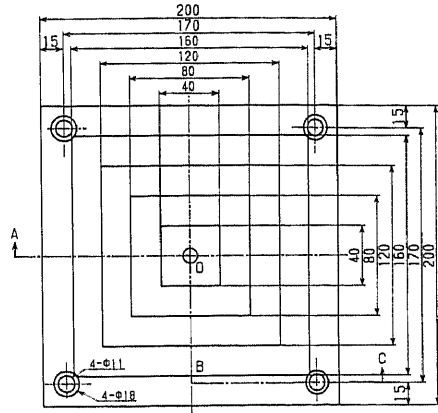


Fig. 1 Workpiece for straight machining

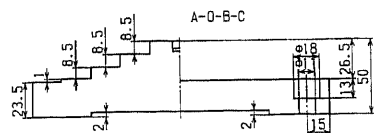
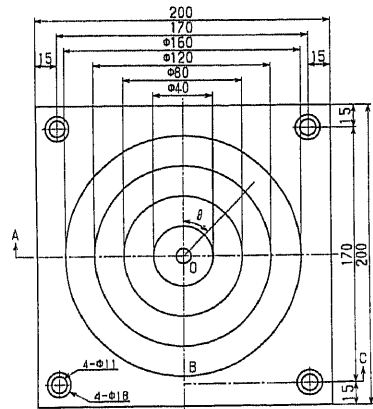


Fig. 2 Workpiece for circular machining

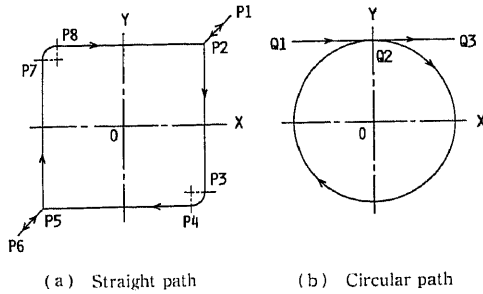


Fig. 3 Cutter path

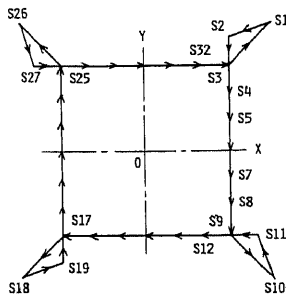


Fig. 4 Cutter path for measurement of cutter run-out

に真円加工を行った後再び点 Q2 より接線方向に工作物から離れて、点 Q3 まで移動する。また、真円加工においては同一の条件で一つの円加工を行うため、1 個の工作物で 3 種類の実験を行っている。なお、すべての加工には後述するフィード・フォワード補償を採用している。

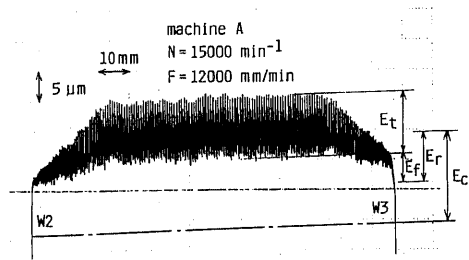
この外工作物の最外周の直線部を用いて、図 4 に示す工具経路により工具の振れを測定する実験を行っている。具体的には、互いに向かい合っている例えば点 S9 より S12 までと点 S32 より S3 までの直線部を同一の主軸回転数で加工し、両直線部の間隔を指令値と比較することにより、その回転数における工具の振れの大きさを簡易的に予測している。

加工誤差の測定は真円度測定機(ランクテラーホブソン; Talyround 3)、三次元測定機(東京精密; UA-40OA)および電気マイクロメータ(東京精密; E-DI)を用い、半径減少量の測定には円運動精度測定機(牧野フライス製作所; CMD)を用いた。

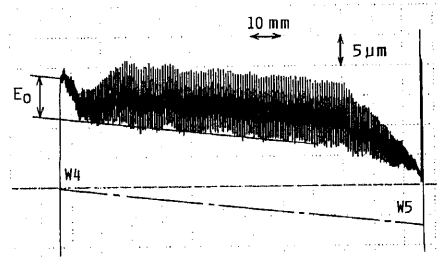
3. 実験結果および考察

3.1 直線加工による加工誤差

3.1.1 加工誤差の分類 図 5, 6 は機械 A および B を用い、図中に示す条件により直線加工を行った加工面の形状を電気マイクロメータにより測定した結

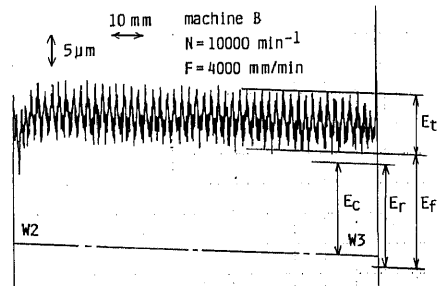


(a) Machining to -Y direction

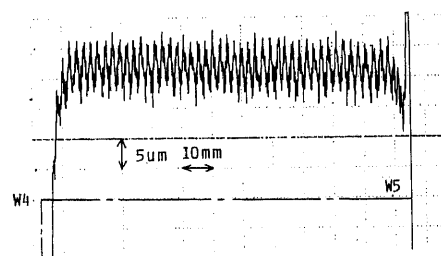


(b) Machining to -X direction

Fig. 5 Error shape of machining surface by straight path (Machine A)



(a) Machining to -Y direction



(b) Machining to -X direction

Fig. 6 Error shape of machining surface by straight path (Machine B)

果である。それぞれ図 5(a)、図 6(a)に関して、左端の点 W2 は図 3(a)に示す工具中心が点 P2 の位置で加工した点に相当し、同様に右端の点 W3 は工具中心

が点 P3 において加工した位置である。一方図 5(b), 図 6(b)の点 W4 および W5 も工具中心が点 P4 および P5 に到達した際に加工された位置である。

なお、両図とも三次元測定機による測定結果および後述する工具の振れの結果等に基づいて、一点鎖線により誤差零の位置を示している。一点鎖線に傾きがみられるが、これは加工後に一度取外した工作物を再度機械 B 上で測定したことによるもので、その際に生じた取付誤差である。

両図の結果より、直線加工による加工誤差を次のように分類することができ、図中にはそれぞれ記号により対応する部分を示している。

- (1) ツールマークによる誤差： E_t
- (2) 切削力による誤差： E_f
- (3) 工具径による誤差： E_c
- (4) 工具の振れによる誤差： E_r
- (5) オーバシュートによる誤差： E_o

以下に上記の分類における各誤差について考察するが、まず図 5(a), 図 6(a)を用いて(1)ないし(3)の誤差について考える。

工具は点 P2 の位置で回転したまま 2 秒間停止させている。そのため点 W2 における誤差は工具径による誤差 E_c から工具の振れによる誤差 E_r を差し引いた値となる。誤差 E_r については後述するが、使用した工具の直径が 9.970 mm であり、 $E_c=15 \mu\text{m}$ となる。

その後工具は $F=12000$ または 4000 mm/min の送りを指令されて直線加工を開始するが、図 5(a)では点 W2 より約 25 mm, 図 6(a)では約 3 mm 切削してから送り速度の指令値に達したものと考えられる。なぜなら、送り速度の増加によりツールマークによる誤差 E_t および切削力による誤差 E_f が増加し、上記の距離切削した後に定常状態を示しているからである。ツールマークによる理論粗さ R_m は後述する式(1)により与えられ、図 5, 6 の条件ではそれぞれ 0.5 および $0.13 \mu\text{m}$ と小さい。しかし機械 A による場合、

工具の振れは後述する図 9 によれば $8 \mu\text{m}$ と大きく、加工面は 4 枚のうち 1 ないし 2 枚の切れ刃によって仕上げられたものと考えられる。なぜなら式(1)に示す 1 刃当たりの送り $f(\text{mm/tooth})$ を 2 ないし 4 倍にして計算すると、 $R_m=8\sim 16 \mu\text{m}$ となり、図 5 の結果 ($10 \mu\text{m}$) がこの範囲内にあるからである。一方機械 B の場合、工具の振れによる誤差に加えて主軸の回転数を 6 倍に増速するアタッチメントの振れが重なり、図 6 の条件では $E_r=20 \mu\text{m}$ と大きい。

切削力による誤差 E_f は主軸回転数が $N=15000$ または 10000 min^{-1} と一定なため、送り速度に比例して切れ刃による切削面積が増加し、切削力が切削面積にほぼ比例することから工具と工作物間の相対変位が生じたことによるものである⁽⁶⁾。送り速度による誤差 E_f を整理すると図 7 のようになる。図 7 から明らかなように、両機械とも送り速度の増加につれて誤差が増大している。また、機械 B による結果が機械 A に比べて非常に大きくなっているが、これは増速アタッチメントの剛性が低かったことによるものと考えられる。

また点 W3 および W5 の手前約 25 および 3 mm の位置から誤差 E_o および E_f が減少しているが、これは送りが減速したことによる。なお両図の点 W3 および W5 近傍における突起状の大きな誤差はバリである。

次に(5)オーバシュートによる誤差 E_o について考える。この誤差は図 5(b)において生じており、機械 B には生じていない。機械 A は横形のマシニングセンタであり、図 3(a)に示すように工具中心は点 P4 に至るまでに重力方向(Y 負方向)となる点 P2 より点 P3 の少し手前まで高速で移動している。点 P3 より点 P4 までは半径 5 mm の円弧が指令されているが、コーナの角度 90° を高速で回ることになり、主軸部が慣性によって重力方向に傾き、工具と工作物に相対変位が生じて誤差 E_o が発生したものと考えられる。直線加工においては正方形を 2 面ずつ L 字に加工し

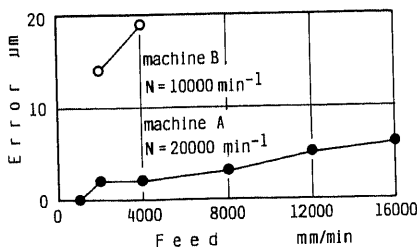


Fig. 7 Error by cutting force

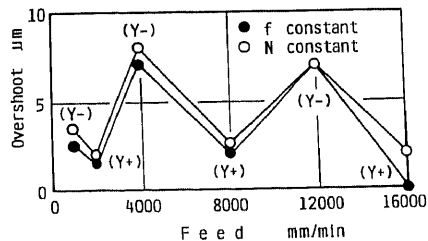


Fig. 8 Error by overshoot

しており、工具中心が点 P5 より P2 までの加工においては、主軸は重力と反対方向 (Y 正方向) に移動することになる。

各条件による誤差 E_0 の値を整理すると図 8 のようになる。図中 (Y-) および (Y+) は正方形の 2 面を L 字に加工する際に、最初の面に関してそれぞれ工具を重力方向および反対方向に移動させて行ったことを意味している。図 8 より (Y+) に比べて (Y-) の条件で誤差 E_0 が大きくなっており、高速による送り が重力方向に一致し、しかも急激に指令方向が変化する場合にはこの種の誤差の発生に注意が必要である。

なお、図 6 は立形の機械 B により加工しているため、図 6 (b) に誤差 E_0 は生じていない。しかし、点 W4 においては半径 5 mm の円弧の指令によって後述する半径減少量が生じており、その値は円運動精度の測定結果より 207 μm と大きい。そのため図中に点 W4 に対応する加工面を示すことができていない。

3.1.2 工具の振れによる加工誤差 工具中心軸を機械主軸に一致させることは極めて困難である⁽⁷⁾。取付時に生じる両者の偏心は、高速回転時に遠心力を発生し、工具の剛性と釣合った量だけ工具がふれまわることになる。このふれまわりによって工具半径は幾何学的な寸法より大きくなり、図 5 および 6 に示した誤差 E_r の原因となる。

しかし、切削中にこの値を測定することは難しいため、図 4 に示した工具経路を用いて間接的に E_r の値を測定している。図 9 は機械 A による結果であり、3 回の測定より求めた平均値と標準偏差を示している。その間に工具の取付取外しを行っていないため、図より取付時における工具の偏心は 5 μm であったことがわかる。また最小二乗法を用いて角速度 ω の二乗による回帰線を示すと、実験値はほぼ回帰線上にあり、取付時に 5 μm の振れが $N=20\,000\text{ min}^{-1}$ の条件では

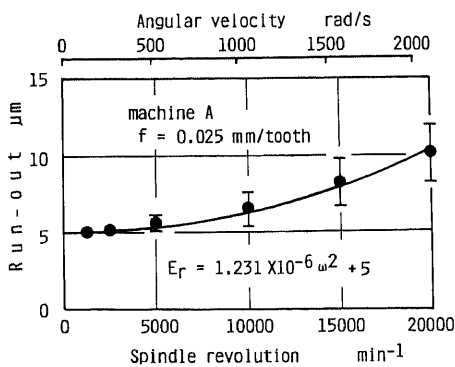


Fig. 9 Error by cutter run-out

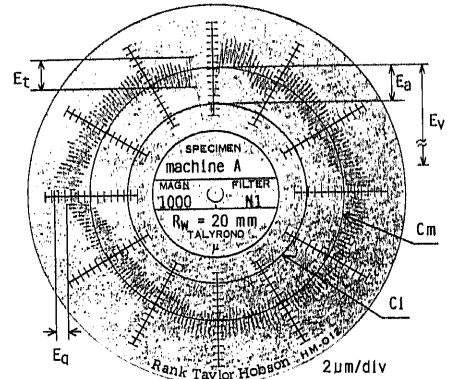
遠心力によって 10 μm へと倍増したことになる。

3.2 真円加工による加工精度

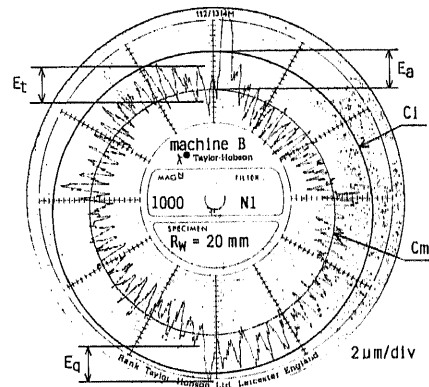
3.2.1 真円度曲線と誤差の分類 図 10 は図 2 に示す工作物を用いて真円加工を行い、加工面の真円度曲線を示したもので、図 10 (a) は機械 A、図 10 (b) は機械 B による結果である。図中の円 C_i は三次元測定機による測定結果から推定した加工面の指令円、円 C_m は真円度測定における最小二乗平均円である。両図より真円加工による加工誤差を次のように分類することができる。

- (1) ツールマークによる誤差: E_t
- (2) 切削開始位置における切欠状の誤差: E_0
- (3) 象限切換え位置における段差状および突起状の誤差: E_q
- (4) 寸法誤差: E_a

ただし (4) の寸法誤差 E_a にはツールマークによる誤差 E_t の一部、直線加工における分類で示した切削力による誤差 E_f 、工具径による誤差 E_c および工具の振れによる誤差 E_r が含まれており、これに制御系の



(a) Machine A ($N=20\,000\text{ min}^{-1}$, $F=16\,000\text{ mm/min}$)



(b) Machine B ($N=10\,000\text{ min}^{-1}$, $F=4\,000\text{ mm/min}$)

Fig. 10 Roundness curve

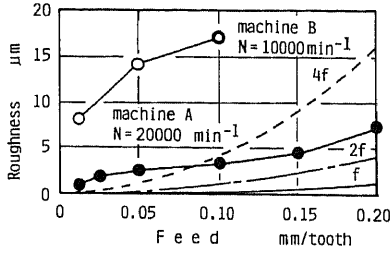


Fig. 11 Roughness by tool marks ($R_e=5$ mm, $R_w=20$ mm)

ドロープと呼ばれる定常速度偏差に基づく半径減少量 E_d が加算されることになる。誤差 E_d に関しては次節で検討するため、ここでは上記(1)ないし(3)に分類された誤差について考えることにする。

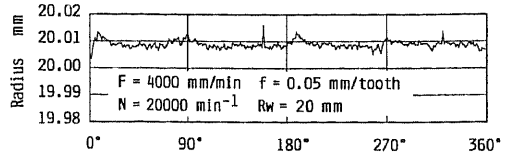
(1)の誤差は直線加工の場合と同様であり、加工面は切れ刃の回転と送りによって創成されるが、工具半径に比べて送りが十分小さいため、真円加工における理論粗さ R_{th} は次式で近似することができる⁽⁴⁾。

$$R_{th} = \frac{f^2}{8 \cdot R_e} \left(1 - \frac{R_e}{R_e + R_w} \right) \dots\dots\dots (1)$$

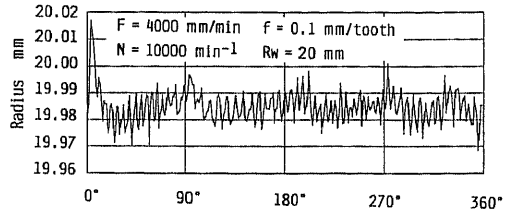
ここで R_e mm は工具半径、 R_w mm は工作物半径であり、直線加工の場合は $R_w = \infty$ を代入すればよい。

図 11 は各種条件により得られたツールマークによる最大高さ粗さを整理したものであり、実線は式(1)による理論値を示している。しかし f の値を2および4倍にして計算し、その結果を一点鎖線および破線で示すと機械 A による実験値は破線にほぼ一致または両線の中間にあり、加工面は4枚のうち1ないし2枚で仕上げられたことになる。一方機械 B による誤差 E_t は図 10(b)からも明らかなように、非常に大きい。これは増速アタッチメントの振れの影響を受けているためと考えられる。

次に(2)の誤差 E_v について考える。この誤差は工具中心が図 3(b)の点 Q2 に達したときの誤差であり、工具がこの点を2回切削することにより生ずる。誤差 E_v は円 Cm の位置から切欠の谷部までの距離で示しており、谷部の位置は仕上げ加工された面と考えることができる。したがって誤差 E_v には E_t の一部、 E_r 、 E_c 、 E_f および後述する E_d が含まれることになる。図 10(a)の場合、低倍率の計測結果より求めた誤差 E_v の値は $25 \mu\text{m}$ である。一方上記の誤差を加算(E_t には図 10 の結果を総合的に判断して係数 0.5 を乗じた)すると $21.4 \mu\text{m}$ となり、両者はほぼ一致している。また、図に示していないが、送り速度が小さい $F=8000$ m/min の条件では誤差 E_r および E_d が小さく



(a) Machine A



(b) Machine B

Fig. 12 Workpiece radius by circular machining

なるため、誤差 E_v も $11.2 \mu\text{m}$ と小さい。この条件における上記の誤差を同様の方法で加算すると $11.4 \mu\text{m}$ となり、両者はよく一致している。

一方機械 B の場合、図 10(b)から明らかなようにツールマークによる加工面の粗さが大きく、誤差 E_v を識別することが困難なため、検討を行っていない。

次に(3)の誤差 E_q について考える。この誤差はバックラッシュ補正パルスとロストモーションが合成されると段差状の誤差が生じ、突起状となる場合はバックラッシュ補正のタイミングのずれがその原因であり、スティックモーションと呼ばれている⁽⁵⁾。機械 A の場合後述する図 13(a)と比較すると、X 軸方向に後者の理由によって $E_q=4 \mu\text{m}$ が生じている。一方機械 B の場合も、同様に後述する図 13(b)と比較すると、Y 軸方向に両者の理由によって段差状および突起状の誤差が重なり、 $E_q=12 \mu\text{m}$ と大きな値となっている。

(4)の寸法誤差には大きく五つの誤差が含まれているが、図 5、6 と同様に表現すると見づらく、まとめて E_a として示している。図 12 は三次元測定機により測定した加工面の半径を、図 2 に示す角度 θ を横軸にとって示したものである。両図とも 90° を周期としてその中間で誤差が小さくなる傾向を示しているが、これはパルス分配に起因する送り速度の周期的変化⁽⁶⁾ を完全に補正できていないためと考えられる。指令寸法 20.0 mm に対する寸法誤差の平均値および標準偏差は、図 12(a)に示す機械 A の場合 8.9 および $1.5 \mu\text{m}$ 、図 12(b)に示す機械 B の場合 -14.9 および $8.3 \mu\text{m}$ である。この結果に基づいて図 10 に円 Ci を記入している。

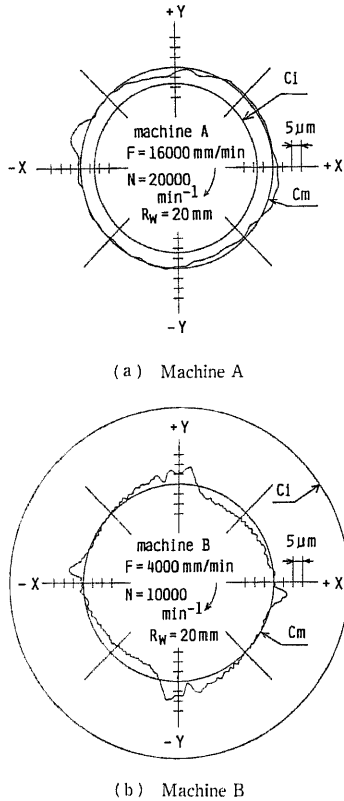


Fig. 13 Error motion traces for circular movement

3・2・2 半径減少量 図13は図10と同一条件により X-Y 平面における円運動精度の測定結果を示したもので、図中の円 Ci および Cm はそれぞれ指令円および最小二乗平均円である。両図には前述の誤差 E_i, E_v, E_f, E_c および E_r を含んでいないため、誤差 E_q および本節で述べる半径減少量 E_d のみが残されることになる。両図を図10と比較すると、誤差の大きな変化の傾向、すなわち円 Ci と Cm の位置関係および両円の差の大きさ、象限切換え位置における段差や突起の方向と大きさはほぼ一致している。特に X 軸方向の象限切換え位置においては、ともにバックラッシュ補正が適正に与えられているため、スティックモーションによる突起状の誤差の挙動が明らかとなっている。

従来形の制御系の追従誤差による半径減少量 E_d は式(2)で与えられるが⁹⁾、高い送り速度におけるドループの値を低減するためにフィードフォワード補償の採用が不可欠であり、その補償を採用すると誤差 E_d は式(3)のようになる⁹⁾。

Table 4 Analysis of dimensional error

error factor	machine A	machine B
tool marks	1.0	8.5
cutting force	1.6	15.2
cutter radius	15.0	15.0
run-out of cutter	-10.0	-19.0
droop	2.0	-38.9
predicted value	9.6	-19.2
experimental value	8.9	-14.9

(μm)

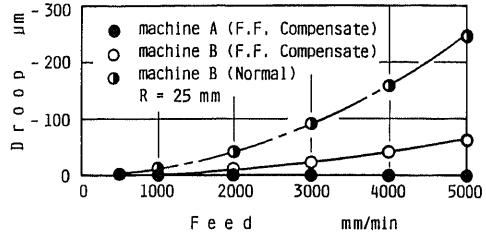


Fig. 14 Droop with feed

$$E_d = -\frac{F^2}{2 \cdot R \cdot 60^2} (T_p^2 + T_s^2) \dots\dots\dots (2)$$

$$E_d = -\frac{F^2 T_p^2}{2 \cdot R \cdot 60^2} (1 - \alpha^2) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 T_p s および T_s s は位置決めループおよび平滑化ループの時定数、 R mm は工具中心経路の半径および α はフィードフォワードゲインである。

図14は送り速度による半径減少量の結果を整理したもので、図中の一点鎖線および実線はそれぞれ式(2)、(3)に $R=25$ mm と機械 B の製造メーカーによる設定値 $T_p = T_s = 0.03$ s、 $\alpha = 0.7$ を代入して求めた計算値である。図14より機械 B の場合実験値は一点鎖線または実線によく一致しており、 $F=4000$ mm/min の条件で誤差 E_d はフィードフォワード補償により、 $-156 \mu\text{m}$ から $-38.9 \mu\text{m}$ へと大幅に改善する。しかし、図14の条件で $E_d = -5 \mu\text{m}$ 以下にするためには、送り速度を $F=1000$ mm/min 以下で指令しなければならない。

一方機械 A の場合、 $F=4000$ mm/min で $E_d=2 \mu\text{m}$ 、 $F=16000$ mm/min で $E_d=7 \mu\text{m}$ (図13) となり、工具経路の半径は逆に増加している。半径減少量を補正する方法として、式(2)または式(3)で予測できる誤差量を指令半径に加えて補間を行う方法¹⁰⁾が提案されているが、使用した制御装置における補正方法の詳細については明らかにされていない。

3・2・3 寸法誤差の要因解析 図12の結果より求めた寸法誤差 E_a の要因は大きく五つに分類できることをすでに述べた。そこで次に、具体的な数値で各誤

差の大きさを計算し、それらの和によって寸法誤差の推定値を求めた実験値と比較を行う。

表4は寸法誤差に及ぼすツールマークの影響の係数を0.5と近似して示している。表4より機械Aの場合寸法誤差の推定値9.6 μm は実験値8.9 μm によく一致している。また表4には示していないが、工作物の半径が40および60mmの場合でも両者の値はそれぞれ8.9 μm に対して6.2 μm および8.5 μm に対して7.3 μm とほぼ一致している。

一方機械Bの場合、ツールマークによる粗さが大きく、図9の実験を行っていない。そのため表4に示した工具の振れによる誤差 $E_r = -19.0\mu\text{m}$ は、工作物の半径が20, 40, 60mmのそれぞれに対して、寸法誤差の推定値と実験値が一致するような工具の振れの値を逆算し、それらの平均値により与えている。しかしそのような値を用いても、表4より寸法誤差は推定値 $-19.2\mu\text{m}$ に対して $-14.9\mu\text{m}$ であり、両者の差は小さい。また機械Aと同様に、工作物の半径が40, 60mmの場合についてもそれぞれ $-0.6\mu\text{m}$ に対して $0.0\mu\text{m}$ および $9.0\mu\text{m}$ に対して $4.2\mu\text{m}$ である。機械Aに比べて推定値と実験値の差は少し大きい、 $\pm 5\mu\text{m}$ 以下であり、真円加工による寸法誤差の要因ならびに大きさをほぼ推定できたものと考えられる。同時に、上記誤差要因の分類および各要因による誤差の計算方法が妥当であったものと考えられる。

なお切削力による誤差 E_f の値は、工作物の半径が変化することによって実半径方向切込みが変化し、図7の結果をそのまま使用できない。そのため、工作物の半径20, 40および60mmに対して、直線加工と比較した半径方向切込みの変化率0.8, 0.9および0.95を図7の結果に乗じて用いている。

4. 結 論

正形状および真円形状の工作物を用いて、エンドミルによる高速輪郭加工を行い、次の結論を得た。

(1) 切削状態がほぼ一定となる定常区間において、輪郭加工精度を次のように分類することができる。すなわち、(a)ツールマークによる誤差、(b)切削力による誤差、(c)工具径による誤差、(d)工具の

振れによる誤差、(e)半径減少量による誤差である。

(2) 送り速度や工具経路の急激な変化等による切削状態の過渡区間では、上記以外に次の誤差が生じる。(f)切削開始位置における切欠状の誤差、(g)オーバシユートによる誤差、(h)象限切換え位置における段差状および突起状の誤差である。

(3) 上記(d)の誤差は主軸の角速度の二乗に比例して増大し、実験条件では4枚のうち1ないし2枚の切れ刃によって加工面が仕上げられている。

(4) 真円加工における寸法誤差の要因は上記の(a)ないし(e)に整理することができる。寸法誤差に及ぼす各要因の誤差量を計算し、それらを加算して推定値を求めると、実験値にほぼ一致する。

本研究は(財)工作機械技術振興財団の試験研究助成を受けるとともに、(株)牧野フライス製作所R&Dセンタ所長佐藤 真氏および同社の中村 誠氏に多大なご支援をいただいた。また測定に関しては新潟県工業技術総合研究所の山崎栄一氏および石川淳氏に、実験およびデータの整理に当たっては西野直樹君および綿貫和彦君に協力いただいた。記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 森脇俊道, 切削加工機械, 機械と工具, 39-1(1995), 2-7.
- (2) Schulz, H. and Moriwaki, T., High-Speed Machining, *Annals of CIRP*, 41-2(1992), 637-643.
- (3) Komanduri, R., Flom, D. G. and Lee, M., *ASME, PED-Vol. 12*(1984), 15-36.
- (4) Schulz, H., *ASME, PED-Vol. 12*(1984), 241-244.
- (5) 垣野義昭・井原之敏・中津善夫・米谷光雄・手嶋健夫, NC工作機械の運動精度に関する研究(第4報)-円弧補間時の半径減少のNC補間一, 精密工学会誌, 54-6(1988), 1113-1118.
- (6) 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の関係(第1報)-加工誤差生成機構一, 精密機械, 43-7(1977), 807-813.
- (7) 岩部洋育・三星宏, ねじれ刃エンドミルの偏心が加工精度に及ぼす影響, 精密工学会誌, 61-6(1995), 834-838.
- (8) 藤井義也・岩部洋育, dwell機能による輪郭加工精度の向上-数値制御工作機械による加工精度に関する研究(第2報)-, 精密機械, 44-9(1978), 1092-1098.
- (9) 飯掛三津夫, 高速化に対応するNC装置-高速・高精度の32ビットAI-CNC, 型技術, 4-9(1989), 68-71.