

Influence of Difference of Servo Characteristics between Straight Axis and Rotating Axis on Motion Error and Machining Performance of Complex Geometry Workpieces with a Five Axis Machining Center

Takayuki AKAI *, Toshiki HIROGAKI**, Keiji OGAWA*** and Yoshiaki KAKINO****

(Received April 17, 2014)

We monitored the influence of the difference of servo characteristics between straight axis and rotating axis on motion error in a circular interpolation motion with a servo guide software and discussed its result under DBB3 expression. Especially, we investigated the influence of feed speed and position loop gain on motion error. As a result, five axis machining center equipped with direct driving (DD) motors at the rotating axes was found to achieve the high accuracy motion because its servo characteristics between straight axis and rotating axis could be tuned almost same. Moreover, we attempted to machine the complex geometry workpieces with a five axis machining center to compare the cutting performance by a conventional three axis machining center. As a result, it could be demonstrated that in the case of parts of simpler geometry, both accuracy and productivity were almost the same. On the other hand, for parts of more complex geometry, five-axis machining could produce superior accuracy and productivity.

Key words : five Axis machining center, simultaneous five axis control machining, servo characteristics, motion error, machining accuracy

キーワード: 5軸制御マシニングセンタ, 同時5軸制御加工, サーボ特性, 運動誤差, 加工精度

5軸制御マシニングセンタの旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いより 生じる誤差と複雑形状の加工性能の考察

赤井孝行, 廣垣俊樹, 小川圭二, 垣野義昭

1. 緒言

従来の5軸制御マシニングセンタ(5軸MC)では旋回軸の駆動にウオームなどの変速機を用いており, 旋回軸のサーボ特性が低いので直進軸のサーボ特性をこれに合わせると機械全体としてのサーボ特性は非常に低くなりがちであった。さらに旋回軸と直進軸のサーボ特性をマ

ッチングさせることもほとんど行なわれてこなかった。その理由としては, 加工の現場では旋回軸はワークのインデックス用のみ用いて, 加工は直進3軸の同時制御で行なわれることが多かったため, 旋回軸のサーボ特性は加工精度に関係しなかったからである。

もちろん同時5軸制御で輪郭形状の加工も行われてい

* Graduate Student, Doshisha University, Kyoto

Telephone/Fax: +81-743-53-1146, E-mail: akai@dmgmoreiseiki.co.jp

** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

*** Department of Mechanical Systems Engineering, Ryukoku University, Shiga

Telephone: + 81-77-543-7640, E-mail: ogawa@rins.ryukoku.ac.jp

****Kakino Research Institute, Kyoto

Telephone: +81- 75-384-0668, E-mail: kakino@crux.ocn.ne.jp

たが¹⁾、対象となる部品は主としてインペラーやタービンブレードなどで、その業界における加工形状の誤差は50 μm程度と大きな許容値であった。そのため特に旋回軸のサーボ特性を向上させなくても実用上大きな問題とはならなかった²⁾。しかしながら、同時5軸制御を用いて金型加工等を行う場合には一般的に1000 mm/min～2000 mm/minという送りで加工して、その許容誤差をその1/5以下(10 μm)にする必要がある。

直進軸と旋回軸を同期制御して輪郭加工を早い送り速度で高精度に行なうためには、直進軸のサーボ特性と旋回軸のサーボ特性を共に高める必要がある³⁾。そこで旋回軸には減速機を用いないダイレクトドライブ(DDモータ駆動)方式を採用したテーブル・オン・テーブル型5軸制御マシニングセンタを開発した。また当該のサーボ特性を改善するためのその基礎として、1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行なわせる際の位置フィードバック値を検出して、DBB法⁴⁾とよく似た表示法を用いて運動誤差軌跡を表示し、両者のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差量を解析し、高速送りで能率よく加工しても輪郭運動誤差ひいては加工形状誤差を小さくする方法について研究することとした。

一方で、実際に加工現象の特徴を考慮しながら、最新の5軸MCを用いた場合の加工能率、実加工された工作物の表面品位や加工精度を考慮した報告はほとんどなされていないようである。開発した5軸MCを用いて複雑さの異なる種々の円錐台形状のワークを加工し、従来の立形MCを用いて直進3軸だけで加工した場合に比べて、どの程度の加工能率と加工精度が得られるかを比較することとした。5軸MCは直進3軸に加えて、旋回2軸を有しているため、立形MCよりも当然高価である。故にその価格の差に相応した性能を發揮せねばならない。

ただし、加工対象とするワーク形状は、立形MCでも加工可能な形状に限定し、原則として立形MCの直進3軸を用いてボールエンドミル加工によって得られた加工精度と同程度の精度を持つワークが旋回軸も併せ用いることによって、どの程度の加工能率を達成するかについても検討した。

2. 提案する手法とその基礎理論

2.1 旋回軸と直進軸の同期運動により作る円運動

1つの旋回軸(C)と1つの直進軸(X)を同期させて円運動を行わせる場合の両軸のサーボ特性の差によって生じる運動誤差について着目する。すなわち、直進軸と旋回軸を同期させて円弧補間運動をさせた時に、どの程度の偏差の小さい円軌跡を描くかを考える。

旋回軸系においては、同一の送り速度*F*(mm/min)が指令された時の旋回速度(=角速度)は旋回軸中心からの距離によって異なるので、どこに旋回軸中心があり、どの大きさの半径で運動を行うかが問題である。そこで実際の加工でよく使われるであろう位置を考え、かつ測定半径として*R*として、ある程度の大きさが必要であることを勘案しながら、Fig. 1に示す位置と半径で一定の送り速度*F*(mm/min)で円運動を行わせた場合について検討する。

すなわち、直進軸において、ある点(主軸中心=工具中心を想定)がX軸上の点*X*₀(=100 mm)を中心にして、X軸上を半径*R*(=50 mm)で、

$$X=R\cos\omega t \quad (1)$$

で運動する場合を考える。ここで*t*は時間、 ω は角速度、である。

一方で旋回軸の旋回角度*C*として

$$Y=(X_0+R\cos\omega t)\tan C=R\sin\omega t \quad (2)$$

なる関係の旋回角度*C*を考えると、Fig. 1中の点*Q*が点*P*₁を始点として、*P*₁→*P*₂→*P*₃の順に、X軸上の点*X*₀を中心にして、半径*R*で円運動する。この運動中の半径方向の誤差Δ*R*より、DBB法に良く似た手

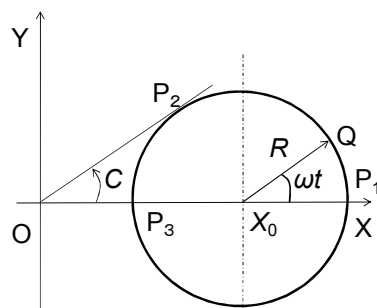


Fig. 1. Circular motion generated by synchronization of a straight axis and a rotating axis motion.

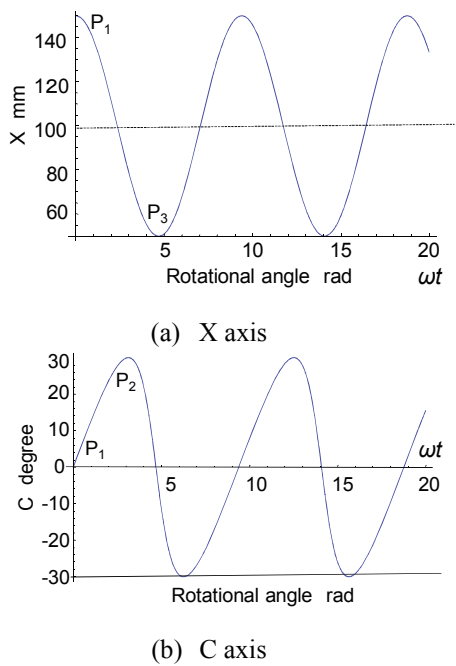


Fig. 2. Example of commanded motion.

法で、運動誤差の解析が可能になる。すなわち、加工形状誤差に対応した半径方向の偏差の軌跡を描かせることができる。

横軸は点 X_0 を中心にして点 Q が X 軸となす角 $\{\text{式(1)の } \omega t\}$ で示してある。Fig. 2(a)より、当然であるが、点 P_1 および点 P_3 において直進軸である X 軸の運動の向きが反転している。Fig. 2(b)より、回転軸である C 軸においては、点 P_2 で運動の向きの反転が生じている。また C 軸の角速度は一定ではないが、大きな変動も生じることなく、比較的なめらかであることもわかる。この運動指令中に、工作機械のサーボ系からサーボガイド (FANUC 社製) でサーボ系の位置の指令値と検出器で検出した位置フィードバック値を比較して分析する。この際、フィードバック位置の誤差の運動方向の法線方向成分を基礎円上に描かせて運動誤差軌跡を求める。法線方向成分のみを用いるのは、DBB 法と同様に接線方向成分は加工形状誤差には影響しないためである。この運動誤差軌跡を解析して、両軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差原因を診断する。位置フィードバック信号は工作機械 CNC の指定端子から取り出し、サーボガイドに入力するだけであり、きわめて簡単に測定データの取得ができる。

すなわち、回転軸には、半径方向の誤差 ΔR と回転角度誤差 ΔC があるとするとき、点 Q の実際の位置 (X', Y') は、

$$X' = (R + \Delta R) \cos(C + \Delta C) \quad (3)$$

$$Y' = (R + \Delta R) \sin(C + \Delta C) \quad (4)$$

$\Delta R, \Delta C$ は十分に小さく、これらの 2 次の項を無視すると、誤差ベクトルは

$$E_x = X' - X = \Delta R \cos C - R \Delta C \sin C \quad (5)$$

$$E_y = Y' - Y = \Delta R \sin C + R \Delta C \cos C \quad (6)$$

これより、運動誤差の法線方向誤差 ΔR は、

$$\Delta R = (E_x R \cos \omega t + E_y R \sin \omega t) / R \quad (7)$$

となる。

3. 実験装置および方法

3.1 使用する 5 軸 MC

開発した回転 2 軸が共に DD モータ駆動方式のテーブル・オン・テーブル型 5 軸 MC (Fig. 3 参照) と回転 1 軸 (B 軸) にローラギヤドライブ減速機を有し、回転のもう 1 軸 (C 軸) には旋盤用の主軸モーターと同じ形式のものが使用されトランシオン型の従来型 5 軸 MC で比較検討する。従来型 5 軸 MC の C 軸の最高回転数は 200/min と高いが、厳密な速度制御は行われておらず、静的な角度位置の制御のみが行われている。

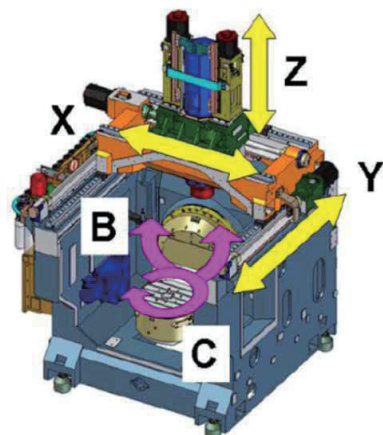


Fig. 3. Novel five axis controlled machining center.

各回転軸の駆動機構をまとめると以下のようになる。

開発した5軸MC (ストローク X730, Y510, Z510 mm)

B:DD モーター駆動 (クロスロー軸受, 最高 50 min⁻¹)

C:DD モーター駆動 (クロスロー軸受, 最高 120 min⁻¹)

両軸にインダクトシンスケールを使用。

従来型5軸MC (ストローク X600, Y425, Z450 mm)

A:ローギヤ減速 (アンギュラコンタクト軸受, 最高 30 min⁻¹)

C:旋削用主軸ビルトインモーター駆動

(アンギュラコンタクト軸受, 最高 200 min⁻¹)

となる。これらの回転軸のサーボパラメータとして、標準値として位置ループゲイン K_p はすべての軸が 60/s で同一となっている。

測定に際しては、原則として FANUC 社製のサーボガイドを用いて、各軸の位置フィードバック値を検出する。ただし、この測定値に機械系が有している運動誤差を加えないと、厳密には加工形状誤差とは対応しない。

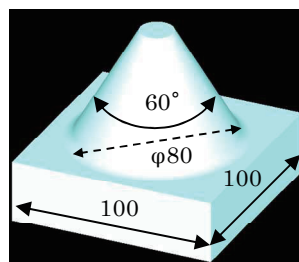
直進と旋回の補間時の運動誤差軌跡の測定に際しては、フィードフォワードゲイン、補間後加減速、ピッチ誤差補正、バックラッシュ補正などの CNC に内蔵されている補正機能は全てオフにしている。その理由はそれらが測定結果を不正確にすることを避けるためである。

3.2 ケースステディに用いるワーク形状

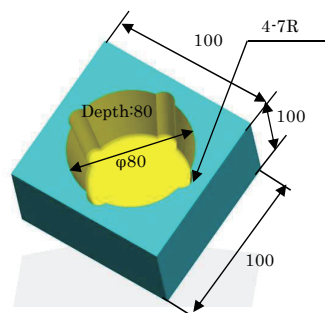
Fig. 4 に示す円錐台形状とその形状を修飾した複雑さの異なる2種類の形状 (合計3種類) のワークの仕上げ加工を対象とすることとした。これらのワークはすべてアンダーカット部のない形状としている。アンダーカット部があると、立形 MC では特殊な取り付けジグや回転軸がないと加工できず、比較することが困難であるので、対象としない。また一般に、エンドミル加工現象において、使用する工具の突き出し長さ L と工具直径の比 (L/D) が重要なパラメータになる。そこで L/D に着目しながら考察を進める。

それぞれをボールエンドミルで加工する場合を想定する。Fig. 4(a)は、円錐台形状のコア状のワークの加工になる。この形状の場合は直進3軸のみを用いる場合 (ケース1) と、回転軸 C も用いて加

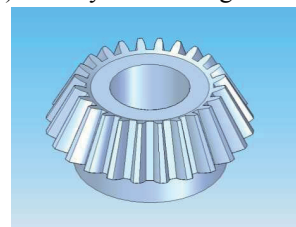
工する場合 (ケース2) で切削条件をまったく同一にできるので、機械の運動誤差の影響のみを抽出することができる。また、この測定は円形断面について行われるため、加工精度の評価が比較的簡単に行える。これは直進2軸の円弧補間運動の精度と回転軸の回転精度の比較になる。



(a) Cone



(b) Cavity cone with grooves



(c) Straight bevel gear

Type of gear	Straight bevel gear
Module	5
Number of teeth	17
Width of gear [mm]	38
Average cone distance [mm]	121.5
Pitch cone angle [deg.]	25.278
Material	Pre-hardened steel

Fig. 4. Geometries of workpiece.

Fig. 4(b)は、溝付キャビティ円錐台形状のワークをボールエンドミルで加工する。加工精度と仕上げ面あさは Fig. 4(a)の円錐台形状ワークに準じた方法で測定し、評価する。このワーク形状も、直

進軸のみの同時 3 軸加工の場合 (ケース 1) と旋回軸を用いる場合 (ケース 2) で加工が可能である。しかし、(ケース 1) の場合は、突き出し長さが例えば $L/D=4$ と短い場合は工具のアクセス性が悪くて、工具とワークの干渉が生じるので、 $L/D=7$ と大にせねばならず、加工能率と加工精度が悪くなる。それがどの程度の差になるかを検討する。そのため、半径 7 mm の円形断面溝付のものを対象とする。

Fig. 4(c)は、ベベルギア形状ワークを直進 3 軸のみを用いてボールエンドミルで加工する場合 (= 立形 MC で加工する場合に該当、(ケース 1) と、旋回軸と直進軸を用いてスクエアエンドミルの外周刃で加工する場合 (ケース 2) の加工能率と加工精度を比較する。ボールエンドミルで加工する場合は原則として等高線加工を行う。

大型のスパイラルベベルギアは、従来は Klingernberg 社製の専用機を用いて加工されてきたが、最近では 5 軸 MC とスクエアエンドミルを用いても加工できるようになってきた^{5,6)}。そこで、高精度・高能率加工が要求される複雑な形状の部品として、これがどの程度達成されているかを検討することとした。ただし、簡単のため小型のストレートベベルギアの加工を対象とする。

エンドミル工具を用いて比較的硬い材料を加工する場合はびびり振動を誘発しやすく、それを避けるために切削条件は緩くせざるをえない。またびびり振動が生じていない場合でも、切削抵抗によって工具とその支持系が弾性変形しやすいので、加工形状誤差が増大する恐れがある。

以上の点を考えると、かなり良い加工形状精度や仕上げ面あらさが要求される仕上げ加工の場合には必ずしもスクエアエンドミルを用いた方がはるかに高能率で加工できるとは限らない。そこで、どの程度の加工能率の向上が図れるかをこのモデルワークを加工する場合について検討することとした。

4. 旋回・直進軸サーボ特性の評価結果と考察

4.1 開発機における評価結果と考察

開発した 5 軸 MC の X-B 軸間で円弧補間運動をさ

せた場合の運動誤差軌跡をサーボガイドを用いて測定した。各軸の位置ループゲインを $Kp=60/s$ から $Kp=195/s$ まで 15/s ずつ増大させたところ、Fig. 5(c)に示すように、 $Kp=195/s$ でサーボ系が不安定になった。この場合には直進軸の X 軸が旋回軸の B 軸よりも先に不安定になっていた。

$Kp=60/s$ における P_3 点での半径減少量は約 $5 \mu m$ 、B 軸の P_2 点でのステックモーシオン量は約 $1 \mu m$ 、X 軸の P_3 点でのステックモーシオン量は約 $5 \mu m$ であった。それに対して、 $Kp=180/s$ においては、それぞ

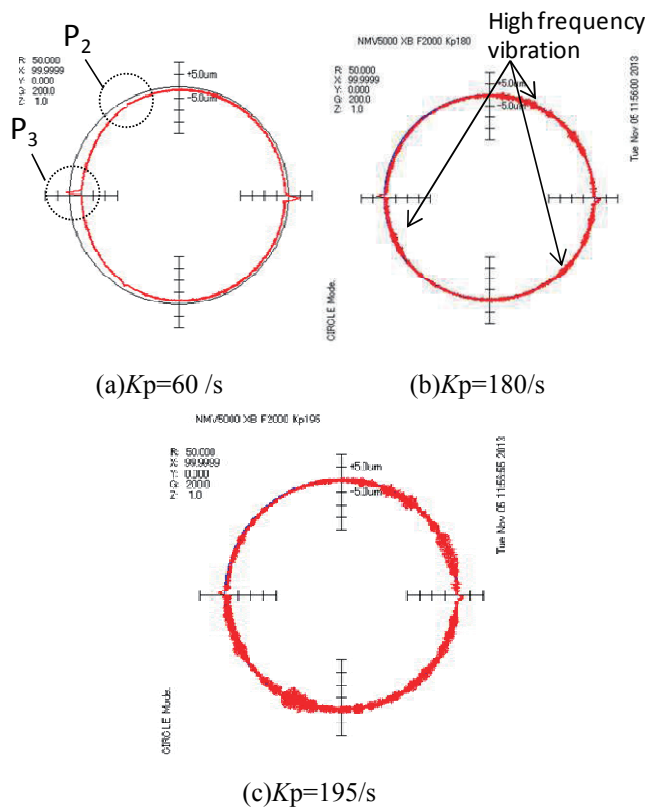
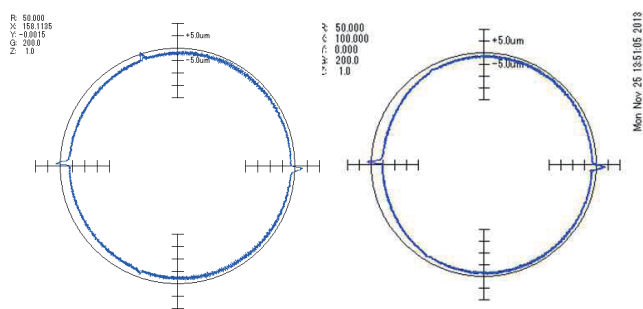


Fig. 5. ΔR in circular motion. (Feed speed 2000 min/min, 1 div= $5 \mu m$, X-B)

Table 1. Unstable axis under synchronized motion.

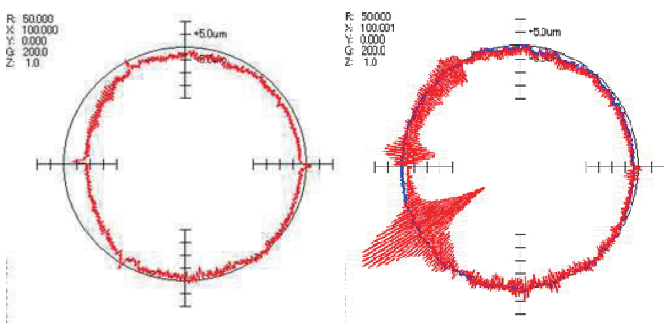
Axes	Kp 1/s	Unstable axis
X-C	210	X
X-B	195	X
Y-B	135	Y
Y-C	120	Y
Z-B	210	B
Z-C	230	Z



(a)Y-B (b)Z-B

Fig. 6. ΔR in circular motion.

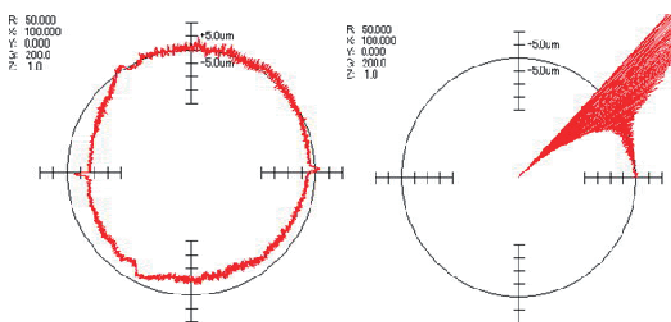
(Feed speed 2000 min/min, $K_p=60/s$, 1div=5 μm)



(a) $K_p=60/s$ (b) $K_p=105/s$

Fig. 7. ΔR in circular motion.

(Feed speed 2000 min/min, 1div=5 μm , X-A,
Conventional five axis MC)



(a) $K_p=60/s$ (b) $K_p=180/s$

Fig. 8. ΔR in circular motion.

(Feed speed 2000 min/min, 1div=5 μm , X-C,
Conventional five axis MC)

れの運動誤差は大幅に改善する一方で、高次の振動成分が約 2 μm 生じていた。

同様にして、回転軸と直進軸の組み合わせを変更して、サーボ系が不安定になる K_p およびその運動

軸を調べた。結果を Table 1 に示す。金型加工などでの実用性を考慮した送り速度と運動の範囲において、直進軸が発振を生じる制約軸になる様子が見られる。すなわち、回転軸に DD モータ駆動を採用した事で、十分に当該のサーボ特性が改善されたことがわかる。

Fig. 6 は、 $K_p=60/s$ における Y-B 軸および Z-B 軸の評価結果である。目標となる 10 μm 以下の運動精度を達成していることが確認された。

4.2 従来機との比較結果と考察

従来 5 軸 MC の X-B 軸間で補間円運動をさせた場合に測定された結果を Fig. 7 に示す。各軸の位置ループゲインを $K_p=60/s$ から $K_p=105/s$ まで 4 段階に変化させたところ、同図 (b) に示すように、 $K_p=105/s$ という小さな値でサーボ系が不安定になった。この場合には、回転軸の A 軸が不安定になっていた。

ローギア減速機を介在させている当該機の A 軸（第 1 回転軸）では、このように $K_p=105/s$ という小さな値で、回転軸サーボ系が発振した。ローギア減速機は、装置内部で予圧を与えることで、伝達誤差を小さくしているが、やはりある程度のバックラッシュが存在するかみあいもあるので、回転軸の位置ループゲインを $K_p=105/s$ まで大きくすると、サーボ系が不安定になったものと思われる。発振を生じた制約軸は A 軸であった。また $K_p=60/s$ においても、Fig. 6 に比べて高次の振動成分が大きいことがわかる。このような場合には、DD モータ駆動を用いることによって、回転軸のサーボ特性を大きく向上させることができることがわかった。

当該機の C 軸は、前述のように、旋盤主軸として開発されたものをそのまま使っており、速度制御は行われていないので、厳密には他の軸と性能の比較を行うことは意味がない。しかし、参考のために同様の測定を X-C 軸について行った。その測定結果を Fig. 8 に示す。同図 (b) のように、 $K_p=180/s$ にしたところ、サーボ系が不安定になった。この場合、発振を生じる制約軸は X 軸であった。

以上より、5 軸 MC といえども回転軸よりも直進軸の使用頻度の方がはるかに高く、DD モータ駆動すれ

ば、回転軸のサーボ特性は直進軸と同程度かそれ以上に向上できていることがわかった。フィードフォワード制御によっても、かなりの程度運動誤差を小さくできるが、DD モータ駆動すれば、これを使用せずとも運動誤差を小さくすることができるので、その利点は大きい。例えば、フィードフォワード補正では小さくすることが困難なスティックモーションによる突起を小さくするのに有効である。逆にいえば、回転軸のサーボ性能が DD モータ駆動化によって大きく向上したので、今後は直進軸のそれを一層向上させる必要性が明確になってきた。5 軸 MC では、全体構造をコンパクトにまとめるために、直進軸のストロークを短くせざるをえず、それを支えているキャリッジの長さも 3 軸 MC に比べて短いことがその原因の 1 つである。

5. 加工性能の比較結果と考察

5.1 加工条件の検討

前章の結果より、開発した 5 軸 MC が十分に高精度な運動を具現化することが判明した。そこで本章では、当該機の加工性能を考察する。特に、3 軸 MC での加工と比較して、加工対象のワーク形状の複雑さとの関係を検討する。

(1) 加工試験 1 (コア円錐台形状ワーク)

Fig. 4(a)に示したコア円錐台形状を直進 3 軸のみを用いてボールエンドミル加工する場合 (=立形 MC で加工する場合に該当, (ケース 1)) と、回転軸と直進軸を用いてボールエンドミル加工する場合 (ケース 2) の加工能率と加工精度を比較する。2 つの場合とも等高線加工を行う。回転軸も用いて加工する場合の運動の与え方を Fig. 9(a)に示す。粗加工はどちらの方法で加工しても所要時間はあまり変わらないので、仕上げ加工についてのみ比較する。その加工条件は次のとおりである。

直進 3 軸で加工する場合 (回転軸を用いる場合も同じ)

ボールエンドミル : TiAlN コーティング超硬合金製
2 枚刃

直径 : 10 mm

ワーク材質 : プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)

突き出し長さ : 40 mm (L/D=4)

主軸回転数 : 10000 min⁻¹

送り速度 F : 1000 mm/min (これと等しい周速を C 軸回転で与える)

加工方法 : 等高線ヘリカル加工

加工ピッチ : 0.15 mm (カスプ高さ=0.5 μm)

取代 : 0.1 mm

(2) 加工試験 2 (溝付キャビティ円錐台形状ワーク)
Fig. 4(b)に示した溝付キャビティ円錐台形状を直進 3 軸のみを用いてボールエンドミル加工する場合 (=立形 MC で加工する場合に該当, ケース 1)) と、回転軸と直進軸を用いてボールエンドミル加工する場合 (ケース 2) の加工能率と加工精度を比較する。(ケース 2) の場合の加工に用いる運動の与え方を Fig. 9(b)に示す。

直進 3 軸のみで加工する場合 (ケース 1) の加工条件は次のとおりである。

ボールエンドミル : TiAlN コーティング超硬合金製
2 枚刃

直径 : 10mm

ワーク材質 : プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)

突き出し長さ : 70 mm (L/D=7)

主軸回転数 : 6000 min⁻¹

送り速度 : 1200 mm/min

加工方法 : 等高線ヘリカル加工

加工ピッチ : 0.15 mm (カスプ高さ=0.5 μm)

取代 : 0.1 mm

回転軸を併用して加工する場合 (ケース 2) の切削条件は次のとおりである。

突き出し長さ : 40 mm (L/D=4)

その他は直進 3 軸で加工する場合に同じ。

(3) 加工試験 3 (ベベルギア形状ワーク)

Fig. 4(c)に示したベベルギア形状ワークを直進 3 軸のみを用いてボールエンドミルで加工する場合 (=立形 MC で加工する場合に該当 (ケース 1)) と、回転軸と直進軸を用いてスクエアエンドミルで加工する場合 (ケース 2) の加工能率と加工精度を比較する。ボールエンドミル加工 (ケース 1) の場合は等高線加工を行う。スクエアエンドミルと回転軸運動も用いて加工する (ケース 2) 場合には、B 軸

を 0° ～ 20° に徐々に傾けて下から上へ送りをかけて加工する。1回の送りはボールエンドミルで加工する場合のカブス高さと同しくなるB軸の角度変化とする。

ボールエンドミルを用いて直進3軸で加工する場合(ケース1)の加工条件は次のとおりである。

ボールエンドミル: TiAlNコーティング超硬合金製
2枚刃

直径 : 4 mm
ワーク材質 : プリハードン鋼 NAK55 (40HRC)
突き出し長さ : 38 mm (L/D=9.5)
主軸回転数 : 6000 min^{-1}
送り速度 : 1200 mm/min
加工ピッチ : 仕上がり形状に沿って 0.18 mm (平均)

(カブス高さ: $2.6 \mu\text{m}$ になるようにピッチを変化させる/ Fig. 4(c)の上面側からZマイナス方向に工具をアプローチして歯溝を等高線で順に加工)

取代(半径方向切込): 0.1 mm

ダウンカット

スクエアエンドミルを用いて同時5軸加工する場合(ケース2)の切削条件は次のとおりである(Fig. 9(a)の姿勢でB,C軸を運動させながら歯溝に沿って工具が運動)。

スクエアエンドミル: TiAlNコーティング超硬合金製
2枚刃

直径 : 4 mm
突き出し長さ : 18 mm (L/D=4.5)
主軸回転速度 : 6000 min^{-1}
送り速度 : 1200 mm/min
加工ピッチ : 仕上がり形状に沿って工具を移動させた場合にカブス高さが(ケース1)と同じ量(= $2.6 \mu\text{m}$)になる角度ずつB軸の角度を変化させる。(Bの角度を 67.1° から 64.1° まで徐々に変化させる。1回の変化量の平均値 0.035° , 送り経路に沿った平均ピッチ: 0.34 mm)

ダウンカット

ボールエンドミルを用いた場合, この加工条件ではびびり振動が生じて, 仕上げ面あらさが大になることが考えられる。したがって, スクエアエンドミル

で加工した場合と同程度の加工形状誤差と仕上げ面あらさでボールエンドミル加工するにはどの程度の切削条件で加工すればよいかわからないので, 上に挙げた以外の切削条件のうち, 送り速度と主軸回転数を次のように10%ずつ小さくして加工する。

スクエアエンドミルの場合に比べて: 50, 40, 30%

5.2 コア円錐台形状の加工と考察

まず加工時間に着目する。直進3軸のみを用いて加工した場合(ケース1)の加工時間は31分3秒であり, 旋回軸を用いた同時4軸加工の場合(ケース2)は31分32秒と, ほとんど差がない。これは切削条件を完全に同一にしてあるので, 当然の結果であり, わずかに直進3軸のみを用いた方が短いのは, 補間処理に伴う時間がわずかしかなかったためと思われる。ただしここでいう加工時間とは, 加工の前準備をすべて終え, NCのスタートボタンを押してから加工が終了して, エンドの信号が出るまでの時間であり, 厳密に言うと, 切削時間とエアカット時間の和で定義される時間である。通常, 加工時間に含まれる工具交換に要する時間は, この部品の場合には工具交換しないので, 0としている。

次にワークの3つの断面(円錐台の頂点, 中央, 麓付近)における真円度プロフィールと3つの稜線における仕上げ面プロフィールを測定した。仕上げ面あらさはどの断面においても $2.6 \mu\text{mRz}$ でほぼ等しく, 真円度は直進軸のみの円弧補間で加工した場合(ケース1)も $3 \mu\text{m}$ と小さかった。それに対し, 旋回軸Cも用いた場合(ケース2)は真円度が $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ とさらに小さくなった。わずかではあるがC軸テーブルからの高い断面ほど真円度が悪くなっているのは, C軸のアンギュラーモーションのためではないかと思われる。

結局, この2つの加工法では切削機構と切削条件は両方で全く同一になっているので, この加工形状誤差の差は直進2軸X,Yの円弧補間時の運動誤差とC軸のラジアル方向の運動誤差の加工形状誤差への反映度を比較したことになる。すなわちその結果は, X,Y軸の円弧補間運動で円を描かせた場合には $4 \mu\text{m}$ の真円度誤差が生じているのに対し, C軸のラジアル方向回転誤差は $1.5 \mu\text{m}$ 程度であり, かなり小さ

いことが原因しているものと思われる。しかし、5軸MCでは円錐形状ワークを加工する場合常にこのような加工法が選ばれるとは限らない。これとは異なった方法で加工される場合には、必ずしも回転軸を回転させて加工する方が常に高精度な加工が行えるとは限らない。それはボールエンドミルの切れ刃上の加工点の移動、切削抵抗の方向などが加工形状誤差に影響するからである。

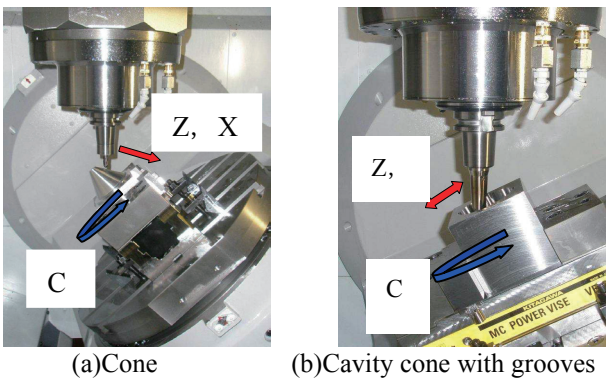


Fig. 9. Examples of controlled axes.

5.3 溝付きキャビティ円錐台形状の加工と考察

直進軸のみを用いて加工した場合の加工時間は1時間28分28秒(ただしテーパ形状部のみ)であった。一方、回転軸も用いたインデックス同時4軸制御加工で同じワークを加工した場合には55分12秒(ただしテーパ形状部のみ)であり、加工能率が約1.6倍向上した。もちろん、ワーク材料が硬い場合や立壁部分の長さが大になったり、立壁の角度が急になるほど、L/Dの大きい工具を使って加工せざるをえないので、この加工能率の向上の度合いは大きくなる。逆にワーク材料が柔らかい場合や立壁部分の長さが短い場合、立壁の角度が緩やかになるほど、加工能率の向上の度合いは小さくなる。

深さを変化させて、入口、中央、底部3つの断面における真円度プロフィールと3つの稜線における仕上げ面プロフィールを測定した。比較的平坦な円錐部の仕上げ面あらさは2つの加工法で $2.6 \mu\text{mRz}$ とほとんど同じであるが、直進3軸のみで加工した場合の溝部の仕上げ面あらさは $5.9 \mu\text{mRz}$ あり、平坦部のほぼ2倍になっていた。この原因は用いた切削条件がL/D=7の工具を用いる場合には過酷で、溝部を

加工した時にびびり振動を誘発したためである。仕上げ面あらさはびびり振動が生じないように切削条件を緩くすると良くなるが、それによって加工能率は大幅に低下する。

溝部を除いた真円度も2つの加工法でかなり異なっている。すなわち、直進3軸のみを用いた加工で得られた真円度は $8 \mu\text{m}$ であったのに対し、C軸を回転させて加工した場合には $5 \mu\text{m}$ とかなり小さかった。稜線の真直度もほぼ同じ結果になった。すなわち、直進3軸のみを用いた加工で得られた真直度は $3 \mu\text{m}$ 弱であったのに対し、C軸を回転させて加工した場合には真直度は $2 \mu\text{m}$ とかなり小さかった。

5.4 ベベルギヤ形状の加工と考察

直進3軸のみを用いてベベルギヤ形状ワーク(Fig. 4(c))の1溝分をボールエンドミルで加工した場合(ケース1)のCAMで計算した加工時間は4分56秒(ただし1溝の両歯面のみ、カブス高さ $2.6 \mu\text{m}$ として得られたNCプログラムを使用)であった。ただし、主軸回転数 6000 min^{-1} 、送り速度 1200 mm/min としている。スクエアエンドミルを用いて5軸加工した場合のそれは(ケース2)2分46秒(56%)となった。この場合の平均的な送りピッチは(ケース1)で 0.18 mm 、(ケース2)で 0.34 mm となった。計算上の加工時間の差の大部分はこの平均送りピッチの差によって生じている。実際の加工時間は(ケース2)の場合で、4分6秒かかり、CAMでの計算値より48%長くかかった。これはCAMでの計算値にはATCによる工具交換時間や送り速度の加減速に要する時間などが含まれていないためである。

以上のように使用工具による加工法の違いによっても、44%の加工時間の差が生じるが、ボールエンドミルを用いて加工する場合にはL/D=9.5と工具の突出し量が大きいため、加工の際に生じるびびり振動を避ける目的で、(ケース1)の場合には主軸回転数と送り速度を5軸加工の40%程度に抑えるので、推定される所要加工時間は12分20秒とかなり長くなる。両ケースについて同じ加工条件で試し加工を行って、仕上げ面あらさを測定し、(ケース1)の場合どの程度送り速度を低くしたら、びびり振動が抑制されるかを調べた。その結果、送り速度を30%

程度に低くすれば、十分であることが分かった。それに基づいて、送り速度と主軸回転数を共に30%に下げて、加工実験を行った。この場合、実際に加工に要した時間は18分26秒となり、スクエアエンドミルで加工した場合の4.5倍もの時間がかかった。その得られた仕上げ面あらさは4.2 μmRz となった。

仕上げ面あらさは測定した3ヶ所の平均で、ボールエンドミルの場合(50%送り)のとき10.8 μmRz 、(40%送り)のとき4.8 μmRz 、(30%送り)のとき4.2 μmRz となり、スクエアエンドミルの場合3.4 μmRz となった。スクエアエンドミルの場合、計算上期待されるあらさ2.8 μmRz にかかなり近いが、ボールエンドミルで加工した場合には計算上期待されるあらさよりかなり悪くなった。

5.5 3軸および5軸制御加工の加工結果の比較

3軸加工(30%送り)と5軸加工の2つのケースで加工したベベルギアの加工偏差を3次元測定機で測定した。

- 1) スクエアエンドミルを用いて同時5軸加工した場合には、加工偏差の量は左右の歯面においてそれぞれ10 μm 程度とかなり小さい。この加工偏差は後述する同時3軸加工の場合に比べて約1/5程度と小さく、かなり精度よく加工できていると言えよう。
- 2) ボールエンドミルを用いて同時3軸加工した場合には、2つの歯面ともに歯底で最も偏差量が大きくなり、歯先に行くに従って右側歯面では減少し、左側歯面ではほぼ一定になっている。その偏差量は歯底で70~80 μm に達し、同時5軸加工の場合に比べて、60 μm 程度も大である。ただし、このベベルギアの場合は歯底と歯先から約1 mmの歯面では歯車間での接触は生じないので、実用上は無視してもよい。

そこで、この部分を外して加工偏差を評価すると、右側歯面の偏差は40~60 μm の範囲に入っており、その変化量は20 μm しかない。歯底で加工偏差が60 μm と大になった原因は、歯底部をボールエンドミルで加工する時には先端のボール部の広い範囲でワーク材との干渉が生じ、切削抵抗が大になるだけでなく、その作用方向がより水平方向に近くなり、工

具の弾性変形量が大きくなったために生じたものと思われる。また、副次的には細くて、突き出し長さの長い工具の先端部に切削抵抗が作用するので、工具の弾性変形量がこのように大きくなったものと思われる。

切削速度、送り速度をもっと小さくすることによって、びびり振動の発生を抑制し、仕上げ面あらさを小さくすることは可能である。切込み(=仕上げ加工の取代)や1刃当たりの送りを小さくすると、切削抵抗もある程度まで小さくできるので、加工偏差は小さくなるはずである。本研究では取代を0.1 mmとして仕上げ加工を行ったが、これは通常行われている歯車の加工に倣った条件であるが、このような2つのケースの比較としては少し過酷すぎたかもしれない。

以上、特に3軸加工と5軸加工で差が顕著であった、(加工試験2)および(加工試験3)の2種類の形状のワークに対して、加工能率と加工精度の測定結果をまとめたものをTable 2に示す。形状が単純なコア円錐台ワーク(加工試験1)の場合には、3軸加工と5軸加工で加工時間および加工精度ともほとんど同じである。

溝付キャビティ円錐台形状ワーク(加工試験2)の場合にはほぼ同じ仕上げ面あらさと加工精度を得るためには、3軸加工では5軸加工よりも1.6倍程度長い加工時間を必要とする。すなわち、工具のL/Dが同じであっても加工法の自由度が増大する効果で約1.5倍程度の加工能率の改善が得られたものと考えられる。さらに形状が複雑なベベルギア(加工試験3)の場合には、ほぼ同じ加工結果を得るためには4.5倍程度の加工時間を必要とした。すなわちこの場合は3軸から5軸加工で工具のL/D=9.5から4.5に改善しており、その場合に工具径Dが同様なら系の固有振動数は(L/D)の二乗に比例して4.5倍向上する。そのため加工現象におけるびびり現象などの動的安定性の差による加工能率の差が生じたものと考えられる。

このように、L/Dが同じであっても加工現象の改善により、さらにL/Dが異なる場合にはその二乗に比例するように、ワーク形状が複雑になればなるほ

ど、5軸加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認された。また、加工精度についても両者はほぼ同等かそれ以上に加工できており、高精度な5軸MCを使用すれば、直進3軸加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが確認された。

また、スクエアエンドミルを用いて加工できる形状については、できるだけこれを使う方が加工能率と仕上げ面あらさの点からも数10%~3倍程度改善でき、かなり有利である。

Table 2. Productivity and Accuracy (3MC/5MC).

Part geometry	Machining time (min)	Out-of-cylindricity (μm)	Surface roughness (μmRz)
Cavity cone with grooves	88.5/55.2	7.9/4.8	5.9/2.6
Straight bevel gear(1 groove)	18.4/4.1	50/10 (Diviation)	6.5/1.5

6. 結 言

本研究では、旋回軸にダイレクトドライブ (DD方式) 駆動方式を用いたテーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシニングセンタを対象にして、そのサーボ特性と運動誤差について考察した。さらに当該機を用いて複雑さの異なるワークを加工し、その加工性能を調べた。結果は以下の通りである。

(1) 1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行わせる場合の両軸のサーボ特性の差によって生じる運動誤差について、両軸を同期させて円弧補間運動をさせた時に1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行なわせる際の位置フィードバック値を検出して、DBB法とよく似た表示法を用いて運動誤差軌跡を表示し、両者のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差量を解明できることがわかった。

(2) 旋回軸にダイレクトモータ駆動を用いることに

より、旋回軸のサーボ特性を直進軸のそれと同程度にすることができ、運動誤差を非常に小さくすることができ、高精度な5軸制御マシニングセンタが具現化できる。

(3) ワーク形状が複雑になればなるほど、5軸加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認された。また、加工精度についても両者はほぼ同等に加工できており、加工現象も考慮することで高精度な5軸制御マシニングセンタを使用すれば、3軸加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが確認された。

参考文献

- 1) 齊藤明德, 堤正臣, 牛久健太郎, “5軸マシニングセンタのキャリブレーション法に関する研究 (第2報) – 同時3軸制御運動を用いた位置偏差および角度偏差の推定 –”, 精密工学会誌, **69**(2), 268-272 (2003).
- 2) 井原之敏, 田中和也, “多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法 (第1報) – 主軸旋回5MCでのボールバー測定と実加工との比較 –”, 精密工学会誌, **71**(12), 1553-1557 (2005).
- 3) 茨木創一, 垣野義昭, 赤井孝行, 高山直士, 山路伊和夫, 小川圭二, “ボールバー測定を用いた5軸制御加工機の運動誤差原因の診断 (第1報) – 誤差成分の分類と改良型ボールバー装置 (DBB5) の開発 –”, 精密工学会誌, **76**(3), 333-337 (2010).
- 4) 垣野義昭, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢徹, “NC工作機械の運動精度に関する研究 (第1報) – DBB法による運動誤差の測定と評価 –”, 精密工学会誌, **52**(7), 1193-1198 (1986).
- 5) J.T. Alves, M. Guingand and J.P. Vaujany, “Designing and Manufacturing Spiral Bevel Gears Using 5-Axis Computer Numerical Control (CNC) Milling Machines”, *Journal of Mechanical Design*, **135**(2), 024502/1-024502/6 (2013).
- 6) 辻勇, 川崎一正, 阿部義和, 郡原宏, “汎用の多軸制御工作機械による大型スパイラルベベルギヤの加工法に関する研究”, 日本機械学会論文集 C編, **77**(775), 728-736 (2011).