

## 5 軸マシニングセンタの円錐台試験による精度評価

院生 B (M2) 学生 L (B4) 指導教員：井原之敏

## Accuracy Evaluation by a Truncated Cone Test on Five-axis Machining Center

Graduate student B

Undergraduate student L

## 1. 緒言

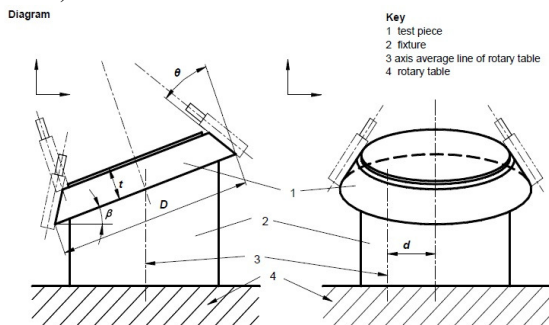
5軸マシニングセンタ(以下5軸MC)の精度評価基準は ISO に提案され最終調整段階である。現在, ISO10791-6 の新たな検査規格として, 同時5軸制御での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法が提案されている。これはボールバーと呼ばれる測定装置を用いることで, 同時5軸制御を行いつつ補間運動精度検査を行うことができるというものである<sup>1)2)</sup>。また, このときに使用するNCプログラムで切削加工を行えば, ISO10791-7にて提案されている工作精度検査を行うことができる。

本研究ではこの ISO にて提案され最終調整段階である円錐台加工を模擬した補間運動精度検査(ISO/DIS10791-6 BK3)<sup>3)</sup>を実際に行い作業上の問題点及び評価方法の検討を行うことを目的とする。また, 同様に ISO10791-7 にて提案され最終調整段階である円錐台加工試験(ISO/DIS10791-7 M3)<sup>4)</sup>についても作業上の問題点及び評価方法の検討を行う。

## 2. 実験条件

## 2.1 工作精度検査

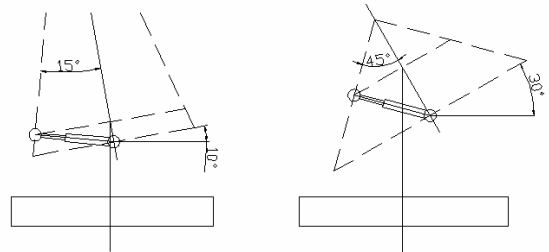
円錐台加工試験(ISO/DIS10791-7 M3)の設置条件を図1に示す。円錐台の半頂角を  $\theta$ , 厚さを  $t$ , 底面の直径を  $D$ , 傾きを  $\beta$ , テーブル中心から円錐台底面中心までのオフセット値を  $d$  とする。検査条件として(1) $\theta=15^\circ$ ,  $t=20\text{mm}$ ,  $\beta=10^\circ$ , (2) $\theta=45^\circ$ ,  $t=15\text{mm}$ ,  $\beta=30^\circ$ の2種類があり, 共通する条件として  $D=80\text{mm}$ ,  $d=(\text{テーブル直径の}25\%)$ となっている。

図1 円錐台設置条件<sup>4)</sup>

今回は被削材には A2017 を使用し, 工具にはフラットエンドミル(工具径  $\phi 20$ , 2枚刃)を使用する。加工条件は, 主軸回転数 5000rpm, 指令送り速度 500mm/min に設定した。NCプログラムの作成は, 表計算ソフトウェアと, CAM ソフトウェアである ESPRIT2011 と MastercamX3 を用いて行う。

## 2.2 補間運動精度検査

ISO/DIS10791-6 BK3 の設置条件を図2に示す。仮想円錐台の半頂角及び傾きは ISO/DIS10791-7 M3 と同じ条件である。テーブル中心から円錐台底面中心までのオフセット値はテーブル直径の 10%, 指令送り速度は 1000mm/min とする。計測は時計回り, 反時計回りの両方で行う。測定器は次項で示すボールバーを使用する。NCプログラムは表計算ソフトで作成した。

図2 半頂角  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  の設置条件

## 3. 実験装置及び測定方法

## 3.1 測定器と測定対象

本研究の実験にて用いる測定機は RENISHAW 製の QC20-W(以下ボールバー)である。図3に測定器を示す。ボールバーとは2つの球とそれらを繋ぐ変位計を内蔵した棒からなる装置である。それぞれの球を主軸側とテーブル側に設置し, 変位計で接続する。この2つの球の距離を一定に保つように円運動させる NC プログラムを組む事で工作機械の運動精度を測ることができる。



図3 RENISHAW 製 QC20-W ボールバーシステム

測定対象は主に森精機製作所製 NMV5000DCG を使用した。NMV5000DCG は3つの直進軸(X, Y, Z)に加え, テーブル側に2つの回転軸(B, C)を持つ5軸マシニングセンタである。最大移動範囲は X 軸方向に 730mm, Y 軸方向に 510mm, Z 軸方向に 510mm, B 軸は  $160^\circ \sim 180^\circ$ , C 軸は  $360^\circ$  回転が可能となっている。回転テーブルの直径は 500mm である。図4に軸構成を, 図5に NMV5000DCG の外観を示す。工具先端点制御などの一般的な機能に加え,

工具姿勢制御やワーク設置誤差補正などの特殊な機能を持っている。

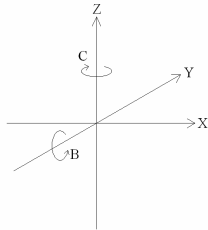


図4 軸構成



図5 NMV5000DCG<sup>5)</sup>

### 3.2 工具先端点制御

工具先端点制御(TCP)とは、5軸マシニングセンタにおいて回転軸の動作を含む工具先端の軌跡を直線的に制御する技術である。この機能を使用することにより、工具先端の位置がB軸やC軸の旋回に同期して自動的に調整され、工具先端とワークの位置を常に一定に保つことができる。つまり、NCプログラムを作成するとき、X、Y、Zの直進3軸の座標を回転軸2軸の回転に追従するよう変換する必要がなくなる。そのため、同時5軸運動による加工などの際、NCプログラムの作成が簡略化される。また、工具先端点制御はNCに保存されている回転軸位置のパラメータを参照している。本研究では、工具先端点制御の有無による作業手順と結果の違いを確認する<sup>6)</sup>。

### 3.3 工具先端点制御を使用しない測定方法

通常5軸制御にて計測を行う場合、主軸中心と主軸につける球の中心のずれが誤差の原因になる。そのため、主軸中心と球の中心の芯出し作業をする必要がある。しかし、本研究の測定方法では、球の中心と回転軸中心の芯出しを行う。そして、芯出しをした時の主軸中心と球の中心のX、Yがずれていた分、仮想円錐台をオフセットしてプログラムを作成する。図6に芯出し方法を示す。芯出しが完了したら、ボールバー設置条件に基づき、各軸の移動を行い、ボールバーを設置する。最後に、作成したNCプログラムを起動し測定を行う。なお、NCプログラムはインクリメンタル方式(G91)を使用している。

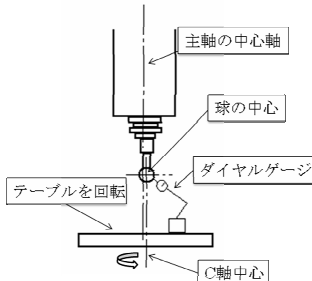


図6 芯出し方法

### 3.4 工具先端点制御を使用する測定方法

工具先端点制御を使用する場合、NCに保存されている回転軸の中心座標が使用されている。このため、回転軸中心の芯出し作業を行う必要がある。図7にC軸回転軸の芯出し作業方法を示す。ダイヤルゲージを図7のように鋼

球にあてテーブルを回転させC軸中心と球中心の芯出し作業を行う。次に、ツールホルダーにダイヤルゲージを取り付け、主軸を回転させることで主軸中心とC軸中心の芯出し作業を行う。以上のことを行いC軸のX、Y座標を計測し補正する。B軸旋回軸のX座標はC軸旋回軸のX座標から18 $\mu\text{m}$ 離れていると分かっており、本研究の計測ではZ軸方向は補正しなくても結果にあまり影響しないとわかったためB軸旋回軸の計測は行わなかった。鋼球は真球度0.1 $\mu\text{m}$ のものを使用した。図8に工具先端点制御を使用する場合の芯出し方法を示す。C軸旋回軸の芯出しが完了したら、主軸に球を取り付ける。このとき主軸側球の設置位置の誤差を無くすため、主軸中心と球の中心が一致するように芯出しを行う。芯出しが完了したら、ボールバー設置条件に基づき、各軸の移動を行い、ボールバーを設置する。最後に、作成したNCプログラムを起動し計測を行う。

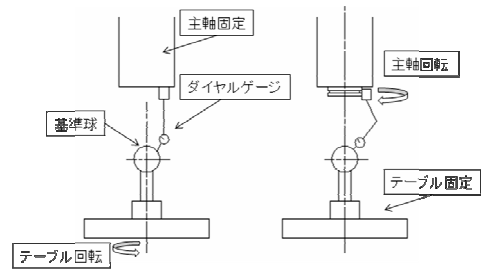


図7 C軸旋回軸中心の芯出し方法

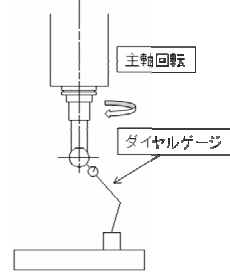


図8 工具先端点制御使用の芯出し方法

## 4. 補間運動精度検査の結果

### 4.1 工具先端点制御を使用しない場合の計測結果

初めに計測した結果を真円に近づける方法を記述する。工具先端点制御を使用しない測定方法に従い半頂角15°の計測した結果を図9(真円度9.0 $\mu\text{m}$ )に示す。図9の測定開始位置をX+4 $\mu\text{m}$ 、Y+5 $\mu\text{m}$ だけ変更して得られた結果を図10(真円度6.8 $\mu\text{m}$ )に示す。

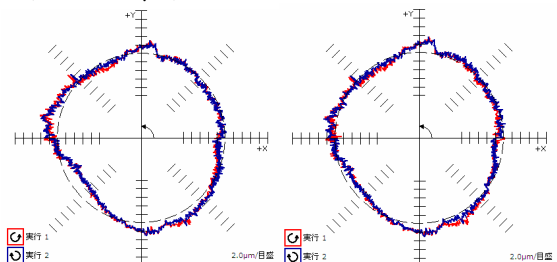
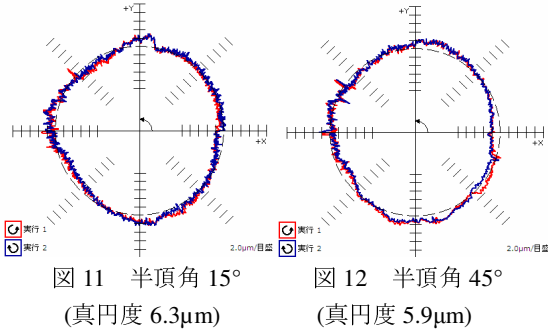


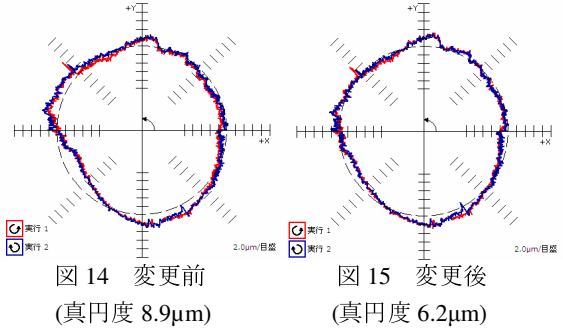
図9 変更前  
(真円度9.0 $\mu\text{m}$ )

図10 変更後  
(真円度6.8 $\mu\text{m}$ )

測定開始位置を変更することで 90°~180°の膨らみが減り 180°~270°の凹みが減っており真円度が良くなっている。これは、芯出しが不十分であったため出た誤差、計測までの温度変化による誤差を補正したためだと考えられる。半頂角 15°、45°の計測を数回行った中で一番良い結果を図 11、図 12 に示す。



誤差が出た場合の結果を図 14(真円度 8.9µm)に示す。工具先端点制御を使用する場合、測定開始位置を変更しても真円度は変わらないため、図 14 の結果を見て NC に保存されている旋回軸のパラメータを Y+5µm だけ変更する。この補正で得られた結果を図 15(真円度 6.2µm)に示す。



半頂角 15°では 80°付近にて大きな段差がある。この誤差に対して反対側の 280°の位置でも同じぐらいの誤差が出ているが段差は小さい。半頂角 45°の円の形状は縦長で少し凸凹しており突起が多く発生している。半頂角 15°の 2つの段差は B 軸が 19°付近を通る時に発生するため B 軸が原因だと考えられる。段差の誤差がある場所でボールバーの位置がどうなっているかを調べるために 80°と 280°の位置でのボールバーの位置を真上から見た XY 平面の図を図 13 に示す。

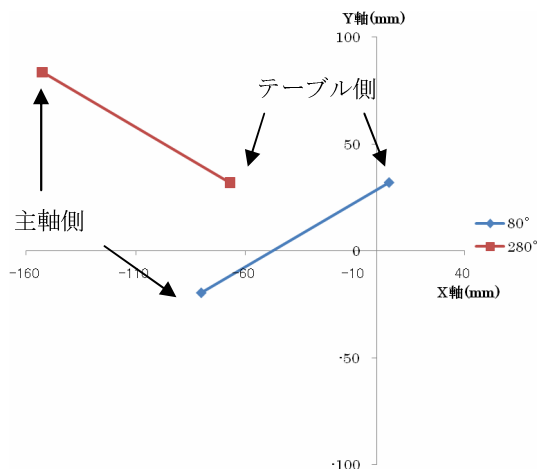


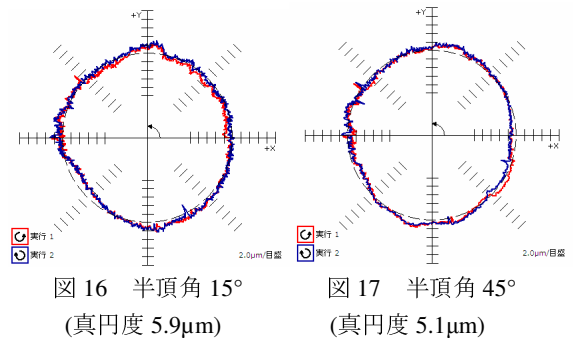
図 13 80°と 280°でのボールバーの位置

80°と 280°の位置でのボールバーの向きは逆を向いているが同じ角度だけ傾いている。このため、B 軸旋回軸の誤差が出た場合、計測結果には同じ量の誤差がでると考えられる。しかし、80°の方が誤差の段差は急にでている。これは 280°の位置では他の誤差の影響で段差が目立たないと考えられる。

#### 4.2 工具先端点制御を使用する場合の計測結果

工具先端点制御を使用する場合の測定方法は工具先端点制御を使用しない測定方法に比べ、C 軸旋回軸の芯出し作業分芯出しが多いため芯出し誤差が出やすい。そこで、旋回軸の芯出し誤差が出た場合の手順を記述する。芯出し

パラメータを変更することで 90°~180°の膨らみが減り 180°~270°の凹みが減っており真円度が良くなっている。半頂角 15°、45°の計測を数回行った中で一番良い結果を図 16、図 17 に示す。



半頂角 15°では工具先端点制御を使用しない時と同様に 80°付近にて大きな段差があり 280° 付近にて小さな段差がある。半頂角 45°は突起が多く発生しており円の形状は少し凸凹している。

#### 4.3 旋回軸の中心座標の誤差が計測結果に及ぼす影響

芯出しが不十分などのために旋回軸の位置に誤差がある場合、真円度に影響を及ぼす。まず、半頂角 15°にて旋回軸の誤差が円の形状にどのような影響を及ぼすかを記述する。半頂角 15°の比較的誤差が小さい結果を図 18 に示す。

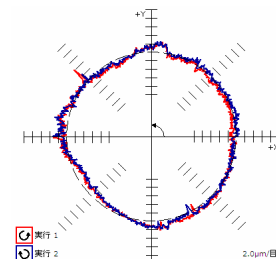


図 18 誤差が小さい真円度 (真円度 6.7µm)

図 18 を基準に X 軸方向に±20µm 誤差を与えた場合の結果を図 19、図 20 に示す。

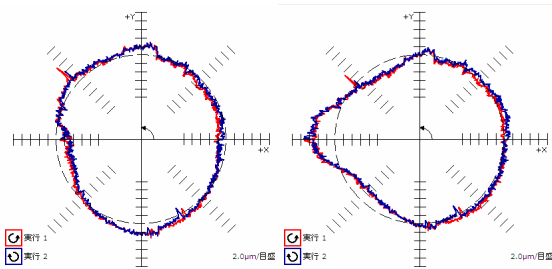


図 19 +X 軸方向に誤差 (真円度 10.4 $\mu\text{m}$ ) 図 20 -X 軸方向に誤差 (真円度 11.3 $\mu\text{m}$ )

+X 軸方向に誤差を与えた場合、 $160^{\circ}\sim 225^{\circ}$ が凹んでいる。-X 軸方向に誤差を与えた場合、 $90^{\circ}\sim 135^{\circ}$ と  $195^{\circ}\sim 270^{\circ}$ が凹み  $135^{\circ}\sim 195^{\circ}$ が膨らんでいる。

Y 軸方向は形状変化が出やすいため図 18 を基準に  $\pm 10\mu\text{m}$  誤差を与えた。結果を図 21, 図 22 に示す。

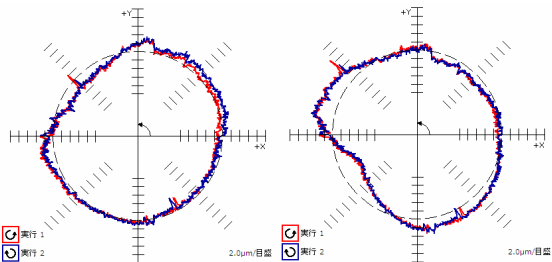


図 21 +Y 軸方向に誤差 (真円度 7.5 $\mu\text{m}$ ) 図 22 -Y 軸方向に誤差 (真円度 12.8 $\mu\text{m}$ )

+Y 軸方向に誤差を与えた場合  $100^{\circ}\sim 180^{\circ}$ が凹み、 $180^{\circ}\sim 225^{\circ}$ が膨らんでいる。-Y 軸方向に誤差を与えた場合逆に  $125^{\circ}\sim 180^{\circ}$ が膨み、 $180^{\circ}\sim 250^{\circ}$ が凹んでいる。

図 18 を基準に Z 軸方向に  $\pm 20\mu\text{m}$  誤差を与えた。結果を図 23, 図 24 に示す。

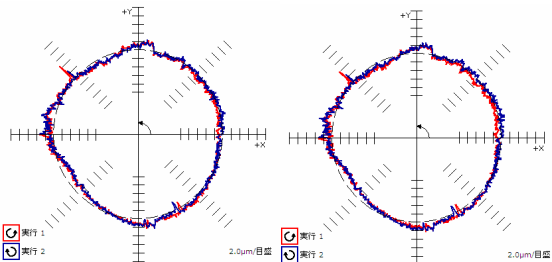


図 23 +Z 軸方向に誤差 (真円度 7.2 $\mu\text{m}$ ) 図 24 -Z 軸方向に誤差 (真円度 6.7 $\mu\text{m}$ )

$\pm Z$  軸方向に誤差を与えた場合円の形状、真円度共にほとんど変化は見られない。さらに、Z 軸方向に  $\pm 40\mu\text{m}$  の誤差を与えたが結果はあまり変わらなかった。半頂角  $45^{\circ}$  においても同様の実験を行ったが、半頂角  $15^{\circ}$  と同じ結果となった。

#### 4.4 旋回軸 2 軸間の位置偏差が計測結果に及ぼす影響

B 軸, C 軸は図 4 のように設計上では交差している。しかし、現実には製造の時に誤差が生じるため交差させるのは難しい。そのため、今回使用した機械では NC 内部に位

置偏差分(C 軸と B 軸の間隔が  $18\mu\text{m}$ )の補正を行っている。ここではこの補正をしない場合、結果にどのような影響を及ぼすかを検討する。半頂角  $15^{\circ}$  の補正をした場合を図 25 に、補正をしない場合を図 26 に示す。

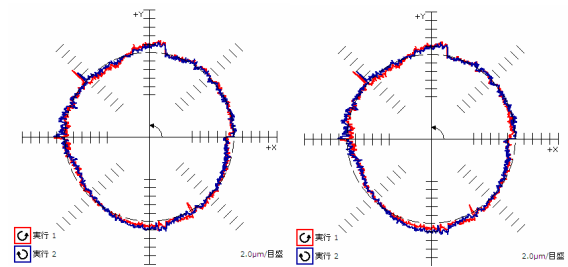


図 25 補正をした場合 (真円度 6.7 $\mu\text{m}$ ) 図 26 補正をしない場合 (真円度 7.4 $\mu\text{m}$ )

半頂角  $15^{\circ}$  の結果を比較すると円の形状にはあまり変化がなく、真円度は  $0.7\mu\text{m}$  異なっている。工具先端点制御を使用しない場合、この旋回軸 2 軸間の位置偏差を補正していない。このため、プログラムを表計算ソフトで作る段階で補正するか、測定結果をみて測定開始位置を変更して補正する必要がある。半頂角  $45^{\circ}$  の補正をした場合を図 27 に、補正をしない場合を図 28 に示す。

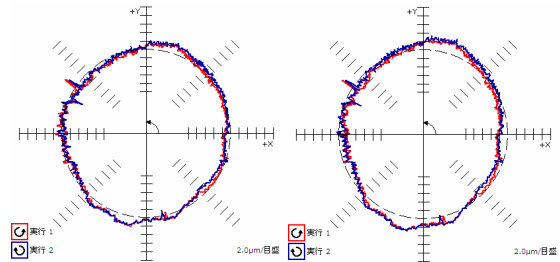


図 27 補正をした場合 (真円度 6.5 $\mu\text{m}$ ) 図 28 補正をしない場合 (真円度 7.7 $\mu\text{m}$ )

半頂角  $45^{\circ}$  の結果を比較すると真円度は  $1.2\mu\text{m}$  異なっており、円の形状では縦に細長くなっている。補正をしない場合 NC 装置内では C 軸旋回軸中心に B 軸旋回軸が交差していると設定している。このため、実際は交差していないため B 軸旋回軸を動かすと誤差が出ると考えられる。半頂角  $45^{\circ}$  の方が影響を大きく受けたのは B 軸旋回軸を大きく動かしたためだと考えられる。

#### 4.5 円錐台を ZX 平面に対して逆に設置した計測結果

本研究で今まで計測してきた方法では B 軸は+側, X 軸は-側にしか移動していないため反対側の計測ができていない。通常のテーブル旋回型は旋回角度が小さいため円錐台を ZX 平面に対して逆に設置した計測ができないことが多い。しかし、NMV5000DCG は B 軸が  $160^{\circ}\sim -180^{\circ}$  まで旋回するため逆に設置しても計測が可能である。そこで、B 軸の+側と X 軸の-側を計測することのできる円錐台を ZX 平面に対して逆に設置した計測を行った。図 29 に半頂角  $15^{\circ}$  の工具先端点制御を使用しない場合の結果、図 30 に半頂角  $15^{\circ}$  の工具先端点制御を使用した場合の結果を示す。

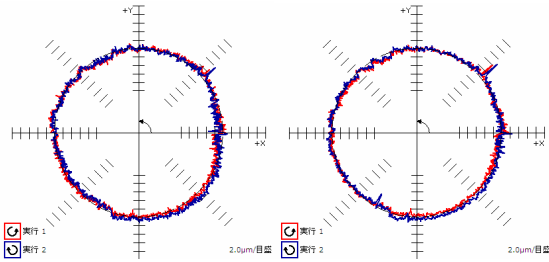


図 29 TCP 不使用  
(真円度 7.5 $\mu\text{m}$ )

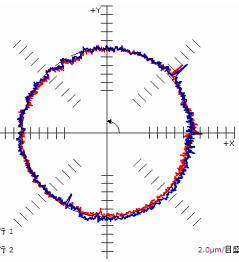


図 30 TCP 使用  
(真円度 8.3 $\mu\text{m}$ )

45°の位置に突起と 250°の位置に内向き突起が表れている。これは、X 軸の運動方向が変わる位置である。真円度は突起の影響により大きくなっているが、今までの半頂角 15°にて計測してきた結果に比べ円の形状は綺麗である。105°付近に小さな段差があり反対側の 255°にも小さな段差がある。これは、今までの半頂角 15°の計測同様 B 軸が原因だと考えられる。今までの半頂角 15°の結果では必ず 80°付近で大きな誤差が発生しているが逆に設置した円錐の結果では大きな段差はない。これは、今までの計測及び加工で B 軸の+側を一側に比べ使い続けた結果、B 軸の+側が劣化しているのではないかと考えられる。

#### 4.6 CAM によるボールバー計測結果

メーカーがボールバー測定を行う場合 CAM にて NC プログラムを作成する場合がある。このため、CAM にて作成したプログラムでボールバー測定を行い問題がないかを確認する必要がある。ESPRIT2011 にて NC プログラムを作成しボールバー測定を行った。図 31 に表計算ソフトの計測結果、図 32 に ESPRIT2011 の計測結果を示す。

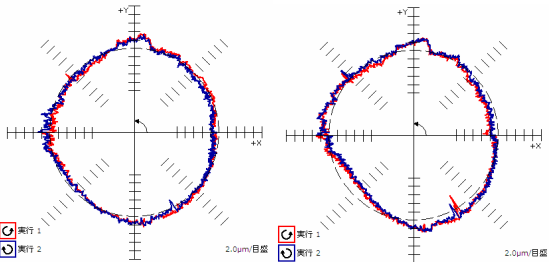


図 31 表計算ソフト  
(真円度 6.0 $\mu\text{m}$ )

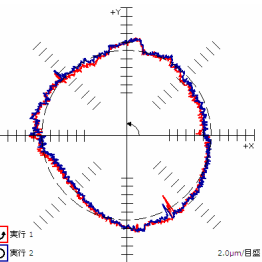


図 32 ESPRIT2011  
(真円度 6.8 $\mu\text{m}$ )

真円度及び円の形状を比較した結果は、表計算ソフトの方が良い結果となっている。ESPRIT2011 の計測結果は 180°~270°が凹んでいるので図 22 から -Y 軸方向に誤差が出ていると考えられるため、誤差を補正すれば表計算ソフトに近い円の形状及び真円度が得られる。このため、CAM を使用してのボールバー測定は問題がないと考えられる。

#### 5. 工作精度検査の結果

表計算ソフト、ESPRIT2011、MastercamX3 で作成した NC プログラムで加工をした円錐台を真円度測定器にて計測を行った。計測は円錐台上面から 2mm の位置と、底面

から 2mm の位置で行う。計測結果は上面と底面を重ねて表示している。なお、すべて工具先端点制御を使用している。表計算ソフトを使用し加工した半頂角 15°、45°の結果を図 33、図 34 に示す。ESPRIT2011 を使用し加工した半頂角 15°、45°の結果を図 35、図 36 に示す。MastercamX3 を使用し加工した半頂角 15°、45°の結果を図 37、図 38 に示す。真円度測定の結果を表 1 にまとめた。

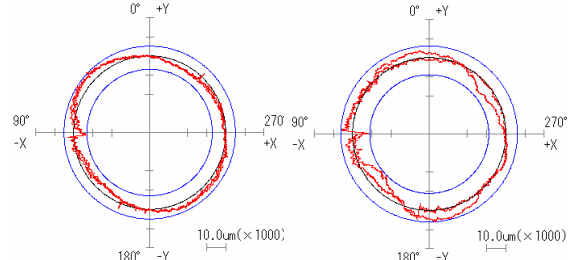


図 33 表計算ソフト  
(半頂角 15°)

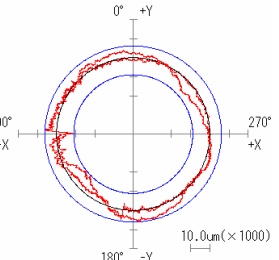


図 34 表計算ソフト  
(半頂角 45°)

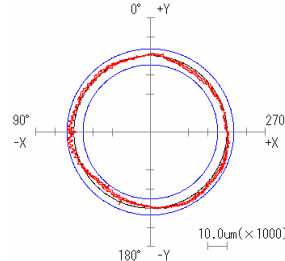


図 35 ESPRIT2011  
(半頂角 15°)

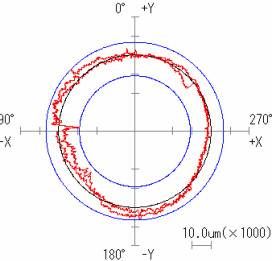


図 36 ESPRIT2011  
(半頂角 45°)

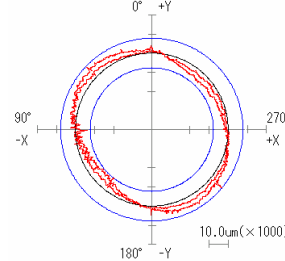


図 37 MastercamX3  
(半頂角 15°)

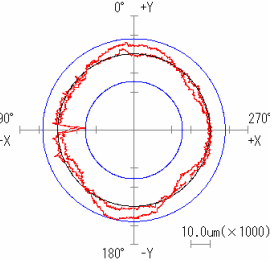


図 38 MastercamX3  
(半頂角 45°)

表 1 円錐台加工試験の真円度測定結果( $\mu\text{m}$ )

	半頂角 15°		半頂角 45°	
	上面	底面	上面	底面
表計算ソフト	11.8	12.0	11.5	15.0
ESPRIT2011	7.3	8.5	13.5	17.6
MastercamX3	10.1	15.6	13.9	22.4

半頂角 15°の結果を見ると MastercamX3 の底面が真円度 15.6 $\mu\text{m}$  と少し大きいですが、他の結果は 7.3~12.0 $\mu\text{m}$  なのでボールバー測定の半頂角 15°の結果と比較して妥当な結果だと言える。半頂角 45°の結果は半頂角 15°と比べて真円度 11.5~22.4 $\mu\text{m}$  と誤差が大きい。半頂角 45°では上面側と底面側での真円度の差が大きい。これは工具の姿勢が 45°と大きく底面側が工具の振れを大きく受けたためと考えられる。半頂角 45°の上面側は真円度 11.5~13.9 $\mu\text{m}$  で、半頂角 45°のボールバー測定では 5.0~7.0 $\mu\text{m}$  と誤差が小さく

出ている。この結果から、半頂角 45°のボールバー測定では半頂角の角度が大きいため誤差が  $1/\sqrt{2}$  になっている可能性がある。このため、今後他のテーブル旋回形、主軸旋回形、混合形ではどのような結果が出るかを確認する必要がある。3種類のソフトの真円度に差があるのは加工した日がすべて違うため ESPRIT2011 で加工した日が旋回軸の芯出しが上手くいき良い結果が出たと考えられる。

全ての結果で 180°付近に凹みが確認できる。これは、180°の所が加工開始点及び加工終了点であるため同じ箇所を2度加工している事が原因である。また、加工開始点にて停止していた旋回軸が動きだす時に発生する応答遅れが原因だと考えられる。この他にすべての加工で加工開始点までのアプローチ方法は円錐に対して半径方向から接近している。この事も原因の1つだと考えられる。このため、アプローチ方法を ESPRIT2011 では円を描くようにアプローチし、表計算ソフトでは円錐に対して接線方向にアプローチする方法で加工を行った。なお、半頂角 15°で行い、表計算ソフトに関しては別の日にもう一度加工を行っている。図 39 に ESPRIT2011、図 40、図 41 に表計算ソフトの加工形状を示す。表 2 に真円度の結果を示す。

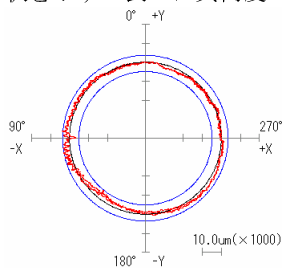


図 39 ESPRIT2011

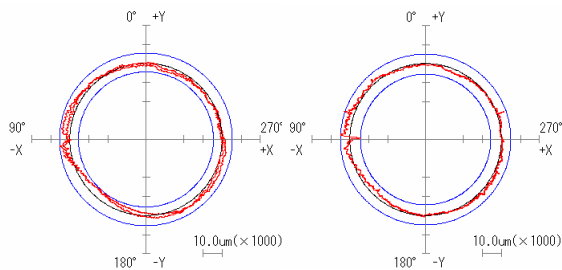


図 40 表計算ソフト① 図 41 表計算ソフト②

表 2 円錐台加工試験の真円度測定結果(μm)

	半頂角 15°	
	上面側	底面側
ESPRIT2011	7.7	8.5
表計算ソフト①	9.9	7.7
表計算ソフト②	10.0	10.6

表計算ソフトの結果は図 33 の結果と図 40、図 41 の結果を比べると加工開始点の誤差は改善されている。このため、表計算ソフトでは半径方向にアプローチをした場合、加工開始点で一瞬止まり加工を行ったため誤差が大きくなったと考えられる。ESPRIT2011 は図 35 が元々良いため図 39 はあまり変化していない。ESPRIT2011 の半径方向のアプローチでは加工したプログラムを見ると Y 軸に-

681μm 離れた距離から斜めに加工開始点に入っていたため ESPRIT2011 ではどちらの方法でも加工開始点で止まる事なく、スムーズに加工を行い誤差が小さくなったのではないかと考えられる。表計算ソフト①の上面側の真円度が大きいのは、円錐を加工する時に荒加工から仕上げ加工まで同じ工具を使用したため、加工する割合の多い工具の上面側が摩耗し表面が粗くなったためだと考えられる。

## 6. 結 言

本研究では 5 軸マシニングセンタの円錐台試験による精度評価を行った結果、以下の成果を得た。

- 1) 円錐台加工を模擬した補間運動精度測定を行った結果、作業手順や工具先端点制御の有無による結果の現れ方の違いについて確認した。
- 2) 旋回軸の中心座標の位置に誤差があった場合に、計測結果にどのような影響を及ぼすかを確認した。
- 3) 円錐台を ZX 平面に対して反対側に設置した計測を行い、B 軸の-側と X 軸の+側の計測ができる事を確認した。
- 4) 機械の精度が悪くなっている原因がある程度わかった。
- 5) CAM にて作成したプログラムにてボールバー測定を行い問題がないことを確認した。
- 6) 各 CAM ソフトウェアで作成した NC コードを使って実加工を行い、ボールバー測定との結果の違いや作業上の問題点を確認した。

## 参考文献

- 1) 堤正臣, 5 軸制御マシニングセンタ精度検査規格標準化説明会資料, 社団法人日本工作機械工業会, 2008
- 2) 堤正臣, 井原之敏, 崔成日, 茨木創一, 5 軸マシニングセンタ運動精度調査研究説明会資料, 社団法人日本工作機械工業会, 2010.
- 3) ISO/DIS10791-6:2012 Machine Tools -Test conditions for machining centres- Part 6:Accuracy of speeds and interpolations.
- 4) ISO/DIS10791-7:2012 Machine Tools -Test conditions for machining centres- Part 7:Accuracy of finished test piece.
- 5) <http://www.moriseiki.se/2007/05/nmv5000-dcg%E2%84%A2-the-new-benchmark-in-flexibility-and-perfection/>
- 6) FANAC Series 30i/300i/300is-MODEL A FANAC Series 31i/310i/310is-MODEL A FANAC Series 32i/320i/320is-MODEL A 旋盤系/マシニングセンタ系 共通ユーザーズマニュアル
- 7) NAS979, Uniform cutting test -NAS series, metal cutting equipment specifications (1969).
- 8) 清水伸二, 目で見える「多軸制御工作機械の最前線」 pp.6-13, 日本機械学会, Vol.111, No.1073 (2008)