

## 5 軸マシニングセンタの同時 5 軸制御による精度検査に関する研究

学生 E 指導教員：井原之敏

## Study on Accuracy Test by the Simultaneous 5-axis Control of 5-axis Machining Center

Student E

The motion accuracy evaluation method of five-axis machining centers was not fixed enough though their demand has increased now. The discussion about the ISO standard concerning the accuracy test method of five-axis machining centers started in 2006. In the discussion, the cone frustum cutting test in NAS979 is improved as five-axis simultaneous interpolation motion described in ISO10791-7 “Accuracy of a finished test piece”, and similar test using the ball bar is also described in ISO10791-6 “Accuracy of interpolation motion test”. These two standards were issued as International Standards in 2014. In this report, the evaluation methods and problems of interpolation motion accuracy test simulating the cone frustum cutting that described in ISO10791-6 are considered.

**Key Words:** five-axis machining center, ball-bar, cone frustum, NAS979, International Standard

## 1 緒 言

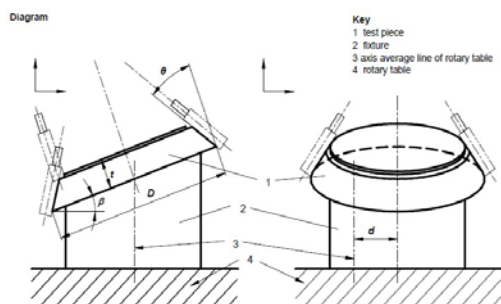
5 軸マシニングセンタ(以下 5 軸 MC)とは送り軸として 3 つの直進軸に加え 2 つの旋回軸を持つ工作機械である。工作物に対する工具の向きを変えることにより特殊な治具を用いず複雑形状の加工を可能としている。そのため 5 軸 MC の需要が増加しているが、精度評価を行っていないのが現状である。そこで様々な構造の 5 軸 MC に対応するため、2006 年に NAS979 の円錐台加工を改良した同時 5 軸制御による検査方法が ISO10791-6<sup>1)</sup>の補間運動精度検査と、ISO10791-7<sup>2)</sup>の工作精度検査に提案された<sup>3)</sup>。それら 2 つの規格は 2014 年度に ISO として発行された。

本研究ではテーブル旋回形 5 軸 MC を対象として実際に円錐台加工を模擬した補間運動精度検査を行い、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。

## 2 5 軸マシニングセンタの精度検査規格

## 2.1 工作精度検査

円錐台加工試験である ISO10791-7 M3<sup>2)</sup>の設置条件を Fig. 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  $D=80\text{mm}$ 、 $d=(\text{回転テーブル直径の } 25\%)$ となっている。

Fig. 1 円錐台設置条件<sup>2)</sup>

## 2.2 補間運動精度検査

ISO10791-6<sup>1)</sup>の補間運動精度検査では 5 軸 MC の構造別に附属書が分類されており、主軸頭旋回形は A、テーブル旋回形は B、混合形は C の検査項目がある。本研究ではテーブル旋回形 5 軸 MC を対象としたため、ISO10791-6 BK3 に記述されている円錐台加工を模擬した補間運動精度検査を行う。その設置条件を Fig. 2 に示す。仮想円錐台の半頂角及び傾きは ISO10791-7 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( $d$ )は回転テーブル直径の 10%、周速は 1000mm/min、測定は時計回り及び反時計回りとなっている。使用する NC プログラムは表計算ソフトウェアを用いて微小線分分割プログラムで作成する。測定装置は 3.2 で説明するボールバーを用いる。

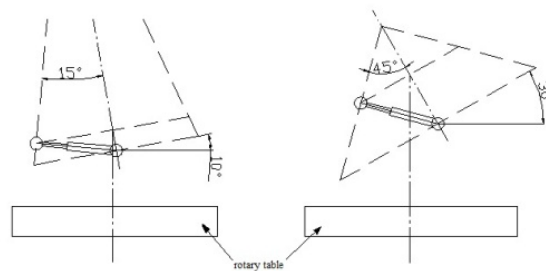


Fig. 2 半頂角 15°及び半頂角 45°の設置条件

## 3 実験装置

## 3.1 測定対象機

本研究の測定対象機は Fig. 3 に示すテーブル旋回形 5 軸 MC である。この 5 軸 MC は 3 つの直進軸(X, Y, Z)に加え、テーブル側に 2 つの旋回軸(B, C)を持っている。各軸の最大移動範囲は 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。最小移動単位は  $1\mu\text{m}$ 、 $0.001^\circ$ である。回転テーブルの直径は 500mm である。

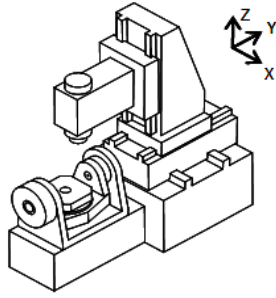


Fig. 3 5軸MC [w C' B' b X Y Z (C) t]

### 3.2 測定装置

本研究で用いる測定装置はFig. 4に示すRENISHAW製のQC20-W(以下ボールバー)である。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。ボールバーの球を主軸側とテーブル側に設置し、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プログラムを組むことで工作機械の運動精度を測定することができる。今回使用したボールバーは従来の有線式のボールバーと違い、Bluetoothでの無線通信が可能であるため、信号ケーブルの影響を受けずに測定をすることが可能である。



Fig. 4 RENISHAW製QC20-Wボールバーシステム

### 3.3 工具先端点制御

工具先端点制御とは、5軸MCにおいて工具の向きが変わっても工具先端を指令された径路に沿って動くように制御する機能である。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時、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に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に保存されている旋回軸の中心座標を参照している<sup>4)</sup>。

### 3.4 工具先端点制御を使用した測定

工具先端点制御を使用した場合、上述したようにNCに保存されている旋回軸の中心座標が参照される。この座標は熱変形や経年劣化により日々変化している。そのため、工具先端点制御を使用して精度検査を行う場合は、この旋回軸の座標を修正しておく必要がある。Fig. 5に測定対象機とした5軸MCの座標系を示す。

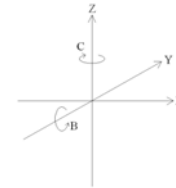


Fig. 5 5軸MCの座標系

そして、工具先端点制御を使用した場合、主軸側球を厳密に主軸中心に設置する必要がある。ISO10791-6<sup>1)</sup>の附属書Dに記述されている取り付け具を用いて主軸中心と主軸に取り付けている球中心を一致させる。Fig. 6に心出し方法を示す。

ダイヤルゲージをFig. 6のように鋼球にあて主軸を回転させる。そして取り付け具で設置位置の誤差が無くなるように調節することで主軸中心と球中心の心出しを行う。

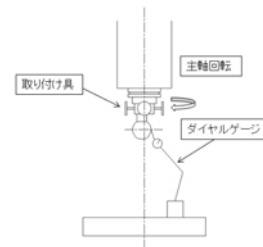


Fig. 6 主軸中心と球中心の心出し

#### 3.4.1 旋回軸の中心座標

主軸中心と球中心の心出しを行った後に、ダイヤルゲージをFig. 7のように鋼球にあてテーブルを回転させ、主軸位置を調節することでC軸の中心座標を求める。

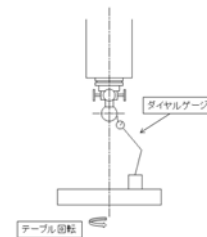


Fig. 7 C軸の測定方法

次に、テーブルをFig. 8のように旋回させ、主軸位置を調節することでB軸の中心座標を求める。

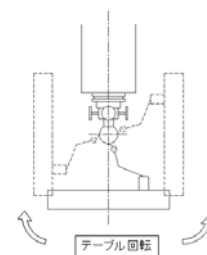


Fig. 8 B軸の測定方法

本研究ではこのようにして得られた旋回軸の中心座標に着目し、NC に保存されている設定値を変化させた場合、測定結果にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

### 3.4.2 旋回 2 軸間の位置偏差

大抵のテーブル旋回形 5 軸 MC の旋回軸 2 軸は設計上 Fig. 5 に示すように交差している。しかし、実際には製造、組み立てを経て厳密には交差していない。この旋回軸の偏差を本研究では位置偏差と呼ぶことにする。工具先端点制御を使用して精度検査を行う場合は、その位置偏差を修正する必要がある。主軸中心と球中心の心出しを行ったあと、ダイヤルゲージを Fig. 9(a)のように鋼球にあてテーブルを回転させ、主軸位置を調節することで C 軸中心と球中心の心出しを行う。次に、B 軸を 90° 回転させ Fig. 9(b)のようにダイヤルゲージをあてテーブルを回転させ、主軸位置を調節することで C 軸中心と球中心の心出しを行う。最後に、Fig. 9(c)のようにダイヤルゲージをあてテーブルを 0° から 90° に回転させる。その動いたダイヤルゲージの目盛りの半分が位置偏差の値である。本研究で用いた測定対象機では偏差が 18μm であった。

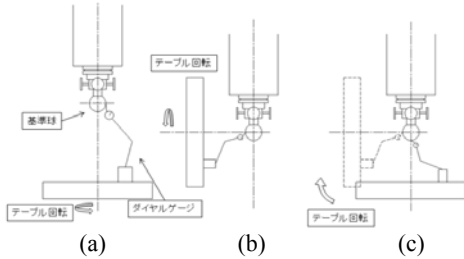


Fig. 9 BC 軸の位置偏差測定方法

本研究ではこのようにして得られた旋回軸の位置偏差に着目し、NC に保存されている設定値を変化させた場合、測定結果にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

## 4 測定結果及び考察

### 4.1 旋回軸の中心座標が測定結果に及ぼす影響

工作機械の熱変形や経年劣化等によって旋回軸の中心座標が NC に保存されている設定値から変化した場合、工具先端点制御を使用した測定結果に影響を及ぼすことが考えられる。そこで半頂角 15° の条件での誤差軌跡が基準円に沿っている測定結果を Fig. 10 に示す。その測定結果から C 軸の中心座標が変化したと仮定して、各軸方向に誤差を与えた場合、測定結果にどのような影響を及ぼすか検討を行った。

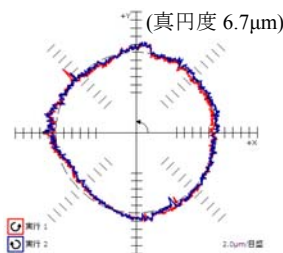


Fig. 10 半頂角 15°

Fig. 10 に示す測定結果が得られた条件から X 軸方向に ±20μm 誤差を与えた測定結果を Fig. 11 と Fig. 12 に示す。

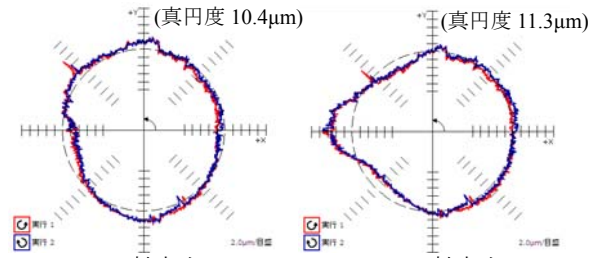


Fig. 11 +X 軸方向 (20μm) Fig. 12 -X 軸方向 (20μm)

+X 軸方向に誤差を与えた場合、位相角 180° 付近が凹んでいる。-X 軸方向に誤差を与えた場合、位相角 180° 付近が膨らんでいる。

Y 軸方向に ±10μm 誤差を与えた測定結果を Fig. 13 と Fig. 14 に示す。

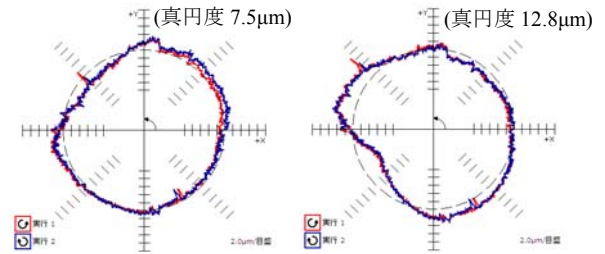


Fig. 13 +Y 軸方向 (10μm) Fig. 14 -Y 軸方向 (10μm)

+Y 軸方向に誤差を与えた場合、位相角 135° 付近が凹んでいる。-Y 軸方向に誤差を与えた場合、位相角 225° 付近が凹んでいる。

Z 軸方向に誤差を与えた場合、誤差軌跡にほとんど変化は見られなかった。

また測定時、ボールバーの姿勢が刻々と変化するのでボールバーの姿勢が誤差軌跡の変化に関係していると考えられる。ボールバーは主軸に対して常に垂直に取り付けられていて、XY 平面でボールバーの姿勢が変化することがわかっている。NC プログラムを作成する時に用いた微小線分割プログラムから主軸側とテーブル側の球の軌道を求め、同じ位相角の座標を繋げることで XY 平面でのボールバーの姿勢を求めた。半頂角 15° の条件での主軸側とテーブル側の球の軌道と、位相角 30° 毎のボールバーの姿勢を Fig. 15 に示す。そして Fig. 16 にはボールバーが X 軸に対して平行な状態を 0° とし、測定時に刻々と変化するボールバーの姿勢を角度で示す。

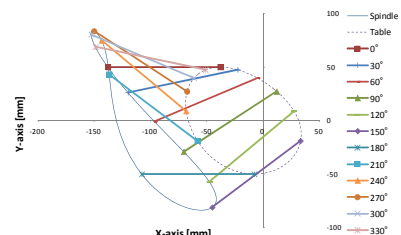


Fig. 15 球の軌道とボールバーの姿勢

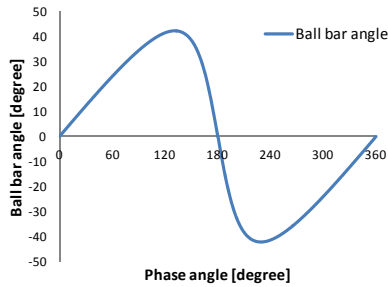


Fig. 16 ボールバーの姿勢の変化

Fig. 15 に示すボールバーの姿勢が位相角  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  では X 軸に対して平行であるため、ボールバーが読み取る誤差は、実際の X 軸方向の誤差と等しくなる。X 軸方向の誤差によって Fig. 11 では位相角  $180^\circ$  付近の誤差軌跡が凹み、Fig. 12 では膨らんでいるが、それぞれの位相角  $0^\circ$  付近では誤差が現れていない。これは中心オフセットや最適化半径等のソフトウェア上の処理がされているため、位相角  $0^\circ$  付近では誤差が現れていないように表示されていると考えられる。ここで中心オフセットと最適化半径について説明する。中心オフセットとは、ボールバー測定から得られた誤差軌跡が描く円に対して、最小二乗中心法を用いて円の中心を求め、基準円の中心からの偏心を取り除く機能である。そして偏心を取り除いた誤差軌跡を表示するのに最適な基準円の半径が最適化半径である。

測定時のボールバーの姿勢の変化を示した Fig. 16 からボールバーの姿勢が位相角  $135^\circ$ 、 $225^\circ$  で  $\pm 42^\circ$  となり、角度が最大となることがわかる。ボールバーの姿勢に角度がつくと、ボールバーが読み取る誤差は実際の誤差の余弦となるため、Y 軸方向の誤差によって Fig. 13 では位相角  $135^\circ$  付近の誤差軌跡が凹み、Fig. 14 では位相角  $225^\circ$  付近が凹んでいる。また位相角  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  ではボールバーの姿勢が X 軸に対して平行であるため、ボールバーが読み取る Y 軸方向の誤差が微小となる。

Fig. 11～Fig. 14 には誤差軌跡の偏心を取り除くため、中心オフセットの処理がされている。そのためボールバーの姿勢から求めたボールバーが読み取る誤差は誤差軌跡に現れている誤差と一致しない。そこで測定時のボールバーの姿勢が誤差軌跡の変化に関係しているか確認するため測定結果のシミュレーションを 4.4 で行う。

#### 4.2 回転軸 2 軸間の位置偏差が測定結果に及ぼす影響

本研究で用いた測定対象機では工具先端点制御を使用することで NC に保存されている B 軸を基準とした B 軸と C 軸との  $18\mu\text{m}$  の位置偏差が考慮される。この位置偏差が正確に考慮されていない場合は、測定結果に影響を及ぼすと考えられる。そのため NC に保存されている位置偏差を  $\pm 100\mu\text{m}$  と実際より大きく設定して測定を行った。半頂角  $15^\circ$  と半頂角  $45^\circ$  の両条件での測定結果を Fig.17～Fig. 20 に示す。

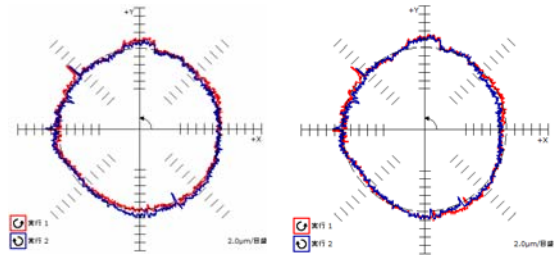


Fig. 17 半頂角  $15^\circ$  ( $+100\mu\text{m}$ ) Fig. 18 半頂角  $15^\circ$  ( $-100\mu\text{m}$ )

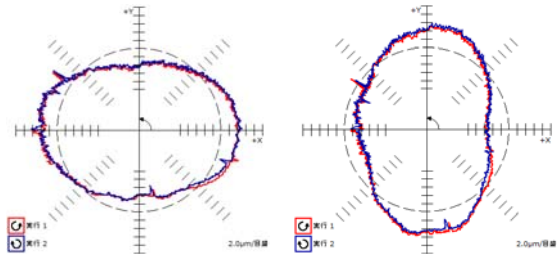


Fig. 19 半頂角  $45^\circ$  ( $+100\mu\text{m}$ ) Fig. 20 半頂角  $45^\circ$  ( $-100\mu\text{m}$ )

Fig. 17 と Fig. 18 に示す誤差軌跡は基準円に沿っているが、Fig.19 と Fig. 20 に示す誤差軌跡は楕円形状になっているので半頂角  $45^\circ$  の条件の方が位置偏差の影響が現れやすいと考えられる。

位置偏差が誤差軌跡に及ぼす影響を考察するため、NC プログラムを作成する時に用いた微小線分割プログラムから 4.1 と同じように主軸側とテーブル側の球の軌道を求めた。両条件での球の軌道と、位相角  $90^\circ$  毎のボールバーの姿勢をそれぞれ Fig. 21 と Fig. 22 に示す。位置偏差の設定を  $\pm 100\mu\text{m}$  にしたテーブル側の球の軌道は 100 倍の  $\pm 10\text{mm}$  に拡大して示している。

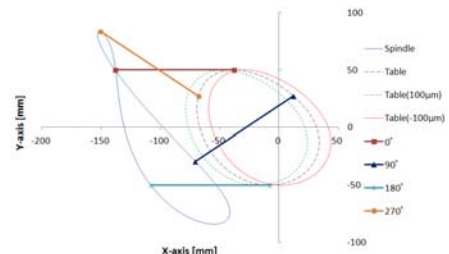


Fig. 21 半頂角  $15^\circ$  での軌道とボールバーの姿勢

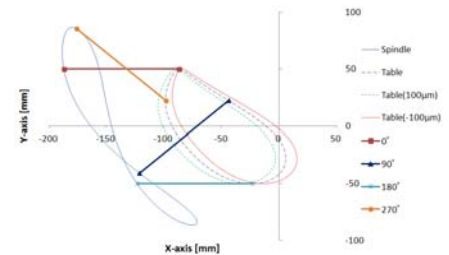


Fig. 22 半頂角  $45^\circ$  での軌道とボールバーの姿勢

Fig. 21 と Fig. 22 から両条件の位相角  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  では X 軸に対してボールバーの姿勢は平行である。半頂角  $15^\circ$  の条件での位相角  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  ではボールバーの姿勢の角度が  $\pm 34^\circ$  である。そして半頂角  $45^\circ$  の条件での位相角  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  ではボールバーの姿勢の角度は  $\pm 39^\circ$  である。両条件を比較してもボールバーの姿勢には大きな違いがないこ



とから、半頂角 45°の条件のみ誤差軌跡が楕円形状となる原因はボールバーの姿勢には関係がないと考えられる。

半頂角 15°の条件において位置偏差を与えた時の軌道は全体が同じように X 軸方向に移動しているが、半頂角 45°の条件において位置偏差を与えた時の軌道は位相角 0°付近の X 軸方向の移動が小さく、位相角 180°付近の X 軸方向の移動が大きい。この違いは B 軸の旋回角度が半頂角 45°の条件では 15°~75°と半頂角 15°の条件での 5°~25°に比べて大きいためである。そして B 軸が 0°の時、位置偏差は X 軸方向の偏差であるが、B 軸が旋回すると Z 軸方向の偏差となる。B 軸の旋回角度に対する X 軸方向の偏差は余弦で表すことができる。そこで X 軸方向の偏差を余弦で表すと半頂角 15°では 0.996~0.906、半頂角 45°では 0.966~0.259 になり、半頂角 45°の条件の方が余弦の範囲が約 8 倍大きい。そのため半頂角 45°の条件の方が誤差軌跡に位置偏差の影響が大きく現れたと考えられる。

### 4.3 直進 2 軸の直角度が測定結果に及ぼす影響

測定対象機とした 5 軸 MC は一度トレーラーに乗せて倉庫まで移動された。そして再びトレーラーに乗せて元の位置に戻した。移動後に XY 平面での直進 2 軸円弧補間精度検査を行うと移動前と測定結果が大きく異なったので、移動時に 5 軸 MC は何らかの衝撃を受けたと考えられる。移動前の測定結果を Fig. 23、移動後の測定結果を Fig. 24 に示す。

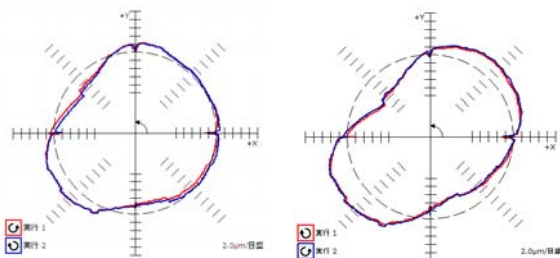


Fig. 23 XY 平面 (移動前) Fig. 24 XY 平面 (移動後)

移動後に測定を行った Fig. 24 から XY 軸の直角度の影響により誤差軌跡が斜めの楕円形状になっていることがわかる。円錐台加工を模擬した補間運動精度検査にも XY 軸の直角度が影響を及ぼすと考えられたので、移動後に測定を行った。半頂角 15°の条件での測定結果を Fig. 25 に示す。

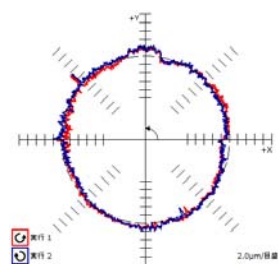


Fig. 25 半頂角 15° (移動後)

Fig. 25 を移動前の測定結果である Fig. 10 と比較すると誤差軌跡に大きな違いはない。円錐台加工を模擬した補間運動精度検査は 4.1 で述べたように NC に設定されている旋回軸の中心座標を変化させると、誤差軌跡を容易に変化させることができるため、XY 軸の直角度の影響が打ち消されることが考えられる。そこで、XY 軸の直角度が測定結果に与える影響を確認するため測定結果のシミュレーションを次項で行う。

### 4.4 測定結果のシミュレーション

NC プログラムを作成する時に用いた微小線分割プログラムから主軸側の球の軌道とテーブル側の球の軌道を求め、それらの 2 つの軌道からボールバーが読み取る距離を求めることができる。その距離から HEIDENHAIN 製の評価ソフトウェア ACCOM を用いて、旋回軸の中心座標が測定結果に及ぼす影響と直角度が測定結果に及ぼす影響のシミュレーションを行った。ACCOM とは測定半径、測定角度、データ数を用いることで ISO230-4<sup>5)</sup>に基づいて測定結果を表示できる評価ソフトウェアである。

#### 4.4.1 旋回軸の中心座標が測定結果に及ぼす影響

旋回軸の中心座標が測定結果に及ぼす影響のシミュレーションには式(1)に示すボールバーの基本式<sup>6)</sup>を用いた。

$$\Delta R = (\Delta X \cdot X + \Delta Y \cdot Y + \Delta Z \cdot Z) / R \quad (1)$$

$$\Delta X = (\Delta X_t - \Delta X_w), \quad X = (X_t - X_w)$$

$$\Delta Y = (\Delta Y_t - \Delta Y_w), \quad Y = (Y_t - Y_w)$$

$$\Delta Z = (\Delta Z_t - \Delta Z_w), \quad Z = (Z_t - Z_w)$$

式(1)の R をボールバー長さ 100mm、テーブル側の球の設置誤差を 0 とし、 $X_t, Y_t, Z_t$  に主軸側球の座標、 $X_w, Y_w, Z_w$  にテーブル側球の座標、 $\Delta X_t, \Delta Y_t, \Delta Z_t$  に旋回軸の中心座標に与えた誤差を代入して伸縮量  $\Delta R$  を求めた。そしてボールバー長さ 100mm に  $\Delta R$  を加えてボールバーが読み取る距離を求めた。求めた距離から ACCOM を用いて測定結果のシミュレーションを行った。

C 軸の中心座標が NC に保存されている設定値から変化したと仮定して、X 軸方向に  $\pm 20\mu\text{m}$  誤差を与えた場合のシミュレーションを Fig. 26 と Fig. 27、Y 軸方向に  $\pm 10\mu\text{m}$  誤差を与えた場合のシミュレーションを Fig. 28 と Fig. 29 に示す。なお、Fig. 26~Fig. 29 に示す誤差軌跡には中心オフセットの処理を行っていない。

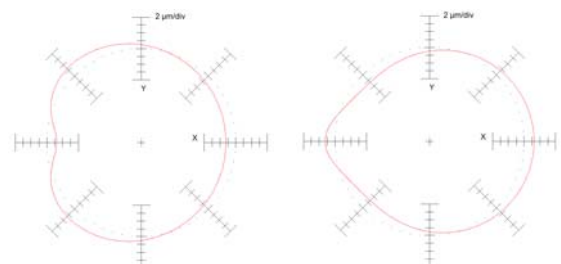


Fig. 26 +X 軸方向 (20 $\mu\text{m}$ ) Fig. 27 -X 軸方向 (20 $\mu\text{m}$ )  
最適化半径 99.983mm 最適化半径 100.018mm

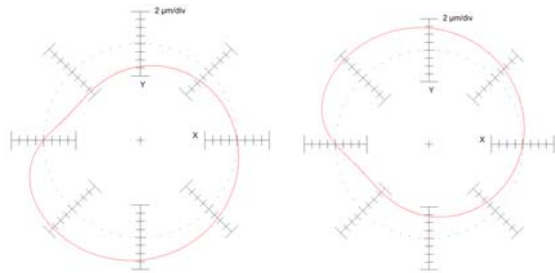


Fig. 28 +Y 軸方向 (10 $\mu$ m) Fig. 29 -Y 軸方向 (10 $\mu$ m)  
最適化半径 100.000mm 最適化半径 100.000mm

Fig. 26 では最適化半径が 99.983mm となり、測定半径が 17 $\mu$ m 小さくなっている。誤差軌跡は位相角 0°, 180° 付近が基準円から 2 $\mu$ m 程度小さくなっている。また Fig. 27 では最適化半径が 100.018mm と測定半径が 18 $\mu$ m 大きくなり、誤差軌跡が位相角 0°, 180° 付近で基準円から 2 $\mu$ m 程度大きくなっている。これより 4.1 で述べた位相角 0°, 180° でボールバーが読み取る誤差が実際の X 軸方向の誤差と等しいことが確認できる。Fig. 26 と Fig. 27 に示す誤差軌跡に中心オフセットの処理を行うと、実際に測定を行った Fig. 11 と Fig. 12 に示す誤差軌跡と同じように表示される。

Fig. 28 と Fig. 29 では最適化半径が 100.000mm となり、位相角 0°, 180° では誤差軌跡が基準円と一致している。これより 4.1 で述べた位相角 0°, 180° ではボールバーが読み取る Y 軸方向の誤差が微小となっていることが確認できる。また位相角 0°, 180° 以外ではボールバーの角度に応じてボールバーの読み取る誤差は実際の Y 軸方向の誤差の余弦となり、位相角 135°, 225° で最も Y 軸方向の誤差が大きくなっていることが確認できる。Fig. 28 と Fig. 29 に示す誤差軌跡に中心オフセットの処理を行うと、実際に測定を行った Fig. 13 と Fig. 14 に示す誤差軌跡と同じように表示される。

#### 4.4.2 直角度が測定結果に及ぼす影響

Y 軸が X 軸に垂直な方向から CCW に  $\alpha$  傾いている場合、Y 軸による X 軸方向の誤差  $\Delta X$  は

$$\Delta X = \alpha Y \quad (2)$$

と表すことができる。

ボールバーに付属されているソフトウェアを用いて Fig. 24 に示す誤差軌跡から直角度の診断値を確認すると -94.4 $\mu$ m/m であった。直角度が測定結果に及ぼす影響のシミュレーションでは式(2)の  $\alpha$  にボールバーの診断値から求めた -94.4 $\mu$ m/m を代入して、主軸側の球の軌道の Y 軸に対する  $\Delta X$  を求めた。そして式(1)の  $R$  をボールバー長さ 100mm、テーブル側の球の設置誤差を 0 とし、 $X_b$ ,  $Y_b$ ,  $Z_b$  に主軸側球の座標、 $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $Z_w$  にテーブル側球の座標、 $\Delta X_i$  に式(2)から求めた  $\Delta X$  を代入して  $\Delta R$  を求めた。そして ACCOM を用いた測定結果のシミュレーションを Fig. 30 に示す。そして誤差軌跡を基準円に近づけるため、旋回軸の中心座標を X 軸方向に +8 $\mu$ m, Y 軸方向に +

12 $\mu$ m 変化させた結果を Fig. 31 に示す。なお、Fig. 30 と Fig. 31 に示す誤差軌跡には中心オフセットの処理を行っている。

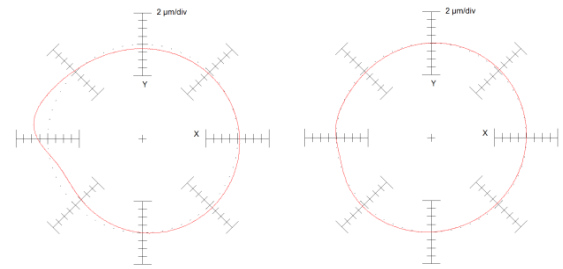


Fig. 30 直角度 Fig. 31 直角度 (X 軸 8 $\mu$ m, Y 軸 12 $\mu$ m)

このように旋回軸の中心座標を調節することで Fig. 31 の示す誤差軌跡が基準円にほぼ一致している。これより 4.3 で述べたように Fig. 25 に示す誤差軌跡は、旋回軸の中心座標を変化させたことにより XY 軸の直角度の影響が打ち消されることを確認できる。

## 5 結言

本研究では 5 軸 MC の精度検査を行った結果、以下の成果を得た。

- 1) 旋回軸の中心座標が NC に保存されている設定値から変化した場合、その測定結果に及ぼす影響を確認した。さらにシミュレーションを行うことで、ボールバーの姿勢が誤差軌跡の形状の変化に関係していることを確認した。
- 2) 旋回軸 2 軸間の位置偏差が測定結果に及ぼす影響を確認した。そして半頂角 45° の条件の方が旋回軸の移動範囲が大きいため、位置偏差の影響が大きく現れることを確認した。
- 3) XY 軸の直角度が測定結果に及ぼす影響を確認した。さらにシミュレーションを行うことで、旋回軸の中心座標を調節すると直角度の影響が打ち消されることを確認した。

## 参考文献

- 1) ISO10791-6:2014, Machine Tools -Test conditions for machining centres- Part 6:Accuracy of speeds and interpolations.
- 2) ISO10791-7:2014, Machine Tools -Test conditions for machining centres- Part 7:Accuracy of finished test piece.
- 3) 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.
- 4) FANUC Series 30i-MODEL A FANUC Series 31i-MODEL A FANUC Series 32i-MODEL A 旋盤系/マシニングセンタ系共通取扱説明書, 2011.
- 5) ISO230-4:2005, Test code for machine tools - Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.
- 6) 井原之敏, DBB 法を用いた NC 工作機械の運動精度の測定と改善に関する研究, 京都大学博士論文, 1992.