

研究論文

同時 5 軸加工機の工作精度評価

水野和康*¹、伊藤俊治*¹、島津達哉*¹、池上大輔*¹

Accuracy of Machining-Tests by Five-axis Machine Tools

Kazuyasu MIZUNO*¹, Shunji ITO*¹, Daisuke IKEGAMI*¹ and Tatsuya SHIMAZU*¹Industrial Technology Division, AITEC *¹

同時 5 軸加工機の簡易位置決め、回転・傾斜軸を含む同時多軸加工精度などの評価を行う工作モデル 1 と、三次元自由曲面加工精度と加工時間などを評価する工作モデル 2 を考案し、加工と精度評価を行う加工機検査スキームを構築した。その適用実験において、モデル 1 では傾斜軸を含む同時 4 軸制御加工（工具先端点制御を使用）で、工作物の湾曲、工具の形状誤差転写、制御軸の反転動作を含む不利な条件であるにも関わらず $17\mu\text{m}$ の工作精度が得られた。また、モデル 2 を同時制御軸などが異なる 5 条件で加工・評価を行ったところ、3 軸制御が最も高精度で $14\mu\text{m}$ の加工誤差となった。また、各加工条件に対する表面あらさ、データ処理時間、加工時間の関係を明らかにした。

1. はじめに

近年同時 5 軸加工機が普及しつつあるが、多軸を積み重ねた構造ゆえ工作精度は 3 軸加工機には及ばないといわれている。その工作精度を評価する規格は NAS979 (航空機部品を対象とした円錐台の加工) が知られているが、この試験では幾何誤差を分離できないなど問題点が指摘されている。

一方、3 軸加工機の工作精度は JIS B 6336-7 で規格化されているが、水平面内の面および直線と円弧の工作精度しか評価していない。

本研究では、それらの欠点を補うため、簡易位置決め、回転・傾斜軸を含む同時多軸加工精度などの評価を行うモデル 1 と三次元自由曲面加工を総合的に評価するモデル 2 を考案し、その加工と工作精度評価を行った。

2. 実験方法

2.1 使用工具および加工・測定の安定性

JIS B 6336-7 において、工作試験に用いる工具は直径 30mm、切れ歯長さ 35mm のエンドミルとされているが、本研究では、工作モデルに効率よくテストパターンを刻み込むため、直径 10mm のスクウェアエンドミルを用いた。また、位置決めおよび同時多軸制御性能を効率的に検査するため、位置決めエンドミル（頂角 90° の円錐形）、V 溝エンドミル（頂角 90° の円錐形）およびボールエンドミルを用いた（図 1）。

これらの工具のうち、位置決めエンドミルは切削加工初期に先端が踊ることによる穴位置のばらつきが懸念さ

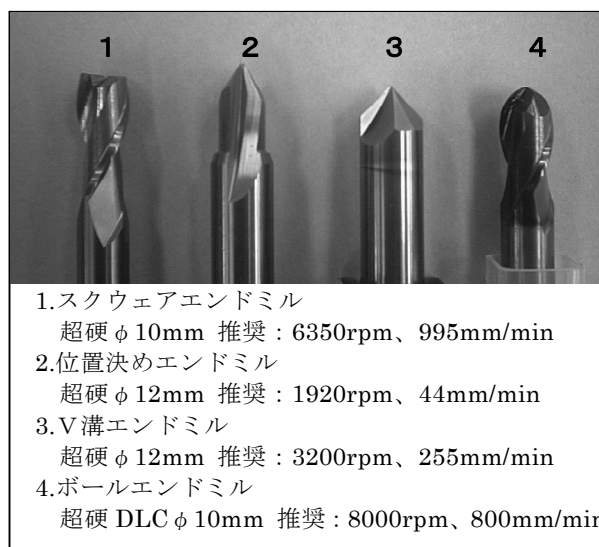
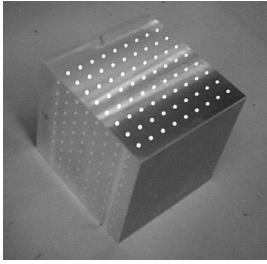


図 1 使用した工具（エンドミル）と推奨切削条件

れる。そこで $100 \times 100 \times 100\text{mm}$ のアルミブロック（A2017、T351 処理）の 4 面に $\phi 1 \sim 4\text{mm}$ の円錐穴を格子状に開け、その位置を三次元測定機の自動求心プロービングにより測定し（図 2）、各面の穴の相対位置を比較することにより位置決め加工およびその測定の安定性を確認した。また、V 溝エンドミルは加工した溝の真直度に関する情報が得られなかったため、位置決めエンドミルと同様の方法で幅 $1 \sim 4\text{mm}$ の溝を切り、その真直度を評価した。

切削条件、は工具メーカーの推奨値、クーラントは水溶性を用いた。加工機は、安田工業製 3 軸マシニングセ



自動求心プロービング

図2 位置決め加工と位置の測定

ンター（位置決め精度： $\pm 0.001\text{mm}$ ）、測定機は、カー
ルツアイス製超精密三次元測定機（測定精度
 $U_1=0.5+L/900\mu\text{m}$ 、 $U_3=0.8+L/600\mu\text{m}$ ）である。

2.2 工作モデル1の設計と加工

最も普及していると思われる X、Y、Z 軸および A 軸
（X 軸回りの傾斜軸）、C 軸（Z 軸回りの回転軸）からなる
立形同時 5 軸加工機での工作精度評価を想定し、JIS B
6336-7:2000、6338:1985 を参考にして簡易位置決め、
同時多軸加工精度試験などを盛り込んだ工作モデル 1
（図 3）を考案した。本モデルでは同一形状を複数条件
で加工できるよう、外周を 6 または 3 段重ねて設計して
ある。

被削材、使用工具、切削条件、クーラントは実験方法
2.1 節と同じとし、その他の工具としてフライスを用いた。
加工は十分暖機運転した後、NC にて連続加工を行
うこととした。

ワークは回転テーブルのほぼ中央で、A 軸がその上面
より 1mm 下を通るよう高さおよび平面度を十分調整し
た治具に固定し、仕上げ後のワーク位置が回転テー
ブル中央、A 軸が上面に一致するよう前加工を行った。仕上
げ加工は仕上げ代 0.1mm を基準とし、新品工具で仕上
げることとした。また、加工順序は工具のつかみ換えお
よびワークの姿勢変更が最小になるよう設定した。

主な試験項目を表 1 に示す。このうち位置決め精度試
験は Z 軸方向の真直運動誤差を含み、繰返し位置決め精

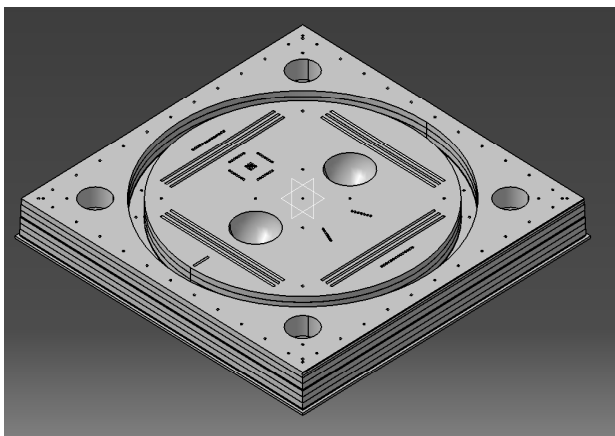


図3 工作モデル1 (305×305×35mm)

度は X、Y 方向に 2.5mm ずれた位置での繰返し誤差を
含んだ簡易評価である。なお、回転・傾斜軸を含む同時
多軸制御加工では工具先端点制御を用いることとした。

2.3 工作モデル2の設計と加工

三次元自由曲面の加工方法を変えた場合の工作精度
などを評価するためのモデル 2（図 4）を考案した。こ

表1 主な工作精度試験の項目

工具	試験名	評価内容	加工姿勢の例 (No.は試験名)
スク ウ エ ア	1. X、Y 側面切削 2. XY 直線補間 3. XY 円弧補間 4. C 軸回転ふれ 5. C 軸回転中心	真直度 直角度 平行度 真円度 位置度	2. 4、5
	6. 工具交換 7. X、Y、C 軸 位置決め 8. X、Y、A、C 軸 繰返し位置決め 9. C 軸倒れ 10. XYZ 空間位置決め	位置度 角度	7 8
	11. A 軸の倒れ 12. YZ 直線補間 13. XC 同時 2 軸 14. YC 同時 2 軸 15. XYZ 同時 3 軸	平行度 真直度	12 15
	16. ZA 同時 2 軸 17. YZA 同時 3 軸 18. XYZC 同時 4 軸 19. XYZA 同時 4 軸 20. XYZ 同時 3 軸 ヘリカル半球 21. XYZC 同時 4 軸 半球加工	平行度 平行度 真円度	17 21

注：正方形は試料を真上、長方形は真横から見た図。

●は真上から見た工具、○は試料の回転・傾斜軸中
心を示す。

矢印は工具または試料の移動、回転、傾斜を示す。

のモデルは姿勢を変えることにより同時 3、4 および 5 軸加工機で加工できること、平面と曲面が徐変 R で連結していること、大まかな形状で加工時間がかからないことを考慮して設計した。また、モデル 1 と同様、仕上げ加工では 0.1mm の仕上げ代を 1 本のエンドミルで仕上げることとした。加工条件は表 2 に示した 5 条件とし、加工精度の他に、表面あらさ、CAD データから CAM データの生成、前加工、仕上げ加工に要した時間も測定し、工程全体のパフォーマンスを評価した。

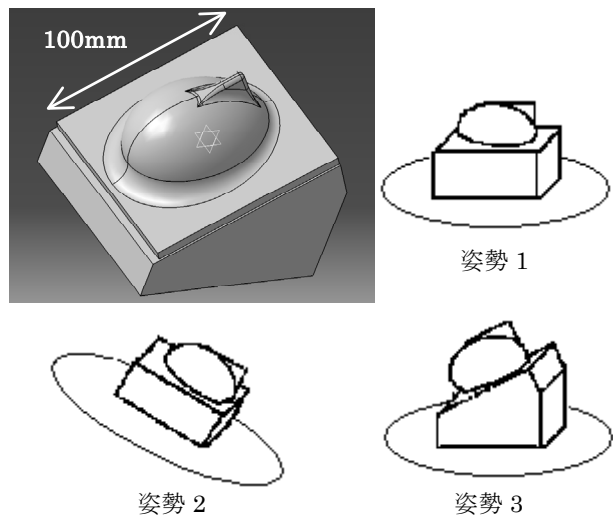


図 4 工作モデルと加工姿勢

表 2 モデル 2 の加工条件

加工条件	説明
同時 3 軸 等高最適化	加工姿勢：1 緩斜面で段差が目立たないよう等高線と走査線を組合わせて加工する(基本パス)。
同時 4 軸 等高最適化	加工姿勢：2 基本パスを 4 軸用に変換。
同時 5 軸 等高最適化	加工姿勢：3 基本パスを 5 軸用に変換。
同上 (ワーク位置)	加工姿勢：3 回転テーブルの端にワークを固定して加工。
同上 (工具長)	加工姿勢：3 2 倍の長さのボールエンドミルを用いて加工。

3. 実験結果及び考察

3.1 位置決め加工の安定性評価

穴径 1、2、3、4mm の加工および位置測定をしたところ、 $\pm 8\mu\text{m}$ のばらつきがあった。穴状態を顕微鏡観察したところ、クリーニングしきれないゴミが認められたため、測定子の球径をクリーニングしやすい端面近傍で

接触する径とし、穴あけ最後のタイミングでドウェル(移動休止)を設けて再試験した。その結果、81 個(9 行×9 列)の $\phi 2\text{mm}$ 穴の各面での相対位置は XY 軸上 $\pm 1\mu\text{m}$ 、Z 軸上 $\pm 2\mu\text{m}$ の精度で加工・測定可能なことが確認できた(図 5)。ここで用いた測定子球径は 2mm である。また、V 溝加工についても、溝幅 2mm、測定子球径 2mm の組合せで真直度 $2\mu\text{m}$ の安定した加工・評価を確認できた。

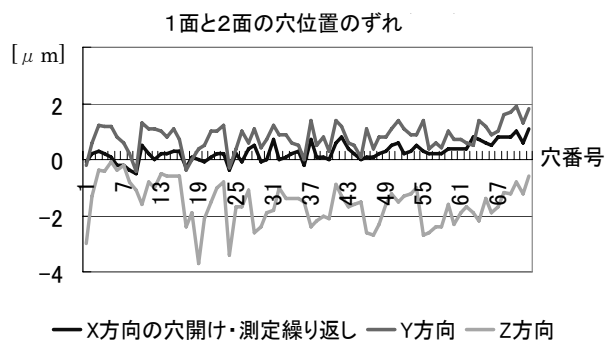


図 5 位置決め加工の安定性

3.2 工作モデル 1 の工作精度評価

CAM : A 社、同時 5 軸加工機 : B 社を用いて加工し、その工作精度を評価した。回転、傾斜軸を含む同時多軸制御の評価項目として Z 軸方向の真直度があるが、加工試料には大きな湾曲(平面度 $12\mu\text{m}$)が生じており、正確な工作精度を評価することができなかった。ここでは 5 軸加工機の回転、傾斜軸を含む評価項目を選び表 3、図 6 にその結果を示した。そのうち、図 6-2 XYZA 同時 4 軸加工は、ボールエンドミル頂点から $\pm 20^\circ$ の範囲を連続的に使う加工であり、その形状誤差が加工面に転写される。また、Y、Z および A 軸は加工途中(図中央の凹部)で反転動作する本試験中最も不利な条件であるが、真直度は $17\mu\text{m}$ であった。

試料に生じた $12\mu\text{m}$ の湾曲は大きな深溝加工($\phi 250\text{mm}$ 、深さ 15mm)によるものと思われる。信頼度の高い評価を行うためには焼鈍した材料を用いる、溝の深さを抑える等の改善が必要である。

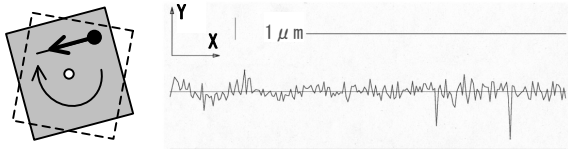
3.3 工作モデル 2 の工作精度評価

モデル 1 と同じ CAM、加工機で加工し、形状誤差、あらさ(Ra)、データ処理時間および仕上げ加工時間を評価した結果を表 4 に示す。図 7 は、形状誤差のグラフィック表示例である。一般的に言われているとおり、加工精度、所要時間とも 3 軸加工が最良の結果となった。同時 5 軸加工機はワークのつかみ換えを無くした無人運転、同時 5 軸でない加工できないワークに適用するのが適当であり、高精度・高品位化にはまだ課題を残していると言える。

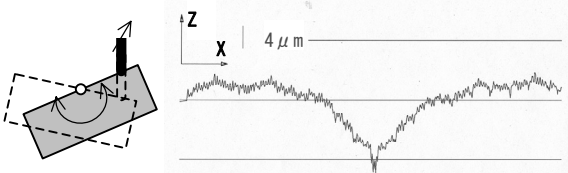
表3 モデル1の評価結果

試験名	評価結果
4.C 軸回転ふれ	真円度 $2\mu\text{m}$
5.C 軸回転中心	位置度 $2\mu\text{m}$
7.C 軸位置決め	角度誤差 $\pm 4''$
8.C 軸繰返し位置決め	角度誤差 $\pm 6''$
8.A 軸繰返し位置決め	角度誤差 $\pm 6''$
9.C 軸倒れ	角度誤差 $1''$
13.XC 同時2軸	真直度 $4\mu\text{m}$ (評価長 110mm)
14.YC 同時2軸	真直度 $3\mu\text{m}$ (" ")
15.XYC 同時3軸	真直度 $2\mu\text{m}$ (" ")
16.ZA 同時2軸	平行度 $5\mu\text{m}$ (" 10mm)
17.YZA 同時3軸	平行度 $7\mu\text{m}$ (" 110mm)
18.XYZC 同時4軸	平行度 $3\mu\text{m}$ (" ")
19.XYZA 同時4軸	平行度 $17\mu\text{m}$ (" ")
21.XYZC 同時4軸 半球加工	真円度 $3\mu\text{m}$

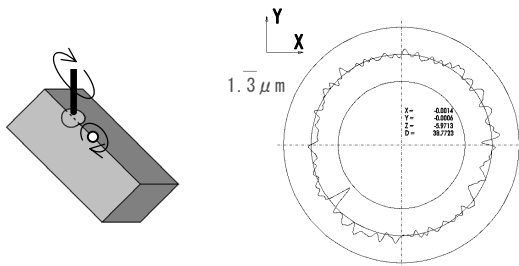
注:表中アンダーラインを施した値は試料湾曲の影響が特に大きいと思われる項目。



6-1 XYZC 同時3軸(幅 1mm、評価長 110mm)

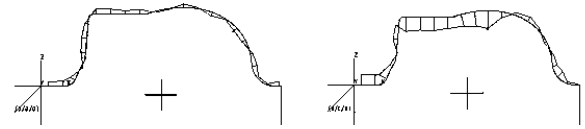


6-2 XYZA 同時4軸(幅 1mm、評価長 110mm)



6-3 XYZC 同時4軸半球加工(深さ 5mm での真円度)

図6 モデル1の評価結果の例



同時3軸等高最適化 同時5軸等高最適化

図7 モデル2の加工精度評価結果例

表4 モデル2の加工精度と所要時間

	形状誤差	あらさ (Ra)	データ処理時間	加工時間
同時3軸 等高最適化	$14\mu\text{m}$	$1.0\mu\text{m}$	9min	46min
同時4軸 "	$23\mu\text{m}$	$1.1\mu\text{m}$	9+6min	47min
同時5軸 "	$26\mu\text{m}$	$2.2\mu\text{m}$	9+6min	47min
同上 (加工位置)	$29\mu\text{m}$	$2.6\mu\text{m}$	9+6min	50min
同上 (工具長)	$26\mu\text{m}$	$2.2\mu\text{m}$	9+6min	47min

注:データ処理時間は基本パス作成時間+データ変換時間を示す。

4. 結び

3軸から5軸加工機までの簡易位置決めおよび同時多軸加工精度などを評価するモデル1と、自由曲面加工精度および加工時間等を評価するモデル2を考案し、同時5軸加工機による加工実験、三次元測定機による工作精度評価を行った。本実験で用いた加工機におけるモデル1の工作精度は、試料の湾曲、工具の形状誤差、制御軸の反転運動を含む本試験中最も不利な加工条件において $17\mu\text{m}$ であった。モデル2の加工では3軸加工の優位性を確認できた。

モデル1では、より信頼性の高い評価値を得るため、被削材の前処理(熱処理)および溝加工の深さなどを検討する必要があるが、加工機の性能比較、定期点検などに利用することができる。また、モデル1、2ともに最適加工方法の選択、加工条件のチューニングに有効と思われる。