

## 軸のフライス加工における工作物挙動 —切削力と工作物挙動に及ぼす工具姿勢の影響—

伊藤 将一\*<sup>1</sup>, 笠原 和夫\*<sup>2</sup>

### Workpiece Behavior in the Milling Process of a Shaft —Influence of Cutting Forces and Workpiece Behavior on Tool Attitudes—

Shoichi ITO\*<sup>1</sup>, Kazuo KASAHARA\*<sup>2</sup>

**ABSTRACT** : The development of a CNC lathe having a milling spindle significantly improved the productivity of circular shafts with a straight groove and/or a plane surface on an outside surface of a workpiece. However, in the case of milling of shafts with a large length and a small diameter, workpiece deflection induced by cutting forces causes deterioration of surface quality and chatter vibration. This investigation deals with an analysis of workpiece behavior and optimization of the machining conditions for ball-end milling a shaft with a small flexural rigidity in the direction of perpendicular to the shaft axis. In this report, cutting forces during milling for various tool attitudes are calculated by using the cutting model and an energy method. Then, the workpiece deflection is analyzed on the basis of calculated results of cutting forces, and the trajectory of workpiece axis during abovementioned milling process is discussed. As the results, it is clarified that tool attitudes in which deflection and machining error of the shaft can be small.

**Keywords** : milling, ball end mill, cutting model, cutting forces, tool attitude, workpiece behavior

(Received March 5, 2015)

## 1. はじめに

近年、複数の刃物台や姿勢変化が可能なミーリング軸を搭載した複合型CNC旋盤が実用化され、工作物の付け替え時間の短縮、加工誤差軽減ならびに設置スペース有効利用の点から、その導入が急速に広まっている<sup>1)2)</sup>。またこれと連動して複合型工作機械の運動に対応できるCAMソフトの開発やミーリング加工時の切削力評価、さらにはこの切削力による工具・工作物の弾性挙動の解析が各方面で試みられている<sup>3)~9)</sup>。

しかし曲げ剛性の小さな工作物のボールエンドミル加工においては、工具軸がいかなる姿勢で加工したときにどのような大きさの切削力が発生し、これが工作物のた

わみ・弾性挙動にいかなる影響を及ぼすかといった点については、未だ十分明らかにされていない。

また工具・工作物の剛性や加工条件によっては、びびり振動<sup>10)~13)</sup>を誘発しその変更を余儀なくされることもある。

以上を踏まえ、本報告ではミーリング軸を有するCNC旋盤にて実施し得る軸の外周面をボールエンドミルで溝加工する場合をとりあげ、工具姿勢が切削力に及ぼす影響を、既報<sup>14)15)</sup>のエネルギー解法に基づく切削モデルを用いた力学的解析をとおして明らかにする。そしてこの切削力の計算結果に基づき工作物の弾性挙動の解析を試み、加工精度向上に有効な工具姿勢について検証する。

## 2. 工作物形状と加工様式および解析モデルと解析条件

### 2. 1 工作物形状と加工様式

図1に本研究で対象とした溝加工を施す前の軸の外観

\*1 : 理工学研究科エレクトロメカニクス専攻修士学生 (現、三井精機工業株式会社)

\*2 : システムデザイン学科教授 (kasahara@st.seikei.ac.jp)

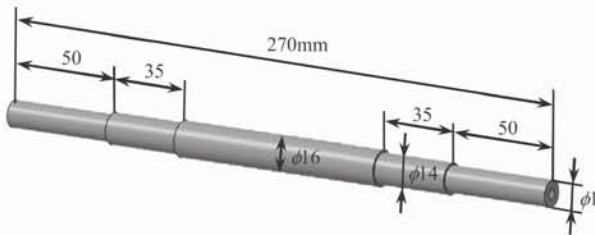


Fig.1 Workpiece shape.

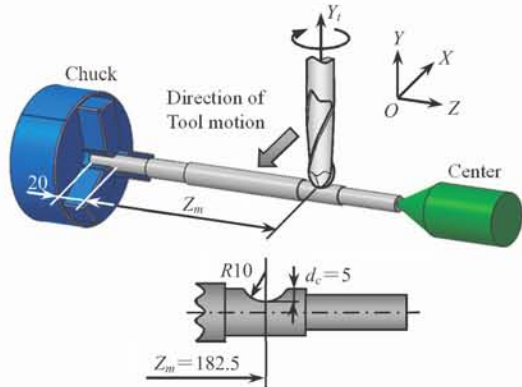
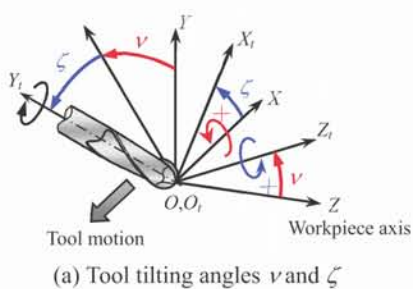
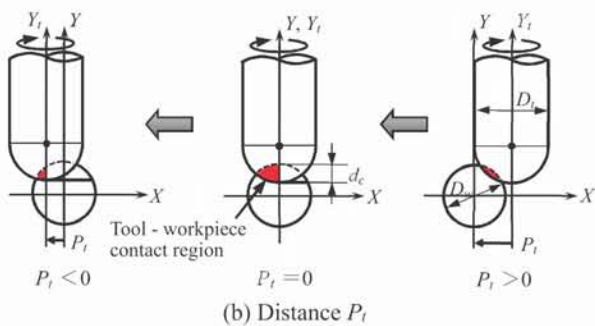


Fig.2 Explanatory diagram of milling process with ball end mill and machine tool axis conventions.



(a) Tool tilting angles  $\nu$  and  $\zeta$



(b) Distance  $P_i$

Fig.3 Definition of tool tilting angles and distance indicating the tool location on the workpiece.

を示す。全長は 270mm, 直径は中央より 16, 14, 12mm の 3 段からなる。

図 2 は工具軸と工作物軸が直交する状態 (工具姿勢を規定する後述の角  $\nu$  と  $\zeta$  をともに  $0^\circ$  とした場合に対応する) における溝加工の模式図である。円弧状の溝はボールエンドミルの球体部で加工するものとし, そのときの工作物支持様式は同図に示すようにチャック-センタ支持とする。

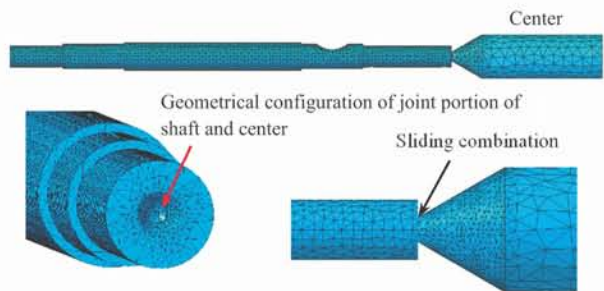
工具の運動, 工作物上の工具位置および工作物の変位量の表示に際しては, 同図に示される工作物の回転軸方向を Z 軸とする座標系 O-XYZ を用い, この座標系の X 軸の負方向に工具の送り運動を与えるものとする。また工作物把持部の長さは 20mm とし, この状態でセンタ側の 2 段目の中央部 (爪の端面と工具軸間の距離  $Z_m$  は 182.5mm である) を溝加工する場合を扱う。

図 3(a) は溝加時の工具姿勢を定める角  $\nu$  と  $\zeta$  (以下では工具傾斜角とよぶ) の定義を示す。工具傾斜角  $\nu$  は X 軸の正の方向から見て時計回りに, 一方角  $\zeta$  は Z 軸の正の方向から見て反時計回りに回転させた場合をそれぞれ正と定める。図 2 と図 3 からわかるように,  $\zeta$  については大きな角を指定することが可能である。一方  $\nu$  については, 同図に示される切削深さ  $d_c$  が工具径  $D_t$  の 1/4 に相当する 5mm の場合,  $30^\circ$  を超えると円筒部の切れ刃が切削に関与する。そこで本報告では,  $\nu$  は  $\pm 30^\circ$ ,  $\zeta$  は  $\pm 60^\circ$  を上限として指定することとした。

次に工作物上の工具位置の指定方法について述べる。図 3(b) に示すように工具と工作物の位置関係は, 両者の X 軸方向の軸間距離  $P_i$  をもって定める。すなわち同図の中央に示される工具軸が工作物軸上に重なる状態では  $P_i = 0$  であり, 溝加工前半の工具軸が工作物軸の手前に存在する場合は X 軸の符号に対応させて  $P_i > 0$ , 後半の工具軸が工作物軸通過後は  $P_i < 0$  とする。

2. 2 解析モデルと解析条件

工作物にたわみをもたらす切削力は, 既述のようにエネルギー解法に基づく切削モデルを利用して算出した。そしてこの切削力の計算値を図 4 に示す弾性解析の有限



Type of elements	Tetra
Number of elements	
Center	11000
Workpiece	33000
Young's modulus GPa	206
Poisson's ratio	0.3

Fig.4 FEM model and analytical condition used in analysis of workpiece behavior (for the case corresponding to milling process shown in Figs.2 and 3(a)).

Table 1 Tool shape and cutting conditions.

Tool diameter $D_t$ mm	20
(Radius of spherical portion)	(10)
Helix angle $\delta^\circ$	30
Number of tooth $N_z$	2
Tool material	H.S.S.
Rotational speed $N$ rpm	320
Depth of cut $d_c$ mm	5
Feed $f$ mm/tooth	0.05
Workpiece diameter in milling portion $D_w$ mm	14
Material cut	S45C
Cutting fluid	Fatty oil

要素モデル<sup>9)</sup>に適用し、工作物挙動の解析を進めた。同図のモデルは図2に示した工作物のセンタ側をエンドミル加工する場合に対応するものである。センタ部に関しては、静的曲げ試験を実施して得られた弾性変位特性が解析モデルに考慮されている。

当然のことながら、工具と工作物との曲げ剛性が接近すると工作物挙動は工具の弾性挙動の影響を受けるようになる。しかし本報告でとりあげている軸と工具の曲げ剛性には大きな差があるので、工具の弾性挙動の影響は無視することとした。なお本報告で対象とした工具の形状および切削条件は表1に示すとおりである。また工作物の弾性解析の具体的実施に際してはDassault社のCATIA V5を利用した。

### 3. 解析結果と検討

#### 3.1 工具軸が工作物軸に垂直な場合

図5および図6は既報<sup>16)</sup>で示した工具軸が工作物軸に垂直、工具軸が工作物軸上に存在する $P_t=0\text{mm}$ の状態得られた結果である。図5は上述の切削モデルによる切削力の計算結果であり、同図には工具が1回転する間の各軸方向の分力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ が示されている。工作物挙動の解析には、この3分力を用いた。上記の3分力は切りくず生成状態を支配すると考えられる、切削断面積を2等分する切れ刃位置に対応する工作物上の点において指定した。ただし、2枚の切れ刃が同時に切削に関与する回転角 $\theta$ においては、各切れ刃の切削抵抗データを上記の位置でそれぞれ指定し計算を進めた。

図6(a)は溝最深部に対応する位置においての、工具が1回転する間の $X$ 、 $Y$ 軸方向の変位 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ の変化を、同図(b)はセンタ側すなわち $Z$ 軸の正の方向から見た工作物軸の移動軌跡を示す。また同図(c)は工作物上の工具位置を表す $P_t$ を横軸にとって示した変位 $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ の最大値の変化

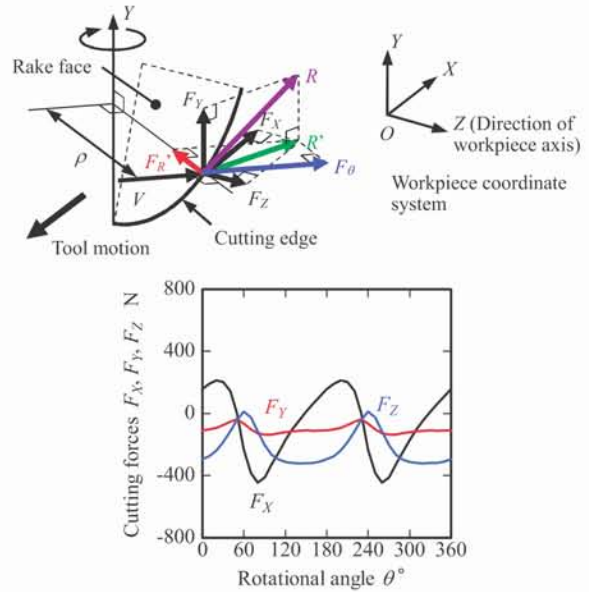
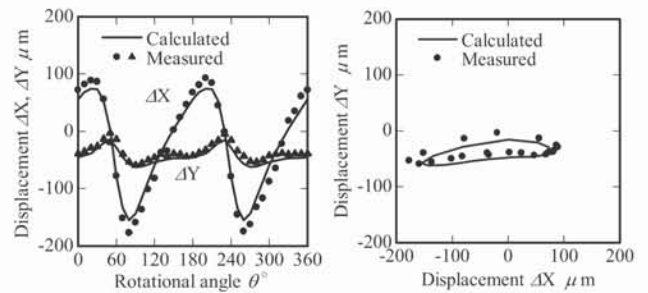
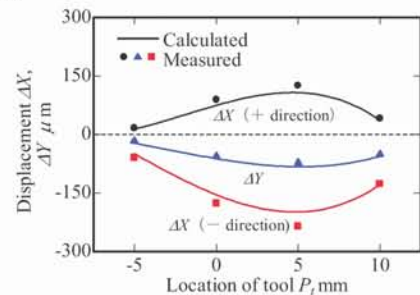


Fig.5 Variation of three components of cutting force with rotational angle ( $v=\zeta=0^\circ$ ,  $P_t=0\text{mm}$ ). Cutting conditions are same as in Table 1.



(a) Variation of displacement with rotational angle ( $P_t=0\text{mm}$ ) (b) Trajectory of workpiece axis ( $P_t=0\text{mm}$ )



(c) Variation of maximum values of displacement with tool location on the workpiece

Fig.6 Comparison of calculated and experimental results of displacement of workpiece axis ( $v=\zeta=0^\circ$ ). Cutting conditions are same as in Fig.5.

である。ただし同図の切削条件における $\Delta X$ は正と負の領域にわたって変化するので、その両方を示している。これら図中の●、▲、■印は渦電流式変位センサ(キーエンス, EX-305V)およびデータ収集システム(同, NR-2000)を利用し、溝の最深部に対応する位置で得られた

測定結果である。計算結果は測定結果の変化の傾向をよく説明しており、全体として両者は良好な一致が得られている。この結果から、切削抵抗の計算値に基づく工作物変位の予測は十分可能であると言える。そこで、以下に示す工具を傾斜させた場合の検討は、すべて計算結果に基づき進めることとした。

### 3. 2 工具姿勢が切削力に及ぼす影響

既述のように工作物挙動の解析に際しては、各軸方向の3分力を用いた。しかし、工作物軸方向の分力 $F_z$ が工作物の曲げモーメントに及ぼす影響は極めて小さいので、ここでは他の2分力 $F_x$ 、 $F_y$ をとりあげ議論する。図7は図3(b)の $P_t=0\text{mm}$ の状態に対応し、工具傾斜角 $\zeta$ を $0^\circ$ として $\nu$ を変化させた場合の、工具が1回転する間の工作物に作用する切削力 $F_x$ と $F_y$ の推移を示したものである。ただし、以下に示す切削力と工具挙動の解析結果は、回転角 $\theta$ の刻み幅を $10^\circ$ として得られている。

図(a)の $F_x$ および図(b)の $F_y$ の正負は図2に示した座標系に基づく。 $F_x$ は工具移動方向の変位に、一方 $F_y$ は工作物に形成される溝の深さ方向の変位にそれぞれ影響を及ぼすと考えられる。 $F_x$ を見ると、同図の $\nu$ の範囲では図5に見られた工具軸が垂直な場合の切削力の挙動と同様、工具軸の回転とともに正と負の領域にわたって推移する。しかしその変動の大きさは $\nu$ によって異なり、 $\nu=30, 15, -15, -30^\circ$ の順に大きくなっている。そして同順序に従って、波形全体が負の領域に推移する傾向が見られる。一方 $F_y$ は図示の工具傾斜角 $\nu$ のすべてで $F_x$ より変動が小さく、また $\nu=-30^\circ$ を除く他の $\nu$ においての変動はすべて負の領域で生じている。しかしその大きさはX軸方向ならびに $\nu$ の変化に比べて小さい点異なる。

図8は工具傾斜角 $\nu$ を $0^\circ$ として $\zeta$ を変化させた場合の結果である。 $F_x$ に関する図(a)と図(c)を比較すると、図(a)では $\zeta=30, 15, -15, -30^\circ$ の順に、これに対して工具をさらに大きく傾斜させた場合の図(c)では $\zeta=60, 45, -60, -45^\circ$ の順に変動が大きくなっている。すなわち、この結果は工具傾斜角 $\zeta$ の大きさと $F_x$ の変動の大きさに、1対1対応の関係が成立していないことを示すものである。この状況については図(b)と(d)に示される $F_y$ についても同様である。

以上の結果が示すように、工具姿勢の変化に伴って工作物に作用する切削力の大きさと変動状態に差異が生じる。この現象は工具傾斜角の変化によって切削に関与する切れ刃の領域が移動し、これに連動して切削断面の大きさに影響を及ぼす切れ刃に沿う切削厚さや切削速度の分布が、変化するために生じていると考えられる。

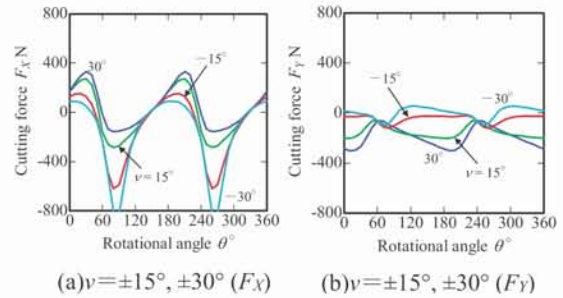


Fig.7 Variation of cutting forces with tool attitudes ( $P_t=0\text{mm}$ ,  $\zeta=0^\circ$ ). Cutting conditions are same as in Fig.5.

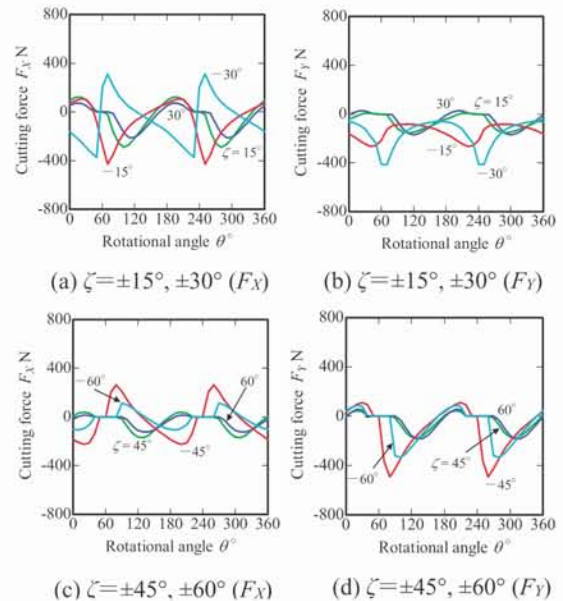


Fig.8 Variation of cutting forces with tool attitudes ( $P_t=0\text{mm}$ ,  $\nu=0^\circ$ ). Cutting conditions are same as in Fig.5.

### 3. 3 工具姿勢が工作物挙動に及ぼす影響

以下に示す工作物挙動（工作物軸の変位、移動軌跡）に関する結果は、上述の切削力 $F_x$ 、 $F_y$ の計算値を、切削断面を2等分する工作物上で指定し、図4の解析モデルと解析条件を用いて得られたものである。

図9は図5の工具軸が垂直な場合と図7、図8に対応する工作物上の工具位置と工具姿勢で得られた、溝の最深部に対応する位置における工作物軸の移動軌跡である。既述のように、同図でのX、Yの正負は図2に示した座標系のそれに対応する。すなわち、溝の深さに関してはY軸方向の変位 $\Delta Y$ が関与し、 $\Delta Y > 0$ の場合は工作物軸が工具側に引き寄せられる状態に、一方 $\Delta Y < 0$ の場合は工作物軸が工具から離れる状態になることを意味する。

図(a)の $\zeta=0^\circ$ の場合には $\nu=-30, -15, 0, 15, 30^\circ$ の順に工具軸軌跡の移動領域がX軸については負の側から正

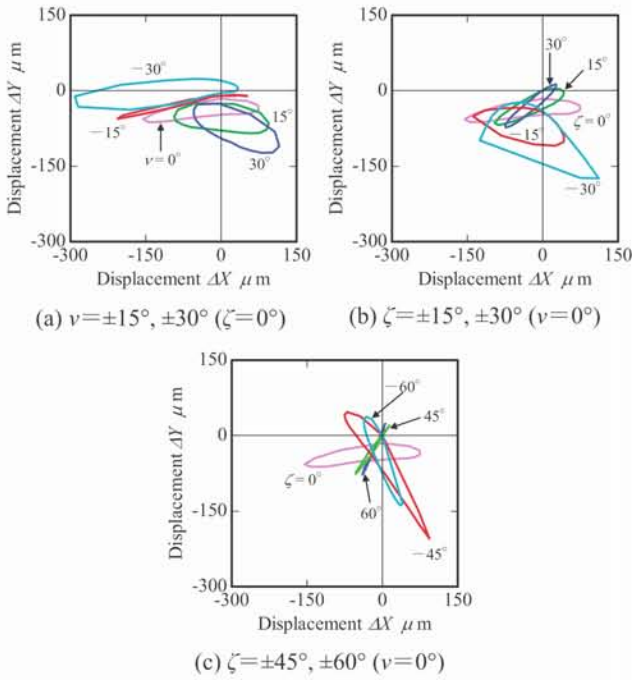


Fig.9 Trajectory of workpiece axis corresponding to Figs.7 and 8. Cutting and analytical conditions are same as in Fig.5.

の側に、Y軸については正の側から負の側へと推移する傾向が見られる。一方図(b), (c)の $v=0^\circ$ の場合には $\zeta$ が $-60^\circ$ から $60^\circ$ へと変化するにつれて、移動軌跡の領域は図上で反時計回りに推移する傾向が現れている。

### 3. 4 工具の移動に伴う変位の推移

以上で展開された議論は工具軸が工作物軸上に存在する $P_t=0\text{mm}$ に関するものである。そこで次に、工具の移動を考慮した場合、すなわち工作物上の工具位置を示す距離 $P_t$ を変化させた場合について検討する。ただし、本節では溝の深さに直接影響を及ぼすY軸方向の工作物軸変位 $\Delta Y$ をとりあげて議論を進める。

図 10 は $\zeta=0^\circ$ として工具傾斜角 $v$ を変化させた場合の結果である。横軸に示す $P_t=10\text{mm}$ は溝加工初期、 $P_t=-5\text{mm}$ は加工終了直前の位置に対応する。図中の記号は工具が1回転する間の変位（縦線は変動幅、●印はその中央値である）を示す。同図に示されるように $v$ の大きさおよび正負によって、工作物軸の変位の大きさと中央値を結ぶ実線の変化の傾向は推移する。変動幅は本報告で取り扱った工具傾斜角の中では $v=30^\circ$ の場合が最も大きく、次いで $v=15, -30, -15^\circ$ の順に小さくなっている。そしていずれの $v$ においても、工具軸が工作物軸に到達する前の $P_t=5\text{mm}$ 付近で変動幅は大となる傾向が見られる。一方変動の領域で見ると、 $v=-30^\circ$ の工具傾斜角のときに $\Delta Y$ が正の値をとる。この現象は既述のように、工

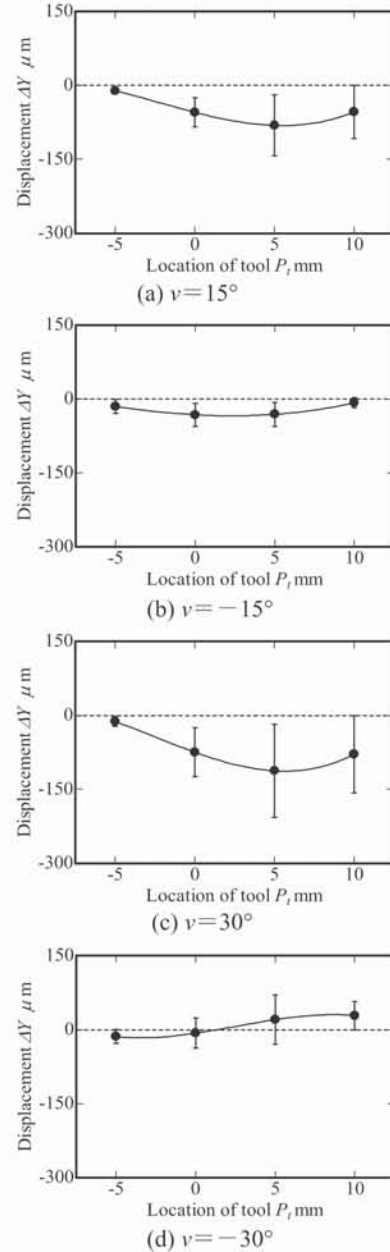


Fig.10 Variation of displacement of workpiece axis with tool location on the workpiece. Cutting and analytical conditions are same as in Fig.5 ( $\zeta=0^\circ$ ).

作物軸が工具側に引き寄せられるように変位している状態に対応し、修正困難なオーバカットが生じ易いことを意味する。

図 11 は $v=0^\circ$ で $\zeta$ を $30^\circ$ および $-30^\circ$ とした場合の結果である。 $\zeta=30^\circ$ のときには溝加工終了付近で僅かではあるが、 $\Delta Y$ が正の値をとる状態が生じる。一方 $\zeta=-30^\circ$ では、切削開始から終了に至る全域で $\Delta Y$ は負の値をとる。なお結果は省略するが、 $\zeta=15, -15^\circ$ の場合にも $\Delta Y$ の $P_t$ による変化は上記 $\zeta=30, -30^\circ$ の場合とそれぞれ類似の傾向が見られた。

以上の工作物挙動は切削力の変動に対応するものであ

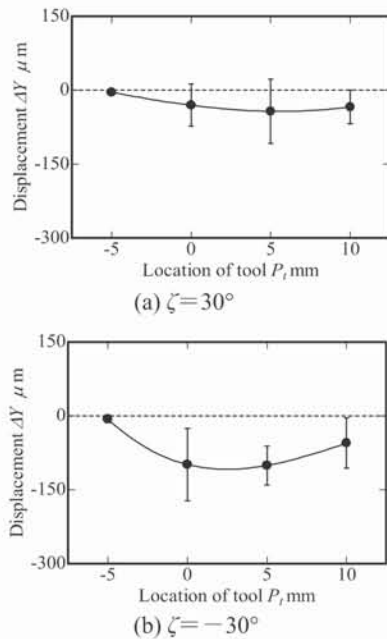


Fig.11 Variation of displacement of workpiece axis with tool location on the workpiece. Cutting and analytical conditions are same as in Fig.5 ( $\nu=0^\circ$ ).

り、これらの結果から $\zeta=0^\circ$ で $\nu=-15^\circ$ と指定した場合の工具姿勢が加工精度および修正困難なオーバカット回避の点から有効であると言える。

#### 4. まとめ

チャックセンター支持された3つの異なる直径をもつ軸の外周部をボールエンドミルで溝加工する場合をとりあげ、工具姿勢が切削抵抗と工作物挙動（工作物軸の変位、移動軌跡）に及ぼす影響を、切削抵抗の予測値とセンター部の弾性変形を考慮した工作物のFEMモデルを用いて検討した。その結果、切削抵抗と工作物挙動は工具姿勢によって大きく推移することが、また $\zeta=0^\circ$ で $\nu=-15^\circ$ と指定した場合の工具姿勢が加工精度や修正困難なオーバカット回避の点から有効であることが見出された。

以上の結論は一定の条件下で得られたものである。切削条件や工作物の大きさ・形状を変えた広範囲な条件での検討については今後の課題としたい。

#### 参考文献

- 1) Y. Altintas : Manufacturing Automation, Cambridge University Press, (2006) 70.
- 2) W. Grzesic : Advanced Machining Process of Metallic Materials, Elsevier, (2008) 278.

- 3) G. Yucesan and Y. Altintas: Prediction of Ball End Milling Forces, Trans. ASME, 118, (1996) 95.
- 4) His-Yung Feng and Ning Su: A Mechanics Cutting Force Model for 3D Ball-end Milling, Trans. ASME, 123, (2000) 23.
- 5) H. Tanaka, F. Obata, B. W. Ikua, M. Ashimori and T. Shirakawa: Prediction of Cutting Forces in Ball End Milling of Inclined Surfaces, Proc. of 14th Int. Conf. on Computer-Aided Production Engineering, (1998) 229.
- 6) I. Lazoglu and S. Y. Liang: Modeling of Ball-End Milling Forces with Cutter Axis Inclination, Trans. ASME, 122, (2000) 3.
- 7) R. Zhu, S. G. Kapoor and R. E. DeVor: Mechanistic Modeling of the Ball End Milling Process for Multi-Axis Machining of Free-Form Surfaces, Trans. ASME, 123, (2001) 369.
- 8) 小池雄介, 松原 厚, 西脇眞二, 泉井一浩, 山路伊和夫: 加工点工作物変位を最小化する切削プロセスの設計, 精密工学会誌, 76, 12, (2010) 1406.
- 9) 笠原和夫, 広田明彦, 滝野亮人: CNC 旋盤による加工での切削抵抗データに基づく加工精度向上, 精密工学会誌, 77, 6, (2011) 581.
- 10) 土井雅博, 中澤俊介, 山口裕文: 旋削加工におけるびびり振動発生判定に関する研究(第3報), 日本機械学会論文集(C編), 62, 600, (1996) 3308.
- 11) 辺見信彦, 村田良司: 能動型振れ止め機構による旋削加工時の振動防止に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 63, 612, (1997) 2886.
- 12) H. Ota, M. Kito and T. Handa: A Study on Primary Chatter Caused by Mode Coupling of Machine Tool Structure, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., C, 73, 726, (2007) 570 (in Japanese).
- 13) 赤沢浩一, 社本英二: 低剛性工作物のボールエンドミル加工における再生型びびり振動に関する研究, 精密工学会誌, 75, 8, (2009) 984.
- 14) 笠原和夫, 広田明彦, 笹井洋介: ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第1報), 精密工学会誌, 69, 3, (2003) 396.
- 15) 笠原和夫, 広田明彦, 赤間 知: 斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と切削機構の解析(第1報), 精密工学会誌, 74, 9, (2008) 965.
- 16) 笠原和夫, 吉田亮二, 大久保雅文: 副合型 CNC 旋盤による加工での加工精度向上に関する研究, 成蹊大学理工学研究報告, 49, 2, (2012) 109.