

14 工具突出し長さが大きい場合の高速ミリングにおける加工精度

西川隆敏, 前田圭治, 山下弘之

(Study of High Speed and High Accuracy Milling)

Machining accuracy in high speed milling in case of long overhang of end mill

NISHIKAWA Takatoshi, MAETA Keiji, YAMASHITA Hiroyuki

It is difficult to get high accuracy in case of milling deep cavity. In this study, Machining errors with long overhang of end mill are discussed. The main results are as follows ;

- (1) Machining errors are affected by compliance of machine tool and cutting force.
- (2) High spindle speed milling can get small machining errors.
- (3) Method for deciding spindle speed to get high accuracy is proposed.

キーワード：ボールエンドミル加工，加工精度，コンプライアンス，切削抵抗，工具突出し長さ

1 緒 言

工作機械，工具，加工技術の進歩により，高硬度材の金型直彫り加工が可能となっている。しかし，小さなRをもつ深い形状の加工を行う場合，工具突出し長さ/工具径(L/D)が大きくなり，それに伴う剛性低下により，精度悪化や工具損傷などの問題が発生することが多い。その際，切削条件(能率)を下げる，あるいは，試行錯誤で条件設定が行われているのが現状で，工数低減に対してネックとなっている。

本研究は，工具突出し長さが大きい条件において，高速高精度な加工を行うための加工方法を明らかにすることを目的としている。前報¹⁾では，仕上げ加工前の加工面粗さ，およびホルダや工具突出し長さの違いによる工具・主軸系のコンプライアンスの違いが表面粗さへ影響を及ぼすことを明らかにした。

本報では，切削抵抗による工具のたわみに起因した加工誤差を評価した。また，切削抵抗の測定，工具・主軸系のコンプライアンスの測定を行い，切削中の工具先端変位を予測した。そして，これらの結果に基づき，加工精度の良い加工を行うための指針を示した。

2 実験方法

実験に使用した機器を表1に示す。加工方向は図1に示す4種類とし，X方向に対して θ ($\theta = 5, 30, 60, 85$)傾いた傾斜面切削を行った。切削条件は表2に示

すとおりで 主軸回転数をパラメータとした。そして，切削抵抗によるたわみに起因した加工誤差を次の方法で評価した。まず，前加工(送り方向は切削試験時の送り方向に対して直角方向，ピックフィード1.5mm)を行い，切削試験時の送り方向の起伏を0.1mm(ピッチ1.5mm)とする。この状態で切削試験を行うことにより，試験中の切込量を0.1mmから0.2mmに変動させた。試験後の加工面には，切込量の違いによる工具の逃げの差がピッチ1.5mmのうねりとして残されるため，この面を形状測定器(ミットヨ製CS5000)で測定し，うねりの最大高さWz(JIS2001，評価長さ8mm，f8mm，c0.4mm)を加工誤差とした。

表1 実験機器

工作機械	形式	豊田工機(株)製 マシニングセンタ UH55
	主軸回転数	max50000min ⁻¹
	主軸テーパ	HSK-A40(特)
工具	種類	MMCコベルコツール(株)製 TiAlNコーティング超硬 ボールエンドミル VC-2MB
	直径D	6mm (R 3mm)
	突出し長さL	54mm(L/D=9)
	刃数	2
	振れ	3 μ m以下
ホルダ	黒田精工(株)製コレットホルダ	
被削材	SKD61(硬度HRC45)	

3 工具変位予測方法

工具の軸方向剛性は径方向と比較して十分大きい。また、径方向のうち加工誤差に影響する加工面法線方向変位に作用するのはX方向である。したがって、X方向剛性のみを考慮し、X方向の切削抵抗からX方向工具変位を予測し、その加工面法線方向成分を求める。

3.1 切削抵抗測定と予測

測定器（キスラー製動力計 9256A1）の周波数特性から高速回転時の切削抵抗の測定は困難であることが確認された。また、工具突出し長さが大きく剛性の小さい条件では切削中の振動の影響で安定した測定が困難である。したがって、まず、切削抵抗を安定して測定できる条件（ $L/D=3$ 、主軸回転数 5000min^{-1} ）で、切込を 0.1mm と 0.2mm に固定して、X方向の切削抵抗を測定した。そして、各実験条件における切込 0.1mm 、 0.2mm での切削抵抗は、この測定値と比切削抵抗、切削面積が変わらないものとして予測した。

3.2 コンプライアンス測定

コンプライアンスとは、変位/力（剛性の逆数）を周波数の関数として表現した伝達関数のことである。主軸停止状態でインパルス加振を行い、工具R中心部のX方向自己コンプライアンスを測定した。なお、前

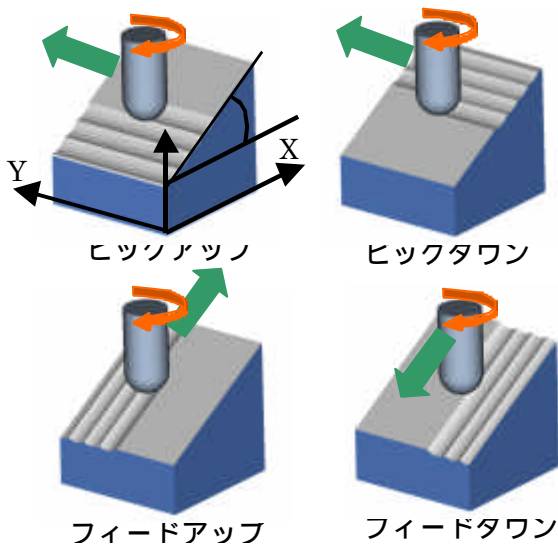


図1 加工方向

表2 切削条件

主軸回転数	min^{-1}	10000 ~ 50000
1刃当り送り量	$\text{mm}/\text{刃}$	0.1
切込	mm	0.1 ~ 0.2
ピックフィード	mm	0.2
傾斜角	$^{\circ}$	5, 30, 60, 85
切削油		エアブロー

報¹⁾では、加速度ピックアップを工具に取付け測定したが、加速度ピックアップの質量が測定結果へ影響することが確認されたため、本報では、非接触式の静電容量型変位計（ADE製3401）により応答変位を測定した。なお、測定に要する時間は10分程度である。

3.3 工具変位の加工面法線方向成分の予測

切削抵抗振幅スペクトル（予測値）とコンプライアンス測定結果から、切込 0.1mm 、 0.2mm における工具のX方向変位振幅実効値（rms値）を求めた。そして次式により、これらの差の加工面法線方向成分Dを予測した。

$$D = |X_2 - X_1| \sin$$

ここで、 X_2 、 X_1 は、それぞれ切込 0.2mm 、 0.1mm でのX方向変位振幅実効値、 θ は傾斜角である。

4 実験結果および考察

4.1 切削抵抗

図2に切込 0.2mm での加工方向の違い（傾斜角 30° ）、および傾斜角の違い（加工方向ピックダウン）によるX方向切削抵抗の時間波形を示す（ 2kHz のローパスフィルターで処理）。本図は一枚の刃が一回転中に切削する過程を示しており、X方向への力を正の値にとり、切削開始時間を一致させて表示している。加工方向、傾斜角の違いにより、切削抵抗の最大値や切削時間に差があることが確認された。

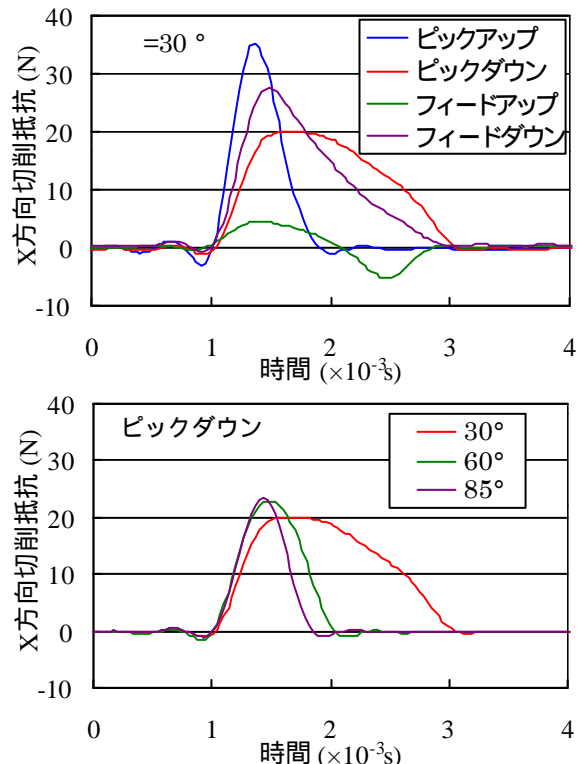


図2 X方向切削抵抗の時間波形

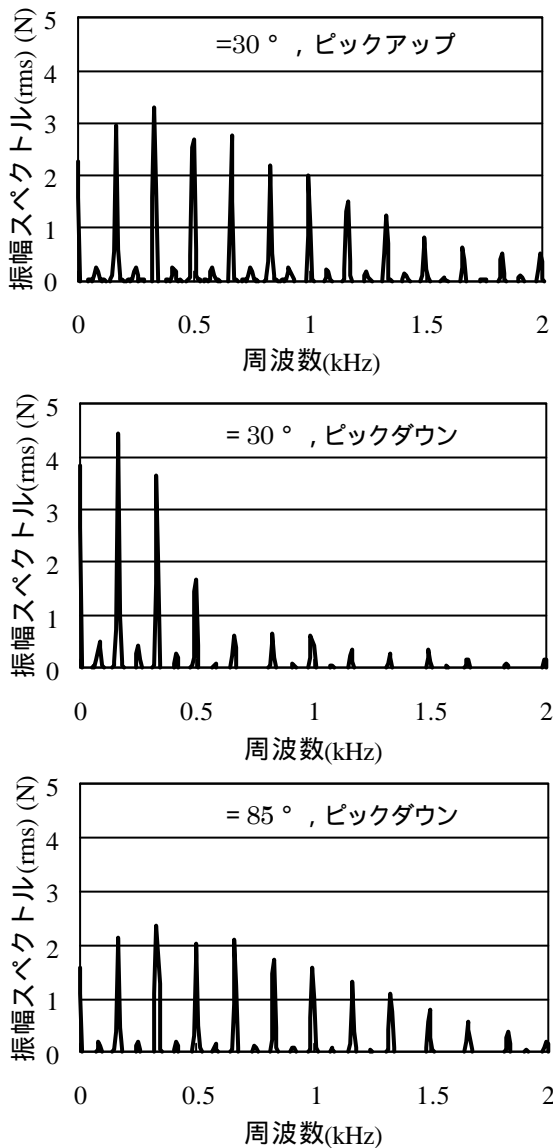


図3 X 方向切削抵抗の振幅スペクトル

図3に傾斜角 30° のピックアップ, ピックダウン, および 85° のピックアップにおける X 方向切削抵抗の振幅スペクトルを示す。どの条件でもエンドミルによる断続切削の整数倍の周波数 (主軸回転数 (min^{-1}) / $60 \times$ 刃数 (2) \times 次数 i ($i=0,1,2,3 \dots$) Hz) の成分が確認された。また, ピックダウンよりもピックアップの方が, そして, 傾斜角が大きい方が低次 (0~2 次) のスペクトルが小さく, 高次までフラットな周波数特性を示している。これは, 主に実切削時間が短いことによるものである。

4.2 コンプライアンス

図4にコンプライアンスを示す。L/D=9は, 1次の固有振動数 1.72kHz (エンドミル曲げモード) で最大値 $35.5 \mu\text{m}/\text{N}$ をとり, 3kHz 以上の高周波領域では $1 \mu\text{m}/\text{N}$ 以下に減衰している。L/D=3は, 比較的平坦な周波数特性を示している。いずれも 2kHz

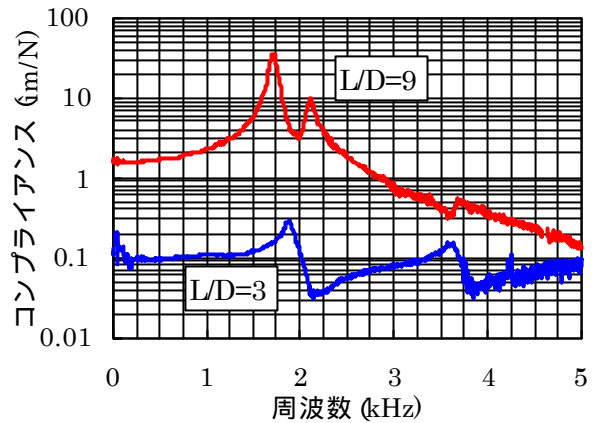


図4 コンプライアンス

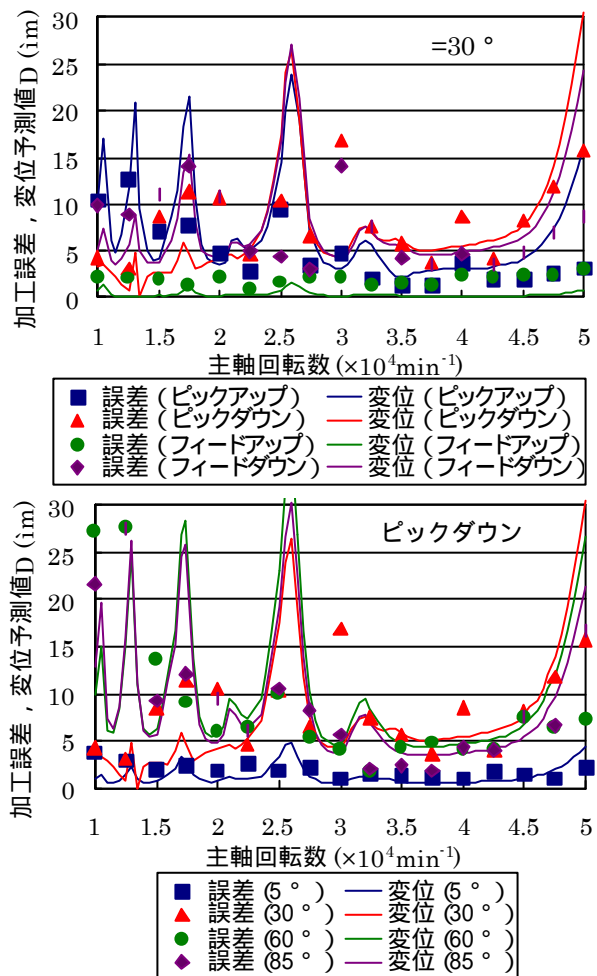


図5 加工誤差と工具変位予測値 D

付近にピークがあるが, これは主軸の固有振動数であると考えられる。

4.3 加工誤差と工具変位予測値

図5に加工方向の違い (傾斜角 30°), および傾斜角の違い (加工方向ピックアップ) による加工誤差と工具変位の加工面法線方向成分予測値 D を示す。なお, これらの条件での表面粗さは良好で, 切削自体は安定していた。加工誤差と工具変位予測値とはある程度相関がみられ, 回転数, 加工方向, 傾斜角により加工誤

差は異なることが確認される。予測値が極大値をとる回転数では、断続切削の周波数が固有振動数に一致しており、これらの回転数付近は避ける必要がある。

加工方向については、X方向の切削抵抗が小さいフィードアップの条件が最も良好であった。その他の条件は、12500min⁻¹以下の低回転領域では、ピックアップ、フィードダウン、ピックアップの順に増大し、切削抵抗の最大値が大きいほど誤差が大きくなっている。高い回転数ではピックアップが良好となり、32500～42500min⁻¹の高回転領域では、全ての条件で誤差が小さく安定している。傾斜角についても似た傾向がみられ、低回転領域では傾斜角が大きい方が誤差が大きい傾向にあるが、32500～42500min⁻¹の高回転領域ではすべての条件での誤差が小さく安定している。

30,000min⁻¹以上の高回転領域では、切削抵抗の3次以上の周波数が3kHz以上となる。しかし、コンプライアンスは3kHz以上では減衰している（力が作用しても変位が小さい）ため、切削抵抗の2次までの成分しか変位に効かなくなる。したがって、高回転切削では振動変位が小さく、加工誤差が小さいと考えられる。特に、切削抵抗の低次の成分が小さく高次までフラットな周波数特性を示す条件、つまり、切削時間が短い条件（ここではピックアップや傾斜角大）では高回転切削により加工誤差を小さくすることが可能になると考えられる。

高速切削ではせん断角の増大により切削抵抗自体が小さくなる利点も報告されている²⁾が、さらに、高回転切削では切削抵抗の周波数が高くなり、工具変位を小さくする利点があるといえる。突出し長さが大きく、コンプライアンスが低い周波数から減衰する条件ほどこの傾向は強いと思われる。突出し長さが大きく切削速度が高い条件では再生びりなどの発生も懸念される³⁾が、これらの振動が生じない範囲で、高回転切削を行うことが推奨される（固有振動数は避ける必要がある）。一刃当り送り量が一定の条件では、高回転であるほど送り速度が高く、能率の面でも優れている。

金型のような3次元的な形状を一般的な3軸加工で行う場合、通常、加工方向・傾斜角とも変化し、ユーザ側で制御することは困難である。ユーザ側で容易に設定することが可能な主軸回転数の選定方法について検討するため、次式のとおり、各主軸回転数での振動の大きさを見積もるための指標 C_{rms} を定義する。

$$C_{rms} = \sqrt{\sum_{i=0} C_{f(i)}^2}$$

ここで、 $C_{f(i)}$ は周波数 $f(i)$ Hz でのコンプライアンス

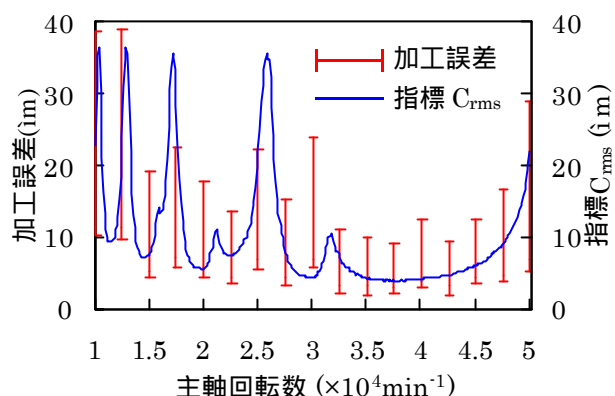


図6 加工誤差と指標 C_{rms}

ゲイン、 $f(i)$ は断続切削の周波数（主軸回転数(min⁻¹)/60×刃数× i ($i=0,1,2,\dots,n$))である。

指標 C_{rms} は断続切削の各周波数での切削抵抗(径方向)振幅が全て単位荷重であると仮定したときの工具変位(径方向)振幅実効値に相当する。図6に指標 C_{rms} と実験の全条件での加工誤差を示す。指標 C_{rms} と加工誤差は似た傾向がみられる。指標 C_{rms} は測定したコンプライアンスから容易に求めることができ、高能率、高精度加工の行える主軸回転数を選択する手法として利用できると考える。なお、予測値 D や指標 C_{rms} に対して加工誤差が大きい回転数（15000、20000、30000min⁻¹）では2kHz（断続切削の4、3、2次）の振動が大きいことが確認された。主軸回転中のコンプライアンスを測定したところ固有振動数が若干低下し、主軸の固有振動数が2kHz程度であることが確認されたため、このことが原因と考えられる。

5 結 言

工具突出し長さが大きい条件において、切削抵抗によるたわみに起因した加工誤差の評価を行い、次の結果を得た。

- (1) 加工誤差は工具・主軸系のコンプライアンスと切削抵抗の周波数特性に起因する。
- (2) 断続切削の周波数が固有振動数に近づかない領域で高回転切削を行うことにより、高精度加工が可能である。
- (3) コンプライアンスを測定することにより、高精度加工が可能な主軸回転数を選択することができる。

文 献

- 1) 西川他：広島県西部工技研究報告，45(2002)，72
- 2) 宮口，嶽岡，榊田，岩部：精密工学会誌，67(2001)3，450
- 3) 星：機械加工の振動解析，(1990)，20