

# 金型加工状態監視システムの開発

## 12 エンドミル加工におけるびびり回避システムの開発

西川隆敏, 菊田敬一, 山下弘之, 打田澄雄, 安部重毅

(The development of monitoring system of die machining conditions)  
The development of system for preventing chatter in end milling

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, YAMASHITA Hiroyuki, UCHIDA Sumio and ABE Shigeki

It is difficult to get high accurate machined surface in case of milling the deep cavity because of chatter vibrations. We propose a new method for detecting chatter in end milling by using statistical distance between the spectrum of vibrations under air-cutting and that under real-cutting. The proposed method is especially effective in finished milling with a small diameter tool. And we developed the system to prevent chatter automatically. The present system was verified by several experiments.

キーワード: びびり, 異常検知, エンドミル, 金型加工

### 1 緒 言

金型加工では、納期短縮のため放電加工レスが指向されており、直彫り加工が可能なL/D (工具長さ/工具径)の向上がキーワードとなっている。しかし、一般にL/Dが大きくなると工具剛性が低下し、びびりが発生しやすい。びびりは加工面粗さの悪化や工具欠損などを引き起こすため、回避すべき課題である。

加工現場では、標準的な切削条件が整備されつつあるものの、技能者が音や振動などの状況を確認しながら、切削条件を調整しているのが現状である。また、近年は、機械の密閉化や無人加工のために、異常情報を人が把握することが困難になっており、加工途中に発生するびびりへの対応が難しくなっている。

これらの問題に対して、センサ (加速度センサ, 変位センサ, 力センサなど) を機械に取り付け、センサ情報 (パワースペクトルのピーク値など) を利用して、びびりを検知する試み<sup>1), 2)</sup> が報告されている。しかし、これらの方法は、比較的大きな振幅のあるびびりを対象としており、小径工具による金型仕上げ加工時などにみられる小さなびびりを検知することは難しい。

そこで、本研究では、高速エンドミル加工で問題になりやすい再生びびりなどの自励びびりを対象とし、振動パワースペクトルのみからでは判断困難な小さな振幅のびびりに対しても有効な検知方法について検討した。そして、びびりが発生した場合に、切削条件を変更することにより、びびりを回避するシステムを試作し、傾斜面加工、および、実金型モデルの等高線仕上げ加工に適用した。

### 2 びびり検知方法の開発

#### 2.1 実験方法

表1に実験に使用した機器を示す。実験手順として、まず、短い工具を用いて安定した条件で前加工 (溝加工) を行い、次に、前加工箇所からピックフィード分ずらした位置を、実験工具で1パス (切削距離 100mm) 加工し、その際の振動を測定した (図1)。これを、表2の切削条件の主軸回転数毎に行った。センサは、加速度センサ (NEC 三栄機製 SV2111W) と渦電流式変位センサ (機キーエンス製 EX-201) を使用し、主軸頭の加速度、および、工具ホルダの主軸頭に対する相対変位を測定した。測定方向はいずれも工具送り方向とした。サンプリング周波数は 25.6kHz とし、4096 サンプル (0.16sec) 毎に周波数解析を行った。

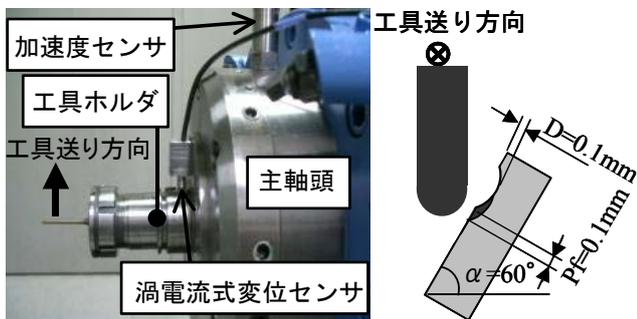
#### 2.2 実験結果とびびり検知方法の検討

図2に代表的な加工面の写真、および、送り方向の粗さ曲線を示す。左側から良好な加工が行われているもの

表1 実験機器

工作機械	形式	豊田工機(株)製 横型マシニングセンタ UH55
工具	種類	日立ツール(株)製 TiSiN コーティング超硬ボールエンドミル EPDBP2020-25-09-TH
	直径D	Φ2mm (R 1mm)
	首下長さL	25mm (L/D=12.5)
	刃数	2
ホルダ	黒田精工(株)製コレットホルダ	
被削材	SKD61 (HRC45)	

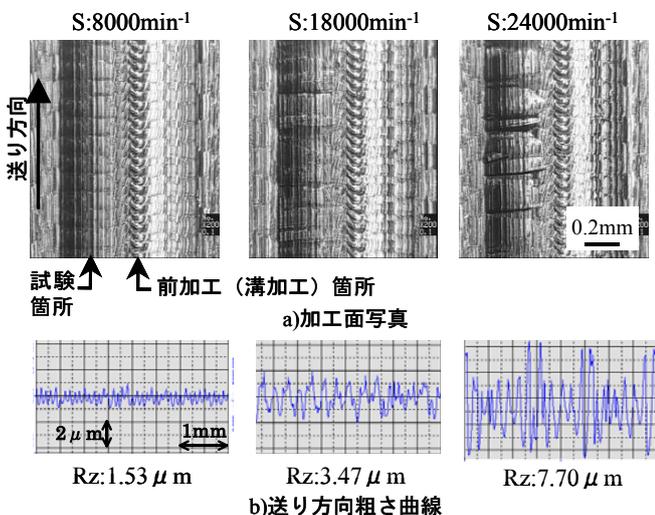
(主軸回転数  $8000\text{min}^{-1}$ ) , びびりが中程度のもの ( $18000\text{min}^{-1}$ ) , びびり大のもの ( $24000\text{min}^{-1}$ ) を示している。びびりが中程度 ( $18000\text{min}^{-1}$ ) の条件での主軸頭加速度, および, 工具ホルダ変位のパワースペクトルを **図3** に示す。回転周波数の整数倍である強制周波数のスペクトルを点線 (黒) で, 強制周波数以外のスペクトルを実線 (青) で表示した。再生びびりなどの自励びびりは, 強制周波数以外で, かつ, 固有振動数に近い周波数のスペクトルが大きくなることから知られている。しかし, この図からはスペクトルの大きなびびり周波数を見つけることはできない。なお, 後述する方法で求めたびびり周波数 ( $3.85\text{kHz}$ ) のスペクトルは, 加速度  $0.0154(\text{m/s}^2)^2$ , 変位  $0.00192\mu\text{m}^2$  と小さく, ノイズに埋もれ, 検知することが



**図1 実験方法**

**表2 切削条件**

主軸回転数 S	$6000\sim 28000\text{min}^{-1}$ ( $2000\text{min}^{-1}$ ピッチ)
一刃当り送り f	$0.05\text{mm/刃}$
切込み D	$0.1\text{mm}$ (加工面法線方向)
ピックフィード Pf	$0.1\text{mm}$ (加工面接線方向)
クーラント	エアブロー
傾斜角 $\alpha$	$60^\circ$



**図2 加工面写真と粗さ曲線**

ことが難しいことが確認できる。

このノイズについて調査したところ, これらが空転中から発生していることが判明した。そこで, 空転中の信号と切削中の信号とが, どの程度異なっているかについて検討した。ここでは, 式(1)により, 切削中のパワースペクトルを空転中パワースペクトル集合で基準化し, 各周波数毎に, 空転中との違いを“距離 D”として求めた。

$$D_i = (X_i - a_i) / \sigma_i \quad (1)$$

$D_i$ : 周波数  $i$  での基準化した“距離”

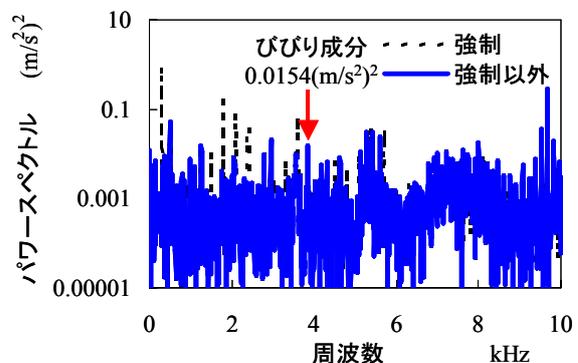
$X_i$ : 周波数  $i$  での切削中パワースペクトル

$a_i$ : 周波数  $i$  での空転中パワースペクトルの平均値

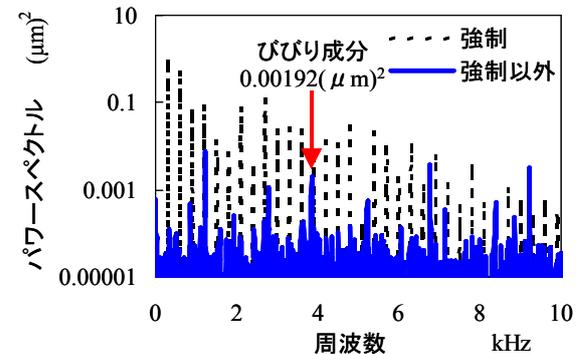
$\sigma_i$ : 周波数  $i$  での空転中パワースペクトルの標準偏差  
空転中の平均値, 標準偏差は 25 回分のスペクトルから算出した。結果を **図4** に示す。強制周波数以外で“距離”

が大きな周波数 ( $3.85\text{kHz}$ ) が確認され, これは測定した工具固有振動数 ( $3.88\text{kHz}$ ) に近いことから, びびり周波数であると判断できる。したがって, この方法により, ノイズを除去することが可能で, 小さな振幅のびびりを検知できると考えられる。なお, 加速度センサでは, いくつかの強制周波数の“距離”が大きくなっている。これは, 切削時に強制周波数で工具が加振されるためで, 良好な場合にもみられる現象である。変位センサでは, 切削時と空転時の強制周波数でのスペクトルの差が小さく, この現象は確認されなかった。

**図5** に全実験条件での送り方向表面粗さ (最大高さ



a) 加速度センサ



b) 変位センサ

**図3 びびり発生時のパワースペクトル ( $18000\text{min}^{-1}$ )**

Rz), および, 変位と加速度の“距離”を示す。回転数  $18000\text{min}^{-1}$  以上ではびびりの発生がみられた。“距離”は, 4096 サンプル毎に“距離”の最大値(強制周波数以外)を求め, その切削中の平均値を表示している。これをもとに, びびりを正確に判断できるかどうかについて検討する。正確な検知を行うためには, びびり発生時の“距離”が, 良好な条件の“距離”に対して離れているほど良いと考えられる。そこで, 図5の良好な条件での“距離”最大値に対する, びびり条件での“距離”最小値の比を求めた。加速度センサでは  $2.24 (30.58 (20000\text{min}^{-1}) / 13.64(6000\text{min}^{-1}))$ , 変位センサでは  $3.05 (71.07(22000\text{min}^{-1}) / 23.27(8000\text{min}^{-1}))$  であった。いずれも2を超えており, びびりの判断が可能であると考え

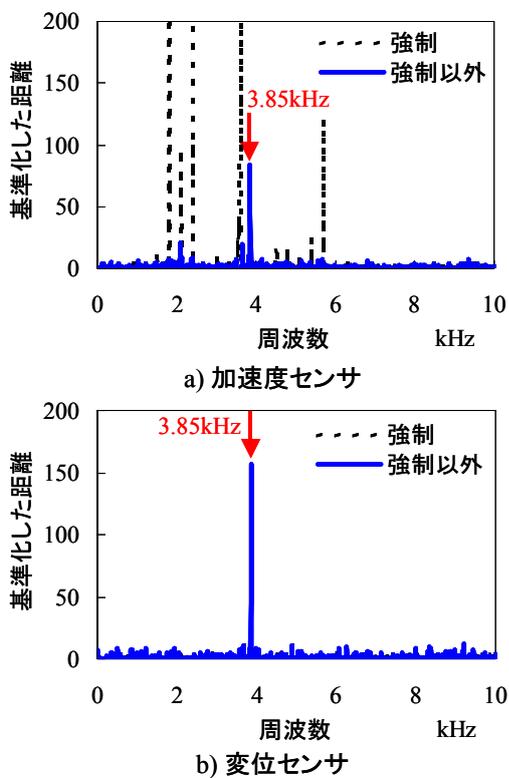


図4 図3のパワースペクトルを空転中信号で基準化した距離

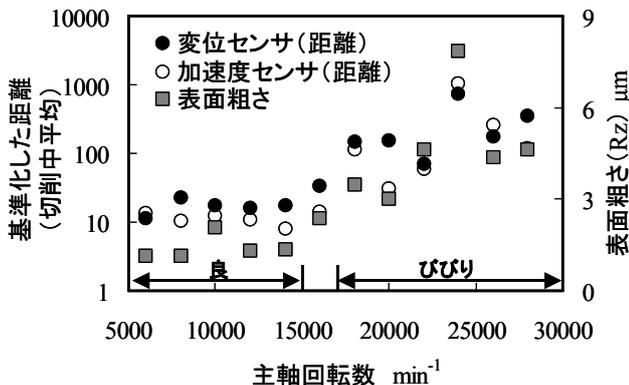


図5 表面粗さと基準化した距離の切削中平均値

られるが, 変位センサの方がより大きな値が得られた。次に, 加工条件が異なる場合について考える。条件(工具径・長さ, 回転数など)の違いにより, びびり周波数が変化することを考慮すると, 空転中の強制周波数以外の全ての周波数でのスペクトル(ノイズ)が, 異常信号の大きさに対して, 相対的に小さいことが望ましい。図3に代表的に示されるように, 変位センサの方がノイズが小さい傾向が確認された。これらの要因としては, 変位センサが, 異常発生箇所である切削点に近い箇所を測定しており, 異常信号をより大きく測定できることが考えられる。また, 加速度センサでは, 主軸頭移動時の加減速や残留振動がノイズとなる問題が確認されたが, 変位センサでは, 主軸頭に対する工具ホルダの相対変位を測定するため, この現象がみられなかった。これらのことから, びびりの検知には, 工具ホルダの変位を測定する方が良いと考えられる。

### 3 びびり回避システムの開発

前項までの検討結果から, 工具ホルダの変位情報を用いてびびりを検知し, びびりが発生した場合に, 主軸回転数と送り速度を, 機械のオーバーライド信号を用いて低下させることにより安定化させる, びびり回避システムを開発した。プログラム開発環境は LabVIEW7.1 を用いた。本システムに必要な入力項目は, 初期指令回転数, 空転中データ(平均, 標準偏差), びびり判断条件(閾値, 回数), 探索周波数範囲である。空転中データは, 各オーバーライドの値(50~100% (10%刻み))毎に必要なである。探索周波数範囲は, びびり周波数を含む必要があるが, 本検知手法では広い周波数範囲を設定することが可能である。システムでは変位データを取得し, 4096 サンプル毎に周波数解析, “距離”の計算, びびり判断を行い, びびりが発生した場合には, 自動で主軸回転数と送り速度をともに10%ずつ低下させる。

変位センサ入力モジュールは SCXI-1530, SCXI-1600 (日本ナショナルインスツルメンツ(株)製), 回転数と送り制御のためのデジタル出力ボードは PCI-2702C (株式会社インターフェイス製)を用いた。

### 4 適用例

#### 4.1 傾斜面加工への適用

開発したびびり回避システムを傾斜角  $60^\circ$ , および  $85^\circ$  の等高線仕上げ加工に適用した。工具は R1mm, 首下長さ 35mm (L/D=17.5) の超硬ボールエンドミル(日立ツール(株)製 EPDBP2020-35-09-TH), 被削材は SKD61 (HRC45) である。空転中データはオーバーライド毎に100回分のスペクトルから求めた。びびり判断条件は,

表3 切削条件

主軸回転数 S	15000min <sup>-1</sup> (初期)
一刃当り送り f	0.1mm/刃 (固定)
切込み D	0.1mm (加工面法線方向)
ピックフィード Pf	0.1mm (加工面接線方向)
クーラント	MQL
傾斜角 α	60°, 85°

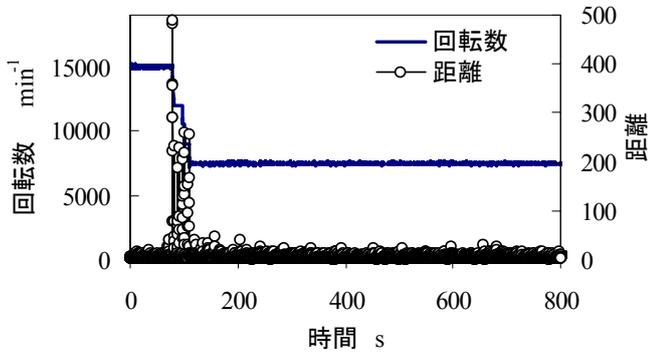


図6 回転数と基準化した距離 (傾斜角 85°)

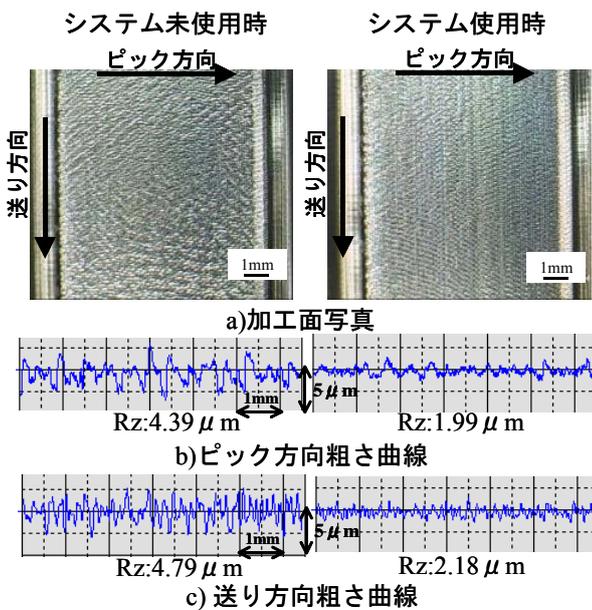


図7 加工面写真と粗さ曲線 (傾斜角 85°)



図8 加工した実金型モデル

強制周波数以外の“距離”が 0.8 秒 (“距離”計算 5 回) 以内に 2 回以上 100 を超えた場合とした。切削条件は表3のとおりとし、100mm の長さの被削材を 70 パス加工した。図6に傾斜角 85°での回転数と“距離”の推移を示す。加工開始とともにびびりを検知し、回転数を変更され、7500min<sup>-1</sup> (オーバライド値 50%) で“距離”が小さくなっている。図7に回避システム未使用時、および使用時の加工面写真、粗さ曲線を示す。回避システムにより、びびりを抑制できていることが確認できる。なお、傾斜角 60°では回転数が 13500min<sup>-1</sup>で安定し、表面粗さは、システム未使用時に Rz6.31 μm (ピック方向)、7.40 μm (送り方向)、システム使用時はそれぞれ 3.90 μm、3.74 μm であり、びびりを抑制できた。

#### 4.2 実金型モデル加工への適用

実金型の一部を切り出したモデルの等高線仕上げ加工へ適用した。工具は直径 2mm, R0.5mm, 首下長さ 40mm (L/D=20) のラジラスエンドミル (日立ツール(株)製 EPDRP2020-40-0905-TH), 被削材は日立金属(株)製の DAC55 (HRC42) である。初期回転数は 5000min<sup>-1</sup>で、3000min<sup>-1</sup>で加工を完了した。加工したワークの写真を図8に示す。表面粗さ Rz2.09 μm (深さ方向) が得られ、L/D=20 の実金型加工においてもびびりを抑制できた。

### 5 結 言

金型加工時に発生するびびりを検知し、回避するシステムの開発を行った。以下に内容をまとめる。

1) 切削中の振動パワースペクトルの、空転中パワースペクトル集合で基準化した“距離” (切削中パワースペクトルから空転中平均値を減じ、空転中標準偏差で除したものが、強制周波数以外で大きくなることを利用した)びびり検知技術を開発した。この手法により小さなびびりでも検知可能である。

2) 今回の実験条件内においては、主軸頭の加速度を測定するより、工具ホルダの主軸頭に対する相対変位を測定する方が望ましい結果が得られた。この要因として、より切削点に近い箇所を測定していること、また、主軸頭移動時の加減速や振動の影響を受けにくいことがあげられる。

3) びびりが発生した場合に回転数、送り速度を変更し、びびりを回避するシステムを開発した。そして、このシステムを、傾斜面加工と実金型モデルの加工に適用し、有効性を示した。

### 文 献

- 1) 近藤他：日本機械学会論文集(C), 59(1993)567, 3261
- 2) 枇杷他：2002 精密工学会秋季講演論文集, 2002, 469