

(高速高精度加工に関する研究)

11 小径ロング工具による高速金型加工

西川隆敏, 前田圭治, 山下弘之

(Study of High Speed and High Accuracy Milling)

High speed milling of die and mold by small and long ball-end-mill

NISHIKAWA Takatoshi, MAETA Keiji and YAMASHITA Hiroyuki

Recently, high speed milling technique realizes high efficiency and high accuracy in the manufacturing of die and mold. But it is difficult to get high accurate machined surface in case of milling the deep cavity. In this study, high speed milling technology for small and long ball-end-mill are developed. It provides high-quality machined surface without chatter in short machining time.

キーワード：金型加工，ボールエンドミル，びびり，小径ロング工具，直彫り加工

1 緒 言

金型加工では，特に仕上げ工程において金型の最小 R 以下の工具を用いる必要があり，深い形状では必然的に工具長さとも工具径の比 (L/D) が大きくなる。L/D が大きい場合，びびりの発生による加工面不良や，工具のたわみによる加工精度の悪化などの問題から，放電加工が用いられることが多く，工程が煩雑になっている。また，切削加工で行う場合においても，びびり回避のため低速で加工が行われることが多く，大きな加工時間を要しているのが現状である。

これまで，L/D が大きい条件 (L/D = 9 (工具直径 6 mm, 工具長さ 54 mm)) での加工精度について検討を行い，びびりが発生しない条件において，コンプライアンス (動剛性) 測定結果を用いて加工精度の良い主軸回転数を決定できること，及び，高回転切削により高精度加工が可能であることを明らかにした¹⁾²⁾。しかし，L/D がさらに大きくなり，剛性が低い条件ほど，びびりの問題がより支配的になることから，びびりを回避することが重要な課題となる。また，実際の金型加工においてはカッターパスの加工面へ与える影響も大きい。本報では，現状放電加工が用いられている L/D = 17.5 の実金型モデルの加工を事例として，これらの問題について検討を行った。

2 実験機器

実験に使用した工作機械，工具，ホルダを表 1 に示す。なお，本工具のカタログ推奨条件は主軸回転数 6422 min⁻¹ (外周切削速度 40 m/min)，送り速度 899 mm

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	日立ツール(株)製コーティング超硬ボールエンドミル EPDB2020 35 09 TH
	直 径 D	Φ 2 mm (R 1 mm)
	工具首下長 L	35 mm (L/D = 17.5)
	首 部 角 度	0.9°
	刃 数	2
	振 れ	3 μm 以下
ホルダ	黒田精工(株)製コレットホルダ	

/min (一刀当り送り 0.07 mm/刃)，切込み 0.03 mm である。加工対象の実金型モデルの材質は SKD61 (日立金属(株)製 DAC，硬度 HRC48)，大きさ 70 mm × 45 mm × 50 mm で，加工形状は凹形状，最小 R 1 mm，加工深さ 35 mm，抜き勾配角 1°，溝最小幅 3 mm である。切削油は用いず，すべてエアブローで加工を行った。

3 切削条件・加工方法の検討

3.1 びびり確認実験

びびりは加工面の悪化や工具損傷を引き起こすため，避けるべき問題である。びびりの生じない切削条件を求めるため，「主軸回転数と送り速度をパラメータとした加工実験を行い，加工面を目視で判断する方

法³⁾を利用した。切削条件を表2に示す。実金型モデルと同じ材質のテストピースを用い、まず首下長さの短い工具により安定した条件で溝加工を行い、その後、実験工具を用いて、ピックフィード分ずらした位置を1パス加工する。荒加工を考慮した条件（傾斜角0°、ダウンカット）と、仕上げ加工を考慮した傾斜面（傾斜角60°）の等高線ダウンカットの条件とした。予備実験において傾斜面加工では傾斜角が大きいほどびびりが発生しやすいことを確認しているが、傾斜角が大きい条件では工具とテストピースの干渉の問題から多くの条件を一度に評価することが困難である。したがって、まず、傾斜角60°で実験を行い、良好な条件を用いて傾斜角89°での実験を行った。

表2 びびり確認実験での切削条件

主軸回転数 S	min ⁻¹	5000 ~ 40000 (2500min ⁻¹ ピッチ)
一刀当り送り f	mm/刃	0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15
加工面法線方向切込み D	mm	0.04
加工面接線方向ピックフィード pf	mm	0.125

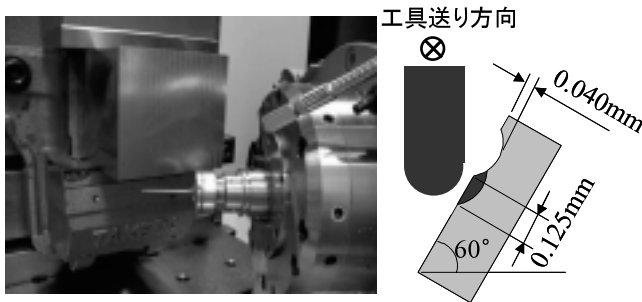


図1 びびり確認実験方法

傾斜角60°での実験方法を図1に、加工後のテストピースを図2に示す。テストピースを蛍光灯の下に置き斜めから見ると、びびりの起きている箇所では乱反射により白く見え、良好な箇所は黒く見える³⁾ことから、加工現場においても比較的容易にびびりの判断が可能である。びびりの無い(小さい)回転数は、5000, 17500, 22500, 35000min⁻¹である。傾斜角0°の条件では、35000min⁻¹以上の低送り条件(0.025mm/刃)でびびりが発生した。なお、実加工では加工形状に応じた加減速などのため、指令送り速度に対して送り速度が低下する箇所もあることから、低い送り速度でびびりが発生しないことを確認する必要がある。

傾斜角0°, 60°で良好な条件(5000, 17500, 22500min⁻¹)で、傾斜角89°として加工を行ったところ、17500, 22500min⁻¹ではびびりの発生(表面粗さはそれぞれ最大高さ6.2μmRz, 4.3μmRz)が確認された。5000min⁻¹でも少しびびりがみられたが、表面粗さは良好(一刀当り送り0.025~0.075mm/刃にて最大高さ3μmRz以下)であった。

3.2 びびり回避のための加工方法

前節の結果より、びびりが大きく発生しない条件として、5000min⁻¹程度での加工が推奨される。これは、工具推奨条件にも近いが、低回転であるため送り速度を大きくすることができず、加工時間が大きくかかってしまう。また、切削速度が低い(0.04mm切込み位置にて、8.8m/min)ことから、工具磨耗の増大や、むしろなどの切削性の悪さも予想される。そこで、高速条件でのびびり回避を検討した。

主軸回転数22500min⁻¹、一刀当り送り0.025mm/刃として、図3に示す2種類の加工方法で行った。図3(a)に示す加工方法は、等高線荒加工で所定の仕上げ代を残した後に、等高線仕上げ加工を行うもので、今回のモデルのような傾斜角の大きい形状の金型加工で一般的に用いられる方法である。一方、図3(b)は1つの等高線断面毎に順次、仕上げていく方法である。加工結果を図4に示す。図3(a)の加工方法ではびびりが大きく発生している(図4(a))が、等高線断面毎に形状を仕上げる方法とすることで、びびりを回避することができた(図4(b))。この理由については検討が必要であるが、工具中心部が切削に関与し、軸方向の力を常に受けることにより、工具先端が支持され工具剛性が向上すること、あるいは、工具中心部付近の低切削速度領域において、びびりの安定効果(ダンピング)が働いていることなどが考えられる。

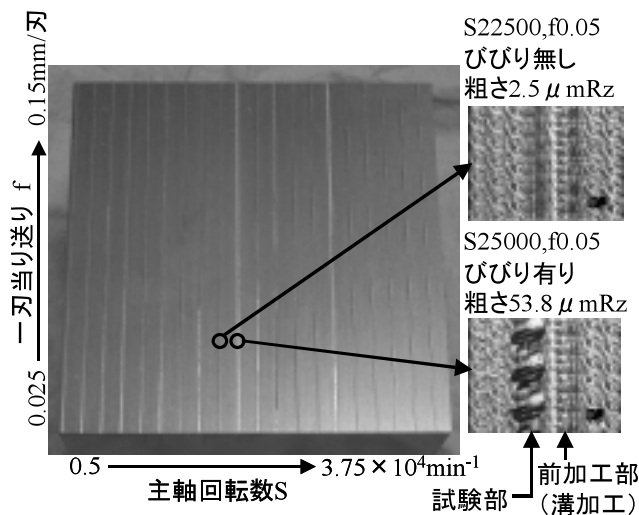


図2 加工後のテストピース(傾斜角60°)

3.3 コンプライアンス測定による強制振動の回避

工具ホルダ部をインパルス加振し、工具先端から2.5mmの位置の応答速度をレーザドップラー振動計(株)小野測器製 LV-1620)で測定し、コンプライアンス伝達関数(動剛性)を得た。図3(a)の切削形態では、直流成分と断続切削の1次の成分(主軸回転数(min^{-1}) \times 刃数(2)/60(Hz))の力が支配的に作用すると考えられる。22500 min^{-1} に対応した周波数である750Hz近傍には固有振動数は確認されなかった。これらの結果より、びびりが生じにくく、かつ、切削中の強制振動も少ないと考えられる22500 min^{-1} とした。

4 カッターパスの検討

表3に示す切削条件にて、内側から外側へ繰り広げていく一般的な等高線荒加工パス(ダウンカット)により、深さ1mmまで加工を行った。カッターパスは日立造船(株)製 SPACE-E を用いて作成した。加工結果を図5に示す。パスの最外周部に10ヶ所程度、形状不良が確認され、工具損傷が生じている。この発生位置はピックフィードの位置であり、1つの等高線断面の加工終了時にZ軸上方へ回避する箇所と一致していた。外側から内側へのパスとした場合でも、同様にZ

軸上方へ回避する箇所でも不良が発生した。また、パスの折れ部でも加工面不良が確認された(図6)。これらの現象は、指令送り速度を下げると小さくなり、また、同じ切削条件で首下長さの短い(16mm)工具を用いた場合は、確認されなかった。

剛性の小さい工具では、工具のたわみ量が多い状態で加工が行われる(今回の条件では、工具送り方向の右側から力を受け、左側にたわむ)。しかし、カッターパスの折れ(送り方向の急激な変化)のある箇所では、送り速度が低下し切削抵抗が減少するため、たわみ量が減少する。また、回避やアプローチの際の空転部分ではたわみは発生しない。これらのたわみ量の差により、加工面不良が発生したものと考えられる。対策としては、切込み量や一刃当り送り量を小さくし、切削抵抗を小さくすることや、指令送り速度を下げ、切削中の送り速度の変化を小さくすることが有効であるが、加工能率の低下が懸念される。したがって、1つの等高線断面の加工において、工程を3工程(荒、中仕上げ、仕上げ)に分け、荒加工では能率を重視し、加工面へ影響する中仕上げ、仕上げ加工では径方向切込み量、送り速度を小さくした。傾斜面仕上げ加工時は、工具R部全体で切削する状態となり、工具損傷が発生しやすいことから、その対策としても

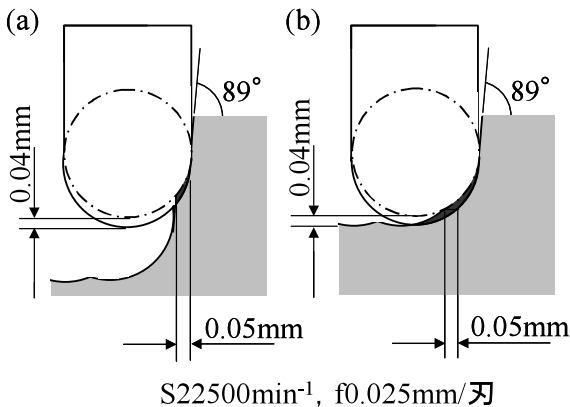


図3 加工方法

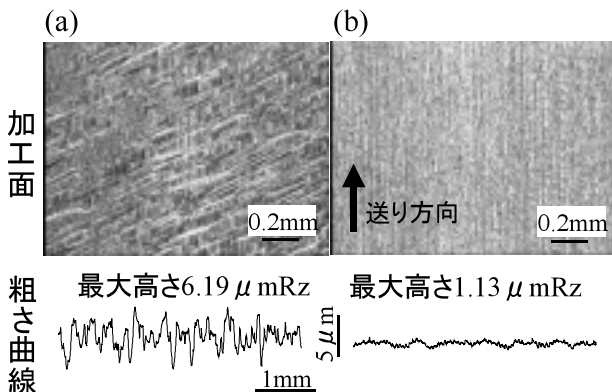


図4 加工結果

表3 パス検討での切削条件

主軸回転数 S	min^{-1}	22500
送り速度 F (一刃当り送り f)	mm/min (mm/刃)	3375 (0.075)
軸方向切込み D	mm	0.04
ピックフィード pf	mm	0.25

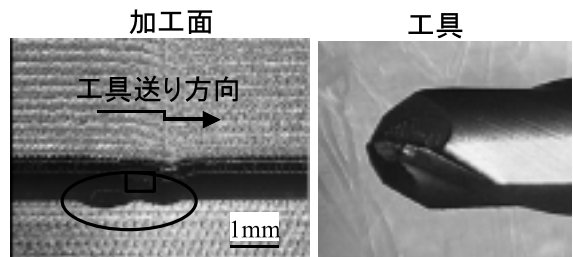


図5 加工面と工具

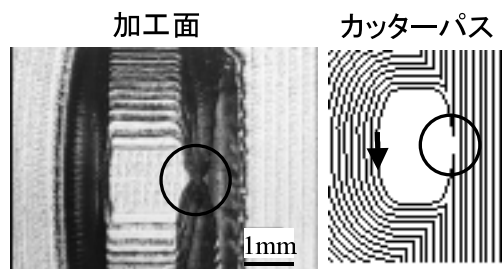


図6 カッターパスの加工面への影響

有効である。また、中仕上げ、仕上げ工程では、円弧進入・円弧回避を用いて滑らかなパスとし、送り速度の変化を小さくした。そして、Z軸垂直方向へ回避・進入する位置を仕上げ加工面から離すことで、回避・進入時の仕上げ加工面との干渉による加工面不良を防止した。

なお、市販のCAMではこれらの工程（荒、中仕上げ、仕上げ）を1つの等高線断面毎に繰り返すパスを自動作成することができないため、3つの工程のパスをCAMで自動作成し、その後、等高線断面毎に編集した。

表4 切削条件

工具 首下長 (mm)	加工範囲 (深さ) (mm)	主軸 回転数 (min ⁻¹)	工 程	送 り 速 度 (mm/min)	軸方向 切込み (mm)	径方向 切込み (mm)
16	0 ~ 17	24000	荒	3600	0.2	0.5
			中仕上げ	2400		0.2
			仕上げ	1200		0.05
25	17 ~ 26	23000	荒	3350	0.1	0.4
			中仕上げ	2300		0.2
			仕上げ	1150		0.05
35	26 ~ 35	22500	荒	3375	0.04	0.35
			中仕上げ	2250		0.2
			仕上げ	1125		0.05



図7 加工した実金型モデルの外観

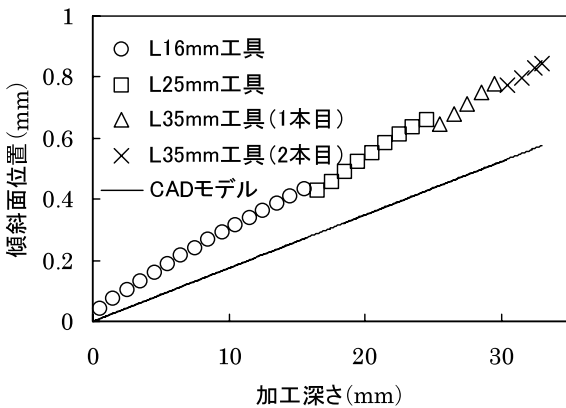


図8 傾斜面加工形状

5 加工結果

能率向上のため首下長さの異なる3種類の工具（全てR1mm）を用い、表4に示す切削条件で加工を行った。図7に加工した実金型モデルの外観を示す。総加工時間13時間59分（首下長さ16mm工具にて3時間、25mm工具にて2時間58分、35mm工具にて8時間1分）で、工具の異常損傷はなく、4本の工具（16mm、25mm工具を1本、35mm工具を2本）で加工を完了した。加工面の不良や大きなびびりの発生はみられず、表面粗さ（最大高さRz）は16mm工具部で送り方向2.4μm、深さ方向3.3μm、25mm工具部でそれぞれ2.4μm、2.3μm、35mm工具部でそれぞれ3.6μm、4.0μmで良好であった。

傾斜面の加工形状を3次元測定機で測定した結果を図8に示す。CADモデルに対して削り残しが生じ、勾配角1°に対して0.5°程度傾いていることが確認される。これは、工具磨耗の進行により切削抵抗が増大すること、及び、1つの断面での削り残しが、次の等高線断面加工時の切込み量増大をもたらし、削り残し量が増大することが原因と考えられる。この削り残しにより、深い部分の加工の際には、工具シャンク部のワークへの接触も確認された。また、工具交換の際の加工面段差が0.02~0.03mm程度発生しており、これらの問題については、今後の検討課題である。

6 結 言

小径ロング工具での加工を行い、次の結果を得た。

- (1) 傾斜角が大きい条件ではびびりが発生しやすいが、工具中心部を切削に関与させる切削形態とすることでびびりを抑制し、高速切削を可能とした。
- (2) 1つの等高線断面毎に3つの工程（荒、中仕上げ、仕上げ）で仕上げる方法とし、円弧進入・回避を用い、Z軸垂直方向への動作位置を仕上げ加工面から離すことで、高能率高品位加工を実現した。

以上より、従来の放電加工から直彫り加工に置き換えることのできる目処を得た。また、工具の推奨条件と比較して大幅な高速化を達成した。

文 献

- 1) 西川他：広島県西部工技研究報告，46（2003），72
- 2) 西川，前田，山下：2003年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，（2003），107
- 3) 嶽岡，宮口，岩部：精密工学会誌，65（1999）8，1131