金型加工用切削工具を使いこなす技術課題*

Technical Requirements for Fully Utilizing Cutting Tools in Mold and Die Profile Machining

星 鐵 太 郎**

Tetsutaro HOSHI

Key words : mold and die profile machining, copy milling, NC milling, 3-d CAM software, machining curved surface

1. ま え が き

金型の製作には種々な加工方法が組み合わせて用いられており、切削加工による割合が依然として最も大きく、続いて放電加工（ワイヤカットも含む）が多用されている。切削加工の能率と精度の向上は高性能な切削工具が実用化されてきたこと、それを可能とする工作機械の性能向上、加工上の進んだノウハウの蓄積、NC加工においては計算機ソフトウェアの開発実用による所が大きい。本稿は金型加工の中でも、とくに曲面部分の加工を行う、いわゆる型面加工の工程を主題とし、近年の切削工具の動向をもととして、高性能切削工具の持つ能力を、刃先の欠け（チッピング）などのために無為に終わらすことなく現実に発揮させるための、いわゆる使いこなす技術、とくに工作機械と加工ソフトウェアに要求される技術課題について解説する。

2. 金型の種類

用途、大きさ、精度、材質ともに多岐にわたっており、表1中の例えば板金プレス型では、かたや成形品の寸法がメートルオーダーのボディ型から、小は十数mmのリードフレーム型まである。プラ

スチック型の多くは、数百mmの成形品を対象とするが、最大高さ $R_{\max}$ 0.1 μm オーダの表面粗さまで磨きあげる鏡面仕上が必要とされるものが多い。一方、熱間用の鍛造型では $R_{\max}$ 数十 μm の粗さで、0.1 mm オーダの形状精度がでていれば切削加工のままで十分なものもある。

铸铁（FC 25 など）や構造用炭素鋼（S 55 C など）の比較的切削しやすい材料を素材とする金型もあるが、合金鋼、工具鋼、ステンレス鋼など難削性の素材

表1 金型の用途と材料の代表例

用 途	材 料
冷間加工	
板金プレス型 大形	铸铁 FC 25 など
低精度または小量生産用	構造用炭素鋼 S 55 C など
小物金型用	工具鋼 SKS 93
中量生産用	SKS 3
量産用	SKD 11
パンチ、トリミングダイなど	SKD 51
熱間加工	
鋳造型	工具鋼 SKT 4
AL ダイカスト型	SKD 61
精密鍛造型	SKD 7, SKD 8
温間鍛造型	高速度工具鋼 SKH 51
プラスチック金型	合金鋼 SCM 系 SCM 440
	SNM 系 AISI P 20
	マルテンサイト系ステンレス鋼
	SUS 420 J 2, SUS 440 C
	工具鋼 SKD 61, SKD 11
	析出硬化鋼 AISI P 21
	析出硬化形ステンレス鋼 SUS 630
	マルエージング鋼 18%Ni マルエージング鋼
プラスチックマグネット成型型	高C高Mn鋼 SCMnH 21

* 原稿受付 平成元年2月14日

** 正 会 員 豊橋技術科学大学（豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1）

を切削加工しなければならない場合が多い。焼きならし状態で粗加工し、焼入れ焼戻し後に仕上加工を行う場合と、加工前に熱処理を施して HRC 30~45 程度の硬さにして（プリハードンと呼ばれている）において切削加工する場合がある。

3. 金型製作の達成目標と加工方法の選択

多数の金型を製作する期間を含めて、開発期間の短いことが新製品をタイムリーに市場に出して成功を収める要因となる。そのため、金型製作の達成目標としては所要期間の短いこと、すなわち短納期が最優先されることが多い。続いて高精度・高品質、それから製作コストの低減、とくに製作作業の自動化がとり上げられるのが本来の順序である。

フライス加工を主体とする切削加工が、放電型彫り加工（EDM）と競合して型面加工で用いられている。放電型彫り加工は、逆形状に製作した銅、銅合金またはグラファイト電極を用い、液槽中で放電によって金型材料を徐々に除去し、電極形状を転写する加工法で、加工時間は長くなるが自動化されており、硬質材料も加工できる。切削加工では難しい狭く深い凹み（プラスチック金型の深リブと呼ばれる部分）や、半径の小さな隅の加工ができるなどの特徴のため、広く用いられている。液膜を介した放電の代わりに、電解溶液を介した通電に伴う電気分解の原理による電解型彫り加工（ECM）もわずかではあるが、鍛造型などに実用例がある。

フライス加工による曲面形状の切削には、微いフライス加工と NC（数値制御）フライス加工がある。微いフライス加工は、他の方法で製作したモデルを倣って、ボールエンドミル等の切削工具により金型素材を切削する方法で、古くから型面の粗加工に用いられていた。1977 年以降、切削性能の高い超硬ボールエンドミルが実用されるようになったのに伴い、能率と加工精度の優れた微いフライス盤が開発され、仕上加工にも広く用いられる主要な加工法となっている。NC フライス加工は、曲面加工動作を指示する NC 指令をコンピュータを用いて作成し、NC フライス盤または多くの場合マシニングセンタによって型面加工を行う。CAD/CAM と呼ばれる加工ソフトウェア技術の進歩に伴ってかなり広く行われるようになったが、その技術は現在まだ急速な発展途上にあり、本文に掲げるような技術的課題の達成によって、今後一層の展開が期待される加工法である。

どの加工法をとるかは、総合した製作期間の長短が大きな決定要因となっている。ここで「総合した」と

直径 20 mm, 1 枚刃スローアウェイ式超硬ボールエンドミル

図1 円弧状中心切れ刃を持つボールエンドミルの渦巻状刃先形状

言うのは、工程自体の所要時間のほかに、微いフライスではモデルの製作、NC フライスでは NC 指令の準備、放電型彫りでは電極の製作を含み、またフライス加工で細かい仕上面粗さまで仕上切削をしておけば、後工程の手仕上の時間が短縮されるとか、放電型彫りの仕上面は表面の硬化層があるために手仕上に長時間を要するなどの要因が考慮されるためである。

4. 金型加工用切削工具の進歩

4.1 新刃形ボールエンドミル

切削加工による型面加工に高能率をもたらすきっかけとなったのは 1977 年に実用化された中心部に円弧状切れ刃をもつ新刃形の超硬ボールエンドミルの登場であった。超硬合金を刃先とする切削工具は第 2 次大戦中から使用され、国内では戦後に広く普及したことは周知の通りであるが、ボールエンドミルについては、切削速度がゼロに近くなる中心部の切れ刃に欠損（チッピング）が生じるため、鋼材に対しては超硬合金が使用できず、高速度工具鋼（HSS）のみが使用されていた。

図 1 の写真に見るような、中心部の切れ刃を円弧状の渦巻形状とすることによって、中心部切れ刃に欠損を起こさずに円滑な切削を行わせることができる。図 2 の連続写真に見るように、1 片の切りくずが生成される切削サイクルは、中心部切れ刃がまず切削を終わり（写真 3）、切削速度の高い外周切れ刃が最後まで切削を続けて切りくずを外側に投げ出すようにして終了する（写真 4）ため切りくず離れがよく、切れ刃の欠損が起りにくい¹⁾。この工具の実用により超硬工具による曲面形状の高能率・高精度加工の可能性が高まり、新技術の開発が相次いで今日に至り、まだ多くが今後の課題として残されている。

工具直径：30 mm，回転数：1 000 rpm，
被削材：S 45 C，送り：600 mm/min，
切削幅：17 mm，軸方向切込み：3 mm，
ダウンカット

図2 円弧状中心切れ刃1枚刃超硬ボール
エンドミルによる切削サイクルの
ストロボ連続写真（細井らより）

4.2 8角形チップエンドミル（スローアウェイ式）

新刃形ボールエンドミルに用いられたような凸曲面すくい面の優れた切削性能は、それ以前からあった千鳥刃サイドカッタにも例を見ることができる²⁾。型面加工用に近年よく用いられるようになった8角形チップのスローアウェイ式エンドミルにも図3の写真に見るような凸すくい面の応用がなされたものがある。従来からある8角形チップのすくい面外周を頂角が大きい円すい面に修正することによって凸すくい面とし、切削性能を向上している。図4に示すように8角形チップのスローアウェイエンドミルは、半径方向に送る平削り（A及びB）のほかに、軸方向に送るドリル加工（C）、ドリル加工に引き続く平削り加工、彫り込んだポケット内の肩削り（D）、斜め下に送るランピング加工（E）ができる。型面の粗加工で大きな工具径（30 mm以上）を用いる段階ではボールエン

図3 凸すくい面を持つ8角形
チップスローアウェイ式
非球面エンドミルの刃先
形状

図4 8角形スローアウェイチップ非球面エンドミルによる各種粗加工の説明図
（新井：深切込みエンドミル/ボールエンドミル/多機能工具³⁾，p. 49による）

ドミルよりも高効率加工のできる非球面工具の一つとして有効である。また、カッタの回転に加えて公転円運動の送りを行わせながらヘリカル状にランピング加工すれば大径穴の粗加工を高効率に行う工具としても有効である。

4.3 その他の金型加工用切削工具

詳細は業界誌等（例えば文献3）にゆずるとして、工具メーカー各社より種々の新工具が出されている。型面加工用に限って主なものを挙げてみると次のような例がある。

(1) ボールエンドミル

- a. スローアウェイ式各種設計
- b. サーメットあるいはセラミックチップの併用
- c. 超硬あるいは粉末 HSS ソリッド（むく）ボールエンドミル
- d. CBN 刃先ボールエンドミル（鋳鉄型面加工用あるいは高硬度型面仕上切削用）

(2) 非球面工具

- a. 小径深リブ加工用エンドミル
- b. 深切込み用不等ねじれ角，スローアウェイエンドミル
- c. ポケット彫り込み用スローアウェイエンドミル
- d. 丸型チップスローアウェイエンドミル

図5 工具の進行方向による材料除去率 (MRR) の変化の説明例 (直径 25 mm ボールエンドミル) (細井⁴⁾より)

5. 高能率粗加工の技術課題

切削による型面加工の長所は、とくに粗加工においては材料除去率 (Material Removal Rate, MRR) を大きくして、加工時間が短縮できる点であり、短所としては工具の破損ないしは切れ刃の欠損 (チッピング) が起こりやすい、フライス加工に特有の振動が起こることがある、作業の完全な自動化がはかりにくいなどがあげられる。短所を補い長所を伸ばすために必要な技術的課題をあげてみよう。

5.1 材料除去率 (MRR) の一定保持

工具の破損あるいは切れ刃の欠損は、工具 1 回転当たりの材料除去体積が急激に増大して刃先にかかる切削力とそれに伴う刃先のたわみ変位が急増する瞬間に生じる。図 5 に見るように工具を軸方向 (Z 方向) にも送りながら加工する場合 (a)、軸方向には動かさず XY 平面内で等高線工具経路で加工する場合 (b) のいずれにおいても、曲面輪郭の加工においては送り

図6 近似的に MRR 一定保持の容易な高能率加工工具経路の説明図 (鈴木⁵⁾より)

率一定であれば MRR は絶えず変動し、とくに工具軌跡が曲がり角に達した時には MRR が瞬間的に急増する。高能率粗加工の実現のためには、使用工具と被削物材質に対して経験的に定めることのできる適当な MRR の上限許容範囲 (例えばさきの図 1 に示した円弧状中心切れ刃ボールエンドミルで S 45 C 鋼切削の場合は $30 \sim 35 \text{ mm}^3/\text{rev}$) を常に保つよう加工を行うことが必要である。

MRR 一定保持の条件を近似的にはあるが容易に実現できる工具経路の要点として、円弧状中心切れ刃ボールエンドミルの発明者による著書⁵⁾には次の 3 点が説かれている。

- (1) 切削中に工具を軸方向 (Z 軸方向) にはなるべく動かさない。従って平らな素材面に対して最初に行う荒取り工程においてはカッタ (高能率のため非球面工具を用いる) がある高さの平面上を移動しながら加工を行い、図 6 (a) に見るようにその高さより上の不要部分を全部削り終わってから、切込み分だけ軸方向に移動して次の高さの平

図7 複合曲面（要素曲面A, B, C, Dの組合せで与えられている）に対する連続乗り移り工具経路の説明図

面にかかるようにする。

- (2) 荒取り後の曲面を中仕上するには、球面工具（ボールエンドミル）によってまず図6(b)に示すような等高線工具経路により加工する。このときダウンカットが行われる方向に送り運動を行い、アップカットの状況を極力避ける。
- (3) 走査線工具経路は必然的に軸方向移動を伴うので、図6(c)に見るように傾斜が例えば45°（この角度は状況によって変えるが）より緩い曲面の頂上部と底面部のみに限って行う。

近年における做いフライス盤の性能向上の課題はこれら3項目に対応する工具経路を高速でも安定して做い動作できるような做いサーボ装置を実現することにあった。またNCフライスによる場合には、複数の要素曲面を組み合わせで与えられた曲面形状（複合曲面と呼ばれる）に対して、図7に示すように要素曲面間の交差線上で次の要素曲面に連続的に乗り移って行くような加工ソフトウェアの研究がすでに行われている⁵⁾。

さて、上記3点に従う工具軌跡においても、送り率を一定にする限りは急な曲がり角におけるMRRの急増を避けることはできない。送り駆動機構に適応制御を組み込んで送り速度の自動調整を行うのが一つの解決方法である。今後の課題としてコンピュータ上でシミュレーションを行いMRRの一定保持が行われるような送り率を求めてNC指令を発生する機能が実現可能となるであろう。

5.2 振動の抑制

フライス加工によく出現する振動には、原因の異なる2つの種類がある。一つは再生びりであり、他方は断続切削に伴う切削力の強制的変動による振動である。比較的小径のカッタを用いて行う型面加工においては後者が問題となることが多い。これは切削力が周期的に変動し、強制振動源となって工具・工作物間に働くことにより、断続の基本周波数あるいはその整数倍の高調波周波数で発生しうる強制振動である。これらの周波数のいずれかが、機械構造系の振動しやすい

周波数、すなわち固有振動数に近づくと共振して顕著な振動を生じる。工具の回転数をわずかに調整することにより、共振を避けて振動を抑制することができるはずである。しかし、型面加工においては送り方向が絶えず変化するので問題となる固有振動数が単一ではなく、時間と共に移り変わるので、振動を常時監視し、自動的に主軸回転数の微調節を行うような自動振動抑制装置の開発が望まれている⁶⁾。

また、粗加工の高能率化に伴って、従来の主軸ターバによる工具保持が断続切削に伴う振動と衝撃に対して、十分に強固ではなくなっており改良が望まれている。

6. 高能率高精度仕上加工の技術課題

6.1 高速高精度工作機械

さきに図6に示された(b)等高線工具経路と(c)走査線工具経路による加工を、工具経路の間隔（ピクフィードという）を十分に細かくして行えば高精度な仕上面が得られる。NCフライス加工でこれを行うには5.1節で述べたような連続乗り移り機能を持つ加工ソフトウェアによることが前提であり、また乗り移り時の干渉チェックと工具半径のオフセット計算が十分な精度で行われることが必要である。また、以下に述べるような細かなピクフィードを用いるため、作成したNC指令は膨大な量となり、すべてを記憶媒体に収めることが経済的に不可能となるので、加工と実時間に計算処理を進めることが必要である。

中仕上の次に仕上を行う場合、ボールエンドミルの工具径は中仕上に用いたものの60%前後の小さなものを選ぶことができる。最終仕上の段階では、曲面間の交差線の角に指定された最小半径に対応する工具径を用いることとなる。プラスチック型の場合、最小工具径は3~10mm程度の小さいものをとる必要のある場合が多いので、工作機械の主軸回転数は控え目に見ても最高6000rpm程度的高速性能が求められている。最高回転数で連続長時間の切削を行っても主軸位置の熱変位が±0.03mm以内に入る熱安定性が必要である。

ピクフィードを細かくするほど仕上面の粗さは小さくなり、後工程の手仕上の時間が短縮される効果があるので最終切削仕上においては、0.3mm程度まで小さくして行いたい場合が多い。ピクフィードを小さくするに伴い、加工時間の面から高い送り速度が必要となり当面の目標として6000mm/minの同時3軸連続経路送り速度で±0.03mmの輪郭精度を保証したい。NC工作機械の場合には工具軌跡の補間計算を

表2 NC フライス加工による仕上加工の高速・高精度性能の達成目標

	実用的 ビーク フィード (mm)	最高主軸 回転数 (rpm)	連続送り 速度 (mm/min)	(その時の 直線補間 間隔) (mm)	精度 (mm)
現状の代表例	1~0.5	4 000	1 000	(1)	
当面の目標	~0.3	6 000	6 000	(0.5)	±0.03
長期的目標	0.1	10 000	10 000	(0.3)

図8 切り立った壁の仕上加工における工具たわみによる加工誤差発生の説明例 (a) 図と、同時5軸制御による抑制の方法 (b) 図

行う間隔を大きくとれば高速送りは可能であるが、それを十分に細かい間隔 (例えば 0.5 mm) で行うには、高速な計算処理機構を備えなければならないという技術課題がある。

現状の NC フライス加工では、表2に示すようにこれら性能が達せられない場合が多く、上記の数字は当面の達成目標であり、長期的には表の下欄に示すさらに高速性能を目指す必要がある。

金型加工用切削工具にもスローアウェイ工具が一般化した今日、主軸の内部を通して (スルスピンデル) 空気を送り、工具刃先を冷却する機能が強く望まれている。これは工具寿命の延長と切りくずの排出に効果があり、スローアウェイ工具の締付けねじが固く締め過ぎて分解できなくなるのを防ぐのに必要である。また、同じ機械で高能率ドリル加工を行う場合のためにスルスピンデルの切削液供給も行える設計が望ましい。

6.2 工具たわみの抑制

切り立った壁の根元の角を小径工具で仕上加工する場合、図8(a)のように生じる工具たわみによる加工誤差は、切削加工にとって最も困難な問題である。図8(b)に示すように15°程度工具を傾斜させて加工すれば、根元の太い工具を使用でき、この誤差を防ぐこ

とができる。常にこのような傾きを保つような同時5軸制御の NC フライス加工の開発が一つの技術課題である。これはXYZ3軸方向の直線移動に加えてA (X軸回り) とB (Y軸回り) 両軸の回転送りを備えた工作機械と、同時5軸の NC 指令を発生し、主軸端とチャック及び工具が他と干渉しないことを検証する加工ソフトウェアを必要とする。

もう一つの可能な方法としては5.1節に述べたMRRの計算シミュレーションによって工具刃先のたわみとその方向を計算によって求め、その誤差分を補正した NC 指令を発生する機能の実現できるであろう。

7. 結 言

近年における金型用切削工具の進歩は型面加工における切削技術の重要性を高め、做いフライス盤の性能向上と NC フライス盤あるいはマシニングセンタによる曲面加工技術の向上、とくに金型 CAD/CAM 加工ソフトウェアの発達を促してきた。今後における技術課題として、工作機械においては高速高精度性能、送り速度の適応制御、振動の自動抑制制御、スルスピンデル空油供給ならびに工具保持強度の強化が必要であり、また同時5軸制御の NC 機械が検討されるべきである。また、金型 CAD/CAM 加工ソフトウェアの今後の進展には多くの重要課題があり、工具経路発生にかかわる CAM 部分にだけ限定しても、複合曲面に対する連続乗り移り、正確な干渉チェック、非球面工具に対する工具オフセット、荒取り工程・等高線工具経路・走査線工具経路の実時間自動発生、シミュレーションによる MRR 一定保持と工具たわみの補正制御などが望まれている。また、同時5軸制御による曲面加工のソフトウェアも必要な課題である。

参 考 文 献

- 1) 細井俊明, 星 鐵太郎: うず巻状刃先をもつボールエンドミルの切削作用, 日本機械学会論文集, 44, 378 (1978) 722.
- 2) 加工技術データファイル, (財)機械技術振興協会技術研究所 (1978) 704 D 32-02, 1-2/2.
- 3) 最近の金型用切削工具の技術動向, 型技術, 3, 12 (1988) 17.
- 4) 細井俊明: 新しい金型型面加工法——Hosoi 式型彫り法と加工例, 日刊工業新聞社 (1983).
- 5) 鈴木 裕, 山崎和雄, 星 鐵太郎, 黒宮義久: 金型実時間加工用数値制御システムの開発 (第2報), 精密工学会誌, 53, 12 (1987) 1952.
- 6) 星 鐵太郎, 吉原 篤, 中村公一: 振動抑制のためのフライス加工適応制御システムの開発, 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 C (1987) 75.