金型の高精度・高速高能率加工*

戸沢幸一**

Key Technology for High-Speed, High-Accurate and High-Efficient Manufacturing of Die and Mold / Koichi TOZAWA

Key words: die-milling machine, high-pressure coolant, surface roughness, curvilinear interpolation, cubic boron nitride, gantry, dimensional accuracy, solid carbide endmill

1. はじめに

自動車、家電製品に代表される生産のグローバル化に伴い、金型製作も一部海外展開しつつあるが、付加価値の高い精密な金型、高額設備と高度な技能を必要とする自動車用等の大物金型に関しては、依然として国内生産・調達が主流である。

開発リードタイムの短縮、原価低減の強い要請のもと、CAD/CAM、CAE、ラビッドプロトタイプングなど主要な型技術は近年目ざましい発展をする中で、型加工技術も高速加工機と切削工具の日進月歩の性能向上と型加工法の考案・開発により、高精度・高速高能率加工が型製作現場に浸透しつつある。

本稿では、金型の高速切削加工の最新事例を中心に紹介し、工作機械・切削工具・CAM・加工法などの基盤技術の重要性と今後への期待を概説したい。

2. 高精度・高速高能率加工のねらいと現状

高精度・高速高能率加工のねらいは、企業として型工場として期待されるニーズにより、その優先順位はまちまちであるが、おおむね製品開発リードタイム短縮、製品コストを含めたトータルな原価低減、品質の安定化および労働環境の向上の4点に絞られる。企業の投資環境・重点課題、型種別の要求精度、CAD/CAM および加工技術の蓄積レ

ベル、仕上技能者の過不足など様々な要因により、高精度・高速高能率加工の実施状況と効果は千差万別である。

高速加工として外部に発表された事例としては、小型マシニングセンタ（24 000 rev/min）適用によるファスナ樹脂型/ダイキャスト型の高速加工¹⁾（1985）、大型高速型彫り盤（8 000 rev/min ユニバーサルヘッド）による自動車用大物プレス型の高速加工²⁾（1986）が先駆けである。

本格的な普及は、1987 年以降高速スピンドルヘッド、高速送り機構、NC コントローラによる送り加減速制御、高圧クラーントなどの高精度・高速高能率加工に適した機械要素を装備した工作機械の実用化が契機となった。しかし、当初は、CAD/CAM の処理能力とコスト、高硬度な型材・焼入れ鋼に適した高速加工用切削工具の性能不足、高精度かつ効率的な加工法と CAM ソフト開発の遅れなど、高性能工作機械を十分に活かす周辺技術に課題が山積し、型の高精度・高速高能率加工の普及を妨げていた。

具体的な高精度・高速高能率加工を進める上での問題点として、自動車用大物金型を例にして表 1 に示す。

昨今の開発リードタイムの短縮、原価低減、型技能者の高齢化対応などの経営ニーズの高まりと CAD/CAM、切削工具・保持工具、工作機械など基盤技術のコストパフォーマンス、精度、信頼性の向上により、ようやく高精度・高速高能率加工が企業規模を問わず実を結ぶ段階になりつつある。

現在、金型の高精度・高速高能率加工は精密工学会、型技術協会主催の会議・セミナーほかで研究内容・実用化事例が活発に発表されている。本来これらのすべてについて体系化し、精密工学の観点から正確に解説すべきであるが、紙面の制約と筆者の浅学もあり、高精度・高速・高能率、各々の現状と課題および弊社の最新事例を主体に概説したい。なお、説明の便宜上、高精度・高速加工は仕上加工、高能率加工は荒加工を対象として取り扱うこととする。

* 原稿受付 平成9年6月16日
 ** 正会員 日産自動車(株)工機技術本部(座間市広野台2-5000)
 1979年東京大学大学院修士課程(産業機械工学専攻)修了。金型の加工技術、FAに従事

表1 高精度・高速高能率加工の問題点

要因	問題点
工作機械	動的精度不良 例：1. 往復加工のピック不ぞろい 2. 象限切替え時の段差 3. テーブルのハンチング 主軸発熱による熱変形 NC制御装置の処理速度 傾斜ヘッド・テーブルの角度誤差 クーラント能力不足
工具系	高硬度材加工時の摩耗・欠け ボールエンドミルの真球度・先端部でのむしれ 工具・保持具の剛性と動バランス CBN, サーメットの再研磨時間
加工法とCAD/CAM	垂直壁と隅部での切削負荷過大 NCデータの精度と量 処理時間とコスト 工具選択・加工条件などの冗長性

3. 高精度加工の基盤技術向上

(1) 高精度加工の課題

金型の加工精度を悪化させる誤差要因は、工作機械、切削工具、切削現象、NCデータ精度に大別される。参考として自動車用プレス型での各要因の相関を表2に示す。工作機械の動的精度に関しては、サーボ系を含めた送り剛性とNC制御の応答性向上により、門型の大型機械においても往復運動の真円度は、10 μm 前後（送り6 m/min, 半径150 mm）が一般的であり、表面粗さに関しては特にNCデータ精度の良し悪しとボールねじの経年劣化が問題視されている。

また、寸法精度・形状精度に関しては、従来主要因とされていた工作機械の位置決め精度・熱変位、工具のアップカット、ダウンカット時の逃げ・食込み以外に、工作機械の直角度、主軸のふれ、工具Rの真球度³⁾・摩耗の影響が無視できないことが3次元測定機の解析結果から確認されている。

本稿では、NCデータ精度と工具剛性・摩耗対策による型精度の向上に関して実施例を紹介する。

(2) NCデータ精度の向上と表面粗さ

自動車外板用パネルの絞り型完成品の最大表面粗さは、5~10 μm が許容値であるが、CAD/CAM用コンピュータの演算能力、ディスク容量、DNCの転送能力の制限から、CAD/CAMデータの累積誤差は、従来10 μm 前後が一般的であった。図1に示すように、CAD/CAMデータ作成プロセスにおいて発生する、カットパス計算用モデルの近似誤差、モデルと工具との接触計算精度、NCデータ出力トレラン

表2 加工誤差要因（例：自動車用プレス型）

		寸法精度 (とくに 大物金型)	高意匠面		表面粗さ (とくにア ウタ部品)
			形状	うねり	
工作機械	位置決め精度	◎	○	△	○
	直角度・真直度	◎	○	△	△
	主軸の流れ	◎	◎	○	◎
	熱変位	◎	△	△	△
	運動精度	○	◎	◎	◎
工具	逃げ・食込み	◎	○	○	◎
	摩耗	◎	◎	◎	◎
	溶着	△	△	○	◎
	むしれ	○	◎	◎	◎
	工具R精度	◎	◎	◎	○
切削現象	ピックフィードの山谷	○	○	○	◎
	送りマーク	△	○	○	◎
	構成刃先	△	○	○	◎
	びびり	△	○	○	◎
NCデータ	スキヤニング精度	○	◎	◎	◎
	CADデータ精度	△	◎	◎	◎
	直線補間誤差	△	◎	◎	◎

記号説明：◎相関強い、○相関あり、△相関弱い

ス（誤差許容値）の累積誤差により、加工方向と平行な筋状の模様と直交した折れ線の発生が避けられなかった。

これらの誤差に対して、CAD/CAMデータ作成プロセスのエンジニアリングワークステーションへの移植と誤差低減ソフトの開発、およびNCコントローラによる曲線補間の活用により、累積誤差は3 μm 以下となり、筋状の模様と折れ線が消滅し、磨き作業レス化への課題の1つが解決された。

図2に、CBN（Cubic Boron Nitride）ボールエンドミル加工による表面粗さを示す。ピックフィード1.0 mm（従来0.7 mm）と高速形状仕上加工としては大きいですが、データ精度と工作機械の動的精度の向上により、表面粗さは10 μm 前後（従来20 μm ）を達成し、加工時間、手仕上時間とも短縮化を実現している⁴⁾。

(3) 工具性能向上と寸法精度

プレス型の切れ刃部は、切れ刃摩耗から発生する製品のバリを抑制する上で、ロックウェル硬さで60程度の高硬度が要求されている。従来の大物プレス型では、超硬工具の摩耗と工具の逃げ（ L/D 5~6）により、加工精度の確保が困難であった（ L/D ：工具突出し長/工具径を意味し工具剛性を簡便に評価するパラメータ）。この課題に対し

図1 NCデータ精度の誤差要因

図2 高速加工後(FC250)の表面粗さ

て、高剛性多刃に設計された超硬ソリッドエンドミルにチタンアルミナ系コーティングを施し、高精度化と高能率化を図った。表3に示すように3次元測定機で測定したポイントの99%が加工公差を満足すると共に、切削送りが従来比5倍の能率アップが実現している。現在は、上下型切り刃の合わせ手作業の廃止(寸法精度 $\pm 0.025\text{mm}$)をねらいに、加工精度の解析により工作機械・工具・保持具・加工条件などの誤差要因を究明している。

4. 高速加工の基盤技術向上

(1) 高速加工の課題

金型加工の高速化を阻害させる要因として、NCを含めた工作機械の送り性能(最大送り、加速度)、主軸性能(最高回転数、動力)、切削工具性能(硬さ、じん性、剛性、動バランス)、NCデータの特徴(粗密、並び方、補間方式)、加工条件(切込み、切り幅)、型材などに大別される。概して、ねずみ鋳鉄・ダクタイル鋳鉄など削りやすい型材は工作機械の性能向上、焼入れ鋼等高硬度材は切

削工具の性能向上が、高速化を加速するキープポイントとして期待されている。

本稿では、工作機械の性能向上による鋳鉄の超高速加工とCBN工具による高硬度材高速加工に関して実施例を紹介する。

(2) 鋳鉄の超高速加工

自動車用プレス型の加工は、段取りの容易性から門型の立て型マシニングセンタの適用が一般的である。しかし、テーブル駆動の欠点として、重量物の型構成部品(最大15トン程度)加工時のイナーシャ、送り剛性などの問題から、切削送り10m/min以上、加速度0.1G以上の高速化は困難であった。

1996年の工作機械見本市で発表された、テーブル固定のガントリータイプ超高速大型マシニングセンタ(送り20m/min、主軸回転数20000rpm:BT50)は、超高速用切削工具、超高速NC制御など周辺技術が整えば、従来テーブル駆動タイプの2倍以上の高速化を可能とするものである⁵⁾。現在、試切削中であるが送り15m/min、回転数15000rpm(切削速度MAX2360m/min、φ50CBNボールエンドミル)で、良好な結果が得られている。参考として、旋削における鋳鉄の高速切削⁶⁾との比較をVT線図(切削速度と工具寿命との関連図)として図3に示す。

(3) CBN工具による高硬度材高速加工

プレスせん断型を対象に、鋳鉄などの母材に溶接肉盛された切れ刃部(ロックウェル硬さ $60\pm 2\text{NIW-5}$ 材)にCBNボールエンドミルを適用した。すでに工具メーカーから公表されている焼入れ鋼(63HRC)の連続切削を参考として、エアカットが大半であるボールエンドミル加工特有の冷却効果と真の切削時間の短さを考慮して加工条件を決定した(図4、表4)。焼入れ鋼においても4m/minの

表3 高硬度材の高精度輪郭加工

	従 来 加 工	新 加 工
被削材	溶接盛り刃 NIW-5 ($60\pm 2\text{HRC}$)	⇐
工具径×工具長×刃長 材種・刃数・芯厚	φ32×160×60 超硬ソリッド, 4枚刃, 60%	⇐ 超硬ソリッド(コーティング), 8枚刃, 80%
回転数(切削速度) 送 り 工具摩耗量(VB)	150 min ⁻¹ (15 m/min) 50 mm/min (0.08 mm/刃) 0.1 mm	300 min ⁻¹ (30 m/min) 250 mm/min (0.1 mm/刃) 0.02 mm
加工精度(公差±0.1)	<p>$C_p = 0.62$, 合格率=81%</p>	<p>$C_p = 1.17$, 合格率=99%</p>

図3 V-T線図 (FC250)

図4 V-T線図 (焼入れ鋼)

切削送りが達成されると共に、鋳鉄部との連続加工により切れ刃部との段差も $5\mu\text{m}$ 以内と良好な結果が得られた(表5)⁷⁾。

5. 高能率加工の基盤技術向上

(1) 高能率化の現状

金型荒加工の高能率化を阻害させる要因として、主軸アタッチメントを含む工作機械の機械剛性、主軸動力、切削工具性能(硬さ、じん性、剛性、切り粉排出性、クーラント穴)、保持具剛性、加工条件(切込み、切り幅)、型材などに大別される。概して、 L/D の小さい工具で加工可能な金型もしくは部位は、工作機械・工具・保持具の総合性能が能率を決定する。一方、 L/D の大きい工具を使用せざるをえない、深く、狭い金型・部位は、工具の逃げ・振動などが起因して、工作機械および工具材の性能限界まで加工条件を上げるのは困難である。

高能率化としては、工作機械の高速化と工具性能の向上を基盤として、切削力の安定化をねらった、浅切込み・高回転加工が理にかなった加工法である。

また、工具剛性・切り粉排出性・切削速度において高能率化を阻害しているボールエンドミルの先端部を可能な限り使用しない、等高線加工、面沿い加工がCAMソフトの充実により一般化しつつある。

さらに、樹脂型キャビティの大荒加工では、ボールエン

表4 CBN 工具仕様と加工条件

項 目	仕 様
工具径、刃数	$\phi 50\text{ mm}$ (R25), 2枚
粒子サイズ	M
CBN 容積	70%
主バインダ	TiC
切削送り	4 000 mm/min
回転数	$5\,100\text{ min}^{-1}$
切削速度	800 m/min (先端から 90° の外周部)
加工ビックフィード	1 mm
切削長	鋳鉄: 1 560 m NIW-5: 60 m

表5 高速加工後の表面粗さと異種材間の段差

		FC250	NIW-5	段 差 (μm)
ビック方向	Ry (μm)	8.9	13.6	4.8
	Ra (μm)	1.5	2.6	
送り方向	Ry (μm)	5.1	1.9	
	Ra (μm)	0.9	0.3	

表6 鍛造型高速加工の加工条件

	従 来 加 工	高 速 加 工
ワーク材質・硬さ	SKT4相当	45 HRC
加工機出力(kw)	22	26
加工機最高回転数(min^{-1})	3 500	15 000
切削工具仕様	スローアウェイ ボールエンドミル	ソリッドスクエア エンドミル
加工径・刃数	$\phi 30$, 2枚	$\phi 20$ (R1付き), 6枚
切削条件回転数(min^{-1})	1 060	2 250
送り (mm/min)	200	2 000

図5 荒加工用円弧パス

ドミルを使用せずに、エンドミルの側刃をフルに活用した一発かけ上がり法⁸⁾、丸コマカッタによる浅切込み高送り加工、高剛性専用工作機械による突き加工など様々な型加工法が提案され、実現されつつある。

本稿では、鍛造型の高能率化に関して実施例を紹介する。

(2) 形状荒加工の高速化

高速加工機(主軸回転数 15 000 rpm)の導入、ソリッド強ねじれ(50°)スクエアエンドミルの採用(表6)、荒加工用等高線円弧パスの作成(図5)により、結果として従来比で単位時間当たり切削量で6倍、加工時間で75%

穴位置の検討

図6 スパイラルホール付き超硬エンドミル

表7 クーラント供給位置比較試験の加工条件

加工径	φ10
金型材質	SKD 61 相当 45 HRC
工具材質	超微粒子超硬+TiAlN コーティング
回転数	10 000 min ⁻¹
送り	1 000 mm/min
切込み	1 mm
切削液	水溶性 (エマルジョン)
クーラント圧	6.9 MPa

以上の削減を達成している。

(3) 高圧クーラントの有効活用

高圧クーラントによる刃先冷却は、発熱の抑制による工具寿命の延長と加工条件向上に有効である。工具メーカの技術開発により、内部スパイラルホールを有する超硬ソリッドエンドミル（図6）の製造が可能となったことを契機として、スピンドルスルークーラントの有効性に関して穴位置をパラメータとして評価した。以下の3通りについて、他の条件は同一として切削比較試験を行った（表7）。その結果、逃げ面に穴をあけた工具が、穴なしの3倍、すくい面穴の2倍の寿命延長が確認された（図7）。本結果は、切りくずの排出性の良さと切削点への効率的なクーラント供給によるものと考察できる⁹⁾。

6. 今後の技術開発に期待すること

工作機械各社のチャンピオン仕様を列挙すれば、小型のマシニングセンタでは最高回転数 100 000 rpm、最大加速度 1.0 G、最高早送り 120 m/min、主軸の振れ量 0.05 μm など、従来からみれば驚異的な性能である。

また、最近の CAD/CAM、データ通信、NC 制御など情報関連の飛躍的性能向上により、単純形状の小物金型（自動車エンジンのコンロッドの鍛造型、受話機の樹脂型など）においては、磨きレスと工程集約をねらった高精度・高速高能率加工が切削工具の限界の範囲内で、急速に

トライアル結果

図7 穴位置による工具摩耗比較

進展していくと推察される。

一方、中大物金型では、工作機械とワークのイナーシャ、工作機械のコストパフォーマンス、相対的に大きな工具使用による切削速度と主軸 Dn 値の限界、工具摩耗と交換時の面段差など、いわゆる機械と工具の課題が山積している。

工作機械ではリニアモータ、パラレルリンク¹⁰⁾、磁気軸受、工具では多層コーティング、高じん性 CBN、保持具では2面拘束など新技術も活発であるが、性能とコストを高いレベルで両立しうる、斬新な新技術の発明・開発が待ち望まれる¹¹⁾。また、金型のリードタイム短縮、原価低減、品質の安定化を図る上で、最新の工作機械、切削工具の性能を最大限に発揮しうる型加工法の開発、加工条件の最適化、加工精度の解析を推進する型加工技術の役割は、CAD/CAM、CAE 技術と共に今後ますます重要であると確信している。

参 考 文 献

- 1) 中井昭昭：吉田工業における FA/CIM、'90 FA 実戦ガイドブック、機械技術別冊、日刊工業新聞社、(1990) 144.
- 2) 戸沢幸一：高精度・高速微細加工による外板用プレス型のみがきレス化、型技術、6, 10 (1991) 46.
- 3) 戸沢幸一：工具研削の内転化による最適工具の実現と工具費低減、型技術、10, 5 (1995) 41.
- 4) 岩田欣児、戸沢幸一：高精度・高速加工を実現する NC データ自動作成システム、機械技術、44, 8 (1996) 45.
- 5) 長谷川 弘：ガントリー形超高速形状加工、型技術、12, 3 (1997) 34.
- 6) 後藤光宏：スミポロンによる高硬度材の高能率加工、機械と工具、39, 4 (1995) 24.
- 7) 増澤重敏、戸沢幸一：CBN 工具によるプレス型高硬度材の高速加工事例、型技術者会議講演論文集、(1997)、NO 125.
- 8) 高橋百利、大隅 博、福井雅彦：三次元金型荒取り用新高速加工法の開発、型技術者会議講演論文集、(1995) 15.
- 9) 佐々木久次、渡辺啓一郎：鍛造型の高速加工事例、型技術ワークショップ講演論文集、(1996) NO 104.
- 10) 鈴木基之、渋谷哲郎：パラレルリンク形切削加工機、型技術、12, 3 (1997) 38.
- 11) 中川威雄：一軸高速送りによる3次元切削法の提案、理研シンポジウム「第2回ラビッドプロダクトマニファクチャリング」講演論文集、(1996) 48.