

金型加工用高速ミーリングを考える

ファインテック(株) 中川 威雄*

高速ミーリングは古くて新しい技術である。回転切削工具を使うミーリング加工用の工作機械は、フライス盤から NC 制御付きフライス盤、ATC 付きマシンニングセンタと発展し、さらに、現在は 5 軸制御マシンニングセンタと旋削加工を含めた複合加工用工作機械へと発展している。これらミーリング加工機発展の歴史の中で、切削工具の回転数は増大を続けてきた。

言うまでもなく、工具の回転高速化は加工速度、すなわち工具送り速度を増加させ、加工時間を短縮する。工作機械としては高速回転の工具軸と高速化に適した工具ホルダーと工作機械の剛性の向上などが必要であり、また、それに応じた NC データと制御システムの高速化も必要である。

われわれが理化学研究所で、当時としては画期的すぎて使いこなせなかった新潟鉄工製の $10 \text{万} \text{min}^{-1}$ の高速ミーリング機による研究を本格的に開始したのは 1990 年頃であった。その後、約 10 数年間、一貫して高速ミーリングのあるべき姿を追いかけてきた。今回、当社で開発した高速ミーリング機は、これまでの研究開発成果を凝縮し、具現化したものである。以下に、その考えを述べたい。

高速ミーリングの課題は工具寿命

高速ミーリングの効果は昔から十分に知られていた。少なくとも、回転速度が増えれば、それに反比例して加工時間は短縮するので、これまでも回転速度を増す

方向で、フライス加工やエンドミル加工は発展してきた。

回転が増すたびに、スピンドルの駆動法や軸受や送り速度制御の問題は存在したが、それらは着実に解決されてきた。しかし、高速ミーリングの実現にとっての最も大きな課題は工具の耐久性であった。高速回転により切削速度が増加するため、切削時の発熱は増大する。その発熱により工具切り刃が損傷を受けるので、当然、切削速度には限界が存在する。

金型加工に広く使われている超合金製の工具は、かなり耐熱性が高いので、例えば、Al 合金を超高速で切削しても、発熱などにより工具が短時間に傷むことは少ない。そのため、超高速のミーリングは Al 合金材の切削から普及を始めた。

特に、航空機に使用される Al 合金部品の加工では、部品軽量化のためにミーリングで除去される割合も多く、その加工時間を短縮するための高速ミーリングは航空機産業には不可欠なものとなった。

一方、金型のミーリング加工の主な被加工材は工具用合金鋼やステンレス鋼であり、超高速ミーリングでは当然、発熱量も増大し、切り刃の損傷は増大する。さらに、ミーリングのような断続切削では切り刃が被加工材にぶつかるたびに衝撃力が加わるばかりでなく、加熱と冷却の熱衝撃の繰り返しが行われるため、切り刃にサーマルショックによる亀裂が発生し、刃こぼれやチッピングの原因にもなる。

これらのことから、金型加工における高速ミーリングは、これまで工具の耐久性が画期的に向上しない限り、採用は難しいと考えられていた。幸いなことに、

*Takeo Nakagawa : 代表取締役社長 (東京大学名誉教授)
〒144-0033 東京都大田区東糀谷 4-9-7
TEL (03) 5735-0888

超硬合金のエンドミルにセラミックなどのコーティング処理がなされ、耐熱性・耐摩耗性も大幅に向上した。また、エンドミルの刃先に負のすくい角が採用されるようになって、チッピングの防止に顕著な効果があった。

さらに、究極の工具材と言われる cBN 焼結工具も使われるようになって、金型材の高速ミーリングにおける工具の耐久性の課題もかなり解決されてきた。

目標は金型のボールエンドミル加工

金型加工に高速ミーリングを適用する場合、何と云っても、大きな期待は加工に長時間を要するボールエンドミル加工の高速化である。ボールエンドミル加工は、図1のように自由曲面創成の唯一の手段であるものの、切込みを多くすれば、工具にびびりが発生するので、無理な加工ができず、最も加工能率の低い加工法である。

しかも、最も使用頻度の高い切り刃部分は、切れ味の悪い歯底のチゼル部分である。さらに、送りピッチを大きくとれば表面に残留する波状の凹凸は拡大する。凹凸を減じて平滑化しようとするれば、送りピッチを細かくする必要がある。その送りピッチを細かくすれば、それに応じて加工時間が増大する。

この課題に対処するには、加工能率を落とすことなく、より平滑な表面加工面が得られる工具回転数を増大した高速ミーリングが唯一の解決策なのである。つまり、金型の高速ボールエンドミル加工では、加工時間の短縮効果と加工表面の平滑化が同時に得られる。加工表面は後工程で手作業を含む仕上げ加工を加えることとなる。

多くの場合、この仕上げ工程は手間ひまかけるものの、寸法的には精度を落とすこととなる。したがって、高速ミーリングによる表面の平滑化は、金型の形状寸法精度の向上にも直接貢献することになる。

小径工具に適する高速ミーリング

金型加工用ボールエンドミルの工具耐久性が向上したと言っても、いまだ cBN 工具はかなり高価であり、広く普及しているとは言えない。しかも、この cBN 工具は、高能率加工が得られる深切込み条件では切り刃のチッピング発生のおそれも大きい。

結局、現実には超硬合金工具が主に使用されており、

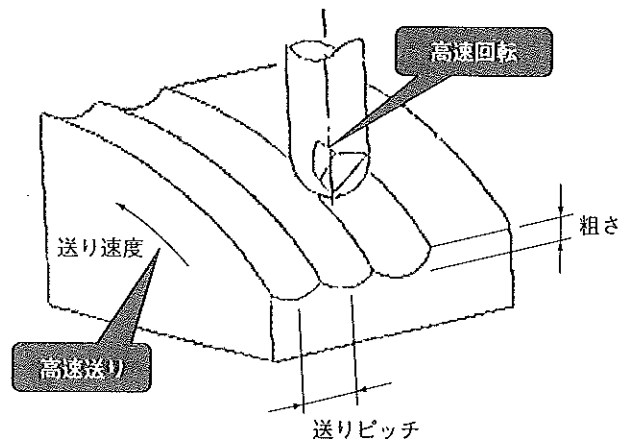


図1 ボールエンドミルによる曲面加工

当然、超硬合金には限界切削速度が存在する。今の超硬合金工具では 3~400 m/min の速度を超すと摩耗の進行は加速され、実用上、それ以上の高速域でのミーリング加工は適用できない。

エンドミルの中で外径の大きいフェイスミルでは、外周部は簡単に限界速度を超えるうえ、連続切削で切り刃は高温に曝される。また、外周刃を利用するエンドミルでは、小径工具でも高速ミーリングでは比較的簡単に限界速度を超えてしまう。その点、ボールエンドミル加工では外周刃で側壁部の加工を行うこともあるが、通常金型加工では量的には、それほど多いものではない。

ボールエンドミルでは、最も使用頻度の高い切り刃中心のチゼル部分は周速が低く、限界速度から見るとかなり余裕がある。もちろん、ボールエンドミルでも工具直径が大きいと、工具外周部で切削すれば、この限界切削速度を簡単にオーバーする。そのため、大物の金型加工機に、必要以上の高速主轴を取付けても実際には使用できないこととなる。

これに対し、小径工具を用いる場合には回転数を高くしても、限界の切削速度を超す心配は少ない。つまり、直径が 20 mm のボールエンドミルに対して、2 mm のボールエンドミルを使うと、10 倍の高速で回転させても実際の切削速度は同じである。

さらに、0.2 mm のボールエンドミルでは 100 倍まで可能である。最近では、直径 0.05~0.03 mm のボールエンドミルが市販されるようになってきている。直径 20 mm の工具で $5,000 \text{ min}^{-1}$ 程度が適切であるとされるが、それならば 2 mm の径では $5 \text{ 万 } \text{min}^{-1}$ 、0.2

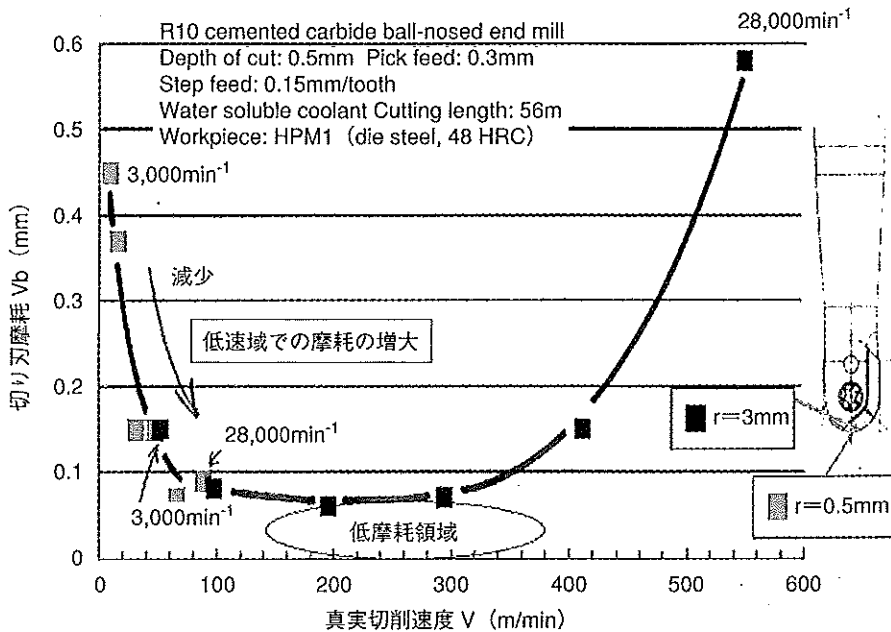


図2 低摩耗速度領域の存在 (理化学研究所)
(チゼル部分は高速化により摩耗が減少)

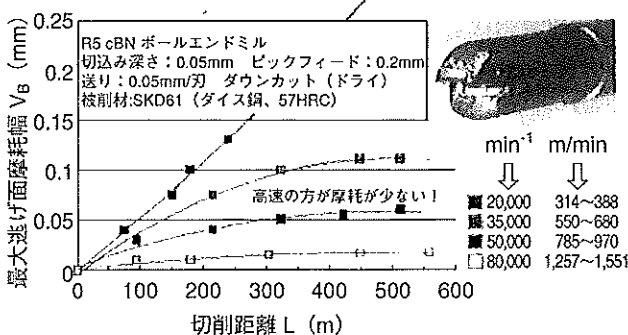


図3 cBN 工具は高速ほど摩耗が減少する実験結果 (理化学研究所)

mm では 50 万 min^{-1} となる。

つまり、直径 1 mm 以下の工具では、少なくとも 10 万回転の高速ミーリングが適切であり、既存の高速ミーリング加工機では、むしろ回転数が不足しているのである。特に、微細金型の加工が多くなると、形状の制約より小径工具を使わざるを得ないため、加工時間は加速度的に増えており、どうしても、さらなる高速回転のミーリングが望まれている。

高速ボールエンドミル切削の特性

言うまでもなく、高速ミーリングの効果の第 1 は加工能率の向上であり、それから派生して、高精度加工の効果が生み出されている。金型用鋼材の高速ミーリングの実験が行われる過程で、それまで指摘されていなかった、以下のようないくつかの現象が認められた。

① 高速ミーリングにおける超硬工具による切削に

おいて、旋盤のような連続切削に比べて、断続切削における冷却効果により切り刃の摩耗は減少し、工具の長寿命化が期待できる。

- ② 同じく断続切削の冷却効果により、超合金工具のエンドミル加工では限界切削速度は増加する。また、条件によっては速度の上昇により、工具寿命が延びる (図 2 参照)。
- ③ また、ボールエンドミル加工において、高速化するほど被削性が向上し、被削面粗さも高速化するほど良好となる。
- ④ 工具送り速度の減少などにより、一刃当たりの切込み量が減りすぎると、切り刃の滑りにより摩耗が急増する。
- ⑤ 高速ミーリングでは湿式切削を行うと、切り刃の急速加熱と冷却によるサーマルショックによりチッピングが発生する。乾式またはミスト潤滑が適している。
- ⑥ cBN ミーリング工具を使った軽切削では、条件によっては速度上昇とともに工具寿命が増加し、限界切削速度は毎分 2,000 m 以上と極めて大きい (図 3 参照)。

高速ミーリングにおける切削は、負のすくい角の採用で、切り刃のチッピングの発生を防止し、断続切削における空冷による冷却効果で切り刃の摩耗を減少させている。言うまでもなく、ボールエンドミル工具の寿命はチゼル部分の摩耗によって決まることが多い。高速ミーリングによるボールエンドミルの寿命の延長

は、主にチゼル部分の摩耗状況の改善によっている。

しかし、少なくとも切削速度を増加することにより、摩耗が減少して工具寿命が向上するというのは、従来の切削加工理論では、ほとんど指摘されていない現象である。切削速度を高速化することにより、切り味が向上し、摩耗が減少したと考えられ、ボールエンドミルのチゼル部分の切削性が関与していると思われる。

小型高精度高速ミーリング機

いずれにしても、限界切削速度が存在する以上、高速ミーリングは真実の切削速度の低い小型加工機に適することは明らかである。また、高能率のみならず、高精度加工に向いており、特に、ボールエンドミル加工を多用する金型加工にはうってつけの加工法と言える。

このところ、多くの機器の軽薄短小化やモバイル化が進行しており、それとともに機械部品の成形用金型も小型化・微細化・高精度化が加速しており、小型の高速ミーリング機は、それらの金型加工機として適している。

しかし、高速主軸を備えただけでは、これらの利点が十分に享受されるわけではない。もちろん高速回転の遠心力で取り付けた工具がゆるまない、主軸のフレが少なくといった高速ミーリングに必須の条件を満足しなければならない。また、加工精度を上げるには、送りピッチを細かくできて滑らかな面が得られるだけでは十分ではないし、工作機械自体の駆動時の精度も上げなければならない。

また、ATCの使用を前提としたうえで加工面精度を上げるといった難しい問題も生ずるほか、CNC制御が高精度に行われなければならないだけでなく、加工される形状データ自体の精度や微細さも、それ以上のものが求められることとなる。

工作機械の精度の問題となると、業界が長年取り組んできたことで、これらの基本的な対策は、ほぼ出尽くしている。最高の加工機は光学素子の金型加工用の超精密加工機であろう。しかし、その技術をすべて採用したのでは高価となりすぎ、一般の金型加工用としては機能低下の許容範囲内の低コスト化が必要となる。精度に関して言えば、工作機械の発熱や温度変化に起因する要素が大きいですが、温度誤差は機械寸法に比例するので小形工作機械の場合は有利となる。

工具も加工精度を決める

加工精度を支配するそのほかの大きな要因に、工具関係に起因する精度の問題がある。つまり、工具ホルダー、工具精度、切り刃形状、工具長変化、工具変形、工具摩耗などが加工品精度に与える影響は、かなり大きなもので決して無視できない。これらは、ある意味では切削加工の根本的な課題で解決困難なものも多く、これまでミーリング機械精度向上の意欲を殺ぐことにもなっていた。

超精密加工機による加工精度でも、工具に起因する誤差については、いまだ解決されていない課題も多い。例えば、加工抵抗による工具の変形や摩耗による工具形状の変化に対しては、加工後に加工面を計測して、厄介な補正加工を行わなければならない状況である。

したがって、通常の精密ミーリングでは、ひたすら工具と工具ホルダーの精度を上げ、工具の剛性を高めるとともに、耐摩耗性を向上させることに期待せざるを得ない。さらに、加工中にATCなどで工具交換した時の工具長変化に対する対策などには、手もつけられない状況と言える。

したがって、これらの工具に起因する対策は、ほとんど工作機械のユーザーのノウハウによって解決することを期待しているのが現状である。しかし、ボールエンドミル工具自体にも、旋盤におけるバイトによる旋削のように高精度につくられてはいないので、精度追求も困難なことが多い。さらに、小径工具による硬質の金型材切削では、工具の折損も起きやすいので、その対策も必要である。

新開発！「SuperMill-2 m」機の紹介

以上のような高速ミーリングに対する考えのもとに、理想的な小型高速ミーリング機を目指し、小型高速ミーリング機の開発を行った（次頁図4、仕様は次頁表1参照）。

本機の開発に当たっては、高精度と高能率を追求するため、以下のような、いくつかの新技术を導入している。

(1) 2本の高速主軸により高能率加工

ATCを備えた通常の高周波モータ駆動・ころがり軸受の高速主軸 5万 min^{-1} に加え、ナカニシ製エアータービン駆動・エアベアリングの超高速 12万

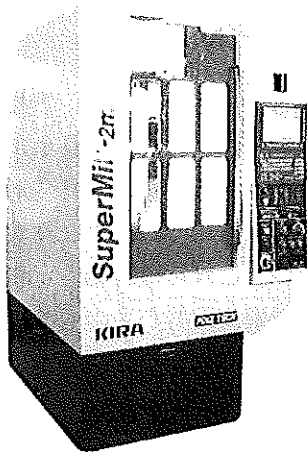


図4 高速ミーリング機
「SuperMill-2 m」の外観

表1 機械の主な仕様

本機	各軸移動量 (X×Y×Z)	270×200×170 (mm)
	最大送り速度	20 (m/min)
	最大送り加速度	0.5 G
	テーブルサイズ	350×250 (mm)
	最大積載重量	40 (kg)
	機械本体寸法	820×1,500×2,150 (mm)
	機械本体重量	2,000 (kg) 以下
主軸	回転速度	3,000~160,000 (min ⁻¹)
	ツーリング形式	5万 min ⁻¹ (HSK 25-E 焼きばめ、 16万 min ⁻¹ (コレット)
	ATC	8本
FANUC NC 装置	同時制御軸数	3軸 (X、Y、Z)
	最小設定単位 (最小移動単位)	0.01 (μm)

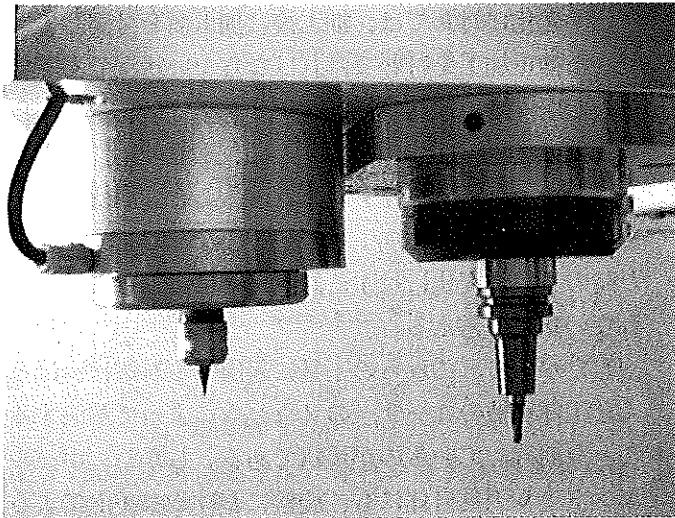


図5
2本の主軸
(左; 12~16万 min⁻¹、右 ATC; 5万 min⁻¹)



図6
リニアモータとLM
ガイド部 (左の駆動
部はAl合金製)

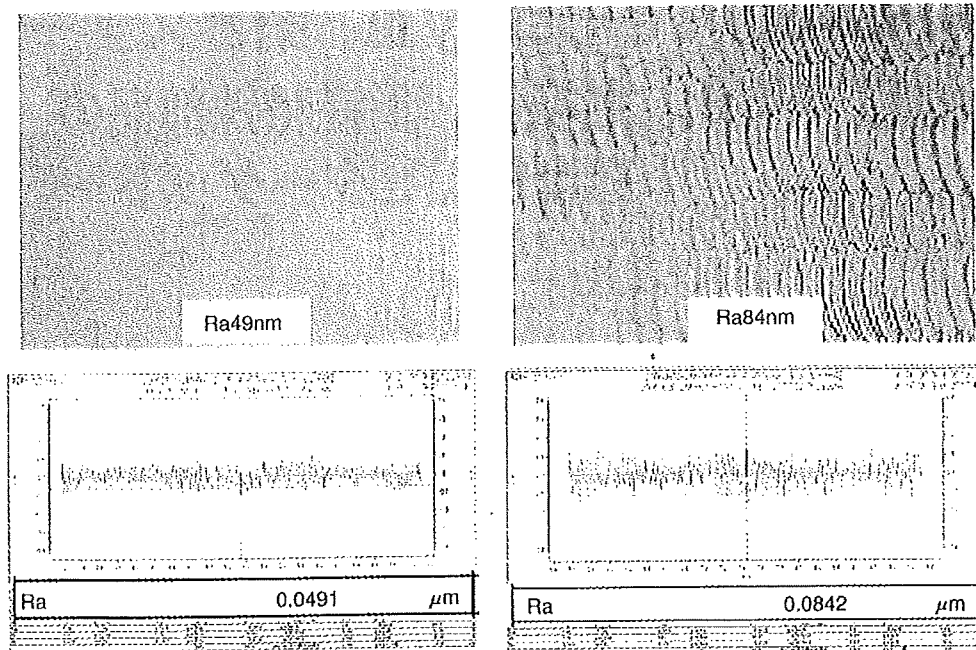
たは 16万 min⁻¹ 主軸をダブルに備えた (図5 参照)。
これにより、φ4 mm までの工具による荒加工から、

φ50 μm の工具による微細仕上げまで、同一機械に
よる高能率なワンチャック加工を可能とした。また、
工具長の正確な把握が可能となり、工具交換での段差
の発生を最小限に抑え、加工時の工具交換と加工時間
の短縮と高精度加工が行うことができる。

(2) 高精度ころがりガイドをリニアモータ駆動し、
高精度制御

THK 製高精度ころがりリニアガイドと FANUC
製リニアモータ駆動を採用した。可動部を Al 合金製
とし、軽量構造採用による高速・高能率送りを実現し
た (図6 参照)。さらに、10 nm 分解能リニアスケール採用と FANUC ナノ補間 CNC を使って高精度駆
動制御を実現した。

この技術は、先に超精密のレンズ金型加工機の開発
で成功したものであり、この方式の採用によって静圧
軸受並みの高精度送りを低価格で実現した。



ナノCAD/CAMの効果
(左：ナノ、右：通常)

図7 ボールエンドミルによる自由曲面の粗さ比較

(3) 小型コンパクトで高いコストパフォーマンス設計

多くの小型部品を成形できる金型として、A4サイズ程度の加工ができる小型高速ミーリング機を目標とした。機械構造の小型・シンプル設計とともに、可動部の軽量化、熱源・振動源の分離により、安定で高精度な効率的な高速ミーリング加工を可能とし、あわせて高機能の割に比較的低価格を実現し、コストパフォーマンスの高い高速ミーリングの提供を目指した。

☆

筆者は、これまでいくつかの高速ミーリング加工機の開発に関与してきたが、本機の開発にはそれらの経験を活かし、現時点では最高性能の高速ミーリングの開発に挑戦したつもりである。

もとより、加工機を使う立場と加工機をつくる立場は大きく異なる。当社は金型加工も行っており、いわばユーザーの視点で開発したものであり、かなり欲張った機能を備えている。

製造を担当した(株)キラコーポレーションだけでなく、多くの構成部品メーカーに無理をお願いし、比較的低価格で販売できる加工機を完成させたものである。すでに自社用の光学素子用金型製作や微細部品の試作、導光板金型などに活用しているが、高精度加工ができるだけでなく、加工時間を短くでき、コストパフォーマンスの優れた加工機であると確信している。

参考文献

- 1) 松岡甫篁、安斎正博：「高速ミーリングの基礎と実際」、日刊工業新聞社 (2006)