

NACHI  
**TECHNICAL  
REPORT**  
Machining

Vol. **11** A1  
October/2006

マシニング事業

工具  
マシナリー

■ 寄稿・論文・報文・解説

「高速ミーリングにおける鋼材の切削諸特性」

The Cutting Characteristics of Mold Steel Under  
The High-speed Milling Condition

〈キーワード〉 高速ミーリング・ボールエンドミル・工具摩耗・  
表面粗さ・リニアモーター

(独) 理化学研究所 中央研究所 先端技術開発支援センター  
アドバンスト・エンジニアリングチーム リーダー

工学博士 安齋 正博 Masahiro Anzai

## 要 旨

工業製品を速く、精度良く、それなりの価格で製作することは、製造業にとって常に要求される場所である。切削加工の高能率化をはかるには、切削面積を大きくして送り速度や切込みを増大する高除去加工がある。

この実現には高剛性や大消費動力を有する大型機が要求されるが、仕上げ寸法に規定があるために、むやみに切込みを大きくできないなど制限がある。

これに比べ切削速度の高速化による高能率化は、この制約が少なく、速く、精度良くしかも安価に工業製品（金型、機械部品など）を得るための有効な手立てとして注目されている<sup>1)</sup>。

## Abstract

Quick, precise manufacturing of industrial products with a reasonable cost is always required for manufacturing companies. A method that removes a large stock is used in order to make milling highly efficient and it requires a larger area for milling, increased feed speed and milling capability.

However, a large, highly-rigid milling machine is necessary to achieve such high efficiency, and it will consume a large amount of electricity. In addition, the milling depth is limited and cannot be increased excessively because of the specified finished dimensions.

In comparison with the aforementioned method, high-speed milling is a highly-efficient, fast, precise and inexpensive method with lesser limitation and is drawing attention as an effective means for milling industrial products such as molds and machine parts.

## 1. 切削加工の高速化による切削環境の変化

高速化によって顕著な変化が見られるのは、切りくず形態の変化と工具摩耗であろう。

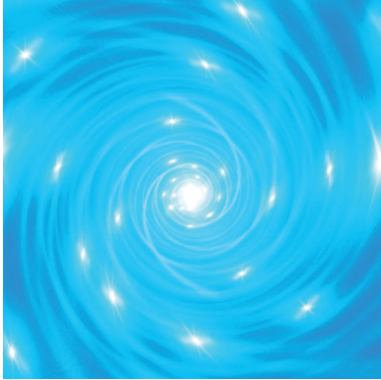
一般的に切削速度が速くなるほど流れ型切りくずが生成され、切削抵抗の変動が少なく、良好な仕上げ面粗さが得られ、良好な加工が実現されるといわれている。

切削速度の高速化に伴い切削温度は上昇し、切削温度と工具摩耗の関係は、実験的に

$$\theta T^{n\theta} = C_{\theta}$$

で表わされる。ここで、 $\theta$ は切削温度、 $T$ は工具寿命、 $n_{\theta}$ 、 $C_{\theta}$ は実験によりあらかじめ求める工具材種などによる定数を表わす<sup>2)</sup>。

切削温度に影響する因子としては、切削条件、被削材種、工具刃先形状、切削油剤などがあり、加工条件の中では、切削速度の影響が最も大きい。したがって、切削速度を上昇させれば温度が上昇し、工具摩耗が促進され、寿命が短くなると一般的にいわれていた。しかし、高速ミーリングでは、高速側で工具摩耗が減少する場合が見出されており、切削速度の上昇＝工具温度の上昇≠工具摩耗の増大の場合もあることが分かってきた。



## 2. 高速ミーリングのメリット

ここでいう高速ミーリングは、浅切り込み、高送りを前提とし、工具にかかる負荷を均一にする断続切削法である。高速に回転したボールエンドミルを用いて、少ない種類の工具で形状加工することによるCAMの軽減も考慮している。高速に回転させて、速く送れば生産性がアップするから当然その方が良いと思われるが、実は高速ミーリング手法を選択する必然性がある。

金型曲面などの形状加工ではボールエンドミルが主に使用され、図1に示すように切削される。すなわち、工具進行方向とこれと直角方向にそれぞれ送り<sup>※1</sup>をかけて切削する。前者は1刃当りの送り、後者をピックフィード(Pf)と呼ぶ。1刃当りの送りは、機械、工具の剛性で決まり、かつチップポケットより大きくできない。これが削り残し形状におよぼす影響はPfほど大きくない。この場合の表面粗さは、近似的に $Pf^2/8R$ で表わされ(Rは工具半径)、工具半径を大きくするかPfを小さくすれば切削後の表面粗さは小さくなる。

できるだけ少ない種類の工具で加工しようとするれば、最終仕上げRの工具を使用して加工することになり、Pfを小さくすることが表面粗さを小さくするための残された手段であることが分かる。切削後の表面粗さはできるだけ小さい方が後工程の軽減になって、さらなるリードタイム短縮が期待できる。しかし、Pfを小さくすればそれだけ加工時間がかかり、それを短縮するためには、工具を速く送らなければならないが、回転数を変えずに送りを速くすると工具への負荷が増大する。これを減少させるのには、回転数を増大させて1刃当りの送りを小さくすれば良い。かくして工具を高速回転させ、送りを速くする高速ミーリングの必然性が生ずる。

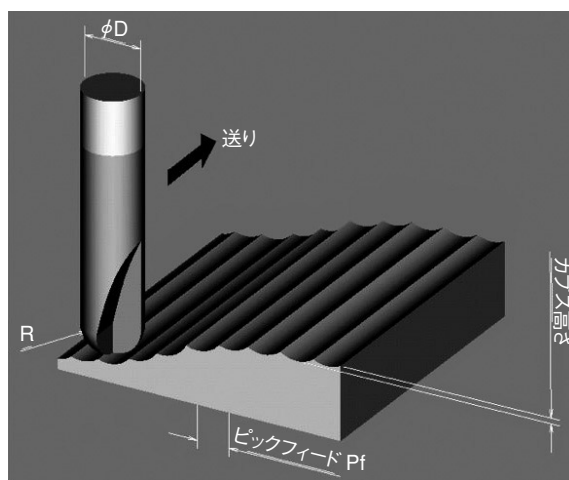


図1 ボールエンドミルによる金型形状加工

### 3. 各種金型用鋼材の超硬ボールエンドミル加工における摩耗特性<sup>3)</sup>

超硬合金製ボールエンドミルで、各種金型用鋼材を一定距離切削した後の、逃げ面最大摩耗幅と実切削速度の関係を図2に示す。同一鋼材種で塗つぶし印は中心刃近傍( $r=0.5\text{mm}$ )、白抜き印は外周( $r=3\text{mm}$ )での工具摩耗を示している。

中心近傍の摩耗は、いずれの鋼材種でも切削速度の増加に伴い減少しているが、外周部での摩耗は切削速度の増加に伴い増大している。ボールエンドミルにおける高速域での摩耗増加は、熱に起因するものであり、低速域での摩耗とは明らかに形態が異なる。低速側では主に圧力凝着に伴う機械的な

因子による摩耗であると考えられる。摩耗形態の相違については後述する。また、断続切削であるボールエンドミル加工では、回転数が低くなると工具・被削材の接触時間が長くなること、切屑の排出性が悪化すること、切削エネルギーの低下など多くの因子が複雑に関与している。

一方、より高速で切削すれば、図3に示すように、低速側での切りくず厚みに比して高速側でのそれは薄くなっており、せん断角が変化しているのが推測される。さらに図4に示すように切削速度の上昇に伴う切削抵抗の減少も見られ、高速での優位性が確認されている。

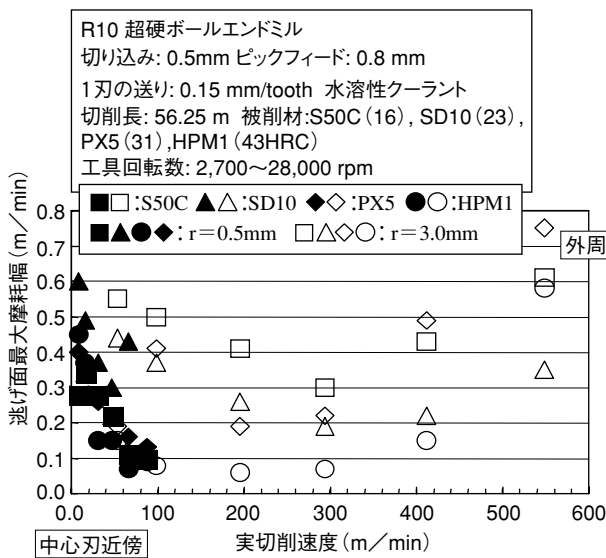


図2 各種金型用鋼材をボールエンドミル加工した際の実切削速度と逃げ面最大摩耗幅の関係

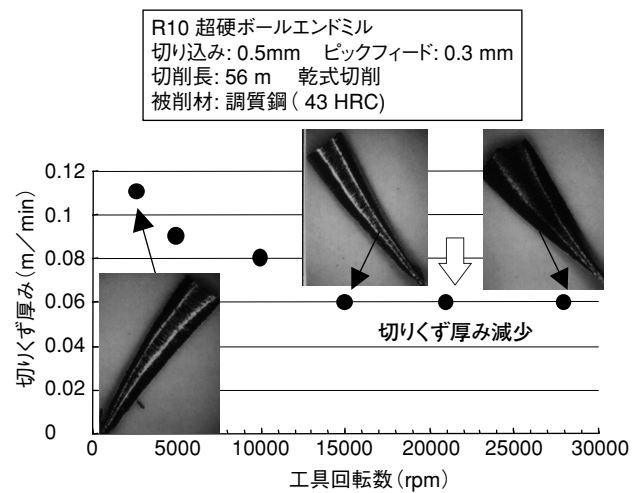


図3 調質鋼をボールエンドミル加工した際の工具回転数と切りくず厚みの関係

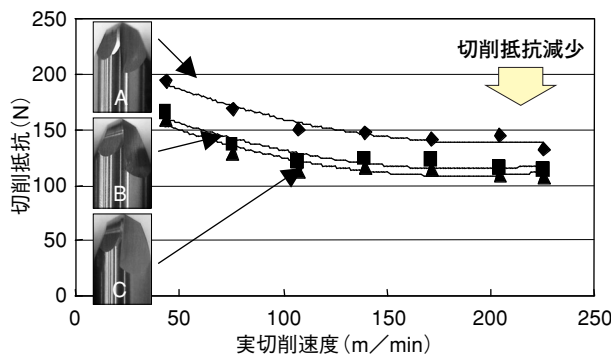


図4 試作した各種ボールエンドミルを使用して加工した際の実切削速度と切削抵抗の関係

工具仕様	Neg/Neg	Neg/Pos	Pos/Pos
	A	B	C
アキシャルレーキ (deg)	-5	-5	5
ラジアルレーキ (deg)	-3	3	3
工具径 $\phi$ (mm)	6	6	6

切り込み: 0.3mm ピックフィード: 0.3mm  
 1刃の送り: 0.05mm/tooth 乾式切削  
 被削材: 調質鋼 (43HRC)  
 工具回転数: 2,700~28,000rpm  
 動力計: Kistler 9256A2

# 4. 高速ミーリングにおける表面粗さ

超合金製ボールエンドミルで、調質鋼を各工具回転数で切削した際の、切削距離と被削材表面粗さの関係を図5に示す。低速側では切削長の増加に伴い表面粗さが増加している。一方、15,000rpm以上の高回転では、切削長に関係なく表面粗さは一定値を示す。この傾向は、前出のいずれの金型鋼材でも同様に観察された。ここでの表面粗さは、切り込みおよびPfの値から工具中心近傍の形状に依存する。

すなわち、低速側では切れ刃中心が、高速側では外周部が摩耗しているため、高速になればなるほど、

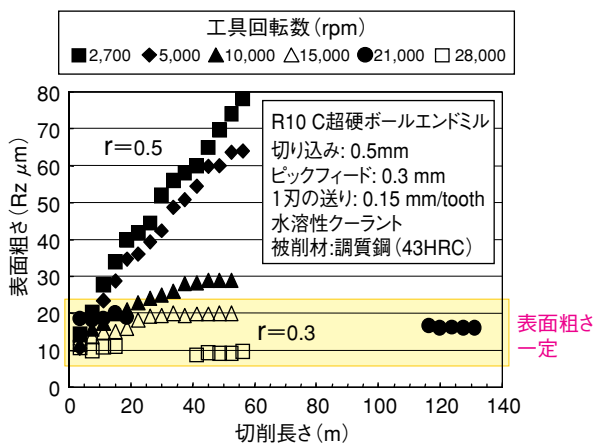


図5 調質鋼を各工具回転数でボールエンドミル加工した際の切削長と表面粗さの関係

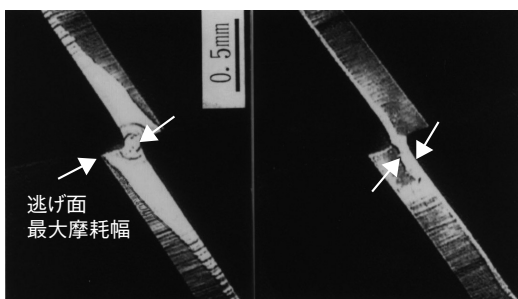
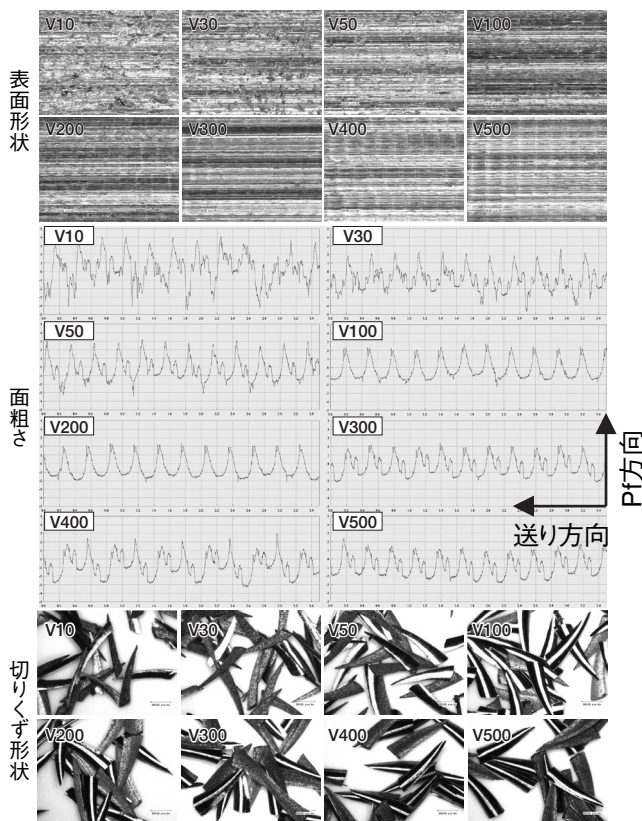


図6 調質金型用鋼材を超硬ボールエンドミルで切削した際の摩耗形態の相違 (左:2700rpm、右:15000rpm)

ど、中心刃近傍は摩耗しないので、高速側で良好な表面粗さが得られる(図6)。より高速で、切削した方が良好な表面粗さになるということは、一刃当りの送りを同一にして加工すると、送り速度をより高速にすることができる。さらに、Pfを小さくしても加工効率を落とすことなく切削でき、後工程の軽減あるいは省略などが可能になることを意味している。

コーテッド超合金製ボールエンドミルで、切削速度を変えて調質鋼を切削した際の、表面性状、表面粗さおよび切りくず形状を図7に示す<sup>4)</sup>。より高速側で表面性状、粗さともに良好になっており、切削速度の上昇に伴い切りくず幅が大きくなり、その結果切りくずが薄くなっているのが確認できる。



基本加工条件	
被削材	プリハードン鋼 HPM1
工具	コーティング超硬 (R3)
刃数	1枚
傾斜角度	30°
切込量	0.3mm
ピックフィード量	0.3mm
1刃の送り	0.15mm
切削速度範囲	10m~500m

図7 各切削速度で切削した際の表面性状、面粗さ、切りくず形状

## 5. 焼入れ鋼のコーテッド超硬、cBNボールエンドミルによる高速ミーリング

45HRC程度までの金型用鋼材の超硬ボールエンドミルによる切削では、高速で切削する方が工具寿命、切削後の表面粗さの点から、良好な結果が得られた。ここでは、より高硬度な焼入れ鋼材のコーテッド超硬ボールエンドミル、cBNボールエンドミルによる切削特性について述べる。

57HRCのSKD11を切削した際の逃げ面摩耗量、被削材加工精度と切削速度の関係をそれぞれ図8、9に示す<sup>5)</sup>。切削速度が約200~500m/minの範囲で摩耗量が少なく、加工精度が良好である。これは工具摩耗形態と大いに関連がある。図10に各切削速度で300m切削した後の工具摩耗状況を示す。低速側では、主に欠けが観察され、凝着物も見られるが、889m/minではサーマルクラックが観察されて熱的に損傷した摩耗形態を示す。その中間では正常摩耗を呈し、この範囲で寿命、精度ともに良好である。これは前述のコーティングなしの場合と同様の傾向を示している。

通常、焼入れ鋼材を用いた金型加工では、放電加工が一般的であるが、電極の切削加工、加工精度、

経済性などを考慮した場合、55HRC程度なら適当な加工条件を選択すれば、コーテッド超硬ボールエンドミルが十分実用的であろう。それ以上の高硬度鋼材の切削加工はcBN工具に頼らざるを得ないのが現状である。

図11は高速ミーリングの実験を継続する発端になった実験結果である<sup>6)</sup>。すなわち、焼入れ鋼材をcBNボールエンドミルで切削した際、周速を上げれば上げるほど工具寿命が延びるという現象である。この現象に少なからず驚愕して、高速ミーリングは従来の加工法と違ったメリットがあるに違いないという確信のもと、多くの実験を遂行してきた。

100%cBNボールエンドミル工具と他のcBNボールエンドミルで焼入れ鋼を切削した際の切削長と最大逃げ面摩耗幅の関係を図12に示す<sup>7)</sup>。

2,500m/minという高速にもかかわらず、<sup>※4</sup>バインドレスcBNはほとんど摩耗していないのが分かる。最適な加工条件を見出すことによって60HRCを越す焼入れ鋼材であっても低コストで直彫りできる可能性の一つがここに存在する。

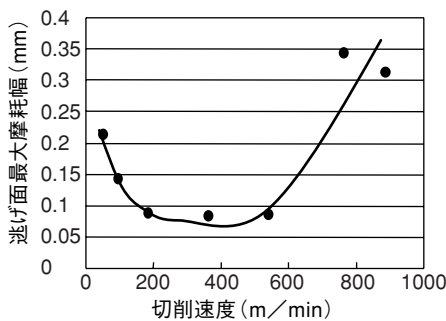


図8 焼入れ鋼材をコーテッド超硬ボールエンドミルで切削した際の切削速度と逃げ面最大摩耗幅の関係

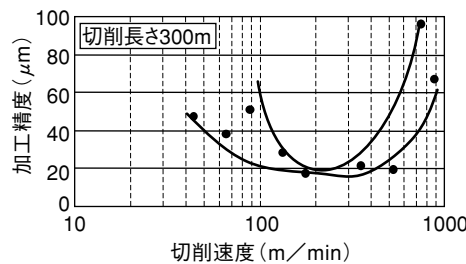


図9 焼入れ鋼材をコーテッド超硬ボールエンドミルで切削した際の切削速度と加工精度の関係

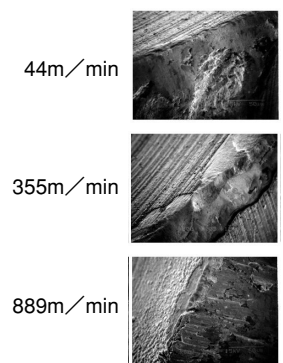


図10 各切削速度で焼入れ鋼材をコーテッド超硬ボールエンドミルで切削した後の工具摩耗形態の相違

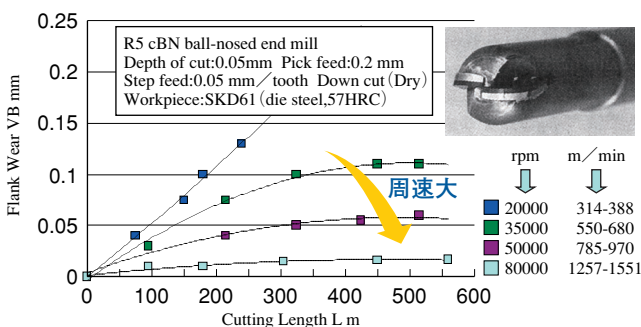


図11 cBNボールエンドミルで焼入れ鋼を切削した際の最大逃げ面摩耗幅と切削距離の関係

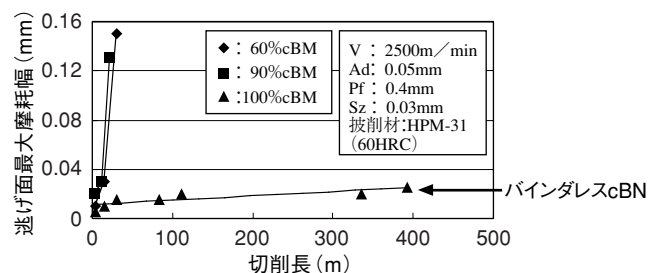


図12 焼入れ鋼を各種cBNボールエンドミルで切削した際の切削長と最大逃げ面摩耗幅の関係

# 6. 高速ミーリングにおけるボールエンドミル工具の摩耗特性

前述した実験結果をまとめるとボールエンドミルの摩耗現象は定性的に図13のようになる<sup>8)</sup>。ボールエンドミル加工では高速側に工具摩耗を減少させる加工条件が存在する。被削材種、工具種、工作機械等に応じて最適な加工条件を探索することは形状加工において重要であり、このような摩耗曲線をいくつか持っているかが高速ミーリングを実現する上で不可欠である。

図14はなぜこのようになるかを説明したものである<sup>9)</sup>。乱暴にまとめると、ボールエンドミルの摩耗は引っかかり摩耗、圧力凝着摩耗、温度凝着摩耗の総和よりなる。

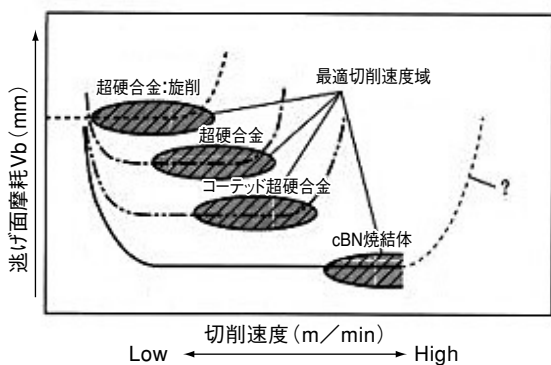


図13 各種ボールエンドミル工具における切削速度と摩耗の関係(概念図)

引っかかり摩耗は材料が軟化するためもう少し右上がりになるだろうか。圧力に起因する摩耗は、切削抵抗と同様に右下がりになる。初期摩耗を考慮するとさらに左上がりになるであろう。

一方、温度による摩耗は古くからいわれてきたように右上がりになる。これらを総和するとU字型の摩耗曲線を示すようになる。

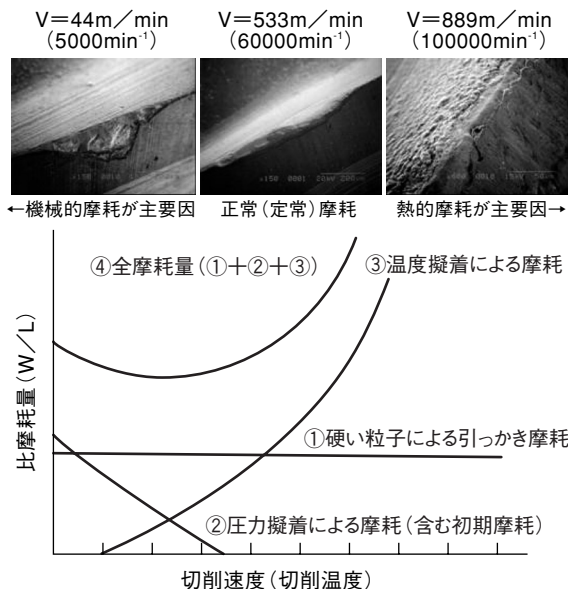


図14 ボールエンドミル工具の基本摩耗機構

# 7. 高速ミーリングの問題点と課題

高速ミーリングのメリットについて上述した。もちろん万能な加工ではないので問題点もある。従来の切削加工での問題点はやはり高速ミーリングでも問題点として残る。重要な問題点の一つにカットパスやCAD/CAMがあり、高速ミーリング用の最適なカットパスはいかにあるべきかについての結論はでていない。ハード的な問題を挙げれば、工作機械、工具、ツーリングなどはどのような仕様が良いか結論づけられているとはいえない。ここでは工作機械の送り速度の問題点について例をあげる。

4種類のマシニングセンタを用いて焼入れ鋼を形状加工(ゲーム機金型モデル)した際の荒加工、仕上げ加工における指定送り速度と実際の加工時間から計算した実送り速度の関係を図15に示す<sup>10)</sup>。指定送り速度が速くても遅くても1刃の送り量を一定に設定しているので、指定送り速度が速い方が高回転であることを意味する。しかし、加工形状や機械の制約により指定送り速度が速くなればなるほど実送り

速度は指令値に追従しなくなる。すなわち、工具は仕事をしないで擦ってばかりいるので摩耗が促進され工具寿命が短くなる。基礎的なデータを取る場合は、直線かつ一定速度で切削する場合はほとんどであるが、実際の形状加工ではむしろ曲面が多くなるため高回転、高送り条件で切削することは難しくなる。たとえニアモーター駆動のマシニングセンターを用いても微細・複雑形状な加工になると高速での方向転換は難しい。

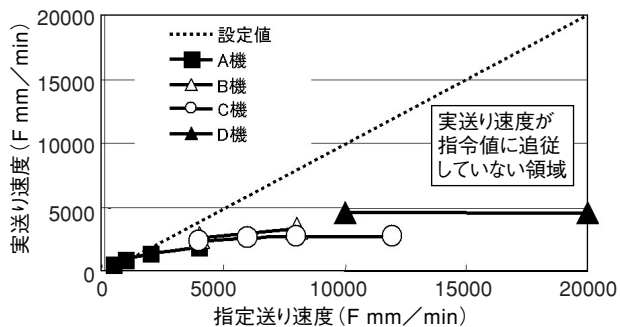


図15 ゲーム機金型モデルを形状加工した際の指定送り量と推定送り量の関係(設定送り速度が増大するほど実送り速度は追従しない)

# 8. 高速ミーリングの将来

## (高速ミーリング加工機の将来)

前述したように工作機械自体に原理的な問題がある以上、どのように対処すればよいのであろうか。周辺の要素技術の開発も重要であろうが、やはりハードの高度化も重要であろう。ここでは、著者らが開発に携わった大型と小型の極端に用途が異なるNC切削加工機を例にその将来像について触れる。

最近開発された大型工作機械(4.5×3×1.7m)と小型工作機械(0.5×0.5×1.6m)の外観を図16に示す<sup>11)12)</sup>。いずれの機械も駆動系はリニアモーターを採用している。大型機の特徴は4スピンドル・各5軸で加工時間の短縮、多種類の加工、省スペース(機械の方が軽量の場合は、ワーク側へ機械を移動することも想定)、大型機にもかかわらず高速ミーリングの概念( $\phi 10$ で40,000rpm)がそのまま適用できる。一方小型機は3軸とも2個のリニアモーターを搭載しており、それぞれが相対運動(加速度制御)することにより振動を抑制し、 $\phi 0.1\text{mm}$ 以下の工具を対象としているために約毎分20万回転のエアタービンスピンドルを搭載して最適な加工条件に適用できるよう工夫している。このような加工機も将来の金型加工に対してスタンダードになってゆくのではないだろうか?

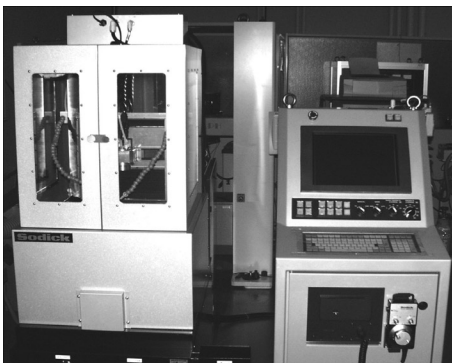


図16 リニアモーター駆動移動型マルチヘッド多軸大型金型加工機(キタムラ機械(株):上)と小型超高速ミーリング機(理化学研究所,(株)ソデック:下)

## (究極のミーリング加工)

種々の問題点が解決され、各要素技術がさらに高度化すればさらなる高精度で迅速な加工が実現できる。しかしながら、新たな工具や被削材が開発されれば、やはり削ってみなければ、詳細な摩耗状況などは判断できない。これらがシミュレーションによっておおよそ判定でき、削る前に加工条件の最適化ができれば、それは究極のミーリングになる。コンピュータの発達を考えればそれほど無理な話でもなく、切削のデータベースが併せて構築されればこれらのことは近い将来可能になるだろう。

### 用語解説

#### ※1 ピックフィード

ボールエンドミルで底面を加工するときに切削送り方向に対し90°方向へ横送りをします。このときボールエンドミルでは先端が半球(R)のためフラット面にはならず、R面となります。このときのピッチ(横送り量)がピックフィードです。

#### ※2 圧力凝着

切削速度が遅い場合高速切削に比し、切削抵抗が増大します。また切りくず厚も高速切削に比し厚くなります。そのため低速切削では、すくい面の磨耗形態は、厚みの厚い切りくずがすくい面に圧縮しながら接触します。その結果すくい面上に切りくずの凝着が発生します。これが圧力凝着です。この圧力凝着が進行すると欠けの原因となります。

#### ※3 サーマルクラック

熱亀裂とも呼ばれています。切削熱による膨張と収縮すなわち急激な昇温と冷却の繰り返しの場合に発生します。工具材種の場合高硬度材(例えばサーメット、セラミックス等)で発生します。加工方法では切削熱の急激な変化が生じやすい加工、すなわちミーリング加工や断続のターニング加工での高速ウェット加工です。このような高速加工の場合はエアブローのみでの加工が良い場合もあります。

#### ※4 バインダレスcBN

cBNは立方晶窒化ホウ素(Cubic Boron Nitride)の略でダイヤモンドに次ぐ硬度と熱伝導率を兼ね備えた材質です。cBNは自然界には存在せず、超高温高压下で人工的に合成されます。このときにcBNの粉末はバインダーと呼ばれる結合材を介して焼結され合金となっています。このバインダー量が多いと(cBN量が少ないと)欠けにくいと摩耗は進行しやすくなります。一方バインダー量が少ないと(cBN量が多いと)欠けやすくなりますが、耐摩耗性は大幅に向上します。しかし最近のcBNはcBN粒子を微粒化することによりバインダレス化をはかりcBN単層での靱性(欠けにくさ)と耐摩耗性を両立させたバインダレスcBN焼結体が開発されています。これがバインダレスcBNです。

### 参考文献

- 1) 精密加工実用便覧、187、日刊工業新聞社(2000)
- 2) 吉田嘉太郎:時末 光編ものづくり機械工学、日刊工業新聞(2003)、98
- 3) 安斎正博:機械の研究、55、6(2003)、23
- 4) 安斎正博:「金型設計・製作技術」の最新動向を見る、でか版技能ブックス⑩大河出版(2005)、99
- 5) 第64回切削油技術研究会総会資料「精度を維持・向上する現場の工夫」(2002)、106-107
- 6) 池田直弘・高橋一郎・松岡甫篁・中川威雄:型技術5、8(1991)、92
- 7) 安斎正博・高橋一郎:cBNボールエンドミルによる焼入れ鋼の高速ミーリング、砥粒加工学会誌、47、1(2003)、18
- 8) 松岡甫篁・安斎正博・高橋一郎:はじめての切削加工、工業調査会(2003)、154
- 9) M. C. Shaw: Metal Cutting Principles, MIT (1960)、11-17 に加筆
- 10) 第65回切削油技術研究会総会資料「高効率加工の新たな展開」、切削油技術研究会(2003)、129
- 11) 北村彰浩・高橋一郎・安斎正博・竹内芳美:移動型マルチヘッド多軸加工機の開発(開発コンセプトと評価)、機械学会誌、72、716、C編(2006)、364
- 12) 安斎正博・高橋一郎:微細形状加工用高速ミーリング機とその切削特性、機械技術、53、10(2005)、24