10 万回転超高速ミーリングにおける超硬小径ボール

エンドミルの摩耗特性*

高橋 一郎** 安斎 正博** 中川 威雄**

Tool Wear Characteristics of Small Diameter Ball End Mill on Ultra High Speed Milling at 100000min⁻¹ Rotation Speed

Ichiro TAKAHASHI, Masahiro ANZAI and Takeo NAKAGAWA

Experiments were conducted to investigate the tool wear of small diameter coated cemented carbide ball end mills using an ultra high speed milling machine with a maximum speed of 120000 min⁻¹ and feed speed of 100 m/min. The results showed that the tool life is suitable for actual use and indicated that the flank wear at the external circumference of the tool, where speed is maximum, determines the tool life. As the tool wear of this area conforms to Taylor's law, the cutting power required increases as wear progresses. Although the finished surface also deteriorates, the degree is slight. Experiments were also performed on wear reduction by changing conditions. The results showed that the feed rate and real cutting speed contribute considerably to wear, and serve as a criteria for selecting the optimum cutting conditions.

Key words: ultra high speed milling, tool wear, coated carbide ball end mill, die steel

1. 緒 論

生産加工技術に常に求められる基本的な課題は加工能率の向上、加工精度の改善、加工コストの低減である。これらの課題を解決するものとして、切削加工分野では鋼材の高速ミーリングへの期待が高まっている。金型の直彫り加工に代表されるような複雑かつ高精度な3次元形状創成のためのボールエンドミル加工は、これまで非効率的と言わざるを得なかったが、特にこの分野において、最近の切削工具、加工機械をはじめ CAD/CAM や周辺技術の進歩によって急速に高速切削化が図られている。筆者らは、この動向とこれまでに遂行してきた高速切削に関する研究結果¹⁾²⁾を踏まえて、現状において適用可能な最高仕様の要素技術を組み合わせるとともに、新たな発想を取り入れた超高速ミーリング機 (High Speed Cutting Advanced RIKEN Technology:以下 HICART と略記)を開発し、あわせて往復カットパスを基本とする高速ミーリング法を提案している³⁾。HICART は、その仕様詳細を後述するが、現在生産加工現場において導入されつつある市販の高速対応機に比して数倍程度の高い工具回転数と切削送り速度を実現している。当然ながら、本機で実現可能となる超高速切削条件でのボールエンドミル加工に関する実験結果はこれまでにほとんど存在せず、その加工特性については不明な点も多い。そこで本研究では、小径コーテッド超硬ボールエンドミルによる金型用鋼材の超高速ミーリングにおける各種切削条件が、工具摩耗に及ぼす影響を調査する切削実験を遂行し、金型用鋼材の超高速ミーリング特性を明らかにし、これにより高速ミーリングにおける最適な切削条件選定のための指針を得ることを目的とした。

2. 実験装置の仕様と実験方法

切削実験に使用した HICART の仕様を表 1 に示す。スピンドル最大実用回転数は 12 万 min⁻¹、最大切削送り速度は 100m/min である。なお、この最大送り速度は、1 方向における送り駆動系を 2 軸構成とし、かつ互いに反対方向に駆動することによる加算された相対速度によって実現している。

本実験で使用する工具材種はコーテッド超硬であり、一般にその適用切削速度は数百 m/min が限界と言われている⁴⁾。しかし、ボールエンドミル工具の切削速度 V は、切れ刃の位置や加工条件によって変化する。ある切れ刃位置での実切削速度は、その点の回転半径を r (mm)、回転数を N (min⁻¹) とすると、その関係は図 1 のようになる。回転数 10 万 min⁻¹ では $r=1.0$ mm となる加工条件の選定で、実切削速度は 628m/min に達し、小径工具を用いた場合でも十分な高切削速度となる。

Table 1 Specifications of ultra high speed milling machine (HICART)

Machine type	Vertical milling machine (without ATC), 3-direction, 4-axis traverse, (X:saddle, U:table, Y:table, Z:ram)
Movements	Ball screws and linear ball bearing slide ways Diameter of screws: X, U, Y=25mm, Z=32mm Lead of screws: X=20mm, U=16mm, Y, Z=12mm
Travel	X:600, U:300, Y:600, Z:300mm
Feed speed	X:60, U:40, Y:36, Z:36m/min
Acceleration	X:1.0, U:1.0G
Accuracy	Position: ± 0.006 mm, Repeatability: ± 0.003 mm
Spindle	Air bearing + build-in motor (660W) Air pressure: 0.9MPa, Air volume: 298NL/min Stiffness: 22(radial), 27(axial)N/ μ m
NC	FANUC series 15-module B (with RISC, multi-buffer 60 blocks and data server)
Tool holder	Shrinkage fit (tool and holder): $\phi 20 \times 33$ mm (straight shank, cramped to spindle by 4 screws)

* 原稿受付 平成 10 年 10 月 22 日

** 正 会 員 理化学研究所 研究基盤技術部 (和光市広沢 2-1)

また、結果の安定化と考察の容易さを考慮して、図2に示すようにダウン加工のみで一方送りによる平面切削に限定して切削実験を行った。加工のストロークは送り速度が一定となるように十分長くとっている。表2に主な切削条件を示す。なお、切削条件の影響に関する実験では括弧中の範囲内で変化させた。使用した工具と被加工材種の仕様および測定に用いた機器仕様を表3に示す。使用した工具は市販品であり、購入ロットにより実験結果にばらつきが生じたため、目的が異なる各実験ごとに同一ロット品を用いた。被加工材として金型用プリハードン鋼（HRC43）を用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 高速ミーリング特性と工具寿命の判定

$R=1.0\text{mm}$ の工具を用いて先に示した切削条件で加工実験を行い、工具摩耗、切りくず形状、切削面粗さの変化を、一定切削距離間隔で随時加工を中断して測定した。また、加工中のスピンドルモータの消費電力を測定して正味切削動力を求めた。工具摩耗はSEMを用い、また切りくず形状はCCDカメラを用いて観察した。さらに切削面粗さの測定も行った。

Fig. 1 Relationship between radius of cutting point, rotational speed and real cutting speed

Fig. 2 Illustration of tool path for experiments

Table 2 Cutting conditions

Rotational speed	N	100000min^{-1} (28000–115000)
Depth of cut (axial)	Ad	0.3mm (0.18–0.5)
Pick feed	Pf	0.3mm (0.15–0.45)
Feed rate	Sz	0.10mm/tooth (0.002–0.20)

Down-cut, Dry-cutting

Table 3 Specifications of tool and workpiece

Tool	Ball end mill, Ti(Al)N-coating WC Shank dia.: 4mm, 2-tooth $R1.0 \times 8\text{mm}$ ($R0.5 \times 1.5$, $R0.75 \times 12.5$) Setting length from holder: 14mm
Work piece	Pre-hardened steel (for plastic injection mold) HRC43, size $150 \times 130 \times \text{mm}$
Measuring instruments	CCD microscope: HI-SCOPE (HIROX) SEM: JSM-T220 (JEOL) Surface roughness: SEF-30D (Kosaka)

3.1.1 切削特性の変化

$N=100000\text{min}^{-1}$, $F=20\text{m/min}$ の高速切削条件にて長時間加工が可能であったが、その際の工具摩耗は図3(a)に示すように逃げ面側のみに進行しており、すくい面側には認められない。また、加工初期の切れ刃の一部に小さな欠けの発生がみられるものの、漸進的な擦り摩耗が主体であり、正常な摩耗形態を示していることが分かる。さらに、この逃げ面摩耗は工具中心近傍では少なく、外周に向かって増大している。この現象については後項でも考察するが、切削速度は切削を行う切れ刃の最外周部で最大値 448m/min に達し（図1参照）、この高い速度で被削材を切削するため、その時に発生する摩擦熱の上昇もあって逃げ面摩耗が促進されるものと考えられる。切りくず形状は、加工開始時の規則正しい針状の扇形が、切削距離の増加に伴い徐々に不規則な形状に変化しており（図3(b)）、またその色も変化している（黄褐色→褐色→青→薄青）。これは工具摩耗の進行によって切削性が悪化し、切りくずの創生機構や切りくず温度（切削温度）が変化したためと推察される。

切削面粗さも加工の進行に伴い、図3(c)に示すようにピックフィード、ステップフィードの両方向とも大きくなってお

(a) Tool wear 0.1mm

(b) Cutting chips 0.5mm

(c) Surface roughness

Fig. 3 Changes of tool wear, cutting chips and finished surface roughness

り、特にピックフィード方向での悪化が顕著となっている。しかし、本実験条件では平面加工であるため、工具中心付近の工具摩耗が切削面粗さに影響するため、前述の逃げ面摩耗幅の進行ほどには面粗さは悪化していない。これらの変化は、工具逃げ面側の外周で摩耗が生じ、それに伴って切削状態が変化したものと考えられる。

3.1.2 工具寿命の判定

工具寿命の定義は、実際作業では工具の摩耗によって切削を続行するのが困難となるまでの切削時間であろうが、一般的には工具摩耗量、切削状態、加工精度などから判断されている。工具を再研削して使用する場合には、再研削に適した工具摩耗量が工具寿命の判定基準となるが、高速ミーリングでは使用する工具が小径なために工具再研削のメリットは少ない。したがって高速ミーリングでの工具の使用方法是、切削そのものが不可能となるような工具の使用限界まで使い切ると考えられる。切削の最終目的が被削材の除去による形状の創成であることを考慮すると、高速ミーリングでは表面粗さや寸法の許容精度を維持できる限界が工具寿命となる。

前項の結果より、工具摩耗量として最大逃げ面摩耗幅 V_{gmax} 、切削面粗さはピックフィード方向の十点平均粗さ Rz をとり、切削距離との関係を正味切削動力 Ne も付け加えて図4に示す（図中の N_0 は無負荷時消費電力、 R_{th} は理論粗さ）。最大逃げ面摩耗幅は、その増大に伴い被削材との摩擦面積が増加するため、切削距離と共に加速される傾向を示している。一方、切削トルクを測定することになるスピンドルモータの消費電力から求めた正味切削動力と、工具中心付近の切れ刃により最終的に創成される切削面粗さは、最大逃げ面摩耗幅の増大ほどには変化が少なく、飽和傾向を示している。特に製品精度に直結する面粗さが安定していることは実用面で有効である。しかし、これら切削動力と面粗さの増大は逃げ面摩耗の増大に起因していると推測されるため、工具寿命自体は逃げ面側の摩耗によって決定付けられることになる。また、逃げ面摩耗の増大によりボールエンドミル工具の形状が崩れると加工精度が悪化するため、極端に大きくなった逃げ面摩耗は許されない。以上の考察により以下の実験で

Fig. 4 Relationship between Ne , Rz , V_g and cutting length L

は、最大逃げ面摩耗幅が $0.1mm$ に達するまでの加工時間を工具寿命とした。

3.1.3 ボールエンドミル工具の摩耗の解析

前述の実験結果により示されたように、高速ミーリングにおける工具摩耗は逃げ面側の切込みに対応する最外周部付近で最大となる。これは切削速度の影響が大きいので、さらに外周部ほど実切込み、切削弧長さも大きく、切削量も大きいことも要因と考えられる。これは図5左に示したように、半球を一刃送り分ずつ移動したときの差から求めた切りくず形状の単純化モデルからも直観的に理解できる。実際には回転と送りによって連続的に移動する切れ刃の1点の軌跡は、同図右に示すようにトロコイド曲線となり、回転半径 r 位置の切削弧の長さ lc と最大切り厚 h はそれぞれ式(1)、(2)で表される⁵⁾。

$$lc = r \cdot \cos^{-1} \left(1 - \frac{Pf}{r} \right) - \frac{Sz \cdot Z}{2\pi r} \sqrt{2r \cdot Pf - Pf^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$h = r - \sqrt{r^2 + Sz^2 - 2Sz \sqrt{2r \cdot Pf - Pf^2}} \dots \dots \dots (2)$$

$$r = \sqrt{2R \cdot a - a^2}$$

同式からも r が大きいほど、つまり外周の切れ刃点ほど lc と h の値は大きくなり、切削量も大きいことが分かる。また、逃げ面摩耗は被削材との接触により生じるが、摩耗は摩擦距離に比例する。ボールエンドミル加工においては、切削弧長さの累積が摩擦距離に相当するので、通常用いられる工具の移動距離をとった切削距離 L ではなく、累積切削弧長さをを用いて摩耗変化を評価することが必要となる。したがって、本実験では最大逃げ面摩耗幅を評価の対象とするため、切込みに相当する切れ刃最外周点における切削弧の累積長さを真実切削距離 L_c として用い検討する。

3.2 各種切削条件が工具逃げ面摩耗に及ぼす影響

3.2.1 工具回転数と工具寿命の関係

$R=1.0mm$ の工具を用い軸方向切込み量 Ad 、ピックフィード量 Pf 、一刃送り量 Sz を一定の条件で、工具回転数を変化させたときの最大逃げ面摩耗幅 V_{gmax} を測定して、工具摩耗曲線を求めた。回転数はスピンドルの共振域を避けて $N=46200, 72500, 85800, 100000, 115000$ とした。また、HICART では低速回転域の切削が困難なため、他の高速マシニングセンタを使用した $N=28,000$ の条件での実験結果も付け加えた。工具摩耗曲線から工具寿命 T ($V_{gmax}=0.1mm$) および工具寿命に達するまでの除去体積 V_c を算出し、工具回転数 N および最大実切削速度 V_{max} との関係を求めた。その結果、図6に示すように、工具回転数が高いほど工具外周部で最大となる実切削速度も高く、工具寿命は短くなった。

Fig. 5 Illustration for analysis of ball end milling

各切削速度における工具寿命は対数グラフ上でほぼ直線上にあり、その傾きと切片から Taylor の工具寿命方程式として、およそ $V \cdot T^{0.34} = 800$ と求められる。この指数および定数の値は旋削実験等から既に求められている鋼材における実験値⁶⁾と大差ない。このことから、 100000 min^{-1} を超える高速ミーリングにおける小径ボールエンドミルの工具寿命と切削速度の関係においても従来則が成立することが分かった。

3.2.2 半径方向切込み量が工具摩耗に及ぼす影響

工具回転数、軸方向切込みを一定とし半径方向切込み量が工具逃げ面摩耗に及ぼす影響を調べた。まず、一刃送り量 S_z をパラメータにとった摩耗曲線を図 7 に示す。横軸に通常用いる切削距離 L (工具の累積移動距離) をとると、 S_z が大きいほうが摩耗の進行は緩やかであり、 S_z が極端に小さくなる条件ではわずかな切削距離において摩耗量が大きくなる事が分かる。同一摩耗幅に達するまでで比較すれば、 S_z が大きいほうが切削距離 L は長く、除去体積 ($L \times Ad \times Pf$) も大きくなる。また、除去能率は送り速度 F ($= S_z \times N$) と軸方向切込み量 Ad 、ピックフィード量 Pf の積で求まることから、 S_z を大きくとるほど当然高効率化が図れる。ただし、 S_z の最大値は工具形状や切削抵抗に耐える工具剛性によって制限される。本実験で用いた工具では、すくい面のチップポケット形状から 0.25 mm が限界であった。

さらに、図 7 の横軸を前述の真実切削距離 L_c に変換した結果を図 8 に示す。図から S_z の変化にかかわらずほぼ同一直線に重なり合うことが分かり、最大逃げ面摩耗幅は切れ刃の累積切削弧長さである真実切削距離 L_c に依存し、一刃送り量には影響されない。つまり、1 回の切削量には関係しないことが判明した。

次にピックフィード量が摩耗に及ぼす影響として、 Pf をパラメータとした真実切削距離と最大逃げ面摩耗幅の関係を図 9 に示す。 Pf の大きさにかかわらず摩耗幅は一定値を示し、 S_z と同様に逃げ面摩耗は真実切削距離によって決まり、 Pf にも影響されないことが判明した。

よって、高効率な高速ミーリングの実現のためには、工具チップポケット部の形状や切削力に耐え得る工具剛性などの工具仕様から決まる制限内で、大きな半径方向切込みの切削条件設定が望ましいと言える。

3.2.3 軸方向切込み量が工具摩耗に及ぼす影響

図 10 に軸方向切込み量が工具摩耗に及ぼす影響について、軸方向切込み量 Ad とピックフィード量 Pf の積が一定となる図中の 3 条件における真実切削距離と最大逃げ面摩耗幅の関係を示す。 Ad が大きいほど摩耗の進行は速いことが分かる。

Fig. 6 Relationship between N (V_c) and T

Fig. 7 Relationship between flank wear width and cutting length for changed feed rate S_z

Fig. 8 Relationship between flank wear width and real cutting length for changed feed rate S_z

Fig. 9 Relationship between flank wear width and real cutting length for changed pick feed Pf

Fig. 10 Relationship between flank wear width and real cutting length for changed depth of cut Ad

本実験では Pf も変化させているが、前述の結果より Pf の影響は少ないこと、 $Ad \times Pf$ 一定より除去能率は一定であること、 Ad が大きいほど図中に示すように最大実切削速度 V_{max} が大きくなることを考慮すると、 Ad の増大に伴い切削速度が高くなり V_{gmax} が大きくなるものと考えられる。この考え方は Ad が大きく Pf が小さいとき V_{gmax} が 0.1mm を超えてから急速に摩耗が進行していることから支持されよう。以上から、同一除去能率でありながら低摩耗となる高速ミーリングの実現には、浅切込みでピックフィードを大きくとることが望ましいと言える。

3.2.4 工具半径が工具摩耗に及ぼす影響

工具半径 R の異なる 3 種のボールエンドミル ($R=0.5, 0.75, 1.0\text{mm}$) を用いたときの真実切削距離と最大逃げ面摩耗幅の関係を図 11 に示す。各工具は工具半径の違いによって、刃長などの工具仕様も異なる (表 3 参照)。また、切削条件も工具半径が小さい場合にその剛性が弱く切削抵抗によって折損を招く恐れがあるため、工具径に比例して Pf 量を小さくした。よって、 N, Sz, Ad は同一条件であるが、除去能率は工具径が小さいほど低い。図より前項までに用いた $R=1.0\text{mm}$ に対し、より小径である $R=0.5, 0.75\text{mm}$ の工具で最大逃げ面摩耗幅が少ないことが分かる。これは小径工具ほど最大実切削速度が低いためである。よって、工具の折損などを招かずに、かつ必要な除去能率が達成できる範囲内で小径な工具を選定することが工具摩耗の点からは望ましい。

3.2.5 各種切削条件が最大逃げ面摩耗量に及ぼす影響

前述のように、各種切削条件が高速ミーリングにおいて主たる工具摩耗である最大逃げ面摩耗幅に及ぼす影響について実験的に明らかとした。この結果をまとめて整理するために、 N, Sz, Pf, Ad, R の各切削条件の本実験で平均的に用いた値 (図中添字 ₀ で表示) との比を横軸にとって、単位時間当たりの除去体積 (除去能率) V_c 、最大実切削速度 V_{max} 、単位時間当たりの真実切削距離 L_c との関係を求め図 12 に示す。 R 以外の切削条件は V_c と比例関係にあるが、 V_{max}, L_c との関係はそれぞれの切削条件で異なることが分かる。本実験結果から最大逃げ面摩耗幅は V_{max} 、 L_c に依存することから、両者の増加を伴わない Sz を大きくすることにより、摩耗増加を抑え能率向上を図れることが分かる。一方、 N の変化が最も摩耗に影響することが分かる。

4. 結 論

コーテッド超硬製の小径ボールエンドミルを用いた金型用鋼材の超高速ミーリング実験を遂行し、工具摩耗の特性と各種切削条件が工具摩耗に及ぼす影響について調べた。以下に本実験の範囲内で得られた結果をまとめる。

- (1) 工具回転数 $10 \text{ 万 } \text{min}^{-1}$ の高速切削条件で十分実用的な鋼材加工が可能である。
- (2) 高速ミーリングにおける工具摩耗は、工具外周切れ刃部の逃げ面摩耗が大きい。
- (3) 平面加工における切削面粗さを決定する工具中心付の

工具摩耗は少なく、 V_{gmax} の進行ほどには面粗さの悪化は無く、安定した面粗さが得られる。

- (4) 最大逃げ面摩耗幅 V_{gmax} は、加工進行に伴い増大し、被削性と精度を悪化させるため、 V_{gmax} が工具寿命を決定する。
- (5) 最大実切削速度と工具寿命の関係から求めた $V-T$ 曲線はおおよそ $V \cdot T^{0.34} = 800$ で表される。切削速度の高速化によって加工能率は向上するが、工具寿命は短くなる。
- (6) 最大逃げ面摩耗幅は、切れ刃の最外周点の接触弧長さから求めた累積実切削距離に依存し、一刃送り量 Sz 、ピックフィード量 Pf には関係しない。
- (7) 軸方向切込み量と工具半径は実切削速度に関係し、工具摩耗に影響する。

以上、高速ミーリングのための各種切削条件選定の基本的な指針を明らかとした。本速度領域での高速ミーリングの活用には、さらに広範囲な切削条件下での実験と解析によるデータベースの構築が重要と思われる。

Fig. 11 Relationship between flank wear width and real cutting length for changed radius of tool R

Fig. 12 Relationship between V_c, V_{max}, L_c and cutting conditions

謝 辞

本研究を遂行するにあたり多大な便宜を賜ったキタムラ機械(株)、東芝機械(株)、ファナック(株)、日立ツール(株)、MST コーポレーション(株)、NTT データ通信(株)、(株)セイロジャパン、(株)インクスの関係各位、および実験の解析に協力頂いた電気通信大学 石塚伸護君に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 高橋一郎ほか：cBN 工具による鋳鉄の高速フライス加工，1995 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1997) 867.
- 2) 高橋一郎ほか：超硬ボールエンドミルによる高速ミーリング，1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1997) 58.
- 3) 高橋一郎ほか：超高速ミーリング機 (HICART) の開発，1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1997) 51.
- 4) 例えば，日立ツール(株)カタログ，'95-96 版，(1995).
- 5) フライス加工ハンドブック，切削油技術研究会，(1988) 12.
- 6) 例えば，藤村善雄：実用切削加工法 第 2 版，(1995) 76.