

# 高硬度金型材のエンドミル加工 (第1報)

## 一切削抵抗の解析

大塚裕俊・中川平三郎\*・廣垣俊樹\*・垣野義昭\*\*・佐々木将志\*\*・喜田義宏\*\*\*  
機械電子部・\*滋賀県立大学工学部・\*\*京都大学工学部・\*\*\*大阪工業大学

Endmilling of Hardened Die(1st Report)  
-Analysis of Cutting Forces in Endmilling with Coated Carbide Tools-

Hirotoshi OHTSUKA・H. NAKAGAWA\*・T. HIROGAKI\*・Y. KAKINO\*\*・M. SASAKI\*\*・Y. KITA\*\*\*  
Mechanics & Electronics Division・\*The University of Shiga Prefecture・\*\*Kyoto University・\*\*\*Osaka Institute of Technology

### 要旨

近年、金型加工の高能率化のため、様々な加工技術のデータベース化が必要となっている。またエンドミル加工における切削抵抗を解析することにより、工具負荷や加工精度、工具摩耗の予測が可能になると考えられる。そこで本稿では金型加工に不可欠である高硬度材のエンドミル切削について、切削抵抗予測モデルによりシミュレーションを行い実測値との比較を行った。またこの予測値を用いて被加工面の形状精度予測を行い同様の評価を行った。

### 1. 緒言

現在一般に用いられている金型加工用 CAD/CAM システムでは、3次元 CAD データから加工用 CAM データ、即ち CL データを生成する際、熟練作業者がその都度加工条件を与えてやらねばならない。したがって熟練者以外の作業でも加工条件の自動設定が可能な CAD/CAM システムの開発が望まれる。近年、金型加工には高硬度材のエンドミル切削が不可欠であり、以下のような点を考慮した加工技術データベース化が必要となる。

- (1) 急激に変化する曲面の加工などの場合、工具にかかる負荷を制御できるようにする。
- (2) 工具のたわみにより発生する被加工面の形状寸法・加工誤差を、目標精度以下にする。

そこで本稿では高硬度材の切削に適したエンドミルについて、まず切削抵抗の予測を行い実測値との比較を行った。さらにこの値を用いてエンドミル側面切削における被加工面の形状精度の予測を行い、実測値との比較を行った。

### 2. 実験装置

エンドミルによる高硬度材の側面切削実験を、直径 10mm、ねじれ角 45°、6 枚刃の(Ti, Al)N コーティング超硬エンドミルを用いて、縦形 MC で行った。また切削抵抗は 3 次元動力計を用いて測定した。切削加工後、被加工面の形状精度測定を行った。

切削条件は Table 1 に示す条件にて実験を行った。特に今回は軸方向切込量の変化が切削抵抗及び加工誤差に及ぼす影響を調べるため、軸方向切込量 4.4, 8, 10mm のそれぞれについて実験及び考察を行った。

### 3. 切削抵抗及び形状精度予測モデル

#### 3.1 切削抵抗予測モデル

エンドミル加工における切削抵抗予測については、多

くのモデルが提案されている<sup>1)</sup>。本稿では、エンドミル切れ刃のすくい面上で形成される切り屑とすくい面との幾何的な定式化に基づいた力学的モデルを用いて切削抵抗の解析を行った。ここで得られた値を用いて、次節以下での形状精度予測を行う。

#### 3.2 形状精度予測モデル

エンドミル加工における形状精度については、その加工誤差の生成機構の研究<sup>2)</sup>を始め多くの研究が行われている<sup>3)</sup>。また被加工面の形状は、エンドミルとワークの相対運動により決定される。そこで本稿ではエンドミルを弾性体の片持ち梁としてモデル化し、切削抵抗によるエンドミル切れ刃の径方向の変位が、そのまま被加工面の加工誤差として転写されると仮定し、形状精度予測を行った。

#### 3.3 工具剛性

前節において、径方向変位はエンドミルを片持ち梁と見なすことにより求められる。しかし実際には工具だけでなく、工具ホルダ部の弾性の影響も無視できない。そこで本稿では、エンドミル部の径方向の変位・力の測定値から片持ち梁の実効工具長を算出した。この結果より、等価工具剛性は工具突き出し量 + 12mm でモデル化した。

### 4. 解析結果と実験結果

切削抵抗についての解析結果と実験結果について Figure 1 に示す。これは径方向（加工面に対し法線方向）の切削抵抗の変化を示したものである。径方向の切込みが等しく、軸方向切込量が 4.4, 8, 10mm と変化するに従い、同時に切削に関与する切れ刃の数が増えるため、切削抵抗値は大きくなっている。エンドミル主軸のランアウトは今回考慮に入れていないため、一刃毎の切削抵抗変動を比較すると若干のずれがあるが、切削抵抗の平均値や peak-peak 値はいずれの場合でも非常に良く一致しており、エンドミルのたわみや、たわみにより生じる

ワーク被加工面の加工誤差を予測するにあたっては、このモデルで十分適用可能であることがわかる。

### 5. 形状精度

加工表面の形状精度についての予測値と測定値を Figure 2 に示す。エンドミルの切れ刃は被切削面上に、4.4mm では同時に最大1枚、8mm では2枚、10mm では3枚存在する。そのため予測値はそれに応じて特徴のある凹凸をもった形状となっている。測定値のくぼみ部の位置や変化の傾向は予測値とほぼ合致しているが、凹凸の大きさは予測値よりも小さくなっている。このことは軸方向切込量、即ち切削抵抗が大きくなるほど顕著に現れている。またワークの弾性変形量はエンドミルの弾性変形量に比べて無視しうるほど小さかった。従ってこの原因は、予測モデルでは切り屑が理想的に厚さ0まで形成されると仮定しているが、実際には切れ刃が2枚以上同時に切削に関与している場合、1つ前の切れ刃による弾性変形の影響で、新たに切削を開始した切れ刃が完全にはワーク被加工面を切削していないためだと考えられる。

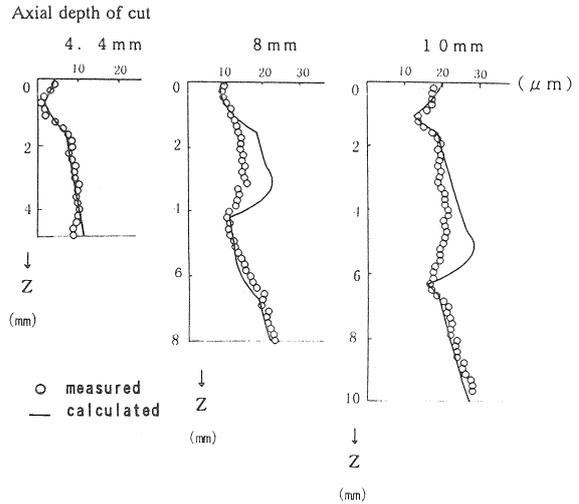


Fig. 2 Surface Accuracy

Table 1 Cutting Conditions

主軸回転数	1,200rpm (切削速度 37.7m/min)
送り速度	0.1mm/tooth (720 mm/min)
送り方向	ダウンカット
工具突き出し量	10mm
工具刃先振れ	5 $\mu$ m 以内
径方向切込量	0.25mm (側面切削)
軸方向切込量	10, 8, 4.4mm
工具ホルダ	ゲージラインから 60mm
ワーク	SKD-61(HRc53)
クーラント	ドライカット

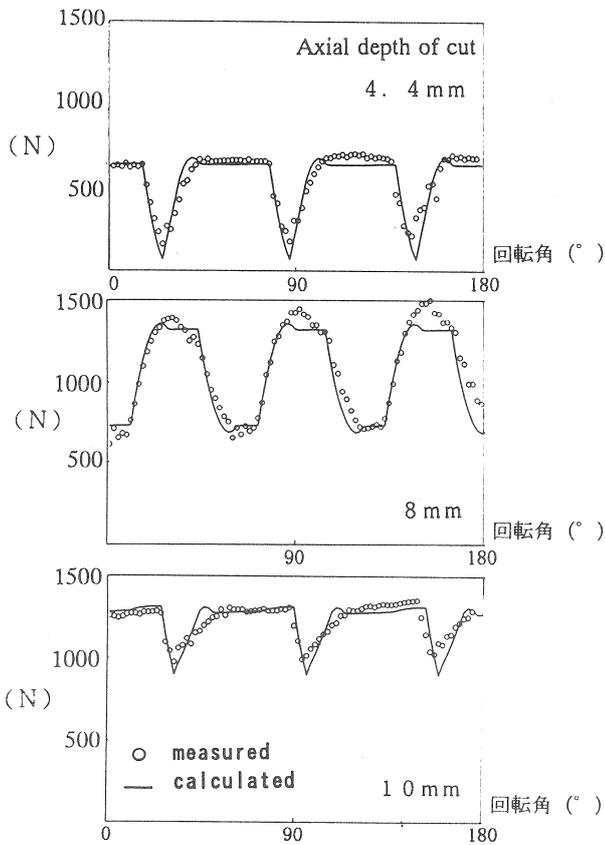


Fig. 1 Cutting Force(Normal Direction)

### 6. 結言

高硬度材の切削に適したエンドミルについて、その切削抵抗の予測を行い実測値との比較検討した。その結果、エンドミル切れ刃のすくい面上での力学的定式化による切削抵抗モデルを用いた切削抵抗の予測値は、実測値とよく合致しており、高硬度材のエンドミル切削についてもこのモデルが十分適用できることがわかった。また形状精度についても形状の凹凸や変化傾向は概ね合致した。

### 参考文献

- 1) A. E. Bayoumi et al : An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations, Trans. ASME, 116, 8, (1994) p331
- 2) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴 : 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係 (第1報), 精密機械, 43, 7 (1977) p807
- 3) W. A. Kline et al : The Prediction Accuracy in End Milling, Trans, ASME, 104, 8, (1982) p272