

ボールエンドミル加工の表面粗さの改善

Improvement of Surface Roughness Generated
by Ball Endmill Machining

技術本部 黒田基文*¹
京都精機製作所 江川庸夫*²
広島工機工場 渡部健*³
熊本工業大学 是田規之*⁴

金型の型彫りに用いられているボールエンドミル加工における表面粗さの改善を目的として、ボールエンドミル加工面の生成過程を幾何学的に解析した。その結果、切れ刃がスパイラルに運動するため、ボールエンドミルの回転中心付近で削り残しが生じることが分かった。表面粗さが悪くなるのは、従来はボールエンドミル径とピックフィード量で決まるカスプによると言われていた。しかし、これまで知られていなかった上述の削り残しの生成が原因であり、最近のような0.5mm/刃以上の高送りによる加工では、特にこの削り残しが問題となることが分かった。そこで、本解析結果を用いて削り残しをなくす方法について検討したところ、ボールエンドミルの1刃当たりの送り量の減少（主軸の高速化）のほか、ボールエンドミルの工具軸の傾斜、工具先端部切れ刃の平坦化により削り残しの生成を抑えることができ、表面粗さが改善できることを見いだした。

Surface roughness generated during ball endmill machining was analyzed geometrically. The results clearly show that the cutting edge moves spirally and generates cut remainder when machining is performed near the center of rotation of a ball endmill. The height of the above-mentioned cut remainder increases as the feed per tooth increases. The surface roughness is mainly determined by this cut remainder at a higher feed rate than 0.5mm per tooth. These calculated results coincide well with the experimental results. Further analytical results show that reducing the feed rate, increasing the inclination angle of the endmill and flattening the tip of the endmill are very effective means to reduce the roughness of the machined surface. These points have also been confirmed by cutting experiments.

1. ま え が き

金型加工の分野では生産性向上と高精度化が要求され、それらを両立させる加工技術と工作機械が必要とされている。通常、自動車、家電製品用金型の加工は、ボールエンドミルで型彫りされている。しかし、加工後の表面粗さが問題になる場合が多いため、後工程で砥石（といし）による仕上げの要らないより良い表面粗さが得られるボールエンドミル加工法が望まれている。

従来、ボールエンドミル加工ではカスプ⁽¹⁾、いわゆるピックフィード量 f とボールエンドミルの工具半径 r によって決定される表面粗さ $f^2/8r$ のみを問題としていた。しかし、最近のように、高能率化のため0.5mm/刃以上の高い送りが使用され始めると、切削送り方向の表面粗さを考慮する必要がある。

筆者らは、ボールエンドミル加工面の生成過程を幾何学的に解析し、削り残しが生じることを見だし、現実と合った表面粗さを得ることができた。さらに、その結果を基に、表面粗さの改善策を見いだした。

2. 加工面の生成過程の解析

2.1 解析内容

加工面の形状を解析するために、ボールエンドミルの座標系 (u, v, w) と、被削材の座標系 (x, y, z) を図1(a)のように設定する。ここで、ボールエンドミルの回転中心軸 w は、 $x-z$ 平面に平行で、 $y-z$ 平面とはボールエンドミルの傾斜角 ξ で傾いている。また、ボールエンドミルは w 軸回りに回転しながら y 方向

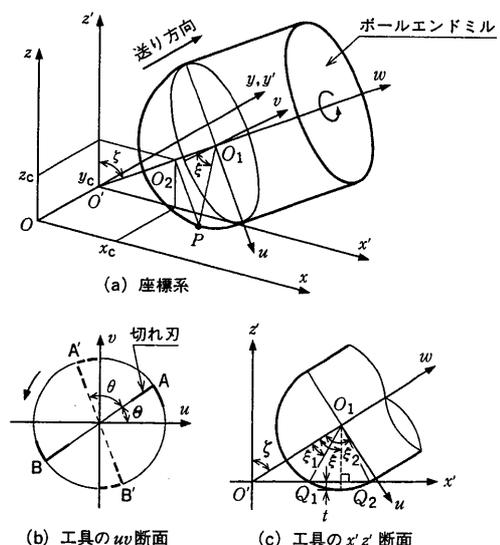


図1 ボールエンドミルと被削材の座標軸
加工面の形状を解析するために、ボールエンドミルの座標系 (u, v, w) と被削材の座標系 (x, y, z) を設定。
Coordinate axes of ball endmill and workpiece

に送られ、間欠的に x 方向にピックフィードされるとする。さらに、送りに伴い移動する w 軸を含む xyz 面に平行な面を $x'y'z'$ とする。ボールエンドミルの切れ刃上の任意点を点 P としたとき、まずボールエンドミルの座標系 (u, v, w) での点 P の軌跡は次式

*¹ 広島研究所工作機械研究推進室

*³ 技術部次長

*² 技術部精機設計課長

*⁴ 機械工学科教授 工博

で与えられる。

$$\begin{aligned} u &= r \sin \xi \cos (\theta + \theta) \\ v &= r \sin \xi \sin (\theta + \theta) \\ w &= -r \cos \xi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

- r : ボールエンドミルの工具半径 (mm)
- ξ : O_1P と w 軸とのなす角 ($0 \leq \xi \leq \pi/2$) (rad)
- θ : 各切れ刃と u 軸とがなす初期角度 (rad)
- θ : 切れ刃の初期角度からの回転角 (rad)

θ はボールエンドミルの刃数 Z によって式(2)のように表すことができ、各切れ刃についてそれぞれ軌跡を求める。

$$\theta = (n-1)2\pi/Z \quad (1 \leq n \leq Z) \quad (2)$$

ここで、切れ刃の一つを u 軸に一致させ、これを第一の切れ刃 ($n=1$) とする。

つぎに、切れ刃上の任意点 P の軌跡を被削材の座標系 (x, y, z) で示すとつぎのとおりである。

$$\begin{aligned} x &= r \sin \xi \cos (\theta + \theta) \cos \zeta + x_c \\ y &= r \sin \xi \sin (\theta + \theta) + y_c \\ z &= -r \sin \xi \cos (\theta + \theta) \sin \zeta + z_c \end{aligned} \quad (3)$$

- ここで、 (x_c, y_c, z_c) : 点 P の回転中心 O_2 の座標
- ζ : ボールエンドミルの傾斜角 (rad)

$O_2 (x_c, y_c, z_c)$ の座標は式(4)のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= \left(\frac{r-t}{\cos \zeta} - r \cos \xi \right) \sin \zeta \\ y_c &= \frac{F}{N} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \\ z_c &= \left(\frac{r-t}{\cos \zeta} - r \cos \xi \right) \cos \zeta \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 N : ボールエンドミルの回転数 (rpm)

F : 送り速度 (mm/min)

t : 切込み深さ (mm)

式(4)を式(3)に代入することにより、切れ刃上の任意点 P の軌跡は、式(5)で表せる。

$$\left. \begin{aligned} x &= r \sin \xi \cos (\theta + \theta) \cos \zeta + \left(\frac{r-t}{\cos \zeta} - r \cos \xi \right) \sin \zeta \\ y &= r \sin \xi \sin (\theta + \theta) + \frac{F}{N} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \\ z &= -r \sin \xi \cos (\theta + \theta) \sin \zeta + \left(\frac{r-t}{\cos \zeta} - r \cos \xi \right) \cos \zeta \end{aligned} \right\} (5)$$

ここで、 ξ_1, ξ_2 は図1(c)に示すようにボールエンドミルの切れ刃と、ボールエンドミル中心 O_1 を通る $x'z'$ 平面の x' 軸との交点を Q_1, Q_2 とすると、 $\xi_1 = \angle O' O_1 Q_1, \xi_2 = \angle O' O_1 Q_2$ と表せる。ボールエンドミル1回転、すなわち $0 \leq \theta \leq 2\pi$ の範囲で各切れ刃の切削幅 ($\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$) 内の軌跡を計算することにより、表面粗さが求まる。

2.2 加工面形状と切削条件

ボールエンドミルの傾斜角 ζ が 0° の場合の表面粗さを、式(5)を用いて解析した結果を図2に示す。ここで、傾斜角 ζ は、ボールエンドミルの回転軸が加工面に対して直角のときを 0° としている。同図中の切れ刃 A に着目すると、ボールエンドミルが回転しながら同図(a)から(b)の状態へと、移動して加工が進む。このとき、カスプ高さは $6.3\mu\text{m}$ であるのに対し、解析した結果は、同図に示すようにダウンカット側に著しい削り残しを生じている。その高

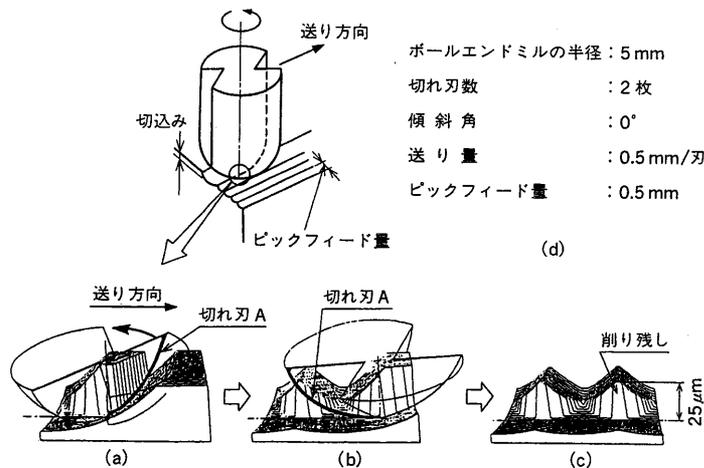


図2 ボールエンドミルによる加工面の生成過程 工具回転中心付近で切削した箇所には、本加工条件では高さ $25\mu\text{m}$ の削り残しが生じる。
Generation process of machined surface by ball endmill

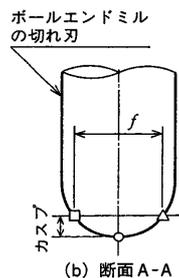
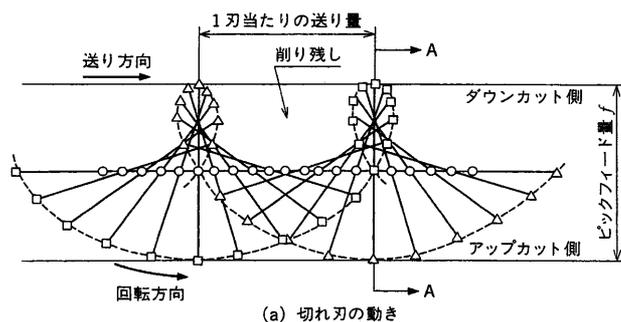


図3 ボールエンドミルの切れ刃の動き
ボールエンドミルの切れ刃が切削していく様子を平面的に示す。
Movement of cutting edge of ball endmill

さは $25\mu\text{m}$ となり、約4倍にも達することが分かった⁽²⁾⁽³⁾。ここで切れ刃の動きを図3(a)に示す。工具は、反時計回りで回転しながら右方へ送られるとする。図中の○印が回転中心、△、□印は同図(b)に示す点の軌跡であり、△印と□印の点の高さが従来カスプと呼ばれていたものである。同図から、ピックフィード幅内に□印や△印より外側に削っている部分が存在し、これらの部分は□印や△印の点より工具先端からの高さが高いことが分かる。その結果、削られない部分が生じ、それはダウンカット側で顕著になる。従来、実際の切削において表面粗さがカスプと比べて大幅に悪化するの、エンドミルの回転中心付近でむしれが発生しているためと考えられていた。しかし、本解析により幾何学的形状誤差である削り残しが、表面粗さを悪化させる大きな要因であることが明らかになった。なお、図2は削り残しを際立たせるため、垂直方向は水平方向に対して3倍に拡大して表示している。

つぎに、ボールエンドミルの1刃当たりの送り量と表面粗さとの関係を図4に示す。同図(a)はボールエンドミルの半径 r が 5mm の場合についての加工面形状であるが、送り量が小さい場合には、従来から知られているカスプが表面粗さを決める。送り量が大きくなると、送り方向の凹凸⁽⁴⁾が大きくなるとともに削り残し

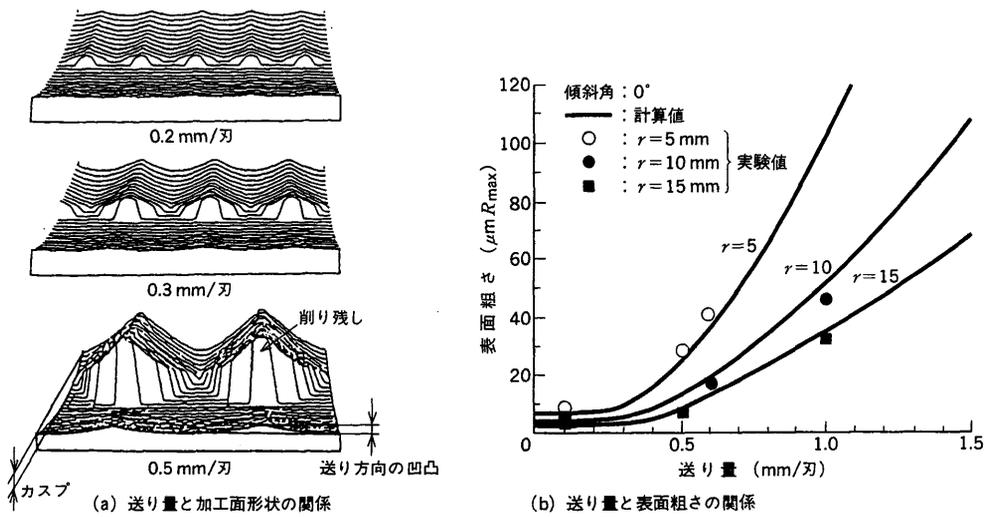


図4 送り量と加工面形状, 表面粗さの関係 送り量が大きくなると削り残しが増え, 削り残しが表面粗さを決定するようになる。
Relation between feed rate and surface roughness

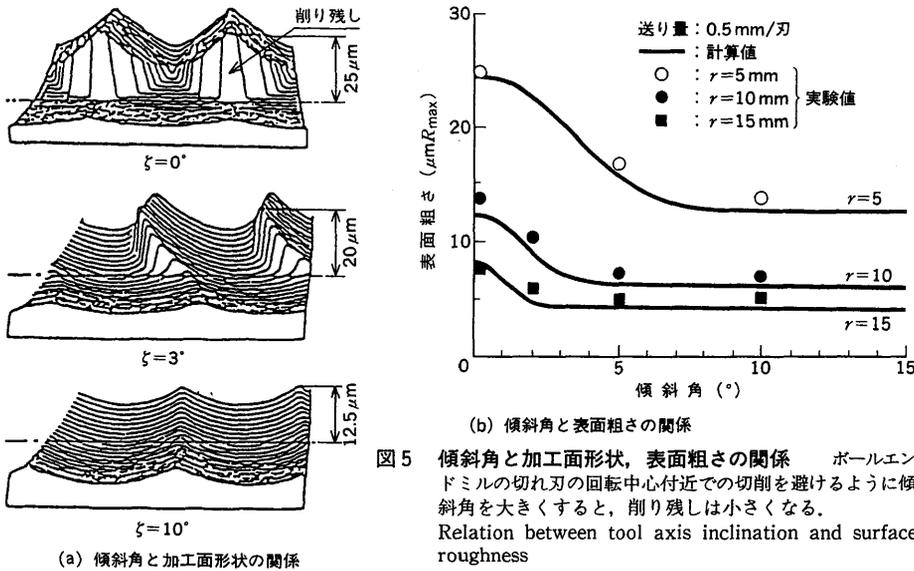


図5 傾斜角と加工面形状, 表面粗さの関係 ボールエンドミルの切れ刃の回転中心付近での切削を避けるように傾斜角を大きくすると, 削り残しは小さくなる。
Relation between tool axis inclination and surface roughness

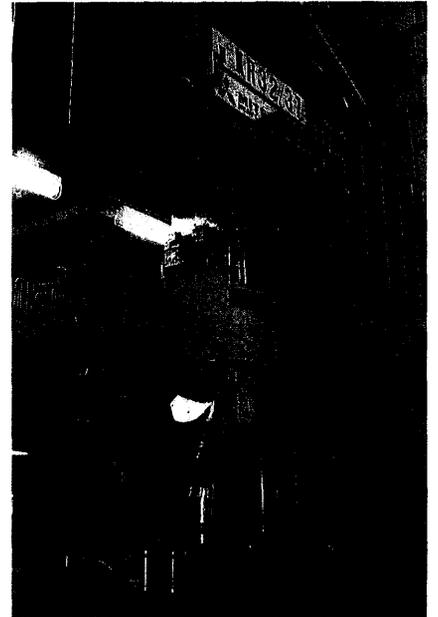


図6 傾斜角を最適にするためのアタッチメント 主軸を旋回, 傾斜させるアタッチメントを装着して, 自由曲面に対して所要の傾斜角になるように同時5軸制御する。
Attachment providing optimal inclination

も増え, 表面粗さは悪くなる。1刃当たりの送り量を変化させたときの工具半径5, 10, 15 mm別に解析した表面粗さの結果を, 同図(b)に示す。表面粗さは1刃当たりの送り量が大きくなるほど, あるいは工具半径が小さくなるほど悪くなる。同図(b)で1刃当たりの送り量が零の時の表面粗さが従来のカスプの高さと等しくなる。1刃当たりの送り量が大きくなるにつれて, 送り方向の凹凸が大きくなってカスプに加算されるため, 表面粗さは徐々に悪くなる。さらに1刃当たりの送り量が大きくなると表面粗さは急激に悪化する。

すなわち, 本解析で用いた工具半径の範囲では, 従来の平均的な1刃当たりの送り量約0.3 mm/刃以上になると, カスプと送り方向の凹凸とで与えられる表面粗さより削り残しの方が高くなり, 削り残しが表面粗さを決定するようになる。なお, 同図中には実験結果も併記しており, 解析結果と実験結果は良く一致している。

3. 表面粗さの改善策

3.1 ボールエンドミルの傾斜角の制御

図2の条件で, ボールエンドミルの傾斜角 ζ を 0° , 3° 及び 10° にした場合の表面粗さを図5(a)に示す。傾斜角 ζ が 3° の場合,

削り残しの高さは $20 \mu\text{m}$ であり 0° の場合より $5 \mu\text{m}$ 低くなる。さらに傾斜角 ζ を 10° にすると削り残しはなくなり, カスプ及び送り方向の凹凸が表面粗さを決めるようになる。これ以上傾斜角 ζ を大きくしても, 被削材と切れ刃の相対的關係は同じなので, 表面粗さは変わらない。ボールエンドミルの半径 r を5, 10, 15 mm, 傾斜角 ζ を 0° から 15° まで変えた場合の表面粗さの変化を同図(b)に示す。傾斜角を大きくすると, ある傾斜角までは削り残しは急激に減少し, それ以降は徐々に小さくなって一定値となる。また, 工具半径が大きいくほど同じ傾斜角で比較すると削り残しは小さく, 工具半径が大きくなるほど傾斜角での改善効果は小さくなる。解析と同じ条件で実際に切削実験した結果も示しているが, 解析結果と実験結果は比較的良好一致を示している。

以上のように, ボールエンドミルの傾斜角 ζ を, 表面粗さに対

する削り残しの影響がなくなる傾斜角以上にすれば、表面粗さを改善できる。そこで、当社で商品化している図6に示す数値制御2軸ユニバーサルヘッドを装着すれば、ボールエンドミルを傾けて切削できる⁽⁶⁾。自由曲面上の任意の切削点において、常に所要の傾斜角をもつように同時5軸制御することにより、複雑形状や多面体などの自由曲面の加工物に対しても、前述の削り残しが生じない条件で加工できる特徴がある。また本ヘッドは、配線や配管の自動着脱が可能であり、高剛性で、加工物との干渉が小さい、コンパクトな構造になっている。金型のような傾斜面の加工には、以上のようなユニバーサルヘッドを搭載した5軸加工機を用いるのが有効であり、本機は現在金型加工等の分野で稼動中である。

3.2 主軸の高速化

前述のとおり、削り残しは1刃当たりの送り量が小さいほど小さくなる。加工能率を保ったまま削り残しを小さくするには、主軸の高速化が有効である。

これを実現できる加工機として、当社では主軸回転数15000rpm、切削送り20m/minの高速金型加工機を商品化している。本機により4枚刃のボールエンドミルであれば、最高能率で加工しても送り量は0.33mm/刃程度となり、削り残しが顕著になる送り量以下での加工が可能となる。

3.3 工具先端部切れ刃の平坦化

平面の加工物の切削で削り残しをなくすためには、図2に示す加工後に残る範囲を切削する切れ刃が、図7(a)に示すように平坦であればよい⁽⁶⁾。ただし、平坦にすることにより、通常のボールエンドミルと形状が異なり、NC加工プログラミングが難しくなるなど、実用上の問題が顕在化してくる。また、直線状切れ刃長さは切削条件で異なる。そこで、直線状切れ刃の最外周点の軌跡を計算し、削り残しが生じないような条件を求めることが必要である。ここで、ボールエンドミルの回転数を N (rpm)、送り速度を F (mm/min)とし、直線状切れ刃の長さを r_0 (mm)、時間を T (min)として切れ刃2枚のときの直線状切れ刃の最外周点を考えると、その軌跡は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x &= FT + r_0 \cos(2\pi NT + \theta) \\ y &= r_0 \sin(2\pi NT + \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

今、切れ刃が2枚であるから、 $\theta=0, \pi$ である。

同図(b)において直線切れ刃の半径が r' の場合、その長さが十分でないため、削り残しが発生している。したがって、最終的に加工面に削り残しが発生しないための条件は、同図(b)の M_1, M_2 及び N_1, N_2 が一致する際の、直線切れ刃の長さ r_0 の長い方をその長さとして選択することである。ここで、ボールエンドミルの刃数 Z (枚)、ピックフィード量 f (mm)、時刻 T_N (min)として、つぎに示す式(7)で r_M, r_N を計算し、大きい方の値を平坦部の半径 r_0 とすればよい。

$$\begin{aligned} r_M &= \frac{Z+2}{4Z} \cdot \frac{F}{N} \\ r_N &= \frac{f}{2 \sin 2\pi NT_N} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし、 T_N は、 $F \cdot T_N + r \cos(2\pi NT_N) = [(Z+2)/4Z] \cdot (F/N)$ を満足する値($0 \leq T_N \leq 1/4N$)とする。

例えば、図2の条件では、ボールエンドミルの先端部の半径

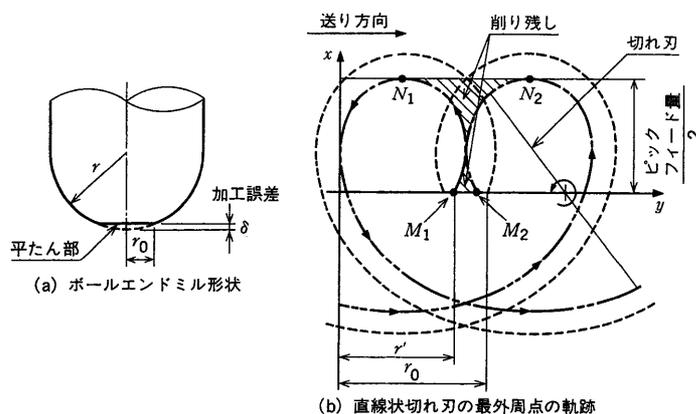


図7 先端部を平坦にしたボールエンドミルと切れ刃の軌跡
工具先端部をわずかに平坦にした工具を用いれば、削り残しの発生を抑えることができる。
Flat center endmill and locus of cutting edge

$r_0=0.55$ mmの範囲を平坦にすればよい。ただし、図7(a)に示す誤差 δ が $30\mu\text{m}$ となり、これを補正するように加工プログラムをつくる必要がある。

4. む す び

ボールエンドミル加工で送り量を大きくした場合に表面粗さが悪化するのには、従来むしろが原因と言われていた。しかし、加工面の生成過程を解析した結果、ボールエンドミルの切れ刃がスパイラル運動することにより生じる削り残しが原因であることが分かった。この結果を利用して、表面粗さを適切に改善することができた。

本報は、金型産業における生産性向上と高精度化のユーザーズを受けて、大形の門形マシニングセンタの高速化及び高精度化を革新することを目的として、要素技術の研究を行ったものである。当社では、これまでに熱平衡壁板による熱変位制御、修正逆伝達関数制御による送りの高速化等に取り組んだ。その結果、一般機械部品や金型部品の加工等の分野で、自由曲面加工に不可欠なNC2軸アタッチメント、20m/minという高送りの加工が可能で高速・高精度マシニングセンタを開発した。今後とも、更なる高速化、高精度化を図り、金型加工法の革新を目指して努力していきたいと考える。

参 考 文 献

- (1) 佐田登志夫ほか、切削仕上面の粗さ、理化学研究所報告 Vol. 33 No. 5 (1957) p. 295
- (2) 是田規之ほか、ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析、精密工学会誌 Vol. 59 No. 9(1993)p. 1537
- (3) Kuroda, M. et al., Analysis of Surface Roughness Generated by Ball End Mill Machining, ICPE '95 (1995) p. 271
- (4) 内藤国雄ほか、金型の高品位・高能率仕上切削法の開発、精密工学会誌 Vol. 59 No. 4 (1993) p. 649
- (5) 江川庸夫ほか、同時5軸制御加工機の開発、三菱重工技報 Vol. 27 No. 2 (1990) p. 139
- (6) 桑原晴義ほか、ボールエンドミル加工の面粗さの改善、精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1989) p. 725