

8 グラフィックスハードウェアを用いた切削力予測システムの開発

菊田敬一，西川隆敏，山下弘之，岡野仁，門格史，門藤至宏，中濱久雄

Development of a compensation system for machining error of dies and mold (1st Report)

Development of a system to estimate cutting force with graphics hardware in end milling

KIKUTA Keiichi, NISHIKAWA Takatoshi, YAMASHITA Hiroyuki, OKANO Hitoshi, KADO Tadashi,
MONDOU Munehiro *and NAKAHAMA Hisao*

To shorten the processes of metal mold measurement and correction, improvement of the machining accuracy is required. In this research, the final purpose is developing compensation system by using calculated machining error caused by tool deflection during cutting. It is difficult to calculate cutting area on free-form surface of metal mold in short time. Then we are developing a system that calculates cutting force in cutting process in high-speed and high accuracy. This system uses a graphics board for calculating cutting force by drawing tools and work shapes. It was available for flat and slope cutting process.

キーワード：グラフィックスハードウェア，切削力予測，金型加工

1 緒 言

金型の加工では，CAM と呼ばれる，カッターパスを作成するソフトが使用されている。しかし，市販のCAM ソフトは，CAD モデルの設計形状に忠実に工具を移動させることに重点が置かれており，実際の加工における，切削力の作用による工具のたわみについては考慮されていない。そのため，加工された金型は，CAD モデルとの間に加工誤差が生じている。

例えばプレス金型においては，成形時の不良を防ぐために，上下金型間のクリアランスを均一にすることや，プレス工程間の金型精度を確保することが重要である。しかし加工誤差が生じるため，加工後に金型を測定・修正する工程が繰り返されており，リードタイム短縮，コスト削減のネックとなっている。この修正工数を削減するために，金型の加工精度を向上させる技術開発が求められている。

CAD モデルに対する加工誤差の要因となる，工具たわみを同定する為には，加工時に工具に加わる切削力を求める必要がある。しかし金型のような自由曲面を有する被削物の加工では，加工箇所により切削領域・切削量が常に変動するため，CPU を用いた幾何計算によりこれを推定することは，膨大な計算コストを要する。

そこで本研究では，工具姿勢が一定である3軸加工機による切削領域の推定を，一般的に「グラフィックボード」「ビデオカード」等と呼ばれるグラフィックスハードウェアの描画機能を用いて行う手法¹⁾の導入により，高速・高精度に行うシステムの開発を行った。またテス

*広島県立総合技術研究所東部工業技術センター

トピースの平面加工試験・傾斜面加工試験を実施し，切削力の実測値と，本システムにより算出された予測値を比較し，システムの有効性を検証した。

2 切削力予測システムの開発

2.1 切削領域の推定

切削力を予測する為には，現在の工具位置における切削領域を推定する必要がある。これをグラフィックハードウェアの描画機能により高速に行う。システムのソフトウェアインターフェースとして，移植性が高くOSやハードウェアに依存しないOpenGLを使用する。まず被削物の初期形状と，加工開始時から工具が移動してきた軌跡（工具掃引体），および予測位置での工具の3者を同一座標系上に同時に色を変えて描画する。この状態で工具の刃先下側から主軸を見る方向に視線を設定した時，初期形状領域内において工具の色が見えている領域が現在の加工領域と定義することができる。図1に被削物・工具掃引体・工具をそれぞれ異なる色で，工具中心が視界の中心に，工具直径Dが視界の幅と高さになるよう描画したときの様子を示す。このとき工具を表す色で描画された領域の位置情報をスクリーン上のピクセル単位で読み取ることで加工領域を推定することが可能となる。

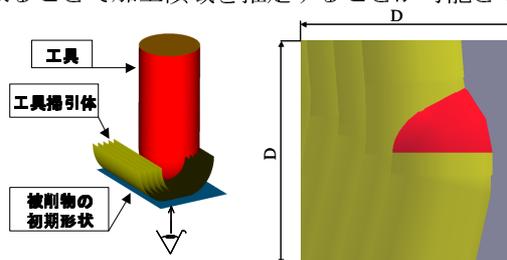


図1 切削領域描画例

2.2 比切削抵抗モデルによる切削力の導出

図2にねじれ角を考慮したボールエンドミル刃先のモデルを示す。工具中心を原点、工具送り方向ベクトルをXY平面上に投影した軸をu軸、それに直交する軸をv軸とし、1辺を表示ピクセル数に分割した座標系として定義する。

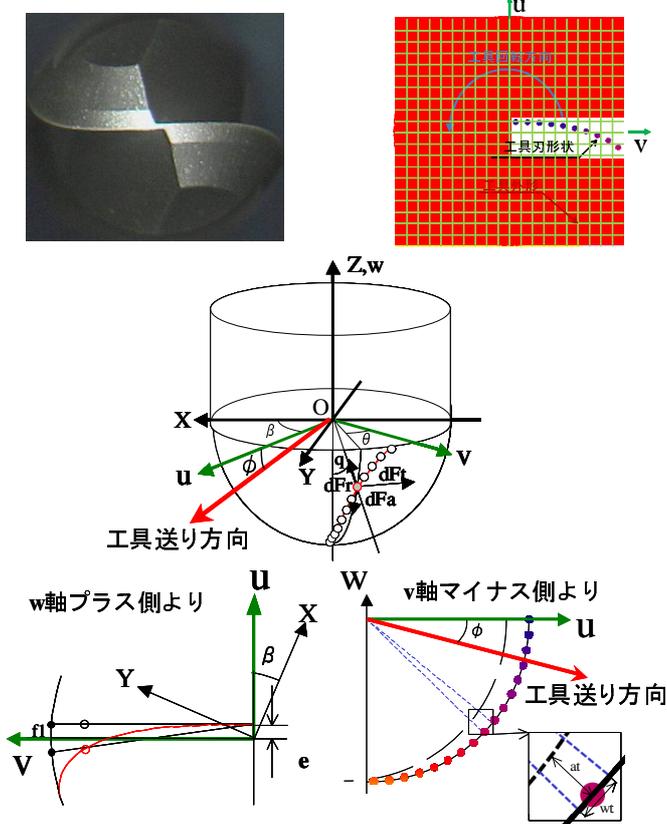


図2 工具刃先のモデル化

工具刃先の初期座標（回転角 $\theta=0$ ）をねじれによる遅れ角 f_l と、中心からのオフセット e を考慮して式(1)のように定義する。

$$\begin{aligned} u(i) &= \cos(f_l) \times e - \sin(f_l) \times i \\ v(i) &= \sin(f_l) \times e + \cos(f_l) \times i \end{aligned} \quad (1)$$

e : オフセット量（ピクセル）

i : 1～表示ピクセル幅の半分

$f_l = f_l(q)$: ねじれによる遅れ角

ここで、 $u(i), v(i)$ は工具の切れ刃1枚をv軸プラス側の表示ピクセル幅半分（工具半径相当）の領域に、1ピクセル幅に分割された微小切れ刃として割り当てた時のuv座標系上の座標値となる。この座標値はディスプレイのピクセル座標に対応しているため、微小切れ刃のピクセル座標値の色情報が工具を表す色である場合、当該微小切れ刃は切削加工中であると判定できる。この工具刃先初期座標を回転角ピッチ分ずつ回転させながら、各微小切れ刃が加工であるか判定を行っていく。切削加工中であると判定された微小切れ刃については、式(2)に基づき図2に示した dF_t, dF_r, dF_a の各分力を算出する。また工具が複数枚の切れ刃を持つ場合、切れ刃の角度ピッチ分

（図2に示す2枚刃の工具では180度）位相をずらした切れ刃モデルの座標値を用いて同様の判定を行い、それらを切れ刃枚数分足し合わせることで各分力を算定する。

$$\begin{aligned} dF_t &= (K_{te} + K_{tc} \cdot at)wt(i) \\ dF_r &= (K_{re} + K_{rc} \cdot at)wt(i) \end{aligned} \quad (2)$$

$$dF_a = (K_{ae} + K_{ac} \cdot at)wt(i)$$

$K_{te}, K_{tc}, K_{re}, K_{rc}, K_{ae}, K_{ac}$: 切削係数

at : 切り取り厚さ（工具R中心方向）

$wt(i)$: 微小刃投影長さ近似値

$$wt(i) = r(\delta(i) - \delta(i-1))$$

$$\delta(i) = \sin^{-1}\left(\frac{2i}{pw}\right)$$

r : 工具半径

pw : 表示画面の1辺のピクセル数

また切り取り厚さ at は、式(3)に示す近似式²⁾を適用した。

$$at = r + fb - \sqrt{f^2(b^2 - 1) + r^2} \quad (3)$$

$$b = \sin\theta \sin q \cos\phi - \cos q \sin\phi$$

f : 工具1刃送り

θ : 工具回転角

q : Z軸と微小切れ刃位置の角度

ϕ : 工具送り方向とXY平面の角度

切削係数は後述する加工試験により得られた F_x, F_y, F_z の3方向切削抵抗を基に、共役傾斜法により最適化した数値を用いる。これらの分力を、切削動力計の実測値と比較するためには、式(4)(5)によりX,Y,Z座標系の軸分力に変換する必要がある。

$$\begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} = \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_t \\ dF_r \sin q + dF_a \cos q \\ dF_r \cos q - dF_a \sin q \end{pmatrix}$$

β : 工具送り方向のX方向に対する角度

$$F_x = \sum dF_x$$

$$F_y = \sum dF_y \quad (5)$$

$$F_z = \sum dF_z$$

この式により工具回転角毎にX,Y,Z方向の切削力を算出し、1回転分の切削力の予測値を得ることが出来る。

2.3 描画の高速化手法

多段階・多工具種を用いる大規模なNCプログラムを要する加工の切削力予測においては、カッターパスの進行とともに大量の工具掃引体を描画する必要があるため、グラフィックスハードウェアの負荷は徐々に増大する。そこで予測しようとする工程以前の描き変える必要のない工具掃引体を事前にSTLデータ化し、描画点数を減らすことで高速化することが可能である。本システムでは、荒加工の工具掃引体を事前にSTLデータ化し、こ

れを初期形状として切削力の予測を行う。荒加工後の被削物形状 STL データ化の実施例を図3に示す。

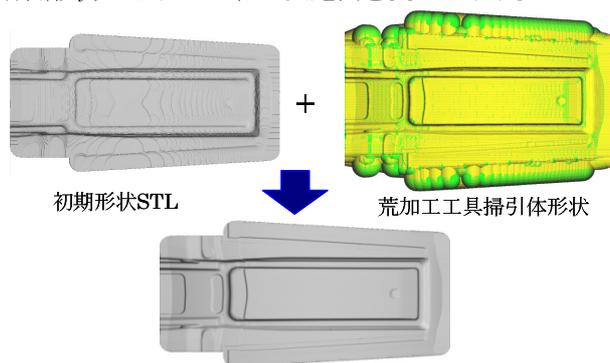


図3 荒加工終了時の被削物 STL データ

STL データを読み込み後、ディスプレイリスト化し描画点位置情報に使用しているメモリーを解放すれば、主記憶容量の節約もできる。

仕上げ加工の切削力を予測しようとする場合は、中仕上げ加工予測時より精度を高めるため、中仕上げの工具掃引体を描画した状態で予測を行う。前出の通り工具掃引体を全て描画すると、グラフィックスハードウェアの負荷が増大し計算速度が低下するため、ディスプレイの描画範囲に登場する工具掃引体のみを描画するよう、式(6)に示す判定式を導入する。

$$\begin{aligned}
 & \textcircled{1} (\vec{b} - \vec{a}) \cdot (\vec{c} - \vec{a}) < 0 \text{ の時 } |\vec{c} - \vec{a}| \leq rs + rt \\
 & \textcircled{2} (\vec{a} - \vec{b}) \cdot (\vec{c} - \vec{b}) < 0 \text{ の時 } |\vec{c} - \vec{b}| \leq rs + rt \\
 & \textcircled{3} (\vec{b} - \vec{a}) \cdot (\vec{c} - \vec{a}) \geq 0 \text{ かつ } (\vec{a} - \vec{b}) \cdot (\vec{c} - \vec{b}) \geq 0 \text{ の時} \\
 & \quad \frac{|\vec{b} - \vec{a}| \times |\vec{c} - \vec{a}|}{|\vec{b} - \vec{a}|} \leq rs + rt
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

\vec{a} : 工具掃引体の始点位置 ベクトル

\vec{b} : 工具掃引体の終点位置 ベクトル

\vec{c} : 予測時の工具位置ベクトル

rs : 描画判定対象の工具掃引体半径

rt : 工具半径

式(6)の①～③のいずれかの条件を満たす、加工済みの工具掃引体のみを描画することで、不必要な工具掃引体の描画時間を削減することが出来る。

上記高速化手法を導入し、表1に示す計算条件で、中仕上げ工程と仕上げ工程のうち、φ30mmの工具による加工について1stepにつき1箇所、3方向切削力の予測を行った。

表1 計算条件

CPU	IntelCore2DuoE6850(3GHz)
メモリ	2.0GBデュアルチャネル
GPU	GeForce8800GTS/G92 512MB
回転角ピッチ	2度毎
描画サイズ	512x512ピクセル
ステップ数	中仕上げ99,673 step(内φ30工具分35,880step) 仕上げ125,822step

中仕上げ加工の切削力予測は、STL形状と中仕上げ工程の工具位置以前に生じた工具掃引体を描画して行った。また仕上げ加工の切削力予測は、STL形状と中仕上げ工具掃引体及び仕上げ工程の工具位置以前に生じた工具掃引体を描画して行った。その結果、中仕上げ加工では1箇所あたり平均0.09秒、仕上げ加工では1箇所あたり平均0.13秒の予測時間となった。図4に3方向切削力のうち、1回転中のXY方向の切削力最大値を、仕上げ加工工程について予測した結果を示す。今後、この結果を基に工具たわみに起因する加工誤差の予測を行い、モデルの実測値と比較し、検証・改良を行う予定である。

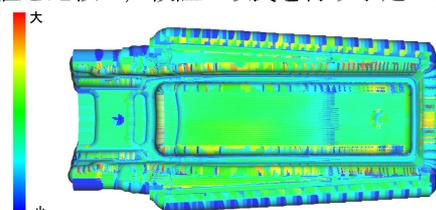


図4 仕上げ加工時の切削力予測結果

3 実測データとの比較

3.1 平面切削試験

表2に試験に使用した機材を示す。まず平面切削試験を実施した。Y軸プラスを工具送り方向、X軸プラスをピック方向とした。表3に切削条件を示す。最初に軸方向切込量0.5mmの試験を行ってX,Y,Z軸方向の切削力を取得し、このデータをもとに切削係数を算出した。0.5mm以外の軸方向切込量条件の場合においても、この切削係数を用いて切削力の予測を行った。

表2 試験機材

加工機	大阪機工(株)製PCV40II-MS
切削動力計	キスラー製9256A1
被削材	SKD61 (HRC43)

表3 平面切削時の切削条件

工具	種類	日立ツール(株)製PTH08M TiSiNコーティング超硬ボールエンドミル
	直径D	φ10mm
	刃数	2枚
	主軸回転数S	6369min ⁻¹
	一刃当り送り量f	0.1mm/刃
	軸方向切込d	0.1mm～0.9mm 0.1mmピッチで変更
	ピックフィードPf	0.3mm
	クーラント	ドライ
	切削方向	ダウンカット

図5に切削力の比較結果を示す。軸方向切込を0.1mmピッチで変化させ、計9種類の軸方向切込条件について実測値と予測値をそれぞれ取得し、比較を行った。実測値の1回転平均切削力は10回転分のデータを平均した数値を、最大切削力は工具の振れを考慮し、1刃加工中毎に切削力の大きさの最大値を取得し、それを同じく10回転分(20データ)平均した数値を採用した。このうち特に加工誤差に影響を与えるX・Y方向の分力はともに

比較的良好に一致している。ただし Y 方向分力については、軸方向切込が小さい場合、実測した切削力の方が予測値に対して大きくなる傾向が確認された。次に図6に軸方向切込 0.1mm と 0.9mm 時の工具 1 回転中の切削力を示す。軸方向切込 0.9mm 時の切削力は予測値と実測値がかなり一致しているが、0.1mm のほうは、特に Y 方向分力において相当の違いが見られる。これは平面切削において軸方向の切込量が小さい場合、実際の切削速度が極端に遅くなる工具中心付近の切れ刃による加工割合が大きくなるが、この部分の微小切れ刃の切削係数が、今回用いた切込量 0.5mm 時の値とかなり違うことが原因ではないかと考えられる。

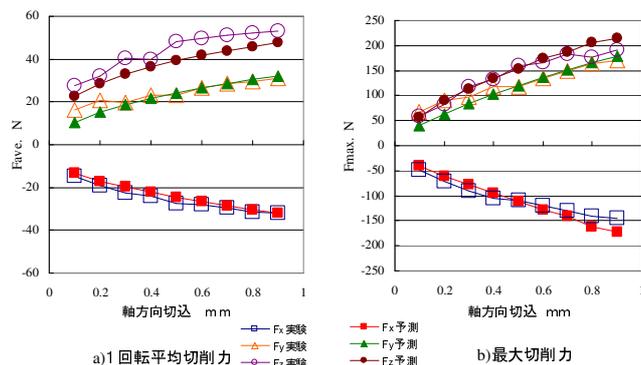


図5 平面切削時の切削力

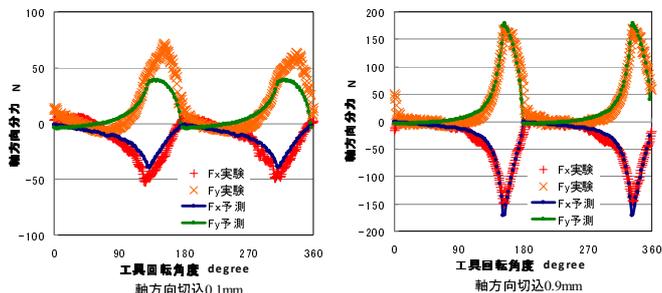


図6 平面切削時の1回転中の切削力

3.2 傾斜面切削試験

次に工具中心部付近の切れ刃が加工に関与しない傾斜面切削試験を行った。表4に切削条件を示す。試験機材は表2に示した平面切削試験と同じものを使用し、傾斜角は 30 度、切削係数は加工面法線方向切込量 0.35mm の加工試験で得られた切削力を基に算出した。

表4 傾斜面切削時の切削条件

工具	種類	MMCコベルコツール製VC-2MB TiAlNコーティング超硬ボールエンドミル
	直径D	φ6m m
	刃数	2枚
	主軸回転数S	4750min ⁻¹
	一刃当り送り量f	0.15mm/刃
	加工面法線方向切込d	0.1mm・0.35mm
	ピックフィードPf	0.2mm
	クーラント	ドライ
	切削方向	ダウンカット

図7に切込量 0.1mm と 0.35mm の工具 1 回転中の切削力を示す。両方の切込量条件で、切削状態時の位相の予測

値と実測値がほぼ一致していることから、本システムによる切削領域の推定が適当であると考えられる。また軸方向分力の大きさに関しては、工具切れ刃が加工状態にある場合の切削力はほぼ一致している。一方、切れ刃が被削物に接触していない工具回転位相の時には、実測値では平面切削に比べて切削力の変動成分が顕著に現れている。この原因は、今回の試験条件では、傾斜面切削時に生じる切削力が平面切削時の切削力と比較して、切削動力計の固有振動数付近の成分が大きいため、動力計が振動し、切削力の高調波成分が増幅されて出力されているためであると考えられる。

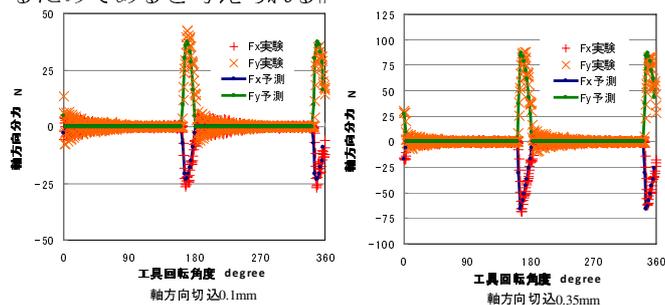


図7 傾斜面切削時の1回転中の切削力

4 結 言

ボールエンドミルによる金型加工時の切削力を、グラフィックスハードウェアを用いて高速に予測するシステムの開発を行った。以下に内容をまとめる。

- 1) OpenGL を用いてグラフィックスハードウェアで被削物初期形状・工具掃引体・工具を描画し、切削力の予測に必要な切削領域の推定を行うシステムを試作した。また荒加工工程終了後の STL データのディスプレイリスト化、描画すべき工具掃引体の判定などの高速化手法を導入することにより、自由曲面の加工において、中仕上げ工程の場合は 1 箇所平均 0.09 秒、仕上げ工程の場合は 1 箇所平均 0.13 秒で工具 1 回転中の切削力を予測することが可能となった。今後、この結果を基に工具たわみに起因する加工誤差の予測を行い、モデルの実測値との比較により、システムの検証・改良を行う予定である。
- 2) 平面切削・傾斜面切削試験を行い、条件付きながらシステムの有効性を確認した。

謝 辞

本システムの開発に当たり懇切なる御指導いただいた埼玉大学の金子先生、サンプルモデルを提供いただいた(株)ヒロテック様に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 金子他：精密工学会秋季講演論文集 2007, 67
- 2) 金子他：精密工学会会誌 72, 2 (2006) 229