

金型高精度加工システムの開発（第1報）

2 切削力予測に基づく送り速度修正システムの開発

西川隆敏, 菊田敬一, 筒本隆博, 山下弘之, 佐野 誠, 弓場憲生, 佐々木憲吾, 古本浩章

Development of system for high accuracy machining of die and mold (1st Report)

Development of feedrate scheduling system based on cutting force prediction

NISHIKAWA Takatoshi, KIKUTA Keiichi, TSUTSUMOTO Takahiro, YAMASHITA Hiroyuki,
SANO Makoto, YUBA Norio, SASAKI Kengo and FURUMOTO Hiroaki

In general, CAM software does not take account of cutting physical properties including cutting force, and feedrate is kept constant. In this paper, a model-based feedrate scheduling system was developed. It optimizes feedrate to regulate cutting force as desired, based on cutting force prediction. Consequently, tool breakage can be avoided, and machining time decreases. The developed system was tested for rough milling process of die. It was shown that the machining time has decreased by 26% compared with constant feedrate.

キーワード：ボールエンドミル, 切削力予測, 送り速度修正, 金型

1 緒 言

金型の加工では, CAM と呼ばれるソフトウェアを用いて, 工具の移動経路である NC データが作成される。金型加工技術は, CAM の高精度化や高機能化により発展してきた。しかし, CAM は加工中に発生する切削力や摩耗などの切削現象をほとんど考慮していない。そのため, 過大な切削力による工具損傷や, 工具のたわみ, 摩耗などによる加工誤差が問題となっている。

本研究の目的は, CAM で作成された NC データを加工前に最適化することにより, 機械加工時間や加工後の修正時間を短縮することである。これまでに, 切削力による工具のたわみに起因する加工誤差を予測して, NC データの座標値を修正することで, 加工誤差を補償するシステムを開発している^{1) 2)}。

本報では, 切削力を一定にするように NC データの送り速度を修正するシステムを開発したので報告する。通常, 加工中の送り速度は固定されているが, 加工箇所によって切込み量などが異なるため切削力は一定ではない。本システムでは, 切削力を予測し, 過大な切削力が発生する箇所は, 送り速度を低下させて工具損傷を防ぐ。また, 小さな切削力の箇所は, 送り速度を上げて切削加工時間の短縮を図る。市販のソフトウェアの中に同様の考え方をもつものもあるが, これらは, 主に切削除去体積に基づいて, 送り速度を修正するものである。この方法はある程度の効果は認められるものの, 工具の損傷が主に過大な切削力により引き起こされることを考えれば,

本システムのような切削力による制御の方が優れている。

以下, 開発した送り速度修正システムの概要と, 実金型モデルの荒加工工程に適用した事例を示す。

2 切削力予測モデル

切削力は既報の予測モデル¹⁾を用いて予測する。このモデルでは, 工具切れ刃を微小切れ刃に分割して, 各微小切れ刃に作用する3方向の微小切削力を, それぞれ切り厚さの1次関数でモデル化する。1次関数の係数である切削力係数は, 主に工具と被削材との組み合わせで決まるものであり, 予め切削実験により決定しておく。

切り厚さ at は, 切れ刃回転軌跡を球で近似し, 次式で算出される。

$$at = r + fb - r\sqrt{1 + \left(\frac{f}{r}\right)^2 (b^2 - 1)} \quad \dots (1)$$

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

ここで r は工具半径, f は工具1刃当たり送り量で F_s / SZ (F_s は送り速度, S は主軸回転数, Z は工具の刃数) で求められる。 ϕ は XY 平面と工具送り方向のなす角度, θ と q は微小切れ刃の回転角度と位置角度である。切り厚さ at は, 1刃当たり送り量 f の関数になっており, 送り速度によって切削力が変化する。

図1は SKD61 (硬度 HRC45) の 30° 傾斜面を, 直径 6 mm, 刃数 2 枚のボールエンドミルを用いて, **表1**の切削条件で加工したときの工具1回転中の切削力の波形である。なお, F_y は送り方向, F_z は工具軸方向, F_x はそれらに

直交する方向の切削力である。予測は送り量 0.15mm/刃の測定結果から決定した切削力係数を用いて行った。送り量が大きいと切削力は増大するが、予測値は測定値とおおむね一致しており、予測モデルが妥当であるといえる。よって、本予測モデルに基づいて送り速度を修正することにより、切削力の制御が可能である。

3 送り速度修正システム

3.1 システムの概要

図2に送り速度修正システムの概要を示す。まず、切削力を予測するため、工具仕様、被削物の初期形状、CAMから出力されたNCデータが必要である。そして、送り速度修正のための計算条件として、以下の項目を設定する。

- ・切削力目標値 F_{obj}
- ・送り速度の範囲 (最小 $F_{S_{min}}$ 、最大 $F_{S_{max}}$)

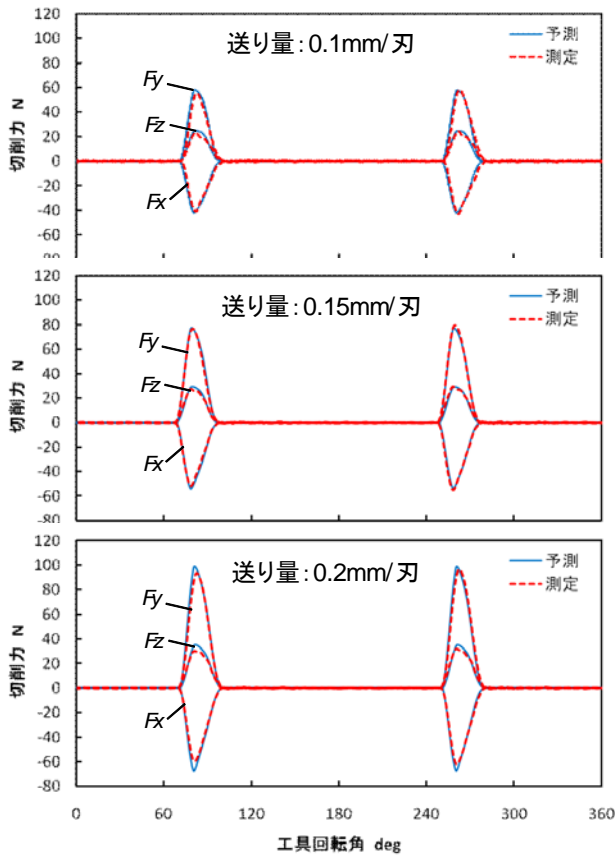


図1 工具1回転中の切削力の予測値と測定値の比較

表1 30° 傾斜面加工における切削条件

回転数	min ⁻¹	5000
加工面法線方向切込み	mm	0.35
1刃当たり送り量	mm/刃	0.1, 0.15, 0.2
ピックフィード	mm	0.2

- ・計算分割長さ L
- ・工具侵入時の送り速度条件 (固定速度 F_{S_0})

本システムでは、設定した送り速度の範囲内で、1回転中の切削合力の最大値が目標値になるように送り速度を修正する。なお、制御する力の種類は、次式の切削合力としているが、他のある方向の力 (例えばZ方向分力など) とすることも可能である。

$$F_{max} = \max\left(\sqrt{F_{x_i}^2 + F_{y_i}^2 + F_{z_i}^2}\right) \dots (2)$$

また、切削力の急激な変動を防ぐため、工具が空転時から被削材に侵入するときの送り速度については、通常通り修正するか、ある値 F_{S_0} に固定するかを選択できる。

システムでは、まず、1つの工具経路 (NCデータの1つのパス (ブロック)) が計算分割長さを超える場合、複数の工具経路に分割する。次に、分割した工具経路毎に順次最適な送り速度を求める。最後に、NCデータの送り速度指令 (Fコード) の追加、修正や、分割した経路で同じ送り速度の経路を結合するポスト処理を行い、修正したNCデータを出力する。

3.2 最適送り速度の決定方法

工具経路毎に最適な送り速度 $F_{S_{obj}}$ を決定する手順を図3に示す。まず、侵入時の送り速度を固定する場合には、その工具経路が侵入時かどうかを判断し、侵入時には送り速度を F_{S_0} とする。

次に切削力予測を行う。ここで、式(1)の β は0から1の値を取り、また、一般に1刃当たり送り量 f は工具半径 r に対して小さいため、 $(f/r)^2(\beta-1)$ は十分小

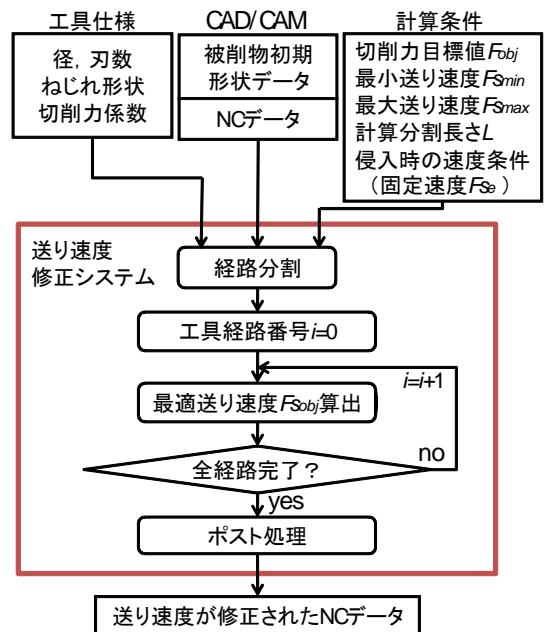


図2 送り速度修正システムの概要

い。よって、式(1)は次式のように近似され、切取り厚さ at は1刃当たり送り量 f の2次関数となる。

$$at \cong r + fb - r \left(1 + 0.5 \left(\frac{f}{r} \right)^2 (b^2 - 1) \right)$$

$$= \frac{1-b^2}{2r} f^2 + bf \quad \dots (3)$$

また、切削力は切取り厚さの1次関数であるので、最大切削力を送り速度の2次関数で近似して、**図4**に示すように、最適な送り速度を求める。まず3つの送り速度 (F_{s1}, F_{s2}, F_{s3}) で1回転中の切削力を予測して、式(2)の最大切削力をそれぞれ求める。次に、この値から近似曲線を決定し、目標切削力 F_{obj} となる最適送り速度 F_{Sobj} を求める。一般に、金型加工では1つの工具経路の長さが短く、速度を工具経路毎に細かく変更しても、加減速時間のため実際の送り速度はそれに追従できない。

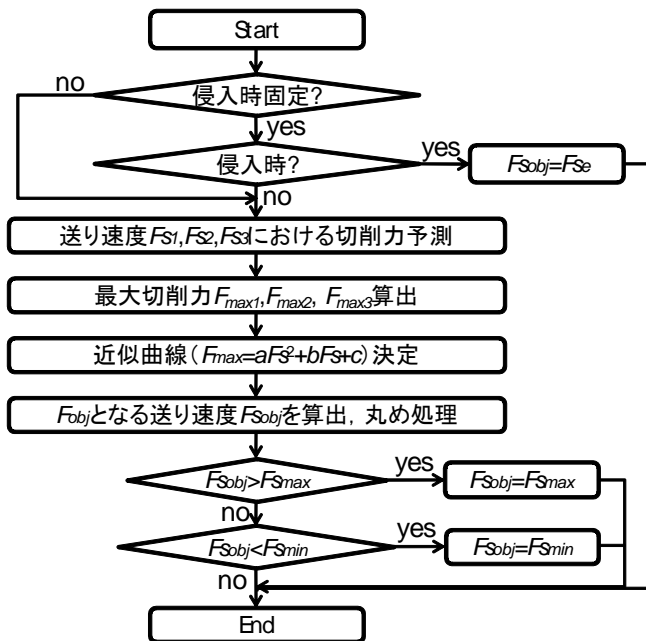


図3 最適送り速度 F_{Sobj} の決定方法

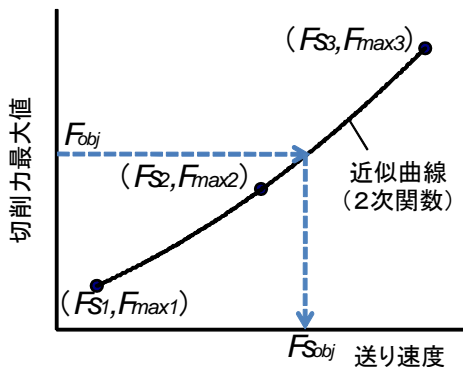


図4 最適送り速度の決定方法

また、送り速度の指令が多くなると機械へのデータ転送に問題が生じる場合がある。そこで、最適送り速度はユーザが指定する数値 (例えば 200mm/min) 単位に丸めて、送り速度が頻繁に変更されることを防ぐ。また、最適送り速度が設定した速度の範囲外の場合は、範囲内に修正して終了する。

4 適用例

開発したシステムを**図5**に示す加工深さ 25mm の荒加工工程に適用した。工具と被削材を**表2**に、切削条件を**表3**に示す。加工方法は等高線ダウンカットとした。

まず、送り速度一定のNCデータで加工を行った。送り速度は1100, 2200mm/minの2条件とした。加工後の工具写真を**図6**に示す。送り速度1100mm/minでは、工具の異常損傷は発生せず加工が完了した。一方、送り速度2200mm/minでは、深さ7.8mmの**図7**に示す位置で、工具がコレット端部で折損した。深さ7.8mmでの切削力最大値の予測値の推移を**図8**に示す。折損箇所は、大きな切削力が作用する箇所と一致しており、過大な切削力が原因で折損したと考えられる。

次に、開発したシステムを用いて**表4**の計算条件で送

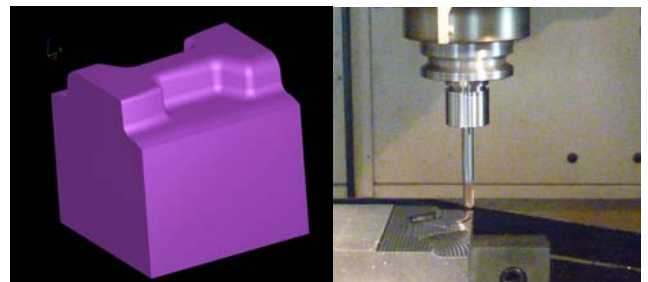


図5 被削材形状と実験風景

表2 工具と被削材

工具種類	TiSiNコーティング超硬ボールエンドミル
径 D	8mm
長さL	60mm (L/D=7.5)
刃数	2
被削材	SKD61(硬さHRC48)

表3 図5の加工における切削条件

回転数	min ⁻¹	11000
送り速度	mm/min	1100(一定), 2200(一定) 1100~5500(送り速度修正)
Z方向ピッチ	mm	0.5
XY方向ピッチ	mm	2.4
切削油		エアブロー

り速度を修正した。計算に使用したパソコンは、CPUがCore i7 920, GPUがGeForce GTX275であり、計算時間は23.9分であった。加工後の工具写真を図9に示す。工具侵入時の送り速度を固定せず、他の箇所と同様に修正したものは、1枚の切れ刃に欠損がみられた。一方、侵入時の送り速度を1100mm/minに固定したものは欠損しなかった。前者の加工において、被削材の平坦な箇所

へ工具が侵入する際に、切削音が変わったため、工具侵入時に欠損したものと推測される。

図10に、欠損なく加工が完了した条件でのNCデータ修正前後の加工時間の比較を示す。送り速度が一定の条件(1100mm/min)の77.6分に対して、本システムで修正した場合(侵入時速度固定)は57.1分となり、加工時間が26%低減した。

表4 送り速度修正の計算条件

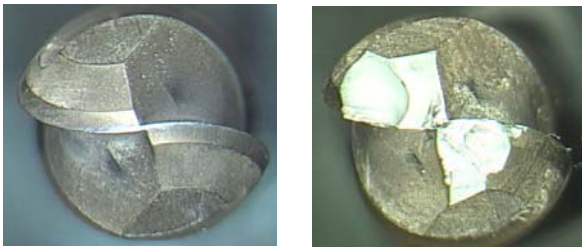
切削力目標値 F_{obj}	250 N
最小送り速度 F_{smin}	1100 mm/min
最大送り速度 F_{smax}	5500mm/mm
計算分割長さ L	10mm
侵入時送り速度	固定しない 固定する(F_{se} :1100mm/min)

5 結 言

- 1) 切削力の予測に基づいて1回転中の最大切削力が一定になるようにNCデータの送り速度を修正するシステムを開発した。
- 2) 開発したシステムを実金型モデルの荒加工工程に適用した。工具が被削材に侵入するときの送り速度を1100mm/minに固定し、その他の箇所の切削力が250Nになるように送り速度を修正した結果、工具の異常損傷が発生せず、一定の送り速度としたときと比較して、加工時間が26%低減した。

文 献

- 1) 菊田他：広島県西部工技研究報告, 51(2008), 26
- 2) 西川他：広島県西部工技研究報告, 52(2009), 40



a) 送り速度 1100mm/min b) 送り速度 2200mm/min

図6 送り速度一定のときの工具

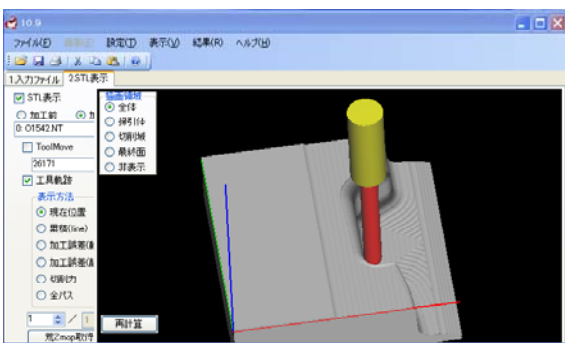


図7 速度一定(2200mm/min)での工具折損箇所

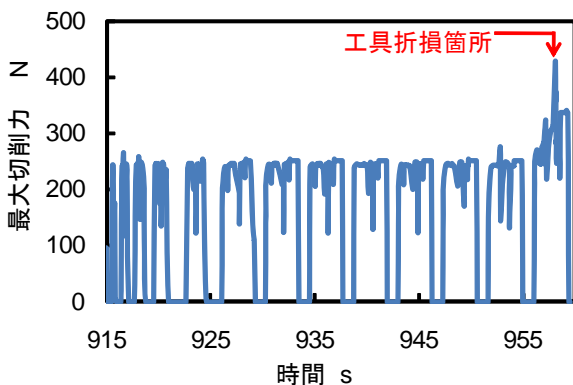


図8 工具折損時の切削力予測値(深さ7.8mm)



a) 侵入時速度固定せず b) 侵入時速度固定

図9 送り速度を修正したときの工具

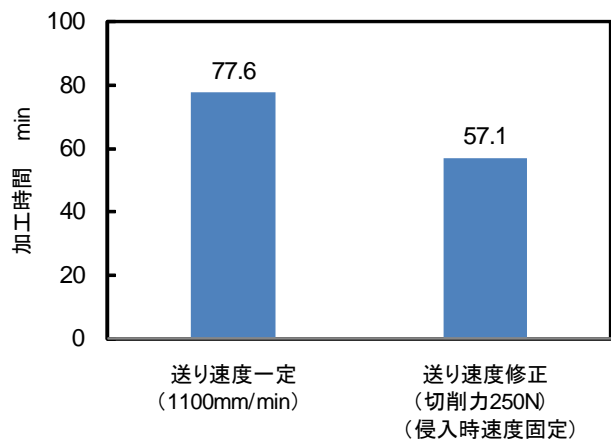


図10 送り速度修正前後の加工時間