

シミュレーション技術を用いたジグ設計検証手法の開発

横山 哲也 坂東 直行

Development of Jig Design Verification Method using Simulation

Tetsuya YOKOYAMA Naoyuki BANDO

あらまし フライス加工などの切削加工では、被削材を固定するジグの設計が不適切で被削材がずれ動いたり、振動が生じることで加工精度が低下する。ジグ設計が不適切となる理由の一つに、設計指標がなく作業者の経験に依存していることが挙げられる。本研究では作業者の経験に左右されず加工精度を維持することを目的とした、ジグ設計を検証評価するシミュレーション技術の開発を目指している。本報告では、切削加工シミュレーションの高精度化を図るための切削力計算と、精度検証の結果について述べる。

キーワード ジグ設計, シミュレーション, 切削モデル, 有限要素法

1. はじめに

フライス加工などの切削加工では、被削材を固定するのにジグを使用している。多品種少量生産や大物の切削加工においては、専用ジグを設けるとコスト高となるため、クランプやブロックなどの汎用ジグを用いて被削材を固定している。この際、ジグの配置、位置、個数および締め付け力などが適切でないと、被削材がずれ動いたり、振動が生じて加工精度が低下する。

上記問題が発生する理由の一つに、ジグ設計に明確な指標がなく、作業者の経験に依存していることが挙げられる。ジグ設計では、加工中に発生する切削力を考慮してジグの配置位置、配置個数および締め付け力を決める必要があるが、経験の浅い作業者では、不適切なジグ設計を行ってしまうおそれがある。そのため、ジグ設計支援ツールの構築は、非熟練者でも熟練者と同等のジグ設計を可能とし、加工品質の向上を図ることができる。

我々は過去、ジグ設計の支援ツールとして、ジグに働く力を算出できる切削加工シミュレーションを作成した^[1]。このシミュレーションは、有限要素法を用いて構造解析を行い、被削材およびジグにかかる歪みや応力等を計算できる。しかし、切削力計算に平均切削力モデルを用いており、切削力の作用方向等を厳密に考慮していなかった。

本研究は、作業者の経験に左右されず加工精度を維持することを目的とした、ジグ設計を検証評価するシミュレーション技術の開発を目指している。先に開発した切削加工シミュレーションの高精度化を図ることで、ジグ設計の妥当性を評価できるツールになり得ると考える。本報告では、切削加工シミュレーションの高精度化を図るための切削力計算と、精度検証の結果について述べる。

2. 瞬間切削力モデルに基づく切削力計算

2. 1 切削加工シミュレーションの概要

図1に切削加工シミュレーションの概要図を示す。CAMソフトで計算した工具のツールパスをNCデータで出力し、切削加工シミュレーションに与える。シミュレーション内部でNCデータを解析し一連のツールパスをつくる。そのツールパス上を工具が一定距離の刻み幅で進むものとして、被削材と工具の干渉を行い、その結果を受けて切削力を計算する。切削力を外力として、有限要素法を用いた構造解析を行い、被削材とクランプの変形を計算とする。作業者は評価値をもとに、材料とクランプ間の接触状態を選択するか、切削条件またはジグ設計を見直しCAMソフトでツールパスを再計算させる。

過去に開発した切削加工シミュレーションの切削力計算には平均切削力モデルを用いており、切削力の作

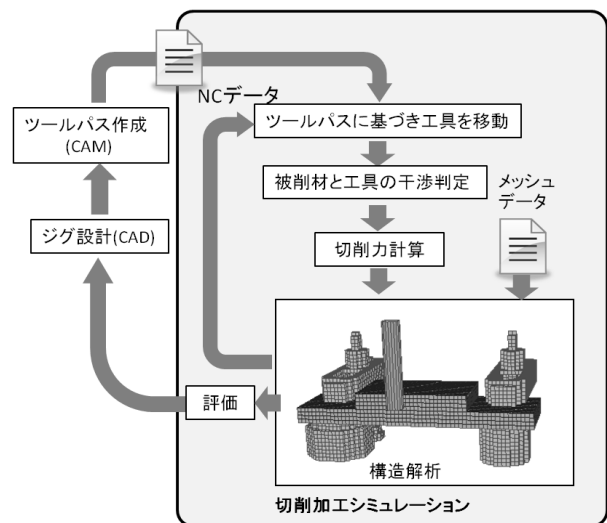


図1 切削加工シミュレーションの概要図

用方向等を厳密に考慮していなかった。シミュレーションの高精度化を図るため、切削力の計算方法を見直す。

2. 2 切削力の計算

切削力計算で使用する切削モデルには、平均切削力モデルと瞬間切削力モデルがある。平均切削力モデルは加工除去体積に基づいて切削力を求めるが、近似値を簡易に求めるものであり、切削力の方向や最大値を厳密に求めることができない。瞬間切削力モデルは工具の回転角に応じた切削力を求めることができ、切削力の方向や最大値を計算することが可能である。シミュレーションの精度を向上させるため、本研究では瞬間切削力モデルを採用する。

切削力は切りくずの厚み t に比例するため、切りくず厚みを求める必要がある。図2に、溝加工時における、切りくず厚みと切削力を示す。刃の軌跡はトロコイド曲線により求まるが、1刃当たりの送り量が小さいときには円弧に近似できることから、切りくず厚み t は以下のように近似することができる。

$$t = F_z \sin(\phi + \theta) \tag{1}$$

ここで F_z は1刃当たりの送り量、 ϕ は切削工具の進行角度、 θ は進行方向からみた切れ刃角度である。

切削力 F は、切りくずの切削断面積 A と、単位面積当たりの切削力（以下、比切削抵抗）の積となる。切削断面積は、軸方向の切り込み量 R_a と切りくず厚み t より、

$$A(\theta) = R_a t(\theta) \tag{2}$$

となる。工具軸方向の切り込み量が大きいと、エンドミルのねじれ角により、切れ刃の角度が切り込み量に応じて変化する。しかし本研究での軸方向切り込み量は小さく切れ刃の角度に差がないとし、切りくず厚みは θ のみに依存するとする。

式(3)に切削力を示す。

$$\begin{aligned} F_t &= K_{tc} A(\theta) + K_{te} \\ F_r &= K_{rc} A(\theta) + K_{re} \\ F_a &= K_{ac} A(\theta) + K_{ae} \end{aligned} \tag{3}$$

ここで F_t は工具の接線方向に働く力、 F_r は径方向に働く力、 F_a は軸方向に働く力である。 K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} は切りくず厚みとは関係なく、摩擦により生じる力である。式(4)に、座標変換を施した直交座標系の切削力を示す。

$$\begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi + \theta) & -\sin(\phi + \theta) & 0 \\ \sin(\phi + \theta) & \cos(\phi + \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_r \\ -F_t \\ F_a \end{pmatrix} \tag{4}$$

切削加工シミュレーションの構造解析は、有限要素法を用いた剛性方程式で、外力 $F \in R^{3N}$ 、変位 $u \in R^{3N}$ 、剛性行列 $K \in R^{3N \times 3N}$ と重力 $M_g \in R^{3N}$ を用いて

$$F = Ku + M_g \tag{5}$$

となる。ここで N は有限要素法で使用するノード数である。先に求めた直交座標系の切削力は、外力 F ベクトルの要素として含まれる。

2. 3 切削力が作用するノードの決定

式(4)で求めた切削力を、有限要素法で使用するメッシュモデルのどのノードに作用させるか考える。本研究では、有限要素法で構造解析を行う際、有限要素としてボクセル形状の6面体を採用している。また、6面体内に複数のパーティクルを存在させ、そのパーティクルが工具掃引体内に存在するか内外判定を行うことで、干渉判定を行っている。そこで切削力が作用するノードは、干渉したパーティクルが属する6面体の構成ノードとする。また、各ノードに対する切削力の分配は、干渉したパーティクルの数に比例させる。

有限要素を用いて構造解析を行うため、切削力が作用するノードは、工具の刃先と厳密に干渉している部位ではない。しかし、物体に作用する荷重はその荷重と等価な分布荷重で置き換えても、作用点から十分離れた断面に生じる変位および応力は等しくなるサンプソンの原理²⁾より、ジグから見た場合、その影響は少ないと考える。

3. 切削加工シミュレーションの検証

3. 1 被削材変形の検証

シミュレーション結果と加工計測値の比較を行い、精度を検証する。本節では、加工時の被削材の変形を、歪みを用いてシミュレーション結果と比較する。

使用した材料の物性値を表1に、切削条件を表2に示す。被削材の寸法は50[mm]角の高さ100[mm]で、下側20[mm]をマシンバイスで固定した(図3)。加工は被削材の上面右側の肩削りで、エンドミルを手前から奥、奥から手前に動かした。

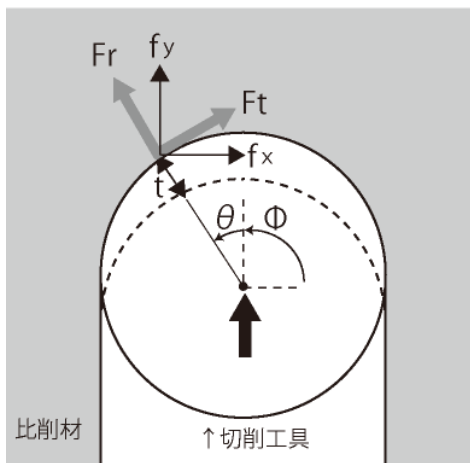


図2 切りくず厚みと切削力

表1 使用材料の物性値

被削材	物性値	
ポリアセタール	ヤング率	3.6[GPa]
	ポアソン比	0.35
	密度	1.41[Kg/m ³]

表2 切削条件

切削工具	スクエアエンドミル φ 10[mm] 2枚刃
回転数	2000[rpm]
送り	1500[mm/s]
軸方向切込み	1[mm]
径方向切込み	5[mm]

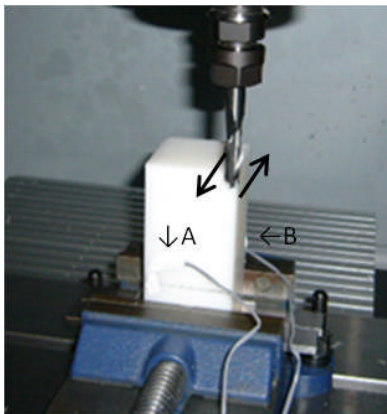


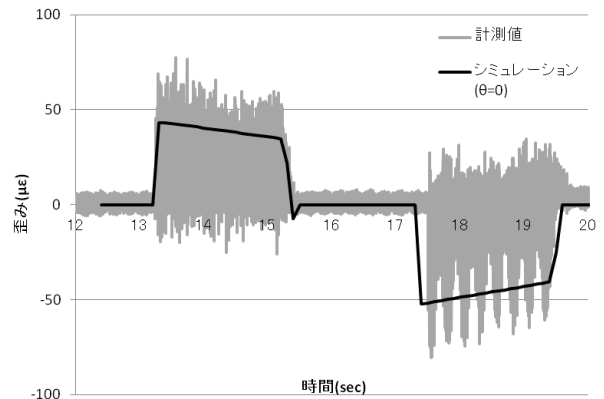
図3 被削材の拘束と歪みゲージ貼付箇所

被削材の歪みは、歪みゲージを用いて計測する。図3に歪みゲージの貼り付け箇所を示す。被削材手前側に歪みゲージA、反対側に歪みゲージBを貼付した。歪みゲージを動歪み測定機に取付け、加工時の歪みデータを計測した。

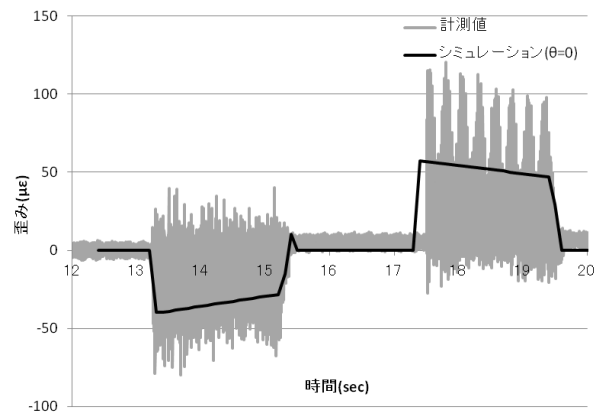
シミュレーションで使用する比切削抵抗の値は、 $K_{tc} = 9.5e7$ [N/m²]、 $K_{rc} = 0.1K_{tc}$ 、 $K_{ac} = 0.42K_{tc}$ とした。この値は、予備実験で行った溝加工時の切削力を3分力計で計測した値から求めた。なお、摩擦力の推定ができなかったため $K_{te} = K_{re} = K_{ae} = 0$ とした。またシミュレーションで使用したメッシュはボクセル形状の6面体で、メッシュサイズは2.0[mm]である。

図4(a)(b)に加工時の歪みとシミュレーションで求めた歪みを示す。シミュレーションにおける歪みは、歪みゲージ位置に近い2つのノードの変形量から算出し、エンドミルの進行方向から見た切れ刃角度 $\theta = 0$ [rad]の結果を示す。なお計測値は、加工時の切れ刃角度が $\theta = 0 \sim \pi/2$ [rad]の範囲で変化しているため、切れ刃角度に応じて変動している。

$\theta = 0$ [rad]のとき、切りくず厚みが大きくなり切削力が最大になる。それに応じて被削材の歪みも大きくなる。図4の結果より、 $\theta = 0$ [rad]のシミュレーション結果は計測データの極大値と概ね一致していることがわかる。なお、



(a) 歪みゲージAの歪み



(b) 歪みゲージBの歪み

図4 歪みゲージ計測値とシミュレーション結果

エンドミルが奥から手前へ進む際に、ダウンカットによる衝撃力で被削材に振動が生じているが、シミュレーションでは動特性まで考慮していないため、振動を模擬することはできない。

3. 2 ジグに作用する力の検証

ジグを用いて被削材を固定した加工において、ジグに作用する力をシミュレーションと実加工で比較した。

使用した材料の物性値を表3に、表4に切削条件を示す。被削材は図5のようにジグで固定され、エンドミルは被削材の中央を手前から奥に向かって溝加工を行う。ジグに作用する力は、3分力計を用いて、被削材と3分力計の合

表3 使用材料の物性値

材料名	物性値	
ポリアセタール (被削材)	ヤング率	3.6[GPa]
	ポアソン比	0.35
	密度	1.41[Kg/m ³]
鉄 (ジグ)	ヤング率	210[GPa]
	ポアソン比	0.3
	密度	7.8[Kg/m ³]

表4 切削条件

切削工具	スクエアエンドミル φ 10[mm] 2枚刃
回転数	2000[rpm]
送り	1500[mm/s]
軸方向切込み	1[mm]

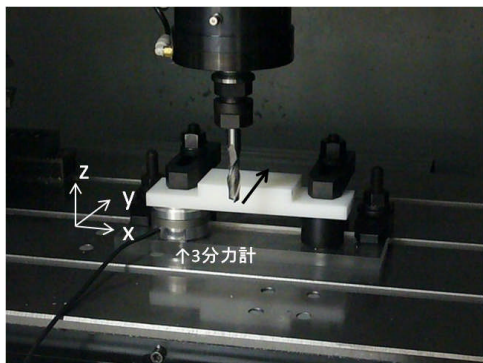


図5 ジグを用いた被削材の加工

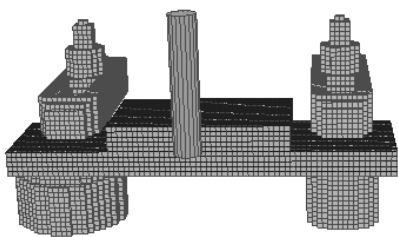


図6 メッシュモデル

わせ面に働くxyz成分の並進力を計測する。

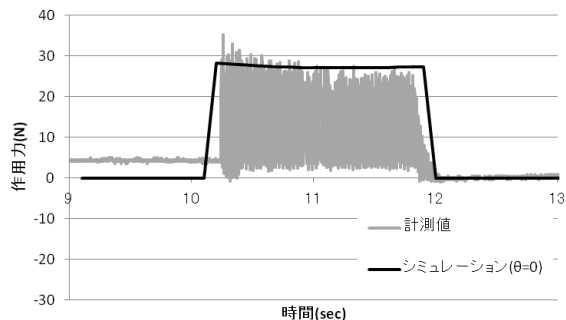
図6に、シミュレーションで使用したメッシュモデルを示す。被削材、ジグと3分力計をボクセル形状の6面体で置き換え、メッシュサイズは2.0[mm]である。シミュレーションで使用した比切削抵抗は前節の値と同じである。

図7(a)(b)(c)に、3分力計の計測値とシミュレーションの結果を示す。被削材はクランプされているため、加工前から力が加わっているが、図7はその力は差し引いている。加工前と加工後で被削材の内部応力のつり合いがずれているため、ここでは加工後の力をゼロ基準にしている。また、シミュレーションは、エンドミルの進行方向から見た切れ刃角度 $\theta=0[\text{rad}]$ の結果を示している。y成分のみ $\theta=\pi/4[\text{rad}]$ の結果も示している。加工時の計測値は $\theta=-\pi/2\sim\pi/2 [\text{rad}]$ の値を示し、 θ の値に応じて変動している。

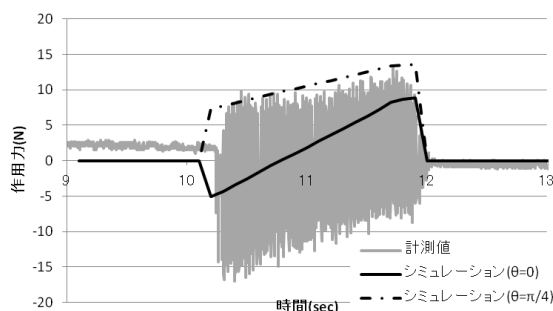
式(3)(4)より、 $\theta=0[\text{rad}]$ 近くでxとz方向の切削力が最大になることから、ジグにかかるxとz方向の作用力も $\theta=0[\text{rad}]$ 近くで大きくなる。図7 (a) (c)の結果から、 $\theta=0 [\text{rad}]$ のシミュレーション結果は、計測データの極大値とほぼ一致していることがわかる。また、式(3)(4)より $\theta=0 [\text{rad}]$ 近くでは、y方向の切削力は大きくなることから、ジグにかかるy方向の作用力も大きくなる。それも図7(b)で確認することができる。これより、シミュレーションの精度の妥当性を確認することができる。

4. まとめ

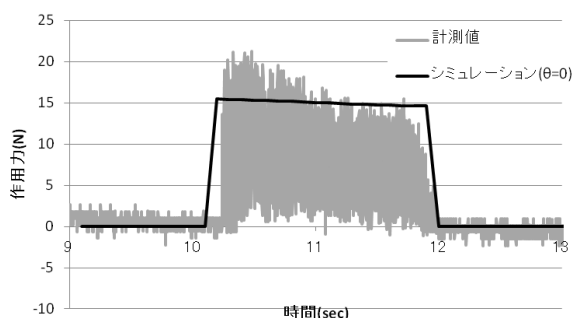
本研究では作業者の経験に左右されず加工精度を維持することを目的とした、ジグ設計を検証評価するシミュレーション技術の開発を目指し、切削加工シミュレーション



(a) x成分



(b) y成分



(c) z成分

図7 3分力計測値とシミュレーション結果

の高精度化を図るため、瞬間切削力モデルによる切削力計算を行った。その結果、加工時の計測値とシミュレーション結果は概ね一致することを確認した。

今後は比切削抵抗の摩擦項を推定すると共に、被削材の固定方法を変えて精度検証を行いたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、財団法人越山科学技術振興財団から研究助成金を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、ジグ設計のアドバイスを頂きました株式会社イマオコーポレーションに感謝致します。

文献

- [1] 横山哲也，“ジグ設計評価の構造解析に関する研究(第2報)”，岐阜県情報技術研究所研究報告 第13号，pp.36-40, 2012.
- [2] 日本機械学会編，“機械工学便覧基礎編α3”，2005.