

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(第2報)

横山 哲也 坂東 直行

Development of Jig Design Verification Method using Simulation (2nd Report)

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。著者らは昨年度、フライス加工を対象に実加工とシミュレーション結果の比較を行い、ジグに作用する力は概ね一致することを確認した。本年度は穴あけ加工において、実加工とシミュレーション結果の検証を行った。本報ではその検証結果について報告する。

キーワード ジグ設計, 切削シミュレーション, 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、被削材のずれ動き、ビビリ振動や過大な締め付け力による変形等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、ジグ設計を支援するツールの構築は、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。昨年度はジグを用いて被削材を固定したフライス加工において、実加工とシミュレーション結果の比較を行い、ジグに作用する力は概ね一致することを確認した^[2]。

本年度は切削加工シミュレーション上で穴あけ加工を模擬し、実加工とシミュレーション結果の比較を行った。本報告では検証の結果について述べる。

2. 穴あけ加工のシミュレーション

2. 1 切削加工シミュレーションの処理手順

以下に、穴あけ加工のシミュレーション手順を示す。
①NCデータに基づき、切削工具を一定距離の刻み幅で移動させる。②被削材と工具の干渉判定を行い、その結果を受けて、被削材に働く切削力を計算する。③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、被削材およびジグにかかる力等を計算する。

2. 2 被削材と工具の干渉判定

切削工具と被削材の干渉判定を行うにあたり、図1に示すように、被削材内部に均等な間隔で点を配置する。切削工具の動きに応じて、配置した点が工具内部に存在するか内外判定を行うことで干渉を判定する。

2. 3 被削材に作用する切削力の計算

穴あけ加工において、切削工具から被削材が受ける切削力は工具軸方向に働くスラスト力 F_m と、工具径方向に働くトルク T_q がある。以下ではこれら切削力を、被削材の干渉点 i に作用する z 方向の力 $f_{i,z}$ と xy 方向の力ベクトル $\mathbf{f}_{i,xy}$ に変換する。なお、スラスト力 F_m とトルク T_q は切

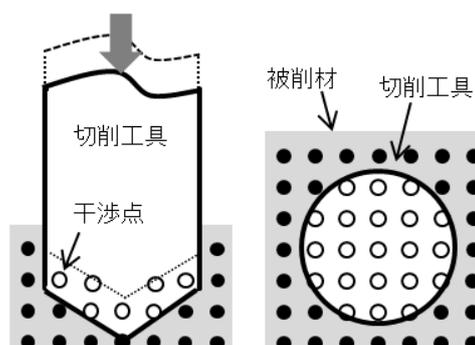


図1 切削工具と点の干渉 (左: 水平方向 右: 軸方向)

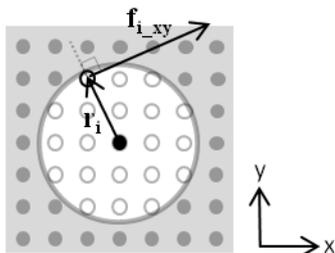


図2 干渉点に働くxy方向の力 $f_{i,xy}$

削条件, 被削材のブリネル硬さ等によって実験式から算出可能である^[3].

干渉点 i に作用する z 方向の力 $f_{i,z}$ を算出する. $f_{i,z}$ の総和は工具からの受けるスラスト力であることから, 干渉点の数を N とした場合, $f_{i,z}$ は以下のとおりとする.

$$f_{i,z} = \frac{F_{th}}{N} \quad (1)$$

次に, 干渉点 i に作用する xy 方向の力ベクトル $f_{i,xy}$ (図2) を算出する. 干渉点全体にトルクが作用するとし, そのトルクにより生じる力の大きさは干渉点毎にすべて同じと仮定すると, トルクは位置ベクトルと干渉点に作用する水平力ベクトルの外積の総和で表すことができる.

$$T_q = \left| \sum_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{f}_{i,xy}) \right| \quad (2)$$

ここで \mathbf{r} は切削工具中心を始点, 干渉点を終点とする位置ベクトルである.

水平力 $f_{i,xy}$ を単位ベクトル t_i と係数 k の積で表す.

$$\mathbf{f}_{i,xy} = k t_i \quad (3)$$

トルク値は実験式より既知であるから, 式(2)式(3)より係数 k を以下のとおり算出する.

$$k = \frac{T_q}{\left| \sum_i (\mathbf{r}_i \times \mathbf{t}_i) \right|} \quad (4)$$

これより干渉点 i に作用する $f_{i,xy}$ が決まる.

2. 4 ジグに作用する力の計算

有限要素法を用いて以下の剛性方程式を解くことで, ジグに作用する力を計算する.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{M}\mathbf{g} \quad (5)$$

ここで \mathbf{F} は外力, \mathbf{u} は変位, \mathbf{K} は剛性行列, $\mathbf{M}\mathbf{g}$ は重力である. 式(1)式(3)で求めたで求めた切削力は, 外力 \mathbf{F} ベクトルの要素として含まれる.

干渉点に働く切削力を, 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を用いて計算する際, メッシュ要素としてボクセル形状の6面体を採用している. 干渉判定に用いる点はこの6面体内部に等間隔に配置されていることから,

切削力が作用するノードは干渉した点が属する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, 干渉した点の6面体内の位置に基づき分配する.

ジグに作用する力をジグと被削材の合わせ面に働く力 f_{cl} とした場合, その力は合わせ面の構成ノードに作用する内力を基に計算することができる. 式(6)にその計算式を示す.

$$\mathbf{f}_{cl} = \sum_{j \in R} \mathbf{K}_j \mathbf{u}_j \quad (6)$$

ここで \mathbf{K}_j は構成ノード j とその隣接ノードからなる剛性行列, \mathbf{u}_j は \mathbf{K}_j に対応する変位であり, R は被削材(またはジグ)の合わせ面の構成ノードの集合である.

3. 切削加工シミュレーションの検証

ジグを用いて被削材を固定した穴あけ加工において, 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.

使用した部材の物性値を表1に, 切削条件を表2に示す. 被削材は図3のようにジグで固定され, ドリルを用いて被削材の中央を, 3mm毎のステップで穴あけを行った. ジグに作用する力は, 被削材と3分力計の合わせ面に働く xyz 成分の力とし, 3分力計を用いて計測する. 3分力計の z 軸は切削工具の軸方向, xy 平面は被削材と3分力計の合わせ面と平行とし, 被削材の長手方向を x 方向とした. なお, 今回の実験で使用した被削材のブリネル硬さが測定できなかったため, スラスト力とトルクの値は予備実験

表1 使用部材の物性値

部材	物性値	
被削材 (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[g/cm ³]
ジグ (鉄)	ヤング率	210[GPa]
	ポアソン比	0.3
	密度	7.8[g/cm ³]

表2 切削条件

切削工具	ドリル φ 8[mm] 2枚刃
回転数	2000[rpm]
送り	1080[mm/min]



図3 ジグを用いた被削材の加工

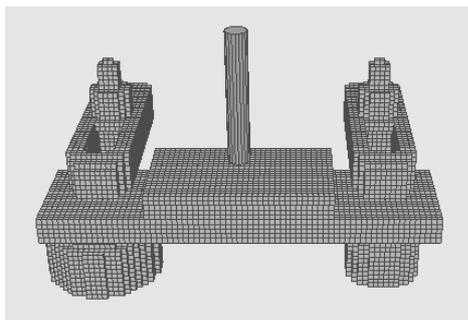


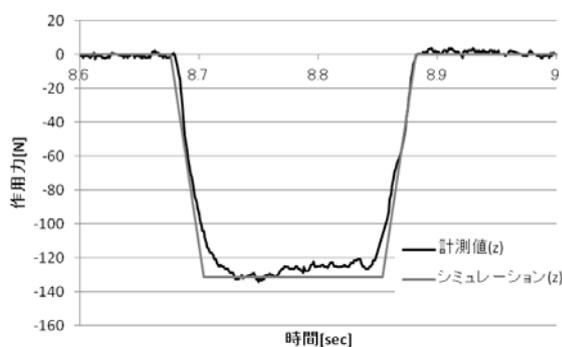
図4 有限要素法でのメッシュモデル

で計測した値を用いた。

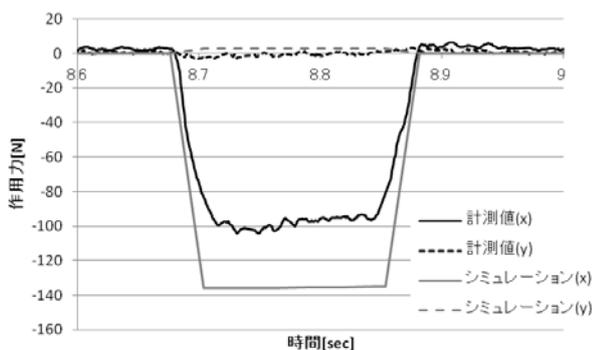
図4にシミュレーションで使用したメッシュモデルを示す。被削材、ジグと3分力計をメッシュサイズ2.0mmのボクセル形状(6面体)で置き換えた。

図5(a)(b)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5はその力は差し引いている。

図5(a)より、ジグに作用するz方向の力は実加工とシミュレーション結果とでほぼ一致していることが確認できる。図5(b)では両者に差が生じているが、この理由は以下のとおりと考えられる。スラスト力が被削材中央に働くことで、被削材に曲げが生じる。被削材の固定状況が両端固定梁と見做せるため、被削材のドリルが当たらない側は引張り応力が支配的になり、被削材は両端方向に伸びようとする。シミュレーションでは3分力計を中身が詰まった中実モデルと見做したが、実物の3分力計はセン



(a) z方向のジグ作用力



(b) x, y 方向のジグ作用力

図5 計測値とシミュレーション結果の比較

サが内蔵されていることから中空と推定され、実物に比べ剛性が高く設定されている。そのため、シミュレーションでは両端方向に伸びようとする被削材に対して、3分力計が変形せずに抵抗するため、計測値より大きい値になったと推測される。y方向に関してはx方向ほどの力が作用せず、両者とも小さい値となっていることが確認できる。

4. まとめ

本研究ではジグ設計を評価するシミュレーション技術の開発を目指し、今年度は切削加工シミュレーションで穴あけ加工の模擬を行った。ジグを用いて被削材を固定した穴あけ加工において、実加工とシミュレーション結果の比較を行った。その結果、z方向のジグ作用力はほぼ一致することを確認した。今後更なる検証を行い、シミュレーションの精度向上を図りたい。

謝 辞

本研究を進めるにあたり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] 横山ら, “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”, 岐阜県情報技術研究所研究報告 第14号, pp.29-32, 2013.
- [3] 例えば, M.C.Shaw, and C.J.Oxford Jr, “On the Drilling of Metals 2-The Torque and Thrust in Drilling”, Trans. of ASME, Vol.79, pp.139-148, 1957.