

ジグ設計評価の構造解析に関する研究(第2報)

横山 哲也

Research on Evaluation of Jig Design using FEM (2nd Report)

Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 切削加工においてジグ設計が適切でないと、切削中に材料がずれ動くことがあり加工精度が低下する。ジグ設計が不適切となる理由の1つに、設計指標がなく熟練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依存しない、ジグ設計評価手法を構築することを目的に、NCデータに基づく切削シミュレーションを構築した。シミュレーションではクランプと被削材間に働く力が算出できることから、過大な切削力による材料のずれ動く可能性を数値化することができる。

キーワード ジグ設計, 有限要素法, 切削抵抗

1. はじめに

切削加工において、図1に示す被削材の動きを固定するジグは加工精度に大きな影響を与える。配置位置、配置個数および締付け力を決めるジグ設計が適切でないと、被削材のずれ動きが発生し加工精度を低下させる原因になる。

被削材のずれ動きを抑えるためには、切削中に発生する切削抵抗を考慮した力でジグを締付ければよい。しかし、切削中は被削材上を切削工具が移動するため、ジグが受ける切削抵抗の分力は変化する。またジグの締め付け力が過大な場合は、被削材に塑性変形を与えることになる。それらを考慮して締め付け力を決定する必要がある。ジグ設計が不適切となる理由の1つには、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。そのため、ジグ設計評価手法の構築は、支援ツールとして非熟練者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。

我々は上記課題の解決策として、有限要素法を用いた構造解析を行い、フライス加工を用いた切削加工において、ジグに作用する切削抵抗の分力を算出した¹⁾。本年度は被削材の動きを固定するクランプジグの変形も考慮し、NC加工プログラムに基づいたシミュレーションを構築する。これにより、クランプと被削材との合わせ面に働く力を算出することで、合わせ面で滑りが生じる可能性が分かり、ひいては被削材のずれ動く可能性を数値化することができる。また、構造解析に係る計算時間の短縮を図るため、GPUを用いた有限要素法の解法を行う。

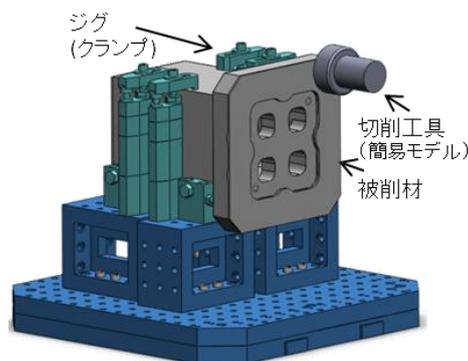


図1 ジグで固定された被削材のフライス加工

2. 切削シミュレーションの構成

2.1 概要

図2に切削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、被削材と工具の衝突判定を行い、その結果を受けて切削抵抗を計算する。切削抵抗を外力として、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。併せて、被削材とクランプの接触面間に作用するクランプ力を計算し、合わせ面で被削材が滑る可能性を数値化する。作業者はその値をもとに、被削材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。

切削シミュレーションの変形・応力計算は、有限要素法に基づく構造解析を行っている。本シミュレーションでは工具の動きに応じて境界条件を逐次変更し、切削量

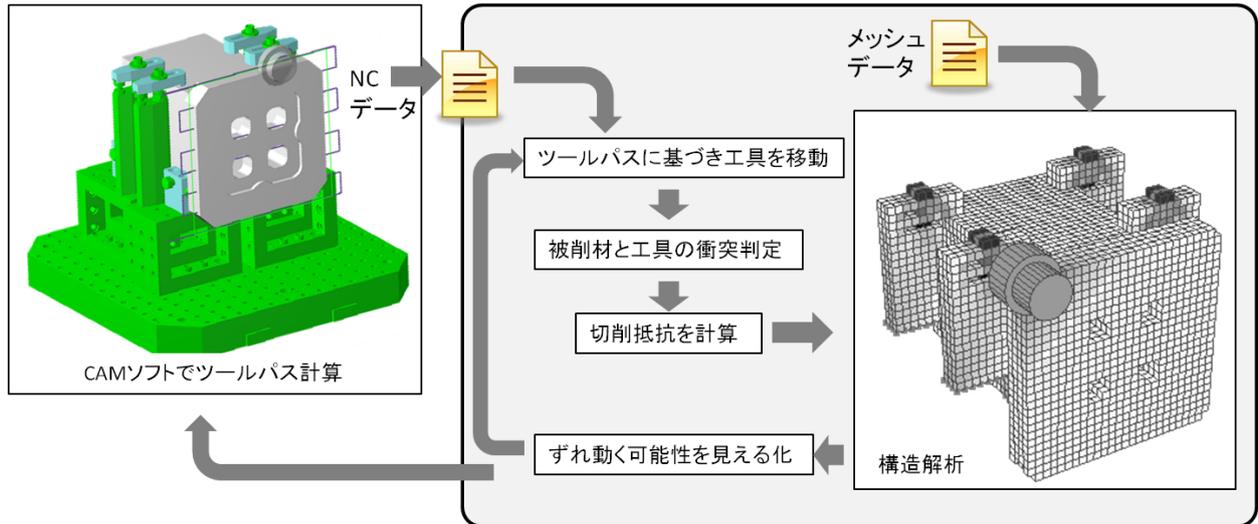


図2 切削シミュレーション概要図

に応じて被削材の剛性変更する必要があるため、専用のソルバーを開発した。ソルバーに与えるメッシュデータは、汎用性のあるNastran Bulk Data形式で記述してある。

2. 2 有限要素法を用いた変形算出

有限要素法は対象物体を有限要素で構成し、物体の特性値を組み込むことで、物体が外力を受けた際の変形と反力を正確に計算できる。本研究では有限要素法を用いて被削材に切削抵抗が働いた際の、ジグに作用する切削抵抗の分力を算出する。なお、変形は微小であることから、線形有限要素法を適用する。

我々は先の研究^[1]で有限要素を1次四面体としていたが、本年度はより精度を高めるため、図2に示す六面体のボクセルメッシュに変更とした。また、曲げによるロッキングにも対応できるように非適合要素とした。

有限要素法による剛性方程式は、外力 F 、変位 u 、剛性行列 K と物体力(重力) M_g を用いて式(1)で与えられる。

$$F = Ku + Mg \quad (1)$$

式(1)をベクトル、行列の要素を用いて書き直す。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_{cu} \\ F_{cl} \\ * \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (2)$$

添字の f, cu, cl は非拘束 (free) ノード、切削抵抗 (cutting force) が働くノード、締付け力が働くクランプジグ (clamp jig) のノードを指す。なお、式(2)の左辺第1行は外から荷重を受けないため0ある。第4行はクランプを固定しているノードに関する式であり、ノードが固定されていることから変位は0とした。また、その固定ノードに働く力は、シミュレーションでは求めないため、*で置き換えた。

式(2)の剛性方程式は剛性行列 K が逆行列をもたないた

めに、解くことができない。そこで、式(3)のように剛性行列の一部対角要素に単位行列 I を設けるよう変形することで解を求める。

$$\begin{pmatrix} 0 \\ F_{cu} \\ F_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K' & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (3)$$

式(3)のクランプ締付け力 F_{cl} は既知であるから、切削抵抗 F_{cu} が作用した際、共役勾配法^[2]を用いて右辺の変位 u_f, u_{cu}, u_{cl} を算出する。

2. 3 クランプと被削材間に働くクランプ力の算出

前節の変位計算結果を用いて、クランプと被削材間に働くクランプ力 f_{cl} を求める。 f_{cl} はクランプと被削材間の共有ノードに働く力であり、式(2)の第1行に示すように内力であるため値はゼロである。そこで、図3に示すようにクランプに属する有限要素と、被削材に属する要素を仮想的に分離する。分離した状態で共有ノードにかかる内力を計算することで、非ゼロの f_{cl} が計算できる。

$$f_{cl} = \sum_i K_e u \quad (4)$$

ここで K_e は有限要素の剛性行列である。添え字の i は、共有ノードが属する有限要素の識別子である。

被削材とクランプとの合わせ面で生じる滑りの有無は、

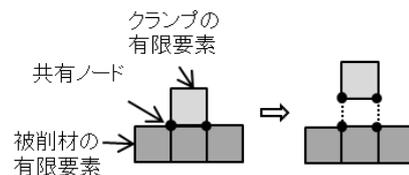


図3 有限要素の分離

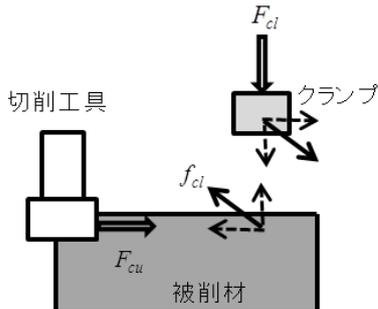


図4 クランプと被削材間に働く作用力 f_{cl}

クランプ f_{cl} を用いて以下の式で判断できる。

$$|f_{cl-t}| \leq \mu |f_{cl-n}| \quad (5)$$

ここで μ は摩擦係数, f_{cl-t}, f_{cl-n} は f_{cl} の接線成分力と, 法線成分力である。式(5)の関係が満たされない f_{cl} が作用する場合, クランプと被削材間で滑りが発生し, 材料がずれ動く。

本研究で扱う切削シミュレーションは, 被削材とクランプの接触状態を固着とするため, 摩擦係数を使用せず, 接線力と法線力の比 $|f_{cl-t} / f_{cl-n}|$ を滑り可能性の指標とする。摩擦係数を使用しない理由は, 被削材とクランプの間の接触状態に応じて摩擦係数が変化するため, 作業員が接線力と法線力の比を上回る摩擦係数の接触状態を選択すればよいと考えるからである。また, 接線力と法線力の比を上回る摩擦係数の接触状態がない場合は, 切削条件やジグ設計の見直しを図り, 接線力と法線力の比を下げることになる。

2. 4 切削抵抗の算出

本手法はNCデータに基づき工具位置を併進させるシミュレーションであり, 工具刃先の回転まで考慮していない。そのため, 切りくず厚みに比例した切削抵抗を計算することができない。そこで工具の1刃当りの送り量を切りくず厚みとして計算した切削抵抗を, 工具がシミュレーション1周期で削り落とす領域全体に作用させて計算した^[1]。この手法は, 刃先と材料の接触部の応力状態を正確に表現できないが, 本研究が目的としているクランプ近辺の応力を求めるには, その影響は低く抑えることができる。

本研究ではフライス加工の切削を対象とし, 使用する工具は底がフラットな形状とし, 工具の側刃で切削を行う。切削抵抗を算出するにあたり, 被削材内に均等に質点を配置し, 切削工具の動きに応じて質点と工具の干渉を判定する。ここでの干渉は幾何学的な干渉であり, 切削工具の領域内で質点の内外判定を行う。

工具と干渉する質点に働く切削抵抗 F_{cu} を以下のとおり算出する。

$$F_{cu} = NKsA \cos \theta = NKslF_z \cos \theta \quad (6)$$

ここで N は同時切れ刃数の最大値, Ks [N/mm^2] は比切削抵抗, A [mm^2] は切削面積とし, l [mm] は切削工具軸方向の切り込み量である。 $\cos \theta$ は工具進行方向に対して工具と干渉した質点の配置角度である。 F_z [$mm/tooth$] は切削工具1刃当りの送り量で, 以下の計算式で算出する。

$$F_z = \frac{F}{ZS} \quad (7)$$

ここで S [rpm] は切削工具の回転数, F [mm/min] は送り速度, Z は切削工具の刃数である。シミュレーション1周期における干渉質点に働く切削抵抗は, 式(6)で求めた F_{cu} を工具軸に垂直な平面内に存在する干渉質点個数で割った値とした。

3. GPUを用いた計算時間の短縮

本研究で扱う切削シミュレーションでは有限要素法を用いることから, 被削材料の有限要素を細かくするほど, 計算結果の精度は向上する。ただし, 式(3)の連立方程式を解くにあたり, 有限要素を構成するノード数の2乗に比例した計算時間が費やされるため, 有限要素を細かくするほど効率が悪くなる。そこで本章では, グラフィックボードのGPU(Graphic Processing Unit)を用いて計算時間の短縮を図る。GPUはSIMD(Single Instruction Multiple Data)等を用いることで並列計算を可能とし, 大規模行列計算における有益なツールである。

式(3)の連立方程式を解くにあたり, 剛性行列 K' の記憶方法を変更する。 K' は疎行列であるから, このままの形で行列-ベクトル演算を行うと無駄な乗算が発生する。本研究では行方向を圧縮したCRS(Compressed Row Storage)形式で K' の要素を記憶することで, 疎行列計算に対応する。

式(3)の解を共役勾配法^[2]を用いて反復計算で求める。共役勾配法は, 解ベクトルの次元数以下の回数で反復計算解が収束する。さらに, 剛性行列の条件数を小さくする前処理を施すことで, 収束が速くなる。そこで本研究では, 前処理として対角スケールリングを使用した。NVIDIA社のグラフィックボードGeForce GTX480のGPUを用いて, 共役勾配法と対角スケールリングを実装した。実装に当たっては, NVIDIA社CUDAライブラリのCUSPARSEライブラリを使用することで, CRS形式の行列-ベクトル演算に対応した。剛性行列要素はシミュレーション起動時にパソコンからGPUへ一括して送信している。計算が終了したときは, 計算結果のみGPUからパソコンへ送信する。材料が削られ剛性要素が変化したときは, 要素の変更箇所だけデータ転送する。

表1 計算時間の比較

	共役勾配法 +前処理[秒]	共役勾配法 [秒]
パソコン(OpenMP)	6.4	11.1
GPU	1.26	2.12

図2で示す有限要素モデルを用いて、パソコンとGPUでの計算時間の比較を行った。このモデルにおける有限要素のノード数は13,890、解ベクトルの次数は41,670である。計算に用いたパソコンはDELL社のXPS-720で、CPUはInter Core2 Extream(3.0GHz)、並列演算ライブラリOpenMPを用いて並列演算している。

表1に計算時間を示す。GPUを用いることで計算時間が短縮できたことがわかる。参考までに、共役勾配法だけの計算時間も記載する。材料のサイズが大きくなると、有限要素の数が増加するため、GPUを用いても計算時間の増加は免れない。今回利用したCRS形式のGPU計算は、GPU内でのデータ転送のレイテンシが大きいことから、レイテンシを小さくする対応が必要である。

4. 切削加工のシミュレーション

本章では、NCデータに基づいて切削加工のシミュレーションを行い、被削材のずれ動きについて検討を行う。シミュレーションする加工は、正面フライスを用いた面出しで、使用したフライスの軸方向のすくい角度は0°とした。また、材料の物性値を表2に示す。

図5に、10,000[N]でクランプを締付けた際のクランプと被削材間に発生するクランプ力 f_{cl} を示す。図中のクランプの上にある数字がクランプのIDを示し、そのクランプにかかる f_{cl} の成分(単位は[N])を図右上に示す。図中の $|f_{cl_t} / f_{cl_n}|$ が、クランプと被削材の合わせ面に働くクランプ力の接線力と法線力の比である。この値が大きくなるほど、合わせ面で被削材が滑る可能性が高く、ひいてはずれ動く可能性が高くなる。

シミュレーションで求めた面出し加工時のクランプ力 f_{cl} を図6(a)(b)に示す。切削工具の進行方向および工具の回転方向を図中の矢印で示す。また、白抜き矢印で、計算で求めた切削抵抗の向きを示す。図6(a)のダウンカットにおいて、工具に近いクランプ#2と#4で切削前(図5)に比べて f_{cl} のx成分が負に変化、#4ではy成分が負に

表2 材料物性値

材料名	物性値	
被削材 (ねずみ鉄鉄)	ヤング率	200[GPa]
	ポアソン比	0.27
	密度	7.2[g/cm ³]
クランプ (S45C)	ヤング率	205[GPa]
	ポアソン比	0.3
	密度	7.8[g/cm ³]

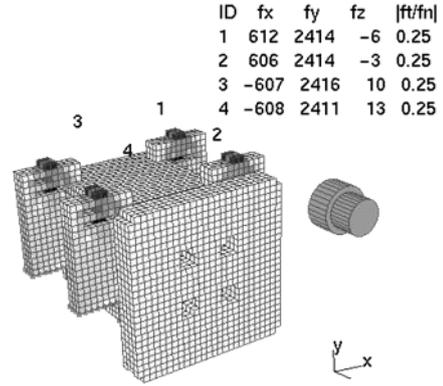


図5 クランプ締付け (切削前)

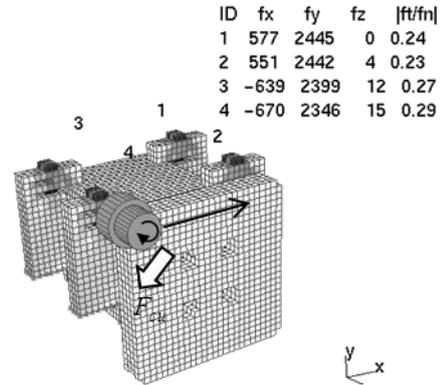


図6(a) 面出し加工 (工具位置は左上)

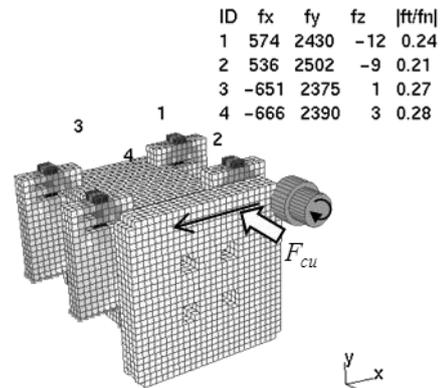


図6(b) 面出し加工 (工具位置は右上)

変化している。図6(b)のアップカットにおいては、#2と#4ではx成分が負に変化、y成分が正に変化している。図中の比より、この面出し加工において、被削材とクランプ面の合わせ面が滑る可能性が一番高いのは、加工開始時(アップカット)のクランプ#4である。

今回のシミュレーションケースでは、クランプの締付けで接線力と法線力の比が0.25であるため、材料の加工面が支持片に接するクランプ(摩擦係数が0.1~0.15^[3])は滑りを生じる可能性が高く、使用を避けるという結果が得られる。

5. まとめ

フライス加工を用いた切削加工のジグ設計評価手法を構築するため、有限要素法を用いた切削シミュレーションを構築した。本年度は被削材の動きを固定するクランプジグの変形も考慮し、NC加工プログラムに基づいたシミュレーションを構築した。その結果、被削材とクランプジグとの合わせ面に働くクランプ力を算出することができ、その接線力と法線力の比から、合わせ面での滑りが発生する可能性を数値化した。

接線力と法線力の比の値が小さい場合、被削材とクランプの合わせ面の接触状態（面接触、点接触）、接触面の面出し有無等で摩擦係数を選択すること、材料のずれ動きは未然に防げると考える。値が大きい場合は、値そのものを小さくするよう、切削条件の見直しまたはジグ設計の見直しを図る必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、CADデータの提供およびジグ設計の指導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”，岐阜県情報技術研究所研究報告 第12号，pp.15-16，2011
- [2] 戸川隼人，“共役勾配法”，教育出版，1990.
- [3] 酒庭秀康，“現場で役立つモノづくりのための治具設計”，日刊工業新聞，2006.