

ジグ設計評価のための構造解析に関する研究(第1報)

横山 哲也

Research on FEM for Jig Design Evaluation (1st 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、ジグ設計の評価手法を構築することを目的とする。本年度はフライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象とし、有限要素法を用いた構造解析について検討を行い、ジグに働く切削抵抗反力と締付け力とを比較可能なシミュレーションを構築した。

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に示す材料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。このジグに関して、配置位置、配置個数および締付け力を決めることをジグ設計というが、ジグ設計が適切でないと材料のずれ動きが発生し加工精度を低下させる原因になる。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、ジグ設計の評価手法の構築は、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と考える。

材料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締付け力がジグに働けばよい。しかし、切削中は材料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し、材料が削られ剛性は劣化する。それらを考慮して締付け力を決定する必要がある。また、ジグ自体が切削工具の動きを阻害しないため、取り付け位置にも制約があり、適切なジグ設計を行うことは難しい。

そこで我々は上記課題の解決策として、NCプログラムに基づいた加工シミュレーションにおいて、有限要素法を用いた構造解析を行い、ジグに作用する切削抵抗の反力を算出し、その値を基にジグの締付け力を評価するジグ設計の評価手法を構築する。本年度は、フライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象とし、有限要素法を用いた構造解析について検討を行う。

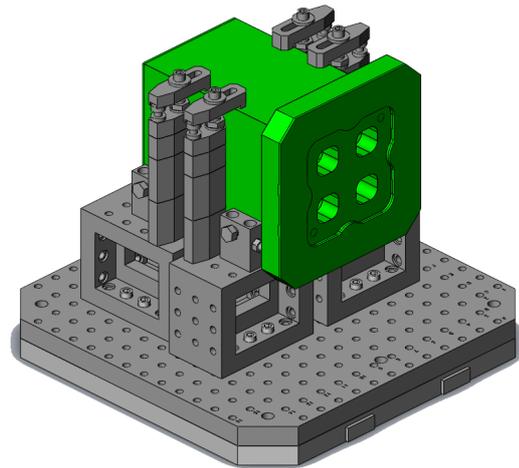


図1 ジグで固定された鋳物素形材料

2. ジグに働く切削抵抗反力の算出

2.1 ジグに働く切削抵抗反力の算出

有限要素法は対象物体を有限要素で構成し、材料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。本研究では線形の有限要素法を用いて材料に切削抵抗が働いた際の、ジグに作用する切削抵抗の反力を算出する。図2に、四面体を有限要素として構成した鋳物材料を示す。使用したメッシュャソフトはCIMNE社のGiDである。なお、本章では便宜上、切削加工時に材料と切削工具の間に発生する切削抵抗は既知とする。

線形の有限要素モデル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。

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

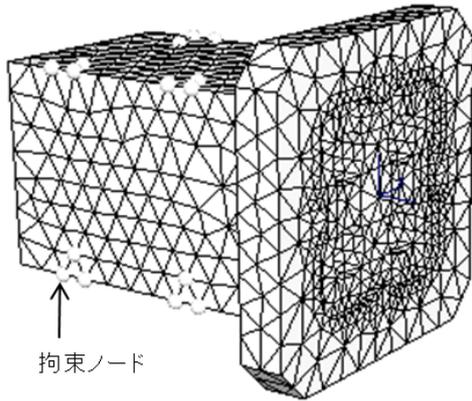


図2 有限要素で構成された鋳物素形材

剛性方程式(1)を以下のとおり書き直す.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_{cu} \\ f_{cl} \\ f_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} & & & \\ & K & & \\ & & & \\ & & & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_{cu} \\ u_{cl} \\ u_s \end{pmatrix} + Mg \quad (2)$$

添字の f, cu, cl, s は拘束を受けないノード, 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) に接触するノードおよびストップジグ (stopper jig) に接触するノードである. なお, 式(2)の左辺第1行は外から荷重を受けないため0である. 本研究では線形の有限要素法を使用することから, 締付け力と切削抵抗による変形は線形の重ね合わせの原理から別々に考えることが可能である.

切削抵抗 f_{cu} が働くもとの, ジグに働く反力 f_{cl}, f_s を求める. 拘束条件のない剛性行列 K の逆行列は存在しないため, 剛性方程式を解くにあたり剛性行列の一部に単位行列を設けるよう, 式(3)のとおり変形した. なお, クランプジグおよびストップジグは強制変位0の拘束が働くとした. 式中の*は未知であることを示す.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ f_{cu} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} & 0 & & \\ & & 0 & \\ 0 & & I & \\ & 0 & & I \end{pmatrix}}_K \begin{pmatrix} * \\ * \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (3)$$

切削抵抗 f_{cu} が作用した際, 共役勾配法^[1]を用いて右辺の変位 u_f, u_{cu} を算出し, 式(2)を用いてジグに働く反力 f_{cl}, f_s を求める.

2. 2 締付け力と切削抵抗反力の関係

ジグの反力 f_{cl} によって, 材料がずれ動く可能性を以下の方法で判断する. 締付け力 $\overline{f_{cl}}$ とした場合, 図3のように f_{cl} と $\overline{f_{cl}}$ が直交する場合, 次の関係を満たす必要がある.

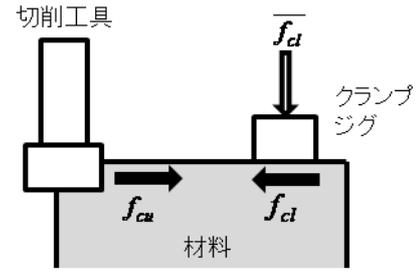


図3 締付け力と切削抵抗反力の関係(1)

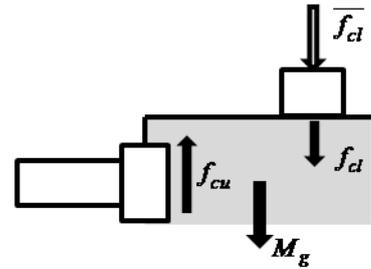


図4 締付け力と切削抵抗反力の関係(2)

$$|f_{cl}| \leq \mu |\overline{f_{cl}}| \quad (4)$$

ここで μ は摩擦係数である. 式(4)の関係が満たされない f_{cl} が作用する場合, ジグと材料間ですべりが発生し, 材料がずれ動く可能性が高いと判断できる.

図4のように f_{cl} と $\overline{f_{cl}}$ が平行に働く場合, 材料を押さえるために式(5)の関係を満たす必要がある.

$$|f_{cl}| \leq |\overline{f_{cl}}| \quad (5)$$

3. 切削抵抗の算出

3. 1 切削抵抗の算出

有限要素法による構造解析を行うにあたり, 入力値となる切削抵抗の算出が必須になる. 切削抵抗の算出には, 切削工具の回転角度に応じて変動する瞬間切削抵抗を計算する手法がある^[2]. 切削抵抗の変動は切りくず厚みが

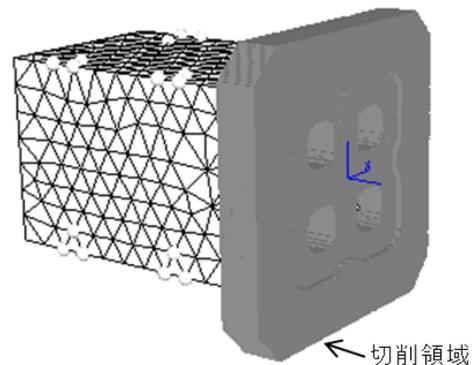


図5 材料上の切削領域

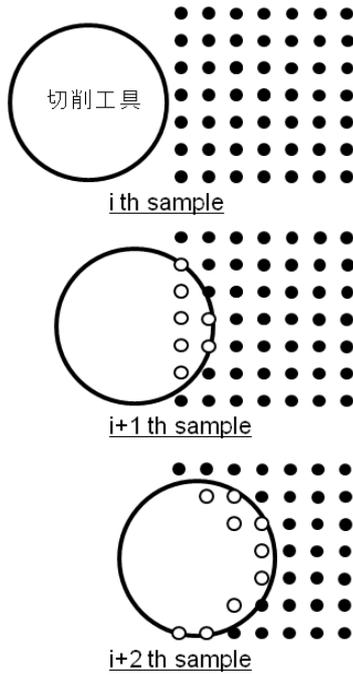


図6 材料と切削工具の干渉

一定でないことに起因するが、本研究では切削抵抗の最大値が求めればよいことから、切りくず厚み最大値の1刃当りの送り量を用いた計算とする。また、今年度に関しては切削抵抗の主応力のみを求めることとした。なお、本研究では切削部位特定にかかる計算量を削減するため、図5のとおり材料上に予め切削領域を定義しておく。図中のボクセル表示（グレー箇所）が切削領域である。

切削抵抗を算出するにあたり、切削領域内に均等に質点を配置し、切削工具の動きに応じて、質点と切削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、図6に示す切削工具の領域内で質点の内外判定を行う。干渉した質点について図中では白抜きで表示する。

サンプル間の材料全体にかかる切削抵抗 f_{cu} を以下のとおり算出する。

$$f_{cu} = NKsA = NKslf_z \quad (6)$$

ここで N は同時切れ刃数の最大値、 Ks [N/mm²] は比切削抵抗、 A [mm²] 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。 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] は送り速度と Z は切削工具の刃数である。各質点に働く切削抵抗は、式(6)で求めた f_{cu} を干渉した質点個数で割った値とした。

次に切削抵抗の向きを求める。切削抵抗は図7のように

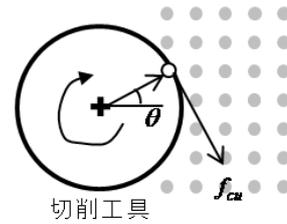


図7 切削抵抗の向き

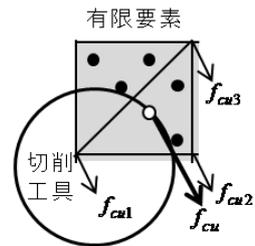


図8 ノードに働く切削抵抗等価力

切削工具外周の接線方向に働く。切削工具の回転中心と質点を結ぶベクトルに対して直角方向に切削抵抗が働くことから、角度 θ を用いて切削抵抗の向きを算出可能である。なおベクトルが働く平面は、切削工具軸に対して垂直平面である。

3. 2 有限要素に働く切削抵抗

切削抵抗を算出後、有限要素法へ計算の入力とするために、有限要素のノードに切削抵抗を分配させる必要がある。本研究では要素の重心座標を用いて、要素を構成するノードに切削抵抗を分配する。図8に切削抵抗の分配力(以下、等価力) $f_{cu1,2,3}$ を示す。この等価力が有限要素法の入力値となる。

3. 3 切削に伴う剛性劣化

切削に伴い材料の形状が変化し、剛体が劣化する。本研究では有限要素内に含まれる質点数を把握し、切削に伴い質点個数がゼロとなった場合に有限要素モデルから

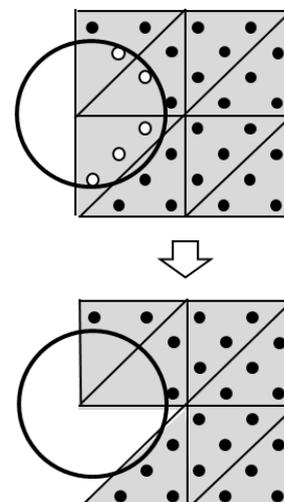


図9 要素削除イメージ

要素を削除することとした. 図9に要素削除のイメージを示す.

有限要素削除に伴い剛性行列を修正する必要がある.

$$K' = K - \Delta K_e \quad (8)$$

ここで ΔK_e は要素剛性行列である. 本研究では剛性方程式の解法において, 共役勾配法を用いている. 共役勾配法は反復計算で事前計算を必要としないことから, 剛性行列の変化に伴う計算時間の影響はない.

3.4 切削抵抗を計算入力とした加工シミュレーション

図10に, 横型フライスによる切削抵抗を計算入力とした加工シミュレーションを示す. パッチの色はミーゼス応力の大きさを示す. 図より切削工具に近い部位に応力が集中していることがわかる. なお, 図10は便宜上, 物体力をゼロとして計算した結果である.

1 サンプルにおける式(3)の計算時間は, 共役勾配法(対角スケール)とOpenMPを用いた並列計算を施した結果, 0.05~0.1[sec]程度であった. なお, 材料の有限要素を構成するノード数は1955, 共役勾配法の収束判定条件の許容誤差は1.0E-12である.

4. まとめ

フライス盤を用いた鋳物素形材の切削加工を対象としたジグ設計評価手法を構築するため, 有限要素法を用いた構造解析について検討を行い, ジグに働く切削抵抗反力と締付け力とを比較可能なシミュレーションを構築した. 今後は加工シミュレーションの妥当性を検証するため, 実加工との比較を行う予定である.

なお, ジグの締め付け力が過大な場合は, 材料に塑性変形を与えることになる. これについては補足Aに記載する方法で, その影響を調べることができる.

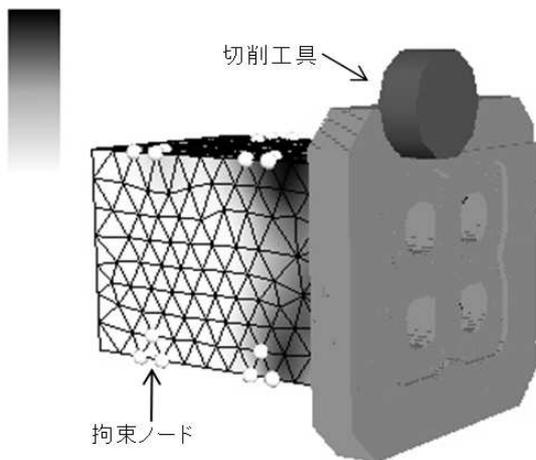


図10 加工シミュレーション

謝辞

本研究を進めるにあたり, 財団法人遠藤斉治郎記念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, 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も感謝致します.

文献

- [1] 戸川隼人, “共役勾配法”, 教育出版, 1990.
- [2] 例えば, 高田祥三, 山崎好幸, “切削状態予測のためのモデルベース切削加工シミュレーションシステム”, 日本機械学会論文集(C編), 61巻581号, 1995.
- [3] 三好敏郎, “有限要素法入門”, 培風館, 1978.

補足

A. 締付け力が材料に及ぼす影響について

過大な締付け力が材料に加わると, 材料は塑性変形を生じる. 加工シミュレーションでは以下に記載する計算で締付け力の大きさから応力を計算することで, 材料が弾性変形から塑性変形に変わる応力(以下, 降伏応力)との比較が可能である.

締付け力 f_{cl} のみが材料に作用した際の剛性方程式を以下に示す.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_{cl} \\ 0 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} & & & \\ & & 0 & \\ & & & \\ 0 & & & I \end{pmatrix}}_{K'} \begin{pmatrix} * \\ * \\ * \\ 0 \end{pmatrix} + Mg \quad (9)$$

式(9)は剛性方程式を解くため, 剛性行列の一部に単位行列を設けている. 共役勾配法を用いて, 式(9)の未知変位 $u(=u_f, u_{cu}, u_{cl})$ を算出したら, 式(10)より各四面体に働く応力 σ を求める.

$$\sigma = DBu \quad (10)$$

ここで D はヤング率とポアソン比で構成される応力-歪み行列, B は形状関数の微分で表された歪み-変位行列である^[3]. 算出した応力 σ を最大主応力もしくはミーゼス応力に変換することで, 降伏応力との比較が可能となる.