

複雑形状部品の高効率加工技術の開発

工業材料科 研究員 福田 洋平
工業材料科 科 長 瀧内 直祐

インペラー及びタービンブレード等の複雑形状部品の加工には、5軸制御工作機械とボールエンドミルが用いられる。しかし、ボールエンドミルの切削機構は複雑であると共に、切削条件のパラメータとして2軸の工具傾斜が加わるため、最適な工具経路及び切削条件の決定手法が確立されていない。

本研究では、ボールエンドミル切削の幾何学解析及びスクエアエンドミルを用いた切削実験を実施し、切削実験によって得た工具の摩耗進行データと幾何学解析を組み合わせることでボールエンドミルの摩耗予測プログラムを作成した。また、摩耗予測プログラムより得られた知見からインペラーの高効率加工方法を考案した。

1. 緒言

近年、工作機械及びCAD・CAM技術の進歩に伴い、5軸制御工作機械の普及が進んでいる。5軸制御工作機械は、工作物に対して任意の方向から工具をアプローチさせることができるため、①ワンチャッキングによる多面加工、②アンダーカット部の加工及び③短い工具突出しでの加工が可能となる。これらの特徴によって、加工工程の削減及び高付加価値部品の加工を実現することができる。

インペラー及びタービンブレード等の複雑形状部品の加工する場合、切削工具にはボールエンドミルが用いられる。しかし、ボールエンドミルの切削機構は複雑であると共に、切削条件のパラメータとして2軸の工具傾斜が加わるため、最適な工具経路及び切削条件の決定手法が確立されていない。

本研究では、ボールエンドミル切削における高効率な切削条件を導くため、①切れ刃各部の実切削速度等を算出する幾何学解析プログラムの作成、及び②工具の摩耗進行データを取得するための切削実験を行い、それらを組み合わせることで工具の摩耗予測プログラムを作成する。また、摩耗予測プログラムより得られた知見からインペラーの高効率加工法を考案する。

2. 幾何学解析プログラム

単位時間当たりの除去体積を大きくするためには、切削速度(工具回転数)、1刃当りの送り量及び切込みを大きくする必要がある。一方、工具寿命を長くするためには、切削速度及び切削厚さを小さくする必要がある。しかし、ボールエンドミル切削では、切れ刃の各位置において切削速度及び切削厚さが異なるとともに、2軸の工具傾斜を付与することによってそれらの値が変化する。そのため、熟練技能者においても切削

現象の把握が困難である。

そこで、ボールエンドミル切れ刃各位置の切削速度及び切削厚さ、そして切れ刃に生じる負荷(切削抵抗等)を簡便に把握するため、笠原らの研究報告^{[1][2]}を基に幾何学解析プログラムを作成した。

解析手順は、①工具切れ刃の定義、②切削断面積(切削厚さ)の計算、③切削抵抗の計算となる。

2.1 工具切れ刃の定義

工具半球部の切れ刃は下記の位置関係にあるとし、工具径D、すくい面傾斜及びすくい面オフセットeの4つのパラメータによって定義する。

- ①先端部の切れ刃は球面上にある。
- ②すくい面は先端で(e,0,0)を通る平面で近似する。
- ③切れ刃はすくい面と球面の交線で表す。

一例とし、図1に2枚刃ボールエンドミル(S-2MB R10:三菱マテリアル製)を対象として定義した場合の切れ刃位置を示す。

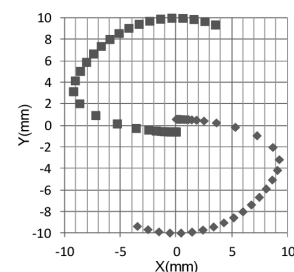


図1 切れ刃座標(X-Y)

2.2 切削断面積の計算

図2に示すように、切れ刃上の任意の一点における切削厚さは、1回転前の切れ刃によって生成された面との法線方向距離とする。ここで得られる切削厚さを切れ刃全域にわたって積分することで、任意の回転角における切削断面積を得ることができる。図3にボールエンドミル(S-2MB R10：三菱マテリアル製)の切れ刃が1枚であると仮定して、送り速度0.1mm/toothの条件で溝切削を行った場合の工具1回転中における切削断面積の変化を示す。

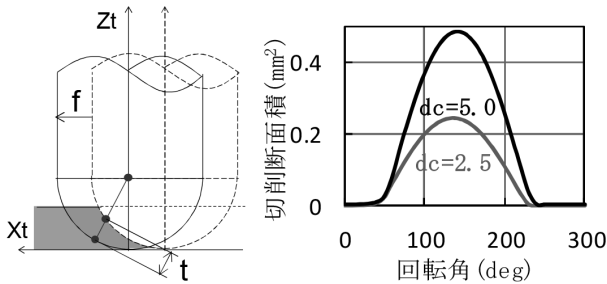


図2 切削厚さ t

図3 切削断面積

2.3 切削抵抗の計算

切削抵抗の計算に用いるモデルの特徴を以下に示す。

- ①切れ刃に沿う全体の変形様式を微小幅の単純せん断面からなる傾斜切削模型の集積ととらえる。
- ②切れ刃にそった有効せん断角、切りくず流出角、せん断速度、切りくず流出速度等の変化を考慮する。
- ③せん断面通過後の切りくず流出速度に基づき、一体で横向きカールを伴う切りくず生成状態を表現する。

このモデルは2変数の関数で表現でき、切れ刃上のある1点の切りくずカール半径と切りくず流出角を与えることで全体の変形様式を定めることができる。そして、全体の変形に要する動力が最も小さくなる条件を解とする。ただし、せん断応力、有効せん断角及びすくい面摩擦角と有効すくい角との関係は2次元切削実験に基づき与えられる。

2.4 解析結果と評価

作成したプログラムを評価するため、切削実験を行った。実験は5軸制御立形マシニングセンタ(株)牧野フライス製作所：D500)を使用し、切削動力計(日本キスラー(株)：9257B)を用いて切削抵抗を測定した。表1に実験条件、図4に溝切削時の解析値と実験結果及び図5にピックフィード時の解析値と実験結果を示す。なお、解析値は1枚刃のみとして計算している。

溝切削時及びピックフィード切削時の実験結果と解析値は良好な一致を示しており、本プログラムによってボールエンドミルの切れ刃に生じる負荷(切削抵抗)をモニタリングすることが十分可能であるといえる。

表1 切削条件

工具	S-2MB R10 (三菱マテリアル)
回転数	320min ⁻¹
送り	0.1mm/tooth
切込み	3.0mm

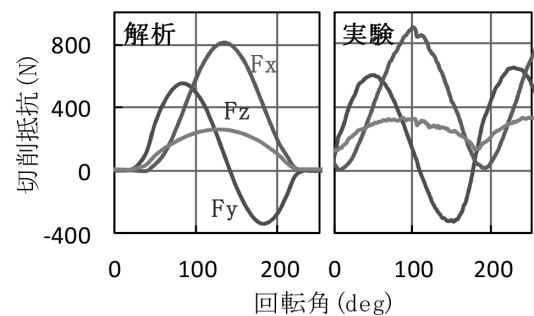


図4 溝切削における解析及び実験結果

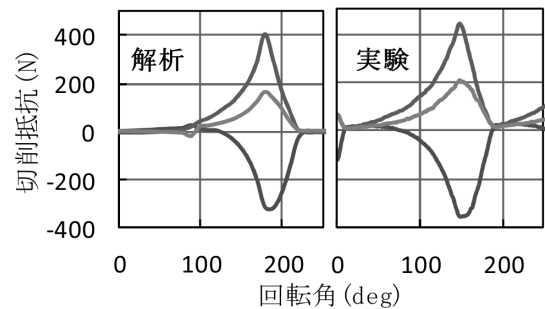


図5 ピックフィード切削における解析及び実験結果

3. 切削実験

幾何学解析プログラムにより任意の切削条件における切れ刃各位置の切削速度及び切削厚さの算出が可能となった。しかし、工具摩耗の進行は切削速度と切削厚さの2パラメータのみで決まるわけではなく、工具材質、ワーク材質、潤滑状態及び工具とワークの接触長さ等によって全く異なる傾向となる。そのため、いかなる加工条件においても実加工時の条件に合わせた切削実験を行い、そこで取得したデータを基に工具の摩耗予測を進める必要がある。今回は、耐熱性及び比強度が高く、切削加工が困難な難削材とされるチタン

合金(Ti-6Al-4V)を被削材と定め、切削実験を行った。

3.1 実験条件

スクエアエンドミルを用いた切削実験によりデータの取得を行った。工具は、びびり振動の発生によるチップング等の損傷を防ぐため、不等リード・不等ピッチの4枚刃エンドミル(VF-MHV0600：三菱マテリアル製)とした。また、工具刃先の冷却のために水溶性クーラントを供給した。実験条件を表2に示す。

表2 スクエアエンドミルによる切削実験の条件

	切削速度 (m/min)	1刃当りの送り量 (mm/tooth)
①	80	0.05
②	40	0.05
③	120	0.05
④	80	0.025
⑤	80	0.075

条件①を標準切削条件とし、切削速度及び1刃当りの送り量を実験パラメータとした5条件を設定した。なお、全ての条件において軸方向切込みは3.0mm、径方向切込みは1.0mmとした。

3.2 実験結果

切削速度が異なる3条件における逃げ面摩耗の推移を図6に、1刃当りの送り量が異なる3条件における逃げ面摩耗の推移を図7に示す。一般的に工具摩耗の推移を示すグラフの横軸は、切削距離、切削時間若しくは除去体積で示される。しかし、本実験は工具の摩耗予測プログラムを作成するためのものであるため、横軸は衝撃回数(1枚の切れ刃が工具に切り込んだ回数)と設定している。切削速度が速くなるほど、また、1刃当りの送り量が大きくなるほど逃げ面摩耗の進行は早く、切れ刃の負荷が大きくなっていることが分かる。切削速度120m/minの条件における逃げ面摩耗幅の推移は、逃げ面摩耗幅が150 μ mを越えたあたりで急激に増加していることから、逃げ面摩耗幅が150 μ mに到達した衝撃回数を工具寿命と設定した。

工具切れ刃のすくい角、逃げ角及びエッジの質は工具摩耗の進行に伴い変化する。そのため、新品の工具で加工を開始した直後の切れ味の良い状態では、1回の切り込みごとに切れ刃に加わる負荷は小さく、工具摩耗が進行して切れ味が低下するに従い切れ刃に加わる負荷は大きくなる。しかし、切れ刃の状態を加工中に把握し管理することは現実的に不可能である。その

ため、加工を開始してから工具が寿命を迎えるまで切削条件は変わらないと仮定し、工具が寿命を迎える衝撃回数の逆数を、1回の切り込みによって切れ刃に加わるダメージと単純化して定義した。各実験条件におけるダメージを図8に示す。

なお、ここで定義したダメージの累積値が1になることで工具は寿命を迎えるが、あくまで切削条件が一定の場合であり、材料疲労の分野で用いられる線形累積損傷則のように複合した切削条件には適用できない。

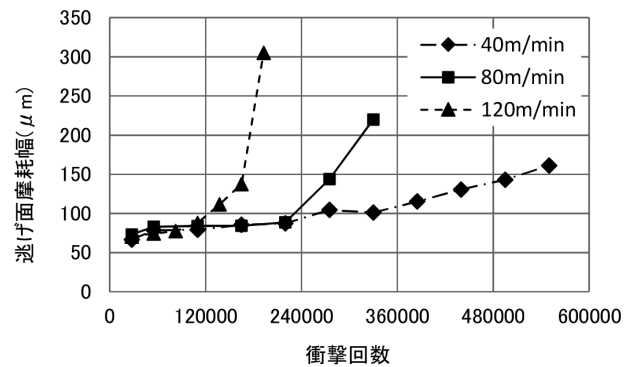


図6 逃げ面摩耗幅の推移(切削速度)

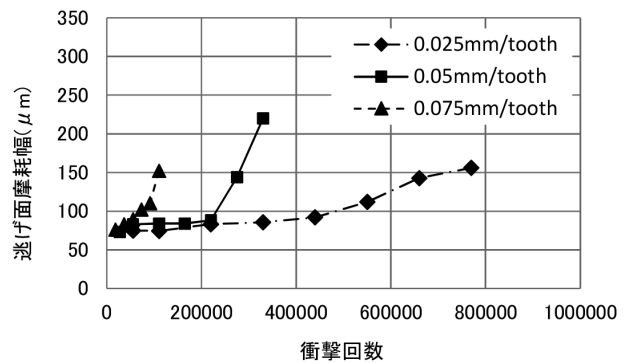


図7 逃げ面摩耗幅の推移(1刃当りの送り量)

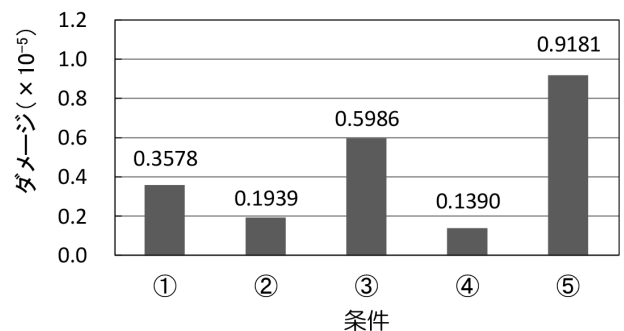


図8 1回の切り込みによる切れ刃のダメージ

4. 工具の摩耗予測プログラム

切削実験の結果を基に工具ダメージの予測式を検討し、幾何学解析プログラムに組み合わせることで工具の摩耗予測プログラムを作成する。

4.1 工具ダメージの予測式

図8に示した実験結果を基とし、図9に切削速度とダメージの関係を示す。実験した切削速度の範囲において、切削速度とダメージの相関は原点を通る直線との良好な近似が確認できた。関係式を図中に示す。

また、1刃当りの送り量が異なる3条件における最大切削厚さを幾何学的に算出し、最大切削厚さとダメージとの関係を示したものが図10である。最大切削厚さとダメージの相関は原点を通る2次の多項式による良好な近似が確認できた。関係式を図中に示す。

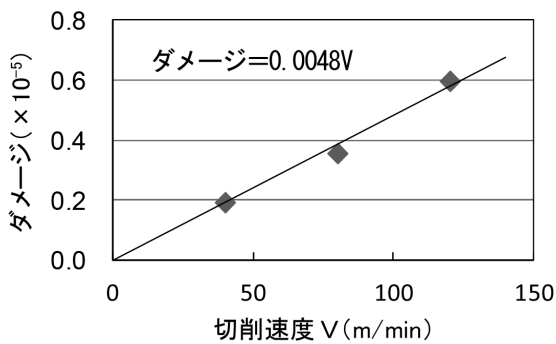


図9 切削速度の影響

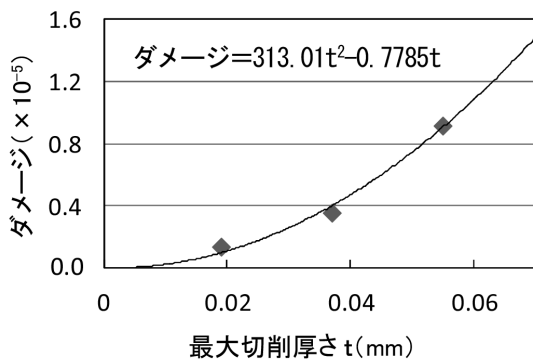


図10 最大切削厚さの影響

今回、切れ刃に加わるダメージは切削速度と最大切削厚さ及び切削長さ(切れ刃がワークに食い込み、抜けるまでの接触長さ)の影響を大きく受けると仮定し、切削速度の影響と最大切削厚さの影響及び切削長さL[mm]を乗じることで工具ダメージを予測するとした。

$$\text{ダメージ} = 0.0048V \times (313.01t^2 - 0.7785t) \times L \quad (1)$$

(1)式により算出したダメージと実験結果により得たダメージの比較を図11に示す。いずれの条件においても実験結果と計算結果には良好な一致が確認できた。

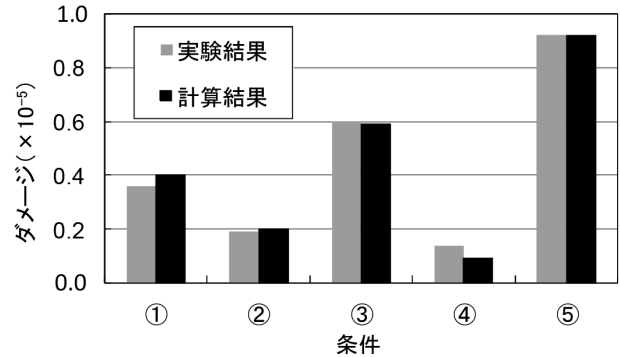


図11 ダメージ計算結果と実験結果の比較

4.2 摩耗予測プログラムの検証

工具ダメージの予測式を幾何学解析プログラムに組み合わせ、ボールエンドミルの工具摩耗予測プログラムを作成した。そして、予測プログラムの予測精度を検証するため切削実験を行い、予測結果と比較した。検証実験の条件を表3に示す。軸方向切り込みは0.5mm、ピックフィードは1.5mmとし、使用した工具は不等カーブ・不等ピッチの4枚刃ボールエンドミル(VF-4SVBR3：三菱マテリアル製)である。なお、リードは送り方向へ工具軸が倒れた角度を示し、リーンはリードに対し直交方向に工具が倒れた角度を示す。

切削実験の結果と摩耗予測プログラムによる計算結果の比較を図12に示す。いずれの条件においても計算結果は実験結果の2倍程度大きい値であった。これは、実験に使用したスクエアエンドミルとボールエンドミルの切れ刃諸元が一致しないことに起因すると考えられる。そのため、最小二乗法によって補正係数を求め計算結果に乗じることとした。補正の結果、実験結果との良好な一致が確認できた。

表3 検証実験の条件

	工具回転数 (min ⁻¹)	送り速度 (mm/min)	リード (deg)	リーン (deg)
①	12000	3200	0	0
②	7000	1820	30	0
③	7000	1820	0	30
④	7000	1820	-30	0

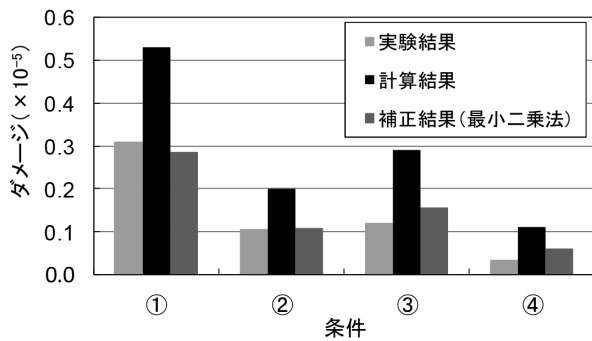


図12 ボールエンドミルのダメージ予測結果

4.3 ボールエンドミル切削の考察

摩耗予測プログラムは切れ刃のダメージ分布を算出することもできる。図13に切削実験を行った4条件のダメージ分布を示す。

図13(a)では、切れ刃の外周側になるほどダメージが加速度的に増加している。これは工具傾斜が無い場合、最外周の切削点は最も切削速度が速く、最も切削厚さが厚く、切削長さも長くなるためである。

それに対して工具傾斜が傾斜した場合、最も切削厚さが厚くなる点と切削長さが長くなる点が分散されるため、工具傾斜が無い場合よりも緩やかなダメージの分布となる。

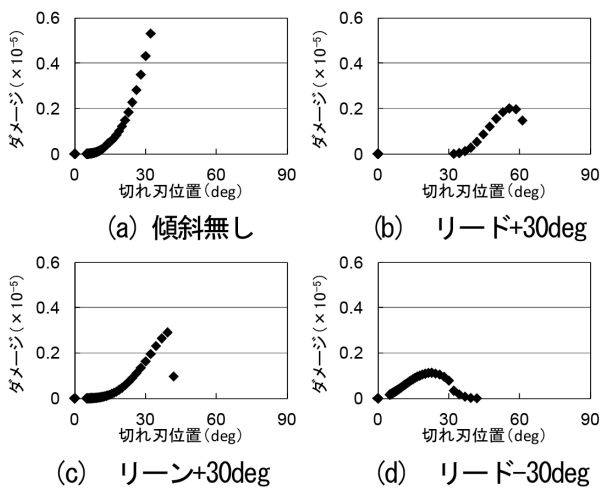
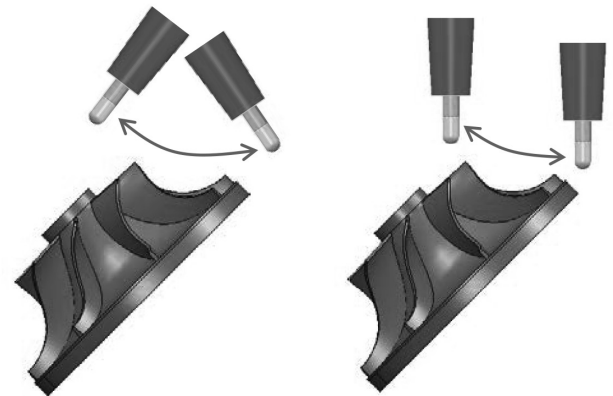


図13 ボールエンドミルのダメージ分布

5. インペラー加工法の提案

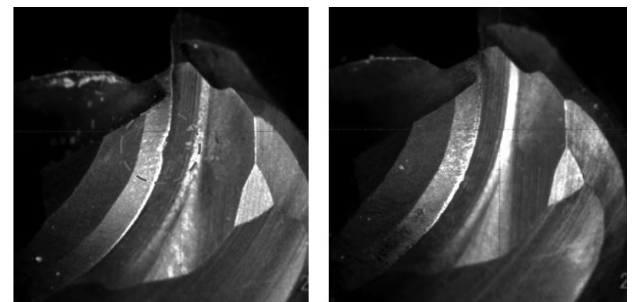
図13のダメージ分布より、リードがプラスの場合は外周部にダメージのピークが生じ、リードがマイナスの場合は軸中心付近にダメージのピークが生じることが分かった。これをインペラーの加工に応用し、従来の法線ベクトル加工法に対して図14に示す傾斜軸

一定加工法を提案し、加工実験を行った。図15に加工後の工具の拡大写真を示す。法線ベクトル加工法においては、切削に寄与する切れ刃の最外周部にダメージが集中し、100 μ m程の逃げ面摩耗が発生している。それに対して傾斜軸一定加工法は工具摩耗が分散されるため、目立った摩耗は観察されなかった。



(a)法線ベクトル加工法 (b)傾斜軸一定加工法

図14 インペラー加工法



(a)法線ベクトル加工法 (b)傾斜軸一定加工法

図15 加工後の工具摩耗

6. 結言

- (1)切削抵抗の予測が可能な幾何学解析プログラムを作成し、有効性を確認した。
- (2)工具の摩耗予測プログラムを作成し、有効性を確認した。
- (3)インペラーの加工法として傾斜軸一定加工法を提案し、有効性を確認した。

参考文献

- [1] 笠原和男ら：ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第1報),精密工学会誌,vol.69,No.3,pp.396-401(2003)
- [2] 笠原和男ら：ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第2報),精密工学会誌,vol.69,No.4,pp.524-529(2003)