

6軸制御による金型の平滑仕上げの研究

竹内芳美*

1. はじめに

複雑な形状・機能を有した製品の増加やそのライフサイクルの短期化などから、これまで以上に迅速な製品開発技術が要求されている。そのために切削加工機も3軸制御から多軸制御に関心が深まっている。フライス加工では、その加工特性から5軸制御マシニングセンタへの期待が高い。5軸制御マシニングセンタは、工具姿勢を工作物に対して一定にできるほか、オーバーハングした形状を段取り換えなしに高能率・高精度で加工できるからである(1)(2)。しかし、回転工具の使用はカスプを生じさせ、カスプ高さが面粗さとなるので、良好な面粗さにするには、ピックフィードを小さくせざるを得ない。このため、精度を要求される場合は、後工程に磨き作業を余儀なくされる。しかし、この磨き作業は自動化が難しく、多くは手作業で行われることが多い(3)。

6軸制御マシニングセンタによる非回転切削加工を行うことで、上記の問題を軽減できる可能性がある(4)。6軸制御加工は、工具姿勢を任意にとれる5軸制御マシニングセンタの主軸に制御軸を加えて、工具の向きまでを同時に制御するもので、そのために非回転工具(いわゆるヘール工具)を使用する。この結果、5軸制御フライス加工の汎用性と、高精度加工が可能なヘール加工を同時に実現できる。ヘール工具を使用した加工とは、のみを使用した3次元切削をマシニングセンタ上で行うようなものである。

この加工法では、回転工具を用いると滑ってしまうような数ミクロン単位の切込みが可能となり、磨き作業を低減することができる(5)。しかし、ヘール加工は、工具の送り速度が切削速度になる加工法であり、回転工具を

利用した場合に比べて効率の低い加工のため、通常は回転工具を使用して形状精度を実現した後にヘール工具を使用して仕上げ加工を行う手順になる。

ここでは、5軸制御による回転工具の使用に加えて、まず非回転工具の工具姿勢を加工面に対して一定の姿勢を保持しながら加工する場合について述べ、次に工具姿勢を変化させながら効果的に自由曲面を仕上げる方法を考える。さらに、低切削速度では加工が困難なアルミのような軟質金属に対して超音波振動工具を用いてそれを6軸制御することによって仕上げを可能にした例を紹介する。

2. 6軸制御加工

6軸制御とは、図1に示すように工具の位置・姿勢・方向を任意に作成できる最少の制御軸数であり、工作機械のxyz並進3軸とそれぞれの軸回りのABC回転3軸を制御することを意味する(6)。通常の3軸制御加工とは、xyz並進3軸方向に工具位置を制御するものである。これにAB軸を付加して5軸制御加工とし、さらにC軸(いわゆるCs軸)制御を加えることで6軸制御となる。すなわち、並進3軸を利用して工具の位置を制御し、回転2軸ABを利用して工具姿勢を定め、残りの回転1軸Cを利用して工具方向を決定するもので、機械構造は図2のようになる。

その結果、ヘール工具のような非回転工具を使用した自由度の高い3次元加工を行うことができる。ヘール加工

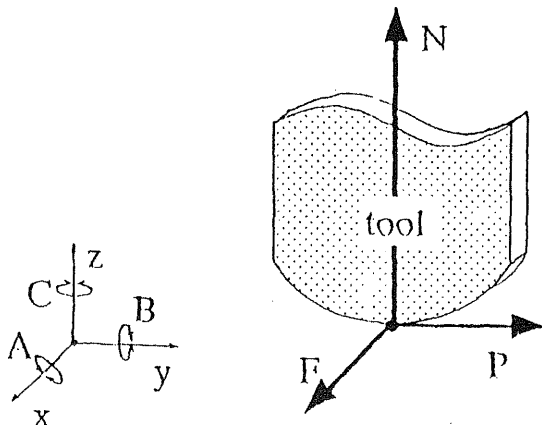


図1 非回転工具の6軸制御

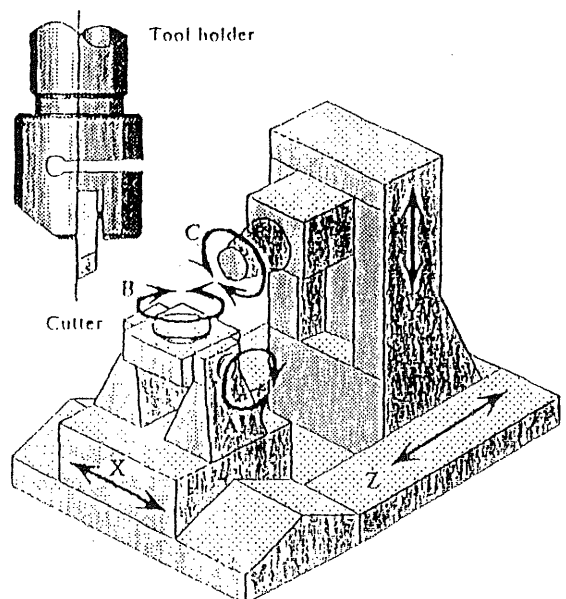


図2 6軸制御マシニングセンタ



図3 非回転工具切れ刃と工作物形状の組合せ

には、その加工特性や工具形状などから様々な使用方法が考えられるが、ここでは6軸制御による自由曲面の平滑加工を対象とする。

初めに工具姿勢を加工面に垂直にし、カスプ高さを一定にするようピックフィードを決定する。次に工具姿勢を変化させる制御法を考察する。

カスプの除去では、対象とする加工形状の曲率と同じ曲率をもつ切れ刃の非回転工具を用いることが理想である。しかし、自由曲面形状の場合、その加工面の至る所で曲率が変化するので、加工形状と工具の曲率を一致させることは一般的に困難である。そこで、予想される工具経路に沿って曲率が変動する範囲をあらかじめ計算しておき、曲率の変動範囲によって必要となる工具先端の曲率を判断する。変動範囲が1本の工具の許容範囲に入っていれば、1本の工具だけで加工可能である。変動範囲が広範である場合、先端曲率の異なる複数の工具を用意し、適宜ATCにて変更しながら加工を実行することになる。

自由曲面は、場所によって任意の曲率をもっており、曲率の大小でカスプ長さが異なってくる。仮に加工後の面あさがカスプと一致するならば、ピックフィード一定で切削すると面あさが不均一となる。そこで、曲率とピックフィード量からカスプを計算し、それが許容値を越えない範囲でできるだけピックフィード量を大きくとる。カスプの計算式は工具と工作物の円弧の組み合わせによって異なる。図3に示すように組み合わせは3通りある。

6軸制御の場合は、NCデータの1ブロックの情報が多いため、ブロック間距離が極端に小さくなるとNC装置の処理能力に必要以上に負荷を与え、切削速度が不安定になる恐れがある。そこで、ここではオーバカット、削り残しの許容範囲を設け、それに抵触しない範囲で可能な限りブロック間距離を大きくとるものとしている。

3. システム構成について

3次元CADシステムで定義されたソリッドモデル(CSG形式)の工作物データに対して、ワーク座標系における工具経路データ(CLデータ)を生成するものがメインプロセッサである。生成されたCLデータは、経路上の各切削点における工具中心点の座標値Pと工具軸ベクトルT、工具面方向ベクトルD、ならびに切削送りか早送りかを示すコードから構成される。同時に、このCLデータに対応する工具送り方向ベクトルFと切削点の法線ベクトルNから生成されるFNデータを生成する。ポストプロセッサは

FNデータを使用し、CLデータをNCデータに変換する。

メインプロセッサでは、まず、対象面に対して指定した分割数で多数の切削点を発生させる。このとき、ワークの2次元座標系(u-v座標系)が利用される。次にそれぞれの切削点における曲率半径を計算し、 θ と ϕ の2値で工具姿勢を決定する。

加工対象面を自由曲面に限定しているため、場所によって異なる曲率に合った工具姿勢を作成する。その結果、ピックフィード方向に隣接する工具姿勢も異なってくる。すなわち、常に同じピックフィード量で加工するとカスプ高さの不均一な仕上げ面になってしまう。また、前述のように、ハール工具を使用した平滑加工で磨き作業を省こうとしているので、カスプ高さを均一にすることは非常に重要である。

そこで、この工具姿勢から決められる切刃形状を基に、カスプ高さが指定値相当になるようピックフィード方向に切削点列を設定してゆく。これは、あらかじめ多めに切削点列を設け、それぞれのカスプ高さを指定カスプ高さと比較し、小さい切削点列を削除することで行う。最後に、離脱パスを付け加えてCLデータとする。

作成されたCLデータは、6軸制御用ポストプロセッサにおいてNCデータに変換される。これは、回転軸の構成、マシニングセンタに固有の制御軸間距離などのデータをもつ工作機械情報と、加工情報データの2つを必要とする。切削点を機械座標系へと変換するには、工具軸ベクトルから工具姿勢を決定する回転2軸の値を計算し、それらを利用して工具中心点の位置を示すxyz並進3軸の値を求める。この過程で工具方向ベクトルよりCs軸値が決まる。

次に、軸の回転運動による工作物のオーバカットが起こらないように、工具経路上に幾つかの位置補正を行った新たな分割点を設けるリニアライゼーション処理を行う。同時に、各軸の移動量から加工面に対する送り速度を一定にする送り速度制御を行う。このようにして求めたデータにヘッダとフッタを付け加えて、テキストファイル形式でNCデータを出力する。

4. 工具姿勢変化なしの加工実験

定義した加工対象形状の陰影表示と同時6軸制御による仕上げ加工の工具経路を図4に示す。100×100×100mm、高低差約20mmの自由曲面であり、材質はS45Cである。まず、3軸制御による荒加工を行った。切削時間は270分であった。次に5軸制御による中仕上げ加工を実施した。切削時間は30分であった。非回転工具による6軸制御曲面平滑加工の様子を図5に示す。切削時間は1面20分であった。切削後の形状を図6に、その表面の拡大写真を図7に示す。図から分かるように良好な面が得られている。

本加工法における加工品質の評価は、この加工の目的である回転工具による加工で発生した削り残し部分の除去と均一かつ良好な面あさの実現ということを考慮すると、面あさが重要である。6軸制御による仕上げ加工

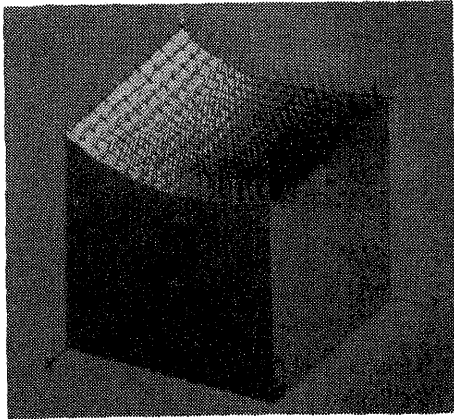


図4 生成された工具経路

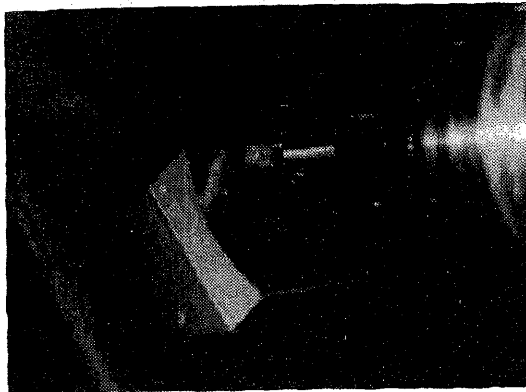


図5 加工の状況

後の表面あらさを、送り方向とピックフィード方向について測定した。送り方向の面あらさは $0.85 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ であった。これは回転系工具を使用した場合にはかなり困難な、非常に良好な面精度である。非回転系工具使用の目的の一つである送りマークの除去が達成できた。ピックフィード方向の面あらさは $9.33 \mu\text{m } R_{\text{max}}$ であり、設定した理論面あらさの $5 \mu\text{m}$ に対して $4 \mu\text{m}$ 余り悪い結果となっている。これは工具の切れ刃の形状精度が大きく影響していると考えられる。非回転工具による切削は工具切れ刃形状の転写であり、ピックフィード方向の加工面あらさはカスプ高さにより計算される理論的な面あらさに工具切れ刃形状の精度が重畳されると考えられるからである。

5. 工具シーケンスと工具姿勢

自由曲面形状を考えると、各切削点における曲率を計算し、合致した曲率を有する工具を複数使い分けるようにすると、結果として加工時間を短くできる。凸面に関しては問題ないので、凹面部全体を考え、最小曲率半径 r_{min} を求め、 r_{min} 以下の工具半径 R をもつ工具を使用すればよいが、その工具を使用して対象形状全体を加工することは効率的ではない。そこで、工作物の曲率に合った工具を局所的に複数使用せざるを得ない。しかし、ATCによる工具交換は、数ミクロンの取り付け誤差を生じる。数ミクロンの切込みを制御するハール加工においてこの取り付

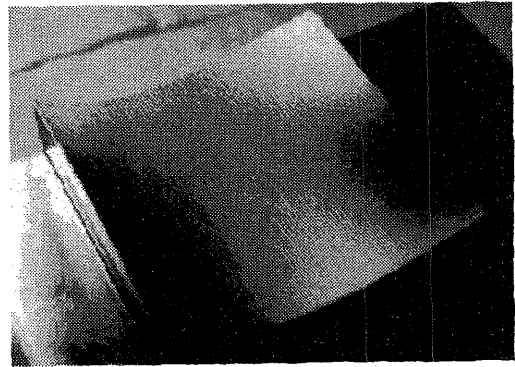


図6 加工後の形状

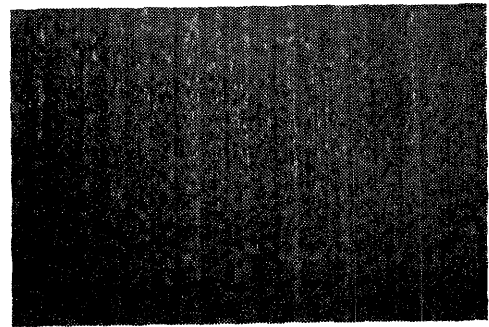
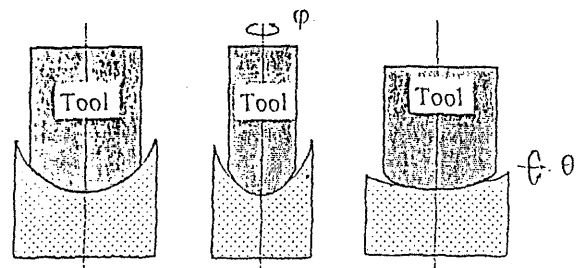


図7 表面の拡大写真

け誤差は致命的である。その上、工具送り方向に曲率が変化する場合、工具交換によって送り方向にも精度低下のおそれがある。そこで、工具交換の回数を減らし、径の小さなものも加工できるような次の方法を考案した。

図8のような単一の R をもつ工具を θ 方向に傾斜させることで仮想的に曲率半径を大きくし、 ϕ 方向に傾斜させることで小さくするような新しい加工法である。このように工具の回転傾斜を利用して工具仮想曲率半径を連続的に制御することで、図9のような切削加工が可能となる。これまで θ 方向傾斜の研究は報告されている(7)が、 ϕ 方向傾斜の研究はない。そのため、基礎データ収集を行い、その結果を利用してCAMシステムを開発した。

ハール工具を使用した加工では、切削点の法線方向に工具軸ベクトルを合わせ、送り方向に工具方向ベクトルを合わせる制御を行ってきたため、工作物の曲率に工具の仮想曲率を合わせる際に考慮すべき姿勢限界について



(a) Normal position (b) Control of angle θ (c) Control of angle ϕ

図8 工具傾斜による曲率半径の変化

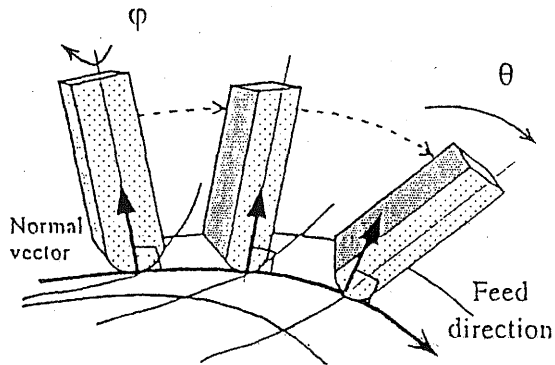


図9 工具姿勢の連続変化の概念図

は不明であった。そこで、まず θ 方向、 ϕ 方向の回転による切削抵抗変化を調べた。なお、使用したヘール工具は厚さ6mm、幅14mmで先端Rが30mmのハイスである。

θ 方向の回転については、神谷らの結果(7)を参考に、製作した工具と工具ホルダーの特性、切削抵抗と仕上げ面粗さの点から $\pm 15^\circ$ の回転が可能である。しかし、工具を作製した放電加工機の限界から、逃げ角は $10 \pm 2^\circ$ 位までしか作成できない。この結果、マイナス方向の回転は 8° までしか行えず、効率的な回転ではない。そこで、 $\theta = 0^\circ \sim 15^\circ$ のように設定した。

ϕ 方向の回転については、幅5mmのNAK55材を回転角を変えた工具で切削し、その際に働く切削力の変化を調べた。切削条件は、送り速度400mm/min、切込み量0.01mmとし、 ϕ を 6° おきに 0° から 60° まで変化させ、工具先端(R30mm)が完全に被切削物に接触した時点で、x,yそれぞれの方向に働く切削力を測定した。 ϕ が 60° のとき、加工後の面粗さは $0.67 \mu \text{mRmax}$ となり、十分な加工が行える。

本加工では、びびり振動の対策として工具ホルダー部の弾性変形を利用しているが、その変形の幾何学的限界が加工特性に大きく関係し、切削力を変化させる。また、傾斜角が大きくなると連続切屑が発生し、良好な切削が行われない。そこで、 ϕ 方向の切削限界を $\phi = 0^\circ \sim 45^\circ$ とする。この結果、工具の曲率半径を1/2倍まで変化させることができる。

以上のような工具回転量を利用して、複雑に曲率の変化するワークを対象に加工を試みる。

6. 工具姿勢変化のある加工実験

加工実験では、加工能率を考慮して3軸制御荒加工から5軸制御中仕上げ加工を行い、同時6軸制御で仕上げ加工を実施した。対象とする工作物は、図10に示すような自由曲面である。この工作物には凹面と凸面が存在し、凹面部の最小曲率半径は32mmである。この工作物に対して50mmの単一半径ヘール工具を使用したデータを作成する。図中の点群では、凹面の曲率半径が50mm以下に

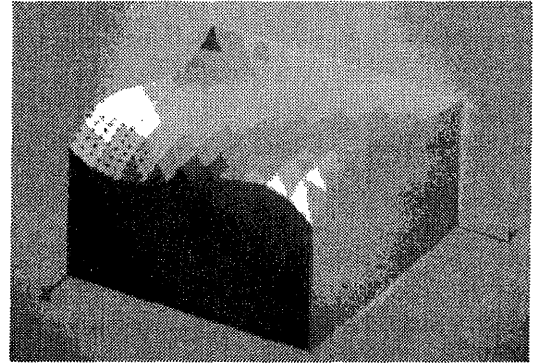


図10 凹凸を持つ工作物形状

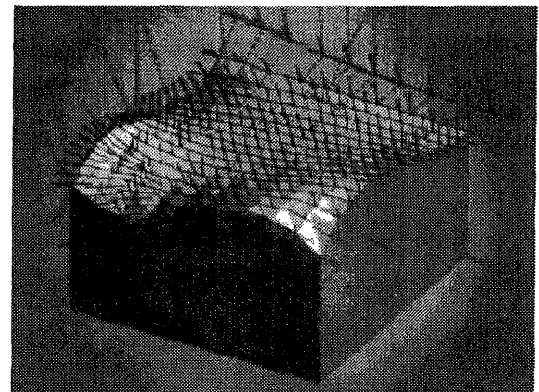


図11 得られた工具経路

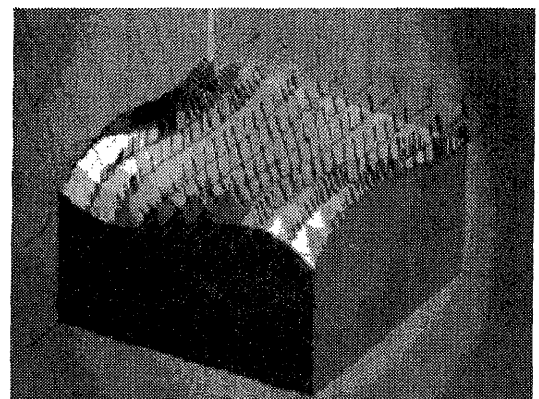


図12 ポストプロセッサによって処理されたNCデータ

なっており、 ϕ 方向に工具を回転させる必要がある。また、その他の部分の加工では θ 方向の傾斜が有効になってくる。

分かりやすくするためにカスプ高さを0.5mm以下、フィード方向許容値を0.5mm以下に指定したときのCLデータを図11に示す。ここでは、対象面の上方に伸びている線が工具軸ベクトルを示し、接線は工具方向ベクトルから 90° 傾斜したベクトルを示している。工具傾斜が適切に実施されていることが確認できる。このデータをもとに作成したNCデータを図12に示す。

実際の加工においては、指定最大カスプ高さを0.04mm、指定許容値0.005mmでデータを作成した。加工の様子を図13に示す。加工条件は、送り速度を400~600mm/min、切込みを0.02mmとした。加工した面粗さを

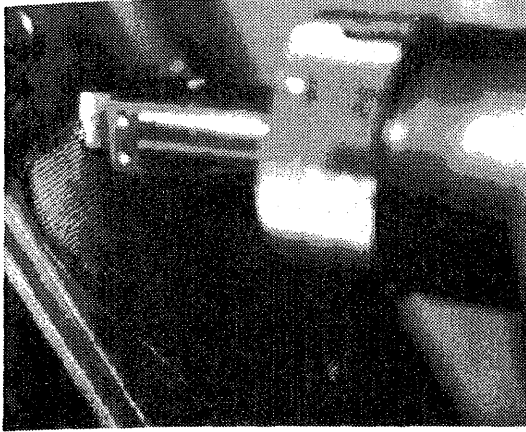


図13 加工の様子

測定した結果、フィード方向の R_{max} は $1.38 \mu m$ であるが、加工の際の送り速度が速すぎたために多少悪い値となっている。すなわち、6軸を同時に制御しなければならないため、NCスケジューラからマシニングセンタへのデータ転送が切削速度に追いつかなかったからである。なお、びりりなどは確認されなかった。ピックフィード方向の R_{max} は $38 \mu m$ であり、十分な値となっている。

7. 超音波振動切削工具

6軸制御加工では以下のような問題点を解決しなければ実用化が難しい。すなわち、

1. 非回転工具の送り速度は切削速度と等しくなるために、他の切削加工と比べて切削速度は非常に低い。したがって切削速度を上げることは難しい。
2. 非回転工具を用いた加工では切削抵抗の増減が工具変形に大きく影響し、それが目的とする加工形状からの誤差として現れやすく、また面荒れも発生しやすい。

そのため、硬い材料はともかく、アルミニウムのように展延性に富む材料の加工においては、切削面粗さの良好な加工面が得にくい。低切削速度でも良好な切削面粗さを得るには切込みと送りを小さくすればよいが、加工時間の大幅な増加をもたらす。そこで、低切削速度であっても切削性の良好な加工法として、振動切削法(8)を適用する。

振動切削法とは、工具に超音波振動を加えながら切削を行う加工方法である。6軸制御加工は3次元的な平削り加工と考えられるので、旋削用振動切削ユニット(多賀電気(株)製SB-150)を利用した。このユニットは振動工具と振動素子駆動アンプから構成され、工具は振動周波数19kHzで振動する。振動工具は、工具先端振動部にチップホルダを装着し、そのチップホルダに切削チップを取付ける構造となっている。

この工具を有効に使用するには、切削方向と刃先振動方向を一致させることが重要で、そのために加工経路に

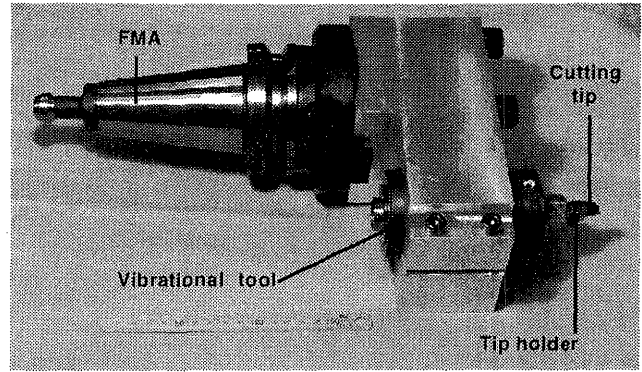


図14 工具ホルダに取り付けられた超音波振動工具

沿って変化する工具姿勢を随時調整しなければならない。個々のチップホルダにおいては、すでに工具姿勢調整方向があらかじめ設定されており、6軸制御切削時には振動方向と切削方向の違いを、ピッチ角とロール角の値を指定し、工具位置の修正によって加工を行う。

この振動工具をッ図14に示すようなL字型ジグを用いてフェースミル・アバに装着して、マシニングセンタに取り付ける。

8. 振動切削を利用した同時6軸制御加工

振動切削効果を確認するため、6軸制御マシニングセンタに振動工具を取り付け、加工しながら切削抵抗と切削面粗さの測定とバリ発生を観察した。

その結果、振動切削時と慣用切削時における切削抵抗を比較すると、設定した切削速度、切込み深さの範囲において振動切削時に大幅に減少することを確認できた。切削抵抗が減少することにより切込み量の増大が可能となるので、6軸制御加工においても切込み量を大きくし、加工時間の短縮を図れる。

切削面粗さに関しては、振動切削の場合でも設定した切削条件において理論カスプ高さと同程度の切削面粗さが得られた。これに対し、慣用切削の場合、切込みを大きくすると切削面粗さは理論カスプ高さより大きくなる傾向がある。振動切削では切込みを大きくしても切削面粗さは低下せず、その効果を確認できた。

以上の結果をもとに、アルミニウム合金(A7075)の円柱上面に直線および曲線のV溝の形状を加工する。荒加工を行わず、直接6軸制御加工によりV字溝を生成することにした。V字型形状を台形形状の集合体と考え、1つの台形形状ブロックごとに除去加工を行い、それを繰り返しながら掘り下げ、最終的に所定のV字型形状を得るのである。

真剣バイトタイプの工具を使用して加工実験を行った。なお、工具材質は超硬K313である。加工中の様子を図15に、加工結果を図16に示す。写真から分かるように、切削終端のバリ発生や著しい加工面の荒れも認められなかった。また、直線溝における切削方向の面粗さ R_y を測

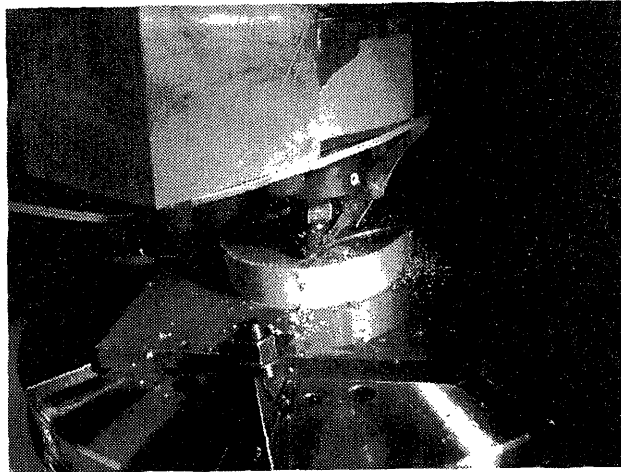


図 15 超音波振動加工の様子

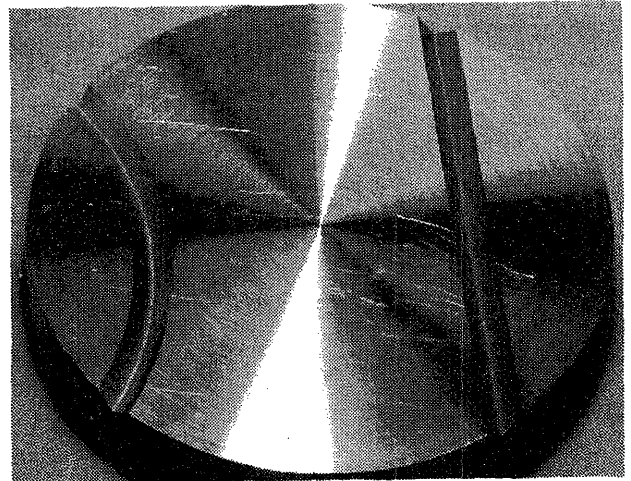


図 16 超音波振動切削された直線と曲線のV溝

定したところ1.19mmであり、良好な加工ができたことが確認された。

9. 結 言

自由曲面を対象として、一本の工具の切刃断面を制御することにより効率的な6軸制御加工を試み、以下の結論を得た。

- (1) 自由曲面のそれぞれの曲率に合わせて工具姿勢を決定し、切刃断面を制御する方法を考案した。
- (2) 複雑な自由曲面形状に対して、工作物の曲率と工具形状を考慮した工具姿勢をもつ同時6軸制御平滑加工用工具経路を生成した。
- (3) 工具経路を基に切削実験を行い、工具姿勢が任意の場所において適切に得られていることを確認し、同時6軸制御ヘール加工の可能性を確認した。
- (4) 展延性材を6軸制御で切削加工をしたときに面粗さが悪化するという問題を解決するため、振動切削を導入したところ、低速切削において切削抵抗の減少、バリ発生の防止、比較的大きな切込みを可能にできた。
- (5) 6軸制御マシニングセンタに振動工具を装着してアルミ材のV溝加工を行い、バリ発生や加工面の荒れを生じさせることなく、良好な切削が可能であることを確認した。

参 考 文 献

- 1) 江川庸夫, 寺井久宣, 松本隆博, 木下俊之, 高林信利: 同時5軸制御加工機の開発, 三菱重工技報27, 2(1990-3).
- 2) 出村健, 竹内芳美: 5軸制御マシニングセンタによる切削・研削加工 - 凸型自由曲面について, 精密工学会誌, 57, 11(1991) 1989.
- 3) 佐々木哲夫, 三好隆志, 斎藤勝政, 岡田信一郎: 金型磨き作業の知的獲得と自動化に関する研究(第3報) - 金型自動磨き装置の試作・開発, 精密工学会誌, 58, 12(1992) 2037.
- 4) 佐藤眞, 竹内芳美, 鈴木裕: 新しい概念による自由曲面の加工法, 精密工学会講演論文集(1993. 3) B18 61.
- 5) 大平研五, 浅見雄一: ヘール加工の金型への応用, 型技術, 8, 8(1993) 219.
- 6) 竹内芳美・横山信人・久木達也・鈴木裕・佐藤眞: 6軸制御による自由曲面平滑加工, 精密工学会誌, 60, 12(1994) 1786.
- 7) 神谷昌秀, 鈴木祐, 島田元浩, 安部幹伸: 曲面仕上げ用楕円ヘール工具の基本特性について, 精密工学会講演論文集(1994. 3) E51 555.
- 8) 隈部淳一郎: 精密加工 振動切削, 実教出版(1979)