

インペラなどの複雑形状部品の同時5軸加工

佐藤 正二 *

Shouji Satou

産業用遠心圧縮機、送風機、ガスタービン、過給機などで使用されるインペラ（羽根車）などの複雑形状部品は、3次元的にねじれた複雑な曲面で構成されている。当社では、これら部品の削り出し加工のため、早くから同時5軸制御マシニングセンタ（以下、5軸MCと記す）を導入し、開発部品の試作加工及び製品の受託加工を行っている。本稿では、複雑形状部品の特徴、5軸MCの軸構成、加工工具の選定、加工する順番、加工前の事前チェック、加工精度など、「インペラなどの複雑形状部品の同時5軸加工」の処理概要を紹介するとともに、加工精度面への注意すべき点について述べる。

キーワード：複雑形状部品、自由曲面、同時5軸加工、羽根面加工

1. はじめに

一般的な工業製品は、平面、円筒面、球面などが多用されており、これらは簡単な関数で表現することができ、比較的簡単に加工できる形状と云える。一方、複雑形状部品は、幾何学的に表現できない複雑にねじれた自由曲面を有した部品である。

当社では、インペラ、インデューサー、ブリスク及びプロペラなどの回転部品を主体とした5軸加工部品の試作及び受託加工を行っており、今回は、この複雑形状部品の加工技術を紹介する。

これらの部品は、産業用遠心圧縮機、送風機、ガスタービン、過給機などに利用され、製品の性能を左右する重要な部品の一つである。写真1～4に複雑形状部品の加工例を示し、図1にインペラの例とその部分呼称を示す。

以下に複雑な形状の部品の例として遠心圧縮機用インペラの5軸加工を紹介する。

サイズは船用過給機の直径1,000 mmを越えるものから、オートバイ用過給機の直径数10 mm程度のものまでである。

製作方法は、生産量、形状精度、サイズなどによって最適な製作方法が選択されており、比較的小径で、かつ量産されるものは、精密鋳造されることが多く、大径のものは切削加工するものが多い。20数年ほど前までは、羽根形状の金型を製作し、プレス成形してからディスクに溶接し、取り付けるタイプのものも多く生産されていた。しかし、数年前より製品の高性能化のために、羽根を薄くして羽根枚数を増やす傾向となり、強度上の理由などにより鍛造素材からの羽根削り出し加工が多くなってきている。

* 研究開発事業部 装置開発部 課長



写真1 インペラ

写真2 インデューサー

写真3 プリスク

写真4 プロペラ

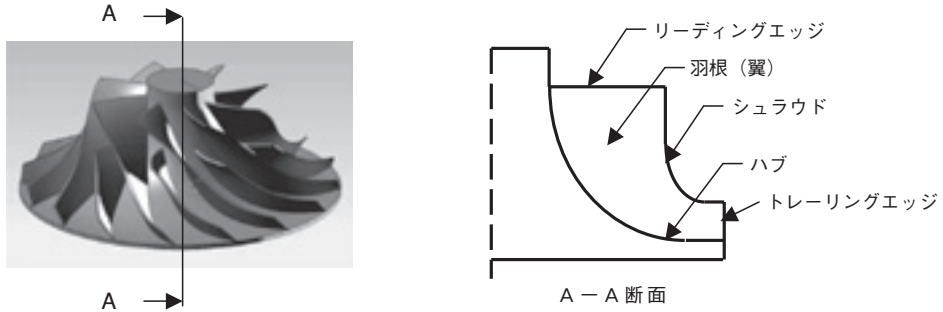


図1 遠心圧縮機用インペラの形状と各部の名称

2. 羽根面の形状

インペラなどの羽根面形状は、設計方式により2種類に分類され、羽根面が母線（3次元直線）で構成されているものと、点群（3次元座標点）で構成されるものがある。加工方法から分類すると、母線で構成されるものは、ボールエンドミルの側面で羽根面全体を幅広く一度に加工することが可能であり、加工効率が良い特長がある。しかし流体性能の面から自由曲面となるケースでは、ボールエンドミルの先端部で加工することになり、必

然的に加工パスが多くなり、前者と比べて加工効率の低下はまぬがれない。図2は母線加工と自由曲面加工の概念を示している。

インペラ羽根面は、図3に示す直交座標系のX、Y、Z、どちらの方向から投影しても、互いに重なり合うことが多く、同時3軸制御の加工ではボールエンドミルと加工物との干渉が生じるためNC同時5軸制御の加工が必要である。まれには、Z方向に投影した場合、X、Y2次元の羽根となっているインペラもある。この場合は、NC同時3軸制御で加工が可能である。



図2 母線加工と自由曲面加工の概念

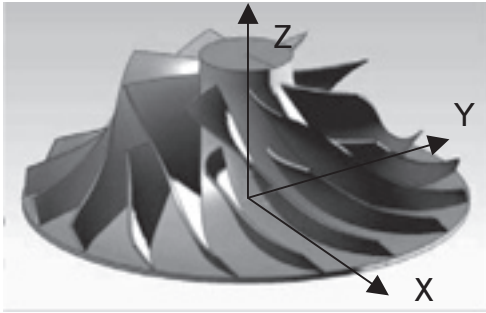


図3 インペラ座標系

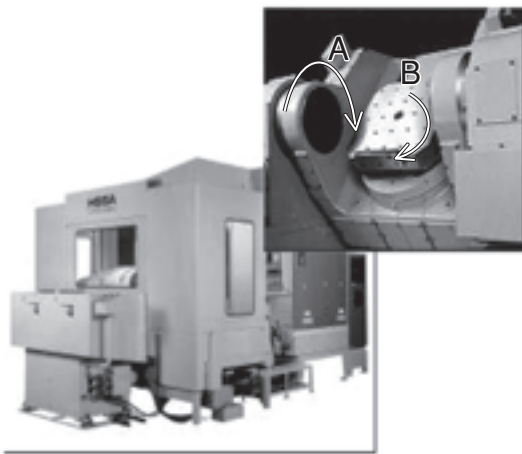


写真5 同時5軸マシニングセンタ

3. 5軸マシニングセンタ

同時5軸マシニングセンタ（以下5軸MC）の一例を写真5に示す。JISの機械座標系では、X, Y, Zの直交座標系とそれぞれの軸まわりの回転座標A, B, Cの6軸を主要構成軸とし、補助軸にU, V, WおよびP, Q, C軸を規定している。回転座標は、2つあれば工具軸の傾き角度を自由に変化させることが可能なため、X, Y, Z軸の直線3軸に加えてA, BあるいはB, C軸を使用する5軸加工機が使用される。

写真5の5軸MCは、X, Y, Zの直線3軸とテーブル回転のB軸、およびX軸まわりにテーブルを旋回させるA軸の5軸で構成されている。

4. NCプログラミング

複雑形状部品は先に述べたように、複雑にねじれた自由曲面形状を有した形状であるため、工具軸ベクトル（工具の傾き）を制御可能な3D-CAMシステムを利用しているケースがほとんどで、当社においては、汎用の3D-CAM/CAMシステムに加え、翼加工に特化した専用システム利用している。

4.1 加工範囲と工具の決定

複雑にねじれたインペラの羽根と羽根の間を能率良く高精度に切削加工するには、羽根間の隙間に応じた適切なサイズのエンドミルを選定する必要がある。より剛性の高いエンドミルを選定するためには、隣り合う羽根間全域の隙間を求め、隙間に見合った工具と加工範囲を決定し、これに基づいて、次項で述べる加工工程を決定させる。

4.2 加工工程の決定

ここで述べる加工工程とは、使用工具ごとの加工開始から加工終了までを一つの単位とした切削加工の手順のことである。インペラを切削加工するためには、羽根間の荒加工ならびにハブ面の仕上げ前加工及び仕上げ加工の手順を踏むことが重要である。

加工中に、材料の内部応力の解放などにより発生する変形の影響を極力抑えるため、羽根1枚ずつ一気に仕上げるのではなく、全体を均一に少しずつ翼間の粗加工を行い、その後、翼先端から翼の付け根方向に徐々に仕上げ加工を行う必要がある。

インペラの切削加工は、荒加工から仕上げ加工まで約60～100工程に分けられる。

4.3 工具

インペラの特長上チタン合金などの高強度材料が使用され、羽根は長く、羽根間は狭くなる傾向がある。さらに旋削された無垢（一体）の材料か

ら切削加工するため、切削除去量は相対的に多くなる。荒加工及び仕上げ前加工を滑らかに加工することが仕上げ加工の精度確保に重要である。従って、可能な限りボール径が大きく、テーパが強く、さらに工具長が短いものを使用して、有効切れ刃長さ、切れ刃溝深さも必要最小限におさえ、工具剛性の高いエンドミルを使用することが重要である。このため、最適な市販工具を選定できない場合は、特別注文による超硬ソリッド材料の専用テーパボールエンドミルが多く用いられている。写真6は加工に用いられているエンドミルの例を示している。

4.4 加工パス

インペラ加工における加工パス（工具の動き）は、羽根間荒加工、羽根面加工、羽根とハブとのフィレット加工、リーディングエッジ加工及びハブ面加工に分類され、加工時間の約半分を占める羽根間荒加工の効率を向上させることが重要である。図4は、羽根面仕上げ加工パスの例を示す。

4.5 干渉チェック

インペラ羽根間は狭く、しかも3次元にねじれているため、切削加工は干渉寸前のぎりぎりの状



写真6 加工用エンドミル

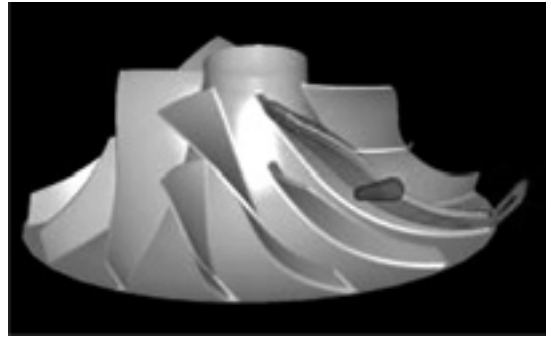


図4 羽根面仕上げ加工パス

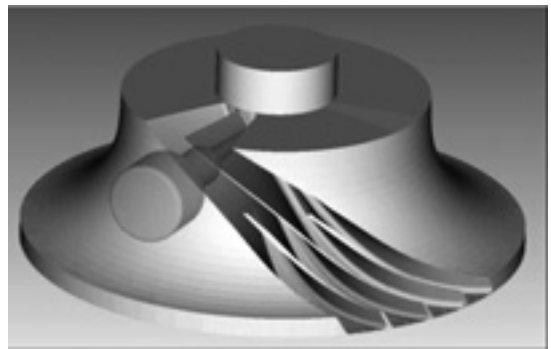


図5 加工シミュレーション

態で行われている。これを試し削りによらず事前に確認するため、「NCシミュレーション」ソフトを利用している。「工具と加工物」、「工具ホルダと加工物」の干渉チェック、「削りすぎ」、「削り残し」をコンピュータグラフィック上で目視チェックし、加工物の寸法検査などを行う。図5は、羽根面仕上げ加工のシミュレーションの例を示す。

5. 切削加工

インペラの材料は用途により、アルミニウム合金、チタン合金、オーステナイト系ステンレス鋼などバラエティに富んでいるが、インペラが高性能化するにつれ材料はアルミニウム合金から被削性の悪い材料へ移行する傾向がある。

大径エンドミルの場合、工具の剛性が大きいいため問題はないが、小径エンドミルでは被削性の差

は顕著に現れる。荒加工から仕上げ加工のプロセスと切削速度、切込み量、送り速度の決定を慎重にしなければ、NC切削加工中での工具破損が発生するなどの問題があり、荒加工時仕上げ面に喰い込みが発生する可能性も生じる。写真7は、羽根面仕上げ加工の例を示す。

6. 加工精度

インペラの加工精度は、加工指令パスの正確さ、機械の位置決め精度、エンドミルとホルダの切削力による変位などによって決まる。これらの内、量的に最も影響し、また、定量的にコントロールする必要があるのは、切削負荷による、エンドミ



写真7 仕上げ加工

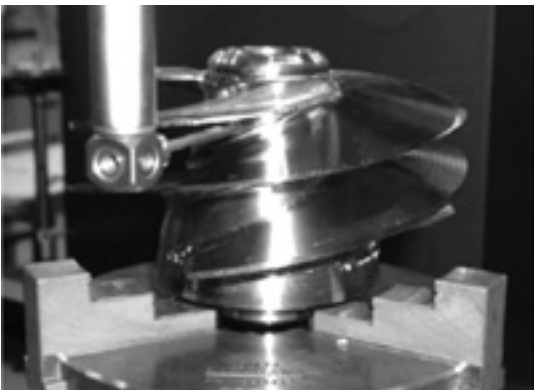


写真8 インデューサーの3次元計測

ルの変位である。このためには、羽根間荒加工時にいかに、滑らかに切削するかがポイントとなる。

7. 加工精度の計測

インペラなどの羽根面及びハブ面の計測には、3次元測定機を利用しており、その進歩により、指定した検査断面上での精密計測と任意断面での計測が可能となっている。写真8は、この測定

8. おわりに

当社における「インペラなどの複雑形状部品の同時5軸加工」の加工例と取り組んできた課題を紹介した。近年、世の中では工作機械の高速化/高精度化、CAD/CAM/CAEシステムの進化が著しく発展している。当社においても、これらハード、ソフト両面を強化すると同時に、加工技術力を強化して市場ニーズを満たすように、更なる高能率/高精度加工を目指して行く。

参考文献

- (1) 石川島播磨技報 1990年5月 VOL.30 No3
インペラCAD/CAM一貫処理システム：ARISの開発
- (2) ツールエンジニア 1996年5月 VOL.37
No.5
同時5軸制御マシニングセンタによるインペラの加工
- (3) あい・えいち・あい 2001年6月
テクノネット 複雑形状部品加工技術



研究開発事業部
装置開発部
課長

佐藤 正二

TEL. 045-759-2216
FAX. 045-759-2216