

# 遠心圧縮機インペラ加工技術

唐津武弘\*・木浦大三\*・吉岡 徹\*\*・白神隆文\*\*

\*機械事業部・製造部 \*\*機械事業部・開発部

## Centrifugal Compressor Impeller Machining Technology

Takehiro Karatsu・Daizo Kiura・Tohru Yoshioka・Takafumi Shirakami

Centrifugal compressor impellers generally have three dimensionally-skewed blades. To machine these blades precisely requires a five-axis, simultaneous NC machining center. We have improved the conventional five-axis machining technique by developing a NC programming method for related to impellers that reduces machining time. This paper describes aspects material characteristics, cutter tool selection and NC programming skill.

まえがき = 遠心圧縮機にもちいられるインペラの製造方法は 溶接，精密鋳造，機械加工による方法に大別され，従来は溶接型，精密鋳造型のインペラが主流であった。近年インペラは高効率・高性能化が進み，形状の複雑化・多様化および高精度化とともに，短納期化が要求されるようになった。これらの要求を満たすためには，溶接，精密鋳造では対応しきれなくなっており，機械加工での製造技術の確立が急務となってきている。

インペラの翼形状は，高圧力比・高効率をえるため，三次元的にねじれた複雑な形状となっている。また，隣接する翼が覆い被さっているため，一般的な金型加工に適用される同時3軸制御マシニングセンタでは加工が困難であり，同時5軸制御マシニングセンタによる加工が必要となる。

また，インペラの回転速度の高速化が進むにつれ，高強度材料（難削材）が使われるようになり，切削技術とともにNCプログラムにも新たな工夫を盛り込む必要がでてきた。インペラは，同時多軸制御加工においてもっとも高度な加工が要求される部品である。

機械加工によるインペラの製造方法の概要について以下に紹介する。

### 1. インペラ翼の形状

インペラの翼形状は，仕様に基づき性能面，応力・振動面，構造面のすべての条件を満たすように流体性能解析，強度振動解析などを繰り返しおこない，最適な形状が決定される。典型的なインペラ形状のソリッドモデルを第1図に示す。また，インペラ各部の名称を第2図に示す。

翼形状には大きく分けて，シュラウド面，ハブ面の二つの曲線間に直線線素を持つ面で定義される母線型インペラと，点群により定義されている三次元自由曲面形状の点群型インペラとがある。

上記の母線型インペラの翼は，工具（エンドミル）側面切削が可能で，点切削を必要とする点群型インペラにくらべて，短時間で加工が可能である。また工具側面切削により，高品質の加工面をえることができ，手仕上げは通常必要とせず，図面に記載された面粗度・寸法

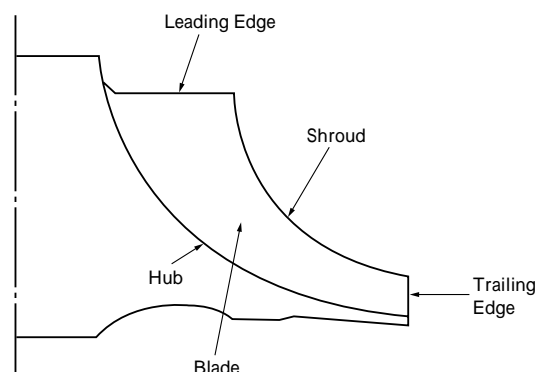
公差を短時間で満足することができる。

いっぽう，点群型インペラの翼は，翼の形状定義上，母線をもたない形状であるため，工具側面では削ることができず，球形の工具先端での点切削をおこなわざるをえない。したがって，三次元自由曲面での加工において，側面切削と同程度の仕上がり面を実現するためには，多くの加工パスが必要になる。しかも，実用的な加工条件においては，切削跡であるカスプが翼面に残ることになる。そこで，翼面の面粗さを向上させるために，機械加工後，手仕上げなどの別の加工方法を採用するのが一般的である。



第1図 インペラソリッドモデル

Fig. 1 Impeller solid model



第2図 インペラ各部名称

Fig. 2 Name of impeller parts

## 2.5 軸制御マシニングセンタの特徴

インペラのような自由曲面形状をもった部品の加工には、X、Y、Zの直交3軸の並進駆動系に回転傾斜2軸を付加した構造をもつ5軸制御マシニングセンタが必要である。加工中のインペラを写真1に示す。5軸制御マシニングセンタの概念図を第3図に示す。

同時5軸マシニングセンタでは、回転傾斜構造を機械のどの部分にもつかによって、テーブルティルト型、スピンドルティルト型などの種類があり、ワークの特性にあった機械を選択することが重要である。当社では、インペラのサイズ・重量、ワークへの機械の接近性、高速切削などを考慮し、Y軸・Z軸まわりに回転自由度をもつB軸、C軸タイプで、主軸回転数が10,000rpmの高速切削対応の5軸制御マシニングセンタを採用している。

5軸制御マシニングセンタは、工具姿勢を任意に制御できるので、三次元形状部品などの複雑な加工が可能であるが、その反面、工具（主軸）とワーク・治具との干渉、ボールエンドミルのデッドポイントでの加工を回避した工具軌跡を生成する必要があり、NCプログラム作成が格段に難しくなる。

## 3. インペラ材料

インペラ材料の選択については、要求仕様に応じて決定されるが、強度、耐食性の面から、主にステンレス鋼が、またとくにインペラの周速度が高い場合は、比強度の高いチタン合金などが採用される。

ステンレス鋼・チタン合金は、炭素鋼にくらべて切削抵抗が低い値を示しているにもかかわらず切削性が落ちるため、一般的に難削材といわれている。

ステンレス鋼の切削特性は弾性限界が低く、硬度もそれほど高くはないにもかかわらず被削性が悪い。この原因としては、

熱伝導率が他の鋼にくらべて小さいために、切削熱が刃先に集中し、工具先端の劣化が早まり、工具寿命が短くなる。また、ワークの仕上げ精度にも悪影響を与える。

韌性が高いため、切削抵抗が大きく、構成刃先が生じやすい。

などが挙げられる。

チタン合金についても被削性がよくない。この原因としては、

ステンレス鋼と同様に、熱伝導率が小さく、切削熱が工具刃先に集中しやすく、工具寿命が短くなる。

化学的に活性で、工具材料の結合相を形成するCoなどと反応して拡散磨耗を進行させる。

などが挙げられる。

切削加工の難易には、材料特性のみならず工具材料・加工方法・工作機械などの要因も関与している。難削材を加工するにあたって、留意すべき一般事項を以下に挙げる。

(1) 切削熱の発生を抑えるための最適な切削条件・切削方法を見つけたす。

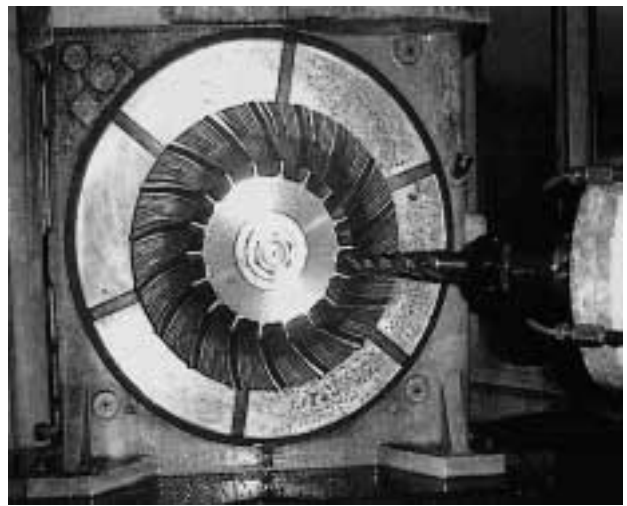
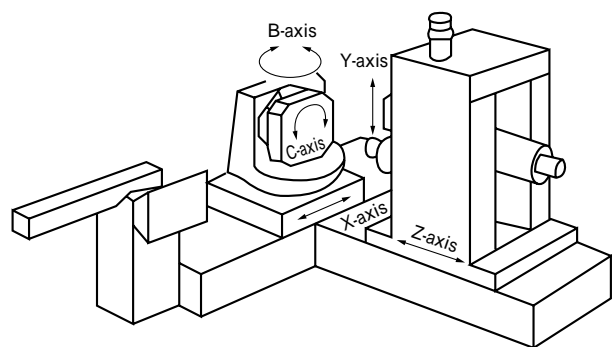


写真1 機械加工中のインペラ

Photo 1 A view of an impeller being machined



第3図 同時5軸制御マシニングセンタ

Fig. 3 5-axis simultaneous numerical controlled machining center

- (2) 切削抵抗を緩和するため、すくい角を大きくとる。ただし、逃げ角はやや小さくする。
- (3) 冷却・潤滑能力の高い切削油剤を刃先に大量に注ぐ（切削熱の放散。構成刃先の防止。）
- (4) 刃先はつねにシャープに保ち、わずかの磨耗でも再研磨をおこなう。
- (5) 剛性の高い工作機械を使用する。

## 4. NC プログラム

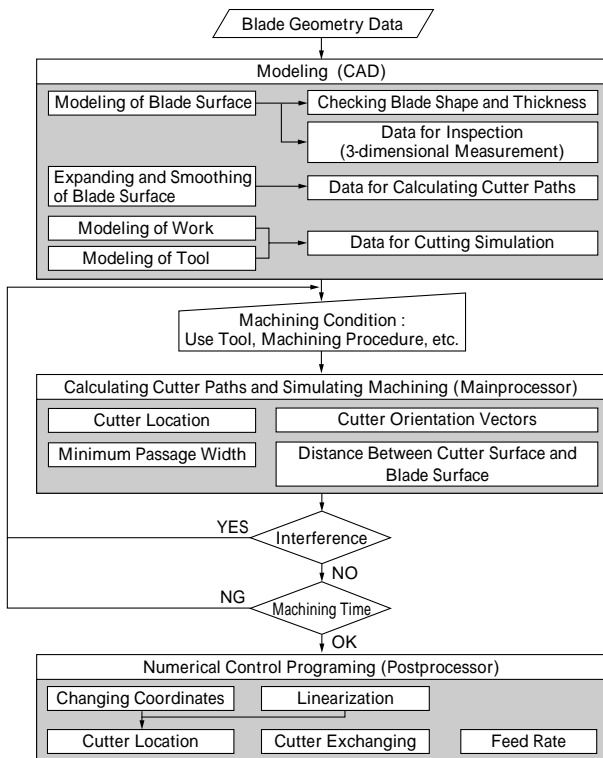
NCプログラムは、翼面・素材・工具形状のモデリング、工具軌跡の算出、切削シミュレーションによる干渉チェック、ポスト処理などの手順を経て、作成される。NCプログラム作成フローを第4図に示す。

### 4.1 モデリング

図面に記載されている翼面形状データを基に、三次元CADをもちいてワーク（翼面・素材）や工具のサーフェイス、ソリッドモデルを作図する。

これは、翼面形状・翼厚寸法の事前チェック、加工後に実施する三次元測定の検査データを作成するためにおこなわれる。また、メインプロセッサで工具軌跡を算出させる際入力データとして必要な、翼形状定義データ、ハブ・シュラウドの断面形状データなどもサーフェイスモデルを基に作成する。

### 4.2 工具軌跡の算出



第4図 NCプログラム作成フロー  
Fig. 4 Programing flow of numerical control

4.1節で作成した翼形状定義データ、ハブ・シュラウドの断面形状データをもとに、指定した工具形状・工具経路・切り込み量、加工パス数などの加工情報に応じた同時5軸制御の工具軌跡（CLデータ）を生成する。このソフトウェアはメインプロセッサと呼ばれる。また、工具軌跡を計算する際には、翼間最狭部、工具と翼面との距離を算出し、工具とワークの干渉を回避した工具姿勢が自動的に決定される。生成される工具軌跡は、工具先端の座標値（X, Y, Z）と工具軸ベクトル（i, j, k）で定義されるデータである。

#### 4.3 NCデータ作成

4.2節で生成されたCLデータを5軸制御マシニングセンタを実際に動かすためのNCデータに自動変換する。このソフトウェアはポストプロセッサと呼ばれ、工作機械の構造および制御装置の仕様に依存する。

ポストプロセッサはCLデータを機械の各制御軸の動きに応じたデータに変換するだけでなく、回転運動にともなうオーバカットを避けるリニアリゼーション機能や、加工面に対する送り速度を一定に保つための送り速度制御機能を備えている。

### 5. 使用工具

加工時間を極力最小に抑えるには、翼間の材料を効率的に削り取る必要がある。いい換えれば、荒加工時に使用する工具は、高能率を考えた工具を選択する必要がある。しかし、インペラ翼間のもっとも狭くなるハブ面のリーディングエッジ近傍の加工では、小径で長い工具を使用する必要があり、ストレートのエンドミルでは、剛性不足のため、切削速度が上げられない。そこで、当社では高切削条件を維持し加工するために、加工部位に



Tapered Endmills for Roughing



Tapered Endmills for Finishing

写真2 インペラ加工用工具  
Photo 2 Cutting tools for impeller

じた専用工具を採用している。

たとえば、荒加工用工具については、

刃長を極力短くする、

テーバ角度を大きくし、シャンク部を太くする、

ホルダー体型の工具（大径工具）を使用する、

など重切削に耐えるように工具剛性を高めた形状にしている。工具の外観を写真2に示す。

翼面仕上げ加工に使用する工具は、翼付け根のフィレットRをもつボールエンドミルを使用するが、ストレート工具では剛性が不足するため、隣の翼と干渉しない範囲でテーバ角度を付けた翼高さ以上の刃長をもつテーバボールエンドミルをもちいている。

### 6. 工具軌跡

工具軌跡は加工部位によって、次の4種類がある。

翼間加工用

翼面加工用

リーディングエッジ加工用

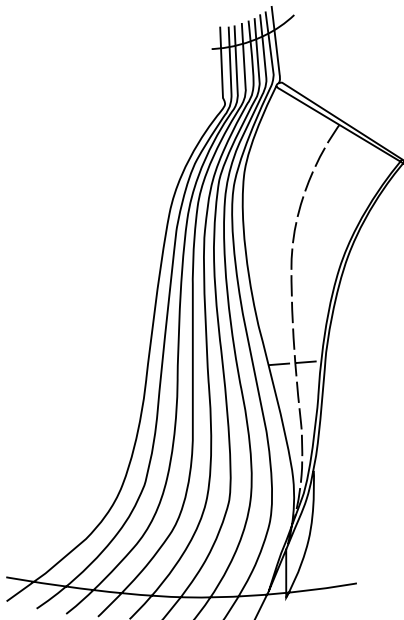
ハブ面加工用

ここでは、これらの中で加工時間の大半を占める翼間加工と、加工に注意を要するリーディングエッジ加工について以下に述べる。

#### 6.1 翼間加工の工具軌跡

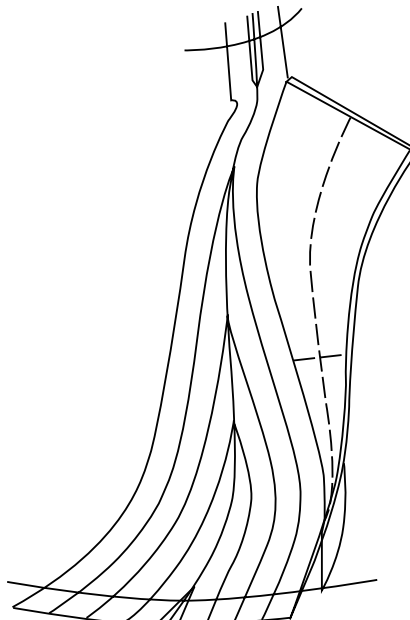
通常、翼間加工は数回の段数に分けておこなう。これは、シュラウド側の翼間（流路幅）がハブ側よりも広いいため、シュラウド側では大径工具をもちい、ハブ側に近づくほど小径工具を使用し加工することにより、材料を効率的に取り除くためである。

当初、翼間加工は、第5図に示すようにリーディングエッジ側からトレーリングエッジ側への一方の工具軌跡でおこなっていた。この工具軌跡では、リーディングエッジ近傍の翼間が狭くなっているところで、パス回数が必要以上に多くなり、1パスごとに戻りのパス（エ



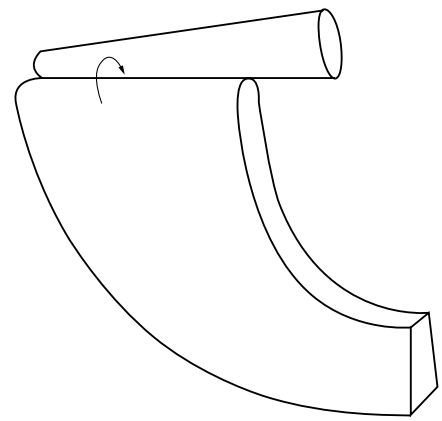
第5図 リーディングエッジからトレイディングエッジへの一方方向の工具軌跡

Fig. 5 Roughing cutter paths from leading to trailing edge



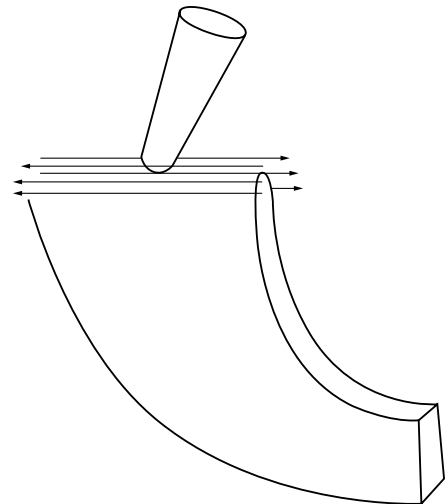
第6図 三角形の工具軌跡

Fig. 6 Triangulated roughing cutter paths



第7図 工具側面切削

Fig. 7 Frank milling



第8図 工具先端切削

Fig. 8 Point milling

アーカット)が発生するなど無駄が多い加工方法となっていた。

そこで、第6図に示すようにツールパス間隔が一定となる三角形の工具軌跡に変更し、加工パス数の最適化、エアーカットの最少化を実施している。

#### 6.2 リーディングエッジ加工の工具軌跡

翼先端のリーディングエッジ部は、丸みをもった薄く細長い形状をしており、加工部位近傍の剛性が小さいため、加工の際もっとも注意を要する箇所である。

まず、リーディングエッジは翼面を仕上げる前に加工する。これは、翼厚を薄くする前に加工することにより、加工中のビブリの発生、工具刃先による翼の巻き込まれ破損を低減するためである。

次に、工具のどの部位を使って切削するかについて述べる。第7図に示す工具側面での切削方法は、加工時間が短くてすむが、リーディングエッジ全長にわたって工具側面が同時に接触するため、切削抵抗が大きく、リーディングエッジ周辺の翼がビブリー、良好な面粗度がえられない。また、切削抵抗により翼のたわみ量が大きくなり、幾何公差を確保することが非常に困難となる。さらに、工具刃先が翼を巻き込み破損させる可能性が大となる。したがって、剛性の小さい翼のリーディングエッジを加工する場合には、切削抵抗が最小限となる方法を見いだすことが重要なポイントとなる。

当社では、種々の方法を試行錯誤しながら、第8図

に示すような工具先端での加工(筋彫り加工)を見いだした。この方法によれば、加工時間は長くなるが、リーディングエッジ部の寸法精度、面粗度などの品質を確保でき、翼の巻き込み破損も防止できる。

むすび=当社のインペラの機械加工(削り出し)の概要について紹介し、工具や加工方法・加工条件の選択により、加工精度の向上、加工時間の短縮ができることを示した。削り出しインペラは、精密鑄造インペラにくらべ、品質の安定性や表面粗度が良くなり、遠心圧縮機の性能向上に寄与することから採用が増加している。今後は、種々のインペラ形状や精度の要求に応えながら、さらなる加工時間の短縮をめざしていきたい。

#### 参考文献

- 1) 鳴瀬則彦: 難削材の切削加工, 日刊工業新聞社, (1989).