

(解説)

遠心圧縮機大型インペラ加工技術

Machining Technology for Large Impellers of Centrifugal Compressors



戒能 徹*1
Toru KAINO

The impellers of centrifugal compressors are becoming larger. We needed to achieve machining efficiency in dealing with the characteristics of 5-axis machining centers, work shapes and upsizing. Kobe Steel reduced the machining time by using contour machining, a system for leveling cutting resistance, a method for predicting chatter vibration, and so on. This paper describes the actions we have recently taken to improve the machining of large impellers.

まえがき = 近年、空気分離装置などに使用される遠心式圧縮機は大型化し需要も旺盛である。それに伴って、主要部品であるインペラも大型化して加工時間が長くなっており、製品の長納期化や加工コストアップを防ぐための加工時間短縮が急務である。

高速回転する遠心式圧縮機のインペラは、高精度かつ高強度であることが求められるため、機械加工による削り出しによって製作するのが主流である。インペラの翼形状は、高圧力比・高効率を得るために3次的にねじれた複雑な形状となっており、隣接する翼が覆い被さっている。そのため、一般的な金型加工に適用される同時3軸、4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。

そこで当社では、同時5軸制御マシニングセンタの特性やワーク形状の特性に合わせた加工方法を見出すために、近年発達の著しいシミュレーション技術を取り入れて、インペラの大型化に対応した高効率加工方法の開発に取り組んだ。以下に近年取り組んだ加工技術の概要を紹介する。

1. インペラ翼加工

インペラの翼形状は、性能面、強度・振動面、構造面のすべての要求仕様を満たすよう、流体性能解析や強度・振動解析などを繰り返し行うことによって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とインペラ各部の名称を図1に示す。

インペラのような自由曲面の加工は同時5軸マシニングセンタによって加工される。同時5軸マシニングセンタの特徴は、直線軸3軸と回転軸2軸を同時制御することによって工具姿勢を任意に制御し、複雑な3次元形状

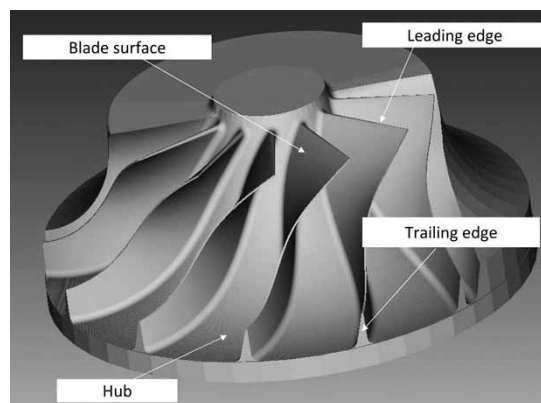


図1 インペラソリッドモデル
Fig.1 Solid model of impeller

部品を加工できることである。その反面、工具（主軸）とワーク・治具との3次的な干渉を考慮する必要や、ボールエンドミル先端の刃先の周速がゼロになる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など、NCプログラム作成は格段に難しくなる。

インペラの素材としては、強度、耐食性の面から主にステンレス鋼が、さら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。ステンレス鋼やチタン合金は切削性が悪く一般的に難削材と呼ばれている。さらに、熱伝導率が他の鋼に比べて小さいため、切削熱が刃先に集中して工具先端の劣化が速まり、工具寿命が短くなる。また、ワークの仕上精度にも悪影響を与える。

つぎにインペラ翼加工の問題点を下記にまとめる。

- ① 3次元形状の加工であるため切込量が常時変化し、切削負荷が一定でない。
- ② 同時5軸マシニングセンタは構造上、回転軸周辺の機械剛性が低いいため、一般的に重切削加工に向いて

*1 機械事業部御門 開発センター 高砂加工部

いない。

- ③ワーク形状が薄肉で工具長も長くなるため、びびり振動が発生しやすく加工速度を上げられない。

これらの問題を解決するため、①に対しては切削負荷平準化技術の採用、②に対しては等高線加工の採用、③に対しては不等ピッチ・不等リード工具の採用や、びびり振動予測技術の採用により加工効率化に取り組んだ。以下にそれぞれの概要を紹介する。

2. インペラ翼荒加工効率化の取り組み

2.1 切削負荷平準化技術

インペラ翼の荒加工工程で使用している工具は、図2に示すようなハイスラフィングテーパボールエンドミルである。インペラの大型化に伴って荒加工用工具も大型化してきたが、同時に切込量も増加したため切削抵抗も増加し、加工途中に過負荷による機械停止や、工具破損が発生しやすくなった。そのため、切込量や送り速度などの加工条件を下げる必要があり、単純に工具を大型化しただけでは加工効率を上げることができなかった。

工具破損の原因は、切込量増加による切削負荷の増加

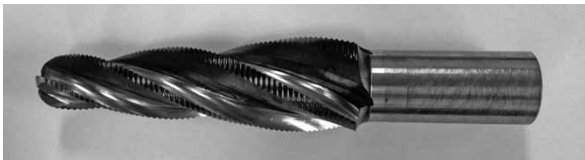


図2 ハイスラフィングテーパボールエンドミル
Fig.2 High-speed steel roughing taper ball end mill

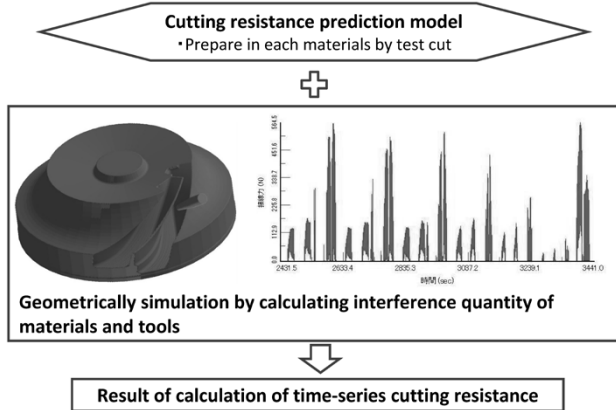


図3 切削負荷平準化システムの概念図
Fig.3 Conceptual diagram of system for leveling cutting resistance

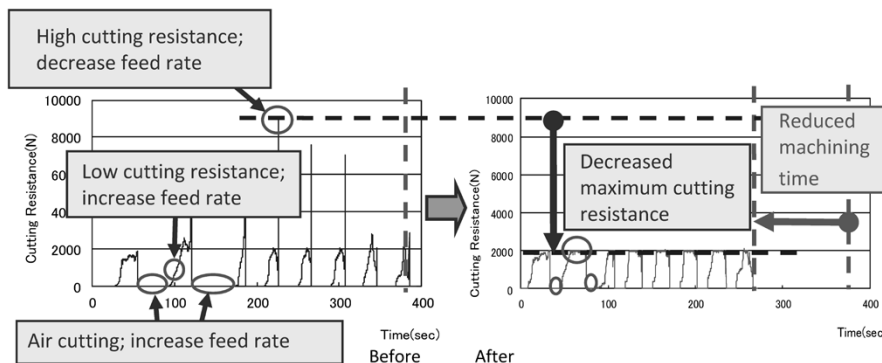


図4 切削負荷平準化の例
Fig.4 Example leveling cutting resistance

以外に、インペラ翼加工においてはワークと機械の干渉を回避するために工具長が長くなり、工具のたわみが生じやすいことが考えられる。また、インペラのような複雑な3次元形状の加工は、切込量や工具姿勢が常に変化し、それに伴って切削負荷も常に変化する。工具破損を防止するためには負荷がなるべく高くないように切削条件を落として加工しなければならず、加工時間が長くなってしまいう問題があった。

そこで、切削負荷の変動を低減するために、切削負荷平準化技術を採用した。切削負荷平準化技術を応用したシステムを図3に示す。切削負荷平準化システムは、材料に応じた切削負荷モデル、工具形状データ、素材形状モデル、およびNCプログラム（工具軌跡）を用いて素材と工具の接触量を幾何学的に計算することにより、時系列の切削負荷を算出することができる。

また、最大切削負荷のしきい値を入力し、再計算させることによって切削負荷を平準化できる。これにより、切削負荷が大きい所は送り速度を遅くして切削負荷を下げ、切削負荷が小さい所は送り速度を速くして切削負荷を上げることで、工具軌跡を変えることなく切削負荷の変動を抑えることが可能になった。切削負荷平準化の例を図4に示す。なお、切削負荷のしきい値は、材料や工具サイズ、切込量に応じてテスト加工を行い、データベース化した。

切削負荷平準化により安定した加工を実現した結果、送り速度を約60%向上させることができ、切込量を径方向で25%、軸方向で約30%まで増加することができた。また、切削負荷の変動が安定したため、工具のたわみや工具破損が原因の削り込みの危険性が少なく、従来2mm残していた仕上代を1mm残しまで削減できた。そのため仕上加工時間も大幅に削減できた。

2.2 等高線加工

等高線加工は主に金型加工などの複雑な形状の加工に用いられる。軸方向の切込量を一定にして加工するため、小さい切込量で高い送り速度での加工を実現することにより、複雑な形状でも高能率な荒加工が可能である。また、このような低切込高送り加工は、切削負荷が軸方向すなわち機械の主軸方向に多くかかり、径方向にかかる切削負荷は低い。そのため、インペラ翼加工のように突出しの長い工具を使用している場合、低工具剛性による面粗度不良や工具寿命悪化を回避して高能率加工が

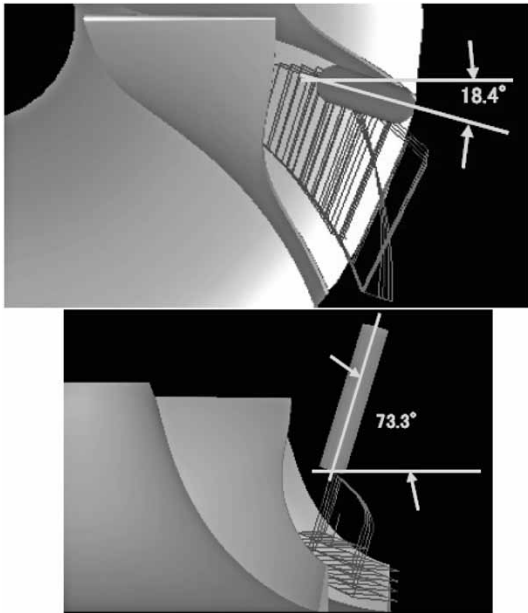


図5 工具姿勢決定の例
Fig. 5 Example of tool attitude

できる。また、5軸加工においては剛性が低い回転軸を固定して加工ができるため、突出しの長い工具でも剛性を維持して安定した加工が期待できる。

しかし、等高線加工は高能率加工を期待できる反面、インペラに適用する際は、複雑な翼形状と工具の干渉を回避しつつ、アンダーカットが発生しない加工範囲や最適な工具姿勢を3次元的に見つけ出さなければならない。従来のCAMでは工具姿勢の角度をおおまかに指定して等高線加工パスを作成し、加工範囲が適正か検証を重ねる必要があり、従来のNCプログラム作成方法での等高線加工は困難であった。工具姿勢を決定するための幾何学的切削面の設計の様子を図5に示す。

しかし、近年の3D-CAD/CAMの発達により、加工範囲の指定や最適な工具姿勢の指定が3Dモデル上で視覚的にできるようになり、短時間で最適な加工パスを作成し検証できるようになった。その結果、翼面形状に沿った形で効率よく最大の加工範囲で低切込高送り加工を実現できるようになった。

低切込高送り加工では、従来のハイスラフィングテーパボールエンドミルでの荒加工と比べて切込量は小さくなるが、刃先を超硬素材にすることによって送り速度を20倍に向上させることができ、切粉排出量の増加が期待できる。しかし、切込量が小さくなるため、ある程度大径の工具で加工する必要がある。そのため、翼間の広いトレーリングエッジ側の荒加工に適用することにした。

さらに、従来荒加工に用いていたハイスラフィングテーパボールエンドミルに代えて超硬素材の刃先を持ったラジアスカッタを使用できるようになり、加工時間を平均で17%短縮できた。

3. インペラ翼仕上加工効率化の取り組み

3.1 不等ピッチ・不等リード工具

リーディングエッジの加工方法において、工具側面で

切削する場合は、パス数も少なく加工時間が短くできるが、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荷荷が大きい。さらに、ワークも薄肉で低剛性であるため、リーディングエッジ周辺でびびり振動が発生し、良好な面粗度を得られない問題があった。そのため、工具先端R部を使用した突き加工にして切削荷荷を抑えていたが、パス数が増加するために加工効率の低下を招いていた。工具側面加工と工具先端加工における工具移動方向の模式図を図6に示す。

高効率加工を目標に、工具側面での加工時のびびり振動防止効果をねらった工具の開発を行った。『びびり振動には、強制びびり振動と自励びびり振動とがあり、加工中に大きな振動を伴う場合の多くが、自励びびり振動の一つである再生型びびり振動である。

図7に切削加工におけるびびり振動の発生原理を示す¹⁾。切削加工中には、被削材と工具の相対運動により切削面に若干の凹凸が生じる。さらに、『前加工波状面と現加工波状面との位相差により、切り取り厚さ(切削量: 図中の実線と破線の間)が周期的に変化する(図7a)。これが切削抵抗の周期的な変動となり、その振動が一定値を超えると振動が成長して再生型びびり振動につながる。

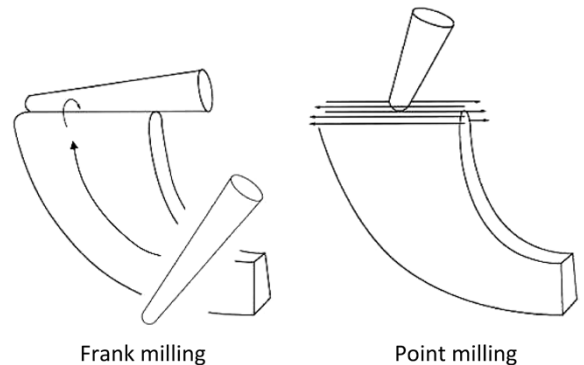


図6 工側面切削と工具先端切削
Fig. 6 Frank milling and point milling

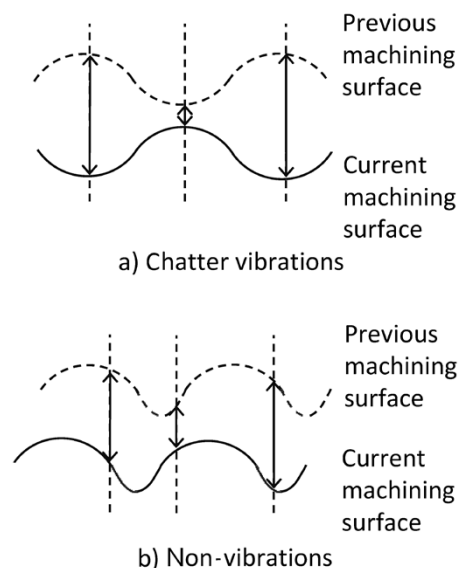


図7 切削加工におけるびびり振動¹⁾
Fig. 7 Mechanism of chatter vibrations in cutting¹⁾

これを抑制するには、切れ刃の間隔を変えるなど、切り取り厚さの周期もしくは規則性を変える方法が有効である(図7b)』¹⁾。上記理論を採り入れたインペラ翼加工用の不等ピッチ・不等リード工具を開発した。これにより、工具側面でリーディングエッジを加工してもびびり振動が防止でき、面粗度を満足する加工ができた。図8に不等ピッチ・不等リード工具を示す。

3.2 びびり振動予測技術

ハブ面の加工は突出しの長い工具を使用して加工しているため、加工速度を上げたり切込量を増やしたりするとびびり振動が発生し、要求面粗度を満足できない問題があった。そこで、びびり振動を防止し加工効率を上げるための最適な加工条件を追及するために、びびり振動予測技術の適用を検討した。

びびり振動予測技術は、理論上のびびり発生限界加工条件を予測するものである。ワーク側の材料特性として、2次元切削実験により求めたすくい角、工具傾斜角と切削抵抗値の関係をあらかじめ求めておく。つぎに、工具(切刃)とワークの幾何学的関係を考慮した切削力モデルにより切削抵抗値を算出する。一方、工具・機械の動特性を求めるために、エンドミルの機上加振実験からシステムのパネ定数と粘性係数を求める。この切削力と工具取り付け時の動特性から理論上のびびり発生限界加工条件を予測する。

インペラ翼加工に使用する工具は一般的に、使用後に毎回再研磨するため工具長がまちまちである。しかし、ハブ面加工用の工具は先端のボールエンドミルを交換す

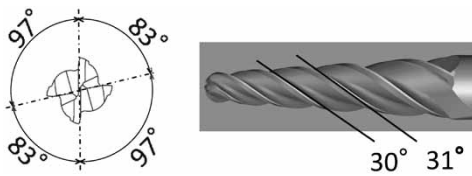


図8 不等ピッチ・不等リード工具

Fig. 8 Variable pitch and variable lead angle milling cutter

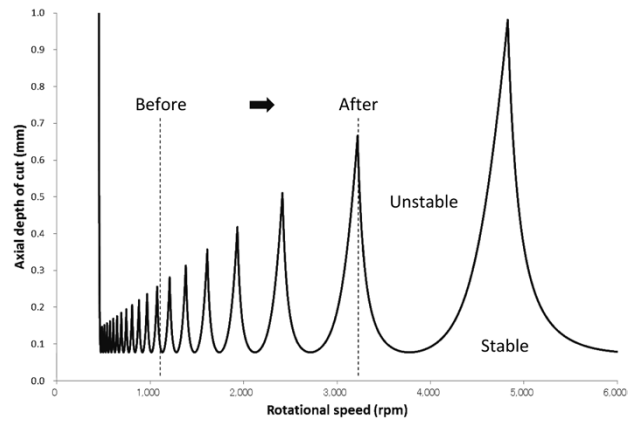


図9 びびり振動予測技術適用による切削条件の向上

Fig. 9 Improvement of cutter condition with chatter vibrations predicting method

る焼嵌め式であるため工具長に変化がなく、ワークが変わっても工具の動特性に変化がない。このため、本予測技術を採用することにした。図9は本予測技術を用いたびびり振動予測曲線である。びびり振動予測技術の適用により、軸方向の切込量を0.4mmから1mmへ向上でき、工具回転数も1,280rpmから3,200rpmまで向上してもびびりを発生させることなく加工することができた。

むすび= 当社大型インペラの機械加工における課題について紹介し、その課題に対して大型インペラに適した工具や加工方法、加工条件を最適化することにより、加工時間を大幅に短縮することができることを示した。今後もインペラは大型化していく傾向にあり、加工難易度はますます高くなると予想されるなか、今後も品質を維持しながら最新の加工技術を取り入れることによって、加工時間の短縮をめざしていきたい。

参考文献

- 1) 柴田朝子. NACHI TECHNICAL REPORT. 2012, Vol.25 B2.