

C軸制御による翼型ノズル形状の加工

内田豊春

筑波大学研究基盤総合センター 工作部門

〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1

概要

強力な旋回流を発生させる装置の重要な部分である翼型ノズルの加工を、本学の研究基盤総合センター工作部門（以下、工作部門とする）が設備する、主軸割り出し機能（C軸制御）とミーリング機能を有するCNC旋盤、いわゆるターニングセンターで行った。

翼型形状の加工に際しては、翼断面の形状を再検討し、工具径補正值は2D-CADとExcelを利用して適切な値を求めた。この結果、C軸とZ軸の2軸を同時に制御することで、工作依頼者が要求する形状の翼型ノズルができた報告である。

1. はじめに

流体の渦崩壊を利用して微細な気泡を生成することができる。ただし、渦崩壊を生じさせるには非常に強い旋回流を必要とする。

工作部門では、この旋回流を発生させる装置の重要な部分である翼型ノズルを、実験目的に合わせた形状で各種加工している。図1に最近加工した翼型ノズルを示し、形状を簡単に説明する。

翼型ノズルは、半球状をした先端部と6枚の翼(vane)から構成され、図1の上が上流部、下が下流部となる。翼の先端は、流体が抵抗少なく流れるように、R形状をしている。上流部の翼幅は広く、直線に近い緩やかな曲線をしているが、下流部に行くに従い翼幅も細くなり、曲線も90°近く曲がった形状をしている。下流先端部ではエッジ状になる。この翼と翼の間で形成される溝がノズル形状となる。

本報告では、初期検討（翼型ノズル形状が加工できるか否かの最初の検討）から実際の加工に至るまでを述べる。

初期検討の説明は、初めて加工した翼型ノズル形状を例に取り、実際の加工は図1の翼型ノズル形状を例に取り説明する。

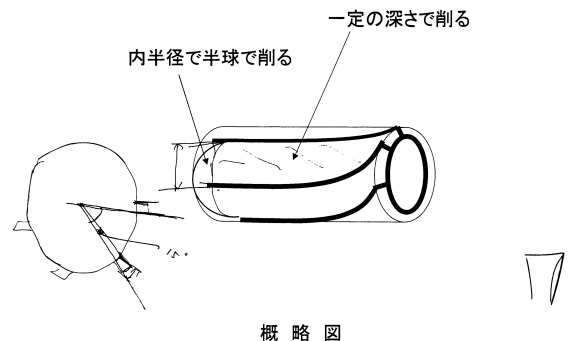
2. 初期検討

最初の翼型ノズル加工に際しては、図2に示す形状の概略と、各部の寸法等が記入された仕様書、それに依頼者自身がアクリル材から削り出した簡単な形状見本が提示された。

仕様書には、翼型ノズルの半径、全長、vane数、原点からの距離に対する円周角を算出する式、vane角、vane幅、溝角、溝幅、溝深さ、vane形状（縦軸に円周角、横軸に原点からの距離で描いた曲線）が記載されている。この仕様書と形状見本を元に翼型ノズルの形状が、工作部門が設備するOKUMA製ターニングセンターLB15II-MWで加工可能な形状で



図1. 翼型ノズルの形状



翼形状R=2.1cm; Vane:6枚

半径(R)=2.1(cm), L=5.0072(cm) 孔 a=1.6mm程度

vane数=6(枚)

円周角=27.2837 $\left(-0.0911817 + \frac{0.476315}{5.2238 - z} \right)$ (度); z:距離(cm), 0<z<L

vane角=15.(度); vane幅=0.549779(cm)

溝角=60.(度); 溝幅=2.19911(cm); 溝深さd=0.5 cm

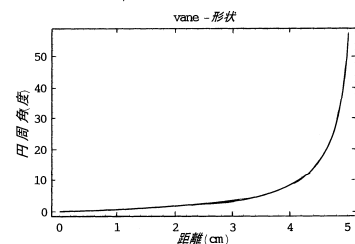


図2. 翼型ノズルの概略と仕様

表 1 LB15 の仕様 (抜粋) 単位 : mm

能力	ベッド上の振り	530
	往復台上の振り	340
容量	ノーズ間距離	760
	最大加工径	340
移動量	X軸移動量	260
	Z軸移動量	520
	C軸移動量	360° (0.001°) C軸ダイレクト制御

あるか、検討を行った。LB15 II - MW の仕様を表 1 に示す。(以下、ターニングセンターを LB15 とする)
 詳細な検討の結果、翼の曲線形状加工に関しては、加工ワークを取り付ける主軸の回転角度が制御可能なので、問題無く加工できることが分かった。しかし、翼型ノズル全体の加工に関しては、解決しなければならない以下の問題点が明らかになった。

2.1 翼断面形状の問題

LB15 の座標系を図 3 に、図 2 の概略形状から描き直した翼断面形状と、この形状を加工する場合のエンドミル位置の模式図を図 4 に示す。主軸回転角中心が C 軸、中心の軸方向が Z 軸となる。(X, Y の各軸は直感的な見やすさと説明のため 90° ずらした)

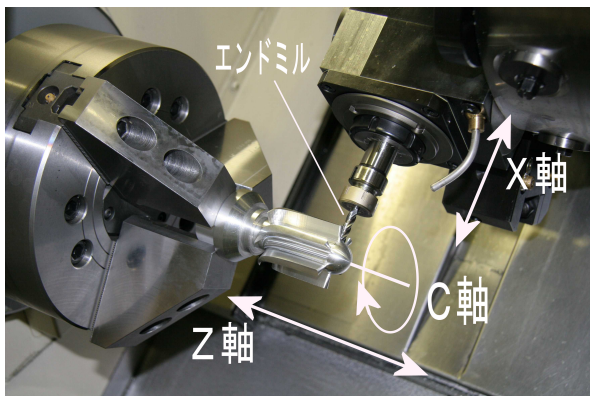


図 3. LB15 の座標系

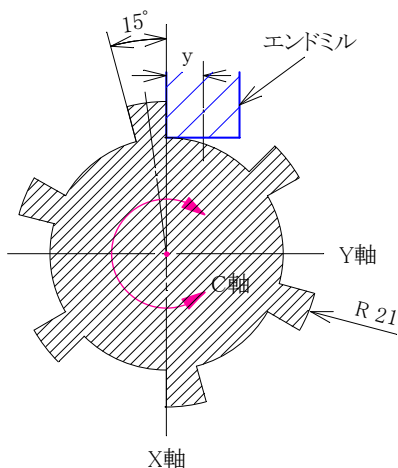


図 4. 翼断面形状とエンドミルの位置

図 4 のように、翼側面は軸中心に向かっていている。LB15 は、表 1 の仕様からも分かるように Y 軸を持たず、回転工具であるエンドミル中心と主軸中心が一致し固定されている。このため図 4 の翼断面形状を加工するには、y 分だけ Y 軸がオフセットできる NC フライス盤、または Y 軸制御が可能なターニングセンター等の NC 複合加工機を使用しないと加工が非常に困難である。限りなく細いエンドミルを使えば、この形状は加工できるが非現実的である。

2.2 工具径補正の問題

翼型ノズルの概略と仕様で記された形状式から描いた翼形状を図 5 に示す。

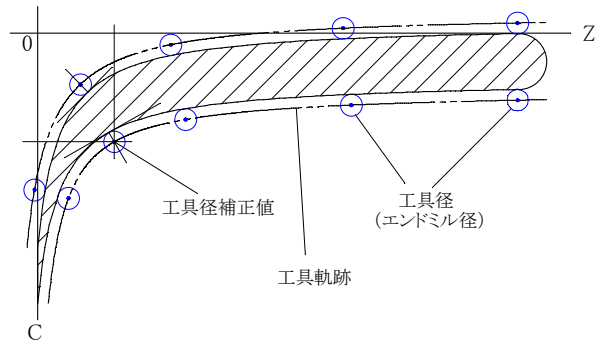


図 5. 翼形状と工具補正曲線 (工具軌跡)

ハッチング部分が翼形状を表し、上下の 2 点鎖線は各点の工具径補正值を曲線で表した。また、実際に加工する場合の工具径中心が通る軌跡でもある。

図からもわかるように、翼の曲線形状を正確に加工するには、切削工具を曲線の法線方向に工具半径分ずらした場所へ正確に位置決めしなければならない。これを工具径補正といい、補正された値を工具径補正值という。

3. 問題点への対処

3.1 翼断面形状の検討と工夫

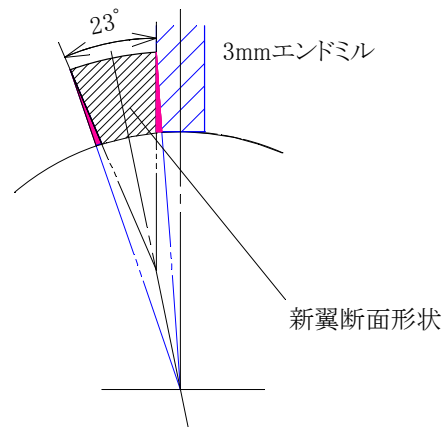


図 6. 検討した翼断面形状

翼断面形状を再検討するため、2D-CAD を使いエンドミルと翼断面の位置関係を見直した。LB15 と同じくエンドミルを主軸中心上に描き、翼断面図を回転させながら描いたところ、図6の翼断面形状が得られた。細かなハッチング部が新翼断面形状。

図のように、正式な形状より根本部分が細くなる。得られた形状を、加工依頼者を交え検討した結果、この形状でも問題はないと判断され、Y 軸を持たないLB15でも、C 軸とZ 軸の同時2軸制御で加工可能な形状となった。加工に使用するエンドミル径も、この再検討で適切なものが判断できた。

3.2 工具径補正值の計算

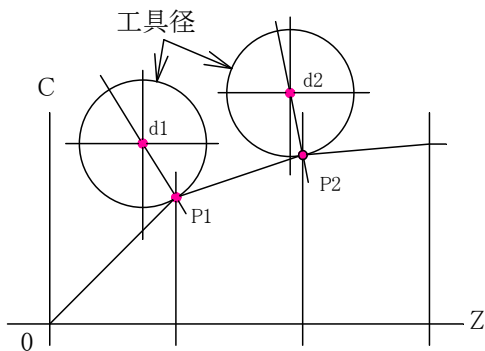


図7. 工具径補正值の計算

工具径補正值は図7に示すとおり、形状式から算出された座標値の3点を取り、線0-P1の傾き、線P1-P2の傾きから、点P1に対する法線の傾きが計算できる。この法線から工具半径分d1の位置が工具補正值になる。

以上の各点の数値計算は、全て表計算ソフトであるExcelで行った。形状式から出てくる数値は円周角なので、計算に際しては角度を円周長さに換算した。

例えば、加工例とした42mmの翼型ノズルを平面に展開すると、 $42 \times \pi = 131.947$ となる。また、 1° は、 $131.947/360 = 0.366$ となる。

平面に展開された円周角は、NCデータ作成時に再びC軸の値として角度に換算される。

4. 実際の翼型ノズル形状の加工

各種製作をしてきた翼型ノズル形状は、翼の全長、

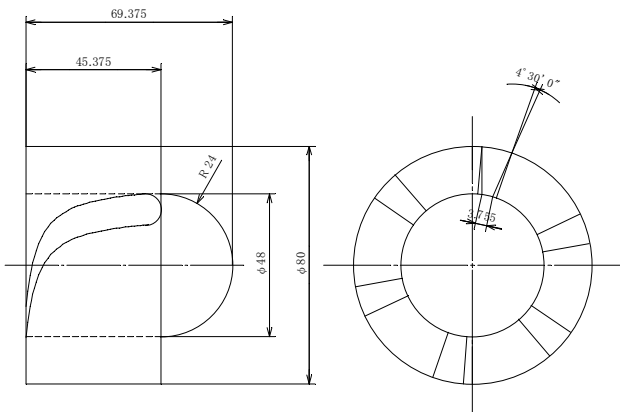


図8. 80mm翼型ノズルの寸法形状

直径、溝深さ、溝幅、先端半径が違う程度で、基本形状は同じである、加工手順も同じであるので、実際の加工説明は、図1の翼型ノズル形状で行う。

4.1 形状

翼型ノズルの寸法形状は、全体の長さが69.4mm、先端部の球面R24mm、翼の長さ45.4mm、翼の外径80mm、溝深さ16mm、翼数6枚(60°間隔)である。

80mm翼型ノズルの寸法形状を図8に示す。

4.2 材種と切削工具

翼型ノズルの材種は、切削性が良好なアルミニウム合金(JIS A2017)を採用した。

切削工具は、翼形状の粗加工用としてハイス5mmラフィングエンドミル、仕上げ用は同じくハイス6mmエンドミルを使用した。5mmと6mmの使い分けは、仕上げ代として0.5mm残すためである。

半球面と外径の切削加工は、粗加工、仕上げ加工共に、スロアウェイ片刃バイト1本で行った。

4.3 NCデータの作成

前述された工具径補正等に関する事項を踏まえ、NCデータを作成した。

翼形状曲線のデータは、翼長Zを1mm間隔で分割し、各点の座標を直線をつなぐ直線補間とした。

NCデータの作成手順を説明する。

- (1) Excelで計算された工具径補正值は、CSVファイル等のテキストファイル形式で保存。
- (2) 保存されたCSVファイルをエディタで編集し、NCデータを作成する。
- (3) 作成したNCデータは、LB15の数値制御装置(OSP5020L)へ転送し加工準備が整う。

4.4 加工手順

翼型ノズル形状の加工手順を簡単に説明する。

- (1) 加工ワークの直径85mm長さ110mmアルミニウム合金丸棒の片側を、LB15の生爪チャックのつかみ径に合わせ、汎用旋盤で切削。
- (2) LB15に着け換え、仕上げ代0.3mmを残し外径形状を切削。
- (3) 5mmラフィングエンドミルにより、翼形状と溝部を粗加工。
- (4) 6mm4枚刃エンドミルで、翼形状と溝部を仕上げ加工。
- (5) 外径形状の仕上げ代0.3mmの仕上げ切削を行い、LB15による加工は終了。
- (6) 最後に、生爪チャックつかみ代を汎用旋盤で削り落とし、翼型ノズル形状が完成する。

5. まとめ

今回のような翼型ノズル形状の加工では、翼型形状を描画するだけでNCデータの作成が可能な、3D-CAD/CAMソフトの使用が一般的である。しかし、LB15用の3D-CAD/CAMソフトは所有していない。

そこで、今までの加工経験とNC加工機の各軸の動きを理解していることで、3D-CAD/CAMソフトを使用せずに、図2のラフスケッチから要求された形状の翼型ノズルを完成させた。

初め、依頼者の希望する翼型ノズルの材種は、ステンレス鋼(JIS SUS304)であったが、最初は試作的な意味もあり、切削性の良好なアルミニウム合金(JIS A2017)を採用した。

完成した翼型ノズル形状は、実験に使われ良好な結果を得ている。その様子を図9に示す。

翼型ノズル形状を加工するに当たり、加工依頼者と加工者は、事前に綿密かつ詳細な打ち合わせを行った。その結果、当初、加工不可能と思われた翼の断面形状は、形状を若干変更することで現有する加工機械で加工が可能となった。この事は大学の工作部門として非常に重要な意味を持っている。加工依頼者と加工者の連携が重要な、今回のようなゼロからの試作的な仕事は、加工する人間のスキルをかなり向上させる。

謝辞

本報告の作成にあたり、依頼者でもあり、資料を提供していただいたシステム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻京藤敏達助教授、研究基盤総合センター工作部門長松内一雄教授、長田秀治講師のご支援をはじめとし、工作部門の皆様の協力に感謝いたします。

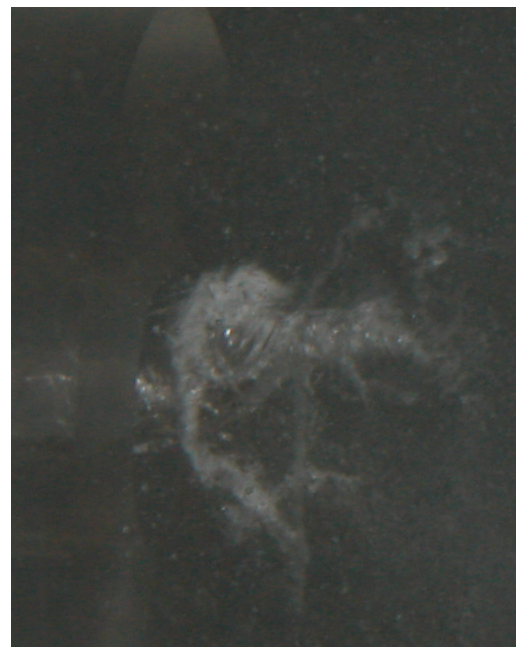
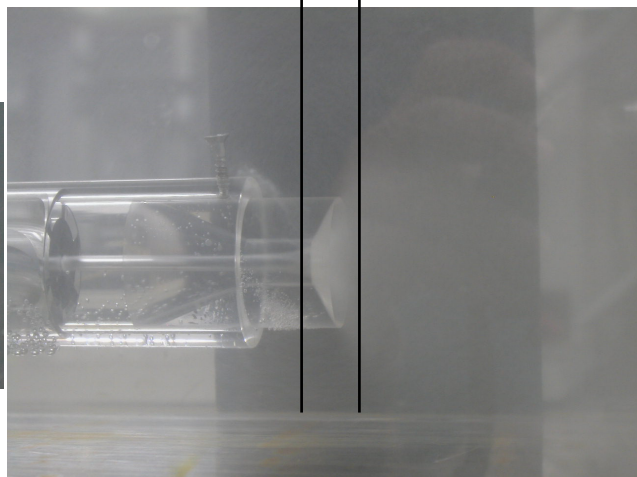
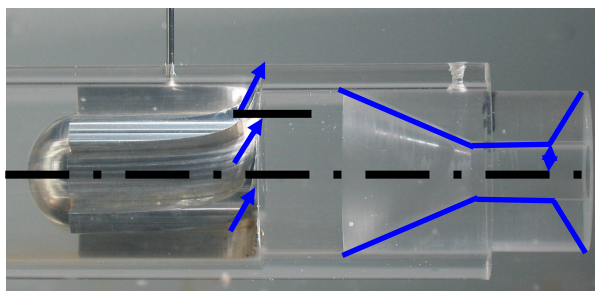


図9. 翼型ノズルによる実験の様子