

模型プロペラ製作技術の紹介

田嶋 正紀*

Tajima Masanori

船舶用プロペラに要求される性能を実機製作前に確認する手段の一つとして、実機プロペラと相似形状の模型プロペラを用いた性能試験がある。当社では、模型プロペラの製作から性能試験まで実施できる設備・技術を保有している。本稿では、模型プロペラの製作技術を中心に、製作フロー、精度管理、課題と改善策について述べる。

キーワード：性能試験、模型製作、3D-CAD/CAM、5軸マシニングセンター、手仕上げ

1. はじめに

1.1 実機プロペラに要求される性能

大型一般商船用プロペラでは、次の4つの性能が要求され、(2)～(4)を満たしつつ、(1)で最高の効率を得ることが求められている。⁽¹⁾

(1) プロペラ単独性能

<効率が良いこと>

(2) キャビテーション

<エロージョンが発生しないこと>

(3) プロペラ起振力

<振動・騒音が許容限度内であること>

(4) 翼応力

<強度上の問題がないこと>

1.2 模型プロペラによる性能試験

上述の性能のうち、数値シミュレーションによる評価のみでは不十分な場合、模型プロペラを用いて、次の性能試験が行われる。

(1) プロペラ単独性能試験

一様流（等速度で同方向の流れ）中を回転・前進するプロペラに生じるスラスト（推力）とトルク（ねじりモーメント）、およびその比率（プロペラ単独効率）を測定する。

(2) キャビテーション試験

翼面上の圧力低下により発生する気泡（キャビティ）の状況を観察する。

1.3 模型プロペラの製作

このような模型プロペラ性能試験に供せられる模型プロペラの主な仕様を次に示す。

(1) 直径 : ϕ 250mm 前後

(2) 翼数 : 3翼～6翼程度

(3) 材質 : アルミニウム合金

(4) 表面処理 : アルマイト処理（着色）

一般的に、実際の商船用のプロペラ（直径数m）の場合、銅合金の鋳物から大型機械で削り、研磨仕上げするのに対し、模型プロペラ（直径数十mm～数百mm）の場合、アルミ合金の丸棒等から削り出す方法が取られている。当社では同時5

* 機器装置事業部 機器装置部 製作グループ 課長 一般計量士

軸制御マシニングセンター（以下5軸MC）（写真1）を用いて翼形状を削り出している。

次に模型プロペラの製作技術を紹介する。



写真1 同時5軸制御マシニングセンター

2. 模型プロペラ製作技術の紹介

2.1 模型プロペラの製作フロー

設計された翼形状データを用いて模型プロペラを完成させるまでの、当社での製作フローを紹介する（図1）。

(1) データ変換・モデリング

翼形状は、翼断面のオフセットテーブル、直径、翼幅、ピッチ、レーキ、スキュー等といったデータを用いた専門的な定義がされている。これらのデータを一般的な3次元座標系のデータに変換し、同時に、実機寸法から模型寸法へスケールダウンする。次に、3D-CADによりモデリングする。モデリングした形状データは、後に3D-CAMによるNCプログラミング、および切削シミュレーションで利用される。

(2) 前加工（旋削・ワイヤー放電・ミーリング）

模型プロペラの加工のうち、5軸MCでは不可能な加工（キー溝のワイヤー放電加工）や、5軸MCでは非効率的な加工（翼間以外の概略形状の旋削加工、穴あけ/座ぐり等のミーリング加工）を、5軸MCでの加工の前に実施する。

(3) NCプログラミング

5軸MCで翼形状を削り出すためのNCプログラムを作成する。プロペラの翼面は自由曲面（円柱や球などのように単純な数式で表せない曲面）であり、しかも複雑にねじれているため、工具軸ベクトル（工具の傾き）の制御可能な3D-CAMが利用される。当社では、翼加工専用の3D-CAMと汎用的な3D-CAMを併用することにより、効率良く、また製品の最終形状により近い（手仕上げ作業のより少ない）形状に5軸MCで仕上げることを追求している。

(4) 切削シミュレーション

プロペラの翼面は複雑な自由曲面であるため、5軸MCの各軸（直線：3軸/回転：2軸）の動きも複雑となる。そのため、干渉（工具と加工物、工具ホルダと加工物、機械と機械等の衝突）の有無や、加工後の形状精度（削り過ぎ、削り残し）などを、実際の製品を加工する前に確認し、必要に応じてNCプログラムを修正する。テスト加工用の材料を用意して実際に5軸MCを動かし、干渉の有無を確認する方法もあるが、当社では確認時間の短縮と機械損傷リスク低減のため、切削シミュレーションソフト（図2）を用い、干渉の有無と加工後の形状精度を確認している。

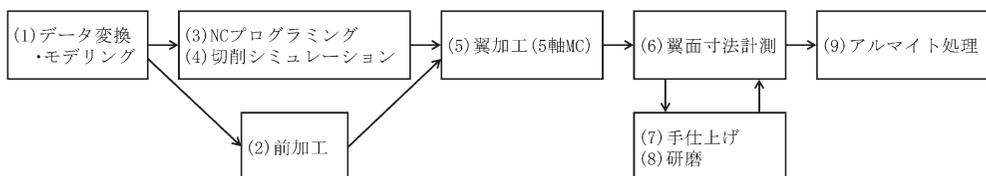


図1 模型プロペラの製作フロー

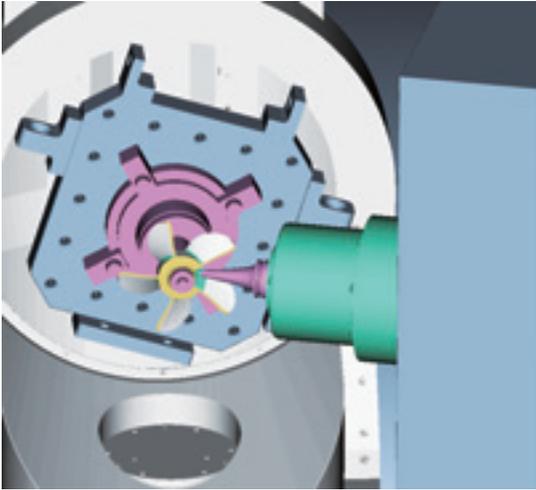


図2 切削シミュレーション

(5) 翼加工 (5軸MC)

切削シミュレーションにより問題ないことが確認されたNCプログラムを用い、5軸MCにより翼形状を削り出す(写真2)。切削条件(主軸回転数、各軸の送り速度)等が適切であれば、数十時間の自動運転の後、翼形状の削り出しが完了する。

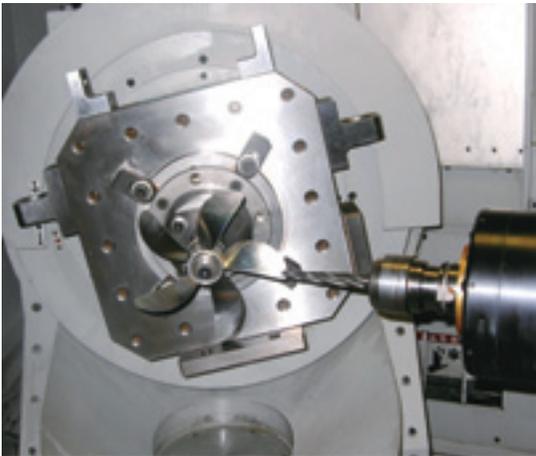


写真2 翼形状の削り出し (5軸MC)

(6) 翼面寸法計測

5軸MCで翼を削り出した後、翼面の寸法を測定する(写真3)。各翼(3~6翼)、各面(フェース面/バック面)、各断面(十数断面)につき十

数点を、許容値に基づいて評価する。当社では、模型プロペラ専用の測定機を製作し、測定作業の効率化を図っている。



写真3 翼面寸法の測定

(7) 手仕上げ (ヤスリがけ)

翼面寸法計測の結果、許容値より大きい場合は、手仕上げ(ヤスリがけ)により小さくする(写真4)。許容値より小さい場合は再製作が避けられないため、5軸MCでの仕上げの際は、加工精度のばらつきを考慮して、ある程度の手仕上げ代(数十 μm)を残している。手仕上げ代が大きい場合は手仕上げ作業が増えるため、加工精度のばらつきを小さくすることにより手仕上げ代を小さくすることが要求される。



写真4 手仕上げ (ヤスリがけ)

(8) 研磨

ヤスリがけにより翼面寸法が精度内に仕上がった後、翼面粗さの精度を確保するために、手仕上げにより研磨を行う。

(9) アルマイト処理

模型プロペラの腐食および損傷を防ぐため、アルマイト処理（陽極酸化処理）を行う。また、水槽での性能試験の観察時の視認性を高めるため、アルマイト処理と同時に試験内容に応じて適した着色を施す。

2.2 模型プロペラの精度管理

翼形状および翼面の表面仕上げについて、模型プロペラの用途（試験内容）に応じて要求される精度がある。これらを管理するため、翼面寸法と翼面粗さを測定する。

(1) 翼面寸法

翼形状を定義する寸法データ（直径、翼幅、ピッチ、レーキ、スキュー）の各項目に対する精度を総合的に評価するため、翼面寸法を測定する。模型プロペラ製作の最初の工程であるデータ変換の際に、3次元座標系の1つである円筒座標系($r \theta z$)を用いた翼形状データを作成している。 r （プロペラ回転軸からの径方向の寸法）および θ （プロペラ回転軸回りの基準位置からの回転角度）に対して、 z （プロペラ回転軸方向の基準位置からの寸法）を測定し、評価する。模型プロペラの用途（試験内容）によるが、面の輪郭度公差で数十 μm 程度が要求される。

(2) 翼面粗さ

模型プロペラの表面仕上げは鏡面仕上げが要求される。定量的に評価するために、算術平均粗さ(Ra)や最大高さ(Ry)を測定する。模型プロペラの用途（試験内容）によるが、数 μm 程度が要求される。最終工程である研磨およびアルマイ

ト処理の後に、粗さ測定機を用いて測定する。

2.3 模型プロペラ製作上の課題

現在のところ、5軸MCによる翼の削り出しのみで翼面寸法の要求精度を確保するのは困難なため、手仕上げ（ヤスリがけ）による寸法調整が欠かせない。加工中のびびり発生による加工面の不良や、翼の変形が加工精度悪化の原因であり、その主な原因として次が想定される。

- ・ワーク（プロペラ翼）の剛性が低い。
- ・工具の剛性が低い
- ・加工工程および加工条件が最適でない。

これらを改善することにより、加工精度の向上、手仕上げ作業の短縮が可能となり、製作期間の短縮および製作費用の低減が可能となる。

2.4 模型プロペラ製作上の改善策

加工精度の向上を図るため、①ワーク（プロペラ翼）の剛性を上げる、②工具の剛性を上げる、③加工工程および加工条件を改善する、ことが必要であり、各項目について検討すべき事項を次に述べる。

(1) ワークの剛性

模型プロペラは、その翼形状に対して翼間（隣接する2つの翼の間）の体積が大きい。そのため、素材形状から翼間部分の材料を除去する際の残留応力解放による変形が無視できない。変形の影響を抑えるため、翼間の粗加工では最終形状に対してある程度の仕上げ代を残し、最後に翼面の仕上げ加工を行うようにしている。

模型プロペラの翼は概ね、細い、薄い、長い、のが一般的であり、翼の仕上げ加工の開始時点で既に剛性の低い形状となっている。仕上げ加工時の翼の剛性を上げるためには、粗加工時に残す仕上げ代を大きくする必要がある（図3）。

一方、仕上げ代を大きくすると、仕上げ加工時

の材料除去量が大きくなるため、この時点でも残留応力解放による変形を考慮しなければならない。

仕上げ加工時の剛性向上（仕上げ代→大）と、残留応力縮小（仕上げ代→小）のバランスを考慮して、加工工程を検討することが重要である。

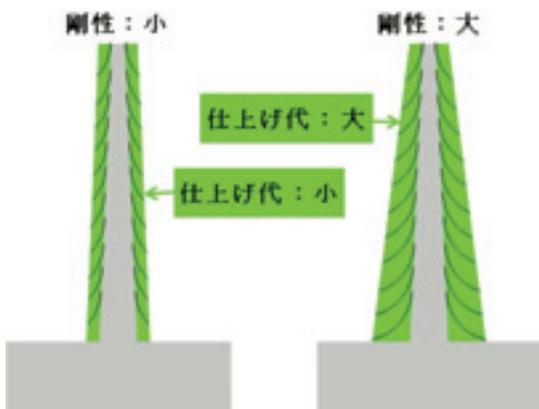


図3 仕上げ代とワーク剛性

(2) 工具の剛性

工具の形状を表す各項目に対する工具剛性の大きさを表1に示す。

表1 工具形状に対する工具剛性

	剛性：大	剛性：小
工具径	太	細
刃長	短	長
テーパ角度	大	小
突き出し長	短	長
刃数	多	少

一般的に太く短い方が工具剛性は大きいといえる。模型プロペラの翼形状は複雑な自由曲面であり、工具を干渉させないようにするために、工具形状は細くかつ長くなりがちである。いかに太くかつ短い工具を適用できるかの検討が、工具剛性確保の面で重要である（図4）。

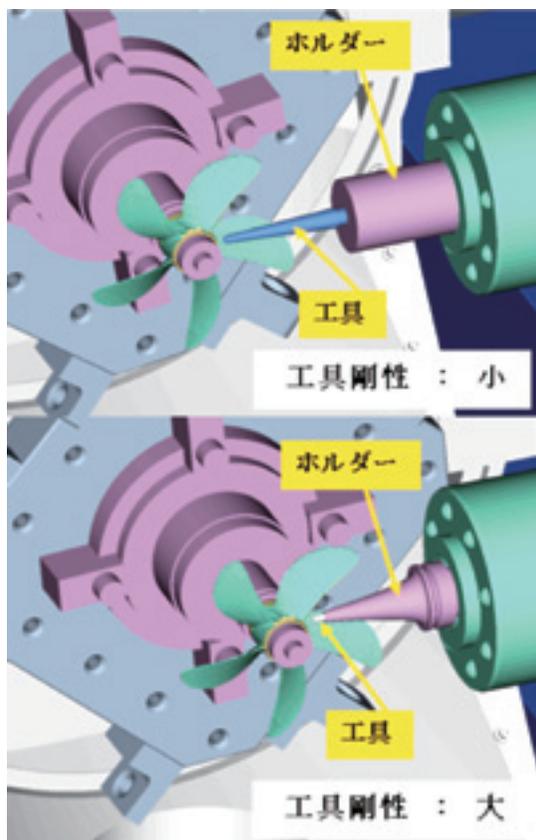


図4 工具ホルダの検討

(3) 加工工程および加工条件

主な加工条件として次が挙げられる。

- ・工具の回転数
- ・工具の送り速度
- ・材料の除去量（切り込み、ピッチ）

工具の回転数および送り速度は、工具径、刃数、切削速度（工具外周における速度）、1刃あたりの送り量（工具が1刃分回転する間に工具が移動する距離）によって計算される。切削速度および1刃あたりの送り量は、工具の種類（材質、表面処理、形状、等）およびワークの材質により工具メーカーで推奨する値を参考に、加工環境（工具/ワークの剛性等）を考慮して決定する。

材料の除去量は工具の刃長や工具径を限度に決定する。除去量や加工環境によって加工精度が変

わるため、工程（粗加工、仕上げ加工）によって材料の除去量を検討する必要がある。精度確保のために、場合によっては粗加工と仕上げ加工の間に中仕上げ加工を入れる（図5）。

以上のとおり、加工環境によって最適な加工条件は変わってくるため、模型プロペラの翼形状に応じた加工工程および加工条件の検討が必要となる。



図5 中仕上げ加工

3. おわりに

3.1 まとめ

(1) 模型プロペラの製作フロー

翼形状データから模型プロペラを完成させるまでの製作フローの詳細を述べた。

(2) 模型プロペラの精度管理

翼形状および翼面の表面仕上げについて、模型プロペラの用途に応じて要求される精度があり、これらを管理するため、翼面寸法と翼面粗さを測定する。

翼面寸法は、面の輪郭度公差で数十 μm 程度が要求され、模型プロペラ専用測定機による測定結果を評価する。

翼面粗さは、 R_a または R_y で数 μm 程度が要求され、研磨およびアルマイト処理後に粗さ測定機による測定結果を評価する。

(3) 模型プロペラ製作上の課題

現在では、5軸MCによる翼の削り出しのみで、翼面寸法の要求精度を確保するのは困難なため、手仕上げ（ヤスリがけ）による寸法調整の工程が欠かせない。加工精度向上により製作期間の短縮および製作費用の低減が可能となる。

(4) 模型プロペラ製作上の改善策

次の3点を改善することにより加工精度の向上を図る。

①ワーク（プロペラ翼）の剛性を上げるために、粗加工時に残す仕上げ代を、残留応力を考慮しつつ調整する。

②工具の剛性を上げるために、より太く短い工具およびホルダで、かつ干渉しないものを適用する。

③加工環境（工具/ワークの剛性、等）によって最適な加工条件が変わってくるため、模型プロペラの翼形状に応じた加工工程および加工条件を検討する。

3.2 今後の課題

地球温暖化の緩和策について、船舶の分野では、省エネルギー、燃費向上の手段の1つとして推進性能の向上が挙げられ、高性能のプロペラの開発が課題となっている。その開発促進のために、模型プロペラ製作と性能試験の期間短縮、費用削減が求められている。

模型プロペラ製作の工程では、現状では機械加工のみでの精度確保が困難なため、手仕上げ作業が必須となっている。さらなる機械加工精度の向上による手仕上げ作業の削減、あるいは計測方法の見直しによる計測時間の削減について検討を進め、製作期間の短縮と製作費用の低減を図りたい。工具、加工工程、加工条件の検討に加え、模型プロペラ計測システムについても現状の機能・操作性について改善を進めていく。

参考文献

- (1) 山崎 正三郎：第5回 船用プロペラに関するシンポジウム、Tokyo, December 1～2, 2005



機器装置事業部 機器装置部
製作グループ 課長
一般計量士
田嶋 正紀
TEL. 045-759-2216
FAX. 045-759-2216