

曳航水槽と模型試験

プロペラ単独試験(1) (POT)

プロペラ単独試験(Propeller Open-water Test, POT)は、プロペラの前後に船体や舵が無いプロペラだけの場合の性能を求める試験です。ただし、図-1に示すように、スラスト、トルク、回転数を計測する装置がプロペラ後方に取り付けられていますので「全く単独」とはなりません。

ここでいう性能とは、推進性能のこと、で、プロペラを回す馬力（トルクと回転数を掛け合わせたもの）が、どれだけ効率よく船体を押す馬力（スラストとプロペラ前進速度を掛け合わせたもの）に変換できるかという性能を指します。ここでプロペラ単独性能と呼ぶ場合は、通常、プロペラのキャビテーション性能などは指しません。

試験の対象となる模型プロペラは、実船に装備するプロペラの模型と自航試験（次号以降で掲載予定）で使用する模型プロペラの2つに大別できます。

実船に装備するプロペラの単独試験の場合は、造船技術センターでは、通常、直径が25cm程度の模型を使用します。

自航試験で使用する模型プロペラは、模型の縮尺を船体の縮尺と同じにしますので、長さが6mの模型船用の模型プロペラの直径は22~23cmが普通です。このプロペラは、Stock Propellerと呼ばれていますが、一般的には、手持ちのプロペラの中から最適なものを選んで使います。当センターは、400個以上のプロペラを保有していますので、通常の試験では不自由することはありません。

一般に模型プロペラの材料は、実船のプロペラとの同一性は考慮されません。当センターでは、以前は、製作の容易性から鉛合金を使用していましたが、重い、表面に傷が付きやすい等の欠点があり、NC切削機の導入を機会に、今はアルミニウムを使用しています。

プロペラが、ある回転数nで回転しながら、プロペラ軸の方向にある速度 V_A で前進するとき、必要なトルクQと発生するスラストTはどのようなパラメータに依存するのでしょうか。また、どのようにして模型試験結果から実船のプロペラ性能を得るのでしょうか。

まず考えられるのがプロペラの大きさです。プロペラの大きさはその直径Dで代表させます。次は、船体の抵抗試験について説明したとき(SRC News No.24 参照)と同じで、水の密度 ρ 、水の動粘性係数 ν 、重力の加速度 g です。プロペラが水面近くで作動し空気を吸い込むような場合は、水の表面張力Sもプロペラ性能に影響します。

これらのパラメーターの次元は以下のようになります。

	工学単位	SI 単位
スラスト T	kgf	kg m/sec ²
トルク Q	kgf m	kg m ² /sec ²
プロペラ回転数 n	sec ⁻¹	sec ⁻¹
プロペラ前進速度 V _A	m/sec	m/sec
プロペラ直径 D	m	m
水の密度 ρ	kgf sec ² /m ⁴	kg/m ³
水の動粘性係数 ν	m ² /sec	m ² /sec
重力の加速度 g	m/sec ²	m/sec ²
水の表面張力 S	kgf/m	kg/sec ²

これらのパラメーターから、次の無次元係数が得られます。

スラスト係数

$$K_T = T / \rho n^2 D^4 \quad \dots \dots \dots (1)$$

トルク係数

$$K_Q = Q / \rho n^2 D^5 \quad \dots \dots \dots (2)$$

プロペラ前進係数

$$J = V_A / n D \quad \dots \dots \dots (3)$$

レイノルズ数

$$R_{nD} = n D^2 / \nu \quad \dots \dots \dots (4)$$

フルード数

$$F_n = V_A / \sqrt{g D} \quad \dots \dots \dots (5)$$

ウェバー数

$$We = n \sqrt{\rho D^3 / S} \quad \dots \dots \dots (6)$$

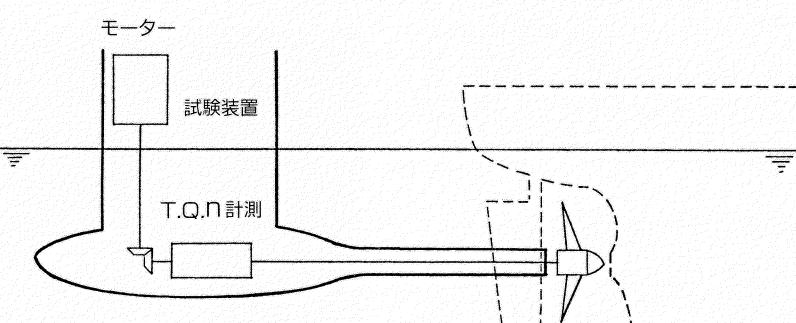
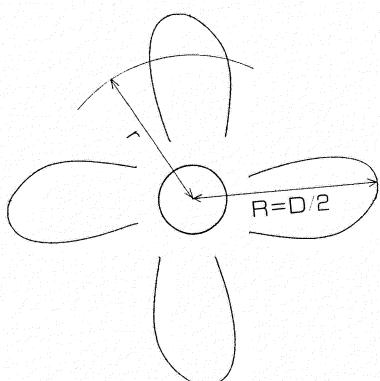


図-1 プロペラ単独試験の概念図

プロペラ前進係数は、プロペラ前進速度とプロペラ回転速度の比を表す係数です。（コラム 参照）レイノルズ数は水の慣性力と粘着力の比を表すパラメーターです。フルード数は、水の慣性力と重力の比を表すパラメーターで、プロペラがつくる水面の波に関係します。ウェバー数はプロペラが水面から空気を吸い込む現象を支配します。

◆プロペラ前進係数◆

図一2に示すように、プロペラの翼がある半径 r で切断して平面に展開しますと、図一3、4に示すように切断面は翼型になっています。これが半径 r における翼素です。プロペラは回転しながら前進しますので、翼素の前進方向は図一3の合速度のようになります。横向きのベクトルはプロペラ回転による速度 $2\pi r \times n$ です。縦向きのベクトルはプロペラ軸の方向でプロペラ前進による速度 V_A です。この2つのベクトルを合せた合ベクトルがこの翼素の合速度です。



図一2 ある半径 r で翼を切断

いうまでもなく、これら無次元係数の積・商も無次元係数ですが、流体力学的意味、慣例から、これらの係数を使用しています。プロペラ理論やウォータージェット推進等のタイプの異なる推進器と比較する際は、(1)式の分母で使用しているプロペラ回転数の代わりにプロペラ前進速度を使用し、面積の次元を有する D^2 の代わりにプロペラの全円面積 πR^2 (R

はプロペラ半径)を使用した無次元係数

$$C_T = T / (1/2 \rho V_A^2 (\pi R^2)) \quad \dots\dots (7)$$

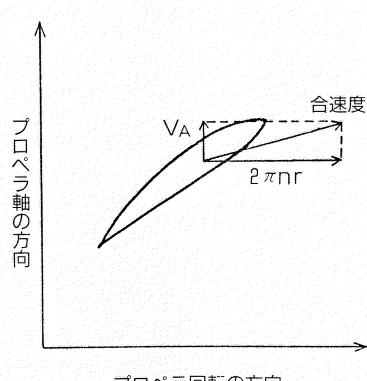
が使用されます。

次回は、これら無次元数を用いて模型試験から実機プロペラの性能を求めていきます。

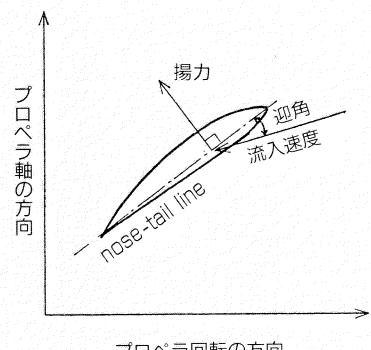
2つのベクトルの比 $V_A / 2\pi r n$ において、半径位置をプロペラチップ（プロペラ翼の先端） $r = R$ とし、定数 π を省きますとプロペラ前進係数となります。つまり、プロペラ前進係数は、プロペラ前進速度のプロペラチップの回転速度に対する比を表す係数です。

図一3と同じことを、プロペラの翼素が固定されており、それに流れが当たっている場合に置き換えますと図一4のようになります。図一3の合速度は、長さが同じで向きが反対の流入速度を表すべ

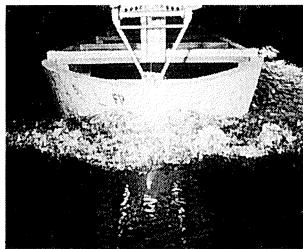
クトルになります。このベクトルと翼のnose-tail lineのなす角が（幾何学的）迎角です。プロペラの回転数を同じにしてプロペラ前進速度を小さくした場合、プロペラ前進係数は小さくなり、翼素に流入する流れの迎角は大きくなります。迎角が大きくなると翼素が発生する揚力も大きくなり、揚力のプロペラ軸方向成分に関するスラスト、回転方向成分に関するトルクも大きくなります。



図一3 翼素の前進速度



図一4 翼素を固定したときの流入速度



曳航水槽と模型試験

プロペラ単独試験 (2) (POT)

前号では、プロペラに関するパラメータを用いてこれらの処理に必要な無次元数を示しました。本号では、これらの無次元数を用いて模型試験から実船の性能推定における実機プロペラ性能に関する考え方を示します。

プロペラ効率は、プロペラが吸収する馬力 $2\pi n Q$ に対するプロペラが発生するスラスト馬力 T_{VA} の比ですから

$$\eta_0 = T_{VA} / 2\pi n Q \\ = J K_T / 2\pi K_Q \quad \dots \dots (8)$$

となります。

スラスト係数、トルク係数はプロペラ前進係数等の関数ですから、次式のように表すことができます。

$$K_T = f(J, RnD, Fn, We) \quad \dots \dots (9)$$

$$K_Q = h(J, RnD, Fn, We) \quad \dots \dots (10)$$

これらの式は、実船用プロペラと形状が相似な模型プロペラを作成し、 J 、 RnD 、 Fn 、 We を実船の場合と同じにして模型試験を実施することができれば、 K_T 、 K_Q も同じになりますから、実船用プロペラのスラスト、トルクを求めることができることを示しています。

しかし、前にも述べたように、 J 、 RnD 、 Fn 、 We のすべてを合致させることはできません。

プロペラ前進係数 J はプロペラの荷重の度合いを表すパラメーターで、これを合わせることは可能であり、これを合わせないでは、プロペラ単独試験を実施する意味がありません。一方、船体の抵抗試験の場合と同様、レイノルズ数 RnD を合わせることはできません。同様の理由でウェバー数 We も合わせることがで

きません。ただし、フルード数 Fn を合わせることは可能です。

プロペラの没水深度が十分に大きいときは、水面の表面張力や重力に関するウエバー数やフルード数の影響は無視できるオーダーとなります。曳航水槽において大気圧下で行われる模型プロペラの単独試験では没水深度 (I) とプロペラ直径 (D) の比 I/D が約 0.7 より大きい場合には、空気吸込みによるプロペラ特性の変化は無いことが一般に知られており、通常は $I/D = 1$ における試験を標準としています。

プロペラが船尾に付けられた場合、ごく低速で、大きなプロペラスラストを出

さねばならない場合を除けば、船の速力上昇に伴って船尾の水位も上昇し、静止状態の場合よりも相対的に没水深度が増加することもあり、没水深度の小さなバースト状態についても、標準状態 $I/D = 1$ にて求めたプロペラ特性を性能推定に使用します。なお、船尾に付けたプロペラの状況により、 I/D が 0.7 より小さい状況にあると判断される場合でも、明らかに明瞭な空気吸込みが認められない場合は、プロペラ単獨特性が変化したとはせず、自航要素の変化とみなして処理するのが通常の方法です。

レイノルズ数の小さい模型プロペラの翼面上の流れの様子は、場所により層流、遷移域、乱流が混在する複雑なものであ

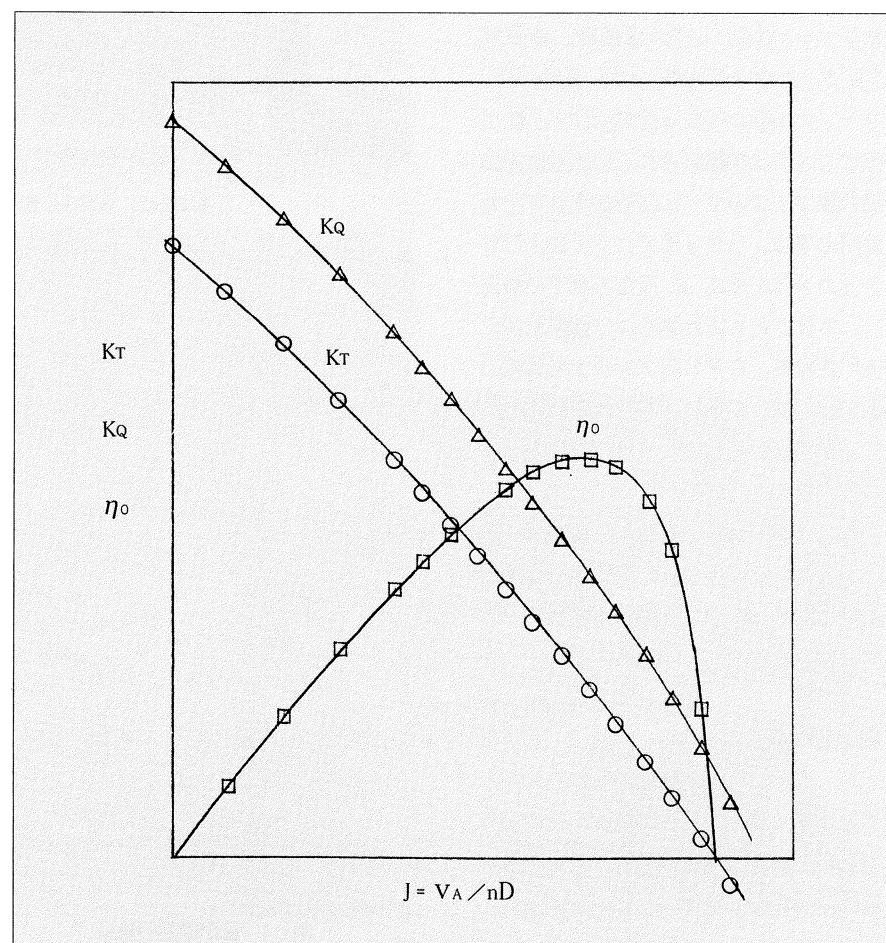


図-5 プロペラ単独性能曲線

ることが知られており、レイノルズ数の大きな実機プロペラとは異なり、レイノルズ数の影響は無視できません。このような現象の相違を考慮して理論計算により修正する方法も提案されておりますが、一般的に使用される段階にはありません。一方、実験的にはプロペラ単独試験において、プロペラの回転数を大きくして行くと、それ以上ではプロペラ特性があまり変化しなくなる回転数があり、これをレイノルズ数で整理すると $Rn_D = 4.5 \sim 5.0 \times 10^5$ 程度となることから、これを臨界レイノルズ数と称し、これ以上のレイノ

ルズ数で行ったプロペラ単独試験の結果を実機プロペラ特性として使用しています。近年の新型プロペラでは、臨界レイノルズ数が従来のプロペラより高くなっている例、あるいは実験的に明確には得られない場合もあります。また、プロペラ特性そのものも、実験設備、試験法等により微妙に影響されることがあり、異なる試験水槽間の評価や実船の推定においては注意を要します。

以上に述べたことを前提として、(9)、(10)式は、普通、次のように簡略化して使用されています。

$$K_T = f(J) \quad \dots \quad (11)$$

$$K_Q = h(J) \quad \dots \quad (12)$$

前者はスラスト係数曲線、後者はトルク係数曲線、この2曲線にプロペラ単独効率を表す曲線を併せてプロペラ単独性能曲線と呼んでいます。その例を図-5に示します。模型試験は、普通、プロペラ回転数 n を一定に保ち、プロペラ前進速度 V_A を変えてプロペラ前進係数 $J = V_A/nD$ を変化させます。模型試験を実施するプロペラ前進係数の範囲は、 $J = 0$ ($V_A = 0$ 、ボラード状態) から $K_T = 0$ の点までです。

◆レイノルズ数◆

さきに、プロペラのレイノルズ数を $Rn_D = nD^2/v$ としました。レイノルズ数は
(速度) × (長さ) / (動粘性係数 v) ですが、速度の代表として nD 、長さの代表として D を使用したのが nD^2/v です。

また、翼素の性能に注目して、長さとして、ある半径位置 r の翼弦長 C_r 、速度 V_A としてその半径位置の流入速度 $\sqrt{V_A^2 + (2\pi nr)^2}$ を使用する方法も考えられます。このレイノルズ数を、前述のレイノルズ数 Rn_D と対比して示しますと次式のようになります。

$$Rn_k = \frac{nD^2}{v} \frac{C_r}{D} \sqrt{J^2 + (\pi n \frac{r}{R})^2}$$

このレイノルズ数は、半径位置 r によって変化し、計算量も多い（電卓で計算すると数十秒を要す。翼弦長 C_r は記憶されていない）ので煩わしいのですが、その流力的合理性は捨て難く、かなり使用されています。半径位置としては、普通、プロペラ半径 R の 70% が使

用されます。

◆プロペラを流速計として使う◆

翼車式の風力計、潮流計、風力発電装置の翼（これらの場合は翼とは呼んで、羽根と呼ぶことが普通のようです。）もプロペラと同じような形をしています。

プロペラはエンジンから伝えられたエネルギーを水中に放出し、その反動で推力を得ていますが、風力計の場合は、流れのエネルギーを吸収して羽根を回し、その回転数を計測することによって風速を求めます。形は似ていますがエネルギーの流れは逆です。（8）式の効率の定義も分母・分子が逆になります。

風力計の回転軸の摩擦が無いと仮定しますと、翼のトルクは零となりますので図-6の○印の点が作動点になります。軸の摩擦は実際には零ではありませんので、△印の点が作動点になりますが、今はこの違いを無視します。翼の形状が定まりますと○印の点のプロペラ（この場合はプロペラ=推進器ではないか）前進係数 J が定まりますので、回転数 n を計

測すると $V_A = JnD$ で、風速が得られます。

単独性能が既知のプロペラを使用しますと、プロペラでも流速を計測することができます。つまり、速さ V_A が未知の流れの中で、直徑 D のプロペラを回転数 n で回してトルク Q を計測します。設定値、計測値 D, n, Q からトルク係数 $K_Q = Q / \rho n^2 D^5$ を求めますと、既知の K_Q 曲線を使用して、図6の矢印に沿って作動状態 J を得ることができます。これから、風速計の場合と同じように、流れの速さ $V_A = JnD$ が求められます。スラストを計測している場合も同様の手順で、 K_T 曲線を使用して流れの速さを計測することができます。

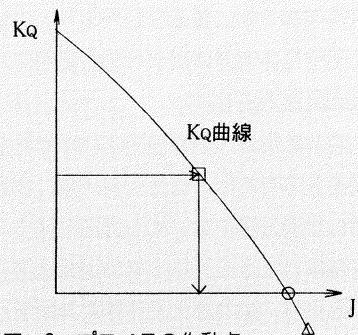


図-6 プロペラの作動点