

## 「船舶工学入門」 流体関係

内容構成は大筋で以下の通り

- ① 浮体の静力学と復原性
- ② 船が受ける抵抗
- ③ **推進器**
- ④ 船の動揺

他に比べて流体関係だけ密度が違うが、造船系の大学院に進学しない限り「船の流体」を学ぶ機会は無いと思うので、一通りの基礎をカバーしておくことにした。

## 推進装置について

推進の原理と種々の推進装置  
Screw Propeller  
Propeller性能の表現と模型試験

## 推進器 (1)

推進の基本原理はNewtonの運動の第二法則:「作用反作用の法則」であり、船は外界にある何かを推進器で押し(作用), その反力(反作用)を推進力としている。

浅瀬を移動する舟の場合に、竿を使って水底を押しという例外を除けば、船にとって外界には水と空気しか無いので、推進器は水か空気を後方に押ししている。そのメカニズムを説明しているのは運動量の定理で、推進装置によって水または空気の後ろ向き運動量を増加(または前向き運動量を減少)させ、反力として前向きの力を得て居る。

帆は、和船の帆のようにDragを利用するものと、ヨットの帆のようにLiftを利用するものがあり、ともに帆の両面に発生する圧力差を推進力としているので、「作用反作用の法則」ではないようにも思える。しかし、何れの場合も空気を押し反作用を得ていないだけで、風の有る状態で空気に押し貫っているのであるから、広い意味での「作用反作用の法則」である。

## 運動量の定理

Newtonの運動方程式

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F$$

を時間について一回積分したもので、

$$m \cdot \left( \frac{dx}{dt} \Big|_{t=T_2} - \frac{dx}{dt} \Big|_{t=T_1} \right) = F \cdot (T_2 - T_1)$$

「力が継続して作用すると作用方向の運動量(=質量×速度)が増加する」というもの。

推進装置によって水または後ろ向き運動量を増加させるには、後ろ向きの力を加えなければならないので、反力として前向きの力(推力)が得られる。

和船の帆のようにDragを利用するものでは、空気の前向き運動量が帆に当たって減少するので、帆が前向き力(推力)を受ける。

## 推進器 (2)

帆のように空気を対象とするものを除き、水を対象とするものだけ述べると、推進器は大きく分けて次の三種類になる。

- (1) 可動部分が水から受ける抵抗を利用して推進する方式 ----- 櫂が代表的なもので、機械仕掛けにしたのがPaddle Wheelである。
- (2) 可動部分が水から受ける揚力を利用して推進する方式 ----- 代表はもちろんScrew Propellerである。櫓は揚力を使っており、櫂に比べて流体力学的に高度な装置であるが、往復動を発生させる機械装置が作り難いため、実用的な機械仕掛けは無いようである。Voit-Schneider PropellerのようなVertical Axis Propellerは櫓の機械仕掛けと言えるが、機構が複雑なために効率が上がらない。
- (3) ジェット推進方式 ----- 前方から吸い込んだ水を加速して後方に噴き出せば推力が得られるが、通常のWater-Jet推進装置はScrew Propellerと同じ原理で作動するポンプを使って居るので、厳密な意味での「ジェット推進方式」とは言えない。本当にジェット推進方式と言えるのは、電磁誘導推進(管内の海水に強力な磁場を掛けて、電磁誘導によって加速する)くらいかなと思われる。

## Paddle Wheel (1)

動力推進の船で最初に使われた推進器はPaddle Wheelであったが、効率を上げるためには大直径のWheelをゆっくり回転させる必要があり、重くて大きな低速の機関を必要とすること、大きなWheel

を装備する場所は両舷の外側しか無いので岸壁との取り合いが不便になること、といった問題があり、Screw

Propellerの発達に伴って姿を消した。

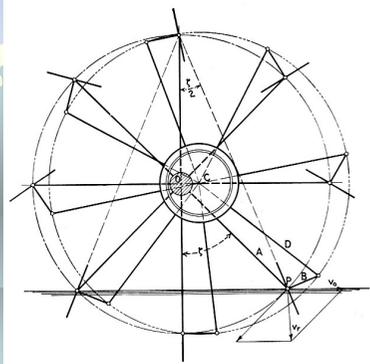


## Paddle Wheel (2)

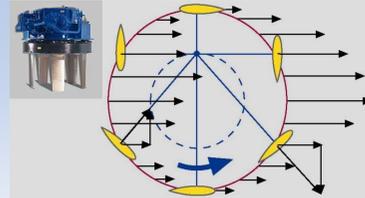
当初はWheelにPaddleが固定されたタイプであったが、このタイプでは大きなWheelをゆっくり廻さないと効率が上がらず、重くて大きな低速の機関を必要とするという欠点が顕著であった。その改善のために出現したのが右図の

Feathering Paddle Wheelである。Paddleが水面を出入りする際に、水面とPaddle面の角度が垂直から大きく外れることが効率低下の大きな原因であるので、O点中心でWheelを廻しながらC点中心で廻るリンクでPaddleの角度を変化させ、Paddle面の角度を調整する。

この機構はVoith-Schneider Propellerに使われているのと同じである。



## 特殊な推進器



Voith-Schneider Propeller



Water-Jet推進装置



CRP Pod推進装置

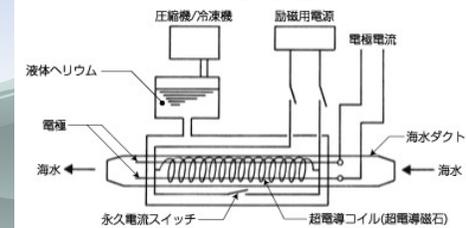
## 電磁誘導推進船 ヤマト1

どれほどの意義があったか知らないが、超電導磁石を使った電磁誘導推進の実験船が造られたことがある。2ノットくらいの速力しか出なかったが、「動いたことに意義がある」と聞いた覚えがある。  
神戸港のメケンパークの近くに、展示保存されている。



## ヤマト1の電磁誘導推進装置

機械装置を全く使わないで海水を加速するウォータージェット推進なので、音がしない(速力が2ノットでは現実的に意味がないけど)。  
「レッドオクトーバーを追え」という映画はソビエト海軍の最新鋭ミサイル潜水艦がニューヨークに近づく物語だが、この潜水艦はこの種の推進装置を装備して無音で航行できるという設定であった。



超電導コイルの磁界と電極電流との相互作用によって海水に力が働き(フレミングの左手の法則)、海水はウォータージェット式にダクトから吐き出される

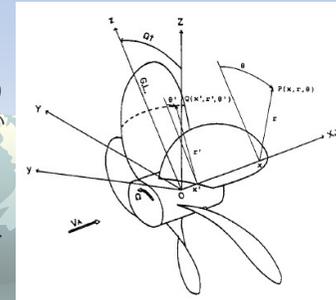
<http://www.tdk.co.jp/techmag/ninja/daa00731.htm>

## 推進装置について

推進の原理と種々の推進装置  
Screw Propeller  
Propeller性能の表現と模型試験

## Screw Propeller (1)

Screw Propeller(螺旋推進器)は「螺旋のような形状の推進器」を意味し、推進器の一種に過ぎないのであるが、船に関する限り今や推進器の代名詞になっていて、Screw(螺旋)を付けずにPropeller(推進器)と呼ばれることが多い。五翼プロペラの構成を図に示すように、Screw Propellerでは二枚以上の翼が回転軸に取り付けられていて、プロペラの翼面はほぼ螺旋面に沿った形になっている。



推進器の機能としては効率の高いことが第一義的に求められるが、現在のプロペラは、効率を高めるという要求だけでなくCavitationの発生抑制という要求も合わせて考慮し、発展した理論計算法を援用して設計されている。

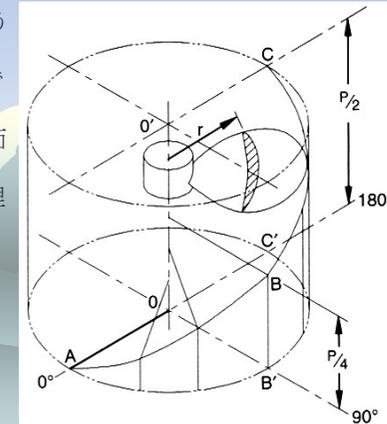
### Screw Propeller (2)

普通に見掛けるネジがScrew (螺旋)であるが、ネジ部高さが小さいので特徴が良く分からない。右の写真は典型的な螺旋階段を示している。螺旋階段は中心軸を廻るようにStepが配置された階段で、当然ながらStepの高さは中心軸からの距離によらず一定だから、中心軸の近くを登る方が急である。螺旋面はこれと同様に、「中心軸からの距離に拘わらず一周することによって上昇する高さが同じになる」ような曲面であるから、面の傾斜は軸に近いほど急である。



### Screw Propeller (3)

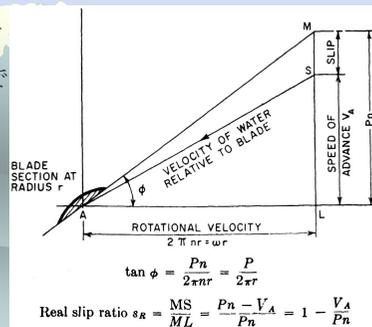
仮に水が高粘度の糊のようなものであって、糊の中をプロペラが回転しながら進んでいく状態を考えるとネジと同じことになるので、プロペラ面が螺旋面に似た形状でなければならないことは容易に理解できる。螺旋面上で軸を一周する度に上昇する高さのことをPitch(右図のP)と言い、Pitchとプロペラ直径の比:P/DをPitch Ratio (ピッチ比)と呼んでいる。



### Screw Propeller (4)

プロペラ軸から半径rの円筒面を展開した平面で、プロペラ翼と水との関係を見たのが下の図である。プロペラは毎秒n回、回転しているから、プロペラ翼は水の流れと垂直方向に $2\pi \times n \times r$ の速度で動く。前進速度が $V_A$ であればプロペラ翼には図のS点からA点へ向かう相対流れが当ることになる。

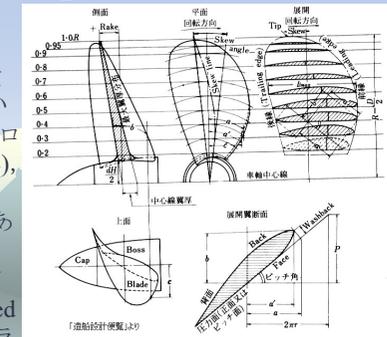
一方、プロペラのPitchがPであれば螺旋面は $P \times n$ の速度で進むから、プロペラ翼面はA点からM点へ向かう方向に動く。MとSの差がSlipで、これがあるからプロペラ翼は仰角を持ち、揚力を発生する。したがって、プロペラは推力を発生するのである。



### Screw Propeller (5)

プロペラは、ボスまたはハブと呼ばれる中心軸部分とボスに取付けられた複数枚の翼(Blade)で構成されているので、基本的な要目はプロペラ直径( $D_P$ )、ボス直径( $d_H$ )、翼数(Z)と上で説明したピッチ(P,  $p=P/D_P$ :ピッチ比)である。

展開面における翼の総面積を展開面積( $A_E$ : Expanded Blade Area)と呼び、プロペラ円盤の面積: $A_0$  (Propeller Disc Area= $\pi D_P^2/4$ )との比を、展開面積比: $A_E/A_0$ と呼んでいる。翼幅の中心点を結んだ半径方向の曲線をSkew lineと呼び、Skewの最大最小値の差をSkew angleと呼んでいる。



## ABBのPod推進器の展示模型

三菱長崎の船型試験水槽が、創立100周年を記念し、各国の技術者を招待してパーティを開いた時に、CRP Pod推進のフェリーの開発で一緒に働いたABB(Finland)の技師がこれを贈呈してくれた。



しかし、この模型は何処かオカシイんです。何処がオカシイか、分かりますか？

自由記述で回答し提出して下さい。(期限:来週の木曜日)

## 推進装置について

推進の原理と種々の推進装置  
Screw Propeller  
Propeller性能の表現と模型試験

## スクリュープロペラの無次元特性 (1)

スクリュープロペラを回転数: $n$ で回転させながら前進速度: $v_A$ で前進させ、「回転させるのに必要なトルク」: $Q$ と「プロペラが発生する推力」: $T$ が計測されたとする。

前進速度: $v_A$ またはプロペラ周速の二倍: $nD$ を速度として使い、推力とトルクの無次元値を定義する。すなわち、回転数または前進速度の無次元値である前進係数: $J$

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D}$$

を独立変数とし、

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad \text{または} \quad K_T = \frac{T}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad \text{または} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^3}$$

を従属変数とした形にプロペラ特性を表記する。

## スクリュープロペラの無次元特性 (2)

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad \text{または} \quad K_T = \frac{T}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^2}$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad \text{または} \quad K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^3}$$

と書いたが、前進係数: $J$ の定義

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D}$$

より、

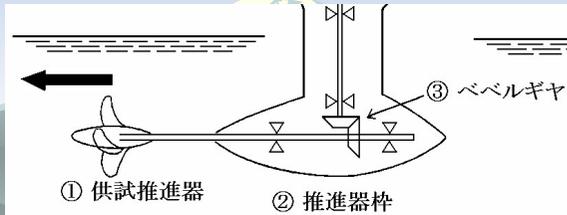
$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}, \quad K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad \text{の時}$$

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T \cdot n^2 \cdot D^2}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4 \cdot v_A^2} = \frac{T}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^2}, \quad \frac{K_Q}{J^2} = \frac{Q \cdot n^2 \cdot D^2}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5 \cdot v_A^2} = \frac{Q}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^3}$$

を得るので、どちらか一方を使ってデータを整理すれば良い。

## プロペラオープン試験

プロペラオープン試験(Propeller Open-Water Test)の目的は、無限流体中でプロペラが回転する時に、回転数と必要なトルク、発生する推力の関係を得ることであるから、プロペラ模型の周囲に何も無い状態で実験しなければならず、プロペラ模型を自由表面



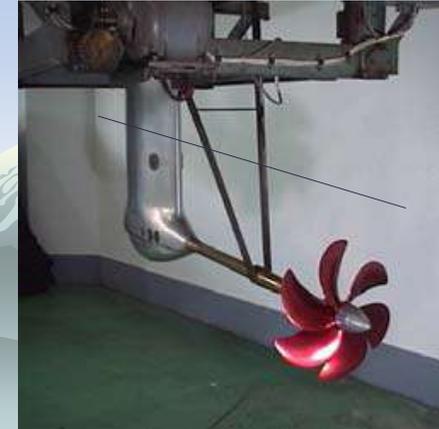
の影響が無視できる程度に沈め、後ろから駆動する装置を使う。得られた特性をプロペラオープン特性またはプロペラ単独特性(Propeller Open-Water Characteristics)と呼んでいる。

## プロペラオープン試験装置

プロペラ模型のオープン試験装置を右に示す。

斜線の辺りが水面になるように試験水槽に設置して、プロペラを回転させながらプロペラが前になる方向に走る。

船のプロペラは船体の後ろに着くが、装置が前にあると流れが乱されるので、逆に走る。



## プロペラオープン特性

プロペラオープン試験の結果は、前進係数

$$J = \frac{v_A}{n \cdot D}$$

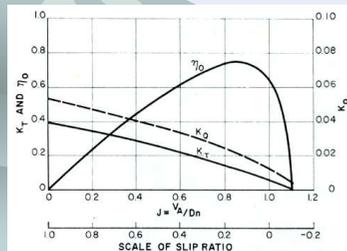
を独立変数として、

$$K_T = \frac{T_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}, \quad K_Q = \frac{Q_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5}$$

を表示した形にまとめられ、これらから、推力のなす仕事とプロペラを回転させる仕事の比、すなわちプロペラ効率:  $\eta$  が

$$\eta = \frac{v_A \cdot T_p}{2\pi \cdot n \cdot Q} = \frac{J \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q}$$

で計算される。これらをプロペラオープン特性と総称し、一例を右に示すようなオープン特性図で表現される。



## プロペラ特性の活用

$J = \frac{v_A}{n \cdot D}$  を独立変数とし、

$$K_T = \frac{T_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4} \quad \text{または} \quad K_T = \frac{T_p}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^2}$$

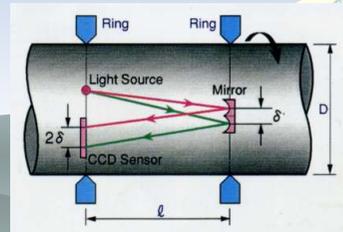
$$K_Q = \frac{Q_p}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5} \quad \text{または} \quad K_Q = \frac{Q_p}{\rho \cdot v_A^2 \cdot D^3}$$

を従属変数としたプロペラ特性は、 $J$ を与えて $K_T, K_Q$ を計算するのみならず、 $K_T$ または $K_Q$ が得られた場合にはそれから $J$ を逆算して、 $K_T, K_Q$ の他方とプロペラ効率:  $\eta$ を計算するなど、イロイロな形で使用される。

すなわち、スクループロペラを上記の無次元特性で表される流体機械と見なすことにより、所要馬力の計算だけでなく、例えば試運転で軸トルクを計測して $K_Q$ と回転数が推定できた場合に、更に $J$ を推定して $v_A$ を計算するだけでなく、 $K_T$ を計算して推力(更には船体抵抗)を推定するなど、様々な形で活用される。

### 試運転での軸馬力計測

船が完成して試運転をする際に、一定のエンジン出力、速度で走っている状態でプロペラ軸の捩れ角と軸回転数を計測する。計測装置の一例を図に示すが、計測結果から軸によって伝達される馬力、更にはプロペラのトルク係数( $K_Q$ )が推定できる。



$$SHP = \frac{2\pi^2 ND^4 G}{75 \times 60 \times 32 l R} \delta$$

プロペラ特性の推定値を使うと $K_Q$ に対応するJが分かり、Jから推力係数( $K_T$ )が計算できるので、プロペラが発生している推力が推定でき、更には船に作用している抵抗の大きさまで推定することができる。

### 推進性能試験結果の外捜法のまとめ

Reynolds数の低い状態で実施した模型試験の結果を、実船のReynolds数領域に外捜する方法について、説明したが、外挿手順の詳細については種々の議論があって未だに「これが最善」という定番が定まっていないのが現実である。

模型実験結果の解析法と外挿法はFroudeの仮定に基づいて居て、「正しい」という保証は無いので、実船の実績をFeed backしながら図に示すような全体系で検証することが重要である。

