

「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。

船の抵抗について

D'Alembert's Paradoxと船の抵抗
摩擦抵抗

船が造る波と造波抵抗
船体抵抗計測の模型試験

“D'Alembert's Paradox”って 知っていますか？

摩擦(粘性)の無い理想流体が無限に広がる中では、物体から十分後方に離れた流体の速度は物体前方と同じ値に回復し、何ら運動量の変化を生じない。すなわち無限に広がる理想流体中では、物体には抵抗が作用しない。

これを「ダランベールの背理(D'Alembert's Paradox)」という。

しかし現実には、水は理想流体ではなく(僅かながら粘性を持つ)、無限に広がっても居ないので、抵抗が発生する。

船は水と空気の境界面(自由表面)の上に浮いて走る



物体(船)の抵抗について (2)

自動車や列車に働く抵抗は主に接触面の摩擦抵抗
 ⇒ 重量に比例 速度に依存する成分は一部

それに対して船の抵抗は流体抵抗

⇒ 寸法の二乗に比例

船は浮力で浮いているから、重量は没水容積に比例

⇒ 重量は寸法の三乗に比例

↓
 船の抵抗は重量の2/3乗に比例

反面、速度の2乗に比例

↓
 船は大きくて重いものを運ぶのに適している。

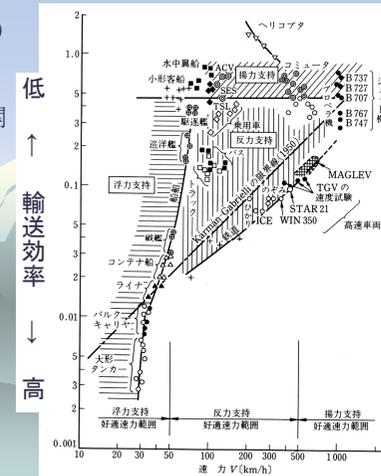
Kármán-Gabrielli線図

Kármán-Gabrielli (1950)

が示した線図の形式を踏襲して、大阪大学の赤木先生が代表的な交通機関の効率を速度ベースにプロットしたのが右図。

船は高速輸送に適さない反面、低速輸送では著しく高い輸送効率を実現している。

こうした特性を上手く活用することが大事。



物体(船)の抵抗について (1)

物体が移動する際の抵抗として一般的なものは接触面における摩擦抵抗であり、摩擦抵抗係数を μ とすると、抵抗(R)は

$$R = \mu \times W \quad \text{ここに、} W: \text{物体の重量}$$

である。摩擦抵抗係数を減らすことが重要な課題であり、車輪で支えて車軸を潤滑し転がり抵抗を減少させることで抵抗の低減を図っている

船は先に示した表の赤枠内に相当し、抵抗係数は船型によって微妙に変化する。

物体名	物体の形状	摩擦係数	C _d
立方体		$\mu = 1$	1.16
円柱		$\mu = 1$	1.02
球		$\mu = 1$	0.44
平板		$\mu = 1$	1.16
円錐		$\mu = 1$	1.11
2枚の円板		$\mu = 1$	0.82
円板		$\mu = 1$	1.10
円錐		$\mu = 1$	0.81
円柱		$\mu = 1$	0.85
球		$\mu = 1$	0.99
円錐		$\mu = 1$	0.41
円柱		$\mu = 1$	0.72
球		$\mu = 1$	0.74
板		$\mu = 1$	0.42
球		$\mu = 1$	0.47
球		$\mu = 1$	0.49

物体(船)の抵抗について (3)

船の場合は、前の説明で除外した「細い流線型物体に当るので、「正面投影面積で無次元化した抵抗係数は略一定値を取る」というような単純な割り切りでは済まない。流体抵抗は速度の二乗と面積(長さの次元の二乗)に比例するが、それを前提として定義された無次元抵抗係数は、造波抵抗の成分と摩擦抵抗の成分からなる。摩擦抵抗係数は速度に殆ど依存しないとされているが、造波抵抗係数は速度の増加によって激増する。

重量は体積(長さの次元の三乗)に比例するから、船の方が陸上の輸送手段より重量の増加に影響され難い。その反面、速度の二乗(造波抵抗は二乗よりも更に高次)に比例する性質から、高速になると不利になる。したがって船は、**大きくて重いものをゆっくり移動させるのに適した輸送手段である**と言って良い。

その辺りをもう少し説明する。

物体(船)の抵抗について (4)

詳しいことは船を専門的に勉強する人に大学院で説明するとして、ここでは大まかな話だけする。

造波抵抗に拘わる「移動する船が波を起こす現象」は、Froude数(Froude Number: Fr)と呼ばれる無次元速度がキーファクターになっている。長さ:Lの船が速度:vで動く時のFroude数は

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$$

で定義される。

摩擦抵抗に拘わる「船の表面と水が擦れる現象」は、Reynolds数(Reynolds Number: Re)と呼ばれる無次元速度がキーファクターになっている。長さ:Lの船が速度:vで動く時のReynolds数は

$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

で定義される。ここに ν は水の動粘性係数である。

大きさが異なってもFroude数(Reynolds数)を同じにできれば、船が波を起こす現象(船の表面と水が擦れる現象)は相似になる。

物体(船)の抵抗について (5)

流体抵抗は物体の重量に比例せず、速度の自乗と寸法の自乗に比例すると述べたが、そのことから、流体抵抗:Rの無次元係数を

$$C_T = \frac{R}{1/2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L^2}$$

で定義する。ここに ρ は流体の密度、 v は速度、 L は物体の長さに限らず寸法を表わしている。

船の抵抗の主要部は造波抵抗と摩擦抵抗であるから、造船学では、大まかに言って、船の抵抗係数は造波抵抗係数と摩擦抵抗係数の和で表わされるとしている。すなわち、造波抵抗係数はFroude数の関数、摩擦抵抗係数はReynolds数の関数だと考えて良いから、船の抵抗係数を下のよう書けるとしているのである。

$$C_T = C_W(Fr) + C_F(Re)$$

ここに、 $C_W(Fr)$ は造波抵抗係数、 $C_F(Re)$ は摩擦抵抗係数、造波抵抗係数はFroude数(Fr)の関数であり、摩擦抵抗係数はReynolds数(Re)の関数である。

相似速度の計算例

今、長さ300mの船が速度20ノットで走る場合を考えよう。1ノットは毎時1海里(1852m)の速度であるから、20ノット=10.29m/s= 37km/hである。

長さ7mの模型で実験する場合を想定し、Froude数、Reynolds数を合わせた場合の速度を計算する。これらを相似速度と呼ぶ。

Froude数 $Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ を合わせた場合、速度は長さの平方根に比例するから、模型船の速度は1.572m/sとなる。

Reynolds数 $Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$ を合わせた場合、速度と長さの積を動粘性係数で割ったものが一定であるから、動粘性係数の差を無視すると、模型船の速度は441m/sとなる。

大きなもの速度は小さなもの速度より大きいのが常識的な所だとすれば、Froude数を合わせた場合はさほど違和感を感じないが、Reynolds数を合わせた場合は常識からかけ離れた値になる。

そうした事情もあり、**船の模型試験はFroude数を合わせて実施し、実船抵抗推定の段階でReynolds数の影響を補正している。**

「船舶工学入門」 流体関係

全5週の講義計画は大筋で以下の通り

- 第1週 浮体の静力学と復原性(1)
- 第2週 浮体の静力学と復原性(2)、船が受ける抵抗(1)
- 第3週 船が受ける抵抗(2)
- 第4週 推進器、船の動揺(1)
- 第5週 船の動揺(2)

船の抵抗について

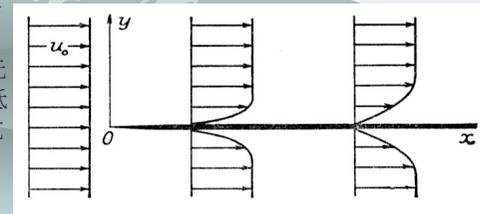
D'Alembert's Paradoxと船の抵抗
 摩擦抵抗
 船が造る波と造波抵抗
 船体抵抗計測の模型試験

摩擦抵抗, 平板周りの流れ

厚さの無い平板に平行な一様流が当たる場合の流れの様子を模式的に書いて図に示す. 平板表面に垂直な速度成分が無いので流れは平板によって排除されることなくスムーズに流れるが, 平板表面では接線速度がゼロになるために, その極く近傍では急激な速度変化が起こっている. これが次に説明する境界層である.

このように見ると, 全抵抗を, 船体表面に沿って流れるだけでも発生する抵抗(→摩擦抵抗)と流れが船体によって排除されること

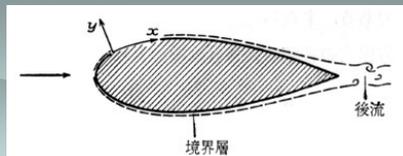
に起因して発生する抵抗(→造波抵抗)に分け, 無次元抵抗係数を摩擦抵抗係数と造波抵抗係数の和とみなすという考え方も, 納得できる.



境界層と層流・乱流 (1)

粘性が無視できない場合, 流体運動の方程式は非線形になるので, 摂動解が求められる. Reynolds数が小さい場合の摂動解としてはStokes流れやOseen流れが知られているが, Reynolds数が大きい場合の摂動解が境界層である. 粘性の影響は物体表面付近の極く薄い層(Prandtlの境界層)の中に限定され, その外側の流れは完全流体と仮定して推定した結果に極めて近いとするのである. なお, 当然ながら図の「後流」は完全流体の流れでは出現せず, 境界層の影響が無限下流まで続いているものと見做すことができる. この「後流」内の圧力は総圧(Stagnation Pressure)まで回復しないので, 幾分か粘性圧力抵抗が発生する.

境界層内の流れには乱れが発生し, その特徴から, 層流と乱流という言葉で区別される.



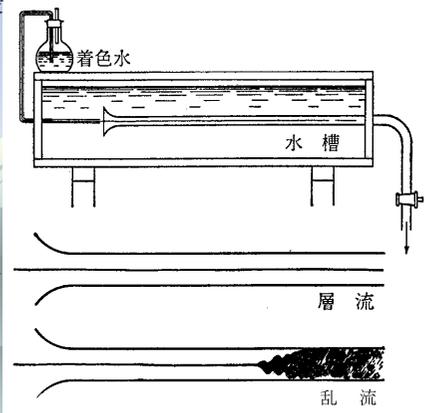
境界層と層流・乱流 (2)

境界層が存在してもReynolds数が比較的小さい場合には, 流体粒子の流れの方向は殆ど一定で粒子は整然と流れる. この状態を「層流(Laminar Flow)」と呼ぶ. Reynolds数が大きくなる, ないし流れの下流側になるにつれて境界層内の流れの安定性が失われて「層流」状態を保てなくなり, 主流の方向と直交する方向の激しく変動する速度成分が発生する. この状態を「乱流(Turbulent Flow)」と呼び, 「層流」から「乱流」に変わることを「遷移(Transition)」と呼ぶ.

平板が一様な流れに平行に置かれた場合, Reynolds数が比較的小さい場合には平板全体が「層流境界層(Laminar Boundary Layer)」に覆われているが, Reynolds数が大きくなるにつれて後端付近の境界層が「遷移」して「乱流」に変わる. Reynolds数が更に大きくなると, 境界層の遷移点は平板の先端方向へ移動し, 遂には平板の殆どが「乱流境界層(Turbulent Boundary Layer)」に覆われるに至る. この状態に至っても平板の先端付近の境界層は層流状態を保って居るが, 全体としては単に「乱流状態」と呼ばれる.

境界層と層流・乱流 (3)

流れの乱れについて最初に研究したのは Reynoldsであった。彼は図のような実験装置を作り、水槽から流れ出る水流の中心に着色した水を注いで、流れを観察した。その結果、流速が低い場合には乱れて居なかった流れが、流速が上がるにつれて下流域で乱れを生ずることを明らかにした。
これがReynoldsの相似則につながる。



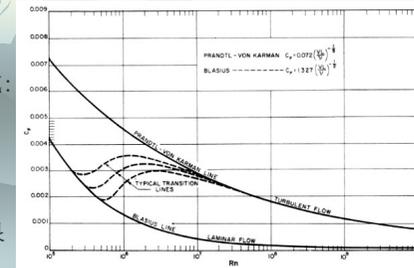
境界層と層流・乱流 (4)

滑面の場合にはReynolds数が 4.5×10^5 辺りから境界層の遷移が発生し、 10^7 辺りに至って乱流状態になるとされている。
問題は境界層が層流か乱流かによって抵抗係数が大きく異なることである。層流状態の摩擦抵抗は乱流状態に比べて小さい。摩擦抵抗係数： $C_f = \frac{R_f}{\frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S}$ ここにS:浸水面積

を比較して右図に示す。
下側にある線が層流の抵抗係数を表すBlasiusの式:

$$C_f = \frac{1.32824}{\sqrt{Re}}$$

で、境界層の方程式を解いて理論的に求められた式であるが、実験結果と良く合っているとされる。

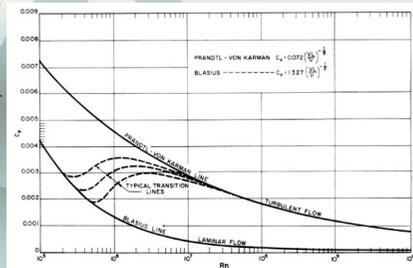


Reynolds数と動粘性係数

この図の横軸はReynolds数と呼ばれる速度の無次元値である。Reynolds数は、
$$Re = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

で定義される。ここにvは速度、Lは船長、 ν は動粘性係数である。
大型船では、実船のReynolds数は 10^9 を越えて居るが、実験に使う模型船が長さ7mの大型であっても、Reynolds数は 10^7 程度であるから、実船と模型でReynolds数、延いては摩擦抵抗係数が相違している。

この事実は、実船の所要馬力推定を極めて難しい問題にしている。

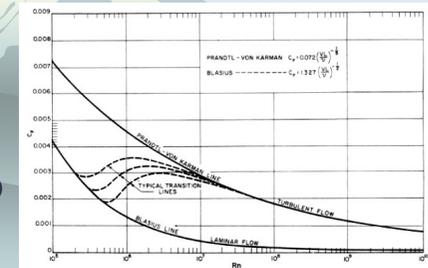


摩擦抵抗係数と摩擦抵抗

模型船の境界層は層流から乱流への遷移域にあることが多いが、模型船も含めて船の境界層は乱流であると考えて、乱流の摩擦抵抗係数の推定式が使われる。

摩擦抵抗係数の推定式には余りにも沢山の式が有るが、どれを使っても「Reynolds数が増加するにしたがって、摩擦抵抗係数が次第に小さくなる」という傾向に変わりはない。

摩擦抵抗係数は摩擦抵抗を速度の2乗で割ったものであるから、この傾向のために「摩擦抵抗は速度の2乗より小さい幕で(速度の1.9乗とか1.8乗に比例して)増加する」ことが分かる。



船の抵抗について

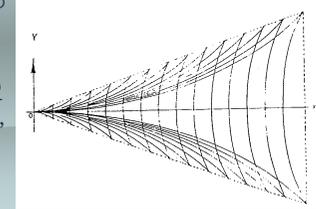
D'Alembert's Paradoxと船の抵抗
 摩擦抵抗
 船が造る波と造波抵抗
 船体抵抗計測の模型試験

自由表面がある場合の抵抗

船体が水を掻き分けて移動すると、船体表面上に圧力の高い所と低い所ができ、水面(自由表面)があると、圧力の高い所では水面が盛り上がり低い所では水面が落ち込む。そこに重力が作用すると変形した水面を元に戻そうとするので、重力波(Gravity Wave)が発生する。その波が後方に伝播してエネルギーを失うことに対応する抵抗成分を、造波抵抗(Wave Making Resistance)と呼ぶ。

点圧力が移動する場合に発生する波を、初めて計算した人の名前からKelvin波と呼び、図に示すような波紋を呈するが、進行方向を中心として $\pm\pi/2$ の範囲に進行する成分波からなり、船が造る波も同じような形になる。

造波抵抗に最も寄与するのは船の進行と同じ方向に進む波成分であり、この波成分を減らすように船の形を設計することが、速い船の場合には特に重要になる。



Kelvin波 (Kelvin's Wave Pattern)

点吹出し(Point Source)は圧力の高い点に相当し、高圧点が一つだけ動いていく場合の波紋がKelvin波である。一定速度で進む船体は圧力が高かったり低かったりする点の集合であるので、船の造る波は船体の各部を始点とする無数のKelvin波を合成したものになる。しかし全体としてみると、写真に示すKelvin波に似た波紋を見せる。

左右の船の造る波が違って見えるのは、左の船の方が速く走っているからである。

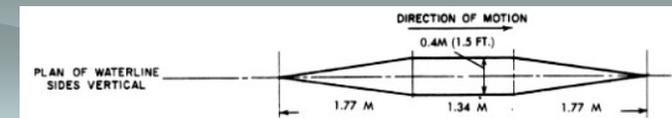


船が造る波とその干渉 (1)

Wigleyの単純船型-1

船体の各部から発生する波が干渉する様子を分かり易く示し、理論推定の適用性について検討したのが、単純船型(平行部の前後に楔型を付けた形状:平面形状を図に示す)について理論計算結果と水槽試験結果を比較したWigleyの論文である。

この船が走ると、船首と船尾に高圧点が、前後の肩部(楔形と平行部の接点)に低圧点が出るので、これら四点から波が発生する。四点から発生する波が船と同じ方向に伝わる成分が造波抵抗を支配するが、これらの波は発生位置と位相が異なるので互いに干渉して、合成波の振幅が変化する。

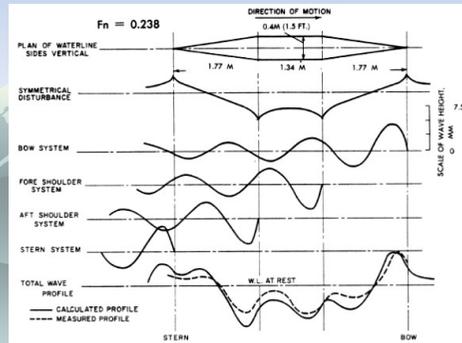


船の抵抗成分, 造波抵抗 (3)

Wigleyの単純船型-2

厳密には正しくないが, Wigleyの単純船型(Double-wedge-shaped body)の場合, 船首尾端に高压部, 船首尾の肩部に低压部が出来るので, 船首尾端には波の山ができて船首尾の肩部には波の谷ができて, それらから発生する波が船と同じ速度で移動すると考えれば, 船の造る波の概要が理解できる。

その結果, 波の概要は右図のようになる。

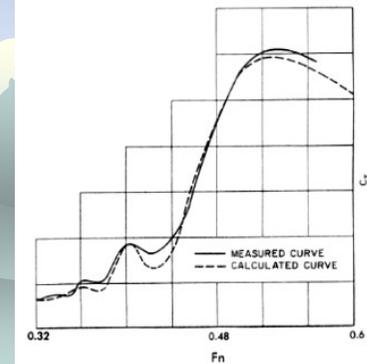


船の抵抗成分, 造波抵抗 (4)

Wigleyの単純船型-3

こうして計算された波から造波抵抗を計算し, 摩擦抵抗の推定値を加えたものと水槽試験で得られた全抵抗係数を比較したのが

下図であるが, これより船の各部から発生する波が干渉する現象およびその結果である造波抵抗の特性が, 上記のような考え方で, 理解できることが分かる。



船が造る波とその干渉

船速と波長の関係

船が進行することで発生する重力波の波数と波長は,

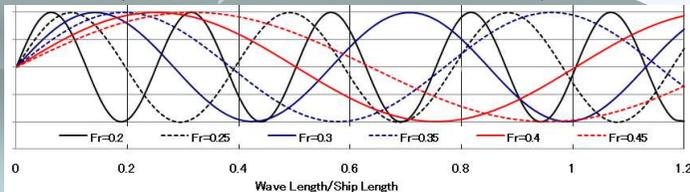
$$K_0 = g/v^2 = 2\pi/\lambda, \quad v: \text{船速}, \lambda: \text{波長}$$

であるから,

$$\lambda/L = 2\pi \cdot v^2 / (g \cdot L) = 2\pi \cdot Fr^2, \quad L: \text{船長}$$

を得る。すなわち, 波長と船長の比はFroude数の二乗に比例する。

種々のFroude数に対して発生する正弦波形を比較して下に示す。この図より, $Fr < 0.25$ のような低速では上手く設計すれば造波干渉を起こせるが, 高速になると不可能に近くなることが理解される。



球状船首(Bulbous Bow) (1)



呉海事歴史科学館(通称: 大和ミュージアム)の1/10大和。写真等では見えない水面下の球状船首が良く見える。

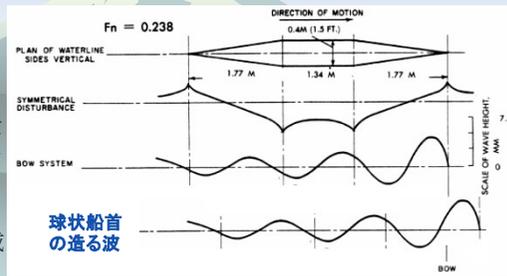
球状船首は, 元来の船首で起こる波と球状船首が起こす波を干渉させて, 造波抵抗を減らすものである。

球状船首(Bulbous Bow) (2)

Wigleyの単純船型の図は速度が高すぎて多少不適切だが、その図を使って球状船首(Bulbous Bow)の説明をする。

下には船首波までの図を示しているが、船首の前で同様な波を発生させたとすると、二つの波が干渉して小さくなる。この図では船首よりかなり前で波を発生させなければならず現実的ではないが、低速になれば波長が短くなるので有効に造波干渉を実現できる。これが球状船首の原理である。

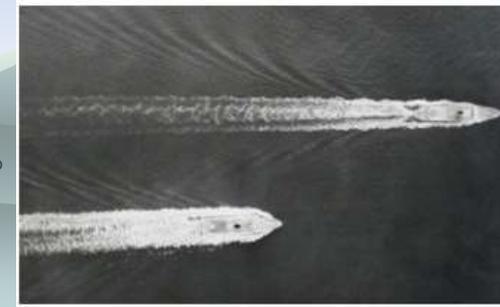
現実の船型設計では先ず船体自体からの造波を減らす工夫をし、更に球状船首などを付けて造波抵抗を減らしている。



球状船首(Bulbous Bow) (3)

戦後になり、造波抵抗理論の発達によって球状船首による造波抵抗低減が明確になった頃、瀬戸内海の別府航路に就航したばかりの旅客船:「くれない丸」と「むらさき丸」の内、「くれない丸」に球状船首を装備して実船試験が行われた。両船が並走している際の写真を見れば、「くれない丸」(上)の造る波が小さいことが分かる。

また「むらさき丸」の船首と「くれない丸」の船尾からKelvin波が出ているのがハッキリと見えるのに対し、「くれない丸」の船首から出る波は小さい。

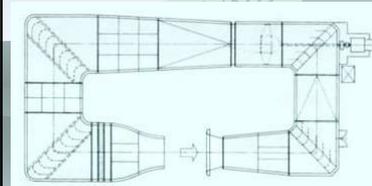


船の抵抗について

D'Alembert's Paradoxと船の抵抗
相似則について
船が造る波と造波抵抗
摩擦抵抗
船体抵抗計測の模型試験

抵抗試験の方法 (1)

流体中の物体の抵抗を計測するには、周囲の流体と物体の間に相対速度を生じさせる必要がある。相対速度を発生させる方法として、流体を動かすのと物体を動かすのと二通りあり、飛行機の実験では空気を動かして(風を吹かせて)その中に飛行機の模型を固定する方法(風洞試験)が一般的である。しかし船の実験では、風洞試験と同じやり方(回流水槽試験)もあるが、細長い水槽の中で船の模型を動かす場合(曳航水槽試験)の方が多い。



ゲッチング風洞

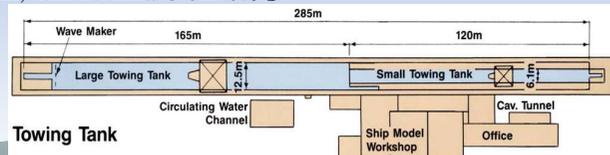


回流水槽

模型実験の設備

船の場合は自由表面に起こる波が抵抗特性に重要な影響を与えるので、水を停めたまま実験を行う方が良いと考えられたのであろう。

三菱長崎の曳航水槽の概要を下に示す。水深はLarge Tankが6.5m, Small Tankが3.6mである。

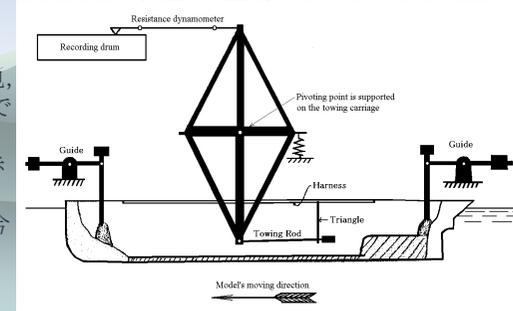


抵抗試験の方法 (2)

1908年に三菱長崎水槽が英国から導入した初期の抵抗試験装置の配置図を図に示す。模型船を進行方向に正確に向けるため、船首尾にガイド装置が取り付けられ、船首尾のガイド装置で船首尾端の上下・前後方向運動を自由に保ちながら左右方向の運動だけを拘束している。抵抗計測装置(抵抗動力計)は単純なバネ秤の変形である。

計測項目は、抵抗と速度の他、航走時の姿勢である。

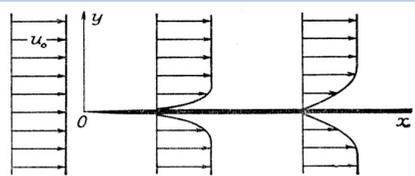
装置類は進歩したが、基本的な計測方法は今でも変わっていない。



摩擦抵抗の説明

William Froudeの方法

厚さの無い平板に平行な一様流が当たる場合の流れは図のようになる。平板表面に垂直な速度成分が無いので流れは平板によって排除されることなくスムーズに流れる。ただし



平板表面では接線速度がゼロになるために、近傍では急激な速度変化が起こっている。

このように見ると、全抵抗を船体表面に沿って流れる場合にも発生する抵抗(→摩擦抵抗)と流れが船体に排除されるために波が起こることに起因して発生する抵抗(→造波抵抗)に分けるという考え方が出て来る。これがFroudeの方法で、全抵抗を無次元化した係数: C_T を $C_T = C_R(Fr) + C_F(Re)$ のように分け、後者の摩擦抵抗係数は等価平板の抵抗係数であると仮定した。

抵抗係数の計算

抵抗試験では、模型船の(水に対する)速度と抵抗(曳航ロッドに掛かる力)を計測する。抵抗の無次元係数を計算するとともに、模型船の大きさからFroude数とReynolds数を計算する。

抵抗係数の単純な定義は次の通りである。

$$C_T = \frac{R_T}{\rho \cdot v^2 \cdot S/2}$$

Sは浸水表面積で、摩擦抵抗成分の無次元化にも使うので、全抵抗を R_T 、摩擦抵抗を R_F 、残余抵抗を R_R と書けば

$$R_T = R_F + R_R$$

であるが、これを無次元化した時も

$$C_T = \frac{R_F}{\rho \cdot v^2 \cdot S/2} + \frac{R_R}{\rho \cdot v^2 \cdot S/2} = C_F + C_R$$

のように単純な和になる。

我国では、全抵抗と残余抵抗の無次元化にSではなく $\nabla^{2/3}$ (∇ : 排水容積)を使うが、ここは理屈の話だから簡単しておく。

抵抗試験結果の外挿

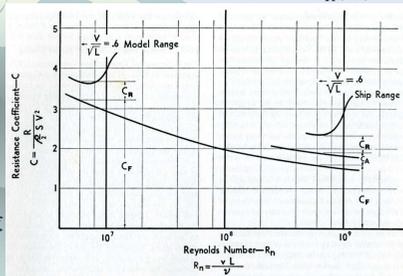
模型試験で計測した抵抗値から全抵抗係数: C_T を計算する. 別途, 試験状態に対応する Reynolds 数さらには摩擦抵抗係数: C_F を計算し, 全抵抗係数: C_T から差し引いて

$$C_R(\text{Fr}) = C_T(\text{Re}, \text{Fr}) - C_F(\text{Re})$$

を求める. **実船の抵抗を推定する**際には, 実船の速度に対応する Froude 数と Reynolds 数を計算する. Froude 数に対応する $C_R(\text{Fr})$ を模型試験結果から求め, Reynolds 数から模型試験の解析に使ったと同じ摩擦抵抗算式を使って $C_F(\text{Re})$ を計算する.

$$C_T(\text{Re}, \text{Fr}) = C_R(\text{Fr}) + C_F(\text{Fr})$$

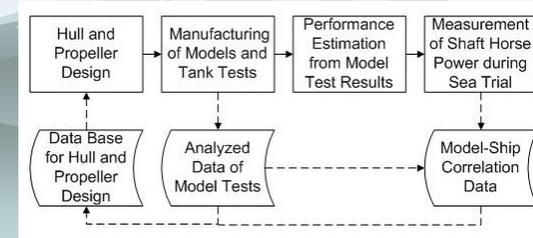
で実船の全抵抗係数が求められる.



抵抗試験結果の外挿法のまとめ

Reynolds 数の低い状態で実施した模型の抵抗試験の結果を, 実船の高い Reynolds 数領域に外挿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, 「正しい結果が得られる」という保証は無いので, 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.



FroudeによるGreyhound号の実船実験

実船を曳航したりジェットエンジンで走らせたり, 種々の方法で実船の抵抗計測が行われているが, Greyhound号は最初の例である.

図のような配置で, 曳航船(Active: 3,078t, 長さ82.2m, 幅12.8m)の舷側から外側に張り出した曳航点から索を出し, Greyhound号(1,157t, 長さ52.5m, 幅10.07m)を曳航し, 標柱間を往復した. この「実船の抵抗試験結果」を解析し, 模型領域で実施した相似模型と平板の抵抗試験結果から推定した剰余抵抗を差し引いて, 実船の摩擦抵抗(係数)を求めた.

