

上下端板付魚型断面舵に働く流体力に関する一考察 － 数値計算による検討 －

湯田 紀男*・栗本 裕和**・山下 真史**・山下 敏久***

A Consideration on Hydrodynamic Forces Acting on the Rudder of Fish-Shape Section with End Plates -Based on Numerical Calculation-

Norio Yuda*, Hirokazu Kurimoto**, Masafumi Yamashita** and Toshihisa Yamashita***

Abstract

Recently the ship equipped scilling rudder is on increase. Generally, the scilling rudder is the fish-shape section with end-plates and provides high lift performance. The scilling rudder displays higher handling performance than the normal one, especially in berthing controls. In the model experiment the rudder of fish-shape section with end plates provide high-capacity lift. However, the mechanism bringing strong lift force even in large rudder angle is not entirely studied yet. To know the above mechanism will give useful suggestion and information to navigator, shipbuilder and marine engineer.

In this paper, as the basic research clearing up this mechanism, we examined computationally the relation between the shape of fishlike rudder section and hydrodynamic forces.

Keywords : scilling rudder, rudder, fish-shape section

キーワード : シリング舵, 舵, 魚型断面

1. はじめに

瀬戸内島嶼部, 弓削島周辺の交通手段を考えると, 生活において主要な交通手段は船舶である。渡船無しには島民の快適な生活を維持することは現状としては不可能である。そこで渡船にとって如何に乗りやすい船であるかということを考えてみると, それは必要以上の速さではなく, 低速航行時における操縦性能が優れた船が望まれると考えられる。内航船舶, 特に航行距離が短く低速航行, 離着岸の多い船舶に必要な高揚力を発生する舵について検討する事は, 弓削島周辺の瀬戸内に隣接する地域 (中小造船業を含む) に対する貢献にも繋がるものと考えられる。

近年シリング舵と呼ばれる舵を装備した船舶が増えてきている。シリング舵とは, 上下端板や魚型断面を設けた高揚力を発生することのできる舵である。この舵は離着岸操船において通常舵と比べ性能の面で優れた舵であると言える。しかしながらこの舵が, 大迎角時において

如何に高揚力を発生させているかというメカニズムについては, 詳しい研究検討がされているとは言えない。湯田⁽⁹⁾らはこの舵の高揚力発生メカニズムを知る第一歩として, 一様流中において数種の上下端板付魚型断面を持つ舵に働く流体力を計測し, 舵断面形状と流体力との関係を模型実験により調査している。その実験結果からも, 大迎角時において通常舵型より魚型断面舵の方が高揚力を発生することが言える。

そこで本研究は, 数値計算によりこの舵の高揚力発生メカニズムについて検討する。

2. 舵模型の製作と実験方法及び計測結果

2. 1. 舵模型の製作

舵模型は翼弦長0.113 [m], 舵高さ0.096 [m], アスペクト比1.177とし, いずれも上下端板付きとした。舵模型の断面は, 淡水魚の尾の形状に着目し大きく分類して4種類とした。一つ目はハゼ科, グッピー科の尾に似た楕

* 商船学科

** 専攻科海上輸送システム工学専攻

*** 学生課実験実習第二係

円形状のものでNo.1, No.4とし, 二つ目はトゲウオ科の尾に似たスカート形状のものでNo.2, No.5とし, 三つ目はシリング舵形状に一番近いコイ科, サケ科の尾に似たラッパ形状のものでNo.3, No.6とし, No.1, No.2, No.3を尾の長いもの, No.4, No.5, No.6をそれぞれの尾の短いものとした。四つ目は通常舵形状のものNo.7とした。なお全種類前縁部は同じ形状とした。これらの舵模型の舵型をFig.1に示す。舵模型は, 材料をアクリル板とアルミ板としNCフライス盤により削り出した。

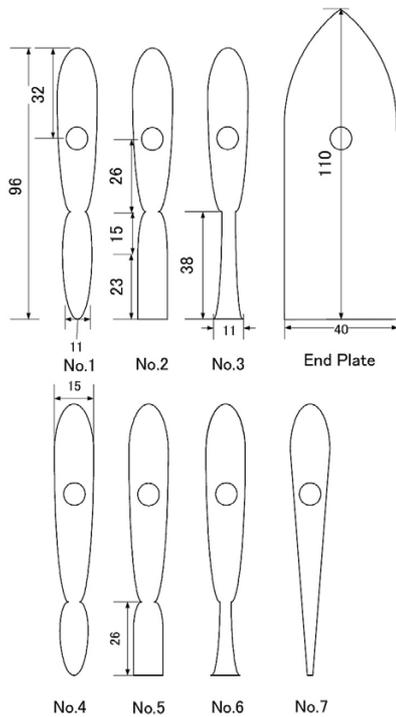


Fig.1 Rudder section

2.2 実験方法

実験は, 弓削商船高等専門学校にある荒天航泊実験室内の研究用回流水槽で行った。回流水槽は幅1.2[m], 水深0.8[m], 計測洞は3[m]である。

実験状態は一様流中とし, 全ての舵型に上下端板を付けた状態で舵模型に働く流体力の計測を行った。舵模型は上端板が水深0.22[m]の位置に設置し, 流体力の計測は三分力計を用いた。計測した流体力は, 流れに平行な方向(X方向)の力(抗力), 流れに垂直な方向(Y方向)の力(揚力)とラダーストックに働く舵軸モーメントを計測した。なお揚力, 抗力の計測値は舵軸に働く流体力を取り除き, それぞれの舵模型単独に働く流体力の計測を行った。計測における座標をFig.2に示す。計測時の流速は0.8[m/s]でレイノルズ数は $Rn=8.06 \times 10^4$ の状態で行った。

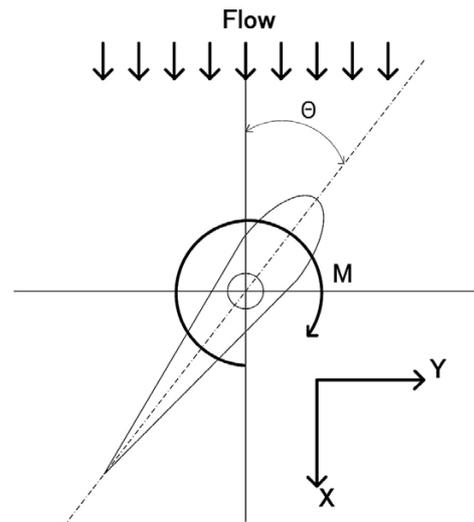


Fig.2 Coordinate system

2.3 計測結果

揚力の計測結果をFig.3に示す。Fig.3は尾が短い魚型舵と通常舵の舵角と揚力の関係を示した図である。縦軸は揚力を $1/2 \rho S U^2$ で除した無次元値 C_L を, 横軸は舵角 θ を示す。 ρ は流体密度, S は舵面積, U は流速を示す。

これらの図より, 失速しない舵角の範囲では, ほぼ同一ラインに乗るものの, 失速後からシリング舵の使用最大舵角である70[deg.]の範囲においては, 尾がスカート形状の魚型舵No.5, 及び尾がラッパ形状の魚型舵No.6が, 通常舵No.7に比べやや大きめの揚力を得ると言う結果を得た。特に失速直後の舵角においては, 尾がラッパ形状の魚型舵が通常舵に比べ最大で約1.5倍程度の揚力となった。これらの揚力の差は舵後縁部の形状の違いによって生じたものと考えられる。また, 尾の長さの違いによる揚力の差は揚力の差は顕著には見受けられなかった。なお, 尾の長さの違いによる揚力の差異及び, 抗力, 舵軸モーメントの詳しい計測結果については, 湯田⁽⁹⁾らの論文に詳しく記載してあるので御参照して

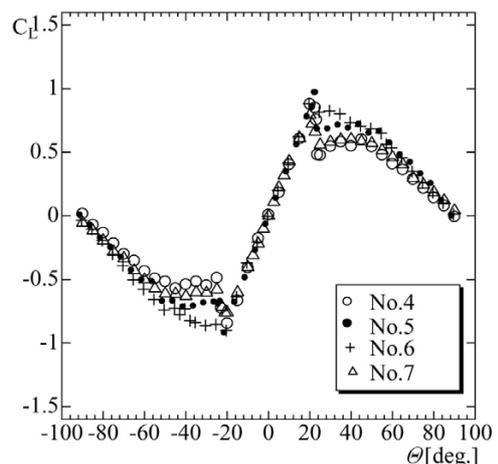


Fig.3 Lift coefficient (No.4~7)

ただければ幸いである。以後論文中、通常舵とは舵断面か通常舵形状物を指し、また魚型舵とは尾がラップ形状の魚型舵を指す。

3. 数値解析法

上記のような計測結果より、魚型舵が高揚力を発生する事が実験的にわかってきた。そこでこの舵の高揚力発生メカニズムについて数値計算により検討を試みた。

3.1 問題の定義と基礎式

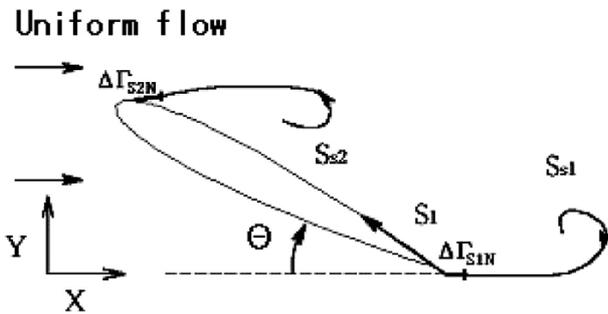


Fig.4 Coordinate system on calculation

舵周りの流れの一樣流と舵角の関係をFig.4に示す。座標は一樣流の流れる方向をx, 垂直上方をy, 翼弦長をC, 一樣流速Uとする。舵角 θ は時計回りを正とする。また舵の後縁を原点とし反時計回りに s_1 の表面に沿った座標系をとる。また場合によっては翼周囲の総長さを s_1 で表す。舵に2つの剥離点を考え剥離点から渦層に沿って先端から剥離点方向に向かって正となる長さが s_{sk} である。kは剥離点の番号を表し、1は舵の後縁、2は前縁剥離を表すとする。高レイノルズ数領域における流れでは厚さが無限小の境界層と伴流以外の領域では非粘性ポテンシャル流れが近似的に実現されていると考えることができる。従って非圧縮の完全流体として取り扱った。この場合速度ポテンシャルを考えることができ、その速度ポテンシャルの満足する基礎方程式は以下のラプラスの式となる。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3-1)$$

また境界条件は物体表面を流れが貫かない条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{at} \quad \text{body surface} \quad (3-2)$$

を課す。ただし $\partial/\partial n$ は法線方向の微分であり、法線ベクトルはベクトルn, またその成分は (n_x, n_y) で表す。一樣流, 物体表面に配置した特異点による速度ポテンシャル及び放出された渦層も十分に薄くそれ以外の領域では速度ポテンシャル考えることができるとし、速度ポテンシャルを(3-3)式で表す。

$$\begin{aligned} \Phi = & Ux - \frac{1}{2\pi} \oint_{s_1} r_1 \tan^{-1} \frac{y-y'}{x-x'} ds_1 \\ & + \frac{1}{2\pi} \oint_{s_1} \sigma(x', y') \ln \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2} ds_1 \\ & + \sum_{k=1}^2 -\frac{1}{2\pi} \int_{s_{sk}} \gamma(x', y') \tan^{-1} \frac{y-y'}{x-x'} ds_{sk} \end{aligned} \quad (3-3)$$

ただしUは一樣流で、 (x, y) は流体中の点の座標、 (x', y') は s_1 上の座標である。 γ_1 はそれぞれの翼周りの循環を表す項で数値計算上の便利のため表面に一樣な循環密度の分布とした。また σ は表面に分布した吹き出し密度の分布で場所ごとに異なる。また、 γ は剥離渦層の密度である。第4項で表される剥離渦層のポテンシャルは、時間間隔 Δt ごとに放出される離散放出渦で表し、境界条件は渦がある時刻の流れに乗って Δt の間流れるという条件で近似的に満足させることとした。また急出発から計算を開始する手法をとり初期値には渦がない条件とした。この方法では、剥離がない場合のクッタの条件に変わってケルヴィンの循環定理を満足するように物体周りの循環が定まる。したがって物体表面から微小時間の間にその翼から放出された渦強さだけその時間間隔に翼周りに逆向きの循環が増えたとし、(3-4)式で表現した。

$$\begin{aligned} s_1(\gamma_1(t + \Delta t) - \gamma_1(t)) + \Gamma_{s1N} + \Gamma_{s2N} = 0 \\ t = N\Delta t, \quad \Gamma_{s_{sk}N} = \int_{s_{sk}(t)}^{s_{sk}(t+\Delta t)} \gamma(x', y') ds_{sk} \end{aligned} \quad (3-4)$$

ただし $\Gamma_{s_{sk}N}$ はN時間間隔進んだとき放出される渦層の渦を単独渦に置き換えたものである。また(3-4)式により渦保存則は満たされる。

3.2 離散化

計算においては物体表面 s_1 をM個の線要素に分割し、計算の便宜上各要素内で吹き出し強さを一定として分布させて、(3-2), (3-4)式を満足する(3-3)式の吹き出し及び舵の循環分布を求めた。(3-2)式の離散化はi番目の要素の midpoint を例にすると(3-5)式となる。

$$\begin{aligned} -Un_{xi} = & \sum_{j=1}^M A(i, j)\sigma_j + \gamma_1 \sum_{j=1}^M B(i, j) \\ & + \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^N \frac{1}{2\pi} \Gamma_{skl} \left(\frac{-(y_i - y_{skl})n_{xi} + (x_i - x_{skl})n_{yi}}{(x_i - x_{skl})^2 + (y_i - y_{skl})^2} \right) \end{aligned} \quad (\text{for } i=1, \dots, M) \quad (3-5)$$

ただし

$$A(i, j) = u_{\sigma j} n_{xi} + v_{\sigma j} n_{yi}, \quad B(i, j) = u_{\gamma j} n_{xi} + v_{\gamma j} n_{yi} \quad (3-6)$$

ここでu, vはそれぞれx, y方向流速であり、添え字 σ, γ はそれぞれ単位強さの吹き出し及び循環の分布による誘導速度を示し、添え字jiはj番目のパネルの分布からi番目のパネル中心に及ぼすことを表している。従ってA

(j, i), B(j, i) は j 番目のパネルの単位強さの吹き出し及び循環分布による i 番目のパネルへの法線方向速度である。また Γ_{skl} (l=1, N-1) は N-1 時間までの情報でわかっており, その位置 (x_{skl}, y_{skl}) は N 時間の渦位置でのその渦の影響を除いた速度で Δt の時間流されるとしてわかっている。したがって Γ_{skN} およびその位置を決定すればよい事になる。その強さは

$$\Delta\Gamma_{skN} = \frac{1}{2} U_{skN}^2 \Delta t \tag{3-7}$$

ここで U_{skN} は N 時間時における剥離点の流速である。

3.3 渦モデル

渦点は誘導速度の大きさが中心からの距離に反比例する。そのため流れ場にある渦点が互いに接近する場合, また渦点が物体表面に接近する場合に非現実的な速度が誘導されることになる。そこで, この不都合を回避するために, 流体の粘性による渦の拡散効果を考慮し, 次に示す旋回速度を誘起する粘性渦モデルを用いる事とした。

$$v_\theta = \begin{cases} \frac{1}{2\pi r} \Gamma_{skl}, (r \geq r_0) \\ \frac{r}{2\pi r_0^2} \Gamma_{skl}, (r < r_0) \end{cases} \tag{3-8}$$

$$u = v_\theta \frac{-(y - y_{skl})}{\sqrt{(x - x_{skl})^2 - (y - y_{skl})^2}}$$

$$v = v_\theta \frac{x - x_{skl}}{\sqrt{(x - x_{skl})^2 - (y - y_{skl})^2}} \tag{3-9}$$

ここで Γ は渦点の循環, r は渦点の中心からの半径, r_0 は粘性渦のコアである。今回の計算においてコアは 0.1C とした。ただし C とは翼弦長を表す。

3.3 物体に働く流体力

物体表面上の圧力係数 C_P , 揚力係数 C_L , 抗力係数 C_D は次式により計算する事ができる。

$$C_P = \frac{1}{\frac{1}{2} U^2} \left\{ -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} (u^2 + v^2) + \frac{1}{2} U^2 \right\} \tag{3-10}$$

$$C_L = \frac{1}{C} \int_{s1} -C_p n_y ds \tag{3-11}$$

$$C_D = \frac{1}{C} \int_{s1} -C_p n_x ds \tag{3-12}$$

ここで (u, v) は物体表面上の流速である。

物体表面上の速度ポテンシャルは, 物体表面上および剥離せん断層の接線速度時計回りに積分して得られる。舵表面上の剥離点 (k=1) より反時計回りの要素の midpoint を基準に取り, 基準点から時計回りに J 番目の速度ポテンシャルは次のように求められる。

$$\Phi_j = \begin{cases} \sum_{j=1}^J U^{sj} & (\text{基準点} \sim \text{剥離点}(k=1)) \\ \sum_{j=1}^J U^{sj} + \Delta\Phi_1 & (\text{剥離点}(k=1) \sim \text{剥離点}(k=2)) \\ \sum_{j=1}^J U^{sj} + \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 & (\text{剥離点}(k=2) \sim \text{基準点}) \end{cases} \tag{3-13}$$

$$\Delta\Phi_1 = \sum_{K=1}^N \Gamma_{s1N}, \quad \Delta\Phi_2 = \sum_{K=1}^N \Gamma_{s2N} \tag{3-14}$$

ここで $\Gamma_{s1N}, \Gamma_{s2N}$ は N 時間間隔進んだとき放出される渦層の渦を単独渦に置き換えたものであり, $\Delta\Phi_1, \Delta\Phi_2$ は剥離点 1, 2 点から出る剥離渦層の跳躍である。

4. 計算結果

計算において前縁からの剥離は, 通常舵、魚型舵共に先端に固定し, 後縁からの剥離は, 通常舵においては後端に固定し, 魚型舵においては後端 2ヶ所の角のうち便宜上, 流れに対して上流側の方のみの剥離として計算を行った。また計算は 2次元であるので計算結果は等価アスペクト比を揚力全体がほぼ一致するように修正して比較した。修正は揚力が両面の圧力差を積分して計算されているので, 有限翼幅の影響は翼端部で圧力差が小さくなる効果を考え定数倍になると考えて行った。今回の修正係数は 0.7 であった。誘導抵抗及び摩擦抵抗の修正は行っていない。計算パラメータは $\Delta t (U/C) = 0.02$ (無次元時間ステップ), $v / (UC) = 0.00025$ を用いて行った。なお計算による流体力の無次元化は $1/2 \rho U^2 C$ で行った。計算結果と実験値を比較した図を Fig.5 に示す。Fig.5 は縦軸が C_L で横軸が舵角 θ である。この図より計算結果は, 実験値の傾向をほぼとらえているものと考えられる。次

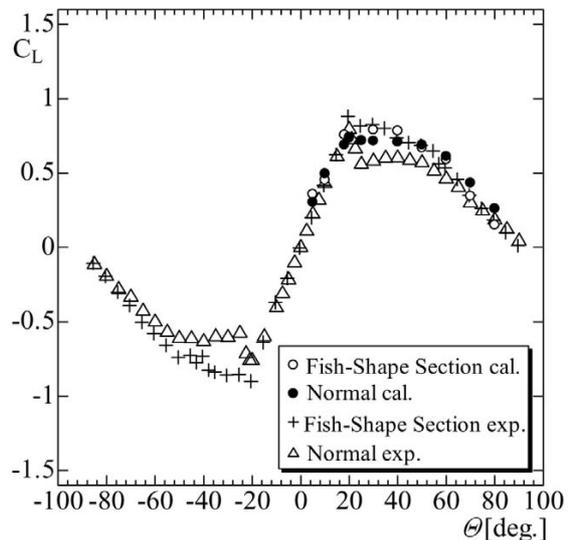


Fig.5 Lift coefficients

に通常舵と魚型舵の無次元時間時系列と C_L の関係をFig.6に示す。Fig.6は縦軸が C_L 、横軸が無次元時間($Ut/C=0\sim 20$), 舵角 $\theta=40[\text{deg.}]$ の状態の図である。この図より、 C_L は周期的に変動し、通常舵より魚型舵の方が高揚力を発生する事が理解できる。

Fig.6より舵周りの流れが非定常のため、放出渦の挙動により舵表面の圧力分布は変化する。したがって舵周りの圧力分布を大要把握することは難しい。そこで、強引ではあるが、剥離の無い定常状態における舵周りの圧力分布の算出を試みた。この場合、ケルビンの循環定理の代わりに舵後端部においてクッタの条件を満足させた。ただし魚型舵の後端は2箇所あるため便宜上その中点(舵断面の中心線上の点)でクッタの条件を満足させた。計算は本来剥離のある $\theta=40[\text{deg.}]$ の状態で行った。計算結果をFig.7, Fig.8に示す。Fig.7は通常舵, Fig.8は魚型舵の舵周りの圧力分布である。これらの図よりほぼ似たような圧力分布になるものの、魚型舵の方が後端部に正圧が広がっている事が理解できる。次に舵表面の圧力分布図をFig.9に示す。Fig.9は縦軸が圧力係数、横軸は迎角 $40[\text{deg.}]$ 時の舵弦のX座標で通常舵の長さを1.0にし

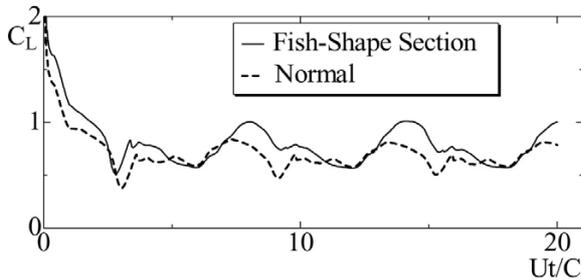


Fig.6 Time history of lift coefficients ($\theta=40[\text{deg.}]$)

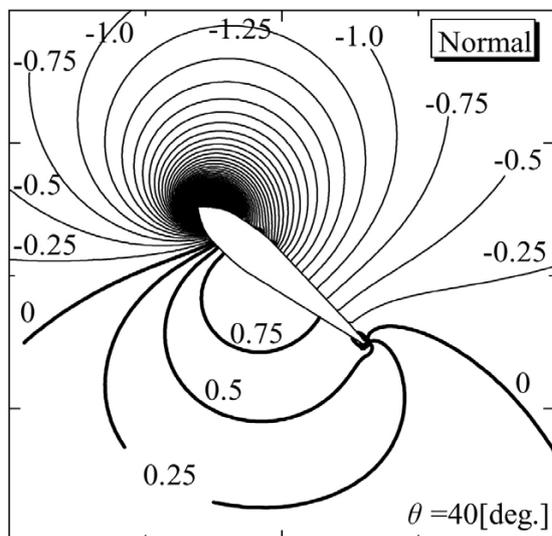


Fig.7 Computed pressure counter map around the normal rudder

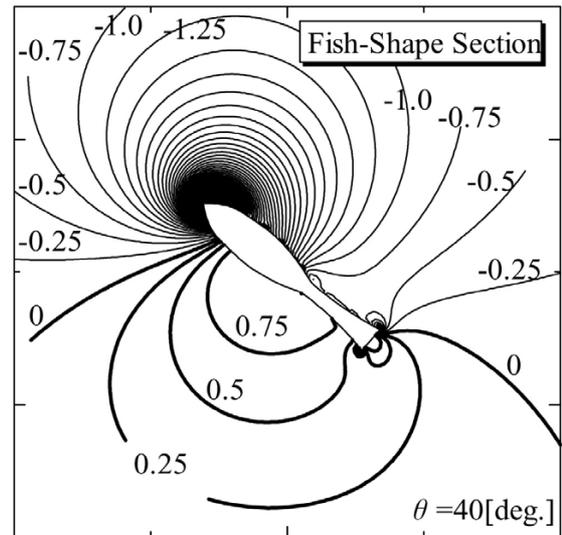


Fig.8 Computed pressure counter map around the rudder of fish-shape section

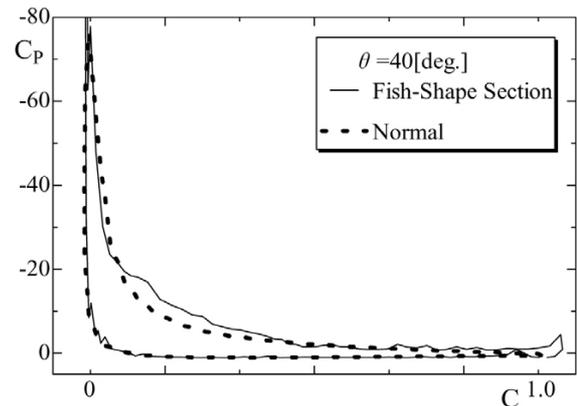


Fig.9 Effect of ground computed pressure coefficient

たものである。ここで魚型舵の方が、舵弦が長くなっているのは後端部の広がり部のためである。この図を見ると魚型舵の下流側後縁部の負圧及び翼幅の大きい面で負圧が多少大きくなっている事が理解できる。最後に、 $Ut/C=20, \theta=40[\text{deg.}]$ の状態の渦配置をFig.10, Fig.11に示す。Fig.10は通常舵, Fig.11は魚型舵のものである。これらの図より、剥離渦は微妙な差異を生じて位置している事が確認できる。

5. まとめ

剥離を伴う数値計算により舵表面に働く圧力計算を試み、実験値との比較を行った。その結果、計算値が実験値と同様の傾向を捉えていることを確認することができた。数値計算において、通常舵型と魚型断面舵との舵表面上の圧力分布及び剥離渦に微妙な差異が生じていることを確認することができた。今回の計算による手法によ

り、魚型舵が高揚力を発生するメカニズムを解明できたとは言えず、今後なお詳しい検討が必要であると考えます。

謝 辞

本研究の実験装置の製作に協力して頂いた、弓削商船高等専門学校第1及び第2実習係の皆さんにお礼申し上げます。本研究を行うにあたり貴重なご助言を頂きました、大阪大学大学院船舶海洋工学科教授長谷川和彦先生、神戸大学海事科学部教授定兼廣行先生に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 稲室隆二：渦点法による剥離流れの数値シュミレーション，ながれ7，p104-122，1988
- (2) 稲室隆二，足立武司：渦放出モデルを用いたはく離を伴う非定常流れの一解法，日本機械学会論文集 (B編)，52巻476号，No.85-0163A，1986
- (3) 船体周りの流れと流体力，第3回推進性能研究委員会シンポジウム，(p173-156，Ⅲ揚力を伴う流れ：小山鴻一)，1989
- (4) 永野三郎，内藤政彦，高田浩之：うず点法による長方形柱まわりの流れ解析，日本機海学会論文集 (B編)，47巻413号，1981
- (5) 林正徳：剥離流と離散渦について，ながれ5，p4-5，1986
- (6) 福谷恒男：平行補助翼付舵の模型実験，日本航海学会論文集，第92号，pp205-211，1995
- (7) 福谷恒男：平行補助翼付舵の模型実験，日本航海学会論文集，第104号，pp103-107，2001
- (8) 福谷恒男：推進性能に及ぼす平行補助翼付舵の影響，日本航海学会論文集，第107号，pp109-113，2002
- (9) 湯田紀男，猪俣活人：上下端板付魚型水平断面舵に働く流体力に関する研究－模型実験による検討－，第112号，pp361-365，2005