

シリング舵の性能推定に関する基礎的研究

上田耕平, 中山 博, 内山 暢, 鳥越貴之, 松尾郁夫

A Study on Performance Estimation of Shilling Rudder

Kohei Ueda^{*1}, Hiroshi Nakayama^{*1}, Toru Uchiyama^{*2},
Takayuki Torigoe^{*2} and Ikuo Matsuo^{*2}

Keywords : Performance of Rudder, Shilling Rudder, Lift, Drag

Abstract

The number of ships equipped a shilling rudder has increased recently. It is easy comparatively to estimate a performance of a rudder that has a section as a normal wing section. But it is not easy to estimate a performance of a shilling rudder, theoretically with conventional methods, had inverse-wedge-shape.

Therefore we have started from checking a situation of a surrounding flow of a rudder. And models of shilling rudder and of normal rudder with rectangle were made.

Experiments were carried out in the circulating water tank of Kagoshima University. Experiment on visualization of 2-dimensional flow fields in mid-span section of each rudder was done by depth tuft method. Furthermore the lift and the drag acting on the rudder and moment of the rudder shaft were measured. The influences that the rudder tail wedge angle of the shilling rudder effected these forces and moment were examined.

As a result the following understood. When a rudder angle is 0, especially one of a shilling rudder, a flow of behind rudder was unstable in a flow immediately after trailing edge. To calculate the forces acting on a shilling rudder theoretically, especially a situation of a flow around the tail part of a rudder needs to be grasped. We knew to be necessary to make visibility of the position where parted more from

*1, *2 鹿児島大学水産学部漁船運用学講座 (Laboratory of Fishing Vessel Seamanship, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima 890, Japan)

*2 研究当時学生 (student at the research)

a relation. It is able to say that a shilling rudder is excellent in turning even from a normal rudder obviously. A value of drag of a shilling rudder is always larger than a normal rudder. Wedge angle of the shilling rudder tail might make a turning performance conversely worse when the angle is greater than 20° .

As one of methods to calculate numerically the performance of a shilling rudder, we conceive that to add an influence of wedge angle α to one after determining the performance of a shilling rudder of wedge angle $\alpha = 0$, first.

舵は船舶の針路保持、針路変更に無くてはならない存在であり、過去において舵の形状を流体力学、流体工学の分野から様々な検討が行われ、現在は、NACAの対称翼型舵が最も広く一般に使用されているが、近年、外洋航海の多い船舶では主として、省エネルギーの立場から、他方比較的出入港の多い内航船では、旋回性、操縦性の立場から様々な舵型が考えられ、実用に供している。後者の一つとして、最近、シリング舵（シリング・モノベックラダー）を採用する船舶が増えてきている。

シリング舵の外観はFig. 1に示すように、断面の形が特徴的で、後半中央部分が平板状でその後方（後縁端）が楔型になっており、上下に補強板（端板）が設けられており、水中にいったいの可動部分を持たない単純構造の舵である。また、特性として旋回性能が優れ、舵

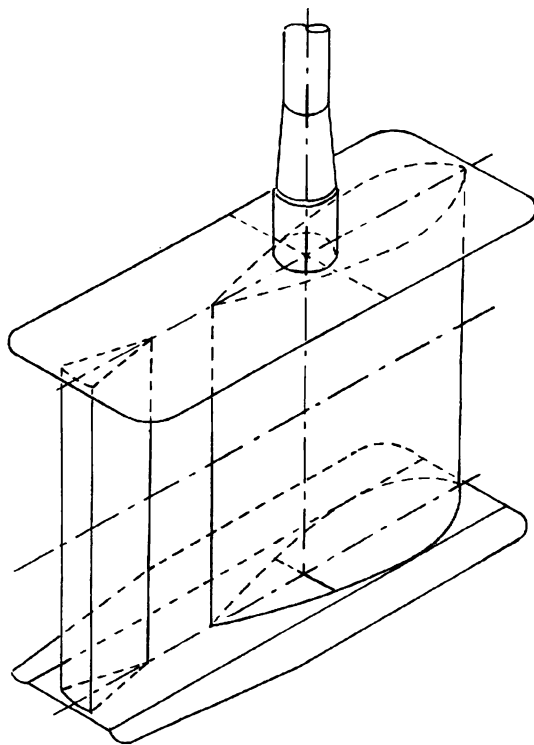


Fig. 1 Shilling Rudder (Using Reference¹⁾)

角を 75° までとることができ、さらに保針性が良いなどが挙げられている¹⁾。

断面が通常の翼型をした舵（後縁が鋭いと近似できる舵）の性能を流体力学的に求めることは比較的容易であるが、シリング舵のように特殊な後縁（逆楔型）をもつ舵の性能を従来の方法で理論的に求めることは容易ではない。それゆえ

- 1) 舵の周りの流れの様子を調べることから始めることにした。簡単の為矩形のシリング舵と普通舵の模型を作り、今回は舵の中央横断面（翼型）における2次元流れをタフト法によって調べると共に模型舵に働く揚力、抗力および舵軸周りのモーメントを計測した。
- 2) シリング舵の舵尾部楔角の影響を調べるために、舵尾部楔部分を取替え可能な舵模型を作り、楔角の影響を調べた。

その方法と結果の一部を紹介する。

実 験

水 槽 鹿児島大学大型回流水槽

模型舵 実験に用いた模型舵は

舵周りの流れ観察用	普通舵，シリング舵	各1	木製
流体力測定用	普通舵，シリング舵	各1	アルミ製
流体力測定用（楔角の影響）	シリング舵	1	アクリル製

の計5個で何れも手作りである。なお楔角の影響を調べるための舵は楔部分を取替え可能なように工夫した。これらの主要目および断面図をTable 1 及びFig. 2 に示す。

Table 1 Principal Particulars of Rudders

Type of Rudder	Observation of Flow Surrounding a Rudder		Measurement of Forces		Influence of Wedge Angle
	Shilling	Normal	Shilling	Normal	Shilling
Hight	180.0mm		131.0mm		132.2
Chord Length	150.0mm		87.0mm		86.3
Aspect Ratio	1.2		1.5		1.53
Thickness Ratio	0.16	0.18	0.16	0.18	0.15
Center of Shaft			26.0mm from Nose		26.0mm
Section Type	NACA		NACA		

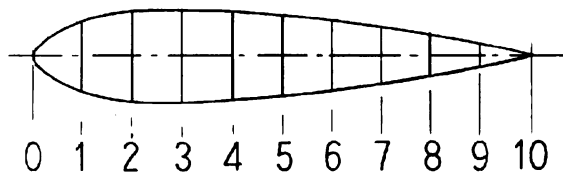


Fig. 2 (a) Normal Rudder (Measurement of Forces)

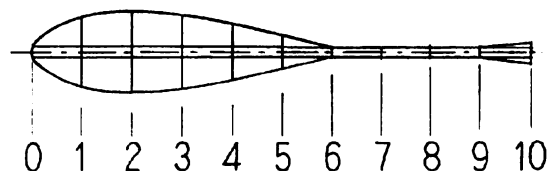


Fig. 2 (b) Shilling Rudder (Comparison of Forces with Normal Rudder)

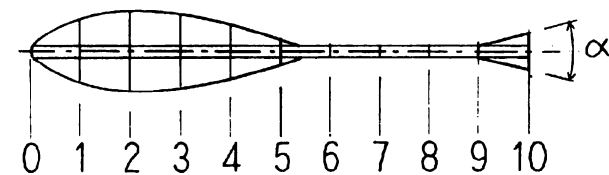


Fig. 2 (c) Shilling Rudder (Influence of Wedge Angle)

Fig. 2 Sections of Model Rudders

可視化 舵の周りの流れの様子を調べるために、舵の縦長 $1/2$ （中央部）に直径44cmの円盤を固定し（Fig. 3 参照）、この円盤にタフトを取り付ける。この円盤は舵角を取る時に、舵及びタフトと共に回転するように工夫したものであり、その直径は予備実験から舵の位置

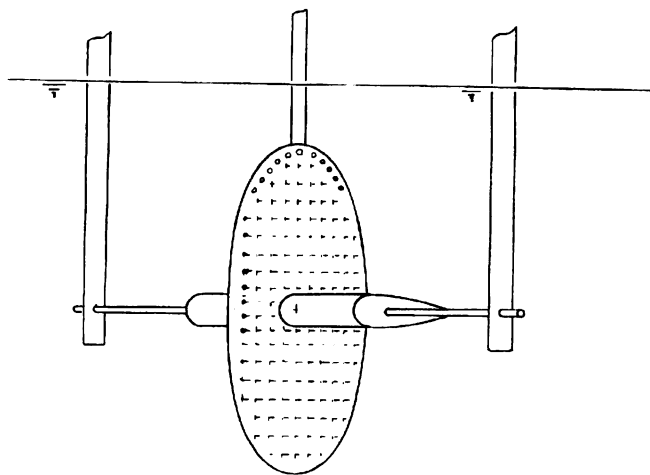


Fig. 3 Equipment for Experiment

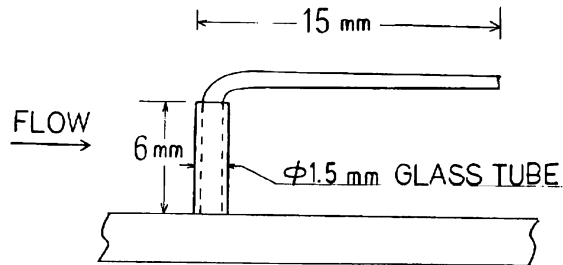


Fig.4 Attachment of Tuft

への流入がほぼ平行流れとなるように吟味してある。タフトは長さ15mmの黒色木綿糸をFig. 4に示すように、長さ6mm、直径1.5mmの手芸用ビーズを支柱として使用し、タフト数はシリング舵の場合554本、普通舵の場合は546本取り付け付けた。

舵角 舵角 θ の影響を調べるために 5° 刻みで $-75^\circ \sim 75^\circ$ について計測した。

楔角 舵に働く流体力への楔角の影響を調べる実験では、楔角 α (Fig. 2 (c) 参照) を 0° , 10° , 20° , 30° の4種類とした。

流速 舵への流入流速は、流れの観察では前後進時とも0.50及び1.00m/secについて行った。この流速はそれぞれレイノルズ数 $R_n = 7 \times 10^4$ 及び $R_n = 14 \times 10^4$ に相当する。なおレイノルズ数 R_n は舵への流入速度を V 、舵の翼弦長を L_R 、動粘性係数を ν とおき次式で定義している、

$$R_n = V \cdot L_R / \nu.$$

流体力の測定（普通舵とシリング舵の比較）では0.25, 0.50, 0.75, 1.00及び1.20m/secに設定した。この流速はそれぞれレイノルズ数 $R_n = 2.2$, 4.3, 6.5, 8.7及び 10.4×10^4 に相当する。

流体力への楔角の影響では前述の流体力の測定と同じ様に0.25, 0.50, 0.75, 1.00及び1.20m/secに設定したが、翼弦長及び水温の違いにより、レイノルズ数は $R_n = 2.7$, 5.4, 8.2, 10.8及び 12.4×10^4 に相当する。

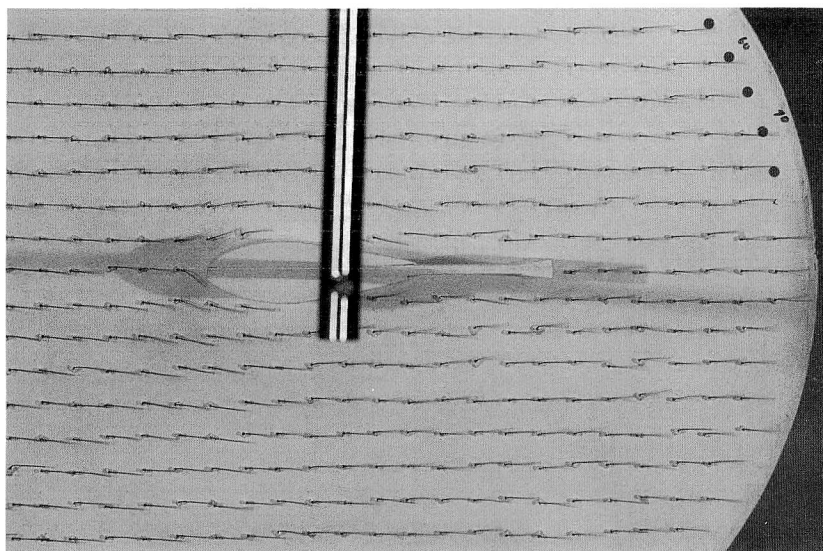
実験結果および考察

1. 舵の周りの流れの可視化（シリング舵と普通舵）

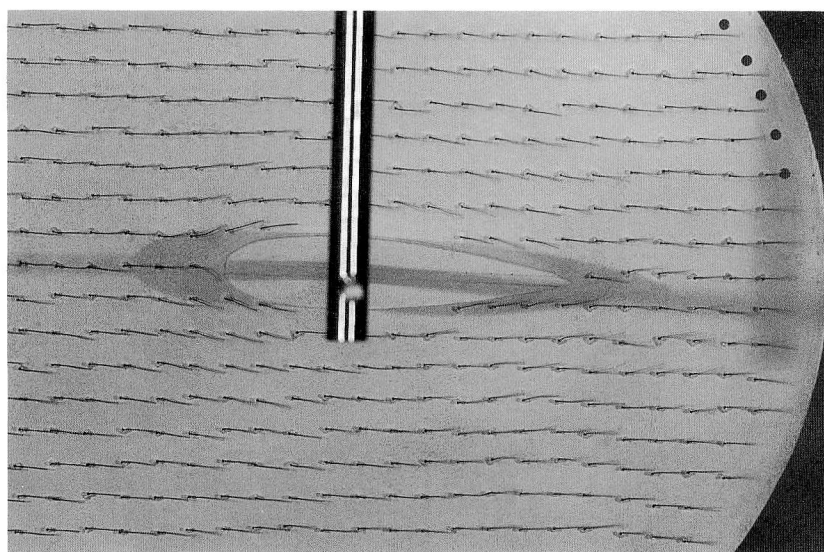
タフトの状態をカメラで撮影するとともに肉眼で観察してスケッチを行い、さらにビデオに記録した。写真のタフトの向きから流線を求め、2つの舵の周りの流れの状態を比較、検

討した。写真の一部をPhoto 1に示す。Photo 1には、流速 $V=1.00\text{m/sec}$ の場合のシリング舵と普通舵について、それぞれ前進時の舵角 $\theta = 0^\circ$ 、 15° 及び 30° について示している。これらの写真にはタフトの影が映っているため見にくいが、タフトの向きから流れの様子が少しは分ると思われる。

次にPhoto 1に相当する写真をもとに計算によって得られた流線をFig. 5及びFig. 6に示



(a) Shilling Rudder $\theta = 0^\circ$

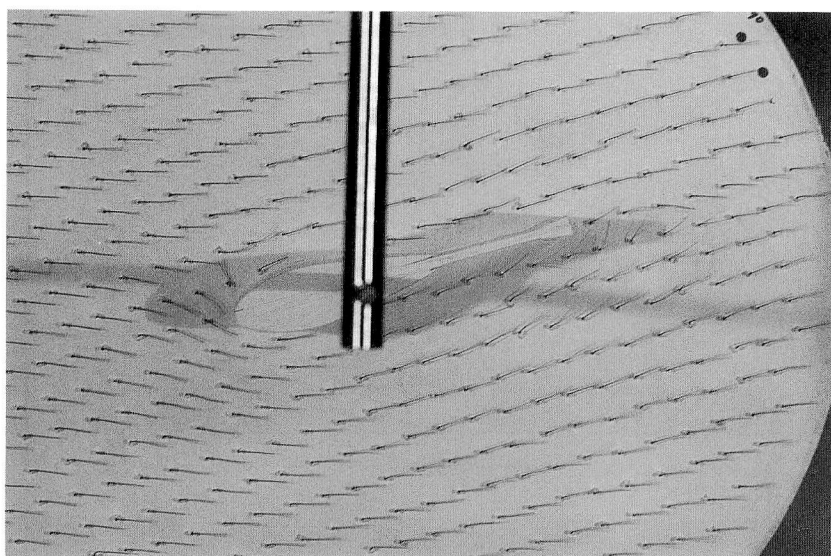


(b) Normal Rudder $\theta = 0^\circ$

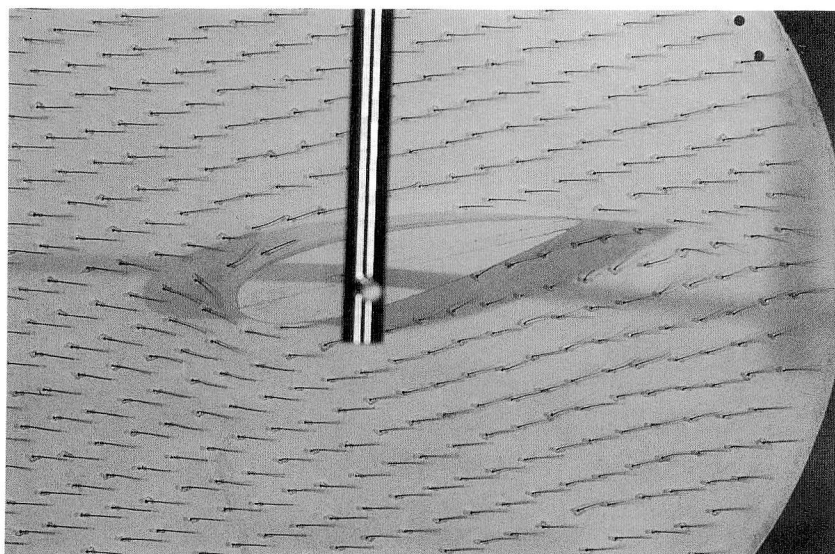
Photo 1 Flow Surrounding Rudders $V=100\text{cm/sec}$

す。Fig. 5 及び Fig. 6 は流速 $V=0.50\text{m/sec}$ の場合のシリング舵と普通舵について、それぞれ前進時の舵角 $\theta=15^\circ$ 及び 30° について破線で示している。さらに $\theta=30^\circ$ の場合について示している Fig. 6 には渦を実線で記入している。この図から普通舵とシリング舵の渦の出来る位置の違いが明らかである。

実験で得られた写真や流線の全てをここに掲載することは紙面の都合から不可能であり、さらにこの様な実験では動的な観察が重要である。したがって、実験で撮影したビデオや、



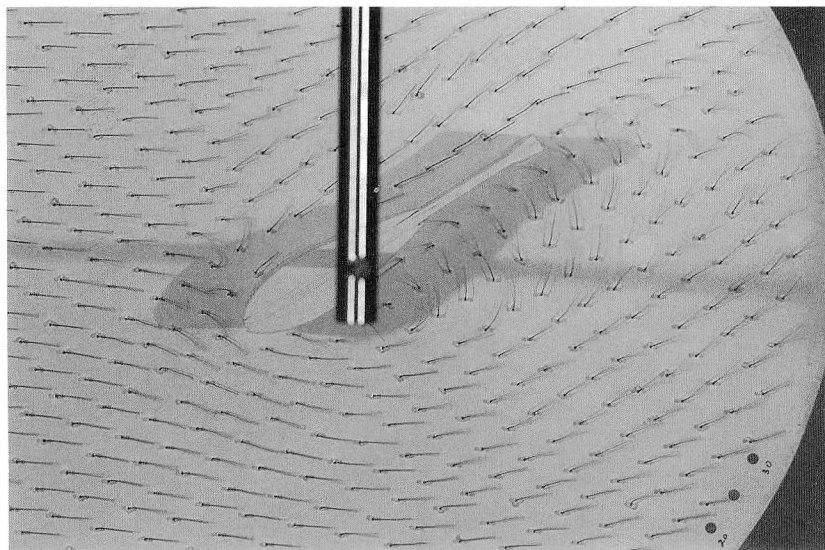
(c) Shilling Rudder $\theta = 15^\circ$



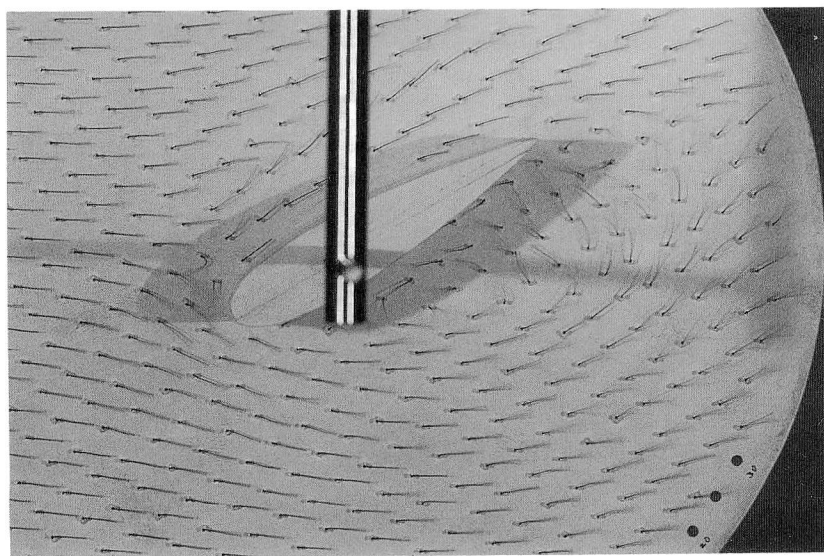
(d) Normal Rudder $\theta = 15^\circ$

Photo 1 Flow Surrounding Rudders $V=100\text{cm/sec}$

肉眼による観察を付け加えて、実験の結果を舵の前進時と後進時に分けて以下に略記する。



(e) Shilling Rudder $\theta = 30^\circ$



(f) Normal Rudder $\theta = 30^\circ$

Photo 1 Flow Surrounding Rudders $V=100\text{cm/sec}$

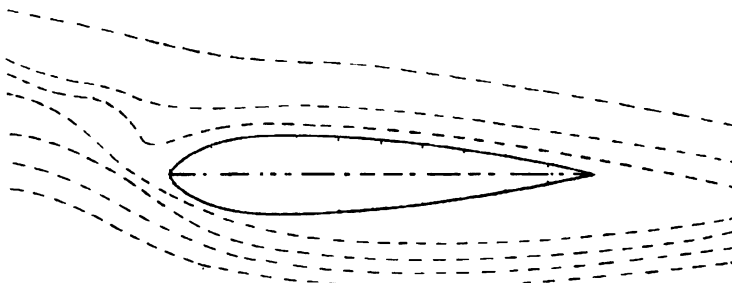


Fig. 5 (a) Normal Rudder

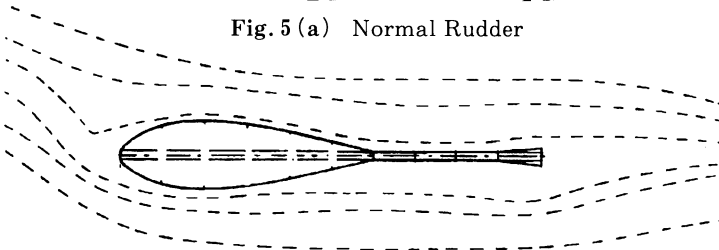


Fig. 5 (b) Shilling Rudder

Fig. 5 Stream Line ($\theta = 15^\circ$; $R_n = 7 \times 10^4$)

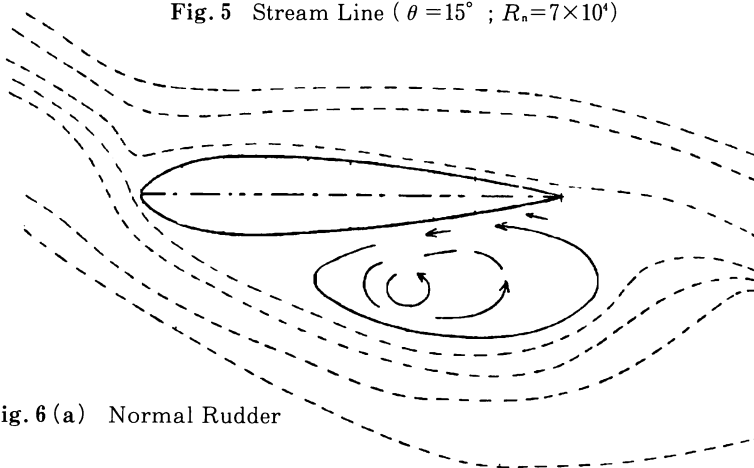


Fig. 6 (a) Normal Rudder

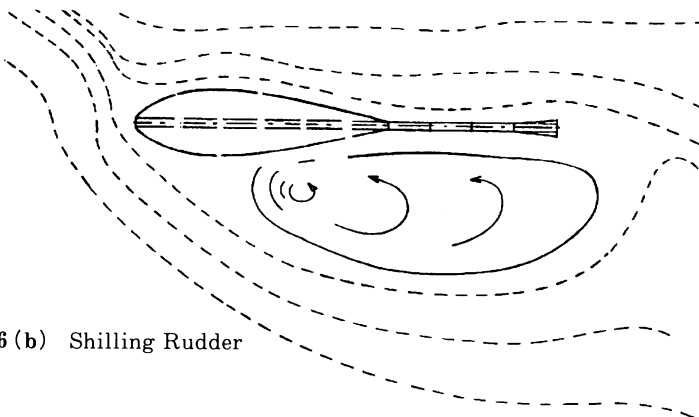


Fig. 6 (b) Shilling Rudder

Fig. 6 Stream Line ($\theta = 30^\circ$; $R_n = 7 \times 10^4$)

(1) 前進時

舵角 0° の場合、シリング舵では後方の流れにおいて後端直後のタフトが2本であるが周囲のものよりも激しく動いていることからシリング舵の後流に乱れがみられる。これは舵の後縁部の形状からある程度推測された。そして舵角を取ると、 $\theta = 5^\circ \sim 10^\circ$ では腹面側のタフトが周囲のものに比べてやや不安定になりはじめ、流速 50cm/sec ではシリング舵、普通舵ともに 25° で初めて渦が発生する。 $\theta = 30^\circ$ では渦がやや大きくなり、シリング舵では、 35° 以上では渦が徐々に下流側に膨らみ始め、後端部付近では3本のタフトが腹面側の大きな渦とは逆の方向に回っていることから後縁部に小さな渦が発生していることが分った。流速 100cm/sec の場合は渦ができる舵角が大きくなり、舵角 40° まではほとんどこのような渦は発生しない。なおシリング舵の場合 $\theta = 35^\circ$ 以上で流速 50cm/sec の場合と 100cm/sec の場合を比較すると、流速 100cm/sec の方がタフトの動きが活発になるだけで、大きな相違点はみられなかった。

なお理論的にシリング舵の流体力を計算するためには、とくに舵の後縁部分の流れの様子を把握する必要があるが、この実験から結論づけるのには、後縁からもっと離れたところまで可視化する必要があることが分った。

(2) 後進時

舵角 0° においてはシリング舵、普通舵ともに後流部分のタフトが不安定であることから、流れに乱れがあり、さらに舵前端部のタフトが一本だけであるがほぼ直立して揺らいでいることから死水領域があるものと思われる。そして舵角がある場合は、シリング舵では 15° で舵の中央よりやや後方に小さな渦ができ、舵角が大きくなるとともに渦の中心が徐々に下流に移動し、渦の大きさも大きくなっていった。一方の普通舵は舵角 0° の時にみられた死水領域が舵角が増すに連れて大きくなり 25° で初めて渦ができた。

2. 舵に働く力 (シリング舵と普通舵)

舵に沿って働く力とこの力に垂直に働く直圧力及び舵軸まわりのトルクを3分力計で計測し、計測された2つの力の合力から抗力と揚力を求めるとともに、着力点を求めた。

通常、舵力としては直圧力だけを考えれば充分であるが、失速すると舵に沿って大きな抵抗が働き、舵に沿って働く力が急増し直圧力は減少するため、相対的に舵に沿って働く力が無視できなくなるので、揚力 L および抗力 D の形でまとめることにし、揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D を

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}, \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S}$$

で定義する。ここで V 、 S 及び ρ はそれぞれ舵への流入速度、舵の投影面積及び水の密度を表す。

実験によって得られた揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D を Fig. 7, Fig. 8 及び Fig. 9 に示す。Fig. 7 及び Fig. 8 は流速一定 (レイノルズ数一定) のときの舵角の変化に対する揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D の変化を表し、Fig. 9 はレイノルズ数の変化に対する揚力係数 C_L 及び

抗力係数 C_D の変化を表している。

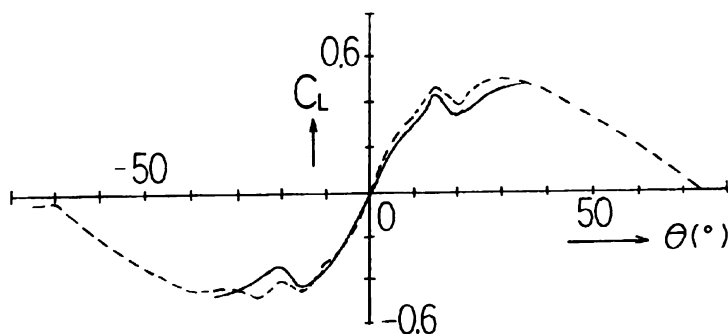


Fig. 7 (a) $R_n = 6.53 \times 10^4$

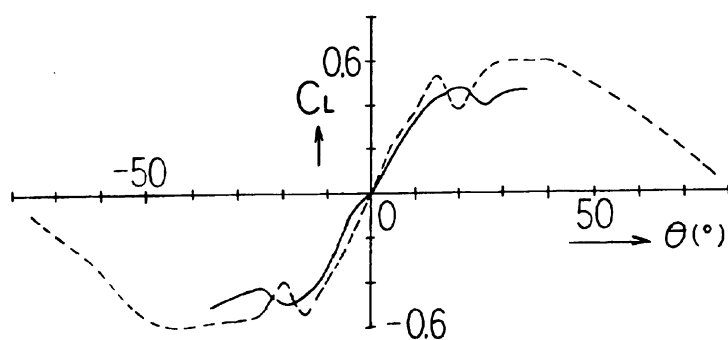


Fig. 7 (b) $R_n = 8.69 \times 10^4$

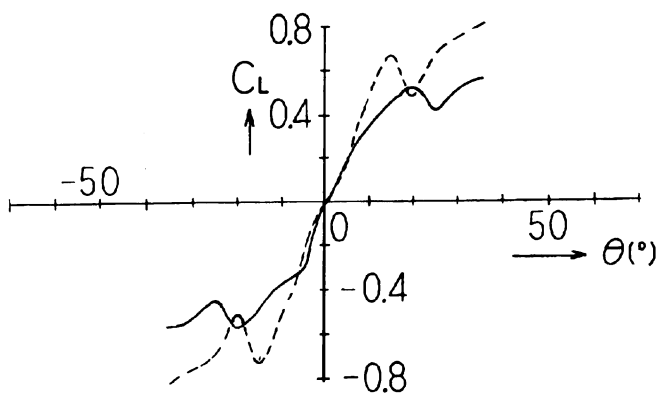


Fig. 7 (c) $R_n = 10.4 \times 10^4$

Fig. 7 Comparison of C_L

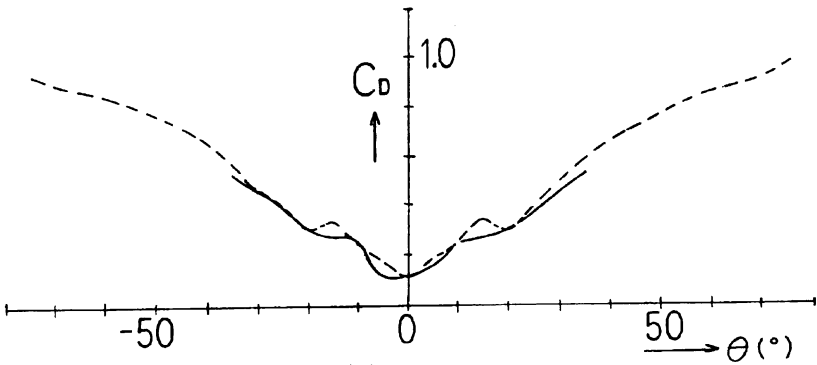


Fig. 8 (a) $R_n = 6.53 \times 10^4$

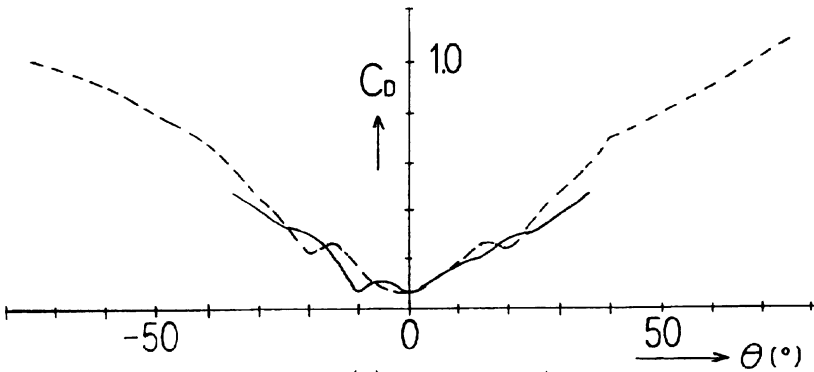


Fig. 8 (b) $R_n = 8.69 \times 10^4$

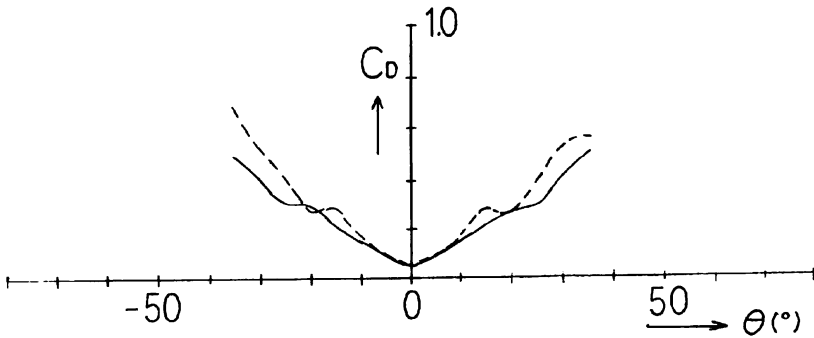


Fig. 8 (c) $R_n = 10.4 \times 10^4$

Fig. 8 Comparison of C_D

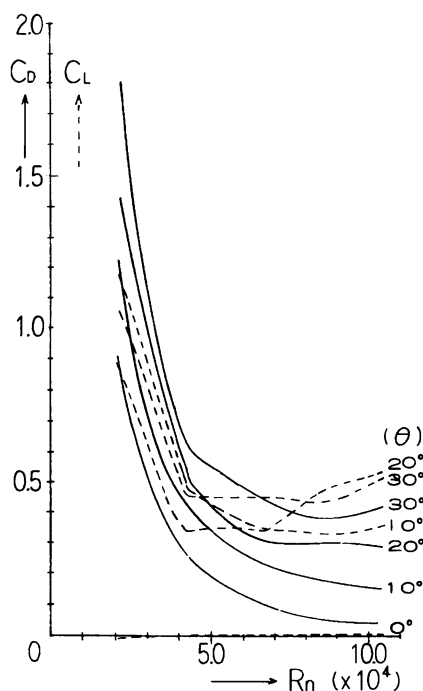


Fig. 9 (a) Normal Rudder

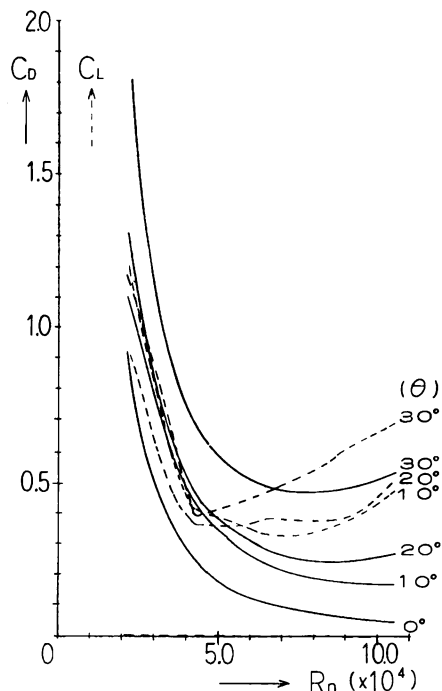


Fig. 9 (b) Shilling Rudder

Fig. 9 Comparison of C_L and C_D based R_n .

Fig. 7 及び Fig. 9 から揚力係数 C_L は、両舵共に流速 V 及び舵角 θ を増すと大きくなり、流速が速くなると、シリング舵の方が普通舵より、各舵角において大きな値を示している。つまり、シリング舵の方が揚力が大きいので、旋回力においては普通舵より優れているといえる。尚流速が遅い場合（レイノルズ数が小さい）場合は、粘性による層流の影響が大きいので逆になっている。なお本実験ではレイノルズ数を充分大きく取ることも、また実験での最大設定流速で舵角を大きく取ることが出来なかったため、最大舵角 75° における C_L の値は他の研究¹⁾で得られている値ほど大きな値にはなっていない。

抗力係数 C_D を示した Fig. 8 及び Fig. 9 から、流速及び舵角を増すと、抗力は両舵とも大きくなり、ほとんどの場合シリング舵の方が普通舵より大きな値を示している。

これらの結果から同じ速度で前進している場合に同じ舵角を取ると少なくともシリング舵を装備した船は、普通舵を装備した船に較べて減速し、さらに早く旋回できる、即ち小回りが出来ることが明らかである。

舵軸周りの回転モーメント及び着力点についても計測計算したが、舵軸周りの回転モーメントは普通舵及びシリング舵共に非常に小さい値を示し、大きさの違いはほとんどなく、着力点の値にも大差なく、舵角による着力点の変動は非常に小さかったので、ここには示していない。

3. 楔角の影響

シリング舵の舵尾部楔角の影響を調べるために、舵尾部楔部分を取替え可能な舵模型を作り、楔角の影響を調べた。ここでも前述の揚力係数 C_L 及び抗力係数 C_D 及びレイノルズ数 R_n を用いて整理している。

結果の一部を Fig. 10, Fig. 11 及び Fig. 12 に示し、さらに Table 2 に舵角 0° のときの抗力係数 C_D の値を普通舵の値とともに示す。

Fig. 10 及び Fig. 12 から C_L は、全舵共にレイノルズ数 R_n 及び舵角 θ を増すと大きくなる傾向があり、4 種類のシリング舵ともほぼ同じ増減の傾向を示しているが、 R_n の値が大きいとき、各舵角 θ において楔角 α が 30° の舵が全体的に大きな値を示している。また Fig. 10 から楔角の大きさが舵角を少し取ったとき $\theta - C_L$ 曲線の勾配の大きさに影響しており、楔角 α が 20° の場合が最大になっていることが分る。このことから楔角をあまり大きくしない方がよいのではないと思われる。

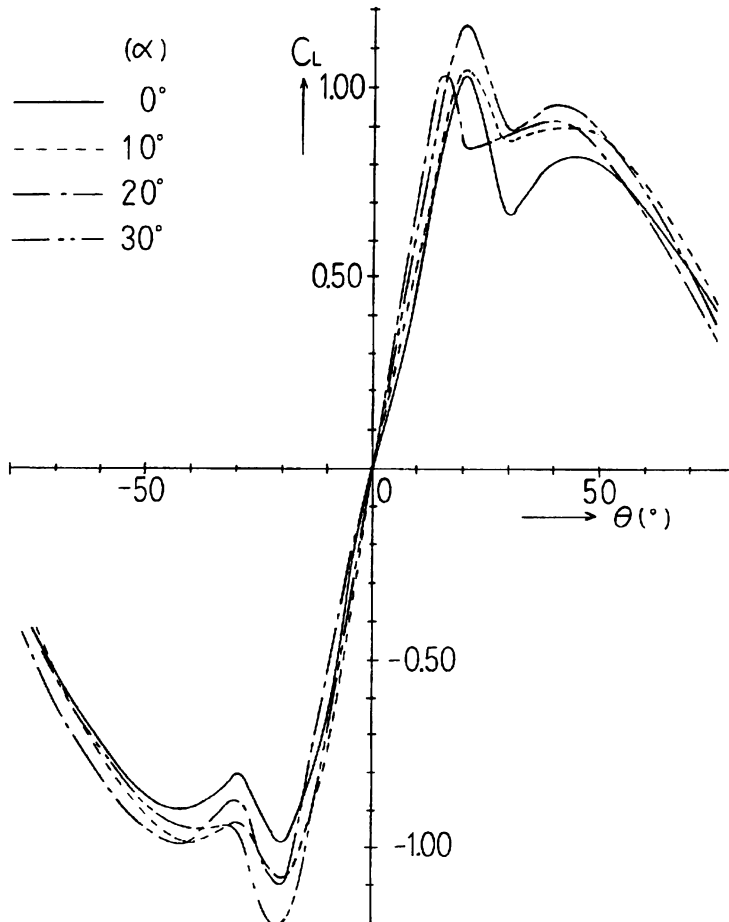
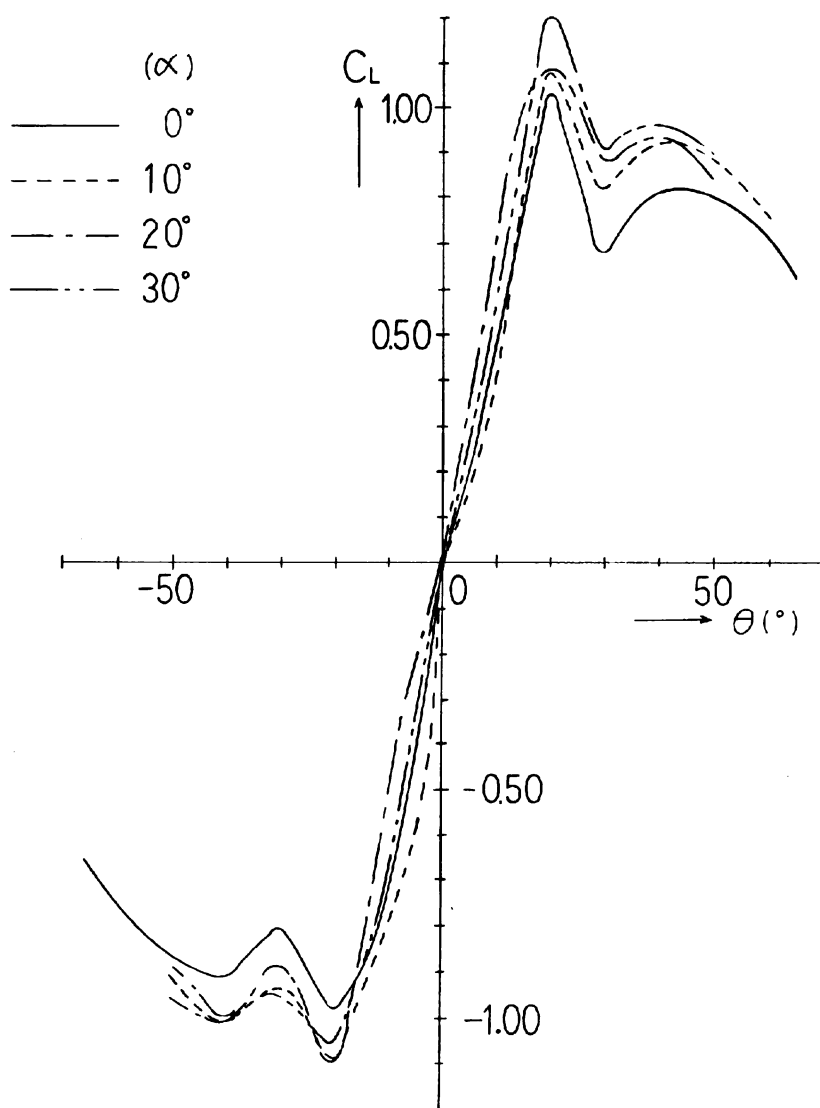


Fig. 10 (a) $R_n = 8.2 \times 10^4$

Fig. 10 Comparison of C_L

Fig. 10 (b) $R_n = 10.8 \times 10^4$ Fig. 10 Comparison of C_L

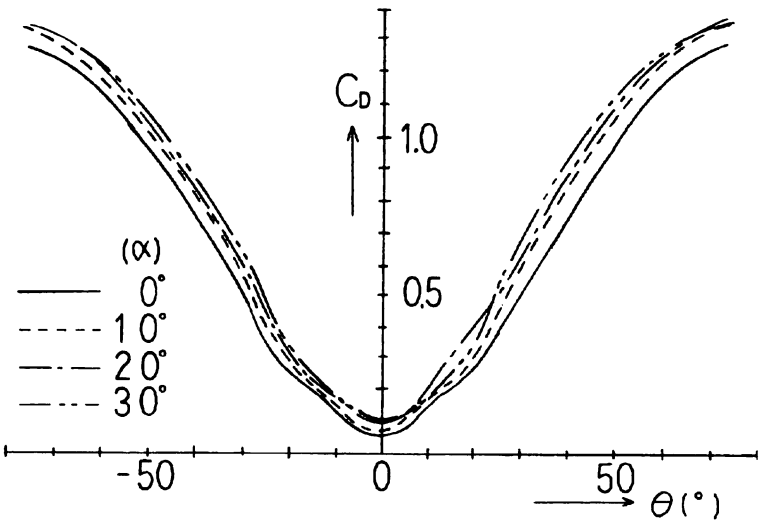


Fig. 11 (a) $R_n = 8.2 \times 10^4$

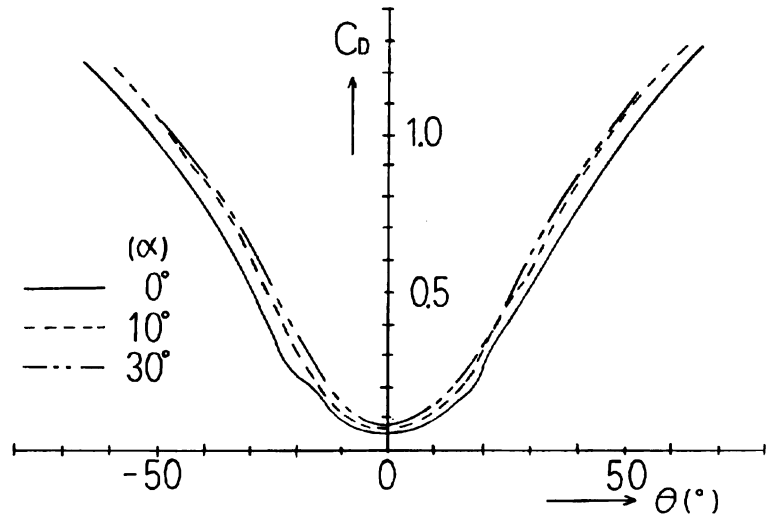


Fig. 11 (b) $R_n = 10.8 \times 10^4$

Fig. 11 Comparison of C_D

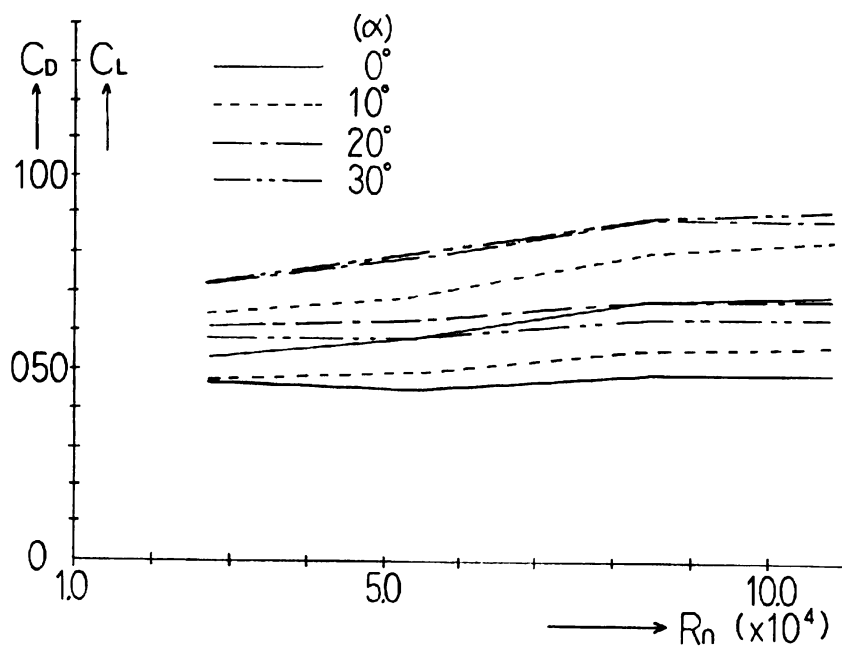


Fig. 12 (a) $\theta = 30^\circ$

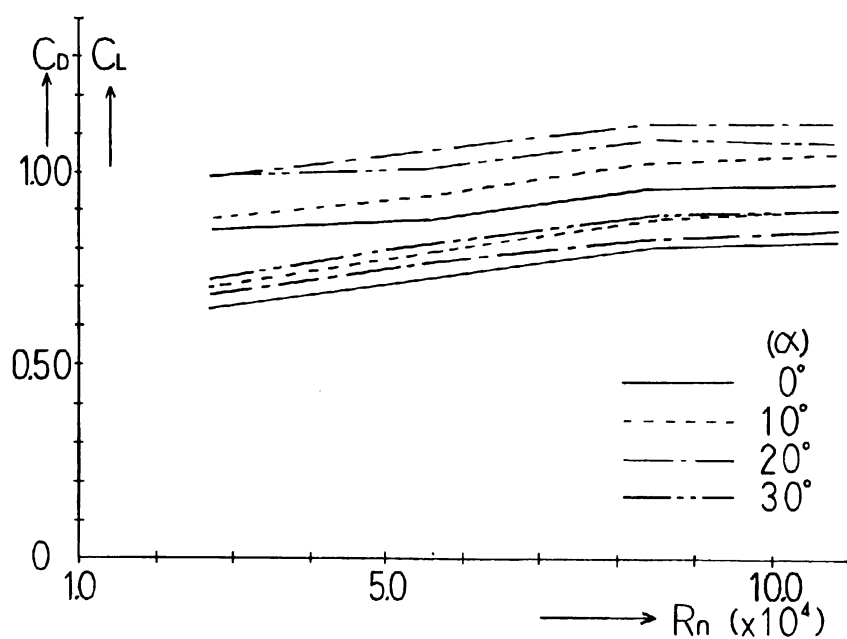


Fig. 12 (b) $\theta = 50^\circ$

Fig. 12 Comparison of C_L and C_D based R_n

Table 2 The Values of C_D in a Helm Angle 0°

Rn	8.7×10^4	10.2×10^4	
Normal Rudder	0.062	0.048	
Shilling Rudder	0.073	0.056	
Rn	8.2×10^4	10.8×10^4	12.4×10^4
$\alpha = 0^\circ$	0.057	0.052	0.051
$\alpha = 10^\circ$	0.063	0.063	0.061
$\alpha = 20^\circ$	0.077	0.075	0.073
$\alpha = 30^\circ$	0.091	0.088	0.085

Fig. 11 及び Fig. 12 から抗力係数 C_D は、全舵共に流速及び舵角を増すと大きくなっており、楔角 α が大きいほど C_D の値が大きい、 $\theta - C_D$ 曲線の傾向はほとんど同じである。

Fig. 10 及び Fig. 11 の $\theta - C_L$ 及び $\theta - C_D$ 曲線へ楔角 α の影響から、シリング舵の性能を理論的に取り扱う一つの方法として楔角 $\alpha = 0$ のシリング舵なら後縁を 0 と近似することで取扱が可能であり、この舵に楔角 α の影響を加味していく方法が考えられる。

また Table 2 から舵角 0° のときの C_D の値も楔角 α が大きいほど大きいことが分る。

なお舵軸周りの回転モーメント及び着力点についても計測計算したが、楔角の影響は特筆するほどのことはなかった。

結 言

以上において、シリング舵と普通舵の周りの流れの様子を 2 次元タフト法によって調べると共にこれらの舵に働く揚力、抗力および舵軸周りのモーメントを計測し、さらにシリング舵の舵尾部楔角がこれらの流体力に及ぼす影響を調べた。

その結果次のことがわかった。

1. 舵角が 0° の場合は後方の流れ、特に後端部直後の流れにおいて、シリング舵の方が、不安定であった。そしてシリング舵、普通舵ともに流速が速いほど渦が出来る舵角が大きいという傾向がみられた。なおシリング舵の $35^\circ \sim 75^\circ$ においては、流速の違いによる流れ線の相違は小さかった。後進時においてはシリング舵の方が流れの乱れが大きかった。
2. 理論的にシリング舵の流体力を計算するためには、とくに舵の後縁部分の流れの様子を把握する必要があるが、今回の実験から結論づけるのには、後縁からもっと離れたところまで可視化する必要があることが分った。
3. 普通舵はレイノルズ数 6.5×10^4 以上において、通常よく知られた、抗力と揚力の傾向を示すことから定性的な研究においてはかなり低いレイノルズ数でよいが、シリング舵の楔

角の影響等を調べるためにはレイノルズ数の値が 10^5 程度ではやや無理があることが分った。

4. シリング舵は明らかに普通舵よりも旋回力では優れているということがいえるが、シリング舵の抗力の値が、常に普通舵より大きいことから、舵に働く抵抗が大きいということになるので、普通舵より推進性が悪くなるという欠点はあるが、その影響の度合いは使用する船舶に最適なシリング舵と比較しなければ結論が出せない。
5. シリング舵尾部の楔角は 20° を大きく超えると旋回性能を逆に悪くするかも知れない。
6. シリング舵の性能を理論的に取り扱う一つの方法として、まず楔角 0 のシリング舵の性能を求め、これに楔角の影響を加味していく方法が考えられる。

しかしながら、これらの結論は舵の単独性能についてであり、実際の舵は船体後部にあり、さらにプロペラの後にあるため、これらの干渉とともに船体後方の複雑な流れの中にある舵に働く流体力を調べていく必要があり、今後の研究に待ちたい。

参 考 文 献

- 1) 向原誠也 (1992): 固定幾何形状高揚力舵 (シリング舵) について, 漁船, 第296号 10-20頁