

(昭和 34 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

模型試験による舵の研究

正員 志 波 久 光*

Model Experiments of Rudder Working behind Propeller

By Hisamitsu Shiba, *Member*

Abstract

The characteristics of rudder working behind propeller are investigated with model tests.

According to the above, they are much different from those of open rudder, and the existence of optimum rudder area ratio can be explained, at least, from rudder side.

Finally, design-charts based upon these test results are presented for general use.

1. 緒 言

単螺旋船用の舵すなわち普通推進器の直後に働く舵を設計するにも現在なお舵単独の場合の旧来の実験式と各自の経験に多くは依存しているようである。しかしながら船型、速度等において次第に複雑化した近代では旧来の実験式等のみに依存する方法は経験不足による誤算無きを保し難い。本研究は推進器の背後にあるためその影響を受ける舵の特性を究明しこれより一般実用に適する設計資料を得るを第 1 の主眼目とした。さらに操縦性能は舵面積比が大き過ぎるとかえつて不良となることは理論式より観念的には一応肯定出来るが船の示す特種な性質が未解明の今日では不備の資料を以てする算定結果には定性的にはとに角として定量的には全幅の信頼を置くわけにわゆかぬ。そこで今回の研究は最適舵面積比（造協論 105 号参照）を生む一因が舵そのものの側にもあり得るかどうかを調査することを第 2 の主眼目とした。

2. 供試模型舵および推進器

これらはさきの「模型船による最適舵面積の研究」に使用されたもので詳細は造協論 105 号を参照されたい。なお推進器は螺距比 0.80 のもののみを使用した。

3. 実 験 方 法

自由表面の影響をなるべく避ける目的で舵上面の水面からの距離を 10 糎に保ち前進速度を毎秒約 1.17 米に定め推進器の失脚率が 11%, (22%), 28%, 44% の場合示す舵の特性を舵動力計により計測した。なお前進速度零失脚率 100% ($NP_E = 1.53$ 米/秒) の場合と舵単独の場合もあわせ計測した。本試験におけるレイノルズ数は約 1.0×10^5 程度である。

4. 実 験 結 果

実験により求めた直圧力 F とその着力点の前縁からの割合を係数 C_N と α の貌として Fig. 1~6 に示した。 P_E は有効螺距であり速度として NP_E を採用したのは舵に当る流速が概略的に考えて次の関係にあるからであり。

$$V + sNP_E = V + (NP_E - V) = NP_E$$

かくの如く扱うことにより 100% 失脚率の場合も関連せしめようとしたからに外ならない。

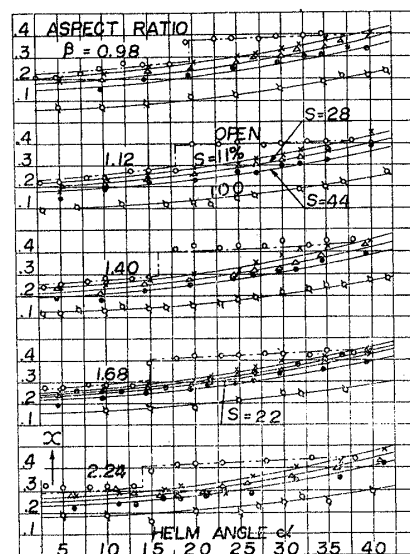
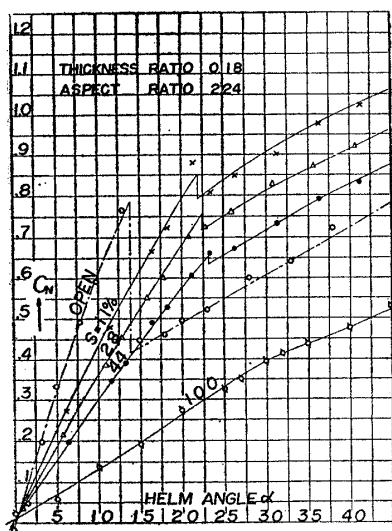
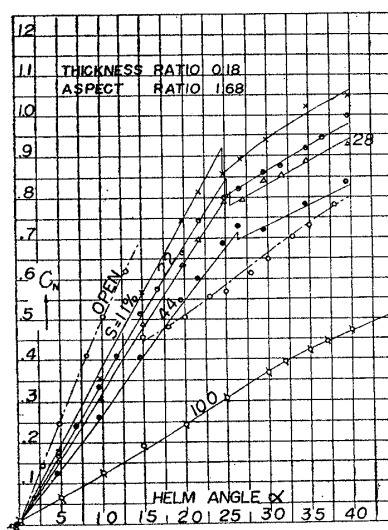
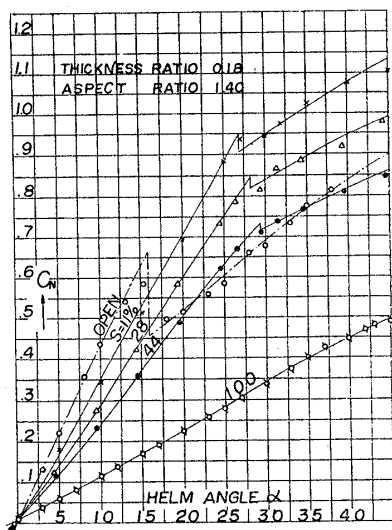
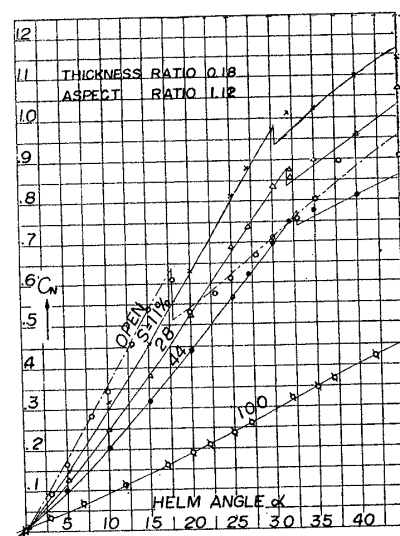
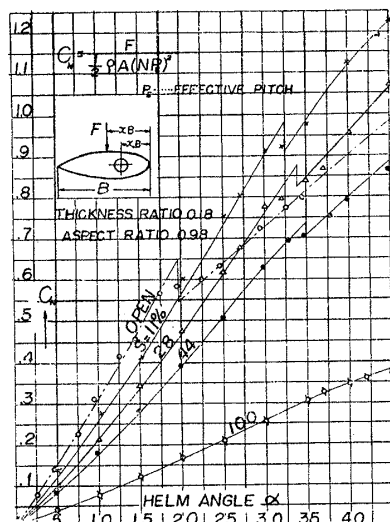
5. 実験結果に対する考察

5.1

先ず使用に便のため直圧力係数 C_N とアスペクト比 β の関係を Fig. 7 に、さらに着力点の舵前縁からの割

原稿受付 昭和 34 年 7 月 10 日

* 運輸技術研究所



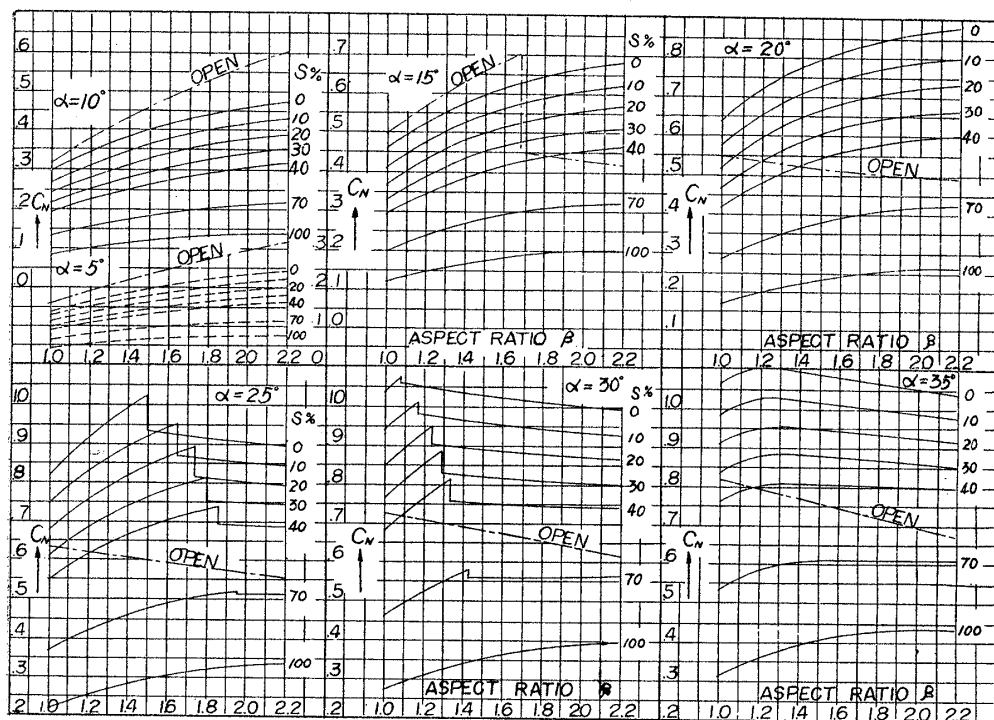


Fig. 7 Curves of Normal Pressure Coefficient

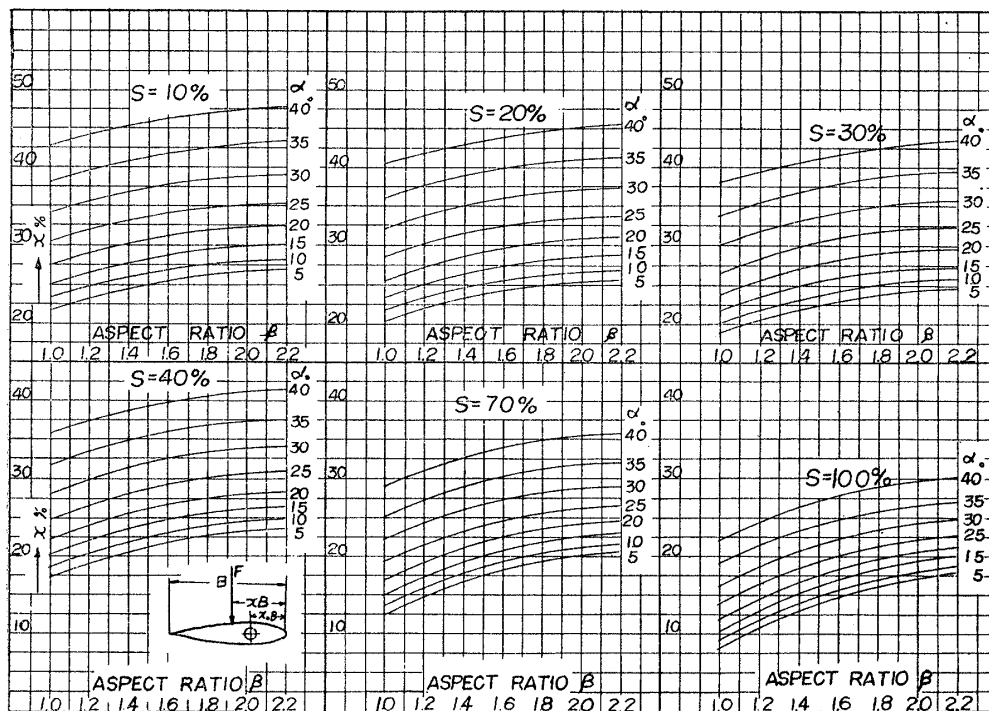


Fig. 8 Curves of Distance of Center of Pressure from Leading Edge

合 α とアスペクト比の関係を Fig. 8 に示した。

5.2 推進器の有無による舵特性の相違

5.2.1 直圧力係数 C_N : Fig. 7 より次のことが判る。

- イ) 推進器失脚率 S が増大するに伴い C_N は著るしく低下する。
- ロ) 推進器失脚率が零のときでも換言すれば推進器による後流がない場合でも C_N は舵単独の場合に比べて著るしく低下する。これは推進器による攪乱の影響と見做す可きであろう。
- ハ) 失速のため C_N が低下する割合は舵単独の場合に比べては著るしく小さい。

5.2.2 推進器失脚率 S の相違に伴う着力点の変化 : Fig. 6 によれば S の増加に伴ない着力点は次第に前方に移動してゆくことは注意すべきであろう。また舵単独の場合は失速後の着力点は急激に後方に移動するに反し推進器の背後に働く舵の場合はこのような急激な変化は認め難い。

5.2.3 失速後の直圧力係数 : Fig. 1~5 または Fig. 7 より知られるように舵単独の場合は失速により直圧力係数に格段の低下を来すが推進器の背後に働く舵の場合はその低下は比較的僅少である。これらは空気吸引によるものでないことは写真観測によつても明瞭であつた。

5.2.4 失速角 : 失脚率とアスペクト比の相違により失速角の変化する様相を Fig. 9 に示した。すなわち

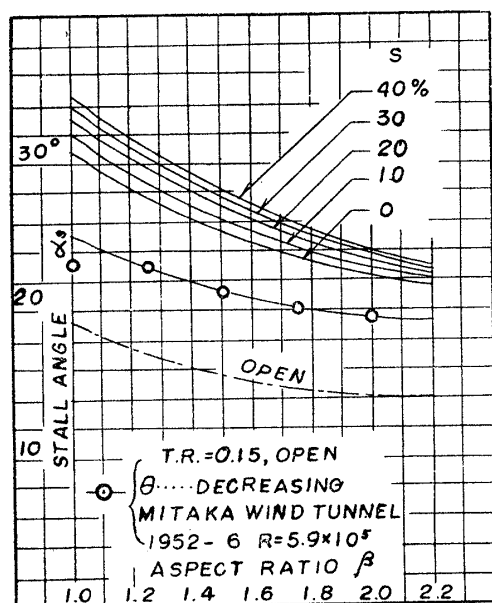


Fig. 9 Curves of Stall Angle

失速角は S と β の函数である。なお当部において行なつた厚さ 15% の対称翼型の風洞資料を参考のため同図中に示した。これを今回試験の舵単独のものと比較すると約 5° の相違が認められる。本相違は流体、翼厚比、支持方法、振動、表面仕上の精度、自由表面の有無、試験方法等に相違あるため定かでない。しかしながら推進器の影響により失速角に相当変化あることは他の経験によつても確実であつた。

5.2.5 舵力率に対する考察 : 以上により C_N および α は S と β の函数であることが明瞭でありしたがつて舵を設計するに単純な実験式を以てしては不可であることが判る。すなわち舵軸の位置を普通程度に仮定し各失脚率に対し Fig. 7~8 を用いて舵力率係数を算定してみれば容易に判るように S の過大のときは舵力率は常に over-balance の状態もあり得るから曳船または曳網漁船等では舵心の位置に相当注意する必要がある。

6. 最適舵面積への考察

舵の直圧力 F は $F = 1/2 \cdot \rho A V^2 C_N = 1/2 \cdot \rho D^2 V^2 \times (C_N/\beta)$ で

現わされる。すなわちより大きな直圧力を得ようとして面積を増す場合一般には舵の深さ D は船尾の関係上変更し得ないことが多いから今 D , V を一定とすれば直圧力は C_N/β に左右される。すなわち面積を増すことは β が減少することになるが同時に C_N も減少するから結果として C_N/β がどうなるかは一概には云えない。Fig. 10 は厚さ 11.7% の Clark Y 翼型について Zimmerman の行なつた風洞試験結果の揚力係数 C_L を示すものである。同図中に C_L/β の値を重ねて示した。 C_N は C_L と大差ないから簡単のため C_L を採つた。本図によれば β を小すなわち面積を増す程 C_L の低下するに拘わらず結果としては C_L/β したがつて総揚力は増加する一方である。しかしながら C_N の相違は翼型および翼厚比にも多少左右されるものと考えられまた推進器の存在によつても影響されるから厚さ 18% の対称翼 (普通の舵の舵厚比は 18% 前後) に関する今回の試験結果について C_N/β を算定してみると Fig. 11 を得る。本図によれば舵角が約 15 度以下では舵の深さを一定として舵面積を増してゆくと (β 減少) C_N/β したがつて直圧力はある値の舵面積を境としてその後は低下するが、舵角が 15 度以上では舵面積を増す程直圧力は増加し失速後特に甚しいことが判る。これらの傾向は舵単独の場合にも云い得る。ここにおいてさきに筆者等の発表した最適舵面積比の値について考察して見る。Fig. 12 はその舵角 35 度における定常旋回径比を再掲したものである。かくのごとく最適舵面積比の存在することが若し舵の特性のみに基因するものとすれ

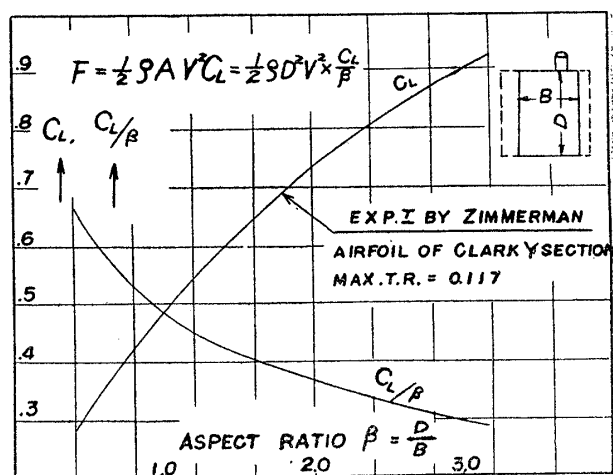


Fig. 10 Effect of Area Upon Lift

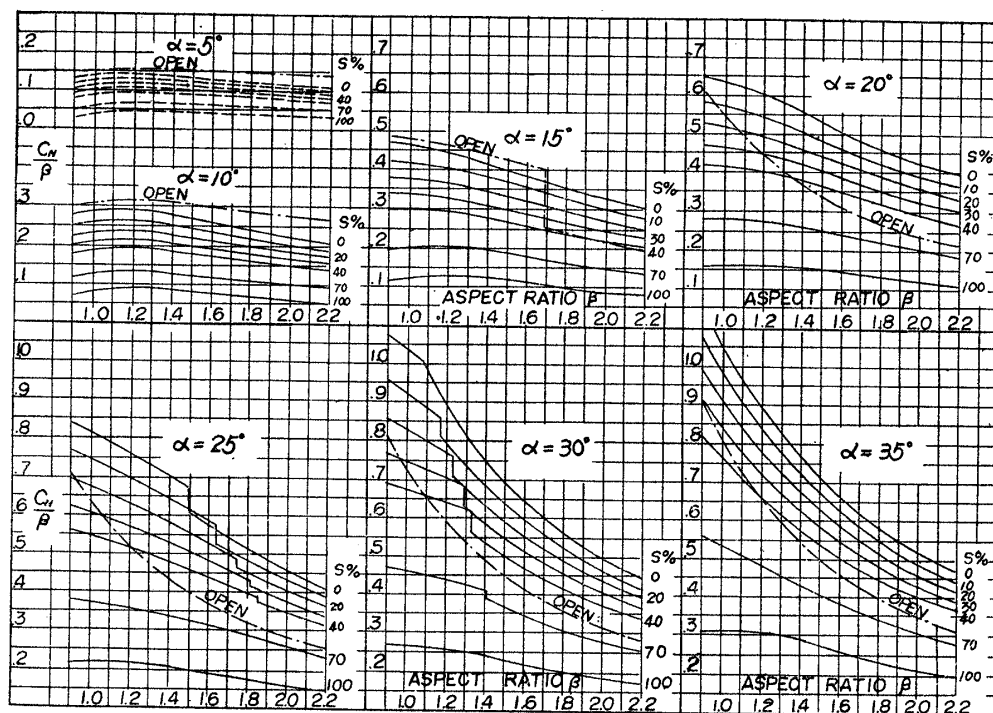


Fig. 11 Curves of C_N/β

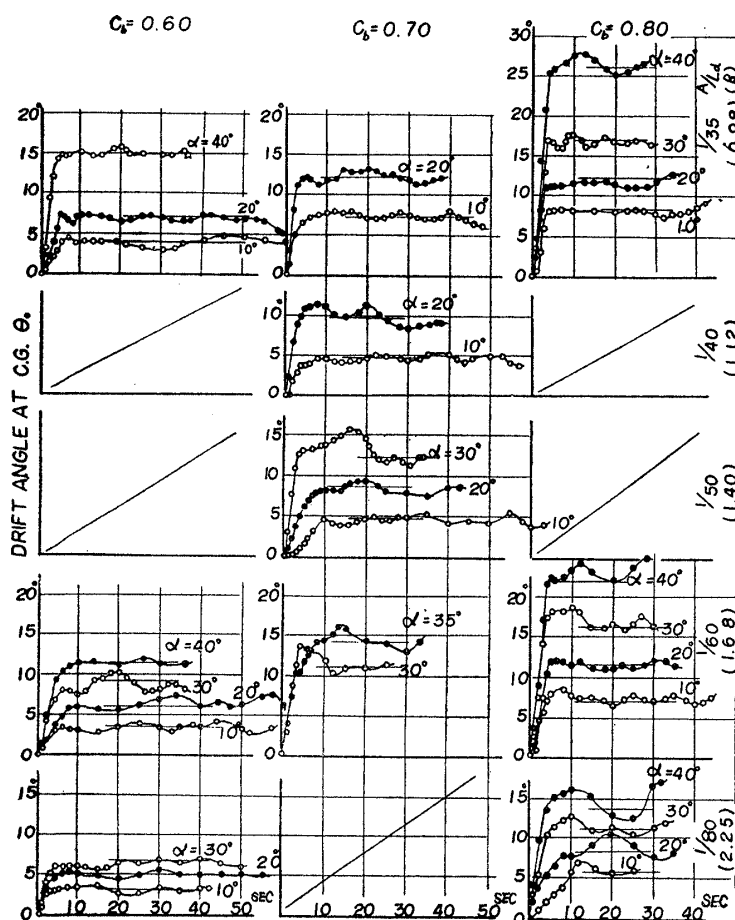


Fig. 13 a Drift Angle (2.50 m Model)

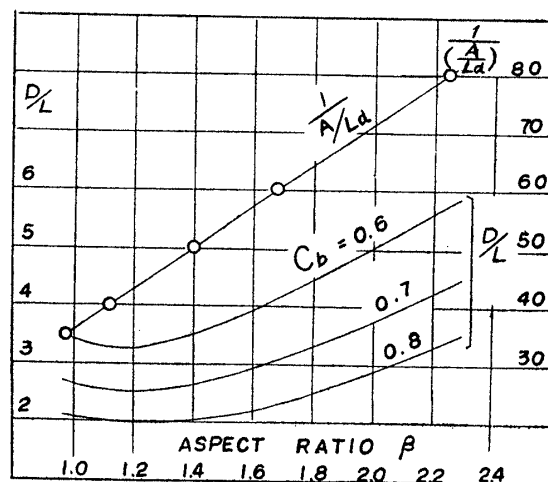


Fig. 12 Turning Diameter At $\alpha=35^\circ$

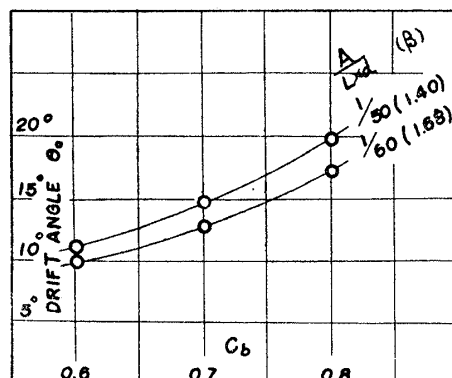


Fig. 13 b Drift Angle At $\alpha=35^\circ$

Table 1

肥瘠係数	C_b	0.7	0.8
模型船長	L (m)	2.5	2.5
操舵角	α	35°	35°
舵面積比	a	1/50	1/60
アスペクト比	β	1.40	1.68
旋回半径	ρ (m)	3.37	3.88
C.G.位置の漂流角	θ_0	14.5	12.5
舵位置の漂流角	θ_1	32.8	29.0
推進器失脚率	s	0.25	0.30
Slによる方向修正量	θ_2	8.1	7.2
舵への入射角	$\alpha - (\theta_1 - \theta_2)$	10.3	13.2

入射角を概略算定してみると Table. 1 を得る。すなわち操舵角が 35 度の場合でも実際舵への入射角は略 15 度以下であることがわかる。したがって Fig. 11 に示す事実を勘案すれば一般的に最適舵面積の存在する理由は少くも舵そのものの側にもあることが納得されるのである。

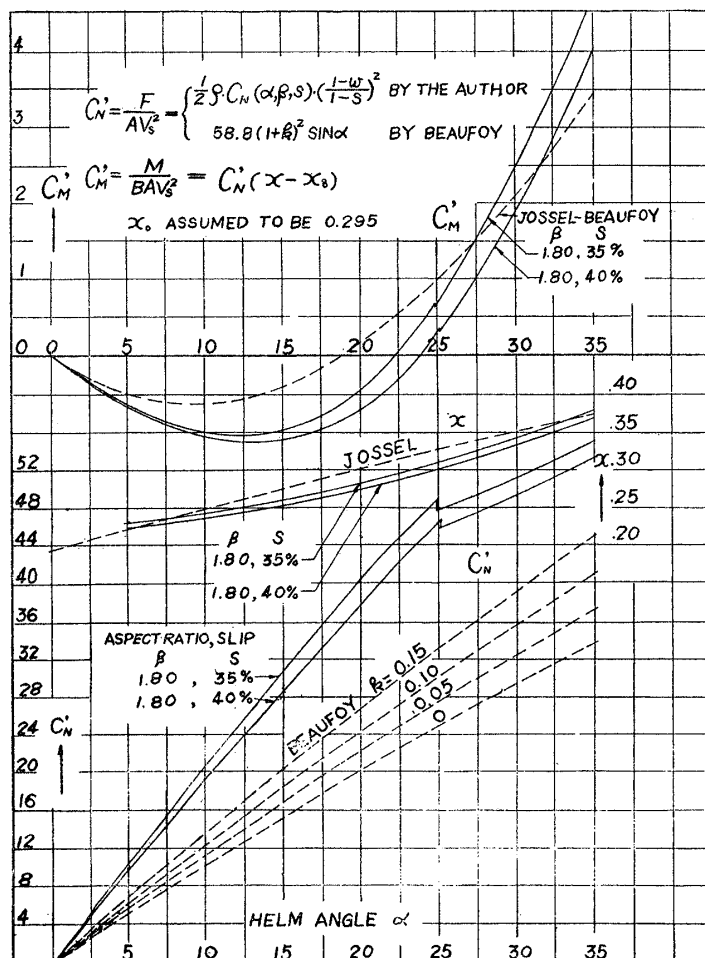
7. 在来の舵設計法に対する考察

例えば舵軸の径を決定するには直圧力 F と着力点の前縁からの距離 x_B を知る必要がある。これらが算定に用いられる実験式は種々あるが次のもので代表せしめ得る。

$$\begin{aligned} F &= 58.8 A V^2 \sin \alpha & \text{Beaufoy} \\ x_B &= (0.195 + 0.305 \sin \alpha) B & \text{Jossel} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} \text{kg. m. s. 単位}$$

ただし、 V 舵への流速、 A 舵面積、 B 舵弦長、 α 舵角

本式において V を船速に関連せしめておくと便利である。すなわち $V = (1+k)V_S$ とし直圧力と振力率を係数の形に書けば次式を得る。

Fig. 14 Examples of C_n' , x and C_m'

ば上述の点から考えて操舵角 35 度の場合でも定常旋回に移行した後の舵への入射角は略 15 度以下であつたと断ぜざるを得ない。

この点をいささか吟味してみることにする。

すなわち前記の報告に省略した漂流角の計測結果を必要上 Fig. 13 a に示した。これより舵面積比が 1/50 および 1/60 に対応する漂流角を知ることが出来る。(Fig. 13 b 参照)。本結果を用いて肥瘠係数 0.7 および 0.8, 舵面積比 1/50 および 1/60 操舵角 35 度の場合舵への

$$C_N' \equiv \frac{F}{A V_S^2} = 58.8 (1+k)^2 \sin \alpha$$

$$C_M' \equiv \frac{M}{B A V_S^2} = C_N' (x - x_0)$$

x_0 は舵軸の前縁からの距離の割合である。経験要素の k は造船所により相違し海事協会舵委員会の折の調査によれば、0.05 ~ 0.15 の範囲にとつているようである。本実験式では C_b, w, s , 等の影響を個々には考慮し得ず一括して k に頼るのみでありまた着力点に関しては失脚率 s の影響を全く無視している。この C_N', C_M' を Fig. 14 に破線で示した。本実験式に対し今回求めた結果を比較してみる。

Fig. 1~5 に示した直圧力係数の表現には $C_N = F / (1/2 \rho A N P^2 E)$ の形を用いているから $1-s = V_{AD} / N P E$, $1-w = V_{AD} / V_S$ の関係を用いて書き改めると次の関係を得る。

$$C_N' \equiv \frac{F}{A V_S^2} = \frac{1}{2} \rho C_N(\alpha, \beta, s) \times \left(\frac{1-w}{1-s} \right)^2$$

$$C_M' \equiv \frac{M}{B A V_S^2} = C_N' (x - x_0)$$

Table 2

C_b	w	S	$\left(\frac{1-w}{1-S}\right)^2$
0.7	0.27	0.35	1.27
0.8	0.32	0.40	1.27

すなわち同一の表現法で比較するためには w と s を知りしかる後 s とアスペクト比 β に対応する C_N の値を Fig. 7 より求め C_N' , C_M' を算定する必要がある。

$(1-w/1-s)^2$ は主として船型に支配されるもので今 C_b が 0.7 の普通型貨物船と 0.8 の超肥大油槽船について本値を調査してみると実船について Table 2 を得る。船型が肥大化するにつれて一般に w も s も増加するから $(1-w/1-s)^2$ の値は結果としては甚だしい相違のないことは予め想像し得る所であり本表よりみれば一般には 1.27 程度にとつても大過ないことが判る。すなわちこれを 1.27 に採り $C_b \times s = 0.7 \times 0.35$, 0.8×0.40 の 2 例につき $\beta = 1.80$ のときの C_N' , C_M' を Fig. 14 に実線で示した。なお x_0 はすべて 0.295 とし x の値は同図中の中央に示した。本図によれば C_M' については実験式の k を 0.15 に採つても甚だしく under-estimate することになり、また着力点も図に示す如く相違している関係上捩力率を表わす係数 C_N' は実験式によるものは over-balance の部分も大角度の場合もともに低い。普通型貨物船 ($s = 0.35$, $\beta = 1.8$) を例にとれば 35 度操舵の場合実験式による舵力率を実験値に一致させるためには k の値として 0.30 程度を採る可きであることは今後実験式使用者にとつて充分留意すべき点であろう。

実際問題としては操舵終了ころ回頭角はすでに若干生ずるから 35 度操舵と雖も Fig. 14 に示す力率より若干低い筈である。しかしながらそのころの回頭角は 5 度以下という僅少値であるから舵の設計には回頭角を無視してかかるのが妥当である。しかるとすれば Fig. 14 に示す関係のあることを充分考慮に入れる必要がある。

8. 海上試運転において実測した舵力率に対する考察

本研究資料がどの程度まで実船の実情を説明できるか調査してみる。Fig. 15 の左半部および右半部の舵力率曲線は磁歪式振計により当性能部および日立技研でそれぞれ 5 隻の実船につき実測したものである。これらはすべて普通の貨物船であるから簡単のため次のごとく仮定する。

肥瘠係数……………0.7
伴流率 w ……………27%
舵の位置の漂流角…………0°, 3°
舵厚比……………18%
失脚率 S ……………35%
 s による補正角…………0°, 1°
アスペクト比……………1.8
舵は対称翼型
 ρ ……………1.025 × 101.96

しかる場合 Fig. 7, 8 より Table. 3 を得る。よつて次式により力率 M を算定できる。

Table 3

θ	C_N'	x
35°	55.1	.378
33°	53.5	.365

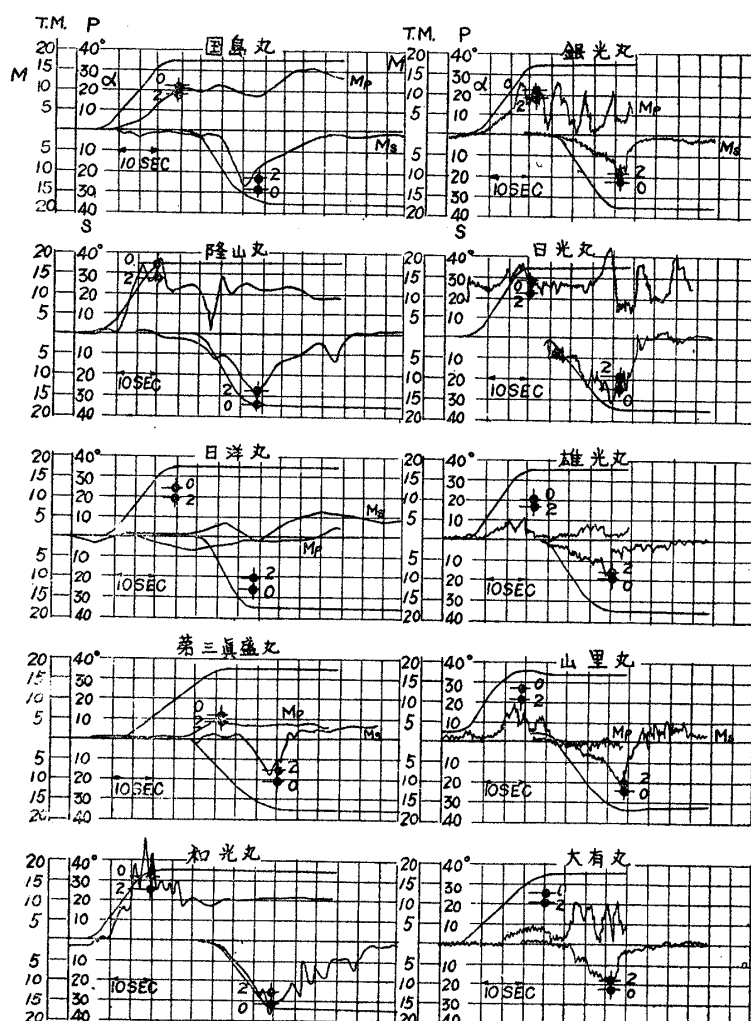


Fig. 15 Twisting Moment of Rudder in Full Size Test

$$M = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{1-w}{1-s} \right)^2 C_N (x-x_0) B A V_s^2 = C_N' (x-x_0) B A V_s^2$$

Table 4

船名	B (m)	α_0	A (m ²)	T _S (m/s)	M/1000 (T.M.) 漂流角	
					0°	2°
国島丸	3.05	.289	16.31	S 7.87	14.3	11.5
				P 6.89	11.0	8.8
隆山丸	3.05	.289	16.31	S 8.64	17.3	13.9
				P 8.59	17.0	13.7
日洋丸	2.94	.297	15.27	S 8.23	13.0	10.3
				P 7.92	12.1	9.5
水島丸	3.05	.312	16.04	S 7.77	10.7	8.1
				P 5.55	5.5	4.1
和光丸	3.05	.289	16.31	S 8.28	15.9	12.7
				P "	"	"
銀光丸	2.71	.273	13.22	S 7.72	11.5	9.5
				P 7.51	10.8	8.9
日光丸	3.25	.308	19.01	S 7.30	12.5	9.6
				P 7.72	14.0	10.7
雄光丸	2.66	.276	12.73	S 7.44	9.7	8.0
				P 7.54	10.0	8.3
山里丸	3.04	.282	16.61	S 7.10	12.6	10.3
				P 7.54	13.2	11.6
大角丸	2.97	.289	15.91	S 7.20	11.4	9.1
				P 7.61	12.7	10.2

これらの概略算定値を Table 4 にまたは Fig. 15 中の操舵終了位置に示した。0 は漂流角を無視したもの、2 は漂流角 3 度を考慮したものである。Fig. 15 より知られるように日洋丸を除けば算定に前記の仮定あるにも拘わらず実測値と比較的に良く一致している。したがって舵設計上の実際的の観点からは次のように考えて大過ないであろう。

1) 普通型商船の場合は航走中舵が略全没に近い場合舵の深度影響を無視して C_N , x を採り舵面積はその儘とする。

2) 操舵終了直後の若干の漂流角は無視する。

3) 若し Beufoy-Jossel の式に依るときは k の値として 0.30 程度とする。

なお Fig. 15 の力率曲線には操舵終了頃に急激な山が現われているが Fig. 13 a の初期の部分拡大してみれば判るように漂流角は一般に操舵終了頃より急激に増加するから舵の直圧力もまた急激に減少するは当然である。すなわち、いわゆるピークは結局するに舵

への入射角が極めて短時間の間だけ最大であるという極めて単純な理由に外ならない。

9. 其 の 他

9.1 推進器螺距比の影響

少くも螺距比が 0.7~0.9 の範囲ではその影響は無視して良い。

9.2 伴流分布影響、舵の深度影響等

8 節の実船解析結果からみてともに甚しい影響があるものとは考えられない。後者の影響については実用はとに角として折あれば研究する予定である。

10. 本研究の適用範囲

本研究に使用した推進器と舵およびその相対関係は普通型商船または超肥大型油槽船に対するものである。したがって例えば舵厚比が甚だしく相違するもの、または回転数が普通と甚だしく相違するため舵と推進器の直径との関係が異常のもの等には本研究結果はその儘では適用出来ない。

11. 結 論

以上により緒論に述べた 2 つの主眼目を不完全乍らほぼ達成したと信ずる。すなわち一般に最適舵面積は少くも舵そのものの側にもあることを明にしさらに船体の伴流値および推進器の失脚率等の影響を考慮に入れ得る舵設計図表を提示し得たと信ずる。