

一軸二舵船の舵に取り付けた水平フィンの設計について

正会員 有井俊彦* 正会員 細萱和敬*
正会員 長谷川和彦**

Design Practice for the Horizontal Fin of a Single Screw-Twin Rudder System

by Toshihiko Arai, *Member* Kazuyoshi Hosogaya, *Member*
Kazuhiko Hasegawa, *Member*

Summary

The single-propeller/twin-rudder system composed of single propeller and two high-lift rudders of fish-tail type has been installed on many vessels in Japan. With this system, a ship can be maneuvered at any mode including going astern, hovering, dead slow forwarding and turning by means of various rudder angle combination, with propeller revolution being kept in the forward direction. To improve propulsive efficiency of the single-propeller/twin-rudder system, a pair of reaction fins is attached between two rudders where the propeller slip stream passes. Form, size and setting angle of the fin affect propulsive performance a great deal. A method to determine of the setting angle of fin is discussed in this paper. Fundamentally the setting angle is determined by doing model experiment in model basin. As the second method we propose to estimate the setting angle based on fluid pattern of stern. A concept of the datum line for evaluation of lift of fin is introduced. A method to determine the representative inflow angle to the fin by the datum line and to determine the optimum setting angle of fin is discussed.

1. 緒言

一基のプロペラに二枚の高揚力舵（シリング舵）を配する構成の“ベクツイン”舵は優れた操船性能を評価されている。このシステムの推進性能を改良するために、二舵の内側に水平フィンを設けて、プロペラ後流を利用して得たフィンの揚力の船首尾方向成分を前進推力として、推進性能を改善するシステムが採用されている。一軸一舵の推進性能改良については、乾等の舵による抵抗推進性能の改善¹⁾、プロペラ後流の利用による性能改良については、谷口などの反動舵への応用²⁾、石田の放射状のフィンによる回収³⁾などで基本的な研究がなされてきた。しかし、一軸一舵の場合は、プロペラの真後ろに舵が存在し、舵自体がプロペラ後流エネルギーをある程度回収しているため、さらにフィンなどの付加物の効果を上げるためには、模型試験やCFDによっ

て時間と労力を費やす必要がある。一方、一軸二舵の場合は、プロペラ直後に舵が無いいため、プロペラ後流はエネルギー回収されずに流れ去ってゆく。このため、二舵間の流場にフィンを置くことにより、後流エネルギーの回収効果がジャパンハムワージ船の実験等による経験では一軸一舵の場合より大きくなる。その際、フィンの平面形状・大きさ・取り付け角などの設計要素について効果的に設計することが重要である。設計要素の最適化は、回流水槽における舵模型実験、大型水槽での実験、実船の就航データ解析を基に数値計算法を加えて、個々の船の船尾形状に適したものとすると、本論文ではこのうち、フィンの取り付け角を決定する手法について述べる。

2. ベクツイン舵の概要

Fig. 1 は小型船舶に採用されているベクツイン舵の例である。二枚の舵の角度を組み合わせることによって、プロペラは前進回転のまま船体の定点保持・前後進・その場回頭を含めたいろいろなパターンでの操船が可能である。

* ジャパンハムワージ船

** 大阪大学大学院工学研究科

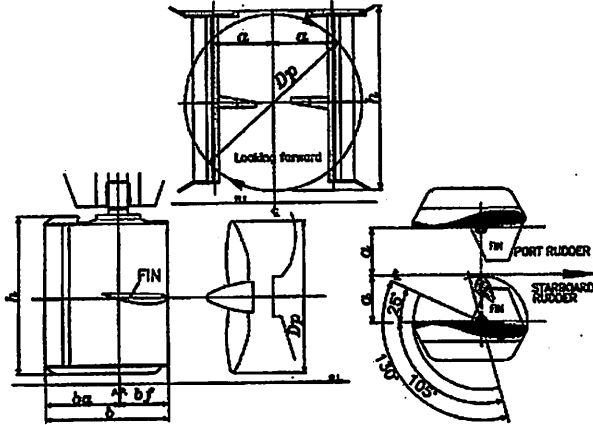


Fig.1 Arrangement of Vec Twin rudder.

舵の寸法は、Table 1 に示す標準(ジャパンハムワージ㈱の設計標準)で決められるが、後述のフィンの寸法は、上記の舵寸法の条件の中で決定される。

Table 1 Miscellaneous dimension of rudder.

Rudder height h	$(D_p + \text{about } 0.2)$ (m)
Rudder width b	$(0.75 \sim 0.83) * D_p$ (m)
Distance between A.P. and leading edge of rudder bf	$0.40 * b$ (m)
Distance between propeller center and center of rudder stock a	$(bf + 0.04 \sim 0.05)$ (m)

ベクツイン舵の推進性能を改良するために、二舵の内側に水平フィン进行を設け、プロペラ後流を受けてフィンの揚力を前進推力に利用し、推進性能を改善することが提案された⁴⁾。Lpp 97.00mの5,000m³タンカーのベクツイン舵付き同型船に対して、一隻はフィン付き、もう一隻はフィンなしの実船成績の比較を行った。Fig. 2 に両船の満載喫水での海

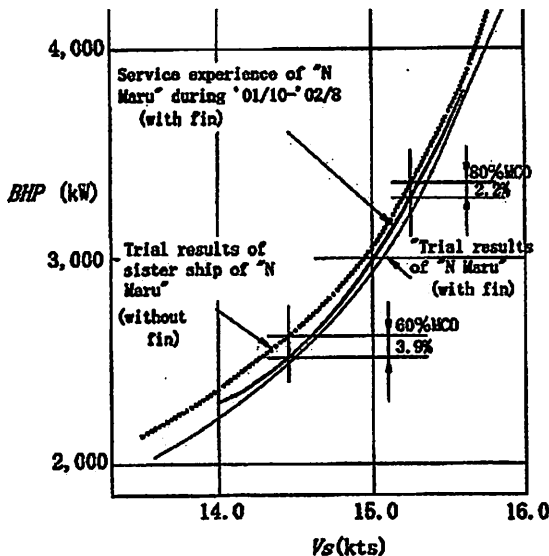


Fig. 2 Power curves for 5000m³ tanker.

上試運転成績を示す。いずれの試運転も、海上模様は平穏な中で実施された。海上試運転の比較では、フィン付き船の馬力が3.0~3.5%少ない。フィン付き船の就航後の10ヶ月の運航データを解析して満載状態の就航実績とし、フィンなし船の試運転実績と比較すると、フィンの効果は主機約80%出力時で2.2%、約60%出力時で3.9%の効果を確認された。

プロペラの回転によって生じるプロペラ後流は、プロペラの回転方向に旋回しながら後に流れ、左右のフィンに流入する。このとき、左右のフィンはプロペラの後方において、ほぼプロペラ軸線上に位置するので、一方のフィンに対する水流が後方に向かって上向き角度をもって入射し、他方のフィンに対する水流が後方に向かって下向き角度をもって入射し、船の前進方向に分力を持つ揚力を発生して船の推進効率上がる。プロペラの回転方向が、船尾方向より見て前進時に右回りする場合は、左舷側につくフィンは翼先端~後端ラインに対して上方にキャンバーを有するものとし、右舷側のフィンはその逆で、下方にキャンバーを有するものとする。Fig. 3 に左舷側フィンの場合のフィン取り付け角度、流入角とフィンによる推力の模式図を示す。フィン取り付け角 α 及び流入迎角 β の符号は図中に記載している。フィン翼は NACA4415 とし、翼弦長は、Fig. 4 に示す吊舵のように、フィン取り付け部のモーメントを小さくするように、翼根部の翼弦長を大きくし、翼端部の翼弦長を小さくした。

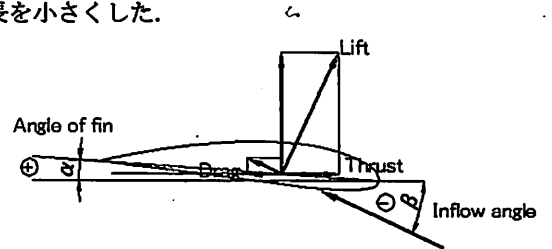


Fig.3 Fin force and its component.

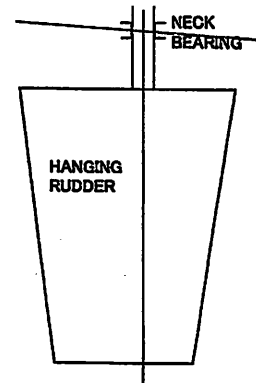


Fig.4 Hanging rudder.

フィンの平面形状を表すパラメーターを Fig.5 に示す。 C_{FT} は翼端部の翼弦長、 C_{FR} は翼根部の翼弦長、 S_F はフィンのスパン長さ、 θ はフィン前縁の後退角である。

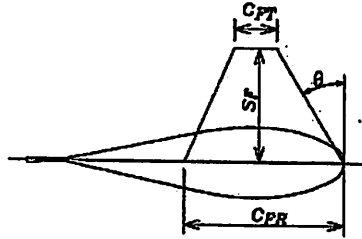


Fig.5 Parameter of fin shape.

Table 2 には本論文でとりあげる船の模型船の長さ、プロペラ直径、舵寸法およびフィンパラメーターの値を示している。

Table 2 Miscellaneous dimension of rudder.

Ship name	A	B
Ship type	Cargo	VLCC
L_{pp} (m)	7.80	7.08
D_p (m)	0.25	0.215
Rudder height h (m)	0.261	0.419
breadth b (m)	0.200	0.112
Fin s_F (m)	0.075	0.065
c_{FR} (m)	0.106	0.097
c_{FT} (m)	0.040	0.036
θ (deg.)	22	30

3. 最適フィン取り付け角

3.1 水槽試験による最適値設定

フィン取り付け角の最適値を設定するには水槽試験による方法が基本的である。水槽試験（実施場所 A 船：㈱ジャパノテクノメイト、B 船：㈱明石船型研究所）は次のような試験を行う。例として Table 2 の A 船の場合をとりあげる。左舷側のフィンの取り付け角度を 4 度とし、右舷側のフィンの取り付け角度を -8 度、-4 度、0 度、4 度として各々計画速度で自航試験を行う。後述する A 船の流線計測は母型となった一舵の場合の計画速度対応フルード数 0.22 で実施したが、自航試験の速度は二舵の場合の計画速度対応のフルード数 0.21 とし、実船での自航点に対応するプロペラ荷重で行った。模型船のプロペラ回転数は曳引車で模型船を曳航する力と、予め計算した実船と模型船との摩擦抵抗修正量（設定 SFC）との差が、設定 SFC の 10% 以内になるように制御した。フィン効果は、模型船の全推進効率 η の値で良否を判断するものとする。 Fig.6 において、左舷側のフィンの取り付け角度を 4 度に固定したとき、右舷側のフィンの

取り付け角度は 0 度が最適となる。次に右舷側のフィンの取り付け角度を 0 度にして左舷側のフィンの取り付け角度を 0 度、4 度、8 度、14 度に変えて自航試験を行い、左舷側のフィンの取り付け角度は 8 度が最適となる。フィン取り付け角度を左舷 8 度、右舷 0 度として、以降の抵抗試験・自航試験を実施することになる。自航試験結果より自航試験データを Fig.7 に示す。フィンをつけることにより主に $1-t$ 、 $1-w_m$ の向上で推進効率が向上することを示している。

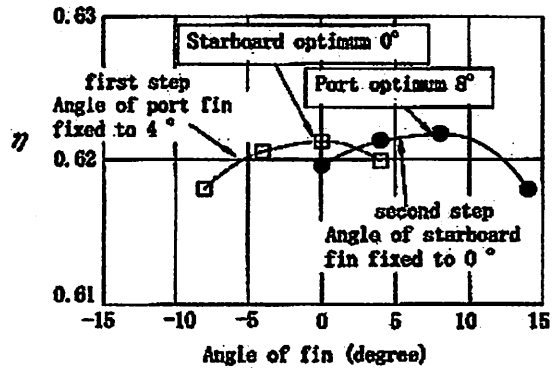


Fig.6 Optimum fin angle for Ship A.

計画速度付近のフルード数 0.21 での各自航要素の (with fin)/(without fin) の値を Table 3 に示す。フィンありの場合、フィンの揚力の前進方向成分による舵抗力の減少により t が下がり $1-t$ が増加し、フィンの排除効果により w_m が増加し、 $1-w_m$ が減少したと考えられる。なお $1-w_m$ の減少に応じた分だけプロペラ単独効率 η_o は下がっている。

Fig.6 の効率 η と Fig.7 の効率 η の関係であるが、Fig.6 に示す試験のときは、フィン取り付け角度変更機構を舵模型に付けて実験しており、その分舵抵抗が増えているが、Fig.7 の場合は、当該部をフェアにしているため、その分舵抵抗が Fig.6 の実験に比べて減ってきており、 η の値は異なっている。

Table 3 Ratio of self propulsion factor with fin and without fin ($F_n = 0.21$).

	Ratio of self propulsion factors with fin and without fin
η_R	1.002
η_o	0.994
$1-t$	1.023
$1-w_m$	1.016
η	1.035

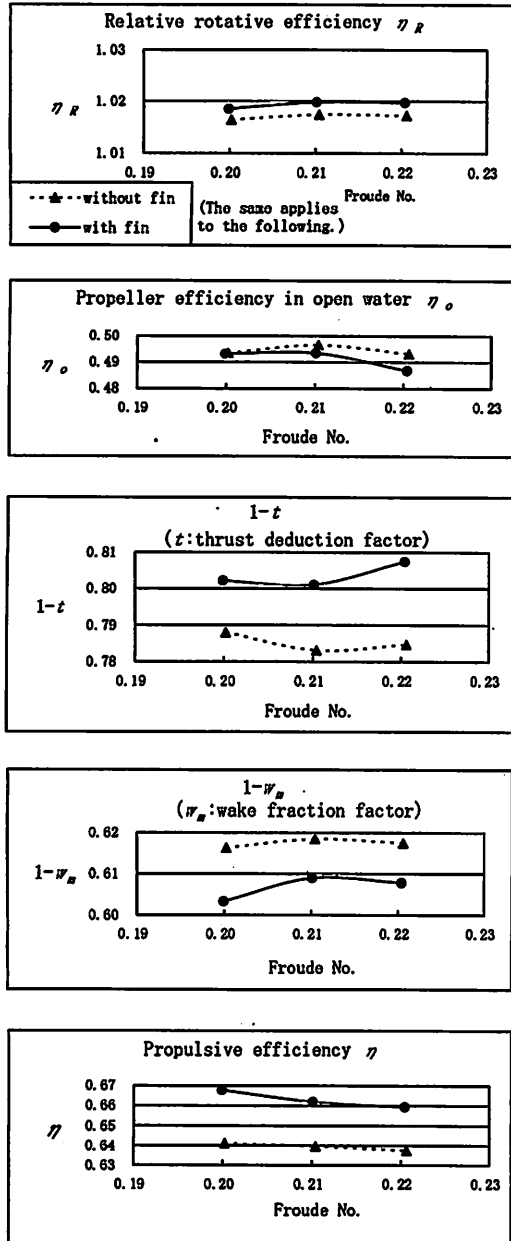


Fig.7 Self propulsion test results for Ship A.

3.2 流場特性とフィン取り付け角最適値の関係

フィンを設ける流場の特性を把握して、フィン取り付け角最適値との相関を調べるため次のような手法を用いた。まず流線計測を実施（実施場所 A 船：㈱ジャパンテクノメイト, B 船：㈱明石船型研究所）して、フィンへの流入角を求める。Fig.8はA船の流線計測点を示す。船長方向位置は舵先端位置、速力はフルード数 0.22, 模型プロペラ回転数は 12.0rps で実施した。計測点フルード数は、母型となった一舵の場合の計画速力対応フルード数で、前述の自航試験は二舵の場合の計画速力対応フルード数 0.21 と若干異なるが、流線計測フルード数が 0.21 となっても、流場の特性は波動影響も無いと考えられるので、同一とみなした。

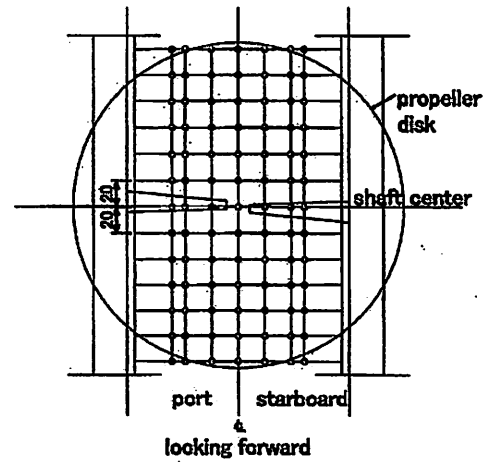


Fig.8 Measuring points of inflow angle for Ship A.

二舵内に設けるフィンの角度の基礎データとするため実験はフィンなしで行った。5孔ピット管により圧力、流向を計測し、解析はKh-Kv法⁵⁾によった。

Fig.9に流れの模式図⁶⁾を示すが、流れVのx-z面への投影V_vとx軸とのなす角度β_vがフィンへの流入角βである。

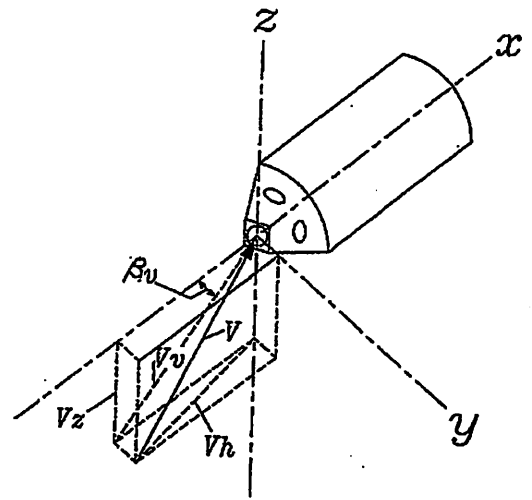


Fig.9 Flow measurement by Pitot tube.

プロペラ軸心面を挟んだ3点 (z=20, 0, -20(mm))での流入角βをFig.10のように示す。横軸は軸心からの距離yを表す。この分布図は両船とも同様な傾向を示し、z=0の場合、軸心からの距離yが約20(mm)近辺で流入角の極値がある。フィンへの流入角はプロペラ軸心からの距離に応じて変化しているので、効率のよいフィンを設計するには、本来はこの変化に従ったものとするべきであるが、その場合、Fig.11に示すように翼のひねりが入ってくるので構造的に複雑となる⁷⁾。このため、フィンはスパン方向にひねりの無い形状とした。

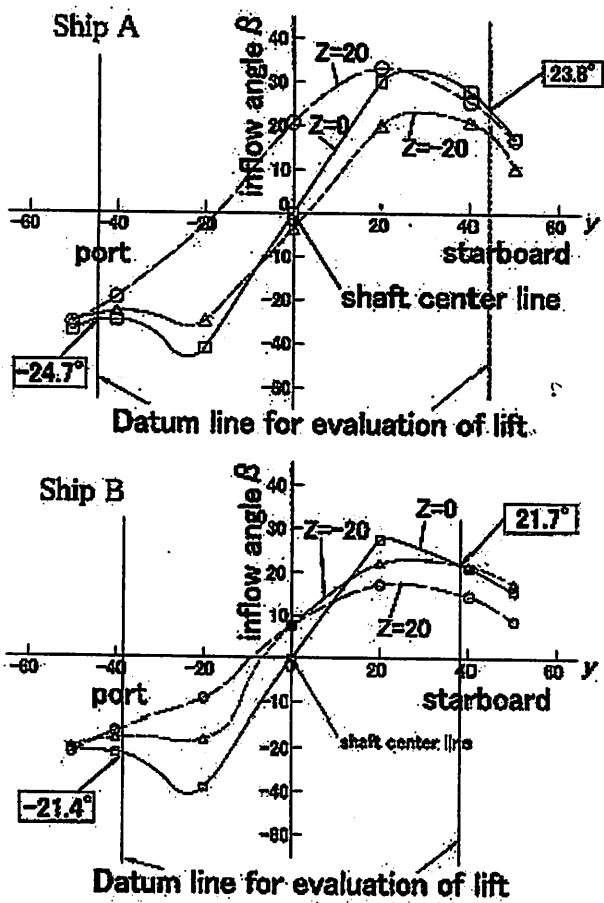


Fig.10 Athwartships distribution of inflow angle.

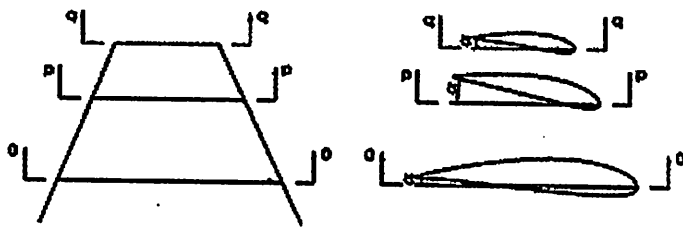


Fig.11 Fin with non-uniform attack angle.

フィンの取り付け位置、角度を決定する基準として、代表となる或るyでの流入角をもって代表流入角とした。この代表点yをフィンの揚力評価基準線と呼び、次のようにして設定した。フィンの揚力は、フィンのスパン方向にわたって変化しているが、矩形フィンの場合の形状を文献⁹⁾に従って、Fig.12のように楕円分布をしていると想定するとこの分布は(1)式で表される。

$$(x/S_F)^2 + (y/C_{L0})^2 = 1 \quad (1)$$

ただし、 C_{L0} は翼根部 ($x=0$) での揚力係数値である。さらにフィンの翼弦長に対応して翼根から翼端にわたって分布を(2)式で修正する。

$$k_x = 1.0 - (1.0 - C_{FT}/C_{FR}) \times (x/S_F) \quad (2)$$

ここで k_x は修正係数、 C_{FT} 、 C_{FR} は Fig.5 のとおり、それぞれフィンの翼端部、翼根部の翼弦長である。

C_{Lm} を修正揚力値とすれば(3)式で表わされる。

$$C_{Lm} = C_{L0} \{1 - (x/S_F)^2\}^{0.5} \times \{1.0 - (1.0 - C_{FT}/C_{FR}) \times (x/S_F)\} \quad (3)$$

フィンの揚力値(ただしフィン長さ S_F に対して)を Λ とすれば、 $x=0 \sim S_F$ で積分して

$$\Lambda = C_{L0} \times S_F \times \{\pi/4 - (1 - C_{FT}/C_{FR})/3\} \quad (4)$$

フィン長さ S_F にわたっての Λ の平均値を Λ/S_F で表すと

$$\Lambda/S_F = C_{L0} \times \{\pi/4 - (1 - C_{FT}/C_{FR})/3\} \quad (5)$$

(3)式で表される修正揚力値が、(5)式で表される値に等しくなる横軸 x/S_F の値を揚力評価基準線とした。この揚力評価基準線は翼根部での揚力係数値 C_{L0} に無関係で、 C_{FT}/C_{FR} の値で決まってくる。

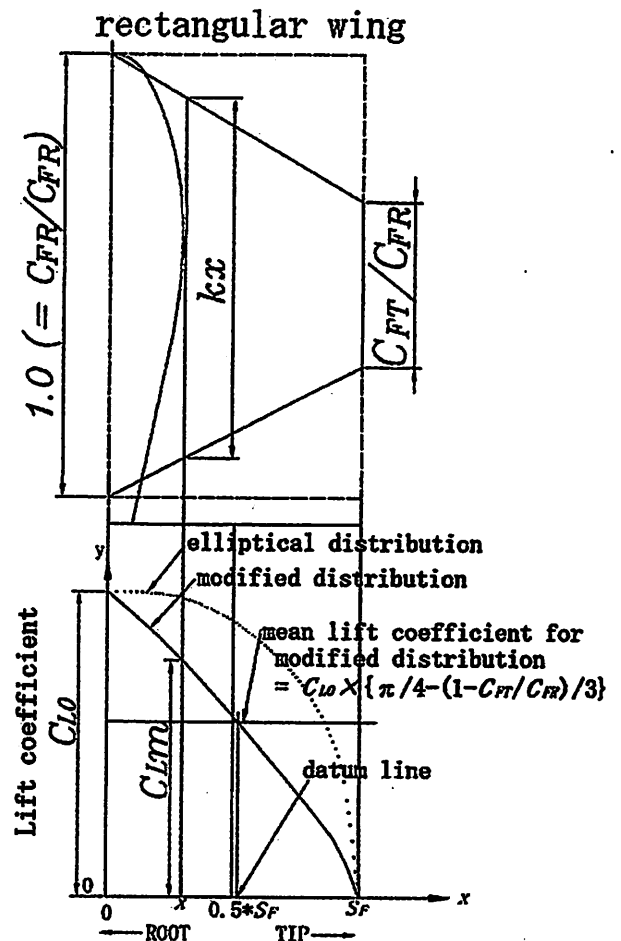


Fig.12 Datum line for evaluation of lift.

先の Fig.10 において揚力評価基準線に対応した角度を読み、 $z=0$ での値を Table 4 に示す。

Table 4 Inflow angle.

	Ship name	A	B
Inflow angle	Port (deg.)	-24.7	-21.4
	Starboard (deg.)	23.8	21.7
Optimum fin angle	Port (deg.)	8.0	8.0
	Starboard (deg.)	0	-4.0

Table 4 には、水槽試験で得たフィン取り付け角の最適値も記載している。Fig.13 に流入角とフィン取り付け角最適値を示した。Fig.13 には A 船、B 船の取り付け角最適値に加えて、最適点での推進効率値の+0.5%及び-0.5%に対応する取り付け角をプロットしてあるが、この推進効率 -0.5%~+0.5%を誤差許容範囲として、これに対応した取り付け角の許容範囲にあるように流入角と取り付け角最適値との相関関係を図中の直線（最適値および±0.5%の12点を対象とした最小二乗法により決定）で示した。非常に大雑把ではあるが、このようにある程度流場の傾向が推定できれば、Fig.13 の関係からフィン取り付け角の最適値を求めることができる。今後データの数を増やすなどして、プロペラ後流流場とフィンの作動迎角との関係などの検討を重ね、最適取り付け角の精度を向上していきたい。

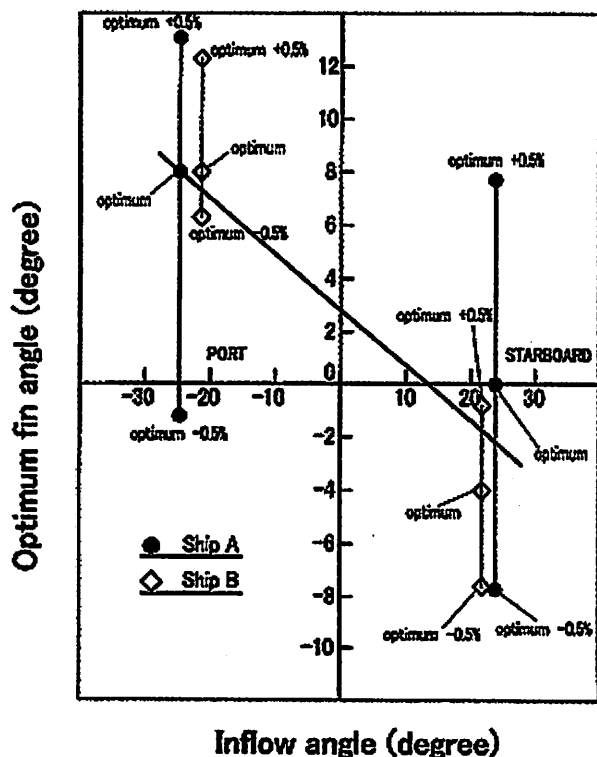


Fig.13 Relation between inflow angle and optimum fin angle..

4. 結論

一軸二舵船の二舵の内側に水平フィンを設置し、プロペラ後流を利用して推進性能を改善するシステムにおいて、フィンの形状が決定された後、最適の取り付け角を決定する方法について検討して次の結論を得た。

- 1) フィンの取り付け角が推進効率に影響することを水槽実験により確認した。
- 2) フィンの取り付け角を評価するために揚力評価基準線概念を提示した。
- 3) この概念を2隻の模型船に適用し、フィンの取り付け角を決定するための設計図表を作成した。

今後、実験データの数を増やすなどして、プロペラ後流流場とフィンの作動迎角との関係などの検討を重ね、最適取り付け角の精度を向上していきたい。

参考文献

- 1) 乾崇夫, 宮田秀明: 舵の総合性能の最適化に関する研究(第2報), 日本造船学会論文集, 第145号, 1979年。
- 2) 谷口中, 渡辺恭二: 自航模型船の後流計測並びにそのReaction Rudderへの応用, 造船協会論文集, 第88号, 1950年。
- 3) 石田駿一: プロペラ後流船の回転エネルギーとフィンによる回収について, 日本造船学会論文集, 第159号, 1986年。
- 4) ピーター・ビンガム, 富田幸雄: 公開実用新案, 実願平6-61965, 1994年1月25日。
- 5) P. C. Pien: Five-Hole Spherical Pitot Tube, D.T.M.B. Report No. 1229, 1958。
- 6) University of Cambridge, Department of engineering, Whittle laboratory: Pressure probes, current research, Dec. 2005。
- 7) 岡本幸彦: 実用新案公報, 実公平6-35918, 1994年9月21日。
- 8) S. F. Hoerner, H. V. Borst: Fluid-dynamic lift, 1975, pp. 3-2, 15-5。