

船の操縦性に関する実験的研究— I.

高 島 末 夫

Some Experimental Studies on Ship Manoeuvrability — I.

By
Sueo TAKASHIMA

Manoeuvrability has become one of the most important considerations not only in large ship designs but in the efficient steer for every ship type.

From the point of view, the author has experimented some problems on ship manoeuvrability. The standard turning tests at various rudder angles were carried out for a 1215 GT training ship. On the other hand, her model tests were performed by making use of the free-running, self-propelled, 2.5m in length model ship and the model experiments were carried out at the Kyushu University Tank.

The present paper relates to the following contents, i.e. an error of turning locus obtained by standard turning tests of an actual ship, ship correlation between an actual ship and her model ship in respect to manoeuvrability, shallow water effects upon turning ability, and the forces acting upon the rudder of model ship under turning.

And in addition to these experiments, the author has tried some calculations for the standard turning locus of a ship. The results obtained are summarised as follows:

(1) The error of measurements or calculations effects upon the turning locus. Even if in the case of turning test of an actual ship under calm sea conditions, which may be able to disregard effects of external forces, i.e. winds, waves, there are some cases including an error of turning locus about $\pm 10\%$ in D_A/L , D_T/L , etc.

(2) Ship correlation in respect to reduction of propeller revolutions is nearly excellent, but ship correlation with regard to speed reduction during turning motion is slightly different in turning directions.

The correlation in respect to turning ability indices, D_A/L , D_{Tr}/L , D_T/L and the relation between L/R and δ , decrease with increasing the intensity of the turning motion. And under that motion, the turning ability of model ship tends to appear to be less ability, compared with actual ship.

(3) Even a ship with $C_b=0.560$ grade, the shallow water effect upon turning ability

* 水産大学校研究業績 第645号, 1971年10月18日 受理.
Contribution from the Shimonoseki University of Fisheries, No. 645.
Received Oct. 18, 1971.

increases slightly in accordance with decrease of water depth, while the depth is deeper than about $2.5d$, but increases rapidly when the depth decreases less than $2.5d$, and that rudder angles larger than 30 degrees.

Under shallow water depth, the ship's turning ability, drift angles and speed reduction rate decrease respectively, compared with fully water depth as the same rudder angles.

For example, the final turning radius of ship for 40 degrees rudder angles, at water depth of $1.7d$, becomes 1.74 times for the same rudder angles at the fully water depth.

(4) In the case of this model ship, by application of FUJII's approximate formula, the normal force coefficient C_N of the rudder at the time of termination of steering, is able to calculate accurately with the exception of the rudder angles more than 20 degrees under port side turning.

And experimental values of C_N for these rudder angles of the latter, are 10–20% larger than calculated values.

The center of pressure on the rudder at the time of end of steering and during the steady turning, are shown in Fig. 25. The center of pressure moves forward according as the turning motion grows to steady, but there are some cases where the center of pressure moves backward at extremely shallow water depth.

(5) The value of the coefficient γ for this ship's type, which is known as effect flow smoothing, scattered from 0.607 to 0.688 in extent.

The standard turning locus, calculated by the application of INOUE's theory, FUJII and TSUDA's formula, etc. and using the results of this model experiments, shows smaller values about 10–13% in D_A/L , D_T/L , etc., compared with observed values of the actual ship turning tests.

1. 緒 言

巨大船の建造に伴って、船の操縦性に関する研究は理論、実験両面にわたって近年極めて盛んである。したがって船の操縦性に関する性質も、次第に明らかになり、船の建造、操船上に寄与している。

操縦性の解析で、最も効果的な知識を与えるものは実船の資料である。ところが実船の旋回性試験による計測結果には、試験状態によってかなり誤差が含まれる場合がある。一方操縦性に関する模型試験では、実船・模型船の相関性の検討もまだ完全とは言えない。したがって、船の操縦性に関する問題点もまだ多くみられ、特に種々の船型についてこれらを解明し、船の建造および操船上の資料とする必要がある。

このような目的のため、ここでは1215 G.T 型の船を中心に、操縦性について若干考察を行なった。すなわち実船の旋回性試験における誤差、実船および模型船の操縦性に関する相関性、操縦性に対する浅水影響、船の旋回運動と舵に作用する力などについて検討し、またこの試験結果から得た資料をもとに旋回運動の数値計算も試みたので、これらの結果を報告する。

2. 実船旋回試験で得た航跡の誤差

実船の旋回試験の結果が操縦性に関する最も有力な資料を与える。しかし実船試験では、風潮流の影響を大きく受ける場合があり、それを正確に除去することが出来ない。また仮に風潮流の影響がほとんど無視出

来る場合でも、計測上の誤差が加わるので、試験結果の航跡にはある程度の誤差が含まれている。その一例として、縦距/船長 D_A/L ・旋回径/船長 D_T/L の値が同型船でも平均値の54~25%，すなわち平均値±(平均値×0.27~0.12)程度に分散している例が報告されている¹⁾。

実船の旋回試験は、(1)電波計器を用いるもの、(2)浮標方位盤を用いるもの、(3)速力 $V(t)$ と船首方位 $\theta(t)$ を計測し計算によるものなど、種々の方法によって航跡が求められているが、現在では(2)、(3)によるものが多い。風潮流の影響が無視出来るものとして、(2)、(3)の方法で得た航跡の誤差について考察してみる。

2・1 浮標、方位盤を用いる場合

この方法は、1個の浮標を海中に投げ、この浮標が旋回を中心になるように船を旋回する。旋回中、船の前部および後部に置かれた2個の方位盤で、浮標と船首方位の相対角を計測し、作図で旋回航跡を知るものである。

いま第1図で、海面の浮標の位置を G とし、船上の2つの方位盤 J 、 E を用い、船首方位と浮標との相対角 θ_1 、 θ_2 を得たものとし、この θ_1 、 θ_2 にそれぞれ± $\Delta\theta$ の方位測定誤差が含まれているとする。航跡作図上 G は固定されているので、船は \overline{JE} の方位を保持しながら前後左右に移動し、正しい位置 \overline{JE} の周辺にある大きさの誤差範囲を生じる。すなわち、逆に船 \overline{JE} を固定すると、浮標の位置は図の誤差四角形 $G'G''G'''G''''$ の中で移動することになる。その最大誤差 $\overline{GG'}$ は $\Delta\theta$ が極めて小さいものとするれば、 $\overline{GB} \approx \overline{AG'}$ とすることにより

$$\begin{aligned} \overline{GG'} &= \frac{\sin \Delta\theta}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 2d_1d_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)} \\ &= \frac{\sin \Delta\theta}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \overline{FE} \end{aligned}$$

ここで $\overline{FE} \parallel \overline{GH}$ とすると

$$\overline{GG'} = \frac{2 \sin \Delta\theta}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \overline{GH}$$

となる。また面積 $GAG'B$ は

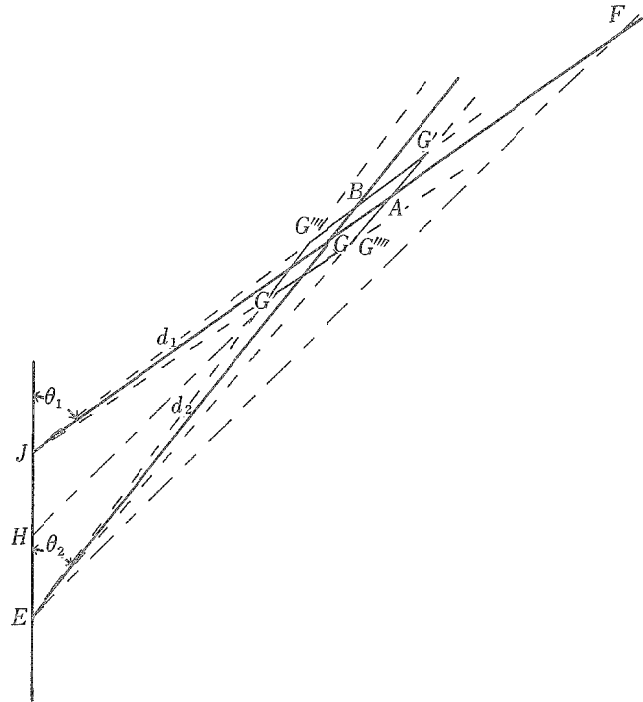


Fig. 1. Illustrative diagram showing bouy(G), dump cards (J, E) and observed relative bearing (θ_1, θ_2).

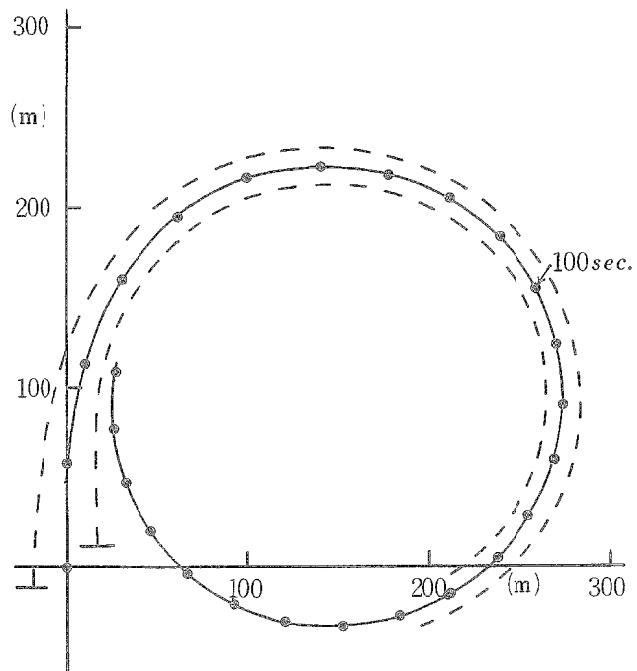


Fig. 2. An example of the effect of $\Delta\theta$ upon turning locus.

$\Delta\theta$ is error of observed bearing, and Fig. 2 shows the area of 50% of the maximum position error at the center of gravity of the ship ($L=65m$, $\overline{JE}=30m$) including $\Delta\theta=1^\circ$.

$$\begin{aligned}
 GAG'B &= \overline{GA} \times \overline{GB} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
 &= \frac{d_2 \sin \Delta \theta}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \times \frac{d_1 \sin \Delta \theta}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\
 &= \frac{d_1 d_2 (\sin \Delta \theta)^2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}
 \end{aligned}$$

ゆえに位置の精度は誤差面積に逆比例するから

$$\text{精度} \propto \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{d_1 d_2} \cdot \frac{1}{(\Delta \theta)^2}$$

となる。すなわち $(\theta_1 - \theta_2) < 90^\circ$ の場合の最大誤差は、近似的に $\overline{HG} \parallel \overline{GG'}$ とすると、浮標と両方位盤の中点を結ぶ線上を、 $\overline{GG'}$ だけ浮標から遠くんだり近づいたりする。また浮標と中点を結ぶ線に直角方向には、ほぼ $d_2 \sin \Delta \theta$ ($d_2 > d_1$) の誤差がある。したがってこの方法による航跡決定では、旋回初期すなわち浮標と方位盤の距離 d_1, d_2 が大きく、2つの方位盤と浮標との交角 $\theta_1 - \theta_2$ が小さいほど誤差は大きくなる。

この種の誤差が旋回航跡に与える影響の一例を第2図に示す。第2図は 1215 G.T, $L = 65m$ の船で、転心付近とそこから 30m 後方に方位盤を置き、測定方位角に $\pm 1^\circ$ の誤差があった場合の最大誤差の50%の範囲を示したものである。これによると、 $D_A/L = +10 \sim -11.5\%$ 、横距/船長 $D_{Tr}/L = +12 \sim -10\%$ 、 $D_T/L = +10 \sim -9.5\%$ の誤差となる。したがって、この方法で航跡を求める場合には、浮標が遠方であったり、船の動揺がある場合には D_A/L などに約 10% 以上の誤差が含まれていると考えて良い。

2・2 $V(t), \theta(t)$ 計測から計算で求める場合

この方法は、任意の時刻に対する船の速力 $V(t)$ 、および船首方位 $\theta(t)$ が正確に計測され、転心の位置が正しく推定出来ると、簡単に航跡を求めることが可能である。 $\theta(t)$ はマグネチックコンパスあるいはジャイロコンパスで計測し、旋回角速度が大きくな

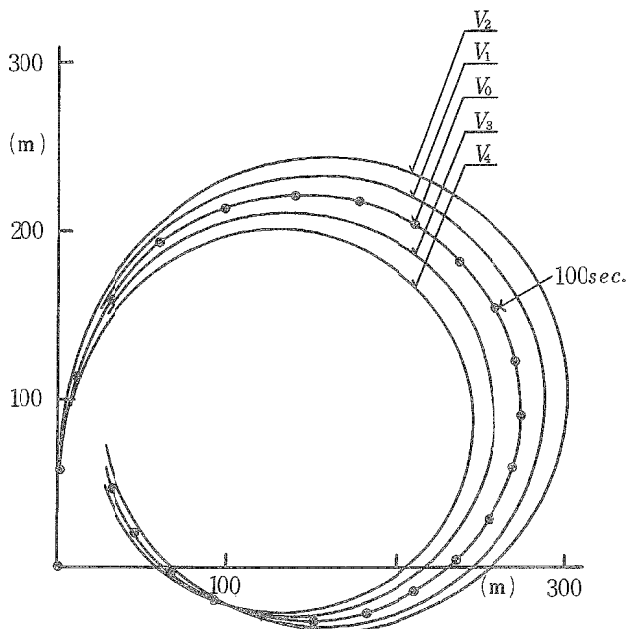


Fig. 3. An example of the effect of a constant error of ship speed upon turning locus.

Notes $V(t)$: Observed ship speed
 $V_0 = V(t)$
 $V_1 = V(t) (1+0.05)$ $V_2 = V(t) (1+0.10)$
 $V_3 = V(t) (1-0.05)$ $V_4 = V(t) (1-0.10)$

らない限り、その読み取りも正確である。 $V(t)$ は、(1)流木試験、(2)プロペラ式電流速速計、(3)船底サルログまたは電磁ログなどによって計測されるが、いずれの計測方法によっても、いろいろな型の誤差が含まれている。流木試験では、船の偏角が大きくなるほど、風波など外力の影響を受けて計測された速力の誤差が大きくなる。プロペラ式電流速速計では、船体運動の影響を受けて速力誤差を生じ、また船底サルログでは船の旋回運動による影響を受けるが、その影響の程度は明らかでない^{2), 3)}。また船底サルログは船舶の通常航海速力において誤差が最小になるように調整されている。したがってその速力範囲から離れると、すなわち直進運動から旋回運動にはいり速力低下が起るような場合には、指示速力の誤差は大きくなる傾向がある。船の旋回航跡が速力の積分されたものであるから、これらの速力誤差は当然航跡誤差として大きく影響する。

船が直進運動から旋回運動にはいる場合、

運動の変化に伴う速力誤差の型にはいろいろ考えられる。いま正確な速力を $V(t)$ とすると、

(1) 直進中、旋回中ともに $V(t)(1 \pm c_1)$ である場合

(2) 直進中には誤差がないが、旋回にはいると誤差が現われ、定常旋回では一定の誤差を含む。すなわち $V(t)(1 \pm c_2(t))$ である場合の二通りが考えられる。ただし c_1, c_2 は誤差係数とし、定常旋回になると c_2 は一定値をとる型とする。

このような速力誤差が航跡に与える影響として、一例を示せば第3～5図のようになる。これらの図は、前述の船についてサルログを使用して得た速力実測値 $V(t)$ を基準として、定常旋回中の $c_1 = c_2 = \pm 0.05, \pm 0.10$ として航跡計算をしたものである。

これらの図から次のようなことが云える。すなわち速力に一樣な誤差のある場合、定常旋回半径は速力に比例し、 $D_A/L, D_{T_r}/L$ などは速力誤差と同じ割合で増減する。これに対して、定常旋回中のみに計算例くらいの速力誤差がある場合は、 $D_A/L, D_{T_r}/L$ などは $\pm 1 \sim 1.5$ の増減であるが、 D_T/L は $+3.5 \sim -5.7\%$ くらいの誤差が現われる。船底サルログなど通常の速力計測器具では、後者のような誤差型態が多いので注意が必要である。また、計測された船首方位に含まれる誤差は一般に小さく、それが航跡に与える影響は第5図に示すように小さい。

3. 操縦性に関する実船、模型船の相関性

船の操縦性を明らかにするための実船試験の結果は、有力な資料を得ることが出来るが、多くの不定誤差を含む場合がある。また試験には相当長時間を要するので、この種の詳細な試験を、すべての実船について実施することは困難である。模型船による操縦性の試験

は、これらの問題点を幾らか解決して、操縦性の解析研究に便利である。しかしこの場合、操縦性に関する実船、模型船の相関性について検討しておく必要がある。ここでは、この相関性を検討するため、実船と

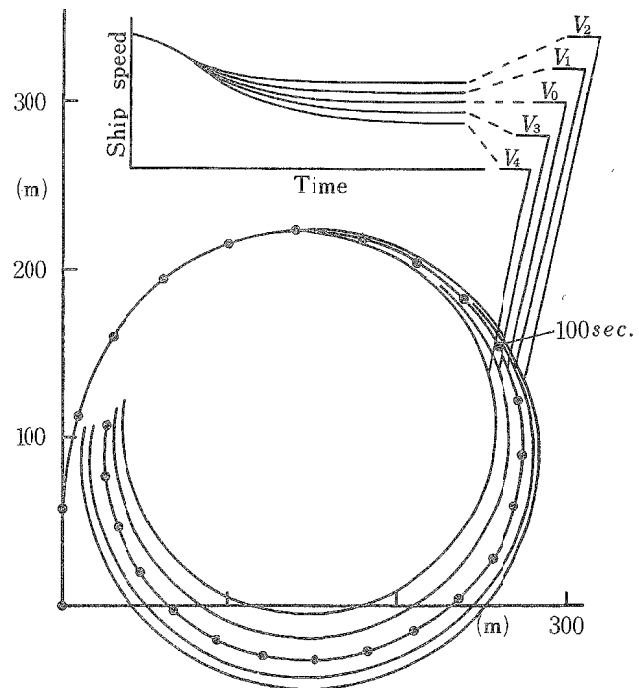


Fig. 4. Types of variable error of ship speed during turning motion, and effect of the types upon turning locus. Symbols are the same in Fig. 3, while the motion is steady turning.

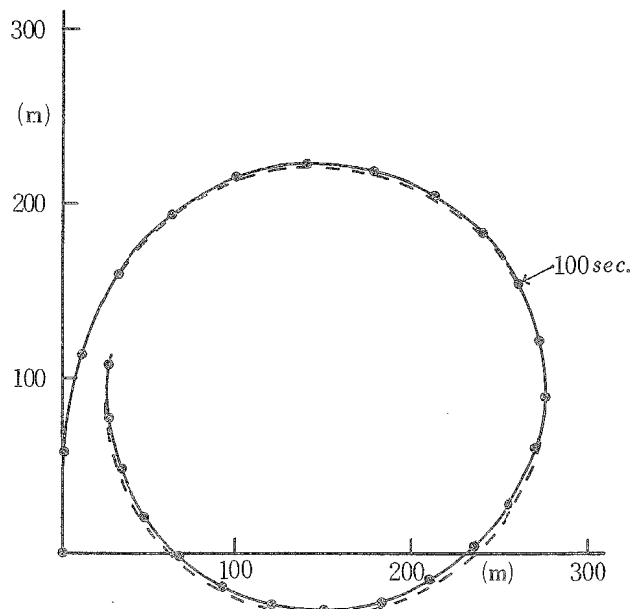


Fig. 5. Effect a constant error of observed ship's heading angle upon turning locus. Notes —: Observed ship's heading angle $\theta(t)$ ---: $\theta(t)+1^\circ$

模型船による旋回試験を行ない，その結果を比較した。試験に使用した供試船の要目を第1表に示す。

実船試験は1215G.T型練習船を使用し，水深十分で海潮流の弱い海域で試験し，当時の海況，風力ともに

Table 1. Principal particulars.

Kind of ship	Training ship		
	Actual ship	Model ship	
L×B×D (m)	64.9×11.20×5.60	2.50×0.431×0.216	
Load condition	d_f (m)	3.00	} Correspond to actual ship
	d_a (m)	4.80	
	Δ (ton)	1618.0	
	C_b	0.560	
Engine type	Diesel	Motor	
Engine power	1800 BHP	D.C. 6 V—150W	
R.P.M.	172		
Speed (kt)	11.4		
Rudder type	Balanced rudder		
Rudder area ratio	1/34.5		} Correspond to actual ship
Aspect ratio	1.32		
Balanced ratio	0.262		
Thickness ratio	0.388		
Propeller dia. (m)	2.850		
Pitch ratio	0.7193		
No. of blades	4		

Table 2. Ship correlation in respect to D_A/L , D_{T_r}/L and D_T/L .

	Actual ship		Model ship		Model with stimulator	
	Star.	Port	Star.	Port	Star.	Port
D_A/L	3.43	3.16	3.57	3.47	4.06	3.56
D_{T_r}/L	2.18	1.85	2.22	2.02	2.60	2.03
D_T/L	4.42	4.26	5.05	4.50	5.70	4.60

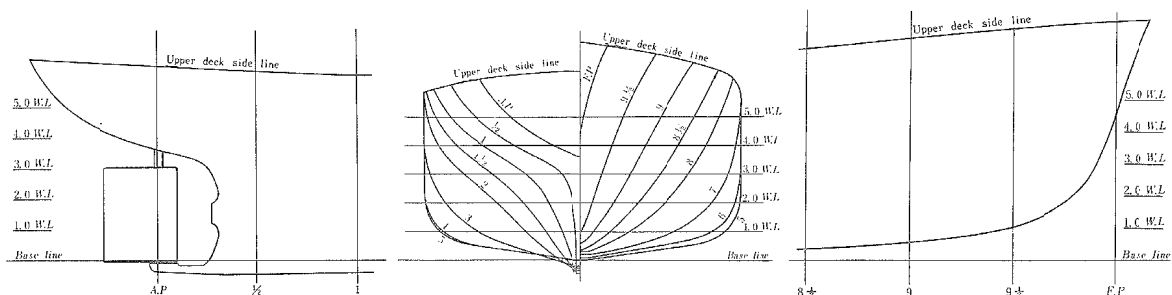


Fig. 6. Body plan and contours of stem and stern of the model ship.

ビューフォート階級で1であった。試験は各舵角に対する定常旋回試験とスパイラル試験、 \approx 試験を行なった。速力 V はサルログ指示から、船首方位 θ はジャイロコンパスから、それぞれ5秒ごとに読み取った。つぎにそれぞれのフニアー曲線から各時刻 t に対する V, θ を決定し、計算により重心軌跡を求めた。

模型船は長さ2.50mの木製自航模型を製作し、九州大学造船学教室の船舶運動性能試験水槽にて、無線操縦方式により試験した。模型船の線図を第6図に示す。模型船の航跡は、水槽中央上部(約14m)に設置したカメラで2秒ごとに撮影した。また舵に作用する力は模型船の舵軸に、直圧力用とトルク用のストレインゲージをはり付け、ストレインメーターの出力をローパスフィルターを通してオシロに記録した。

試験中、水槽の水深は1.73mであった。模型船にはビルジキールを付けていないが、 $0.95L$ の水線下に乱流促進のため直径1mmのトリップワイヤーを付けた場合と、付けない場合について旋回試験をした。

直進運動から旋回運動になった場合のプロペラ回転数と速力変化の一例を第7図に示す。

プロペラ回転数は、直進運動から定常旋回になると、実船が8~9%減少するのに対し、模型船は4~7%の減少である。また、わずかではあるが、右旋回に比べて左旋回の場合が減少率は大きい。実船と模型船とのプロペラ回転数減少の差は小さいが、これは模型船で使用した推進モーターと実船主機の特性によるものと思われる。

次に直進運動から定常旋回にはいった場合の速力減少は、実船、模型船ともに左旋回の場合が大きく、ま

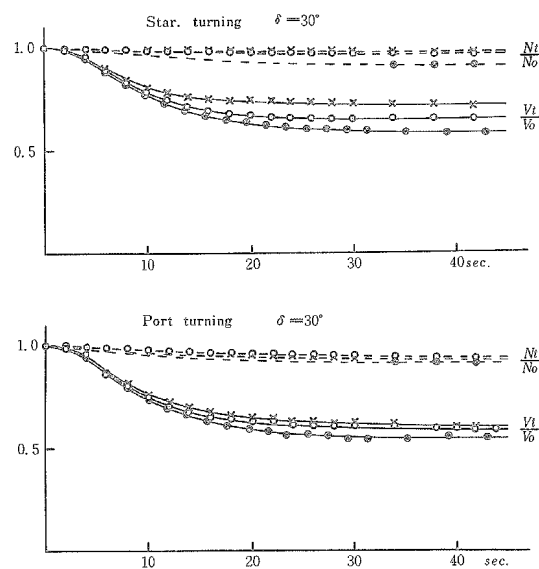


Fig. 7. Ship correlation in relation to ship speeds and revolutions of propeller reduction rate under turning with rudder angle $\delta=30^\circ$.

Notes V, N : Ship speed and revolution of propeller
 Suffix, o, t : The values at advancing straight course and at each instant of turning
 ●: Actual ship
 ×, ○: Model ship with stimulator and without

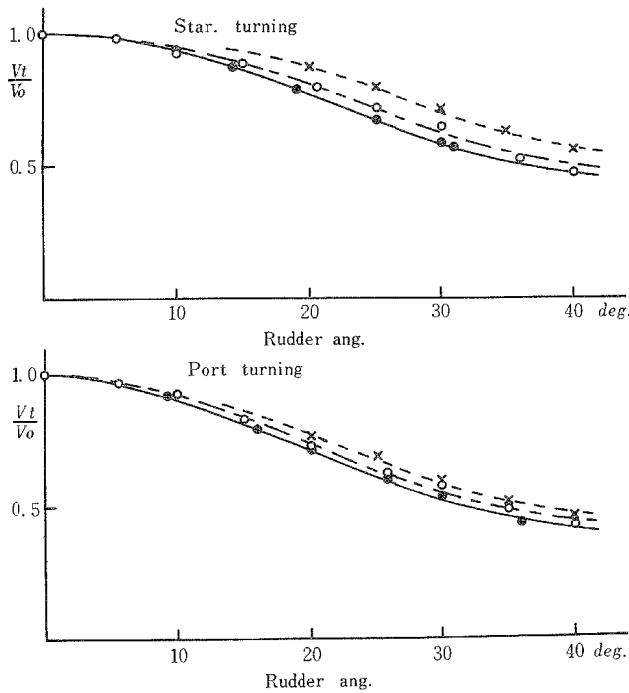


Fig. 8. Ship correlation in relation to speed reduction rate during steady turning. Symbols are shown in Fig. 7.

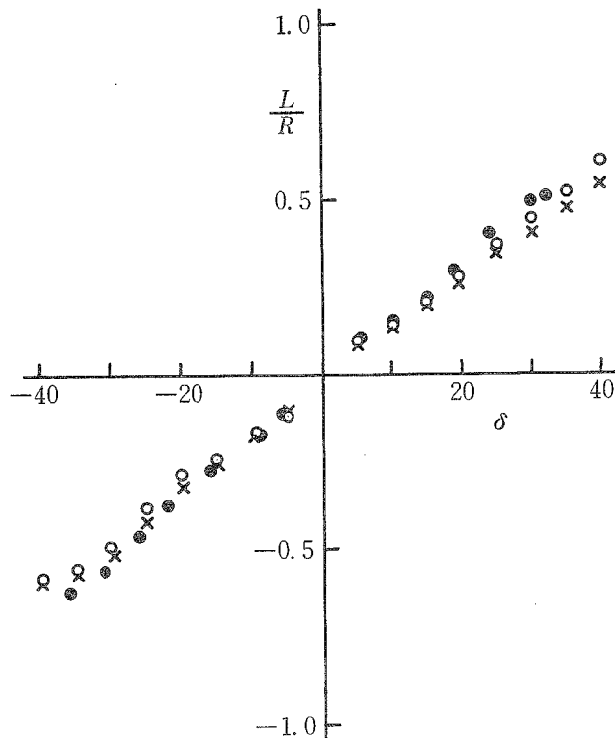


Fig. 9. Ship correlation in respect to steady turning characteristics.

Notes L: Ship length p.p. (m)
 R: Steady turning radius (m)
 δ : Rudder angle (deg.)
 And other symbols are shown in Fig. 7.

た右旋回の場合が実船、模型船の差が大きい。この差の原因は、試験水槽の広さから助走距離に制約を受け、操舵直前の速力が正確に対応速度に達していなかったものを二、三含んでいるためと思われる。また旋回方向に関係なく、乱流促進装置を付けると速力減少が小さくなった。

定常旋回中の速力減少と、舵角の関係を第8図に示す。これらの図から、舵角の大きさに関係なく、右旋回より左旋回の場合が速力減少は大きく、実船模型船の差は左旋回が小さい。また模型船に乱流促進装置を付けると、舵角の大きさに関係なく、実船に比較して速力減少が小さくなった。

実船、模型船の D_A/L , D_{Tr}/L , D_T/L などの相関性の一例を第2表に示す。この表は、いずれも舵角 30° の場合である。この表から明らかのように、模型船の D_A/L などは実船の値より大きく現われる傾向がある。

定常旋回性能だけでなく、船の操縦性能全般を端的に表わすために、無次元化した旋回角速度 L/R と舵角 δ との関係を第9図に示す。ここで R は定常旋回半径である。全体の傾向は、模型船の旋回半径が、実船のそれに比べて、少し大きい値を示している。模型船試験は、水面広さの制限から小舵角旋回の場合、定常旋回半径を不完全旋回航跡から推定した。したがってその推定に基づく誤差、および前述の実船試験に含まれる誤差などを考慮すると、舵角が左右 20° くらいまでの小舵角では実船模型船の対応は良いと思われる。舵角が大きくなり旋回運動が激しくなると、実船模型船の対応は悪くなり、実船に比較して模型船の旋回力は小さく現われる。

舵角の小さいところでは、舵の直圧力に与える模型船の伴流影響とプロペラ後流影響が打ち消し合うと思われる。さらに旋回中の速力減少も小さく舵のレイノルズ数も小さくならないので、実船模型船の力の相似がほぼ成立していると考えられる。しかし舵角が大きくなると旋回運動は激しくなり、プロペラ後流影響より伴流影響が大きくなり舵に作用し、また直進中の舵のレイノルズ数に比べて旋回中

はより小さくなる。これらの影響で模型船の舵直圧力が実船のそれより小さく、その結果として旋回半径は大きくなるので、実船模型船の対応が悪くなるものと思われる。

操縦性に関する実船、模型船の相関例は少ない。今回の試験結果を他の成果と比較すると、マリナー型模型船について試験した湯室の結果⁴⁾とは反対の傾向を示し、大型タンカーについて試験した川野らの結果³⁾とは、全体の傾向は一致しているが、舵角変化に伴う対応程度の傾向は逆である。

次に $L/R \sim \delta$ 曲線に与える乱流促進装置の効果は、左旋回では十分認められ、明らかに実船結果に近づくが、右旋回では反対の効果が出た。この原因は今後さらに詳細に検討したい。

4. 旋回性能に関する浅水影響

建造される船舶の巨大化に伴い、今まで重要視されなかった港内、海峡など、水深の浅い海域での船の操縦性が問題になっている。船の操縦性に与える浅水影響は、古くから指摘されているが、最近になって大型タンカーを中心に、いろいろ実験的理論的に解明され始めている。あらゆる水域で安全に操船し、また操船出来る船と云うことは、船の大小に関係なく必要なことである。ここでは、浅水影響をより定量的に知り、造船操船上の参考とするため試験を行なった。試験に使用した模型船は、前述と同じ船であるが、実船試験は実施していない。

試験時の船の状態は前述と同じであるが、水深 H と喫水 d との比すなわち H/d を、 $H/d = 11.5, 3.0, 2.0, 1.7$ に変化した。ここで $H/d = 11.5$ の場合を一応水深無限大の場合と考えることにする。それぞれの H/d の状態で、各舵角に対する定常旋回試験を行ない、模型船の航跡と舵に作用する力を計測して解析した。

船の操縦性能を最も端的に表わす $L/R \sim \delta$ 曲線と浅水影響の関係を第10図に示す。この種の試験例は少ないが、小関らがタンカー、貨物船について浅水影響を試験して、その結果を発表している⁵⁾。第10図に示すように今回試験した船型においても、タンカーなどと同様に、明らかに浅水影響が現われている。すなわち、水深が喫水の約3倍の所からこの浅水影響は現われて、しかも水深が浅くなるほどその影響が大きい。さらにその影響は、舵角が小さく運動のゆるやかなところより、舵角の大きい急激な運動のところほど大きい。

たとえば、舵角 20° では、 $H/d = 1.7$ の水域の定常旋回半径は、水深無限大の水域での定常旋回半径の55%大きくなるに過ぎない。ところが舵角 40° では、同様に水深無限大のところの定常旋回半径の74%も大きくなっている。したがって、今回の試験範囲では、水深が喫水の2倍以下の浅い水域では針路安定性は増加して

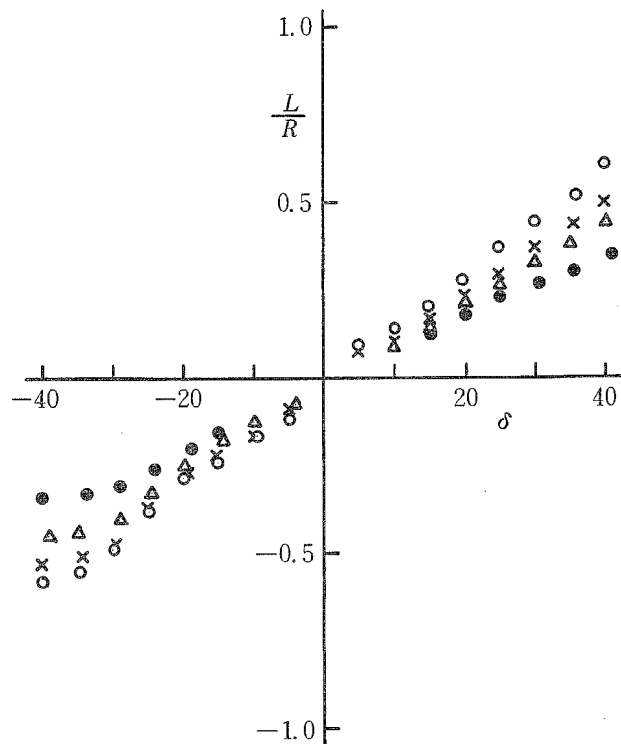


Fig. 10. Effect of shallow water on steady turning characteristics.

Notes H, d : Water depth (m) and mean draft of ship (m)

○: $H = \infty$ ×: $H = 3.0d$
 △: $H = 2.0d$ ●: $H = 1.7d$

And other symbols are shown in Fig. 9.

いるものの、旋回力は相当減少していると考えられる。またこの傾向は旋回方向には関係なく現われ、そのうえ影響の程度は左旋回に比較して右旋回が5~10%大きい。

次に旋回中の速力減少率と浅水影響の関係を第11図に示す。これらの図から明らかなように、水深無限大

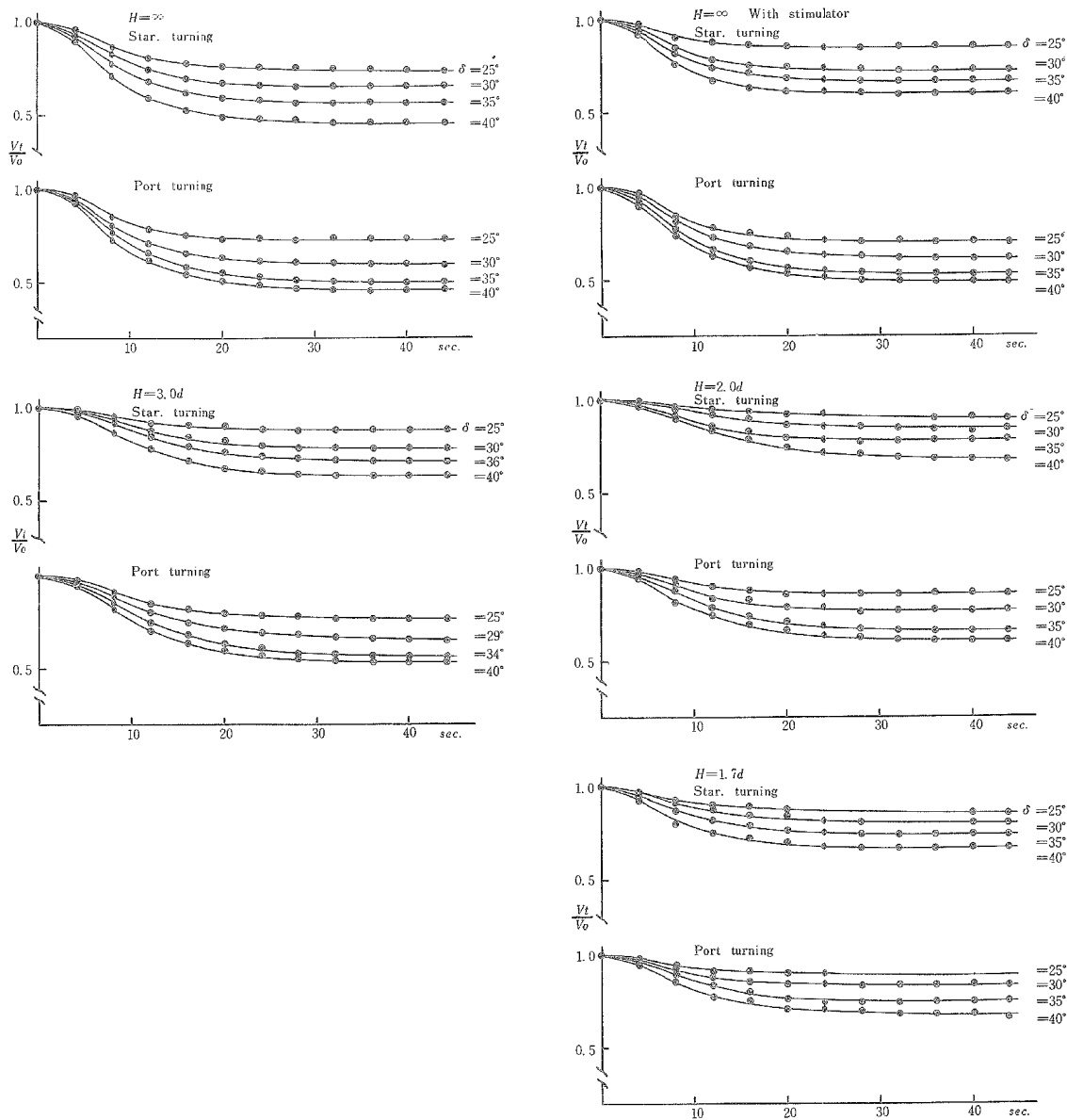


Fig. 11. Effect of shallow water on ship speed reduction rate during turning. Symbols are shown in Figs. 9 and 10.

の場合に比較して、浅水になるに従い速力の減少率が小さくなり、しかもこの傾向は、旋回力に与える浅水影響とほぼ同じである。 $H/d=3.0$ くらいからこの傾向が現われ、 $H/d=2.0$ より浅くなると、この影響はさらに顕著に現われる。たとえば、舵角 40° 右旋回の場合、操舵直前の速力に対する定常旋回中の速力の割合は、水深無限大の水域では約45%に減少するが、 $H/d=3.0$ では63%、 $H/d=1.7$ では67%となり、浅くなるほど速力減少は小さい。

$L/R \sim \delta$ 曲線が定常旋回の操縦性を表わしているのに対し、 D_A/L 、 D_{T_r}/L などは定常旋回になるまでの過渡現象を表わしていると考えることが出来る。 D_A/L 、 D_{T_r}/L と浅水影響の関係を第12図、 D_T/L と浅水影響の関係を第13図に示す。舵角が小さくなれば当然 D_A/L 、 D_{T_r}/L の値は大きくなる。しかもこれらの図から明らかなように、同一舵角でも水深が浅くなると D_A/L などの値は大きくなり、操舵に対する船の追従が非常に悪くなっていることを示している。たとえば、舵角右40°の場合の縦距は、 $H/d=2.0$ になると、水深無限大に比較して約13%大きくなる。これを操舵角の大きさからみれば、 $H/d=2.0$ の水域の舵角35°は、水深無限大の場合の約28°の舵角に相当し、浅水影響を受けて舵角が約20%減少したことになる。

旋回方向による D_A/L などの値は、水深変化に関係なく、右旋回に比較して左旋回が小さい。第12図の左旋回で曲線が凹になっているのは舵角35°~40°の範囲で失速を生じたものと思われ、同時計測した舵力の項で検討する。第13図の D_T/L 曲線も D_A/L 曲線に与える浅水影響とはほぼ同様な影響を受けていることを示している。

次に定常旋回中の船の重心点における偏角 β と浅水影響の関係を第14図に示す。水深が一定の場合は舵角が小さくなれば偏角も小さくなり、この傾向は水深が変化しても変わらない。しかし、偏角に与える浅水影響は大きく、同一舵角でも水深が浅くなると偏角は小さくなり、 $H/d=2.0$ 以下になると旋回方向に関係なく偏角は非常に小さくなる。

任意の水深における定常旋回中の角速度 $(L/R)_H$ と水深無限大における定常旋回中の角速度 $(L/R)_\infty$ の比、および H/d の関係を整理すると第15図のようになる。同図には小関らがタンカーおよび貨物船について試験した結果⁵⁾と、井上の抵抗微係数計算理論⁶⁾によってこの試験船の抵抗微係数を求め、菅らの浅水影響の理論式⁷⁾による計算値も示した。今回の試験では、水深変化の種類が十分とは云えないため詳細にわたっては不明で

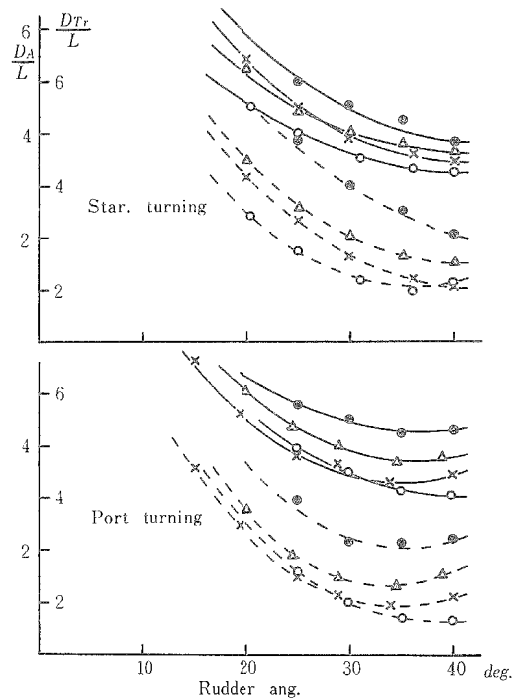


Fig. 12. Effect of shallow water on D_A/L and D_{T_r}/L under starboard and port turning.
Notes D_A : Advance turning circle (m)
 D_{T_r} : Transfer turning circle (m)
And other symbols are shown in Fig. 10.

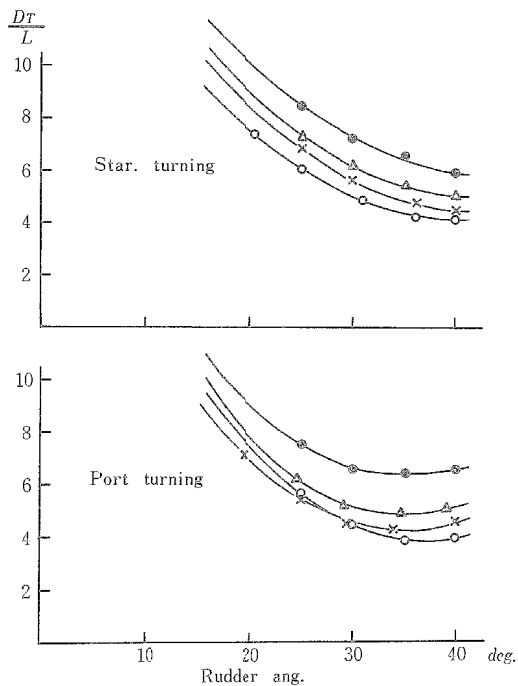


Fig. 13. Effect of shallow water on D_T/L under starboard and port turning.
 D_T is tactical diameter and other symbols are shown in Fig. 10.

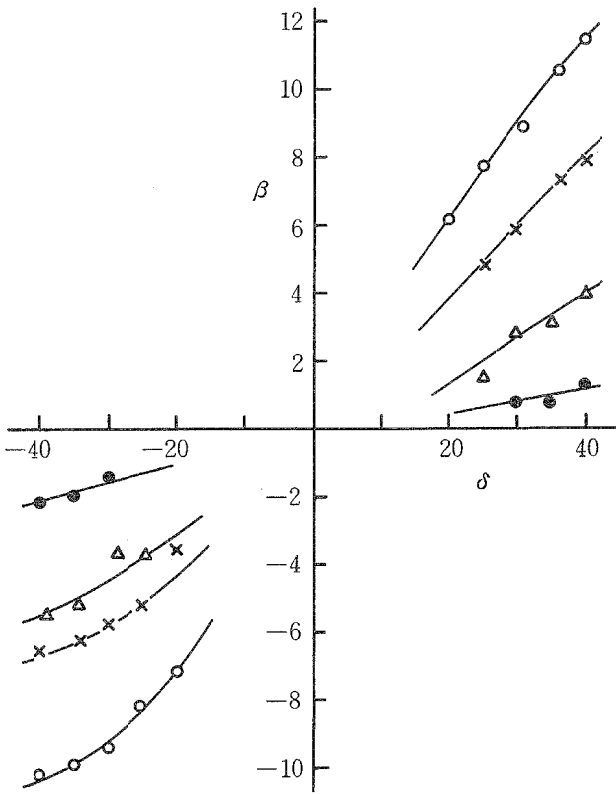


Fig. 14. Effect of shallow water on drift angle β , in deg. at center of gravity of ship. Symbols are shown in Fig. 10.

ある。しかし第15図から明らかなように、船型が相当異なるにもかかわらず、水深変化による旋回角速度変化の大体の傾向は似ていると云える。

旋回中の船体沈下は、極めて複雑で、しかも重要な問題であるが、今回の試験では船体沈下の計測はしなかった。しかし、 $H/d=1.5$ (トリム2.8%後) の水深で、模型船が直進中は底触しなかったが、旋回のため舵角 40° を取った瞬間船尾が底触し、旋回が進むと浮揚しているのを認めた。

5. 舵に作用する力

合理的な舵面積の決定あるいは舵の設計などにおいて、または船の操縦運動の解析においては、舵に作用する力を正確に推定しなければならない。ここでは、今回の試験において、旋回運動の航跡記録と同時に計測した舵に作用する力について解析する。

5・1 力の計測方法と表示方法

舵軸の上部で上下2個所に直圧力測定用のストレインゲージ2枚を表裏にはりつけ、また舵抵抗測定用のストレインゲージ2枚を同位置の舵軸の前後にはり付け、舵面に作用する直圧力、抵抗により舵軸に発生する曲げモーメントを電気的にとり出し、オシロに記録させた。また舵軸にかかるトルクは、トルク計測用のストレインゲージを舵軸にはり付け、直圧力などと同じ方法でオシロに記録した。直圧力、抵抗およびトルクの大きさと、ストレインメーター出力の関係は、各試験の終了時に、重錘を用いてキャリブレーション曲線を求めて確認した。

このような方法で舵に作用する直圧力 N 、トルク M 、抵抗 R を計測し、次のように無次元化して表示した。

$$\text{直圧力係数 } C_N = N / \frac{1}{2} \rho A_R V^2$$

$$\text{トルク係数 } C_T = M / \frac{1}{2} \rho A_R L_R V^2$$

$$\text{圧力中心係数 } C_X = C_T / C_N$$

$$\text{抵抗係数 } C_R = R / \frac{1}{2} \rho A_R V^2$$

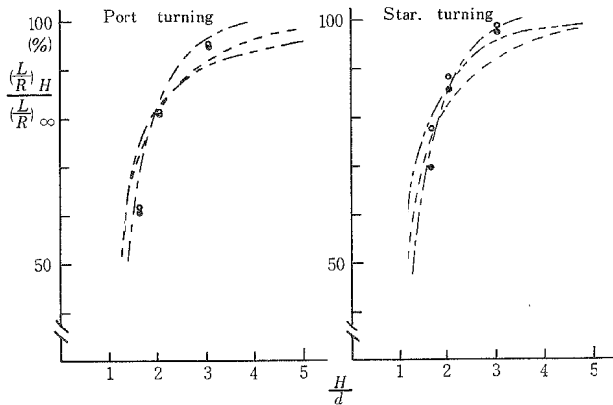


Fig. 15. Effect of shallow water on non-dimensional angular velocity during steady turning.

$(L/R)_H$ and $(L/R)_\infty$ are non-dimensional angular velocity at water depth = H and ∞ .

Notes ●, ○: Exp. values with rudder angle of 40° and 35°

-----: Cal. values obtained by KAN's formula with hydrodynamic derivatives calculated by INOUE's theory

-----: Exp. values obtained by OZEKI using a cargo type model

-----: Exp. values obtained by OZEKI using a tanker type model

ただし、 ρ = 水の密度、 A_R = 舵面積、 V = 直進中の船速、 L_R = 舵弦長とする。舵角 δ は右舵を正、直圧力は右舷から左舷に作用するものを正、舵トルクは舵軸を上から見て時計方向に回そうとするトルクを正トルクとする。圧力中心係数は、舵面の圧力中心が舵軸より後方にある場合を正とし左旋回では便宜上この逆とした。また抵抗係数は、舵の前縁から前縁方向に作用するものを正とする。

5・2 水深無限大の場合の舵に作用する力

直進運動から旋回運動にはいった場合のオシロ記録紙の一部を第16図に示す。この図は舵角 40° の場合で、右旋回の記録と左旋回の記録を合わせてトレースしたものである。この図から明らかなように、船の旋回、操縦性を支配する舵の直圧力は、大体の傾向として、舵が所要の舵角に達した直後に最大値を示す。その後、旋回の発達に伴って直圧力は幾分減少し、定常旋回になるとほぼ一定値に落ち着く。

操舵直後に舵が受ける直圧力の最大値 $C_{N \cdot MAX}$ を藤井らの計算式⁸⁾で計算した結果と比較すると第17図のようになる。同図に示すように、右舵では 40° まで、左舵では 15° までは計算値と実測値はよく一致する。しかし左舵 20° 以上では実測値が大きくなり、左舵 40° では実測値が26.8%も大きくなっている。この差は、藤井らは直圧力の舵の上下方向の作用点は舵高さの中央にあるとしているのに対し、今回の整理では、上下方向の作用点を計算し、その作用点を基にして直圧力を計算したので、このような整理方法の差異にもよると考えられる。

今回の試験結果を藤井らの計算式の型で近似するならば、同式の定数 k の値を、左旋回では $k=6.05$ でほぼ近似出来る。なお $C_{N \cdot MAX}$ は、舵角の大きさに関係なく、同一舵角では左旋回の場合が大きい。

この試験に用いた実船の舵は、本来アクティブラダー (Active rudder) として設計され、翼厚比は一般の船と比較して大きい。翼厚比

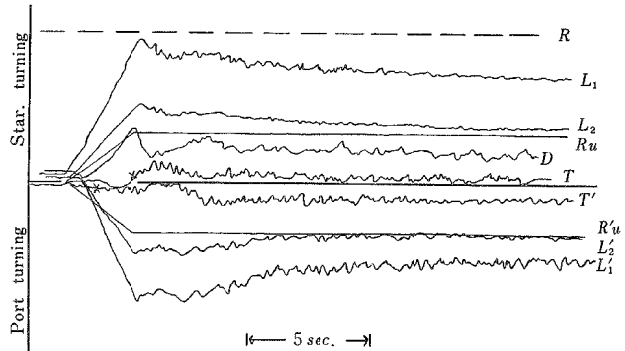


Fig. 16. A copy of records on oscillograph under turning rudder angle of 40° .

- Notes R: Revolutions of propeller
 R_u, R'_u : Rudder angle
 L_1, L_2, L'_1, L'_2 : Lift of rudder at starboard and port
 D, T, T' : Drag and torque of rudder
 Torque is put as positive in case of clockwise direction to see from deck.

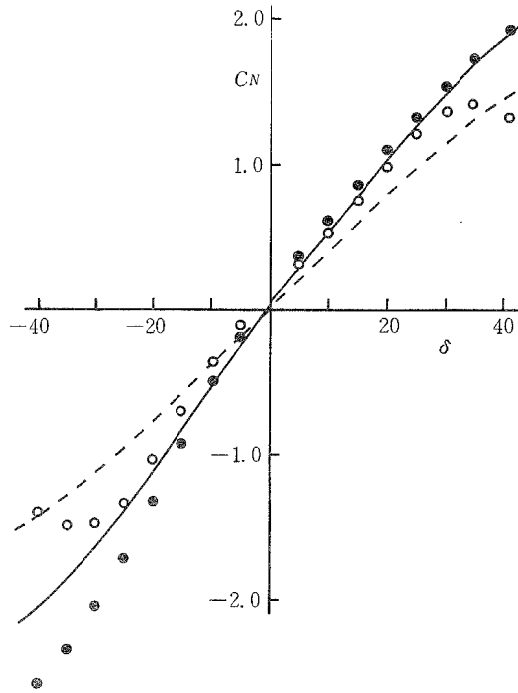


Fig. 17. Comparison of normal force coefficient C_N calculated and experimented.

- Notes ●: Exp. values (max.) of C_N at the time of termination of steering
 ○: Exp. values (mean) of C_N at the steady turning
 —: Cal. values obtained by FUJII and TSUDA's formula
 - - - : Cal. values at open rudder obtained by FUJII and TSUDA's formula

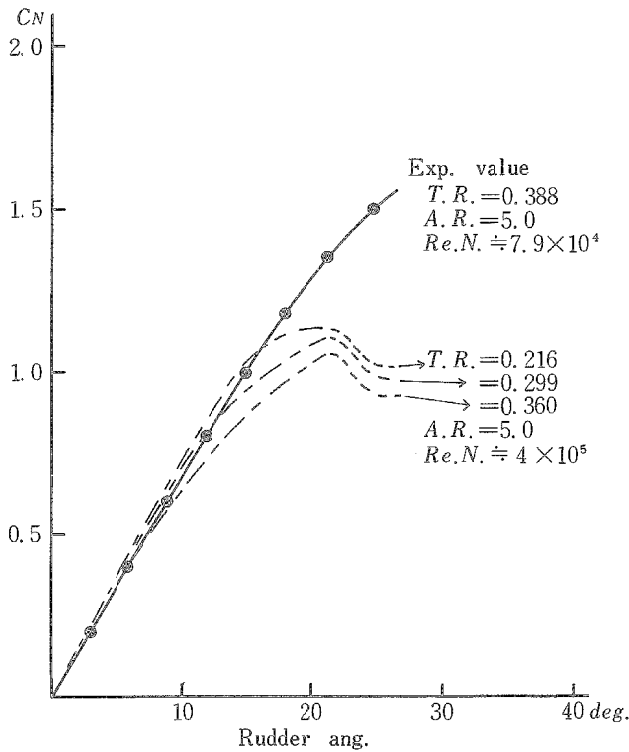


Fig. 18. Comparison of C_N obtained by present experiments and the results of GÖTTINGEN Wind Tunnel experiments.

Notes -----: Results of GÖTTINGEN exp. with aspect ratio ($A.R.$) = 5.0, Reynold's No. ($Re.N.$) $\doteq 4 \times 10^5$, and thickness ratio ($T.R.$) of rudder changing from 0.216 to 0.360

●: Results of present exp. obtained by the application of PRANDTL's formula to the present experimented results in order to adjust the effects of rudder aspect ratio

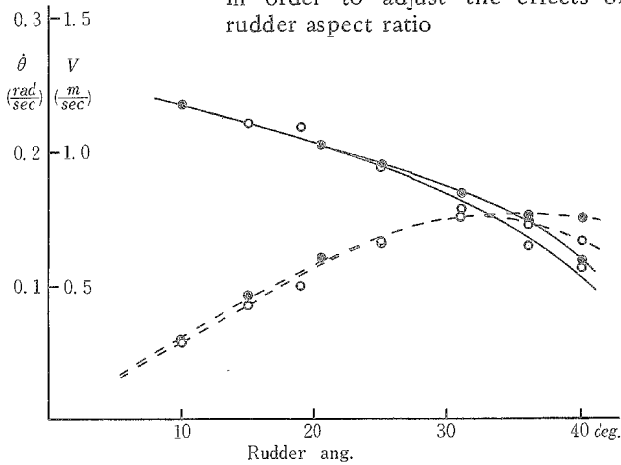


Fig. 20. Relation between angular velocity ($\dot{\theta}$) and speed (V) during steady turning.

Notes ———: Ship speed
 -----: Angular velocity

And other symbols are shown in Fig. 19.

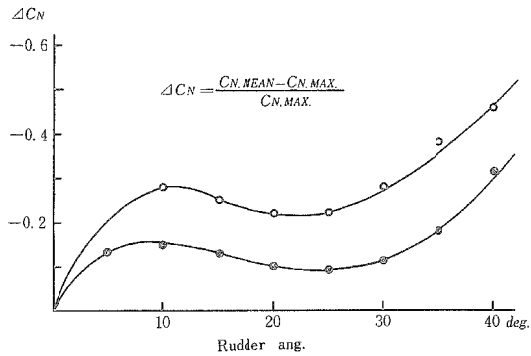


Fig. 19. Effect of turning direction upon ΔC_N .

Notes ●: Starboard turning
 ○: Port turning

の大きい舵特性について試験した例はほとんど無いが、ゲッチンゲン風洞試験（縦横比 5.0 で翼厚比 0.216~0.360, レイノルズ数 4×10^5 ）の結果⁹⁾と比較すれば第18図のようになる。ここでは自航模型で計測した舵の直圧力を、舵単独試験の場合に換算し、その結果を Prandtl の縦横比に対する理論的修正公式¹⁰⁾によりゲッチンゲン風洞試験と同一の縦横比に換算した。

第17図には、定常旋回中に舵に作用した直圧力 $C_{N.MEAN}$ も示してある。いまこの試験で得た直圧力について、 $\Delta C_N = (C_{N.MEAN} - C_{N.MAX}) / C_{N.MAX}$ の値を舵角ベースに表わすと第19図のようになる。 ΔC_N は操舵直後の最大直圧力から定常旋回中の直圧力になるまでの減少率で、この試験では旋回方向によって差がある。すなわち舵角 35° までを考えるならば、右舵で10~15%、左舵で23~30%の減少となり、左旋回の場合の減少が大きい。このような定常旋回中の直圧力の減少は、プロペラスリップ比の変化、舵位置の漏角の影響などと、旋回運動に伴う伴流分布の非対称が大きく影響しているのではないかと考えられる。

舵の直圧力の大きさと旋回航跡の関係は、 $C_{N.MAX}$ が $D_A/L, D_{Tr}/L$ に影響し、 $C_{N.MEAN}$ は L/R に関係すると考えられる。第9図と第17図を検討すると、舵角 35° 付近までは $C_{N.MEAN}$ の増加と共に L/R も大きくなっている。しかし、舵角 40° では $C_{N.MEAN}$ が減少しているのに L/R は増加している。いま各舵角

に対する定常旋回中の旋回角速度 $\dot{\theta}$ (rad.) と V の関係を示すと第20図のようになる。これから $L\dot{\theta}/V$ と δ の関係を求め、 $L/R \sim \delta$ 曲線と比較すると第21図のように極めて良く一致し、 L/R は舵角 40° まで明らかに増加している。これは定常旋回になると直圧力は幾分減少するが、旋回による横傾斜、速力減少と旋回角速度の増加によるトリム変化が生じ、それに伴って船体を受ける旋回抵抗が変化して定常旋回半径は小さくなったと考えられる。

直進運動から旋回運動にはいった場合の舵トルク変化の状況を、一例として第16図に示したが、その特徴は次のようである。

(1)右旋回の場合 操舵中に負トルク（舵角を増す方向のトルク）を生じるが、所要舵角に達した直後に大きい正トルク（舵角を減じる方向のトルク）が現われ、その後正トルクは幾分減少し、定常旋回になると一定の大きさの正トルクとなっている。

(2)左旋回の場合 操舵中わずかに正トルク（舵角を増す方向のトルク）を生じ、その後負トルク（舵角を減少さす方向のトルク）が現われ、舵角が所要の角度に達すると一時負トルクはほとんど零になり、その後大きい負トルクが現われる。この時の負トルクが最大値となり、以後その大きさはあまり変化せず定常旋回となる。またこの最大トルクの発生時期は、操舵終了後ほぼ操舵時間だけ過ぎてから現われ、右旋回の場合に比較して遅れて現われる。

測定したトルクを整理して C_T , C_X と δ の関係を第22図に示す。また同図には藤井らの近似式⁸⁾で求めた最大トルク係数 $C_{T \cdot MAX}$ と最大圧力中心係数 $C_{X \cdot MAX}$ も示してある。 C_T , C_X の計算値と実測値は、右舵 25° 以上ではほぼ一致するが、それ以外の舵角では誤差があり、 C_T より C_X の近似がより困難であることを示している。この試験に用いた舵のつり合い比 ε ($\varepsilon = A_f/A_r$, A_f : 舵軸から前部の面積, A_r : 舵面積) は 0.262 であるが、この舵では舵角 30° 付近で C_T , C_X ともに最小値を示している。操舵直後に現われる C_T の最大値は、舵角が 30° より大きくなると舵角を減

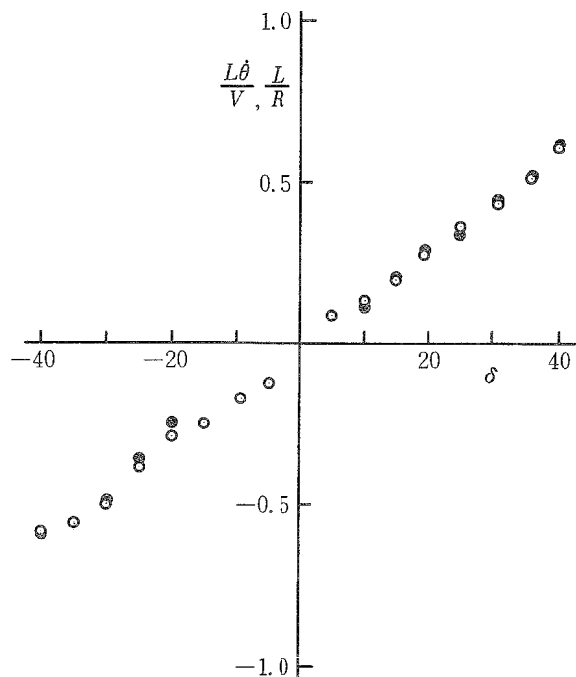


Fig. 21. Comparison of steady turning characteristics obtained by $L\dot{\theta}/V$ and L/R .

Notes ●: Obtained by $L\dot{\theta}/V$
○: Obtained by L/R

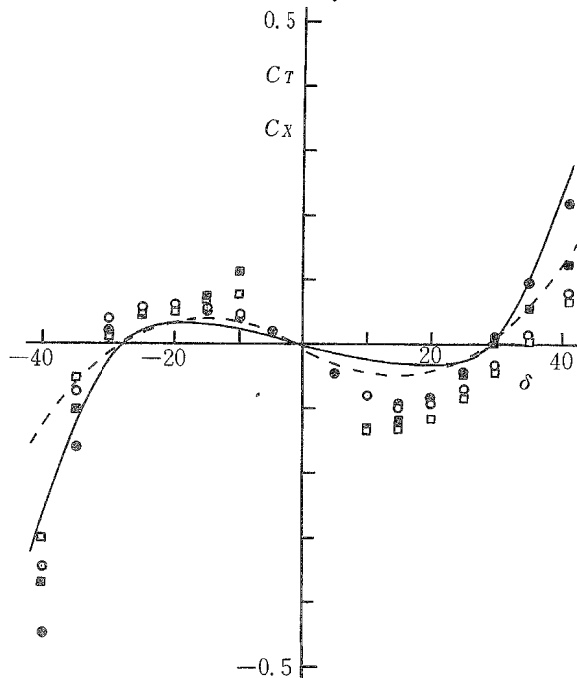


Fig. 22. Comparison of calculated and experimental values of C_T and C_X with various rudder angle δ (deg.).

Notes —: Torque coefficient C_T } Calculated by
 ----: Center of pressure } Fujii's
 coefficient C_X } formula
 ●, ○: Exp. values of $C_{T \cdot MAX}$ and $C_{T \cdot MEAN}$
 ■, □: Exp. values of $C_{X \cdot MAX}$ and $C_{X \cdot MEAN}$

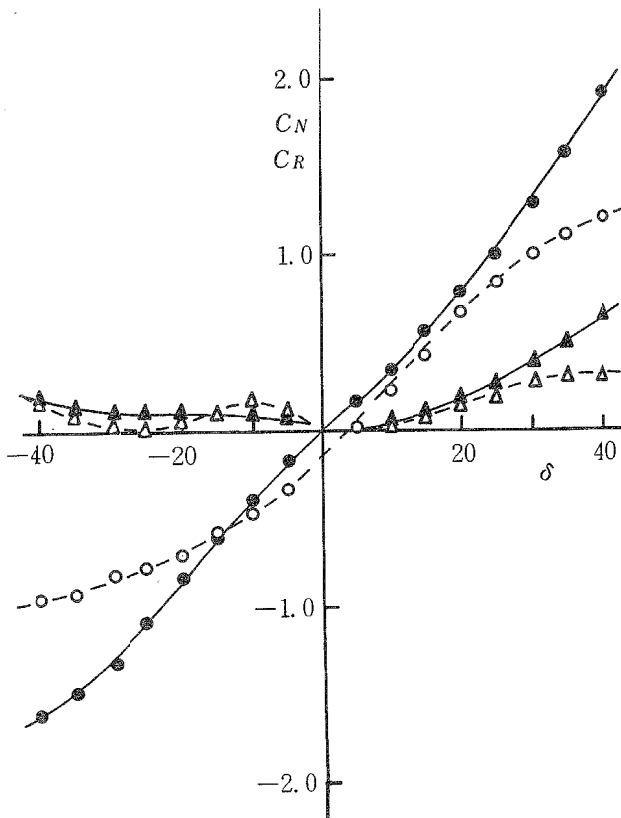


Fig. 23. Relation between C_N , C_R and δ with stimulator at $H=\infty$.

Notes C_R : Drag coefficient
 ●, ○ : Exp. values of C_N . MAX. and C_N . MEAN
 ▲, △ : Exp. values of C_R . MAX. and C_R . MEAN

少する方向のトルクが生じ、それより小さい舵角では舵角を増加する方向のトルクが生じる。藤井らによると、この試験に用いた船の最適つり合い比は0.250が良いとしている。なお、模型船に乱流促進装置を付けた場合の舵に作用した力を整理すると第23図のようになり、旋回方向に関係なく、同一舵角に対する C_N の値は小さくなっている。

5・3 舵に作用する力の浅水影響

4. で述べたように、水深を変化させて船の旋回性能に与える浅水影響を試験したが、このとき同時に計測した舵に作用する力と浅水影響の関係を第24~25図に示す。 $H/d=3.0$ 以下になると、この試験に用いた船型でも $L/R \sim \delta$ 曲線には浅水影響が現われ、しかも著しく旋回性能が低下するのが認められた。しかし舵の直圧力に関する浅水影響は、第24図に示されるように特に大きいものではなく、水深が浅くなると直圧力が幾分減少する傾向がみられる程度である。このことは次のように考えられる。

すなわち、水深十分な水域の定常旋回中では、プロペラ後流の影響は受けるが舵位置の偏角も大きく、このため C_N は幾分減少するが、一方速力減少も大きくプロペラスリップ比の増大により C_N は増加する。これに対し水深が浅くなると偏角は小さく、したがって偏角による C_N の減少は小さく、また速力減

少も小さいのでプロペラスリップ比の増大による C_N の増加も小さい。このように偏角、スリップ比の増減が、水深十分な水域とそうでない水域では相反するから、旋回運動が舵直圧力に与える影響のみを考えると結局 C_N の浅水影響は小さいのであろう。

水深が十分な水域では最大舵角 40° でも、 $C_{N\text{MAX}}$ の失速現象は現われなかったが、 $H/d=2.0$ 以下になると、 $C_{N\text{MEAN}}$ と同様に、 $C_{N\text{MAX}}$ にも失速現象が現われ、操舵直後から複雑な水流が舵面に当たっていることを示している。

C_T , C_X と浅水影響の関係が第25図に示してある。 $C_T \sim \delta$ 曲線に与える浅水影響の特徴は次のようである。すなわち $25^\circ \sim 30^\circ$ 以下の舵角で操舵したとき負トルク(舵角を増す方向のトルク)が現われるが、この負トルクを水深十分な場合に比較すれば、水深が浅くなると小さくなる傾向がある。たとえば、 $H/d=2.0$ の場合、 $H=\infty$ の場合の負トルクの約50%に減少する。このことは、舵の直圧力が浅水影響をあまり受けないことを考えると、水深が浅くなれば、舵面では複雑な流れを受けてその圧力分布が相当変化していると思われる。特に $H/d=1.7$ では舵角 30° 付近で C_T が急に大きくなり、 $35^\circ \sim 40^\circ$ になるとその増加率が小さくなる傾向がみられた。

次に圧力中心位置について考察する。水深無限大の場合は右舵左舵ともに操舵直後の最大トルクを示す時

点における圧力中心位置は、舵角 30° 付近で舵軸に最も近く、舵角がそれより大きくなると舵軸より後方に位置し、小さくなると前方に位置している。また定常旋回になると、舵角の左右に関係なく、操舵直後の圧力中心位置から舵の前縁方向に移動し、しかもその移動量は、舵角の大きさにほぼ比例する傾向がみられる。

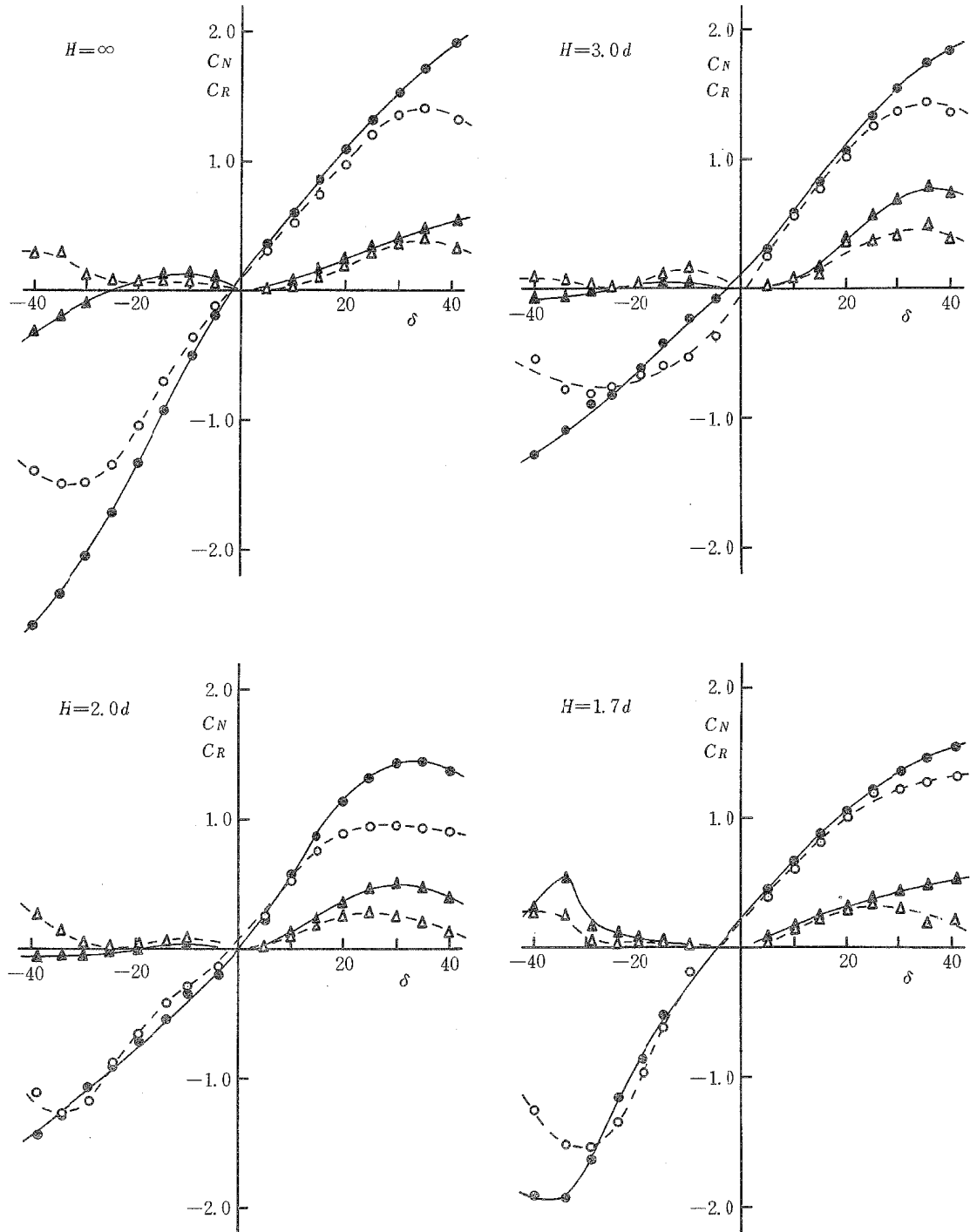


Fig. 24. Effect of shallow water on C_N and C_R . Symbols are shown in Figs. 10 and 23.

$H/d=3.0\sim 2.0$ の場合の圧力中心位置の移動は、右旋回では $H=\infty$ の場合とほぼ同じ傾向を示す。しかし左舵で定常旋回になると、 $H/d=2.0$ のとき二、三前縁方向に移動する点もあるが、全体としてはむしろ舵の後縁方向に後退する傾向がみられる。 $H/d=1.7$ の場合は、舵角が 30° 以上で定常旋回になると、旋回方

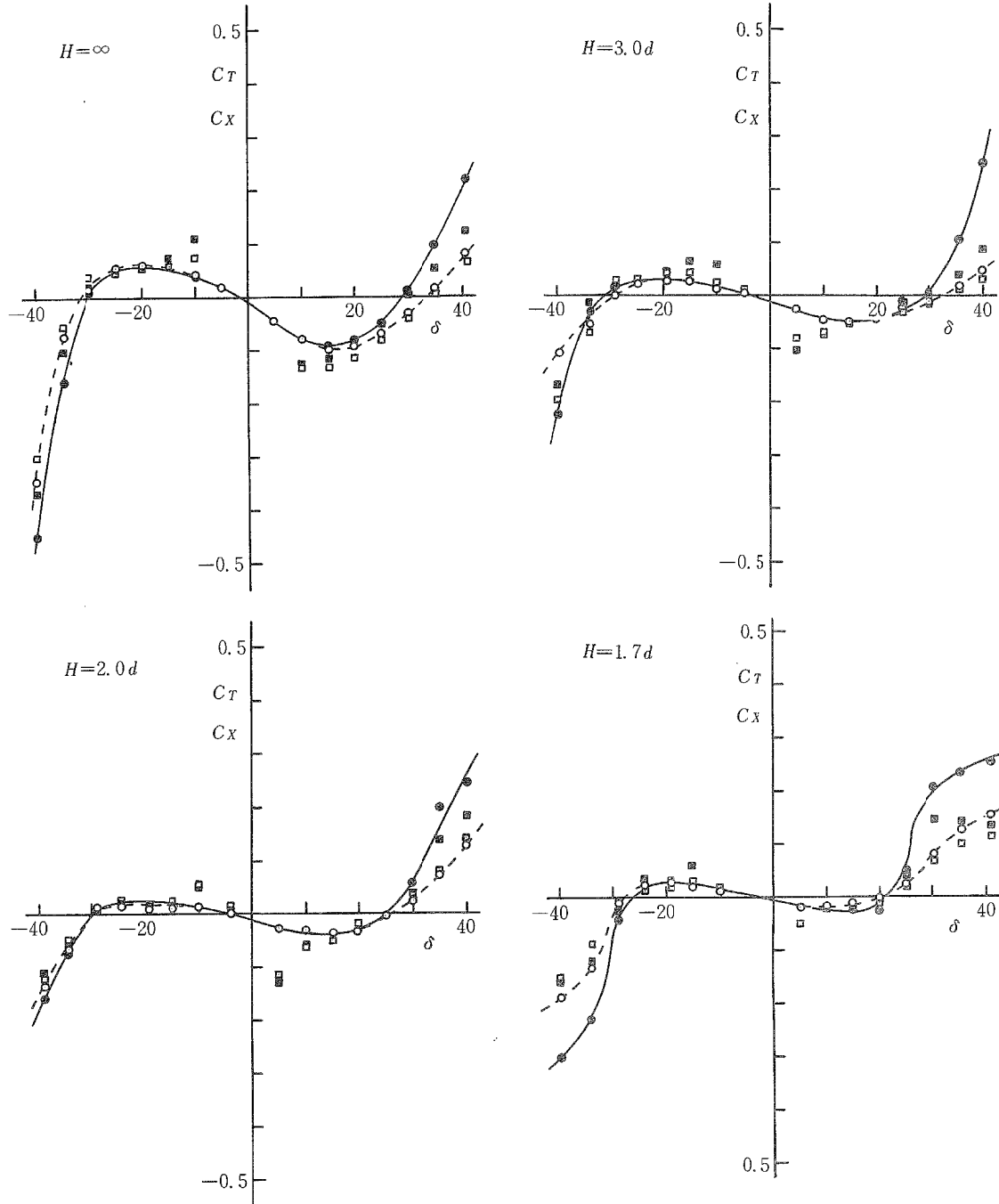


Fig. 25. Effect of shallow water on C_T and C_X .
 Notes $\bullet, -\circ-$: Exp. values of $C_{T, MAX.}$ and $C_{T, MEAN}$
 \blacksquare, \square : Exp. values of $C_{X, MAX.}$ and $C_{X, MEAN}$
 And other symbols are shown in Fig. 22.

向に関係なく、圧力中心は舵の前縁方向に移動している。しかし、その移動量と舵角の大きさとの関係は不規則となる。また舵角が25°以下では、わずかではあるが後方に移動する傾向がみられる。

舵面の圧力中心位置は直接求める方法がなく、実測から求めた位置には直圧力とモーメントの両方の計測誤差の影響を受けている。また圧力中心の移動すなわち舵面の圧力分布の変化は、舵角の大小に伴う船体運動の影響、たとえば偏角、旋回角速度、プロペラスリップ比などの相互影響を受けている。このほか水深が浅くなると舵周辺の流れが複雑になり、これらのすべての影響を受けて圧力中心位置が定まるので、その正確な推定はむづかしい。

6. 旋回航跡の数値計算

操舵に伴う船の運動を数値計算で求めようとする努力は古くより多数みられ、その中でも最も簡単な平水中の定常旋回半径を求める算式には多くの成果がある。しかしそのほとんどは、旋回中の速力変化を省略して、船の横方向（ y 軸）と回転方向（ z 軸）のみの運動方程式をたて線型運動方程式として解を得ている。ところが最近では電子計算機の応用で、あらゆる型の方程式で計算し、その進歩は著しい^{6), 11)}。

ここでは旋回抵抗を井上の理論式¹²⁾で求め、見掛質量については元良の結果¹³⁾、旋回中の前後方向（ x 軸）の抵抗は偏角の関数として表わす方法¹⁴⁾もあるがここでは COMPASS ISLAND 号の方法¹⁵⁾から推定、舵に作用する力は藤井らの式⁸⁾に今回の実験結果を考慮し、船の前後方向の運動方程式をたて、非線型三元連立方程式として解いた。

第26図のように船の重心に座標の原点をおくと、無次元化された運動方程式は次のようになる。

$$m_x \frac{L}{V} \left[\frac{\dot{V}}{V} \cos \beta - \sin \beta \cdot \dot{\beta} \right] + m_y \sin \beta \cdot \omega = C'_x \dots\dots(1)$$

$$-m_y \frac{L}{V} \left[\frac{\dot{V}}{V} \sin \beta + \cos \beta \cdot \dot{\beta} \right] + m_x \cos \beta \cdot \omega = C'_y \dots\dots(2)$$

$$n \left(\frac{L}{V} \right)^2 \left[\dot{V} \frac{\omega}{L} + \frac{V}{L} \dot{\omega} \right] = C'_M \dots\dots(3)$$

ただし ρ を水の密度、 S を船体中央縦断面積、 L を船長として次のように無次元化してある。

$$C'_x = \bar{X} / \frac{1}{2} \rho S V^2, \quad C'_y = \bar{Y} / \frac{1}{2} \rho S V^2,$$

$$C'_M = \bar{N} / \frac{1}{2} \rho S L V^2, \quad \omega = \frac{L}{V} \dot{\phi},$$

$$m_x = (M + M_x) / \frac{1}{2} \rho S L, \quad m_y = (M + M_y) / \frac{1}{2} \rho S L,$$

$$n = (I_z + J_z) / \frac{1}{2} \rho S L^3,$$

ここで、

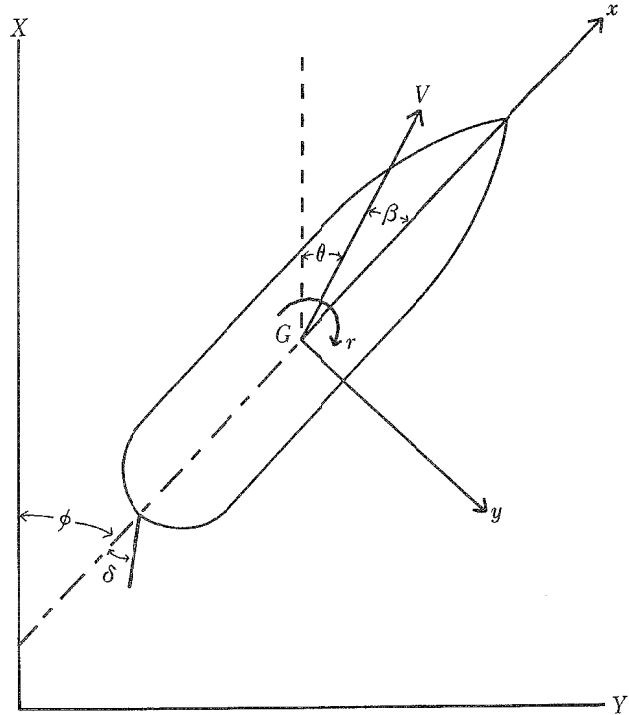


Fig. 26. Plan of ship showing the axes in the ship and the angle θ, β, ϕ and δ .

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{N}$: x, y, z 軸のそれぞれの力およびモーメント
 M_x, M_y, J_z : x, y, z 軸の見掛質量および見掛慣性能率
 M, I_z : 船の質量および z 軸まわりの慣性能率

ところで

$$C'_X = C'_T - C_D - C_{XR} \dots \dots \dots (4)$$

$$C'_Y = C_{YH} - C_{YR} \dots \dots \dots (5)$$

$$C'_M = C_{MH} + C_{MR} \dots \dots \dots (6)$$

よりなるとする。添字 T, D は推力, 抵抗, H, R は船体, 舵からの力, モーメントを示す。

C_D は旋回中の船の抵抗係数で, 直進中の抵抗係数 C_{D0} と等しいとおき, COMPASS ISLAND 号の考えを適用すると,

$$C'_T - C_D = C_{D0} \left\{ \frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{V_0}{V} \right)^3 - 1 \right\} \dots \dots \dots (7)$$

また C_{XR} は舵の直圧力に $\sin \delta_r$ を掛けたもので結局次のようになる。

$$C_{XR} = \frac{6.13k_r}{k_r + 2.25} (1 + cs_o^{1.5}) (1-w)^2 \frac{A_r}{S} \times \left[\frac{1 + cs_t^{1.5}}{1 + cs_o^{1.5}} \sin (\delta_r + \delta_{ot}) \right. \\ \left. - \sin (\delta_r + \delta_o) + \sin \left\{ \delta_r + \delta_o - \gamma \left(\beta + \frac{L_2}{L} \omega \right) \right\} \right] \sin \delta_r \dots \dots \dots (8)$$

C_{YH}, C_{MH} には, 井上の次のような理論式を採用する。

$$C_{YH} = C_{Y\beta} \cdot \beta + C_{Y\omega} \cdot \omega + f_Y \\ = \left\{ 0.8\pi k \left(1 \pm \frac{\tau}{4d_m} \right) + 2K_2 (2C_w - 1) \beta \right\} \beta \\ + \left\{ 0.56\pi k (0.367 + 0.21k \pm \frac{\tau}{16d_m}) \right\} \omega \\ + 8K_2 C_w (1 - C_w) \left(\frac{L_2}{L} \right)^2 \beta \omega \dots \dots \dots (9)$$

$$C_{MH} = (C_{M\beta 1} + C_{M\beta 2} \cdot \beta) \beta - C_{M\omega} \cdot \omega - f_M \\ = [0.9144k (k + 0.62) \{ 1.224 + 0.932C_w - (0.128 + \frac{C_w}{5}) \frac{d_m}{B} \} \\ \pm \frac{\tau}{2d_m} \{ 0.2\pi k + K_2 \left(\frac{1}{6} \frac{\partial C_{NO}}{\partial \beta} + \frac{\partial C_{M\omega 0}}{\partial \beta} \right) \} + 0.8\pi k \left(1 \pm \frac{\tau}{4d_m} \right) \frac{\overline{\overline{G}}}{L} \\ + 2K_2 (2C_w - 1) \frac{\overline{\overline{G}}}{L} \cdot \beta] \beta \\ - [0.54k \mp \frac{\tau}{2d_m} \{ 0.05\pi k + K_2 \left(\frac{1}{6} \frac{\partial C_{NO}}{\partial \omega} - \frac{\partial C_{M\omega 0}}{\partial \omega} \right) \} \\ - 0.56\pi k (0.367 + 0.21k \pm \frac{\tau}{16d_m}) \cdot \frac{\overline{\overline{G}}}{L}] \omega \\ - 8K_2 C_w^2 (1 - C_w) \left(\frac{L_2}{L} \right)^3 \cdot \beta \omega \dots \dots \dots (10)$$

次に C_{YR}, C_{MR} は旋回中の舵に作用する直圧力に $\cos \delta_r$ を掛ければ良く, 直圧力の推定には藤井らの実験式を用いると,

$$C_{YR} = \frac{6.13k_r}{k_r + 2.25} (1 + cs_o^{1.5}) (1-w)^2 \frac{A_r}{S} \times \left[\frac{1 + cs_t^{1.5}}{1 + cs_o^{1.5}} \sin (\delta_r + \delta_{ot}) \right. \\ \left. - \sin (\delta_r + \delta_o) + \sin \left\{ \delta_r + \delta_o - \gamma \left(\beta + \frac{L_2}{L} \omega \right) \right\} \right] \cos \delta_r \\ = C_{YR}^* [\dots \dots \dots] \cos \delta_r \dots \dots \dots (11) \\ C_{YR}^* = \frac{6.13k_r}{k_r + 2.25} (1 + cs_o^{1.5}) (1-w)^2 \frac{A_r}{S}$$

$$C_{MR} = C_{MR}^* [\dots] \cos \delta_r \dots\dots\dots (12)$$

$$C_{MR}^* = \frac{L_2}{L} C_{YR}^*$$

旋回中の船体に作用する力を以上(4)~(12)式で推定し、運動方程式(1)~(3)の右辺に代入すれば良い。(4)~(12)式の記号は次のとおりである。

$$C_{Y\beta}, C_{Y\omega}, C_{M\beta}, C_{M\omega} \dots\dots\dots \frac{\partial C'_Y}{\partial \beta}, \frac{\partial C'_Y}{\partial \omega}, \frac{\partial C'_M}{\partial \beta}, \frac{\partial C'_M}{\partial \omega}$$

$$f_Y, f_M \dots\dots\dots C_{YH}, C_{MH} \text{の非線型項}$$

$$k \dots\dots\dots \text{船体の縦横比} = \frac{2S}{L^2} \doteq \frac{2d_m}{L}$$

d_m 平均喫水

τ トリム ⊕ 船首トリム

C_w 水線面積係数

L_2 A. P から船の重心までの距離

B 船巾

$$\frac{\partial C_{N0}}{\partial \beta}, \frac{\partial C_{M0}}{\partial \beta}, \frac{\partial C_{N0}}{\partial \omega}, \frac{\partial C_{M0}}{\partial \omega}, K_2$$

..... いずれも補正係数で図より求める。

$\odot G$ 中央から船の重心の前後方向の距離(後を+)

k_r 舵の縦横比

c 定数

s_o, s_{ot} 直進中および旋回中のプロペラスリップ比

w 有効伴流係数

A_r 舵面積

δ_o, δ_{ot} 直進中および旋回中のプロペラスリップ比による舵角の変化量, $\delta_o = 2s$ (右舵+)

γ プロペラによる整流係数
ところで舵に作用する力と船体運動の関係は、多くの要素がはいる極めて複雑であるが、藤井らは γ なる係数を導入して合理的に解析している。今回の試験で、舵に作用した力の一例を解析すると第27図のようになる。

すなわちこれらの図で、直圧力の大きさを直進中の速力 (va) で無次元化すると $C_N(va)$ のようになり、

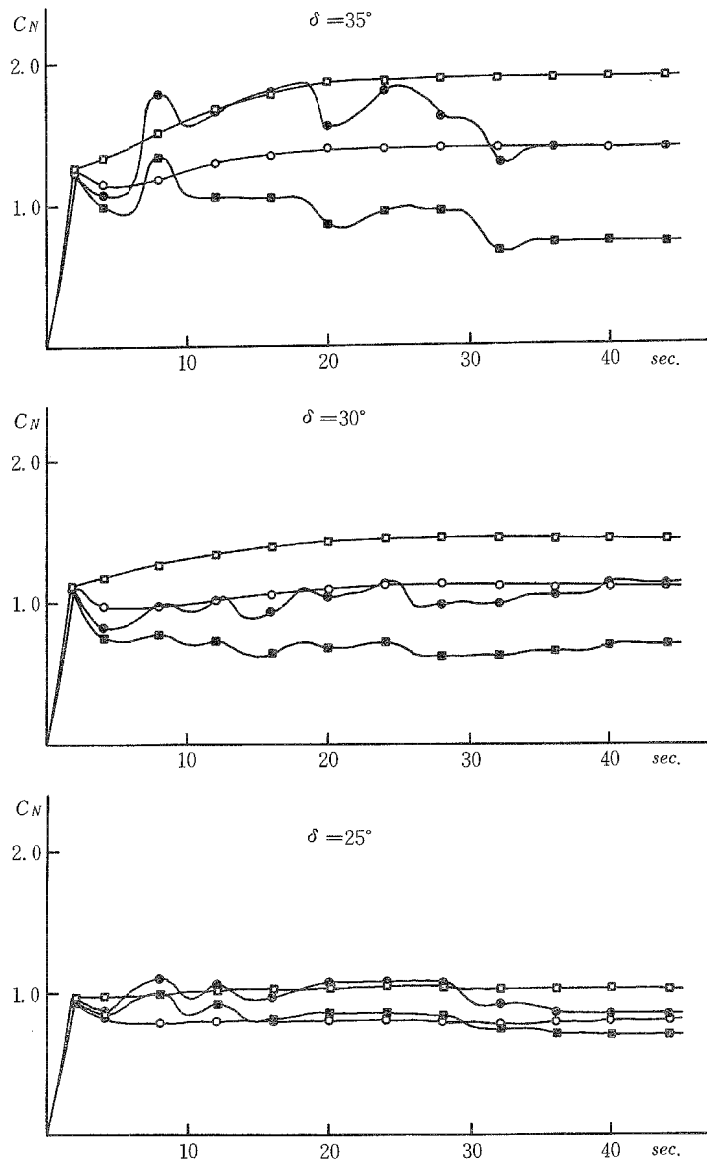


Fig. 27. Estimate of C_N during turning motion.

Notes \blacksquare : $C_N(Va)$ \square : $C_N(S)$
 \bullet : $C_N(Vt)$ \circ : $C_N(Vt)^*$

プロベラスリップ比の増加のみを考えると $C_{N(s)}$ のようになり、旋回中の各瞬間の速力 (vi) で無次元化すると $C_{N(vi)}$ のようになる。 $C_{N(vi)}$ は大体の傾向として操舵終了時以後いくらか減少するが、その後速力の低下とともに大きくなり、定常旋回になると一定値になる。ここで伴流係数をシェーンヘルの有効伴流係数を求める実験式¹⁶⁾で計算し、オシロおよび航跡フィルムから各瞬間のプロベラスリップ比、舵位置の偏角を求めることが出来る。このような実験値を基にして γ を求めると第3表のようになった。これらの γ の

Table 3. Values of γ experimented.

	Rudder angle			Mean value
	35°	30°	25°	
Starboard turning	0.719	0.647	0.434	0.607
Port turning	0.790	0.565	0.709	0.688

Table 4. Comparison of standard turning locus calculated and experimented.

	Exp.		Cal.	
	Actual	Model	$\gamma = 0.145$	$\gamma = 0.607$
D_A/L	1.000	1.027	1.095	1.190
D_T/L	1.000	1.117	0.793	0.952
D_T/L	1.000	1.153	0.693	0.865

値を用い、偏角による直圧力の減少量の修正と、スリップ比による直圧力の増加量を加減した直圧力係数が第27図の $C_{N(vi)}$ * である。今回の試験より得た γ の値は、舵角の大きさ、旋回方向により多小のばらつきがあるが、平均すると右旋回で0.607、左旋回で0.688となった。

(1)~(3)式を $\frac{dV}{dt}$, $\frac{d\beta}{dt}$, $\frac{d\omega}{dt}$ について整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = V \left\{ -\frac{Vm_y\omega}{m_x L} \sin\beta \cos\beta + \frac{VC'_X}{m_x L} \cos\beta \right. \\ \left. + \frac{Vm_x\omega}{m_y L} \sin\beta \cos\beta - \frac{VC'_Y}{m_y L} \sin\beta \right\} \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\beta}{dt} = V \left\{ \frac{m_y\omega}{m_x L} \sin^2\beta - \frac{C'_X}{m_x L} \sin\beta \right. \\ \left. + \frac{m_x\omega}{m_y L} \cos^2\beta - \frac{C'_Y}{m_y L} \cos\beta \right\} \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} = \omega \left\{ \frac{Vm_y\omega}{m_x L} \sin\beta \cos\beta - \frac{VC'_X}{m_x L} \cos\beta - \frac{Vm_x\omega}{m_y L} \sin\beta \cos\beta \right. \\ \left. + \frac{VC'_Y}{m_y L} \sin\beta \right\} + \frac{V}{nL} C'_M \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

また、 $\phi(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V(t)\omega(t)dt$ から $\theta = \phi - \beta$ として重心の運動方向が定まり、結局操舵後の船の重心軌跡の X, Y 方向の座標は次式にて求まる。

$$X = \int_0^t V(t) \cos\theta(t) dt, \quad Y = \int_0^t V(t) \sin\theta(t) dt \dots\dots\dots (16)$$

なお舵角は予定舵角を δ_0 、操舵時間を t_1 とすると $t=0$ から $t=t_1$ までは $\delta = \frac{\delta_0}{t_1} t$ 、それ以後は $\delta = \delta_0$ として与え、計算は九州大学大型計算センター FACOM 230-60型を使用した。

航跡計算の結果を第28図に示す。同図には、藤井らの図から推定した $\gamma = 0.145$ 、およびこの実験で得た

$\gamma = 0.607$ を用いて計算した結果と、実測した実船、模型船の航跡を示す。またこの図から D_A/L , D_{T_r}/L , D_T/L を求め、実船実測の比で表わすと第4表ようになる。これらの図、表から $\gamma = 0.145$ では舵力が大きく、 $\gamma = 0.607$ とすると実船航跡の方に接近する。しかしそれでも実船に比べて D_A/L は約19%大きすぎ、 D_{T_r}/L , D_T/L では5~13%小さく現われる。これらの誤差は勿論、実船航跡の誤差、数値計算のための各力の近似誤差の相方が含まれるが、 D_{T_r}/L の誤差が小さく、 D_A/L の誤差が大きくなっている点を考えると、実船試験における操舵時間の誤差が大きいとも考えられる。操舵時間と D_A/L の関係は解析的に明らかであるので、実船試験では

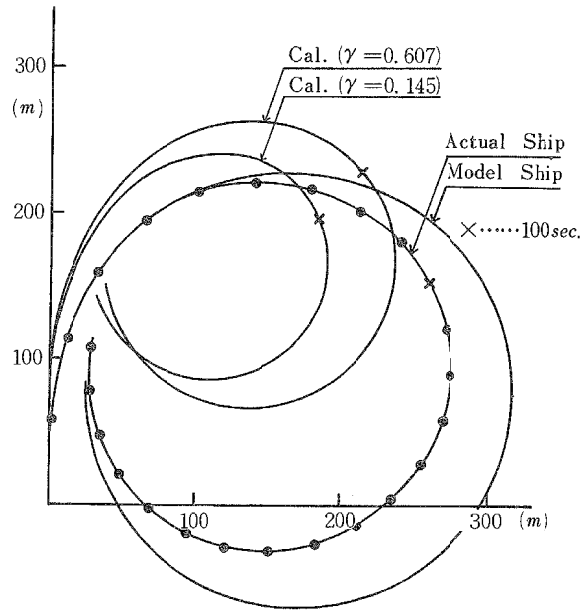


Fig. 28. Comparison of turning locus obtained by calculation and experiment.

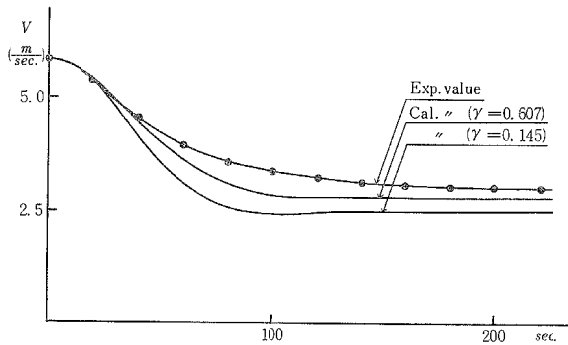


Fig. 29. Comparison of changing of ship speed obtained by calculation and experiment.

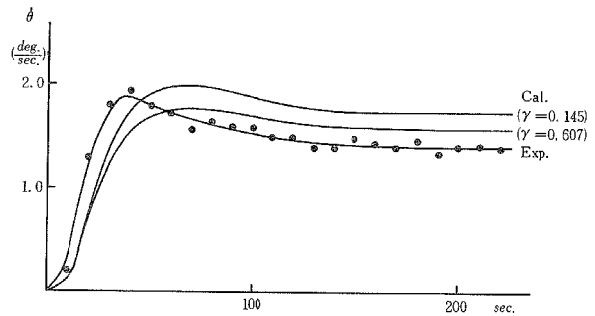


Fig. 31. Comparison of changing angular velocity obtained by calculation and experiment.

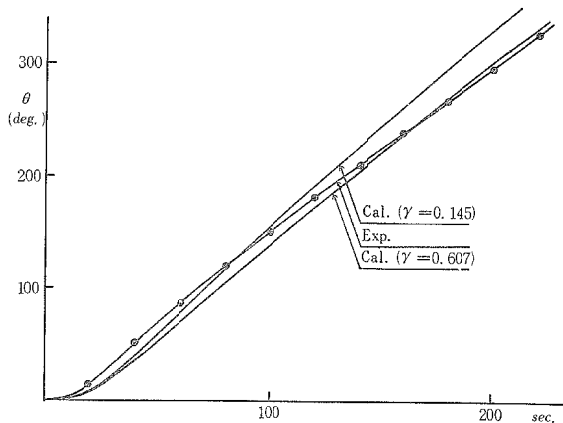


Fig. 30. Comparison of changing of ship's heading angle obtained by calculation and experiment.

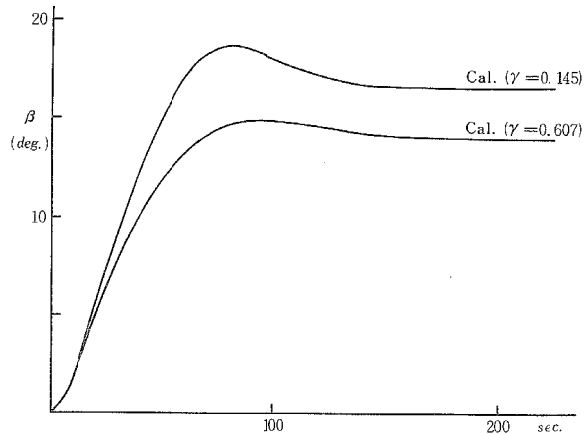


Fig. 32. Effect of changing in γ on β calculated.

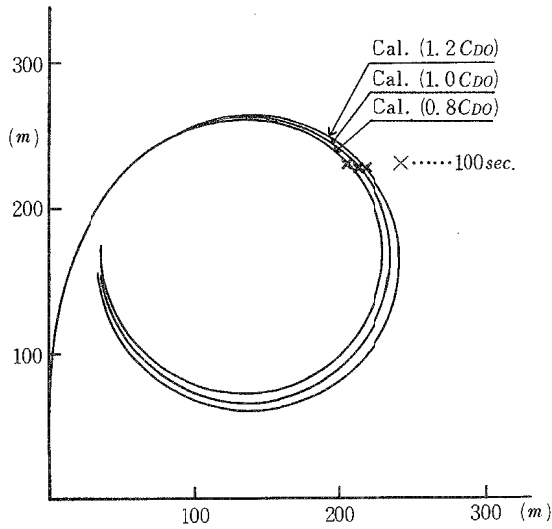


Fig. 33. Effect of changing in the axial force (or drag) coefficient C_{DO} of X axis on turning locus calculated.

操舵時間を正確に記録する必要がある。 γ の値が旋回中の速力、旋回角、旋回角速度および偏角などを与える影響を、実船の測定値と比較すると第29~32図のようになる。これらの図から明らかなように、 γ の値によって旋回航跡、速力変化などに大きい差を生じ、 γ の値を大きくすることによって一応実船結果に近づく傾向がみられる。しかし藤井らの図から推定した γ の値と、この実験で得た γ の値には大きい差があり、この原因の一つとして前述のように舵直圧力中心の上下方向位置の決め方が異なる。したがって今後の問題として、藤井らと同じ方法で γ を検討してみる必要がある。

次に船体抵抗算定の方法によって、その全抵抗に差が生じ、結果的に航跡に影響すると

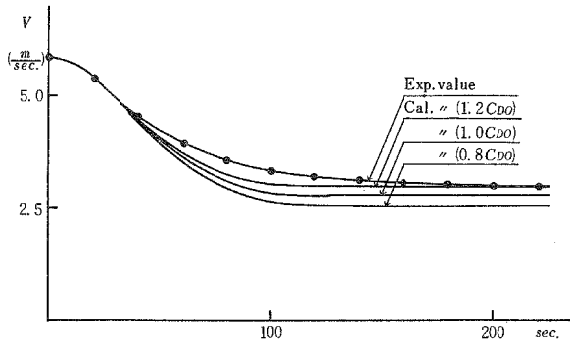


Fig. 34. Effect of changing in C_{DO} on ship speed during turning motion.

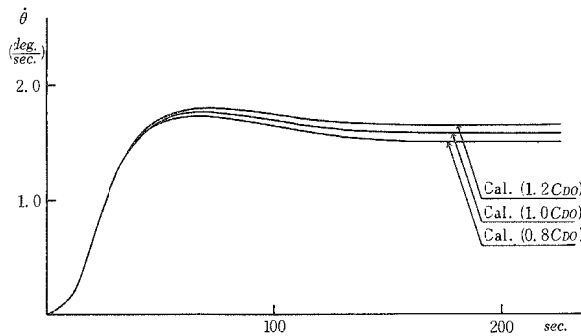


Fig. 36. Effect of changing in C_{DO} on angular velocity during turning motion.

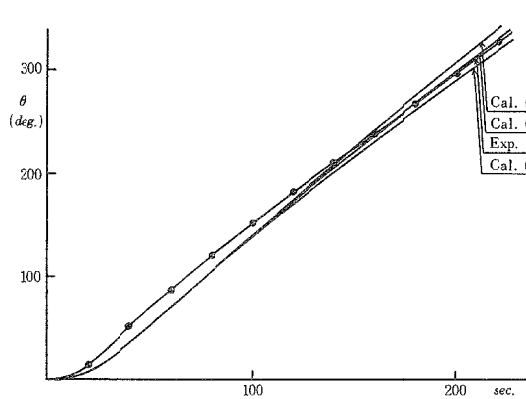


Fig. 35. Effect of changing in C_{DO} on ship's heading angle during turning motion.

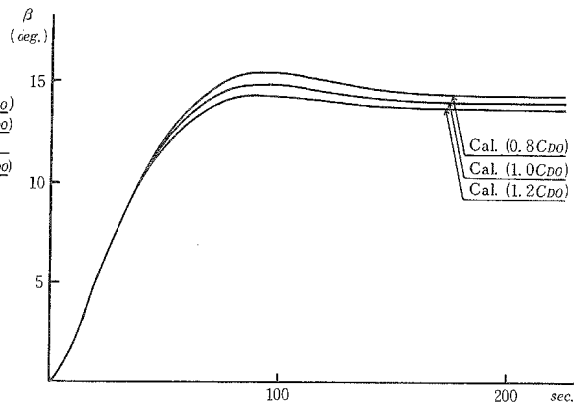


Fig. 37. Effect of changing in C_{DO} on drift angle during turning motion.

考えられる。摩擦抵抗をシェーンヘル、またはプラントル・シュリヒティングの式、剰余抵抗をテラー図表または山県の図表で推定すれば、それぞれの抵抗が多少異なる。例えば、 $v/\sqrt{gL}=0.195$ では摩擦抵抗で2.7%、剰余抵抗で16%、全抵抗で5.3~8.6%くらいの差が出る。そこで、今回はシェーンヘルと山県の図表から抵抗値を求めたが、その値が±10%、±20%変化したとき航跡に与える影響を計算し、±20%の場合の結果を第33~37図に示す。これらの図から、±20%程度の抵抗値の変化は旋回中の速力減少、旋回角、旋回角速度および偏角などに影響し、その結果航跡が変化する。しかもその航跡に与える影響は、実船航跡の誤差の項で述べた速力誤差の航跡に与える影響と同じく、縦距、横距に与える影響は小さく、旋回径には±2%程度の差異を生じるだけである。したがって抵抗の算定方法の差異が航跡に与える影響は、ほとんど考慮する必要がないと思われる。

7. 結 論

船の操縦性について二、三の考察ならびに、実船模型船を用い試験を行ない、解析した結果をまとめると次のようである。

(1) 実船の旋回試験では、風波の影響を無視し得ても計測、計算上の誤差が航跡に影響し、 D_A/L 、 D_T/L などには±10%程度の誤差が含まれることがある。

(2) 実船と模型船の操縦性に関する相関性は、旋回中のプロペラ回転数の減少率は良く対応するが、速力減少率は旋回方向により対応に差がある。また D_A/L 、 D_{Tr}/L 、 D_T/L および $L/R \sim \delta$ 曲線では、舵角が大きくなると対応が悪くなり、模型船の旋回力が実船より小さく現われる傾向がある。

(3) $C_b=0.560$ 程度の供試船でも、 $H/d=3.0$ 付近から旋回性に浅水影響を受け始め、浅くなるほど、しかも舵角が大きいくほどその影響は大きく、水深十分な水域に比較し、同一舵角でも旋回力、偏角、速力減少率ともに小さくなる。たとえば舵角 40° 、水深喫水比1.7の水域では、同一舵角、水深十分な場合の旋回半径の74%も大きくなる。

(4) 操舵直後に現われる舵の最大直圧力は藤井らの式でほぼ近似出来るが、左 20° 以上の舵角では実測値が10~20%大きくなる。この試験に用いた舵では、舵角 30° 付近で圧力中心は舵軸に最も近く、舵角がそれより大きくなると舵角を小さくする方向のトルクが作用する。

また直圧力に及ぼす浅水影響はあまり大きいものではないようで、浅くなると幾分直圧力が減少する傾向がみられる程度である。

圧力中心位置は、水深十分な水域では、操舵直後から定常旋回になると舵前縁方向に移動するが、水深が浅くなると後縁方向に後退する場合もある。

(5) プロペラの整流効果としての係数 γ は、本船型の場合、 $\gamma=0.607\sim 0.688$ を得たが、今後より詳しく検討する必要がある。旋回航跡の数値計算は、実船に比較して D_A/L 、 D_T/L などで10~13%小さく現われる。これら計算値の検証のために、より簡易で正確な実船の旋回航跡計測法の確立が急務と考えられる。

なお、本研究は九州大学工学部造船学教室で研修中に実施したものである。

最後にこの研究を実施するに当たり、種々便宜を計って頂き、終始ご指導とご討論を戴いた同教室井上正祐教授に厚くお礼申し上げますとともに、長期間にわたって実験に協力していただいた同教室村上正義助手ほか職員各位、また数値計算に協力して戴いた九州大学大型計算機センターの各位に心から謝意を表します。なお研修中、種々ご厚情を戴いた元水産大学校長 江良至徳教授、同漁業学科長 南四郎教授、同学科 橋本市雄助教授に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 井上正祐, 1964: 船の旋回運動方程式とその微係数. 日本造船学会操縦性シンポジウムテキスト, 1~8.
- 2) 笹島秀雄・田中一郎・鈴木敏夫, 1966: 肥大船の伴流分布. 造船協会論文集, 120, 1~9.
- 3) 川野浩一・村田良雄・松岡史香・安井三郎, 1963: 操縦性試験における実船, 模型船の相関実例. 造船協論文集, 113, 58~65.
- 4) 湯室彰規, 1966: 船の操縦性に関する2, 3の模型実験. 石川島播磨技報, 6(29), 207~215.
- 5) 小関信篤・山内保文・松岡史香・山崎芳嗣, 1965: 旋回性に及ぼす浅水影響に関する模型実験. 造船協論文集, 117, 139~145.
- 6) 井上正祐・村上正義・平野雅祥・井上 徹, 1969: 平水中の船の旋回航跡について. 西部造船会報, 37, 59~71.
- 7) 菅 信・花岡達郎, 1964: 旋回性に及ぼす浅水影響の計算. 造船協会論文集, 115, 49~55.
- 8) 藤井 斎・津田達雄, 1962: 自航模型による舵特性の研究. 造船協会論文集, 107, 110, 111.
- 9) 造船工学便覧, 1960: 操縦旋回および針路安定, 675.
- 10) 造船工学便覧, 1960: 操縦旋回および針路安定, 673.
- 11) 小川陽弘, 1969: 外力を受ける船の操縦運動の計算(その1). 日本造船学会論文集, 126, 107~120.
- 12) 日本造船学会, 1970: 第2回操縦性シンポジウムテキスト, 101.
- 13) 元良誠三, 1960: 船体運動に対する付加質量および付加慣性モーメントについて. 造船協会論文集, 105, 106.
- 14) WELNICH, Wieslaw, 1968: Method of Estimation of Wind Influence upon the Course Keeping Ability of Ship with Large Superstructures. *The Royal Institution of Naval Architects*, 110(4).
- 15) The David Taylor Model Basin, 1961: Maneuvering Characteristics of the Mariner Type Ship (USS COMPASS ISLAND) in Calm Seas.
- 16) 大串雅信, 1958: 理論船舶工学(下巻). 188. 海文堂(東京).