

(昭和 43 年 11 月造船学会秋季講演会において講演)

船の転心と旋回性について

正員 赤崎 繁*

On the pivoting point and the turning quality of Ships

By Shigeru Akazaki, Member

Summary

It is often said that the position of the pivoting point of any ship moves to the stem along with the progress of its turning motion, or that it moves with the ship's situation in the course of its turning motion.

But when an ordinary ship is steered in a calm sea without external forces, her pivoting point is fixed, and settled regardless of her speed or rudder angle.

So any ship has her own proper turning quality which depends on the position of her pivoting point at any given time. If we divide the turning quality of this ship into two kinds, that is, the steering and the rotating, each has also a special quality of its own. So these qualities of any ship can be shown by indices which are comparable with those of other ships.

1 緒 言

船の転心点は、旋回運動が進むに従つて、その位置が前方に移つてゆくとか、旋回中の船の位置によつて異なるなどといわれるが、普通の船が平水中で、他の外力なしに舵力だけで旋回する場合の転心位置は、その船固有の定点であつて、船速や舵角のいかんにかかわらず一定である。したがつて船は転心の位置に基づく独自の旋回性を持つ。この旋回性を、操縦性と回転性とに分けると、それぞれがその船独自の性質を持つので、これらは他の船と比較できる指数で表わすことができる。

2 船 の 転 心

静止中の船の衝撃中心位置 O' は

$$\overline{O'E} = K^2 / \overline{AE}$$

ただし E ……横押中心 (押して船が真横に水平に平行移動する点)

A ……舵力の作用点

K ……船の質量と横進付加質量との和による E 点を軸とする慣性乗率

であり、進行中の船の転心位置 O は

$$\overline{OE} = K^2 / \overline{FE}$$

ただし F ……舵力の作用点と旋回遠心力の作用点との合成作用点であつて、舵力や遠心力の大きさには無関係である。そして、8.2m の 4 軸 2 枚舵の模型船の実験値は第 1 図の通りである。

これを計算によつて合成作用点 F の位置を求めてみると、

$$M\overline{FG} = (M + m) (\overline{AG} - \overline{FG})$$

ただし $M = 93.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ……船の質量

$m = 79.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ ……横進付加質量

$$\therefore \overline{FG} = 2.32 \text{ m}$$

* 長崎造船大学

$$\overline{F_{\text{衝}}} = 2.43 \text{ m}$$

となり、また

$$\overline{OE} = K^2 / \overline{FE}$$

ただし

$$K = 2.150 \text{ m}$$

$$\therefore \overline{FE} = 2.34 \text{ m}$$

$$\overline{F_{\text{衝}}} = 2.52 \text{ m}$$

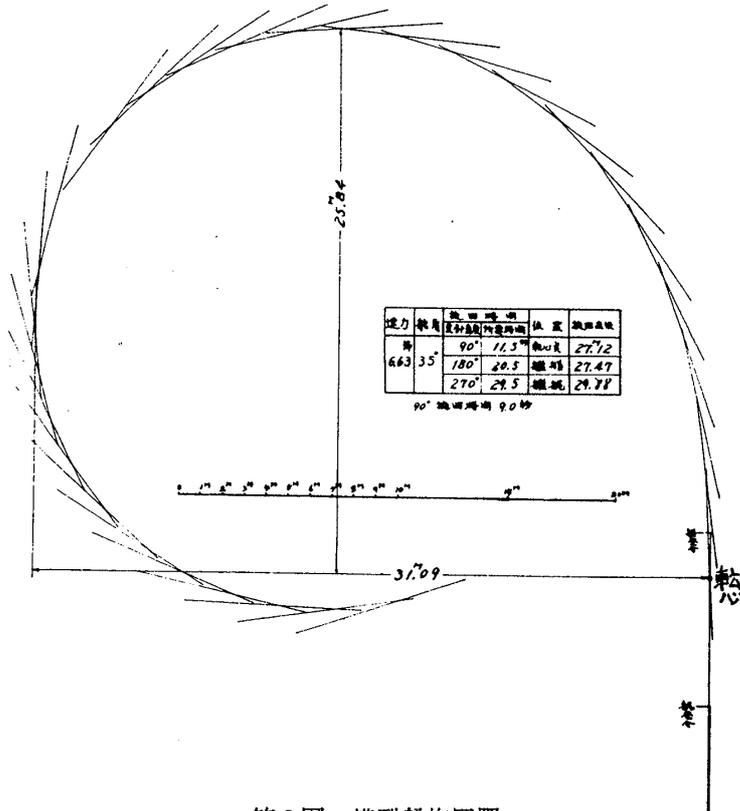
となる。さらにまた、静止中の模型船の「押位置対回転軸位置曲線」¹⁾から、回転軸位置 $\overline{O_{\text{衝}}} = 1.81 \text{ m}$ に対する横押位置を求めると $\overline{F_{\text{衝}}} = 2.48$ となる。

すなわち進行中の船の転心位置は旋回遠心力 (M に作用する) の作用点と舵力 (M と 舵 に作用する) の作用点との合成作用点に対する静止中の船の衝撃中心に一致し、しかも遠心力の強さ、舵力の強さに無関係に一定である。

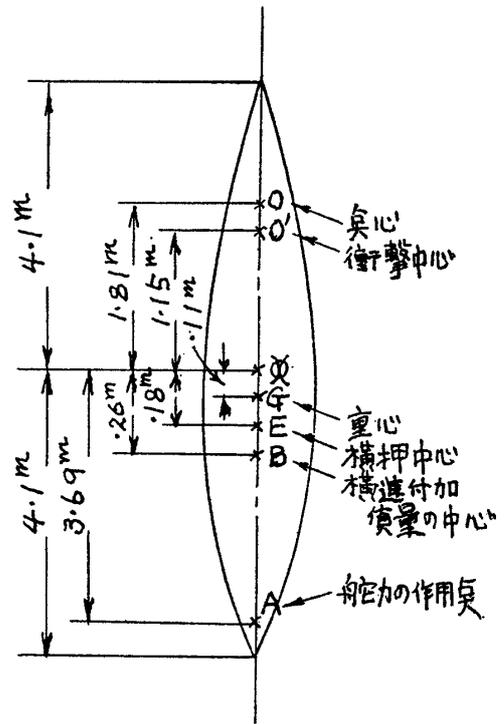
したがって、進行中の模型船の操舵開始時から旋回中の運動を、真上から1秒間隔で写真に重ね撮りした一例を第2図に示すごとく、転心位置は操舵開始時から常に一定である。

また静止中の模型船に横押推進器を付けて横進力を与え、船の運動を真上から1秒間隔で写真に重ね撮りした一例を第3図に示すごとく、静止中の船でも衝撃力でなく横進力を加えると、船が回転を始め自転遠心力が生じて進行を始めると同時に旋回遠心力が生ずるので、転心位置は横推力を加え始めた時から常に一定である。

そして、これらは船が静止中と旋回中に、横進付加質量とその慣性乗率とが変らない場合であつて、風その他の船に作用する外力がなく、船の横傾斜 15° 以内で縦傾斜ほとんど無い場合²⁾であるから、無風の平水中で普通の船が操舵して旋回する場合には、転心は其船固有の定点であつて、船速や舵角のいかにかわららず一定である。



第2図 模型船旋回図



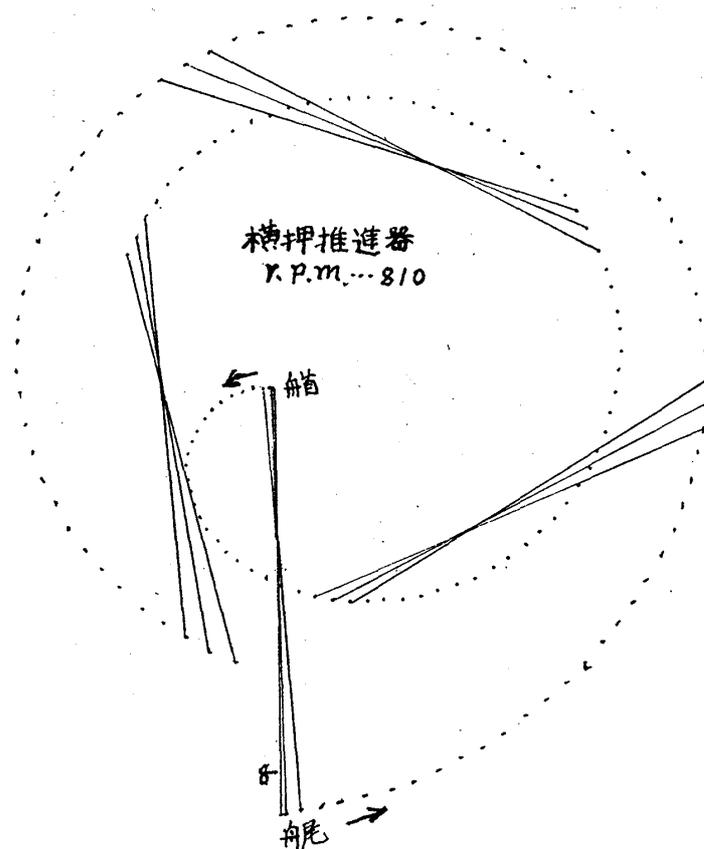
第1図 8.2m 模型船の転心位置

船の転心点を求めるには船首から船長の $1/3.5$ 付近に適當の長さ甲板上に中心線を白線で画いておいて、舵の位置に索を着けて横に引張るか、あるいは舵の位置を他の曳船で横に押して、船が旋回を始めたとき真上から第4図に示すごとく写真を重ね撮りして求められる。

3 旋回性とその指数

船の転心位置が、船の質量と回転付加質量とによる回転抵抗の最小となる軸の位置に、近いか遠いかによつて旋回は容易になるか困難になる。また回転付加質量の大きい程船の操縦性あるいは追従性が悪くなり、回転付加質量の慣性乗率が大きい程回転性が悪くなる。

一つの船では転心位置が一定であるから、それに基づく独自の旋回性を持つ。この旋回性を操縦性と回転性とに分けると、それぞれがまた独自の性質を持つので、これらを他の船と比較のできる指数で表わすことができる。



第3図 8.2m 模型船横押旋回

回頭する角度は大きくなる。また舵力を加え終った点からさらに1ラジアン回頭した点すなわち定円点で角速度が最大となり、それ以後の旋回では、回頭角速度が船の前進速度の低減とともに減少し、船の前進速度の一定となる点から先で一定となる。旋回半径は定円点以後の旋回では一定である³⁾。

したがって、原進路と θ_1 の角をなす直線上の各定円点は、舵角または船速に比例してすなわち原点からの距離に反比例して回頭角度が伸びるので、伸びた各定円点を結んだ直線は原進路と θ_1 より小さい角 θ_s をなす。

θ_s は舵力の変化に対する最大回頭角速度の変化の度合すなわち操舵に対する回頭応答の度合を、その度合の変化の方向とともに示すので、 θ_s はその船の操縦性（追従性）を表わす。

理想的な旋回すなわち原点から円を画いて旋回する場合の定円点、すなわち原点から1ラジアン回頭した点の $\theta_s = 28.65^\circ$ を基準にとり、これで割って $\theta_s / 28.65^\circ = \theta_s$ は操縦性指数（追従性指数）を表わす。最良の場合1で、悪くなるにつれて小さい数となり、最悪の場合0である。

3.2 回 転 性

原点において瞬間的に舵力を加え、また旋回中の速度低減がない場合には、原点から原進路と θ_1 の角をなす直線上の各定円点に到るまでの航跡は、それぞれただ一本であるが、それから先は各定円点ごとに船速と舵角の組合せで、原点と定円点を結ぶ直線と $(32.7^\circ + \theta_1)$ の角をなす直線上に中心を持つ大小無数の旋回円を持ち、また同直径の旋回円でも角速度の異なるものがある。

したがって旋回円を考える場合に、船速か舵角のいずれかに限定すると、各定円点はそれぞれ一つの旋回円を持つことになる。それで船速を一つに限定し舵角を変えて考えると、各定円点の持つ旋回円の半径 R は

$$R = V \sqrt{I/2P_\delta \cos \delta \Delta A}$$

ただし I : 船の質量と回転付加質量による慣性能率

P_δ : 舵角 δ の舵の直圧力

δ : 舵角

であつて $\sqrt{\delta}$ に反比例するから、各旋回円の中心を直線で結んだ線は原進路と θ_2 の角をなす。

3.1 操縦性（追従性）

操舵開始点すなわち原点において舵力を瞬間的に加え、また旋回中の速力低減のない場合を考えると、船は転心の回りに回頭を始め、角速度が次第に増して 57.3° (1ラジアン) 回頭した定円点で最大となり、それから後の回頭では一定となる³⁾。したがって原点と定円点 (X, Y) とを結んだ線が原進路となす角 θ_1 は

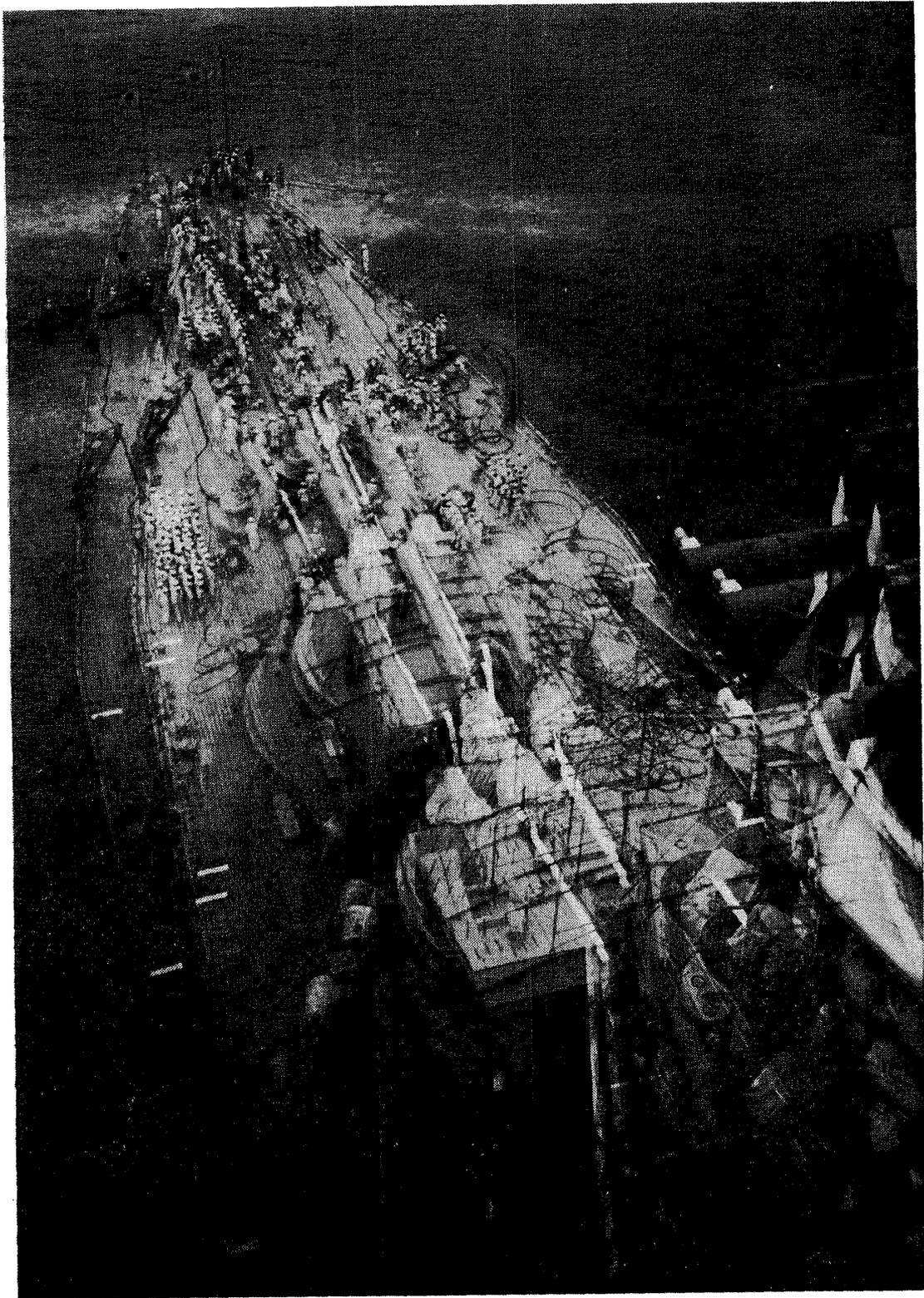
$$\begin{aligned} \theta_1 &= Y/X = \int_0^{t_1} V \sin \psi dt / \int_0^{t_1} V \cos \psi dt \\ &= \int_0^{t_1} \tan \psi dt \end{aligned}$$

ただし V : 船速, ψ : 回頭角度,

t_1 : 1ラジアン回頭時間

であつて舵角や船速の大小にかかわらず一定である。すなわち総ての旋回の各定円点は総て原進路と θ_1 の角をなし原点を通る直線上にある。

しかし実際の場合は、舵力を瞬間的に加えるのでなく操舵速度を毎秒 $2^\circ/s$ にしているので、舵角が大きいほど時間が長くかかり、船速が早いほど比較的について時間が長くかつたことになり、操舵中に船の



第4図 船の転心測定

しかし実際の場合は、操舵速度が一定であるため原進路と θ_1 の角をなす直線が θ_2 の角をなす直線に移るように、 θ_2 をなす直線上の各定円点が持つ旋回円の半径が、その直線となす角は、原進路とその直線との交点からの距離に反比例して $(32.7 + \theta_1)$ より小さい角になるので、各旋回円の中心を結んだ線は一直線となり、原進路と θ_2 より小さい θ_0 の角をなす。

θ_c はすべての船速について、舵角の変化に対する旋回円の変化の度合をその旋回円の中心の移動方向とともに示すので θ_c はその船の回転性を表わす。

理想的な旋回すなわち原点から円を画いて旋回する場合の中心位置 $\theta_c=90^\circ$ を基準にとり、これで割つて $\theta_c/90^\circ=\theta_c$ は回転性指数を表わす。最良の場合 1 で悪くなるにつれて小さい数となり最悪の場合 0 である。

3.3 旋 回 性

操舵を瞬間的に行なう場合のごとく θ_1 の直線が原点を通る場合には θ_s と θ_c は同じ値をとるが、しかし実際の場合には操舵時間の関係で θ_1 が θ_s になり、その結果 θ_2 が θ_c となるので θ_s の方が θ_c より小さくなる。また θ_s の直線は θ_c の直線上に中心を持つ各旋回円のその開始点を示しているの、旋回性は操縦性 θ_s と回転性 θ_c の平均を θ_T として θ_T で表わされる。また旋回性指数は θ_s と θ_c の平均値 θ_T で表わされる。

船の標準の指数は大体次の通りである。

	戦艦	巡洋艦	駆逐艦	客船	商船
θ_s	.50	.60	.75	.60	.55
θ_c	.60	.80	.95	.80	.75
θ_T	.55	.70	.85	.70	.65
舵面積比	1/35	1/50	1/53	1/55	1/65

船の旋回性は船体と舵が定まると、船速や舵角の大きさに関係なく定まるものであつて、船体の一部を変えたり舵面積を変えると、それは別の船に変つたことで旋回性も変わる。

第5図と第6図に実船とその 1/24 縮尺模型船との旋回性指数を示す。実船の $\theta_T=.63$ で模型船の $\theta_T=.77$ である。

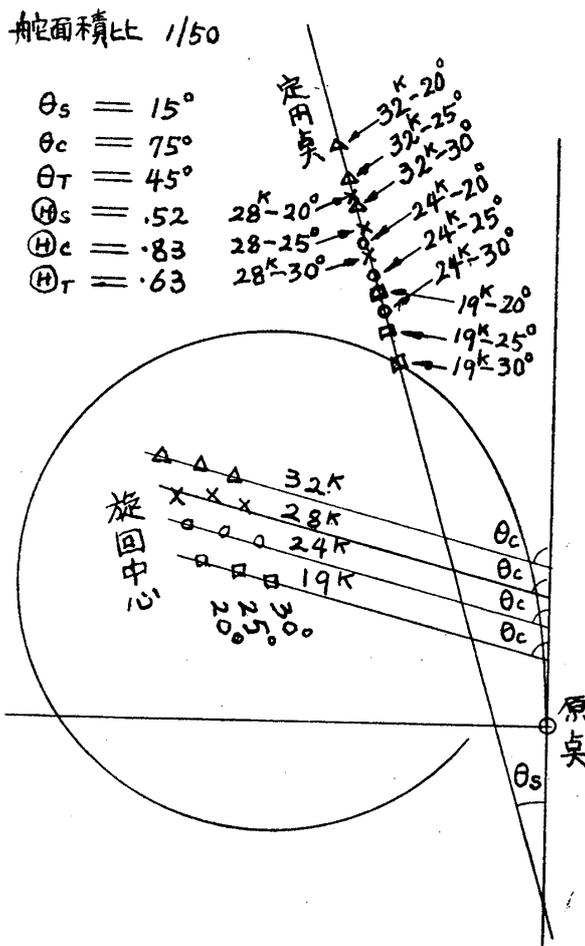
4 旋 回 圈

旋回圏は船速と舵角の組合せで大小無数のものが得られるので、旋回圏の大きさの変化の仕方は旋回性 θ_T で表わされるが、旋回圏の大きさそのものは船速と舵角の両方を限定しなければならぬので、旋回性として表わし他の船と比較することは困難である。

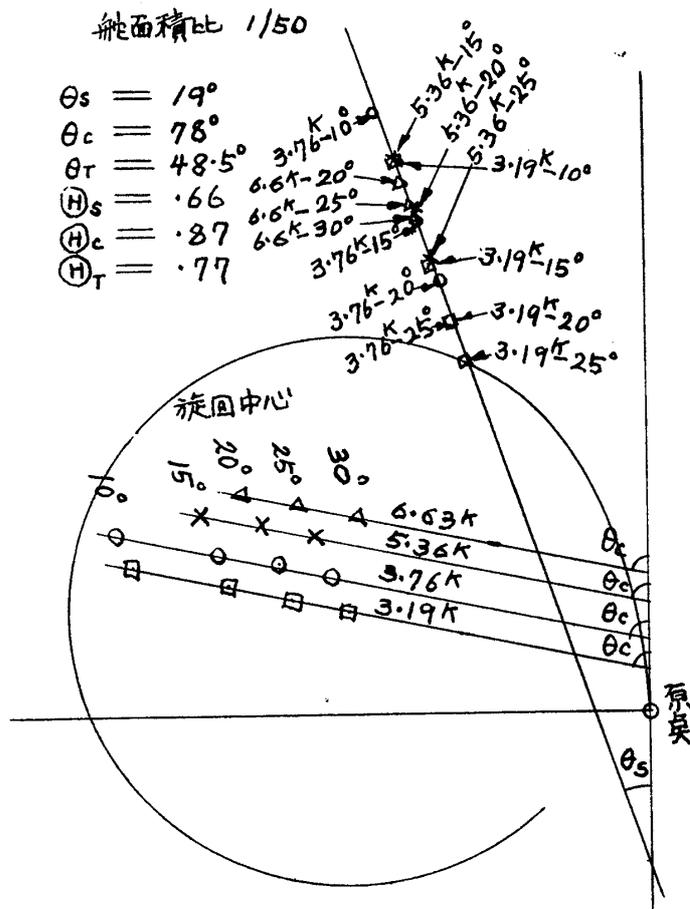
しかし船の旋回を設計する場合には、船速 4/4、舵角 35° で、旋回を船長 L の倍数で例えば縦距を $2.5L$ 、横距を $3L$ のごとく設計する。それででき上つた船の旋回圏を求めると、船速 4/4 で舵角 35° と 15° の旋回試験を行なつて旋回圏を求めると、 θ_s と θ_c がわかるので、同一速度で他の舵角の旋回圏を内挿あるいは外挿して画くことができる。

5 保 針 性

保針性は小舵角で進路が保てることであるから、小舵角の操縦性のことであつて θ_s で表わされる。しかし一推進軸一枚舵の船では取舵と面舵とで舵力が異なり、また直進するためには推進器の回転方向に起因する船の回頭を防ぐために抵舵を必要とするので、適当な舵角例えば 15° で面舵と取舵の旋回を行なつて、操舵し終つた点の回頭角度の大きさを求めると、その和の小さいほどまたその差の大きいほど保針性が悪いことになる。



第5図 実船旋回の原点、定円点および旋回中心の関係



第6図 1/24 縮尺模型旋回の原点, 定円点 および旋回円中心の関係

約 30° 以内の場合と約 30° 以上の場合とで、船の回頭の減衰の様子が非常に異なるのであつて、船の斜行角度と圧力中心位置の問題であるが、いずれにしても船の質量と回転付加質量とによる慣性能率が大きい程、回頭の減衰に助けとなるので θ_T の小さいほど良いということがいえる。

7 旋回試験

でき上つた船の旋回性指数と旋回圏は次のようにして求められる。船の転心点を前述の方法で求めて置き、旋回試験は満載排水量、船速 $4/4$ 、舵角 35° と 15° で面舵と取舵の計4回の旋回を行ない、転心点の航跡を原点、操舵終了点、 15° 、 30° 、 45° 、定円点（操舵終了点からさらに 57.3° 回頭した点）、 90° 、以後 30° ごとに 270° 回頭点までの各位置を測定すれば次の値を求めることができる。

- 操縦性 θ_s とその指数 $\Theta_s = \theta_s / 28.65^\circ$
舵角 35° との両旋回の定円点を直線で結んで θ_s を求める。取舵と面舵とそれぞれ同じ値である。
- 回転性 θ_c とその指数 $\Theta_c = \theta_c / 90^\circ$
同上旋回圏の中心を直線で結んで θ_c を求める。
取舵と面舵とそれぞれ同じ値である。
- 旋回性 $\theta_T = (\theta_s + \theta_c) / 2$ とその指数 $\Theta_T = (\Theta_s + \Theta_c) / 2$
- 保針性
舵角 15° の面舵と取舵の旋回でそれぞれ舵を取り終つた点の回頭角度を求め、和が大きいほど、また差が小さいほど保針性が良い、また Θ_s が大きいほど保針性が良い。
- 進路安定性
 Θ_s が1のとき最不安定で、小さい数になるほど安定となり、0ときの最安定である。

7 進路安定性

進路安定性とは船が直進中（抵舵を必要とする場合は抵舵の状態）に外力によつてある角度強制回頭させられ、その外力が止んだ後に回頭がどのように減衰するかということである。外力が止んだとき船には惰勢による回転力が残され、船の質量と回転付加質量との和による慣性能率の最小となる軸の回りに回転する。また船は原進路方向の船速と強制回頭方向の船速との合成速度で合成方向に進むので、その方向の抵抗を受けて偶力が生じ、その合成作用点の回りに回頭する。したがつて船の回頭は段々強くなる。

しかし船が斜行する場合の抵抗の作用点は、斜行角度 0 から 30° 位までは急激に首から船長の $3/8$ 位までに移動し、 30° から 60° 位まではほとんど移動せず、 60° から 90° までは急速に横押中心まで移動する。したがつて外力により強制回頭させられた角度が約 30° 以内であれば、回頭角度が増すと偶力が急激に減少するので、船はある程度の回頭角度に到してから減衰を始める。しかし強制回頭角度が約 30° 以上であれば、偶力の減少が少ないので 60° 近くまで回頭して減衰を始める。

したがつて外力で強制回頭させられた角度が

f. 旋回圏

取舵または面舵の舵角 35° と 15° の両旋回圏から θ_s と θ_c を用いて他の舵角の旋回圏が画ける、

8 結 言

普通の船が無風の平水中で操舵して旋回する場合の転心位置はその船固有の定点であつて、船速や舵角の大きさに無関係である。したがつて船速や舵角の大きさを変えて行なつた旋回の各定円点は皆原進路と θ_s の角をなす直線にあるので、 θ_s でその船の操縦性が表わされる。また一つの速度で舵角を変えて行なつた旋回の定常旋回円の各中心点は、原進路と θ_c の角をなす直線上にあるので、 θ_c でその船の回転性が表わされる。 θ_s と θ_c を原点から円を画く理想的な旋回の θ_s と θ_c でそれぞれ割つた Θ_s と Θ_c で操縦性指数と回転性指数が表わされる。旋回性は θ_s と θ_c の平均値 θ_T で、また旋回性指数は Θ_s と Θ_c の平均値 Θ_T で表わされる。そして完成した船のこれらの指数は旋回試験を行なつて求めることができる。

参 考 文 献

- 1) 赤崎繁：船の旋回に関する実験的研究，造船協会々報，第 61 号，（昭和 12 年 12 月）
- 2) 赤崎繁：船の旋回中の見掛の水の質量に就て（第 4 報），造船協会々報，第 73 号，（昭和 17 年 12 月）
- 3) 赤崎繁：船の旋回性に就て，造船協会々報，第 66 号，（昭和 15 年 6 月）