

トリムによる船の静復原力の変化

田 宮 真

船の復原力計算では、横傾斜にともなうトリムを無視しているが、実際には浮心の前後移動によりトリムを生じ、このため復原力が多くの場合に減少することを明らかにした。

緒 論

造船技術が年々進歩し、長さ 200 m 以上の油送船が多数建造せられる今日でも、小型船の遭難はあとを絶たない。統計によると転覆、浸水、行方不明船舶は最近においても年間平均 600 隻をかぞえ、隻数 % として保有船腹の約 0.8% に達する。これらの事故は多数の因子が組み合せて生ずるもので、船舶建造ならびに運航上あらゆる点に注意をばらう必要があるが、なかでも横復原力の不足はもっとも危険な事故原因となるので、十分な横復原力を確保しなければならない。

このことはさきに制定された運輸省の復原力基準にも明らかで、すべての計算の基礎が、復原力曲線にもとづいている。

復原力曲線は古くから種々の計算法が提案されたが最近にいたるまで、積分器（インテグレータ）を使用する方法がもっとも迅速確実とされてきた。計算機の発達により、これをさらに正確に求めることも現在では可能であるが、一般にはこの計算に際して船の横傾斜だけを考え、横傾斜にもとづく縦傾斜（トリム）を無視している。このため実際船舶が水上に浮かんで傾斜する場合は条件が異なり、計算ではトリムを固定するモーメントを暗に仮定していることになる。これに注意して行なわれた一二の計算^{1),2)}や実験では、トリム変化を考えた場合復原力がかなり減少することが知られており、計算による復原力がもともと小さい場合にはかなり危険なことになる。本小論においては、この点について若干理論的な考察を行なった結果についてのべる。

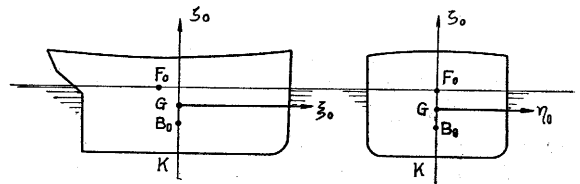
なお本文でいうトリムは、横傾斜にともなっておこるトリムをいうもので、計画の（直立状態における）トリムとことなるトリムで（つまり重心位置が計画時から前後にずれた状態で）浮くときの復原力を問題にするものではないことをことわっておく。

定 義

本文においてはつぎの記号と定義をもちいる（第 1~3 図参照）。第 1 図は船がある排水量で直立して浮かんでいる状態（添字 0 をつける）を示す。

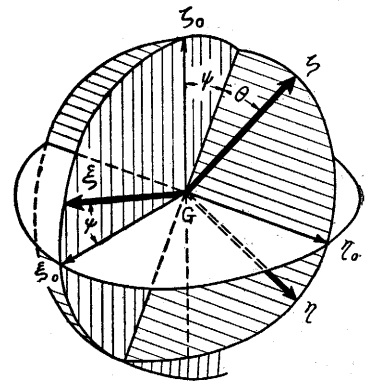
$G-\xi, \eta, \zeta$: 重心 G が原点をとり、船体中心線面内に（船体に固定） ξ, ζ 軸をとる。直立のとき ζ 軸は鉛直、 ξ 軸は水平とする。 η 軸は ξ, ζ に直角にとる。

- θ =横傾角: $\xi\zeta$ 面と $\xi\zeta_0$ 面とのなす角
- ψ =縦傾角, トリム角: ξ 軸と $\xi_0\eta_0$ 面とのなす角
- M =横復原力: 船を一定排水量のまま一定の θ にたもつためにあたえるべき偶力
- GZ =横復原挺= M/Δ
- Δ =排水重量: 船体重量に等しい
- $\nabla = \Delta/\gamma$ =排水容積: γ は海水の比重量
- KG =重心の高さ
- B =浮心: 浮力中心すなわち排水容積の重心
- F =浮面心: きつ水面の面積中心



第 1 図 直立状態

第 3 図は任意の θ のときに、 G をとおり ξ_0 に直角な鉛直面による船体横断面を示す。一般に $\psi \neq 0$ の条件のもとではその時の浮心 B はこの面内にはないが、普通の計算ではそのことによるトリム変化



第 2 図 傾斜状態

は考えず、 B 点のこの鉛直面への投影点に浮力 $\gamma \nabla = \Delta$ が鉛直上方にはたらくものとして M を算定する。 GZ は G と B との η_0 方向の距離をあらわすことになる。

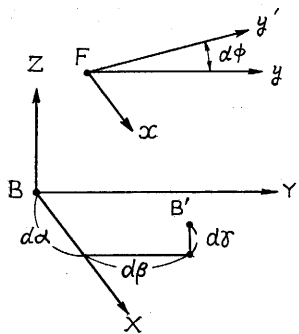
第 3 図 任意の θ における $\xi_0=0$ 断面

実際には θ に対応して ψ がさだまり、 B は常に G と同一鉛直面内にくるはずである。

復原力曲線とよばれるものは一定の Δ, KG のもとでの M を θ の関数としてあらわしたもので、 GZ を同様に θ に対してあらわした復原挺曲線もしばしば使用せられる。

横傾斜にもとづくトリム

船が θ だけ横傾斜したときのトリム ϕ を近似的に求めるのに、つぎのように考える。まずトリムを許さずに θ だけ傾け、この状態から η_0 まわりの固定偶力を開放して θ は一定に保ったまま自由な状態にしたときトリム角が ϕ になったと考える。



第4図 微小傾斜角による浮心の移動

第4図 微小傾斜角による浮心の移動をとることが証明されている。このとき最初 B にあった浮心は B' にうつるが、 B をとおり、 x, y 軸に平行に X, Y 軸を、これらに直交する鉛直軸 Z をとるとき、 B' の X, Y, Z 座標を $d\alpha, d\beta, d\gamma$ とすると

$$d\alpha = \frac{P_{xz} d\phi}{\nabla} \quad (1)$$

$$d\beta = \frac{I_x d\phi}{\nabla} \quad (2)$$

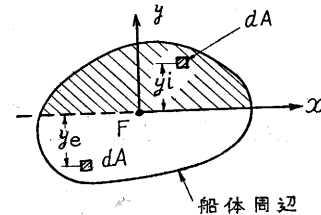
$$d\gamma \ll d\alpha, d\beta$$

となる。ここに

$$P_{xz} = \int xy_i dA - \int xy_e dA \quad (3)$$

$$I_x = \int y_i^2 dA + \int y_e^2 dA \quad (4)$$

積分は xFy 面についておこなう (第5図)。 y_i は傾斜 $d\phi$ によって水没する側の面積素片 dA までの x 軸からの距離で、 y_e は露出する側の距離である。



第5図

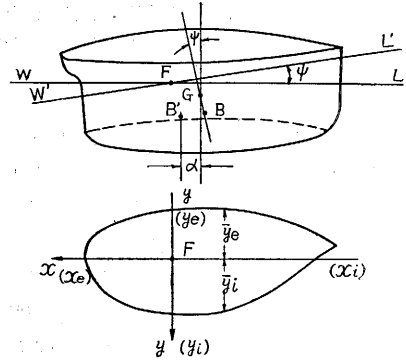
今これを横傾斜に適用すると、 $\phi \equiv 0$ のもとでは x 軸、 X 軸は常に ξ_0 に平行である。便宜上 X, x の正のむ

きを ξ_0 と反対にとり、 ξ_0 の方向に (船を後から) 見たとき、 η_0 の正の側の水面が上がるような横傾斜を正とする。このとき横傾斜 θ による浮心の X 方向の移動 α

は ($\theta=0$ のとき B は G の鉛直下方にあることを注意して)、

$$\alpha = \int_0^\theta \frac{P_{xz} d\theta}{\nabla} \quad (5)$$

であたえられる (第6図)。 P_{xy} は θ の関数である。



第6図 傾斜時の浮心位置

浮心 B' は G と同一鉛直面内にないから、ここでトリムを自由にすると、水線 WL は変化して $W'L'$ となり、 B' は B にうつる。 ϕ が小さく、 $\overline{BB'}$ はほとんど WL に平行であるからつぎの関係式がえられる (第3図をも参照)。

$$BZ \cdot \phi = \overline{BB'} - \alpha$$

一方 (2) の式を傾斜角 ϕ に対して応用すると

$$\overline{BB'} = \frac{I_y \phi}{\nabla}$$

よって

$$\phi = \frac{\alpha}{\frac{I_y}{\nabla} - BZ} \quad (6)$$

実際には

$$\frac{I_y}{\nabla} \gg BZ$$

であるため

$$\phi \doteq \frac{\alpha}{\nabla} = \frac{\nabla \int_0^\theta P_{xz} d\theta}{I_y} \quad (7)$$

(7) 式によつて任意の θ に対して ϕ が近似的にもとめられる。第6図の座標に従って I_y, P_{xy} をあらためてかくと

$$P_{xy} = \int xy_i dA - \int xy_e dA = \frac{1}{2} \int x (\bar{y}_i^2 - \bar{y}_e^2) dx \quad (8)$$

$$I_y = \int x_i^2 dA + \int x_e^2 dA = \int x^2 (\bar{y}_i + \bar{y}_e) dx \quad (9)$$

トリムによる GZ の変化

これは第6図の B' が、 ϕ によつて η_0 方向 (y_i 方向) に移動する量 β を求めればよい。 β が正ならば GZ は

増し、負ならば GZ は減ずる。再び (1) 式を適用すると

$$\beta = \frac{P_{yz}\psi}{\nabla} \quad (10)$$

ただし

$$P_{yz} = \int yx_i dA - \int yx_i dA \quad (11)$$

しかるに簡単な考察によって

$$P_{yz} \equiv -P_{xy} \quad (12)$$

なることが証明できるから

$$\begin{aligned} \delta GZ &\equiv \beta = -\frac{P_{xy}\psi}{\nabla} \\ &\equiv -\frac{P_{xy}}{I_y} \int_0^\theta P_{xy} d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

(13) によってトリムにもとづく GZ の増分が計算できるが、 I_y 、 ∇ は常に正であるから、 P_{xy} が θ に対してその符号をかえなければ β は常に負となり、 GZ は減少する。 P_{xy} は $\theta=0$ のとき 0 であるが、 θ の有限値に対して P_{xy} がふたたび 0 になり、その符号を変えずと $\delta GZ > 0$ の範囲が生じうるが、普通の船では $\theta=0 \sim 90^\circ$ の範囲ではこういうことはおこらない。それゆえ

“トリムを自由にすると GZ は減少する”

ということがいえる。

δGZ は P_{xy} 、 I_y 、 ∇ によって計算できるので、船の形、重量、 θ できまるが、 GZ は第 3 図からわかるとおり、重心の位置が関係する。したがってトリムによる GZ の減少がどのような重要性をもつかは、船の状態によって異なる。

今のところ横傾斜したときの水面に関する I_y 、 P_{xy} の資料は手もとにないので、 δGZ の大きさを一般に推定することも困難である。それで以下に一二の計算例を示し、実測値との比較をあわせて行なうことにする。

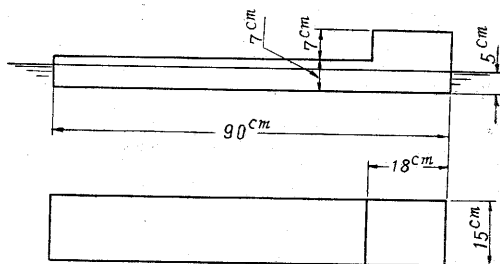
模型 A

もっとも簡単な形状として直方体をえらんだ。第 7 図に直立状態を示す。

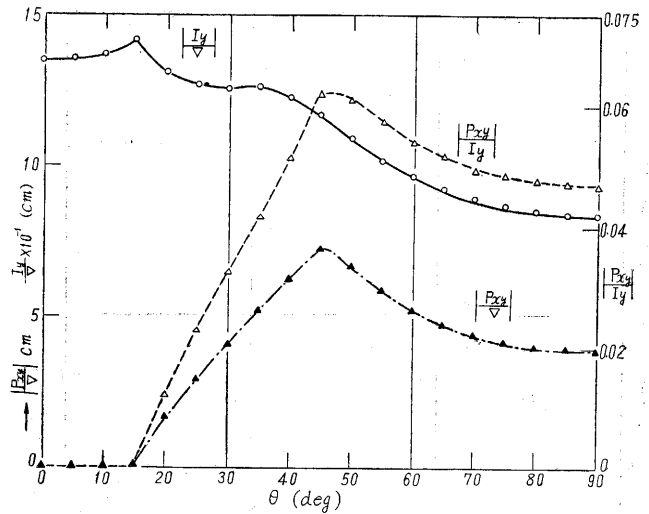
$$\nabla = 6,750 \text{ cm}^3 \quad (\gamma = 1 \text{ gr./cm}^3)$$

$$KG = 4.000 \text{ cm}$$

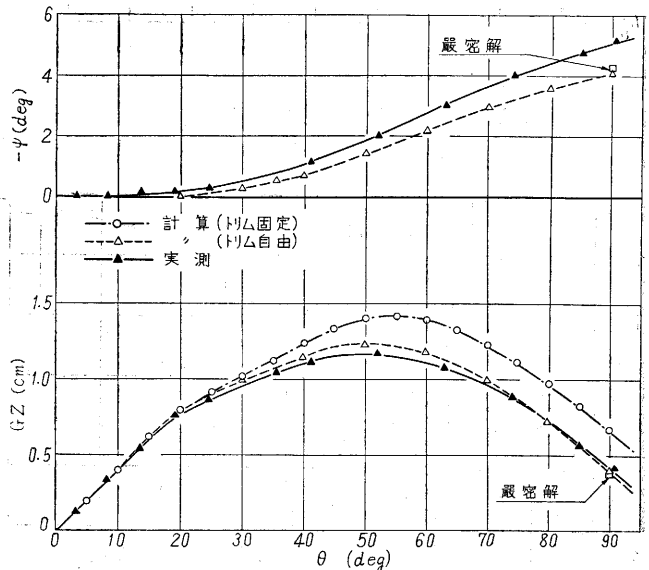
とする。



第 7 図 模型 A



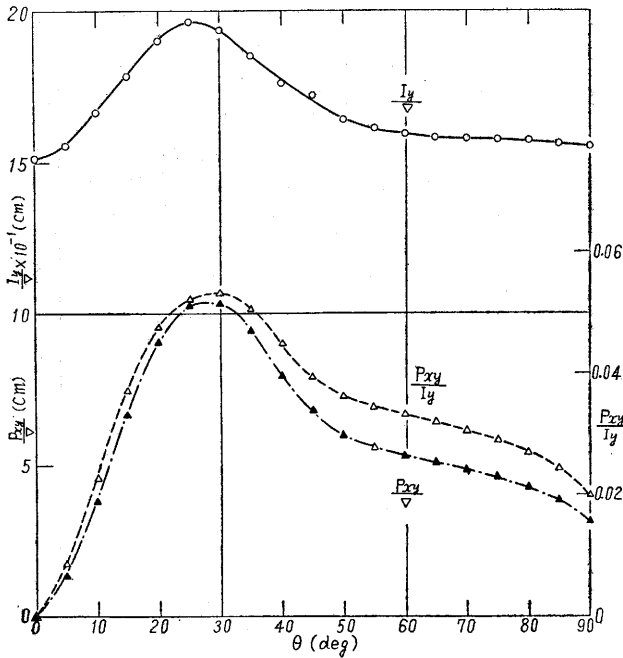
第 8 図 $\frac{I_y}{\nabla}$, $\frac{P_{xy}}{\nabla}$, $\frac{P_{xy}}{I_y}$ (模型 A)



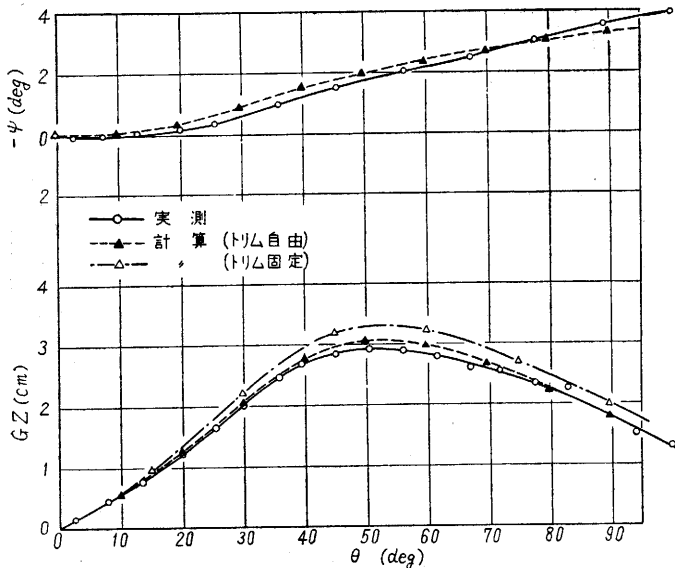
第 9 図 ψ , δGZ (模型 A)

トリムを考えないで、 ∇ を一定にして θ をかえてゆくと、これに対応する水線面の形状がきまり、この水面について P_{xy}/∇ 、 I_y/∇ 、 P_{xy}/I_y を計算すると第 8 図がえられる。水面が前後左右対称の間は、 P_{xy} は 0 である。この船型では P_{xy} が $\theta=0 \sim 90^\circ$ にわたって負となったが、前述のとおり δGZ には影響しないので図には絶対値を示した。 ψ は負で、いわゆる trim by stern となる。

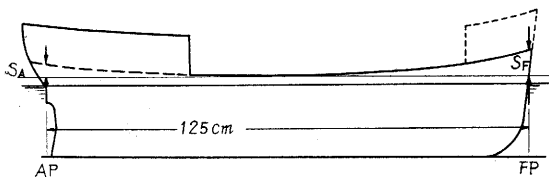
第 8 図をもとにして ψ 、 δGZ を計算した結果を第 9 図にしめす。図にはトリムを 0 とした計算値、これに δGZ の補正をほどこしてトリム自由の状態とした GZ の計算値とともに、静復原力計測装置によって直接計測した GZ 、 ψ をあわせかかげた。 $\theta=90^\circ$ におけるトリム自由のときの ψ 、 GZ はこの場合簡単に計算できるの



第 10 図 $\frac{P_{xy}}{\bar{V}}, \frac{I_y}{\bar{V}}, \frac{P_{xy}}{I_y}$ (模型 B)



第 11 図 $\psi, \delta GZ$ (模型 B)



第 12 図 模型 C, プロファイル

で、その値 $GZ=0.376$ cm, $\phi=4.25^\circ$ も記入してある。

この図から補正計算値と通常の計算値とはかなり差があること、補正値と実測値はほぼ一致することが認められる。トリムを考えに入れた 90° における厳密値と実測値との差は模型寸法の僅小の偏差、装置への船体取付の誤差、装置に存在するガタ、摩擦等によるものである。

模型 B

この模型は本誌 Vol. 12, No. 11 に渡辺弥幸助手の報告した模型 M. 12 で長さ=120 cm, 幅=20.0 cm, 深さ=11.815 cm である。この模型について

$$\bar{V}=7,180 \text{ cm}^3$$

$$KG=4.769 \text{ cm}$$

の場合の $\phi, \delta GZ$ を計算した。模型は平甲板で、上部構造なしである。

P_{xy} 等を第 10 図に、 ϕ, GZ を第 11 図に示す。

GZ のトリム 0 における値は、電子計算機を使用してえられたものであって、通例の積分器によるものより精度は高いと考えてよい。 δGZ の補正を行った値と、計測値はここでもよく一致している。

トリム角もよくあっている。ただしトリムの影響はあまり大きくない。

模型 C

最後に小形貨物船模型 C についての計算結果を示す。この模型の主要寸法等は次に記すとおりで、実船の長さは 50.00 m である。ただし実船には上部構造として約 17 m の船尾楼と 7.5 m の船首楼があるが、本計算では、横傾斜時のトリムをなるべく大きくするために、船首楼はないものとした (第 12 図)。

垂線間長さ=1.250 m, 幅=0.210 m,

深さ=0.105 m, 船尾楼全長=0.430 m,

船尾楼高さ=50 mm,

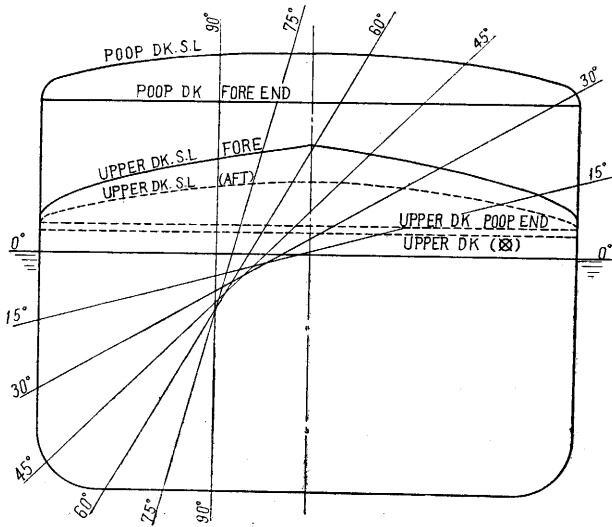
舷弧 $S_F=33.6$ mm, $S_A=16.9$ mm,

排水量=18,330 cm^3 ,

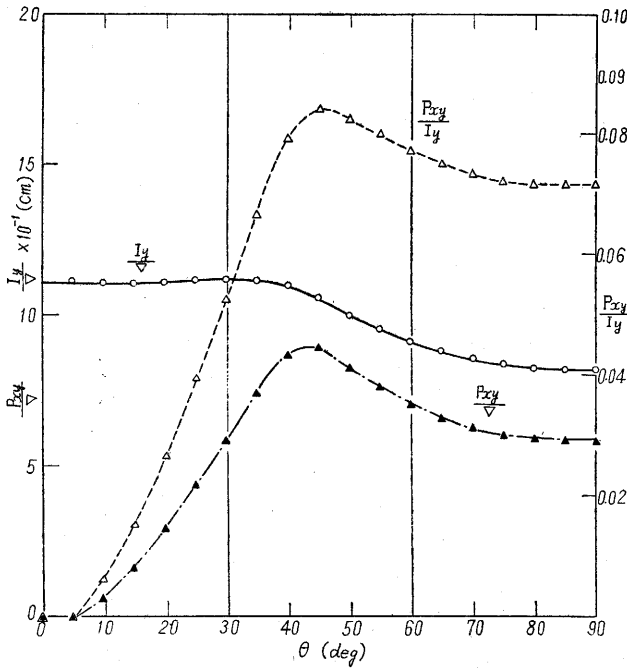
$KG=7.30$ cm, $GM=1.62$ cm

本模型において、トリムを 0 とした時の水線面を第 13 図に示す。第 14 図はこれらの水線面に対して計算せられた P_{xy} 等で、トリム角、 δGZ は表(次ページ)に示すとおりである。

P_{xy} が大きいために $\phi, \delta GZ$ ともかなり大きくなっている。実験値は未整理であるが、概略を記した。これと対照すると、この場合はトリムのため GZ 曲線が大幅に劣化したことになる。実際には船首楼があつてよほど改善せられるが、この程度の小型船で乾舷一杯に満載して航行するときは注意が肝要である。



第 13 図 傾斜水面 (模型 C, トリム固定)



第 14 図 $\frac{P_{xy}}{\nabla}, \frac{I_y}{\nabla}, \frac{P_{xy}}{I_y}$ (模型 C)

θ (deg)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ψ (deg)	0.01	0.17	0.56	1.25	2.25	3.30	4.31	5.20	5.97
δGZ (cm)	0	-0.01	-0.06	-0.19	-0.33	-0.41	-0.47	-0.54	-0.61
GZ (cm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.6 (実測)

結 論

以上をまとめるとつぎのようにいえる。

- 1) 横傾斜にもとづくトリム角 ψ およびトリムによる復原挺の増分 δGZ は (7), (8), (9), (13) 式によって計算することができる。
- 2) 普通の場合トリム角 ψ の正負にかかわらず, δGZ は負、すなわちトリムをゆるすとき復原挺は減少し、減少量はトリム角の絶対値に比例する。
- 3) 式 (7), (8), (9), (13) は近似式であるが、補正量をもとめるのには十分である。
- 4) 横傾斜にもとづくトリムは、甲板が没水してから急に大きくなるから、横傾斜が小さい間は, GZ の減少はほとんど無視できる程度である。しかし乾舷が小さく、復原力の正の範囲もまた小さい場合には、トリムによる復原力減少を無視することは危険である。

計算に必要な P_{xy} 等は、水線面がきまれば容易に計算できるが、実際には水線面をきめるのに手数がかかる。ことに傾斜角 θ が大きくなると船楼や、舷弧(甲板面の前後方向のソリ)が関係してくるので、簡単な推算が困難になる。主要寸法、船形の代表的なシリーズに対して P_{xy} 等の推定図表を作製することができればわざわざ補正計算に手間をかける必要がなくてすむが、今のところ資料不足である。

(1961. 2. 7)

文 献

- 1) J.W. Bonebakker; "Initial Metacentric Height of Small Seagoing Ships and the Inaccuracy and Unreliability of Calculated Curves of Righting Levers", Intern. Shipbg. Progr., Vol. 4, No. 40.
- 2) 金山美彦; "トリム変化を許した場合の横復原力" (未公表)
- 3) 渡辺弥幸, 石井善一; "船の静復原力の実測", 生産研究 第 12 卷 第 11 号