

(昭和 26 年 4 月造船協会春季講演会に於て講演)

## 船舶の動揺造波抵抗に関する研究

(其の七, 三次元船型の場合)

正 員 工 学 士 菱 田 敏 男\*

A Study on the Wave-Making Resistance to the Rolling of Ships.

(Report No.7 Ship Forms in three-dimensions)

By Toshio Hishida, *Kogakushi, Member*

## Abstract

In this report, under one assumption the author proposes an equation for the wave-making resistance of the ship forms in three dimensions. One of the characteristics of the equation is that we can use the diagrams prepared in the Report No.3 and then a direct calculation without searching for the velocity potential will be possible.

And by this method he examines systematically in detail the effects of principal dimensions of ships, coefficients of fineness, height of the center of gravity, load conditions, and rolling period etc. upon the resistance, mainly for cargo ship-forms and fishing-boat-forms.

Now this study, the author supposes, comes to a close and the summary of the study is appended at the end of this report.

## 1. 緒 言

著者<sup>(1)</sup>は曩に色々な断面形を持つた壱状体の横揺れによつて生ずる進行波を計算し、併せて之を簡単に求め得る図表を用意しておいた。本報に於ては実際の三次元船型を取扱う。然し之を解くに当り、船体表面の条件より出発して必要な速度 potential を見出すことは仮令近似的にもせよ事実上殆んど不可能であろう。然るに幸い造波抵抗に関する限り、必要なは速度 potential そのものではなく、進行波系の形と大きさなのであるから、之と同じ系を与える様な例えば doublets の配列を求め得るならば、之は船型と造波抵抗に就ては等価である。故にここでは一つの仮定の許に、船体をこの様な比較的簡単な近似等価系にて置換し、この doublets の強度分布を、船の各横断面と同じ断面の壱状体による二次元進行波の波高に結びつけることによつて決定し、間接にではあるが比較的簡単に実船型の造波抵抗を算出する方法を工夫した。

次でこの方法と、前に用意してあつた図表を応用して、主として貨物船型及び漁船型に就て、造波抵抗に対する船の主要寸法、船型係数、重心の高さ、載荷状態、横揺れ周期等の影響を系統的に稍々詳細に調べたのである。

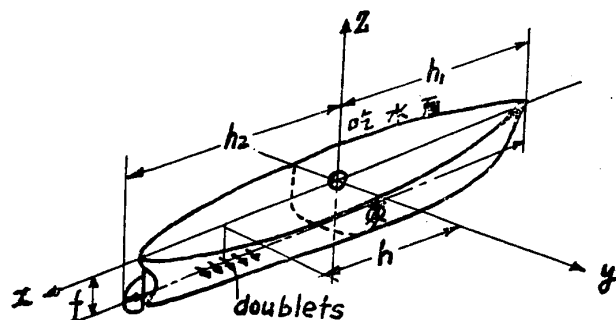
## 2. 計 算 法

船の中央横断面、中心縦断面及び静水面の交点  $O$  を原点とし、之らに夫々垂直に  $x, y, z$  軸をとり、 $z$  は上向を正とする。(第 1 図)

船体表面条件は満足せず従つて船体近傍の波系は違つても、十分遠い所で近似な波系を与え得るならば、その様な doublets の配列は造波抵抗に関する限り船体と近似的に同等である。故にここでは次の様な等価 doublets を採る。

【仮定】 「船の中心縦断面内にて横揺軸（重心を通り静水面に平行とす）に平行な直線上、船の没水部の長さ ( $x = -h_1 \sim h_2$ ) に亘り、 $y$  軸に平行な軸を有する doublets を並べ、その  $x = h$  の近傍単位長さ当りの強さは、 $x = h$  に於ける船の横断面と同じ断面の壱状体が同一横揺軸及び週期にて生成する二次元進行波の振幅  $a$  (特に符号を含める) に比例す。」

\* 浪速大学工学部助教授



第 1 図

$$\xi = \frac{2\pi\sigma k_0^2 \cdot k}{g} \cdot e^{-k_0 f} \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \cdot \frac{y}{r} \left[ J_1(k_0 r) \cos \sigma t - \left\{ \frac{2}{\pi} - H_1(k_0 r) \right\} \sin \sigma t \right] dh; \quad (2)$$

$$\text{但し, } \xi: \text{波面の隆起, } g: \text{重力加速度, } k_0 = \sigma^2/g, \quad r = \sqrt{(x-h)^2 + y^2}, \quad (3)$$

又  $J_1$  及び  $H_1$  は夫々 Bessel 及び Struve<sup>(2)</sup> の函数である。

さて比例常数を決定しなければならない。然し之を純理論的に求めることはむずかしいので実験を併用する。この結果によれば、普通の船の様に細長い物体では、若しそれが全長に亘つて同一断面を有するならば、その中央断面内且つ物体に近い所では進行波の振幅は物体の長さが無限大となつた二次元進行波の振幅に等しい。例えば第 2 図に示す如き長さ  $L$  幅  $B$  を有する水平平板を  $0$  軸の周りに動揺せしめる時、 $x=0$ ,  $y=0.4M$  の位置に於ける進行波の振幅と  $L=\infty$  の時のそれとの比  $e$  は同図の如き変化を示し、普通の船の様に  $k_0 \frac{L}{2} > 1.5$  の場合には  $e$  は殆んど 1 に近い。尚図に於て  $\theta_0$  は横揺振幅である。故にこの水平平板の  $k_0 \frac{L}{2} > 1.5$  の特別の場合に就て  $k$  を次の様に算定することが出来る。(2) 式より平板の近傍 ( $0, y_1$ ) に於ける進行波の振幅は

$$a = \frac{2\pi\sigma k_0^2 k}{g} e^{-k_0 f} a_i y_1, \quad (4)$$

$$i^2 = \left\{ \int_{-h_1}^{h_2} \frac{1}{r_1} J_1(k_0 r_1) dh \right\}^2 + \left\{ \int_{-h_1}^{h_2} \frac{1}{r_1} \left\{ \frac{2}{\pi} - H_1(k_0 r_1) \right\} dh \right\}^2, \quad (5)$$

$$r_1 = \sqrt{h^2 + y_1^2}. \quad (6)$$

$y_1$  は (4) の関係を指定する位置であるがまだ決っていない。之は船の没水部の横寸法とその長さとの関係で変る筈であり、与えられた船の長さに対して横寸法をどうとるかは亦色々考え方が有るであろうが、考える断面の最大寸法をとるのが最も妥当と考えられるから、ここでは簡単の為に  $x$  軸より測つた各断面の最大寸法  $\rho$  の全長に亘る平均

$$\rho_0 = \int_{-h_1}^{h_2} \rho dh / (h_1 + h_2) \quad (7)$$

なる  $\rho_0$  を用い

$$y_1 = c' \rho_0 \quad (7)$$

とおく。然る時は (4) より

$$k = \frac{c}{\frac{2\pi\sigma k_0^2}{g} e^{-k_0 f} \rho_0}, \quad c = \frac{1}{c' i}. \quad (8)$$

故に  $y_1$  をきめる代りにこの  $c$  を定めれば  $k$  が決定される。即ち前述の水平平板及び垂直平板並びに  $E$  及び  $F$  模型船にては実験によつて第 3～第 5 図中に記入した値となる。之らは  $y=105\text{cm}$  に於て水槽の全幅に亘つて計測された波の振幅と (2) 及び (8) 式を用いて算定した値とを対比して求められたものであつて、両振

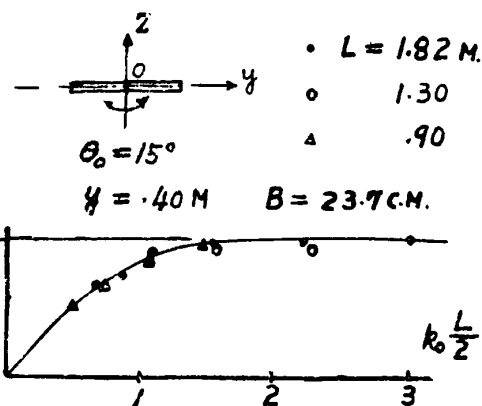
$x=h$  の近傍単位長さに亘る doublets を

$$ka(h) \frac{y}{[(x-h)^2 + y^2 + (z+f)^2]^{3/2}} \cos \sigma t; \quad (1)$$

但し,  $ka(h) \cos \sigma t$ : 強さ,  $k$ : 比例常数,  
 $f$ : doublet の位置の深さ,  $t$ : 時間,

$$\frac{2\pi}{\sigma} = T: \text{横揺週期}$$

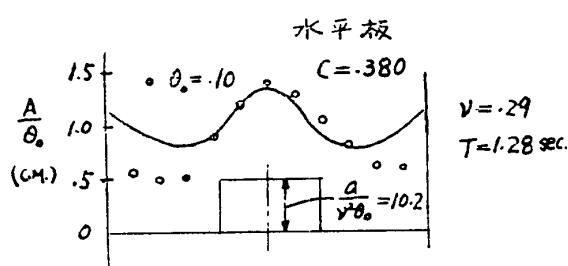
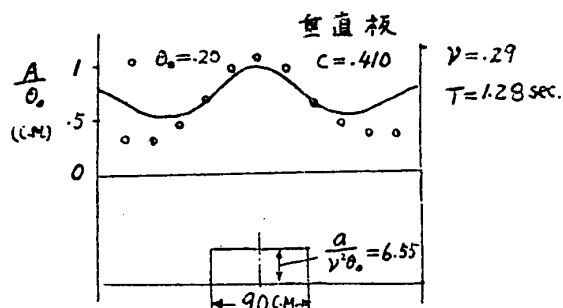
にて表わせば, doublet 系全体による進行波形は容易に次式の如くなる。(附録参照)



第 2 図

## D 平板

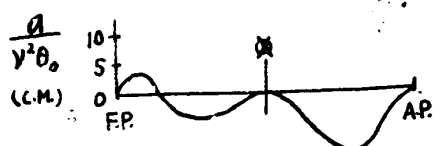
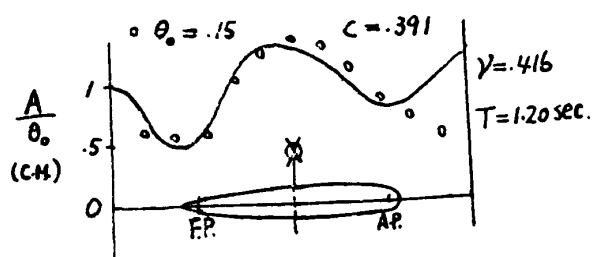
$$L = 70 \text{ cm}, \quad \frac{B}{2} (\text{ord}) = 11.8 \text{ cm}, \\ p_0 = 11.8 \text{ cm}, \quad \theta_0 = 0, \\ y = 10.5 \text{ cm}.$$



第 3 図

## F 模型船

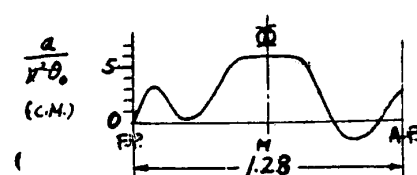
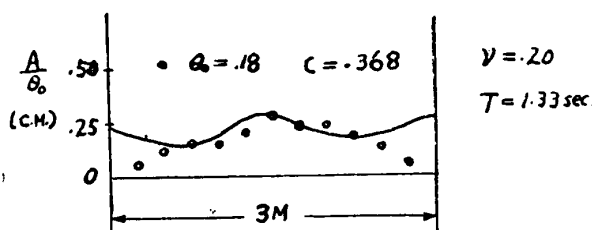
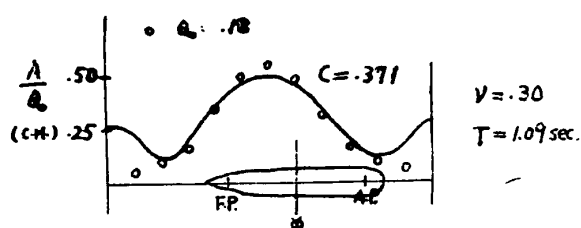
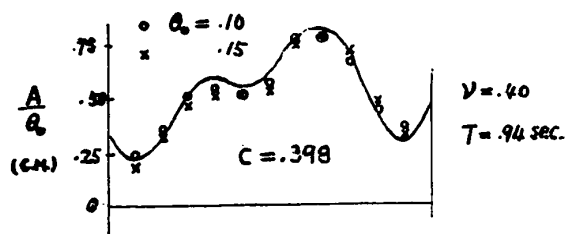
$$L = 160 \text{ cm}, \quad B = 30 \text{ cm}, \quad d = 10 \text{ cm}, \\ C_b = .53, \quad C_m = .92, \quad C_w = .81, \\ \theta_0 = -1.72 \text{ cm}, \quad p_0 = 12.0 \text{ cm}, \quad y = 10.5 \text{ cm}.$$



第 5 図

## E 模型船

$$L = 128 \text{ cm}, \quad B = 17.5 \text{ cm}, \quad p_0 = 8.8 \text{ cm}, \\ C_b = .71, \quad C_m = .99, \quad C_w = .81, \\ d = 8.0 \text{ cm}, \quad \theta_0 = .5 \text{ cm}, \\ y = 10.5 \text{ cm}.$$



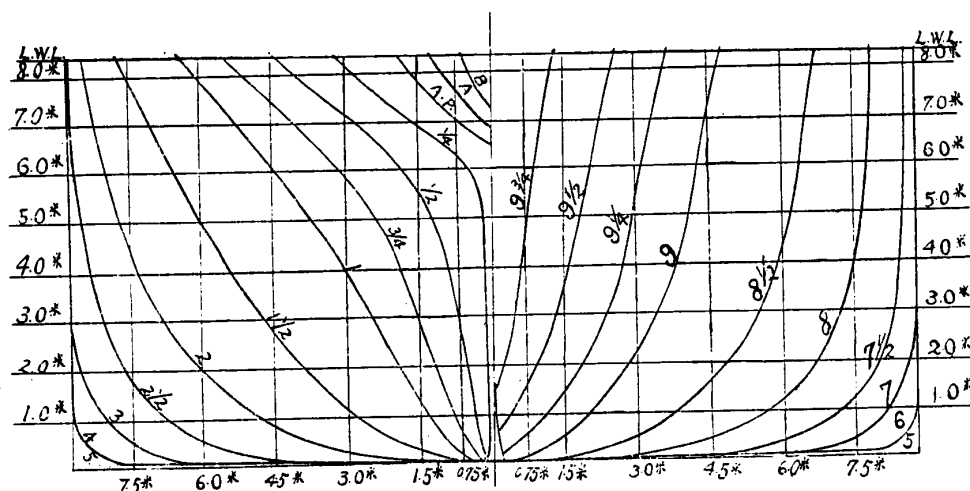
第 4 図

幅は同図に示した通りである。但しそこで  $A$  は波の振幅,  $\theta_0$  は横揺振幅であり, 又計算値は水槽側壁の影響を考慮に入れてある。尚実験の状態は図中に記入した通りであり,  $E$  及び  $F$  模型船は夫々  $A$  型貨物船及び小型客船の  $\frac{1}{100}$  及び  $\frac{1}{25}$  の模型で, これらの線図は夫々

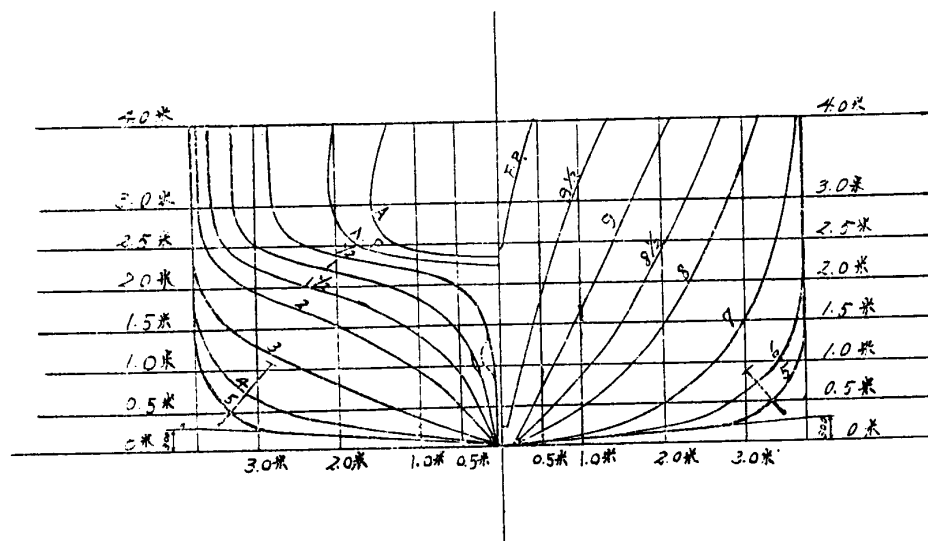
第 6 及び第 7 図に, その主要項目は第 1 表に示され, 又各の場を用いた  $a$  の値の分布は第 3 ~ 第 5 図に  $a/v^2 \theta_0$  の形 ( $v = k_0 \frac{B}{2}$ ;  $\frac{B}{2}$  は船又は板の半幅, 特に今の場合に限り垂直平板ではその吃水を表わす) で示されている。

之等 6 種の  $c$  の値を見るに約 .37 より .41 迄に亘りその間に凡そ 1 割の開きがある。又同じ  $E$  模型船に対しても  $v$  従つて  $k_0$  によつて多少異つてゐる。然しここでは, 上の実験は相当極端な形の物体を含んでいることに鑑み, 簡単の為に数%の誤差を忍んで, 少くとも通常の船型に対しては一様にこれら 6 種の平均値  $c = .387$  を取ることに定める。

輒ち



第 6 図

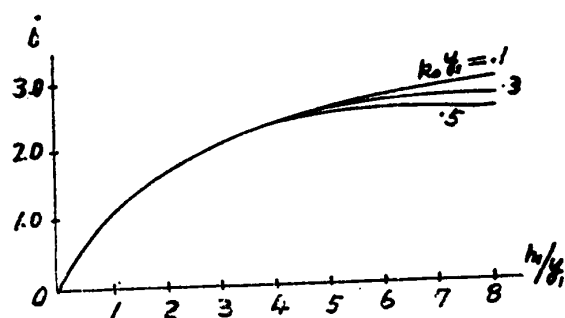


第 7 図

第 1 表

| 項 目                         | E 船    | F 船  |
|-----------------------------|--------|------|
| L. P. P. (M.)               | 128.0  | 40.0 |
| B (M.)                      | 17.5   | 7.5  |
| D (M.)                      | 10.5   | 3.4  |
| Rise of floor (M.)          | .075   | .30  |
| Radius of bilge circle (M.) | 1.10   | 1.20 |
| 満載吃水(M.)                    | 8.0    | 2.5  |
| 同上排水量(t.)                   | 13,280 | 410  |
| $C_b$                       | .711   | .53  |
| $C_p$                       | .715   | .58  |
| $C_w$                       | .81    | .81  |
| $C_m$                       | .99    | .92  |

対 応 線 図 第 6 図 第 7 図



第 8 図

$$c = .387, \quad k = \frac{.387}{2\pi\sigma k_0^2 e^{k_0 y_1} \rho_0} \quad (9)$$

この様に  $c$  は船型、船の縦横寸法並びにその比及び  $k_0, y_1$  に無関係な常数である故、(7) 式及び (8) の第 2 式より  $c'$  及び  $i$  共に常数なる筈である。然るに  $i$  は第 8 図に示す様な変化を示し、従つて今の場合の  $i$  は  $h_1/y_1$  が略 5 以上の所に対応しなければならぬ。即ち  $i$  は  $h_1/y_1$  及び  $k_0 y_1$  に殆んど無関係なる 2.8 である。依つて (7)

及び(8)の第2式より

$$y_1/\rho_0 = c' = \frac{1}{ci} = \frac{1}{.387 \times 2.8} = .92.$$

$\rho_0$  は色々な船型に就て実際計算してみると、普通の吃水の範囲では殆んど  $(B/2+d)/2$  ( $d$  は考える吃水) に等しく、従つて  $y_1$  は船の横寸法に近い値であることがわかる。

尚我々は  $y_1$  を横断面の形及び位置に拘らず全長に亘つて一定にとつたが、第3～第5図はこの近似も大過なきを示すものである。

かくて造波抵抗はもはや容易に求まり、それが船の一揺の間になす仕事  $E_w$  は(附録参照)

$$E_w = \frac{\pi c^2}{(k_0 \rho_0)^2} \rho g \int_{-h_1}^{h_2} a(h) dh \int_{-h_1}^{h_2} a(h') dh' \frac{J_1\{k_0(h-h')\}}{k_0(h-h')}, \quad (10)$$

但し  $\rho$ : 水の密度.

然るに  $k_0(h_1+h_2) < 6$  なる普通の船の範囲では

$$\frac{J_1(x)}{x} \approx 0.21 + 0.29 \cos(0.61x), \quad (x < 6) \quad (11)$$

と近似出来るから(第9図参照),

$$E_w \approx \frac{\rho g}{10(k_0 \rho_0)^2} \left[ \left\{ \int_{-h_1}^{h_2} a(h) dh \right\}^2 + 1.38 \left\{ \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \cos(0.61 k_0 h) dh \right\}^2 + 1.38 \left\{ \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \sin(0.61 k_0 h) dh \right\}^2 \right]. \quad (12)$$

$a$  は第3報<sup>(1)</sup>の図表から容易に求めることが出来る。

最後に造波抵抗による減減係数  $a$  を  $a_w$  とおけば

$$a_w = E_w / W \cdot GZ \cdot \theta_0, \quad (13)$$

但し,  $W$ : 排水量,  $\theta_0$ : 横揺振幅 (radian) である。

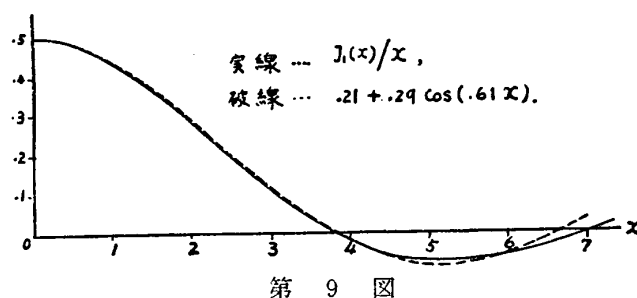
### 3. 造波抵抗上の船型の二つの類型及び吃水, 重心の高さ及び横揺週期と造波抵抗の関係

第 2 表

| 項 目                         | F 型   | D 型   | C 型   | 捕 鯨  | トロール |
|-----------------------------|-------|-------|-------|------|------|
| L. P. P. (M.)               | 54.0  | 85.0  | 93.0  | 38.0 | 38.5 |
| B(M.)                       | 9.2   | 12.5  | 13.7  | 7.2  | 7.2  |
| D(M.)                       | 4.7   |       | 7.6   | 4.0  | 4.05 |
| 初期トリム(M.)                   | 0     | 0     | 0     | .60  | 1.0  |
| Rise of floor (M.)          | .17   | .17   | .10   | .90  | .60  |
| Radius of bilge circle (M.) | .90   | 1.00  | 1.16  | 1.50 | 1.20 |
| 満載平均吃水 (M.) (B. L. 上)       | 4.3   | 5.63  | 6.38  | 3.5  | 3.76 |
| 同上排水量(t.)                   | 1,548 | 4,500 | 6,100 | 510  | 630  |
| $C_b$                       | .71   | .73   | .725  | .50  | .60  |
| $C_p$                       | .72   | .74   | .73   | .59  | .66  |
| $C_w$                       | .85   | .83   | .81   | .80  | .82  |
| $C_{\Sigma}$                | .98   | .98   | .99   | .85  | .90  |
| 対 応 線 図                     | 第10図  | 第11図  | 第12図  | 第13図 | 第14図 |

的である。これらの標準は第20図以後に於ては番号0を以て示されている。

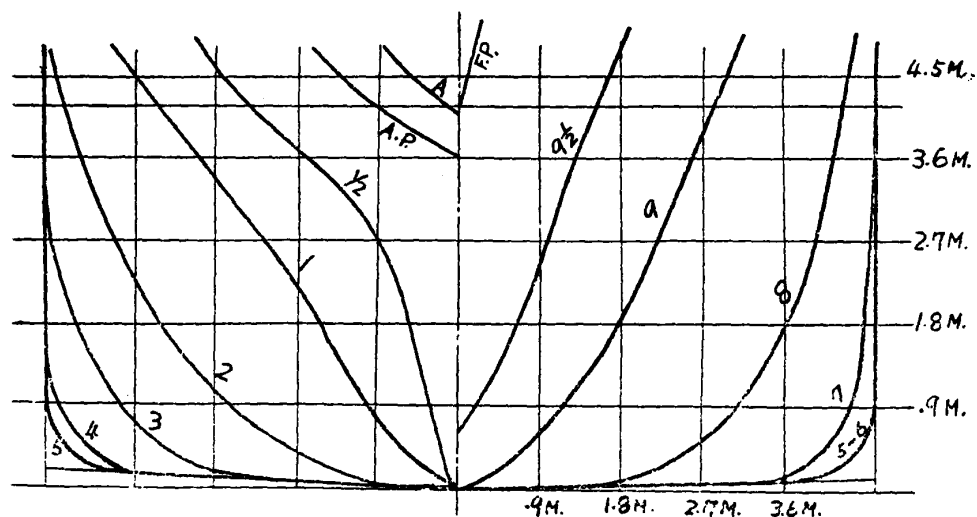
この標準の前後に重心位置及び  $\nu$  を変化させてみると、減減係数  $a_w$  は第20～29図の様になる。之らの図



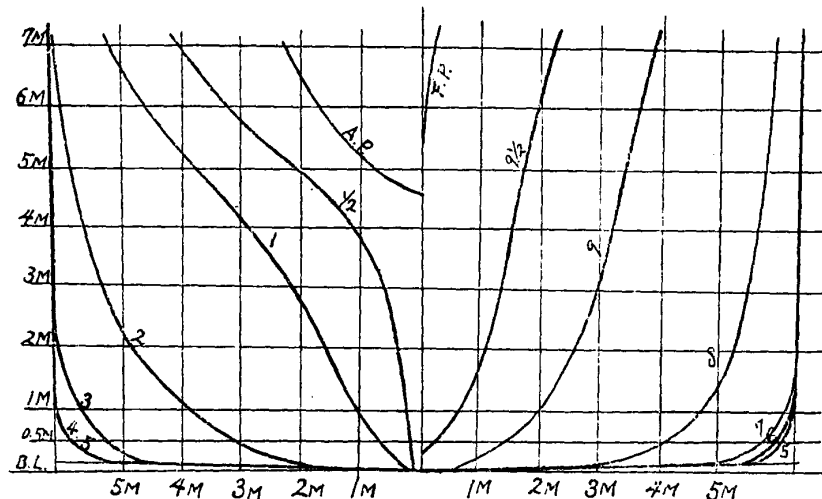
第 9 図

本節では漁船型として捕鯨船及びトロール船の二隻、貨物船型として F, D 及び C 型船の3隻に就て考えて行く。第10～14図は之等の船の線図を第2表はその主要項目を示す。

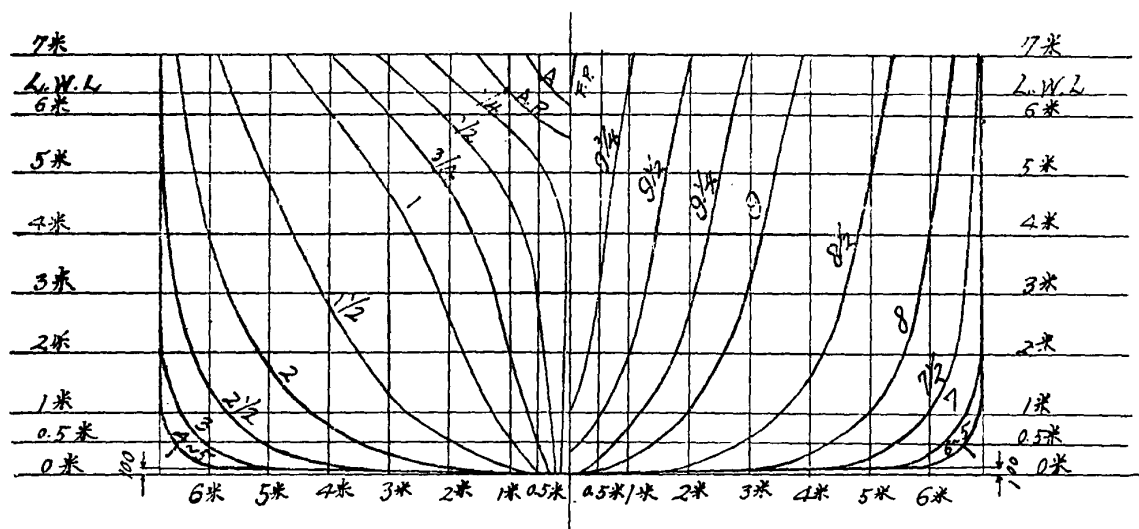
種々な変数の影響を調べる上に予め標準状態をきめておくのが便利である。この為夫々の船の普通の吃水範囲で先ず重心の高さを調べてみると、数隻の同型船の資料より GM 或いは OG (OG は G が 0 の下にある場合を正とす) は第15～19図の様になる。故にここでは各吃水に依りそれらの平均値をとり重心の高さの標準に定める。次に横揺週期であるが、この資料は入手困難でもあり、又後述の如くこの為の変化は比較的少いので、ここでは仮に第20、～26及び28図中に示す  $\nu$  の値をとつておく。但し  $\nu = k_0 \frac{B}{2} = \frac{4\pi^2}{gT^2} \cdot \frac{B}{2}$  で (B は船の型幅),  $T$  そのものよりも合理的



第 10 図



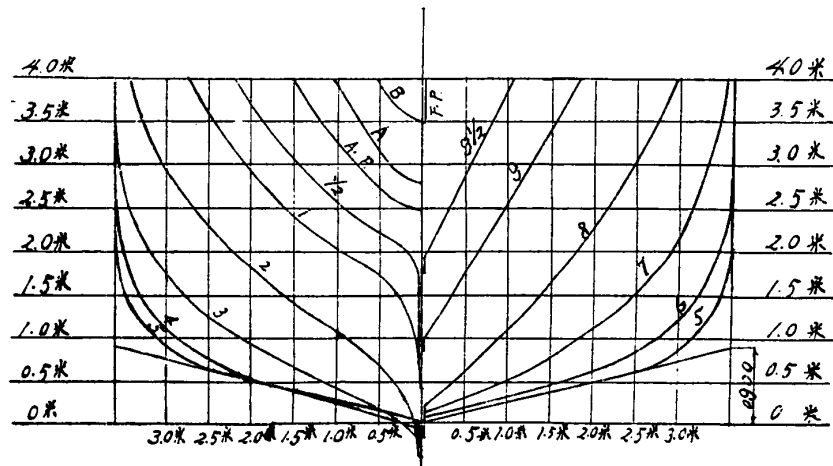
第 11 図



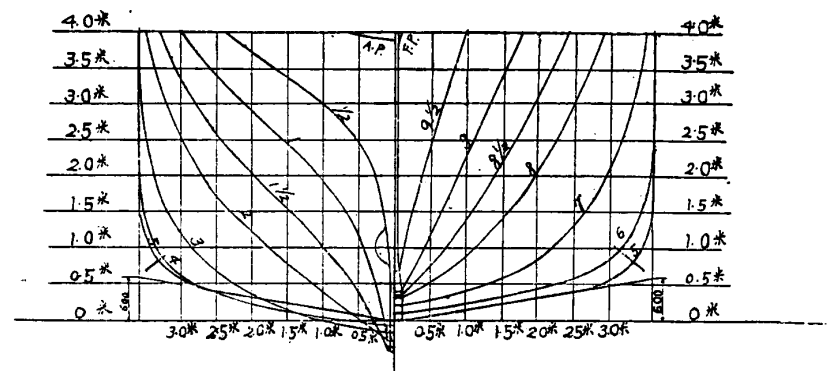
第 12 図

中には有効波傾斜係数<sup>(3)</sup>  $\gamma$  の値を併記し、限界動揺角の概観に便ならしめてある。図中曲線群に附した番号は互に対応するものである。但し第 20 図以下に於ては図の混乱をさける為、考える変数に対して変化少く且単調な量は、その曲線群の中一部を省略したものがある。

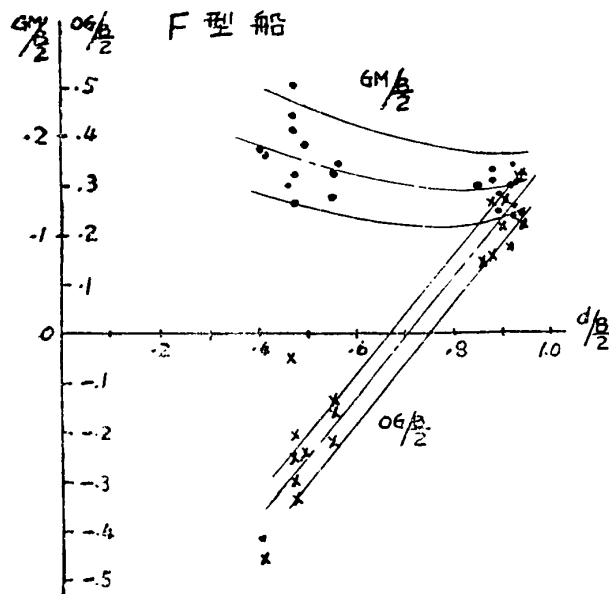
さて  $a_w$  の変化を説明するに当つて、先ず次のことを断つておく必要がある。無限に長い平板の動揺による二次元進行波は、板の姿勢が水平の時と垂直の場合では  $180^\circ$  の位相差を有する。任意の断面を持つ壱状体に於



第 13 図

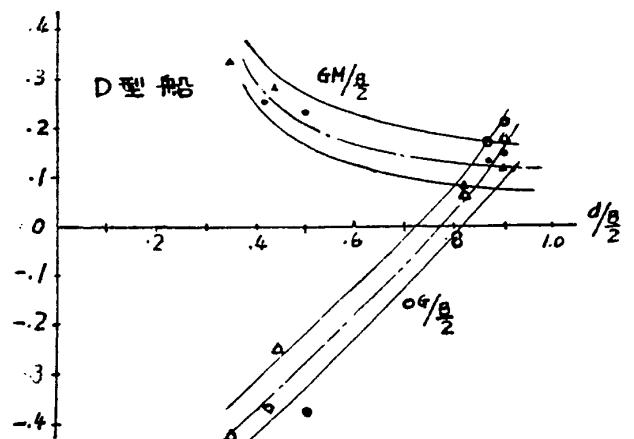


第 14 図

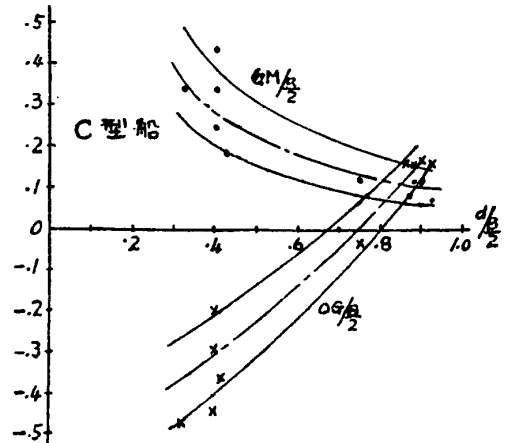


第 15 図

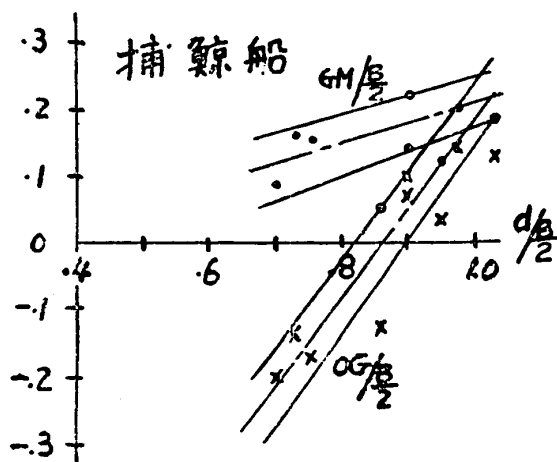
ても、横揺軸に関する没水部の断面形が、水平或いは垂直平板の何れにより近いかによつて生成波の性質は夫々この二つの場合に近づく。即ち横揺軸を固定して考えれば U 型は V 型よりも、又同じ型に就ては横揺軸が高く OG が (-) になる程垂直平板に近いわけである。故に断面形が系統的に変るか OG が順次変化する場合には、振幅  $a$  は途中ある所で 0 となりその前後に於て符号を変える。一般の三次元船型に於ても、各断面の素成波が集るだけ



第 16 図

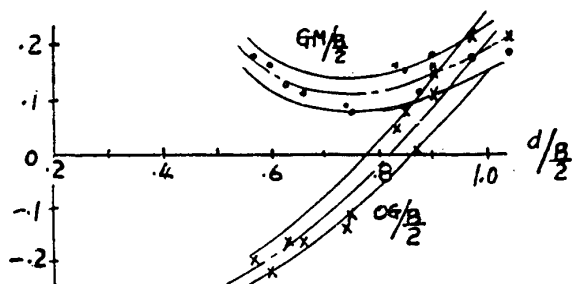


第 17 図



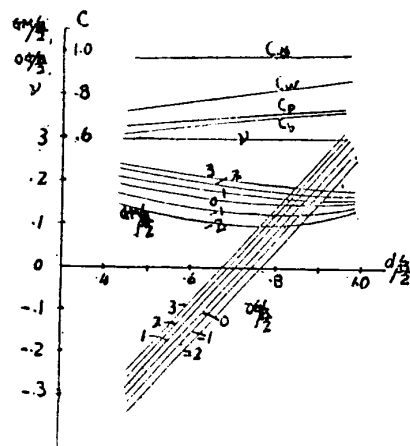
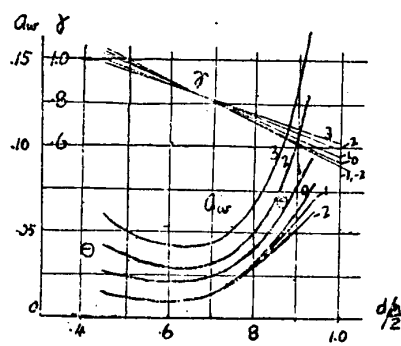
第 18 図

漁船 (捕鯨船を含まず)



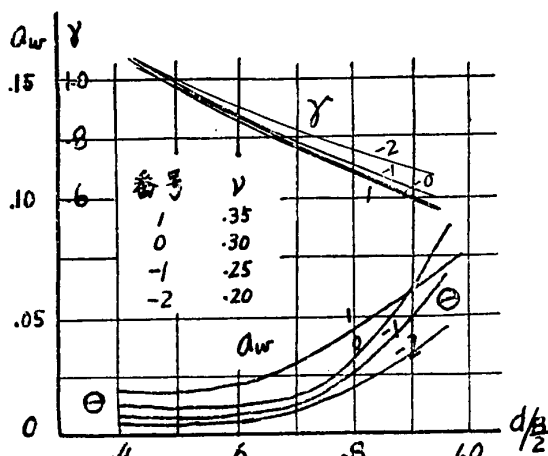
第 19 図

F型船 C.G. の上下



第 20 図

F型船 T(or v)の大小



第 21 図

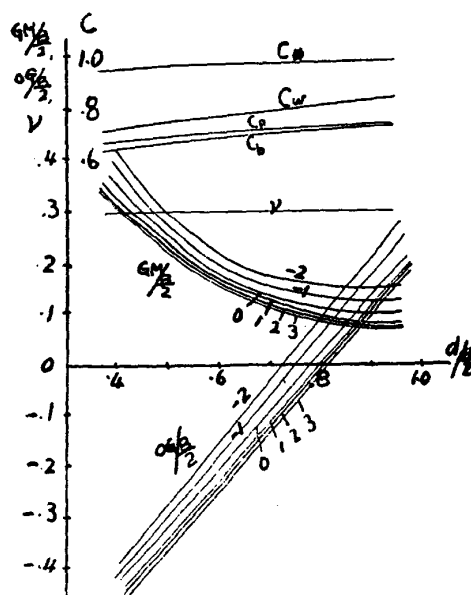
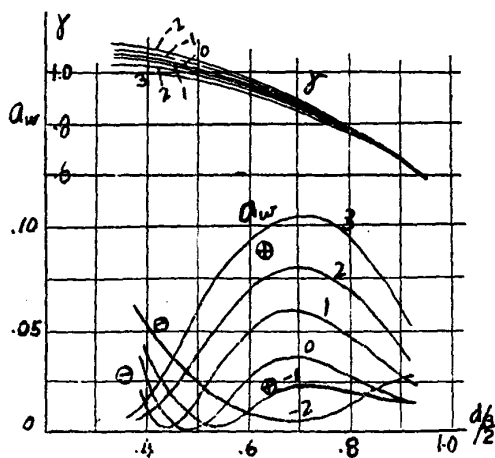
であるからこの傾向に何ら変るところわない。唯二次元の時の様に進行波の振幅が到る処0になることはなく、それに相当しては、全体としての極小点が現れる。故に以下の説明に於ては垂直及び水平平板に近いものを夫々(+)及び(-)型と呼称して行くことにする。第20図以下図中の⊕⊖はこの意味を表わす。而して三次元船型ではこれは【仮定】に従えば  $a$  値の全長に亘る平均が大体に於て(+)なるか(-)なるかを示すものと考えて差支えない。前記5隻の船の標準状態に於ける  $a$  値の分布は第30図に示す如くである。但しこの図で互に異なる船に就ては曲線の尺度は必ずしも同一ではない。

(A) 吃水並びに重心高さの影響：第20,22,24,26及び28図はこれを表わす。第30図と照合すればF型及びトロール船は略々同様の傾向を示し、曲線の全範囲が(-)型である。

故に重心が低い程  $a_w$  は大きく、高ければ減少する。然しその率は低い場合がより大きい。次に吃水が浅くなれば(-)型が厚くなるが、一方重心は大体之に伴つて吃水線より上昇するからこの差引が現われ、之らの船では後者がより大きく利いて  $a_w$  は減少する。而して初は重心の上りが大きくきき  $a_w$  は急に下るが次第に形状の利きが現われて減少率は緩和せられることがわかる。更に浅吃水となつて重心位置に殆んど関係せず常に(-)型なる水平平板に近づけば、 $a_w$  は再び上昇を始める。この極小点は大体  $d/B \approx 0.6 \sim 0.7$  の辺りにある。而してこれは前述の極小点とは少々異り同じ(-)型の間で起るが本質的に

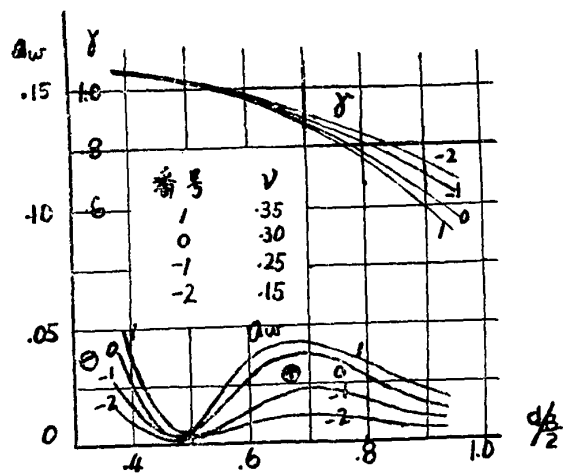


D型船 C.G. の上下



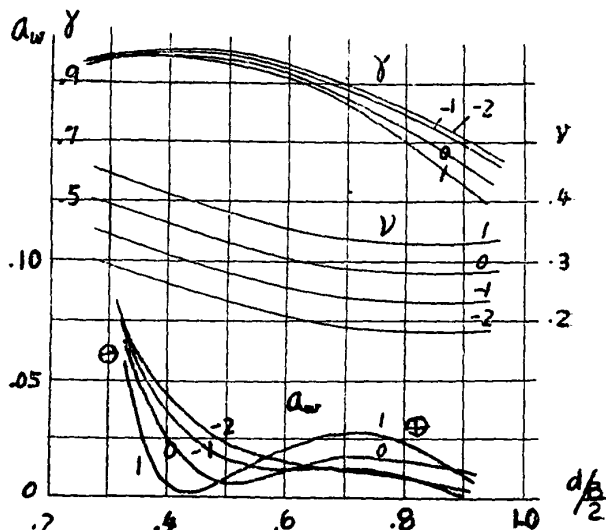
第 22 図

D型船 T(or V) の大小



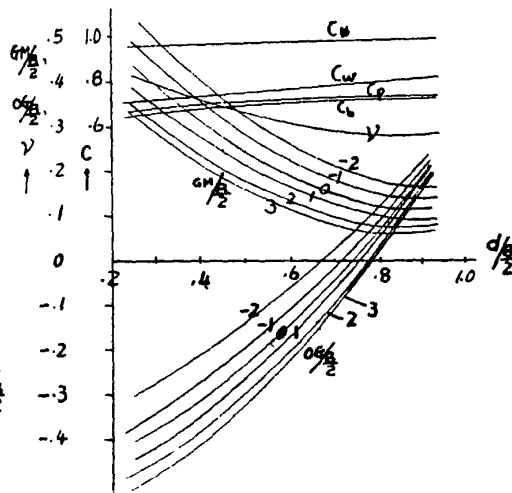
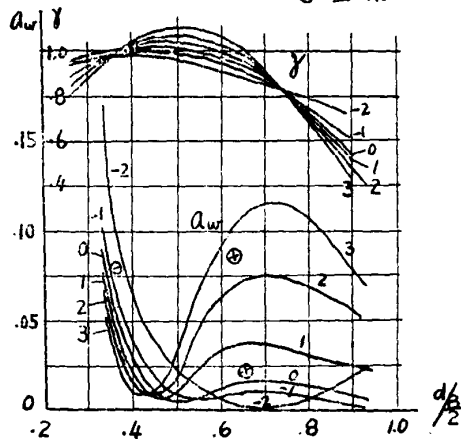
第 23 図

C型船 T(or V) の大小



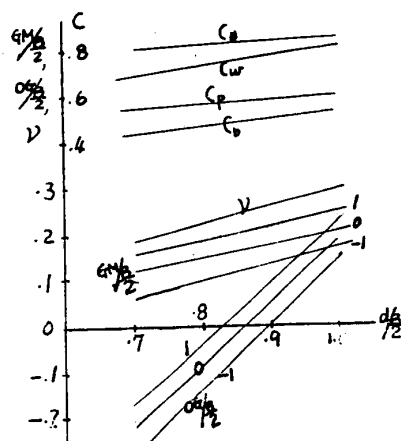
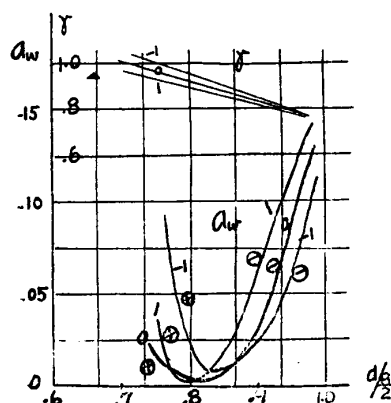
第 25 図

C型船 C.G. の上下



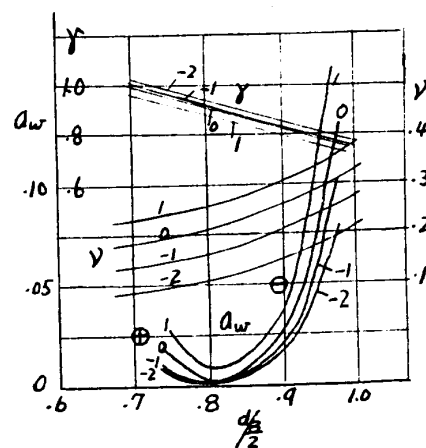
第 24 図

捕鯨船 C.G. の上下



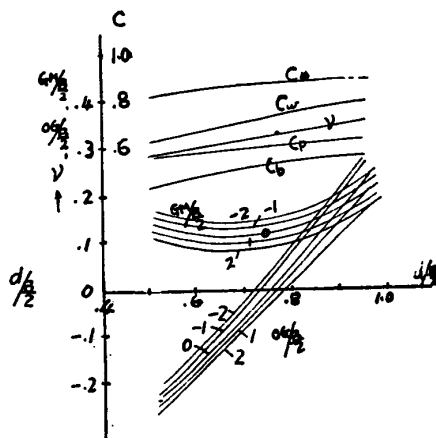
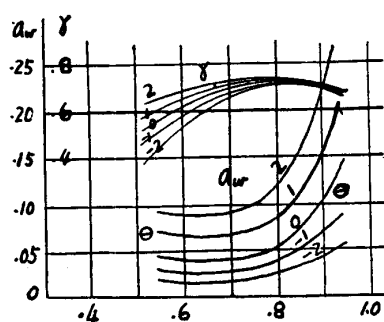
第 26 図

捕鯨船 T(or ν) の大小



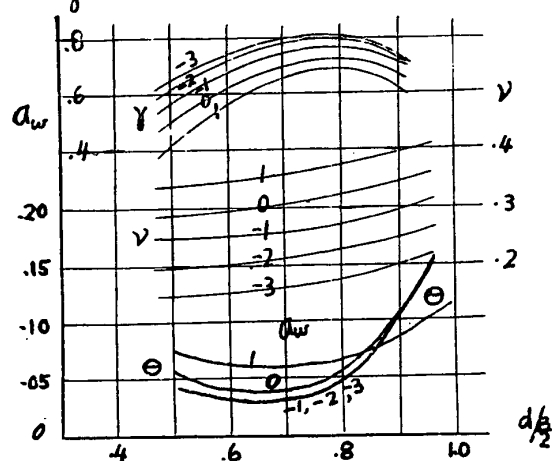
第 27 図

トロール船 C.G. の上下



第 28 図

トロール船 T(or ν) の大小



第 29 図

は変りはない。故に  $\gamma$  と併せて考えれば, bilge keel 其の他の chock を持たない場合には, F 型船では  $d \approx 0.6 \frac{B}{2}$  の前後,

トロール船では  $d \approx 0.7 \frac{B}{2}$  の辺りで限界動揺角が極大となる惧れがある。然しその値は他の 3 隻に比して著しく小さい。

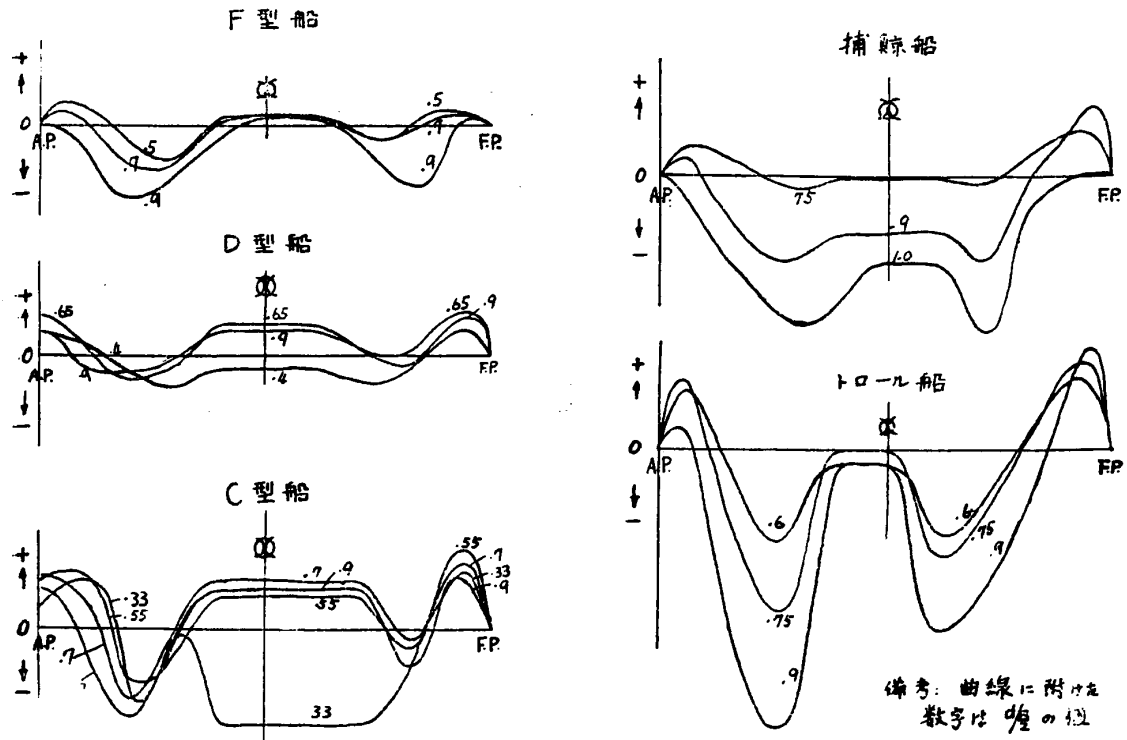
次に D 及び C 型船であるが、之らは略同じ傾向を有し、吃水の深い所では (+), 浅い所では (-) でありその中間に極小点がある。従つて吃水深き所では重心の高い程、逆に浅い所ではその低い程  $a_w$  は大きい。深い吃水より之が減ずるにつれて、やはり初は重心の上昇が利く為  $a_w$  は一時上昇し  $d/\frac{B}{2} \approx 0.7$  の辺りで極大値を示し、以後形状の利きによつて  $a_w$  は急激に減少を初め、 $d/\frac{B}{2} \approx 0.5$  附近にて極小となり (-) 型に移行する。

この二つの船では  $d/\frac{B}{2} \approx 0.4 \sim 0.6$  の辺りが危険である。然も

之を  $KG$  の調整によつて避けんとすることは先ず不可能である。

捕鯨船は寧ろ F 型又はトロール船の型に類し、その変化を誇大したものを見るべきである。極小値は  $d/\frac{B}{2} \approx 0.8$  附近にある。

(B) 横揺週期の影響: 週期が小さく従つて  $\nu$  の大きいものは多少  $a_w$  大であるが、どの船もこの影響は重心高さに比して小さい。

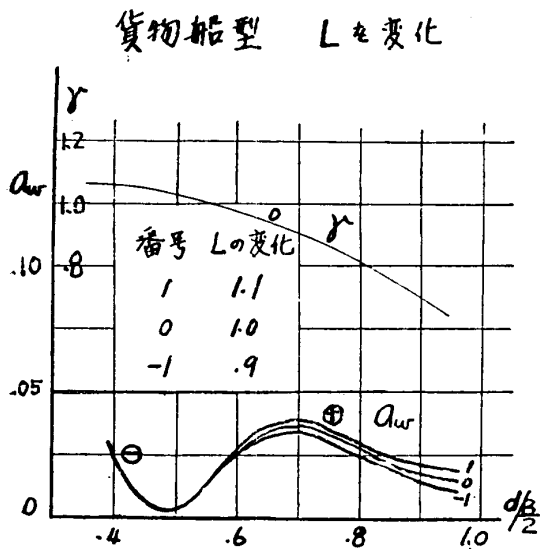


第 30 図

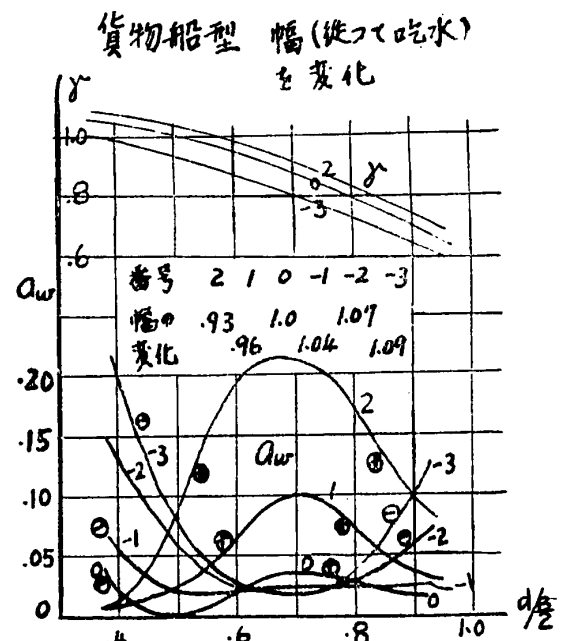
(C) 造波抵抗に於ける船型の二つの類型: 以上の説明によつて少くとも本研究の範囲に於ては船型を二つの型, 一つはF型及びトロール船の型と他はD及びC型船の型に大別し得ることが判明した。前者は概ね(一)型, 後者は(十)型であつた。肥えた船は当然やせた船より他の条件が同じであれば(十)型に近い筈であるから, よく肥えた船は一般に(十)型, やせた船は(一)型と見てよく, 従つて貨物船型は概ね前者に, 漁船及び高速小型客船等は後者に属すると考えることが出来る。而してこの二者に対する重心高さの影響は全く相反するものである。

#### 4. 主要寸法, 船型係数及びトリム等の影響

次に上の二型の代表としてD型及び捕鯨船をとり, その主要寸法, 船型係数, 肋骨線の形及びトリムの有無等影響を調査する。凡ての状態を通じて排水量は標準状態と同一としておく。又  $a_w$  はいつも標準状態の  $d/B$  の上に置点する。例えば船の幅が  $n$  倍に増した時同じ吃水  $d$  に対



第 31 図



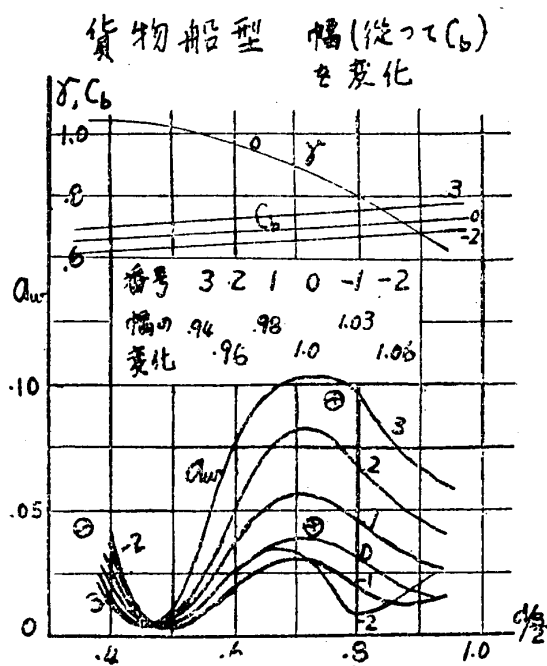
第 32 図

ても  $d/\frac{B}{2}$  は  $\frac{1}{n}$  となるが、之を標準状態の  $B$  を用いた  $d/\frac{B}{2}$  の上に置点することである。

Ⅲ(A) (+)型 (貨物船型)

(1) 長さ  $L$  の影響: 第 31 図。船を一様に長さの方向に  $n$  倍に (ここでは約 0.9~1.1 倍) 伸縮し、幅及び深さの方向は夫々  $1/\sqrt{n}$  倍とした場合、各横断面は相似、各船型係数は不変である。 $a_w$  は当然殆んど変化しない。

(2) 横寸法の影響: 第 32 図。先ず幅の方向に一様に  $n$  倍 (ここでは .93~1.09 倍) し深さの方向は一様に  $1/n$  倍とする。各船係数は不変、幅が小さい程 (+) 型が深まり標準状態では  $d/\frac{B}{2} \approx .5$  にあつた極小点は左へ移動する。逆に幅が大きくなると (-) 型に近づき遂に全部 (-) 型に変わる。然し幅を小さくした場合の



第 33 図

変化率はより大きい。

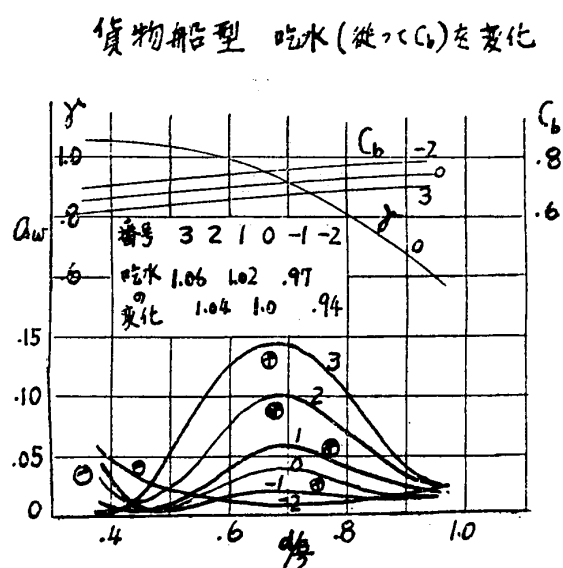
(3) 幅を変へ之に伴つて  $C_b$  を動かす場合: 第 33 図。幅を一様に .94~1.06 倍に変へ、之に応じて  $C_b$  を調整する。 $C_b$  を変へるには第 35 図の prismatic curves に従つて square station の位置を動かす。各横断面の形は幅方向に伸縮を受けたまま新 station へ移る。 $C_p$ ,  $C_w$  は共に変り。 $C_m$  は不変,  $a_w$  の変化は傾向に於て (2) と一致するが変化の割合は約半分である。第 30 図に見る如くこの船の (+) 型は大部分中央部の寄與によるのであるが, (2) の方では形が横及び縦に同時に相扶けて変化し、今の場合は横方向だけに変形を受ける故、この為の影響は (2) の方が比例以上に大きく、 $C_b$  の動きによつて中央部附近の形が前後に伸縮する為の影響を凌駕するからである。

(4) 深さの方向の寸法を変へ之に伴つて  $C_b$  を動かす場合: 第 34 図。 $a_w$  の変化の様子は前二項に準ずる。割合は (2) と (3) の中間にある。深さの方向へ形を変える方が幅の方よりも影響が大きいのである。

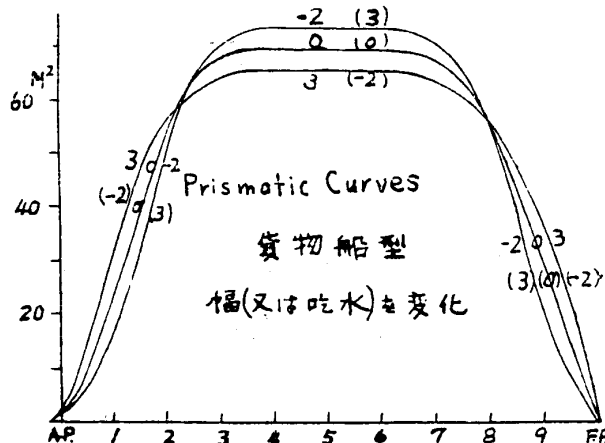
上の三項によつて、幅又は吃水を変える場合には、何れも  $C_b$  を一定に保つて、吃水又は幅を変える方が有効であることがわかる。

(5)  $C_m$  の影響: 第 36 図~第 37 図に従つて square stations を動かす。 $C_m$  が小さい程当然 (-) 型に移行し、極小点は右へ又極小値は上へ移動する。

(6) 中央平行部の長短: 第 38 図。Prismatic curves は第 39 図、殆んど変化はない。

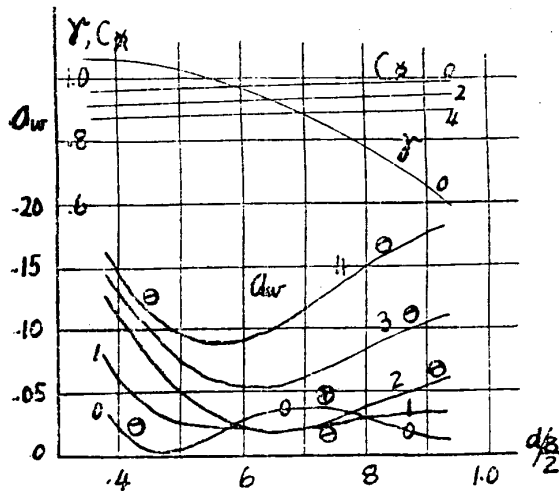


第 34 図



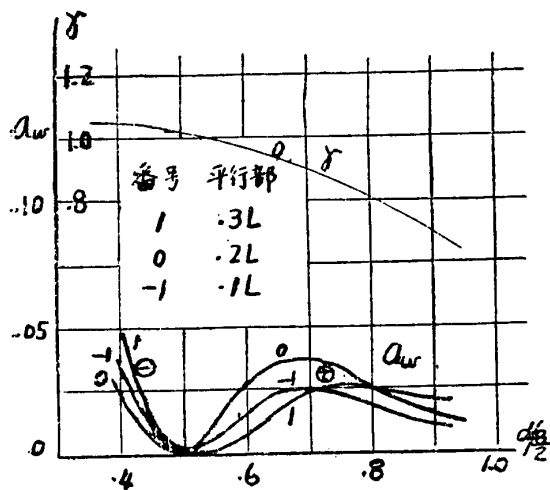
第 35 図

貨物船型  $C_m$  を変化



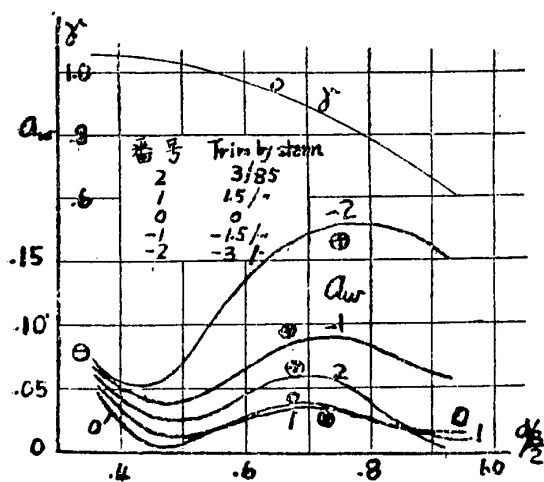
第 36 図

貨物船型 中央平行部の長短



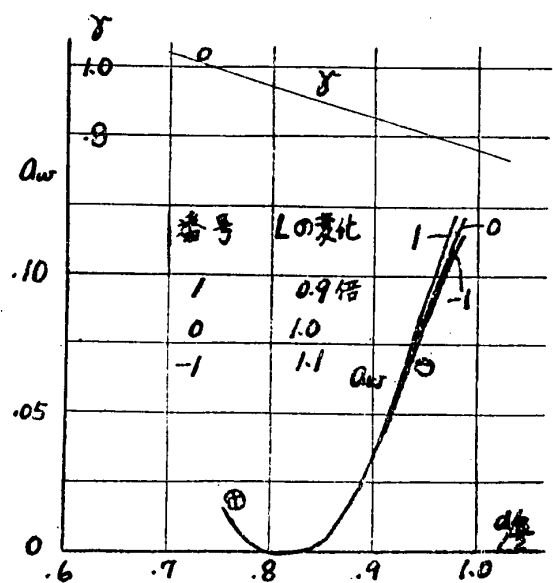
第 38 図

貨物船型 Trim を変化



第 40 図

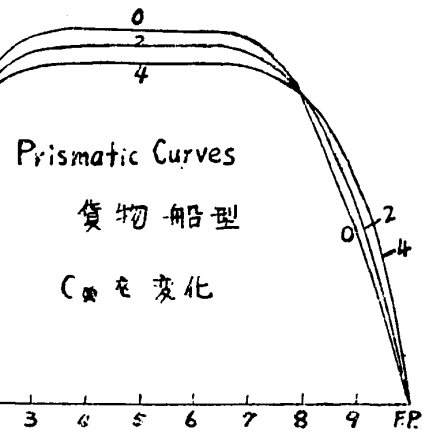
漁船型  $L$  を変化



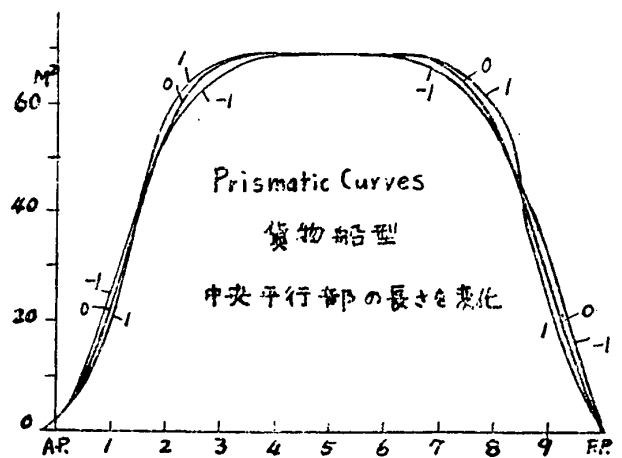
第 41 図

(7) Trim の影響: 第 40 図。船トリムは著しく  $a_w$  を増大させる。然し之は船にとっては望ましい姿勢ではない。

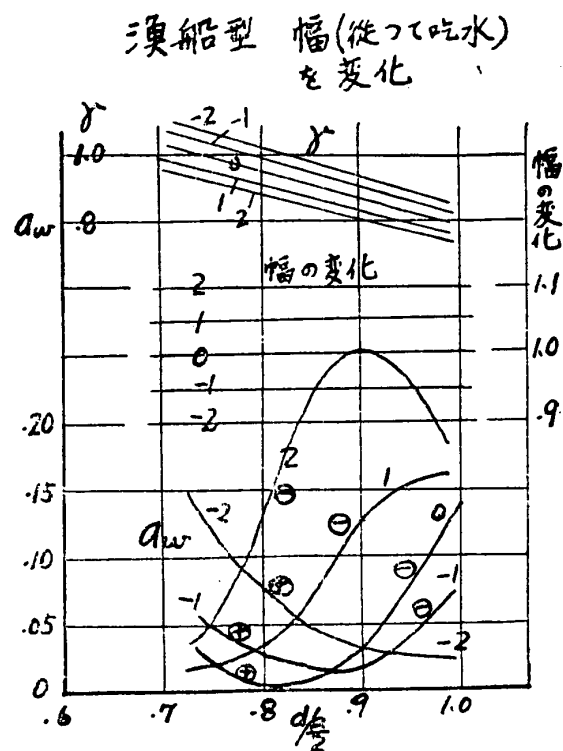
(B) (一) 型 (漁船型)



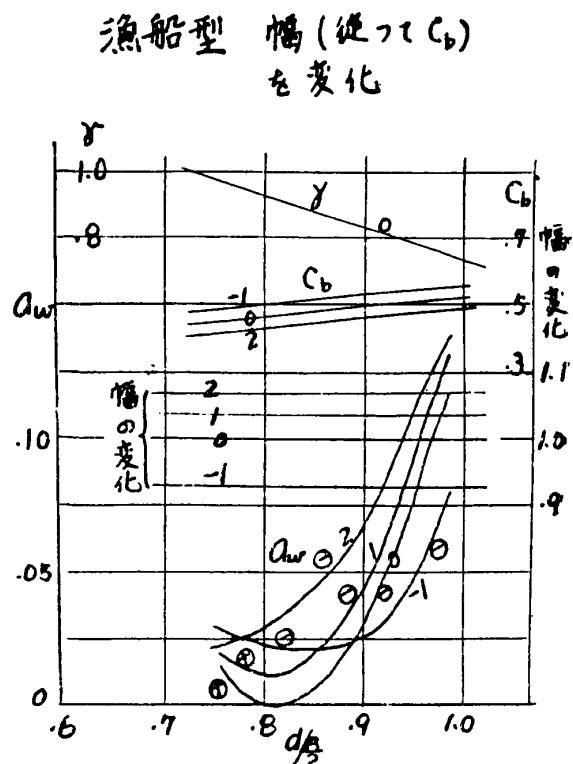
第 37 図



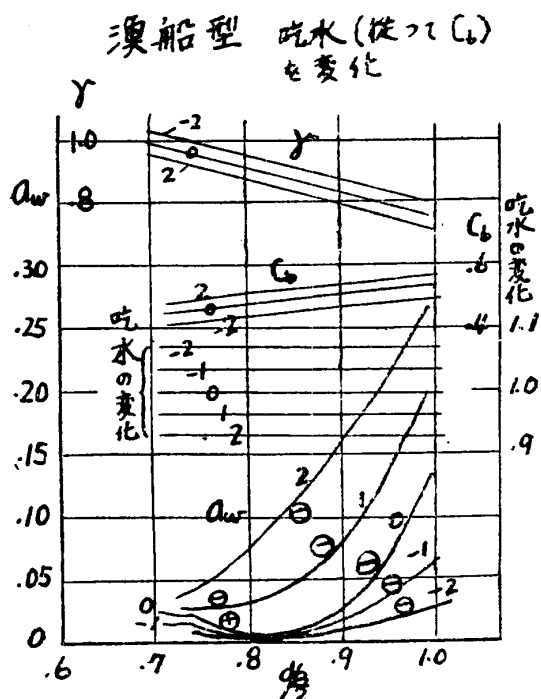
第 39 図



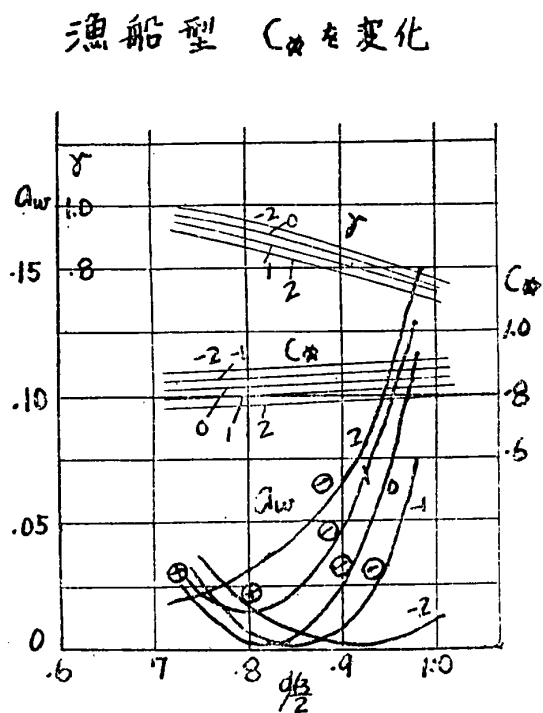
第 42 図



第 43 図

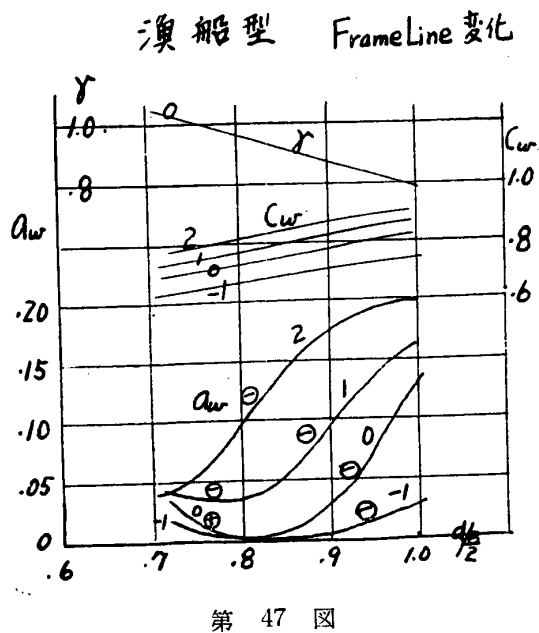


第 44 図

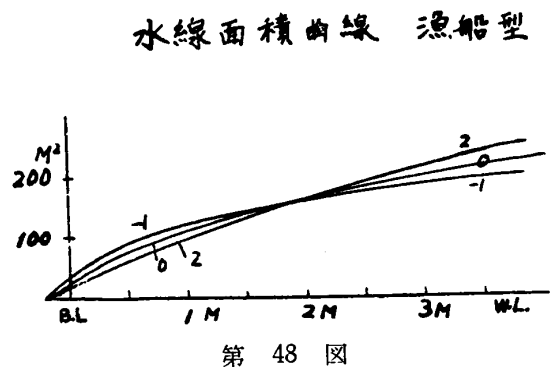
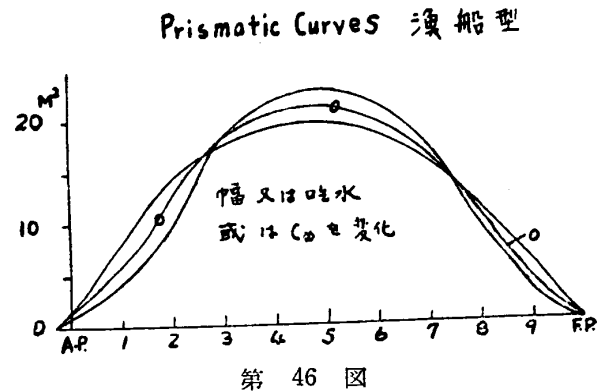


第 45 図

- (1) 長さ  $L$  の影響: 第 41 図。前同様影響はない。
  - (2) 横寸法: 第 42 図。幅が増し吃水が減れば  $a_w$  は著しく増大する。Prismatic curves は第 46 図。
  - (3) 幅と  $C_b$ : 第 43 図。幅の増大による効果は  $C_b$  の減少従つて船底の扁平な部分の伸長に依つて減殺せられ、 $a_w$  の変化は (2) に比して遙かに緩やかである。
  - (4) 吃水と  $C_b$ : 第 44 図。前項の減殺効果と逆に互に相扶け合つて  $a_w$  の変化は著しい。
- 上の三項によつて、幅を変化させる場合には  $C_b$  を一定とし吃水を動かし、吃水を変える場合には幅を一定とし  $C_b$  にて調整する方が有効であると云える。
- (5)  $C_m$ : 第 45 図。 $C_m$  小なる方  $a_w$  大、変化は比較的緩慢である。



(6) 肋骨線の形: 第 47 図。第 48 図の水線面積曲線に従つて水線の位置を動かす。各水平断面形はそのまま移動,  $C_w$ ,  $C_m$ ,  $C_p$  は従つて変化し,  $C_b$  は不変。肋骨線が V 型となり従つて  $C_w$  大なる程 (一) 型を深め  $a_w$  は著しく増大する。



## 5. 結 語

以上の要点を摘記すれば,

- (1) 第 1 図の如き等価 doublet 系を以て船体を置換する場合, その任意の部分の強度はその場所の船体横断面と同じ断面形の二次元嚙状体による進行波の振幅 (特に符号を含ませる) に比例させて差支えない。この比例常数は船型に拘らず略々一定である。任意の船の造波抵抗は (12) 式によつて比較的簡単に算定出来る。
- (2) 本報の範囲に於ては, 船型は概ね二つの類型 (+) 及び (-) 型に大別することが出来る。肥えた貨物船等は主として前者に, やせ型の漁船及び小型客船等は主として後者に属する。船の横寸法等の変化がその造波抵抗に及ぼす影響は, 多くはこの二型に於て相反する。
- (3) 船の重心は, (+) 型に於てはその高き程, (-) 型では低き程著しく造波抵抗を増大せしめる。
- (4) 横揺週期は短い程何れの型に於ても造波抵抗を増大せしめるが, その率は緩やかである。
- (5) 排水量一定なる (以下同じ) とし, 船の長さは何れも殆んど影響を与えないが, 横寸法の変化は急激な効果をもたらす。即ち幅を狭め或いは吃水を深めること又はこの両者を同時に伴う時は, (+) 型では造波抵抗は著しく増大する。(-) 型ではこの逆の変化によつて抵抗は甚しく増加する。而して (+) 型では幅又は吃水を変える場合には  $C_b$  を固定し, 吃水又は幅を以て補うを有効とし, (-) 型に於ては幅に対しては吃水, 吃水に対しては  $C_b$  を以て調査する方より効果的である。
- (6)  $C_m$  は (+) 型ではその大なる程, (-) 型では小なる程抵抗を増すが効果は比較的緩やかである。
- (7) 肋骨線の形状を変えることは有効であるが中央平行部の長短は殆んど影響を示さない。
- (8) 普通の寸法比の船の普通の状態に於ては一般にその型に応じ, ある吃水に於て造波抵抗が極小値を示す。然しこの様な極小値は本報の調査により船型を僅か変更することによつて避け得, 又全般的に抵抗を増大せしめることも必ずしも困難でないことが判明した。

## 附. 本研究の総括

著者<sup>(4)</sup> は横揺に対する造波抵抗を取扱い数回に亘つて報告して来たが, 1st. order の問題は先ず大体済んだのではないかと考えるので, 茲にその筋道を附記して一段落の締めくくりとしたい。

- (1) 横揺の場合には前進造波抵抗理論に於ける所謂 Michell-Havelock の 仮定の様な巧妙な仮定を使うこ

とが出来ないし、又等価 doublet の向きが船の対称面内でない為に、所謂 Havelock 流の計算法では近似の精度が著しく低下し、加之一寸複雑な形の物体に対しては解法が極めて複雑となり事実上解答が不可能でさえある。故に第 1 報に於ては Havelock の方法に再検討を加へ、之を改良拡張して相当に精度高き近似法を工夫した。この方法は二次元の場合には等角写像の応用によつて殊に簡単に利用出来る。之によつて初めて本研究が可能となつたと考えられる。

(2) 横揺造波抵抗は当然横揺角速度の函数であろうが、それが如何なる形であるかは W. Froude 以来色々論議され尚且はつきりした結論はないのではないかと考えられるので、第 3 報に於てはこのことを調べ、それは角速度の一乗に比例し高次の寄与は普通の船では無視して差支えないと云う結果を得た。これは以下の研究を一層簡単化するものである。又造波抵抗が全横揺抵抗中どの位の割合を占めるかに就ても、余り資料がないようであるから、之に就ても調査を行い、全抵抗の数割を占めることが判明した。全抵抗の性質をその成分抵抗より概観するに当つて参考となるであらう。尚第 3 報では次に実船型の場合に必要なべき、色々な形の断面形を持つた二次元塊状体による進行波を第 1 報の方法によつて計算し多くの図表を用意しておいた。又この結果から造波抵抗に関する若干の性質が判明した。

(3) 第 2 報では bilge keel による造波抵抗を取扱い、bilge keel は必ずしも横揺抵抗を増加させるとは限らないことその他の性質が分つた。又 bilge keel による造波抵抗の算定に供すべき図表を作成した。

(4) 第 7 報に到つて三次元の船型に入り、第 3 報の図表を利用して比較的簡単に任意の船型に対する造波抵抗を計算し得る算式を求め、又貨物船と漁船型とに就てその重心の高さ、主要寸法、船型係数及び横揺週期等を系統的に変化した場合の造波抵抗の変化を調査した。そして造波抵抗に於ては船型を二つの類型に大別することを試みておいた。

(5) この他、第 5 報では、従来運動が定常的又は週期的である場合波動は不定であると考えられていたことは、実は水波に於ては完全流体と仮定する限り造波抵抗に寄与する波系を含まないのであると云う見解を述べ、従つて数式解に抵抗波を出す為には何らかの抵抗を持つた medium を考える必要があること、又之を以て Rayleigh によつて使用され初め、その当初の姿のまま慣用されている所謂抵抗  $\mu$  なるものの一つの物理的数学的説明を施してみた。又第 6 報では前進中の船の横揺造波抵抗の性質及び主として実験に当つて考慮するべき水幅の影響を論じ、第 4 報にては第 1 報の一応用として active resistance を計算し、之を数理的に取扱う初めての試みを行い、尚別報<sup>(5)</sup>として横揺造波抵抗に於ける過渡現象を解き、実験資料の有効範囲を見積つている。

筆を闢くに当り、終始益に陽に御指導御激励を賜つた大阪大学工学部の原田・寺沢・笹島諸先生並びに東京大学第一工学部の加藤教授に対し衷心感謝の意を捧げ、幾多貴重な資料資料を頂戴した日立造船・川崎重工・中日本重工並びに藤永田造船所の造船設計課(部)及び大阪大学造船学科教室、模型船の製作上便宜を与えられた藤永田造船所造船工作課、及び龐大な数値計算に当つて援助を仰いだ浪速大学工学部の助手田中紀男君並びに外山嵩君の御厚意に対し深甚の謝意を表するものである。

尚本研究費の一部は文部省科学研究費の補助によつてゐる。

## 附 録

本文の式(1)は自由表面を一時無視した時の速度 potential であつて、之を  $\varphi_0$  とおく。次に自由表面を考慮しその条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} &= 0, \\ (\varphi = \varphi_1 + \varphi_0) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

を満足させる為に速度 potential  $\varphi_1$  を附加すると

$$\begin{aligned} \varphi = & -\frac{ika}{2\pi} e^{i\sigma t} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} k \cdot \text{Exp} \cdot [-k(z+f) + ik\{(x-h)\cos \theta + y \sin \theta\}] dk \\ & - \frac{ika}{2\pi} e^{i\sigma t} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} k \cdot \alpha(k) \cdot \text{Exp} \cdot [-k(f-z) + ik\{\ " \}] dk, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha(k) = \frac{k+k_0-i\mu'}{k-k_0+i\mu'}, \quad \mu' = \frac{\mu\sigma}{g} \quad (3)$$



となる。但し (2) 式右辺の第 1 項は  $\varphi_0$  を書き直したもので、第 2 項が  $\varphi_1$  であり、又  $\mu$  は Rayleigh の抵抗係数で最後には 0 に移行するべきものである。尚函数は凡て実部をとるものと定める。

造波抵抗に与える進行波を求める。明かに定常波となる項を逐次省略してゆく。

$$\zeta = \frac{1}{g} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)_{z=0} = \frac{k a \sigma}{2 \pi g} e^{i \sigma t} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \theta d\theta \int_0^{\infty} k \cdot \alpha \cdot \text{Exp}[-k f + i k \{(x-h) \cos \theta + y \sin \theta\}] dk.$$

$$k \alpha = k + 2 k_0 + \frac{2 k_0^2}{k - k_0 + i \mu'}$$

で進行波はこの右辺第 3 項の掛る項丈けに含まれる。

$$\therefore \zeta = \frac{k a k_0^2 \sigma}{\pi g} e^{i \sigma t} \int \sin \theta d\theta \int \frac{\text{Exp}[\cdot]}{k - k_0 + i \mu'} dk. \quad (4)$$

$k$  に関する積分を contour integration によつて変形し、 $\mu' \rightarrow 0$  を行えば

$$\begin{aligned} \zeta &= -\frac{2 k a i \sigma k_0^2}{g} e^{i \sigma t - k_0 f} \int_{-\pi}^{\pi} \sin \theta e^{i k_0 r \cos \phi} d\theta, \quad (\cos \phi < 0), \\ (r &= \sqrt{(x-h)^2 + y^2}, \quad \phi = \theta - \delta, \quad \tan \delta = -\frac{y}{x-h}) \\ &= -\frac{2 k a i \sigma k_0^2}{g} e^{-k_0 f + i \sigma t} \sin \delta \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \cos \phi e^{i r \cos \phi} d\phi \\ &= -\frac{4 k a \sigma k_0^2}{g} e^{-k_0 f} \sin \delta \int_0^{\pi/2} \cos \phi \sin(\sigma t - k_0 r \cos \phi) d\phi + \text{虚部} \\ &= \frac{2 \pi k a \sigma k_0^2}{g} e^{-k_0 f} \frac{y}{r} \left[ J_1(k_0 r) \cos \sigma t - \left\{ \frac{2}{\pi} - H_1(k_0 r) \right\} \sin \sigma t \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

之を  $h$  について積分すれば本文 (2) 式となる。

更に  $r$  が十分大きい所では漸近展開により容易に

$$\zeta = \frac{2 \pi k a \sigma k_0^2}{g} e^{-k_0 f} \frac{y}{r} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} \sin \left( k_0 r - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right). \quad (6)$$

之に相当する速度 potential は

$$\varphi = 2 \pi k a k_0^2 e^{-k_0(f-z)} \frac{y}{r} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} \cos \left( k_0 r - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right). \quad (7)$$

$x = -h_1 \sim h_2$  に亘る doublets の列による造波抵抗のなす仕事は、 $z$  軸を軸とする十分大きな半径  $R$  の円環面を通して伝る勢力に等しい。

$$\therefore E_w = - \int_0^{T/2} \int_{-\infty}^0 \int_0^{2\pi} \left( \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right) \left( \frac{\partial \varphi}{\partial R} \right) R d\theta \cdot dz \cdot dt, \quad (8)$$

$$\text{但し } \tan \theta = \frac{y}{x}.$$

而して  $R^2 = x^2 + y^2$ ,  $\frac{\partial}{\partial R} = \frac{\partial}{\partial r}$  for a large  $R$

であるから、(7) 式を用いて

$$\begin{aligned} E_w &= \int_0^{T/2} \int_{-\infty}^0 \int_0^{2\pi} \left[ 2 \pi \rho \sigma k_0^2 k \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \frac{y}{r} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r}} \sin \left( k_0 r - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) \cdot e^{-k_0(f-z)} dh \right. \\ &\quad \times \left. 2 \pi k_0^3 k \int_{-h_1}^{h_2} a(h') \frac{y}{r'} \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 r'}} \sin \left( k_0 r' - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) e^{-k_0(f-z)} dh' \right] R d\theta dz dt \\ &\doteq 4 \pi^2 \rho \sigma k_0^5 k^2 \int_0^{T/2} \int_{-\infty}^0 \int_0^{2\pi} \left[ \frac{y^2}{R^2} \cdot \frac{2}{\pi k_0 R} \cdot e^{-2k_0(f-z)} \right. \\ &\quad \times \left. \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \sin \left( k_0 r - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) dh \int_{-h_1}^{h_2} a(h') \sin \left( k_0 r' - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) dh' \right] R d\theta dz dt \\ &= 4 \pi \rho \sigma k_0^3 k^2 e^{-2k_0 f} \int_0^{T/2} dt \int_0^{2\pi} d\theta \frac{y^2}{x^2 + y^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left[ \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \sin \left( k_0 r - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) dh \int_{-h_1}^{h_2} a(h') \sin \left( k_0 r' - \sigma t - \frac{\pi}{4} \right) dh' \right] \\
& = \pi \rho \sigma k_0^3 k^2 T e^{-2k_0 f} \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \sin^2 \theta \left[ \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \sin k_0 r dh \int_{-h_1}^{h_2} a(h') \sin k_0 r' dh' \right. \\
& \quad \left. + \int_{-h_1}^{h_2} a(h) \cos k_0 r dh \int_{-h_1}^{h_2} a(h') \cos k_0 r' dh' \right] \\
& = 2\pi^2 \rho k_0^3 k^2 e^{-2k_0 f} \int_0^{2\pi} d\theta \sin^2 \theta \int_{-h_1}^{h_2} dh \int_{-h_1}^{h_2} dh' a(h) a(h') \cos k_0 (r - r').
\end{aligned}$$

ここで  $r = \sqrt{(x-h)^2 + y^2} \approx \sqrt{x^2 + y^2 - 2xh} \approx \sqrt{x^2 + y^2} \left( 1 - \frac{xh}{x^2 + y^2} \right)$

$$= R - \frac{xh}{R} \text{ for a large } R,$$

同様に  $r' = R - \frac{xh'}{R}$ .  $\therefore r - r' = -(h - h') \frac{x}{R} = -(h - h') \cos \theta$ .

$$\begin{aligned}
\therefore E_w &= 2\pi^2 \rho k_0^3 k^2 e^{-2k_0 f} \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \sin^2 \theta \int_{-h_1}^{h_2} dh \int_{-h_1}^{h_2} dh' a(h) a(h') \cos \{ (h - h') k_0 \cos \theta \} \\
&= 2\pi^2 \rho k_0^3 k^2 e^{-2k_0 f} \int_{-h_1}^{h_2} dh \int_{-h_1}^{h_2} dh' a(h) a(h') \cdot 2\pi \frac{J_0 \{ k_0 (h - h') \}}{k_0 (h - h')}.
\end{aligned}$$

この式中  $k$  に本文の (8) 式を代入すれば本文 (10) 式を得る。

(附録終)

(註)

- (1) 著者:「船舶の動揺造波抵抗に関する研究. (其の三)」造船協会報第 86 号
- (2) Watson: "Theory of Bessel Functions" p.328.
- (3) 渡辺恵弘:「横動揺に於ける船の重心の運動と波の有効傾斜に就て」造船協会報第 49 号
- (4) 著者:「船舶の動揺造波抵抗に関する研究」の (其の一) 造船協会報第 85 号, (其の二) 以下 (其の六) 迄  
夫々同第 85 号 1~2, 第 86 号 3~4, 第 87 号 5~6, 第 89 号 7.
- (5) 著者:「動揺抵抗に関する一考察」関西造船協会誌第 67 号.