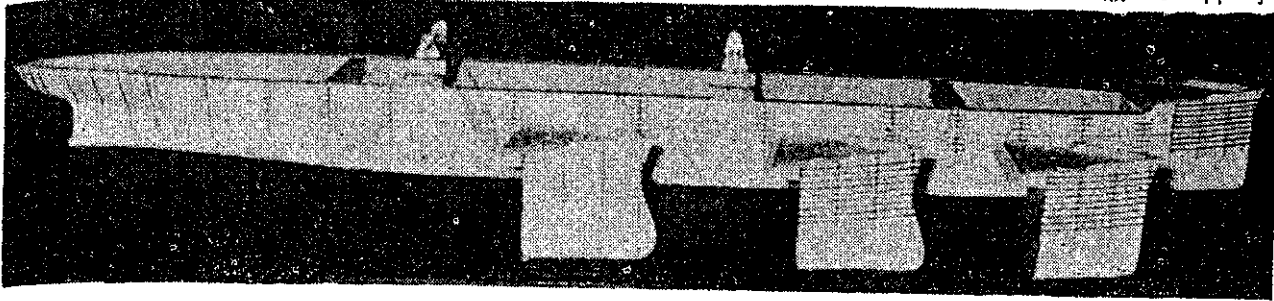
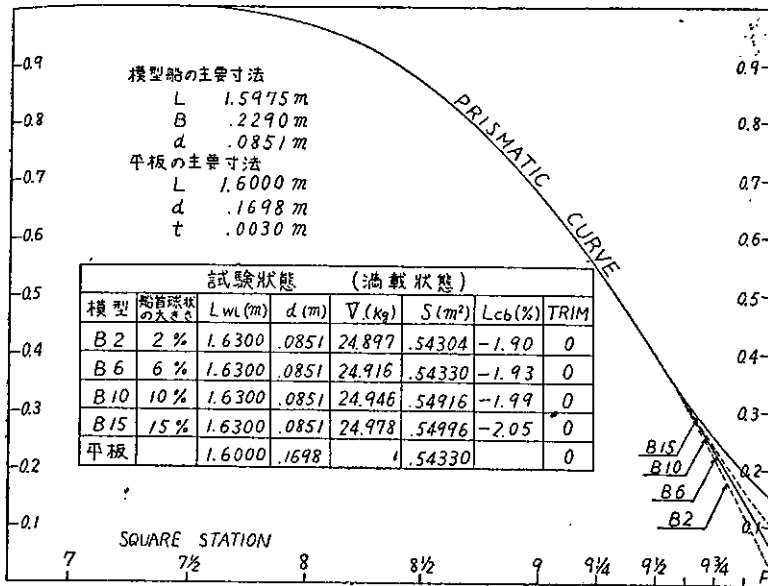




写 真 2



第 1-2 図

正を施した。試験結果を見ると Froude 数 $F=0.15$ 以下においては層流から乱流への過渡状態による抵抗減少期が見られるが、それより高速においては安定した抵抗を示し、抵抗係数曲線の値は Hughes 式において Form factor $K=0.5$ とした値に殆んど近くその傾斜は Hughes line と Schoenherr line との略々中間となっている。

回流水槽における抵抗試験の結果は目黒中水槽におけるものよりも一般に高い値を示している。(第 1.3 図)

この原因としてはまず側壁影響が挙げられ、谷口・田村氏の式によれば約 4.4% 程度の抵抗増加があると考えられるが、第 1.3 図に示した結果にはこの修正は施していない。さらに船の長さ方向の静圧差が抵抗の増大をきたしているのではないかと考えられたが、種々の深度で測定した結果水面近くでは最大 4% 程度であり、大きな影響は見られなかった。

目黒水槽における試験成績と回流水槽における抵抗値との比は後者が大略 15% の増加を示しているが、B.2, B.6 の 2 隻について増加の傾向は略々一致しており、その大きさも殆んど一定であった。また第 1.3 図に見られるように全抵抗係数曲線の交叉する速度も殆んど一致し

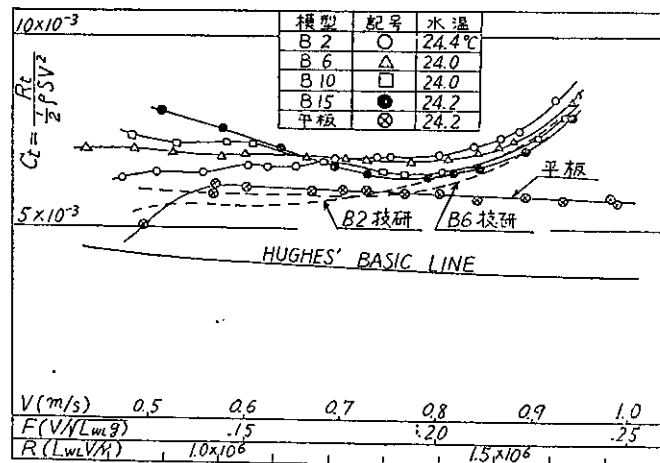
ている。また目黒中水槽における抵抗試験より得られた全抵抗係数と Hughes の摩擦抵抗式において Form factor $K=0.30$ とした値との差(剰余抵抗係数)は、運輸技術研究所³⁾において行なわれた類似船の造波抵抗係数と殆んど一致しているが、この値は回流水槽における試験による全抵抗係数と平板試験により得られた摩擦抵抗係数との差と大体同じになる。

1.3 抵抗試験結果と考察

抵抗試験の結果は全抵抗係数(浸水面積に関する)と Froude 数, Reynolds 数との関係を第 1.3 図に示し、この時の摩擦抵抗値をも同時に示した。

この結果を見ると球状船首がその効果を示すのは $F=0.17$ 附近である。

山県博士によれば、球状船首は限界 Froude 数以上の速度範囲において効果があるとされているが、本試験の場合方形肥楕係数は 0.80 であり、この時の限界 Froude 数は山県博士の式によれば $F=0.16$ となるので、この結果は妥当なものであると思われる。またこの事実は D. W. Taylor の予想を裏付けるものである。球状船首の大きさが増すにつれてその効果はきわめて顕著に現われて



第 1-3 図 抵抗係数曲線

くるのが見られるが、B. 15 の全抵抗係数は低速において少し大き過ぎるようである。この場合、船首が直径約 50mm の球状となって飛出しているの、その Reynolds 数から考えると層流剥離を起こしていることを予想しなければならないだろう。

以上のことから得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 回流水槽における抵抗試験はその絶対値に重きを置く場合はあまり期待できないが、比較試験においては定性的に充分有為な成績を得ることができる。
- (2) 方形肥瘠係数が 0.80 程度の大型船でも限界 Froude 数以上のある範囲において球状船首の効果を期待することができる。その範囲の下限は約 $F = 0.17$ であると思われる。
- (3) 本試験に用いたような船型においては、球状船首の大きさの大きいほどその効果は著しい。

2. 理 論

2.1 総説および船型

第 1 部の実験で見たようにこのような低速においても従来の常識を超えて球状船首が有効であることが推察されるが、その抵抗減少の機構、従って設計上の指針等は定量的には大規模な系統実験に俟つ他ないであろう。

しかしながらその前に球船首の効果の機構を造波抵抗理論的に説明できたことを想起して、われわれはこの場合にもその方法が有効であるかどうかを次に考察して見た。

さていま問題の模型は、

$$L/B = 7.12, \quad L/T = 19.16,$$

$$B/T = 2.67, \quad C_b = 0.800$$

であるが、数値計算の手数をできる限り省くために、まず基本船型として水線が 2 次放物線と直線から成る垂直舷側船を考えてその要目を次のように定めた。

$$L/B = 7.0, \quad L/T = 20.0$$

$$2a = 0.4, \quad C_b = 0.800$$

但し $2a$ は中央平行部長さの L に対する比とする。

また半巾 η は次式で与えられる。

$$\eta = \begin{cases} \frac{B}{2} \left\{ 1 - \frac{\left(\frac{x}{L} - a\right)^2}{\left(\frac{1}{2} - a\right)^2} \right\} \cdots \cdots \frac{L}{2} > x > aL \\ \frac{B}{2} \cdots \cdots (1-a)L > x > -(1-a)L \\ \frac{B}{2} \left\{ 1 - \frac{\left(\frac{x}{L} + a\right)^2}{\left(\frac{1}{2} - a\right)^2} \right\} \cdots \cdots -\frac{L}{2} > x > -aL \end{cases} \quad \cdots (1)$$

2.2 造波抵抗とその影響線

まず上の基本船型の造波抵抗は次のようにして求められる。¹⁴⁾

$$R = 16\pi\rho K_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} |F(K_0 \sec^2 \theta, \theta)|^2 \sec^2 \theta d\theta \cdots \cdots (2)$$

$$\text{但し } F(K_0 \sec^2 \theta, \theta) = \iint_s \sigma(x, Z) e^{\frac{K_0 Z \sec^2 \theta - i K_0 x \sec \theta}{dx dZ}} \cdots \cdots (3)$$

$$\sigma(x, Z) = \frac{V}{2\pi} \frac{\partial \eta}{\partial x} \cdots \cdots (4)$$

V は速度、 $K_0 = g/V^2$ 、 ρ は水の密度

(1) を (4) に代入すれば (3) から

$$F = \frac{ibVL^2}{\pi \left(\frac{1}{2} - a\right)^2 P_0 q_0} (1 - e^{-iq_0}) \left[-\left(\frac{1}{2} - a\right) \cos \frac{P_0}{2} + \frac{1}{P_0} \left\{ \sin \frac{P_0}{2} - \sin a P_0 \right\} \right] \cdots \cdots (5)$$

$$\text{但し } p_0 = K_0 L \sec \theta, \quad q_0 = K_0 L \sec^2 \theta, \quad t = \frac{T}{L}, \quad b = \frac{B}{L}$$

これを (2) に代入すれば直ちに

$$C_{W0} = \frac{R_0}{\frac{\rho}{2} V^2 L^2} = \frac{16b^2}{\pi \left(\frac{1}{2} - a\right)^2 \lambda^2} \left\{ P_3(o, t) - \frac{2}{\lambda^2 \left(\frac{1}{2} - a\right)^2} \right. \\ P_5(o, t) + P_3(\lambda, t) - \frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{2} - a\right)} \{ P_4 \left(\frac{1}{2} - a, \lambda, t\right) \\ - P_4 \left(\frac{1}{2} + a, \lambda, t\right) + P_4(\lambda, t) \} + \frac{2}{\lambda^2 \left(\frac{1}{2} - a\right)^2} \{ P_5 \\ \left(\frac{1}{2} - a, \lambda, t\right) + \frac{1}{2} P_5(2a, t) - P_5 \left(\frac{1}{2} + a, \lambda, t\right) + \frac{1}{2} \\ P_5(\lambda, t) \} \left. \right\} - 2 \frac{\left\{ \begin{matrix} t=0 \\ t=\tau \\ t=2\tau \end{matrix} \right\}}{\left\{ \begin{matrix} t=0 \\ t=\tau \\ t=2\tau \end{matrix} \right\}} \cdots \cdots (6)$$

ここで $\lambda = K_0 L$, $\tau = t\lambda = K_0 T$

$$P_{2n+1}(x, t) = (-1)^n \int_0^{\frac{\pi}{2} - t \sec^2 \theta} e^{\sin(x \sec \theta)} \cos^{2n} \theta d\theta \\ P_{2n+1}(x, t) = (-1)^{n+1} \int_0^{\frac{\pi}{2} - t \sec^2 \theta} e^{\cos(x \sec \theta)} \cos^{2n+1} \theta d\theta \quad \left. \right\} (7)$$

また (6) の大括弧の右側の記号は $t=0$ と置いた値から $t=\tau$ と置いたものの 2 倍を引きそれに $t=2\tau$ と置いたものを加えることを意味する。¹¹⁾

これらの計算は主として P_n 函数の漸近展開によって行ない、その値は第 2.4 図①に示すが、まず気が付くことは Froude 数 $F = 0.16$ を境として急激に抵抗が増大することである。

ところがこの値は所謂限界 Froude 数に一致した¹⁾この現象は計算の過程から船首波と船首肩波との相互干渉によるものであることが判る。

さてわれわれの目的はこの母船型に種々の船首形状を加えてそれらの間の優劣を決定することである。しかしながらこの方法は多大の労力を要するし、また全体の傾向を見通すことが困難なので結局定性的な問題に立ち帰らざるを得ない。

このような難点は船型の変化が非常に僅かであるならば、E. Hogner の所謂影響線の方法によって補われる。もっとも彼は無限吃水の場合にのみ適用しているので、ここでは少し拡張して次のように考える。

さて水線の半巾 η が点 (x, Z) の近傍で、次の条件を満たして左右対称的に $\Delta\eta$ だけ増加するとしよう。

$$\iint \Delta\eta \, dx \, dZ = \Delta\eta, \quad \iint \frac{\partial}{\partial x} (\Delta\eta) \, dx \, dZ = 0 \quad \dots\dots (8)$$

そうすると、(3)あるいは(5)の F は ΔF だけ増加する。

$$\Delta F = \frac{iK_0 V}{2\pi} \sec\theta \left(\frac{\Delta\eta}{2} \right) e^{-K_0 Z \sec^2\theta - iK_0 x \sec\theta} \quad \dots\dots (9)$$

そこで造波抵抗は(2)によって

$$R = R_0 + R_1 + R_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$R_1 = 16\pi\rho K_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (F_b \overline{\Delta F} + \overline{F_b} \Delta F) \sec^3\theta \, d\theta \quad \dots\dots (11)$$

$$R_2 = 16\pi\rho K_0^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\Delta F \overline{\Delta F}) \sec^3\theta \, d\theta \quad \dots\dots\dots (12)$$

まず R_2 を Hogner に倣って無視すれば抵抗変化はこの時 R_1 であって、これは(9)から見えるように排水量増分 $\Delta\eta$ に比例する。従って単位排水量増分に対する R_1 (影響線) を各点各速度に対して計算して置けば、母船型からの任意の変化に対する抵抗変化が単純な積分によって求められる。

今の場合について計算すればまず(3)、(9)から

$$F \overline{\Delta F} + \overline{F} \Delta F = \frac{BLV^3}{2\pi \left(\frac{1}{2} - a \right)^2} \cdot \frac{\Delta\eta}{q_0} (1 - e^{-q_0 Z}) e^{\frac{q_0 Z}{L}} \\ \times \left[-\left(\frac{1}{2} - a \right) \cos \frac{p_0}{2} + \frac{1}{p_0} (\sin \frac{p_0}{2} - \sin ap) \right] \cos \left(\frac{p_0 x}{L} \right) \quad \dots\dots\dots (13)$$

従って(11)は

$$\frac{R_1}{\frac{\rho}{2} V^3 L^2} = C_{w1} = -G \left(\xi, -\frac{Z}{L} \right) \left(\frac{\Delta\eta}{\eta} \right) \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$G \left(\xi, -\frac{Z}{L} \right) = \frac{\eta}{L^3} [P_{-1}(\xi\lambda, t) - P_{-1}(\overline{1-\xi}\lambda, t) - \frac{1}{-(\frac{1}{2}-a)\lambda} \{P_{-1}(\xi\lambda, t) + P_{-1}(\overline{1-\xi}\lambda, t) - P_0(\overline{a-\frac{1}{2}+\xi}\lambda, t)$$

$$-P_0(\overline{a+\frac{1}{2}-\xi}, t)] \Big|_{t=-K_0 Z}^{t=-K_0 Z} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\text{但し } \gamma = \frac{8\lambda}{\pi(\frac{1}{2}-a)}$$

また ξ はある点の x 座標を前部垂線から後方へ測った長さを L の分数で表わした値とする。特に $\xi = 0$, $Z = -T$ と置けば

$$G(0, \frac{T}{L}) = \frac{\eta}{L^3} [P_{-1}(0, t) - P_{-1}(\lambda, t) - \frac{1}{(\frac{1}{2}-a)\lambda}]$$

$$\{P_0(\lambda, t) - P_0(\overline{a-\frac{1}{2}\lambda}, t) - P_0(\overline{a+\frac{1}{2}\lambda}, t)\} \Big|_{t=0}^{t=\tau} \quad \dots\dots\dots (16)$$

また垂直方向に一樣に水線が変化するならば、上2式を積して A を水線面積とし

$$\frac{R_1}{\frac{1}{2}\rho V^3 L^2} = C'_{w1} = -H(\xi) \left(\frac{\Delta A}{A} \right) \quad \dots\dots\dots (17)$$

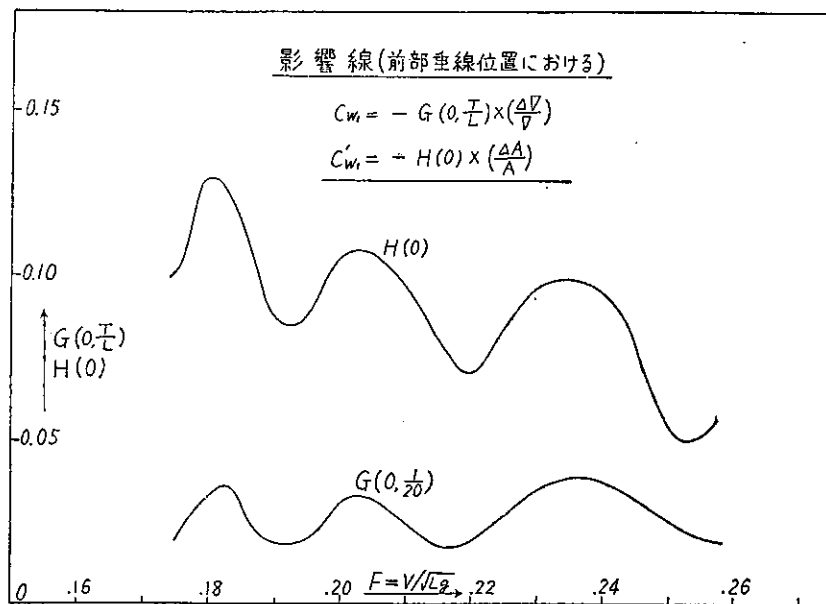
$$H(\xi) = -\frac{\gamma A}{L^2} [P_1(\xi\lambda, t) + P_1(\overline{1-\xi}\lambda, t) - \frac{1}{(\frac{1}{2}-a)\lambda} \{P_2(\xi\lambda, t) + P_2(\overline{1-\xi}\lambda, t) - P_2(\overline{a-\frac{1}{2}+\xi}\lambda, t) - P_2(\overline{a+\frac{1}{2}-\xi}\lambda, t)\}] \Big|_{t=0}^{t=\tau} \quad \dots\dots\dots (18)$$

特に $\xi = 0$ とすると

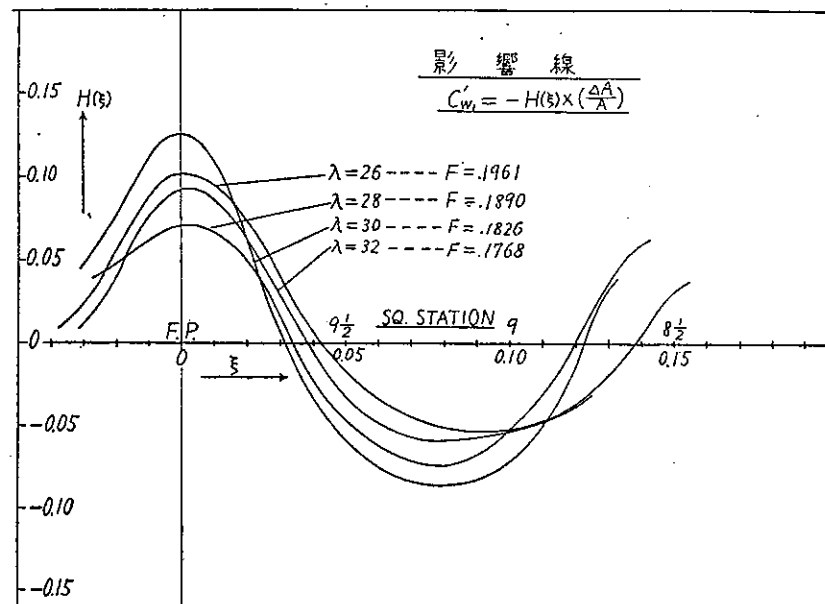
$$H(0) = -\frac{\gamma A}{L^2} [P_1(0, t) + P_1(\lambda, t) - \frac{1}{(\frac{1}{2}-a)\lambda}]$$

$$\{P_2(\lambda, t) + P_2(\overline{\frac{1}{2}-a}\lambda, t) - P_2(\overline{\frac{1}{2}+a}\lambda, t)\} \Big|_{t=0}^{t=\tau} \quad \dots\dots\dots (19)$$

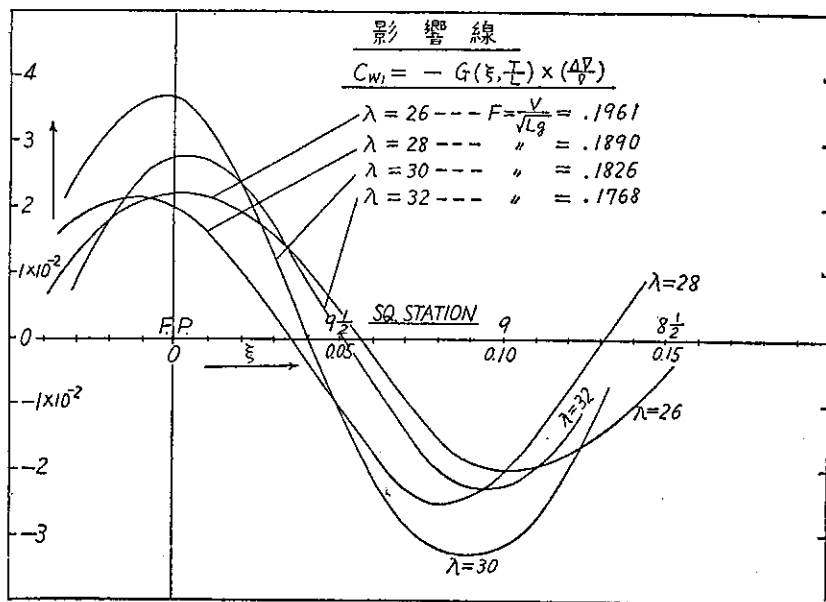
これらの式で船体表面のすべての点の値を計算して置けば良いのだが、手数の関係から第2.1図には船首船底における G と、前部垂線位置における H を、第2.2図には船首船底近傍の G を、第2.3図には前部垂線近傍の H を計算して図示した。定性的な目的にはこの程度で充分有用である。さて最後に(12)について少し考えよう。この項は変形分単独の固有抵抗であって(9)から判るように排水量増分の自乗に比例するから一般には殆んど無視できるが、われわれの場合は Wigley も指摘したように重要な役割を演じる。そこでこれを簡単に推定するために排水量増分に等しい容積を持つ球、あるいは水線面積増分に等しい断面積を持つ垂直円筒の造波抵抗をもって代表させることとする。



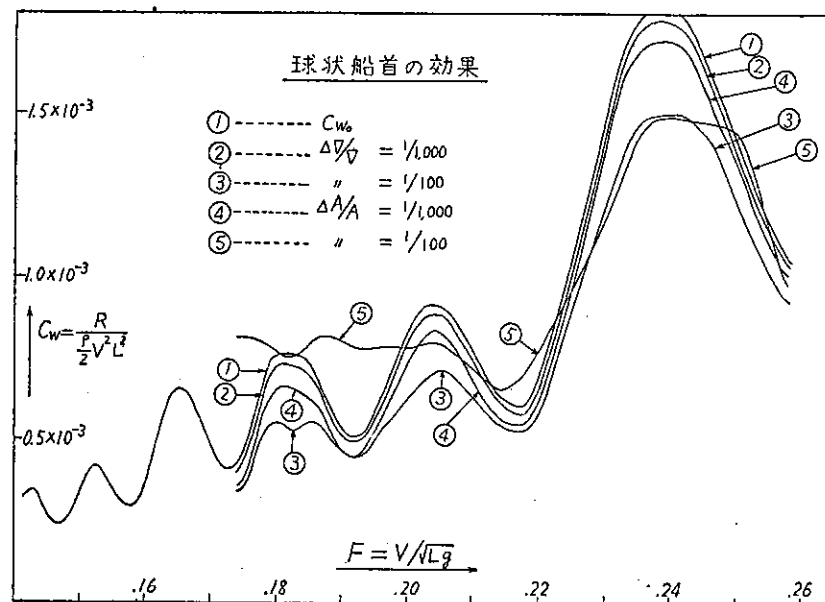
第2-1図



第2-3図



第2-2図



第2-4図

半径 a , 深度 T の球の造波抵抗は

$$\frac{R_0}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} = C_{w2} = \left(\frac{4\nabla}{\nabla}\right)^2 I(\lambda) \dots (20)$$

ここで $4\nabla = \frac{4}{3}\pi a^3 \quad (L/T=20)$

$$I(\lambda) = -\frac{9}{8\pi} \left(\frac{\nabla}{L^3}\right)^2 \lambda^4 e^{-\frac{\lambda}{20}} \left\{ K_0\left(\frac{\lambda}{20}\right) + \left(1 + \frac{20}{\lambda}\right) K_1\left(\frac{\lambda}{20}\right) \right\} \dots (21)$$

次は垂直半没円筒 (半径 a , 吃水無限大) の抵抗は

$$R'_2 = 16\pi\rho V^2 a^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} J_1^2(K_0 \sec^2 \theta) \cos^3 \theta d\theta \dots (22)$$

この積分はメラン積分表示に変換すれば容易に級数展開できてその第1項のみ採れば,

$$\frac{R'_2}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} = C'_{w2} = -\left(\frac{2}{\pi} \log_e 10\right) \left(\frac{4A}{L^2}\right)^2 \lambda^2 \log_{10} \left(\frac{\alpha^2 (4A)\lambda}{\pi L^2}\right) \dots (23)$$

$$\alpha^2 = \frac{1.78107}{32\sqrt{e}}$$

2.3 球状船首の効果および結論

さて, 以上の計算から次の第2.4図を描いて見た。

まず船首船底に排水量の0.1%の大きさの球を置いた場合②は計算範囲で殆んど一様に抵抗減少を示してその最大減少量は約4%である。この値から推して球の大きさは大体この程度以上でなければ効果は無いと思われる。

(第1部B.6模型参照) 次に同じ位置で排水量の1%の球を置けば(③), 抵抗減少は比例的に大きくなって最大約30%となる。なおこの計算範囲には出てこなかったが, 前節の R_2 なる固有抵抗のために $F=0.172$ 附近で母型の抵抗曲線と交叉することは確実である。従って $F=0.18$ の近辺の速度を狙うならば球船首の大きさはこの程度が限度であろう。

また, 一方では第2.3図から判るように影響線は船首から3~5% L 這入ったところで負から正に変わるから実際問題としてこのような大きな球状部に肉付けをすることは困難な問題となろう。

次に船首材に沿って一様に排水量を増した場合を考えよう。排水量あるいは水線面積の増分が0.1%の時(④)は, 前の球の場合よりも抵抗減少は大きく最大12%となるけれども $F=0.17$ の辺でおそらく交差するだろう。またこれを1%とすると, 最早 $F=0.22$ で交差して $F=0.24$ の Hump において効果を表わすことになる。また第2.3図を参照すれば影響線の符号の変わる点は前例より少し前にくるから, 満載水線を膨らますことの難しさ

はよく判る。しかし一方ではこの図はユークレビッチ船型の効果を明らかに説明している。

さて以上を要約して見ると,

- (1) 造波抵抗論的に言って $C_b=0.80$ の船に球状船首をつけることは $F=0.18$ 以上で充分有効と考えられる。
- (2) その場合球状部の排水量に全体の排水量の1%内外とすれば最も効果があるだろうが, この場合球状部と母型との肉付けによる膨らみは船首から3~5% L の間で終わるように計画し, その後方では逆にむしろ凹ませるべきである。
- (3) 満載水線は船首から3~4% L の間では水線面積の0.1%以内の範囲で膨らませれば効果があるが, これは抵抗減少範囲を高速側に移動させるから充分留意すべきである。またこの後方を少し凹ませてユークレビッチ船型とすることは有効であろう。

これをもって見れば従来の高速船の場合もわれわれの場合も球船首の効果の機構は同じであることがよく判る。ただ速度に応じてその寸法, 特に球状部の最後端の選定に留意しなければならないわけである。

最後に, この研究は当講座牧山教授の研究進展と実用的設計面についてのご助言のもとに, 次の方々のご協力を俟ってはじめて可能であったことを銘記し感謝の意を表すものであります。

回流水槽および模型設計製作	浦賀船渠株式会社
抵抗動力計設計製作	山口機器製作所
実験および解析	技官 宮川 清
	防衛大学校機械科 第2期生 小高 長利
	同 小浜 氏高
	同 外山 祐一郎
	同 越智 富士夫
	同 高橋 光望
	同 福田 光望
数値計算	

参考文献

- (1) D. W. Taylor; "The Speed and Power of Ships" (1933)
- (2) 谷口中, 田村欣也「模型船の抵抗に及ぼす側壁影響の研究」西部造船協会会報第9号昭和30年
- (3) 土田陽, 横尾幸一, 伊藤達郎「大型油槽船の水槽試験における縮率影響について」造船協会論文集102号
- (4) 山県昌夫 「船型学 抵抗篇」
- (5) E. M. Bragg; T. S. N. A. M. E. (1930)
- (6) J. M. Ferguson and M. N. Parker; T. I. N. A. Vol. 98 (1956)
- (7) 谷口中 「船舶」昭和33年1月
- (8) W. C. S. Wigley; T. N. E. C. I. S. (1935~36)
- (9) G. Weinblum; Schiffbau (1936)
- (10) E. Hogner; P. R. S. Vol. 155A (1932)
- (11) 別所正利 大学院研究報告 昭和30年3月
- (12) H. Lamb; P. R. S. Vol. 111 (1926)
- (13) T. H. Havelock. P. R. S. Vol. 138A (1932)
- (14) V. Yourkevitch; Bull. L'Assoe. Tech. Mari. et Aero. (1932)