(昭和 23 年 11 月造船協会秋季講演会に於て講演)

船体抵抗試験について

正員 工学士 田 宮 眞

Abstract

“On Resistance Experiments of Ship Models”

By Shin Tamiya, *Kogakushi, Member*

The author has reanalysed some of the published data of resistance experiments of similar ship models in a form of the so-called residuary resistance coeft. (r_{r0}) versus Schoenherr's frictional resistance coeft. (r_{f0}) under constant Froude number.

The r_{r0} -contours ($\mathfrak{F}=\text{const.}$) are found out to be not always parallel to the base line. He has explained the causes of these phenomena to be attributable to the form effect on skin friction resistance and the effect of viscosity on wave resistance, and suggests the necessity of the reconsideration of Froude's law of comparison.

§1 緒 言

著者はさきに摩擦抵抗における形状影響¹⁾について若干の計算結果を発表し、又別に抵抗試験と乱流剝離との関係について考察した。之等はそれぞれ独立に検討をしたので今回改めて抵抗試験に関して以上の二項を併せ考え、所謂 Froude の比較則に対する再考察を行つたのでその結果を報告する。

§2 Froude の比較則と従来の相似模型試験

周知の如く W. Froude の抵抗比較則の概念は次の様に表現出来る。

“船体抵抗は摩擦抵抗と剰余抵抗との和と考える。両者は互に独立であつて、剰余抵抗係数は Froude 数のみの函数であり、摩擦抵抗係数は相当平板の係数値に等しいとみなす。”

現在の流体力学の概念から之を数式であらわすと次の如くなる。

$$r = r_f + r_r \quad (1)$$

$$r_f = f(\mathfrak{R}) \quad (2)$$

$$r_r = f(\mathfrak{F}) \quad (3)$$

r 等は無次元の抵抗係数である。 $\mathfrak{R}$ 、および $\mathfrak{F}$ は云うまでもなくレイノルズ数、フルード数である。

今 r_f として平板の値をとり之を r_{f0} とすると $r - r_{f0} \equiv r_{r0}$ は $\mathfrak{F}$ のみの函数であつて $\mathfrak{F} = \text{const.}$ のとき r_{f0} 又は $\mathfrak{R}$ には無関係である。従つて横軸に r_{f0} をとり、縦軸に r_{r0} をとると、 $\mathfrak{F} = \text{const.}$ なるコントロールは、横軸に平行な直線になるはずである。 r 、 r_{f0} は測定および計算で求められる値である。ただ r_{f0} は種々の計算式があつていずれが正しいとも断定できないが、本論文では Schoenherr の式によることとした。国際的に広く認められて居り、又模型の $\mathfrak{R}$ の範囲でよく理論的考察にも一致するからである。

さて上の r_{r0} 対 r_{f0} ($\mathfrak{F} = \text{const.}$) 曲線をうるためには、相似模型による抵抗試験が必要となるが、層流影響が不明のまま存在しては問題の考察を甚だあいまいなるものにするので、従来行われた試験結果のうち、利用できるものは比較的僅少であつて、手許に集められた次の 10 隻について考察した。主要寸法等を第 1 表に、 $r_{r0} - r_{f0}$ 曲線を Pl. 1 に示す。

之等の実験は長さ 1.5 m ~ 9.14 m の模型を使用して居るが、Pl. 1 には長さ 2.4 m 以上のものを採録した。大型模型では側壁或は底面影響が考えられるが、L. A. の大型 2 模型を除いてはかかる影響が現れていないと認められる。

Pl. 1 を通覧すると、その様相はかなり区々であつて、何等の結論が導けない様にみえる。Froude の比較則は r_{f0} のある範囲および $\mathfrak{F}$ に対する広い平均をとれば成立つと云える様であるが、一般に fine な船形については曲線はかなりの傾斜を示し、十分大きな模型に対して之が漸近値をもつものと断定することも困難である。

第 1 表

符号	船 種	状 態	$L_{wl}(m)$	$B(m)$	$d(m)$	$\nabla(m^3)$	$S(m^2)$	C_b	文 献
Y-1	鯨 工 船		163.1	22.61	10.27	32344	6108	.833	造船協会々報 第65号, 山県
Y-2	高速貨物船		145.0	19.54	8.32	16170	3952	.669	
Y-3	砲 艦		71.4	13.30	4.32	2275	1055	.555	
M-1	高速客船	満 載	151.0	18.30	5.94	8585	2992	.542	西部造船会々報 第3号, 高田
//	//	公 試	148.7	18.30	4.82	6633	2590	.515	
M-2	高速貨物船	満 載	146.8	19.60	8.43	16190	4118	.682	
//	//	公 試	140.2	19.60	5.04	8882	3088	.622	N. E. C. I. Vol. LVI, 1939-40 v. Lammeren Soc. N. A. M. E.. Vol. 40, 1932. Saunders.
H	貨 物 船	満 載	125.2	17.60	7.28	11250	3100	.702	
//	//	半 載	119.7	17.60	5.16	7530	2544	.692	
//	//	公 試	114.7	17.60	3.52	4880	2132	.687	Skipsmodell Tankens Meddelelse NR. 11
S. B.	貨 客 船		128.6	17.93	7.32	11906	3237	.706	
W.	巡 洋 艦		153.0	22.20	7.62	14370	3748	.555	
B. A.		満 載	124.87	16.76	7.92	12100		.746	T. I. N. A. 1951, Denny T. I. N. A. 1953, Conn他
//		半 載	120.51	16.76	6.40	9515		.728	
//		公 試	118.68	16.76	4.88	7033		.705	
L. A.	河 船		58.1	6.40	1.52	387	41.72	.685	

ただ従来普通船の速度の範囲では r_{r0} が r に比してかなり小さいことと、実船については、粗度影響の大きさが明らかでないために、たとえ Pl. 1 の程度に Froude のを比較則が満足されなくても、実船の $E.H.P.$ の算定に支障を来すことは比較的少かつたと想像される。

ここに一つ注意しておくことは、自明の事ながら大型模型における r_{r0} の見掛の一致のみで Froude 比較則を是認することの危険であつて、模型の長さの差 1m に対する Δr_{r0} は、模型の長さが大になると共に急速に小さくなり、従つて対応する Δr_{r0} も減少することを忘れてはならない。

著者はさきに白馬山丸 (H) 模型実験の共同研究に参加した際、所謂 Trip Wire による乱流促進の効果の著しいことを経験したが、模型船 B. A. においても、T. W. 付きとなしの両方について実験が行われている。H および B. A. について T. W. の有無による $r_{r0}-r_{r0}$ 曲線の差異を示すために、Fig. 1 を掲げた。T. W. の効果は船形によつて異なるけれども一般に乱流移行の起りにくい船形に顕著で、之の効果の小さい場合は容易に遷移が起つている時であると考えられる。Fig. 1 は T. W. の効果を歴然とあらわして居り、結果がはるかに整然としている。そこで以後 T. W. を用いた実験結果 (H. B. A.,) および之と同等の効果を認められている実験 (S. B., L. A.) を主として観察し、層流影響が十分小さいと想像される高速の範囲についてのみ他の実験結果をも参照することにする。H. B. A., S. B., L. A. をみると、之等はほぼある傾きをもつた直線群であらわされている。傾きは $dr_{r0}/dr_{r0} > 0$ の傾向にあり、 $\Re$ 値によつて若干変化する様である。このことは W, M 等の高速部にあらわれている。ここでは $dr_{r0}/dr_{r0} < 0$ でしかもかなりその傾きが著しい。之は乱流剝離を考えたときには予想しなかつた現象である。

我々はここで抵抗比較則を改めて考直す機会をもちたいと思う。

§ 3 抵抗比較則の再検討

今層流剝離は起らないものとし

全抵抗係数 r を次の形に仮定する

$$r = r_f + r_w + r_{fw} + r_{wf} + r_e \quad (4)$$

ここに

r_f = 船体表面に働く摩擦応力の合成抵抗力係数。但し

波動の影響を含まず。船形と $\Re$ との函数

r_w = 造波現象にもとづく抵抗係数、但し粘性影響を含まず。船形と $\Re$ との函数

r_{fw} = 造波現象の r_f に対する影響

船型数表 (船)

	Y-17.3	M-1	M-2	H	S	B	W	B	A	L	A
●	6.000	5.182	5.775	7.00	8.57	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74	8.74
○	5.000	4.591	4.20	6.00	7.14	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81
○	4.000	4.000	3.75	5.00	6.12	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20	6.20
○	3.000	3.000	2.40	2.50	5.14	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72
○			2.000		3.57						
△					2.57						
					2.14						

本図 縦軸 = $T - T_0$

、横軸 = F_F [Schenck の式 (1.5)]

同: Froude 数 (右側に数字) = 主と指標で結ぶ

Plate 1.

Fig. 1.

r_{wf} = 粘性の r_w に対する影響

r_e = 剥離に伴う渦抵抗

(4)式及び r_f 等の区分は以後の解析に便利な様に考えたままで、必然的な理由はない。 r_f, r_w は従来の研究によつて大体の傾向なり絶対値なりを計算出来る利点は考へてある。粘性の圧力分布に対する影響はまず r_e に現われ之が更に r_w に干渉して r_{wf} をあたえる。 r_{wf} と r_e との間には更に干渉が行われ、結局はある平衡を保つものとする。この結果 r_e と r_{wf} とを分離することは実は困難であるが、ここでは $(r_e + r_{wf})$ のうちで、 $\Re, \mathfrak{F}$ に無関係となる部分 (波のない場合の r_e にあたるもの、之が $\Re$ に無関係な値をとることは、粗面の抵抗の性質等から推察される。) を r_e とし、他を r_{wf} と書き現すこととする。従つて $\mathfrak{F}$ = 一定の後述の条件下では r_e は r_w と同じグループに入れてよく、又 r_e の r_{f0} に対する大きさは普通船形では小さいとしてよい。

先ず相当平板の抵抗係数 r_{f0} を用い、 r_f を

$$r_f = r_{f0}(1+K) \quad (5)$$

と書く。 K は所謂形状影響係数で、主として船形のみで定まる。次に

$$r_{fw} = K_w r_f \quad (6)$$

とあらわすと K_w は主として $\mathfrak{F}$ の函数となる。(5)(6)を(4)に入れて変形すると

$$r - r_{f0} \equiv r_{r0} = r_{f0}(K + K_w + K K_w) + r_w + r_{wf} + r_e \quad (7)$$

ここで $\mathfrak{F} = \text{const.}$ とすると(7)式の K, K_w, r_w は一定と考えられ、変数は r_{f0} と r_{wf} となる。今 r_{f0} で微分すると

$$\partial r_{r0} / \partial r_{f0} = (K + K_w + K K_w) + \partial r_{wf} / \partial r_{f0} \quad (8)$$

先ず右辺括弧内を考えると、既に行つた計算により K は大約 0.10 前後の値であり、 K_w は K に比し小さいことが計算および若干の実験結果から想像される。従つてこの括弧内はほぼ K に等しい正の値をもつものと考えられる。

次に右辺第二項の検討にあつては、乾助教授の本年春季講演会における論文³⁾が有無なる参考となる。この論文に示された結果の必要箇所だけをとると、 r_w に対する粘性影響 r_{wf} は δ, α を $\Re$ の函数として近似的に

$$r_{wf} = (2\delta - \alpha)r_w - \frac{\delta}{2} \left(X \frac{dr_w}{dX} \right) \quad (9)$$

と書き現わせる。ここに X は $\mathfrak{F}$ 又は船速を代表する。(9)式の成立つ X の範囲は低速とだけで論文中に明示していないが、同論文が $\mathfrak{F} > 0.3$ における実験をとりあつかっている所から、普通の船の $\mathfrak{F}$ の範囲では十分近似すると考えられる。又 α は船尾波の減衰量を示し、(同論文中の β とは $\alpha + \beta = 1$ なる関係あり) δ は船尾波の起点のずれをあらわし、その値は 2.33 m の模型船に対し夫々約 0.2~0.3 および 0.05 であつた。

$F = \text{const}$ として r_{f0} で微分すると

$$\frac{\partial r_{wf}}{\partial r_{f0}} = \left(2r_w - \frac{X}{2} \frac{dr_w}{dX} \right) \frac{\partial \delta}{\partial r_{f0}} - r_w \frac{\partial \alpha}{\partial r_{f0}} \quad (10)$$

先ず $\frac{\partial \delta}{\partial r_{f0}}$ 等には係数 $\left(2r_w - \frac{X}{2} \frac{dr_w}{dX} \right)$, r_w がかかっているから、 F の小さい所では $\partial r_{wf}/\partial r_{f0}$ は小さいと考えられる。又 $r_w = kX^n$ と書きあらわしたとき $n < 4$ ならば $2r_w - \frac{X}{2} \frac{dr_w}{dX} > 0$ である。この際 $r_w \doteq r_w + r_{wf}$ と考えれば Taylor の著書からわかる様に $\mathfrak{F} < 0.3$ ではほぼ $n < 4$ であつて右辺第一項の係数は正である。之より高速では $\frac{dr_w}{dX} \leq 0$ の僅の範囲をのぞき括弧内は負となる。

次に $\frac{\partial \delta}{\partial r_{f0}}$, $\frac{\partial \alpha}{\partial r_{f0}}$ については今の所定量的にははつきりしたことは云えないが、流れの中におかれた物体の圧力分布に関する実験の傾向から考えて、共に正の値をもつと考えるのが合理的であろう。従つて $\partial r_{wf}/\partial r_{f0}$ については低速では極めて小さく、高速において負の値を有すると考えてよい。なお一般に α , δ 自体については full な船型ほどその値が大きく、その r_{f0} に対する変化も又大きいと思われる。

さきに報文(1)に考えたのは(5)式の K であり、又報文(2)では $r_e + r_{wf} + r_{fw}$ を一括して考察を行つていたもので、後者については $\frac{\partial \delta}{\partial r_{f0}}$ に関する部分にのみその説明が適用されるべきものであつたと考える。

$\partial r_{wf}/\partial r_{f0}$ の数値的の値については、Havelock が平板等に関して一二の計算⁴⁾ を行い、同じ考えで抵抗の一般式を Lunde⁵⁾ があたえている。この考えの当否は暫くおき、Havelock の結果を借用するとパラボラ型船形で船尾における $\delta_1/b = (\text{排除厚})/(\text{半幅}) = 9/128$ 及び $5/32$ に対して算定された $-K_f \equiv -r_{wf}/r_w$ から推定して

$-\frac{dK_f}{d\Delta_1} \left(\Delta_1 \equiv \frac{\delta_1}{b} \right)$ の平均値として 2 を得る。但し $\mathfrak{F} = .19 \sim .30$ の範囲である。 $L/B = 7$ として Δ_1 を r_{f0} で書

直すと

$$\partial r_{wf}/\partial r_{f0} \doteq \frac{1}{0.7} \left(\frac{L}{B} \right) \frac{dK_f}{d\Delta_1} \cdot r_w \doteq -20 r_w$$

となる。 $\mathfrak{F} = 0.25$ に於て r_w は船形により大巾に異なるけれども 0.001~0.003 の範囲であつて $\partial r_{wf}/\partial r_{f0} = -.02 \sim -.06$ の程度である。 $K + K_w + KK_w$ がほぼ 0.10 の程度であることと比べて、Pl. I を見直すと、Trip Wire つきの実験結果では $\mathfrak{F} = 0.25$ 以下では $\partial r_{f0}/\partial r_{f0} > 0$ 之以上では負の場合のあらわれていることが看取され興味深い。T. W. なしの実験例からみても、Y-3 及び M-1 (公試) 3.4 m 模型を除き、 $\mathfrak{F} \geq 0.3$ では $\partial r_{f0}/\partial r_{f0} < 0$ となつている。

著者の先に行つた 2 次元流の計算結果¹⁾において B の代りに $D_0 = \sqrt{\frac{8A}{\pi}}$ (A = 中央横断面積) をとり、 c_m の代りに c_p をとつて(5)式の K を求め、 K を傾斜に有する直線を H, S. B, B. A, L. A の図に入れたものを Pl. II に再録し、この直線がよくあわないものについては同図中に点線で大体の平均直線を描いておいた。低速では K_w , $\partial r_{wf}/\partial r_{f0}$ 共に小さいからコントロールの傾斜はほぼ K に等しい筈であるが、平均的にいずれもよくこの直線上に測定点がついている。 K_w が小さいことは、計算側でも嘗て示したが、Laute, Eggert, 横田等の直接計測の結果をみても r_f (計測) ~ r_f (計算) が $\mathfrak{F}$ によつて、単調な変化しか示さないことから肯定されるであろう。

著者は相似模型試験結果から K の計算値の当否を知りうると信ずるので、更に適切な乱流促進を行つたこの種実験のデーターを集めたいと考えている。

§ 4 結 論

上の考察からは、Froude の抵抗比較法則を再検討する必要があるという以上に結論をひき出すことは危険であるが、普通商船の航行速度の範囲で $r_{f0} \sim r_{f0}$ コントロールが大抵 K に等しい傾斜を有し、高速では $\partial r_{f0}/\partial r_{f0} < 0$

Plate II

の性質を示すことから、かりに § 3 の考察結果が真に近いとすると次の事を予想してよいであろう。〔推進問題に関する他の因子には従来の経験に重大な変化がないことは二三の文献から推察される。〕

1. Froude の比較則では低速で有効馬力を実際より高く、高速で低く評価することになる。
 2. 従つて所謂粗度影響を低速では過少に、高速では過大に推定している。又 fine な船では full な船より過大に推定することになる。
 3. ほぼ商船の就航 Fr 値のあたりで $\partial r_{ro}/\partial r_{fo}$ がごく小さいことは従来の水槽試験法に幸であつた。なお乱流促進法の研究は今後も重要な課題であると考えられる。
- 終りに相似模型試験に関し有益なデータをあたえられた高田茂俊氏他の諸氏に厚く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 摩擦抵抗に関する一二の問題, 著者 昭和 25 年秋季講演会
- (2) 船体抵抗試験と乱流剥離との関係について, 著者 昭和 27 年春季講演会
- (3) A New Theory of Wave-Making Resistance T. Inui, 造船協会論文集第 93 号
- (4) Calculations Illustrating the Effect of Boundary Layer on Wave Resistance. T.H. Havellock. T.I.N.A. 1948.
- (5) Skipsmodelltankens Meddelelse Nr. 11.