(昭和十五年四月三日第四回日本工學會大會第十三部會に於て講演)

船の横搖に對する抵抗の性質並に相似則に就て

正員 工 學 士 加 藤 弘*

Abstract.

On the Nature of Resistances to Rolling of Ships
and the Law of Comparison.

By Hiroshi Kato, *Kōjakushi, Member.*

To study the properties of the rolling motion of ships, especially through large angles, ship-models are usually employed; consequently a law of comparison must be in existence between them. By Mr. W. Froude's assumptions on the frictional and eddy making resistances and on the waves created by the rolling of ships it has hitherto been believed that the coefficients of extinction are constant for similar ships at corresponding periods. But it was found from experiments that these coefficients are different by a large amount between actual ships and their small models, and by a moderate amount between similar ship-models. Particular experiments were therefore carried out to study the nature of resistances to the rolling of ships. For the investigations on the frictional and eddy making resistances three cylinders of different diameters and a cylinder fitted with fins of various depths were suspended vertically in water sufficiently deep and caused to oscillate in various periods. As to the wave making resistance waves created by the rolling of similar ship-models were carefully measured. These experiments showed that the frictional resistance to oscillation was expressed by the sum of resistances proportional to the angular velocity and its square, the coefficients being different in each period for each cylinder; that the eddy making resistance was expressed by the sum of resistances proportional to from first to third power of the angular velocity, the coefficients being also different in each period for each depth of fins; and that the height of the created wave did not vary as the amplitude of roll, but varied as the breadth of the ship-model. Based upon these results a new law of comparison was established and its validity was shown after having been applied between an actual ship and her model, and also between three similar ship-models.

1. 緒 論

船が静水中で横搖する時の抵抗は、波浪中に於ける横搖の角度を決定する爲に重要なものである。而して船の波浪中横搖が問題となるのは横搖角が相當大なる時であるから、静水中横搖も大角度の場合が必要で、従つて此方面の研究は専ら模型試験に依らねばならない。此爲には模型船と實船との間に相似則が存在する必要がある。W. Froude 氏⁽¹⁾は減減曲線を $\delta\theta_m = a\theta_m + b\theta_m^2$ の形で表はし、横搖に依つて生ずる波に就て、其幅が船の長さに比例し、其週期が船の横搖週期に等しく、其高さが船

* 東京帝國大學助教授

(1) W. Froude, "On Resistance in Rolling of Ships," Naval Science Vol. III. 1874.

の幅と横揺角との積に比例すると假定して生成波の勢力を求め、之を横揺の勢力損失と比較して造波抵抗が a 係數に關係する事を述べ、摩擦抵抗及造渦抵抗は速度の 2 乗に比例すると假定して之等が b 係數に關係する事を述べ、相似船の對應週期に於ける a 及 b 係數は一定なる事を理論的に證明した。Froude 氏は振子装置に依り板の動搖試験を行ひ、造渦抵抗が速度の 2 乗に比例する事を見出し、又軍艦 Devastation 號 ($L \times B \times D = 86.9 \text{ 米} \times 19.2 \text{ 米} \times 8.2 \text{ 米}$) の長さ 274 米及 549 米なる 2 模型船に就て靜水中横揺試験を行ひ、其減衰曲線が大體一致する事を認めた事か Naval Science Vol. III. 1874 226 頁に記載してあるが、詳細なる資料は發表されてなく、又實艦との比較もない。G Idle 氏及 G S Baker 氏⁽¹⁾が長さ 381 米の燈臺船模型に就て其中央部 168 米の間をリンネル布を張り表面の粗密度を變化して行つた實驗に於ては、 a 係數は變らぬが、 b 係數は計算に依る推定以上に著しく増加し、兎も角摩擦抵抗は速度の 2 乗に比例する如く思はれた。然るに多くの模型船及實艦の横揺試験の成績の中には b 係數が殆ど零の場合もあり、又速度の 3 乗に比例する抵抗をも考慮せねばならぬ場合があつて、抵抗に關する Froude 氏の假定の成立を疑はしめるものがある。相似模型船に就ての試験成績の發表されたもの及び模型船と實艦との成績を比較した論文は殆どない。昭和 5 年に末廣教授が學生を指導して行はせた長さ 2.20 米、1.65 米及 1.10 米の彎曲部龍骨無き相似船形模型船の靜水中横揺試験⁽²⁾に於ては、中型及小型模型船の減衰角は大型模型船に比べて夫々約 16% 及 80% の著しい増加を示してゐる。更に昭和 9 年に行はれた長さ 152 米の碎水船模型 (B 模型船⁽³⁾) の試験に於ては其減衰角は實艦の約 2 倍に達してゐる。H C. Adams 氏⁽⁴⁾は軍艦 Inconstant 號及 Sultan 號の長さ約 3 米の模型船に就て試験を行ひ、其成績を Froude 氏が實艦から得た成績と比較した所が、模型船の減衰角は實艦よりも 30% 乃至 50% 少なかつた。然し之は彼が述べてる様に模型船は水線上の附屬物 (索具類) を有せず、従つて相似性を缺いてゐるので比較するのは無理である。

要するに模型船の大きさ減少すれば、實艦との差異が著しくなる傾向があり、従つて小模型船の試験結果を其儘實艦に適用する事は極めて危険である。模型船の大きさ或程度以上になる時は實艦との間に大體相似則の成立すべきことは Froude 氏の實驗に徴しても想像される所で、模型試験に當つて如何なる大きさの模型船を選択すべきかは重要な問題である。勿論 Froude 氏の實驗した相似模型船の程度の大きさを選べば實艦との差異は少ない筈であるが、然し未だ其差異の程度が船形に依つて如何に變化するか判明せず、而して小なる方の 274 米模型船と同程度の横寸法を採るとしても近代商船模型に對しては長さ約 5 米になり、驅逐艦模型に對しては長さ約 7 米になり、之等の模型船に就て完全なる靜水中及波浪中試験を行はんとすれば大なる試験水槽を要し、模型船の取扱いも相當に骨が

(1) G Idle and G S Baker, "The Effect of Bilge Keels on the Rolling of Lightships," T I N A 1912

(2) 小澤久之丞、清田丁未、卒業論文 (昭和 5 年 3 月)

(3) 加藤弘、「艦船の横動揺試験成績の新解析法」、造船協會會報第 58 號 (昭和 11 年 6 月刊行)

(4) H C Adams, "Some Notes on the Use of Models in the Study of the Rolling of Ships" Soc N.A. & M E 1938

折れることになる。故に小模型船と實船との間の横揺減衰性の相違の原因を明らかにして、兩者の間に新たなる相似則を確立することは實際に必要な問題である。此爲には横揺に對する抵抗の性質を究明する必要があるので、先づ圓壙に就て摩擦抵抗及造渦抵抗に關する試験を行ひ、模型船に就て横揺に依つて生起される波の試験を行ひ、次いで小相似模型船に就て靜水中横揺試験を行つた。

2. 動揺する圓壙の摩擦抵抗及造渦抵抗に關する試験

横揺に對する摩擦抵抗を調査する爲に次の 3 種の圓壙に就て動揺試験を行つた。

圓壙	A	B	C
長 (吋)	75.0	75.3	74.9
直径 (吋)	30.5	22.4	13.9
重量 (斤)	70.25	43.45	23.80
惰率 (斤-吋 ²)	2,901	1,016	242

圓壙は總て木製で表面はワニス塗仕上である。之を鋼線で懸垂して水中に十分深く全没し、鋼線の太さ及長さを變化して週期約 0.8 秒乃至 2.4 秒の動揺を行はせ、其振幅減衰狀況を撮影して解析した。之等の動揺に於ける振幅減衰は略、Froude 氏の式で表はすことが出來、減減係數は第 1 表の如くなる。此試験に於ては水温は約 20°C で、溫度變化の範圍が僅少であるから粘性變化の抵抗に及ぼ

第 1 表

$$\delta\theta_m = a\theta_m + b\theta_m^2, (\theta_m \text{ 度})$$

圓 壙	週期 (秒)	鋼線の振り剛性 (斤-吋)	a	b	有効最大角 (度)	水温 (°C)
A	1.170	85.34	-.0415	-.00186	8	20.7
	1.471	54.00	-.0401	-.00108	8	20.7
	1.944	30.92	-.0433	-.00022	12	20.4
	2.381	20.61	-.0412	.00064	12	20.4
B	.812	63.14	-.0289	-.00231	6	20.0
	1.178	30.64	-.0362	-.00085	12	18.7
	1.579	16.59	-.0426	-.00086	10	19.4
	1.943	10.67	-.0520	-.00037	12	19.4
	2.550	6.58	-.0529	-.00015	12	19.4
C	.804	15.03	-.0268	-.00122	8	19.6
	1.206	6.88	-.0309	-.00079	10	19.2
	1.589	4.00	.0380	-.00036	10	19.8
	1.994	1.810	-.0481	-.00067	12	19.4
	2.436	1.357	-.0737	-.00046	12	19.4

す影響は無視出来る。表より明らかなる如く、之等の圓壩に於ては摩擦抵抗は速度及其 2 乗に比例する抵抗の和で表はされ、減衰角に及ぼす影響は實驗の範圍内に於ては速度に比例する抵抗は速度の 2 乗に比例する抵抗よりも大きい。即ち横寸法が之等の圓壩の範圍に屬する小模型船の横揺に對する摩擦抵抗は減減係數 a 及 b に關係し、而かも普通の横揺週期の範圍では b 係數よりは寧ろ a 係數に多く關係することが知られる。

$\theta_1=1$ 揺の初めの振幅 (ラジアン)

$\theta_2=1$ 揺の終りの振幅 (ラジアン)

C = 鋼線の振り剛性 (庇-種)

とすれば、1 揺の間の勢力損失即ち抵抗の爲す仕事 δE は次式で與へられる。

$$\begin{aligned}\delta E &= \frac{1}{2} C (\theta_1^2 - \theta_2^2) \\ &= C \ell_m \delta \theta_m\end{aligned}$$

第 2 表

$\delta E / \theta_m^2$ の値 (庇-種)

A 圓 壩					
週期 (秒) / θ_m (度)	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4
2	3.547	2.604	1.987	1.261	.871
4	3.852	2.743	2.063	1.294	.887
6	4.157	2.880	2.141	1.327	.902
8	4.462	3.016	2.218	1.359	.917
10	4.768	3.153	2.295	1.392	.933
B 圓 壩					
週期 (秒) / θ_m (度)	.8	1.2	1.6	2.0	2.4
2	2.172	1.143	.731	.512	.384
6	2.752	1.282	.782	.534	.393
10	3.333	1.421	.832	.556	.402
C 圓 壩					
週期 (秒) / θ_m (度)	.8	1.2	1.6	2.0	2.4
2	.4511	.2287	.1412	.0967	.0712
6	.5270	.2498	.1490	.1006	.0735
10	.6030	.2708	.1569	.1045	.0758

但し $\theta_m = \frac{1}{2}(\theta_1 + \theta_2)$, $\delta\theta_m = \theta_1 - \theta_2$

$$\therefore \frac{\delta E}{\theta_m^2} = C \frac{\delta\theta_m}{\theta_m} \dots\dots\dots (1)$$

即ち $\delta E/\theta_m^2$ は週期一定の時は平均振幅に對して略々直線的に變る。Fig. 1 A, B 及 C は週期を基線に取つて各圓壙の勢力損失を表はした曲線で、之より一定週期に於ける勢力損失を求めて第 2 表に示す。

圓壙の縁影響を無視し、端面に於ける抵抗を圓壙面に於けるものと同様に考へ、

r = 圓壙の半径 (糎)

A_c = 圓壙面の面積 (平方糎)

A_e = 1 端面の面積 (平方糎)

f = 速度に比例する抵抗の係數 $\left(\frac{\text{㏍-秒}}{\text{糎}^3}\right)$

f' = 速度の 2 乗に比例する抵抗の係數 $\left(\frac{\text{㏍-秒}^2}{\text{糎}^4}\right)$

T = 半週期 (秒) とすれば、

$$\begin{aligned} \text{抵抗偶力} \quad R &= f A_c r^2 \frac{d\theta}{dt} + f' A_c r^3 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \\ &\quad + 2 \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^r f r^3 \frac{d\theta}{dt} dr d\theta + \int_0^{2\pi} \int_0^r f' r^4 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 dr d\theta \right\} \\ &= f(A_c + A_e) r^2 \frac{d\theta}{dt} + f' \left(A_c + \frac{4}{5} A_e\right) r^3 \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2, \quad (\text{㏍-糎}) \end{aligned}$$

$$1 \text{ 揺の間の勢力損失 } \delta E = 2 \int_0^{\theta_m} R d\theta$$

$$\therefore \frac{\delta E}{\theta_m^2} = \pi^2 r^2 \left\{ (A_c + A_e) \frac{f}{2T} + \left(A_c + \frac{4}{5} A_e\right) \frac{4}{3} \frac{f' r}{T^2} \theta_m \right\}, \quad (\text{㏍-糎}) \dots\dots\dots (2)$$

第 2 表の $\delta E/\theta_m^2$ の値を (2) 式に代入して f 及 f' 係数を求め、之を第 3 表及 Fig. 2 及 3 に示す。之等の係数の値は各圓壙に依つて異なるだけでなく、同一圓壙でも動揺週期に依つて異なる。即ち動揺に對する摩擦抵抗は、一定速力で走る板の場合の如くに速力の簡単な函數では表はし得ない。然し乍ら本實驗の結果を用ひて或範圍内の大さ及週期を有する圓壙の摩擦抵抗及之に因る勢力損失を計算する事が出来る。

次に A 圓壙に 1 直径の兩端位置に圓壙全長に互つて動揺減衰鰭を取付け其効果を試験した。鰭は深 5 糎、10 糎及 15 糎の 3 種で、前同様の解析に依り一定週期に於ける勢力損失を求め、之を第 4 表及 Fig. 4 A, B 及 C に示す。何れの鰭を附けた場合にも週期が 1.6 秒以上の時は減減割合曲線は略々直線で表はし得るが、週期が 1.4 秒以下の時は該曲線は平均振幅の 2 次曲線となり、從つて抵抗は速度の 3 乗に比例するものを含むことになる。

鰭附圓壙の勢力損失と鰭無圓壙の勢力損失との差は、勿論鰭單獨の場合の抵抗に基づくものとは異

第 3 表

圓 壩	週期 (秒)	$f \left(\frac{\text{廷-秒}}{\text{糧}^3} \right)$	$f' \left(\frac{\text{廷-秒}^2}{\text{糧}^4} \right)$
A 直徑 30.5 糧	1.2	2.141×10^{-7}	$.867 \times 10^{-8}$
	1.4	1.902 "	.531 "
	1.6	1.682 "	.390 "
	2.0	1.354 "	.256 "
	2.4	1.131 "	.174 "
B 直徑 23.4 糧	.8	2.135×10^{-7}	1.282×10^{-8}
	1.2	1.827 "	.692 "
	1.6	1.601 "	.446 "
	2.0	1.422 "	.303 "
	2.4	1.291 "	.183 "
C 直徑 13.9 糧	.8	2.038×10^{-7}	1.161×10^{-8}
	1.2	1.604 "	.726 "
	1.6	1.346 "	.481 "
	2.0	1.162 "	.370 "
	2.4	1.032 "	.316 "

第 4 表

鰭附 A 圓壩に對する $\delta E/\theta_m^2$ の値 (廷-糧)

週期 (秒) θ_m (度)	1.2	1.4	1.6	2.0	2.4
5 耗 鰭 附					
2	4.190	3.012	2.308	1.536	1.118
3	4.868	3.378	2.515	1.592	1.143
4	5.712	3.775	2.724	1.653	1.180
6	8.134	4.696	3.114	1.774	1.233
8	—	5.714	3.490	1.896	1.286
10 耗 鰭 附					
2	6.696	5.155	3.949	2.414	1.581
3	9.092	6.449	4.603	2.636	1.669
4	12.280	7.741	5.270	2.857	1.755
6	21.690	10.934	6.592	3.310	1.929
15 耗 鰭 附					
2	8.125	5.659	4.408	2.981	2.296
3	12.662	8.592	6.347	3.929	2.735
4	18.503	11.852	8.276	4.718	3.058
6	34.180	19.242	12.116	5.995	3.511

なり、圓壙と鰭との相互作用に依る抵抗の變化にも基因するものである。此勢力損失差を Fig. 5 A, B 及 C に示す。即ち圓壙に取附けた鰭に依る造渦抵抗は週期が 1.4 秒以下の時は速度の 3 乗に比例する抵抗を含むが、週期が 1.6 秒以上の時は速度及其 2 乗に比例する抵抗の和で表はされる。而して各抵抗に對する係数は鰭の深さと動揺の週期に依つて異なる甚だ面倒なものであるが、船の横揺に對して必要なものは造渦抵抗自身でなく、夫れの爲す仕事であるから、總ての場合に於て造渦抵抗を速度の 2 乗に比例する相當抵抗で置換し、之に對する係数 f_h を鰭の深さに應じて各週期及各振幅に對して次式から計算し、其結果を Fig. 6 A, B 及 C に示す。

$$f_h = \frac{3T^2\delta E}{4A\pi^2 r^3 \theta_m^3}, \quad \left(\frac{\text{kg-秒}^3}{\text{kg}^4} \right) \dots\dots\dots (3)$$

但し A = 鰭の片面の面積 (平方糎)

r = 圓壙の軸から鰭の中心線迄の距離 (糎)

此係数の値を用ひれば、本實驗の範圍内の鰭に對して造渦抵抗の爲す仕事が計算出来る。

3. 模型船の横揺に依つて生起される波に關する試験

模型船の艀部に、其重心を通る縦軸の位置に 2 箇の自在接手を持つ桿を取附け、小型電動機を用ひて桿を回轉動揺させることに依り、模型船を靜水中に於て略々自由横揺週期に等しい週期で種々の角度の強制横揺を行はせた。而して此時模型船の横揺に依つて生起される波の高さを、模型船の中央横截面と同面内に船側から船幅に等しい距離の水上に浮べた浮子の上下運動を鏡裝置で擴大撮影して測定した。使用した模型船は A ,⁽¹⁾ A_L 及 C の 3 隻で、 A 及 A_L は相似模型船である。

(i) A 模型船に就ての試験

A 模型船の横揺に依つて生ずる波の形を Fig. 7 A に示す。生成波の週期は模型船の横揺週期に等しいが、波の形は水線下船體横截面が圓形の如き簡単な形でなく、且彎曲部龍骨が裝着してゐる爲に可なり複雑なものである。而して水線下船體の形は傾斜角に依つて變化する爲に、生成波の形も横揺角に應じて變化する。波の形が不規則な爲に、其高さは相當する正弦波の高さで表はし、之を第 5 表及 Fig. 8 A に示す。強制横揺の週期即ち生成波の週期は各振幅に對する自然週期と多少異なるので修正をする必要がある。即ち波の高さは横揺週期の僅少の變化に對しては週期の 2 乗に逆比例すると假定して、自然週期に對する修正を行つた。Fig. 8 A に見る如く生成波の高さは Froude 氏の假定した様に振幅に比例せず、本模型船に對しては振幅の 4 次の曲線で表はされ、從つて造波抵抗は振幅が増せば著しく増大する。

(ii) A_L 模型船に就ての試験

生成波の高さに就ての Froude 氏の假定が成立しなくなつたので、相似船に於て造波抵抗從つて

(1) A 模型船の要目は著者の前記論文に記載す。

生成波が如何なる關係に在るかを研究する爲に、 A 模型船と相似にして其の $4/3$ の大さなる A_L 模型船に就て試験を行つた。生成波の形は A 模型船のものと相似であり、對應週期に於ける波高と振幅との關係は第 5 表及 Fig. 8 B に示す。本曲線は Fig. 8 A と全く相似であるから、相似船の横揺に依つて生ずる波の高さは船の幅に比例することが判る。従つて生成波の高さは次式で與へられる。

$$h_w \propto B \cdot f(\theta_m)$$

但し h_w = 生成波の高さ、 B = 船の幅

θ_m = 横揺の平均振幅

相似船が其長さの平方根に比例する對應週期で横揺する時に生起される波の長さ l 及波の幅 b は共に船の長さ L に比例する。故に

$$\text{生成波の勢力} \propto l \cdot b \cdot h_w^2$$

$$\propto L^4 \cdot \{f(\theta_m)\}^2$$

$$\text{船の 1 揺の間の勢力損失} \propto W \cdot GM \cdot \theta_m \delta \theta_m$$

$$\propto L^4 \cdot \theta_m \delta \theta_m$$

故に造波抵抗に依る減衰角は次の如し。

$$\delta \theta_m \propto \frac{\{f(\theta_m)\}^2}{\theta_m}$$

$f(\theta_m)$ は相似船に對しては θ_m の同一函數であるから、造波抵抗に依る減衰角は相似船に於ては相等しい。 A 及 A_L 模型船の生成波高は次式で表はされる。

$$\frac{h_w}{B} = a_1 \theta_m + a_2 \theta_m^2 + a_3 \theta_m^3 + a_4 \theta_m^4, \quad (\theta_m \text{ 度})$$

$$a_1 = 1.788 \times 10^{-4}, \quad a_2 = 1.416 \times 10^{-5},$$

$$a_3 = .734 \times 10^{-6}, \quad a_4 = .396 \times 10^{-7},$$

(iii) C 模型船に就ての試験

之は高速貨物船の模型船で次の如き要領である。

垂線間長	200 浬
幅	26.21 "
深	16.83 "

第 5 表
相似模型船の生成波高

A 模型船		A_L 模型船	
横揺角(度)	生成波高(耗)	横揺角(度)	生成波高(耗)
21.18	6.37	20.90	8.37
21.76	6.05	21.66	8.07
21.50	5.75	22.00	8.86
16.42	3.10	17.40	5.26
16.30	3.10	17.00	4.78
16.10	3.24	17.60	4.83
12.00	1.56	12.40	2.07
10.86	1.27	11.84	2.14
7.10	.56	12.58	2.14
7.20	.53	8.12	1.09
3.79	.25	8.42	1.11
3.75	.23	8.81	.97
3.81	.20	4.15	.33
		3.85	.28
		3.94	.45

吃水	11.86 糎
排水量	42.77 匁
KG	9.88 糎
GM	1.24 "
BM	4.81 "
方形肥満係數	0.688
中央横截面係數	0.991
彎曲部龍骨	0.48 糎×50.9 糎
小横揺の全週期	1.65 秒

C 模型船の生成波の形は Fig. 7B に示す如く、A 模型船のものとは異なり、略、同大の 2 波を並列せる如き形である。其相當正弦波の高さと横揺振幅との關係を Fig. 8C に示す。本曲線は振幅約 7° から略、直線的に上昇し、大體振幅の 3 次の式で表はされる。

4. 船の横揺に關する相似則

上述の實驗に依り對應週期の相似模型船に對して摩擦抵抗及造渦抵抗は相似にならぬが、造波抵抗は相似になることが判明した。従つて摩擦抵抗及造渦抵抗の爲す仕事は計算に依つて求め、他の剩餘抵抗の爲す仕事は船の長さの 4 乗及水の密度に比例すると假定して計算すれば、模型船の横揺試驗成績から實船の横揺性能を推定する事が出来るであらう。

(i) 摩擦抵抗の爲す仕事

小模型船の摩擦抵抗は速度に比例する抵抗が大部分であるから、浸水面に對する平均半徑を次式から求め、此平均半徑と横揺週期とに對應して Fig. 2 及 3 から摩擦抵抗係數 f 及 f' を求めて摩擦抵抗の爲す仕事を計算する。

S = 模型船の浸水面積 (平方糎)

T = 横揺の半週期 (秒)

θ_m = 横揺の平均振幅 (ラジアン)

dx = 模型船の縦方向の長さの微分 (糎)

dl = 横截面の曲線の長さの微分 (糎)

r = 模型船の重心から dl 迄の距離 (糎)

とすれば、

$$\text{模型船の浸水面の平均半徑} \quad r_s = \sqrt{\frac{1}{S} \int \int r^2 dl dx}, \quad (\text{糎}) \dots\dots\dots (4)$$

1 揺の間に摩擦抵抗の爲す仕事

$$\delta E_f = S \pi^2 r_s^2 \theta_m^2 \left(\frac{f}{2T} + \frac{4}{3} \frac{r_s f'}{T^2} \theta_m \right), \quad (\text{匁-糎}) \dots\dots\dots (5)$$

實船の摩擦抵抗に對しては實驗的係數は無いが、此抵抗は實船に於ては全抵抗の 1% 前後の極めて小さいものであるから、W. Froude 氏に従ひ速度の 2 乗に比例すると假定し、且つ Froude 氏の係數を用ひることとする。即ち

$$\text{實船の浸水面の平均半徑} \quad r_s = \sqrt[3]{\frac{1}{S} \int r' dl dx}, \quad (\text{極}) \quad (6)$$

1 搖の間に摩擦抵抗の爲す仕事

$$\delta E_f = 0.21 \times 10^{-8} \times \frac{4}{3} \frac{S \pi^2 r_s'}{T^2} \theta_m^3, \quad (\text{瓦-極}) \quad \dots \quad (7)$$

(ii) 造渦抵抗の爲す仕事

造渦抵抗は普通の船では殆ど總てか彎曲部龍骨に因るもので、之を求めるには彎曲部に於ける船と水との相對速度が必要である。此の水流の速度を一般船形に對して計算することは甚だ困難であるが G. H. Bryan⁽¹⁾ 氏が 3 種の船形横断面に對して彎曲部龍骨無き場合の彎曲部に於ける壓力増加を理論的に計算してゐるので、之を次の如く利用することとする。

r = 船の重心から彎曲部迄の距離 (極)

R = 彎曲部の圓弧の半徑 (極)

KG = 龍骨上面から重心迄の高さ (極)

AG = 重心位置に於ける船の半幅 (極)

とし、 $\kappa = \frac{R^2}{AG \cdot KG}$ を基線に取つて、彎曲部に於ける壓力増加から計算した速度係數 v の曲線を描けば Fig. 9 の如くなる。然る時は彎曲部龍骨無き場合に、彎曲部に於ける水流の相對速度は次式で與へられる。

$$v = r \frac{d\theta}{dt}, \quad (\text{極/秒})$$

彎曲部龍骨が存在する時は水流速度は當然變化すへきてあり、又造渦抵抗係數は波を起さざる圓壩の動搖試驗から求めたものとは異なるへきてゐるので、之等の影響を彎曲部龍骨係數 x で表はす。此 x の値は、彎曲部龍骨附の場合と、之と同週期の彎曲部龍骨無き場合とに於ける 1 搖の間の勢力損失の差から、同じく兩場合の生成波の勢力の差を減した殘餘を、彎曲部龍骨の造渦抵抗に因るものと見做して實驗的に定める。然る時は模型船の 1 搖の間に於て彎曲部龍骨の造渦抵抗の爲す仕事は次の如くに計算される。

(a) 單板彎曲部龍骨

彎曲部龍骨は單板で船の表面に垂直に取附けられ、且つ龍骨面は船の重心と龍骨面中心とを結ぶ直線と φ なる角度をなすものとする (Fig. 10)。

1 搖の間に彎曲部龍骨の造渦抵抗の爲す仕事

(1) G. H. Bryan, "The Action of Bilge Keels," T I N A 1900

$$\delta E_h = \frac{4}{3} f_h \frac{A \pi^2 x^2 c^2 r_k^3}{T^2} \theta_m^3 \cos \varphi, \quad (\text{珎-珎}) \dots \dots \dots (8)$$

但し $f_h = \text{Fig. 6}$ から求められる造渦抵抗係数

$A = \text{彎曲部龍骨の片面の面積 (平方珎)}$

$r_k = \text{船の重心から彎曲部龍骨の中心迄の平均距離 (珎)}$

(b) 組立式彎曲部龍骨

彎曲部龍骨は組立式で、其内側面 (面積 A_i 平方珎) 及外側面 (面積 A_o 平方珎) が船の表面への垂線となす角が夫々 φ_i' 及 φ_o' 、船の重心と各面の中心とを結ぶ直線と爲す角が夫々 φ_i 及 φ_o であるとする (Fig. 10)。

$$\delta E_h = \frac{2}{3} f_h \frac{\pi^2 x^2 c^2 r_k^3}{T^2} \theta_m^3 (A_i \cos \varphi_i \cos^2 \varphi_i' + A_o \cos \varphi_o \cos^2 \varphi_o'), \quad (\text{珎-珎}) \dots \dots \dots (9)$$

但し f_h 及 r_k は内側面及外側面に対する平均値である。

實船の彎曲部龍骨の造渦抵抗に就ては未だ適當なる實驗が行はれてないので、Froude 氏が振子裝置で板を動揺させて得た結果を用ひる。即ち造渦抵抗は速度の 2 乗に比例し、其係数は次の如くである。

$$f_h = 0.84 \times 10^{-6}, \quad (\text{珎、珎、秒單位}) \dots \dots \dots (10)$$

(iii) 相似則の適用例

此新相似則を 3 隻の相似模型船及實船と模型船との間に適用して見る。

(a) 相似模型船の比較

相似模型船に就ての靜水中横揺れ試験成績及計算結果を第 6 表及第 7 表に示す。各模型船の横揺れ週期は嚴密に對應する値ではないので、相似船に對して剩餘抵抗の爲す仕事を計算するには、週期の僅かの相違に對しては此仕事は週期の 2 乗に逆比例すると假定する。

第 6 表の彎曲部龍骨無き場合を見ると、平均振幅 4° 及 8° の時に大型船の減衰角と比較して中型船の減衰角は約 16% 大きく、小型船の減衰角は約 80% 大きい。然るに中型船の試験成績から計算した大型船の減衰角は實驗値に非常に近く、從つて之等の模型船の間では相似則が成立すると見做せる。之に反して小型船の試験成績から計算した大型船の減衰角は實驗値よりも 60% 以上大きい、即ち斯様な小型船では性質が全く相違する抵抗が可なり大きな割合で存在する爲であると考へられるので、横揺れ研究用模型船としては不適當なものである。故に相似則を適用し得る横揺れ研究用模型船の大きさには限度があり、其最小の大きさは略、4 模型船の横寸法を持つもので、近代商船型ならば長さ約 1.8 米、驅逐艦型ならば長さ約 2.8 米に相當する。

第 7 表の彎曲部龍骨係数 x は船形、彎曲部龍骨の位置、横揺角等に依つて變化すべきもので、本相似模型船に於ては横揺角との關係が Fig. 11 に示す如き曲線になる。彎曲部龍骨附の場合には平均振幅 4° 及 8° の時に對應週期及對應 GM に於ける中型船の減衰角は夫々 0.93° 及 2.44° になり大型

第 6 表
彎曲部龍骨無 相似模型船

模 型 船		A_L	A	A_s	
長 L	(糧)	220	165	110	
幅 B	(糧)	32	24	16	
深 D	(糧)	18	13.5	9	
吃水 d	(糧)	9.38	7.04	4.70	
排水量 W	(疋)	46.4	19.58	5.8	
GM	(糧)	2.03	1.52	1.02	
浸水面積 S	(平方糧)	8,168	4,595	2,042	
浸水面の平均半径 r_s	(糧)	12.24	9.18	6.12	
$\theta_m=4^\circ$	横揺週期 $2T$	(秒)	1.37	1.14	.96
	減衰角 $\delta\theta_m$	(度)	.193	.224	.341
	實際の全抵抗の仕事 δE	(疋 糧)	.02224	.00815	.00247
	摩擦抵抗の仕事 δE_f	(疋 糧)	.00849	.00321	.00074
	メタセンター係数 k		1.002		
$\theta_m=8^\circ$	$2T$		1.34	1.11	.94
	$\delta\theta_m$		.405	.472	.732
	δE		.09452	.03481	.01073
	δE		.03479	.01510	.00346
	k		1.008		
A_L に対する $\delta\theta_m$ の計算値		$\delta\theta_m = \frac{\text{計算せる } \delta E}{W \cdot GM \cdot k^2 \theta_m}$			
$\theta_m=4^\circ$	A より	$\delta\theta_m = .200^\circ$	誤差 3.6%		
	A_s より	$\delta\theta_m = .314^\circ$	66%		
$\theta_m=8^\circ$	A より	$\delta\theta_m = .411^\circ$	1.5%		
	A_s より	$\delta\theta_m = .630^\circ$	64%		

船の減衰角に比して夫々 9% 及 21% 大きいが、相似則に依つて求めた大型船の減衰角は可なり實驗値に近い。即ち彎曲部龍骨附の場合にも A 模型船と A_L 模型船との間に相似則が成立すると見做せる。

(b) 實船と模型船との比較

昭和 9 年に碎氷船の静水中横揺試験が行はれ、次で其の 1/40 の大きさの模型船 (B 模型船) の試験が行はれた。其試験成績及計算結果を第 8 表に示す。模型船の彎曲部龍骨の造渦抵抗が爲す仕事を計算するに當り、深さ 30 耗の彎曲部龍骨に對する係数 f_h は Fig. 6 から補外法に依つて求め、彎

第 7 表
彎曲部龍骨附 相似模型船

模 型 船		A_L	A
排水量	(匁)	46.65	19.67
GM	(匁)	2.09	1.74
彎曲部龍骨	面積 A (平方匁)	293.4	165.0
	平均半徑 r_k (匁)	16.8	12.6
	φ (度)	13	
	κ	.359	
速度係数 c		1.25	
$\theta_m = 4^\circ$	$2T$ (秒)	1.424	1.186
	$\delta\theta_m$ (度)	.855	.91
	δE (匁-匁)	.10197	.03810
	δE_f (匁-匁)	.00782	.00302
	δE_h (匁-匁)	.07547	.02774
	k	1.002	
$\theta_m = 8^\circ$	x	.888	
	$2T$	1.426	1.203
	$\delta\theta_m$	2.01	2.30
	δE	.48560	.19509
	δE_f	.03423	.01309
	δE_h	.31660	.14662
$\theta_m = 8^\circ$	k	1.008	
	x	.578	
A より計算したる A_L に対する $\delta\theta_m$ の値			
$\theta_m = 4^\circ$ の時		$\delta\theta_m = .879^\circ$	誤差 2.8%
$\theta_m = 8^\circ$ の時		$\delta\theta_m = 1.894^\circ$	-5.8%

第 8 表
實船と模型船との比較

		實 船	模型船
排水量 W		2,832 吨	44.01 匁
GM		1.98 米	4.95 糧
浸水面積 S		1,083 米 ²	6,770 糧 ²
浸水面の平均半徑 r_s		4.81 米	11.33 糧
彎曲部龍骨	内側面々積 A_i	65.28 米 ²	408.0 糧 ²
	外側面々積 A_o	70.72 "	442.0 "
	平均半徑 r_k	6.60 米	16.50 糧
	φ_i	10.5°	
	φ_i'	14°	
	φ_o	47°	
方形龍骨	φ_o'	31.5°	
	速度係数の平均値 c	1.041	
方形龍骨	有效面積 A'	2.36 米 ²	14.75 糧 ²
	有效半徑 r_k'	5.54 米	13.85 糧
$\theta_m = 4^\circ$	$2T$	7.68 秒	1.21 秒
	$\delta\theta_m$	.234°	.580°
	δE	1,976 匁-米	.1489 匁-糧
	δI_f	7.7 "	.00709 "
	δE_h	299.2 "	.07874 "
	$\delta E_h'$	10.25 "	.00095 "
	k	.983	
	x	.888	
模型船より計算したる實船に對する $\delta\theta_m = .289^\circ$			
誤差 -2%			

曲部龍骨係数 x は假りに A 模型船の値を用ひた。速度係数 c は彎曲部龍骨の全長に對する平均値である。 $\delta E_h'$ は方形龍骨の造渦抵抗の爲す仕事であるが、方形龍骨と彎曲部龍骨とは互に其効果を減殺するものであるから、 $\delta E_h'$ は方形龍骨の有効深に對して計算した。Idle 及 Baker 兩氏の燈臺船模型に就ての實驗に依れば、深さ 0.762 米 (實船に對するもの) の彎曲部龍骨装着の時に其の 0.3 倍の深さ即ち 0.229 米の方形龍骨を附しても減減曲線は全然變化しなかつた。本砕氷船に於ては方形龍骨は彎曲部龍骨より稍、長いに過ぎないから、方形龍骨の深さから彎曲部龍骨の深さの 0.6 倍を減

じたるものを以て其有效深としたのである。平均振幅 4° に於て、模型船の減衰角は實船の約 2 倍であるが、模型船の成績から計算した實船に對する減衰角は略々實値に等しく、從つて相似則は此大さの横寸法の模型船と實船との間に適用し得る事が判る。

5 結 論

以上説述せる實驗的研究より次の如き結論が得られた。

1 小模型船の横搖に對する摩擦抵抗は速度に比例するものと、其自乗に比例するものとの和で表はされ、減衰角に及ぼす影響は前者は後者より遙かに大きく、抵抗係数は模型船の大さ及其横搖週期に依つて變化する。

2 小模型船の彎曲部龍骨の造渦抵抗は速度の 1 乗乃至 3 乗に比例する抵抗の和で表はされ、抵抗係数は彎曲部龍骨の深さ及横搖週期に依つて變化する。

3 模型船の横搖に依つて生起される波の高さは振幅の 2 次以上の函數で、相似模型船の對應週期に於ける生成波高は船の幅に比例する。

4 摩擦抵抗及造渦抵抗の爲す仕事を計算に依つて求め、造波抵抗の爲す仕事に對して相似則を適用すれば、模型船の横搖試験成績から實船の横搖性能を推定し得る。

5 相似則を適用し得る模型船の最小の大さは商船型ならば長さ約 2 米、驅逐艦型ならば長さ約 3 米である。

終りに本研究の一部は近藤記念海事財團の御援助に依つて行はれたもので、茲に同團に對して深い感謝の意を表する。

(終)

FIG. 7 A
WAVES CREATED BY ROLLING OF MODEL "A"

FIG 7 B
WAVES CREATED BY ROLLING OF MODEL "C"

FIG. 10.

FIG. 11.

CURVE OF BILGE KEEL FACTOR χ
FOR MODEL "A."

討 論

○會長(重光 族君) 只今の御講演に對し、御質問なり御討論なり御座いませんか。誰方が御座いませんか。御座いませんやうですから、私から著者に御禮を申し度いと思ひます。此問題は極めて重要な問題であります、之に就ては以前に末廣博士より伺つて以來今迄問題に取られません様でしたが、今回更に深き御研究を頂き且實驗と併せて御所見を伺ひ得た事は本會の幸であります。尙此問題は重大である丈に將來共研究を進められ、御研鑽の結果を御發表下さる事を御願致します。此の御講演に對し一同拍手を以て御禮申上げたいと思ひます。(一同拍手)