(昭和31年11月 造船協会秋季講演会に於て講演)

浅水における造波抵抗 — 理論・実験の比較

正員 工 学 士 乾 崇 夫*

正員 菊 池 義 男*

正員 工 学 士 岩 田 達 三*

Shallow Water Effects on Wave-Making of Ships
— A Comparison of Calculated and Measured Resistance

By Takao INUI, *Kogakushi, Member*

Yoshiwo KIKUCHI, *Member*

and Tatsuzo IWATA, *Kogakushi, Member*

Abstract

Since 1944, when one of the present Authors (INUI) and his collaborator calculated mathematically the wave-making resistance of ships in a shallow sea, necessity has long been recognized for making further quantitative investigations regarding to the practical adaptability of the theory. The following notes are aimed for clarifying the still remained question to what extent such a linearized wave-making theory can be safely applied in cases of a restricted water ($b=h$ =finite) as well as a shallow water (h =finite, b =infinite), where h denotes the depth of a water, b the width.

A 1.750 m mathematical model S-201, whose equivalent source distribution is known, is towed in the Tokyo University Tank at the depth of water $h/L=1.371, 0.400, 0.300$ and 0.200 .

Comparatively good coincidence has been obtained between the calculated and measured wave-making resistance, excluding the narrow critical range of $F_h=0.82\sim0.95$ where the KREITNER'S non-linear restricted water effect is clearly observed especially at the shoalest depth $h/L=0.200$.

目 次

1. 序	言	3. 理 論 解 析
2. 実	験	4. 結 言

1. 序 言

東大水槽においては数年来造波抵抗理論の定量化**というテーマについて研究を行つている。この小論も上記一連の研究につながるもののひとつであるが、今回はそのしめくりとしていわゆる浅水影響の問題を取扱つた。すなわちこれまでの深水時の理論船型模型に関する研究によつてえられた結果をそのまま浅水時の線型造波抵抗理論に適用して、それが水槽試験と定量的にどの程度までよい一致を示すものかをしらべみた。以下はその概要の報告である。

この場合、あらかじめことわつておきたい点が2, 3ある。すなわち前記「造波抵抗理論の定量化」という課題に対してはここで採り上げている「浅水影響」の問題は必ずしも重要なものではなく、いわば附随的なもので

原稿受付. 昭和 31 年 7 月 14 日

* 東京大学工学部船舶工学科教室

** 従来の造波抵抗理論は定性的にはもちろん定量的にもかなりの程度まで実験とよい一致を示している。しかし定量的に水槽実験と等価の位置にまでこれを引上げるためにはなお多くの問題が残されている。

あること。実用上の見地からいえば問題の範囲を深水時に限つても、まだまだ追求すべき船型学上の問題は枚挙に遑のないほど山積しているということ。それにもかかわらず、実験・理論計算ともに深水時にくらべて比較にならぬほど時間と労力を要する本問題を敢えて採り上げたのは次のような理由による。

第1に、造波抵抗理論を深水時の船型試験結果と比較するということは1926年以来、Wigley⁽¹⁾、Weinblum⁽²⁾らによつて諸外国でもさかんに行われているが、浅水時については未だどこでも行われていない。

第2に、この実験を行うに当つていわゆる仮底（false bottom）を使用したのでは実験誤差が大きく入るので、かならず実底を使用しなければならない⁽³⁾。すなわち水槽本底をあらかじめ平滑に水準面に近い程度にしていねいに仕上げておき、水深の変化は実際に水槽内の水量を減じ、抵抗動力計・ガイドなど必要な装置は担当計測員もろとも実験水深にあわせて通常の深水時実験位置よりもはるか下方に下げうる大がかりな浅水実験用フレームが必要となる。東大水槽では幸にして故山本武蔵名誉教授および木下昌雄博士の御尽力によつて1943年前記フレーム構造および水槽本底の仕上げが完成し⁽⁴⁾、随時理想的な浅水時実験が実施しようという好条件に恵まれている*。

第3に、そして特に重視したいのはいわゆる制限水路影響の名で呼ばれている非線型水流現象と交錯した線型造波抵抗理論の適用限界の問題である。Kreitner⁽⁵⁾によつてはじめて定性的に説明されたこの興味ある現象は実験的には出淵巽博士らによる実底実験⁽⁶⁾によつて明らかにされ、木下昌雄博士⁽⁷⁾によつて詳細な実用的理論がたてられた。またその後丸尾孟助教授⁽⁸⁾による2次元非線型理論の若干の計算があり、さらに中島康吉工学士⁽⁹⁾は船体抵抗とトリムとの相互因果関係について在来の「トリム現象論（結果論）」に対する「トリム原因論」を提唱するなど、わが国におけるこの方面の研究は一時なかなかの活況を呈したものである。

トリムが（抵抗増加の）原因か結果（付随した現象）かということは著者らの見解ではさらに検討を要する問題であつて、中島工学士の示したトリムによる抵抗増分は、船首と船尾とにおける水面変位差**にもとづく静水圧合力の不均衡からくる水平分力に他ならず、従つて必ずしも船体の姿勢には無関係である。すなわち上記水面変位差が同じであれば、船体の姿勢がトリムしてもしなくても同一の抵抗増加量がこれからでてくるはずである。ただしトリムを自由に許すか否かということは制限水路影響が大きくなるか小さくなるか、一層具体的にいえば上記水面変位差が大きい小さいかということとは大いに関係があるようである。すなわち今回の実験によればトリムを許した方がトリムを許さぬ場合よりも非線型の制限水路の影響がやや著しいようである。このことは最初にKreitnerが船体重心の上下の変化のみを許し、トリムを省略して1次元理論を展開したのとは対比して注意すべきことであろう。トリムは堰返波によつて象徴される非線型流水状態を助長することにはなつても、それ自体が非線型制限水路抵抗の直接の原因になつてゐるわけではないのである。

第4に、上記Kreitnerの仮定と関連して模型船嚮導装置としては今回もまた深水時と同様、特に試作した水平曳行ガイド（horizontal guide）を使用したことである。本ガイドについては既に発表した⁽¹⁰⁾ことがあるのでその詳細は省略しFig. 1.にその一般配置図のみを示す。本装置によつて模型船の姿勢（トリム）は速度や周囲の水流状況に無関係に最初設定したそのままの姿勢——いまの場合はいうまでもなく平吃水——をとり、しかも重心の上下変化は自由にこれを許して排水型船舶において最も重要視される排水量一定の条件は正確に満足される。このような特殊嚮導装置は先頃行われた没水体3分力水槽実験にも有効に利用されるが、主として造波抵抗研究上の便宜を考慮して用意したものである。実用的見地からいえば造波抵抗理論と実験との比較をなすに当つても通常のガイドを使用しトリムを自由に許して実験を行う方が最終目的に対してはより実際に近く、かつ望ましい。しかし両者の間の厳密な定量的比較を行うためには、このような実験に対応する理論としては、船体に等価な吹出し分布の姿勢もそれぞれの速度によつて変えて実験時のトリムにあわせ計算を行うことが望ましく、それには多大の計算労力を要することになる。本装置を使用すれば、実験時の姿勢は自由航走の場合と若干異なるけれども計算の側における上記の煩を全く解消することができる。一方トリムの影響は必要に応じ、第2段の問題としてこれを取扱うことが可能で、そうした方がこのような基礎的研究を進めるに当つてより賢明な、かつ当然必要なまわりみちであると考えられる。

* Taylor 水槽および近く完成を伝えられる Wageningen 新水槽には浅水実験専用の水槽および付属装置がある。これらを除いた在来の諸水槽ではこのような理想的条件は容易に実現しないものと考えられる。

** ここにいう水面変位とは制限水路固有の非線型流水状況に由来する特別のものであつて、臨界領域内にみられる船首前面の堰返し波で代表される未通過流量にみあう船尾後方の平均的な水面の降下を意味し、線型理論における「波」とは厳密に区別されるべき性質のものである。

Fig. 1.—General Arrangement for Horizontal Towing Guide (Tokyo University Tank)
 V : Direction of running   R : Horizontal resistance   M : Magnetostriction tube
 W : Weight   L : Lift   L' : Measuring point for lift   (Unit in mm)

第5に、この小論は順序として深水時の一連の研究をとりまとめ発表した後、に引続いて最後に発表されるべき性質のものである。それが今回は逆になった。その理由は、前者については木製模型 S-102⁽¹¹⁾ の再実験* が現在なお行われつつあり、その完了をまたねばその全貌を発表しえない状況にあるためである。従つて今回は本論と直接関係のある模型 S-201 について、まず深水時の場合の比較方法を例示し、その後において浅水時の結果を述べることにした。

第6に、著者の1人(乾)が10年ほど以前に木下昌雄博士とともに行つた浅水影響の計算⁽¹³⁾、および水槽側壁による反射波の影響が浅水時において顕著になるという点に関する計算⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾、さらに浅水時の実験では臨界速度の近くで定常抵抗値を示すまでには長大な助走距離を必要とするという点に関する西山哲男工学士との計算⁽¹⁶⁾ など線型造波理論による一連の諸計算は前掲諸家の貴重な研究とともに今回の研究実施上、理論および実験の両面でよい指標となつたことを付け加えておく。

2. 実 験

模型：供試模型としては相等吹出しと船型との厳密な対応が知られている4種の3次元理論船型⁽¹⁷⁾のうち模型 S-201 を選んだ、理由は本船型が上記4隻の模型のうち低速域での造波抵抗対摩擦抵抗の比がもつとも大きいからである。摩擦抵抗の比重はほぼ浸水面積 S の大小でさまじり、低速域の造波抵抗は吃水比 $T/L (=2t)$ にはあまり支配されずほとんど吹出し強さの係数 a_1 と船長 L の積 $a_1 L$ でさまじり。従つて摩擦抵抗の影響の大き

* 模型 S-102 については水平曳行ガイド完成前にパラフィン模型($L=2.330\text{ m}=2/3\times$ 水幅)を用いて予備実験を行い、その結果については既に発表した⁽¹²⁾。この模型は水平ガイド完成後再実験を行うべく大切に保存していたのであるが、先年過つて破損したので今春檜製模型($L=2.400\text{ m}$)を新たに製作した。

い低速域で造波抵抗対摩擦抵抗の比重を比較する因子として無次元パラメーター $S/(a_1 L)^2$ が利用できる*。

Table 1 には参考のため上記4種の理論船型についてその値を示してある。

Table 1

Model	L	a_1	t	$(a_1 L)^2$	S	$S/(a_1 L)^2$
S-101	2.400m	0.4	0.1	0.9216m ²	0.9617m ²	1.0435
S-102	2.400	0.4	0.2	0.9216	1.5755	1.7095
S-201	1.750	0.8	0.1	1.9600	0.6493	0.3313
S-202	1.750	0.8	0.2	1.9600	0.9967	0.5085

また測定抵抗値を高めるために他船型(S-101, S-102)と同様 $L=2.400$ m とする方が望ましいのであるが、浅水時の実験を行うことが最初から予定されていたので、上記の如き不利を忍んでこのように短かい長さを採用した。また序言で述べた非線型制限水路影響の介入する範囲を必要以上に大きくしないという考慮からも上記の L が最終的に定められた。

水深：実験水深は深水時をも含めて4種である。各水深(h)に対する水深/船長比(h/L)、水幅/水深比(b/h)および、模型の中央横断面積($S_m=0.02928$ m²)と水路断面面積比 $S_T(=bh)$ との比 k_a (apparent sectional ratio) $=S_m/S_T$ ならびに木下博士の方法による有効断面積比 k (effective sectional ratio) $=\psi \cdot k_a$ を Table 2 に示す。木下博士の結論によればトリムを許した自由曳航時の非線型水路影響は $k_a > 0.018$ においてはつきりとみとめられるが、今回実験を行つた3種の浅水時実験($h/L=0.4, 0.3, 0.2$)のうち、もつとも浅い $h/L=0.2$

Table 2

Depth of Water h (m)	h/L	b/h	h/b	S_T (m ²)	$100k_a$	ψ	$100k$
2.400	1.3714	1.4583	0.6857	8.400	0.349	—	—
0.700	0.4000	5.000	0.2000	2.450	1.195	—	—
0.525	0.3000	6.667	0.1500	1.838	1.593	(3.0)	(4.80)
0.350	0.2000	10.000	0.1000	1.225	2.390	1.50	3.58

Note: Width of Water $b=3.500$ m ($b/L=2.000$)

本模型の長さは S-202 とともに表に示す如く $L=1.750$ m であつてこれは東大水槽の水幅 $b=3.500$ m に対し $b/L=2$ の関係となつている。深水時のみの実験研究に対しては必ずしもこのような長さを採用する必要はなく、むしろ層流影響を避け、

のみが上記の場合に相当し、それよりも深い $h/L=0.3$ および 0.4 はほとんどその影響が入らぬことになる。ただ $h/L=0.3$ では $k_a=0.0159$ となり、これは上記限界値にかなり近く、 ψ および k も木下博士の資料**を外挿すれば大略の値は判定しうる。表中( )にて示したのがこれらの値である。

る。

その他：実験に関連して付記すべき諸点を一括して述べる。まず抵抗動力計としては深水時の場合とも磁歪式検力計を使用した。浅水時には臨界速度 $V_h=\sqrt{gh}$ の近傍で造波抵抗が容易に定常値を示さず長大な助走距離を必要とするのであるが、磁歪式検力計を使用することによつて走行距離(時間)と抵抗変化との関係を在来の天秤式動力計を使用した場合よりもはるかに正確に測定記録することができ、これによつて水槽の長さ***の十分でない割合に抵抗記録の上からほぼ最終定常抵抗値らしきものを推定しえた場合も少なくない。

模型嚮導装置には序言に述べた如く水平曳行ガイドを使用し、模型重心の浮沈はこれを自由に許しつつ(排水量=一定)、航走中のトリムは終始平吃水の状態で実験を行つた。

深水時($h/L=1.371$)の実験では、本模型の如く $b/L=2$ に対しては水槽側壁による反射波の干渉の程度が十分小さいことが予め知られている⁽¹⁶⁾。従つて水槽側壁に沿う消波装置を有効に使用して各航走間の時間間隔を短縮し実験能率を高めることができた。しかるに浅水時実験($h/L=0.4, 0.3, 0.2$)においては上記反射波の干渉が著しくなるので、線型理論との比較を行う見地から、両側消波装置は故意に使用しないことにした。もともと浅水時に生ずる船の波は波長波高とも大きくなり、それが次の航走に支障を来たさぬ程度に減衰するには非常に

* なお厳密に言えばこのパラメーターの分母に $1/2(1+\beta^2)$ を乗ずる必要がある。 β は水の粘性に起因する船尾波の波高修正係数であつて、低速で、かつ full な船型では1(理想流体)に比してかなり小さい値をとる。

** 文献(7)の Figs. 44, 45 による。

*** 東大水槽の有効水面長さは80m、本実験における最大定常航走距離は低速で約45m 高速で約20m であつた。

長大な時間を必要とするのであるが*、この傾向は上記消波装置の不採用方針によつてさらに強められた。すなわち上記浅水時実験は昭 28. 9. 15 より 28. 10. 31 の 2 ヶ月半の間に実験日数 25 日、航走回数 327 回で**、平均 1 日の航走回数はわずか 13.1 となる。これは深水時の実験能率の $1/6$ 以下であつて、これによつてもこの種の実験の困難な事情が認められよう。なお磁歪式検力計を使用したことは毎回発走の時機の判定にあたつても極めて有効であつた。すなわち検力計につながる自己電流計の指針の動きを予定発走時刻の約 5~10 分前から記録紙に書かせることによつて水槽内の残流ならびに浅波の減衰過程を適確に直読把握することができた。

最後に乱流促進法としては浅水時実験には船首より $0.05L$ の位置に直径 0.8mm のトリップ・ワイヤーを使用し、深水時実験***（今回発表の昭 30. 7. 18~7. 20 および同 8. 8~8. 9 に実施せるもの）には特殊平型ピン⁽²⁰⁾ 2 種を実験速度の高低に応じピンの高さ、船首からの位置、相互の間隔を適宜変えて、2 次的な固有抵抗の影響を極力小さくしてなおかつ十分なる乱流促進の効果がえられるように努めた。

結果：Figs. 2~5 にこれら 4 種の水深の抵抗試験の結果を F 数ベースの全抵抗係数曲線 $C_t' = R_t / \frac{\rho}{2} V^2$ ($\alpha_1 L$)² の形で示し、Fig. 6 には船体沈下量 s/L を示した。Figs. 2~5 にはまた全抵抗中の摩擦抵抗の占める比重を示す目的で、Hughes (1954)⁽²¹⁾ の 2 次元基本摩擦線に対し Table 3 に示す如き見掛けの形状影響因子 $r=1+k$ を乗じたものを実線で、また上記基本線 ($k=0$) を鎖線でそれぞれ示してある。

上表中 $r_0=1+k_0$ は無制限水域における真の形状影響因子、 R/R_0 は広義の水路制限に基づく摩擦抵抗の増加率、 $r=1+k$ は制限水域における見掛けの形状影響因子、であつて前 2 者とは $r/r_0=R/R_0$ の関係にある。また表中 R/R_0 と r について 2 種の数値が示されているが、そのうち (1) 欄は谷口中、田村欣也両工学士⁽²²⁾ によつてえられた実験式

$$R/R_0 = 1 + 3.0985 k_a + 10.928 k_a^2,$$

によるものである。しかし上記実験式は長崎船型試験場固有の水幅/水深比 b/h （大水槽 1.923, 小水槽 1.667）に対応するものであつて、水幅と水深との関係が今回の実験中浅水時の $b/h=5\sim10$ という極端な比率をとる場合にはこれに対してさらに若干の補正を加える必要があると考えられる。ただこの問題については信頼しうる資料がなく、はなはだ不満足ながら Comstock-Hancock⁽²³⁾ らの資料を若干の参考としつつ求めたきわめてあいまい推定値が (2) に示した値である。すなわち Figs. 2~5 に示した摩擦抵抗線（実線）は Hughes の基本線（鎖

Table 3

h/L	$k_a(S_m/T_T)$	b/h	R/R_0		$r_0=1+k_0$	$r=1+k$	
			(1)	(2)		(1)	(2)
1.371	0.00349	1.458	1.011	1.011	1.17	1.183	1.18
0.400	0.01195	5.000	1.039	1.042	1.17	1.216	1.22
0.300	0.01593	6.667	1.052	1.060	1.17	1.231	1.24
0.200	0.02390	10.000	1.081	1.102	1.17	1.265	1.29

Fig. 2—Curves of Total Resistance Coefficients for S-201 ($h/L=1.371$)

* 堰返し波を生ずる場合には、水深が浅いため、このほかにほとんど水槽全体の 1 次元的流れを生じ、これが水槽端で強くはね返されて顕著な平均残流をのこす結果となる。

** これらのなかには本文には示していないが模型 S-202 に関する若干の補足的実験（実験日数 5 日、航走回数 68 回）を含む。

*** 模型 S-201 の深水時実験は既発表⁽¹⁹⁾ のものとあわせて前後 2 回行つた。前回には同じ 0.8mm のトリップ・ワイヤーを使用した。

Fig. 3—Curves of Total Resistance Coefficients for S-201 ($h/L=0.400$) Fig. 4—Curves of Total Resistance Coefficients for S-201 ($h/L=0.300$) Fig. 5—Curves of Total Resistance Coefficients for S-201 ($h/L=0.200$)

Fig. 6—Curves of Measured Bodily Sinkage for S-201

線 $k=0$) に対し上表中 $r=1+k$ の (2) 欄の値を乗じたものとなっている。このように水深の減少に基づく摩擦抵抗増分の定量的評価についてはなお若干の不確実性が残されているが、序言に述べた如く供試模型の S/a_1L^2 比が非常に小さく、摩擦抵抗の側における上記の程度のあいまいさは浅水時造波抵抗の比較というこの小論の最終目的に対してはあまり重要な影響を及ぼさないものと考えられる。

なお最後に供試模型 S-201 に対する真の形状影響係数は上表に示した如く $r_0=1+k_0=1.17$ であるが、この値が最終的に定められた経緯については既に前回発表した通りである⁽²⁴⁾。

3. 理論解析

理想流体の場合 粘性による剥離がなく ($\delta=0, \beta=1$) かつ船首波に対する船体の自己干渉もない ($\alpha=1$) いわば仮想的な場合の造波抵抗理論値は深水時、浅水時とも在来の方法で求められる。その結果を Fig. 7 に示す。図中浅水時に対応するものとして純浅水 ($b=\infty$) の場合と制限水路 (この場合 $b/L=2$) の場合とをあわせて示してある。数式は前出文献 (13)・(14)・(15) にゆずって省略し、数値のみ Table 4 に掲げる。

深水時の造波抵抗解析 Fig. 7 の結果はそのままでは定量的な使用に役立たない。本船型の如く吹出し分布と船型との対応が一応厳密に知られている場合には比較的簡単かつ合理的な修正法の存在することが既に確かめられた。修正の種類はさきに発表した通り (i) 粘性修正 (β および δ)、(ii) 自己干渉修正 (α)、の 2 種がある⁽²⁵⁾。前回発表ののちにさらに $F=0.10\sim0.70$ の広い F 数領域で S-102 を除く 3 種の理論船型の理論と実験との比較によつて知られたところでは、 δ が $F>0.4$ の高 F 数域で次第に初期値から減少して $\delta\rightarrow 0$ に近づくこと、および $\alpha=\exp(-n/F^2)$ における n がはじめに予想しておいた⁽²⁶⁾ 通り B/L と単純に $n=0.4 B/L$ という直線関係にあるということである。これらの結果を Fig. 8 において δ, β, α 対 F 数曲線の形で示し、また Fig. 9 においては (δ, β) と effective angle of run $\theta_A=y_{1/2}/0.05L$ (ただし $y_{1/2}$ は S.S. $_{1/2}$ における L.W.L. の半幅) との関係、および上記 n と B/L の関係を示した。このような修正係数を採用しつつ前回発表せる方法で Fig. 7 の水深無限大の場合の造波抵抗係数 $[C_w'=R_w/\rho_{1/2} V^2 (a_1L)^2]$ 理論曲線を再表現し、その結果を friction line の上に重ねたものが前出 Fig. 2 ($h/L=1.371$) の実曲線である。これをみると理論曲線はほとんど完全に実験点と一致している。

浅水時の造波抵抗解析 浅水時の修正も原理的には深水時とほぼ同様の手法を踏襲すればよいものと考えられる。ただ同一の F 数では一般に浅水波は深水波に比し長くなり、かつ diverging wave system の diverging angle Θ も Fig. 10 に示す如く拡がる傾向がある。従つて粘性修正 (とくに δ) や自己干渉修正 (α) はともに理想流体の場合に近づいてくる。とくに α は元来が transverse wave system に関するものであつて、浅水時の臨界速度以上 ($F_h>1$) では周知の如く transverse wave は消失して diverging wave のみとなり、

* S-101 および S-102 (ただしパラフィン 2.330m 模型の予備実験) では $\delta=0.06$, S-201 と S-202 では $\delta=0.10$.

Table 4—Calculated Wave Making Resistance Coefficients $C'_w = \frac{R_w}{\frac{\rho}{2} V^2 (a_1 L)^2}$, for S-101. S-201

($T/L=0.05$) Corresponding to Ideal Flow Condition ($\alpha=\beta=1$, $\delta=0$).

$T/L=0.05$ $\delta=0$		$h/L=0.4$				$h/L=0.2$			
$h/L=\infty$		Fh	F	$100C'h$	$100C'b,h$	Fh	F	$100C'b$	$100C'b,h$
F	$100C'w$	.60	.3795	.2559	—	.60	.2683	.1310	—
.15	.0462	.65	.4111	.4313	.4276	.65	.2907	.2720	.2697
.16	.0401	.70	.4427	.5699	.5694	.70	.3130	.2305	.2284
.17	.0472	.75	.4743	.6451	.6501	.75	.3354	.1703	.1709
.18	.0841	.80	.5060	.6604	.6737	.775	.3466	.2127	.2173
.19	.0552	.85	.5376	.6430	.6668	.80	.3578	.3139	.3230
.20	.1085	.90	.5692	.6028	.6427	.825	.3689	.4615	.4808
.21	.1018	.95	.6008	.5505	.6094	.85	.3801	.6419	.6791
.22	.0763	1.00(−)	.6325	.4893	.5737	.90	.4025	.9910	1.1099
.23	.1395	1.00(+)	.6325	.4893	.4109	.95	.4248	1.2077	1.5150
.24	.1703	1.05	.6641	.4329	.3923	1.00(−)	.4472	1.0602	1.8524
.25	.1315	1.10	.6957	.3957	.3689	1.00(+)	.4472	1.0602	0.5503
.26	.1023					1.05	.4696	.7817	.5631
.27	.1308					1.10	.4919	.6696	.5559
.28	.1950					1.20	.5367	.5445	.5676
.29	.2497					1.30	.5814	.4716	.4580
.30	.2700					1.40	.6261	.4195	.4135
.31	.2541					1.50	.6708	.3806	.3752
.32	.2201					1.60	.7155	.3498	.3477
.33	.1816								
.34	.1606								
.35	.1556								
.36	.1706								
.37	.2009								
.38	.1548								
.39	.2053								
.40	.3471								
.45	.5347								
.50	.5830								
.55	.5576								
.60	.5079								
.65	.4485								
.6957	.4111								

$h/L=0.3$			
Fh	F	$100C'h$	$100C'b,h$
.60	.3286	.1794	—
.65	.3560	.1749	—
.70	.3834	.3226	.3241
.75	.4108	.5187	.5273
.80	.4385	.6761	.6946
.85	.4656	.7655	.8034
.90	.4929	.7861	.8565
.95	.5203	.7433	.8660
1.00(−)	.5477	.6418	.8167
1.00(+)	.5477	.6418	.4709
1.05	.5751	.5408	.4534
1.10	.6025	.4868	.4355
1.20	.6573	.4146	.3954
1.30	.7120	.3680	.3586

Note { $C'h$ =Shallow water ($b/L=\infty$)
 $C'b,h$ =Restricted water ($b/L=2$)

Note $\{C'_h = \text{Shallow water } (b/L=\infty)$
 $C'_{b,h} = \text{Restricted Water } (b/L=2)$

Fig. 7—Curves of Calculated Wave-Making Resistance Coefficient for S-201 ($\delta=0$, $\alpha=\beta=1$)

従つてこの範囲では $\alpha=1$ としてよいことが容易に結論される。さらに $F_h < 1$ で、かつ F_h が 1 に近づいた場合には transverse wave の波長 λ_h は非常に大きくなり、深水時の式 $\alpha = \exp(-n/F^2) = \exp\left(-\frac{nL}{2\pi\lambda}\right)$ に相等する式 $\alpha_h = \exp\left(-\frac{nL}{2\pi\lambda_h}\right)$ に従つて α_h を求めればよい。Fig. 8 の α 曲線にはその結果を各水深 h/L ごとに点線で示してある。また δ についても α と同様これまた transverse wave に関係が深く $F_h \leq 0.60$ までは深水時の値をとり、 F_h がこれより 1 に近づくにつれて急速に $\delta \rightarrow 0$ に減少する。Fig. 8 の δ 曲線にはこの経過を点線で示す。最後に β については前 2 者と異なり深水時とほとんど変化がないのであつて、Fig. 8 の β 曲線をそのまま採用できる。このことは β が α や δ と異なり transverse system および diverging system をあわせた全波系に対する平均的な修正係数であることを考慮すれば当然のことといえよう。

かくして浅水時に対応する修正係数 α , β , δ の値が各水深、各 F 数について求められた。いまこれを用いて深水時と同様の理論

C_w' 曲線の修正を施してみる。ただし浅水時の造波抵抗積分は非常に複雑であると同時に波長が長いことに原因して深水時において有力な解析的武器となつていた漸近展開の手法が利用できない。従つてやや近似的にまず $F_h \geq 0.8$ 以上の高速域では、本来ならば C_w' のうち基本項と干渉項とを分離して取扱うべきところを、これを一括して $\delta=0$ に対する積分値を求め、これに修正係数 $\frac{1}{2}(1+\beta^2)$ (但し $\beta=0.75$) を乗じたものをそのまま採用した。

既に述べた如くこの領域では $\alpha \approx 1$, $\delta \approx 0$, 従つて上記の近似法によつて介入してくる誤差は、もともと小さな量であるところの干渉項に対する正しい修正係数 $\alpha \cdot \beta \approx 0.750$ の代りに $\frac{1}{2}(1+\beta^2) \approx 0.781$ を採用した程度の僅少な量であることがわかる。 $F_h < 0.8$, とくに対応する F 数の低い $h/L=0.2$ では、このような近似法は用いられず $\delta=0.05$, あるいは $\delta=0.10$ の場合の正確な浅水時理論値が必要になる。しかし深水時の $\delta=0.05$, 0.10 に対する C_w' 曲線の性質が既知であり、一方 $\delta=0$ に対する浅水影響の現われはじめてくる傾向も既に知っているのので、両者を比較すれば、さしあたり必要な程度の計算は可能である。Fig. 3 ($h/L=0.4$), Fig. 4 ($h/L=0.3$) Fig. 5 ($h/L=0.2$) 中の実曲線はこうにしてえられたものであつて実験状態 ($b/L=2$) に対応している。また図中の鎖線は純浅水 ($b/L=\infty$) に対する同様の理論曲線である。

これらを実験点と比較してわかることは、浅水影響は大体において $F_h \geq 0.55$ のあたりから現われてくること

Fig. 9

は Fig. 10 (a) に図解的に示した通り diverging angle Θ がいまの場合 $\Theta_b = \tan^{-1} 2 = 68^\circ 26'$ をこえると反射波は船体に当つてその干渉作用をうけ当然変形されることである。従つて浅水時側壁影響の計算は同図の Θ 曲線からしらべて少くとも $F_h = 0.98 \sim 1.06$ の範囲では当然修正を必要とすることになる。しかも船体の近傍における第一波の Θ は Fig. 10 に示したところの、厳密には遙か後方の波のみにしか適用できないはずの近似値よりも一般に大きくなることが知られているから⁽²⁷⁾、本理論がこの意味で修正を必要とされるべき速度領域は $F_h = 1$ を中心としとくに $F_h < 1$ の側においてかなり拡大されているものと想像される。

4. 結 言

吹出し分布と船型との対応が厳密に知れている理論船型 1 種 S-201 について、浅水時の水槽実験を行ない、これを線型造波抵抗理論による結果と定量的に比較し、それによつて従来あまり明らかでなかつた線型理論の浅水影響問題に対する適用限界を明らかにした。

結果は $F_h = 0.80 \sim 0.82$ 附近で若干みられる非線型制限水路の影響を除けば、全般的にはかなりよい一致を示し、とくに浅水影響の出現しはじめる $F_h = 0.55$ から $F_h = 0.75$ までの初期浅水影響領域、および臨界速度をこ

である。このあたりでは波長は未だ深水時の波長と全く等しく、波高のみがやや増大する。従つて hump-hollow の位相変化はこのあたりでは未だみられず、これはさらに高速側 $F_h \sim 0.70$ 附近のようやく波長変化ははじまるあたりからみられる。また $F_h \leq 0.75$ までは理論と実験との一致はきわめてよいが、 $F_h > 0.75$ でそろそろ実験点の方が理論値よりも大きくなつてくる。この開きは last hump の頂点直前 ($F_h = 0.80 \sim 0.82$) で最も大きく、また水深の浅いほど大きい。そしてこの事実を Fig. 6 の船体浮沈量変化曲線と対比してみると、両者不一致のもつとはなはだしい速度 F は各水深とも大略最大船体沈下の速度*に相当している。これらのことから、この領域にみられる過剰抵抗の大部分がおそらく序言に述べたいいわゆる非線型制限水路影響によるものであることが想像される。なお F_h が 0.90 をこえてさらに臨界 F 数に近づくと同前実験・理論との開きはかえつて減少しはじめて一般に $F_h \geq 1$ では両者は予想以上によい一致を示している。ただ図に 3 種の記号 ($\circ$, δ , $\diamond$) で示してあるように、 $F_h = 1$ の附近では明らかに最終抵抗値に達していないもの、および堰返し波の反射による不安定現象らしきものが若干みとめられた。しかしこれらの現象がみられるのもほぼ $F_h < 1.05$ あたりまでであつて (ただし $h/L = 0.2$ では $F_h \leq 1.10$ までその影響がみとめられた)、これ以上の高速域では測定抵抗値も極めて安定し、かつ側壁影響を考慮した線型理論値が実験値と非常によい一致を示している。この結果は、この附近の高い F 数を考慮すると、著者らの理論の適用限界をむしろこえており、予想外の結果といえる。なお側壁影響すなわち側壁による反射波の影響についてはいまひとつ注意すべき点がある。それ

* $h/L = 0.4, 0.3, 0.2$ に対し $F = 0.51, 0.45, 0.37$.

Fig.10 Diverging Angle of Free Wave Pattern in A Shallow Water

および磁歪式検力計の試作に協力された山口機器研究所，さらに実験に，数値計算に終始熱心にこの仕事を推進して下さった本学船型試験水槽室の皆さんに心から御礼を申上げる。

えた $F_h > 1.05$ の最終浅水影響領域ではきわめてよい一致をみた。なお今回附随的に確かめられたこととしては浅水影響が最初に現われるのは波長よりもさきに波高に対してであつて ($F_h \geq 0.55$)，従来経験的に主として摩擦抵抗に関して言われていた因子 T/h (吃水/水深比) が浅水影響の初期段階では造波抵抗に対しても主因子 F_h とともに軽視できないことが知れた。波長にその影響が現われるのは従来からいわれている通り $F_h \geq 0.70$ からであつて，抵抗曲線の hump-hollow の位相のズレもこの後においてはじめて現われてくる。

最後に，本研究は昭和 28 年 9 月最初の実験に着手して以来，まる 3 年を経過した今日ようやくこのような形でまとめることができた。そしてその間非常に多数の方々の御世話になつた。就中，終始熱心に御指導，御激励を賜つた山県昌夫教授に対して厚く御礼を申述べるとともに，さかのぼつて本学水槽に理想的な浅水実験用の基本的設備をのこされた故山本武蔵名誉教授および木下昌雄博士のお骨折りに対して深く感謝の意を表したい。また水平曳行ガイドお

文 献

- (1) WIGLEY, C.: TINA 68 (1926), 以下多数.
- (2) WEINBLUM, G.: Jahrb. SBTG 31 (1930) 以下.
- (3) 出淵・大津: 造船協会会報 68・69 (1941)
- (4) 山本・木下: 造船協会会報 73 (1951)
- (5) KREITNER, J.: W. R. H. 15—7 (1934)
- (6) 前出 (3),
- (7) KINOSHITA, M.: 造船協会会報 76 (1954)
- (8) 丸尾 孟: 造船協会論文集 84 (1952)
- (9) 中島康吉: 造船協会論文集 88 (1955)
- (10) 菊池義男: 船の科学 8—8 (1955)
- (11) INUI, T.: 造船協会論文集 93 (1953)
- (12) 乾・別所: 造船協会論文集 92 (1956) および前出 (11).
- (13) KINOSHITA-INUI: 造船協会会報 75 (1953)
- (14) INUI, T.: 造船協会会報 76 (1954)
- (15) 乾 崇夫: 造船協会会報 77 (1955)
- (16) 乾・西山: 造船協会論文集 84 (1952)
- (17) 前出 (11) 参照.
- (18) 前出 (12) 参照.
- (19) 乾・岩田・沈: 造船協会文集 97 (1955)
- (20) 乾 崇夫: 船舶論 29—1 (1956)
- (21) HUGHES, G.: TINA 96 (1954)
- (22) 谷口・田村: 西部造船協会会報 9 (1955)
- (23) COMSTOCK-HANCOCK: TSNAME 50 (1942)
- (24) 乾・菊池・岩田・田古里: 造船協会論文集 99 (1956)
- (25) INUI, T.: Discussions and Replies to the General Lecture by T. Inui, at the Seventh International Conference on Ship Hydrodynamics, Oslo (1954), Norwegian Ship Model Experiment Tank Pub. Nos. 32~37 (1955)
- (26) 前出 (19)
- (27) 神中竜雄: 西部造船協会会報 11 (1956)