

(昭和 36 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

Waveless Bow の研究 (その 2)

正員 高幣哲夫*

A Study on the Waveless Bow (Part 2)

By Tetsuo Takahei, Member

Summary

In the first paper on the "Waveless Bow", the author showed the theoretical possibility of realizing the idea of the "Waveless Hull Form," and attained the "Waveless Bow" with the two models. This remarkable fact has been inferred from the results of the resistance tests and the careful analysis of the profiles of the transverse waves on the sides of the models.

The above should be most surely confirmed by measuring the wave patterns including the both waves, transverse and diverging.

In this second paper, proceeding on the author's way by introducing the stereophotogrammetry into the tank experiments, he has succeeded in figuring wave contours.

If the suitable bow bulb for the desinged speed is adopted, the bow waves undergo a great change from the state of Fig. 4 in which the wave influence is predominant, to the state "Waveless" of Fig. 5. The idea of the elementary waves is also very effective in interpreting these phenomena.

前論文¹⁾では船の造る波を完全造波干渉によつて Waveless の状態にする可能性を理論的に示すとともに、実際船首波について 2 種の船型 C-101F, C-201F2 において完全波消しの状態を実現させるまでの経過について述べた。この完全波消しの状態の実現している事実は船側波形の観察の結果や、Waveless Bow 船型の抵抗試験の結果が理論的に予測できる船首波による造波抵抗ゼロの値によく一致することなどからも十分認めることができるが、その後横波、縦波を含めた全波系についてステレオ・カメラによる波形測定を行ない、造波干渉によつてほとんど完全に全波系について波が消えている状態を確認した。本論文ではこの写真測量によつて得られた波形図とこれについて種々解析を行なつた結果について述べる。

1 写真測量による波形測定

1.1 波形測定の意義

船型試験の要諦は船の運動に伴う造波現象を模型を使って乱されない純粹の形で再現し、造波特性の解明を行なうところにある。しかるに従来の船型試験は造波現象の複雑さと波形の記録、測定の技術上の困難さとから直接対象となる造波現象を観測して、造波機構の内部に立入つてそれを物理的に研究するということがほとんど行われていない。そもそも抵抗試験なるものが常用の速度範囲では効率の悪い仕事であつて、最終的な対象量である造波抵抗が全抵抗中に占める比率が $1/2$ にも達しない場合が多いうえに、摩擦抵抗について層流影響・形状影響など今日なお完全には解決されていない面倒な問題がいろいろ介入する。かつ測定量が力やモーメントであるから、模型が小型になるほど急速に測定精度が低下する。しかるに波高は模型の寸法比そのものに比例するから、小模型といえども大模型に比較して測定精度はさして低下しない。むしろ広い範囲の波形測定には種々の条件を勘案して小水槽の方が大水槽よりも有利であるとも考えられる。東大乾崇夫教授はかねてから波形分析の重要性を強調せられ、Chemical Film 法による Wave Profile の測定や、写真による船尾造波機構の観察など²⁾この方面に関して貴重な報告を発表しておられる。これら報告の中で乾教授も言つておられるように水面に二次元

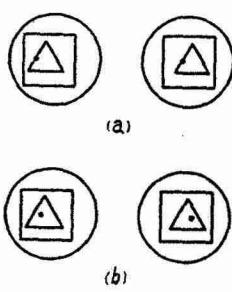
* 原稿受付 昭和 35 年 12 月 20 日

* 茨城大学助教授

的に拡がる全波系を忠実に記録する方法としてはステレオ写真による光学的方法が最上の方法であり、教授のこれらの研究もステレオ写真による本格的測定に対する予備的な準備を兼ねて行なわれたもので、このために水槽施設に各種の設備を施し、写真撮影の技術についても貴重な経験を積んで来られた。首題の Waveless Bow の研究は主船体とバルブの造波干渉機構を取扱うものであり、前報に述べた素成波による干渉機構の物理的推論を実証するうえにも、写真測量を適用する最も格好な研究対象といえる。そこで東大水槽の諸設備と経験を利用していただき、とりあえず必要な諸装置を整え、関係方面の協力を得て、この方法による波形測定を実施し、ほぼ予期の成果を収めることができた。

1・2 写真測量の原理³⁾

写真測量で使う写真はステレオ写真と称し、ある1つの物体を少し離れた2ヶ所から撮影し、2枚1組としたものである。例えば第1図の図形を実体視すると○、□、△と順次に沈んでみえる。



第1図

いま(a)のように左右の対応点の位置に黒点(メス・マーク)を置いて実体視すると、黒点も実体的に浮び上つてみえ、しかも△と視差の量が同じなのでちょうど△上に黒点を置いたように見える。ところがいずれか一方または両方の黒点を左右にずらし、例えば(b)のようにして実体視すると、黒点は△の奥に沈んでみえ、逆に黒点間の距離を(a)よりも近づければ浮び上つてくる。全く同様に波形のステレオ写真上にメス・マークを置き、その間の距離を一定に保つて、その立体像が常に水面に接触してみえるようにして追跡して行けば波の等高線が得られる。またメス・マーク間の距離の差を正確に求めれば、次に示す関係式によつて波高を計算することができる。

いま第2図に示すように2点 O_1 , O_2 からカメラを真下に向けて撮影したとする。これを垂直空中写真と呼ぶ。また図の O_1 , O_2 の間の距離 b を撮影基線長という。波頂の点Aは左右の写真上で a_1 , a_2 に、標定点Bは b_1 , b_2 にそれぞれ写る。 $\overline{O_1a_1}$, $\overline{O_1b_1}$ に平行に $\overline{O_2a'_1}$, $\overline{O_2b'_1}$ を引けば $p_a = \overline{a'_1a_2}$, $p_b = \overline{b'_1b_2}$ がそれぞれA点, B点の視差である。カメラの画面距離を f , カメラからA, B両点までの高さを h_A , h_B とすれば $p_a/b = f/h_A$, $p_b/b = f/h_B$ 一般に $h = b \cdot f/p$ の関係が成立つ。これが視差による標高測定の基本式である。A, B 2点間の標高の差(比高)を dh とし、これが h に比べて小さい場合はこの基本式を微分して得られる次の(1)あるいは(1')式の関係によつて視差の差 dp から比高を求めることができる。

$$dh = -\frac{bf}{p^2} dp = -\frac{h^2}{bf} dp \quad (1)$$

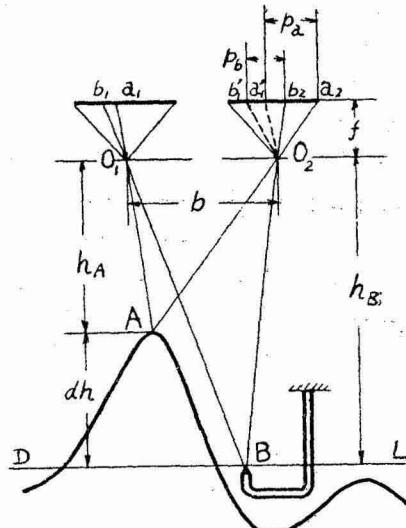
ここで $h/f = m_b$, $b/h = \theta$ とおけば(1)式は

$$dh = -\frac{m_b}{\theta} dp \quad (1')$$

となる。(1')式で m_b は写真的縮尺分母数と呼ばれ、また θ は基線高度比と呼ばれる。後者は撮影カメラの種類と2枚の写真的重複度によって定まる定数である。

実際の撮影ではカメラの傾斜や写真的標定(2枚の写真を自然の対象物をみるのと同じ視線の関係に設定すること)の誤差、あるいは印画紙の伸縮などによる誤差があり、水平面が彎曲して見えることもある。そこで写真上に標高のわかつた点を適当に配置し、上述の各種の誤差の補正を機械的な方法で自動的に行なうようにした図化機にステレオ・トップがある。これは小縮尺図用として設計されたもので、その精度は撮影高度の約1/1,000であつて、この級のものを3級図化機といふ。図化機にはこの他一級図化機と称して垂直空中写真的他、斜め写真上に写真などにも使うことができ、また航空三角測量や断面測量などもできる万能精密図化機や、二級図化機と呼ばれる、垂直空中写真による図化を主目的とする高精度(精度は1級、2級ともに撮影高度の約1/10,000)のものがある。

今回の実験では図化作業は建設省国土地理院の協力を得て、主として同所のステレオ・トップによつて行なわ



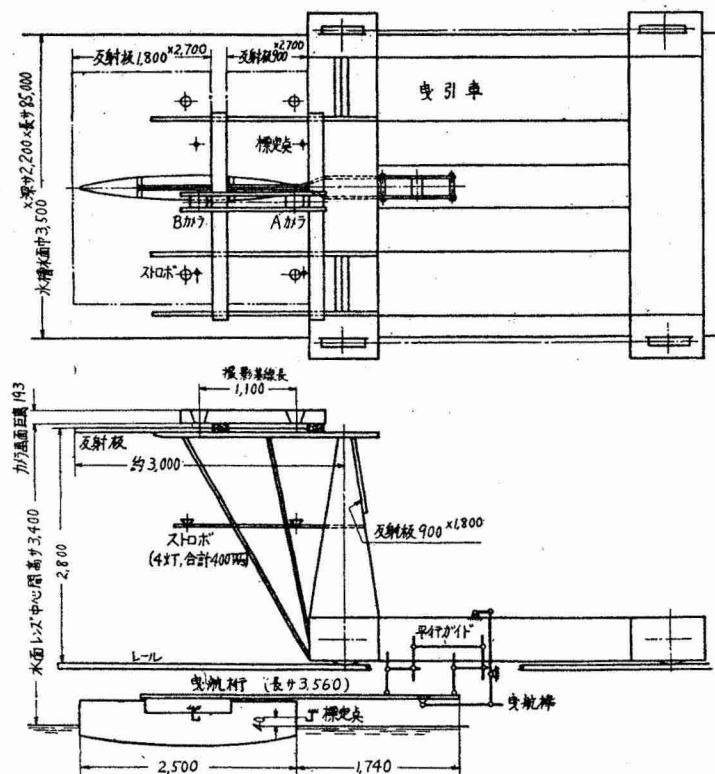
第2図

れ、一部は2級図化機に属するステレオ・プロッター A8にかけられた。これらの図化機にかける写真の備えるべき条件としては次のようなものをあげることができる。特にカメラのレンズについてはもつとも厳密な要求がある。

- (1) 2枚の写真の重複度を少なくとも50%以上、普通60%に近くすること。
- (2) 画面重複部の四隅に標高のわかつた標定点が明瞭に写つていて、さらにその相対位置がはつきり求まつていること。
- (3) 撮影カメラが完全に調整されていること。
- (4) レンズはわい曲収差が小さく* (普通0.05mm以下)、解像力が50以上** (0.02mmの線まで見分けられる) あること。
- (5) 露出時間が短かく、写真像のブレが分解能以下であること。
- (6) 2枚の写真上で対応点が容易に判定できて、立体像が明確に定まること。

特に(6)については、条件は地図作製の航空写真の場合も全く同様であるが、水面にできる波の撮影の場合は、特に技術的に重要な問題となる。水面形状の細かい変化が良好なコントラストで鮮明に出ているとともに、色調の微妙な変化をも捕えた写真的には極めて軟調なものでなければ、尖鋭な対応点の認定が困難となる。

2 写真撮影ならびに図化



第3図

い位置である。また2台のカメラの中心線を船体中心線に一致させて配置したのでは玄側の付近が隠れるので、カメラの中心線を右玄側に約200mmかわしてセットした。

波形と船体との相対的関係は長い観測時間の平均としては定常的であるが、瞬間的にはかなり変動があるもの

2.1 撮影の計画と装置

写真撮影の計画とそれにともなう各種装置は次のようなものとなつた。これらの全体配置を第3図に示す。

(1) 通常の船型試験のように模型を曳引車台の下におくことができない。また抵抗試験は平行ガイドを用いて沈下だけを許してトリムを許さない曳航法によつて行なわれたので波形撮影も同じ曳航法をとることとする。したがつて模型を曳引車台をかわしてその後方にセットする。

(2) 撮影は垂直空中写真の方法によつた。また後に述べる理由から船首尾間を2回にわけて分割撮影する。後半部の撮影の際は模型を前方に移動する。カメラは暗箱カメラ2台を使用し、これを曳引車台の後部のトロリー塔から張出した梁上に等高度にセットし、同時撮影を行なう。カメラの高さは水面上約3,400mmで、本水槽として許される最も高

* 使用するレンズに対して、標準格子を作つてそれを撮影し、わい曲収差が十分に小さいことを確めた。

** 使用したレンズでは約40であった。

と考えられるから、通常の航空ステレオ写真のように1台のカメラで適宜の距離を隔てて連続2枚を撮影する方法をとることはできない。したがつて写真的特性の揃つたカメラを2台用意して同時撮影を行なう必要がある。このために特に照明にストロボ・ライトを使用した。また写真測量専用のカメラは無限遠の対象に対してピントが調整してあるが、水槽で波を撮影する際はカメラの位置に制限があるから、有限距離の対象にピントをあわす必要がある。そのために専用のカメラをそのまま利用するということは困難である。さいわい日聖丸の実船実験において海象状況の写真測量の目的に準備された暗箱カメラを利用することができた。日聖丸では船上にカメラを据えて海象を斜め上方から撮影している。これは地上写真測量の方法にもとづくもので、この方法はもちろん水槽での波形測定の場合にも用いることができるが、図化に際して特殊な図化機が要求され、また水槽でのカメラの配置の関係にも種々の支障があるので、今回の実験では既述の垂直空中写真の方法を採つた。写真は少なくとも船首尾間の波形を図化するに必要な範囲を撮影できることが望ましいが、水槽の天井の高さの制限とカメラの画角が狭いため、どうしても船首尾間の波形を2回にわけて撮影せざるを得なかつた。別に広角カメラによつて全波形を一枚の写真に収め、ステレオ写真による波形を前後継ぎ合わせる際の参考に資した。前報第7図の写真はそれである。

撮影の要目は第2図についてレンズの画面距離 $f=193^*$ 、画面の大きさ 160×110 、レンズの中心より水面までの距離 $3,381 \sim 3,390$ 、基線長 $b=1,100$ （単位はいずれも mm）で、この場合2つの写真の重複度は60%の適当な値となり、 $m_b=18$ 、 $\theta=0.325$ であるから、(1) 式は

$$dh = -55.5 dp$$

となり、写真上 1 mm の視差の差が比高で約 56 mm となる。ステレオ・トップの読み取りの精度からいえば独立標高点の波高は十分 ± 1 mm の精度で測定できる。等高線の平均の精度はそれより幾分低く \pm (等高線間隔) 程度となる。

(3) 画面の4隅に設ける標定点はフック・ゲージの形式を用い、フックの尖端を水面上約 40 mm の同一水平面に一致せしめ(水槽水面を上げて行なう)，別にフックの尖端と静水面との距離を実験の前後に正確に測定して標高の基準水面の位置を定めた。また標定点の相対位置を測定して写真倍率を定める資料とした。

(4) 水槽水面にメッシュ 150~170 程度のアルミ箔粉を散布する。長さ 85 m、幅 3.5 m の水面に必要な1回の散布量は約 100 g である。

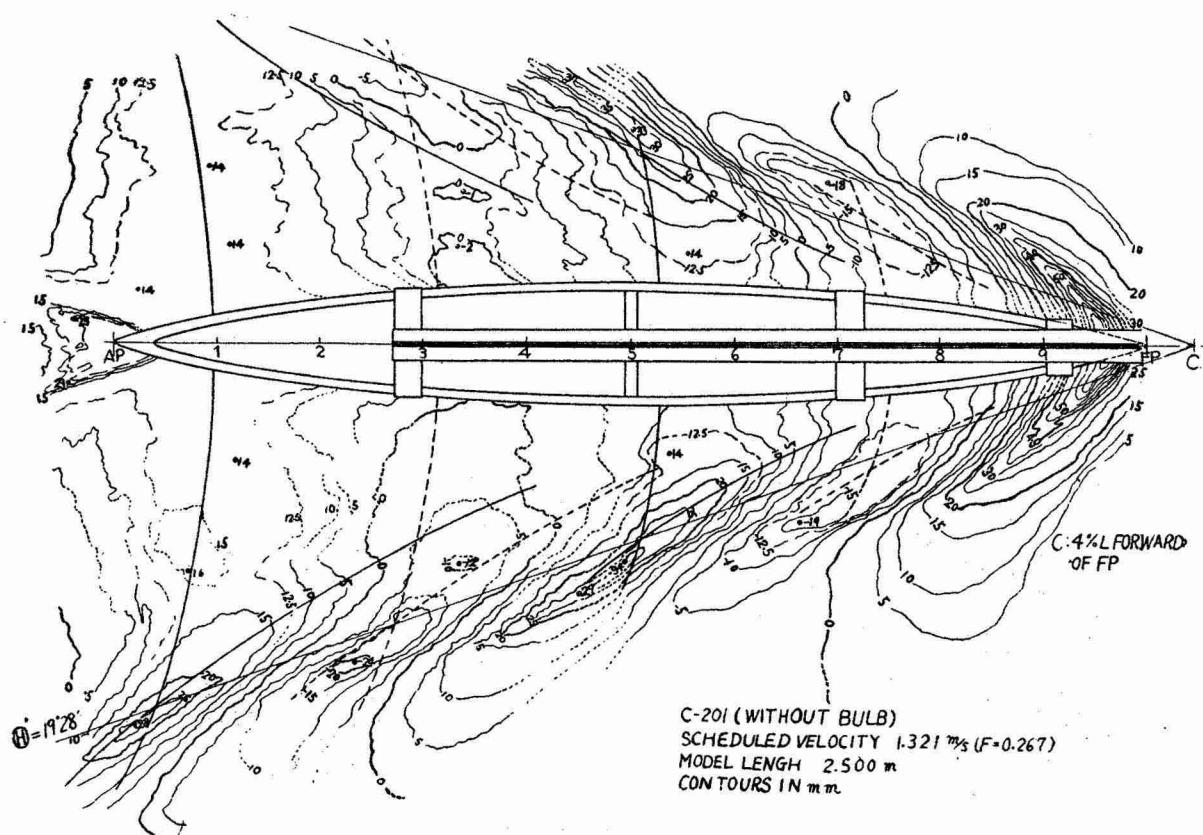
波の鮮明な写真をとるうえにまず解決しなければならない最も重大な課題は照明技術の問題である。水面の照明法には二つあつて、一つは水面に明るい天井の影を映す方法、他の一つは水面を不透明な膜で蔽う方法である。

第1の方法は自然界では晴れた空がそのまま湖水や海面に映つて理想的な撮影条件になるが、現在の水槽でこれと同じ状態を実現することは極めて困難で、東大水槽でもこれを試みて必ずしも満足な結果が得られなかつた。第2の方法については水に混入したり、水面に散布したりする物質が次の条件を満足するものでなければならぬ。すなわち i) 水の粘性をかえない ii) 水の表面張力をかえない iii) 水面に攪乱を与えるても直ちにもとの均一な分布にもどる、などの性質をもつことである。上述のアルミ箔粉は水面に浮遊してほとんど沈まず、表面張力に与える変化も極めて小さく**、上記の条件をほぼ満足する。ただ iii) の条件は散布した直後は問題ないが、散布後 3, 4 日を経ると水面がゴミで汚れるため、模型が航走すると後方の Wake の部分で水面が露出し、それが容易に閉じなくなる。このときは水面を掃除して、新たにまた散布を行なつた。水面に散布されたアルミ箔粉は Wave Slope の変化に伴つて微妙な変化を示し、適當な散光照明を施せば極めて鮮明な写真が得られる。

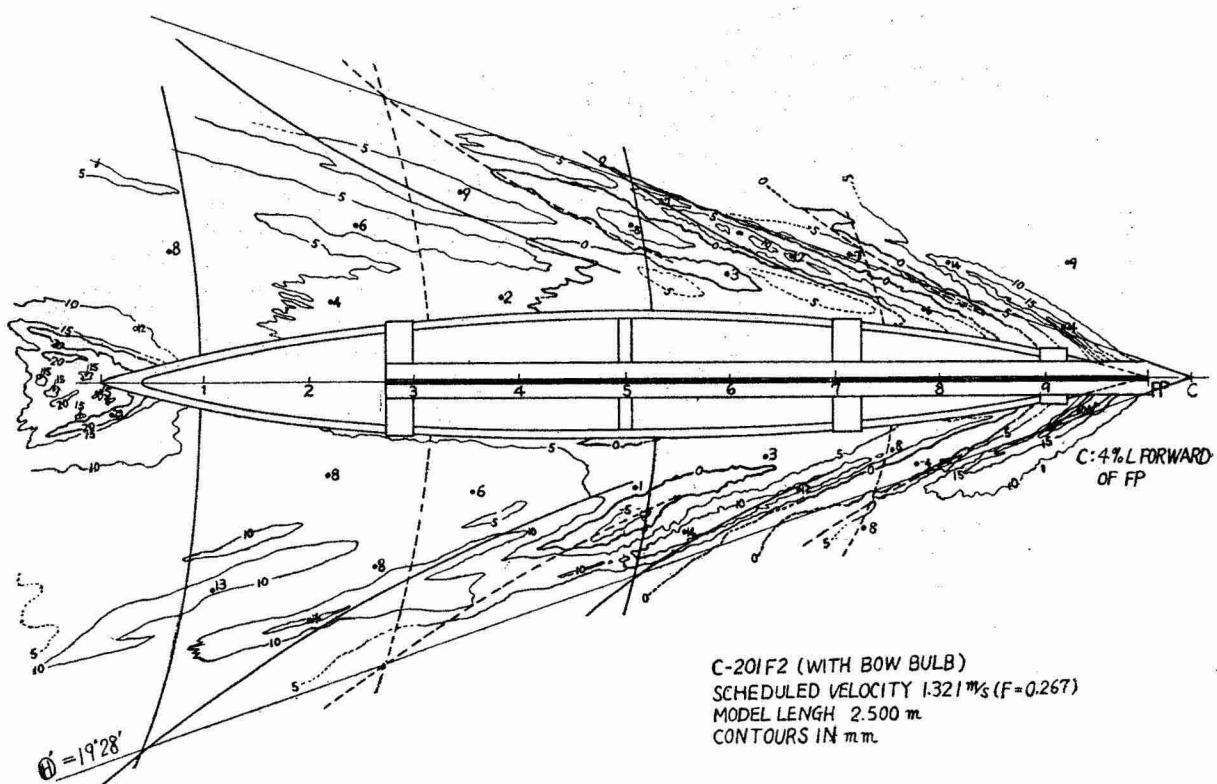
(5) 写真の色調を整えるため照明は間接散乱光によつて行なつた。このために模型の上空を蔽うように長さ 3.8 m、幅 3.6 m の銀紙を貼つた仮天井をあげて曳引車台上のカメラの位置に固定し、これを4箇のストロボ・ライトで照射する。すくないライトの数で水面がなるべく一様な散乱光で効果的に照明できるように多くの努力を試みた。なお撮影の際は長さ 100 m 以上におよぶ水槽室の南北両側のすべての窓を暗幕で遮蔽して、水面に不必要的日光の直射光が入ることをさけた。この遮蔽装置もかつての乾教授の実験の際設備されたものである。使

* 2つのレンズは 3,400 の距離にピントを調節し、その写真倍率を厳密に一致させる必要がある。使用したレンズではその差異が 0.1% 以内に収まるように調整した。このときの画面距離である。

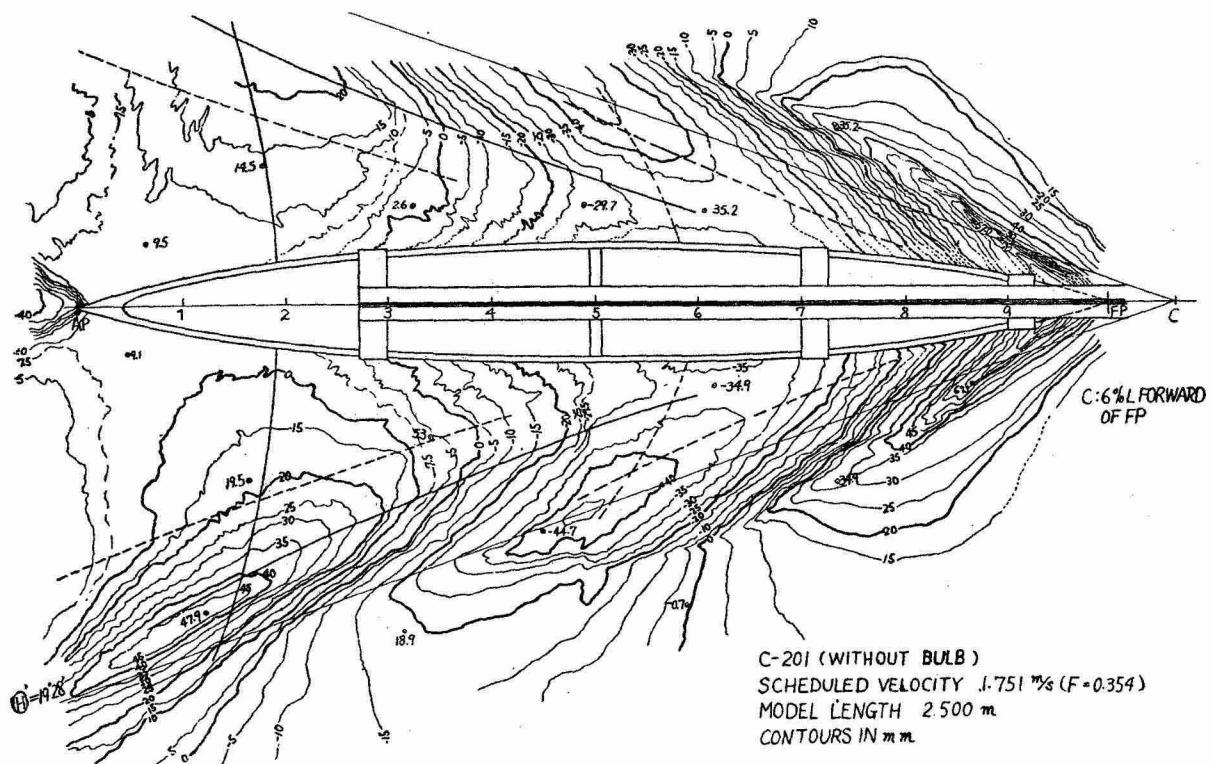
** 使用したアルミ箔粉は、中島金属箔粉工業 KK の製品で、メッシュ 150~170 のものについて簡単な Jolly の弾條計によつて測定した結果では、温度 12°C で、アルミ箔粉を散布した水面の表面張力は清水の 97~99% 程度であつた。



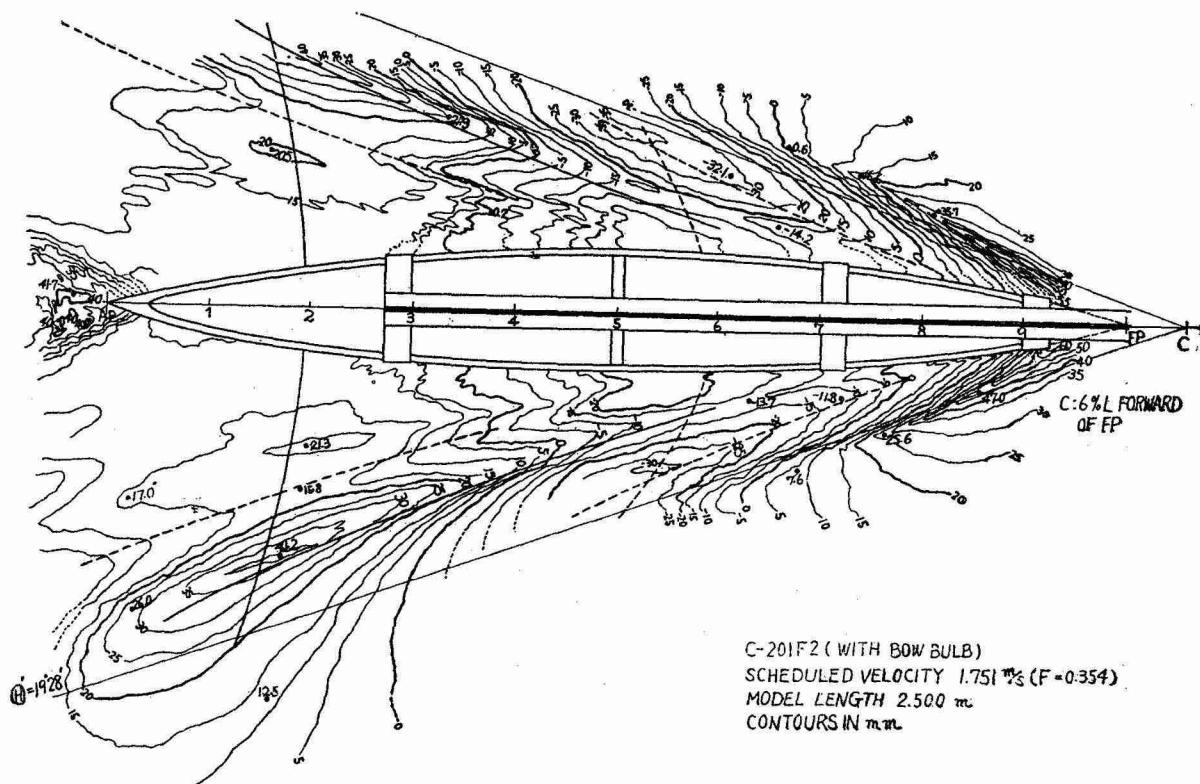
第 4 図



第 5 図



第 6 図



第 7 図

用したストロボ・ライトは4灯で合計400Wsの容量をもち、レンズの絞りをf16とし、感光度ASA100のパンクロ乾板を用い、現像処理は増感超微粒軟調現像液と称するプロマイクロールによつて行ない、十分測量写真としての要求に応じうるものを得ることができた。水面をアルミ箔粉で蔽つたことは照度の点でも極めて有利であつた。ストロボ・ライトの閃光時間は短く約1/2,000sで、完全な同時撮影が行なわれ、また写真像のブレを完全に防ぐことができた。またストロボ・ライトは曳引車に電流負荷をかけることなく十分な照明が得られ、極めて有効であつた。

2・2 波形図

実際の写真撮影は昭和35年6月22日から28日の間にわたつて行なわれた。すなわち船型C-201およびこの船首尾にバルブをつけたC-201F2, C-201F, C-201F2×A4の4種の船型⁴⁾について、予定航走速度を第1表のように選んで、実際の速度が±0.5%以内の偏差に収まつた場合に限つて撮影を行なつた。

図化機から直接求めた波形図は縮尺1/10とし、水平等高曲線は主曲線は比高5mm、間曲線（波形図で長破線で示されている）は比高2.5mmとし、なるべく多くの独立標高点を、主として傾斜変換線の位置に求めるようにした。図化に要する工数は1モデル（1/2Lの範囲）につき平均約2工数という。昭和35年12月末日現在5状態（10モデル）の図化作業が完成している。ここには船型C-201, C-201F2のF=0.267およびF=0.354における測定波形を第4~7図に示す。図の短破線の部分は測定精度の幾分落ちることを示している。その航走状態を第2表に示す。

第1表

F	0.250	0.267	0.289	0.316	0.354
K ₀ L	16	14	12	10	8
V(m/s)	1.236	1.321	1.430	1.563	1.751

Model Length=2.500 m

第2表

Model	Fig. No.	Velocity (m/s)			Sinkage (mm)
		Scheduled	Fore Half	Aft Half	
C-201	4	1.321	1.324	1.323	6.4
C-201 F2	5	(F=0.267)	1.323	1.320	5.7
C-201	6	1.751	1.751	1.748	13.2
C-201 F2	7	(F=0.354)	1.750	1.749	12.2

3 Waveless Bow の波形と造波干渉

水面上を一定速度で航走する攪乱点の後方に生ずる波はKelvin波として知られ、そのWave Ridgeの模様は速度のいかんにかかわらず相似性が保たれる。Wave Ridgeの模様についてはHognerによつて詳細な研究⁵⁾が行なわれた。二次元的にひろがる船の造る波の後続波形はWave Ridge上の振幅の分布の変化によつて種々の波模様となる。

さて船の造る波のうち自由波成分は船の後方では漸近的に次の式で与えられる。

$$\xi(x, y) \sim \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\theta) \sin(K_0 p \sec^2 \theta) d\theta + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} C(\theta) \cos(K_0 p \sec^2 \theta) d\theta \quad (2)$$

ただし

$$K_0 = g/V^2 \quad p = (x - x_0) \cos \theta + y \sin \theta \quad (3)$$

特にある特定のθについて考えるときには(2)式は

$$\xi(x, y) \sim \int_{-\pi/2}^{\pi/2} A(\theta) \sin\{K_0 p \sec^2 \theta + \gamma(\theta)\} d\theta \quad (4)$$

とかくことができる。ただし

$$\left. \begin{aligned} A^2(\theta) &= S^2(\theta) + C^2(\theta) \\ \tan \gamma(\theta) &= C(\theta)/S(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

このA(θ)は素成波の振幅関数である。いま(2)式において

$$x - x_0 = R \cos \Theta, \quad y = R \sin \Theta \quad (6)$$

とおけば

$$K_0 p \sec^2 \theta = K_0 R \sec^2 \theta \cos(\Theta - \theta) \quad (7)$$

とかくことができる。

(7) 式の K_0R がある大きさ以上 ($K_0R \geq 6$) になると (2) 式の積分は漸近展開で近似させることができる⁶⁾。すなわち

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(\theta) \sin[K_0R \sec^2 \theta \cos(\Theta - \theta)] d\theta \sim \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_1 S(\theta_1) \sin \left[K_0RF_1 + \frac{\pi}{4} \right] \\ + \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_2 S(\theta_2) \sin \left[K_0RF_2 - \frac{\pi}{4} \right] \quad (8)$$

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} C(\theta) \cos[K_0R \sec^2 \theta \cos(\Theta - \theta)] d\theta \sim \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_1 C(\theta_1) \sin \left[K_0RF_1 - \frac{\pi}{4} \right] \\ + \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_2 C(\theta_2) \sin \left[K_0RF_2 + \frac{\pi}{4} \right] \quad (9)$$

したがつて (2) 式の漸近展開の一般形として

$$\left. \begin{aligned} \zeta(x, y) &\equiv \zeta(R, \Theta) = \zeta_1(R, \Theta) + \zeta_2(R, \Theta), \\ \zeta_1(R, \Theta) &\sim \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_1 A(\theta_1) \sin \left[F_1 K_0R + \gamma(\theta_1) + \frac{\pi}{4} \right] \\ \zeta_2(R, \Theta) &\sim \left(\frac{2\pi}{K_0R} \right)^{1/2} K_2 A(\theta_2) \sin \left[F_2 K_0R + \gamma(\theta_2) - \frac{\pi}{4} \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

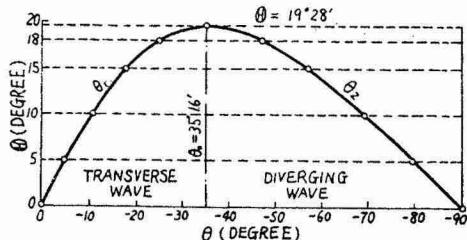
を得る。(8), (9), (10) 式において添字 1, 2 はそれぞれ横波および縦波の意味を表わし, $\theta_1, \theta_2; F_1, F_2; K_1, K_2$ はいずれも Θ のみによって定まる関数である。特に θ_1, θ_2 は物理的には今考えている点 (R, Θ) の水面変化 ζ に主として寄与する素成波成分の x 軸に対する伝播方向を表わし, ζ_1, ζ_2 の波高の振幅はそれぞれ振幅関数 $A(\theta)$ の $\theta = \theta_1, \theta_2$ における値に比例する。そして θ_1, θ_2 と Θ との関係式は、各素成波群がその点で同じ位相をもつということ、すなわち(7)式右辺が θ_1, θ_2 の附近で停留値をとるという条件から導くことができて

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = -\frac{\cot \Theta}{4} [1 \mp (1 - 8 \tan^2 \Theta)^{1/2}] \quad (11)$$

となる。なお (11) 式は Θ が限界角 ($=19^\circ 28'$) に一致するとき等根となり, $F'(\theta)$ も 0 となるから、この付近ではさらに高次の漸近展開を考える必要がある。ちょうど Θ が限界角に一致するとき (11) 式は次のような形にまとめることができる。

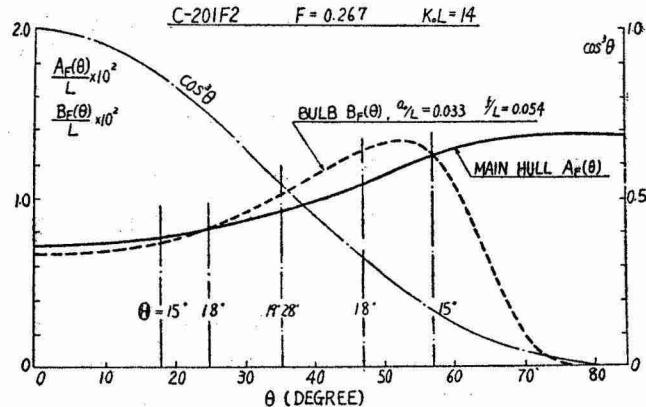
$$\zeta(\Theta=19^\circ 28') \sim \frac{\Gamma(1/3)}{\sqrt{3}} \left(\frac{2}{K_0R} \right)^{1/3} H_0 A(\theta_0) \sin[F_0 K_0 R + \gamma(\theta_0)] \quad (12)$$

ただし θ_0 は (11) 式が等根をもつときの θ の値、すなわち $\cos \theta_0 = \sqrt{2}/3$, $(\theta_0 = 35^\circ 16')$, F_0, H_0 はそれぞれ 0.866 および 1.347 となる。限界角の外側に対しても $\Theta \geq 21^\circ$ 位までは波が存在していることが式の上でも示される。



第 8 図

さて (11) 式を解いて Θ に対する θ_1, θ_2 の関係を求めると第 8 図のようになる。正の Θ に対しては負の θ_1, θ_2 が対応する。船型 C-201F2 において主船体の船首波とバルブ



第 9 図

の造る波の振幅関数 $A_F(\theta), B_F(\theta)$ は (5) 式について $C(\theta)$ の成分ではなく $S(\theta)$ の成分のみで、その θ による変化は第 9 図のようになる。また (3) 式について波の発生の起点の位置 x_0 は主船体、バルブとともに速度によつて変ることなく常に船首端となる。したがつて種々の $\Theta = \text{一定}$ の放射状鉛直面内の波高についてバルブ

の干渉効果がどのようにあらわれるかをみるには、各 θ に対応する素成波の θ_1, θ_2 の成分について $\{A_F(\theta) - B_F(\theta)\}$ をみれば容易に推定することができる。船型 C-201 F2 の計画速度では $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲まで $A_F(\theta) \approx B_F(\theta)$ の関係が成立しているから、横波はもちろん、縦波も $\theta=19^\circ 28' \sim 15^\circ$ の範囲のものはほぼ完全に打消される。ところで θ の大きい値に対しては $A_F(\theta)$ は $\theta=90^\circ$ で有限値をとるが、その波長 $\lambda(\theta)$ は

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \cos^2 \theta \quad (\lambda_0 = 2\pi/K_0 = 2\pi V^2/g)$$

の関係に従つて θ が 90° に近づくとともに 0 に近づく。したがつて θ が 90° に近いところでは Wave Slope は急峻となり、線型の一次理論が成立しなくなり、この近傍の $A(\theta)$ は実際は波高には利いてこない。

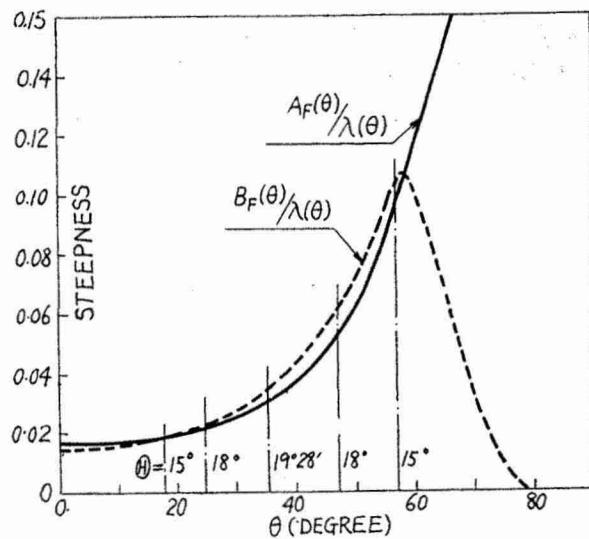
波の Steepness をみるために試みに $A_F(\theta)/\lambda(\theta)$, $B_F(\theta)/\lambda(\theta)$ を θ について求めると第 10 図のようになる。一次理論の有効な限界を $A_F(\theta)/\lambda(\theta) \leq 1/7$ ($=0.14$) と考えれば、素成波の振幅関数において物理的に意味のあるのはせいぜい $\theta \leq 70^\circ$ 程度までと思われる。このことを考慮に入れて $\theta < 70^\circ$ について干渉の効果を推定すれば、縦波も $15^\circ > \theta > 10^\circ$ 付近をわずかに残して大半は完全に打消される。

以上を総合してバルブによる造波干渉が最も有効に行なわれれば、船首波の $\theta=15^\circ \sim 18^\circ$ 附近の Cusp が消えて $\theta \approx 12^\circ$ 付近にわずかに消し残った縦波による Wave Ridge が現われることが予想される。

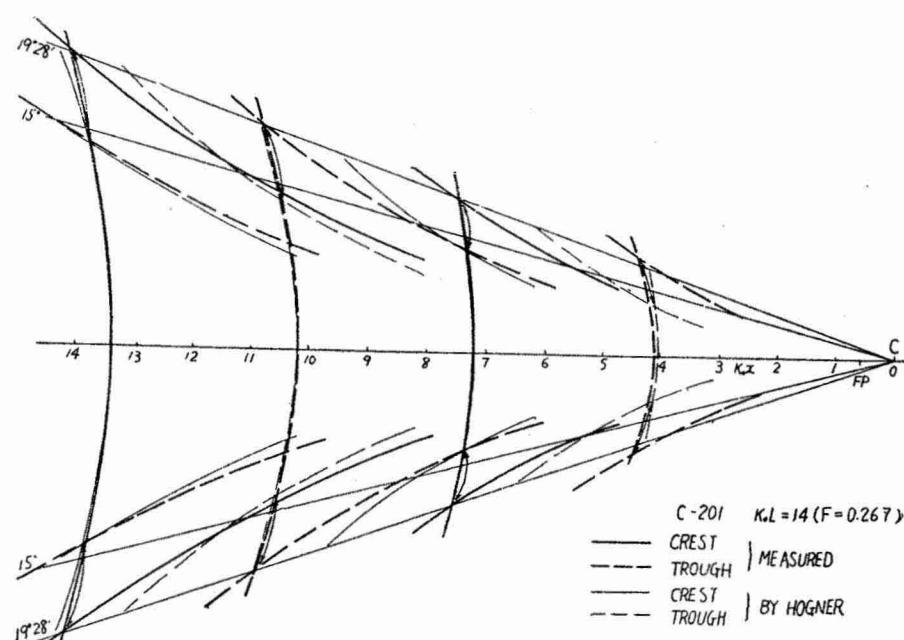
4 実測波形の解析

船型 C-201 を主船体とし、計画速度を $K_0 L = 14$ ($F = 0.267$) に選んで Waveless Bow を実現した

ものが船型 C-201 F2 である。その要目は前報第 1 表に示したが、バルブ F2 についてはこれを前報の所論に従つて流体力学的 Point Doublet として取扱つて、その中心深さ $f/L = 0.054$ 、強さは対応する球（その容積は Fairing 部分を除いたバルブの排水容積に等しい）の半径を a_0 で表わして $a_0/L = 0.033$ となる。計画速度における両者の測定波形を第 4 図と第 5 図とによつて比較すれば、一見して横波縦波を含めた全波系についてバルブによる造波干渉が有効に行なわれて、Waveless の状態が実現されていることが確認できる。

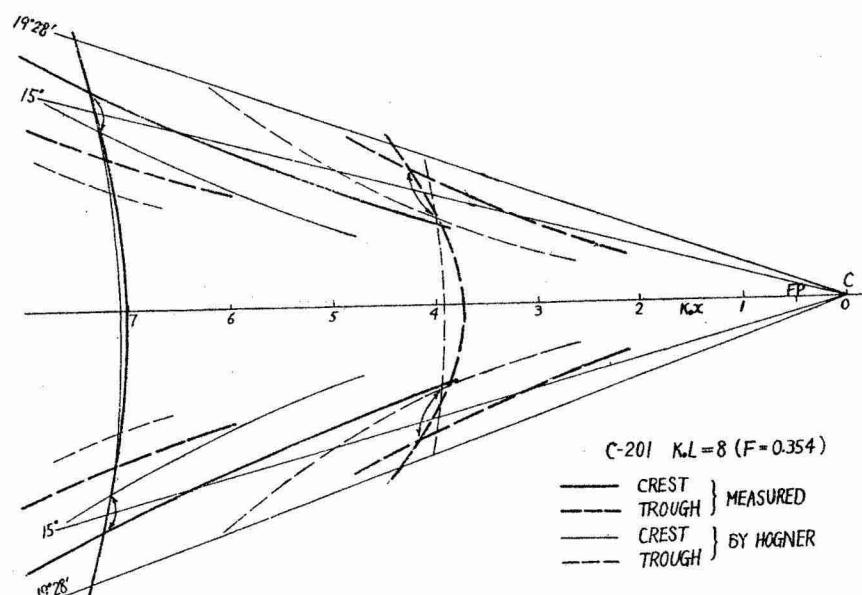


第 10 図

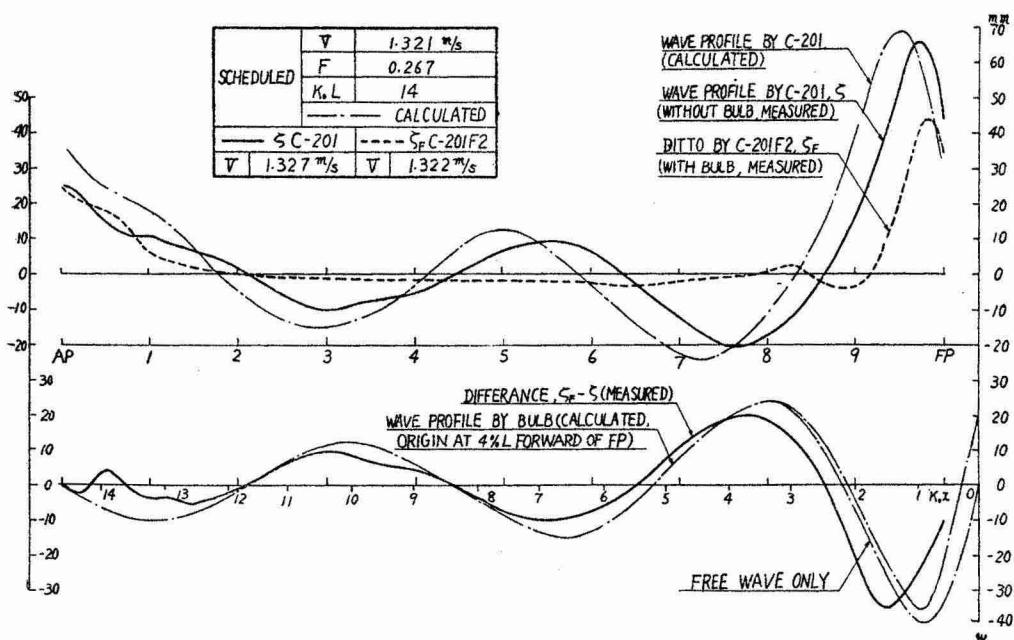


第 11 図

両者の波形を3.の解析の結果に従つてさらに仔細に比較してみる。まず第4図には実測波形についてそのWave Ridge(およびTrough)をHognerのそれにならつてトレースしてある。これをHognerの波形と比較して示したのが第11図である。この図でHogner波形は、その横波が実測波形に一致するように、起点をFP位置に置かないでその前方4%LのC点にとつてある。理論と実測の対応するCuspを矢印で指示したが、一般に実測波形では波の領域が拡がつている。しかも単に領域が広くなるというのではなく、例えばCuspの位置にみると、対応する Θ が拡がつている。これと同じことは他の速度についてもいえる。第12図は第6図について求めたWave RidgeをHognerのそれと比較したものである。ただしこの場合には起点をFP前方6%LのC点にとつた。またこの現象は単にこの船型に限られたものではなく、模型船や実船における観測の結果⁽⁷⁾についても同様な事実がみられる。理論波形の位相の後れる原因是、主に波形計算にあたつて船体表面の境界条件における波のOrbital Motionによる修正が施されていないためであり、波形の拡がりの原因とし



第12図

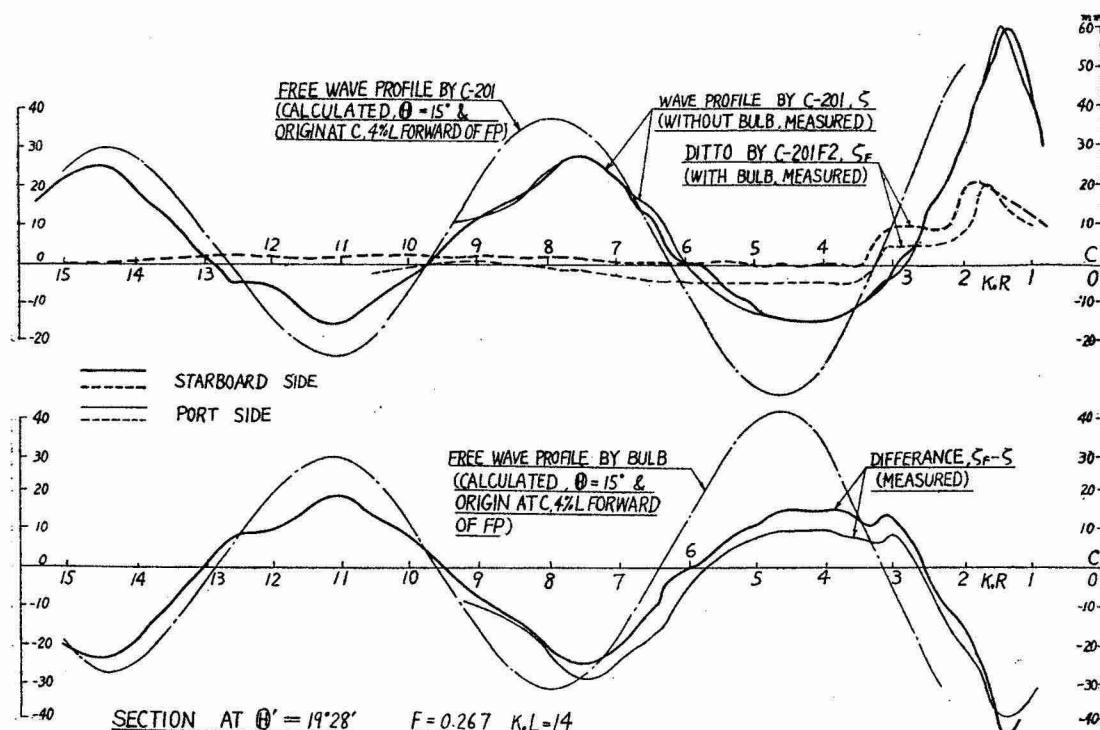


第13図

ては航走攪乱点の場合と違つて船体が排水量をもつこと、自己の造る波の伝播を妨げる自己干渉の影響(Sheltering Effect)などが挙げられる。この波形の拡がりの差は船の後方では漸近的に減少するものと考えられる。

上記のような現象が存在することを考慮して、実測波形についてバルブによる消波効果を考えるにあたつては Hogner 波形が上記の二次的影響によつて、実測波形のように位相が進み、拡げられたものとして、造波干渉を Hogner 波形の対応点において考えることとする。すなわち、例えば実測波形の Cusp においてはさきに述べた Hogner 波形の Cusp におけると同様な素成波による干渉が行なわれるものと考える。このように考えて第 5 図の Waveless Bow の波形をそれに記入した第 4 図に求めたと同じ主船体の船首波の Wave Ridge でたどつてみれば、ほとんど完全に Waveless の状態になつてゐるなかで、3. に述べた予想に正しく一致して、Hogner 波形の Cusp の内側 $\Theta = 12^\circ$ 付近に対応する実測波形の位置で、主船体と同位相の縦波が消し残されている。

さらに波高の変化を鉛直断面でみてみよう。第 13 図は計画速度におけるバルブをつけた場合とつけない場合の船側波形を比較したもので、横波は完全に消えている。図に記入した主船体の波の理論値は局部波をも含むもので、前報提出以後一部完成した波形計算用の数表によつて求めたものである。実測値が理論値に比べて約 4% L 位相が進んでいる点を除けば両者はよく一致する。図にはまたバルブの有無による波高差を求め、バルブの波の理論波形* と比較したが、両者もよく一致している。放射状鉛直面内の波高については次のようにした。船側波形および実測した全波形の Wave Ridge の模様から、原点を FP 位置にとらずにその前方 4% L の C 点にとつて断面の方向を定める。いま実測波形の Cusp を狙つて船体中心線と $\Theta' = 19^\circ 28''$ ** をなす方向(第 4 ~ 7 図にその方向を示した)の鉛直面内の波形を求めたものが第 14 図である。この図に記入した理論曲線は、既述の取



第 14 図

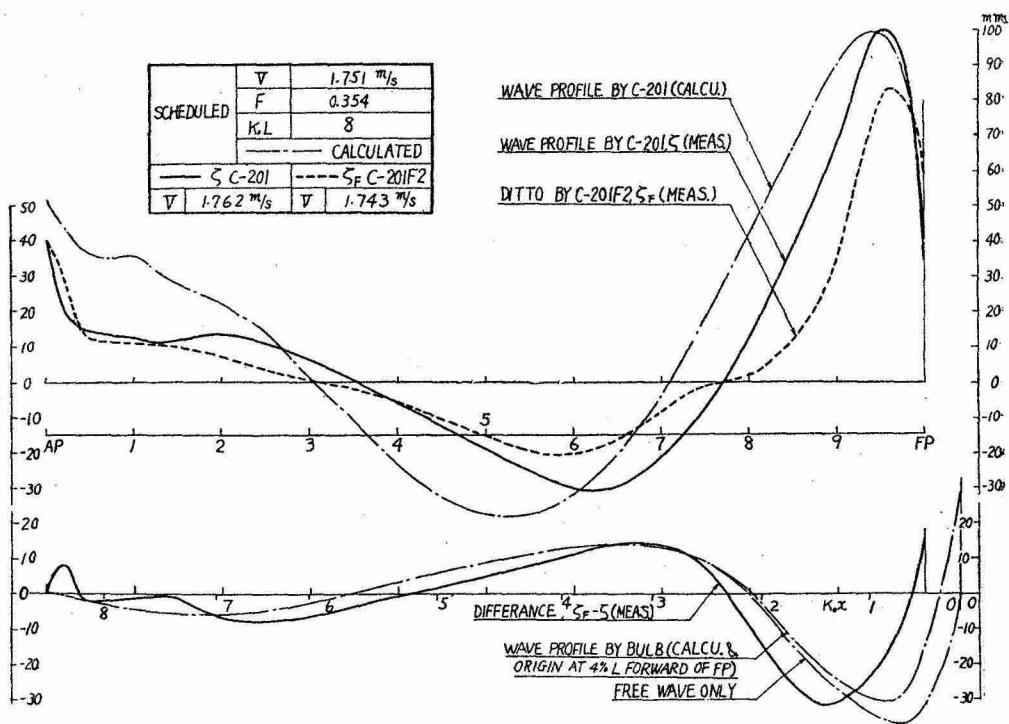
扱いに従つて、Hogner 波形の Cusp の方向を与える Θ がほぼ 15° であるから (10) 式において $\Theta = 15^\circ$ として求めた漸近波形である***。実測波形は理論値と比較して、船側の場合に比べて振幅の減少の割合がやや大きい点を除けば、両者はよく一致する。バルブの有無による波高差についても全く同じことがいえる。

同じ船型でさらに高速の $F = 0.354$ の波形第 6, 7 図においてはバルブによつて横波が打消される結果、相対

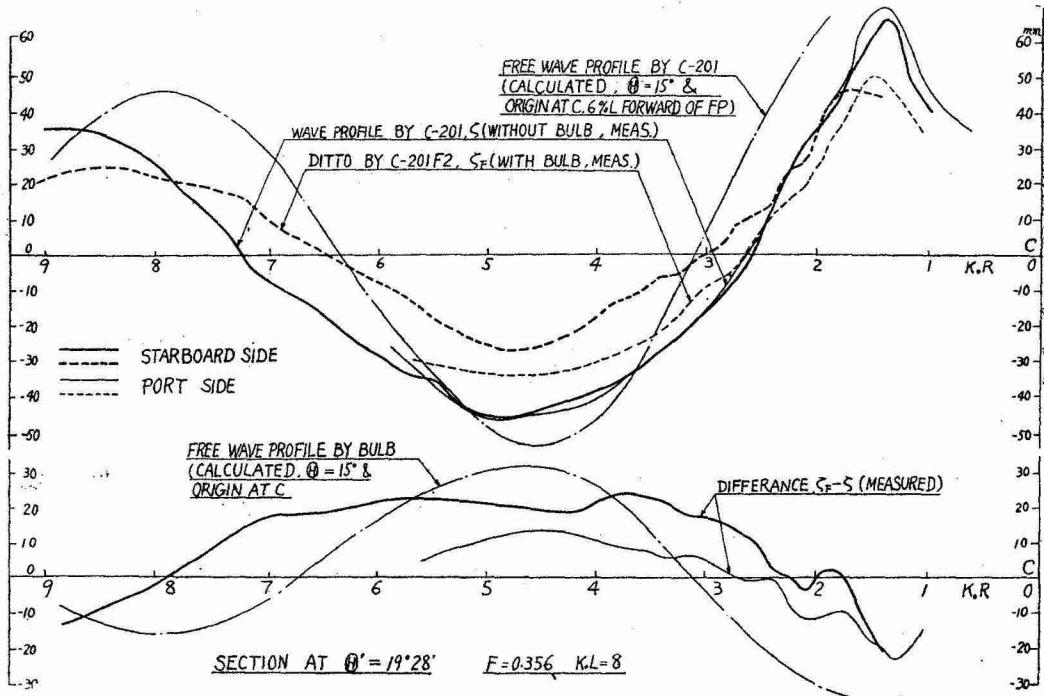
* 第 13, 14 図でバルブの理論波形の原点を FP 前方 4% L の位置にとつた。これはバルブの有効的な中心がこの位置にあると考えたからである。

** 限界角に等しくとつたが、特に物理的に意味はない。(6) 式の Θ と区別するために'を付した。

*** $\Theta = 15^\circ$ のとき $F_1 = 0.93$, $F_2 = 1.03$, $K_1 = 1.18$, $K_2 = 0.53$ となる。



第 15 図



第 16 図

的に縦波が顕著となり、第 7 図では Wave Ridge が明瞭にあらわれている。これらの図について前記と同様な処理を施したものが第 15, 16 図である。ただしこの場合は原点 C を FP 前方 6% L の位置とて方向を定めた。

以上を総合して船型 C-201F2 が計画速度 $F=0.267$ において Waveless Bow の状態となつてゐる事実が確認されるとともに、バルブによる波形の変化が、船首波とバルブの造る波の、それぞれの素成波について干渉打消しの効果を考えて得られる予想とよく一致し、バルブによる造波干涉機構を素成波の概念によつて把握することの合理性が改めて確認された。

む す び

以上 Waveless Bow の研究の第 2 の段階として、写真測量の方法によつて全波系の測定を行ない、Waveless の状態が実現されていることを確認した。

水槽試験における写真測量の方法が確立されたことは今後船体の造波現象を研究するうえに有力な方法を提供するものと考える。本研究の発端も球船首船型の水槽試験において波形分析の方法を適用して、バルブによる造波干渉の機構を明らかにすることができた処にあつた。

今回得られた波形図については造波理論の研究の対象として多くの興味ある問題を残している。今後さらにこれらの問題について研究を進めて行きたいと考える。

最後に本研究は前報に引き継ぎ東大試験水槽において乾崇夫教授の御懇篤な御指導と、水槽各位の熱心な御協力によつて完成をみたものである。写真撮影ならびにその図化については建設省国土地理院西村蹊二技官はじめ関係各位の御協力を得た。また船側波形計算用諸関数表の作製については水槽委員会造波抵抗小委員会の委員各位の御支援を得た。ここに記して厚く感謝の意を表する次第である。

文 献

- (1) 乾・高幣・熊野：球状船首の造波効果に関する水槽試験、造船協会論文集 108 号 (1960)
高幣：Waveless Bow の研究 (その 1)，同上
- (2) 乾・菊池・岩田：安息香酸塗膜による模型船 Wave Profile の測定、造船協会論文集 100 号 (1956)
乾・増永・三浦・大越：写真による船尾造波機構の観察、造船協会論文集 101 号 (1957)
- (3) 木本氏房：航空写真測量、日本林業技術協会 (昭 32)
尾崎幸男：写真測量、森北出版 (昭 34)
井島武士：海岸・港湾測量、森北出版 (昭 35)
O. Lacmman : Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf Nicht-Topographischen Gebieten, Hirzel Verlag, Leipzig (1950)
G. Weinblum, W. Block : Stereophotogrammetrische Wellen Aufnahmen, Schiffbautechn. Ges. 36 Hauptversammlung, Berlin 1935
A. Marussi : Stereophotogrammetric Apparatus for the Study of Waves generated by Ship Models, Intern. Shipb. Progress 2-15 (1955)
- (4) 熊野道雄：Waveless Stern の研究 (その 1)，造船協会論文集 108 号 (1960)
- (5) E. Hogner : A Contribution to the Theory of Ship Waves, Arkiv för M. A. och Fysik Bd. 17, No. 12 (1923~24)
無限奥水の楔状物体による波について下記文献に波模様が詳細に計算されている。
T. Jinnaka : Wave Patterns and Ship Waves; Advances in Calculations of Wave-Making Resistance of Ships, S. N. A. J. 60th Anniversary Series (1957)
楔状の物体とはいっても、神中氏の計算では波は結局その尖端の位置における擾乱によつて与えられ、したがつて有限幅の影響や、自己干渉の影響は考慮されていない。その Wave Ridge の模様は Hogner のそれと一致する。
Wave Patterns の計算としてはこの他に
T. H. Havelock : The Wave Pattern of a Doublet in a Stream, Proc. R. S. Vol. 121 (1928)
T. H. Havelock : Wave Patterns and Wave Resistance, T. I. N. A. Vol. 76 (1934)
- (6) T. Inui : Asymptotic Expansions Applied to Problems in Ship Waves and Wave-Making Resistance, Proc. 5th J. N. C. A. M. (1955)
- (7) W. Hovgaard : Diverging Waves, T. I. N. A. Vol. 51 (1909)