

(昭和 35 年 11 月 造船協会秋季講演会において講演)

球状船首の造波効果に関する水槽試験

正員 乾 崇夫* 正員 高幣哲夫**

正員 熊野道雄***

Wave Profile Measurements on the Wave-Making Characteristics of the Bulbous Bow

By Takao Inui, Member, Tetsuo Takahei, Member,
Michio Kumano, Member.

Summary

As to the wave-interference phenomena connected with the bulb there have been presented two kinds of explanations: one being theoretical, and the other practical.

Following the theoretical explanation, which is largely indebted to Havelock and Wigley, we may assume that the wave-making characteristics of the bulbous bow can be safely represented by an isolated point doublet. If admitted, this goes at once to the conclusion that the free wave patterns due to the fitted bulb can be intentionally put just in inverse phase or with strictly half wave-length difference against the main hull waves. This is nothing but the most desirable situation for us in view of promoting the maximum interfering merits of the bulb.

On the contrary, the other explanation enforces, rather practically, too much importance of the virtual increment in the wave-making length of the hull which is caused by the bulb waves. In this way, it has long been believed that the reduced wave-making resistance accompanying the bulbous bow has much to do with its increased "effective wave-making length". From this standpoint of view, it is suggested that, when any amount of bulb merit observed, the bulb waves must proceed by some intermediate fraction between $1/4 \sim 1/2$ of ship wave length against the main hull waves. This means that from the bulbous bow we can expect only an incomplete interfering merit at the best.

This report is aimed for the experimental determination of the existing conflict, mentioned above, with regard to the 'actual' phase-difference between the bulb waves and the hull waves. The wave analysis procedure is applied for the first time. The conclusion is that the theoretical treatment of the bulb which is introduced by Havelock and Wigley can be practically approved. A few remarks are also made on the two different phases of the hydrodynamical characteristics of the bulbous bow. Its corresponding system of singularities is represented by the combination of an isolated doublet with a continuous source distribution.

The former has a positive and therefore the same sense with the latter in hull form characteristics, but has a negative and therefore the reverse sense in wave-making characteristics. This is the true reason why the wavemaking resistance is sometimes reduced remarkably with the bulbous form whose displacement is larger by its bulb than the original form.

この報告は、著者らがかねてから提唱してきた波形分析を主とする新しい船型（抵抗）試験の方法¹⁾²⁾を、具体的に球船首船型の問題に適用してみた最初の報告である。今回は、そのうちのもつとも基本的なテーマ、すなわち球状船首のバルブはどのような波をつくるか、という点を中心としてしらべてみた。

原稿受付 昭和 35 年 6 月 10 日

* 東京大学工学部

** 茨城大学工学部

*** 香川大学学芸学部

1. 球船首船型におけるバルブの効用

ある船に球状船首を採用するか否かということは、単に推進抵抗の見地からばかりではなく、航路保針性が悪くなる、あるいは投錨・接岸のさいにバルブが邪魔になる、または船殻建造費が高くなる、といった各種の demerits を考えなければならない。また推進抵抗だけの問題にしても、載貨状態が常時大はばに変化する船や、波浪の影響を受けやすい航路に就航する船ではバルブのメリット計算もそれだけに複雑になつてくる。しかし以下この報告では上記のような設計上の応用問題を考える前に、喫水一定で波浪のない平水を航行する船におけるバルブの効用というものを、いま一度その根本から考え方としてみたいと思う。

さて、このバルブの効用であるが、普通は排水量一定の条件の下でバルブをつけたことによる造波抵抗減少の割合から判定される*。このような比較の方法は設計者にとって実際的ではあるけれども、バルブの直接的効用と間接的効用とが混ざつた総合効果だけが出てきて、この両者を分離することができないという欠点がある。ここにバルブの直接的効用とは、バルブ自体の造る波によつて船の波との間におこる造波干渉、およびその直接的効果としてもたらされる造波抵抗の減少を意味し、バルブの間接的効用とは、排水量一定の条件という制約のために、バルブをつけることにより必然的にもたらされる主船体造波特性の変化、すなわちバルブの排水量に相当する分だけ主船体の排水量が前後および上下方向に移動するため主船体自身の造波抵抗がある程度変化することの副次的影響を意味する。

球船首船型について行なわれた在来の水槽試験を上に述べた意味の比較法によつて分類すると次の種類に分けられる。その第1は上述の、排水量一定でかつ喫水も一定、すなわちバルブの大きさの変化に応じて主船体の形状を変化せしめる場合であつて、有名な Taylor³⁾ の系統的試験もこの方法によつている。この場合、模型はひとつひとつ別のものとして、はじめから比較すべき数だけ独立に作つておく必要がある。これに対して模型の数は1つで、主船体の形状は変えず、バルブをその大きい方から順に削り落して次々と実験して行く方法がある。ただし、この場合にも実験状態を前と同様に排水量一定（従つて実験喫水はバルブの排水量分だけ減らす）で行なう方法と、逆に実験喫水を一定（従つて実験排水量はバルブの排水量だけます）にして比較する方法がある。山県博士⁴⁾ が大型高速客船について行なつた実験、あるいは Dillon-Lewis⁵⁾ の論文の付録に出ている同種船型についての補足実験が前者に属し、Wigley⁶⁾、Weinblum⁷⁾ らの数式的船型についての実験の全部、および Lindblad⁸⁾⁹⁾ の高速双螺旋船型に関する実験の一部や、運研推進部¹⁰⁾ で行なわれた大型油槽船と高速貨物船に関する実験の一部は後者に属する。

球船首船型の問題ではバルブの直接的効用がどの程度のものであるかを見きわめることができ大切であるが、この点をなるべく正確にしらべる目的に対しては上記3種の実験のうち第3の方法がもつともよく、ついで第2、第1の順になる。ところが在来の資料の内訳は第1の種類に属するもの¹¹⁾が大部分を占め、第2あるいは第3の種類に属するものとしては上掲の資料が現在発表されているもののすべてであつてその数は非常に少ない。

しかし少ないながらもこれらの実験例や Wigley と Weinblum が造波抵抗減少量について行なつた理論計算の結果から判断して、バルブの直接的効用が確かに存在する、という点は現在のところまで認められているとしてよいであろう。しかし、それらがいかなる機構によつてもたらされているか、という点になると從来の研究者の関心が実験・理論ともにひたすら船の抵抗という最後の結果のみに偏重されていたために、本当のところはよく判つていない。この点を明らかにするためには船の波をよくみると、それも肉眼で観察される波をそのままうのみにするのではなくて、これから造波抵抗に関係のない局部波を差引いた残りの自由波成分について注意深くしらべるということ（以下この操作を簡単に波形分析と称する）がどうしても必要になつてくる。しかしそれはそれとして、現在上記バルブによる造波干渉の機構を一般にどのように見ているかというと大体次の2種類の考え方を行なわれている。

その第1は実験船型学を背景とする経験論的な考え方で、バルブの波は船の波よりも位相が進んでいる、したがつて両者干渉の結果、船首波の位置が全体として前方にズレ、その結果船の有効造波長さがまし、これによつて造波抵抗が減ると考える¹²⁾。この説はいかにももつともらしく聞こえるし、また事実、模型船の船側波形をとくに第1の波の山に着目して観察すると、見掛け上はこの説の通りになつてゐる、というようなことがあつて現

* 一般にバルブをつけると浸水面積が僅か（普通1%以内）増し、またときには形状影響係数が増すこともある。ただしここでは簡単に粘性抵抗は変わらないと仮定する。

在でも非常に広く用いられている。

これに対して第2の考え方は理論船型学を背景とする観念論的な考え方で、バルブ→球体→point doublet という類推から、バルブの波は point doublet の波と等価であるということを実験的な確証もないままに、あたまから仮定してかかるやり方である¹³⁾。このような仮定は船体が非常に fine で、これを代表する特異点分布の影響が無視できるほど小さい場合には許されるかもしれないが、最近のタンカーのごとき超肥大船型に採用されるバルブの場合などにおいてはバルブから主船体への流線の移行が極めて連続的であつて、上記のような単純な仮定がそのまま当てはまるか否か、十分疑つてみてよいところであろう。

2. バルブの波の位相差

バルブの波による造波干渉がもつとも効果を上げるために船の波*に対するバルブの波の位相的な条件と、振幅的な条件がある。いまこれを簡単な2次元正弦波の問題に直して干渉効果最大の条件を求めてみると付録1に示す通りになる。実際に見られる波は船もバルブとともに3次元的な波であり、かつこの他に両者の局部波が重なつて非常に複雑になつてくるが、しかしながらここに示された結論はほとんどそのまま適用できる。すなわち干渉を利用する見地からは、振幅よりもまず位相差の方が大切であつて、両者の位相差を $1/2$ 波長差つまり逆位相の関係にもつてくることがもつとも望ましく、万一それが不可能な場合には、極力これに近い位相差にまでつてくることが先決問題である。

さてこの位相差の見地からみて、前節の最後に掲げたバルブの造波干渉に関する経験論・観念論がどのような関係にあるかを調べてみよう。

まず経験論の方では船の有効造波長さが延びるという見掛けの観測事実に重点をおき、造波抵抗が減ることがあるのはすべてこのためであるとしている。したがつて、もしもこの説のどこにも誤りがないものとすれば、バルブの波は船の波と逆位相の関係には絶対に立ちえないという帰結になる*。つまりバルブの波が船の波に対して進んでいる位相差の程度は $1/2$ 波長ほど大きなものではなく、それ以下、おそらくは $1/4 \sim 1/2$ 波長の中間にくるであろうというのが経験論を前提とした位相差に関する予想である。

これに対して観念論の方はどうかというと、もしその主張がそのまま正しいものとすれば、付録2に示す通りの経緯によつて、造波干渉上もつとも望ましいところの逆位相の関係が現実に成立していてもなんらの不思議はないということになる。さて、このいづれが真相に近いであろうか。理論的には観念論の方に歩があるように思われるが、一方これにも前節に触れた超肥大船型のバルブについての疑問があるし、さらにもしその通り逆位相が成立するのならば、バルブの最適大きさやバルブによる造波干渉の効果は付録1, 2の結論から考えてみて、従来いわれているよりも遙かに大きくなつてもよいはずであるのに、それらが存外低い値に止つているということは、反面逆位相の可能性を裏から否定している材料のようにもうけとれる。以上結論として、経験論にも観念論にも肯定・否定両面の材料があつていづれが真に近いかはにわかに即断できない。つまり当面の問題を整理してみれば、バルブの波が船の波に対して進んでいる位相差の量は $1/4 \sim 1/2$ 波長の間にくるか、あるいは $1/2$ 波長なのかということであり、これを流体力学的な表現で言い換えれば、バルブの造波効果は純粹の doublet 的な要素のほかに source 的な要素が混在しているものなのか、あるいは単純に doublet そのものに近いのかということである。

3. 供 試 船 型

原型として第1表にその主要寸法を示す大型油槽船を選び、模型は木製 $1/125.2$ (約 1.6 m)、バルブの大きさは第2表に示す通り4種とした。この模型は S.S. $9\frac{1}{4}$ の位置で前後に2分され、後部本体1コに対し4コの船首部が自由に差し換えできるようになつてゐる。第1～2図にその正面線図と船首部の写真とを示す。実験は船側波形測定実験と抵抗試験の2種類を行なつたが、とくに前者の波

Table 1—Principal Dimensions of
Original Form
(Full Tanker)

Dimensions	Ship	Model
L_{pp}	200.00 m	1.5975 m
B	28.68 m	0.2290 m
T	10.66 m	0.0851 m
C_b	0.800	0.800

* 正確にはその自由波成分。以下同様。

** なぜならば、逆位相の場合には合成された波の位相は合成前の波の位相と変らず、振幅だけが両者の差になるはずであるから。

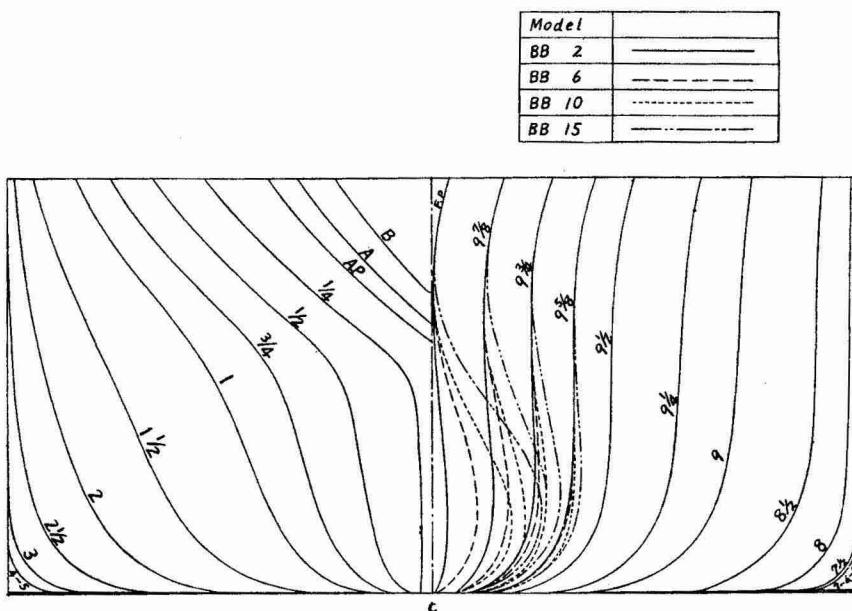
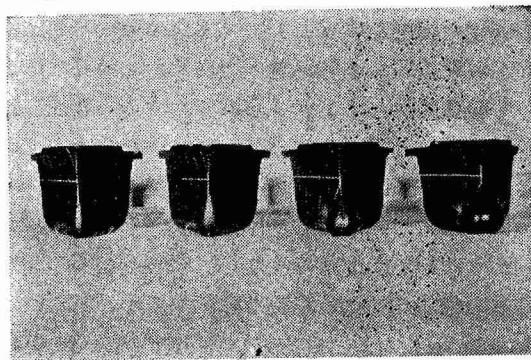


Fig. 1-Body Plans For Tested Model Series

Table 2-Particulars for Series Models with Bulbs

Model No.	Proj. Area f	L_{WL}	T	B	A	$\delta A/A$	$(2) S$	$\delta S/S$	I_{cb}	Trim	C_b
BB 2	2%	1.630 m	0.0851 m	0.2290 m	24.897 kg	0%	0.5430 m ²	0%	-1.90%	0	0.800
BB 6	6	1.630	0.0851	0.2290	24.916	0.156	0.5433	0.06	-1.93	0	0.801
BB 10	10	1.630	0.0851	0.2290	24.946	0.269	0.5492	1.14	-1.99	0	0.802
BB 15	15	1.630	0.0851	0.2290	24.978	0.325	0.5500	1.29	-2.05	0	0.803

(1) $f = A_f/A_m$, where A_f =sectional area at F.P., A_m =midship-sectional area.(2) S =wetted surfaceFig. 2-Bulb Series (from left to right:
Model BB2, BB6, BB10, & BB15)

形分析に重点をおいた今回の実験は、もつとも基礎的な問題として、バルブの波の直接的影響をなるべく純粋な形でみるのが目的であるから、両実験ともさきに述べた3種類の比較方法のうち、上記の目的にもつとも適した第3の、喫水一定法を採用した。

4. 船側波形測定実験並びに波形分析

バルブの波の性質を全面的にしらべる目的に対しては、transverse wave のほかに diverging wave をも測定する必要があるが、さし当りいまは位相の点だけをまず明らかにしたいので、測定の容易な船側波形のみを安息香酸法によ

つて調べることにした。そのねらいはバルブの大小による波形差曲線を求め、これが流体力学的に doublet の波に近いか、あるいはこのほかに source 的な成分がいくらか加わっているかを、それらの理論波形と比較した上で決定しようというのである。このためにはあらかじめ理論波形曲線を計算すべき速力を何点か選定しておき、実験の方は4隻ともピッタリこれと同じ速力で航走しなければならない。なぜならば波形曲線は速度が異なれば波の位相も振幅も複雑に変化して、速度による補正が困難だからである。たとえば位相に関係する波長の方は、これが速度の自乗に比例することは判っているが、船首波のほかに前肩波など、起点を異にする波が合成されている場合、両成分の正確な分離ができない限り、波長誤差による位相の修正は不可能となる。また速度と波高との関係は波長の場合以上に複雑である。結論として、実測波形曲線は許容速度誤差範囲内での航走に成功した場合のもののみを採用するのが無難であつて、この場合の許容速度誤差としては0.5%以内がもつとも望ましく、0.5~1.0%までは不満足ながら一応採用でき、1.0%以上の速度誤差は極力これを避ける必要がある。今回選定した速力は第3表に示す通り6種であり、従つて最終的に採用された実測波形曲線の数 $4 \times 6 = 24$ である

球状船首の造波効果に関する水槽試験

43

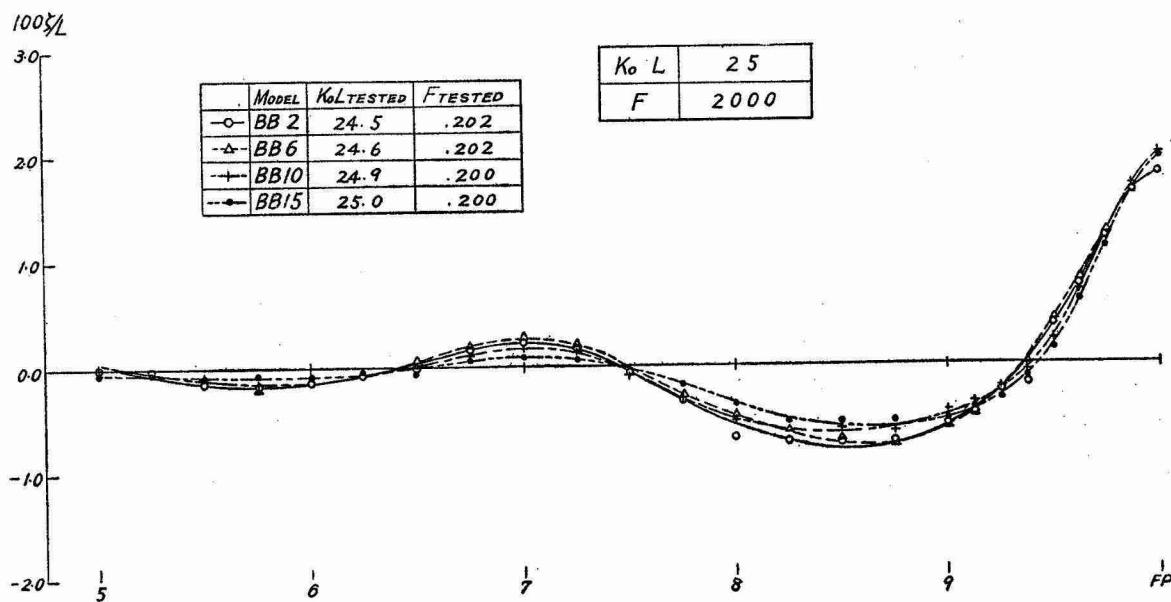
が、実際はこれに倍する回数以上の無駄走りを行なつてゐる。今回は他の目的もあつて波形測定を写真撮影によらず、非常に手数のかかるchemical film 法を用いたために、上記のために費した無駄は精神的にも労力・時間の点からも大変なものであつた。今後の船型試験、とくに東大水槽のように基礎的研究をその使命とする水槽での実験が、今回行なつた波形分析実験のように模型船周辺におこる物理現象を細かにしらべて行く方向に向つて行くことは必至と考えられるので、現在経費の点だけで行き悩んでいる自動速度制御装置は一刻も早くこれを完成させる必要があるものと考える。なお採用された 24 回の航走のうち速度誤差 0.5% 以下のもの 12 回、0.5~1.0% のもの 8 回、1.0~1.5% のもの 4 回となつてゐる。

実験方法はあらかじめ抵抗試験のさいに各速度における航走時の模型船平均沈下量とトリムとを求めておき、トリムは小さいのでこれを無視して、平均沈下量だけを合わせて模型船固定の状態で航走する。その他の詳細は既報¹⁴⁾の通りであつて、かくして求めた模型船表面上の波形残像を模型の実物について、静水面を基準にして girth に沿つて読みとり、これに girth の勾配の修正を施して鉛直成分に直した水面上昇量をととする。このようにして上記 24 種の航走点に対し模型船全長にわたる波形曲線がまず求められる。ついでこれを各速力ごとに 4 隻ずつかさねてみる。第 3 図は速力 $F=0.2000$ ($K_0 L=25$) に対するその 1 例である。これをみるとバルブ

Table 3-Model & Corresponding Ship Speeds for Wave Profile Measurements

No.	Model	Model & Ship		Ship
	$V(\text{m/s})$	$K_0 L (=1/F^2)^*$	$F (=V/\sqrt{Lg})$	$V_s(\text{kn})$
1	0.730	30	0.1826	15.87
2	0.799	25	0.2000	15.39
3	0.850	22	0.2132	18.53
4	0.894	20	0.2236	19.44
5	0.942	18	0.2457	20.49
6	0.999	16	0.2500	21.73

$$* K_0 L = gL/V^2 = 2\pi L/\lambda_0 \quad (\lambda_0 = \text{wave length})$$

Fig. 3-Observed Wave Profiles ($F=0.2000$; $K_0 L=25$)

が大きくなるにつれて船首波の第 1 の山はやや高く、かつやや前方に寄り、それより後方の、船首局部波の影響が小さいところでは、波の振幅はバルブの大きいほど逆に漸減している。またこの傾向は他の速力についても全く同様である。

つぎにバルブ最小の場合（模型 BB 2）を基準にして、他の 3 隻の模型の波形とこれとの差、つまり波形差曲線を求めてみる。第 4 図はこのうちのバルブ最大（模型 BB 15）のものについて求めた波形差曲線であつて、これが大体においてバルブの造る波をそのまま現わしているとみて差し支えない。ただしこれはバルブの波のいわゆる総合波であつて、このなかには自由波成分のほかに造波干渉に関係のない局部波も含まれている。そこで理論の方でも局部波をも含めた理論波形を没水せる point doublet および同じく point source について計算してみて、これを上記実測波形差曲線の上にかさねて、どちらが近いかを比較してみる。その結果は、やや予想に反して、本船型のごとき超肥大船型においても、なおかつバルブの波は単純に doublet の波で置き換えて実用上

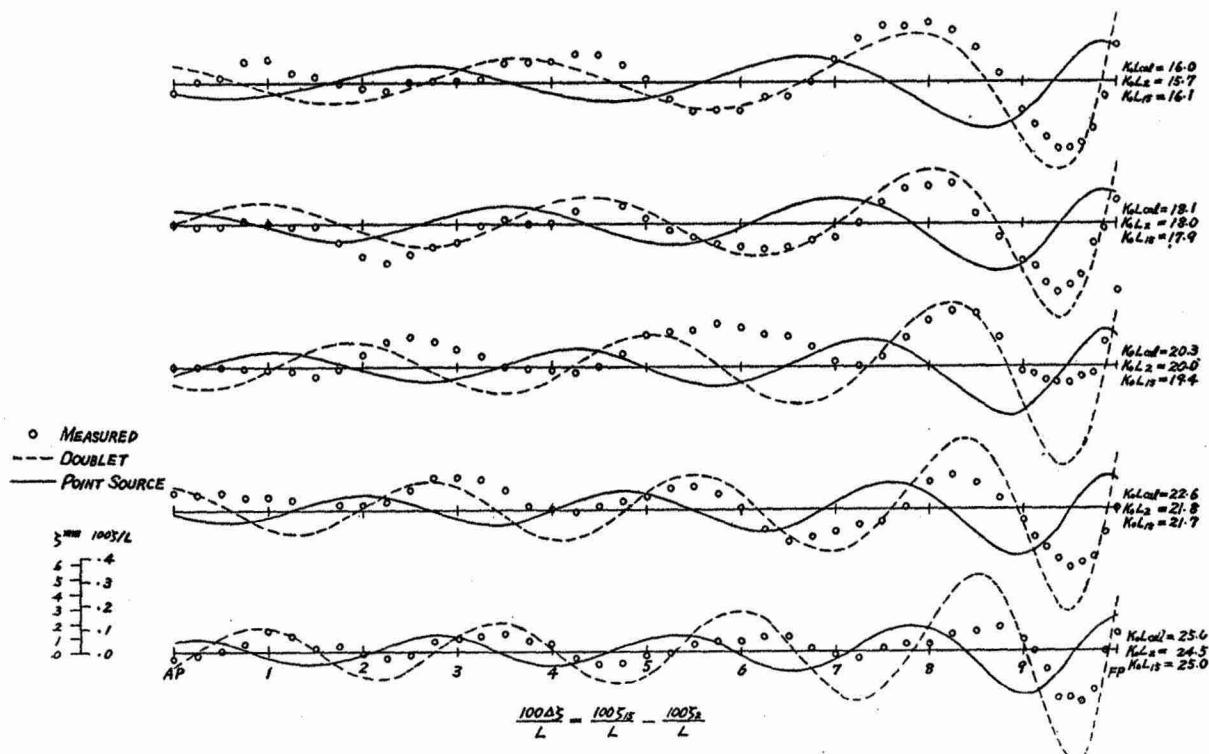


Fig. 4-Differential Wave Profiles

差し支えないという結論になるようである。また経験論でいう、船の有効造波長さが延びるという説は、doublet の波の局部波が船首局部波とたまたま同じ F.P. の位置に尖点をもつため、その影響で船首波の第 1 の山が前方に進んで見える、いわば皮相的観察の結果とみてよいようである。

以上今回の波形分析の結果は、形の上では単に従来からいわれていた観念論での仮定が正しいことを、事実によつて示したに過ぎないが、しかしこれを調べる過程において、バルブによつて、船の波とちようど逆位相の波を現実に造ることが可能である、という認識を新たにすることができた点は、船型学上の大きな収穫と考えられる*。なおついでに、バルブの波の大きさについて一言すれば、前掲第 4 図中の doublet の理論波形の振幅は模型 BB 15 と BB 2 とのバルブ排水容積の差に等しい球体（中心の没水深度 $f/L = 0.04$ 、その前後位置は前部垂線に一致）について計算したものであつて、このような簡単な考え方で位相のみならず振幅までもがかなり実際の結果と一致している点は興味深い。しかし今回は使用した模型も小さく、また選んだ船型もかなり複雑かつ肥大な実用船型**であるから、これ以上の定量的分析は差控えて、他の機会にあらためてこれを取上げることとした。

5. 抵抗試験

抵抗試験は模型が小さく、かつ実験フルード数が低いので細心の注意を払つて行なつた。まずはじめに乱流促進法を施さない状態で $F=0.10 \sim 0.27$ の範囲の抵抗測定を行ない、次に S.S. $9\frac{1}{2}$ の位置に高さ 1.0 mm、水流方向に対する幅 2.3 mm の plate studs を約 5 mm の間隔で 1 列に植えた状態で抵抗実験を繰返した。その結果えられた合計 8 コの全抵抗係数曲線は割愛するが、両方の差から非促進の場合には明らかに層流影響が見られ、かつその程度はバルブが小さいほど著しいことが判る。これはおそらくバルブ自体が、不完全ながらある程度の乱流促進効果をもつためと想像される。なおこのことは前節に述べた船側波形測定実験のさいに、同時に求められた残存層流域の広さからもはつきりと認められた¹⁵⁾。検力計としては測定全抵抗が 0.040～0.300 kg の範囲に限られており全体として非常に低いので、かつて伴流測定あるいは微小抵抗測定用に特別に用意してお

* これから直ちに waveless hull form の可能性が実証される経緯については高島、熊野の各論文参照のこと。

** 今回は船型が複雑であつたために主船体の波の波形分析（局部波と自由波との分離）をやつていないが、バルブによつて完全に逆位相の条件を実現させるためにはこれはどうしても必要である。

球状船首の造波効果に関する水槽試験

た高感度磁歪式検力計を使用し、曳行用ガイドも摩擦のもつとも少ない単式ガイドを用いた。抵抗試験結果の解析法としては上述の促進状態の結果をそのまま採用し、これから $C_f = (1+K)C_{f0}$ を差引いて残りを造波抵抗係数曲線 $C_w' = R_w/1/2 \rho V^2 D^{2/3}$ の形に現わしたのが第5図である。ただし C_{f0} には Hughes' Line (1954) を、また形状影響係数としては低 F 数域の造波抵抗の趨勢を理論的に考察しつつ4隻とも一律に $K=0.33$ を採用した*。第5図は使用模型が小さいために細かな議論をする目的に対しては多少信頼度が不足しているかと考え

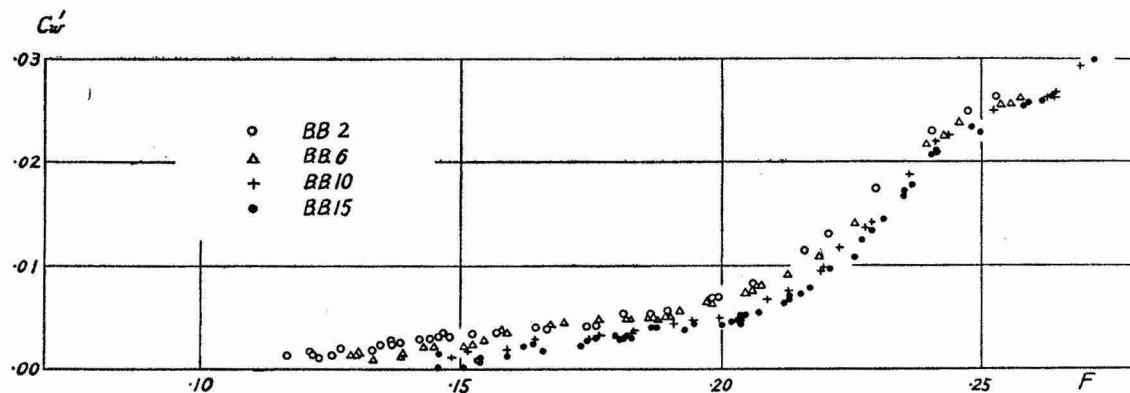


Fig. 5 Wave-Making Resistance Coefficient with One Row of Studs

られるが、バルブの直接的効果が造波抵抗の上で、最終的にどの程度に現われるかを前節の波形分析結果と組合せながら考察する目的に対しては十分価値のある資料とみてよい。この図から判ることはこの程度の低速肥大船型に対して、この程度の大きさのバルブをつけた場合には、 $F=0.25$ 以下の全速度域にわたってバルブをつけることにより造波抵抗が減少すること、およびその差はバルブが大きいほど著しいということである。このことは前節の波形分析の結果、バルブの波が船首波に対しほぼ逆位相に近いことが明らかにされた以上、これと付録3の考察とを組合わせて、当然予想されていたことでもある。なお第5図をよく見るとバルブの小さい方の2隻 (BB 2, BB 6) と大きい方の2隻 (BB 10, BB 15) とがそれぞれ別のグループになつているように思われる。

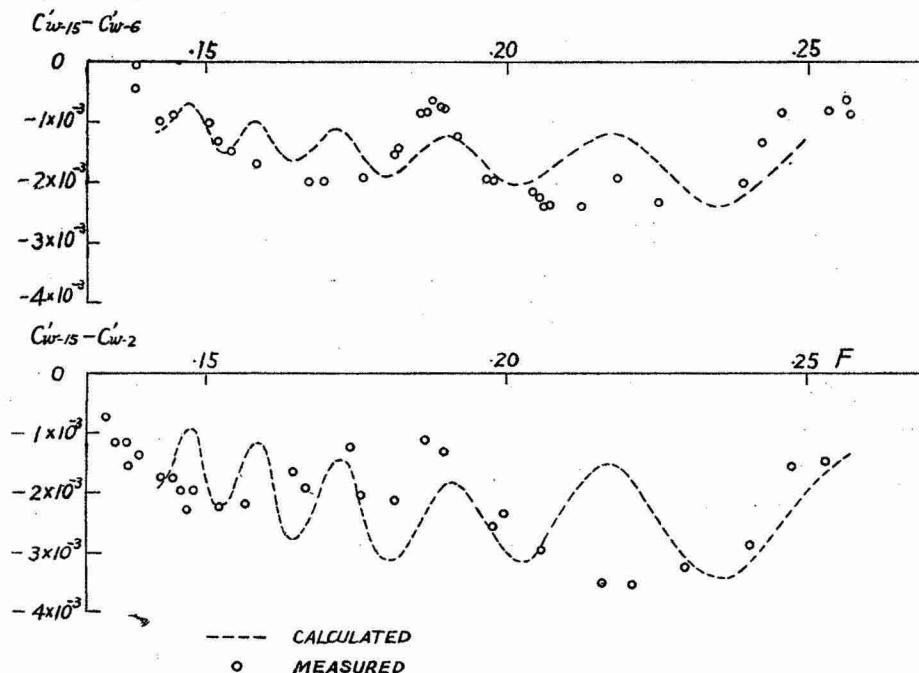


Fig. 6-Difference of Wave-Making Resistance

これはバルブの形状がこの2つのグループの間で明瞭な差があるためと考えられる。最後に造波抵抗の理論的計算を付録3ないし付録4の方法で行えば、第5図の実験結果との比較ができる。第6図は第5図から模型BB 15

* K の値はバルブが大きいほど多少大きくなるのではないかと予想したが、今回の結果からは差が出なかつた。

と BB 2, および BB 15 と BB 6 との造波抵抗の差を付録 4 の近似理論計算結果と比較したものであつて、大きさ・傾向ともにかなりよく一致している。ただしここで実験値の差をとる場合に、BB 2 のみならず BB 6 をも基準にとつてみたのは、BB 2 の $F \approx 0.22$ のあたりの実験点が僅か 2 ヶしかなく、その信頼性に多少の疑問があつたからである。

6. 球船首船型の造波特性と横截面積曲線

今回の波形分析の結果から、球船首船型の造波特性が普通型船型のそれと著しく異なる点が明らかになつた。いまその主なる点を要約すれば次のとくである。

まず普通型船型では、一般にこれをある連続的な 1 ヶの特異点分布系で表わすことができる。各特異点からその後方に無数の自由波素子が拡がり、それらは船の長さ方向に積分されて、この系全体としての造波効果は最終的に船首波と船尾波の 2 ヶ、またはせいぜいこれに前肩波と後肩波とが加わつた合計 4 ヶの可視的波系に集約されてくる。

これに対して球船首船型の場合には、上記のような連続的特異点分布系のほかに孤立せる point doublet (またはこれを若干変形したもの) が重なつた、ひとつの複合系として認識することができる。しかも、この複合の在り方が、船体形状や排水量の上からは相加的・加算的な常識的複合である反面、造波効果の上では（とくに船首波と船尾波について）正負相反の相殺的・減算的な複合になつてゐるところがはなはだ興味深く、かつ重要な点である。

球船首船型についての従来の認識は Wigley, Weinblum らのいわゆる理論家を含めてこの大切な点をすべて看過していると断言して誤りではないようである。そのためか、球船首船型に関する在来の水槽試験資料を調べてみると、バルブ本来の特長やメリットが未だそこには十分に發揮されていないと思われるふしが多々ある。

最後に、上記の認識の問題に関連して、球船首船型の設計をする場合に、普通型船型と全く同じような“連続的”あるいは“相加的”意識、つまりは常識通りの考え方で対処することの危険性を指摘しておきたい。例え Taylor 以来横截面積曲線の形状要素* によって直接に球船首船型の造波特性を代表せしめようとする方法が採られているけれども、この場合、出発点となつてゐる横截面積曲線は相加的なプロセスをへて出てきた具象であり、一方求めようとする造波特性は途中に相殺的な要因を含んでゐる抽象であるから、この両者を直接に結びつけることは一般に考えられているほど容易な問題ではない。本来は当然両者の中間に前記複合特異点分布系をおき、それを介してはじめて両者の関係が正しく把握されるものとみるべきであろう。

む　　す　　び

以上、波形分析の方法を適用して、従来皮相的あるいは観念的な説明しか与えられていなかつたバルブによる造波干渉の機構を、はじめてその根底から明らかにすることができた。またそれから出發して、球船首船型についての新しい認識が生まれ、これはただちに船型学上多年の夢である “Waveless Hull Form” の構想にもつながることを指摘した。

終りに本研究は昭和 33 年度文部省科学研究費によつたこと、および模型製作や供試船型の選定にあたつては浦賀船渠株式会社造船設計部の御支援を得たこと、また実験および波形計算については東大船舶工学科の卒業論文として滝沢 峴・関根三馨両工学士の熱心な協力を得たことを付記する。

また著者らが本研究を着手するに至つたそもそもの動機には恩師山県昌夫先生および渡瀬正磨先生の御懇意と御激励とがあつたことを特記して、ここに厚く御礼申し上げる次第である。
(以上)

文　　獻

- 1) T. Inui : Asymptotic Expansions Applied to Problem in Ship Waves and Wave-Making Resistance, Proc. 5 th Japan Nat. Congr. App. Mech. (1955)
- 2) 乾 崇夫 : 統・眼で見る船型試験の話, 船舶 (昭 32/1 月)
- 3) D. W. Taylor : The Speed and Power of Ships, (Washington 1943)
- 4) 山県昌夫 : 船型学 (抵抗篇), 天然社 (昭 28)

* いわゆる面積係数 f と接線係数 t_0 。

- 5) E. S. Dillon, E. V. Lewis : Ships with Bulbous Bow in Smooth Water and in Waves, TSNAME (1955)
- 6) W. C. S. Wigley : The Theory of the Bulbous Bow and its Practical Application, TN-EIS (1935/36)
- 7) G. Weinblum : Die Theorie der Wulstschiffe, Schiffbau (1935)
- 8) A. Lindblad : Experiments with Bulbous Bows, Publications of the Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, No. 3 (1944)
- 9) A. Lindblad : Further Experiments with Bulbous Bows, Publications of the Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, No. 8 (1948)
- 10) 横尾, 森山, 大橋 : 単螺旋大型油槽船と単螺旋高速貨物船の球状船首が推進性能におよぼす影響についての水槽試験, 運輸技術研究所研究発表会講演概要 (昭 32/11 月)
- 11) 前掲 (3), (5), (8), (9), (10) のほかに例えば下記のようなものがある。
- E. M. Bragg : Results of Experiments upon Bulbous Bow, TSNAME (1930)
- 日本造船研究協会第 41 研究部会 (超大型船の運航性能に関する研究) 船型試験資料 (昭 33~) (三菱造船 K. K. 船型試験場と運研推進部とで行われた大型油槽船に関する各種系統的試験)
- なおこのほかに戦前旧海軍技術研究所において戦艦大和級の設計に関連して 40 隻余の大規模な系統試験が行われている (未公表)。
- 12) 例えれば前掲 (6) の序文および下記参照。
- 谷口中 : 大型タンカーに関する 2, 3 の問題, 船舶 (昭 33/1 月)
- 13) 前掲 (6) および下記参照。
- T. H. Havelok : The Wave Patterns of a Doublet in a Stream, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 121 (1928)
- 14) 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 (昭 31/11 月)
- 15) 関根・滝沢 : 昭 34/3 月東大船舶工学科卒業論文 (別冊一写真記録集)
- 16) T. H. Havelock : Ship Waves : Their Variation with Certain Systematic Changes of Form, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 136 (1932)
- 17) T. H. Havelock : The Calculation of Wave Resistance, Proc. Roy. Soc. A. Vol. 144 (1934)
- 18) W. C. S. Wigley : L'état actuel des Calculs de Résistance de Vagues, ATMA (1949), p. 6 の Tableau de I₁, 同じ表は下記にも出ている。
- W. C. S. Wigley : A Note on the Use of Tables of a Certain Integral in connection with Wave-Making Calculations, TINA (1949) p. 378
- 19) Reference Number Ma/16/1502, Mathematics Division, National Physical Laboratory
- 20) T. H. Havelock : Wave Patterns and Wave Resistance, TINA (1934)
- 21) 乾 崇夫 : 造波抵抗理論ノート (2), 船舶 (昭 24/7 月)
- 22) 乾 崇夫 : 造波抵抗の成分について, 造船協会々報 77 号 (昭 21/5 月)
- 23) 乾・岩田・沈 : 造波抵抗のハンプ・ホールについて, 造船協会論文集 97 号 (昭 30/5 月)

付録 1:2 次元正弦波の干渉 第 A-1 図に示すごとく, 与えられた正弦波 $y_1 = A \sin kx$ に対し, 位相が δ だけ進んでいる他の正弦波 $y_2 = B \sin(kx + \delta)$ が重なつた場合の波消しの効果を, 振幅比 B/A および位相差 δ の函数として考えてみる。いま合成波の振幅 C , その A 波に対する位相差を ϵ とすれば,

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 = A \sin kx + B \sin(kx + \delta) = (A + B \cos \delta) \sin kx + B \sin \delta \cdot \cos kx \\ &= C \sin(kx + \epsilon), \end{aligned}$$

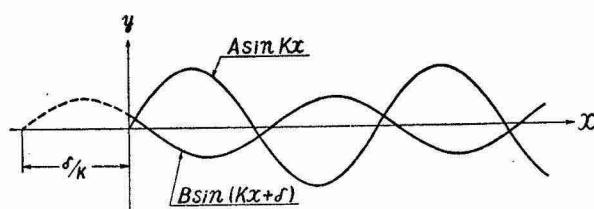


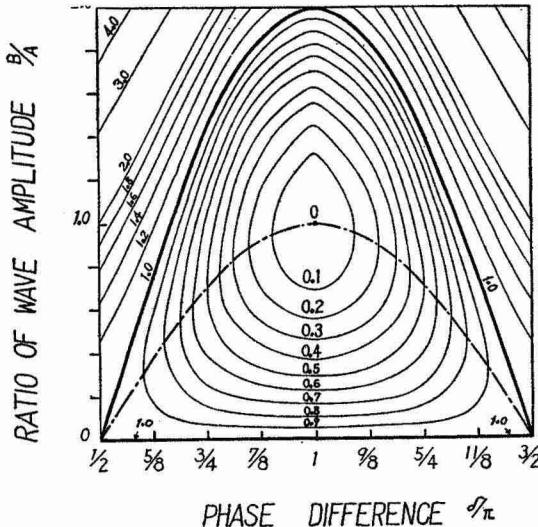
Fig. A-1

ただし

$$\tan \epsilon = -\frac{B \sin \delta}{A + B \cos \delta}$$

$$C^2 = (A + B \cos \delta)^2 + B^2 \sin^2 \delta = A^2 + 2AB \cos \delta + B^2$$

$$= (B + A \cos \delta)^2 + A^2 \sin^2 \delta, \quad (1.1)$$

Fig. A-2-Contours for Square of Resultant Amplitude in C^2/A^2

行くこと、およびこれと同時に振幅比 B/A を 1 にまで高めることの必要性が定量的に把握できる。また位相差が $1/2$ 波長差から外れるときには、(b) に示すごく波消しの効果は急速に悪くなり、かつその条件 ($\delta \neq \pi$) の下での最適振幅比 (図中鎖線で示す) は 1 よりも小さくなつて行くことがわかる。

付録 2 進行する Point Source, Point Doublet および Continuous Source Distribution による波¹⁶⁾¹⁷⁾

(2-A) 進行する Point Source による波 進行方向を第 A-1 図と同様 x 軸の負の方向にとる。

$$\zeta_s(x, y) = \zeta_{ws}(x, y) + \zeta_{ls}(x, y), \quad (2.1)$$

ただし添字 w , l はそれぞれ後続自由波 (free wave patterns) および局部擾乱波 (local disturbance) を表わす。造波抵抗に関係のあるのは前者のみである。

$$\zeta_{ws}(x, y) \sim \frac{m K_0}{\pi V} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sec^3 \theta \cdot \exp(-K_0 f \sec^2 \theta) \cdot \cos(K_0 p \sec^2 \theta) d\theta, \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ただし } p &= x \cos \theta + y \sin \theta, \\ K_0 &= g/V^2, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

ここに m は Source の強さ (単位時間流量), V は進行速力, f は没水深度である。とくに進行軸 ($y=0$) 上では,

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{ws}(x, 0) &= \frac{m K_0}{\pi V} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sec^3 \theta \cdot \exp(-K_0 f \sec^2 \theta) \cos(K_0 x \sec \theta) d\theta, \quad (x > 0) \\ \zeta_{ws}(x, 0) &= 0, \quad (x < 0) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{ls}(x, 0) &= -\frac{2m}{\pi V f} I_1, \quad (x > 0) \\ \zeta_{ls}(x, 0) &= \frac{2m}{\pi V f} I_1, \quad (x < 0) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{ここに, } I_1 = \frac{f}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sec \theta d\theta \int_0^{\infty} \frac{\exp(-n|x| \cos \theta) (K_0 \sec^2 \theta \sin nf - n \cos nf) n dn}{K_0^2 \sec^4 \theta + n^2}, \quad (2.6)$$

(2-B) 進行する Point Doublet による波 point doublet のモーメントを M (その軸の方向は進行方向、すなわち x 軸の負の方向と一致) とする。原点に $+m$ の point source を考え、さらにそのすぐ近傍 $x=\delta (>0)$ の位置に $-m$ の point sink をおき、両者の総合効果を $\lim_{\delta \rightarrow +0} (\delta \cdot m) = M$ の極限において考えれば

一般に波動エネルギーは振幅の自乗に比例するから、干渉効果を無次元値 C^2/A^2 の大きさで表わしてみる。

(1.1) 式を位相差 $\delta = \pi/2 \sim 3\pi/2$ ($1/4 \sim 3/4$ 波長差), 振幅比 $B/A = 0 \sim 2$ の間で計算し、その等値曲線を描いてみると第 A-2 図の如くになる。 $C^2/A^2 < 1$ の部分が干渉による波消し効果が認められる範囲である。簡単な計算によつて、 $A = \text{一定}$ に対し、波消し効果最大の条件は

- (a) $B/A = \text{一定}$ で δ のみ変化する場合 : $\delta = \pi$, このとき $(C/A)^2_{min} = (1 - B/A)^2$,
- (b) $\delta = \text{一定}$ で B/A のみ変化する場合 : $B/A = -\cos \delta$, このとき $(C/A)^2_{min} = \sin^2 \delta$,
- (c) 任意の $(B/A, \delta)$ の組合せに対しては : $\delta = \pi, B/A = 1$, このとき $(C/A)^2_{min} = 0$

となることが判る。以上から最大の波消し効果を実現するためには、まず位相差 δ を π ($1/2$ 波長差) にもつて

よい。結論的には形式的に (2.4) あるいは (2.5) を $\frac{\partial}{\partial x}$ し、 $m \rightarrow M$ とおけば、そのまま point doublet の場合の波高式が求められる。たとえば x 軸上の自由波成分は、

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{WD}(x, 0) &= -\frac{MK_0^2}{\pi V} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \sec^4 \theta \cdot \exp(-K_0 f \sec^2 \theta) \sin(K_0 x \sec \theta) d\theta, \quad (x > 0) \\ \zeta_{WD}(x, 0) &= 0, \quad (x < 0), \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

(2-C) Continuous Source Distribution による波 バルブをもたない通常の船型は近似的にこれを船体中心線上の連続的な source 分布で表わすことができる。各 source element からは (2-A) に述べたような波ができる。これらの積分的效果として船首波・船尾波（中央平行部のあるときにはこのほかに前肩波・後肩波）ができる。いま source element の x 座標を ξ' とし、 $x' = x/L$, $\xi' = \xi/L$ (L は船の長さ), source の分布特性函数を $m(\xi')$ とする。(2.4) 式の積分にあたり、 $m(\xi')$ が船の全長 $\xi' = 0 \sim 1$ にわたってその高次微係数とともに連続であると仮定し、部分積分を適用すれば、

$$\begin{aligned} \int_0^1 m(\xi') \cos [K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi' &= -\frac{1}{K_0 L \sec \theta} \left[m(\xi') \sin [K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] \right]_0^1 \\ &\quad + \frac{1}{K_0 L \sec \theta} \int_0^1 m'(\xi') \sin [K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi' \\ &= \frac{1}{K_0 L \sec \theta} \{ m_F \sin(K_0 x \sec \theta) - m_A \sin[K_0(x-L) \sec \theta] \} \\ &\quad + \frac{1}{(K_0 L \sec \theta)^2} \left[m'(\xi') \cos [K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] \right]_0^1 - \frac{1}{(K_0 L \sec \theta)^2} \int_0^1 m''(\xi') \cos [K_0 L(x' - \xi') \sec \theta] d\xi' \\ &= \dots \end{aligned}$$

のように変形できる。ただし $m_F = m(0)$, $m_A = m(1)$ はそれぞれ船首尾端における source の強さを表す。とくに船首波系に關係する項のみ書けば、 $m_F' = m'(0)$, $m_F'' = m''(0)$, ……として

$$\left\{ \frac{m_F}{K_0 L \sec \theta} - \frac{m_F''}{(K_0 L \sec \theta)^3} + \frac{m_F^{IV}}{(K_0 L \sec \theta)^5} \dots \right\} \sin(K_0 x \sec \theta)$$

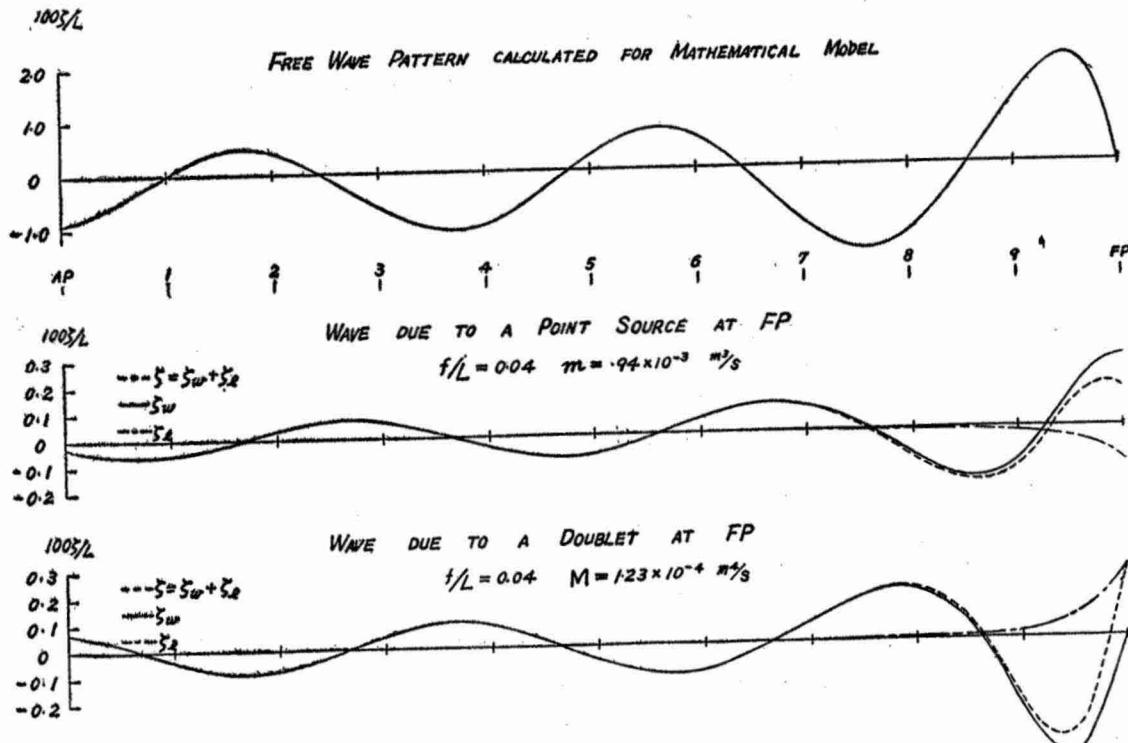


Fig. A-3 Calculated Wave Profiles for Continuous Source, Point Source & Point Doublet
($F=0.2500$; $K_0 L=16$)

$$-\left\{ \frac{m_F'}{(K_0 L \sec \theta)^2} - \frac{m_F'''}{(K_0 L \sec \theta)^4} + \frac{m_F^V}{(K_0 L \sec \theta)^6} \dots \right\} \cos(K_0 x \sec \theta), \quad (2 \cdot 8)$$

となる。これによると一般的には船首波は \sin の波と \cos の波と合成されたものであるが、 $K_0 L = 1/F^2$ であるから $F \lesssim 0.250 (K_0 L > 16)$ の低 F 数域では上式中第1項 (\sin 波)の方が大きく、第2項 (\cos 波) はほとんど無視できる。それより高速では第2項の影響がきいてきて $m_F' > 0$ (hollow water line) では船首波の山は後退 (反対に船尾波の山は前進) し、 $m_F' < 0$ (full water line) では船首波の山は前進 (船尾波の山は後退) する。しかし $F \lesssim 0.35$ の実用フルード数域では常に第1項 \sin 波の方が支配的であつて、これと (2・B) で述べた (2・7) 式の結果とを対比してみれば、船首波と point doublet (球体) の波とが位相的にほぼ正反対になつていることがわかる。このことは両者とも point source の波から出発して、前者はその積分、後者はその微分操作によつて出てきたものであり、よく知られた $\int x \cos x dx = \sin x, \frac{d}{dx} \cos x = -\sin x$ という関係をあわせ考えれば、むしろ当然のことといつてよい。

1例として $F=0.250 (K_0 L=16)$ のときの上記 (2・A), (2・B), (2・C) の波の性質をその成分と共に第 A-3 図に示した。(2・A), (2・B) の計算には Wigley¹⁸⁾ が作製した point source に関する数表と N.P.L.¹⁹⁾ の数表、およびこれをもととして東大水槽で作製した point doublet の波の計算用数表を使用した。

付録 3 素成波の振幅函数と造波抵抗 (2・C) に述べたごとく、一般に船体の後続自由波は 2 コあるいは 4 コの可視的波系からなる。これらひとつひとつの波系は、それを全部合成した合成波系とともに、一般に

$$\zeta_w(x, y) \sim \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} A(\theta) \frac{\sin}{\cos} [K_0 \sec^2 \theta (\overline{x-x_0} \cos \theta + y \sin \theta)] d\theta, \quad (3 \cdot 1)$$

の形に書ける。ここに $A(\theta)$ は素成波*の振幅函数であつて船体の形状と速力とが与えられればきまる。

個々の波系についての $A(\theta)$ は θ について単調 (非振動的) であるが、それらを合成した船全体としての $A(\theta)$ は複雑な振動的性質をもつてゐる。またこのことが船の造波抵抗についてよく知られている hump-hollow の原因ともなつてゐる。

さて、(3・1) で表わされる後続自由波があるとき、この波を造るための抵抗、すなわち造波抵抗は次式で与えられる (前記文献 17)・20) 参照)。

$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \{A(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta, \quad (3 \cdot 2)$$

いま船首波のみに着目し、(3・1), (3・2) の $A(\theta)$ がバルブを付ける前の主船体の船首波の振幅函数であるとする。これに対してバルブによつて逆位相の波を造り得たとして、その振幅函数を $B(\theta)$ で表わす。これら2つの波の干渉による複合船首波の振幅函数は両者の差 $A(\theta) - B(\theta)$ で与えられ、また船首波だけの受けもつ造波抵抗は

$$R_w = \pi \rho V^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \{A(\theta) - B(\theta)\}^2 \cos^3 \theta d\theta, \quad (3 \cdot 3)$$

で与えられる。この関係は付録 1 でみた2次元波の干渉の場合と酷似している。すなわち、まず逆位相の関係を実現させた上で、次に振幅比 $B(\theta)/A(\theta)$ をすべての素成波に対して 1 にもつてくれれば、船首自由波は完全に消え、それによる造波抵抗の受持分も完全に零になる。理想流体に関する限り、船尾波についても同様であつて、結論として、上記位相的条件のほかに振幅的条件 $B(\theta)/A(\theta) = 1$ を成立せしめる船型ならびに F 数域で、waveless hull form 実現の可能性が理論的に予見できる。一般に船の波は F 数とともに増大するが、バルブの波は (その形状にもよるが) 低速で最大値を示し中速以上では F 数とともに減少する。これから、完全波消しの状態を実現させるには、高速船よりも低速船の方が容易であることがわかる。またここに述べた方法はバルブの干渉効果を波の上からでも、造波抵抗の上からでも、同時に平行的に考えられることと、バルブの設計方針を θ についての積分記号を外し、きわめて初等的な手法 $A(\theta) = B(\theta)$ で行なうことができる点がその著しい特長である。これに対して従来は $A(\theta)$ として船全体の波についての振幅函数をとり、さらに $\{A(\theta) - B(\theta)\}^2 = A^2(\theta) - 2A(\theta)B(\theta) + B^2(\theta)$ と変形して $-2A(\theta)B(\theta)$ に相当する項をバルブによる干渉項、 $B^2(\theta)$ による項をバルブの固有抵抗とし、別々にそれぞれ θ について積分して求めている。これでは単に手数が非常にかかるばかりでは

* 素成波の定義および (3・1) 式の物理的解説については文献 17)・20)・21)・22) 参照

なく、バルブにまつわる物理現象の正しい把握を妨げるおそれがあると考えられる。

付録 4 近似船型に関する造波抵抗減少量の計算例 一般に船の造波抵抗は F 数に対して非振動的に単調増加する基本項と正負に振動する干渉項との和として理解できる（文献 1）・23 参照）。前項に述べた方法は船首波に対し逆位相のバルブをつけた場合の造波抵抗の減少量を、前記基本項のみについて考えていることに相当している。バルブの波が逆位相になつているとき、それによる造波抵抗減少量を見積るには一般にこの程度で十分である。また完全波消しの場合（かつ両肩波がない場合）には同時に干渉項も消え、船尾波だけの抵抗が残る。しかし不完全波消しの場合には、厳密にいえば干渉項の値も変る。すなわちその振幅がバルブのないときを 1 としてこれに $|A_0 - B_0|/A_0$ がかかつただけ減少する。ここに A_0, B_0 はともに $\theta=0$ における $A(\theta), B(\theta)$ の値である。両肩波があれば 4 コの波系の間に 6 コの干渉項があり、うち船首波に関係のある 3 種の干渉項がみな変化する。いま $B/L=1/7, T/L=0.05$, 中央平行部の長さ 40%, entrance および run の形状が、長さ方向に直線的、奥水方向に一様な source 分布で代表されるような対称船型（したがつて Michell 近似では前後部は 2 次のバラボラで、かつ $C_b=0.800$ となる）について、船首船底に point doublet をおいたときの造波抵抗減少量を、干渉項の変化まで考えて（理想流体に対して）計算してみたのが第 6 図中破線で示した理論曲線である（計算式は紙面の都合上省略する）。