(昭和 48 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

斜め波中の船体に働く波浪変動水圧 に関する模型実験

正員 菅 井 和 夫*	正員 郷 田 国 夫*
正員 北 川 弘 光*	正員 武 井 幸 雄*
正員 菅 信*	正員 宮 本 武*
正員 大 松 重 雄*	正員 岡 本 三 千 朗*

Model Tests on Hydrodynamic Pressures acting on the
Hull of an Ore-carrier in Oblique Waves

by Kazuo Sugai, <i>Member</i>	Kunio Goda, <i>Member</i>
Hiromitsu Kitagawa, <i>Member</i>	Yukio Takei, <i>Member</i>
Makoto Kan, <i>Member</i>	Takeshi Miyamoto, <i>Member</i>
Shigeo Oomatsu, <i>Member</i>	Michio Okamoto, <i>Member</i>

Summary

Test results on a free running model of a gigantic ore-carrier are described, in which the hydrodynamic pressures on the hull in oblique waves together with the ship behaviors were measured in order to present the useful materials for the method of wave loads estimation.

The behaviors of the gigantic ore-carrier in rough seas, namely speed loss, ship motions and relative water elevations are shown. The distributions of hydrodynamic pressure amplitudes are shown for various wave length and heading angle. In addition to amplitude distributions, phase relations of the hydrodynamic pressures are also shown. Characteristics of the hydrodynamic pressures are explained in connection with the relative water elevations.

Comparison between the experimental data and the calculated results obtained by the strip method are made and the usefulness of the strip method for the estimation of the hydrodynamic pressures is discussed.

1 緒 言

最近、連続して起った大型鉱石専用船の海難事故を契機として、船体構造設計のより精密化をはかろうという気運にある。それには、船体が波浪から受ける外力も適確に推定することが必要である。最終的な目標は、これを計算だけで可能にすることにあるが、そこに到る迄には各段階で計算法の確認と修正とを繰返ししながら、合理的な推定法を確立していかなければならない。水槽実験による計測結果との比較検討は、その有力な手段とされよう。

本論文は、上述の目的のもとに角水槽で模型試験を行ない、斜め波中の大型鉱石専用船の挙動と変動水圧とを計測したものである。なお、波浪外力は、波と同じ程度の周期で比較的ゆっくり変動するいわゆる変動水圧と、極めて短時間ではあるが高い極値をもって衝撃的に船体に加わるいわゆる衝撃水圧とに大別される。本論文では、もっぱら前者に関する事柄だけを取扱っている。

本実験の特徴とするところは、その即物性にある。もともと、角水槽における実験は自由航走模型船を中心に

* 船舶技術研究所

行なわれるため即物性の強いものであるが、今回の実験ではさらにその点を強調し、実際の海面に直して波高 10 m を超えるような大波中での実験を行ない、荒天中の大型鉱石専用船の特性をなるべくありのままに把握できるように努めた。すなわち、波浪変動水圧が波とそこでの船のいろいろな応答とが複雑に絡み合って生じたものであるとの認識のもとに、船速低下をも含めてこれら諸応答がなるべく自然に近い状態の下で行なわれるよう実験法に工夫を加えた。したがって、本実験で得られた結果は、船体構造設計者にとっても、また操船者にとっても波浪変動水圧の実情を知る上で有用な資料となるであろう。

波浪変動水圧に関する水槽試験は、縦波中のもの¹⁾から始まり、最近やっと斜め波中のもの²⁾も行なわれるようになってきた。したがって、その実施にあたっては従来角水槽で行なわれて来た耐航性に関する実験技術³⁾に加えて、自動操舵、変動水圧計測、記録解析のシステム化など幾つかの新しい実験技術の開発を必要とした。

本論文の内容としては、まず、船速低下や船体運動、相対水位など、大型鉱石専用船が荒天中で示す応答を明らかにしている。ついで、波浪変動水圧の実態を把握するため、いろいろな波長、出会角に対する変動水圧分布を船の横断面についてだけでなく、長さ方向についても求めている。また、変動水圧については、振幅だけでなく位相関係についても解析、考察を行なっている。さらに、これら変動水圧の特性を波浪中における船体運動や相対水位との関連において説明している。最後に、これらの計測結果をストリップ法による計算値と比較することにより、同計算法の有用性の検討と今後改良を加えて行くべき問題点の指摘とを行なっている。

2 実験法と計算法

2.1 供試模型船とその状態

実験に用いた模型船は、大型鉱石専用船笠木山丸の 4.5 m 木製模型である。その線図を Fig. 1 に、主要目を Table 1 に示す。

主要目の表の中で、実船の GM、縦および横環動半径などは福田の推定した値⁴⁾であり、これらに対応する模型船の状態はすべて実験時の計測値を示す。模型船の状態は上記実船推定値に相似させることを目標としたが、船内の空間余すところなく搭載された多数の計測器、電池などの配置の都合で、横環動半径だけは調整が困難で、目標値をかなり上まわる結果となった。そこで、重心をなるべく下げて、横揺れ固有周期だけでも実船の状態に近づけるように努力した。

模型船の上部構造については、海水打込みの影響なども考慮して、船首から $0.35L$ の範囲は船首楼、甲板上倉口など実船相似の形状とした。それより後方では、計測器の搭載上、囲壁を設けたが、これもなるべく幅を狭くして実船との相似性を損なわないようにした。

Table 1 Principal Particulars

Items	Ship	Model
Length betw. P.P. (L _{pp})	247.000 m	4.5000 m
Breadth Mid. (B)	40.600 m	0.7397 m
Depth Mid. (D)	23.000 m	0.4190 m
Draft Mid. (d)	16.000 m	0.2915 m
Displacement (W)	135,950 ^{ton}	0.8020 ^{ton}
Block Coefficient (C _b)	0.8243	0.6243
Midship Coefficient (C _m)	0.9975	0.9975
C.G. from Midship (G _M)	fore 7.301 m	fore 0.1330 m
C.G. from Keel (K _G)	12.280 m	0.2225 m
Metacentric Radius (GM)	4.130 m	0.0765 m
Longi. Gyradius (K _L)	0.2362 L _{pp}	0.228 L _{pp}
Trans. Gyradius (K _T)	0.2200 B	0.38 B
Rolling Period (T _R)	11.04 Sec.	1.87 Sec.
Rudder Area (A _r)	58.731 m ²	0.0196 m ²
Rudder Area Ratio (A _r /dL _{pp})	0.0149	0.0149
Bilge Keel Breadth	0.425 m	0.0077 m
Length	62.320 m	1.1353 m
from ☒ fore	38.320 m	0.6981 m
from ☒ aft.	24.000 m	0.4372 m

Fig. 1 Body Plan, Stem and Stern Contours

Fig. 2 Measuring System

Fig. 3 Details of Measuring System on the Model

2.2 計測項目と計測法

変動水圧分布を船の横断面についてだけでなく、長さ方向にも同時計測し、しかもそれを波浪中の船の応答との関連において求めようとしたため、計測項目、計測点とも必然的に広範多数なものとなった。したがって、実験の遂行には、計器の較正から計測、記録、解析に至るまでの合理的なシステム設計を必須条件とした。

Fig. 2 に角水槽での実験計測システムの概要を示す。また、Fig. 3 に模型船内の計測システムの詳細を示す。

本実験の計測項目をあげると次のごとくである。

- 1) 波高
- 2) 船の航跡と速度
- 3) 船体運動（縦揺れ，横揺れ）
- 4) 上下加速度（重心および F. P. 後方 $0.025 L$ における）
- 5) 方位角，回頭角速度，舵角
- 6) 相対水位（S. S. $8\frac{1}{2}$, $9\frac{1}{2}$, $9\frac{3}{4}$ の風上側船側における），海水打込
- 7) 変動水圧（24 点同時計測）
- 8) プロペラ軸の回転数，推力

変動水圧以外の計測項目に関する計測法は、いままで角水槽で行なわれて来たものと同一³⁾である。

変動水圧の計測には、豊田工機製の PMS-5 M-0.5 H 型水圧計を用いた。本器は感度が高く線型性も優れているが、温度変化に対して敏感であるという欠点もある⁹⁾。これを改善するため、Fig. 4 に示すように受圧面をかこんでアクリル製のキャップをとりつけ、その中をシリコンオイルで満たした。

水圧計の較正は、陸上の較正用水槽に模型船を浮かべ、これをスクリュメカニズムを持つ特殊な治具により強制沈下させて、実際に水頭を与えることにより行なった。この較正は毎日実験開始前に行なった。

以上の計測以外に、現象の観察と計測の補助データとするために、陸上に 16 mm、また船上に 8 mm シネカメラを搭載して撮影を行なった。

2.3 実験方法と実験状態

実験は、船舶技術研究所の三鷹第一船舶試験水槽（通称角水槽）において行なった。

荒天中で大型鉾石専用船が受ける変動水圧の実態をなるべく自然に近い状態で把握することを目的としたため、実験法もこれに沿ったものとなっている。すなわち、今回の実験の特徴として、まず大波中での実験であるということを挙げることができる。波高の標準としては、 $L/20=12.35\text{ m}$ のものを選んだ。その理由は、 $L/20$ の波高がいままで船体強度上の一つの基準として用いられてきたこと、波高の平均が 12.35 m といえは実在する荒海面の上限に近いものを表わすと考えられたことなどである。このような大波の中では、波との出会角を一定に保ちながら航走させることが非常にむづかしく、模型船にも実船と同じような自動操舵を加える必要を生じた。また、波浪中での船速低下が著しく、これをなるべく自然に近づけた方が波浪変動水圧の実状をより良くあらわすことができるものと考えられた。そこで、模型船のプロペラ駆動モータの電圧を一定値に保ったまま航走させ、船の速力はそれぞれの出会波に従って自然のままに低下するようにした。

水圧計の計測点数には限度があるため、実験を I～V のグループに分け、それぞれの目的に応じて水圧計の配置をきめた。すなわち、I, II, V グループは、変動水圧の長さ方向の分布、船首附近の横断面分布ならびに船体中央から船尾にかけての横断面分布の測定にそれぞれ重点をおいたものである。これに対して III, IV は、波高の変化に重点をおいたものである。各グループとも波長、出会角、船速等を適当に変えて実験を行なっている。Table 2 に、これらの実験状態を一覧表にして示す。

Fig.5(a), (b) に、変動水圧の計測位置を示す。図中、水圧計の位置に角度が記されているが、これは実際の船体横断面形に対応する Lewis form の座標パラメータである。ただし、吃水線直下および直上にある水圧計の上下位置は、各断面とも Lewis form によらず同一水線上にあり、その吃水線からの距離は $\pm 2.25\text{ m}$ である。

2.4 計 算 法

波浪中の船体運動や変動水圧を計算する方法として、現在最も広く実用されているものにストリップ法があ

Fig. 4 Details of Pressure Gauge

Table 2 Experimental Conditions

*Ship Test Cond.	Speed, X λ _L	180°	165°	150°	135°	120°	90°	45°	0°	Wave Height	Remarks
		14.8 16.5 17.7 18.5 19.3	14.8 19.3	14.8 19.3	14.8 16.5 17.7 18.5 19.3	14.8 19.3	14.8 19.3	14.8 19.3	14.8		
I	1.50	○	○	○	○	○	○	○	○	12.35m (L/20)	Locations of Press. Gages : S.S. 5 and Longi: 13.75m WL Bottom C.L.
	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○		
	1.00	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.875	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.625	○	○	○	○	○	○	○	○		
II	1.50	○	○	○	○	○	○	○	○	12.35m (L/20)	Locations of Press. Gages : S.S. 8½, 9 and 9½
	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○		
	1.00	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.875	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.625	○	○	○	○	○	○	○	○		
III	1.50	○	○	○	○	○	○	○	○	8.23m (L/30)	Locations of Press. Gages : S.S. 5, 8½ and 9½
	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○		
	1.00	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.875	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.625	○	○	○	○	○	○	○	○		
IV	1.50	○	○	○	○	○	○	○	○	16.47m (L/15)	Locations of Press. Gages : S.S. 5, 8½ and 9½
	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○		
	1.00	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.875	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.625	○	○	○	○	○	○	○	○		
V	1.50	○	○	○	○	○	○	○	○	12.35m (L/20)	Locations of Press. Gages : S.S. 1, 2½, 5, 7½ and 9½
	1.25	○	○	○	○	○	○	○	○		
	1.00	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.875	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.75	○	○	○	○	○	○	○	○		
	0.625	○	○	○	○	○	○	○	○		

*In Still Water

る。もともと船は3次元物体であり、ストリップ法のような2次元理論ですべてが説明できるとは思われないが、実用的な見地からすれば、このような簡単な計算法でこのように実際とよく合うものは他に類例がない。そこで、波浪変動水圧を推定する場合にも、ストリップ法をもととして計算をすすめ⁷⁾、実情に合わない点があればこれに修正を加えて行くのが実際的なやり方であると考えられる。一方、ストリップ法にも細かい相違点を持ついくつかの計算法があるが、本論文が斜め波中で船体に加わる変動水圧に関し、実験値と比較検討する最初の試みであることを考えると、その計算法としては原典にたちかえっていわゆる O. S. M. (Ordinary Strip Method) を採用するのが最も妥当であると考えた。そこで、まず船体運動の計算には田才の論文をもととした O. S. M. の計算プログラムを用いた。ただし、横揺の計算だけは抵抗に2次の項も含めた実験値を導入し非線型な取扱いを行なっている。波浪変動水圧の計算には、一部に Ursell-Tasai の方法と同一原理にもとづく渡辺の計算⁸⁾ プログラムを利用しているが、その全体的なプログラムの構成は田才の論文^{9,10)} をもととした O. S. M. と全く等しいものである。ただし、その場合、船速影響は除外してある。

大型鉱石専用船の特徴として漂流 (drift) が大きいことをあげることができる。したがって、こ

Fig. 5 Locations of Pressure Gauges

Fig. 6 Definitions

Fig. 7 Speed of the Ship in Oblique Waves

Fig. 8 Course Angle of the Ship in Oblique Waves

れを考慮するとしないのでは出合周期にかなりの相違を生ずる。そこで、本論文におけるストリップ法の計算プログラムでは、漂流の影響を考慮できるようにした。

なお、ここで、本論文で用いられる定義や記号等を Fig. 6 に示しておく。

3 波浪中の船の応答

船体に働く波浪外力は、波とそれの中の船の応答とが複雑に絡み合って生じたものである。したがって、その特性を把握するには、まず、波浪中における船速低下、船体運動、相対水位など一般に船の応答といわれているものを明らかにしておく必要がある。

3.1 船速低下

本実験では、荒天中における大型鉱石専用船の挙動をなるべく忠実に再現できるように、模型船の推進用モータの電圧を、たとえば平水中の航海速力に相当するものにするなど、ある一定電圧に保ったまま航走させている。したがって、波浪中では模型船は実船とはほぼ同じように船速が自然に低下して行くものと考えられる。

Fig. 7 は、斜め規則波中で船速がいろいろな波長の波に対してどのように低下して行くかを示したものである。この図から、縦波に近い程船速の低下が大きい事、また波長対船長比 (λ/L) が 0.75 附近で甚しい船速低下を来すことがわかる。波高 12.35m といった大波の中では、この値が平水中速力の 80~90% という甚しいものになることは注目に値する。もちろん、模型船と実船とでは駆動系の特性に相違があるため、船速低下を正確に対応させるにはエンジン・シミュレーションを必要とする。したがって、今回の実験結果は実船の荒天中における船速低下の概要を示すにとどまっている。

ここでいう船速低下とは、船が波浪中で絶対空間に対してその速度をどのように低下させるかということである。したがって、その原因となるものに波浪による抵抗増加と漂流とがある。大型鉱石専用船では、その中で漂流が占める割合の大きいことはその水線面積が大きいことから容易に想像される。Fig. 8 は、縦軸にコース角を、また横軸に方位角をとって斜め波中における漂流の度合を表わしたものである。漂流が全くなければ実験点が 45° の線上に乗るはずであり、これから下方に離れるほど漂流の大きいことを示す。この図から、 λ/L が 0.75 以下の波では斜め波から横波

にかけて漂流が非常に大きくなることがわかる。

船速低下や漂流が大きくなるのは、運動の振幅だけでなく位相とも重要な関係にある¹¹⁾。たとえば、 $\lambda/L=0.75$ の場合、後述のように向い波中の縦運動がそれ程大きくないにもかかわらず船速低下が甚しいのは、丁度この波に相当する辺りに本船の縦運動の同調点があり、位相関係がより重要な役割を果たしているためと考えられる。一方、波長が船長より短い場合、斜め波から横波にかけて漂流が大きくなるのは、運動の振幅が大きくなることと対応している。

3.2 船体運動

波浪変動水圧の大きさを左右するものは、波浪中の船体運動である。もし、船体運動がないとするならば、波浪変動水圧の大きさは、ただだか波高程度のものに過ぎないであろう。こうした意味で、まず波浪中の船体運動の特性を明確にしておく必要がある。

Fig. 9 は、斜め規則波中の縦揺振幅応答をいろいろな λ/L の波に対して示したものである。以下、運動の振幅の表現には、すべて波高 12.35m の場合の実船の値を生単位で示す。ここで注意しなければならないのは、各図中で同じカーブで結ばれていても、船速はそれぞれの波長や出会角に応じて自然に低下しており、同じ値ではないということである。

大型鉱石専用船の縦揺同調周期は、低速では λ/L が 0.75 附近の比較的波長の短い波に相当しているが、そこでは波の強制力も小さいのでたとえ同調しても縦揺が激しくなることはない。強制力が大きい波長の長い波に対して、一般には向い波で速度が高くなると同調に近くなって縦揺が激しくなるが、大型鉱石専用船ではもともと速力がおそく、しかも波浪中の船速低下が大きいこともあって、このようなことは起こらない。同図中、 λ/L が 1.0 より小さいとき斜め波中で縦揺が大きくなるのは同調ではなく、そこで縦揺強制力が大きくなるためと考えられる。図中には、ストリップ法 (O. S. M.) により計算した縦揺振幅応答を比較のために示してある。計算でも船の速力は実験に対応したもの、つまり出会波に従って自然に低下した値をとっている。この図から、縦揺に関してはストリップ法による計算値が向い波から斜め波に至るまで実験値と非常によく合っていることがわかる。 $\lambda/L=0.75$ 以下の短い波では計算値との一致度が多少悪くなるが、全体的にみてストリップ法により縦揺

Fig. 9 Pitching

振幅を推定しても実用上ほとんど問題がないであろう。

Fig. 10 は、斜め波中の上下揺振幅を上下加速度から換算して求めたものである。図中には、縦揺の場合と同

Fig. 10 Heaving

Fig. 11 Rolling

様にストリップ法による計算値が比較のため書入れてあるが、やはり実験値と大体よく一致しており、上下揺振幅もストリップ法による推定が実用上十分であることがわかる。

Fig. 11 に斜め波中の横揺振幅応答を示す。横揺強制力が横波を最高として出会角に対してほぼ正弦的に変化すること、固有周期と波の出会い周期とが同調したとき激しい横揺をすることなど、船の横揺に関する一般的な性質は、大型鉱石専用船についても変わるところがない。ただ、大型鉱石専用船は船体の大きさの割には横揺固有周期が短かく、横波で同調する危険性が大きい。横揺応答は、同調率 (tuning factor) と横揺抵抗さえわかれば

Fig. 12 Rolling (Including Drifting Effect)

3.3 相 対 水 位

船側における相対水位変動は、出会波と船体運動との関連によって生ずるものであり、船側における変動水圧の、いわば一次近似としての意味をもつものである。また、相対水位変動は様々な船体運動のベクトル和としての発現であるから、これを船体運動と対比することにより相互間位相の特性を概観することもできる。さらには、相対水位変動にいわゆる Froude-Kriloff 成分がどの程度対応するかを調べることにより、船体運動や波との出会いにもとづく流体攪乱の程度をうかがい知ることできる。相対水位変動は、このように出会波と船体運動とを変動水圧に結びつける媒体として重要である。

Fig. 13 および 14 は、それぞれ S.S. 9 $1/2$ および 8 $1/2$ における相対水位変動振幅の計測値を無次元化して出

Fig. 13 Relative Water Elevation

Fig. 14 Relative Water Elevation

会角ベースに表わしたものである。これらの計測値は、大体信頼できる妥当な値を与えているが、相対水位が乾玄を越える程度に大きくなり検出器の特性が直線的でなくなる場合とか、甲板上に打ち込まれた水塊の流出などがある場合には、その信頼度は低下する。これらの図には、ストリップ法 (O. S. M.) による相対水位の計算値 (Froude-Kriloff) を細線で併記してある。計算値は、船体運動計算の場合と同様に船速低下を考慮したものである。実験値と計算値とを比較すると、ストリップ法は相対水位の傾向をかなり正しく与えるが、振幅の絶対値に関しては $\lambda/L=1.50$ 程度の波長が長いところではよく一致するが、波長が短くなると実験値との間に相当の差異を生ずることがわかる。出会角に対する変化は、実験値が計算値に比してより変化の少ないおだやかな様相を呈する。一般に、計算値と実験値との差異は横波および斜め波中で大きく、向い波に近づくにつれてその差を縮めている。また、追波では傾向的にも合わなくなるようである。これは、船体横運動の計算に実情と合わないところがあるためと思われる。そこで、横揺のときと同様に、漂流の影響を出会周期の修正という形で考慮してみると、Fig. 15 に示すように相対水位の計算値は実験値とかなりよく合うようになる。なお、計算ではいわゆる dynamic swell-up は考えていないが、肥大船型では向い波中においてこの影響の大きいことが田崎¹²⁾、田才¹³⁾等によって指摘されている。短波長域での計算と実験との差の多くは、この dynamic swell-up によるものと思われる。

Fig. 15 Relative Water Elevation

4 変動水圧

4.1 変動水圧の実験結果

本実験では、第2章にも述べたように実験状態、計測点数が広範囲かつ多数にわたり、得られた実験データも相当な量になったが、これらの実験結果のうちで主なものを Fig. 16~Fig. 36 に示す。すなわち、Fig. 16~

Fig. 16 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 17 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 18 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 19 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 20 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 21 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 22 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 23 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 24 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 25 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 26 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 27 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 28 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 29 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 23 は、S.S. $8\frac{1}{2}$ 、S.S. 5 および S.S. $2\frac{1}{2}$ における変動水圧振幅の横断面分布をそれぞれ波長別に、出会角をパラメータとして示したものである。Fig. 24～Fig. 29 は風上側吃水線下 2.25m の位置および船底の中心線上の位置をそれぞれ船側および船底の代表点を選び、変動水圧振幅の船の長さ方向の分布を示したものである。これらの図に示した変動水圧振幅のスケールには実船換算値も記入してある。また、これらの図を見るに当っては、船速は一定でなくそれぞれの出会波に応じて自然に低下していること、波高はすべてを通じて 12.35m ($=L/20$) であることに注意しなければならない。

これらの図をもとに、変動水圧振幅の分布の大略について考察する。まず、変動水圧振幅の横断面分布形状についてみると、各断面とも向い波から横波に移るに従い、左右対称な分布から風上側が大きな値を示す非対称な分布になる。船底における変動水圧の振幅は、出会波による変化が少なく、その値も小さい。船側における変動水圧の振幅は、吃水線附近からビルジ部にわたるまで大体同程度の大きさである。風上側の船側における変動水圧振幅は、波長や出会角により変化する。風下側の船側における変動水圧振幅は、出会波による変化も少なく、その値も小さいので風上側ほど重要ではない。

つぎに、変動水圧振幅の長さ方向の分布についてみると、船底の中心線上においては S.S. $1\frac{1}{2}$ 附近から S.S. $8\frac{1}{2}$ 附近までのかなり広い範囲にわたって、出会波にかかわらず変動水圧振幅は大体一様で、またその値も $P_0/\rho gh_0 \approx 0.2$ 程度の小さいものである。風上側吃水線附近における変動水圧振幅の長さ方向の分布形状は、向い波中では船首と船尾が大きくなる以外に、船体中央で山、S.S. $7\frac{1}{2}$ と S.S. $2\frac{1}{2}$ で谷といったような凹凸をもったものとなる。この凹凸は向い波から斜め波に移るにしたがって消失し、さらに横波になると船体中央部に最高値を持ち船首、船尾で低い高原状の分布形状となる。そして、その最高値は $P_0/\rho gh_0 \approx 2.0$ のオーダーである。前にも述べたように大型鉱石専用船ではあまり縦揺の激しくなることはなく、むしろ横揺の方が横波で同調して激しくなる危険性が高い。したがって、船全体を考えると船首のごく近傍を除くと変動水圧振幅は縦揺よりも横揺に支配されることの方が多いようである。 $\lambda/L = 0.5$ のように波長が短い場合には、向い波中でも上述のような凹凸がなく長さ方向にはほぼ一定で、その振幅の大きさは $P_0/\rho gh_0 \approx 1.0$ 程度である。これは、船体がほとんど運動せず、また到来波もあまり変形を受けずに船側に沿ってそのまま移動するためである。なお、前述の変動水圧振幅の長さ方向分布で S.S. $7\frac{1}{2}$ に谷が生じることは、縦運動と出会波との位相関係によるものと考えられ、著者等の一人が以前に行なった T2 タンカー模型の向い波中の実験⁷⁾でも同じ傾向がみられる。しかし同実験の結果から、この傾向が低

Fig. 3 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution

Fig. 31 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution

Fig. 32 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution

Fig. 33 Phase Difference in Hydrodynamic Pressure

S. S. 8 $\frac{1}{2}$ の風上側吃水線下 2.25 m の点の変動水圧が最大になった時刻, 1 はそれから $T_e/4$ だけ経過した時刻, 以下順に $T_e/4$ 間隔の時刻を表わす。また, 縦軸は変動水圧に平水中で浮かんでいる時の静水圧を加えた全水圧をとっている。これらの図によれば, 向い波の場合には船側の水圧の瞬時値は大体波長と同程度の長さで船に沿って変化する。横波の場合には船側の水圧瞬時値は長さ方向にほとんど変化しない。以上に述べた瞬時値に関することは一例であってその全貌を明らかにするには今後さらに解析を進める必要がある。

4.2 船の応答との関連

大型鉱石専用船が波浪中で受ける変動水圧の性質をさらに明確にするために, まず船体運動との関連から調べて行くことにする。Fig. 37 は, $\lambda/L=0.75$ の波につき風上側船側において変動水圧の振幅が会角に対してど

速においてのみあらわれるもので, 高速になるにしたがって消失するものと考えられる。

これまでに述べてきたことは, 船体表面に働く変動水圧の振幅の分布についてであって, ある時刻における変動水圧の瞬間値ではない。船体強度に対する荷重としては, 同一時刻における変動水圧の瞬時値の分布が問題であろう。Fig. 30~Fig. 32 は, $\lambda/L=0.75$ の場合の S. S. 8 $\frac{1}{2}$ における瞬時値の分布を示したものである。瞬時値としては, 平水中で浮かんでいる時の静水圧を変動水圧の瞬時値に加えた全水圧がとられている。これらの図の中で各瞬時値に番号がついているが, この番号はその瞬時値の発現する時刻をあらわす。すなわち, 0 は S. S. 8 $\frac{1}{2}$ における風上側船側の吃水線下 2.25 m の点の変動水圧が最大になった時刻, 1 はそれから会周期 T_e の $1/8$ だけ経過した時刻, 以下順に $T_e/8$ 間隔の時刻を表わす。

これらの図によれば, 向い波中では船側も船底もほぼ同時に最大値または最小値になることがわかる。言いかえれば, 断面上の各点における変動水圧の間には位相差がほとんどない。これに対して, 横波中では風上側の変動水圧が最大になる時刻には, 風下側の変動水圧がほぼ最小になっている。Fig. 33 は, 横軸に断面上の位置をあらわす角度 (Fig. 5 参照) をとり, 風上側吃水線下 2.25 m の点における変動水圧を基準とした各点の変動水圧の位相差を示したものである。この図でみると, 横波では船底の中心線よりやや風下側寄りの点を境にして位相が急に 180° 近くずれている⁹⁾。向い波 ($\chi=180^\circ$) の場合には各点の変動水圧の位相差はほとんどなく, 斜め波 ($\chi=135^\circ$) では両者の中間的な状態を示している。

つぎに, 変動水圧の瞬時値の長手方向の分布について述べる。Fig. 34~Fig. 36 は, 吃水線下 2.25 m における水圧の瞬時値を示したものである。各瞬時値に番号がついているが, 0 は

Fig. 34 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution on Ship Side

Fig. 35 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution on Ship Side

Fig. 36 Instantaneous Hydrodynamic Pressure Distribution on Ship Side

もちろん、波と各船体運動との位相関係もここで重要な役割を果していることは言うまでもない。角水槽では、波と船体運動との位相関係を直接とらえることは難しい。しかし、間接的な裏付けとして相対水位の計測値を利用することができる。Fig. 37 には、S.S. $9\frac{1}{2}$ および $8\frac{1}{2}$ における相対水位の測定値も書入れているが、これ

Fig. 37 Hydrodynamic Pressure, Relative Water Elevation and Ship Motions vs. Heading Angle

のように変化するかを断面位置をパラメータに示したものである。この図から、船体中央部 S.S. 5 の風上側では変動水圧振幅は、斜め波から横波にかけて、同図中に示した横揺振幅応答とカーブの傾向が極めてよく似ており、横揺との相関が強いことがわかる。船首部 S.S. $8\frac{1}{2}$ になると、斜め波から横波にかけて、船体中央部ほどではないにしろ依然として横揺との相関の方がむしろ向い波での縦揺との相関よりも強いことがわかる。つまり、S.S. $8\frac{1}{2}$ 辺りでは、まだ相当船幅も広く横揺の影響の方が強い。S.S. $9\frac{1}{2}$ になると、風上側船側における変動水圧振幅は、向い波から斜め波にかけて縦揺振幅応答のカーブとよく似ており、縦揺との相関が強いことがわかる。つまり、S.S. $9\frac{1}{2}$ といったような極めて船首に近い辺りでやっと船首らしい縦揺との相関の強さが表われて来るが、S.S. $8\frac{1}{2}$ ではその中間的というよりはむしろ船体中央部に近い性質を持っていることがわかる。

以上は、変動水圧振幅と船体運動との相関を運動の振幅を通じて概略的に把握したものである。

から相対水位の方が船体運動の振幅応答との関連よりも遙かに密接に吃水線附近の変動水圧と対応していることがわかる。しかも、その対応が単なる傾向的な面だけに止まらず、絶対値の面でも非常に近いものであることは注目値する。

4.3 計算との比較

ストリップ法 (O. S. M.) による変動水圧振幅の計算値と模型実験による計測値との比較を行ない、同計算法の有用性を検討する。

比較は、変動水圧振幅の船の長さ方向の分布と横断面分布との2つの分布形について行なう。船の長さ方向の分布形としては、波が到来する側の吃水線下 2.25m の位置のものを船側における代表値として、また船底の中心線上のものを船底における代表値として選び、いろいろな λ/L の波に対して示している。一方、横断面の分布形としては、S. S. 8 $\frac{1}{2}$ および S. S. 5 における分布形をそれぞれ船首部および船体中央部における代表値として選び、同じく λ/L をパラメータにして示している。

Fig. 38 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 39 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 38 および 39 は、向い波中における上記2つの分布形の比較を行なったものである。これらの図から、計算値は船の長さ方向には船首部、船体中央部、船尾部ともに、また船側部、船底部いずれの場所をも問わず、傾向、絶対値ともに非常に良く実験値と合っていることがわかる。また、横断面分布形についても船首部、船体中央部ともに、また船側のみならず船底においても、やはり傾向、絶対値ともに非常に良く実験値と合っていることがわかる。強いて言えば、波長が短くなると吃水線附近で計算値が実験値よりも高めに出る傾向にあるようである。総じて、向い波中では、ストリップ法による変動水圧振幅の計算値は実験値と非常によく合っており、推定法としてそのまま採用しても問題がないであろう。

Fig. 40 および 41 は、斜め波中の上記2つの分布形を λ/L をパラメータにして比較したものである。まず、船の長さ方向の分布形について比較すると、船底では計算値は傾向、絶対値ともに実験値と非常に良く一致しているが、風上側船側では傾向的にはよいが、波長が短くなると絶対値にかなりの相違を生ずる。横断面の分布形について比較すると、船首部、船体中央部ともに風上側のビルジから船底にかけては計算値は実験値とよく合っているが、風上側の船側では絶対値にかなりの相違を生ずる。概して、実験値は波長によってさほど変化がないのにもかかわらず、計算上では波長が短くなるほど吃水線附近で変動水圧振幅が明瞭に大きくなっている。風下側の船側では、船首部で計算値の方が大きく出る傾向にあり、船体中央部では波長の短い所で傾向的にも

Fig. 40 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 41 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 42 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

Fig. 43 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

合わないものがでてくる。

Fig. 42 および 43 は、横波中の上記2つの分布形を λ/L をパラメータにして比較したものである。まず、船の長さ方向の分布形について比較すると、船底では依然として計算値は傾向、絶対値ともよく合っているが、風上側の船側では傾向は大体合っているが、波長が短くなると絶対値に相当の相違を生じ、計算値の方が高めになる。横断面分布形の比較では、船首部、船体中央部ともに風上側船側で絶対値に相当の差があるだけでなく、傾向的にも合わないところがある。また、風上側ベルジ部でも絶対値に相当の差があることは注目に値する。

Fig. 44 Distribution of Hydrodynamic Pressure Amplitude

た。これに対して、変動水圧の計算が漂流を考慮しても改善されないのは、横揺が大きい場合 Froude-Kriloff にもとづく項ではなく動的な流体攪乱にもとづく項になにか問題があるためと想像される。縦波中では、ストリップ法による計算は運動から変動水圧の推定に至るまで首尾一貫している。これに対して、横波中では横揺の推定に実験的に求めた抵抗値をしきも非線型の項まで含めて使うなど、変動水圧の計算法とは根底を一にしていなかったところがある。

斜め波から横波になっても船底においては計算値は実験値とそうかけ離れたものにはならないが、吃水線附近では相違が大きく、とくに波長が短くなるほどその差は大きい。横断面分布形状でみると、Fig. 45 に示すように実験値が船側で上下方向にあまり変化のない鍋底形をしているのに対して、計算値は波長が短くなると風上側吃水線附近で急に値が大きくなるスーパ皿形を呈する。したがって、今後吃水線附近の変動水圧の計算を実際に合うように修正して行く必要がある。

Fig. 45 Typical Example of Measured and Calculated Hydrodynamic Pressure in Short Waves

5 結 言

大型鉱石専用船が波浪中で受ける変動水圧の性質を明かにするため、角水槽で斜め波中の模型実験を行なった。その結果、波浪変動水圧の実態を荒天中での船速低下も含めた実際に近い状態で把握することができた。また、その特性を船体運動や相対水位との関連において説明することができた。

波浪変動水圧をストリップ法 (O. S. M.) により計算し、実験結果と比較した。その結果、

- 1) ストリップ法による計算は、波浪変動水圧の全般的な傾向をよく表わしている。向い波では、傾向だけでなく変動水圧の値そのものもよく一致する。
- 2) 斜め波から横波になるに従い、計算値は実験値と相違してくる。横運動と変動水圧との関係をさらによく調べる必要がある。
- 3) 水面附近では、波長が短くなるほど計算値は実験値より高めに出る傾向にあり、これに対する修正を必要とする。

ことが明らかになった。

本実験は、日本造船研究協会第 131 研究部会との共同研究として実施されたものである。元良部会長をはじめ委員各位の有益なご教示、ご討論に対し、ここに厚くお礼申し上げる。なお、上記研究部会は現在その研究を継続実施中であり、したがって、本論文に述べられた結言が同研究部会の最終結論でないことを附記する。

本論文中の計算は、船研共用電子計算機 FACOM 270-20 によった。

参 考 文 献

- 1) 郷田国夫：波浪中の船体に働く横荷重について，日本造船学会論文集第 121 号，(1967, 6).
郷田国夫：波浪中の船体に働く横荷重について（第 2 報），日本造船学会論文集，第 123 号，(1968, 6).
- 2) 菅井和夫，菅 信，猿田俊彦，大松重雄：大型鉱石専用船の波浪外力と船体強度に関する研究，3) 斜波中における船体運動と変動水圧，第 18 回船研研究発表会講演概要，(1971, 11).
- 3) 高石敬史，菅井和夫，小川陽弘：最近の角水槽における波浪中模型実験法（その 1），日本造船学会誌，第 525 号，(1973, 3) に掲載の予定。
- 4) 日本造船研究協会第 131 研究部会：波浪外力に関する水槽試験報告書，日本造船研究協会研究資料，No. 163，(1972, 3).
- 5) 武井幸雄，島田尚信，宮本 武：大型鉱石専用船の波浪外力と船体強度に関する研究，6) 水圧計の特性，第 18 回船研研究発表会講演概要，(1971, 11).
- 6) 森 信篤，菅 信，宮本 武：大型鉱石専用船の波浪外力と船体強度に関する研究，7) 自航模型船の自動方位設定試験，第 18 回船研研究発表会講演概要，(1971, 11).
- 7) 福田淳一，永元隆一，小沼 守，高橋 実：波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する理論計算，日本造船学会論文集，第 129 号，(1971, 6).
- 8) 渡辺 巖：二次元物体まわりの変動圧計算法，日本造船学会昭和 48 年度春季講演会において発表。
- 9) 田才福造：Beam Sea Condition にある船に働く変動圧力，西部造船会会報，第 35 号，(1968, 2).
- 10) Fukuzo Tasai : An Approximate Calculation of Hydrodynamic Pressure on the Midship Section Contour of a Ship Heaving and Pitching in Regular Head Waves, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. XIV, No. 48, (1966).
- 11) 花岡達郎：波浪中の船の運動と造波抵抗理論，造船協会論文集，第 98 号，(1956, 2).
- 12) 田崎 亮：向い波中における甲板上への海水の打込みについて，造船協会論文集第 107 号，(1960, 7).
- 13) Fukuzo Tasai : Wave Height at the Side of Two-Dimensional Body Oscillating on the Surface of a Fluid, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Vol. IX, No. 35, (1961).