

斜め規則波中を航行するコンテナ船模型に作用する波浪変動水圧分布について

渡辺 巖*

On Measurements of Pressure Distribution over a Container Ship Model in Oblique Regular Waves

By

Iwao WATANABE

Summary

In this paper, a model experiment to measure pressure distribution around a container ship model has been described. More than 20 pressure gauges are installed on the hull surface, together with wave height probes, acceleration sensors and a gyroscope for ship motions.

The results are presented in the form of amplitude as well as phase lag to the pitching motion and are compared to the estimations by strip method to show that the strip method can be used successfully as a method to predict pressure distribution in waves.

1. はし が き

波浪中を航行する船舶に作用する水圧変動を正確に知ることは、船体構造に対する波浪荷重のより正確な推定を図る上からも、また船体まわりの流場を解明するためにも重要なステップであることは言うまでもないことであり、従来から多くの関心が寄せられてきた問題の一つである。¹⁾²⁾

船体に働く水圧変動をその要因によって大別すると出会波周期もしくはその近傍の周期を持つ波浪変動圧成分と、非常に作用時間が短かく、局所的に高圧になる衝撃圧成分とに分類される。後者はスラミング或いは海水打込等によって発生するものであるが、出現頻度も小さくかつ発生部位も限られており、船の全体強度との関連で考えると、前者の波浪圧の方が広い範囲にわたって作用することから荷重としては第一義的な重要性があると考えられる。

波浪変動圧に主眼を置いた水圧計測はこれまでも試みられてきた。中でも菅井等の行った鉱石専用船模

型を用いた自然状態での水圧分布計測は、その計測点の多さで従来にない情報をもたらした。彼等の研究により、鉱石専用船という肥えて低速で波浪中を航行する船型に作用する水圧は、ストリップ法に基く水圧計算法で概ね良く推定できることが明らかになった。ストリップ法はこれまでに運動、加速度等の推定については十分な精度を持った結果をもたらすことが明らかになっており、水圧についても適用可能ならば、大変都合が良い。このことを確固としたものにするためには、他の船型についても検証しておく必要があり、とりわけ高速船型については、その前進速度影響あるいは三次元影響等が考えられるので、ストリップ法の適用可能性を是非共チェックしておく必要がある。

このような事情を踏えて高速コンテナ船型を用いた波浪変動圧計測の実験を行うこととした。実験は規則波中を自由航走する模型船を用い、船体全域にわたる水圧分布を計測することとし、諸量の振幅のみならず、位相的な関係についても出来る限り情報を得るべく努めた。そしてこの様な実験結果に対し、OSMに基づくストリップ法計算を求め、水圧をはじめ相対水位変動、船体運動について、振幅、位相関係が精度良く推定できるかを確かめることにした。

* 運動性能部

原稿受付：昭和59年4月27日

2. 実験方法

実験は完全自航状態の高速コンテナ船模型を用いて行ったが、模型船計測項目および波浪条件等を以下に記す。

供試模型

用いた模型は一軸コンテナ船で、いわゆるSR-108船型と呼ばれる船型を持った乗線間長5mの木製模型である。これを満載喫水状態で使用した。実験時主要目を table 1 に、船体形状を Fig. 1 に示す。

Table 1

Items	Model	Ship
L_{PP} (m)	5.000	175.0
B (m)	0.726	25.40
D (m)	0.44	15.40
d (m)	0.271	9.50
∇ (m ³)	562.5	24119
C_B	0.5717	
l_{CB}/L_{PP}	1.42% aft	
KG (m)	0.272	9.52
GM (m)	0.0286	1.00
T_R (sec)	3.09	18.28
K_L/L	0.239	

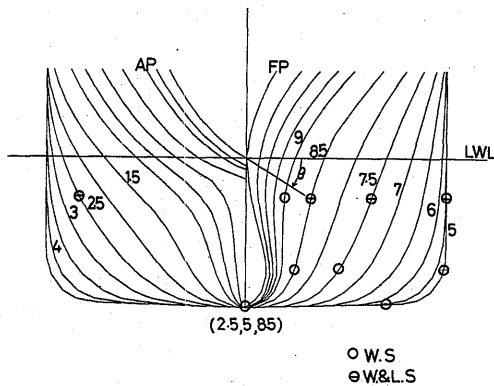


Fig 1 Body plan and pressure gauges arrangement

計測項目

同時計測項目は全体で30項目にわたる。その内訳は、

運動に関する項目7種 (pitching, rolling, Yawing, 加速度等) 相対水位変動2点 (SS 8 $\frac{1}{2}$, SS 5のWeather Side) および水圧変動20点である。水圧の計測位置については船体まわり全般の分布が明らかとなるよう配慮した。計測位置をFig 1の中に記号で示す。使用した水圧計は豊田工機製PMS-5M-0.5Hに受圧計をミリコンオイル溜で覆ったものを用いた。この水圧計の周波数特性はDC~300Hzである。波浪変動圧成分の計測には十分と考えられる。

供試波浪及び航走状態

実験に用いた波浪は規則波である。波長は $\lambda/L=0.35, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ の6つで、それぞれの波高は13cm ($L/38$) もしくはそれに近い値となっている。

船の出会角は $\chi=180^\circ, 150^\circ, 120^\circ, 90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ の6通りで、各々の角度で船速が $F_n=0.1\sim 0.3$ の範囲で実験を行った。実験中は方位ジャイロを用いたオートパイロットを作動させて平均的な方位が一定に保持されるように努めた。なお以上の実験ケースのうち、 λ/L で0.35, 0.5および $\chi=90^\circ, 60^\circ, 30^\circ$ についての結果は本論文には含まれておらず、別途報告の予定である。

データの収録・解析

船上で計測されたデータの大部分は30CHのテレメーターによって陸上に送信して、データレコーダーに収録すると同時にA/D変換装置を介して電算機処理が可能なよう、デジタルMTへの書込みを行った。今回のデータは規則波中のデータであるため、単一の出会周期を定義、検出することができ、これに対するFourier成分の算出をすべてのデータについて行った。そのためのソフトは文献⁴⁾に述べたものを用いた。

以下のデータ表現では各成分の振幅、位相を用いるので、ここで信号波形の位相関係を定義しておく。

本実験では完全自航模型を使用しているため、通常行う入射波を基準位相にとるという整理法を取れない。それにかわってpitchingを基準信号として、それからの位相差で他の運動との関係を定量化することにする。

位相差は遅れを正としてあらわし、基準となるpitchingについては、船首下げを正とする。これと関連づけられる他の信号の内、heavingは船体上昇を正、相対水位は水位上昇を正、水圧変動については上昇を正として扱っている。

3. 実験結果および考察

(1) Pitching

Fig. 2 から 4 に, pitching 振幅の船速に対する変化の様子を出会波の波長, 出会角毎に示す。振幅は最大波傾斜に対する比であらわれている。図に記されている曲線類は, ストリップ法 (OSM) による推定計算値である。(以降の図においてもこれに倣う)

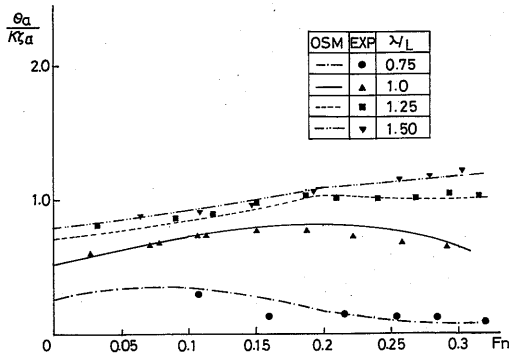


Fig. 2 Amplitude of pitching ($\chi=180^\circ$)

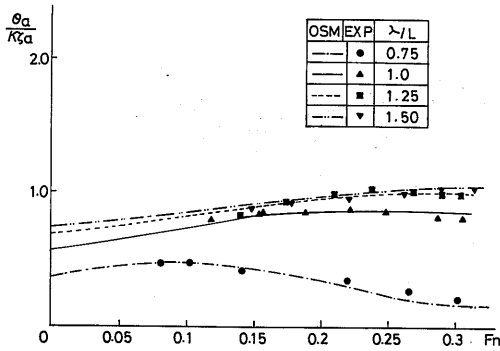


Fig. 3 Amplitude of pitching ($\chi=180^\circ$)

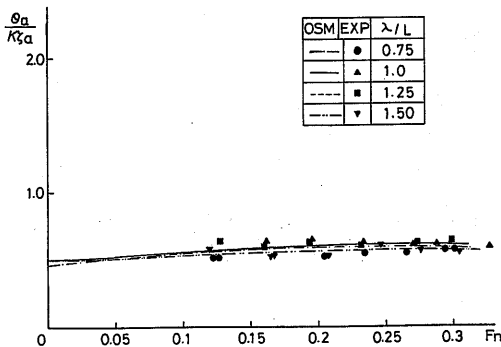


Fig. 4 Amplitude of pitching ($\chi=120^\circ$)

$\chi=180^\circ$ の船速に対する変化の様子は波長によって異なる。特に $\lambda/L=0.75$ の場合には船速が増すと運動は一度増大し, その後は減少し, 非常に小さくなる。それより長い波長の場合には, 船速と共に pitching も大きくなること, その変化の様子は波長によって差がみられ, $\lambda/L=1.5$ が大きいこと等が図からみてとれる。このような運動の変化の様子は出会角が斜めになって, $\chi=150^\circ$ になっても同様である。

$\chi=120^\circ$ では波長が短い $\lambda/L=0.75$ の場合でも長い波長と同一傾向となり, 船速の増大と共に横ばいもしくは微増する様子がみられる。これは出会角の効果で見掛け上波が長くなったように入射することによるものと思われる。ピッチングの強さを出会角の関係でみると, 正面波では大体 1, すなわち波傾斜と同じ程度であるが, $\chi=150^\circ$ になると 1 以下になり, $\chi=120^\circ$ になれば更に小さくなり, 約 1/2 程度である。

このような実験結果に対し, ストリップ法の推定値は非常に良い一致を示している。

(2) heaving

本模型実験は完全自航状態で行われたもので, heaving そのものを測ることはできない。しかし重心位置の上下加速度を測り, それから積分により変位を推定することは可能である。これを行う方法としては, 加速度の時間波形を何らかの手段 (電氣的あるいは数値的) で二回積分を行うか, あるいは, 周波数成分に変換した後に, 加速度振幅を周波数の二乗で割って, 変位の振幅とする方法の二種類が考えられる。ここでは後者の方法に依り, 上下加速度の出会周期成分の Fourier 係数に出会周期の二乗をかけて求めることとした。Fig. 5~7 に示す heaving の振幅はこのようにして求めたものである。ストリップ法の結果と良く一致しており, 妥当な傾向があらわれている。

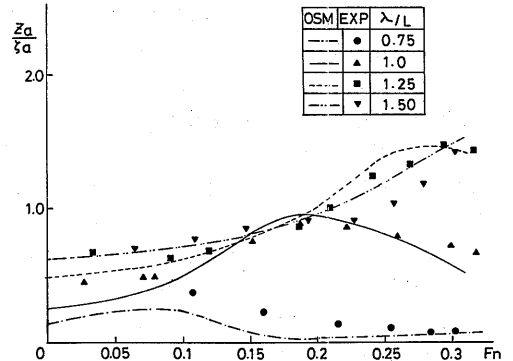


Fig. 5 Amplitude of heaving ($\chi=180^\circ$)

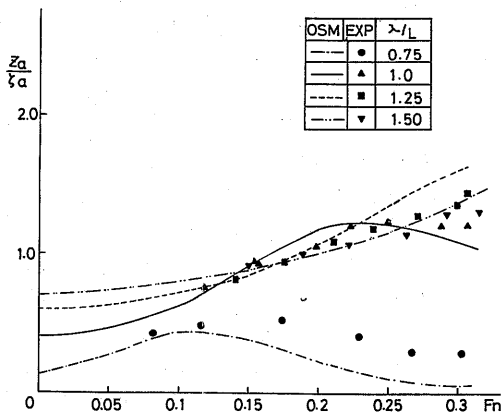


Fig. 6 Amplitude of heaving ($\chi=150^\circ$)

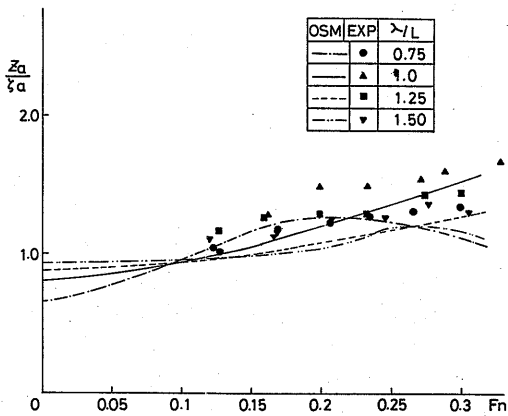


Fig. 7 Amplitude of heaving ($\chi=120^\circ$)

この運動モードの場合でも pitching の場合と同じく、船速が増すと長波長の波浪中では運動が大きくなり、短波長波中では逆に運動が沈静化する方向にある。出会角との関係でみると、 χ が 120° となり、横波状態に近づくとつれ、波長による運動の差異は少なくなり、いずれも船速と共に漸増傾向を持つようになる。また heaving の大きさは、大体、波高の大きさのオーダーとなる。

(3) pitching と heaving の位相差

各運動モード間の位相差は、運動振幅と同等の重要性を持つことがあるが、計測波形からの算出が面倒なためか、データとしてまとめられたものは少い。モード間の位相差の内でも、pitching と heaving の位相差は縦運動、とりわけ船首部の運動と密接な関係を持っているものである。本来ならば、入射波に対する pitching あるいは heaving の各位相差という形で表現することが適切であろうが前に述べた理由により pitching

を基準にとり、それと heaving との位相差で考えることにする。Fig. 8~10 によするものがそれである。運動の位相定義は、前に記した通り、pitching は船首下げを正に、heaving は重心上昇を正にとり、位相遅れを正としている。

$\chi=180^\circ$ の $\lambda/L=0.75$ の場合は、実験値、計算値いずれも大きく変化している他は、船速の変化に対してあまり影響されない。出会角、波長によって少しずつ変わっているが、位相差は大体 $-90^\circ \sim -140^\circ$ である。特に出会角 150° から 120° へと斜波になっていくと、 -90° に近づいていく。これは船が波面に沿って航行していくことを意味する。

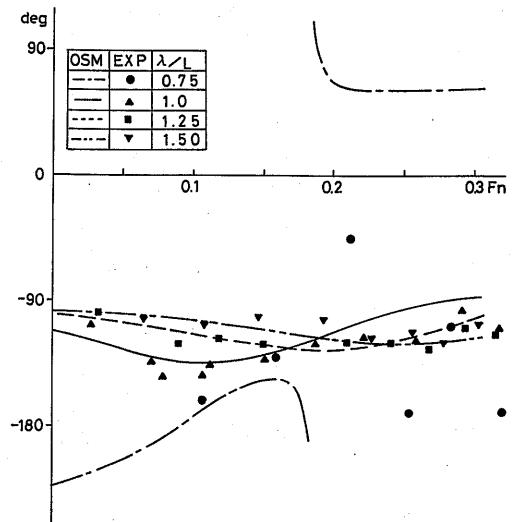


Fig. 8 Phase lag of heaving to pitching ($\chi=180^\circ$)

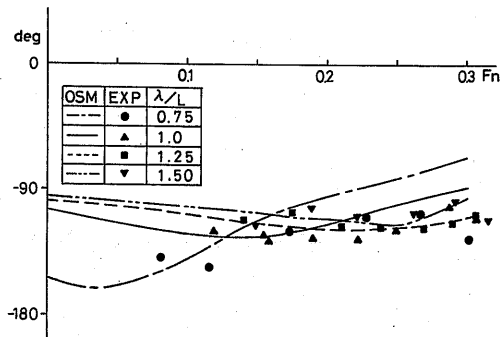


Fig. 9 Phase lag of heaving to pitching ($\chi=150^\circ$)

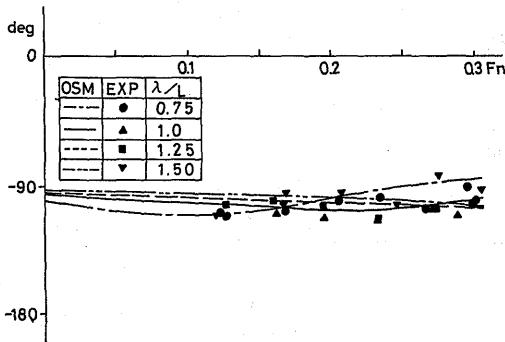


Fig. 10 Phase lag of heaving to pitching ($\chi=120^\circ$)

(4) 相対水位

船側で計測される相対水位は水圧変動と等価なものとなすことができるので、船底露出の有無と言った即物的な情報だけでなく、船に働く変動水圧の概略の大きさを示す指標の役割も果たす。本実験では船首部SS8½と船体中央SS5のいずれも weather side にテフロン被覆線を用いた容量式水位計を装着して、相対水位の計測を行った。

まずSS8½における相対水位変動の振幅と、その変動のピッチングに対する位相遅れを Fig. 11~16 に示す。水位変動の振幅をみると船速によって大きく変化することがわかる。 $\chi=180^\circ$ と 150° の $\lambda/L=0.75$ の場合は、船速がある程度大きくなると逆に減少する傾向を持つが、それ以外の波長および $\lambda/L=0.75$ でも、 $\chi=120^\circ$ 程度になると、いずれも船速と共に変動の振幅は大きくなっていく。これらは先にみた pitching および heaving の増大に対応するものである。これは斜め波のために見掛上波長が伸びたようになるためであろうと考えられる。これらの実験値に対し、OSMによる計算値を曲線で示す。定性的ばかりでなく、定量的にも、実験値と良く一致していることがわかる。ただし $\lambda/L=0.75$ の場合は、定性的な傾向は合っているが、やや計算値の方が低速で大き目になり、逆に高速で過少に評価しているようである。

ピッチングに対する位相差は、実験結果によれば、 $\chi=180^\circ$ と 150° の $\lambda/L=0.75$ の場合、船速と共に位相遅れが減少していく傾向がみられる。しかしそれよりも長い波では船速の増減に対し、位相の変化はあまりみられない。概ね 60° 附近の値で推移している。これに対し計算値は、実験結果よりも $20^\circ\sim 30^\circ$ 少い位相遅れを示している。定性的な性質は実験結果と良い一致を示しているようである。すなわち計算値でも $\lambda/L=$

0.75の波を正面近くを受ける場合が船速に対する位相変化が一番大きく、波長が長くなるにつれて位相差は船速によらずほぼ一定となること、また斜波になるに連れ、位相差は大きくなること等が計算でも明確に出ている。

SS5における相対水位変動の振幅と pitching に

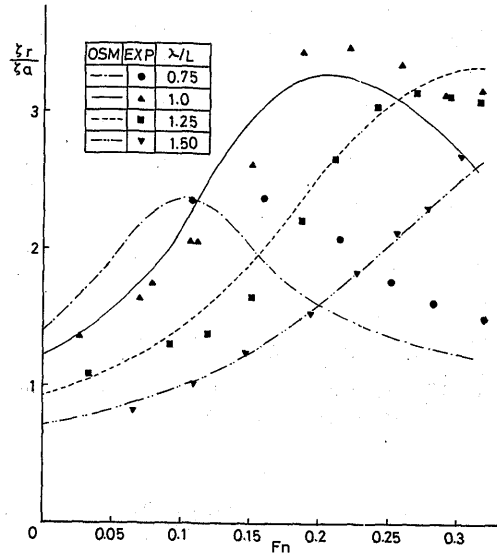


Fig. 11 Amplitude of relative wave at

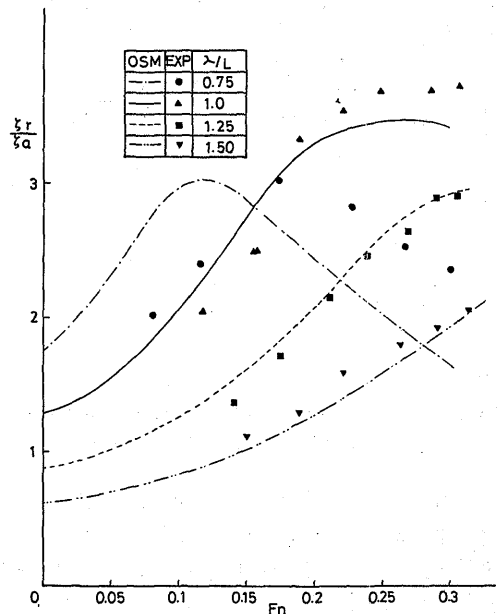


Fig. 12 Amplitude of relative wave elevation at SS8½ ($\chi=150^\circ$)

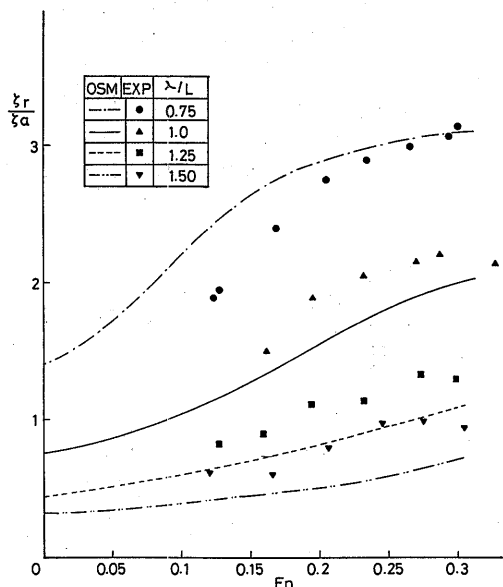


Fig. 13 Amplitude of relative wave elevation at SS 8 1/2 ($\chi=120^\circ$)

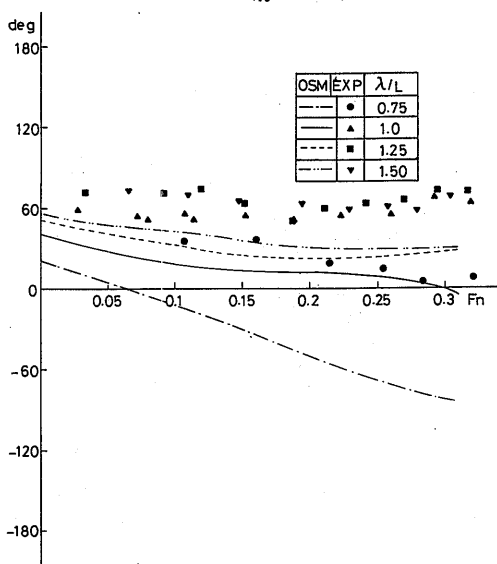


Fig. 14 Phase lag of relative wave elevation at SS 8 1/2 to pitching ($\chi=180^\circ$)

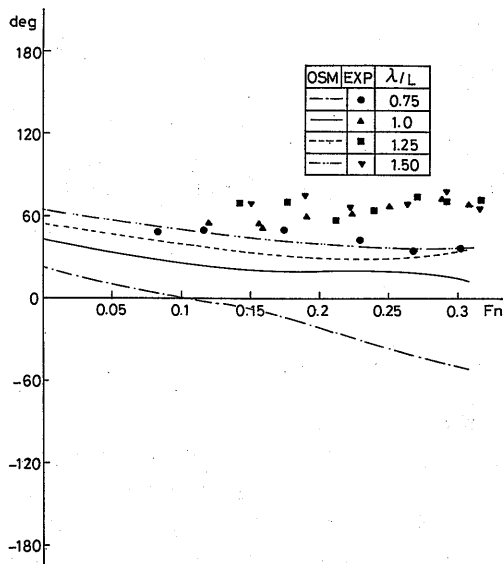


Fig. 15 Phase lag of relative wave elevation at SS 8 1/2 to pitching ($\chi=150^\circ$)

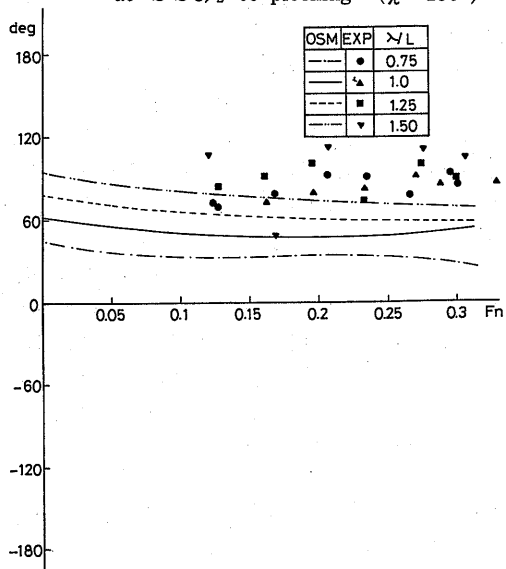


Fig. 16 Phase lag of relative wave elevation at SS 8 1/2 to pitching ($\chi=120^\circ$)

対する位相差をFig. 17~22に示す。振幅の船速に対する変化の様子は先に見たSS 8 1/2の場合とかなり違い、 $\chi=180^\circ$ と 150° においては船速が増大すると一度振幅は減少し、その後又大きくなっていく。また出会角の関係でみると、 $\chi=180^\circ$ の場合が一番振幅レベルが低く、斜波に移っていくに従い振幅は大きくなっていく

ようである。

次に位相差をみてみると、SS 8 1/2でのそれと異なり、位相の変化が激しい。その傾向は実験値のみならず、計算値でもあらわれている。これらの原因は、SS 5の水位変動が入射波とheavingの位相的な重なりの結果生ずることによると考えられる。

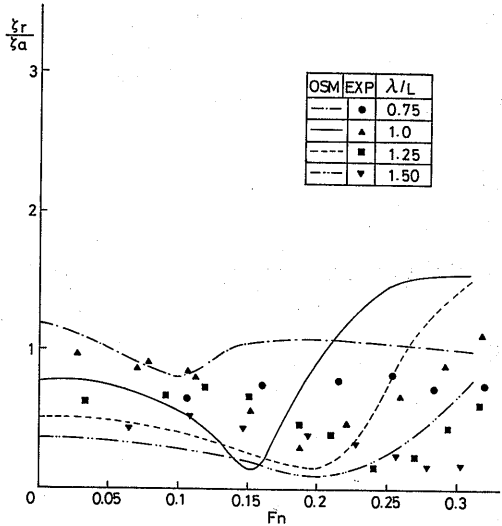


Fig. 17 Amplitude of relative wave elevation at S S5 ($\chi=180^\circ$)

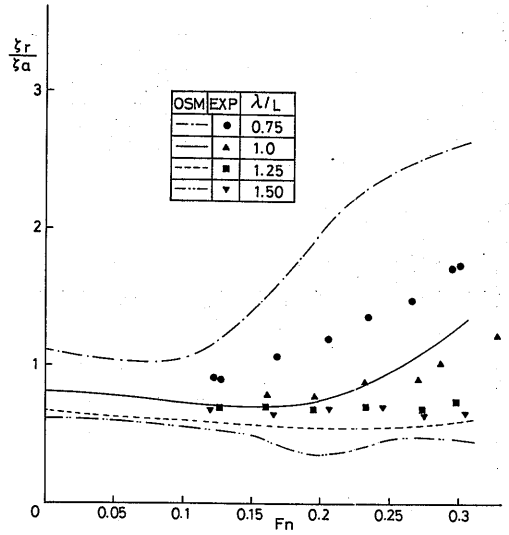


Fig. 19 Amplitude of relative wave elevation at S S5 ($\chi=120^\circ$)

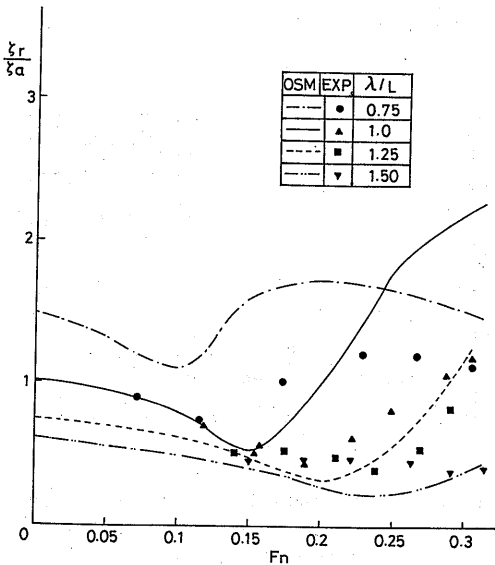


Fig. 18 Amplitude of relative wave elevation at S S5 ($\chi=150^\circ$)

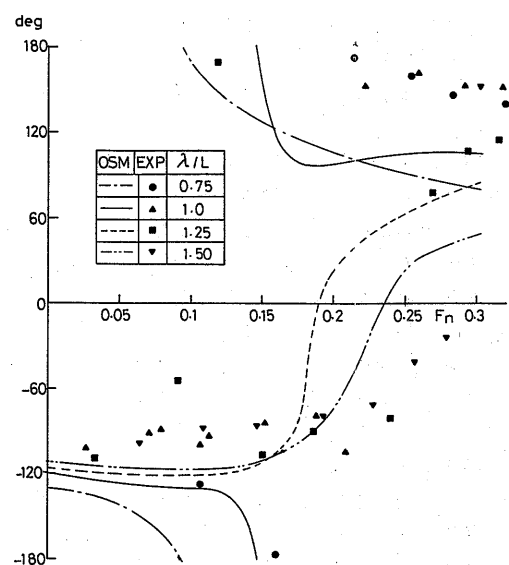


Fig. 20 Phase lag of relative wave elevation at S S5 to pitching ($\chi=180^\circ$)

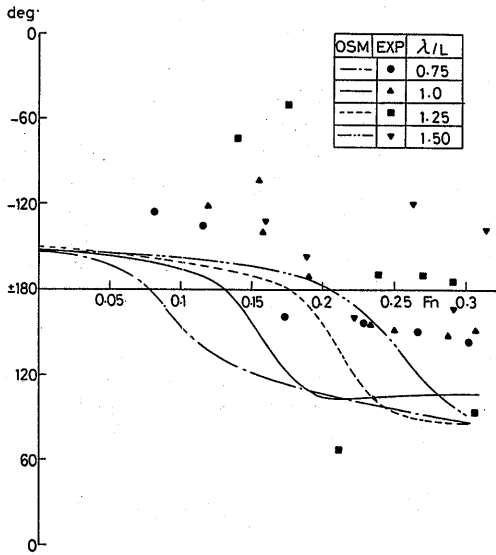


Fig. 21 Phase lag of relative wave elevation at SS5 to pitching ($\chi=180^\circ$)

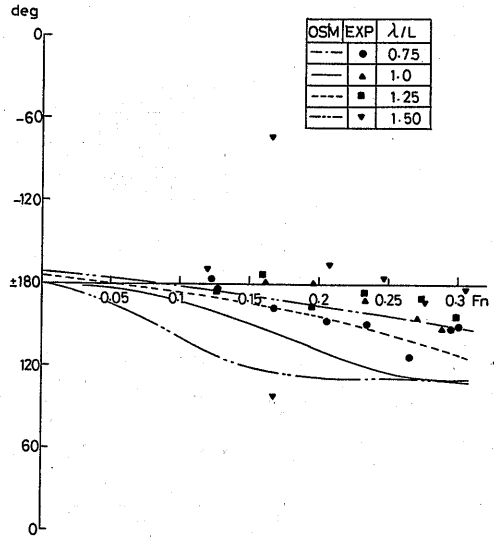


Fig. 22 Phase lag of relative wave elevation at SS5 to pitching ($\chi=120^\circ$)

(5) 水圧の船長方向分布

諸測された水圧分布のうち、船の船長方向の分布の特徴を見るために船底中央で計測された水圧の振幅を Fig.23から25に示す。

水圧 (\bar{p}) は波振幅に対する比でその大きさをあわせている。

$\chi=180^\circ$ の場合、船長方向分布は出会う波によって差はあるものの、いずれの場合もSS7より船首側で急に圧力の上昇がみられる点が共通している。その傾向は船速が急大したり、波長が長くなるとより顕著になる。また船速が増大すると、船首部だけでなく、全体に水圧の変動が大きくなるようである。

推定計算の結果は概ね実験で得られた水圧分布と一致しているといえる。船速、波長、出会う角に対する変化の様子についても実験結果を良くあらわしている。

$\chi=150^\circ$ になっても分布の基本的なパターンは $\chi=180^\circ$ の場合と同じである。すなわち船首部での水圧の急激な盛り上がり、船速の増大と共に分布全体が大きくなる事はこの出会う角でも認められる。理論値はこの場合も良く実験値と対応している。

$\chi=120^\circ$ になると、斜波の影響が加わるためか、前二例の出会う角の場合とはやや異った分布形となる。すなわち船首部の盛り上がり傾向が弱められ、全体に平坦化

された分布形が与えられる。それと共に水圧そのものの大きさが減少するようである。

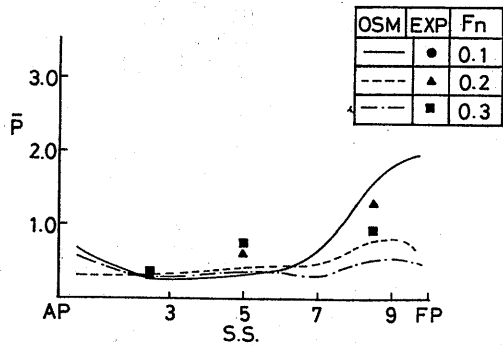


Fig. 23—(1) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=180^\circ, \lambda/L=0.75$)

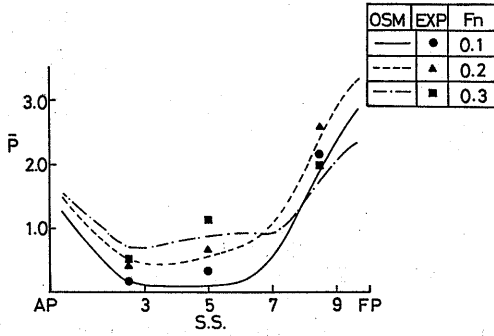


Fig. 23-(2) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.0$)

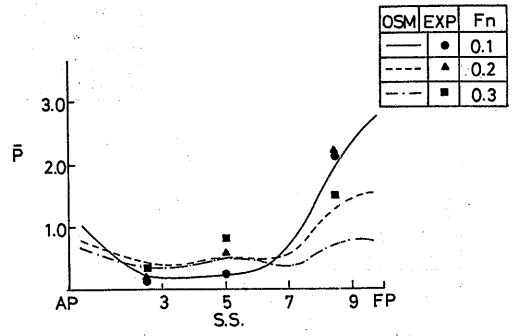


Fig. 24-(1) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=150^\circ, \lambda/L=0.75$)

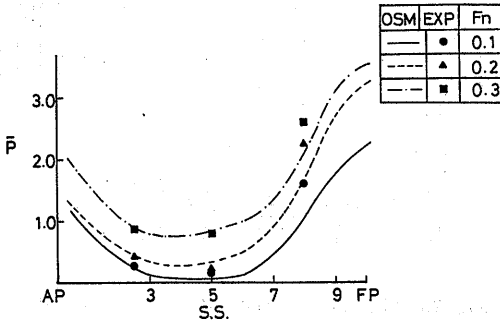


Fig. 23-(3) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.25$)

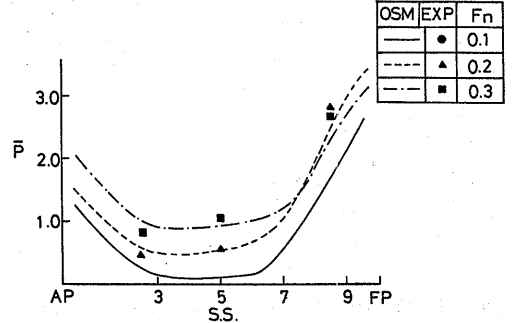


Fig. 24-(2) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.0$)

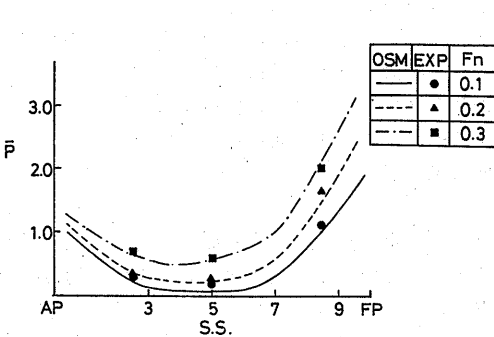


Fig. 23-(4) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.50$)

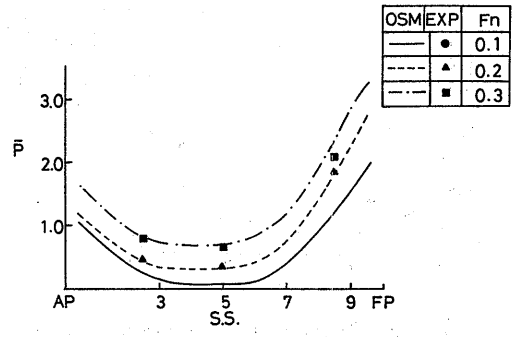


Fig. 24-(3) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.25$)

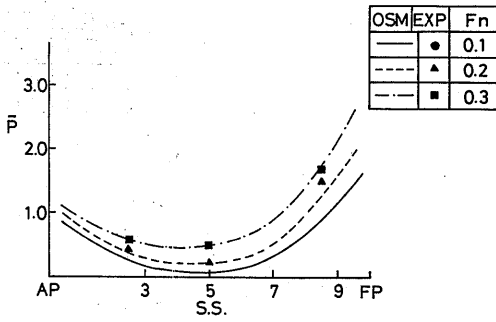


Fig. 24—(4) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.50$)

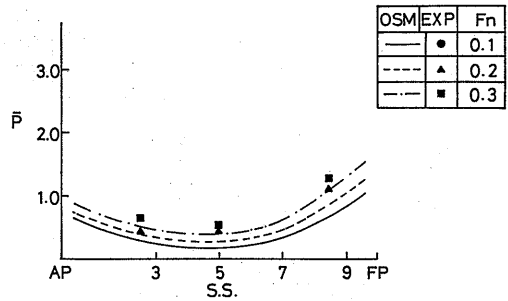


Fig. 25—(3) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.25$)

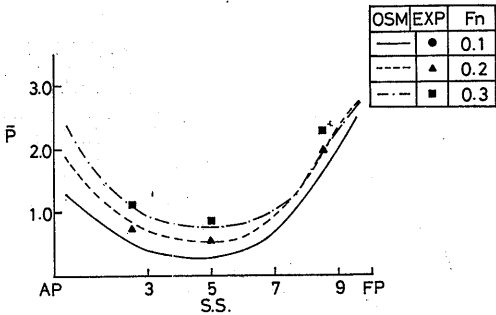


Fig. 25—(1) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\lambda=120^\circ, \lambda/L=0.75$)

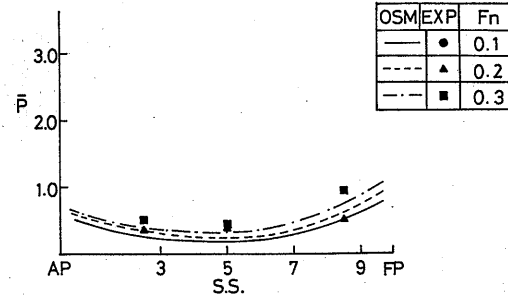


Fig. 25—(4) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.50$)

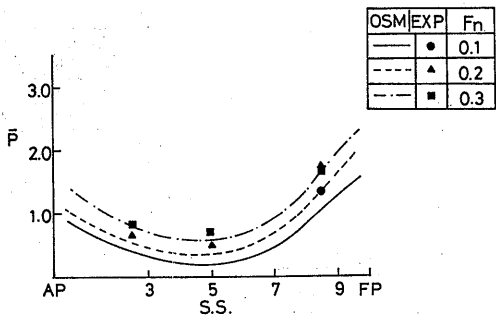


Fig. 25—(2) longitudinal pressure distribution along the bottom center line ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0$)

(6) 水圧の横断面内分布

船体の代表的な横断面について、そこでの横断面内の水圧分布を次にみることにする。対象としたのはSS 2½, 5, 7½, 8½の4断面である。各断面内における水圧計側位置はFig. 1に示す通りであるが、以下の分布図においてはその位置の表示法として、図に示すような水圧計と喫水面のなす角度を取ることにする。角度は Weather side から測るものとする。

ここで空中に露出したり、浸水したりする水圧計で計測される水圧波形に対する振幅の定義を述べておく。このような波形は水中に入っている場合は通常の波形であるが、空中に露出した時は大気圧で一定となる、いわゆる半波形波形である。この場合は、静止状態の記録から基本水位を求め、それよりも水圧の高い部分のみを用いて振幅その他の計算を行っている。

Fig.26から29に $\chi=180^\circ$ の場合の各横断面毎の分布を示す。曲線で理論推定値を示すが、実験と良く対応していることが判る。ただ実験で得られた分布では、水面近くの水圧が理論値程大きくない。これは、船体が波を崩すといった非線形現象が関与しているのではないと思われる。断面の船長方向の位置と関係づけて眺めてみると、船体中央から船尾側では、断面内分布のレベルが低く、船首側では船底部も含む断面全体の水圧レベルが高いことがわかる。波長が長くなるにつれて、水圧変動の断面内分布は平坦になっていく傾向がみられる。これは波が長くなると深さ方向の水圧減少の度が緩やかになり、深い所まで大きな水圧変化が生ずるためと思われる。

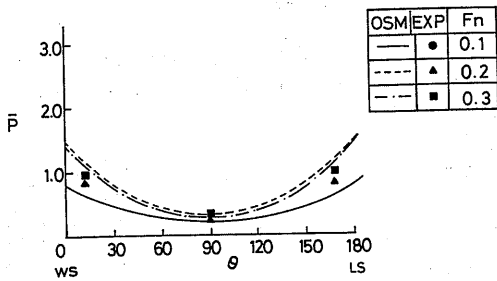


Fig. 26-(1) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=0.75, SS2\frac{1}{2}$)

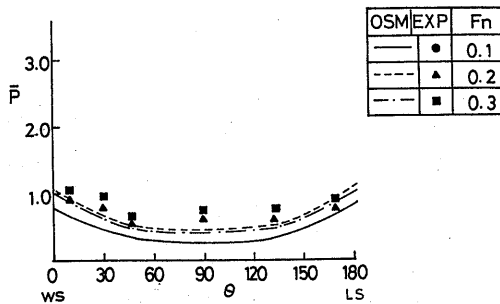


Fig. 26-(2) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=0.75, SS5$)

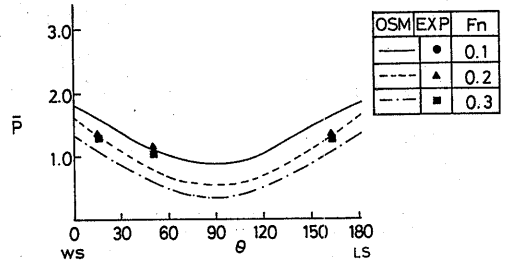


Fig. 26-(3) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=0.75, SS7\frac{1}{2}$)

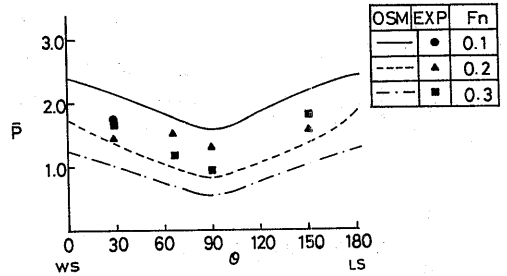


Fig. 26-(4) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=0.75, SS8\frac{1}{2}$)

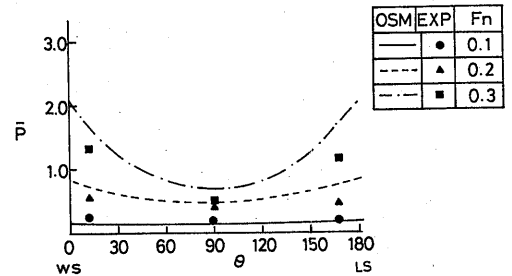


Fig. 27-(1) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.0, SS2\frac{1}{2}$)

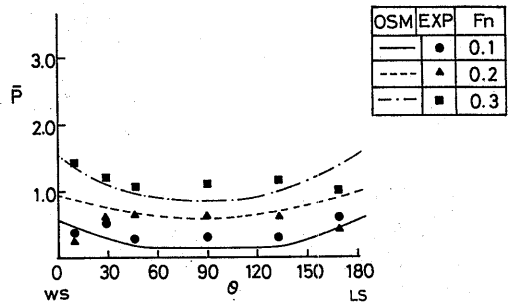


Fig. 27-(2) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.0, SS5$)

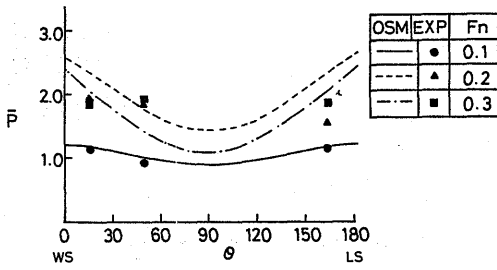


Fig. 27-(3) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.0, SS7\frac{1}{2}$)

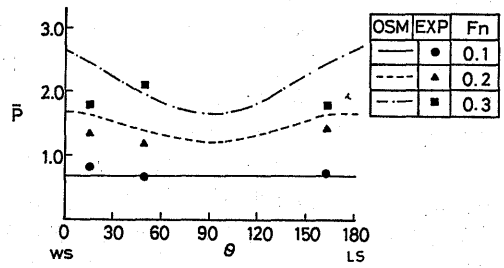


Fig. 28-(3) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.25, SS7\frac{1}{2}$)

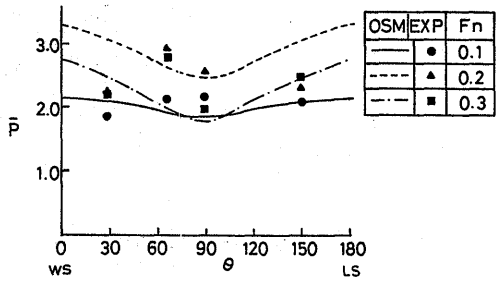


Fig. 27-(4) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.0, SS8\frac{1}{2}$)

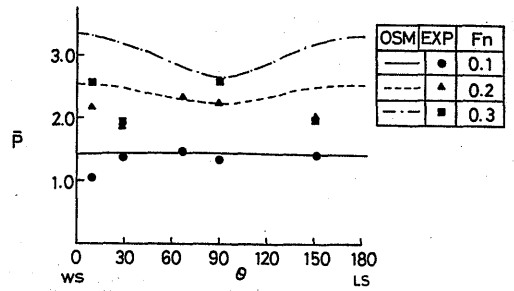


Fig. 28-(4) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.25, SS8\frac{1}{2}$)

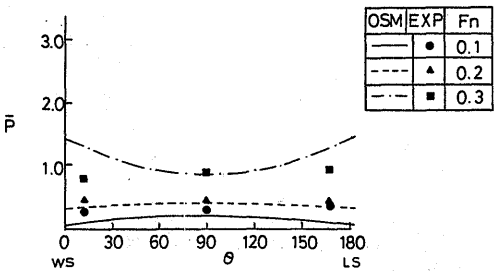


Fig. 28-(1) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.25, SS2\frac{1}{2}$)

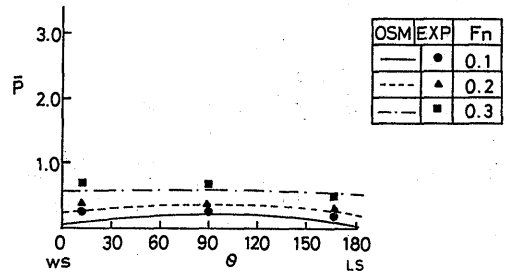


Fig. 29-(1) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.50, SS2\frac{1}{2}$)

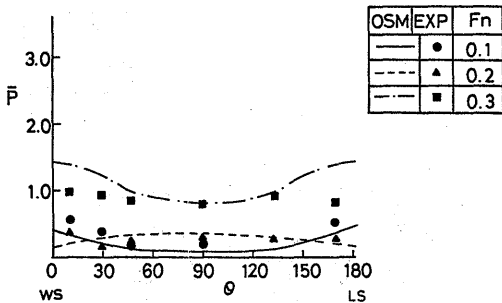


Fig. 28-(2) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.25, SS5$)

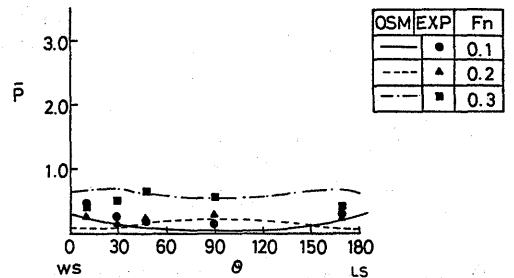


Fig. 29-(2) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.50, SS5$)

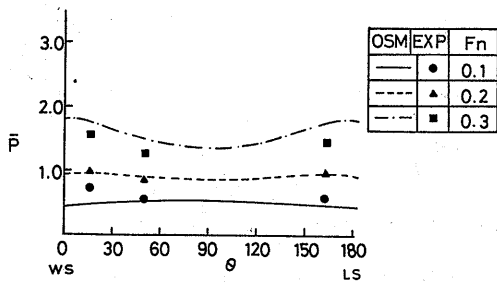


Fig. 29—(3) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.50, SS7\frac{1}{2}$)

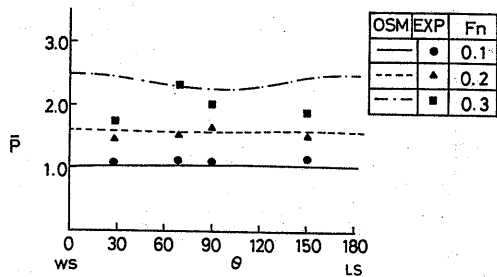


Fig. 29—(4) transverse pressure distribution ($\chi=180^\circ, \lambda/L=1.50, SS8\frac{1}{2}$)

$\chi=150^\circ$ の場合を Fig. 30 から 33 に示す。斜波状態のため左右両舷の非対称性があらわれる。特に船体中央部に顕著である。対称成分である縦運動成分の寄与が少く、横運動がこの附近の水圧に支配的な影響を及ぼしていることのアラわれと考えられる。波が短い場合にも非対称性が顕著になっているが、これは運動自体が小さいので、波が斜めに入射していることによる差があらわれているものと思われる。この出会角における水圧変動の大きさは、概ね $\chi=180^\circ$ の場合と同程度とみなせるようである。またこの場合でも実験結果には水面近くでの分布のつぶれた傾向があらわれている。

$\chi=120^\circ$ の場合を Fig. 34 から 37 に示す。この出会角の場合は、前二者の出会角と異なり、船尾側の分布もかなり大きくなっている。これは先に述べた船底水圧変動にもあらわれていた傾向である。この出会角では波が長くなると水圧変動が前二者の場合に比して小さくなっている。見掛上の波長が長くなる結果、波と船の相対運動が減少し、船は波面に沿って運動しているだけという状態のアラわれと考えられる。

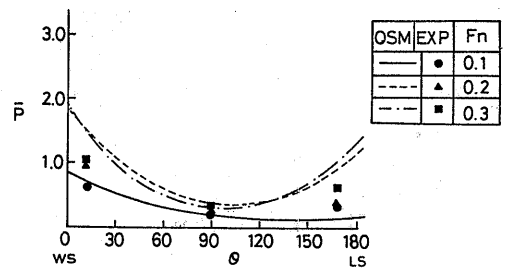


Fig. 30—(1) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=0.75, SS2\frac{1}{2}$)

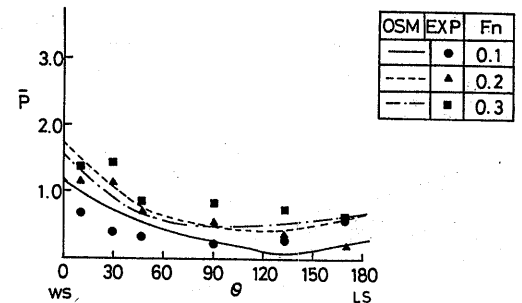


Fig. 30—(2) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=0.75, SS5$)

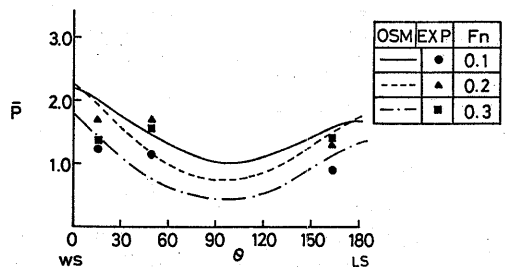


Fig. 30—(3) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=0.75, SS7\frac{1}{2}$)

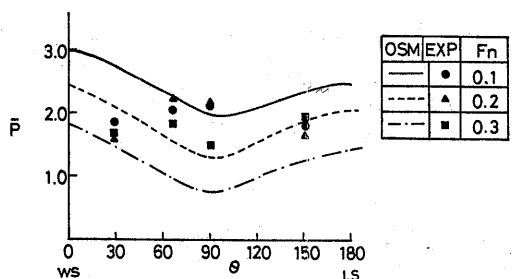


Fig. 30—(4) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=0.75, SS8\frac{1}{2}$)

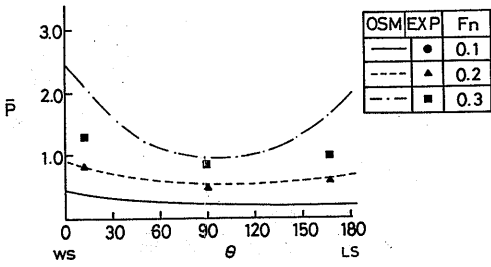


Fig. 31-(1) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.0, SS2\frac{1}{2}$)

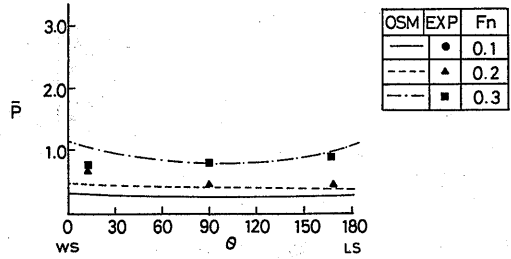


Fig. 32-(1) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.25, SS2\frac{1}{2}$)

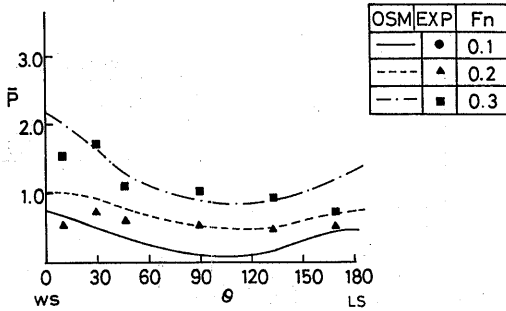


Fig. 31-(2) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.0, SS5$)

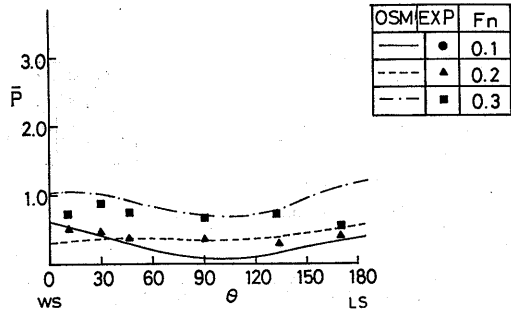


Fig. 32-(2) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.25, SS5$)

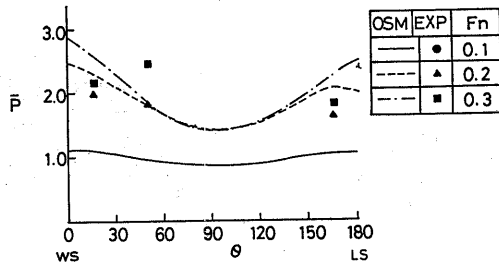


Fig. 31-(3) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.0, SS7\frac{1}{2}$)

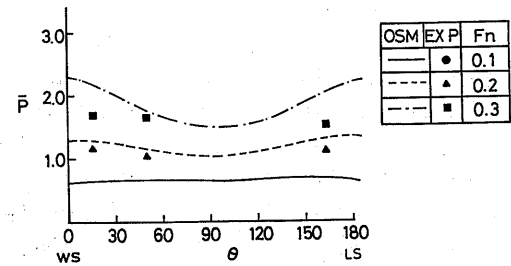


Fig. 32-(3) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.25, SS7\frac{1}{2}$)

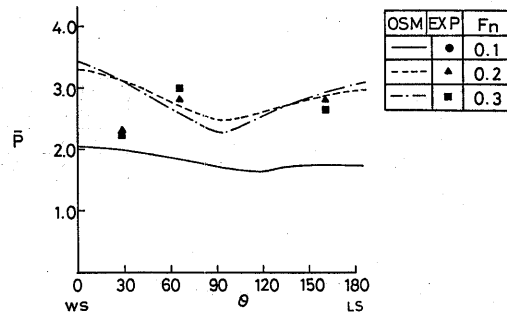


Fig. 31-(4) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.0, SS8\frac{1}{2}$)

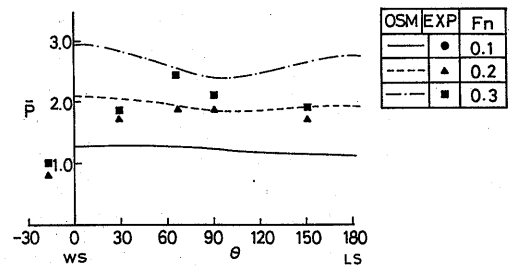


Fig. 32-(4) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.25, SS8\frac{1}{2}$)

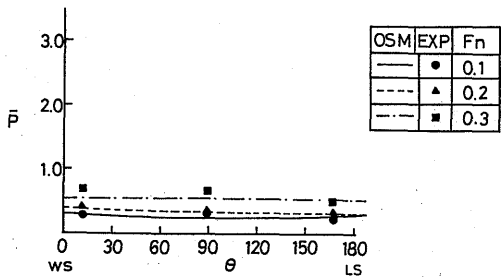


Fig. 33-(1) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.50, SS2\frac{1}{2}$)

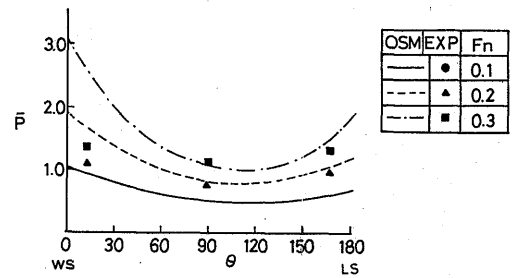


Fig. 34-(1) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=0.75, SS2\frac{1}{2}$)

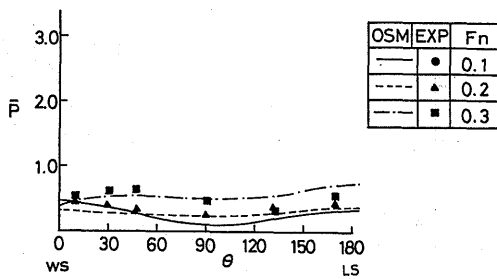


Fig. 33-(2) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.50, SS5$)

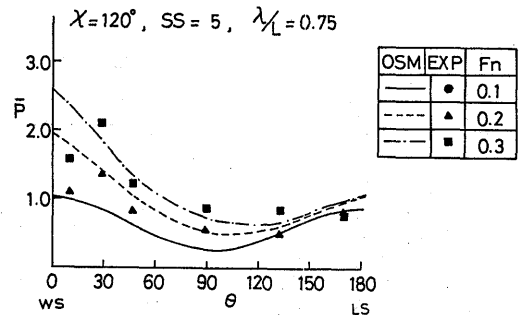


Fig. 34-(2) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=0.75, SS5$)

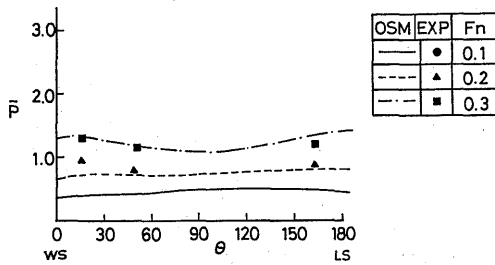


Fig. 33-(3) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.50, SS7\frac{1}{2}$)

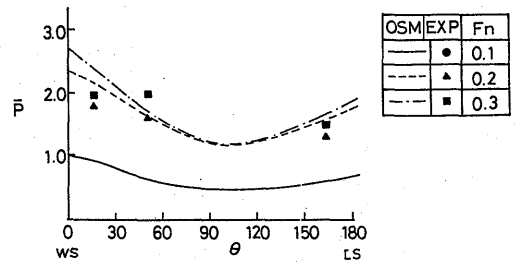


Fig. 34-(3) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=0.75, SS7\frac{1}{2}$)

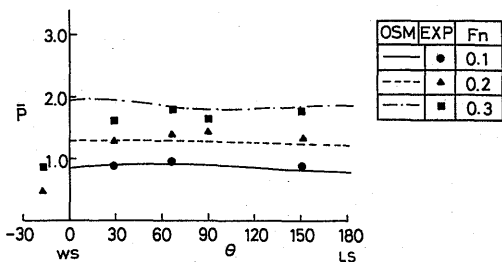


Fig. 33-(4) transverse pressure distribution ($\chi=150^\circ, \lambda/L=1.50, SS8\frac{1}{2}$)

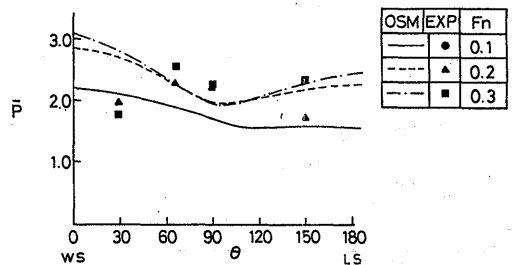


Fig. 34-(4) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=0.75, SS8\frac{1}{2}$)

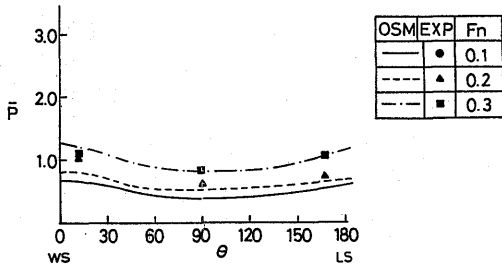


Fig. 35-(1) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0, SS2\frac{1}{2}$)

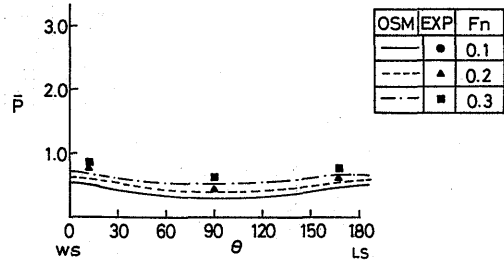


Fig. 36-(1) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.25, SS2\frac{1}{2}$)

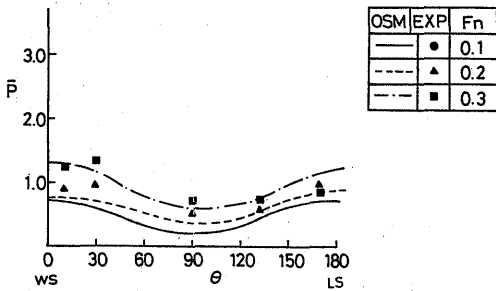


Fig. 35-(2) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0, SS5$)

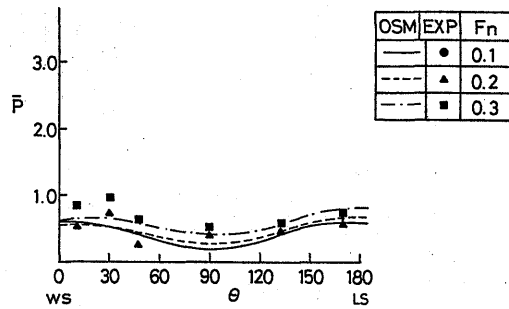


Fig. 36-(2) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.25, SS5$)

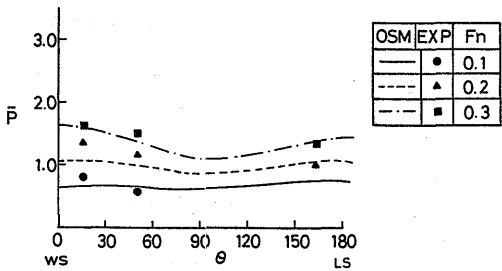


Fig. 35-(3) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0, SS7\frac{1}{2}$)

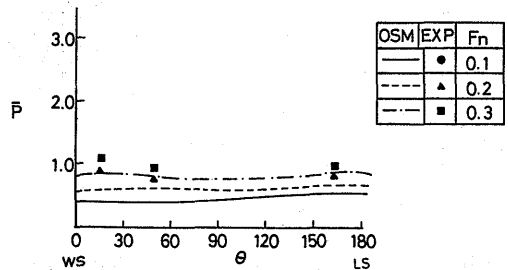


Fig. 36-(3) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.25, SS7\frac{1}{2}$)

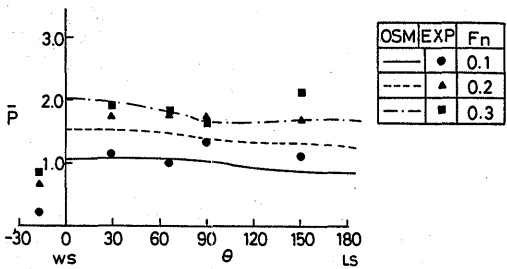


Fig. 35-(4) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0, SS8\frac{1}{2}$)

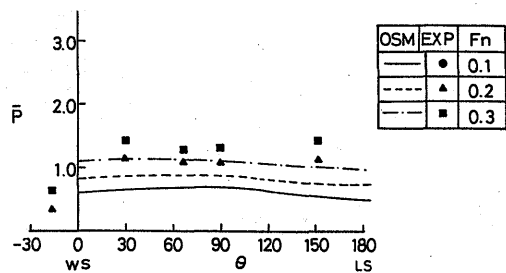


Fig. 36-(4) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ, \lambda/L=1.0, SS8\frac{1}{2}$)

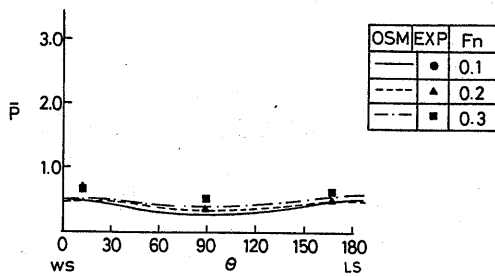


Fig. 37-(1) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ$, $\lambda/L=1.0$, SS2½)

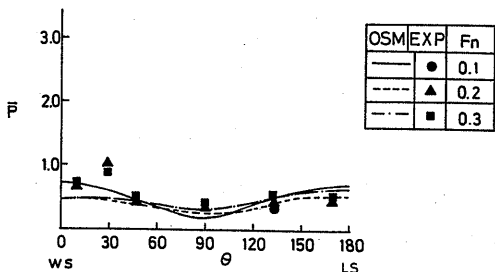


Fig. 37-(2) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ$, $\lambda/L=1.50$, SS5)

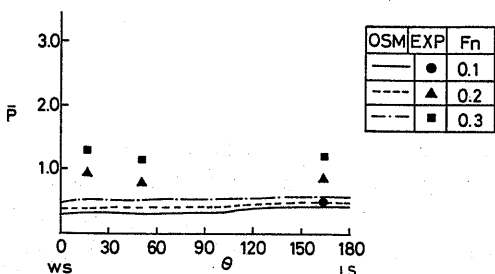


Fig. 37-(3) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ$, $\lambda/L=1.50$, SS7½)

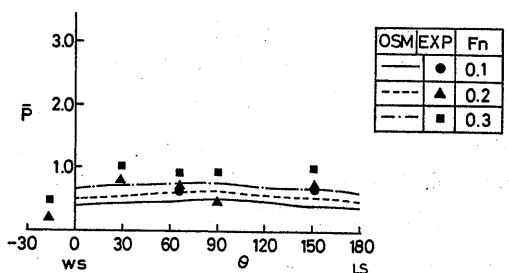


Fig. 37-(4) transverse pressure distribution ($\chi=120^\circ$, $\lambda/L=1.50$, SS8½)

4. 結 言

高速コンテナ船模型を規則波中に自由航走させ、その時の船体運動、相対水位および波浪変動水位の計測を行い、出会波、出会角および船速と諸量の関係を調べた。この結果から高速コンテナ船の斜波中での応答特性全般の知見が得られたと思われる。これらは従来から使われてきたストリップ法に基づく計算値の適用可能分野と不十分な点を明らかにしていると考えられるので、今後行なうべき推定計算法改良の作業に役立つものと思われる。今回は斜め向波中のデータを中心にまとめたが、追波中のデータについても今後報告する予定である。

本稿に用いた実験データはかなり以前（8年前）に採取したもので、筆者の怠慢により今日にまで報告が遅れてしまった。この間、データの整理、図面の調整等、多くの人々に御援助を戴いた。とりわけ、高石敬史氏（前耐航性研究室長、現海洋開発工学部長）には、終始変らぬ御指導と御鞭達を戴いた。また運動性能部の同僚各位には実験の支援はじめ、幾多の局面で支援を賜った。

参 考 文 献

- 1) 福田淳一他：“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)
- 2) 高石敬史他：“斜め波中における船側の相対水位変動について” 日本造船学会論文集第132号(1972.11)
- 3) 菅井和夫他：“斜め波中の船体に働く波浪変動水圧に関する模型実験” 日本造船学会論文集第133号(1973.6)
- 4) 渡辺巖：“変動水圧データの解析プログラム” 船舶技術研究所報告15巻1号(1978.1)
- 5) 日本造船学会試験水槽委員会：“「第2回耐航性に関するシンポジウム」テキスト”(1977.12)

Appendix 波浪変動圧の計算式

本論文で使用したストリップ法 (OSM) に基づく波浪変動水圧の計算手順⁹⁾を簡単に述べる。

まずはじめに用いた座標系および船体運動を表わす記号等を定義する。座標系はFig. A-1のように船と共に一定速度Uで併進する右手系 (0xyz) とする。船体中央に原点を置き、船首方向にx軸を左舷側にはy軸、z軸を上向きにとる。

入射波 ζ_w は規則波とし、波振幅 a_0 、波長 λ の波が船と χ の角度で出会うとする。波の式は

$$\zeta_w = a_0 \cos \{ \omega t - k(x \cos \chi - y \sin \chi) \} = \text{Re} [a_0 \exp i \{ \omega t - k(x \cos \chi - y \sin \chi) \}] \dots (A-1)$$

対応する速度ポテンシャルは

$$\phi_w = \text{Re} [i \frac{g}{\omega} a_0 e^{kz} \exp i \{ \omega t - k(x \cos \chi - y \sin \chi) \}] \dots (A-2)$$

ここで $\omega_e = \omega - kU \cos \chi$, $\omega = \sqrt{gk}$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

である。上式のようにここで扱う時間変動量はすべて ω_e で変動するので、複素振幅表示を用いることとし、必要がなければ Re を省略する。

これに対し船体運動の各モードを

heaving	$\zeta = \zeta_a \exp i(\omega t - \varepsilon_\zeta)$	} (A-3)
pitching	$\theta = \theta_a \exp i(\omega t - \varepsilon_\theta)$	
swaying	$\eta = \eta_a \exp i(\omega t - \varepsilon_\eta)$	
yawing	$\psi = \psi_a \exp i(\omega t - \varepsilon_\psi)$	
rolling	$\varphi = \varphi_a \exp i(\omega t - \varepsilon_\varphi)$	

とする。運動の方向はFig. A-1にも記した通り、heavingは重心上昇を、pitchingは船首沈下を、swayingは左舷方向への移動、yawingは左回頭を、またrollingは左舷上昇を正方向とそれぞれ定義する。

入射波および船体運動間の位相は、全体の基準として、 $x = 0$ である船体中央で水面隆起が最大となった時点を取り、それからの位相遅れを正としてあらわす。

ストリップ法に基づく水圧計算であるから、各断面毎の二次元流場の水圧のみを扱うこととし、三次元影響は省略する。

断面としての上下動、左右動、回転運動は、先に定義した船全体の運動モードからそれぞれ次のように与えられる。

上下動の変位は

$$\zeta_2 = \zeta - (x - x_c) \theta$$

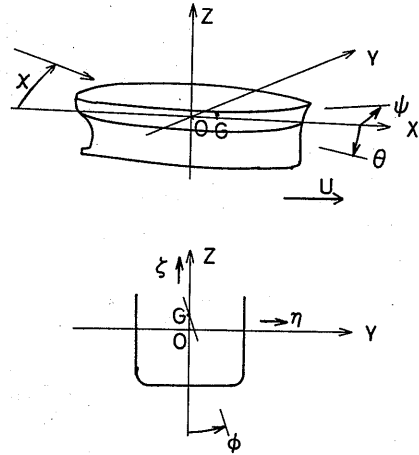


Fig. A-1 Definition of coordinates

$$= \{ \zeta_a e^{-i\varepsilon_\zeta} - (x - x_c) \theta_a e^{-i\varepsilon_\theta} \} e^{i\omega t} \dots (A-4)$$

左右動は

$$\eta_2 = \eta + (x - x_c) \psi + z_c \varphi = \{ \eta_a e^{-i\varepsilon_\eta} + (x - x_c) \psi_a e^{-i\varepsilon_\psi} + z_c e^{-i\varepsilon_\varphi} \} e^{i\omega t} \dots (A-5)$$

および横揺

$$\varphi_2 = \varphi = \varphi_a e^{-i\varepsilon_\varphi} e^{i\omega t} \dots (A-6)$$

と書かれる。ここで x_c , z_c は重心の座標である。

波浪変動圧は浮力変化に対応する頃、Froude・Krylov力に対応する頃、およびhydrodynamic成分からなる。最後の項は更にradiation項とdiffraction項に分れる。

(1) 浮力に対応する成分は船体各点はその平衡位置から沈下もしくは上昇することによる静水圧変化であり、

$$P_B = -\rho g (\zeta_2 + \varphi_{z2}) = -\rho g \{ \zeta - (x - x_c) \theta + \varphi_y \} = -\rho g \{ \zeta_a e^{-i\varepsilon_\zeta} - (x - x_c) \theta_a e^{-i\varepsilon_\theta} + \varphi_a y e^{-i\varepsilon_\varphi} \} e^{i\omega t} \dots (A-7)$$

と書かれる。

(2) Froude・Krylov力に対応する成分は平衡位置にある船体に作用する波圧である。すなわち

$$P_{FK} = \rho g a_0 e^{kz} \exp i \{ \omega t - k(x \cos \chi - y \sin \chi) \} \dots (A-8)$$

である。

(3) hydrodynamic な成分のうち radiation によるものをまず考える。対象とした断面が単位振幅で、上下、左右、回転運動をしている時のそれぞれに対応する水圧を添字 V, H, R をつけて

$$\left. \begin{aligned} P_V &= P_{Va} e^{-i\varepsilon_V} e^{-i\omega_e t} \\ P_H &= P_{Ha} e^{-i\varepsilon_H} e^{i\omega_e t} \\ P_R &= P_{Ra} e^{-i\varepsilon_R} e^{i\omega_e t} \end{aligned} \right\} \dots (A-9)$$

この時の位相遅れは変位を基準にしてあらわす。

この水圧は単位振幅の運動によるものであるが、見方を変えると、 ω_e の速度と ω_e^2 の加速度を持つ運動に対するものとみなすことができる。各断面の変位 (A-3) ~ (A-5) に実質微分を施して速度、加速度を求め、それを (A-8) の各成分に乗じて足し合わせれば、求める全 radiation pressure となる。

上下変位の式 (A-3) から速度が

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_z}{dt} &\equiv \left(\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \xi_z = \dot{\xi} - (x-x_c) \dot{\theta} + U\theta \\ &= i\omega_e \left(\xi_a e^{-i\varepsilon_s} - (x-x_c) \theta_a e^{-i\varepsilon_\theta} - \right. \\ &\quad \left. - i_j \frac{U}{\omega_e} \theta_a e^{-i\varepsilon_\theta} \right) e^{i\omega_e t} = i\omega_e \left(\xi_z - i \frac{U}{\omega_e} \theta \right) \end{aligned} \dots (A-10)$$

となり、加速度も同様に

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \xi_z}{dt^2} &= \ddot{\xi} - (x-x_c) \ddot{\theta} + 2U\dot{\theta} \\ &= -\omega_e^2 \left(\xi_z - i \frac{2U}{\omega_e} \theta \right) \end{aligned} \dots (A-11)$$

となる。

左右動についても全く同様な演算により

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta_2}{dt} &= i\omega_e \left(\eta_2 + i \frac{U}{\omega_e} \varphi \right) \\ \frac{d^2 \eta_2}{dt^2} &= -\omega_e^2 \left(\eta_2 + i \frac{2U}{\omega_e} \varphi \right) \end{aligned} \right\} \dots (A-12)$$

回転運動については

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_2}{dt} &= i\omega_e \varphi_2 \\ \frac{d^2 \varphi_2}{dt^2} &= -\omega_e^2 \varphi_2 \end{aligned} \right\} \dots (A-13)$$

である。

水圧の式 (A-9) の第一式を変形すると

$$P_V = P_{Va} \cos \varepsilon_V \cos \omega_e t + P_{Va} \sin \varepsilon_V \sin \omega_e t$$

$$\begin{aligned} &= \left(-\frac{P_{Va}}{\omega_e^2} \cos \varepsilon_V \right) (-\omega_e^2 \cos \omega_e t) \\ &\quad + \left(-\frac{P_{Va}}{\omega_e} \sin \varepsilon_V \right) (-\omega_e \sin \omega_e t) \end{aligned} \dots (A-14)$$

と書ける。この第一項が加速度に比例する部分、第二項が速度に比例する部分である。今考えている断面に対する水圧は、この各項と断面の持つ加速度、速度を乗じて加えあわせたものとなる。すなわち

$$\begin{aligned} &\left(-\frac{P_{Va}}{\omega_e^2} \cos \varepsilon_V \right) \left(\frac{d^2 \xi_z}{dt^2} \right) \\ &\quad + \left(-\frac{P_{Va}}{\omega_e} \sin \varepsilon_V \right) \left(\frac{d\xi_z}{dt} \right) \end{aligned} \dots (A-15)$$

が上下動によって生ずる水圧の計算式である。

同じく左右動、横揺についても P_H , P_R より断面に対する水圧成分が計算できる。これらをまとめると

$$\begin{aligned} P_{DR} &= \left(-\frac{P_{Va}}{\omega_e^2} \cos \varepsilon_V \right) \left(\frac{d^2 \xi_z}{dt^2} \right) \\ &\quad + \left(-\frac{P_{Na}}{\omega_e} \sin \varepsilon_V \right) \left(\frac{d\xi_z}{dt} \right) \\ &\quad + \left(-\frac{P_{Ha}}{\omega_e^2} \cos \varepsilon_H \right) \left(\frac{d^2 \eta_2}{dt^2} \right) \\ &\quad + \left(-\frac{P_{Ha}}{\omega_e} \sin \varepsilon_H \right) \left(\frac{d\eta_2}{dt} \right) \\ &\quad + P_{Ra} e^{-i(\varepsilon_R + \varepsilon_\theta)} e^{i\omega_e t} \dots (A-16) \end{aligned}$$

(4) hydrodynamic pressure のうち diffraction 成分は、縦波、横波中では厳密な形の二次元 diffraction 問題を解いて求めることができるが、斜波では本質的に二次元問題として扱えないので近似解に依らざるを得ない。ここでは代表点での波粒子速度を媒介にして radiation 問題に置換える手法による。上下方向成分については (A-2) より $z = -d^*$ における波粒子の速度、加速度

$$\begin{aligned} v_w &= i\omega a_0 e^{-kd^*} \exp \{ i\omega_e t - ik(x \cos \chi - y \sin \chi) \} \\ a_w &= -\omega^2 a_0 e^{-kd^*} \exp \{ i\omega_e t - ik(x \cos \chi - y \sin \chi) \} \end{aligned} \dots (A-17)$$

ここで $d^* = \sigma d$, σ は断面係数, d は喫水。

また水平方向の粒子速度についても $z = -d/z$ の値は、

$$\begin{aligned} v_w &= -\omega a_0 \sin \chi e^{-kd/2} \exp \{ i\omega_e t - ik(x \cos \chi - y \sin \chi) \} \\ a_w &= -i\omega^2 a_0 \sin \chi e^{-kd/2} \exp \{ i\omega_e t - ik(x \cos \chi - y \sin \chi) \} \end{aligned} \dots (A-18)$$

となる。これらの速度，加速度の符号を逆転させた大ききで船体が運動しているとするとその時のpressureは

$$P_{DD} = [(-a_w - i v_w) P_{V\alpha} e^{-i\epsilon_V} + (-a_v - i v_v) P_{H\alpha} e^{-i\epsilon_H}] e^{-i\epsilon_H} \dots (A-19)$$

となる。

以上求めた P_B , P_{FK} , P_{DR} , P_{DD} を足しあわせれば船体に作用する全水圧が得られる。