

1-1

(昭和 50 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

船側波浪衝撃水圧に関する実験的研究

正員 菅 井 和 夫* 正員 北 川 弘 光*
 正員 不 破 健* 正員 大 松 重 雄*

Experimental Investigations into Impulsive Water Pressures
 upon the Hull Surface in Two-directional Irregular Waves

by Kazuo Sugai, Member, Hiromitsu Kitagawa, Member,
 Takeshi Fuwa, Member, Shigeo Ohomatsu, Member

Summary

Results of model experiments on an ore carrier are presented to investigate hydrodynamic impact upon the hull surface in two-directional irregular waves. Short term analysis of peak values of impulsive pressures indicates that the expected peak value distributions of the pressures are well approximated by Rayleigh distributions.

Distributions of impulsive pressure peaks over the stem and the hull side above water are examined. Effects of ship speed, course angle and mean wave period of irregular waves on impulsive pressures are also discussed.

1 緒 言

船首部や船体側部に働く波浪衝撃水圧に関する研究は、最近、各所で精力的に取組まれており、既に数々の成果が報告^{1~4)}されている。また、それらの成果をもとに、現在いくつかの衝撃水圧推定法^{5~7)}が提案されている。

船舶技術研究所においても、この方面の研究の一端として先に 2 方向規則波中における模型実験⁸⁾を行ない、波浪中の船体に働く衝撃水圧を計測した。その結果、船首から船側にかけて衝撃水圧がいかなる波浪条件のもとに、いかなる船体表面上の範囲に発生するかを定性的に明かにすることができた。また、衝撃水圧のピーク値、持続時間などを自航模型船上でかなり正確に測定できることがわかったので、衝撃水圧の定量的な検討も実験的にできる見通しがついた。

本論文は、これに引き続き 2 方向不規則波中における模型実験を行ない、波浪や船速などの条件ならびに船体表面上の位置に応じて、夫々の短期の衝撃水圧発生頻度分布を求めたものである。波浪衝撃水圧現象は極めて複雑なため、たとえ外的条件をかなり純粋に一定に保ち得たとしても、なんらかの不確定な要素が入り込むことが多いものと想像される。まして、不規則な実際の海面で船体が受ける衝撃水圧を推定しようとするには、どうしても統計論的な取扱いを必要とする。これが、今回、不規則波中で模型実験を行なった所以であり、そこで得られた短期の衝撃水圧発生頻度分布は、実海面での衝撃水圧推定法を確立して行く上での基礎資料となるものである。

2 実験方法

実験は、船舶技術研究所の角水槽において行なわれた。実験に用いた模型船は、大型鉱石専用船「笠木山丸」の 4.5m 木製模型である。実船および模型船の主要目および状態については、前論文⁸⁾を参照されたい。衝撃水圧の計測法は、前回の実験で確立された手法によった。Fig.1 に衝撃水圧計の船体表面上における配置を示す。

模型船の航走方法は、従来角水槽においてとられて来たものと同様なものとした。すなわち、自航模型船には

* 船舶技術研究所

自動操縦を加え、またプロペラ軸駆動モータの電圧は一定値に保ったまま航走させた。したがって、船の速度は夫々の出会い波の特性に応じて自然に低下している。

不規則波のタイプとしては、各素成波とも ISSC 型のものを採用し、その平均波周期をいろいろ変化して実験した。また、波高は各素成波とも有義波高で $L/50$ のものを標準とした。2 方向不規則波は、これら 2 つの直交する波群が合成されてできたものである。船速としては平水中速力 14.8 節に相当するものを標準とし、代表的な出会い波に対しては若干の船速を変化した実験ケースも加えた。2 方向不規則波中で波に対する船の出会い角を定義することは難しいが、ここでは各素成波の平均波周期を持った波が合成されてできた 3 角波の進行方向に対する船首方位角を主要出会い角 χ_p とし、これが真向いないし斜め向い波になるものを主に実験した。

不規則波中の実験データを統計論的にながめて意味があるようになるには、各実験とも唯一度の航走では角水槽といえども狭過ぎて充分とはいえない。そこで、夫々のケース毎に不規則波の発生信号をずらしながら 3 航走ずつは、することにした。こうして得られたデータを合せたものは、実船に換算して約 30 分間の航走に相当し、統計論的に処理して短期分布を求めるには充分な長さとなった。

3 2 方向不規則波の性質

角水槽の直交する 2 辺に設置された造波装置により、夫々 ISSC 型の正面不規則波を発生し、これら 2 つの素成波を合成して 2 方向不規則波とした。不規則波の発生方法は、第 1 面造波装置（フラップ・タイプ）については従来通りとしたが、第 2 面造波装置（プランジャー・タイプ）については新しく開発したインパルス応答法によることにした。その詳細については文献 9) を参照されたい。

波高の計測は、水没型超音波式波高計¹⁰⁾によった。Fig.2 にその計測データ（固定点）をスペクトラム解析した結果を実船スケールに直して示す。図中には、第 1 面造波および第 2 面造波を夫々単独に行なったときの波のスペクトラム $S^{(1)}(\omega)$ および $S^{(2)}(\omega)$ と、両方同時に造波したときの合成波のスペクトラム $S^{(1+2)}(\omega)$ とが示されている。いずれの場合にも、目標とする ISSC 型スペクトラムに非常に近いものが得られている。

合成波のスペクトラムが夫々の素成波のスペクトラムの線型重ね合せ

$$S^{(1+2)}(\omega) = S^{(1)}(\omega) + S^{(2)}(\omega) \quad (1)$$

であるとおおよそ見做せるということもここで得られた重要な結論である。これより、合成波の有義波高 $H_{1/3}^{(1+2)}$ は各素成波の有義波高を夫々 $H_{1/3}^{(1)}$ および $H_{1/3}^{(2)}$ としたとき、

$$H_{1/3}^{(1+2)} = \sqrt{\{H_{1/3}^{(1)}\}^2 + \{H_{1/3}^{(2)}\}^2} \quad (2)$$

のごとく与えられる。

さらに、2 方向不規則波の船の進行方向に対する粒子速度および波面傾斜角のスペクトラムは、各素成波毎に求められた夫々のスペクトラムの重ね合せとして与えられる（付録 I 参照）。また、2 方向不規則波中の船の縦運動¹¹⁾の応答スペクトラムを求めるときも、各素成波に対する出会いを考慮した応答スペクトラムを計算しそれらを重ね合せればよい。

4 衝撃水圧の実験結果とその考察

4.1 元良、高木、竹川による衝撃水圧推定法の概要

衝撃水圧の実験結果とその考察に入る前に、本論文の基調とする考え方を知る一助として、ここでは元良、高木、竹川の提案による衝撃水圧推定法⁷⁾について若干触れておきたい。同推定法は、西部造船会の技術研究会構造部会でとりまとめられた衝撃水圧の推定法⁶⁾を基礎とし、これに多少の変更を加えるとともに主としてその不規則波への拡張を行なったものである。その概要について述べると、衝撃水圧の発生メカニズムとして Wagner 型（碎波前）と Bagnold 型（碎波後）とに分けて考えてはいるが、要は衝撃水圧のピーク値 P_I が落下衝撃実験の結果から

$$P_I = K(\beta) \cdot \frac{1}{2} \rho V_n^2 \quad (3)$$

の形で与えられるものとしている。ここで、 β は波面と船体表面との相対傾斜角を、また V_n は同じく相対速度の船体表面法線方向成分を表わしており、それらのとり方は上記衝撃の型により多少異なる。 K は係数でやはり

衝撃の型により異なる値を採用している。そして、上記3つの因子が衝撃水圧の値を支配するものとしている。この不規則波中への拡張では、短期の試行回数 N のもとで衝撃水圧の最大値の期待値が

$$E[N P_{\max}] = f(N) \cdot K(N \beta_{\min}) \cdot \frac{1}{2} \rho_N V_{n\max} \quad (4)$$

のごとく与えられるものとし、試行回数 N のもとで β および V_n が夫々独立に最小値および最大値をとるものとした計算で、それらが同時に起るとしたことに対する修正係数 $f(N)$ を導入している。

以上のごとく、元良、高木、竹川の推定法は、現段階で波浪衝撃水圧を具体的に計算しようとするには、合理的でかつよく纏った方法であるということができ、本論文における衝撃水圧に対するイメージもそこに発している。ただ、各因子の細かい取扱い方に関しては現在研究が進行中であるため、本論文では、具体的に同推定法の計算を行ない実験値と比較することはしない。

4.2 波浪衝撃水圧の短期分布

実験データの解析に当っては、まず、圧力計の記録の上で、鋭い立上りと尖ったピーク、そして非常に短い持続時間とを持った衝撃水圧波形と、そうでないわゆる変動水圧波形とに分離を行なった。分離の理由は、現象のメカニズムが全く異なる2つの波形を一緒に扱えないという原理的な問題のほかに、接水すれば必ず衝撃が起るという仮定のもとに現実には衝撃波形でないものに衝撃のピーク値を仮想的に与えてやることが、実験解析上、困難であったためである。もちろん、記録波形からそれ以上の分離、たとえば Wagner 型と Bagnold 型の分離を行なうことなどは、識別不可能なためできない。

Fig. 3 (a), (b) は、このようにして分離した両波形の 30 分間における発生度数分布を示したものである。図の上部に両波形の分離の基準とした典型的な記録波形の例を示した。このような分離法では、多分に主観が入る恐れがあるようと思われるが、結果的には以下に述べるように大体合理的に分離が行なわれたようである。すなわち、衝撃水圧の発生度数分布はおおよそ Rayleigh 分布と見做せるのに対して、変動水圧のそれはあたかも Rayleigh 分布の左端を水圧計の水線上の高さに相当する分だけ切落したような分布となっている。後者の分布形が現われる原因是、出会い波によっては相対水位が圧力計の接水するところ迄に到らなかったものがあるためと考えられる。図中に書入れた Truncate Rayleigh 分布の曲線は、この左の切落された部分にも仮想した変動水圧の発生度数分布を与える、水線からの分散を求めて計算して得たものである。

一方、衝撃水圧に関しては、その発生頻度が高い位置のものについて、さらに詳しい検討を試みる。Fig. 3(c) は、船首ステムにおける波浪衝撃水圧の発生確率密度分布を示したものである。図の右上には、30 分間の全出会い数 N_{total} と、その中で発生した衝撃水圧の回数 N_I とが書入れてある。衝撃水圧発生の条件をその点が接水し、かつ波傾斜があるしきい値を超えたときに起るという仮定のもとに、実験で得られた衝撃の回数 N_I から逆算して波傾斜（ここでは diffraction wave については算入していない。）のしきい値 θ_w^* を求めるとき約 5°、波面と船体表面とのなす角 β のしきい値に直して約 52° を得た（付録 II 参照）。衝撃水圧現象の把握には、このような逆算から β など直接実験からは測り難い値の見当をつけてみるのも時には必要であろう。

Fig. 3 (c) から、波浪衝撃水圧の短期分布がおおよそ Rayleigh 分布と見做せることがより明確になった。統計論的な検定を行なった結果も、同様な結論に達した（付録 III 参照）。

4.3 短期分布の最大値の期待値

前節で波浪衝撃水圧の短期分布が Rayleigh 分布として取扱ってよいことがわかった。その分散の値は実験値から容易に求められるから、短期分布の衝撃水圧の最大値の期待値を直ちに推定することができる。このような最大値の期待値をもとにして実験値を整理するのが精度の良い方法であると考える。以下の解析では、短期分布として実船換算 30 分間の航海に相当するものを採ることにする。

まず、Fig. 4 に上記期待値が船体表面上の位置が変るに従ってどのように変化するかを示す。船の長さ方向には、期待値が船首付近で大きく、船体平行部に近づくに従って急激に減少して行く様子がよくわかる。この図は 2 方向不規則波の主なる伝播方向に対して真向いの方向に航走している場合であるが、斜め向い波になんでもこの一般的傾向は変わらない。Wagner 型と Bagnold 型とは本来ならば分けて考えるべきであるが、前にも述べたようにこれらを実験記録上分けることが不可能であったため、船首付近では主に Wagner 型、また船体平行部では主に Bagnold 型が起きていると想像しながら本図を眺める必要がある。

船の長手方向には同じ位置で、上下の高さ位置だけが変化した場合には、衝撃水圧の上下方向の分布で極大に

なるところがどこかにあるものと思われる。その位置は、もちろん船速、出会い波の性質などに応じて変化するであろう。Fig. 4 に関する限り、船首付近では高さ 6 m のものの方が 2.25 m のものよりも衝撃水圧が大きくなっているがその差はあまり大きくないといえる。

このようにして、各実験状態毎に Fig. 4 と同様の図面が沢山画けるが、それらをもとに衝撃水圧に対する船速、波長、波との出会い角の影響をしらべた結果を以下に述べる。

Fig. 5 に 2 方向不規則波中の波浪衝撃水圧に及ぼす船速の影響を示す。この図は波の主なる伝播方向に対して真向いに航走した場合であるが、船速影響は船首ステム近傍でのみ顕著である。船体表面上の位置が船首から後方に移るにつれて船速の影響は急速に穏かになる。これらの結果は、傾向的には式(3)により容易に説明することができる。

Fig. 6 に、波浪衝撃水圧に及ぼす波長の影響を示す。2 方向不規則波中では、波長を定義することが難しいが、各素成波の平均波周期に対応する波長 λ_m の組合せを以ってここでは表現している。不規則波中における模型船の平均船速は、それぞれの出会い波の特性に応じて当然変って来るが、Fig. 6 では船速の影響を除去するため、実験値を補正して平均船速 10.5 節に相当する値に揃えてある。

波浪衝撃水圧に及ぼす波長の影響は、船首ステム付近で著しく、船体表面上の位置が後方に移るにつれてその影響は薄れて行く。波長は短くなる程衝撃水圧は大きくなるが、その極大となるところが $\lambda_m/L=0.5$ より少し低いところにあるらしい。

Fig. 7 に、波浪衝撃水圧に及ぼす波との出会い角の影響を示す。この図でも Fig. 6 の場合と同様に船速の補正を行なって船速一定としている。各素成波とも同一のスペクトラムを有する 2 方向不規則波であるが、船首ステムから S. S. 8 $^{1/2}$ に至るまで、いずれも波の主なる進行方向に対して真向い、 $\chi_p=180^\circ$ 付近で極大となっているが、その極大点は、船体表面上の位置が左舷後方に移るにつれて僅かではあるが χ_p が増加する方向にずれている。また、出会い角の影響も船首ステムで顕著であり、船体表面上の位置が後方に移るにつれてその影響は穏かになる。

以上、波浪衝撃水圧に関して実験値を短期分布における最大値の期待値の形で整理したが、このように短期分布としての特性が求められると、これをもとに長期分布を推定する道がひらかれることになる。その具体的な方法としては、たとえば長期分布を Weibull 分布とおき、その特性をしらべて行く方法¹²⁾などがあるが、本論文では現在それを行なう立場にはない。

5 結 言

大型鉱石専用船が波浪中で受けける船側衝撃水圧について統計論的な立場から定量的に検討を加えるため、角水槽で 2 方向不規則波中の模型実験を行なった。その結果、次のとき結論を得た。

- (1) 2 方向不規則波の統計論的な特性は、各素成波のそれを線型重ね合せしたものから推定することができる。
- (2) 実験から得られた船側波浪衝撃水圧の短期分布は、おおよそ Rayleigh 分布と見做せることがわかったので、それぞれの実験状態ごとに短期分布(実船換算 30 分間)の最大値の期待値を求めるこにより、実験データを整理した。
- (3) 船側波浪衝撃水圧に及ぼす不規則波中の船速、波長ならびに波との出会い角の影響をしらべた。また、衝撃水圧が船体表面上の位置によりどのように変化するかについても明かにした。

本実験の一部は、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、ご討論に対して、ここに厚くお礼申上げる。また、船舶技術研究所の角川明、二村正両君には、実験ならびに解析に多大の労をおかけした。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第 131 研究部会: 研究資料, No. 192, (1975).
- 2) 藤井 斎, 高橋 雄: 肥大船の船首衝撃に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 131 号, (1972).
- 3) Hagiwara, K. & Yuhara, T.: Fundamental Study of Wave Impact Loads on Ship Bow, (1st Report & 2nd Report), 日本造船学会論文集, 第 135 号, 第 136 号, (1974).
- 4) 竹沢誠二, 長谷川清一: 船体表面に働く波浪衝撃圧の特性について, 日本造船学会論文集, 第 135 号, (1974).

- 5) 西部造船技術研究会研究報告, 第 16 号, (1974).
- 6) 永元隆一, 塚本 修: 船首部波浪衝撃圧力の推定について, 西部造船会々報, 第 49 号, (1975).
- 7) 元良誠三, 高木又男, 竹川正夫: 日本造船研究協会研究資料, No. 192, (1975), p. 189~202.
- 8) 菅井和夫, 郷田国夫, 北川弘光 他: 2 方向波中の船体に働く波浪衝撃水圧に関する模型実験, 日本造船学会論文集, 第 135 号, (1974).
- 9) 北川弘光, 角川 明: 第 2 面造波装置による不規則波の発生について, 第 24 回船研発表会講演概要, (1974).
- 10) 松元尚義, 菅井和夫, 北川弘光: 複合波の計測例, 第 22 回船研発表会講演概要, (1973).
- 11) 北川弘光, 大松重雄: 2 方向波中の船体運動に関する一実験, 日本造船学会論文集, 第 135 号, (1974).
- 12) Mansour, A.: Methods of Computing the Probability of Failure Under Extreme Values of Bending Moment, Journal of Ship Research, Vol. 16, No. 2, (1972).

付 錄

付録 I 2 方向不規則波の粒子速度と波面傾斜角のスペクトラム

2 方向不規則波の船の進行方向に対する粒子速度のスペクトラム $S_u^{(1+2)}(\omega)$ は, 素成波の進行方向粒子速度のスペクトラムが, たとえば第 1 面不規則波について

$$S_u^{(1)}(\omega) = \frac{\omega^2}{4} e^{2kz} \cdot S^{(1)}(\omega)$$

のごとく与えられ, また本文 (1) 式が成立つことから,

$$S_u^{(1+2)}(\omega) = S_u^{(1)}(\omega) \cdot \cos^2(\pi - \chi^{(1)}) + S_u^{(2)}(\omega) \cdot \cos^2(\pi - \chi^{(2)})$$

となる。ここで $\chi^{(1)}, (2)$ は各素成波の進行方向と船首方位とのなす角である。

同様に, 2 方向不規則波の船の進行方向に対する波面傾斜角のスペクトラム $S_s^{(1+2)}(\omega)$ は, 素成波の進行方向波面傾斜角のスペクトラムが, たとえば第 1 面不規則波について

$$S_s^{(1)}(\omega) = \frac{\omega^4}{4g^2} \cdot S^{(1)}(\omega)$$

のごとく与えられ, また本文 (1) 式が成立つことから, 碎波の起らない範囲では近似的に

$$S_s^{(1+2)}(\omega) = S_s^{(1)}(\omega) \cdot \cos^2(\pi - \chi^{(1)}) + S_s^{(2)}(\omega) \cdot \cos^2(\pi - \chi^{(2)})$$

となる。

付録 II 船側波浪衝撃水圧の起る確率

衝撃の起る条件を

- (1) 圧力計が水につくこと。すなわち, 相対水位 η が圧力計位置の水面上の高さ z を超えること。
- (2) 波面と船体表面とのなす角 β があるしきい値 β^* 以下になること。

とし, 波面と船体表面との相対速度 V_n にはしきい値を設けないことにすると, その発生確率は

$$P[\eta > z \cap \beta < \beta^*]$$

を考えればよいことになる。 η と β とが互に独立であるとすれば

$$P[\eta > z \cap \beta < \beta^*] = P[\eta > z] P[\beta < \beta^*]$$

$\eta(t)$ が Gauss の random process とすると

$$P[\eta > z] = e^{-\frac{z^2}{2m_0}}$$

一方, $\beta = \alpha - \theta_w$ なる関係にあるから, 波傾斜 $\theta_w(t)$ もまた Gauss の random process とすると

$$P[\beta < \beta^*] = P[\theta_w > \theta_w^*] = e^{-\frac{\theta_w^{*2}}{2m_0'}}$$

したがって, 30 分間に起る衝撃の回数は

$$N_I = \frac{1800}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} e^{-\left\{ \frac{z^2}{2m_0} + \frac{\theta_w^{*2}}{2m_0'} \right\}}$$

で与えられる。

ここで, $m_0 \cdots \eta$ の分散, $m_2 \cdots \eta$ の速度の分散, $m_0' \cdots \theta_w$ の分散である。

付録 III 分布形の検定

船側波浪衝撃水圧の短期分布が Rayleigh 分布で近似できるか否かを代表的な数例につき検討した結果を Table 1 に示す。自由度 ($k-1$) の χ^2 分布で 1 乃至 5 % の値より実測した χ^2 の値の方が大きいと、その分布が想定した分布から有意にはずれていることになるが、そのような例は存在せず、おおよそ Rayleigh 分布と見做してよいことがわかる。

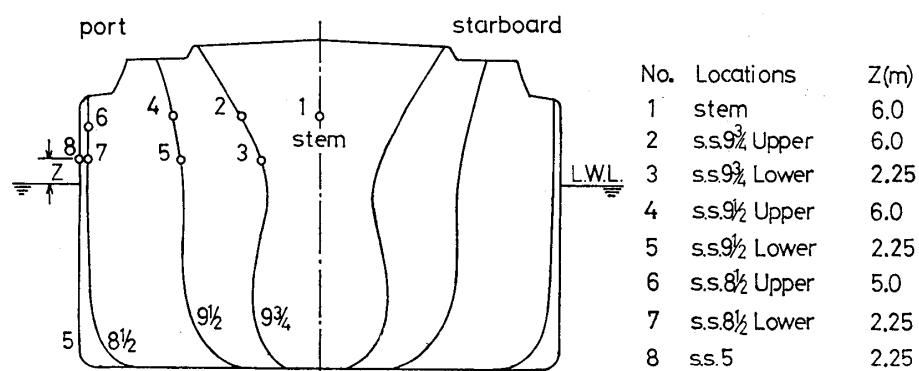
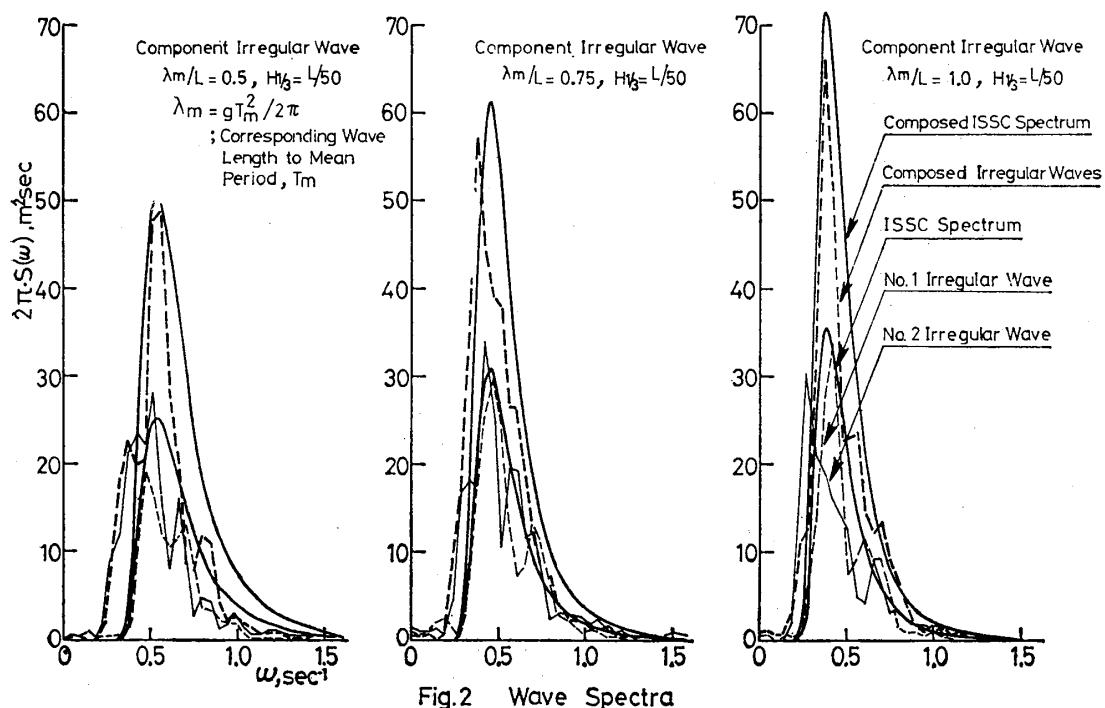


Fig. 1 Locations of Impact Pressure Gauges



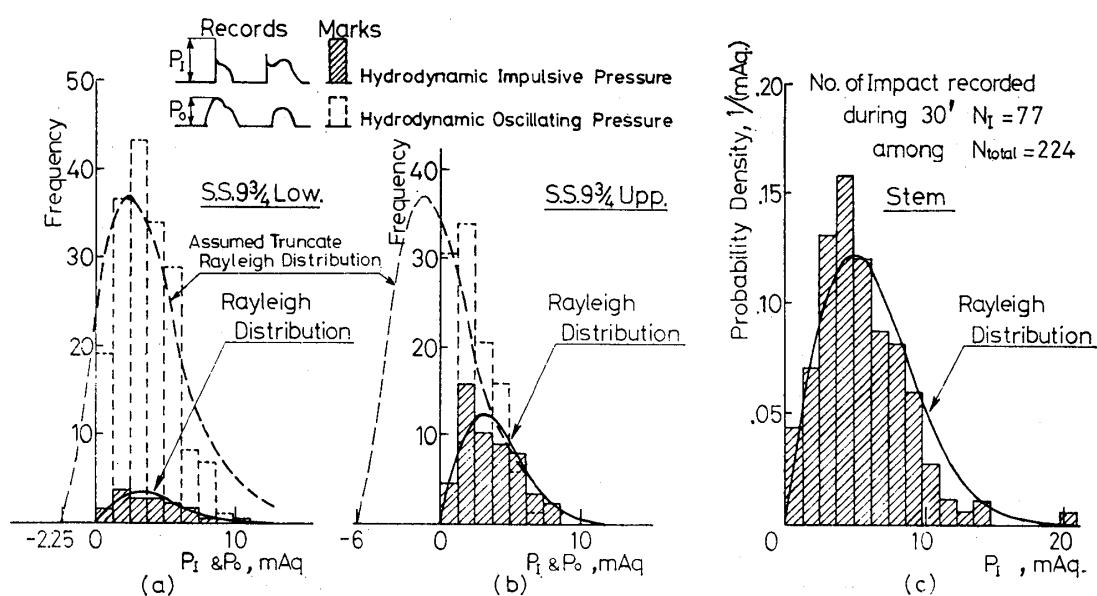


Fig. 3(a),(b),(c) Distributions of Peak Values of Hydrodynamic Oscillating and Impulsive Pressure
(Experimental Conditions are all the same as those of Fig. 4)

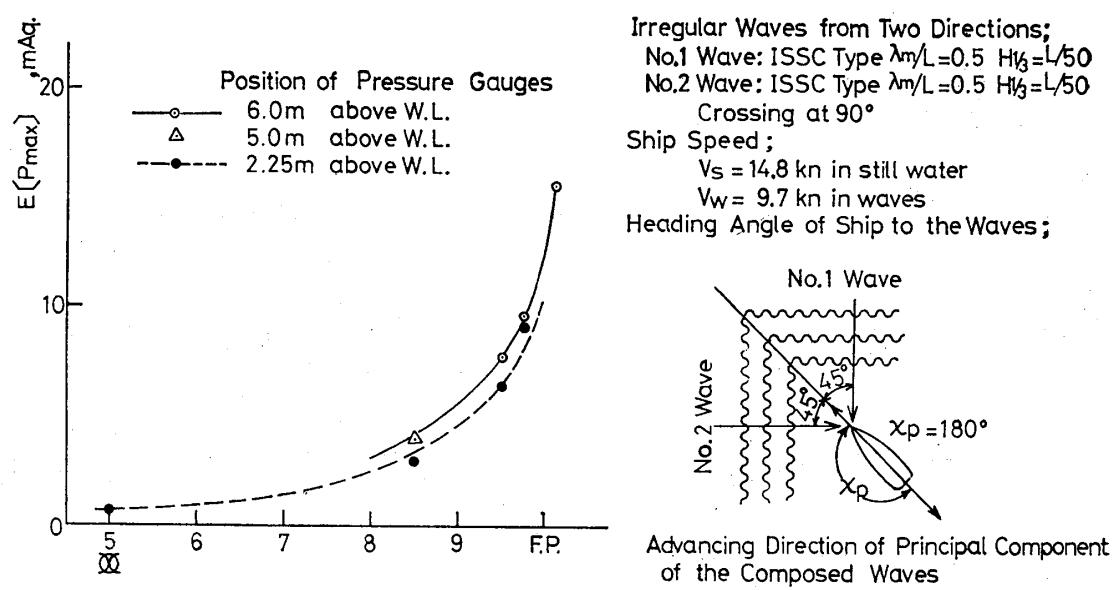


Fig. 4 Longitudinal Distributions of Short Term Expected Values of Impulsive Pressure Peaks

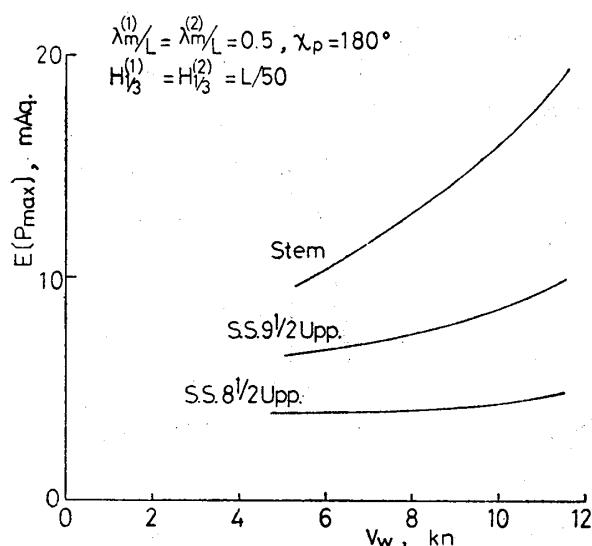


Fig. 5 Effect of Ship Speed on Impulsive Pressure

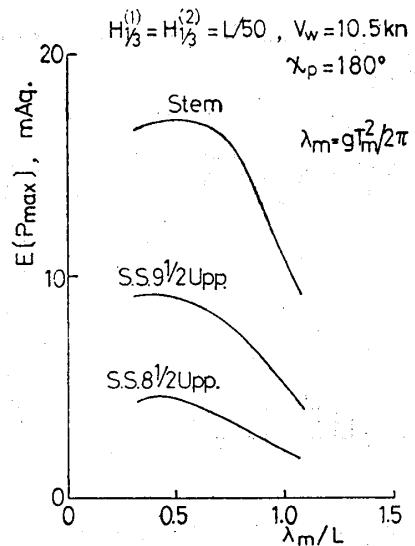


Fig. 6 Effect of Mean Wave Length of Waves on Impulsive Pressure

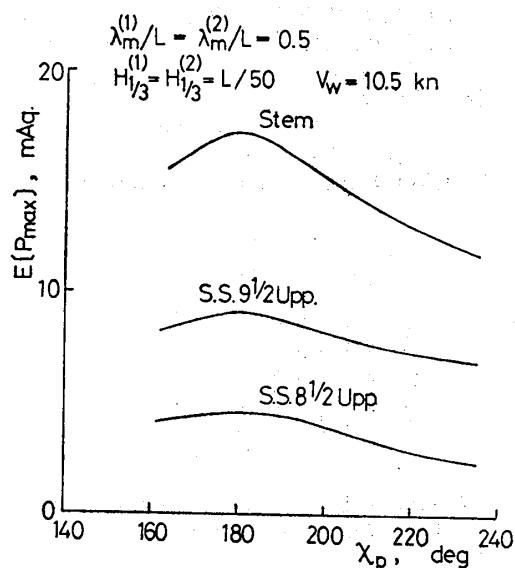


Fig. 7 Effect of Heading Angle on Impulsive Pressure

Table 1 χ^2 -Confidence

WAVE	V_w, kn	CONDITION	LOCATION	P=P($\chi^2 \geq \chi^2_0$)		
				χ^2	k-1	1 %
$\lambda_m/L = 0.5$	9.7	Stem	S.S. NO.	8.59	9	21.70
		9 3/4 Upp.		3.86	5	15.09
		9 3/4 Low.		3.73	5	15.09
	11.1	Stem		10.36	8	20.10
	7.6	Stem		4.75	5	15.09
						11.07