

(昭和52年5月 日本造船学会春季講演会において講演)

大波高不規則正面向波中における Deck Wetness および甲板衝撃水圧について

正員 竹 沢 誠 二* 正員 小 林 顕 太 郎**
正員 萩 野 功 正員 沢 田 和 男***

On the Deck Wetness and the Impulsive Water Pressures
Acting on the Deck in Head Seas

by Seiji Takezawa, *Member* Kentaro Kobayashi, *Member*
Kou Hagino, *Member* Kazuo Sawada, *Member*

Summary

The deck wetness and the impulsive water pressures induced by shipping water on the deck are serious problems of a ship operating in rough seas. For these problems, model experiments were conducted in extreme head seas in a towing tank.

In this study, relations between the probability of deck wetness and the following matters are discussed :

1. significant wave height
2. mean wave period
3. ship speed
4. significant values of ship motions
5. relative bow motion.

Relations between the peak values of impulsive pressures, relative bow motion and impact velocity of shipping water are also discussed.

Moreover, the prediction of the probability of deck wetness was made, applying the empirical expression of the dynamic swell-up proposed by R. Tasaki¹⁾, and compared with the experimental results. Finally some recorded patterns of impulsive water pressures are discussed in detail.

1 緒 言

船舶が波浪中を航行する際に発生する海水打ち込み、いわゆる Deck Wetness の現象およびそれに伴う甲板衝撃水圧の発生は、船の耐航性を考える上で欠かすことのできない研究課題である。これらの現象には多くの要素が複雑にからみあっているため、いろいろな角度から多くの研究^{1)~7)}が行なわれてきており、ようやくその特性が明らかとなりつつある。本学においては過渡水波関連の研究の一環として、極限状況を発生させるべく大波高過渡水波中で曳航実験⁸⁾を行ない、大きな甲板衝撃水圧(吃水の約5倍の水頭)を得ている。今回これに引き続き非常に大きい波高の不規則波中にて実験を行ない、多数の甲板衝撃水圧を計測し得た。その検討結果として極限状況下での甲板衝撃水圧、Deck Wetness の発生頻

度および衝撃水圧の大きさなどについて報告する。なお、前論文⁹⁾で船首正面および船底の衝撃水圧について、その発生機構を検討したのに続き、本論では甲板衝撃水圧について同様な検討を行なった。

2 実 験

2.1 供試模型船および使用不規則波

使用した模型船は前論文^{8),9)}と同型の大型鉱石専用船“笠木山丸”の2m FRP 模型である。実験は、満載、正面向波状態でフルード数 0.10, 0.15 の2通りについて行なった。主要目を Table 1 に示す。甲板は打ち込み水に備えて厚いアクリル板で被い、特に船首部は補強し

Table 1 Principal Particulars of “KASAGI-SAN-MARU”

Scale 1/123.5	Full Load
$L_{pp} = 2.0m$, $B = 0.329m$, $D = 0.186m$, $d = 0.13m$, $\nabla = 0.0704m^3$	
$C_B = 0.8243$, $\overline{CG} = 0.059m$ fore, $KG = 0.099m$, $K/L = 0.2362$	

* 横浜国立大学工学部

** 横浜国立大学大学院工学研究科

*** 石川島播磨重工業(株)

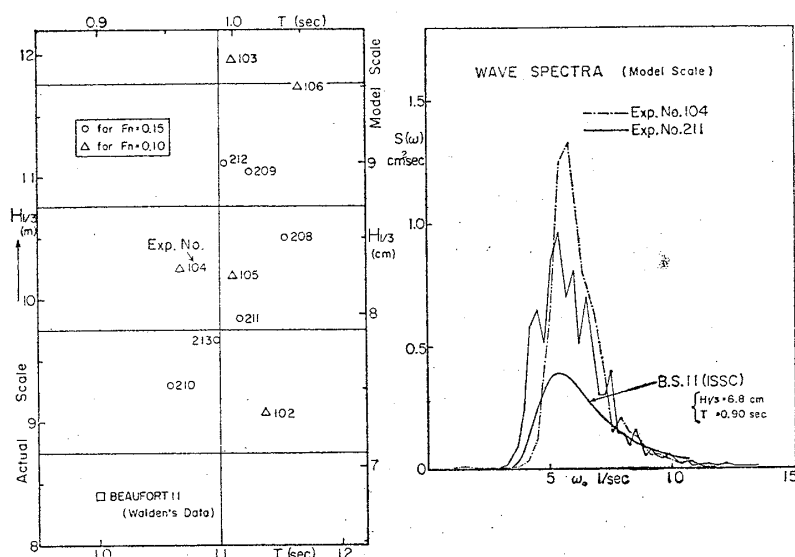


Fig. 1 Irregular Waves Generated in the Tank

できるだけ剛性をもたせてある。甲板上に歪ゲージを貼って測定した結果によると固有振動数は 1,300Hz 以上であった。使用した不規則波の造波用原信号は、指定した波高と平均周期を持つ ISSC 型スペクトルをねらって作られたものであるが、甲板上に衝撃圧を頻繁に発生させる必要上、信号を規定値以上に増幅して使用した。このため波高が大となり波崩れを生じ、同じ信号を使用してもスペクトルの再現性はよくない。それ故すべて異なる不規則波として扱わざるを得なかった。また波崩れを生じたことが平均周期が 1sec (実船で 11sec) 付近に集中してしまった原因ともなっている。水槽の長さが十分でないため一つの信号をずらしながら使用して 6~8 回走行し、約 300 の出会波数に対して求めた使用不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ とゼロクロス平均周期 T 、および FFT 法 (高速フーリエ変換法) により求めたそのスペクトルの一例を Fig. 1 に示す。図からわかるように波高は非常に大きく、北大西洋のビューフォート風力階級 11 の平均状態 (Walden の値) を大きく上まわっている。冬期北大西洋で平均周期 11~13sec なる波は Walden のデータ²⁾によると発生確率約 5%, その中でも本実験に対応する波高約 9m 以上の波の発生確率は 1% 以下である。このように現実にはめったに起こりえないような不規則波中を、しかも正面向波として航走した状態における実験値であることに注意されたい。

2.2 計測項目

計測項目は船体運動 [ヒープ, ピッチ, 船首上下加速度 (S.S. 9³/₄)], 出会波高 [FP 前方 3m, および FP 側方 1m], 甲板衝撃水圧 [船上 FP および S.S. 9³/₄] であり、圧力計その他の計測器、記録再生解析装置は前論文⁹⁾と同一である。FP 側方の波高は船首と波との相対変位の計算に用いた。予備実験において S.S. 9¹/₄,

9¹/₄ においても圧力を計測したが、甲板衝撃水圧の発生は FP, S.S. 9³/₄ に比べ非常に少ないので上記 2 点にしぼった。

また、衝撃圧の発生機構を調べるには、水塊の衝突速度を知る必要があるため、甲板上 FP において上記の圧力計の横にもう一つの圧力計を入れたパイプを Fig. 2 のように突出させ、2 つの圧力計の感応時間差を読むことによって、衝突速度 V_n の計測を試みた。2 つの圧力計の高低差は 1cm であるので、図に示した時間差 Δt を読み、 $V_n = 1/\Delta t$ (cm/s) として求めた。

なお、圧力計測系の応答特性は少なくとも 1,000Hz まで確保されており、

データレコーダーの高速記録、低速再生によって直記式電磁オシロのガルバノメータの特性をカバーしていることも前論文⁹⁾と同様である。

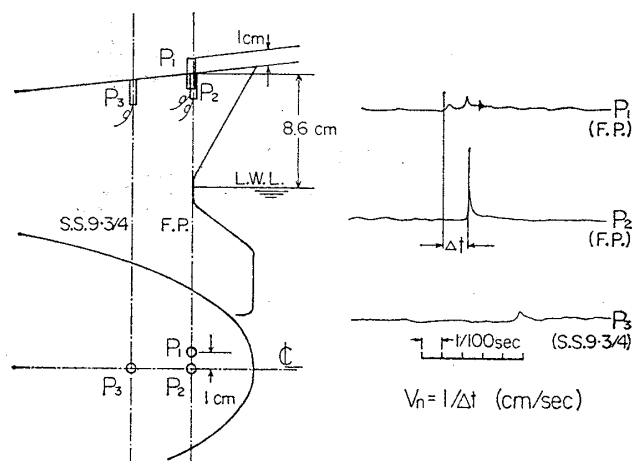


Fig. 2 Arrangement of Pressure Gauges and Recorded Pressures

3 船体運動

Fig. 3 に FFT 法を使った高速解析機により求めた不規則波中における船体運動の応答関数と O.S.M. による計算値を示す。本実験は波高が非常に大きく、甲板に打ち込む状態であり、打ち込み水はかなりの時間甲板上に滞留しているのが認められた。当然、運動は非線型域と考えられ、線型理論との一致度はよくない。とくにヒープでは $\sqrt{L/\lambda} < 0.9$ で理論値より 30% ほども低く、ばらつきも大きい。なお、Fig. 1 からわかるように今回の不規則波には $\omega_0 < 3.5$ の成分がほとんど含まれていないため、この範囲の計算精度が悪く、ばらつきが大となるので、 $\omega_0 < 3.5$ に対応する $\sqrt{L/\lambda} < 0.63$ の部分は図中には示していない。ヒープ, ピッチには模型船、計測

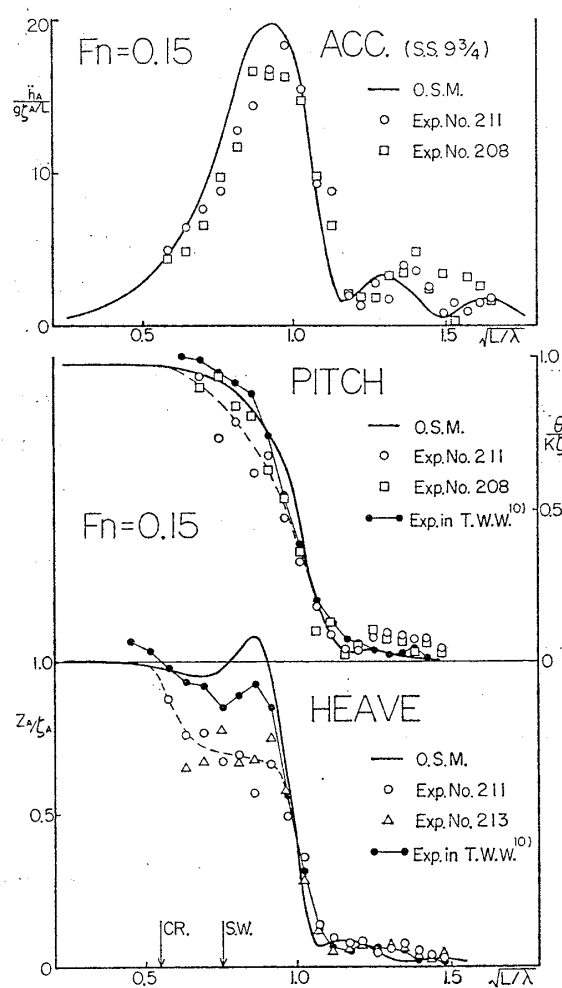


Fig. 3 Amplitudes of Ship Motions

器など同一の状態で行なった。波高がさほど大でない過渡水波 (T. W. W.) 中の実験結果¹⁰⁾を併記したが、明らかに今回の応答関数はこれらの値より落ちこんでおり明白な非線型性がみられる。

なお図中の CR., S. W. はそれぞれ限界周波数 ($\omega_e = g/4V$), 側壁影響の限界周波数を示している。

このような大波高中での船体運動に関する精密な実験が望まれるが、今回、予測計算に使用した船体運動の応答関数としては、図中破線で示した実験の平均値を用いた。

4 甲板衝撃水圧, Deck Wetness の発生頻度および衝撃水圧の大きさ

4.1 甲板水圧ヒストグラム, Deck Wetness と衝撃水圧

一つの不規則波中の走行で発生した甲板水圧を、ヒストグラムの形にまとめたものの一例が Fig. 4 である。FP 位置に

おける衝撃水圧のピーク値は非常に大きく、100cm Aq (船長の 1/2 の水頭) を超えるものもみられた。今回の実験中での最大値は、FP における 132.8cm Aq であったが、これを単純にスケール倍すると実船で 164m 水頭になり、船長の 0.65 倍、吃水の 10 倍の水頭にも達する。これをただちに実船における値と考えることはできないが、非常に大きな衝撃圧が発生可能なことがわかる。

図において 0~10cm Aq の範囲の割合が大きく、とくに、S. S. 93/4 では大部分を占めているが、これは圧力計の上を単に水が流れた場合のような小さな圧力でも、圧力計が感応していればすべて一回に数えているため、真に衝撃圧のみを選べば 0~10cm Aq の割合はずっと小さくなる。これらの図から衝撃水圧に関し、S. S. 93/4 より FP が苛酷であることがわかる。S. S. 93/4 では前方に落下した水塊が流れてきて感応している場合がほとんどである。全実験を通じて S. S. 93/4 で発生した衝撃水圧の最大値は FP でのその 1/2 以下に過ぎなかった。

Table 2 に実験時の Deck Wetness 発生確率 (圧力計が感応した回数/船と波の出会い回数) と FP 位置で発

Table 2 Probability of Deck Wetness and Max. Impact Pressure

EXP. NO.	Fn=0.10				
	102	103	104	105	106
Probability of Deck Wetness	19.0%	38.2	39.0	34.4	41.9
Max. Impact Pressure (FP)	105.0 cmAq	120.3	116.7	97.9	100.3

EXP. NO.	Fn=0.15					
	208	209	210	211	212	213
Probability of Deck Wetness	37.2%	45.8	30.8	28.3	45.3	35.3
Max. Impact Pressure (FP)	95.0 cmAq	112.1	95.0	88.9	109.7	132.8

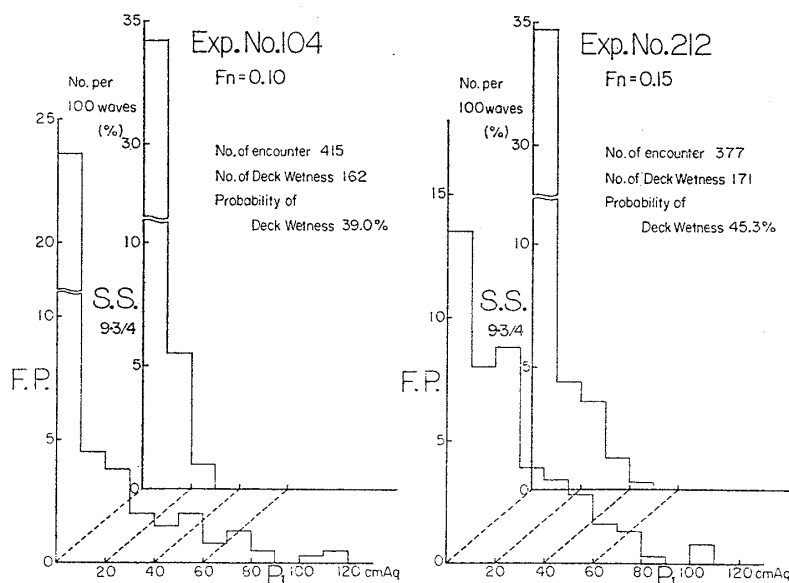


Fig. 4 Histograms of Pressures on the Deck

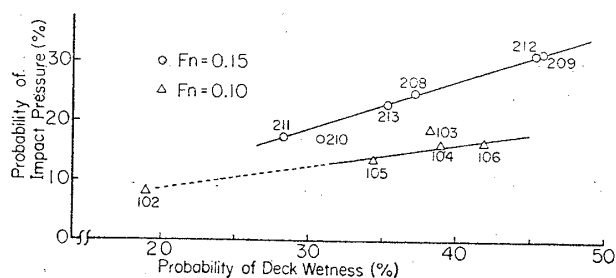


Fig. 5 Relation between Probability of Deck Wetness and that of Impact Pressure

生した衝撃水圧の最大値を示した。Deck Wetness 発生確率が10%でも、現実にはかなり苛酷な状態であるが、非常に苛酷な状況が発生させ、その時の様子を物理的に調査することも実験の目的としたので、さらに大なる波高の不規則波中を走行させ、Deck Wetness が頻繁に発生するようにした。そのため Deck Wetness 発生確率は19~45%と非現実的に大きな値となった。

Table 2 を見ると、計測時間はほぼ等しくなっているのだが、Deck Wetness 発生確率と衝撃水圧の最大値の間に有意な関係が見出せない。本実験の計測点が上のみと少ないことが大きな原因と考えられるが、波数を400 近くとっているにもかかわらず、このような結果となった。両者の関係を実験的に求めることはむずかしいようである。

Fig. 5 は FP における圧力計の記録のうち 10cm Aq (実船で約 12m Aq) 以上を衝撃圧とみなし、出会波数に対する衝撃水圧の発生率と Deck Wetness の発生確率を比較したもので単純な比例関係が認められる。この関係から Deck Wetness 発生確率によって、衝撃圧発生率を推定できると思われるが、船速により差が表われている。すなわち FP 位置においては、船速の小なる方が同じ Deck Wetness 発生確率であっても、衝撃圧の発生は少なく有利である。以後 Deck Wetness 発生確率によって検討を進める。

4.2 波および船体運動と Deck Wetness

Fig. 6 は Deck Wetness 発生確率と有義波高 $H_{1/3}$ との関係をみたものである。本実験のような苛酷な状況下では波高の影響は顕著であり、不規則波の周波数成分や平均周期が異なっているにもかかわらず、図のように波高に比例して確率が増す。とくに周期を一定とし、波高が変化した時の Deck Wetness 発生確率の変化の様子を、線型理論による相対波高から予測したものが図中の曲線である。ここでは Dynamic swell-up は考えていない。実験時の不規則波の周期は一定でないため、確率の大きさの比較はできないが、それを考慮しても線型理論による予測値は、はるかに小さい。また、実験結果は予測値ほど $F_n=0.10$ と 0.15 の間に差がない。しか

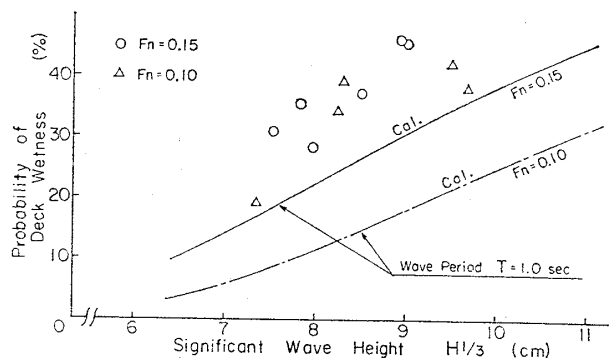


Fig. 6 Relation between Probability of Deck Wetness and Significant Wave Height

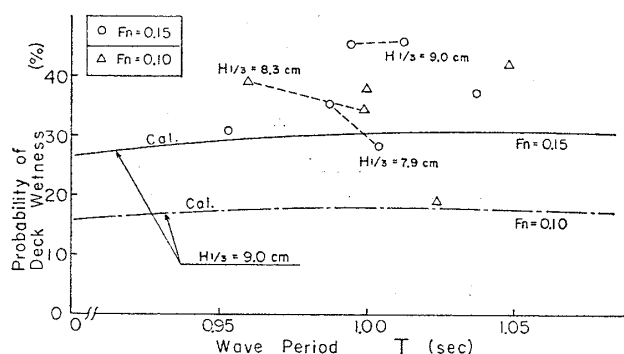


Fig. 7 Relation between Probability of Deck Wetness and Mean Wave Period

し波高による変化の傾向は線型理論による予測と一致しているといえよう。

Fig. 7 は Deck Wetness 発生確率と不規則波の平均周期 T との関係である。有義波高による変化ほど強い関係が見出せなかったもので、ほぼ等しい波高で行なった数例の実験を選び破線で結んで示した。一方、波高が一定で周期の異なる不規則波中の Deck Wetness を前図と同様に線型理論により求め、波周期による変化の傾向をみたものが図中の曲線である。図に示された範囲では確率はほとんど変化していないが、周期の変化量が小さく、本実験のみで結論を出すのは無理である。いずれにしてもかような大波高中での Deck Wetness 発生確率に関しては、波高の影響が支配的といえる。

Fig. 8 はヒープ、ピッチ、船首上下変位、船首上下加速度 ($S.S. 9^3/4$)、および船首における波との相対変位のそれぞれの有義値と Deck Wetness 発生確率との関係をみたものである。上下変位はヒープ、ピッチから、相対変位はさらに FP における波高の記録を用いて、それぞれアナログ演算回路により求めている (Fig. 13 参照)。波高計は FP の側方 1m の位置であるので、この相対変位には Static swell-up, Dynamic swell-up は含まれていない。

本実験のような状況下ではヒープ、ピッチおよび船首の上下変位の大きさと Deck Wetness 発生確率とは、

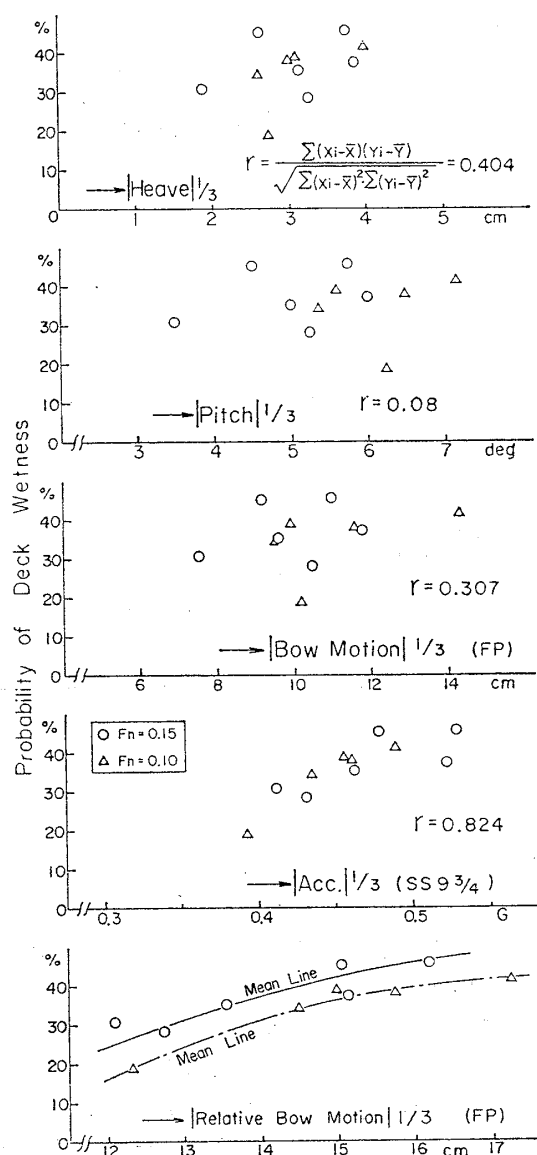


Fig. 8 Relations between Probability of Deck Wetness and Significant Heave, Pitch, Bow Motion, Bow Acc. and Relative Bow Motion

直接的関係がないようである。ただし、本実験は最も小さな船体運動でもかなりの大きさであることに注意しなければならない。図中に相関係数 r を記入しておいたがピッチとの相関が弱いのが目立つ。これは実験点が少ないため、ばらついた点により r が大幅に減少させられるからであろう。以上のものに比べ加速度および相対変位の大きさと Deck Wetness 発生確率とは、かなりの正の相関をもっている。相対変位の大きさととの正の相関は当然としても、船体運動の大きさよりも船首における上下加速度の大きさが、Deck Wetness 発生確率とかなりの相関性を持つことは、Dynamic swell-up などに上下加速度が影響することを意味しており興味深い。

また、全般的に船速の影響が明瞭でないが、相対変位との図には実験値が示すと思われる曲線を記入した。こ

の図が示すように同じ有義値の相対変位では $F_n=0.15$ の方が $F_n=0.10$ より 5% ほど Deck Wetness 発生確率が大きくなっている。運動応答の大きさの影響はあまり見られないから、Static swell-up, Dynamic swell-up の影響と考えることができよう。

4.3 Deck Wetness 発生確率の予測および

発生頻度分布

Deck Wetness は船首と波との相対変位の極大値が乾舷を超えた場合に発生すると考えれば、Deck Wetness 発生確率の予測が可能である。しかし、Static swell-up, Dynamic swell-up を無視することはできない。

正面向波中における船首と波との相対変位の分散 σ^2 は、不規則波のスペクトルを $S'(\omega)$ 、相対変位の応答関数の振幅部分を $A(\omega)$ とすれば

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S'(\omega) [A(\omega)]^2 d\omega \quad (1)$$

で与えられる。ここでは田崎¹⁾の示した Dynamic swell-up: h_d を考慮した応答関数 $A'(\omega)$ を用いた、次式によって計算した。

$$\sigma^2 = \int_0^\infty S'(\omega) [A'(\omega)]^2 d\omega \quad (2)$$

ただし

$$A'(\omega) = \{1 + k_2(\omega_e^2 L/g)^{1/2}\} A(\omega) \quad (3)$$

ω_e : 出会円周波数

$$k_2 = (C_B - 0.45)/3 = 0.1248$$

相対変位の極大値分布がレイレイ分布に従うとすれば、Deck Wetness 発生確率 q は次式で与えられる。

$$q = \exp\{-(f - h_s)^2 / 2\sigma^2\} \quad (4)$$

ただし f : FP における乾舷 (8.6 cm)

h_s : Static swell-up

$$\text{SR 131 の実験値} \begin{cases} 0.6 \text{ cm} (F_n=0.10) \\ 1.6 \text{ cm} (F_n=0.15) \end{cases}$$

σ^2 : Dynamic swell-up (h_d) を考慮した相対変位の分散

不規則波のスペクトル $S'(\omega)$ として実験時のデータを用い、相対変位の応答関数 $A(\omega)$ として O. S. M. の値を用いて求めた計算結果を Fig. 9 に示す。横軸は (2) 式より求めた Dynamic swell-up を含んだ相対変位分散の計算値で、縦軸は Deck Wetness 発生確率である。図中の曲線が (4) 式による Deck Wetness 発生確率であるが、ヒープ、ピッチの応答関数 (Fig. 3) から予想されるように、O. S. M. による理論値をそのまま使ったのでは過大に評価してしまう。そこでヒープ、ピッチの応答関数として Fig. 3 に破線で示したような実験値を用い、同様の予測を行なった結果を Fig. 10 中 $\circ, \triangle$ 印で示した。一致度は改良され、とくに $F_n=0.10$ の場合は傾向をうまく予測している。田崎の示した実験式 (3) 式はかなり有効といえるが、本実験のような大波高

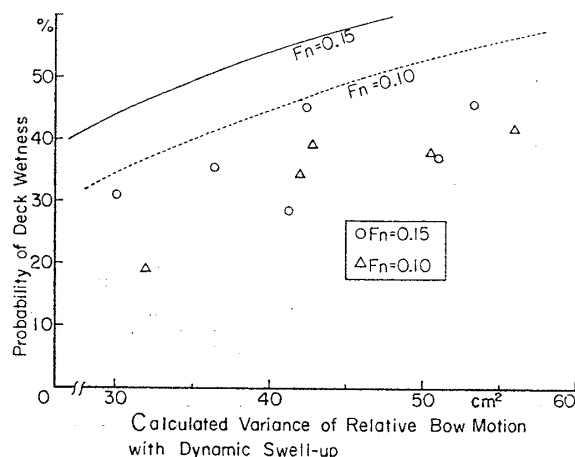


Fig. 9 Prediction of Probability of Deck Wetness (by O. S. M.)

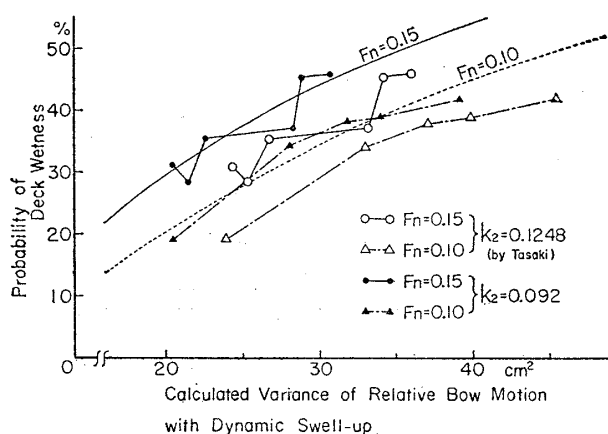


Fig. 10 Prediction of Probability of Deck Wetness (by Fig. 3)

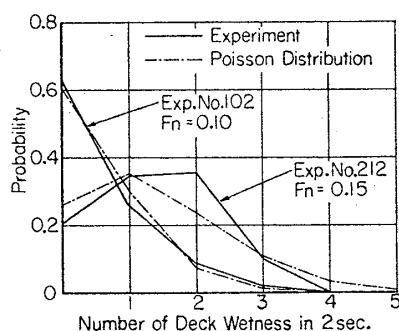


Fig. 11 Comparison between Probability Density for Number of Deck Wetness in 2 sec. and Poisson Distribution

時には、田崎の式を使用した予測値は実験から得られた応答関数を使用しても、なお全般的に確率を過大に評価することもわかる。試みに実験値をうまく予測できるように(3)式中の k_2 を修正すると、 $k_2=0.092$ が得られ、この結果は Fig. 10 中の ●, ▲ 印で示されている。本実験に関してはこの値を用いれば $F_n=0.15, 0.10$ ともによりよく予測できることがわかる。

次に Deck Wetness 発生頻度分布に関し、M. K.

Ochi¹¹⁾ はポアソン分布に従うと述べている。Fig. 11 は 2 秒間に発生する Deck Wetness の回数を数え、その確率分布とポアソン分布を比較したものである。ポアソン分布は次式によって求めた。

$$P\{X=k\} = e^{-\nu T} (\nu T)^k / k! = e^{-\lambda} \lambda^k / k! \quad (5)$$

X : 一定時間 T 内に Deck Wetness が発生する回数。ここでは $T \equiv 2 \text{ sec}$

k : 整数

ν : 単位時間内に発生する回数の平均値

$\lambda = \nu T$: T 時間内に発生する回数の平均値

Ochi の指摘通りよい一致が得られており、Deck Wetness 発生過程はこのような苛酷な状況でもポアソン過程とみなしてよいであろう。

5 甲板衝撃水圧発生状況

5.1 波形分類

甲板衝撃水圧の波形も船首正面や船底で発生する波形⁹⁾と定性的に違うものではない。前論文とほぼ同様に次の 5 つの型に分類しその例を Fig. 12 に示した。

A 型: 振動型。振動数は 200~1,000 Hz 程度。

B 型: 非振動型。

C 型: B 型の途中から A 型に移行するもので水塊衝突速度を測るために甲板上にパイプを突出させた場合には、この型が非常に多く発生した。すなわち後半の振動部分は、このパイプによる水塊の攪乱の影響とみられ元来は B 型に近い場合であると考えられる。

D 型: くずれた波形。

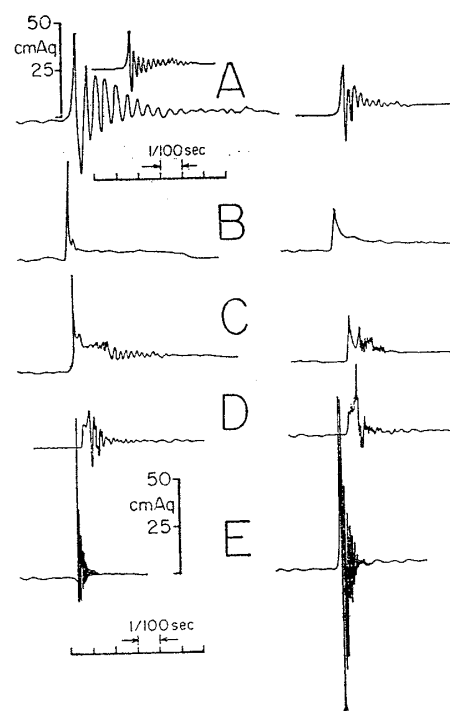


Fig. 12 Various Types of Impact Pressure

E型：非常に振動数の大きい振動型(2,000Hz以上)。

時間軸をさらに引伸すとA型と似た波形が得られる。発生は非常に稀である。

甲板衝撃水圧の波形を以上5つに分類したが大別すると振動型(A, E), 非振動型(B, C), 折中型あるいは共存型(D)の3分類にすることもできる。

発生の割合はFP位置では, B, C型(非振動型)が約6割で最も多く, ついでD型が約3割, A, E型(振動型)は1割以下であった。また, S.S. $9\frac{3}{4}$ ではピーク値の小さなB, C型とD型が多く, 振動型はほとんど発生しなかった。これらの波形についての考察は後述の6節において行なう。

5.2 相対変位と甲板衝撃水圧の大きさ

Fig. 13 に諸量のタイムヒストリーの例を示す。船首上下変位および船首と波の相対変位は, 前述のようにアナログ演算回路によって求められたものであり, 船首上下速度もアナコンにより加速度の記録を積分して得たものである。ただし, 加速度計は模型船型状により S.S. $9\frac{3}{4}$ に取りつけてある。これらより甲板衝撃水圧は当然ながら船首を突込んで波の山がきた時, すなわち相対変位が山になったその直後に発生し, 発生時の船首速度は上向き of 小さな値であることがわかる。

タイムヒストリーから相対変位の極大値 h とその直後に発生した FP での衝撃水圧のピーク値 P_I を読み, 両者の関係をみたものが Fig. 14 である。ただし, 衝撃圧は非常に早い現象であり Fig. 13 のようなタイムヒストリーでは正しいピーク値を示し得ていないので, データレコーダーを低速再生して時間軸を引伸ばした記録から読みとった。衝撃水圧はほぼ実船吃水の水頭に相当する

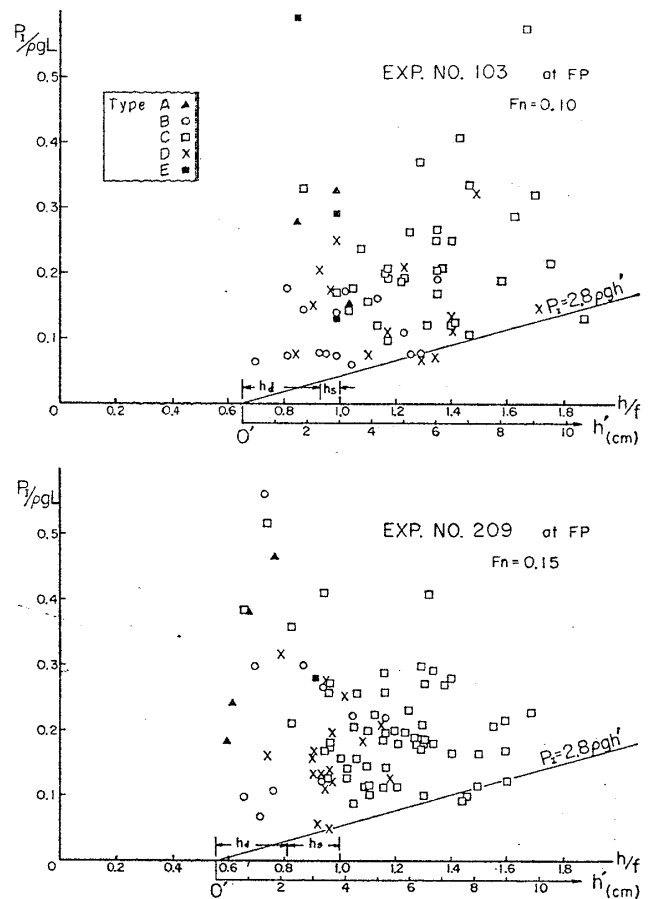


Fig. 14 Relation between Impact Pressure and Amplitude of Relative Bow Motion

約 13cm Aq 以上のものについて, 圧力波形ごとに分類してプロットしてある。

横軸で $h/f=1.0$ の点は相対変位 h と FP での乾舷 f (8.6cm) が等しくなった点であるが, 衝撃水圧は h/f

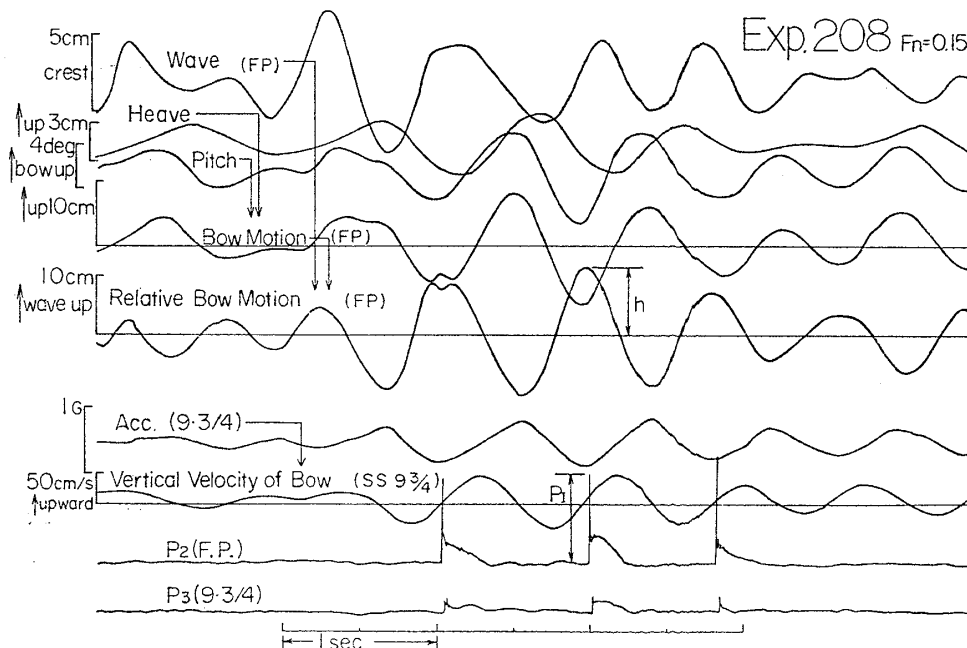


Fig. 13 Example of Time Histories in Irregular Waves

が約 0.6 ですでに発生しており、相対変位が乾舷に達するほどの相対運動でなくとも Deck Wetness が起こっていることを示している。このことから Static swell-up, Dynamic swell-up を考慮する必要性が示される。Static swell-up (h_s), Dynamic swell-up (h_d) を考えると、相対変位が $f-h_s-h_d$ の大きさですでに水面が甲板に達することになる。この限界の相対変位 $f-h_s-h_d$ は図中 O' で示されているが、この O' より大きな相対変位で衝撃水圧が発生していることは興味深い。なおここでの h_d は相対変位 h の平均出会周波数 $\bar{\omega}_e$ を使って田崎の実験式¹⁾, $h_d=k_2(\bar{\omega}_e^2 L/g)^{1/2} h$ より求めた平均値を使用している。

O' から横軸にとった座標は $h-(f-h_s-h_d)$ の値を示す。

$$h' \equiv h - (f - h_s - h_d) = h + h_s + h_d - f$$

は Fig. 15 のように甲板上った水頭 (甲板上波高ということにする) を表わす。この甲板上波高 h' に相当する高さから水塊が落下した時に発生する衝撃水圧の大きさを調べてみる。柗原¹²⁾による水塊落下実験によれば衝突速度 V_n と衝撃水圧のピーク値 P_I との間には

$$P_I / \frac{1}{2} \rho V_n^2 = 2.8$$

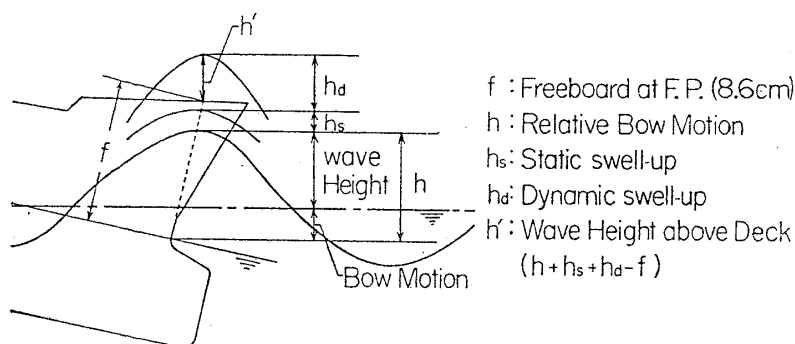


Fig. 15 Relative Bow Motion (h) and Wave Height above Deck (h')

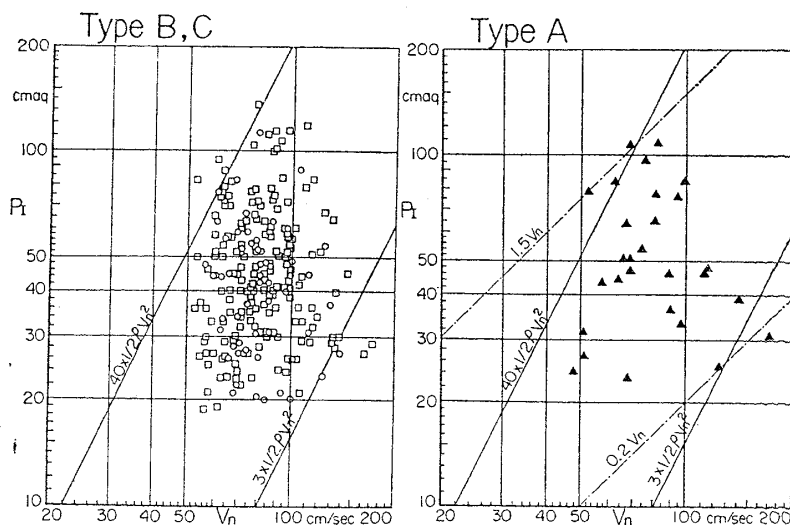


Fig. 16 Relations between Impact Pressure P_I and Impact Velocity V_n

の関係がある。 V_n を自由落下によるものとして $V_n^2 = 2gh'$ とし、

$$P_I = 2.8 \rho gh' \quad (6)$$

ただし h' : 甲板上波高
と変形する。この式が図中 O' を端点とした直線であるがほぼ衝撃水圧の最低線になっている。実際には自由落下による速度に船体の上昇速度が加わっているから、これを考慮すれば、ある程度の大きさの圧力までは説明が可能である。たとえば $h' = 10$ cm の場合、自由落下による速度は 140 cm/sec で衝撃圧は (6) 式より 28 cm Aq となるが、これに 30 cm/sec の船体上昇速度が加わると 41.3 cm Aq となる。同様に $h' = 5$ cm では 14 cm Aq が 23.8 cm Aq になる。

しかしながら、船首の上昇速度は最大でこれ位であるのに対し、上で試算した以上の大圧力も頻繁に発生している。柗原らの実験では水塊は完全に乱された状態と考えられ、それゆえ衝撃圧の下限値を与えていると思われるが、比較的乱されていない水塊が打ち込むなど、うまく条件が整った場合には、圧力係数 $(P_I / \frac{1}{2} \rho V_n^2)$ が柗原らによって得られた 2.8 よりも大きな値になることがあり、大圧力が発生すると考えられる。次節で述べるように今回の実験での最大圧力係数は約 40 であった。

5.3 衝突速度と甲板衝撃水圧の大きさ

前論文⁹⁾と同様に衝突速度 V_n と衝撃水圧の大きさ P_I の関係を甲板衝撃圧について解析してみる。Fig. 16 に非振動型 (B, C 型) と振動型 (A 型) の場合の両者の関係を示した。かなりばらつきが大きいですが、その範囲は圧力係数 $(P_I / \frac{1}{2} \rho V_n^2)$ の形でおさえれば、上限 40, 下限 3 におさまる。これらの値は SR 131⁶⁾ での水塊落下実験で得られた値とオーダー的に一致しており、さらに下限値 3 は前述の圧力係数 2.8 にほぼ等しいことは興味深く、下限値の物理的意味をよく説明していると考えられる。

また、振動型である A 型の場合には、後述の (8) 式, (9) 式が示すように速度の 2 乗ではなく 1 乗の関数とした方が実験結果をうまく説明できることは興味深い。

有意な衝撃圧力を与える衝突速度の範囲は、ほぼ 50~150 cm/sec 程度で

あるが、Fig. 14 からわかるように甲板上波高 h' は最大約 0.1m のオーダーで、この高さから水が自由落下すると速度は約 1.4m/sec となり、自由落下の速度で衝突速度のオーダーが説明できる。しかし、詳細には小ではあるが船首上下速度が加わっており、また速度の測定精度も良いとはいえないので今後の検討が必要であろう。

前論文⁹⁾の中に示した船底の場合と比較すると、衝撃圧力係数は約 60%，また得られた衝撃圧の最大値は船底の場合の約 30% に止まっている。これは、甲板衝撃は船底衝撃と同様に平板に水が衝突する場合に近いのであるが、船底のように理想的な水塊と衝突するのではなく、複雑な状況で水塊が落ちてくること、および衝突速度が船底の場合に比べて小であることに起因していると考えられる。

6 甲板衝撃水圧の波形の検討

衝撃圧発生機構は、物体と流体との間に空気層が存在するか否かにより、大きく2つに分類できる。ここでは空気層のないものとして Wagner¹³⁾ のモデルを、空気層の圧縮を考えるものとして光易¹⁴⁾ のモデルをとり、今回の実験で得られた甲板衝撃圧波形の検討を前論文の方法に沿ってさらに詳細に行なった。

6.1 非振動型波形

前節の波形分類Bは、鋭い立上りからいわゆる腰掛部へ推移する衝撃圧波形のもので、Wagner 型衝撃と呼ばれる。Wagner の式による最大衝撃圧を与える式

$$P_I = \frac{1}{2} \rho V_n^2 [1 + (\pi \cot \beta / 2)^2] \quad (7)$$

V_n : 衝突速度 β : 衝突角度

において実測値である P_I および V_n を用い、最大圧力係数 $C = P_I / \frac{1}{2} \rho V_n^2$ および衝突角度 β を逆算すれば Table 3 のようになる。この β と V_n を用い Wagner 理論のくさびの先端を、船首端に対応させた場合の衝撃圧タイムヒストリーを、実測波形に合わせて図示したものが Fig. 17 である。Wagner 理論によると β が大のときには、右図のように立上り後の減衰が非常にゆるやかとなり、実測波形とは掛け離れたものになる。 β が小の場合には、左図のように実測波形と似た波形となるが、やはり立上り後の一致度は良くない。Wagner 理論

Table 3 Examples of Wagner Type Impulsive Pressures

No.	P_I (cmAq)	V_n (cm/sec)	$C = P_I / \frac{1}{2} \rho V_n^2$	β (deg)
13-1	132.8	76.1	44.9	13.3
8-3	112.1	76.8	37.2	14.6
5-2	81.2	61.8	41.6	13.8
11-7	54.7	90.8	12.9	24.4
11-16	39.1	74.1	13.9	23.6

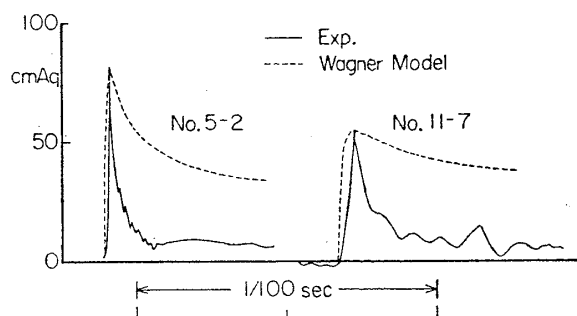


Fig. 17 Comparison of Calculated and Recorded Pressure Time Histories (Wagner Type)

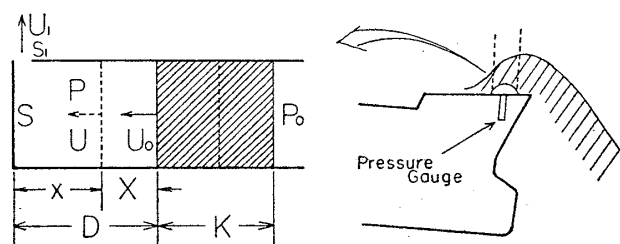


Fig. 18 Mitsuyasu's Model

は物体が水面に落下するのに対し、甲板衝撃は水が落下してくるという違いのほか、乱された水塊の落下衝撃であることにより Wagner 理論との一致度がよくないと思われる。

6.2 減衰振動型波形

波形分類Aに属するものは減衰振動に近い型をもつが、これは水塊が巻き込んだ空気層に起因すると考えられる。前論文⁹⁾の船底衝撃水圧の減衰振動型波形 (i), (ii) の解析と同様に光易のモデル¹⁴⁾ から導びかれる次の関係式を用いて解析する (Fig. 18 参照)。

$$P - P_0 = A_1 e^{-\beta_1 t} \sin \sigma_1 t \quad (8)$$

ここで

$$A_1 = \rho K U_0 \sigma_1 (1 - \alpha^2)^{-1} \quad (9)$$

$$\beta_1 = (\gamma P_0 / \rho K D)^{1/2} \alpha \quad (10)$$

$$\sigma_1 = (\gamma P_0 / \rho K D)^{1/2} (1 - \alpha^2)^{1/2} \quad (11)$$

$$\alpha^2 = \left(\frac{\gamma P_0 S_1 K_0}{2 D S} \right) / \left(\frac{\gamma P_0}{\rho K D} \right) = \frac{\beta_1^2}{\sigma_1^2 + \beta_1^2} \quad (12)$$

圧力の最初のピーク値 P_I およびその時刻 t_1 は次式で与えられる。

$$P_I = A_1 e^{-\beta_1 t_1} \sin \sigma_1 t_1 \quad (13)$$

$$t_1 = (1 / \sigma_1) \tan^{-1} (\sigma_1 / \beta_1) \quad (14)$$

実験結果から求められた P_I , 衝突速度 U_0 , 周波数 σ_1 , 減衰率 β_1 を用いて、空気漏れパラメータ α , 水塊の厚さ K , 空気層の厚さ D を計算した結果を Table 4 にあげた。すなわち “INPUT” が実験から得られた値, “OUTPUT” が実験値を用いて算出した値である。さらに Fig. 19 にこれらの値を用いた (8) 式による減衰振動曲線 (破線) の実測波形 (実線) へのあてはめ状況を示し

Table 4 Examples of Calculations
(Mitsuyasu's Model)

No.	INPUT				OUTPUT		
	P_1 (cmAq)	U_0 (cm/sec)	$\sigma/2\pi$ (Hz)	β_1	α	K (cm)	D (cm)
12-2	109.1	80.0	960.0	605.6	0.100	0.26	0.15
12-1	108.8	68.8	838.8	736.3	0.138	0.36	0.14
1-17	97.1	76.4	649.6	379.5	0.093	0.35	0.24
11-13	63.3	67.6	284.7	249.4	0.138	0.62	0.68
16-3	54.5	74.0	741.3	317.2	0.068	0.17	0.37
6-4	51.4	68.7	212.5	231.3	0.171	0.69	1.08
12-12	50.1	66.0	294.9	299.1	0.159	0.50	0.79
5-5	47.9	115.5	454.7	309.4	0.108	0.17	1.00
6-13	36.5	89.4	409.2	307.7	0.119	0.18	1.11

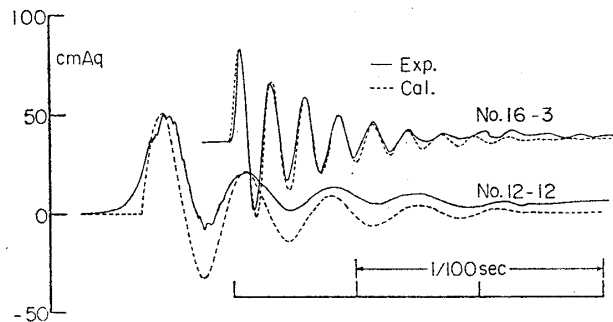
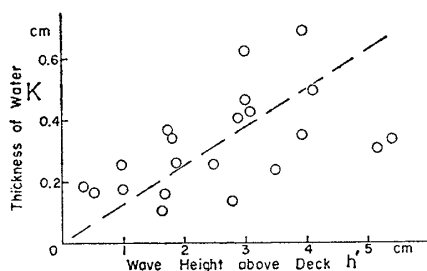


Fig. 19 Comparison of Calculated and Recorded Pressure Time Histories (Type A)

Fig. 20 Correlation between h' and K

た。

α , K , D は光易および前論文で得られた値に近く、また写真から判断しても実際の現象として発生しそうな範囲にある。Fig. 20 には水塊の厚さ K と甲板上波高 h' との関係を示したが、弱いながらも正の相関がみられ、算出された K の値が物理的に意味をもっていることを示している。これらのことから振動型圧力波形は光易モデルで大略の説明がつくといえるであろう。また同じ振動型の一つである E 型について同様の解析を行なったところ、空気層厚 D が 1mm 以下のオーダーの時、このような高振動となることがわかった。しかし、計測系の応答特性を超えた高振動であり、計測例も少ないためデータは省略した。

7 結 言

肥大船の船首部甲板上への海水打ち込み、およびそれに伴って発生する衝撃水圧に関し、非常に大きな波高の不規則波中にて正面向波状態で実験を行ない、甲板衝撃

の極限状況の検討を行なって次の結果を得た。

(1) 大波高不規則波中の縦運動、とくにヒープに明白な非線型性(波高に対して)が見られた。

(2) Deck Wetness 発生確率と衝撃水圧発生確率の間に、単純な比例関係が認められた。

(3) Deck Wetness 発生確率は波高の増加に従い増し、波周期による変化は小である。この傾向は線型理論による予測と一致する。

(4) Deck Wetness 発生確率と、ヒープ、ピッチ、船首上下変位との相関は弱く、船首上下加速度および波と船首との相対変位とは、かなりの正の相関が認められた。

(5) 田崎りの示した Dynamic swell-up の実験式と、実験によって得られた大波高中の船体運動の応答関数を用い、Deck Wetness 発生確率を線型予測したところ、大略実験結果と一致したが、予測値はやや過大となった。

(6) Deck Wetness 発生過程は、このような非常に苛酷な航行状況下でもポアソン過程とみなすことができる。

(7) 圧力計測位置を固定してみた場合、船首と波の相対上下変位の大きさと、衝撃水圧の大きさは比例せず相対変位が小であっても大圧力が発生した。

(8) 実測した振動型圧力波形を、光易¹⁴⁾の空気圧縮および漏れを考えた理論から求めた波形でよく説明できた。

(9) 甲板衝撃水圧の大きさは圧力係数

$$C = P_1 / \frac{1}{2} \rho V_n^2$$

の形で整理すれば、ほぼ 3~40 の間にあった。

(10) 実験吃水の水頭以上の衝撃圧が発生した場合、水塊衝突速度は大略 50~150 cm/sec (実験船速の 1~3 倍のオーダー) であり、そのうち船首の上昇速度による分は小さかった。

本論では実際の平均的的海洋波としての不規則波中での実験および検討が十分でない。とくに発生頻度などに関して、実海面をシミュレートした不規則波中で追加検討する予定である。

本論文作成にあたり、実験および解析にご協力いただいた宮川 清氏、高山武彦氏に心から謝意を表します。また適宜ご助言、ご検討いただいた本学の平山次清助教授に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田崎 亮：船舶の波浪中における甲板上への海水打ち込みについて、運輸技術研究所報告、第 11 巻、第 8 号、(昭和 36 年)。

- 2) 福田淳一：波浪中の船の Deck Wetness に関する長期予測，日本造船学会論文集，第124号，(昭和43年)。
- 3) 川上益男：船体の青波衝撃強度について，日本造船学会論文集，第125号，(昭和44年)。
- 4) 福田淳一，池上国広，森 俊哲：Shipping Water による甲板荷重に関する予測，西部造船会々報，第45号，(昭和47年)。
- 5) 雁野昌明：斜波中を航行する船への海水打込みに関する一計算，関西造船協会誌，第145号，(昭和47年)。
- 6) 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，研究資料，No.163，(昭和47年)；176，(昭和48年)；192，(昭和49年)；213，(昭和50年)。
- 7) 川上益男，田中一雅：船首甲板の青波衝撃圧の統計予測，西部造船会会報，(昭和51年前刷)。
- 8) 竹沢誠二：船体縦運動における過渡応答法による船型試験，日本造船学会論文集，第134号，(昭和48年)。
- 9) 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，(昭和49年)。
- 10) Takezawa, S. and M. Takekawa: Advanced experimental techniques for testing ship models in transient water waves. Part I, 11th Symposium on Naval Hydrodynamics, (1976).
- 11) Ochi, M.K. and W.E. Bolton: Statistics for Prediction of Ship Performance in a Seaway, Part III, I.S.P. Vol. 20, No.229, (1973).
- 12) 栖原寿郎，肥山 央，古賀洋治：水塊の衝突圧力と弾性板の応答，西部造船会々報，第46号，(昭和48年)。
- 13) Wagner, H: Über Stoss-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, ZAMM Vol. 12, (1932).
- 14) Mitsuyasu, H: Shock Pressure of Breaking Wave, Coastal Engineering, Chapter 18, (1965).