(昭和51年11月 日本造船学会秋季講演会にて講演)

不規則波中における船首波浪衝撃圧について

——その1 水槽実験——

正員 竹 川 正 夫*

Prediction of Hydrodynamic Impact Pressure Acting on Bow in Rough Sea

(Part 1 Experimental Research)

by Masao Takekawa, *Member*

Summary

The characteristics of hydrodynamic impact pressure acting on bow have been investigated in detail by many researchers. However, since the impact pressure is a nonlinear and complicated phenomenon of very short duration, it is difficult to obtain reproducible data even if the experiment is carried out with extreme care. Accordingly, the quantitative analyses of the effects due to bow flare shape, advance speed, steepness of incident wave and other factors have not been executed with sufficient accuracy.

In the meanwhile, the studies on the stochastic properties of the impact pressure have been started recently, and only a few papers were reported. It is because the measurements of impact pressure, impact velocity (relative normal velocity at the moment of impact) and impact angle (relative angle between the hull surface and the wave surface) are difficult, and also the considerably long time is required for the experiment and analysis work in order to collect a large number of data.

Therefore, the author carried out the experiments in both regular and irregular waves to clarify the problem mentioned above, applying the skillful technique introduced by S. Takekawa and S. Hasegawa. The displacement effect on bow wave steepness, the frequency of occurrence of impact pressure and the distribution of random variables such as impact pressure, impact velocity and impact angle were determined successfully.

Summarizing this study, the following conclusions are obtained.

- 1) The slope of local wave surface at the moment when the impact pressure acts on bow is proportional to the product of maximum slope of incident wave and the bow wave interference factor γ . The interference factor γ was obtained from the test result in short regular waves.
- 2) The frequency of occurrence of impact pressure was determined experimentally as a function of effective wave height, advance speed, relative vertical motion at bow and stem angle to a horizontal plane.
- 3) The probability density of the impact pressure can be represented by the log-normal distribution. The impact velocity and the impact angle can also be explained by the log-normal distribution and by the normal distribution respectively. The relationship among three random variables are made clear theoretically and experimentally.

The prediction of impact pressure in rough sea based on the obtained experiment results will be reported in the near future.

1 緒 言

最近の大型船には、在来船の船首部形状と比較して、首部外板の水線面に対する傾斜角が小さい船や、ま、水線より上の船首部肥稜度の大きくなっているもの

* 住友重機械工業(株)

が多く、この構造的要因と高速運航という経済要請とが相俟ってか、船首部の損傷事故例が衆知のように数多く報告されている。たとえば、大型肥大船の損傷実績を調査した西部造船会の報告¹⁾には、S. S. 97²⁾より前方の満載吃水線より上の部分に、外板パネルの凹損から、損傷のひどいものでは、船首内構材にも及ぶ多種多様の損傷

例が報告されている。また、コンテナ船に関する村井の調査²⁾によると、大型肥大船とほぼ同じような損傷が S. S. 9 より前方の水線近傍に多数発見されている。これらの損傷のほとんどは、船体と波との衝突により生ずる衝撃水圧に起因するものと考えられており、波浪衝撃現象とステムの傾斜、船首部の肥瘠度との関係、さらに構造応答との関係の究明が、西部造船会の船首外板損傷小委員会¹⁾および日本造船研究協会の第131研究部会³⁾等を中心に、鋭意進められ、貴重な成果が多数報告されている。これらの研究により、船首衝撃圧の発生機構が細部にわたり、定性的にも定量的にも、大分明らかにされ^{4,5,6)}、またそれらを基礎に実用的な衝撃圧の推定法が、いくつか提案されるに及んでいる^{1,3,7)}。

しかしながら、現象そのものが継続時間の非常に短い非線形現象であるために、外的条件を十分同一に保った実験においても、衝撃現象の再現性はほとんど困難に近く、したがって衝撃圧の定量的把握は、必ずしも十分とはいえない点もあるようである。また、確率論的な視点に立った現象解明も、最近見うけられるようになったものの^{8,11)}、実験および解析に十分な設備と多大の時間を要することもあり、研究の緒についたばかりのようである。

そこで著者は、上記の問題点を解明するため、規則波中および不規則波中での衝撃圧実験を行ない、大型肥大船の船首波浪衝撃圧推定の基礎資料を得ることができたので、ここに報告するしだいである。規則波中の実験では、竹沢⁵⁾の巧妙な計測法を採用することにより、藤井と高橋⁴⁾により初めて明らかにされた、船首せき返し波の衝撃圧に及ぼす影響を、すなわち船の排除作用により、船首前方に発生するせき返し波と、入射波の干渉によって船首前方に急峻な波が生じ、衝撃圧が発生しやすくなる現象を、より定量的に調べることを目指した。また、不規則波中の実験は、衝撃圧の発生頻度、衝撃圧の大きさの統計分布、および衝撃速度、衝撃角度の統計分布等を求めることに重点を置いて実施した。本論文では、これら水槽試験結果について詳しく検討することにし、今回の実験結果に基づいた推定法およびすでに提案されている推定法との比較検討は、次の機会に報告したい。

2 実験および解析

2.1 供試模型船

鉄石運搬船「笠木山丸」の木製 3m 模型を使用した。規則波中の実験は、完全に船体運動を拘束した状態で、また不規則波中の実験はサージを固定し、ヒープおよびピッチを許した状態で行なわれた。模型船の主要寸法等を Table 1 に示す。

Table 1 Principal Particulars

Items	Unit	Value
Length between Perpendiculars L (m)	m	4.16
Breadth B (m)	m	4.03
Depth D (m)	m	2.36
draught d (m)	m	1.60
Displacement Volume V (m ³)	m ³	132.35
Block Coefficient C _B		0.8243
Midship Coefficient C _M		0.96
Waterplane Coefficient C _W		0.81
Center of Gravity before Midship	m	1.301
Center of Gravity above Keel Line	m	1.24
Longitudinal Center of Gravity	m	1.24

Fig. 1 水圧計，相対水位計，相対波面計の設置状況

2.2 実験項目

Fig. 1 に示すように、吃水上方 4cm、8cm の Stem 上に、豊田工機製の水圧計（PMS-5M 型）を、吃水上方 2cm、6cm、10cm の位置で、Stem に垂直に、長さ 7cm の抵抗線型波高計（Wave Probe A；相対波面計と呼ぶ）を、Stem に沿って容量型波高計（Wave Probe B；相対水位計と呼ぶ）を取り付け、以下に示す規則波、不規則波中の衝撃圧計測実験を東京大学千葉水槽で実施した。

a) 短波長規則波中の衝撃圧実験

衝撃角度（衝撃水圧発生時に船体表面と波面とのなす角度）に及ぼす船首せき返し波の影響を調べることが主眼なので、衝撃圧の発生しやすい比較的波傾斜の大きな短波長規則波を使用した。実際に起こされた波は、波長船長比が $\lambda/L=1/4$ （波高（全振幅）波長比； $H/\lambda=1/16, 3, 1/22, 1$ ）， $\lambda/L=1/6$ （ $H/\lambda=1/14, 7, 1/17, 2$ ）の波である。このように波長が非常に短いので、仮に、運動を拘束しなくとも、船体運動はほとんど起こらず、したがって、ヒープ、ピッチの運動を許した時の実験とほぼ等し

いと考えられる。

実験船速は、Froude 数 $F_n=0.15, 0.175, 0.20$ の 3 種とした。計測項目は、入射波、衝撃圧、相対波面、および相対水位の 4 項目である。計測系の周波数特性を良くするために計測データはすべて、データレコーダーに高速記録され、解析時に低速再生された。

b) 不規則波中の衝撃圧実験

実験は、実船スケールで有義波高 (H_W) が 5m, 7.5 m, 10m の海面に対応する二次元不規則波中の正面向い波状態で、3 種類の船速 ($F_n=0.10, 0.15, 0.20$) に

Fig. 2 使用不規則波

Fig. 3 不規則波中の衝撃圧記録例 (Wagner 型)

Fig. 4 解析例 (Fig. 3 に対応)

対して行なわれた。

使用不規則波は、I. T. T. C. スペクトルを基準スペクトルとして作製されたアナログ入力信号を用いて起こされている。Fig. 2 に、予定した基準スペクトルと、実際に計測された不規則波のスペクトルとを比較して示した。

船体運動は、シングル・ガイドにより、ヒープ、ピッチを許した。ヒープ、およびピッチの計測は、それぞれポテンシオメータ、パーティカル・ジャイロで行なった。その他の計測項目および計測方法は、規則波中の実験と同じである。

2.3 解析法

水圧の計測波形より、衝撃圧が発生したか否かを判断するわけであるが、再生速度により、解析者の主観的要

素の介入するおそれがある。本研究では、以下に述べる理由から波形の立ち上がり時間（水圧が作用し始めてから peak に達するまでの時間）が、1/100 秒以下のものを衝撃圧として取り扱った。いま千葉水槽で発生可能な最も短い波を考えると、それは周期が 0.4 秒程度の波である。したがって不規則波中で計測される変動圧力波形としては、立ち上がり時間が 1/10 秒程度のもので見いだされる可能性がある。そこで、最も短い変動圧力波形の立ち上がり時間より一桁オーダーの低い立ち上がり時間を有するような圧力波形を衝撃圧波形として採用するならば、衝撃圧の立ち上がり時間は 1/100

秒以下となる。また、波浪荷重の実船計測においては、立ち上がり時間とはやや異なるが、継続時間(文献8)参照)が0.1秒以下のものを衝撃圧としている。これを模型スケールに換算すると約1/100秒以下となり、ここで採用した衝撃水圧の波形のそれとほぼ対応する。

次に、上で定義された衝撃圧が発生したときの衝撃角度、および衝撃速度の解析法について、不規則波中の記録例に基づいて具体的に説明する。Fig. 3およびFig. 4に示した記録例から理解されるように、衝撃圧発生時の相対波面形の記録(Relative Normal Wave Elevation)は、きれいな直線状となっており、この傾きから衝撃速度 V_n は容易に求められる。また、Stem上を波面が上昇する速度 V_t も、船体表面から約7mm離して、Stemに沿って取り付けられた相対水位計の記録(Relative Tangential Wave Elevation)から求められる。衝撃水圧の持続時間は非常に短いので、この微少時間では V_n , V_t とも一定と考えても支障ないから、衝撃角度は、

$$\beta = \frac{180}{\pi} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{V_n}{V_t} \right) \quad (1)$$

として求められる⁵⁾。

衝撃圧、衝撃速度が計測されると、次式で定義される衝撃圧係数 $C(\beta)$ も決定される。

$$C(\beta) = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2} \rho V_n^2} \quad (2)$$

Fig. 4で解析してみると、直線Aより $V_t = 354 \text{ cm/sec}$ 、直線Bより $V_n = 93.3 \text{ cm/sec}$ と求まるので、衝撃角度は $\beta = 14.8^\circ$ となる。また、衝撃圧の計測値が $P_{\max} = 96.8 \text{ cmAq}$ であるから、衝撃圧係数は(2)式より $C(\beta) = 21.8$ と求まる。

ところで、不規則波中の場合、出会い波ごとに衝撃圧が発生するわけではないし、また、波面の乱れも著しく、衝撃圧が記録されていても、 V_n , V_t が計測しかねる場合も生じている。Fig. 5にその一例を示した。

Fig. 5 不規則波中の衝撃圧記録例 (Bagnold 型)

Stem上の相対水位は下降しているにもかかわらず、相対波面計の記録は上昇しており、明らかに空気の巻き込みが起こったものと考えられる。Stem 4cmの水圧計の記録には、約850Hzの振動が見られ、また、Stem 8cmの記録には、砕波して飛び散った水塊が水圧計に当たったような波形が示されている。すなわち、典型的なBagnold型の衝撃が起こったといえよう。このような計測例は非常に少なかったので、とくに分類はせずに、衝撃圧発生回数の一つとして数えている。

3 考 察

3.1 船首波干渉係数(規則波中の実験)

計測された衝撃角度 β は、船体運動が完全に拘束されていたので、衝撃圧発生時のLocalな波傾斜 θ_L を導入することにより

$$\beta = \alpha - \theta_L \quad (3)$$

ただし、 α は平水面に対するStemの傾斜角を示し、本実験の場合は $\alpha = 56^\circ$ である。単位はすべて“degree”である。

と表現される。Localな波傾斜 θ_L を入射波の最大波傾斜 θ_w で割ると、船首せき返し波の影響による船首付近の波面の盛り上がりが定量化できるので、これを船首波干渉係数と呼ぶことにして考えてみる。

$$\gamma = \theta_L / \theta_w = (\alpha - \beta) / \theta_w \quad (4)$$

ただし、 $\theta_w = 180 \cdot \frac{H}{\lambda}$, H : 入射波の波高(全振幅), λ : 入射波の波長

Stem 4cmの位置の水圧計に衝撃圧が計測された時の衝撃角度 β と入射波の最大波傾斜 θ_w の実測値を(4)

式に代入して船首波干渉係数を求めると、Fig. 6のようになる。本図を見ると、局部波の波傾斜は入射波の波

Fig. 6 船首波干渉係数

傾斜の3～4倍にも容易になり得ることがわかる(文献4参照)。また、解析値にバラツキは見られるものの、船速が一定ならば、 γ は入射波の最大波傾斜によらず、ほぼ一定値をとるようである。船速の影響については、 F_n に比例すると、 F_n^2 に比例するともいえそうであるが、ここでは、一応、 $\gamma \propto F_n^2$ と考えておく(文献7参照)。また、(4)式で定義された γ は、波長が変化すれば、当然変わり得るものであろうが、短波長の波の中でしか衝撃圧はほとんど発生しないので、『衝撃圧発生時の船首波干渉係数』と限定した上で、波長による変化はないものと仮定する。これらの点を考慮し、 γ のおおよその値を与える実験式を求めると、次式のようになる。↗

$$\left. \begin{aligned} N_0 &= \frac{1}{2\pi} (m_{w2}/m_{w0})^{1/2} \equiv 1/T_0 \\ N_W &= \frac{1}{2\pi} (m_{r2}/m_{r0})^{1/2} \exp[-z^2/2m_{r0}] \\ &\equiv \frac{1}{T_z} \exp[-z^2/2m_{r0}] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、

$$m_{w0} = \int_0^\infty S(\omega) \omega e^n d\omega \quad (n=0, 2)$$

$$m_{r0} = \int_0^\infty S(\omega) \omega e^n A_r^2(\omega) d\omega \quad (n=0, 2)$$

$S(\omega)$: 不規則波の出合いスペクトル

$$z = h_s - z_s$$

z_s : 考えている点の z 座標

(吃水線を基準に上方を正とする)

$$h_s: \text{Static Swell Up}^{1,7,13)}$$

$$h_s/L = k_1 \cdot F_n^2$$

$$k_1 = \begin{cases} 0.75 B/L_e & (B/L_e < 0.5) \\ 0.125 B/L_e + 0.375 & (0.5 \leq B/L_e < 1.5) \\ 0.5 & (1.5 \leq B/L_e) \end{cases}$$

L_e : entrance 長さ

L : 船長, B : 船幅

A_r : Dynamic Swell Up^{1,7,13)}を考慮した、相対上下揺の応答関数の振幅部分

$$r = s - h_d = h_d A_r \cos(\omega t + \varepsilon_r)$$

$$h_d = -k_2 \cdot \omega \cdot s$$

$$k_2 = \frac{1}{3} (C_0 - 0.45) \sqrt{L/g}$$

$$s = \zeta - \alpha_s \theta - h = h_d s_a \cos(\omega t + \varepsilon_s)$$

$$h = h_a \cos(\omega t + k x_s)$$

ζ : Heave (上向き方向を正とする)

↗

$$\gamma = 75 F_n^2 + 1 \quad (5)$$

本推定式は、不規則波中での衝撃圧推定計算において使用されるが、その具体的な適用法については次の機会に報告したい。また、船首波干渉係数は、本来、ここで考えている Stem の傾斜角、入射波の波傾斜、船速等以外に、船首部形状(たとえば、Entrance Angle, Bulbの大きさ、L.W.L.より上の船首肥瘠度等)が考慮されたものに改良される必要があり、今後さらに詳しい研究を続けていく予定である。

3.2 衝撃圧発生率(不規則波中の実験)

衝撃圧が発生するための最低必須条件は、考えている点が接水することである。いま、考えている点の接水率を、↗

$$f_W = \frac{(\text{単位時間当りの考えている点の上から下への平均接水回数})}{(\text{単位時間当りの平均出合い波数})} = \frac{N_W}{N_0} \quad (6)$$

θ : Pitch (船首下がり方を正とする)

h : 入射波 (上向きを正とする)

x_s : 考えている点の x 座標

(重心より前方を正とする)

h_d : Dynamic Swell Up

したがって

$$f_W = \frac{T_0}{T_z} \exp[-z^2/2m_{r0}] \quad (8)$$

となる。(8)式で与えられる接水率に、ある係数(船速(F_n)と Stem の傾斜(α)の関数と考える)を乗じたものが衝撃圧発生率 f_i 、すなわち、

$$\begin{aligned} f_i(\alpha, z, F_n, H_W) &= C_i(\alpha, F_n) f_W(z, F_n, H_W) \\ &\equiv K_i \cdot \exp[-z^2/2m_{r0}] \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、 $K_i = C_i(\alpha, F_n) \cdot (T_0/T_z)$

と仮定し、上式中の K_i を実験的に決めることを考えてみる。(9)式は、言い換えると、

$$\begin{aligned} f_i(\alpha, z, F_n, H_W) &= \frac{(\text{単位時間当りの衝撃圧発生回数})}{(\text{単位時間当りの平均出合い波数})} \\ &= \frac{(\text{総衝撃圧発生回数})}{(\text{総出合い波数})} \\ &\equiv \frac{N_i}{N_e} \end{aligned} \quad (10)$$

であるから、各実験状態における総出合い波数 N_e と、総衝撃圧回数 N_i との比とから、 f_i は容易に求められる。したがって、 h_s, m_{r0} とを計算しておくと、 K_i は実験的に決定されることになる。今回の実験と、模型(笠木山丸)の船首部形状を変えて衝撃圧の発生頻度に及ぼす Stem 角度の影響を調べた竹沢¹¹⁾の研究を比較検討して、おおよその K_i を与える実験式を求めると、

$$K_i \doteq (90 - \alpha) F_n^3 \quad (11)$$

となる。詳しくは、 T_0, T_z の影響をも調べるべきだが、ここでは省略した。従って、衝撃圧発生率 f_i は、

Fig. 7 衝撃圧発生率

$$f_i(\alpha, z, F_n, H_w) \doteq (90 - \alpha) F_n^3 \exp[-z^2/2 m_{r0}] \quad (12)$$

ただし, $F_n \leq 0.20$, $46 \leq \alpha \leq 90$

と推定される。(12) 式による計算結果と実験結果とを比較して, Fig. 7 に示した。細かい点に関しては, いろいろ問題があるが, 出合い波数に対する衝撃圧発生回数の割合は, Fig. 7 に示された程度であると考えてよいだろう。不規則波中での衝撃圧発生率の推定は必要不可欠のものであり, 大胆な推定式ではあるが, (12) 式を採用することとする。

3.3 衝撃圧, 衝撃速度および衝撃角度の分布形

船速 $F_n=0.15$, 有義波高 $H_w=6.1$ cm (実船換算 5 m) の実験状態で, Stem 4 cm (実船 3.3 m L. W. L.) の位置で計測されたデータを中心に, 衝撃圧, 衝撃速度および衝撃角度の分布形について, 検討することにする。

線形理論によると, 入力現象が正規不規則過程なら, 出力現象も正規不規則過程となり, これら正規過程の極値分布は, スペクトルが狭帯域の場合は Rayleigh 分布となることが知られている。

そこで, 衝撃圧の計測結果が Rayleigh 分布⁹⁾である

Fig. 9 衝撃圧の累積密度関数と対数正規分布

かどうかを, 累積密度関数で検討したのが Fig. 8 である。本図では, 衝撃圧は Rayleigh 分布とはならないように思われる。衝撃圧 P と衝撃速度 V_n との関係が一般に, $P \propto V_n^2$ であるといわれており, 衝撃速度 V_n が線形応答であるとしても, この関係式より衝撃圧は非線形となることや, 発生個所は異なるが, 同じ衝撃現象である Slamming に対する Ochi の研究¹⁰⁾から推察しても, 同様なことがいえるものと思われる。

Fig. 8 の実験結果を見ると, 発生回数は少なくなっていくものの, 非常に大きな衝撃圧まで連続的に起こっており, このような大きな値まで考慮するには, 対数分布を考えるのが適当かと思われた。そこで, 対数正規分布を適用してみることにし, Fig. 9 に累積密度関数と, 90% 信頼限界¹⁴⁾を示した。実験値は, 対数正規分布で非常によく説明されることが判る。Fig. 10 には, その密

Fig. 8 衝撃圧の累積密度関係と Rayleigh 分布

Fig. 10 衝撃圧の確率密度関数

度関数を計測値のヒストグラムと比較して示したが、両者とも満足のゆく一致が得られている。また、対数正規分布を採用してよいか、仮説の棄却率が 5% として χ^2 検定を行なってみても、有意の差は認められず、対数正規分布でよいという結論が得られた。すなわち、衝撃圧の密度関数は、次式で表現されよう。

$$f_P(\log P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left[-\frac{(\log P - u_P)^2}{2\sigma_P^2}\right] \quad (13)$$

ただし、

$$u_P = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} \log P_j \quad (= \log P \text{ の平均値})$$

$$\sigma_P = \sqrt{\frac{1}{N_i - 1} \left[\sum_{j=1}^{N_i} (\log P_j)^2 - \frac{1}{N_i} \left(\sum_{j=1}^{N_i} \log P_j \right)^2 \right]} \quad (= \log P \text{ の標準偏差})$$

次に、衝撃速度 V_n と衝撃角度 β の分布形について検討してみる。衝撃圧 P 、衝撃速度 V_n および衝撃角度 β との関係は、一般に

$$P = \frac{1}{2} \rho C(\beta) \cdot V_n^2 \quad (14)$$

と表現される。上式中の $C(\beta)$ は、衝撃圧係数と呼ばれる修正係数で、前田¹²⁾は、落下衝撃、波浪中衝撃圧実験等を整理して、次式を提案している。

$$C(\beta) = 400 \exp[-0.14\beta] \quad (15)$$

上式のように、 $C(\beta)$ が指数表示できるとし、(14) 式に代入すれば、衝撃圧 P は、一般に

$$P = a V_n^2 \exp[-b\beta] \quad (16)$$

のように表現される。両辺の対数をとるとわかるように、衝撃圧が対数正規分布とすれば、この確率変数間の関係から、 $\log V_n$ および β は正規分布、すなわち、

衝撃速度の密度関数

$$f_{V_n}(\log V_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{V_n}} \exp\left[-\frac{(\log V_n - u_{V_n})^2}{2\sigma_{V_n}^2}\right] \quad (17)$$

ただし、 u_{V_n} : $\log V_n$ の平均値

σ_{V_n} : $\log V_n$ の標準偏差

衝撃角度の密度関数

$$f_\beta(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\beta} \exp\left[-\frac{(\beta - u_\beta)^2}{2\sigma_\beta^2}\right] \quad (18)$$

ただし、 u_β : β の平均値

σ_β : β の標準偏差

で表現される密度関数を有する必要がある。そこで、Fig. 9 の衝撃圧計測時に求められている V_n, β の分布を、それぞれ対数正規確率紙、正規確率紙にプロットしたものが、Fig. 11, 12 である。両図を見ると、上記仮説の正しいことが裏付けられているといえよう。ところで、文献 11) の竹沢による不規則波中の実験結果を、前述の仮定に基づいて再整理したものが Fig. 13, Fig. 14 である。竹沢の実験の場合、衝撃圧、衝撃速度、衝撃角度の三者が組となって記載されているかわからないが、そ

Fig. 11 衝撃速度の累積密度関数

Fig. 12 衝撃角度の累積密度関数

Fig. 13 衝撃圧と衝撃速度の累積密度関数 (文献11)

Fig. 14 衝撃角度の累積密度関数 (文献11)

それぞれの分布形は著者の実験結果と一致していることが理解される。

上の検討で、衝撃速度 V_n が対数正規分布、衝撃角度 β が正規分布に従うといえそうなので、次に衝撃圧 P の分布と、衝撃速度および衝撃角度の分布との関係を求めてみる。いま、 $\log V_n$ と β との結合密度関数を、

$$f(\log V_n, \beta) = \frac{1}{2\pi\sigma_{V_n}\sigma_\beta\sqrt{1-r^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}Q(\log V_n, \beta)\right] \quad (19)$$

ただし、

Fig. 15 衝撃圧係数 ($F_n=0.15$) Fig. 16 衝撃速度と衝撃角度に関する散布図 ($F_n=0.15$)

$$Q(\log V_n, \beta) = \frac{1}{1-r^2} \left\{ \frac{(\log V_n - u_{V_n})^2}{\sigma_{V_n}^2} - 2 \frac{r(\log V_n - u_{V_n})(\beta - u_\beta)}{\sigma_{V_n}\sigma_\beta} + \frac{(\beta - u_\beta)^2}{\sigma_\beta^2} \right\} \quad (20)$$

r : $\log V_n$ と β との間の相関係数

とすれば、衝撃圧 P の密度関数 $f_P(\log P)$ は、(16) 式の関係を用いて

$$f_P(\log P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{4\sigma_{V_n}^2 - 4rb\sigma_{V_n}\sigma_\beta + b^2\sigma_\beta^2}}$$

$$\times \exp \left[-\frac{(\log P - \log a - 2u_{V_n} + bu_{\beta})^2}{2(4\sigma_{V_n}^2 - 4rb\sigma_{V_n}\sigma_{\beta} + b^2\sigma_{\beta}^2)} \right] \quad (21)$$

となり、(13) 式と比較すると、 $\log P$ は

$$\left. \begin{aligned} \text{平均: } u_P &= \log a + 2u_{V_n} - bu_{\beta} \\ \text{標準偏差: } \sigma_P &= \sqrt{4\sigma_{V_n}^2 - 4rb\sigma_{V_n}\sigma_{\beta} + b^2\sigma_{\beta}^2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

なるパラメータで記述される正規分布になることを意味する。上式の関係を、実験値を用いて検討する必要があるが、その前に、実験値 P , V_n , β を用いて、衝撃圧係数 $C(\beta)$ と相関係数 r を計算しておく。Fig. 15 に Fig. 9, 11, 12 に対応する実測値 P , V_n , β より算出された衝撃圧係数を、Fig. 16 には、 $\log V_n$ と β との間の相関関係を表わす散布図を示した。衝撃圧係数の図を見ると、大部分の実験点は、前田の近似式より下側にあるが、上側にも何点が見られる。 V_n , β の測定精度が十分とはいえないので、細かい議論は、今後の研究に譲らざるを得ないが、前田の近似式は、過去の種々の実験値の最大値の包絡線であることを考えると、この近似式は $C(\beta)$ の最大値の包絡線として、ほぼ妥当なものと考えられる。このことは、海象条件は同じで、船速のみを変えた実験例 (Fig. 17) から結論される。しかしながら、衝撃圧係数の定数に相当する a , b は、統計論的に考えると、実験より得られる u_P , σ_P , u_{V_n} , σ_{V_n} , u_{β} , σ_{β} および r を、(22) 式に代入して決められるべきものである。一方、 $\log V_n$ と β との相関は、Fig. 16 より判るように、非常に弱く、事実、相関係数 r は $r=0.061$ であった。また、 $F_n=0.20$ の場合の例では、Fig. 18 に示したように、やや相関が見られ、 $r=0.375$ であった。この相関係数に対し、95% 信頼区間を求めてみると (Fig. 18 の場合)、

$$0.184 < r < 0.604$$

となる。二例からではあるが、衝撃速度と衝撃角度との間には、比較的弱い相関があるといえそうである。

以上の解析で、確率変数の平均、標準偏差および相関係数が求められたので、(22) 式の関係を検討してみる。標準偏差に関する式において、実根 b を得るための条件は

$$r^2 \geq 1 - \frac{\sigma_P^2}{4\sigma_{V_n}^2} \quad (23)$$

であるが、本論文でとりあげている2組の実験値は、両者とも、残念ながら、上式を満たしていなかった。そこで、相関係数に幅をもたせて、95% 信頼区間内に存在する値で、かつ (23) 式をも満足する値をとり得るものと仮定して、 a , b をすなわち衝撃圧係数を求めてみる。いま、 $F_n=0.20$ の場合に、95% 信頼区間の上限値 $r=0.6$ を相関係数とすると、(22) 式より、衝撃圧係数は

$$C(\beta) = 226 \exp[-0.140\beta] \quad (r=0.6)$$

となった。また $r=0.5$ とすると

$$C(\beta) = 119 \exp[-0.107\beta] \quad (r=0.5)$$

Fig. 17 衝撃圧係数 ($F_n=0.20$)

Fig. 18 衝撃速度と衝撃角度に関する散布図 ($F_n=0.20$)

が得られた。Fig. 17 の図中に、これらの衝撃圧係数も示してあるが、どちらもほぼ実験値を説明しているように思われる。Fig. 15 には $b=0.14$ としたときの、実験値より決定された衝撃圧係数 $C(\beta) = 215 \exp[-0.14\beta]$ を記入しておいたが、本図からも同様なことが結論されよう。今後、計測法の改善につとめ、より精度の高いデータを蓄積することにより、(22) 式の関係をもさらに詳しく検討する必要がある。

4 結 言

大型肥大船の船首部に働く衝撃圧、衝撃圧発生時の衝

撃速度，衝撃角度の計測を，規則波中および不規則波中で行ない，船首せき返し波の衝撃圧に及ぼす影響，衝撃圧の発生率，衝撃圧の分布形等の問題について詳しく検討してきた。得られた結果をまとめると，次のとおりである。

1. 衝撃圧発生時の船首付近の波面の傾斜は，入射波の最大波傾斜に，船速の関数である船首波干渉係数(5)式を乗ずることにより，その大略値が求められることを明らかにした。

2. 有義波高，船速，船首相対上下運動，Stemの傾斜等を考慮した不規則波中での衝撃圧発生率(12)式を実験的に求めた。

3. 衝撃圧の分布形は，対数正規分布で近似されるようである。また，衝撃圧の大きさを決めるパラメータである衝撃速度，衝撃角度は，それぞれ対数正規分布，正規分布となるようである。また，衝撃速度と衝撃角度との間には，弱い相関があるようである。

今回の実験で得られた諸結果に，さらに検討を付け加えたとともに，短期不規則海象下での船首衝撃圧の推定を試み，次の機会に報告させていただく予定である。最後に，本研究を進めるにあたり，御指導いただいた東京大学の元良誠三教授，藤野正隆助教授に，また適宜御助言，御検討いただいた横浜国立大学の竹沢誠二教授，九州大学の福田淳一教授をはじめ，日本造船研究協会第131研究部会の委員の方々に，深く感謝し厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 西部造船会技術研究会：船体の損傷に関する調査研究(4)——波浪による船首外板の損傷とその対策——，西部造船会技術研究報告，第16号(昭和49年11月)。
- 2) 村井謙二：コンテナ運搬船の船首部船側外板の損傷，日本海事協会会誌，No.150(昭和50年1月)。
- 3) 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3月)，176(昭和48年3月)，192(昭和49年3月)，213(昭和50年3月)。
- 4) 藤井 齊，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(昭和47年5月)。
- 5) 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5月)。
- 6) K. Hagiwara & T. Yuhara: Fundamental Study of Wave Impact Loads on Ship Bow (1st, 2nd and 3rd Report), 日本造船学会論文集，第135号(昭和49年5月)，136号(昭和49年11月)，137号(昭和50年5月)。
- 7) 永元隆一，塚本 修：船首部波浪衝撃圧力の推定について，西部造船会会報，第49号(昭和49年11月)。
- 8) 日本造船研究協会第124研究部会：大型鉾石船の船首部波浪荷重および鉾石圧に関する実船試験，研究資料，No.156(昭和47年3月)。
- 9) 菅井和夫他：船側波浪衝撃水圧に関する実験的研究，日本造船学会論文集，第138号(昭和50年11月)。
- 10) M. K. Ochi: Prediction of Occurrence and Severiy of Ship Slamming at Sea, 5th Symposium on Naval Hydrodynamics, ONR, ACR-112 (1964)。
- 11) 竹沢誠二：大波高不規則波中の船首正面衝撃圧の計測，日本造船研究協会第131研究部会報告書，研究資料，No.213(昭和50年3月)。
- 12) 前田久明：衝撃圧係数，日本造船研究協会第131研究部会報告書，研究資料，No.213(昭和50年3月)。
- 13) 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，運輸省技術研究所報告，第11巻第8号(昭和36年)。
- 14) N. H. Jasper: Statistical Distribution Patterns of Ocean Waves and of Wave-Induced Ship Stresses and Motions, with Engineering Applications, Trans. SNAME, Vol.64 (1956)。