

(昭和 35 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

向い波中における甲板上への海水の 打ち込みについて

正員 田 崎 亮*

On the Shipping Water in Head Waves

By Ryo Tasaki, Member

Abstract

The author carried out an experiment on the shipping water during the experiment of the propulsive performance of tanker models in regular head waves. The amount of shipping water per one cycle was measured and presented in Fig. 4 versus model speed. After the calculation of relative motion of the bow to waves, it was found that water shipped on the forcastle deck even when the bow did not submerge into free ocean waves. This fact and further consideration show that when the free board at the bow is regarded as an allowance for shipping water, it must be reduced by the height of the static swell-up of bow wave due to forward speed of the ship and the relative submergence of the bow must be increased by the height of the dynamical swell-up of water surface due to relative vertical velocity of the bow and waves.

The amount of shipping water at the beginning is approximately proportional to forward speed, encounter period and to square of wave height and to 2.5th power of the ratio of excess of water surface over the top of bowchock to the free board at the bow.

Then he shows a method to calculate the cumulative energy of the bow submergence in irregular heading seas and gives the time proportion of wet deck for a tanker of length $L=190.5$ m as an example.

1. 緒 言

甲板上への海水の打ち込みは船の耐航性あるいは凌波性を取りあつかう場合, slamming, propeller racing 等とともに, 非常に荒れた海面を航行する船舶の安全性あるいは運航速度の保持等の面から重要な問題の一つである。しかしこの現象に付随しておこる現象たとえば波浪衝撃によつて甲板上に生ずる圧力あるいは損傷についての研究はすでに行なわれているが^{(1),(2),(3),(4),(5),(6)}現象自身を取扱つたものは見受けられないようである。

著者は大型油送船の波浪中の推進性能に関する実験⁽⁷⁾のさいに海水の打ち込みについての1実験をおこなつた。即ち波高を一定とし波長を変えた規則正しい向い波の中で船首甲板上への海水の打ち込み水量を測定した。したがつてこれに続く結果の検討あるいは応用も主として向い波の場合にかぎられる。

2. 実験方法

2.1 打ち込み水量の測定

Fig. 1 に示すように船首甲板に取付けた bucket のふたを電磁石により測定台車から開閉し, 任意の振動数にわたつて bowchock をこえて甲板上に打ち込んだ水を集め, これから1振動あたりの打ち込み水量を算定した。この bucket は flexible pipe を介して曳行台車上の pump に連結されており, この pump は bucket 内に溜つた水が模型船の重量配置に影響を与えることのないよう, また溢れだすことのないように常に作動させておく。その配置図を Fig. 2 に示す。このような装置により船体運動, thrust 等の測定に影響を与えることなく

原稿受付 昭和 35 年 1 月 9 日

* 運輸技術研究所

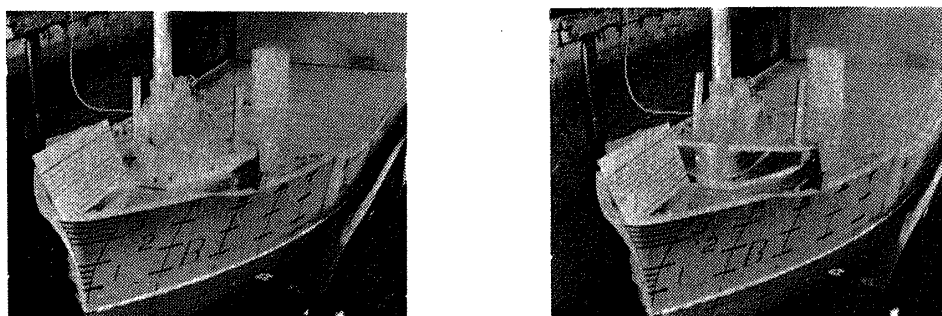


Fig.1 Photographs of apparatus for collecting shipping water

1 振動あたりの打ち込み水量を測定することができる。

2.2 模 型 船

使用した模型船および対応する実船の主要寸法を Table 1 に、その正面線図および船首尾形状を Fig. 3 に示す。船首の flare の変化が海水の打ち込みにおよぼす影響をみるために S. S. No. 8³/₄ から前方の flare を3段階に変化させた。しかし簡単にするために船首の profile は変化させなかつた。Fig. 3においてBは普通の型であり、AおよびCはそれぞれ flare を落したものと誇張したものである。模型船は船内に自蔵した電動機により自

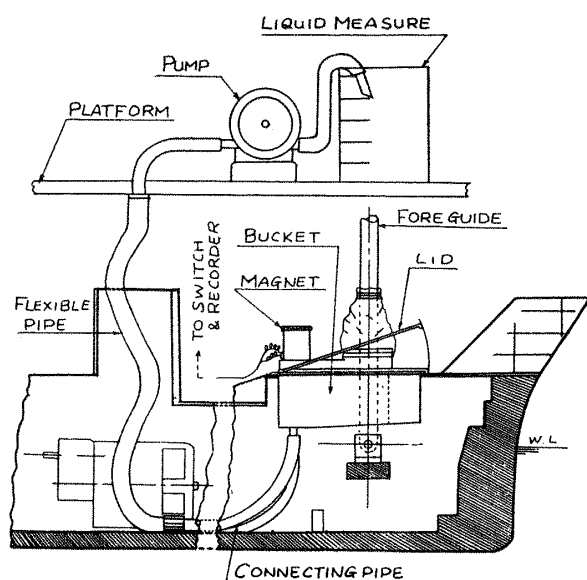


Fig.2 General arrangement of apparatus for collecting shipping water

Table 1 Characteristics of Model and Ship

Model	
Model number	1320
Length between perpendiculars, L_{pp} , m	4.500
Breadth, B , m	0.643
Depth, D , m	0.352
Draft, d , m	0.261
Displacement, v , m^3	0.604
Wetted surface area, S_W , m^2	4.467
Block coefficient, C_B	0.800
Water plane coefficient, C_W	0.868
Longitudinal centre of buoyancy, % of L_{pp} from F.P.	48.50
Distance between L.W.L. and bowchock top line at bow, f , m	0.202
Radius of gyration in air, k_a	$0.25L_{pp}$
Natural pitching period afloat, T_{PO} , s	1.19
Ship	
Length between perpendiculars, L_{pp} , m	190.50
Breadth, B , m	27.21
Depth, D , m	14.89
Draft, d , m	11.05

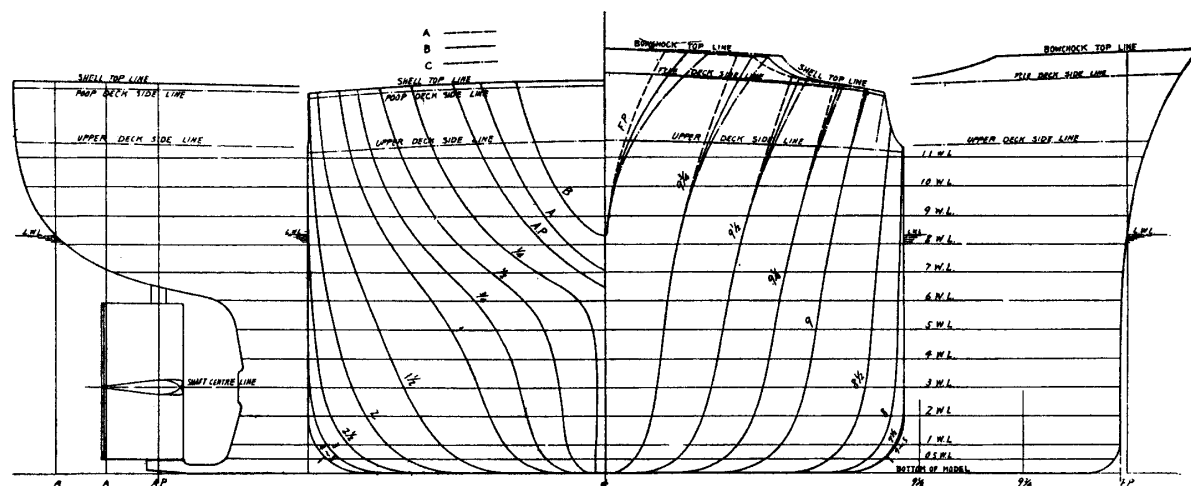


Fig.3 Body plan and forms of stern and stem of model (M. No.1320)

航させ、その速度範囲は 0 から 1.60 m/s までであった。

2.3 波

実験をおこなった波は波高 H_W を 10 cm の一定とし、波長 λ を模型船の長さ L の 50, 75, 100, 125, 150, 200 および 250% の 7 種類に変化させた規則正しい向い波であった。なお波と船との相対運動を算定するために各測定量の位相の測定には特に注意を払った。

3. 実験結果

1 振動あたりの打ち込み水量を模型船の速度を横軸に置点したものが Fig. 4 である。本実験では波長・船長比 $\lambda/L=100, 125$ および 150% の場合以外は打ち込みはおこななかった。図からわかるように打ち込みの初期においては flare の大小による差はみられない。大量の打ち込みのおこった $\lambda/L=100\%$ については flare が大きいほど、すなわち A, B, C の順に打ち込み水量は少くなっているのに対し、 $\lambda/L=125\%$ についてはこの順序が逆になっている。しか

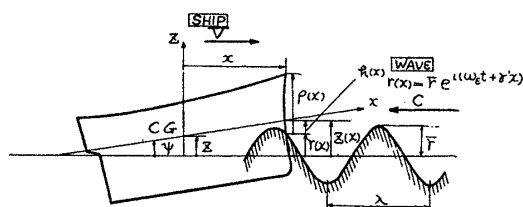


Fig. 5 Coordinate system and marks.

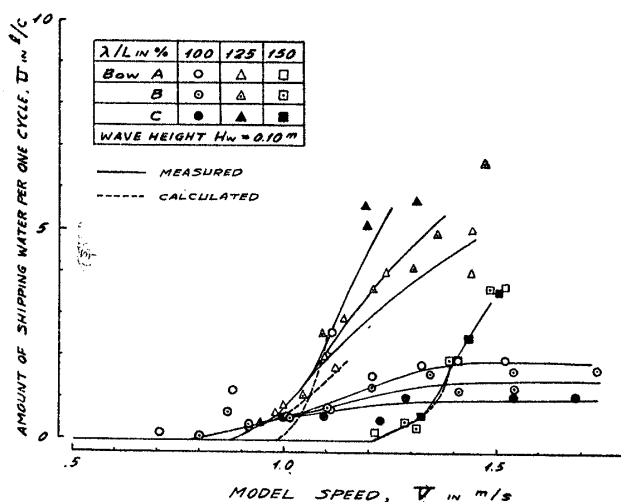


Fig. 4 Amount of shipping water per one cycle

しこのような flare の影響を詳細に知るためには実験の精度を向上し、さらに写真撮影等の補助手段を用いる必要がある。

なお船首の flare の変化が船体運動, thrust, torque 等におよぼす影響は本実験では認められなかった⁽⁷⁾。

4. 実験結果の検討

4.1 船首における乾玄

Fig. 5 に示すように、座標系の原点を船の重心 C.G. に固定し、船の進行方向に x 軸、垂直上方に z 軸をとる。船速を V とし、波は x 軸の負の方向に c なる速度で進行する。したがって船と波との相対速度は $V+c$ である。船に対する波型 $r(x)$ は C.G. における波面

$$r(0) = \bar{r} e^{j\omega_E t} \quad (1)$$

を基準としてあらわすと、 $\gamma' = 2\pi/\lambda$ として

$$r(x) = \bar{r} e^{j(\omega_E t + \gamma' x)} = e^{j\gamma' x} \cdot \bar{r} e^{j\omega_E t} = e^{j\gamma' x} \cdot r(0). \quad (2)$$

上下揺れ z および縦揺れ角 ψ も同様に、

$$z = \bar{z} e^{j\omega_E t} = \frac{\bar{z}}{\bar{r}} \cdot r(0) = |Z| e^{j\delta_z} \cdot r(0), \quad (3)$$

$$\psi = \bar{\psi} e^{j\omega_E t} = \frac{\bar{\psi}}{\bar{r}} \cdot r(0) = |\Psi| e^{j\delta_\psi} \cdot r(0) \quad (4)$$

となる。ここで δ_z および δ_ψ はそれぞれ上下揺れおよび縦揺れと船体中央における波面との位相差であり、 Z および Ψ はそれぞれ単位振幅の波の C.G. における波面を基準とした上下揺れおよび縦揺れの応答、すなわち

$$Z = \frac{\bar{z}}{\bar{r}} = |Z| e^{j\delta_z}, \quad (5)$$

$$\Psi = \frac{\bar{\psi}}{\bar{r}} = |\Psi| e^{j\delta_\psi}. \quad (6)$$

である。

船体の任意の点 x における変位 $z(x)$ は (5), (6) から

$$z(x) = z + x\psi = (|Z|e^{j\delta_z} + x|\Psi|e^{j\delta_\psi}) \cdot r(0). \quad (7)$$

x における変位 $z(x)$ と波面 $r(x)$ との差 $h(x)$ は

$$h(x) = z(x) - r(x) = \bar{h}(x)e^{j\omega Et} = (|Z|e^{j\delta_z} + |\Psi|e^{j\delta_\psi - e^{j\gamma'\alpha}}) \cdot r(0), \quad (8)$$

または単位振幅の波に対する応答として,

$$H(x) = \frac{\bar{h}(x)}{\bar{r}} = |Z|e^{j\delta_z} + x|\Psi|e^{j\delta_\psi - e^{j\gamma'\alpha}}. \quad (9)$$

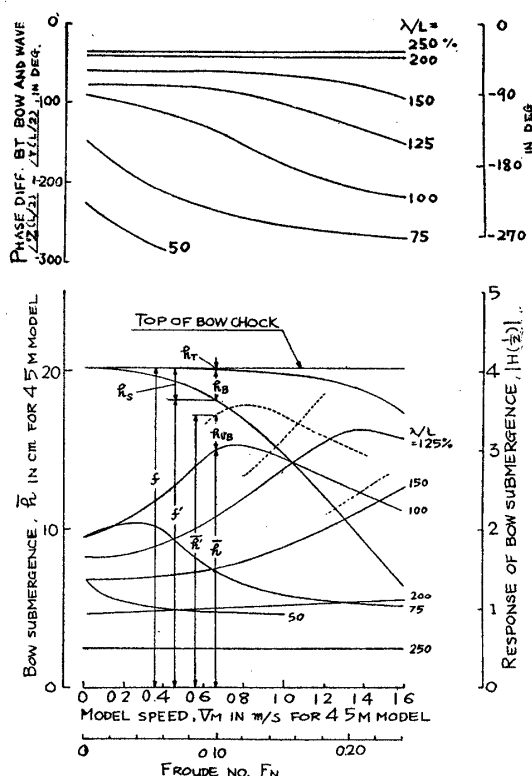


Fig.6 Bow submergence and phase relation between bow motion and wave

実験の結果⁽⁷⁾を用いて船首露出 $h(L/2)$ および $H(L/2)$ を計算したものを Fig. 6 に示す。さらに船首と波面との位相関係をあきらかにするために vector 表示したものが Fig. 7 である。すなわち船首運動をあらわす vector $\bar{z}(L/2)$ と船首における波面を表わす vector $\bar{r}(L/2)$ との差が船首露出を表わす vector $\bar{h}(L/2)$ となる。なお正弦運動を考えているから船首露出と船首没入とは同等であつて、以下これを船首没入とよぶ。

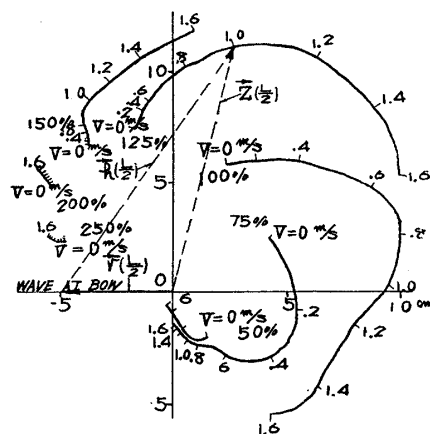


Fig.7 Vector representation of bow motion.

本実験の場合模型船の船首における乾玄，すなわち満載喫水線から bowchock の上縁までの距離 f は 20.2 cm であつて，これを Fig. 6 に記入しておいた。この図と Fig. 4 を比較することにより，船体によつて攪乱されない到来波に対して船首が没入しなくてもはげしい打ち込みが起つてることが判かる。

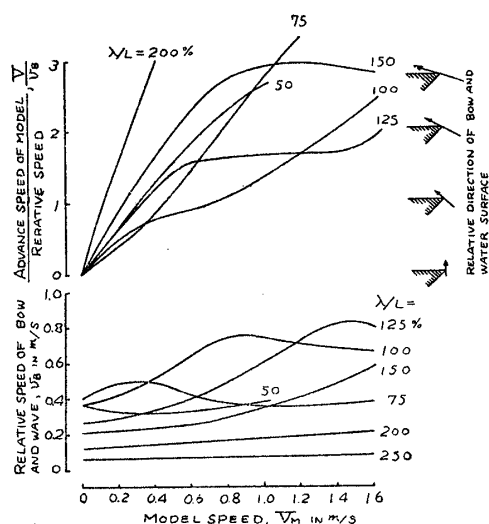


Fig.8 Relative speed of bow to wave

4.2 船首波

船が静水中を航走する場合の船首に対する相対的な水面の盛りあがり h_s は船首波による成分 h_b と船体の沈下および trim の変化による成分 h_T との和 $h_s = h_b + h_T$ である。船首乾玄 f とこの盛りあがり量 h_s との差

$$f' = f - h_s \quad (10)$$

を修正した乾玄とよぶことにする。実験から得た f' を Fig. 6 に記入しておいた。

さらに船首における動的な水面の盛りあがりとして船首と波面との相対速度 v_B による盛りあがり h_{vB} が考えられる。実験結果から計算した v_B を Fig. 8 に示す。参考のために前進速度と上下速度との比 V/v_B ——船首と水面との相対速度の方向を示す——を記入しておいた。この盛りあがり h_{vB} の振幅 $\bar{h}_{vB}$ は前進速度が v_B に等しい場合の定常的な盛りあがり h_s に comparable であるとし，位相は船首と波面との相対運動と同相——観測結

果からはほぼ妥当と思われる——であるとし、これを前述の船首没入 $h(L/2)$ に加えたもの、

$$h' = h + h_{vB} \quad (11)$$

を修正した船首没入とよぶことにする。これを Fig. 6 に記入しておいた。Fig. 4 および Fig. 6 から判かるようにこの修正した船首没入 h' が修正した船首乾玄 f' を越える 模型船の前進速度と打ち込みが始まる前進速度とは略一致している。すなわち船首からの海水の打ち込みを考える場合、以上に述べたような修正した乾玄および修正した船首没入を対象としなければならないことが判かる。

4.3 打ち込み水量

単位時間内の水の打ち込み量は船の前進速度に比例し、修正した船首没入 h' が修正した乾玄 f' をこえる量

$$\rho = h' - f' \quad (12)$$

の自乗に比例するものとする、1 振動あたりの打ち込み水量 U は

$$U = C \int_{\rho > 0} V \cdot \rho^2 dt \quad (13)$$

となり、演算をおこなうと

$$\begin{aligned} U &= C \cdot V \cdot T_E \cdot h'^2 \cdot \left\{ (1 + 2 \cos^2 \varphi) \varphi - \frac{3}{2} \sin 2\varphi \right\} \\ &= C \cdot V \cdot T_E \cdot h'^2 \cdot \left(\frac{h'}{f'} - 1 \right)^{2.5} \quad \left(\text{ただし } \frac{h'}{f'} < 1.10 \right) \end{aligned} \quad (14)$$

となる。ここで $f' = \bar{h}' \cos \varphi$, T_E は出会周期である。Fig. 6 から ρ を求め、 $C=0.5$ として本式から計算した U を Fig. 4 に点線で記入しておいた。これから打ち込みの初期においては、船首の flare の形に無関係に、上述の仮定がほぼ成立することが判かる。

大量の打ち込みの際にみられる船首の flare の変化の影響は非常に複雑であつて、これを定量的に解析するためには飛沫現象あるいは船首の波返し作用等についての基本的な実験が必要である。Fig. 7 の vector 表示から判かるように、船首における波面と運動との位相差が、大量の打ち込みのおこる $\lambda/L=125$ および 150% の場合は、ほとんど 90° であるのに対し、飽和現象を呈している $\lambda/L=100\%$ の場合にはほとんど 180° である。このような点も波長あるいは flare の影響の違いに関係していると考えられる。

4.4 船首没入のスペクトル密度

船の C.G. における波面を入力、船首と波面との相対運動を出力とみなせばその周波数応答関数は (9) の $H(L/2)$ で与えられる。したがつて $E_r(\omega)$ なる energy spectrum をもつ海洋波の中の船首と波面との相対運動の energy spectrum $E_h(\omega)$ は

$$E_h(\omega) = |H(L/2)|^2 \cdot E_r(\omega) = E_z(\omega) + (L/2)^2 E_\psi(\omega) + L E_z \psi(\omega) + E_r(\omega) + 2 E_{zr}(\omega) + L E_{\psi r}(\omega) \quad (15)$$

で与えられる。ここで

$$\left. \begin{aligned} E_z(\omega) &= |Z|^2 \cdot E_r(\omega) : \text{上下揺れの energy spectrum,} \\ E_\psi(\omega) &= |\Psi|^2 \cdot E_r(\omega) : \text{縦揺れの energy spectrum,} \\ E_z \psi(\omega) &= |Z| |\Psi| \cos \delta_{z\psi} \cdot E_r(\omega) : \text{上下揺れと縦揺れの co-spectrum,} \\ E_{zr}(\omega) &= -|Z| \cos \delta_{zr} \cdot E_r(\omega) : \text{上下揺れと波との co-spectrum,} \\ E_{\psi r}(\omega) &= -|\Psi| \cos \delta_{\psi r} \cdot E_r(\omega) : \text{縦揺れと波との co-spectrum,} \\ \delta_{z\psi} &= \delta_z - \delta_\psi, \quad \delta_{zr} = \delta_z - \gamma'(L/2), \quad \delta_{\psi r} = \delta_\psi - \gamma'(L/2). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

以上の式から不規則波中における上下揺れ、縦揺れおよび波の船首没入に対する weight を知ることができる。operator の性質を知るためにその 1 例を Fig. 9 に示す。また Fig. 10 に $|H(L/2)|^2$ の例を示す。いずれも横軸は模型船に対する波の円周波数である。参考のために風速 $U_W=15 \text{ m/s}$ における Neuman spectrum を縮尺して記入しておいた。これらの図からわかることは、縦揺れの作用が顕著であり、相互干渉による作用は波長 λ が船の長さ L の 130% 以上になると運動を打ち消すようになることである。各成分の weight を示すためそれらの割合の 1 例を Table 2 に示す。また総合した operator は低速では平坦であるが、速度の増加とともに急速に鋭さをまし、非常に sharp な filter の性質を示す。したがつて λ/L に対して非常に敏感である。なお本模型については operator の peak は船体運動の同調点に一致している。

4.5 不規則波中における海水の打ち込み

簡単なために船首と波との相対速度による盛りあがり h_{vB} は h と 180° の位相差をもち、その振幅は $\dot{h}=v_B$

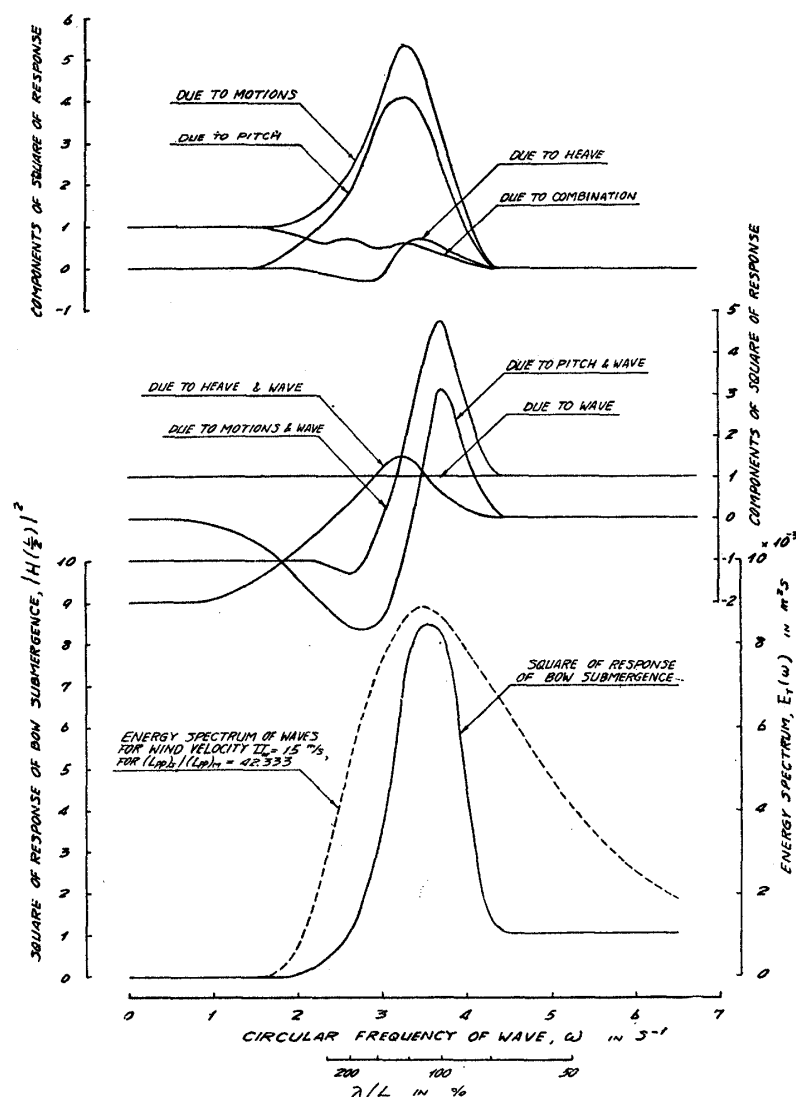


Fig.9 Components of square of response amplitude operator of bow submergence

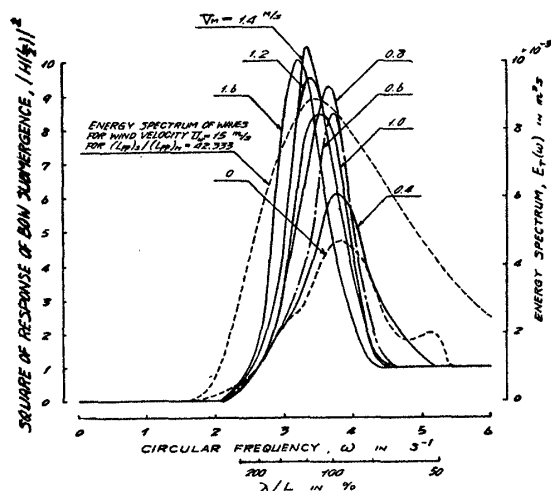


Fig.10 Square of response amplitude operator of bow submergence

このとき (10) で定義される修正した船首没入 h' の不規則波中における energy spectrum $F_{h'}(\omega)$ は次式で与えられる。

$$E_{h'}(\omega) = (1 + k\omega)^2 E_h(\omega). \quad (18)$$

Table 2 Components of cumulative energy of bow submergence

Wind velocity, U_W , m/s	15.0	
Cumulative energy of waves, E_r , m^2	4.80	
Ship speed, V , kts	12.7	
Cumulative energy of bow submergence		
due to heave, E_z , m^2	1.25	8.4%
due to pitch, $(L/2)^2 E_\psi$, m^2	6.63	44.6%
due to heave and pitch, $LE_{z\psi}$, m^2	0.55	3.7%
due to wave, E_r , m^2	4.80	32.4%
due to heave and wave, $2E_{zr}$, m^2	1.98	13.4%
due to pitch and wave, $LE_{\psi r}$, m^2	-0.38	-2.5%
total, E_h , m	14.83	100.0%
Cumulative energy of bow submergence due to pitch, wave and combination of pitch and wave, $(L/2)^2 E_\psi + E_r + LE_{\psi r}$, m^2		
	11.05	74.5%

の振幅に比例するものとする、すなわち

$$h_{vB} = k\omega E_h. \quad (17)$$

よく知られているように、この energy spectrum を ω について積分した累積 energy $E_h' = \int_0^\infty E_h'(\omega) d\omega$ を用いて不規則波中における海水の打ち込みに関する諸量の統計的推定がおこなえる。Table. 1 に示した実船について、 $E_r(\omega)$ に Neuman の海洋波の spectrum を用い、(17)(18)における k の値を 0.216 として計算したものが Fig. 11 である。これから、たとえば航海時間に対する wet deck の時間的な割合 $P_T[h' > f']$ は次式で与えられる。

$$P_T[h' > f'] = \frac{1}{\sqrt{\pi E_h'}} \int_{f'}^\infty \exp -\frac{h'^2}{2E_h'} dh'. \quad (19)$$

本船の船首乾玄 f を 8.54m として $P_T[h' > f']$ を求めたものを Fig. 12 に示した。参考のために修正しない乾玄 f および没入 h をそのまま用いたときの割合 $P_T[h > f]$ も同時に記入しておいた。これから修正値を用いないと wet deck に対する安全性を相当過大評価することになることが判かる。最後に上式を用いて、その程度の大きさの油送船について乾玄 f の変化による $P_T[h' > f']$ の変化の様子を Fig. 13 に示す。さらに規則波中の打ち込み水量と乾玄との関係を $\lambda/L=100\%$ 、 $H_w/\lambda=1/45$ の場合について、(14) により計算した例を参考のため記入しておいた。全振動数に対する打ち込みをおこす振動の回数の割合、打ち込み水量の頻度分布等も求めることができるが、このような点については他の船型についての資料とともに検討したいと考える。

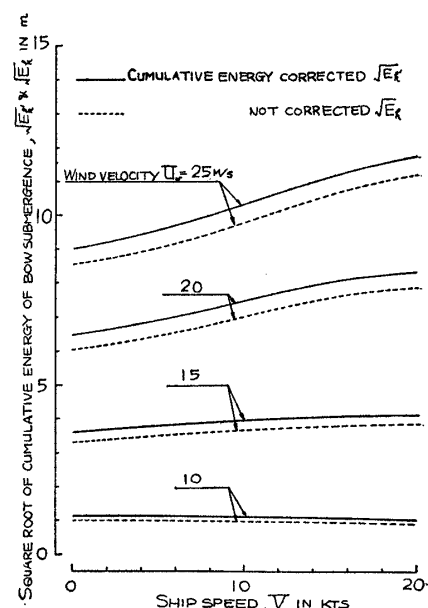


Fig. 11 Cumulative energy of bow submergence in irregular head seas

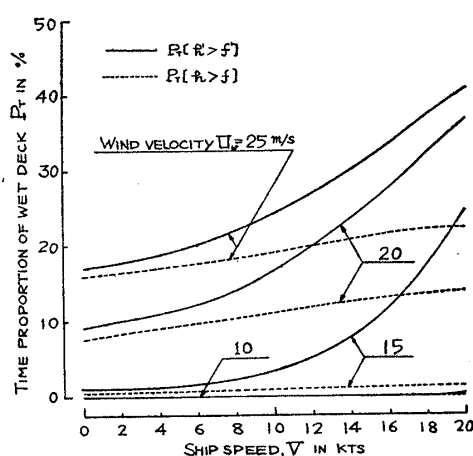


Fig. 12 Time proportion of wet deck for the $L_{pp}=190.5$ tanker

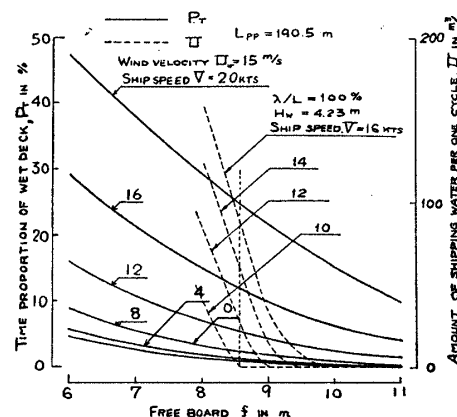


Fig. 13 Influence of free board on time proportion of wet deck and amount of shipping water

5. 結 論

以上の結果をまとめ、さらに若干の考察を付け加える。

(1) 船首における乾玄 f を海水の打ち込みに対する余裕と考えるときには、船首波による水面の盛りあがり h_s を減じたものを乾玄とし、船首と波面との相対運動 h にさらに相対速度によつて生ずる盛りあがり h_{vB} も考慮しておかなければならない。なお本実験は油送船のような肥えた船型に限られており、各要素 h_s および h_{vB} の最大は船首部におこつたが、たとえば高速貨物船のような場合には、これらの諸量の最大は S. S. No. 9 附近におこつており、したがつて船首楼後端附近からの打ち込みに重要な影響を与えることが考えられる。また h_s および h_{vB} の概念は船首部以外の乾玄についても適用できるであろう。

(2) 打ち込みの初期においては船首部の flare の変化は打ち込み水量に影響を与えない。その量は (14) 式で略近似できる。ただし船首の profile を変化させた場合については不明である。

(3) 船首と波との相対運動の到来波に対する応答の大半は縦揺れと波およびそれらの結合による項によつて

きまる。しかもこの応答の波長・船長比 $\lambda/L=100\sim150\%$ の波によるものであり、比較的鋭い filter の性質を示している。

(4) 船首と波面との相對運動の応答函数に修正項を付け加え、さらに修正した乾玄を用いて海洋波中における海水の打ち込みについての統計量を推定することができる。大型油送船についてその1例を示した。

最後に本研究に対し有益な御指導を賜わった運研船舶推進部土田部長、御協力を戴いた佐々木、小川両技官をはじめ同部の方々に厚く御礼申しあげる。また本実験は日本原子力船研究協会船体分科会の依託試験に付随しておこなわれたものであつて、測定装置、解析等に非常な御援助を戴いたことを附記して感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- (1) 渡辺恵弘、熊井豊二、小野雄二“波浪衝撃を受ける甲板の圧力および過渡応力に関する基礎的実験”西部造船会会報第16号、昭和33年10月。
- (2) 渡辺恵弘、熊井豊二、森 正治、井上 敏“波浪衝撃を受ける甲板の圧力および過渡応力に関する基礎的実験(続報)”西部造船会会報第18号、昭和34年8月。
- (3) 栖原寿郎“船首玄楼の損傷解析”西部造船会会報第8号、昭和29年8月。
- (4) 栖原寿郎、橋本武幸“波浪に依る Bulwark Stay の損傷に就て”西部造船会会報第12号、昭和31年11月。
- (5) 栖原二郎“艙口梁の損傷例とその強度計算法について”西部造船会報第12号、昭和31年11月。
- (6) Leo J. Tick “Certain Probabilities Associated with Bow Submergence and Ship Slamming in Irregular Seas” Journal of Ship Research, Vol.2, No.1, June 1958.
- (7) Ryo Tasaki and Hiromitsu Kitagawa “On the Experiment of the Propulsive Performance of Tanker Models in Waves(the Influence of the Displacement Length Ratio)”Report of TTRI, 未刊。