

漁船の甲板上海水打ち込みについて (2)

波と船との相対方向に対する海水打ち込み確率密度

誌名	北海道大学水産学部研究彙報
ISSN	00183458
著者名	松岡,達郎 川島,利兵衛
発行元	北海道大学水産学部
巻/号	32巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 250-271
発行年月	1981年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



漁船の甲板上海水打ち込みについて II.
波と船との相対方向に対する海水打ち込み確率密度

松岡達郎*・川島利兵衛*

On the Shipping Water onto Deck of Fishing Boat - II
Probability density of shipping water for the encountered angle
between ship's head and wave direction

Tatsuro MATSUOKA*, Rihei KAWASHIMA*

Abstract

Experiments with a 2 m radio controlled boat in the wind waves were carried out to clarify the statistical properties of the relative wave elevation and the shipping water on the deck which occur when the relative wave elevation rises above the upper deck side line.

According to the results of the experiments the statistical model of the relative wave elevation and the shipping water were estimated as follows.

The values of a frequency-band width parameter for the relative wave elevation were large i.e. 0.6~0.9.

The distributions of the relative wave elevation and its maxima can be described with the normal distribution function and the function of ψ .

The probability of occurrence of the shipping water had large values in beam or quartering sea when GM of the boat was small.

The variances of the relative wave elevation were larger at weather side than at lee side, but the values of the probability of the shipping water of both sides showed no significant difference.

The shipping water at the sternward should be taken into consideration in designing a hull.

まえがき

小型漁船の転覆事故は漁船海難の全発生件数の約 1/10 を占め、人命喪失・船体全損につながる重大な事故となっている。

漁船の転覆現象は複雑であるが、最近の耐航性研究では一つの大きな要因として、ブルワークを越えて甲板上に海水が打ち込んで来る、いわゆる甲板上打ち込み海水が滞留することによる復原力低下が注目されている。川島・高石らは漁船の一連の転覆実験を通じて、甲板上海水打ち込みを荷崩れと共に、最も大きな転覆の要因として上げている¹⁾。従って、甲板上海水打ち込みの発生機構を明らかにし、これを回避することは転覆防止のための有効な手段となる。

甲板上海水打ち込みは、舷側における波面の相対的高さの変動、つまり相対水位変動がブルワークを越える時に発生すると考えることができる。よって相対水位変動の挙動を明らかにすることは、甲

* 北海道大学漁船運用学講座

(Laboratory of Fishing Boat Seamanship, Faculty of Fisheries, Hokkaido University)

板上海水打ち込みを考える上での基礎となる。

相対水位変動の研究では、福田はストリップ法を用いた縦運動の計算から求めた船首での相対水位変動を計算すると共に、レーリー分布を用いて甲板上海水打ち込みの発生確率の長期分布を求めた²⁾³⁾。さらに雁野は、斜め波中での縦運動・横運動に *dynamic swell up* を考慮して、舷側での相対水位振幅を求める計算法を示し、向い波状態では船体前半部で海水打ち込みが起りやすいとした⁴⁾。慎は、相対水位変動の各要素を精度よく計算し、二次元柱状模型実験により、横揺れ同調時の風上舷と風下舷で海水打ち込み限界波高はほぼ等しいとした⁵⁾。

以上のような基礎的研究、及び理論的計算法の発達と共に、高石らは角水槽の規則波中での模型実験と、縦運動・横運動及び *dynamic swell up* を考慮したストリップ法によって求めた相対水位変動の応答特性を比較し、*head* 及び *bow sea* での航走に対して計算による応答特性の予測が可能なることを示した。さらに水槽における不規則波中の相対水位変動の振幅に言及した⁶⁾。又、川島・高石らは小型漁船模型を用いた一連の規則波、不規則波中実験により、転覆は必ず甲板上海水打ち込みに伴って発生することを明らかにした。またストリップ法により求めた相対水位変動の応答関数と実験に用いた不規則波のスペクトルの線型重ね合わせ理論に基づく計算結果を用いて、この時の目視・写真等により観察した現象を説明し得ることを示した¹⁾。

これらの結果からさらに実船航行時の相対水位変動、甲板上海水打ち込みを考察するためには、外力としての現実の海面状態をより正確にシミュレートできる自然の風波中での実験研究が不可欠である。著者らは小型の容量式波高計と運動計測装置及び 11 チャンネルテレメータを装備した 2m 自航模型を用いて、自然の風波中での実験を行った。その結果より、波との出合い角毎の舷側での海水打ち込み発生確率を求めると共に、風浪中での相対水位変動は、そのスペクトル帯域幅係数が極めて大きな値となることを示した。又、相対水位変動の標準偏差は風上舷で大きいものに対して、海水打ち込み発生確率は両舷で差異が見られないことから、自然の風浪中では風圧による船体横傾斜を考慮する必要があるとした⁷⁾。

上の実験に加えて、さらに GM が小さな船体状態について舷側上の多くの点での相対水位変動を計測し、その統計的处理から甲板上海水打ち込み発生確率モデルを設定し、これを検討した⁸⁾。本論では、これに基づいて船型、船体状態、波浪状態及び波との出会い方向と、相対水位変動、甲板上海水打ち込み発生確率について考察する。

甲板上海水打ち込みの確率モデル

甲板上海水打ち込みは、相対水位変動がブルワークを越える時に発生すると考える。本論では相対水位変動及びその極大値に関して、以下のような確率モデルを設定する。

まず座標系は以下のようにする (図 1)。いま移動空間座標系を $O-XYZ$ とし、 XY 平面を静止自由平面に一致させ、 Z 軸は鉛直上方を正とする。船体座標系を $O'-X'Y'Z'$ とする。 X' 軸は船体ベースラインに一致させ船体重心 G 点より X' 軸におろした垂線の交点を O' とする。 O' を通り船体幅方向に Y' 軸、 $O'G$ を Z' 軸にとり上方を正とする。船体が G 点まわりに運動しているものとして、空

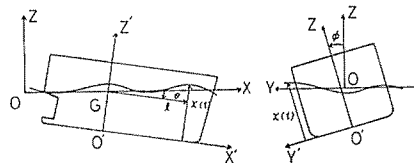


Fig. 1. Co-ordinate system of ship.

間座標系に対する船の横揺れ角を ϕ , 縦揺れ角を θ とする。X' 座標 $=l$ なる船体断面における水面の Z' 座標を相対水位変動 $x(t)$ とする。

相対水位変動は主として船体横揺れによる水位変動 $d_r(t)$, 縦揺れによる水位変動 $d_p(t)$, 上下揺れによる水位変動 $d_h(t)$ 及び航走水面の出会いの波による水面の変動 $w(t)$ によって起ると考える。これに船体の任意の断面における喫水 d , 航走時の船側波形変化 d_{nav} , 载荷状態による船体の初期傾斜による水面の相対的上昇 d_{h0} , 風圧による船体横傾斜によって生ずる水面の相対的上昇 d_{hw} を考慮すると, 相対水位変動は

$$x(t) = d + d_{nav} + d_{h0} + d_{hw} + d_r(t) + d_p(t) + d_h(t) + w(t) \quad (1)$$

で表わされる。

先の座標系を用いれば, $d_r(t)$, $d_p(t)$ は

$$d_r(t) = \frac{B}{2} \phi(t) \quad (2)$$

$$d_p(t) = l \cdot \theta(t) \quad (3)$$

不規則波中を航行する場合, (1) 式右辺第 5, 6, 7 及び 8 項は 確率変数であり, これらが重畳されて起る $x(t)$ も 確率変数となる。 $x(t)$ の平均値は

$$\bar{x} = d + d_{nav} + d_{h0} + d_{hw} + \bar{d}_r + \bar{d}_p + \bar{d}_h + \bar{w}$$

と考えられ,

$$\bar{d}_r = \bar{d}_p = \bar{d}_h = \bar{w} = 0$$

とおけるから

$$\bar{x} = d + d_{nav} + d_{h0} + d_{hw} \quad (4)$$

$$x(t) = \bar{x} + d_r(t) + d_p(t) + d_h(t) + w(t) \quad (5)$$

と書ける。

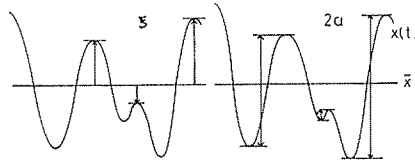


Fig. 2. Definition of relative wave elevation $x(t)$, maxima $\bar{x}$ and amplitude $2a$.

$x(t)$ より次の 2 つの量を定義する。図 2 に示すように, 相対水位変動の平均値 $\bar{x}$ からの相対水位変動の極大値の距離を ξ とし, 極大値とあいついで起る極小値の差を相対水位変動の振幅 $2a$ とする。

相対水位変動 $x(t)$ は標準偏差 σ_x なる正規型の分布をなす定常確率過程と見做すことができると, すなわち相対水位変動の確率密度関数は次式となる。

$$p(x(t)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_x} e^{-\frac{(x(t) - \bar{x})^2}{\sigma_x^2}} \quad (6)$$

$$\bar{x} = E[x(t)] \quad (7)$$

相対水位変動の自己相関関数, スペクトル密度関数は次式で与えられる。

$$R_x(\tau) = E[(x(t) - \bar{x}) \cdot (x(t+\tau) - \bar{x})] \quad (8)$$

$$S_x(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R_x(\tau) \cdot \cos \omega \tau d\tau \quad (9)$$

ξ の確率密度関数は次のように, 相対水位変動のスペクトル密度関数のスペクトル帯域幅係数 ϵ の関数として表わされる⁹⁾。

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\epsilon e^{-\eta^2/2\epsilon^2} + \sqrt{1-\epsilon^2} \eta e^{-\eta^2/2} \int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon}} e^{-y^2/2} dy \right] \quad (10)$$

$$\eta = \xi/\sqrt{m_0} \quad (11)$$

$$m_n = \int_0^\infty S_x(\omega) \omega^n d\omega \quad (12)$$

$$\epsilon^2 = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4} \quad (13)$$

ここで ϵ は

$$0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (14)$$

なる係数で、 $p(\eta)$ は $\epsilon=0$ の時レーリー型、 $\epsilon=1$ のとき正規型をなし、 ϵ の値により両者の中間的な形を示す確率密度関数である。

振幅 $2a$ の分布は ϵ が十分に小さい時にはレーリー分布と見做すことができ、確率密度関数は

$$p(\gamma) = 2\gamma e^{-\gamma^2} \quad (15)$$

$$\gamma = a/\sqrt{m_0} \quad (16)$$

で表わすことができる。

甲板上海水打ち込みの発生確率は、相対水位変動及びその極大値に関する確率密度関数により以下のように定義する。 $x(t)$, ξ により 2 通りの場合について考える。

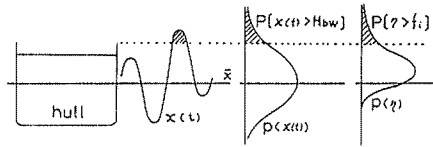


Fig. 3. Probability of occurrence of shipping water $P[x(t) > H_{bw}]$ and $P[\eta > f_i]$.

相対水位変動が時間的にブルワークを越えている確率は、ベースラインからのブルワークトップ高さを H_{bw} とすると

$$\begin{aligned} P[x(t) > H_{bw}] &= \int_{H_{bw}}^{\infty} p(x(t)) dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{H_{bw}}^{\infty} e^{-\frac{(x(t)-\bar{x})^2}{\sigma_x^2}} dx \end{aligned} \quad (17)$$

一方、 ξ で定義される相対水位変動の極大値がブルワークを越える確率は

$$F_i = H_{bw} - \bar{x} \quad (18)$$

$$f_i = F_i/\sqrt{m_0} \quad (19)$$

とおくと次式となる (図 3)。

$$\begin{aligned} P[\xi > H_{bw}] &= P[\eta > f_i] \\ &= \int_{f_i}^{\infty} p(\eta) d\eta \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{f_i}^{\infty} \left[\epsilon e^{-\eta^2/2\epsilon^2} + \sqrt{1-\epsilon^2} \eta e^{-\eta^2/2} \int_{-\infty}^{\frac{\eta\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon}} e^{-y^2/2} dy \right] d\eta \end{aligned} \quad (20)$$

前述の如く、 ϵ が十分に小さい時には ξ の確率密度関数はレーリー型に近づき、 $2a$ の確率密度関数もレーリー型で近似できる。従って極大値 ξ の分布は振幅 a の分布で近似し、 $P[\xi > H_{bw}]$ を

$$\begin{aligned} P[a > F_i] &= \int_{f_i}^{\infty} p(\gamma) d\gamma \\ &= 2 \int_{f_i}^{\infty} \gamma e^{-\gamma^2} d\gamma \end{aligned} \quad (21)$$

で近似して実用上きつかえない。しかし、相対水位変動の如くスペクトル帯域幅係数 ϵ が大きな値をとる現象では、極大値 ξ と振幅 a の分布の間には大きな差異が生ずる。よって相対水位変動の極大値の分布及びそれによる海水打ち込み発生確率を求めるには、より適切なモデルとして (10) 式の確率密度関数と (20) 式の確率を用いるべきであると考ええる。

実 験 方 法

実験は北海道大沼湖の北東水面で行った。同湖は、長軸をはば北東から南西方向とする長さ 4.8km、幅 1.2km の淡水湖であり、実験水面では南西の風が吹いた時にフェッチが約 4km である。

供試船は 124GT 型鋼製沖合底曳網漁船の 1/15, 1 自航模型である (図 4)。模型船は相対水位変動、各種の船体運動の計測装置及び 11ch FM-FM 方式無線テレメータ装置により計測データを伝送する計測システムを備え、遠隔操縦装置により自航する 2m モデルである。

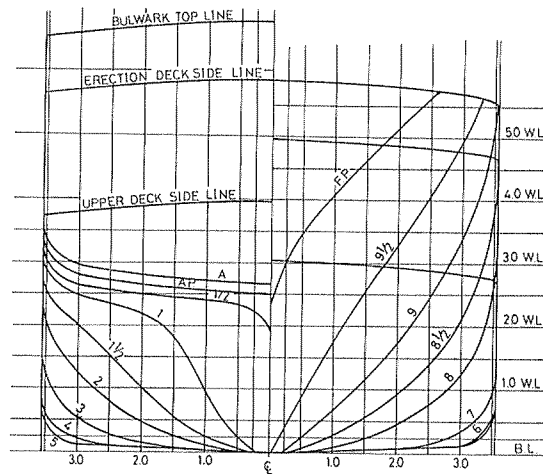


Fig. 4. Body lines of 124GT model boat.

波は実験水面に容量式波高計を 3 点アレイ式に設置して計測記録した。風向風速は小型ロビンソン風速計及びエアロベーン式風向風速計を用いて計測した。模型船の計測項目は、相対水位変動、船体横揺れ角、縦揺れ角、横揺れ角速度、船首方位角及び舵角であり、相対水位変動は小型容量式波高計で、船体横揺れ角、縦揺れ角はパーティカルジャイロ、横揺れ角速度はレイトジャイロ、船首方位角はディレクショナルジャイロ及び舵角はポテンショ方式で計測し、無線テレメータ装置により陸上のベースキャンプに伝送し、アナログレコーダに記録した。これ等の計測記録と同時に、8mm シネ、35mm モータドライブ、ビデオレコーダを用いて船体の姿勢を映像記録した (図 5)。

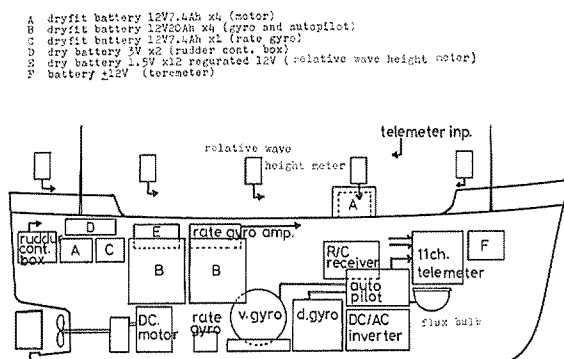


Fig. 5. Schematic diagram of arrangement of measuring apparatus for ship's motion and relative wave elevation.

実験航走時に、湖畔に設置した2台のトランシットを用いて30秒毎の三角測量を行い、これにより船位を決定し、航跡、船速を求めた。

大沼湖における波浪観測によれば、実験水域で南西の風が吹く時、図6に示す風速と有義波高の関係が得られる。本実験では、約5m/sec以上の南西風が吹く時に実験航走を行った。一つの波浪状態のもとでは、head, 左右のbow, beam, quartering 及び following sea の8方向で航走を行った。

相対水位計は左舷に取り付け、波を左舷から受ける航走では風上舷、右舷から受ける航走では風下舷での相対水位変動を計測することとした。

1航走では120秒以上波との出会い方向を一定に保ち計測記録を行った。

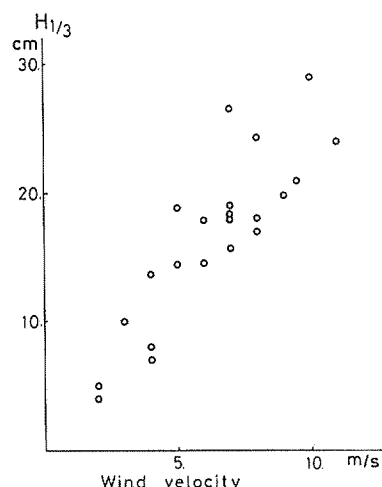


Fig. 6. Relation between wind velocity and wave height in Lake Ohnuma.

実験状態

実験は2つの船体状態と3つの波浪状態で4回行った(表1)。

表2に実験水域の波の記録の内、実験中の時間経過に従ってランダムに抽出した3分毎の記録から得た波浪状態を示す。図7に表2の Sea Cond. に対応する波スペクトルの代表例を示す。

模型船の船体要目、および実験を行った2つの船体状態を表3に示す。Ship Cond. A の GM は実

Table 1. Variation of experiments and measured ordinats.

	Ship Cond. A	Ship Cond. B
Sea Cond. 1	Exp. A-1 S.S. 3, 1	
Sea Cond. 2	Exp. A-2 S.S. 7, 3, 1	Exp. B-2 S.S. 8, 6, 4, 2, A.P.
Sea Cond. 3	Exp. A-3 S.S. 3, 1	

Table 2. Statistical values of sea conditions.

Sea Cond.	$\bar{H}$ (cm)	$H_{1/3}$	$H_{1/10}$	$\bar{T}$ (sec)	$\bar{\lambda}$ (m)
1	7.33	14.05	17.59	.889	1.23
	8.50	15.40	19.61	.965	1.45
2 (A)	9.14	17.62	22.71	.955	1.42
	9.46	16.96	21.08	1.023	1.63
(B)	8.45	17.28	22.80	.898	1.25
	9.11	18.98	26.37	.870	1.18
3	10.82	21.23	27.78	.986	1.51
	10.09	20.24	26.16	1.003	1.57

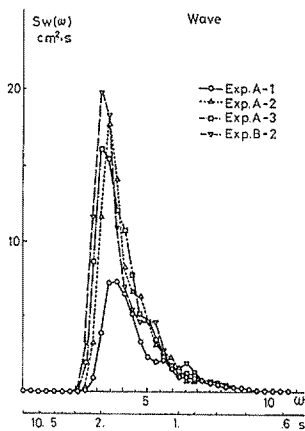


Fig. 7. Wave spectra at experiment area.

船の満載漁場発状態を基準として設定し、Ship Cond. B ではこれらの約半分とした。GM と横揺れ固有周期は傾斜試験及び横揺れ試験による実測値である。Ship Cond. A と B では横揺れ固有周期に約 0.6 秒の差があり、Sea Cond. 2 の波スペクトルのピークに対応する波周期は、2 つの横揺れ固有周期の中間にある。

模型船の船位、航跡の例を図 8 に示す。模型船の平水中速力は Ship Cond. A と B でそれぞれ、 $Fn=0.306$ および 0.312 で実船換算で 10.2 knot 及び 10.4 knot であった。

実 験 結 果

相対水位変動のパワースペクトル

記録波形の例を図 9 に示す。各記録について、航走毎に 120 秒間の記録を読み取り時間間隔 $\Delta t=0.1$ 秒で A/D 変換し、得られた時系列データよりスペクトル解析およびその他の統計値の計算を行った。

相対水位変動のパワースペクトル $S_x(\omega_c)$ 及び出会いの波スペクトル $S_w(\omega_c)$ の例として Exp. B-2

Table 3. Principal particulars and conditions of model boat.

Item	Ship Cond. A		Ship Cond. B	
	Model	Full Scale	Mdoel	Full Scale
Lpp (m)	2.000	30.20		
B (m)	0.470	7.155		
D (m)	0.175	2.650		
Disp.	125.0 kg	441.1 ton	126.7 kg	447.1 ton
dm (m)	0.178	2.690	0.177	2.672
Trim (m)	0.098	1.490	0.122	1.842
Fb (m)	-0.003	-0.040	-0.002	-0.022
GM (m)	0.053	0.800	0.029	0.436
Kxx/B	0.377		0.409	
Tr (sec)	1.545	6.004	2.163	8.405
ØG (m)	0.095 aft	1.435	0.121 aft	1.827
Kyy/Lpp	0.256		0.263	

の場合を図 10 に示す。同じく Exp. B-2 の船体縦揺れ、横揺れによる各計測位置での水位変動成分 $d_p(t)$, $d_r(t)$ のスペクトル $S_{d_p}(\omega_e)$, $S_{d_r}(\omega_e)$ の例を図 11 に示す。各実験での相対水位変動スペクトルの特徴は以下のようなものである。

i) Exp. A-1 では *head* 及び *following sea* において、S, S, 1 で S, S, 3 よりパワーが大きい。*bow*, *beam* 及び *quartering sea* においては S, S, 1 と S, S, 3 で差異はない。

相対水位変動スペクトルのピークは、*head sea* において縦揺れのスペクトルのピークとほぼ同じ周波数帯 $\omega_e = 3.8 \sim 3.2$ にある。*following sea* では相対水位変動スペクトルは縦揺れ、横揺れ両者のパワーの重なる広い周波数帯にわたってパワーが認められる。

出合いの波スペクトルのピークのある波周波数は、*bow sea* と *beam sea* の中間の出合い方向の時、横揺れ固有周波数と一致し、この時相対水位変動のパワーは大きく、横揺れ固有周波数付近に顕著なピークを持つ。

ii) Exp. A-2 では *head sea* においては S, S, 7 で、*following sea* においては S, S, 1 でパワーが大きい。

相対水位変動スペクトルのピークは *head sea* では縦揺れのスペクトルのピークとほぼ同じ周波数帯にあり、*following sea* では波のパワーの集中する周波数帯にある。*bow sea* では横揺れ、縦揺れ

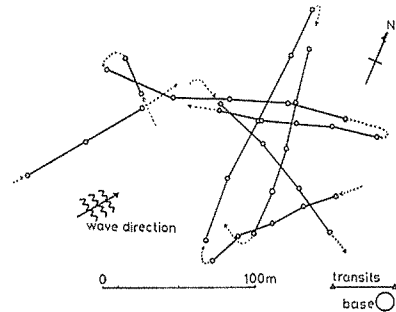


Fig. 8. Traces of model boat.

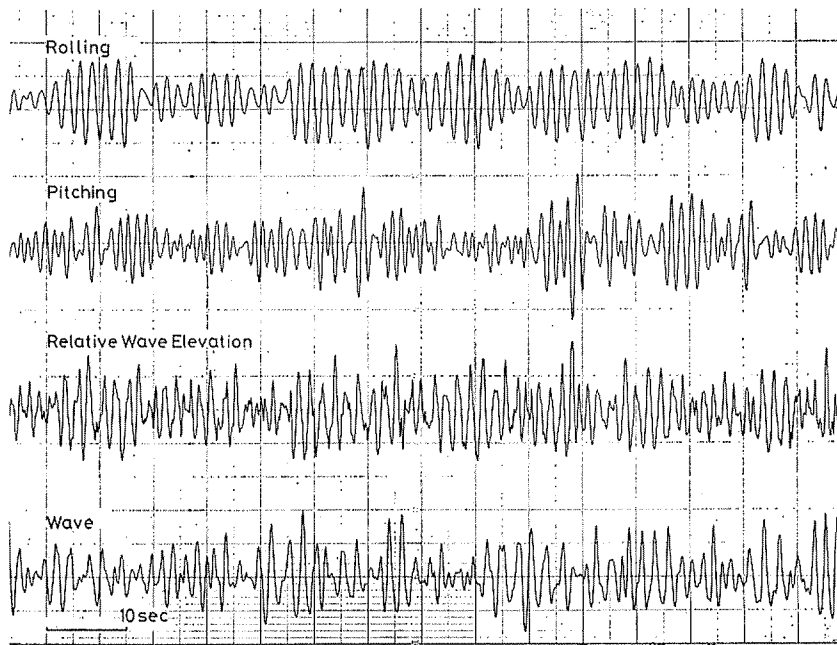


Fig. 9. Records of rolling, pitching, relative wave elevation at S.S.1 and wave (Exp. A-2 L. Bow)

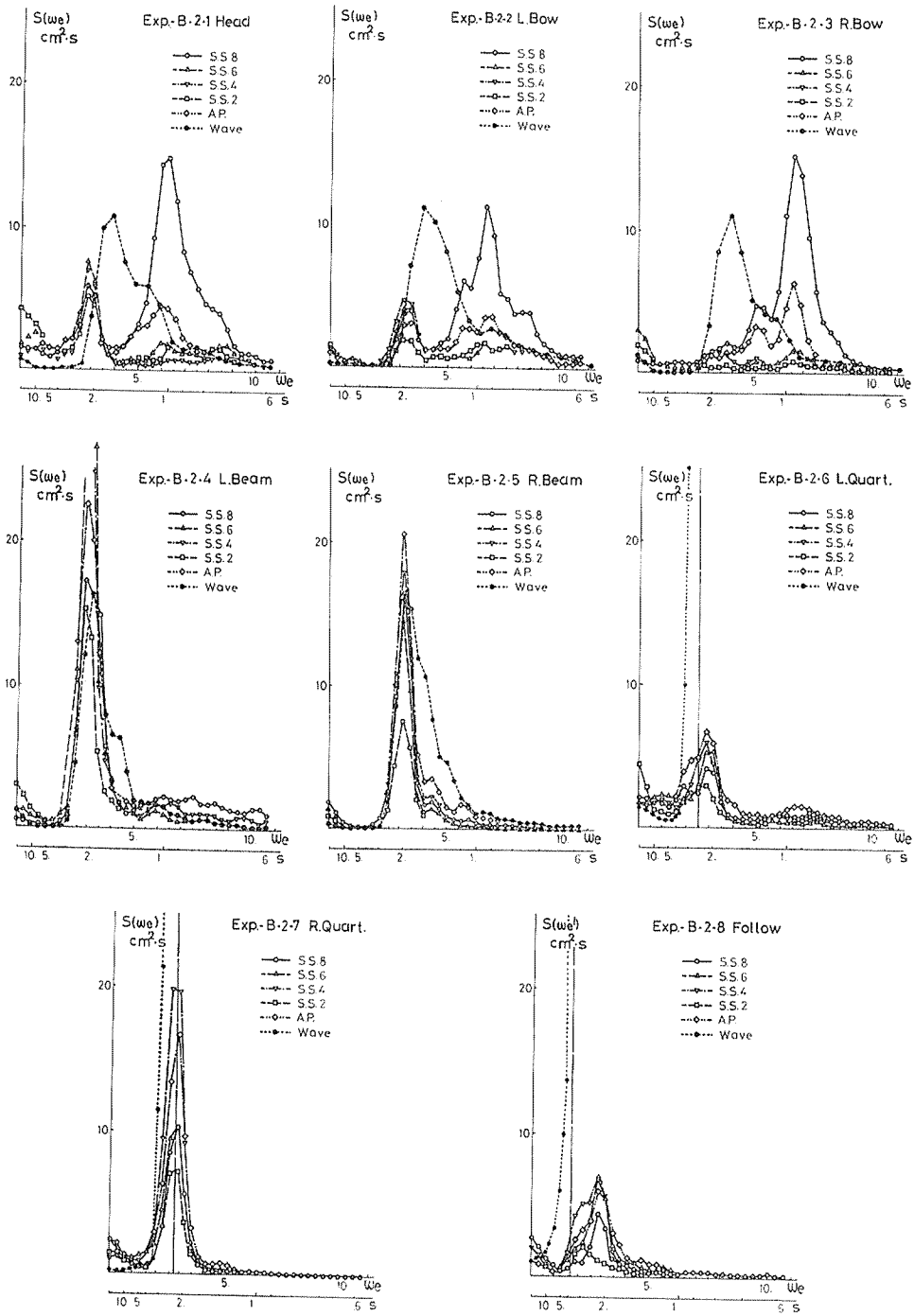


Fig. 10. Power spectra of relative wave elevation and encountered wave.

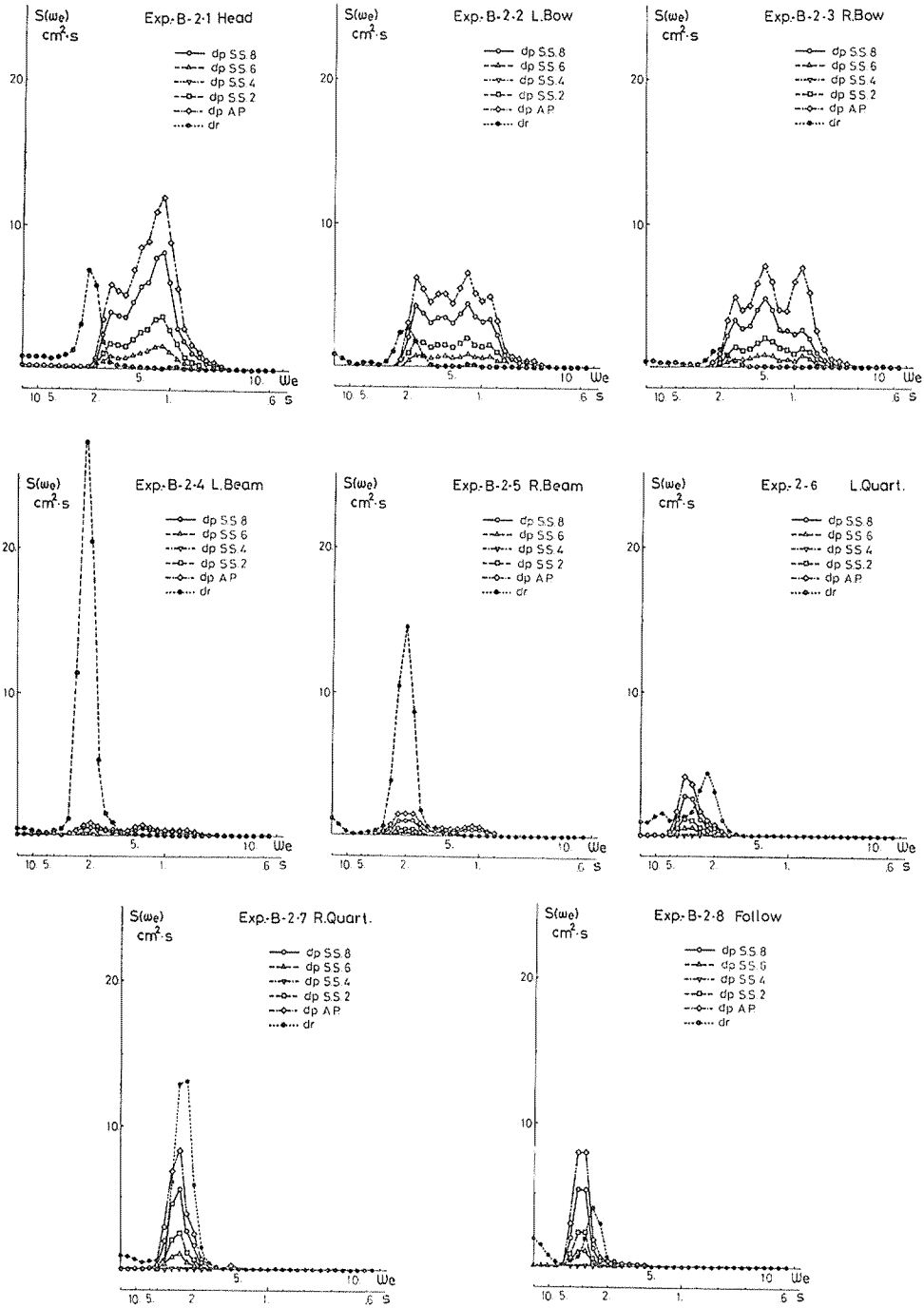


Fig. 11. Power spectra of factors of relative wave elevation; $dp(t)$ and $dr(t)$ caused by pitching and rolling.

のパワーが大きい周波数帯で大小2つのピークがある。*quartering sea* では波のパワーの集中する周波数帯と、横揺れ固有周波数付近に2つのピークを持つ。*beam sea* では横揺れ固有周波数付近に顕著なピークを持ち、高周波側に裾をひくようにパワーを持つ。

iii) Exp. A-3 では *head sea* で顕著なピークが認められず、*quartering* 及び *following sea* では波のパワーの集中する周波数帯と横揺れ固有周波数付近に2つのピークが認められる。*beam* 及び *bow sea* では横揺れ固有周波数付近の大きなピークから、縦揺れのパワーのある周波数側に裾をひくようにパワーが認められる。

出合いの波スペクトルのピークは *bow sea* で横揺れ固有周波数と一致する。

Table 4. σ_x and ϵ of relative wave elevation.

	S.S. 7				S.S. 3		S.S. 1		
	σ_x	ϵ	σ_x	ϵ	σ_x	ϵ	σ_x	ϵ	
Exp. A-1									
1. Head					2.63	.5977	3.54	.6334	
2. L. Bow					4.74	.7609	4.87	.7494	
3. R. Bow					4.44	.7764	4.54	.7562	
4. L. Bea					4.74	.7664	4.84	.7756	
5. R. Bea					4.19	.8116	4.36	.8097	
6. L. Qua					3.38	.7643	3.70	.7647	
7. R. Qua					1.78	.9368	1.56	.8836	
8. Follow					2.42	.9236	2.95	.9177	
Exp. A-2									
1. Head	3.94	.7507			5.77	.7605	5.38	.7926	
2. L. Bow	5.19	.6286			5.38	.6504	5.41	.6847	
3. R. Bow	6.05	.7008			4.98	.8007	4.30	.7760	
4. L. Bea	3.94	.7507			5.77	.7605	5.38	.7926	
5. R. Bea	4.79	.8383			4.30	.8386	4.08	.8229	
6. L. Qua	3.37	.7555			4.08	.7605	4.41	.7784	
7. R. Qua	2.93	.8080			3.11	.8422	2.94	.8318	
8. Follow	1.30	.8073			2.42	.8871	3.18	.8809	
Exp. A-3									
1. Head					2.93	.5807	3.36	.6121	
2. L. Bow					5.56	.7409	4.99	.7609	
3. R. Bow					4.45	.8092	4.63	.7967	
4. L. Bea					5.46	.7640	4.98	.7670	
5. R. Bea					4.62	.7777	4.07	.7891	
6. L. Qua					4.42	.7998	3.94	.7886	
7. R. Qua					2.71	.8599	2.90	.8271	
8. Follow					2.80	.8476	2.94	.8001	
	S.S. 8		S.S. 6		S.S. 4		S.S. 2		A.P.
Exp. B-2									
1. Head	6.89	.6697	4.95	.7983	3.71	.8212	4.40	.8102	4.82 .7477
2. L. Bow	5.80	.6421	3.73	.7507	3.75	.7624	3.31	.7289	4.26 .7221
3. R. Bow	5.92	.6027	3.01	.7986	2.45	.8270	2.38	.7889	4.08 .6989
4. L. Bea	5.57	.7888	6.07	.7727	5.97	.8579	5.28	.8397	5.65 .8290
5. R. Bea	4.21	.8173	3.81	.8297	4.30	.7032	3.04	.8509	4.89 .7735
6. L. Qua	4.04	.8421	3.57	.8927	3.74	.8646	3.22	.8809	4.48 .8517
7. R. Qua	3.57	.8764	3.79	.8818	4.75	.7872	3.15	.8890	4.65 .8776
8. Follow	2.94	.8850	3.47	.8850	3.60	.8866	2.44	.8676	4.08 .8509

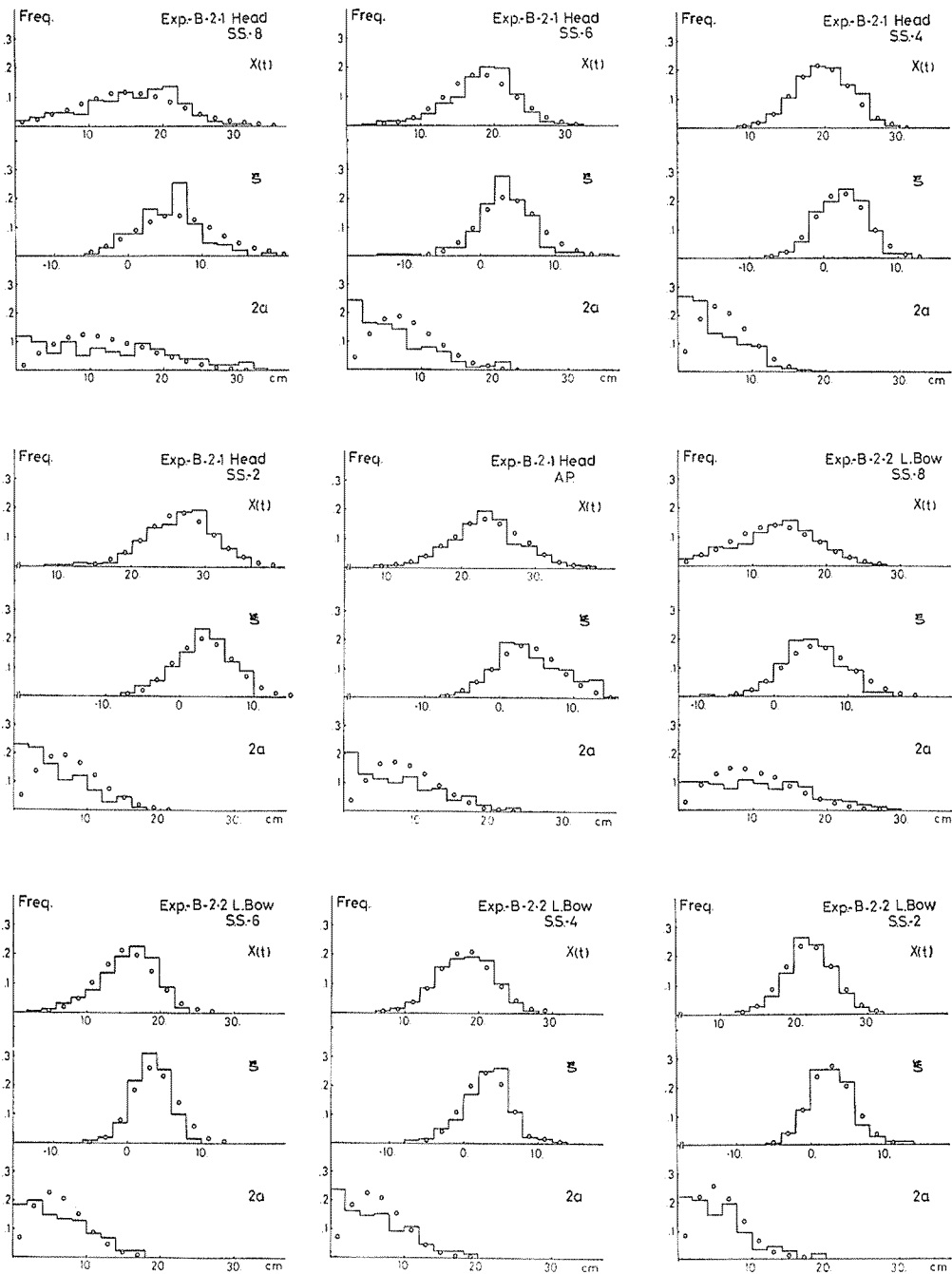


Fig. 12 a.

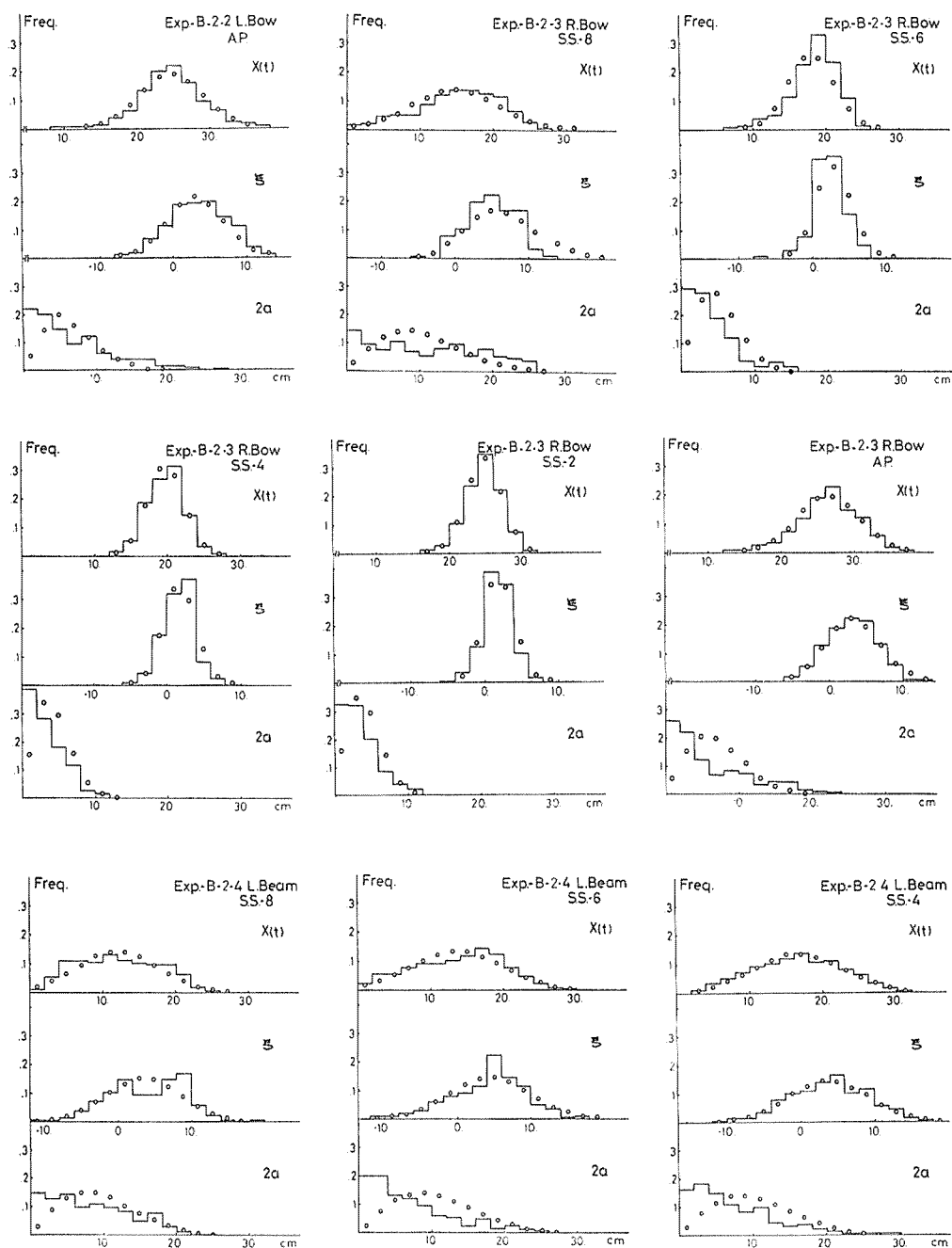


Fig. 12 b.

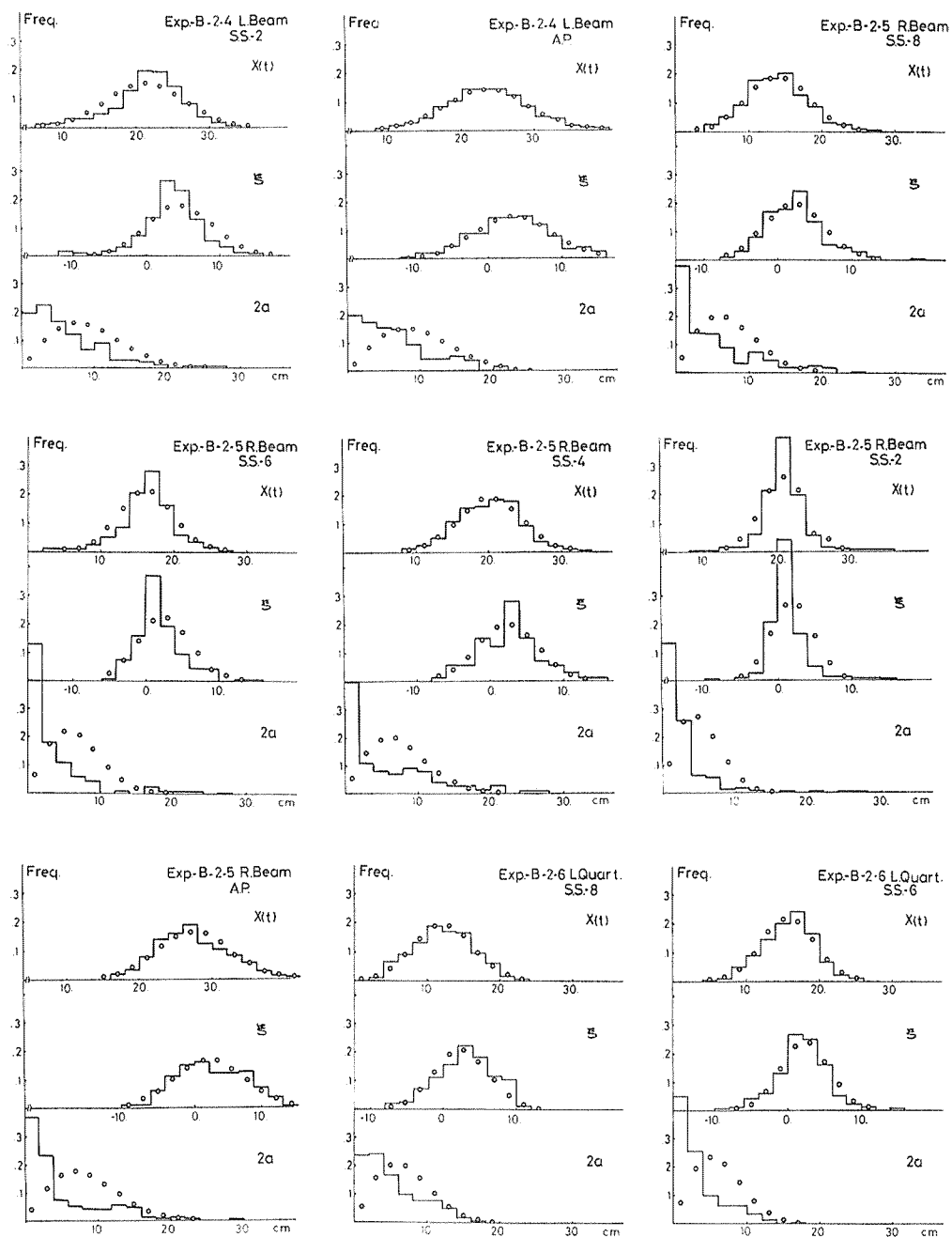


Fig. 12 c.

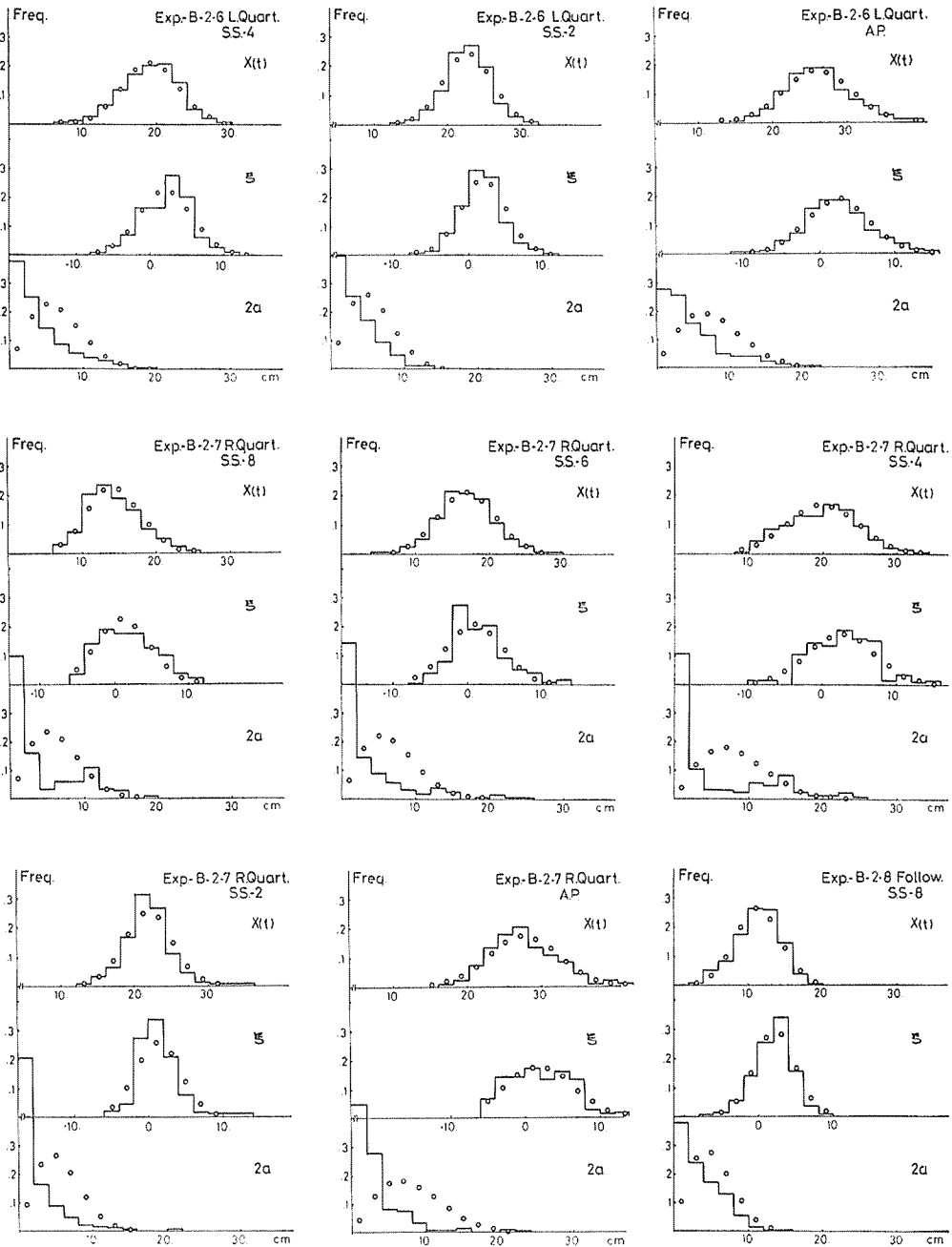


Fig. 12 d.

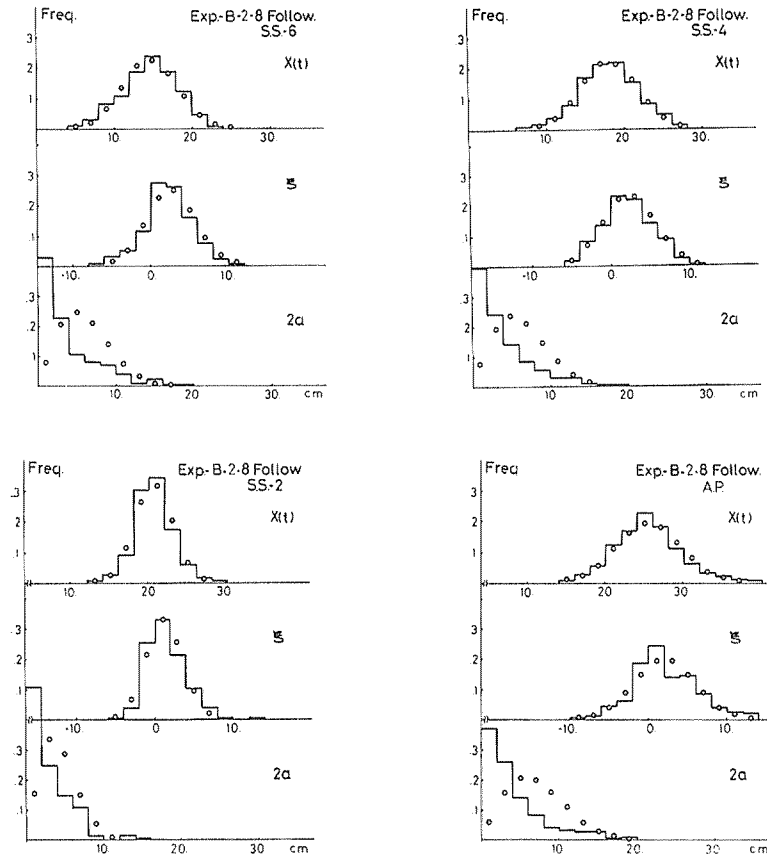


Fig. 12e. Histograms of relative wave elevation $x(t)$, maxima ξ and amplitude $2a$.

iv) Exp. A-2 では, *head* 及び *bow sea* の時 S, S, 8, で, *quartering* および *following sea* では A, P, でパワーが大きい。

相対水位変動スペクトルは *head* および *bow sea* では横揺れ固有周波数付近と縦揺れスペクトルのパワーが大きい周波数帯に 2つのピークを持つ。横揺れ固有周波数付近のピークでは測定箇所によるピークの値の差は小さいが, 他方のピークでは S, S, 8 及び A, P, で大きく, S, S, 6, 4, 2 で小さなピークとなる。*following*, *quartering* 及び *beam sea* では横揺れ固有周波数付近にピークが認められる。

出合いの波スペクトルのピークは *beam* から *quartering sea* で横揺れ固有周波数と一致する。

スペクトル帯域幅係数

相対水位変動のスペクトル帯域幅係数 ϵ の値は表 4 に示すように, 0.6 から 0.9 の範囲にある。

波との出合い方向に対して, ϵ の値は *following* 及び *quartering sea* で大きく, *head* 及び *bow* で小さい。船体の船首尾方向の計測位置に対して Exp. B-2 では, ϵ の値に大きな差異はないが, S, S, 4, 6, 2 でやや大きく, S, S, 8 および A, P, でやや小さい。波浪状態, 船体状態による ϵ の値の差は顕著ではない。

相対水位変動, 極大値, 振幅の分布

相対水位変動 $x(t)$, その極大値および振幅 $2a$ の分布の例として, Exp. B-2 の場合を図 12 に示す。図中に, 実験より得た $\bar{x}$, σ_x および ε を用いて (6), (10), (15) 式より求めた確率分布を○印で示す。

相対水位変動の標準偏差 σ_x の値を表 4 に示す。波との 出会い角 に対して σ_x の値は Exp. A では *beam* および *bow sea* で大きく, Exp. B では *beam* および *quartaring sea* で大きい。

風上, 風下舷に対しては, 風上舷の σ_x の値の方が大きい。

Exp. B における船首尾方向の計測位置による σ_x の値は *head* および *bow sea* では S.S. 8 で大きく, S.S. 4 で小さい。*beam sea* では計測位置による差異は小さい。

Table 5. Significant values of maxima ξ and amplitude a of relative wave elevation.

	S.S. 7				S.S. 3		S.S. 1			
	$\xi_{1/3}$	$a_{1/3}$	$\xi_{1/3}$	$a_{1/3}$	$\xi_{1/3}$	$a_{1/3}$	$\xi_{1/3}$	$a_{1/3}$	$\xi_{1/3}$	$a_{1/3}$
Exp. A-1										
1. Head					4.92	4.47	6.01	6.16		
2. L. Bow					8.05	7.69	8.95	8.03		
3. R. Bow					7.28	6.49	7.61	6.95		
4. L. Bea					7.68	7.31	8.21	7.22		
5. R. Bea					7.44	7.60	7.97	7.44		
6. L. Qua					5.83	5.07	6.41	5.66		
7. R. Qua					2.89	1.96	2.49	2.06		
8. Follo					4.13	2.25	4.67	3.09		
Exp. A-2										
1. Head	10.13	8.30			5.92	5.60	6.75	7.31		
2. L. Bow	10.62	8.42			10.17	9.34	9.80	10.08		
3. R. Bow	11.81	9.74			8.72	7.84	7.59	7.32		
4. L. Bea	7.65	6.49			10.16	9.55	10.12	8.90		
5. R. Bea	8.52	7.50			7.31	6.86	7.30	7.08		
6. L. Qua	6.09	5.31			7.16	6.14	7.96	7.08		
7. R. Qua	5.23	4.59			5.85	5.29	5.53	5.25		
8. Follo	2.43	1.88			4.40	3.04	5.51	4.28		
Exp. A-3										
1. Head					5.68	4.99	5.97	5.78		
2. L. Bow					9.68	9.09	8.96	7.85		
3. R. Bow					7.60	6.76	8.00	7.09		
4. L. Bea					9.20	8.16	9.20	7.53		
5. R. Bea					8.68	8.92	8.07	7.18		
6. L. Qua					6.86	6.05	7.01	5.68		
7. R. Qua					4.75	4.48	5.44	4.85		
8. Follo					4.70	3.88	4.95	4.47		
	S.S. 8		S.S. 6		S.S. 4		S.S. 2		A.P.	
Exp. B-2										
1. Head	10.06	10.94	6.70	6.03	6.12	4.83	6.75	5.58	8.73	7.10
2. L. Bow	9.50	9.62	5.74	5.54	6.30	5.78	5.72	5.20	7.36	6.50
3. R. Bow	8.81	9.89	4.48	8.02	3.69	3.07	3.85	3.20	6.67	6.42
4. L. Bea	9.43	7.45	9.33	7.21	9.54	7.47	7.31	6.36	9.18	6.69
5. R. Bea	6.76	5.87	5.12	4.42	7.10	6.83	4.01	3.43	8.09	6.30
6. L. Qua	6.61	5.20	5.36	3.82	5.61	4.23	4.79	3.48	7.54	5.18
7. R. Qua	6.22	4.99	5.48	4.74	7.36	7.26	4.22	3.10	7.33	4.22
8. Follo	4.41	3.50	5.32	4.21	5.53	4.17	4.15	2.72	6.74	4.34

ξ および a の有義値を表 5 に示す。これ等の値の大小と、波との出会い方向、船体船首尾方向の計測位置の関係は、 σ_x の値の場合と同様である。

海水打ち込み発生確率

海水打ち込み発生確率 $P[x(t) > H_{lw}]$, $P[\xi > F_i]$ を表 6, 7 に示す。ここではブルワークトップ高さとして二層甲板高きを用いる。

Exp. A では海水打ち込み発生確率は *beam* および *bow sea* で大きく、風上舷と風下舷での値の差

Table 6. *Probability of occurrence of shipping water $P[x(t) > E.D.S.L.]$ (observed and theoretical).*

	S.S. 7				S.S. 3		S.S. 1			
	ov	th	ov	th	ov	th	ov	th	ov	th
Exp. A-1										
1. Head					.000	.358-6	.250-3	.159-3		
2. L. Bow					.242-2	.391-2	.109-1	.379-2		
3. R. Bow					.430-2	.357-2	.114-1	.298-2		
4. L. Ben					.108-2	.280-2	.125-2	.135-2		
5. R. Bea					.958-3	.205-2	.275-2	.272-2		
6. L. Qua					.000	.344-4	.167-3	.117-3		
7. R. Qua					.000	.000	.000	.000		
8. Follo					.000	.000	.000	.000		
Exp. A-2										
1. Head	.118-1	.816-3			.000	.755-2	.483-2	.110-1		
2. L. Bow	.829-2	.494-2			.358-2	.289-2	.268-1	.734-2		
3. R. Bow	.323-1	.143-1			.183-2	.657-2	.492-2	.144-2		
4. L. Bea	.000	.290-5			.829-2	.939-2	.233-2	.139-2		
5. R. Bea	.172-2	.440-2			.454-2	.205-2	.221-1	.139-2		
6. L. Qua	.000	.153-5			.875-3	.641-3	.375-2	.466-3		
7. R. Qua	.000	.239-5			.000	.145-4	.292-2	.344-4		
8. Follo	.000	.000			.000	.849-5	.167-2	.145-4		
Exp. A-3										
1. Head					.417-4	.245-4	.000	.784-4		
2. L. Bow					.292-2	.280-2	.183-2	.968-3		
3. R. Bow					.829-2	.657-2	.683-2	.391-2		
4. L. Bea					.358-2	.415-2	.142-2	.619-3		
5. R. Bea					.106-1	.480-2	.292-2	.233-3		
6. L. Qua					.371-2	.100-2	.917-3	.102-4		
7. R. Qua					.000	.256-4	.000	.478-6		
8. Follo					.000	.915-6	.000	.227-5		
	S.S. 8		S.S. 6		S.S. 4		S.S. 2		A.P.	
Exp. B-2										
1. Head	.888-2	.139-1	.358-2	.820-2	.292-2	.968-3	.584-1	.643-1	.850-2	.107-1
2. L. Bow	.000	.131-2	.000	.615-4	.417-3	.291-3	.121-2	.390-3	.108-2	.125-1
3. R. Bow	.000	.440-2	.000	.374-4	.000	.138-5	.000	.200-3	.308-2	.820-2
4. L. Bea	.000	.483-3	.221-2	.357-2	.458-2	.755-2	.308-2	.110-1	.533-2	.113-1
5. R. Bea	.225-2	.501-4	.258-2	.153-3	.104-1	.570-2	.567-2	.344-4	.264-1	.359-1
6. L. Qua	.000	.216-5	.175-2	.330-4	.000	.664-3	.750-3	.501-3	.118-1	.107-1
7. R. Qua	.000	.216-5	.196-2	.302-3	.121-1	.939-2	.929-2	.142-3	.315-1	.301-1
8. Follo	.000	.000	.000	.315-5	.000	.159-3	.000	.000	.258-2	.427-2

Table 7. Probability of occurrence of shipping water $P[\xi > E.D.S.L.]$ (observed and theoretical).

	S.S. 7				S.S. 3		S.S. 1			
	ov	th	ov	th	ov	th	ov	th	ov	th
Exp. A-1										
1. Head					.000	.150-4	.000	.171-2		
2. L. Bow					.185-1	.195-1	.291-1	.211-1		
3. R. Bow					.109-1	.136-1	.130-1	.171-1		
4. L. Bea					.788-2	.175-1	.000	.735-2		
5. R. Bea					.921-2	.119-1	.000	.148-1		
6. L. Qua					.000	.412-3	.000	.937-3		
7. R. Qua					.000	.000	.000	.000		
8. Follo					.000	.000	.000	.000		
Exp. A-2										
1. Head	.649-1	.432-1			.000	.600-4	.000	.887-3		
2. L. Bow	.497-1	.300-1			.176-1	.192-1	.665-2	.581-2		
3. R. Bow	.126-0	.519-1			.825-2	.233-1	.144-1	.164-1		
4. L. Bea	.000	.640-4			.424-1	.395-1	.524-2	.371-2		
5. R. Bea	.215-1	.206-1			.140-1	.728-2	.675-2	.146-2		
6. L. Qua	.000	.450-4			.250-2	.485-2	.326-2	.900-4		
7. R. Qua	.000	.510-4			.000	.181-3	.000	.110-4		
8. Follo	.000	.000			.000	.920-4	.000	.750-4		
Exp. A-3										
1. Head					.502-2	.260-3	.000	.887-3		
2. L. Bow					.207-1	.392-3	.665-2	.581-2		
3. R. Bow					.273-1	.265-1	.144-1	.164-1		
4. L. Bea					.130-1	.220-1	.524-2	.371-2		
5. R. Bea					.526-1	.262-1	.675-2	.146-2		
6. L. Qua					.153-1	.624-2	.326-2	.900-4		
7. R. Qua					.000	.320-4	.000	.110-4		
8. Follo					.000	.260-4	.000	.750-4		
	S.S. 8		S.S. 6		S.S. 4		S.S. 2		A.P.	
Exp. B-2										
1. Head	.196-1	.700-1	.143-1	.221-1	.750-2	.550-2	.166-0	.199-0	.244-1	.187-1
2. L. Bow	.000	.880-2	.000	.400-3	.260-2	.260-2	.670-2	.390-2	.151-1	.170-1
3. R. Bow	.000	.261-1	.000	.300-3	.000	.000	.000	.180-2	.136-1	.368-1
4. L. Bea	.340-2	.240-2	.810-2	.161-1	.152-1	.286-1	.122-1	.516-1	.843-1	.790-1
5. R. Bea	.320-1	.204-1	.540-2	.600-3	.610-2	.200-3	.138-1	.200-3	.102-0	.790-1
6. L. Qua	.000	.000	.390-2	.200-3	.000	.270-2	.260-2	.290-2	.574-1	.325-1
7. R. Qua	.000	.000	.680-2	.800-3	.393-1	.310-1	.840-2	.100-3	.589-1	.658-1
8. Follo	.000	.000	.000	.000	.000	.100-3	.290-2	.000	.338-1	.150-1

異は顕著ではない。又 *head sea* においては S.S. 7 で最も大きく、*following* および *quartering sea* では S.S. 3, 1 で大きい。

Exp. B では海水打ち込み発生確率は、*head sea* においては S.S. 8 で大きく、*quartering* および *following sea* では A.P. で大きい。又 *beam* および *quartering sea* では海水打ち込み発生確率は風下舷で大きい。

S.S. 8 では海水打ち込み発生確率は *head sea* の時最大で *following sea* 側になるに従って急激に小さくなる。これに対して A.P. では全ての波との出会い角において海水打ち込み発生確率の値は一樣に大きい。

表 6, 7 それぞれにおいて、実測値と関数 (7), (20) 式より求めた計算値は比較的良好に一致する。

考 察

確率モデル

一連の実験において、相対水位変動 $x(t)$ とその極大値 ξ の分布に対して (6), (10) 式を用いた確率分布は良好に一致している。振幅 $2a$ の分布は (15) 式を用いたレーリー分布では明らかに一致しない。Exp. B-2 について、 $x(t)$, ξ , $2a$ の分布のモデル (6), (10), (15) 式による確率分布に対する、実験例の適合度の χ^2 検定を行った結果、40 例中、有意水準を 0.01 とすると $x(t)$ については 8 例、 ξ については 24 例が適合と判定された。振幅の分布ではレーリー分布に適合すると判定されたものはなかった。これ等の結果、相対水位変動およびその極大値の分布に対して、その確率密度関数はそれぞれ (6), (10) 式で近似できる。特に ϵ を用いた (10) 式は極大値の分布に極めてよく一致しており、強靱さを持っている。

甲板上海水打ち込み発生確率も、(17), (20) 式によるモデルは $x(t)$, ξ による甲板上海水打ち込みの実測値とよく一致する。これに対して (21) 式により振幅 a より求めた海水打ち込み発生確率は実測値に対して過少な値を示す。

相対水位変動のスペクトル帯域幅係数 ϵ の値は、ほぼ 0.6 から 0.9 の範囲にあり、極めて大きい。これは相対水位変動の大きな特徴であり、主に船体横揺れ、縦揺れおよび波により異った周波数帯にパワーがある成分が重畳して相対水位変動が発生するからであると考えられる。

海水打ち込み発生確率と GM、波との出会い角

相対水位変動のパワーは、出会いの波のピークが横揺れ固有周波数と一致する航走の場合に最も大きくなり、海水打ち込み発生確率も最も大きくなる。

これを GM と波との出会い方向の関係から見ると、Exp. A では *bow* および *beam sea* で海水打ち込み発生確率は大きく、Exp. B では GM が小さく横揺れ固有周波数が小さいために *beam* および *quartering sea* で出会いの波のピークは横揺れ固有周波数と一致し、海水打ち込み発生確率も高くなっている。

これ等の結果から、GM が小さな船体状態で大波高の波浪中を航行する場合、*beam* および *quartering sea* で甲板上海水打ち込みが発生しやすいと言える。

相対水位変動は一般に風上舷で風下舷より σ_x の値が大きい。これに対して海水打ち込み発生確率は、Exp. A-2 では *beam* および *bow sea* の時 S, S, 7 の風下舷で、Exp. B-2 では *beam* および *quartering sea* の時 A, P, の風下舷で高い。共に横揺れ固有周波数が出会いの波のスペクトルのピークに近い場合であり、海水打ち込みは横揺れ同調時に風下舷で起りやすいと言える。

これ等の場合、風圧による船体横傾斜が顕著であり、上のように風下舷で海水打ち込みが発生しやすくなるのは船体横傾斜により風下舷で見掛け上船が沈下し、有効な乾舷、ブルワーク高さが減少していることに起因していると考えられる。

船型

船体はシアー、トリムにより船体船首尾線方向にブルワークの水面からの高さは異なる。特に漁船は

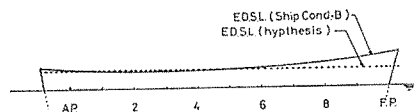


Fig. 13. Relation between election deck side line E.D.S.L. and hypothetical deck side line.

Table 8. Hypothetical probability of occurrence of shipping water
 $P[x(t) > H_{bwh}]$.

Exp. B-2	S.S. 8	S.S. 6	S.S. 4	S.S. 2	A.P.
1. Head	.206-0	.450-1	.390-2	.165-0	.621-1
2. L. Bow	.175-2	.987-3	.350-2	.185-2	.555-1
3. R. Bow	.128-0	.156-2	.140-4	.712-3	.447-1
4. L. Bea	.291-1	.387-1	.410-1	.505-1	.666-1
5. R. Bea	.219-2	.363-2	.418-1	.375-1	.136-0
6. L. Qua	.628-1	.182-2	.204-2	.166-2	.727-1
7. R. Qua	.000	.204-3	.100-2	.000	.226-1
8. Follo	.924-2	.302-2	.263-1	.116-3	.149

シアーが大きく、船首楼も大きいために、船首における乾舷が極めて大きいのが特徴である。

いま船体船首尾線方向による海水打ち込み発生確率の差異を考えるために、図 13 に示すように平水中の二層甲板の高さが船首尾線方向にわたって一様であると仮定し、Exp. B-2 においてこの仮定のブルワーク高さ H_{bwh} を相対水位変動 $x(t)$ が越える確率 $P[x(t) > H_{bwh}]$ を求めた (表 8)。結果は、実際の場合に比べて船体前半部では、head 及び bow sea の時、海水打ち込み発生確率が高くなり、船体後半部では実際との差異は顕著ではない。

これは実際の船型ではシアー・トリムにより船体前半部では海水打ち込み発生確率が抑制されているが、船尾側では抑制されていないことを示す。したがって GM が小さい時の船尾側からの海水打ち込みに対する配慮が足りないと言える。

要 約

相対水位変動、および甲板上海水打ち込み発生確率について、実験を解析した結果をまとめると以下となる。

- i) 相対水位変動のスペクトル帯域幅係数 ϵ の値は、0.6 から 0.9 の範囲にあり大きい。
- ii) 相対水位変動及びその極大値の分布は、正規分布および ϵ を用いた関数で近似できる。
- iii) 甲板上海水打ち込みは横揺れ同調時に起りやすい。大波高の海面を船が航行する場合、GM が満載漁場発状態に近い値であれば bow から beam sea で船首から、GM が小さい場合には beam から quartering sea で船尾側から海水打ち込みが起りやすい。
- iv) 相対水位変動の標準偏差は風上舷で大きい、GM が小さい場合、甲板上海水打ち込み確率は風下舷で大きい。これは横揺れ同調時に顕著である。
- v) 船型は船尾側からの海水打ち込みに対して配慮する必要がある。

文 献

- 1) 川島利兵衛・高石敬史・守村慎次・吉野泰平・佐々木寛 (1978). 小型漁船の波浪中転覆とその防止に関する実験的研究, 日本造船学会論文集 143, 169-179.
- 2) 福田淳一 (1969). 船体運動の統計的予測, 99-119, 耐航性に関するシンポジウム, 216p, 日本造船学会, 東京.
- 3) 福田淳一・飯塚正文・小沼 守 (1970). Deck wetness の長期予測に基づく乾舷の検討, 日本造船学会論文集 128, 191-203.
- 4) 羅野昌明 (1972). 斜め波中を航行する船への海水打ち込みに関する一計算, 関西造船学会誌 145, 75-81.
- 5) 榎 燦益 (1978). 二次元柱状甲板上への海水打ち込み限界波高について, 西部造船会会報 56, 207-227.

- 6) 高石敬史・雁野昌明・吉野泰平・松本尚義・猿田俊彦 (1972). 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 **132**, 147-157.
- 7) 松岡達郎・川島利兵衛 (1980). 漁船の甲板上海水打ち込みについて. 一自然風波中における相対水位変動一. 日本航海学会論文集 **62**, 131-138.
- 8) 川島利兵衛・松岡達郎・稲葉恭人・天下井清・松島寛治 (1980). 漁船の極限状態における運動に関する研究. 日本航海学会論文集 **63**, 55-62.
- 9) Cartright, D.E., Longuet-Higgins, M.S. (1956). The statistical distribution of a maxima of a random function. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A* **237**, 212-232.