

(昭和 53 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

## 海水打込みに関する実験的研究 (第 1 報)

—斜波中の海水打込みについて—

正員 北川 弘 光\* 角 川 明\*

Experimental Study on Shipping Water of the Ship in Waves

Part 1: On Shipping Water onto Deck of the Ship in Oblique Regular Waves

by Hiromitsu Kitagawa, Member Akira Kakugawa

## Summary

Model experiments were carried out on an ore and two container carriers in head and oblique regular waves. Relative water elevation around the bow and shipping water passing through the forecastle deck end were measured to analyze the behaviour of the shipping water on deck. Criterion for deck wetness was also examined by the O.S.M. calculations and the model experiments. Severity index to shipping water onto deck of the ship was proposed.

## 1 緒 言

船舶の甲板上への海水打込みの現象は、船舶の運航性能あるいは安全性を支配する重要な因子の一つであり、古くから関心が持たれてきた。しかし、海水打込みに関する研究が実際に行なわれるようになったのは近年のことであり、しかも海水打込み現象を研究の主対象としたものは数少ない。近時、船体運動の理論計算法の開発に伴って、船舶の海水打込み限界の計算<sup>1)</sup>が簡単に行なえるようになり、また、さらに進んで長期分布<sup>2)</sup>まで求められるようになったが、実験的研究や現象そのものに対する研究は依然として少ない。Newton<sup>3)</sup>、加藤ら<sup>4)</sup>、田崎<sup>5)</sup>、田才<sup>6)</sup>の研究以後では、コンテナ船に関する田才らの実験<sup>7)</sup>、漁船に関する菅井らの実験<sup>8)</sup>、高速艇に関する田坂らの研究<sup>9)</sup>、甲板水圧を対象とした川上<sup>10),11)</sup>、郷田ら<sup>12),13)</sup>、竹沢ら<sup>14)</sup>、および横波中の海水打込みに関する高梨の研究<sup>15)</sup>などがある。

海水打込みに関する模型実験の大半は、向波中のものであり、斜波中の打込みについては、ストリップ法による計算こそあれ、模型実験による研究はほとんど見当たらない。そこで、本論文では、コンテナ船型および鉱石専用船型について斜波中の模型実験を行ない、斜波中の海水打込みの概要を明らかにすることとした。

もとより、海水打込み現象は複雑であり、現論的解明の難しいものであるから、今後様々な船型、海象に対して多くの実験を重ね、さまざまな観点から検討されねばならない。本研究は、甲板上への海水打込みの様態と船型要素との関係を、その一側面から明らかにすることを

意図したものであり、本論文はその第 1 報である。

## 2 模型実験

## 2.1 供試船

実験に用いた模型船の主要目等を一括して Table 1 に示す。Model A-1 は、船舶技術研究所において開発研究を行なった設計速力 35kts の大型超高速コンテナ船模型<sup>16)</sup>で、4軸、ボッシング付である。船首フレアは SR-108 母型とほぼ同程度、上甲板付近に弱いナックルを有し、船尾部には比較的強いナックルがある。Model A-2 は、1軸コンテナ船模型であり、SR-108 母型(高船首楼付)である。なお、Model A-2 については、低船首楼付の模型船についても若干の実験を行なった。Model B は、鉱石専用船笠木丸模型である。実験状態は満載状態とした。

## 2.2 実験方法等

実験は、船舶技術研究所第 1、第 2 および第 3 船舶試験水槽で行なった。第 2 および第 3 水槽(長水槽)にお

Table 1 Main particulars

ITEMS	MODEL A-1	MODEL A-2	MODEL B
LENGTH, $L_{pp}$ , m	5.000	5.000	4.500
BREADTH, B, m	0.667	0.726	0.740
DRAFT, d, m	0.200	0.271	0.292
FREEBOARD, $f_b$ , m	0.321	0.385	0.210
BLOCK COEFFICIENT, $C_B$	0.587	0.572	0.824
DISPLACEMENT, $V$ , m <sup>3</sup>	0.392	0.563	0.782
POSITION OF C.G., $l_{CB}$ , m	-0.087	-0.074	0.133
HEIGHT OF C.G., $K_G$ , m	0.273	0.272	0.239
METACENTRIC RADIUS, $GM$ , m	0.027	0.029	0.069
ROLLING PERIOD, $T_R$ , s	3.23	3.07	2.01
RADIUS OF GYRATION, $k_{yy}$ , m	0.24L	0.237L	0.238L
RUDDER AREA, $A_R$ , m <sup>2</sup>	0.0198	0.0218	0.0196
SCALE RATIO, a	5/300	5/175	4.5/247

\* 船舶技術研究所

いては直進ガイド付, 第1水槽(角水槽)においては無線操縦による自由航走実験である。自由航走模型による実験では, 計測中の操舵は自動方位設定装置で行なわれ, 指定した針路が保たれる。角水槽では, プロペラ駆動用直流電動機の電圧を一定に保って, 模型船を自走させた。

計測項目は, 船体運動, 船首および船側相対水位, 船首楼後端を通過する打込水の水位変化, 船速, 波高などである。この打込水位の計測には, 1線式容量型水位計を改造したものを利用した。一般に, 甲板上の打込水位は一様でなく, 多くの場合, 船体中心線付近で高く舷側で低くなるが, この打込水位計では, 船幅方向の平均打込水位が計測される。

波は規則波で, 波長・船長比  $\lambda/L=0.75, 1.00, 1.25, 1.50$ , 波高は 20 cm を中心に必要に応じて高低変化させた。

なお, 実験データとしては, 海水打込み計測を目的として行なった実験結果のほか, これまでに Model A-2 および B を供試船として波浪中の模型試験<sup>17), 18)</sup>を行なった際に得た資料も利用した。

これらの模型船の運動特性については, それぞれ, 文献 16), 17) および 18), あるいは造船研究協会第 108, 125 および 132 研究部会報告等を参照されたい。

bow chock top や shell top で, 海水の打込みがある部位の近傍では, 打込みの様態は極めて複雑であり, このような個所に着目して打込みの検討を行なうことは必ずしも得策でなく, 打込み特性の主要を理解するためには, むしろ不適当と考えられる。一方, 打込み個所から離れた船首楼後端などで, 流下してくる打込水の挙動に着目する場合には, 詳細な打込み個所の調査や局所的な衝撃圧力の計測にはそぐわないものの, 打込み部位で著しい不規則性もある程度相殺され, 平均的ではあるが安定した情報を比較的簡単に得る利点がある。そこで, 本実験では, それぞれの模型船の船首楼後端に検査面をとり, ここを流下する打込水位の計測に重点を置いた。

なお, 実際には, 甲板上には甲板機械や貨物等があり, 船首楼に打込まれた打込水の様態はさらに複雑となるが, 本論文では, 打込水の流下に対して甲板上にはまったく障害物の存在しない場合を取り扱うこととする。

### 3 打込水

#### 3.1 記号等

船舶の甲板への海水打込みは, 船の運動と波面の盛り上がりによる相対水位が乾舷を超えた場合に生ずると考えられる。正面からの打込みであれば, 打込まれた水塊は船首楼甲板上を流下し, 船首楼後端から上甲板上へと落下して行く。したがっては船首に相対水位計を, 船首

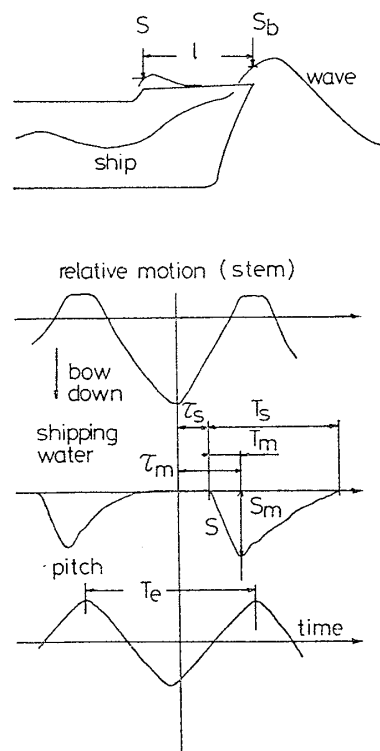


Fig. 1 Definitions

楼甲板上的の適当な位置に打込水位計を取付ければ, 打込みを生じた場合には Fig.1 のような計測記録を得ることができる。そこで, 打込水の特性を表わす諸量を Fig. 1 のように定義する。すなわち, bow chock top の先端より後方  $l$  なる位置で打込水位を計測するとき,  $S_m$  を打込水位の最大値,  $T_s$  を打込持続時間,  $T_m$  を打込水塊の先端が計測位置に到達してから最大値  $S_m$  に達するまでの立上り時間とする。 $\tau_s$  は stem (bow chock top) での相対水位変動が最大となったときから打込水塊の先端が計測位置に達するまでの時間遅れ, 同様に  $\tau_m$  は打込水位の最大値についての時間遅れである。

#### 3.2 打込持続時間

打込時間とは, 一般には船首付近での打込部位における打込時間を意味し, Tick<sup>19)</sup> 以来, duration of bow submergence と解釈されているが, ここでは少し広義に, 打込持続時間とは, 甲板上任意の位置において, 打込まれた水塊が通過ないし停滞する時間と定義する。

Fig. 2, 3 および 4 は, Model A-1 および B について, それぞれの船首楼後端での最大打込水位と打込持続時間との関係を調べたものである。最大打込水位は出会波高にて, また打込持続時間は出会周期で無次元化してある。したがって, 打込みが規則正しく発生する限り, 打込みがある限度を超えれば打込持続時間は飽和状態となり, 出会周期  $T_e$  に等しくなる。このような場合には, この位置では, 打込水は常に存在することになる。もちろん,  $T_s$  は打込水位計測位置  $l$  の関数であり,  $l$  が小さければ  $T_s$  も短くなる。

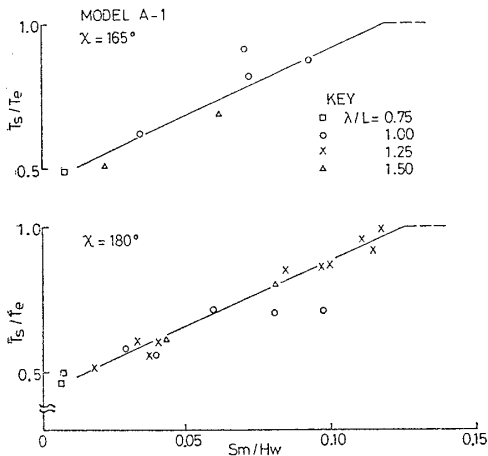


Fig. 2 Duration of wetness on deck

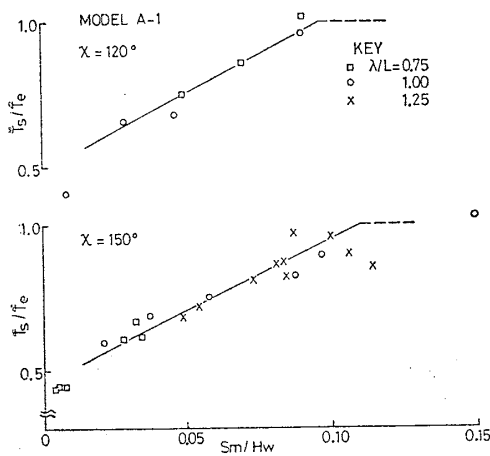


Fig. 3 Duration of wetness on deck

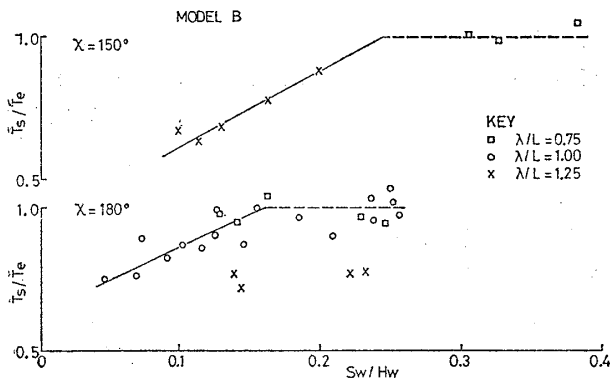


Fig. 4 Duration of wetness on deck

まず、打込み個所での  $T_s/T_e (= T_{bs}/T_e)$  が主としてどのようなパラメータによって支配されているか、ごく簡単な2次元モデルで考えてみる。

2次元的な箱舟の船側で、相対水位変動が

$$\zeta = \zeta_r \cos \frac{2\pi}{T_e} t \quad (1)$$

で表わされ、打込みは  $\zeta$  が有効乾玄  $f_e$  を超えたときに生ずるものとする、打込持続時間  $T_{bs}$  は

$$T_{bs} = \frac{T_e}{\pi} \cos^{-1} \frac{f_e}{\zeta_r} \quad (2)$$

であり、このときの最大打込水位  $S_{bm}$  は

$$S_{bm} = \zeta_r - f_e \quad (3)$$

である。したがって

$$\frac{T_{bs}}{T_e} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{S_{bm}}{\zeta_r} \right\} \sim \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{S_{bm}/H_w}{\zeta_r/\zeta_0} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

である。ここに、 $H_w = 2\zeta_0$ 、 $H_w$  は出会波高である。すなわち、 $T_{bs}/T_e$  は、 $S_{bm}/H_w$  と  $\zeta_r/\zeta_0$  で決まることになる。

Model A-1 について、bow chock top での最大打込水位  $S_{bm}$  と打込持続時間  $T_{bs}$  を計測した結果が Fig. 5 である。同図から  $S_{bm}/H_w \leq 0.8$  のデータについて最小二乗法で係数を求めると、

$$\frac{T_{bs}}{T_e} = 0.424 \left( \frac{S_{bm}}{H_w} \right)^{1/2}$$

を得る。一方、これらの実験点に対応する相対水位は、ストリップ法による計算によれば平均して、 $\zeta_r/\zeta_0 \sim 2$  としてよく、これを (4) 式に代入すれば、係数 0.450 を得る。実際の打込みの複雑さ、打込部位での打込水位計測の難しさなどを考えると、このような簡単なモデル化には問題があるろうが、大局的には船首部における海水打込みも、このような2次元の考察で、ある程度説明し得るものと思われる。

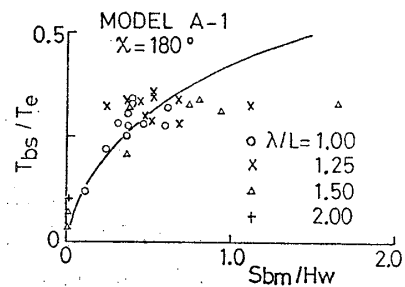


Fig. 5 Duration of wetness on deck

次に、Fig. 2 および 3 に戻って、打込部位から下流での打込持続時間は、実験結果から

$$\frac{T_s}{T_e} \propto k_s(l, \chi) \frac{S_m}{H_w}; \quad \frac{T_s}{T_e} < 1 \quad (5)$$

と表わすことができ、 $k_s$  は  $l/L$  に無関係となる。ただし、 $\chi$  は方位角である。打込部位と打込部位から離れた下流とでは、打込持続時間はそれぞれ別個の支配則にしたがうものと考えられ、また、次章で述べる流下速度と併せ考えると、下流での打込持続時間は、 $S_m$  (または  $S_m/H_w$ ) のみに支配され、船と波との出会角の影響は、打込部位が時間的な遅れを伴って船首より後方に広がることとして説明できる。このことは、シネフィルムの解析からも確認できた。

Model A-1 について、bow chock top (stem) および船首甲板での最大打込水位  $S_{bm}$  および  $S_m$  の関係を調べたものが Fig. 6 である。大波高あるいは高速航

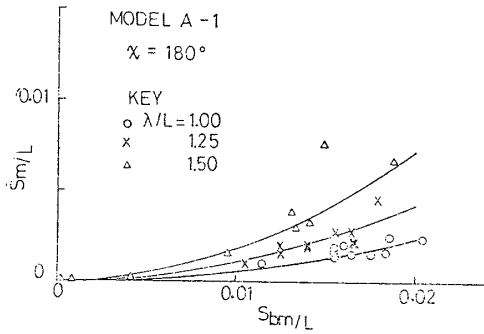


Fig. 6 Maximum water depth on deck

走時には、船首部の飛沫が激しく、これが stem の水位計に附着して計測誤差を増大させる。Fig. 6 では、 $L/H_w=25$  の実験結果のみを示した。 $S_{bm}$  が大きくなるにつれ、船首楼後端を通過する水塊にも飛沫化の傾向がしだいに現われ、空気混入の割合も増大し、 $S_m$  の計測誤差が大きくなるおそれがある。

$S_{bm}$  と  $S_m$  の関係について詳細に検討するためには、実験状態を単純化した実験を行ない、水線面上の船型要素、 $\lambda/L$ 、 $H_w$  などの影響を調べる必要がある。

### 3.3 波形と流下速度

Model A-1 について、船首楼後端における打込水位の計測例を Fig. 7 に示す。他の模型船についても同様であるが、その波形は様々で、打込みのパターンと打込水位波形とは密接な関係があることがわかる。

Fig. 8 および 9 には、打込水塊がそれぞれの模型船の船首楼後端に達するまでの間の平均流下速度  $l/\tau_s$  と最大打込水位  $S_m$  との関係を示す。本来は、最大打込水位としては、打込部位における  $S_{bm}$  をとるべきであるが、向波中はともかくとして斜波中では打込部位の広がり

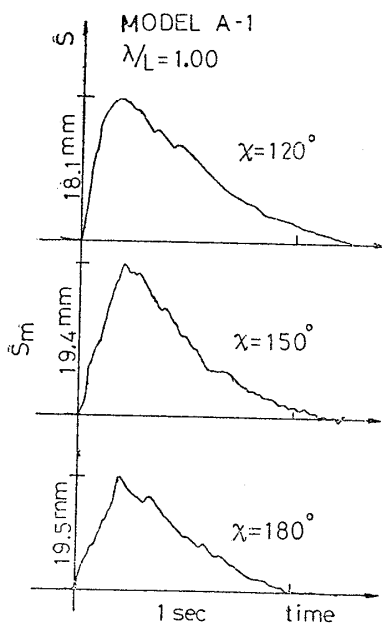


Fig. 7 Time history of shipping water on deck

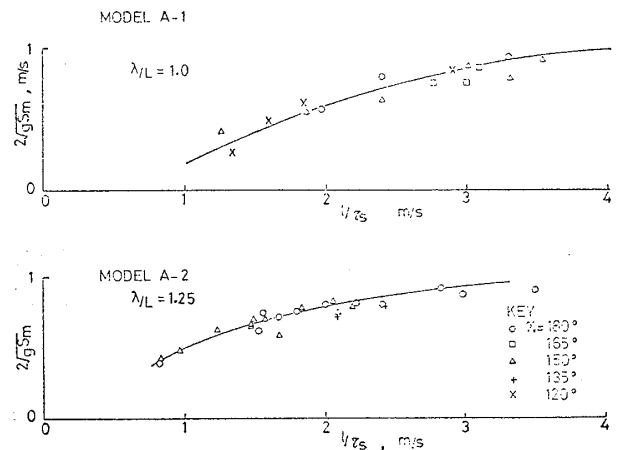


Fig. 8 Wave front velocity

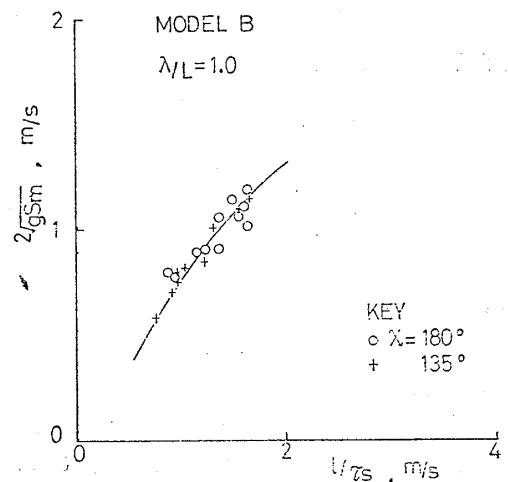


Fig. 9 Wave front velocity

問題があり、また計測精度の上からも実際上は  $S_{bm}$  の代りに  $S_m$  を用いる方が、妥当な結論を導くためには得策と考えられる。

打込水塊前端的の流下が、ダムが決壊による流水の挙動で類推しうるものと考えてみる。Ritter<sup>20)</sup>によれば、摩擦のない dry bed を流下する流水前端的の移動速度  $C_d$  は、決壊前のダム水位を  $h_0$  として、

$$C_d = 2\sqrt{gh_0} \quad (7)$$

で与えられる。ダム壁面を座標の原点として下流方向に  $x$  軸をとれば、 $t$  時間後ダム壁面より  $x$  なる位置における水深  $h_x$  および粒子速度  $u$  は、それぞれ、

$$u = \frac{2}{3} \left( \frac{x}{t} + \sqrt{gh_0} \right) \quad (8)$$

$$\sqrt{gh_x} = \frac{1}{3} \left( 2\sqrt{gh_0} - \frac{x}{t} \right) \quad (9)$$

となる。(9) 式で与えられる水面形状は、Fig. 7 の波形とは異なり、流下速度も (7) 式とは異なる。しかし、甲板上での摩擦力や表面張力の影響は、流水前端的では著しいものと考えられ、これらの影響で流水は前端的で pile up されるはずである。そこで、(7) 式を基礎式として、

Fig. 8 に対する実験式を立ててみると

$$\tau_s/l \sim \sqrt{gS_m} \{2 - k_d (gS_m)^n\} \quad (10)$$

と表わすことができる。参考のため、一応係数等を探ってみると  $k_d = 1.43$ ,  $n = -0.066$  となる。

しかし、水塊前端では、流下速度と粒子速度は一致していなければならない。Fig. 7 で例示した波形が  $l$  の変化によってあまり大きくは変形しないことに着目して、極限的には段波のモデルで近似できるものと考えてみる。

一様水深  $h_i$  なる水面を波高  $h$  の段波が  $c$  なる速度で進む場合を考え、段波の前後で、連続の条件およびエネルギー損失の関係式を考えれば、流速を  $u$  として

$$ch_i = (h_i + c)(c - u) \quad (11)$$

$$\frac{1}{2}c^2 - \frac{1}{2}(c - u)^2 = gh \quad (12)$$

であるから次式を得る。

$$c = \sqrt{\frac{(h_i + h)^2 g}{h_i + \frac{h}{2}}} \quad (13)$$

$$u = \sqrt{\frac{h^2 g}{h_i + \frac{h}{2}}} \quad (14)$$

ここで、 $h_i \rightarrow 0$  とすれば

$$u_0 = c_0 = \sqrt{2gh} \quad (15)$$

であり、流下速度（位相速度）と粒子速度は一致するが速度そのものは実情と合わない。また、打込波形は、段波とは異なり、水位変化の大きな波である。このため、波頂部とその他の部分とは伝播速度が異なり、波形は漸変する。

流量を  $Q$ 、流域幅を  $b$  とすると、連続の条件から

$$c \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$$

$$b \frac{\partial h_i}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{1}{x} \frac{\partial Q}{\partial t}, \quad h_1 = h_i + h$$

である。しかし、

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial u} \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

であるから、最大水位の瞬間  $\partial h / \partial t = 0$  には、 $\partial Q / \partial t$  は完全には 0 とならない。すなわち、打込み水位と打込流量

$$Q = \rho \int u S dt \quad (16)$$

とは、同時に最大とならないことになる。これを実際に検証することは難しく、小球の抵抗変化より流速を求める抵抗型流速計を試作して用いたが、計測結果が妥当と思われる 2, 3 の成功例をみても、水位最大時に流速最大となっており、実際上は、打込水位最大時に流量が最大となるとしてよいものと思われる。

流域幅一定として、最大打込水位  $S_m$  を用いて連続の

条件を書けば、

$$S_m \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial S_m}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

となる。 $S = S_m$  の近傍では、 $\partial u / \partial t < 0$ ,  $\partial u / \partial x > 0$ , また、 $u > 0$  であるから

$$\frac{\partial S_m}{\partial x} < 0 \quad (18)$$

となつて、打込水塊の流下に伴って最大打込水位  $S_m$  は漸減する。このことは、実際にも、 $l$  のかなりの範囲で成立つことが実験で確かめられてはいるが、流域幅（船首楼甲板の幅）が変化する場合には、理論上では  $\partial S_m / \partial x$  の符号は簡単には判断できないことになるが、実際の打込水については、流域幅の変化のみを詳細に検討することは、打込水の様態から見てあまり意味がない。

船の甲板へ打込まれた水塊の挙動を、正しい境界条件の下に理論計算によって検討することは不可能に近い。MAC 法の応用等が考えられるが、さまざまな初期条件の下では、個々に計算する必要があり、これでは煩雑すぎて本研究の主旨にそぐわない。そこで、開水路の非定常流の運動方程式を線形化し、Duhamel の定理を利用して、任意の打込波形を、柱状の打込水位の重ね合わせで近似する方法<sup>21)</sup>を試みてみる。

Chézy の流速式を用いれば、開水路の非定常流の運動方程式は、

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} - \theta + \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{u^2}{C^2 R} = 0 \quad (19)$$

であり、連続の条件は

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (20)$$

である。ここに、 $u$ ,  $S$ ,  $C$ ,  $\theta$  および  $R$  は、それぞれ、断面平均流速、水位、Chézy の流速係数、甲板勾配および径深、また、 $A$  は流れの断面積、 $Q$  は流量である。(19) 式で加速度項を無視し、流路を一様幅の広い長方形断面として、水位変動の高次項を省略して線形化を行ない、初期条件として、原点  $x=0$  において持続時間  $t_0$ 、水位  $a$  なる水柱を与えて (19), (20) 式を解けば、

$$\zeta(x, t, a) = aF(x, t)$$

$$= \frac{2a}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{\sqrt{4\sigma t}}}^{\frac{x}{\sqrt{4\sigma(t-t_0)}}} \exp\left\{-\left(\xi - \frac{kx}{4\sigma\xi}\right)^2\right\} d\xi \quad (21)$$

を得る。ただし、 $\zeta_0(x, t)$  は求める打込水位であり、

$$\left. \begin{aligned} k &= \frac{3}{2} u_0 \\ u_0 &= C \theta^{1/2} (h_i + a)^{3/2} \\ \sigma &= \frac{1}{2\theta} (h_i + a) u_0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

である。

したがって、 $x=0$  に任意の水位が与えられた場合には、これを持続時間  $t_0$ 、一定水位  $a_n$  の水柱に分割して

考えれば、この時の  $\zeta(x, t)$  は、Duhamel の定理により、

$$\zeta(x, t) = \sum_{n=1}^m a_n F_n \{x, t - (n-1)t_0\} \quad (23)$$

で求められる。

bow chock top (stem) を原点とし、ここに、 $a \cos \pi \left(t - \frac{1}{2}\right)$ , ( $a_0 = 0.1\text{m}$ ,  $t$ : sec) なる打込みがあった場合、 $x = 0.744\text{m}$  および  $1.15\text{m}$  下流における打込水位を(23)式により計算したものが Fig. 10 である。ただし、分割数は 8,  $h_t = 1\text{mm}$ , 径深  $R$  は、

$$R = \frac{bh_t}{b + 2h_t} \rightarrow h_t; b(\text{流路幅}) \rightarrow \infty$$

として、2次元流れとした。C については、Chézy の式と Maning の式との関係式

$$C = \frac{1}{k_m} R^{1/6}$$

を用い、Maning の粗度係数  $k_m$  としては 0.02 を、また  $\theta$  は  $2^\circ$  とした。

Fig. 10 と Fig. 6, 7 とを比較すると、最大打込水位の低減率と水塊前端的流下速度については (23) 式はまずまずの結果を与えるが、最大打込水位の流下速度、立上り時間、打込持続時間についてはかなり異なり、計算波形は全体になだらか過ぎる。これは、(23)式を導く際の線形化に問題があることはいうまでもないが、しかし、(19), (20)式をそのまま解いてもあまり意味がない。それは、甲板上的打込水では、船体運動による加速度、 $\theta$  の変化、船速と波の orbital motion による打込初速度の存在などをまず考慮しなければならず、さらに、甲板は多くは dry bed として扱う必要がある。しかし、これを考慮して計算を行なうことは現状では至難であり、

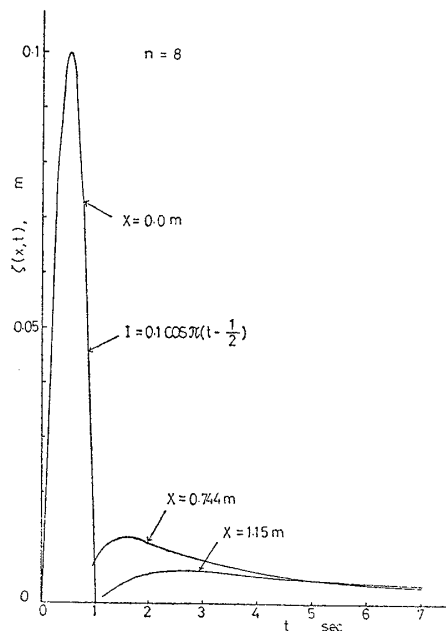


Fig. 10 Time history of shipping water

問題対象によってその都度適当なモデルを選択することもやむを得ないかも知れない。

Fig. 8 と Fig. 9 と比較してみると、コンテナ船と肥大船とではかなり打込みの様態が異なることがわかる。その主たる原因は、コンテナ船では、水塊が、bow chock top 上方というよりは、むしろ水平に近い角度で bow chock top を越えて激しく流入し、船首楼甲板上で跳水現象を生ずることにある。打込部位近傍で打込水位がどこで最大となるかを Model A-1 について調べたものが Fig. 11 である。图中、 $x_p$  は stem より打込水位が最大となる位置までの距離、 $V_m$  は船速、 $V_w$  は波の orbital velocity である。一方、肥大船 Model B について  $x_p$  を求めてみると高速時を除いてほぼ  $x_p \sim 0$  であり、肥大船は bow chock top で打込水位が最大となる。つまり、船首部への打込みは、肥大船では水位型の打込みであり、コンテナ船では、流速型の打込みであるといえよう。

Fig. 12 には、打込水位最大値 (波頂) の流下速度を示す。これは、stem より  $0.744\text{m}$  および  $1.15\text{m}$  までの平均流下速度を比較したもので、打込水塊は流下に伴って速度をやや減じることがわかる。原因としては、摩

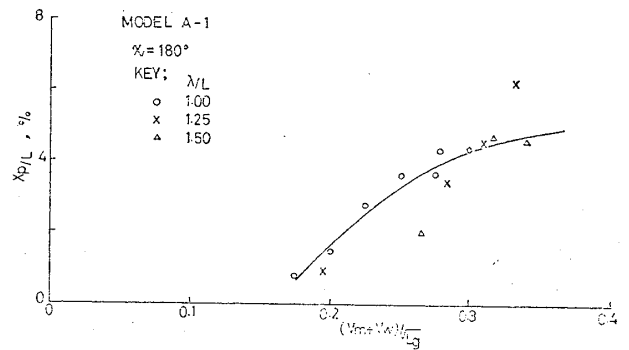


Fig. 11 Location of maximum height of shipping water on deck

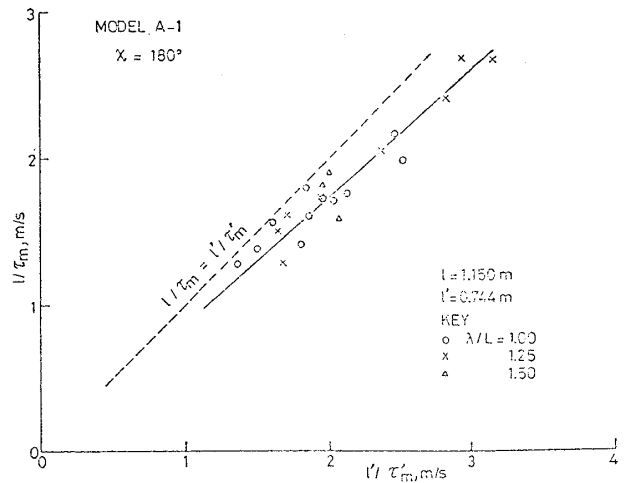


Fig. 12 Propagation velocity of shipping water wave on deck

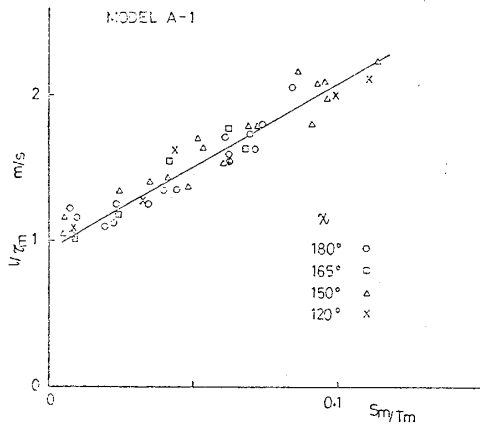


Fig. 13 Rise-up time of shipping water wave on deck

擦力のほか、船体運動の影響が考えられる。

Fig. 13 に、打込水位波形の立上り速度  $S_m/T_m$  と、波頂の流下速度との関係を示す。 $S_m/T_m$  は、甲板上に取付けられたさまざまな機械、コンテナ、遮浪板などに加わる荷重の問題では重要な量となる。

### 3.4 検査面の選定

前章までに、打込部位の下流に検査面を設け、そこでの打込水の性質を検討することによって、海水打込み現象の大要を知ることができることを述べたが、この検査面をどの位置に設けるかは、なかなかむずかしい問題である。

打込水が甲板上を流下するにつれ、境界層が発達するわけであるが、この境界層（乱流）が水面に達すれば、空気混入を生じ、打込水塊の飛沫化を助長する。したがって、検査面としては打込部位からあまり下流でない方がよい。一方、打込部位に近づけば、打込みの様態には不規則性が増大し、良質な情報が得難くなる。また、斜波中では、打込まれた水が必ずしも船首楼後端を通過せず、極端な場合には、stem 近傍の bow chock top から直接船外に流出することもあり、この場合には妥当な検査面の設定はもとより、打込水量の測定、さらにはその定義にも疑問を生ずる。現状では、船首楼後端に検査面をとるのが無難であろう。

## 4 打込限界

船舶の甲板上への海水打込みは dynamic swell up を考慮した相対水位が有効乾玄  $f_e$  を越えたときに起こるものとして、OSM による計算を行なった。ただし、前章での検討結果 (Fig. 2~10) によれば、 $120^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  では、打込みはまず stem 近傍で始まり、斜波中においても打込水の大半は stem 近傍からの打込みによるものであること、また、高石らの研究<sup>22)</sup>によれば、コンテナ船にあっては、stem 付近での相対水位は dynamic swell up を考慮しない方が実験結果と一致することな

どから、Model A-1、および A-2 については dynamic swell up を考慮していない。static swell up の計測例を Fig. 14 に示す。

Fig. 15, 16 および 17 に、計算による海水打込みの限界曲線を実験結果とともに示す。なお、stem において dynamic swell up は S.S. 9~S.S. 9<sup>1</sup>/<sub>4</sub> の値を外挿して求めたものである。これらの結果から、球状船首付のコンテナ船では相対水位変動に dynamic swell up を考慮しない方が一般に良好な結果が得られ、また、肥大船では、dynamic swell up を考慮した方がよい。dynamic swell up の考慮の是非については、3次元理論の展開とさらに多くの模型実験を重ねる必要がある。

海水打込みの激しさの指標として、船首楼後端での最大打込水位を採り、これがそれぞれ、喫水の 2, 4, 6, 8 および 10% に達する場合の限界線を求めたのが、

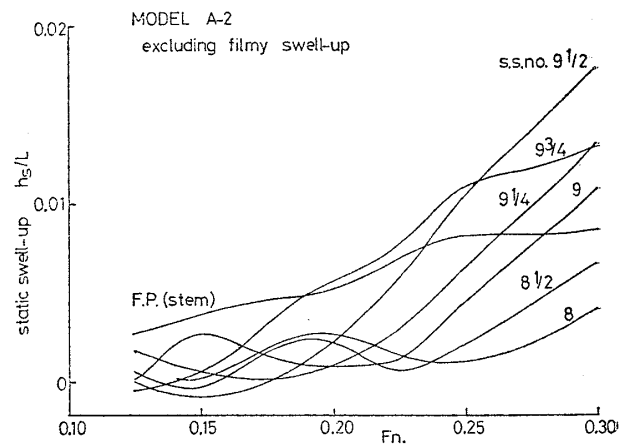


Fig. 14 Static swell up

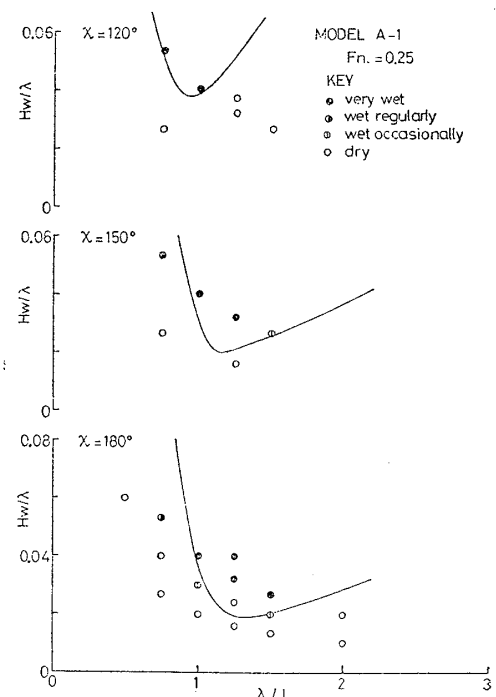


Fig. 15 Critical wave height for deck wetness

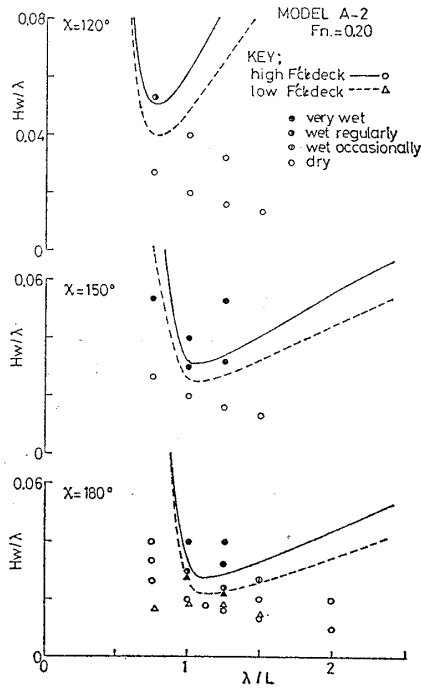


Fig. 16 Critical wave height for deck wetness

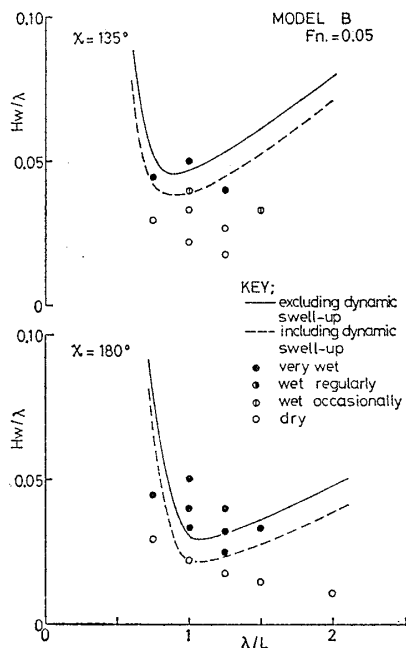


Fig. 17 Critical wave height for deck wetness

Fig. 18 および 19 である。実用上は、海水打込みについても、ただ単に打込みがあるかないかの限界でなく、その激しさがどの程度のものとなるかが重要である。コンテナ船では、 $S_m$  は波高に対して比較的 linear に増大するが、肥大船では、この linearity が悪く Fig. 19 のようなパターンとなる。これは海水打込みが縦揺れの同調点付近で激しく、肥大船では大波高時に船体運動の波高に対する linearity が同調点付近で悪くなる<sup>23)</sup> ことが一因であろう。この限界線のパターンは、方位角が変わってもあまり変化しない。

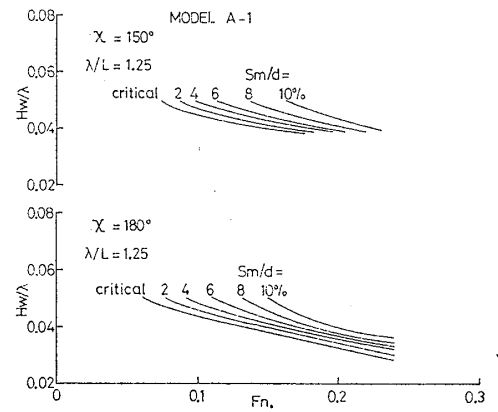


Fig. 18 Contour of shipping water severity

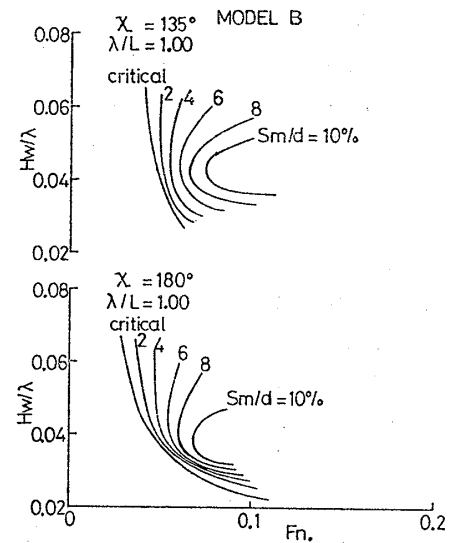


Fig. 19 Contour of shipping water severity

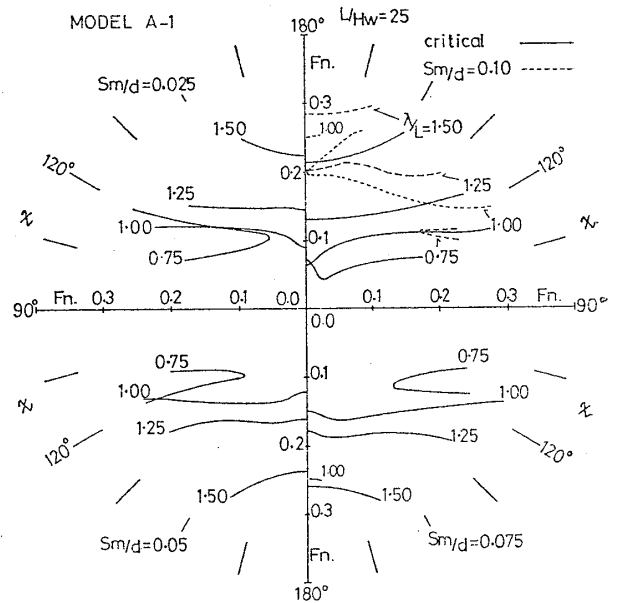


Fig. 20 Contour of shipping water severity

Fig. 20 は、Fig. 18 を円座標表示に直したものであり、方位角と限界線との関係が明確にわかる。なお、図中、第1象限には、打込限界(critical)と  $S_m=0.1d$  の

場合(点線)の限界線とが併記してある。

## 5 結 言

斜波中の模型実験を行ない、相対水位および甲板上の打込水位等を計測し、斜波中における甲板上への海水打込みの特性を検討した。その結果、下記のような結論を得た。

1) 船首部からの打込みにおいては、bow chock topを越す打込みの打込持続時間  $T_{bs}/T_e$  は、最大打込水位  $S_{bm}/H_w$  によってほぼ定まり、 $T_{bs}/T_e \propto \sqrt{S_{bm}/H_w}$  なる関係がある。

2) 打込み部位から下流での打込水の挙動は、最大打込水位  $S_{bm}$  によってほぼ支配される。

3) 打込水塊の流下速度および最大打込水位は、肥大船にあっては、 $0.5 \leq (l/L) \leq 0.2$  の範囲で、流下に伴って漸減するが、コンテナ船にあっては、stemより船首楼甲板上やや下流で跳水現象を生じ、この位置で打込水位は最大値をとる。

4) 船首付近の海水打込みは、低速肥大船と高速コンテナ船とでは異なった特性を有し、肥大船では水位型、コンテナ船では流速型打込みといえる。

5) 斜波中の海水打込みは、出会角が  $120^\circ \leq \chi \leq 180^\circ$  の範囲では、船首よりの打込みが支配的であり、打込みの初生も船首においてである。

6) ストリップ法による相対水位の計算は、船首部の打込限界については良好な結果を与えるが、その際、dynamic swell upの取扱いは、コンテナ船では考慮せず肥大船では考慮した方がよい。

7) 打込部位から離れた下流での打込水の様態を検討することにより、船首部からの海水打込み現象の概要を知ることができる。

また、このような方法により、海水打込みの激しさを量的に表現することができ、さらには、検査面を統一した実験を各種船型について行なうことにより、海水打込みと船型との量的な対応がある程度つけられるものと思われる。

今後、甲板上の打込水の様態についてさらに検討を重ねるとともに、2次元模型による打込み実験を行なって、フレアなどの効果を調査する予定である。

## 謝 辞

本研究を進めるに当って、終始懇切なる御指導を賜った東京大学 元良誠三教授に厚くお礼申し上げます。

常に暖かい御鞭撻、御教示をいただいた石川島播磨重工(株)技術研究所 田崎 亮博士、ならびに船舶技術研究所 菅井和夫博士に深く感謝いたします。また実験の実施に当って御助力いただいた船舶技術研究所運動性能部および推進性能部の方々に厚く謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 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47)。
- 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43)。
- 3) Newton, R.N. : Wetness related to free board and flare, Trans. INA, vol.102 (1960)。
- 4) 加藤 弘，佐藤正彦，元良誠三：青函連絡船洞爺丸等の転覆事件に関する実験的研究，造船協会論文集，第101号(昭32)。
- 5) 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(1961)。
- 6) Tasai, F. : Wave height at the side of two-dimensional body oscillating on the surface of a fluid, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, vol. IX, No.35 (1961)。
- 7) 田才福造，高木又男，雁野昌明，荒川広行，栗原真人：一軸高速コンテナ船の縦波中の耐航性能に関する研究，西部造船会会報，第41号(昭45)。
- 8) 菅井和夫，北川弘光他：高速小型船の海水打込みに関する模型実験，船舶技術研究所講演集，第28回(昭51)。
- 9) 田坂鋭一，橋本州史，深沢塔一，小柳雅志郎，元良誠三：高速艇の海水打込みについて，日本造船学会論文集，第142号(昭52)。
- 10) 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44)。
- 11) 川上益男，田中一雅：船首甲板の青波衝撃圧力の統計予測，西部造船会会報，第53号(昭52)。
- 12) 郷田国夫，宮本 武：二次元模型の大振幅強制動揺試験による変動水圧および甲板水圧の計測，西部造船会会報，第49号(昭50)。
- 13) 郷田国夫，宮本 武：二次元模型実験による甲板水圧の研究，日本造船学会論文集，第140号(昭51)。
- 14) 竹沢誠二，小林頭太郎，萩野 功，沢田和男：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，日本造船学会論文集，第141号(昭52)。
- 15) 高梨伊三夫：横波中の船体への海水流入(第1報)一流入水量，関西造船協会誌，第165号(昭52)。
- 16) 高石敬史，北川弘光，他：正面規則波中の模型試験(第1報)一実験概要と船体運動，船舶技術研究所講演集，第28回(昭51)。
- 17) 田崎 亮，北川弘光，岡本 洋，田中 陽：単螺旋コンテナ船の波浪中試験，関西造船協会誌，第158号(昭50)。
- 18) 菅井和夫，北川弘光，不破 健，大松重雄：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50)。
- 19) Tick, L.J. : Certain probabilities associated with bow submergence and ship slamming in

- irregular seas, Journ. of Ship Research, Vol. 2, No. 1 (1958)
- 20) Ritter, A. : Die Fortpflanzung der Wasserwellen, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, Bd. XXXVI, No. 33 (1892).
- 21) 本間 仁, 安芸皎一編: 物部水理学, 岩波書店, 1962, 614~616 頁.
- 22) 高石敬史, 雁野昌明, 吉野泰平, 松元尚義, 猿田俊彦: 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, 第 132 号 (昭 47).
- 23) 北川弘光, 角川 明: 波浪中の推力増加に対する波高指数に関する一実験, 船舶技術研究所報告 (未刊).
-