

(昭和 43 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

# 波浪中の船の Deck Wetness に関する長期予測

正員 福田 淳 一\*

Predicting Long Term Trends of Deck Wetness  
for Ships in Ocean Waves

By Jun-ichi FUKUDA, *Member*

## Summary

A method of predicting the short term probability of deck wetness and the long term probability of "wet-deck navigation" is presented, along with results of its application to cargo ships operating on the North Atlantic.

Relative bow motions have been evaluated theoretically for geometrically similar ships of various sizes at different headings to regular and irregular waves, based upon the linear strip theory and the linear superposition technique. According to those results, the relationship between the short term probability of deck wetness related to bow freeboard and the significant wave height of irregular sea has been determined in correlation to average wave period, heading angle and ship speed. Then, the long term probabilities of "wet-deck navigation", where the short term probability of deck wetness will be larger than 1/10, are predicted for different seasons and for various wind forces by the aid of long term wave statistics on the North Atlantic.

The following trends of deckwetness related to bow freeboard are concluded from the predicted results :

- (a) The probability of deck wetness is large in head and bow seas, and small in following, quartering and beam seas.
- (b) The probability of deck wetness decreases with decrease of ship speed, but the influence of ship speed is rather small in higher speeds beyond 10 knots.
- (c) A large sized ship has small probability of deck wetness.
- (d) A full ship has small probability of deck wetness.
- (e) The long term probability of "wet-deck navigaton" is large in winter and small in summer on the North Atlantic.
- (f) The long term probability of "wet-deck navigation" increases with increase of wind force on the North Atlantic, but this trend is not so remarkable in extremely heavy weather.

## 1 緒 言

波浪中の船の甲板上への海水打込み、すなわち Shipping Water の現象は、主として波浪中の船の動揺に基づく船体と波面との相対運動によつて起きるものと考えられる。乾舷の大きさ、船楼配置のいかん等によつて Shipping Water の様相は異なるけれども、正面迎波状態またはこれに近い状態では船首部において、追波状態またはこれに近い状態では船尾部において、また、横波状態あるいはこれに近い状態では船体中央部付近において、Shipping Water が起きる可能性が多い。

迎波状態での船首部における Shipping Water は主として縦動揺と上下動揺による船首甲板と波面の相対運動の大きさが船首乾舷を越える場合に起こり、追波状態では縦動揺と上下動揺による船尾甲板と波面の相対運動

\* 九州大学工学部

の大きさが船尾乾舷を越える場合に船尾部で Shipping Water が起きるものと考えられる。また、横波状態では主として横動揺および上下動揺、縦動揺による船体中央部付近の舷側と波面の相対運動の大きさが乾舷を越える場合に Shipping Water が起きるものと考えられる。このように、Shipping Water の最大の原因は船体と波面の相対運動によるものと考え、短期の不規則波浪海面における船体運動を解明することによつて短期の Shipping Water の発生確率を推定することができる。

一方、世界の主要航海海域について、最近ではかなり詳細に長期の波浪発現頻度に関する資料が蒐集整理されている。したがつて、任意の短期波浪海面における Shipping Water の発生確率すなわち Deck Wetness の確率が求められるならば、ある海域における長期の Deck Wetness に関する統計的推定も、その海域の長期の波浪発現頻度を利用することにより可能となる。

ここでは、船首と波面の相対運動に基づき船首甲板の Shipping Water の問題だけを取扱うことにする。この種の研究としては、Lewis<sup>1)</sup> 以来多くの著者<sup>2~7)</sup>によつて主として短期波浪海面における Deck Wetness の推定が行なわれているが、長期の波浪発現頻度を利用して長期の Deck Wetness に関する予測を行なつたものは少なく、Newton<sup>8)</sup> および Nordenström<sup>9)</sup> の論文以外には見るべきものがない。本論文では、Deck Wetness に関する短期および長期の予測法を提案し、一般貨物船船型について北大西洋に就航した場合の Deck Wetness の長期予測を試みている。そして、船型の大きさ、Fineness、波に対する針路、船速等と Deck Wetness との関係、四季別および風力階級による Deck Wetness の大略の傾向等について検討している。

## 2 短期波浪海面における Deck Wetness

短期の不規則波浪海面における船首と波面の相対運動の分散  $R^2$  または標準偏差  $R$  は、その海面の波スペクトルと規則波中の相対運動の周波数応答関数とが与えられれば、線形重ね合わせの理論に基づきエネルギースペクトル法<sup>10)</sup>によつて次式により計算することができる。

$$R^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega, \theta - \chi)]^2 [f(\omega, \chi)]^2 d\omega d\chi \quad (1)$$

ただし  $R^2$ : variance of relative bow motion in irregular sea  
 $R$ : standard deviation of relative bow motion in irregular sea  
 $[A(\omega, \theta - \chi)]$ : response amplitude of relative bow motion in regular oblique waves  
 $[f(\omega, \chi)]^2$ : directional spectral density of sea waves  
 $\omega$ : circular frequency of component wave  
 $\theta$ : angle between the ship course and the average wave direction  
 $\chi$ : angle between a component wave direction and the average wave direction

ここで、有義波高  $H$ 、平均波周期  $T$  の短期波浪海面を表わす波スペクトルとして、次のような Modified Pierson-Moskowitz Wave Spectrum (ISSC Spectrum)<sup>11)</sup> を採用することにする。

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H^2 \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_1)^{-4}\} \quad (2)$$

ただし

$$0 < \omega < \infty, \quad \omega_1 = 2\pi/T$$

$H$ : average wave height according to visual estimation (assumed to be equal to significant wave height)

$T$ : average wave period according to visual estimation

波スペクトルの方向性エネルギー分布が  $-\pi/2 \leq \chi \leq \pi/2$  の範囲に  $(\cosine)^2$  分布をしていると仮定すれば次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} [f(\omega, \chi)]^2 &= (2/\pi) [f(\omega)]^2 : -\pi/2 \leq \chi \leq \pi/2 \\ &= 0 : \text{elsewhere} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

一方、規則波中を一定速度で波に対して  $\psi (= \theta - \chi)$  の角度で進行する船の船首と波面の相対運動の応答関数は、線形ストリップ理論による上下動揺と縦動揺の解を用いて近似的に計算することができる<sup>12) 13)</sup>。

したがつて、このような理論計算による船首の波面に対する相対運動の応答関数と (2) および (3) で表わされる波スペクトルを用いて (1) の計算を行なえば、有義波高  $H$ 、平均波周期  $T$  の短期波浪海面を波の平均進

行方向に対して  $\theta$  の針路をとつて一定速度で船が進行する場合の船首と波面の相対運動の分散  $R^2$  または標準偏差  $R$  を求めることができる。

船首の波面に対する相対運動の大きさが船首乾舷を越えた場合に船首甲板上に海水が打込むと仮定すれば、Deck Wetness の発生確率 (Deck Wetness の発生回数と船と波の出会い回数との比) は Rice<sup>14)</sup> の理論より次式によつて与えられる。

$$q = \exp\left\{-\frac{f^2}{2R^2}\right\} = \exp\left\{-\frac{(f/L)^2}{2(R/H)^2(H/L)^2}\right\} \quad (4)$$

ただし  $q$  : probability of deck wetness

$f$  : bow freeboard

$L$  : ship length

したがつて

$$\log_e(1/q) = \frac{(f/L)^2 L^2}{2(R/H)^2 H^2} \quad (5)$$

となる。

ある短期の波浪海面において、Deck Wetness の確率が  $q$  を越える限界に相当する有義波高を  $H_{s(q)}$  とすると、(5) より

$$H_{s(q)} = \frac{(f/L)L}{\sqrt{2\log_e(1/q)}(R/H)} \quad (6)$$

ただし  $H_{s(q)}$  : the significant wave height of irregular sea where the expected probability of deck wetness will be  $q$

を得る。

$R/H$  は短期波浪海面の平均波周期、波に対する船の針路および船速の関数として求められるから、Deck Wetness の確率が  $q$  を越える限界の有義波高  $H_{s(q)}$  は船の針路と速度が一定ならば平均波周期の関数として求められる。

### 3 Deck Wetness に関する長期予測

世界の主要航海海域については、適当な間隔の階級区分に分けられた有義波高と平均波周期との組合わせによつて表わされた海面状態の長期の発現確率が与えられている。したがつて、これを利用してその海域に就航する船の短期の Deck Wetness の確率がある値  $q$  を越えるような航海状態が長期間においてどの程度の確率で起きるかを推定することができる。たとえば、Deck Wetness 発生回数が波との出会い回数 10 回について 1 回を越えるような航海状態が、冬期の航海日数 50 日に対して延べ何日存在するか、あるいは年間航海日数 200 日に対して延べなん日存在するかというような質問に対する解答を与えることができる。また、風力階級 Beaufort 8 (風速 34~40 kt) の暴風海面では Deck Wetness 発生回数が波との出会い回数 10 回について 1 回を越えるような航海状態に遭遇する長期の確率がどの程度となるかを予測することもできる。

有義波高  $H$ 、平均波周期  $T$  の海面状態の長期の発現確率密度関数を  $p(H, T)$  とする。船が常に波の平均進行方向に対して  $\theta$  の針路を保ち一定速度で進行するならば、前節で述べたように、船首の波面に対する相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  は平均波周期  $T$  の関数として求められ、(6) によつて Deck Wetness の確率が  $q$  を越える限界に相当する有義波高  $H_{s(q)}$  が平均波周期  $T$  の関数として求められるので、Deck Wetness の確率が  $q$  を越えるような海面状態に遭遇する長期の確率は次式によつて与えられる。

$$Q_q(\theta) = \int_{T=0}^{\infty} \int_{H=H_{s(q)}}^{\infty} p(H, T) dH dT \quad (7)$$

ただし  $Q_q(\theta)$  : long term probability of "wet-deck navigation" for the heading angle  $\theta$  where the short term probability of deck wetness will be larger than  $q$

$p(H, T)$  : long term probability density function for the sea state where the significant wave height is equal to  $H$  and the average wave period  $T$

(7) の  $Q_q(\theta)$  は、船速一定の場合には波に対する針路  $\theta$  の関数として求められる。そこで、長期における針路  $\theta$  の確率密度関数を  $p^*(\theta)$  とすると、あらゆる針路を考慮した場合の "Wet-Deck Navigation" の長期の

確率は次式によつて求められる。

$$Q_q = \int_0^{2\pi} Q_q(\theta) p^*(\theta) d\theta \tag{8}$$

$Q_q$  : long term probability of "wet-deck navigation" for all headings where the short term probability of deck wetness will be larger than  $q$

$p^*(\theta)$  : long term probability density function of heading to waves

$p^*(\theta)$  は、実際には海面状態、船速等に支配される複雑な関数であるが、これが  $0 \sim 2\pi$  の範囲に一様に分布していると近似し得るならば、(8) は次のように簡単化される。

$$Q_q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Q_q(\theta) d\theta \tag{9}$$

(7) によつて波に対する針路が一定の場合の、また (8) あるいは (9) によつてあらゆる針路を考慮した場合の長期の "Wet-Deck Navigation" の確率が船速の関数として求められる。

(7) の右辺の  $p(H, T)$  は、実際には適当な間隔の有義波高と平均波周期の階級区分によつて段階的に発現確率が与えられている。したがつて、(7) の積分は実際には数値積分によつて計算される。また、(8) あるいは (9) の針路  $\theta$  についての積分も、実際には  $0 \sim 2\pi$  の範囲を適当な間隔に分割して数値積分によつて求められる。

#### 4 計算例および考察

前節までに説明した短期および長期の Deck Wetness に関する統計的予測法を適用するために、Series 60<sup>15)</sup>

の中から一般貨物船船型 2 種類すなわち Model 4210 W ( $C_b=0.60$ ) および Model 4212 W ( $C_b=0.70$ ) を選び、水線下形状は相似で長さの異なる多数の船型を仮定した。載荷状態は満載とし、縦方向慣動半径は垂線間長さの 25% とした。船首乾舷は 1966 年条約の規定通りとし、次式による値を採用した。

Table 1 Particulars of Ship Forms

Model Number	4210W	4212W
Length-Breadth Ratio (L/B)	7.500	7.000
Length-Draught Ratio (L/d)	18.750	17.500
Breadth-Draught Ratio (B/d)	2.500	2.500
Block Coefficient	0.600	0.700
Water Plane Coefficient	0.706	0.785
Midship Coefficient	0.977	0.986
Centre of Buoyancy from Midship	0.015L (A)	0.005L (F)
Longitudinal Gyradius	0.250L	0.250L

$$f = 56L \left(1 - \frac{L}{500}\right) \frac{1.36}{C + 0.68} \text{ (in mm) : } L < 250\text{m} \tag{10}$$

ただし  $C = \text{block coefficient} : C_b \geq 0.68$

$C = 0.68 : C_b < 0.68$

その他の主要目は Table 1 に示されている。

これらの船について、短期波浪海面における船首の波面に対する相対運動の標準偏差の計算、短期の Deck Wetness の確率  $q=1/10$  に対応する有義波高  $H_{s(1/10)}$  の計算等を行ない、次に、Walden<sup>16)</sup> による北大西洋の長期の波浪発現頻度の資料を用いて、四季および年間の "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" の確率を推定した。また、各風力階級 (Beaufort No. 3~10) の暴風海面における "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" の長期確率を推定した。

短期の Deck Wetness に関する計算の過程と結果は Fig. 1~10 に示されており、長期の "Wet-Deck Navigation" の確率の予測結果は Fig. 11~

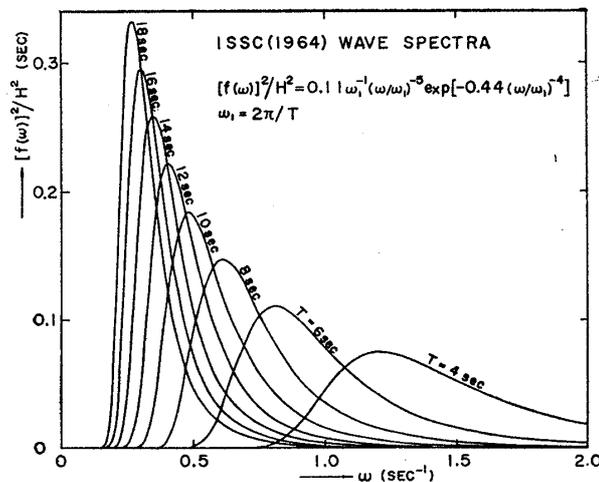


Fig. 1 Modified Pierson-Moskowitz Wave Spectra (ISSC Spectra)

16 に示されている。

(短期波浪海面における Deck Wetness)

Fig.1 に、(2) の Modified Pierson-Moskowitz Wave Spectra (ISSC Spectra) を

$$[f(\omega)]^2/H^2 = 0.11 \omega_1^{-1} (\omega/\omega_1)^{-5} \exp\{-0.44(\omega/\omega_1)^{-4}\} \quad (11)$$

の形に変形して、 $T=4, 6, 8, \dots, 18$  sec の各場合について示している。

Fig.2 および 3 には、船首 (前部垂線の位置) の波面に対する相対運動の応答関数 (振幅) の計算結果の例を

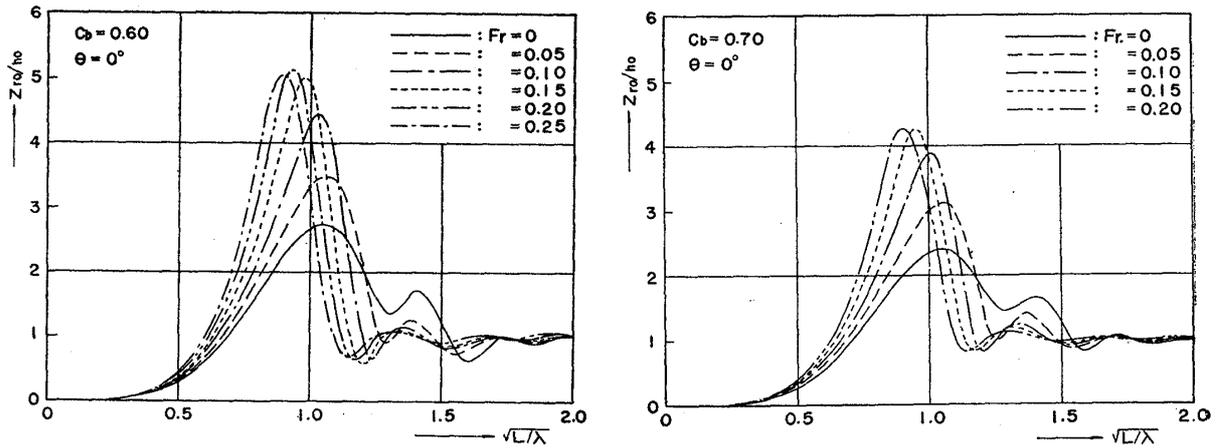


Fig.2 Response Amplitudes of Relative Bow Motion in Regular Head Waves

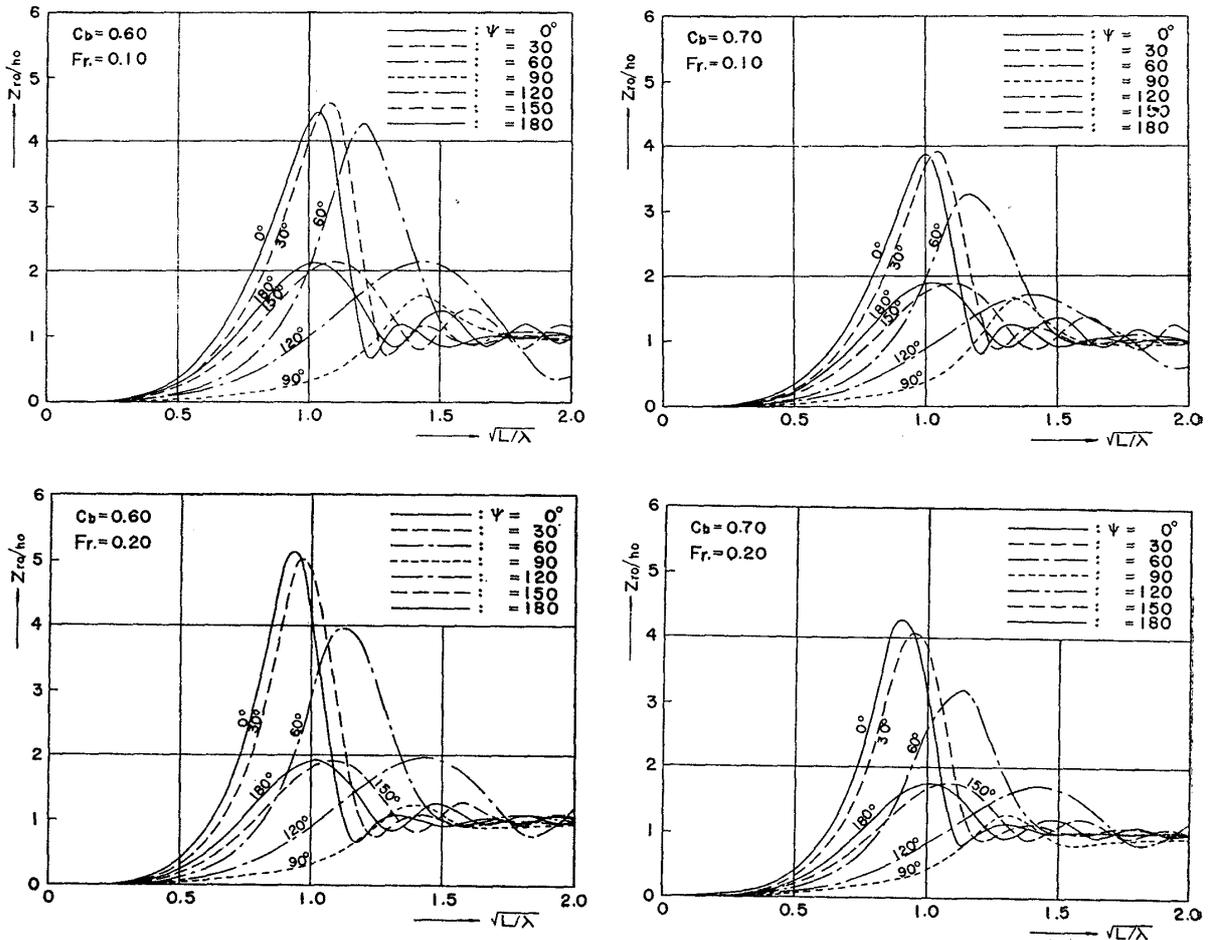


Fig.3 Response Amplitudes of Relative Bow Motion in Regular Waves from Different Directions

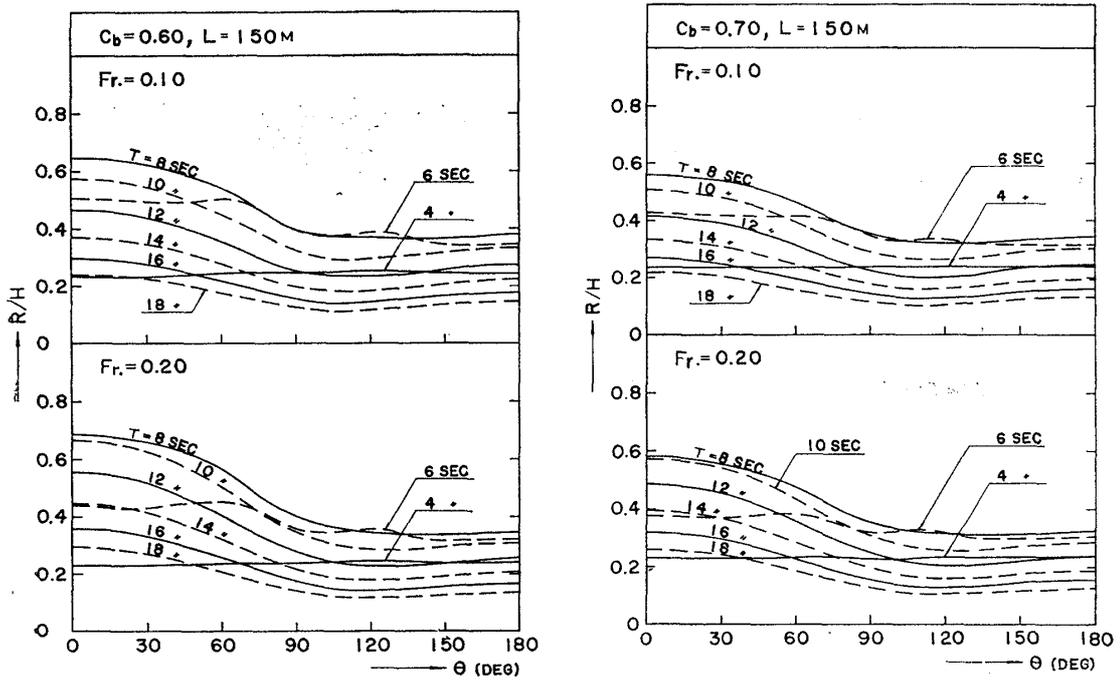


Fig. 4 Standard Deviations of Relative Bow Motion in Short Crested Irregular Waves as Functions of Heading Angle

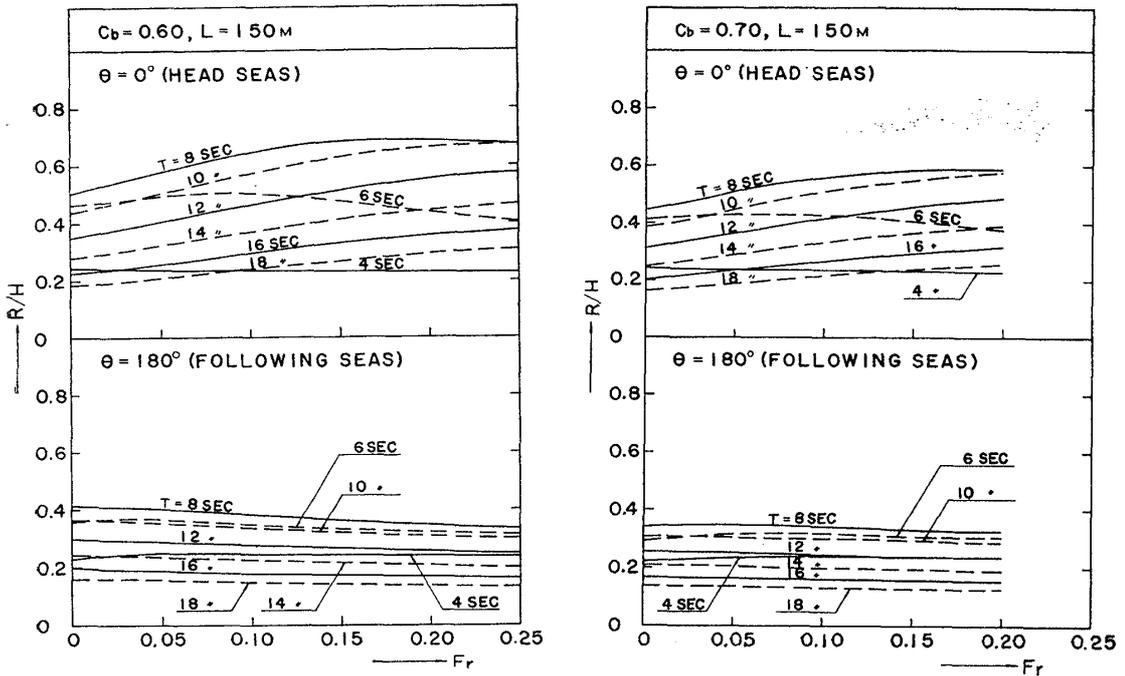


Fig. 5 Standard Deviations of Relative Bow Motion in Short Crested Irregular Waves as Functions of Ship Speed

示す。図中に用いた記号は次の通りである。

$Z_{r0}$  : amplitude of relative bow motion (at fore perpendicular)

$h_0$  : wave amplitude

$\lambda$  : wave length

$\psi$  : heading angle to regular waves ( $\psi=0^\circ$  : head waves)

$Fr$  : Froude number

Fig. 2 および 3 に示すような応答関数と (2) および (3) の波スペクトルを用いて (1) によつて計算された船首の波面に対する相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  を Fig. 4~7 に示す。

Fig. 4 では  $R/H$  を不規則波の平均進行方向に対する船の針路  $\theta$  の関数として表わしており、正面迎波状態を  $\theta=0^\circ$  としている。Fig. 5 では  $R/H$  をフルード数  $Fr$  の関数として表わしている。これらの図では船長 150 米の場合の例を示している。

Fig. 6 および 7 には  $R/H$  を  $\sqrt{L/\lambda_e}$  の関数として表わしている。ここで

$$\lambda_e = gT^2/2\pi \quad (12)$$

ただし

$g$  : acceleration of gravity

$T$  : average wave period

であつて、 $\lambda_e$  は不規則波の平均波周期  $T$  と等しい波周期を有する規則波の波長に相当する。不規則波中の応答の標準偏差の無次元値  $R/H$  を  $\sqrt{L/\lambda_e}$  の関数として表わした Fig. 6 および 7 は、規則波中の応答振幅の無次元値  $Z_{r0}/h_0$  を  $\sqrt{L/\lambda}$  の関数として表わした Fig. 2 および 3 に対応している。Fig. 6 および 7 に示すような無次元表示ができるのは、(2) および (3) のような形式の波スペクトルを仮定して  $R/H$  の計算を行なつたからである。

Fig. 8 には 1966 年条約の規定による最小船首乾舷を船長の関数として表わしている。

Fig. 8 に示すような船首乾舷を有する船について、短期波浪海面における Deck Wetness の確率が 1/10 を越える限界に相当する有義波高  $H_{s(1/10)}$  を (6) によつて計算した結果を Fig. 9 および 10 に示す。これらの図では船長 150 米の場合の  $H_{s(1/10)}$  を平均波周期  $T$  の関数として表わしている。短期波浪海面における Deck Wetness の確率が 1/10 ではなく異なる値  $q_1$  を越える限界に相当する有義波高  $H_{s(q_1)}$  を求めるには次式によればよい。

$$H_{s(q_1)} = H_{s(1/10)} / \sqrt{\log_{10}(1/q_1)} \quad (13)$$

また、船首乾舷の大きさが  $f$  でなく異なる値  $f_1$  となつている場合には、短期の Deck Wetness の確率がある値  $q_1$  を越える限界に相当する有義波高  $H_{s(q_1)(f_1)}$  は次のようになる。

$$H_{s(q_1)(f_1)} = H_{s(q_1)(f)} \times (f_1/f) \quad (14)$$

さて、短期波浪海面における船首の波面に対する相対運動について、以上に得られた結果から次のような一般的傾向が見出される。

船首の波面に対する相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  は、正面迎波状態において最も大きく、斜め迎波状態ではやや減少し、横波状態より追波状態の範囲では正面迎波状態に比較してほぼ 1/2 程度に減少する (Fig. 4)。

船首の波面に対する相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  は、正面迎波状態では海面の平均波周期が小さい場合を除き一般に船速の増加とともにかなり増大し、追波状態では船速の増加とともに僅かに減少する傾

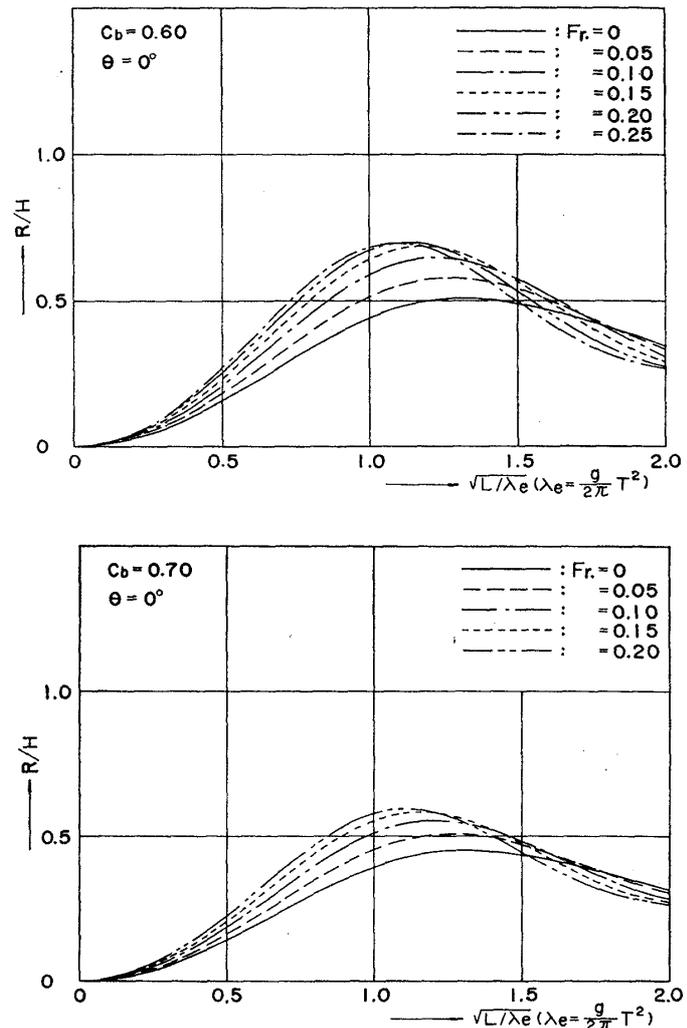


Fig. 6 Standard Deviations of Relative Bow Motion in Short Crested Irregular Head Waves as Functions of  $\sqrt{L/\lambda_e}$

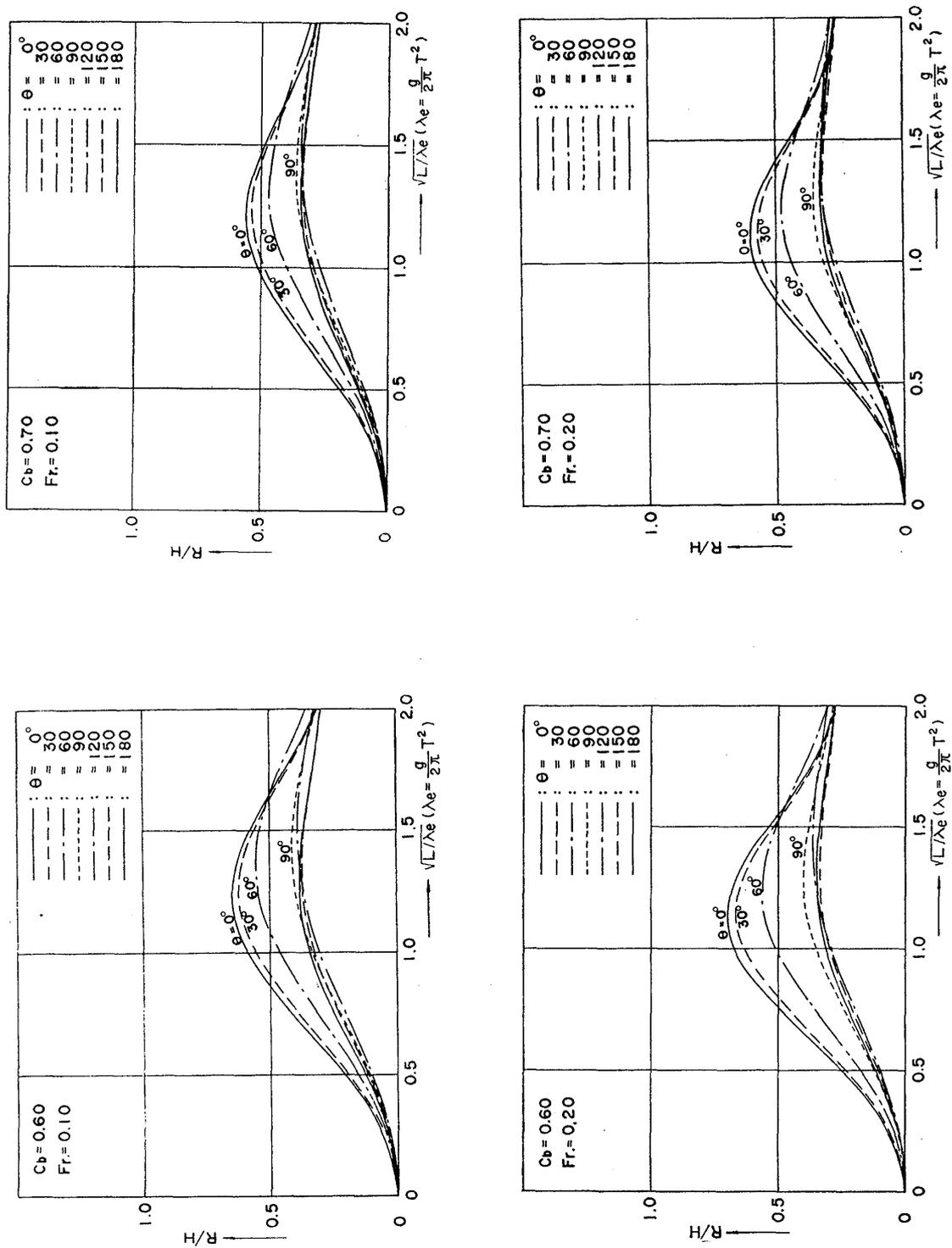


Fig. 7 Standard Deviations of Relative Bow Motion in Short Crested Irregular Waves from Different Directions as Functions of  $\sqrt{L/\lambda_e}$

向を示す (Fig.5)。

規則波中では、船首の波面に対する相対運動の振幅の無次元値  $Z_{r0}/h_0$  は正面迎波状態で  $\sqrt{L/\lambda} = 0.9 \sim 1.0$  の場合に最大となるが (Fig.2, 3), 不規則波中では、船首の波面に対する相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  が正面迎波状態で  $\sqrt{L/\lambda_e} = 1.1 \sim 1.2$  ( $\lambda_e = gT^2/2\pi$ ) となるような平均波周期  $T$  の場合に最大となる (Fig.6, 7)。したがって、Deck Wetness の確率がある値たとえば  $1/10$  を越える限界に相当する有義波高  $H_{s(1/10)}$  は正面迎波状態で  $\sqrt{L/\lambda_e} = 1.1 \sim 1.2$  に相当する平均波周期  $T$  の海面で最小となる (Fig.9, 10)。

肥えた船型の船首の波面に対する相対運動は一般に瘠せた船型のそれよりも小さい。

ここに得られた不規則波中の船首相対運動の標準偏差  $R$  の値は、ストリップ法による船首相対運動の応答関数の理論計算値と Modified Pierson-Moskowitz Wave Spectra (ISSC Spectra) を用いて計算されたものである。

短期の不規則波浪海面をその有義波高  $H$  と平均波周期  $T$  の2個のパラメータのみによつて (2) および (3) のような波スペクトルで一義的に表わし得るかどうかという点には疑問があり、有義波高  $H$  および平均波周期  $T$  の目測値と真の値との関係についても問題がある。また、ストリップ法による船首相対運動の応答関数の理論計算には船首波の盛りりの影響<sup>9)</sup>等が考慮されておらず、計算法自体にも理論的に厳密でない近似が行なわれているので、規則波中の模型実験値と理論計算値との一致の程度を検討する必要がある。最近の Nordenström<sup>17)</sup>, Joosen 等<sup>18)</sup>の報告によれば、船首相対運動の応答関数 (振幅) のストリップ法による理論計算値は模型実験値よりも低い値となることが指摘されている。したがって、ここで得られた船首相対運動の標準偏差の無次元値  $R/H$  は過小値となつており、その結果として Fig.9 および 10 の  $H_{s(1/10)}$  は過大値となつていることが懸念される。最近の田才の模型実験結果 (未発表) にも同様の傾向が見出されているとのことである。かように  $R/H$  および  $H_{s(1/10)}$  の計算値がやや危険側の値

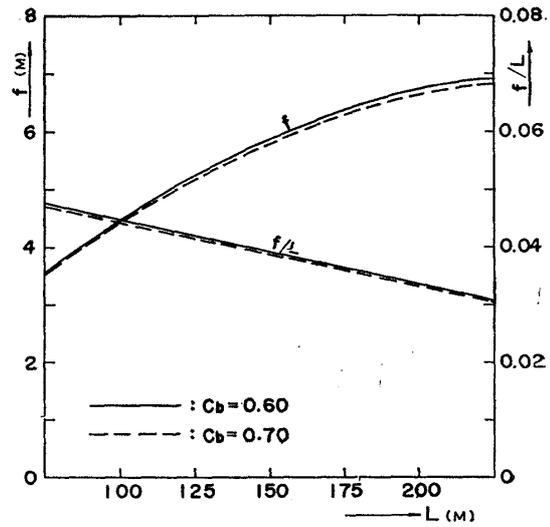


Fig. 8 Bow Freeboards According to the Conference on Load Lines 1966

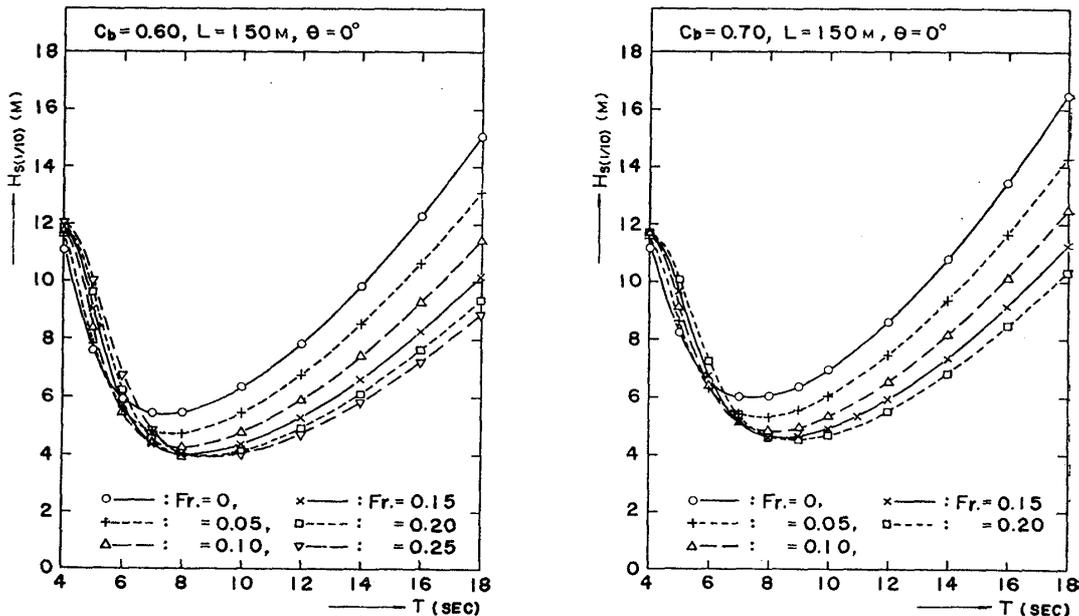


Fig. 9 Significant Wave Heights of Short Crested Irregular Head Waves, Where the Expected Probability of Deck Wetness "q" Will Be 1/10, as Functions of Average Wave Period

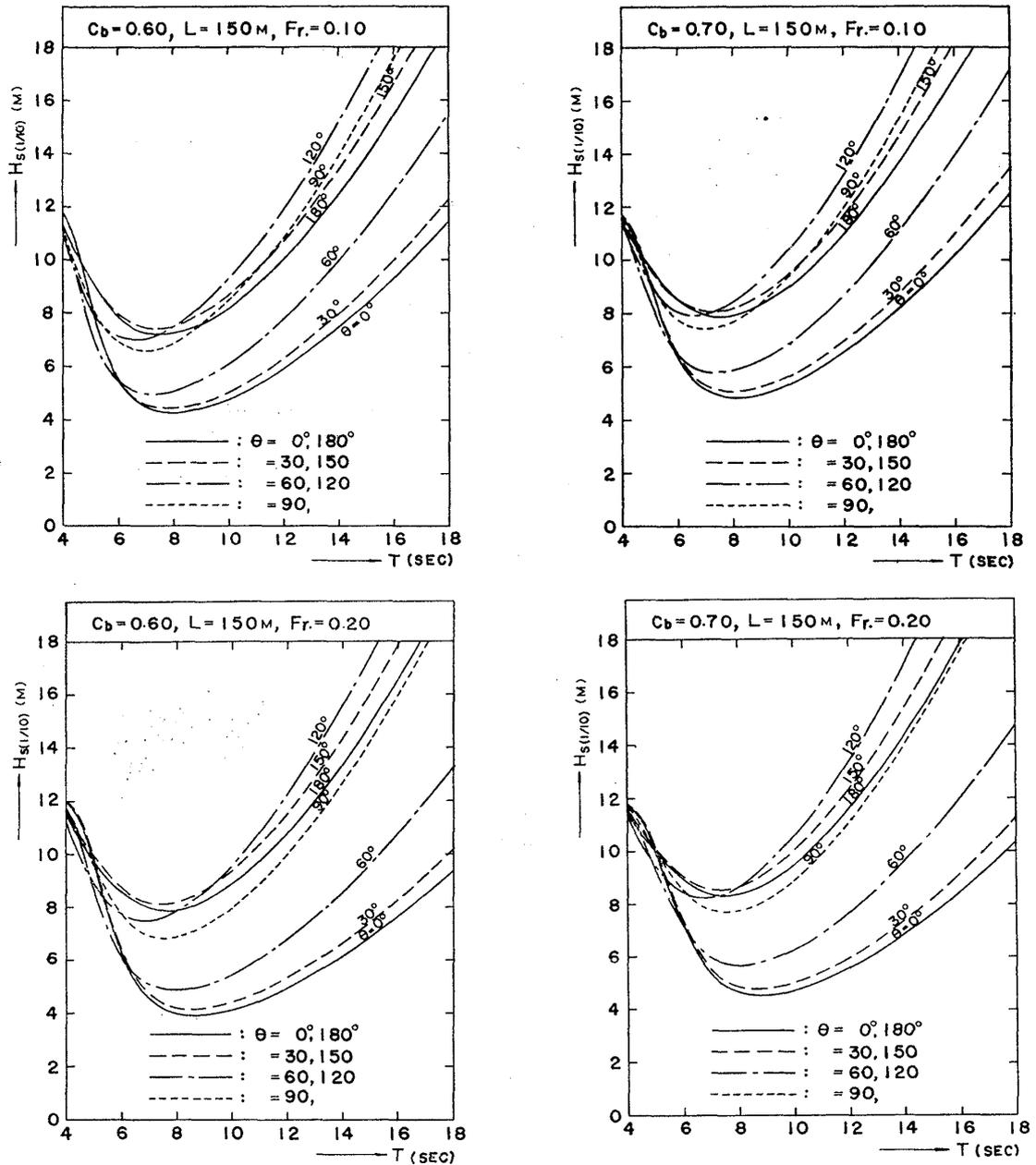


Fig.10 Significant Wave Heights of Short Crested Irregular Waves from Different Directions, Where the Expected Probability of Deck Wetness "q" Will Be 1/10, as Functions of Average Wave Period

となつてゐることから、つぎに述べる Deck Wetness に関する長期予測の結果もまた若干危険側の値となつてゐる惧れがあることに注意を要する。将来、多くの模型実験資料により  $R/H$  あるいは  $H_s(1/10)$  等に対する修正係数のようなものが得られれば、理論的方法による Deck Wetness に関する長期予測がより完全に近く行なわれ得るであろう。

(Wet-Deck Navigation に関する長期予測)

Walden<sup>16)</sup> による北大西洋の A, B, C, D, E, I, J, K および M の 9 定点の波浪発現頻度を総合したものを Table 2 および 3 に示す。各表は北大西洋全域の長期の波浪発現頻度を四季別および風力階級別に示している。これらの表に示す波浪発現頻度を用いて北大西洋に就航する船の "Wet-Deck Navigation for  $q > 1/10$ " (短期の Deck Wetness の確率が 1/10 を越えるような航海状態) の長期予測を行なつた結果を Fig. 11~16 に示す。

Fig. 11 は、長さ 150 米の船が冬期北大西洋に就航した場合に短期の Deck Wetness の確率が 1/10 を越え

Table 2 Wave Frequency in the North Atlantic (According to Walden's Data)

Spring (for All Nine Weather Ships) (57,273 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
0.75	16.90	10.16	4.03	2.95	0.44		0.49	34.87	
1.75	63.88	125.83	61.64	21.28	2.29	0.40	0.17	276.36	
2.75	21.65	128.61	128.63	35.13	3.84	0.26	0.09	318.70	
3.75	3.07	51.79	95.03	37.42	6.72	0.76	0.16	195.14	
4.75	0.52	18.81	45.23	19.96	3.53	1.03	0.09	89.49	
5.75	0.14	4.89	16.87	11.77	2.38	0.54	0.09	36.73	
6.75	0.05	2.74	8.93	8.13	2.62	0.49	0.10	22.92	
7.75	0.07	1.85	4.16	4.07	1.90	0.23	0.03	12.45	
8.75	0.02	0.25	1.69	2.29	2.17	0.14	0.09	8.07	
9.75		0.35	1.01	1.26	1.45	0.35	0.02	4.58	
10.75		0.33		0.07	0.03	0.02		0.14	
11.75			0.02	0.09	0.03		0.02	0.16	
12.75				0.02	0.09	0.02		0.13	
13.75					0.03	0.05	0.02	0.12	
14.75						0.09		0.09	
15.75									
Sum over All Heights	106.20	345.96	367.13	145.24	27.52	4.38	0.88	2.69	1000.00

Summer (for All Nine Weather Ships) (56,931 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
0.75	47.98	24.70	8.92	3.55	1.09	0.11	0.04	1.46	87.56
1.75	139.66	201.92	90.08	20.64	2.30	0.44	0.11	1.40	456.55
2.75	28.71	141.62	109.33	19.46	2.30	0.35	0.07	0.68	302.52
3.75	3.44	35.44	51.70	13.80	1.53	0.17		0.23	106.40
4.75	0.23	6.53	15.05	7.15	1.07	0.05		0.23	30.31
5.75	0.04	1.35	3.83	2.84	0.30	0.09		0.45	8.45
6.75	0.05	0.72	1.77	1.23	0.47	0.11		0.05	4.40
7.75		0.17	0.58	0.67	0.05	0.02	0.02	0.02	1.53
8.75	0.02	0.09	0.58	0.60	0.12			0.02	1.43
9.75			0.05	0.07	0.12				0.24
10.75					0.04			0.02	0.06
11.75	0.05	0.02			0.05			0.02	0.14
12.75					0.05			0.05	0.05
13.75					0.05			0.05	0.05
14.75									0.02
15.75			0.02						0.02
Sum over All Heights	220.18	412.61	281.93	70.15	9.42	1.34	0.24	4.13	1000.00

Autumn (for All Nine Weather Ships) (57,340 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
0.75	13.38	8.81	3.45	1.62	0.19		0.30	27.75	
1.75	27.22	119.46	69.02	14.25	2.67	0.25	0.05	254.80	
2.75	17.70	125.84	126.92	20.19	3.68	0.51	0.21	305.52	
3.75	3.21	92.30	107.96	30.20	6.14	1.01	0.14	207.22	
4.75	0.61	14.58	30.62	25.55	5.37	1.59	0.16	98.92	
5.75	0.09	4.59	20.91	14.58	3.92	0.49	0.17	44.84	
6.75	0.05	2.62	12.94	0.24	3.02	0.45	0.14	28.51	
7.75	0.03	0.94	6.05	5.22	2.01	0.42	0.03	14.73	
8.75		0.52	3.40	4.13	1.57	0.54	0.07	10.26	
9.75	0.02	0.10	1.81	2.42	0.94	0.61	0.14	6.06	
10.75		0.18	0.03	0.05	0.02			0.28	
11.75			0.05	0.14	0.21	0.05		0.45	
12.75		0.03		0.19	0.19			0.44	
13.75				0.03	0.07	0.02		0.12	
14.75			0.02	0.03	0.05			0.10	
15.75									
Sum over All Heights	92.81	328.77	394.56	144.52	30.08	6.06	1.11	2.09	1000.00

Winter (for All Nine Weather Ships) (55,825 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
0.75	6.00	4.03	2.10	0.99	0.21	0.14		0.18	13.65
1.75	29.50	79.77	41.40	13.06	2.63	0.18	0.09	0.21	166.84
2.75	16.84	108.86	108.02	37.87	5.36	0.77	0.05	0.52	278.20
3.75	3.30	57.77	114.74	45.03	7.50	0.91	0.13	0.34	229.72
4.75	0.79	24.20	64.76	36.45	9.26	1.93	0.18	0.23	137.80
5.75	0.21	6.32	26.31	22.46	6.05	1.07	0.18	0.04	62.64
6.75	0.11	5.34	15.53	16.80	6.23	1.29	0.05	0.07	45.42
7.75	0.07	2.47	6.86	10.94	3.80	0.84	0.09	0.04	25.11
8.75	0.02	2.67	4.35	7.84	4.12	1.32	0.02	0.04	20.41
9.75		1.61	2.44	5.34	3.78	1.79	0.61	0.14	15.71
10.75			0.20	0.23	0.36	0.16	0.09		1.04
11.75		0.02	0.13	0.07	0.43	0.18			0.83
12.75		0.11		0.39	0.37	0.29			1.36
13.75		0.07		0.23	0.18	0.04	0.04	0.04	0.60
14.75		0.07		0.05	0.16	0.11	0.04	0.05	0.48
15.75				0.05				0.05	0.10
Sum over All Heights	56.84	293.31	386.84	197.82	50.64	11.03	1.57	1.95	1000.00

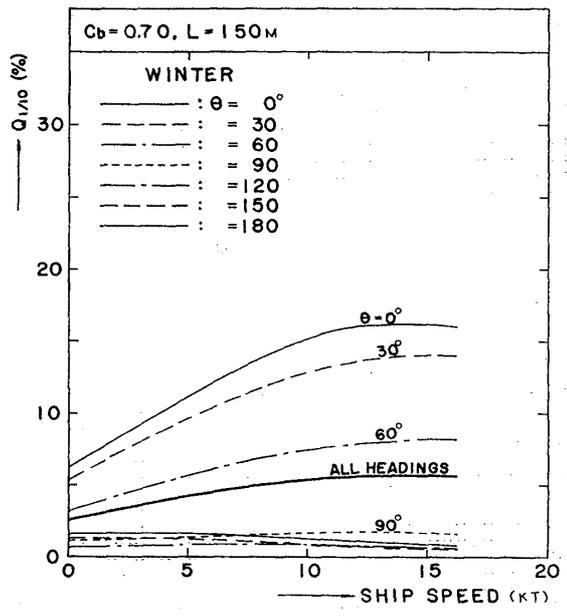
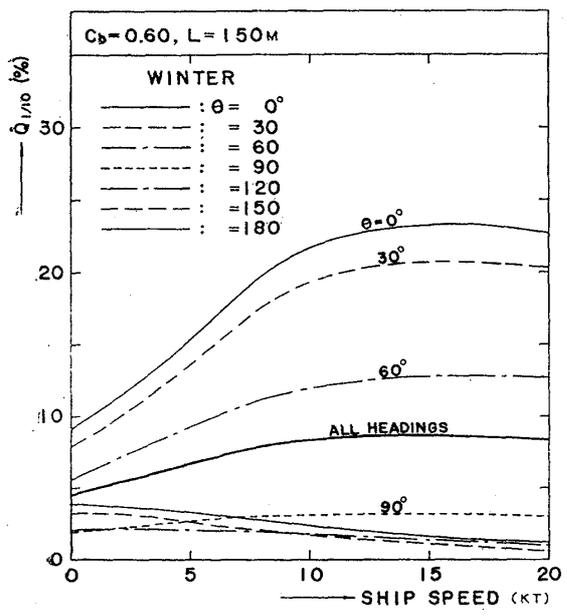


Fig.11 Long Term Probabilities of "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" on the North Atlantic in Winter as Functions of Ship Speed

Table 3 Wave Frequency in the North Atlantic  
(According to Walden's Data)

3 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (26,285 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	58.69	30.82	9.78	5.55	1.41	0.11		0.04
1.75	147.53	235.21	118.54	35.91	5.93	0.91	0.11	1.33	545.47
2.75	15.26	96.36	101.99	37.54	4.76	0.76	0.27	0.49	257.43
3.75	0.88	13.92	33.14	18.15	2.78	0.42	0.04	0.23	69.56
4.75	0.08	1.52	5.74	5.40	1.60	0.34	0.04	0.08	14.80
5.75		0.12	0.95	1.07	0.49	0.11	0.04		2.85
6.75	0.04	0.08	0.30	0.54	0.30	0.12			1.75
7.75				0.19	0.08	0.04		0.04	0.35
8.75			0.08	0.04	0.08			0.04	0.24
9.75			0.04	0.04					0.08
10.75								0.04	0.04
11.75									
12.75									
13.75									
14.75									
15.75									
Sum over All Heights	222.48	378.10	270.56	104.73	17.43	2.88	0.54	3.28	1000.00

4 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (42,700 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	25.49	16.09	4.88	2.01	0.33			0.37
1.75	127.08	225.85	103.10	25.34	2.93	0.26	0.09	1.31	485.96
2.75	20.94	137.83	129.68	34.48	4.07	0.34	0.05	0.59	328.18
3.75	1.83	24.45	48.65	22.67	4.31	0.56	0.05	0.23	102.75
4.75	0.23	3.54	11.15	7.21	2.15	0.35		0.09	24.72
5.75	0.02	0.37	1.87	2.15	1.08	0.19			5.68
6.75	0.02	0.14	0.73	0.84	0.21	0.07	0.02		2.03
7.75		0.05	0.19	0.37	0.12	0.12			0.85
8.75		0.09	0.07	0.12	0.14	0.05			0.47
9.75			0.09		0.05	0.02			0.16
10.75								0.02	0.04
11.75	0.02								0.02
12.75									
13.75									
14.75									
15.75									
Sum over All Heights	175.63	408.43	300.38	95.19	15.39	2.16	0.21	2.61	1000.00

5 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (53,819 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	6.45	3.77	1.58	0.59	0.07	0.04		
1.75	73.27	146.22	63.56	13.75	1.82	0.26	0.11	0.89	299.88
2.75	33.23	185.02	164.26	37.32	3.99	0.43	0.13	0.67	425.05
3.75	3.27	50.79	94.32	32.90	5.37	0.65	0.15	0.20	187.65
4.75	0.33	9.12	25.02	14.92	3.14	0.56	0.04	0.17	53.30
5.75		1.17	4.68	5.41	1.47	0.11	0.02		12.86
6.75	0.04	0.52	1.69	2.06	0.89	0.30	0.06		5.56
7.75		0.09	0.56	0.56	0.41	0.07			1.69
8.75		0.09	0.22	0.32	0.28	0.06			0.97
9.75			0.04	0.07	0.15	0.11			0.37
10.75									
11.75	0.02								0.02
12.75									
13.75				0.02					0.02
14.75									
15.75									
Sum over All Heights	116.61	396.79	355.93	107.92	17.59	2.59	0.51	2.06	1000.00

6 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (41,349 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	0.85	0.94	0.63	0.24	0.07			
1.75	23.27	53.36	22.98	4.52	0.31		0.02	0.22	104.68
2.75	27.06	162.91	145.64	30.52	3.53	0.36	0.05	0.41	370.48
3.75	5.34	86.88	165.84	51.07	6.67	0.87	0.17	0.31	317.15
4.75	0.73	24.18	66.55	31.91	5.97	1.38	0.10	0.41	131.23
5.75	0.10	4.96	17.22	15.86	3.60	0.48	0.10	0.02	42.34
6.75	0.02	1.86	6.41	7.38	3.31	0.51	0.07	0.05	19.61
7.75	0.03	0.36	1.69	2.81	1.40	0.31	0.05	0.02	6.69
8.75	0.02	0.46	0.89	1.14	0.89	0.31	0.05	0.02	3.78
9.75		0.05	0.17	0.41	0.22	0.22		0.02	1.09
10.75			0.05		0.02				0.07
11.75	0.02				0.02				0.04
12.75						0.02			0.02
13.75							0.02		0.02
14.75								0.02	0.02
15.75									
Sum over All Heights	57.46	335.96	428.07	145.86	26.01	4.46	0.63	1.55	1000.00

7 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (25,278 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	0.24	0.44	0.67	0.16				
1.75	6.88	14.15	6.69	1.46	0.28	0.04		0.12	29.82
2.75	15.81	82.59	78.32	17.95	2.49	0.24	0.08	0.51	197.99
3.75	6.13	95.05	164.26	53.24	9.02	1.31	0.47	0.77	329.49
4.75	2.42	43.31	120.76	54.05	9.68	2.61	0.24	0.36	232.41
5.75	0.24	12.89	42.15	35.67	7.08	1.03	0.16	0.12	106.55
6.75	0.08	7.40	22.26	21.55	6.73	1.15	0.04	0.08	39.29
7.75		2.77	5.27	10.17	3.68	0.75	0.04	0.12	23.90
8.75	0.04	1.42	3.28	5.30	2.85	0.55	0.04		13.48
9.75		0.35	1.23	1.38	1.70	0.55		0.16	5.57
10.75			0.12		0.12				0.24
11.75					0.08	0.04			0.20
12.75					0.04	0.04			0.08
13.75					0.04				0.04
14.75						0.04			0.04
15.75									
Sum over All Heights	30.84	260.57	452.72	201.27	43.75	8.31	0.60	1.94	1000.00

8 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (14,245 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75	0.07	0.63	0.42	0.28				
1.75	1.26	4.21	2.25	0.98	0.14		0.07	0.07	8.98
2.75	4.49	25.75	26.60	6.46	1.68	0.07	0.14	0.49	65.68
3.75	4.63	57.40	94.87	36.14	6.95	1.26	0.35	0.42	202.02
4.75	1.61	47.22	124.07	57.60	13.19	3.09	0.35	0.84	247.97
5.75	0.70	18.10	82.18	48.42	11.22	2.74	0.84	0.35	164.55
6.75	0.35	16.00	57.48	45.33	12.35	2.18	0.28	0.07	134.04
7.75	0.42	8.99	29.54	30.95	9.96	0.77	0.14	0.42	81.19
8.75	0.07	6.81	14.55	25.15	10.31	2.04	0.21	0.14	59.22
9.75		3.79	6.18	9.62	6.74	2.53	0.63	0.07	29.56
10.75		0.14	0.35	0.42	0.35	0.28			1.54
11.75		0.07	0.28	0.35	0.27	0.14			1.19
12.75		0.21		0.35	0.63				0.63
13.75				0.28	0.27				0.35
14.75				0.14	0.07		0.07		0.25
15.75					0.07				0.07
Sum over All Heights	13.60	189.32	438.67	262.44	74.71	15.31	3.01	2.94	1000.00

9 Beaufort (for All Nine Weather Ships) (4,014 Obs.)

Wave Height (m)	Wave Period (sec)							Sum over All Periods	
	5	7	9	11	13	15	17		
	0.75			0.25	0.25	0.25			
1.75	0.75	1.49	1.74	0.25					4.23
2.75	1.74	10.21	8.97	3.49	1.25				25.66
3.75	1.74	23.43	39.62	16.94	5.48	0.50			87.71
4.75	0.75	29.91	75.25	41.37	15.20	8.22	0.25		171.70
5.75	1.00	17.95	72.26	44.11	13.70	4.24	0.25		153.51
6.75		19.69	74.75	59.02	23.93	3.49	0.75		182.16
7.75		12.21	48.34	49.84	15.04	4.48	0.75		132.06
8.75	0.25	11.71	33.64	49.05	24.92	10.71	0.50	0.25	131.07
9.75		7.72	18.19	32.65	19.19	8.22	3.24	0.50	89.71
10.75			5.50	1.25	2.74	0.50			5.24
11.75			0.25	1.74	1.74	0.75			4.73
12.75		0.75	0.25	1.99	2.99	0.75			2.99
13.75				0.50	0.25		0.25		1.00
14.									

るような航海状態に遭遇する長期の確率  $Q_{1/10}$  を求めた結果を船速の関数として表わしている。波に対する針路が常に一定であると仮定した場合の結果は (7) によつて求められ、すべての針路を考慮した場合は長期の針路の確率密度が  $0 \sim 2\pi$  の範囲に一樣に分布していると仮定して (9) によつて求められたものである。

Fig. 11 と同様の結果が、船長の異なる多数の船について、また各季節について求められる。これらの結果より、四季別の “Wet-Deck Navigation” の長期の確率  $Q_{1/10}$  を船長の関数として表わした Fig. 12 が得られる。さらに、各季節の  $Q_{1/10}$  の平均をとつて年間の “Wet-Deck Navigation” の長期の確率を示す Fig. 13 が得られる。これらの図には、正面迎波状態の場合とすべての針路を考慮した場合の結果を示している。

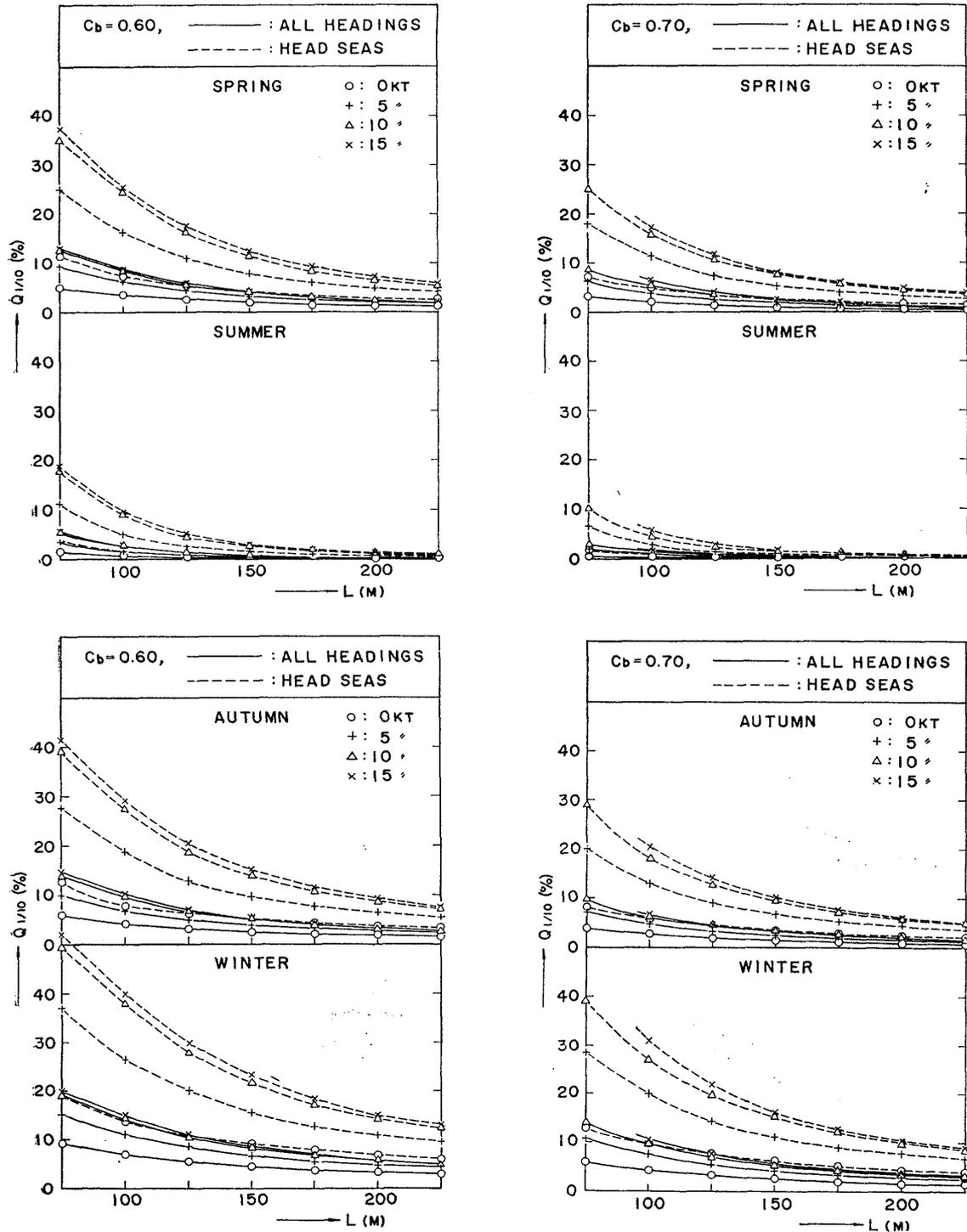


Fig. 12 Long Term Probabilities of “Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )” on the North Atlantic in Different Seasons as Functions of Ship Length

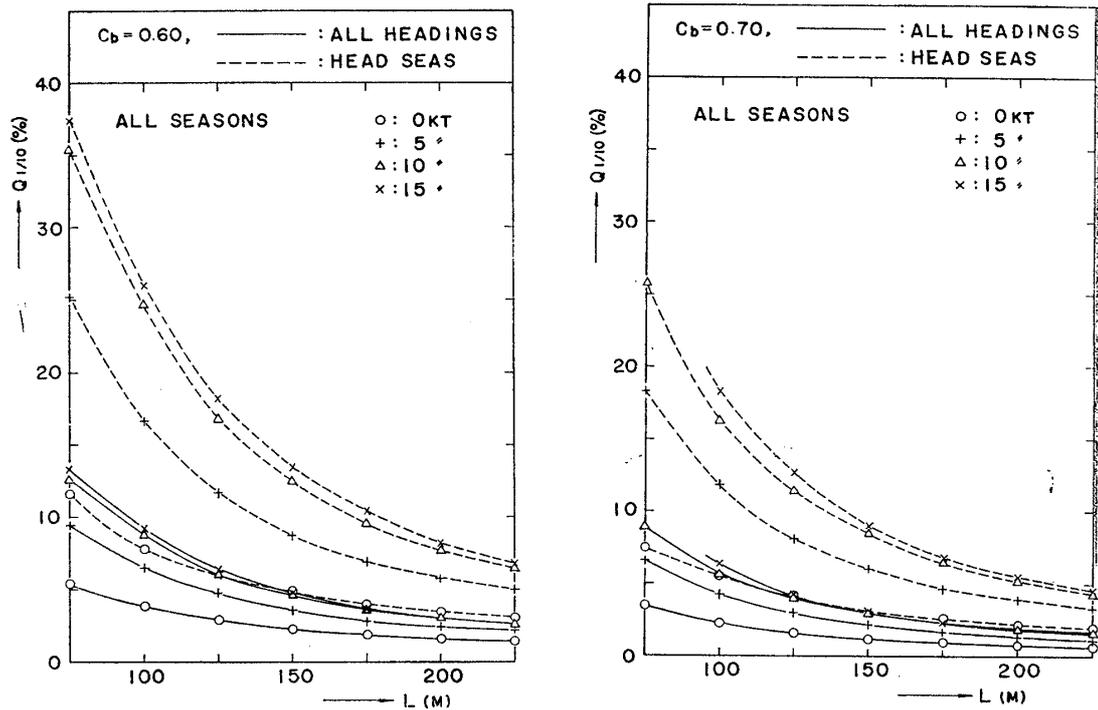


Fig.13 Long Term Probabilities of "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" on the North Atlantic during All Seasons as Functions of Ship Length

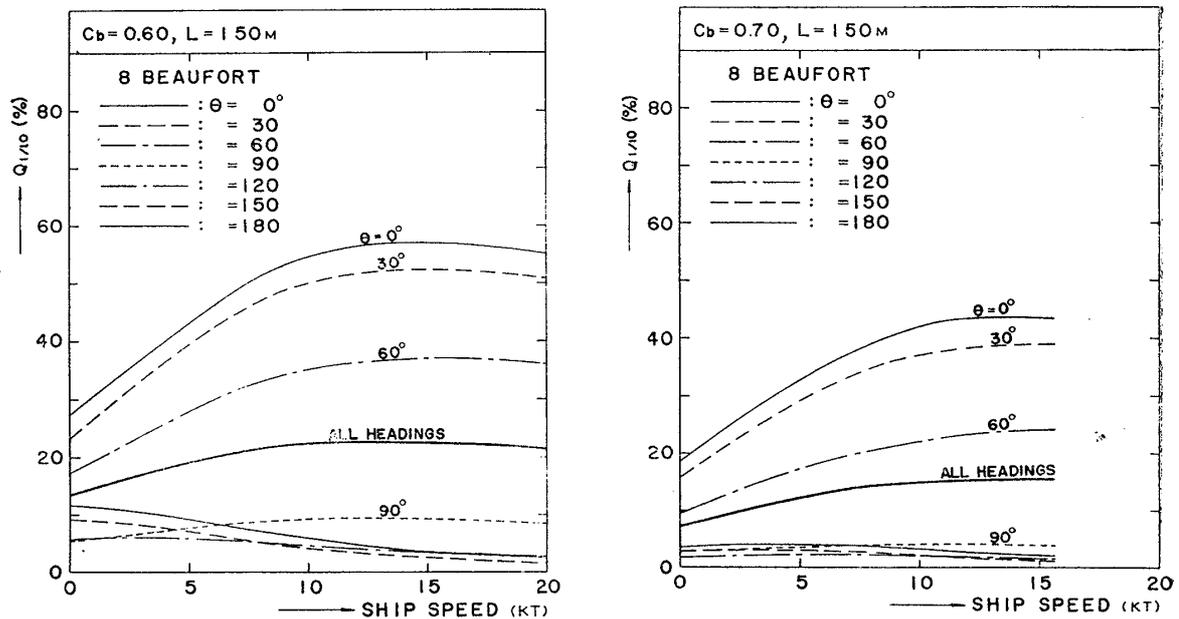


Fig.14 Long Term Probabilities of "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" on the North Atlantic for Beaufort No.8 as Functions of Ship Speed

つぎに、長さ 150 米の船が北大西洋において風力階級 Beaufort 8 の海面を航海する場合に短期の Deck Wetness の確率が 1/10 を越えるような航海状態に遭遇する長期の確率  $Q_{1/10}$  を求めた結果を船速の関数として表わしたのが Fig.14 である。計算方法は Fig.11 の場合と同様である。

船長の異なる多数の船について、また各風力階級について、Fig.14 と同様の結果が得られる。これらの結果より、各風力階級ごとに "Wet-Deck Navigation" の長期の確率  $Q_{1/10}$  を船長の関数として表わす Fig.15 が得られる。図には Beaufort No.4, 6, 8 および 10 の場合の例を示す。また、Fig.16 は長さ 100, 150 および 200 米の船について "Wet-Deck Navigation" の長期の確率  $Q_{1/10}$  を風力の関数として表わしている。これ

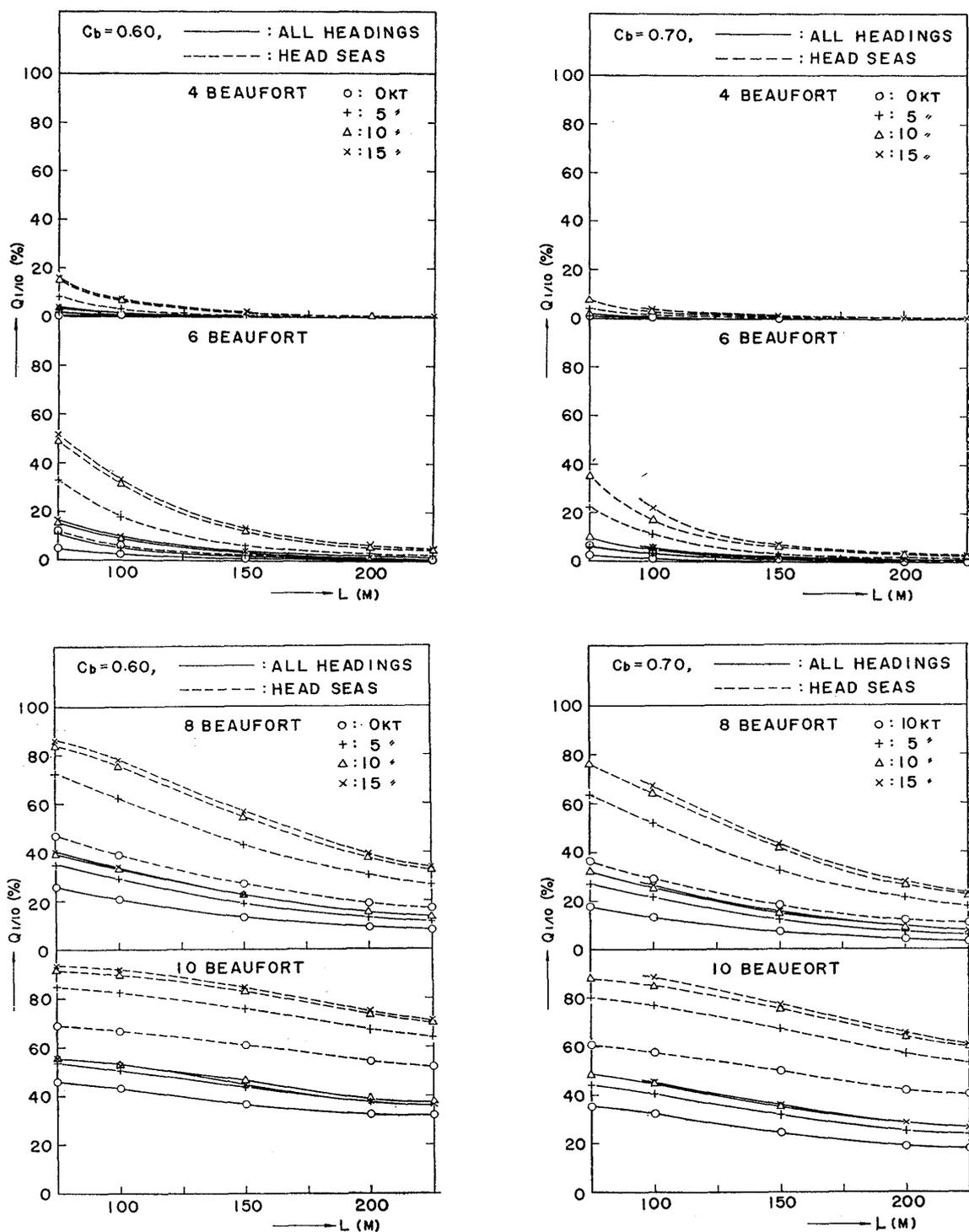


Fig. 15 Long Term Probabilities of "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" on the North Atlantic for Different Beaufort Numbers as Functions of Ship Length

らの図には、正面迎波状態の場合とすべての針路を考慮した場合の結果を示している。

以上のような北大西洋における "Wet-Deck Navigation" の長期確率予測結果より、次のような一般的傾向が見出される。

"Wet-Deck Navigation" の長期確率は正面迎波状態で最も大きく、斜め迎波状態ではやや小さくなり、横波状態より追波状態では正面迎波状態に比較して非常に小さい (Fig. 11, 14)。

"Wet-Deck Navigation" の長期確率は一般に高速の場合に大きく、船速を低下させることによりある程

度 Deck Wetness を軽減させることができる。しかし、船速 10kt 程度以上の範囲では Deck Wetness に対する船速の影響は比較的小さい (Fig.11~16)。

“Wet-Deck Navigation” の長期確率は、大型船の場合には小型船の場合に比較してはるかに小さい。

“Wet-Deck Navigation” の長期確率は肥えた船型の場合には瘠せた船型の場合よりもかなり小さい。

Deck Wetness に関する限り、1966 年条約の船首乾舷の規定は、小型船に対して過小値を与えている傾

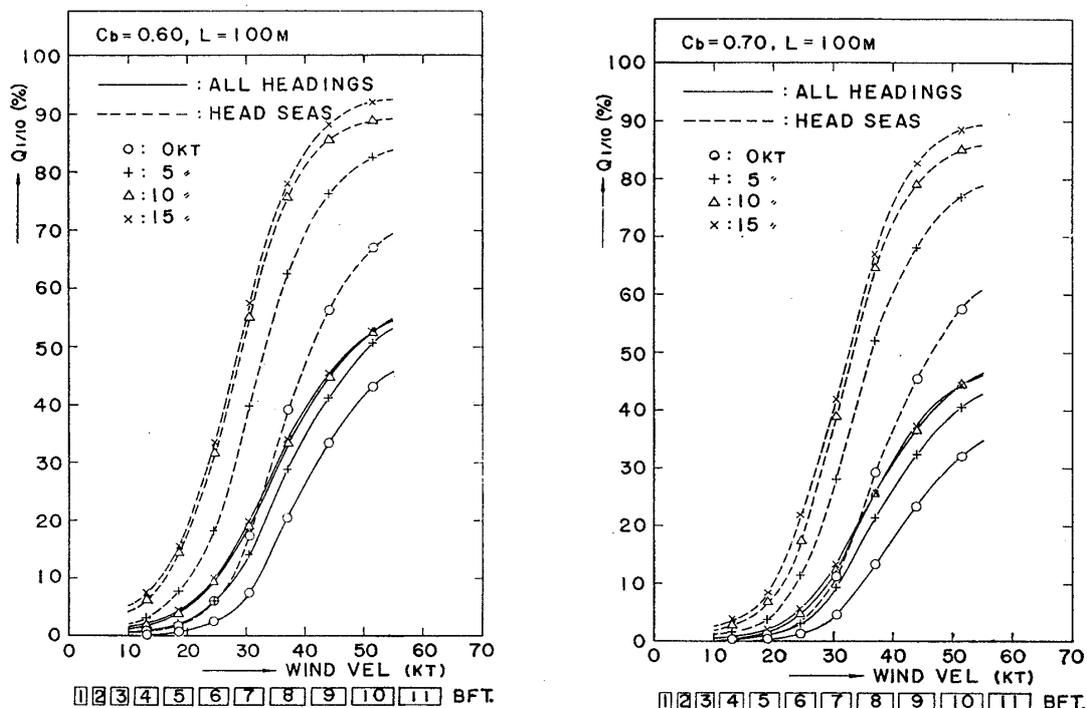


Fig.16 a Long Term Probabilities of “Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )” on the North Atlantic as Functions of Wind Force ( $L=100m$ )

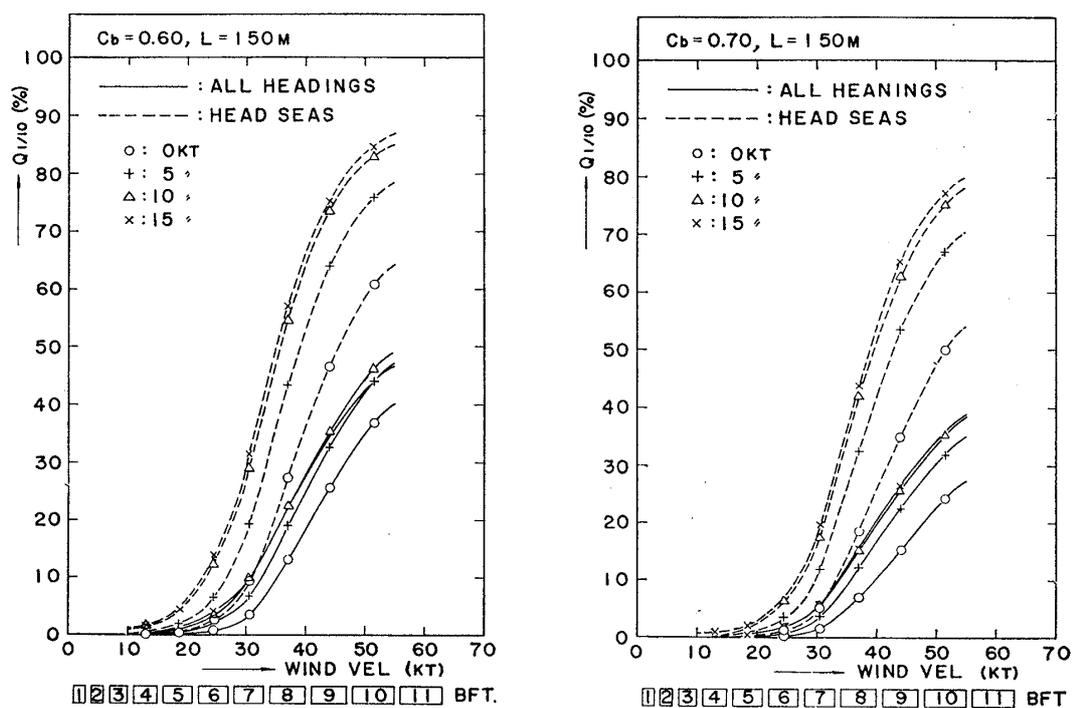


Fig.16 b Long Term Probabilities of “Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )” on the North Atlantic as Functions of Wind Force ( $L=150m$ )

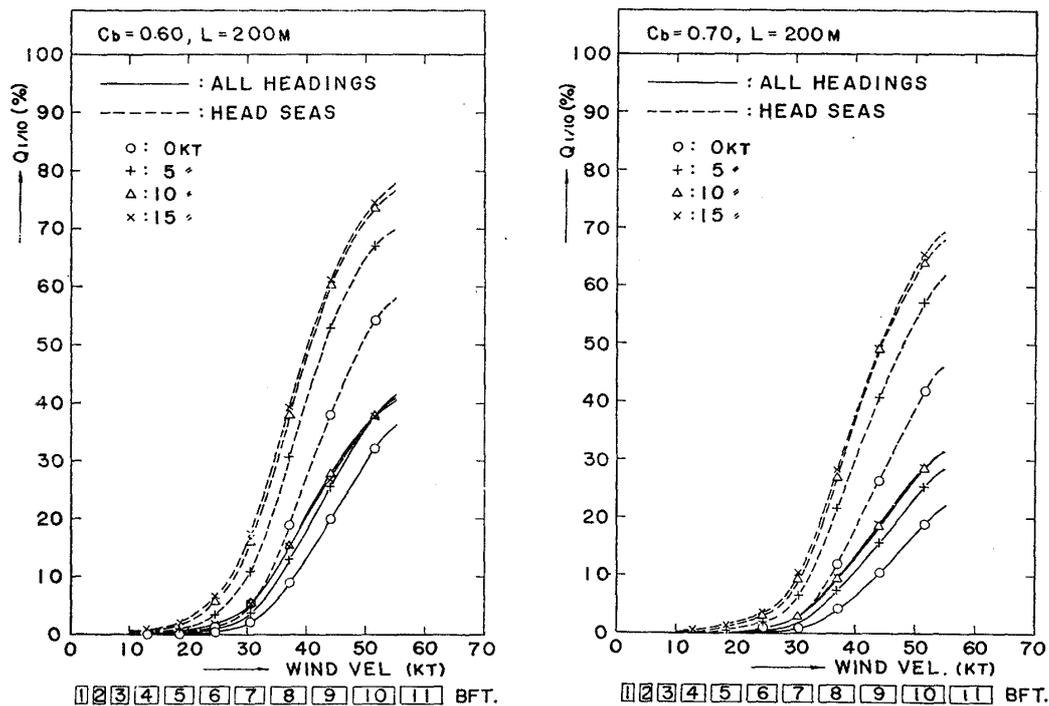


Fig. 16 c Long Term Probabilities of "Wet-Deck Navigation ( $q > 1/10$ )" on the North Atlantic as Functions of Wind Force ( $L=200\text{m}$ )

向があり、また瘠せた船型に対しても過小値を与えている傾向がある。

北大西洋においては、“Wet-Deck Navigation”の長期確率は冬季に最も大きく、秋季、春季の順に小さくなり、夏季は最も小さい (Fig. 12)。

北大西洋においては、“Wet-Deck Navigation”の長期確率は風力の増大とともに急激に大きくなる。しかし、著るしく風力の大きい場合にはその増加の割合は小さくなる (Fig. 16)。

以上に述べた一般的傾向は、“Wet-Deck Navigation”の一応の基準として短期波浪海面における Deck Wetness の確率が  $1/10$  を越えるような航海状態を想定して、北大西洋における “Wet-Deck Navigation” の長期確率を推定した結果から得られたものである。“Wet-Deck Navigation”の基準として短期波浪海面における Deck Wetness の確率を  $1/10$  よりも大きい値あるいは小さい値をとって “Wet-Deck Navigation” の長期確率を予測することもできるし、また、北大西洋以外の海域における “Wet-Deck Navigation” の長期確率を予測することもできる。しかし、Deck Wetness に関する一般的傾向としては、ここで得られた結論によつて大過ないものと考えてよからう。

## 5 結 言

波浪海面における船首甲板の Wetness に関する短期および長期の統計的予測法を提案し、一般貨物船船型を例として、北大西洋における “Wet-Deck Navigation” の長期確率を四季別、年間および風力階級別に推定した。予測結果より、Deck Wetness に関する一般的傾向として次のような結論を得た。

(a) Deck Wetness の確率は正面迎波状態において最も大きく、横波状態より追波状態の範囲では正面迎波状態に比べてはるかに小さい。

(b) Deck Wetness の確率は高速の場合に大きく、船速を低下させることによつてある程度 Deck Wetness を軽減することはできるが、船速 10kt 程度以上の範囲では船速の影響は比較的小さい。

(c) Deck Wetness に関しては、大型船は小型船よりもはるかに有利である。

(d) Deck Wetness に関しては、肥えた船型は瘠せた船型よりも有利である。

(e) 北大西洋においては、Deck Wetness の確率は冬期に最も大きく、夏期に最も小さい。

(f) 北大西洋においては、Deck Wetness の確率は風力の増大とともに急激に大きくなるが、著るしく風

力の大きい場合にはその増加の割合は小さくなる。

ここに提案した Deck Wetness に関する短期および長期の予測法は全く理論計算のみに基づくもので、得られた結果の定性的傾向は首肯し得るものと思われるが、その定量的信頼性は、船首の波面に対する相対運動の理論解の定量的信頼性と海洋の波浪に関する長期資料の信頼性に大きく依存している。得られた結果の定量的信頼性を確かめるためには、波浪中の模型実験、実船試験等の結果と比較検討する必要がある、この種の研究の活発な推進が望まれる。このように、本論文で得られた結果は、その定量的信頼性に問題が残るにしても、波浪中の船の Deck Wetness に関する一般的傾向を判断するための有力な資料を与えるものといえることができる。

終りに臨み、本研究の遂行に協力した九州大学工学部造船学教室職員秦一郎助手および堤繁美技術員に謝意を表す。また、本研究は文部省科学研究費の補助を受けて行なわれたことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) E. V. Lewis : "Ship Speeds in Irregular Seas" TSNAME, Vol.63 (1955)
- 2) J. L. Tick : "Certain Probabilities Associated with Bow Submergence and Ship Slamming in Irregular Seas" JSR, Vol.2, No.1 (1958)
- 3) 田崎 亮 : "向い波中における甲板上への海水打込みについて" 造船協会論文集第107号 (1960)
- 4) O. Krappinger : "Freibord und Freibordvorschrift" Jahrbuch der Schiffbau Technischer Gesellschaft (1964)
- 5) M. K. Ochi : "Extreme Behavior of a Ship in Rough Seas" TSNAME, Vol.72 (1964)
- 6) G. J. Goodrich : "The Influence of Freeboard on Wetness" NPL Ship Rep.60 (1964)
- 7) 福田淳一, 柴田 実 : "荒海中の船体運動に関連した二, 三の問題とこれらに及ぼす船長の影響" 西部造船会会報第30号 (1965)
- 8) R. N. Newton : "Wetness Related to Freeboard and Flare" TRINA, Vol.102 (1960)
- 9) N. Nordenström : "Calculations of Wave-Induced Motions and Loads. Progress Report No.5. Ship Motions Relative to the Waves" DNV Report No.66-5-S (1966)
- 10) M. St. Denis and W. J. Pierson, Jr. : "On the Motions of Ships in Confused Seas" TSNAME, Vol.61 (1953)
- 11) "Report of the Committee on Environmental Conditions" Proceedings of 2nd ISSC, Delft (1964)
- 12) 福田淳一 : "電子計算機による規則波中の波浪曲げモーメント応答関数の計算" 西部造船会会報第32号 (1966)
- 13) J. Fukuda : "Computer Program Results for Ship Behaviour in Regular Oblique Waves" Proceedings of 11th ITTC, Tokyo (1966)
- 14) S. O. Rice : "Mathematical Analysis of Random Noise" The Bell System Technical Journal, Vol.24 (1945)
- 15) F. H. Todd : "Some Further Experiments on Single Screw Merchant Ship Forms - Series 60" TSNAME, Vol.61 (1953)
- 16) H. Walden : "Die Eigenschaften der Meerswellen im Nordatlantischen Ozean" Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzelveröffentlichungen Nr. 41, Hamburg (1964)
- 17) N. Nordenström and B. Pedersen : "Calculations of Wave Induced Motions and Loads. Progress Report No.6. Comparisons with Results from Model Experiments and Full Scale Measurements" DNV Report No.68-12-S (1968)
- 18) W. P. A. Joosen, R. Wahab and J. J. Woortman : "Vertical Motions and Bending Moments in Regular Waves. A Comparison between Calculation and Experiment" ISP, Vol.15, No.161 (1968)