

(昭和 49 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

海洋波に対する応答の長期分布の理論的推定 における想定海象について

正員 真 能 創*

The Severity of Supposed Wave Conditions in Estimating Extreme
Values of Wave Induced Response Variables of a Ship

by Hajimu Mano, *Member*

Summary

In the case when the long-term distribution of wave induced variable of a ship is estimated theoretically, it becomes usual to suppose wave condition on the North Atlantic Ocean. It is the reason why the condition is chosen, that accurate wave statistics on the sea zone are prepared and the sea zone is regarded as one of the severest main trade routes, so supposing the condition means estimating the distribution at a safety side. Though it is known that the long-term distribution changes according to supposed wave condition, analytical study on the problem that by what factor of supposed wave statistics the severity of supposition is evaluated has never been made.

From investigation of character of the extreme value of the response variable, author finds that severity of supposed wave statistics is evaluated by such factors as the maximum wave height in each wave period interval. Thus the severity of a given wave condition is shown by drawing a curve which shows change of the maximum wave height along the abscissa of wave period. Comparing a given condition with another one, the condition is regarded severer than another one for smaller ships but moderate for larger ships when the maximum wave height is higher than that of another condition in shorter wave period range and it become lower than that of another condition in longer range. By drawing the curve from the wave statistics by Walden, the curve from those by Roll, and the curve from those by Hogben and Lumb, it is clarified that the estimated extreme value changes largely by supposed wave statistics in some case. Being so high the maximum wave height in the wave period interval from 5 sec. to 7 sec. of the wave statistics by Walden, the effective wave height curve corresponding the extreme value of wave bending moments of similar ships of various length has a hump and hollow when the wave statistics are supposed in estimation.

The height of the maximum wave height is determined by result of only several observations. So the height of each wave statistics is not accurate. By assuming the frequency distribution of wave heights in each wave period interval is described by the Weibull distribution, author corrects the maximum wave height in each wave period interval of wave statistics including those by Walden, those by Hogben and Lumb, those on the sea zone 3, and those observed on board of a Japanese patrol ship is corrected. And the severity of the corrected wave condition on the North Atlantic Ocean are compared with that of the one on the North Pacific Ocean. From the comparison, it is found that the wave condition on the North Pacific Ocean has at least the same severity

* 防衛大学校

as that on the North Atlantic Ocean, when wave period is less than 10 sec. And when the period is over 10 sec, it becomes slightly moderate in comparison with that on the North Atlantic Ocean.

1 緒 言

波浪荷重のような海洋波に対する船の応答の長期分布を理論的に推定する場合は、北大西洋の海象を想定することが多い。これは同海域の海象については Walden 等の波浪観測資料^{1)~3)}が整っているのも理由の1つであるが、同海域は主要航路では最も荒いものの1つであり、同海域における海象観測船の波浪観測値を想定すれば、十分安全側にあるとの認識も基になっている。一般に応答の長期分布は想定海象によって相当大幅に変化するが、想定海象の苛酷さというものが、そのどのような要素によって決まるものであるかということについて、解析的に研究された資料は少ない。

筆者は応答の長期分布における最大値は、それを構成する短期分布の中で、応答の分散が最大になる短期分布の発現確率とその分散の最大値が与えられれば、精度よく求められることに着目し^{4),5)}、想定海象の苛酷さはその各波周期別の最高波高とその発現頻度の変化によって判断できることを明らかにした。また、これから想定海象の苛酷さは船の大きさによって異なる場合があること、波浪曲げモーメントの最大値において、船の応答特性であると見られているものが実は想定海象の特色が現われたにすぎぬものがあることを明らかにした。

応答の長期分布における想定海象の適用方法について検討を加え、観測結果の統計をそのまま使用するのでは精度がよくないことが明らかになったので、これを改良する方法を研究し、波高頻度を理論的に修正した結果を使用する方法を見出した。

この方法によって修正された北大西洋と北太平洋の海象を基に、その苛酷度について比較し、北太平洋は波周期が短い波では北大西洋にまさるとも劣らない苛酷さを有していることを明らかにした。このことを波浪曲げモーメントについて考えると、長さ 300m 程度までの船の想定条件についてのいままでの観念を変えなければならぬことを意味する。

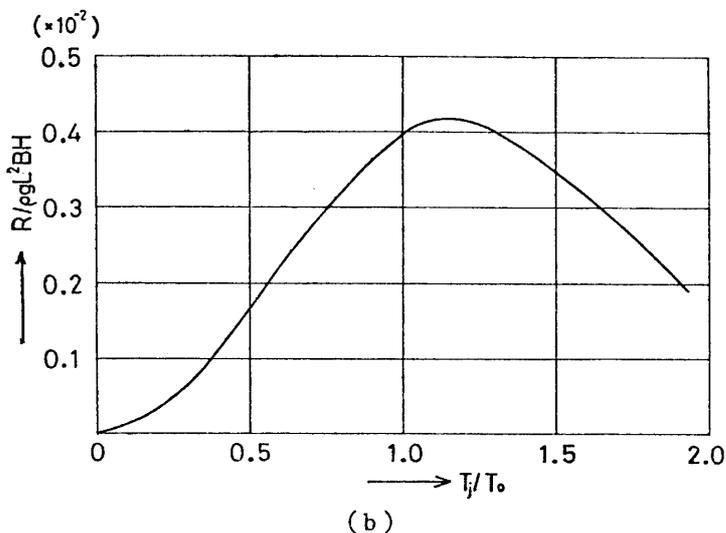
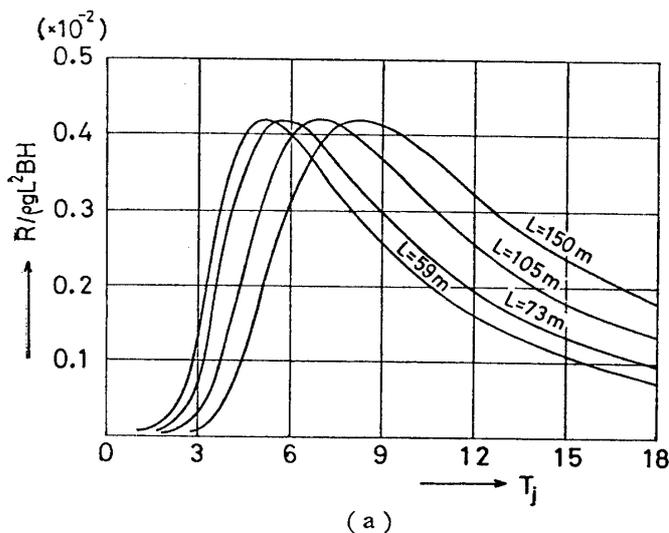


図 1 Standard deviation (R) of wave induced variable of similar ships

2 想定遭遇海象の苛酷度 (荒さ)

以下においては、遭遇海象は波高と波周期で表わされた各海面状態の発現頻度で与えられるものとする。また、波周期が一定のときの波浪に対する船の応答の標準偏差は波高に比例して増加するものとする。さらに船は一定の速力で常に向い波で航海すると仮定する。

これらの仮定は、説明を簡単にするために設けるもので、以下述べることはこれらの仮定に限定されるものでないことは、その都度詳述する。

2.1 波浪に対する応答の長期分布における最大値

応答の長期分布がそれぞれが Rayleigh

表 1 Extreme wave conditions in various wave statistics

Wave Statistics	North Atlantic (Walden)		North Atlantic (Roll)	
Wave Period $T_j(\text{sec})$	Wave Height $H_m(\text{m})$	Probability $p_{mj}(\times 10^{-5})$	Wave Height $H_m(\text{m})$	Probability $p_{mj}(\times 10^{-4})$
0~5	9.75~10.75	1	5.75~6.25	1
5~7	14.75~15.75	2	9.25~9.75	2
7~9	10.75~11.75	3	10.75~11.25	1
9~11	14.75~15.75	1	11.75~12.25	1
11~13	14.75~15.75	2	13.75~14.25	1
13~15	14.75~15.75	2	14.75~15.25	1
15~17	14.75~15.75	1	10.25~10.75	1
17~	14.75~15.75	1	8.25~8.75	1
Wave Statistics	North Atlantic (Hogben, Lumb)		North Pacific (Observed on Ship C)	
Wave Period $T_j(\text{sec})$	Wave Height $H_m(\text{m})$	Probability $p_{mj}(\times 10^{-5})$	Wave Height $H_m(\text{m})$	Probability $p_{mj}(\times 10^{-4})$
0~5	9.5	6	6~9	2
5~7	9.5	24	9~14	2
7~9	9.5	78	9~14	5
9~11	15	3	14~	1
11~13	15	3	14~	1
13~15	9.5	69	9~14	4
15~17	9.5	36	} 9~14 }	} 3
17~	11	3		

分布で表わされる多数の短期分布で構成されている場合は、その全数を 10^N とし、超過確率が 10^{-N} である応答値を最大値とすると、 N が 8 程度になると最大値はそれらの短期分布のうちで、その分散が最大となる最悪短期分布の発現頻度とその分散の最大値 R_m^2 のみの関数とみなせる。

波周期 $T_j(j=1, 2, \dots, n)$ 、波高 $H_i(i=1, 2, \dots, m)$ の任意の海面状態における応答の標準偏差 R_{ijk} は次式で与えられる。

$$R_{ijk} = \bar{R}(jk) H_i \quad (1)$$

上式中の $\bar{R}(jk)$ は波周期だけの関数であるから、波周期が等しい海面状態の中では波高が最大値 H_m になる海面の R_{ijk} が最大となる。想定海象の波周期は n 個の階級に区分されているとすると、各波周期階級で波高が最大となる n 個の海面状態の中の 1 個において R_{ijk} は最大となる。以下においてはこの R_{ijk} が最大となる海面状態を最悪海面状態とよぶ。

$\bar{R}(jk)$ は波周期のみの関数であって、普通は図 1 に示すように、船の長さ等で決まるある波周期 T_{max} において最大値をとるから、普通は上記の n 個の海面状態の中で波周期が T_{max} の海面状態が最悪海面状態となる(後述のように例外的に T_{max} 以外のものになることもある)。

例えば遭遇海象を北大西洋の Walden の波浪観測値とすると、最悪海面状態は表 1 の各 8 個の海面状態の中のどれかであり、図 1(a) の $L=73\text{m}$ の船の応答では $T_j=5\sim 7\text{ sec}$ 、 $H_m=14.75\sim 15.75\text{m}$ の海面状態がこれに相当する。

以上は一定速力で向い波で運航される場合について述べたが、船速、出会い角、排水量等の航行条件が $k(k=1, 2, \dots, l)$ が l 通りあるとすると、それぞれについて l 個の R_{ijk} の最大値が見出され、その中の最大値が R_m になるが、それは表 1 のどれかの海面において見出されることは変わらない。

また、応答が波高に比例しない場合でも、 R_{ijk} は波高とともに増大するなら、波周期が等しい海面の中では波高が最大の海面で R_{ijk} が最大となることは同じであり、表 1 のどれかの海面が最悪海面状態になることは変わらない。

2.2 想定遭遇海象の苛酷度の H_{me} 曲線による表示

2.2.1 遭遇海象の苛酷度

応答の最大値が R_m の値とその発現確率のみの関数とみなせるということを、遭遇海象の面で見ると、その苛酷度（荒さ）は最悪海面状態の波高 H_m とその海面の発現確率 p_{mj} によって支配されることになる。図1(a)の $L=73\text{m}$ の船の応答を例にとると、波周期が $5\sim 7\text{sec}$ の波の H_m が $14.75\sim 15.75\text{m}$ より高いか、 H_m は等しくても p_{mj} が 2×10^{-5} より大きい海象があれば、その海象の方が北大西洋 (Walden) より荒いことになる。

後述のように、任意の海象 I, II を比較したとき、 T_j が小さい範囲では I の H_m が高く (p_{mj} は一定と仮定する)、大となると II の H_m の方が高いということも起こりうる。 T_{max} は主として船の長さによって変化し、同一の応答であれば船の長さとともに T_{max} も大となる。したがって、この場合は小型船にとっては I の方が苛酷であり、大型船にとっては II の方が苛酷ということになる。

ともすれば直観的に長期分布では発現頻度の高い海面状態、あるいは平均波高というような要素が重要な意義を持つと誤解されやすいが、応答の最大値に関する限り海の荒さは H_m と p_{mj} に支配されるものであって、 H_m より低い波高の発現頻度に関する要素は重要な意義を持たない。

2.2.2 等価最高波高曲線 (H_{me} 曲線)

与えられた想定海象の各波周期における H_m を、図2に示すように波周期を横軸にとり図示すると、その海象の荒さを表わせる。ただし、 H_m をそのまま示したのでは、 H_m は等しくても各海面の p_{mj} が異なる場合も存在する。応答の最大値 X_m は H_m だけでなく p_{mj} によっても変化するから、海象の荒さを正確に表現できない。

応答の長期分布において、超過確率が 10^{-N} である最大値は次式で近似できる⁴⁾。

$$X_m = 1.073 N f_2(p) \bar{R}(jk) H_m \quad (2)$$

ここに、 $f_2(p) = \{-\log p_{mj} - \log p_{m0}\}^{-1/2}$

$$\bar{R}(jk) H_m = R_m$$

上式中の p_{m0} は最悪海面状態で分散が最大となる航海条件の発現確率で、遭遇海象の比較をするときには定数として取扱われるべきものである。

上式において、最悪海面状態の発現確率が p_{mjs} に変更されても、 H_m が次式で計算される等価最高波高 H_{me} に修正されれば、 X_m の値は変わらない。

$$H_{me} = H_m \left\{ \frac{(-\log p_{mjs} - \log p_{m0})}{(-\log p_{mj} - \log p_{m0})} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

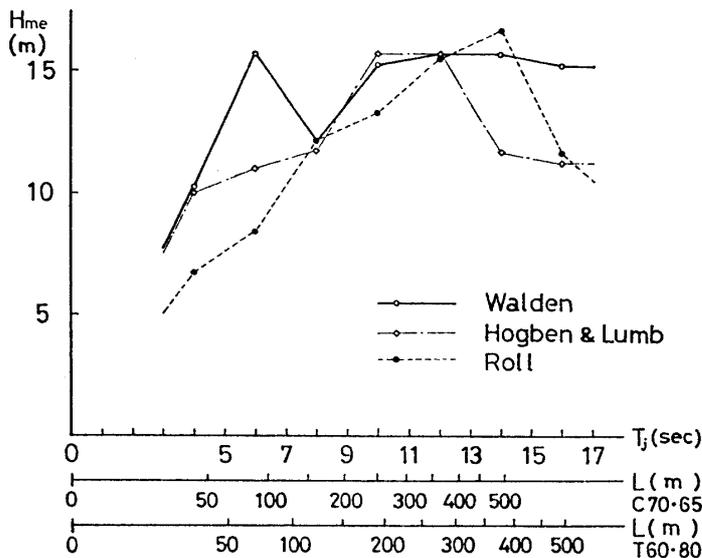


図2 Effective max wave height (H_{me}) in each wave period interval from original wave statistics (H_{me} curve)

同様に、任意の海象 I におけるある応答に対する最悪海面状態の波高を H_{mI} 、発現確率を p_{mI} とし、他の海象 II におけるそれらをそれぞれ H_{mII} 、 p_{mII} とすると、両海象における最大値の比 X_{mII}/X_{mI} は次のようになる。

$$\frac{X_{mII}}{X_{mI}} = \frac{H_{meII}}{H_{meI}} \quad (4)$$

ここに、

$$H_{meII} = H_{mII} \left\{ \frac{-\log p_{mII} - \log p_{m0}}{-\log p_{mI} - \log p_{m0}} \right\}^{1/2}$$

以上から、ある標準になる p_{mj} の値 p_{mjs} を定め、与えられた海象における H_m を、(3) を使用してその標準値に対応する H_{me} に修正して示すと、正確に海象の荒さを図示できる。Walden の波浪観測値では、 p_{mj} の最低単位は 1×10^{-5} となっているので、 p_{mjs}

をこの値とすると、 H_{me} は次のようになる。

$$H_{me} = H_m \left\{ \frac{(5 - \log p_{m0})}{(-\log p_{mj} - \log p_{m0})} \right\}^{1/2} \quad (3')$$

図2は p_{mjs} が 1×10^{-5} のときの H_{me} を示したもので、この曲線を以後等価最高波高曲線 (H_{me} 曲線) とよぶ。 H_{me} の値は p_{m0} の値によって多少変化する。図は航海条件として波に対する出会い角だけを考え、向い波だけで航行するときは p_{m0} は1、各出会い角を等しい確率で走るときは $1/6 \sim 1/12$ (出会い角を 30° 間隔の12方位に区分した場合) となるから、これらの値を (3)' に代入し、上下限値の平均値を H_{me} として図示した。

図から Walden の海象では T_j が6 sec (今後 T_j, H_m は各波周期階級、波高階級の中位値を以て示す) のときの H_{me} が異常に高く、それに比べると8 sec のそれは異常に低い。Roll, Hogben-Lumb の海象では H_{me} は T_j とともに滑らかに増加している。 T_j が8~12 sec では3者は大体一致し、 T_j がそれ以上になると Walden の H_{me} はほぼ一定値を保つが、他は徐々に低下している。

図の H_{me} はそれぞれの海象で求められる X_m の値に比例するから、 T_{max} が5 sec 以下の船では海象に Walden の代りに Roll を選べば約25%、 T_{max} が6 sec のときは実に50% 近く小さな値となる。同じ北大西洋の海象でこのような差がつくのは不合理と言わざるを得ない。他の海象との比較、前後の大きさの船との釣合という点で考えて、Walden の $T_j=6$ sec の H_{me} は不当に高いと考えられ、修正の必要がある。

2.2.3 相似船の波浪曲げモーメントに対する有効波高

不規則波中の波浪曲げモーメントの分散は次式で与えられる。

$$R_{ijk}^2 = \int_0^\infty [A(\omega)]^2 [f(\omega)]^2 d\omega \quad (5)$$

ここに、 $A(\omega)$ = 応答関数

$[f(\omega)]^2$ = 不規則波のパワースペクトル

ω = 成分波の円周波数

一定の航行条件における相似船の波浪曲げモーメントの応答関数 (無次元値) は波長と船長 (L) の比のみの関数となる。

$$A(\omega) = A(\omega/\omega_0) \equiv A(\bar{\omega}) \quad (6)$$

ここに、 $\omega_0 = 2\pi/T_0 = (2\pi g/L)^{1/2}$ (波長が L に等しい波の円周波数)

波のスペクトルを ISSC スペクトルとすると、波高 H_i 、波周期 T_j の海面の $[f(\omega)]^2$ は次式で与えられる。

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H_i^2 \omega^{-1} (\omega/\omega_j)^{-5} \exp[-0.44(\omega/\omega_j)^{-4}] \quad (7)$$

ここに、 $\omega_j = 2\pi/T_j$

(6), (7) を (5) に代入し、変数を $\bar{\omega}$ に変換すると、

$$\left. \begin{aligned} R_{ijk}^2 &= 0.11 H_i^2 \int_0^\infty [A(\bar{\omega})]^2 \bar{\omega}^{-6} (\omega_0/\omega_j)^{-5} \exp[-0.44\{(\omega_0/\omega_j)\bar{\omega}\}^{-4}] d\bar{\omega} \\ \bar{R}(jk) &= R_{ijk}/H_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

不規則波の見掛の波長と船長の比 (上式では ω_0/ω_j あるいは T_j/T_0 (T_0 は波長が船長に等しい波の波周期) で表わされている) が一定のときの R_{ijk} および $\bar{R}(jk)$ (無次元値) は一定値となる。したがって、 L が異なる相似船の $\bar{R}(jk)$ は T_j を横軸にとって示すと図1(a) のような曲線群になるが、 T_j/T_0 を横軸にとると1本の曲線になる (図1(b) 参照)。また、相似船では $\bar{R}(jk)$ が極大値をとるときの波長と船長の比 $T_j/T_0 (= T_{max}/T_0)$ およびその極大値は一定値となる。

$$T_{max}/T_0 \equiv \eta_{max} = \text{const.} \quad (9)$$

以上は長波頂不規則波中を向い波で航走するときを対象としたが、長波頂不規則波中または短波頂不規則波中を任意の出会い角で航行する場合でも全く同じである⁶⁾。

T_0 と L の関係は (6) より求められるから、これと (9) から L と T_{max} の関係が求められる。

$$T_{max} = \eta_{max} \left(\frac{2\pi}{g} L \right)^{1/2} \quad (10)$$

最悪海面状態の波周期 T_{max} は L に応じて変化するから、 L が種々の値をとる相似船の R_m および X_m は、それぞれの L に対応する波周期 T_{max} の波の想定海象における H_{me} の変化に比例して増減する。

具体例で示すと、日本造船研究協会、第90研究部会の報告⁷⁾によると、 η_{max} (長波頂不規則波, 向い波) は貨物船 C 70.65 ($L/B=7$, $C_b=0.65$) では 0.785, タンカー T 60.80 ($L/B=6$, $C_b=0.80$) では 0.900 であるから、この値を(10)に代入してそれぞれの L に対応する T_{max} を求め、図2に示すように横軸を L に変えれば、それぞれの船型について L の変化に対応する H_{me} の変化が示される。同時に図から想定海象の差が L によってどのように変化するかも知ることができる。

既に述べたことと重複するが、Walden の海象では C 70.65 の L が 100m の場合に T_{max} が 6 sec となり、 L が 160m の船に比べ波浪曲げモーメントは不釣合に大となる。

η_{max} は船型、航海条件によって変化するため、船型がちがえば横軸を変えねばならない。上記の Walden の海象の山と谷は T 60.80 では山は 70m, 谷は 125m に変化する。

波浪曲げモーメントの最大値 (あるいは統計値) を、それに等しい静的波浪曲げモーメントが加わる波長が L に等しい波の波高 (有効波高) H_e で表わすことは従来よく行われた。波長 L , 波高 H_e の波による静的波浪曲げモーメント M は次式で近似できる⁸⁾。

$$M = 2.5 \rho g L^2 B (0.015 C_b - 0.004) H_e \quad (11)$$

長波頂不規則波中を向い波で航行する場合の $N=7$ のときの最大値 M_m を対象とすると、

$$M_m = 1.073 \times 7 \times (5)^{-1/2} \rho g L^2 B \bar{R}(jk) H_{me} \quad (2)'$$

H_e は有効波高であるから M と M_m は等しいということから、 H_e と H_{me} の関係が求められる。(2)' に C 70.65 および T 60.80 の C_b および $\bar{R}(jk)$ の極大値を代入すると、

$$\left. \begin{aligned} H_e &= 0.643 H_{me} \quad (\text{C 70.65}) \\ H_e &= 0.623 H_{me} \quad (\text{T 60.80}) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

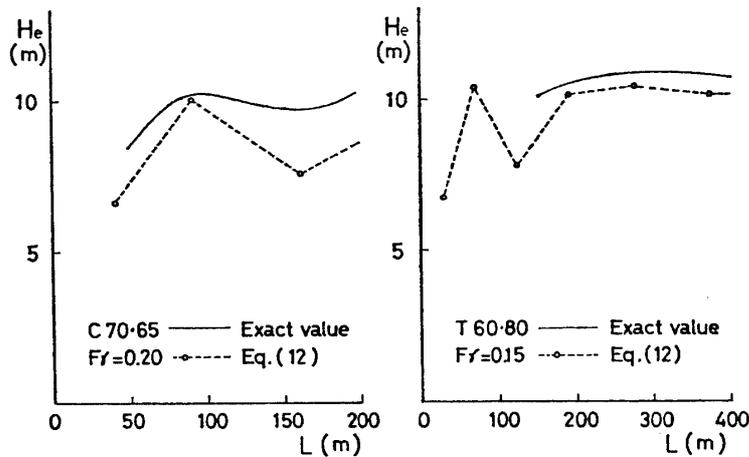


図3 Hump and hollow of effective wave height corresponding to the extreme value of wave bending moment (statistics by Walden are supposed)

これから、図2の H_{me} 曲線は H_e 曲線と同性格のものであることがわかる。図3は Walden の海象を想定したときの(12)より求めた H_e と精密計算値を比較したもので、全体的に低目の値となり、C 70.65 の山と谷が精密計算値では大きくない他はよく一致している。

全般的に低目の値になるのは(11)による近似値の誤差が主な原因である。谷が浅くなるのは、 L が 150m 前後の船では T_{max} は 8 sec であるが、 H_{me} が低いいため $T_j=8$ sec, $H_m=11.25$ m の海面状態が最悪海面状態にならないで、 $T_j=10$ sec, $H_m=15.25$ m の海面状態が最悪海面となるため、 R_m が $T_j=8$ sec の

ときの H_m から求められたものより大となるためである (表1参照)。山がそれ程高くないのは、精密計算値は $L=100$ m の船の値を基にしており、この場合は $T_j=6$ sec では $\bar{R}(jk)$ は極大値よりやや低目の値をとるためと思われる。

図で重要なことは C_b が比較的小さい船では応答の特性から常に $L=100$ m 付近に H_e の山が現われるように誤解してはならないということである。この山と谷は想定海象に Walden の海象を使用したため、その H_{me} 曲線の特徴が表われたにすぎないのであって、肥えた船ではたまたま精密計算の範囲外の L が 70~125 m の部分に同じ現象が現われる。

2.2.4 一般の応答

以上は例を波浪曲げモーメントにとったが、長期分布の構成がこれと同じ応答については、全く同じ結果が得られる。例えば、あらゆる船体動揺を考慮して求められた垂直曲げモーメント、水平曲げモーメント、ねじりモーメントを含めた縦強度に対する波浪荷重を対象としても、この荷重によって生じる船体の任意の点の応力と外

力の関係が線形であれば、その応力の長期分布の特性は前述の波浪曲げモーメントと変わらない。

したがって、この応答の最大値等に与える想定海象の影響も、全く波浪曲げモーメントに対するものと同じになる。この場合は τ_{max} は応答の種類等によって異なるが、Walden の海象を想定すれば、 T_{max} が 6 sec になる船の荷重の最大値は、8 sec の相似船のそれと比べ不釣合に大となる等の同じ結果が得られる。

これは他の応答でも共通であることは言うまでもない。また、航海条件が向い波だけでない場合、短波頂不規則波の場合でも全く同じであることは、容易に説明できる。

2.2.5 他の表現法による想定海象

想定海象としては前述の形の他に、Beaufort 風力階級または波浪階級の長期発現確率で与えるものも多い。この場合は任意の風力または波浪階級における応答の短期分布の標準偏差 R は種々の値をとるが、その分布形が与えられれば R の長期分布は容易に求められ、最悪短期分布の R_m および p_m は決定できる。

Band によると、実船の応力計測結果では一定の風力階級における波浪曲げモーメントの R は正規分布に従い、その平均値は風力階級の増加とともに直線的に増加し、その標準偏差はほぼ一定値とみなせる⁹⁾。この特性は他の応答でも共通であり、また波浪階級の場合にも同様であると推定される。

この場合は正規分布の性質からみて、想定海象の荒さはその中の最高の風力または波浪階級（以後簡単のため風力階級で代表させる）の値とその発現頻度であらわされると推論できる。いま R_m を与えられた想定海象の中で最高の風力階級 w において、超過確率が任意の小さな一定値 q_w になる R の値であると、 w における R_m の発現確率を q_w より小さいある一定の値 p_{mw} であるとする (q_w, p_{mw} は任意に選ぶ)。応答の最大値は (2) より、

$$X_m = 1.073 N f_2(p) R_m \quad (13)$$

ここに、 $f_2(p) = \{-\log p_{mw} - \log p_w\}^{-1/2}$

p_w = 想定海象における w の発現確率

最高の風力階級（風力 12）において超過確率が q_w になる R の値を R_{ex} とすると各階級における R の標準偏差は等しいとみなせるから、

$$R_m - m(w) = R_{ex} - m(12) \quad (14)$$

ここに、 $m(w)$ = 風力階級 w における R の平均値

$m(12)$ = 風力 12 のときの R の平均値

$m(w)$ は w とともに直線的に増加するから次式で与えられる。

$$m(w) = m_0 + kw \quad (15)$$

ここに、 m_0, k = 与えられた船の応答の特性から定められる係数

(15)を(14)に代入すると、

$$R_m = R_{ex} \{1 - k(12 - w) / R_{ex}\} \quad (14)'$$

よって、最大値は次式で与えられる。

$$X_m = 1.073 N f_w(p) R_{ex} \quad (16)$$

ここに、 $f_w(p) = f_2(p) \{1 - k(12 - w) / R_{ex}\}$

R_{ex} は与えられた船の応答の特性と q_w, p_{mw} から定められる一定値であるから、想定海象の苛酷度は $f_w(p)$ の値から判定される。なお、波浪階級で与えられるときは最高の階級が波浪 9 になる他は全く同一となる。

ただし、 $f_w(p)$ では前述の H_{me} 曲線のように、想定海象の船の大きさによる苛酷度の変化までは知ることはできない。

2.3 想定遭遇海象の精度

想定海象の苛酷度が H_{me} 曲線によって表わされるから、応答の最大値の精度は想定海象から得られる H_{me} 曲線の精度に左右される。現在航洋船に対する想定海象として前述の北大西洋の波浪観測値がよく使用される理由としては、同海域が主要航路中最も荒い海域の 1 つであることと、試料数および観測の精度からみて精度が高いとみられることがあげられる。

試料数が大となれば精度はよくなるが、 H_{me} 曲線に関する観測値の数からみると、これらの波浪観測値の精度はよいとは言えない。例えば表 1 に示すように Walden の海象では、 T_j が 11~13 sec の波の H_m は 15.25 m になるが、その p_{mj} と同海象の観測値の総数が約 22 万であることから推定すると、このような波浪

が2~3回観測されたことを意味する。

この観測は海象観測船の乗組員によって実施されたものであり、精度は高いと推定されるが、目視観測値であり、わずか2~3回の観測値の信頼性は高いと言えない。このような見地から Walden の海象をみると、その応答の最大値推定のための想定海象としての精度は、表1の海面状態が観測された20個程度の観測値の精度に左右される（これは他の海象でも同様である）。同海象で T_j が7~9 sec の波の H_m は前述のように低いですが、もし表1の基となる観測値の中で T_j が5~7, または9~11 sec と観測されたものの1個の T_j が7~9 sec であるとすると、 T_j が7~9 sec の波の H_m は15.25mに増加する。目視観測ではこの程度の誤差は十分考えられることであり、このことからこれらの海象を想定して得られる結果の信頼性は十分推測できよう。

これほど多くの観測値を集めても、不安定な結果が得られるということは、応答の最大値が各波周期の波の H_m にのみ影響されるという特性に由来するもので、その点でこれらの海象をそのまま想定海象とする点に問題がある。

日本造船研究協会、第80研究部会（SR80部会）によって発表された北太平洋、日本近海の海象¹⁰、およびISSCにおいてまとめられた各海域の海象¹¹では、最高波高階級が前者は7.75m、後者が8m以上となっており、応答の最大値はこの区分に属する波の発現頻度に左右されるから、この波高区分の波の波高をどのような値で代表させるかで最大値は大幅に変化する。その点でこれらの海象を想定した結果は北大西洋の海象による結果より信頼性が低下する。

結局、これらの海象を想定海象とする場合、現在行われているように、直接これを使用したのでは精度のよい結果は期待できないことになる。

3 修正海象による苛酷度の比較

3.1 波浪観測値の修正

波浪観測値の統計結果をそのまま想定海象として使用すると、 H_{me} 曲線に関係する観測値はその極く一部であり数が少ないため、普通は無視できるような個々の測定値の誤差がそのまま X_m に影響を与える。また、測定が正確であるとしても個々の測定値のパラッキの影響がそのまま X_m に現われることになる。

このような欠点を除くためには、観測の統計結果から波高の従う分布形を見出し、その分布形から理論的に各波高階級の発現頻度を修正した海象を使用すべきである。

この修正はSR80部会およびISSCによる波浪観測値のように、波高階級の上限值が低いものから、合理的な H_m を導くには必要欠くことができない。

Nordenström は任意の波周期階級に属する波の波高の分布は、超過確率 $q(H)$ が次式で与える Weibull 分布に従うとしている¹²。

$$q(H) = \exp[-\{(H-H_0)/(H_c-H_0)\}^r] \quad (17)$$

ここに、 H_0, H_c, r = Weibull 分布の形を定めるパラメータ

筆者の検討結果では上式中のパラメータ H_0 の算定は試行錯誤法によらねばならないから、解析する者の主観が加わる可能性があり、また Weibull 分布に従うとみなせないものも存在するが、大部分のものは Weibull 分布に従うとみなせる。よって、Walden, Hogben-Lumb による北大西洋の海象、SR80部会による北太平洋の海域3の海象、および文献⁴に発表したC船（巡視船）の航海記録の海象（主要航行海域は大体海域3bと一致する）を、Weibull 分布に従うとし、波高の頻度分布を修正した。

なお、C船の海象は波高の頻度分布だけが与えられているので、各波高階級内の波周期別頻度分布は海域3bの同一波高階級における波周期別頻度分布に等しいとした。この点で同船の海象は波周期別発現頻度に若干の誤差があるとみられる。同海象における最悪海面状態を表1に示す。

上記のパラメータは各波高階級上限値に対する $q(H)$ の値を Weibull 確率紙上に記入し、これらの点がほぼ直線になる H_0 の値、およびこれらの点に適合する直線の係数を見出すことによって決定できるが、北大西洋の観測値は波高階級の区分が小さすぎるので、波高階級の区分を大体2mにとり、パラメータを決定した。また、高波高部で発現確率が極端に少ない箇所、および波高が1.75~2.75m以下の部分の $q(H)$ は確率紙に記入しなかった。これはモード付近は観測数も多く信頼度が高いと考えたためである。太平洋の海象は波高階級の区分が大きいので、一部低波高部を除いた例もあるが、中位以上の波高は大部分記入してパラメータを決定した。パ

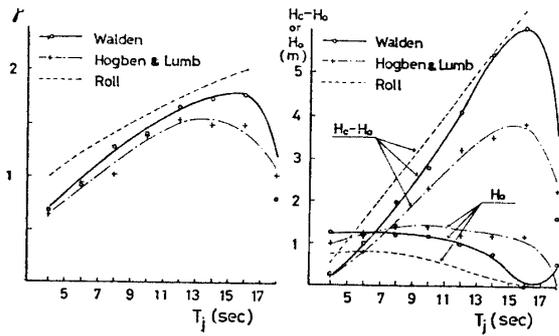


図 4 Estimated parameters of wave height distribution (Walden, Hogben-Lumb, (Roll))

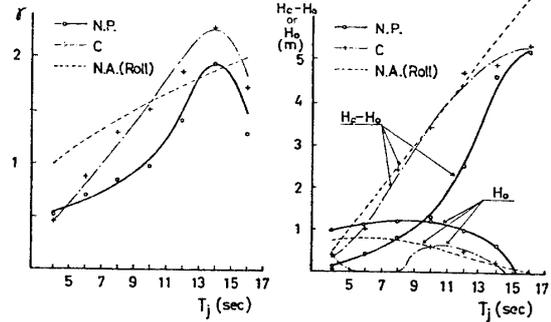


図 5 Estimated parameters of wave height distribution (N.P., Ship C, N.A. (Roll))

ラメータによって H_{me} は動くので、このパラメータによる H_{me} は 1m 程度の誤差はあると考えられる。

図 4, 5 に求められた各海象のパラメータを示す。個々の値は H_0 の値決定の際の誤差、高低波高部の除外範囲によって若干変化するから、全般的傾向で判断すべきである。北大西洋の 3 者は相異点もあるが類似点も多い。しかし、太平洋のそれは北大西洋と分布形が相当異なると判断される。

両海域とも T_j の最大階級のパラメータは不連続であり、算出される H_{me} も信頼性に問題があるので参考に止めることとする。

3.2 修正海象より求めた H_{me} 曲線

修正された海象の各波周期階級別に適当に定めた波高階級毎の発現頻度を求め、これが p_{mjs} に達する波高階級を求めれば、その代表値がその波周期階級の H_m となる。この場合波高階級の区分および p_{mjs} は任意に選べるが、比較しやすいように Walden の波高区分と同一とする。また同じ理由から p_{mjs} は 1×10^{-5} とする。

p_{mjs} は小さくとればとる程 H_m は高くなるが、 p_{mjs} を 1×10^{-5} にとるということは、船令を 20 年、年間航海日数 200 日とすると、船の生涯においてその海面状態に遭遇する時間は約 1 時間ということになる。したがってこれ以上小さな p_{mjs} を想定することは実用上無意味となる。

p_{mjs} を 1×10^{-5} 以下のある値 p_{mjs}' にとったときの H_m および X_m をそれぞれ H_m' , X_m' とし、 p_{mjs} が 1×10^{-5} のときのそれらの値 H_m , X_m と比較してみる。 X_m' と X_m の比は (2) より容易に求められる。

$$\frac{X_m'}{X_m} = \left\{ \frac{5 - \log p_{m0}}{-\log p_{mjs}' - \log p_{m0}} \right\}^{1/2} \left(\frac{H_m'}{H_m} \right) \quad (18)$$

超過確率が 1×10^{-5} になる波高と H_m 、また p_{mjs}' になる波高と H_m' がほぼ等しいとし、(17)において $H_0 = 0$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} p(T) \exp[-(H_m'/H_c)^\tau] &= p_{mjs}' \\ p(T) \exp[-(H_m/H_c)^\tau] &= 1 \times 10^{-5} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここに、 $p(T)$ ……任意の波周期階級の発現確率

上式より

$$\left(\frac{H_m'}{H_m} \right)^\tau = \frac{-\log p_{mjs}' + \log p(T)}{5 + \log p(T)} \quad (19)'$$

(18)と(19)'より

$$\frac{X_m'}{X_m} = \left(\frac{5 - \log p_{m0}}{-\log p_{mjs}' - \log p_{m0}} \right)^{1/2} \left(\frac{-\log p_{mjs}' + \log p(T)}{5 + \log p(T)} \right)^{1/\tau} \quad (20)$$

想定船令、年間航海日数の相異を考慮しても p_{mjs}' の最小限度は 5×10^{-6} までと思われる。また p_{m0} のとりうる範囲は普通 1~0.1 程度、 $p(T)$ は 0.4~0.01、 τ は 1~2 程度と思われるのでこれらの値を代入しても X_m'/X_m の変化は 1.02~1.04 程度であり、最大値はほとんど変化しない。これは p_{mjs} の変化にともなう H_m の変化と、 $f_2(p)$ の変化が相殺するためで、 p_{mjs} は 1×10^{-5} に固定しても問題ないことがわかる。

図 6, 7 は修正した各海象より求められた H_{me} 曲線 (この場合 p_{mjs} は固定されているので H_m と H_{me} は一致する) を示す。北大西洋には Nordenström が求めたパラメータを使用して算出した Roll の海象の H_{me} を加えてあるが、これら各海象の H_{me} の差は図 2 に比べて小さく、Walden の H_{me} が特に変わった値をとる

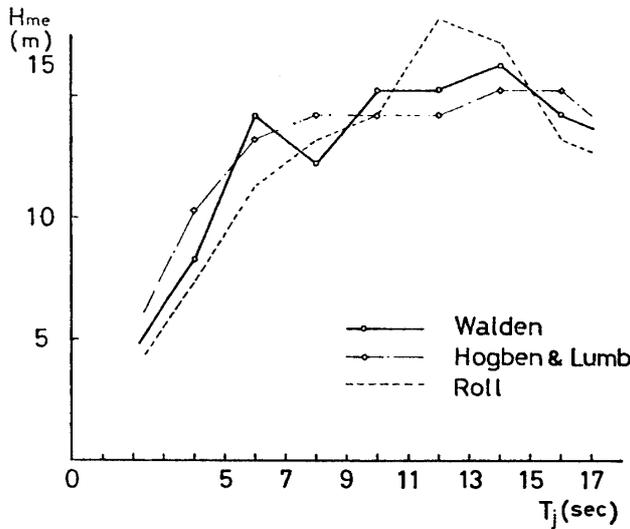


図 6 H_{me} curve from corrected wave statistics (N. A.)

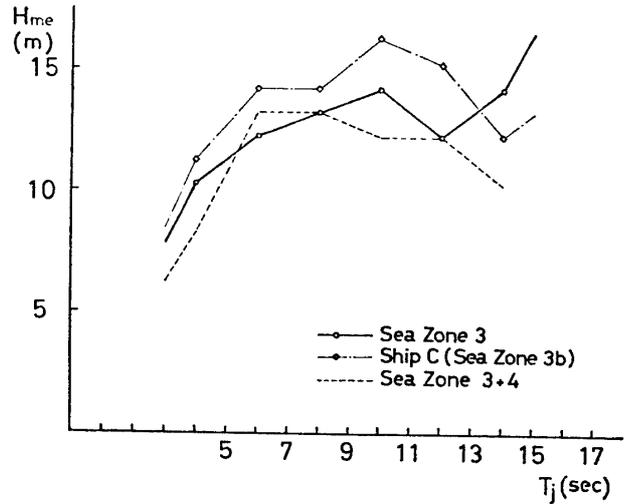


図 7 H_{me} curve from corrected wave statistics (N. P.)

T_j が6および8 sec, Roll の H_{me} が特に大きな値をとる T_j が12 sec の場合の他は, Roll, Hogben-Lumb の H_{me} は大体 Walden の H_{me} から $\pm 1m$ の範囲内にある。図の H_{me} にはこの程度の誤差は当然考えられることであり, よく一致していると言える。

修正前のこれらの海象の $q(H)$ を, $H_0=0$ として Weibull 確率紙に記入した結果では, Walden と Roll のそれは比較的似た傾向を有するが, Hogben 等のそれはやや異なるように見られる。それにも拘らず, これらの H_{me} がよく一致することは面白い現象である。

観測条件の差を考えると, Roll と Walden は海象観測船の観測値であり, Hogben 等のは一般船舶の観測値であるから, その船が荒天を避けることによる差が見られるべきであるのに, 逆に T_j が10 sec 以下では H_{me} は高目になる。これは一般の乗組員と海洋観測船の乗組員の観測値の差を示すものかも知れない。

図7には Nordenström が求めたパラメータを使用して求めた SR 80 部会報告の海域 3+4 の H_{me} 曲線を加えた。海域4は日本南方海域で海域3よりはややおだやかで, $T_j=6$ sec の場合の他は全般的に H_{me} は低くなる。

海域3とC船の海象では, 傾向が似ているが常にC船の H_{me} が高い。これは海域3の海象は一般船舶による観測値であり, C船は海難救助の任務があり荒天を避ける確率が一般船舶より小さいことによる差とも見られるが, 同船の海象の平均波高は海域3の平均波高より低く矛盾している。結局同船は平常は一般航洋船よりおだやかな海上を航行することが多いが, 任務上異常な荒天に遭遇する率は一般船舶より高いのであろうと考えるより

仕方ない。

3.3 修正海象による奇酷度の比較

3.3.1 北大西洋の標準 H_{me} 曲線

北大西洋の修正海象より得られた H_{me} 曲線はたがい大きな差はないが, 他海域と比較するためには, 1本の標準曲線にまとめた方が便利である。

これらの曲線の中で標本数からみて最も信頼性の高いのは Walden の海象から得られたもので, 修正前の海象による H_{me} 曲線と, 修正海象によるそれを比べても大きな差はなく, 非常に安定したものである。よって, Walden の H_{me} 曲線を基準とし, 他の2者と大きく相異なる個所だけを修正する方法によって, 各波周期別の標準 H_{me} の値を決定した。標準 H_{me} の値は 0.25m 刻みとした。

表 2 Extreme wave condition in standard wave statistics for North Atlantic and North Pacific ($p_{mjs}=1 \times 10^{-5}$)

Sea Zone	North Atlantic	North Pacific
Wave Period T_j (sec)	Wave Height H_m (m)	Wave Height H_m (m)
0~5	8.25	10.25
5~7	13.00	14.00
7~9	13.50	14.25
9~11	15.25	16.25
11~13	15.75	15.25
13~15	16.25	14.00
15~17	14.25	14.00
17~	13.25	

修正したときの標準 H_{me} は Walden に 4 倍の重み係数を乗じた加重平均値に近いが、次の点は著者の主観によって修正した。 $T_j=6$ sec の H_{me} は Walden の H_{me} は高すぎると思われるので 13m に減じた。 $T_j=8$ sec では加重平均値より高くとり、13.5m とした。図 8 はこうして求めた標準曲線を示す。図中の破線は Roll のパラメータを Nordenström が修正した結果から求めたもので、 T_j が低い値および高い値では低目の H_{me} を与えることがわかる。

表 2 はこの標準 H_{me} 曲線に対応する最悪海面状態を表 1 と同じ要領で示す。

3.3.2 北太平洋の標準 H_{me} 曲線

北太平洋の海象には Roll, Walden の海象と同条件で観測されたものはない。C 船は任務上一般船舶より荒天に遭遇する機会が多いと思われるが、前述のように同船の海象は低波高の発現頻度は高く、平均波高は海域 3 より低い。また、同船の航行海域が 3b (海域 3 の中では平穏な海域に属する) に偏っているのも問題であるが、同海象の H_{me} は海域 3 より高く、傾向も似ているので、これを基準に海域 3 の H_{me} を参考にして修正したものを、前記の北大西洋の標準 H_{me} に対応するこの海域の標準 H_{me} とする。

C 船の海象の H_{me} 曲線では $T_j=6$ sec 以下の H_{me} は T_j に比べやや高いので、低目に修正した。 T_j が 14 sec 以上では変化が大きいので 14 m に固定した。図 8 にこの海域の標準 H_{me} 曲線、表 2 にそれに対応する最悪海面状態を示す。

Walden の海象に見られる $T_j=6$ sec の H_{me} が著しく高くなるのと似た傾向が C 船の H_{me} にも見られる。標準 H_{me} 曲線の作成に当っては、Roll, Hogben 等、あるいは海域 3 の H_{me} 曲線を参考にいずれもこの傾向を修正したが、これは観測の誤差とみなしたことになる。今後の研究によって、この現象があらわれる根拠が明らかになるか、同傾向が多数観測されるようになれば、本論文の既述の部分および標準 H_{me} 曲線のこの部分は修正されねばならない。

3.3.3 北大西洋と北太平洋の海象の比較

図 8 の両海域の標準 H_{me} 曲線、および図 9 に示す海域 3 と Hogben 等の H_{me} 曲線を比較することで、ほぼ同条件の観測値による両海域の海象の比較ができる。

標準 H_{me} 曲線を比較すると、 T_j が 10 sec 以下では常に北太平洋の方が苛酷である。本曲線には ± 1 m 程度の誤差はあるとしても、全周期にわたって差があるということは、海象に差があると言える。ただし、Hogben 等と Roll あるいは Walden の比較から、一般乗組員の観測値は短周期の波の波高を高く見る傾向があるとしても、図 9 に示すように C 船の H_{me} は Hogben 等のより高いから、観測者の差ということで標準 H_{me} 曲線の差を否定はできない。控え目にみても、両海域はほぼ同程度の苛酷度を有すると言える。

T_j が 10 sec を超えると、北大西洋の方が若干苛酷になってくる。全体的に見ると、両海域の H_{me} は T_j が 2~3 sec ずれた形になる。

海域 3 と Hogben 等の H_{me} を比較すると、 T_j が 10 sec 以下では 6 および 8 sec で Hogben 等の方が 1 m 高く、他では一致している。この点で標準 H_{me} のように全般的に差があるという訳ではなく、差は明瞭でない。 T_j が 10 sec を超えると、標準 H_{me} と同様北大西洋の方が若干苛酷となる。

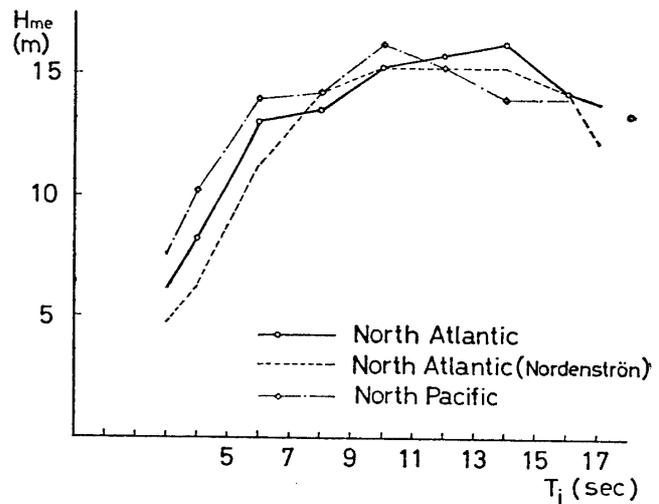


図 8 Comparison of standard H_{me} curves

図 8 の両海域の標準 H_{me} 曲線、および図 9 に示す海域 3 と Hogben 等の H_{me} 曲線を比較することで、ほぼ同条件の観測値による両海域の海象の比較ができる。

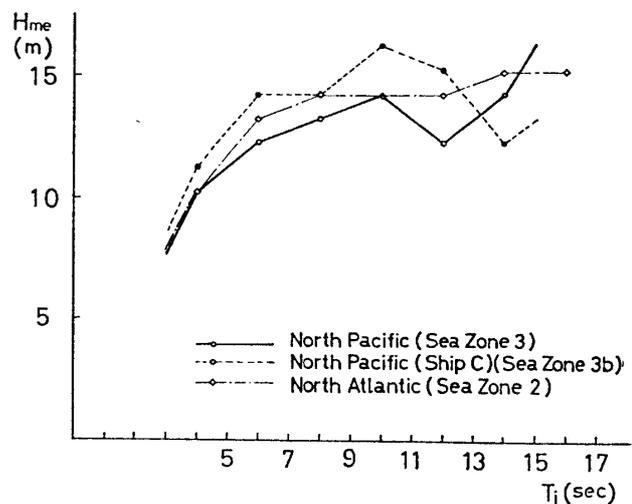


図 9 H_{me} curve from corrected wave statistics on ships except weather ship

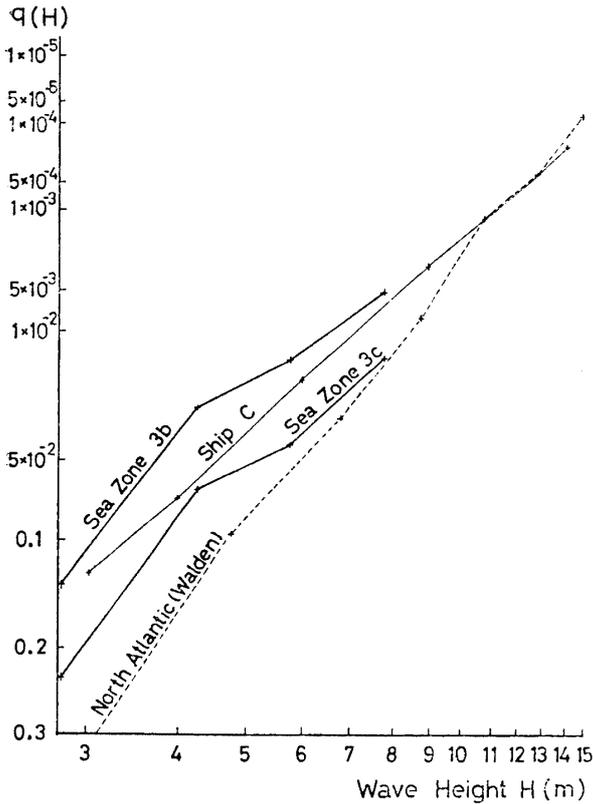


図10 Comparison of $q(H)$ on the North Atlantic with those on the North Pacific

それに平行で、それより相当低い値であるが、それ以上の波高では Walden のそれはほぼ同じ傾向で波高とともに $q(H)$ が減少するが、海域3のそれは彎曲がひどくなり $q(H)$ の減少率が小となり（傾斜が小となる）、外挿すると 3b で 12m, 3c で 9m 以上では $q(H)$ は Walden のそれより大となる。C船のそれは傾向が異なるが、高波高部では 3b に近くほぼ直線的にのびており、12m 付近で北大西洋の $q(H)$ と一致し、それを超えると明らかに $q(H)$ はそれより大となる。これは、いずれの場合でも 12m 以上の波高の波の発現確率は、北太平洋の方が北大西洋より高くなることを示している。

これから、波高頻度分布では北太平洋のそのモードは低波高側にあり、平均波高は低いが、平均波高が低い割には高波高領域の発現頻度は低下しないで、結局 H_m は北大西洋とほぼ等しいか、それ以上の値になることがわかる。頻度分布の傾向が両海域は異なるから、平均波高と最大値とは異なる傾向となる。

蛇足を加えると、波浪曲げモーメントの長期分布における最大値の推定に、北大西洋の海象を想定することは（修正前の Walden の海象では T_j が 6 sec のときの X_m が異常に高くなることを除いて）図2に見られるように L が約 300m 以下の船については、それが北太平洋を主要航路とする船であっても、安全側をとり特に苛酷な海象を想定したことにはならない。

4 結 言

海洋波に対する船の応答の長期分布における最大値に与える想定海象の影響は、最大値の特性からそれは想定海象における各波周期の波の中の波高が最大の波の発現確率とその波高だけで決定されるとみなせる。したがって、想定海象から各波周期別の最高波高の波の発現確率の修正を施した有効最高波高 H_{me} の変化を求め、これを曲線にして表わせば、想定海象相互の苛酷さの比較は勿論、応答の分散が最大となる波周期は船の大きさによって変化するから、想定海象の苛酷さの船の大きさによる変化まで明らかにできる。

北大西洋の Walden, Roll, Hogben 等の海象の H_{me} を比較すると、応答の最大値は想定海象に何を選ぶかによって 50% 以上も変化する場合がある。Walden の海象を使用すると、応答の分散が 6 sec の波で最大となる大きさの船ではその前後の大きさの船に比べ応答の最大値は異常に大となる。これは同海象の H_{me} 曲線の特徴によるもので、他の海象の場合と比べて不当と思われる。

以上を総合して、 T_j が 10 sec 以下の波では北太平洋は北大西洋以上か、控え目に見ても同程度の荒さがあり、 T_j が 10 sec を超える波では北大西洋に比べやや平穏であるということになる。

これは平均波高等を基準にした従来の常識とは異なるようであるが、これは両海域で推定される波高の最高値を比較したもので、平均波高とは別個の問題である。北太平洋の平均波高は約 1.8m であり、北大西洋の平均波高約 2.5m より低いのに、 H_{me} が同等あるいはそれ以上ということは、太平洋は平常は大西洋より穏やかであるが何年に 1 度というような非常な荒天の激しさは大西洋と同程度かそれ以上であると説明できる。

図10は海域3で最も苛酷な海域3cと平穏でC船の主要航行海域である海域3bの $q(H)$ 、C船の海象の $q(H)$ 、および Walden の海象のそれを、 $H_0=0$ として Weibull 確率紙に記入したものの高波高部を示す。なお、省略したが海域3のそれは 3b, 3c の中間を両者に平行に走る。また Roll のそれはほぼ Walden と一致し、Hogben 等のそれはやや傾向が異なるが、高いずれも $q(H)$ は常に Walden の値より小さい。波 4m 程度までは海域3の $q(H)$ はほぼ Walden の

この現象は相似船の波浪曲げモーメントの最大値を有効波高で表わした場合にもあらわれ、船長を横軸にとり有効波高を表わすと、なめらかに変化しないで山と谷が見られるが、これは船の応答特性ではなく、Walden の海象を想定したために生じる現象にすぎない。

想定海象が最大値に与える影響からその精度を判断すると、どのような場合でも最高波高が観測された観測値の精度に支配されるから、標本数は少なく精度はよくない。この欠点を防ぐには、各波周期別に波高の頻度分布形を見出し、 H_{me} を理論的に求めるのがよいと言える。

この方法によって修正された海象から導かれた北大西洋の標準 H_{me} 曲線と、北太平洋のそれを比較して両海域の苛酷さを比較した。その結果波周期が 10 sec 以下の波については、北太平洋は北大西洋と同等かそれ以上の苛酷さがあり、10 sec を超える波では北大西洋の方がやや荒いことが明らかになった。

このことから波浪曲げモーメントの想定海象を考えると、 L が 300m 以下の船については北大西洋の海象を想定することは、北太平洋航路の船にとって過大な荷重条件を想定することにはならないと考えられる。

参 考 文 献

- 1) H. U. Roll : Height, Length and Steepness of Sea Waves in the North Atlantic and Dimensions of Seawaves as Function of Wind Force (English Translation) Technical and Research Bulletin No. 1~19, SNAME, (1958).
- 2) H. Walden : Die Eigenschaften der Meerswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen Nr. 41, Hamburg, (1964).
- 3) N. Hogben and F. E. Lumb : Ocean Wave Statistics, HM Stationery Office, London, (1967).
- 4) 真能 創, 中生啓一, 上野洋純 : 航海記録からみた波浪曲げモーメントの長期分布についての考察, 日本造船学会論文集第 131 号 (昭 47 年).
- 5) 真能 創, 上野洋純 : 波浪に対する各種船体応答の長期分布の近似推定法とその応用, 日本造船学会論文集第 132 号 (昭 47 年).
- 6) 福田淳一 : 船体応答の統計的予測, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会 (昭 44 年).
- 7) 第 90 研究部会 : 海象・気象と船体構造の関連に関する調査研究, 日本造船研究協会報告第 69 号 (昭 45 年).
- 8) 榎田吉郎 : 統計的見地よりの船体の近似曲げモーメント, 造船協会論文集第 111 号 (昭 37 年).
- 9) E. G. U. Band : Analysis of Ship Data to Predict Long-term Trend of Hull Bending Moments, American Bureau of Shipping (1966) (その他文献多し).
- 10) 第 80 研究部会 : 北太平洋および日本近海の波浪統計調査, 造船研究 Vol. 8, No. 1, 日本造船研究協会 (昭 41 年).
- 11) Report of the Committee Nr. 1, "Environmental Conditions", Proc. ISSC, (1964).
- 12) N. Nordenström : Calculation of Wave-Induced Motions and Loads, Progress Report no. 2. Long-Term Description of the State of Sea, Det Norske Veritas Report No. 65-13-S, (1965).
N. Nordenström : Calculation of Wave Induced Motions and Loads. Progress Report No. 3. Additional Notes on the Long Term Description of the State of Sea, Det Norske Veritas Report No. 66-12-S, (1966).