

(昭和 57 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

実船の遭遇海象について

正員 河 辺 寛* 正員 真 能 創*
正員 阿 波 健 二**

On the Variety of Wave Conditions Encountered
by Ships Sailing in the Same Sea Zone

by Hiroshi Kawabe, *Member* Hajimu Mano, *Member*
Kenji Awa, *Member*

Summary

On the study of the wave induced variable of a ship, the full scale measurement have been developed a many useful and remarkable success. Because of the measuring period is short in such measurement, the wave condition encountered by the ship may deviate from that to be encountered in her life time. So, it is feared that the estimated extreme value of the response from the result of the measurement will include error which is not to be neglected.

Authors research the observed wave conditions of 62 voluntary merchant ships in North Pacific Ocean for three years (1976—78). It is clarified by our research that in the case of such short term operation the difference of wave condition between ships according to variability of service condition is remarkable in comparison with the difference between random samples from the same population.

Regarding each wave condition observed by a voluntary ship as that observed by a ship on which the response is measured, the reliability of the extreme value over her life time estimated from result of the measurement are studied. The estimated values scatter over wide range, and moreover, the reliability of the value falls off as the length of the ship becomes longer. So, it is concluded that to estimate the correct extreme value of the wave induced variable from the measurement for such years may be difficult especially in the case of a large ship. Authors analyse the effect of wave condition on the extreme, and suggest a new method to estimate the extreme from the result of the measurement with higher reliability.

1 緒 言

波浪荷重のような波浪応答の研究では、現在までに数多くの実船計測が実施され、多大の成果をあげてきた。しかし、実船計測は実施される期間は船の全就航期間に比べると短期間であり、その間の遭遇海象はその船の全就航期間におけるそれと比べて、偏ることは避けられない。この計測結果から応答の長期分布を推定した場合、遭遇海象の偏りが推定結果にどのように影響しているかは不明である。

筆者らは 1976～78 年の 3 年間に、北太平洋海域を航行する 62 隻の海象通報船の観測結果をもとにして、非常に長期にわたるなら各船間の差はなくなると見られる、同一海域を同一期間航海する船の間の遭遇海象の差

を調べた。

次に、これらの船が 3 年間の実船計測の対象船になったと仮定したとき、計測される波浪応答（垂直波浪曲げモーメントで代表させた）の計測値、およびそれから推定した船の全就航期間中に働く最大値の信頼度について研究し、これらが相当広範囲に分布することを明らかにした。

筆者らはさらに、個々の実船試験の計測結果から、信頼度の高い最大値を推定する方法について研究を進め、新しい推定方法を導いた。

本論文は以上の研究について報告するものである。

2 北太平洋における遭遇海象

2.1 海域海象と遭遇海象

北太平洋、あるいは北大西洋などの海域の海象はその海域に配置された海象観測船、またはその海域を航海す

* 防衛大学校

** 海上自衛隊

る多数の船の長期間にわたる海象観測結果から推定されている。これらは、それぞれの海域の海象の母集団分布を与えるもので、船が有限の時間この海域を航海する場合、その航海条件がランダムであれば、各船の遭遇海象は上記の海域海象を中心に、いわゆる標本分布に従ったバラツキを示すが、航海期間が長くなるとともに母集団分布との差は無視できる程度になると推定される（海象観測船と一般船舶とでは、荒天避航に関する条件が異なるので、観測結果に若干の差は存在すると思われる）。1, 2年程度の比較的短期の航海では、海域内の小海域別の航行頻度、季節別航海頻度、荒天避航などの種々の航海条件の偏りはさげられず、遭遇海象はランダムな状態でとり出された標本とは異なる。また、海象自体も長周期の変化の影響を受けるから、上記の標本分布から考えるようなものにはならない。短期航海における遭遇海象がどのような分布になるかは、多数の実例によって調査するのがよいが、この場合、同一期間の観測記録によるときは、上記の海象変化の影響を除去した結果が得られる。

2.2 調査対象船

世界気象機関（WMO）に登録された国際気象通報船舶（Selected ships）のうち、日本国籍の船舶が観測した資料は、船舶気象観測表に記入され気象庁に送付される。この船舶気象観測表の資料は、種々のチェックルーチンにかけられた後、磁気テープに入れて保存される。

本資料から一定の海域における一定期間の個々の船の観測記録をとり出せば、それぞれがその海域における前記の遭遇海象の実例とみなすことができる。筆者らは、この中から 1976~78 年の 3 年間の資料を気象庁より借出し、上記の見解に従ってこれを調査した。

この期間に気象通報を行った船舶は 801 隻にのぼる。これらの中で航海期間中に 1 日に 1 回以上気象観測を行ったものを対象とすることとし、観測回数が 800 回以上の船を選ぶと 186 隻になる。今回は対象海域として北緯 30° 以北の北太平洋海域とした。よって、上記の 186 隻中その海域での観測数が全体の 70% 以上の船舶に限定し、該当する 62 隻を対象に選んだ。以下これを海象通報船と呼ぶ。以上の 62 隻の記録は 3 年という短期間における同一海域での遭遇海象の 62 個の実測例を与える。

海象通報船の主要目とこの期間の観測回数等を Table 1 に示す。同表で船種の SC は特殊貨物船（自動車専用船、木材専用船、パルプ専用船等）、B はバラ積専用船、C はコンテナ船である。

2.3 全海象通報船の遭遇海象

Table 2 に前記の 62 隻の海象通報船の観測結果をまとめたものを示す。本資料は約 10 万回の観測の成果で、以後これを総合海象と呼ぶ。本資料の特性を調べるため、次に述べる北太平洋および北大西洋の波浪観測結果と比較をしてみる。

北太平洋の波浪資料としては、同海域における海象通

Table 1 Principle particulars in voluntary merchant ships.

Name	L (m)	D.W. (ton)	No. of Data	Name	L (m)	D.W. (ton)	No. of Data
SC 1	150	12300	1002	SC 2	164	7061	1114
SC 3	180	11151	3410	SC 4	150	12517	1627
SC 5	152	11538	3446	B 1	249	63287	1501
B 2	244	65799	1782	B 3	153	17294	2218
B 4	185	31900	4094	B 5	166	19476	1654
B 6	166	19524	1102	B 7	174	25700	3884
B 8	165	20078	1478	B 9	185	34948	2123
B 10	185	34843	3604	B 11	174	25795	3329
B112	166	19922	1319	B 13	188	31858	1632
B 14	165	20687	2476	B 15	165	20686	2820
B 16	188	31973	1701	B 17	160	18800	2180
B 18	153	17338	1659	B 19	170	18736	804
B 20	249	63218	925	SC 6	140	10027	924
SC 7	165	16359	2118	SC 8	146	15572	805
SC 9	142	10555	2240	SC10	143	10598	2256
SC11	140	10250	1407	SC12	144	16563	3601
SC13	132	6317	2411	SC14	140	11290	2587
B 21	196	30600	2244	B 22	170	18922	1587
B 23	170	19311	898	B 24	155	14302	1012
B 25	175	19344	1008	B 26	175	19392	175
SC15	134	8999	802	SC16	178	24489	1659
SC17	75	1692	340	SC18	142	17055	852
C 1	175	16592	1624	C 2	175	16528	1589
C 3	204	30007	1053	C 4	175	16911	2300
C 5	211	30135	1006	C 6	204	29860	931
C 7	195	23602	2789	C 8	242	38540	1473
C 9	200	24770	1367	C 10	200	24278	2765
C 11	195	23578	2380	C 12	175	16404	1223
C 13	200	23766	1864	C 14	183	21057	855
C 15	230	35491	1093	C 16	175	16626	1704
C 17	200	23667	1579	C 18	200	23457	1387

Table 2 Wave frequency observed by all voluntary ships.

Wave Height (m)	Wave Period (sec)						Sum over all Period
	0 - 5	5 - 7	7 - 9	9 - 11	11 - 13	13 -	
- 0.75	1435	335	61	44	20	7	1902
0.75 - 1.75	15932	7727	903	577	147	58	25344
1.75 - 2.75	17204	17720	2376	1650	363	60	39373
2.75 - 3.75	5537	15137	3000	2330	567	90	26661
3.75 - 4.75	890	5518	2293	2087	518	80	11386
4.75 - 5.75	135	1324	857	1356	408	53	4133
5.75 - 6.75	56	389	242	544	353	39	1623
6.75 - 7.75	21	501	170	250	225	41	1208
7.75 - 8.75	13	55	50	79	104	20	321
8.75 - 9.75	2	30	30	44	37	8	151
9.75 - 10.75	5	22	19	28	46	15	135
10.75 - 11.75				1	8		9
11.75 - 12.75		1		46	3	10	60
12.75 - 13.75	1				1	1	3
13.75 - 14.75						2	2
14.75 - 15.75				4	2		6
Sum over all Height	41231	48759	10001	9040	2802	484	112317

報船の4年間の観測結果をまとめた日本造船研究協会第80研究部会(SR 80部会)の報告¹⁾, さらにそれを拡張し10年間の観測結果をまとめた山内の資料²⁾, その後10年間350万個の観測結果をまとめた同協会第163研究部会(SR 163部会)の報告³⁾があるが, いずれも総合海象と同じ海域の観測結果を対象とする。北大西洋は海象観測船の10年間の観測結果であるWalden⁴⁾の資料と比較する。

2.3.1 波周期分布

筆者らは, 上記の北太平洋および北大西洋の波浪資料について波周期分布を調べ, これが対数正規分布に一致することを明らかにした⁵⁾。総合海象の波周期分布については, これを対数正規確率紙, ワイブル確率紙に記入した場合は, どちらの場合も直線に近く, 対数正規分布, ワイブル分布のどちらの分布にも適合するような結果が得られた。しかし, 理論分布と標本分布の差の2乗和の比較, およびモードの位置などからみて, 対数正規分布に従うと判定した。

Fig. 1に総合海象と北太平洋, 北大西洋の波周期分布の比較を示す。一般に, 北太平洋の波浪観測結果は北大西洋のそれと比べ, 低周期の発現確率が高いが, 総合海象も同じ傾向を示し, モード位置は北大西洋が約8秒であるのに, 総合海象では約6秒になる。また, それとともに13秒以上の長周期の波の発生確率は, 総合海象は0.43%で, 北大西洋のそれに比べ著しく低い。

2.3.2 波高分布

波高の頻度分布は, 対数正規分布とワイブル分布につ

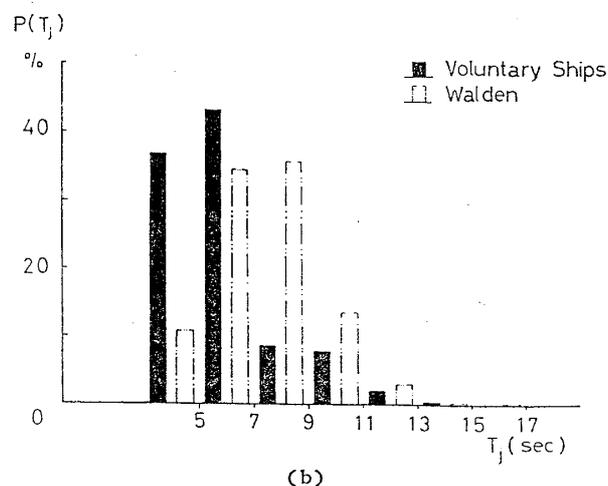
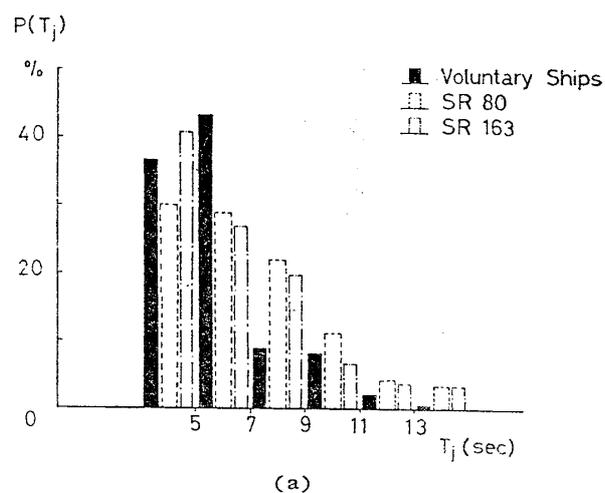


Fig. 1 Comparison of wave period distribution, (a) North Pacific, (b) North Atlantic.

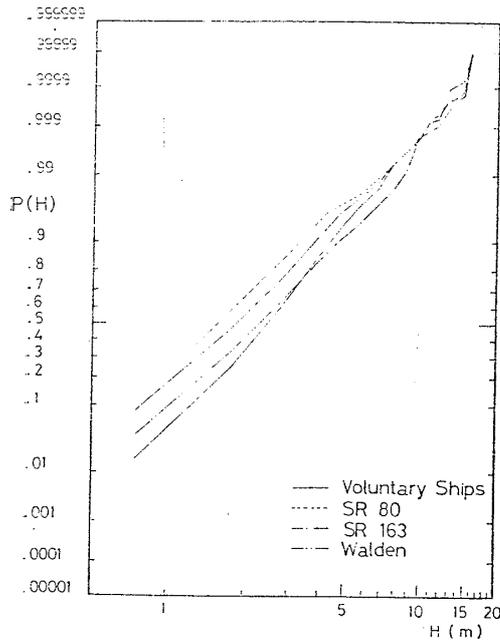


Fig. 2 Cumulative distribution function of wave height plotted on long-normal probability paper.

いて適合性を調べたが、対数正規分布がすべての波周期において適合性が良かった。Fig. 2 に波高の周辺分布を対数正規確率紙に記入した結果を示す。

既に文献 6) で述べたように、任意の波浪資料を波浪荷重の長期分布における最大値推定の想定海象として使った場合、その過酷度（荒さ）はその海象の等価最高波高 H_{me} によって比較することができる。 H_{me} はその海象の任意の波周期区分 T_j における最高波高 H_{mj} をその発生確率 p_{mj} の影響を考慮して修正したもので、次式で計算される。

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

上式中 p_{mjs} は p_{mj} の基準値で、任意の値をとり得るが、 1×10^{-5} をとることとする。 p_{m0} は波高 H_{mj} の海面で応答の標準偏差が最大となる航海条件の発現確率で、今の場合、単に遭遇海象の過酷度の比較であるため、 $p_{m0} = 1$ とする。よって、式 (1) は次式の形になる。

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

Fig. 3 は、式 (2) より求めた北太平洋 (SR 163, SR 80)、北大西洋 (Walden) の波浪資料における H_{me} 曲線と、総合海象のそれを比較したものである。同図において、○印を付した H_{me} は、それぞれの海象における波周期区分の最高波高 H_{mj} が、隣接する波周期区分の $H_{mj \pm 1}$ に比べ低いので、付録の式 (A.5) によって修正した値を記入したことを示す。

総合海象の H_{me} は同じ北太平洋の観測値と比較して、 $T_j = 6$ 秒の値がやや低い他は、他の二者の値とほぼ中間

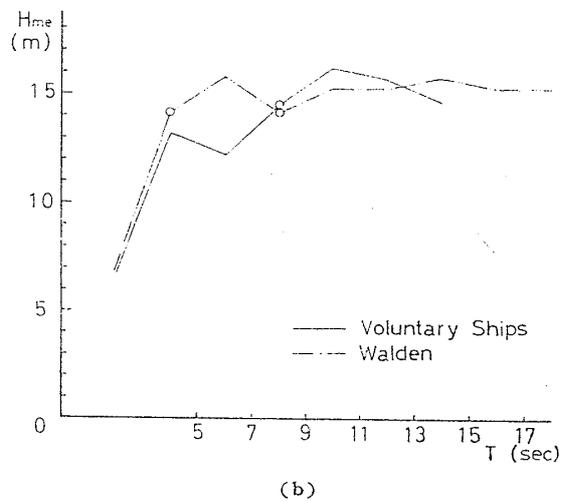
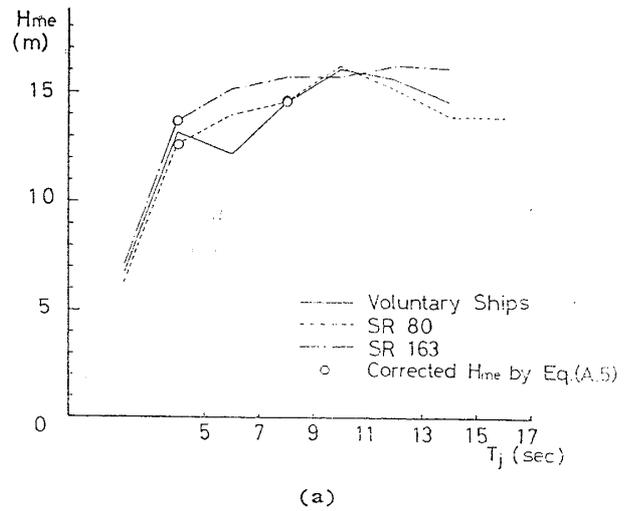


Fig. 3 Comparison of effective maximum wave height (H_{me}) curves, (a) North Pacific, (b) North Atlantic.

の値を示す。本資料の海象は、個々の船の遭遇海象は後述のように変化は大きいですが、総合的にみると、同一海域の他の観測結果に近い過酷度であると判断できる。また、北大西洋のそれと比較しても、 $T_j = 6$ 秒の H_{me} 以外はほぼ一致する。総合海象は大体北大西洋の海象に匹敵する荒さであるということになる。

2.4 各船別遭遇海象

2.4.1 波周期分布

各船の遭遇海象の波周期分布も同様これを対数正規確率紙、ワイブル確率紙に記入した結果では、対数正規分布、ワイブル分布のどちらでも波周期分布を近似できる。ただし、各船ごとの観測値では、波周期が 11 秒以上の長波長の観測回数は非常に少なく、この周期以上の領域で分布の適合度は正確に判定するのは困難である。

2.4.2 波高分布

波高分布は総合海象と同様、対数正規分布に従うとみられる。Fig. 4 は 62 隻の遭遇海象の波高の周辺分布を対数正規確率紙に記入した結果で、個々の分布は直線に

近いが、そのバラツキの範囲は非常に広い。各船の観測波高が、分布のバラツキが対数正規分布に従う無限母集団よりランダムにとり出された n_0 個（観測回数、この場合平均 1,500 回程度）の標本のバラツキと同じものとする、標本数が 1,500 個にもなると、この標本のバラツキは非常にせまくならなければならない。この差の生じる原因には目視観測の誤差をはじめ種々のものがあげられるが、前述の短期航海における航海条件の偏りがその主要なものと思われる。

無限母集団からランダムにとり出された n_i 個の標本

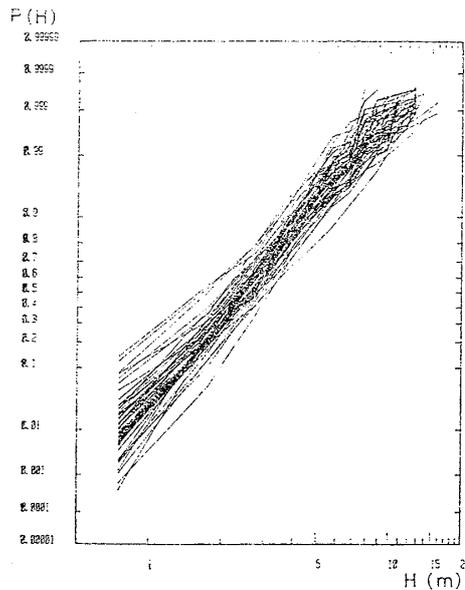


Fig. 4 Cumulative distribution function of wave height observed by each voluntary ship (plotted on log-normal probability paper).

の平均値 m_i は、母数が次の値の正規分布に従う。

$$\left. \begin{aligned} \text{平均値} &= m \\ \text{標準偏差} &= \sigma/\sqrt{n_i} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 m : 母集団の平均値、 σ : 母集団の標準偏差。

Fig. 5 は 62 隻の遭遇海象における平均波高（この場合は波高の対数の平均値）の分布を示す。横軸の副尺 u_m は次式で与えられる値（ m, σ は後述の修正総合海象の m と σ を採用した）で、平均値が上記の分布に従うなら、 m_i は u_m が $-2 \sim +2$ の間に約 95% が分布すべきであり、この平均値の分布の広さがわかる。

$$u_m = (m_i - m) / (\sigma / \sqrt{n_i}) \quad (4)$$

このバラツキをその海象の荒さという面で示すため、各波周期区分における H_{me} を式 (2) で求めた結果を図

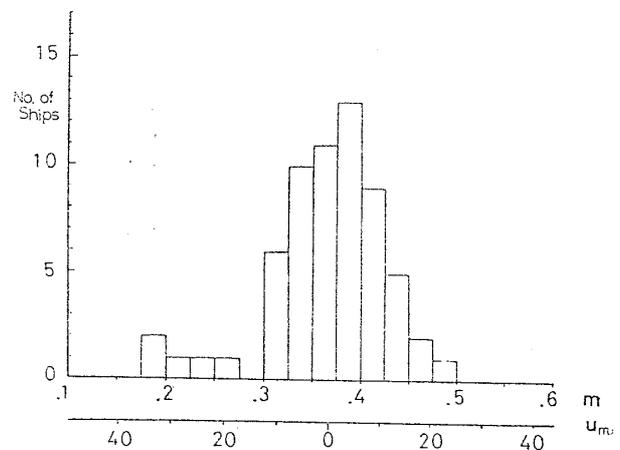


Fig. 5 Frequency distribution of mean wave height observed by voluntary ship (m in log-value).

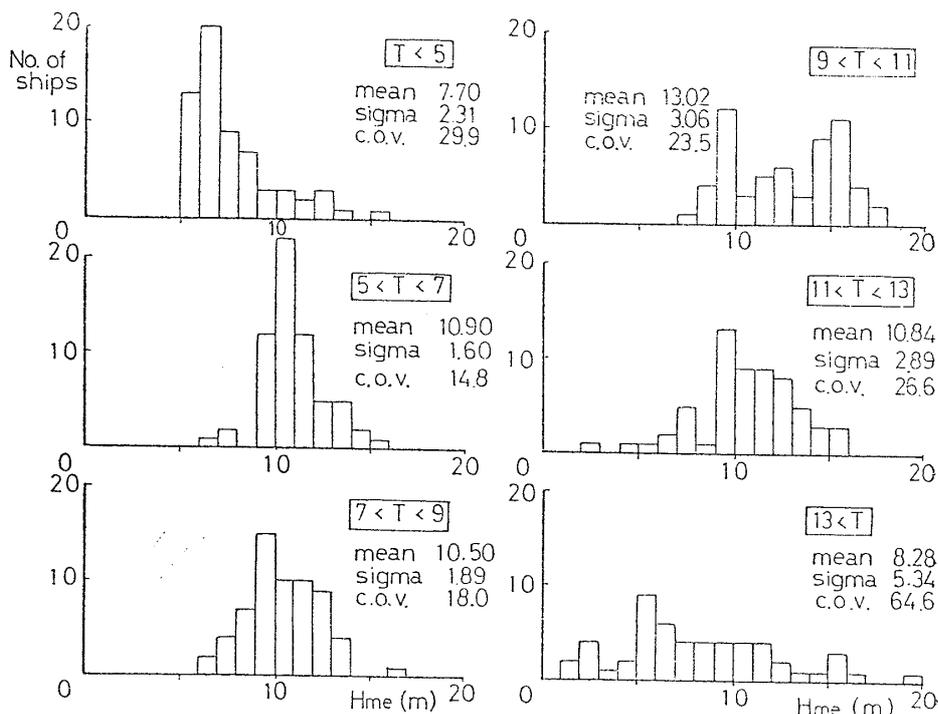


Fig. 6 Frequency distribution of H_{me} values in each wave period interval.

示したものが Fig. 6 である。図中に記入された変動係数の大きいことが、この海象における波浪応答の極値のパラッキに直接影響を与える。

3 波浪応答の実船計測結果の信頼度

3.1 実船計測の遭遇海象の点からの考察

波浪応答の長期分布の研究においては、数多くの実船計測が実施され、現在までに多くの成果をあげてきた。しかし、実船計測から応答の長期分布を推定する場合には、供試船の与えられた海域内の航行海域の偏り、航行条件の偏り、海象の長周期変動などの影響を含んだものとなる。これらの諸要因を分離して、任意の海域を航行するときの航海条件の偏りだけについて考えると、実船計測が実施される期間は3年程度であり、それが大きく影響することは、前記の海象通報船の結果から明らかである。

前記の海象通報船の各船別の遭遇海象は、北太平洋海域でこれらの船を供試船として、各3年の実船計測を実施したときの各船の遭遇海象のパラッキの実例と見ることができ、これから実船計測における航海条件の偏りの影響を推測できる。また、これらの観測結果は同一期間に実施されたものであり、実船試験でも含まれる海象の長周期変化の影響は除去されており、純粋に航海条件のパラッキだけが含まれた貴重な資料である。

3.2 実船試験による波浪応答計測値の信頼度

3.2.1 計測応答

対象とする波浪応答は何であってもよいが、船体中央における垂直波曲げモーメント（以下浪曲げモーメントと呼ぶ）を代表として選び、考察を進める。現在与えられているのは各船の遭遇海象のみで、応答の計測値は存在しないから、任意の海面での計測値は、海面状態の波スペクトルとしては ISSC スペクトルを想定し、ストリップ法および線形重ね合せ法によって求めた浪曲げモーメントの計算値を実測値であると仮定する。また、ここで問題とするのは遭遇海象の差の影響であり、この場合航行条件は正確に想定する必要はないから、一定の船速で常に向い波で航行するものとする。

船の長さ L は 100, 150, 200, 250 m の場合を対象とする。想定船の船形などの細目は、文献 9) において筆者らが対象とした船と同一とする。

3.2.2 計測最大値

Table 1 に示すように、海象通報船の観測回数は平均 1,500 回程度であるので、実船計測において 1,500 回の応答の短期分布が計測されたとする。1 回の計測は 30 分、応答の平均周期を 6 秒とすると、計測された応答のピーク値の総数は $1,500 \times 300$ 個となる。よって、計測される最大値は、その長期分布において超過確率 $1/$

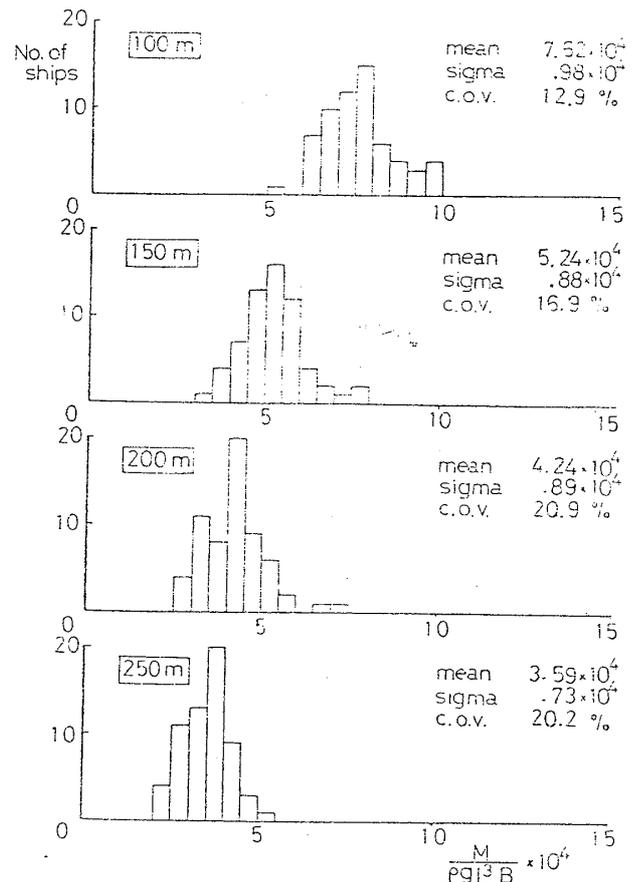


Fig. 7 Distribution of measured maximum wave bending moment ($L=100\text{m}\sim 250\text{m}$)

(1,500×300) に対応する特性極値と一致すると仮定する。

Fig. 7 は 62 隻の海象について計測最大値を求めた結果で、図示のように広範囲に分布し、その信頼度は低い。

付録に示すように、応答の長期分布は多数のそれぞれがレーレー分布に従う短期分布で構成され、それぞれの分布における R (応答の標準偏差) 中の最大値 R_m は、 $\bar{R}(jk)$ が極大となるある波周期の海面の中の波高が最高となる海面で見出される。

したがって、図の最大値のパラッキは R_m が見出される波周期における H_{me} のそれとは極めて近い。相似船では R_m が見出される波長と L の比は一定値となる。したがって、 R_m が見出される海面の波周期は L とともに増加し、計算例では L が 100 m でこの波周期は 6 秒であるが、250 m では 11 秒になる。Fig. 7 の任意の船の最大値のパラッキと、Fig. 6 の対応する波周期区分のそれは、極めて近い値になっている。Fig. 6 に付録の式 (A.5) の修正を施した結果ではさらによく一致する。

3.2.3 長期分布の推定最大値

実船計測結果から、その船の全就航期間中の最大値を推定する方法として、計測された長期分布における応答 X とその計測回数 $n(X)$ ($n(X)$ は $X \sim X + \Delta X$ の応答

の計測回数), あるいは X とその超過確率 $Q(X)$ の関係を, Fig. 8 に示すように片対数紙に記入し, その結果を想定する船令に対する荷重回数まで外挿し, 極値を推定する方法がとられることが多い。これは, 波浪応答の長期分布は指数分布で近似でき, 指数分布に従うときは X と $n(X)$, X と $Q(X)$ の関係は片対数グラフ上では直線となり, 外挿が容易なことを利用している。

ここでは計算値を実測値と仮定しているのので, 上記の X と $n(X)$ の関係は次の方法によって求めた。波高 H_i , 波周期 T_j の任意の海面において, 航行条件を一定すると応答は超過確率 $q(X)$ が次式であらわされるレーレ分布に従う。

$$q(X) = \exp\{-X^2/2R_{ij}^2\} \quad (5)$$

ここに, R_{ij} : 応答の標準偏差

したがって, X が $X \sim X + \Delta X$ の間の値になる確率 $P(X)$ は

$$P(X) = q(X) - q(X + \Delta X) = -\frac{dq(X)}{dx} \Delta X \quad (6)$$

与えられた遭遇海象において, この海面の観測回数は n_{ij} とすると, この海面で $X \sim X + \Delta X$ の応答の計測回数 $n_{ij}(X)$ は, 1 回の計測時間を 30 分とするから,

$$n_{ij}(X) = \frac{60 \times 30}{T_x} n_{ij} P(X) \quad (7)$$

ここに, T_x : 応答の周期

したがって,

$$n(X) = \sum_i \sum_j n_{ij}(X) \quad (8)$$

Fig. 8 は上式より求めた X と $n(X)$ の関係を片対数紙に記入した結果の 1 例を示す。上式中の T_x は波周期, 航行条件, L などによって変化するが, 平均波周期に等しいとして 6 秒とした。なお, T_x がそれぞれの海面の T_j に等しいとしたときの結果も検討したが, その差は無視できる程度であった。

最大値は 10^8 個の応答の中の最大値とすると, $n(X)$ が一様に 7 倍になるとして, 同図に示す方法で求められる。

Fig. 9 はこのようにして求めた各船の推定最大値の分布状態を示す。図中の矢印は後出の修正総合海象における最大値であり, 船が海域海象を航海したときの最大値で, 実船計測の目的は短期間の計測結果からこの値を推定することにある。図示のように推定最大値の平均値は, 海域海象における値に近いが常に低い。この場合も推定値のバラツキは大きく, 変動係数 (C. O. V.) は 12~20% になる。1 隻の実船計測から海域海象における最大値を推定することは, 図中のヒストグラム中の 1 個の値から, それを推定することであり, 精度のよい推定が困難なことを示す。また, C. O. V. の傾向から, L が大となる程, 精度が低下する傾向にあることも注

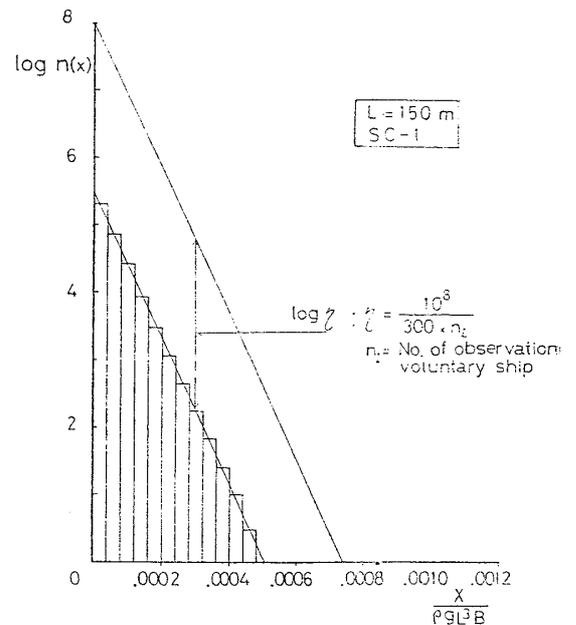


Fig. 8 Distribution of peak value of wave bending moment for 3 years. (ship SC-1, supposed $L=150$ m)

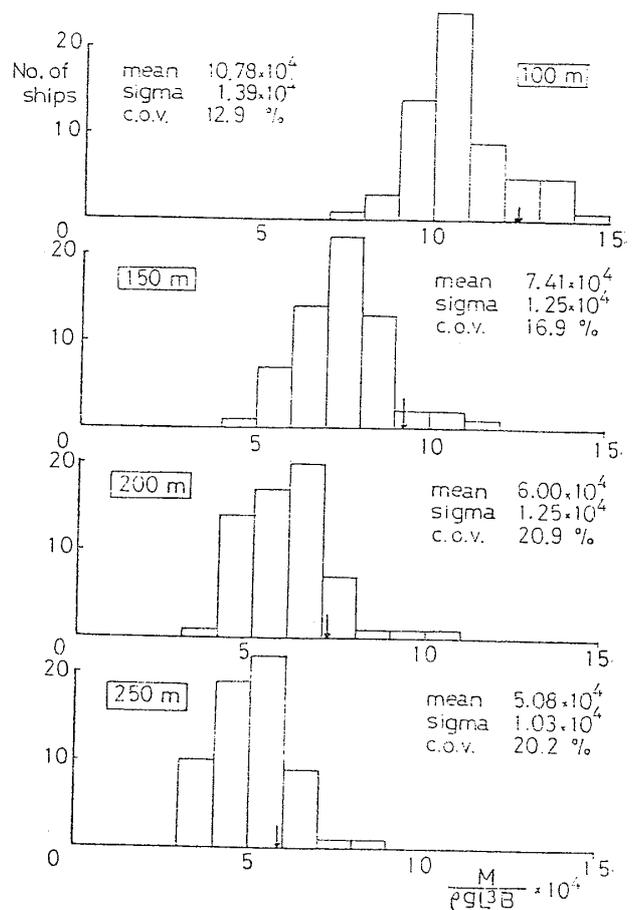


Fig. 9 Distribution of estimated extreme wave bending moment ($Q=10^{-8}$), ($L=100$ m-250 m), (arrow=correct value).

目に値する。

4 実船計測結果より波浪応答の長期分布の推定法

4.1 北太平洋の海域海象

Table 2 に示す総合海象は、1 隻の船に換算すると、186 (62×3) 年の観測結果であり、北太平洋海域の海象推定資料として信頼おけるものといえる。ただし、同表は観測値のままの資料であるので、これから波周期、波高の分布形およびその母数を推定し、この理論分布から求めた修正総合海象を、本解析における北太平洋の海域海象とみなす。

修正海象における波高と波周期の同時確率密度関数は次式で与えられるものとする。

$$p(H, T)dHdT = p(H|T)p(T)dHdT \quad (9)$$

ここに、 $p(H, T)$: 波高と波周期の同時確率密度関数

$p(H|T)$: 波高の条件付確率密度関数

$p(T)$: 波周期の周辺分布の確率密度関数

波周期分布については対数正規分布に従うとみなせ、

Table 2 の標本値から母数を求めると次のようになる。

$$p(T) = \frac{\log e}{\sqrt{2\pi} \sigma_t T} \exp\left\{-\frac{(\log T - m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right\} \quad (10)$$

ここに、 $m_t = .7456 \dots \log T$ の平均値

$\sigma_t = .1480 \dots \log T$ の標準偏差

波高の周辺分布、各波周期区分における条件付分布は、ともに対数正規分布に従うとみなせる。よって、

$p(H|T)$ は次式で与えられる。

$$p(H|T) = \frac{\log e}{\sqrt{2\pi} \sigma_h H} \exp\left\{-\frac{(\log H - m_h)^2}{2\sigma_h^2}\right\} \quad (11)$$

ここに、 $m_h = \log H$ の平均値 (波周期の関数)

$\sigma_h = \log H$ の標準偏差 (波周期の関数)

各波周期区分における波高分布を対数正規確率紙に記入した結果では、低波高部で若干直線から外れるものが見出されるので、母数推定では波高 1.75m 以下の標本値は除外した。総合海象から求めた母数の波周期による変化を図示すると Fig. 10 の○印のようになり、これは次式で近似できる。図中の曲線は次式によるものである。

$$\left. \begin{aligned} m_h &= A_m T^4 + B_m T^3 + C_m T^2 + D_m T + E_m \quad (T < 13) \\ &= 0.6254 \quad (T \geq 13) \\ \sigma_h &= A_s T^4 + B_s T^3 + C_s T^2 + D_s T + E_s \quad (T < 13) \\ &= 0.1708 \quad (T \geq 13) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

ここに、 $A_m = -3.0804 \times 10^{-4}$, $B_m = 1.2059 \times 10^{-2}$

$C_m = -1.7429 \times 10^{-1}$, $D_m = 1.1301$

$E_m = -2.2885$

$A_s = 8.4669 \times 10^{-5}$, $B_s = -3.5417 \times 10^{-3}$

$C_s = 5.3673 \times 10^{-2}$, $D_s = -3.4665 \times 10^{-1}$

$E_s = 9.6611 \times 10^{-1}$

Table 3 は以上の理論分布から求めた修正総合海象の波高、波周期別の発生確率を示す。なお、文献 5) で述べたように、対数正規分布は実測された波高を超える高い波の発生率を外挿して推定するには若干問題があるので、

Table 3 Corrected wave frequency observed by all voluntary ships.

Wave Height (m)	Wave Period (sec)						Sum over all Period
	0 - 3	3 - 7	7 - 9	9 - 11	11 - 13	13 -	
- 0.75	4.959	0.014	0.001				4.974
0.75 - 1.75	20.510	4.957	0.875	0.170	0.021	0.024	26.537
1.75 - 2.75	8.521	15.154	4.335	1.154	0.207	0.103	29.974
2.75 - 3.75	2.507	10.600	5.488	1.653	0.399	0.140	20.787
3.75 - 4.75	0.754	4.370	3.318	1.254	0.386	0.123	10.205
4.75 - 5.75	0.245	1.493	1.547	0.722	0.272	0.089	4.368
5.75 - 6.75	0.086	0.480	0.640	0.366	0.163	0.059	1.300
6.75 - 7.75	0.032	0.153	0.258	0.175	0.091	0.038	0.747
7.75 - 8.75	0.013	0.050	0.102	0.082	0.048	0.024	0.319
8.75 - 9.75	0.006	0.017	0.041	0.038	0.025	0.015	0.142
9.75 - 10.75	0.002	0.006	0.016	0.018	0.013	0.009	0.064
10.75 - 11.75	0.001	0.002	0.007	0.008	0.007	0.006	0.031
11.75 - 12.75	0.001	0.001	0.003	0.004	0.004	0.004	0.017
12.75 - 13.75			0.001	0.002	0.002	0.002	0.007
13.75 - 14.75			0.001	0.001	0.001	0.002	0.005
14.75 - 15.75					0.001	0.001	0.002
15.75 - 16.75						0.001	0.001
Sum over all Height	37.637	37.296	17.139	5.647	1.640	0.640	100.000

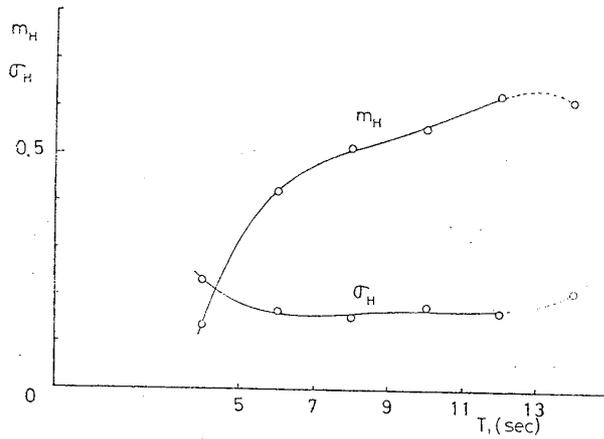


Fig. 10 Mean and standard deviation of wave height distribution in log-normal distribution for various wave period.

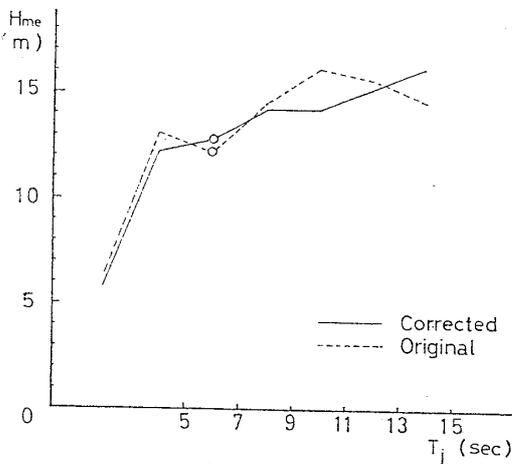


Fig. 11 Comparison between corrected H_{me} and original H_{me} for all voluntary ships.

波高は適用範囲を発生率 10^{-5} までに限定した。Fig. 11 は p_{mjs} を 10^{-5} としたときの修正総合海象の H_{me} 曲線と、未修正海象のそれを比較したもので、全体的にみて大差はないが、凹凸がややなめらかになっている。

実船計測より推定した波浪応答の長期分布の信頼度の検討は、海域海象での応答の長期分布を基準として論じるべきである。海域海象としては文献 3), 5) などの海象を採用することも考えられるが、これらと Table 3 の修正海象では若干の差もあり、観測年が異なることも考慮すると、今回の海象通報船の資料を対象とするには、この修正総合海象を海域海象とするのが妥当といえる。よって、同表の海象における応答を基準として、個々の船の計測結果から長期分布を精度より推定する方法について検討する。

4.2 遭遇海象修正による推定法

前に示したように、実測値から推定した最大値が広く散るのは、個々の船の航海条件の偏りによる遭遇海象の偏りに主として起因するが、他に標本数が少ないことによる H_{me} のバラツキと低下も影響している。後者につ

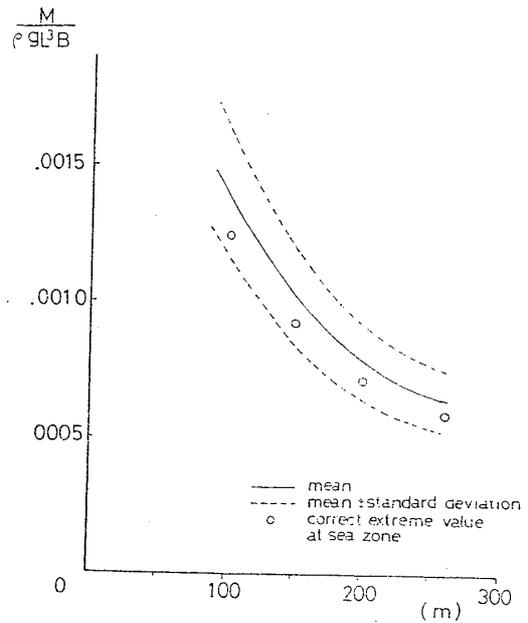


Fig. 12 Result of H -correction ($Q=10^{-8}$).

いては、総合海象の場合と同様に、個々の遭遇海象を修正することで改善される。

修正海象を導く方法は同一であるが、総合海象に比べ標本数が少ないため、波周期が最も長い $T > 13$ 秒の部分では、観測値がないもの、あるいは標本数が少なくて求めた $p(H|T)$ の信頼度に不安が残る例も見出される。

Fig. 12 は各船の修正海象における応答の長期分布の最大値 (超過確率 10^{-8} に対する特性極値) を求めた結果を示す。この遭遇海象を修正する方法 (以後 H 推定法と呼ぶ) によると、推定最大値の平均値は海域海象におけるそれより約 9% 高く、また変動係数は約 17% であるが、その値は L によって大きく変化しないという優れた性質を有している。

一般に実船計測から得られるものは応答の長期分布と遭遇海象であって、これから Fig. 12 の H 修正による推定最大値を求めることはできない。 H 推定法は応答の計算値を利用し、次の手順によらねばならない。

実船計測時の遭遇海象における応答の長期分布を計算によって求め (想定航海条件は単純なものでよい)、実測された応答の長期分布との比較から、修正係数 k_h を定める。次に遭遇海象の修正海象を導き、この海象での応答の計算値による長期分布、さらに超過確率 10^{-8} に対する極値 X_{mh} を求める。海域海象における極値 X_m は次式で求める。

$$X_m = 0.91 k_h X_{mh} \tag{13}$$

上式による推定値は 17% の C. O. V. に対応した誤差が含まれることはいうまでもない。

4.3 波浪応答の標準偏差分布による推定法

応答の長期分布は多数の短期分布の集合であり、それ

それぞれの短期分布はレーレー分布に従う。また、それぞれのレーレー分布の母数 R (応答の標準偏差) はある確率分布に従う。この R の確率密度関数 $p(R)$ が与えられると、応答の長期分布における応答 X の超過確率 $Q(X)$ は、次式で求められる。

$$Q(X) = \int_0^\infty p(R) \exp\left\{-\frac{X^2}{2R^2}\right\} dR \quad (14)$$

筆者らの研究によると、北大西洋の海象を想定海象としたときの波浪曲げモーメントの長期分布においては、 R は $p(R)$ が次式で与えられるワイブル分布で近似でき⁹⁾、この性質は海象、応答の種類が変わっても大きく変化しないと思われる。

$$p(R) = (\gamma_r/R)(R/\alpha_r)^{(\gamma_r-1)} \exp\{-(R/\alpha_r)^{\gamma_r}\} \quad (15)$$

ここに、 α_r : 尺度母数, γ_r : 形状母数

式(15)を式(14)に代入し、若干の変数変換により次式が導かれる。

$$Q(X) = \int_0^\infty \exp\{-t - (1/2)(X/\alpha_r)^2 t^{-(2/\gamma_r)}\} dt \quad (16)$$

Nordenström の展開式を参考に⁸⁾、 X が大きな値のとき適用できる $Q(X)$ の近似式を導くと、次式が得られる。

$$Q(X) \doteq \left\{ 2\pi f(\gamma) \left(\frac{X^2}{\alpha_r^2 \gamma_r} \right)^{f(\gamma)} \right\}^{1/2} \times \exp\left\{ -\frac{(2+\gamma_r)}{2} \left(\frac{X^2}{\alpha_r^2 \gamma_r} \right)^{f(\gamma)} \right\} \quad (17)$$

ここに、 $X \gg \alpha_r$, $f(\gamma) = \gamma_r / (2 + \gamma_r)$

上式によらないで、次の方法で $Q(X)$ を求めることもできる。 R がワイブル分布に従うとき、 X の分布もワイブル分布で近似でき、 $Q(X)$ は次式で表わされる。

$$Q(X) = \exp\{-(X/\alpha_x)^{\gamma_x}\} \quad (18)$$

ここに、 α_x : 尺度母数, γ_x : 形状母数

α_r , γ_r と α_x , γ_x の関係は文献 9) に図で与えられており、容易に求められる。式(17)あるいは(18)から、 $Q(X)$ が 10^{-8} に対応する特性極値は求められる。

以後 R の分布形を求め、それから X の極値を求める方法を R 推定法と呼ぶ。本法では実船計測で得られた R の分布をワイブル確率紙に記入し α_r , γ_r を求め、式(17)あるいは式(18)から X の極値を求めることになる。

Fig. 13 は個々の遭遇海象で得られた R の分布をワイブル確率紙に記入した結果の 1 例を示す。既述のように本稿では波浪曲げモーメントの計算値で考察を進めているが、実測結果でも似た分布になるといえる。Fig. 14 は R 推定法による推定最大値の分布状態を示す。本法によるときはその平均値と海域海象における極値の差は、 L が 150~200m の場合は小さいが、この誤差は L によって敏感に変化する。図から本推定法によるときは、推定値に L の関係になる修正係数を乗じなければならない

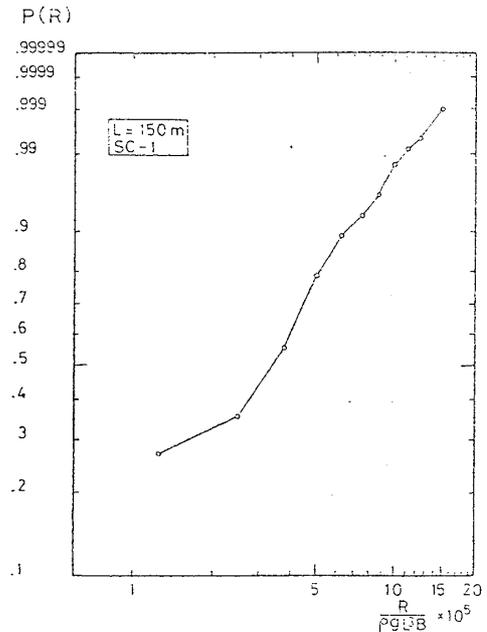


Fig. 13 Cumulative distribution function of standard deviation of wave bending moment plotted on Weibull probability paper (SC-1, supposed $L=150$ m)

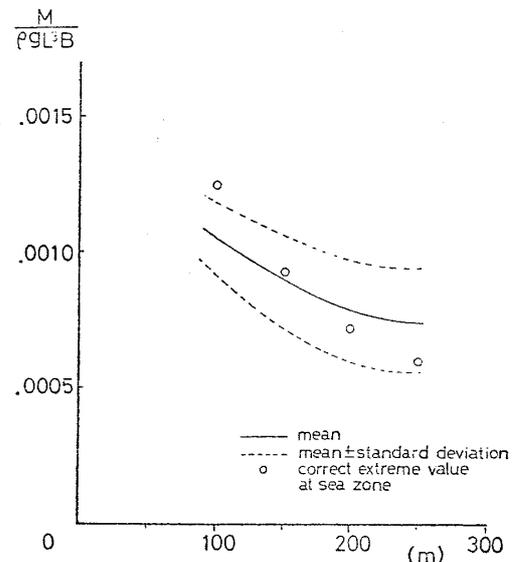


Fig. 14 Result of R -correction ($Q=10^{-8}$)

と判断される。しかし、誤差と L の関係は極値の性質から考えると、船の肥せきが変われば変化すると考えられ、精度のよい修正係数を求めるのは難しいと思われる。

Fig. 15 は各種の推定法による推定値の変動係数を比較したもので、本推定法による結果は L が大となるとバラツキは非常に大となり、大型船に対する推定値は他の方法によるものより劣ると判定される。

4.4 波浪応答分布による推定法

本推定法は既に 3.2.3 で示した X と $n(X)$, または X

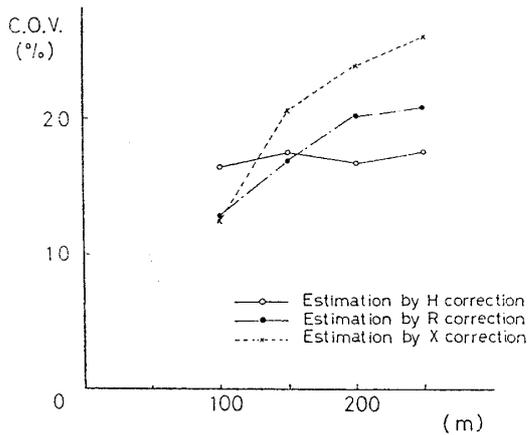
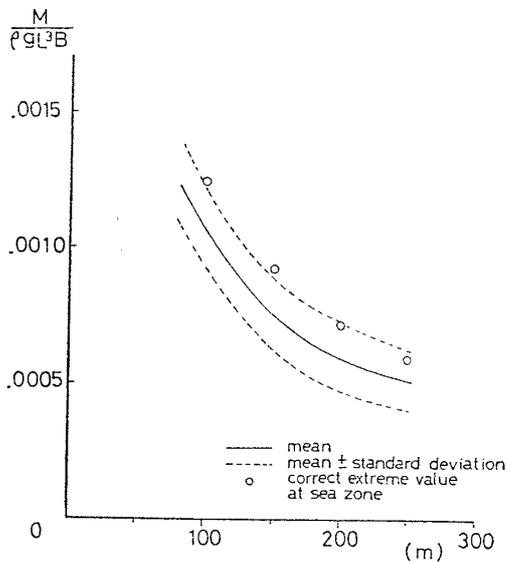


Fig. 15 C.O.V. in each result of correction.

Fig. 16 Result of X-correction ($Q=10^{-8}$)

と $Q(X)$ の関係の実測結果から応答の極値を推定する方法で、3.2.3では X の $n(X)$ の関係から外挿する方法を示したが、 X と $Q(X)$ の関係を採用しても結果は大差ない。Fig. 16 は本法(以下 X 推定法と呼ぶ)による推定極値の分布状態を示したもので、平均値は海域海象における極値より約 19% 低い値を示すが、 L によって大きくは変化しない。本推定法によるときは、推定値 X_{mx} を次式で修正すると、その平均値は海域海象における値に大体一致する。

$$X_m = 1.19 X_{mx} \quad (19)$$

なお、Fig. 14 に示すように、本法による推定値は L が大となるとともに変動係数が増加し、信頼度は低下して行く。

4.5 推定法に関する考察

現在採用されている X 推定法による応答の推定極値の信頼度が高くないので、それに代る推定法について検討した。海域海象における極値を基準にとり、推定値の平均値の誤差、そのバラツキの程度から判断すると、十分なものとはいえないが、平均値の誤差が最も小さく、ま

た誤差、変動係数の L による変化が非常に小さいという点で、 H 推定法が最良といえる。しかし、 H 推定法によっても推定極値の変動係数は約 17% で、満足すべきものとはいえない。実船計測から船の全就航期間中に働く波浪応答の最大値を推定することは、偏った採取法による標本から母集団の分布形を推定するのに似ており、推定値の変動係数がこの程度であるのは止むを得ない。

この検討を通じて明らかになったのは、推定値の信頼度は船が大型になる程低下することである。Fig. 15 に示したように、 X および R 推定法では C.O.V. は L とともに増加する。これは H 推定法では現われていないが、 L が 250m を超えると、同様のことになる可能性が高い。

前記のように R_m が見出される海面の波周期は L とともに大となる。計算に想定した船の例では L が 100m では波周期 6 秒だが、250m では約 11 秒になる。したがって、 L が 100m の船では遭遇海象において波周期区分 6 秒の海面の $p(H|T)$ が乱れてなければ信頼度の高い結果が得られ、250m の船で 12 秒の海面の $p(H|T)$ に左右される。

各船の遭遇海象での $p(H|T)$ のバラツキは、その波周期区分の海面の観測回数に影響する。Table 2 に示すように、各波周期区分別遭遇確率は、 T_j が増すとともに急速に減少する。 $T_j > 13$ 秒の海面では観測数 6 回程度、0 回の例も 9 隻に上る。このような標本数では信頼度の高い $p(H|T)$ は得られない。したがって、 L が増加するとともに $p(H|T)$ のバラツキは増す傾向にあり、得られる計測値、推定される最大値ともに信頼度が低下する。特に L が 250m を超える船では、計測結果が精度のよいものである確率は、相当低いと思われる。この問題は実船計測期間にも関係し、本資料の観測期間よりもさらに長期の計測が行われ、長周期の波における計測回数が増加した資料からの大型船に対する推定値の信頼度は、ここに示すものよりは向上したものになる。

5 結 言

北太平洋海域を航行する 62 隻の海象通報船の 3 年間にわたる遭遇海象を各船別に調べた結果、このような短期間では各船の航海条件の偏りの影響は顕著なものであり、海域海象という母集団からランダムに取り出された標本が示す分布よりはるかに広範囲に変化することが明らかになった。この各船の遭遇海象は、波浪応答の長期計測を実施したとき、実施船が遭遇するであろう海象のバラツキの標本と見なせることに着目し、長期実船計測で計測される最大値、あるいは計測結果から推定される全就航期間中の応答の極値の信頼度について研究した。その結果、それらのバラツキは大きく、しかも船が大型になる程信頼度が低下して行くことが明らかになった。

これから少数の実船計測例から応答の極値を推定することは、このバラツキの大きい推定値の少数の値から、正しい値を見出そうとすることであり、精度のよい結果を得ることは難しいとの結論が得られた。

この困難を解消するため、実測値を外挿し信頼度の高い推定極値を得る方法について検討した結果、観測された遭遇海象を修正し、その海象での極値を推定する方法を導いた。この方法によるときは推定値の平均値は、求めるべき海域海象での極値に一致し、その変動係数は約17%になると判断される。

なお、実船計測より推定する極値の信頼度は、長周期の波ほど観測回数が少なくなるため、船が大型になるほど低下する。したがって、長さが250mを超える船では3年程度の実船計測では、応答の極値を精度よく推定することは、特に困難になるといえる。

謝 辞

本研究のために貴重な資料を提供していただいた、気象庁海上気象部 松本次男氏、長谷川禮三氏に、篤く謝意を呈します。

参 考 文 献

- 1) 日本造船研究協会第80研究部会：北太平洋および日本近海の波浪統計資料，造船研究，Vol. 8, No. 1 (昭和41年)。
- 2) Yamanouchi, Y. and Ogawa, A.: Statistical Diagrams on the Winds and Waves on the North Pacific Ocean, Papers of Ship Research Institute, No. 2 (1970)。
- 3) 日本造船研究協会第163研究部会：気象海象および船舶の波浪中応答に関する統計解析ならびに実船計測，研究資料 No. 293 (昭和53年)，研究資料 No. 312 (昭和54年)。
- 4) Walden, H.: Die Eigenschaften der Meerswellen in Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen Nr. 41, Hamburg (1964)。
- 5) 真能 創，河辺 寛：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 (第4報)，日本造船学会論文集，第147号 (昭和55年)。
- 6) 真能 創：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，日本造船学会論文集，第135号 (昭和49年)。

- 7) 太田恭一，杉江英俊：北太平洋の波浪観測値の統計解析について，防衛大学校卒業論文 (昭和56年)。
- 8) Nodenström, N.: Methods for Predicting Long Term Distributions of Wave Loads and Probability of Failure for Ship, Det Norske Veritas, Report No. 69-29-S (1970)。
- 9) 真能 創，河辺 寛：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 (第3報)，日本造船学会論文集，第142号 (昭和52年)。

Appendix

波浪応答の長期分布において，超過確率 10^{-N} に対応する特性極値 X_m は，次式で近似できる⁶⁾。

$$X_m = 1.073 N f_2(p) R_m \quad (\text{A.1})$$

ここに， $f_2(p) = \{-\log p_{m_j} - \log p_{m_0}\}^{-1/2}$

R_m ：長期分布を構成する短期分布の標準偏差 R の中の最大値

上記の標準偏差が R_m になる航海条件を対象に考えると，線形応答では R は波高 H に比例し，その比例定数 $\bar{R}(j, k)$ は波周期 T_j のみの関数となる。任意の船において， $\bar{R}(j, k)$ がある波周期 T_j で極大となるものとするとき，想定海象において波周期区分 T_j のときの最高波高を H_{m_j} とすると，

$$R_m = \bar{R}(j, k) H_{m_j} \quad (\text{A.2})$$

式 (A.1)，式 (A.2) から， X_m は想定海象の H_{m_j} と $f_2(p)$ によって変化する。したがって，式 (1) に示す H_{me} が想定海象の荒さを示すものとなる。

ただ，ある波周期区分 T_j における最高波高 H_{m_j} が非常に低く，隣接する波周期区分の最高波高 $H_{m, j-1}$ または $H_{m, j+1}$ が高い場合 (以下 $H_{m, j\pm 1}$ で表現する) は，

$$R_m = \bar{R}(j\pm 1, k) H_{m, j\pm 1} > \bar{R}(j, k) H_{m, j} \quad (\text{A.3})$$

ここに， $\bar{R}(j\pm 1, k)$ は隣接する波周期区分における応答の標準偏差の比例定数

垂直波浪曲げモーメントの場合， $\bar{R}(j\pm 1, k)$ と $\bar{R}(j, k)$ の関係は大体次式で近似できる。

$$\bar{R}(j\pm 1, k) \geq 0.9 \bar{R}(j, k) \quad (\text{A.4})$$

このことから，このような場合はその波周期 T_j に対する H_{me} は次式で求める値に修正する必要がある。

$$H_{me} = 0.9 H_{me}(j\pm 1) \quad (\text{A.5})$$

ここに， $H_{me}(j\pm 1)$ は隣接波高区分 $T_{j\pm 1}$ における H_{me}