

(昭和 58 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 (続)

正員 河 辺 寛* 正員 真 能 創*

On the Variety of Wave Conditions Encountered by Ships Sailing in the
Same Sea Zone (Continued)by Hiroshi Kawabe, *Member* Hajimu Mano, *Member*

Summary

The supposed wave condition has the most significant effect on the result of the statistical estimation of the wave induced variable of a ship. It is the general case of the theoretical estimation of the wave induced variable of a ship in a given sea zone to suppose the observed wave statistics of the weather ships or voluntary ships in the sea zone.

Authors researched the data of wave observation of 62 voluntary ships in the North Pacific Ocean during 3 years (1976-78). It was clarified that the wave conditions encountered by them had remarkably wide scatter band in comparison with that of random samples from the same population.

To investigate the cause of the wide scatter band, authors research statistical character of wave and wind conditions observed on 35 voluntary ships in the above sea zone during 6 years (1976~81), wave condition on 9 weather ships in the North Atlantic Ocean for 18 years, and records wind measurement at 5 weather stations in Japan for 20 years.

From the above statistical study, it is made clear that the newly analysed wave and wind records have also the similar wider scatter band. Authors deduced from the result that such variable as wave and wind in ocean have the basic character in which the sample distribution shows a different distribution from that of random samples from usual population having a given distribution with constant parameters.¹

Authors study on the probabilistic model of population which can describe this special sample distribution, and introduce a population having a complex distribution with parameters which are not constant but stochastic variables, too. The distribution of the above observed wave heights is described by assuming them as sample values from the population with a complex log-normal distribution with a constant standard deviation and a mean which is described by a normal distribution.

From the study of the sample distribution of wave conditions encountered by ships, it is evaluated that the coefficient of variation of the extreme wave condition encountered by a ship during her life time in a given sea zone may be nearly 15% in maximum, and the value for larger ship will increase. This means the coefficient of the extreme value of wave induced variables of the ship has also nearly the same value. This value is larger than that usually supposed in the case of reliability of strength of ship structure.

1 緒 言

海洋波に対する船の線形応答の統計的推定においては、想定海象が非常に大きな影響を与える。任意の海域を航行する船のこの種の応答の長期分布の推定には、その海域における海象観測船、またはその海域を航行する多数の船の海象観測結果から得られた海域海象を、その

* 防衛大学校

船の遭遇海象とするのが、一般的である。これは、船がその海域を航海する場合、遭遇海象はいわゆる標本分布に従ったバラツキを示すが、航海期間が長期になると、母集団分布との差は無視できるであろうとの考えを基にしている。

筆者らは、北太平洋を航行する 62 隻の船の 3 年間の波浪観測結果を解析し、このような短期間では、各船の遭遇海象のバラツキは非常に大きいことを明らかにし

たり。

筆者らはこのバラツキの発生する要因を究明するため、北太平洋海域を航行する35隻の船の6年間の海象観測結果、北大西洋における海象観測船の18年にわたる観測結果²⁾、および海洋および沿岸の気象台の20年間にわたる風の観測値を解析し、海洋における風、波浪の標本分布は従来の単一分布の母集団からとり出された標本の示す分布とは、異なる分布を示すことを明らかにした。さらに、筆者らは海洋波の特異な標本分布を記述できる母集団の工学モデルについて研究した。

この海洋波の標本分布においては、船の航海期間が20年になっても、遭遇海象のバラツキは、従来考えられていたものよりはるかに大きい。したがって、海洋波に対する線形波浪応答の長期分布における極値のような統計値の信頼度については、従来の概念の修正を要求するものであり、重要であるのでここに報告する。

2 気象現象の統計的性質

本報告で目的とするところは船舶が遭遇した海象の統計的特性の解明であるが、既に文献1)でも述べたように船舶の遭遇海象の差は大きい。これが、どのような要因によって生じるかを検討するため、海洋波と密接な関係があり、計測精度が高く、標本採取の上で偏りのない気象現象の統計的特性を知ることが重要である。この目的で、海洋および沿岸における風速の統計的解析を行った。

2.1 調査資料

日本全国の127か所の気象観測所が日々の3時間間隔に計測した気温、気圧等の各種観測データは、1961年より新地上気象テープという名称で気象庁に保存されている。筆者らは気象庁より1961～81年の20年間の磁気テープを借用しその統計解析を行った。

海洋波の性質を知る目的に関連して、海洋性気候であると考えられる日本沿岸の大島、八丈島、三宅島、御前崎、潮岬の5か所の気象観測所の記録を対象とした。

2.2 風速の観測値の統計的独立性

海洋および沿岸における風は、波浪と似た統計的特性を有する確率変数であるとみられる。また、風速は計器計測値であり、測定精度が高く、風の長期計測結果より求められる統計的特性は、波浪のそれを推定する材料に使うとみられる。

確率変数とみられる物理量の統計解析において、普通個々の標本値がたがいに独立であることが基本的条件になる。風速は3時間おきに1日に8回観測されているが、こうした定時観測による測定値は、1個の時系列を形成すると考えられ、それぞれの観測値間の統計的独立性を検討し、上記の条件を満足する標本抽出法によらね

ばならない。

時系列観測値の独立性の検討には、次式による自己相関係数が用いられる³⁾。

$$\rho(P) = \frac{\frac{1}{N-P} \sum_{i=1}^{N-P} (X_i - \bar{X})(X_{i+P} - \bar{X})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

ここに、 X_i : i 番目の観測値

N : 全観測数

$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$: X の平均値

$P=0, 1, 2, 3, \dots$

ρ は $P=0$ のとき1であり、 ρ がゼロに近いほど観測値間の相関が小さくそれぞれが独立であるとみなせる。一例として1975年の大島における記録の時系列と自己相関係数をFig.1に示す。気温、気圧などの気象統計では ρ がゼロとなるには2.5～3日程度の間隔であるといわれているが⁴⁾、Fig.1の結果を見ると1～1.5日程度で相関係数がゼロとなり、1日間隔の観測値を統計量として用いばそれぞれの観測値間は統計的に独立であると見なせる。よって、以下の統計では午前9時(国際標準時0時)の観測値を用いた。なお、標本間の相関係数と標本分布との関係については後に考察する。

2.3 風速の頻度分布

風速の分布をワイブル確率紙、対数正規確率紙にプロットをして、それぞれの適合性について検討した結果、どの観測地点においてもワイブル分布の直線性が良く、風速の分布はワイブル分布に従うと見なせる⁵⁾。Fig.2に三宅島の各年ごとの20年間の風速分布をワイブル確率紙に記入した結果を示す。個々の分布は直線に近いが、そのバラツキは非常に広い。比較の例として、三宅島の20年を総合した風速分布に等しいワイブル分布に

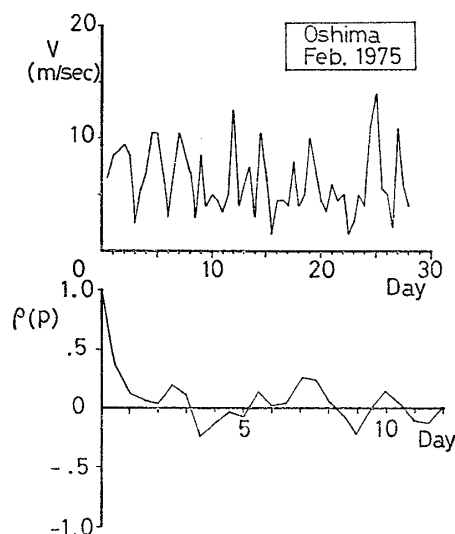


Fig.1 Time history and auto-correlation coefficient of wind velocity (February 1975, Oshima)

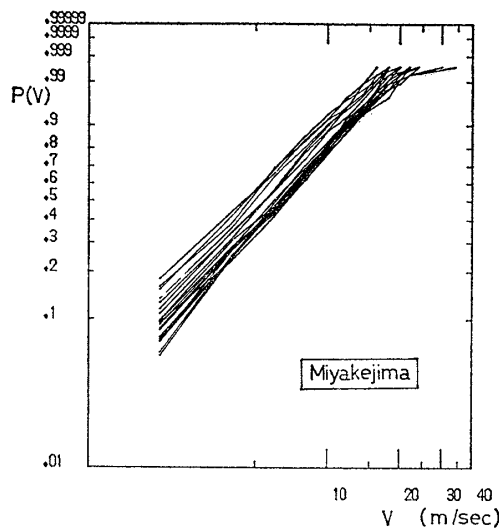


Fig. 2 Cumulative distribution function of wind velocity plotted on Weibull probability paper (1961~1981, Miyakejima)

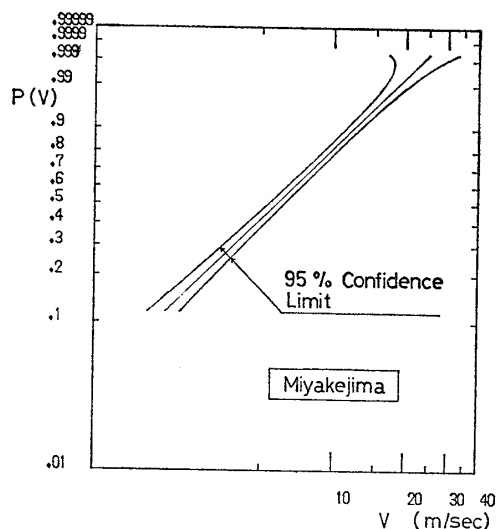


Fig. 3 Theoretical cumulative distribution function of wind velocity and confidence limit for the probability level of 95% plotted on Weibull probability paper

95% 管理曲線を記入して Fig. 3 に示す。各年ごとの風の観測値が分布のバラツキがワイブル分布に従う無限母集団よりランダムにとり出された標本値であるとする、その95%は図の曲線の中に入るわけであるが、Fig. 2 にみられるように実際の観測値は、はるか広範囲に分布する。

2.4 平均値分布

風速の母集団の平均値、標準偏差がそれぞれ m_{v0}, σ_{v0} であるとする、標本数 N 個の標本群の平均値の標本分布は、平均 m_{v0} 、標準偏差 $\sigma_{v0}/\sqrt{N}$ の正規分布となる。母集団平均と標準偏差の推定値を各地点の20年間を総合した分布より得られる値とし、任意の年 i における平均風速 m_{vi} を、次式によって正規化した平均値 u_m に換算し、その頻度分布を求めると、Fig. 4 のようになる。

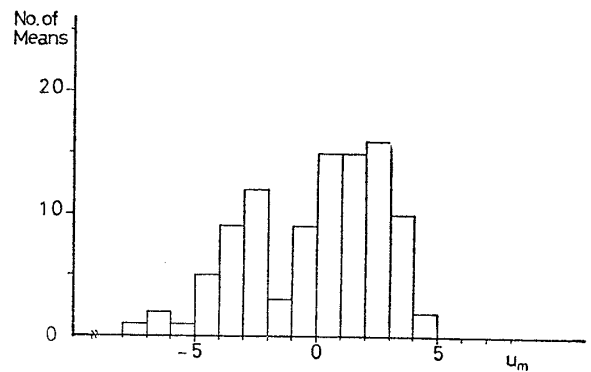


Fig. 4 Frequency distribution of mean wind velocity observed at 5 weather station in Japan

$$u_m = \frac{m_{vi} - m_{v0}}{\sigma_{v0}/\sqrt{N}} \quad (2)$$

ここに、 N は観測数で $N=365$ である。

各年ごとの標本群が同一の母集団よりとり出されたものであるとすると、 u_m の平均値はゼロであり、その標準偏差は1であるが、図を見てわかるようにバラツキ範囲は相当広い。

2.5 年間観測値間の母集団検定

気象現象は1年を1サイクルとした変化を続ける。よって、統計量の単位として1年間の観測値が一つの標本分布を形成する。先に述べた年間平均などの統計量を比較する場合には、これらの年単位の標本群がそれぞれ同一の母集団からとり出されたかどうかということが問題となる。

標本群の母集団検定の手法として次の χ^2 検定が用いられる⁶⁾。風速を r 個の階級に分け、 s 組の標本群 (20 年間の観測値であるから20組) について次の χ^2 値の有意性水準の検定を行えばよい。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \frac{(v_{ij} - N_j P_i)^2}{N_j P_i} \quad (3)$$

ここに、 v_{ij} : j 番目の標本群の i 番目の階級に入る個数

$$N_j = \sum_{i=1}^r v_{ij} : j \text{ 番目の標本群の全個数}$$

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^s v_{ij}$$

$$N = \sum_{j=1}^s N_j$$

$$\text{自由度} = (r-1)(s-1)$$

風速階級を 2m/sec おきに8階級に分けると自由度は133となり、有意水準を5%とすると $\chi^2_{0.05} = 160.72$ となる。各観測所における観測結果の χ^2 値を Table 1 に示す。表には観測単位を5年としたときの χ^2 値も示してある。これらの結果より各気象台の各観測値は5%の有意水準で、同一母集団より抽出された標本であることは棄却される。

Table 1 Result of χ^2 test

Weather station	Year	
	1	5
Miyakejima	395.62	268.93
Oshima	217.81	116.26
Hachijojima	294.77	148.76
Omaezaki	259.97	112.79
Shionomisaki	205.57	105.67
Degree of freedom	133	76
$\chi_{0.05}^2$	160.72	97.13

以上のように、風のような気象現象は観測値ごとにその分布範囲が異なり、それらの平均値のバラツキからも、また標本群の母集団の χ^2 検定からも、単一母集団から得られた標本の理論分布より、相当広範囲に分布する特性を有する。

3 大洋における風、波の統計的特性

3.1 調査対象船、調査項目

調査に用いた資料は文献 1) と同じもので、気象庁に保管されている船舶気象観測表の磁気テープである。

調査対象期間は 1976~81 年の 6 年間とする。この期間に気象通報を行った船舶は約 800 隻にのぼる。この中で以下の条件を満たす船を調査の対象とした。

- i) 6 年間の期間中欠けることなく連続して観測を続けている。
- ii) 航海期間中に 1 日に 1 回以上気象観測を行っている。
- iii) 対象海域として北緯 30°N 以北の北太平洋海域とし、この海域での観測数が全観測の 70% 以上である。

文献 1) では 1976~78 年の 3 年間で上記の条件を満足する船は 62 隻であったが、その後の 3 年間で観測の欠落や航行区域の変更があったものが 27 隻あり、その結

Table 2 Principle particular of voluntary ship

Name	L (m)	D.W. (ton)	No. of Data	Name	L (m)	D.W. (ton)	No. of Data
SC 1	150	12300	2814	B 8	188	31973	2993
SC 2	164	7061	2536	B 9	196	30600	4555
SC 3	180	11151	6781	B 10	170	18922	2722
SC 4	150	12517	3614	B 11	155	14302	2604
SC 5	188	31950	2943	C 1	175	16528	2947
SC 6	143	10598	5269	C 2	204	30007	2720
SC 7	132	6317	4264	C 3	175	16911	3765
SC 8	144	11290	5084	C 4	211	30135	2431
SC 9	134	8999	2062	C 5	204	29860	2633
SC 10	178	24489	3872	C 6	195	23602	5184
B 1	244	65799	2983	C 7	242	38540	2457
B 2	166	19524	4678	C 8	200	24770	3037
B 3	174	25700	7230	C 9	200	24278	4875
B 4	185	34948	4314	C 10	195	23578	4877
B 5	185	34843	6413	C 11	175	16404	2342
B 6	174	25795	5523	C 12	200	23766	3670
B 7	188	31858	3952	C 13	175	16626	3005
				C 14	200	23667	3810

果調査対象船は 35 隻となった。以後これを海象通報船と呼ぶ。海象通報船の主要目と期間中の観測数を Table 2 に示す。同表で船種の SC は特種貨物船（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。

船舶気象観測表の観測項目は気温、気圧その他全部で 34 項目に及ぶ。その中から波高と波周期および風速を取りだし各船別の波高波周期相対頻度表、風速頻度表およびそれらの平均値、標準偏差などの統計処理を行った。なお、波高はうねりと風浪が報告されているが、どちらか高いほうの値とした。

3.2 全海象通報船の遭遇海象

Table 3 に 35 隻の海象通報船の波と風の観測結果をまとめたものを示す。以後これを総合海象、総合風速分布という。文献 1) では 1976~78 年の 3 年間の総合海象の特性を検討するため、波について既存の北太平洋、北大西洋の観測値との比較をしたが、その後の 3 年間の観測値の追加によって観測値の特性が変化したかどうかを検討する。

比較に用いる資料は、同海域を航行する海象通報船の 4 年間の資料をまとめた日本造船研究協会第 80 部会 (SR 80 部会)⁷⁾ と、同じく海象通報船の 1964~73 年の 10 年間の 350 万個の観測値をまとめた同協会 163 研究部会 (SR 163 部会)⁸⁾ の報告である。

i) 総合海象

Fig. 5 に総合海象と北太平洋の波周期分布の比較を示す。前の 3 年間のものと比べて波周期が 5 秒以下の発現頻度が若干減少し、7~9 秒の発現頻度が増加した。他と比べると、11 秒以上の長周期の波の発生頻度が低い。

波高の頻度分布は対数正規分布に従う¹⁾。Fig. 6 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。

任意の波浪統計資料の過酷度を比較するには、その海

象の等価最高波高 H_{me} によって比べることができる。 H_{me} による比較は文献 9) により次式で計算される。

$$H_{me} = H_{mj} \left\{ \frac{5}{-\log p_{mj}} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

上式で、 H_{mj} は任意の波周期区分 T_j における最高波高、 p_{mj} はその発生確率を示す。Fig. 7 は式 (4) より求めた前記の観測結果と総合海象の H_{me} 曲線である。個々の船の遭遇海象には相当バラツキはあるが、総合的に見ると同一海域の他の観測結果と同程度の過酷度であるといえる。

ii) 風速分布

海象報告船の風速の観測値も、先に

Table 3 a) 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	1277	332	81	29	10	2	1731
0.75 - 1.75	15444	10845	2182	507	157	95	29230
1.75 - 2.75	14170	23071	6513	1821	427	147	46149
2.75 - 3.75	4133	16828	7977	2742	615	153	32448
3.75 - 4.75	636	5355	5732	2653	712	170	15258
4.75 - 5.75	102	1203	1760	1721	580	119	5485
5.75 - 6.75	34	389	539	748	428	67	2205
6.75 - 7.75	12	561	284	365	273	66	1561
7.75 - 8.75	7	47	93	131	114	25	417
8.75 - 9.75	3	27	56	40	42	13	181
9.75 - 10.75	6	26	37	50	51	10	180
10.75 - 11.75		1		6	7	1	15
11.75 - 12.75				40	3	7	50
12.75 - 13.75	1				7	1	9
13.75 - 14.75				1	1	4	6
14.75 -			4	15	2	4	25
Sum over all Height	35825	58685	25258	10869	3429	884	134950

Table 3 b) Wind frequency observed by all voluntary ships

Wind speed (kt)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-	Total
No. of data	21986	56089	39843	13797	2793	358	65	29	0	134950

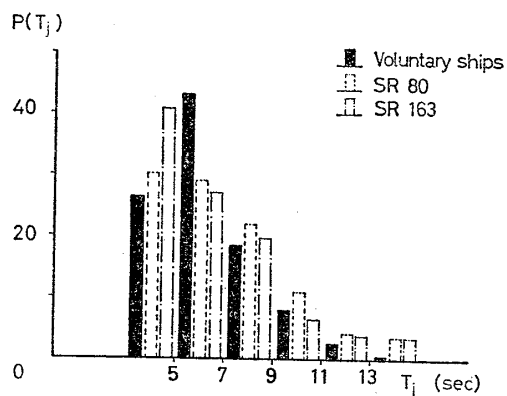


Fig. 5 Comparison of wave period distribution

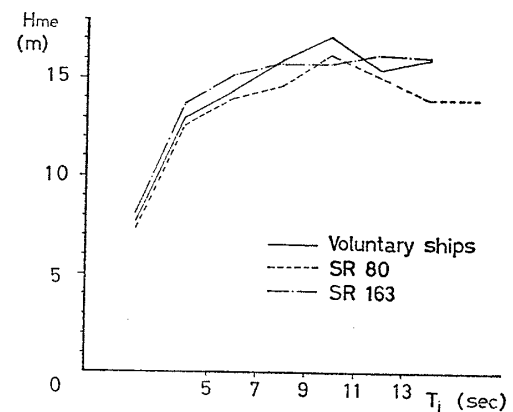
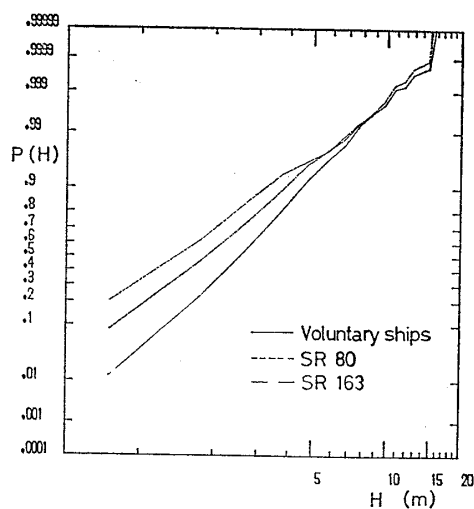
Fig. 7 Comparison of effective maximum wave height (H_{me}) curves

Fig. 6 Cumulative distribution function of wave height plotted on log-normal probability paper

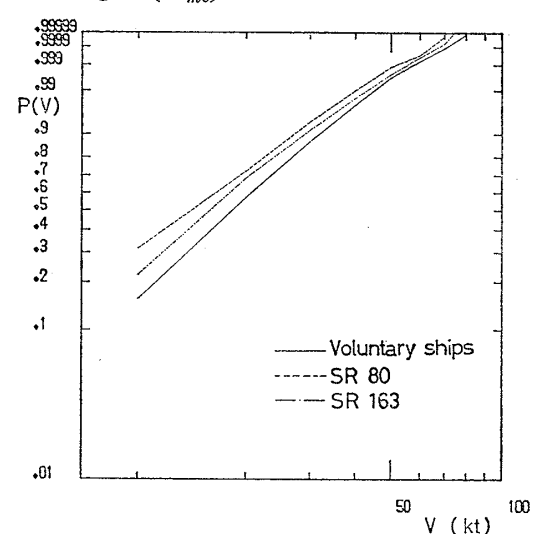


Fig. 8 Cumulative distribution function of wind velocity plotted on Weibull probability paper

示した気象台の観測値と同様に風速分布はワイブル分布に従う。Fig. 8 に風速分布をワイブル確率紙に記入した結果を示す。

3.3 各船別遭遇海象

3.3.1 波高分布

Fig. 9 に各船の遭遇海象における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。この場合も波高は対数正規分布に従うと見なせる。ただ、同図に明らかにように、各船の観測値は広範囲に分布する。Fig. 10 は風速の場合と同一要領で、各船の観測平均波高（この場合は波高の対数の平均値）を正規化した u_m （母集団の平均値 m_{H0} 、標準偏差 σ_{H0} は総合海象における値とした）の分布を示す。総合海象がこの海域の海域海象¹⁾であるとしたとき、この母集団よりとり出された N 個の標本の平均値の標本分布は、前記のように平均値 m_{H0} 、標準偏差は $\sigma_{H0}/\sqrt{N}$ の正規分布に従う。したがって、各船の平均波高は同図の u_m が ± 2 の間に 95% が分布すべきである。同図から、この場合の標本平均値の分布

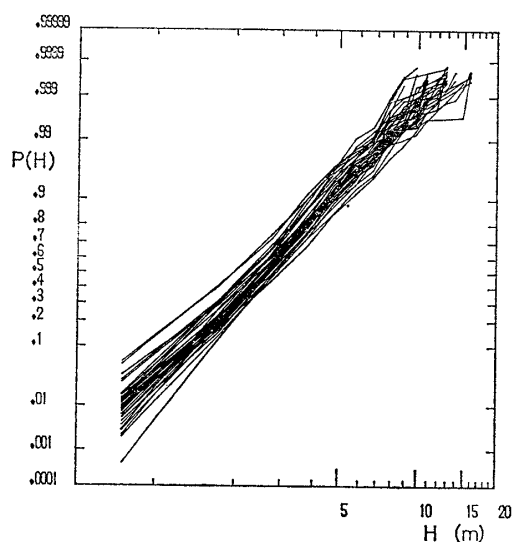


Fig. 9 Cumulative distribution function of wave height observed by each voluntary ship plotted on log-normal probability paper

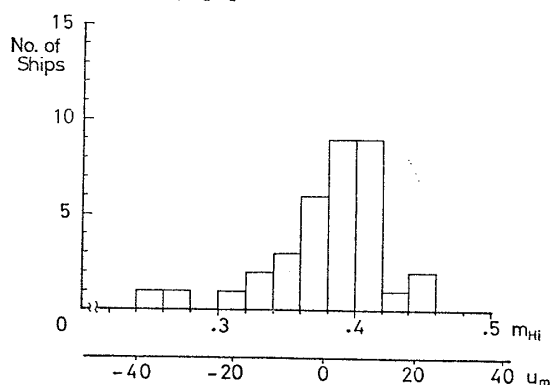


Fig. 10 Frequency distribution of mean wave height observed by each voluntary ship (m_{Hi} in log value)

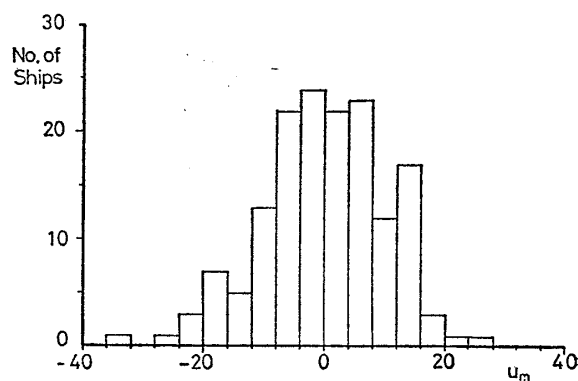


Fig. 11 Frequency distribution of mean wave height observed by 9 weather ship in North Atlantic Ocean for 18 years

が、いわゆる標本分布より如何に広いかが分かる。

Fig. 11 は北大西洋の9定点における海象観測船の18年の波浪観測結果²⁾より波高の年平均値を整理した結果を示す。本資料は専門の観測員による観測値であり、通報船の場合より観測精度は高くみられるが、そのバラツキは Fig. 10 の場合と大差ない。したがって、Fig. 10 のバラツキは、観測精度の影響によるものではなく、波高の標本分布の持つ特性に由来するといえる。

3.3.2 風速分布

Fig. 12 に各船の観測した風速分布をワイブル確率紙にプロットをした結果を示す。前記の気象台の観測値と同様に、ワイブル分布に従うと見なせる。

Fig. 13 に各船の観測平均風速 m_{vi} を、前記と同様に総合風速分布の平均値、標準偏差を母集団のそれとして、式(2)により正規化した値で、頻度分布を示す。この場合も波高と同様に、単一母集団よりとり出した標本の平均値の標本分布より広範囲に分布する。

3.3.3 波および風の母集団検定

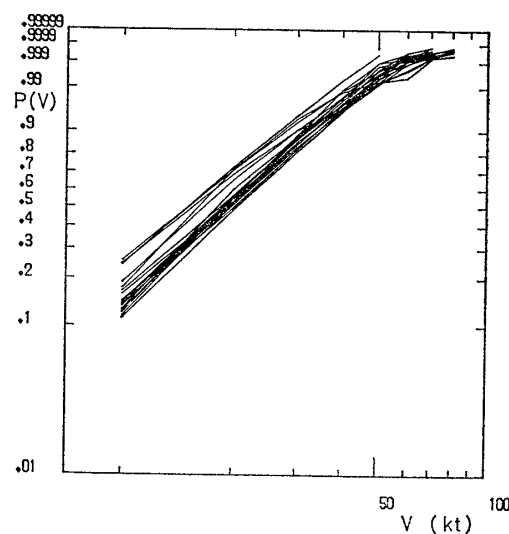


Fig. 12 Cumulative distribution function of wind velocity observed by each voluntary ship plotted on Weibull probability paper

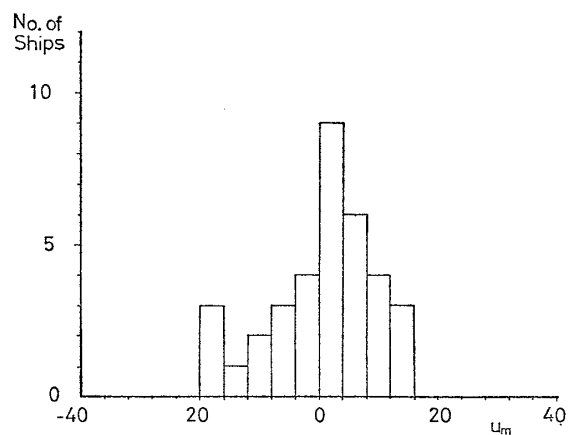


Fig. 13 Frequency distribution of mean wind velocity observed by each voluntary ship

Table 4 Result of χ^2 test

	Wave	Wind
χ^2	9089.07	4886.6
Degree of freedom	510	238
$\chi^2_{0.05}$	565	274

海象通報船の波、風の観測値は、同一の期間同一の海域を航行したときに計測された値であるが、前述のようにそれぞれの観測値間には相当のパラツキがある。船ごとに観測値が同一母集団よりとり出された標本と見なせるかどうかを調べるため、前記の χ^2 検定を行った結果を、Table 4 に示す。 χ^2 検定および前記の平均値検定の結果より明らかなように、船ごとの遭遇海象、風速の観測値は同一の母集団より抽出されたものであるとは見なせない。波高は目視観測による誤差は考慮の必要があ

るとしても、計器計測値である風速でも同じ結果が得られることは重要である。

文献 1) で今回と同一結果が得られたことに関しては、航海期間が 3 年であり、海域内の小海域別の航行頻度、季節別の航海頻度などの航海条件の偏りがその主要因と考えたが、6 年でも同様の結果が得られるということは、他の要因も考える必要がある。

3.3.4 等価最高波高

波高分布のパラツキを海象の荒さという面で比較するため、各波周期区分における H_{me} を示すと、Fig. 14 のようになる。また、Fig. 15 はその変動係数を文献 1) のそれと比較したもので、航海期間が 3 年から 6 年に延長されても、ほとんど同じ結果になる。

ただ、長周期の波の H_{me} の変動係数は、標本数の増加により若干小となったが、依然かなり大きく、文献 1) で述べたように、船長が 250 m 以上の大型船がこの海域を航海する場合、6 年程度でも線形波浪応答の極値のパラツキは、より小型の船のそれよりは大きくなるとみられる。

3.4 総合考察

波浪応答の長期分布の統計的予測では、その船の就航海域の海象をその海域における海象観測船あるいは実船の観測結果から求め、一定の形で与え、これを海域海象としている。これは与えられた想定海象という単一母集団分布があり、個々の船の遭遇海象はその分布のまわりに、いわゆる標本分布に従って分布するであろうとの考えに基づいている。母集団分布が単一であれば、この標本分布は船の全就航期間（例えば 20 年）というような標本数が大となると、母集団分布との差というのは

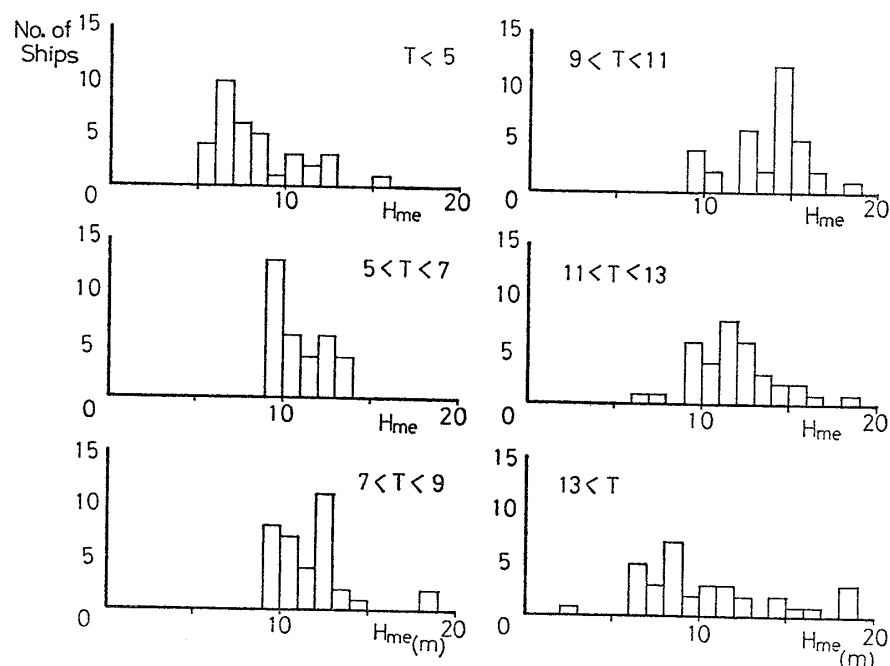


Fig. 14 Frequency distribution of H_{me} values in each wave period interval

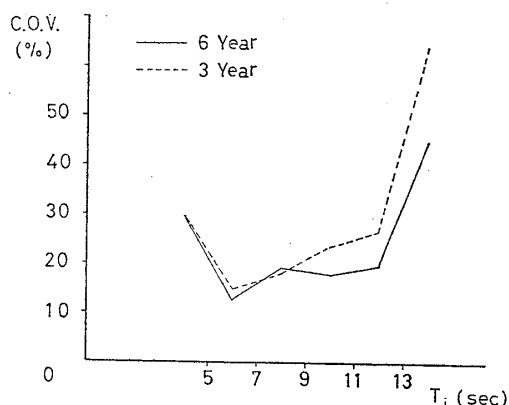


Fig. 15 Coefficient of variation (C. O. V.) of H_{me} values in each wave period

無視できる程度になり、母集団分布を海域海象であるとしても個々の船の遭遇海象との差は無視できる。

しかし、前述のように、実船の遭遇海象というものの分布範囲は単一分布からとり出された任意の標本の示す分布をはるかに超えたものになる。

風、海洋波の標本分布が独得の特性を示すことは、これらのものの母集団分布は単一分布では記述できない特性を有していることを意味している。このことは観測誤差が考えられない風速でも全く同一の特性を示しており、自然現象の有している基本的特性であるとみられる¹⁰⁾。

このような特性を有する海洋波に対する線形応答の長期分布における極値は、単一分布の母集団を想定して推定する既往の結果より、相当大きく偏った値が、無視できない確率で見出されると考えられる。

なお、気象台の観測値においては、標本はたがいに独立とみなせる。しかし、北太平洋の観測値の一部、北大西洋の観測値では、観測間隔からみて、たがいに相関のある標本も含まれる。これらは有効標本数を減少させ、標本分布が見掛上大きなバラツキを有する影響は考えられる。これについては後述する。

4 風および波の母集団の工学的モデル

4.1 母集団モデル

前記の風および波の独得の標本分布は、その現われる要因は複雑であろうと思われるので、このような標本分布が現われる母集団分布のモデルについて考察を進める。

4.1.1 海象通報船による観測結果

(1) 平均値

全通報船の観測結果を総合した総合海象（海域海象）より得られる波高および風速の平均値、標準偏差を、母集団分布のそれと見なしたときの各船の観測値の平均値（標本平均値）の分布は Fig. 10, 13 に示すようになる。

母集団分布を母数が一定値の単一分布とみるときは、このような標本分布は記述できない。しかし、母集団分布を母数もまた確率変数である複合分布であるとする、このようなバラツキを記述できる。

母集団の平均値が確率変数であると仮定した場合、それによる標本平均値の分散は σ_μ^2 だけ増加する。したがって、母集団標準偏差 σ_0 が一定値の場合は、標本平均値の分散 σ_m^2 は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_m^2 &= \sigma_\mu^2 + \sigma_N^2 \\ &= \sigma_0^2(\eta_\mu^2 + 1/N)\end{aligned}\quad (5)$$

ここに、

$$\eta_\mu = \sigma_\mu / \sigma_0$$

$$\sigma_N = \sigma_0 / \sqrt{N}$$

本観測例の場合、観測期間は6年であり、文献1)で述べた航海条件の偏りの影響は依然含まれているとすると、その影響による標本平均値の分散の増加はありうるので、それを σ_s^2 とすると、 σ_m^2 は次式のようにになる。

$$\begin{aligned}\sigma_m^2 &= \sigma_\mu^2 + \sigma_s^2 + \sigma_N^2 \\ &= \sigma_0^2(\eta_\mu^2 + \eta_s^2 + 1/N)\end{aligned}$$

ここに、

$$\eta_s = \sigma_s / \sigma_0$$

Fig. 16 は各通報船の1年、3年、6年の記録から求めた平均値のバラツキの変化を図示した結果であって (σ_m から σ_N を除去してある)、 σ_m が観測期間に応じて低下しているのは、観測期間が延長するとともに η_s が低下するためとみられる。しかし、船の全就航期間を対象とすると、 η_μ , η_s がそれぞれどのような値になるかは、本資料では推定できない。

(2) 標準偏差

Fig. 17 に各通報船の観測結果から得られた波高の標準偏差のバラツキを示す。また、Fig. 18 に示すように、標準偏差と平均値の間に相関は認めにくい。よって、平均値と同じ考え方で波高の母集団分布を考えるなら、平均値、標準偏差がそれぞれ独立の確率変数である複合分布を仮定すべきであろう。しかし、標準偏差の方が若干バラツキが小さいようにみられるので、ここでは第1近

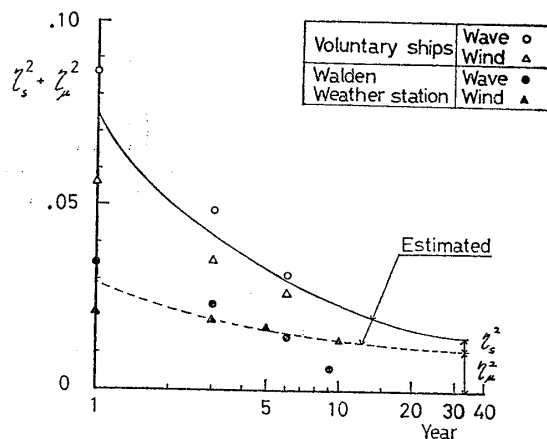


Fig. 16 Relation between η_μ , η_s and observed year

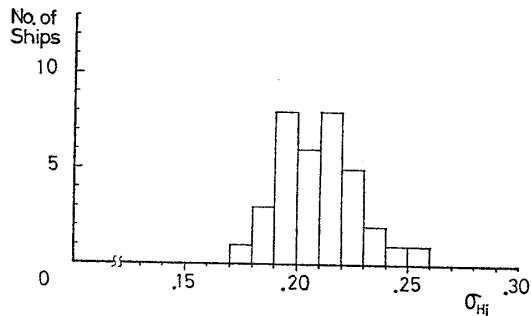


Fig. 17 Frequency distribution of standard deviation of wave height by each voluntary ship (σ_{Hi} in log value)

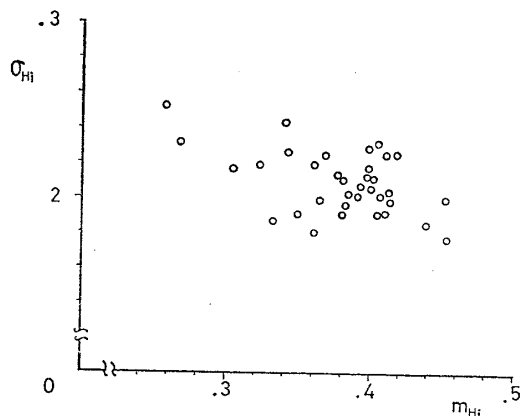


Fig. 18 Correlation between M_{Hi} and σ_{Hi} observed by each voluntary ship

似として、波高の母集団分布としては平均値のみ確率変数である複合分布を考える。なお、波高分布は対数正規分布に従うとみられるので、平均値が確率変数である複合対数正規分布を考える。

4.1.2 気象台、海象観測船による観測結果

前記の海象通報船による観測値と海象観測船による観測の差は、後者の方が観測精度が高いことと、定点観測値であり、航海条件の偏りが含まれないという点があげられる。この内、航海条件の偏りが除去されている点は貴重といえる。また、気象台の観測値の風速は計器計測値であり、通報船のそれと精度に差はないが、航海条件の偏りが無い点では同様に重要である。

Fig. 16 にこれらの標本平均値の観測期間による変化も示す(先と同様に σ_m から σ_N を除去してある)。両者はそれぞれ風、波高という異なる物理量の観測結果であるにもかかわらず、ほぼ一致することは重要であり、両者の母集団の確率モデルが同一性質であると推定できる。両者ともにゆるやかであるが観測期間が長くなるとともに標本平均値のバラツキは減少し、およそ 20 年程度ではほぼ一定値になるとみられる。バラツキが観測期間とともに徐々に低下すること、なお海象観測船の 9 年での値が他と異なることは、本資料程度の観測期間では

風、波長の長期変動の影響が含まれるためかとも思われるが、要因は不明である。

船の全就航期間を 20 年としたときの標本平均のバラツキは同図から比較的精度よく求めることができる。また、前記通報船のバラツキを外挿し、20 年のときの値との差が η_s によるものであると推定できる。本例から明らかのように、航海期間 20 年における η_μ 、 η_s はそれぞれ 0.12, 0.05 程度であり η_μ が η_s よりはるかに大きいことは注目に値する。

海象通報船の資料では分離が困難な就航期間が 20 年に延長されたときの η_μ と η_s の成分比が、気象台および海象通報船の資料から導かれたことは重要である。また、20 年の長期間になっても、 η_s は小さな値であるが 0 にはならないことも面白い。

4.1.3 母集団モデルより実船の遭遇海象の推定

波高の母集団モデルを前記の複合対数正規分布とし、母数である平均値は平均値が m_{H0} 、標準偏差は $\sigma_{\mu 0}$ の正規分布、母数である標準偏差は一定値 σ_{H0} とすると、前記の η_μ 、 η_s と $\sigma_{\mu 0}$ の関係は次式で与えられる。

$$\sigma_{\mu 0}^2 = \sigma_{H0}^2 (\eta_\mu^2 + \eta_s^2) \quad (6)$$

ここに、 $\sigma_{H0} = \sigma_0$

なお、上式の $\sigma_{\mu 0}$ は η_s の影響を含めた見掛けの値であって、厳密な意味の母集団における平均値のバラツキに対応した値ではない。 m_{H0} 、 σ_{H0} は通報船の総合海象の平均値、標準偏差の値とし、 $\sigma_{\mu 0}$ は同海象の σ_m から求めた。このような複合母集団より得られる標本群の分布の 95% 信頼限界に対する管理曲線を求めると Fig. 19

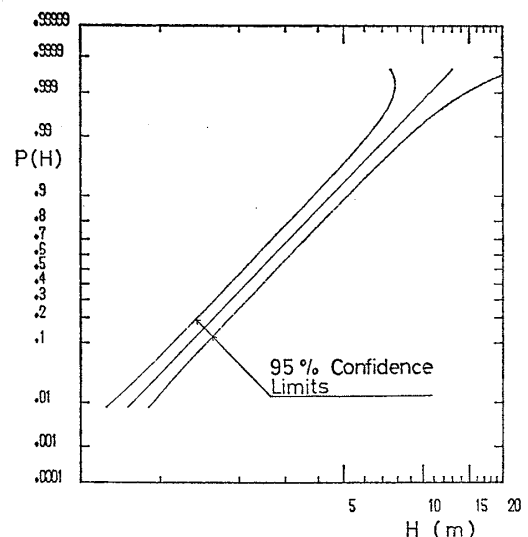


Fig. 19 Cumulative distribution function of wave height with a complex log-normal distribution with a constant standard deviation and a mean which is described by a normal distribution and confidence limit for the probability level of 95%

となり、Fig. 6の分布とよく似たものが得られる。ただ、高い波高領域での分布範囲が Fig. 6 の場合より広くなる。これは、対数正規分布の特性が関係していると思われる、この点に関しては今後の研究を要する。

本モデルを基にして、船の就航年数を20年としたときの η_μ, η_s をFig. 16から求め、遭遇海象の平均波高のバラツキを求めてみると、 σ_m は $0.13\sigma_{H0}$ となり、その値は文献1)の結果と期待したほどの差が出ない。これはFig. 16に示すように η_μ が η_s より相当大きいことで、文献1)で述べた3年程度の航海では航海条件の偏りの影響が大きいとの見解は、修正を要する。すなわち、母集団分布において、平均値のバラツキは大きく、3年程度でも標本平均のバラツキは η_s と η_μ の値はほぼ同程度の値である。

遭遇海象の荒さを示す H_{me} のバラツキも、平均値のバラツキに対応しているものであり、Fig. 15に示したように、観測期間が3年から6年に延長されても顕著に変化しない理由も、 η_μ が大きいことで説明される。

したがって、同一海域を航行する船の遭遇海象のバラツキは、就航年数が20年になっても大きく、その H_{me} はFig. 15より若干せまくなる程度と推定される。 H_{me} と比例関係にある波浪に対する線形応答の長期分布における極値も、Fig. 14, 15の値に近いバラツキを示すと推定できる。波浪荷重の長期分布における極値の変動係数については、単一分布の母集団に対する極値統計学による推定値から7%程度とみられて来たが¹¹⁾、上記の結果からみると、これより大きく文献1)による17%よりは小さい値になる。この値は超大船では大となる傾向を有する。

4.2 風、波の確率過程としてのシミュレーション

風、波はともにランダム変動であり、その計測間隔が短いときは、任意の計測値 X_i とその直前の計測値 X_{i-1} はたがいに独立ではない。このような条件で得られた計測値群の統計的特性が、たがいに独立な計測値群のそれとどのように異なるかを考察してみる。

想定したランダム変動は、そのスペクトルがFig. 20で与えられる帯域制限白色雑音スペクトルに対応するものとする。

4.2.1 サンプル間隔が計測値間の相関係数および計測値の統計的特性に与える影響

同スペクトルに対応する自己相関係数 $\rho(\Delta T)$ は次式で与えられる。

$$\rho(\Delta T) = \Phi(\sin \omega_u \Delta T - \sin \omega_l \Delta T) / \Delta T \quad (7)$$

ここに、 Φ ：スペクトル高さ

ΔT ：計測（標本採取）周期

ω_l ：下限円周波数

ω_u ：上限円周波数

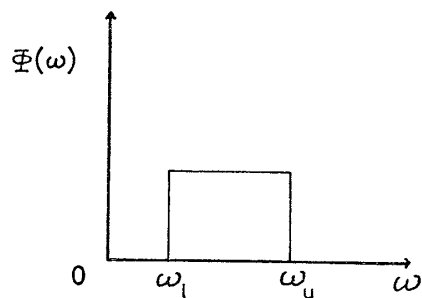


Fig. 20 Band-limited white noise spectral supposed in simulation

Fig. 21に示すように、自己相関係数 $\rho(\Delta T)$ は ΔT とともに低下し、次式を満足する周期 ΔT_0 で0になる。

$$\sin \omega_u \Delta T_0 - \sin \omega_l \Delta T_0 = 0 \quad (8)$$

同図はスペクトルが次の値のときの ΔT と ρ の関係を示したものである。

$$\omega_l = \pi/30 \text{ (rad/day)}, \quad \omega_u = 5\pi/3 \text{ (rad/day)}$$

$$\Phi(\omega) = \text{const.} = 20/49\pi, \quad (\because m_0=1) \text{ (day/rad)}$$

$$m_0=1.00, \quad m_2=0.954\pi^2, \quad m_4=1.574\pi^4$$

$$\varepsilon = (1 - m_2^2/m_0 m_4) = 0.658$$

m_i ：スペクトルの i 次モーメント

$$\bar{T}=0 \text{ 交差周期} = 2.058 \text{ (day)}$$

$$\Delta T_0 = 10/17 \text{ (day)}$$

上記の細目中、 ε は帯域幅パラメータで0~1の値をとり、1の場合は白色雑音を与える。また、時間の単位のdayは便宜上与えたもので、これが秒、時、週、月、年等であってもよい。 $\Phi(\omega)$ 等の単位は、対象とする物理量の単位が含まれてないので、不完全な表示になっている。Fig. 21はFig. 1と同一性質のもので、本例では ΔT_0 は $\bar{T}$ の0.285倍になる。

Table 5は周期 ΔT で40回の計測を50回繰り返した場合（標本数40個の標本群50組）の計測値 X_i の標本標準偏差 σ_X 、各計測値群の平均値の標本標準偏差 σ_m を求めた結果を示す。この場合、理論値は σ_X は σ_{X0} ($m_0=1, \therefore \sigma_{X0}=1$)、 σ_m は $\sigma_{X0}/\sqrt{N}$ ($N=40$)を中心分布する。この場合 σ_X は1に極めて近い値となるが、

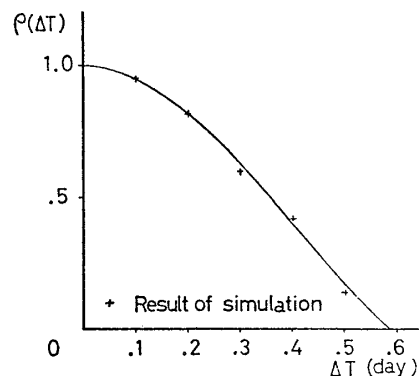


Fig. 21 Theoretical value auto-correlation function and result of simulation

Table 5 Effect of sampling interval on σ_x , σ_N and effective sample size

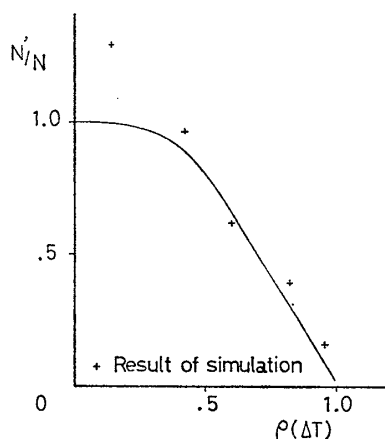
ΔT (day)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	Remark
$\Delta T/\Delta T_0$	0.17	0.34	0.51	0.68	0.85	$\Delta T_0 = 10/17$
$\rho(\Delta T)$	0.954	0.823	0.629	0.402	0.174	$\sigma_{x_0} = 1$
σ_x	0.985	0.992	1.047	0.997	1.022	$\sigma_{m_0} = 1/\sqrt{N}$
σ_m	0.392	0.249	0.201	0.161	0.139	$N = 40$
N'	6.50	16.1	24.8	38.6	51.7	$\omega_0 = \pi/30$
N'/N	0.163	0.403	0.619	0.964	1.294	$\omega_0 = 5\pi/3$

Table 6 Effect of value of ω_l on σ_x , σ_m and effective sample size

ω_l (rad/day)	$\pi/30$	$\pi/15$	$\pi/6$	$\pi/3$	Remark
ω_u (rad/day)	$5\pi/3$	$10\pi/3$	$25\pi/3$	$50\pi/3$	$\omega_u/\omega_l = 50$
$\Phi(\omega)$	$30/49\pi$	$15/49\pi$	$6/49\pi$	$3/49\pi$	$\varepsilon = 0.658$
$\tilde{T}$ (day)	2.06	1.03	0.41	0.21	$\Delta T = 0.4\Delta T_0$
ΔT_0 (day)	$10/17$	$5/17$	$2/17$	$1/17$	$\rho(\Delta T) = 0.761$
σ_x	1.002	0.992	0.975	0.956	$\sigma_{x_0} = 1$
σ_m	0.199	0.234	0.211	0.245	$\sigma_{m_0} = \sigma_x/\sqrt{N}$
N'	25.4	18.2	22.5	16	$N = 40$
N'/N	0.643	0.455	0.563	0.416	

Table 7 Effect of band-width on σ_x , σ_m and effective sample size

ω_u (rad/day)	$5\pi/3$	$25\pi/30$	$10\pi/30$	$5\pi/30$	Remark
$\Phi(\omega)$	$30/49\pi$	$5/4\pi$	$10/3\pi$	$15/2\pi$	$m_0 = 1$
ε	0.658	0.649	0.620	0.562	$\rho(\Delta T) = 0.761$
$\tilde{T}$ (sec)	2.06	4.07	9.86	18.67	$\Delta T = 0.4\Delta T_0$
ΔT_0 (sec)	$10/17$	$15/13$	$30/11$	5	$\sigma_{x_0} = 1$
σ_x	0.992	0.968	1.028	0.964	$\sigma_{m_0} = \sigma_x/\sqrt{N}$
σ_m	0.264	0.199	0.088	0.081	
N'	14.3	25.2	129	153	
N'/N	0.358	0.629	3.23	3.83	

Fig. 22 Reduction of effective sample size ($N=40$)

σ_m は ΔT が小となると増加する。これは標本間に相関があるための影響を示している。この場合は、標本がたがいに独立でない影響は σ_x にはほとんど現われない

が、平均値のパラッキの増加という形で現われる。この結果は前記の風、波の計測結果で標準偏差のパラッキより平均値のパラッキが顕著であるのによく似ている。表中の N' は次式で求めた有効標本数である。

$$\sigma_m = \sigma_x / \sqrt{N'} \quad (\sigma_x = 1) \quad (9)$$

N'/N は Fig. 22 に示すように $\rho(\Delta T)$ とともに減少している。相関を有する標本では同図から標本数を修正する方法が考えられる。

4.2.2 有効標本数に与えるスペクトル形状の影響

(1) ω_l の影響

Table 6 は Fig. 20 の帯域制限白色雑音スペクトルで ω_u/ω_l の比は一定とし (ε は一定), ω_l を変化させた場合の検討結果を示す。この場合 $\rho(\Delta T)$ の影響は除去するために, $0.4\Delta T_0(R(\Delta T) = 0.761)$ とした。このようなシミュレーションでは N'/N は一定にはならないことを考えると, N'/N は ω_l が変化しても ε が一定なら変化しないとみられる。この場合も σ_x は常に σ_{x0} に近い値を示している。

(2) スペクトルの帯域幅の影響

Table 7 は Fig. 20 のスペクトルの帯域幅の影響を, ω_l を一定とし ω_u を変化させて検討した結果を示す。 σ_m は狭帯域になるとともに, $\rho(\Delta T) = 0$ (標本はたがいに独立) の場合と変らない結果が

得られる。この場合も σ_x は理論値 σ_{x0} に近い値となる。

4.3 総合考察

本シミュレーションにおいて、標本間に相関がある場合は、平均値の標本分布は広くなるという結果は観察できる。前記の海象通報船、海象観測船の平均値の標本分布の広がりには、この標本が互に独立でない影響は含まれているとみられる。しかし、この修正法に関しては、有効標本数はスペクトルの形の影響があり、 $\rho(\Delta T)$ は同じでも狭帯域の場合は N' は N に近くなる。

現在のところ、対象となる風、波の変動が、どのようなスペクトルで表わされるかについては資料も少なく、測定周期、標本間の相関係数が与えられても、 N' を推定することは難しい。

本シミュレーションで σ_x はほとんど変化しなかったことは、波等の観測結果にも類似点が見出される。

船の遭遇海象を近似的に 20~30 分の周期で区切られた海象の集合と見なし、その海象群の統計的特性を考え、相関を有する標本の特性を論じることになる。このような見解からすると、本稿に示した標本数の修正をしない特性であっても、十分ではないかと思われる。

5 結 言

著者らは文献 1) において北太平洋を航行する 3 年間の 62 隻の船の遭遇海象を調べ、その結果船ごとの海象は非常にバラツキが大きいことを明らかにした。この原因がどのような要因によるものであるかを調べるため、同海域を航行する 35 隻の海象通報船の 6 年間の遭遇海象と北大西洋の 9 隻の 18 年間の海象観測値および日本沿岸の 5 か所の気象台の 20 年間の風速の計測値の統計解析を行った。その結果以下のことが明らかとなった。

実船の遭遇海象の分布範囲は、観測期間が 3 年から 6 年に延びたにもかかわらず、単一の母集団からとり出された任意の標本の示す分布よりはるかに広い分布をする。これと同様の結果が、観測精度の点で十分信頼でき、航海条件の偏り等も考えられない北大西洋の海象観測船の資料および気象台の観測値においても見出され、これらの風、海洋波の標本分布は母集団分布を単一分布と考えたのでは記述できない特性を有していることを明らかにした。

このような風、波の標本分布が持つ独特の性質が表現できる母集団モデルについて考察し、母集団分布の母数もまた確率変数である複合分布であるとすれば、海洋波のもっている特異な標本分布の性質を記述できることを示した。この母集団分布において、平均値のバラツキは大きく、標本平均のバラツキもそれによる成分が相当大であり、観測期間が 20 年程度になれば、航海条件によるバラツキよりもこの平均値のバラツキによる要因が主たるものになる。

この母集団モデルから、就航期間を 20 年としたときの同一海域を航行する実船の遭遇海象を考察し、上記で述べたように母集団分布のバラツキが大きく、船ごとの遭遇海象の差は依然として大きい。このことは、波浪荷重の長期分布における極値の変動係数については、従来

単一分布の母集団に対する極値統計学による推定値から 7% 程度とみられていたが、本研究の結果からみると、これより大きく文献 1) による 17% より小さい値となる。

参 考 文 献

- 1) 河辺 寛, 真能 創, 阿波健二: 実船の遭遇海象について, 日本造船学会論文集, 第 152 号 (昭和 57 年), p. 173~184.
- 2) Proceedings of the Fourth International Ship Structures Congress, Tokyo 1970, Report of Committee 1, Environmental Conditions, および Walden, H.: Die Eigenschaften der Meerswellen in Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen Nr. 41, Hamburg (1964).
- 3) 合田良実: 波浪統計に関する二、三の考察, 港湾技研資料, No. 39 (1967), p. 239~255.
- 4) 高橋浩一郎: 気象統計, 地人書館 (1956).
- 5) ルジャニーツイン, A. P. 著, 高岡宣善 訳: 構造物の信頼性解析, 丸善 (昭和 55 年).
- 6) バーリントン, R. S., メイ, D. C. 著, 林知己夫, 脇本和昌 監訳: 確率・統計ハンドブック, 森北出版 (1975).
- 7) 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).
- 8) 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. 239 (昭和 53 年), 研究資料, No. 312 (昭和 54 年).
- 9) 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), p. 81~93.
- 10) グンベル, E. J. 著, 河田竜夫, 岩井重久, 加瀬滋男 監訳: 極値統計学, 生産技術センター (昭和 53 年).
- 11) 日本造船研究協会第 134 研究部会: 船体構造部材の許容応力に関する研究, 研究資料 No. 237 (1976 年 3 月).
- 12) 末永 仁, 二瓶雅樹: 船が航行中に遭遇する気象条件の変動について, 防衛大学校卒業論文 (昭和 57 年).
- 13) 尾島義貴, 大仲私弘: 北太平洋の波と風の統計解析, 防衛大学校卒業論文 (昭和 58 年).