

(昭和 47 年 10 月日本造船学会秋季講演会において講演)

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

正員 真 能 創* 正員 上 野 洋 純*

A Simplified Estimation of Long-Term Distributions of Various Random
Variables Induced by Ocean Waves, and a Study on the Influences
of Operating Conditions on the Extremes

by Hajimu Mano, *Member* Hirozumi Ueno, *Member*

Summary

It has been shown in the previous paper¹⁾, that the extreme value in the long-term distribution of wave bending moment expected to be exceeded with the probability of 10^{-8} or near order is ruled by only probability of encounter of one or at most several severe wave conditions. This is caused by the composition of the long-term distribution of it. The distribution is composed by various short-term distributions which are described by the Rayleigh distribution.

In this paper, it is shown that the extreme values in the long-term distributions of such various random variables as wave shearing force, various wave loads, pitching and rolling angles, heaving amplitude, various accelerations caused by ship motions etc., which have the same composition as that of wave bending moment, have the same character. And a new simplified method of estimating the extreme values with high accuracy is suggested.

The method not only simplifies the calculation, but also can be applied to the analysis of relation between the extreme values and various factors which have influences on the values. As examples of the application of the method, the influences of operating conditions such as change of course or ship speed in rough seas, etc., and wave conditions, on the extreme values are analyzed in detail. Judging from the foregoing studies, it is concluded that the extreme values are to be estimated on assumed operating condition that the ship sails always heading sea course at very low speed (heave to condition) in short crest irregular waves.

1 緒 言

筆者等は波浪曲げモーメントの長期分布に与える遭遇海象の影響について調べ、超過確率が 10^{-8} またはそれに近い値の最大値(異常値)は、長期分布を構成する短期分布の中で、その分散が最大のものの発現確率とその分散の値が与えられれば近似的に求められ、これから長期分布の全容を推定できることを示した¹⁾。

本論文では長期分布の構成が波浪曲げモーメントと同質の各種の波浪に対する船体応答、すなわち波浪剪断力、縦揺等の各種の動揺、動揺加速度、および船体表面の変動水圧等にも、この近似推定法を拡張適用できることを明らかにする。

この推定法は単に計算が簡単になるだけでなく、上記の各種応答の長期分布に与える荒天時の操船条件の変化、荒天避航等の影響、波を長波頂波とした計算値と短波頂波とした計算値の関係等を解析的に検討するのに適しているという利点があるので、この推定法を応用してこれらの諸要因と長期分布の関係を明らかにし、さらに長期分布計算時に最も合理的な想定航海条件についても考察を進めたので、その結果についても報告する。

* 防衛大学校

2 各種の船体応答の長期分布の近似推定法

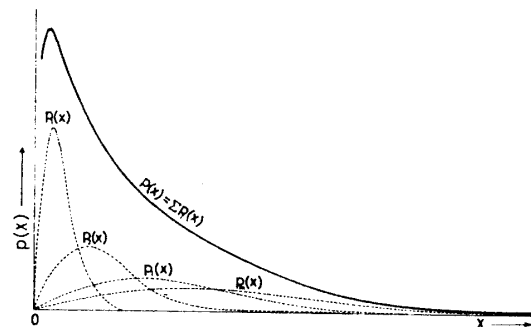
2.1 海洋波に対する船体応答の長期分布の構成

波浪曲げモーメント、船体表面の変動水圧等の準静的な波浪荷重、縦揺、上下揺等の船体動揺およびそれによる船体各部の動揺加速度等の波浪に対する船体応答（以下応答と呼ぶ）は、いうまでもなく海面状態によって変化するが、同時に波の進行方向に対する船の針路（以下相対針路と呼ぶ）、速力、排水量等の航海条件の影響をうける。これらの諸要因が一定の状態での応答の頻度分布

（短期分布）は Rayleigh 分布に従うと見なせる。この場合、Rayleigh 分布の形を決定するパラメータ R^2 （応答の分散、 R は標準偏差）は、これら諸要因によって変化する。

長期間におけるこれらの応答の頻度分布（長期分布）は、海面状態、航海条件が種々変化するから、 R^2 が種々の値をとる多数の短期分布の集合となる。この長期分布の構成を単純化して示すと、図1のようになる。

長期分布における遭遇海象を近似的に、波高については m 個、波周期については n 個の階級に分け、両者の組合わせであらわされる $m \times n$ 個の海面状態で与えられ（波高、波周期が同一の値の海面状態に対応する波スペクトルは、すべて同一と仮定できるものとする）、各海面状態を通じて航海条件は l 通りに分けられるとすると、長期分布は $l \times m \times n$ 個の短期分布の集合となる。



$P(X)$: 長期分布における X の確率密度
 $P_i(X)$: 短期分布 i における X の確率密度

図1 長期分布の構成 (1, 2, ..., i, ..., m, 短期分布)

2.2 長期分布における最大値

2.2.1 長期分布における任意の応答値の超過確率

長期分布における任意の応答値 X の超過確率 $Q(X)$ は、それを構成する個々の短期分布における X の超過確率の和で与えられる。長期分布が前述のような $l \times m \times n$ 個の短期分布で構成されている場合は、任意の海面状態 ij （波高 H_i 、波周期 T_j ）において、任意の航海条件 k で航海しているときの短期分布における X の超過確率を $q_{ijk}(X)$ とすると、

$$Q(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l p_{ij} p_0(ijk) q_{ijk}(X) \quad (1)$$

ここに、 p_{ij} : 海面状態 ij の発現確率

$p_0(ijk)$: 海面状態 ij における航海条件 k の発現確率

上式において、短期分布は Rayleigh 分布に従うとすると、 $q_{ijk}(X)$ は次式で与えられる。

$$q_{ijk}(X) = \exp\left[-\frac{X^2}{2(R_{ijk})^2}\right] \quad (2)$$

ここに、 $(R_{ijk})^2$: 海面状態 ij 、航海条件 k のときの X の分散

長期分布における想定遭遇海象として、Roll⁹⁾ あるいは Walden⁹⁾ の北大西洋における波浪観測値を採用したときの応答の長期分布では、 X と $Q(X)$ の対数の関係は図2に示すような直線であらわされる Weibull 分布（形状パラメータが1の Weibull 分布）に従うとみなせる。この性質は多少遭遇海象が変化しても変わらない¹⁾。

長期分布において $Q(X)$ が 10^{-N} である応答値を、 10^N 個の応答の最大値（異常値）の期待値とする。 X と $Q(X)$ の関係が(1)、(2)式より求められれば、これから任意の数の応答における最大値が求められる。

2.2.2 最大値の計算式（第一近似式）

(2)式の計算において、Rayleigh 分布の特性として、 X/R_{ijk} の値が大となると $q_{ijk}(X)$ は急速に小となる。したがって、 X がある値以上になると(1)式の右辺の計算では、 R_{ijk} が最大値である短期分布（以後最悪短期分布と呼ぶ）における超過確率以外は無視できる。船体応答の長期分布における最大値に対する $Q(X)$ の値は 10^{-8} 程度であり、このような $Q(X)$ に対応する X ではこのような取扱いが可能となる。いま、 R_{ijk} の最大値を R_m 、このときの p_{ij} を $p_{m,j}$ 、 $p_0(ijk)$ を p_{m0} とすると、 $Q(X)$ が 10^{-N} である最大値 X_m は近似的に次式で求められる。

$$\log Q(X) = -N \doteq \log p_m - \frac{X_m^2}{2R_m^2} \log e \quad (3)$$

$$\therefore X_m = 2.146 f_1(N, p) R_m \quad (4)$$

$$\text{ここに, } f_1(N, p) = \{N + \log p_m\}^{1/2}, \quad p_m = p_{mj} \times p_{m0}$$

$$2.146 \equiv \{2 / \log e\}^{1/2}$$

以後(4)式を第一近似式と呼ぶ。文献 1) の A 船が北大西洋 (Roll) を航海するとしたときの波浪曲げモーメントについて、精密計算による X_m と $Q(X)$ の関係と、(4)式から求めたそれを比較すると、図 2 のようになる(速力は一定、針路は向い波、波は長波頂不規則とする)。図の①は(4)式より求めた結果であり、②は R を大きさの順に数えて上位 2 位までの 2 個の短期分布、③は同様 3 位までの 3 個の短期分布から求めた X_m と $Q(X)$ の関係を示す。①は N が小さいと精密計算値とはなれるが、 N が大となるとともに近付き、最終的にはほぼ一致する。図の場合、 $N=8$ で①の誤差は 4% 未満、②、③の誤差はそれぞれ 3%、2% 未満である。

図の①は(3)式より明らかなように放物線となり、その横軸との交点(放物線の頂点)は $\log p_m$ に等しい。図の形であらわした X_m と $Q(X)$ の関係(以後 X_m - Q 曲線と呼ぶ)を多数の計算例で観察すると、直線に近いが S 形に曲がるもの、上方に湾曲するもの、下方に湾曲するもの等が見出される。しかし、この曲線は N が大となるとともに①の放物線に漸近することから、いずれの場合も N が大となると放物線に似た形に曲がる性質を有するといえる。

2.2.3 R_{ijk} が最大値となるとき海面状態

航海条件が一定のときは、 R は海面状態だけの関数となるが、応答は波高に比例し、不規則波中の応答が重ね合わせて求められる場合の R は、次式で与えられる。

$$R_{ijk} = \bar{R}(j, k) H_i$$

上式中の $\bar{R}(j, k)$ は波周期のみの関数となるから、波周期が同一階級に属する m 個の海面状態に対応する m 個の R の中では、波高が最大 (H_m) の海面状態 mj で R は最大となる。 $\bar{R}(j, k)$ はある波周期で極大となるから、その波周期で波高が H_m の海面状態で R は最大となる。

航海条件が l 通りあるとすると、それぞれの航海条件で見出される l 個の R の最大値の中で最大のものを選べば、それが R_m となる。以後 R_m に対応する海面状態を最悪海面状態と呼ぶ。 R_m がどの航海条件のときに現われるにしても、最悪海面状態は遭遇海象の中で、各波周期階級中で波高が最大となる n 個の海面状態の中の 1 つ

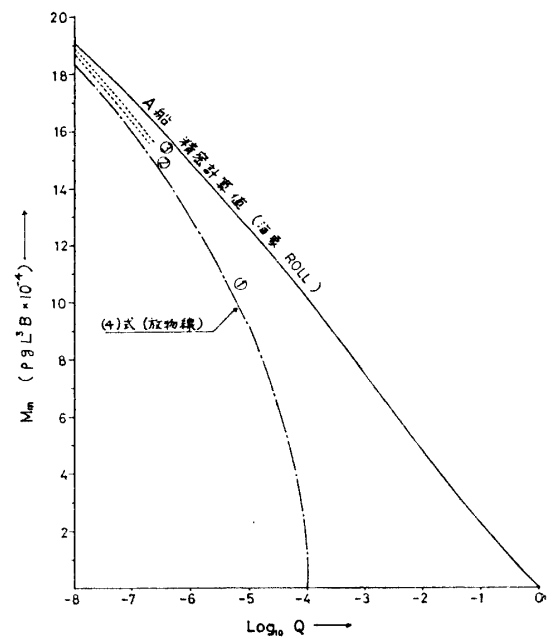


図 2 A 船の波浪曲げモーメントの長期分布 (船体中央) における近似値の精度

がそれに相当する。遭遇海象を北大西洋 (Roll) あるいは Walden) とした場合には、最悪海面状態は表 1 の各海面状態の中の 1 つであり、その中のどれが最悪海面状態になるかは、船の長さ、航海条件等で変化する。

2.2.4 最大値の計算式 (第二近似式)

a. 第一近似式の精度

文献 1) における A 船、日本造船研究協会第 90 研究部会 (SR 90 部会) における貨物船およびタンカー⁴⁾、原子力第一船⁵⁾ (以下 M 船と呼ぶ) 等の波浪曲げモーメント、波浪剪断力、船体表面に働く変動水圧、縦揺等の動揺および動揺加速度等の長期分布の精密計算結果を対象に、 N が 8 の場合について(4)式から求められ

表 1 最悪短期分布における海面状態

遭遇海象	北大西洋 (Walden)		北大西洋 (Roll)	
	波 高 H_m (m)	発現確率 $p_{mj}(\times 10^{-5})$	波 高 H_m (m)	発現確率 $p_{mj}(\times 10^{-4})$
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	1(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

* 2.2.4 b の修正をした p_{jm}

た X_m の近似値の精度を検討した結果、近似値は常に低い目の値をとり、長波頂不規則波中を向い波で航海するとしたときの X_m では誤差は大体 5% 以下であるが、短波頂不規則波中をあらゆる相対針路を等しい確率で走るとしたとき (all heading) の X_m ではバラツキがやや大で、ときには誤差が 15% を越える場合があることが判った。

b. 最大値の修正近似式 (第二近似式)

針路が all heading の場合、全般的に精度が低下するのは、これらはいずれも Walden の観測値を遭遇海象としており、 p_{mj} は $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ である上に (表 1 参照)、針路は 30° 間隔の 12 方位に分類されているから、最悪短期分布の針路が 0° (向い波) または 180° (追い波) のときは p_{m0} は $1/12$ 、その他の針路のときは $1/6$ になる。これに対し針路は向い波だけであるとするときは p_{m0} は 1 であり、遭遇海象は Roll の海象で向い波だけで走る場合と比べて、前記の all heading の計算値は、 p_m は約 $1/100$ 、Walden の海象中を向い波だけで走る場合と比べても約 $1/10$ に低下する。

p_m が低下すると、図 3 の第一近似式による最大値を示す放物線の頂点はそれだけ左へ移動することになり、基準とした $N=8$ が変わらなければ、当然近似値の精度は低下する。すなわち、 p_m が過小であれば $N=8$ 程度では近似推定法の基本仮定である、 $Q(X)$ の計算において最悪短期分布における超過確率以外は無視できる段階に、まだ到達しないことになる。

この場合でも N が $-\log p_m$ に比べ十分大であれば、第一近似式でも精度のよい結果は得られる。 X_m-Q 曲線は図の放物線に漸近する性質を持ち、必ず原点 O を通りほぼ直線とみなせるから、原点から放物線に引いた接線 OT で近似させることができる。接線 OT の精度は接点 T の精度に左右されるが、放物線の性質から接点 T は N が $-2 \log p_m$ に対応する点であり、ほぼ X_m-Q 曲線上の点とみなせる上に、 p_m の値に応じて位置が移動するから、その精度は p_m の値によって大きく変わらない。この近似 X_m-Q 曲線上で任意の N に対応する値を最大値の第二近似値とする。図 3 に $N=8$ のときの最大値 (P_0)、第一近似値 (P_1)、第二近似値 (P_2) の関係を図示する。

第二近似値は、点 T は N が $-2 \log p_m$ に対応する点であることと、 OT が直線であることから求められる。

$$X_m = \frac{2.146N}{-2 \log p_m} \{-2 \log p_m + \log p_m\}^{1/2} R_m$$

$$\therefore X_m = 1.073 N f_2(p) R_m \quad (5)$$

ここに、 $f_2(p) = \{-\log p_m\}^{-1/2}$

以後上式を第二近似式と呼ぶ。

なお、第一近似式の精度を検討した結果、 R の値が R_m に近い短期分布が存在するとき、また遭遇海象に Walden の海象を想定し、最悪海面状態の波周期が 12 秒のときは、いずれも精度が低下することが明らかになった。

前者の場合は近似推定法の基礎からみて精度が低下するのは当然であり、 R が R_m に近い短期分布の発現確率も p_m の中に含ませる必要がある。この場合多くの短期分布を含ませることは複雑になるので、以下に示す近似値の計算では一応 R の値が $0.97 R_m$ より大きい短期分布の発現頻度は p_m に含ませることとした。

後者の場合は、最悪海面状態の波高は 15.25m (波高階級の上下限値の平均値をとった) で、波周期が等しく R がこれについて大きいのは、波高 14.25m の海面 (海面状態 $m-1, j$ 、そのときの R を R_{m-1} とする) であるが、その発現確率 $p_{m-1,j}$ は 6×10^{-5} になる。この短期分布から X_m を求めると、

$$X_m = 1.073 N \{-\log p_{m-1,j} \times p_{m-1,0}\}^{-1/2} R_{m-1}$$

ここに、 $R_{m-1} = (14.25/15.25) R_m$

$$\therefore X_m = 1.073 N \left\{ -\left(\frac{15.25}{14.25} \right)^2 \log p_{m-1,j} \times p_{m-1,0} \right\}^{-1/2} R_m$$

針路を 12 方位に分けると、普通 $p_{m-1,0}$ は $1 \sim 1/12$ になるから、これを代入すると

$$\left(\frac{15.25}{14.25} \right)^2 \log p_{m-1,j} \times p_{m-1,0} = -4.835 \sim -6.071$$

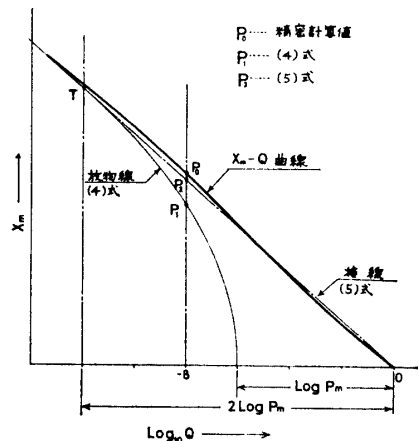


図 3 第二近似値導出の基礎

上式の値は $p_m = 1 \times 10^{-5}$, $p_{m0} = 1 \sim 1/12$ のときの $\log p_m$ の値 ($-5 \sim -6.079$) に大体一致する。これは R_{m-1} の短期分布における X の超過確率が, $p_{mj} = 1 \times 10^{-5}$ の最悪短期分布のそれに相当することを示す。これは $p_{m-1,j}$ が特に大であるために生じた現象で, 近似式の適用に当って遭遇海象に Walden の海象を使い, 最悪海面状態の波周期が 12 秒のときに限り, p_{mj} を 2×10^{-5} に修正すれば, 前述の精度の低下は避けられる (表 1 参照)。

c. 第二近似式の精度

長波頂不規則波中を向い波で航海するとした場合の各種の応答の長期分布について, 第二近似式の精度を検討した結果を表 2~4 に示す。同様に, 短波頂不規則波中を all heading の状態で航海するとした場合の計算値についての検討結果を, 表 5~7 に示す。

表の最大値等は A 船は文献 1), C 70・65, T 60・80 は文献 4), M 船は文献 5) に示された値であるが, 図示されたものを読みとった場合は, 図示の際の誤差および読みとりの誤差が含まれている。遭遇海象は A 船だけは自船の航海記録による海象および北大西洋 (Roll) を想定しているが, 他はすべて北大西洋 (Walden) を想定している。波スペクトルは各船とも ISSC スペクトルを採用している。

近似値はいずれも前述の p_m についての修正, 波周期が 12 秒の最悪海面状態があらわれた場合の p_{mj} の修正を施した結果を示す。

表 4 に誤差が 7% に達する例もあるが, 前述の読みとり等の誤差が含まれることを考えると, 第二近似式の誤差は大体 5% 以下と見られる。この場合は第一近似式の場合と異なり, 近似値の方が過大になるときもある。

表 2 波浪曲げモーメントの長期分布における最大値 (長波頂不規則波, 向い波)

船 名	L (m)	遭 遇 海 象	最悪海面状態		速 力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	$M_m/\rho g L^3 B$ (10^{-8}) ($N=8$)		
			T (sec)	H_m (m)		近 似 値	正しい値	比
A	109	A 船の航海記録 北大西洋 (Roll)	8	7.5	0.23	1.28	1.29	0.99
			8	11.0		1.84	1.91	0.96
C 70・65*	100	北大西洋 (Walden)	6	15.25	0.20	1.66	1.62	1.03
	150		10	15.25		0.929	0.955	0.97
	200		10	15.25		0.778	0.795	0.98
T 60・80**	200	北大西洋 (Walden)	10	15.25	0.15	1.07	1.12	0.96
	300		12	15.25		0.737	0.759	0.97
	400		14	15.25		0.552	0.565	0.98

* 貨物船 ($L/B=7$, $C_b=0.65$, シリーズ船型)

** タンカー ($L/B=6$, $C_b=0.80$, シリーズ船型)

T=波周期, H=波高, M_m =波浪曲げモーメントの最大値

表 3 船体表面の変動水圧の長期分布における最大値 (長波頂不規則波, 向い波)

船 名	L (m)	速 力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	$ p_H /\rho g H$ ($N=8$)								
			船 底			ビ ル ジ			船 側		
			近似値	正しい値	比	近似値	正しい値	比	近似値	正しい値	比
C 70・65	100	0.20	1.06	1.06	1.00	1.54	1.51	1.02	2.92	2.86	1.03
	150		0.652	0.670	0.97	0.891	0.908	0.98	1.96	1.89	1.04
	200		0.538	0.545	0.99	0.756	0.763	0.99	1.41	1.38	1.02
T 60・80	200	0.15	0.353	0.370	0.95	0.485	0.485	1.00	1.49	1.47	1.01
	300		0.251	0.263	0.96	0.353	0.353	1.00	0.964	0.980	0.98
	400		0.189	0.198	0.95	0.265	0.265	1.00	0.719	0.750	0.96

$|p_H|$ =船体表面の変動水圧最大値, 特記の他は表 1 と同じ

表4 波浪剪断力の長期分布における最大値（長波頂不規則波，向い波）

船名	L (m)	速力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	横断面 位置	最悪海面状態		$F_m/\rho g L^2 B$ (10^{-3}) ($N=8$)		
				T (sec)	H_m (m)	近似値	正しい値	比
T 60・80	200	0.15	No. 3	10	15.25	3.57	3.83	0.93
	300			12	15.25	2.44	2.63	0.93
	400			14	15.25	1.85	1.94	0.95
	200		No. 7	10	15.25	2.88	3.00	0.96
	300			12	15.25	1.96	2.09	0.94
	400			14	15.25	1.54	1.55	0.99

 F_m = 剪断力最大値

表5 波浪曲げモーメントの長期分布における最大値（短波頂不規則波，all heading）

船名	L (m)	速力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	最悪短期分布				$M_m/\rho g L^3 B$ (10^{-3}) ($N=8$)		
			海面状態		相対針路 (deg)	p_m ($\times 10^{-5}$)	近似値	正しい値	比
			T (sec)	H_m (m)					
C 70・65	150	0.20	6	15.25	0	7/12**	0.774	0.818	0.95
T 60・80	250	0.15	10	15.25	0	1/6**	0.717	0.763	0.94
M*	116	0	6	15.25	180	1/6	1.38	1.42	0.97
		0.25	6	15.25	0	1/6	1.37	1.33	1.03

* 原子力第一船

** 最悪短期分布以外の発現確率を含む

表6 波浪剪断力の長期分布における最大値（短波頂不規則波，all heading）

船名	L (m)	速力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	横断面 位置	最悪短期分布				$F_m/\rho g L^2 B$ (10^{-3}) ($N=8$)		
				海面状態		相対針路 (deg)	p_m ($\times 10^{-5}$)	近似値	正しい値	比
				T (sec)	H_m (m)					
T 60・80	300	0.15	No. 3	12	15.25	0	1/2*	2.15	2.14	1.00
			No. 7	12	15.25	180	3/4*	2.00	1.95	1.03

* 最悪短期分布以外の発現確率を含む

なお、長波頂不規則波中の計算値は、第一近似式の結果とほとんど変わらない。他は第二近似式による方が精度ははるかによいが、第二近似式は X_m-Q 曲線が直線に近付く程精度がよいから、後述のように特殊な海象でこの湾曲が大になる心配があり、第一近似式の精度が悪くないような条件のときは、これを使うことも考えられる（第一近似式の結果は常に低目の値を与えることを利用して精度を高めることも可能である）。

2.2.5 近似推定法の適用範囲

a. 遭遇海象が風力階級等で与えられた場合

近似式の導出にあたっては、遭遇海象は波周期と波高の組合わせで与えられると仮定した。しかし、本近似推定法は一般化すると、長期分布が R の長期分布で与えられるときの近似推定法で、遭遇海象から R の長期分布が導かれるなら、それがどのような形であってもよい。 R の長期分布が求められ、これが近似的に有限個の R の階級別発現頻度に換算されるなら、その最高階級の R を R_m 、その発現頻度を p_m とし、(4)式または(5)式にこれらの値を代入すれば、 X の最大値は求められる。

具体例として、遭遇海象が風力階級とその発現確率、および各風力階級における R の頻度分布の形で与えられる場合について考える。任意の風力階級 w の発現確率を p_w 、 R を適当な刻みの階級に分けたとき、その風力階

表 7 動揺および動揺加速度の長期分布における最大値 (M 船)
(短波頂不規則波, all heading)

応 答	速 力 $V/\sqrt{L \cdot g}$	最 悪 短 期 分 布				最 大 値** ($N=8$)		
		海 面 状 態		相対針路 (deg)	p_m ($\times 10^{-5}$)	近 似 値	正しい値	比
		T (sec)	H_m (m)					
縦 揺	0	10	15.25	0	1/12	14.8	15.6	0.95
	0.25	10	15.25	0	1/12	18.4	18.7	0.98
横 揺	0	12	15.25	90	1/3	44.7	46.0	0.97
	0.25	6	15.25	120	1/3	62.5	60.3	1.04
上 下 揺	0	14	15.25	90	3/2*	14.3	14.7	0.98
	0.25	14	15.25	60	11/6*	14.9	15.3	0.98
加速度 (重心)	0	12	15.25	90	1/3	0.756	0.780	0.97
	0.25	6	15.25	120	1/3	1.12	1.08	1.04
加速度(船体中央)	0	6	15.25	90	1/3	0.649	0.615	1.06
	0.25	10	15.25	0	1/4*	0.777	0.785	0.99
加速度 (F P)	0	6	15.25	60	1/3	1.17	1.17	1.01
	0.25	10	15.25	0	1/12	1.94	2.04	0.95
加速度 (A P)	0	6	15.25	60	1/3	1.04	1.02	1.01
	0.25	10	15.25	0	11/12*	1.84	1.82	1.01

* 最悪短期分布以外の発現確率を含む

** 単位, 縦揺, 横揺 (deg), 上下揺 (m), 加速度 (g)

級での R の任意の階級 r の発現確率を $p(rw)$ とすると⁶⁾, 長期分布における階級 r の発現確率 p_r は次式で求められる。

$$p_r = \sum_{w=1}^{12} p_w p(rw)$$

ここに, 風力階級は 12 階級に分けるものとする。

上式によって R の最高階級の発現確率が求まれば, それを p_m , 最高階級の中位値を R_m とすれば, X_m は求められる。

遭遇海象の与え方は他にも種々考えられるが, 上述の方法に準じて本推定法は適用できる。

b. 応答の種類

近似推定法の精度の検討に引用した応答は, すべてストリップ法および線形重ね合わせ法によって算出されたものであるが, 本推定法はその基礎からみて, 適用範囲はこのような応答に限定されることはない。要は長期分布を構成する個々の短期分布が Rayleigh 分布に従う応答であれば適用可能であり, その応答の導出過程や応答の種類は問題にならない。

ただし, 第二近似式は長期分布の X_m-Q 曲線が直線に近いものに限定される。

3 長期分布の近似推定法の応用

この近似推定法は計算の手間を大幅に減らすという利点を有するだけでなく, さらに航海条件, 遭遇海象等の変化が応答の長期分布に与える影響の解析に応用できるという大きな利点を持っている。

精密計算によれば, (1)式より明らかなように $Q(X)$ は多数項の和になるから, 上述の諸条件がいかに影響するかを解明することは難しい。また後述の航海条件の与え方も, 海象とこの条件の変化を忠実に追うと複雑になるが, 近似推定法では途中を省略し最悪短期分布のそれさえ与えられればよく, 非常に簡単化できる。

以下は応用例として, 現在最も一般的な想定条件である, 一定速力でいわゆる all heading の状態を想定して

得られた結果の意義等について解析してみる。

3.1 荒天時の操船の影響

3.1.1 荒天時に横波を避ける影響

実船の航海記録によると長期の統計では相対針路は all heading と想定してよいが、針路は海面状態によって変化し荒天時は横波を避けるため、向い波、斜め前、斜め後から波（船によっては追い波）をうける頻度が増加している¹⁾。最悪海面状態は遭遇頻度からみて船の一生に一度か二度しか会わないような異常な荒天であり、そこで当然このような操船が行われると思われる。荒天時に船のとり針路の型式は、大体図4の5種に分けられるので、最悪海面状態での針路がこの5種のどれかに属するとしたとき、all heading の場合と比べ長期分布がいかに異なるかを検討してみる。

応答には種々の型があり、同一海面状態では向い波、または追い波で R が最大となる縦揺型、横波をうけるとき R が最大となる横揺型、針路と応答の関係が明確でない上下揺型に分けられるが（各応答の属する型は表5～7から判定できる）、この荒天時の操船条件の変化の影響は応答の型によって異なる。

なお、以下の荒天時の操船条件の変化は、すべて海面状態の悪化とともに徐々にあらわれると推定されるから、以後は最悪海面状態でもそれにつぐ海面状態でも、操船条件は変わらないと仮定する。

a. 縦揺型

R_m は普通向い波の状態で見出されるから、荒天時の針路が図4のどの型に変化しても、 R_m の値は all heading とした場合と変わらない。針路のとり方が X_m に影響するのは、(4)および(5)式の $f_1(Np)$, $f_2(p)$ の変化である。針路が制限されると、それに応じて p_{m0} が増加し、その結果 $f_1(Np)$, $f_2(p)$ が増加する。遭遇海象を北大西洋、針路を12方位に分けたとき、図4の操船条件に応じ $f_2(p)$ の値が all heading のときに比べどの程度増加するかを、表8に示す。

図5はこの操船条件による X_m の変化を図示したもので、OT は all heading のときの近似 X_m-Q 曲線、OT' は常に図4の針路をとったときのそれを示す。両者の差は p_m の値の変化した

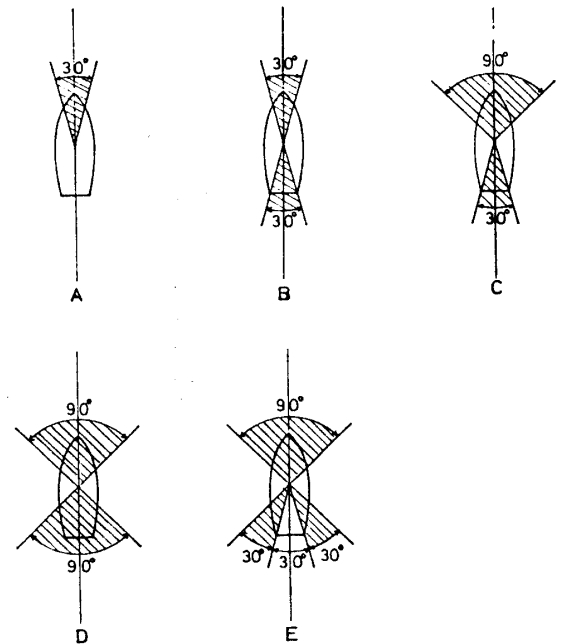


図4 荒天時の相対針路の型

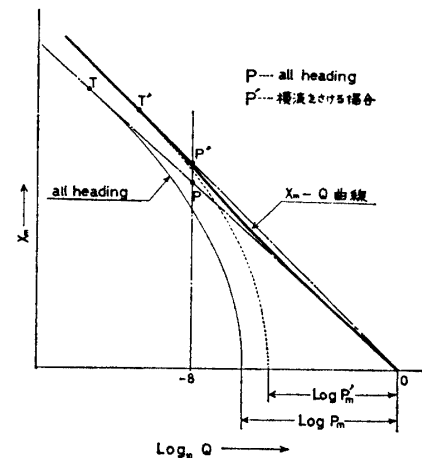


図5 荒天時に横波を避けた場合の縦揺型応答の X_m の変化 ($p_m \rightarrow p'_m$, R_m 変化なし)

表8 荒天時に横波を避けた場合の縦揺型応答の X_m の変化

荒天時 操船条件	遭遇海象 p_{m0}	北大西洋 (Walden)		北大西洋 (Roll)	
		$p_{mj}(\times 10^{-5})$	$\frac{f_2(p)_i}{f_2(p)}$	$p_{mj}(\times 10^{-4})$	$\frac{f_2(p)_i}{f_2(p)}$
all heading	1/12 or 1/6		1		1
A	1/1		1.08~1.11		1.09~1.14
B	1/2 or 1/1		1.07~1.08		1.09~1.10
C	1/4 or 1/2	1~2	1.04~1.05	1~2	1.05~1.06
D	1/6 or 1/3		1.03		1.03~1.04
E	1/5		1.01~1.04		1.01~1.04

* $f_2(p)$...all heading の場合, $f_2(p)_i$ は操船条件 $i(i=A\sim E)$ の場合, 操船条件 A~E は図4参照

だけ放物線(R_m は一定故放物線は同じ形となる)が左右に平行移動するために生じる。実線の X_m-Q 曲線は X_m が小さいうちは OT と一致し、 X_m が大となるとともに徐々に OT' の方に移る。図で P は all heading の場合の近似値、P' は p_m の変化を修正した近似値を示す。

荒天時の操船条件の変化の影響は、 p_m の値を変化させる場合と、 R_m の値を変化させる場合とに分けられるが、前者の場合は $f_1(Np)$ または $f_2(p)$ はその平方根となるため、影響は顕著ではない。この型の応答に属する波浪曲げモーメントの長期分布を all heading として計算することは、重要な操船の荒天時の操船条件は相異なるが、表 8 からみてその誤差は余り大きくはない。

b. 横 揺 型

この型では all heading とした場合と最悪短期分布が異なり(相対針路が異なる) R_m の値が減少し、それに比例して X_m が小となる。操船条件によって R_m が変化するときの影響が大で、この場合は $f_2(p)$ 等は若干増加するが、 R_m の変化に打消されてしまう。M船について図 4 の針路をとる場合の横揺 X_m の変化を求めた結果を表 9 に示す。

表 9 荒天時に横波を避けるとした場合の横揺の X_m の変化 (M船)

荒天時操船条件	$V/\sqrt{L \cdot g}=0$					$V/\sqrt{L \cdot g}=0.25$				
	最悪短期分布				X_m (deg)	最悪短期分布				X_m (deg)
	海 面 状 態		相対針路 (deg)	R_m (deg)		海 面 状 態		相対針路 (deg)	R_m (deg)	
	T (sec)	H_m (m)				T (sec)	H_m (m)			
all heading	12	15.25	90	12.17	44.7	6	15.25	120	17.03	62.5
A	12	15.25	0	7.03	27.8	14	15.25	0	3.75	14.9
B	12	15.25	0	7.03	27.8	6	15.25	180	14.34	55.1
C	12	15.25	30	8.61	33.0	6	15.25	180	14.34	53.5
D	12	15.25	30	8.61	33.5	6	15.25	150	15.28	57.7
E	12	15.25	30	8.61	33.7	6	15.25	150	15.28	58.1

遭遇海象 北大西洋 (Walden), 操船条件 A~E は図 4 参照

ここで重要なのは縦揺、横揺等のように感知できる応答と、波浪曲げモーメント等の感知しにくい応答の差で、異常な荒天ではいかにして動揺を危険がない程度に軽減させるかという努力が払われており、その結果が図 4 のような針路の型になって現われると推定される。したがって、いままでの手順は逆であって、表 9 の結果から横揺(操船者が対象とするのは横揺だけでなく、スラミング、甲板への波の打込み等も対象となるが、一応横揺で代表させる)が最小あるいはそれに近い針路が実際には選ばれると見て、荒天時の針路をきめるのが正しい。この見地から M 船の最悪短期分布での針路は図 4 の A またはそれに近いと見るのが妥当といえる。

図 6 に示すように、このような操船条件では、 X_m-Q 曲線は X_m が小さいときは all heading のそれ(図の OT)と一致するが、 X_m が大となるとともに針路が制限される場合のそれ(図の OT')に移行し、 $N=8$ では X_m は減少する。図で P は all heading の場合の X_m 、P' は横波を避けた場合の X_m を示す。

c. 上下揺型

この型に属する応答では荒天時針路が制限されても R_m の変化は小さく、 $f_2(p)$ 等の変化と打消し合って X_m の変化は無視できる。

表 7 に示すように動揺加速度もこの型に属するが、その大部分は速力によって性格が変わり、フルード数 0 で

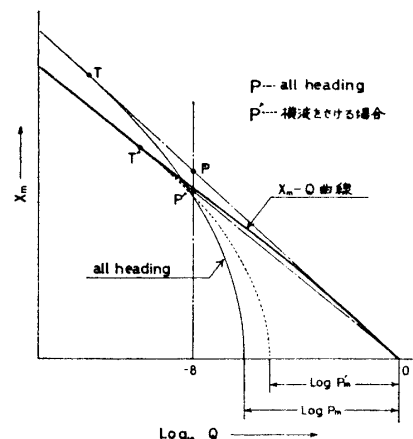


図 6 荒天時に横波を避けるとした場合の横揺型応答の X_m の変化 ($p_m \rightarrow p'_m$, $R_m \rightarrow R'_m$ (減少))

は横揺型, 0.25 では縦揺型になっている。

3.1.2 荒天時の速力低下の影響

船の速力は海面状態の悪化とともに低下するが, それを詳細にとり入れて長期分布を求めるのは非常に複雑になるが, 近似推定法によれば最悪海面状態における船速が与えられれば, 応答の最大値は容易に求められる。

最悪海面状態のような異常な荒天では, 船は heave to あるいはそれに近い状態とみられる。したがって, この状態での速力低下により R_m は変化し, 普通の想定条件である一定の速力を保つとして求められた結果とは, R_m の変化分だけ X_m が変化する。

R_m の船速による変化は応答の種類によって異なるが, 一般に動揺, 動揺加速度では変化が大きく, 船速の増加とともに R_m も増加する。したがって, 一定の船速を想定した長期分布は過大評価になる。また表9の横揺に与える荒天時の操船の影響も, 船速によって多少異なるが, これも速力0の状態のものをとるのが合理的である。

M船の波浪曲げモーメントについて R_m の変化を調べた結果では, 船速の影響は小さくなく, 結果的には船速を一定としても誤差は小さいが, やはり速力0の場合をとる方が合理的といえる。

3.1.3 荒天避航

操船者が荒天を避けると, 遭遇海象の各海面状態に対する遭遇頻度が変化し, p_{mj} は減少し $f_1(Np)$, $f_2(p)$ 等は小となり, X_m の値も小となる。避航の程度が大となると, 荒天を避けないとして想定したときの最悪海面状態には出会わなくなり, R_m が低下するため X_m は大幅に低下する。

例えば文献1)のA船の航海記録による遭遇海象は, 航行海域からみて同船が荒天を避けないとするとC船の遭遇海象に大体一致すると仮定し, これから波浪曲げモーメントの荒天避航による変化を検討してみる。C船の海象における最悪海面状態は波周期8秒, 波高10.5mであるが, A船のそれは7.5mに低下するから R_m は71.4%に低下する。また p_m はC船の23%に減少し, $f_2(p)$ はC船のその91.4%になり, 結局 X_m は65%に低下する(なお, 精密計算値では X_m は66%に低下するから, 近似推定法によっても X_m の変化を精度よくとらえられることが判る)。

一般航洋船ではどの程度荒天を避けるとしてよいかは十分な資料がないが, 文献1)の一般航洋船の遭遇海象であるSR80部会報告の海象では, 波高7.75m以上の海面に対する遭遇頻度は0.36%であり, C船の同一波高以上の海面に対する遭遇頻度1.01%(波高6~9mの階級において, 頻度分布は波高については均一に分布するとして, 7.75m以上の海面の頻度を推定した)であることから, 荒天を避けるための p_{mj} の変化を求めると約36%になる。枅田は波浪曲げモーメントの推定に際し, 風速25m/sec以上の遭遇頻度は船が荒天を避けるために発現頻度の20%に低下するとしている⁷⁾。

航洋船の避航をこの程度とすると, R_m の値は変わらないで p_{mj} が減少するだけで $f_2(p)$ 等の変化は小さいから X_m の値は全然避航しなかった計算値と大差ない。例えば p_{mj} が20%に減少するとしても X_m は約10%減少するにすぎない。しかし, 荒天避航がこの程度と見てよいかどうかは, なお研究の必要がある。

3.2 長期分布計算方法に対する考察

3.2.1 短波頂不規則波中の計算値と長波頂不規則波中の計算値の比較

波浪曲げモーメントの長期分布においては, 短波頂不規則波中を all heading の状態で走るとしたときの, N が8に対する最大値は, 長波頂不規則波中を向い波だけで走るとしたときの $N=7$ に対する最大値と, 大体一致するとされている⁴⁾。

これは多数の計算結果から推定されたもので, このような結果が得られる理由は不明であり, どのような条件, どのような船に適用できるかは判らないが, 近似推定法で検討すると次のようになる。

上記の短波頂波中の最大値を X_s , 長波頂波中のそれを X_l とすると, これらは第一近似式より次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} X_s &= 2.146 \{8 + \log p_{mj} + \log p_{m0}\}^{1/2} R_{ms} \\ X_l &= 2.146 \{7 + \log p_{mj}\}^{1/2} R_{ml} \end{aligned} \right\}$$

ここに, R_{ms} …短波頂不規則波中の R_m

R_{ml} …長波頂不規則波中の R_m

波浪曲げモーメントでは普通下記条件が成立する。

- a. 短波頂波中でも、長波頂波中でも最悪海面状態は大体一致する。
 b. 波浪曲げモーメントは縦揺型応答で、向い波か追い波で R は最大となり、他の針路の R は R_m の 0.97 より小さい。

遭遇海象を北大西洋 (Walden) とすると、 p_{mj} は $1 \sim 2 \times 10^{-5}$ 、針路は 12 方位に分けるとすると、向い波または追い波で R が最大値になるなら p_{m0} は $1/12$ 、向い波、追い波の両方で R が最大値になるなら $1/6$ となる。この p_{mj} 、 p_{m0} を $f_1(Np)$ に代入すると、

$$\frac{f_1(Np)_s}{f_1(Np)_l} = \frac{\{(8 + \log p_{mj}) + \log p_{m0}\}^{1/2}}{\{(8 + \log p_{mj}) - 1\}^{1/2}} = 0.98 \sim 1.06$$

上式の分子中の p_{m0} の対数はほぼ -1 で、分子と分母の N (分子 8, 分母 7) の差と大体一致し、しかも $f_1(Np)$ はそれらの平方根であるから、分子と分母の値は大体一致する。これは短波頂波中の N と、長波頂波中の N の差が 1 のとき成立し、 N が大となる程、また Roll の海象のように p_{mj} が大となる程、その比は 1 に近くなる。

短波頂波中の R の最大値 R_{ms} と、長波頂波中のそれ R_{ml} の比を SR 90 の C 70・65 と T 60・80 について調べると、常に R_{ml} の方が大であるが差は小さく、比で $0.88 \sim 0.90$ となる。これらを代入して X_s と X_l の比を求めると、

$$\frac{X_s}{X_l} = 0.86 \sim 0.95 \quad (6)$$

となり、文献 4) に示された比とほぼ一致する。

R_{ms} は常に R_{ml} より小であるから、短波頂不規則波中の $f_1(Np)$ が大となるような条件 (例えば針路を 45° 間隔の 8 方位に分類し、 p_{m0} が $1/6$ より大となるような場合) のときは、 X_s と X_l の比はさらに 1 に近くなる。

以上から総括すると、 $f_1(Np)$ は p_m の値が少々変化してもその変化はわずかであり、上記の場合と条件が変化しても R_{ms} と R_{ml} の差が大きくなければ $X_s \approx X_l$ となる。この関係は波浪曲げモーメントに限らず、前記の a の特性と R_{ms} と R_{ml} の差が大きい応答に共通の現象と考えられる。

3.2.2 特殊な遭遇海象を想定する場合

船種によっては別個の遭遇海象を想定する必要がある船がある。例えば護衛艦は平常の遭遇海象は比較的小さく、使用目的からすると短期間であっても、苛酷な使用条件を想定する必要がある (海難救助を任務とする船も、このような遭遇海象の与え方をする方が合理的と思われる)。ある種の専用船のように、載貨条件が満載とバラスト状態に 2 分され、遭遇海象は同じであっても応答が異なるから、長期分布の構成は 2 種の遭遇海象を想定した場合と同様に取扱える。

この場合は R_m が見出される方の遭遇海象だけをとり上げ、その p_{mj} をその遭遇海象に出会う確率だけ減じればよい。例えば船の寿命を 20 年とし、そのうち 5 年だけ苛酷な海象に出会うとすれば、 p_{mj} は $1/4$ に減少するとし、 X_m を求めればよい。

この場合船の全生涯をその苛酷な海象下で航海したと仮定したときの X_m に比べると、 p_{mj} の減少による $f_2(p)$ の変化分だけ X_m は減少するが、 p_{mj} の変化による $f_2(p)$ の変化は僅かであるから X_m の変化も僅かである。苛酷な海象を北大西洋とし、船の生涯の $1/4$ の期間だけこの海象に出会うとした場合の X_m は、全生涯この海象下で航海するとした場合の X_m の 95% 程度である。この場合苛酷な海象だけを想定しても結果は大して変わらないことになる。

3.3 応答の長期分布計算のための想定条件

近似推定法の基礎となった応答の長期分布の特性から考えて、遭遇海象における平均波高や航海条件における平均速力のような平均値は、長期分布では余り意義がない。例えば平均波高は低くても表 1 に示す最悪海面状態より H_m が高いか、 H_m が等しくても p_{mj} が大きい海象は、波高に比例する応答では北大西洋より苛酷となる (観測値の精度という問題はここでは取扱わない)。同様に高速船でも最悪短期分布において速力が 0 であるなら、 X_m は速力 0 のときの値となる。文献 1) に示したように平均値は $X_m - Q$ 曲線の形を多少変化させるにすぎない。

このように考えるとき、長期分布計算のときの想定条件は航海条件を忠実にとり入れる必要はないが、荒天時の操船条件が長期のそれと異なることは応答の長期分布にとっては重要であり、長期分布を求めるときの航海条

表 10 応答の長期分布計算のための修正想定条件

項 目	従 来 の 想 定 条 件	修 正 想 定 条 件
遭 遇 海 象	北大西洋 (Roll または Walden)	同左(ただし荒天避航を考慮して p_{mj} は $p_c \times p_{mj}$)* ($p_c < 1$)
波	短波頂不規則波	短波頂不規則波
相 対 針 路	全方位 (all heading)	向 い 波
速 力	巡航速力	0

* p_c は荒天避航による遭遇確率の低下率, 専用船ではさらにそれを 1/2 とする。

表 11 修正想定条件による応答の最大値 (M船, $N=8$)

応 答	最 大 値		
	従来の相定条件 X_m	修正想定条件 X'_m	X'_m/X_m
波浪曲げモーメント ($\times 10^{-8} \rho g L^3 B$)	1.37	1.38	1.01
横 揺 (deg)	62.5	26.0	0.42
上 下 揺 (m)	14.9	14.3	0.96

件等は表 10 のように想定するのが合理的といえる。

同表で北大西洋の波浪観測値を使用したのは, 現在よく使用されているからで, これはとくに提案する訳ではない。荒天避航の想定も検討の余地があり, p_c を一定値にとるなら比較強度的見地からすると p_{mj} の修正は無意味であるが, 将来荒天避航の率の船型, 船種等による差, 専用船等の特殊条件等がとり入れられ, p_c が船によって変えられるようになれば, この修正は活用される。

表 11 は M 船の波浪曲げモーメント, 横揺, 上下揺について, 想定条件を修正 ($p_c=0.2$ とする) すると, X_m がいかに変化するかを調べた結果を示す。横揺は変化が大きいが, 波浪曲げモーメント, 上下揺の変化は小さい。これから現在の all heading とした波浪曲げモーメントを比較強度の立場で新しい意義を付けることもできる。

また p_c を固定するなら, 波浪曲げモーメントについては前述の性質から, 長波頂不規則波中の計算値 ($N=7$) を使用することも可能である。

4 結 言

ここに示した波浪に対する船体応答の近似推定法の基礎原理は, 筆者等は既に文献 1) において波浪曲げモーメントについて述べているが, それ以外の応答については言及しなかった。本論文において, この推定法は構成が波浪曲げモーメントと類似する応答にすべて適用できることが明らかにされた。また, この推定法による結果の精度についても明らかにされてなかったが, 長波頂不規則波中を向い波で航行すると仮定した場合には, 第一近似式による結果でも誤差は 5% 以内であり, さらにその精度を向上させた第二近似式によるときは, どのような想定条件でも誤差は 5% までであることが明らかになった。

本推定法は各短期分布は Rayleigh 分布に属し, そのパラメータ R の長期分布さえ与えられるものであれば, 遭遇海象, 航海条件, 応答の種類はどのようなものであっても適用できる。

近似推定法は計算が簡単になるだけでなく, 遭遇海象や航海条件等の想定条件が最大値に与える影響を解明するのに便利であるので, これを応用してこれらの諸要因の影響を解明した。また長期分布の性質から, 応答の長期分布を計算する場合は, 短波頂不規則波中を船速 0 で全期間にわたって向い波で航行するという想定条件が最も合理的であるとの結論に達した。

参 考 文 献

- 1) 真能創外: 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 (昭和47年)。
- 2) H. U. Roll: Height, Length and Steepness of Seawaves in the North Atlantic and Dimensions of Seawaves as Function of Wind Force (English Translation), Technical and Research Bulletin, No.

- 1~19, SNAME (1958).
- 3) H. Walden : Die Eigenschaften der Meerswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst, Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen Nr. 41 (1964).
 - 4) 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報告書, 日本造船研究協会研究資料 No. 88 (昭和 41 年).
 - 5) 山内保文外 : 原子力第一船の波浪中動揺と加速度について, 日本造船学会論文集第 123 号 (昭和 43 年).
 - 6) R. Bennet : Stress and Motion Measurements on Ships at Sea, Part I, II, III, Swedish Shipbuilding Research Foundation, Reports No. 13 & 15 (1958, 1959),
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)
 - 7) 枅田吉郎 : 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 (昭和 37 年).
-