

## 海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析

### II. 波高特性について

藤 本 昌 宣・渡 辺 潔

(干拓水工学研究室)

昭和59年9月3日 受理

## Analysis of Ocean Waves in the Shallow Area of the Ariake Sea by Oceanographic Observation System

### II. On the characteristics of the wave height

Masanobu FUJIMOTO and Kiyoshi WATANABE

(Laboratory of Shore Reclamation and Hydraulic Engineering)

*Received September 3, 1984*

#### Summary

The data of wave heights obtained by the observational apparatus of oceanic phenomena in the Ariake Sea were analyzed statistically and the characteristics of the distribution and variation of wave heights in the shallow area were examined.

The following results were obtained.

- 1) The frequency distribution of the wave heights was fairly approximated by Rayleigh distribution.
- 2) The representative wave heights,  $\bar{H}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$  and  $H_{\max}$ , were affected remarkably by wind velocity and water depth, and vary with the periodicity for about twelve hours.
- 3) The mean values of the representative wave heights for six years (from 1978 to 1983) were as follows

$$\bar{H}=8\text{cm}, H_{1/3}=13\text{cm}, H_{1/10}=17\text{cm}, H_{\max}=23\text{cm}.$$

The variation of these yearly mean values was small. On the contrary, the variation of the monthly mean values was relatively large and these peak values appeared in summer.

- 4) The representative wave heights corresponding to 10 per cent in probability of exceedance were as follows

$$\bar{H}=18\text{cm}, H_{1/3}=28\text{cm}, H_{1/10}=35\text{cm}, H_{\max}=48\text{cm}.$$

- 5) The ratios of wave heights,  $H_{1/3}/\bar{H}$  and  $H_{1/10}/\bar{H}$  were the function of the ratio of the standard deviation  $\sigma$  to  $\bar{H}$ , and these relationships, derived from the Gram-Charlier distribution and assumed by Rayleigh distribution, were expressed as, respectively,

$$H_{1/3}/\bar{H}=1+1.126 (\sigma/\bar{H}), H_{1/10}/\bar{H}=1+2.000 (\sigma/\bar{H})$$

and

$$H_{1/3}/\bar{H}=1+1.143 (\sigma/\bar{H}), H_{1/10}/\bar{H}=1+1.971 (\sigma/\bar{H}).$$

#### 1. 緒 言

有明海湾奥部は、その湾形から潮汐の干満差が非常に大きく、かつ広大な干潟が発達してい

る。そして、これらの特性を利用して、沿岸部では干拓による農地造成が、また浅海域では海苔養殖を代表とする沿岸漁業が盛んに行われてきた。このような海域を保全し、より高度に利用するためには、気象、潮流および水質特性の他に波浪特性を十分に把握する必要がある。

このような観点から、本文は、有明海湾奥部に設置されている佐賀大学海象観測塔(以降「観測塔」と略称)に取付けた波浪計によって定時的に得られる一連の海面の水位変動を解析し、浅海域に発生する波高の分布特性を明らかにするとともに、代表波波高の変動特性について検討するものである。

## 2. 波高の経時変化

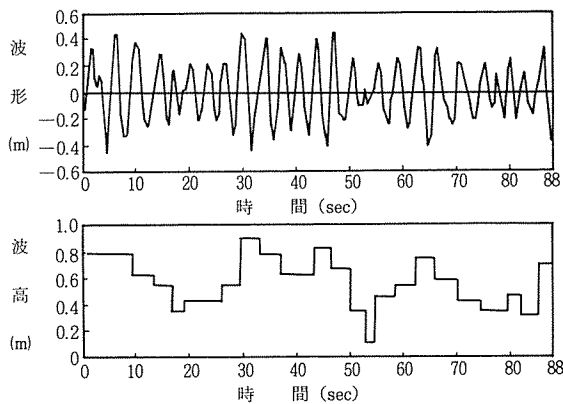


図-1 波形および波高の経時変化  
(1981年6月25日16時30分)

既報<sup>6)</sup>で述べたように、抵抗線型の波浪計によってサンプリング間隔0.44秒で得られた海面の水位変動に関する時系列データを200個ごとに平均し、平均値からの偏差を波形とした。図-1は、このような波形の変動を200個、すなわち88秒間について示したものである。このような不規則に変動する波形から波高を求めるためには、一般にゼロアップクロス法がよく用いられる。すなわち、波形が平均値ゼロを上向きに横切ってから、次に再び上向きに横切るまでの時間を周期とし、この間の波形の最大値と最小値の差を波高とするものである。図-1は、このよ

うにして求めた波高を波形と対比して示したものであるが、その時間的変化はそれぞれの周期を幅にもつ階段状となる。

## 3. 波高の度数分布

2.で述べたような方法によって得られた波高に対して1観測255波ごとにその相対度数分布を求めた。図-2は、このような波高の相対度数分布を1983年9月28日(台風10号)の10時~13時30分における30分ごとの8観測について例示したものである。なお、相対度数分布は、横軸に波高 $H$ を、縦軸に出現数 $n$ /(波数 $N \times$ 波高区間幅 $\Delta H$ )をとり、分布の棒グラフの面積が1.0となるようにしたものである<sup>3)</sup>。この8観測についての気象状況をみると、最初は風波が発達過程にあり、12時~12時30分ごろ風速18.5m/sec、波高1.81mとなってピークを示し、その後やや衰えている。度数分布は波数が255波で比較的少ないために、棒グラフの高さの変化がなめらかではないが、総体的には、風速が大きいほど波高が大きくなって、分布の幅が広がるために山の低い曲線となる。このような波高の分布は、その波群の周波数が比較的狭いバンド幅におさまる場合は、次式に示す Rayleigh 分布に従うことが Longuet-Higgins<sup>8)</sup>によって示された。

$$p(H) = \frac{\pi}{2\bar{H}^2} H \exp\left(-\frac{\pi}{4\bar{H}^2} H^2\right) \quad (1)$$

ここに、 $p(H)$ は波高の確率密度関数、 $\bar{H}$ は平均波高である。そこで、図-2に示した各測定時

間での波高の平均値を使用  
してそれぞれの Rayleigh  
分布曲線を求めたものを同  
じ図に示す。これによれば、  
いずれの度数分布もほぼ  
Rayleigh 分布を中心に変  
動しており、浅海域におい  
ても波高の分布に対してこ  
のような理論分布が比較的  
よい近似を与えることが認  
められた。

以上のように、1 観測255  
波での相対度数分布曲線は  
波数が少ないために変動が  
はげしい。そこで、数観測  
分の波高度数分布を合算し  
て同様の度数分布を求めた。  
この場合、期間中に風速や  
水深が変化し、平均波高が  
異なるために、ここでは波  
高をその観測時の平均値 $\bar{H}$   
で除して無次元化した $H/\bar{H}$   
についての度数分布を求  
めた。図-3 は、1976年 9  
月12日における11観測2805  
波および1983年 9月28日

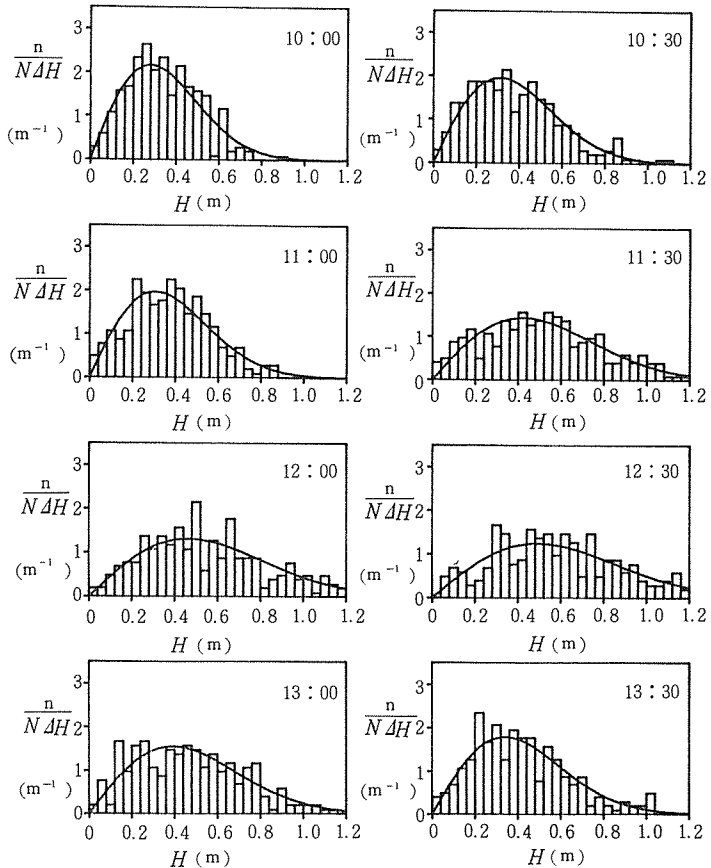


図-2 波高の相対度数分布 (1983年 9月28日)

9 観測2295波についての度数分布を示したものである。この図に示す2つの例では、度数分布の形にやや違いがみられるが、このように波数が相対的に多くなると、 $H/\bar{H}$ の分布は図-2のような255波における $H$ の度数分布に比べて、その変動の凹凸が非常に少なくなる。さらに、この図にも

$$p\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right) \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} \quad (2)$$

で表わされる Rayleigh 分布曲線を併記しているが、いずれの度数分布もこの曲線とかなり良い一致を示しており、さらに、波数が多くなれば、この傾向はより顕著になるものと考えられる。

次に、図-4 は、波高の出現率を波高の大きい方から累計して求めた超過出現率を図-2の10時30分と12時の例で Rayleigh 分布確率紙上に示したものである。この図の縦軸は、Rayleigh 分布関数を積分した

$$P(H) = \int_H^{\infty} p(x) dx = \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right\} \quad (3)$$

において、 $H$ と $P(H)$ の関係が直線となるように目盛を刻んだものである。したがって、波高の出現率分布が完全に Rayleigh 分布に従う場合は直線となる。図-4 に示す破線は、それぞれの

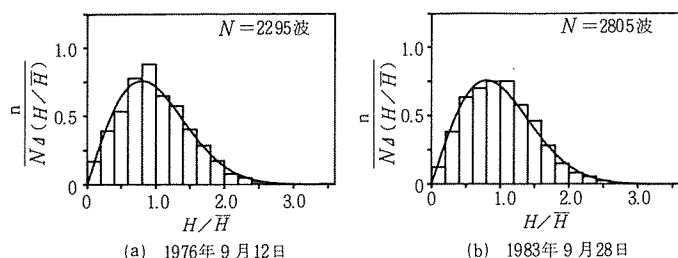


図-3 波高比の相対度数分布

は理論直線に近い値を示しているが、ややわん曲しており、 $H/\bar{H}$ が約1.3以上では実測曲線の超過確率の方が小さく、1.3以下では逆の傾向を示している。このような性質が6.で述べる代表波波高間の波高比の大きさに影響すると考えられる。

平均波高より求めた理論直線であり、実測値はこれを中心に変動している。また、図-3の波高比の出現率に対応する超過出現率を図-5に示す。この場合、破線で示す理論直線は $H/\bar{H}$ によって一義的に決定される。また、2本の実測曲線

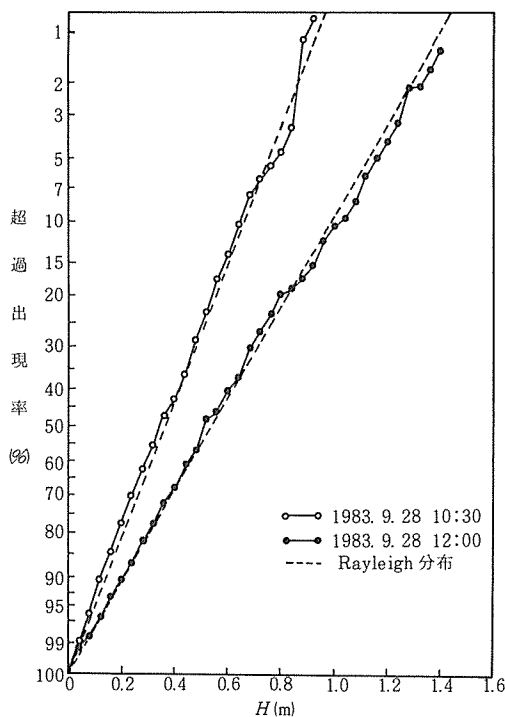


図-4 波高の超過出現率曲線

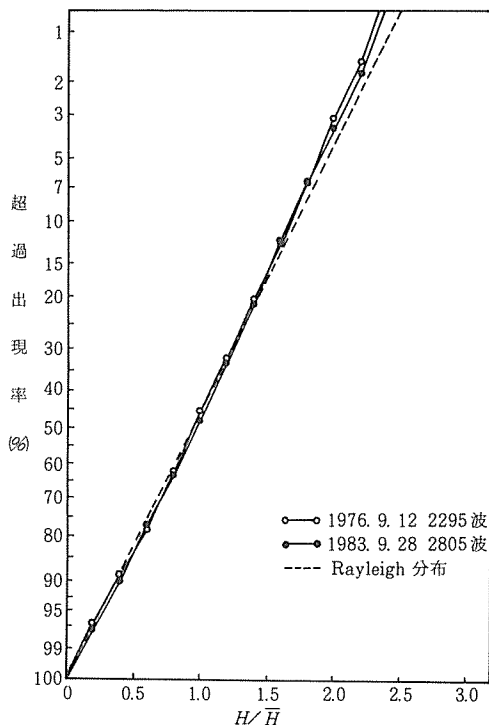
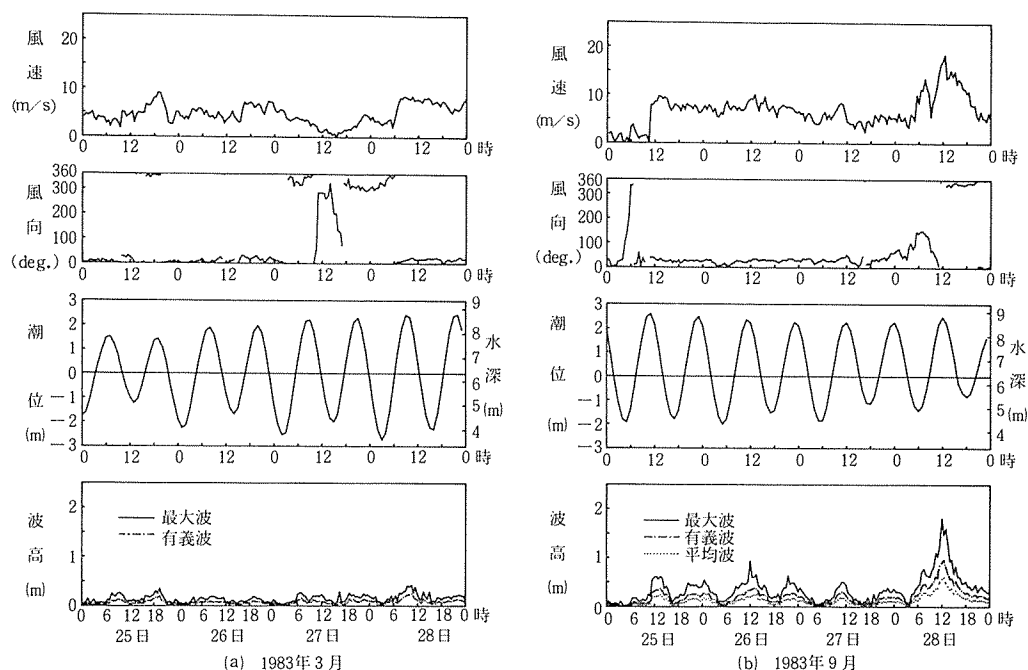


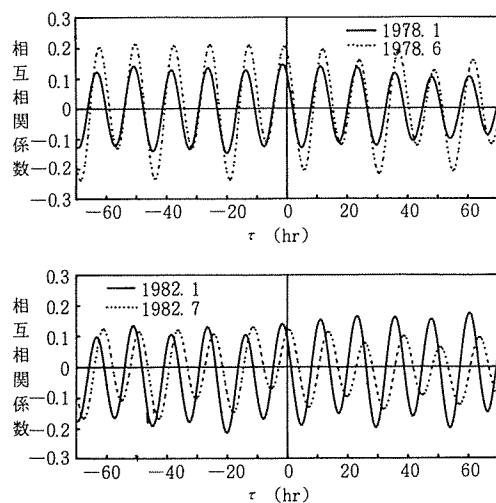
図-5 波高比の超過出現率曲線

#### 4. 代表波波高の変動特性

30分ごとの一連の波形観測から得られる波高を統計的に処理して求めた代表波波高のうち、平均波、有義波および最大波のそれぞれの波高の経時変化を、比較的波の穏やかな1983年3月25日～28日と、風波の高い同年9月25日～28日(台風10号)の例で図-6に示す。また、この図には風速、風向および潮位(水深)の変動もあわせて示している。一般に、各波高ともにそ



の変動は、風速および水深の影響を受けていることが認められる。特に、有明海特有の大きい潮位変動に起因する水深の影響が顕著である。そこで、水深および風速の有義波高に対するそれぞれの相互相関係数を図-7および図-8に示す。まず、水深と有義波高の関係についてみると、曲線のピークが  $\tau=0$  よりややずれるが、係数値が0.2から-0.2の間を約12時間周期で変動する非常に周期性の強い曲線となる。このことは、代表波波高の時系列が巨視的には潮汐すなわち水深と同じ変動周期をもち、浅海域の特徴を示すものである。また、風速と有義波高の



関係をみると、曲線は  $\tau = 0 \sim 1$  時間のところで係数値0.8程度の高いピークを示している。すなわち、風速は0～1時間後の波高と高い相関性があることが認められる。

## 5. 代表波波高の統計値

### 5.1 代表波波高の平均値および最大波高

1978年から1983年までの6年間に於ける72168観測で得られた  $\bar{H}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{\max}$  の4種類の代表波波高の平均値と最大値を月別および年別にして表-1, 2および図-9に示す。この結果、年平均値はいずれの波高も6年間にわたってほとんど変化がみられず、この間の平均値

表-1 代表波波高の月別平均値および最大値

(a)平均値													(単位: cm)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年	
$\bar{H}$	6.2	6.4	8.1	9.5	8.9	10.5	10.8	10.3	9.0	6.5	5.2	6.0	7.9	
$H_{1/3}$	10.2	10.6	13.1	15.2	14.4	16.9	17.3	16.6	14.6	10.7	8.6	9.9	12.9	
$H_{1/10}$	13.3	13.7	16.7	19.4	18.2	21.5	22.0	21.1	18.6	13.7	11.2	12.9	16.5	
$H_{\max}$	18.8	19.3	23.1	26.8	25.1	29.6	30.2	29.2	25.7	19.3	16.5	18.7	23.1	

(b)最大値													(単位: cm)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年	
$\bar{H}$	46	62	55	64	51	62	79	73	75	43	38	50	79	
$H_{1/3}$	75	99	92	100	83	97	123	114	118	67	60	79	123	
$H_{1/10}$	94	122	114	124	104	122	159	141	149	84	75	97	159	
$H_{\max}$	132	173	158	203	144	183	226	177	201	123	99	132	226	

表-2 代表波波高の年別平均値および最大値

(a)平均値 (単位: cm)							
	1978	1979	1980	1981	1982	1983	全体
$\bar{H}$	8.2	7.8	7.9	8.2	7.8	7.7	7.9
$H_{1/3}$	13.0	12.5	12.6	13.3	12.9	12.7	12.9
$H_{1/10}$	16.5	15.9	16.0	17.0	16.5	16.5	16.5
$H_{\max}$	22.8	22.0	22.1	23.7	23.2	23.5	23.1

(b)最大値 (単位: cm)							
	1978	1979	1980	1981	1982	1983	全体
$\bar{H}$	74	47	75	79	73	62	79
$H_{1/3}$	118	74	105	123	114	99	123
$H_{1/10}$	149	96	124	159	141	122	159
$H_{\max}$	197	144	203	226	177	181	226

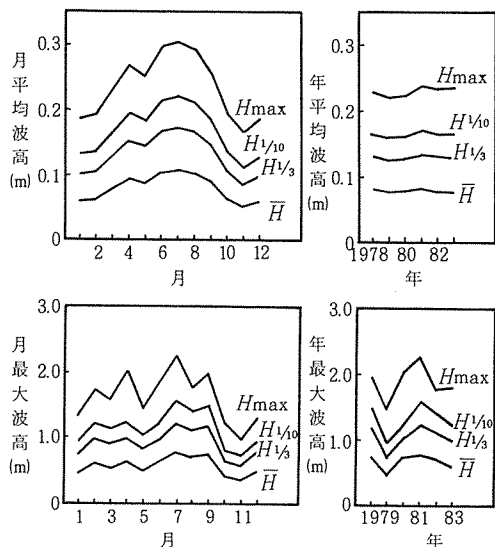


図-9 代表波の月別、年別の平均波高および最大波高

は、 $\bar{H}=7.9\text{cm}$ ,  $H_{1/3}=12.9\text{cm}$ ,  $H_{1/10}=16.5\text{cm}$ ,  $H_{\max}=23.1\text{cm}$ である。これに対して、月平均値は1年間でかなり大きい変化を示し、6～8月ごろに最大となり、11月から翌年の2月ごろにかけて最小となる。このような現象は次のような理由によるものと考えられる。観測地点の年平均風速は約4 m/secで年による変化が小さいこと<sup>9)</sup>、風向の変化のサイクルが1年であること、のためにいずれの年平均波高もほぼ一定している。これに対して、平均波高の経月変化が比較的大きいのは、有明海湾奥部の地形に起因するもので、特に風向の変化が大きく影響している。すなわち、5～8月ごろの春から夏にかけては南東～南の風が卓越しており、この方向の対岸距離は最大約55kmにもなること、月平均風速も他の時期に比較してやや大きいこと<sup>9)</sup>、などがそれぞれの平均波高を大きくする要因となっている。

また、最大波高は、平均波高のような統計値ではなく、波群中の1波によって決まるものであるために、年変化、月変化ともに平均波高に比べると不規則に変動している。しかし、最大波高も冬期に比べると夏期の方がやや大きい傾向がみられる。対象としている6年間の各波高の最大値は1981年に発生したもので、 $\bar{H}=79\text{cm}$ ,  $H_{1/3}=123\text{cm}$ ,  $H_{1/10}=159\text{cm}$ ,  $H_{\max}=226\text{cm}$ である。これらの値は、各波高ともにそれぞれの平均値のほぼ10倍程度の値となっている。なお、1975年に観測を開始して以来の最大波高は、1976年9月13日2時30分（台風17号）に記録した3.18mである。

## 5.2 代表波波高の出現率

5.1と同じ6年間の代表波波高を用いて、これらの出現率分布を求めた。図-10は、72168個の波高データを4 cmごとに区分けし、その出現率分布を4つの代表波高について棒グラフで、また、1年ごとに求めた出現率分布を折れ線で示したものである。これによれば、1年ごとの出現率分布曲線は、各波高ともに毎年ほとんど同じ形を示しており、結局、これらを平均した形の棒グラフのような出現率分布が浅海域における1つのパターンであると考えられる。したがって、分布のピークを示す波高は $\bar{H}$ と $H_{1/3}$ では4～8 cm,  $H_{1/10}$ と $H_{\max}$ は8～12cmの区間に現われ、また、これらの波高は5.1で述べたそれぞれの平均波高の1/1.5～1/2.0程度と

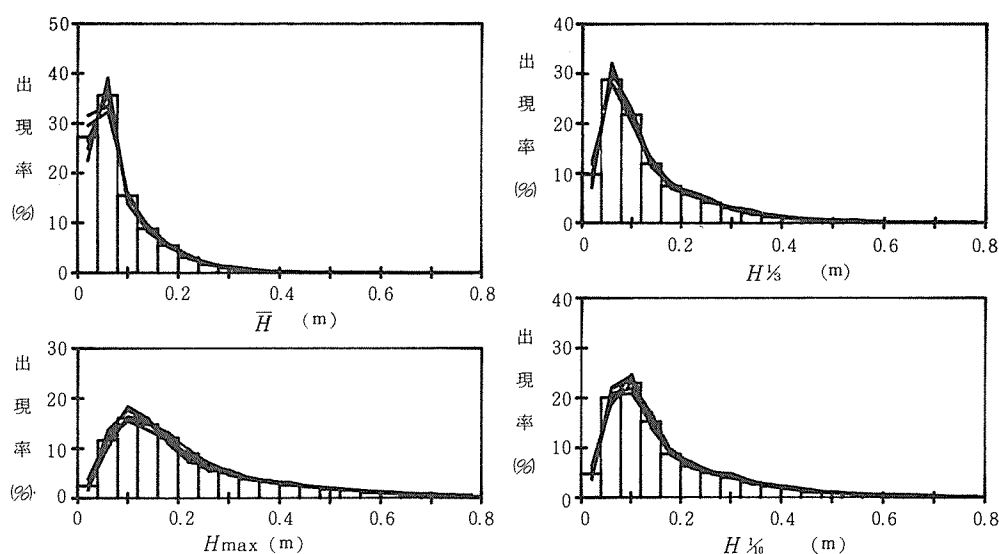


図-10 代表波波高の年別および平均の出現率分布 (1978～1983年)

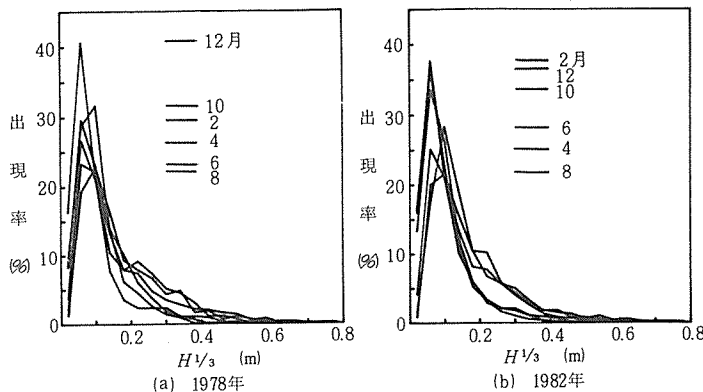


図-11 有義波高の月別出現率分布曲線

が小さくなる。

### 5.3 代表波波高の超過出現率

図-10に示す6年間の各波高の出現率分布曲線において、それぞれの波高の大きい方から小さい方へ出現率を順次累計して、各代表波波高ごとの超過出現率を求めた。この出現率曲線を波高別に対数正規確率紙上に描いたものが図-12である。これによれば、波高の超過出現率曲線は各波高ともにほぼ直線で表わすことができ、かつ4つの波高における曲線が平行になることが認められる。これは、図-10の出現率分布がいずれも対数正規分布に非常に近似していることを示している。他の港湾における観測事例によれば、対数正規確率紙上の超過出現率曲線

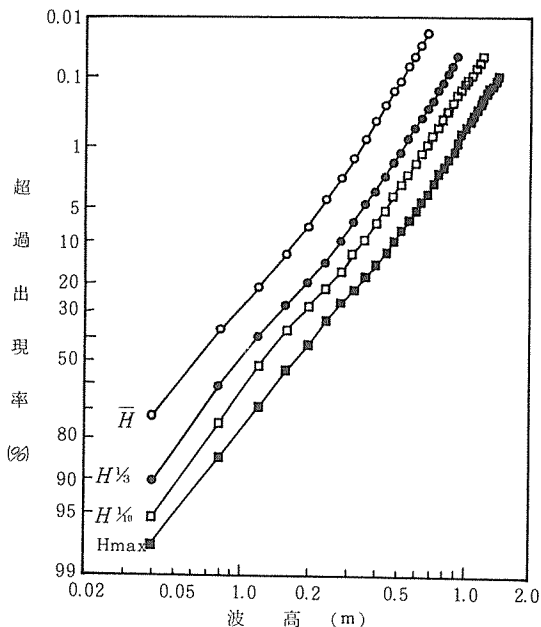


図-12 代表波波高の超過出現率曲線

なっている。

一方、月別のこれらの出現率分布を $H_{1/3}$ についてみたのが図-11である。この図は1978年と1982年のそれぞれ2月から12月までの2か月ごとについて例示したものであるが、出現率分布曲線も月によってかなり大きく変化し、平均波高が夏に大きく、冬に小さいことに対応して4～8月の方が相対的に分布曲線の幅が広く、ピークでの出現率

は、直線近似できる場合、下に凸の曲線となる場合、さらに、正規確率紙上で直線となる場合、などがある<sup>1)</sup>。

次に、超過出現率50%、10%および1%に相当するそれぞれの波高は表-3のようになる。このうち、超過出現率10%の $H_{1/3}$ について他の港湾の例<sup>1)</sup>と比較すると、鹿島港で2m、酒田港、金沢港では3m程度の大きい値を示し、有明海浅海域におけるこのような統計値が、その地形的理由から非

表-3 代表波波高の超過出現率  
(単位: cm)

超過出現率	$\bar{H}$	$H_{1/3}$	$H_{1/10}$	$H_{max}$
50%	6	10	13	18
10	18	28	35	48
1	35	53	67	91



常に小さいことが認められる。

## 6. 代表波波高の波高比

前述のような代表波波高，すなわち平均波高  $\bar{H}$ ，有義波高  $H_{1/3}$ ，1/10最大波高  $H_{1/10}$  および最大波高  $H_{\max}$  のそれぞれ相互の波高の比率は波高の分布を表わす一つの指標である。

理論的には，3. で述べたように，波高の確率密度が Rayleigh 分布に適合するとして，その確率計算からそれぞれの波高比が求められている<sup>2),4)</sup>。Rayleigh 分布の確率密度は式(1)，(2)で，また，その超過確率は式(3)で表わされる。これらの式を用いると，1/N最大波高と平均波高の比  $H_{1/N}/\bar{H}$  は，超過確率 1/N となる波高比  $\beta$  として，次式によって求められる。

$$\exp\left[-\frac{\pi}{4}\beta^2\right] = \frac{1}{N} \text{ または } \beta = \sqrt{\frac{4}{\pi} \ln N} \quad (4)$$

$$H_{1/N}/\bar{H} = \frac{\int_{\beta}^{\infty} \alpha p(\alpha) d\alpha}{1/N}, \quad (\alpha = H/\bar{H}) \quad (5)$$

この結果， $H_{1/3}/\bar{H} = 1.598$ ， $H_{1/10}/\bar{H} = 2.031$ ，したがって  $H_{1/10}/H_{1/3} = 1.271$  が得られる。

また，最大波高の確率密度関数  $p^*(\alpha_{\max})$  は，波数を  $N_0$ ，任意の基準波高を  $H_*$  とすると

$$\alpha_{\max} = H_{\max}/H_* \quad (6)$$

$$\xi = N_0 \exp[-\alpha^2 \alpha_{\max}^2] \quad (7)$$

$$p^*(\alpha_{\max}) = 2\alpha^2 \alpha_{\max} \xi e^{-\xi} \quad (8)$$

$$(\alpha_{\max})_{\text{mean}} \approx \frac{1}{a} (\ln N_0)^{1/2} + \frac{\gamma}{2a(\ln N_0)^{1/2}} - \frac{\pi^2 + 6\gamma^2}{48a(\ln N_0)^{3/2}} + \dots \quad (9)$$

( $\gamma = 0.5772 \dots$  : Euler の定数)

によって求めることができる<sup>2),7)</sup>。ただし， $H_*$  が  $\bar{H}$ ， $H_{1/3}$ ， $H_{1/10}$  の場合に対する  $\alpha$  の値は，それぞれ 0.886，1.416，1.800 である。本装置においては波数  $N_0 = 255$  としているので，この場合の  $\alpha_{\max}$  の平均値は式(9)より， $H_{\max}/\bar{H} = 2.774$ ， $H_{\max}/H_{1/3} = 1.736$ ， $H_{\max}/H_{1/10} = 1.365$  となる。

### 6.1 波高比の度数分布

観測塔において得られた実測の波高比を，波形観測を行なった198例について相対度数分布で示したものが図-13である。また，それぞれの波高比の平均値，出現範囲および標準偏差を前述の理論値とあ

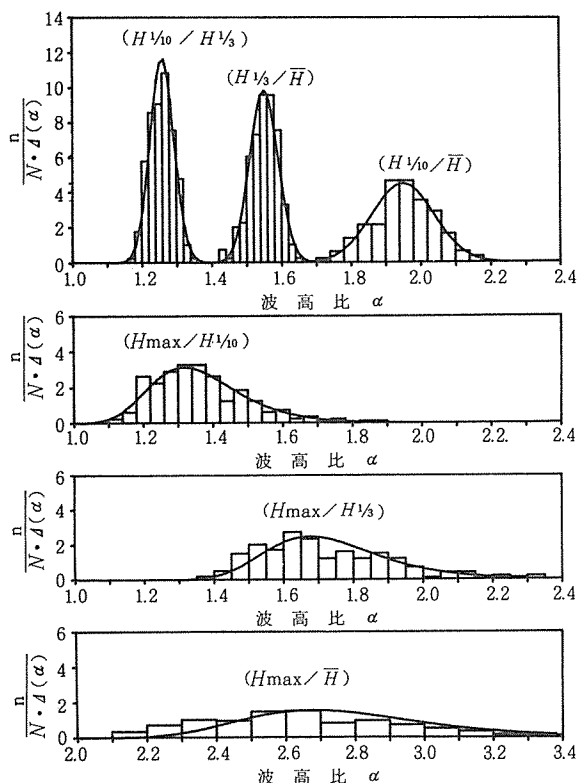


図-13 波高比の相対度数分布 ( $N=198$ )

表-4 代表波波高相互の波高比 ( $N=198$ )

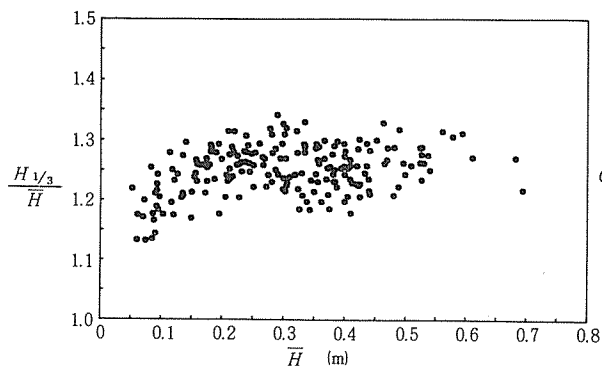
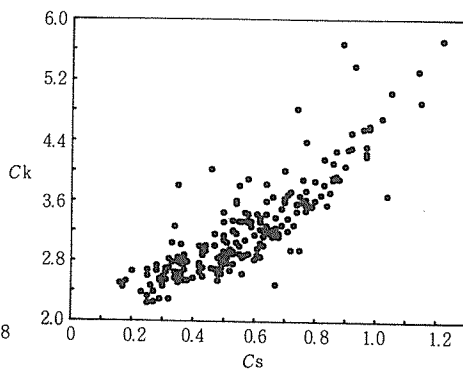
波 高 比	平 均 値	出 現 範 囲	標 準 偏 差	理 論 値
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.550	1.43~1.65	0.041	1.598
$H_{1/10}/\bar{H}$	1.949	1.70~2.16	0.089	2.031
$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.257	1.17~1.35	0.034	1.271
$H_{\max}/\bar{H}$	2.666	1.90~3.70	0.319	2.774
$H_{\max}/H_{1/3}$	1.719	1.30~2.35	0.195	1.736
$H_{\max}/H_{1/10}$	1.366	1.10~1.90	0.137	1.365

わせて表-4に示す。この結果、いずれの波高比も出現範囲の幅が比較的広く、 $H_{1/3}/\bar{H}$ 、 $H_{1/10}/\bar{H}$ 、 $H_{1/10}/H_{1/3}$ については、その分布形が曲線で示す正規分布に近似しており、これらの平均値は Rayleigh 分布より求めた理論値よりもやや小さい値を示している。このような傾向は、波高分布が正しく Rayleigh 分布とならず、かつ超過出現率の実測曲線と理論直線が図-5に示すような形のずれを生じていることに起因するものである。また、 $H_{\max}/\bar{H}$ 、 $H_{\max}/H_{1/3}$ 、 $H_{\max}/H_{1/10}$ については、その理論値は式(8)に示すような確率密度曲線で表わされ、前述の3つの波高比の理論値のように唯一の値を持たずに、ある幅で分布する。そして実測の度数分布は曲線で示す理論曲線と相対的にほぼ同じ分布形となり、分布の幅が広いにもかかわらず、それぞれの波高比の平均値も理論値と近似している。

## 6.2 波高比と分布の統計量の関係

代表波波高のうち、 $\bar{H}$ 、 $H_{1/3}$ および $H_{1/10}$ の値は、波高の確率密度が Rayleigh 分布にしたがう場合は、 $\bar{H}$ を与えれば $H_{1/3}$ 、 $H_{1/10}$ が得られ、さらに $H_{1/3}/\bar{H}$ 、 $H_{1/10}/\bar{H}$ の値が定まる。しかし、実測した198例について図-14に示すように、 $\bar{H}$ に対する $H_{1/3}/\bar{H}$ の関係を求めると、これらの間にはほとんど相関性がみられない。そこで、波高の分布を正規分布的に考えて、波高比と分布の統計量、すなわち、平均値 $\bar{H}$ 、標準偏差 $\sigma$ 、ひずみ度 $C_s$ および尖鋭度 $C_k$ との関係について検討する。なお、 $C_s$ および $C_k$ は次式によって表わされる。

$$C_s = \frac{1}{\sigma^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^3 \quad (10)$$

図-14 平均波高  $\bar{H}$  と波高比  $H_{1/3}/\bar{H}$  の関係図-15 波高分布のひずみ度  $C_s$  と尖鋭度  $C_k$  の関係

$$C_k = \frac{1}{\sigma^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^4 \quad (11)$$

まず、波高の分布を正規分布と考えると、確率計算より波高比は次のようになる。

$$\frac{H_{1/3} - \bar{H}}{\sigma} = 0.1091 \text{ または } \frac{H_{1/3}}{\bar{H}} = 1 + 0.1091 \left( \frac{\sigma}{\bar{H}} \right) \quad (12)$$

$$\frac{H_{1/10} - \bar{H}}{\sigma} = 1.755 \text{ または } \frac{H_{1/10}}{\bar{H}} = 1 + 1.755 \left( \frac{\sigma}{\bar{H}} \right) \quad (13)$$

また、正規分布からわずかにゆがんだ形の確率変数の分布曲線として、Gram-charlier 分布<sup>5)</sup>がある。この密度関数 $p(x)$ は、正規分布とそれに対する補正項の和として次式のように表わされる。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \left[ 1 + \frac{C_s}{6} (x^3 - 3x) + \frac{C_k - 3}{24} (x^4 - 6x^2 + 3) \right] \quad (14)$$

ただし、 $x = (H - \bar{H})/\sigma$ である。また、 $C_s = 0$ 、 $C_k = 3$ とすると $p(x)$ は正規分布に等しくなる。Gram-Charlier 分布を波高の密度関数として用い、これから波高比を求める場合、 $\sigma/\bar{H}$ 、 $C_s$ および $C_k$ を与える必要がある。実測のこれらの平均値は、それぞれ0.49、0.58、3.24である。さらに、 $C_s$ と $C_k$ の関係は図-15のようになり、 $C_s$ が大きくなるにつれて $C_k$ も増加する傾向がみられる。また、このような統計量を Rayleigh 分布に対して求めると $\sigma/\bar{H} = 0.52$ 、 $C_s = 0.63$ 、 $C_k = 3.25$ となり、実測の平均値にかなり近い値を示す。したがってここでは、式(14)に示すGram-Charlier 分布の $C_s$ と $C_k$ に Rayleigh 分布で得られる値を採用し、これらの値を代入して、確率計算によって波高比を求めると、

$$\frac{H_{1/3} - \bar{H}}{\sigma} = 1.126 \text{ または } \frac{H_{1/3}}{\bar{H}} = 1 + 1.126 \left( \frac{\sigma}{\bar{H}} \right) \quad (15)$$

$$\frac{H_{1/10} - \bar{H}}{\sigma} = 2.000 \text{ または }$$

$$\frac{H_{1/10}}{\bar{H}} = 1 + 2.000 \left( \frac{\sigma}{\bar{H}} \right) \quad (16)$$

が得られる。

なお、式(12)、(13)および式(15)、(16)は $\sigma$ がゼロに近づくとき、波高比が1に漸近することを示している。

このような観点から、観測塔で得られた実測の波高比のうち $H_{1/3}/\bar{H}$ 、 $H_{1/10}/\bar{H}$ および $H_{1/10}/H_{1/3}$ と $\sigma/\bar{H}$ の関係を示すと図-16のようになり、ほぼ直線関係にある。また、これらの関係式および相関係数 $r$ は次のようになる。

$$H_{1/3}/\bar{H} = 1.209(\sigma/\bar{H}) + 0.960 \quad (r=0.962) \quad (17)$$

$$H_{1/10}/\bar{H} = 2.514(\sigma/\bar{H}) + 0.722 \quad (r=0.914) \quad (18)$$

$$H_{1/10}/H_{1/3} = 0.647(\sigma/\bar{H}) + 0.941$$

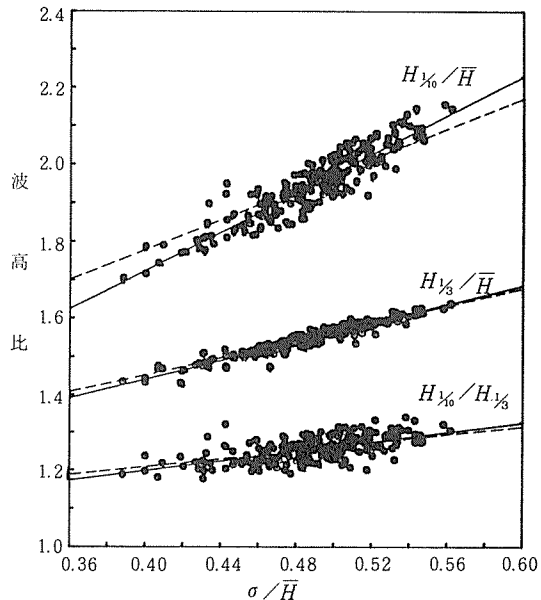


図-16  $\sigma/\bar{H}$ と波高比の関係

表-5 波高比と  $\sigma/\bar{H}$  の関係式における係数  $a$  の値

波 高 比	式(12) (13)	式(15) (16)	式(23) (24)	式(20) (21)
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.091	1.126	1.143	1.128
$H_{1/10}/\bar{H}$	1.755	2.000	1.971	1.947

$$(\gamma=0.611) \quad (19)$$

ただし,  $H_{1/10}/H_{1/3}$  は本質的には式(18)を式(17)で除したものとなる. ここで, 式(17)~(19)は  $\sigma/\bar{H}=0$  の時に 1 とならないが, これをデータ数の関係と考え, これらを 1 とするような実験式に修正すると

$$H_{1/3}/\bar{H}=1+1.128(\sigma/\bar{H}) \quad (20)$$

$$H_{1/10}/\bar{H}=1+1.947(\sigma/\bar{H}) \quad (21)$$

$$H_{1/10}/H_{1/3}=1+0.527(\sigma/\bar{H}) \quad (22)$$

となる.

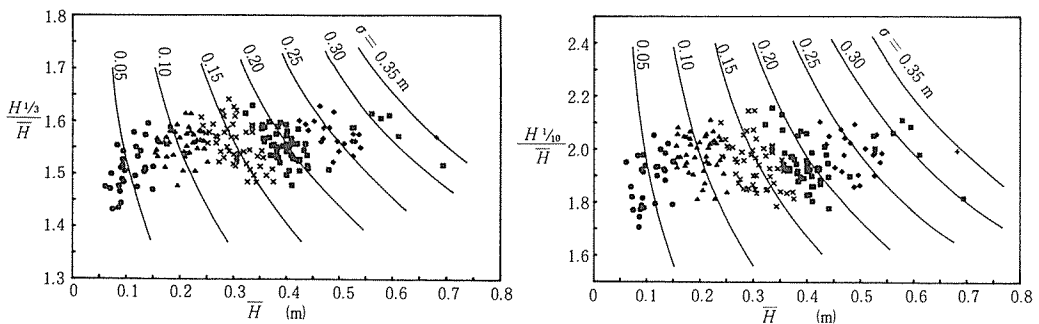
さらに, Rayleigh 分布は  $\sigma/\bar{H}=0.523$  に固定され, この時の波高比は  $H_{1/3}/\bar{H}=1.598$ ,  $H_{1/10}/\bar{H}=2.031$  であるが, 仮りに  $\sigma/\bar{H}=0$  での波高比が 1 となるような直線式を想定すると次式が得られる.

$$H_{1/3}/\bar{H}=1+1.143(\sigma/\bar{H}) \quad (23)$$

$$H_{1/10}/\bar{H}=1+1.971(\sigma/\bar{H}) \quad (24)$$

以上のように, 波高比  $H_{1/3}/\bar{H}$  および  $H_{1/10}/\bar{H}$  と  $\sigma/\bar{H}$  は直線関係にあり, 波高の分布を正規分布と仮定した式(12), (13), Rayleigh 分布から得られた  $C_s$ ,  $C_k$  を用いた Gram-charlier 分布による式(15), (16), Rayleigh 分布から想定した式(23), (24)および実験式(17), (18)あるいは式(20), (21)が導かれる. 図-16には実験式の式(17)~(19) (実線) および式(20)~(22) (破線) のみを記入しているが, 波高比  $=1+a(\sigma/\bar{H})$  とした場合の各式における  $a$  の値をまとめて表-5 に示す. この結果, 波高比  $H_{1/3}/\bar{H}$  および  $H_{1/10}/\bar{H}$  は一定の値とはならず,  $\sigma/\bar{H}$  が大きくなるにつれて増加し, 表-5 の係数の比較により, 式(15), (16)あるいは式(22), (23)によって推定することが可能である.

さらに, 図-17は  $\bar{H}$  に対する  $H_{1/3}/\bar{H}$ ,  $H_{1/10}/\bar{H}$  の関係を  $\sigma$  をパラメータとして示しているが, 図中の曲線は式(17), (18)をもとにして描いたものである. このような波高比が, その分布の形から  $\bar{H}$  が一定の時は  $\sigma$  が小さいほど, また  $\sigma$  が一定の時は  $\bar{H}$  が大きいほど波高比が小さくなること, この図からも明らかである.

図-17 平均波高  $\bar{H}$ , 標準偏差  $\sigma$  と波高比の関係

## 7. 摘 要

有明海海象観測装置によって得られた波浪データを統計的に解析し、浅海域における波高の分布ならびに変動特性について検討を行った。

その結果、次のようなことが明らかになった。

- 1) 波高の度数分布は近似的に Rayleigh 分布にしたがう。
- 2) 代表波波高は風速と水深の影響を大きく受けて、約12時間周期で変動する。
- 3) 代表波波高の6年間(1978年～1983年)の平均値は、 $\bar{H} = 8 \text{ cm}$ ,  $H_{1/3} = 13 \text{ cm}$ ,  $H_{1/10} = 17 \text{ cm}$ ,  $H_{\max} = 23 \text{ cm}$ で、年平均値の変化は小さい。一方、月平均値の変化は比較的大きく、いずれの波高も夏期に最大となる。
- 4) 超過出現率10%に相当する波高は、 $\bar{H} = 18 \text{ cm}$ ,  $H_{1/3} = 28 \text{ cm}$ ,  $H_{1/10} = 35 \text{ cm}$ ,  $H_{\max} = 48 \text{ cm}$ である。
- 5) 波高比  $H_{1/3}/\bar{H}$  および  $H_{1/10}/\bar{H}$  は  $\sigma/\bar{H}$  の関数で、その関係は Gram-Charlier 分布から求めた

$$H_{1/3}/\bar{H} = 1 + 1.126(\sigma/\bar{H}), \quad H_{1/10}/\bar{H} = 1 + 2.000(\sigma/\bar{H})$$

あるいは、Rayleigh 分布から仮想した

$$H_{1/3}/\bar{H} = 1 + 1.143(\sigma/\bar{H}), \quad H_{1/10}/\bar{H} = 1 + 1.971(\sigma/\bar{H})$$

によって近似させることができる。

## 参 考 文 献

- 1) 合田良實 (1975). 波浪の統計的性質とその応用. 水工学に関する研修会講義集 B-1. 土木学会, 15-18.
- 2) 合田良實 (1982). 港湾構造物の耐波設計. 鹿島出版会. 東京. p. 12-16.
- 3) 合田良實・永井康平 (1974). 波浪の統計的性質に関する調査・解析. 港湾技術研究所報告. 13. 1-37.
- 4) 河野二夫 (1980). 海岸水理学. 森北出版. 東京. p. 225-230.
- 5) 日野幹雄 (1978). スペクトル解析. 朝倉書店. 東京. p. 115-118.
- 6) 藤本昌宣・渡辺 潔 (1984). 海象観測システムによる有明海浅海域の波浪解析 I. 表面波形特性について, 佐大農彙. 57. 103-114.
- 7) 森口繁一・宇田川銑久・一松 信 (1984). 数学公式 II. 岩波書店. 東京. p. 140.
- 8) Longuet-Higgins, M. S. (1952). On the statistical distribution of the height of sea waves. Jour. of Marine Research. 11. 245-266.
- 9) 渡辺 潔・藤本昌宣 (1982). 海象観測システムによる有明海の海象気象の解析 III. 風向風速の分布特性について, 佐大農彙. 53. 9-16.