



# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 39 December 1967

波高計による観測データの処理方法……高橋智晴・鈴木禧美・中井徹也  
波浪統計に関する二、三の考察……合田良実

昭和 42 年 12 月

運輸省港湾技術研究所



## 総 目 次

波高計による観測データの処理方法

.....高橋智晴・鈴木禮美・中井徹也..... 3

波浪統計に関する二，三の考察.....

.....合田良実... 235

## 波浪統計に関する二、三の考察

合 田 良 実

# 波浪統計に関する二、三の考察

## 目 次

概 要 .....	239
1. ま え が き .....	239
2. 波浪統計とその表示法 .....	240
3. 波浪観測値の統計的独立性 .....	242
4. 定時観測の最小回数 .....	244
5. 極値時系列による確率波高の推定法 .....	245
5.1 定時観測値からの推定法の検討 .....	245
5.2 期間最大値からの推定法の検討 .....	246
5.3 極値時系列による推定の基本的な手順 .....	247
5.4 極値時系列法に対する二、三の補足的手法 .....	249
6. 波浪観測における観測水深の影響 .....	251
7. 波浪観測成果の整理法に関する試案—結論にかえて— .....	253
参考文献 .....	254

## 波浪統計に関する二、三の考察

合 田 良 実\*

### 概 要

波浪観測は港湾・海岸工事の基礎調査として欠くことのできないものであるとともに、その遂行に多大の労力を費す事業であり、観測の成果は十二分に活用されなければならない。本資料は、観測成果の整理法を中心に種々の統計的考察を述べたもので、各種の整理法を説明し、それぞれの問題点を指摘し、最後に標準的な整理法の試案を提示した。その要点は、波浪記録は1～2時間ごとに取得するけれども、記録の読み取りは日最大波浪の発生時および6時間ごとの読取定時についてのみ行なうことで、定時読取値は月別平均値、超過波高出現率、波高別継続時間などの諸元の算出に使用する。設計波高の選定資料などに用いられるN年確率波の諸元は、定時読取値ではなく、ある波高以上の大時化の際の最大有義波などを拾い上げて作成した「極値時系列」にもとづいて推定することを推奨し、その実際的手順について解説した。また欠測の際は目視観測によって補足しておくことが望ましく、これによってN年確率波推定のための統計期間を長くとれることを指摘した。

なお、波浪観測値に対する観測水深の影響はかなり著しいようで、 $H_{\max}/H_{1/3}$  の比なども  $H_{1/3}/h$  の増加につれて減少する傾向があり、波高計はできるだけ水深の大きい地点に設置することが望まれる。

### 1. ま え が き

湾港工事や海岸工事を進めて行く上で、波浪観測がいかに重要であるかは改めて論ずるまでもないであろう。しかしながら、波浪観測を欠測なしに長年月継続して行くことは、非常に困難な事業であり、波高計の保守点検、記録計の維持調整、さらには得られた波浪記録の整理解析にと、多大の労力を要し、担当者各位の熱意と献身的努力なしには不可能な事業である。

波浪観測の重要性は古くから認識されていたにもかかわらず、波高計による連続記録の取得は比較的新しく、第二次大戦以後のことである。これは、連続観測用の波高計の開発がむずかしいことが主な理由であり、また海の波の現象が非常に複雑で、これを統計的に表示する方法が固まっていなかったことも影響していたと思われる。従って、戦前における波浪記録はほとんどが目視観測（波高桿などを補助手段に使った場合もある）によるもので、普通はほぼ最大波、あるいは大きそうな波を目測で平均したものをとっていたようで、その結果は単純に波高6m、周期12秒などと表わされていた。このため、現行の観測法による有義波高  $H_{1/3}$ 、あるいは  $1/2$  最大

波高  $H_{1/10}$  とは直接に結びつけることができない。

波高計による波浪観測は、わが国では昭和25年頃から各港湾建設局関係者や井島博士の努力によって継続的に行なわれるようになり、これらの成果は昭和36年に日本沿岸の波の性質<sup>1)</sup>としてひとまずとりまとめられている。その後も波高計による波浪観測はさらに普及し、苫小牧、鹿島、新潟東港などを始めとして数年以上にわたってほぼ無欠測の優れた記録が蓄積されつつある。

こうした波浪観測の成果は、波浪観測台帳の形で関係諸機関から公開されており、わが国沿岸の波浪特性を明らかにする上でこの上なく貴重なデータとなっている。しかしながら、こうした波浪台帳からどのような波浪統計の諸元を導き、設計施工面に活用するかについては、あまり検討されていなかったように思われる。そこで、今までに用いられた整理法を一通り検討し、考察を行なって、波浪統計の手法が多数の人々に容易に活用できるようにし、ひいてはこれによって貴重な波浪観測の成果がより有効に活用される一助としたいと考えた次第である。

現場観測の苦勞を知らない者がその成果の利用について述べるのは、誠に出すぎたことではあるが、あるいは直接関係していない者の方がかえって全体を眺めれるの

\* 水工部波浪研究室長

ではないかとも思い、あえて本資料をとりまとめた次第である。関係各位の御批判、御教示を願う次第である。

## 2. 波浪統計とその表示法

波浪観測の成果は、各観測時刻ごとの波高・周期を記載した波浪観測台帳の形にまず取りまとめられる。しかし、そのままではデータ量が多くて波浪の特性が明瞭でないで、適当な統計量の形に整理して表示する。こうした波浪観測台帳から読みとられる波浪の統計量および統計方法を、この資料では「波浪統計」と呼ぶことにする。

波浪の現象はもともと統計的な現象であって、観測の次の瞬間にどのような波が襲来するか、あるいは1日後、1週間後、さらには1年後にどのような波浪状況となるかを、波浪記録からだけ予測することは原理的に不可能である。これは、天文潮のような確定的な現象とは根本的に異なる点である。しかしながら、個々の波の予測ではなくて、ある期間内の波を全体として考えると、それぞれの波高・周期が出現する割合はほぼ定まっており、たとえば1年間に有義波高1m以上の波浪が発生するのは約50日である、という風に述べることができる。

こうした波浪の統計的性質を考えるときは、その統計期間が一つの重要な要素となる。統計期間として最も短かいのは、1回の波浪観測が行なわれる10~20分の時間である。この程度の時間内では、波はほぼ定常状態にあって、さまざまな波浪周期の波が無規則に続いていると見なすことができる。この場合は、1波づつの波が整理の対象となる。

統計期間として次に考えられるのは、週、月、年等の期間で、個々の波よりも各観測時における $H_{1/10}$ 、 $H_{1/3}$ などの波浪状況がどのようなひん度で発生したかが問題になる。なお波の場合に注意しなければならないのは、一つの時化あるいは「なぎ」の状態が数時間ないし数日間続くことで、このため各観測時の波浪状況は統計的に独立でなく、通常の統計的手法を無条件に用いることはできない。

さらに、構造物の設計波を選定するような場合には、数十年あるいはそれ以上の長期間が対象となり、波の資料としても、台風や低気圧に伴った異常波浪が続いている間の最大有義波などを考えることになる。

こうした統計期間の長短なども考えながら、波浪統計の諸元として用いられているものを挙げてみると、次のようなものがある。

- a. 各種の平均波（ $\frac{1}{2}$ 最大波、有義波など）
- b. 期間内平均値（月平均有義波など）
- c. 波高、周期、波向の各出現率
- d. 波高・周期および波高・波向の相関出現率
- e. 波高別継続時間の発生ひん度
- f. 期間内最大値（日最大有義波など）
- g.  $N$ 年確率波

以下、これらの統計諸元について説明するとともに、二、三の問題点を指摘しておく。

a) 各種の平均波……これは各観測時における波浪状況を表示するためのもので、観測された波形を1波づつに分割し、個々の波の波高・周期の平均値で波高諸元を表示する。全ての波について平均したのが、通常にいう平均波高 $H_{mean}$ 、平均周期 $T_{mean}$ であり、振幅の大きな波を全波数の $\frac{1}{3}$ の数だけ選んでその平均を求めたのが、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ である。また、同じく全波数の $\frac{1}{10}$ について求めたのが $\frac{1}{10}$ 最大波高 $H_{1/10}$ 、同周期 $T_{1/10}$ である。さらに、観測時間内あるいは一時化の続いている間の最高波高の1波について、その波高 $H_{max}$ 、周期 $T_{max}$ を問題にすることもある。特に注意すべきは、 $T_{max}$ が周期として最大の波の周期ではなく、波高が最大の波の周期であることである。 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ などについても同様である。波浪統計としては、これら各種平均波の間の波高比、周期比などが議論の対象となる。

なお、各観測時における波浪状況の表示方法としてエネルギースペクトルを用いることがあるが、一般的な波浪統計の諸元としてはまだ熟していない。

b) 期間内平均値……これは、月、季節、年などにおける平均的な波浪状況を表示するためのもので、普通は有義波の波高および周期について平均値を求めるが、 $\frac{1}{2}$ 最大波について平均することもある。特に月別平均波高などは、4.の表-2に1例を示したように、季節的な波浪状況の変化を浮び上らせるのによい。また、年平均有義波高は、対象地点の波浪概況を表示するのに便利である。なお、波高および周期の平均値を求める場合、適当な区分ごとの度数分布を求め、各区分の中央値にその度数を乗じて総和を求める方式が用いられることがある。この場合、 $H=0$ が相当数現われるときは、波高区分0~19、20~49cmをどのようにして計算しないと、平均値にかなりの誤差を生ずることになる。また最上位の区分帯については、誤差を小さくするために個々の値を集計した方がよい。

c) 波高、周期、波向の各出現率……前項の期間内平

均値のデータを補足し、波高、周期、波向がどのように分布しているかを示すものである。波高、周期についてはそれぞれの大きさを10~20階級に分け、各階級の出現度数を算え、階級の上位あるいは下位から集計して累加出現度数を求め、これを総度数で割って超過あるいは未超過出現率とする。表-1は、新潟東港<sup>3)</sup>の1963年9月~1965年8月の波高出現率の計算例である。この表では、各波高階級の下限值に対する超過出現率および未超過出現率が与えられ、2つの出現率の和は常に1である(これは出現率の定義からいって当然である)。波浪統計では、この表の結果を確率紙(対数正規あるいは正規)上にプロットして、超過あるいは未超過出現率曲線<sup>注)</sup>として表示することが多い。この際、波高としては各階級の上限値または下限値(表-1の累加方式の場合は下限値)を用い、各階級の中央値を用いてはならない。

表-1 新潟東港波高出現率  
(1963年9月~1965年8月)

波高階級	出現度数	未超過出現率		超過出現率	
		累加度数	比率	累加度数	比率
0 — cm	2555	—	%	8611	100.0
0 — 19	2555	—	0	8611	100.0
20 — 49	2577	2555	29.7	6056	70.3
50 — 99	1387	5132	59.6	3749	40.4
100 — 149	780	6519	75.7	2092	24.3
150 — 199	501	7299	84.8	1312	15.2
200 — 249	332	7800	90.58	881	9.42
250 — 299	189	8132	94.44	479	5.56
300 — 349	131	8321	96.63	290	3.37
350 — 399	79	8452	98.15	159	1.85
400 — 449	47	8531	99.07	80	0.93
450 — 499	20	8578	99.62	33	0.38
500 — 549	9	8598	99.849	13	0.151
550 — 599	4	8607	99.953	4	0.047
600 —	0	8611	100.000	0	0

こうした出現率曲線は、波高・周期の分布状態を示すのに便利であるが、設計波高のように極くまれにしか起らないような値をこれから推定する目的に用いるのは不適當である(5.参照)。また、観測地点によっては、対数正規または正規確率紙上の直線で表示されることも多い。しかし、波高や周期の超過出現率が対数正規分布などで表示されなければならない本質的理由は何もないのであり、結果的にそうなることが多いだけである。したがって、出現率曲線は観測結果に最も

適合するように引くのがよい。

なお超過あるいは未超過出現率の表示法は、定時観測値ばかりでなく後述の日最大波の諸元などについても用いられる。

d) 波高・周期および波高・波向の相関出現率………上記の各要素別出現率を2つずつ組み合わせたもので、まず相関度数表の形で計算し、総度数で割って相関出現率表としたり、あるいは棒グラフの形で表示することが多い。その地点の波浪の全体的特性が、さらに詳しく表わされる。

なお、以上の b~d) の統計諸元は、定時観測値の読取値について行なうものである。すなわち、データとしてはさらに数多く含む波浪時系列から、等時間間隔でサンプルした値を対象として統計操作を行なうものである。定時観測値のサンプル集団が、母集団である波浪時系列の統計的性質を十分正確に再現している限り、サンプル間隔(すなわち観測時間間隔)はかなり抜けてもよい。また、少々の欠測は、それが時化の時期あるいは特定の季節に集中していない限り、あまり問題にならない。ただし、波浪の時系列は個々の値が無規則に続いているものでなく、波浪の発達・減衰に応じてゆるやかに変動しているものである。したがって、統計理論で対象とするような母集団とはかなり異なる性格を持つことに注意しなければならない。

e) 波高別継続時間の発生ひん度………波高2m以上の時化が2日以上続くのが年に約5回、あるいは波高0.5m以下の「なぎ」が1週間以上続くのは年約15回のように表示するもので、施工計画などを樹てるときに極めて有用な資料となる。鹿島港<sup>4)</sup>、小名浜港<sup>5)</sup>などの波浪統計に用いられており、適当な波高区分ごとにその継続時間を調べてその出現度数を集計し、波高・継続時間の相関度数表の形に表わすのがよい。この統計を行なうには、無欠測の観測資料が必要である。

f) 期間内最大値………ある期間内の波浪の激しさを示すのによく、その期間内の最大有義波あるいは最大の1/2最大波の波高・周期として表示される。期間としては、日、半月(5日)、週、旬(10日)、月、季節、年などが用いられる。特に、日最大波はその日の代表波浪として便利であり、また工事計画の検討資料としても利用度が高い。月最大波の諸元は b) の月平均値を補足するものであり、さらに年最大波は構造物に対する設計波の選定資料として重要である。

注) これは超過発生確率と称せられることが多い。しかし、個々の観測値は統計的に独立でないから、確率の語を用いるのは不適當である。

こうした期間内最大値の統計は、その期間内の統計量の変化が完全に知られていることを前提としている。すなわち、波浪の連続的な記録が得られていることが必要である。少なくとも、期間内の最大値は確実に観測されていなければならない。實際上、波浪状況は数時間かかって変化するのが普通であるから、1時間あるいは2時間間隔で観測値が得られていれば、期間内の最大値はほぼ確実に求められる。もし統計期間内に欠測がある場合は、欠測していた間に最大波浪が発生しなかったことが確認されない限り、欠測を含む統計期間は統計資料として使用できない。この点 b~d) の波浪統計諸元よりも欠測値の取り扱いかたが厳しい。

g) **N年確率波**……統計的に見て、その波高と等しいかあるいはそれよりも大きな波高の波が、N年間に平均して1回現われるような波高の波である。したがって、N年確率波が任意のN年間に1回も現われないこともあり、またN年間に数回現われる可能性もある。現在の時点から将来のN年間にN年確率波が何回現われるかは、全く確率的にしか言えないのである。またこのN年確率波を推定するには、相当長期間にわたって主要な大時化を確実に観測してあることが必須条件である(5.参照)。

以上のような波浪統計の諸元を求めるほかに、波浪観測の成果は波浪推算の裏付資料として欠くことのできないものである。主要な台風、低気圧による波浪の推算値を観測結果と比較することによって、その地点に特有な補正率を定めることができ、これを積み重ねることによってその地点の波浪予報の精度を格段に向上させ得るものである。ただし、本資料においては推算値との比較の問題については触れず、波浪統計の整理法についてのみ考察することにする。

### 3. 波浪観測値の統計的独立性

前章で触れた波浪観測値の独立性の問題は、一つの波浪状態が何時間くらい続くのが普通かということであり、これはまた、今日の波浪状況から明日の波をどの程度の確からしさで予測できるかということにも関係する。

定時観測によって得られた波浪観測値は一つの時系列を作っており、こうした時系列の独立性を検討するには自己相関係数がしばしば用いられる。これは、 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m, \dots, X_N$  の観測値の系列があるときに、おのおのの観測値が  $p$  箇だけ離れた観測値とどの程度の

相関を示すかを表すもので、 $[X_1, X_{N-p}]$  と  $[X_{p+1}, X_N]$  の2つの時系列の間の相関係数として求められる。この計算式は、

$$r(p) = \frac{\frac{1}{N-p} \sum_{m=1}^{N-p} (X_m - \bar{X})(X_{m+p} - \bar{X})}{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N (X_m - \bar{X})^2} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $p=0, 1, 2, \dots\dots\dots$

$\bar{X}$ : 全観測値の平均値

である。 $r(0)$  は定義によって1である。もし  $[X_1, X_N]$  の時系列が周期  $2k$  で繰り返す現象であれば、 $p=2k, 4k, 6k, \dots\dots$  では  $r(p)=1$  となる。またこのとき  $[X_1, X_N]$  が平均値の両側に対称であれば、 $p=k, 3k, 5k, \dots\dots$  では  $r(p)=-1$  となる。ただし、平均値の両側に非対称であれば、 $p=k, 3k, \dots\dots$  でも  $r(p) > -1$  である。またもし  $X_m$  と  $X_{m+p}$  との間に全く相関がなければ  $r(p)=0$  である。

自己相関係数による時系列の解析は、気象統計などでも用いられ、気温、気圧などについては、近似的に  $r(p) = e^{-p/p_0}$  と表したときに  $p_0$  がほぼ2日となり、 $p=2.5 \sim 3$  日で  $r=0$  となることが知られている<sup>6)</sup>。このことから、天気現象の寿命は約4日であると見られている。

そこで、苫小牧港<sup>7)</sup> (1964年1月~1965年12月) および新潟東港<sup>8)</sup> (1964年4月~1965年3月) の波高観測値  $H_{1/3}$  について式(1)で自己相関係数を計算した結果が、図-1, 2である。苫小牧港では09時と15時が観測定時なので、それぞれの時系列について計算した。また新潟東港では、日本海沿岸の特性として、夏季と冬季で波浪状況が全く異なるので、4月から9月、および10月から3月の半年づつに分けて計算した。新潟東港の分は2時間単位であるが、苫小牧港は1日単位の計算である。

図-1, 2の結果を見ると、まず  $p=2$  日ではほとんど相関関係がなくなっている。これは天気現象と同様の傾向であるが、やや変化が早い。また5~7日後に弱い相関が認められる。特に冬季の新潟東港については、 $p=7$  日に対する相関係数が0.3にも達しており、時化が1週間おきに発生する傾向が幾分あることを示している。また、この新潟東港の冬季波浪については、約2.3日の週期的変動も認められる。

さらに短時間の相関を見ると、24時間後では相関係数が約0.3であり、弱いながらも相関がある。また12時間後では相関係数が0.65、6時間後では0.85と高くなり、2時間後では0.96にも達している。したがって、数時間



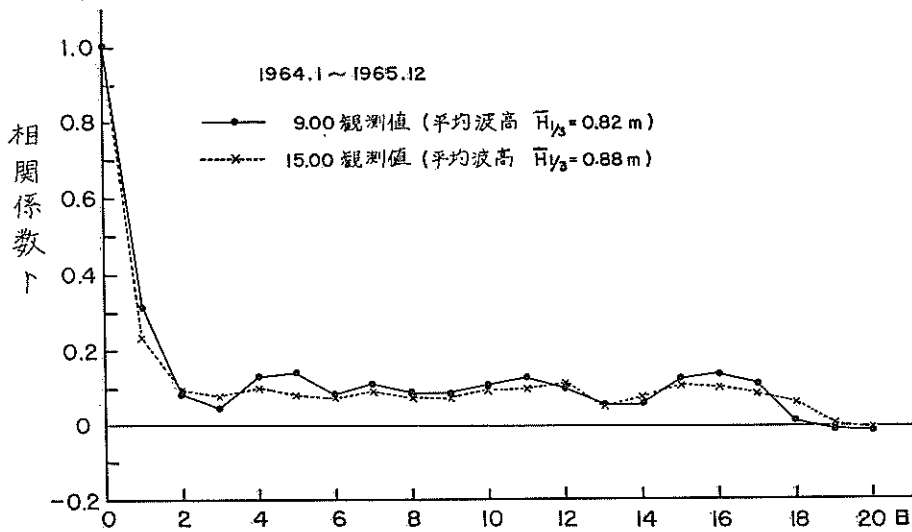


図-1 苫小牧港における波高の自己相関係数

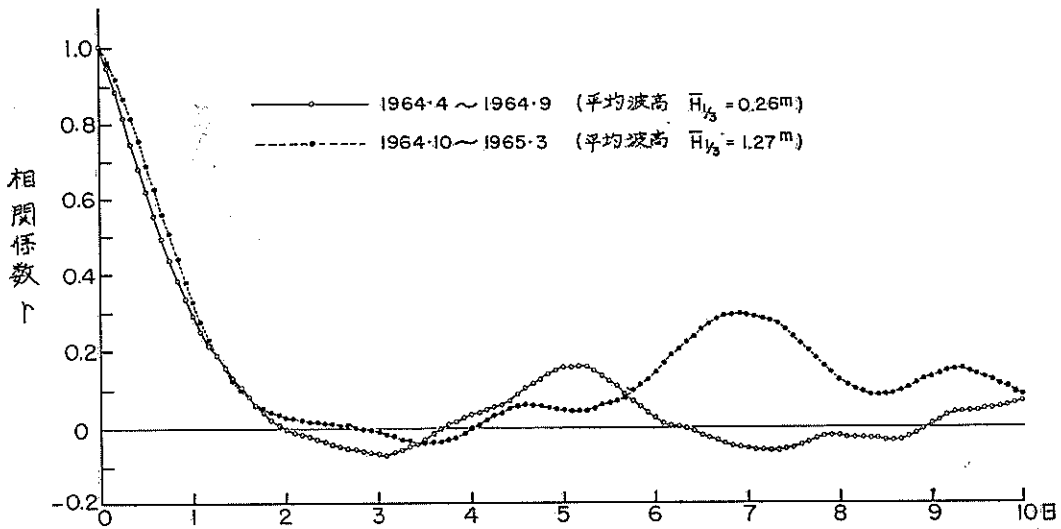


図-2 新潟東港における波高の自己相関係数

間隔で観測を行なって得られた観測値の時系列は統計的に独立でなく、かなりの自己相関性を持っている。これは逆に、波浪の全体的な傾向を見る上では6~12時間ごとの観測値でもかなり役に立つことを示唆している。

なお、波浪の自己相関係数の計算にあたっては、データに季節的な変動が含まれていないかどうかを調べておく必要がある。こうした場合は、図-2のように季節を分けるか、あるいは移動平均を用いて残差( $X_m - \bar{X}$ )を計

算するなどの方法を考えなければならない。 $\bar{X}$ の季節的な変動を考慮せずに全年平均値をそのまま用いると、残差( $X_m - \bar{X}$ )がある期間は正、他の期間は負の値が続くことになり、 $\rho$ を大きくとっても $\tau$ が0とならなくなる。ただし、図-1の苫小牧港についてはこうした処置をとらなかったため、このためもあって2日以後の相関係数が約0.1のまわりを変動する結果になったのではないかとと思われる。

#### 4. 定時観測値の最小回数

波浪観測においては、波形記録の読み取りとその整理に多大の労力を要する。このため、この部分の機械化あるいはデジタル記録からの計算機処理<sup>9)</sup>がいろいろ試みられており、特に後者は実用段階に入っている。しかし、記録整理を人間の手で行なうにしろ、あるいは計算機にまかせるにしろ相当の時間を要することは避けられない。若し、波浪観測データの必要数を減らすことができれば、波浪観測に伴う困難さもかなり減少すると思われる。

すでに2.でも述べたように、定時観測は統計的には等間隔サンプリングの分類に入り、もともと観測の行なわれていない時間における現象に対しては、個別的な情報を与えない性格のものである。ただ波浪の場合には、前章で示したように現象自身にかなり強い自己相関性があり、観測の時間間隔が短かければ有義波などの諸元はそれほど変化しないと見なすことができる。現行の2時間間隔1日12回観測は、このような点を考慮して定めたものと思われる。ただし、異常波浪の発達時にはかなり急激に波高・周期が増大するから2時間間隔でも長過ぎ、1時間間隔あるいは連続記録が望ましいものとなる。

このような極大波高を求めるためには観測の時間間隔をできるだけ縮めなければならないけれども、ある期間内の平均波高や波高の超過出現率などを求めるためには、定時観測の間隔を長くとも可能と考えられる。このため、新潟東港の波浪観測台帳<sup>3)</sup>を用いて次のような検討を行なってみた。

新潟東港においては、0時、2時、……と毎偶数時に観測が行なわれているので、各観測時刻に毎月の平均波高を1964年4月～1965年3月の1年間について計算した。この結果が表-2である。観測時刻による平均波高の差は10%内外であり、特定の時刻に平均波高が大きく、あるいは小さく出るような傾向は見られない。内湾部においては、あるいは朝なぎ、夕なぎの現象によって平均波高が変わるかも知れないが、一般には観測時刻による平均波高の系統的差異はないと見られよう。

次に同じ資料の1963年9月～1965年8月の2ヶ年分について、有義波高の超過出現率を計算した結果が図-3である。この1日12回観測値のデータは、表-1で計算したものである。この図を見ると、1日12回の全観測値も1日1回(正12時)の観測値もほとんど重なっていて、両者の間に系統的な差は認められない。すなわち、波高の超過出現率に関しては1日1回の観測値からでもほぼ十分な結果が得られる。なお、新潟東港の超過波高出現率は、全体としては正規確率紙上の直線で表わされる。ただし、この直線を左へ延長すると  $H=0$  で約50%の出現率となり、正規分布ではなくてその右半分のみ分布形、すなわち半正規分布(semi-normal)<sup>9)</sup>に近い。さらに、 $H < 0.5\text{m}$  および  $H > 5.0\text{m}$  の下限、上限附近は直線から外れており、正確には逆S字状の曲線である。

さらに、鹿島港の1962年4月～1963年3月の波浪観測資料<sup>4)</sup>について、1日12回観測値と1日1回(正12時)の観測値の超過波高出現率を比較したのが図-4である。データの数が少ないこともあって、両者の間にやや差があるが、実際には無視できる程度の差である。なお、鹿島港の場合には、ほぼ対数正規分布で表示されるが、上

表-2 新潟東港観測時間別の各月平均有義波高  $\bar{H}$ (m)  
期間 1964年4月～1965年3月

観測時刻	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
0時	1.39	1.65	1.56	0.32	0.15	0.29	0.17	0.24	0.41	0.70	0.95	1.27	0.76
2時	1.47	1.75	1.48	0.32	0.16	0.26	0.15	0.24	0.42	0.70	0.88	1.40	0.77
4時	1.40	1.80	1.47	0.33	0.16	0.26	0.15	0.28	0.44	0.63	0.86	1.36	0.75
6時	1.51	1.84	1.43	0.34	0.14	0.26	0.15	0.26	0.44	0.63	0.85	1.36	0.77
8時	1.47	1.75	1.51	0.40	0.13	0.25	0.17	0.23	0.44	0.62	0.90	1.45	0.77
10時	1.44	1.80	1.54	0.40	0.12	0.25	0.18	0.24	0.48	0.62	0.94	1.26	0.77
12時	1.49	1.81	1.54	0.38	0.12	0.24	0.19	0.25	0.44	0.62	0.95	1.29	0.77
14時	1.58	1.73	1.55	0.37	0.13	0.22	0.18	0.28	0.41	0.66	0.94	1.33	0.78
16時	1.49	1.72	1.59	0.35	0.14	0.20	0.17	0.28	0.45	0.63	0.91	1.41	0.76
18時	1.46	1.80	1.55	0.36	0.16	0.24	0.16	0.28	0.44	0.66	1.00	1.34	0.78
20時	1.51	1.80	1.55	0.35	0.18	0.24	0.17	0.30	0.39	0.71	1.02	1.33	0.79
22時	1.47	1.77	1.56	0.35	0.15	0.29	0.18	0.29	0.38	0.72	0.98	1.34	0.79
全平均	1.47	1.77	1.53	0.36	0.14	0.25	0.17	0.26	0.43	0.65	0.93	1.35	0.77

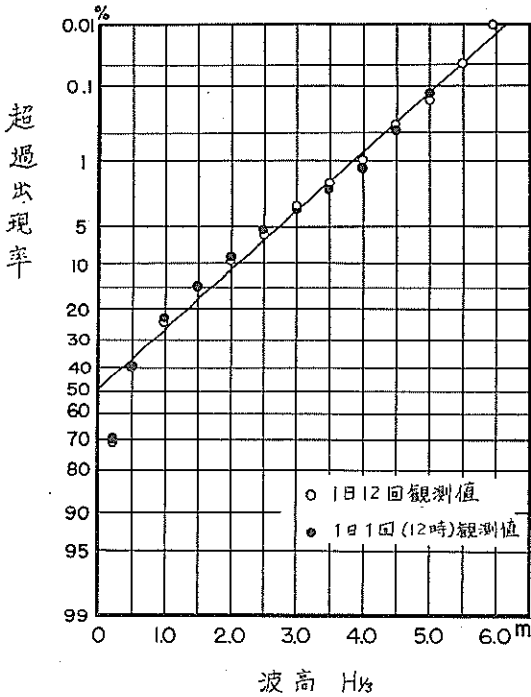


図-3 新潟東港の波高超過出現率  
(1963年9月～1965年8月)

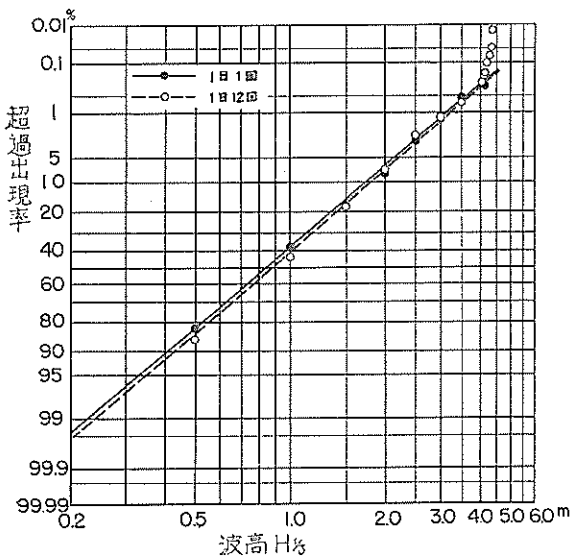


図-4 鹿島港の波高超過出現率  
(1962年4月～1963年3月)

限附近は直線から外れる傾向が見られる。

以上の結果から判断して、平均波高や波高の超過出現率などの算出のためには1日1回の観測値からでもほぼ

満足し得る結果を得られるが、より正確には1日数回の観測値を用いた方がよい。また、施工計画などの資料として波高別継続時間の発生ひん度などを求めるためには、作業時間や前章の自己相関係数の値を考へて、観測時間間隔を6時間程度にとるのが最も効果的と思われる。

一方、波浪統計の諸元としては、2.で述べたように日最大波のような期間最大値、あるいは $N$ 年確率波なども極めて重要である。また時化の際の波浪状況の変化を把握することも、波浪観測の重要な目的である。こうした波浪諸元を求めるためには、観測時間間隔を2時間以下にしなければならない。

この2つの要請を調和させるためには、次のようにするのがよいと思われる。まず、記録計は2時間あるいは1時間ごとに作動させて記録を取る。これから6時間間隔の定時(たとえば4時、10時、16時、22時)について記録の読み取りを行なって定時観測値とする。このほか1日の全記録から日最大波が発生した時刻の記録についても読み取りを行ない、以上の1日4回の定時の波浪および日最大波の諸元を観測台帳に記載する。このようにすれば、観測記録の整理に要する時間を $1/2.4$ に縮めることができる。この方法で重要なことは記録を1～2時間間隔で取っておくことであり、読み取りが6時間おきであるからといって記録間隔までも6時間に延ばしたのでは、日最大波の諸元および時化の際の波浪状況の変化を把握することができなくなる。なお、台風の来襲の際などの異常海象時については、波浪の発達、減衰状況を詳しく検討するため、連続記録を取ることが望ましい。

## 5. 極値時系列による確率波高の推定法

### 5.1 定時観測値からの推定法の検討

波浪観測の一つの重要な目的は、長期間の観測データを集積することによって、構造物の設計波高を合理的に決定できるようにすることである。設計波高の選定基準としては、i) 既往最大波高、ii) モデル台風等に対する波浪の推算値、iii)  $N$ 年確率波高、iv) 波高発生確率と構造物建設費等を考慮した費用最小波高、などがある。実際には、こうした方法の二、三を用いた結果を勘案して定めることが多いと思われるが、このうち iii)、iv) の方法を用いるためには、異常波浪の発生確率を知らなければならない。これを波浪観測資料から推定する方法を考えてみよう。

波浪の出現確率として一般に試みられているのは、正

規または対数正規確率紙上にプロットした超過発生確率である。これは2.のc)で述べた超過出現率をそのまま確率と見なすものであり、図-3,4のような形である。これから $N$ 年確率波高を求める場合、 $N$ 年間の総観測回数 $M$ (注)を計算し、出現確率が $1/M$ であるとしてこれに対応する波高を確率紙上で読みとって $N$ 年確率波高とする方法が用いられる例がある。しかしながら、この方法には次のような難点があり、異常波浪の発生確率を求めるは不適當である。

- i) 観測値が統計的に独立でない。
- ii) 定時観測値は必しも最大値を捕捉していない。
- iii) 1日の規定観測回数によって $N$ 年確率波高が変る。
- iv) 異常波浪発生の確率は、一般的な波浪の発生確率と異なることが多い。
- v) 短期間の観測値にもとづいて、長期にわたる確率波高を推定しがちである。

以下各項目について詳述しよう。

- i) 3.で示したように、個々の観測値は統計的に独立でないから、超過出現率は厳密な意味での確率ではない。たとえば、観測期間中の最大値とそれに続く波高の大きな数個の観測値は、同一の台風または低気圧による同じ日の記録であるのが普通である。しかしこれらは、確率的にはまとめて一つの事象と見るべきものである。
- ii) 定時観測はもともと等間隔サンプリングの性格をもち、1日あるいは一時化の間の最大波浪を捕捉しようとの積極的意図はもっていない。ただ、観測時間間隔1~2を時間に縮めれば、波浪の時系列の自己相関性から、期間内の $H_{1/3}$ あるいは $H_{1/10}$ の最大値をほぼ確実に求め得る。しかし、観測時間間隔が数時間以上にもなれば、最大波浪は定時観測の中間に発生する可能性の方が大きくなるのである。
- iii) 上記の方法では、1日の規定観測回数によって $N$ 年間の総観測回数 $M$ が変化し、 $N$ 年確率波の出現確率 $1/M$ が異なる。しかし、図-3,4に示されるように波高の超過出現率は1日の観測回数に関係しない。したがって、1日の規定回数を増すほど $1/M$ が小さくなり、 $N$ 年確率波高が大きくなることになる。これは、期間内最大値の資料にもとづくべき $N$ 年確率波高を、定時観測値のデータから求めようとするための矛盾である。すなわち、定時観測値から求めた確率波高は、 $N$ 年間の全期間における最大波高ではなく、 $N$ 年間の

観測定時における最大波高として、その値を下廻らない波高が $N$ 年間に平均して1回観測されるような波高である。たとえば、図-4で超過出現率1%に対応する波高は $H_{1/3} = 3.1\text{m}$ であるが、この波高は毎日12時にだけ波浪を観測したときに100日に1回観測される値であり、毎月1日の12時にだけ観測したとして100ヶ月に1回観測される値であり、さらには毎年1月1日の12時にだけ観測したときに100年に1回観測されるような波高である。すなわち、定時観測値から求めた確率波高は、設計波高の選定の基準となる確率波高とその定義が異なるのである。

- iv) 波高の超過出現率曲線は、主として波高の全体的な分布状態を見るためのもので、その上限付近の分布形状を調べるには適當でない。特に、発生ひん度が年数回以下の異常波浪のひん度分布の形は、全体としての分布形と異なるのが通常である。したがって、主に中央付近の波高出現率にあてはめた出現率曲線を外挿して異常波浪の発生ひん度を推定したのでは、誤差が大きくなる可能性が非常に強い。
- v) 波高の超過出現率は、1~3年程度の短期間の観測結果から作成されることが多い。しかし、異常波浪の発生状況は年によって相当の差があるので、短期間の統計資料から長年月の期間に対する確率波高を求めることは、大きな誤差を伴う危険がある。

## 5.2 期間最大値からの推定法の検討

以上のような定時観測値法の問題点を取り除く1案として、期間内最大値を用いる推定法が考えられる。たとえば鹿島港については10日最大有義波高からの解析<sup>10)</sup>が試みられており、また確率洪水の算定などでは年最大流量が基礎データとして用いられている。

波浪統計において期間最大値から確率波高を推定する方法としては、次のようなものが考えられる。

- i) 日最大波の超過出現率を用いる。
- ii) 半旬、週、または旬間最大波の超過出現率を用いる。
- iii) 年最大波の統計を用いる。

まずi)の方法は、1日12回以上の定時観測記録から日最大有義波高あるいは日最大場最大波高などを求め、この超過出現率を計算して確率紙上にプロットし、これを超過発生確率とするものである。この方法によれば、日最大波を求め得た日がすべて観測日として利用される

注) たとえば、1日12回観測の結果から求めた超過出現率であれば、 $N=10$ 年の場合ならば $M=10 \times 365 \times 12 = 43,800$ 回となる。

ので、データ数が沢山得られる。ただし、日々の最大波高は幾分の相関性を持つから、出現率=発生確率として確率波高を算定するのはやや問題がある。

次に半月、週、または旬間最大波高による方法は、3.の自己相関係数の解析結果から分るように、各最大波高同志の相関が小さいから統計的に独立と見なすことができ、出現率=確率と見てよい。また、日最大波が確実に求められてあれば、半月～旬間の単位期間中の最大波を拾い落す心配もない。ただし欠測を含む単位期間は、欠測期間中に最大波が発生していなかったことが確認されない限り、統計期間に繰り入れることができない。この方法はかなり良好な結果を与えるが、一つの時化が2箇の単位期間にまたがったときや、一つの単位期間中に2箇以上の異なる時化が発生した場合などの取り扱いがやや面倒である。

最後に年最大波の統計を用いる方法は、原理としては最も分りやすく、計算も単純である。しかし、この方法は年間の最大波を確実に記録し、これを数十年にわたって継続した資料をまず必要とする。現在このような波高資料はわが国だけでなく世界中のどの沿岸でも得られていない。したがって、現実の問題としてはこの方法を採用することは不可能である。ただ、長期間の異常気象資料を用いて波浪追算を行ない、これを比較的短期間の波浪観測結果と併用する場合には、この方法を有効に利用することができる。このような場合は、Gumbelの二重指数分布の確率紙<sup>11,12)</sup>を使うのがよい。

なお、上記のi)およびii)の方法による $N$ 年確率波高の推定を試みたのが図-5である。統計資料は新潟東港1963年9月～1965年8月の2ヶ年間の連続観測記録<sup>9)</sup>である。これから、まず日最大波および週最大波の時系列を作成し、定時観測値の超過出現率の計算と同じように10～20階級の波高区分についてその出現度数を算え、上位の数箇のデータについては超過出現率を $1/n, 2/n, 3/n, \dots$  (ただし $n$ はデータの総数)として求め、この結果を半対数方眼紙にプロットしたのが図-5である。波高の小さい部分はほぼ直線分布であるが、波高が大きくなるにつれて右に凸な分布になっている。これに対して視察によって滑らかな曲線をあてはめ、 $N=1$ 年および $N=10$ 年の確率有義波高を読みとると次のような推定値が得られる。

	日最大波による値	週最大波による値
1年確率波高	5.7m	5.6m
10年確率波高	6.5m	6.6m

ただし、2年間の記録から $N=10$ 年の確率波高を求めた

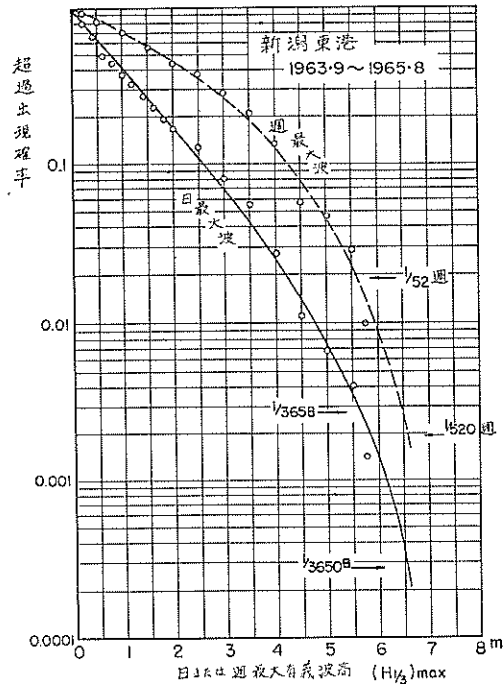


図-5 日最大波および週最大波の超過出現確率の例

結果は信頼度が低く、参考値にとどまる。この例では両法による推定値がほぼ一致したが、一般的にはii)の半月～旬間最大波を用いる方が便利である。

### 5.3 極値時系列による推定の基本的手順

前節の例でも、 $N$ 年確率波高の推定値に影響を及ぼすのは、波高のかなり大きい部分のデータである。波高の小さい部分のデータはほとんど利用されていない。そこで、ある設定値以上の極大波高についてのみ解析を行なって確率波高を算出する方法が考えられる。これは、異常潮位の発生確率などにしばしば用いられており、期間最大値による方法よりもむしろ一般的といえる。また、再現期間の算定なども直接的で分り易く、さらに計算の手間も期間最大値よりも少なくて済む。

この方法の基本は、波浪観測記録を波浪の発生要因ごとに数日間づつの波浪群に分割して各群の極大値を拾い出す操作であり、こうした極大波高のシリーズを、以下「極値時系列」<sup>13)</sup>と呼ぶ。極値時系列の資料から確率波高を推定する手順としては、次のようにすればよい。この方法は、主として文献13)の確率洪水の算出法を参考

注) これは Partial-duration-series に対する仮訳である。

にして定めたものである。なお、本節では、理想的な状態として $n$ 年間の連続的な観測記録が得られている場合を想定する。

a) 設定値の選定 解析の対象として何 $m$ 以上の極大波高を採用するかをあらかじめ選定する。対象地点における設計波高の $m$ 程度、または年数回発生する程度の波高が適当である。この設定値が低く過ぎた場合は対象とする極大波高の数が増すだけであるが、設定値が高過ぎたときは極大波高の総数が不足して、確率曲線のあてはめが十分に行えないので、設定値はむしろ低目の方がよい。

b) 極値表の作成 連続的な波浪観測記録から、上記の設定値以上の極大波高を統計全期間にわたって拾い上げ、発生月日順に表-3のような様式に記入する。この

表-3 極大波高の記載例(新潟東港)

統計期間 1963.9~1965.8

年月日	極大波高		順位 $m$	再現期間 $T_m$	気象状況 (最大風速)
	$H_{1/3}$	$(T_{1/3})$			
	$m$	sec		年	m/sec
1963. 9.23	3.35	(9.8)	25	0.080	W 14.3
10.12	3.01	(8.9)	33	0.061	N 15.2
11. 9	5.75	(14.0)	1	2.00	W 16.3
12.15	3.27	(10.8)	29	0.069	NW 17.7
12.18	3.97	(9.3)	15	0.133	NW 21.8
12.30	3.61	(11.1)	21	0.095	WSW 13.3
1964. 1.20	5.25	(12.1)	4	0.50	WNW 19.7
2. 2	4.11	(11.3)	13	0.154	N 18.0
2.12	5.72	(13.1)	2	1.00	NW 22.2
3.21	3.83	(10.0)	18	0.111	W 19.0
1964.10.24	3.34	(8.8)	28	0.071	NW 15.3
11.22	4.43	(11.7)	8	0.250	NW 23.7
11.24	3.00	(9.0)	34	0.059	NW 15.7
12. 2	4.60	(12.3)	6	0.333	W 16.3
12. 7	3.68	(11.0)	20	0.100	W 16.0
12. 9	3.23	(9.4)	30	0.067	NW 14.3
12.11	4.05	(9.5)	14	0.143	NW 18.3
12.18	3.35	(8.3)	26	0.077	NW 19.0
1965. 1. 2	4.22	(10.8)	11	0.182	WNW 18.8
1. 5	3.94	(12.1)	17	0.118	NW 18.0
1.10	5.22	(11.1)	5	0.400	NW 21.8
1.17	3.19	(10.7)	31	0.064	WNW 19.7
1.23	3.95	(9.8)	16	0.125	NW 17.5
2. 1	3.08	(8.3)	32	0.062	NW 19.7
2. 4	4.39	(11.1)	9	0.222	NW 17.8
2.12	3.53	(9.8)	23	0.087	NNW 13.2
2.24	3.57	(10.3)	22	0.091	WNW 15.7
3. 1	3.52	(10.4)	24	0.083	WNW 21.7
3.10	3.68	(10.3)	19	0.105	W 16.0
3.14	4.27	(10.2)	10	0.200	NW 18.3
3.20	5.59	(10.8)	3	0.667	WNW 22.0
3.27	4.18	(9.5)	12	0.167	W 16.7
4. 3	4.58	(11.2)	7	0.286	NW 20.7
4.11	3.34	(9.5)	27	0.074	W 17.5

際、一つの気象要因による一続きの時化からは一つの極大波高のみを選び出す。2~3日後に別の極大値が現われている場合は、天気図および風資料を調べ、異なる気象要因によって発生した波浪であることが確認されたときにのみ、極大波高として表に記載する。なお極大波高

の読み取りは連続観測からの整理結果によることが望ましく、定時観測値の場合は2時間以下の記録にもとづかなければならない。

c) 再現期間の計算 表-3に拾い上げられた極大波高に、波高の大きい方から算えた順位 $m$ をつける。この第 $m$ 位の極大波高 $H_m$ に等しいか、またはこれよりも大きな波高の波浪が平均して1回出現する時間間隔(すなわち再現期間) $T_m$ は、次のように算定される。

$$T_m = n/m \dots\dots\dots(2)$$

これも表-2に記入する。なお $n$ は連続記録年数または有効統計年数(後述)である。

d) 既往最大記録の処理 連続的な観測を開始する以前の $N_0$ 年間について、その最大波高( $H_{max}$ ) $_0$ の観測値あるいは確実な推定値があり、これを上廻る波高が発生しなかったことが確認されている場合は、次のような修正を行なう。すなわち、 $n$ 年間の上位の波高記録 $H_1, H_2, H_3, \dots$ と( $H_{max}$ ) $_0$ とを比較し、( $H_{max}$ ) $_0$ およびそれを上廻る記録については、その再現期間を

$$T_m = (n + N_0)/m' \dots\dots\dots(3)$$

として算定する。ただし $m'$ は( $H_{max}$ ) $_0$ を含む上位の波高の順位である。( $H_{max}$ ) $_0$ 未満の波高についてはc)のままとする。

e) 確率波高推定曲線のあてはめ 表-3の $H_m$ と $T_m$ との関係を半対数方眼紙上にプロットし、視察によって最も適合した曲線を引く(図-6)。この際、第1,2位の点が全体の傾向から著しく外れる場合は、これを無視して曲線をあてはめた方がよい。また、機械的に最小二乗法で直線をあてはめるのは、実際の傾向を無視することがあるので避けた方がよい。特に、半対数紙上、あるいは他の確率紙上で直線となるべき理論的根拠は全くなく、各地区によって曲線の傾向が異なるものと予想されるから、機械的なあてはめは好ましくない。担当者の判断に、より重点をおくべきものである。Thomasプロットで知られているThomasは、洪水流量の分布曲線の外挿に関して次のように述べている<sup>14)</sup>。

「実際のところ、記録された洪水の範囲を超えて外挿を行なう場合には、どのような複雑な計算で曲線のあてはめを行なう方式を用いたにしても、適当な確率紙上にプロットされた超過確率曲線を視察によって単純に延長した結果と同程度の信頼性しか期待できないのである。」

f) 確率波高の読みとり 以上によって得られた確率曲線の外挿によって、所要の期間に対する確率波高を読みとる。

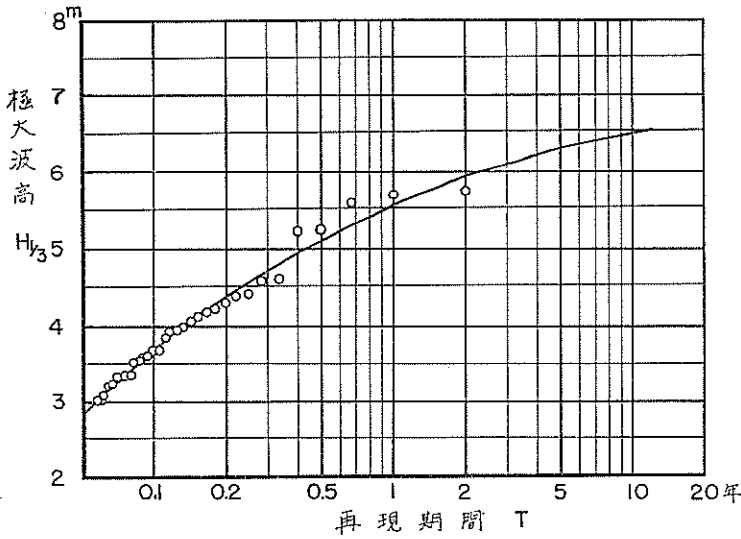


図-6 確率波高推定曲線の例—新潟東港 (1963. 9~1965. 8)—

#### 5.4 極値時系列法に対する二、三の補足的 手法

##### (1) 欠測を含む資料の取り扱い

欠測の生ずる原因は、波高計本体の故障やケーブル切断事故等と、記録計の作動不良などの種類に分けることができる。前者のときは長期間にわたって観測不能となり、後者による場合は観測値数回分の欠測で済むことが多い。したがって欠測期間の取り扱いとしても、この2者を分けて考えることにする。

まず、欠測期間が1日以下の程度の場合を考えよう。極値時系列による解析においては、ある設定波高以上の極大波高だけが対象となる。したがって、欠測中の波浪が設定波高以下であることが目視あるいは風記録からの推定によって確認されるときは、欠測が起らなかったものと見なして全期間を統計期間として用いることができる。また、欠測期間の前後に設定値以上の極大波高が現われている場合でも、欠測期間が波の発達期あるいは減衰期にあたっていて、その期間中に極大波高が生じていないと推定されれば、欠測期間も統計期間に含めてよい。しかし、極大波高が欠測期間中に生じていたと推定されるときは、その気象要因による波浪群の継続した数日間を、たとえ記録が若干得られていても、これを統計期間から除外しなければならない。このように、確率波

高の推定資料として利用されるためには、極大波高の値が確実に求められていることが何より重要であり、観測時の記録が何%取得できたかよりも、設定値以上の極大波高が記録されたかどうかの問題なのである。

次に、欠測期間が長期にわたる場合を考えよう。この場合の観測の中止および再開の日時は、実際の日時ではなく、上に述べた波浪群の区切り目をとらなければならない。したがって、統計上の欠測期間の長さは、実際の値と必しも一致しない。また何らかの方法で設定値以上の波高が発生しなかったことが確認される場合は、この期間中も観測値が得られていたものと見なして統計期間に繰り入れてよい。これは上述の場合と同じである。

しかし、欠測期間が長期にわたる場合は波浪状況の推定がむずかしいのが普通であるから、観測期間が連続せずにとびとびに続き、統計期間の算出が不明確になる。一つの方法は、観測期間の総和を求めて年数に換算することである。しかし極大波高の発生率は季節によって異なるのが普通であるから、次のようにして有効統計年数を算出するのがよいと思われる。

- 1) 表-4のように各年の各月ごとに測得月数を0.1ヶ月単位で算出する。この算出にあたっては、総観測回数/規定観測回数のような機械的な方法ではなく、発生波浪群の区切り目(注)を考慮して測得月数を算出しなければならない。
- 2) 観測の総期間について、月別の測得延月数を求める。
- 3) 各月ごとに設定値以上の極大波高の出現回数を算え、これを上記の月別の測得延月数で割って平均出現回数を求める。これを図-7のように表示すれば、極大波高の季節的な発生状況が明瞭になる。
- 4) このままでは年による極大波高の出現状況の癖が強くなるので、これを図-7のように視察によって滑らかな曲線に改める。このとき、各月の平均出現回数を合計した年間の値が変わらないように調整する。

注) 欠測を含む記録については、発生波浪群の区切り目が不明確になりやすいので、実際手続としては2~4日単位で記録がとれていたかどうかを調べ、有効に観測されたと見なせる日数を0.1ヶ月単位に換算するのがよい。したがって、ぼつんと1日くらいの観測記録があっても、有効な観測とは見なせない。

表-4 有効統計期間の算定例（小名浜港）

月	観 測 月 数									(11)	(12)	(13)
	'58	'59	'60	'61	'62	'63	'64	'65	計			
1	—	0.2	0.8	0.2	—	0.8	0.9	1.0	3.9	2/0.5	5.4	21.0
2	—	0.5	1.0	0.8	—	0.7	1.0	1.0	5.0	3/0.6	7.1	35.5
3	—	0.7	0.5	1.0	—	0.6	0.8	1.0	4.6	3/0.65	8.3	39.2
4	0.3	0.7	0.8	0.8	—	—	0.1	—	2.7	5/1.85	20.7	55.9
5	0.7	—	0.7	0.9	0.7	0.4	—	—	3.4	3/0.9	13.0	44.2
6	—	—	0.4	0.9	1.0	0.8	0.3	—	3.4	0/0	2.3	7.8
7	0.2	0.6	0.7	1.0	0.7	0.5	0.9	—	4.6	0/0	1.1	5.1
8	—	0.4	1.0	0.9	0.6	0.6	1.0	—	4.5	2/0.45	2.4	10.8
9	0.1	0.2	1.0	0.7	—	1.0	0.8	—	3.8	2/0.55	6.5	24.7
10	0.1	0.2	0.9	0.3	0.9	0.8	0.8	—	4.0	8/2.0	21.3	85.2
11	0.2	0.4	—	—	0.8	0.8	1.0	—	3.2	0/0	6.5	20.8
12	0.7	0.7	—	—	0.9	1.0	0.5	—	3.8	2/0.55	5.4	20.5
計	2.3	4.6	7.8	7.5	5.6	8.0	8.1	3.0	46.9	30/8.05	100.0	370.7

注 (11)：極大波高の出現度数/月平均出現回数  
 (12)：極大波高の月別相対出現率の調整値  $f_i$  (%)  
 (13)：測得月数  $\times p_i$

この欄の合計から、有効統計年数  $n=370.7/100=3.71$ 年が得られる。

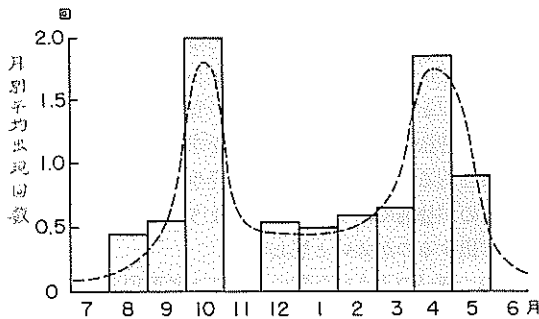


図-7 極大波高の月別出現回数—小名浜港(1958.4~1965.3)—

5) 図-7の月別の平均出現回数の平滑値から、極大波高の出現百分率  $p_i$  を計算し、これを各月の測得延月数  $n_i$  に乗じたものを12ヶ月分合計して100で割れば、有効統計年数が得られる。すなわち、

$$n = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{12} p_i \times n_i \dots\dots\dots (4)$$

である。これはすなわち、各月の測得延月数に重み  $p_i/100$  を付けて観測延年数を求める操作である。

この表-4、図-7は、1958年4月~1965年3月の小名浜港の解析例で、機械的な延月数は46.9月=3.91年であるが、季節的な発生ひん度の変化を考慮すると、有効統計年数が  $n=3.71$ 年に修正される。

この延年数と有効年数との関係は、欠測が季節的にかたよってなければ差がないが、時化の季節（日本海沿岸では冬季）を重点的に観測しているような場合は、有効統計期間の方がかなり長くなる。

なお、この有効統計期間を用いて小名浜港の波高発生確率を求めたのが図-8である。図-6の新潟東港の例と比べてみると、小名浜港の確率波高は新潟港よりも小さいことがわかる。

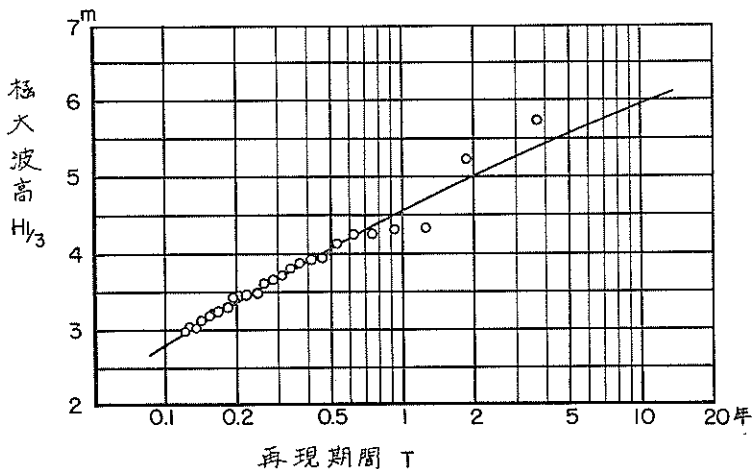


図-8 小名浜港の確率波高推定曲線（有効統計年数3.7年）

(2) 波浪推算値との組み合わせ

前項の方法でわが国の主要波浪観



測ステーションの記録を調べてみると有効統計期間が $N=4$ 年を超える箇所はまず見当たらない。長年月にわたる確率波高を推定するにいたって不十分な期間であり、気象資料からの推算値と組み合わせて長期間の波浪資料を作成しなければならない。

このためには、まず図-4のような様式に記載された極大波高について、気象資料からの波浪推算を行なう。現在波浪推算法としては各種の方式が提案されており、用いる方法によって若干異なる値が得られるのが普通である。したがって、各種の方法を試みて観測値に最も適合する方法を用いるのがよいであろう。ただし、完全な一致は望めないから、推算値と観測値が平均的に一致するよう必要に応じて適当な補正係数を定める。もっとも、観測結果に次章で述べるような観測水深の影響が入っているとみられるときは、観測値よりも大きい値を与える推算結果に重点をおくことも考えられる。

この観測値と波浪推算結果との比較を通じて、異常波浪の発生原因となる気象条件が明らかになるであろうから、既往30年以上の天気図および周辺区域内での風資料などから異常気象を拾い出し、各々について波浪推算を行なう。この場合、設定値以上の極大波高の波浪状況がすべて含まれるように注意する。設定値としては、極大波高の総数が50~100程度になるように選ぶのがよい。したがって、波浪観測記録から極値時系列を作成する際の設定値よりは高目となる。

以上によって波浪推算値の時系列が得られたならば、5.3の方法によって極大波高の確率曲線を作成する。この際、観測値が得られているものについては、観測による極大波高を用いるのがよい。いずれにしても、この波浪推算値との組み合わせにおいては、観測結果による推算値の補正が最も重要な操作であり、この検討を十分に行なうことが望ましい。

### (3) $N$ 年確率波の周期

以上の方法で $N$ 年確率波の波高が推定されたときは、その周期を次のようにして求めればよい。すなわち、極値時系列の解析に用いられた極大波(推算値を含む)の波高と周期の相関図を図-9のように作成し、その相関関係から $N$ 年確率波高に対応する周期を求める。ただし、波高と周期の相関は必しも強くないから、ある幅の中で適宜決定することになる。

なお、極値時系列の極大波からその周期だけを取り出し、確率波高と同様の方法で周期発生確率を推定することは可能である。しかし、これは波高を全く考えずに周期の発生確率のみを求めたものであるから、これから $N$

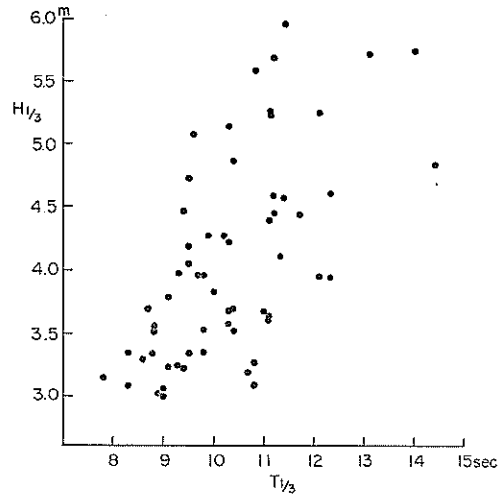


図-9 極大波高と周期の相関図—新潟東港(1962.6~1966.12)一

年確率周期を算出しても、 $N$ 年確率波の波高とは結びつかない。港湾や海岸構造物の設計・施工においては波高がまず問題になるのであるから、周期だけの発生確率を求めることは工学的にはあまり意味がなく、図-9のような相関図を用いるのが適当である。

## 6. 波浪観測における観測水深の影響

波浪観測において波高計をあまり浅い所に据えたのでは、砕波後の波を観測する結果になることは明らかである。しかし、観測水深によって観測値がどのように影響されるかについては、十分な検討が行なわれていない。著者の知る範囲では、小名浜港において $H_{1/3}/H_{mean}$ の比を波高階級別に算出した結果、水深10.5mにおいて $H_{mean} > 2.0$ mで上記の比が小さくなる、すなわち浅海の影響が現われると報告されている例<sup>17)</sup>と、運輸省第一港湾建設局において日本海沿岸の波浪観測成果について考察を行なった例<sup>18,19)</sup>がある程度である。

このような点を検討するため、本資料では $H_{max}/H_{1/3}$ の比について調べてみた。統計資料としては第一港湾建設局の波浪観測台帳<sup>20)</sup>から、1964年12月~1965年3月の日最大波の記録を用い、日最大の $H_{max}$ と同じく日最大の $H_{1/3}$ の比を求め、これを $H_{1/3}/h$ の0.1ごとの階級別に平均した。この際、日最大の $H_{max}$ と $H_{1/3}$ は必しも同一観測時に出現していないが、 $H_{max}/H_{1/3}$ の平均値を得る目的から、時刻がやや異なってもそれぞれの最大値を用いて計算した。また、日最大波を用いたのは、その日の代表波浪の意味である。整理の対象としたのは、雄

物川河口沖 (-16m), 酒田港 (-9.6m), 新潟東港 (-10.0m), および輪島港 (-15m) である。波高計はいずれも水圧式であるが, 雄物川河口沖が差動変圧型, 他はシュウ動抵抗型である。

この結果は図-10に示すように, 波高水深比  $H_{1/3}/h$  の

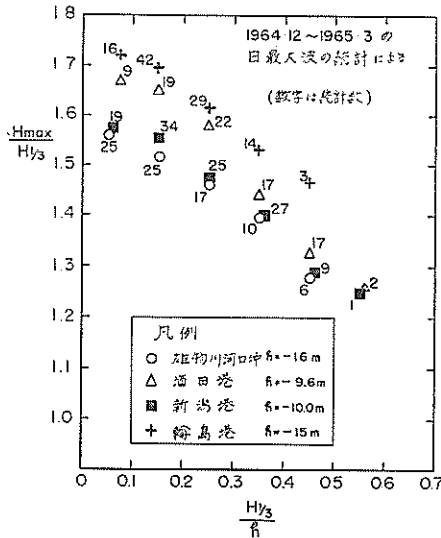


図-10 波高分布に及ぼす観測水深の影響

増加につれて  $H_{max}/H_{1/3}$  の比が減少している様子がはっきりと出ている。日本海沿岸の冬季波浪の周期は7~11秒であるから, 10~20分連続観測における記録波数は50~150波である。波高のひん度分布が Rayleigh 型であるとの Longuet-Higgins<sup>15)</sup> の理論によれば,  $H_{max}/H_{1/3}$  の平均値は  $N=50\sim 150$  に対して 1.50~1.67 である<sup>16)</sup>。図-10では, 波高の小さい部分についてはこの理論値とほぼ一致していて Rayleigh 分布に従うことが示されるけれども, 波高が大きくなるにつれて  $H_{max}/H_{1/3}$  の比が 1.3 以下にまで減少する。特に, この減少の傾向が  $H_{1/3}/h$  の値によってほぼ一義的に表わされる様子は, 波高水深比  $H_{1/3}/h$  が重要なファクターであることを示唆している。

この波高増大に伴う  $H_{max}/H_{1/3}$  の値の減少の原因としては, 水圧式波高計の特性によるとの見方もある。すなわち, 水底圧力から表面波高への換算係数が  $\cosh kh$  の形であるため, 波形記録の上に短周期の波状記録があると,  $\cosh kh$  の換算の結果, 異常に大きな表面波高になることがある。また,  $H_{max}$  に対して  $n=1.35$  の補正係数が適用できるかどうかの問題もある。そこで, リレ型階段抵抗式波高計で表面波形を記録している苫小牧

港の観測資料 (1964年1月~1965年12月, 1日2回観測)<sup>17)</sup> について同様の整理を行なってみた結果では, 次表のように  $H_{max}/H_{1/3}$  の比が全般的に小さく, また  $H_{1/3}/h=0.3\sim 0.4$  の部分で極大値を示して, 図-10の傾向とはやや異なっている。

$H_{1/3}/h$	統計数	$[H_{max}/H_{1/3}]_{ave}$
0.0—0.09	1060	1.466
0.10—0.19	271	1.462
0.20—0.29	32	1.479
0.30—0.39	7	1.556
0.40—0.49	4	1.375

ただ, 苫小牧港の波浪は日本海沿岸よりも波高が小さいため, 波高の大きな部分のデータが不足しており, また図-10のように冬季風浪に限定せずに全年の記録を使っているので, 波高の小さい部分についてはうねりの影響なども考えられる。さらに, Wiegel と Kukki<sup>17)</sup> によれば, 同一地点で水圧型と表面波形型の波高計を用いた結果では, 水圧式の記録では  $H_{max}/H_{1/3}$  や  $H_{1/10}/H_{1/3}$  などの比が Longuet-Higgins の理論値に一致するにもかかわらず, 表面波形用波高計の記録ではこれらの値が理論値よりも小さくなるとされており,  $H_{max}/H_{1/3}$  の比がどの程度であるのが波本来の姿であるのかは, 簡単に決めがたい。

図-10の  $H_{max}/H_{1/3}$  の傾向の原因としてもう一つ考えられるのは, 砕波の現象である。もともと Rayleigh 分布の理論においては, スペクトル成分波の重ね合を基本にしており, 砕波による限界波高の制限はとり入れられていない。しかし,  $H_{1/3}$  がかなり大きな波浪が一様傾斜の海岸に来襲したと考えると, 波浪群の中でも波高の大きな波は観測地点に到達する前に砕波限界に達し, 沖で一度砕けるであろう。砕けた波はエネルギーの一部分を失なって波高が減少する。この際, 海底勾配が緩ければ波高の減少はあまり急激でなく, 砕波限界に近い値を維持しながら何度も砕波を繰り返して海岸線にまで寄せて行くと考えられる。今, 視点を観測地点に固定して考えれば, その水深と波の周期に対応する砕波限界に近い波が, かなりのひん度で来襲することになる。したがって,  $H_{1/3}$  は砕波限界波高にかなり近い値をとろう。しかし  $H_{max}$  は砕波限界波高を越え得ないから,  $H_{max}/H_{1/3}$  の値は沖合での値よりも相当小さくなる筈である。図-10の傾向はこの考え方によって説明することができる。しかしながら, これを証明することは现阶段では不可能であり, 推測の範囲を出ない。

次に観測水深の影響をさらに調べるため, 極大波高の

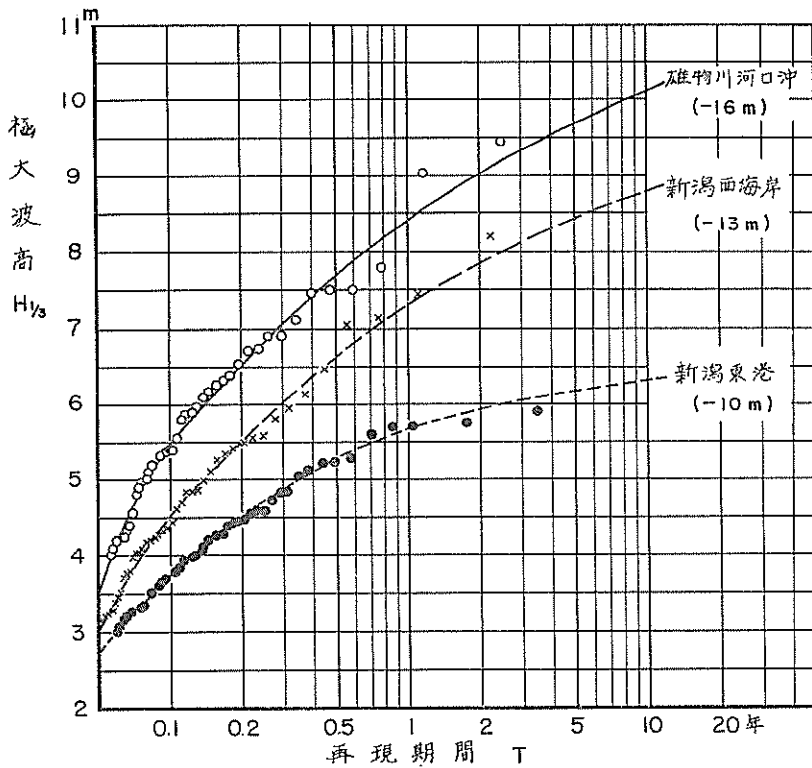


図-11 日本海中部沿岸の確率波高推定曲線

発生確率の方から検討したのが 図-11 である。これは、5.3. 5.4. の方法で、雄物川河口沖 (-16m)、新潟東港 (-10m)、および新潟西海岸 (-13m) の確率波高を算定したもので、有効統計期間はそれぞれ、2.36年、3.46年、2.21年である。括弧内の数字は観測水深であり、これが大きい地点ほど確率波高が増大している。特に新潟東港と新潟西海岸では、地形的要素はほぼ同一と思われるのに、西海岸の方が3割近く大きな確率波高を示している。またこの図では、極大波高の絶対値 (m) に対してプロットしてあるが、これを観測水深  $h$  で割った無次元量  $H_{1/3}/h$  でプロットし直すと、3地点の確率波高がほとんど一致することが確かめられる。したがって、これらの地点の異常時の波浪は、水深の影響を相当に受けているのではないかと推測され、さらに水深数十米の沖合では、 $H_{1/3}$  が10m以上に達することも少なくないのではないかと想像される。

## 7. 波浪観測成果の整理法に関する試案 —結論にかえて—

以上の考察の結果から、波浪観測成果の標準的な整理法として、次のような方法を提案したい。

- 1) 記録は2時間ごと、または1時間ごとにする。ただし、異常海象時は連続記録を取ることが望ましい。
- 2) 記録の読み取りは、平常時は6時間ごとの定時および日最大波の発生時の記録について行なう。ただし、異常海象時は全記録について行なう。
- 3) 波浪観測台帳には、6時間ごとの波浪諸元および日最大波の諸元とその発生時刻を記載し、異常波浪については別表に各時刻ごとの変化を記載する。
- 4) 各月ごとに、6時間の定時読取値の平均値および日最大波の諸元の平均値を算出する。また、数年以上にわたる記録が得られているものについては、各月最大波の平均値を算出する。さらに必要に応じ季節の平均値も求める。ただし季節の分けかたについては、その地点の波候が最もよく表わされるよう留意する。
- 5) 波高、周期、波向の単独および相関出現率を、6時間ごとの定時読取値を用いて算出する。この表示

は年間について行ない、必要に応じて季別および月別の出現率も表示する。

- 6) 各種平均波 ( $H_{\max}$ ,  $H_{1/10}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{\text{mean}}$ ) の間の波高比, 周期比を必要に応じて算出する。
- 7) 止むを得ず欠測した場合は, 1日1回必ず目測を行ない, その結果を( )でかこんで台帳に記載する。特に, 欠測中の異常波浪については, 目測, 波浪推算, および被害があればその状況, などから判断した極大波高 ( $H_{1/3}$ ) の推定値を必ず記載する。
- 8) 異常波浪時の記録については, 各種の波浪推算法による推算を行なって, 推算値に対する補正率を求めることが望ましい。
- 9) 数年以上の記録が得られた箇所については, 5.3, 5.4.の方法で極大波高の発生確率を求める。

なお, 6. で述べた観測水深の影響の可能性を考えると, 波高計はできるだけ深い所に設置することが望ましい。ただし, 水圧式の波高計の場合に圧力振幅の換算の問題のために短周期の波を観測しにくくなるので, 観測目的に応じて設置水深を適宜選定することが必要である。

まえがきでも述べたように, 波浪観測の本務は各種波浪の諸元を正確かつ確実に記録することである。本資料で考察したのは, そうした観測成果のより有効な活用法であり, 信頼し得る観測データが得られたものとの前提に立っている。上述の整理法を考慮された上で, 優れた波浪観測を各地で継続されることを期待する次第である。

謝辞 なお, 本資料のとりまとめにあたっては, 運輸省第一〜第四港湾建設局の各調査設計事務所, 第五港湾建設局設計室, ならびに総理府北海道開発局港湾部建設課の方々から個人的に, 貴重な御意見を多数お寄せ頂いた。厚く御礼申し上げる次第である。また, 本資料に記載した各種の波浪統計の多くは, 水工部波浪研究室の阿部淑輝技官が計算したものである。ここに記して謝意を表する次第である。最後に, 3. の自己相関係数の計算にあたっては, 当所設計基準部計算室の TOSBAC 3400 を用いたことを付記する。

#### 参 考 文 献

- 1) 運輸省第二港湾建設局: 日本沿岸の波の性質に関する研究, 1961年2月, 471pp. および同附図及附表 117pp.
- 2) 坂本信雄・井島武士・木村茂雄: 日本沿岸の波の一般的分布, 第8回海岸工学講演会講演集, 1961年, pp. 13-18.
- 3) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所: 波浪観測台帳, 第1〜5集 (1958年9月〜1966年12月), 1965年1月〜1967年3月。
- 4) 第二港湾建設局・港湾技術研究所・茨城県: 鹿島工業港の自然条件について, 第1〜4報および総取りまとめ編, 1962年4月〜1966年5月。
- 5) 運輸省第二港湾建設局小名浜港工事事務所: 小名浜港の風と波, 1958.4〜1964.3 および 1964.4〜1965.3.
- 6) 高橋浩一郎: 気象統計, 地人書館, 1956年, p. 34 (112pp.)
- 7) 北海道開発局室蘭開発建設部苫小牧港建設事務所: 苫小牧港調査報告書 (昭和39・40年度), 1966年4月, 431pp.
- 8) 高橋智晴・佐々木弘・鈴木裕実・菅原一晃・中井徹也: 波浪観測の一例について (デジタル記録方式による波浪観測データ処理システム), 第4回港湾技術研究所研究発表会講演概要, 1966年11月, pp. 83-98.
- 9) 鈴木栄一: 降水量に関する統計的研究 (第15報) —降水量分布則の正規化変換—, 研究時報第14巻12号, 1962年, pp. 900-911.
- 10) 高橋智晴・鈴木裕実・佐々木弘: 鹿島港における波浪観測について, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966年12月, pp. 62-70.
- 11) GUMBEL, E.J.: *Statistics of Extremes*, Columbia Univ. Press, New York, 1958, 375pp. (河田・岩井・加瀬監訳, 広川書店, 1963年)。
- 12) U. S. Department of Commerce: Probability Tables for the Analysis of Extreme-Value Data, *National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series • 22*, U. S. Government Printing Office, July 1953, 32pp.
- 13) DALRYMPLE, T.: Flood Frequency Analyses, *Geological Survey Water-Supply Paper 1543-A*, U. S. Government Printing Office, 1960, 80pp.
- 14) BENSON, M. A.: Evolution of Methods for Evaluating the Occurrence of Floods, *Geological Survey Water-Supply Paper 1580-A*, U. S. Government Printing Office, 1962, p. 8 of 30pp. (THOMAS, H. A., *Boston Soc. Civil Engineers Jour.* Vol. 35, 1948, p. 428).
- 15) LONGUET-HIGGINS, M. S.: On the Statistical

- Distribution of the Heights of Sea Waves,  
*Jour. of Marine Research*, Vol. XI, No. 3,  
 1952, pp. 245-265.
- 16) PIERSON, W. J. JR., NEUMANN, G., and JAMES,  
 R. W.: Practical Methods for Observing and  
 Forecasting Ocean Waves by Means of Wave  
 Spectra and Statistics, *U.S. Navy Hydrographic  
 Office Pub. No. 603*, 1955, p. 12 of 284pp.
- 17) WIEGEL, R. L. and KUKK, J.: Wave Measu-  
 rements along the California Coast, *Trans.  
 A. G. U.*, Vol. 38, No. 5, Oct. 1957, pp. 667-  
 674.
- 18) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所: 「波  
 浪観測台帳」による観測記録の整理について—東  
 北, 北陸地方における日本海の波の統計的諸元—,  
 新調査 40-2, 1966年3月, 104pp.
- 19) 板尾純一・木戸武・山田五郎: 日本海沿岸の波に  
 ついて(第1報)—中部沿岸における波の統計的分  
 布—, 第13回海岸工学講演会講演集, 1966年12月,  
 pp. 50-56.

(昭和42年9月9日受付)

港湾技研資料 No. 39

1967年12月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 第一印刷所  
東京都中央区湊町2-16