

沿岸波浪に関する極値統計解析

(独)水産総合研究センター 水産工学研究所
水産土木工学部 水理研究室
中山 哲巖、大村 智宏

調査実施年度 平成 11～15 年度

緒 言

波浪は、漁港施設、漁場施設等の水産基盤施設に作用する主要な外力の一つである。波浪の規模が、これら水産基盤施設の規模、配置、構造を決定すると言っても過言ではない。我が国沿岸に來襲する波浪特性を常に精度良く把握することは、適切な水産基盤整備を行う上で極めて重要である。

波浪特性とは、主として、波高・周期・波向きの出現特性のことである。基本的に波浪は、沿岸に点在する波浪観測所で観測されている。当研究センターでは、昭和 37 年から現在までの漁港に設置された波浪観測所のデータを収集し、データベースとして構築し、これを随時更新している。これらのうち、データの精度等を考慮すると昭和 50 年代以降のデータが、統計解析を行えるものとなっている。

近年世界的な異常気象や、地球温暖化等による異常波浪の発生が考えられ、継続的な波浪観測の実施はこれらの長期的な変動を把握する上でも、今後の水産基盤施設等の設計・施工法を開発する上にも必要な資料となる。

このため漁港沿岸の波浪観測により海域における波浪特性を明らかにし、水産基盤備計画、構造物の設計等に役立てる。

調 査 方 法

1. 調査経緯

調査期間である平成 11 年～平成 15 年までの調査・検討内容の概要を以下に示す。

平成 11 年度；

- ・平成 10 年度に、島の越、四倉、越前、辺土名の 4 漁港で観測された波浪データを取りまとめデータベース化するとともに、報告書を作成した。報告書では、観測率及び月別最大波、波高・周期相関出現、有義波高頻度、有義波周期頻度、日別最大有義波、有義波高・周期分布図、の各項目別に整理した。
- ・1978 年から 1985 年までのデータについて整理を実施して、1986 年より現在までのデータベースと共通化した。

平成 12 年度；

- ・平成 11 年度に島の越、四倉、片貝、佐田岬、辺土名の 5 漁港で観測された波浪データを取りまとめデータベース化するとともに、報告書を作成した。

- ・新たに片貝漁港よりをデータベースに加えた。
- ・銚子漁港において観測システムの構築を行った。構築に当たってはパソコンを用いることにより観測のリアルタイム化、観測体制の省力化、自動化をはかった。

平成 13 年度；

- ・平成 12 年度に島の越、四倉，片貝，佐田岬、辺土名の 5 漁港で観測された波浪データをとりまとめデータベース化するとともに，報告書を作成した。
- ・観測箇所の波浪発生状況の変化を把握するため、波浪観測データより 20 年間の年最大波を用いて確率波高（30 年確率波高）を算定し、昔のデータより求められたものと最近のデータより求められたものとを比較して、確率波高の推移状況を試算した。

平成 14 年度；

- ・平成 13 年度に仙法志、様似，島の越、四倉，銚子，片貝，乙浜，佐田岬、辺土名の 9 漁港で観測された波浪データをとりまとめデータベース化するとともに，報告書を作成した。
- ・新たに北海道の 2 漁港（仙法志、様似）、千葉県 の 2 漁港（銚子、乙浜）をデータベースに加えた。

平成 15 年度；

- ・平成 14 年度に仙法志、様似，島の越、四倉，銚子，片貝，乙浜，佐田岬、辺土名の 9 漁港で観測された波浪データをとりまとめデータベース化するとともに，報告書を作成した。
- ・新たに北海道の 2 漁港（宇登呂，神威脇）、千葉県 の 2 漁港（鴨川），沖縄県（博愛，港川，南大東）をデータベースに加えた。
- ・昭和 40 年代の波浪データを PDF ファイル化し，データの保存につとめた。
- ・データベースをもとに，宇登呂，仙法志，様似，島之越，四倉，銚子，片貝，乙浜，神湊，越前，佐多岬，辺土名の 12 漁港において、1980～2002 年間における 30 年確率波の変化について統計解析をおこない検討した。

2．調査内容

定常的な波浪観測を行っているまたは行っていた漁港については、当センターが毎年度データベースを更新する際に調査しており、1978 年からの波浪観測所の一覧を表 1 及び図 1 に示す。図

表 1 1978 からの波浪観測所一覧

観測所名	1978～2000年の測得状況：長期の欠測等により年最大波が抽出できなかった年に"×"を付した。																									
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	
仙法志																										
宇登呂																										
様似	x			x	x																					
島の越																										
四倉																										
銚子						x		x	x	x																
片貝	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/				x												
乙浜	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/																
神湊													/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
越前														x	x	x										
佐田岬												x									x	x				
辺戸名						x	x																		x	/

1に示す波浪観測所から、十分な観測データがある12地点を表1に示した。後に述べる極値統計解析は、この12地点について行った。昭和の年代では、波浪観測所は20以上あったが、最近では減少する傾向にある。これは、データ取得の必要性が無くなったということではなく、この種の調査に要する資金の確保が困難になってきたことを示している。なお、現在では、各波浪観測所は地方公共団体が設置、運用しており、当センターが各波浪観測所のデータ提供を受け、データベースとしている。昭和の年代では、水産庁が直轄で調査していたものもある。各観測所のデータを毎年度、地方公共団体から提供を受け、毎年度データベースを更新した。このデータベースを用いて、データベースを基に宇登呂、仙法志、様似、島之越、四倉、銚子、片貝、乙浜、神湊、越前、佐多岬、辺土名の12漁港において、1980～2002年間に於ける30年確率波の変化を統計解析により、検討した。データベースの書式等については、参考資料に記載したので、参照されたい。表2に各地点の計測器設置位置・水深、観測機器の形式等を示す。



図1 主な波浪観測所

表2 波浪観測諸元

漁港名	波高計位置		水深 (m)	波浪観測機器		当該漁港観測開始	当該機器観測開始
	緯度	経度		波高計	波向計		
仙法志	45°06'19.80"	140°12'18.11"	-20.4	超音波式	超音波式	1961年	1995年3月
神威脇	42°08'28.65"	139°24'00.50"	-50.0	海象計		1997年3月	
様似	42°06'06"	142°19'09"	-31.0	超音波式	超音波式	(1973年)	1990年5月
宇登呂	44°04'36"	144°58'59"	-31.0	超音波式	超音波式	1970年7月	1996年11月
島之越	*39°54'50"	*141°57'	-18.0	超音波式	電磁式	不明	不明
四倉	37°05'33.0"	141°00'42.7"	-19.3	海象計		-	2001年4月
銚子	35°42'59.96"	140°54'17.18"	-25.1	海象計		1967年10月	2000年7月
片貝	35°31'14.4"	140°28'40.1"	-11.0	超音波式	-	1976年1月	1981年1月
鴨川	35°05'21.0"	140°08'19.2"	-32.3	海象計		2003年4月	
乙浜	34°53'10.2"	139°53'01.1"	-36.7	海象計		1985年11月	2003年5月
神湊	*33°08'	*139°48'30"	-23.0	水圧式	-	1991年3月で休止	
佐多岬	*32°31'36"	*132°03'	-14.5	超音波式	-	1978年	1980年
越前	*35°56'20"	*135°59'30"	-35.0	超音波式	-	1998年9月で休止	
辺土名	X=84,741.34m	Y=67,906.89m	-32.0	超音波式	電磁式	不明	不明
博愛	X=-142,859.67m	Y=134,422.79m	-32.0	超音波式	電磁式	不明	不明
港川	X=-12,772.57m	Y=26,913.62m	-37.0	超音波式	電磁式	不明	不明
南大東	X-14,316.21m	Y=22,281.24m	-19.4	超音波式	電磁式	不明	不明

注)*は漁港位置・X,Y=公共座標・太字はWGS

(1) 観測地点別の波浪

各地点では、2時間毎に10分間水位変動の観測を行い、有義波高・周期及び波向きを算出している。従って1日に12セットのデータがあるが、このうちの波高・周期をグラフ化したものの例を図2に示す。この例は、データ取得率の良い例であるが、計測器の故障、メンテナンス等で欠測になることは多々ある。

これらデータを用いて、波高・周期の相関を検討した。図3にその例を示す。この図から、波形勾配(H/L)が0.04以上の波浪(図中の太線)は、ほとんど存在しないことがわかる。

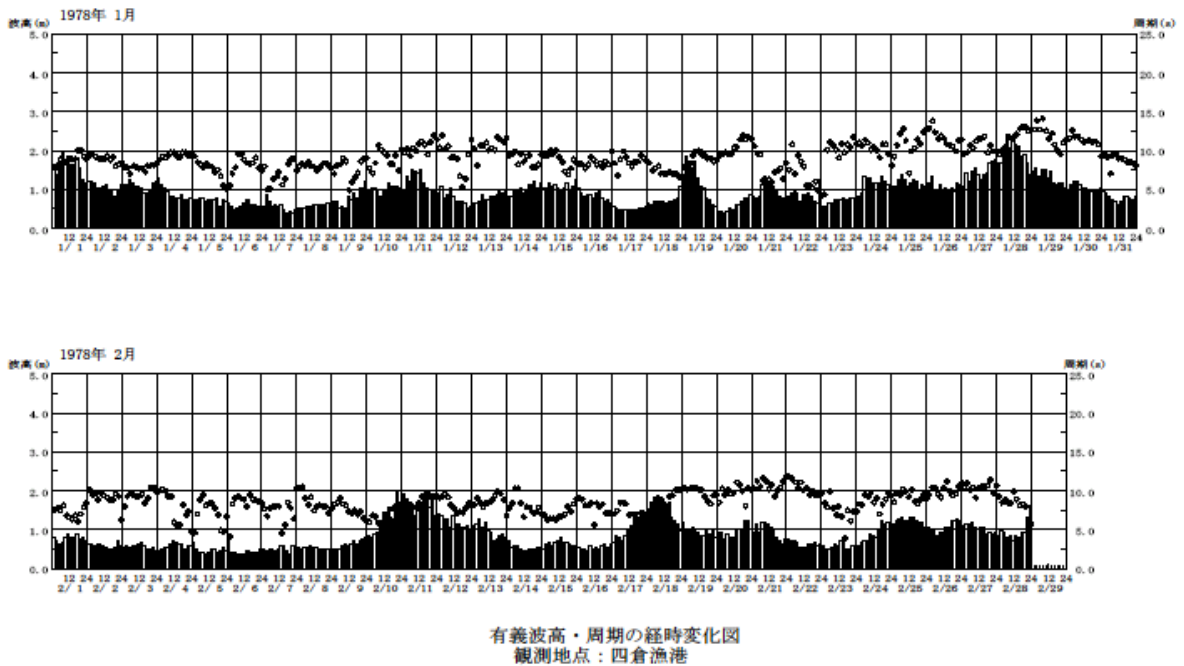


図2 有義波高・周期の時系列の例

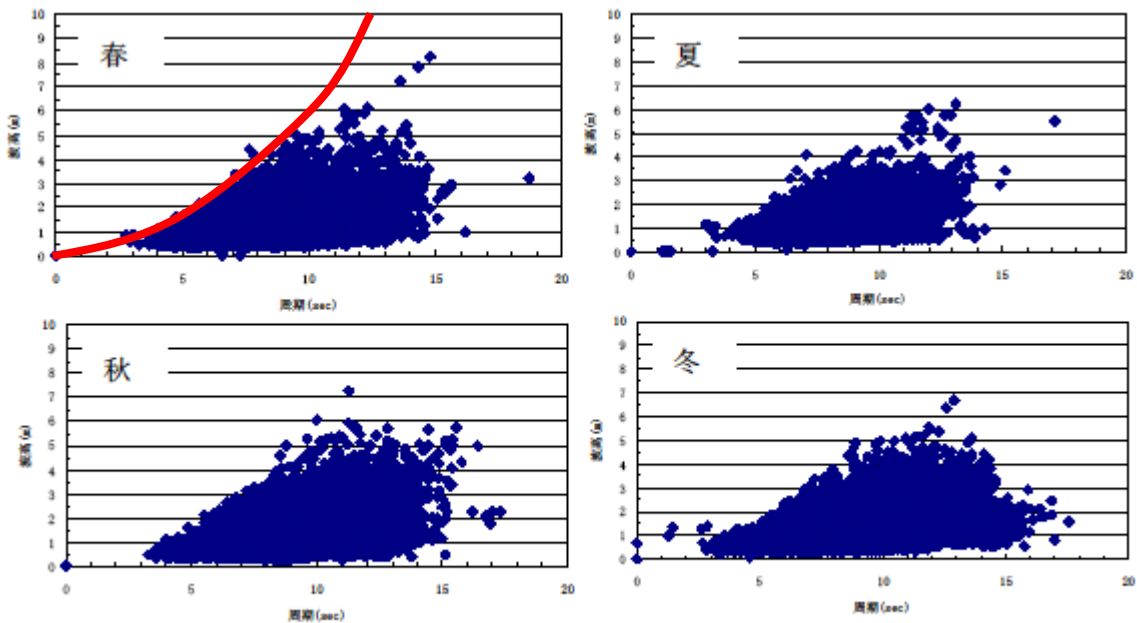


図3 波高・周期の相関図の例(四倉漁港)

(2) 30年確率波の推移

各地点のデータから、異常波浪（大きな波浪）を抽出して、これらのデータがある確率分布で出現すると仮定し、その確率分布を求めて、30年確率波を推定した。その際に、データ区間を10年として、確率分布関数を推定した。さらにこの区間を1年毎にずらし、30年確率波高が最近10年間でどのように推移しているのかを検討した。

具体的には、以下のような解析を行った。

極値統計に用いた資料

極値統計は、1978年以降、1年毎に年次をずらした10年間の標本（サンプル）について、30年確率波高を推定した。ここで、標本は日最大有義波高をもとに、次の3通りの方法で抽出した。

a) 年最大波高

b) 高波の極大波高

高波の極大波高の抽出は次のように行った。

- ・各漁港の年最大波高から、表3に示す下限値以上の波高を各漁港での高波とした。
- ・高波の極大波高は、同一の気象擾乱に起因して数日に渡って制限値以上の日最大波高が出現していた場合はその内の最大のもの1つを抽出するものとし、1つの極大値発現から、その日を含め4日以内に発現した極大値はその内の最大のものを採用した。

c) 高波の極大波高の年間上位5位

高波の標本を、年間上位5位までとした。

表3 高波の下限値

観測所名	極大波の下限値
仙法志	3.5m
宇登呂	3.5m
様似	3.0m
島の越	3.0m
四倉	3.0m
銚子	3.5m
片貝	3.0m
乙浜	3.5m
神湊	3.0m
越前	3.0m
佐田岬	2.0m
辺戸名	2.0m

極値統計の方法

極値統計の方法は、「漁港・漁場の施設の設計の手引 2003年版」に示されている Petruaskas・Aagaard（ペトルアスカ・アガード）法（P・A法）および合田(1990)の提案による修正P・A法（合田法）の2方法を用いた。以下に、これら2つの方法について記述する。

・ Petruaskas・ Aagaard (ペトルアスカ・アガート) 法

Petruaskas・Aagaard(1970)の方法による極値統計解析は、グンベル分布(2重指数分布)およびワイブル分布(k=0.75,0.85,1.00,1.10,1.25,1.50,2.00)7種の計8種の確率分布関数をあてはめの対象とする。適合する分布関数は、回帰式を計算して相関係数を求め、その中の最も相関係数の大きい分布型をもって採択する。

(a) 確率分布関数

$$\text{グンベル(Gumbel)分布 ; } P[H \leq x] = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)\right]\right\} \dots (1)$$

$$\text{ワイブル(Weibull)分布 ; } P[H \leq x] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right] \dots (2)$$

ここに、 $P\{H \leq x\}$; 波高 H が x を越えない確率
 A ; 尺度母数, B ; 位置母数, k ; 形状母数

(b) 未超過確率 P の算出 (plotting position)

$$P[H \leq x_{m,N}] = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta} \dots (3)$$

ここに、 $x_{m,N}$ はデータ N 個中 m 番目の極大波高($m=1,2,\dots,N$)であり、 α, β は想定する分布型により次の値を用いる。

- Gumbel 分布 : $\alpha = 0.44$
 $\beta = 0.12$
- Weibull 分布 : $\alpha = 0.30 + 0.18/k$
 $\beta = 0.21 + 0.32/k$

(c) 分布関数の当てはめと確率波高推定式の算出

各極大波高 x の $P\{H \leq x\}$ を次式で $r_v = (x - A) / B$ に変換する。

$$\text{Gumbell 布 ; } r_v = -\ln\{-\ln P[H \leq x]\} \dots (4)$$

$$\text{Weibull 分布 ; } r_v = [-\ln\{1 - P[H \leq x]\}]^{1/k} \dots (5)$$

x と r_v の関係を直線と仮定し、その係数 A, B を最小自乗法で求める。

$$x = \hat{A}r_v + \hat{B} \dots (6)$$

各分布の適合度は上式からの分散の程度で判断する。ここでは、相関係数が最も大きくなる分布型を適合分布関数として採択し再現期待値を求める。

(d) 再現期間 R_p に対応する確率波高 x の算出

波高の再現期間 R_p は未超過確率 $P[H \leq x]$ と次の関係にある。

$$R_p = \frac{K}{N} \cdot \frac{1}{1 - P[H \leq x]}$$

又は

$$P[H \leq x] = 1 - \frac{K}{NR_p}$$

ここに、 K は解析対象年数、 N は極大波の個数 (データ数)

従って、再現期間 R_p に対応する波高 x は、式(7)、式(4)又は(5)、式(6)により算出できることとなる。

(e) 信頼区間の推定

再現期間 R に対応する波高の推定値 \hat{x}_R の標準偏差 $\sigma(\hat{x}_R)$ を積率法によって推定し、信頼区間として $1 \times$ の範囲を求めた。

ここで、Gumbel 分布の対する再現確率統計量の分散の推定は Gumbel(1957) による式(8)の、Weibull 分布に対しては泉宮・斎藤(1998)による式(9)の積率法による評価式*により求めた。

$$\text{Gumbel 分布; } \sigma^2(\hat{x}_R) = \frac{\sigma^2}{N} \left\{ 1 + 0.885(y_R - \gamma) + 0.6687(y_R - \gamma)^2 \right\} \quad \dots \quad (8)$$

ここに、 y_R は x_R に関する基準化変量、 σ^2 は母集団の分散、 γ はオイラー数(0.5772...)

$$\text{Weibull 分布; } \sigma^2(\hat{x}_R) = \frac{\sigma^2}{N} \left\{ 1 + \frac{(y_R - \Gamma_{11k})}{\sqrt{\Gamma_{12k} - \Gamma_{11k}^2}} \sqrt{\beta_1} + \frac{(y_R - \Gamma_{11k})^2}{(\Gamma_{12k} - \Gamma_{11k}^2)} \frac{(\beta_2 - 1)}{4} \right\} \quad \dots \quad (9)$$

ここに、 $\Gamma_{1nk} = \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right)$, $n=1,2,3,\dots$

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{(\Gamma_{13k} - 3\Gamma_{12k} + 2\Gamma_{11k}^3)}{(\Gamma_{12k} - \Gamma_{11k}^2)^{3/2}}, \beta_2 = \frac{(\Gamma_{14k} - 4\Gamma_{13k}\Gamma_{11k} + 6\Gamma_{12k}\Gamma_{11k}^2 - 3\Gamma_{11k}^4)}{(\Gamma_{12k} - \Gamma_{11k}^2)^2}$$

*) 泉宮・斎藤(1998), 値統計解析における普遍条件式並びに漸近理論による信頼区間の推定, 海岸工学論文集, 第 45 回, pp.206-210

・合田法（修正P・A法）

合田(1990)の方法^{*)}は Petruaskas・Aagaard の方法を発展させたもので、極値統計解析はグンベル分布、極値型分布 (k=2.5,3.3,5.10) の4種、並びにワイブル分布 (k=0.75,1.0,1.4,2.0) の4種の計9種の確率分布関数をあてはめの対象となる分布関数とする。適合する分布関数は、相関係数の残差の平均値に対する相関係数の残差の比率 (MIR 基準: MInimun Ratio of residual correlation coefficient) が最小となる分布関数を採択する。また、標本中の最大値を異常値かどうかの棄却判定に DOL 基準 (Deviation Out Lier, 最大値の無次元偏差 が標本の5%非超過確率: 5%および95%非超過確率: 95%の範囲内か否かで検定) を導入している。

*) 合田良實,増補改定 港湾構造物の耐波設計, 極値統計解析

(a) 確率分布関数

確率分布関数は前記の Gumbel 分布, Weibull 分布と極値型 (FT-) 分布。

$$\text{グンベル(Gumbel)分布; } P[H \leq x] = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)\right]\right\} \dots (10)$$

$$\text{極値型(FT-型)分布; } P[H \leq x] = \exp\left[-\left(1+\frac{x-B}{kA}\right)^{-k}\right] \dots (11)$$

$$\text{ワイブル(Weibull)分布; } P[H \leq x] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right] \dots (12)$$

ここに, P { H ≤ x }; 波高 H が x を越えない確率
A ; 尺度母数, B ; 位置母数, k ; 形状母数

(b) 未超過確率 P の算出 (plotting position)

$$P[H \leq x_{m,N}] = 1 - \frac{m - \alpha}{N + \beta} \dots (13)$$

ここに, x_{m,N} はデータ N 個中 m 番目の極大波高(m=1,2,...,N)であり, α, β は想定する分布型により次の値を用いる。

- Gumbel 分布 : α=0.44
β=0.12
- FT-型分布 : α=0.44+.52k
β=0.12-0.11/k
- Weibull 分布 : α=0.20+0.27/ k
β=0.20+0.23/ k

(c) 分布関数の当てはめと確率波高推定式の算出

各極大波高 x の $P[H \leq x]$ を次式で $r_v = (x - A) / B$ に変換する .

$$\text{Gumbel 分布} \quad ; \quad r_v = -\ln\{-\ln P[H \leq x]\} \dots \dots \dots (14)$$

$$\text{FT- 型分布} \quad ; \quad r_v = k \left\{ -\ln[H \leq x]^{-1/k} - 1 \right\} \dots \dots \dots (15)$$

$$\text{Weibull 分布} \quad ; \quad r_v = [-\ln\{1 - P[H \leq x]\}]^{1/k} \dots \dots \dots (16)$$

x と r_v の関係を直線と仮定し , その係数 A, B を最小自乗法で求める .

$$x = \hat{A}r_v + \hat{B} \dots \dots \dots (17)$$

各分布の適合度は上式からの分散の程度で判断する . ここでは , MIR 基準が最小となる分布型を適合分布関数として採択し再現期待値を求める .

$$\text{MIR} = r / r_{\text{mean}}$$

ここで , $r = 1 - r$; r = 相関係数

$$r_{\text{mean}} = \exp\left[a + b * \ln N + c(\ln N)^2\right] \dots \dots \dots (18)$$

(18)式はモンテカルロ法で各分布関数の相関係数 r についての数値実験による合田(1990)の提案式で , N : データ数 , a, b, c は表 4 の係数である .

表 4 相関係数の残差の平均値 r_{mean} の係数

分布型 / 係数		a	b	c
Gumbel 分布		-2.364+0.054 ^{5/2}	-0.2665-0.0457 ^{5/2}	-0.044
FT- 型分布	k= 2.5	-2.470+0.015 ^{3/2}	-0.1530-0.0052 ^{5/2}	0
	k= 3.3	-2.462+0.009 ²	-0.1933-0.0037 ^{5/2}	-0.007
	k= 5.0	-2.463	-0.2110-0.0131 ^{5/2}	-0.019
	k=10.0	-2.437+0.028 ^{5/2}	-0.2280-0.0300 ^{5/2}	-0.033
Weibull 分布	k=0.75	-2.435-0.168 ^{1/2}	-0.2083+0.1074	-0.147
	k=1.0	-2.355	^{1/2}	-0.043
	k=1.4	-2.277+0.056 ^{1/2}	-0.2615	-0.044
	k=2.0	-2.160+0.113	-0.3169-0.0499	-0.041
			-0.3788-0.0979	

注) : データの採択率 = N/K , N =データ数 , K =解析対象年数

(d) 最大値の棄却検定 (DOL 基準)

標本の最大値 x_1 の無次元最大偏差 を用いて、母集団における最大無次元標準偏差の非超過確率 5% (5%) 以下、および 95% (95%) 以上を棄却判定の基準とする。

$$\xi = (x_1 - \bar{x}) / \sigma \quad \dots \dots \dots (19)$$

ここに、 x_1 : 最大値、 \bar{x} : 平均値、 σ : 標本の標準偏差

$$\xi_p = a + b * \ln N + c(\ln N)^2 \quad \dots \dots \dots (20)$$

ここに、 p : 95%または 5%、 N : データ数、 a, b, c は表 5、表 6 の係数である

表 5 標本中の最大値の偏差 5%非超過確率 5%の係数

分布型 / 係数		a	b	c
Gumbel 分布		0.257+0.133 ²	0.452-0.118 ²	0.032
FT- 型分布	k= 2.5	1.481-0.126 ^{1/4}	-0.331-0.031 ²	0.192
	k= 3.3	1.025	-0.077-0.050 ²	0.143
	k= 5.0	0.700+0.060 ²	0.139-0.076 ²	0.100
	k=10.0	0.424+0.088 ²	0.329-0.094 ²	0.061
Weibull 分布	k=0.75	0.534-0.162	0.277+0.095	0.065
	k=1.0	0.308	0.423	0.037
	k=1.4	0.192+0.126 ^{3/2}	0.501-0.081 ^{3/2}	0.018
	k=2.0	0.050+0.182 ^{3/2}	0.592-0.139 ^{3/2}	0

表 6 標本中の最大値の偏差 95%非超過確率 95%の係数

分布型 / 係数		a	b	c
Gumbel 分布		-0579+0.468	1.496-0.227 ²	-0.038
FT- 型分布	k= 2.5	4.653-1.076 ^{1/2}	-2.047+0.307 ^{1/2}	0.635
	k= 3.3	3.217-1.216 ^{1/2}	-0.903+0.294 ^{1/4}	0.427
	k= 5.0	0.599-0.038 ²	0.518-0.045 ²	0.210
	k=10.0	-0.371+0.171 ²	1.283-0.133 ²	0.045
Weibull 分布	k=0.75	-0.256-0.632 ²	1.269+0.254 ²	0.037
	k=1.0	-0.682	1.600	-0.045
	k=1.4	-0.548+0.452 ^{1/2}	1.521-0.187	-0.065
	k=2.0	-0.322+0.641 ^{1/2}	1.414-0.326	-0.069

(e) 再現期間 R_p に対応する確率波高 x の算出

波高の再現期間 R_p は未超過確率 $P[H \leq x]$ と次の関係にある .

$$R_p = \frac{K}{N} \cdot \frac{1}{1 - P[H \leq x]}$$

又は (21)

$$P[H \leq x] = 1 - \frac{K}{NR_p}$$

ここに , K は解析対象年数 , N は極大波の個数 (データ数)

従って , 再現期間 R_p に対応する波高 x は , 式(7) , 式(4)又は(5) , 式(6)により算出できることとなる .

(f) 信頼区間の推定

再現期間 R に対応する波高の推定値 \hat{x}_R の標準偏差 $\sigma(\hat{x}_R)$ を積率法によって推定し , 信頼区間として $1 \times$ の範囲を求めた .

ここで , 再現確率統計量の分散 の推定は合田(1990)による式(8)により求めた .

$$\sigma(\hat{x}_R) = \left[1 + a(y_R - c + \alpha \ln v)^2 \right]^{1/2} / \sqrt{N} \quad \dots \dots \dots (22)$$

ここに , a は分布により次のように与えられる .

Gumbel 分布と Weibull 分布 ; $a = a_1 \exp \left[a_2 N^{-1.3} + \kappa (-\ln v)^{1/2} \right]$

FT- 型分布 ; $a = a_1 \exp \left\{ a_2 \left[\ln(Nv^{0.5}/N_0) \right]^2 - \kappa \left[\ln(v/v_0) \right]^2 \right\}$

N : データ数 , v : データの採択率 $= N/K$, 各係数は表 7、表 8 の値である .

表7 Gumbel 分布と Weibull 分布の再現確率統計量の標準偏差の係数

分布型 / 係数		a ₁	a ₂		C	
Gumbel 分布		0.64	9.0	0.93	0	1.33
Weibull 分布	k=0.75	1.65	11.4	-0.63	0	1.55
	k=1.0	1.92	11.4	0	0.3	0.90
	k=1.4	2.05	11.4	0.63	0.4	0.72
	k=2.0	2.24	11.4	1.34	0.5	0.54

表8 FT- 型分布の再現確率統計量の標準偏差の係数

分布型 / 係数		a ₁	a ₂	N ₀		o	c	
FT- 型分布	k= 2.5	1.27	0.12	23	0.24	1.34	0.3	2.3
	k= 3.3	1.23	0.09	25	0.36	0.66	0.2	1.9
	k= 5.0	1.34	0.07	35	0.41	0.45	0.1	1.6
	k=10.0	1.48	0.06	60	0.47	0.34	0	1.4

調査結果及び考察

(1) 極値統計方法の比較

全資料期間を対象に、3種類の標本（年最大波高、極大波高、極大波高の年間上位5位）について、P・A法と合田法の2方法の極値統計解析を行った。

極値統計に用いた年最大波高、並びに高波の極大波高の標本（サンプル）数と測得率の推移を図4(1)～図4(12)に示す。

各標本、統計方法での30年確率波高とその信頼区間（1× ）、適合分布関数等を表9(1)～表9(3)および図5(1)～図5(4)に示す。

これらの結果は次のとおりである。

- ・全資料を対象として推定した30年確率波高は、年最大波高ないし極大波高を標本とした場合が高く、P・A法と合田法による推定では合田法での値が高い傾向が見られるが、その差は辺土名での極大波高を標本とした例以外は0.2m程度未満であった。
- ・P・A法での適合分布関数の相関係数は、極大波高を標本とした場合に高い（適合性が良い）傾向が見られる。合田法でのMIR基準も極大波高を用いた場合が小さい（適合性が良い）傾向が見られる。
- ・なお、各標本のうち、合田法でのDOL基準で規約される標本は佐田岬の第1位のみであった。

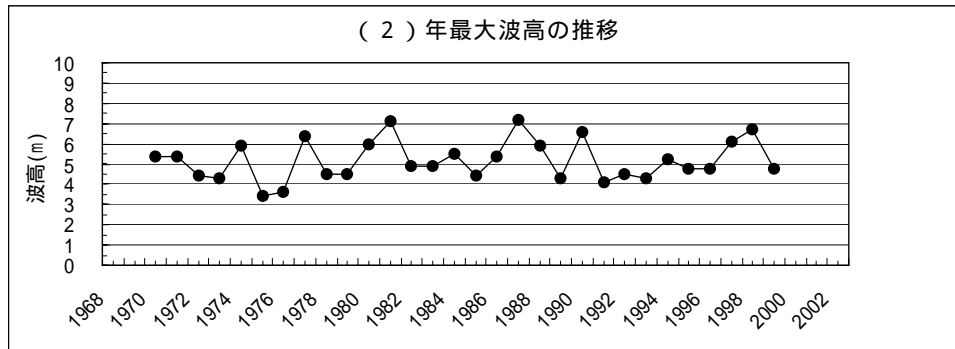
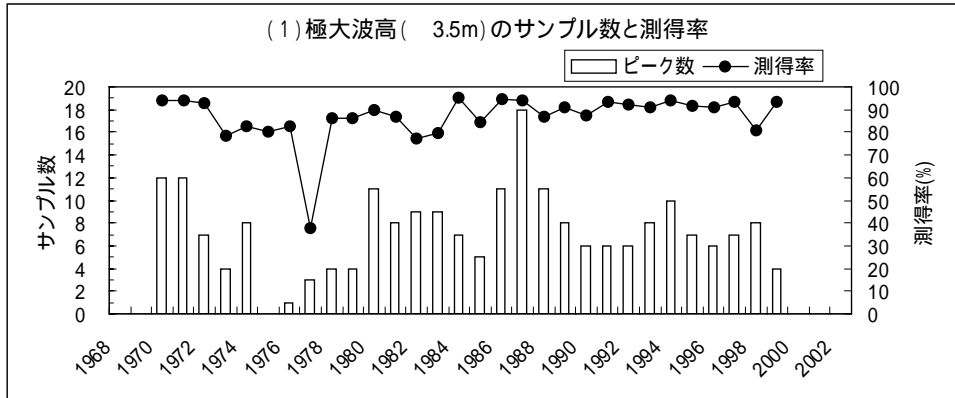


図 4 (1) 高波の発現状況 (仙法師漁港)

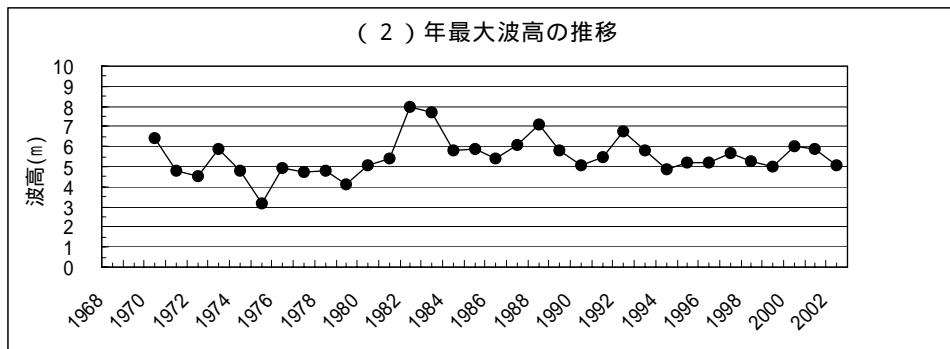
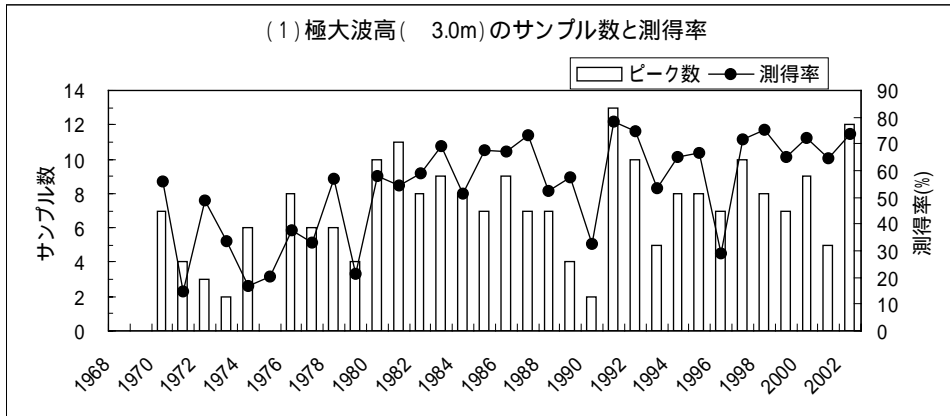


図 4 (2) 高波の発現状況 (宇登路漁港)

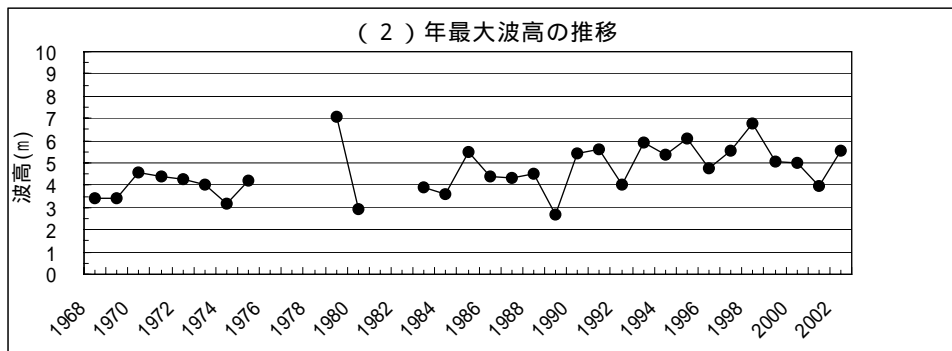
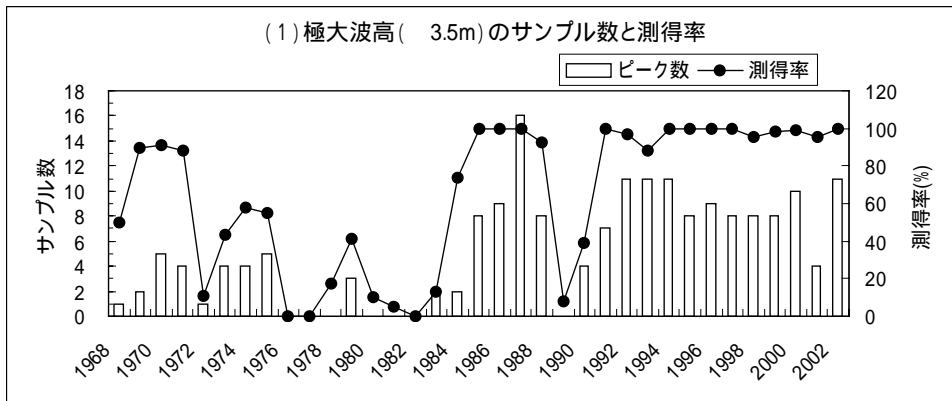


図 4 (3) 高波の発現状況 (様似漁港)

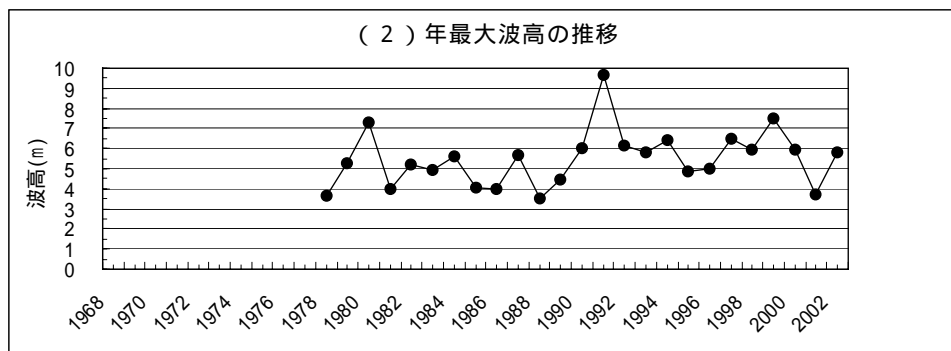
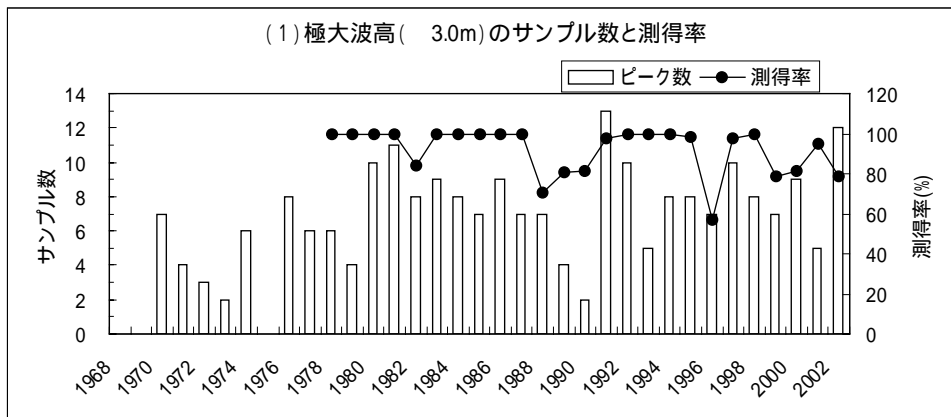


図 4 (4) 高波の発現状況 (島の越漁港)

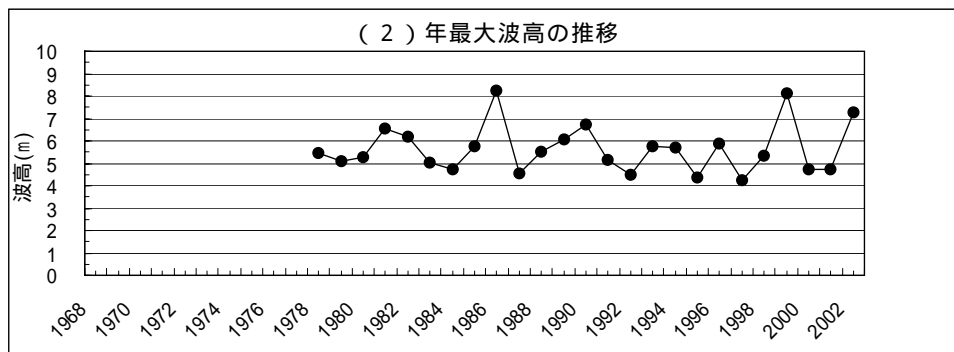
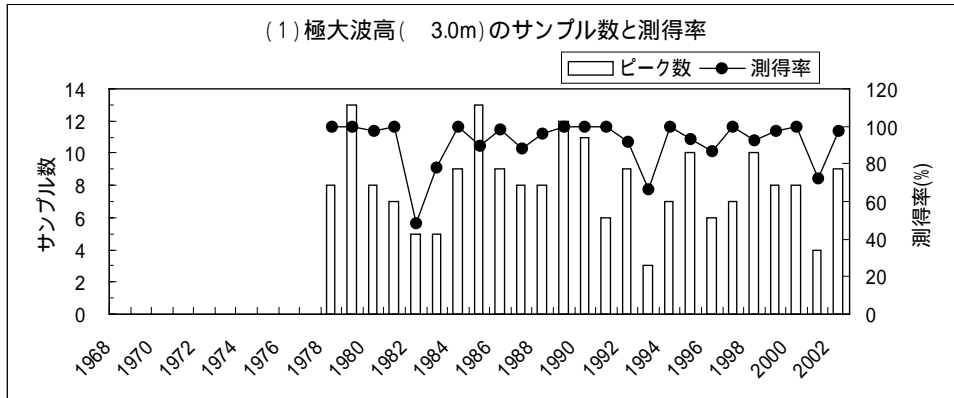


図4(5) 高波の発現状況(四倉漁港)

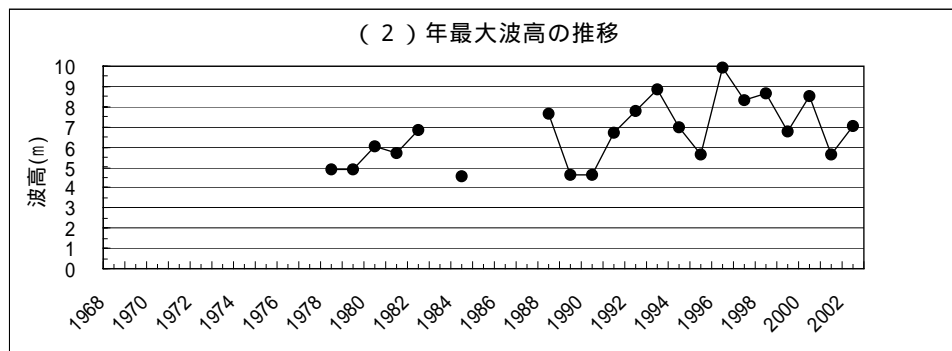
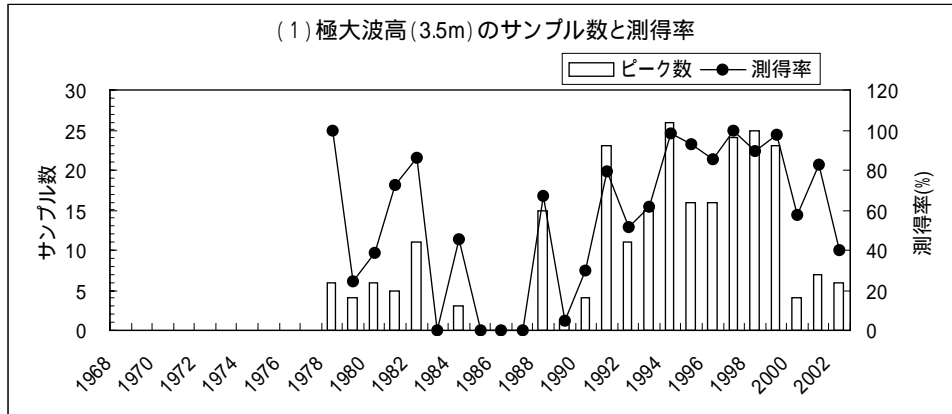


図4(6) 高波の発現状況(銚子漁港)

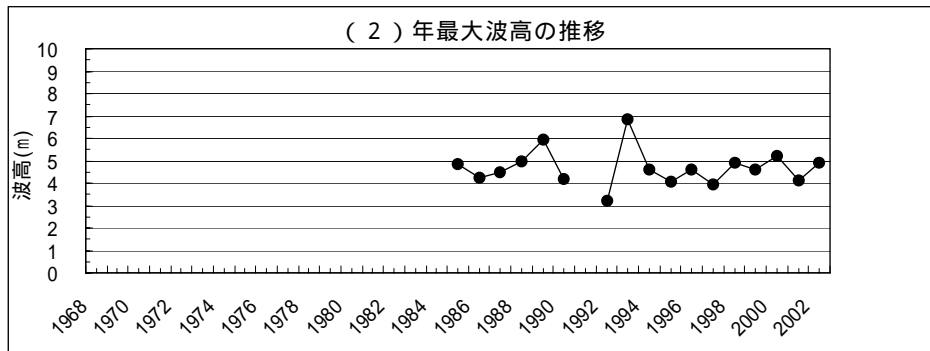
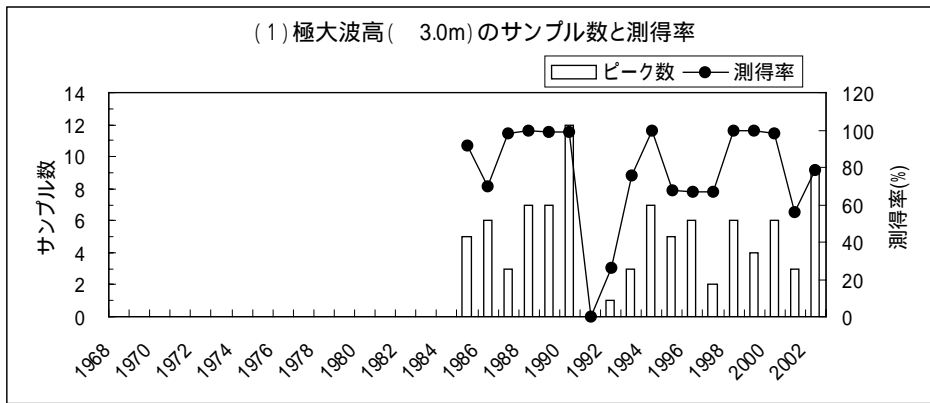


図 4 (7) 高波の発現状況 (片貝漁港)

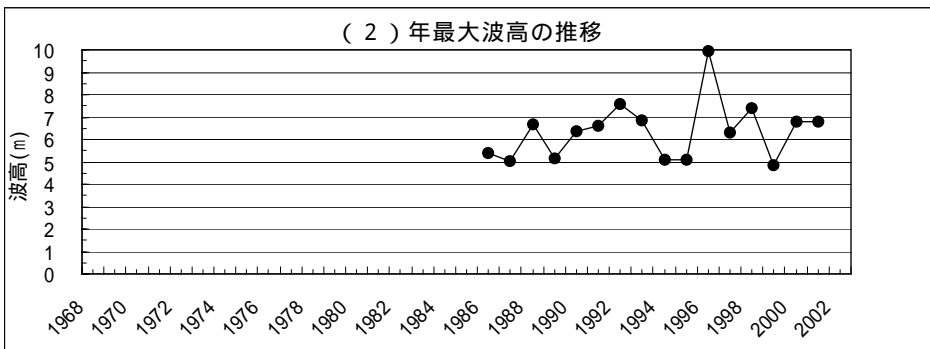
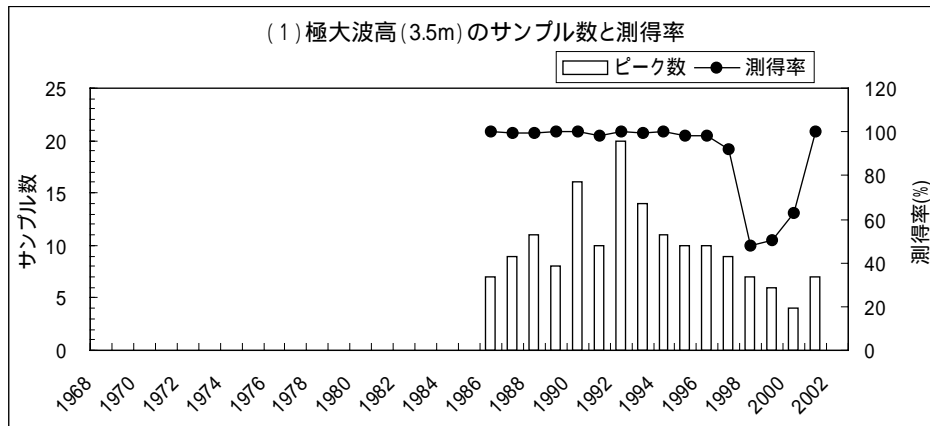


図 4 (8) 高波の発現状況 (乙浜漁港)

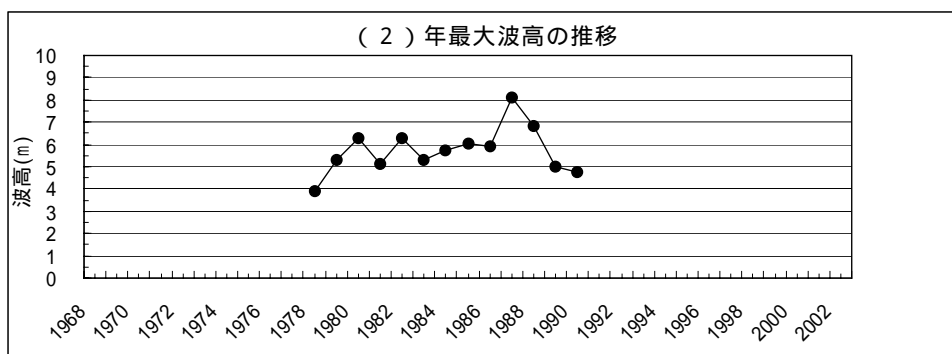
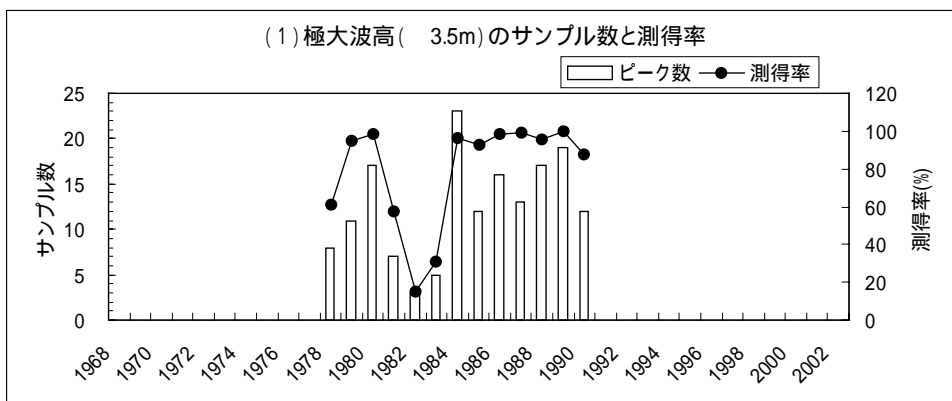


図 4 (9) 高波の発現状況 (神湊漁港)

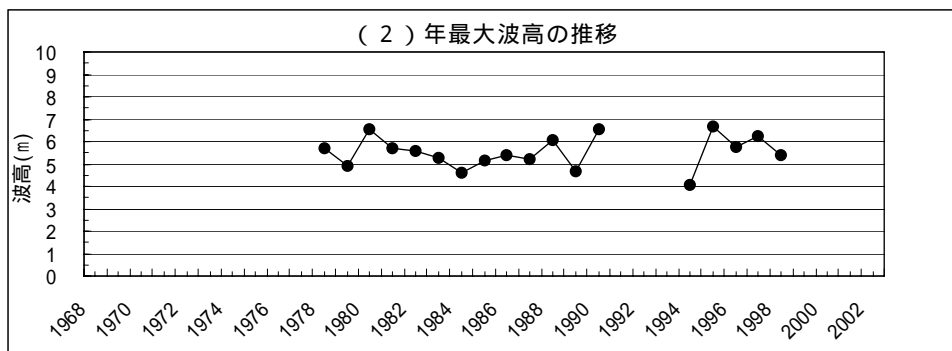
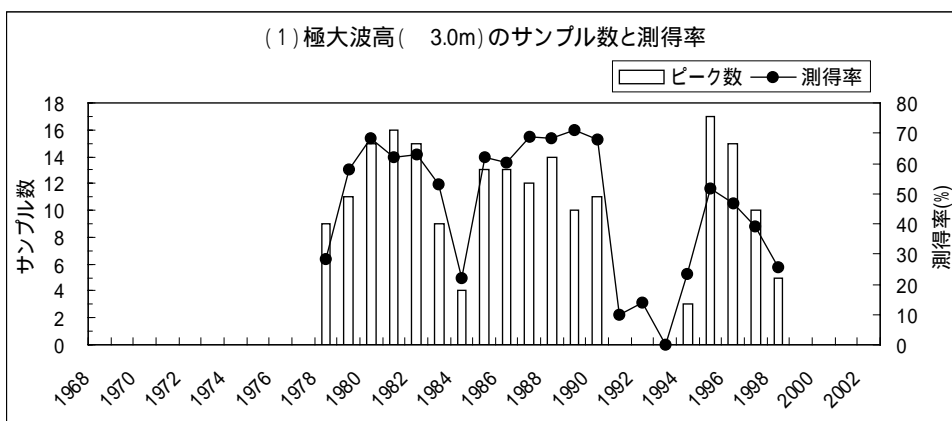


図 4 (10) 高波の発現状況 (越前漁港)

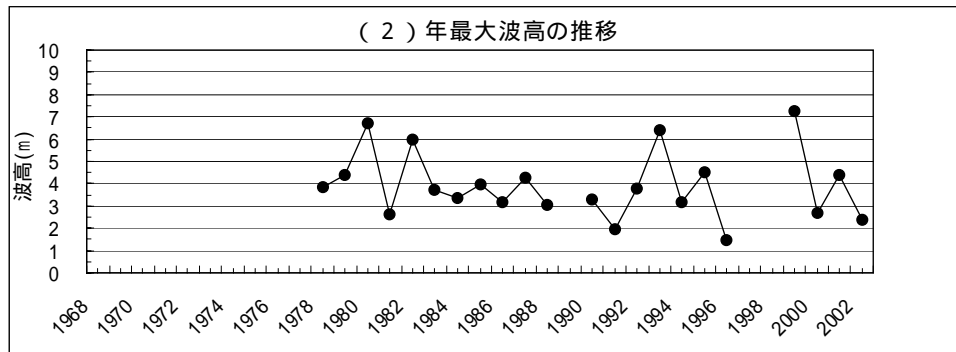
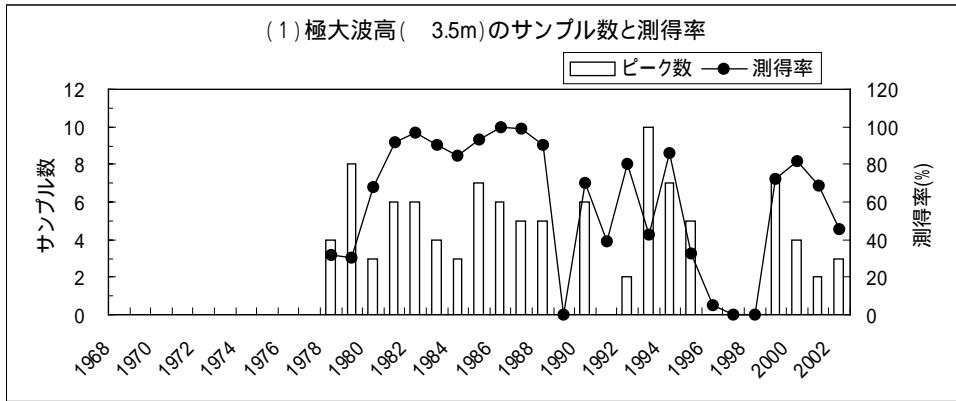


図 4 (11) 高波の発現状況 (佐田岬漁港)

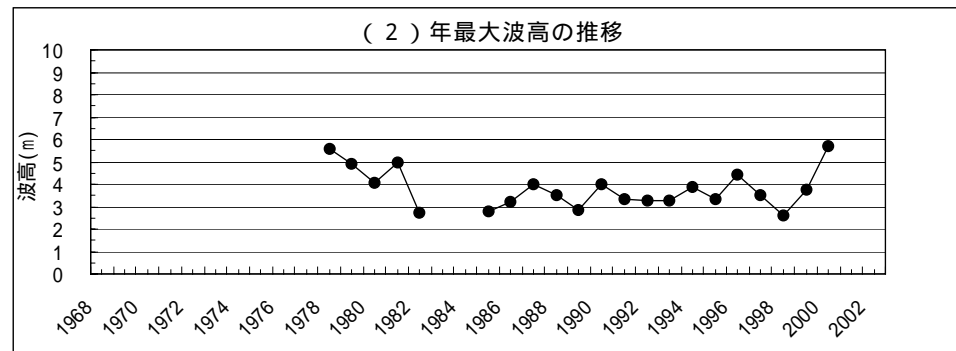
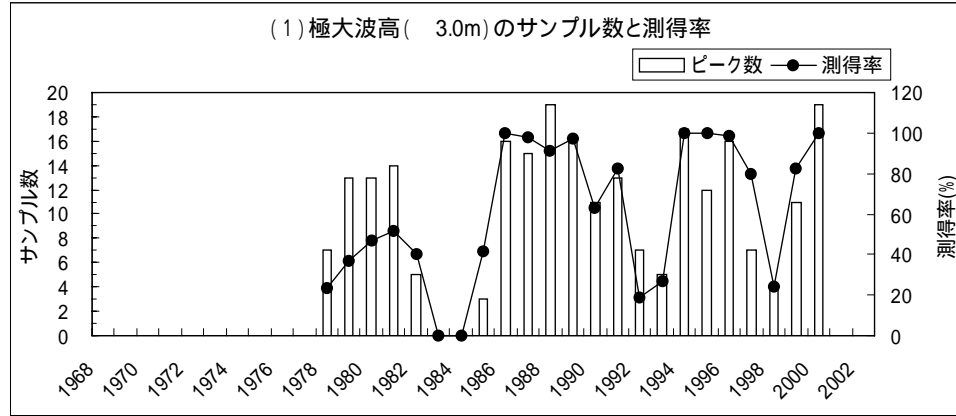


図 4 (12) 高波の発現状況 (辺土名漁港)

表 9 (1) 最適分布関数と確率波高【標本：年最大波】

方法	漁港	仙法志	宇登呂	様 似	島の越	四 倉	銚 子	片 貝	乙 浜	神 湊	越 前	佐田岬	辺土名
	データ期間	1970 ~ 1999	1970 ~ 2002	1968 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2002	1985 ~ 2002	1986 ~ 2001	1978 ~ 1990	1978 ~ 1998	1978 ~ 2001	1978 ~ 2000
	データ採取期間(年)	30	33	35	25	25	23	18	16	13	21	24	23
	極値の総数	30	33	30	25	25	21	17	16	13	18	22	21
	平均発生率	1.00	1.00	0.86	1.00	1.00	0.91	0.94	1.00	1.00	0.86	0.92	0.91
P A 法	分布型	Weibull	Gumbel	Weibull	Gumbel	Weibull	Weibull	Gumbel	Weibull	Gumbel	Weibull	Gumbel	Weibull
	K	2.00	0.00	2.00	0.00	1.50	2.00	0.00	1.25	0.00	2.00	0.00	1.50
	A値	2.18	0.76	2.39	1.12	1.81	3.49	0.65	1.80	0.86	1.58	1.22	1.48
	B値	3.24	5.08	2.53	4.85	4.00	3.60	4.33	4.69	5.27	4.13	3.23	2.46
	相関係数	0.990	0.979	0.993	0.982	0.990	0.987	0.975	0.963	0.986	0.974	0.984	0.987
	確率波高(m)	7.26	7.64	6.97	8.65	8.09	9.88	6.48	9.47	8.18	6.98	7.22	5.75
	(1×)の上限	7.65	8.13	7.37	9.46	8.67	10.59	7.04	10.52	9.01	7.33	8.12	6.26
(1×)の下限	6.87	7.16	6.56	7.83	7.51	9.17	5.93	8.43	7.36	6.63	6.31	5.24	
合 田 法	分布型	Weibull	Gumbel	Weibull	FT-	Weibull	Weibull	FT-	FT-	Gumbel	Weibull	Gumbel	Weibull
	K	2.00	0.00	2.00	10.00	1.40	2.00	5.00	5.00	0.00	2.00	0.00	1.40
	A値	2.18	0.76	2.39	0.99	1.68	3.49	0.49	0.80	0.86	1.58	1.22	1.38
	B値	3.25	5.08	2.53	4.82	4.10	3.60	4.29	5.72	5.27	4.13	3.23	2.54
	MIR	0.656	1.100	0.455	0.642	0.431	0.630	0.624	0.802	0.428	1.144	0.636	0.580
	確率波高(m)	7.26	7.64	6.84	8.79	8.14	9.88	6.61	9.58	8.18	6.98	7.22	5.78
	(1×)の上限	7.66	8.14	7.27	10.15	8.79	10.62	7.69	11.44	9.11	7.35	8.16	6.35
(1×)の下限	6.86	7.15	6.41	7.43	7.49	9.14	5.53	7.72	7.25	6.61	6.27	5.22	

表 9 (2) 最適分布関数と確率波高【標本：極大波高】

方法	漁港	仙法志	宇登呂	様 似	島の越	四 倉	銚 子	片 貝	乙 浜	神 湊	越 前	佐田岬	辺土名
	データ期間	1970 ~ 1999	1970 ~ 2002	1968 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2002	1985 ~ 2002	1986 ~ 2001	1978 ~ 1990	1978 ~ 1998	1978 ~ 2001	1978 ~ 2000
	データ採取期間(年)	30	33	35	25	25	23	18	17	13	21	24	23
	極値の総数	220	230	184	176	203	251	92	159	163	202	103	243
	平均発生率	7.33	6.97	5.26	7.04	8.12	10.91	5.11	9.35	12.54	9.62	4.29	10.57
P A 法	分布型	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Gumbel	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull
	K	1.00	1.25	1.10	1.00	1.10	1.00	0.00	1.00	1.00	1.50	0.85	1.00
	A値	0.67	1.03	0.84	1.04	1.10	1.10	0.54	1.02	0.89	1.43	0.77	0.60
	B値	3.53	3.46	2.94	2.96	3.00	3.56	3.61	3.49	3.00	2.81	2.08	2.04
	相関係数	0.995	0.996	0.997	0.996	0.996	0.998	0.990	0.995	0.997	0.992	0.988	0.996
	確率波高(m)	7.14	7.40	6.60	8.52	8.15	9.82	6.29	9.29	8.25	7.36	6.97	5.48
	(1×)の上限	7.46	7.65	6.90	9.05	8.56	10.33	6.59	9.88	8.78	7.61	7.73	5.76
(1×)の下限	6.83	7.15	6.30	7.98	7.74	9.31	5.98	8.70	7.72	7.10	6.21	5.19	
合 田 法	分布型	Weibull	FT-	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	FT-	Weibull	Weibull	Weibull	FT-	FT-
	K	1.00	10.00	1.00	1.00	1.00	1.00	10.00	1.00	1.00	1.40	5.00	5.00
	A値	0.67	0.52	0.74	0.04	0.96	1.10	0.46	1.02	0.89	1.33	0.55	0.33
	B値	3.53	4.06	3.01	2.96	3.09	3.55	3.59	3.49	3.00	2.89	2.47	2.36
	MIR	0.814	0.580	0.410	0.500	0.869	0.392	0.654	0.625	0.324	1.825	0.710	0.558
	確率波高(m)	7.17	7.75	6.75	8.52	8.37	9.82	6.63	8.89	8.26	7.48	6.95	5.96
	(1×)の上限	7.49	8.15	7.10	9.07	8.86	10.34	7.13	9.29	8.80	7.76	7.85	6.47
(1×)の下限	6.84	7.34	6.39	7.98	7.89	9.30	6.12	8.69	7.72	7.20	6.06	5.45	

表 9 (3) 最適分布関数と確率波高【標本：極大波高の年間上位 5 位】

漁港	仙法志	宇登呂	様似	島の越	四倉	銚子	片貝	乙浜	神湊	越前	佐田岬	辺土名
データ期間	1970 ~ 1999	1970 ~ 2002	1968 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2002	1978 ~ 2000	1985 ~ 2002	1986 ~ 2001	1978 ~ 1990	1978 ~ 1998	1978 ~ 2001	1978 ~ 2000
データ採取期間(年)	30	33	35	25	25	23	18	17	13	21	24	23
極値の総数	135	149	116	114	122	96	71	79	63	87	82	102
平均発生率	4.50	4.52	3.31	4.56	4.88	4.17	3.94	4.65	4.85	4.14	3.42	4.43
分布型	Weibull	Gumbel	Weibull	Weibull	Gumbel	Gumbel	Gumbel	Weibull	Gumbel	Weibull	Weibull	Gumbel
K	1.10	0.00	1.25	1.25	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	2.00	0.85	0.00
A値	0.83	0.61	1.04	1.50	0.76	1.01	0.51	1.26	0.79	1.77	0.81	0.52
B値	3.66	4.38	3.07	2.96	4.08	4.94	3.81	3.87	4.15	3.18	2.17	2.77
相関係数	0.993	0.995	0.995	0.993	0.995	0.994	0.988	0.989	0.995	0.987	0.988	0.988
確率波高(m)	7.17	7.35	6.58	8.31	7.86	9.72	6.24	9.30	8.06	7.07	7.11	5.33
(1x)の上限	7.51	7.61	6.89	8.78	8.23	10.24	6.55	9.98	8.58	7.31	7.97	5.60
(1x)の下限	6.84	7.09	6.27	7.83	7.49	9.19	5.93	8.62	7.53	6.84	6.25	5.06
分布型	Weibull	FT-	FT-	FT-	FT-	Gumbel	FT-	FT-	Gumbel	Gumbel	FT-	FT-
K	1.00	10.00	10.00	10.00	10.00	0.00	10.00	10.00	0.00	0.00	5.00	10.00
A値	0.73	0.53	0.53	0.76	0.66	1.01	0.45	0.75	0.79	0.64	0.58	0.46
B値	3.73	4.37	3.67	3.83	4.07	4.94	3.80	4.57	4.15	4.38	2.55	2.76
MIR	0.823	0.438	0.428	0.409	0.513	0.664	0.571	0.615	0.354	1.905	0.704	0.592
確率波高(m)	7.30	7.70	6.74	8.66	8.32	9.72	6.52	9.43	8.06	7.47	6.98	5.64
(1x)の上限	7.70	8.14	7.21	9.40	8.94	10.23	7.04	10.29	8.58	7.82	7.94	6.10
(1x)の下限	6.90	7.25	6.28	7.93	7.69	9.20	6.01	8.56	7.54	7.12	6.02	5.18

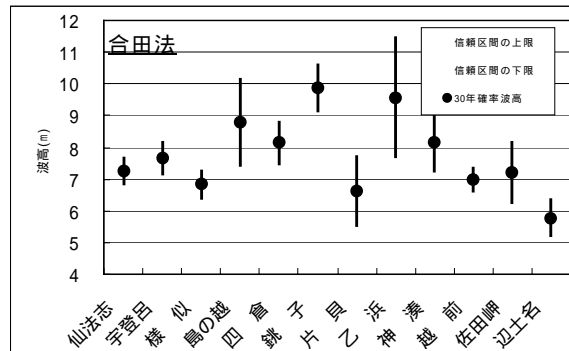
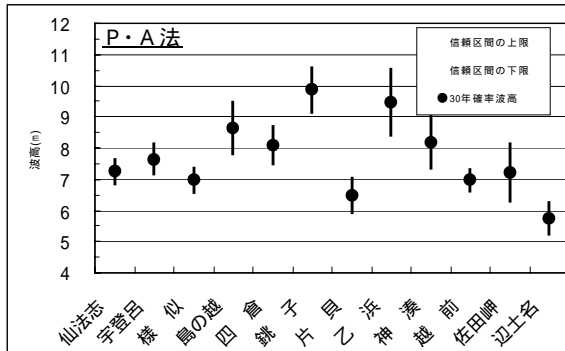


図 5 (1) 30 年確率波高と 1x 信頼区間 (標本：年最大波高)

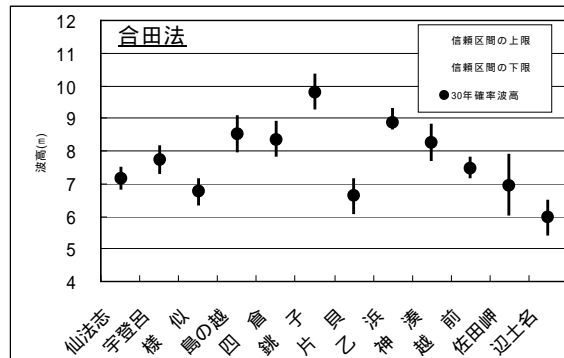
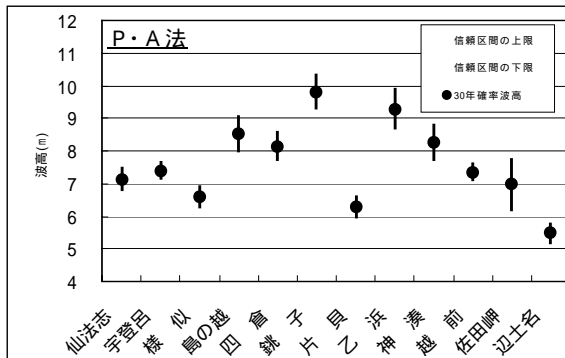


図 5 (2) 30 年確率波高と 1x 信頼区間 (標本：極大波高)

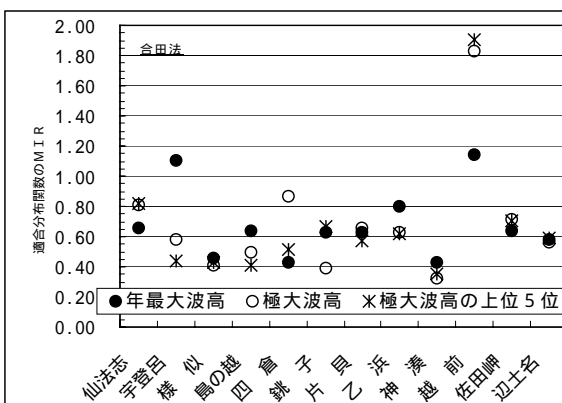
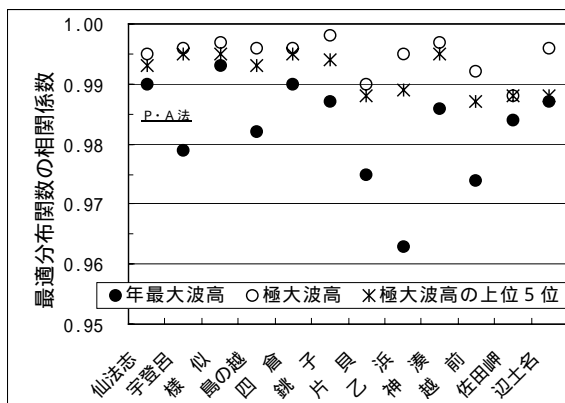


図 5 (4) 適合分布関数の適合判定指標 (相関係数およびM I R 基準)

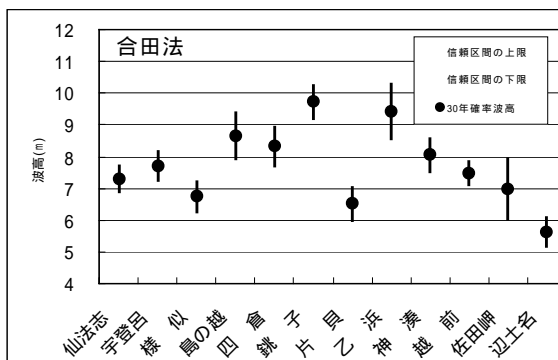
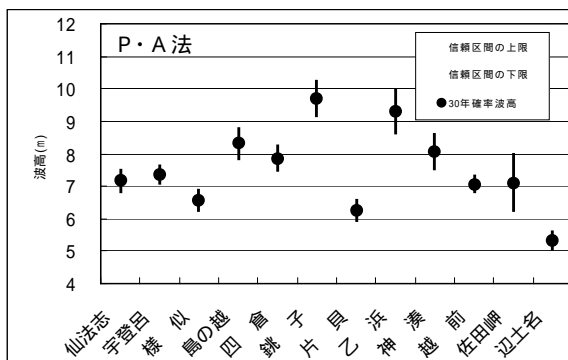


図 5 (3) 30 年確率波高と 1× 信頼区間 (標本: 極大波高の年間上位 5 位)

(2) 30年確率波高の推移

全期間での極値統計の結果から、分布関数の適合性が良いと判断されるので、10年間の各年次の極大波高を標本として、P・A法と合田法で推定した30年確率波の推移を図6、図7(1)～図7(3)に示す。

各漁港での30年確率波高の推移は下記のような状況であり、近年、太平洋側の漁港での確率波高が全般に高くなっている傾向がみられる。一方、日本海側、東シナ海側の漁港での確率波高に変化はみられない。

北海道の仙法志、宇登呂、様似の3漁港での30年確率波高

- ・宇登呂漁港：1980年代での資料では9m近かったが、1990年代の資料では7m以下である。
- ・仙法志漁港：全期間を通して7m台の波高で、概ね同程度である。
- ・様似漁港：1980年代には波高6m程度であったが、近年は波高7m程度と高い傾向がでる。なお、1979年～1988年の資料での波高が7mと次の1980年～1989年での資料での波高より1.5m以上高く推定されているが、これは全期間を通しての第1位の波高が1979年に観測されていることによる。

太平洋沿岸の島の越、四倉、銚子、片貝、乙浜、神湊の6漁港

- ・島の越漁港：1980年代の資料では7～8mであった波高が、1991年の全期間で第1位の10m近い高波が含まれる1990年代の資料では波高9～10mと高い。近年の波高は8m程度であるが1980年代での資料より高い。
- ・四倉漁港：概ね8m前後の波高である。
- ・銚子漁港：1980年代の資料では8m台の波高であったが、近年は11m程度である。
- ・片貝漁港：1985年の観測開始であるが、全期間を通して6m程度の波高で、概ね同程度である。観測は水深11mと浅い。
- ・乙浜漁港：1986年の観測開始であり、1996年に全期間で第1位の10m近い高波が観測されており、この高波が含まれない1986年～1995年以外は9m前後の波高であるが、近年に向かって波高が高くなっている傾向が見うけられる。
- ・神湊漁港：波浪観測は1990年で終了しており、資料期間の波高は10m程度である。

北陸の越前漁港、豊後水道の佐田岬漁港、沖縄の辺土名漁港

- ・越前漁港：全期間を通して概ね7.5m程度である。
- ・佐田岬漁港：1980年代の資料での波高は7m程度で、その後6m程度であったが、近年は8m程度である。
- ・辺土名漁港：1980年代の資料による当初は波高6m程度、その後が波高4～5mである。

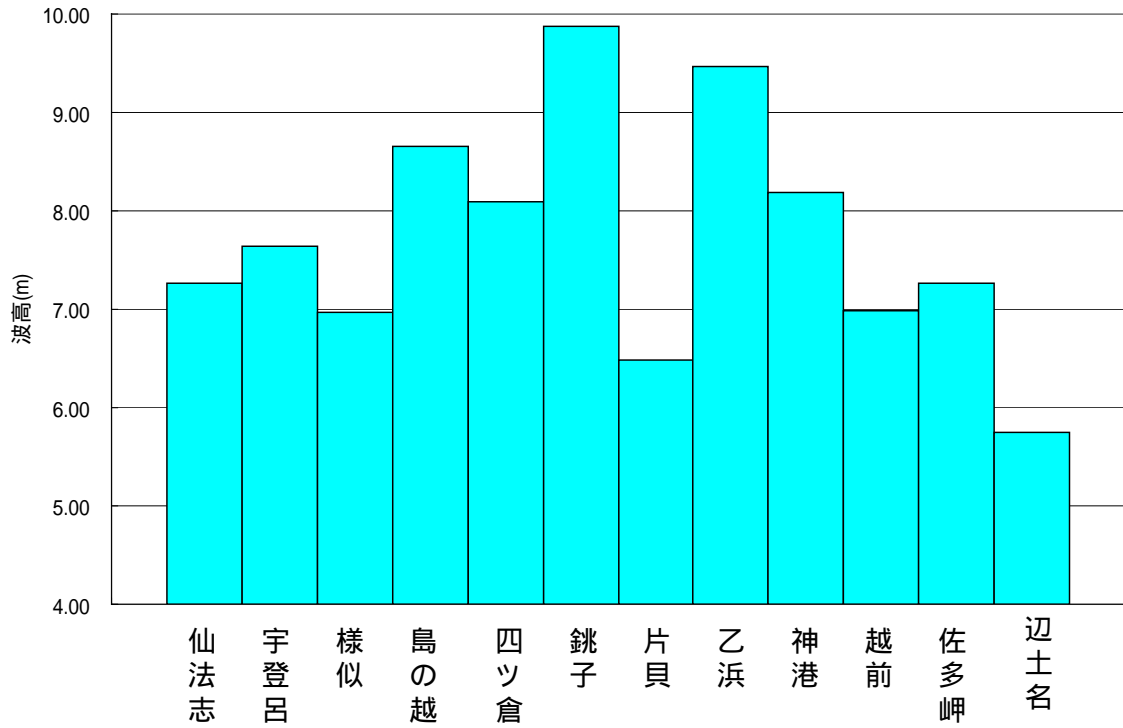


図6 各観測点の1978～2002のデータによる30年確率波高

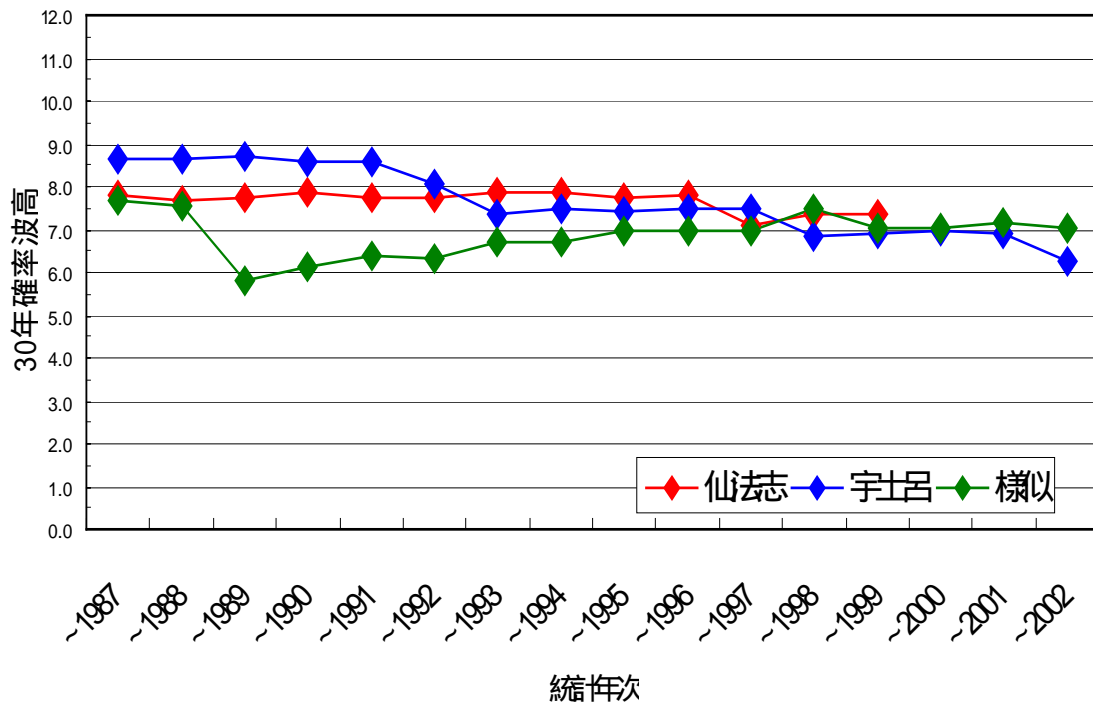


図7(1) 30年確率波の推移

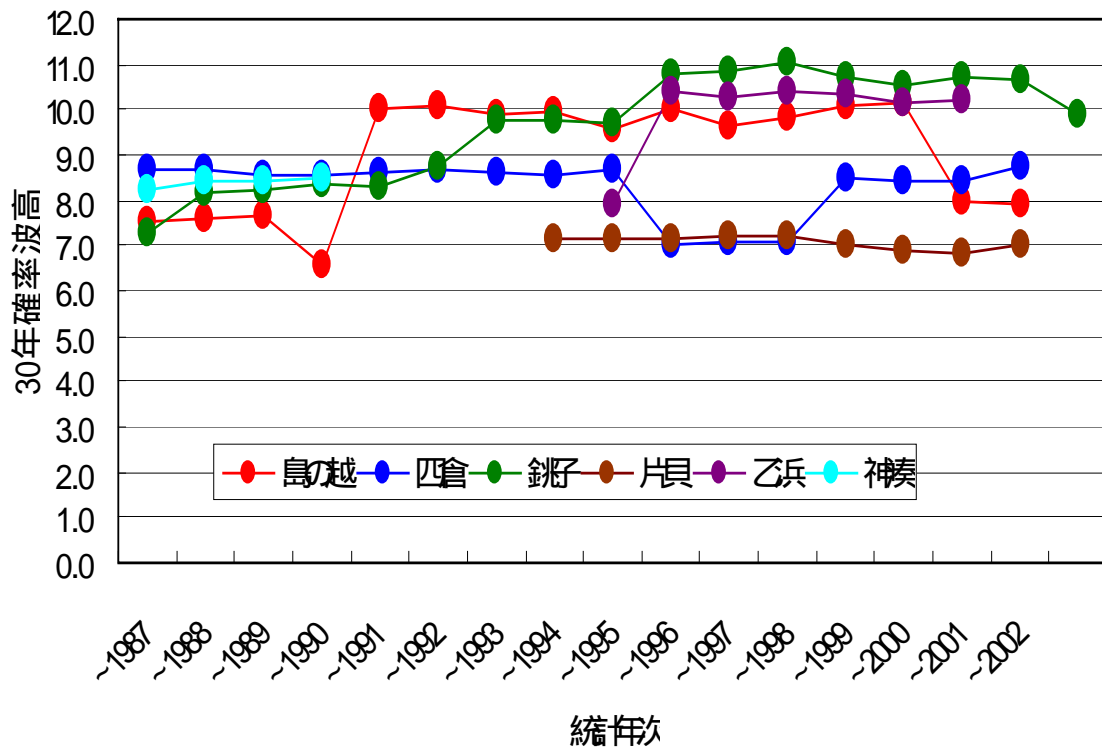


図 7 (2) 30年確率波の推移

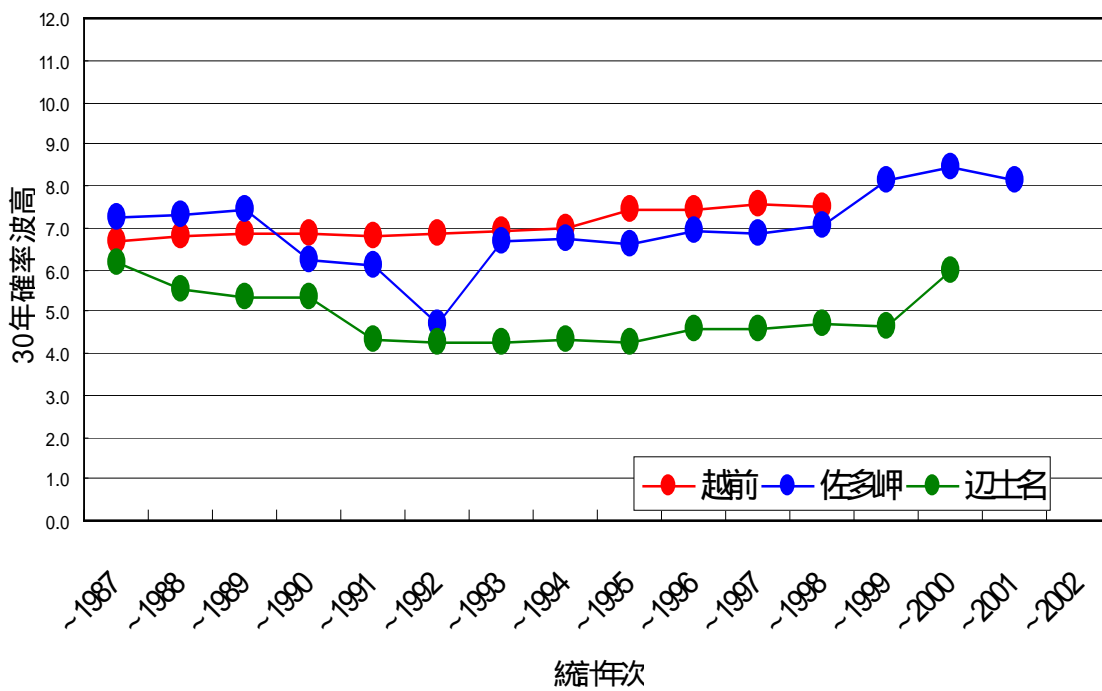


図 7 (3) 30年確率波の推移

摘要

漁港波浪観測データベースを基にした極値統計解析から、次のことがいえる。

波浪観測が10年以上継続して行われている全国12漁港について極値統計解析を行い、30年確率波高の推移を見ると、太平洋側の漁港では確率波高が近年高くなっている傾向がみられる。一方、日本海側、東シナ海側の漁港での確率波高に変化はみられない。

年最大波高、極大波高および極大波高の上位5位の3種類の標本について、P・A法と合田法(修正P・A法)で極値統計を行った。解析方法については、P・A法と合田法での差は殆どみられなかったが、標本については、極大波高を標本として用いた場合が、年最大波高を用いた場合よりも分布関数への当てはめ適合性が高いといえる。これは、観測資料に欠測期間が含まれ、この間に年最大波高となるような高波の発生していた場合、極大波高を指標とすることで、ある程度の年最大波高の欠落が補正されると考えられる。

今回の極値統計は波候の特性変化を観点に、標本期間を10年間とし30年確率波高を推定したが、高波発現の経年変化をみると、10年程度の間隔をあけて全期間の上位に位置する高波が発現していた状況もみられ、標本期間にこれらの高波が含まれるか否かで確率波高が大きく変化する。漁港施設の設計波には一般に30年確率波高が用いられるので、このことを考慮すれば確率波高の推移も20年～30年間の標本をもとに考えることが適当といえる。

今後の課題として残された事項を挙げると次のとおりである。

太平洋側の漁港においては、近年、確率波高が高くなっており、波候特性が変化していることが伺え、今後も継続した波浪観測を展開し長期的な変化を把握、監視することは重要である。漁港施設の設計波浪は一般に30年確率波であり、波候特性の変化も30年間以上の標本を用いて把握することが望ましい。しかし、蓄積されている漁港波浪観測データ殆どは30年間の標本を用いて確率波高の経年変化を検討するには十分なものではなく、欠測期間も多く、実測資料のみの解析で必ずしも適切な評価とはいえない。従って、欠測期間の高波を波浪推算により補てんし、より確度の高い確率波高の推移変化を把握する必要がある、全国各地漁港での現行設計沖波の妥当性、安全性を検討評価するにも有効である。

引用文献

- 1) 全国漁港漁場協会、「漁港・漁場の施設の設計の手引、2003年版」
- 2) 泉宮・斎藤(1998), 値統計解析における普遍性条件式並びに漸近理論による信頼区間の推定, 海岸工学論文集, 第45回, pp.206-210
- 3) 合田良寛, 増補改定 港湾構造物の耐波設計, 極値統計解析