

太平洋南岸の極値波高統計の 母分布関数について

ON THE PARENT DISTRIBUTION OF EXTREME WAVE HEIGHTS ALONG THE SOUTHERN PACIFIC COAST OF JAPAN

合田良実¹・竹下直樹²・永井紀彦³

Yoshimi Goda, Naoki Takeshita, Norihiko Nagai

¹フェロー会員 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区)

²北海道開発コンサルタント(株) (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)

³正会員 工博 港湾技術研究所 水工部 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

The wave observation data at ten stations along the Southern Pacific Coast of Japan were analyzed for the distribution of extreme significant wave heights for the purpose of establishing the parent distribution in this region. The wave observation at these stations has been conducted every two hours for the duration of 8 to 25 years. The peaks-over-threshold method was used to define the extreme wave heights, the number of which ranged from 151 to 409 per station with the total number of 2884.

The candidate distributions of the FT-II (four), FT-I, and Weibull (four) were subjected to rejection tests by the DOL and REC criteria proposed by Goda, and the distribution with the least case of rejection was assumed as the parent distribution. The necessity to deal with the mixed population was clearly demonstrated for this region, because storm waves by typhoons were much greater than those by other disturbances. The population of extreme waves by typhoons seems to have the FT-I distribution as the parent, but the limitation in the sample size prohibits to draw the definite conclusion.

Key Words : *Extreme wave statistics, storm wave heights, extreme distribution functions, mixed population, parent distribution*

1. まえがき

毎年台風や、冬型気圧配置、移動性低気圧などの気象擾乱により高波が来襲しており、被害を最小限に防ぐべく防波堤等が建設されている。そのため、どれくらいの波が来襲するのか設計波高を推測するために極値解析を行なって分布関数を推定し、所定の再現期間に対する確率波高を求める方法が検討されている。合田・小長谷・永井(1998)の解析(前報)では、太平洋東岸の高波はワイブル分布($k=1.00$)を母分布関数とすることが既に指摘されている。そこで本研究では、上記の研究を引き継ぎ、太平洋南岸全域における極値波高統計を解析することにより、この海域での母集団分布を推定することを目的とする。

2. 波浪データの概要

(1) データ取得状況

対象とした観測地点は、表-1に示すように波浮から中城湾までの10港で、油津(1975~1990)と油津

の後継拠点とされている宮崎(1991~1997)を合わせたデータも加え合計11地点の波高データを用いて解析を行った。なお波浮のデータに関しては前報の解析データを用いた。解析を行ったのは、運輸省港湾技術研究所所有のデータベース「ナウファス」(全国港湾海洋波浪情報網: NOWPHAS; Nationwide Ocean Wave information network for Ports and Harbours)に保管されている各港の2時間ごとの有

表-1 波浪観測地点の観測状況の概要

観測地点	水深 (m)	観測 年数	欠測率 (%)	有効 年数	高波基準値(m)		最大 波高(m)	高波 個数
					下限値	上限値		
波浮	-49.0	23.0	21.58	18.04	2.00	3.00	8.36	409
下田	-50.0	10.0	9.00	9.10	1.50	2.00	6.57	170
御前崎	-17.0	10.0	12.50	8.75	1.50	2.00	5.71	151
潮岬	-50.5	11.0	9.91	9.91	1.50	2.00	9.07	385
御坊沖	-170.0	15.0	33.07	10.04	1.50	2.00	11.37	357
室津	-30.0	8.0	29.00	5.68	1.50	2.00	9.45	135
宮崎	-29.0	8.0	6.50	7.48	1.50	2.00	10.75	210
油津+宮崎	-----	23.0	8.74	20.99	1.50	2.00	10.75	530
油津	-48.5	16.0	15.35	14.39	1.50	2.00	10.34	343
志布志	-35.0	18.0	4.78	17.14	1.00	1.50	8.30	320
中城湾	-45.0,	25.0	15.92	21.02	1.50	2.00	10.63	404
	-53.0							

義波高・周期のデータで、1973～1997年の期間が対象であるが、潮岬の1986年以前のデータは、水深12.8mと浅い位置で観測しているので、解析には用いなかった。なお、観測に用いている波高計はいずれも超音波式である。

観測対象期間は8～25年であるが、48時間以上の欠測は、日単位で長期欠測として積算した。そして48時間以内での欠測については、周辺地点の波高の経時変化曲線を参考にして、高波基準の上限値を超えるような波が観測されていないことが明らかとなきには、特に長期欠測としては扱わず、観測されている可能性が少しでもあるのならば、それを長期欠測として扱った。また、高波のピーク付近で断続的な欠測がある場合、後述の方法でピーク値を推定できないときには、その高波の下限値を超えたときから、次の高波が発生するまでとした。極値統計解析では、こうした長期欠測を除外した総日数を年単位に換算した有効年数 K を使用した。この有効年数は、5.7～21.0年であった。

(2) 高波の定義

本研究では、1 気象擾乱の高波を1つのデータとして用いる。しかし気象擾乱自体が連続していることや、一度押し寄せた高波が静まりかけてから再び波高が上昇する現象を考えると、どこまでを1つの気象擾乱とみなすかを天気図のみで判断することは困難である。そこで本研究では運輸省港湾技術研究所で採用している高波の基準を参照し、上限値と下限値を表 - 1 のように設定する。数値は全て有義波高であり、上限値を超える波高を高波と扱い、下限値を越える波高の期間をその高波の発生期間とする。

表-2 気象擾乱別の高波のデータ数

観測地点	全データ(個)	台風のみ(個)	台風以外(個)
波浮	409	83	326
下田	170	48	122
御前崎	151	62	89
潮岬	385	88	297
御坊沖	357	80	277
室津	135	50	85
宮崎	210	71	139
油津+宮崎	530	138	392
油津	343	77	266
志布志	320	123	197
中城湾	404	178	226
全体	3414	998	2416

たとえば波浮では、3.0mを超える波高を高波として扱い、その発生期間は波高が初めて2.0mを超えて観測されたときから波高が2.0mを下回る一つ前の観測時までとする。したがって下限値である2.0mを超えていても、上限値である3.0mを超えていない波の場合は高波としての条件を満たさず、対象には含めない。

さらに、この基準のみでデータを摘出すると、極めて短い期間に2つ以上の高波が生じることがある。その場合は経験則ではあるが、起時つまり最大値が観測された時間が48時間以内に起きた2つ以上の事

象については、大きいほうの最大値を取り1つの事象として処理する。以上の方法で抽出した高波のデータ数を表-2に示す。

(3) スプライン曲線によるピーク時欠測の補間

超音波式波高計では、高波浪時の碎波による気泡の激しい巻き込みによって波高計が作動不良となって記録が欠落することがある。ピーク付近で欠測が生じた高波の個数を表-3に示す。この表を見ると、高波の総数に対しては5%程度であるが、ピーク時欠測の時に大きな高波が発生している場合があることがわかる。このため、欠落した部分を前後のデータの変化傾向で補完することを考え、スプライン曲線のあてはめを行った。なお、あてはめの方法は前報に従った。

表-3 ピーク時欠測に対するスプライン補間

観測地点	ピーク時欠測個数	補間個数	ピーク時欠測中の実測最大	無欠測時のデータ中の最大	平均波高増加率(%)
波浮	15	9	6.74	8.36	106.79
下田	1	0	2.20	6.57	
御前崎	6	5	5.49	5.71	106.03
潮岬	21	15	8.99	9.07	108.16
御坊沖	6	4	3.49	11.37	103.31
室津	6	4	5.63	9.45	108.7
宮崎	5	4	5.69	10.75	108.83
油津+宮崎	(16)	(14)	6.85	10.75	(107.55)
油津	11	10	6.85	10.34	107.04
志布志	7	7	5.70	8.30	108.47
中城湾	18	8	8.39	10.63	109.36

3. 極値分布関数と判定基準

高波の極値統計解析は、合田(1990)の提案する方法に従って実施した。極値分布関数の候補は、以下の9種類である。

1) FT- I 型分布

$$F(x)=\exp\{-\exp(-\frac{x-B}{A})\} : -\infty < x < \infty \quad (1)$$

2) FT- II 型分布 (4種 : $k = 2.5, 3.3, 5.0, 10.0$)

$$F(x)=\exp\{-(1+\frac{x-B}{kA})^{-k}\} : B-kA < x < \infty \quad (2)$$

3) ワイブル分布 (4種 : $k = 0.75, 1.0, 1.4, 2.0$)

$$F(x)=1-\exp\{-(\frac{x-B}{A})^k\} : B \leq x < \infty \quad (3)$$

ここに x は波高の極値、 $F(x)$ は非超過確率、 A, B, k はそれぞれ尺度母数、位置母数、形状母数である。なお、FT- I 型分布はFT- II 型分布の $k = \infty$ の場合に相当する。

適合の判定は前報と同様にMIR基準、棄却判定はREC基準、DOL基準に従った。

4. 高波浪データの欠落への対応

各港の上位の高波を見てみると、実測最大値が大きいもののピーク値が推定できないため、棄却されてしまうデータがいくつかある。これら上位の棄却データは解析結果に大きな影響を与えるので、その取り扱いが問題となる。そこで、本研究ではこれらの順位を空欄にして解析することにした。例として表-4 に中城湾の上位10位の高波データを示す。2位の高波は実測では3位であるが、スプライン補間す

表-4 中城湾の上位波高

順位	発生期間	起時	実測最大値(m)	周期(s)	欠測有無	気象観測所	スプライン補間結果
1	1997/8/14~8/20	1997/8/17	10.63	103	有	T9713	—
2	1986/8/23~8/28	1986/8/26	8.39	125	有	T8614, 15	9.90
3	1991/9/7~11/25	1991/9/13	8.74	98	有	T9117	—
4	1990/8/24~9/4	1990/8/29	7.89	109	無	T9015	—
5	1990/10/4~10/6	1990/10/5	7.85	114	有	T9021	—
6	1990/9/13~9/18	1990/9/17	7.67	124	有	T9018, 19	—
7	1983/9/23~9/28	1983/9/25	7.53	132	有	T8310	棄却
8	1996/7/24~8/2	1996/7/30	7.39	115	有	T9609	—
9	1981/8/29~9/2	1981/8/30	7.34	122	有	T8118	棄却
10	1997/6/24~6/28	1997/6/27	7.34	80	有	T9708	—

ることによって2位の高波となった。7位と9位の高波は実測で7.53m、7.34mと大きな値を示しているが、スプライン補間でピーク値を推定できなかったため棄却とした。この場合7位と9位は高波データを空欄とし、高波の総個数を $N = 404 + 2 = 406$ として、404個のデータに対して最小2乗法を適用した。

5. 太平洋南岸の高波の極値統計解析結果

(1) 当初の高波基準値での解析結果

当初の高波基準値で解析をまとめて表-6~8に示す。使用している記号の説明を表-5に示す。

まず、全データを一括して取り扱った表-6の結果では、ワイブル分布 ($k = 0.75$) がどの地点でも棄却されず、しかも最適合の場合が多い。すなわち、共通の母分布関数であるように見える。

表-5 極値データの統計解析結果の記号説明

記号	分布関数	記号	適合・棄却判定
A	FT-II型 ($k = 2.50$)	◎	MIR基準による最適合分布
B	FT-II型 ($k = 3.33$)	○	MIR基準による次点の最適合分布
C	FT-II型 ($k = 5.00$)	◇	棄却基準に該当しない分布
D	FT-II型 ($k = 10.00$)	▲	REC基準により棄却される分布
E	FT-I型分布	▼	DOL基準により棄却される分布
F	ワイブル分布 ($k = 0.75$)	■	両基準により棄却される分布
G	ワイブル分布 ($k = 1.00$)		
H	ワイブル分布 ($k = 1.40$)		
I	ワイブル分布 ($k = 2.00$)		

しかし、台風系の表-7ではFT-II型あるいはワイブル分布 ($k = 1.0$) が母分布関数とみられるのに対し、台風系以外の表-8ではどの分布関数も棄却

表-6 高波極値の全データに対する統計解析結果 (当初の高波基準)

観測地点	N (個)	λ (個/年)	分布関数									高波基準値 (m)	確率波高H100 (m)
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
波浮	409	22.67	■	▼	◇	◇	▲	◇	◎	▲	■	3.0	9.68
下田	170	18.68	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◎	▲	■	2.0	9.97
御前崎	151	17.25	■	▼	◇	◇	▲	◇	◎	▲	■	2.0	8.32
潮岬	385	38.85	■	▼	◎	◇	▲	◇	◎	▲	■	2.0	17.10
御坊沖	357	35.56	◇	◇	◇	▲	■	◎	▲	■	■	2.0	14.82
室津	135	23.77	◇	◇	◇	◇	■	◎	◇	■	■	2.0	13.32
宮崎	210	28.07	◇	◇	◇	▲	■	◎	◇	■	■	2.0	16.25
油津+宮崎	530	25.25	▼	◇	◇	▲	■	◎	▲	■	■	2.0	14.12
油津	343	23.84	◇	◇	◎	◇	■	◎	◇	■	■	2.0	13.95
志布志	320	18.67	▼	◇	◇	▲	■	◎	▲	■	■	1.5	12.25
中城湾	404	19.22	■	▲	◇	▲	■	◎	▲	■	■	2.0	15.05

表-7 高波極値の台風系データに対する統計解析結果 (当初の高波基準)

観測地点	N (個)	λ (個/年)	分布関数									高波基準値 (m)	確率波高H100 (m)
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
波浮	83	4.60	■	▼	◇	◇	◇	▼	◇	◎	▲	3.0	9.57
下田	48	5.27	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	◇	▲	2.0	8.75
御前崎	62	7.09	■	▼	◇	◇	◇	■	◇	◎	▲	2.0	7.93
潮岬	88	8.88	■	■	▼	◇	◇	■	◎	◇	▲	2.0	14.92
御坊沖	80	7.97	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	◇	■	2.0	14.94
室津	50	8.80	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◎	◇	■	2.0	15.68
宮崎	71	9.49	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◎	▲	2.0	15.87
油津+宮崎	138	6.57	■	▼	◇	◎	◇	■	◇	◎	▲	2.0	14.20
油津	77	5.35	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◎	■	2.0	12.98
志布志	123	7.18	■	▼	◇	◇	◇	▼	◇	◎	▲	1.5	11.70
中城湾	178	8.47	■	■	◇	◇	▲	▲	◇	◎	▲	2.0	11.81

表-8 高波極値の台風系以外のデータに対する統計解析結果 (当初の高波基準)

観測地点	N (個)	λ (個/年)	分布関数									高波基準値 (m)	確率波高H100 (m)
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
波浮	326	18.07	■	◇	◇	◇	▲	◇	◎	▲	■	3.0	8.09
下田	122	13.41	■	■	■	▼	▲	■	■	◎	▲	2.0	5.56
御前崎	89	10.17	■	▼	◇	◇	◇	■	◇	◎	▲	2.0	4.63
潮岬	297	29.97	■	■	■	◇	▲	■	▲	◎	▲	2.0	7.41
御坊沖	277	27.59	■	▼	◇	◇	▲	◇	◎	▲	■	2.0	7.66
室津	85	14.96	▼	◇	◇	◇	◇	◇	◎	◇	▲	2.0	6.41
宮崎	139	18.58	■	▼	◇	◇	◇	▲	◎	◇	▲	2.0	6.42
油津+宮崎	392	18.68	■	■	■	▼	▲	■	■	◎	▲	2.0	5.58
油津	266	18.49	■	■	■	▼	▲	■	▼	◎	▲	2.0	5.67
志布志	197	11.49	■	▼	◇	◇	▲	◇	◎	◇	■	1.5	4.71
中城湾	226	10.75	■	◇	◇	◎	▲	▲	◇	▲	■	2.0	5.45

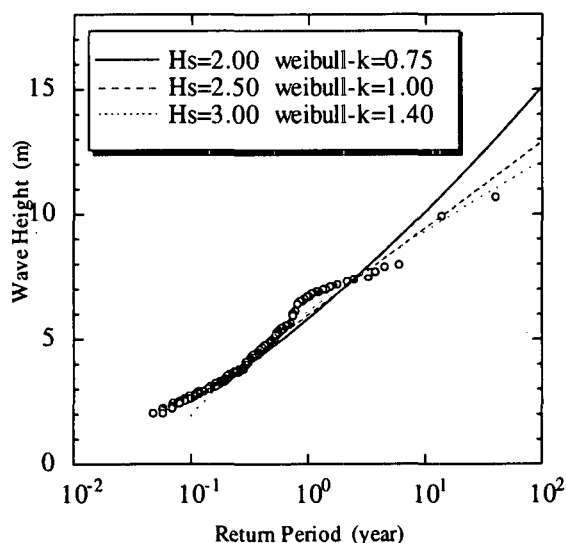


図-1 中城湾の全データに対する極値波高の分布

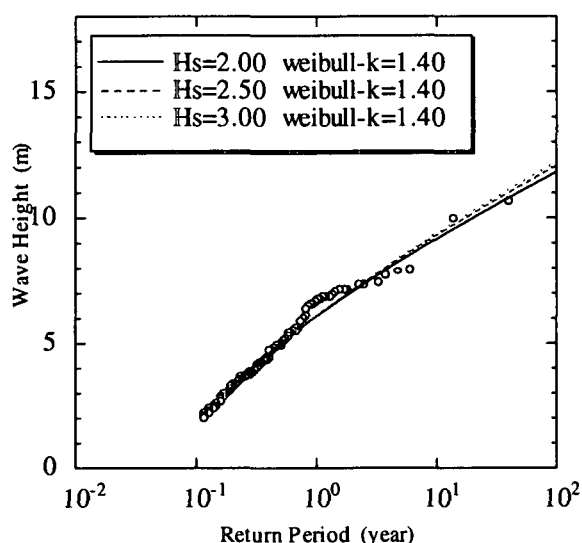


図-2 中城湾の台風系の極値波高の分布

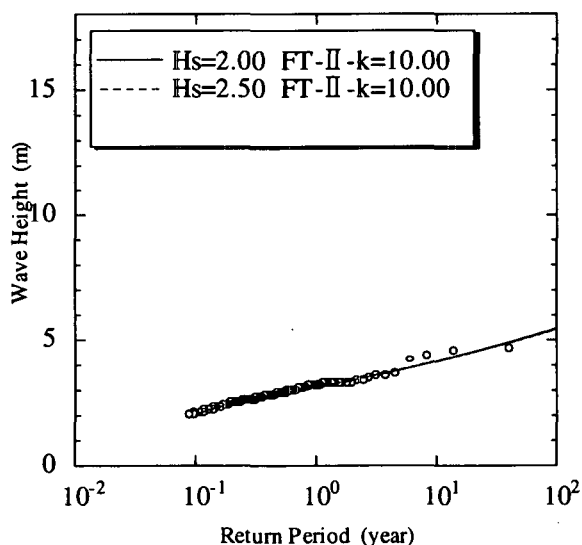


図-3 中城湾の台風系以外の極値波高の分布

される地点があり、共通の母分布関数を見出すことがむずかしい。なお、表-6～8には再現期間100年に対する確率波高を H_{100} として記載しているが、同一地点でも確率波高の値が3つの表によって相異なることがわかる。

こうした点を解明するために、高波基準値 H_s を変えた場合の解析を試みた。その結果、基準波高値を上げるにつれて最適分布関数が変わり、100年確率波高が低下する例が多く見られた。図-1は中城湾の事例であり、基準値を2.0mから3.0mに上げることによって、最適分布がワイブル分布の $k = 0.75$ から $k = 1.4$ に変わってしまう。なお、図の縦軸は有義波高、横軸は再現期間である。データのプロットに際しては、観測された波高データにワイブル分布($k = 1.0$)を当てはめたときの再現期間を使用した。再現期間は分布関数ごとに変わるが、ここでは異なった分布関数を比較するので、最も平均的なワイブル分布($k = 1.0$)を用いた。

図-2, 3は、それぞれ中城湾の台風系および台風系以外の極値波高に分布関数をあてはめた結果である。このように高波のデータを発生原因によって分けて処理すると、高波基準値の影響をほとんど受けないことが分かる。

すなわち、台風系とそれ以外では高波の絶対値に顕著な差があり、極値波高のデータはそれぞれ異なる母集団に属すると考えられる。図-1において高波基準値を変えることによって最適分布関数および確率波高の値が変化したのは、混合集団を一つの集団として解析したためである。今回解析した10港のうちでは、下田、油津、宮崎、志布志が中城湾と同様の結果を示した。波浮、御前崎、室津は単一集団として取り扱っても、高波基準値の影響がほとんど見られなかった。潮岬の場合には、単一集団として扱うと高波基準値を上げるにつれて確率波高が増大し、台風系の高波を分離して解析すると高波基準値の上昇につれて確率波高が低下した。

このように、地点によって状況は異なるけれども、太平洋南岸全体では台風による非常に大きな高波が来襲するので、局地低気圧その他の台風系以外の高波と分離して極値統計解析を行う必要がある。

(2) 台風系の極値解析最終結果

台風系においても高波の基準とする波高によって最適分布関数は変化する。潮岬がその例であった。これは気象擾乱別に分けた際、台風によるうねりなども台風系に含めたためであると考えられる。

全体的に、高波基準値を高くすれば最適分布関数による長期の再現期間に対する確率波高と観測最大値の値が近づくけれども、データ数が少なくなるために棄却判定が難しくなる。そこで、データ数を50個以上に保つように高波基準値を0.5mずつ上げて最適の高波基準値を探索した。ただし室津については、高波基準値を2.00mにすると明らかに確率波高が大きくなりすぎてしまうので、データ数が50個を切ってしまうけれども2.50mを高波基準値とした。

このようにして高波基準値を再設定して解析を行った結果を表-9,10に示す。

表-9 台風系の極値解析最終結果(1)

観測地点	N (個)	λ (個/年)	分布関数									高波基準値 (m)	データ 採得率 %
			A	B	C	D	E	F	G	H	I		
波浮	58	4.60	■	◇	◇	◇	○	◇	◇	◎	◇	3.5	0.70
下田	48	5.27	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◇	▲	2.0	1.00
御前崎	62	7.09	■	▼	◇	◇	◇	■	◇	◎	▲	2.0	1.00
潮岬	55	8.88	■	■	▼	▼	◇	■	▼	◇	◎	3.0	0.62
御坊沖	56	7.97	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◎	◇	◇	3.0	0.70
室津	39	8.80	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◇	▼	2.5	0.78
宮崎	51	9.49	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◇	◇	3.0	0.72
油津+宮崎	101	6.57	■	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	▲	3.0	0.73
油津	66	5.35	◇	◇	◇	◎	◇	◇	◇	◇	▼	2.5	0.85
志布志	70	7.18	■	▼	▼	◇	◎	▼	◇	◇	◇	2.5	0.57
中城湾	112	8.47	■	▲	▲	◇	◇	▲	◇	◎	◇	3.0	0.62

表-10 台風系の極値解析最終結果(2)

観測地点	観測最大 波高 (m)	観測 年数 (年)	100年確率波高(m)				
			最適合 関数	E型 分布	G型 分布	H型 分布	D型 分布
波浮	8.36	23.00	9.74	10.16	10.52	9.7	10.98
下田	6.57	10.00	8.75	7.77	8.75	7.5	8.90
御前崎	6.1	10.00	7.93	8.18	9.12	7.9	9.38
潮岬	9.51	11.00	12.19	14	14.53	13.2	15.63
御坊沖	11.37	15.00	14.85	14.09	14.85	13.2	15.98
室津	9.45	8.00	13.58	11.79	12.62	11.0	13.58
宮崎	10.75	8.00	15.69	13.77	14.52	12.9	15.69
油津+宮崎	10.75	23.00	12.63	12.63	13.3	12.0	14.08
油津	10.34	16.00	12.9	11.09	12.32	11.0	12.90
志布志	8.3	18.00	10.96	10.96	11.33	10.4	12.10
中城湾	10.63	25.00	12.2	12.94	13.46	12.2	14.39

表-9,10を見ても、これだけでは最適な分布関数がはっきりとは決められないことがわかる。台風のデータはデータ数が足りなく、棄却判定を行ってもほとんどが棄却されないことも原因の一つと思われる。そこで、当初の高波基準値を用いて解析した表-7の結果と、高波基準値を再設定して解析した表-9の結果を比較してみると、基準値を高く設定することによって分布関数のFT-I型の適合度が高くなっていることがわかる。すなわち、太平洋南岸の台風系の高波の母分布関数としては、FT-I型分布である可能性が高い。しかしながら、しかし、FT-II型($k=10.0$)、ワイブル分布($k=1.0$)、ワイブル分布($k=1.4$)である可能性も捨て切れない。今後は、

対象とする期間を延長し、波浪追算作業を実施して高波の個数を大幅に増加して解析する必要があるだろう。

6. 結論

本研究では、日本沿岸のうちで伊豆大島の波浮から沖縄本島の中城湾に至る太平洋南岸を対象とし、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の波浪観測データに基づいて高波極値の分布関数について吟味した。主要な結論は以下の通りである。

- 1. この海域では、台風系とそれ以外の高波を分離して極値解析をおこなう必要がある。
- 2. 台風系の高波の母分布関数はFT-I型である可能性が高いけれども、標本の大きさが小さいために明確な結論に至らない。
- 3. 今後は波浪追算のデータを追加し、母分布関数の探求を続ける必要がある。

今回の解析によって、前報の結果と合わせて太平洋全域の高波の極値分布についての知見が得られたので、今後は日本海側の解析を行うことによって日本全域の極値波高統計の特性を明らかにすることが課題となろう。

参考文献

1)小長谷 修 (1998)：太平洋東岸における高波極値分布の統計解析,横浜国立大学卒業論文,pp.1-97.
2)合田良実・小長谷 修・永井紀彦(1998)：極値波浪統計の母分布関数に関する実証的研究,海岸工学論文集,第45巻,pp.211-215.
3)合田 良実 (1990)：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－(増補改訂),鹿島出版会,pp.265-322.
4)永井 紀彦・菅原 一晃・渡邊 弘・川口 浩二 (1998)：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS1996),港湾技研資料 No.894,pp7-323,(1972-1997年の観測年報は同資料 No.137, No.158, No.178, No.209, No.233, No.258, No.282, No.332, No.373, No.417, No.445, No.480, No.517, No.545, No.574, No.612, No.642, No.666, No.712, No.721, No.745, No.770, No.796, No.821, No.859として発行済み。)
5)菅原 一晃・永井 紀彦・橋本 典明・清水 勝義 (1998)：全国港湾海洋波浪観測施設台帳, No.782, pp.160-286.
6)菅原 一晃・永井 紀彦・橋本 典明・浅井 正(1993)：全国港湾海洋波浪観測20ヶ年統計, No.744, pp.1-240.

(1999.4.19受付)