

沿岸波浪の統計的性質について

高橋 智晴*・ 広瀬 宗一**・ 橋本 典明***

1. はじめに

運輸省港湾関係機関では、昭和 45 年以来組織的な波浪観測を実施してきた。観測は毎偶数正時前後各 10 分の 20 分間、サンプリング間隔は 0.5 秒でおこなうことを標準としている。この観測体制では当初 -20m を標準水深とし、ディジタルデータは紙テープ (PT: 純二進コード 250 dig./F.S.) に取得することにより施設整備をおこなった。しかしながら、その後の港湾における調査規模の拡大、観測技術の進歩、また一方における社会的要請を背景として、昭和 53 年度からは観測地点の大水深 (-50m) 化をはかり、ディジタルデータの分解能及び処理効率を高めるために PT に代ってカートリッジ磁気テープ (CMT: BCD, ± 1024 dig./F.S.) を導入して観測体制の整備向上をはかってきた。

観測成果は毎年波浪観測年報にとりまとめ、また 56 年度には昭和 45 年から 54 年の成果を 10 カ年統計報²⁾として公刊してきた。本稿は、これに昭和 55 年の観測成果を加え、沿岸波浪の出現特性を中心としてとりまとめた結果を報告するものである。この 10 年余りの間には観測地点それぞれに経緯があり³⁾、用いたデータには統一性に欠ける面があるが、日本沿岸の波浪の出現特性及び大きさの把握をするには有効な資料となるものと考ええる。

2. 観測状況

沿岸波浪の観測地点数は、昭和 45 年の 14 から徐々に増加して昭和 57 年現在では図-1 に示すように 37 に達している。図中、◎、●、○印で示す地点はそれぞれ測定点の水深が -50m, -30m, -20m 前後であることを示す。また、下線を付した 21 地点は長期統計量を算出するのに対象とした地点を示す。これら 21 地点の平均観測期間は約 7.9 年である。なお、酒田、八戸では観測期間の途中で水圧式波高計から超音波式波高計へと観測機種が変更されているが、長期間の統計量を重視してこ

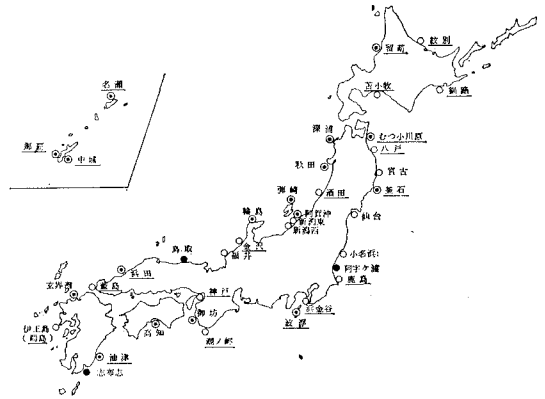


図-1 沿岸波浪観測地点位置図

れらを同等として取扱うこととした。また、伊王島は端島から波高計を移設して現在も観測を継続しているが、データ資質を考慮して両者を区別し、伊王島のデータは沿岸波浪の出現特性を考察する時には対象から除外することとした。

図-1 に示す地点の内、水圧式波高計で観測しているのは潮ノ岬、伊王島の二地点、Buoy を用いて観測しているのは高知、秋田の二地点であり、他の地点ではいずれも超音波式波高計を用いて観測を実施している。

これ迄の沿岸波浪の観測の歴史における最大波浪は台風第 8013 号来襲時に得られており、高知では $H_{1/3}=10.9$ m、油津では $H_{1/3}=10.34$ m の記録がある。

3. 沿岸波浪の特性

3.1 代表波諸元間の関係

水位変動 η が正規分布に従い、周期が狭帯域に分布すると仮定すると、波高の分布は Rayleigh 分布に従うことが示される⁴⁾。この Rayleigh 分布を出発点とすると、各種の代表波の波高間の関係が次式をもとに与えられる。

$$H_{1/n} \doteq \eta_{rms} \left[2\sqrt{2} \sqrt{\ln n} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\ln n}} \left\{ 1 - \frac{1}{4 \ln n} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 η_{rms} は η の標準偏差である。

(1) 式より、

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部 海象観測研究室長
 ** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 主任研究官
 *** 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 水工部 高潮流波研究室

$$\left. \begin{aligned} H_m &= 2.507 & \eta_{rms} &= 0.626 H_{1/3} \\ H_{1/10} &= 5.090 & \eta_{rms} &= 1.27 H_{1/3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

最高波高 H_{max} については $H_{1/3}$ に対する比の期待値として次式により与えられる。

$$(H_{max}/H_{1/3}) \div 0.706 \{ \sqrt{\ln N} + \gamma / (2\sqrt{\ln N}) \} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 N は波の数、 γ はオイラー常数(=0.5772...)である。

表-1 には、観測データ ($H_{1/3} \geq 1.0\text{m}$) をもとに得られた代表波の波高、周期それぞれの関係を機種、水深別に示す。表中、() 内に示した数字は標準偏差である。観測機種欄の PW, SGW, USW はそれぞれ水圧式摺動抵

表-1 代表波諸元間の関係

観 測 機 種	(1) PW	(2) SGW	(3) USW (水深 -15~-50m)	(4) USW (水深 -15~-30m)	(5) USW (水深 -50m)	(6) USW-CMT (水深 -50m)	
対 象 地 点	酒田, 潮ノ岬	八戸, 端島, 伊王島	(4)+(5)	酒田, 金沢, 八戸, 鹿島, 浜金谷, 藍島	小川原, 波浮, 釜石, 浜田, 油津, 名瀬, 那覇, 中城	小川原, 波浮, 浜田, 油津, 名瀬, 那覇, 中城	
サ ン プ ル 数	9129	3020	139393	61942	77451	5898	
波 の 数 の 平 均	117.7	106.2	157.4	162.1	153.6	181.3	
代 表 波 諸 元 間 の 比	$H_m/H_{1/3}$	0.638 (0.055)	0.641 (0.129)	0.639 (0.034)	0.638 (0.043)	0.640 (0.024)	0.635 (0.023)
	$H_{1/10}/H_{1/3}$	1.292 (0.165)	1.301 (0.158)	1.247 (0.044)	1.247 (0.045)	1.247 (0.043)	1.249 (0.037)
	$H_{max}/H_{1/3}$	1.696 (0.497)	1.691 (0.420)	1.603 (0.166)	1.604 (0.156)	1.603 (0.173)	1.632 (0.171)
	$T_m/T_{1/3}$	0.989 (0.049)	0.981 (0.069)	0.856 (0.055)	0.844 (0.055)	0.866 (0.055)	0.847 (0.051)
	$T_{1/10}/T_{1/3}$	0.997 (0.046)	0.997 (0.052)	1.020 (0.066)	1.027 (0.069)	1.015 (0.064)	1.017 (0.052)
	$T_{max}/T_{1/3}$	0.993 (0.117)	0.989 (0.128)	1.021 (0.198)	1.032 (0.217)	1.012 (0.182)	1.015 (0.185)

抗型波高計、水圧式抵抗歪線型波高計、超音波式波高計を意味し、USW-CMT とあるのは USW で観測し、かつ CMT でデジタルデータを取得していることを示す。

表によると、超音波式波高計で観測する場合には、水深の影響は -15m 以深になると周期比にわずかに現われるが波高比にはほとんど現われない。水圧式波高計と超音波高計による結果を比較すると、 $H_m/H_{1/3}$ については両者でほとんど変わらず、理論値よりいずれも大きめである。 $H_{1/10}/H_{1/3}$ 、 $H_{max}/H_{1/3}$ については水圧式波高計で大きく、理論値は両者の中間的な値を示している。これらから、水圧式波高計を用いた場合の波高の分布は、理論分布に比べて波高の大きい方に長くすそ野をひいた分布になり、一方超音波式波高計による場合には逆に波高の大きい方で急に落ち込むような分布になることが考えられる。

周期比については、水圧式波高計による場合は代表波諸元間であまり変わらない結果になっており、超音波式波高計による場合にはほぼ $T_{1/3} = 1.18 T_m$ 、 $T_{max} = T_{1/10} = 1.2 T_m$ の関係となっている。

また、水圧式波高計による場合には波高比、周期比共標準偏差がかなり大きめとなっている。

3.2 平均有義波による沿岸波浪の特性

図-2 には平均有義波の沿岸分布を示す。図中、平均有義波に重ねた白ぬきの棒グラフは標準偏差を表わす。図によると、平均有義波高が大きいのは関東地方の南東岸に位置する波浮、鹿島で、それぞれ 1.5、1.4m 程度となっている。他の沿岸ではおおむね 1m 程度であるが、東北地方～北海道の太平洋岸及び東シナ海でやや小さめ、日本海中部沿岸でやや大きめとなる傾向がみられる。

周期については、太平洋岸では 7~8 秒程度である。

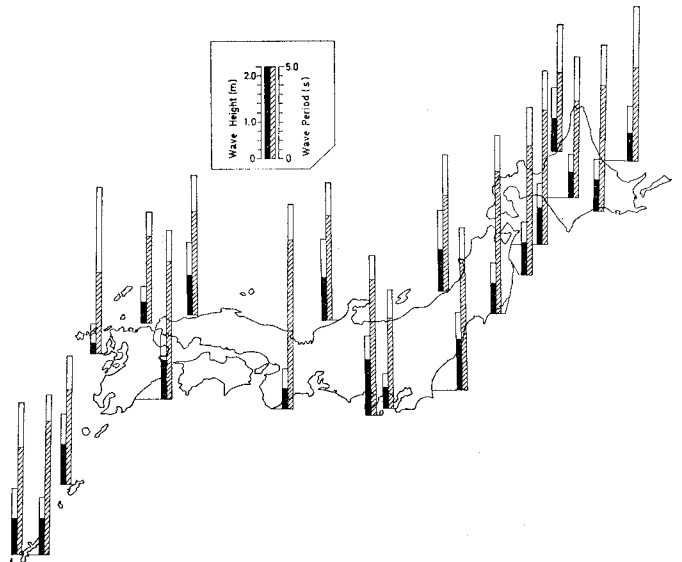


図-2 平均有義波の分布図

日本海沿岸ではほぼ 5.5 秒前後であるが北海道の西岸では 4.3 秒とかなり短くなる。その他、オホーツク海沿岸では 5 秒程度、東シナ海沿岸では 6 秒程度となっている。

波高、周期の標準偏差は日本海で大きく、特に波高については標準偏差と平均有義波高がほぼ同等となっている。これは、本稿には示していないが、太平洋岸では平均有義波に季節変化があまり顕著にみられないが、日本海沿岸では、たとえば酒田を例にとると、もっとも平均有義波高の大きい 1 月の 2.25m からもっとも小さい 7 月の 0.38m 迄季節によって出現波浪の大きさが大きく変動することが一因と考えられる。

3.3 波浪の継続時間による沿岸波浪の特性

波浪の継続時間を考える場合に、常に問題となるのは欠測期間の取扱いである。本稿では、半日以下の連続欠測期間に対してはこの間を直線補間し、これよりも長期にわたる連続欠測期間に対しては継続時間に算入しないこととした。図-3 には、 $H_{1/3}=3\text{m}$ に対する超過継続時間 (storm duration) の季別出現頻度及び総出現日数 (平均継続時間×出現頻度) を、図-4 には、 $H_{1/3}=1\text{m}$ に対する未超過継続時間 (calm duration) の季別平均継続時間及び総継続日数を示している。なお、図-3 及び 図-4 は共に年平均に対して作成している。

(1) 超過継続時間

日本海沿岸：年平均出現頻度はほぼ 50 回前後であるが、北海道西岸ではやや少なく 30 回程度となる。年平均総継続日数は、北陸～東北地方では 30 日前後、中国地方及び北海道西岸では 15 日前後である。季別では、出現頻度、総継続日数共冬季で圧倒的に多く、いずれも 1 年の 2/3 程度を占める。ただし、北海道西岸ではこれが 1/2 程度に減り秋季とほとんど同等となる。夏季は皆無である。平均継続時間は、北海道西岸、中国地方でやや短いもののほぼ 12 時間であり、季節による変動は少ない。

オホーツク海沿岸：年平均出現頻度は 15 回程度、総継続日数も 1 週間程度と、いずれも北海道西岸の半分程度であるが季節の特性は類似している。

東シナ海沿岸：平均出現頻度は 30 回前後、総継続日数は 10～15 日前後と、中国地方の日本海沿岸とほぼ同等であ

る。季別ではやはり冬季が多く 1 年の 1/2 程度を占め、平均継続時間は日本海沿岸より全般的にやや短めである。

太平洋沿岸：年平均出現頻度は関東地方の南東岸に位置する波浮、鹿島で圧倒的に多く、それぞれ 50、35 回程度である。この他では小川原、油津で 15～20 回とやや多いがこれを除けばおおむね 10 回程度である。総継続日数もやはり波浮、鹿島で多く、共に 15 日前後である。季別では全体的に年平均出現頻度、総継続日数共秋でやや多く 1 年の 1/3 程度を占め、冬季、春季はほぼ同等である。しかし、九州～南西諸島では冬季、春季に少なく、秋季、夏季で多くなる傾向がみられる。平均継続時間は季節及び海域によってかなり変動する。すなわち、九州～南西諸島では秋季 (13 時間)、関東地方南岸では夏季 (10 時間)、関東地方以

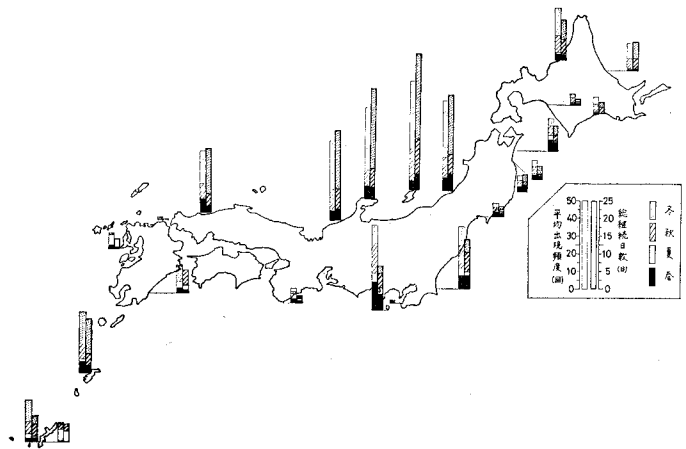


図-3 超過継続時間に関する統計量の分布図

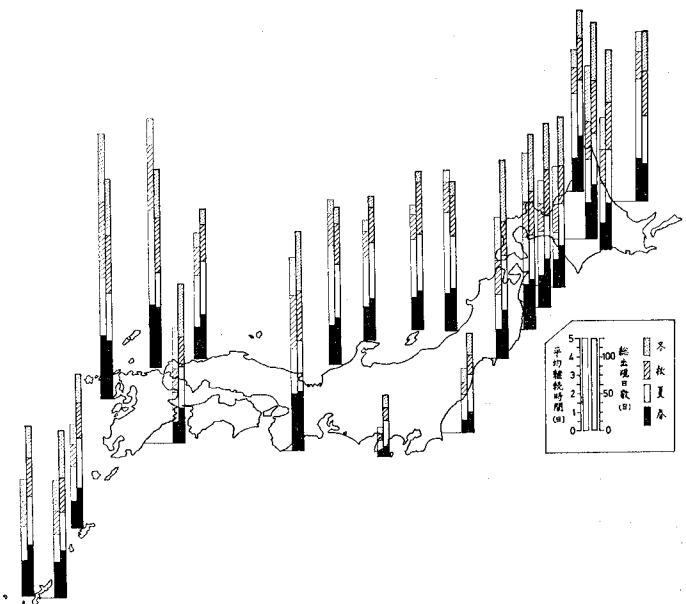


図-4 未超過継続時間に関する統計量の分布図

北では冬季(15時間),春季(10時間)で長い。

(2) 未超過継続時間

日本海沿岸: 年平均総継続日数は,北海道西岸でやや多いがおおむね200日前後である。季節では冬季が際立って少なく15~20日程度である。ただし,北海道西岸では40日程度と比較的多くなる。全般的に夏季は他季に比べて多く75日前後ある。平均継続時間は夏季で長く3~4日,冬季では短く4.5日程度である。

オホーツク海沿岸: 年平均総継続日数は北海道西岸に比べて冬季でやや多くなるもののほとんど同等である。平均継続時間は冬季で1日,夏季で4~5日程度であり,日本海沿岸よりやや長い。

東シナ海沿岸: 年平均継続日数は200日前後である。季節では冬季にやや少なく,夏季にやや多くなる傾向がみられるが顕著な季節変化は示さない。平均継続時間は冬季で1日,夏季で2日程度である。

太平洋岸: 年平均継続日数は関東地方南岸で少なく,波浮,鹿島でそれぞれ100,150日程度である。これをはさむ東北地方~北海道及び九州~南西諸島ではこれよりかなり多くそれぞれ250,200日程度となる。季節に考えると,波浮では夏に多く50日,他季では15日前後,鹿島では夏で50日,他季で25~30日となっている。他の地域ではいずれの季節も50~80日で波浮,鹿島ほど顕著な季節変化を示さない。平均継続時間は波浮でもっとも短く,もっとも長い夏季でも12時間,他季では8時間程度である。鹿島では総じて波浮の2倍程度長くなる。他の地点では多少ばらつきはあるが,冬季で2日,他季では1.5日前後となっている。

3.4 確率波高による沿岸波浪特性

Petruaskas と Aagaard⁵⁾ は,設計波高を推定するために storm data に二重指数分布を適用することにより

外挿する方法を示している。しかしながら,この方法を実測値に適用する場合には欠測期間の補正が問題となる。合田ら⁶⁾はこのための方法を示しており,補正された統計期間を有効統計年数と呼んでいる。

本稿では有義波高の極値時系列に上述の方法を適用することとした。

Petruaskas と Aagaard によると,ある極大波高 H が極大波高 $x_{m,N}$ を越えないという条件付確率 $P[H \leq x_{m,N}]$ は plotting position 公式により算定される,ここに, N はサンプル数, m は N 個のサンプルの内 m 番目に大きい極大波高である。極大波高 x の分布型としては以下のものが考えられる。

二重指数分布:

$$P[H \leq x] = \exp[-\exp(-(x-B)/A)] \dots\dots\dots (4)$$

Weibull 分布:

$$P[H \leq x] = 1 - \exp[-\{(x-B)/A\}^k] \dots\dots\dots (5)$$

ここに, k は形状パラメータであり, 0.75, 0.85, ..., 2.0 (Rayleigh 分布) の7種類が考えられる。式(4),

表-2 有効統計年数及び最良分布型

オホーツク海~日本海 ~東シナ海沿岸			太平洋岸		
地点名	有効統計年数	k	地点名	有効統計年数	k
紋別	3.94 ^(年)	1.10	釧路	2.58 ^(年)	0.75
留萌	8.36	1.10	苫小牧	9.50	0.85
金沢	9.12	1.50	小川原	6.25	1.50
浜田	9.13	1.50	八戸	8.34	1.25
藍島	5.30	1.50	釜石	2.84	1.10
端島	4.96	1.10	鹿島	7.32	1.10
名瀬	2.59	0.85	波浮	6.43	1.25
那覇	3.62	1.50	(浜金谷)	8.22	1.50
	6.53	1.50	潮ノ岬	8.35	1.10
			(神戸)	6.86	1.25
			油津	5.15	0.75
			中城	5.12	1.00

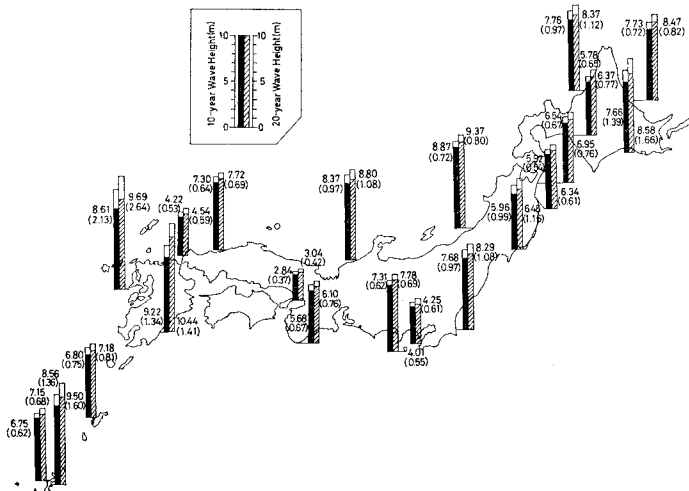


図-5 確率波高の分布図

(5) を線型化することによって通常の最小自乗法を適用することができ,未知パラメータ A, B の値を決めることができる。ある最大波高 H と再現期間の関係は,式(4)あるいは式(5)の分布関数の確率スケールを再現期間のスケールに変換することによって得られる。

図-5にはこのようにして得られた各地点の再現期間10年,20年に対する確率波高及び95%信頼限界(片側)を棒グラフ及び数字により示している。図中,白ぬきの棒グラフ及び()内の数字が信頼限界に対応している。表-2には図-5に示す値を算定するのに採用した分布型,すなわち最良分布型と有効統計年数を示している。

図—5 によると、日本海沿岸では酒田でもっとも大きく、オホーツク海沿岸は北海道西岸と同等である。東シナ海は日本海沿岸でもっとも小さい中国地方よりもやや小さめである。太平洋沿岸では、九州～南西諸島、関東地方東岸、北海道東岸でピークとなっている。この中で、台風第 8013 号により $H_{1/3}=10.34\text{ m}$ の高波を観測した油津でもっとも大きく、20 年確率波高が 10m を越えている。

表—2 の最良分布型によると、日本海及び東シナ海では Weibull 分布の指数 $k=1.50$ が多く、北海道西岸、オホーツク海では $k=1.10$ となる。太平洋岸ではややばらつくが、小川原で $k=1.50$ 、八戸、波浮で $k=1.25$ の他はいずれも 1.10 以下である。

3.5 沿岸波浪観測データからみた海域区分

(1) 太平洋岸

- ① 南西諸島～四国南岸 主として台風により高波がもたらされる。大型台風の来襲時には波高が 10m (有義波高、以下同様) を越える。
- ② 近畿～東海地方沿岸 主として台風、及び日本海低気圧と南岸低気圧に伴う前線により高波をもたらされる。日本海低気圧に伴う前線によっても 4～5 m の高波の出現することがしばしばある。
- ③ 関東地方南東岸 主として南岸低気圧の通過により高波をもたらされる。南岸低気圧は東進するに従い急激に発達するため時には 7m を越える高波が来襲する。また、この沿岸では発達した日本海低気圧に伴う前線の通過によっても 6m 程度の高波が出現する一方、はるか東方海上を通過する台風によっても 5m を越えるうねりがもたらされることがあり、太平洋岸ではもっとも高波の出現頻度の大きい海域である。
- ④ 東北地方沿岸 主として南岸低気圧、及び本州北部を横切って北東進する日本海低気圧によって高波がもたらされる。全般的に(特に前者の場合)、うねり性の波浪が卓越し、これらによってもたらされる波浪は 6m 前後に達することがある。
- ⑤ 北海道東岸 主として日本海低気圧、及び列島沿いに北東進してくる南岸低気圧によって高波がもたらされる。その他、台風が列島を縦断し北海道の東海上を通過する場合には 7m を越える高波が来襲することがある。

(2) 日本海沿岸

- ① 中国地方沿岸 主として日本海低気圧の通過、冬型気圧配置により高波がもたらされる。また、九州～四国を北上してきた台風によっても 6m 前後の高波の出現することがある。
- ② 北陸～東北地方沿岸 主として冬型気圧配置により高波がもたらされる。その他、列島を縦断する台風によっても、能登半島以東の沿岸では 7m を越える高波の出現することがある。
- ③ 北海道西岸 主として日本海低気圧の通過によって高波がもたらされる。日本海沿岸では高波の出現頻度はもっとも低い。
- (3) オホーツク海沿岸 全般的に北海道西岸と類似しているが、北海道西岸に比べてややうねり性の波浪が卓越する。
- (4) 東シナ海沿岸 主として台風、冬型気圧配置により高波がもたらされる。前者によりもたらされる波浪が大きいのは当然であるが、後者によっても大きい時には 5～6m の波浪が出現する。

4. あとがき

約 10 年にあたる沿岸波浪の観測データをもとに日本沿岸の波浪の出現特性を中心として概観してみたが、各観測地点間には、観測期間、水深、観測機種等にばらつきがあり、さらに観測地点のほとんどない地点もあるため、全国的に沿岸波浪の特性を把握するためには基礎データの不十分さは否定できない。また、日本沿岸に來襲した高波の頻度、大きさについては昭和 45 年前後、昭和 55 年がピークであるが、大型台風と称し得る台風はこの間ほとんど来襲していない。これらの影響については今後の沿岸波浪観測網の充実により徐々に減じ、本稿に示す結果をより普遍性を有するものにしてゆく所存である。

参考文献

- 1) 広瀬・佐々木・高橋: 港湾技研資料, No. 400, 1981.
- 2) 高橋ほか: 港湾技研資料, No. 401, 1981.
- 3) 高橋・菅原・広瀬: 港湾技研資料, No. 418, 1982.
- 4) Longuet-Higgins, M. S.: Jour. Mar. Res., Vol. XI, No. 3.
- 5) Petruaskas, C. and Aagaard, P. M.: Soc. Petrol. Eng. Jour., 1971.
- 6) 合田・阿部: 第 5 回港湾技研研究発表会概要, 1967.