

台風による二山型スペクトルを有する現地波浪の諸特性

永井康平*, 小沢大造**, 岸良安治***, 西村達郎****

1. まえがき

比較的閉鎖的な湾において台風等の気象擾乱時に出現する波浪は湾外から侵入するうねりと湾内で発生する風波とが重畳したものである。このような波浪についてスペクトル解析を施すと複数のピークを有するスペクトルが得られ¹⁾, 通常の単峰型のスペクトルを有する波浪とはその特性の異なることが考えられる。従来このような湾内での港湾海岸構造物の計画・設計に当っては、重ね合わせ法により推定する手段がよく使われてきたが^{2), 3)}, そういう波の実態を観測した例は少ない^{4), 5)}。

れこで著者らは台風による各種の波浪データを取得すべく、沖縄本島東南部に位置する中城湾の内外で現地波浪の観測を行なってきたが⁶⁾, 今回台風接近時に湾内で二山型スペクトルを有する波浪を観測することができた。

本稿はこの観測データを基にその波浪の特性を明らかにすることを目的としたもので、ここではその観測および解析結果の一部を報告するものである。

2. 現地観測の方法

現地波浪観測を実施した中城湾は、図-1に示すように東西約 15km, 南北約 20km の湾であり、その東側が大小の島々と極めて水深の浅い珊瑚礁によって囲まれた閉鎖的な水域となっている。外海から湾内に侵入する波の主な入口は津堅島と久高島との間のニツロである。波浪観測点は湾外に 1ヶ所（津堅島沖合 2km, St. 1）、湾内北部に 2ヶ所（St. 2, St. 3）設けた。使用した波高計はいずれも超音波式波高計（海上電機社製）である。設置水深は St. 1 が約 50m, St. 2 が約 30m, St. 3 が約 15m である。

観測方法は毎時の 20 分間としたが、湾内の波高計については湾外からの侵入波の伝播時間を考慮して観測開始時刻を湾外よりもそれぞれ 10 分, 15 分遅らせた。取

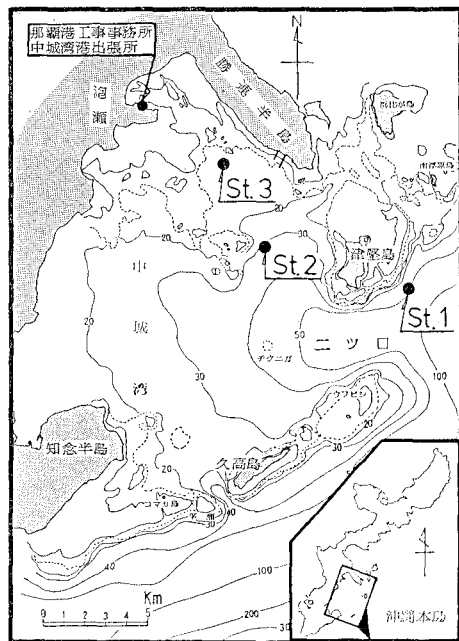


図-1 調査海域及び波浪観測地点位置図

得した水位データはサンプリングタイムを 0.5 秒とし、磁気テープに収録、電算機を用いて処理した。個々の波はゼロアップクロス法により定義した。スペクトル解析は FFT 法を用い、データ個数は 2048 個とした。なお観測期間は昭和 60 年 8 月～10 月の約 3 ヶ月間である。

3. 観測結果および統計処理

今回の観測期間中、沖縄本島に接近した台風は 4 ケース見られたが、顕著な二山型スペクトルを有する波浪が湾内で観測できたのは台風 8509 号と台風 8511 号の 2 ケースであった。

(1) 台風の規模と経路

台風 8509 号と 8511 号の経路を図-2に示す。8509 号は 8 月 12 日の早朝、沖縄本島に極めて近い南方海上で発生した中型の台風で、沖縄本島の東側を北上し本島と奄美大島の間を通過した。本島では台風が接近した 12 日の夕方から夜半にかけて 10 m/s を越える西ないし南

* 正会員 工修 運輸省港湾局防災課災害対策室室長

** 沖縄総合事務局港湾計画課課長

*** 第四港湾建設局鹿児島港工事事務所工事専門官

**** 正会員 (財)日本気象協会沖縄支部

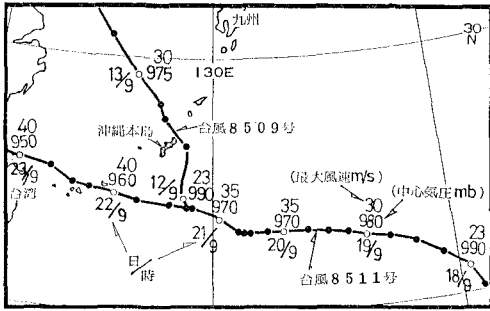


図-2 台風 8509 号及び台風 8511 号の経路図

西風が吹いた。最接近時の台風の規模は中心気圧が 990 mb, 最大風速が約 23 m/s であった。

8511 号は 8 月 18 日の未明、沖の鳥島の東方海上で発生しそのまま西進しながら沖縄本島の南岸に接近した大型の並みの台風で、接近時の 21 日の夕方から翌 22 日の早朝にかけて 15 m/s を越える東風が長時間吹き荒れた。最接近時の台風の規模は中心気圧が 970 mb, 最大風速が約 35 m/s であった。

(2) 湾内外の波浪の経時変化

前記の台風によって出現した湾内外の波浪について、有義波の波高 ($H_{1/3}$) および周期 ($T_{1/3}$) の経時変化を図-3 に示す。図の上段には沖縄気象台での平均風向 (矢印)、平均風速 (U) と気圧 (P) を示している。図の左側半分は 8509 号、右側は 8511 号のケースを示している。

8509 号の場合、湾外では 3 m 近い有義波高がみられたのに対し、湾内では 1 m 前後の波高であった。湾内で二山型のスペクトルが観測されたのは 12 日 16 時頃から 13 日 24 時頃までである。

一方、8511 号の場合、湾外では 7 m 近い有義波高が出現したのに対し、湾内では 2 m 以下の波高であった。二

山型のスペクトルは 21 日 19 時頃から 22 日 22 時頃にかけて観測された。

(3) 二山型スペクトル

湾内における二山型スペクトルの例を図-4, 5 に示す。また、これらの波の統計量を表-1 に示している。

図-4 (8509 号) は台風接近時の 12 日の 16 時, 18 時そして 22 時のケースである。図中の記号を付した実線が St. 1, 無印の実線が St. 2, 破線が St. 3 のスペクトルをそれぞれ表す。いずれの図も湾内のスペクトルは明確な二山型となっている。低周波側の一次ピークはその周波数 (0.1 Hz) が湾外のピーク周波数とほぼ一致しており、湾外からの侵入波によるものである。図には参考としてこの侵入波の成分を後述する不規則波の回折計算²⁾により行なった計算スペクトルも示している。また、高周波側の二次ピークは St. 2, 3 と時刻の経過とともに低周波側 (0.5 Hz→0.3 Hz) に移行し、そのエネルギーも増大している。前述の図-3 に示したようにこの時風も 5 m/s から 10 m/s へと増大しており、この二次ピークは湾内で発達した風波によるものである。湾口から侵入するうねりの波向は常に ESE~SE 方向であり、これに対し 16 時と 18 時のケースでは風向 (WSW~W) は逆向であった。

図-5 (8511 号) は左側から 21 日 22 時, 22 日 4 時, 10 時の湾内外のスペクトルである。前二者の湾内外の波はいずれも最盛期のもので、この時の風速は 16 m/s 前後、風向は ENE, E であった。22 日 10 時の St. 1 の波は減衰期のもので、風もやや減衰していた。いずれの図も湾内のスペクトルは二山型となっており、特に湾奥の St. 3 において顕著である。そして、図-4 と同様低周波側の一次ピーク (周波数は 0.09~0.10 Hz) は湾外からの侵入波によるものである。二次ピークの周波数 (0.24~0.26 Hz) から高周波帯においては湾内外ともにスペク

トルがほぼ直線上に一致し、概ね f^{-5} に比例しており、この二次ピークは飽和状態の風波によるものである。なお、湾内での侵入波と風波の波向は概ね同一であった。

4. 侵入波と風波の分離

そこで湾内の二山型の観測スペクトルから侵入波と風波の分離を試みた。分離の方法は一次ピークのスペクトルの高周波側を St. 1 のスペクトルの勾配で近似して、侵入波のスペクトルとし、さらに二山型スペクトル

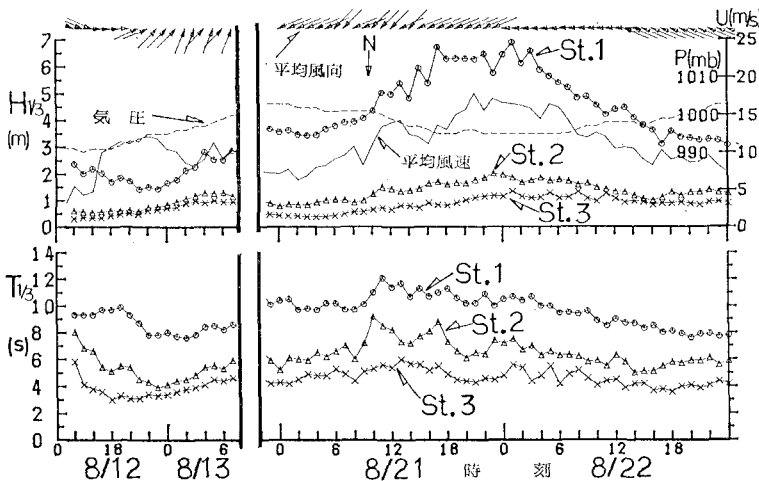


図-3 台風 8509 号, 台風 8511 号による湾内外の有義波の経時変化図

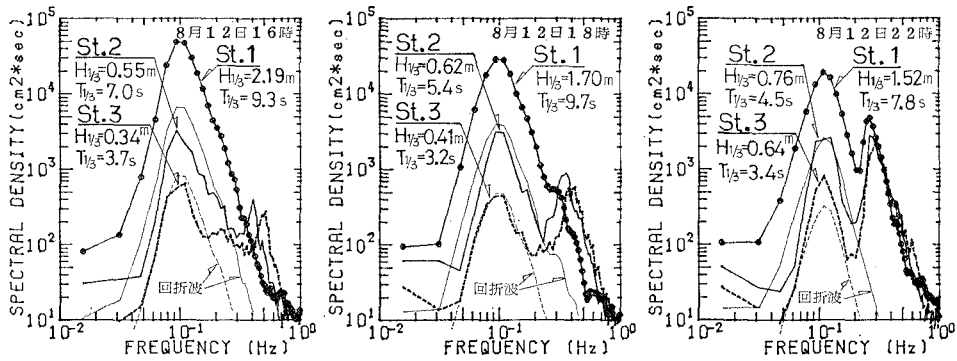


図-4 中城湾内外の波のスペクトルの例(台風8509号のケース)

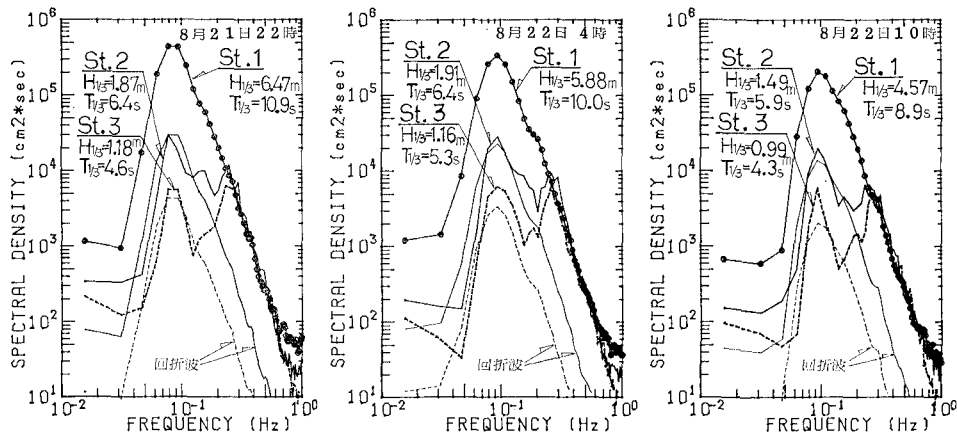


図-5 中城湾内外の波のスペクトルの例(台風8511号のケース)

表-1 中城湾内外の波の統計量の例

台 風	Case	起 時	測 点	η_{rms} (m)	$\sqrt{\beta_1}$	β_2	ϵ_s	Q_p	N_0	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	$\bar{H}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$\bar{T}$ (s)	T_z (s)	$r(H, T)$
8509 号 (8月)	1	12日 16時	1	0.57	—	—	0.878	2.06	144	3.83	2.19	1.42	9.3	9.3	8.2	7.5	—
			2	0.16	0.183	3.03	0.877	1.31	228	1.04	0.55	0.35	9.2	7.0	4.5	4.3	0.741
			3	0.10	0.005	3.29	0.751	1.07	346	0.56	0.34	0.23	7.4	3.7	2.9	2.7	0.476
	2	12日 18時	1	0.46	—	—	0.903	1.87	152	2.76	1.70	1.09	10.1	9.7	7.8	7.3	—
			2	0.18	0.100	3.16	0.815	1.31	263	1.06	0.62	0.40	8.8	5.4	3.9	3.7	0.628
			3	0.12	0.103	3.03	0.670	1.57	369	0.63	0.41	0.28	2.6	3.2	2.8	2.5	0.236
	3	12日 22時	1	0.41	—	—	0.852	1.58	209	2.40	1.52	0.95	8.3	7.8	5.7	5.3	—
			2	0.21	0.029	2.89	0.740	1.68	266	1.16	0.76	0.52	8.2	4.5	3.8	3.5	0.365
			3	0.17	0.155	3.19	0.673	2.17	335	0.96	0.64	0.40	4.3	3.4	3.0	2.9	0.310
8511 号 (8月)	4	21日 22時	1	1.65	—	—	0.884	1.93	132	10.26	6.47	3.92	10.7	10.9	8.9	8.5	—
			2	0.52	0.063	3.04	0.809	1.20	202	3.09	1.87	1.22	8.0	6.4	5.0	4.7	0.531
			2	0.33	0.200	2.94	0.719	1.53	263	1.87	1.18	0.80	3.3	4.6	3.9	3.8	0.422
	5	22日 4時	1	1.48	—	—	0.863	1.86	149	9.30	5.88	3.53	11.4	10.0	7.9	7.9	—
			2	0.52	0.183	3.12	0.805	1.24	206	3.17	1.91	1.21	4.1	6.4	5.0	4.7	0.537
			3	0.32	0.115	2.98	0.760	1.38	249	1.81	1.16	0.75	4.4	5.3	4.1	3.9	0.537
	6	22日 10時	1	1.21	—	—	0.852	1.80	155	6.63	4.57	2.95	9.5	8.9	7.6	7.3	—
			2	0.43	0.008	3.14	0.822	1.25	227	2.70	1.49	0.96	8.7	5.9	4.5	4.4	0.625
			3	0.28	0.199	3.14	0.718	1.53	286	1.59	0.99	0.65	4.7	4.3	3.6	3.5	0.427

(注) η_{rms} , $\sqrt{\beta_1}$, β_2 は波形の標準偏差値, 歪度, 尖鋭度は ϵ_s , Q_p はスペクトルのパラメーター, N_0 は波の数, $r(H, T)$ は波高と周期の相関係数を示す。

から侵入波のスペクトルを差し引いたものが風波のスペクトルであるとして考えた。そして、各々のスペクトルからフーリエ逆変換によって侵入波と風波の水位波形を再現した。その結果、得られた波形の一例を 図-6 に

示す。また、この波形より zero-up cross 法で算出した有義波の波高、周期を前述の6ケースについて 表-2 に示す。

一方、この侵入波は主として二ツ口からの回折波であ

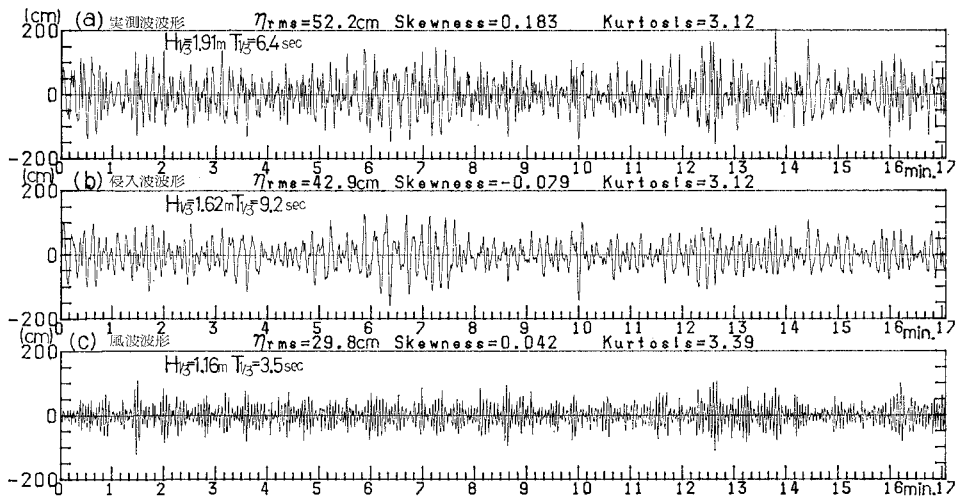


図-6 実測波波形 (a) から分離した侵入波 (b) と風波 (c) の波形 (St. 2, 台風 8511 号, 8 月 22 時 4 時)

る。そこで、津堅島及び久高島とその周辺の珊瑚礁を一種の防波堤とみなし、不規則波の回折計算⁸⁾により湾外からの侵入波の推算を試みた。この時湾口での波高、周期は St. 1 の値を用いた。一方、湾内発生風波は浅海波の推定法の 1 つである Bretschneider 法を用いて推算した。この時フェッチは有効フェッチを用い、また、風はその時刻の 図-3 の値を用いた。推算結果を 表-2 に示す。そこで、各ケースのスペクトル分離波と推算波から求めた侵入波と風波をそれぞれ比較すると、波高、周期ともかなり良く一致していることがいえる。

5. 二山型スペクトル波の諸特性

(1) 実測波高および周期の分布特性

二山型スペクトルが得られた時の各ケースについて、波高および周期の分布を算出した。その結果だけを述べると以下ようになる。

① 湾内外の波高分布は二山型のスペクトルについても近似的にレーリー分布に合うといえる。ただし、湾内では平均波高及びその近辺の波高の度数が湾外の分布と比較して若干増加する傾向がみられる。

② 湾内の周期分布は湾外のそれと比較して平均周期よりも短いもの、また、その 2 倍前後の周期の度数が増加し、全般的に分布が偏平する傾向がみられ、レーリー分布に近い形を呈していることがいえる。

(2) 二山型スペクトル波の合成波高、周期と実測値との比較

例えばうねりと風波が共存する場合、その波浪の波高と周期の代表値は Rice の理論に基づく次式で示すエネルギーの重ね合わせ方式で求めるのが通常である。

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$T = \sqrt{\frac{H_1^2/T_1^2 + H_2^2/T_2^2}{H_1^2/T_1^2 + H_2^2/T_2^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

表-2 中城湾内の侵入波と風波の推定 (有義波高 (m), 有義波周期 (sec))

ケース	起時	平均風向 平均風速 (m/s)	湾 外 波		観測 点	湾 内 波		スペクトル分離波				推 算 波					
			実 測 値			実 測 値		侵 入 波		風 波		侵 入 波		風 波		合 成 波	
			波高	周期		波高	周期	波高	周期	波高	周期	波高	周期	波高	周期	波高	周期
1	12日 16時	WNW 4.8	m 2.2	sec 9.3	2 3	0.6 0.3	7.0 3.7	0.6 0.3	9.1 9.4	0.3 0.3	2.5 2.4	0.8 0.3	10.0 9.9	0.3 0.2	1.9 1.6	0.9 0.4	5.1 3.1
2	12日 18時	W 10.8	1.7	9.7	2 3	0.6 0.4	5.4 3.2	0.5 0.2	9.1 9.3	0.4 0.4	2.7 2.5	0.6 0.2	10.5 10.3	0.7 0.6	2.6 2.4	0.9 0.6	3.3 2.4
3	12日 22時	WSW 12.2	1.5	7.8	2 3	0.8 0.6	4.5 3.4	0.5 0.3	8.0 7.7	0.6 0.6	3.2 3.1	0.6 0.2	8.5 8.2	1.0 0.7	3.1 2.5	1.2 0.7	3.6 2.5
4	21日 22時	ENE 15.7	6.5	10.9	2 3	1.9 1.2	6.4 4.6	1.6 0.6	9.2 11.0	1.2 1.1	3.8 3.8	1.7 0.5	10.4 10.0	1.2 1.0	3.2 2.9	2.1 1.1	5.1 3.2
5	22日 4時	E 14.5	5.9	10.0	2 3	1.9 1.2	6.4 5.3	1.6 0.8	9.2 9.5	1.2 0.9	3.5 3.6	1.5 0.5	9.5 9.2	1.2 0.9	3.4 2.8	1.9 1.0	4.9 3.1
6	22日 10時	E 12.6	4.6	8.9	2 3	1.5 1.0	5.9 4.3	1.3 0.6	8.9 10.1	1.0 0.9	3.6 3.5	1.2 0.4	8.3 7.9	1.2 0.9	3.3 2.8	1.7 0.9	4.4 3.0

ここに, H , T は合成波の波高, 周期, H_1 , T_1 はうねりの波高, 周期, H_2 , T_2 は風波の波高, 周期である。(ただし, 式 (2) は厳密には平均周期に関する近似式である)。そこで, 4 で述べた方法で湾内の二山型スペクトルから侵入波と風波を分離し, これから各代表波の波高, 周期を求め実測波高, 周期との比較により上式の検証を行なった。検証に用いたデータは 8511 号のケースで St. 2, 3 の各々 20 ケースである。その結果の一例を図-7, 8 に示す。図-7 は有義波高, 図-8 は有義波周期の場合である。これらの結果によると, 波高についてはいずれの代表波高も上式を使って求めることができる。しかし, 周期の場合, 平均波周期は 5% 程度の誤差であるが, 他の代表波周期は周期が長くなる程, 誤差が大きくなっており, 例えば $T_{1/3}$ では上式による値は 20% 程度実測値よりも小さい。

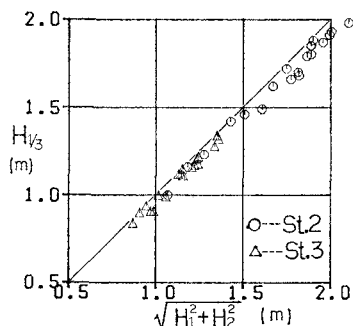


図-7 実測波高と合成波高との比較 (有義波高)

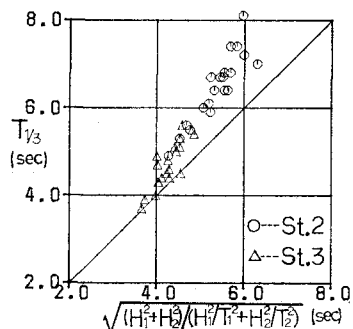


図-8 実測周期と合成周期との比較 (有義波周期)

(3) 全エネルギーと代表波との比較

狭帯域のスペクトル波の場合, 波形の標準偏差値 η_{rms} あるいは波の全エネルギー m_0 と, 代表波高との間には, Longuet-Higgins らによって次のような関係が成立することが示された。

$$H_{1/3} = 4.004\eta_{rms} = 4.004\sqrt{m_0} \dots\dots\dots (3)$$

そこで, 湾内外の観測結果から $H_{1/3}$ と η_{rms} との関係調べてみた。使用したデータは上と同じ 20 ケースである。最小自乗法によるあてはめで求めた結果は, St. 1 の比例係数が, 3.88, St. 2 が 3.61, St. 3 が 3.65 であった。いずれの地点も資料の変動は極めて小さい。このことから湾内の二山型スペクトル波の場合, その比例係数は単峰型スペクトル波の値よりも小さい目であることがわかった。これは, 特に広帯域である湾内の二山スペクトル波の場合, 代表波高をゼロアップクロス法によって算出する際, 長周期波に乗った波高の小さい短周期波が拾われた結果等によるものと考えられる。

スペクトルから求めた平均周期 ($\sqrt{m_0/m_2}$) は実測値よりも平均的に約 5% ほど小さかった。

6. あとがき

今回, 沖縄本島の比較的閉鎖的な湾である中城湾において極めて明瞭な二山型スペクトル波を観測できた。低周波側のピークは湾外からの侵入波, 高周波側のピークは湾内で発生した風波によるものである。

この侵入波と風波をスペクトル上で分離し, 二山型スペクトル波の特性を調べた。その結果, 二つの波浪系の存在する波の波高はエネルギーの重ね合わせ方式による式 (1) を用いて算出できることが確認された。しかし, 周期の算定式 (2) は誤差の生ずることがわかった。

$H_{1/3}$ と η_{rms} との関係については, 二山型の場合, その比例係数は 3.6 程度で通常より小さな値が得られた。

最後に, 本研究にあたり御協力頂いた運輸省港湾技研の谷本勝利防波堤研究室長並びに海象観測研究室小舟浩治室長及び亀山 豊技官に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 合田良実・永井康平・伊藤正彦: 名古屋港における波浪観測第3報, 港湾技術研究所資料, No. 120, 1971.
- 2) 合田良実・永井康平: 大阪湾における台風時の波浪の数値計算, 第16回海岸工学講演会論文集, pp. 75~84, 1969.
- 3) 高山知司: 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 367, 1981.
- 4) 中野猿人・川鍋安次・森下敏之・金谷光三: 大阪湾の波について (第1報), 神戸海洋気象台彙報, 第176号, 1966.
- 5) Ochi, M. K. et al.: On six-parameter wave spectra, Proc. 15th Conf. Coastal Eng. Hawaii, 1976, pp. 301~328.
- 6) 江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎: リーフによる波浪変形の現地観測, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 90~94, 1985.