

現地資料および実測に基づく副振動の特性に関する考察 (2)

村上 仁士*・島田 富美男**

1. 緒 言

港湾の地理的条件や港湾の形状、来襲波の種別によって観測される副振動の特性が大きく異なる。所定の港湾で生ずる副振動の実態を把握し、その特性を明らかにするには、数多くの資料に基づいた種々の角度からの解析が必要とされる。前報¹⁾では、MEM を用いて副振動の記録をスペクトル解析するにあたり問題となるデータ数および予測誤差フィルターの項数の影響について調べ、 $L=20$ とすればデータ数が比較的少ない場合でもかなり高い精度で正しいスペクトルを得ることが示された。

本研究では、太平洋岸の高知港、土佐清水港、瀬戸内海側の松山港、高松港、紀伊水道に面した小松島港、以上の四国の主要港湾を対象にして、検潮記録をもとに種々の要因によって生ずる副振動の実態を把握し、あわせてその特性について考察することにした。

まず、現地資料から、これらの港湾で生じた副振動の波形、波高、周期特性および月別発生回数が調べられた。ついで、各港湾で発生した顕著な副振動に対し MEM に

よるスペクトル解析を行って、各港湾における湾水の振動特性が考察された。以下にその結果を報告する。

2. 四国四県の主要港湾における副振動の発生頻度に関する考察

四国の主要港湾であり、かつ検潮記録がかなりの期間にわたって整理されている高知、土佐清水、松山、高松および小松島の5港湾(図-1)について、気象台から入手した観測資料に基づき副振動の解析を行う。各港湾の概況図と検潮所を図-2に示す。

まず、種々の解析を行うまえに検潮記録にあらわれている副振動の波形(水位変動)の特性について調べる。

不規則に変動している水面の昇降量 η を一定時間間隔 Δt ごとに N 個読み取ると、 η に関する統計量は次式に

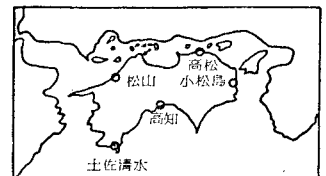
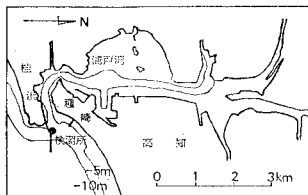
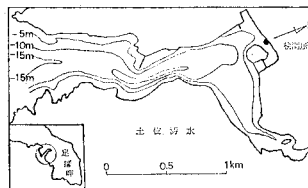


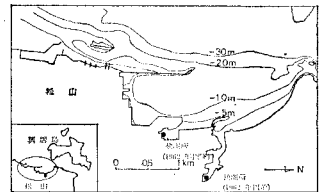
図-1 港湾位置図



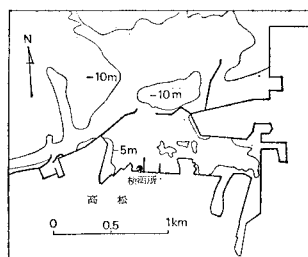
(1) 高知港



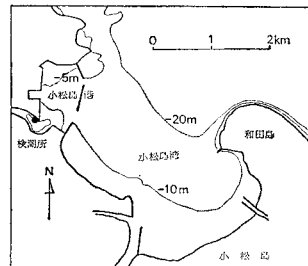
(2) 土佐清水港



(3) 松山港



(4) 高松港



(5) 小松島港

図-2 対象港湾の概況と検潮位置

* 正会員 工博 徳島大学工業短期大学部助教授 土木工学科

** 正会員 工修 阿南工業高等専門学校助手 土木工学科

よって定義される.

平均水位:

$$\bar{\eta} = (1/N) \sum_{i=1}^N \eta_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

標準偏差値:

$$\eta_{rms} = \left[(1/N) \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

skewness:

$$\sqrt{\beta_1} = (1/\eta_{rms}^3) \left[(1/N) \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^3 \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

kurtosis:

$$\beta_2 = (1/\eta_{rms}^4) \left[(1/N) \sum_{i=1}^N (\eta_i - \bar{\eta})^4 \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

skewness および kurtosis は η の度数分布の形状を表わし、波が線形な場合には η が正規分布 (Gaussian) に従い、 $\sqrt{\beta_1} = 0$, $\beta_2 = 3$ となる.

表—1 は、5 港湾における顕著な副振動に対し、読み取り間隔 5 分、最小読み取り精度 1 cm として上記の統計量を求めた結果を示している. この表より、skewness は松山での資料 No. 1 において、-2.212、高松での No. 6 で 0.908 という大きな値を示し、その他の場合でも必ずしも 0 にならず、-0.49~0.55 の範囲にあ

り、 η は厳密には正規分布に従わないことがわかる. なお、合田ら²⁾も浅海性の波浪に対し skewness を求め、その値が 0.632 ± 0.330 という結果を得ており、浅海波の場合には当然のことながら非線形性が強くなることが知れる. 一方、kurtosis はほとんどの場合、4 以上の値をとり、20 以上という値も生じている. 合田らが上記の場合に対し求めた 3.7 ± 0.67 という値と比較しても異常に大きすぎる. これは検潮記録からの最小読み取り可能量が 1 cm、読み取り間隔が 5 分としたため、それ以下の周期の波が実質的には解析上無視されたこと、また全般的に読み取り精度が低いことなどにもよるものと考えられる. いずれにしろ副振動の水位変動は非線形性が強く、スペクトル解析結果の一部に非線形干渉に基因する見掛けの値が含まれる²⁾ことに注意を要する.

(1) 波高に関する考察

気象台の顕著副振動表から、副振動の最大波高の頻度分布を調査し、整理したものを表—2 に示す. なお、() 内の値は宇野木³⁾による調査結果を示している.

a) 高知港: 表より、この港では 10~20 cm の波高の頻度が最も高く、30 cm を越す副振動はほとんど生じ

ないことがわかる. しかし、この港の検潮所は図—2 に示したように湾口にあり、湾水が共振を起した場合でも振動モードの節に近い位置となるため、観測され波高は小さくなるのは当然で、高知港 (浦戸湾) の湾奥部ではこれらの値よりもさらに大きくなると考えられる.

b) 土佐清水港: 他の港湾に比較して波高が大きく 30~40 cm のものが最も多く、ついで 40~50 cm の波高の頻度が高い. しかし、宇野木による調査では 20~30 cm の波高の頻度が高く、調査期間が長くなるにつれて宇野木と同様な傾向に近づくものと思われる. また、この港では波高 1 m 以上にもなることが表から知れる. このように波高が大きくなるのは検

表—1 調査資料

検地 地点	資料 No.	観測期間	気象状況	平均水位 (cm)	標準偏差 (cm)	skew- ness	kurtosis	データ数
高 知	1	1975.12.21 0:00 12:22 20:00	日本海低気圧	-0.585	4.423	-0.283	5.299	540
	2	1977.3.29 0:00 4.1 14:35	移動性高気圧の張り出し	0.006	2.432	0.171	7.594	1040
高 松	1	1970.8.18 15:00 8.23 22:55	台風 7010	0.046	5.770	-0.195	10.143	1536
	2	1971.6.1 0:00 6.9 3:55	低気圧 四国沖通過	-0.147	3.408	-0.092	7.848	2352
	3	1972.1.9 1:00 1.14 6:55	低気圧 南岸通過	0.007	3.279	0.094	4.893	1512
	4	1973.2.21 12:00 3.3 7:55	前線 四国沖停滯	0.344	5.441	0.073	5.859	2832
	5	1975.12.20 17:00 12.22 17:55	低気圧 日本海と四国沖合	-0.155	3.863	-0.170	4.632	588
	6	1968.2.21 9:00 2.23 7:55	日向灘地震津波	0.367	10.728	0.908	16.167	564
	7	1960.5.26 9:00 5.31 7:55	チリ地震津波	-0.162	5.905	-0.067	6.012	1428
松 山	1	1969.4.16 11:00 4.17 10:55	低気圧 四国沖通過	0.083	7.885	-2.212	26.002	288
	2	1971.6.27 8:00 6.30 19:55	低気圧 日本海通過	0.067	3.493	0.547	23.534	1008
	3	1960.5.24 10:00 5.26 21:55	チリ地震津波	0.088	4.102	-0.277	6.228	720
土 佐 清 水	1	1960.5.24 8:00 5.25 16:55	チリ地震津波	0.293	6.232	-0.160	3.976	396
小松島	1	1957.10.29 8:00 10.31 1:55	低気圧	-0.417	3.937	0.229	4.681	504
	2	1960.8.29 8:00 8.30 15:55	台風 6010	0.164	4.305	-0.318	3.890	384
	3	1960.5.24 3:00 5.25 16:55	チリ地震津波	0.432	11.741	-0.487	20.792	2224

表-2 波高別発生回数

地名 波高 (cm)	高 知	土佐清水	松 山	高 松	小 松 島
0~			2	43	64
10~	117		99	10	211
20~	24 (13)	13 (230)	62 (175)	2 (4)	46 (17)
30~	3 (—)	54 (164)	28 (104)	— (—)	16 (1)
40~	— (—)	20 (47)	2 (46)	1 (—)	2 (—)
50~	— (—)	9 (12)	2 (19)	— (—)	— (—)
60~	— (—)	1 (2)	1 (4)	— (—)	1 (1)
70~	— (—)	— (2)	1 (5)	— (—)	— (—)
80~	— (—)	— (—)	— (3)	— (—)	— (—)
90~	— (—)	— (1)	— (2)	— (—)	— (—)
100~	— (—)	— (3)	— (—)	— (—)	— (—)
総 回 数	144 (13)	97 (461)	197 (358)	57 (4)	340 (19)
期 間	'69~'76 ('49~'56)	'70~'76 ('36~'56)	'69~'76 ('50~'56)	'52~'75 ('47~'56)	'52~'75 ('51~'56)
年 数	8 (8)	7 (21)	8 (7)	24 (10)	24 (6)
最大波高	34 cm	68 cm	74 cm	41 cm	157 cm
周 期	15 min	23 min	12 min	54 min	37 min
期 日	1970. 8.21	1970. 2.22	1974. 7.11	1960. 5.24	1960. 5.24
原 因	台風による高潮	前 線	梅雨前線	チリ地震津波	チリ地震津波

潮所が湾奥部に位置することにもよるが、湾形が細長い L 字形で固有周期が明瞭であり、その周期では波高が大きく増幅されるためであろう。

c) 松山港: 宇野木の調査時の発生頻度に比べ、本調査では副振動の発生回数が著しく減少し、大きな波高をもつ副振動の起る回数も少なくなり、10~30 cm 程度の波高が顕著である。調査期間がほぼ同じにもかかわらず発生頻度が低くなった原因は、入江の奥にあった検潮所を約 700 m 離れた現在の位置に変えたこと、さらに 1959 年に港口に防波堤ができたために副振動の発生回数が減少したことなどによるものと思われる。とくに防波堤の効果が主因となることは種々の港で実証されている。

d) 高松港: この港の西防波堤、中防波堤はそれぞれ 1964 年および 1966 年に完成し、宇野木の調査時にはまだなかった。しかし防波堤の有無にかかわらず、波高は小さく、大部分 10 cm 以内で調査期間の長さから考えて発生頻度も決して多くない。

e) 小松島港: 10~20 cm の副振動が卓越し、20~30 cm の波高もしばしば起っている。

(2) 周期に関する考察

副振動が起っている波群のうち、最大波を含む周辺 2~3 波の平均値から平均周期を求め、その頻度分布を図-3 に示した。なお、図中の破線は宇野木の結果である。

a) 高知港: 図より、振動の周期は 20 分周辺に分布し、とくに 20 分周期の振動が卓越していることがわかる。この港(浦戸湾)の湾長を 4~6 km、平均水深を 3~4 m として Merian 周期を求めると基本モードで 49~63 分、2 次モードで約 16~21 分となる。したがって、この港では 2 次の振動モードが最も頻繁に生じているとい

える。

b) 土佐清水港: 20~21 分に顕著なピークがあり、その他の周期に対してはほとんど副振動は生じていない。この港

の湾長を 2.4 km、平均水深を 8 m として固有周期を概算すると、基本モードで約 18 分となる。

c) 松山港: 8~12 分に周期の頻度が高く、とくに 10 分に顕著なピークが認められる。

d) 高松港: この港の振動周期は広い帯域にわたっており、顕著に卓越した振動周期は見い出せないが、16~17 分でやや発生頻度が高い。

e) 小松島港: 高松港と同様、振動周期は広い帯域にわたっているが、12 分、30 分および 40 分に卓越したピークがみられる。

(3) 月別発生回数に関する考察

図-4 は、各月における副振動の平均発生回数を調べたもので、同図の破線は宇野木による結果である。観測年および観測期間が宇野木の調査時と異なるので、直接両者を比較するのは困難であるが、高知港を除く他の港湾では各月とも副振動の発生回数が減少していることがわかる。これは、宇野木の調査時以降に防波堤が設置されたことから副振動の発生回数が減少したのも大きな原因の一つに考えられる。高知港については、宇野木の調査年数が 4.4 年間で著者らのそれは 8 年間である。

地域別にみると、太平洋に面する高知港および土佐清水港における副振動の発生回数は冬に多く夏に少ない。とくに、土佐清水港ではこの傾向が強く表われている。

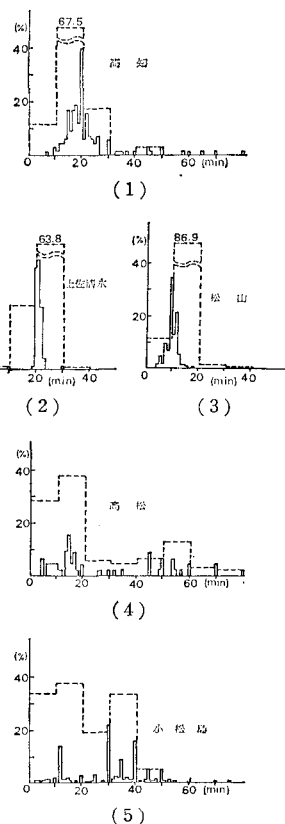


図-3 平均周期の頻度分布

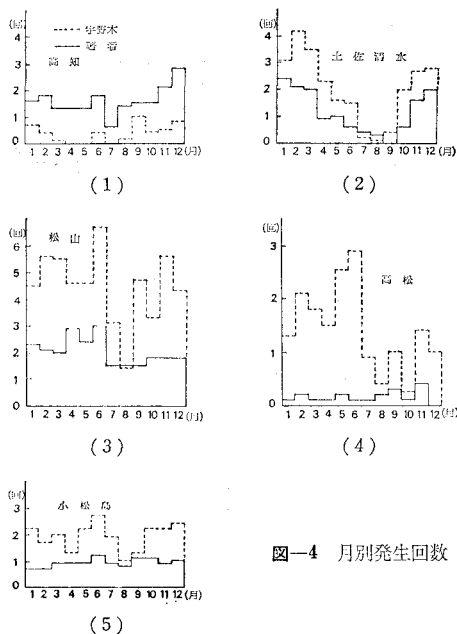


図-4 月別発生回数

松山港では、宇野木の調査(53.8年間)によると、6月、9月および11月に発生回数が多く、8月に少なくなっているが、本調査(8年間)では9月および11月の発生回数がかかなり少なくなっているという違いがある。高松港では、宇野木(17.1年間、波高0cm以上)によれば5月、6月に多く、10月に最も少なくなっているが、本調査(24年間、波高5cm以上)によると11月にやや多くなるものの、各月とも回数自体非常に少ない。小

松島港では梅雨期にやや多く、8月に若干少ないことを除けば一年中ほぼ変化しない。

3. 四国四県の主要港湾における副振動のスペクトル解析

顕著な副振動が起っている潮位記録から、MEMを用いてスペクトル解析を行った結果が図-5に示されている。計算にあたり、前報¹⁾で述べた理由によって、予測誤差フィルターの項数 L の値は20を用いた。用いたデータおよびデータ数は表-1に示している。

(1) 高知港

この港では、60分、27分、22分および17分に顕著なパワーのピークが認められる。このうち60分周期の振動は浦戸湾の基本モードに相当する。平均周期の頻度は20分前後で2次モードの振動が頻繁に生ずることを述べたが、個々の副振動についてみると、基本モードの周期に対応する成分波も2次モードと同程度かそれ以上のエネルギーをもつことが図からわかる。また、潮位振動には外洋の棚セイシュなどの影響も入っている可能性がある。

(2) 土佐清水港

42分、25分、13分のあたりにパワーのピークがあらわれる。1968年の日向灘地震津波以外では港の基本モードに相当する20分でのパワーが最も大きくなる。周期42分の振動については津波のように入力のパワーが大きい場合に、その成分がかかなり増幅されている。日向灘地震津波の場合、周期25分の振動が基本モードの振

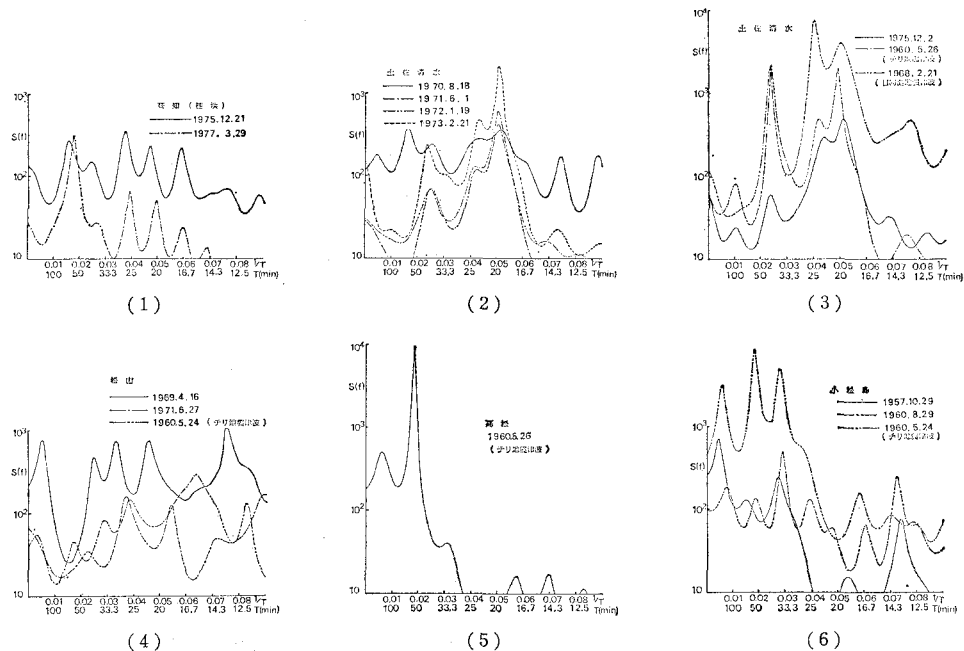


図-5 スペクトル解析結果

動よりも大きなパワーをもつが、他の場合にはそれほど顕著ではなく成分波の非線形干渉の結果として現われたものであるのかも知れない。1970 年の台風 7010 号の場合、基本モードの振動以外にもパワーのレベルが相当大きくなり、高次の振動モードに相当する成分波も大きく増幅されることがわかる。

(3) 松 山 港

平均周期の頻度は 10 分前後に集中していたが、本解析ではデータの読み取り間隔が 5 分であるため、10 分以下の周期については解析できない。松山港の沖合には多くの島が散在しており、こうした地形のところでは種々の振動モードが考えられる。しかし、副振動を発生させる原因によって振動モードが変わるためか、この港の特性値を見い出すことができない。また、ここで計算に用いたデータは非線形性が強く、kurtosis が異常に大きい値を示すことを考えれば、5 分間隔で読み取りを行って求めたスペクトル解析はもはや妥当とは言えないかも知れない。

(4) 高 松 港

この港では、チリ地震津波によるデータのみを解析の対象にした。図によれば 54 分に鋭いパワーのピークがみられるが、解析に用いたデータ数が 396 個と少なく、津波の強制振動の部分も含まれている可能性もある。最大波高が生じたときのこの津波の平均周期は 54 分であったことを考えても上述の推論ができよう。周期 14 分および 17 分でもピークが認められるが、この港の副振動のもつエネルギーは決して大きくないと言える。

(5) 小 松 島 港

35 分、17 分および 14 分にパワーのピークが認められ、

チリ地震津波では 54 分にも顕著なピークがみられる。14 分周期の振動は小松島港の周有振動と考えられ、17 分の振動は入力エネルギーが比較的大きい場合にみられる周期 35 分の倍周波成分に相当している。また、常時 35 分周期の振動がみられるが、小松島だけの規模では起り得ない振動で、紀伊水道の 2～3 節の振動かあるいは棚セイシュによる振動であるかも知れない。

4. 結 言

現地資料に基づき、四国の主要 5 港湾における副振動の実態とその特性について調べた結果、各港湾の副振動の特性がかなり明らかになった。しかしながら、波の非線形に基づく解析上の問題や固有振動の原因、とくに棚セイシュの存在の証明など多くの未解決の問題が残された。今後さらに観測データについて検討する必要がある。

最後に、本研究にあたり御助言、御激励を賜った徳島大学三井宏教授、資料収集に御助力頂いた国鉄高谷博文氏(元大学院生)、現地資料を快く提供して頂いた徳島地方気象台、高知気象台、同土佐清水測候所、松山地方気象台ならびに高松地方気象台の関係諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 村上仁士・高谷博文： 現地資料および実測に基づく副振動の特性に関する考察，第 25 回海講論文集，pp. 85～89，1978.
- 2) 合田良実・永井康平： 波浪の統計的性質に関する調査・解析，港湾技術研究所報告，Vol. 13，No. 1，pp. 3～37，1974.
- 3) 宇野木早苗： 港湾のセイシュと長周期波について，第 6 回海講講演集，pp. 1～11，1959.