

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

村上 仁士*・高谷 博文**

1. 緒 言

わが国の主要な港湾の副振動について宇野木¹⁾は、その周期、波高、継続時間、季節変化等の頻度分布を詳細に調べている。一方、近年津波防災対策に関連して現地港湾の副振動の解析や実測が行われ、特定の港湾に対する湾水の振動特性を明確にしようとする研究が精力的になされている^{2)~4)}。著者ら⁵⁾も、四国四県の主要港湾について宇野木と同様の方法で副振動を解析するとともに、顕著な副振動についてはスペクトル解析を行って湾水の振動特性を調べた。現地資料をもとにスペクトル解析を行うときとくに問題となるのは、第一にデータの読取り間隔が粗くなり一定の時間内でデータ数が多くとれず、解析手法によってはスペクトルの分解能が極めて悪く正しいスペクトルを得にくいこと、第二に津波来襲時や台風時にみられる振幅が大きく、しかも数分周期の波の解析が困難なことである。前者については、Burg⁶⁾によって提案された少ないデータでも分解能が極めてよいスペクトルを推定する最大エントロピー法（以下 MEM と呼ぶ）を用いればある程度の改善が期待できる。後者の問題は、振幅が大きいために工学的に特に重要であり、記録紙を拡大して読取り精度をあげるという方法もあるが、記録手法そのものを改善しないかぎりこの種の長周期波の解析は不可能な場合も起り得る。

本研究では、副振動のスペクトル解析に MEM を用いるにあたり、得られるスペクトルの妥当性を左右する予測誤差フィルターの項数についてあらかじめ検討を加える。ついで、モデル港湾で台風時を含む数回の副振動の実測を行ってデータのサンプリング間隔を小さくし、解析精度の向上に努めるとともに、副振動の時間変化、発達・減衰過程について若干の考察を行う。

2. MEM による副振動のスペクトル解析における予測誤差フィルターの項数 L の検討

MEM の理論については、多くの解説書⁷⁾に紹介され

ているので省略する。ここでは、モデル波（正弦波＋白色雑音）を用いて MEM で求めたスペクトルに及ぼすノイズレベル、データ数、予測誤差フィルターの項数の影響を調べ、後述する副振動の解析に適用すべきフィルターの項数 L を求めることに主眼を置く。

MEM はデータ数が少ない場合でも分解能のよいスペクトルを推定するが、図-1 のように、フィルターの項数

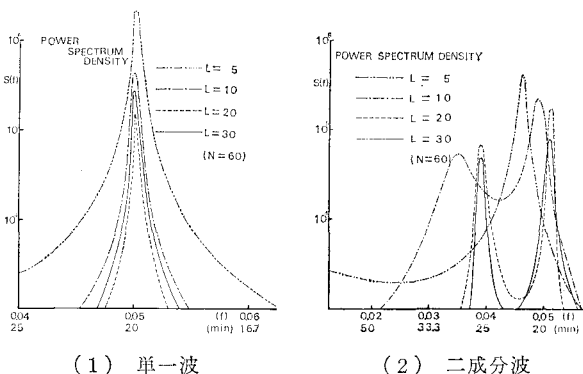


図-1 L の変化に伴うスペクトルの変化

L を適切に与えなければ、 L が大きくなるとかえって劣化したスペクトルを推定するおそれがある。また MEM を用いるには、あらかじめデータの読取り間隔がスペクトルに及ぼす影響⁸⁾や、初期位相の取りかたとデータ数との関係によってスペクトルのピークの位置 (LOSP) の変化も考えられるので、これらの影響についても検討が必要であり、実際すでにこれらの検討も行われている⁹⁾。

(1) フィルターの項数 L とノイズレベルとの関係

高いレベルのノイズは得られるスペクトルに大きく影響を及ぼす^{9), 10)}。いま、単一正弦波に対し、データ数 N が 24, 60, 1200 の場合についてノイズレベル WN/S 比 (W : [白色雑音の rms], S : [信号の rms]) を 5~100% に変え、 L を表-1 に示した値にそれぞれ変化させて MEM を用いてスペクトルを求めた。その結果を YES, NO で表現した。ここで、YES は分解能のよいスペクトル、NO は与えられた周波数に対しなだらかなすそをひくスペクトルあるいは与えられた周波数以外の周波数で大きな誤差パワーを示すスペクトルを意味する。()内の数

* 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 日本国有鉄道

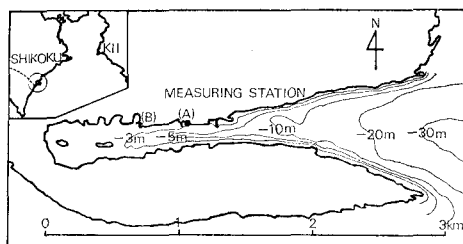


図-2 那佐湾と観測位置図

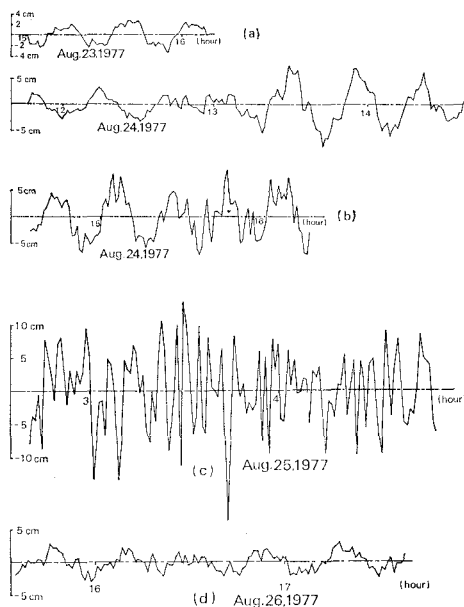


図-4 台風 7707 号による副振動の記録

25 m, 海底勾配約 1/200 という規模の小さい細長い湾で副振動の振動モードが比較的明確にわかる湾である。湾奥部では干潮時に海底が露出する。当初, A, B 2 地点で径 125 mm の鋼管パイプに簡易水位計(石田式変位水位計)を一部改造して設置し, 時計ドラム上の自記紙からデータを読取る方法がとられていた。それらの解析結果は一部すでに報告されている¹²⁾。その後 1977 年, A 点のフロートの動きを電圧に変え, AD 変換器(計測技研製 DR108)を用いてデジタル量に変換し, 1 分ごとに紙テープに出力されるように水位計を改造してデータ処理が容易に行えるようにした(図-3)。この方法での可能観測時間は約 1 週間である。1977 年に行った観測の諸元を表-3 に示す。

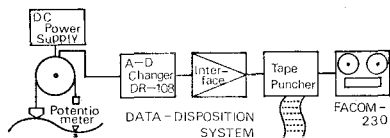


図-3 データ処理システム

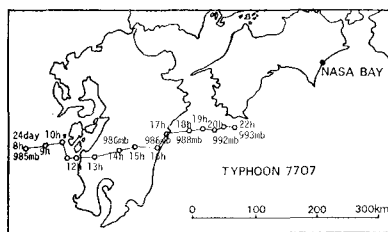


図-5 台風 7707 号の進路と中心気圧

表-3 観測諸元 (1977)

No.	開始時刻	終了時刻	データ数	気象状況	最大波高 (cm)
1	8月10日15時9分	8月13日13時8分	4 200	平常時	6.3
2	8月17日15時48分	8月20日13時47分	4 200	平常時	5.6
3	8月23日15時	8月27日8時59分	5 400	台風7707号	30.1
4	9月9日19時12分	9月13日13時11分	5 400	台風7709号	31.0
5	12月14日3時10分	12月19日4時9分	7 200	大潮時	9.6

4. 観測結果および考察

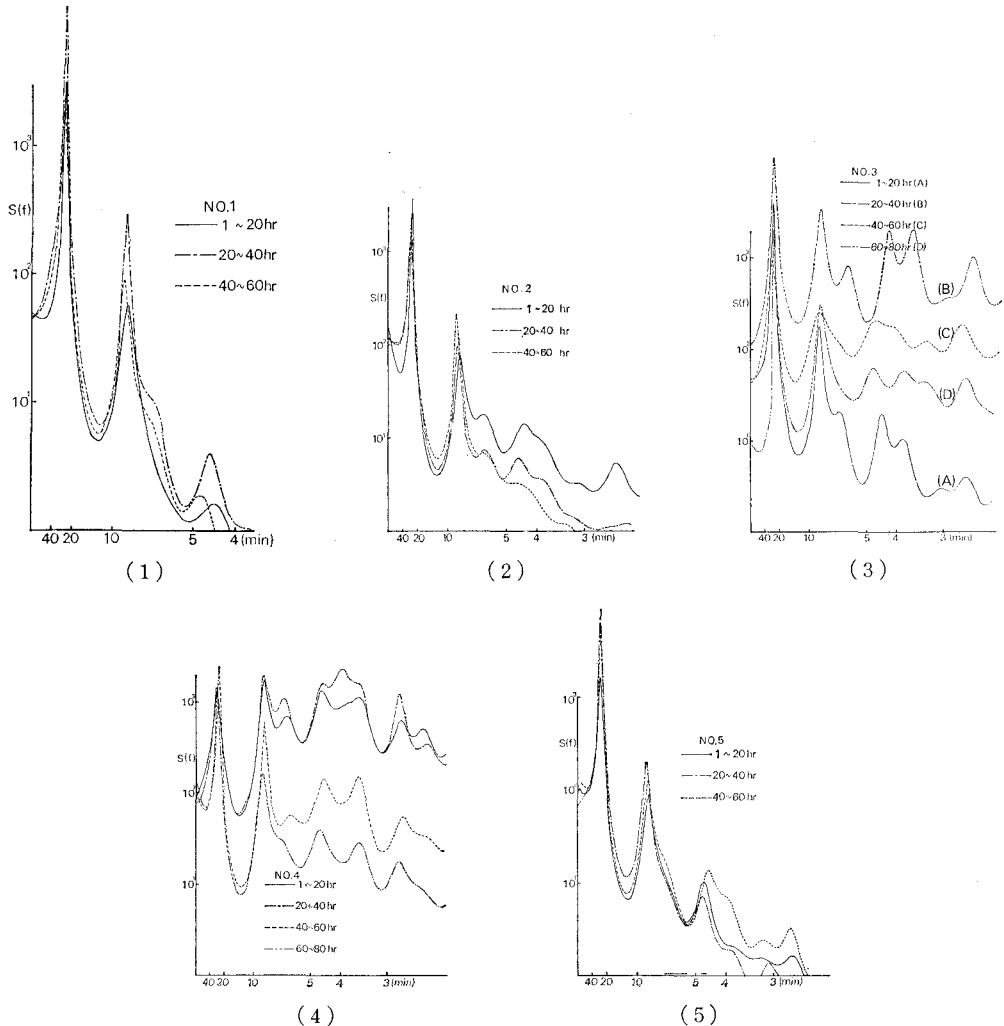
(1) 副振動の発達・減衰の記録例の考察

図-4 は, 台風 7707 号 (以下観測番号で呼ぶ) による副振動の記録の一部で潮汐成分は除去されている。図-5 には, 8 月 20 日頃南海洋上で発生したこの台風が九州に接近してからの進路と中心気圧が示されている。この台風は中型で中心気圧 985 mb, 中心付近の最大風速は 30 m/sec, 中心から 120 km 以内は 25 m/sec 以上の暴風圏, 北側 400 km, 南側 600 km の範囲は 15 m/sec 以上の強風圏であった。台風が九州に上陸したのは 8 月 24 日 12 時でこのとき那佐湾までの距離は 430 km とな

り, 13 時頃から那佐湾では副振動の振幅が大きくなり始めている(図-4(b))。台風は東進し, 8 月 24 日 22 時に足摺岬沖で勢力を弱めながら停滞して 8 月 25 日 0 時には弱い熱帯性低気圧になった。しかし那佐湾では 8 月 25 日 3 時すぎの満潮時に最大波高 30 cm を記録している(図-4(c))。8 月 26 日になると低気圧は南進し始め, 8 月 27 日 9 時には那佐湾から 400 km 以南まで遠ざかった。観測記録の方も 8 月 25 日 3 時すぎ以降も副振動は続いているが, 波高は次第に減少し, 8 月 26 日になると観測開始時の波形と類似してくる(図-4(d), (a))。

(2) MEM によるスペクトル解析結果と考察

図-6 は, 20 時間ごと ($N=1200$) のスペクトルを求めたものである。図の (1), (2), (5) は平常時の副振動の解析結果である。平常時, 周期 25 分と 8 分に顕著なピークを示し, これが那佐湾の形状から定まる基本モードと 2 次モードの周期である。この場合, 2 次モードより高次のモードのパワーは非常に小さい。つぎに No. 3 (図の (3)) を考察する。観測開始から 20 時間までのス



図—6 スペクトル解析結果

ペクトル (A) は、平常時と同様 25 分と 8 分に顕著なピークを示し、台風の影響がまだ現われていない。20~40 時間 (B) になると、(A) と比較して 2 次モード以下の周期に対してもかなり大きなパワーをもち、固有周期 4~5 分の 3 次モードの振動も明瞭になる。このことは、図—4 (b) の記録をみればわかるように台風の影響下に入ったのが 8 月 24 日 13 時以降で、その後数分周期の波が観測されていることと対応している。台風の接近に伴う長周期波によって、高次の共振周期と一致する波が増幅される様子がうかがえよう。また、6 分および 3.8 分程度の周期帯にもピークが現われているが、前者は基本モードと 2 次モードの周波数和に相当し、後者は基本モードと 3 次モードの周波数和に相当しており、こうしたことは No. 4 の台風 7709 号の場合 (図の (4)) にもみられることから、台風時の長周期波の非線形性によるものと思われる。さらに、40~60 時間以上 ((C), (D)) 経

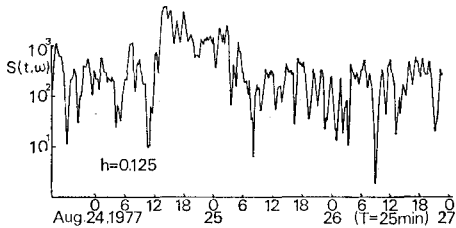
過すると、2 次共振周期以下の長周期波は次第に減衰してゆくことがわかる。

(3) 非定常スペクトルによる解析結果と考察

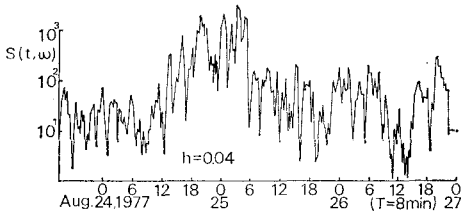
2. で述べたように、MEM を用いれば数時間ごとのスペクトルを求めることも可能であり、固有周期成分に対するパワーの変化の様相を調べれば、副振動の非定常性や副振動の発達・減衰過程についても、おおよその特性が求められる⁽¹²⁾。

ここでは、1 自由度振動系を狭帯域フィルターと考え、副振動の時間変動を振動系に入力として与え、でてくる応答を用いてスペクトルを計算する方法 (亀田⁽¹³⁾の多重フィルタースペクトル) で非定常スペクトルを求める。

図—7 は、No. 3 のデータを用いて基本モード (周期 25 分) および 2 次モード (周期 8 分) について非定常スペクトルを求めたもので、図中の h は等価帯域幅によ



(1) 基本モード



(2) 2次モード

図-7 非定常スペクトル解析結果

って求めた減衰定数である。スペクトルに激しい変動がみられ、この変動を除くにはある一定の幅にわたり移動平均をほどこすとよいが¹³⁾、ここでは1回の移動平均しか行っていない。しかし、これらのスペクトルを平滑化してながめると、その変化の傾向が把握されよう。まず、基本モードについてみると、8月24日12時頃からパワーが増大し始め、12時から18時の間で最大パワーを生じ、その後、緩やかに減衰してゆく。ついで2次モードでは、8月24日6時～12時頃からパワーが次第に増大し8月25日0時～6時の間で最大パワーを生じ、その後かなり急激にパワーを減じてゆく。先に示した観測記録(図-4)からも上述のことが裏付けられよう。

二つのスペクトル図を比較すれば、長周期の波ほど湾水振動を助長し、最大パワーに達するまでの時間は短く、その後の湾水振動の減衰は緩やかになること、および周期の短い波では最大パワーが生ずる時間が長周期の波よりもかなり遅れることがわかる。

5. 結 言

現地資料に基づく副振動のスペクトルをMEMによって求めるにあたり、問題となる予測誤差フィルターの項数 L の決定について若干の検討を行うとともに、副振動の実測を行ってその特性を考察した。その結果、妥協的な値として $L=20$ が求められ、この値を用いて観測記録を解析し、台風時には高次の固有振動周期でも高いパワーを示すこと、長周期波の非線形効果が認められることを示した。さらに非定常スペクトルによる解析を行

って、副振動の発達・減衰過程をある程度説明しえた。

しかし、本研究では副振動のみの観測であり、種々の気象条件との関連、長周期波の発生原因との関連等については何ら考察されていない。今後さらに多くの資料から副振動の特性を把握するように努める。

最後に、本研究にあたり御助言を賜った徳島大学三井宏教授、那佐湾の現地観測に便宜をはかっていただいた徳島県土木部港湾課、同日和佐土木事務所の関係諸氏、本研究の協力者である阿南工専の島田富美男助手、衛生研究室の山下豊久技官、同室当時学生の徳永誠之、鈴木茂両氏に謝意を表するとともに、本研究の一部は文部省科学研究費(代表者三井宏教授)によるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 宇野木早苗: 港湾のセイシュと長周期波について, 第6回海講演集, pp. 1-11, 1959.
- 2) 赤塚雄三・川上俊雄: 釜石・西石湾の湾水振動特性, 第23回海講演集, pp. 422-427, 1976.
- 3) 高橋 将: 津軽海峡と内浦湾における津波特性, 第23回海講演集, pp. 459-463, 1976.
- 4) 小菅 晋・斉藤 晃: 8mm ムービーカメラによる泊地振動の観測, 第32回年講演概要集(第2部), pp. 65-66, 1977.
- 5) 村上仁士・高谷博文・鈴木 茂: 四国四県の主要港湾における副振動の特性について, 第30回中国四国支部講演会一般講演概要, pp. 85-86, 1978.
- 6) Burg, J. P.: Maximum entropy spectral analysis, paper presented at the 37th Annual International Meeting, Soc. of Explor. Geophys., Okla., Oct. 31, 1967.
- 7) たとえば, 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 300 p., 1977.
- 8) 高谷博文: 統計的手法による現地港湾の副振動特性に関する基礎的研究, 徳島大学修士論文, 162 p., 1977.
- 9) Chen, W. Y. and G. R. Stegen: Experiments with maximum entropy power spectra of sinusoids, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, pp. 3019-3022, 1974.
- 10) 高橋智晴・広瀬宗一・佐々木徹也: MEMによる波浪スペクトルに関する考察(1)—特に予測誤差とフィルター長について—, 運輸省港湾技研資料, No. 273, 35 p., 1977.
- 11) Akaike, H.: Power spectrum estimation through autoregressive model fitting, Ann. Inst. Statist. Math., Vol. 21, pp. 407-419, 1969.
- 12) 村上仁士・高谷博文: 那佐湾の湾水振動特性, 第32回年講演概要集(第2部), pp. 63-64, 1977.
- 13) 亀田弘行: 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, No. 235, pp. 55~62, 1975.