

1978 年宮城県沖地震津波による海水振動特性

岩崎敏夫*・阿部至雄**・相原昭洋***

1. 序 論

津波はその発生の際にはほとんど一山一谷の浅海長波と考えられるのに、沿岸においての観測波形は多くの波長、周期をもつ不規則な振動をしている。この原因についてはこれまでの研究から津波の分散性、大陸棚の存在とそれに伴う陸棚セイシュやエッジ波および内湾の存在によって生ずる湾水振動などによると考えられている。しかし、大陸棚以浅の海域における津波特性には個々の地域性が強く関与しているため十分解決されたわけではなく、実測記録による研究も進められている^{1),2)}。

そこで、本研究では三陸沿岸の検潮所において捕捉された津波記録を収集し、その定常および非定常確率過程における津波による海水振動のスペクトルを推定することにより、津波襲来時の海水振動の振動周期とその時間的変化について各地域の地形特性などとの関係において考察した結果について報告する。

2. 解析の概要

解析対象津波は1978年6月12日に宮城県沖で発生した地震に伴う小規模津波とした。推定波源域は長径約65km、短径約50kmの東西方向に長い楕円形であり、余震域は羽鳥³⁾が推定している歴史津波(1861年10月)の波源域付近に位置するが、歴史津波に比べてかなり小規模津波となっている⁴⁾。波高の分布は波源域に直面する女川と北上川河口の月浜、および気仙沼湾や大船渡湾の山口で、湾の開口方向や湾水深の効果などが加わり、他の検潮所に比べて波高が高くなっている。そこで、解析対象検潮所は女川と外海に面する江の島、大船渡湾の山口と長崎および湾の振動特性に関して情報の多い釜石の計5検潮所とした。

データ解析を行うにあたり、まず検潮記録に含まれている潮汐成分を移動平均によって求め、それらの偏差値をもって津波の成分とした。表-1に津波解析の諸元を示した。

表-1 津波解析の諸元

検潮所	諸元	解析開始時刻 $t=0$ (78, 6, 12)	データ 読取間隔 Δt (秒)	読取総数 N	フィルタ 項数 K	
					N	$N/2$
釜石湾	釜石	15:00	90.36	509	50	20
大船渡湾	山口(湾内)	15:05	30.0	600	50	30
	長崎(湾外)	15:05	30.0	600	60	30
女川湾	女川	15:00	297.7	473	40	20
	江の島	17:00	17.6	1420	93	60

定常確率過程におけるスペクトルの推定は最大エントロピー法を利用し、次の MEM スペクトル

$$S(f) = \frac{\Delta t \sigma_{M+1}^2}{\left| \sum_{m=0}^M \gamma_{m+1, K+1} \exp(i2\pi f m \Delta t) \right|^2} \dots (1)$$

をもって津波の定常スペクトルとした。ここに、 σ_{M+1}^2 は予測誤差の分散、 $\gamma_{m+1, K+1}$ はフィルター個数 $K+1$ に対する予測誤差フィルター、 M はラグ個数、 f は周波数である。データ読取間隔は検潮儀の記録速度と波形読取装置との関係から決めたため、女川の場合高次の振動モードに関する情報は必ずしも十分でない。解析周波数帯域は最大周波数 $f_{\max} = (2/3)f_N$ (f_N : Nyquist 周波数) を参考にして決め、それを100個に分割してスペクトルを求めた。また、フィルター項数の決定には自己回帰モデルの FPE 基準を用いたが、ここでは少ない項数に対するスペクトルからその形を判断し、項数を多くしたときのスペクトルが示す卓越周期が含まれるような項数をもって最適フィルター項数とした(表-1)。

次に、非定常確率過程に対するスペクトル $F(f, t)$ の推定は、システム関数 $H_n(f)$ を有する応答系が線型であり、その系の入出力 $x(t), y_n(t)$ の Fourier 変換を $X(f), Y_n(f)$ とすれば、 $Y_n(f) = X(f)H_n(f)$ であるので、 $y_n(t)$ は $Y_n(f)$ を逆変換することにより

$$y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)H_n(f)e^{i2\pi f t} df \dots \dots \dots (2)$$

から求まる。すなわち、この $y_n(t)$ の振幅包絡線として $F(f, t)$ を定義した⁵⁾。システム関数は Gauss 型フィルター $H_n(f) = \exp[-\alpha((f-f_n)/f_n)^2]$ とした。ここに、 f_n は中心周波数、 α は任意のパラメーターである。 f_n の

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 東北工業大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 東北工業大学 工学部土木工学科

表-2 陸棚周期および湾の固有振動周期

諸元 湾	方向別陸棚周期(分)						湾の固有振動周期(分)								
							寺田・本多 ⁶⁾ (1908)		山口 ⁶⁾ (1933)	佐々木 ⁶⁾ (1950)	佐々木(1959) [第6回海講]	相田 ⁷⁾ (1973)	岩崎ら ⁸⁾ (1974)	赤塚ら(1976) [第23回海講]	
	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	計算値	実測値	グラフの 読取値	湾口補正	補正なし	計算値	実測値	計算値	実測値
釜石湾	61	44	38	39	—	—	24.8 22.3	24.8 20.3	22.6	33.2	25.9	15.6		18.7	17
大船湾 山口 長崎	—	83	74	76	75	88			39.5	51.7	42.0	39.1			
女川湾 女川 江の島	97	76	77	83	89	—							36(主振動) 18(湾縦振動) 14(湾横振動) 8(防波堤内)		

決め方はMEMスペクトルの場合と同じであるが、 α と周波数バンド幅 Δf_n は一義的には決められないので、 α は 0.5 から 100 まで、 Δf_n は 0.15 から 0.30 まで変化させて求め、以下に示す結果は α が 50、 Δf_n が 0.15 に対するものである。

3. 津波襲来時の海水振動特性

沿岸における津波の特性に影響を及ぼす要因のひとつに陸棚、湾、防波堤内のセイシュ、副振動がある。表-2 は、各検潮所の外海における海底地形の断面を方向別に求め、大陸棚の水深を 200 m と仮定したときの陸棚の周期を $T=4l/60(2n-1)\sqrt{gh}$ (h : 陸棚の平均水深、 l : 同距離、 g : 重力の加速度) から求めて示したものである。また同表に湾、防波堤内の固有振動周期に関する既往の研究結果も同時に示した。

3.1 津波の MEM スペクトル

図-1~図-5 は津波襲来時の記録の前半と後半および全期間に対する推定スペクトルである。解析周期帯域は 7~350 分で、縦軸は $S(f)$ の最大を 100、最小を 1 として示してある。

釜石湾の場合、図によればスペクトル波形は双峰性を示し、E~ESE 方向の陸棚セイシュか湾の副振動に相当する長周期(約 29~35 分)の主振動と、岩崎や赤塚らが指摘している両石湾との共振に帰因する横振動(約 17~18 分)の 2 つの振動形態が存在する。津波前半から後半

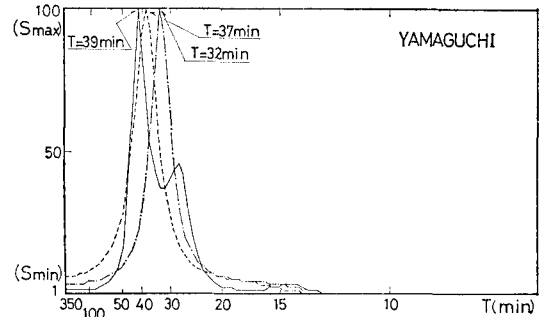


図-2 津波の MEM スペクトル (--- 前半, ---- 後半, —— 全体)

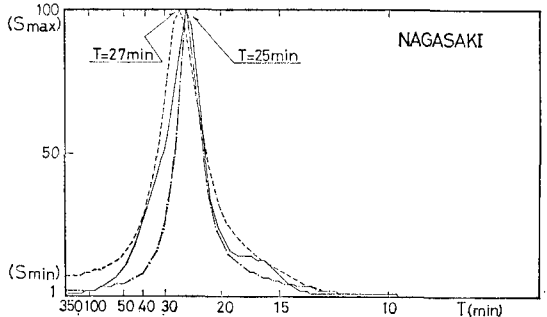


図-3 津波の MEM スペクトル (--- 前半, ---- 後半, —— 全体)

に至る間に主振動は湾の固有振動周期の方へ、2 次の振動は横振動の共振周期の方へ共に短周期側へ移動する。とくに津波後半に生ずる横振動に伴う 2 次振動の励起が特徴的である。

大船渡湾の場合のスペクトル波形は単峰性を示し、津波前半から後半にかけて主振動周期は長周期側へ移動する。外海に位置する長崎での卓越周期は約 25 分であり、湾内山口での卓越周期は佐々木 (1959) のいう湾の固有振動周期に極めて近い、約 39 分を示す。周期 27 分前後の 2 次振動の原因については定かでない。

女川湾では津波前半と全体の振動形態は類似し、陸棚の影響はあるものの、卓越する周期は約 39 分と 32 分であり、相田がいう江の島付近を節とする振動系が支配的

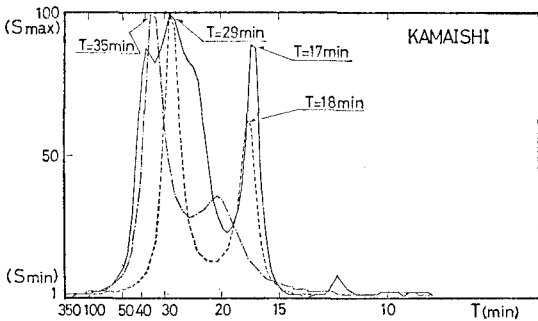


図-4 津波の MEM スペクトル (--- 前半, ---- 後半, —— 全体)

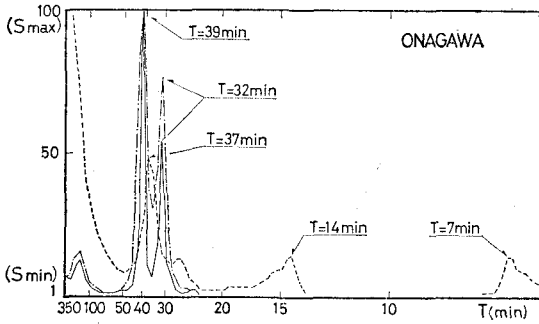


図-4 津波の MEM スペクトル (--- 前半, ---- 後半, —— 全体)

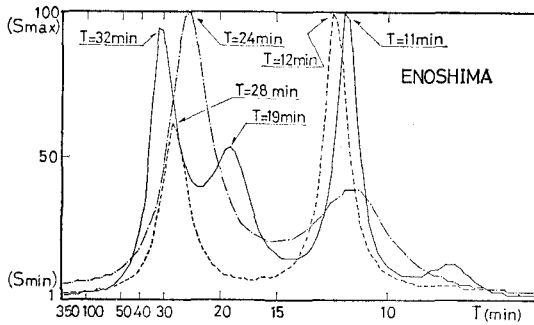


図-5 津波の MEM スペクトル (--- 前半, ---- 後半, —— 全体)

である。しかし、津波後半では女川沖の陸棚の影響を強く受け、さらに津波前半の記録からは見出し得ない湾の縦と横および防波堤内の副振動による振動形態が生ずる。江の島は外海に位置するが、海面振動に及ぼす女川

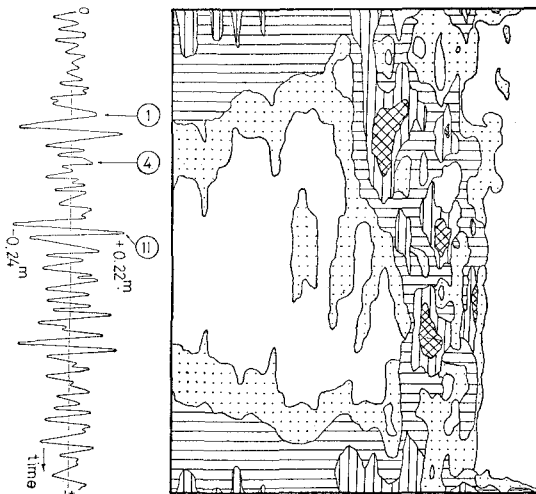
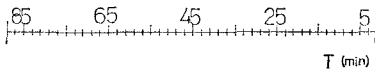
湾の影響は無視できないと相田⁹⁾が述べているように、スペクトルの高まりが周期約 32 分, 19 分, 11 分のところで生じる。これらが女川湾との相関を示すものであろう。

3.2 津波スペクトルの時間的変化

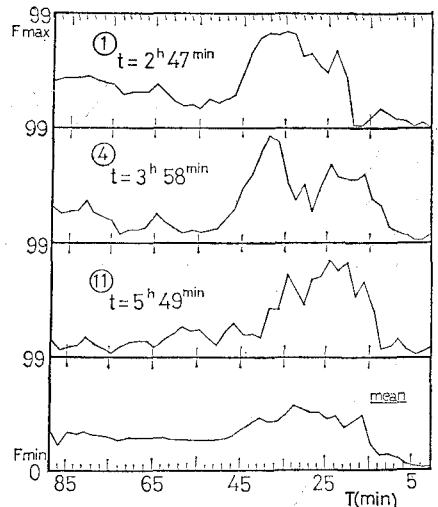
津波スペクトルの時間的変化の様相を地域固有の周期成分について調べれば、津波の進入に伴う海水振動の非定常性についておおよその特性は知ることができる。

図-6, 図-7 は釜石と江の島における津波スペクトルの時間的変化で、周期帯域 (1 分~89 分) を 45 等分して求めた周期別エネルギー分布 $F(f, t)$ の最高値と最低値を 5 段階 (0~19, 20~39, 40~59, 60~79, 80~99) に表示して示してある。図-6 (b) は同図 (a) に付した番号に対応する経過時間での津波のスペクトルであり、時間 t は読取開始時を原点とする経過時間である。第 11 波 ($t=5^h 49^{min}$) は湾水が最高時に対するものであり、また図中の mean は全経過時間についての平均のスペクトルである。

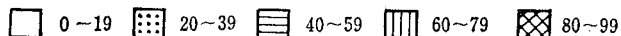
図-6 (a) から、釜石湾の津波スペクトルは湾の固有振動周期を含む周期帯域で複雑な経時変化を示す。まず、津波の進入に伴い主に湾の固有振動周期に相当する周期 33~39 分と 23~25 分においてスペクトルは増幅するが持続することはない。この傾向は津波の振幅に呼応して生じる。しかし、励起される周期は短周期側へ移動し、第 16 波付近では周期 17 分、第 18 波~第 20 波にかけては周期 25~29 分となる。このことは同図 (b) から



(a) 図-6 津波の非定常スペクトル (釜石)



(b)



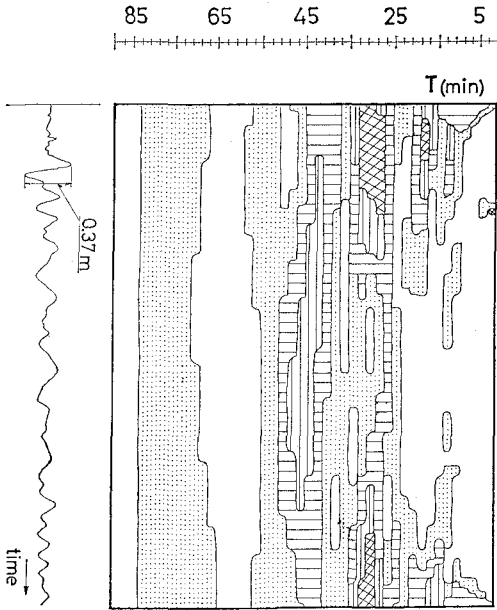
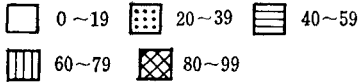


図-7 津波の非正常スペクトル(江の島)



るためであり、時間経過に伴う地域特性の現われを示す。

図-7 から、江の島での海水振動は釜石湾に比べてかなり規則的である。周期が70分~80分の振動は女川沖の陸棚に関与するものと思われる。また、津波の発生に伴う周期41分を中心とする振動が特徴的となっているが、周期17分および27分~31分付近の振動との関係において検討すべきものであると考えている。

図-8~図-10はMEMスペクトルで得られた卓越周

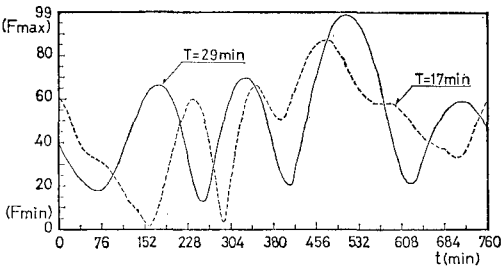


図-8 卓越周期に対するスペクトルの経時変化(釜石)

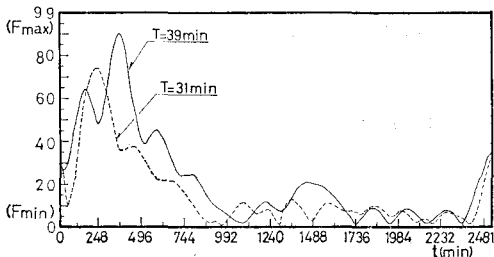


図-9 卓越周期に対するスペクトルの経時変化(女川)

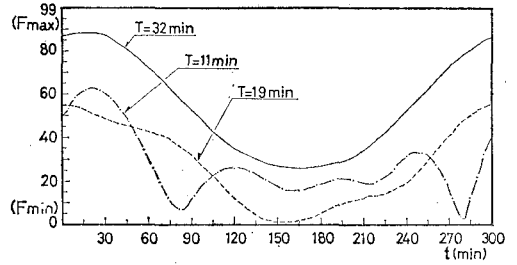


図-10 卓越周期に対するスペクトルの経時変化(江の島)

期に対する津波スペクトルの経時変化を示したものである。

釜石湾での主振動と横振動に関与するスペクトル強さの変化の様相は図-6に示した傾向をよく表わしており、津波の進入に伴い主振動による湾水振動が生じ、次いで横振動による振動が励起されていく経過がよくわかる。この湾水振動の傾向は女川湾の場合にも同様であるが、江の島では釜石や女川と逆の傾向を示す。長崎は江の島のタイプであり、山口では釜石と江の島の傾向を兼ねた結果となったが、湾と外海との相違に帰因するのかどうかについては不明である。

4. 結 論

津波の実測記録からその定常・非定常スペクトルを推算し、陸棚セイシュや湾、防波堤内の副振動など各地域の特性との関連で、津波による海水振動について考察を試みた。今回の解析結果によれば、

- 1) 津波による海水振動の特性は津波の前半と後半でその性質を異にし、とくに津波後半の海水振動は各地域の特性に依存する。
- 2) 津波の湾内進入に伴って生ずる湾水の振動は各地域特有の固有振動周期を含む周期帯域で励起され、時間の経過とともに湾の主振動や2次振動に収れんする。しかし、その振動は定常的に持続するのではなく、湾水の励起は津波振幅の増加に呼応して生じる。
- 3) 大船波湾の長崎と山口は単一振動系から成り、その卓越周期は長崎で25分前後、山口で32分から39分である。釜石湾には周期29~35分の主振動と周期17~18分の横振動が存在する。女川湾では津波後半に生ずる振動形態が特徴的であり、江の島における海水振動には女川湾との相関が示唆される。

今回は津波襲来時のみの解析について報告したが、津波襲来の前後や既往津波について調べる必要があるし、解析上改良すべき点も残された。最後に、本計算は東北工業大学計算センター TOSBAC-3400 を使用したことを記す。

参 考 文 献

- 1) 八 畝 功: 北海道太平洋岸における津波の地域性, 自然災

- 害資料解析, Vol. 3, pp. 55-63, 1976.
- 2) 高橋 将: 津軽海峡と内浦湾における津波特性, 第 23 回海岸工学講演会論文集, pp. 459-463, 1976.
 - 3) 羽鳥徳太郎: 三陸沖歴史津波の規模と推定波源域, 震研彙報, Vol. 50, pp. 397-414, 1975.
 - 4) 岩崎敏夫・真野 明: 1978 年宮城県沖地震に伴った津波について, 第 15 回自然災害総合シンポジウム, pp. 583-584, 1978.
 - 5) 神山 真: フィルター理論による強震地動の解析, 昭和 48 年度東北支部技術研究発表会, pp. 18-20, 1974.
 - 6) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所: 三陸沿岸の津波対策, 94 p., 1978.
 - 7) 相田 勇: 女川湾内外の長周期波の挙動, 海洋科学, 海洋出版, Vol. 5, pp. 554-559, 1973.
 - 8) 岩崎敏夫・真野 明・前原隆生・長谷川 明: 湾内津波の一実験, 第 29 回年次学術講演会講演集, II-14, pp. 30-31, 1974.
 - 9) Aida, I.: Water level oscillations on the continental shelf in the vicinity of Miyagi-Enoshima, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 45, pp. 61-78, 1967.
-