

宮城県沖地震津波による女川湾の湾水振動特性

阿部至雄*・相原昭洋**

1. 序 論

津波に対する湾水の挙動を知るための研究例は、それが防災対策上の基本課題の一つであるために少なくない。渡辺¹⁾(1964)は、三陸沿岸の各湾における既往津波を調査し、湾奥の湾口に対する相対最大波高が各湾の固有振動周期により異なることを理論考察とともに示している。相田²⁾(1973)は、湾内外における平時の長周期波の同時観測と各種の数値モデルによって、津波襲来時の湾水振動特性の予測はある程度可能であるとしている。

あり、ここでは検潮記録に含まれている潮汐成分を移動平均により求め、それからの偏差値をもって津波の成分とした。女川湾は宮城県沖で発生した地震(1978年6月12日17時14分)に伴う小規模津波の波源域に直面したため、高めの波高を記録している。

2.1 津波のスペクトル解析³⁾

定常確率過程に対する津波のスペクトル推定には最大エントロピー法を用い、このMEMスペクトルをもって津波の定常スペクトル $S(f)$ とし、非定常確率過程に対する津波のスペクトル $F(f, t)$ は線型応答系からの出

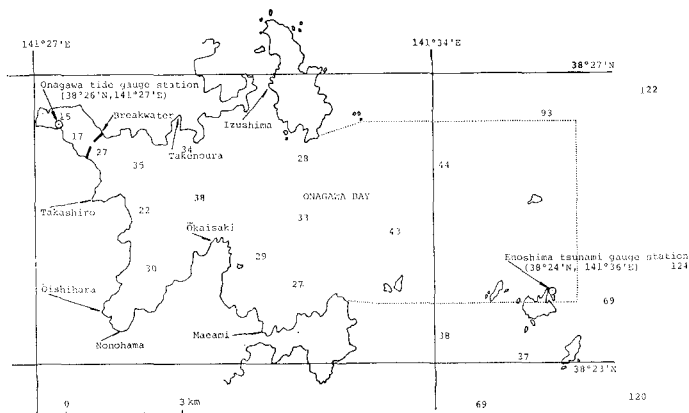


図-1 女川湾の地形図および検潮所位置図

そこで、本研究では女川湾の津波に対する湾水振動の性質を調べるために、江の島と女川の各検潮所で捕捉された宮城県沖地震に伴う津波記録を収集し、その津波の定常および非定常スペクトルの推定から湾水振動の卓越振動周期とその経時変化を求め、ついで湾の地形特性を考慮した2次元数値モデルにより湾の振動モードを求め、それらの結果を相田や渡辺らの研究成果と対比させて考察した結果について報告する。

2. 解析の概要

図-1に女川湾の地形および江の島と女川検潮所の位置を示す。図-2は江の島と女川における津波の記録で

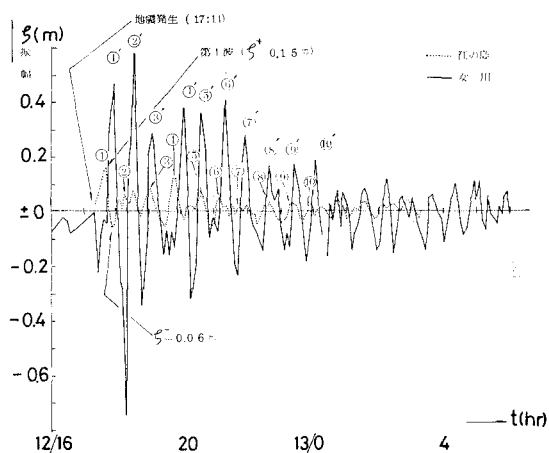


図-2 津波の観測波形

* 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-1 データ解析の諸元

検潮所		諸元	データ解析開始時刻 (78, June)	データ読取間隔 Δt (分)	データ読取総数 N	フィルター数 K
女川湾	女川 (湾奥)	津波襲来前	11日 18:00~	5	265	20
		襲来時	12日 16:00~	5	169	15
		襲来後	13日 6:00~	5	289	20
	江の島 (湾口)	襲来時	12日 16:00~	5	169	15

力の振幅包絡線として定義して求めた。表-1 に津波記録のスペクトル解析の際の諸元を示した。

2.2 湾水振動の数値解析²⁾

津波の侵入によって生ずる湾水の擾乱 $\zeta(x, y, t)$ の支配方程式を

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = 0 \dots (2.1)$$

とする。ここに、 h は水深、 g は重力の加速度、 x および y は静水面に関する座標、 t は時間である。

$\zeta(x, y, t) = A(x, y) \exp[i\sigma t]$ とすると、この長波の波動方程式 (2.1) は周知の Helmholtz の式になる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\sigma^2}{g} A = 0 \dots (2.2)$$

ここに、 σ は角周波数である。境界条件として湾口で $A = A_0$ 、陸岸では法線方向に関して $\partial A / \partial n = 0$ とする。

この基本式 (2.2) の数値解を有限要素法により求めるために、解析領域を m 個の三角形要素に分割すれば、

$$[K]\{A\} - \lambda[M]\{A\} = 0 \dots (2.3)$$

ここに、 $\lambda = \sigma^2$ 、 $\{A\}$ = 未知の node value vector、 $[K] = \sum_{k=1}^m [K]^{(k)}$: Stiffness matrix、 $[M] = \sum_{k=1}^m [M]^{(k)}$: Mass matrix からなる固有値問題に帰着する。

3. 女川湾の湾水振動特性

図-2 に示したように、江の島では地震発生後約 19 分の 17 時 33 分に津波第 1 波のピーク 0.15 m が観測されている。これが約 3.1 倍に増幅され、江の島から約 13.4 km 陸側の湾奥女川での第 1 波のピーク 0.47 m として約 12 分後の 17 時 45 分頃に捕捉されている。女川ではこの津波第 1 波が到達する前に、ほぼ女川防波堤内の基本振動モードに相当する周期 10 分程度の湾水振動が地震発生と同時に生じており、これが女川での津波第 1 波の波形前面に影響を及ぼしている。女川でのこの強制振動と津波第 1 波の影響により、江の島における津波第 2 波に相当する波形が恰も津波の分散性によるかのごとき主たる山を 3 個も有する複雑な形を呈しているものと思われる。

なぜ沿岸で観測される波形が多くの波長、周期をもつ不規則な振動をしているのか、その原因についてはこれ

までの研究成果から津波の分散性、陸棚セイシュやエッジ波、湾水振動などが指摘されているが、上述のように、大陸棚以浅の海域における津波特性には個々の地域特性が強く関与しているため、津波記録の収集とそれに基づく検証は欠かせないと言える。

3.1 津波の MEM スペクトルと卓越振動周期

図-3, 4 は津波記録に対する推定 MEM スペクトルである。これより湾水の卓越振動周期を求めて既往の研究成果とともに表-2 に示した。

女川における津波襲来前の卓越周期は 38, 27, 18, 15 分であり、このうち 38 分は相田のいう江の島付近を湾口とする女川湾の主振動、18 分は大貝崎付近を節とする縦振動、15 分は湾奥女川と野々浜間の横振動に対応するものであると思われる。津波の湾内侵入に伴い海水は湾固有の振動帯域で、とくに主振動を中心に励起される (フィルター項数 $K=20$ の場合 (参考)、女川でのスペクトルは線スペクトルに近い形を示し、その卓越振動周期は 45, 36, 29, 18, 15, 13 分である)。他方、江の島での津波襲来時の振動形態は女川での津波襲来前のそれに類似し、その卓越振動周期は 43, 26, 19, 12 分を示す。津波襲来後半になると主たる振動周期は津波襲来前のそれに近くなるが、湾水の振動帯域は広範囲に広がることにも、最も特徴的なことはこの時点で陸棚に帰因する周期 71 分の振動モードが顕在化することである。

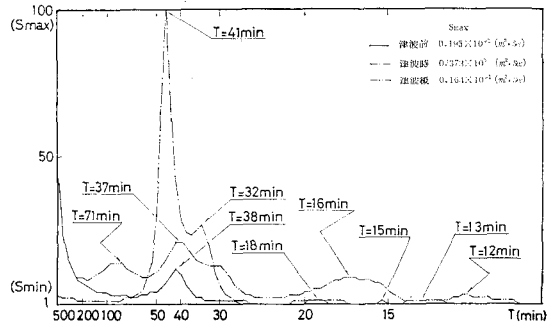


図-3 津波の MEM スペクトル (女川)

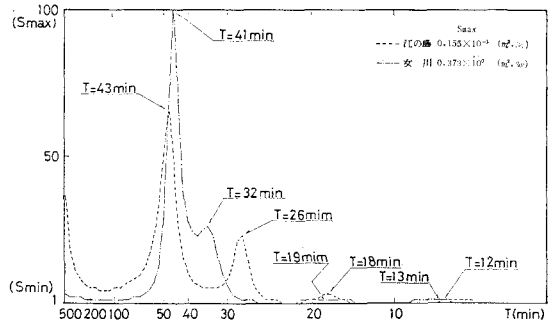


図-4 津波の MEM スペクトル (女川および江の島)

表-2 女川湾の陸棚周期および湾の固有振動周期

			陸棚周期(分)					湾の固有振動周期(分)								
			NE	ENE	E	ESE	SE	F		L ₁	T ₁	L ₂	T ₂		※	
著者	観測(津波)	襲来前	—					38	27	<18>	15					
		襲来時	女川						41, 32		<18>		13			
			江の島						43	26	19		12			
		襲来後	女川	71					37	<30>		16	12			
		全期間	女川	77					42, 33		19	15	13			
	モデル	$T = \frac{4l}{60(2n-1)\sqrt{gh}}$	97	76	77	83	89	$(T = \frac{2l}{60n\sqrt{gh}}) \rightarrow 8$								
	数値モデル	—					38.5			14.8			9.0	7.9		
相田	観測(長周期波)	90~120					36.0		18.1	14.4	12.8	10.0	9.0	8.0		
	数値モデル等	—					40.7		18.1	14.0	12.1	10.0	9.0	8.0		
備考	基本振動(F), 縦振動(L ₁ , L ₂), 横振動(T ₁ , T ₂) [相田による], 防波堤内振動(※), < > はスペクトルの高まりはあるが, 顕著なピークのないもの。															

3.2 湾水振動の非定常性

前節で津波による湾水振動特性がその襲来前半と後半で異なることを示した。そこで、津波の湾内侵入に伴う湾水振動の非定常性について調べるために、湾の固有振動周期を含む帯域で津波スペクトルの時間的変化を求め、MEM スペクトルから得られた卓越振動周期に関してその経時変化について示したのが 図-5 である。

津波襲来前の長周期成分に関する湾水振動は比較的定期的であると言える。津波の侵入により湾水振動のエネルギーは増減し、津波に対する湾水振動の非定常性がわかる。その振動エネルギーのピークはまづ短周期、ついで長周期成分について生じる。津波後半にみる湾水の振動エネルギーの存在は定常MEM スペクトルの津波後半の解析結果をよく説明している。

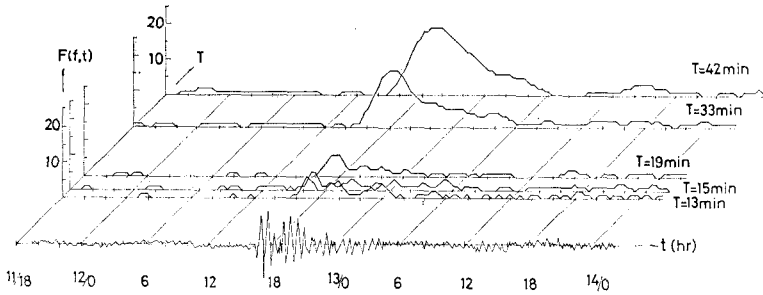


図-5 (a) 津波の非定常スペクトル(女川)

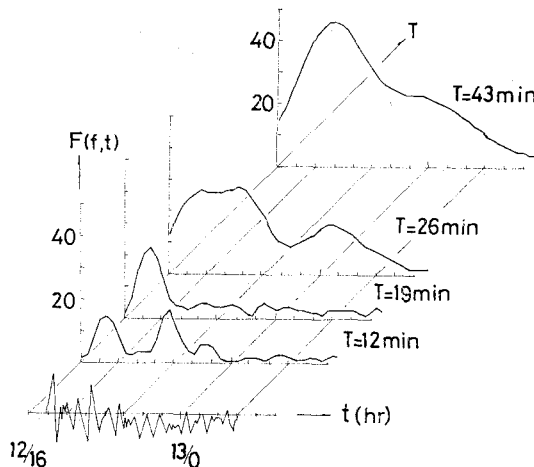


図-5 (b) 津波の非定常スペクトル(江の島)

3.3 湾水振動の数値解

図-1 に示した相田とほぼ同じ領域を 98 個の三角形要素に分割し、有限要素法により求めた女川湾の固有振動周期に関する結果は表-2 に示した通りである。振動形態として 38.5 分 (湾の主振動), 14.8 分 (湾奥女川と野々浜間の横振動), 9.0 分, 7.9 分などの存在が認められたが、津波記録のデータ解析結果をすべて説明している情報は得られていない。

表-3 (a) は女川湾内各地の江の島に対する振幅増幅率を上述の固有振動周期に関して示したものである。この数値解から、女川湾の場合その主振動に呼応する振動形態が生ずる場合に湾水はかなり増幅されるものと思われるが、増幅率の数値については検討の必要がある。

そこで、湾水の卓越振動周期に対する江の島での推定 MEM スペクトル, $S_0(f)$, と女川のスペクトル, $S(f)$, から

$$S(f) = \frac{A^2(f)}{1+\mu} S_0(f) \dots\dots\dots (3.1)^4$$

を用いてエネルギー増幅率 $A(f)$ を求めて示したものが表-3 (b) である。ただし、湾口で反射はない ($\mu=0$) とした。湾の主振動と湾奥に位置する分岐湾間の横振動に帰因する振動形態が女川湾では支配的であり、数値的にも相田らの傾向をよく説明している。次に、表-3 (c) は図-2 に示した津波記録から女川の江の島に対する振幅比 (ζ^+/ζ_0^+ : 山, $|\zeta^-|/|\zeta_0^-|$: 谷) と波高比 (H/H_0) を求めて示したものである。ここに、江の島の振幅は津波計の周期特性 30 分に対する換算値である。江の島と女川との記録で波形の対応が見つかる初期の数波 (第 1, 3, 4 波) の ζ^+/ζ_0^+ の値を渡辺が示している図に加筆追加して示したものが図-6 である。湾の固有振動周期を津波記録から一義的に決められないが、提示した範囲内では渡辺の結果の傾向を説明しているといえる。

表-3 (a) 女川湾内各地の江の島に対する振幅増幅率 (数値モデル)

地点名	固有振動周期(分)			
	38.5	14.8	9.0	7.9
出島(開口部)	29.7	1.2	3.8	30.7
竹の浦	33.7	8.1	5.2	6.3
女川	35.6	13.6	8.1	32.0
高白	35.6	13.9	7.3	29.9
大石原	37.6	23.7	4.0	19.1
野々浜	37.7	24.1	4.2	20.5
大見崎	31.2	2.9	4.6	0.2
前網	25.4	12.0	21.4	13.6
江の島	1.0	1.0	1.0	1.0

表-3 (b) 湾奥女川の江の島に対するエネルギー増幅率 (MEM スペクトル)

地点名	卓越振動周期 (分)											
	F					L1, T1, L2						
江の島		43				26	19			12		
女川	(45)		42	(36)	32	(29)		18	(15)	13		
増幅率	(2.3)	5.1	7.3	(8.8)	11.5	(6.2)	1.4	5.2	3.9	(8.7)	8.0	3.0
備考	記号値。F, L1, L2, T1 は表-2 に同じ。() はフィルター項数 20 に対する参考値。											

表-3 (c) 湾奥女川の江の島に対する振幅および波高の増幅率 (津波記録)

波	江の島				女川				平均周期 (min)	増幅率		
	ζ_0^+ (m)	$ \zeta_0^- $ (m)	H_0 (m)	T_0 (min)	ζ^+ (m)	$ \zeta^- $ (m)	H (m)	T (min)		ζ^+/ζ_0^+	$ \zeta^- / \zeta_0^- $	H/H ₀
第 1 波	0.15	0.06	0.21	35	0.47	0.75	1.22	35	35	3.1	12.5	5.8
第 2 波	0.06	0.02	0.08	45	0.56	0.35	0.91	35	40	9.3	17.5	11.4
第 3 波	0.08	0.06	0.14	45	0.29	0.16	0.45	60	52	3.6	2.7	3.2
第 4 波	0.12	0.03	0.15	50	0.39	0.31	0.70	30	40	3.3	10.3	4.7
第 5 波	0.05	0.04	0.09	35	0.36	0.28	0.64	45	40	7.2	7.0	7.1
第 6 波	0.05	0.02	0.07	45	0.41	0.24	0.65	35	40	8.2	12.0	9.3
第 7 波	0.02	0.05	0.07	45	0.29	0.14	0.43	35	40	14.5	2.8	6.1
第 8 波	0.03	0.04	0.07	45	0.12	0.14	0.26	45	45	4.0	3.5	3.7
第 9 波	0.03	0.03	0.06	40	0.17	0.18	0.35	30	35	5.7	6.0	5.8
第 10 波	0.0	0.01	0.01	25	0.19	0.17	0.36	40	32	—	17.0	36.0

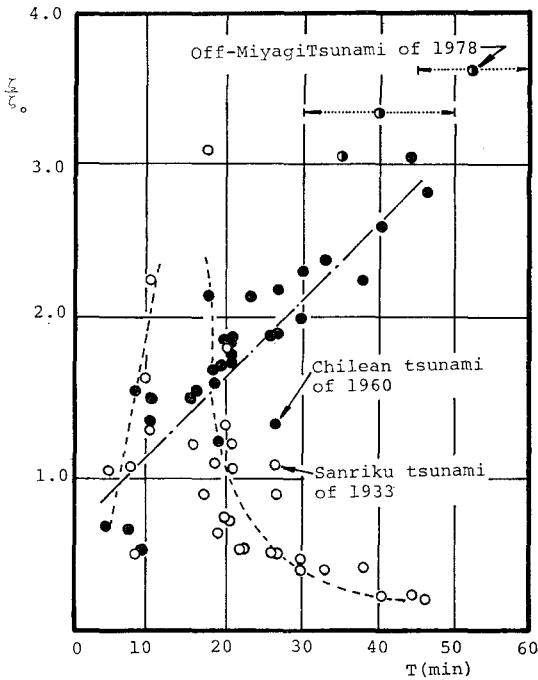


図-6 三陸沿岸における各湾の固有振動周期に対する湾奥の相対的大波高(渡辺偉夫に基づく)

4. 結 論

津波記録のスペクトル解析と2次元数値モデルによる

数値解により、津波に対する湾水の挙動が個々の地域性に強く関与していることが示された。女川湾の場合、湾水振動の background は約 40 分を中心とする主振動と湾奥小分岐湾間の横振動(中心周期約 15 分)および周期 8 分の振動であり、津波の侵入に伴いそれらの振動系を中心に湾水は励起される。津波後半に至り、女川沖陸棚セイシュに帰因するような他の振動モードが顕在化する。また、津波スペクトルの時間的変化を地域固有の周期成分に関して調べることで、津波による湾水振動の非定常性についての性質を知ることができよう。

女川湾内各地の湾口に対する津波の増幅率はその主振動と防波堤内振動のモードに対して顕著であるといえる。最後に本計算は東北工業大学計算センター HITAC M-160H を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Watanabe, H.: Studies on the tsunamis on the Sanriku coast of North-eastern Honshu in Japan, Geophy. Magazine, Vol. 32, 1964.
- 2) 相田 勇: 女川湾内外の長周期波の挙動, 海洋科学, 5 巻, 8 号, pp. 554~559, 1973.
- 3) 岩崎敏夫・阿部至雄・相原昭洋: 1978 年宮城県沖地震津波による海水振動特性, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 143~147, 1979.
- 4) 日野幹雄・日野和子: 東京湾の進入長波に対する振動応答特性, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp. 98~107, 1964.