

## 海岸で観測した静振のスペクトル卓越周期から判明する陸棚振動

阿部 邦昭

### 1. はじめに

津波の際に観測される卓越振動を説明するためには津波のない時の振動 - 静振の観測が必要である。この視点から日本で静振の観測を行ってきた (Abe, 2003, 2009, 2011a, 2011b)。また陸棚振動に関しては高橋・相田 (1961) が女川沖, 林他 (1978) が鹿島沖, いずれも太平洋で観測を行って陸棚振動の存在を認めている。新潟県には佐渡, 粟島の複雑な海岸と平坦な本州海岸が共存している。今回, 県内 25 か所でのべ 53 回静振を観測した結果について, すでに公表した部分も含めてスペクトルの卓越周期を求めた。その結果に対して陸棚振動との関係, 地震津波での陸棚振動の励起について考察した。

### 2. 方法

静振の測定方法はおもりを付けて水中に沈めて圧力を水位に換算する圧力センサーを使って測定する従来の方法と同じである。1 分間隔で 6 時間の水位を測定し, 潮位の補正をしてスペクトルを求める。スペクトルの帯域は振動数で 3.6mHz (周期 4.6 分) までを求めている。振幅はその帯域での平均値を基準にしてその比で表す。1 か所で測定を繰り返した場合はそれらの平均を取って 1 スペクトルで代表させる。スペクトル振幅比の最大値が得られる周期が卓越周期である。次にこれを観測点前面の海の陸棚振動との間で周期を比較する。陸棚は海図から求めた断面図をもとに水深一定のステップ状陸棚でモデル化し, モデルから長さ, 水深を決めてそれをもとに振動周期を計算する。長さ  $L$ , 水深  $h$  の陸棚振動周期  $T_s$  は

$$T_s = \frac{4L}{m\sqrt{g h}}$$

$$(m=1, 3, 5, \dots)$$

で表される。g は重力加速度である。これはメリアンの式である。

またこれらの卓越周期が津波の時にどのように表れたかを見るため, 1964 年新潟地震の津波検潮記録から求めたスペクトルの卓越周期と比較する。

### 3. 結果

測定点を図 1 の地図上に, 表 1 に位置座標と測定期日, 時間を示す。測定点番号は主番号が位置を, 副番号は同一地点の測定順を表す。測定点で検潮所のあるところはそのごく近傍を選んでいる。これは津波の検潮記録と比較するためである。測定時間が重なっているのは比較のため 2 台のセンサーを同時に動かしている場合である。図 2, 3 はその振幅スペクトルである。横軸は振動数で単位は mHz, 縦軸は平均値で正規化した振幅である。その最大値が得られる周期を卓越周期と呼ぶことにし, これを図にしたものが図 4 である。図から佐渡島で 6 分から 100 分台まで幅広く分布するのに対し, 本州では 30-40 分が多い分布になっている。両津湾湾奥の両津検潮所の平均スペクトルの卓越周期は 21 分, 真野湾湾奥佐和田では平均が 49 分となっている。両湾ではその隣の測定点でも同じ卓越周期が得られた。これは Abe (2003) が固有周期とした値と比べると両津湾で -1 分, 真野湾で +2 分の差がある。他の測定点は比較できるような過去の結果はない。今回の測定結果の中で周囲と比べて突出して長い周期が卓越し

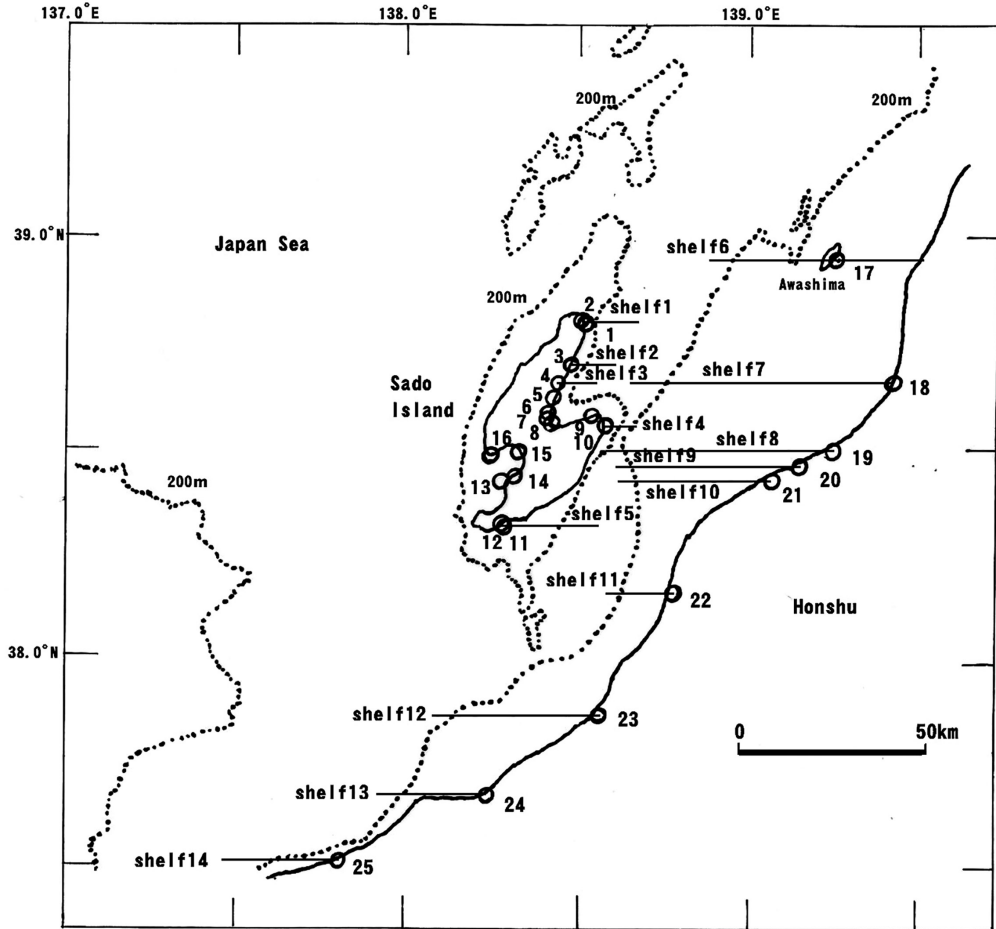


図1 観測点 (○) と陸棚断面の位置 (—)

た所がある。それは白瀬、小木検潮所、大立、粟島、寺泊である。白瀬は両津湾の奥の21分に対して49分、大立は真野湾の奥が49分に対して119分でいずれも2倍以上の値である。この卓越周期が急変する場所を湾の境界とみなし、その外側を陸棚振動を調べる対象にしている。

#### 4. 考察

##### 4-1 陸棚振動

外海に面している14測定点に対し海底断面をモデル化する。ごく近傍で測定した鷺崎検潮所とその港、小木検潮所とその港はそれ

ぞれ同じ断面を共有するとしている。断面はわかりやすいことを理由に東西でとることにし、200m水深を陸棚の端とみなすことにする。粟島は島の東岸にあるが、東側では200mより深いところがないので、かわりに本州海岸を陸棚の出発点にし、西に向けて広がる海の陸棚を考えている。水深200mまでの海岸からの水平距離を陸棚の長さ $L$ 、その中点 $0.5L$ の距離での水深 $h$ を陸棚の水深と定義して陸棚断面図から $L$ 、 $h$ を決め、陸棚の振動周期 $T_s$ の式を使って周期を求める。図5は陸棚断面図で上段はshelf2とshelf8のもの、下段は陸棚の長さ $L$ と水深 $h$ の定義を説明するためのものである。粟島沖の断面では

表1 測定点の番号, 地名, 経度, 緯度, 測定日, 時間, 記録間隔

	SeicheObs	longitude	latitude	date	time	sample time	
	1	Washizaki tide st.	138.5172	38.3192	2007/11/2	10:17-16:16	1 min
	2	Washizaki port	138.5175	38.3203	2007/11/2	10:17-16:16	1 min
	3	Uragawa	138.49	38.2018	2006/3/25	6:56-12:55	1 min
	4	Waki	138.4617	38.1633	2006/3/24	16:27-22:26	1 min
	5-1	Shirose	138.4526	38.1374	2006/3/24	22:50-4:49	1 min
	5-2	Shirose	138.4526	38.1374	2007/5/2	7:45-13:44	1 min
	6-1	Umezu	138.4374	28.0912	2002/8/23	11:37-17:36	1 min
	6-2	Umezu	138.4374	28.0912	2002/8/23	17:47-23:46	1 min
	6-3	Umezu	138.4374	28.0912	2002/8/23	23:47-5:46	1 min
	6-4	Umezu	138.4374	28.0912	2002/8/24	5:55-11:54	1 min
	7	Ryotsu fish port	138.4379	38.0849	2007/5/2	7:51-13:50	1 min
	8-1	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2006/3/24	9:20-15:19	1 min
	8-2	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2006/3/24	16:15-22:14	1 min
	8-3	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2006/3/24	22:38-4:37	1 min
	8-4	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2006/3/25	6:44-12:43	1 min
	8-5	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2007/11/2	18:17-0:16	1 min
	8-6	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2007/11/3	0:17-6:16	1 min
	8-7	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2007/11/3	0:17-6:16	1 min
	8-8	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2008/3/22	6:25-12:24	1 min
	8-9	Ryotsu tide st.	138.4361	38.0833	2008/3/22	12:25-18:24	1 min
	9	Ookawa	138.5533	38.0811	2006/3/24	9:32-15:31	1 min
	10	Suitsu	138.5728	38.0716	2008/3/21	9:30-15:29	1 min
	11	Ogi tide st.	138.2814	37.8147	2007/11/3	9:31-15:30	1 min
	12	Ogi port	138.2807	37.8158	2007/11/3	9:31-15:30	1 min
	13-1	Ootatsu	138.2966	37.9221	2006/3/23	17:37-23:36	1 min
	13-2	Ootatsu	138.2966	37.9221	2007/5/1	10:08-16:07	1 min
	14-1	Toyota	138.3362	37.9532	2006/3/23	17:31-23:30	1 min
	14-2	Toyota	138.3362	37.9532	2007/5/1	23:28-5:27	1 min
	15-1	Sawata	138.3215	37.996	2002/8/22	9:24-15:23	1 min
	15-2	Sawata	138.3215	37.996	2002/8/22	15:37-21:36	1 min
	15-3	Sawata	138.3215	37.996	2002/8/22	21:43-3:42	1 min
	15-4	Sawata	138.3215	37.996	2002/8/23	3:48-9:47	1 min
	15-5	Sawata	138.3215	37.996	2006/3/23	10:40-16:39	1 min
	15-6	Sawata	138.3215	37.996	2006/3/23	17:25-23:24	1 min
	15-7	Sawata	138.3215	37.996	2006/3/23	23:47-5:46	1 min
	15-8	Sawata	138.3215	37.996	2007/5/1	10:08-16:07	1 min
	15-9	Sawata	138.3215	37.996	2007/5/1	16:57-22:56	1 min
	15-10	Sawata	138.3215	37.996	2007/5/1	23:28-5:27	1 min
	16-1	Futami	138.2829	37.9761	2006/3/23	10:52-16:51	1 min
	16-2	Futami	138.2829	37.9761	2007/5/1	16:57-22:56	1 min
	17-1	Awashima	139.2556	38.4689	2003/6/14	13:12-19:11	1 min
	17-2	Awashima	139.2556	38.4689	2003/6/14	19:55-1:54	1 min
	17-3	Awashima	139.2556	38.4689	2003/6/15	5:50-11:49	1 min
	18	Iwafune	139.4149	38.1878	2003/4/6	11:10-17:09	1 min
	19-1	Niigata East port	139.2215	37.9893	2003/2/14	23:18-5:17	1 min
	19-2	Niigata East port	139.2215	37.9893	2003/2/21	21:58-3:57	1 min
	20-1	Aganogawa	139.1414	37.9481	2002/12/22	17:47-23:46	1 min
	20-2	Aganogawa	139.1414	37.9481	2002/12/23	23:47-5:46	1 min
	21	Niigata West port	139.0619	37.9422	2002/11/22	22:02-4:01	1 min
	22	Teradomari	138.7658	37.6431	2003/05/03	6:08-12:07	1 min
	23	Kashiwazaki	138.5306	37.3653	2003/05/02	16:48-22:47	1 min
	24	Naetsu	138.2547	37.1847	2003/5/02	09:25-15:24	1 min
	25	Himekawa	137.8367	37.0397	2007/10/6	10:35-16:34	1 min

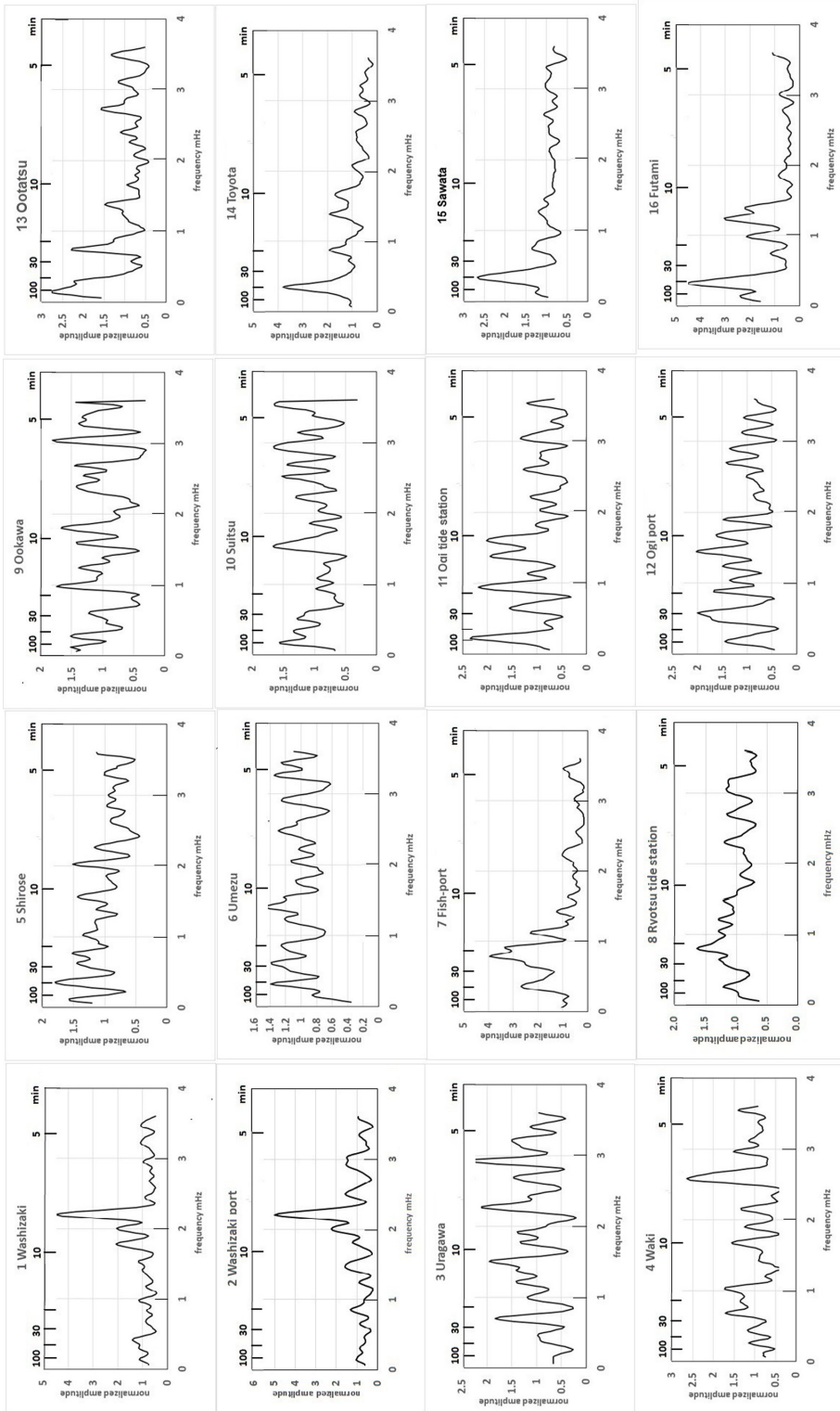


図 2 観測された静振のスペクトル 1, 佐渡島

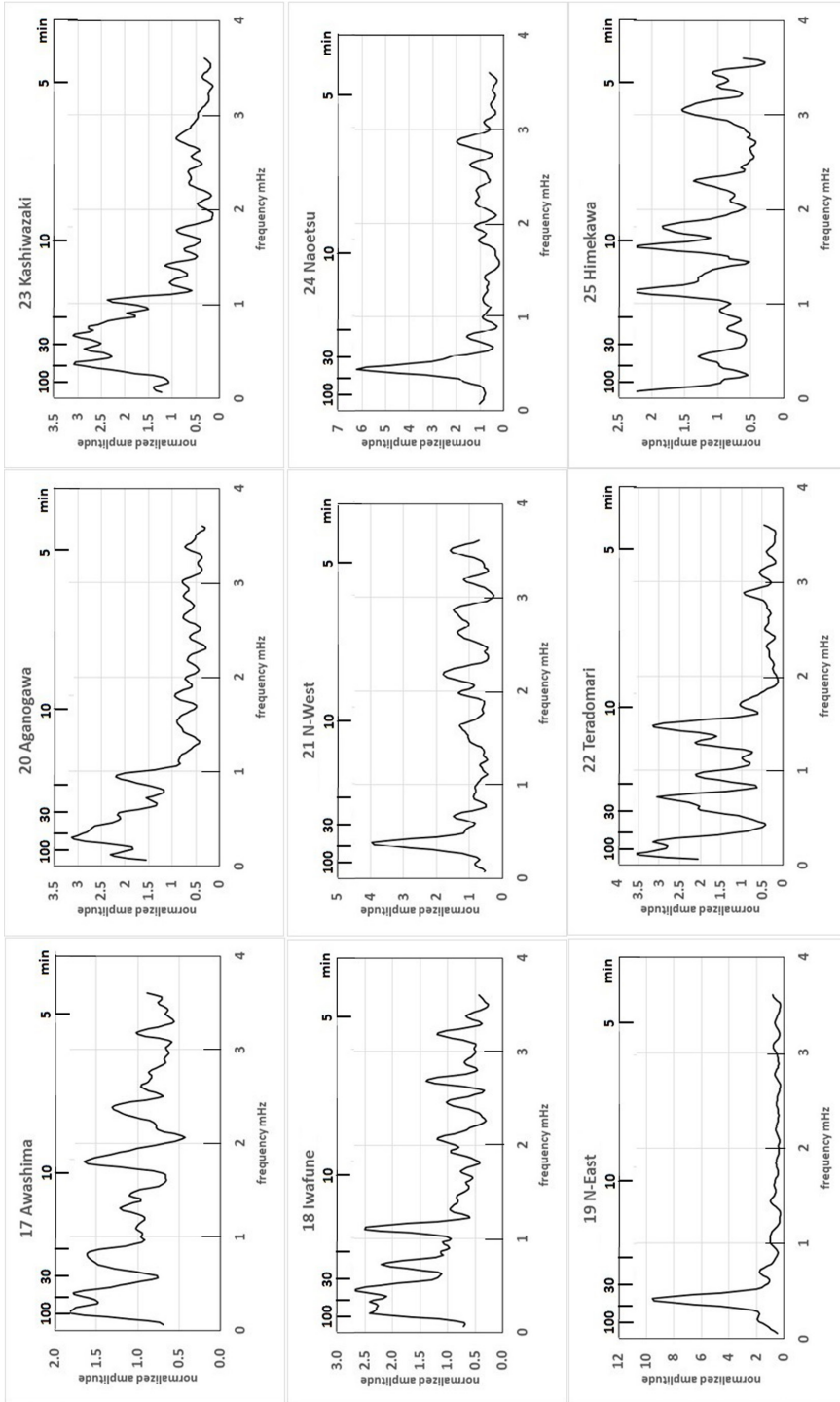


図3 観測された静振のスペクトル2, 粟島, 本州

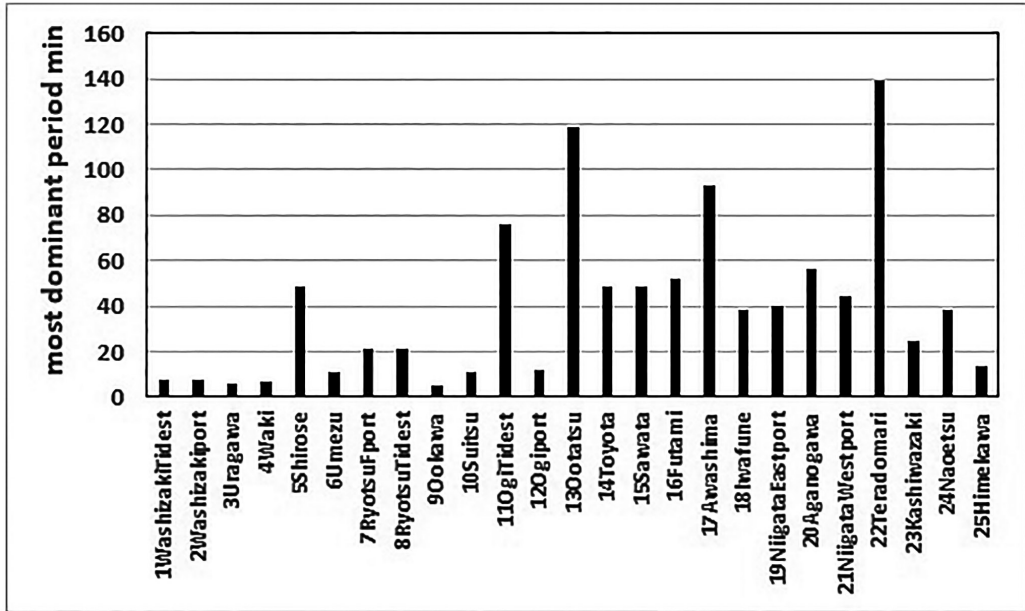


図 4 最大卓越周期

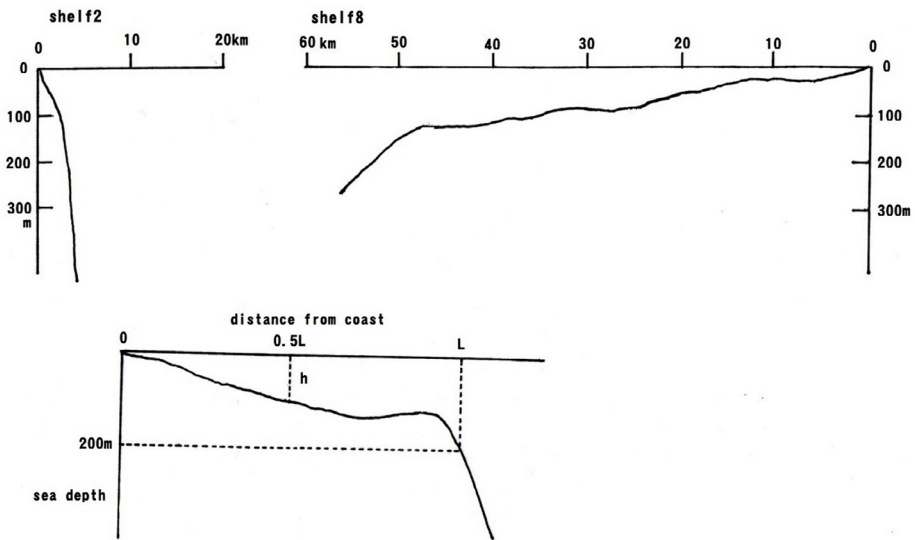


図 5 陸棚断面図, 上段左図 Shelf 2, 上段右図 Shelf 8, 下段 陸棚長さ L, 水深 h の定義

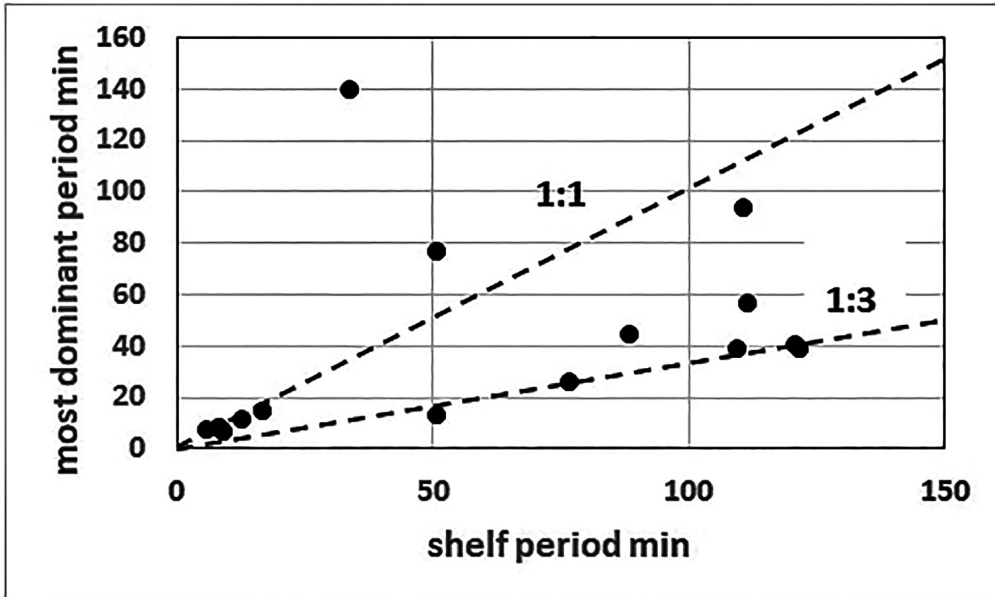


図6 陸棚周期（横軸）に対する最大卓越周期（縦軸），図中の点線は最大卓越周期：陸棚周期

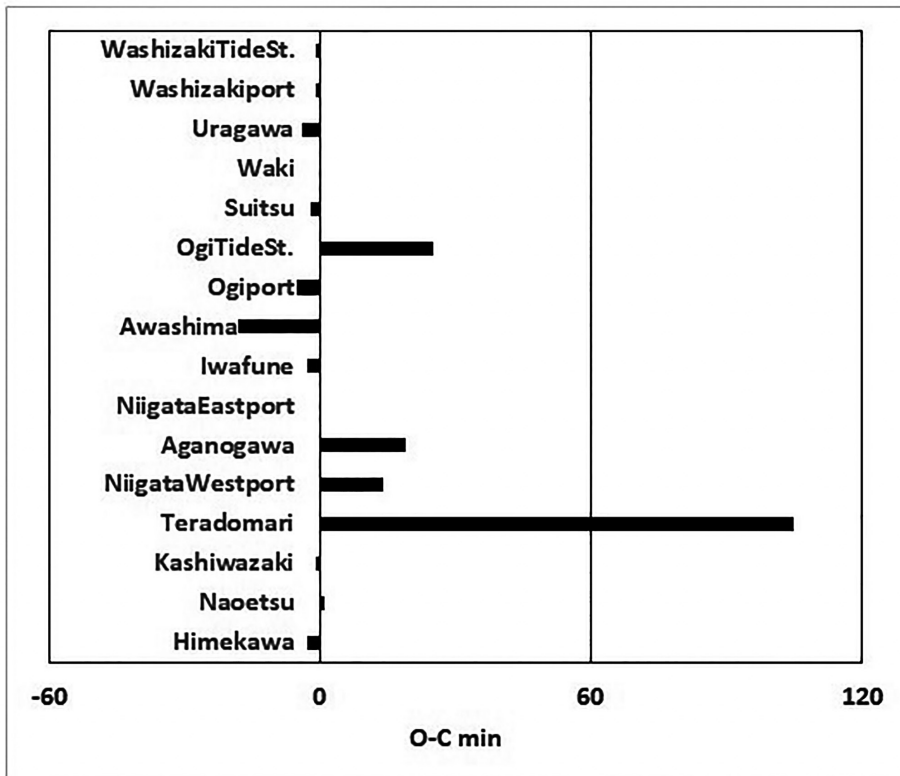


図7 静振卓越周期 (O) と適用した陸棚周期 (C) の差 (O-C)

表 2 陸棚の番号, 測定点番号, 長さ (L), 水深 (h), 陸棚周期 (Ts)

profile	length	sea depth	period
name	L:km	h:m	Ts(m=1):min
shelf 1	4	100	8.5
shelf 2	3.5	60	9.6
shelf 3	2.6	80	6.2
shelf 4	6	100	13
shelf 5	15	40	51
shelf 6	47	81	111
shelf 7	60	110	122
shelf 8	54	90	121
shelf 9	44	70	112
shelf 10	35	70	89
shelf 11	13	65	34
shelf 12	36	100	77
shelf 13	23	20	110
shelf 14	8	100	17

表 3 静振卓越周期と陸棚周期の適用基本周期, 同じく 3 倍高調波周期, 静振卓越周期 (O) と適用周期 (C) の差

No	obs point	obs period (To)	cal period (Ts)			To-Ts (O-C)
		min	m:1 min	m:3 min	model	min
1	Washizak tide st.	7.6	8.5		shelf 1	-0.9
2	Washizaki port	7.6	8.5		shelf 1	-0.9
3	Uragawa	5.7	9.6		shelf 2	-3.9
4	Waki	6.5	6.2		shelf 3	0.3
10	Suitsu	11	13		shelf 4	-2
11	Ogi tide st.	76	51		shelf 5	25
12	Ogi port	12		17	shelf 5	-5
17	Awashima	93	111		shelf 6	-18
18	Iwafune	38		41	shelf 7	3
19	Niigata East port	40		40	shelf 8	0
20	Aganogawa	56		37	shelf 9	19
21	Niigata West port	44		30	shelf 10	14
22	Teradomari	139	34		shelf 11	105
23	Kashiwazaki	25		26	shelf 12	-1
24	Naoetsu	38		37	shelf 13	-1
25	Himekawa	14	17		shelf 14	-3



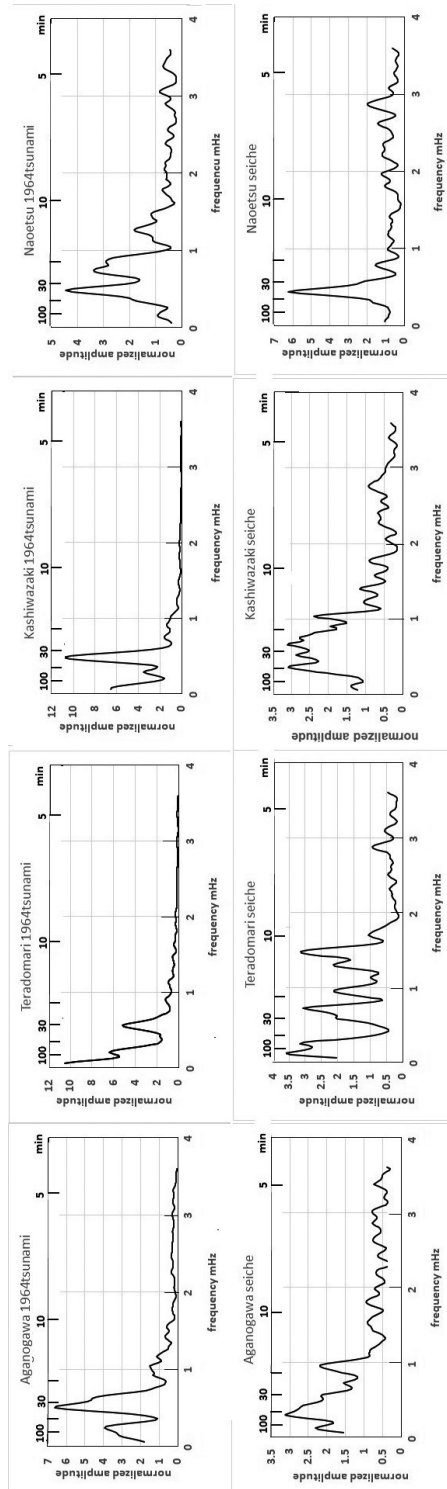


図8 1964年新潟地震津波のスペクトル(下段)と静振スペクトル(上段一図2と同じ) 左から阿賀野川、寺泊、柏崎、直江津

0.5 L の位置に粟島があるので、 $h$  はこれを避けて粟島南方 2.5km の位置の水深 81m を使っている。表 2 は各断面の  $L$ ,  $h$ ,  $T_s$  を示したものである。これから得た陸棚周期  $T_s$  を、対応する断面にある観測点の静振卓越周期  $T_o$  と比較したものが図 6 である。図は横軸に  $T_s$  を、縦軸に  $T_o$  を取ってプロットしている。図中の点線は  $T_o$  と  $T_s$  の比が上から順に 1:1 と 1:3 の場合を示すものである。静振卓越周期で 50 分を境にして、より短い場合は 1:1、より長い場合は 1:3 の直線に載るものが多くみられる。1:1 は  $T_s$  の式で  $m$  が 1、1:3 は  $m$  が 3 の場合に当たる。阿賀野川と新潟西港の場合 1:3 の関係より上にプロットされ 1:2 とすると説明できる。両者は測定点が川の中である点で共通している。津波の最大水位の測定によると川の河口に到達した津波は、海岸で反射する場合と違って、遡上し透過するので振動の腹にならない (Abe, 1986)。これを腹ではなく節であるとすると 1:2 の関係を説明できる。

表 3 は静振の卓越周期  $T_o$  と適用した陸棚周期  $T_s$  を表にしたもの、図 7 は  $T_o$  とその  $T_s$  の差、 $O-C$ 、をグラフにしたものである。誤差を 5 分とすると 25 点のうちで 11 点、69% がこの範囲にある。阿賀野川と西港における陸棚周期として基本周期の 1/2 を使うとこの誤差範囲に収まる数は 13 点、81% になる。この範囲に収まらないのは寺泊、小木、粟島の 3 点になる。これらはすべて静振卓越周期が 70 分以上で長いことから大規模な構造が影響していること、水平方向に地形が変化する 2 次元構造が関係していることなどが原因として考えられる。

#### 4-2 1964 年新潟地震津波での陸棚振動の励起

1964 年新潟地震津波に対して阿賀野川、寺泊、柏崎、直江津の 4 検潮所で得られた記録からスペクトルを求めた。スペクトルを求めるにあたり潮位補正のほか、検潮所に固有な応答の補正も行った。応答補正のデータと方法は Satake et al., (1985) に依っている。

ただし補正量は小さい。その結果を図 8 の上段に示す。下段には比較のため検潮所と同一点とみなせるごく近傍で測定した静振のスペクトル (図 2 と同一) を示している。両者の比較から津波スペクトルの中での陸棚振動の影響を調べた。計算で求めた陸棚振動の周期は阿賀野川、寺泊、柏崎、直江津でそれぞれ 111,34,77,110 分である。これに対する静振の卓越周期はそれぞれ 56,139,25,38 分であった。これを津波で卓越した周期と比較する。津波の最大卓越周期は阿賀野川、寺泊、柏崎、直江津でそれぞれ 33,280,35,35 分である。直江津の 35 分は静振の卓越周期 38 分に近く、陸棚振動周期 110 分のほぼ 3 分の 1 に一致する。これにより津波は陸棚卓越周期の高調波の周期に一致したことが分かる。また寺泊の津波で 3 番目に大きい振幅の 30 分は陸棚振動から期待される 34 分の周期と近似した値になっている。陸棚振動が励起された結果と考えられる。阿賀野川、柏崎の場合は最大卓越周期がそれぞれ 33、35 分で陸棚振動の計算値の 1/2、1/3 から値が離れている。両者は近い値であることやスペクトルの形が類似することから、波源から放射された波が経路の影響を受けずに検潮所に到達したものと考えられる。4 点の中で、阿賀野川、柏崎では陸棚振動の影響がみられないが、最遠地点の直江津ではその影響が大きく出ている。津波で陸棚振動が励起されるには波源から一定の距離が必要のようである。

## 5. まとめ

新潟県の海岸 25 か所で観測した静振からスペクトルを求め、その最大卓越周期から外海に面する海岸で陸棚に由来する振動が卓越していることを指摘した。陸棚を観測点を含む東西断面図から階段状陸棚で近似して、その幅と深さの組み合わせから求めた陸棚周期が静振の最大卓越周期と一致したことが指摘の根拠である。最大卓越周期が 10 分未満に対してはその基本周期で、より長い周期に対してはその 3 倍高調波の周期で説明される。

阿賀野川、新潟西港の静振卓越周期は3倍高調波の周期より長くなっているが、両者は川の中にあることで予想される陸棚周期より長くなっている。寺泊、小木、粟島の最大卓越周期はこの陸棚周期の式で予想される値より大幅に長いがこれは3点の2次元的な大規模構造が反映している。

佐渡の湾状地形に対しては9-10回測定を繰り返し、両津湾では卓越周期が21分、真野湾では49分の値を得た。これは前回の検討結果と1-2分の差があるが、矛盾するものではない。

#### 参考文献

- Abe, K., 1986, Tsunami propagation in rivers of the Japanese Islands. *Continental Shelf Research*, 5, 665-677.
- Abe, K., 2003, Long-wave measurements at bay-shaped coasts using a pressure gauge (II) -Mano and Ryotsu bays, *Bull. Nippon Dental Univ., General Education*, 32, 15-26.
- Abe, K., 2009, Excitation of resonant modes along the Japanese coast by the 1993 and 1983 tsunamis in the Japan Sea, *Pure and Applied Geophys.*, 166, 117-130.
- 阿部邦昭, 2011a, 静振の再測から求めた湾や港の卓越周期 (1) 東北日本太平洋岸, *日本歯科大学紀要*, 40, 13-22.
- 阿部邦昭, 2011b, 静振の再測から求めた湾や港の卓越周期 (2) 西南日本太平洋岸, *日本歯科大学紀要*, 40, 23-30.
- Satake, K., M. Okada and K. Abe, 1988, Tide gauge responses to tsunamis: Measurements at 40 tide gauge stations in Japan, *J. Marine Research*, 46, 557-571.
- 高橋龍太郎, 相田 勇, 1961, 津波スペクトルの研究, *地震研究所彙報*, 39, 523-535.
- 林 直樹, 高橋英彰, 山本政光, 1978, 外海における長周期波の観測, 第25回海岸工学講演会論文集, 14-16.