紀伊半島沿岸における湾の卓越周期の 測定と津波に対する応答

日本歯科大学新潟短期大学* 阿 部 邦 昭

Observations of Dominant Periods at Bays in Kii Peninsula and the Tsunami Response

Kuniaki ABE

College at Niigata, Nippon Dental University, Hamauracho 1-8, Niigata 951-8580, Japan

(Received August 25, 2004; Accepted May 9, 2005)

We observed seiches at 28 bays in Kii Peninsula, Japan, by the use of a pressure gauge and determined the dominant periods from the spectra. The spectra were extracted from time series of 1 minute sampling for 6 hours using Hanning window. Comparing the dominant periods with the maximum wave heights observed at the heads in the 1944 Tonankai tsunami and the 1960 Chilean tsunami, we obtained tsunami height dependence on the dominant period. Moreover, a tsunami height ratio, defined as a ratio of the maximum tsunami height at the head to that at the open coast, was plotted as a function of the dominant period. They showed the maximums at 12-25 and 31-60 minutes for the 1944 Tonankai tsunami and the 1960 Chilean tsunami, respectively. It was attributed to resonance of bays. At the resonance periods the height ratios are 2 for 1944 and 4 for 1960 tsunamis, respectively. The dominant periods, thus obtained, are useful as basic data for predicting tsunami amplifications of bays.

Key words: Bay, Tsunami, Seich, Dominant period, Resonance

§ 1. はじめに

紀伊半島は熊野灘のプレート境界で発生する地震による津波を最初に観測する地域である。同時に紀伊半島は西太平洋の端にあり東南アジアや南米に起源をもつ津波を観測する地域でもある。1944 年東南海津波は熊野灘のプレート境界で発生した大地震による津波であり、その波源は多くの人々によって取り上げられた [たとえば相田 (1979), Ando (1975), Inokuchi and Sato (1975)]。しかし紀伊半島の入り組んだ海岸を構成する湾での津波の挙動については取り上げられることが少なかった。

最近, Abe (2005) は三陸地方において 36 個の湾の卓越周期を観測し, 湾での津波の増幅度を湾奥の最大波高/湾口の最大波高で定義し, 1896 年と 1933 年の三陸津波, 1960 年チリ津波, 1968 年十勝沖津波の増幅度と卓越周期の比較を行った。その結果, 特定の周期で増幅度が増加していることを示して共鳴の重要性を指摘し

た。津波が共鳴により増幅されるのであれば, このような結果は地域によらずに普遍的に成立しなければならないものである。そこで卓越周期が明確ではない紀伊半島の湾や港で卓越周期を観測し, 津波の増幅度と卓越周期の関係を調べることにした。津波の増幅を調べるためには, 津波の波高調査が行われて, 湾の内外での波高が分かっているなければならない。そのような津波の事例は少ないが, 熊野灘に発生した 1944 年東南海地震津波と南米起源の 1960 年チリ津波はデータがあるので, それが可能である。そこで両津波における湾の奥と湾外の外海に面した海岸での波高を参照することで波高比を求め, 観測した卓越周期と比較する。

§ 2. 観測方法および使用データ

卓越周期の観測方法は測定装置と測定場所を含めて Abe (2005) の方法に同じである。つまり水位測定には半導体圧力センサーを使い, 場所は湾奥の船着き場, 測定間隔 (サンプリング) は 1 分で合計測定時間 6 時間で

* 〒951-8580 新潟市浜浦町 1-8

Table 1. List of observation points. The numbers correspond to those both in the detailed maps in Figs. 2-7 and in the spectra plot in Fig. 8.

No	bay	name of obs plad	longitude	latitude	date of observation
1	Ise	Nagoya port	136-53	35-05	2002 12 31 3:28-9:39
2	Matoya	Sakasaka	136-50	34-21	2002 12 30 5:24-11:24
3	Igo	Kashikozima	136-49	34-18	2002 12 29 22:52-4:52
4	Gokasyo	Gokasyoura	136-42	34-21	2002 12 29 12:01-18:01
5	Nie	Iashikaraura	136-34	34-17	2002 12 29 5:19-11:19
6	Kamisaki	Kamisaki	136-30	34-13	2002 12 28 22:47-4:47
7	Kowaura	Kowaura	136-28	34-15	2002 12 28 15:29-21:29
8	Nishiki	Nishiki	136-24	34-13	2002 12 28 8:43-14:43
9		Nagashima	136-20	34-17	2002 12 27 11:24-17:24
10	Owase	Yaguchiura	136-17	34-07	2003 4 1 19:03-1:03
11	Owase	Owase	136-12	34-04	2002 12 28 1:40-7:40
12	Kuki	Nago	136-15	34-01	2003 4 1 12:02-18:02
13	Haida	Haida	136-16	34-00	2003 4 1 5:32-11:32
14	Kata	Kata	136-12	33-58	2003 3 31 22:48-4:48
15	Nigishima	Nigishima	136-11	33-56	2003 3 31 12:33-18:33
16	Atashika	Atashika	136-09	33-55	2003 3 31 6:10-12:10
17	Tomari	Odawari	136-08	33-54	2003 3 30 21:51-5:01
18	Nachi	Nachi	135-57	33-39	2003 3 29 7:32-13:32
19	Moriura	Moriura	135-56	33-35	2003 3 30 9:21-15:21
20	Taiji	Taiji	135-57	33-35	2003 3 30 15:41-21:41
21	Tamanoura	Urakami	135-54	33-33	2003 3 29 14:11-20:11
22	Kushimotokami	Kuro	135-47	33-28	2003 3 29 20:50-2:50
23	Tanabe	Atanoura	135-24	33-48	2003 7 23 11:50-17:50
24	Yura	Yura	135-07	33-57	2003 7 23 19:50-1:50
25	Yuasa	Yuasa	135-10	34-02	2003 7 24 4:52-10:52
26	Shimotsu	Shimotsu	135-08	34-06	2003 7 24 11:51-17:51
27	Wakanoura	Kainan port	135-13	34-09	2003 7 24 18:30-0:30
28	Osaka	Osakaminami port	135-26	34-37	2003 7 27 16:04-22:04

ある。その時系列データをスペクトルに分解して最大ピークの周期を卓越周期と決める。時系列データにはHanningのウィンドウを施し、スペクトルの計算はゲルツェル法を用い、得られた周波数スペクトルには0.04 mHzの幅で移動平均を施し平滑化して示す。

卓越周期の観測点はその点の緯度、経度を測定日時とともに Table 1 に示した。これらの点は伊勢湾から大阪湾までの紀伊半島の湾や港 28 カ所である。湾名（測定点）および港の名前を挙げると東から順に、伊勢湾（名古屋港）、的矢湾（坂崎）、英虞湾（賢島）、五カ所湾（五カ所浦）、贅湾（榑浦）、神前湾（神前）、古和浦湾（古和浦）、錦湾（錦）、長島、尾鷲湾（矢口浦）、尾鷲湾（尾鷲）、九鬼湾（名古）、早田湾（早田）、賀田湾（賀田）、二木島湾（二木島）、新鹿湾（新鹿）、泊湾（大泊）、那智湾（那智）、森浦湾（森浦）、太地湾（太地）、玉之浦湾（浦神）、串本上浦（袋）、田邊湾（跡の浦）、由良湾（由良）、湯浅湾（湯浅）、下津湾（下津）、和歌の浦湾（海南港）、大阪湾（大阪南港）である。湾奥に船着き場がないときはできるだけ湾奥に近い船着き場を選んで観測点とした。そのため長島、大泊、森浦、袋などのように湾奥からずれたところが観測点になっているところもある。

次に比較すべき津波波高データであるが、1944 年東南海津波のものは中央気象台（1945）、表（1946）、飯田（1985）から引用する。また 1960 年チリ津波は高橋（1961）から引用する。Fig. 1 に卓越周期の観測を行う点の位置の概略、Figs. 2-7 に位置の詳細、および比較に用いるために引用した津波の最大波高とその測定点を示す。津波波高の測定値は引用文献の中で平均海水面からの高さで示されているので、本論でもこれを津波の波高とする。そしてそれを湾奥の波高として b (m) で定義す

Fig. 1. Locations of tsunami sources with crosses (top: 1960 Chilean tsunami, middle: 1944 Tonankai tsunami) and Kii peninsula (rectangle in the middle) with index map (bottom). Alphabets in the index map correspond to those of detailed maps shown later.

る。ここには痕跡を残した津波の到達時刻は一般に不明であるために、津波時の海面が決められない事情が反映している。なお波高データには引用文献の中で浸水高と遡上高の区別はない。

§ 3. 卓越周期と最大波高の関係

観測した水位の振幅スペクトルを Fig. 8 に示す。最大ピークには黒丸をつけた。これが卓越周期で T_d とし、分を単位にして Table 2 に湾奥の津波波高 b とともに示す。泊湾では最大値は 93 分になるがピークの孤立状態が良くなく、短周期側の 23 分のほうが振幅が小さい

Fig. 2. Detailed maps of A and B. Observation point, maximum water levels of 1944 and 1960 tsunamis are shown with solid circles, open and solid rectangles, respectively.

Fig. 3. Detailed maps of C. See also the caption of Fig. 2.

けれどもピークがはっきりしているので、これを最大卓越周期とみなした。伊勢湾、的矢湾、英虞湾、大阪湾では短周期側にはっきりしたピークは観測されなかったので長周期側の曲率の変化した点を最大卓越周期としたので、それぞれ、93, 93, 93, 69 分という周期が得られた。全体的にみてピークが明確に観測されているもの、明確でないもの、さらに振幅が同程度のピークが並立していて卓越周期を特定するのが難しいものがあり、卓越周期といってもその明瞭度に差があることがわかる。その中でピークが比較的明確にとらえられたのは、東から、五カ所湾、錦湾、長島、尾鷲湾、賀田湾、新鹿湾、串本上浦、由良湾などである。長島や串本上浦など湾の構造が

Fig. 4. Detailed maps of D and E. See also the caption of Fig. 2.

Fig. 5. Detailed maps of F and G. See also the caption of Fig. 2.

明確でないところでもピークが出ていることに注目したい。ピークの明確でないものも含めてすべての湾で Fig. 8 で黒丸で示すように卓越周期を決めて、10 分ごとにその頻度分布を取ったのが Fig. 9 である。これをみると 10 分台の 9 個が最も多く、次に、20 分台が 5 個、10 分

Fig. 6. Detailed maps of H and I. See also the caption of Fig. 2.

Fig. 7. Detailed maps of J and K. See also the caption of Fig. 2.

Fig. 8. Spectra of observed seiches. Solid circles denote the most dominant period. Numerals correspond to the numbers of observation points shown in detailed maps.

Table 2. List of observed dominant period T_d (min), maximum wave heights of tsunamis referred at bay head b (m), and at coast facing to the open coast a (m).

No.	bay	T_d min	$b(1944)$ m	$a(1944)$ m	$b/a(1944)$ m	$b(1960)$ m	$a(1960)$ m	$b/a(1960)$ m
1	Ise	93	1.5			1.6		
2	Matoya	93				1.4	0.8	1.8
3	Ago	93	2.9	3	1.0	1.2	0.8	1.5
4	Gokasyo	60	3	3	1.0	3.1	0.8	3.9
5	Nie	49				3.4	0.8	4.3
6	Kamisaki	20	6	3	2.0	1.2	0.8	1.5
7	Kowaura	24	6	3	2.0	1.2	0.8	1.5
8	Nishiki	16	6	3	2.0	2.0	0.8	2.5
9	Nagashima	18	4	3	1.3	1.5	0.8	1.9
10	Wase(Yaguchiura)	31	6.7	3	2.2	3.5	0.8	4.4
11	Wase(Wase)	36	5.1	3	1.7	3.4	0.8	4.3
12	Kuki	11	3.5	3	1.2	2.7	0.8	3.4
13	Haida	7	4	3	1.3	0.5	0.8	0.6
14	Kata	25	7.1	3	2.4	2	0.8	2.5
15	Nigishima	12	7.1	3	2.4	2.1	0.8	2.6
16	Atashika	12	6.1	3	2.0	2.6	0.8	3.3
17	Tomari	23	5.2	3	1.7	1.6	0.8	2.0
18	Nachi	11	4.1	3	1.4		0.8	0.0
19	Moriura	7	3	3	1.0	2	0.8	2.5
20	Taiji	11	4.4	3	1.5	0.8	0.8	1.0
21	Tamanoura	13	5.8	2.8	2.1	2.4	0.8	3.0
22	Kushimoto Kamiura	22				2.2		
23	Tanabe	49				3		
24	Yura	73						
25	Yuasa	12						
26	Shimotsu	9.6	0.4			1		
27	Wakanoura	35						
28	Osaka	69	0.2			1.4		

未満が4個でこれに続く．90分台の周期の湾は伊勢湾、
的矢湾、英虞湾で、東端の3湾である。

次に実際の津波について横軸に卓越周期 T_d 、縦軸に
最大波高 b を取ってプロットしたのが Fig. 10 である。
1944 年東南海津波では 1 m 以下の湾も多いがこれらは
すべて紀伊半島の西半分にある湾での値で、津波の波源
が紀伊半島の東側にあるために西側では減衰したことを
反映している [羽鳥(1974)]．東側の湾だけで考えると
12-25 分に最大値があり、両サイドで減少する分布と

なっている。1960 年チリ津波では 31–60 分で最大を示した分布になっている。

§ 4. 津波に対する応答

津波に対する応答を検討する場合、縦軸は波高ではなく増幅度にする必要がある。湾奥の津波波高に対する湾内増幅の基準は湾に入る津波の波高である。しかしその測定値はないので、その湾の近くの外海に面した海岸での津波波高で代用する。そこで、その外海に面した海岸での津波波高をプロットしたのが Fig. 11 である。外海に面した海岸での波高データは元々小さくて少ない中で湾の影響のないデータを選び出さなければならない。そ

の結果、測定されたデータはすべてプロットされた。これを見ると 2 つの津波で共通して英虞湾東岸の外海に面した海岸で周囲より高くなっている。これは海岸が外海に突き出ていることで屈折の効果が働き、波面が収束

Fig. 9. Frequency distribution of observed dominant period T_d .

Fig. 10. Maximum tsunami heights b observed at bay head in the 1944 Tonankai tsunami (top) and those of the 1960 Chilean tsunami (bottom) plotted against the dominant periods T_d (open circles and rectangles denote the observation at west coast of Kii peninsula).

Fig. 11. Maximum tsunami heights observed at open coasts and the observation points (diamonds for the 1944 Tonankai tsunami, triangles for the 1960 Chilean tsunami).

Fig. 12. Tsunami height ratio b/a vs dominant period T_d .

したためであると考えた。しかし両隣の矢湾、英虞湾では向きが屈折効果の大きい方向から東および西にそれていてその影響が及ばないと解釈し、1944年東南海地震津波では的矢湾から太地湾まで波高一定で3 m、玉之浦湾では少し減衰して2.8 mとした。また1960年チリ津波では的矢湾から玉之浦湾まで一定で0.8 mとした。この外海海岸波高が増幅の基準値でこれを a (m)で定義する。1944年、1960年の津波の湾奥での最大波高 b とその湾の近くで定義された外海海岸での最大波高 a との比で波高比 b/a を定義して、これと観測で得られた卓越周期 T_d との関連性を調査した。

串本以西と伊勢湾以東は減衰していると考えられるが平坦な外海に面した海岸でのデータがなくて入射波波高の外挿が困難なので、増幅の議論には使わない。湾奥と外海海岸の波高のそろっている矢湾から玉之浦湾までの範囲で、波高比 b/a を縦軸に、横軸に卓越周期 T_d をとってプロットしたのがFig. 12である。この図から1944年東南海津波は12-25分の湾と共鳴して増幅され、また1960年チリ津波は31-60分の湾と共鳴して増幅されたと考えられる。また1960年チリ津波の場合、11-12分にもピークがある。その波高比は3以上でこれは1944年東南海津波のものより大きい。つまりチリ津波の場合、11-12分にも大きな増幅があったといえる。

§ 5. 議 論

1944年東南海津波の共鳴下限周期12分は波源のサイズと水深にその根拠を求めることができる。羽鳥(1974)は波源域の再検討に関する論文の中で逆伝播図から得られた波源域を示しているが、これは長さや幅が190 km×80 km程度のだ円になっている。海溝軸に平行な方向が長さ方向で、直交する方向が幅方向である。今水深は幅方向では1000 mから2000 mであるから、長波の速度は99 m/sから140 m/sの間にあり、幅を1波長とすると周期は13分から10分の間にあることになる。これはここで推定した共鳴周期12-25分の下限値12分の値を含む範囲である。したがって12分の周期は幅方向を1波長とする津波の波源での周期から説明できる。近地津波はAbe (2004)によるとその卓越周期が10分(1896年三陸津波)、9.4分(1933年三陸津波)、22分(1968年十勝沖津波)と30分未満のものが多く、この場合もそれに当てはまる。

卓越周期の決定の決め手になるスペクトルのピークの現れ方に対して考察を加える。湾口と観測点を結ぶ線の方法が外海の海岸線の方法と直交しているところではピークが鋭く、斜交するところではピークは不明確になる。前者は由良湾の場合であり、後者は玉之浦湾の場合である。湾曲した湾の奥でなく中間の点で観測した場合、湾口に面した場所ではピークは鋭いが湾口に対して陰になるような場所ではピークの出方が弱い。前者の例は長島であり、後者の例は大泊である。枝分かれした湾の湾奥の場合、湾口と観測点を結ぶ線を遮るものがないところではピークが鋭く、遮るものがあるところ、すなわち屈曲した奥ではピークはでにくい。前者の例は尾鷲湾の尾鷲であり、後者の例は同じ湾の矢口浦である。これらの結果を総合すると明瞭なピークを観測するには観測点の湾口に対する直交性と直線性(遮るものがないこと)が重要であることを意味する。これはピークを構成する振動の励起源が外洋にあって湾口を通じて伝えられていることを示すものである。

矩形で水深一定の湾内津波の共鳴周期の最大増幅度はNakamura (1961)によると津波の波数に対応して増加する。ここでの波数は波長の逆数のそれとは違い、山と谷の数をいう。それによると波数1で増幅度2、2で4、3で6、4で8である。ただしその結果をわれわれの結果に引き直して考えるため、外海海岸での最大波高の0.5倍を入射波の振幅とみなした。なぜならば海岸で観測される津波の波高は完全反射の理由からそれ自身2倍になっているものと考えからである。そうすると共鳴周期での波高比の2は増幅度4に、4は8に置き換えてやればよい。したがって増幅度と波数の関係から

1944年東南海津波の場合は波数は2、1960年チリ津波の波数は4であったことになる。1944年東南海津波は周期が短く、かつ波源が海岸から遠くない地域であったことから、反射など波数を増やす過程が少なかったのに対し、1960年チリ津波は周期が長くかつ遠地津波であったため、陸棚振動を励起して波数を増加させる過程があったとすれば説明がつく。

紀伊半島太平洋岸の湾における卓越周期と津波の増幅度の関係を三陸海岸における Abe (2005) の結果と比較すると、紀伊半島の場合は共鳴する周期の幅がより広がっている。その原因として考えられることは紀伊半島の場合、湾の形が三陸の湾に比べて複雑に入り組んでいる場合が多く、卓越周期が多様であるためである。そのような湾の例として賀田湾、尾鷲湾が挙げられるが、尾鷲湾の観測スペクトルはピークが36分での最大のピークのほかに21分、12分にも36分よりは小さいがその7割ほどの高さでピークが出ている。したがって1944年東南海津波では36分ではなく12分のピークが津波と共鳴を起こしたことも考えられる。このように複雑な湾の形がピークの多いスペクトルを生じ、幅広の共鳴周期をえる結果につながったといえる。

この研究を通じて湾の卓越周期は津波の増幅度を議論するときの重要な指標になることが分かった。このことは入射する津波の周期が予測できれば増幅度を推定できることを意味する。その意味でここで測定した卓越周期は津波の増幅を議論する場合の基礎的なデータになると考えることができる。

§ 6. 結 論

紀伊半島の28カ所の湾や港で水位振動を測定することにより、卓越周期を求めた。この卓越周期に対して1944年東南海津波、1960年チリ津波の水位振動測定点近傍の津波最大波高をプロットすると周期依存性が認められた。紀伊半島東部に限ると外海海岸での津波最大波高値が一定(3.0 m: 1944年東南海津波, 0.8 m: 1960年チリ津波)と見なせることから、湾の内外での波高比を求め、卓越周期との関係を調べたところ、それぞれ、12-

25分、31-60分で最大になる分布を得た。これは湾の津波に対する共鳴の結果であると考えられることから、1944年東南海津波、1960年チリ津波の湾内入射時の周期がそれぞれ12-25分、31-60分であったと考えられる。また共鳴時の波高比としてそれぞれ2および4が得られた。これにより測定された卓越周期は津波の湾内増幅の指標となっていることが明確に示され、津波の湾奥波高は特定の周期の津波に対する共鳴として出現したとして理解できることになる。

謝 辞

査読者である谷岡勇市郎、今村文彦両氏のコメントにより原稿を大幅に改良することができました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- Abe, K., 2005, Tsunami Resonance Curve on Dominant Periods Observed at Bays, in "Tsunamis: Case Studies and Recent Developments", ed. by K. Satake, Kluwer Academic Publishers.
- 相田 勇, 1979, 1944年東南海地震津波の波源モデル, 地震研究所彙報, **54**, 329-341.
- Ando, M., 1975, Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai trough, Japan, *Tectonophysics*, **27**, 119-140.
- 中央气象台, 1945, 昭和19年12月7日東南海大地震調査概報, 94 pp.
- 羽鳥徳太郎, 1974, 東海・南海道沖における大津波の波源, *地震* **2**, **27**, 10-24.
- 飯田汲事, 1985, 東海地方地震津波災害誌, 愛知工科大学防災研究室, 800 pp.
- Inokuchi, N. and H. Sato, 1975, Vertical crustal deformation accompanied with the Tokai earthquake of 1944, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, **21**, 10-18.
- Nakamura, K., 1961, Motion of water due to long waves in a rectangular bay of uniform depth, *Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys.*, **12**, 191-213.
- 表 俊一郎, 1946, 昭和19年12月7日東南海大地震に伴った津浪, *地震研究所彙報*, **24**, 31-57.
- 高橋龍太郎(編), 1961, 1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告, 丸善, 397 pp.