

関東・東海沿岸で観測した静振のスペクトルと卓越周期

阿部 邦昭*

1. はじめに

日本における湾や港での静振は検潮所で観測される津波がいつも似た波形を描く事から注目される様になった (例えば大森, 1901)。以後, 検潮所の記録に頼らず, 独自に観測が行われたり (例えば Honda et al., 1908, 高橋, 1934, Aida et al., 1972), 検潮記録の中から原因を問わずに励起された特定周期の振動として, 観測点に固有の卓越周期を取り出す試みがされた (Nakano and Unoki, 1962)。1960 年のチリ津波は奥行き長い湾で大きく増幅された事から湾と津波の共鳴が取り上げられた (Kato et al., 1961)。そして湾の卓越周期を静振の観測から決めて津波の増幅度と関連づける事で, 多くの湾でえられた津波の水位から津波の周期を決める事が出来る事が示された (Abe, 2005a)。この後, 湾の卓越周期を求める目的で三陸以外に, 紀伊半島, 四国, 日本海沿岸の各地で測定が行われた (阿部, 2005b, 2006, Abe, 印刷中)。ここでは関東・東海沿岸の各地で静振の観測を行った結果を報告する。

2. 方法

低気圧や津波のないときの水位を圧力センサーで測定するもので, 従来の方と同じである (例えば Abe, 2005)。同じ型の圧力センサーが 2 台使用出来るので, 離れた場所で同時に測定する事が可能で, それを行う所もあるが, ほとんどは独立に使用する。測定を継続する時間は 6 時間, サンプリングの間隔は 1 分である。近くでまとめて多くの測定を行う場合と単独で行う場合がある。まとめて

多点を測定するときは移動には小型乗用車を用いる。湾の卓越周期を測るのが主たる目的であるので湾の奥の水位の高い所で, 出来るだけ岸壁がある所に圧力センサーをセットする。この地域では湾が少ないので検潮所の周囲, 港も測定の対象にする。測定結果のスペクトル解析も従来の方法を踏襲する。

3. 結果

測定した所は北は福島県小名浜港から南は愛知県知多半島の師崎まで 26 カ所で, 測定日は 2002 年 11 月から 2008 年 3 月までの間である。その位置は図 1 に, 測定個所の緯度, 経度, 測定日, 時刻は表 1 にまとめて示している。測定個所には検潮所がある関係で三宅島も含まれている。全 26 カ所で観測からえたスペクトルを図 2 にまとめる。スペクトル振幅の最大値に対応する周期を特に卓越周期 (振動数の場合は卓越振動数) と呼び, 最大でないがピークをなす周期は単に卓越するかピークに対応する周期と呼ぶ事にする。

3-1 スペクトルの型

えられたスペクトルのタイプを特定の周期が卓越する固有スペクトル型と, 卓越する特定の周期がない連続スペクトル型に分類する。2, 3 のピークがあって他の成分が減衰しているものは中間型として 3 分類する。固有スペクトル型の基準を第 2 のピークの振幅が最大振幅の 2/3 を越えないもの, 連続スペクトル型の基準を第 3 のピークの振幅が最大振幅の 2/3 を越すもの, とすると固有スペクトル型に分類されるのは北から大洗, 勝浦, 布良, 館山, 二俣新町, 内浦, 清水の 7 点, 連続スペクトル型に分類されるのは北から小名浜, 銚子港, 小湊, 千葉港, 坪田, 阿古, 大

* 日本歯科大学新潟短期大学

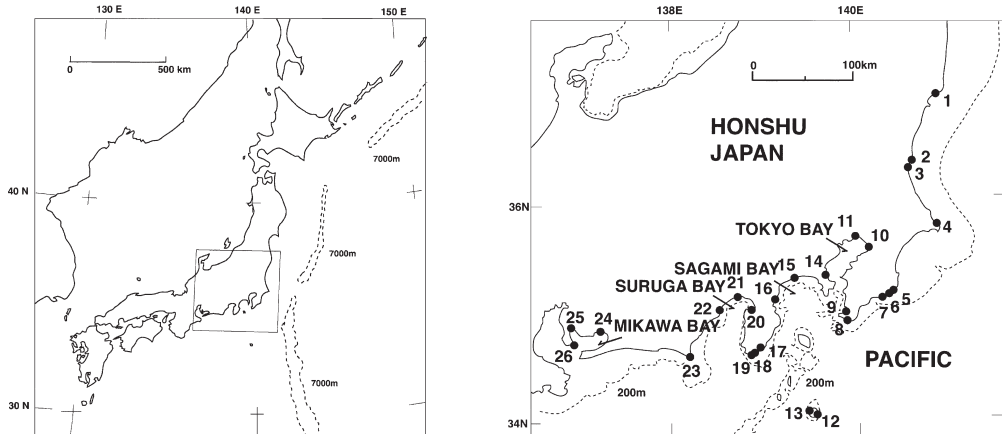


図 1 測定点の分布，●が測定点で番号の地名を表 1 で示す

表 1 測定点に関するデータ一覧 左から番号, 名前 (漢字), 名前 (ローマ字), 緯度, 経度, 測定日, 測定開始時刻の順

No	obs (J)	obs	lati	long	date	time
1	小名浜	Onahama	36-56-43	140-54-31	2006/ 5/ 2	6:25
2	那珂湊	Nakaminato	36-20-23	140-35-43	2006/ 4/30	7:56
3	大洗	Ooarai	36-18-37	140-34-44	2006/ 4/30	7:56
4	銚子港	Choshikou	35-44- 2	140-50-24	2006/ 4/29	14:55
5	御宿	Onjyuku	35-10-40	140-20-52	2006/ 4/29	5:30
6	勝浦	Katsuura	35- 8-52	140-18-41	2006/ 4/28	21:00
7	小湊	Kominato	35- 7-17	140-11-44	2006/ 4/28	13:10
8	布良	Mera	34-55- 7	139-49-29	2006/ 4/28	9:40
9	館山	Tateyama	34-59-14	139-51- 6	2006/ 4/28	5:35
10	千葉港	Chibakou	35-36- 8	140- 6-21	2007/ 5/20	12:30
11	二俣新町	Futamatahshinmachi	35-41-21	139-57-17	2003/ 5/25	11:37
12	坪田	Tsubota	34-03-31	139-32-44	2008/ 3/31	0:00
13	阿古	Ako	34-04-03	139-28-52	2008/ 3/30	18:00
14	横須賀	Yokosuka	35-17- 0	139-39-35	2007/ 3/18	9:03
15	大磯	Ooiso	35-18-25	139-19- 3	2002/11/10	11:00
16	熱海	Atami	35- 5-24	139- 4-40	2007/ 3/17	22:40
17	下田	Shimoda	34-40-21	138-56-48	2007/ 3/17	6:33
18	長津呂	Nagatsuro	34-36-30	138-50-35	2007/ 3/17	7:20
19	石廊崎	Irozaki	34-36-42	138-50-57	2007/ 3/17	13:08
20	内浦	Uchiura	35-01-07	138-53-07	2004/ 8/ 7	9:20
21	田子の浦	Tagonoura	35-08-37	138-41-07	2003/ 3/22	9:17
22	清水	Shimizu	35- 0-33	138-29-42	2007/ 3/16	11:30
23	御前崎	Omaezaki	34-36-39	138-13- 8	2007/ 3/16	8:26
24	三谷	Miya	34-48-44	137-14-48	2007/ 3/15	21:45
25	衣浦	Kinuura	34-53-11	136-56- 5	2007/ 3/15	13:33
26	師崎	Morozaki	34-42-06	136-58-30	2007/ 3/15	11:30

磯, 長津呂, 田子の浦, 御前崎, 三谷, 師崎の 12 点である。どちらにも分類されないものは中間型と呼ぶ。これに分類されるのは那珂湊, 御宿, 横須賀, 熱海, 下田, 石廊崎, 衣浦の 7 点である。卓越周期で振幅が特に卓

越しているのが固有スペクトル型の卓越周期である。連続スペクトル型に分類されるものには長周期から短周期まで種々の成分のピークが並立するものが多い。これを見ると同じ東京湾にありながら二俣新町は固有スペクト

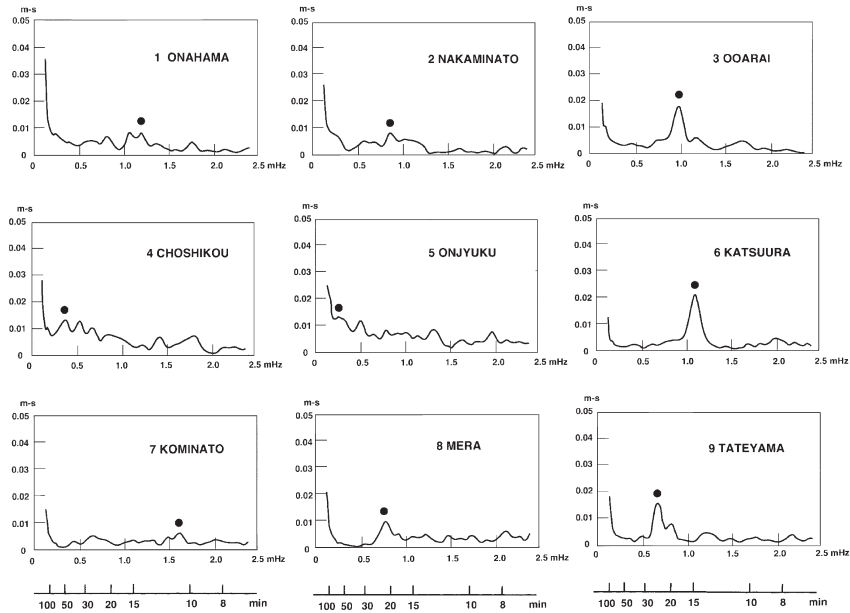


図 2-1 観測された静振の振幅スペクトル 1 卓越振動数 (周期) を●で示す 以下同じ

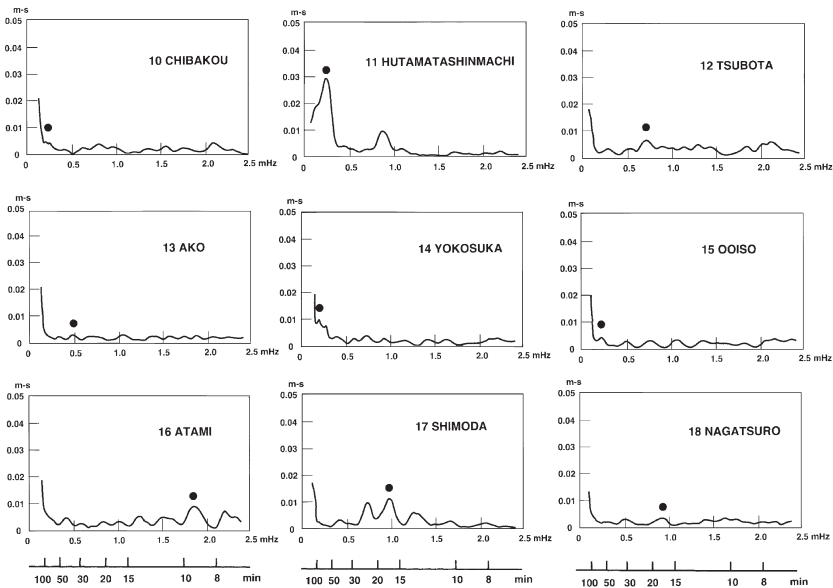


図 2-2 観測された静振の振幅スペクトル 2

ル型，千葉港は連続スペクトル型，横須賀は中間型と分類が分かれる。これと対照的に湾と言えないような地形の所でも固有スペクトル型に分類されている所もある。大洗，布良がそれに当たる。

3-2 卓越周期

観測された卓越周期は最短が熱海の 9 分，最長が横須賀の 93 分である。各点の卓越周期を図 3 にグラフにして示す。特筆すべきは東京湾の二俣新町，千葉港，横須賀ではそれぞれ 69 分，76 分，93 分と長く，相模湾の

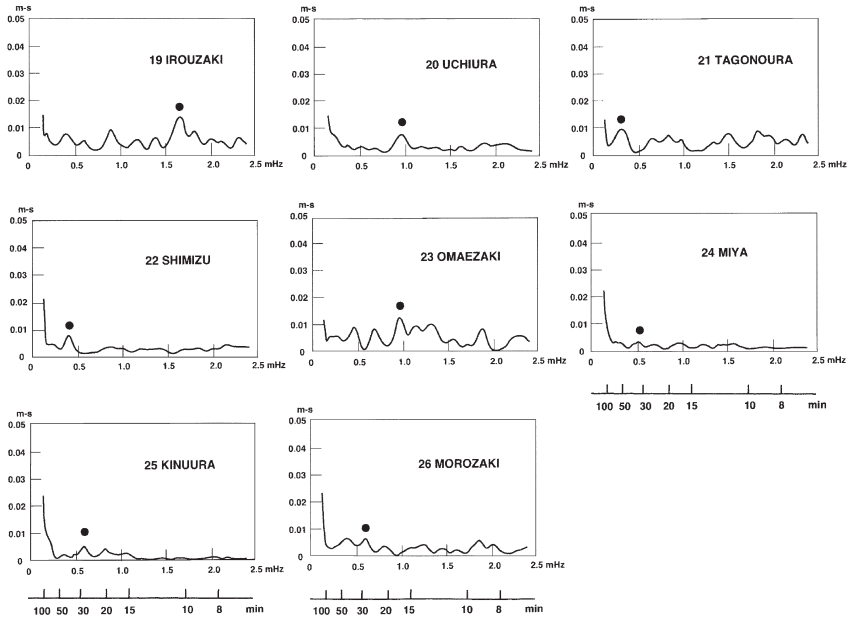


図 2-3 観測された静振の振幅スペクトル 3

dominant period

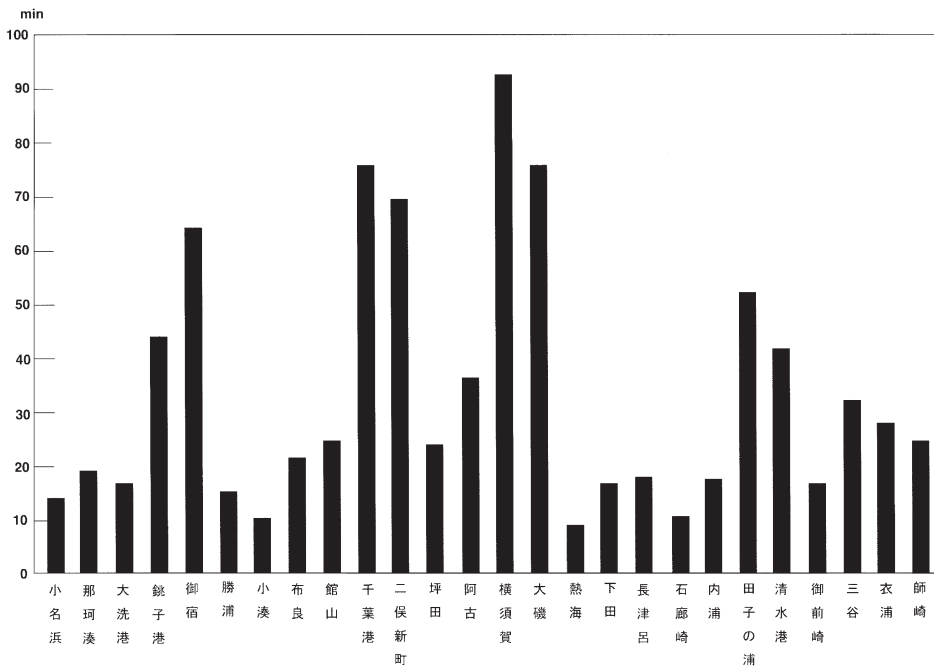


図 3 各測定点でえられた静振の卓越周期

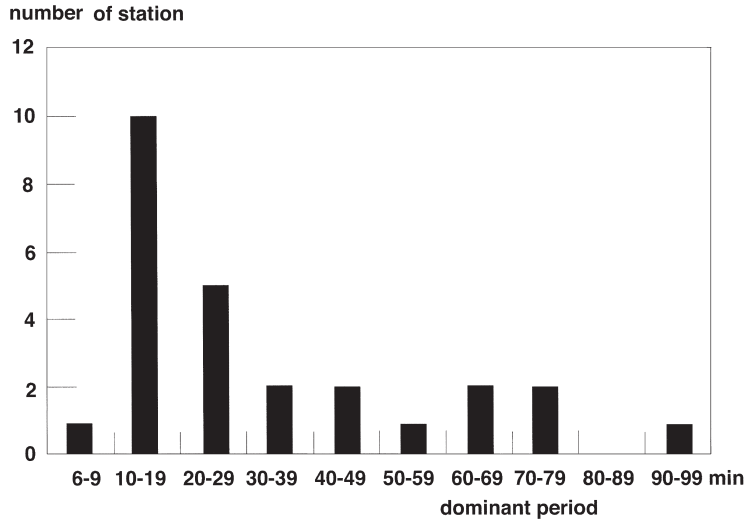


図4 卓越周期の出現頻度の分布

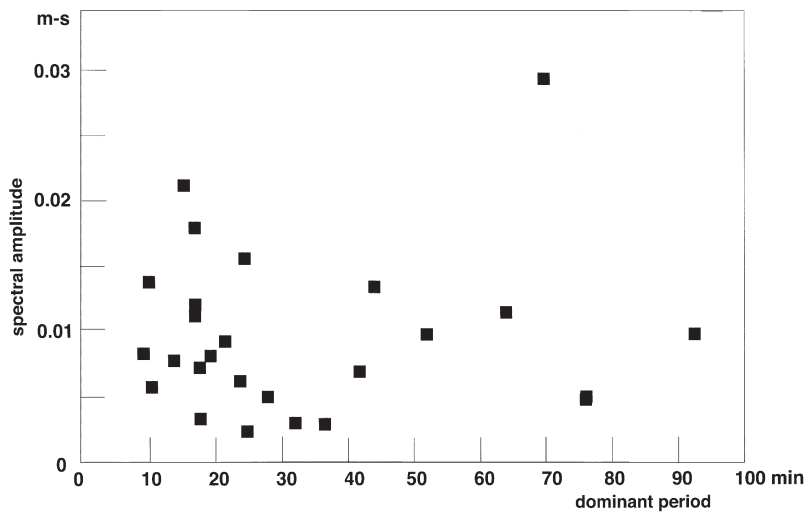


図5 各卓越周期に対するスペクトル振幅

奥に位置する大磯でも76分と長い事である。駿河湾の奥に位置する田子の浦も52分とかなり大きな値を示す。他の地点ではこのように長い周期が観測されない事から見て、これらの湾に特有の振動の結果であると見なせる。これは又同じ東京湾の中でも測定する位置が異なれば卓越周期に差が出る事を示している。これに対して熱海や小湊のように小規模な凹状地形の所での卓越周期は小さい値になっている。卓越周期を10分ごとに切って、

出現頻度を見たのが図4である。これを見ると10分台が最も多く、全体の38%、次いで20分台が19%を占め、両者で全体の57%と過半数を占めた。10分台が多い傾向は入り組んだ海岸線で有名な三陸地方の湾の卓越周期の頻度分布と変わらない(Abe,2005a)。

卓越周期の周期とその振幅の関係を示したのが図5である。東京湾の二俣新町のデータを除けば、17分にピークがあり、両側で減衰する分布となり、数多く表れる卓越周期で

は同時に振幅が大きい事を示している。

4. 考察

4-1 長周期湾の湾奥の卓越周期

東京湾、相模湾、駿河湾の湾奥でのスペクトルをみると共通して、卓越振動数をもとにして、規則正しくピークがなっている構造が指摘出来る。東京湾の二俣新町の場合は最大卓越振動数が 0.24mHz に対して 0.88mHz に第 2 のピークが、千葉港の場合は 0.22mHz の最大に対して 0.82, 1.56, 2.1mHz とピークが並んでいる。最初の場合はほぼ 1:4, 次の場合は 1:4:8:10 の関係にある。又、相模湾の大磯では最大卓越振動数の 0.22mHz に続いて 0.5, 0.76, 1.06, 1.36mHz であるから、これは 1:2:3:5:6 と近似出来る。さらに駿河湾の田子の浦の場合は最大卓越振動数が 0.32mHz に対して、0.86, 1.52mHz であるから、1:3:5 である。これらは観測されている振動が基本振動とその高調波の組み合わせとして理解出来る事を示すものである。ただし、湾ではその奇数倍の高調波しか励起されないはずだから、偶数倍の振動が励起されたという事は、湾ではなくて湖のような閉じた構造になっていると理解しなければならない。東京湾は偶数倍、駿河湾は奇数倍、相模湾は両者が混じった形になっている。このことは、駿河湾では典型的な湾固有の定常波が、東京湾は湾に固有の入り口を節とするような振動ではなく、湾奥とどこかの海岸を腹とする振動の定常波が、相模湾は両者が混在している様子を示すものである。

このことから、基本振動の振動数が小さく、その高調波が対等に励起されれば、連続スペクトル型に近づくことが示唆される。逆に基本振動数が大きく、高調波が表示の振動数範囲をはみ出していれば、基本振動数のみが表れるので、固有スペクトル型になる。

4-2 半島先端の卓越周期

半島の先端では 180 度以上の方角から来る波を観測可能である。これは湾奥では入射

が 1 方向に局限されてくる事と対照的である。小さな島の場合も半島と似た環境である。種々の方角から波が入るという事は、周期成分も多彩なものになりやすい。このような地形に相当する場所は、房総半島先端の布良(固有)、伊豆半島先端の石廊崎(中間)、駿河湾の入り口の御前崎(連続)、知多半島先端の師崎(連続)、及び三宅島の坪田(連続)と阿古(連続)である。しかし、布良は固有型に石廊崎は中間型に分類されていて、すべてが連続型という訳ではない。例外に属する布良や石廊崎は大規模な半島の一部というより、局地的な凹状地形として存在し、これがスペクトルのピークの出現に大きな役割を果たしていると思わなければならない。石廊崎の場合は長さ 600m 余の水路がこの凹状地形にあたると考えられるが、布良の場合は防波堤に囲まれた港がそれにあたるかは、卓越周期の長さから見て疑問である。

4-3 陸棚の影響

長周期の湾を除けば銚子、御宿での卓越周期は 44 分、64 分とかなり大きい。2 点に共通するのは陸棚が広く外に張り出している所に位置している事である(図 1)。静振のスペクトルをみると両者とも卓越周期が長いだけでなく、卓越周期の周囲のスペクトル成分も全体的に大きい事がわかる。これは広い範囲で海が浅くなっている事から来る長周期成分の卓越の結果であると考えられる。この事は外洋に面して単調な海岸地形の場所では陸棚の影響を受けて卓越周期が長くなる事がある事を示している。

4-4 同じ湾内での場所による違い

同じ湾内で複数の観測点がある、東京湾、相模湾、駿河湾、三河湾の場合に見られる傾向について述べる。東京湾の場合は二俣新町、千葉港、横須賀のうち二俣新町での振幅が最も大きい、周期の最も長いものは横須賀のものである。相模湾の場合は、大磯、熱海のうち、周期の長い方は大磯であり、振幅の大きい方は熱海である。駿河湾の場合は田子の

浦、内浦、清水のうち最も振幅の大きい所も最も長い周期の所もともに田子の浦である。三河湾の場合は周期の長いのは三谷、振幅の大きいのは衣浦である。東京湾の場合、卓越周期の最大値は湾口に近い横須賀のものであるが、それ以外の湾ではいずれも湾口距離の最大の所で卓越周期の最大値が出ている。これは湾口距離に比例して卓越周期が伸びるといふメリアンの式を支持するものであるが、同じ湾でも湾口距離が変わっていると卓越周期が同じにならないという事でもある。これは湾口距離が小さくなると、卓越するのが基本振動でなく、高調波であればこのような事が起こりえる。しかし駿河湾の場合に見られる様に田子の浦は湾軸方向にあるが、清水や内浦は小規模な湾を形成する所にあり、そこでの固有振動も関係し、それほど単純ではない。

東京湾では何故横須賀で最大の周期になったかであるが、これは東京湾を湾としてみたととき基本周期がメリアンの式で平均水深を20m、長さ60kmとするととき286分になることからわかるように、6時間の観測では結果をえる事が出来ない長さである。これとあわせて横須賀の95分の卓越周期は粗い近似で286分の半分にあたるとすると湖型の定常波の基本振動の周期で説明がつく。横須賀を腹とするような振動の対岸はどこになっているかであるが、二俣新町付近がそれにあたる。二俣新町のスペクトルで、69分の卓越周期のピークの長周期側側線においてわずかな盛り上がりが見られるが、これが約95分の周期の振動で、最大にはならないが卓越しているのがわかる。二俣新町で最も卓越した69分の振動は横須賀よりもっと近い所を対岸とする湖型の振動に相当する。

相模湾の場合、湾に対するメリアンの式を適用しようとする大磯の卓越周期76分を説明するには平均深さを800mとして長さ約100kmが必要である。これは相模湾を相模トラフに沿って外海にのぼすとき、房総沖まで到達する距離である。スペクトルで基準振動数の奇数倍の振動はこの高調波と見なせる。

駿河湾の場合は、湾のメリアンの式で平均深さ800m、長さ69kmとすると周期が52分で、田子の浦で観測された卓越周期52分が説明出来る。

三河湾の場合は三谷で観測された周期32分を説明するために、矩形の湖に対するメリアンの式で平均水深9m、長さ30kmを代入してえられる値をあてる事が出来る。衣浦での観測値は28分でこれと大きな差がない事から両者を対岸とするような振動が、これらの卓越周期となって観測された可能性がある。

4-5 1960年チリ津波の卓越周期

ここで観測された静振の卓越周期は津波の際にどのように表れるかを見るため1960年チリ津波を例に取り上げる。図6は東京港にある東京検潮所と御前崎検潮所で観測した津波のスペクトルを既に示した静振のそれと比較したものである。津波記録はチリ津波合同調査班の報告集(1961)によっている。また、検潮所の応答補正はSatake et al. (1988)の方法とデータによって行っている。東京検潮所のスペクトルは二俣新町の静振のスペクトルと、御前崎検潮所のスペクトルは御前崎での静振のそれと比較する。これを見ると1960年チリ津波は東京、御前崎ともに0.22mHz(76分)が卓越振動数(卓越周期)にあたり、それ以外の振動数成分では東京は無視出来るほど小さく、御前崎では0.52, 0.88, 1.06mHzのピークが小さくなって続いている。200km近くはなれている東京と御前崎で津波の卓越周期が等しいという事はもともとこの津波がこの周期を持って日本にきた事を意味し、東京や御前崎で新たに生成したものではないと考えられる。この0.22mHzは二俣新町の静振の卓越振動数0.24mHz(69分)にほぼ等しい。このことは津波が0.22mHzで東京湾に入射し、卓越振動数0.24mHzの東京湾と共鳴したと考えるのが自然である。この事は津波で0.22mHz以外の成分がきわめて小さいことでも証明される。一方、御前崎では静振の卓越振動数が0.98mHz(17分)で津波の振動数より大きい方にずれていたこ

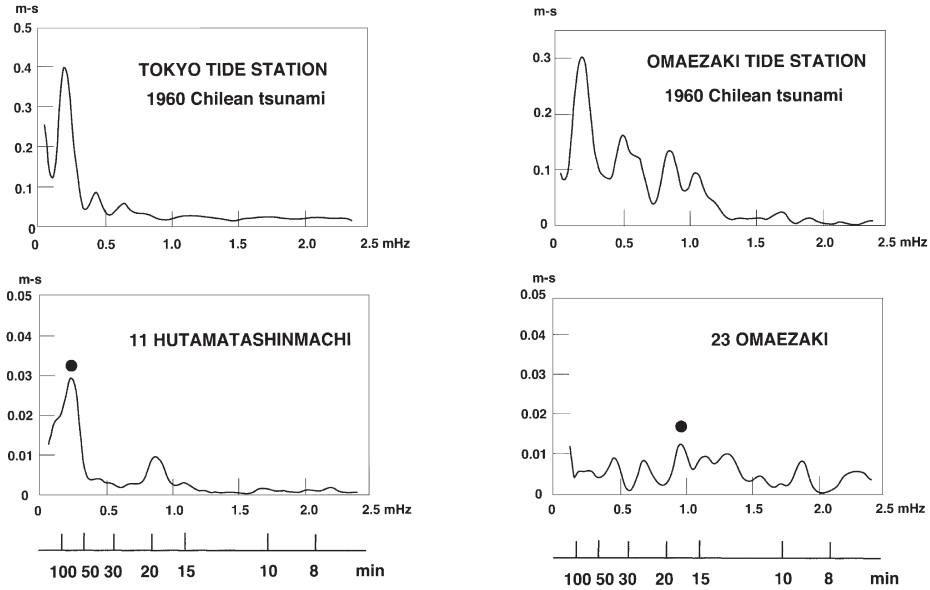


図6 1960年チリ津波の際に東京港（上図左），御前崎（上図右）各検潮所の記録した津波の振幅スペクトルと二俣新町（下図左）と御前崎（下図右）の静振スペクトル

とになる。ピークを形成するスペクトルの振動数は小さい方から順に、0.22, 0.52, 0.88, 1.06 であるからこれは近似的に 1 : 2 : 4 : 5 の割合であって、0.22mHz の波が入ってきて、卓越振動数 0.98mHz の近辺の高調波が励起されたためこのようなスペクトルが観測されたと考えられる。

この例を通じてわかる様に、津波で観測されたスペクトルのピークは、観測された卓越周期をもとにして解釈が可能になる。

5. 議論

ここでは1で引用した Nakano and Unoki (1962) による周期の値との比較を行う。彼らによると良く出る周期として小名浜は 9-25 分、銚子は 4-5, 12-13, 20-21, 25-26, 38-40 分、布良は 5-6, 20-22 分、東京は 45-110 分(なかでも 70-80 分が最も良く出る)、内浦は 8-10, 17-20 分、御前崎は 10-20 分を上げている。一方、今回の観測された静振の卓越周期は小名浜では 14 分、銚子では 44 分、布良では 21 分、二俣新町では 69 分、千葉港

では 76 分、内浦では 17 分、御前崎では 17 分であった。これをみると卓越周期は銚子以外ではすべて良く出る周期範囲に入っている。このことから静振の観測による卓越周期がしばしば表れる値と等しい事が示される。ただ銚子での静振の卓越周期が検潮記録に表れる範囲の外であった事は、その長い周期からみて短周期成分に隠れて表れにくかったためではないかと考えられる。

三陸沿岸での湾の卓越周期と津波増幅度の関係から Abe (2005) は 1960 年チリ津波の周期が 49 分であるとしている。今回、津波スペクトルのピークと東京湾の卓越周期が一致した事でチリ津波の周期が 76 分に卓越したものである事が示された。確かに、三陸地方の鮎川検潮所で観測された津波のスペクトルを見ても、76 分に大きなピークが認められる。従ってこのような周期成分が卓越して西南日本のみでなく東北日本にも来襲した事は認めざるをえない。にもかかわらず、湾の卓越周期との関係からは第 2 のピークである 49 分に共鳴しているものとして表れた。これは三陸沿岸で求められた湾の卓越周期の幅

が最大でも 60 分で、76 分に共鳴出来る湾がなかったことが上げられる。そのために 76 分のピークに注目するに至らなかった。それが今回、東京湾のような卓越周期の大きな湾と 1960 年チリ津波のスペクトルを比べる事で注目する事が出来た。湾の卓越周期から津波の周期を推定するときは検討している周期幅が有限であるという事が前提とされているのである。

6. まとめ

小名浜から師崎に至る関東・東海地方沿岸 26 カ所での静振のスペクトルと卓越周期についてまとめた。その結果、10-20 分台の卓越周期を示す所が全体の 57% を占めた。複数点で測定した湾では湾口からの距離が大きい所ほど長周期が卓越する傾向にある。検潮所で観測された津波のスペクトルと検潮所近傍で観測された静振のスペクトルを比べる事により、津波では静振で観測された卓越周期の成分が選択的に励起される事が示された。

謝辞

この研究は日本歯科大学研究推進補助金 (NDUF-05-24) により推進されました。記して感謝いたします。

参考文献

Abe, K., 2005a. Tsunami resonance curve on dominant periods observed at bays. In: Satake, K., ed. Tsunamis: Case studies and recent developments. Springer Publishing, Netherland, pp. 97-113.
阿部邦昭, 2005b, 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, 地

震, 2,59,83-89.

阿部邦昭, 2006, 四国太平洋岸における 1946 年南海津波の共鳴曲線, 地震, 2,59,39-48.

Abe, K., 2009 (印刷中). Excitation of resonant modes along the Japanese coast by the 1993 and 1983 tsunamis in the Japan Sea,

Aida, I., T. Hatori, M. Koyama, H. Nagashima and K. Kajiura, 1972. Long-period waves in the vicinity of Onagawa bay (I) -Field measurements in Onagawa and Okachi bays, J. Oceanogr. Soc. Jpn., 28, 207-219.

Honda, K., T. Terada, Y. Yoshida and D. Ishitani, 1908. An investigation on the secondary undulations of oceanic tides, Jour. Coll. Sci., Imp. Univ. Tokyo, 24, 1-113.

Kato, Y., Z. Suzuki, K. Nakamura, A. Takagi, K. Emura, M. Ito and H. Ishida, 1961. The Chile tsunami of 1960 observed along the Sanriku coast of Japan, Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophys., 13, 107-125.

Nakano, M., and S. Unoki, 1962, On the seiches (the secondary undulations of tides) along the coasts of Japan, Records of Oceanographic Works in Japan, Special no. 6, 169-214.

大森房吉, 1901, 日本における津浪に就きて, 震災予防調査会報告 34, 5-80.

高橋龍太郎, 1934, 大船渡及びその他の湾における静振および表面波, 地震研究所彙報, 特集号 1, 198-217.

Satake, K., M. Okada and K. Abe, 1988. Tide gauge response to tsunamis: Measurements at 40 tide stations in Japan, J. Mar. Res. 46, 557-571.

The committee for field investigation of the Chilean Tsunami of 1960, 1961, Report on the Chilean Tsunami of May 24, 1960 as observed along the coast of Japan, 1-397.