

日本で観測された 2010 年チリ津波最大振幅の共鳴による解釈

阿部 邦昭*

1. はじめに

2010 年 2 月 27 日 15 時 34 分 (日本標準時, 6 時 34 分世界標準時) にチリ中部の 35.9°S, 72.7°W に震央を持つ地震 (M8.8) によって津波が発生し, 28 日の 13 時 47 分に初動が花咲で確認されたのを始めとして太平洋岸各地で観測された。これは 1960 年チリ津波に比べれば小さいものであったが, 気仙沼市などでは陸上に遡上し, 養殖棚などに被害を及ぼした。その経過は検潮記録でたどる事が出来る。そこで検潮記録の最大全振幅とその周期, 初動水位に注目し, その増幅と周期の関連をみる。その周期は検潮所近傍の局所地形に基づいて励起されたものである可能性を確かめるため, すでに観測されている静振の卓越周期を引き合いに出して比較する。

2. データと方法

使用する検潮記録は気象庁がホームページを通じてリアルタイムで発表している潮位の画像ファイルである (気象庁, 2010)。そのハードコピーから最大全振幅と初動水位, それらの到達時刻, さらに最大全振幅については周期を読みとる。正弦波の場合は押し波と引き波の振幅は同じなので片方の揺れで振幅を代表させるが, 津波のような不規則な波では押し波と引き波の振幅が違うのが一般的なので, 一つの波の山 (谷) から谷 (山) までをとってその垂直変位を全振幅とし, その最大のもを最大全振幅とする。使用した検潮記録はこれだけにとどまらず, 山田湾織笠港, 大槌, 吉里吉里, 船越, 気仙沼の各検潮所の記録を使用する。そしてその結果を解釈する

上で沖合の津波波形が参考になる。東京大学地震研究所は釜石沖に海底津波計を設置して津波を監視しているが, この津波計が捉えた津波波形の一つである TM2 の記録を参考に (東京大学地震研究所, 2010)。そのためホームページで公開されている波形を読み取り, 1 分間隔の水位時系列にして, 津波の到達時刻を含む 6 時間に対してフーリエ解析を行う。津波を読み取った検潮所と東大の海底津波計の位置を図 1 に示す。検潮所は北海道の花咲から九州の志布志までの 55 点であるが中には途中欠測のものがある。全ての要素データがそろわない点もある。途中欠測しているものは記録内で最大のもを最大全振幅としてある。読み取りにあたっては潮位を除いて津波の部分だけを取り出している。図 2 は最大全振幅の決め方を示したものであ

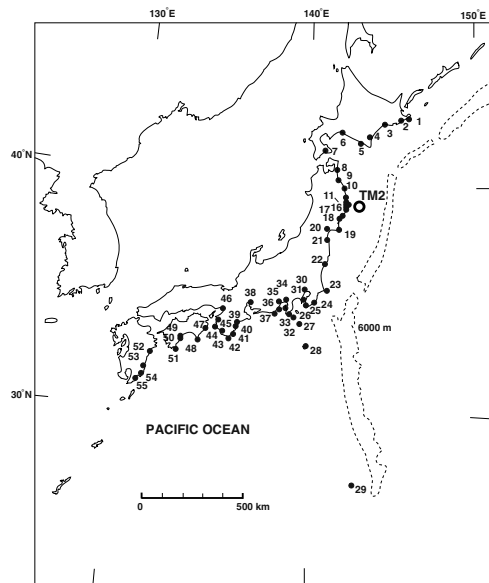


図 1 解析に使用した検潮所 (●) と海底津波計 TM2 (○) の位置。検潮所の番号は表 1 の検潮所の番号と対応する。

* 日本歯科大学新潟短期大学

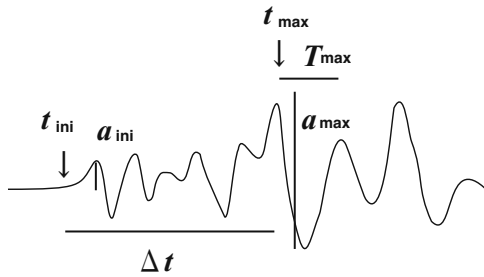


図2 最大全振幅 a_{max} とそれに関する項目の説明図。最大全振幅をもたらす津波の周期を T_{max} 、その到達時刻を t_{max} 、初動到達時刻 t_{ini} からの遅れ時間を Δt で表す。 a_{ini} は初動水位である。

る。最大全振幅波は押し波が先行する場合と引き波が先行する場合があるが、どちらも先行したフェーズの山や谷の到達時刻をもって最大全振幅の到達時刻とする。その周期はその到達時刻と次の同じ方向の山谷の極値の到達時刻の差とする。初動の到達時刻と水位は潮汐を除いた後でも水位が変動するものとして、到達直前の平均的な水位を仮定しこれを基準にして決めた。

検潮所は湾内や港の中であって、普段から特有の固有振動を記録している。津波時にもその場所特有の周期で振動する事が多い事が高橋・相田 (1963) によって指摘されている。そのためあらかじめ湾や検潮所のある点の固有周期がわかっていると都合が良い。これに関して Abe (2005), 阿部 (2009) は圧力センサーを検潮所の近傍やその検潮所の属する湾に置いて 6 時間の水位変動からスペクトルを求めて卓越周期を決めている。最近同一地点で 2 回目の測定を行って、平均操作によってその信頼度を上げている (阿部, 2011a, 2011b)。ここではそのデータから津波を記録した検潮所近傍の海の卓越周期を引用し、その周期を検潮所に対応するものとして解析に用いる。

3. 結果

a 最大全振幅

津波検潮記録の読み取りからえた結果を

表 1 に示す。表には引用された静振の卓越周期も含まれる。その中から最大全振幅を取り出して地図上にプロットしたのが図 3 である。これを地域ごとに見ると北海道ではやや小さい苫小牧西を除けば 1.3–1.7 m と偏差が小さく単調な海岸線と対応している。東北では 0.9–3.2 m と変化が激しく複雑な海岸線を反映したものになっている。特に山田織笠港、大槌では 3.2 m で調べた範囲では最大の値を記録している。関東東海では東北に比べて小さく推移しているが、銚子、布良、下田、御前崎など半島の突端や、突き出た地形点と名古屋でやや大きい値になっている。伊豆・小笠原諸島は 0.7–0.8 m と小さな値であってしかも変化が小さい。紀伊半島から九州にかけては大阪の 0.54 から須崎の 2.1 m まで変化し、変動が激しい。

これを日本全体でならしてみると北で大きく南で小さい傾向がある。これをここでは南北較差と呼ぶ事にする。この差の原因は伊豆七島硫黄島海嶺による反射と見なすが、その原因が何であるかが後の議論に影響することはない。これから先の議論では湾や港の津波に対する応答を議論するのでこの差を補正する。補正は東京以南の全振幅、初動水位に対して行い、補正後の値を観測値の 1.2 倍にする。補正率 1.2 の根拠は外海に面した湾地形でない検潮所の値の最大全振幅の平均値の比の逆数である。この算定に使用した検潮所は北は花咲、霧多布、釧路、十勝、浦河、苫小牧西、函館、むつ小川原、八戸、大船渡、相馬、小名浜、銚子、勝浦、布良の 15 点、

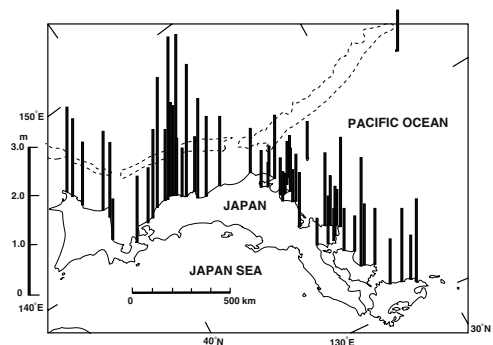


図3 検潮所で観測された最大全振幅の値。

南は御前崎、串本、御坊、阿波由岐、室戸岬、宮崎、油津の 7 点である。伊豆小笠原諸島のデータは短周期成分に富んで分解できない波が多いので以後の議論から除外する事にする。この 1.2 倍の南北較差を補正した後、縦軸に最大全振幅、横軸にその周期を取ってプロットしたのが図 4 である。これによると最大全振幅は周期によって変化し、周期 30-50 分の最大全振幅値が大きい値を占める（そうでないものもある）事がわかる。この傾向を決めているのが山田織笠港（47 分）の 3.2 m、大槌（36 分）の 3.17 m、気仙沼（49 分）の 2.55 m、久慈（37 分）の 2.53 m、須崎（38 分）の 2.52 m（補正前は 2.1 m）である。括弧内の数字は静振の卓越周期である。次に津波の最大全振幅の周期を縦軸に、横軸に検潮所近傍で観測されている静振の卓越周期をとってプロットしてみると図 5 がえられる。これは

津波の周期と静振の卓越周期の相関を調べた図になる。これから見えてくるのは静振の卓越周期に対応して 1:1 の線に近く分布するものと、静振の卓越周期に無関係に津波の周期が 30-60 分の間に分布するものがある事を示す。この傾向をさらに詳しく見ると周期約 50 分を境にそれより小さい周期では 1:1 直線より上側に分布するのに対し、大きい周期では下側に分布しているのがわかる。この事は後で述べるように、周期 52 分の津波が入射した結果と解釈すると都合が良い。この傾向に反して津波の周期が 112 分で 1:1 直線より遥か上にある点は函館の値で、これは静振の卓越周期 56 分の 2 倍にあたるので静振の卓越周期になり損ねた結果であると解釈出来る。函館は津軽海峡の途中で太平洋から見ると奥まった所に位置し、津波に含まれていた 56 分の周期成分が途中で捕捉され函館まで到達出来なかったため函館で 56 分が励起されなかった。しかし 112 分はより周期が長いので函館に届き、56 分の 2 倍なので観測されたのである。つまりこの点は 1:1 直線にのる分布に分類してよい。次に縦軸の最大全振幅はそのまま、横軸に静振の卓越周期を取ってみると図 6 がえられる。結果は図 4 の結果に類似したものになる。これは図 5 で 1:1 に対応する点の振幅が大きかった事の反映である。そこで縦軸はそのまま横軸の値を最大全振幅の周期と静振卓越周期の比にかえてみたのが図 7 である。これは周期の比

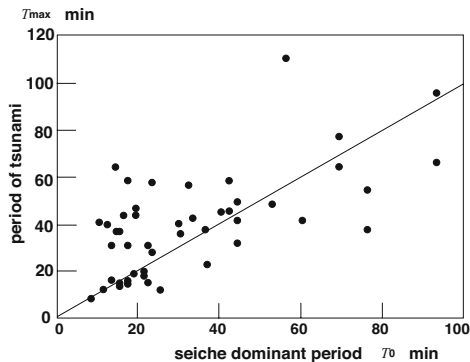


図 4 南北較差補正後の最大全振幅 σ_{max} とその周期 T_{max} との関係（伊豆、小笠原諸島の値は除いてある）。

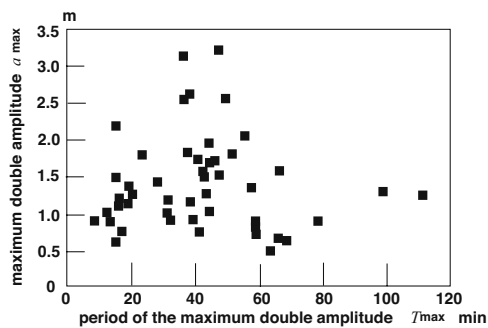


図 5 最大全振幅の周期 T_{max} と検潮所での静振卓越周期 T_0 の相関図。直線は 1:1 の関係。

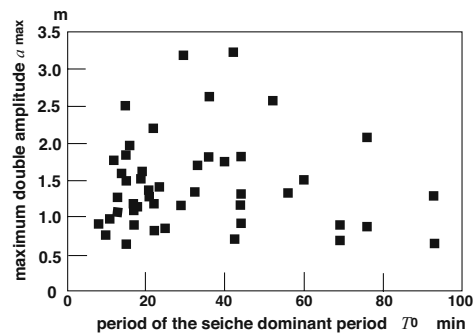


図 6 最大全振幅 σ_{max} と静振卓越周期 T_0 の関係。

が 1 の所で振幅が最大になっているのでいわゆる共鳴曲線の性質である。文字通りを取ると津波の周期が静振の卓越周期に一致した所で振幅が最大になっているという事である。

次に視点をかえてこの津波の沖合での振る舞いを示す結果について述べる。この津波は東京大学地震研究所が設置している釜石沖の 2 組の海底津波計によって捉えられている (2011, 東京大学地震研究所)。そこでその中から海岸に近く設置された方の津波計 (TM2) による波形を選んで、2 月 28 日 14 時から 6 時間を 1 分間隔でデジタイザに取り込んで、そのスペクトルを求めた。これを示したのが図 8 である。これによって津波が沖では 52 分の卓越周期で観測された事がわかる。

b 初動水位

初動の到達時刻と水位も図 2 に示す要領で読み取られたが、その値を表 1 に示す。これを見ると花咲に最も速く到達し、最も遅く

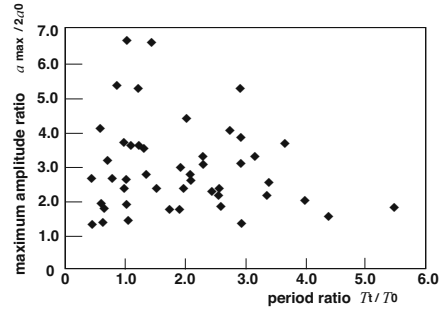


図 7 最大全振幅 a max と津波の周期比 T max / T o の関係。

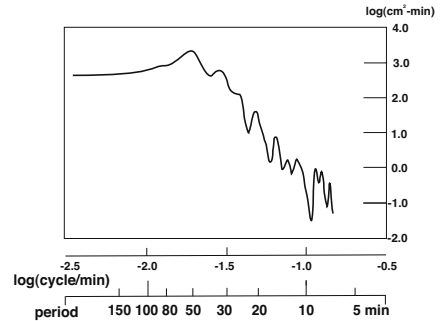


図 8 海底津波計 TM2 の記録した津波のパワースペクトル。

表 1 観測された最大全振幅とそれに関する項目の表。各欄は左から、検潮所番号、検潮所名、初動到達時刻 (日本標準時)、初動水位、最大全振幅、その周期、その遅れ時間、静振の卓越周期を示す。

No.	Tide Station	t ini (h:min)	a ini (m)	a max (m)	T max (min)	Δ t (min)	T o (min)
1	花咲	13:47	0.26	1.68	44	276	33
2	霧多布	13:47	0.22	1.53	43	338	60
3	銅路	14:01	0.15	1.26	43	101	44
4	十勝	14:09	0.22	1.56	43	96	19
5	浦河	14:32	0.17	1.47	15	170	15
6	苫小牧西	14:42	0.27	0.82	59	103	23
7	函館	15:13	0.19	1.3	112	264	56
8	むつ小川原	14:09	0.12	1.06	44	287	
9	八戸	14:38	0.18	1.72	46	103	40
10	久慈	14:07	0.29	2.53	37	88	15
11	宮古	14:01	0.18	1.41	28	259	23
12	山田織笠港	14:55	0.25	3.2	47	117	42
13	船越港			1.82	37		15
14	吉里吉里			1.74	40		12
15	大槌			3.17	36		30
16	釜石	14:13	0.15	1.13	39	70	29
17	長崎	14:13	0.23	0.9	39	47	76
18	気仙沼	14:25	0.55	2.55	49	206	52
19	鮎川	14:29	0.16	1.04	31	188	13
20	仙台新港	15:00	0.31	1.94	44	103	16
21	相馬	14:53	0.4	1.56	66	460	14
22	小名浜	14:22	0.47	1.34	57	392	32
23	銚子	14:25	0.33	0.9	32	141	44
24	勝浦	14:15	0.11	0.62	14	219	15
25	布良	14:16	0.29	1.25	20	213	21
26	神津島	14:31	0.12	0.82	7	226	
27	三宅島(坪田)	14:29	0.2	0.81		239	8

No.	Tide Station	t ini (h:min)	a ini (m)	a max (m)	T max (min)	Δ t (min)	T o (min)
28	八丈島	14:29	0.17	0.74	10	204	
29	父島	14:16	0.2	0.8	17	113	
30	東京	15:34	0.21	0.71	78	106	69
31	横須賀	14:57	0.18	0.5	68	26	93
32	下田	14:38	0.17	0.87	15	96	17
33	田子	14:55	0.18	0.39	63	30	
34	内浦	15:00	0.23	0.71	59	25	17
35	清水	14:56	0.22	0.57	59	26	42
36	焼津	14:52	0.25	0.61	16	396	
37	御前崎	15:00	0.31	0.93	31	235	17
38	名古屋	16:56	0.35	1.04	98	73	93
39	尾鷲	15:12	0.26	1.45	51	110	44
40	熊野	15:00	0.17	1	16	88	13
41	浦神	15:01	0.18	0.71	13	96	25
42	串本	15:18	0.16	1.75	15	169	22
43	白浜	15:26	0.26	0.96	32	338	44
44	御坊	15:16	0.22	0.59	41	153	10
45	海南	16:05	0.18	0.94	31	338	22
46	大阪	17:12	0.22	0.54	65	118	69
47	阿波由岐	15:22	0.25	0.81	12	117	11
48	室戸岬	15:19	0.18	0.72	8	157	8
49	須崎	15:44	0.38	2.1	38	219	36
50	久礼	15:47	0.32	1.22	47	380	19
51	土佐清水	15:44	0.21	1.09	19	47	21
52	細島	15:47	0.23	0.86	16	86	17
53	宮崎	15:59	0.43	1.44	23	701	36
54	油津	15:51	0.3	0.9	19	282	18
55	志布志			1.65	55		76

到達したのが大阪であった。花咲までの所要時間は 22 時間 13 分で伝搬距離を震央距離 16672 km で近似すると時速 750 km/h、秒速では 208m/s になる。これは津波の速度を長波速度とした時、水深 4430 m に相当する。この値は太平洋の平均深さ 4188 m (理科年表, 2010) より大きい値である。初動の水位を縦軸に横軸に静振の卓越周期をとってプロットしたのが図 9 である。これを見るとその傾向が最大全振幅の卓越周期依存性を示す図 6 と類似し、初動水位も静振の卓越周期に反応していることがわかる。これは反応しているのが到達したばかりの初動である事を考えると驚くべき事である。次の図は初動水位と最大全振幅の相関関係を示したものである (図 10)。図中の直線は振幅比を示している。た

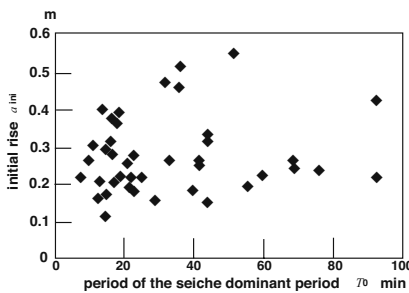


図 9 初動水位 a_{ini} (南北格差を補正) と静振卓越周期 T_0 の関係。

maximum double amplitude a_{max}

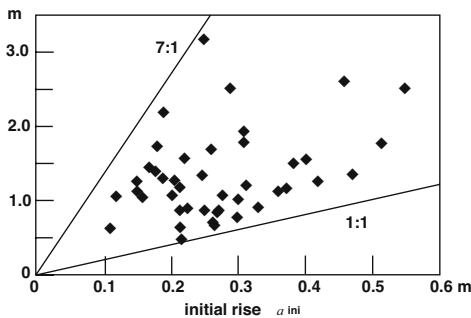


図 10 最大全振幅 a_{max} と初動水位 a_{ini} の相関関係。図中の直線は両者の振幅比が 7 : 1 および 1 : 1 の場合を示す。ただし比をとるにあたって、全振幅の場合はその 1/2 を振幅として使用し、初動水位が高さ (≒振幅) にあたるのに対応させている。

だし最大全振幅の 1/2 を振幅と見なし、それと初動水位の比を取って、振幅比にしている。1 : 1 は初動水位が最大全振幅に一致する場合になる。最大は 7 : 1 に近いことから初動の 7 倍近くまで津波が大きくなった点 (6.4 で山田織笠港) があった事を示している。この点の属する山田湾は湾口が狭くなっているため初動が小さかったことと、湾の周期が長く、津波の周期も長くて共鳴が起こったため最大全振幅が大きくなった事が関係している。一方、外海に面した小名浜の場合は初動水位が 0.47 m と大きい分、振幅比が 1.43 と 1 に近くて小さい。

c 遅れ時間

最大全振幅が表れる時間の長さを調べたのが図 11 である。図 2 で示すように最大全振幅と初動のそれぞれの到達時刻の差を遅れ時間 Δt という事にする。これを横軸に、縦軸に 10 図で定義した振幅比を取ったのが図 11 である。遅れ時間は短い場合は 25 分 (内浦) から最大長さ 701 分 (宮崎) まで広く分布している事がわかる。前者は水深の大きい駿河湾に属し、後者は河口の浅い海に面している。2 番目に長い遅れ時間を記録したのは相馬の 460 分でこれも河口に近く位置し、浅い海に面している。このことから遅れ時間は海の深さに関係し、深い所で短く、浅い所で長くなる傾向があるといえる。遅れ時間で最も頻度が高かったのは 100 分程度の所である。振幅

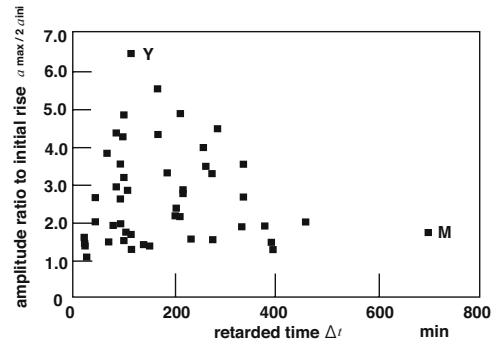


図 11 最大全振幅 a_{max} とその遅れ時間 Δt の関係。図中で山田織笠港を Y、宮崎港を M で示している。

比が最大の山田湾織笠港は遅れ時間は 117 分で 3 波目にあたっている。この結果は 3 波目付近で最も高くなるケースが多い事を示している。振幅比が大きいため遅れ時間が長くなるという事はなく、むしろ全体的に見て、短い部類に入るというのがこの図の示す事である。

4. 議論

増幅のイメージを明確にするためにすべての点に入射する入射波の振幅と周期を固定してみる。そのため入射振幅として 0.24 m, 周期として 52 分をとって、これに対する応答として観測された最大全振幅を見てみる。入射振幅の 0.24 m は、神津島を除く伊豆小笠原諸島の初動水位の平均値 0.2 m の 1.2 倍(南北較差)から決めた。また周期は釜石沖の海底津波計の卓越周期 52 分(図 8)を元にした。こうして縦軸に振幅比, 横軸に 52 分と静振の卓越周期の比をとってプロットしたのが図 12 である。周期比 1 で増幅度が最大になるのが共鳴曲線であるが、この分布がこれを近似的に満たすから、今回の津波の増幅が共鳴によって起こったと解釈出来る根拠となる(例えば Nakamura and Emura, 1961)。

津波の増幅を 52 分に卓越周期を持つ津波の入射に対する湾や港の応答として解釈出来たのは山田湾など周期が 50 分内外の湾で津

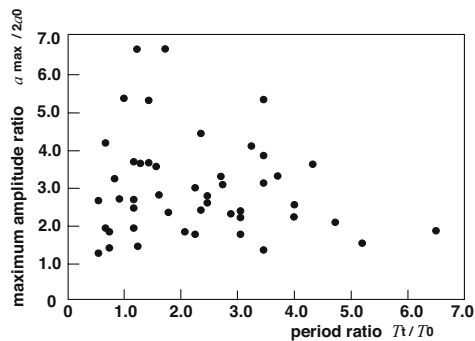


図 12 津波の増幅曲線。横軸は津波の周期 T_t ($=52$ min) と静振の卓越周期 T_0 の比, 縦軸は最大全振幅の半分 $a_{\max}/2$ と入射振幅 a_0 ($=0.24$ m) の比。

波が大きかった事, 最大全振幅の周期分布が静振の卓越周期に対して 50 分を境に反転する事, 海底津波計の卓越周期が 52 分を示した事があげられる。そしてその背景には, 卓越周期の値が色々な多くの検潮所で津波が観測された事があげられる。またチリは日本から遠くはなれているため日本の北と南で津波の放射特性の影響を考えなくて済むので, 入射波を同じもので近似出来た事も大きな利点であった。

ここで 1960 年チリ津波との関係について述べておく必要がある。1960 年チリ津波では 1933 年の三陸津波との比較で周期の長い湾の奥での水位の上昇が目された(例えば Kato et. al., 1961)。これは三陸津波に比べてチリ津波の周期が長い事が原因で起こるとされた。その周期について Kato et. al (1961) は江ノ島の初動をもとに 60-70 分としたが, Abe (2005) は静振卓越周期の測定結果と増幅度の再決定から 49 分が良いとしている。いずれにしても典型的な近地津波が示す周期 9-22 分(例えば Abe, 2005)から比べると長い周期になる。これに比べて今回の津波の周期 52 分も長い周期というべきである。1960 年の津波では大船渡(44 分)や志津川(46 分)の湾奥の被害が大きかったが, 今回は山田湾(47 分)や気仙沼湾(52 分)の湾奥で振幅が大きかった。同じように周期が長くても応答の仕方は同じとはいえないかもしれない。なおこの津波周期の長い原因としては津波の発生した海が陸棚で浅い事があげられる。陸棚の長さを 49km, 水深を 100m とした時, 陸棚を往復する時間が 52 分になる。津波が陸棚の先端部で発生し, 直達波と大陸で反射した波の間隔が津波の周期になっているとするとこの長さが説明できる。

最後に津波の研究に於ける大型の湾(周期の長い湾)の奥にある検潮所の重要性を指摘しておきたい。湾の奥で大きくなるか小さいかは津波の周期と湾の奥行き兼ね合いによって変わるが, その違いは湾の奥ではっきり表れる。大きな湾の奥は遠浅の場合が多く, 検潮を行う場所の確保は難しい面もあるがその

記録は津波の周期を見極める上で重要である。その充実と気象庁のネットワークへの取り込みを期待したい。

5. 結論

2010 年チリ津波の増幅が共鳴の結果であった事を検潮記録の振幅分布を使って示した。

6. 謝辞

解析にあたり、検潮記録を提供していただきました気仙沼市役所、山田町役場、大槌町役場の関係者の方々に感謝致します。またホームページを通じて気象庁の潮位観測情報、東京大学地震研究所の深海観測情報を使わせていただきました。合わせて感謝致します。

参考文献

Abe, K., Tsunami resonance curve on dominant periods observed at bays. In: Satake, K., ed. *Tsunamis: Case studies and recent developments*. Springer Publishing, Netherland, 97-113, 2005.
阿部邦昭, 関東・東海沿岸で観測した静振のスペクトルと卓越周期, 津波工学研究報告, 26, 17-26, 2009.

阿部邦昭, 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, 一般教育系, 40 巻, 13-22, 2011a.

阿部邦昭, 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, 一般教育系, 40 巻, 23-30, 2011b.

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

気象庁, 潮位観測情報, <http://www.jma.go.jp/jp/choi/>, 2010

Nakamura, K. and K. Emura, Maximum water height at bay head in case of tsunami invasion, *Sci Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophysics*, 13, 32-42, 1961.

高橋龍太郎・相田勇, 日本沿岸で観測された数箇の津波のスペクトルについて, 地震研究所彙報 41, 299-314, 1963.

東京大学地震研究所, 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム, http://eoc.eri.u-tokyo.ac.jp/eisei_system/sanrikupanf.html, 2010