沖合と沿岸の津波の最大波高の統計的關係

高山寛美* (気象研究所地震火山研究部)

* 現所属：気象大学校

Statistical Relationship between Tsunami Maximum Amplitudes of Offshore and Coastal Stations

by

Hiromi Takayama*

Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japan

**Present affiliation: Meteorological College, Kashiwa, Japan*

(Received March 18, 2008; Accepted August 7, 2008; Published November 28, 2008)

Abstract

A tsunami warning is issued according to the magnitude, location, and depth of an earthquake as estimated from seismograms. However, there is a large uncertainty of expected tsunami heights because of a lack of information on the rupture process immediately after an earthquake occurs. Actual tsunami heights observed by offshore tsunami recorders can reduce this uncertainty. To make it possible to predict tsunami heights on the coast from offshore tsunami heights, we investigated the statistical relationship between tsunami maximum amplitudes of offshore and coastal stations.

We used data from ocean-bottom pressure gauges, installed as a part of the ocean-bottom seismometer system off-Tokai and off-Boso by the Japan Meteorological Agency, and off-Muroto by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. The data were contaminated with short-period variations accompanied by seismic waves as well as long-period variations, such as the tidal components. To remove noise and extract the tsunami component, we first processed time-series data of the ocean-bottom tsunami recorders with filters, and then compared the tsunami maximum amplitudes observed by the ocean-bottom tsunami recorders off-Tokai, off-Boso, and off-Muroto with those observed at coastal stations. We investigated the statistical relationship by calculating means and standard deviations of the common logarithm of the ratio of coastal to offshore tsunami maximum amplitudes. Next, following Baba *et al.* (2004), we considered the effects of the installation depth of the ocean-bottom tsunami recorders and the reflection at the coastline. The difference of distances to offshore and coastal stations from sources is also corrected through the tsunami magnitude.

Making use of AIC (the Akaike Information Criterion), for each combination of offshore and coastal stations, we chose the best fitting statistical relationship between tsunami maximum amplitudes at offshore and coastal stations. As a result, we found a constant ratio or a linear relationship with offshore amplitude and/or epicentral distance, with or without the above-mentioned correction.

1. はじめに

津波予報は、地震発生直後に限られた地震データを用いて推定された震源の位置と規模に基づいて発表される。しかし、地震動に基づいて決定された規模から推定されるより大きな津波が発生するような津波地震

の場合には、この方法による津波予報は過小評価となる。このような場合には、実際に沖合で観測された津波波高データを活用することによって、沿岸での津波波高をより適切に予測できる可能性がある。気象庁では1978年から東海沖で、1985年から房総沖でケーブル式海底地震観測システムを運用し、圧力計を用いた水位変化の測定も行っている（気象研究所地震火山研究部, 1980; 藤沢・他, 1986）。その後、防災科学技術研究所（Eguchi *et al.*, 2002）、東京大学・東北大学（Kana-zawa and Hasegawa, 1997）、海洋研究開発機構（Momma

Corresponding address:
Meteorological College,
7-4-81 Asahi-cho, Kashiwa, Chiba 277-0852, Japan.
E-mail: htakayama@mc-jma.go.jp

et al., 1997; Hirata *et al.*, 2002) によってケーブル式海底地震観測システムが整備され、海底水圧観測が行われるようになった。また、最近は、RTK (リアルタイムキネマティック) GPS 方式を利用した GPS 波浪計 (Kato *et al.*, 2000) が国土交通省によって整備されつつある。これらの測器によって観測された沖合の津波波高から沿岸での津波波高を推定するために、これまでに得られているデータに基づいて両者の統計的関係を調査し、回帰モデルの作成を試みた。

2. 津波成分の抽出

海底地震観測システムに設置された津波計 (+印) の位置を Fig. 1 に示す。海底津波計データの一例として、2004 年 9 月 5 日 7 時 (以下時刻はすべて日本時間) から 9 月 6 日 23 時までの 40 時間の東海沖海底津波計の 1 秒値の観測データを Fig. 2 に示す。9 月 5 日には 19 時 07 分 07.5 秒に M7.1 の紀伊半島沖の地震 (北緯 33°01.9′、東経 136°47.8′、深さ 38km) が、23 時 57 分 16.8 秒に M7.4 の東海道沖の地震 (北緯 33°08.2′、東経 137°08.4′、深さ 44km) が発生し、沿岸検潮所で津波が観測された。Fig. 2a に示した観測データのうち 9 月 5 日 7 時 0 分 0 秒～9 月 6 日 19 時 24 分 31 秒の期間 (131072 個の 1 秒値) の振幅スペクトルを Fig. 3 に青色で示す。海底津波計の観測データには潮汐などの長周期変動が見られる。この長周期変動を取り除くために、1800 秒の移動平均を取り、観測値から差し引いた残差を計算

し、Fig. 2b に示す。そのスペクトルを Fig. 3 に赤色で示す。Fig. 2b および Fig. 3 に見られるように残差には短周期 (20 秒以下) の変動が含まれている。この短周期変動を取り除くために、残差に 100 秒のチェビシェフ・ローパス・フィルタ (例えば、斎藤, 1978) を位相差が 0 となるように前方からと後方から適用し、その結果を Fig. 2c に示す。フィルタ処理後のスペクトルを Fig. 4 に赤色で示す (青色は残差のスペクトルで、Fig. 3 の赤色と同じ)。Fig. 2 の一部 (9 月 5 日 23 時 50 分から 9 月 6 日 0 時 25 分までの 35 分間) の時間軸を拡大して Fig. 5 に示す。9 月 5 日 23 時 57 分の東海道沖の地震の震央から東海海底津波計までは約 81km で走時表 83A (濱田, 1984) での P 波の走時は約 14 秒であり、23 時 57 分 30 秒頃からの短周期変動 (Fig. 5 参照) は地震動に関係していると思われる。東海沖海底津波計からの津波逆伝播図 (Okada, 1988) と津波波源 (気象庁, 2004) を Fig. 6 に示す。これによると津波の走時は 4～5 分であり、Fig. 5c に見られる変動は津波と考えられる。これらの時間領域での処理によって、波源域に近くて、海岸の影響を受ける前の津波成分を抽出することができた。

3. 津波の最大波高の統計的関係

調査期間は 1990 年から 2004 年までの 15 年間とし、沿岸の津波最大波高は、気象庁の「潮汐観測」(1990～2004) の値を使用した。この期間に対象とした検潮所

Fig. 1 Locations of the observation sites. The offshore tsunami observation points are indicated by plus signs (TK1, off-Tokai; BS1, BS2, BS3, off-Boso; MR1, MR2, off-Muroto). The green, red, and blue circles respectively indicate the coastal stations whose tsunami amplitudes were compared with those off-Boso (ONHM, Onahama; CHOS, Choshi; MERA, Mera; TOKY, Tokyo; OKAD, Okada; IRZK, Irozaki), off-Tokai (OMZK, Omaezaki; MISK, Maisaka; TOBA, Toba; OWAS, Owase; URGM, Urugami; KSMT, Kushimoto), and off-Muroto (SRHM, Shirahama; KMTZ, Komatsuzima; MRTM, Murotomisaki; KOCH, Kochi; TSMZ, Tosashimizu; ABRT, Aburatsubo).

で観測された津波の総数は 24 であり、一覧を Table 1 に示す。前節で述べた処理方法によって得られた沖合の津波波形から最大波高（全振幅）を読み取り、沿岸での津波最大波高と比較した。海底津波計はフィルタ処理後の波形で、（上昇量+下降量）を最大波高としているのに対し、潮汐観測ではフィルタ処理をしていない潮位記録で津波の山（谷）から前後の谷（山）の平

均までの高度差の最大を最大波高としている。沿岸での津波記録では波列が多いのが通例であり、「上昇量（下降量）+下降量（上昇量）」の最大と大きな差はない。

東海沖津波計での津波の最大波高は近くの御前崎、舞阪、鳥羽、尾鷲、浦神、串本の検潮所の最大波高と、房総沖津波計の最大波高は小名浜、銚子、布良、東京、岡田、石廊崎の検潮所の最大波高と、室戸沖津波計で

Fig. 2 Example of offshore tsunami data and the processed result for off-Tokai. The data are every second value recorded from 7:00 September 5 through 23:00 September 6, 2004. (a) The original data. (b) The residuals after subtracting the 1800 seconds moving-averaged data from the original. (c) The 100 seconds low-pass-filtered data, with the ordinate magnified 40 times relative to that in (a) and (b).

Fig. 3 Comparison of the spectra of the original data (blue) with the residuals after subtracting the 1800 seconds moving-averaged data from the original (red). The data used were 131072 values (every second value) recorded from 7:00:00 September 5, through 19:24:31 September 6, 2004.

Fig. 4 Comparison of the spectra of the residuals after subtracting the 1800 seconds moving-averaged data from the original (blue) and the 100 seconds low-pass-filtered data (red). The data used were every second value recorded from 7:00:00 September 5, through 19:24:31 September 6, 2004 (the same period as in Fig. 3).

Fig. 5 Enlarged portion of Fig. 2, for the period from 23:50 September 5, through 0:25 September 6, 2004. (a) The original data. (b) The residuals left after subtracting the 1800 seconds moving-averaged data from the original. (c) The 100 seconds low-pass-filtered data, with the ordinate magnified 40 times in comparison with that in (a) and (b).

Fig. 6 Tsunami inverse refraction diagram from the off-Tokai observation point, marked by the plus sign. The contour interval is 1 minute. The area surrounded by the thick line is the source region of the tsunami generated by the earthquake at 23:57 September 5, 2004.

の最大波高は白浜、小松島、室戸岬、高知、土佐清水、油津の最大波高と比較した。各検潮所の位置を Fig. 1 に赤（東海沖）、緑（房総沖）、青（室戸沖）の丸印で示す。

比較は、沖合での津波最大波高に対する沿岸での津波最大波高の比の常用対数の分布を調べることによって行った。東海沖津波計と御前崎の例を Fig. 7a に示す。横軸は東海沖での津波最大波高、縦軸は東海沖での津

Table 1 List of earthquakes used for the relationship analysis.

No	Year	Month	Day	Hour	Minute	Latitude	Longitude	Epicenter
1	1990	4	6	6	12	15.125	147.596	MARIANAS REGION
2	1990	9	24	6	13	33.100	138.633	FAR S OFF TOKAI DISTRICT
3	1993	8	8	17	34	12.982	144.801	SOUTH OF THE MARIANAS
4	1994	10	4	22	22	43.367	147.668	E OFF HOKKAIDO
5	1994	12	28	21	19	40.418	143.735	FAR E OFF SANRIKU
6	1995	7	30	14	11	-23.340	-70.294	NEAR COAST OF N CHILE
7	1995	10	18	19	37	28.029	130.383	NEAR AMAMI-OSHIMA ISLAND
8	1995	10	19	11	41	28.015	130.441	NEAR AMAMI-OSHIMA ISLAND
9	1995	12	4	3	1	44.557	150.134	SE OFF ETOROFU
10	1996	2	17	14	59	0.891	136.952	IRIAN JAYA, INDONESIA
11	1996	6	10	13	3	51.564	-177.632	ANDREANOF IS., ALEUTIAN
12	1996	9	5	3	15	31.412	139.943	NEAR TORISHIMA IS
13	1997	4	21	21	2	-12.584	166.676	SANTA CRUZ ISLANDS
14	1998	5	4	8	30	22.417	125.417	FAR S OFF ISHIGAKIJIMA
15	1998	7	17	17	49	-2.961	141.926	NEAR NEW GUINEA N. COAST
16	1999	11	26	22	21	-16.423	168.214	VANUATU (NEW HEBRIDES)
17	2000	7	1	16	1	34.205	139.222	NEAR NIJIMA ISLAND
18	2001	6	24	5	33	-16.224	-73.604	NEAR COAST OF PERU
19	2002	9	9	3	44	-3.302	142.945	NEAR NEW GUINEA N. COAST
20	2003	9	26	4	50	41.779	144.079	SE OFF TOKACHI
21	2003	10	31	10	6	37.832	142.696	SE OFF MIYAGI PREF
22	2003	11	17	15	43	51.146	178.650	RAT ISLANDS, ALEUTIAN IS.
23	2004	9	5	19	7	33.033	136.798	SE OFF KII PENINSULA
24	2004	9	5	23	57	33.138	137.141	SE OFF KII PENINSULA

波最大波高に対する御前崎での津波最大波高の比であり、ともに対数軸である。●は震央と沖合の津波計の距離が 600km より近い津波、○はそれより遠い津波を示す。平均を実線で、平均±標準偏差を破線で表している。図中の下方の数字は平均と標準偏差を、() 内にはそれぞれの 10 のべき乗を示している。比の常用対数が正規分布に従うと仮定すれば、その範囲中に入る確率は約 2/3 である。東海沖津波計と御前崎の場合、平均 6.1 倍で、その 1/2.0~2.0 倍の範囲に約 2/3 が入るという結果である。

Baba *et al.* (2004) は沖合と沿岸の津波の高さの関係を次のように導いている。沿岸での津波の高さはグリーンの法則と岸での反射により

$$H_a = 2h^{1/4}H_p$$

となる。ここで、 H_a は沿岸での津波の高さ、 H_p は沖合での津波の高さ、 h は海底津波計の設置深度である。設置深度は東海が 2202m (13.7)、房総 1 が 4011m (15.9)、房総 2 が 2098m (13.5)、房総 3 が 1912m (13.2)、室戸 1 が 2308m (13.9)、室戸 2 が 1507m (12.5) である。ただし、() 内は $2h^{1/4}$ の値である。

Fig. 7a で●で示した距離の近い地震は全般に比が小さい傾向がある。これは沖合と沿岸での震央距離の違いの効果を考慮していないためと考えられる。馬場・平田 (2005) は近地津波に対して距離減衰の効果を次のように補正することを提案している。Abe (1981) は北西太平洋で発生する津波を日本で観測した結果に基づいて、 $\log H$ と $\log A$ が比例関係にありその比例係数はほぼ -1.0 であるとして、近地津波に対する津波マグニチュード M_i を次のように定義した。

$$M_i = \log H + \log A + 5.55$$

ここで、 H は津波の最大波高 (単位 m)、 A は震央から観測点までの海洋を通る最短経路に沿う距離 (単位 km) である。ただし、適用範囲は $100\text{km} < A < 3500\text{km}$ である。同様の関係を仮定すると、沖合と沿岸の津波の最大波高の間に次の関係が得られる。

$$H_c = 2 \frac{A_p}{A_c} h^{1/4} H_p$$

ここで H_c は固定端反射、設置水深、距離の補正がなされた沿岸で推定される津波の最大波高、 H_p は沖合での津波の最大波高、 h は海底津波計の設置深度、 A_p は震央から沖合観測点までの距離、 A_c は震央から沿岸観測点までの距離である。上で述べたように震央から観測点までの距離は海洋を通る最短経路に沿う距離であるが、ここでは簡単のために震央距離を用いた。また、距離が上の範囲を越えた場合も同じ式を使った。なお、震央距離が上述の範囲より長い場合は距離の比は 1 に近づぐためにその補正の影響は小さくなると考えられる。 H_c に対する沿岸での津波の最大波高の比の常用対数についての結果の東海沖津波計と御前崎の例を Fig. 7b に示す。この場合補正前より標準偏差が小さくなっている。ほとんどの観測点の組み合わせで補正前より標準偏差が小さくなっているが、一部の組み合わせ (房総に対する布良と岡田) で補正前より標準偏差が大きくなっている。

Fig. 7b を見ると、比が一定というよりは沖合の津波の最大波高に依存しているように見える。そこで、補正した沖合の津波の最大波高に対する沿岸の津波の最

Fig. 7 Comparison of tsunami maximum amplitudes between off-Tokai and onshore at Omaezaki. (a) The relationship between the ratio of the amplitudes observed at Omaezaki to those observed off-Tokai, and the amplitudes observed off-Tokai. The solid and broken lines indicate the mean and the one standard deviation range, respectively. (b) The relationship between the ratio of the amplitudes observed at Omaezaki to the corrected values observed off-Tokai, and the corrected values observed off-Tokai. The solid and broken lines indicate the mean and the one standard deviation range, respectively. (c) The same as (b), except the solid and broken lines are the regression line and the one standard deviation range, respectively, assuming that the ratio is a linear function of amplitude. (d) The relationship between the ratio of the amplitudes observed at Omaezaki to the corrected values observed off-Tokai, and epicentral distance. The solid and broken lines are the regression line and the one standard deviation range, assuming that the ratio is a linear function of epicentral distance. A common logarithmic scale is used for all axes, and the solid and open circles indicate data recorded at an epicentral distance shorter and longer than 600 km, respectively.

大波高の比の常用対数が補正した沖合の津波の最大波高の常用対数の1次関数であると仮定して、その係数を求めた。東海沖津波計と御前崎の例で得られた回帰直線をFig. 7cに示す。図中の p は係数、 d は残差の標準偏差である。

Fig. 7bあるいはFig. 7cを見ると、補正後も●で示した距離の近い地震は全般に比が小さい傾向があるので、補正した沖合の津波の最大波高に対する沿岸の津波の最大波高の比の常用対数が震央から沖合観測点までの距離の常用対数の1次関数であると仮定して、その係数を求めた。東海沖津波計と御前崎の例で得られた回帰直線をFig. 7dに示す。横軸は東海沖津波計までの震央距離であり、 p は係数、 d は残差の標準偏差である。

これまで、震央距離の違いを補正しない場合、補正した場合、沖合の最大波高の関数と考えた場合、震央

距離の関数と考えた場合について調べてきた。パラメータ数の異なるいくつかのモデルの中から最も良い予測を行うという視点での選択にAIC (Akaike Information Criterion, Akaike, 1973) が役立つ。重回帰モデルの場合はAICは次式で表される (Sugiura, 1978; 小西・北川, 2004)。

$$\text{AIC} = n \log(2\pi + 1) + n \log \hat{\sigma}^2 + \frac{2n(m+2)}{n-m-3}$$

ここで、 m は説明変数の数、 n はデータ数、 $\hat{\sigma}^2$ は残差の分散の推定値である。AICが小さいほど良いモデルである。ここでは、上述の補正を行っていないデータと行ったデータの2つのデータセットを用いて、比が一定、比が沖合の最大波高の関数、比が震央距離の関数、比が沖合の最大波高と震央距離の関数、という4種類のモデル、合計8つのモデルについてAICを比較した。

Table 2 Comparison of AIC values. The shaded rows are the cases with the minimum AIC value for each combination of offshore and coastal observation points. For each combination, the upper four rows, (1)~(4), and the lower four rows, (5)~(8), are for uncorrected and corrected data, respectively. In each set of four rows we assume a constant ratio, (1) and (5); a linear function of amplitude, (2) and (6); a linear function of epicentral distance, (3) and (7); and a linear function of both amplitude and epicentral distance, (4) and (8). From left to right, the columns are the model used, the AIC value, the variance, the standard deviation, its power of 10, the constant (or y-intercept), the regression coefficient for amplitude functions, and the regression coefficient for epicentral distance functions. N, the number of data points used; EQ, the earthquake numbers (see Table 1) used for the statistical relationship analysis.

	AICc	variance	std.dev.	power(std)	constant	amplitude	distance
Tokai Omaezaki N = 8 EQ = 4, 6, 7, 10, 12, 15, 23, 24							
(1)	10.24	0.094594	0.307561	2.030303	0.783402		
(2)	12.41	0.061591	0.248176	1.770826	1.366748	-0.365964	
(3)	1.57	0.015888	0.126049	1.336747	-0.331568		0.371715
(4)	10.56	0.015234	0.123426	1.328698	-0.160316	-0.062866	0.348030
(5)	2.68	0.036776	0.191769	1.555140	-0.258111		
(6)	7.84	0.034806	0.186563	1.536609	0.034944	-0.111194	
(7)	-1.51	0.010817	0.104006	1.270593	-0.898433		0.213474
(8)	7.37	0.010224	0.101112	1.262152	-1.119066	0.067043	0.228124
Tokai Toba N = 7 EQ = 4, 6, 7, 10, 15, 23, 24							
(1)	8.32	0.070674	0.265846	1.844363	0.726840		
(2)	11.04	0.038346	0.195822	1.569720	1.324401	-0.360415	
(3)	7.77	0.024052	0.155086	1.429178	-0.117004		0.275217
(4)	21.37	0.022706	0.150686	1.414771	0.203111	-0.104975	0.227577
(5)	2.69	0.031648	0.177899	1.506257	-0.344608		
(6)	8.20	0.025556	0.159862	1.444982	0.166798	-0.187368	
(7)	4.48	0.015033	0.122608	1.326196	-0.848364		0.164298
(8)	18.46	0.014986	0.122419	1.325619	-0.929237	0.021390	0.171633
Tokai Owase N = 8 EQ = 4, 6, 7, 10, 12, 15, 23, 24							
(1)	5.51	0.052355	0.228812	1.693603	0.875764		
(2)	10.07	0.046019	0.214520	1.638776	1.131368	-0.160354	
(3)	5.29	0.025295	0.159044	1.442260	0.221995		0.217957
(4)	14.52	0.024976	0.158039	1.438929	0.102537	0.043853	0.234479
(5)	1.59	0.032109	0.179191	1.510744	-0.208221		
(6)	7.14	0.031877	0.178542	1.508489	-0.117293	-0.033954	
(7)	3.86	0.021172	0.145506	1.397997	-0.623860		0.138568
(8)	12.47	0.019339	0.139063	1.377410	-1.017326	0.110217	0.171342
Tokai Urugami N = 8 EQ = 4, 6, 7, 10, 12, 15, 23, 24							
(1)	5.31	0.051115	0.226087	1.683010	0.869599		
(2)	10.26	0.047119	0.217069	1.648424	1.072594	-0.127349	
(3)	3.87	0.021195	0.145584	1.398249	0.182143		0.229188
(4)	12.45	0.019280	0.138854	1.376746	-0.110779	0.107531	0.269700
(5)	2.38	0.035435	0.188242	1.542561	-0.237199		
(6)	7.91	0.035134	0.187442	1.539721	-0.136302	-0.037358	
(7)	1.86	0.016483	0.128388	1.343964	-0.784323		0.182403
(8)	8.65	0.011997	0.109531	1.286858	-1.415439	0.171010	0.238830
Tokai Kushimoto N = 8 EQ = 4, 6, 7, 10, 12, 15, 23, 24							
(1)	6.34	0.058113	0.241065	1.742069	1.047776		
(2)	9.56	0.043149	0.207723	1.613329	1.440578	-0.246426	
(3)	-1.01	0.011515	0.107308	1.280289	0.189864		0.286016
(4)	8.32	0.011512	0.107296	1.280253	0.179063	0.003965	0.287509
(5)	2.14	0.034357	0.185356	1.532343	-0.051258		
(6)	6.75	0.030359	0.174238	1.493611	0.323789	-0.139266	
(7)	-6.93	0.005495	0.074129	1.186120	-0.726443		0.225097
(8)	0.92	0.004565	0.067562	1.168321	-1.013796	0.078935	0.250027
Boso1 Onahama N = 7 EQ = 1, 3, 4, 6, 10, 11, 15							
(1)	5.65	0.048276	0.219717	1.658506	1.052035		
(2)	11.94	0.043596	0.208797	1.617325	1.345189	-0.227351	
(3)	12.40	0.046597	0.215864	1.643855	0.615253		0.123347
(4)	25.81	0.042844	0.206988	1.610601	1.021516	-0.208100	0.084395
(5)	3.32	0.034597	0.186003	1.534627	-0.145438		
(6)	9.77	0.031973	0.178810	1.509419	0.268873	-0.166597	
(7)	9.70	0.031693	0.178026	1.506698	-0.719931		0.162236
(8)	23.35	0.030152	0.173644	1.491572	-0.287135	-0.131652	0.132474

データ数が6個以上ある沖合と沿岸の観測点の組み合わせの場合の結果を Table 2 に示す。それぞれの観測点の組み合わせの中で、(1)~(4)は補正なし、(5)~(8)は補正ありの場合で、その中で、比が一定値 ((1)と(5))、

振幅の関数 ((2)と(6))、距離の関数 ((3)と(7))、振幅と距離の関数 ((4)と(8))と仮定したモデルの結果である。観測点の組み合わせの行の、N の後ろの数字は使用したデータの数、EQ の後ろの数字は使用した地震の

Table 2 (continued)

	AICc	variance	std.dev.	power(std)	constant	amplitude	distance
Boso1 Choshi N = 6 EQ = 3, 4, 6, 10, 11, 15							
(1)	5.30	0.037354	0.193272	1.560529	0.937398		
(2)	14.66	0.033554	0.183177	1.524673	1.199529	-0.197913	
(3)	15.16	0.036460	0.190944	1.552187	0.631462		0.085644
(4)	44.63	0.033398	0.182752	1.523181	1.049975	-0.185706	0.037340
(5)	4.25	0.031315	0.176962	1.503009	-0.264688		
(6)	13.71	0.028634	0.169216	1.476441	0.155606	-0.166350	
(7)	13.96	0.029868	0.172824	1.488758	-0.653852		0.108943
(8)	43.60	0.028116	0.167678	1.471223	-0.151922	-0.141830	0.068747
Boso1 Mera N = 8 EQ = 1, 3, 4, 6, 10, 11, 12, 15							
(1)	-2.89	0.018329	0.135383	1.365787	1.297911		
(2)	2.71	0.018326	0.135375	1.365763	1.304093	-0.004912	
(3)	1.90	0.016577	0.128750	1.345087	1.618372		-0.093707
(4)	11.24	0.016575	0.128745	1.345070	1.613786	0.004106	-0.093877
(5)	-2.77	0.018613	0.136428	1.369077	0.104312		
(6)	2.83	0.018601	0.136387	1.368948	0.132081	-0.011325	
(7)	1.83	0.016430	0.128181	1.343324	0.461970		-0.104584
(8)	11.17	0.016430	0.128180	1.343323	0.459135	0.001247	-0.104650
Boso2 Onahama N = 12 EQ = 1, 3, 4, 6, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 20, 22							
(1)	3.90	0.051944	0.227913	1.690101	1.141947		
(2)	4.99	0.041909	0.204716	1.602197	1.548360	-0.347231	
(3)	7.52	0.051753	0.227493	1.688468	1.266957		-0.035378
(4)	9.63	0.041656	0.204098	1.599917	1.693465	-0.348369	-0.040687
(5)	-0.70	0.035426	0.188218	1.542474	-0.006185		
(6)	1.29	0.030805	0.175513	1.498003	0.549224	-0.239548	
(7)	2.87	0.035122	0.187410	1.539606	-0.163708		0.044579
(8)	5.98	0.030731	0.175303	1.497279	0.461662	-0.235548	0.022155
Boso2 Choshi N = 12 EQ = 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 18, 20, 22, 24							
(1)	2.66	0.046867	0.216488	1.646220	0.931734		
(2)	2.68	0.034590	0.185983	1.534558	1.357216	-0.345697	
(3)	3.72	0.037696	0.194156	1.563708	0.237319		0.203685
(4)	5.31	0.029060	0.170469	1.480705	0.745280	-0.296419	0.161703
(5)	-0.12	0.037175	0.192808	1.558863	-0.200910		
(6)	0.87	0.029732	0.172429	1.487403	0.462689	-0.280777	
(7)	0.38	0.028540	0.168938	1.475496	-0.874736		0.197646
(8)	2.94	0.023850	0.154434	1.427032	-0.230923	-0.227841	0.166752
Boso2 Mera N = 17 EQ = 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24							
(1)	-8.88	0.026091	0.161526	1.450527	1.300923		
(2)	-9.65	0.020919	0.144636	1.395198	1.592349	-0.246657	
(3)	-5.97	0.025977	0.161174	1.449354	1.228489		0.021645
(4)	-6.17	0.020907	0.144592	1.395057	1.619895	-0.249101	-0.007369
(5)	-6.64	0.029764	0.172523	1.487727	0.164177		
(6)	-8.69	0.022138	0.148790	1.408607	0.829757	-0.287105	
(7)	-3.99	0.029193	0.170859	1.482036	0.001537		0.048601
(8)	-5.21	0.022124	0.148742	1.408453	0.796689	-0.284163	0.007843
Boso2 Okada N = 9 EQ = 1, 6, 7, 10, 12, 15, 22, 23, 24							
(1)	10.09	0.092259	0.303742	2.012530	1.266136		
(2)	6.65	0.036939	0.192195	1.556666	2.228632	-0.781695	
(3)	13.84	0.082041	0.286428	1.933873	1.873272		-0.187214
(4)	8.21	0.019726	0.140449	1.381812	3.089674	-0.836068	-0.244864
(5)	10.99	0.101895	0.319209	2.085495	0.103798		
(6)	6.27	0.035408	0.188170	1.542304	1.950000	-0.771298	
(7)	15.43	0.097908	0.312903	2.055430	0.483015		-0.116934
(8)	8.31	0.019955	0.141263	1.384406	2.921651	-0.857116	-0.236273

番号 (Table 1 参照) を示している。列は左から、モデルの種類を示す番号、AIC、分散、標準偏差 (分散の平方根)、その 10 のべき乗、一定値 (あるいは y 切片)、振幅の係数、距離の係数である。最も AIC が小さいモデルを網掛けした。Table 2 に記した回帰係数をもつ回帰モデルによって沖合の観測値から沿岸での津波の最大波高を予測することが可能である。AIC 最小の中で標準偏差の 10 のべき乗が最も大きいのは、室戸と白浜の組み合わせで 2.11 である。この誤差はやや大きいよ

うに思われるので、標準偏差の大きさに基準を設ける必要があるかも知れない。

4. 議論

これまでに得られている観測データに基づいて沖合と沿岸の観測点のそれぞれの組み合わせに対して最良と考えられる回帰モデルを作成した。沖合と沿岸の津波の最大波高について一般的な回帰モデルや 1 つの沖

Table 2 (continued)

	AICc	variance	std.dev.	power(std)	constant	amplitude	distance
Boso2 Irozaki N = 8 EQ = 11, 12, 15, 18, 19, 22, 23, 24							
(1)	-1.18	0.022696	0.150651	1.414657	1.206483		
(2)	3.69	0.020730	0.143979	1.393088	1.022651	0.164254	
(3)	0.62	0.014116	0.118811	1.314653	1.733746		-0.160101
(4)	9.87	0.013969	0.118191	1.312776	1.845490	-0.055377	-0.175212
(5)	-3.07	0.017913	0.133839	1.360940	0.025447		
(6)	1.85	0.016466	0.128318	1.343749	0.269180	-0.105961	
(7)	2.25	0.017309	0.131562	1.353823	0.165386		-0.042492
(8)	9.02	0.012568	0.112107	1.294513	1.050272	-0.246744	-0.138844
Boso3 Onahama N = 12 EQ = 1, 3, 4, 6, 9, 10, 11, 15, 16, 18, 20, 22							
(1)	8.57	0.076683	0.276917	1.891981	1.081226		
(2)	8.34	0.055413	0.235400	1.719492	1.691874	-0.495993	
(3)	12.23	0.076642	0.276843	1.891660	1.139076		-0.016365
(4)	13.02	0.055242	0.235036	1.718049	1.813142	-0.498040	-0.033592
(5)	4.89	0.056405	0.237498	1.727818	-0.058220		
(6)	5.98	0.045531	0.213380	1.634480	0.816137	-0.368832	
(7)	8.41	0.055760	0.236135	1.722403	-0.288372		0.065107
(8)	10.68	0.045453	0.213197	1.633794	0.723232	-0.363771	0.022887
Boso3 Choshi N = 12 EQ = 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 18, 20, 22, 24							
(1)	7.24	0.068617	0.261948	1.827882	0.872470		
(2)	5.87	0.045107	0.212385	1.630739	1.460716	-0.455983	
(3)	8.55	0.056388	0.237461	1.727669	0.076165		0.233642
(4)	8.96	0.039388	0.198465	1.579302	0.826768	-0.399698	0.164701
(5)	4.64	0.055280	0.235118	1.718375	-0.249063		
(6)	4.52	0.040314	0.200785	1.587759	0.678896	-0.384791	
(7)	5.68	0.044412	0.210742	1.624585	-0.999743		0.220256
(8)	7.30	0.034311	0.185233	1.531911	-0.038630	-0.325378	0.168489
Boso3 Mera N = 17 EQ = 1, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24							
(1)	-10.72	0.023416	0.153024	1.422406	1.230590		
(2)	-12.36	0.017834	0.133545	1.360019	1.541051	-0.248005	
(3)	-8.07	0.022962	0.151533	1.417531	1.086732		0.043007
(4)	-8.89	0.017815	0.133472	1.359789	1.506096	-0.244574	0.009166
(5)	-8.48	0.026718	0.163458	1.456994	0.105394		
(6)	-11.24	0.019053	0.138031	1.374141	0.773746	-0.281171	
(7)	-6.12	0.025745	0.160454	1.446951	-0.105181		0.062953
(8)	-7.83	0.018963	0.137708	1.373118	0.689128	-0.273279	0.019689
Boso3 Okada N = 9 EQ = 1, 6, 7, 10, 12, 15, 22, 23, 24							
(1)	9.43	0.085668	0.292690	1.961961	1.180466		
(2)	6.08	0.034663	0.186181	1.535256	2.149207	-0.735587	
(3)	13.69	0.080707	0.284090	1.923488	1.598724		-0.129136
(4)	8.05	0.019391	0.139250	1.378004	3.022348	-0.827111	-0.232365
(5)	10.31	0.094483	0.307381	2.029462	0.032309		
(6)	5.74	0.033359	0.182644	1.522805	1.845715	-0.735626	
(7)	14.97	0.093076	0.305084	2.018756	0.255049		-0.068770
(8)	8.16	0.019618	0.140063	1.380586	2.846463	-0.845520	-0.225337
Boso3 Irozaki N = 8 EQ = 11, 12, 15, 18, 19, 22, 23, 24							
(1)	-1.23	0.022571	0.150237	1.413308	1.109623		
(2)	4.01	0.021568	0.146859	1.402358	0.972660	0.112629	
(3)	-0.05	0.012986	0.113957	1.300041	1.660540		-0.167487
(4)	8.84	0.012277	0.110800	1.290625	1.897403	-0.113460	-0.197551
(5)	-2.74	0.018688	0.136703	1.369945	-0.057324		
(6)	2.11	0.017012	0.130430	1.350298	0.212852	-0.113377	
(7)	2.32	0.017452	0.132107	1.355523	0.140470		-0.060132
(8)	8.24	0.011391	0.106727	1.278576	1.115384	-0.270231	-0.160747

合観測点について1つの回帰モデルを作成しなかったのは、津波の発生の仕方は津波毎に異なり沖合と沿岸の津波の最大波高の関係もまた当然異なると考えられ、また同一の沖合観測点に対しても設置条件によって沿岸の観測点での振幅や周期が大きく異なると考えられるからである。

前節では沖合と沿岸の両方の観測点で津波の最大波高が観測された場合のみのデータを用いてその関係を調べた。実際には、どちらか一方でしか観測されない

津波もある。それらを含めたものを東海沖と房総沖3についてそれぞれ Fig. 8 と Fig. 9 に示す。図の左側に並んだ三角は沖合では観測されないが沿岸で観測された津波の沿岸での最大波高を示しており、下側の三角は沖合では観測されたが沿岸で観測されなかった津波の沖合での最大波高を示している。ただし、今回の調査は関東から九州の太平洋岸の検潮所で津波が観測された地震を対象にして沖合の観測データを調査したため、下側の三角のデータは該当する津波を網羅してい

Table 2 (continued)

	AICc	variance	std.dev.	power(std)	constant	amplitude	distance
Muroto1 Shirahama N = 6 EQ = 13, 15, 18, 19, 23, 24							
(1)	11.51	0.105094	0.324183	2.109516	1.102873		
(2)	14.41	0.032202	0.179449	1.511642	1.875956	-0.666434	
(3)	14.66	0.033571	0.183225	1.524842	-0.297427		0.415282
(4)	43.00	0.025465	0.159578	1.444037	0.806877	-0.382563	0.219393
(5)	15.25	0.196052	0.442778	2.771900	-0.138908		
(6)	14.79	0.034274	0.185132	1.531553	1.685703	-0.759681	
(7)	14.69	0.033706	0.183591	1.526129	-2.248599		0.625663
(8)	42.53	0.023525	0.153378	1.423568	-0.317239	-0.399225	0.337253
Muroto1 Murotomisaki N = 7 EQ = 13, 15, 18, 19, 22, 23, 24							
(1)	5.73	0.048858	0.221038	1.663558	1.354328		
(2)	3.56	0.013176	0.114785	1.302521	1.913539	-0.494601	
(3)	10.04	0.033238	0.182312	1.521641	0.646109		0.208410
(4)	16.09	0.010677	0.103329	1.268611	2.610460	-0.678671	-0.143842
(5)	7.87	0.066284	0.257457	1.809077	0.194141		
(6)	4.09	0.014211	0.119209	1.315859	1.443207	-0.545249	
(7)	11.04	0.038357	0.195850	1.569819	-0.752835		0.278670
(8)	16.87	0.011933	0.109236	1.285987	2.359857	-0.725003	-0.148569
Muroto1 Tosashimizu N = 6 EQ = 13, 15, 18, 19, 22, 24							
(1)	9.75	0.078424	0.280044	1.905652	1.417392		
(2)	8.23	0.011488	0.107181	1.279913	2.141794	-0.675192	
(3)	13.18	0.026220	0.161925	1.451862	-0.135091		0.438132
(4)	37.46	0.010101	0.100504	1.260389	1.586681	-0.547395	0.117966
(5)	8.05	0.059044	0.242990	1.749805	0.304481		
(6)	7.30	0.009839	0.099192	1.256584	1.679032	-0.628856	
(7)	11.78	0.020752	0.144056	1.393336	-1.025135		0.375235
(8)	36.32	0.008355	0.091406	1.234259	0.977799	-0.496336	0.116151
Muroto2 Shirahama N = 6 EQ = 13, 15, 18, 19, 23, 24							
(1)	9.67	0.077369	0.278152	1.897372	1.007885		
(2)	14.78	0.034217	0.184977	1.531008	1.785663	-0.619735	
(3)	16.36	0.044528	0.211017	1.625614	0.070574		0.278259
(4)	44.44	0.032326	0.179793	1.512841	1.283579	-0.481529	0.097561
(5)	13.10	0.137019	0.370160	2.345095	-0.183289		
(6)	14.97	0.035342	0.187994	1.541681	1.582094	-0.721686	
(7)	15.89	0.041158	0.202874	1.595416	-1.784688		0.475406
(8)	43.91	0.029627	0.172125	1.486364	0.195829	-0.452758	0.216244
Muroto2 Murotomisaki N = 7 EQ = 13, 15, 18, 19, 22, 23, 24							
(1)	4.86	0.043154	0.207736	1.613377	1.280218		
(2)	6.05	0.018807	0.137140	1.371323	1.843255	-0.467351	
(3)	11.41	0.040449	0.201119	1.588984	0.989058		0.085753
(4)	16.68	0.011628	0.107831	1.281833	2.831986	-0.725946	-0.199447
(5)	6.42	0.053884	0.232129	1.706588	0.170057		
(6)	6.22	0.019256	0.138766	1.376468	1.357877	-0.513119	
(7)	12.35	0.046253	0.215064	1.640832	-0.318963		0.144027
(8)	17.31	0.012722	0.112793	1.296560	2.640573	-0.769374	-0.203069
Muroto2 Tosashimizu N = 6 EQ = 13, 15, 18, 19, 22, 24							
(1)	6.60	0.046375	0.215348	1.641904	1.320572		
(2)	3.85	0.005538	0.074421	1.186919	1.998826	-0.579851	
(3)	10.19	0.015918	0.126167	1.337109	0.147205		0.331226
(4)	31.63	0.003822	0.061826	1.152990	1.451479	-0.455914	0.113586
(5)	4.34	0.031821	0.178383	1.507937	0.255742		
(6)	1.44	0.003703	0.060849	1.150401	1.425761	-0.523608	
(7)	9.09	0.013267	0.115181	1.303711	-0.660078		0.258524
(8)	29.36	0.002618	0.051168	1.125040	0.923988	-0.431852	0.083766

るわけではない。沖合の海底津波計ではノイズレベルは時期によって異なり、機器の不調を含めてノイズレベルの高い時期もあるため津波が観測されない場合もあると思われる。今回の調査期間において、明らかに機器の不調と考えられる場合を除いて、沿岸で最大波高 40cm 以上の津波が観測されたにもかかわらず、沖合の海底津波計で読み取れない場合はなかった。また、このことは津波波源域の場所に依存している可能性もあり、その特性把握のためには津波数値シミュレーション

による分析が有効と考えられる。

2004 年 9 月 5 日 23 時 57 分の東海道沖の地震に伴う津波の東海沖海底津波計と沿岸の検潮所における処理後の時系列を Fig. 10 に示す。東海沖海底津波計では 0 時 3 分頃第一波が観測されているのに対し、沿岸の検潮所では浦神で 0 時 18 分に第一波が観測されており、東海沖の方が約 15 分早い。しかし、高さに関する情報を得るためにはさらに数分は必要であり、沿岸に到達するまでの間に津波予報の必要な修正が可能かどうか

Fig. 8 Correlation of tsunami maximum amplitudes between offshore and coastal observation points for off-Tokai, TK1, including data observed only offshore or only at coastal observation points, indicated by triangles along the bottom or left side of each graph, respectively: a) Omaezaki, (b) Maisaka, (c) Toba, (d) Owase, (e) Urugami, and (f) Kushimoto. The solid and broken lines indicate the regression line $\pm$ one standard deviation.

Fig. 9 The same as Fig. 8 except for off-Boso, BS3, and (a) Onahama, (b) Choshi, (c) Mera, (d) Tokyo, (e) Okada, and (f) Irozaki.

Fig. 10 Filtered data obtained from offshore and coastal observation points, (a) off-Tokai, TK1; (b) Maisaka; (c) Toba; (d) Owase; (e) Uragami; and (f) Kushimoto. The coastal data in (b) to (f) are the residual left after subtracting the 1800 seconds moving-averaged data from the original data, and the offshore data in (a) were obtained by applying the 100 seconds low-pass-filter to the residuals. The data are every second recorded value for the period from 23:30 September 5, through 3:30 September 6, 2004.

検討する必要がある。また、一般に沖合と沿岸の津波波形の対応が良いと言えない場合も多い。これについても、津波数値シミュレーションによる分析が必要と考えられる。

5. まとめ

海底津波計データから時間領域でのフィルタ処理によって津波成分を抽出した。これによって得られた気象庁の東海沖および房総沖、海洋研究開発機構の室戸沖のケーブル式海底地震観測システムの津波計による津波波高を沿岸の検潮所での津波波高と比較し、その統計的関係を調べた。震央距離による補正を行うか否か、振幅あるいは震央距離の関数と仮定するか否かの場合について、AICを求め最も良い回帰モデルを得た。しかし、データ数が少ない観測点の組み合わせも多く、今後のデータの蓄積によって結果は変わり得るものと

考えられる。

沿岸で津波が観測されても沖合では観測されない場合があった。このことは津波波源域と観測点の位置が関係している可能性もあり、その特性把握のためには津波数値シミュレーションによる分析が有効と考えられる。一般に沖合と沿岸の津波波形の対応が良いと言えない。これについても、津波数値シミュレーションによる分析が必要と考えられる。

謝辞

気象研究所地震火山研究部の森 滋男研究部長（現気象庁地震予知情報課長）、平田賢治主任研究官、林豊主任研究官、岡田正実客員研究員からは本調査を進める上で多くのアドバイスをいただきました。気象庁地震津波監視課の中田健嗣氏にはデータ提供に関してお手を煩わせました。2人の査読者には本稿を改善す

るのに有益なコメントをいただきました。海洋研究開発機構には海底津波計のデータ提供に便宜を図っていただきました。一部の図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1995) を利用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- Abe, K., 1981: Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern Pacific. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **27**, 194-205.
- Akaike, H, 1973: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle: *International Symposium on Proceeding 2nd Information Theory*, B. N. Petrov and F. Csaki, editors, Akademiai Kiado, Budapest, 267-281.
- 馬場俊孝・平田賢治, 2005: 沖合での海底水圧観測による沿岸波高の予測. *月刊地球*, **37**, 197-201.
- Baba, T., K. Hirata and Y. Kaneda, 2004: Tsunami magnitudes determined from ocean-bottom pressure gauge data around Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L08303, doi:10.1029/2003GL019397.
- Eguchi, T., Y. Fujinawa, E. Fujita, S. I. Iwasaki, I. Watabe, H. Negishi and H. Fujiwara, 2002: On-line operating network of the high gain seismometers and tsunami sensors, deployed at the sea-floor Sagami trough subduction zone, central Japan: *Seismotectonics in Convergent Plate Boundary*, Y. Fujinawa and A. Yoshida, editors, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 247-260.
- 藤沢 格・立山清二・舟崎 淳, 1986: 房総沖海底地震常時観測システムの概要. *測候時報*, **53**, 127-166.
- 濱田信生, 1984: 近地地震用走時表の再検討. *気象研究所研究報告*, **35**, 109-167.
- Hirata, K., M. Aoyagi, H. Mikada, K. Kawaguchi, Y. Kaiho, R. Iwase, S. Morita, I. Fujisawa, H. Sugioka, K. Mitsuzawa, K. Suyehiro, H. Kinoshita and N. Fujiwara, 2002: Real-time geophysical measurements on the deep seafloor submarine cable in the southern Kurile subduction zone. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **27**, 170-181.
- Kanazawa, T. and A. Hasegawa, 1997: Ocean-bottom observatory for earthquakes and tsunami off Sanriku, north-eastern Japan using submarine cable: *Proceedings of International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables*, 208-209.
- Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama and T. Tanno, 2000: Real-time observation of tsunami by RTK-GPS. *Earth Planets Space*, **52**, 841-845.
- 気象庁, 2004: 平成 16 年 9 月地震・火山月報 (防災編), p.60.
- 気象研究所地震火山研究部, 1980: 海底地震常時観測システムの開発. *気象研究所技術報告*, **4**, 233p.
- 小西貞則・北川源四郎, 2004: *情報量規準*, 朝倉書店, 194p.
- Momma, H., N. Fujiwara, K. Kawaguchi, R. Iwase, S. Suzuki and H. Kinoshita, 1997: Monitoring system for submarine earthquakes and deep sea environment. *MTS/IEEE OCEANS'97*, **2**, 1453-1459.
- Okada, M., 1988: A computer program for producing tsunami travel time chart in Japan: *Proceedings of Pacific Congress on Marine Science and Technology* (PACON88), Honolulu, Hawaii, May 16-20.
- 斎藤正徳, 1978: 漸化式デジタル・フィルターの自動設計. *物理探査*, **31**, 240-263.
- Sugiura, N., 1978: Further analysis of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections. *Communications in Statistics, Theory and Methods*, **A7**, 13-26.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1995: New version of the Genetic Mapping Tools released. *EOS, Trans. Amer. Geophys. U.*, **36**, 15-26.

沖合と沿岸の津波の最大波高の統計的關係

高山寛美* (気象研究所地震火山研究部)

地震発生直後に地震データを用いて推定された震源の位置と規模に基づく現行の津波予報では津波地震の場合には過小評価となる。実際に沖合で観測された津波波高データを活用することによって、沿岸での津波波高をより適切に予測できる可能性があると考えられる。気象庁の東海沖、房総沖、海洋研究開発機構の室戸沖のケーブル式海底地震観測システムに設置された圧力計を用いた海底津波計データから時間領域でのフィルタ処理によって津波成分を抽出した。これによって得られた沖合の津波計による津波波高を沿岸の検潮所での津波波高と比較し、その統計的關係を調べた。震央距離による補正を行うか否か、振幅あるいは震央距離の関数と仮定するか否かの場合について、AIC を使って最も良い回帰モデルを得た。

* 現所属：気象大学校