

20. 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 { 高橋龍太郎
相田 勇

(昭和37年9月18日発表—昭和37年12月28日受理)

緒 言

1957年の地球観測年の前後より、長周期海洋波の観測、研究が盛んに行われるようになったが、そのスペクトルの研究としては、陸棚その他観測点近傍の noise spectra を取扱つたもの^{1), 2), 3)}、津波のスペクトルを取扱つたもの^{2), 4)}とがある。しかしこの中、津波に関するものを考えて見ても、未だ極めて少数のものしか扱われていない。

日本では過去において多くの津波に襲われており、比較的近年の検潮記録のあるもののみについても十指に余る程である。これらの津波記録はほとんど全部が、各港湾に据付けられた検潮器によるものであつて、港湾や陸棚の影響による波形の変形を受けている。しかし日本各地の多数の点の観測記録、また異つたいくつもの津波の記録を、多数スペクトル分析を行うことによつて、各地の津波に対する振動性能、津波によるスペクトル構造の相違、あるいは陸棚の外における津波のスペクトル構造などについて明らかにする可能性がある。この研究が行われた目的もそこにある。

幸い日本津波研究会の仕事として、気象庁広野氏によつて過去の津波の記録が集められ、分類整理されてマイクロフィルムになつたものがあるので、このフィルムから引伸して分析に使用する記録を得ることができた。

各地の記録の周期分析結果

前述のマイクロフィルムの記録の中から、アナライザーにかける際に、記録を再現させ易いもの、同一箇所でいくつかの津波の記録があるものなどという条件で、結局次の8箇の津波がえらばれた。

- 1) F.E. SNODGRASS, W.H. MUNK and G.R. MILLER, "Long-period Waves over California's Continental Borderland, Part I. Background Spectra," *Journ. Marine Res.*, 20 (1962), 3.
- 2) 高橋龍太郎・相田 勇「津波スペクトルの研究」地震研究所彙報, 39 (1961), 523.
- 3) 高橋龍太郎・相田 勇「伊豆大島で観測された長周期波の周期分析」地震研究所彙報, 40 (1962), 561.
- 4) G.R. MILLER, W. H. MUNK and F. E. SNODGRASS, "Long-period Waves over California's Continental Borderland, Part II. Tsunamis," *Journ. Marine Res.*, 20 (1962), 31.

記号	年月日	名称または浪源
A	1944・12・7	東 南 海
C	1946・12・21	南 海
D	1952・3・4	十 勝 沖
E	1952・11・5	カムチャツカ
J	1933・3・3	三 陸
G	1931・11・2	日 向 灘
U	1941・11・19	日 向 灘
Ch	1960・5・24	チ リ

この中で、最後のチリ津波については既に報告されている⁵⁾。これらの津波の記録の、北は釧路より南は油津に至る 23 点の記録が解析された。勿論津波によつては記録のないもの、あるいはあつてもスケールアウトその他で不十分なものなどは解析を行つていない。

解析は津波スペクトル解析用に使用しているウェーブ・アナライザーで行い、津波

記録の 20 時間の長さについてフーリエ・スペクトルが求められた。また解析を行う際アナライザー入力が適当になるように、振巾を伸縮しているの以下に示すスペクトルの振巾は、任意スケールで表わされている。したがつてそのままでは個々のスペクトル相互間での振巾比較は出来ない。まずここでは各周期成分比を問題とする。

今、解析を行つた全部の津波記録のスペクトルを、各観測点毎にまとめて図示すると、Figs. 1~6 のようになる。これらのスペクトルを一見すると、各観測点それぞれに特有なスペクトルの形を示して、津波によつてのスペクトルの差異は明瞭でない。すなわち各観測点のスペクトルは、その点を含む湾、あるいは陸棚などの振動特性に大きく影響を受けている。

例えば宮古、土佐清水などはその最も顕著な例である。宮古においては 1944 年の東南海、1952 年の十勝沖、1952 年のカムチャツカ、1960 年のチリ各津波とも 45~49 min に一致した振巾の大きい山が見られる。また 20 min 位にも同様に共通の山が見られる。かつて本多、寺田らによつて計算された⁶⁾宮古湾の静振周期は 45.4 min および 24 min となつており、津波スペクトルの卓越周期は、津波の浪源位置、伝播距離、方向などの相違にもかかわらず、ほとんど完全にこれと一致している。

また土佐清水においては、1944 年の東南海、1952 年のカムチャツカ、1933 年の三陸、1931 年、1941 年の日向灘、1960 年のチリ各津波について、約 21 min に共通の顕著な山が認められる。また 39~40 min にも非常に大きい山を示す場合もある。土佐清水の湾の静振周期は、前述の論文によれば 22.8 min および 7.6 min となつているが、この前者は津波スペクトルの卓越周期 21 min と略々一致しているといえる。

しかしながら例えば八戸のような場合はそれ程明瞭な共振性は認められず、いくつもの共振周期を持つていて、各津波によつて異つた周期のものが励振されているかのように見える。

今これらのスペクトルの振巾の、最大値の 2/3 以上の値を示す peak を取出し、その周

5) 前出 2)

6) K. HONDA, T. TERADA, Y. YOSHIDA and D. ISITANI, "Secondary Undulations of Oceanic Tides," *Journ. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 24 (1908).

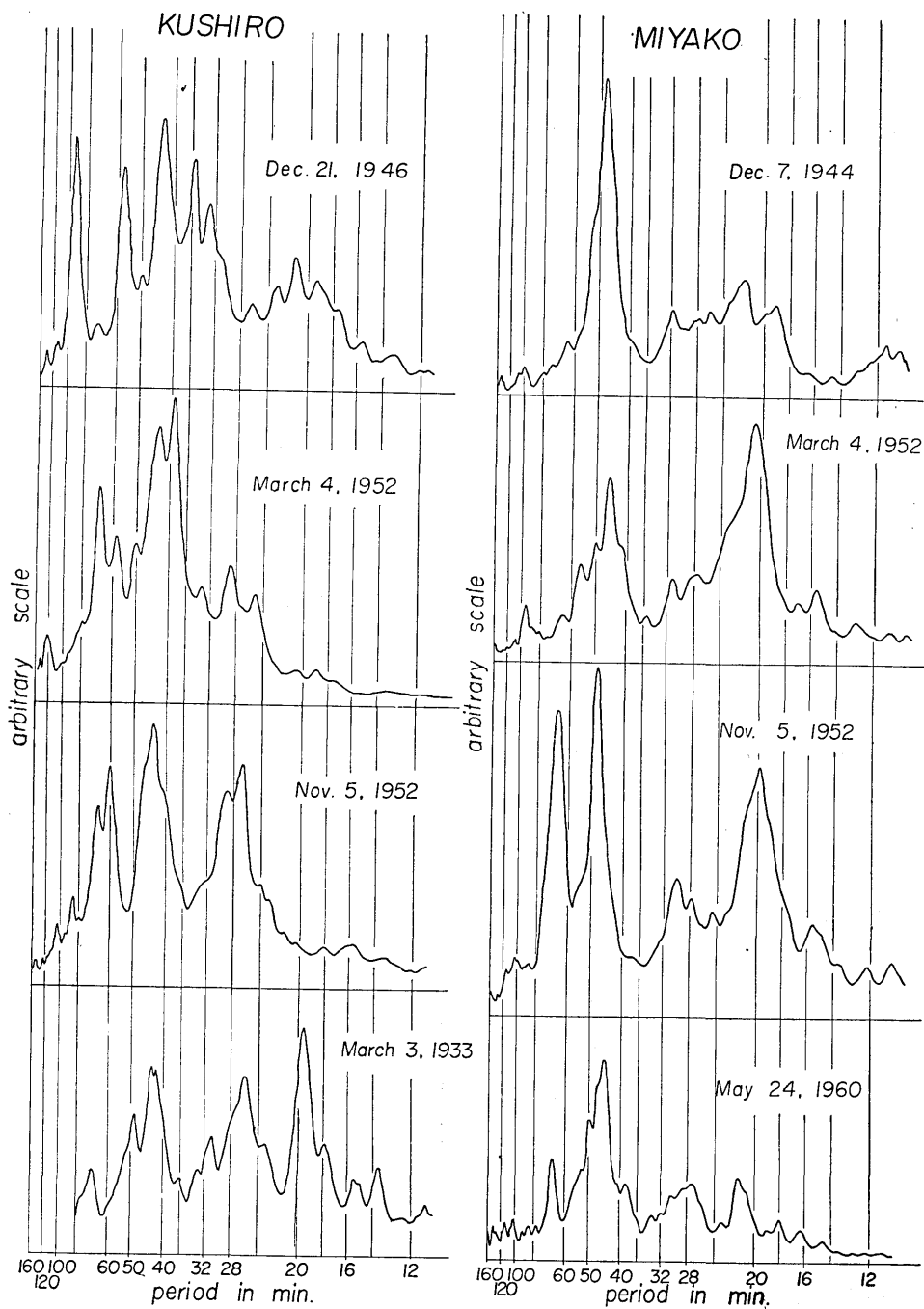


Fig. 1. Spectra of various tsunamis observed at Kushiro and Miyako.

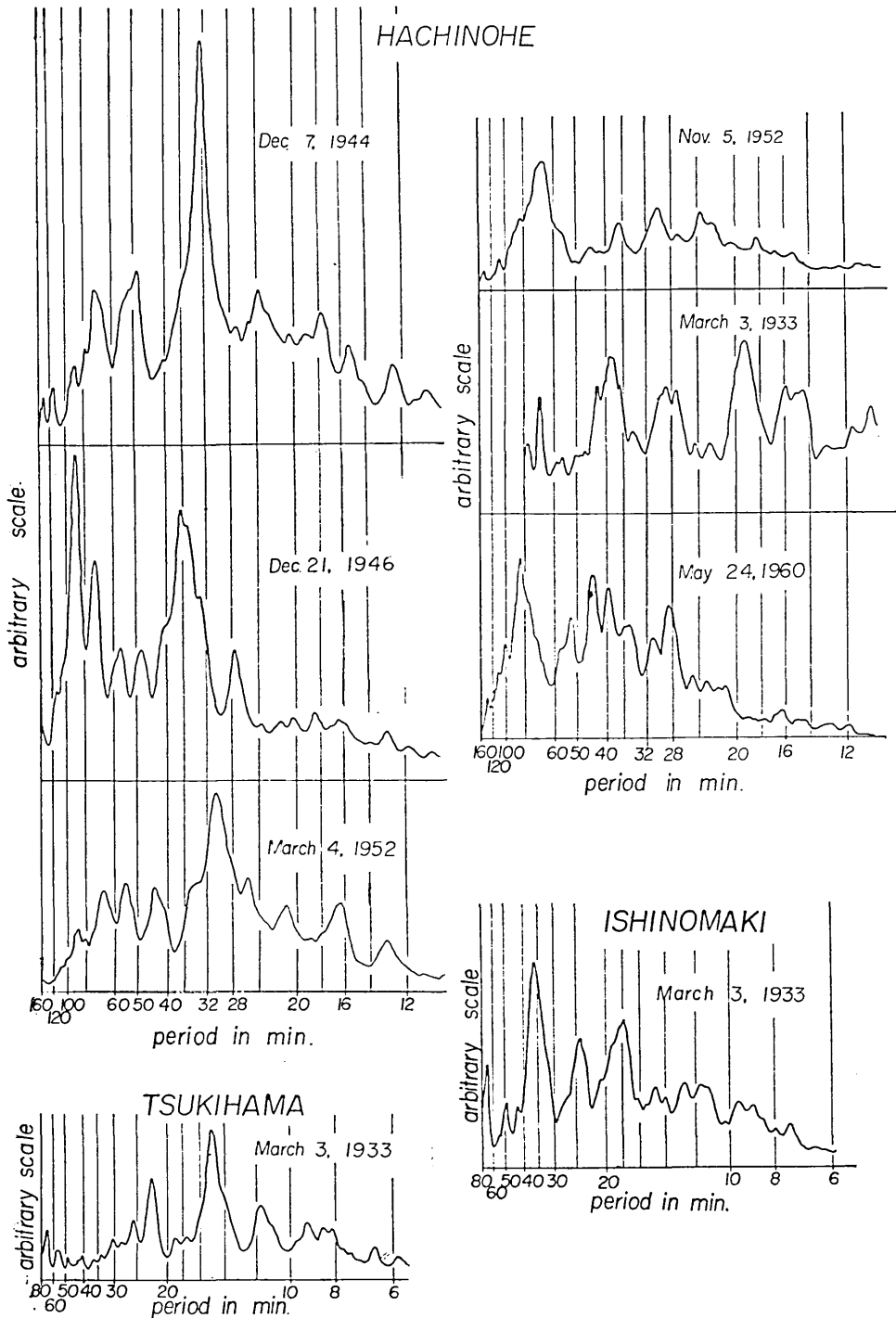


Fig. 2. Spectra of various tsunamis observed at Hachinohe, Tsukihama and Ishinomaki.

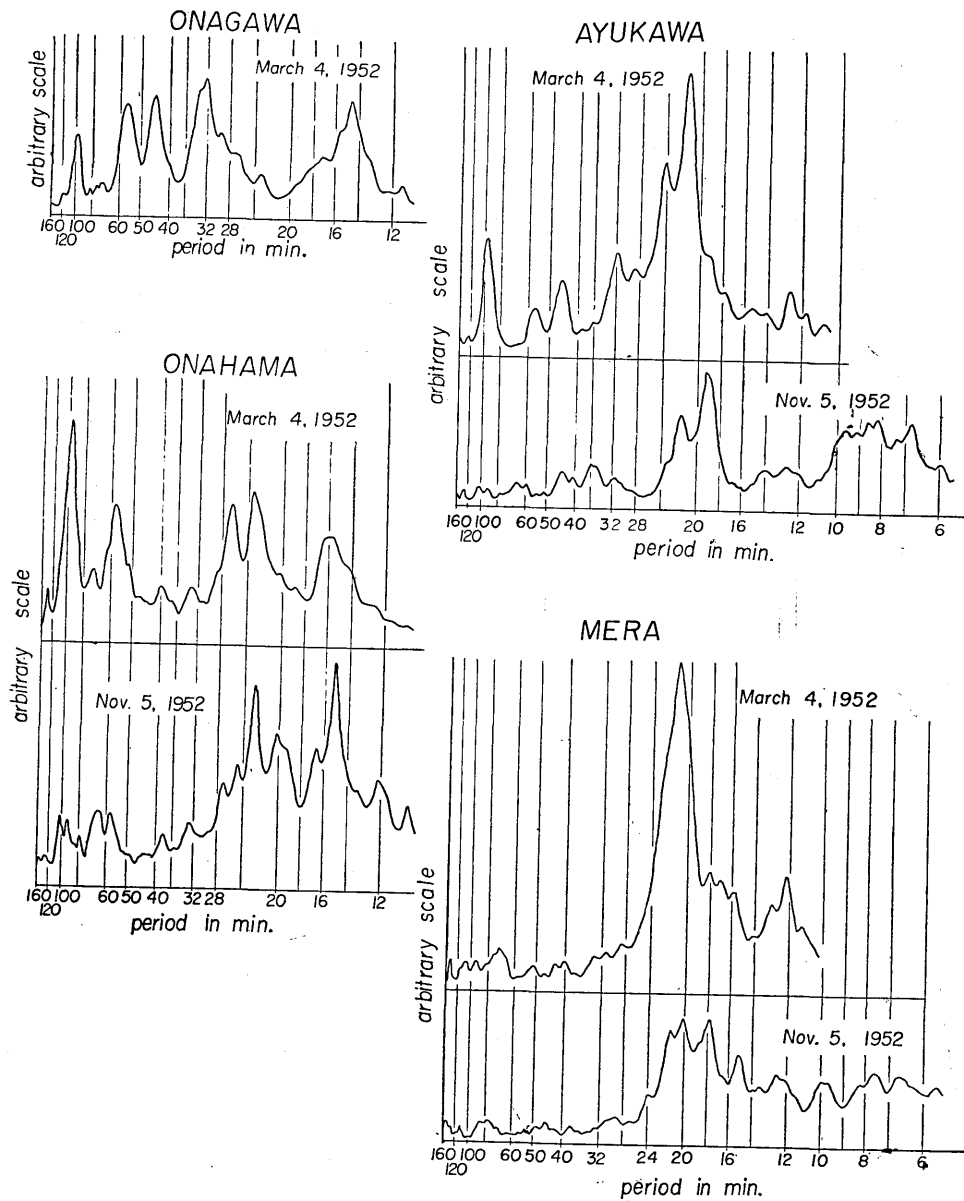


Fig. 3. Spectra of various tsunamis observed at Onagawa, Ayukawa, Onahama and Mera.

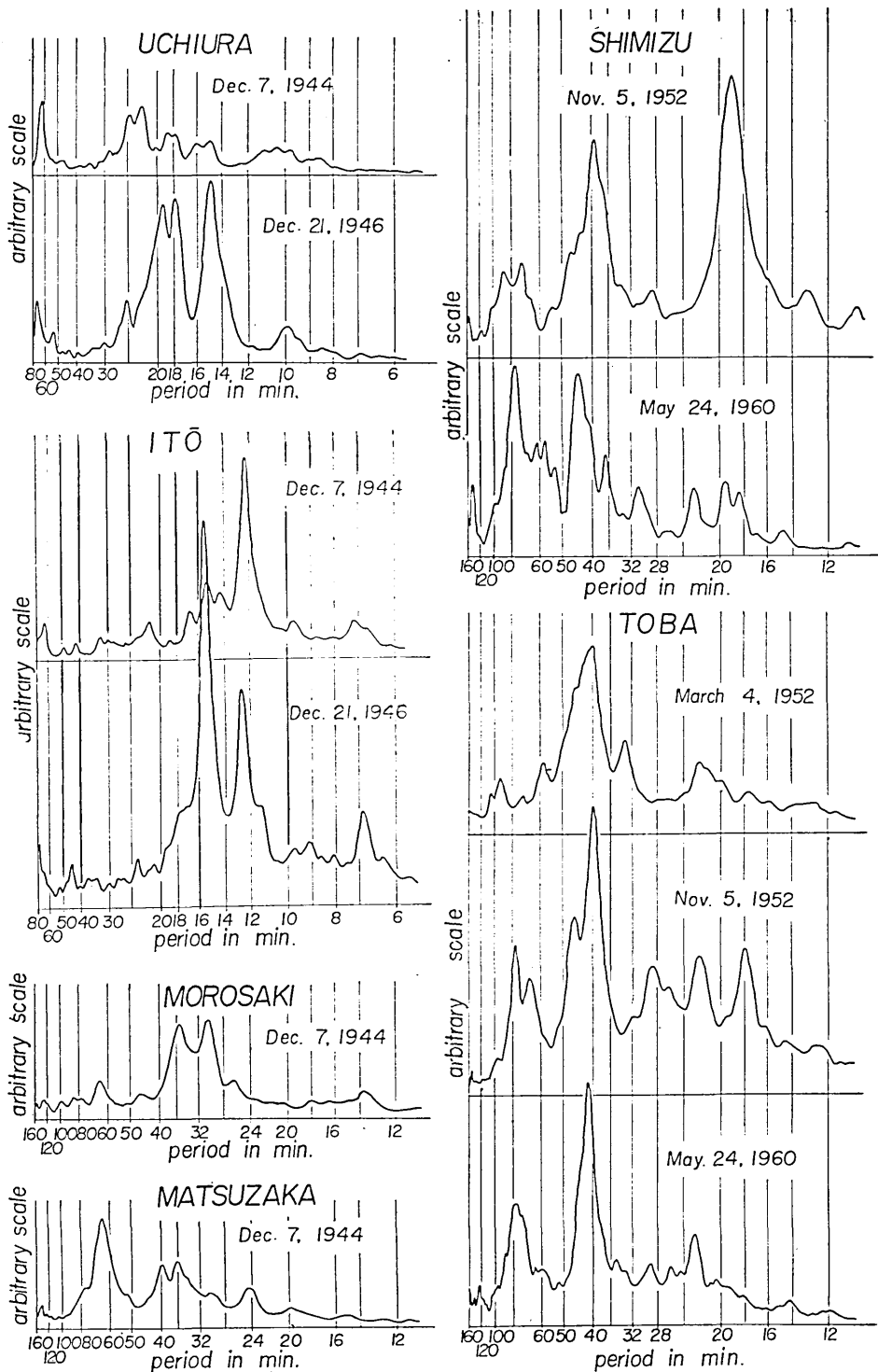


Fig. 4. Spectra of various tsunamis observed at Uchiura, Itō, Shimizu, Morosaki, Matsuzaka and Toba.

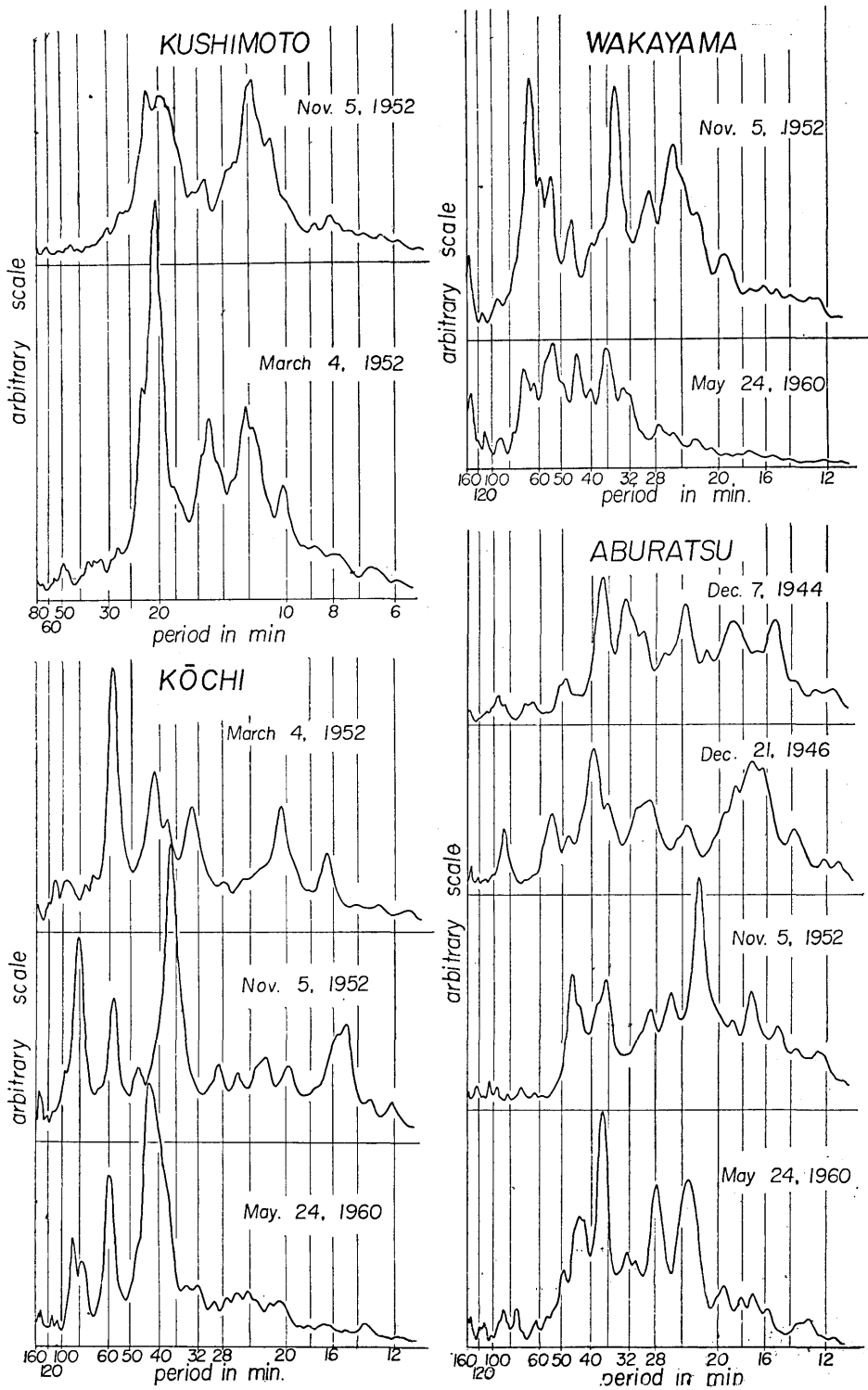


Fig. 5. Spectra of various tsunamis observed at Kushimoto, Wakayama, Kōchi and Aburatsu.

TOSA-SHIMIZU

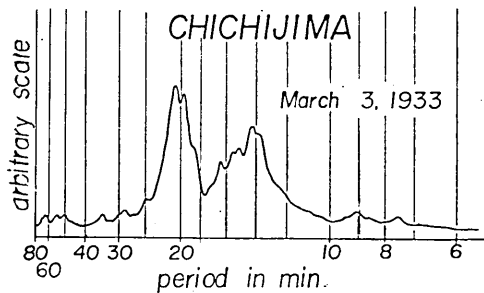
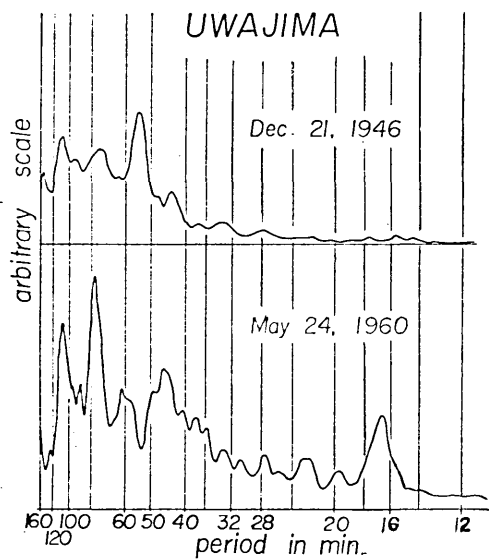
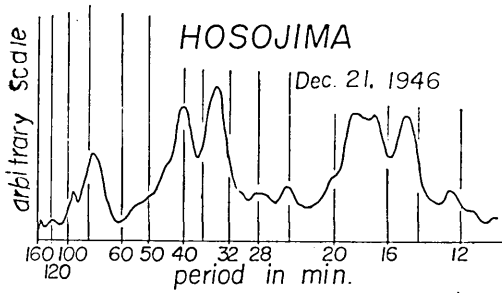
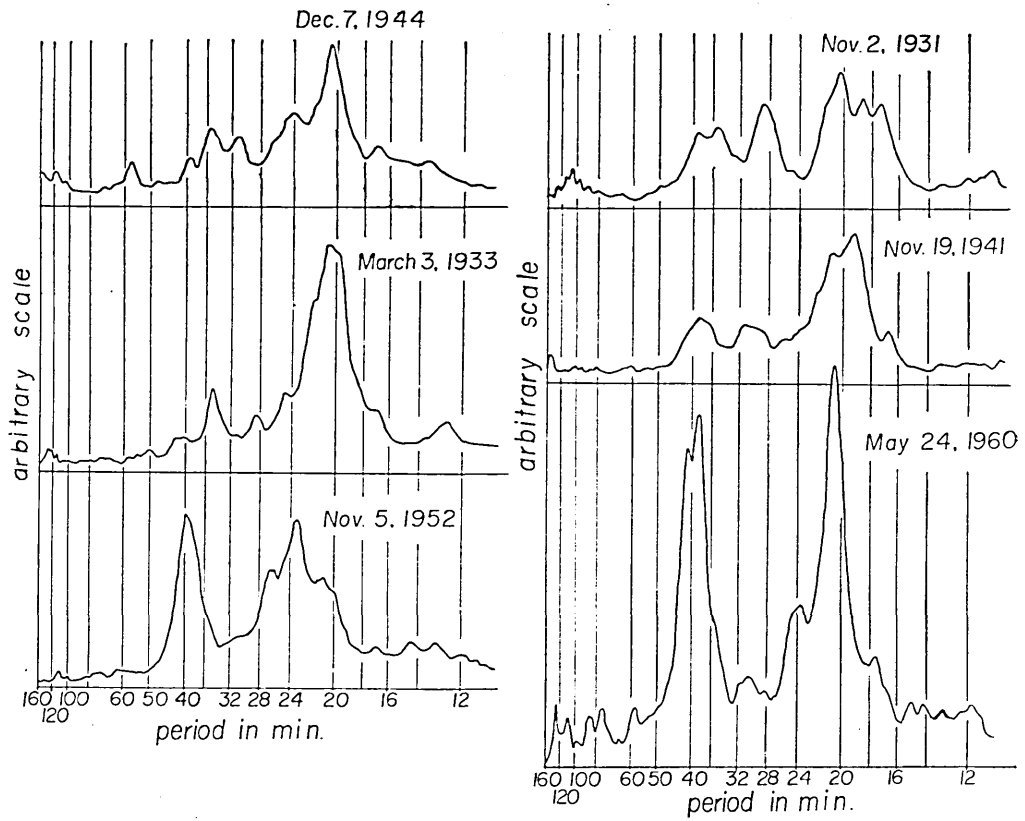


Fig. 6. Spectra of various tsunamis observed at Tosa-shimizu, Uwajima, Hosojima and Chichijima.

Table I. Predominant periods of tsunamis obtained at each station.

Tsunami Station	A Dec. 7, 1944 Tonankai	C Dec. 21, 1946 Nankai	D March 4, 1952 Tokachi	E Nov. 5, 1952 Kamchatka	J March 3, 1933 Sanriku	G Nov. 2, 1931 Hiuganada	U Nov. 19, 1941 Hiuganada	Ch May 24, 1960 Chile	The most predominant period	Calc. periods of seiches after Honda, Terada
Kushiro	32,	95, 58, 44,	70, 39,	70, 60, 44, 28	44, 26, 20			85, 43, 38, 28	44	
Hachinohe	49	92, 74, 36	30	67	70, 40, 28, 20, 16			45	45~49	45.4, 24
Miyako			45, 21	67, 49, 20	22, 15					
Tsukihama			57, 46, 32, 15							
Onagawa										
Ayukawa			22	20, 8.5	36, 18				20~22	8.9
Ishinomaki			95, 23	23, 20, 15					23	
Onahama			21	20, 15					20~21	
Mera									12~15	
Itō	12	15								
Uchiura	68, 23	18, 14		39, 19				75, 43		21.2
Shimizu										
Morosaki	35, 30									
Matsuzaka	65			39				40	40	11.4
Toba			40							
Kushimoto			21	20, 12				65, 54, 44, 36	20~21	18.3, 12.8
Wakayama				65, 35				42		
Kōchi			58	80, 38				40, 21	39~40, 21	22.8, 7.6
Tosa-shimizu	21			39, 24	21	28, 21	19	110, 78	110, 75~78	49.8
Uwajima		110, 75, 55								
Hosojima		34, 18, 15								
Aburatsu	37, 32, 24,	39, 17		22				37, 28, 25	37~39	19.0, 6.3
Chichijima	{19, 15				21, 14					15.1

期を表にして示すと Table I のようになる。

表中の数字は min を単位に示したそれらの周期であり、その内で太字のものは最大の peak の周期である。また右側の方に、いくつもの津波に共通に現れるもの、あるいは共振性の顕著に見えるものの周期を、前述本田・寺田らの計算周期と対比して示した。計算による周期とよく一致するものも多いが、また計算周期より長い周期を示しているものもある。これは計算の際に考慮した範囲よりも、更に広い範囲での共振作用が現われているものと思われる。

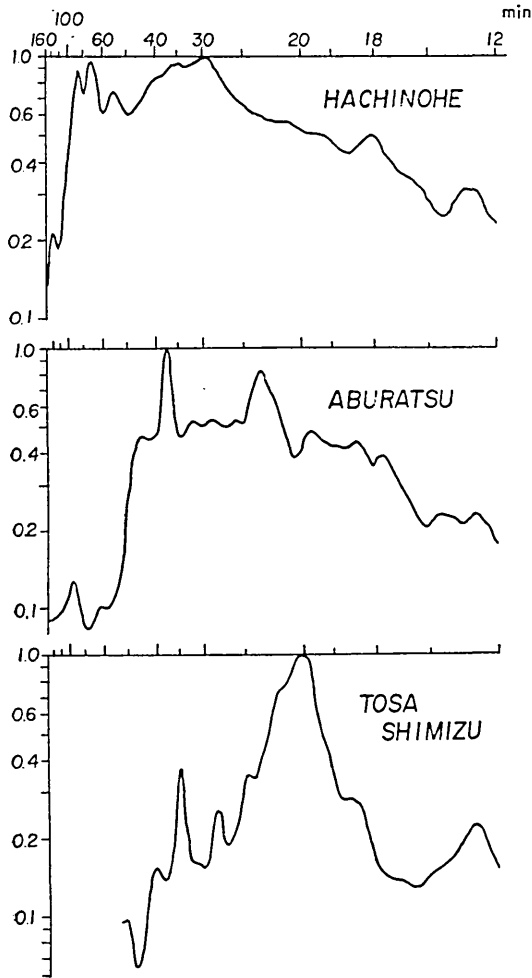


Fig. 7. Mean spectra of various tsunamis in each station.

陸棚外縁での津波スペクトル

今線型一次元の問題として考えると、観測点における津波のスペクトル $R(\omega)$ は、

$$R(\omega) = K(\omega) \cdot I(\omega) \quad (1)$$

で示される。ここに $I(\omega)$ は陸棚外縁に達した津波のスペクトル、 $K(\omega)$ は津波が観測点に達するまでに陸棚や湾などを伝播する際の伝達函数である。 $K(\omega)$ は津波の浪源位置が異ると波の伝播経路が相違するなどにより多少異つて来る筈であるが、津波が陸棚の外縁に達するまでに、海の深さの差による屈折作用により、伝播経路は概ね陸棚に直角になつて来るので、第一近似としては、いかなる津波に対しても $K(\omega)$ は一定であると考えられることができる。

今ある津波についての観測点および陸棚外縁でのスペクトルをそれぞれ $R_1(\omega)$, $I_1(\omega)$ とし、また別の津波について添字 2, 3, ...n などで示すこととし、観測点のスペクトルの平均を求めて見ると、縦軸を対数目盛としたとき

$$\begin{aligned} \overline{R(\omega)} &= \sqrt[n]{R_1(\omega) R_2(\omega) \cdots R_n(\omega)} \\ &= K(\omega) \sqrt[n]{I_1(\omega) I_2(\omega) \cdots I_n(\omega)} \end{aligned} \quad (2)$$

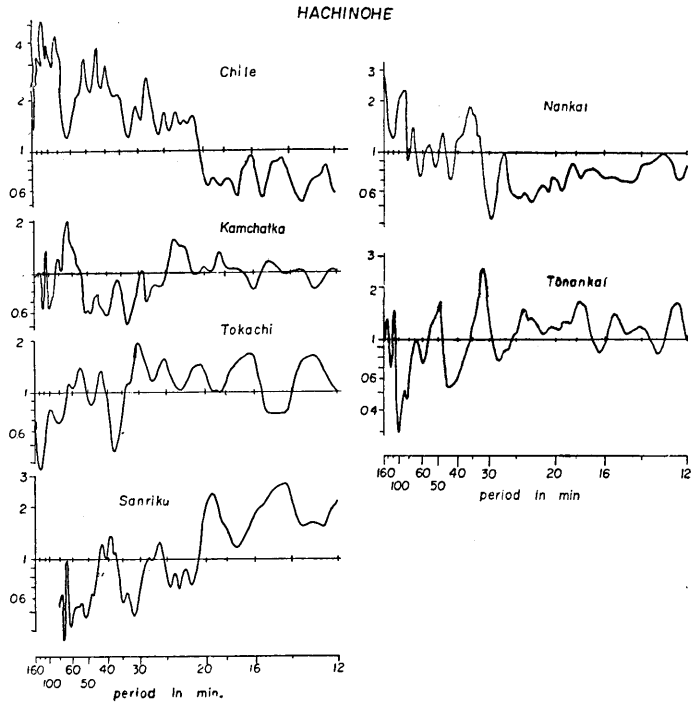


Fig. 8. Approximate spectra of tsunamis at the shelf rim off Hachinohe.

となる。若し右辺の $I_1(\omega)I_2(\omega)\dots I_n(\omega)$ が種々なスペクトルを含んでいて、平均すると各周期で振巾一様になるようなものであるならば、 $\overline{R(\omega)}$ は $K(\omega)$ に等しくなる。今、遠近大小さまざまな、多数の津波について考えれば、ほぼ上の条件が満たされるものと考えられる。

ここでは一ヶ所で多くの津波のスペクトルの得られている八戸、油津、土佐清水について、それぞれの地点の津波スペクトル6ヶ、3ヶ、4ヶの平均を求めた。その結果を Fig. 7 に示す。これらは平均した津波の数も少なく、完全に $K(\omega)$ を示しているとはいえないが、大略の各地点の振動特性を示していると思われる。これらは陸棚外縁の反射、陸棚内の共振および湾内の共振などの特性を含んでいるが、low-cut filter と、band-pass filter を組合せたような

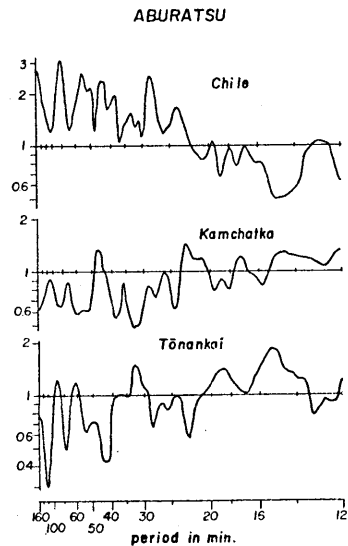


Fig. 9. Approximate spectra of tsunamis at the shelf rim off Aburatsu.

形を示している。そして土佐清水はこの band-pass の特性が鋭く表われているが、八戸はあまり鋭くないことが知られる。

次に八戸、油津、土佐清水の各津波スペクトルを、上に求めた平均スペクトルで割つたもの

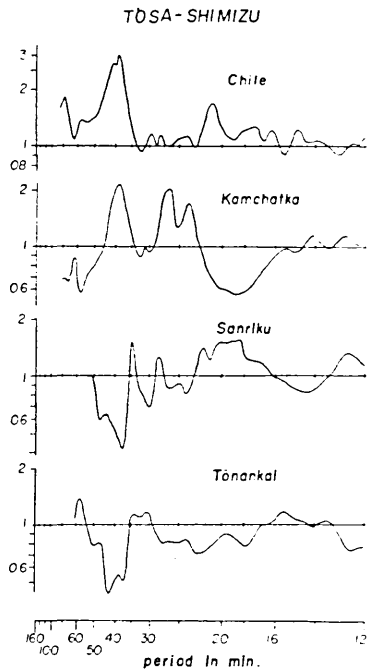


Fig. 10. Approximate spectra of tsunamis at the shelf rim off Tosa-shimizu.

のを求めて見た。(1)によれば観測点における津波スペクトルを伝達函数で割れば陸棚外縁に達した津波のスペクトルが得られる筈であるので、先に求めた平均スペクトルが不完全ながら伝達函数に近似のものを示しているとすれば、この操作で求めたものは陸棚外縁での津波スペクトル近似のものを表わしている。少なくとも異つた各津波相互のスペクトルの差違について、湾奥の観測点のスペクトルのみで比較するより明瞭な情報が得られることになる。この結果を図示すると Figs. 8~10 のようになる。この内で同じ津波を異つた場所において比較して見ると、東南海津波の油津と土佐清水はかなりよく一致している。またチリ津波の油津と八戸もよく一致している。しかしながらまたあまりよく一致していないものも多い。このように上述の操作によつて求められたスペクトルが、同じ津波にもかかわらず、土佐清水、油津のように近い点においても一致しない場合があるのは、このスペクトルが未だ完全に陸棚外縁におけるものを表わしていないためであろう。

また同時に八戸のように離れた地点になると浪源距離や浪源からの射出角の相違による実際のスペクトル

の相違をも含んでいると思われる。

同一地点で津波によるスペクトルの差違を見ると、例えば八戸について、チリ津波と三陸津波は全く対照的なスペクトル構造を示しており、約 21 min を境にチリ津波は長周期側が大きく、三陸津波は短周期側が大きくなっている。また南海津波は東南海津波に比べて長周期成分が大きい。十勝沖津波は比較的短周期成分が大きい。

伝播によるスペクトル変化

前節のような操作を各地点で行うことができれば、各津波の伝播による、乃至は浪源からの射出方向の差違による津波スペクトルの変化について情報を求めることができるが、現在のところそのような充分な資料は得られない。然し若し、多くの地点で2つの異つた津波のスペクトルが得られているような場合、各観測点毎に2つの津波スペクトルの比を求めれば、(1)式より明らかなように、各観測点の振動特性が消去されて、陸棚外縁

でのスペクトル比較を行つた事になる。十勝沖津波およびカムチャツカ津波については、比較的多くスペクトルが得られているので、今この2つを取上げて各観測点毎にスペクトルの比を求めたものが Fig. 11 である。この図は北より南に順に並べてあるが、どの場所でも多くの山や谷を持つて、複雑な形をしているが、顕著なことはその大勢が右上がりあるいは右下がりの直線で表わせるということである。縦軸は対数目盛であるので、これはスペクトルの成分比が ω に対して e または 10 の冪で表わせるというこ

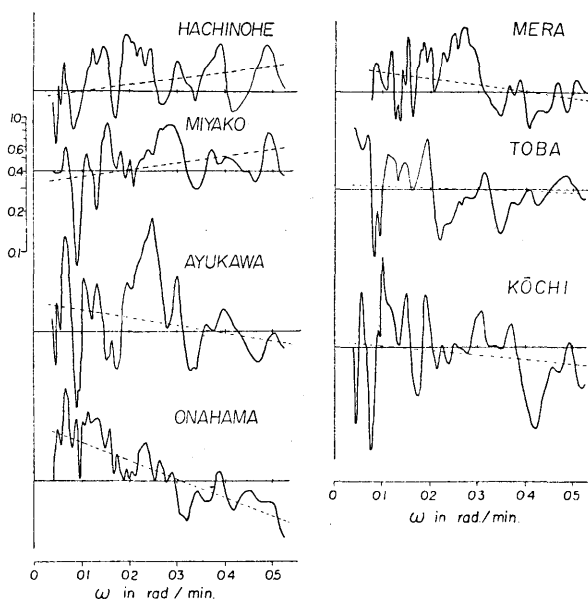


Fig. 11. Spectral ratios of Tokachi tsunami to Kamchatka tsunami in each station.

とである。同様にチリ津波に対する十勝沖津波のスペクトル比を求めることができるが、これを図示すると Fig. 12 になる。これも同様に右上りの直線にのっている。

今この直線の傾斜から、 e の指数を求め横軸に観測点の位置をとつて図示すると Fig. 13 下側に示す図ようになる。図中実線で結んだものは十勝沖津波とカムチャツカ津波のスペクトル比から得られた指数、白丸で示したものは十勝沖津波とチリ津波のスペクトル比から得られたものである。チリ津波は非常に浪源が遠いので、日本付近では比較的どこでも等しいスペクトルを示すことが想像される。このことは Figs. 8, 9 に示した八戸、油津の陸棚外縁の近似スペクトルが、チリ津波の場合はかなりよく似ていることでも確かめられる。それ故白丸で示したものは十勝沖津波の方のスペクトル構造の変化であると考えてよさそうである。すなわちこれは、浪源に近い八戸・宮古などでは指数が大きい、したがつて短周期成分が多く含まれており、また鳥羽・高知など遠方では指数が小さくなり、したがつて短周期成分が減少することを意味している。十勝沖津波の浪源からの射出角は八戸から高知までの範囲でも、Refraction diagram から推定すると高々 20 度の範囲であり、このスペクトルの変化は射出角によるよりも、むしろ距離による減衰が波の周期によつて異なることによるとすべきであろう。

また十勝沖津波とカムチャツカ津波のスペクトルの比では鮎川・小名浜で指数が大きく負になつて来る。このことは八戸・宮古では十勝沖津波の方が短周期成分が多いが、鮎川・小名浜ではカムチャツカ津波の方が短周期成分が多いということである。

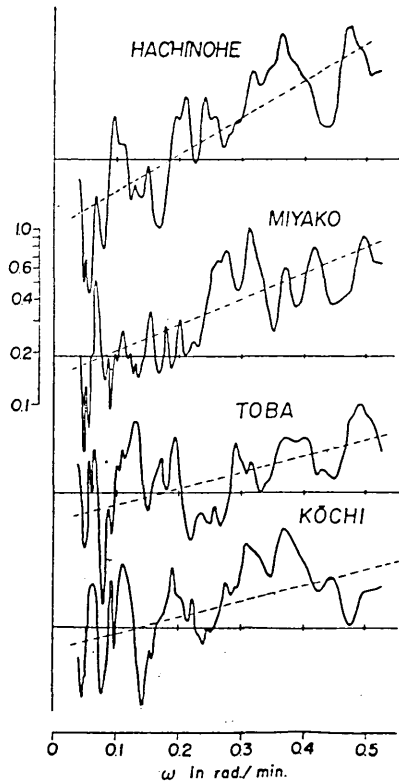


Fig. 12. Spectral ratios of Tokachi tsunami to Chile tsunami in each station.

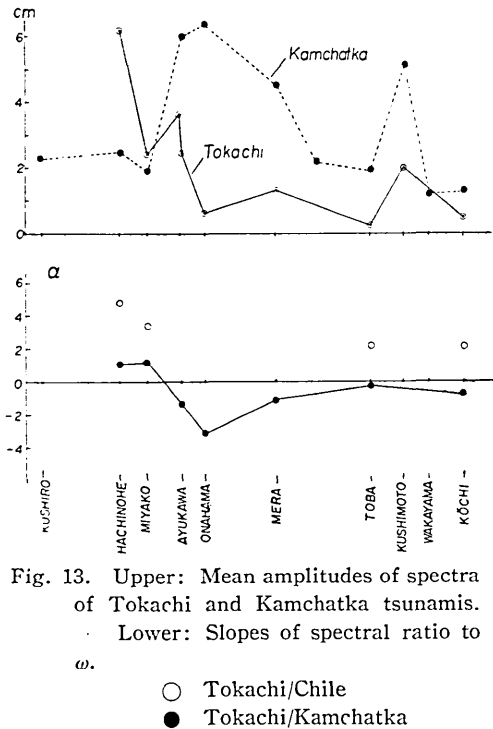


Fig. 13. Upper: Mean amplitudes of spectra of Tokachi and Kamchatka tsunamis. Lower: Slopes of spectral ratio to ω .

- Tokachi/Chile
- Tokachi/Kamchatka

と Fig. 13 の上の図のようになる。これを見ると十勝沖津波の振巾は八戸で大きく、カムチャツカ津波は鮎川・小名浜で大きくなっている。これが下の図のスペクトル比の指数の逆転と全く一致していることは興味深いことである。そしてこれはカムチャツカ津波の際に鮎川から布良附近の海岸にエネルギーの集中作用があり、また丁度その部分でスペクトルの短周期成分が大きくなっているということを示している。

結 言

日本各地で観測された過去の津波の記録多数を周期分析した結果、各観測点の津波の卓越周期を求め表示した。

また各観測点の津波記録のスペクトルそのままでは、異つた津波相互の性質の比較はむづかしいが、陸棚や湾の特性の影響を消去することによつて、陸棚外縁のスペクトル比較を行つた。これによつて定性的ながら過去の津波相互のスペクトル構造の比較がなされた。

今この場合の各スペクトルの面積を出して、スペクトルの平均振巾を求め、解析の際の縮率の補正をして振巾を実波高にしてプロットする

次に異なる2つの津波のスペクトル比を求めることによつて、観測点付近の特性を消去し陸棚外縁のスペクトル比として、津波の伝播によるスペクトル構造変化を考察した。

多数の記録の解析整理にあつては、加藤安彦君の努力に負うところが多い。ここに記して感謝の意を表す次第である。

20. *Spectra of Several Tsunamis observed on the Coast of Japan.*

By Ryutaro TAKAHASI and Isamu AIDA,
Earthquake Research Institute.

Using many records of past tsunamis, an attempt was made to get more information on tsunamis by means of the spectral analyses of these records. The results of analyses of 8 tsunamis at more than 20 stations are shown in Figs. 1~6, in which we can see that the spectra of tsunamis at these stations are strongly affected by the response characteristics of the bays and shelves where the stations are situated. For example, the spectra obtained at Tosa-shimizu or Miyako have amplitude peaks at definite periods even for different tsunamis. Now, periods of the peaks which are larger than two-thirds of the maximum peak value were shown in Table I and, in the right column, the most predominant one of these periods was shown in comparison with the seich periods of the bay calculated by Dr. Honda and others. In Miyako and Tosa-shimizu, the results of observations coincide perfectly with calculated values. In Hachinohe, however, the periods of peaks vary from tsunami to tsunami. That is to say, the former stations have the character of sharp resonance, but the latter station has not.

If the problem can be regarded as one-dimensional and linear, the tsunami spectrum $R(\omega)$ at a station may be represented by

$$R(\omega) = K(\omega) \cdot I(\omega), \dots \dots \dots (1),$$

where $K(\omega)$ is the transfer function of the shelf and bay near the station, and $I(\omega)$ is the spectrum of the tsunami incident to the shelf. Working from this standpoint, we calculated the average spectra of various tsunamis at a station, anticipating that the mean spectrum would show the approximate transfer function, since the tsunamis which we used are of various kinds, i. e. large, small, distant, and near ones, so the mean spectrum of them will become approximately uniform. The results obtained are shown in Fig. 7. If the approximate transfer function mentioned above is assumed to be $K(\omega)$, the spectra of tsunami coming into the shelf can be obtained by (1), and the results of this operation are shown in Figs. 8~10.

Again if the spectral ratio of different tsunamis in the same station was obtained, the effect of the bay and shelf must be eliminated. Therefore, the spectral ratios of Tokachi tsunami to Kamchatka and Chile tsunamis were calculated for several stations of the Pacific coast as shown in Figs. 11~12. These spectral ratios have some inclinations to the angular velocity ω , and the inclinations are different according to stations. Now, from the ratio of Tokachi spectrum to the Chile one, we can conclude that Tokachi tsunami contained a larger proportion of energy of the short-period components at

stations near the source than at distant stations. In the spectral ratio of Tokachi to Kamchatka, the inclinations against ω become remarkably negative at Ayukawa, Onahama and Mera, that is to say, at the central part of Honshū Island. Tokachi tsunami contains large components of short-period in the northern part of Honshū. Kamchatka tsunami, however, contains large components of short period in Miyako and Onahama, so this area shows the inversion of the rate of spectral component. It also coincides with the area of energy concentration in the case of Kamchatka tsunami, as shown in the upper diagram of Fig. 13.