

## 津波の規模階級の区分

羽鳥徳太郎\*

(昭和61年7月16日受理)

### 要 旨

最近88年間に、日本近海で発生した31個の津波について、波源に近い沿岸の遡上高と検潮器で得られた津波データ(最大波の全振幅値)を併用し、津波の規模階級(マグニチュード、 $m$ ; 今村・飯田スケール)を検討した。その結果、津波の高さ $H$ と距離 $A$ (震央から観測点までの海洋上の最短距離、20~2000 kmの範囲)の関係図において、津波マグニチュード $m$ の平均値は

$$m=2.7 \log H+2.7 \log A-4.3 \quad (\text{単位 } H:\text{m}, A:\text{km})$$

で表わせる、10 mを超える遡上高や、岬・島の観測値にバラつきがみられるが、津波の規模階級は0.5の間隔で区分できる。規模スケールは、1階級上がるとエネルギーで5倍、波高にして2.24倍の間隔で変わり、エネルギーと対応する。今回の方法で得た各津波の規模階級を、さきに筆者(羽鳥, 1979)が示した検潮データのみできめたものと比べると、 $m>1.5$ の津波では前方法によるものより0.5ほど大きく格付けされる傾向にある。

一方、波源に面した沿岸において、最大波の地点から沿岸にそう直線距離 $L$ と波高 $H$ との関係を見ると、津波マグニチュードは

$$m=0.008 L+2.7 \log H+0.31 \quad (\text{単位 } H:\text{m}, L:\text{km})$$

で表わせる。津波の範囲が定量化されたことで、今村(1949)の規模階級を区分する定義を補足した。

### 1. はじめに

日本近海で発生した津波について、波源に近い沿岸の津波の高さと被害区域の範囲から、津波の規模(マグニチュード: $m$ )を $m=-1\sim 4$ の6階級に区分した今村・飯田スケール(今村, 1949; IIDA, 1958)がある。現在、理科年表には各津波の規模階級がこのスケールで表示され、一般に普及している。そして津波マグニチュードのもつ意義が、エネルギー量の裏付けや地震との関係など、多角的に多くの研究者によって議論されてきた。一方、最近阿部(1981); ABE(1979, 1981, 1985)は、津波の観測データから地震のモーメント・マグニチュードを表わす $M_i$ を提唱し、地震の規模を区分している。津波データは、地震の長周期波データとしての役割を担い、海でおこる地震の規模や海底の地殻変動など、有用な情報を提供していることは間違いない(例えば阿部, 1981; 羽鳥, 1978, 1979)。

さきに筆者(羽鳥, 1979)は、広域の地域で検潮器で得られた津波記録を用い、今村・

\* 元地震研究所所属、現在 川口市末広 2-3-13 〒332

Table 1. List of tsunami magnitudes

No.	Date	Earthquake			Tsunami magnitude		
		Location	$M$	$M_t$	Imamura-Iida	Hatori (1)*	Hatori (2)**
1	1896 June 15	Sanriku	7.6	8.6	4	3.5	3.5
2	1923 Sept. 1	Kanto	7.9	8.0	2	2	2
3	1933 Mar. 3	Sanriku	8.3	8.3	3	3	3
4	1938 Nov. 5	Fukushima-Oki	7.6	7.6	0	1	1
5	1940 Aug. 2	W. Hokkaido	7.5	7.7	2	2	2
6	1944 Dec. 7	Tonankai	8.0	8.1	3	2.5	2.5
7	1946 Dec. 21	Nankaido	8.1	8.1	3	2.5	3
8	1952 Mar. 4	Tokachi-Oki	8.1	8.2	2	2.5	2.5
9	1953 Nov. 26	Boso-Oki	7.5	7.8	1	1.5	2
10	1960 Mar. 21	Iwate-Oki	7.5	7.5	0	0.5	0.5
11	1961 Feb. 27	Hiuganada	7.0	7.5	0	0	0
12	1963 Oct. 13	Kurile	8.1	8.4	2	2.5	3
13	1964 May 7	Oga-Oki	6.9	7.1	-1	-0.5	-0.5
14	1964 June 16	Niigata	7.5	7.9	2	2	2
15	1968 Apr. 1	Hiuganada	7.5	7.7	1	1	1.5
16	1968 May 16	Tokachi-Oki	7.9	8.2	2	2.5	2.5
17	1968 June 12	Iwata-Oki	7.2	7.4	0	1	1
18	1969 Aug. 12	Kurile	7.8	8.2	2	2	2.5
19	1970 July 26	Hiuganada	6.7	7.1	-1	-1	-0.5
20	1971 Sept. 6	Sakhalin	7.1	7.5	0	0.5	0.5
21	1972 Feb. 29	Hachijoshima	7.0	7.4	-1	0.5	0.5
22	1972 Dec. 4	"	7.2	7.6	-1	1	1
23	1973 June 17	Nemuro-Oki	7.4	8.1	1	1.5	2
24	1975 June 10	Kurile	7.0	7.9	1	1.5	1.5
25	1978 Jan. 14	Oshima-Kinkai	7.0	—	-1	-1	-2
26	1978 June 12	Miyagi-Oki	7.4	7.4	-1	0.5	0.5
27	1980 June 29	Izu-Toho	6.7	—	-1	-1.5	-2
28	1982 Mar. 21	Urakawa-Oki	7.1	—	0	0	0
29	1982 July 23	Ibaraki-Oki	7.0	—	-1	0	-0.5
30	1983 May 26	Nihonkai-Chubu	7.7	8.1	3	2.5	3
31	1983 June 21	W. Aomori	7.1	7.3	0	0.5	0.5

\* Former method: Tsunami magnitudes were determined from the relation of  $H \propto A^{-1/2}$  and the maximum amplitudes obtained by tide-gauge records.

\*\* Present method.

$M_t$ : Tsunami magnitude denoted by the Abe scale (ABE, 1981, 1985) which corresponds closely to moment magnitude  $M_w$ .

飯田スケールを0.5の間隔で等級を区分する方法を示した。そして最近、日本および外国で発生した多くの津波について、この方法で津波規模の格付けを行ってきた。今回は、検潮データと波源に近い沿岸に遡上した痕跡高のデータを併用して、津波マグニチュードを区分する方法を考察した。この方法は、津波の発生直後、波源に近い沿岸の遡上高のデー

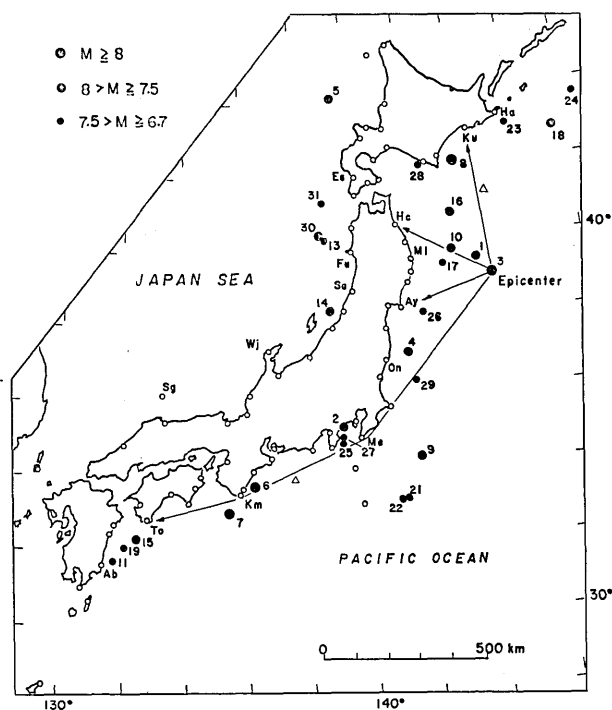


Fig. 1. Distributions of epicenter (closed circle) of the investigated tsunamigenic earthquakes ( $M$ : earthquake magnitude) and tide stations (open circle). Numeral at the epicenters is the serial number in Table 1. Example of measuring distance  $\Delta$  is shown. Ha, Hanasaki; Ku, Kushiro; Hc, Hachinohe; Mi, Miyako; Ay, Ayukawa; On, Onahama; Me, Mera; Km, Kushi-moto; To, Tosa-Shimizu; Ab, Aburatsu; Es, Esashi; Fu, Funakawa; Sa, Sakata; Wj, Wajima; Sg, Saigo.

タを数点入手したとき、遠隔地の検潮データが得られない時点でも、津波マグニチュードを速報できる利点がある。また、波源に近い沿岸の波高値を用いることで、本来の規模区分の方法にも適合する。

一方、理科年表には津波の規模階級の区分が示されているが、マグニチュード  $m \leq 2$  以下の津波では高さの範囲が規定されていない。そこで本稿では、波源に面した沿岸に遡上もしくは検潮器で観測された大小各種の津波をとりあげ、波高分布のパターンから規模階級を明確に区分する定義を示す。

## 2. 規模スケールの区分

ここで取り扱った津波データは、最近 88 年の間 (1896~1983 年) に日本近海で発生した 31 個の津波である (Table 1)。Fig. 1 には、これら津波を伴った地震 ( $M$ : 地震マグニチュード) の震央を黒丸で示し、付記した数字は Table 1 に示す津波の番号に対応す

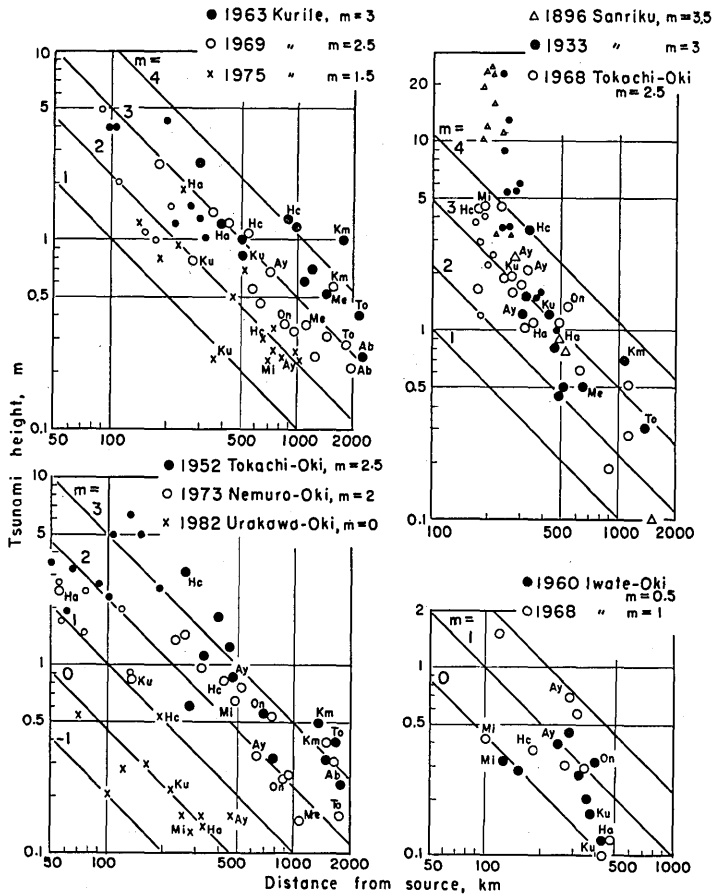


Fig. 2. Relation between tsunami height and distance, where the inundation height (above M. S. L.) and the maximum double-amplitude observed by tide-gauges are shown by small and large marks, respectively. Location of the initial named stations is shown in Fig. 1. The straight lines are tsunami magnitude scale,  $m$ , classified by the present study.

る。また沿岸に分布する白丸は、解析に用いた検潮所の位置を示してある。

次に各津波について、津波の高さと震央からの距離の関係を両対数グラフでみると、Figs. 2~4 のようになる。ここで、たて軸にとった津波の高さは、それぞれの調査報告から引用したもので（文献省略）、陸上に遡上した津波の痕跡高（平均海面上）を小記号で、検潮器で得られたもの（最大波の全振幅値）は大記号で表わし。主な検潮所の略号（Fig. 1）を付記した。横軸には、Fig. 1 に示したように、ABE (1981) と同様に震央から観測点までの海洋上の最短距離  $L$  をとってある。

ABE (1981) は、検潮器で得た波高の観測値が震央からの距離  $L^{-1}$  に比例する関係を見出し、 $L \sim H$  図にモーメント・マグニチュードを表わす  $M_t$  スケールで地震の規模を区

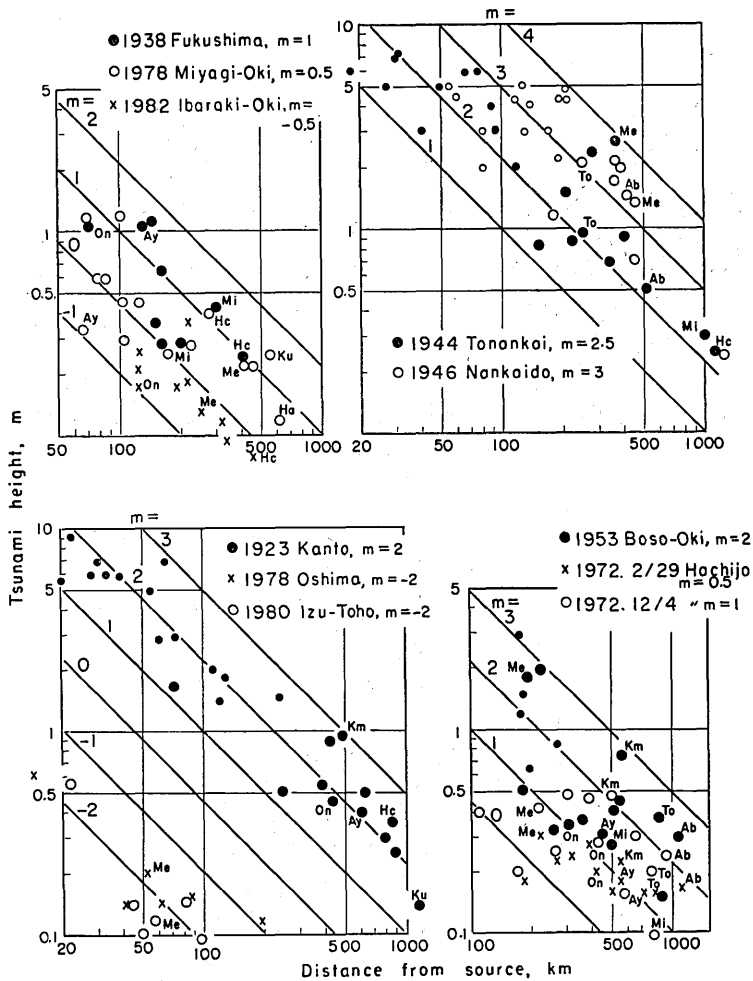


Fig. 3. Relation between tsunami height and distance. The comments are the same as in Fig. 2.

分した (表 1). ここでは, 検潮記録のほかには波源に近い沿岸の遡上高のデータを加え, 津波マグニチュードを今村・飯田スケールで区分することを試みたものである.

Figs. 2~4 に示したように, 観測値はいろいろな要因でバラつくが (後述), 大局的に  $\Delta^{-1}$  に比例して減衰するとみなせる. また, 前方法と同様に, ある距離において波高が 2.24 倍 (エネルギーにして 5 倍) 変るのに応じて, 規模スケールは 1 階級変わる間隔をとると仮定した. そして 31 個の津波例について, 従来の規模階級 (今村・飯田スケール) にあまり矛盾なく, かつ観測値に調和的であるように規模スケールをたて軸にそって試行し, Figs. 2~4 に当てはめてみた. このような手法で, 次に示す実験式を得た.

$$m = 2.7 \log H + 2.7 \log \Delta - 4.3 \quad (\text{単位 } H: \text{m}, \Delta: \text{km})$$

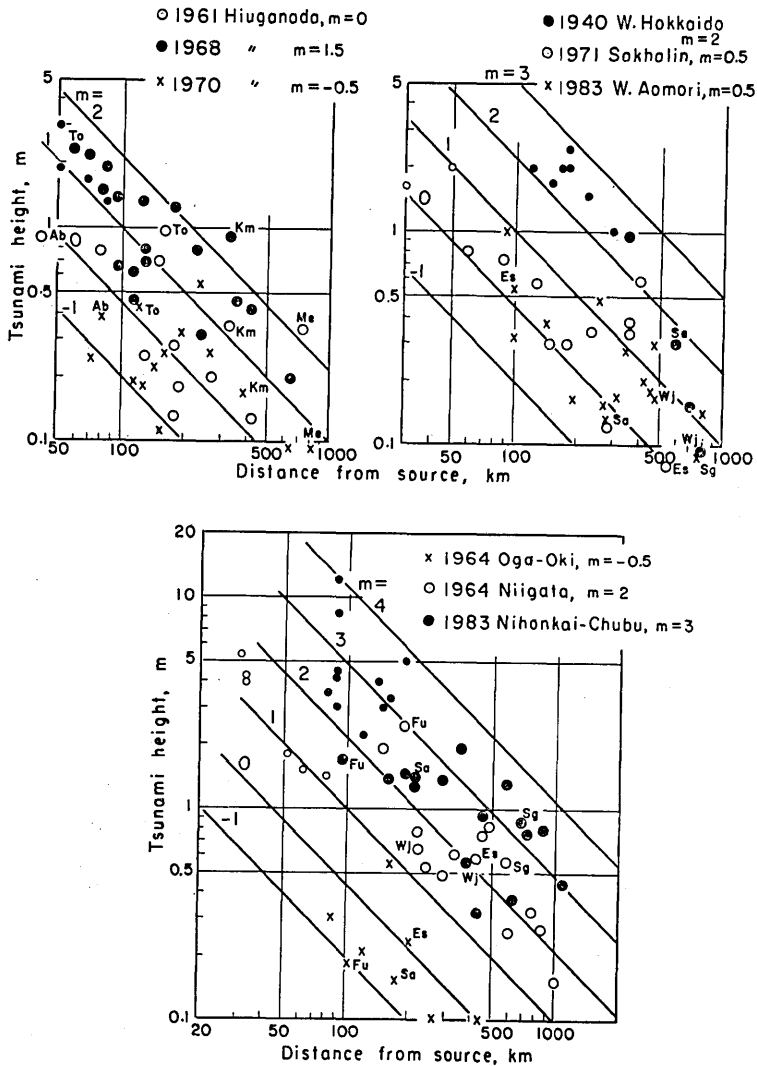


Fig. 4. Relation between tsunami height and distance. The comments are the same as in Fig. 2.

なお、前方法では波源から陸棚にそう遠方の波高（最大波の片振幅）は、 $H \propto \Delta^{-1/2}$  で減衰すると取り扱った。これは、波源近傍のデータが得られない遠地津波の規模の判定には有効である。また近地津波を含め、遠方の観測値に力点を置いた判定方法である。

津波の痕跡から測量された遡上高は、検潮器で得られた最大波の全振幅値（4 m 以下）とほぼ同じになっているが（KAJURA, 1983）、10 m を超えた 1896 年・1933 年三陸津波では、検潮データと比べ遡上高の測量値がきわめて大きい。これは、港湾の副振動周期と共振し局地的に波高が増幅され、波高が陸の斜面上をはいあがった津波の到達地点の高さで表わされており、検潮器で得られた波とで、浸水面の形が異なるからであろう。

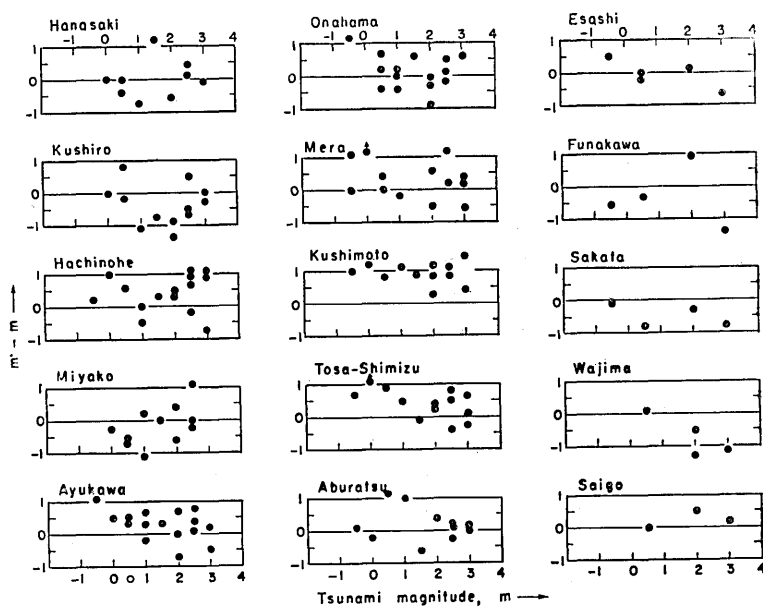


Fig. 5. Relation between tsunami magnitude  $m$  and  $m' - m$ , where  $m'$  is the value of magnitude estimated at the named station itself.

いま、主な 15 点の検潮所において、1つの観測点自身できめた津波マグニチュード  $m'$  と、多数の観測点から得たマグニチュードの平均値  $m$  との偏差値をみると、Fig. 5 のようになる。串本・土佐清水のように岬付近にあるところでは、波の屈折効果でエネルギーが集まり、マグニチュードは平均値より常に1階級ほど上回る。その反面、幅広い陸棚の奥に位置する釧路や、大型湾口にある宮古ではマグニチュードが小さく判定される。以上の例のように、遡上地点の地形の多様性や、検潮所の立地条件などで観測値はかなりバラつくが、上式から津波マグニチュードは平均して0.5の間隔で判定できる。

Table 1 には、遡上高できめた津波マグニチュード（今村, 1949; IIDA, 1958; 理科年表）および今回と前回の方法で得た  $m$  値を示した。Fig. 6 は両値を比較したもので、前回の値を白丸、今回の方法によるものを黒丸で示す。いずれの方法によっても、津波マグニチュードの格付けはほぼ同じ値を得たが、1946年南海道・1983年日本海中部地震津波などマグニチュード  $m > 1.5$  の津波の16例中、7例が今回の方法では0.5ほど大きな値になった。これは、遡上高のデータを加えたことで、近地の観測値に力点が移ったことに起因しており、いずれが妥当な値であるか、いまのところ判定し難い。

### 3. 津波マグニチュードと波高分布

14個の津波について、マグニチュード別に波源に面した沿岸の波高分布をFig. 7に示す。最高波の場所を沿岸区間の原点にとってあるが、この位置は本震々央を沿岸に投影したところに、ほぼ相当する。いま、横軸に沿岸にそって直線距離  $L$  をとり、最高波の場所

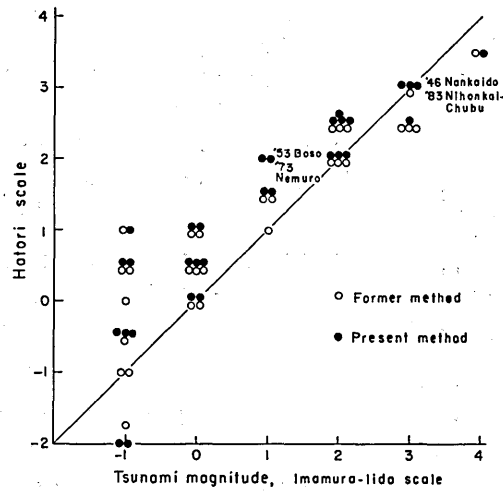


Fig. 6. Comparison with the values of tsunami magnitude of Imamura-Iida scale classified by the former (HATORI, 1979) and present methods. Former method: Making use of tsunami amplitudes observed by tide-gauges without the inundation height data of near-field.

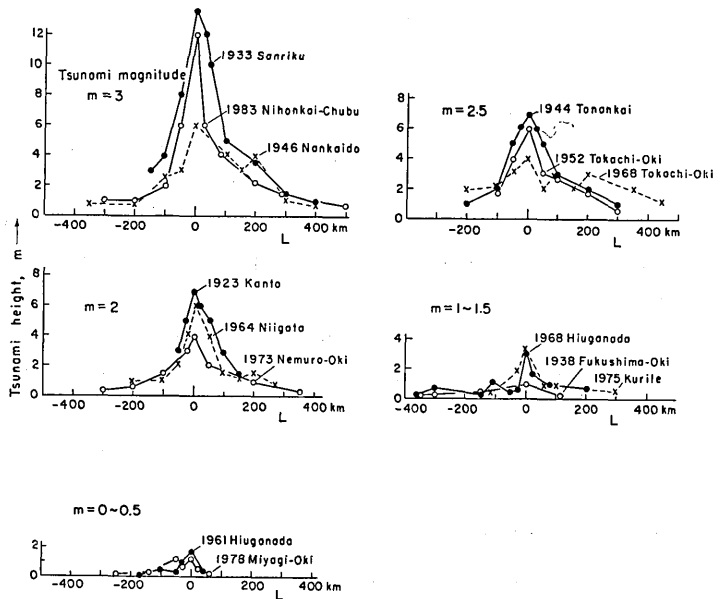


Fig. 7. Distribution of the inundation heights for each tsunami magnitude along the coast facing the tsunami source.



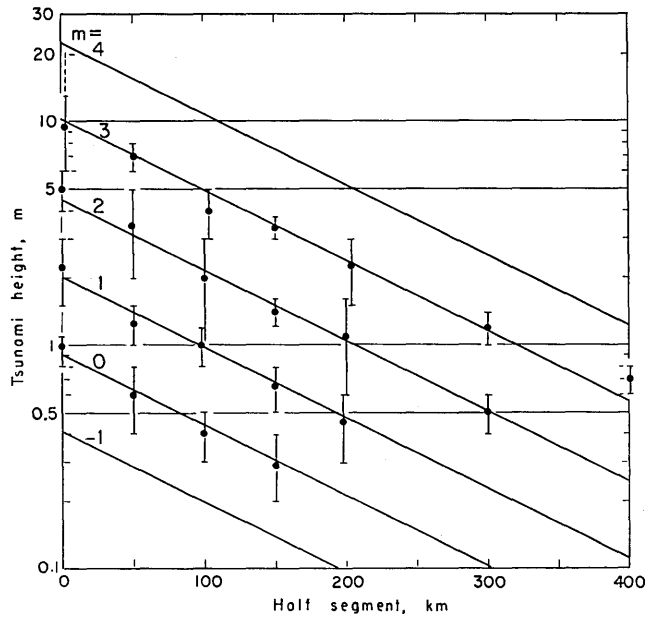


Fig. 8. Relation between tsunami height,  $H$  (unit: m) and coastal half segment,  $L$  (unit: km) facing the tsunami source. The straight lines classified by the magnitude scale,  $m$ , are expressed in accordance with  $m=0.008L+2.7 \log H+0.31$ .

を原点に片側の区間で 50 km ごとの波高  $H$  の変化を片対数グラフで見ると、Fig. 8 のようになる。各区間の波高にはかなり幅があるが、その平均値（黒丸）を規模スケールで結ぶと、津波マグニチュード  $m$  は

$$m=0.008L+2.7 \log H+0.31 \quad (\text{単位 } L:\text{km}, H:\text{m})$$

で表わせる。規模スケールは、波高が 2.24 倍の間隔で 1 階級変わり、前章で示したマグニチュードの区分と矛盾しない。

Table 2 には、上式から区分した各規模階級における津波の概況と、断層モデルの数値解析から得られた津波のポテンシャル・エネルギー（羽鳥，1979）との対応を示す。基本的には、従来の定義とほぼ同様な内容であるが、各規模階級について 100 km ごとの区間における波高を示した。なお、波高と被害との関係は、社会環境の変化にともない多様化しており、状況しだいでも死者が出ることもあり得る。ここでは過去の津波例から概況を示した。そのほか、日本の太平洋側にマグニチュード  $m 3$  以上の津波が起これば、ハワイ・南米に大きな影響をもたらす、日本海側におこればソ連沿海州・韓国に被害を与えたことは周知の通りである。

さて、津波の最高波が何波目に現われるか、防災面から重要なことである。また、過去の事例は、津波の規模を速やかに判定する立場にある予報官にとって、最高波を予測する手掛かりになろう。

Table 2. 津波の規模階級 [m]

[m]	記 事	エネルギー (エルグ)
[-1]	波高 50 cm 以下. 検潮器で観測される程度で無被害.	$2.5 \times 10^{18}$
[0]	波高 1 m 前後で, 漁船・水産施設に被害がでる. 100 km の範囲で波高 50~80 cm.	$1.3 \times 10^{19}$
[1]	波高 2~3 m で, 海岸の低地にある家屋が浸水被害を受け, 船舶が流される. 200 km の範囲で 1 m 程度の波高がある.	$6.4 \times 10^{19}$
[2]	波高 4~6 m で, 多数の家屋が流出・浸水し, 死者がでる. 300 km の範囲で 1.5 m 程度の波高がある.	$3.2 \times 10^{20}$
[3]	波高 10 m 前後, 局地的に 15~20 m に達する. 400 km の範囲で 2.5 m 程度の波高があり, 顕著な被害がでる.	$1.6 \times 10^{21}$
[4]	波高 20 m 前後, 局地的に 30 m に達する. 500 km の範囲で約 4 m の波高があり, 甚大な被害がでる.	$8 \times 10^{21}$

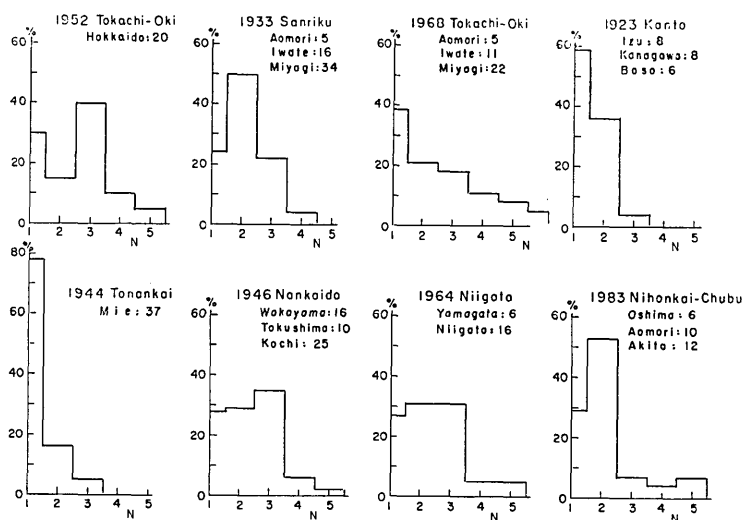


Fig. 9. Occurring percentage of the maximum wave which wave number counted from the initial crest. Numeral is the number of visual observations.

そこで, 比較的規模が大きい 8 個の津波の調査報告から聞きとり調査を整理し, 各地域の最高波の出現率を調べると Fig. 9 のようになる. ここで付記した数字は, 県または地域別のデータ数を示す. これを見ると, いずれの津波も最高波はだいたい 3 波目以内に出現している. 1923 年関東・1944 年東南海津波のように, 沿岸付近に波源があって短周期波が卓越した津波では, 第 1 波が最高波であった. その反面, 1946 年南海道・1964 年新潟地震津波のようにやや周期の長い津波では, 第 1 波から 3 波目まで同じような出現率となっている.

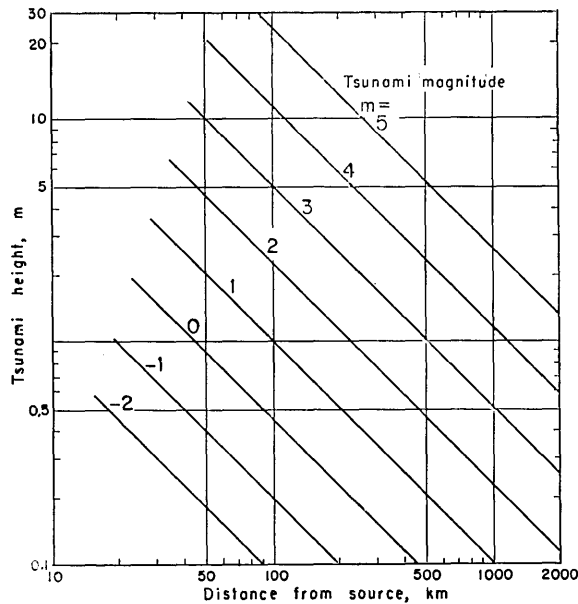


Fig. 10. Relation of tsunami height,  $H$  (unit: m) and distance,  $D$  (unit: km). The straight lines are magnitude scale,  $m$  which represents  $m = 2.7 \log H + 2.7 \log D - 4.3$ .

波源から遠方の地点では、伝播距離が伸びるほど最高波が遅れて出現する傾向がある。太平洋側で発生した近地津波では、地震の発生時からおよそ1時間以内に最高波が現われている。しかし、1983年日本海中部地震津波における隠岐のように、発震時から3時間以後に最高波が観測された例があり、それぞれ発生域の津波特性に注意する必要がある。

#### 4. むすび

日本近海に発生した津波を対象に、波源に近い沿岸に遡上した津波の高さと、広域の地域で得られた検潮記録を併用し、今村・飯田スケールに調和的な津波マグニチュード、 $m$ をきめる方法を考察した。Fig. 10はその判定図を示したもので、たて軸には平均海面上の遡上高または検潮器で得られた最大波の全振幅値をとり、横軸には震央から観測点までの海洋上の最短距離をとる。距離と津波の高さの関係は、ABE (1981) が示した結果と同じく  $H \propto D^{-1}$  で表わされ、今村・飯田スケール  $m$  で区分した。

31個の津波例を解析した結果、津波マグニチュードは0.5の間隔で判定され、前方法と同様に波高で2.24倍、エネルギーにして5倍ごとに1階級変わる。判定精度を向上させるためには、大幅にバラついた10mを超える遡上高や、島・岬付近にある検潮器の観測値の処理方法が、今後の課題である。

なお、ABE (1981) が示した  $M_t = \log H + \log D + 5.55$  と、今回得られた  $m = 2.7 \log H + 2.7 \log D - 4.3$  から、 $M_t = 0.37m + 7.1$  と換算される。ちなみに  $M_t \sim m$  図に  $M_t$  値 (ABE, 1979, 1981, 1985) をプロットしてみると、 $m$  値に対し上式は  $M_t$  の下限値を示し

ている。また同図において、モーメント・マグニチュード  $M_w$  との関係式  $M_w = 0.51 m + 7.19$  (羽鳥, 1979) は,  $M_i$  の上限値を示している\*。

今村 (1949) の規模階級の定義では, 波源付近の沿岸波高について範囲の規定がやや曖昧であった。今回, マグニチュード別に沿岸にそう波高変化を調べ, 規模階級の定義を補足し, 明確なものにした。これは, 将来の津波に対し, マグニチュード別に沿岸波高を予測する目安になるであろう。

#### 文 献

- ABE, K., 1979, Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data, *J. Geophys. Res.*, **84**, 1561-1568.
- 阿部勝征, 1981, 巨大地震と津波の大きさ, *科学*, **51** (12), 754-761.
- ABE, K., 1981, Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern Pacific, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **27**, 194-205.
- ABE, K., 1985, Quantification of major earthquake tsunamis of the Japan Sea, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **38**, 214-223.
- 羽鳥徳太郎, 1978, 津波の規模と地震モーメント, *地震 ii*, **31**, 25-34.
- 羽鳥徳太郎, 1979, 津波の規模階級とエネルギーとの関係, *地震研究所彙報*, **54**, 531-541.
- 羽鳥徳太郎, 1984, 日本海中部地震津波の波源における水位変動——波源の海面変動体積と地震モーメントの関係, *地震 ii*, **37**, 23-29.
- IIDA, K., 1958, Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunami, and tsunami energy, *J. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **6**, 101-112.
- 今村明恒, 1949, 本邦津波年代表, *地震 ii*, **2**, 23-28.
- KAJIURA, K., 1983, Some statistics related to observed tsunami heights along the coast of Japan, *Tsunami—Their Science and Engineering*, edited by K. Iida and T. Iwasaki, *Terra Scientific Pub. Co. Tokyo*, 131-145.

---

\*  $m$  と  $M_i$  の関係は, 査読者のコメントにより付記した。

*Classification of Tsunami Magnitude Scale*

Tokutaro HATORI

On the 31 tsunamis which were generated in the vicinity of Japan during the period from 1896 to 1983, the tsunami magnitude on Imamura-Iida scale,  $m$ , is investigated on the basis of inundation heights surveyed along the coast facing the tsunami source and the tide-gauge records. The tsunami magnitudes,  $m$ , obtain the relation  $m=2.7 \log H+2.7 \log \Delta-4.3$ , where the tsunami height,  $H$  (unit: meter) is the average inundation height above M. S. L. and the maximum double-amplitude observed by tide-gauges.  $\Delta$  (unit: km,  $<2000$  km) is the epicentral distance which is measured along the short oceanic path. The tsunami magnitude can be estimated at intervals of 0.5. However, the data of inundation heights over 10 meters and those of the tide-gauge records which were observed at the capes and islands were widely scattered by the effects of topography. The magnitude values of large tsunami ( $m>1.5$ ) were defined about 0.5 larger than those by the former method (HATORI, 1979), using tide-gauge records only. The magnitude scale is closely related to the potential energy of the tsunami: The magnitude scale is classified by tsunami height of 2.24 intervals, and varies with the interval of 5 times for tsunami energy.

For each magnitude scale,  $m$ , the inundation heights,  $H$  (unit: meter) along the coast facing the tsunami source are empirically expressed as  $m=0.008L+2.7 \log H+0.31$ , where  $L$  (unit: km) is the half area measured from the location of the maximum height along the coast. Thus, the grade of magnitude scale,  $m$ , is clearly defined as follows:

- [-1]: Minor tsunami observed by tide-gauges with wave heights less than 50 cm. No damage.
  - [0]: The maximum height is about one meter. Ships and marine products suffer lightly. The tsunami height is 50~80 cm within the area of 100 km.
  - [1]: The maximum height is 2~3 m. Houses on low ground are inundated and ships are washed ashore. The tsunami height is about one meter within the area of 200 km.
  - [2]: The maximum height is 4~6 m. Many houses are destroyed and some persons are killed. The tsunami height is about 1.5 m within the area of 300 km.
  - [3]: The maximum height is about 10 m and locally reaches 15~20 m. The tsunami height is about 2.5 m within the area of 400 km and this region suffers heavy damage.
  - [4]: The maximum height is about 20 m and locally reaches 30 m. The tsunami height is about four meters within the area of 500 km and this region suffers very heavy damage.
-