最近 45 年間の日向灘津波の規模

東京大学地震研究所 羽 鳥 徳 太 郎
(昭和 46 年 5 月 31 日受理)

The Magnitude of Tsunamis generated in Hiuganada during the Years, 1926~1970

Tokutaro HATORI

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
(Received May 31, 1971)

Based on records of tide gauges, two small tsunamis accompanying the earthquakes on April 21, 1969 ($M=6.5$) and July 26, 1970 ($M=6.7$) are investigated. Both earthquakes occurred in the Hiuganada region, southwestern Japan. A part of the estimated tsunami sources seems to overlap on the continental slope. The dimensions of these tsunami domains are inferred to be 30~40 km, taking account of the aftershock areas. Judging from the features of the initial part of records, the subsidence of the bottom seems to have occurred in the eastern part of the tsunami sources.

Beside these tsunamis, eight others were generated in Hiuganada during the period from 1926 to 1970. The percentage of tsunamigenic earthquakes is 100% in earthquake magnitude $M>7.0$ and about 70% in $6.5<M<6.9$. These percentage are large in comparison with those obtained for the whole region of Japan. The magnitudes of various tsunamis are compared on the basis of the mean values of the maximum wave-heights observed at the same tide stations on the coast of Kyushu and Shikoku. Tsunami energy is closely related to earthquake magnitude, and the lower limit of tsunami energy observed in this region seems to be of the order of 10^{18} ergs. The geographic distributions of the seismic intensity $I=4$ (JMA scale) for tsunamigenic earthquakes are shown to indicate the relation of this area to the location and the dimension of this tsunami source.

§ 1. は し が き

日向灘は、津波カタログ (たとえば渡辺, 1968) に示されるように、津波活動の盛んな地域であり、沿岸に被害を与えた津波には現地調査が行なわれてきた (鷺坂ほか, 1941; 気象庁, 1961; 梶浦ほか, 1968). 筆者 (1969) はこれらの津波の波源域を推定し、その地理的分布と津波スペクトルなどを議論した。

その後、同地域に次の地震が起こされた。すなわち 1969 年 4 月 21 日の地震で、気象庁よりマグニチュードは $M=6.5$ ときめられた。しかし、津波に関する報告は行なわれていないが、この程度の地震規模で津波がひき起こされたかに、関心がもたれる。もう一つの地震は

昭和 46 年 5 月 21 日地震学会で発表。

1970 年 7 月 26 日に起こり、マグニチュードは $M=6.7$ であった。この地震により、微小な津波が九州と四国などの沿岸で観測された。今回、この二つの地震時における検潮記録が気象庁、水路部、国土地理院、県土木部など管理機関の厚意により収集できたので、これらの記録

にもとづいて津波の挙動を調査する。

一方、今回の資料をつけ加え、1926~1970 年の間に日向灘に起こされた津波に対し、九州と四国沿岸の共通の観測点で記録された波高の分布から、各津波の規模を比較したい。また、土佐清水の検潮記録をもとにして、各津波の全エネルギーの推定を試みた。そのほか地震月報から同期間に起きた $M>6.3$ の地震を調べて、波源付近の検潮所で観測されうる津波の下限の規模を検討する。

Fig. 1. Tide gauge records of the tsunami on Apr. 21, 1969.

§ 2. 1969 年 4 月の津波

地震月報によると、発震時は 4 月 21 日 16 時 19 分で、震央は $32^{\circ}09' N$, $132^{\circ}07' E$, 深さ 10 km, $M=6.5$ である。この地震時に、Fig. 1 に示すような検潮記録が得られた。Table 1 には集められた記録の読取り値を示す。これによると土佐清水と細島における津波は、はつきりしないが、室戸と蒲江では津波らしい波形がみられる。とくに室戸の記録では、地震後 42 分たつて現われた引き波が目立っている。

Table 1. The tsunami of April 21, 1969, as recorded by tide gauges. Wave originated near the earthquake epicenter ($32^{\circ}09' N$, $132^{\circ}07' E$) off the coast of Hiuga (Miyazaki Pref.) at 16: 19 (JST), April 21, 1969.

Tide station	Initial wave			Max. wave Double amplitude	Remarks
	Travel time	Initial rise	Period 1 st to 2 nd crest		
	min	cm	min	cm	
Odomari				12	A
Aburatsu				10	B
Hososhima				?	A
Kamae	18	5	15	15	
Yawatahama				10	A
Tosa-Shimizu	27?	6		10	
Muroto	42	-6	12	20	

A: Arrival time indefinite.

B: Incomplete record.

Fig. 2. Estimated source area of the tsunami on Apr. 21, 1969 and the distribution of aftershocks ($4.1 < M < 4.7$). The last wave fronts are shown with the names of tide stations and travel times (min).

津波の初動とみなされる時間にもとづき、逆伝播図の方法により波源域を推定すると Fig. 2 のようになる。この図に地震月報に示された本震以後 4 日分の余震をプロットした。

なお余震のマグニチュードは $M=4.1 \sim 4.7$ である。図示のように、推定波源は余震域と合致した位置にあり、このことから本震によって津波が起こされたことは確からしい。波源域の南側は、この方面の記録の初動がつかめないため明らかでないが、余震を考慮すると波源の大きさは約 30 km と推定できよう。

§ 3. 1970 年 7 月の津波

7 月 26 日 7 時 41 分ごろ、日向灘に起きた地震で宮崎市内などに 13 人が重軽傷を負ったほか、国鉄日南線が土砂くずれで一時不通になった（読売新聞など）。気象庁の報告によれば、震央は $32^{\circ}04' N$, $132^{\circ}02' E$, 深さ 10 km, $M=6.7$ であった。

Fig. 3. Tide gauge records of the tsunami on July 26, 1970.

検潮記録によると、九州・四国沿岸では地震から 15 分以後に津波の第 1 波が押し波で始まり、初動の振幅は約 10 cm、周期 20 分の地点が多かった。Fig. 3 に主な記録が示され、読取り値を表示したのが Table 2 である。各地における最高波の全振幅は Fig. 4 に示すよう

Table 2. The tsunami of July 26, 1970, as recorded by tide gauges. Wave originated near the earthquake epicenter ($32^{\circ}04' N$, $132^{\circ}02' E$) off the coast of Hiuga (Miyazaki Pref.), at 07: 41 (JST), July 26, 1970.

Tide station		Initial wave				Max. wave	Remarks
		Travel time	Initial rise	Following fall	Period 1st to 2nd crest	Double amplitude	
		min	cm	cm	min	cm	
Kyushu	Naze					8	A
	Makurazaki	75?				26	
	Odomari	55	10	18	11	32	
	Fukushima					12	A
	Aburatsu	24	15	22	21	39	
	Hososhima	15	5	2	20	12	
	Tomi	19	8			8	
	Kitaura					24	A
	Kamae	20	8	23	20	38	
	Saiki	38	5	10	25	18	
	Saganoseki					4	A
	Oita (Tsurusaki)					3	A
Shikoku	Ehime-Misaki	46	7	7	15	22	
	Yawatahama					11	A
	Uwajima					8	A
	Misho					25	A
	Sukumo					19	
	Tosa-Shimizu	28	14	28	22	44	
	Tosa-Shimoda	40?	4			7	
	Kamikawaguchi	38	8	8	8	26	
	Kochi (Katsurahama)					4	A
	Muroto	43	12	27	10	56	
	Kan'noura	42	7	18	12	64	
Others	Kushimoto	49	4	4	18	17	
	Uragami					7	A
	Owase					7	A
	Omaezaki					9	A
	Minami-Izu					6	A
	Kozu I.					5	A
	Mera					8	A

A: Arrival time indefinite.

Fig. 4. Distribution of the maximum double amplitude (cm) of the tsunami on July 26, 1970.

に、波の屈折効果により岬付近の地点で目立って大きく、高知県甲浦で 64 cm の最高波が観測された。1968 年 4 月の津波（梶浦ほか, 1968）の場合と同様に、河口地点にある東海、土佐下田では川の影響をうけ付近の波高に比べてきわめて小さい。また、豊後水道から瀬戸内海

Fig. 5. Estimated source area of the tsunami on July 26, 1970 and the distribution of aftershocks ($4.0 < M < 4.7$). The last wave fronts are shown with the names of tide stations and travel time (min).

へ入射した津波は急速に減衰し、大分新港（鶴崎）では認められない。そのほか紀伊半島東岸から房総半島に至る数点の記録を調べたが、初動部分の振幅を読みとることはできなかつた。

波源域は震央周辺の9個所の検潮記録から、第1波の到達時間にもとづき、1分毎に作図した逆伝播図の最終波面により推定される。この結果が Fig. 5 に示してある。各地点とも初動の立上りが明瞭であり、とくに油津、細島、蒲江では地震時にペン先の振動が記録され、到達時間の精度は良好とみなせる。なお、Fig. 5 には地震月報により、本震以後24時間分の余震の分布が示される。これら余震のマグニチュードは一つをのぞき ($M=6.1$), $M=4.0\sim 4.7$ の範囲にあり、余震分布は推定波源に集中している。Fig. 5 から波源の大きさは N-S 方向で 25 km, E-W 方向では西側をきめる記録がないのではつきりしないが、余震分布を考慮すれば約 40 km とみなせる。

今回きめた波源域は、その大きさといふ領域が 1931 年 11 月のもの (Hatori, 1969) とき

Table 3. List of the maximum double amplitude read from tide records, for Hiuganada tsunamis.

Tsumami		1931	1939	1941	1961	1968	1970
Station		Nov. 2	Mar. 20	Nov. 19	Feb. 27	Apr. 1	July 26
Kyushu	Tsukumi	cm	cm	cm	cm	cm	cm
	Saiki			35		62	
	Kamae			10	10	65	18
	Kitaura					(240)	38
	Tomi				15	27	8
	Hososhima			(100)	75	132	12
	Aburatsu		16	(100)	80	70	39
	Fukushima	6			15		12
	Odomari					80	32
	Makurazaki				22	22	26
Shikoku	Yawatahama				23	80	11
	Uwajima	7		30	14	46	8
	Misho				70		25
	Sukumo			(60)		224	19
	Tosa-Shimizu	50	12	110	88	236	44
	Tosa-Shimoda				10	30	7
	Kamikawaguchi					140	26
	Kochi (Katsurahama)				13	46	4
	Muroto	(85)	(80)	(110)		124	56
	Kushimoto	14		40	33	92	17

() Values of visual observation.

わめてよく合致した位置にあたる。また、前に述べた 1969 年 4 月の津波と波源域の一部分が重なり注目される。なお、津波初動の押し引き分布はすべて押し波であつたが、第 1 波に続く引き波の振幅に着目すると、波源の西側より東側に面した記録に引き波が大きい傾向をもつ。これは、波源域の東部に沈下変動があつたことを暗示し、1968 年 4 月の津波の場合にもこのような現象がより顕著にみられた。この事実は発震機構の考察と合せて、地殻変動を論ずるさいに有用な情報となろう。

§ 4. 各津波の規模の比較

それぞれの津波につき、各地の検潮記録から読みとつた津波の最大全振幅を Table 3 に示す。但し括弧内の数字は目視観測値を表わす。Fig. 6 はこれら全振幅の分布を示している。ここに実線は九州沿岸の値であり、点線は四国側の値を表わす。いずれの津波も四国西岸の方がやや振幅が大きい。また、波源から遠く離れた室戸で振幅が大きいことが目立つ。

次に共通の観測点で得られた全振幅につき、各津波と 1970 年 7 月の津波との平均した振幅比と、全振幅の 2 乗値を平均して求めたエネルギー比を Table 4 に示す。これらの計算値

Fig. 6. Distributions of the maximum double amplitude for Hiuganada tsunamis.

Table 4. The ratio of the average amplitude of each tsunami to the 1970 tsunami amplitude.

Tunami	1931 Nov. 2	1939 Mar. 20	1941 Nov. 19	1961 Feb. 27	1968 Apr. 1	1970 July 26
Ampl. ratio	1.2	0.8	2.6	2.0	4.6	1.0
Energy ratio	1.8	1.0	6.5	4.7	22.1	1.0

Table 5. Initial waves observed at Tosa-Shimizu, and the total tsunami energy calculated by Takahasi's formula.

Tsunami	Initial rise		Following fall		Tsunami energy ×10 ²⁰ ergs
	<i>a</i>	<i>T</i>	<i>a</i>	<i>T</i>	
	cm	min	cm	min	
1931	18	10	30	10	0.1
1939	5	15	5	15	0.07
1941	40	10	55	12	0.3
1961	27	10	44	12	0.3
1968	80	10	150	10	1.3
1970	14	8	28	14	0.1

a: Amplitude. *T*: Half-period.

は、観測個数がばらばらで様な精度となっていない。しかし、九州と四国の両地域の観測値を用いたことから、波源の位置による影響は小さく、津波の規模を比較する上でかなりよい目安となる。以上の結果から、津波の規模は地震のマグニチュード (Table 6) とかなりよく対応しているといえる。

一方、土佐清水において多数の日向灘津波の検潮記録が得られているので、この観測値 (Table 5) をもとに、Takahasi (1951) が示した次式から津波の全エネルギー E_t を推定してみる。

$$E_t = \pi \rho g V R \sum a^2 T$$

ここに ρ は水の密度、 g は重力の加速度、 a は波源の中心から距離 R である地点の振幅、 T はその波の半周期、 V は観測点における津波の速度を表わしている。この式は津波の方向による高さの違いや、波数のとり方に不確かな要素があるが、ここでは、津波の方向性や波線の屈折効果を見捨てることにする。観測点の水深を 2.5 m と仮定し、第 1 波の山、谷のみを用いて求めたエネルギーの概算値を Table 5 に示す。これは 1 点観測から推測したきわめて粗っぽい値であるが、相互のエネルギー比は波高分布からきめたものと比べてあまり矛盾しない。1939 年 3 月の津波の場合に、土佐清水の波高は平常時のノイズレベルに近い値となっており、1969 年 4 月の津波はさらに小さい。このことから 10¹⁸ エルグ程度のエネルギーをもった津波が、沿岸の検潮所 (たとえば室戸のような特定な地点) で観測されうる下限と思われる。

§ 5. 地震の規模と津波

1926~1970 年の間に、日向灘で起きた $M > 6.3$ の地震を気象庁発行の「日本付近の主要地震の表 (1926~1956), (1957~1962), (1963~1967), その他」からひろい出し、その震央分布を Fig. 7 に示す。ここで黒丸は津波を伴った地震、白丸は津波のない地震を表わす。この

うち津波のあつた地震の資料と津波の文献を Table 6 にあげる. この調査から $M > 7.0$ の地震で 100%, $6.5 < M < 6.9$ では約 70% の地震が津波をひき起したことになる. これは津波の規模こそ小さいが, $6.5 < M < 6.9$ の範囲で全国平均が 13% であるのに対し (勝又, 1966), 日向灘では津波発生の頻度がきわめて高い. なおこの期間に津波が認められなかったものは, 1937 年 1 月 6 日の地震 ($M=6.5$) と 1948 年 5 月 9 日の地震 ($M=6.7$) である. また, $M < 6.3$ の地震には津波の報告はまったくみられなかった.

Fig. 7. Geographic distribution of the epicenters of earthquake ($M > 6.3$) occurring in Hiuganada during the period from 1926 to 1970.

Table 6. List of tsunamigenic earthquakes occurring in Hiuganada, 1926~1970.

No.	Date (JST)	Epicenter		Depth km	M	References
		Lat. N	Long. E			
1	1929 May 22	31.7°	132.2°	30	6.8	Zisin (1929), Hayata (1929)
2	1931 Nov. 2	32.2	131.1	20	6.6	JMA (1931), Hayata (1832)
3	1939 Mar. 20	32.3	131.7	10	6.6	Watanabe (1968)
4	1941 Nov. 19	32.6	132.1	0~20	7.4	Sagisaka <i>et al.</i> (1941)
5	1961 Feb. 27	31.6	131.8	40	7.0	JMA (1961), Takahasi and Hatori (1961)
6	1968 Apr. 1	32.3	132.5	30	7.5	Kajiura <i>et al.</i> (1968), Hatori (1969)
7	1969 Apr. 21	32.1	132.1	10	6.5	
8	1970 July 26	32.1	132.0	10	6.7	JMA (1971)

さらに時代をさかのぼると, 1909 年 11 月 10 日の地震 ($M=7.4?^*$) では地震の規模からみて, 当然, 津波の発生が考えられるが, これに関する記事は見当らない. そのほか 1899 年 11 月 25 日の地震 ($M=7.1?^{**}$) のとき, 細島において 1961 年 2 月の津波と同程度の振幅で津波の尾部が記録された (大森, 1901). しかし, 立入った報告はなされていない. 当時は沿岸に直接被害を与えないような微小津波に, あまり関心がもたれなかったのであろう. 余震域は本震直後に生成された地殻変形域であると Iida (1970) が提唱するように, 余震を伴う海

* 気象庁の「日本付近におけるおもな地震の規模表 (1885~1950)」には $M=7.9$ と記載されている.

** 同表に $M=7.6$ とある.

Fig. 8. Geographic distributions of the seismic intensity $I=4$ (JMA scale) for tsunamigenic earthquakes and the tsunami source area.

の地震では津波の起こされる可能性は十分考えられる。なお Iida (1970), Watanabe (1970), Ichikawa (1971) によれば、日向灘で津波を伴った大部分の地震は Dip-slip 型の断層運動型であり、地震の主圧力方向は等深線にほぼ直交している。

Table 7. Scale of tsunami source, L , and average radius, R , of the area with the seismic intensity $I=4$.

No.	Tsunami	L km	R km
1	1929		170
2	1931	(40)	150
3	1939		130
4	1941	(60)	160
5	1961	90	200
6	1968	60	190
7	1969	30	100
8	1970	40	140

次に津波を伴った地震で、震度 $I=4$ の分布 (気象要覧などによる) と波源域との地理的關係を図示すると Fig. 8 のようになる。ここに 1941 年 11 月の津波では、2 個所の検潮記録 (伝播時間; 土佐清水 21 分, 串本 50 分) より波源域のごく 1 部分しか推定できなかったが、さらに 2 点の記録 (伝播時間; 津久見 34 分, 字和島 40 分) をつけ加えて波源域を再検討した。この結果、波源の北側は 200m の等深線に沿い、推定波源は余震域より北側にはずれた位置になる。さて、震度分布は Fig. 8

に示すように、震度の誤差、地盤などの影響により不規則な形をとるが、しいて言えば波源の長径の方向に伸びている。いま $I=4$ の分布を近似的に円形で表わし、平均半径 R (Table 7) と波源の長さ L との関係を Fig. 9 に示す。地震の有感地域の広がり、地震のマグニチュードや波源の大きさと相互に対応することはすでに知られている。とくに日向灘の場合のように、波源を囲むように震度分布が得られる地域では、有感半径で表わすよりもむしろ震度を限定し、 $I=4$ の分布から波源域の位置と大きさがかなりよく理解できそうである。

Fsg. 9. Relation between the scale of tsunami source, L , and average radius, R , of the areas with the seismic intensity $I=4$ (JMA scale). Earthquakes are numbered according to Table 7.

§ 6. む す び

検潮記録にもとづき、1969年4月21日と1970年7月26日に日向灘で起こされた津波を調査し、波源域の推定を行なった。この資料をつけ加えて、最近45年間における日向灘津波につき、共通な観測点の波高から相対的にエネルギーを見積ると次のようになる。1970年7月の津波に対して、1931年11月の津波は約2倍、1961年2月の津波は約5倍、1968年4月の津波は約20倍ほど大きい。それぞれの津波の規模は地震のマグニチュードにかなりよく対応する。また、九州と四国沿岸でとらえる津波のエネルギーは 10^{18} エルグ以上のものと思われる。

今回の調査によれば、[1926~1970年の期間に日向灘で起こされた津波は8個を数え、 $M > 7.0$ の地震では100%、 $6.5 < M < 6.9$ では約70%の地震が津波を伴った。これを全国平均で比べると、津波発生の頻度はきわめて高いといえよう。このことは、波源域が沿岸に近い地理的条件にもよるが、この地域における地震の断層運動がDip-slip型の多いことを反映している。

謝 辞

今回の調査研究にあたり、気象庁、水路部、国土地理院ならびに、現地の建設省工事事務所、運輸省港湾建設局、県土木部の検潮所管理機関より検潮記録の提供を賜り、厚くお礼申し

上げます。また、いろいろと御助言下された梶浦欣二郎教授ならびに、図の作成に協力された小山盛雄技官に対し深謝の意を表します。

文 献

- HATORI, T., 1969, A study of the wave sources of the Hiuganada tsunamis, Bull. Earthq. Res. Inst., **47**, 55~63.
- 隼田公地, 1929, 昭和 4 年 5 月 22 日日向灘地震調査報告, 験震時報, **3**, 339~365.
- HAYATA, K., 1932, Note on the destructive earthquake of Hyuga-nada on Nov. 2nd. 1931, Geophys. Mag., **6**, 363~369.
- ICHIKAWA, M., 1971, Reanalysis of mechanism of earthquakes which occurred in and near Japan, and statistical studies on the nodal plane solutions obtained, 1926~1968, Geophys. Mag., **35**, 207~274.
- IDA, K., 1970, The generation of tsunamis and the focal mechanism of earthquakes, Tsunamis in the Pacific Ocean, IUGG Tsunami Symposium Hawaii, 1969, East-West Center Press, Hawaii Univ., 3~18.
- 気象要覧, 1931, 1551~1552; 1948, 24~25.
- 気象庁, 1961, 日向灘地震調査報告, 験震時報, **26**, 81~107.
- 気象庁福岡管区気象台, 1971, 1970 年 7 月 26 日「宮崎県沖の地震」の調査報告, 験震時報, **36**, 77~84.
- 梶浦欣二郎・相田 勇・羽鳥徳太郎, 1968, 1968 年日向灘地震による津波の調査, 地震研究所彙報, **46**, 1149~1168.
- 勝又 護, 1966, 日本付近の地震津波の表, 験震時報, **30**, 47~56.
- 大森房吉, 1901, 日本における津波につきて, 震災予防調査会報告, **34**, p. 79.
- 鷺坂清信・本間 寧・生沼 明・伊藤 博, 1942, 昭和 16 年 11 月 19 日日向灘地震地域踏査報告, 験震時報, **12**, 162~173.
- 史料, 1929, 宮崎地方の強震, 地震, **1**, 436~437.
- TAKAHASHI, R., 1951, An estimate of future tsunami damage along the Pacific coast of Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., **29**, 71~95.
- 高橋龍太郎・羽鳥徳太郎, 1961, 1961 年 2 月 27 日日向灘地震に伴なつた津波について, 地震研究所彙報, **39**, 561~577.
- 渡辺偉夫, 1968, 日本およびその周辺(沖縄および南千島を含む)の津波の表, 地震 II, **21**, 293~313.
- WATANABE, H., 1970, Statistical studies of tsunami sources and tsunamigenic earthquakes occurring in and near Japan, Tsunamis in the Pacific Ocean, IUGG Tsunami Symposium Hawaii, 1969, East-West Center Press, Hawaii Univ., 99~117.
- そのほかに, 日本津波研究会が集めた検潮記録のマイクロフィルムを使用した, Japanese Organization for Tsunami Investigation, 1957, Tide gauge records of tsunami observed in Japan.