1994 年三陸はるか沖津波と三陸沖の 放出津波エネルギー分布

羽 鳥 徳 太 郎*

The 1994 Sanriku-Oki Tsunami and Distribution of the Radiating Tsunami Energy in the Sanriku Region

Tokutaro HATORI

Suehiro 2-3-13, Kawaguchi, Saitama 332, Japan

(Received December 20, 1995; Accepted February 21, 1996)

Adding the newly data of the 1994 Sanriku-Oki tsunamis, the distribution of the radiating tsunami energy off Sanriku, North Japan, is investigated during the last 100 years, 1896-1995. Judging from the diagram of the attenuation of wave-height with distance, magnitudes of the Sanriku-Oki tsunamis on Apr. 8, and Dec. 28, 1994 are $m = -1$ and $m = 1.5$ on the Imamura-Iida scale, respectively. These values are normal compared to earthquake magnitudes ($M = 6.6$ and $M = 7.5$). The source area of the tsunami on Dec. 28, 1994 corresponding to an aftershock area lays extending about 150 km to the unusual E-W direction. During 1896-1959, the maximum cumulative energy was radiated in the source area of the 1896 Sanriku tsunami ($m = 3.5$) with the order of 10^{20} ergs per 15' mesh. And the areas of radiated energy of 10^{18} ergs extend to Shimokita Peninsula and the Miyagi coasts. On the contrary, the amount of cumulative energy during 1960-1995 drops 10^{19} ergs and the radiated area moves to the north side. The remarkable seismic gaps still remain near Shimokita Peninsula and the trench side far off Miyagi Prefecture.

Key words: Tsunami source area, Tsunami magnitude, Cumulative tsunami energy in the Sanriku region.

§1. はじめに

1989 年 10 月ごろから三陸沖で地震活動が顕著になり、群発地震域で津波が 3 回起こり、波源域・マグニチュードが検討された [羽鳥 (1991, 1993a)]. そして 1994 年 4 月 8 日と同年 12 月 28 日に、群発地震域の北側で津波が発生した。12 月 28 日の地震は、最近 6 年間の活動中最大のマグニチュード ($M = 7.5$) であり、余震域が東西 150 km にわたる異例な走向を示した。まず、両津波の規模など検潮記録から解析する。

さきに筆者 [羽鳥 (1991)] は、最近 100 年間に三陸沖で発生した津波を対象に、青森・岩手・宮城県沖を 4 地区に分け、それぞれの地区での放出エネルギーの推移を比較してみた。本稿では、津波の累積エネルギー分布から断層運動域の過程をみる目的で、新データを加えて放

出エネルギーの空間分布を調べてみた。そして変動パターンから今後、津波発生の可能性が高い地域を考察する。

§2. 1994 年 4 月 8 日三陸はるか沖津波

4 月 8 日 10 時 10 分ごろ、三陸はるか沖で発生した地震は、浦河・釧路で震度 2、三陸沿岸では震度 1 であった。気象庁の観測によれば、震央は $40^{\circ}34'N$, $143^{\circ}55'E$ 、深さ 0 km、マグニチュードは $M = 6.6$ である。

Fig. 1 は、三陸沿岸での検潮記録例を示したもので、ノイズと重なって周期がやや長い津波波形が認められる。大船渡で全振幅 20 cm が最大波であった。Table 1 に各地の検潮記録の読取り値を示す。2 観測点から逆伝播図の最終波面を Fig. 3 に示したが、そのほかの地点では初動がはっきりしないので、余震域を参照すると長さ 40 km になる。波源域は同年 12 月 28 日の地震震央の

* 〒332 埼玉県川口市末広 2-3-13

Fig. 1. Tide-gauge records of the Sanriku-Oki tsunami on Apr. 8, 1994.

Table 1. The Sanriku-Oki tsunami of Apr. 8, 1994, as recorded by tide gauges. The wave originated near the earthquake epicenter (40°34' N, 143°55' E. $d=0$ km, $M=6.6$, JMA) far off the Sanriku coast at 10:10 (JST) Apr. 8, 1994.

Tide station	Initial wave			Maximum wave			Authority*
	Travel time	Rise	Period	Occurrence time (JST)	Double ampl.	Period	
	min	cm	min	d h m	cm	min	
Hanasaki	52?	4	20	8 14 22	8	16	JMA
Kushiro	?			8 14 18	6	23	JMA
Urakawa	?			8 12 02	6	12	MSA
Hakodate	No evidence						JMA
Hachinohe	47	4	8	8 11 06	10	8	JMA
Miyako	?			8 11 06	9	7	JMA
Ofunato	48?	3	6	8 11 21	20	4	JMA
Ayukawa	56	4	5	8 11 29	10	8	JMA
Onahama	No evidence						JMA

* JMA: Japan Meteorological Agency, MSA: Marine Sefety Agency.

北隣りに位置し、前駆的な地震活動であった。

§3. 1994 年 12 月 28 日三陸はるか沖津波

12 月 28 日 21 時 19 分ごろ、三陸はるか沖で発生した地震は、三陸沖としては 1978 年宮城県沖地震以来の大規模なものであり、青森・岩手県下に地震災害をもたらした。気象庁の観測によれば、震央は 40°21' N, 143°43' E, 深さ 0 km, マグニチュードは $M=7.5$ であった。半月後の阪神大震災に隠れて目立たないが、八戸で震度 6、むつ・青森・盛岡では震度 5 が記録され、青森県下で死者 3 人、負傷者 784 人、建物の被害総数 6,229 棟にのぼったことが新聞報道された。

地震に伴う津波は、北海道から九州に至る検潮所で観

測され、Table 2 に記録の読取り値を示す。Fig. 2a と Fig. 2b に検潮記録例を示した。各地で津波初動は押し波で記録され、波の周期は 20 分前後、久慈で全振幅 170 cm が最大である。また庶野では、波源の指向性と岬での屈折効果に加わり、全振幅値は 145 cm を超えた。

12 観測点の伝播時間をもとに、逆伝播図の最終波面は Fig. 3 のようになる。波源域は余震域（気象庁の観測による 12 月 23 日～31 日までの期間）とほぼ合致し、東西 150 km, 幅 50 km と推定される。このように、波源の走向が等深線に直交する形をとったことは、きわめて異例である。なお中村 (1995) の解析では、波源域の東縁が余震域より 50 km ほど西側にずれ、長径が短い。花

Table 2. The Sanriku-Oki tsunami of Dec. 28, 1994, as recorded by tide gauges. The wave originated near the earthquake epicenter ($40^{\circ}21'N$, $143^{\circ}43'E$. $d=0$ km, $M=7.5$, JMA) far off the Sanriku coast at 21:19 (JST) Dec. 28, 1994.

Tide station	Initial wave			Maximum wave						Authority*
	Travel time	Rise	Period	Occurrence time (JST)			Double ampl.	H	Period	
	h m	cm	min	d h m	cm	cm	min			
Hanasaki	54	18	18	28 22 40	44	22	18	JMA		
Kushiro	42	15	22	29 3 10	48	24	30	JMA		
Hiroo	44	13	28	28 23 43	37	22	30	HDB		
Shoya	42	>46	15	28 22 06	>145	>46	15	HDB		
Hakodate	58	18	28	29 2 30	36	22	28	JMA		
Tappi	No evidence							MSA		
Ohminato	?			29 1 24	26	13	43	MSA		
Aomori	1 36?	8	20	28 22 32	20	10	15	PCB		
Hachinohe	34	42	15	28 23 02	88	44	36	JMA		
Kuji	24	74	20	28 22 17	170	76	20	IPO		
Miyako	24	46	21	28 21 54	116	46	21	JMA		
Kamaishi	32	22	27	28 23 12	46	22	23	MSA		
Ofunato	38	28	12	28 22 02	62	28	12	JMA		
Ayukawa	52	26	10	28 22 26	105	56	9	JMA		
Ishinomaki	1 12	14	20	29 2 16	25	13	35	TCB		
Onahama	1 06	12	28	29 2 32	28	13	22	JMA		
Choshi	1 10	4	22	29 3 32	16	8	25	JMA		
Miyake Is.	?			29 2 53	16	8	8	MSA		
Hachijo Is.	?			29 1 40	12	6	7	JMA		
Omaezaki	?			29 5 12	13	8	12	JMA		
Owase	?			29 6 25	12	6	16	JMA		
Muroto	?			29 7 20	20	10	8	JMA		
Tosa-Shimizu	?			30 11 02	34	18	20	JMA		
Aburatsu	?			30 4 54	36	18	23	JMA		

H : Tsunami height above ordinary tides.

* JMA: Japan Meteorological Agency, MSA: Marine Safety Agency, HDB: Hokkaido Development Bureau, IPO: Iwate Prefectural Office, PCB: 2nd Port Construction Bureau, TCB: Tohoku Construction Bureau.

咲・釧路・銚子からの波面できめているが、花咲・釧路の初動はゆるやかに立ち上がっており (Fig. 2b), 初動時刻の判定で差がでたようだ。

海溝付近で発生する三陸沖津波の場合、三陸沿岸での伝播時間は通常 30~40 分になるが [羽鳥 (1993b)], 今回の波源域西縁は沿岸に近接しており、八戸では津波が予測より数分早く到達した [岡田・他 (1995)]. しかも警報は地震から 4 分後に発令されたが、護岸に溢れる高さほど上がらなかったで、津波による死傷者は出なかった。

津波の規模

Fig. 4 は、筆者の方法 [羽鳥 (1986)] による津波マグニチュードの判定図を示す。横軸に震央から観測点までの海洋上の最短距離、縦軸に検潮記録上の最大全振幅値

をとり、津波マグニチュード m で区分してある。1994 年 4 月 8 日の津波は、 $m=-1$ と格付けられる。同年 12 月 28 日の津波は、群発地震に伴う 1989 年 11 月 2 日の津波よりやや規模が上回り、 $m=1.5$ と判定される。地震の規模と比べ、11 月 2 日の津波 ($M=7.1$, $m=1$) は評準より大きかったが、今回の津波の規模および波源面積は平均的なサイズといえよう。

なお、地震のメカニズム解によれば、地殻の破壊は海溝付近で始まり、西方に進行した低角逆断層型であった [例えば、岡田 (知)・他 (1995)].

§ 4. 津波の放出エネルギー分布

Fig. 5 は津波の発生期間を 1896~1959 年と 1960~1995 年とに分け、三陸沖における波源域の分布を示す。

Fig. 2a. Tide-gauge records of the Sanriku-Oki tsunami on Dec. 28, 1994.

各波源に、津波の発生年および地震と津波のマグニチュード M/m を付記した。

波源域は前2例で示したように、各観測点の伝播時間をもとに逆伝播図の方法で推定し [例えば、羽鳥 (1974)], 新データを加えてまとめたものである。発生回数は前期64年間で18回、後期36年間では16回を数え短期間ながら多発した。しかし、前期には1896年三陸津波 ($m=3.5$) と1933年三陸津波 ($m=3$) の大規模なものがあり、後期では1968年十勝沖津波 ($m=2.5$) が最大であった。また前期には宮城県沖と下北半島沖に、後期には岩手県の高津側小津波が多発し、波源域が重なって分布している。

次に、放出津波エネルギーの空間分布をみてみよう。三陸沖で経緯度を $15'$ のメッシュに分け、両期間の津波エネルギーの累積値分布は Fig. 6 のようになる。単位は 10^{19} エルグで示した。方法は以下のようである。津波エネルギー E_t として、断層モデルで得られた波源域での津波のポテンシャル・エネルギーをとり [相田 (1977)], 津波マグニチュード m との関係は、次の実験式 [羽鳥 (1979)] が得られる。

$$\log E_t = 0.7m + 19.1 \quad (\text{エルグ})$$

津波エネルギーは、Fig. 4 に示したように m が1階級上がることに波高が2.24倍になり、エネルギーが5倍になる。例えば、 $m=2$ は 3.2×10^{20} エルグ、 $m=3$ は 1.6×10^{21} エルグになる。放出エネルギーとして、波源域内で E_t を各メッシュに均等に割り振り、波源域が重なるメッシュでは、それぞれのエネルギー値を加えて累積値を求めた。

前期 (1896~1959) の単位メッシュあたりの放出エネルギー値は、 10×10^{19} エルグ以上の範囲が1896年三陸津波の波源域と重なる形をとり、南部で 18×10^{19} エルグになる。そして 1×10^{19} エルグ以上の範囲がこれを囲み、 0.1×10^{19} エルグ以上の範囲が下北半島沖と宮城県近海に伸びている。それに対し後期 (1960~1995) の津波では、エネルギー値が1桁小さく、 1×10^{19} エルグ以上の範囲が北部三陸沖に移る。

A地区 (下北半島沖) には、1946年以降津波を伴う地震活動がない。B地区 (宮城県沖の高津側) $150 \times 70 \text{ km}^2$ の範囲では、地震の空白域が指摘されてから [例えば、瀬野 (1979)], 現在も埋められていない。またB

Fig. 2b. Tide-gauge records of the Sanriku-Oki tsunami on Dec. 28, 1994.

地区は、寛政5年(1793)宮城沖地震の震源域とみなされ、震度分布から $M=7.8$ 、または $M=8$ クラスの見方もある[宇佐美(1987)]。この地震に伴った津波は、釜石市両石・牡鹿半島の鮫ノ浦などの地域で波高が4~5 mに達したことが記録され、津波マグニチュードは $m=2.5$ と見積もられている[羽鳥(1987)]。

§5. む す び

検潮記録をもとに、1994年4月8日と12月28日の三陸はるか沖津波を解析した。津波マグニチュードはそれぞれ $m=-1$ と $m=1.5$ と判定され、地震の規模と比べ平均値なサイズである。12月28日の津波波源域は、余震域と合致して東西150 kmに伸び、きわめて異例な

Fig. 3. Estimated source areas of the Sanriku-Oki tsunamis on Apr. 8, and Dec. 28, 1994 and the aftershock area (JMA). The last wave fronts of the inverse refraction diagram of the tsunamis are shown with the names of tide stations and travel times (min).

Fig. 4. Relation between the maximum double-amplitude and distance from the epicenter for various Sanriku-Oki tsunamis. Tsunami magnitude scale is classified assuming the same distance, Δ , dependence of wave-height, h , $h \propto \Delta^{-1}$ (HATORI, 1986).

走向を示した。

1896～1959年間に、三陸沖における津波の放出エネルギーの累積値分布は、1896年三陸津波の波源域が最大であり、緯度・経度それぞれ15'のメッシュあたり 10^{20} エルグのオーダーになる。そして 10^{18} エルグの範囲

が下北半島沖と宮城県近海へ伸びる形をとる。一方、1960～1995年間では放出エネルギー域の最大値は1桁小さく、三陸沖の北部域に移る。1959年以前の地震活動と比べ、近年宮城県沖の海溝沿いと下北半島沖が低調であり、今後の推移に注目していきたい。

Fig. 5. Distributions of source areas of the Sanriku-Oki tsunamis between 1896-1959 and 1960-1995. Years, earthquake magnitudes, M , and tsunami magnitudes of Imamura-Iida scale, m , are indicated.

Fig. 6. Contour maps showing the cumulative tsunami energy in a 15' mesh between 1896-1959 and 1960-1995 (unit: 10^{19} ergs). The A and B regions show seismic gaps.

謝 辞

1994 年三陸はるか沖津波の解析には、気象庁・海上保安庁・北海道開発庁・第 2 港湾建設局・東北地方建設局・岩手県久慈土木事務所の各管理機関で観測した検潮記録を利用させて頂き、関係各位に深く感謝する。また検潮記録の収集にあたっては、気象研究所の岡田正実研究室長ならびに東大地震研究所の都司嘉宣助教授にたいへんお世話になった。併せて厚く御礼を申し述べる。

文 献

- 相田 勇, 1977, 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 地震研彙報, 52, 71-101.
 羽鳥徳太郎, 1974, 東北日本太平洋側における津波の波源, 地震 2, 27, 321-337.
 羽鳥徳太郎, 1979, 津波の規模階級とエネルギーとの関係, 地震研彙報, 54, 531-541.
 羽鳥徳太郎, 1986, 津波の規模階級の区分, 地震研彙

- 報, **61**, 503-515.
- 羽鳥徳太郎, 1987, 寛政 5 年 (1793 年) 宮城沖地震における震度・津波分布, 地震研彙報, **62**, 297-309.
- 羽鳥徳太郎, 1991, 1989 年岩手県沖群発地震における津波—三陸沖の放出津波エネルギー, 津波工学研究報告, 東北大工学部, **8**, 119-131.
- 羽鳥徳太郎, 1993a, 1992 年 7 月三陸沖津波と地震活動の推移, 津波工学研究報告, 東北大工学部, **10**, 19-28.
- 羽鳥徳太郎, 1993b, 北海道・三陸沿岸の震度と津波波高の地域性, 地震 2, **45**, 365-371.
- 中村浩二, 1995, 1994 年三陸はるか沖地震津波の波源域, 日本地震学会講演予稿集, no. 2, B 40.
- 岡田正実・中村浩二・柿下 毅, 1995, 津波到達時刻の予報とその精度, 地球惑星科学関連学会合同大会講演予稿集, no. 1, 141.
- 岡田知己・松澤 暢・海野徳仁・長谷川 昭, 1995, 三陸沖の地震の震源特性, 日本地震学会講演予稿集, no. 2, B 50.
- 瀬野徹三, 1979, 宮城県沖に予想される地震について, 地震予知連絡会会報, **21**, 38-43.
- 宇佐美龍夫, 1987, 新編日本被害地震総覧, 東京大学出版会, pp. 434.