

インドネシア・フィリピン津波の規模特性

— 日本沿岸における波高分布 —

羽 鳥 徳太郎*

1. はじめに

1992年12月インドネシア・フローレス島津波は1,713人にのぼる死者を出し、日本の調査団(都司・他, 1993)によって初めて現地調査され、東南アジアの津波が注目を集めた。筆者(羽鳥, 1994, 以下に前報と記す)は、1960~1993年間に台湾・フィリピン・インドネシアで発生した津波について、津波マグニチュードの地域性を調査した。その後1994~1996年の3年間に、フィリピンで2回、インドネシアでは6回も津波が発生し、顕著な地震活動が続いている。

同期間中に多くの死傷者を出し、規模が大きい1994年6月インドネシア・東ジャワ津波・同年11月フィリピン・ミンドロ島津波および1996年2月インドネシアのイリアン・ジャヤ(ニューギニア)津波については、国際調査チームによって現地調査が行われた(都司・他, 1994, 1996; Tsuji・他, 1995; 今村・他, 1995 a, b; 1996)。一方、ハワイの国際津波情報センター(ITIC)発行のニューズレターに、各津波の概況が報告された。

本稿では、以上の報告と今回収集した検潮記録をもとに、各津波のマグニチュードを筆者の方法(羽鳥, 1979, 1986)で検討した。そして前報の津波データと合せて、インドネシア・フィリピンにおける津波規模の地域性を見直してみる。また、日本に被害をもたらしたイリアン・ジャヤ津波の記録を加え、東南アジア津波による日本の観測例を整理して示す。

2. 津波マグニチュードの判定

前報と合せ、1960~1996年間に東南アジアで発生した津波を伴う地震のリストを表-1に示す。ここで M_s は地震の表面波マグニチュード、津波マグニチュード m は今村・飯田スケールで表す。以下に、1994~1996年間の主な津波を取り上げ、伝播距離に応じて3方法(羽鳥, 1979, 1986)から津波マグニチュードを検討する。

a) 1994年東ジャワ津波

1994年6月2日18時18分UT(現地時間: 3日01時18分)ころ、ジャワ島東部約240km沖を震源とする $M_s=7.2$ ($M_w=7.6$)の地震は津波を伴い、223人にのぼる死者を出した。津波調査はジャワ島東部からバリ島に至る約400kmの区間で行われ、Rajekwesiでの波高13.9mが最大であった(都司・他, 1994; 今村・他, 1995 a)。また、津波がオーストラリア北西岸へ遡上したことがITICのニューズレター(Vol. 27, 1995)に報告された。Tsuji・他(1995)は、調査域の波高分布から津波マグニチュード $m=3$ と推定した。

図-1で、震源域付近の波高分布から津波マグニチュードを見直してみる。横軸に最大波地点を原点に観測点までの距離をとる。各地の波高はE-W線上に投影し、津波マグニチュードは波高を2.24倍の刻みで区分してある。

波高値は地形条件などでバラつくが、Tsujiらと同じ値で $m=3$ と判定され、地震の規模と比べて異常に大きい(図-5)。津波シミュレーションによれば(高橋・他, 1995)、傾斜角 12° の低角断層モデルで波高分布が説明できるとしている。ジャワ島東部・バリ島で地震動による被害がない(メルカリ

*元東京大学地震研究所

表-1 東南アジアにおける地震津波の表 (1960~1996)

| Date | Location | | | Magnitude | | | Remarks (Double ampl.) |
|--------------------|---------------|--------|---------|-----------|-----|------------|---------------------------|
| | Lat. | Long. | d km | M_s | m | δm | |
| Taiwan | | | | | | | |
| 1963 II 13 | E. Taiwan | 24.2°N | 122.1°E | 53 | 6.9 | -1 | N |
| ○1966 III 12 | E. Taiwan | 24.2°N | 122.7°E | 42 | 7.8 | 0 | L |
| ○1972 I 25 | E. Taiwan | 22.6°N | 122.3°E | 29 | 7.4 | 0 | L Ishigaki Is. 5cm |
| ○1978 VII 23 | E. Taiwan | 22.3°N | 121.5°E | 34 | 7.2 | 0 | N Ishigaki Is. 10cm |
| ○1986 XI 15 | E. Taiwan | 24.0°N | 121.8°E | 33 | 7.8 | 1 | L Miyako Is. 56cm |
| Philippines | | | | | | | |
| ○1968 VIII 1 | Luzon | 16.5°N | 122.2°E | 31 | 7.2 | 1.5 | H Kushimoto 28cm |
| ○1972 XII 2 | E. Mindanao | 6.5°N | 126.6°E | 33 | 7.4 | 2 | H Kushimoto 46cm |
| ○1975 X 31 | Samar Is. | 12.5°N | 125.9°E | 48 | 7.4 | 2 | H Hachijo Is. 50cm |
| ○1976 VIII 16 | W. Mindanao | 6.2°N | 124.0°E | 8 | 7.8 | 3 | H Kushimoto 24cm |
| 1992 V 17 | Mindanao | 7.2°N | 126.8°E | 33 | 7.4 | 0? | L |
| 1994 XI 14 | Mindoro Is. | 13.5°N | 121.1°E | 33 | 7.1 | 1.5 | H |
| 1995 IV 21 | Samar Is. | 12.1°N | 125.9°E | 23 | 7.3 | 0 | N |
| Indonesia | | | | | | | |
| 1965 I 24 | N. Buru Is. | 2.4°S | 126.0°E | 6 | 7.5 | 2 | H |
| 1967 IV 11 | W. Celebes | 3.7°S | 119.3°E | 33 | 5.8 | 1 | H |
| ○1968 VIII 10 | N. Celebes | 1.4°N | 126.2°E | 1 | 7.5 | 2 | H Urugami 40cm |
| 1968 VIII 14 | W. Celebes | 0.2°N | 119.8°E | 22 | 7.3 | 2.5 | H |
| 1969 II 23 | W. Celebes | 3.1°S | 118.8°E | 13 | 6.9 | 1 | H |
| 1977 VIII 19 | S. Sumba Is. | 11.1°S | 118.5°E | 38 | 8.1 | 3.5 | N |
| 1987 XI 26 | N. Timor Is. | 8.4°S | 124.3°E | s | 6.5 | (1) | H |
| 1992 XII 12 | N. Flores Is. | 8.5°S | 121.9°E | 36 | 7.5 | 2.5 | H |
| 1994 I 21 | Halmahera | 1.0°N | 127.7°E | 33 | 7.2 | 0 | N |
| 1994 VI 2 | E. Java | 8.3°S | 113.7°E | 33 | 7.2 | 3 | H |
| 1994 X 8 | Halmahera | 1.2°S | 128.0°E | 31 | 6.8 | 1 | H |
| 1995 V 14 | Timor Is. | 8.4°S | 125.1°E | 33 | 7.0 | 1 | H |
| 1996 I 1 | W. Celebes | 1.0°N | 120.0°E | 33 | 7.7 | (2) | N |
| ○1996 II 17 | Irian Jaya | 1.0°S | 137.0°E | 33 | 8.1 | 3 | N Chichijima 200cm |

M_s : Surface-wave magnitude of earthquake. m : Tsunami magnitude of Imamura-Iida scale.

δm : Deviation of tsunami magnitude compared with earthquake magnitude (N, normal. H, high. L, low)

○ Observed in Japan.

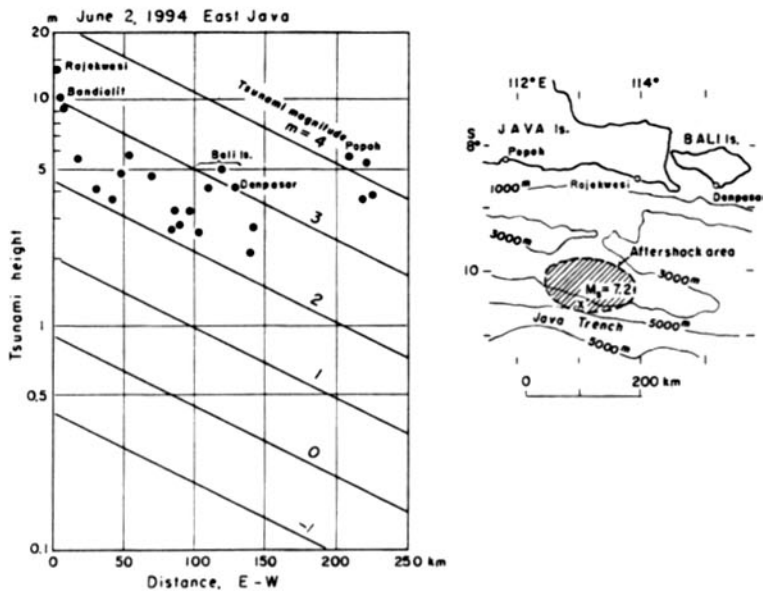


図-1 1994年東ジャワ津波のマグニチュード判定図

震度階, 4~5; 気象庁振動階 2~3) ことから, 低周波性の津波地震であったことを示唆する。

b) 1994年フィリピン・ミンドロ島津波

1994年11月14日19時16分UT (現地時間: 15日03時16分) ころ, ルソン島とミンドロ島をはさむ海峡付近で発生した地震 ($M_s=7.1$, $M_w=7.0$) である。地震と津波で死者74人, 行方不明7人を出し, ミンドロ島東部で797戸が全壊した。津波調査は, 海峡をかこむ約25kmの範囲で行われた (今村・他, 1995b)。その報告によれば, 震央に近いバコ島での最大波高は7.3mに達したが, 半面1.5m内外のところもあり, 波高がバラついている。

図-2は, 前方法と同じ横軸に最大波地点を原点にとり, 海峡沿い (NW-SE) に各地の波高を投影した分布を示す。波源から遠方での波高データはないが, 平均的にみて $m=1.5$ と推定されよう。

c) 1996年イリアン・ジャヤ津波

1996年2月17日14時59分 (日本時間) ころ, インドネシアのイリアン・ジャヤ沖

(1.0°S , 137.0°E) に発生した巨大地震 ($M_s=8.1$, $M_w=7.9$) である。震央に近いビアク島では地震から2~10分後に津波に襲われ, 死者・行方不明258人にのぼった。今村・他 (1996), 都司・他 (1996) によって東西125kmの同島全域で津波調査が行われ, 最大波は7.7mに達した。津波は日本へも伝播し, 高知県南西部などで水産施設や漁船に被害をもたらした (後述)。

図-3は, 震源から遠方で観測された津波データを重点においた。津波マグニチュードの判定方法を示す。横軸に震央から観測点までの距離, 縦軸に最大波の片振幅値をとる。津波マグニチュードは, 波高が距離 $\Delta^{-1/2}$ で減衰するとして, 2.24倍の刻みで区分してある。日本での津波の高さは, 父島で103cmを最大に大幅にバラつくが, $m=3$ と推定される。

d) その他

図-4右に示すように, 1994~1995年間にインドネシア・フィリピン近海で地震が頻発した。1994年1月と10月にハルマヘラ島周辺, 1995年4月のサマル島近海, 1995年5月

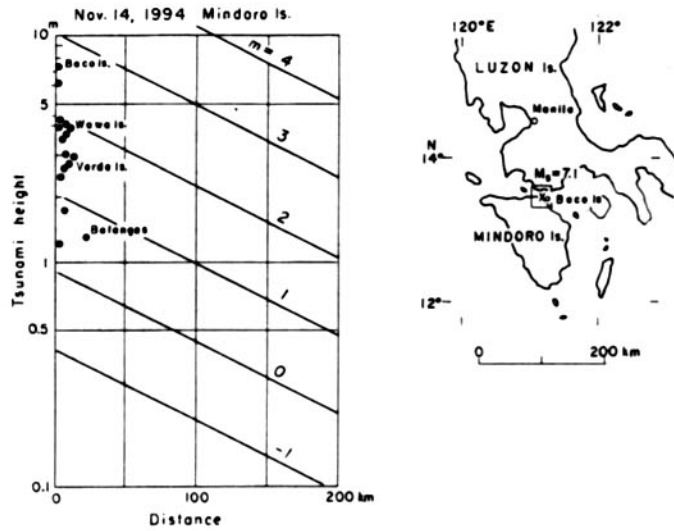


図-2 1994年フィリピン・ミンドロ島津波のマグニチュード判定図

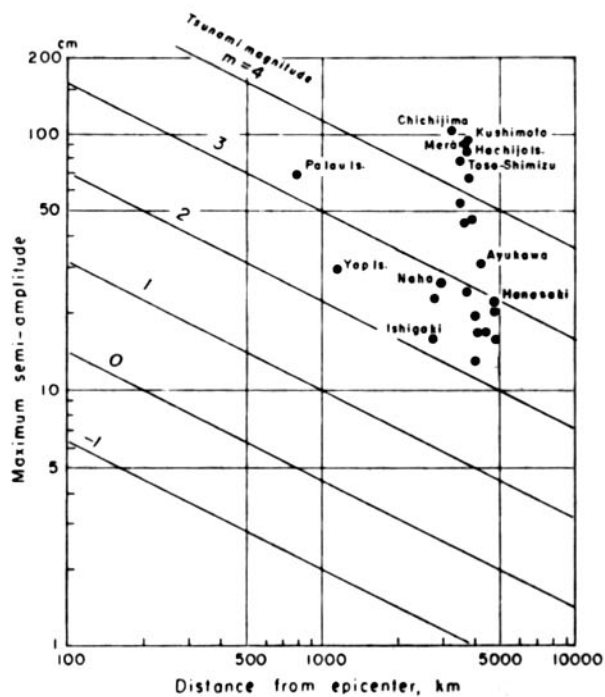


図-3 1996年イリアン・ジャヤ (ニューギニア) 津波のマグニチュード判定図

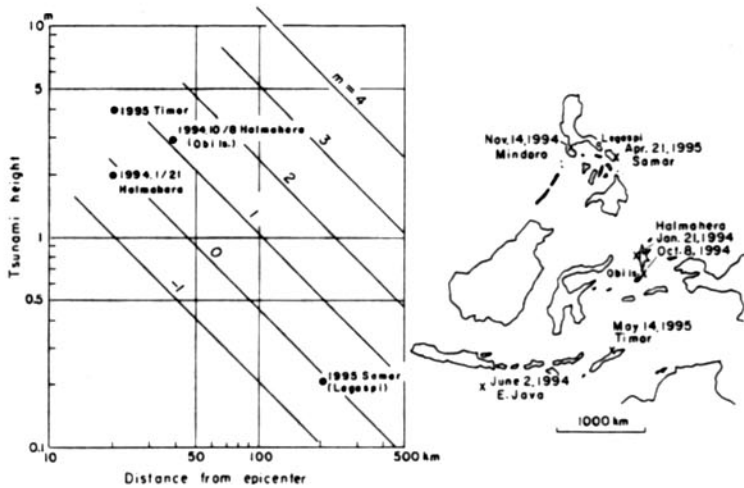


図-4 1994年ハルマヘラ・1995年ティモール島津波および1995年サマル島津波のマグニチュード判定図

のティモール島近海で発生したこれらの津波は、 M_s 7前後の地震に伴い、局地的に被害をもたらした (ITIC, ニュースレター1994-5)。

図-4左には、震源域周辺の波高値 (または検潮記録の最大全振幅値) から、津波マグニチュードを判定する方法を示す。横軸に震央から観測点までの海洋上の距離 Δ 、縦軸に波高をとり、 Δ^{-1} で減衰するとみなし、2.24倍の刻みで津波マグニチュードを区分してある。4津波とも観測値は1点ずつであるが、 m 0~1の範囲内に推定される。

3. 地震と津波マグニチュードの関係

前報に新データを加え、地震の表面波マグニチュード M_s と津波マグニチュードの関係を図-5に示す。ここでAは、日本近海と環太平洋の主要な巨大地震のデータから得た経験式、 $m=3.9M_s-28.6$ (小山・小菅, 1985)。Bは日本近海の津波を対象に、気象庁マグニチュード M で表す式、 $m=3.03M-21.73$ (羽鳥, 1996)を示す。Cは、前報から得られた次式を示す。

$$m=2.66M_s-17.5$$

A, B式と比べ、台湾付近の津波の規模は下回る傾向がある。フィリピン・インドネ

シア周辺では、 $M_s > 8.0$ の地震による津波は、標準的な規模になっている (1977年8月スンバ島地震 ($M_s=8.1$)による津波は、再調査によると $m=3.5$ と格付けられ (Kato・Tsuji, 1995), 最大規模であった)。しかし、 $M_s < 7.8$ の地震による津波の規模はC式で表され、津波マグニチュードが1~2階級 (波高にして2~5倍) 上回るものが多い。

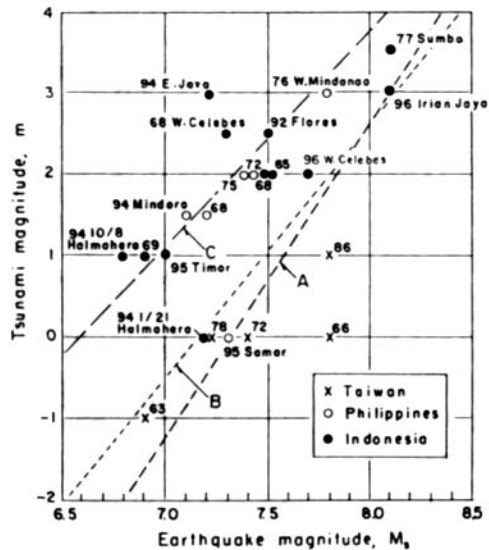


図-5 地震のマグニチュード M_s と津波のマグニチュード m との関係

図-6は、1960~1996年間に津波を伴う地震の震央分布を示す。それぞれに、発生年および地震と津波のマグニチュード、 M_s/m を付記した。震央の記号は、日本近海と環太平洋の主要な地震データ(A, B式)を基準にとり、津波マグニチュードの偏差値 δm を3クラスに区分してある(表-1に、標準的な津波をN, 上回るものをH, 下回るものをLと示した)。インドネシア・フィリピン周辺では、津波発生数21回のうち偏差値の大きいものが71%にのぼっている。

4. 日本での観測例

気象庁地震火山部の地震速報(No.383, 1996)によれば、1996年2月17日インドネシアのイリアン・ジャヤ付近で発生した津波は、日本の太平洋沿岸で1960年のチリ津波以来、遠地津波としては大きな振幅で観測された。今回、収集された津波の検潮記録例を図-7a, bに示す。表-2に記録の読取り値を示す。全振幅値は、父島200cm, 串本170cmが大きく、津波の周期は20分前後であった。高知県土佐清水市や八丈島で漁船の被害が報

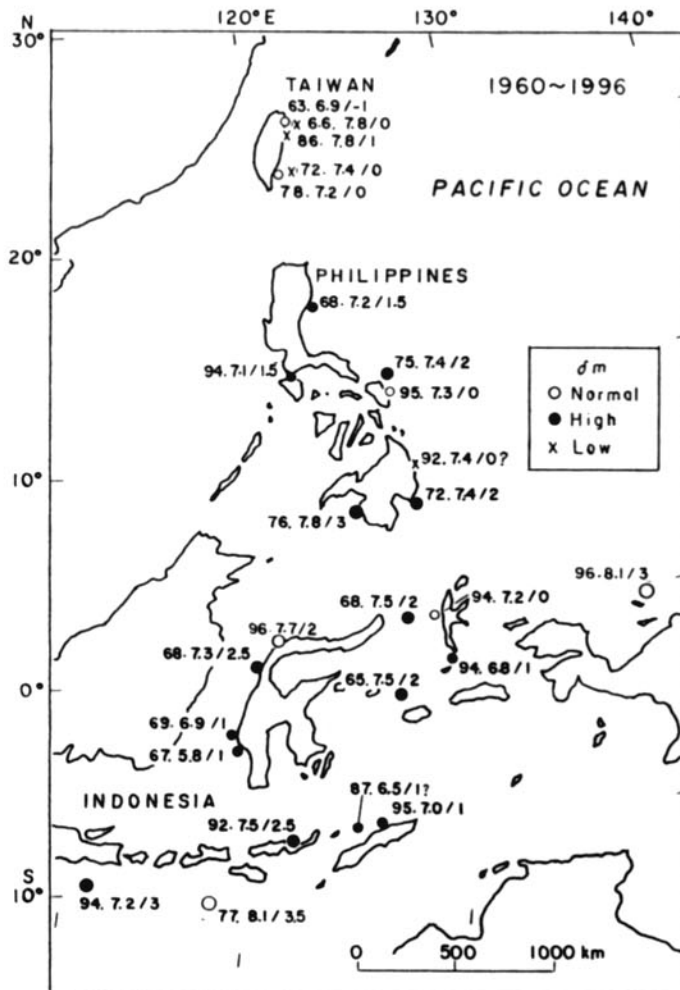


図-6 東南アジアにおける地震津波の震央分布(1960~1996)。津波マグニチュードの偏差値で区分

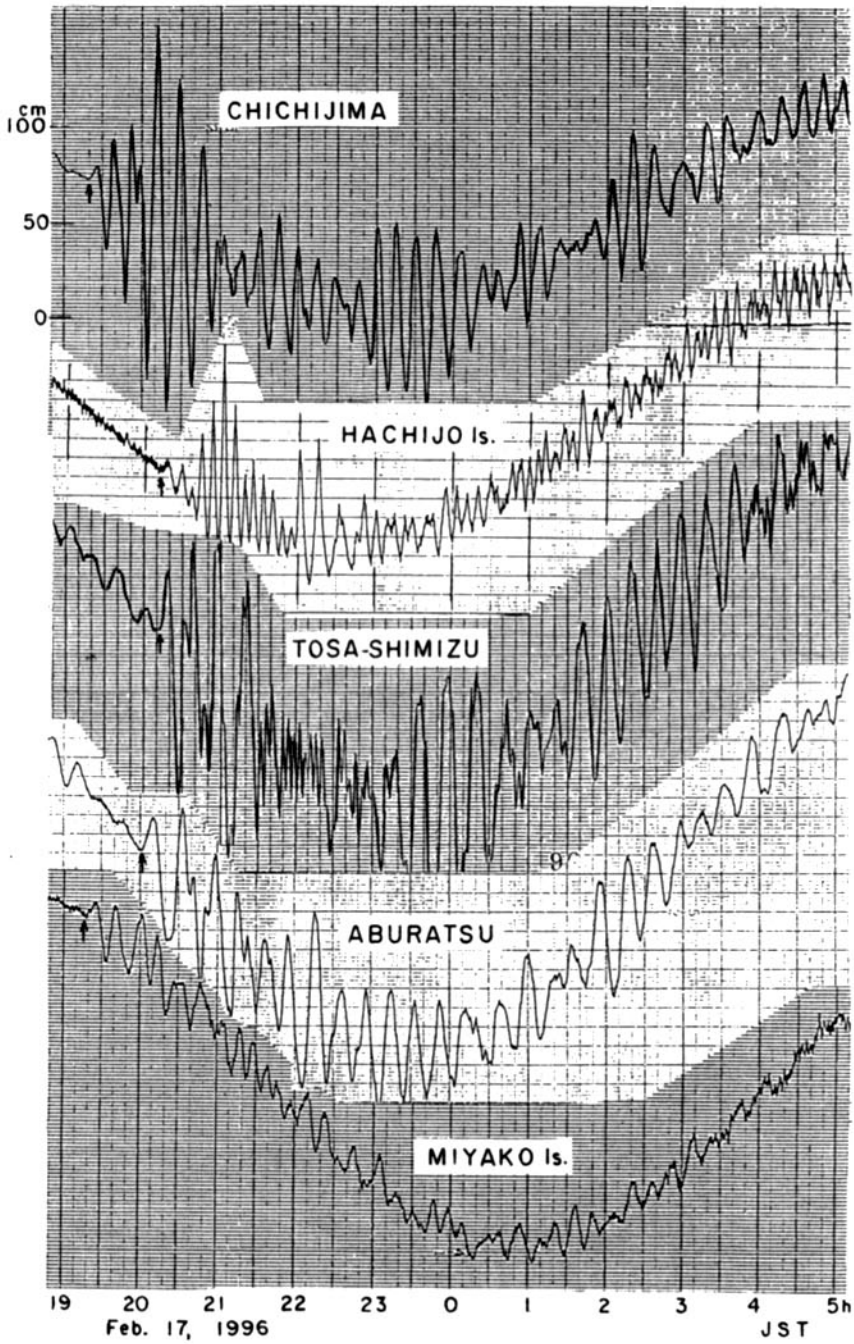


図-7 a 日本で観測された1996年イリアン・ジャヤ津波の検潮記録

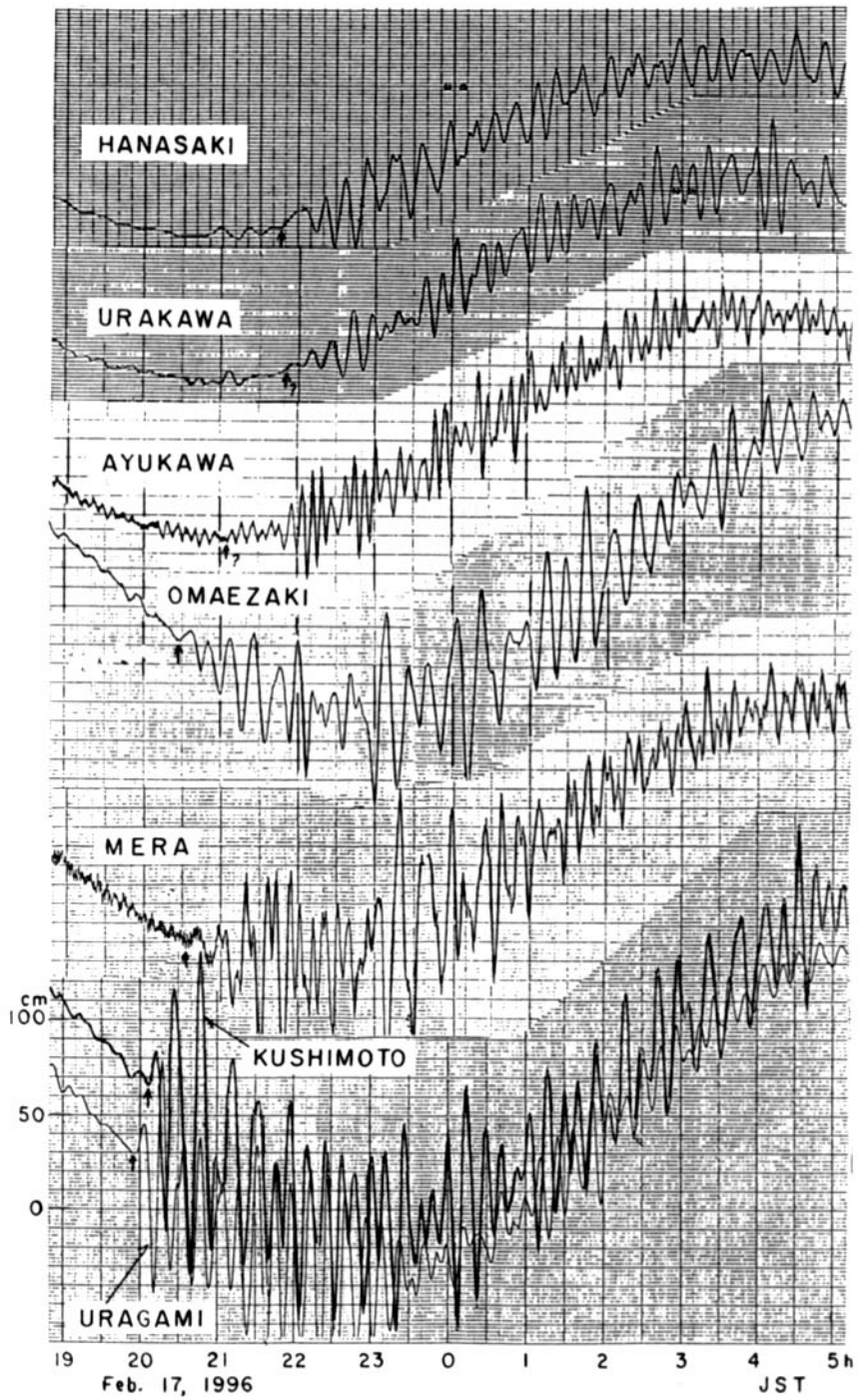


図-7 b 日本で観測された1996年イリアン・ジャヤ津波の検潮記録

表-2 1996年2月17日イリアン・ジャヤ地震の津波観測表

| Tide station | Initial wave | | | Maximum wave | | | |
|--------------|--------------|------|--------|-----------------------|--------------|-----|--------|
| | Travel time | Rise | Period | Occurrence time (JST) | Double ampl. | H | Period |
| | h m | cm | min | d h m | cm | cm | min |
| Hanasaki | 6 49 | 10 | 18 | 17 22 53 | 50 | 22 | 20 |
| Kushiro | 6 51? | 5 | 17 | 17 23 31 | 25 | 14 | 20 |
| Urakawa | 6 51? | 4 | 15 | 18 4 12 | 60 | 33 | 15 |
| Hakodate | ? | | | 18 3 36 | 18 | 12 | 52 |
| Miyako | 6 36 | 7 | 12 | 17 23 08 | 35 | 17 | 24 |
| Ofunato | 6 19? | 5 | 10 | 17 22 17 | 24 | 16 | 10 |
| Ayukowa | 6 07? | 5 | 7 | 18 0 21 | 56 | 32 | 7 |
| Onahama | 6 03? | 6 | 21 | 18 0 10 | 38 | 20 | 20 |
| Choshi | 5 36? | 5 | 14 | 17 23 12 | 40 | 24 | 19 |
| Mera | 5 35 | 10 | 18 | 17 23 20 | >130 | 98 | 18 |
| Chiba | No evidence | | | | | | |
| Yokohama | ? | | | 18 2 08 | 26 | 12 | 29 |
| Yokosuka | No evidence | | | | | | |
| Chichijima | 4 21 | 10 | 15 | 17 20 11 | 200 | 103 | 17 |
| Hachijo Is. | 5 13 | 7 | 13 | 17 21 00 | 108 | 84 | 10 |
| Izu-Oshima | 5 35? | 7 | 5 | 18 0 12 | 46 | 25 | 5 |
| Uchiura | 5 27 | 10 | 20 | 18 0 28 | 93 | 68 | 20 |
| Shimizu | 5 22 | 4 | 20 | 18 0 18 | 36 | 24 | 18 |
| Omazaki | 5 29 | 9 | 16 | 17 23 08 | 99 | 58 | 18 |
| Maisaka | 5 29 | 5 | 19 | 18 1 50 | 40 | 24 | 16 |
| Nagoya | No evidence | | | | | | |
| Yokkaichi | ? | | | 18 0 25 | 18 | 12 | 15 |
| Toba | 5 23? | 3 | 24 | 17 23 20 | 76 | 43 | 16 |
| Owase | 5 17 | 19 | 16 | 17 20 40 | 132 | 50 | 16 |
| Uragami | 4 57 | 18 | 16 | 17 20 17 | 122 | 60 | 16 |
| Kushimoto | 5 06 | 22 | 14 | 17 20 48 | 170 | 96 | 26 |
| Wakayama | 5 52 | 8 | 13 | 17 22 52 | 20 | 14 | 20 |
| Osaka | No evidence | | | | | | |
| Kobe | ? | | | 18 1 44 | 12 | 8 | 24 |
| Sumoto | No evidence | | | | | | |
| Komatsujima | 5 46 | 12 | 19 | 17 23 17 | 30 | 20 | 20 |
| Kuchinotsu | No evidence | | | | | | |
| Nagasaki | " | | | | | | |
| Kagoshima | " | | | | | | |
| Aburatsu | 5 02 | 23 | 22 | 17 22 14 | 92 | 53 | 22 |
| Nobeoka | 5 11 | 10 | 14 | 17 21 15 | 73 | 35 | 14 |
| Tosa-Shimizu | 5 14 | 38 | 16 | 17 21 00 | 164 | 78 | 22 |
| Kochi | 5 18 | 14 | 17 | 18 1 40 | 46 | 24 | 22 |
| Muroto | 5 04 | 14 | 17 | 17 23 29 | 78 | 50 | 8 |
| Misumi | No evidence | | | | | | |
| Fukue | " | | | | | | |
| Naha | 4 16 | 9 | 30 | 17 22 51 | 31 | 26 | 24 |
| Miyako Is. | 4 19 | 10 | 16 | 17 20 02 | 32 | 18 | 12 |
| Ishigaki Is. | 4 01 | 5 | 13 | 17 19 37 | 22 | 12 | 20 |

H : Tsunami height above ordinary tides.

道された。図-8は震央を波源と仮定し、5分間隔で波面を描いた津波伝播図を示す。伊豆小笠原海溝沿いに、波面が屈折している。また、四国・紀伊沿岸には津波が正面から入射し、伊豆マリアナ海嶺でエネルギーがトラップされたようだ。伝播のシミュレーションで、水位の密度分布が再現された(越村・他, 1996)。

これまでのインドネシア津波をみると、シラウェシ(セレベス)島付近で発生した1918年8月15日と1968年8月10日の津波が、串本で全振幅40cmなど各地で観測され、発生域は太平洋に面してしる(羽鳥, 1989)。

一方、フィリピン太平洋沿岸で発生した地震津波($M_s > 7.2$)も、日本各地で全振幅20~50cmが観測されてきた。図-9は、1968年ルソン・1972年ミンダナオ・1975年サマル

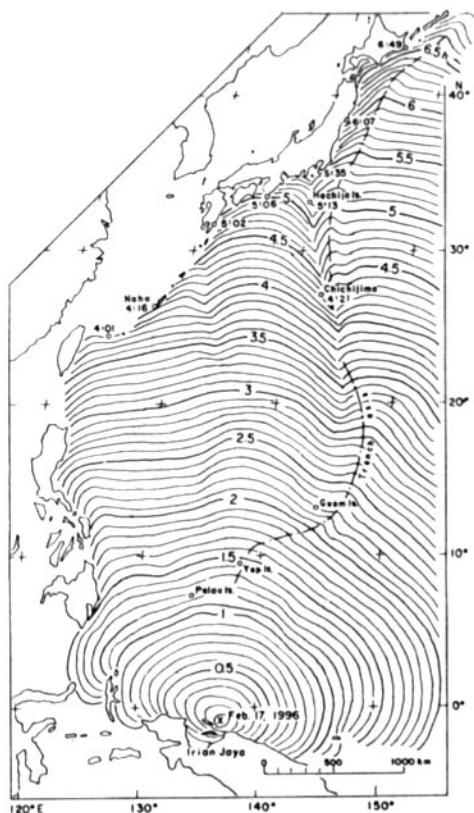


図-8 1996年イリアン・ジャヤ津波の伝播図。波面は5分間隔、日本での実測値(時,分)を示す。

島津波(Hatori, 1969, 1982;羽鳥, 1974)における全振幅値分布とイリアン・ジャヤ津波の高さ(片振幅値)との比較を示す。分布パターンはいずれも共通し、南西諸島よりも四国・紀伊沿岸・父島が大きく、北日本では10~30cmに減衰している。なお、台湾東部の津波は、八重山諸島で観測されており、1986年11月15日の津波において宮古島平良で全振幅56cmが最大波であった。

伝播時間については(図-9右)、関東から西日本にかけて地震後3~5時間になり、北日本はそれより1時間ほど伸びている。

5. むすび

現地調査報告およびITICのニュースレターをもとに、前報に続き1994~1996年にインドネシア・フィリピンで発生した津波のマグニチュードを調査した。その結果、東ジャワ津波のマグニチュードは $m=3$ 、ミンドロ島津波 $m=1.5$ 、イリアン・ジャヤ津波 $m=3$ と推定される。そのほかハルマヘラ・ティモール島付近の津波は、 $m=0\sim1$ であった。

以上の新データを加え、1960~1996年間の津波を対象に地震の規模 M_s と津波マグニチュード m の関係を検討した。日本近海と環太平洋の主要な地震と比べると、 M_s 8クラスによる津波は標準的な規模になるが、発生数の71%の津波のマグニチュードは1~2階級(波高にして2~5倍)上回り、 $m=2.66$ 、 $M_s=17.5$ で表せることが確かめられた。このような地域性の要因は地形効果によるものか、震源メカニズムの特性か、今後の課題である。

フィリピン・インドネシアの太平洋側で発生する津波は、地震から3時間以降に日本列島に到達した。波高分布のパターンは共通し、四国・紀伊沿岸・父島の波高が大きく、房総以北の北日本で著しく減衰する。イリアン・ジャヤ津波は、それを裏付ける波高分布であった。幸い干潮時の津波であったので、陸上での被害は免れた。南方から伝播する津

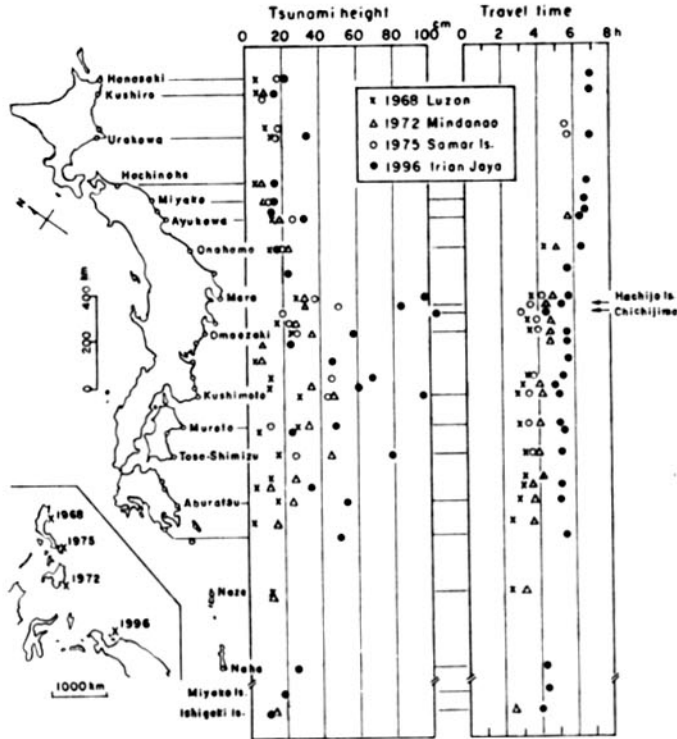


図-9 フィリピン・インドネシア津波による日本沿岸の波高分布と伝播時間分布

波はチリ津波と異なり、波高分布のパターンが西高北低になる。

謝 辞

1996年イリアン・ジャヤ津波における日本沿岸の状況は、気象庁から提供された検潮記録をもとに解析した。関係各位に対し、深く感謝の意を表す。また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お世話になった。併せて厚く御礼を申し述べる。

参 考 文 献

- Hatori, T., 1969 : Study on distant tsunamis along the coast of Japan, Part 3: Tsunamis of Philippines and Indonesia origin, Bull. Earthq. Rec. Inst., Vol.47, pp.523-537.
 羽鳥徳太郎, 1974 : 日本沿岸における1972年

12月2日のミンダナオ島沖津波, 地震研究所研究速報, No.13, pp.77-84.

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, Vol.54, pp.531-541.

Hatori, T., 1982 : Philippine, Solomon and New Hebrides Islands tsunamis observed along the coast of Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol.57, pp.221-237.

羽鳥徳太郎, 1986 : 津波の規模階級の区分, 地震研究所彙報, Vol.61, pp.503-515.

羽鳥徳太郎, 1989 : 日本沿岸における遠地津波のエネルギー分布, 地震2, Vol.42, pp.467-473.

羽鳥徳太郎, 1994 : 台湾・フィリピン・インドネシアにおける津波規模の特性, 地震2, Vol.47, pp.155-162.

羽鳥徳太郎, 1996 : 日本近海における津波マグニチュードの特性, 津波工学研究報告, 東北大学工学部, No.13, pp.17-26.

- 今村文彦・高橋智幸・松富英夫・都司嘉宜・荒井賢一・H. S. Sub・河田恵昭・原田 智・松山昌史, 1995 a : ジャワ東部地震津波の調査, 津波工学研究報告, 東北工科大学, No12, pp.35-44.
- 今村文彦・E. Gica・H. J. Lee・C. Synolakis・T. Vasily・E. Listanco・S. Kawashima・D. Esplanada, 1995 b : 1994年11月15日フィリピン・ミンドロ島地震津波の現地調査, 津波工学研究報告, 東北工科大学, No12, pp.19-13.
- 今村文彦・高橋智幸・松富英夫・李 昊俊・倉吉一盛・堀内信哉・越村俊一, 1996 : 1996年2月17日Irian Jaya地震津波の現地調査, 津波工学研究報告, 東北工科大学, No13, pp.81-99.
- ITIC, 1994-1996 : Newsletter, Vol. 26-28.
- Kato, K., and Tsuji, Y., 1995 : Tsunami of the Sumba earthquake of August 19, 1977, J. Natur. Disas. Sci., Vol. 17, pp. 87-100.
- 越村俊一・今村文彦・高橋智幸・首藤伸夫, 1996 : 1996年Irian Jaya地震津波の外洋伝播計算, 日本地震学会講演予稿集, No 2, P80.
- 小山順二・小菅正裕, 1985 : 津波マグニチュードと断層パラメータ, 地震2, Vol. 38, pp.610-613.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫・堀内信哉・都司嘉宜, 1995 : 1994年ジャワ東部地震津波の数値計算と現地調査, 地球惑星関連学会合同大会予稿集, No 1, F31-07.
- 都司嘉宜・今村文彦・河田恵昭・松富英夫・武尾 実・伯野元彦・渋谷純一・松山昌史・高橋智幸, 1993 : 1992年インドネシア国フローレンス島地震津波, 月刊海洋, Vol.25(12), pp.735-744.
- 都司嘉宜・今村文彦・松富英夫・原田智史・荒井賢一・韓 世燮・C. Synolakis・Jumadi, 1994 : 1994年6月3日東ジャワ地震津波の浸水高分布, 日本地震学会講演予稿集, No 2, Aol.
- Tsuji, Y., Imamura, F., Matsutomi, H., Synolakis, C. E., Nanang, P. T., Jumadi, Harada, S., Han, S. S., Arai, K., and Cook, B., 1995 : Field survey of East Java earthquake and tsunami of June 3, 1994, PAGEOPH, Vol. 144 (3-4), pp. 839-854.
- 都司嘉宜・今村文彦・高橋智幸・松富英夫・P. T. Nanang・M. Husni, 1996 : 1996年2月17日インドネシア・イリアン・ジャヤ地震によるピアック島の津波被害, 平成8年3月地震研究所談話会で発表.