

1992年インドネシア・フローレス島津波の現地調査とその解析

今村文彦* ・松富英夫** ・都司嘉宣***
松山昌史****・河田恵昭*****・高橋智幸*****

1. はじめに

大規模の地震及び津波が1992年12月12日にインドネシアで発生した。12月26日までの調査によると地震と津波により2,080名もの犠牲者を出し、その半数が津波によると言われている。著者らは12月24日から18日間に渡り現地調査を行った。その結果を報告すると共に、津波数値計算を実施しその津波の実態と被害の解明を計る。Flores島津波は最大遡上高さが20mを超える今世紀最大級の津波であり、しかも波源域が沿岸に近いことから、地震発生後早いところで2、3分で来襲してきた。最近懸念されている東海沖地震や東京直下型地震による津波に類似しており、この津波の特性や被災状況を調査することは日本の津波防災にも役立つと期待される。

2. 地震規模と津波波源

2.1 インドネシアでの地震活動

地球の変動帯の中でも、海洋プレートが他の大陸または海洋プレートの下に沈み込む場所、例えば太平洋西部の“島弧-海溝系” (Hamilton, 1988) や太平洋東部の“大陸縁弧-海溝系”で、最も激しく地震や火山噴火が発生している。Flores地震も島弧-海溝系で生じた地震ではあるが、プレート間の地溝に沿った地震ではない。図-1に示す、その震源位置はインド-オーストラリア・プレートのユーラシア・プレート下部への沈み込み (Java Trench) より約100 km ユーラシア・プレート側であり、島弧背後での衝上断層 (Back arc thrust) によって生じた低角逆断層地震である。これは1983年の日本海中部地震と規模と背景のテクトニクスの点でよく類似しており、その発生機構は日本列島に見られる縁海や島弧の構造や形成過程を知る上で重要である。

ESCAP/UNDRO(1991)のレポートによれば、インドネシア国では過去156年間(1828-1984)に人命を奪った

地震だけでも33を数え、その犠牲者数は10,751名に及ぶ。地震の多くは震央を海域に位置するため津波も伴う。1896年からのデータによると津波は15回発生し、マラッカ海峡も含めると死者6,443名に及ぶ。インドネシアはまさに地震国である。また、Silver・Reed (1988)の音波調査により、今回の震源付近では断層が存在せず (Seismic Gaps), 1961年にマグニチュード6.5の地震が発生してはいるが、過去100年以上津波を伴う地震は発生していないことが分かった。

2.2 津波波源について

断層運動に原因した津波の初期波形を推定するには、断層パラメーターを用いて地盤変動量計算を行う必要がある。米国地質調査所 (USGS) による余震分布とSilver・Reed (1988) により示されたSunda arcとそのBack arcの構造に基づき、本イベントはBack thrustで発生した深さは15 km程度の浅域地震でしかも低角の断層面をもつものと推定した。基本パラメータを表-1に示す。さらに、断層の寸法は余震域分布より100 km×

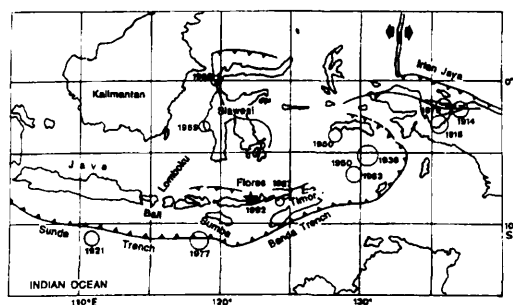


図-1 インドネシア東部での津波を伴った地震 (丸印)

表-1 Harvard Univ. CMT 解をもとにした推定値

発生時間	5:29:46.9 (UT)
震源	(8.36 S, 122.37 E)
深さ	15 km
継続時間	44.0 秒
地震モーメント	6.4×10^{27} dyne-cm
走向	61°
傾き	32°
すべり方向	64°

* 正会員 工博 東北大学助教授 工学部災害制御研究センター
** 正会員 工博 秋田大学助手 鉱山学部土木環境工学科
*** 理博 東京大学助教授 地震研究所
**** 正会員 工修 (財)電力中央研究所
***** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
***** 学生員 工修 東北大学大学院

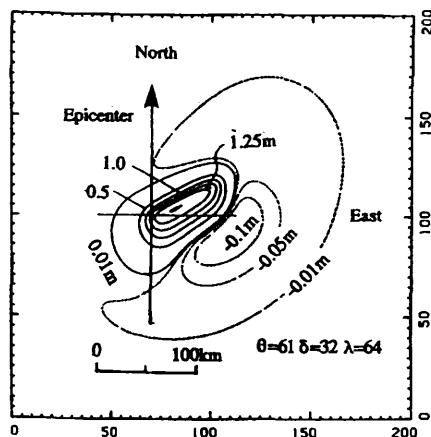


図-2 推定される地盤変動分布 (津波初期波形)

50 km となり、地震の破壊速度の面からも支持される。破壊過程が Unilateral であり破壊速度を 2.5 km/s とすれば破壊継続時間 40 秒より断層長さは 100 km となる。また、すべり量 u は 3.2 m と算出した。

以上のパラメータより地盤変動量計算を行った結果を図-2 に示す。断層面を中心に隆起による変動量が大きく表れ、その南東部に沈降変動が見られる。

3. 調査方法とその結果

3.1 調査方法

被害は図-3 に示す Flores 島 Maunere 市を中心に発生しており、北東部の Hading 湾から南西部の Ende までの 180 km に及ぶ領域での調査を行った。4 班が各地でのアンケート結果 (津波到達時間、来襲状況、被害状況) 及び津波の痕跡高さ、地震による被害・地盤変動などを測定した。その他、ヘリコプターを用いた津波浸水域及び斜面崩壊撮影を行い、測定地点の把握及び記録には現在市販されている携帯用 GPS を利用した。

3.2 津波来襲状況

(a) 津波の初動と波形

証言に基づき、各地での津波の初動と波形の検討を行い、その結果を図-4 に示す。図中、実線は証言波形を、点線は可能性としての波形を示す。波高の大小の関係は地点毎のもので、絶対的なものではなく、その分類は最大波とその他の波の2種類のみである。津波周期に関する情報はなため、図中の横軸方向の時間間隔は周期の長短を示してはいない。四角い枠中の時間と方向は各々津波第一波の地震後からの到達時間と津波の来襲方向を示す。各地での特徴をまとめると以下の通りである。

Hading 湾内の Pantai Lela と Waibalan (①, ②) の津波は押しから始まり、1 度目が最大波で、3 波来襲したと判断するのが妥当であろう。初動の押し引きは周

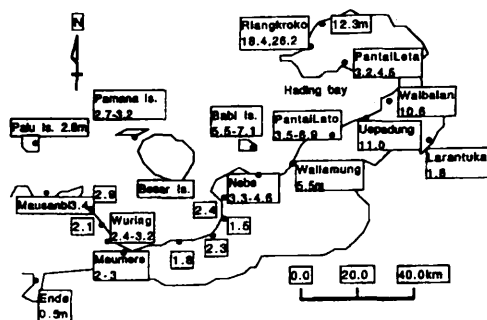


図-3 調査で得た津波痕跡記録 (平均潮位を基準)

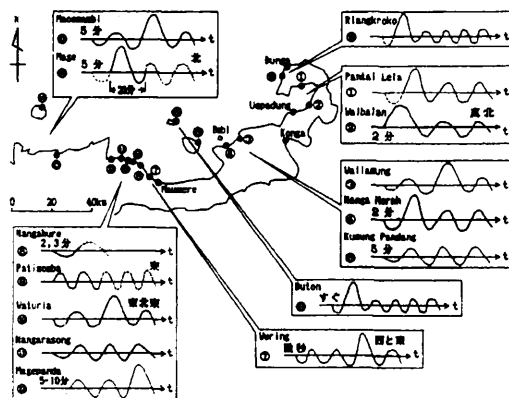


図-4 聞き取り調査から推定される津波初動

辺の他の地点と異なる。Waibalan と Uepadung の間で、ほぼ垂直に切り立った崖が新しく形成されており、沿岸部で地すべりが発生した可能性がある。湾奥であるにもかかわらず到達時間が短いこと、また、押し波から始まっている点を考えると、この地すべりがこの地域の津波初動に関連している可能性が高い。Waialung, Nanga Merah, Kusung Pandang (③, ④, ⑤) では、津波は引きから始まり、3 波来襲したと判断される。引きからの始まりは、この地域の地盤が 1 m 以下の沈下を生じたことに一致し、南東方向下りの低角逆断層による地盤変動沈降領域に対応する。Nangahure, Patisomba, Waturia, Nangarasong, Magepanda (⑧~⑫) でも、津波は引きから始まっている。ここでも地盤が 0.3~1.6 m 程度沈下したことに対応する。来襲波数は 3 波以上である。何度目が最大であったかは、地点により異なる。来襲方向はほぼ東北東と推定される。Maoesambi と Mage (⑬と⑭) では津波は引きから始まっているが、隆起したとされる地盤変動と矛盾している。

最大津波高が測定された Riangkroko の津波は 1 波目が最大で、5 波来襲したようである。初動が押し・引きのどちらであったかは、定かでない。Riangkroko で

の津波高は平均で18 mにも達しており、約5 km北部のBungaでも12 mの津波高が測定されている。この付近での海底勾配は水深200~1000 mで約1/5であり非常に急である。この海底地形だけで20 mに及ぶ津波高は説明出来ないが関連は大きいと思われる。

(b) 津波の高さ

図-3には各地での平均潮位からの津波高さも示す。津波来襲時の潮位は平均海面上約7 cmであり、図中の値は来襲時の津波の高さと考えてよい。ここでの分布の特徴は、Besar島を挟んで、東部と西部で平均高さが大きく違うことである。西部では5 m以下であるのに対し、東部では平均で5 mを上回り20 mに及ぶ地点もある。この分布特性は数値解析で改めて議論する。家屋や人の被害が大きかったWuring地区やBabi島での津波高さはそれほど大きくない。被害の大きさは、津波規模だけではなく、住居の強度・立地条件や人々の災害知識が関係しているようである。

(c) 推定される流速と流体力

Wuring地区で津波流速に関する貴重なデータを得られた。本地区のほぼ中心にモスクがあり、その壁面に図-5に示す様な津波の濁流による痕跡が残された。西側での痕跡は高く、津波が西側から来襲したものと推定される。モスクの存在により流速水頭が壁面で損失し位置水頭に置き換えられたと考え、Bernoulliの式と痕跡高さの差から流速値が2.69~3.57 m/sと推定される。さらに、モスクの平面形状は写真から判断して、ほぼ正方形と考えてよいので、抗力係数 C_d と判断して1程度を採用でき(椿, 1975)、モスクに働く抗力は8.01~10.8 tf (78.5~105.0 kN)となる。また、代表的住居である高床式住居の脚への流体力を算出すると、脚が幅0.15 mの正四角柱、浸水深は1 mとし、一軒(脚9本)当たり働く抗力は0.51~0.90 tf (4.59~8.10 kN)となる。この力により普通家屋のほとんどが破壊された。

(d) 地震に伴う現象

沿岸では液状化が見られ、構造物の多くが被害を受けた。また、北東部での地盤が比較的良好な場所においても海岸での地すべりが生じていた。震源が沿岸に近い位置にある場合、強地震動により、現在の日本の防潮堤・防波堤でも損傷を受ける可能性があり注意が必要である。

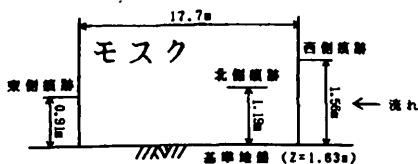


図-5 モスクでの痕跡高さ

3.3 各地での被害状況

(a) Riangkrokro

図-6に示すRiangkrokroは今回の津波で最大の津波高が測定された地点である。最大津波高は26.2 mで南側の小丘の途中に位置し、平均でも18 m程度に達した。東部の中でも飛び抜けて大きい。浸水域奥行長は約550 m、浸水域幅は図中のA点近くで約110 mである。ここには69家族が住み、その内137人が死亡している。激しい流れにより破壊された住居跡は一切確認できず、巨木の倒壊や1 m以上の径を有する珊瑚塊がA点近くで散見された。浸水域での来襲前の地形は判らないが、少なくとも津波後は、小河川域を除き平坦な緩い斜面であった。津波後の海岸線は、以前に比べて、4 m程度後退したとのことである。

(b) Babi島

図-7に示すBabi島は東西方向が直径約2.5 kmのほぼ円形をした小さな島である。北寄りに標高351 mの山を有する。南東側の対岸にはNanga Merahが位置する。周りを珊瑚礁が囲んでいるが、南側のその幅は狭い。島には2つの集落があり、東区にはキリスト教徒、西区にはイスラム教徒が住んでいた。東地区での津波高は4~5.6 mであり、西区では東寄りで3.6 m、西端部で7.2 mであった。浸水域は、両地区共に、平坦部の全域である。特に、西区では南北方向の浸水長が400 m以上に達していた。建物はほとんど全てが全壊し、コンクリート基礎のみが残っていた。

西区西端での流れは下草の倒伏方向から推して西から、集落中央部では家屋の残骸物の位置から南(沿岸)からと推定される。また、西区の東寄りでも下草の倒伏方向から、流れは南東方向と推定された。集落への津波は南から来襲したという証言もあり、痕跡と一致する。対岸のNanga Merah 辺りからの反射波であろうか。

Babi島では、今回の地震と津波で、一地域としてはMauwereに次いで、二番目に多い死者が出た。その数は263人(男:88人, 女:175人)に上り、ほとんどが津波によると思われる。人口が1093人(男:512人, 女:581

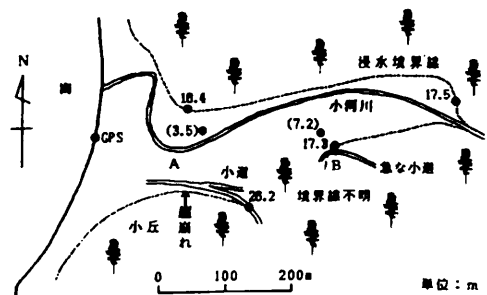


図-6 Riangkrokroでの浸水域

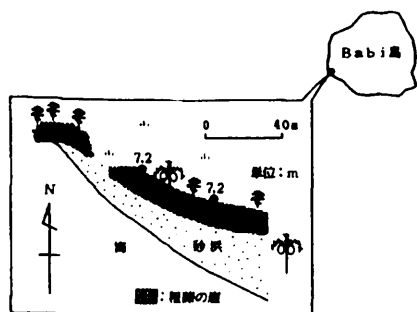


図-7 Babi 島での来襲状況

人)であるから、人口の24%、4人に1人が犠牲になったことになる。女性に至っては、30%が犠牲になったことになる。

(c) Wuring 地区

Wuring は、Maumere の中心街から北西方向約3kmに位置し、650m程度海に突き出た低平地(小半島)である。本地区の中心を道路が走っており、その地盤高さは1.3~2.1mであるが、この地区では高い所となっている。しかも同地区は、珊瑚礁などの浅瀬も先端部北方を除けば発達していない。そのため、浸水域はほぼ全域となり、先端からの浸水長は約670mであった。Babi 島と同様に低地にあった集落が津波に呑みこまれている。

津波高は3m程度で、最大でも3.2mであった。浸水深は場所により異なるが、1m強と考えればよい。本地区には、約1400人が住み、100人(87人という情報もある)が死亡したとのことである。ほとんどが津波によると思われる。小半島の付け根部には珊瑚礁が発達していない。そのためか、先端部より付け根部で津波による被害が著しい。津波は地震後数秒(すぐと言う意味である)と考える)で到達し、小さな引きから始まったとのことである。4波来襲し、1波目は北と東の両方向から、2波目は音を伴いながら流れが最も強く、3波目は波高が最も大きかったとのことである。傾斜いた家屋と打ち上げられた船の位置により、本地区での津波の卓越方向は北西からと判断される。これは推定されている津波波源位置を支持する結果である。

4. 津波数値解析

4.1 初期波源の推定

図-8にも調査結果の一部を載せているが、東部(Hading 湾を中心)と西部(Maumere を中心)では、津波の高さが大きく異なることがわかる。両者は Besar 島を挟んでおり流れの往来は小さい場所である。今の波源モデル(モデル A)では東部の記録を説明することは難しい(Imamura, 1992)。ここでは、東部の痕跡を説明するために、東西に2枚の断層に分け、東部の一枚のすべり量

を大きくするモデルを提案する。これは、東西にすべり量が異なる不均一モデルと考えてもよい。現在までの地震波の解析では、2つのイベント(断層破壊)が生じたと言うデータはない。すべり量の仮定が問題となるが、断層面積ここでは断層幅を半分にし、東断層を3倍とすることにより、地震モーメント不変であるとした。従って、断層長さが50km、幅25kmの断層を2枚仮定する事になり、それぞれ3.2mと9.6mのすべり量を持つものとした。

不均質モデルをBとし、このモデルの初期波形を図-9に示す。図-8でモデルAと比較すると明らかなように、モデルBによる Nebe 周辺や Hading 湾内で津波高さが増加している。記録値に対しモデルBの方がよい一致を示している。ただし、計算値が過小評価している箇所として、Uepadung, Waibalan, Riangkroko がある。いずれも10m以上の記録を出している場所である。不一致原因の1つが周期に関連していると考えられる。一方、モデルA,Bともに Hading 湾奥で計算値は増大しているが、痕跡記録にはそのような傾向は見られない。恐らく、数値計算では湾内振動が卓越したのに対し、実際は無かったと思われる。これから実際には断層幅がさらに短く、津波周期が短かったと考えられる。このことは地盤変動分布にも現れ、モデルA、モデルBでは Flores 東部に地盤の沈下は見られないが、間込みによる調査結果には液状化による以外の低下が現れている。今後、余

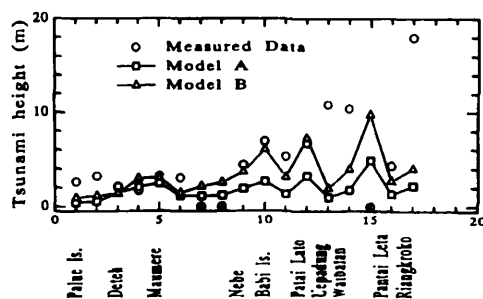


図-8 痕跡記録と数値計算結果の比較

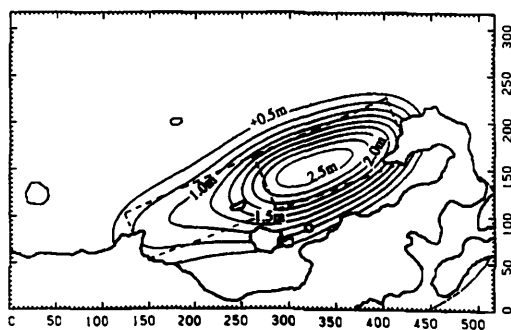


図-9 モデルBの初期波形

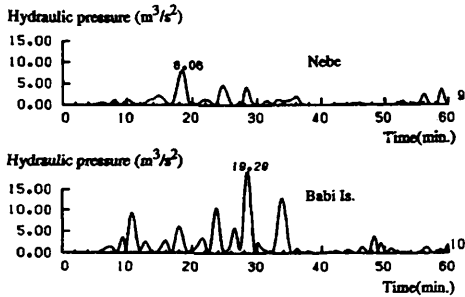


図-10 数値計算による Babi 島と Nebe での流体力

震域データの整理とともに再検討の必要がある。

4.2 Babi 島への来襲状況

Babi 島では津波の波高が局所的に大きいものを除き 5.0 m 程度であったにもかかわらず、1300 名いた集落が跡形もなく流されている。この被害の原因を探るため、Babi 島と対岸の Nebe で流体力を出力し、その結果を図-10 に示す。流体力は、冠水深高と流速の 2 乗の積と定義され、家屋被害に関連すると言われている(羽鳥, 1984)。Babi 島では最高 19.3 m³/s² を記録しており、しかも 4 波目の戻り流れ時に生じている。波源方向からくる直接波ではなく、Flores 島の対岸で生じた戻り流れによることが分かる。これは証言とも一致している。ここで、Wuring で実測された抗力と比べてみる。まず、本計算で得られた Wuring 地区での高床式住居への抗力は 0.56 tf であり、3.2 (C) で推定された値 (0.51~0.90 tf) と一致し、数値計算により良好に再現されていることが分かる。この計算値を Babi 島に適用すると、浸水高さを同じとしても高床式住居への抗力は 2.68 tf となり、Wuring 地区の 4 倍以上の値となる。

5. おわりに

現地で得られた調査結果を津波状況と被害を中心にま

とめた。特筆すべき点は、Riangkroko での 20 m にも及ぶ津波と Babi 島や Wuring 地区での被害である。そのほか、強震動により、液状化、地滑り、地盤沈下が生じていたことなどが挙げられる。津波数値計算を実施し、痕跡記録との比較から、異なるすべり量をもつ 2 つ低角逆断層が妥当であることを示した。ただし、Hading 湾奥での計算値の過大や 4 地点での過小であることを考えると、津波周期は湾内振動を起こさないようなさらに短周期であったことなどが予想される。また、Babi 島での水量変化から、その被災は対岸からの戻り流れであり、かなり大きな流体力(破壊力)を有することを示した。

謝辞：本研究の一部は文部省科研費総合研究 (A) (代表東大都司嘉宣) の援助を、調査計画では東北大学首藤伸夫教授の指導を得た。また、現地の調査ではインドネシア気象庁の協力を得た。著者の 1 名は土木学会学術交流基金より援助を受けた。本論文の公表にあたり小川記念基金の補助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 椿東一郎：水理学 II，森北出版，p. 272，1975。
- 羽鳥徳太郎(1984)：津波による家屋の被害率，地震研究所彙報，59，pp. 433-439。
- ESCAP/UNDRO (1991)：Earthquake disasters, assessment and management in Indonesia, Regional Symposium on the IDNDR, Bangkok, noted by Secretariat, 49 p.
- Hamilton, W. B. (1988)：Plate tectonics and island arcs, Geol. Soc. Amer. Bull., Vol. 100, pp. 1503-1527.
- Imamura, F. (1992)：Numerical Analysis for the 1992 Indonesia Flores Is. Tsunami, Preliminary report, 23 January.
- Silver, E. and D. Reed (1988)：Backthrusting in accretionary wedges, J. Geophy. Res., Vol. 93, No. B4, pp. 3116-3126.