

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 20 m 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

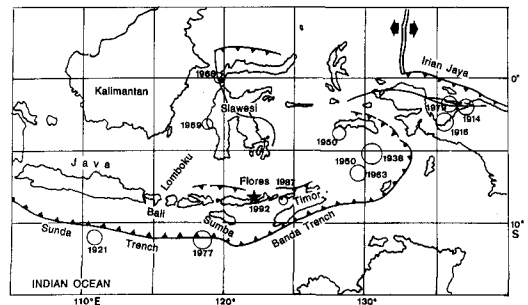
地球の変動帯の中でも、海洋プレートが他の大陸または海洋プレートの下に沈み込む場所、例えば太平洋西部の“島弧—海溝系” (Hamilton, 1988) や太平洋東部の“大陸縁弧—海溝系”で、最も激しく地震や火山噴火が発生している。Flores 地震も島弧—海溝系で生じた地震ではあるが、プレート間の地溝に沿った地震ではない。図 1 に示す、その震源位置はインド—オーストラリア・プレートのユーラシア・プレート下部への沈み込み (Java Trench) より約 100 km ユーラシア・プレート側であり、島弧背後での衝上断層 (Back arc thrust) によって生じた低角逆断層地震である。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} dynecm
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

の津波高は平均で 18 m に達しており、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。家屋や人的被害が大きかった 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)当りに働く抗力は 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。

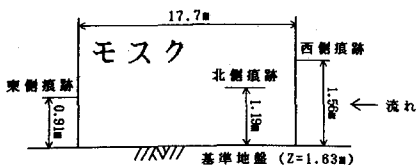


図-5 モスクでの痕跡高さ

3.3 各地での被害状況

(a) Riangkroko

図-6 に示す Riangkroko 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 Maumere 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

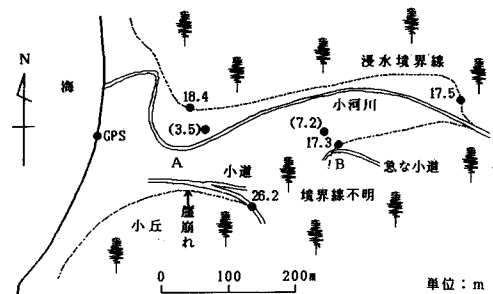


図-6 Riangkroko での浸水域

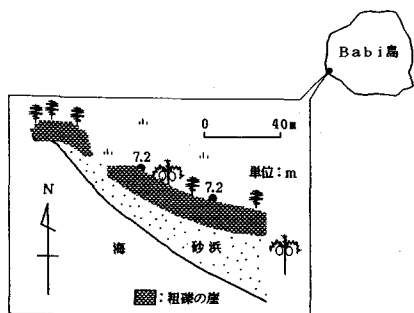


図-7 Babi 島での来襲状況

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)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、聞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

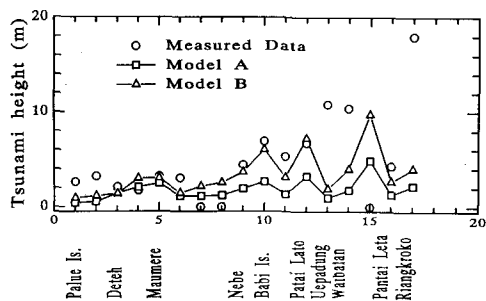


図-8 痕跡記録と数値計算結果の比較

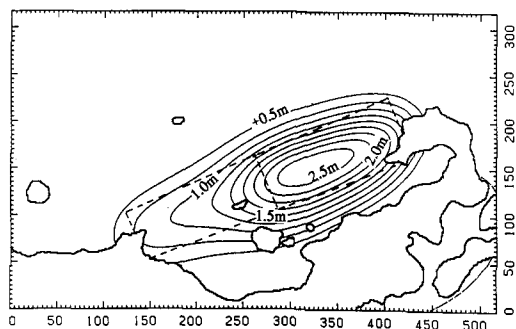


図-9 モデルBの初期波形

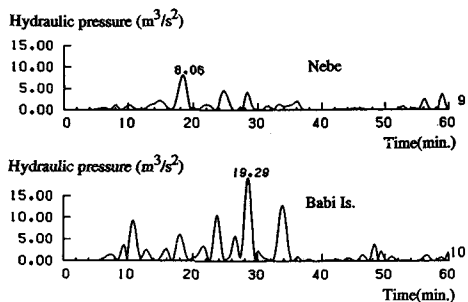


図-10 数値計算による Babi 島と Nebe での流体力

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 $19.3 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 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 ($0.51 \sim 0.90 \text{ tf}$) 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 島での水理量変化から、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, 地震研究所集報, 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, Geolog. 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.