

ビデオ画像による津波氾濫流速と現地調査による推定値との比較

榊山 勉¹⁾、松富英夫²⁾、都司嘉宣³⁾、村上嘉謙⁴⁾

1. はじめに

津波の氾濫流速は、家屋などに作用する流体力の評価(松富・首藤, 1994), また、避難計画の策定のために重要な情報である。この津波の氾濫流速に関しては、これまで現地調査において家屋などに残された上流側と下流側の津波の痕跡高さを調べ、これらの水位差による位置エネルギーが運動エネルギーと等しいとして推定されていることが多い。今回のスマトラ沖地震による津波に関して、海岸に襲撃する津波や陸上での流れの様子が多くのビデオで撮影され報道された。バンダアチェでは、大河のように流れる津波の氾濫の様子や通りに津波の先端が到達し始める段階から流れの様子がビデオで捉えられた。

著者らは、2005年1月中旬から末までインドネシアのバンダアチェを中心に津波被災調査を行った。この調査ではこれまでの津波被災調査に加えて、ビデオ画像の流れの解析のために、報道されたビデオ映像の流れの背景にある建物の大きさを測量した。ビデオ画像上の既知の距離を流れる漂流物の時間経過を解析して流れの速さを算出できる。これまで水位差から推定してきた津波の氾濫流速と比較してより精度良く評価できるものと考えられる。この結果を従来の津波の氾濫流速の推定値と比較する。

2. インドネシア津波調査の概要

日本からのインドネシアへの津波調査団

- 1) (財) 電力中央研究所 流体科学領域
- 2) 秋田大学 工学部
- 3) 東京大学 地震研究所
- 4) 関西電力(株) 土木建築室

(団長都司嘉宣, 東大地震研, 他6名)は、2005年1月17日に日本を発ち、現地でアメリカ人2名とインドネシア気象庁職員5名他と合流し総勢15名で構成され、1月20日から1月28日までバンダアチェを中心に津波による被災調査、津波の痕跡高さ、津波による堆積物の調査を行い、2月1日に帰国した。津波痕跡高さや被災調査の結果は、毎日速報として東大地震研の website に掲載された。

図-1はバンダアチェ市内のグレートモスクから南に約500mの位置にあるISKANDAR MUDA 通り(本編ではJL.を通りと訳す)沿いに設定した基準点 Point A から Point G を経て、Ulee Lheue 海岸に至る経路を示したものである。Ulee Lheue 海岸では約12m, Point G 近くの中学校で8.8m, Point A 近くでも約5mの痕跡高さを記録した。

図-1の●で示した2地点はそれぞれビデオにより津波の氾濫の様子が撮影された場所を示す。Putri 家は LHOKNGA 通り沿い近くにあり、海岸線から約2km, グレートモスクは MOHAMMAD JAM 通りに面し約3kmの内陸に位置する。

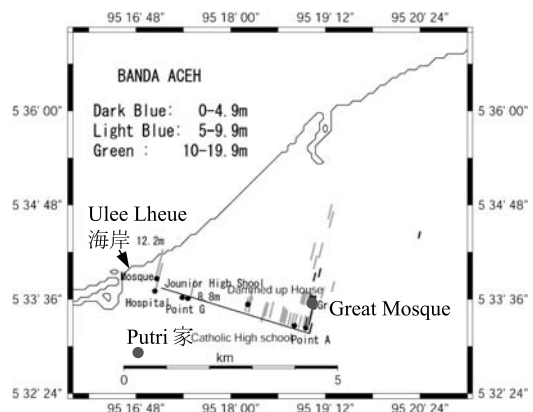


図-1 バンダアチェ市内のビデオ撮影地点(●の2地点)

3. ビデオ画像の解析方法

撮影されたビデオは、家の住人や放送局のスタッフが撮影したもので、実験などで流れ場の画像解析のために撮影されたものとは当然大きく撮影環境が異なる。そのため、撮影された画像から流れの解析に適した場面を抽出することにした。画像の歪みの補正は行えないが、痕跡高さの水位差から流速を推定する方法に比べれば、直接的に算出できる方法である。解析方法を以下に示す。

- 1) ビデオ画面がほぼ固定され、津波による流れで小型の漂流物の移動が確認できる時間帯を抽出した。
- 2) 漂流物が背景の家屋や壁などの近くを平行に近い状態で流れる時間帯を対象とした。
- 3) このような時間帯のビデオ画像を静止画像に変換した。
- 4) 背景に写る空間スケールが分かる家屋などを通過するフレーム数をカウントし、所要時間を算出した。
- 5) 通過する距離を所要時間で除して漂流物の速さとし、これを流れの速さとした。
- 6) 家が流される速さも求めることができたが、漂流物が大きいため、流れの速さとは区別した。
- 7) それぞれのビデオ解析結果の精度について触れることにした。

4. ビデオ画像解析結果

対象としたビデオ画像は以下の 2 本である。

- 1) Putri 家で撮影されたビデオ：配信時間約 2 分 30 秒
- 2) 市内のグレートモスクで撮影された MOHAMMAD JAM 通りの津波のビデオ：配信時間約 2 分 20 秒

4.1 Putri 家で撮影されたビデオ

(a) 赤い屋根の家に沿う流れ

図—2 に示す赤い屋根の家を通過する流れを対象に漂流物の移動を求めた。現地では図

—2 に示す赤い屋根の右端にある白い三角形の鉛直線から左端までの距離を測定し、基準とする距離として 6.9 m を記録した。また、Putir 家の地盤高さを基準とした下流側の痕跡高さは 3.77 m である。

図—4 (a) にこの家を通りしはじめる漂流物の静止画像 (フレーム no1258) を、図—4 (b) に通過し終わった時の静止画像 (フレーム no1295) を示す。1 秒間に 29.97 フレームでビデオ画像を再生しているので、フレーム間の経過時間は 0.0334s である。

$$19:19:02 \text{ frame } 1258 \text{ から } 19:20:08 \text{ frame } 1295 \\ 6.9 / \{ (1295 - 1258) * 0.0334 \} = 6.9 / (37 * 0.0334) \\ = 6.9 / 1.236 = 5.6 \text{ m/s}$$

以上の結果から、流速 5.6m/s を得た。

家の幅 6.9 m を通過する所要時間は 1.267s である。通過したとする画面の選択が 1 コマずれたとすると、

$$6.9 / (38 * 0.0334) = 5.4 \text{ m/s}, 6.9 / (36 * 0.0334) \\ = 5.7 \text{ m/s} \text{ となるので、} -0.2 \text{ m/s} \text{ から } 0.1 \text{ m/s} \text{ 変} \\ \text{化し、} 5.6 \text{ m/s} \text{ に対して } -10\% \text{ から } 5\% \text{ の誤差} \\ \text{となる。}$$

(b) 家が流される速度

同じビデオには、図—3 に示す黄緑色の家の前を別の家が流されていく様子が冒頭に記録されていた。図—5 に流される家の屋根の前側の頂点が図—3 の家の半幅を通過しはじめる画像と通過し終わった時の画像を示す。同様に、図—6 に流される家の後側の屋根の頂点が通過しはじめる画像と通過し終わる画像を示した。

図—5 の結果 (294frame から 309frame)

$$3.2 / \{ (309 - 294) * 0.0334 \} = 3.2 / 0.501 = 6.4 \text{ m/s}$$

図—6 の結果 (307frame から 323frame)

$$3.2 / \{ (323 - 307) * 0.0334 \} = 3.2 / 0.534 = 6.0 \text{ m/s}$$

上記の値の平均値として 6.2m/s を採用する。この値は、(a) の赤い家の屋根の前の流速 5.6m/s と近い値であるが、実際には家のよう



図-2 ビデオに撮影された家屋の寸法-その1-

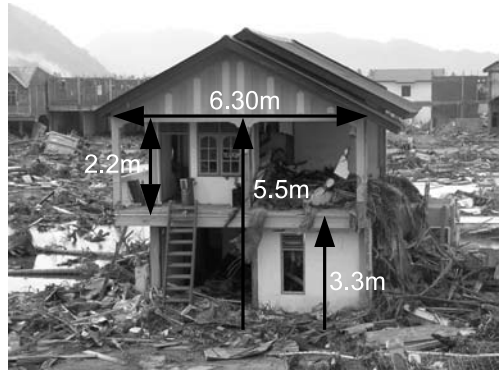


図-3 ビデオに撮影された家屋の寸法-その2-



(a) 漂流物が通過し始める画像



(b) 漂流物が通過し終わる画像

図-4 流れの大きさを求める対象とした画面

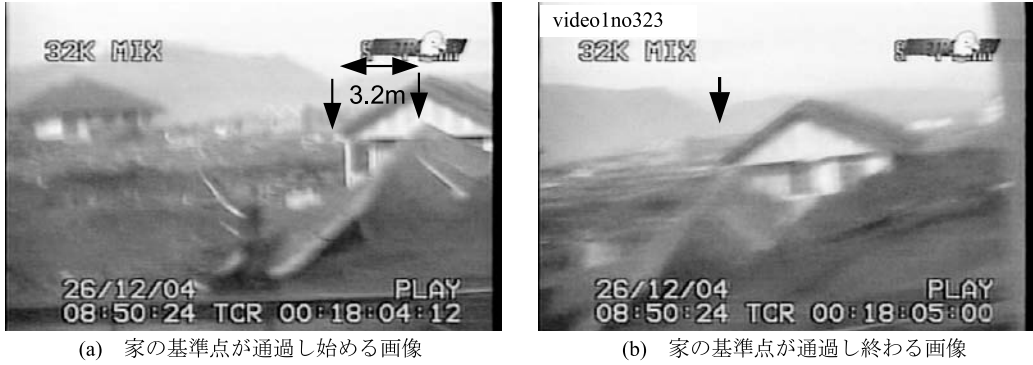


(a) 家の基準点が通過し始める画像



(b) 家の基準点が通過し終わる画像

図-5 家が流される速さを求める対象とした画面-1-



(a) 家の基準点が通過し始める画像

(b) 家の基準点が通過し終わる画像

図一六 家が流される速さを求める対象とした画面-2-



(a) 上流側の痕跡高さ

(b) 下流側の痕跡高さ

図一七 ビデオが撮影された Putri 家の痕跡高さ

な大きな物体の流れる速さは周囲の流体の流速より遅くなる。家が流されている背後にある図一三の黄緑色の家と Putri 家との距離は約 28 m で、図一四の赤い屋根の家と Putri 家との距離は約 60 m である。空間的スケールから流速に大きな変化が生じることは考えられにくく、画像の大きさの違いによる解像度の影響と考えられる。

(c) 水位差から推定した流速との比較

図一四の赤い屋根の家では上流側の痕跡高さを確認しなかった。図一四のビデオ画像では上流側と下流側の有意な水位差は認められ

ない。一方、Putri 家では図一七に示すように、上流側の痕跡高さは 5.60m、下流側の痕跡高さは 3.9m であった。下流側の痕跡高さとして、赤い屋根の家の 3.77m も使えるので、下流の痕跡は 2 個のデータを得たことになる。それぞれの痕跡高さの差から、流速として 5.8m/s、6.0m/s を得る。前者の Putri 家の痕跡高さの水位差から推定した流速値である 5.8m/s はビデオから求めた流速にほぼ一致している。

$$Dh = 5.61\text{m} - 3.9\text{m} = 1.71\text{m}, \quad u = \sqrt{2gDh} = 5.8\text{m/s}$$

$$Dh = 5.61\text{m} - 3.77\text{m} = 1.84\text{m}, \quad u = \sqrt{2gDh} = 6.0\text{m/s}$$

赤い屋根の家の痕跡高さから浸水深（地盤から津波痕跡までの高さ）は、3.77mであるので、これらからフルード数を算出すると

$$Fr = u / \sqrt{gh} = 5.6 / \sqrt{9.8 \times 3.77} = 0.92$$

を得る。流れは常流であり、ビデオで見られる流れの様子と一致する。

4.2 市内のグレートモスクから撮影された MOHAMMAD JAM 通りの津波のビデオ

図一8 (a) に対象となる地点をグレートモスクの4階から撮影した写真を示す。写真の手前側がグレートモスクの敷地になる。津波の氾濫流は、最初交差点の右上の方向から到達し、その後、交差点の左上の方向からの流れが交差点で合流し、写真の左下の通りへと進んだ。この交差点に集まる通りの幅が異なるように見えるのは、グレートモスクの反対側の建物（役所らしきものの部局）の柵が壊されたためである。

MOHAMMAD JAM 通りのビデオ画像から、流れを算出できる映像を選んだ結果、対象となる背景のスケールを図一8 (b) に示す。赤字の看板 Nasional のある2階建ての商店(?)を背景にした流れの映像が約5秒間続いていた。そこで、3本の柱の間の距離6.6mを通過する3個の漂流物の移動をビデオ画像で確認した。それらの結果を図一9、一10、一11に

示す。これらから漂流物の速さを求めると以下の値を得る。

漂流物1の結果 (frame 2000 から 2040)

$$6.6 / \{ (2040 - 2000) * 0.0334 \} = 6.6 / 1.336 = 4.9 \text{ m/s}$$

漂流物2の結果 (frame 2042 から 2080)

$$6.6 / \{ (2080 - 2042) * 0.0334 \} = 6.6 / 1.269 = 5.2 \text{ m/s}$$

漂流物3の結果 (frame 2074 から 2110)

$$6.6 / \{ (2110 - 2074) * 0.0334 \} = 6.6 / 1.202 = 5.5 \text{ m/s}$$

以上の平均値として、流速 (4.9+5.2+5.5)

/3=5.2m/sを採用する。誤差は約15%である。

図一10 (b) に示すように1階の屋根から水面までの距離を画像より算出し、測定した地面から屋根までの高さから水深を逆算すると浸水深として約1.6mを得る。したがって、この流れのフルード数は1.3となる。この流れは射流である。ただし、この交差点での流れは、単純ではない。2方向から流れが合流する位置である。この流れの画面では、左上の通りには車がみられ流れが遮断されているようにみられる。さらに、流れに抵抗して留まる障害物があるようで、ドラム缶などの漂流物が停滞していることがみられた。映像によると、この下流は射流にはみえない。

流速を推定するための痕跡高さの組み合わせはこのような密集した地点では適用できないので、2.1のように現地調査に基づく流速の推定値との比較はできない。



(a) グレートモスクから見た通りの状況



(b) 流れの背景の建物の寸法

図一8 グレートモスク前の通りの津波氾濫流速の算出

5. 最後に

最も単純な原理に基づく津波の氾濫流速の推定方法による流れの値と、ビデオ映像から得られた流れの値は、ほぼ一致したといえる。この結果は、本調査を調査目的に挙げた第一著者の予想に反した結果であった。比較できたデータが 1 点だけということもあり、この結果をもってこれまでの推定方法が妥当であると結論付けるのは困難であると考ええる。編集されたビデオによると、少なくとも 2004/12/26 の地震発生現地時刻 07:58 の約 1 時間後の 08:50:18 から 09:18:38 まで録画されている。この間に、09:04:30 には引き波の様子が、09:16:17 には碎波する津波が撮影されている。オリジナルの映像を入手し、さらに解析を進めることでバンダアチェ市内に來襲した津波の実態を解明することができるものと考えられる。

今回得られた流れの速さはともに、約 5m/s で、時速 18km/h に相当する。少し速い自転車の速さになり、到底人間が逃げ切れる速さではない。大半の家屋が破壊された Putri 家の周辺には、この流れのなかで残っている家屋がある。破壊された家屋が約 5m/s よりも速い津波の先端の流れによる衝撃的な流体力によるものである可能性が考えられる。

現在日本では、津波避難ビルの設計法が検討されている(岡田ら,2004)。この検討では、護岸に遡上した非分裂波と分裂波による建物に作用する流体力に関する水理模型実験によ

り測定された波圧分布(朝倉ら,2000)が採用されている。現地調査結果から推定される流体力と実験結果の流体力との比較が今後の課題と考える。

謝 辞

本調査は、都司東大地震研助教授を調査団長とし、インドネシア気象庁の協力のもとで実施されたものである。調査費用は、科学研究費補助金(特別研究促進費)「2004年12月スマトラ沖地震津波災害の全体像の解明」(研究代表者:京都大学防災研究所河田恵昭,課題番号:16800055)から充てられた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松富英夫, 首藤伸夫: 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第 41 卷, 1994, pp.246-250.
- 2) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 卷, 2000, pp.911-915.
- 3) 岡田恒男, 菅野 忠, 石川忠志, 扇 丈朗, 高井茂光, 浜辺千佐子, 津波に対する建築物の構造設計法について, 一その 2: 設計法(案)一, ビルディングレター, 2004, 11 月, pp.1-8.



(a) 通過開始時の画面



(b) 通過終了時の画面

図一 九 漂流物1の速さから流れの速さを算出



(a) 通過開始時の画面



(b) 通過終了時の画面

図一 十 漂流物2の速さから流れの速さを算出



(a) 通過開始時の画面



(b) 通過終了時の画面

図一 十一 漂流物3の速さから流れの速さを算出