

2004 年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の 津波氾濫解析と被害評価

大家隆行¹・越村俊一²・柳澤英明³・今村文彦⁴

インドネシア, バンダ・アチェ市街地を対象として, 2004 年インド洋大津波の再現計算を実施し, 被害評価を行った。得られた数値解析結果に基づき, アチェ市の行政区画毎の家屋・人的被害実績を用いて GIS 分析を行った結果, アチェ市では津波浸水深が 2 m を超えると甚大な建物被害が発生し始め, 人的被害についても浸水深 2-3 m を境に増大することが分かった。最後に, アチェ市の人口統計データを用いて, 津波の氾濫過程に応じた津波影響人口の時間的推移を求めた結果, 今回の津波浸水による人的被害発生リスクに曝された住民は, 市全体の人口の約半数にあたることが分かった。

1. はじめに

2004 年に発生したインド洋大津波は, 20 万人を超える多数の人命を奪い, 各地で生活の基盤を破壊するなど, その影響は震源地の周辺地域のみならずインド洋各国沿岸に波及した。特に, インドネシア・スマトラ島北部を襲った津波は, バンダ・アチェ市街地 (以下, アチェ市) に壊滅的な被害をもたらした。津波が市街地に氾濫する現象が映像として克明に記録されたのはアチェ市が初めてであり, 記録された映像から流速を推測する試みが松富ら (2005) によって行われている。しかし, これはわずか 2 地点のみの解析であり, 市街地全体での津波挙動を知ることは難しい。また, 現地での被害調査データも数多く報告されているが, 浸水域内における人的・物的被害の発生原因や津波外力と被害の関係など, 依然として未解明な部分が多い。

そこで本研究では, まず越村ら (2005) による断層モデルを基本として, 津波波源に近いタイ・インドネシアで得られた検潮記録と, 人工衛星 Jason1 が捉えた空間波形を組み合わせて合理的な断層モデルを同定する。さらに, アチェ市街地において津波氾濫の再現を数値解析により実施し, 同定した断層モデルのアチェ市街地での妥当性を検証する。最後に, 現地で報告された被害実績から, 被害の発生過程を津波高さと人的・家屋被害の関連で明らかにする。

2. 数値計算条件

図-1 に示すスマトラ島, タイ西部を中心とした領域を, 各検潮記録との比較計算及びアチェ市街地における

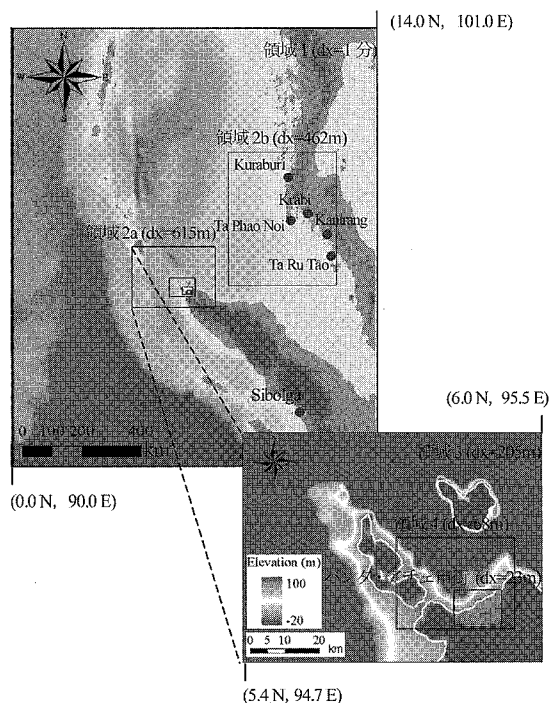


図-1 解析対象領域

解析に用いる。地形データは, 外洋部に英国 General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) から得た 1 分メッシュデータを用い, 沿岸部に近づくにつれ地形の解像度を上げ, アチェ市街地では津波後に行ったレーザ測量の結果を用いて, 23 m のメッシュデータを新たに作成した。また, Jason1 による空間波形との比較には, 米国 2-Minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2) を地形データに用いた。外洋を伝播する津波の数値計算には地球座標系の線形長波理論から得られる支配方程式を適用し, その後の領域では直交座標系の非線形長波理論から得られる支配方程式を用いて接続計算を行う。差分化には Staggered Leap Frog 法を, 断層モデルによる地盤変動量の計算には Mansinha・Smylie (1971) 法を

1 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
2 正 会 員 博(工) 東北大学助教授 大学院工学研究科災害制御研究センター
3 学生会員 修(工) 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
4 正 会 員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科災害制御研究センター

用いている。

3. 断層モデルの同定

(1) 断層パラメータの検討

越村ら (2005) による断層パラメータを基として、スマトラ島、タイ西岸の津波来襲状況を説明できる津波発生モデルを同定する。具体的には、計算波形と津波波源に近いタイ、インドネシアの6ヶ所の検潮所での観測津波波形と人工衛星 Jason1 の海面高度計が捕らえた空間波形を数値解析波形と比較し、最適な断層モデルを試行錯誤的に決定する。断層パラメータは、①位置、走向、②すべり量を未知量とし、その他のパラメータは越村らのモデルの値を用いた。①については、主に各検潮記録と Jason1 による空間波形を、②については、八木 (2005) によるすべり量分布を、それぞれ考慮して決定した。表-1、図-2 に本断層モデルの断層パラメータ及び初期水位変動量を示す。また、本断層モデルの地震モーメント M_0 とモーメントマグニチュード M_w は、それぞれ $4.70 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 、9.05 となるが、これはハーバード大学から発表された値である $4.0 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ 、9.0 と

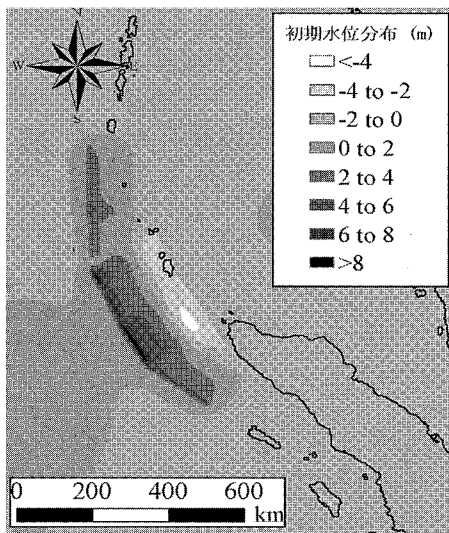
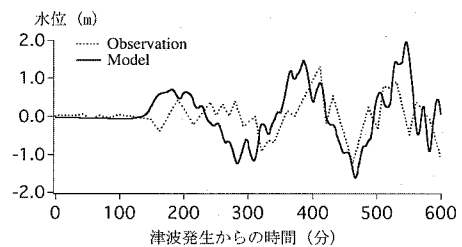


図-2 本断層モデルによる初期水位分布

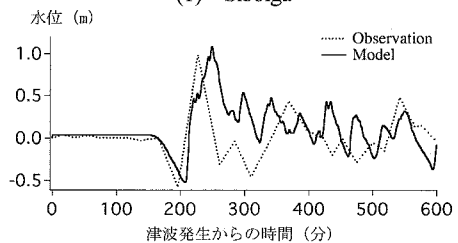
ほぼ一致する。

(2) 検潮記録との比較

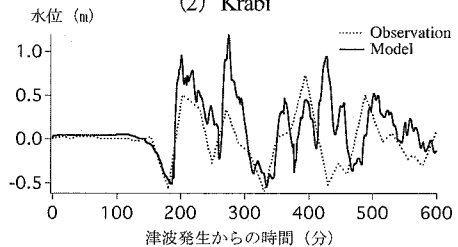
再現時間を10時間とし、同定した断層モデルを用いて、各検潮所で観測された波形と解析結果を比較する。図-3 に代表的な3点の時系列波形を示す。インドネシア Sibolga では、両者の波形は良く一致するが、やや解析結果の方が早く到達している。これは南側断層位置の誤差及び Sibolga の計算に用いた、1分メッシュ地形データの影響が考えられる。また、タイ Krabi, Kuraburi においては、第二波以降にずれが見られるものの、津波の初動に関しては検潮記録と解析結果に良好な整合性が見られた。なお、用いた観測波形には、Sibolga で Mer-



(1) Sibolga



(2) Krabi



(3) Kuraburi

図-3 検潮記録と計算結果の比較

表-1 本研究で得られた2004年インド洋大津波の断層モデル

セグメント	すべり量	断層長さ	断層幅	断層深さ	走向	傾斜角	すべり角	断層位置	
断層	D(m)	L(km)	W(km)	H(km)	$\theta(^{\circ})$	DL($^{\circ}$)	RD($^{\circ}$)	XG($^{\circ}$ E)	YG($^{\circ}$ N)
1	11	200	150	10	305	15	90	94.78	3.41
2	20	125	150	10	329	15	90	93.32	4.48
3	15	125	150	10	335	15	90	92.74	5.45
4	20	55	150	10	335	15	90	92.22	6.50
5	8	145	150	10	358	15	90	91.99	7.26
6	8	200	150	10	358	15	90	91.96	8.40

rifield ら (2005) が, Krabi, Kuraburi で Siripong ら (2005) が実際の波形から津波成分のみを抜き出したものを用いた。

(3) Jason1 の海面高度計による空間波形との比較

Jason1 により捉えられた空間波形と, 本断層モデルにより得られた波形の比較を図-4 に示す。北緯 5 度から 20 度までの計算水位と観測値の整合性は良好であり, 北方向の伝播状況は本モデルではほぼ再現可能であるが, 赤道付近で両者の誤差が大きくなる点があり, 南方向の伝播状況は, 北側に比べ整合性が低くなる結果となった。検潮記録との比較結果を考慮すると, 今後, 特に南側断層の位置, 走向には検討の余地があると考えられる。

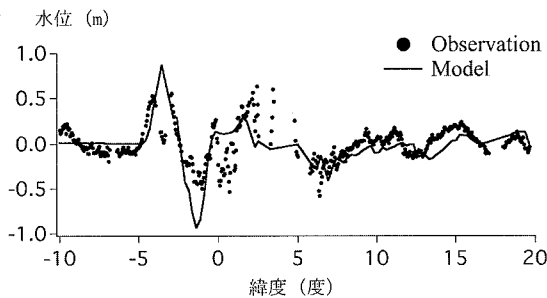


図-4 海面高度計データと計算結果の比較

表-2 遡上計算に用いたアチェ市街の粗度係数値

対象領域	本研究で与えた粗度係数
高密度居住地区	0.100
居住地区	0.060
森林域	0.030
田畑	0.020
海域・河川域	0.025

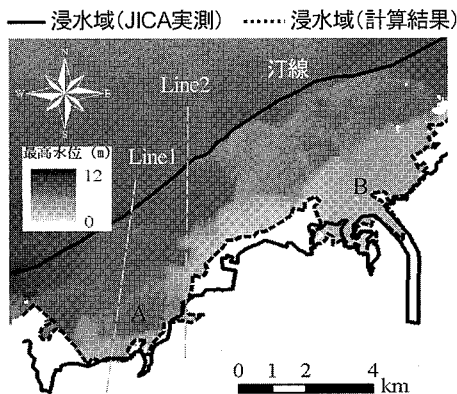


図-5 最高水位分布

4. アチェ市街地における遡上計算

(1) 浸水域の比較

再現時間を 3 時間とし, 非線形長波理論に基づいてアチェ市の津波氾濫計算を実施して, 本断層モデルの妥当性を現地調査により得られた津波浸水深分布との比較により検証する。市街地氾濫計算においては, 高解像度衛星画像 (IKONOS) を用いて, 土地利用状況を高密度居住区域, 居住区域, 森林域, 田畑, 海域・河川域に分類し, 状況に応じた粗度係数を小谷ら (1998) に基づいて与えた (表-2)。図-5 に数値計算と実測による浸水域の範囲を示す。計算から得られた浸水域において, A 点及び B 点付近は汀線から約 4,000 m の地点まで遡上しており, 実測の浸水域と一致している。しかし, 高密度住宅地として大きい粗度を与えた浸水域の中央部分では, やや実測よりも遡上範囲が狭い。これは粗度の与え方と, 津波を水のみで完全な流体と仮定して計算したことによる原因がある。計算では高密度住宅地での粗度係数を $n=0.1$ で一律に与えているが, 実際には建物が破壊され, 漂流物となって流されることにより, 粗度が変化すると考えられる。今回のような市街地での津波被害を評価する上で, 漂流物の影響をどのように取り扱うかが, 今後の課題である。

(2) 最高水位の比較

図-5 に示した Line1,2 に沿って, 計算で得られた最高水位と, 都司ら (2005) が行った実測結果の比較を行った。図-6 に示した結果より, 両者の値はほぼ一致す

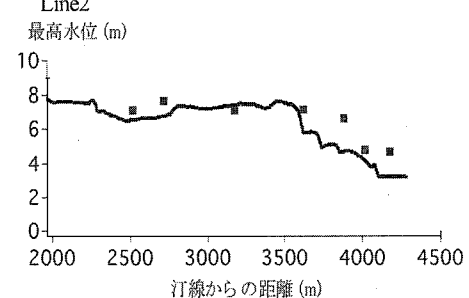
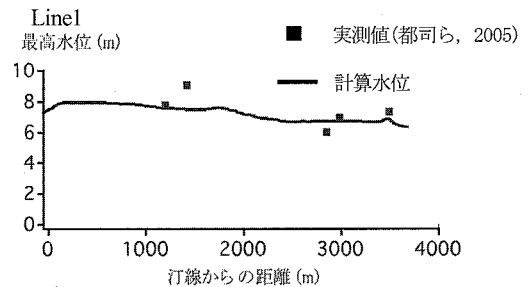


図-6 最高水位比較

ることが確かめられた。なお、Line2において、汀線からの距離が3,500 mを超えると計算水位は実測値より低くなる傾向があるが、これはLine2が高密度住宅地を通るためであり、前述の粗度を一律で表現している影響が現れているものと考えられる。以上の結果と3章での検証により、本研究で同定したモデルは、タイ・インドネシアに伝播した津波を説明可能であることが確かめられた。

5. アチェ市街地での被害評価

(1) 家屋被害評価

被災後に得られたアチェ市の行政区単位の被害データ(JICA, 2005)によると数値解析結果を用いてGIS上で分析を実施し、市街地の津波浸水深と被害程度の間係を求める。浸水深と家屋被害実績をそれぞれの軸に取り、整理したグラフを図-7に示す。ここで、流失大とは1セル(100 m×100 mの評価単位区域)中の家屋が85~100%流出した状態であり、流失中、流失小もそれぞれ50~80%, 0~50%流出した状態を表す。1セル中には3~7件程度の家屋が存在する。グラフから、アチェ市では津波浸水深が2 mを超えると甚大な建物被害が発生し始め、4 mを超えると大破に至ることが分かる。評価手法が異なるため直接比較は出来ないが、松富・首藤(1994)が行った調査によれば、日本で発生した過去の津波被害において、石・煉瓦・コンクリートブロック造の家屋は浸水深が7 mを超えると大破に至るとある。現地に存在した建物の多くはコンクリートブロック構造物であるが、アチェ市の建造物は日本の建造物に比べ、津波に対して構造的に脆弱な可能性が高いことが分かった。

(2) 人的被害評価

家屋被害と同様に、津波浸水深と行政区画毎の人的被害実績、及び死亡率をそれぞれの軸に取り整理したグラフを図-8に示す。人的被害は死亡者と行方不明者の合計とする。また、死亡率は浸水深毎の人口で算出するものとし、住民が津波発生当時、住民登録をしている地区

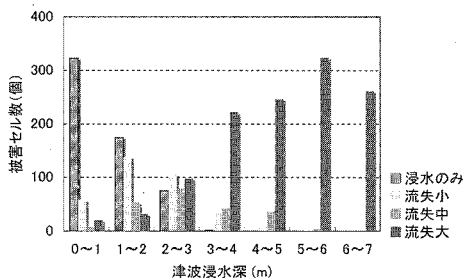


図-7 浸水深-建物被害関係

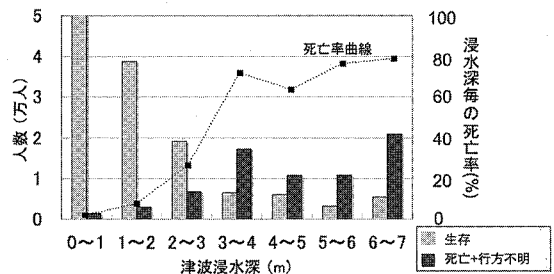


図-8 浸水深-人的被害関係

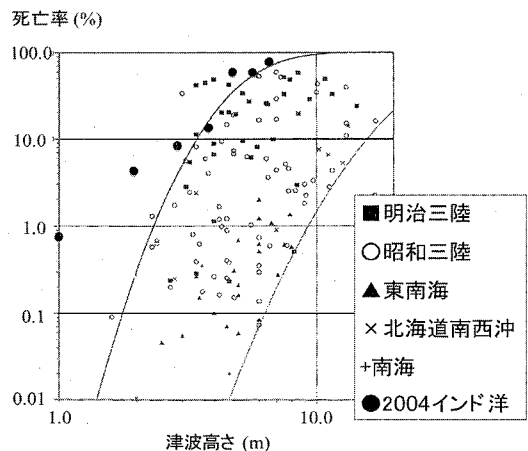


図-9 津波高さ-死亡率関係 (河田(1997)に加筆)

にいたものとして計算した。グラフより、浸水深2~3 mをしきい値として人的被害が増大していることが確認できる。さらに、図-9に示した河田(1997)による過去の日本での津波高さ-死亡率関係図と、アチェ市街地での津波高さ-死亡率関係図を重ね合わせたグラフより、アチェ市街地での人的被害は明治三陸地震での被害と同程度であると確認された。特に、津波高さが1~2 mの地点で高い死亡率を示しており、この原因として、強い流れや漂流物の影響が考えられる。また、アチェ市では、防災教育などは行われておらず、津波の存在を知らない人がほとんどであった。従って、数値計算より得られた傾向について、より詳しい検討を行えば、予備知識の無い人々の津波に対する脆弱性を示すことも可能と成り得る。

(3) 津波影響人口の時系列推移

予想浸水域内に含まれる人口を津波影響人口と定義し、津波浸水域の時間的拡がりや被災前の人口統計データを用いて、市街地内において津波に曝される人口の逐次推計を試みる。津波影響人口は、行政区画の面積に占める浸水域の割合で、その行政区画に居住していた人口を案

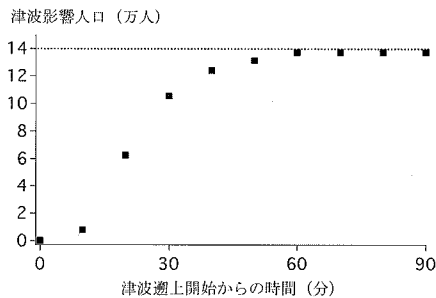


図-10 津波影響人口の時間推移

分することで求めた。その結果、津波浸水による人的被害発生リスクに曝された住民は約14万人となり、これは市全体の人口(267,845人)の約半数にあたるということが分かった。図-10に津波暴露人口の時間的推移を示す。図より、インド洋沿岸に津波警報ネットワークが整備されていた場合の人的被害の軽減効果を、津波到達時間や情報伝達速度等との関連で論じることが可能である。

6. 結 論

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 津波観測記録、人工衛星 Jason1 の海面高度計の空間波形を用いて、タイ・インドネシアの津波を説明する断層モデルを得た。
- (2) アチェ市街地の詳細な津波氾濫解析を行った。解析結果と現地調査結果にはよい整合性が得られ、アチェ市街地の津波氾濫過程の再現に初めて成功した。
- (3) アチェ市の行政区毎の人的・家屋被害実績と数値解析結果を用いた GIS 上での分析により、市街地の津波浸水深と建物・人的被害程度との関係を明らかにした。これにより、アチェ市では津波浸水深が2mを超えると甚大な建物被害が発生し始め、4mを超えると大破に至ることが分かった。市街地に存在していた建物の多くはコンクリートブロック造であり、松富・首藤が調査した我が国のコンクリート造の建物の破壊津波強度よりも脆弱な可能性が高いことが分かった。
- (4) 津波浸水深と人的被害の関係を求めた結果、アチェ市の津波による人的被害は浸水深2~3mを境に増大することが分かった。
- (5) 河田による過去の日本での津波高さ-死亡率関係図と、アチェ市街地での関係図を重ね合わせた結果、アチェ市街地での人的被害は明治三陸地震での被害と同程度であることが分かった。
- (6) アチェ市の人口統計データを用いて、津波の氾濫過程に応じた津波影響人口の時間的推移を求めた。その結

果、津波浸水による人的被害発生リスクに曝された住民は約14万人となり、これは市全体の人口の約半数にあたるということが分かった。

謝辞：本研究を行うに際し、JICA より貴重な資料を提供頂いた。また、研究の一部は振興調整費、科学研究費補助金基盤(A)(代表：今村文彦、課題番号：18201033)より行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 河田恵昭(1997)：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学，Vol.16，No.1，pp. 3-13.
- 京都大学防災研究所(2005)：インドネシア調査団の津波測定結果ならびに定時報告，<http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/Sumatra/surveylog/erindex.htm>，参照 2006-05-15.
- 越村俊一・高島正典・鈴木進吾・林春男・今村文彦・河田恵昭(2005)：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャル評価，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1366-1370.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998)：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp. 356-360.
- 松富英夫・樺山勉・Sindhu Nugroho・都司嘉宜・谷岡勇市郎・西村裕一・鎌滝孝信・村上嘉兼・松山昌史・栗塚一範(2005)：Banda Aceh と周辺における 2004 年インド洋津波と被害想定から見た課題，海岸工学論文集，第52巻，pp. 1366-1370.
- 松富英夫・首藤伸夫(1994)：津波の浸水深，流速と家屋被害，海岸工学論文集，第41巻，pp. 246-250.
- 八木勇治(2005)：2004年12月26日北スマトラ沖で発生した地震について，URL:<http://iisee.kenken.go.jp/staff/yagi-/eq/Sumatra2004/Sumatra2004-j.html>，参照 2006-01-25.
- General Bathymetric Chart of the Oceans URL:<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/gebco.html>，参照 2006-03-02.
- Harvard University (2005)：Harvard Seismology CMT Catalog Search，<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>，参照 2006-05-15.
- JICA (2005)：THE STUDY ON THE URGENT REHABILITATION AND RECONSTRUCTION SUPPORT PROGRAM FOR ACEH PROVINCE AND AFFECTED AREAS IN NORTH SUMATRA
- Merrifield, M.A., Y.L.Firing, T.Aarup, W.Agricole, G.Brundrit (2005)：Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL.32, L09603.
- Mansinha, L. and D.E.Smylie. (1971)：The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.
- National Geophysical Data Center (2005)：2-Minute Gridded Global Relief Data，<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/01mgg04.html>，参照 2006-04-09.
- Siripong, A., B. H. Choi, C. Vichiencharoen, S. Yumuang and N. Sawangphol (2005)：THE CHANGING COASTLINE ON THE ANDAMAN SEACOASTS OF THAILAND FROM INDIAN OCEAN TSUNAMI, Sumatra Tsunami on 26th December 2004, Special Asia Tsunami Session at APAC 2005, pp.21-31.