

衛星画像から判明した Indonesia 国 Banda Aceh 市街地の 2004 年インド洋津波による流失家屋の分布

行谷佑一¹・都司嘉宣²

2004 年インド洋地震津波により Indonesia 国 Banda Aceh 市内では津波により多くの家屋が流失した。この地域では津波来襲の前と後で衛星画像が撮影されており、それらは家屋の一軒一軒を区別できるほどの解像度を有している。そこで、本研究ではこれらの画像を用いて、家屋が流失したか否かを一軒一軒について調査し、ピンポイント的な流失家屋分布図を得た。この結果、海岸に近い地域はほとんどの家屋が流失したが、2.5 km~3 km 内陸のところで流失を免れた家屋が急激に増加することがわかった。また津波浸水深の現地調査結果を用いると、3 m 程度の浸水深を境に流失率が平均値で 15 % から 85 % へ激的に変化することがわかった。

1. はじめに

2004 年インド洋地震による津波は、インド洋沿岸部で甚大な被害をもたらした。とくに、この津波の最大被災都市である、Indonesia 国 Sumatra 島北部の Banda Aceh 市では周知の通り多くの家屋流失が発生した。この Banda Aceh 市周辺の現地における被害調査や津波高調査については、すでに多くの報告がある（たとえば、Tsuji 他, 2006；柴山他, 2005；松富他, 2005 など）。Tsuji 他 (2006) によれば、Banda Aceh 北部海岸 (Ulee Lheue) で高さ 12 m (平均海面上) の津波が襲い、海岸部から 2 km 内陸に入った市内中心部でも高さ 7 m 程度 (平均海面上) の津波が襲ったことが報告されている。また、松富他 (2005) は北部海岸から約 0.9 km 内陸のところで家屋が 1 軒のみ残り周辺の家屋はほとんど流失していると判断できる写真を提供している。

ところで、津波による家屋流失を家屋一軒一軒調査することは、陸上遡上の津波のふるまいを知る上で一つの手助けとなる。また、家屋の流失率と津波の浸水深（あるいは浸水深）や流速との関係を知るためにも必要なことである。しかしながら、家屋が津波により流失したか否かを詳細に知ることが、今回の 2004 年インド洋地震津波においては限界がある。その理由として、①現地調査団のほとんどが外国人を中心とする調査団であったため現地の土地勘に強いとは言えない、②家屋流失域が広大でありなおかつ調査時間が限られているために家屋一軒一軒が流失したか否かを調査することはスケジュール的に難しい、③たとえ現地の行政などから集落単位の流失状況報告を入手したとしても、すでに統計量となっていて流失家屋のピンポイント的な位置を把握することは難しいのと同時に、その流失状況報告が定義する行政区画

が書かれた地図が入手しにくい、などが挙げられる。

そこで、本研究では津波来襲前後に撮影された衛星画像を入手し、家屋が流失したか否かを、両写真をもとに家屋一軒一軒について判断して、Banda Aceh 市内のピンポイント的な流失家屋分布を得た。さらに、Tsuji 他 (2006) は市内中心部の津波浸水深・浸水深を細かく測定しており、このデータを用いて家屋流失率と津波浸水深の関係を得た。

2. 衛星画像から津波による流失家屋分布を得る手法

(1) 調査に用いた衛星画像と家屋流失判断手法

米国 Digital Globe 社は津波来襲の約半年前である 2004 年 6 月 23 日と、津波来襲のわずか 2 日後である 2004 年 12 月 28 日に Banda Aceh 市内の衛星画像を撮影している。これらの画像は、地上での解像度が約 70 cm と言われており、家屋一軒一軒の分布状況だけでなく屋根の色や形状が細かく認識できるものである。また、衛星画像撮影範囲に対する雲の割合は津波前の画像で 3 %、津波後の画像で 1 % であって、家屋の流失状況を調査する上で見えない部分があるという問題はない。

写真-1 は、図-1 の左側にある矢印で示した港地区の Ulee Lheue での衛星画像の例である。同図左 (a)、および右 (b) はそれぞれ津波前と後の画像であり、両者にある白矢印が示す建物は、Ulee Lheue の Baiturrahim モスクである。印刷ではやや不鮮明であるが、この写真-1 の範囲内ではモスクと他 2 軒の家屋のみが流失を免れたことが確認できる。しかしながら、この他の家屋に関しては、津波前は家屋が密集していたことが確認できるのに対し、津波後のその場所は地肌や土台、がれきなどが見えるなど、屋根が見えなくなるため、家屋すべてが流失していることが判明する。屋根と土台の区別は、津波前の屋根の色と津波後が同色か、あるいは土台のコンクリートが見えるかなどに注意して判断した。写真-1 (b) で白く見えるところがあるのは、画像を拡大すると

1 学生会員 修(工) 東京大学大学院工学系研究科
2 博(理) 東京大学助教授 地震研究所

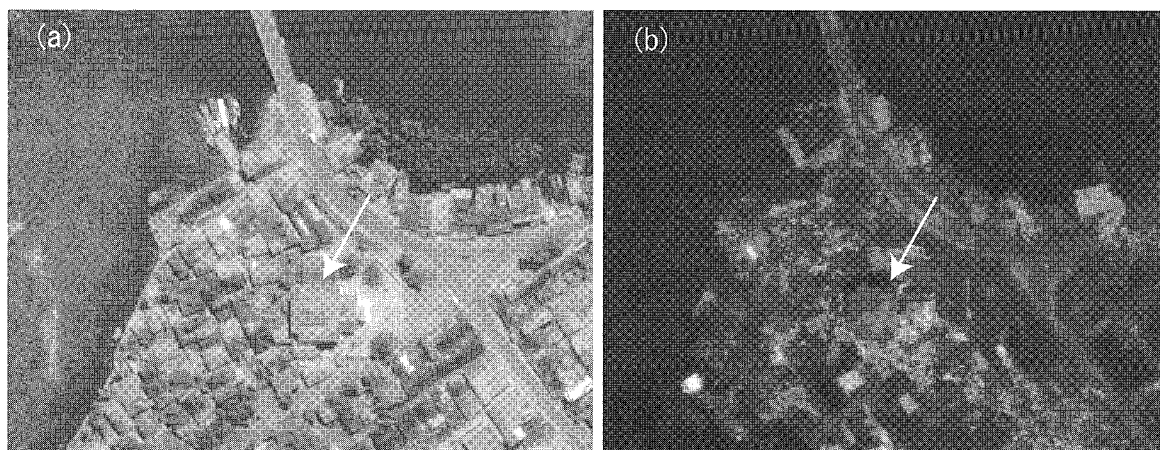


写真-1 Ulee Lheue 港周辺の衛星画像 (a) 津波前 (b) 津波後

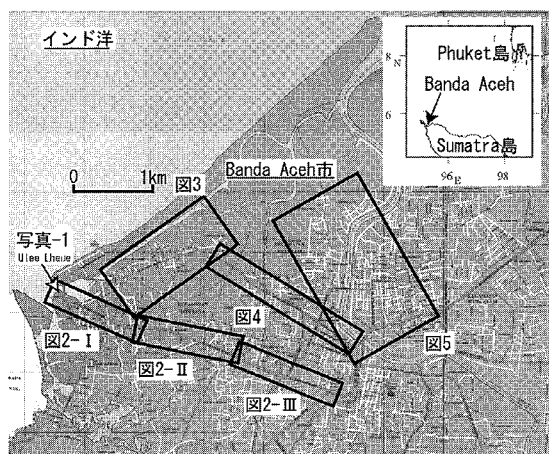


図-1 本研究で流失家屋分布を求めた範囲

家屋の土台であることがわかり、この家屋は流失したと判断することができる。

以上の例からわかるように、本研究では人間の目による判断により、次のようにして家屋流失状況図を作った。すなわち、①まず津波前の衛星画像から津波前に存在した家屋の位置を読み取る。②つぎに、津波後の画像から、土台と屋根の区別に注意して、屋根が残っている家屋を流失から免れた家屋として判断した。

(2) 調査領域

津波前と後の衛星画像により家屋の流失状況を調査したのは図-1の6個の長方形の領域である。各長方形に付けられた図番号は後述の家屋流失状況図に対応している。本研究では、①海岸部から市内中心部にかけてどのように家屋流失状況が変化していくのか知ることと、②Tsuji 他 (2006) による津波浸水高調査と流失状況との関係を調べることを目的としていることから、このとき調査された範囲を含んだ図-2 I・II・IIIおよび図-5の範囲を設定した。また、図-3および図-4には津波浸水高が調査

された地域が含まれていないが、市内中心部である図-5の範囲と海岸線の間の状況を知るために調査を行った。

3. 津波による流失家屋分布と浸水高

(1) 津波による流失家屋分布

a) Ulee Lheue から内陸へ続く Iskandar Muda 通沿い

図-2は、図-1にあるように Ulee Lheue から東側(内陸方向)へ続く Iskandar Muda 通沿いでの津波による流失家屋の分布を表したものであり、上から I, II, および III とする。また、図-2の I および II の右端はそれぞれ II および III の左端につながっている。ここで、○は流失したと判定された家屋を、●は流失を免れたと判定された家屋をそれぞれ表す。また、◎で示した地点およびそこに書かれた数値は、Tsuji 他 (2006) により測定されたその点での地面から測った浸水深であり、かつこ内は津波来襲時海面からの浸水高を表す。なお、図-2の III の地域での調査団による測定点は本図に示された点よりも多いが、本研究ではその一部を引用した。

図-2から明らかなように、海岸の Ulee Lheue から内陸へ向かって約 2.7 km までの範囲(図-2の III の A まで)は、ほとんどの家屋が流失したことがわかる。さらに A 点付近から Doy 川までの 300 m 程度の範囲においては、流失した家屋と流失を免れた家屋が混在する遷移帯となっていることがわかる。そして、Doy 川から内陸ではほとんどの家屋が流失を免れている。海岸から Doy 川までは約 3 km 離れていることから、この遷移帯はきわめて狭い範囲と言え、この遷移帯を境に家屋の流失状況が激的に変化したと言えよう。

b) 海岸に近い Rama Setia 通沿い

図-3は海岸から約 200 m 離れた Rama Setia 通沿いでの家屋流失状況を表す。図上部に Channel と書かれている部分は海岸に平行に流れている水路を表し、この上

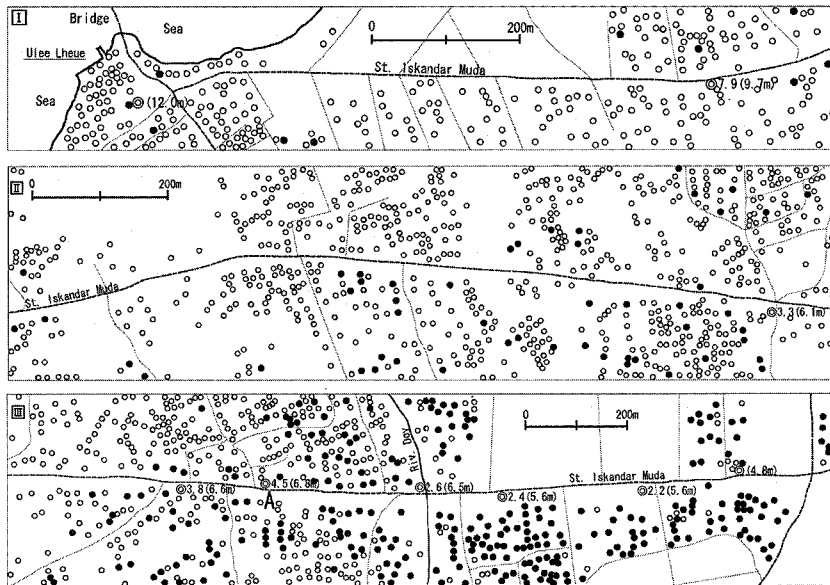


図-2 Ulee Lheue から内陸へ続く Iskandar Muda 通沿いの家屋流失分布

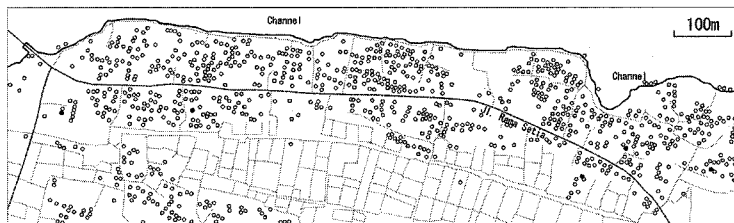


図-3 Rama Setia 通沿いの家屋流失分布

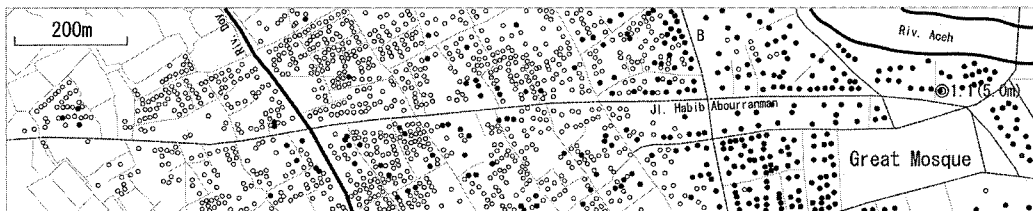


図-4 Habib Abourrenman 通沿いの家屋流失分布

部約 100 m のところに海岸砂丘帯を隔ててインド洋が存在する。また、ここでは載せていないが津波後の衛星画像を見ると、がれきなどのゴミと思われるものが図下方向になびいていることが確認された。すなわち、津波は図上部から浸入してきたと考えられる。この図-3の領域では図から明らかなように、ほとんど全ての家屋が流失したことがわかる。同図でわずかに残った家屋も、おそらくは流失は免れたものの、壁などが打ち破れるといった大きな被害であったと推測される。また、衛星画像からは、木造家屋とコンクリート造家屋の区別はできない。そのため、同図において流失が免れたと判定された家屋とその周辺の流失した家屋との間に、木造かコン

クリート造かによる違いを見つけることはできなかった。なお、同図下部では流失判定を行っていない領域が存在するが、これらは田園地帯でありもともと家屋が存在しなかった領域なため道路のみが描かれている。

c) 海岸と市内中心部を結ぶ Habib Abourrenman 通沿い

図-4 は海岸と市内中心部を結ぶ Habib Abourrenman 通沿いにおける家屋流失分布を表すものである。図中左方向が海の方であり、Habib Abourrenman 通を海側に進むと図-3 における Rama Setia 通に接続する。

海岸に近い左方向から Habib Abourrenman 通を右へ進み Doy 川を渡るまでは、若干の流失を免れた家屋が存在するものの、ほとんどの家屋が流失していることがわ

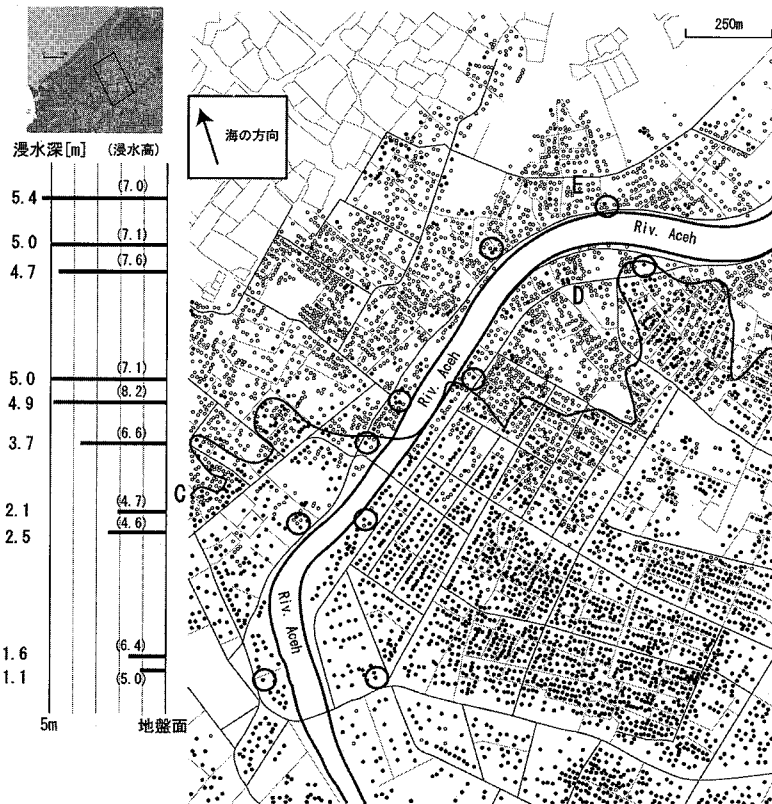


図-5 Banda Aceh 市内中心部の家屋流失分布

かる。いっぽうで、この通りをさらに内陸に進んだところに、この通りに直交する通り(図-4のBが示す通り)が存在するが、この通り付近を境にして内陸側は急激に家屋流失が免れていることがわかる。なお、この「通りB」は海岸から直線距離にして約2.5km離れている。

d) Banda Aceh 市内中心部

図-5は海岸から約2km離れたBanda Aceh市内中心部での津波流失家屋分布を示す。図中心を流れる川は旧Aceh川であり、図左上方向がインド洋の方向である。また図左上部で家屋の浸水率判定を行っていない地域が存在するが、これはこの地域が田園地帯であるために道路のみを描いた。

この図を見ると、海岸に近い方(図中上方向)はほとんどの家屋が流失しているのに対し、内陸方向(図中下方向)はほとんどの家屋が流失から免れていることがわかる。両者の遷移帯の幅はきわめて狭く(図-5中のC線周辺)、流失した家屋と免れた家屋がはっきりと分離していることが見てとれる。前項のa)やc)でも見られた、この流失したかしないかを鋭く分ける分離線は、この線付近で急激に流速が変化したことを示唆するものである。

また、本稿では載せていないが、b)と同様に津波後の衛星画像をみると、①旧Aceh川よりも陸側の領域

(図-5中D部)で流失したがれきが図の右下方向になびいており、なおかつ②旧Aceh川よりも海側の領域(図-5中E部)においても、流失したがれきがやはり図の右下方向になびいていることが確認できる。この①および②から、津波は旧Aceh川を遡上した成分よりも、図左上方向から直接浸入し旧Aceh川を越えた成分のほうが強く、これが内陸側に流失災害を発生させたと考えられる。

なお、次節で流失率と浸水深を考察するために、図-5ではTsuji他(2006)による津波浸水深を測定した地点に○をうち、その左側に測定された浸水深ならびに浸水高の高さを載せた。

(2) 家屋流失率と津波浸水深の関係

家屋流失と津波の浸水深の関係を解明する研究には、大きく分けて次の2種類の研究がある。

まず1つの研究は、たとえば飯塚他(2000)や松富他(1994)に代表される研究であり、津波浸水深とそこでの家屋の被害程度を結びつける研究である。たとえば、松富他(1994)は過去に起きた津波のデータをもとに、木造家屋に関して浸水深が1.5mを越えると家屋は中破に至り、2mを越すと大破に至るようであると述べている。ここで大破というのは、「壁はもちろん、柱のかかなりの部分がおれるか失われている」と定義されており、本研究

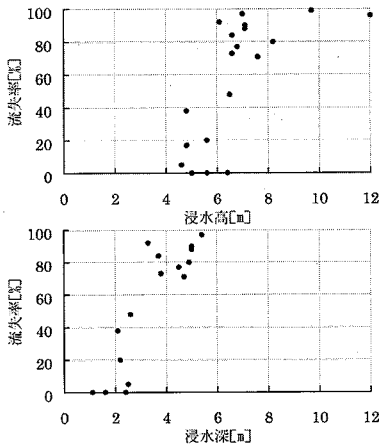


図-6 (a) 津波浸水高と家屋流失率の関係
(b) 津波浸水深と家屋流失率の関係

における「流失」と同程度の意味であろうと解釈できる。

いっぽう、もう1つの研究には羽鳥(1984)やHatori(1964)などの研究がある。これは現地調査結果などから、たとえば小字(こあざ)などの小さな集落での津波浸水高とその集落全体の家屋の津波被害率を結びつける研究である。すなわち、津波浸水高と個々の家屋の被害程度との関係に注目しているのではなく、津波浸水高とある程度の広がりを持った範囲の中で何%の家屋が津波による被害(流失)を受けたかという関係に注目するのである。たとえば、Hatori(1964)では、津波による流失率を、ある集落内での床下浸水以上の被害をうけた家屋数に対する流失・破壊・半壊された家屋総数(ただし半壊家屋は0.5を乗じている)の百分率として定義し、これとその集落での津波浸水高(平均海面上)の関係を調べた。その結果、たとえば1933年昭和三陸地震津波では、浸水高4m程度が遷移帯となってこれよりも浸水高が大きくなると流失率が急に大きくなり80%以上になることを報告している。

ところで、本研究で得られた津波流失家屋分布は、津波データと比較すると、上述の2研究のうち後者的な知見が得られるものである。そこで、Tsuji 他(2006)により津波データが測定された地点での津波流失率を、前項で求めた津波流失家屋分布から算出した。この津波流失率は、津波データが測定された地点を中心に半径100m内に存在する全家屋数に対する流失家屋数の割合として定義した。そして、津波データと津波流失率の関係をプロットしたものが図-6である。ここで、図-6の上段(a)は津波浸水高(津波来襲時海面上)に対する津波流失率を表し、下段(b)は津波浸水深(地盤面上)に対する津波流失率を表す。

まず、図-6(a)を見ると津波来襲時海面上6mを越える津波が襲った地域は家屋の流失率がおおよそ70%を越えているのに対し、6m未満の津波が襲った地域は家屋

の流失率が約20%以下であったことがわかる。そして、この6mという浸水高で、家屋の流失率が激変していることが見てとれよう。いっぽうで、地盤面上の浸水深に対する家屋の流失率(図-6(b))を見ると、浸水深が3m程度を越すと流失率が70%を越えるのに対し(平均値で85%)、それよりも低い浸水深だと流失率が約40%以下(平均値で15%)となっていることがわかる。さらに、この3m付近で流失率が急激に変化していることが言え、図-6(a)と同様の傾向を見ることができる。

4. ま と め

本研究では、2004年インド洋地震津波の前と後で撮影された衛星画像を比較することで、Indonesia国Sumatra島Banda Aceh市内の、家屋一軒一軒について調べ家屋流失分布図を得た。これにより、次のことが判明した。

① Banda Aceh市北部の海岸から2.5km~3km内陸の領域ではほとんどの家屋が流失した。いっぽう、これよりも内陸の地域は、ほとんどの家屋が流失から免れた。さらに両者の遷移帯の幅はわずか300m程度であることがわかった。

② 津波による家屋流失率を算出し、これと現地調査による津波浸水高および浸水深との関係を求めた。その結果、浸水高が6mを越えた地域は家屋の流失率が70%を越えているのに対し、6m未満の地域は家屋の流失率が20%以下であったことが判明した。さらに、この6m付近において流失率が急激に変化することがわかった。浸水深に関しても同様に、3m程度で急激に流失率は変化し、浸水深がそれより低いと流失率の平均値が約15%であり、高いと約85%となることがわかった。

参 考 文 献

- 飯塚秀則・松富英夫(2000): 津波氾濫流の被害想定, 海工論文, 第47巻, pp. 381-385.
- 柴山知也・岡安章夫・佐々木淳・鈴木崇之・松丸亮・Masimin・Zouhrawaty A. Ariff(2005): 2004年スマトラ沖地震津波のインドネシア・バンダアチェ被害調査, 海工論文, 第52巻, pp. 1371-1375.
- 羽鳥徳太郎(1984): 津波による家屋の破壊率, 地震研究所彙報, 59, pp. 433-439.
- 松富英夫・榊山勉・Sindhu Nugroho・都司嘉宜・谷岡勇市郎・西村裕一・鎌滝孝信・村上嘉謙・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みた課題, 海工論文, 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, 海工論文, 第41巻, pp. 246-250.
- Hatori T. (1964): A study of the Damage to Houses due to a Tsunami, Bull. Earthq. Res. Inst., 42, pp. 181-191.
- Tsuji, Y., Y. Tanioka, H. Matsutomi, Y. Nishimura, T. Kamataki, Y. Murakami, T. Sakakiyama, A. Moore, G. Gelfenbaum, S. Nugroho, B. Waluyo, I. Sukanta, R. Triyono, and Y. Namegaya (2006): Damage and Height Distribution of Sumatra Earthquake-Tsunami of December 26, 2004, in Banda Aceh City and its Environs, J. Disaster Research, 1.1, (in press).