

【特集：防潮堤 総説論文】

津波被害関数を利用した過去の津波高さの推定*

Estimations of Historical Tsunami Heights Inferred from Tsunami Fragility

行谷 佑一**, 今井 健太郎***

Yuichi NAMEGAYA and Kentaro IMAI

Abstract. Estimations of heights of past tsunamis are a key to forecast oncoming earthquakes and tsunamis. Generally, the heights of the historical tsunamis have been measured based on historical documents which describe actual marks of the tsunami inundation, such as “the tsunami came up to the fifth steps from the bottom in the temple”, and based on measurements of their heights by field surveys. However, some of the historical documents recorded only number of houses damaged due to the tsunamis. The records obviously indicate that the large tsunamis actually inundated. They are difficult to estimate the tsunami heights because they include no marks which the tsunami rose up to. Tsunami fragility can be useful to estimate the tsunami heights from the damage data, but no existing tsunami fragility targets historical tsunamis. Because strength of houses in historical era may be different from that in nowadays, formulation of tsunami fragility for historical tsunamis is necessary.

Key Words: tsunami height, historical document, tsunami fragility, damage estimation

1. 序論

静岡県から高知県を含む南海トラフ沿岸の地域は、過去に繰り返し巨大地震が発生し、津波の被害を受けてきた。近年発生した例では、1944年昭和東南海地震、1946年昭和南海地震、1854年安政東海地震、1854年安政南海地震、1707年宝永地震が挙げられ、今後30年以内の南海トラフでの大地震の発生確率は60–70%といわれている（地震調査研究推進本部，2013）。

将来発生しうる地震の規模や津波高（海面上の津波の高さ）、あるいは浸水深（地面からの津波の高さ）を検討することは、科学的のみならず社

会的にも重要なことである。例えば、防潮堤の耐津波設計の基礎データや海岸近くに建設予定の建物の強度設計など、様々な場面でその基礎となる知見となる。

将来の津波の高さを推定する上で基本となるのは、「過去起きたことは将来も起こりうる」という視点であろう。すなわち、ある地域で過去に10 mの高さの津波が来襲した経験があるならば、将来的にも少なくともその10 m程度の津波が来襲する可能性があるという考え方である。従って、将来発生しうる津波を推定するには、まずは過去に発生した津波を正しく理解し、それに備え

* 2015年6月1日受付，2015年8月7日受理

** 国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センター活断層・火山研究部門（Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology）

*** 国立研究開発法人海洋研究開発機構地震津波海域観測研究開発センター（Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology）

ることが重要である。

津波高や浸水深は研究者が津波直後に実際に現地を調査することにより測定されてきた（例えば、那須ら，1947）。安政地震津波や宝永地震津波等については，歴史記録（史料や供養碑，絵図等）を調べた上，現地を調査することでその高さが推定されてきた。基本的には，歴史記録の中にある津波の記述，例えば海水が床まで浸水したなどの情報をもとに，現地調査をすることで津波高や浸水深を推定するものである。ただし，歴史記録に記された地点の状況が判明するのみであるため，現代に発生した津波に比べれば，そのデータ数は限定的であり，津波の挙動に関する情報は圧倒的に少ない。

一方，歴史記録の中には，流失家屋百九十九軒，といった，直接的な津波の痕跡は不明であるが確実に被害のあったことがわかる記述もある。このような被害の状況から津波高や浸水深が推定できれば，津波の浸水状況に関するデータ数を増やすことに貢献できるであろう。

本稿では，これまで行われてきた歴史記録から津波高や浸水深を推定する基本的な方法を説明した上で，被害記録を利用してこれらを推定する今後の展望について記す。被害記録から津波高や浸水深を推定するアイディアは行谷(2009)でもすでに述べており，本稿はそれを基本にして執筆した。

2. 過去の津波高や浸水深の推定

わが国沿岸は，気象庁や国土地理院，海上保安庁などの機関により潮位観測網が設置されている。各機関で設置目的は異なるが，基本的には日々の海面変動を測器により連続的に観測している。津波が発生すれば海面に上下変動が生じ，それが潮位観測器に記録されるので，津波高を始めとした時系列波形を知ることができる。波形データには波源に関する様々な情報が含まれており，これらのデータをもとにして地震の規模や断層のすべり量が推定されている（例えば，Satake et al., 2013）。しかしながら，測器による観測が開始されたのは明治時代以降である。1章で紹介した安政地震津波およびそれより前の津波については，わが国で測器観測されたデータは存在しない。

江戸時代以前の津波については，災害内容が記された文書や供養碑といった歴史記録に基づいて推定されてきた（例えば，羽鳥，1984a；都司ら，

1994）。歴史記録を精読し，そこに書かれた津波に関する記述をもとにして，現地調査によって津波高や浸水深を推定するものである。

例えば，1854年12月23日（嘉永七年（安政元年）十一月四日）に発生した安政東海地震による津波に関して，『新収日本地震史料第五巻別巻五』（東京大学地震研究所，1987）の1325ページに所収された『地震津波二付御上江書上帳』によると，「（前略）嘉永七甲寅十一月四日朝上天気二而追々田畑へ参り申候然所朝五ツ時頃，大地震二而一同打驚罷有，（中略）源慶寺・宗七内等ハゆ家下迄汐乗申候（後略）」という記述がある。五ツ時（朝8時頃）に大地震が発生し驚いたことが記されている他，源慶寺（げんきやうじ）の床下まで海水が浸水したことが報告されている。源慶寺は三重県志摩市阿児町国府（こう）に位置する。実際に現地を訪ね，源慶寺前の地盤面の標高を測量すると3.4 mであった。現在の源慶寺の地面と床面との間が0.65 mであったことと，床下まで浸水したことを参考に，ここでの津波高が3.9 mと推定される（行谷，都司，2005）。

また，地域に残された伝承から得られる情報もある。津波調査時に立ち寄った尾鷲市九鬼町に位置する真巖寺（しんがんじ）の住職によると，「安政時には，真巖寺の階段下5段目まで津波が入った」という伝承がある。その5段目の高さを測定することで(Figure 1)，ここでの津波高が8.5 m(行谷，都司，2005)と推定された。

以上から，過去の津波の高さの推定は以下の3つの基本的な手順から構成される。1) 歴史記録を精読する，2) 津波の高さを知ることができそうな記事を抜き出す，3) 現地ヒアリング等で状況を確認した上で，測量機器を用いて津波高や浸水深を測量する。

わずかに地点の高さを推定するにも非常に多くの時間と手間が必要であることは強調したい。もとなる歴史記録の信頼性についても吟味が必要なものがある（例えば，行谷，矢田，2014）。

3. 高さに直接結びつかない歴史記録

歴史記録の中には，津波のことが書かれていても具体的な高さに直接結びつかない記述も存在する。その例を二つ，以下に示す。

前述の安政東海地震の約30時間後に発生した安政南海地震による津波に関して，『新収日本地震史料第五巻別巻五』（東京大学地震研究所，1987）



Figure 1 A scene of measurement of the height of the 1854 Ansei Tokai earthquake tsunami at Shingan-ji temple in Kuki hamlet of Owase city, Mie prefecture (Namegaya and Tsuji, 2005). There is an oral tradition that the tsunami came up to the fifth stair.

の1798ページ以降にある中財家所蔵の『大地震実録記』に次の記述が存在する。

(前略)

同郡西由岐浦
一家数貳百五軒 内三軒無難
同百九十九軒流失
同三軒潰家
男女拾六人流死

(中略)

同郡田井村
一家数四拾軒 内拾七軒無難
同七軒流失
同十六軒大破小破

(後略)

西由岐浦や田井村は徳島県沿岸の集落である(「同郡」とあるのは前略部分の続きから海部郡に相当する)。とくに西由岐浦ではほとんど全ての

家屋が流失し、大きな被害を受けたことがわかる。

もう一つの例として、同じく南海トラフの地震で1707年10月28日(宝永四年十月四日)に発生した宝永地震による津波について、『新収日本地震史料第三巻別巻』(東京大学地震研究所, 1983)の327ページにある『万代記』には次の記述がある。

(前略)

覚

一流家三拾四軒 本町
一潰家貳拾貳軒
一潰家同前貳拾軒
メ七拾六軒

(中略)

一流家八拾七軒 片町
(後略)

『万代記』は和歌山県田辺市における記録であり、同市の本町(ほんまち)や片町(かたまち)の地区で多くの家屋が流失したことがわかる。

いずれの例も、大きな被害が生じたことは確実ではあるが、津波の浸水範囲や浸水の痕跡といった具体的な情報がないので、津波高や浸水深が何mであったのかこの歴史記録から具体的にはわからない。これらの情報を活かして高さを推定するには、津波高や浸水深と被害とを結びつける何らかの関係が必要である。

4. 津波高や浸水深と被害との関係

津波高や浸水深と家屋の被害とを結びつける視点としては大きく分けて二つの視点がある。一つは地域における一軒一軒の被害状況にもとづく散逸的な個々の家屋被害データとそこでの津波高や浸水深とを結びつける視点である。もう一つは地域における各被害データを累積して計算された家屋被害率とそこでの津波高や浸水深とを結びつける視点である。

4.1 個々の家屋に対する浸水深と被害との関係

前者の視点については、松富、首藤(1994)が代表的な研究例であろう。松富、首藤(1994)は1993年7月12日に発生した北海道南西沖地震津波(奥尻島津波)を代表とする過去の津波の現地調査結果から、津波の浸水深と家屋の造り別の被害程度

の関係を得た。それによると、鉄筋コンクリート造の家屋の場合は浸水深が5 mでも被害はほとんど生じない。一方、木造家屋の場合には浸水深が1.5 mを超えると中破（柱は残っている。壁の一部は破壊されている。）に至り、2 mを超えると大破（壁はもちろん、柱のかなりの部分が折れるか失われている。）に至るようである。北海道南西沖地震津波の例では、高々0.25 mの浸水深でも中破に至る家屋も報告されている。

首藤(1992)は過去の津波に関して現地調査による津波の高さや数値計算結果から、浸水深と家屋の強度との関係を得た。それによると木造家屋について浸水深が1–2 mでは「部分的破壊」となり、2 mを越すと「全面破壊」と評価した。この首藤(1992)の基準は現在行われている津波被害評価の

基準として一般的に利用されている。

4.2 面的にとらえた地域における津波高や浸水深と被害率との関係

後者の視点は、地域という面的な範囲での被害率に着目した点が特徴であろう（例えば、Hatori, 1964；羽鳥, 1984b）。羽鳥(1984b)は1896年明治三陸地震津波や1933年昭和三陸地震津波、および1960年チリ地震津波を対象に、これらの津波によって被害を受けた家屋の数をベースに、各地区における津波高と被害率との関係を得た。ここで被害率とは、式(1)で定義される量

$$[(a \times 1 + b \times 0.5) / (a + b + c)] \times 100 [\%] \quad (1)$$

であり、a: 流失・全壊戸数, b: 半壊戸数, c: 床



Figure 2 Distribution of damaged houses in Banda Aceh, Indonesia due to the 2004 Sumatra earthquake tsunami based on Namegaya and Tsuji (2006). Black and white circles show the locations of houses, which were washed away and survived, respectively.

上・床下浸水戸数を意味する。この結果、明治および昭和の両三陸地震津波では津波高が4 mに達すると、被害率（破壊率）は両津波とも急激に増加して50%をこえ、6 mでは70–80%に達することを報告している。

近年発生した津波に関しては、津波直後の衛星写真や航空写真によって、どの家屋が流失したか否かを知ることができる場合がある（例えば、行谷，都司，2006；Koshimura et al., 2009a；越村，郷右近，2012）。行谷，都司(2006)は、2004年12月26日に発生したインド洋地震津波（スマトラ島沖地震津波）により甚大な被害を受けたインドネシアのBanda Acehでの流失家屋について調べた。同地上空からは、家屋の一軒一軒の分布や屋

根の色・形状が認識できる衛星画像が津波来襲の約半年前と2日後に撮影されており、両者の画像を比較することでどの家屋が流失したのかを目視により読み取った(Figure 2)。さらに、津波直後の調査により測定された比較的詳細な津波高や浸水深の分布(Tsuji et al., 2006)を利用し流失率とを関係づけた(Figure 3)。この結果、津波高が6 m未満の地域は家屋の流失率がおおむね20%以下であったのに対し、6 mを境に急激に上昇し流失率が70%以上になることや、浸水深が3 mを超えると急激に流失率が増加することを定量的に示した。

4.3 津波被害関数の構築

4.2節で示した津波高や浸水深と被害率との関係は基本的には離散的な関係にある。一点一点がそれぞれ別の地域における津波高や浸水深と被害率との関係を表しているためである。この関係を連続的なものへ発展させたのが、津波被害関数である（例えば、越村ら，2009b）。

これは、津波高や浸水深、あるいは流速、流体力などに対する家屋などの被害率を、村尾，山崎(2000)の方法を参考にして標準正規分布や対数正規分布の累積確率分布関数を用いて表せると仮定して、回帰分析を行うものである。すなわち、標準正規分布を用いた場合、津波高や浸水深(x)に対する被害率 $P_D(x)$ は、式(2)で表せると仮定する。

$$P_D(x) = \Phi\left[\frac{x - \mu}{\sigma}\right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (2)$$

ここで、 μ および σ は、それぞれ x に対する平均と標準偏差であり、これらの二つのパラメータを（離散的な）データから最小自乗法により推定する。これによって得られた $P_D(x)$ を津波被害関数と呼ぶ。

例えば、Figure 3の例では行谷，都司(2006)で報告したBanda Acehでの流失率と津波高や浸水深の関係（離散点）に対し、越村ら(2009b)はデータの精査の上で回帰分析を行い、これらの離散点を最もよく表現する津波被害関数を構築した(Figure 3の実線)。

津波被害関数は、離散データ間の補間をしていると捉えることもできるし、あるいは被害全体の

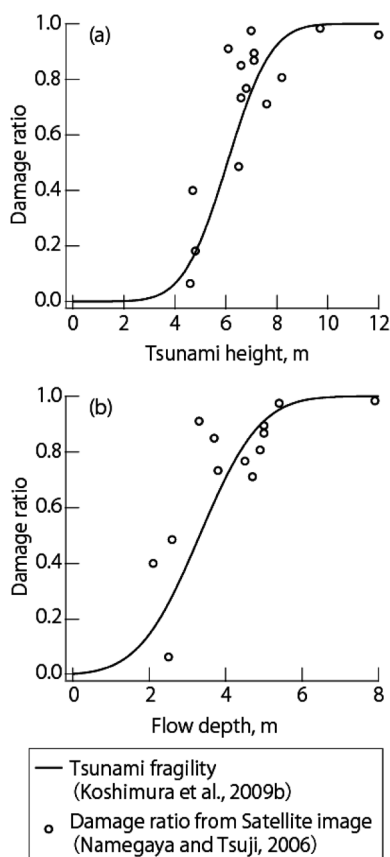


Figure 3 Relationships of damage ratios to (a) the tsunami heights (津波高) and (b) the flow depths (浸水深) of the 2004 Sumatra earthquake tsunami (Namegaya and Tsuji, 2006). Only data used for estimation of tsunami fragility (solid lines, Koshimura et al., 2006b) are plotted.

特徴を表している、と捉えることもできるだろう。津波氾濫シミュレーションによる計算津波高とこの津波被害関数を組み合わせることにより、より定量的な津波被害を推定することができるため、防災計画に重要であると考えられる。

一方で、この津波被害関数の適用条件の検討が必要である。例えば、本論文で紹介した Banda Aceh の津波被害関数（越村ら，2009b）を将来起こりうる南海トラフ巨大地震の被害想定地域にそのまま適用することは、土地利用状況や海岸地形などの地域特性や建築水準が異なるため難しいと考えられる。越村，郷右近（2012）では2011年東北地方太平洋沖地震津波による宮城県全体のデータから得られた津波被害関数と、1993年北海道南西沖地震津波による北海道奥尻島の青苗地区の事例から得られた津波被害関数（越村，萱場，2010）とを比較した。この結果，2011年東北津波の宮城県全体の被害率は，浸水深が2 m程度から流失率が急増し，6 mで流失率はおよそ8割に及ぶのに対し，1993年津波による奥尻島青苗地区での流失率は浸水深が2 mの段階ですでに流失率が80%程度になることが報告されている。

この差異には様々な要因が考えられる。まず，入力である津波そのものが異なる，という点である。地震の規模や発生場所が異なるので，同じ津波高でもその流速や周期といった水理特性が異なることが考えられる。また，建物の構造や配置，密度といったものによって被害の特性は大きく異なる（越村，郷右近，2012）。このように，現段階ではどのような条件下でどのような津波被害関数を利用できるのかは明らかではない状況である。事例をさらに積み重ねることにより，津波被害関数の特性を理解することが必要である。

5. 歴史記録に対する津波被害関数の今後の展望

津波被害関数の考え方を利用すれば，これまで津波高や浸水深に結びつきにくかった歴史記録による津波被害データの活用が期待される。津波高や浸水深から被害率を推定するために津波被害関数を利用するのではなく，被害率からこれらの高さを推定するのである。ただし，家屋の強度が現代とは異なることから，歴史時代における建築水準を考慮した津波被害関数の構築が必要となるであろう。

3章で紹介したように1854年安政南海地震津波

による徳島県沿岸の各集落での被害記録『大地震実録記』には，総家数と被害を受けた家屋の数が記録されている。例えば，徳島県海部郡美波町の田井地区では，同記録に家数が40軒あるうちの17軒が無難，7軒が流失，16軒が大破・小破，と記録されている。式(1)の分母を総家数にした場合の被害率は38%と見積もられる。

一方，『新収日本地震史料第五巻別巻五』（東京大学地震研究所，1987）の1851ページにある『三岐田町史』には「（前略）木岐徳井口迄汐入候田井ハ観音様下迄」という記述があり，安政南海地震津波で田井の集落にある観音様の下まで津波が到達したことがわかる。これをもとにした村上ら（1996）による現地調査によれば，ここでの津波高は4.3 mと推定されている。ゆえに，この地域では，被害率38%に対する津波高4.3 mという，被害率と津波高に関する共役データを取得することができる。地域性を踏まえつつ，津波高と被害率を同時に取得可能な地域を探索しデータの収集を行っていけば，ある程度の離散的なデータをまとめることができ，それをもとに津波被害関数を構築することができる。今後，このような解析を続けることによって，構築した津波被害関数の適用条件等も考慮しながら，従来利用できなかった被害に関する歴史記録により，根拠をもって津波高や浸水深を推定することが可能になるであろう。このことは過去の津波高さに関するデータの量を増やすことに貢献でき，最終的には将来発生しうる地震の推定に資することにつながるであろう。

6. まとめ

過去に発生した地震や津波をできるだけ詳細に根拠をもって解明することが，将来に発生しうる大地震を推定する上で重要となる。本稿では歴史記録を用いた過去の津波の一般的な推定方法について紹介した。一方，津波高や浸水深をこれまで直接的に推定しづらかった被害の記録の例も挙げた。このようなデータから津波高や浸水深を推定するには，津波高や浸水深と被害率との関係（津波被害関数）を構築することが重要であることを述べた。さらに，津波被害関数を利用して津波高や浸水深を推定する今後の展望についても述べた。このためには一地点一地点の津波の被害や高さを，根拠をもって検討する必要があり時間の掛かる作業になる。しかし，津波の高さを推定することは冒頭にも記したとおり津波防災の根幹であ

る。本稿で示した手法により津波推定のさらなるレベル向上等を通して、被害想定にもとづく防潮堤設置の費用効果分析などへの展開を図ることが期待される。

謝辞

本稿の一部は科学研究費「津波痕跡高を用いた地震規模推定法の高度化研究」(研究代表者: 今井健太郎) を利用させて戴きました。また、執筆の機会を与えて下さいました、産業技術総合研究所の恒見清孝氏に感謝致します。

参考文献

- Hatori, T. (1964) A Study of the damage to houses due to a tsunami, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, **42**, 181–191.
- 羽鳥徳太郎(1984a) 関東・伊豆東部沿岸における宝永・安政東海津波の挙動, 東京大学地震研究所彙報, **59**, 501–518.
- 羽鳥徳太郎(1984b) 津波による家屋の破壊率, 東京大学地震研究所彙報, **59**, 433–439.
- 地震調査研究推進本部(2013) 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/nankai2_shubun.pdf
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., and Imamura F. (2009a) Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and posttsunami data from Banda Aceh, Indonesia, *Coastal Engineering Journal*, **51**, 243–273.
- 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明(2009b) 津波被害関数の構築, 土木学会論文集B, **65**, 320–331.
- 越村俊一, 萱場真太郎(2010) 1993年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考—津波被害関数の構築に向けて—, 地震工学会論文集, **10**, 87–101.
- 越村俊一, 郷右近英臣(2012) 2011年東北地方太平洋沖地震津波災害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集B2(海岸工学), **68**, I_336–I_340.
- 松富英夫, 首藤伸夫(1994) 津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学講演会論文集, **41**, 246–250.
- 村上仁士, 島田富美男, 伊藤禎彦, 山本尚明, 石塚順一(1996) 四国における歴史津波 (1605慶長・1707宝永・1854安政) の津波高の再検討, 自然災害科学, **15**, 39–52.
- 村尾 修, 山崎文雄(2000) 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, **527**, 189–196.
- 行谷佑一(2009) 歴史津波の高さの推定手法に関する今後の展望, 産業技術総合研究所活断層・地震研究センター AFERC NEWS, **5**, 1–5.
- 行谷佑一, 都司嘉宣(2005) 宝永(1707)・安政東海(1854)地震津波の三重県における詳細津波浸水深分布, 歴史地震, **20**, 33–56.
- 行谷佑一, 都司嘉宣(2006) 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, 海岸工学講演会論文集, **53**, 286–290.
- 行谷佑一, 矢田俊文(2014) 史料に記録された中世における東日本太平洋沿岸の津波, 地震2, **66**, 73–81.
- 那須信治, 白井俊明, 川島正治, 大内秋三, 高橋龍太郎, 岸上冬彦, 池上良平, 秋間哲夫(1947) 昭和二十一年十二月二十一日南海大地震津浪調査概報 (和歌山県之部), 地震研究所研究速報, **5**, 98–131.
- Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., and Namegaya, Y. (2013) Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **103**, 1473–1492.
- 首藤伸夫(1992) 津波強度と被害, 東北大学災害制御研究センター津波工学研究報告, **9**, 101–136.
- 東京大学地震研究所(1983) 新収日本地震史料第三巻別巻.
- 東京大学地震研究所(1987) 新収日本地震史料第五巻別巻五.
- 都司嘉宣, 上田和枝, 荒井賢一(1994) 須崎市を襲った歴史津波, 歴史地震, **10**, 95–115.
- Tsuji, Y., Tanioka, Y., Matsutomi, H., Nishimura, Y., Kamataki, T., Murakami, Y., Sakakiyama, T., Moore, A., Gelfenbaum, G., Nugroho, S., Waluyo, B., Sukanta, I., Triyono, R., and Namegaya, Y. (2006) Damage and height distribution of Sumatra Earthquake-Tsunami of December 26, 2004, in Banda Aceh City and its environs, *Journal of Disaster Research*, **1**, 103–115.