避難途中に津波によって溺れる危険性の検討

A SUTUDY ON DROWNING RISK DURING EVACUATION FROM TSUNAMI

高橋重雄[1]・酒井洋一[2]・森屋陽一[3]・内山一郎[4]・遠藤仁彦[5]・有川太郎[1]
Shigeo TAKAHASHI, Youichi SAKAI, Youichi MORIYA , Ichirou UCHIYAMA, Kimihiko ENDOU and Taro ARIKAWA

[1]正会員　工博　港湾空港技術研究所　津波防災研究センター（〒239-0826 横須賀市長瀬３－１－１）
[2]正会員　工修　前　沿岸技術研究センター（〒102-0092 東京千代田区隼町3-16住友半蔵門ビル６F）
[3]正会員　工博　沿岸技術研究センター（〒102-0092 東京千代田区隼町3-16住友半蔵門ビル６F）
[4]正会員　工修　日本海洋コンサルタント（〒136-0074 東京江東区東砂7-19-31東京日産江東ビル）
[5]正会員　工博　国土交通省北海道開発局港湾空港部（〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目）.

The primary objective of tsunami disaster mitigation is to reduce the casualties. The major cause of the deaths is drowning by tsunami current, especially during evacuation. In the paper, the causes of deaths are discussed through reference to past experiences. A fault tree is presented to summarize the physical danger posed by tsunami waves to the human body, and the personal danger is discussed based on the tree. The stability of the human body against wave front collision and tsunami currents is discussed and threshold conditions are proposed. The time for evacuation is usually very limited and the risk of encountering a tsunami during evacuation is often high. Walking in inundated areas during a tsunami attack is especially dangerous. Vertical evacuation is highly recommended.

Key Words : *Tsunami, tsunami current, drowning, human body, evacuation, vertical evacuation, physical danger, collision*

1．まえがき

津波に対して市民の避難は非常に重要である[1)2)3)]．しかしながら，津波からの避難途中に亡くなった人が多く，インド洋大津波でも多くの人が避難時に亡くなっている．津波の流れの力は大きく，津波によって転倒し(バランスを崩し)たり，飲み込まれる危険性は大きく，避難途中に津波に遭遇することは非常に危険である．現状では高い安全性を考えて比較的遠い場所が避難場所に指定されていることが少なくないが，津波の来襲までに時間が限られている地域では危険性が大きい．こうした現状は，避難途中に津波に遭遇することの危険性が十分認識されていないことも一因と考えられる．本論文では，津波による人への危険について整理して，そのメカニズムを明らかにするとともに危険性をできるだけ定量的に示し，市民が理解できるようにすることを目的としている．

本研究では，①実際に津波に遭遇した経験談などや映像などから，避難時の危険性を明らかにするとともに，津波によっておぼれる危険パターンについてフローチャートとして整理する．②既存の研究成果を踏まえて，津波に対する人の安定性に関するモデルを提案し，危険な限界の条件を定量的に示す．また，③身近に緊急鉛直避難地を設けている事例を紹介し，その背景についても検討する．

2．避難途中での津波との遭遇

(1) 南海地震津波

日本には津波の災害を繰り返し受けている地区が少なくない．そうした地域では，人々の津波災害の経験を伝えるために，古くから文書や石碑などに残しており，最近では本として出版していることも多い．例えば，徳島県の茂木町では「海がほえた日」と題して 1946 年の南海地震津波による災害の体験談を１冊の本[4)]にしている．その中には，避難途中に津波に巻き込まれて九死に一生を得た人の話が数多く紹介されている．その例をここに示す．

①兄の家の近くの空き地からザーザーと音を立てて津波が私たちのほうにやってきた．私たちは逃げ場を失って，兄の家の竹でできた塀につかまったが，津波の第二波によって小川の向こうの水田に投げ出された．私は三度水を飲み，やや落ち着いた後津波の流れに運ばれていくことにして内陸側に運ばれていった．

②私が自分の家から祖父の家に逃げようとしたとき，すでに当たりは海や川のようであることに気がつ

いた．この水を横切る事ができると思って水の中に入ったとたん，恐ろしい目にあいました．流れは強くサンダルは脱げそうになりました．幸い若かったので何とか戻ることができました．

③私の家族は6名でしたが，家から逃げ出しました．村中の道を通って水田の道に来たとき，暗渠の開口部から水があふれていることに気がつきました．すぐに水は腰まで来て，みんなで摑まりあいながら流されまいとしましたが，私の子供が私の肩から落ちてしまいました．

④私は，驚いて玄関をあけました．そのとき白い泡を立ててすごい水が海岸からこちらにやってくるのが分かりました．私は屋根に逃げたら助かると思い階段のところまで逃げたのですが，そのときにはすでに私のものところまでやってきました．

こうした事例や他の同様な本（海南町[5]，須崎町[6]から，多くの人が非常に危険な体験をして生き延びていることが分かる．また，津波の避難ルートは必ずしも安全ではなかったことが分かる．早期避難は不可欠であるが，必ずしも避難が間に合っているわけではない．二階や屋根に上って助かっている場合もある．ただし，中にはその家が津波で破壊されたり，船などで壊されることもある．

(2) インド洋大津波

津波災害の経験に関する話は人々が津波災害を理解するために非常に役立つ．ただし，写真やビデオなどの映像はよりイメージを正しく伝えることができ，より重要である．ただし，古い時代にはそうしたものは少なく，特に津波の最中の映像はほとんどなかった．

津波の最中の映像，特に動画は，チリ地震津波のときに少しとられているが，ホームビデオが盛んとなった日本海中部地震津波[7]から多くなり，北海道南西沖地震津波[8]，さらにはマンサニジョ津波[9]などでは，貴重な映像が撮られている．2004年のインド洋大津波では，世界中の人々が津波が人々や家々を襲う映像や写真を見て驚かされた[10)11)12)13)14)]．スリランカのゴールのバスターミナルで撮られた映像は，特に貴重であり，津波災害の内容を理解する上で重要である．

そうしたビデオや写真から以下のようなことが考えられる．

①人々が津波を見て，それから逃げ出した場合にはそれから逃れることが困難な場合が多い．通常は人々の逃げる速さより津波の進行速度のほうが早いことが多い．できるだけ速く高いところに逃げる必要がある．

②津波は汀線付近で砕けることが多い．砕けた津波のフロント部分は家屋などを破壊する危険性が高い．また海岸付近での津波の流れのスピードは速くその力は大きい．

③津波の流れは一見速くなさそうな場合でも，多くの人々を流し飲み込むことができる．

④津波の陸上部の流れは破壊された家屋の残骸や車などを含み，それが人に衝突したり，人の自由を奪い飲み込んでいく．

3．人の危険のフロー図

(1) 人の危険の基本フロー図

図-1は，人への危険をフロー図として整理したものであり，直接的な津波の流れによる危険と，津波によって家屋が破壊されることによる危険の二つを示している．

津波が直接作用する場合には，人は立っていることができなくなる．一定の流れのスピードを超えると，人はバランスを失って倒れ，水の中に引き込まれて溺れる．流れに引き込まれるときに，人は海底や護岸などに衝突することもある．場合によっては水底を引きずられて致命的な怪我をすることもある[15)16)]．

一方，津波は家屋や種々の構造物を破壊する．人は，破壊された家屋や構造物内に閉じ込められたりして，負傷したり溺れたりする．スリランカのヒッカドゥアでは約1000名の人が列車の中に閉じ込められて溺れている．車に閉じ込められてなくなった人も少なくない．また，建物などの残骸を含む流れに巻き込まれて亡くなることも多い．

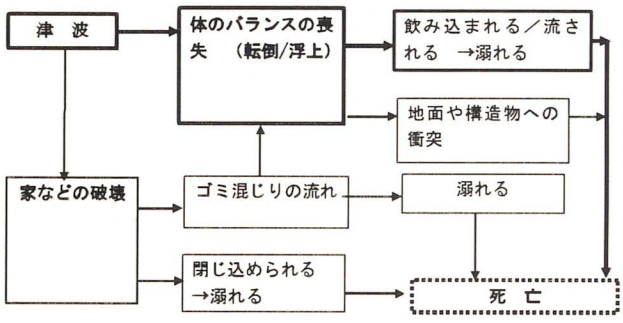

図-1 人への危険のフロー図

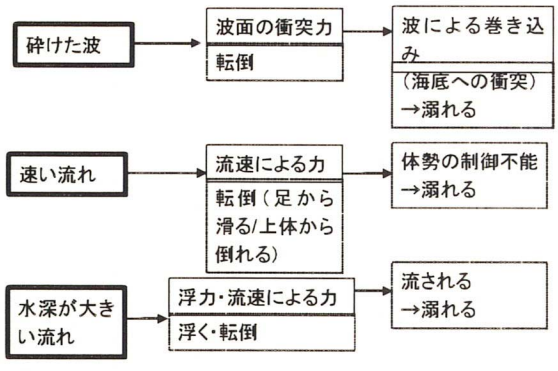

図-2 津波が直接作用する場合の危険のフロー

(2) 津波が直接的に作用する場合の危険のフロー

図-2 には，図-1 のなかで津波が直接的に作用し体のバランスを失う(転倒/浮上) 場合に関して，3つのケースに分けてフローを示している．すなわち，砕波面の衝突によって転倒する場合(ケース A)，早い流れによって転倒する場合(ケース B)，そして水深が大きい流れによって，浮き上がってバランスを崩す場合(ケース C)が考えられる．

ケース A：砕波面の衝突による倒れ込み

①砕波面の衝突

砕波している津波のフロント面は大変危険であり，海岸の施設を破壊する場合がある．砕波面は動く壁のようであり前にあるものを倒していく．人の体も，簡単に倒されたり [17]，ぐるぐると回転して水底に叩き付けられたりする(**図-3**)．もし，頭部が水底に衝突すれば大怪我となる．そうしたことが起きなくても，人は容易にコントロールを失い，速い流れによって流されてしまって溺れる危険性がある．

②砕波面の衝突力

この衝突力は，非常に大きいが作用時間が短い衝撃的な力(衝撃砕波力)である．この衝撃砕波力は作用する波面と人の角度によって異なる．それは，人がプールなどで水面に飛び込んだときに，うまくいかずに胸や腹から水面に衝突すると，大きな痛みを覚えるのと同じである．角度が小さいほど，すなわち水面と人の面が平行であるほど，大きな衝撃力となる．

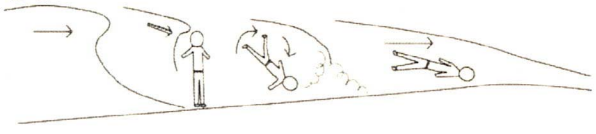

図-3 砕波面の衝突

この衝撃的な力は，直立壁や円柱に作用する衝撃的な波力と同じである．人の体への衝撃的な力は，円柱に作用する衝撃力の算定法 [18] で概略を計算することができる．この力は，通常の流れによる力(抗力)の数倍になることがある．

なお，この力は剛性によっても変る．すなわち，人が固定されている場合と動く場合では，固定されているほうが大きい．また，人の安定性は，作用する力だけでなく，人の姿勢によっても異なる．人が波面の作用を知らなかった場合には，より容易に倒される危険性がある．

③危険な砕波面の高さ

津波の砕波面が危険となる高さは，条件によって異なるが，簡単にチェックする方法として以下の方法を示す．すなわち，砕波面の水底よりの高さ η_{cr} が

$$\eta_{cr} = 0.75\ h_t \qquad (1)$$

以上であると危険である．ここに，h_t は人の身長である．これは，著者らが海水浴の安全性に関する調査を行ったときの実体験に基づくものである．すなわち，砕波面が人の高さと同じとなると非常に危険であり，75%程度でも場合によって危険となる．

この人と水面の衝突とは，人の身体が水の付加質量を瞬間的に得るプロセスであり，衝突力は得る水の付加質量の時間微分で表すことができる．その付加質量は，基本的に人の体積と等しいため，同じ背丈の人が衝突する現象に似ていると考えられる．したがって，同じ背丈の人が津波の砕波面の進行速度で衝突した場合の，人の安定性を考えればよいことになる．砕波面の進行速度は，$(gh_t)^{1/2}$ であり，基本的に人の安定性は 人の背丈 h_t の関数となる．危険な砕波面の高さ η_{cr} として経験的にその 75%を考えることにしている．

ケース B：速い流れによる転倒

①身体の転倒

非常に浅い津波の流れであっても，流れによって人はバランスを崩し，転倒する危険がある．一度倒れると，流れの中では(浅い場合はかえって)体を立て直すことは難しく，怪我や溺れる危険が大きい．

図-4 は，いかに人はバランスを崩して転倒するかをモデル化したものである [19]．このモデルは，遊歩道を持つ防波堤上で越波水によって人が転倒することを検討したものであり，基本的な流れと人の安定性の部分は，津波の流れに対しても同じである．西畑ら [20] あるいは有川ら [21] も同様な実験を行っている．

人体の転倒を考える場合には，滑動(足から滑ること)と回転（体から倒れ込むこと）を考える必要がある．これは，通常の波に対する直立壁の安定性を考えるのと同じであり，同様の式を用いる．すなわち，人体に作用する津波の流れによる力 F は流れの２乗に比例する抗力であらわされ，その力に抵抗する力は，基本的に人の体重（正確には水の浮力を差し引いた体重）W_o によるものである．

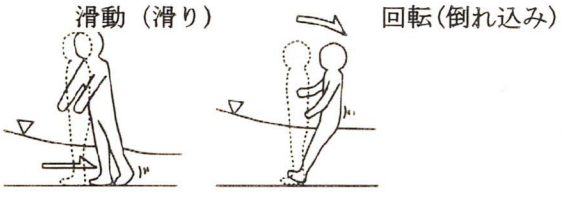

図-4 人の転倒のモデル

したがって，人体の転倒は以下の条件で発生する．

1)滑動

抗力 F が人の体重による抵抗力($\mu_s W_o$)を超えると発生する．すなわち，摩擦係数を μ_s として

$$F = \mu_s W_o \qquad (2)$$

2)回転（倒れ込み）

抗力による足先回り回転モーメント（Fh_G）が抵

抗する回転モーメント（$W_o l_G$）を上回ると回転が発生する．

$$Fh_G = W_o l_G \qquad (3)$$

ここに，h_G は抗力の水底からの作用高さであり，l_G は体重の中心から回転支点との距離であり，正面から津波が来襲し，足を閉じたままの場合には，足（つま先から踵）の長さの 1/4 程度であり、横カラ来襲する場合には足の中心間隔の 1/4 程度である．

③津波によって転倒する限界の水深と流速

図-5 は，津波の流れに対する転倒の実験結果を示す [19] もので，横軸に津波の流れの深さ η をとり，縦軸に流速 U をとっている．この結果は，身長が 183cm でやや細い人の場合であり，流れは正面からやってくる場合で，摩擦係数 μ_s が 0.37 と滑りやすい条件である．η が 60 cm で U が 1.2 m/s のとき，あるいは水深 η が 40 cm で U≒ 2.0 m/s のときに転倒している．この実験結果から分かるように，水深が浅くてそれほど速くない流れでも転倒の危険がある．ただし，この実験は人の動きを固定して直立しているだけの上体で行っている．この実験では回転（倒れ込み）によってバランスを崩し転倒しており，式(3)で示す限界の水深と流速が実験結果によく一致している．

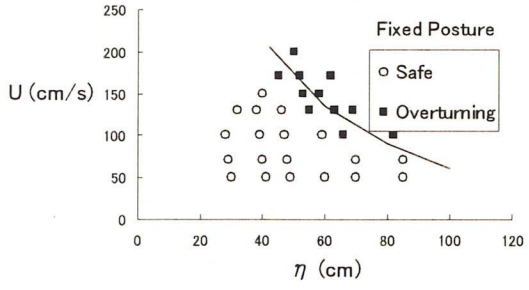

図-5 流れに対する人の安定性の実験結果
（固定条件）

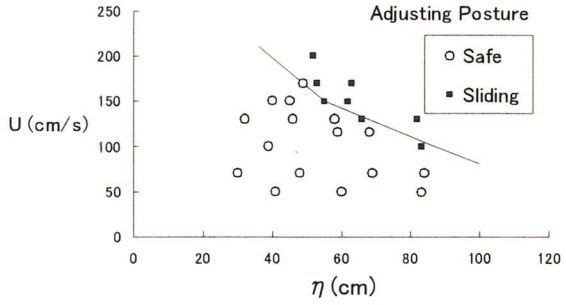

図-6 流れに対する人の安定性の実験結果
（姿勢を変える）

通常は，人は津波が作用するとそれに対抗するように姿勢を変えて安定性を増すようにする．この場合には，転倒するすべてのケースが滑りによる転倒となる．**図-6** は，姿勢を変えて安定性を増したケースであり，実験結果は式(1)の滑りに対する条件にほぼ一致している．**図-7** の結果は，**図-5** より同じ水深でも 10 から 20%程度大きな流速に対しても安定であり，意識して姿勢を変えることによってある程度安定性が高くなることが分かる．ただし，姿勢を変えて対抗できるのは回転に対してであり，滑りに対しては安定性が増えることはないことも留意すべき点である．なお，流れの向きについても実験を行っており，正面からが流れの力も大きく危険であることが分かっている．

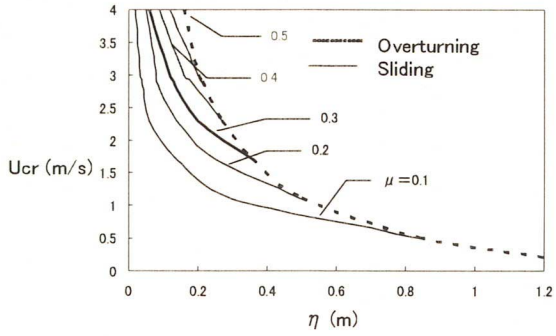

図-7 流れに対する人の安定性の計算結果
（160cm の標準的な人を対象）

図-7 は，身長 160cm の標準的な人に対する限界の流速 U_{cr} と水深 η を計算したものである． 点線は回転が起きる条件であり，実線は滑りによるものである．通常は回転で決まり，極浅いときに滑りによってバランスを崩して転倒にいたることが分かる．なお，摩擦係数は履いているものによって異なり，例えば，運動靴では乾いたコンクリートで 0.6 程度，滑りやすい場合は 0.4 程度であり，安全側を考えても 0.3 以上は考えられ，太い実線は摩擦係数が 0.3 の場合を示すものである．計算結果では，津波の流れが 1.3m/s であると人のひざ程度で，また身長の半部ほどでは 0.6m/s 程度で転倒の危険があることが分かる．

ケースＣ：水深が大きい場合の浮き上がりと転倒

水深が大きい場合には，特に人の首程度より上まで水があると人は浮き上がり，容易にバランスを失って流される．比較的流れが速くないならば，そしてその人が泳げる場合には，泳いで助かることもある．もし浮いているものがあってそれにつかまることができれば，助かる可能性は大きくなる．なお、ケースＣはケースＢの水深が大きい場合に相当するが，浅い場合と異なって完全な転倒には至らないが簡単に流される． ただし、バランスを崩す限界はケースＣの滑り型の算定式で求めることができる．

津波の流れに流されてしまったときには，それに抗して泳ぐことはできない．普通の人は訓練しても 0.5 m/s 以上の流れに抗して泳ぐことはできなく，長時間であれば 0.3 m/s 程度でも困難である．津

波で流された人のなかには，津波よって流されても漂流する物体に摑まって助かった場合が少なくない．沖合まで流されても沖合で助けられる場合もある．ただし，漂流物に衝突したり巻き込まれて死亡することもある． なお，津波の流れは絶えず変化しており，また場所によって変っている．さらに引き波のときの流れも強いことに留意する必要がある．特に河川などの低いところは津波を集めて流れることに注意が必要である．

4．津波避難と鉛直避難

(1) 鉛直避難の必要性

来襲する津波に対する避難の検討では，実際の訓練や避難シミュレーションなどによって避難上の問題点，特に避難を終えるに必要な時間を調べて，津波が到達する前に避難できる様に避難所を設ける．

例えば，和歌山県では津波避難に関する委員会（委員長：高山知司京都大学教授）を設けて，検討を行い，津波シミュレーションや人々の避難シミュレーション結果から，避難困難地域を見つけている．避難困難地域を解消するためには，護岸などを補強することによって津波の浸水を低減することも重要であるが，身近なところに鉛直方向への避難場所を設けることが効果的である．

(2) 鉛直避難場所の例

写真-1 は鉛直避難の例であり，和歌山県田辺市のある地区の自治会の避難場所である．この地区の人々は，津波が来襲した場合にはこの高台に逃げることを決めており，この緊急避難場所の階段や広場の整備を自ら進めている．ただし，この緊急避難場所はあくまで緊急の場所であり，津波が去った後，家屋等が被害を受けて戻れないときには，これまで指定されていた避難所（1km ほど離れている）に集まることになっている．

写真-2 は，もう一つの鉛直避難場所の例である．これは，徳島県美波町に設置された避難タワーであり，比較的簡単な施設で 50 名程度の避難が可能である．**写真-3** は三重県大紀町錦地区の避難タワーであり，500 名収容できる高さ 21mの円筒状の建物で，海抜 4.2mのところにあるため，２階部分で海抜が８m以上となり，最上階の５階では 24m 以上となる．

なお，大紀町や美波町では，5 分以内にすべての住民が避難できることを目指している．もちろん，これらの地域では地震の発生から津波の発生まで十分の時間がないためであるが，長い距離を時間をかけて避難すること自体が危険であり，身近に避難所が必要と考えられるからである．これからの高齢化社会や弱者を含めて津波死者ゼロを目指すためには，身近な鉛直避難が不可欠である．

写真-1　緊急避難場所(田辺市)

写真-2　避難タワー(美波町)

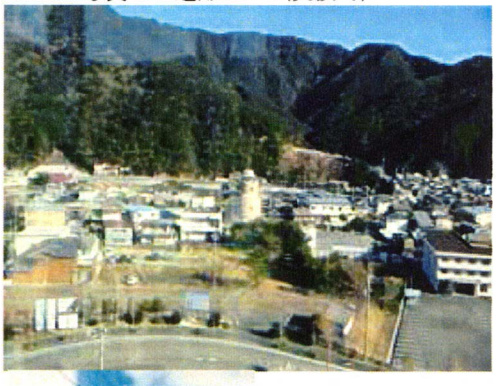

写真-3　避難タワー
(大紀町)

5．まとめ

避難途中に津波に遭遇することは大変危険であり，まして津波の中を動くことは大変危険である．最も大切なことは，早期避難であり，身近なところに避難できる場所があることが，安全性を高める．

津波の避難は基本的に鉛直避難であり，古くから多くの識者によって強調され，また実践されてきている[22)-27)]．実際に鉛直避難が効果的であることは，実際の災害でも証明されている．ただし，実際には避難所が地震などの避難所と同じところであることがあり，被災後に避難生活をする場を兼ねる場所となって，避難場所が遠くになり，結果として「水平避難」となることが少なくなかった．

繰り返しなるが，本論文の目的は避難途中で津波に遭遇する危険性をより明確に示すことであり，市民はもちろん行政の人々に知っていただき，大紀町や美波町などのように，身近なところに鉛直避難場所を設けることを促進することである．

謝辞

この研究の一部は，鉄道運輸機構の基礎的研究制度によるものである．また，この研究を行う上で，東京大学の堀川名誉教授，沿岸センターの高山沿岸防災研究所長，和田研究主管，岡調査役，群馬大学の片田教授，山口大学の瀧本准教授，国土技術政策総合研究所の小田沿岸防災研究室長，熊谷主任研究官，港湾空港技術研究所の富田上席研究官，五洋建設技術研究所の関本部長，西畑主任などに貴重なご意見をお聞きしている．ここに深甚なる感謝の意を表します．

参考文献

1) Horikawa, K., and Shuto, N.,: Tsunami disasters and protection measures in Japan , *Tsunami- their science and engineering*, pp. 9-22, 1983.
2) Synolakis, C.E., and Bernard E.N.,:Tsunami science before and after 2004, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A, 364, 2231 2265, doi: 10.1098 /rsta.2006. 1824, 2006.
3) 今村文彦：環太平洋での津波対策の過去と現状―我が国の防災対策への教訓，海洋開発論文集，第 20 巻，土木学会，pp. 15-19，2004.
4) 茂木町： 海が吠えた日，南海地震津波の記録，209 p. 76，1996.
5) 淺川町：宿命の淺川町，114 p.，1986.
6) 須崎町：海からの警告--南海・チリ地震津波，151p.，1995.
7) 谷本勝利ほか:1993 年日本海中部地震津波の実態と二三の考察，港湾技術研究所資料，No. 470，1983，299 p. 1983.
8) 高山知司ほか: 1993 年北海道南西沖地震津波の特性と被害，港湾技術研究所資料，No. 775，225 p.，1993.
9) Borerro, J., Ortiz, M.,, Titov, V.V., Synolakis, C.E.: Field survey of Mexican Tsunami, EOS, *Trans. American Geophysical Union* , 78 (8). 85, 87 88, 1997.
10) Takahashi, S. : Tsunami disasters and their prevention in Japan－Toward the performance design of coastal defense, *Proceedings of International Symposium Disaster Reduction on Coasts*, Monash University, Australia, 2005.
11) Fritz, H.M.,Borrero, J.C., Synolakis, C.E., Yoo, J.: 2004 Indian Ocean Tsunami flow velocity measurements from survivor videos, *Geophysical Research Letters*, 33L4605, doi:10.1029/2006 GL026784, 2006.
12) 今村文彦・河田恵昭・富田孝史・有川太郎・安田誠宏：インド洋津波災害とスリランカ現地調査報告，津波工学研究報告，第 22 巻，東北大学災害制御研究センター，pp. 93-102，2005.
13) インド洋大津波災害政府調査団：12 月 26 日インド洋津波災害―調査報告書，内閣府，179p.，2005.
14) 榊山 勉・末冨英夫・都司嘉宣・村上嘉謙：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の比較，津波工学研究報告，第 22 巻，東北大学災害制御研究センター，pp. 111-118，2005.
15) Kawata, Y., Benson, B.C., Borrero, J., Davies, H., de Lange, W., Imamura, F., Synolakis, C.E.: Tsunami in Papua New Guinea, EOS, *Trans. American Geophysical Union*, 80 (9) 101 105, 1999.
16) Synolakis, C.E., C.E, Bardet, J.P, Borrero, J., Davies, H., Okal, E., Silver, E., Sweet, J., Tappin, D. Slump: Origin of the 1998 Papua New Guinea tsunami, Proceedings of the Royal Society, A 458, 763-769 , 2002.
17) 高橋重雄・常数浩二・鈴木高二朗・成瀬進・土棚毅・池田義紀:海水浴中の重大事故事例に関する一調査、海岸工学論文集、第 45 巻、pp.1211-1215, 1996.
18) 谷本勝利・高橋重雄・金子忠夫・塩田啓介・小蔵紘一郎：円柱に働く衝撃波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 25 巻 2 号, pp. 29-87，1986.
19) 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一郎；越波時における防波堤上の人の転倒に関する研究-親水性港湾構造物に関する研究，第 2 報，港湾技術研究所報告，第 33 巻 4 号，No. 4，pp. 4-31，1992.
20) 有川太郎・大坪大輔・中野史文・下迫健一郎・高橋重雄・今村文彦・末冨英夫：遡上津波力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 53 巻，pp796-800，2006.
21) 西畑 剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀：津波浸水時の避難条件に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp. 1256-1260，2005.
22) Synolakis, C.E., and Kong, L.: Runup measurements of the December 26, 2004 tsunami, *Earthquake Spectra*, 22 (S3), S67 S91, doi: 10.1193/1.2218371,6, 2006.
23) 津波対策推進マニュアル検討委員会：津波対策推進マニュアル検討報告書，p. 38，2002.
24) 津波避難ビル等にかかわるガイドライン検討会；津波避難ビル等にかかわるガイドライン，内閣府，http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/，2005. tsunami_hinan.html
25) 小田勝也・熊谷兼太郎：避難しない住民を避難させるには－津波・高潮避難対策と動くハザードマップの開発－、土木技術資料、vol.49. No.12, pp.22-27, 2007.
26) 片田敏孝・桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集，部門 D Vol.62, No.23, pp.250-261, 2006.
27) 瀧本浩一、三浦房紀、柿本正裕：防災要員を考慮に入れた避難行動シミュレーション、地域安全学会論文報告集 No.5, pp.457-464, 1995.