

歩行者に作用する津波力の定式化と スマトラ沖地震津波のビデオによる検証

伊東慎一¹・大町達夫²・井上修作³

2004 年スマトラ沖地震津波では、多くの死者・行方不明者が出た。特に婦女子の死亡率が高く、主な死因としては津波に飲み込まれたことによる溺死または漂流物による衝突死と言われている。本研究では、まず、スマトラ沖地震津波のビデオ映像から人が津波に襲われている場面を解析すると共に、年齢性別ごとに、人が受ける津波の流体力と流木の衝突力を力学的に求める。次に、人が津波に抵抗できる水深や流速の範囲を安全領域として算定し、ビデオ解析した結果と比較する。さらに他の研究による実験結果と比較することで、算定した安全領域の妥当性を検証する。

1. はじめに

2004 年 12 月 26 日、スマトラ沖を震源とする Mw9.3 の地震により大津波が発生し、約 29 万人が犠牲となった(表-1)。津波到達時間は、犠牲者が多かったインドネシアでは地震発生直後、タイやスリランカでは約 2~3 時間であった。津波到達までに避難する時間があった地域でも、津波の知識や情報が不足していたことから多数の犠牲者が出た。犠牲者の死因として、津波に飲み込まれたことによる溺死または衝突死があげられるが、津波に襲われた人すべてが犠牲になったわけではない。津波の流速や水深が、どの程度までならば安全であるかを把握しておくことは、津波防災上重要であると考えられる。本研究では、スマトラ沖地震津波のビデオ映像から、人が津波に襲われている場面を解析すると共に、理論的に津波の流体力や流木の衝突力を求め、人が津波に抵抗できる水深や流速の範囲を安全領域として求める。そして、ビデオ解析結果と他の研究による実験結果を比較し、この安全領域が妥当であるかを検討する。

2. 犠牲者分布

一般に、津波による犠牲者の多くは女性や子供だと言われている(山下, 2005)。この原因は、女性や子供が男性に比べ体力的に弱いためか、あるいは地域文化的な背景があるのか、さらには単に女性や子供の人口が本来多かったのか必ずしも明らかでない。そこで、外務省が発表している各国の人口データとスマトラ沖地震津波の性別年齢別の死者データをもとに、性別年齢別の人口に対して死者の割合を調べ、この割合を式(1)に示すよう

表-1 主な被災国および全体の死者、行方不明者数(人)

WHO(2006-3-25 参照)		
国 名	死 者 数	行方不明者数
インドネシア	101,199	127,749
スリランカ	30,959	5,644
インド	10,872	5,551
合 計	約 149,000	142,123

表-2 インド東南部における性別年代別死者数(人)

(河田, 2005)			
	男性	女性	各年代男女合計
子供(15 歳未満)	1,180	1,208	2,388
大人(15 歳以上)	2,189	2,929	5,118
男女別合計	3,369	4,137	7,506

表-3 スリランカにおける性別年代別死者率(%)

Pin Foundation(2006-3-25 参照)			
	男	女	各年代男女合計
子供(12 歳未満)	23.33		23.33
子供(12~21 歳)	15.00		15.00
大人(22 歳以上)	28.33	33.33	61.66
男女別合計	—	—	100.00

に相対的死者率とした。すなわち、相対的死者率が 1 を越えれば、人口のわりに死者が多いことになる。

相対的死者率 =

$$\frac{\text{全死者数に対する年齢別死者数の比率}}{\text{全人口に対する年齢別人口の比率}} \dots (1)$$

本研究では、インド東南部とスリランカのデータを用いた。死者数は合計で約 4 万人であり、スマトラ沖地震津波の総死者数の約 2 割である。表-2, 3 はインド南東部の 3 つの州とスリランカにおける性別年齢別死者数および死者率である。これと人口データから式(1)を用いて、相対的死者率を求めた。次ページの表-4, 5 は、インド東南部およびスリランカの相対的死者率である。インドとスリランカでは死者データの年代が異なることに注意する必要がある。いずれにしても、表-4, 5 より、子供の相対的死者率は性別に関係なく 1 を下回る。このこと

1 学生会員 東京工業大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻 修士課程
2 正 会 員 工博 東京工業大学教授 総合理工学研究科人間環境システム専攻
3 正 会 員 修(工) 東京工業大学教務職員 総合理工学研究科人間環境システム専攻

から、子供の死者数が多いのは、第一義的には人口全体に占める子供の割合が高かったためと言える。逆に大人、特に女性の場合は、相対的死者率が1を上回っていることから、人口のわりには多く亡くなっていることになる。

次に、日本で起きた津波災害に対しても、当時の人口データを用いて各年齢の相対的死者率を調べた。調べた津波災害は1933年昭和三陸地震津波、1983年日本海中部地震、1993年北海道南西沖地震である。この3つの津波災害を選んだ理由は、死者行方不明者が多いこと、当時の国勢調査のデータが残っていることによる。表-6は、各地震津波における各年齢の相対的死者率である。男女別の死者データは無いものの、10歳以下と61歳以上の相対的死者率（北海道南西沖地震津波での10歳以下を除く）が1を越える値となった。つまり、幼児や高齢者は人口のわりに多く亡くなっている。地震津波の条件にもよるが、水深や流速がどの程度までなら、津波に抵抗できるかを示す安全領域の検討には、年齢性別を考慮する必要があると思われる。

3. スマトラ沖地震津波のビデオ解析

(1) 解析の目的

人が水中で避難する時、どの程度の流速や水深までならば避難可能であるかという研究はいくつかある。たとえば、大型実験水路で定常流を作り実際に被験者に体験してもらい、どの程度の流速や水深までなら耐えうるかという実験がある（須賀ら、1994；西畑ら、2005）。しかし、実際に津波が堤防を越えていく場合は、複雑な流れであるため実験によって把握する事は難しい。そこで今回のスマトラ沖地震津波での遡上津波と被災状況が映されているビデオ映像を利用する。ビデオ映像の中から、人が津波に襲われている場面を解析すれば、現実的なデータが得られると考えた。

(2) 解析手法

スマトラ沖地震津波で多大な被害を受けたアチェやプケットを取材した映像の中から、人が津波に襲われている場面を取り出した（写真-1）。その中から、人が身長以上の津波に襲われている場面や人と撮影現場の距離が遠く流速および水深を推定できない映像は除いた。人の性別やおおまかな年代（大人、子供等）を推測し、津波に襲われている場面での流速および水深を推定し、図にまとめた（図-1）。流速は、流木やドラム缶などの漂流物が流されている映像から推定した。この方法では、漂流物の大小によって推定流速が異なると思われる。そのため、各場面で3回以上解析し誤差の減少を図った。水深は、流れている物体の寸法や人体の寸法から推定した。人体の寸法については既存の資料（日本建築学会、2003）を参考に、3回以上解析しそれを平均した。流速

表-4 インドネシア南部における相対的死者率

（河田、2005；総務省統計局、2006-3-10参照）

	男性	女性	各年代男女合計
子供(15歳未満)	0.89	0.96	0.93
大人(15歳以上)	0.86	1.24	1.04
男女合計	0.87	1.14	1.00

表-5 スリランカにおける相対的死者率

（総務省統計局、2006-3-10参照；Pin Foundation、2006-3-25参照）

	男性	女性	各年代男女合計
子供(12歳未満)	0.82	0.82	0.82
子供(12歳以上21歳以下)	0.70	0.70	0.70
大人(22歳以上)	1.11	1.37	1.24
男女合計	—	—	1.00

表-6 日本における主な地震津波による年齢ごとの相対的死者率

（ ）内は死者数（山下、2005；日本建築学会、1995）

	昭和三陸	日本海中部	北海道南西沖
10歳以下	1.21(818)	2.01(9)	0.61(16)
11～20歳	0.61(329)	1.07(5)	0.26(8)
21～60歳	0.56(1134)	0.72(57)	0.75(84)
61歳以上	1.21(304)	1.22(12)	3.07(90)

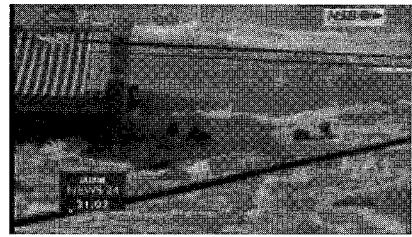


写真-1 流れに耐え切れず流されている場面
(Photos and Videos from the aftermath of the Asia Tsunami, 2006-3-25 参照)

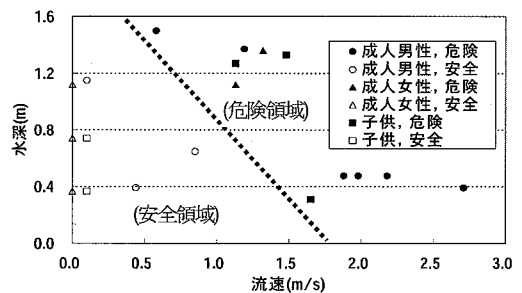


図-1 ビデオ解析結果

を求めるのに必要な時間の測定方法は、ビデオ編集ソフトのコマ数から計算し求めた。

また、実際の映像では観測点が固定されていないことが多いため、一定の時間間隔での撮影機器の移動距離および移動角度も考慮して流速および水深を推定した。

(3) 解析結果および考察

図-1は縦軸を水深(m)、横軸を流速(m/s)とし、

各場面での被害者の性別および大人と子供の区別をして、映像から人が流されている場面を危険とし、人が流されずに耐えている場面を安全と判読した結果を示している。危険を黒塗り、安全を白抜きでプロットしたところ、左下に安全、右上に危険の各場面が分布し、図中の破線が示すように安全および危険の領域が明確に分離していることが確認された。

4. 年齢、性別を考慮した津波力の定式化

(1) 導出方法

須賀ら (1994) はモリソン式を用いて、水中歩行者に作用する流体力の式を求め、松富 (1999) は津波時の流木衝突力を導出している。本研究では既往の研究を参考に新たに年齢および性別、流木衝突力を考慮出来るように定式化を行った。

まず、人が流れに耐える力 $F1$ を式 (2) のようにおく。

$$F1 = Af(mg - w) \dots\dots\dots (2)$$

ここで各項は、 A : 筋力係数、 f : 摩擦係数、 m : 体重 (kg)、 g : 重力加速度 (9.8 m/s^2)、 w : 浮力である。人体は円柱としてモデル化する。

次に人体の前後における圧力差から求められる圧力抗力と、粘性によるせん断応力から求められる摩擦抗力の和を、実験的に式 (3) で求める (越村ら, 2002)。

$$F2 = \int 0.5 \rho C_D u^2 dS \dots\dots\dots (3)$$

ここで各項は、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 C_D : 抗力係数、 u : 流速 (m/s)、 S : 人の投影面積 (m^2) である。抗力係数 C_D は人体を円柱とし、人体の身長と幅の比が 4~6 であるから 0.9 を採用した。

流体の慣性力は、人体とその周りの流体にも力が働くため式 (4) で求めた (越村ら, 2002)。

$$F3 = \int 0.5 \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} dV \dots\dots\dots (4)$$

ここで各項は、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 C_M : 人体に対する慣性係数 ($1 + C_D = 1.9$)、 u : 流速 (m/s)、 V : 水に浸かっている人体の体積 (m^3) である。

$$F4 = 1.6 \beta C_{MA} \gamma D^2 L \left[\frac{V_{A0}}{(gD)^{0.5}} \right]^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4} \dots\dots\dots (5)$$

上記の式 (5) は、松富 (1999) による流木の衝突力を導出する式であり、段波やサージ、定常的な流れに対応することができる。ここで各項は、 β : 流木係数、 C_{MA} : 流木に対する付加質量係数、 γ : 流木の単位体積重量 (kg/m^3)、 D : 流木の直径 (m)、 L : 流木の長さ (m)、 V_{A0} : 流木速度、 g : 重力加速度、 σ_f : 流木の降伏応力である。なお、流木に対する付加質量係数 C_{MA} は、段波やサージでは 1.7、定常流れでは 1.8 とされている。以上より、人体が流れに耐える場合のつりあいの式は

表-7 性別および年齢別の安全係数

安全係数の導出 (C: 男性, D: 女性)				
年齢	A 相対的筋力	B 既存安全率	C 安全係数	D 安全係数
4	20	...	0.095	0.095
10	40	...	0.190	0.127
15	71	...	0.339	0.276
20	100	0.476	0.476	0.333
30	100	...	0.476	0.260
40	76	0.357	0.362	0.226
50	58	...	0.276	0.206
60	46	0.222	0.220	0.170

$$F1 \geq F2 + F3 + F4 \dots\dots\dots (6)$$

となる。この式の右辺と左辺が等しい場合が、安全領域と危険領域の境界線ということになる。これを安全領域境界線と仮称する。

(2) 各係数の説明

a) 安全係数

須賀ら (1994) の研究では、以下の式 (7) のように式 (3) の流体力に安全率 α が付け加えられている。

$$F'2 = \alpha \int 0.5 \rho C_D u^2 dS \dots\dots\dots (7)$$

この α は、歩行者の流れに対する感じ方や、歩行者に対する体力に関する係数とされている。本研究では年齢及び性別の違いは主に筋力の違いであると考え、人の耐力を表す式 (2) に、筋力係数 A を導入した。水中で流れに耐えるときは脚力の影響が大きいことが実感できるからである。筋力が最も発達している 20 代の男の値を 100 として各年齢における筋力の数値を表-7 の A 欄に示す (日本建築学会, 2003)。次に須賀らの研究での 20 代の安全率 α (同表 B 欄) と本研究での安全係数 A の関係を一致させ、40 代 60 代の比較を行った (同表 C 欄)。その結果、須賀らの実験値とほぼ同じとなった。これより、他の性別年齢も利用する事が出来ると考え、以下の関係式を求めた。

求めたい年齢の安全係数 =

$$(\text{求めたい年齢の相対的筋力} / 100) \times 0.476 \dots\dots (8)$$

さらに、文部科学省の平成 15 年度体力統計 (2006-2-12 参照) から女性と男性との体力差を求め、女性の安全係数を求めた (同表 D 欄)。

b) 流木係数

松富 (1999) による流木の衝突力 $F4$ は、瞬間最大衝突力であるため、実際に人が受ける衝突力とは異なる。松富の評価法では、衝突の瞬間から衝突最大値までの時間は約 0.007 秒であり、衝撃力の最終時間は 0.014 秒であるとしている。つまり全衝突力 (力積) は、三角形の面積となる。全衝突力を、作用時間で除して平均衝突力を算出した。ここで作用時間は、流木が人の幅 (約 20

cm) を流れると仮定した時間とした。これより平均衝突力 F_c は、瞬間最大衝突力と作用時間の関係から、式(9)で示される。

$$F_c = F_4 \times 0.014 / 2 \times 0.2 / u \dots \dots \dots (9)$$

以上を考慮し安全領域を検討する。

(3) 導出結果

性別および年齢別の安全係数(表-7 参照)を用いて、20代男性、20代女性、60代男性、5歳児の安全領域図を作成した。

a) 流木無しの場合

図-2は縦軸を水深(m)、横軸を流速(m/s)とし、各曲線は年齢性別ごとの安全と危険の境界線を例示している。各曲線の右上側は流れに耐えられない危険領域、左下側は流れに耐える安全領域となる。流速1.0 m/s、水深0.7 mの流れが襲ってきたと考えると(図-2中の●印)、20代男性では安全領域内であるが、20代女性や幼児などは危険領域内となり、流れに耐え切れないうことになる。20代男性の安全領域とその他の年代の安全領域を比較すると、20代女性、幼児の順に安全領域は狭まる。従来女性や子供は男性に比べ流されやすいと直観的に考えられていたが、図-2より、その差違が客観的に確認できる。

b) 流木ありの場合

流木の衝突力を考慮して、5歳児の安全領域の図を作成し、流木の有無や流木の大小で安全領域がどのように変化するかを検討した。その結果を、図-3に示す。水深が比較的浅い場合(20 cm以下)では、流れに耐えられる流速が流木の無い場合の流速の60%以下となる。水深が40 cm以上70 cm以下の場合には、耐えられる流速は流木が無い場合の80~90%となる。水深が70 cm以上になると人の耐力が減少し、流体の抗力が増加するので、耐えられる流速は減少する。流速が減少した場合、流木の影響はほとんどない。条件によって異なるが、流木により安全領域が激減することから、漂流物が人に衝突すると非常に危険であることが再確認される。

c) 各力の概略比較

人の耐力、津波遡上に伴う抗力・慣性力について、各々の大きさを比較する。各力の大きさは、流速や水深の変動に応じて変化するが、実際に津波が来襲し、押し波・引き波での流速や水深を測ることは困難である。慣性力に対しても、津波の加速度を求めることは困難で、計測も難しい。藤井ら(1996)は、津波の時間-流速および時間-水深の関係を水理模型実験から求めている(図-4)。

このデータから、海岸線で20代男性が津波を受けると仮定して各力の関係を求めてみた。図-4、5において0.8秒以降を押し波、11.5秒以降を引き波と呼ぶ。流速は押し波の方が速いが、水深は引き波の方が深い

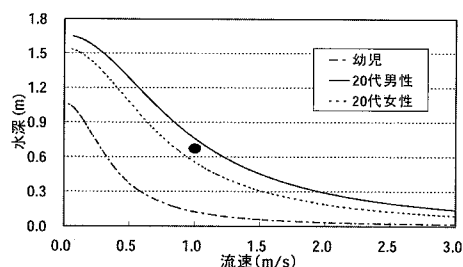


図-2 年代、性別による安全領域境界線(流木なし)

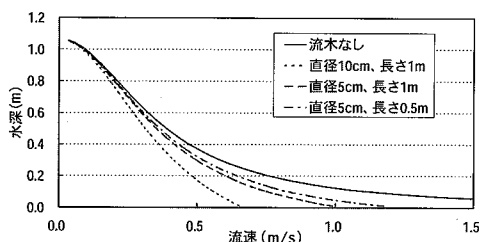


図-3 流木の衝突力を考慮した5歳児に対する安全領域図

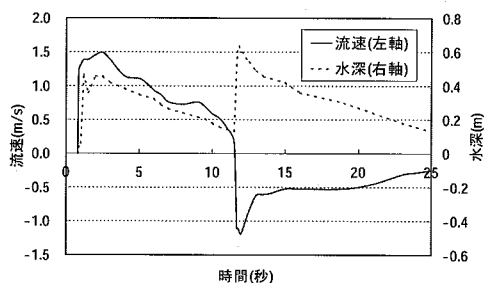


図-4 津波時間と流速および水深の関係(藤井ら, 1996)

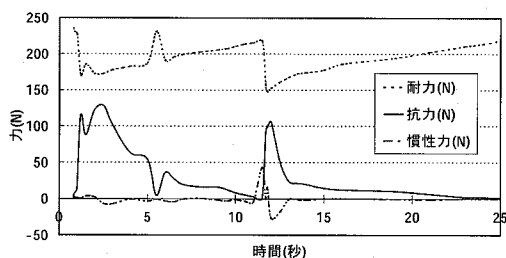


図-5 津波実験における耐力、抗力、慣性力の試算

(図-4)。耐力は水深に依存するため、水深が深いと耐力は減少する。このとき、耐力が急激に減少しているのは、押し波または引き波が急激に襲ったことによる。抗力は流速と水深に影響するため、押し波と引き波に襲われるときは、急激に抗力が増加する。押し波では抗力が大きい状態が5秒ほど続くが、引き波では2秒ほどしかない。引き波の流速が13秒付近で急激に遅くなるのが原因である。慣性力は、水深と加速度による。よって、加速

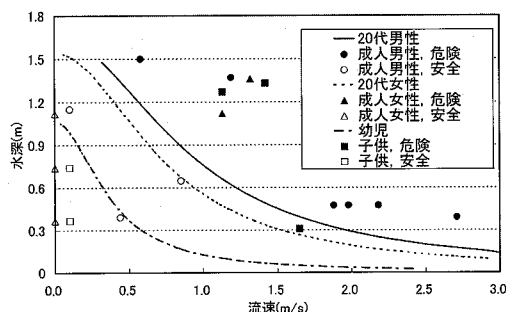


図-6 ビデオ解析による安全領域検討

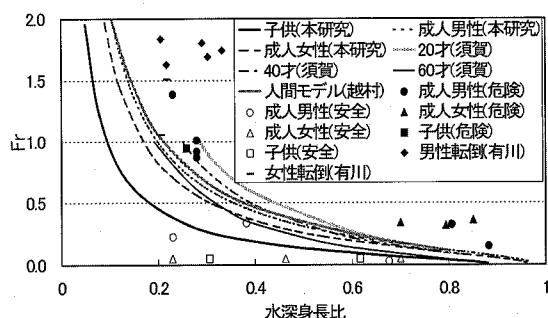


図-7 既往の研究結果との比較検討

度の最大は、押し波と引き波が急激に襲う瞬間となる。以上より、加速度項は押し波時と引き波時において影響が無視できなくなるが、その他では無視するほど小さいものとなることが確認される。

5. 算定安全領域の妥当性の検討

図-6は3章でのスマトラ沖地震津波ビデオの解析結果と4章で力学的に求めた安全領域を比較したものである。ビデオ解析では流木を含む場面が見当たらなかったため、式(5)の流木衝突力を省いた。ビデオ解析点は20点あるが、性別および年齢別の安全、危険のプロット点が安全領域危険領域の点に区分されている。安全領域の境界付近を含めて、ビデオ解析の結果と算定結果は整合している。図-7は、横軸に水深を身長で割った水深身長比、縦軸にフルード数を示した図であり、須賀ら(1995)、越村ら(2002)、有川(2006)の研究結果との比較図である。本研究の成人男性の安全領域と、越村らの安全領域はほぼ一致する。須賀らの研究は歩行速度40 cm/sでの安全領域を示しており、本研究よりも外側にあることが理解できる。また、有川らの研究から転倒、滑動の位置関係が、これら安全領域の内外にあることがわかる。これから、他の研究と比較しても、本研究で導出した安全領域図は妥当であると考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) まず、スマトラ沖地震津波のビデオから、人が津波に抵抗できる水深や流速の範囲を安全領域として求めた。人が津波に襲われている場面での流速、水深、性別、年代(大人、子供)を解析した。その結果、流れに対して安全か危険かの領域が明確に分離していることが確認された。
- (2) 一方、安全領域をモリソン式と流木衝突力の式から力学的に求め、独自に安全係数と流木係数を加えることで、年齢性別および流木を含めた安全領域を求めた。流木の有無や年齢性別ごとの安全領域から、その差違を客観的に確認することができた。
- (3) ビデオ解析の結果と力学的に求めた安全領域の図を比較し両者が整合していることを確認した。また既往の研究結果との比較によって、本研究で導出した安全領域図は妥当であると確認された。

今後の課題として、精度を上げるためにビデオの解析をさらに進めることや、流木が衝突するときの人への影響を考慮した検討が必要と思われる。

参考文献

- 有川 太郎(2006): 人工津波実験について, 震災予防, No.206, January 2006, pp 13-16
- 河田恵昭(2005): 「2004年12月スマトラ沖地震津波災害の全体像の解明」, 科学研究費補助金, 報告書 pp 157-160.
- 越村俊一・Harold Mofjeld・片田敏考・河田恵昭(2002): 津波の市街地氾濫による人的被害に関する一評価法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp 1441-1445.
- 佐藤彦彦(1992): 人間工学基準値数式便覧, 技報堂出版, 437p.
- 須賀亮三・上阪恒雄・吉田高樹・浜口憲一郎・陳志軒(1995): 水害時の安全避難行動(水中歩行)に関する検討, 海岸工学論文集, 第39巻, pp 879-883.
- 総務省統計局: 世界の統計 2006 より(オンライン), <http://www.stat.go.jp/index.htm>, 参照 2006-3-10.
- 土木学会(1968): 1983年日本海中部地震震害調査報告書, pp 167-169.
- 西畑剛・森屋陽一・田村保・瀧本浩一・三浦房紀(2005): 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.
- 日本建築学会(1995): 1993年北海道南西沖地震震害調査報告, pp 94.
- 日本建築学会(2003): 建築設計資料集成「人間」, 丸善, p. 12, 74.
- 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進(1996): 津波の流速計算に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp 291-295.
- 松富英夫(1999): 流木衝突力の実用的な評価式と変化特性, 土木学会論文集, No.621, II-47, pp 111-127.
- 文部科学省: H15年度体力・運動能力調査(オンライン), http://www.me-xt.go.jp/b_menu/toukei/001/022/2003.htm, 参照 2006-2-12.
- 山下文男(2005): 哀史三陸大津波, 青磁社, p 154.
- Photos and Videos from the aftermath of the Asia Tsunami(オンライン), <http://www.waveofdestruction.org/tsunami-videos/>, 参照 2006-3-12.
- Pin Foundation(オンライン), <http://www.pinfoundation.org>, 参照 2006-3-25.
- World Health Organization(オンライン), http://www.who.int/hac/crises/in-ternational/asia_tsunami/en, 参照 2006-3-2