

2007年ソロモン地震津波における海岸樹木の津波力減殺効果について

Tsunami Force Reduction Effect of Coastal Forest in 2007 Solomon Earthquake Tsunami

坂本知己¹・平石哲也²・林田光祐³・井上章二⁴・小林範之⁵

Tomoki SAKAMOTO, Tetsuya HIRAISHI, Mitsuhiro HAYASHIDA,
Shoji INOUE, Hiroyuki KOBAYASHI

Some of dense coastal forests in tropical areas protected several villages from tsunami hazard in 2004 Indian Ocean Tsunami. Several physical and numerical researches to simulate the reduction rate of tsunami force by the forests have been carried out. A few surveys were, however, done to evaluate the prototype effects of the forest in the field devastated in tsunamis but any clear quantitative evidence for the effects was not revealed. A field survey to measure the dense of coastal forest and to validate the simulation results for the tsunami force reduction by coastal vegetation was carried out after the 2007 Solomon Island Earthquake Tsunami. The results demonstrated the validity of the simple calculation method applying the experimentally derived drag force coefficient in dense vertical columns resembling trees.

1. はじめに

海岸のマングローブやココヤシ群落が、遡上した津波力を低減させ人的な被害を軽減できる効果を有することは、2004年インド洋津波以前から示唆されてきた。実際には2004年インド洋津波においては、南インド洋マレーシアの海岸で、マングローブ林の背後に位置していた村落の被害が無かったことが報告されている。さらに、バンダアチェの被災調査では、エビ養殖のためにマングローブ林を消滅させたことが被害を拡大させた一因となることが示された(柳澤ら, 2007)。また、樹木をモデル化した模型実験も実施されている(Hiraishi ら, 2003)。ただし、狭い範囲の海岸線で、樹木の有無による背後地域の被災の相違を観察し、海岸樹木の津波力低減効果を定量的に求めた例は無い。模型実験や数値計算の検証データを作成するためには、実際に効果を有した海岸樹木の密度・幹直径(樹径)・配置等を現地で調べる事が重要で、今後の防災植林計画にも活用できる。

2007年4月にソロモン諸島西方で生じた地震による津波は、近隣のシンボ島やギゾ島で大きな被害を及ぼした。一方、ソロモン諸島はほぼ全島が海岸樹木に覆われ、密生した樹林の背後では破壊を免れた家屋が存在していたことが予想された。そこで、津波直後の調査によって家屋の被害が甚大であることが分かった西ソロモン州ギゾ島において、海岸樹木によって防護されたと考えられる家屋前面の樹木密度・配置を調べ、現地における海岸樹木の効果を検証した。さらに、家屋防護に効果がある手

法を検討した。

2. 津波の概況と調査地点

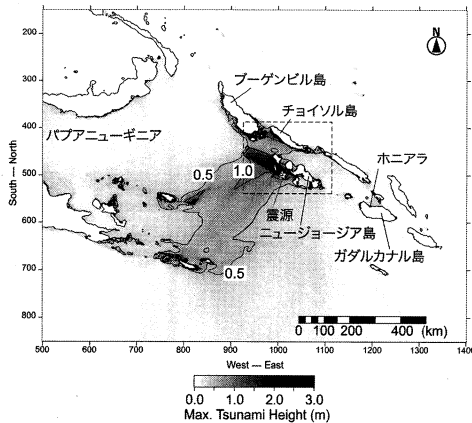
(1) 津波の概況

2007年4月2日5:40頃(日本時間)、ソロモン諸島沖(南緯8.6°, 東経157.2°)を震源として地震が発生し、沿岸部に津波被害を与えた。地震マグニチュードは8.1(Moment) および7.6(RICHTER)である。地震断層は震源を中心に東西へ広がり、ギゾ島、シンボ島、ペララベラ島等の沿岸に数mの遡上高を有する津波をもたらした。図-1にソロモン諸島国の位置および外洋の津波高計算結果を示す。なお、各島の痕跡および浸水高の詳細は、調査団の報告をまとめた文献等にて示されている(松富ら, 2007, 富田ら, 2008)。津波痕跡高は、ギゾ島周辺では、ほぼ明らかになっている。そこで、これらの調査結果を踏まえて海岸樹木林による津波被害の低減が生じていたかどうかを2007年6月16~23日にわたって調べた。

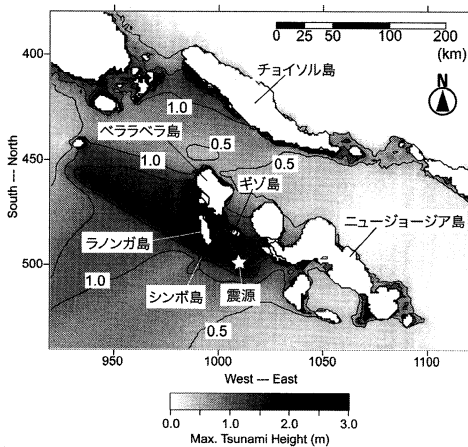
(2) 調査地点

被害が大きかったギゾ(Gizo)島では、浸水高さ約4m、遡上高さ約6mで、ギゾ島ティティアナ(Titiana)村等では一部の高床式家屋を除いてほとんどの家屋が押し流された。植樹帯と津波被害の相関は、ギゾ島の南岸で顕著に生じていたようである。また、ギゾ島南岸スバ(Suva)村では、植生が豊かな場所と、植生が少ない場所で被害程度の差が現れていた(防衛大学藤間教授コメント)。そこで、ギゾ島において地点を特定して、痕跡高、地盤高および植生による被害軽減が推定できる地区の樹木分布を調べた。樹木分布は後述するように、破壊された家屋に残った家屋(1カ所のみ残った家屋)の前面に仮想のラインを海岸線から直交して設け、ラインの左右約20m幅に位置する樹木の高さ、樹径、位置、樹木種を調べた。測定ラインは、ヒアリング等により家屋が

1	博(農)	(独法)森林総合研究所気象・環境研究領域
2	正 会 員	博(工) (独法)港湾空港技術研究所海洋・水工部
3	農博	山形大学農学部
4	博(農)	琉球大学農学部
5	博(農)	愛媛大学農学部



(1) ソロモン諸島



(2) ギゾ島周辺

図-1 調査地点の位置と計算津波高 (埼玉大学工学部 原田賢治氏提供)

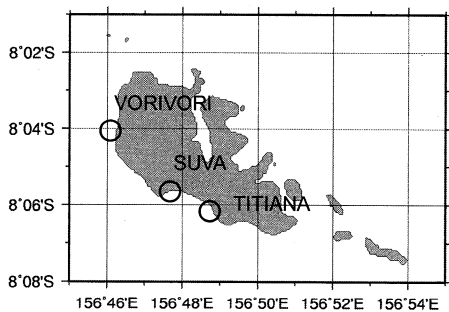


図-2 ギゾ島での調査地点 (地図は当所辰巳大介氏作成)

全壊または流出したことが確認できた場所と汀線を結ぶ測線をLine-1、樹木効果により家屋の損壊が免れた地点と汀線を結ぶ測線をLine-2とした。図-2はギゾ島での調査地点を示す。また、ギゾ島での調査地点の被災状況は次の通りである。痕跡調査の詳細および樹木の測定結果の代表値として、ここでは(a)スバにおける値を表-1に整理した。

(a) スバ (Suva)

スバはギゾ島の西部に位置する村 (S8:5:37.8, E156:47:29.7) で、津波で最も大きな被害を受けた村落の一つである。人口は140名 (28家族) で1軒だけ残して、すべて流された。津波は3回来襲し、地震後数分でラノング島の隆起により、最初の津波は西から来た。2波目、3波目は沖側から来襲し、3波目が最大 (津波高約3m) と言われる。ヒアリングから求めた浸水深は、海岸より200m離れた倉庫が1.3m、100m離れた高床式住居で2.0mであった (柱の回りの洗掘深は45cm)。高床式の家屋は柱を残し全壊し、1軒だけが残った。近隣のパエロギ (Paelogge) 村でも比較的堅牢な家屋を残し、ほぼ全壊していた。地表を基準として測った代表浸水深はヒアリングから確認し、200cmとした。津波来襲時の海面から浸水面までの高さである浸水高は330cmである。

(b) ティティアナ (Titiana)

村落は大きく東西に1km程度広がっている。東端のブロック造りの教会は、基礎が洗掘され、建物回りの砂が掘られていた。洗掘深は70cmである。ほとんどの家は山の方へ流されており、残骸が広がっている。残っている家の特徴は高床式で基礎が堅牢 (深さ90cmくらいまで基礎を埋めている) である。また、周辺の樹木の影響で流出を免れた家もあった。村落の海側には高さ1m程度の石積み防潮堤が築かれていた場所があるが、基部は洗掘を受け、破壊されていた。教会の浸水痕跡をヒアリングで確認し、浸水深を210cm、浸水高は413cmとした。なお、浸水高は場所によって異なり、測定値は349から413cmまで分布していた。

(c) ボリボリ (Vorivori)

ボリボリ村はギゾ島西端に位置し、100名が住む。地震後2、3分で突然前面の海が盛り上がり (リーフによる浅水変形の影響と思われる) 全員が山へ逃げた。インド洋地震津波のことはテレビで知っており、子供たちにも教えている。また朝の8時頃であり避難には都合が良かった。ただし、二つの地区で27軒あったが残った家は1軒だけであった。家屋に記録された痕跡から、浸水深は195cmであった。浸水高は津波来襲時の海面から302cmである。

3カ所のヒアリングと痕跡測量から平坦な村落地表面を基準とした津波による浸水深は、概ね200cmであ

表-1 ギゾ島スバ(Suva)における植生の津波力低減効果に関する調査結果整理例

(1) 津波痕跡と地表高												
緯度・経度	日時	津波時 潮位	津波痕跡			根拠	Line1(樹木無し)			Line2(樹木有り)		
			痕跡高		浸水深		測 点 番号	地盤高 (補正)	汀線からの 距離(m)	測 点 番号	地盤高 (補正)	汀線からの 距離(m)
S8° 5'37.8"	2007/6/19, 10:00	59cm				ヒアリ ング	1	-38cm	0	1	-38cm	0
E156° 47'29.7"		推定潮 位	測定値	補正值	測定値		2	62cm	6.9	2	71cm	9.0
							3	26cm	27.0	3	50cm	23.6
							4	112cm	48.9	4	126cm	25.4
							5	144cm	64.2	5	138cm	42.6
							6	143cm	72.1	6	125cm	66.2
							7	155cm	85.5	7	130cm	118.5
							8	169cm	100.3			
(10:00-14:00 の平均)							21cm	368cm	330cm	200cm		

(2) 樹木の種類											
樹木番号	1	2	3	4	5	6	B1	B2	B3	B4	B5
種類	Christmas Tree	Christmas Tree	Teibia	Coconuts	不明	Teibia	"BUNI"				Adan (細い樹幹の集合体 経を D' とする。
樹径 D'(cm)	55.8	53.6	48	26	22.8	66	105	117	91	110	75
樹高 H'(m)	14	15.4	18.3	12.2	6.6	16.1	22.5				
汀線からの距離 x(m)	114.1	108.7	104.5	100.2	92.6	86.3	37.6				52.5
家屋中心からの横距離 y(m)	-0.7	-3.6	-2.3	-3.7	-3.1	-11.8	0.0				-13.4
											-7.0
											-1.6

た。そこで、この値をギゾ島における海岸の樹木帯に作用する津波の地表からの高さ（浸水深 η ）とした。

3. 樹木による津波力低減効果の計算法

(1) 計算の方法

簡易的に樹木林による津波防災効果を推定する手法は、平石（2008）にしたがい、海岸線に沿って幅数十m以上で生育する樹木帯を代表的な津波防災樹木帯として考える。陸上へ氾濫した津波の単位幅あたりの力 p (N/m) は、一般に津波による浸水深 η (m) と流速 u (m/s) を用いて抗力が卓越するものとして次式で表される（Hiraishi ら、2003）。

$$p = 0.5 C_D \rho \eta u^2 \text{ (N/m)} \quad (\rho \text{ は水の密度 (kg/m}^3\text{)}) \quad (1)$$

C_D は抗力係数で、家屋壁面では $C_D = 2.0$ とした。樹木は主に津波流速 u を軽減するために効果を有しており、 u が減衰することで津波の力も軽減される。グリーンベルトによって低減される津波力は、津波の流れに比例する抗力と、加速度に比例する慣性力で表され、単位幅および単位浸水深当たりで表すと次式で示される。

$$WF = \frac{1}{2} C_D \frac{\rho A_0 u |u|}{\Delta s} + C_M \rho \frac{V_0}{D \Delta x V} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 WF はグリーンベルト前後での津波力の差 (N/m/m)、 C_M は慣性力係数、 A_0 (m²) および V_0 (m³) はグリーンベルトを構成する樹木が占める単位面積あたりの有効投影面積と有効容量を示す。 V (m³) は、グリーンベルト

が位置する単位面積あたりの総水塊量で、面積に津波による浸水深を乗じた数値になる。 Δs (m²) は計算に用いる格子面積で、ここでは 10m × 10m の正方形地形を用いる。 D (m) は津波のグリーンベルト帯での浸水深である。 Δx (m) は津波進行方向に直角な計算格子幅である。

個々の樹木は、幹部と葉部に分けられ、幹部は直径 D' 、長さ H_1 の円柱として近似できる。今回の計算では浸水深が 2m 以下なので、有効投影面積等は幹部だけで決まる。10m × 10m をグリーンベルトの密度を定義する単位面積とした場合に、有効投影面積等は単位面積あたりの樹木本数 N によって決定され、次式で示される。

$$A_0 = D \left[D' \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (3)$$

$$V_0 = D \left[\pi \frac{D'^2}{4} \frac{N}{100} \Delta s \right] \quad (4)$$

抗力係数 C_D と慣性力係数 C_M は模型実験（Hiraishi ら、2003）の結果から次式で与えられる。

$$C_D = 8.4 (V_0 / V) + 0.66 \quad (5)$$

$$C_M = 1.70 \quad (6)$$

津波高さ η は樹木林の中では、大きく変化しないが、流速が小さくなるため、家屋等に作用する津波力（抗力）は小さくなる。なお、沖合から流入する津波の水量は一定なので、樹木帯での流速が低減され、樹木帯に流入する水量そのものが制限を受けると、樹木帯の沖側では津波の一部が反射され、津波水位は増加する。ここでは、

流速に比べると水位の変化は小さいと仮定して、樹木帯の沖側浸水深 η_1 = 樹木帯背後の浸水深 η_2 と近似している。

樹木林の前面と背面で浸水した津波による単位幅あたりの力が変化すると考え、前後の単位幅あたりの抗力の変化は、 $C_R = p_2/p_1$ (添え字1および2は樹木帯の沖および岸側を示す) で表される。ここで、 C_R を津波力比とする。

地表粗度による単位奥行き当たりの力の損失は、マニングの粗度係数 ($n=0.025$) を用いて、次式で求めた。

$$p_g = \frac{g n^2}{\eta^3} \quad (7)$$

(2) 作用条件の決定

陸上で遡上した津波の流速 u は浸水深と関係を有しており、浸水深 (地表面からの津波高さ) が明らかになれば、推定が可能である。松富ら (1994) による流速推定式を式(8)に示す。

$$\frac{u}{\sqrt{gR}} = \sqrt{\frac{2C_v^2 F_r^2}{F_r^2 + 2C_v^2}} \sqrt{\frac{h_f}{R}} \quad (8)$$

ここで、 $R(m)$ は周辺の海浜の津波遡上高、 $h_f(m)$ は構造物前面の浸水深で、構造物が無い海岸では浸水深と同一であるが、ここでは原論文の表記を用いる。 C_v は流速係数で $0.8 \sim 0.9$ 程度になる。 F_r は構造物背後の浸水深 h_r を用いたフルード数である。ここでは松富ら (2005) の現地調査から導かれた近似値である $C_v=0.9$ 、 $F_r=1.0$ を用い、構造物前面の浸水深は津波遡上高 R と等しく、津波力は円柱で近似できる幹部だけで受けているとした。

4. 樹木による津波力低減率

(1) 現地の条件

スバ村では、西側にココヤシの密集林があり、西側からの1波目を弱めた可能性がある。スバ村では樹木前面に巨木が生えているライン上 (Line-2) では高床式家屋が傾きながらも残り、海岸から見通せる (樹木がない) ライン上 (Line-1) では、家屋が全壊し、200m奥まで津波の浸水跡が明瞭であった。約100m離れた両ライン上の地盤高の変化と、樹木ラインの樹木位置と直径などを比較した。図-3に決定したラインのイメージを示す。他の地区でも同じ手法を用いた。写真-1にLine-1での破壊状況を示す。写真-2はLine-2の家屋の様子である。図-4は、各ライン上の横断面であり、樹木無しの家屋破壊が大きかったラインの方が地盤は高い。図-5は被害が少なかった家屋前面の樹木配置である。最も海側には、写真-3で示す巨木があり、洗掘も受けていなかった。この巨木は現地語でBUNIと言われ、根本から5本に枝分かれして

り、それぞれを表-1では枝部をB1~B5として表し、それぞれを単独樹木と同様に整理している。

ティティアナ (Titiana) 村においても樹木効果を調べた。

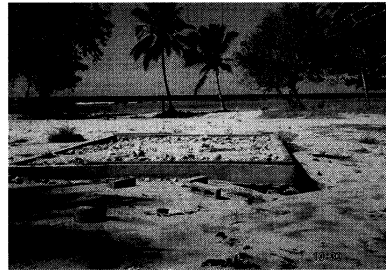


写真-1 Line-1での破壊された家屋の跡 (Suva)



写真-2 Suva村で樹木の効果で被害が軽減された家



写真-3 家屋前面の海岸林 (BUNI)

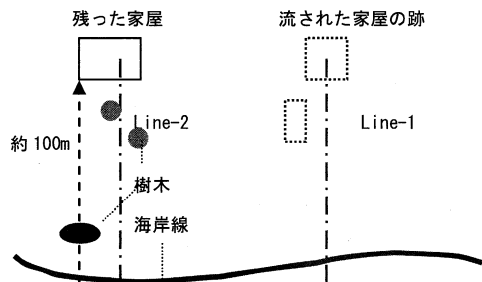


図-3 Suvaにおける Line-1 と Line-2 のイメージ

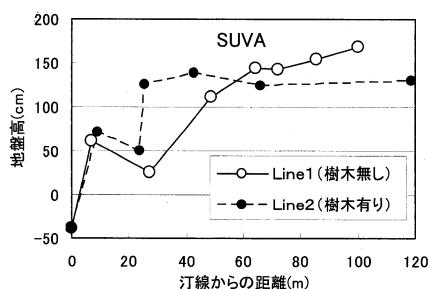


図-4 SuvaにおけるLine-1とLine-2の地盤断面

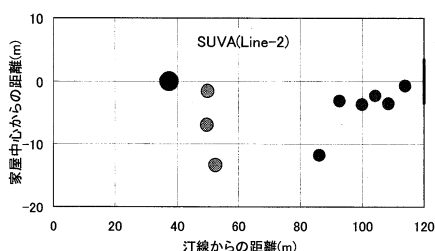


図-5 スパにおける家屋(距離120mの太い直線)前面の樹木配置(黒丸の大きさは樹木の太さを表す)

樹木が無く、被害が顕著であった教会をLine-1とし、それに隣接して、高床式家屋が残っていた場所をLine-2とした。被災の状況等は平石(2008)に示している。Line-1およびLine-2での浸水高は、それぞれ349、413cmであった。樹木調査の結果、ティティアナ村でも、津波による被害が軽微であった家屋の前面には、樹木が多数位置していることが判った。そこで、スパと同様な手法で樹木密度と幅を整理して津波力比を計算した。

ボリボリの唯一残った高床式家屋においては、床柱が堅牢であったことに加えて、家屋周辺に樹径数十cmの樹木が密集していた効果が大きかったと思われる。

(2) 津波力比の計算結果

樹木の配置と樹径から津波力比を推定した。津波の浸水深は200cmである。樹木の密度および幹径は、津波で破壊されずに残った家屋(Line-2)の前面に位置する樹木の平均値から算出した。計算に用いた N (密度)、 N_s (海岸の幅(10mの N 倍とする)、平均幹径(D')を表-2に示す。図-6は津波力比(Reduction Rate)を計算した結果である。図の●に示すように、津波力比は家屋前面の樹木により1割から2割が低減されたことが判る。また○は

表-2 調査地点の樹木密度 N 、樹木林の幅(奥行き $B=N_s \times 10m$)と樹木平均直径(樹径 D' (cm))

スパ	$N=2$ (10m×10mあたり)	$N_s=8$	$D'=76cm$
ボリボリ	$N=7$ (10m×10mあたり)	$N_s=1$	$D'=48cm$
ティティアナ	$N=5$ (10m×10mあたり)	$N_s=1$	$D'=73cm$

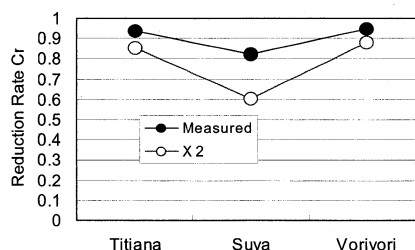


図-6 津波力比(X2は地表粗度も考慮した推定)

地表での摩擦による低減効果も加えた結果である。いずれの計算結果でも津波力を半分程度にすることは困難であったが、樹木帯で津波力の減少したことが家屋の流出防止に役立ったのではないかと推測できる。ただし、津波は前面地形によって変化するので、本計算は限定された条件での比較であり、より詳細な調査が望まれる。

5. まとめ

本調査では、ソロモン地震津波で大きな被害を受けたギゾ島において、被害が甚大であった測線と被害が軽微であった測線における植生の相違を検討し、海岸植生によって津波力が2割程度低減されたことが予想できた。

調査では、他にも(a)高床式家屋を連続したモルタル基礎の上に建設した場合、(b)高床式家屋の柱基部を90cm程度地中に埋めた場合、(c)260cm以上の高い柱で高床式家屋を作った場合等で被害が軽減できることが判明した。また、流出し始めた家屋が樹木(バナナ)に止められて残存したことも確認した。これらのことから、植林とともに自然の樹木帯を保存することが津波防災には重要であると考えられる。

参 考 文 献

- Hiraishi T. and K. Harada (2003): Greenbelt tsunami prevention in South-Pacific region, Report of the Port and Airport Research Institute, Vol.42, No.2, pp.25.
- 富田孝史・有川太郎・本多和彦・辰巳大介(2008): 2007年ソロモン諸島沖の地震津波の現地被害調査と数値計算, 海岸工学論文集, 第55巻, 印刷中。
- 平石哲也(2008): 植栽による津波力減殺効果に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1171, 28p.
- 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.
- 松富英夫・高橋智幸・松山昌史・原田賢治・平石哲也・S. Supartid, S.Naksuksakul(2005): タイの Khao Lak と Phuket 島における2004年スマトラ島沖津波とその被害, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1356-1360.
- 松富英夫・嶋原良典・藤間功司(2007): Earthquake and tsunami disaster in Solomon Islands, 2 April 2007, <http://www.jaee.gr.jp/research/res05/sol2007.pdf>.
- 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・大家隆行・今村文彦(2007): 2004年インド洋大津波におけるインドネシア・バンダアチェでのマングローブ林の潜在的効果, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.246-250.