# 2009年サモア地震津波におけるマングローブ林の津波減災効果

Tsunami mitigation effect of mangrove forest in 2009 Samoa earthquake tsunami

柳澤英明<sup>1</sup> · 宮城豊彦<sup>2</sup> · 馬場繁幸<sup>3</sup>

# Hideaki YANAGISAWA, Toyohiko MIYAGI and Shigeyuki BABA

We investigated tsunami mitigation effect of mangrove forest in 2009 Samoa tsunami using field survey and numerical model. Field surveys revealed that the wetland with 100m width of mangrove forest reduced 80% of tsunami inundation depth. We also found that mangrove forest significantly prevented tsunami debris from damage on the village behind forest. We modeled the propagation of 2009 Samoa tsunami and compared the numerical results with observed data. As results, the numerical results are approximately consistent with the measured data. Using the numerical simulation of tsunami including the resistance of a mangrove forest, we investigated the tsunami reduction effects of the mangrove forest in Samoa Island.

### 1. はじめに

2009年9月30日サモア諸島南方を震源域としたマグニ チュード8.1の地震による津波は、サモア諸島に大きな 被害を及ぼした.この津波による死者・行方不明者数は, 米国領サモアで35名、サモア独立国で148名、トンガで 9名となり、全体で192名に及んだ(DRI、2009).

一方, 津波が襲来した地域でも、マングローブ林など の海岸林が存在する地域では,海岸林が防波堤となり, 津波の被害を軽減したことが報告された(Pacific Disaster Net, 2009). しかしながら、津波の減衰は、植生の状態 (樹種, 樹径, 密度など) や津波の流動状況, 地盤高な どに関連しているため (e.g., Kathiresanら, 2005), 海岸 林がどの程度、津波被害低減に有効であったかは明らか とされていない. 2009年サモア地震津波における海岸林 の効果を明らかにするためには、海岸林の状態やその周 辺の状況を詳細に調査する必要がある.

そこで本研究では、津波で大きな被害を受けたサモア 独立国Upolu島のマングローブ林を対象に、その周辺の 津波浸水深や流向,漂流物,植生状態などの調査を実施 する. さらに、サモア諸島を襲った津波の特徴をとらえ るため、津波の伝播解析を実施する.これらの結果に基 づいて,現地のマングローブ林の状態を考慮した津波解 析を実施し、サモア諸島におけるマングローブ林の津波 減衰効果を検証する.

### 2. 現地調査

#### (1) 調査概要

2009年12月23日~2010年1月1日の期間において、図-1

1 正会員	博(工)	東電設計(株)	
2	理博	東北学院大学教	<b></b> 投教養学部地域構想学科
3	農博	琉球大学教授	熱帯生物圏研究センター



図-1 調査対象地域.★は震源を示す.

に示すサモア独立国Upolu島を対象に、現地調査を実施し た.調査内容としては、津波の痕跡と現地住民に対する 聞き取りから、津波被害状況、マングローブ林周辺にお ける津波浸水深・流向,漂流物の測定を行った. さらに, サモア独立国におけるマングローブ林の状態を把握する ため、樹種、樹径、植生密度の測定も行った.調査した 地点の位置情報は、すべてGPSを用いて測定し、GISによ りマップ上にプロットして整理した.現地調査は、サモ ア独立国Ministry of Natural Resources and Environmentの協 力を得て実施した.

#### (2) サモア独立国 Upolu 島における津波の被害状況

港湾技術研究所(2009)によるUpolu島の津波痕跡高 調査とPacific Disaster Net (2009) による村ごとの津波被 害分布を図-2に示す. Upolu島東部では、10mを越える 津波が観測されており,多くの人的・物的被害が発生し ている.またサモア独立国では,海岸線の防波や浸食防 止のため、石を積んだ簡易な堤防が作られていたが、そ の多くは津波によって破壊されていた(写真-1(a)).現 地住民によれば、これらの石が津波により飛ばされ、人 的被害も発生したという. このような簡易な防波堤は, 津波に対して無力であり、被害を拡大させる原因にもな りえる. Upolu島南部のSa'anapu周辺では、マングロー ブ林内に設置されていたボードウォークが津波によって





写真-1 津波によって破壊された(a) 簡易防波堤と(b) マン グローブ林内のボードウォーク

破壊されていた(写真-1(b)).特に,河川(クリーク) 部分での被害が大きく,マングローブ林内のクリークを 津波が遡上し破壊したものと考えられる.

(3) マングローブ周辺における津波の痕跡と被害状況

マングローブ林周辺の被害調査は、津波の被害が大き かったUpolu島東部のMalaela (図-1)を対象に実施した. 図-3は、現地調査より得られたマングローブ林内および 周辺における津波浸水深、流向、家屋の被害状況を示し たものである。今回の対象地域では、津波の流向は、ほ ぼ南北方向を向いていたため、南から北へ向かって津波 が流れたものと考えられる。津波の流れ方向に対してマ ングローブ林の前面部(南側)では、浸水深2.7-3.5mの 津波が襲来し、居住地に壊滅的な被害を及ぼした(図-3 (b)(c)).一方、マングローブ林の背後地(北側)では、 津波浸水深は0.7-0.9m程度で、家屋の被害は少なかった。 津波がマングローブ林や湿地帯を遡上していく過程で、 減衰していったものと考えられる。

マングローブ林や周辺の森の中には、津波によって破壊された家屋の残骸や車などの大きな漂流物が止められていた(写真-2).現地住民によれば、林内で止められていた車はマングローブ林前面の住宅から流れたものであった。マングローブ林が津波の漂流物を止めることで、マングローブ林背後の居住地に漂流物が侵入することを防いだものと考えられる.しかし一方で、マングローブ 林背後の住宅には、津波によって破壊された樹木が家屋 に侵入してきたという証言もあった.樹木が津波によっ て破壊され,漂流物となる危険性も確認された.

また,周辺の森では,子どもがココヤシなどの樹木に しがみつき津波から難を逃れたという証言もあり,海岸 林が津波の緊急避難場所となる事例も確認した.

#### (4) 植生調査

Upolu島東部Malaelaを対象に、マングローブ林の植生 調査を実施した. Malaelaの森では、Bruguiera属が先駆し ており(写真-3),胸高直径(DBH)が80cm以上の大木 も見られた.樹径および,植生密度の調査は、林内で代 表的な3地点を選定し実施した.表-1に調査結果を示す.



図-3 (a)サモア独立国 Malaela のマングローブ林内および,その 周辺の津波浸水深,流向,家屋被害(△は津波後に残った家 屋,×は津波で破壊された家屋を示す).(b)(c)家屋の被 害写真



写真-2 マングローブ林内で停止した津波漂流物. (a)(b)前面の住宅地から流れた車(停止位置は図-3 参照)

(c) 津波直後の写真(Pacific Disaster Net: http://www.pacificdisaster.net:8080/Plone/samoa-tsunami)



写真-3 Malaelaにおけるマングローブ (Bruguiera属)

表-1 Upolu島東部 Malaela のマングローブ緒元

	DBH (cm)	Tree Density (m <sup>-2</sup> )
Site 1	22.9	0.03
Site 2	69.7	0.04
Site 3	22.8	0.15
ave.	38.5	0.07

Malaelaの森における平均樹径 $\phi$ と平均密度Nは、それぞれ、 $\phi$  =38.5cm、N=0.07m<sup>-2</sup>と測定された.

#### 3.2009年サモア地震津波の数値解析

#### (1) 断層パラメータの設定

今回の地震は、太平洋プレートがオーストラリアプレ ートの下に沈み込むトンガ海溝付近で発生した正断層の 地震である(八木,2009).本研究では、まず2009年サ モア地震の断層位置を制約するため、波向き線法を用い て津波の逆伝播図を作成した(図-4).図-4の点線は、サ モア独立国Apiaおよび、米領サモアPago Pagoまでの津波 の伝播時間に相当する波面で、津波波源の先端部を示し ている.次に、ハーバード大学発表のM<sub>0</sub>=1.66×10<sup>28</sup>Nm (*Mw*=8.1)を考慮し、以下のWellsら(1994)による断層 モデルの幾何学的経験則に基づいて、断層幅*W*と断層長 さ*L*を決定した.

 $Log(L) = -1.88 + 0.5 \times M_W \dots (1)$ 

 $Log(W) = -1.14 + 0.35 \times M_W$  .....(2)

決定された断層面積(*A=L×W*)より,以下の地震モーメントM<sub>0</sub>の定義式から断層すべり量Dを決定した.

 $M_0 = \mu DA$  .....(3)

 $\mu$ は地殻の剛性率で、ここでは3×10<sup>10</sup>N/mと仮定した.



図-4 サモア地震津波の逆伝播図と断層面.★は震源位置, □はModel1とModel2の断層面を示す.

断層の走行,傾斜角,すべり角については,ハーバー ド大学発表のCMT解を参考にした.ハーバード大学発表 の断層面は,南西傾斜(走行:119°)のものと北東傾斜 (走行:346°)のものがあるため,ここでは二つの断層 モデルを仮定し,観測記録と整合するものを検討する. 本研究で採用した断層パラメータを表-2に示す.これら の断層パラメータからManshinhaら(1971)の理論を用 いて地盤変動量を算定し,それを津波の初期水位分布と して評価した.断層面の位置は,初期水位分布と逆伝播 図を参考に試行錯誤的に決定した(図-4).

#### (2) 数值解析手法

解析領域は、トンガ海溝を含むサモア諸島沖の範囲と し(図-4),解析における空間格子サイズを300mとする ことで、ApiaやPago Pagoの湾形状を表現できるようにし た.サモア独立国沿岸の水深・地形データには、SOPAC (http://www.sopac.org/)による水深コンターとSRTMを合 わせて作成した.また、米領サモアの水深・地形データ にはNGDC (http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/inundation/)に よるデジタルデータを利用した.津波解析には非線形長 波式をLeap-flog法により差分化する手法を用いた(後 藤・小川、1982).

#### (3) 数值解析結果

図-5は、Apiaおよび、Pago Pagoにおいて観測された津 波時の水位変動(West Coast & Alaska Tsunami Warning Center)と計算値を比較したものである. Pago Pago湾に おいて、計算波形の方が6分程度、津波の到達が早いも のの、Mode l, Model 2ともに観測された波高や周期をよ く再現している.特に、Model 1では、引き波が始まる

	断層面の原点(°)		長さ	幅	すべり量	傾斜角	すべり角	走行	深さ
	緯度	経度	(km)	(km)	(m)	(°)	(°)	(°)	(km)
Model 1	-172.62	-14.92	145	50	7.6	38	-131	119	12
Model 2	-172.36	-15.67	145	50	7.6	62	-63	346	12

直前(Apiaでは津波発生より約24分後)に発生している 初動の押し波も再現しており,観測記録と調和的である. 次に,津波痕跡高(港湾空港技術研究所,2009)と計算 による最大津波高を比較する.図-5に,サモア独立国 Upolu島における計算と観測結果の比較を示す. Model 2 においては,Upolu島東部の10mを越える津波痕跡高を 再現できていない一方で,Model 1においては,10m以上 の痕跡高を再現している.

以上より, 観測と計算結果の比較から, 本研究では, Model 1を2009年サモア地震津波の断層モデルとして提 案する. 解析結果によれば,約20分程度で第1波がUpolu 島南に襲来し,津波の周期は8分~15分程度であった. また津波は,Upolu島の東側から北側に回りこむように して, 伝播していったことがわかった.

# 4. 数値解析によるマングローブ林の津波減衰効果の検討

津波伝播解析および,現地調査より得られたマングロ ーブ林の状態を考慮し,1次元での津波解析を実施する ことで,サモア独立国におけるマングローブ林の津波減 衰効果を検討する.

#### (1) 解析条件と計算モデル

現地調査によれば、サモア独立国Malaelaにおけるマ ングローブの多くは、Bruguiera属であり、Rhizophora属 のようなタコ足状の支柱根は持っていない.本研究では、 マングローブ林を簡易に円柱として仮定し、解析を行っ た.マングローブ林の樹径々、植生密度N、樹林帯幅W は、現地調査より φ=39cm、N=0.07m<sup>2</sup>、W=100mと決定 した(表-1,図-3(a)).津波解析には、非線形長波方程 式を用い、マングローブ林は以下に示す合成等価粗度で 考慮した(油屋ら、2002;原田ら、2005).



ここで、nは合成等価粗度係数, $n_0$ は底面粗度係数, $C_D$ は抗力係数 (=0.7-1.2; Coastal Engineering Research Center, 1984), Dは浸水深,gは重力加速度,Aは単位底面積あた りの樹木の投影面積 ( $N \times \phi \times D$ ), Vは単位底面積あた りの水塊の体積である.海岸林に働く流体力のほとんど は抗力によるものであり (原田ら,2005),式(3)は抗 力を Manning 粗度係数に従い,合成等価粗度に置き換え たものである.入射波は,津波伝播解析に基づき周期10 分の津波 (sin波)を想定し,現地の津波浸水深 (D=3.5m) を再現するように入射波高を調節した.海底地形には, サモア島東部の平均的な勾配を設定した.

#### (2) 解析結果

解析結果によれば、津波はマングローブ林前面部では





図-6 津波痕跡高(港湾空港技術研究所, 2009)と計算による 最大津波高の比較



図-7 マングローブ林による津波減衰効果(a)津波高(b)水流圧力

流速が止められ,水位が上昇するものの(図-7(a)),背後地では水位や水流圧力(流速<sup>2</sup>×水深)が減衰させられていた(図-7(b)).マングローブ林の合成粗度は,最大で0.1程度と評価された.マングローブ林によって,約40%の流圧力が減衰させられており,津波に対する減勢効果があったものと考えられる.

## 5.まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す.

- (1) 2009年サモア地震津波の痕跡と現地住民に対する聞き取りから、津波被害状況、マングローブ林周辺における津波浸水深・流向、漂流物の状況を明らかにした.
- (2)サモア独立国Upolu島のMalaelaにおける現地調査から、マングローブ林およびその周辺の海岸林で、a) 津波の減衰、b) 漂流物の停止、c)緊急避難場所としての効果を確認することができた。
- (3) 2009年サモア地震の断層モデルを提案し、津波の数 値解析を実施した結果、観測記録に対して妥当な結果 を得ることができた.
- (4) 解析結果によれば、約20分程度で第1波がUpolu島南に襲来し、津波の周期は8分~15分程度であった。 また津波は、Upolu島の東側から北側に回りこむようにして、伝播していったことがわかった。
- (5) 津波に対するマングローブ林の抵抗力を考慮して、 1次元での津波解析を実施した.数値解析結果に基づき、Malaelaにおけるマングローブ林が津波の減衰に対して、有効であることを明らかにした.

謝辞:現地調査では, Ministry of Natural Resources and EnvironmentのPulea Etiseli Ifopo氏の協力を頂きました.

また現地調査を実施するにあたり,秋田大学 松冨英夫教 授,防衛大学 藤間功司教授より,大変有益な助言を頂き ました.本研究の遂行にあたっては、防災研究フォーラ ムおよび琉球大学からの援助を頂きました.ここに記し て謝意を表します.

#### 参考文献

- 油屋貴子・今村文彦(2002):合成等価粗度モデルを用いた津 波氾濫シミュレーションの提案,海岸工学論文集,第49 巻, pp.276-280.
- 港湾技術研究所 (2009):サモア諸島沖地震津波に関する緊急 現地調査報告 (速報), (オンライン)
- http://www.mlit.go.jp/report/press/port06\_hh\_000024.html
- 後藤智明・小川由信(1982):Leap-frog法を用いた津波の数値 計算法,東北大学工学部土木工学科資料,52p.
- 原田賢治・河田惠昭(2005):津波減衰効果を目的とした海岸 林活用条件の検討,海岸工学論文集,第52巻,pp.276-280.
- 八木勇治 (2009): 2009年9月29日 (UT) サモア沖で発生し た巨大地震 (暫定), (オンライン)

http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/20090929/

- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., U.S.Govt. Printing Office, Vol. I, pp. 100-242.
- DRI (2009): 2009年9月サモア諸島沖地震津波による米領サ モア災害調査報告書, DRI 調査レポート, No.26, 4p.
- Kathiresan, K. and N. Rajendran (2005): Coastal mangrove forests mitigated tsunami, Estuarine, Coastal and shelf science, Vol.65, pp.601-606.
- Manshinha, L. and D. E. Smylie (1971): The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.61, pp.1433-1440.
- Pacific Disaster Net (2009): Samoa Tsunami Rapid Environmental Impact Assessment Report, (オンライン) http://www.pacificdisaster. net/pdnadmin/data/documents/3303.html, 56p.
- Wells, D. L. and K. J. Coppersmith (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the seismological Society of America, Vol.84, pp.974-1002.