

南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性

平石 哲也*・竹村 慎治**・永瀬 恭一***

1. はじめに

1998 年パプアニューギニア（アイトペ）地震津波や 2000 年東スラウエン地震津波など近年、環太平洋地震帯南部で津波被害（河田ら, 1999）が頻繁に生じており、早急な対策が必要である。しかし、現地調査（Hiraishi, 2000a）によると、被災地は各国の首都圏から離れており、電気、通信、道路等の基本的な社会資本が整備されておらず、地震・津波警報等を伝達し、すみやかに避難するシステムを設置することは難しい。また、各国の財政事情も良好ではなく沖合の離岸堤や海岸堤防の整備などの防災施設の建設は不可能である。

現在、津波が来襲する危険がある沿岸において実施されている対策は、津波の発生原因と危険性を明確な描画で示したポスターを配布し、住民独自で判断して速やかに避難をする手法（Davies, 1999）である。ただし、東スラウエン津波の場合には、地震発生後 10 分で第 1 波が沿岸へ到達しており（Hiraishi, 2000b）、子供や老人等の災害弱者の避難は容易ではない。したがって、沿岸部における津波による人命の喪失や家屋の破壊を防止するためには、家屋そのものを強固にし、住民と家財の流出を防ぐか、防潮林の育成によって住居へ到達する津波力を低減させなければならない。河田ら（1993）は、1994 年フローレス地震津波被災地の復興に関して南アジア・太平洋諸国の沿岸部に多い高床式家屋の床高さを嵩上げして、家屋側面の作用流圧力を軽減する対策を提案している。

ここでは、通常時には食用として使用でき、南太平洋の海岸部での育成が容易なマングーやココナツの植林によって防潮林を形成し、現地の木造家屋に作用する津波力の低減を図り、津波被害の低減を目指す手法の適用性を模型実験と数値計算で検討した。なお、我が国の沿岸で広く植林されている針葉樹木による高潮、高波対策用の防潮林（原田ら, 2000）と区別するために、南太平洋地域沿岸での津波対策を目的とした樹木群を、以下、

グリーンベルトと呼ぶ。

2. 実験の内容

模型実験は、図-1 に示す水塊落下塔を有する幅 1.0 m の津波水路を用いて、1/10 勾配の斜面上に遡上する津波の水位、流速および波力を測定することによって実施した。水塊落下塔は真空ポンプで水路床より 2.5 m の高さまで水を吸いあげて、水槽上部にある開放バルブを瞬時に開放して水塊を落下させる装置である。開放バルブの直径は 50 mm で、落下塔には 5 基つけられている。グリーンベルト模型の直前では、水路幅を 0.5 m まで縮小した。

津波高は、落下塔の下部の吐出口の前面に 1/2 勾配の斜面の陸側に設けられた幅 1m の水平床上の測点 1、縮流水路の汀線位置（測点 2）、グリーンベルト背後（測点 3）および後背地の遡上位置（測点 3）に波高計を設置して測定した。縮流水路内には波高計と同一位置に水平方向の電磁流速計、波圧計を取り付けた。

図-2 は各測点の波高計で測定した津波水位の変化を示す。図では、グリーンベルトを設置せずに、バルブを 5 カ所開放した場合の波形を示す。水位の値は実験値で示している。1/50 縮尺を仮定すると縮流水路沖の最大水位は 8 m、縮流水路入り口の汀線では 9 m になっている。縮流による津波波高の増大は、現地での浅水変形、屈折、

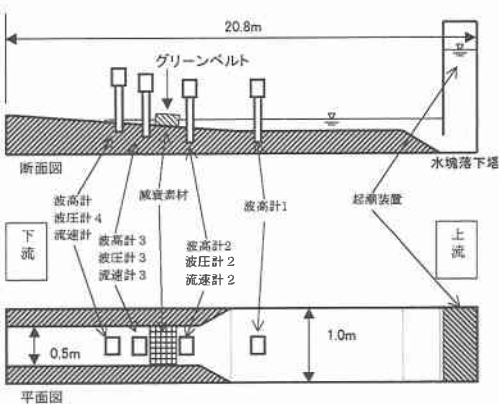


図-1 実験水路と模型の配置

* 正会員 工博 (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部
** (独)港湾空港技術研究所地盤・構造部
*** 正会員 工博 (株)フジタ 技術センター土木研究部

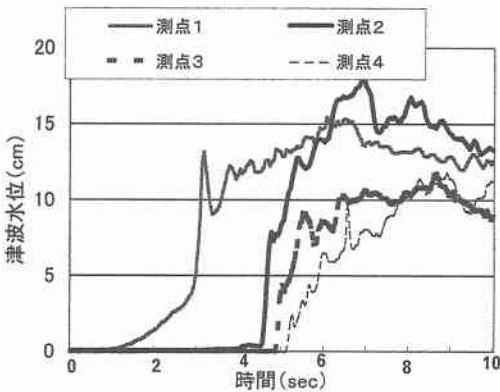


図-2 水路内で観測された津波波形

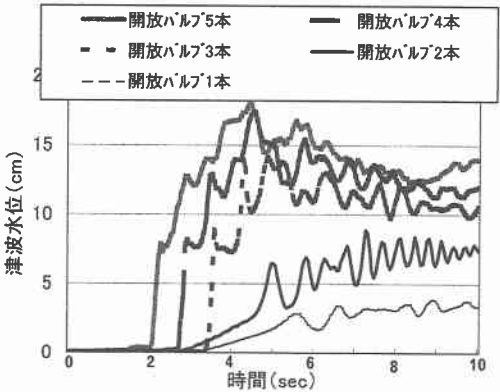


図-3 開放バルブ数による津波波形の変化

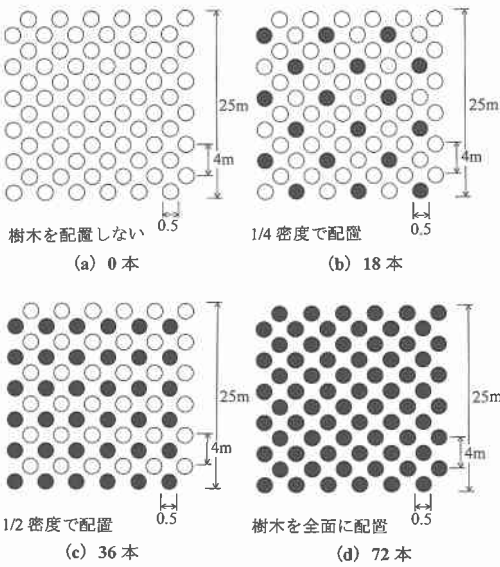


図-4 グリーンベルト内での樹木の配置

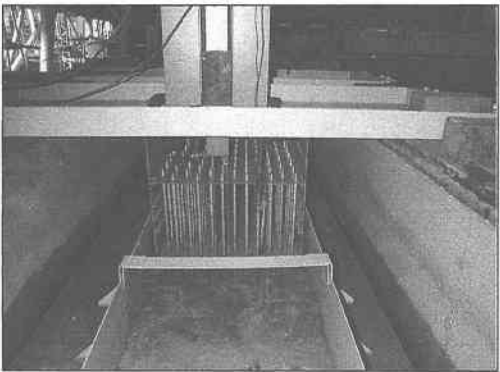


写真-1 グリーンベルト模型の外観

湾幅の縮小による波高増大に相当する。1998 年パプアニューギニア地震津波では汀線付近の津波高が 10m を越えており(河田ら, 1999), 本津波水路で再現した津波は, パプアニューギニア地震津波の規模より若干小さいものに相当する。汀線上を遡上すると地盤高を基準とした津波高は徐々に減少し, その最大値は 6 m になる。

水路内での津波波形の高さが開放弁の数でどのように変化するかを調べたものが, 図-3 である。津波高の値は実験値で示した。図では, 沖合の測点 1 での水位を表示した。開放バルブの数を増やすほど落下する水塊の速度が速くなるので津波高も増加する。しかし, 開放バルブを 4 か所以上にすると, 最大水位はほぼ一定になる。したがって, 開放バルブ 5 か所を有する本水塊落下塔で発生できる津波高の最大値は 18 cm で, 開放弁を増やしても最大津波高を大きくすることはできない。そこで, 本実験では開放弁の開放か所は 5 か所で, 本水路で再現できる最高津波高を有する大型津波を再現し, 小型津波として, 開放弁を 2 か所あけて再現した高さ 9 cm の津波を設定した。

グリーンベルト模型は, 縮流水路の全幅にわたって, 幅 50 cm, 長さ 50 cm の薄い鉄板上にあらかじめ直径 10 mm の穴を多数あけておき, それぞれの穴に直径 10 mm, 長さ 300 mm の鉄製円柱を固定して製作した。現地では直径約 50 cm のココナッツは, ほぼ 5 m 間隔で育成されている。ここでは, グリーンベルトの効果を明瞭にするために, 5 m 間隔で生育したココナッツ林の樹木間の中央部にさらに 1 本植林した千鳥格子状にココナッツ等が育成できるものとした。図-4 に実験で検討したココナッツの配置を示す。配置案 a は, 樹木が全く無い状態に相当し, すでに図-2 で津波水位の変化が示されている。次に, 円柱模型の配置を配置案 b から配置案 d まで変化させ, 現地換算値で 25 m × 25 m の敷地に一定の間隔で樹木が配置されたときの樹木密度を変化させた。625 m² の敷地内の樹木の総数は配置案 b, c, d で, それ

ぞれ18, 36および72本まで変化している。写真-1に実験水路内に設置された樹木模型の外観を示す。

実験では、開放バルブの開放数を2種類、樹木本数を4ケースに変化させて、測点を固定して水位、波圧、流速の変化を測定した。主に、グリーンベルト模型の有無による測定値の変化を調べ、現地でのグリーンベルトの有用性を検討した。測定データは、サンプリング周期0.05 sで造波開始後512個収集し、解析を行っている。

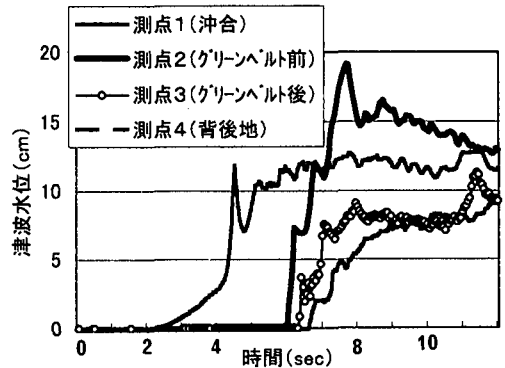
3. 実験の結果と考察

図-5に、開放バルブの数を5ヶとして、最大津波を発生させた場合のグリーンベルト設置時の津波水位、波圧および流速の変化を示す。樹木の本数は、最も密な72本である。津波水位は、沖合に比べると浅水効果と水路幅の急縮によってグリーンベルト直前の汀線位置で大きくなり、最大で19 cmになる。この値は、図-2で示したグリーンベルトの無い場合よりも10%大きくなり、グリーンベルトによる反射の影響によって水位が上昇していることがわかる。ただし、グリーンベルト背後の測点における最大水位は、グリーンベルトが無い場合には、最大値で15 cmであったが、グリーンベルトを設置することにより、最大値が10 cmまで低下している。また遡上域においても、最大水位は12 cmから10 cmに低下しており、グリーンベルトの育成は、背後の人家に作用する津波の地表面からの高さを減衰させ、津波防災に関して有効である。

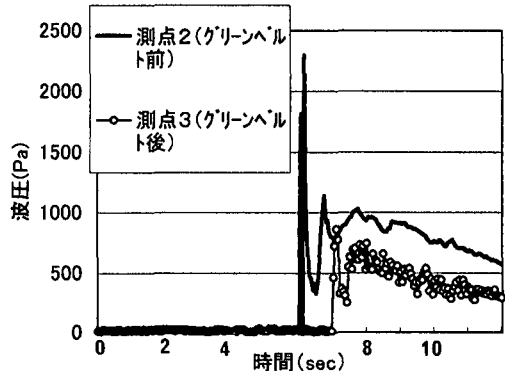
図-5においてグリーンベルトの前後で水位を比較すると、19 cmの最大津波水位が、グリーンベルト背後では9 cmになり、ほぼ1/2に減衰している。図-5(2)の波圧の最大値をグリーンベルトの前後で比較すると、40%に低下しており、水位の低下率より大きい。また図-5(3)の流速値は最大値で70%に減衰している。したがって、グリーンベルトの効果により、水位、流速とも沖側に比較して0.4~0.7倍に減衰でき、建設費の大きい防災施設が建設できない遠隔地の津波防災の一手法として、グリーンベルトの育成が有効であることがわかる。なお、流速の測定結果の中で、遡上域の流速が大きく、100 cm/sで一定を示しているのは、測定部が十分に浸水せず、測定データに誤差が含まれているためと考えられる。

図-6は、開放弁の開放数を変化させて沖合の津波高を変化させた場合のグリーンベルトによる津波低減効果を示したものである。図では、グリーンベルト直後の測点での波圧の変化として、測点3の最大波圧を測点2で除した波圧比を表した。開放弁数が2の場合で、津波高が比較的小さく、現地換算値で沖合2 m以下の場合には、樹木本数が18本の場合でも波圧比が0.2以下となり、津波力の減衰効果が表れた。一方、バルブの開放数

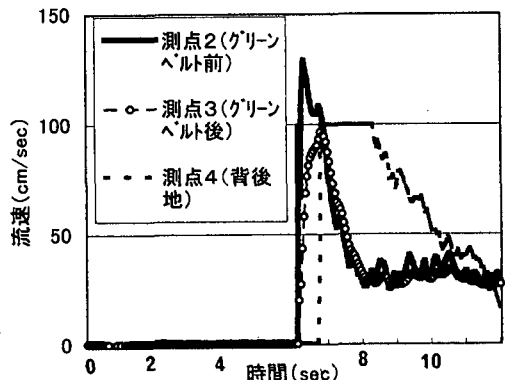
を多くし、津波高が沖合で5 mになると、樹木本数が36本以下ではグリーンベルト前後の波圧比は変化せず0.8~1.2程度であった。したがって、樹木密度を大きくしないと大型の津波には効果が表れないことがわかる。アジア、南太平洋地域で、過去において大きな被害を与えた津波は、すべて汀線付近での津波高が5 m以上であり、本実験でバルブを4本以上開放した場合に相当する。



(1) 津波水位の変化



(2) 波圧



(3) 流速

図-5 グリーンベルトによる水位・圧力・流速の軽減

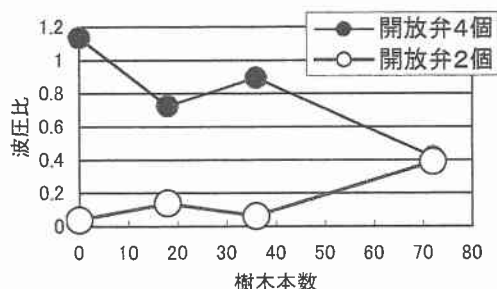


図-6 パルプ開放本数と波圧比の関係

したがって、沖合津波高が5m以上になる場合には、樹木本数が本実験模型で設定できる最大値である72本が必要である。これは、隣り合う樹木の葉が重ならないようにしたときに、現地で最も密に植林した樹木間隔2.5mに相当する。樹木の汀線に平行な列数は、本実験と同様に12列あるのが望ましい。

家屋の破壊を生じる津波力については、羽鳥(1984)が水流圧力による評価を提案している。平石ら(2000)も津波と同様な長波である高潮の被災状況を検討し、木造家屋では、水流圧力 p_u が $5 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ を越えると側壁などが倒壊する危険性があることを明らかにしている。本実験結果を縮尺1/50として、水位と流速の最大値が同時に発生するものとしての水流圧力を計算すると、グリーンベルト前面の測点2では、 $p_u = 22 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ となり、木造家屋に対しては危険である。南太平洋地域の家屋は、高床式であり、その強度ははるかに小さい。グリーンベルトを育成すると、図-5で示した測点3の流速と水位の最高値から、背面の p_u は $4 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ となる。したがって、水流圧力を、さらに減衰させなければ、高床式家屋の破壊を完全に防止できないものの、津波高がグリーンベルトで約50%に軽減され、家屋の受圧面積も通常木造家屋に比べると小さいので、被害は大きく低減できると考えられる。

4. 津波力の変化を推定する数値モデル

さまざまな地形での津波力の低減効果を検討するために模型実験を実施することは多大な時間を要するので、数値計算でグリーンベルト等の効果を推定できることが望ましい。ここでは、自由界面を有する多相流の直接解析法(Multi-interface Advection and Reconstruction Solver, 以下MARS法という)を波浪解析に応用する計算法(永瀬ら, 2000)を用いた。MARS法では、自由表面を有する流れの解析を、表面張力を考慮して高精度で実行でき、水平床板や鉛直壁に作用する波力を正確に推定できる。

計算では、沖側の入射波条件として、現地換算値で沖

側境界での入射振幅5.0mの孤立波を入力させた。模型実験での沖合での津波高は、開放バルブ数が4以上の場合には、7.5mであったが、数値計算では、計算を安定させるために、入射波の振幅を、それよりも小さくした。図-7は、実験水路と同一断面を有する数値水槽内において、直径0.5mからなる樹木よりなるグリーンベルト周辺の波形変化のグラフィック表示である。樹木の間隔は2.5mである。図では、津波の先端がグリーンベルトに到達する直前と、グリーンベルトの中で変形し、先端が背後地に伝搬した時の水面形状を示す。

図中のラインAおよびラインBは、実験水路ではそれぞれ測点2および測点3に相当し、地表面から鉛直上方向への圧力分布を計算した測線である。図-8は、ラインAおよびラインBそれぞれの測線において、地表面から1.0, 1.5, 2.0および2.5mの高さにある測点での計算波圧の時間変化を示す。同一ラインでは、地表面から1.0mの高さでの波圧が最大になり、測点の高さが高くなるほど、作用波圧は小さくなる。ラインBの地表面から1.0mの高さでの測点の波圧最高値は、12000 Paで、この値は、ラインAでの波圧最高値27000 Paの約1/2に相当する。

表-1に、ラインA(樹木前)およびラインB(樹木後)における計算津波最高水位と地表面から1.0mの高さの測点における波圧の最高値をまとめた。比較のために、開放バルブ数を2個とした場合の実験による、測点2(樹木前)と測点3(樹木後)における水位および波圧の最高値を現地換算値で示す。計算で用いた孤立波と実験で発生した津波は、最大波高はほぼ一致しているが波形が一致していないために、計算結果と実験結果をそのまま比

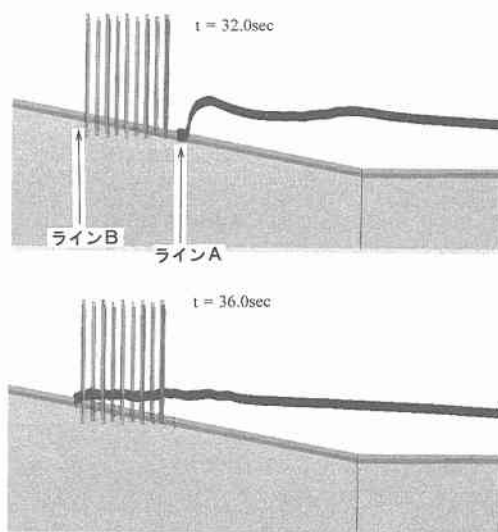
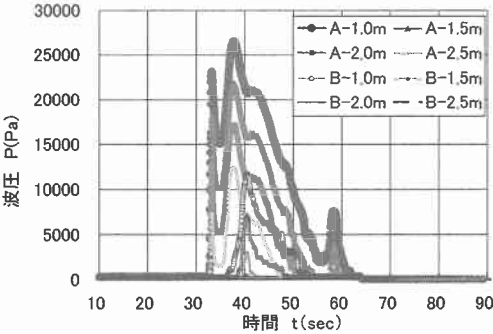


図-7 MARS法を用いたモデルによる斜面上の津波



図—8 グリーンベルト前後での計算波圧の変化

表—1 実験および計算水位・波圧の比較

	実 験 値			計 算 値		
	樹木前	樹木後	比 後/前	樹木前	樹木後	比 後/前
水位						
	6.2 m	3.1 m	0.50	5.3 m	4.0 m	0.75
波圧	45000 Pa	17000 Pa	0.39	26000 Pa	12000 Pa	0.45

較できず、実験による計算モデルの検証は定量的には困難である。しかし、表—1 に示すように、グリーンベルト前後の津波高の比と波圧比は、計算結果と実験結果でよく一致する。したがって、本調査で用いたモデルによって、グリーンベルトによる津波水位の減衰率と波圧の低減効果を推定することが可能である。

5. 津波防災への提言

前章に示したように、海岸部での植樹によってグリーンベルトを設けることにより、平常時には食用作物の栽培ができ、津波来襲時には津波波圧を減衰させることができる。一方、南太平洋・アジア地域では、海岸付近の樹林帯よりも海側に棧橋状に家屋が張り出している居住区が多い。写真—2 は、2000 年 5 月の東スラウェシ地震で被害を受けたスラウェシ島東部のルウク市中心部より 10 km 東に位置するパンガイ地区の水上家屋の被災状況である。

写真中の H の部分は高床式家屋が津波来襲前に存在していたが、高さ約 2 m の津波によってすべて流出している。家屋被害を防ぐためには、グリーンベルト背後への移転を促進することも考えられるが、生活習慣を変え



写真—2 ルウク地区における水上家屋の津波被害

ることになり、場所によっては適していない。もう一つの手段は、国際協力によって、まず海側の第一列の家屋群を強固な材料で製作し、家屋そのものを防潮壁とすることである。第一列によって津波波圧が低減すると第 2 列以降の被害が軽減される。数年後に、資金が活用できれば第二列目を補強する。随時補強を行えば、将来は沿岸部すべてが高い強度を有し、津波防災に適した居住環境が完成する。

参 考 文 献

河田恵昭・都司嘉宣・松山昌史・A. R. Syamusudin・松富英夫・今村文彦・高橋智幸 (1993): インドネシア・フローレス島地震による津波の特性とその教訓, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 191-195.

河田恵昭・高橋智幸・今村文彦・松富英夫・藤間功司・都司嘉宣・松山昌史 (1999): 1998 年バブアニューギニア地震津波の現地調査, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 391-395.

永瀬恭一・島田昌也 (2000): MARS 法を用いた数値波動水槽に関する研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 46-50.

羽鳥徳太郎 (1984): 津波による家屋の被害率, 地震研究所彙報, Vol. 59, pp. 433-439.

原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000): 防潮林の津波に対する減衰効果の検討, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 366-370.

平石哲也・平山克也・河合弘泰・上原 功 (2000): 熊本県竜ヶ岳町における台風 9918 号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 306-310.

Davies, H. (1998): Tsunami, PNG 1998, Graphos Ltd., 48 p.

Hiraishi T. (2000a): Characteristic of Aitape Tsunami in 1998 Papua New Guinea: Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 39, No. 4, pp. 3-23.

Hiraishi T. (2000b): Tunami risk and its reduction, Proc. 3rd. EQTAP International Workshop, (印刷中).