

1998 年パプアニューギニア津波を対象とした グリーンベルト防災の効果

平 石 哲 也*・岩 瀬 浩 之**

近年、東南アジア周辺域の津波対策として、現地に生息する樹木による津波災害の低減効果の有効性が確認されつつあり、一部の地域では既にその対策が講じられている。本研究では、円弧滑り法を用いた地滑りモデルによる津波の再現性について検討すると共に、現地スケールを対象としたグリーンベルトによる津波減災効果の有効性を定量的に検討することを目的とする。1998 年パプアニューギニア津波を例に、グリーンベルトの分布密度による津波の減災効果を、数値計算を利用して考察し、その有効性を確認した。

1. はじめに

環太平洋地震帯南部に位置する東南アジア南太平洋周辺地域は、過去 10 年間で 5 回以上の津波による被災を受けている。特に、1998 年のパプアニューギニア地震津波では、10 m 以上の津波がシッサノ・ラグーン沿岸域へ来襲し、約 2,000 名以上の尊い命が失われた。東南アジア周辺地域は、津波常襲地帯であるにもかかわらず、経済的な理由から、我が国のようにハードによる津波防災のインフラ整備は皆無であり、現状では有効な防災対策がほとんど行われていないに等しい。このような背景から、東南アジア周辺地域の津波防災を目的に、現地の沿岸域に生息する樹木を用いたグリーンベルト(樹木群)によって津波の減災を可能にする手法を提案した。

津波防災を対象としたグリーンベルトの津波減災効果については、平石ら(2001b)が水理実験や MARS 法による数値計算からその有効性を確認している。一方、原田ら(2000)は樹木による抵抗効果を、一般に利用されている津波計算法(後藤・小川, 1983)に、モリソン式を用いて考慮した数値計算モデルを提案し、水理実験との比較を通じてその妥当性を示している。また、松富ら(2002)は、合成粗度係数により樹木の影響を数値計算に考慮することを提案している。しかしながら、現地スケールの津波や地形を対象としたグリーンベルトに対する津波の減災害効果に対する詳細な検討についての事例は少ない。

本研究では、1998 年のパプアニューギニア津波をモデル対象に、円弧滑り法による地滑りモデルの適用性を検討すると共に、数値計算を用いたグリーンベルトの分布密度の違いによる津波浸水域や流速分布、代表点における津波水位および水流圧力等の減衰効果を定量的に検討することを目的とする。

2. 津波外力の検討

(1) 設定方法

パプアニューギニア津波に対する津波外力の設定については、松山ら(1999)の報告による痕跡値と浅水理論に基づく非線形長波式を支配方程式とした数値計算の結果との比較を通じて行う。図-1 は、対象とする計算領域を示したものであり、地震に伴う断層運動による初期水位分布を含む外洋領域(600 m 格子)とシッサノ・ラグーンの沿岸領域(200 m および 100 m 格子)からなる計 3 領域とする。陸上への津波浸水は考慮せず、海岸線で鉛直壁を仮定し、外洋境界は自由透過とする。断層モデル(L :断層長さ、 W :断層幅、 δ :走向角、 θ :傾斜角、 U :すべり量)は、表-1 に示すように、平石ら(2000)によって示されたものを利用する。

(2) 円弧滑り法による地滑りモデル

パプアニューギニア津波は、発生した地震規模($M=7.1$)に比べ来襲した津波高が大きく、海底地滑りを併発した津波であることが過去の研究および調査から示されている(松山ら, 1999)。海底地滑りに伴う津波発生モデルについては、多くの研究成果(橋・今村, 2001; 松

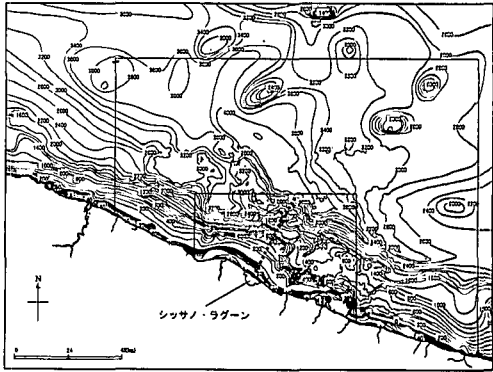


図-1 津波外力の設定のための計算領域

表-1 地震に伴う断層モデルのパラメータ

L (km)	W (km)	δ (°)	θ (°)	U (m)
30	10	N 150° E	15	3.00

* 正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 波浪研究室 室長
* 正会員 (株)エコー 沿岸デザイン本部 環境水工部

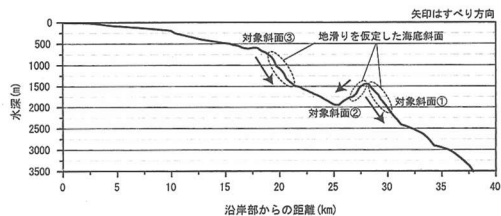


図-2 地滑り面の場所の仮定

表-2 円弧滑り法に用いた土質係数

単位体積重量 (kg/m ³)	粘着力 (kg/m ²)	内部摩擦角 (°)	水平震度
1.9×10 ³	2.0×10 ³	30	0.10

表-3 各斜面に対する地滑り諸量

対象斜面	幅 (km)	長さ (km)	最大層厚 (m)	安全率
①	2.0	1.2	30	0.72
②	1.0	1.0	61	0.79
③	2.0	1.2	42	0.81

(長さ：地滑り部分の水平方向距離を意味する)

山ら, 2002) が報告されているが, 本研究では, 平石ら (2001 a) による円弧滑り法を用いた地滑りモデルによる津波外力の設定を試みることにする。

設定する地滑り位置は, 図-1 中に点線にて示したシッサノ・ラグーンから沖合に向かう法線方向とする。図-2 に同線上の海底横断面図を示すと共に, 図中の地滑りの可能性がある海底斜面として①～③の斜面を対象に円弧滑り法から, 安定率が最も小さくなる滑り面を算出する。ただし, 図-2 の斜面は, 地滑り後であることを考慮し, 地滑り前の想定斜面を考え, 想定斜面を対象に, 表-2 に示すような標準的な土質係数による円弧滑り法を適用する。円弧滑り法を用いた各斜面に対する地滑り諸量を表-3 に示す。なお, 本研究では, 地滑り時間を 15 秒とし, 地震発生と同時に時刻に地滑りが発生するとして計算を行った。

(3) 痕跡高との比較

図-3 は, 対象斜面①～③の地滑りに対するシッサノ・ラグーン沿岸域の最大津波高分布を示したものである。同図中には, 矩形地滑りモデルによる既往の結果 (平石ら, 2000) も示す。3 つの対象斜面では, 海岸に一番近い斜面③の結果が最も高い沿岸分布を示している。しかしながら, 最大津波高は高々 6 m 程度で痕跡値の半分以下となり, 痕跡値を説明できる津波を再現することは出来なかった。円弧すべり法を用いた地滑りモデルでは, 地滑りの規模が限定されると共に, 発生する津波の周期が短く, 松山ら (2002) が示唆するように打ち切り誤差の影響のため, 津波高が沿岸到達直前に急激な水位減衰が生じる。図-4 は, 斜面③による最大津波高分布を示した

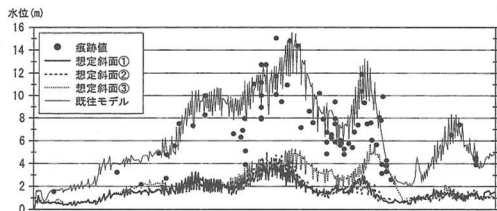


図-3 シッサノ・ラグーン沿岸域の最大津波高分布

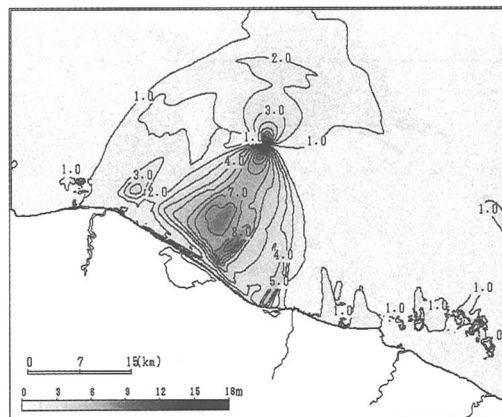


図-4 斜面③の地滑りによる最大津波高分布

ものである。同図中から, シッサノ・ラグーン沿岸沖で, 最大津波高が低下している様子が確認できる。パプアニューギニア津波を対象とした打ち切り誤差に対する問題点については, 格子間隔や使用する支配方程式の検討も含め今後の課題としたい。よって, 本研究では, 実際に来襲した津波に近い痕跡結果を示した矩形地滑りによる結果を津波外力として設定し, グリーンベルトの津波減災効果について検討を行うことにする。

3. グリーンベルトの津波減災効果

(1) 計算方法

使用する津波の運動の式は, 津波外力の設定にて使用した非線形長波式による運動の式に, グリーンベルトによる抵抗力を考慮したモデルとする。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g\eta^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} + F_y = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g\eta^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} + F_y = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ここで, M , N は, それぞれ x , y 方向の線流量, η は水

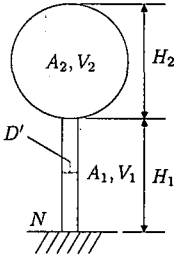


図-5 樹木のモデル化

表-4 樹木モデルのパラメータ設定値

H_1 (m)	D' (m)	A_2	V_2/V	H_2 (m)
5.0	1.0	0.20	0.04	5.0

位, g は重力加速度, D は全水深, n はマンニングの粗度係数, F_x , F_y は, それぞれ x , y 方向における樹木の抵抗力を表す。樹木の抵抗力は, 原田ら (2000) のモデルにない, 抗力項と慣性力項から成る抵抗力として考慮する。

$$F_x = \frac{1}{2} C_D [A_1 + A_2] \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{\Delta x \Delta y D^2} + C_M \left[\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} \right] \frac{\partial M}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$F_y = \frac{1}{2} C_D [A_1 + A_2] \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{\Delta x \Delta y D^2} + C_M \left[\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} \right] \frac{\partial N}{\partial t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで, C_D は抵抗係数, C_M は付加質量係数, A_1 および A_2 は, それぞれ後述するグリーンベルトの幹および葉部の投影面積比, V は 1 格子辺りの水面下における海水とグリーンベルトの体積, V_1 および V_2 は, それぞれ幹および葉部の体積を示す。 C_D および C_M は, Harada ら (2003) の水理実験により算定された以下の値を用いる。

$$C_D = 8.5 \left(\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} \right) + 0.66, \quad C_M = 0.71 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(2) グリーンベルトの設定

グリーンベルトは, 図-5 のように幹部と葉部に分けてモデル化を行う。なお, グリーンベルトは, 等間隔で分布するものと仮定し, 100 m^2 辺りの樹木の本数を N , 幹の直径を D' (m) すると, 幹部の投影面積および体積は,

$$A_1 = D \left[D' \frac{N}{100} \Delta x \Delta y \right], \quad V_1 = D \left[\pi \frac{D'^2}{4} \frac{N}{100} \Delta x \Delta y \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。他の樹木モデルのパラメータは, パプアニューギニアの現地調査より得られた樹木の平均的な値として, 表-4 のように設定する。なお, 樹木の耐久性については, 詳細情報が無いことから, 本研究では津波による樹木の倒壊を考慮せず計算を行う。

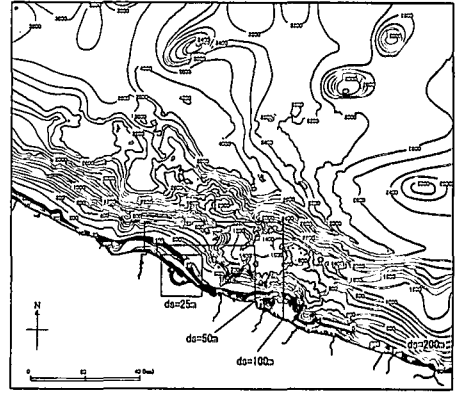


図-6 計算領域の構成図

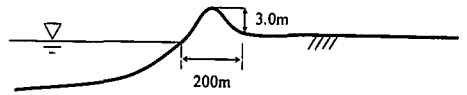


図-7 沿岸モデルの断面図

(3) 計算領域と地形条件

設定するグリーンベルトの都合上, シッサノ・ラグーン周辺域の格子間隔 (ds) は 25 m で近似し, 50 m 以上の格子領域では津波の遡上を考慮しない (図-6)。また, 津波の遡上計算を行うためには, 対象地区の地盤高が必要となるが, 詳細なデータが入手出来なかったため, 陸上地盤高は水面と同レベルで設定する。ただし, シッサノ・ラグーン沿岸域で特徴的なコブ状の地形を再現するため, 図-7 のように海岸線をモデル化する。

4. 密度分布と減衰効果

100 m^2 辺りの樹木の本数を変化 ($N=0, 10, 20, 30$) させた場合の計算結果を以下に示す。

(1) 最大津波浸水深の比較

図-8 は, グリーンベルトを設置しない場合 ($N=0$) と 100 m^2 辺りの樹木本数が 20 本の場合 ($N=20$) における, シッサノ・ラグーン周辺域の最大津波浸水深分布を示したものである。津波浸水深は, 海岸線にグリーンベルトを設置することにより, 最大 6.5 m 程度から 2.5 m 程度へと減衰する。図-9 は, N の違いによる津波浸水域の違いを示したものであり, グリーンベルトの密度分布が増えるに従って, 浸水域が狭くなることが確認できる。グリーンベルトが存在しない時 ($N=0$) に比べ, $N=10$ では約 35%, $N=20$ および $N=30$ では, それぞれ約 45 および 50% へと津波浸水域が減少する。

(2) 最大津波流速の比較

図-10 は, $N=0$ および $N=20$ の場合の, 最大津波浸水深分布を示したものである。 $N=0$ の場合は, 陸上域

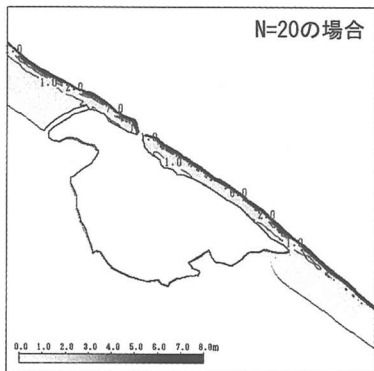


図-8 最大津波浸水深分布

で 8.0 m/s を越える最大流速が確認できるが, $N=20$ の場合には, 5.0 m/s 程度まで減衰する. 流速の減衰効果は浸水深の減衰に比べ大きいと言える.

(3) 代表点における津波の時系列変化

図-11 のグリーンベルト背後に位置する点 P02 とグリーンベルト前面における津波水位の時系列を, 図-12 に示す. 同図より, 前面の水位では, グリーンベルトが存在する場合は, 反射波の影響から水位が大きくなることが確認できる. 背面では, コブ状の地形による効果とグリーンベルトによる効果から, $N=0$ でも水位の低下が確認されるが, $N=10$ の場合ではさらに半減し, $N=30$ ではほぼ 1/3 まで減衰する.

(4) グリーンベルトによる津波減衰率

図-13 は, 点 P01, P02 および P03 における津波水位と「全水深×(流速)²」によって定義される水流圧力の最大値を示したものである. いずれの代表点においても, N の増加に伴って最大水位および最大水流圧力は低下する. 特に水流圧力の低減効果は, 水位にくらべ大きく, $N=10$ で約 1/2, $N=20$ では 1/3 程度まで低減されることが見込まれる.

5. おわりに

1998 年パプアニューギニア津波を対象に, 津波外力の

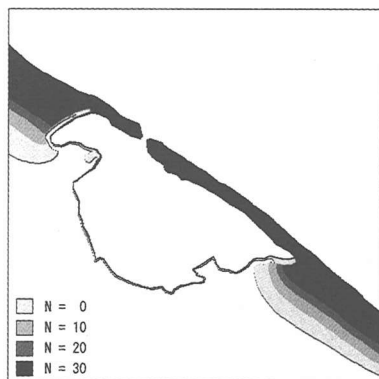
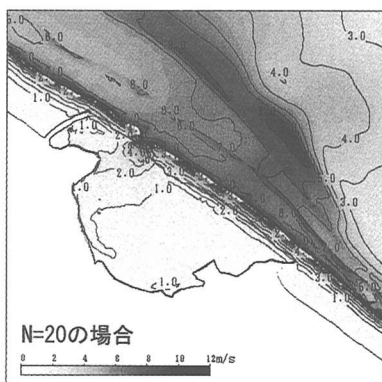
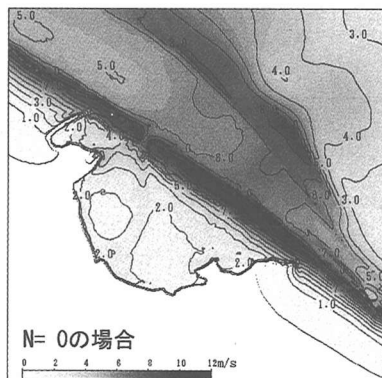
図-9 N の違いによる津波浸水域の違い

図-10 最大津波流速分布

検討およびグリーンベルトによる津波の減災効果について, 数値計算を用いて検討した. 津波外力については, 対象とした海底斜面による円弧滑り法による地滑りモデルでは痕跡値を再現するには至らなかったが, 海底地滑りに伴う地震発生メカニズムは複雑であり今後も, 海底地形等の調査や計算モデルの検討の必要性がある. 一方, グリーンベルトによる津波の減災効果については, 樹木の分布密度が大きくなるに従い, 津波浸水域は減少し, 特に流速の減衰効果は大きくなることが確認できた.

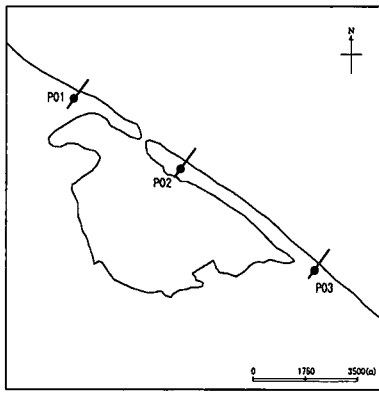


図-11 代表点位置

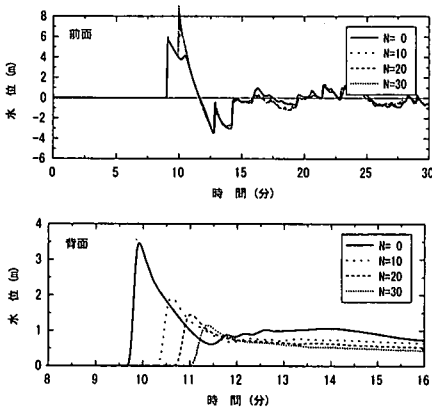


図-12 グリーンベルト前背面での水位の時系列 (P02)

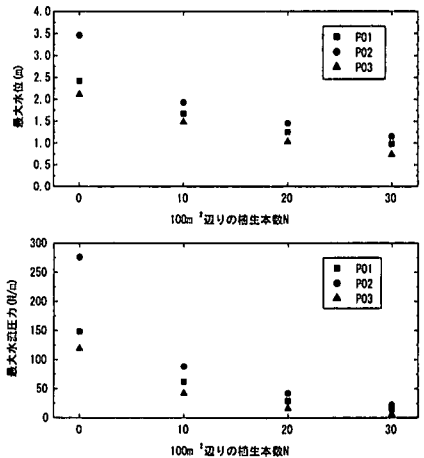


図-13 グリーンベルトによる津波の低減効果

橋 和正・今村文彦 (2000): 複合型津波発生メカニズムの解明—1998年バブアニューギニア津波を例として—, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 346-350.

原田賢治・油屋貴子・Latief Hamzah・今村文彦 (2000): 防樹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・柴本秀之・原崎恵太郎・原 信彦・三嶋宣明 (2000): 地震断層と海底地滑りを考慮した1998年バブアニューギニア地震津波の日本沿岸への適用, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 314-345.

平石哲也・柴本秀之・原 信彦 (2001a): 円弧滑り法を用いた地滑り津波波源による明和八重山地震津波の再現, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 351-355.

平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一 (2001b): 南太平洋地域における植林による津波対策の適用性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 1411-1415.

松富英夫・稲垣拓哉・今井健太郎 (2001): 砂嘴植生域を超える津波の基礎水理, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 316-320.

松山昌史・今村文彦・橋 和正・松本 剛・都司嘉宜 (1999): 1998年バブアニューギニア・シッサノ津波の数値的解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 386-390.

松山昌史・佐竹健治・松本 剛 (2001): 1998年バブア・ニューギニア津波の波源域における反射法探索と数値計算によるパラメータスタディ, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 366-370.

Harada, K., I. Imamura and T. Hiraishi (2003): Study on the effect in reducing tsunami by the coastal permeable structures, Proc. 30th IAMR Congress, (in printing).

また、流体力としての水流圧力は、 $N=10$ で半減し、 $N=20$ を越えると $1/3$ 以下に低減され、津波防災対策としてのグリーンベルトの有効性を確認することができた。

今後は、他の津波および地形に対する適用性を検証すると共に、効率的なグリーンベルトの配置等を検討する。

参 考 文 献

後藤智明・小川由信 (1982): Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学土木工学科, p. 52.