海岸樹林による津波減災効果の評価式の構築

Analysis and Evaluation of Tsunami Mitigation Effects by Coastal Vegetation

飯村耕介¹・田中規夫²・谷本勝利³・田中茂信⁴

Kosuke IIMURA, Norio TANAKA, Katsutoshi TANIMOTO and Shigenobu TANAKA

There are many types of coastal vegetation. However, the systematical method for evaluating the tsunami mitigation effect by coastal vegetation has not been established yet. Therefore, this study systematically analyzes the equations for tsunami through coastal vegetation and evaluates the vegetation effect on the tsunami run-up height and fluid force. The tsunami mitigation effects are investigated by numerical simulation based on non-linear long wave equations. When using dN_{all} , cumulative vegetation length in streamwise direction that includes the effect of different vegetation stand structures, the evaluation of the tsunami mitigation effect has been enabled. The tsunami mitigation effect and dN_{all} show high correlation, and evaluation equations for tsunami mitigation effect by coastal vegetation are given by exponential functions.

1. はじめに

海岸林の津波減災効果については、特に1998年のパプアニューギニア地震津波や2004年のインド洋大津波に際して再認識され、熱帯の開発途上国における有力な津波対策の一つとして注目されている。そのため、これまでに多様な樹種の海岸樹に対して津波減災効果が検討されている。たとえば、平石ら（2001）や平石・岩瀬（2003）は1998年のパプアニューギニア地震津波を調査し、マングローブやココナツの植林によるグリーンベルトの構築により津波力を軽減する構想を提案し、それを評価するための実験や数値計算を行っている。2004年のインド洋大津波に際しても数多くの現地調査が行われ（田中ら、2005；田中ら、2006；原田ら、2006；柳澤ら、2006）、熱帯性海岸樹による津波の軽減を対象とした多くの研究が行われている（谷本ら、2007；柳澤ら、2008）。しかし、多様な樹種を統一的に評価できる手法は未だ確立されていない。そのため、本研究では、海岸樹林帯をモデル化した実験を行い、樹木の抵抗項を取り入れた数値計算法の検証を行う。また、その数値モデルを用いて樹種、樹林帯幅、津波の高さ、陸上勾配を変化させて計算を行い、樹林による津波の低減効果を統一的に評価できる手法について検討を行うことを目的とする。

2. 実験概要

実験は幅40cmの造波水路に前方部の勾配が1/4.7、後

方部の勾配が1/20.5の木製の2段階斜面模型を設置して行った。この水路にマングローブ林に相当する樹林模型を設置して実験を行う（図-1）。樹林模型は直径5mmの木製円柱を中心間隔23mmで千鳥状に配置（図-2）し、このときの樹林密度は0.22本/cm²となる。波は周期20sの長周期波で、図-1に示したG1からG6の測点で容量式波高計により水位を測定している。

3. 数値計算の方法と計算条件

(1) 基礎方程式

計算に用いる基礎方程式は式（1）、（2）に示す水深積分型の1次元非線形長波方程式である。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{d} \right) + gd \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_b}{\rho} + \frac{F}{\rho} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

図-1 実験水路模型と測定点

図-2 樹林模型の配置方法

1 学生会員	修（工）	埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻
2 正会員	工博	埼玉大学大学院理工学研究科
3 フェロー	工博	埼玉大学名誉教授
4 正会員	工修	（独法）土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター 国際普及チーム 上席研究員

ここに、 x は水平座標、 t は時間、 ζ は水位、 Q は線流量、 d は全水深 ($=\zeta+h$, h : 静水深)、 g は重力加速度、 ρ は水の密度、 τ_b は底面摩擦応力、 F は単位面積あたりの樹木による抵抗力である。底面摩擦応力はマニングの粗度係数を用いて評価し、式 (3) で与え、樹木による抵抗力は式 (4) で与える。

$$\tau_b = \frac{\rho g n^2}{d^{7/3}} Q |Q| \dots\dots\dots (3)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho \gamma C_{D-all} b_{ref} \frac{Q |Q|}{d} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 n はマニングの粗度係数、 γ は樹林密度 (単位面積あたりの樹木本数)、 b_{ref} は樹木の基準投影幅 (胸高での幹の直径で与える) であり、 C_{D-all} は式 (5) で与える樹木の抵抗係数である (田中・佐々木, 2007)。

$$C_{D-all}(d) = C_{D-ref} \frac{1}{d} \int_0^d \frac{b(z) C_D(z)}{b_{ref} C_{D-ref}} dz \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 C_{D-ref} は基準抵抗係数 (胸高での幹に対する抗力係数で与える)、 b および C_D は地面からの高さ z での幹と枝の投影幅およびそこでの樹木の抗力係数である。このように、 C_{D-all} は高さ方向における抗力係数の変化と投影幅の変化を含み、全水深 (没水深) の関数である。本研究で対象とした樹木は、熱帯における海岸樹として、砂丘上に生育するアダン (*Pandanus odoratissimus*)、モクマオウ (*Casuarina equisetifolia*)、カシューナッツ (*Anacardium occidentale*) と潮汐の干満帯に生育するフタバナヒルギ (*Rhizophora apiculata*) の4種である (写真-1)。表-1に田中ら (2005, 2006, 2007) の現地調査結果に基づいた樹木の平均的な諸元、図-3に各樹木の抵抗特性 (C_{D-all} , 谷本ら, 2007) を示す。表および図中の H_{Tree} は樹高であり、樹林密度 γ は各樹木の樹間距離で正三角形 (千鳥状) 配置した場合の単位面積あたりの樹木本数である。 C_{D-all} の値や分布は樹木によって異なり、気根を有し、投影幅の大きいアダンやフタバナヒルギが大きな値を示している。数値計算は基礎式を差分式に変換して行う。差分化の方法等は谷本ほか (2007) に従って行う。

(2) 計算条件

計算は現地スケールで、樹種、樹林帯幅、津波高さ、陸上の地形勾配を変化させて行う。図-4に対象とした海岸地形と樹林帯の配置方法を示す。基準面上+0.0mまでは1/100勾配で、陸上の地形勾配 i_L は1/100, 1/150, 1/200, 1/250, 1/500, 1/1000の6ケースについて検討する。図中の樹林帯①には潮汐の干満帯に生育するフタバナヒルギ、樹林帯②には砂丘上に生育するアダン、モクマオウ、カシューナッツを配置し、樹林帯幅 W_v は10m, 20m, 50m, 100m, 200mの5ケースとする。また、来襲する津波は周期20分で、汀線での津波高さ H_{st} が3m, 5m, 7m

写真-1 対象とする熱帯性海岸樹

表-1 樹木の諸元

樹木名	H_{Tree}	b_{ref}	樹間距離	γ
	(m)	(m)	(m)	(本/m ²)
アダン	6	0.155	1.692	0.403
モクマオウ	10	0.124	2.160	0.247
カシューナッツ	5	0.297	7.100	0.023
フタバナヒルギ	8	0.177	3.336	0.104

図-3 各樹木の抵抗特性

図-4 海岸地形と樹林帯の配置方法

の3ケースについて検討する。なお、これらは特定の地点を対象としたものではなく、一つのモデルとして想定したものである。

4. 結果と考察

(1) 実験結果と数値モデルの検証

実験は、多重反射系水路においてほぼ定常状態になるまで待つて測定する手法で行っている。そのため、入射波高は樹林模型が無い状態で、測点G1での実験および数値計算による波高が一致するように定めた。その結果、造波水深0.44mでの入射波高は0.019mとなった。なお、数値計算における格子間隔は0.01m、時間間隔は0.0024sであり、マンニングの粗度係数 n は比較的粗い木製床に対し0.012としている。また、樹林模型の抗力係数 C_{D-ref} を1.5としている。この条件で実験と数値計算の比較を行う。図-5に波高分布の実験および数値計算結果を示す。横軸は造波板からの距離 x 、縦軸は波高 H である。数値計算結果の方が実験結果よりやや大きくなるものの、樹林模型の有無による波高の変化を良く表現している。樹林模型を設置することにより、模型背後(G6)では波高が大きく低減する。測点G6において模型がない場合の波高が0.063mなのに対して、模型を設置した場合の波高は0.042mとなり、約3割程度波高を低減する。なお、 x が11.3m以上の数値計算結果において波高が急激に低下するが、これは引き波の際に底面が露出し、最低水位が底面の高さに一致するためである。図-6, 7にそれぞれ模型なし、ありにおける測点G6での水位の時間変化を示す。両図から、水位の時間変化についても数値計算結果は実験結果を良く再現していることが分かる。したがって、この数値計算モデルを用いて現地スケールでの計算を行う。

(2) 現地スケールでの数値計算

3. (2) で示した条件で数値計算を行い、樹林帯による津波の低減効果について検討する。まず、図-8に各ケースにおける樹林帯がない条件での遡上高 R_0 を示す。横軸は陸上勾配 i_L で、汀線での津波高さ H_{sl} が大きくなるほど遡上高も大きくなる。図-9に $i_L=1/1000$ における無次元遡上高(樹林帯有り条件での遡上高 R /樹林帯無し条件での遡上高 R_0)の樹林帯幅 W_v による変化を示す。図には1つの W_v に対して4樹種と津波高さ3ケースについて示している。谷本ら(2007)でも指摘されているとおり、樹林帯幅を大きくするほど遡上高は低減されるが、その程度は樹種によって異なり、気根を有し、密生するアダンの抵抗が最も大きくなる。樹種による効果の差が大きく、この図から一つの評価式を得るのは非常に困難である。そこで、横軸を樹林帯幅 W_v ではなく、樹林帯の厚みを表すパラメータとして dN_{all} を定義し、これを用いて樹林帯による低減効果を整理する。首藤(1985)は樹林の厚みとして dn を用いた。これは汀線沿いに単位長をもち、樹林帯幅 W_v を他の一辺とする長方形内に存在する樹木の総

図-5 波高分布

図-6 測点G6における水位の時間変化 (樹林なし)

図-7 測点G6における水位の時間変化 (樹林あり)

図-8 樹林帯がない条件での遡上高 R_0

本数と樹木の胸高直径 b_{ref} との積で与えられる量であり、式(6)で与えられ、単位は(本・cm)となる。

$$dn = \gamma(1 \times W_v) b_{ref} \times 100 \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、 dn を算出する際に用いる胸高直径の単位にはcmを用いるため、式(6)では単位をあわせるために100をかけている。図-10に $i_L=1/1000$ における無次元遡上高の dn による変化を示す。図-9に比べて結果はまとまって見えるが、 dn では気根などの影響を評価できないため、気根の有無により差が見られる。そこで、樹種による抵抗特性の違いを考慮できるように、 dN_{all} を式(7)で与える(田中ら, 2005)。

$$dN_{all} = dn \times C_{D-all} \quad \dots\dots\dots (7)$$

C_{D-all} は樹木の抵抗特性値で個々の樹木の投影幅の鉛直分布や葉層の影響を考慮したものであるが、全水深の関数であるため時間や場所によって値が変化してしまう。したがって、 dN_{all} を算出する際には、代表値としてアダン、モクマオウ、カシューナッツの場合は全水深 d に樹林帯がない場合の汀線での津波高さ H_{sl} を、フタバナヒルギの場合は全水深 d に樹林帯がない場合の汀線での津波高さ H_{sl} と樹林帯前面での静水深 h の和をそれぞれ代入して求めることとした。図-11に $i_L=1/1000$ における無次元遡上高の dN_{all} による変化を示す。 dN_{all} を用いることで無次元遡上高の変化を、樹種によらず一様に評価できてい

ることが分かる。また、図中には近似曲線も示している。近似曲線を式(8)に示す形で与えると、 $i_L=1/1000$ の場合、係数 $\alpha=0.00828$ 、決定係数 $R^2=0.941$ となり、 dN_{all} と無次元遡上高との間に高い相関があることが分かる。

$$R/R_0 = e^{-\alpha \sqrt{dN_{all}}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

同様に、ほかの陸上勾配についても無次元遡上高を dN_{all} で評価し、近似曲線を求める。図-12に dN_{all} を用いたときの各陸上勾配における無次元遡上高の近似曲線を示す。遡上高の軽減効果は陸上の地形勾配が緩くなるほど大きくなり、 dN_{all} が1000のとき、 $i_L=1/100$ では遡上高の低減率(1-無次元遡上高)が0.11なのに対して、 $i_L=1/200$ での低減率は0.18、 $i_L=1/1000$ での低減率は0.23にもなる。表-2には各陸上勾配における近似曲線の係数 α と決定係数 R^2 と示しており、陸上勾配が緩くなるほど相関が高くなる。

遡上高と同じように流体力についても検討する。流体力 F^* は式(4)を変形して次式で定義する(谷本ほか, 2007)。

$$F^* = \frac{F}{\gamma C_{D-all} b_{ref}} = \frac{1}{2} \rho \frac{Q|Q|}{d} \quad \dots\dots\dots (9)$$

これは抗力係数が1の高さ方向に一樣な物体が受ける単位幅当たりの抗力に相当する。また、流体力は汀線から陸側に300m離れた地点での値を用いて検討する。図-13に樹林帯がない条件での流体力 F^*_0 を示す。流体力は

図-9 無次元遡上高の W_v による変化 ($i_L=1/1000$)

図-11 無次元遡上高の dN_{all} による変化 ($i_L=1/1000$)

図-10 無次元遡上高の dn による変化 ($i_L=1/1000$)

図-12 各陸上勾配における無次元遡上高の近似曲線

表-2 各陸上勾配における係数 α と決定係数 R^2 (遡上高)

陸上勾配 i_L	係数 α	決定係数 R^2
1/100	0.00371	0.673
1/150	0.00546	0.798
1/200	0.00637	0.850
1/250	0.00691	0.877
1/500	0.00787	0.923
1/1000	0.00828	0.941

図-13 樹林帯がない条件での流体力 F^*_0

図-14 各陸上勾配における無次元流体力の近似曲線

表-3 各陸上勾配における係数 α と決定係数 R^2 (流体力)

陸上勾配 i_L	係数 α	決定係数 R^2
1/100	0.02655	0.905
1/150	0.02584	0.902
1/200	0.02529	0.924
1/250	0.02507	0.936
1/500	0.02460	0.954
1/1000	0.02428	0.960

汀線での津波高さが大きいほど、また陸上勾配が緩いほど大きくなる傾向にある。図-14に dN_{all} を用いたときの各陸上勾配における無次元流体力（樹林帯有り条件での流体力 F^* /樹林帯無し条件での流体力 F^*_0 ）の近似曲線を示す。無次元流体力の近似曲線は無次元遡上高のときと同じように式（8）の形で与える。流体力の低減率は遡上高に比べて全体的に大きく、また陸上勾配による低減率の差があまりない。表-3には各陸上勾配における無次

元流体力の近似曲線の係数 α と決定係数 R^2 と示しており、陸上勾配によらず高い相関を示している。

このように、樹種によらずに津波軽減効果の評価を可能にした。この評価式（近似曲線）を用いれば、本研究で対象としなかった樹種に対しても、樹木の諸元や樹林帯幅、投影幅の鉛直分布などが分かれば数値計算を行わなくとも dN_{all} から津波の減衰率を得ることができる。

5. おわりに

本研究では、樹林帯による津波の軽減効果について統一的に評価できる手法について検討を行った。海岸樹林帯による津波遡上高および流体力の軽減効果については dN_{all} を用いることで樹種によらず指数関数を用いた近似式で一樣に評価できるようになった。遡上高の軽減効果は陸上勾配が緩くなるほど効果が大きく、また dN_{all} と遡上高の減衰率との間の相関が高くなる。一方、流体力の軽減効果については陸上勾配による差はあまり生じない。今後は模型実験により dN_{all} の検証を行う予定である。また、本研究では樹木の破壊を考慮していないため、津波外力が大きいかほど減災効果を過大評価している可能性がある。今後、樹木の破壊を考慮した検討が必要である。

参考文献

- 首藤伸夫（1985）：防潮林の津波に対する効果と限界，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 465-469.
- 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎・Samang Homchuen（2005）：津波防御に対する樹林帯幅と樹種の影響について—インド洋大津波におけるタイでの痕跡調査—，海岸工学論文集，第52巻，pp.1346-1350.
- 田中規夫・武村 武・佐々木寧・M.I.M. Mowjood（2006）：スリランカ海岸林の樹種による破壊条件と津波到達遅延時間の相違，海岸工学論文集，第53巻，pp.281-285.
- 田中規夫・佐々木寧（2007）：2006年ジャワ津波災害において海岸林が果たした役割とその破断・なぎ倒し限界，水工学論文集，第51巻，pp.1445-1450.
- 谷本勝利・田中規夫・N.A.K. Nandasena・飯村耕介・清水 隆（2007）：種々の熱帯性海岸樹の組合せによる津波防御効果に関する数値計算，海岸工学論文集，第54巻，pp.1381-1385.
- 原田賢治・沖村 孝・鳥居宣之（2006）：インド南東部におけるスマトラ地震津波の被災調査，海岸工学論文集，第53巻，pp.296-300.
- 平石哲也・竹村慎治・永瀬恭一（2001）：南太平洋地域における植林による津波対策法の適用性，海岸工学論文集，第48巻，pp.1411-1415.
- 平石哲也・岩瀬浩之（2003）：1998年バブ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，海岸工学論文集，第50巻，pp.1366-1370.
- 柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林 一（2006）：マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件—2004年インド洋大津波によるタイ Khao Lakでの被害調査—，海岸工学論文集，第53巻，pp.231-235.
- 柳澤英明・越村俊一・宮城豊彦・今村文彦（2008）：2004年インド洋大津波におけるマングローブ林のフラジリティ関数と津波減衰効果，海岸工学論文集，第55巻，pp.286-290.