樹林密度の異なる植生帯を組み合わせたときの 津波軽減効果に関する研究

Tsunami Mitigation Effects by the Combination of Vegetation with Different Tree Density

飯村耕介¹·田中規夫²·原田賢治³·谷本勝利⁴

Kosuke IIMURA, Norio TANAKA, Kenji HARADA, Katsutoshi TANIMOTO

There are many types of coastal vegetation. However, the tsunami mitigation effects in relation to the tree density distribution in a forest have not been investigated yet. The objective of this study is to experimentally investigate the tsunami mitigation effects by the combination of vegetation with different tree density under the same vegetation thickness (dn). Vegetation is modeled by circular cylinders and arranged in a wave channel with slope. In the experiments, water level, velocity, force and run-up height are measured. When tree density is dense, the run-up height and maximum velocity behind vegetation become smaller than the sparse case. This implies that the coastal vegetation for tsunami mitigation should be as dense as possible, even if the vegetation thickness is the same.

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おり、これまでに樹林帯に よる津波防御に関する数多くの研究が行われている。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、マンゴーやコ コナッ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、それらを評価するためにグ リーンベルトを円柱群でモデル化した模型実験や数値計 算を行い検証している.また、今井ら(2003)や原田・ 今村(2003)は樹木の枝葉を含めた複雑な構造を持つ植 生模型を用いた水理実験を行い,植生背後における津波 の減衰効果や植生に作用する各種流体力についての検証 を行っている.一方,2004年のインド洋大津波に際して も数多くの研究が行われており、現地調査により海岸林 の樹種による破壊条件の相違が明らかにされたり(田中 ら,2006), dNall(樹林の厚みを表すパラメータ)を用い た樹木の破壊限界評価 (Tanaka et al., 2007) や樹木の破 壊を考慮したマングローブ林による津波減災効果に関す る研究(柳澤ら, 2007)が行われている一方、樹林があ る場合にはその端部付近や通路出口で流速が増幅される 危険性が指摘されている (Thuy et al., 2009). また, 飯 村ら(2009)は多様な樹種に対して統一的に津波減災効 果を評価できる手法について検討している.

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	埼玉大学教授大学院理工学研究科
3	正会員	博(工)	埼玉大学助教大学院理工学研究科
4	フェロー	工博	埼玉大学名誉教授

しかしながら,これら既往研究の多くは樹種や樹林密 度が固定されており,密度の異なる樹木を組み合わせた ときの津波減災効果については未だ十分に検証されてい ない.そこで,本研究では海岸樹林帯をモデル化した水 理模型実験を行い,密度の異なる樹木モデルを組み合わ せたときの津波減災効果について明らかにすることを目 的とする.

2. 実験条件

実験は図-1に示すように,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や 砂浜の海岸樹林に相当する植生模型(直径5mmの木製円 柱を千鳥状配置)を後方部の斜面上の10.36m~11.36m の範囲に設けて行った.沖側の水深を0.4mとし,造波す る波は孤立波で,造波領域における入射波高は3.14cmと する.本実験では,まず植生模型を一様に配置して実験 を行い,植生密度の減衰効果への影響を明らかにする. 次に,植生密度の裏なる2つの植生模型帯を組み合わせ て配置したときの減衰効果について実験を行う.図-2, 表-1および表-2に植生模型の配置条件を示す.表-1は植



生模型を一様に配置したときの実験ケース,表-2は密度 の異なる2つの植生帯を組み合わせて配置したときの実 験ケースをそれぞれ示している.各表中のLは円柱間距 離,Wは植生帯幅を示しており(図-2),表-2における添 え字のfは前方部,bは後方部を意味する.また,LとW はすべての実験ケースで,植生帯の厚みを表すパラメー タであるdn(首藤,1985)が等しくなるように設定して おり,以下の式を用いてdnを算出する.

$$dn = \frac{2}{\sqrt{3}(L+d)^2} Wd \times 10^3 \qquad (1)$$

$$dn = \frac{2}{\sqrt{3}(L_f+d)^2} W_f d \times 10^3 + \frac{2}{\sqrt{3}(L_b+d)^2} W_b d \times 10^3 \quad (2)$$

ここに, dは模型円柱の直径(=0.5cm)である.式(1) は植生模型を一様に配置したとき,式(2)は密度の異



Case No.	<i>L</i> (mm)	<i>W</i> (mm)	密度(本/m ²)
Case-1	45	1000	462
Case-2	35	640	722
Case-3	25	360	1283
Case-4	15	160	2887
Case-5	5	40	11547

表-2 植生模型の配置条件(組み合わせ)

Corr No	前	方部	後方部	
Case No.	$L_f(mm)$	$W_f(mm)$	$L_b (\mathrm{mm})$	$W_b ({ m mm})$
Case-6	5	20	15	80
Case-7	15	80	25	180
Case-8	15	80	35	320
Case-9	15	80	45	500
Case-10	35	320	45	500
Case-11	15	80	5	20
Case-12	25	180	15	80
Case-13	35	320	15	80
Case-14	45	500	15	80
Case-15	45	500	35	320

なる植生模型を組み合わせて配置したときのdnの算出式 であり,式(2)では前方部と後方部の和として求めて いる.なお,*L*, Wの単位はmmを用いているが,式中で はmを用いる必要があるため10³をかけている.また, 本実験におけるdnは231本・cmとなる.

本実験における測定項目は遡上高,水位,流速および 植生模型1本あたりへの作用力の4つで,図-1中のG1~ G9が各測定点を示している.水位は容量式波高計を用い てG1~G9,流速はプロペラ式流速計を用いてG5~G9, 作用力は3分力計を用いてG7~G9でそれぞれ測定して いる.なお,G7,G9はそれぞれ植生の最前列,最後列 であり,G8は実験ケースがCase-1~Case-5の場合は植生 帯の中央部,Case-6~Case-15の場合は密度の異なる植生 帯の境界部となる.

3. 結果と考察

(1) 一様配置の場合

まず植生模型を一様に配置したケースであるCase-1~ Case-5についての結果を示す. 図-3にCase-1, 3, 5にお ける最高水位の空間分布を示す.ここに、横軸xは造波 板からの距離である.実験ケースによって植生帯の幅が 異なるため、測定点G7、G8がケースによって場所が異 なる、植生密度が大きくなるにしたがって、植生前面で は堰き止めや反射の効果により最高波高が大きくなり, また植生帯内部を通過するにしたがって最高水位が大き く低減していく. 図-4には測定点G1におけるCase-1, 3, 5の水位の時間変化を示す.ここに、横軸tは時間である. 最初の波(t=36~43sあたり)は造波板から植生帯に向 かう波であり、2つ目の波(t=43~49sあたり)が植生 帯からの反射波(斜面による反射を含む)となる.植生 密度が大きくなるほど反射波の最高水位が大きくなる. 各ケースにおける反射波の最高水位の値は、Case-1から 順に0.9cm, 1.1cm, 1.4cm, 1.5cm, 1.8cmとなり、最も 植生密度の大きいCase-5は最も植生密度の小さいCase-1 に比べおよそ2倍の値となった.なお、図-3、4において、 Case-2, 4も同様の傾向を示すが割愛した.



表-1 植生模型の配置条件(一様)



次に、植生帯背後における低減効果についての結果を 示す.図-5に各実験ケースにおける無次元遡上高を示す. 縦軸は、植生模型がある場合の遡上高Rを植生模型がな い場合の遡上高R₀で割って無次元化している.なお、本 実験においては $R_0 = 9.9$ cmである.植生密度が大きくな るほど無次元遡上高が小さくなる、つまり、植生背後に おける低減効果が大きくなっているのが分かる.この要 因の一つとしては、図-4で示した反射波の影響が挙げら れ, 密度が大きくなるほど植生前面での反射が大きくな り、植生帯内部を通過するエネルギーが小さくなったと 考えられる.また、図-6に流速の最大値の空間分布、図-7に植生模型1本あたりの作用力の最大値の空間分布を示 す. 流速は底面から鉛直方向に1cm, 2cm, 4cm, 6cmの 4点で測定し、平均流速を求め、その最大値を示してい る. 密度が大きくなると、特に植生帯の後方の抵抗力が 大きくなる.これは、密度が大きいと植生前面での堰上 げの影響により植生内部の水面勾配が大きくなるのと, 空隙が小さくなるために局所的に流速が大きくなるため だと考えられる、これらの影響により、樹林の厚みを表 すパラメータである dnが一定であっても,植生密度が大 きいと植生背後での低減効果が大きくなると考えられ る.図-8に植生帯背後(測定点G6)での各実験ケースに おける無次元最大流速を示す.縦軸は植生模型がある場 合の最大流速 Vを植生模型がない場合の最大流速 Voで割 って無次元化している.こちらも無次元遡上高と同じよ うに、植生密度が大きくなるほど低減効果が大きくなる. 図-6では植生密度が大きくなるほど流速が大きくなる傾 向を示したが、これは植生帯内部の空隙が小さい(空 隙<1)ためで、植生帯の外側である測定点G6では空隙 が1であるため、植生帯内部に比べて流速は小さくなる. なお、本実験において $V_0 = 0.31$ m/sである.

(2) 組み合わせ配置の場合

次に,密度の異なる2つの植生帯を組み合わせて配置 したケースであるCase-6~Case-15についての結果を示 す.密度の組み合わせ方については,Case-6~Case10は



前方部が密, Case-11~Case-15は後方部が密となっている. また, Case-6と11, Case-7と12, Case-8と13, Case-9と14, Case-10と15はそれぞれ前後の植生帯を入れ替え

た形になっている.

図-9に測定点G1における水位の時間変化を示す。一様 配置のときと同じように、植生帯からの反射波を見ると、 Case-6が最も反射波の最高水位が大きく、Case-8、Case-10の順となっている. Case-6は前方部の密度が最も大き く、また植生帯全体としても植生帯幅が小さく、密にま とまっている条件であるため、反射波が大きくなった. 表-3には測定点G1におけるCase-6~Case-15の反射波の 最高水位n.をまとめる.表中の上の行ほど植生帯の合計 幅Wは小さい条件となるため、植生帯全体の密度は大き く、下の行ほど植生帯全体の密度が小さい条件となる. 反射波の最高水位は植生帯が密にまとまっているほど大 きくなり, また後方部よりも前方部の密度が大きい (Case-6~Case-10) ほうが反射波の最高水位は大きくなる 傾向にある.図-10に最高水位の空間分布,図-11に流速 の最大値の空間分布,図-12に作用力の最大値の空間分 布をそれぞれCase-8とCase-13について示す. Case-8は前 方部の植生帯の円柱間距離L_f=15mm,後方部の植生帯 の円柱間距離L_b=35mmのケースで,前方部が密になっ ており、Case-13はCase-8の植生の前後を入れ替えた条件 になっている. 最高水位の空間分布は、どちらのケース も密度の大きい植生帯の前面で堰上げや反射による水位 上昇が大きく、植生帯内で水位大きく低減し、水面勾配 が非常に大きくなっている。特にCase-13の場合、後方 部の密な植生帯による堰上げや反射により、前方部の植 生帯前面での水位が大きく上昇している. 流速の最大値 の空間分布については、どちらのケースも密度が大きい ほうの植生帯の背後で流速が大きくなっている.ただし,



表-3 反射波の最高水位

Case No.	η_r (cm)	Case No.	η_r (cm)
Case-6	1.8	Case-11	1.6
Case-7	1.4	Case-12	1.4
Case-8	1.4	Case-13	1.3
Case-9	1.2	Case-14	1.1
Case-10	0.9	Case-15	1.1

Case-8の場合は密な植生帯が前方部にあり,そのすぐ後 方にもう一つの植生帯があるためCase-13に比べ空隙の 変化が小さく,密な植生帯による流速の上昇もCase-13 ほど大きくはない.しかし,前方部の密な植生帯によっ て加速された流れが後方の植生帯を通過するので,後方 部の粗な植生帯内の流速が比較的早くなる.これら水位 や流速の影響を受け,植生模型への作用力の最大値は図-12のような変化を示す.後方部が密な植生の場合,後方 の抵抗力は非常に大きくなるが,前方部の抵抗は小さい. 前方部が密な植生の場合はその逆の傾向を示す.また, 最終的な植生帯背後での低減効果は,両方の遡上高で比 較すると,Case-8の場合は8.15cm,Case-13の場合は 8.19cmと大きな差はない.ほかのケースについても程度 の差はあるが,Case-8とCase13の関係と同じような傾向



を示す.

図-13に無次元遡上高,図-14に測定点G6における無次 元最大流速をそれぞれ示す.横軸は植生帯幅Wとしてい る.植生帯幅が小さくするほど,すなわち植生帯をより 密に配置するほど無次元遡上高は小さくなり,植生帯背 後における低減効果が大きくなる.また,異なる密度の 植生帯を組み合わせるときにはその前後を入れ替えても 遡上高への影響は小さい.流速についても同様に,植生 帯をより密に配置するほど無次元最大流速は小さくなる 傾向にあるが,後方部の植生帯の密度が大きくなるケー スの一部で流速が下がりにくくなるものも見られる.こ れは植生帯最後列付近での水面勾配と流速が大きいため に測定点G6においても流速が下がりづらくなっている ためだが,それでも植生模型がない場合と比べると流速 は低減している.



4. おわりに

本研究により,異なる密度を持つ2つの植生帯を組み 合わせて配置したときの低減効果について実験的に検証 した.樹林の厚みを表すパラメータ*dn*が同じ値であって も,植生帯の幅を小さくし,より密に配置すれば植生帯 背後での低減効果をより大きくすることができる.

謝辞:本研究の一部は,科学研究費補助金(特別研究員 奨励費)からの研究助成を受けて行われました.ここに 記して謝意を表します.

参考文献

- 飯村耕介・田中規夫・谷本勝利・田中茂信(2009):海岸樹林 による津波減災効果の評価式の構築,海岸工学論文集, 第56巻, pp. 366-370.
- 今井健太郎・松冨英夫・高橋智幸(2003):津波氾濫流の植生 に作用する各種流体力,海岸工学論文集,第50巻,pp. 276-280.
- 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・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.
- 原田賢治・今村文彦(2003):防潮林による津波減衰効果の評 価と減災のための利用の可能性,海岸工学論文集,第50 巻,pp.341-345.
- 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,海岸工学論文 集,第50巻, pp.1366-1370.
- 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減災効果,海 岸工学論文集,第54巻, pp.246-250.
- Tanaka, N., Y. Sasaki, M.I.M. Mowjood and K.B.S.N. Jinadasa (2007): Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami, Landscape and Ecological Engineering. 3, 33-45.
- Thuy, N.B., K. Tanimoto, N. Tanaka, K. Harada and K. Iimura (2009): Effect of open gap in coastal forest on tsunami run-up Investigations by experiment and numerical simulation, Ocean Engineering, 36, 1258-1269.