

海岸堤防と海岸樹林の組み合わせによる 津波減災効果に関する数値計算

NUMERICAL SIMULATION FOR TSUNAMI MITIGATION EFFECT
COMBINING COASTAL EMBANKMENT AND COASTAL VEGETATION

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

¹学生会員 工修 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学教授 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

³正会員 工博 埼玉大学助教 大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

⁴フェロー 工博 埼玉大学名誉教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

There are many coastal locations where sufficient vegetation width for tsunami impact mitigation cannot be accommodated due to restrictions imposed by land use. Therefore, this study evaluates the effect of combining coastal embankment with coastal vegetation on the reduction of tsunami run-up height and fluid force. The tsunami mitigation effects have been investigated by numerical simulation based on non-linear long wave equations. As bank height becomes large, the tsunami mitigation effect also increases. As tsunami height at coast becomes large, tsunami mitigation effect becomes small. In cases where the embankment and coastal vegetation are combined, the tsunami mitigation effect becomes most significant when the embankment is on the land side, i.e., behind the vegetation. When the embankment is located in front of the vegetation (sea side), or inside the vegetation, the decrease is smaller.

Key Words : *Tsunami, Coastal embankment, Coastal vegetation, Run-up height*

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、海岸林の津波減災効果に関する研究が数多く行われ (例えば、1 次元数値計算では原田・今村, 2003¹⁾; 谷本ほか, 2007²⁾ など、2 次元数値計算では谷本ほか, 2008³⁾; 柳澤ほか, 2008⁴⁾ など)、近年非常な発展をみせている。しかし、海岸線近くまで住居が存在するなど土地利用の制約上、十分な樹林帯幅を確保できない地域も多く、こうした地域に津波の浸入を防ぐほどの海岸樹林帯や海岸堤防を設置することは経済的に困難である。そこで、本研究では、比較的天端高の低い海岸堤防と海岸樹林帯を組み合わせることで、効果的に津波を低減させる方策について数値計算を行い検討する。

2. 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)～(3)に示す水深積分型の非線形長波方程式である。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + g d \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{F_x}{\rho} - E_{vx} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q_x Q_y}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q_y^2}{d} \right) + g d \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{F_y}{\rho} - E_{vy} = 0 \quad (3)$$

ここに、 x, y は平面座標、 t は時間、 ζ は水位、 Q_x, Q_y は x, y 方向線流量成分、 d は全水深 (= $h + \zeta$, h : 静水深)、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度である。また、 τ_{bx}, τ_{by} は底面摩擦応力、 F_x, F_y は単位面積あたりの樹林による抵抗力、 E_{vx}, E_{vy} は渦粘性力のそれぞれ x, y 方向成分である。底面摩擦応力はマニングの粗度係数を用いて評価し、摩擦応力ベクトル $\vec{\tau}_b$ は式(4)で与え、樹木の抵抗力ベクトル \vec{F} は式(5)で与える。

$$\bar{\tau}_b = \frac{\rho g n^2}{d^{7/3}} \bar{Q} |\bar{Q}| \quad (4)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \frac{\rho \gamma C_{D-all} b_{ref}}{d} \bar{Q} |\bar{Q}| \quad (5)$$

ここに、 n は Manning の粗度係数 (=0.025)、 \bar{Q} は線流量ベクトル、 γ は樹林密度 (単位面積あたりの樹木の木数)、 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(6)で与える樹木の抵抗係数である (田中・佐々木, 2007⁵⁾) .

$$C_{D-all}(d) = C_{D-ref} \frac{1}{d} \int_0^d \frac{b(z) C_D(z)}{b_{ref} C_{D-ref}} dz \quad (6)$$

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写真-1 に示す熱帯海岸樹のアダン (*Pandanus odoratissimus*) で、気根があり砂丘上に密生するのが特徴で、図-1 に示したような抵抗特性を有している. 図中、 H_{Tree} は樹高で、本研究では 6m としている. また、樹木の基準投影幅 (胸高での幹の直径) b_{ref} を 0.16m、そこでの基準抗力係数 C_{D-ref} を 1.0、樹林密度 γ を 0.4 (樹木間距離を 1.7m として正三角形配置したときの密度に相当) としている.

また、渦粘性項は次式で与える.

$$E_{vx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\nu_e \frac{\partial Q_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \nu_e \left(\frac{\partial Q_y}{\partial x} + \frac{\partial Q_x}{\partial y} \right) \right\} \quad (7)$$

$$E_{vy} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_e \left(\frac{\partial Q_x}{\partial y} + \frac{\partial Q_y}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\nu_e \frac{\partial Q_y}{\partial y} \right) \quad (8)$$

ここに、 ν_e は渦動粘性係数であり、灘岡・八木, 1993⁶⁾ の SDS (Sub Depth Scale) 乱流モデルに倣い、次の乱れエネルギー k_D の輸送方程式を解くことで与える.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial k_D}{\partial t} + U_x \frac{\partial k_D}{\partial x} + U_y \frac{\partial k_D}{\partial y} \\ &= \frac{1}{d} \frac{\partial}{\partial x} \left(d \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k_D}{\partial x} \right) + \frac{1}{d} \frac{\partial}{\partial y} \left(d \frac{\nu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k_D}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$+ p_{kh} + p_{kv} + p_{kd} - \varepsilon_D$$

$$\text{渦動粘性係数: } \nu_e = c_w \frac{k_D^2}{\varepsilon_D} \quad (10)$$

$$\text{乱れエネルギー消散率: } \varepsilon_D = c_d \frac{k_D^{1.5}}{\alpha d} \quad (11)$$

水平せん断変形による乱れエネルギー生産:

$$p_{kh} = \nu_e \left\{ 2 \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial U_y}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

底面摩擦による SDS エネルギー生産:

$$p_{kv} = \frac{g n^2}{d^{4/3}} (U_x^2 + U_y^2)^{1.5} \quad (13)$$



写真-1 アダン

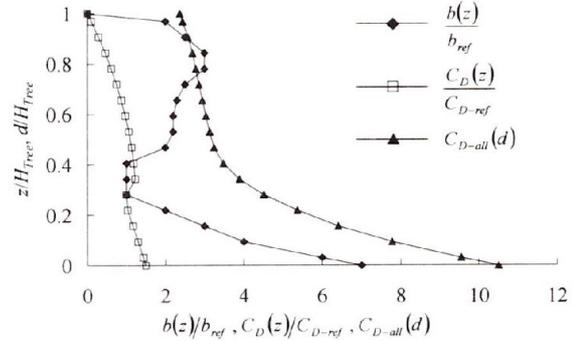


図-1 アダンの抵抗特性 (田中・佐々木, 2007⁵⁾)

樹木抵抗による SDS エネルギー生産:

$$p_{kd} = \frac{\gamma b_{ref} C_{D-all}}{2} (U_x^2 + U_y^2)^{1.5} \quad (14)$$

ここに、 U_x 、 U_y は水深平均流速成分である. また、式中における各モデル係数は次のように与える.

$$\sigma_k = 1.0, c_w = 0.09, c_d = 0.17, \alpha = 0.1 \quad (15)$$

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, 2008³⁾ に従って行う.

(2) 計算条件

対象とする海岸は、図-2 に示す断面が一様に続く海岸で、そこに周期 20 分の津波がまっすぐに来襲する条件である. 汀線付近は基準面上+0.2m まで 1/100 勾配で、その後平坦な地形が 980m にわたって続き、1/250 の勾配に接続する. また、来襲する津波は汀線での高さ H_{st} が 3m, 5m の 2 ケースとする. 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.

海岸堤防と海岸樹林の配置方法は、まず 1 次元数値計算で図-3 に示す 5 ケースについて検討を行う. Case-A は海岸樹林のみ、Case-B は海岸堤防のみ、Case-C1~Case-C3 が堤防と樹林を組み合わせたケースである. Case-A では樹林帯幅 W_v を 5~200m, Case-B では堤防高さ h_b を 0.5~2m にわたって変化させる. Case-C1~Case-C3 では樹林帯幅を 50m で固定し、堤防高さ (0.5~2m) と配置方法を変えて行う. 次に、2 次元数値計算で図-4 に示す堤防と樹林の平面配置に対して計算を行う. 谷本ほか, 2008³⁾ によれば、樹林内に通路があるとき、通路内および

通路出口付近では非常に早い流れになる危険性が指摘されている。本研究では、樹林内に通路がある場合に、海岸堤防と組み合わせることで流れがどのように変化するかを検討する。通路幅は 15m (通路の開口率 0.075) とした。これは通路出口での流速が最も大きくなるとされた値である。また、堤防高さは 1m とした。

3. 結果と考察

(1) Case-A

図-5 に Case-A 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)、図-6 に Case-A における流体力指標比 (樹林帯有り条件での流体力指標 F^* / 樹林帯無し条件での流体力指標の最大値 $F^*_{\max 0}$) の最大値を示す。流体力指標 F^* は式 (5) を参考に次式で定義し、汀線から 300m 陸側に離れた点での値を用いた。

$$F^* \equiv \frac{Q|Q|}{d} \quad (16)$$

汀線での津波高さが 3m のときは $R_0=2.98\text{m}$ 、 $F^*_{\max 0}=25.21\text{m}^3/\text{s}^2$ となり、汀線での津波高さが 5m のときは $R_0=6.32\text{m}$ 、 $F^*_{\max 0}=109.57\text{m}^3/\text{s}^2$ となる。図-5 から樹林帯幅を長くすると遡上高の低減効果が大きくなること分かる。また、津波高さが 3m のと

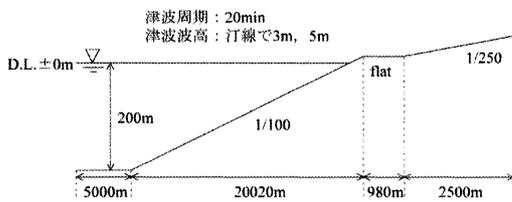


図-2 対象とする海岸地形

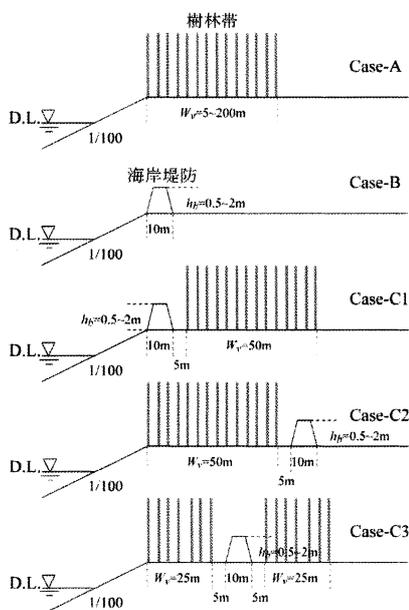


図-3 海岸堤防と海岸樹林の配置方法 (1次元計算)

きのほうが低減効果は大きい。これは、対象とした樹種がアダンであり、津波高さが小さいほど気根層の影響がより大きくなり、樹木の投影面積の水水平平均値が大きくなるので、抗力係数が大きくなる (図-1) ことが理由の一つとして考えられる。樹林帯幅による変化を見ると、樹林帯幅が 50m 程度までは無次元遡上高が大きく減少するのに対して、それ以上になると樹林帯幅の増加に対する無次元遡上高の減少の割合が小さくなり、緩やかに変化ようになる。これは、樹林帯幅を長くしても樹林帯内で流速が低減され、樹林帯内部における後ろ側の樹木での抵抗力が相対的に小さくなるためだと考えられる。図-6 から樹林帯幅による流体力指標比の変化についても、無次元遡上高の変化と同様の変化を示す。しかし、流体力指標比の値は無次元遡上高の値よりも小さな値、すなわち低減効果 (1 - (樹林帯有りの値 / 樹林帯無しの値)) は遡上高に対するものよりも大きい。両図から $H_{st}=3\text{m}$ で樹林帯幅 50m のときには、無次元遡上高の低減効果は 0.38 (=1-0.62 (図-5)) なのに対して流体力の低減効果は 0.58 (=1-0.42 (図-6)) にもなること分かる。

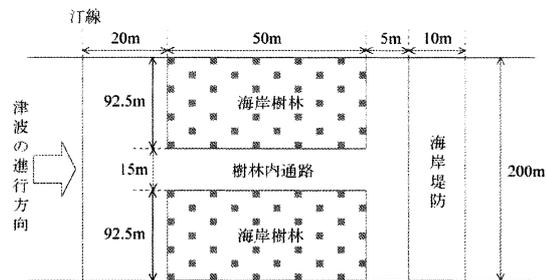


図-4 海岸堤防と海岸樹林の2次元平面配置

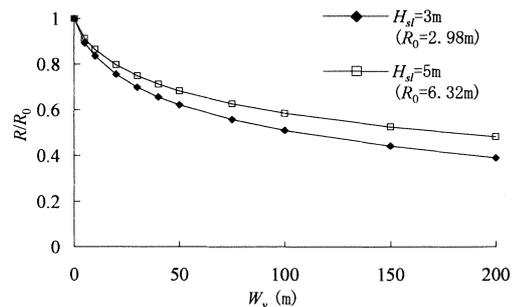


図-5 Case-A における無次元遡上高

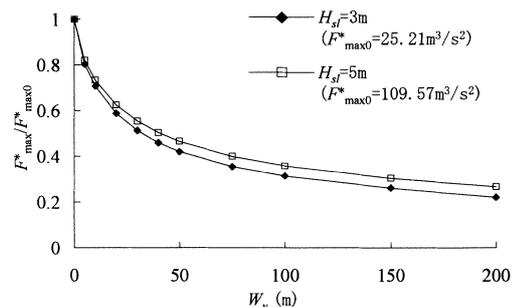


図-6 Case-A における流体力指標比の最大値

(2) Case-B

図-7 に Case-B における無次元遡上高, 図-8 に Case-B における流体力指標比の最大値を示す. 両図とも横軸は堤防高さを汀線での津波高さで割って無次元化している. 図-7 から堤防高さを大きくとるほど無次元遡上高の低減効果が大きくなるのが分かる. また, 無次元遡上高の低減効果は堤防の高さと津波高さの比でほぼ決まってしまうことが分かる. 図-8 から流体力指標比の最大値の低減効果についても無次元遡上高の低減効果と同様の変化を示し, 堤防高さを大きくとるほど流体力の低減効果が大きくなる.

(3) Case-C

図-9 に堤防高さが 1m と 2m のときの Case-C1~Case-C3 における無次元遡上高, 図-10 に堤防高さが 1m と 2m のときの Case-C1~Case-C3 における流体力指標比の最大値をそれぞれ示す. 両図とも縦軸は Case-C1 の遡上高(=R_{C1})と流体力指標の最大値(=F*_{maxC1})で割って無次元化している. 津波高さ 3m のとき堤防高さ 1m では R_{C1}=1.82m, F*_{maxC1}=10.68m³/s², 堤防高さ 2m では R_{C1}=1.25m, F*_{maxC1}=7.42m³/s²となる. また津波高さ 5m のとき堤防高さ 1m では R_{C1}=4.32m, F*_{maxC1}=51.71m³/s², 堤防高さ 2m では R_{C1}=4.22m, F*_{maxC1}=51.25m³/s²となる. 図-9 から津波遡上高の低減効果は堤防と樹林の配置方法によって異なり, Case-C2, つまり海岸堤防を樹林の背後に配置した場合に最も無次元遡上高の低減効果が大きくなる. Case-C2 の場合, 津波高さが 3m のときに堤防高さ 1m では 0.09, 堤防高さ 2m では 0.15 程度, Case-C1 に比べ無次元遡上高

比が小さくなる. 同様に, 津波高さ 5m のとき, 堤防高さ 1m では 0.04, 堤防高さ 2m では 0.11 程度 Case-C1 に比べ無次元遡上高比が小さくなる. 一方で, Case-C1 と Case-C3 の間にはほとんど差がない. 図-10 の流体力指標比の最大値についても同じ傾向を示し, Case-C2 が最も低減効果が大きい. Case-C

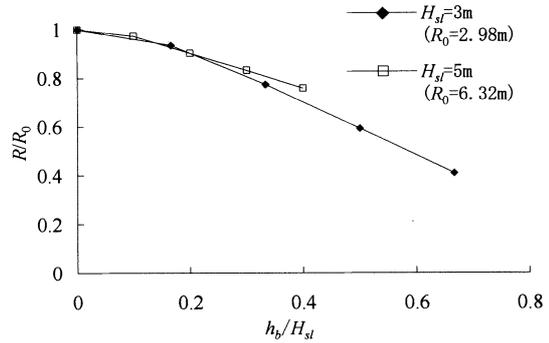


図-7 Case-Bにおける無次元遡上高

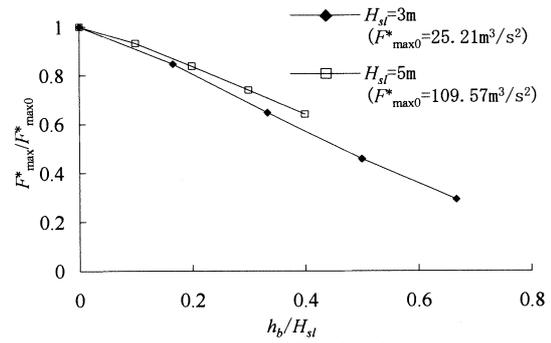


図-8 Case-Bにおける流体力指標比の最大値

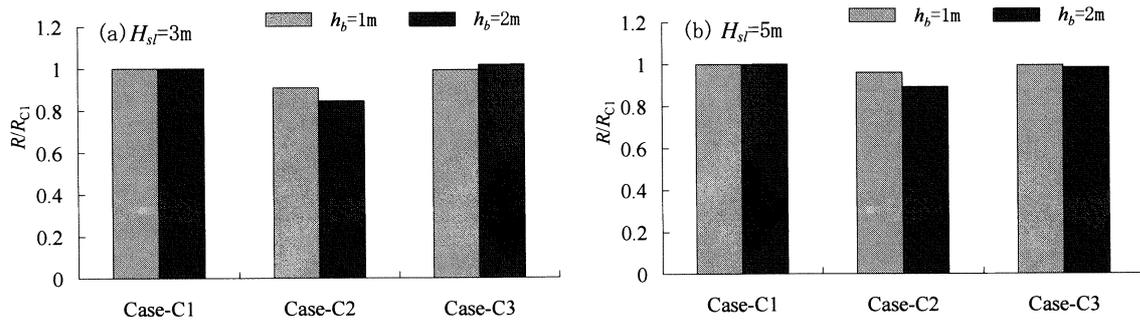


図-9 Case-C1~Case-C3における無次元遡上高

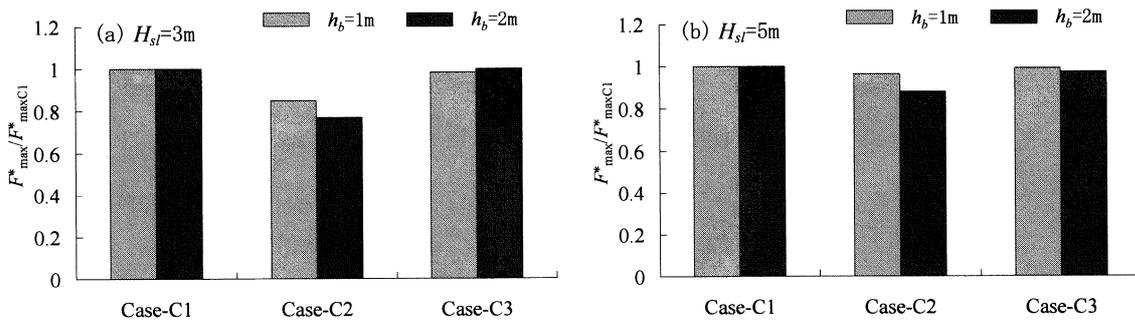


図-10 Case-C1~Case-C3における流体力指標比の最大値

2 の場合、津波高さが 3m のときに堤防高さ 1m では 0.15, 堤防高さ 2m では 0.23 程度 Case-C1 に比べ流体力指標比が小さくなる。同様に津波高さ 5m のとき、堤防高さ 1m では 0.04, 堤防高さ 2m では 0.12 程度 Case-C1 に比べ流体力指標比が小さくなる。なお、堤防高さが 0.5m, 1.5m の場合も 1m や 2m の結果の比較による考察と矛盾しないため紙面の都合上割愛した。

このように海岸堤防と海岸樹林の配置方法によって無次元遡上高, 流体力指標比の低減効果は異なり, 海岸堤防を樹林帯の背後に配置した場合 (Case-C2) に最も低減効果が大きくなる。これは, 海岸堤防を背後に配置することで, まず樹林帯によって樹林帯背後の津波高さが減少することで, 堤防の設置地点での津波の浸水深が小さくなり, 堤防による効果が大きくなるためだと考えられる。一方, 海岸堤防を樹林帯の前面に配置した場合 (Case-C1), 背後の樹林帯による反射やせき止めにより, 堤防設置地点での津波の浸水深が大きくなり, 堤防による効果が小さくなると考えられる。これらを確認するため, 図-11~図-13 にそれぞれ Case-C1~C3 における津波の最高水位 Z_{max} の空間分布を示す。各ケースの海岸堤防の高さは 1m とし, 横軸は汀線からの距離 x^* となっている。各図を比較すると, Case-C2 が堤防の設置地点での最高水位が小さく, 堤防の影響 (低減効果) がより大きくでているのが確認できる。また, 具体的な数値として, 表-1 に Case-C1~C3 における海岸堤防の前面での最高水位を示す。今回検討したどの条件においても Case-C2 が最も堤防前面の最高水位が小さくなるのが分かる。

今回検討した範囲で, 海岸堤防 (堤防高さ 2m) と海岸樹林 (樹林帯幅 50m) を Case-C2 で組み合わせるときと同等の遡上高の低減効果を樹林単独で得ようとした場合, 津波高さ 3m のときは樹林帯幅 200m, 津波高さ 5m のときは樹林帯幅 90m 程度必要となる。つまり, 海岸堤防を樹林の背後に配置することで, 樹林帯幅を 40~150m 減らしても同等の効果が得られることが分かった。

(4) 2次元数値計算

最後に, 図-4 に示す平面配置条件に対して検討を行った。図-14 は樹林のみ配置した場合の津波の最大浸水深の分布, 図-15 は海岸堤防と樹林を組み合わせたときの津波の最大浸水深の分布を示しており, それぞれ何も配置しない条件での計算結果で割って無次元化している。また, 図中の実線で囲った部分は樹林帯, 破線で囲った部分は海岸堤防の配置場所を示している。図-14 から樹林帯により前面で反射により水深が大きくなるが, 背後では樹林帯により低減され水深は小さくなる。また, 通路による浸水深への影響はほとんどない。図-15 から堤防を配置することで, 堤防の前面でも反射が起こるため, 水深が大きくなる領域が増加する。一方, 堤防背後での水深は小さくなり, 例えば $x=25300m$,

$y=100m$ での最大浸水深比は, 樹林のみでは 0.73, 樹林と堤防を組み合わせたときは 0.68 となる。

図-16 に樹林のみ配置した場合の最大水深平均流速の x 方向成分の分布, 図-17 に海岸堤防と樹林と組み合わせたときの最大水深平均流速の x 方向成分の分布を示しており, それぞれ何も配置しない条件での計算結果で割って無次元化している。図-16 から樹林帯内に通路があることで, 通路出口付近で局

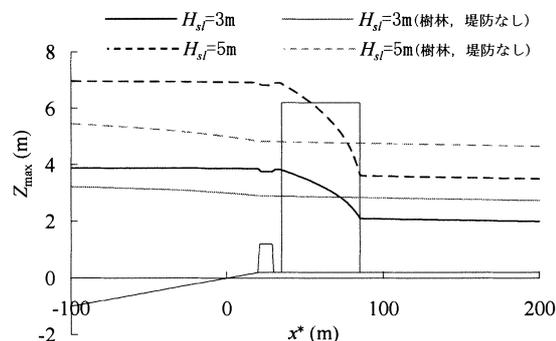


図-11 Case-C1における最高水位の分布

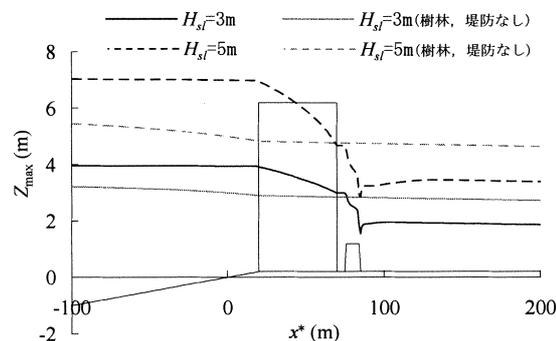


図-12 Case-C2における最高水位の分布

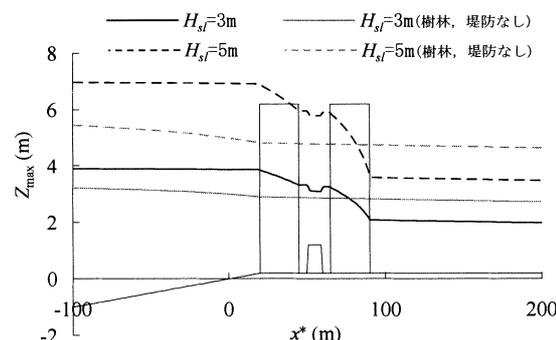


図-13 Case-C3における最高水位の分布

表-1 海岸堤防前面での最高水位 (単位: m)

津波高さ	堤防高さ	Case-C1	Case-C2	Case-C3
3m	1m	3.86	2.99	3.33
	2m	3.97	3.76	3.88
5m	1m	6.91	4.68	5.96
	2m	6.92	5.69	6.06

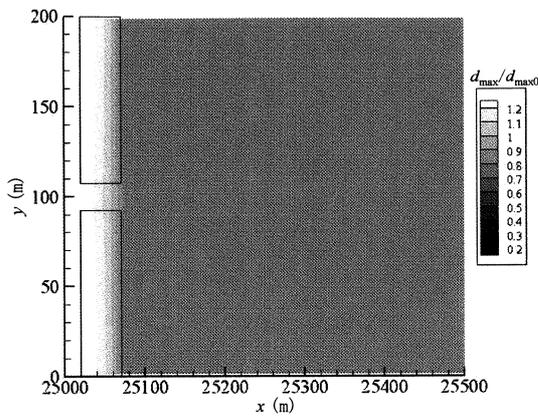


図-14 津波の最大浸水深の分布(樹林)

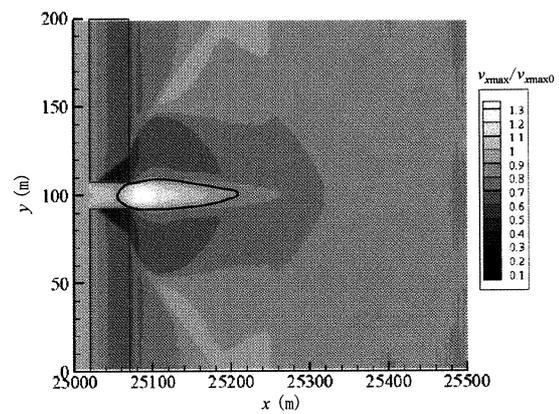


図-16 最大水深平均流速のx方向成分の分布(樹林)

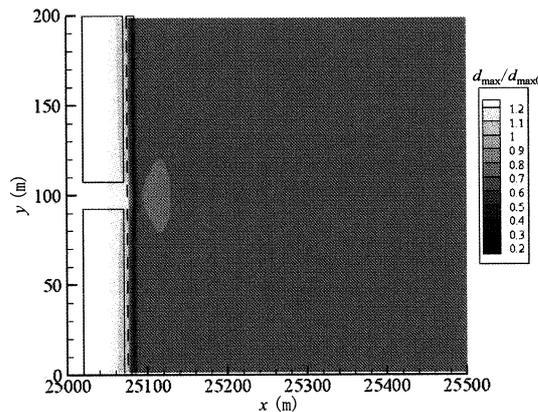


図-15 津波の最大浸水深の分布(堤防+樹林)

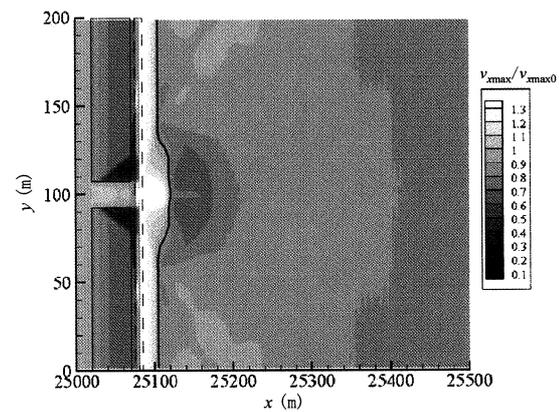


図-17 最大水深平均流速のx方向成分の分布(堤防+樹林)

所的に流速が大きくなり、1.3 倍以上の値となることがわかる。一方で、図-17 から堤防と樹林を組み合わせることで堤防を越流する直後は流速が非常に大きくなるものの、堤防の背後から 40~50m 離れれば、通路の背後であっても、何も配置しない場合に比べて低流速になる。すなわち通路の影響を緩和していることがわかる。なお、図中の黒い太線は流速比が 1 となる境界を示す。

4. おわりに

以上、本研究では海岸堤防と海岸樹林を組み合わせた際の津波遡上高と流体力の低減効果について検討した。海岸堤防を樹林帯の背後に配置した場合に最も津波の低減効果が大きくなる。また、本研究は主として数値計算で海岸堤防と海岸樹林を組み合わせた際の津波減災効果について検討したが、今後、さらに実験的にも検討を行っていく考えである。

謝辞：本研究の実施にあたり、住友財団 2008 年度環境研究助成（代表・田中規夫）の一部を使用した。また、埼玉大学大学院理工学研究科の N. B. Thuy 氏の助力を得た。記して謝意を

表します。

参考文献

- 1) 原田賢治, 今村文彦: 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, 2003.
- 2) 谷本勝利, 田中規夫, N. A. K. Nandasena, 飯村耕介, 清水隆: 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, 2007.
- 3) 谷本勝利, 田中規夫, N. B. Thuy, N. A. K. Nandasena, 飯村耕介: 津波遡上に対する海岸樹林内通路の影響—2次元数値計算による検討—, 海洋開発論文集, 第 24 巻, pp. 87-92, 2008.
- 4) 柳澤英明, 越村俊一, 宮城豊彦, 今村文彦: 2004 年インド洋大津波におけるマングローブ林の脆弱性関数と津波減衰効果, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 286-290, 2008.
- 5) 田中規夫, 佐々木寧: 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, 2007.
- 6) 難岡和夫, 八木宏: SDS & 2DH モデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No. 473/II-24, pp. 35-44, 1993.
- 7) 谷本勝利, 田中規夫, N. B. Thuy, 飯村耕介: 津波の河川遡上へ及ぼす海岸および河道内樹林の影響, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 226-230, 2008.