

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

Numerical Simulation of Tsunami Prevention by Coastal Forest with Several Species of Tropical Tree

谷本勝利¹・田中規夫²・N. A. K. Nandasena³・飯村耕介⁴・清水 隆⁵

Katsutoshi TANIMOTO, Norio TANAKA, N. A. K. Nandasena

Kosuke IIMURA and Takashi SHIMIZU

Tsunami prevention effects of coastal forest with several species of tropical tree have been investigated by one dimensional numerical simulation based on the non-linear long wave equations. The effects vary greatly with the species, the wood size and their combination. It is found that a coastal forest system consisting of 100 m wide *Rhizophora apiculata* woods in the water from the shoreline on the bottom of 1/200 slope, 50 m wide mixed woods of *Pandanus odoratissimus* and *Casuarina equisetifolia*, and 50 m wide *Pandanus odoratissimus* woods on the land of 1/100 slope can reduce the run-up height from 6.3 m to 4.7 m and the tsunami force at the end of forest from 14 kN/m to 3.3 kN/m for a tsunami of 15 minutes in the period. The tsunami height at the shore line in case of no forest is about 5 m.

1. はじめに

防潮林の津波減災効果については、首藤 (1985) による研究があり、古くから指摘されていることとして、

- 1) 船などの漂流物を阻止し、背後の家屋を保護する
 - 2) 流れに対する抵抗として働き、流速や浸水位を軽減する
 - 3) 津波にさらわれた人のすがりつく対象となる
 - 4) 砂丘を育成し、その高い地形が津波に対する自然の障壁となる
- ことを挙げている。

こうした防潮林の津波減災効果については、南太平洋や東南アジアにおいて相次いで発生している地震津波に際して再認識され、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るようになった。たとえば、河田ら (1993) は 1992 年のインドネシア・フローレンス島地震による津波対策の一つとして、ココナツの林を沿岸にベルト状に作ることを挙げている。また、平石ら (2001) は 1998 年のパプアニューギニア地震津波を調査して、マンゴーやココナツの植林によってグリーンベルトを構築し、住居へ到達する津波力を軽減する構想を提案して、それを評価するための実験や数値計算を行っている (平石・岩瀬, 2003)。このパプアニューギニア地震津波を契機としては、松富ら (2001) も砂嘴植生域を越える津波の

基礎水理に関し、実験を含めた研究を行っている。

一方、日本の代表的海岸樹であるクロマツを対象とした研究 (たとえば、原田ら, 2000; 原田・今村, 2003, 原田・河田, 2005) も継続的に行われているが、特に、2004 年のインド洋大津波に際して数多くの現地調査が行われて、海岸林の効果や限界の実態が報告され、熱帯性海岸樹を対象とした研究が一層活発化した (たとえば、田中ら, 2005; 田中ら, 2006; 柳澤ら, 2006; 原田ら, 2006; 田中・佐々木, 2007)。この中で、特に田中ら (2005, 2006) はモクマオウ、ココヤシ、ヒルギダマシ、フタバナヒルギ、シジギウム、カシューナツツ、アダンなどの種々の熱帯性海岸樹の津波抵抗特性を検討し、さらに田中ら (2006)、柳澤ら (2006)、田中・佐々木 (2007) はこれら樹木の破壊条件を検討している。

以上のように、海岸林の津波減災効果に関する研究は数多く行われているところであるが、多様な樹種の海岸樹に対し、その効果が十分に明らかにされているといえず、また、樹種の異なる複数の海岸林を組み合わせたときの効果についての研究はほとんどない。そのため、本論においては、特性の異なる 4 種の熱帯性海岸樹を対象として、水位・流速の減衰効果、到達時間の遅延効果等を数値計算によって検討するとともに、それらを組み合わせたときの津波防御効果についての検討例を示す。

2. 数値計算の方法と計算条件

ここでは、基本的知見を得ることを目的とし、非線形長波方程式に基づく 1 次元計算により検討する。また、樹林帯の抵抗のうち、慣性力の影響は小さいので、抗力のみを考える。さらに、植生の存在による流路面積・体積の変化の影響もとりあえず無視する。このとき、水深積分型の連続の式と運動方程式は次のようになる。

1 フェロー 工博 埼玉大学名誉教授
2 正会員 工博 埼玉大学大学院理工学研究科教授
3 埼玉大学大学院理工学研究科環境システム工学系専攻
4 学生会員 埼玉大学大学院理工学研究科環境システム工学系専攻
5 東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻

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

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

ここに、 ζ は水位、 Q は線流量、 t は時間、 x は水平座標（汀線を原点とする）、 d は全水深（ $\zeta + h$ 、 h : 静水深）、 ρ は水の密度、 g は重力の加速度である。 τ_b は水底での摩擦応力、 F は樹林による水深積分抵抗で、それぞれ次式で与える。

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

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

ここに、 n はManningの粗度係数、 γ は樹木の密度（本/㎡）、 b_{ref} は樹木の基準投影幅（胸高における幹の直径を用いる）、 C_{D-all} は樹種と浸水深（全水深 d ；時間の関数）によって決まる見掛けの抵抗係数であり、樹木の抗力係数と投影面積の鉛直方向の変化を考慮したもので、次式で与えられる（田中・佐々木，2007）。

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

ここに、 C_{Dref} は基準抗力係数（胸高における幹に対する値を用いる）、 b 、 C_D は地面からの高さ z での樹木の幹と枝の投影幅とその高さでの抗力係数である。

数値計算は基礎式を差分式に変換して行すが、差分化には、空間的にはstaggered grid、時間的にはleapfrog schemeを用い、非線形の移流項にはup-wind scheme、摩擦や抵抗の項にはsemi-Crank-Nicolson schemeを適用する。なお、造波領域は線形長波方程式に基づく特性曲線法による無反射性造波方式を採用し、適当な領域において非線形長波方程式に線形的にすり付ける方法をとっている。陸地との移動境界の計算には岩崎・真野の方法（1979）を適用する。

熱帯における海岸樹として、砂丘上に生育するアダン（Pと略記、樹高6m）、モクマオウ（Cと略記、樹高20m）、カシューナッツ（Aと略記、樹高5m）と潮汐の干満帯に生育するフタバナヒルギ（Rと略記、樹高8m）の4種を対象とする。表-1はそれぞれの想定した樹高に対して、田中ら（2005，2006，2007：樹木特性の詳細については、これら参考文献を参照されたい）の現

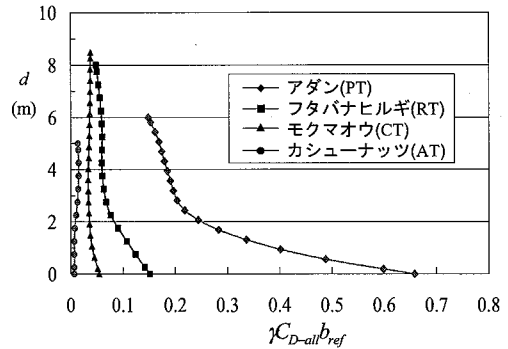


図-1 4種の樹林の抵抗特性

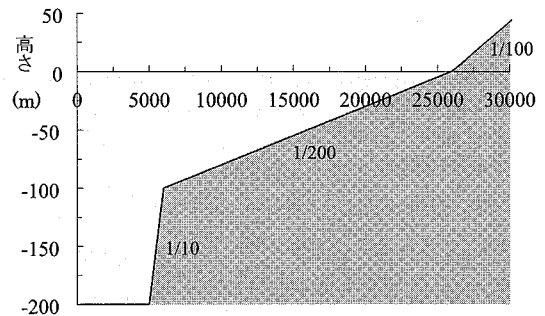


図-2 対象とする海岸地形

地調査結果に基づいて決定した海岸樹の平均的な諸元である。ここに、樹間距離は想定した樹高に対する樹木の中心間距離の平均値であり、表には正三角形（千鳥状、Tと略記）、正方形（矩形状、Sと略記）配置の場合の単位面積当たりの本数 γ の値も示してある。

図-1に正三角形配置の場合の $\gamma C_{D-all} b_{ref}$ の浸水深 d による変化を示している。これが大きいほど抵抗が大きいことを表しているが、値や分布は樹形等の樹木の特性により大きく異なることがわかる。抵抗は気根を有し投影幅が大きく、密集度も高いアダンの大きく、逆に密集度が低いカシューナッツは小さい。フタバナヒルギも気根を有するものの、密集度が低い分アダンより小さいが、モクマオウよりは大きい。

図-2は対象とした海岸地形で、入射津波は水深200mで周期15分の正弦波（押し波初動、振幅1.5m）として与える。砂丘上樹木の場合、汀線（満潮を想定）より50m地点から上を樹林域とする。干満帯の樹木であるフタバナヒルギは汀線から沖に配置する。また、基準抗力係数

表-1 4種の樹木の諸元

樹 木 名	樹 高	胸高直径	気根高	葉部下端高	樹間距離	γ (本/㎡)	
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	正三角形	正方形
アダン <i>Pandanus odoratissimus</i>	6	0.155	1.5	1.875	1.692	0.403	0.349
モクマオウ <i>Casuarina equisetifolia</i>	20	0.490	0	3.814	4.320	0.062	0.054
カシューナッツ <i>Anacardium occidentale</i>	5	0.297	0	2	7.100	0.023	0.020
フタバナヒルギ <i>Rhizophora apiculata</i>	8	0.177	2	2	3.336	0.104	0.090

は樹間距離が胸高直径の9～24倍と大きい条件であるので、いずれの樹木についても1.0とし、Manningの粗度係数は0.025とする(たとえば、原田・今村, 2006)。

3. 結果と考察

(1) 水位・線流量等の時間的変化

図-3に樹林がないときの汀線における水位 ζ_0 、および静水面上地盤高1.5m地点での水位 ζ 、線流量 Q 、流速 U (線流量を全水深で割った値)、津波力 F^* (定義は後述)の時間変化を示す。まず、汀線での水位 ζ_0 から、本研究で対象としている津波は、第1波の高さが汀線で5m程度の規模のものであることがわかる。

次に、地盤高1.5mでの結果で注目すべきことは、水位、線流量、流速、津波力の位相が異なり、ピークの出現時刻が大きくずれることである。これは、海岸における津波は反射を含んだものであることによっており、水位が最大に近い時には、線流量や流速は非常に小さく、したがって津波力も0に近い値となる。ただし、こうした結果は津波の流れを完全に止める1次元条件特有の現象によるものであって、津波が砂丘を乗り越えて背後へ流れ込む場合(最後に例を示す)や2次元の場合には異なるので注意が必要である。

さて、津波力であるが、これは式(4)を変形して次のように定義している。

$$F^* \equiv \frac{F}{\gamma C_{D-a11bref}} = \frac{1}{2\rho} \frac{Q|Q|}{d} \dots\dots\dots (6)$$

つまり、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。

以下、解析は第1波を対象とし、流速の代表値としては津波力のピークに近い線流量最大時の値を示す。

(2) 樹林幅による遡上高の変化

図-4は4種の海岸樹について樹林幅による第1波遡上高(津波先端の静水面上最大高さ)の変化を示したものである。樹林幅が大きくなるにつれて遡上高は低減されるが、その程度は樹種によって異なり、アダン、フタバナヒルギ、モクマオウ、カシューナッツの順に低減効果大きい。これは樹種による抵抗特性の違いによっている。アダンとフタバナヒルギを比較した場合、樹林幅がある程度以上になると効果が接近してくるのは、アダンの場合陸上であって樹林幅が大きくなるにつれて後端付近での低減が小さくなり、やがて樹林の中で津波は減衰してしまうのに対し、フタバナヒルギの場合は幅が大きくなるにつれ樹林は沖側深いところに伸びてゆき、減衰効果が維持されることによる。このことは干満帯に広大な樹林を形成することによって、津波を大きく減衰させる可能性を示唆している。

(3) 樹林幅による流速の変化

樹林は津波水位を低下させるとともに、流速を小さく

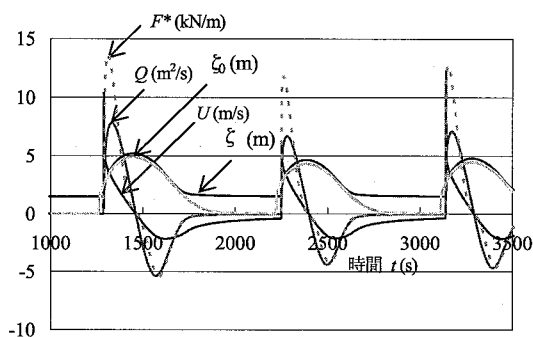


図-3 水位、線流量、流速の時間変化(樹林なし)

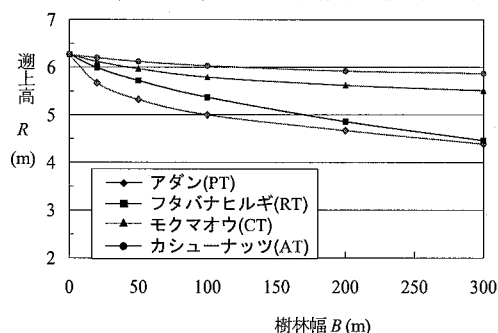


図-4 樹林幅による第1波遡上高の変化

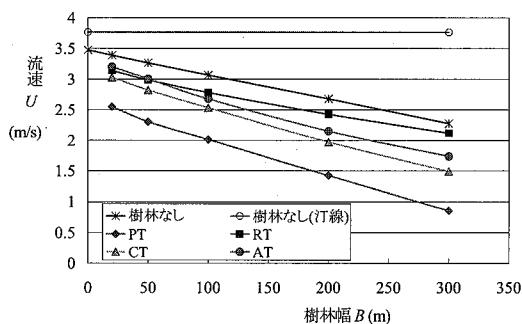


図-5 第1波最大線流量時の平均流速の樹林幅による変化

する効果を有している。図-5は横軸に樹林の幅をとって4種の樹林後端での第1波最大流量時の流速をプロットしたものである。「樹林なし」は横軸を $x=50$ mから岸側に向かう距離としてその場所での最大線流量時の流速をプロットしたもので、「樹林なし(汀線)」は樹林なしの汀線における同値を示したものである。したがって、砂丘上の樹木については「樹林なし」の値からの差が、汀線に後端を有するフタバナヒルギについては「樹林なし(汀線)」の値からの差が平均流速の低減分ということになる。いずれも低減効果が認められるが、特に樹林による流速低減は抵抗の大きいアダン(PT)が大きく、海中にあるフタバナヒルギ(RT)も大きいことがわかる。

(4) 樹林幅による第1波最大水位遅延時間の変化

図-6はアダン(PT)、モクマオウ(CT)、カシュー

ナッツ (AT), フタバナヒルギ (RT) について, 樹林後端での第1波最大水位遅延時間 (その場所での樹林なしの場合の最大水位発生時刻からの遅れ) を示している。いずれも樹林幅が大きくなるにつれて遅延時間は大きくなってゆくが, その効果は抵抗の大きさに順にアダン, フタバナヒルギ, モクマオウ, カシューナッツの順である。

(5) 樹種の異なる海岸樹の組合せ

図-7, 8 に樹林なし, 樹林ありの場合の, 第1波遡上が最大となる以前の水位の $T/24$ ごとの空間分布を示している。樹林は, 汀線から沖側 100 m 区間は正三角形配置のフタバナヒルギ林, 汀線から岸側 50 ~ 100 m 区間はそれぞれ正方形配置のモクマオウとアダンの混在林, さらにその背後 50 m は正三角形配置のアダン林がある条件 (RT100CSPS50PT50) である。樹林によって遡上が軽減される様子がよく窺える。

図-9 は樹林なし, 汀線から沖側 100 m に正三角形配置のフタバナヒルギのみがある場合 (RT100), 汀線から 50 ~ 100 m 区間にそれぞれ正方形配置のモクマオウとアダンの混在林があり, その背後に三角形配置のアダン 50 m を設けた場合 (CSPS50PT50), さらに汀線より沖側に 100 m 幅のフタバナヒルギを三角形配置で設けた場合 (RT100CSPS50PT50) の第1波の最大水位の分布である。樹林帯の前方では樹林による反射のため最大水位は増大するが, その程度はフタバナヒルギ (RT100) のみの場合は小さいことがわかる。第1波遡上高は樹林なしの場合 6.3 m, フタバナヒルギ (RT100) の場合 5.4 m, CSPS50PT50 の場合 5.0 m, RT100CSPS50PT50 の場合 4.7 m 程度である。この場合, 図には示していないけれども, モクマオウがなくても遡上高はあまり変わらず, モクマオウの寄与は小さい。しかし, 巨大津波が来襲する場合には, 他の樹木が倒壊しても, モクマオウは残存する可能性があり, 減勢効果は小さくとも漂流防止や人が掴まる対象となるなど効果が期待されるので, 混在林とするメリットはあると考えられる。同様に, 津波減衰効果は小さいものの, アダンの陸側に流された人がつかまれるようにカシューナッツを配置しておくのもよいであろう。

図-10 は RT100CSPS50PT50 の場合の樹林最後端 ($x=150$ m) での水位, 線流量, 流速, および津波力の時間変化である。前出の図-3 と比較することによって, 樹林帯の効果をを知ることができる。この場合, 第1波の最大水位は 5.2 m から 4.1 m へ, 最大線流量は $7.2 \text{ m}^2/\text{s}$ から $3.2 \text{ m}^2/\text{s}$ へ, 線流量最大時の平均流速は 3.1 m/s から 1.7 m/s へ, 津波力の最大値は 14 kN/m から 3.3 kN/m へと減じる。また, 第1波最大水位の発生時間が 65 s 遅れる。なお, 流速の時間変化の初期で非常に大きな値が出ているのは, 非常に小さな全水深で割っ

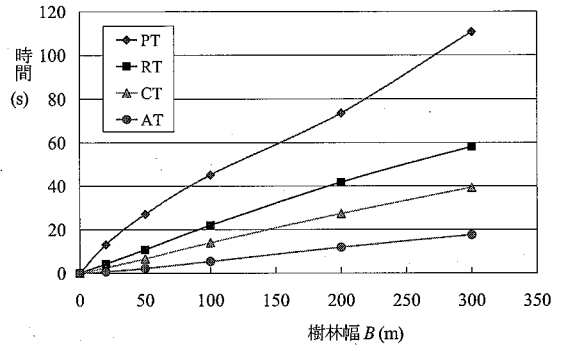


図-6 第1波最大水位遅延時間の樹林幅による変化

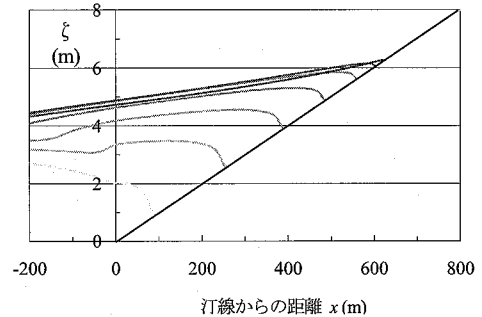


図-7 樹林なしの場合の水位の空間分布 ($T/24$ ごと)

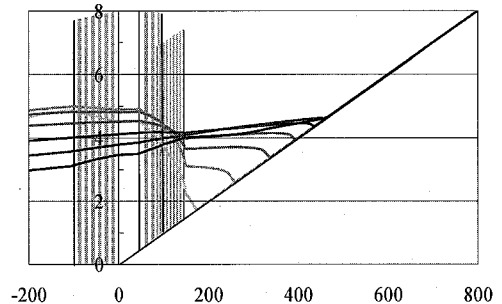


図-8 樹林ありの場合の水位の空間分布 ($T/24$ ごと)

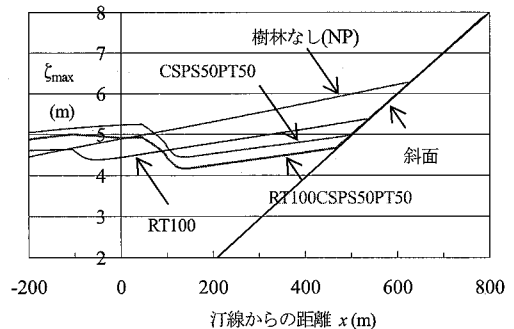


図-9 第1波最大水位の空間分布

ていることによっている。

(6) 砂州を乗り越えて背後に流れ込む場合

最後に, 静水面上地盤高が 1.5 m ($x=150$ m) で斜

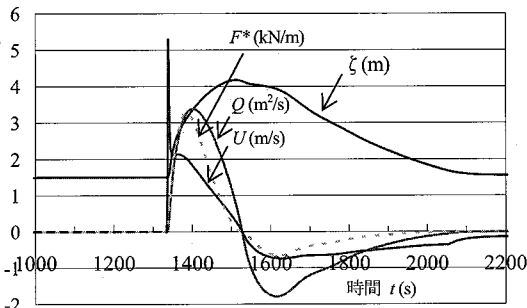


図-10 樹林最後端での水位, 線流量, 流速, 津波力

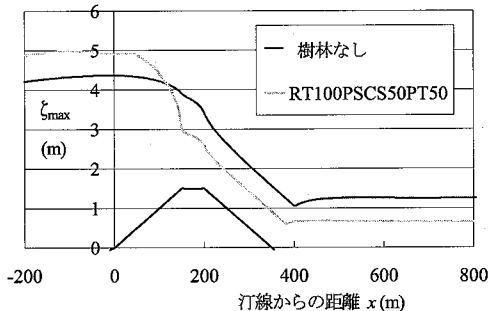


図-11 砂州の場合の第1波最大水位の分布

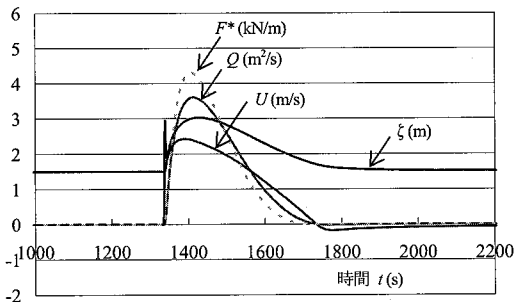


図-12 樹林最後端での水位, 線流量, 流速, 津波力

面が終わり, 50 m の平坦部があって, 1/100 の逆勾配で下る砂州のような地形に対する計算例を示す. 図-11 は樹林なし, ありの場合の第1波最大水位, 図-12 は樹林最後端 ($x=150$ m) での水位, 線流量, 流速, 津波力の時間変化である. この場合, 遡上津波は砂州を乗り越えて背後へ流れ込むので, 水位, 線流量, 流速, 津波力のピークのずれは小さいことが確認される.

4. む す び

以上, 4 種の熱帯性海岸樹を対象として, 津波減勢効果を1次元数値計算により検討した. 樹林の抵抗は樹種によって異なり, 気根を有し, かつ密集度も大きいアダンの抵抗が大きく, 逆に密集度の小さいカシュナツツは小さい. 樹林によって, 津波の水位, 流速は減じられるが, その程度は津波の条件や樹林の条件によって異なるので, 条件に応じた数値計算による検討が有効である.

干満帯の樹木, 高低や強度の異なる陸上の樹木を適切に組み合わせることにより, 津波減災効果を高めることができる可能性がある. たとえば, 計算結果によれば, 干満帯にフタバナヒルギ林を 100 m, 陸上 50 m にモクマオウとアダンの混在林, さらにその背後に 50 m のアダン林を配置した場合, 周期 15 分, 汀線付近で 5 m 程度の来襲津波に対し第1波遡上高は 1.6 m 小さくなり, 樹林最後端での第1波最大水位の発生時間は 65 s 遅れる. また, 樹林最後端での最大線流量時の流速は 3.1 m/s から 1.7 m/s へ, 津波力は 14 kN/m から 3.3 kN/m へと減じる.

今後, さらに実験的検証を行っていく必要がある.

謝辞: 本研究に対して, (財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業による助成金を得た. 記して謝意を表す.

参 考 文 献

- 岩崎敏夫・真野 明(1979): オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算, 第26回海講論文集, pp. 70-74.
- 河田恵昭・都司嘉宣・松山昌史・Syamusudin, A.R.・松富英夫・今村文彦・高橋智幸(1993): インドネシア・フローレン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.
- 首藤伸夫(1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海講論文集, pp. 465-469.
- 田中規夫・佐々木寧・湯谷賢太郎・Samang Homechuen(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.
- 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.
- 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.
- 原田賢治・河田恵昭(2005): 津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 276-280.
- 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, 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, pp. 1366-1370.
- 松富英夫・穂積拓哉・今井健太郎(2001): 砂嘴植生域を越える津波の基礎水理, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 316-320.
- 柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成(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.