

津波の河川遡上へ及ぼす海岸および河道内樹林の影響

Effect of Coastal and River Forests on Tsunami Run-up in River

谷本勝利¹・田中規夫²・N. B. THUY³・飯村耕介⁴

Katsutoshi TANIMOTO, Norio TANAKA, N. B. THUY and Kosuke IIMURA

The effect of coastal and river forests on tsunami run-up in a river has been investigated by numerical simulations based on two-dimensional non-linear long wave equations. A simple coastal and river topography is considered where the river course is straight and perpendicular to the shore line. The coastal forest zone consists of *Rhizophora apiculata* woods of 200m wide in the offshore side from the shore line at high tide and *Pandanus odoratissimus* woods of 100m wide on the backshore. In the river, *Rhizophora apiculata* woods of 1000m long are placed on the high water channel near the river mouth. The results of numerical simulations with and without forests suggest the possibility that the coastal and river forests can reduce the run-up not only on the coast but also in the river.

1. はじめに

海岸林の津波減災効果については, 1998年パプアニューギニア津波, さらに2004年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, 多くの研究 (たとえば, 原田・今村, 2003; 田中・佐々木, 2007; 柳澤ほか, 2007など) が行われているが, そうした樹林が津波の河川遡上にどのように影響するかについてはあまり検討されていない. 本研究においては, 津波の河川遡上へ及ぼす海岸および河道内樹林の影響について基礎的知見を得ることを目的とし, 河川を有する単純なモデル海岸を対象とした平面2次元の数値計算を行い考察する.

2. 数値計算の方法と計算条件

(1) 基礎方程式

計算は, 式(1)~(3)に示している水深積分型の非線形長波方程式に基づく.

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

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

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

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} は水底摩擦応力, 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 方向成分であり, 摩擦応力ベクトル $\vec{\tau}_b$ および樹林による抵抗力ベクトル $\vec{F}$ は次式で与える (田中・佐々木, 2007).

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

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

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

ここに, n はManningの粗度係数, $\vec{Q}$ は線流量ベクトル, γ は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), C_{Dref} は基準抵抗力係数 (本論では1.0), b, C_D は地面からの高さ z での樹木の幹と枝の投影幅, その高さでの抵抗力係数である. なお, 粗度係数は樹林による抵抗を別途考慮することにより, 計算領域全体に0.025を与えている. 樹林の抵抗モデルについては, 田中・佐々木 (2007) が現地における樹木の破断・なぎ倒しの限界によりその適用性を検証している.

また, 渦粘性項は次式で与える.

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
3	修 (工)	埼玉大学大学院理工学研究科理工学専攻
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

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

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

ここに、 ν_e は渦動粘性係数であり、灘岡・八木 (1993) 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によって与える。

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

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

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

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:

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

樹林抵抗による SDS エネルギー生産:

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

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。

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

実際の計算は基礎式を差分式に変換して行う。差分化の方法等は基本的には谷本ほか (2007) を2次元に拡大したもの (谷本ほか, 2008) であるが、渦粘性項を取り入れていること、および次項で述べる河川流を取り入れていることが異なる。

(2) 計算条件

対象とする海岸は、図-1に縦断面を示しているように、基準面 (D.L.) を ± 0 として $-100 \sim -5$ m の領域が $1/10$ 、 $1/100$ 、 $1/500$ の複合勾配、 $-5 \sim +12.8$ m の汀線付近の領域が $1/100$ 勾配、以降勾配 i_R が $1/1000$ の様な地形である。河川は中心軸に対称な一定断面でかつ河床勾配 $1/1000$ で汀線に直角にまっすぐ海に流れる条件を考え、数値計算は河川中心軸を対称軸として半分の領域で行う。

図-2に潮位の影響を受けない地点での河川の横断面を示している。中心軸での水深は5mである。 x 軸を $1/10$ 勾配の始点を原点とし河川軸上流方向に、 y 軸を河川中心軸を原点とし横断方向にとる。沖側に造波領域として2000 m の一定水深領域を設け、上流端の x 座標は22000m、 y 方向には1600mをとっている。格子間隔は x 、 y 方向とも10mである。なお、これらの地形条件は特定の現地を対象としたものではなく、津波の河川遡上に及ぼす樹林の影響を調べるための単純な仮想モデルである。

樹林は D.L. 上0~2m を干満帯とし、図-3に示しているように、フタバナヒルギ (樹高8m) を海岸および河川高水敷の干満帯に配置する。ただし、河川内は潮位2 m のときの高水敷没水上流端を目安とし、少し多いけれども1000mとしている。図中の+2.00m と記した曲線は河川中心軸での初期水位であるが、樹林上流端での高水敷底面の高さは+2.50m で、河川水面から0.26m 高いにすぎない。一方、海岸においては地盤高+2.5m 地点から幅100m にわたってアダン (樹高6m) を配置する。樹林のその他の諸元や抵抗特性は谷本ほか (2007) に同じである。なお、図に示しているように、潮位が0m のときの汀線を基準汀線と定義する。

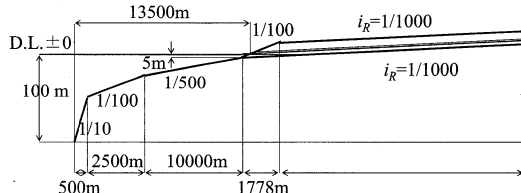


図-1 河川軸に沿う縦断面

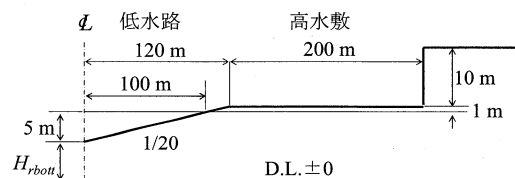


図-2 河川横断面 (中心軸に対して対称)

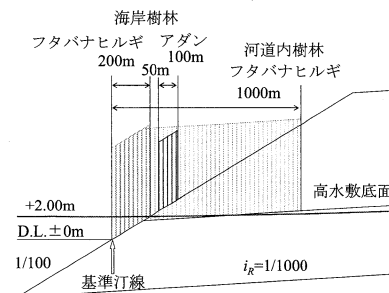


図-3 樹林の配置

河川流については上流端の各メッシュで次式による線流量を与え、その総量を沖側境界 ($x = -2000$ m 地点)

で一様に流出させる.

$$Q_{xR}(i_e, j) = -\frac{1}{n(i_e, j)} d(i_e, j)^{5/3} i_R^{1/2}, \quad j = j_{rs} \sim j_{re} \quad (16)$$

ここに, i_e は上流端でのメッシュ番号, j は横断方向のメッシュ番号で, $j_{rs}=0$, $j_{re}=11$ である. 河床勾配が

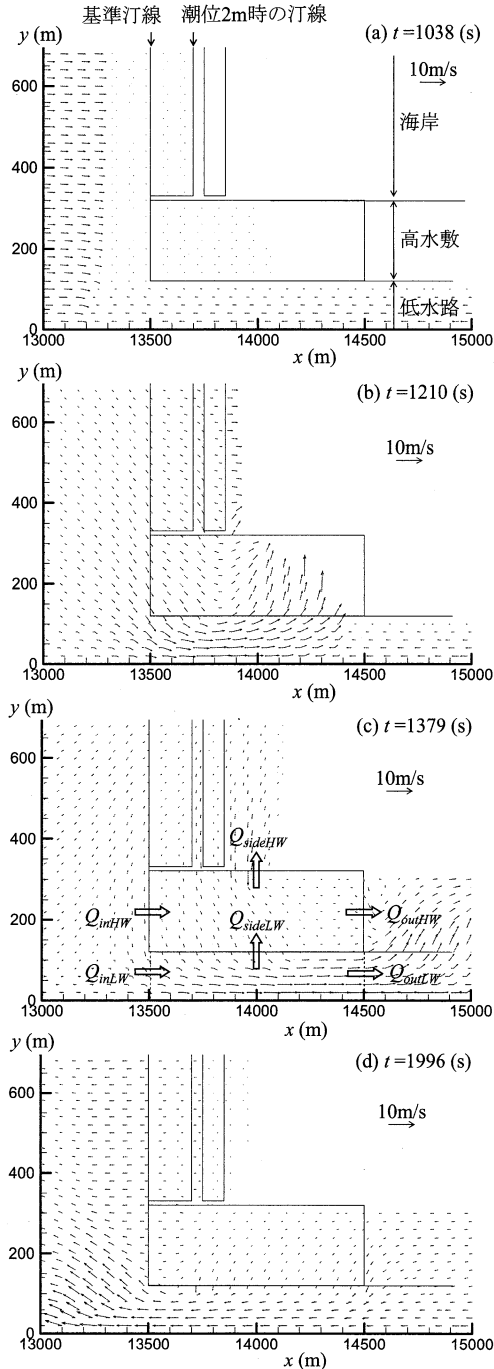


図-4 流れのパターン (樹林あり)

1/1000 の場合の河川流量は半分の領域で $692\text{m}^3/\text{s}$ となる.

津波の数値計算は河川流が定常となるのを待って, 沖側境界において周期15分, 振幅2mの正弦津波を入射させることによって行う. 津波来襲時の潮位は+2mとする.

3. 結果と考察

まず, 津波の第1波来襲時における河口付近での流況を示す. 図-4の(a)は津波が海岸に近づいてきたときの流況で, 河川内では下流向きの流れである. (b)は津波が河川内に流入し遡上が高水敷に広がり始めたときで, 下流側では津波の進入により上流向きの流れに転じているが, 上流側の低水路ではまだ下流向きである. (c)は河道内樹林の終端で上流側へ向かう流量が最大のときの流況で, 全体に上流向きとなっている. (d)は逆に全体が下流向きとなったときの流況で, 河川流と津波の引きによる流れが同じ方向に重なった流れである. 本数値計算は河川内でこのように河川流と津波による流れが干渉し合っている状態での計算である. なお, 図-4中で, 四角で囲った領域が樹林帯の位置を示しており, (c)に示している Q_{inLW} 等については後で説明する.

次に, 樹林なしの場合の計算も行っており, 樹林の効果を検討する. 図-5は河川の影響をほとんど受けない海岸における代表地点 (河口から最遠点で D.L. 上6m, すなわち基準汀線からの水平距離が600m 地点) と河川中心軸上で基準汀線から3500m 上流地点 (津波来襲以前の河川水位が4m の地点) について, 樹林なしとありの場合の水位を示したものである. この場合, 海岸上, 河川内ともに樹林による低減効果が認められる. 図には示していないけれども, 基準汀線における第1波の海面 (D.L. 上2m) 上津波高は海岸軸上で4.70m, 河川軸上で4.18m であり, 河川へ流入するので, 河川軸上での値が小さい.

図-6に樹林なしの場合の河口付近における第1波遡上時の流速の分布を示す. (a)は=1210(s)で図-4の(b)に, (b)は $x=14500\text{m}$ 地点での上流側へ向かう流量が最大の

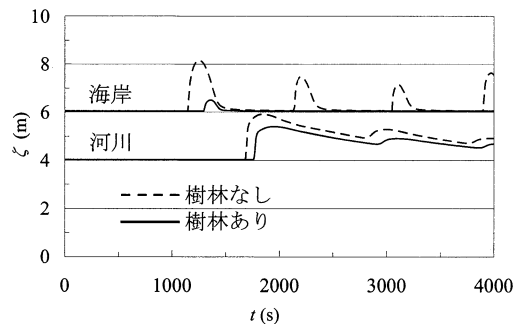


図-5 海岸および河川内代表地点での津波水位 (D. L. 基準)

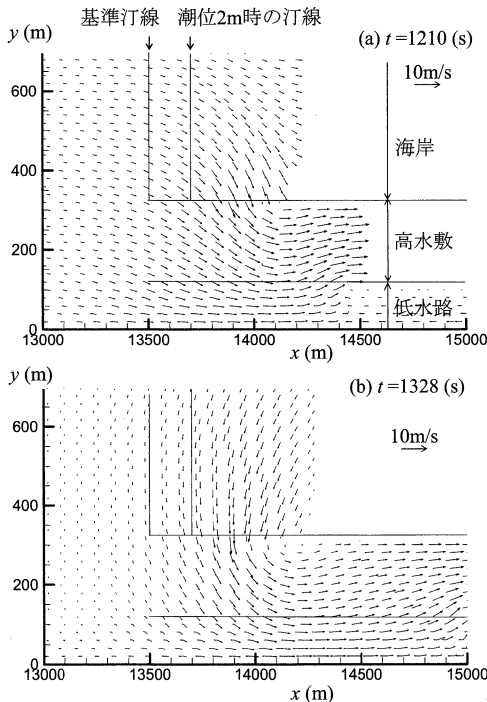


図-6 流れのパターン (樹林なし)

ときの流況で、図-4(c)にそれぞれ対応している。これにより樹林なしの場合、海岸から河川への流れ込みの大きいことがわかる。これらを定量的にみるために河道内樹林帯とそれに接する低水路の領域を検査域とし、図-4(c)に示しているように、下流端における低水路、高水敷での流入流量 Q_{inLW} 、 Q_{inHW} 、上流端におけるそれぞれの流出流量 Q_{outLW} 、 Q_{outHW} 、低水路から高水敷への流出流量 Q_{sideLW} 、高水敷から海岸域への流出流量 Q_{sideHW} の時間変化を図-7に示している。上段(a)および中段(b)の図は低水路および高水敷における下流端での流入流量と上流端での流出流量であるが、樹林の有無によって特に高水敷での流出量が大きく異なっており、樹林があることによって流出流量が大きく減少することがわかる。これは下流端からの流入流量が減ることにもよるが、下段(c)の図に示されているように、海岸から河川高水敷への流入流量が顕著に減ることの効果が大きいと考えられる。これは海岸陸上部と河川高水敷の高低差が大きいことによる結果といえるが、高低差が緩やかな場合であっても、河道が低ければ傾向としては同様であると推測される。

図-8は検査域上・下流端での全流入流出量の時間変化を示したものである。上流端からさらに上流に向かう全流量のピーク値は、樹林なしの場合4984 m^3/s 、樹林ありの場合2876 m^3/s であり、樹林によって全流量ピーク値は58%に減じている。

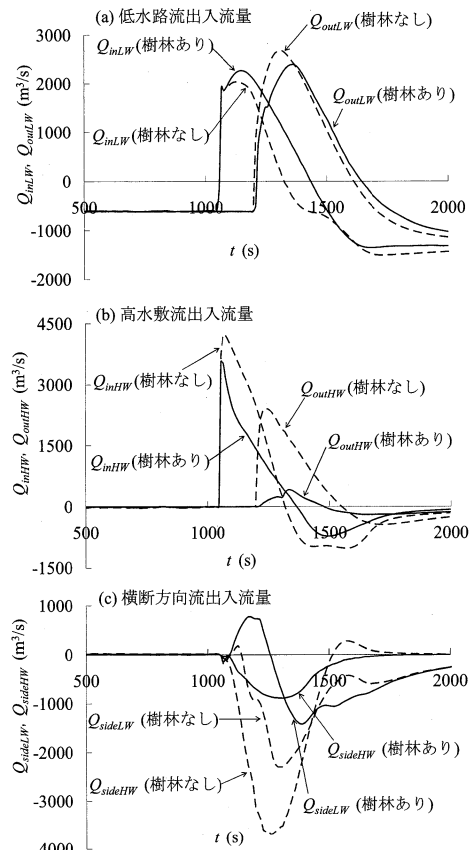


図-7 検査域への流入流出量の時間変化

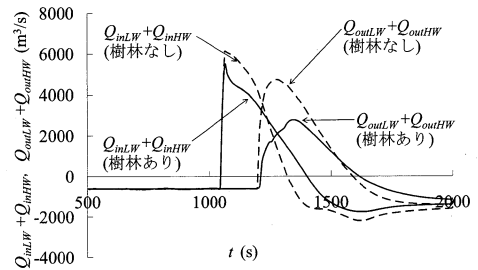


図-8 検査域上・下流端での全流入流出量

この上流端での全流量($Q_{outLW} + Q_{outHW}$)がピーク時の水位、線流量の河川軸方向成分、水深平均流速の河川軸方向成分および横断方向成分の上流端での横断方向分布を図-9に示している。水位は樹林ありのほうが低く、ともに河川中心軸から河岸に向けてやや増大している。その増大量は樹林なしの場合0.02m、ありの場合0.22mである。これに対し、線流量の河川軸方向成分(図では1/10の値をプロットしている)は河川軸から河岸に向けて減少し、特に樹林ありの場合の樹林帯では非常に小さく、河岸ではわずかであるが逆向き(下流向き)となっている。河川軸方向の流速もこれに対応した変化を示してお

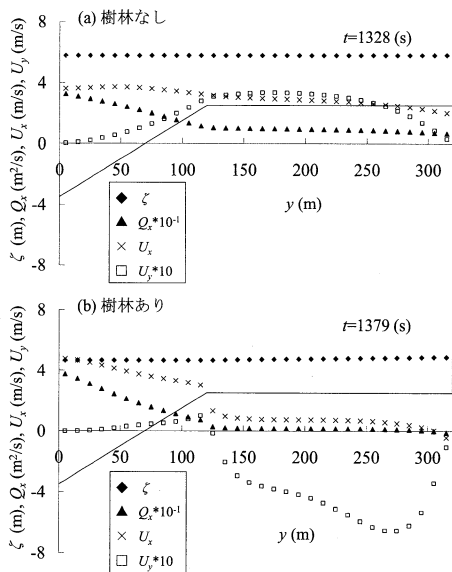


図-9 水位、流速等の横断方向分布 ($x=14500\text{m}$)

り、樹林帯域で急減しているのが認められる。横断方向流速成分(図では10倍の値をプロットしている)は境界条件から両端で0(河岸側は堤防があるときに対応)の分布を示すが、樹林の有無によって分布が大きく異なり、樹林ありの場合は樹林帯域で低水路向きの流れになっている。これは図-4(c)からわかるように、樹林上流端外側にかけて反時計方向の渦が形成されていることに対応している。その低水路に向かう流速成分の最大値は0.65 m/sである。

表-1は、さらに考察を深めるために実施した海岸樹林のみの場合および河道内樹林のみの場合の結果を含めて、河川における海面上遡上高や基準汀線からの遡上距離をまとめて示したものである。表中最高水位は津波遡上の上流端でのD.L.上水位で、津波による水位上昇が2cm以上のところととっている。また、表には海岸での海面上遡上高も示してある。いずれも計算時間内での最大値であるが、ほぼ第1波による値と見なしてよい。この場合、樹林(海岸樹林+河道内樹林)があることによって、海岸での遡上高は34%、河川遡上高は10%減じることがわかる。また、海岸での低減効果は海岸樹林によって、河川での低減効果は河道内樹林によって主として与えられていることもわかる。なお、海岸での遡上高は河口から最も離れた地点ととっているが、河川の影響を受けているようであるものの、その程度は小さい。

4. むすび

津波の河川遡上に及ぼす海岸および河道内樹林の影響について、2次元数値計算に基づき考察した。その結果、

表-1 遡上高と遡上距離(単位:m)

樹林の有無	河川			海岸
	最高水位	海面上遡上高	遡上距離	海面上遡上高
樹林なし	8.08	6.08	7580	6.88
樹林あり	7.47	5.47	6970	4.54
海岸樹林のみ	8.00	6.00	7500	4.48
河道内樹林のみ	7.54	5.54	7040	6.87

海岸樹林は海岸へ遡上した津波の河川への流入を減じ、津波遡上を減じるのに寄与するものの、河道内樹林の効果が大きいことが明らかとなった。本計算条件の場合、海岸林によって海岸での遡上高は34%減になり、河川での遡上高は主として河道内樹林により10%減じる。これらの結果は、海岸・河川の条件、来襲津波の条件、および樹林条件により異なるので、今後さらなる検討が必要である。また、本研究で用いた計算モデルは個々の現象に対しては通常よく用いられているものであるが、今後さらに実験等による検証が必要と考えている。

なお、樹林あり(海岸樹林+河道内樹林)について、渦粘性項の有無による計算を行ったが、本条件の場合、渦粘性項は水位にはほとんど影響せず、流速が若干変化する程度であった。これについても、モデル定数の与え方等今後さらに検討しなければならない課題である。

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。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 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, Nandasena, N.A.K., 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50巻, pp.1381-1385.
- 谷本勝利, 田中規夫, Thuy, N., Nandasena, N.A.K., 飯村耕介(2008): 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.
- 灘岡和夫, 八木宏(1993): 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.
- 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.
- 柳澤英明, 越村俊一, 宮城豊彦, 大塚隆行, 今村文彦(2007): 2004年インド洋大津波におけるインドネシア・パプアニューギニア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50巻, pp.246-250.