

津波減衰効果を目的とした海岸林活用条件の検討

原田賢治*・河田恵昭**

本研究では、海岸林の津波減衰効果の活用に向けての条件を検討するために、従来の抵抗モデルをより使い易い形式の粗度係数で再整理し、いくつかの海岸林の利用条件について数値シミュレーションを活用した検討を行った。これらの結果より、海岸林の利用に向けて、枝下高を低く樹木を育成することが非常に有効であることが示された。間伐による密度管理をうまくすることでこのような海岸林条件を満たすことが可能であり、有益な情報が得られた。さらに、海岸林と低い防潮堤を組み合わせることで、浸水距離や戻り流れをより効果的に軽減させる事がわかった。

1. はじめに

2004年スマトラ島沖地震津波の様に、津波災害は低頻度であるが一度発生すれば広域に渡り、地域の社会・自然条件により様々な形態で甚大な被害をもたらす災害である。津波災害に備えるためには、全ての沿岸域で長大構造物による対策をとることは効果的とは言えず、地域要件に合わせた津波対策・復興計画が必要である（国土庁防災局, 2000）。この様な状況の中で、海岸林等の自然の防災効果を評価・活用していく事は、防災・開発・自然環境を考慮した快適な沿岸域創造のために必要であり、海岸林の津波減衰効果の活用が注目されている。海岸林による津波減衰効果や減災機能については十分に理解されて来なかったが（首藤, 1985；首藤, 1992）、近年、海岸林の津波減衰効果を評価・利用するために、水理模型実験や数値計算による検討（原田ら, 2003；平石ら, 2003；今井ら, 2004, 等）が行われている。実際に、2004年スマトラ島沖地震津波からのインドネシアの復旧・復興計画（Republic of Indonesia, 2005）の中では、沿岸域においてグリーンベルトの保護・造成により、津波バッファゾーンを設け津波に備える計画が提案されている。同様の計画は、スリランカにおいても提案されており、海岸林の津波防災対策への活用についてさらなる知見の蓄積が必要とされている。そのため本研究では、海岸林の津波防災対策への活用条件を明らかにする事を目的とし、斜面の条件及び防潮堤・防潮林の組合せによる津波の氾濫特性を数値計算により示し、樹木の倒伏限界や密度管理による影響について検討を行う。

2. 海岸林の管理状況

まず、海岸林の活用状況把握のため、日本における海岸防災林の造成について表-1に示す。海岸林の果たすべき目的に応じて海岸林幅の条件が設けられており、防

潮を目的とした防潮林については、過去の事例から経験的な値として林帯幅20～40 mが目安とされている。しかし、津波の条件やどの程度効果があるのかについては規準が無いのが現状である。一方で、海岸防風林や飛砂防備林については、農林学の分野において多くの検討がなされ、整備規準が作られている。

表-1 海岸林の造成要件(林業技術ハンドブック, 1998)

海岸林目的	海岸林の条件
海岸防風林	防風のために必要な海岸林幅 日本海側：200～250 m 太平洋側：150～200 m
飛砂防備林	数列の樹高の低い林でも効果有り 強風時にも飛砂防止するためには最低50～60 m 必要
防潮林	漂流物阻止は数列の林帯でも効果有り 過去の事例から20～40 m の幅が必要 下木密集により水勢を弱める効果が大きい
防霧林	海岸に沿って数列あれば効果有り 針葉樹が効果的

次に、海岸林の密度の管理状況について見ると、一般に、森林管理の実務では、樹高： h_{tree} と胸高直径： d_{tree} の比である形状比： h_{tree}/d_{tree} が樹木育成管理の指標として用いられ（田中, 1998）、形状比が100よりも大きくなると、強風や積雪による枝折れや倒木の危険性が高まるとされている。そのため、健全な樹木育成と防風林や防砂林の管理基準として、この形状比を60以下になるよう管理することが望ましいとされ、間伐を行う際の日安とされている。さらに、日本における海岸クロマツ林の造成の場合、通常10,000本/ha（1本/m²）の高密度で植林されることが一般的であり、防災機能を維持するため高密度の樹林密度のまま管理されている。しかし、高密度のまま管理されると、根本に日光が当たらなくなり、樹木の生長に伴い、枝の枯れ上がりが増え、津波に対する効果が小さくなってしまうことが懸念される。また、このような高密度の林相の場合、樹木一本当たりにあたる光量が少なくなり、光合成をする葉が少なくなるため、幹が細いまま樹高だけが生長し形状比が大きくなり、細く弱い樹木になってしまう。これらのため、高密度の樹林密度は、津波の減衰効果を考慮しながら密

* 正 会 員 博(工) 人と防災未来センター 専任研究員
** フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所

度管理していく必要があり、津波減衰効果を期待するのであれば、より具体的な管理目標の設定が今後必要であると考えられる。

3. 海岸林の等価粗度

(1) 粗度係数の換算

海岸林の効果を検討する際に、既往の研究では海岸林の抵抗を Morison 式に基づいて運動方程式の中へ取り込んでいる (原田ら, 2003)。ここでは、より用い易い等価粗度として海岸林の抵抗を換算したモデルを検討する。海岸林に働く流体力のほとんどは抗力によるものである (原田ら, 2003; 今井ら, 2004) ので、海岸林に働く抗力を Manning の粗度係数に習い、等価粗度係数を用いて (1) 式のように書き換えることができる (Petryk et al, 1975; 油屋ら, 2002)。

$$F = \rho g \frac{n_{forest}^2}{D^{1/3}} u^2 dx dy$$

$$F = \frac{\rho}{2} C_D \left(\frac{Num_{tree}}{dx dy} \right) d_{tree} Du^2 dx dy$$

$$n_{forest} = \left[\frac{C_{Dtree}}{2g} \left(\frac{Num_{tree}}{dx dy} \right) A D^{1/3} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F は海岸林による抵抗力、 n_{forest} は海岸林の等価粗度係数、 D は津波の浸水深、 u は津波の流速、 C_D は樹木の抗力係数、 Num_{tree} は空間 $dx dy$ の中に存在する樹木の本数であり、 $(Num_{tree}/dx dy)$ は単位底面積当たりの樹木の本数になり、 A は樹木の投影面積であり、津波の浸水深が枝下高よりも低い場合には $A = d_{tree} D$ となる。樹木の抗力係数： C_D は、原田ら (2003) の水理模型実験から得られたモデルから (2) 式を用いることができる。また、樹木ではなく円柱を仮定すると抗力係数は定数として (3) 式で表すことができる。

$$C_{Dtree} = 8.4 \cdot \frac{V_0}{V} + 0.66 \left(0.01 < \frac{V_0}{V} < 0.07 \right) \dots\dots (2)$$

$$C_{Dcylinder} = 1.2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 V は海岸林の存在する区間の水面下全体積、 V_0 は体積 V 中の海岸林の占める体積を意味している。これらから、(1)、(2)、(3) 式および樹林密度、胸高直径についての海岸林条件を設定することにより、海岸林の等価粗度係数を津波の浸水深の関数として算出することができる。

(2) 既往の研究との比較

(1) 式より、海岸林の等価粗度係数は、津波の浸水深： D の関数となり、浸水深が大きくなると抵抗が大きくなることがわかる。小谷ら (1998) は、津波の影響がある地域の土地利用ごとに一定の粗度係数を与えて津波の氾濫計算による検討を行っており、海岸林のある地域

には森林域として粗度係数を 0.03 として与えている。海岸林の等価粗度の比較として、(1) 式の海岸林の等価粗度係数、円柱群の等価粗度および一定粗度係数 $n = 0.03 \text{ sec/m}^{1/3}$ (小谷ら, 1998) の浸水深による変化の例を図-1 に示す。海岸林条件としては、樹木の胸高直径 0.1 m、樹林密度 0.5 本/ m^2 、枝下高 2.0 m とした場合を示している。また、円柱群の条件としては、海岸林条件と合わせて、直径 0.1 m、樹林密度 0.5 本/ m^2 とした。図-1 より、既往の一定値を仮定した小谷らの粗度係数と比べ、海岸林および円柱群の等価粗度係数は浸水深の増加により大きく増加していることがわかる。特に、海岸林の場合、設定した枝下高 2.0 m 以上の浸水深では、枝葉の抵抗が増大する事により等価粗度が $0.2 \text{ sec/m}^{1/3}$ を越えるほど大きくなる抵抗モデルであることがわかる。これらより、既往の一定の粗度係数の場合、浸水深が大きくなると増加するべき抵抗を小さく見積もっていると言える。

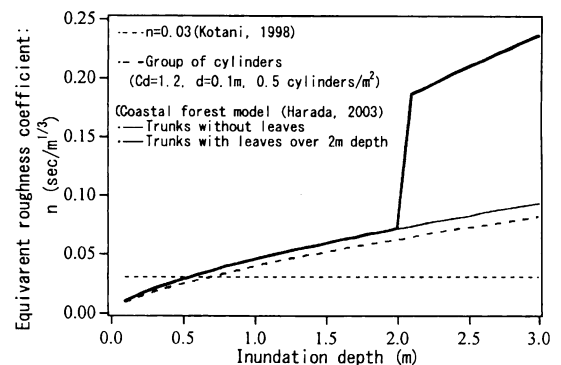


図-1 浸水深による等価粗度係数の変化

(3) 海岸林の生長と間伐による粗度係数への影響

次に、実際の現地海岸林を考えると、植林をされてから年を経るごとに樹木が成長しその形状を変化させる。また、間伐を行うことで密度管理されることもある。このように、実際の海岸林における経年的な海岸林条件の変化により、津波に対する抵抗がどの程度変化するかを評価し、津波の減衰効果がどれだけ変わるのかを把握しておくことで、管理条件に資する検討を行うことができる。海岸林の生長と間伐を考慮するための海岸林条件の設定を表-2 の様に行った。これらの条件の設定にあたっては、林野庁の行った海岸林条件に関する現地調査の結果 (林野庁, 2005) を参考に、密集して植林されたクロマツ林を 0 年とし、植林から 10 年後に樹林密度調整の間伐を行い、さらに植林後から 20 年後にも樹林密度調整間伐を行った海岸林条件を設定した。その後、0.3 本/ m^2 の樹林密度で植林後 50 年までを 10 年間隔で条件設定

を行っている。樹高、枝下高、胸高直径の値は、林野庁の行った現地海岸林の観測結果を参考に年を経るたびに成長する様に条件設定を行っている。間伐については、海岸林育成の現場でとられている方法の一例にもとづいている。枝下高以上の高さには枝葉が存在しており、この高さよりも浸水深が高くなると、枝葉を含んだ樹木体積より、(1)式により抗力係数を算出し用いた。

表-2 樹木の生長と間伐を考慮した海岸林条件

樹齢 (年)	胸高直径 (m)	樹林密度 (本/m ²)	樹高 (m)	枝下高 (m)	林帯幅 (m)
0	0.05	1.0	0.5	0.0	200
10	0.07	0.7	4.0	0.5	200
20	0.09	0.3	7.0	1.0	200
30	0.11	0.3	9.5	1.5	200
40	0.13	0.3	11.5	2.0	200
50	0.15	0.3	13.0	2.5	200

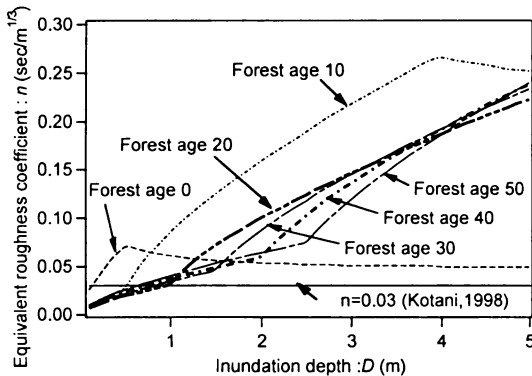


図-2 成長と間伐を考慮した粗度係数

表-2の海岸林条件と(1)式を用いて算出した、海岸林の生長と間伐による粗度係数の変化を図-2に示す。植林直後0年の粗度係数は、樹高が低く、水没後は抵抗係数が小さくなっていく。植林後10年後では、枝下高も低いので大きな粗度係数になっている。その後、間伐と樹木の生長に伴い枝下高が高くなることにより、樹木が生長しても抵抗は大きく増加しない事がわかる。特に間伐がなくなったあとの、樹齢20年以降において、同じ浸水深で、樹齢が古い方が粗度係数が小さくなる。これらの結果から、海岸林の抵抗として枝葉による影響があり、津波減衰効果にも強く影響している。従って、今回設定したような海岸林条件において新しく海岸林を造成する場合には、枝葉の枯れ上がりにより枝下高があまり高くないように、樹木の生長の状況を見ながら間伐による管理をすることで、海岸林の津波減衰効果を低下させない様にとすると、津波に対してより効果的であると考え

られる。しかし、クロマツの場合、梢端からのみ葉を出し、不定枝を出さないで、既存の海岸林について枝葉が一旦枯れ上がってしまった後では、枝葉を地上近くに取戻す事はできない。

(4) 海岸林の間伐、成長による減衰効果の変化

海岸林の間伐、成長による粗度係数の影響に加え、防潮林活用に向けての管理条件の検討のため、津波減衰効果に与える影響を非線形長波方程式基礎方程式とした津波数値シミュレーションにより検討した。図-3に計算条件を示す。図-2で示された海岸林の粗度係数を用いて津波数値シミュレーションを行い、海岸林背後での最大津波高と入射津波の変化を検討するために、津波の有無による最大波高比で津波減衰効果を現したものが、図-4である。ここで、横軸が海岸林の生長を表している。図-2の粗度係数の結果と同様に、植林後10年の海岸林の時に津波の減衰効果が大きくなっていることがわかる。樹齢10年として設定した海岸林条件が、樹林密度が高く、枝下高が0.5mと、進入してくる津波に対して十分に低い位置まで枝があることが津波減衰効果を発揮するために有効であることが確認できる。

3. 地形勾配による津波氾濫特性

海岸林の効果を検討する際に、津波氾濫状況は地形の影響により大きく影響を受けるので、ここでは地形勾配を1/50~1/500、林帯幅50~400mとして変化させて、

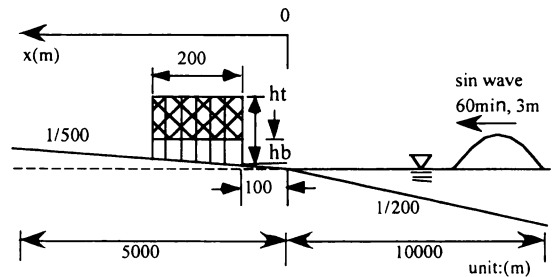


図-3 計算条件

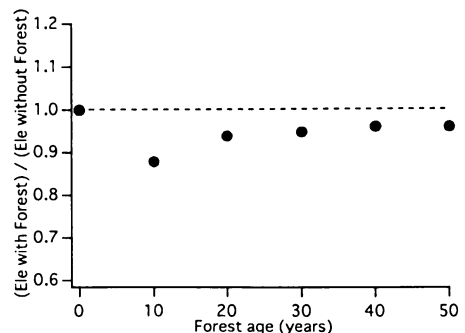


図-4 設定した樹齢と津波減衰効果

数値シミュレーションを行うことにより、地形勾配と海岸林による津波減衰効果への影響を検討する。図-5に計算条件を示す。計算に用いた海岸林条件は胸高直径0.15 m、樹林密度0.3本/m²、枝下高2.0 mとし、入射津波は振幅2.0 m、周期30 minのsin波を半周期入力した。

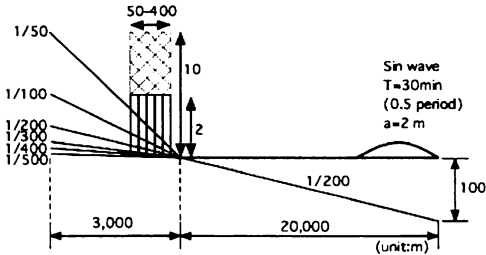


図-5 計算条件（陸上の地形勾配を変化）

幅50～400 mと堤防天端高さ1～3 mを変化させて津波氾濫特性について検討を行った。防潮堤については、本間の越流公式を用いた。図-7に計算条件を示す。計算に用いた海岸林条件は胸高直径0.15 m、樹林密度0.3本/m²、枝下高2.0 mとし、入射津波は振幅2.0 m、周期30 minのsin波を半周期入力した。

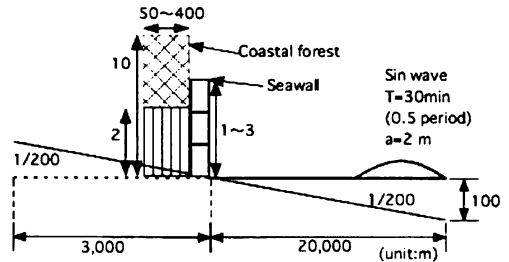


図-7 計算条件（海岸林幅と防潮堤高さを変化）

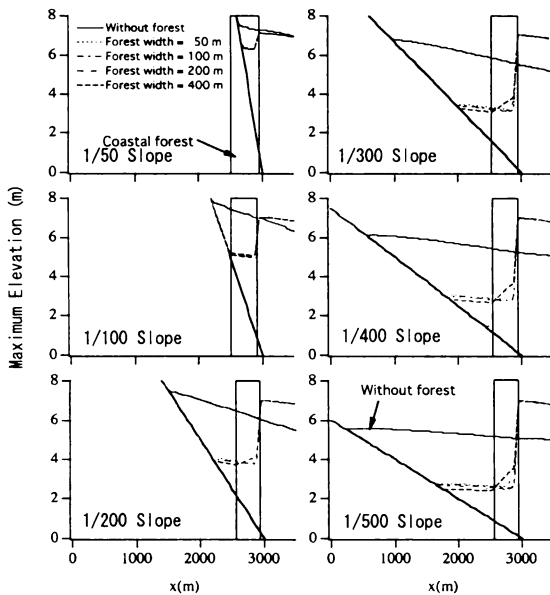


図-6 地形勾配と海岸林幅による津波減衰効果の影響

図-6 に計算結果として、地形勾配ごとに海岸林を変化させた時の最大浸水深の変化を示す。図-6 では線が重なり合い判別が難しいが、地形勾配が大ききところほど、海岸林幅による津波減衰効果の内陸への浸水距離は小さくなる結果となっている。これは、斜面勾配が緩やかなところほど、海岸林による津波減衰効果の違いが遡上距離に表れるためである。

4. 防潮堤と海岸林の組合せによる津波減衰効果

次に、既存の海岸林を活用する際に、津波に対してより効果的にする手法として、津波対策で現実的な小型の防潮堤との組合せによる津波氾濫特性について、海岸林

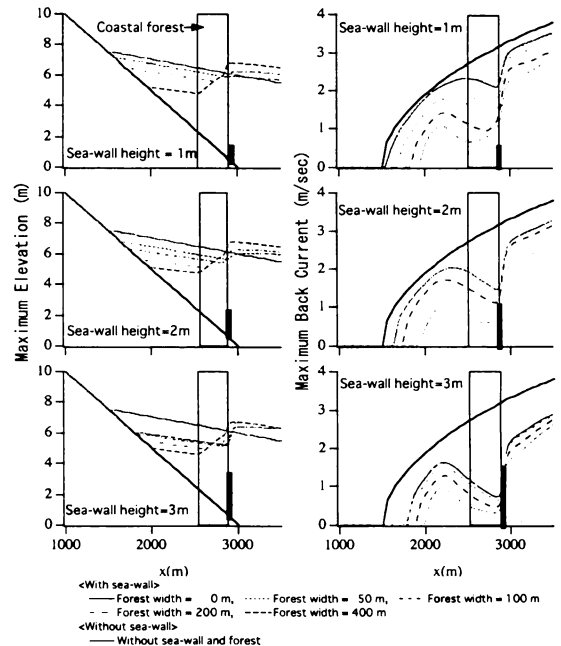


図-8 海岸林と防潮堤による津波減衰効果
(左：最大浸水深，右：引き波時の流速)
(上から順に防潮堤高さ1, 2, 3 m の場合)

図-8には数値計算の結果を示す。図-8の左列が最大浸水深、右列が引き波時の流速を示しており、上中下段は海側防潮堤の高さが1, 2, 3mの時の結果を意味している。海側防潮堤を設置した場合、来襲津波に対して初めに防潮堤により津波流入量が減少され、次に越流津波が海岸林により低減されることにより、わずか1mの高さの防潮堤であっても海岸林のみの条件よりも効果的に氾濫津波を低減できる結果となっている。斜面を遡

上したあとの津波の場合、海に向かう戻り流れが大きくなるが、防潮堤と海岸林の組合せにより、戻り流れの勢いが大きく弱められる。この海岸林と防潮堤による多段的な対策は、津波被害に対する実用的・効果的な活用手法である。

5. 樹木の倒伏条件

海岸林を活用する際には、利用できる限界についても検討が必要である。河道内樹木についての倒伏限界は、河道内樹木の引き倒し試験の結果よりモデル化されており(リバーフロント整備センター, 1999), 樹木倒伏限界モーメントが(4)式で示されている。

$$M_c = \alpha \cdot d^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 M_c は倒伏限界モーメント、 d は樹木の胸高直径、 α は河道内の樹木の引き倒し試験より求められた定数で $2.45 \times 10^{-3} \text{ kg/s}^2$ である。海岸林へ働く作用流体力を浸水深と流速から算出し、倒伏限界を(4)式で評価することで海岸林の利用限界について検討する事ができる。(4)式による倒伏限界モーメントと作用流体力による樹木倒伏モーメントの比較(図-9)から倒伏限界を評価・判定する事が可能となる。首藤(1985)は、過去の津波被害調査の結果を集約し、胸高直径が0.13 m程度の海岸林において、津波高3 m以上で樹木が破壊を受けるとして1つの規準を示している。(4)式を用いた倒伏モーメントによる評価では、浸水深3 mでは胸高直径が0.25 m以下の場合が倒伏条件となる。この様に作用流体力による倒伏モーメントと倒伏限界から、津波に耐えられる海岸林条件の必要条件について検討することが可能である。

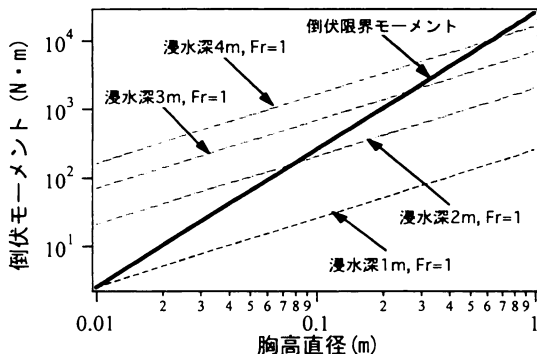


図-9 胸高直径と倒伏モーメント

6. おわりに

本研究では、海岸林の津波減衰効果の活用に向けての条件を検討するために、従来の抵抗モデルをより用いやすい形式の粗度係数で再整理し、いくつかの海岸林の利用条件について数値シミュレーションを活用した検討を行った。これらの結果より、海岸林の利用に向けて、枝下高を低く樹木を育成することが非常に有効であることがわかった。間伐による密度管理をうまくすることでこのような海岸林条件を満たすことが可能であり、有益な情報が得られた。さらに、海岸林と防潮堤を組み合わせることで、海岸林がより効果的に津波減衰効果を発揮することができることがわかった。

参考文献

- 油屋貴子・今村文彦(2002): 合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 276-280.
- 今井健太郎・鈴木明業(2005): 沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積評価法とその倒伏体力, 水工学論文集, 第49巻, pp. 859-864.
- 今井健太郎・松富英夫・高橋智幸(2004): 津波氾濫流れによる植生の動揺とその流体力特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 306-310.
- 国土庁防災局(2000): 復興施策検討調査報告, 214p.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998): GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- 首藤伸夫(1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 海岸工学論文集, 第32巻, pp. 465-469.
- 首藤伸夫(1992): 津波強度と被害, 津波工学研究報告, 第9号, pp. 101-136.
- 田中和博(1998): 森の込み具合を調べる, 森を調べる50の方法, 日本林業技術協会, pp. 74-77.
- 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・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.
- リバーフロント整備センター編集(1999): 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, pp. 154-171.
- 林野庁(2005): 海岸林防災機能の高度発揮のための管理システムに関する調査平成16年度報告書, (印刷中).
- 林野庁監修(1998): 林業技術ハンドブック, 1972p.
- Petryk S., A. M. ASCE and George Bosmajian III(1975): Analysis of flow through vegetation, Journal of the hydraulics division.
- Republic of Indonesia(2005): Master Plan for the Rehabilitation and Reconstruction of the Regions and Communities of the Province of Nanggroe Aceh Darussalam and the Islands of Nias, Province of North Sumatera, 126p.