

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

原 田 賢 治*・今 村 文 彦**

複雑な構造を持つ防潮林模型を用いた水理実験により、津波に対する防潮林の抵抗特性として、水深変化に伴う体積占有率の変化に比例する抗力係数モデルを示した。また、現地調査等から実際の樹林密度と胸高直径の相関を示し、この防潮林条件に基づいた防潮林の抵抗を考慮した数値計算により、防潮林の津波減衰効果を定量的に評価したところ、防潮林幅により減衰効果が大きく異なることがわかり、この数値計算結果を整理して減衰効果の程度を三段階に分けた防潮林効果の簡易判定表を示すことができた。さらに、文献調査により、防潮林の被害を軽減させる 4 つの機能・効果を整理し、減災のための防潮林の利用可能性について検討を行った。

1. はじめに

津波は広範囲にわたる自然災害であり、全ての沿岸地域に長大な構造物による対策をとることは不可能である。防潮林等の自然防災力の効果を適正に評価し積極的に活用していくことは防災面のみでなく、自然環境に配慮した快適な海岸空間の創造のために有効な技術である。しかし、防潮林による津波減衰効果や減災機能について十分に理解されていないため(首藤, 1992)、評価・利用されていないのが現状である。本研究では、防潮林の津波減衰効果を評価するための抵抗特性を検討し、現地条件に基づいた防潮林を考慮した数値計算により津波減衰効果を定量的に評価し、さらに被害を軽減させる機能・効果の実態の理解と減災のための利用可能性を検討する。

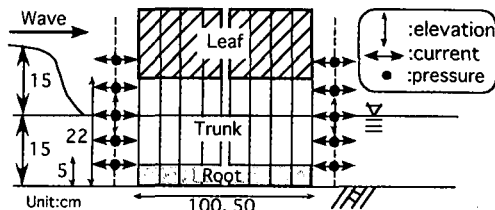
2. 防潮林の抵抗特性とモデル化

(1) 水理模型実験の概要

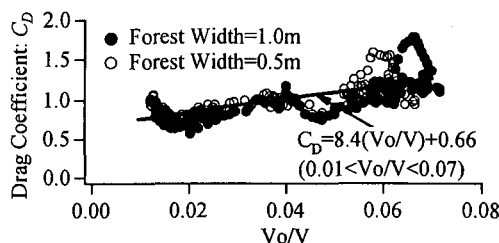
津波に対する防潮林の抵抗特性の理解のため水理模型実験を行った。防潮林モデルは根、幹、葉の 3 つの構造的な特徴を持ち、体積による占有率を 17.5, 1.0, 31.7% とした。根と葉は透過性モデルとし、根は厚さ 5 cm, 幹は直径 2 cm の円柱で 20 cm 間隔に配置し、葉部の高さ 22 cm, モデルの長さ 100, 50 cm とした。モデルは水深 15 cm の水平床に設置し、波高 15 cm の段波を入射させて実験を行った。防潮林モデルに働く作用力を推定するため、モデル前後での水位、流速、波圧を計測した(図一 1)。

(2) 防潮林モデルの抵抗特性

防潮林モデルの抵抗係数を推定するため、計測波圧を水深方向に積分してモデル前後の差をとり作用力を算出した。防潮林の抵抗力は Morison 式に従うとし、段波先端部の非定常区間と継続部の準定常区間に分け、精度良



図一 防潮林モデルと計測点



図二 算出された抗力係数と体積占有率

く算出できるよう各抵抗係数を別々に算出する工夫をした。加速度の小さい準定常区間では、全作用力と抗力が釣り合うとして抗力係数を算出した結果を図二に示す。

抗力係数は水深変化に伴う葉部の影響による体積占有率 V_0/V (V は防潮林の存在する区間の水面下の全体積, V_0 は水面下の防潮林の体積) の変化に比例する抗力係数モデルとして (1) 式を得ることができた。

$$C_D = 8.4 \frac{V_0}{V} + 0.66 \quad \left(0.01 < \frac{V_0}{V} < 0.07 \right) \quad \dots (1)$$

非定常区間において、全作用力が抗力、慣性力と釣り合うとし、(1) 式を用い抗力を算出し、慣性力係数を推定した結果、 $C_M = 1.7$ と算定できた。これらの抵抗係数を用いて算定される抵抗力と計測作用力を比較すると(図三)、流体力が良く再現されることが確認できる。

なお、実験縮尺 1:10 で、直径 0.2 m, 樹林密度 30 本/100 m² の防潮林を想定しており、2 章の防潮林緒元の特徴と対応している。ここで得られた抵抗係数は、4 章において減衰効果の評価の数値計算に用いた。

* 正会員 博(工) 京都大学 COE 研究員防災研究所巨大災害研究センター

** 正会員 工 博 東北大学教授工学研究科附属防災制御研究センター

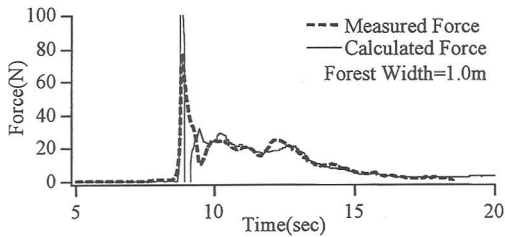


図-3 計測作用力と推定作用力

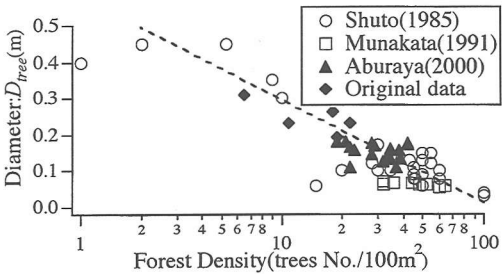


図-4 潮林の樹林密度 (本/100 m²) と樹木胸高直径 (m)

3. 我が国沿岸での防潮林緒元

(1) 防潮林緒元の現地調査

水理モデルの現地適応や防潮林の減衰効果の評価のために必要な現地防潮林の諸条件の特徴を把握するため、宮城県北上川河口、宮城県志津川町松原公園、岩手県高田松原の3防潮林で現地調査を行った。調査では10×10 mの調査区画を設け、樹木の本数：N、全木の高さ1.2 mにおける幹の周長： l_b を計測し、幹を真円として胸高直径： D_{tree} により平均胸高直径を求めた。

北上川河口、志津川町公園の防潮林はチリ地震津波の際に防潮林による津波被害の軽減効果が報告されている(和泉ら, 1961)。高田松原防潮林も昭和三陸地震津波、チリ地震津波の際には家屋被害の軽減や漁船・漂流物の侵入阻止の効果が報告されている(石川, 1988)。

(2) 防潮林緒元の特徴

現地防潮林の減衰効果の評価に必要な、防潮林緒元の特徴を詳しく検討するため、前節に示した独自の現地調

査結果に加え、既往の研究(油屋; 2000, 首藤; 1985, 宗方ら; 1991)より、クロマツ防潮林の樹林密度(本/100 m²)と樹木胸高直径 (m) の関係を図-4 に示す。

樹林密度が小さくなると幹の直径は大きくなる強い相関がある。クロマツは陽樹であるため生長に光が必要であり、密集した状態では光量が減少し光合成を行う葉が減少する。幹は光合成による生産物や根から吸収した栄養の受け渡しの機能を持つので、幹の太さは葉量に依じて決まり、密集した所では幹は太く育たなくなる(田中, 1998)。また、光を十分に獲得できないクロマツは淘汰され樹林帯密度を低下させるため、樹木が生長していく過程でクロマツ林の密度と直径の関係は、直径の小さな密林から直径の大きな疎林へと遷移していく。一般に植林時のクロマツは100本/100 m²で植林されているが、樹木の生育環境と防災効果を考えて密度管理をすると50本/100 m²程度が適正な密度である(宗方ら, 1991)。従って、密度管理された防潮林の樹幹直径が0.1 m程度であることが図-4 から推測することができる。この様に樹林密度から直径を推定することで、防潮林条件の1つを減らすことができ、この防潮林条件の津波減衰効果について検討することで防潮林を計画する際の指標となる情報を得ることができる。

4. 数値計算による津波減衰効果の定量的評価

(1) 計算条件および計算方法

防潮林条件の違いによる津波減衰効果を検討するために、複雑な実地形ではなく仙台湾の代表的な地形勾配(原田ら, 2000)を参考に簡略化した地形条件を用い、現地条件に基づいた防潮林を設定し、防潮林を考慮した津波遡上計算を行った。前章より、防潮林幅は50, 100, 200, 400 m、樹林密度は10, 30, 50本/100 m²、幹の直径は樹林密度に対応させて0.3, 0.15, 0.1 m、葉部は投影面積比を0.65、樹高、枝下高は10, 5 mとした。防潮林の抵抗係数は、1章の水理実験で得られた抵抗係数を計算メッシュサイズに合わせて計算に用いた。入射波として沖側境界より、入射波高0.45, 0.90, 1.2 m、周期10分のsin波を入力した。これは浸水深が約4 mを越えると



写真-1 現地調査状況 (志津川町松原公園)

表-1 防潮林現地調査結果の平均値

	北上川	志津川	高田松原
樹林密度 : N (本/100 m ²)	20.0	6.5	15.0
胸高直径 : D_{tree} (m)	0.24	0.31	0.21
樹高 : H_{tree} (m)	15.0	14.3	15.1
枝下高 : H_{leaf} (m)	5.5	4.6	4.8
葉部の密度 : r_{leaf}	0.63	0.62	0.65

樹木が折損や破壊の被害を受ける(首藤, 1985)ため, 樹木破壊を考慮していない本数値計算手法では浸水深が 1, 2, 3 m となる入射波高として入射波高を設定した. 計算格子間隔は, 油屋・今村(2002)を参考に, $\Delta x = \Delta y = 50$ m, $\Delta t = 1$ sec とした.

数値計算方法は原田ら(2000)の津波数値計算方法と同様に, 浅水理論の運動方程式に植生の影響として, Morison 式にもとづいた抵抗項を加えた(2)式を用いた.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M/M' + \frac{C_D}{2} \frac{A_0}{\Delta x \cdot \Delta y} \frac{M' M'}{D^2} + C_M \frac{V_0}{V} \frac{\partial M'}{\partial t} = 0 \quad \cdots (2)$$

ここで, η は静水面からの水位変動量, M は線流量, D は全水深, n は Manning の粗度係数で 0.025, C_D , C_M は防潮林の抗力係数と慣性力係数, V は防潮林の存在する区間の水面下全体積, V_0 , A_0 は体積 V 中の防潮林の占める体積および投影面積を意味する. 抗力項と慣性力項の M' は防潮林無しの線流量で, 数値計算より求めた.

(2) 防潮林幅による津波減衰効果への影響

防潮林幅の影響を検討するため, 入射波高 3 m, 樹林密度 30 本/100 m² の時の浸水深と流速について(3)式で示す最大値の低減率: r の空間変化を図-5 に示す.

$$r(\text{reduced rate}) = \frac{(\text{max. value with forest})}{(\text{max. value without forest})} \quad \cdots (3)$$

防潮林幅の増加に伴う抵抗の増加により, 防潮林通過後の浸水深の低減率: r は防潮林幅 50 m のときの $r=1$ から防潮林幅 400 m のときの $r=0.18$ まで低下し, 流速の低減率は幅 50 m の $r=0.54$ から幅 400 m の $r=0.24$ にまで大きく低下している. 特に, 防潮林直後の浸水深は防潮林幅と低減率の間に線形の関係が見られるが, 流速に関しては幅が大きくなると低減率の増加は小さくなる傾向にあり, 浸水深と流速の減衰傾向が異なる. また, 防潮林背後における津波減衰効果としては浸水深よりも

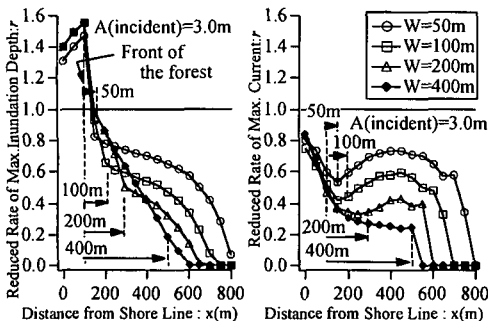


図-5 防潮林幅による津波減衰効果への影響

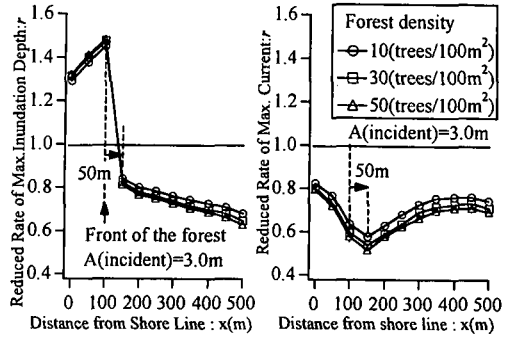


図-6 樹林密度による津波減衰効果への影響

流速の低減効果が大きいことがわかる.

(3) 樹林密度による津波減衰効果

次に, 樹林密度の影響を検討するため, 樹林密度の異なる幅 50 m の防潮林について(2)式で表される浸水深と流速の低減率の各防潮林幅における空間分布を図-6 に示す. 浸水深の減衰率は樹林密度による差が小さく, 防潮林通過直後 ($x=150$ m) ではどの樹林密度においても $r=0.8$ となり密度による影響が見られない. 流速の減衰率は若干の差が見られ, 防潮林通過直後 ($x=150$ m) では樹林密度が 10 本/100 m² で $r=0.6$, 30 本/100 m² で $r=0.54$, 50 本/100 m² で $r=0.51$ となり樹林密度の増加に伴い低減率が低下して, 津波減衰効果が若干大きくなることが示された.

(4) 防潮林効果の定量的評価

a) 既往の防潮林評価(津波強度と防潮林効果)

首藤(1992)は過去の津波被害事例調査より津波による被害と津波の規模(浸水深)の関係について整理している. その中で, 防潮林に関しては, 津波波高が 3 m 以下(津波強度 1 以下)では漂流物を阻止することができ, 下生えが密であれば流勢も緩和できるとしている(表-2). しかし, 防潮林条件の変化による影響や定量的な津波減衰効果については検討されていない.

b) 防潮林の津波減衰効果の定量的評価

防潮林幅により津波減衰効果が大きく異なるので, 幅と波高による減衰効果の定量的評価を行うため, 遡上距離, 防潮林通過直後の浸水深, 流速, 水流圧力の低減率を表-3 に示す. 津波被害に対する減衰効果を検討するためには浸水域, 浸水深以外に, 流速に強く影響を受けて

表-2 津波強度と防潮林の効果(首藤, 1992 より抜粋)

津波強度	0	1	2	3	4	5
津波波高(m)	1	2	4	8	16	32
防潮林	被害軽微 漂流物阻止 津波軽減		部分的被害 漂流物阻止		全面的被害 無効果	

生じる被害も考慮する必要がある。水流圧力は津波による家屋被害と関係づけられ(羽鳥, 1984), 全水深と流速の2乗で表される。防潮林は生長した防潮林を想定し, 樹林密度 30 本/100 m², 胸高直径 0.15 m とした。

表-3 から防潮林幅の増加により, 遡上距離は低減率が 0.89-0.57 まで低下し, 浸水深は 0.86-0.50 (幅 400 m では防潮林中で津波が止まってしまう)まで低下するが, 津波波高による影響は小さい。これらの結果は油屋 (2000) の防潮林効果に関する数値計算結果と一致する。また, 流速の低減率は, 防潮林幅の増加により 0.71-0.34 で, 水位と比較して大きな低減率である。さらに水流圧力の低減率は, 防潮林幅の増加により 0.53~0.01 で, 最も大きく, 流体力の低減効果が大きいといえる。これらより, 防潮林により浸水被害を軽減させる効果に加え, 津波流体力による被害を軽減させる効果を期待できる。

以上より, 表-3 は首藤 (1992) の防潮林の効果判定 (表-2) を定量的な津波減衰効果として補うだけでなく, 流体力による家屋破壊等の被害軽減効果をも評価しており, 防潮林を計画する際に期待される津波減衰率を見積もるための1つの具体的指標として用いることが可能である。

また, 表-3 の定量的評価をもとに, 低減率が 0.99~0.7 を「やや効果あり」, 0.69~0.4 を「効果あり」, 0.39 以下を「十分に効果あり」と三段階に分類して, 表-2 を改良した防潮林効果の判定表を表-4 に示す。防潮林効果の程度を簡単に判断することができる。

表-3 防潮林による定量的津波減衰効果

津波波高 (m)		1	2	3	
防潮林の破壊限界 (首藤, 1985)		被害軽減, 漂流物阻止, 津波軽減			
遡上距離	防	50m	0.89	0.86	0.81
	潮	100m	0.83	0.80	0.71
	林	200m	0.79	0.71	0.64
	幅	400m	0.78	0.65	0.57
浸水深	防	50	0.86	0.86	0.82
	潮	100	0.76	0.74	0.66
	林	200	0.46	0.55	0.50
	幅	400	—	0.11	0.18
流速	防	50	0.71	0.58	0.54
	潮	100	0.57	0.47	0.44
	林	200	0.56	0.39	0.34
	幅	400	—	0.31	0.24
水流圧力	防	50	0.53	0.48	0.39
	潮	100	0.33	0.32	0.17
	林	200	0.01	0.13	0.08
	幅	400	—	0.02	0.01

表-4 防潮林による効果の判定表

津波波高 (m)		1	2	3
津波軽減	~200 m	やや効果あり (浸水距離, 浸水深: 9-7 割)		
	200 m~	効果あり		
被害軽減	~100 m	効果あり (流速: 7-4 割) 十分効果あり (水流圧力: 4-3 割)		
	100 m~	十分効果あり		

5. 防潮林の津波減災機能・効果と利用可能性

(1) 防潮林の津波減災機能

前章までの防潮林の津波自体を減衰させる機能以外にも, 津波来襲時に災害を軽減させる機能が防潮林にはある。過去の被害軽減効果事例および既往の研究報告 (加藤, 1948; 首藤, 1985; 石川, 1988) をもとに整理すると津波減災機能として主に, 次の4項目が上げられる。

a) 漂流物移動・内陸侵入抑止

防潮林が船や巨大な漂流物の移動を阻止し, これら漂流物の侵入・衝突によって生ずる家屋の破壊等の二次的災害を軽減, 防止する。多くの事例が報告されており, 津波により樹木が破壊されない限りこの機能は持続する。

b) 津波エネルギー低減

樹木による抵抗により林内に侵入した津波のエネルギーを低減させ, 通過津波の破壊力を弱め, 被害を軽減する。多くの定性的な事例報告がなされているが, 定量的な津波低減効果については, 事例からの効果の判定が困難であるためこれまで十分に理解されてこなかった。

c) 自然堤防 (砂丘) 形成

防風林・防砂林として砂丘の移動を防ぎ海岸に高い地盤を形成し, 津波に対する自然の障壁となって津波の浸入を抑止する。日本海中部地震津波 (1983 年) では, 青森・秋田の各地において 10 m を越える砂丘堤防により津波の侵入が抑えられ, 砂丘堤防による津波侵入阻止機能が示されている。

d) 人命救助

津波にさらわれた人が津波と一緒に流されないように樹木につかまり津波をやり過ごす事で, 防潮林が人命救助の機能をはたす。北海道南西沖地震津波 (1993 年) の死亡者の死因をみると津波に巻き込まれたことによる溺死者数が 138 名と最も多くなっており (望月, 1994), 津波に流された人が溺れることを防ぐのできる防潮林は人命を守る上で重要な機能を備えていると言える。

(2) 防潮林が被害を拡大させる働き

一方, 首藤 (1985) は防潮林が津波に対して被害を拡大させるよう働くこともあると指摘している。巨大津波

