

防潮林の津波に対する減衰効果の検討

原田 賢 治*・油 屋 貴 子**・Latief Hamzah***・今 村 文 彦****

1. はじめに

津波に対し防潮林などの沿岸植生による減災効果があることは過去の事例から知られている。首藤（1985）は過去の津波災害の現地調査より防潮林の津波に対する効果の判定と限界を示している。また近年、熱帯・亜熱帯地方の沿岸域に分布するマングローブを利用した津波防災施設の 1 つとして防潮林が東南アジア諸国において注目されている。しかし、これらの沿岸植生による定量的な津波低減効果また津波の侵食などに対する強さについて理解が十分されていないために、現状の評価また防災計画での利用が行えないのが現状である。

そこで本研究では、水理実験により防潮林の効果を定量的に評価しそのモデルを運動方程式に取り入れ、減衰効果を再現できる数値シミュレーション方法を提案する。この数値モデルは実験データとの比較により妥当性が示される。さらに現地への適応例として、仙台湾沿岸における現地実測により得られた防潮林データを用い、地図上に防潮林に関するデジタルデータを持つ防潮林マップを作成する。これを数値モデルに適用し防潮林の津波減衰効果を具体的に検討する。

2. 水理実験と数値モデル

2.1 水理実験装置および実験方法

水理実験は東北大学工学部屋外実験水路を用いて行った。実験水路は造波装置側水路端より水深 73 cm の低水路部が 17.5 m, 1/5 勾配の急斜面が 2.5 m, 水深 23 cm の高水路部が 40 m からなる全長 100 m, 幅 1 m のコンクリート製の二次元開水路を用いた（図一1）。防潮林として擬似マングローブ・防潮林モデルを作成し高水路部に設置した。モデルは、根、幹、葉の 3 つの構造的な特徴を持ち（写真一1）、形状と投影面積による占有率为 27.4, 0.75, 31.6% と変えている。また葉のモデルの高さを変えることができるよう工夫している。モデルの設定に関

する実験条件を表一1に示す。実験ではモデルによる流れの変化を理解するため、モデル前後での波高、流速の詳細な計測を行った（図一2）。またモデルを碎波点の前

図一1 実験装置概要

図一2 計測点

写真一1 擬似マングローブモデル

表一1 実験条件

	モデル有り	モデル無し
モデルの位置 (m)	+0, +3, +7, +10	—
モデルの長さ (m)	1, 2	—
葉のモデルの高さ (cm)	22, 32, 無し	—

* 学生会員 修(工) 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
** 学生会員 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻
*** 博(工) バンドン工科大学
**** 正 会 員 工 博 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

後にくるよう4種類に移動して実験を行っている (Hamzahら, 1999)。

2.2 実験結果

図-3はモデルありとなしの時の最高・最低水位の変化を表した結果の一例であり、高水路部端をXの起点としてモデル位置 $X=3\sim5$ m, 葉のモデルの高さ22 cmについて示した。モデル前面で最高水位が増加し特に葉部で反射が大きく、逆にモデル通過後には水位が急激に低下している。最低水位では流れの向きが最高水位とは逆方向になるため、後面での反射による水位増加、前面での水位低下がおこる。この時、流速は急激に増加する。防潮林の基礎での浸食や倒壊はこの際に生じると考えられる。

図-4はモデルの占有率に対する反射率・伝達率の関係を示す。占有率は水位が最高水位時の水の体積に対するモデルの占める体積の比率である。反射率、伝達率はモデルを用いなかったときの入射波に対するモデルありの場合の反射波、伝達波の比率である。なお、モデルの長さは二種類に分けている。

占有率の0.14付近の値は葉部を低く、0.05付近の値が高く設定した時の結果である。占有率が0に近い値が葉部のみを取り除いた場合の結果である。占有率が上がり、モデルが長くなるほど、伝達率は低下している事がわかる。しかし、反射率については複雑であり、占有率

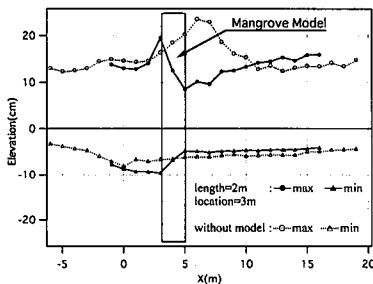


図-3 最高・最低水位の変化

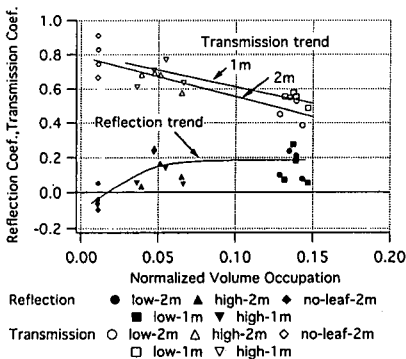


図-4 占有率と反射率・伝達率の関係

0.05までは増加しているが、0.15付近になっても増加は見られない。また、モデル長さの違いも見られない。

2.3 減衰効果のモデル化

防潮林の効果を数値シミュレーションモデルに取り入れるため、浅水理論の運動方程式に防潮林の抵抗を表す項を流体力 F_x, F_y として付加したものを用いる。流体力 F_x, F_y は Morison 式にならない抗力項と慣性力項を取り入れた。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} + F_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{NM}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} + F_y = 0 \quad (2)$$

$$F_x(t) = C_M \frac{V_{obs}}{V} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{obs}}{\Delta x \cdot \Delta y} \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \quad (3)$$

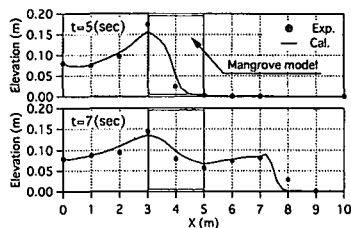
$$F_y(t) = C_M \frac{V_{obs}}{V} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{obs}}{\Delta x \cdot \Delta y} \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \quad (4)$$

ここに、 η は静水面からの水位変動量、 M, N はそれぞれ x, y 方向の線流量、 D は全水深、 n は Manning の粗度係数、 C_D は抗力係数、 C_M は付加質量係数、 V は防潮林の存在する区間における水面下の全体積、 V_{obs}, A_{obs} は体積 V 中の防潮林の占める体積および防潮林の投影面積を意味する。 $\Delta x, \Delta y$ はそれぞれの方向のメッシュサイズを表す。これらの方程式を数値的に差分化して数値シミュレーションに用いた。

2.4 計算結果と実験データの比較

数値計算を行うにあたり各抵抗係数の値が問題となる。これまでに Wolanskiら (1980), Mazdaら (1997) はオーストラリアのマングローブ林を対象として潮汐によるマングローブの形状抵抗を Manning の粗度係数で表し $0.2\sim0.4 \text{ s/m}^{1/3}$ であると推定している。一方、礫山ら (1990) は透過性構造物を仮定してその抵抗の効果を見積もるための実験と数値計算を行い、抗力係数 $C_D=2\sim6$ 慣性力係数 $C_M=1\sim2$ としている。

これまでに提案されている値を参考にしながら、実験結果を再現するよう n, C_M, C_D を決め再現計算を行う。入射条件として高水路部端 ($X=0 \text{ m}$) より実験データを入力した。 $n=0.2, C_M=2.0, C_D=1.0$ の時の計算結果と実験データの空間波形を図-5に示す。マングローブモデル前面での反射、波先がマングローブを通過後の減衰についても実験データをよく再現している。しかし前面での反射において実験値よりも若干小さな値を取る。こ



図—5 計算結果と実験データとの比較

これは実験値が一点におけるデータであるのに対し、計算結果は計算メッシュ間隔に平均化されたデータであるため、波形勾配の大きなモデル前面では計算結果が他の点と比べ小さい方にずれるためである。

この数値モデルによる計算値と実験データの比較により、防潮林の効果に対する数値モデルの妥当性が示された。

3. 仙台湾沿岸における防潮林マップの作成

数値モデルを実地形に適用するためには防潮林に関する詳細な情報が必要となる。ここでは防潮林に関する情報をまとめ地図上に防潮林に関するデジタルデータを持つ防潮林マップを作成する。

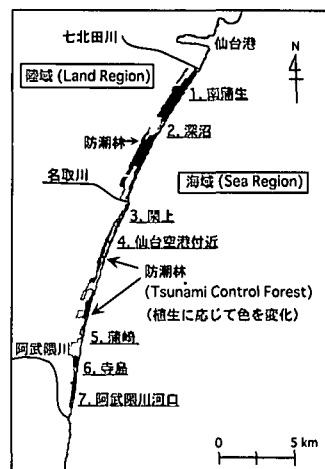
3.1 対象防潮林の特徴

仙台湾沿岸域における七北田川河口より阿武隈川河口までの約 23 km にわたる区間を調査対象領域とした。この区間には、沿岸に沿って貞山堀（水路）が存在しており、海岸との間に黒松を主とした良好な防潮林が整備されている。防潮林によりある程度の防波効果が期待できるものの、河口から貞山堀を通じて津波が容易に浸水する可能性もある。沿岸居住地区は、蒲生、荒浜、藤塚、関上、二の倉、寺島などがあり、ここでは、海水浴場なども多く存在するのでシーズンを通して沿岸利用者が多い。また、七北田川北部には、仙台港を中心とした産業地区（フェリーターミナル、工場、石油タンクなど）も有している。

3.2 現地調査と航空写真の利用

対象領域において、現地実測と航空写真により数値計算に必要な防潮林に関する情報を収集・整理した。

植生の状態に関する情報を得るために仙台湾沿岸の植生について代表的な 7 地区で現地調査を行った。汀線に直交する方向の植生の変化を考慮するために同方向に 2～4 地点測定をし合計 19 地点において調査を行った。調査項目は防潮林の幹の周長、100 m²中の樹木本数、樹高（頂部、葉部）、葉の密度の項目を測定した。葉の密度はデジタルカメラで撮影した画像を葉部の有無により 2 値化し投影面積比を求め密度を推定した。これらの測定値の平均を算出しその地点の植生状態を示す代表値とし



図—6 仙台湾広域防潮林マップ

た。

さらに、航空写真より防潮林の幅、形状、位置を求め地形データと合わせることでメッシュサイズ 50×50 m の防潮林に関するデジタル情報を持つ仙台湾沿岸域防潮林マップを作成した（図—6）。現地調査を行っていない場所、つまり調査地点間のデータをどの地点の代表値にするかを決定する必要がある。原則的に、最も近い調査地点の代表値を用いることとし、実際に防潮林を見て植生が大きく変わるところでは、類似した植生状態をもつ調査地点の代表値を選んでそのデータを与えた。防潮林マップ上で等しい値をもつ格子では同様の植生状態であることを意味する。これにより容易に防潮林の情報を数値計算に取り込むことが可能となる。

4. 仙台湾における数値解析

防潮林マップのデータを防潮林の抵抗を考慮した数値モデルへ適用する。まず防潮林のみによる津波低減効果を評価するため、モデル地形を用いた一次元遡上計算による減衰率、反射率の検討をする。次に、二次元的な地形条件と防潮林形状、位置の効果を検討するため、仙台湾の実地形において防潮林の有無による浸水域の変化を評価する。

4.1 モデル地形による防潮林の効果

モデル地形、防潮林の植生状況は仙台湾における平均的な地形勾配（図—7）及び植生状況（表—2）を用いた。樹高に関して海岸線に近いほど小さくなる傾向があるため、海岸線に最も近いメッシュでは（ ）内のデータを用いることとした。計算に用いた抵抗係数は $C_M=2.0$ 、 $C_D=1.0$ 、 $n=0.025$ とした。まず防潮林付近の波形について詳しく見るために、防潮林幅 500 m の時について防潮林に津波が到達した直後の水位の空間分布について

表-2 平均的防潮林の植生状況

幹の周長 (m)	樹高 (m)		樹木の本数 本/1 格子	葉の投影面積比
	頂部	葉部		
0.50	10.0 (5.0)	5.0 (2.0)	825	0.65

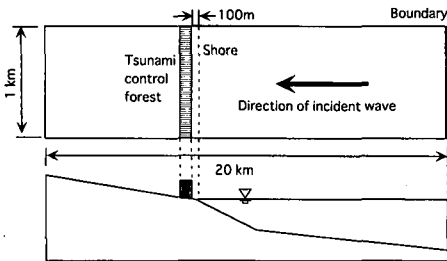


図-7 モデル地形

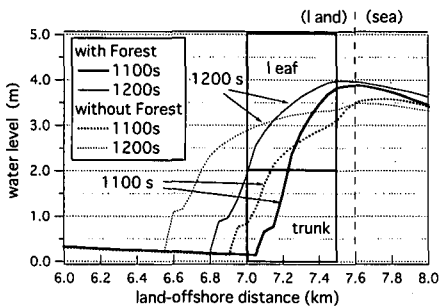


図-8 津波到達直後の水位空間分布

図-8に示す。入射波振幅 2 m, 周期 20 分の正弦波を沖側境界より入射させている。防潮林手前での水位上昇、内部ではしだいに水位低下して浸水域が大きく減少していることがわかる。また 1100 s と 1200 s の波形を比べると、防潮林に到達した直後の 1100 s の方が内部での減衰が大きくなっている。これは、波の先端では流速が大きいため、樹木に衝突する際に失われるエネルギーが大きくなるが原因である。

次に防潮林幅 500 m の時の防潮林手前での反射率と通過後の地点 (汀線より 0.8 km) における浸水深の減衰率について、入射波振幅別にみたものを図-9に示す。入射波振幅が大きくなるにつれて反射率が増している。これは防潮林手前での水深と葉・幹の高さの関係によるもので、入射波振幅 1 m では幹による反射のみであるが振幅が大きくなるにつれて葉部での反射が付加されるからである。しかし、首藤 (1985) によると本計算で設定した直径約 15 cm の樹木の場合、防潮林手前または内部の浸水深がおおよそ 5 m の津波に対しては切断や倒木により無効果であることが示されている。本研究で提案した数値シミュレーション法では防潮林の限界値を設定して

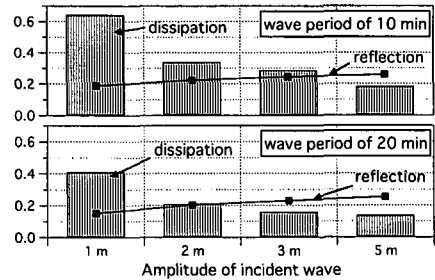


図-9 入射波振幅別の反射率・伝達率

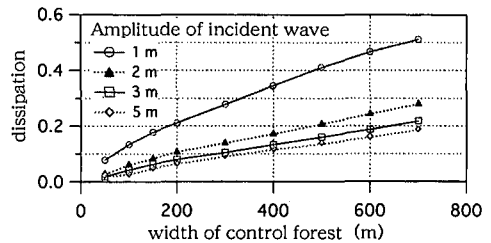


図-10 防潮林幅による波高減衰効果

おらず今後考慮すべき点である。減衰率を見ると入射波振幅が小さいときに減衰率が大きくなっていることが分かる。これは小さい波の方がエネルギーが波の持つエネルギーが小さく、防潮林による損失エネルギーと比較すると損失エネルギーの割合が大きくなるためである。周期 20 分では 10 分と比較してすべての入射波振幅において減衰率が小さいことが分かる。これは、長周期である 20 分の波の方が波の持つエネルギーが大きいために、防潮林による損失エネルギーの割合が小さくなるからである。

防潮林幅による波高の減衰効果についてみるために、図-10に防潮林幅と防潮林通過後の最大浸水深の減衰率の関係を示す。この図のように防潮林幅と、浸水深の減衰率にはほぼ比例関係がある事がわかる。

4.2 仙台湾における数値解析

実際の地形データと 3. で得られた防潮林マップのデータを用いた二次元津波遡上計算を行った。津波の入射条件はそれぞれの入射波振幅、周期について正弦波を沖側境界より入射させている。沿岸の計 6 地点での最大浸水深を防潮林の有無により比較したものを図-11に示す。防潮林幅の大きい大沼や、防潮林が一度途切れてまた始まっている岩沼海浜緑地では大きく減衰しているが、荒浜のように防潮林幅が小さいところでは減衰率も小さくなっていることがわかる。しかし、付近に防潮林のない名取川河口でも水位が低下していることや、岩沼海浜緑地に見られるように、防潮林が存在する場合の方が浸水深が大きい場合も見られた。これらは、沿岸の複

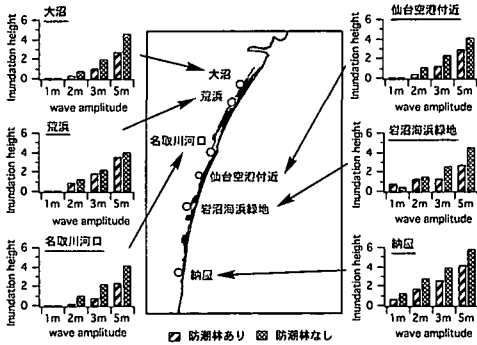


図-11 防潮林の有無による最大浸水深の比較

雑な地形の影響を受けているためであると考えられる。

次に、入射波振幅、周期別にみた浸水面積の変化を図-12に示した。周期別に入射波振幅と浸水面積の減少率の関係を図-13に示した。図-13より、入射波の周期による違いはあまり見られないが、入射波振幅が大きくなるにつれて浸水面積の減少率も大きくなる傾向が見られ、3 mを超える入射高の津波に対しては、4割もの浸水面積の低下が見られた。また、減少率の限界もあるようである。

5. 終わりに

本論文において得られた主要な結果を以下に要約する。

① 津波により防潮林に働く効果を水理実験から明らかにした。水理実験データより最大波高の反射率・伝達率を求め低減効果の検討を行った。これにより防潮林による津波の低減効果を定量的に評価した。また、防潮林の効果を含む数値シミュレーションを提案し実験値との比較によりその妥当性を示した。

② 現地へ数値モデルを適応させるために防潮林のデジタル情報を持つ防潮林マップを現地調査と航空写真により作成した。これにより容易に防潮林データを数値計算に用いる事ができるようになった。

③ 仙台湾における代表地形を用いた防潮林効果を含む数値計算により、防潮林による低減効果の因子として反射とエネルギー損失が重要であることと防潮林幅による低減効果の変化が示された。

④ 仙台湾の地形データと防潮林マップデータを用いた二次元津波遡上計算により防潮林（幅、位置、形状）と地形条件の効果を検討した。実地形では防潮林の形状、

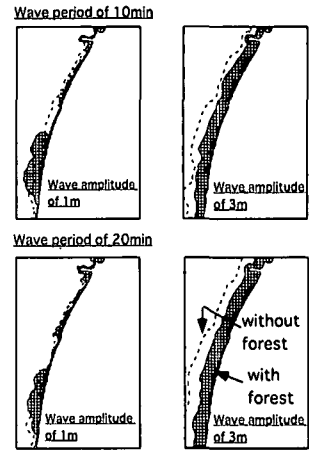


図-12 浸水面積の変化

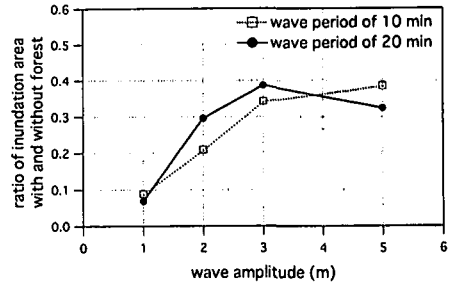


図-13 入射波振幅と浸水面積の減衰率

位置や地形条件により浸水域が複雑になるが、防潮林の効果を考慮した津波シミュレーションが可能となった。

参考文献

- 柳山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 首藤伸夫 (1985): 防潮林の津波に対する効果と限界, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 465-469.
- Hamzah, L., K. Harada and F. Imamura (1999): Experimental and numerical study on the effect of Mangrove to reduce Tsunami, Tohoku Journal of Natural Disaster Science, Vol. 35, pp. 127-132.
- Mazda, Y., E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka and M. Magi (1997): Drag force due to vegetation in mangrove swamps, Mangrove and Salt Marshes 1, pp. 193-199.
- Wolanski, E., M. Jones, and J. S. Bunt (1980): Hydordynamics of a tidal creek-mangrove swanp system. Australian Journal of Marine and Freshwater Research 31: pp. 431-450.