

## 森林生態学に基づいた津波防潮林の津波減衰能力の評価

鹿児島大学工学部海洋土木工学科 学生員 向窪義章  
 鹿児島大学工学部海洋土木工学科 正員 浅野敏之

### 1. はじめに

2004年のスマトラ沖地震津波の甚大な被害を受けて、途上国の津波防災対策としてマングローブ林などのグリーンベルトの有用性が指摘されている。海岸林は普段は景観や環境保全に有用であり、稀に来襲する津波に対しても効果を発揮するから、わが国においても津波防潮林による津波防災対策は魅力的な方法と言える。

しかし、既往の海岸工学分野の研究では、海岸林の樹林密度と樹高・幹径などの条件を独立に与え、海岸林の生態学的な特性を考慮していない。樹木群落の樹高・幹径・立木密度・葉や枝の割合などは時間(樹齢)の関数でもあり、津波防潮林としての機能も樹木群の時間的生長に支配されると考えられる。

本研究では、海岸林を津波防潮林として設計する上で、樹木群落の生長特性を考慮する必要があるとの観点に立って、津波防潮林の津波減衰能力について考察する。外力である津波の流体運動は、非線形項・分散項を含んだ Boussinesq 方程式などによって高精度に求めることができるが、本研究では、現象の特性を数式の形で提示するために、樹木の幹部分を円柱で近似し、その抗力抵抗による波高減衰を簡単な線形長波理論によって解析した。

### 2 海岸林による波高減衰の理論

ここでは、最も簡単なモデルとして、半無限の植生繁茂域に線形長波が侵入する場合の波高減衰理論を説明する。海岸林の幹部に着目すれば、樹木は剛な直立円柱で表現できる。樹木群に作用する波の力の反作用として、流体運動は植生群落から付加応力  $F$  を受ける。これを考慮すると  $x$  方向の運動方程式は次式となる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{F}{\rho} \quad (1)$$

$$F = \rho \frac{C_D}{2} d_0 N u |u| \quad (2)$$

ここに、 $\rho$  は水の密度、 $C_D$  は植生の抗力係数、 $d_0$  は植生の径、 $\eta$  は水位、 $N$  は単位面積当りの植生本数(植生密度)である。線形解を得るために、(2)式の流体抵抗項をフーリエ級数の初項で置き換え、準線形化する。

$$\frac{F}{\rho} = \frac{4}{3\pi} C_D d_0 N \hat{u} u = Du \quad (3)$$

ただし、

$$D = \frac{4}{3\pi} C_D d_0 N \hat{u} \quad (4)$$

式(1)~(4)と連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -h \frac{\partial u}{\partial x} \quad (5)$$

より、最終的に次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + D \frac{\partial \eta}{\partial t} = gh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (6)$$

水位変動  $\eta$  を次式のような正弦波

$$\eta = A_0 \exp(-k_i x) \cos(k_i x - \sigma t) \quad (7)$$

で与え ( $A_0$  は入射波の振幅、 $\sigma$  は周波数)、これを式(6)に代入すると、波高減衰率  $k_i$  は

$$k_i = \frac{\sigma}{\sqrt{2gh}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{D}{\sigma}\right)^2} - 1 \right]^{1/2} \approx \frac{\sigma}{2\sqrt{gh}} \left(\frac{D}{\sigma}\right) \quad (8)$$

となる。最終項は  $D/\sigma$  が十分小さい場合の近似式である。最終項から、波高減衰率  $k_i$  は式(4)で表される流体抵抗の係数項  $D$  に比例し、水深の 1/2 乗に反比例すること、波の周波数には無関係であることがわかる。波高減衰率は水粒子軌道振幅  $\hat{u}$ 、すなわち、津波波高にも比例することになる。これは流速の 2 乗に比例する抗力項を導入したことから理解できる結果である。

以上より、波高減衰率  $k_i$  は林齢による幹径  $d_0$ 、樹木密度  $N$  の時間変化を考慮すると、

$$k_i = \frac{2}{3\pi} C_D d_0(t) N(t) \hat{u} / \sqrt{gh} \quad (9)$$

で表されることがわかる。

なお、式(7)で得られた  $\eta$  の解を式(5)に代入することにより水粒子速度  $u$  の解は次式のように求まる。

$$u_i = \sqrt{gh} \frac{A_0}{h} \left[ 1 + \left(\frac{D}{\sigma}\right)^2 \right]^{-1/4} \exp(-k_i x) \times \cos(k_i x - \sigma t + \varepsilon) \quad (10)$$

ただし、 $\varepsilon = \tan^{-1}(k_i/k_r)$ である。

### 3 海岸林の津波減衰能力の林齢に伴う変化

前節で津波減衰能力が、式(9)により波高減衰率  $k_i$  で表示された。式中には樹木密度  $N(t)$  と幹径  $d_o(t)$  が含まれており、これらは自己間引きによって海岸林の林齢とともに変化すると考える。

別報(岩塚・浅野、2006)で示したように、箕輪(1982)による自己間引き林分の生長モデルに基づけば、樹木密度  $N(t)$  と平均幹材積  $v(t)$  の時系列的な関係は次式で与えられる。

$$\ln v(t) = \ln K_s - \beta \ln N(t) - \left( \frac{\ln N(t)/N_s}{\ln(N_0/N_s)} \right)^\gamma \ln(K_s/K_0) \quad (11)$$

幹径  $d_o(t)$  は次元考察から上式の  $v(t)$  の 2/3 乗に比例する。これら  $N(t)$  と  $d_o(t)$  を式(9)に代入すると津波防潮林による波高減衰率が林齢の関数として求めることができる。なお、式(9)中の  $\hat{u}$  は式(10)の振幅から次式で近似した。

$$\hat{u} = \frac{A_0}{h} \sqrt{gh} \quad (12)$$

図-1は、波高減衰率  $k_i$  の樹齢に伴う変化を示したものである。本計算では、初期値として樹齢5年、植生密度  $N_0=10000$  本/ha、樹木直径  $d_0=7$ cmの海岸林を設定した。式(11)中のパラメータは、 $k=0.017$ ,  $\beta=1.5$ ,  $\gamma=8.644$ ,  $N_s=500$  本/ha,  $K_s=1.275$ ,  $K_0=7.00$  で水深  $h=2.0$ mとした。図-1から次のことがわかる。林齢が増加するとともに樹木直径は増大する。しかし、植生密度が間引きの進行とともに減少するため、波高減衰率は林齢10年程度までわずかに増加した後は、単調に減少することがわかる。初期振幅  $A_0$  によって波高減衰率は若干低下するがその差は大きくない。

さて、樹木群の耐波力を上回る津波が来襲すると、樹木の倒伏が生じる。次に樹木倒伏条件を考慮して図-1の結果の見直しを検討する。直径  $d_o$  の直円柱で近似される樹木に作用する底面周りのモーメントは次式となる。

$$M_0 = \frac{1}{4} \rho C_D \hat{u}^2 d_o (A_0 + h)^2 = \frac{1}{4} \rho g C_D d_o A_0^2 (A_0 + h)^2 / h \quad (13)$$

河川工学の分野では、河道高水敷に存在する樹木群の流体抵抗を評価するにあたって、樹木の倒伏条件が引き倒し試験により検討されている(建設省河川局治水課、1994)。それによると、倒伏限界モーメント  $M_{cr}$  は、樹木直径  $d_o$  の2乗にほぼ比例する。

$$M_{cr} = \alpha d_o^2 \quad (14)$$

比例定数  $\alpha$  は樹種に依存するがその差は大きくない。前出の河川局の文献に基づき、 $\alpha$  の値を  $5.88 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$  として式(13)による津波の作用モーメントが式(14)の倒伏耐力を越える条件を求めた。その結果、津波振幅  $A_0$  が 1.0, 2.0, 3.0m の時、樹木直径  $d_o$  がそれぞれ 0.125, 0.200, 0.292m 未満で倒伏し、津波防潮林の機能を有さない結果となった。この範囲の波高減衰率曲線を図-1中では0で表示した。これによると、津波振幅  $A_0$  が 1m の場合には、林齢15年程度を越えると海岸林が倒伏しなくなるため最も減衰効果が大きいことになるが、 $A_0$  が 3m と大きくなると、林齢70年以下の海岸林は倒伏し津波防潮林として機能しなくなる結果となった。以上より、海岸林の津波防潮林としての機能は、林木の生長とともに変化し、ある林齢で極大となることが簡単な計算によって示された。

### 4. まとめ

海岸林の樹木直径・立木密度の林齢に伴う変化を、森林生長モデルによって定め、津波防潮林としての機能の経時変化を定式化した。樹木の津波による倒伏条件を考慮することにより、津波防潮林の機能が最大化する樹齢があることを明らかにした。

今回は研究の開始段階として、単純化した樹木形状を仮定し簡単な波動理論によって結果を求めた。津波減衰能力を時間軸を通じて最大化する海岸林の保育・密度管理・更新技術、津波高が樹冠部に達する場合の波高減衰や樹木倒伏の評価、主林木のみならず下層木も考慮した減衰能力の評価、分布特性を持った林分モデルへの拡張、などが今後の課題となる。

最後に鹿児島大学農学部森林管理学講座の寺岡行雄先生にご教示を頂いたことを付記し、謝意を表します。

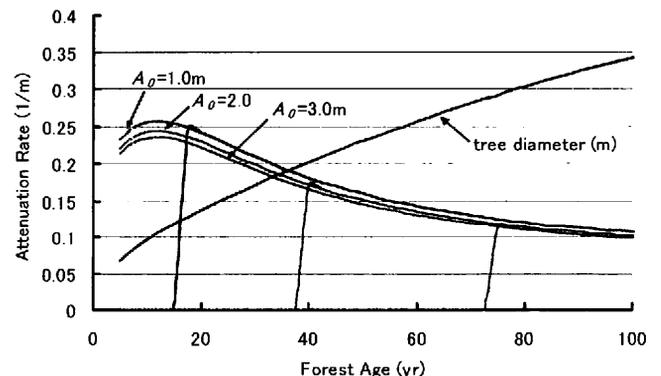


図-1 海岸林による波高減衰率の林齢に伴う変化