

森林生態学に基づいた津波防潮林の防災機能の評価

浅野敏之¹・岩塚雄大²

マングローブ群落やマツ林などの海岸林は津波防災効果を持つとともに、ふだんは景観や環境保全に役立っている。海岸林の津波減衰能力に関する既往の研究では、樹林密度と樹高・幹径などの条件を独立に与えており、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・立木密度などは林齢の関数であり、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、津波防潮林の設計・管理に資するために、津波防潮林の津波減衰機能を樹木群落の生長特性を考慮に入れ検討した。海岸林による津波波高の減衰率に関する解と、幹径・樹木密度の時系列変化を組み合わせ、津波減衰機能の経時変化を定式化することができた。

1. はじめに

スマトラ沖地震津波では、沿岸部にマングローブが繁茂する集落で被害が大きく軽減されたと報告されている。マングローブに限らず森林などの海岸林には次のような津波減災効果がある(首藤, 1985)。

- 幹や樹冠部等が流体抵抗となり津波の波高・流速を減衰させる。
- 津波によって破壊された家屋・船などの漂流を阻止し背後地を守る。
- 漂流者がさがりつく対象となる。
- 通常時の防砂効果により背後に砂丘を形成し、地形標高を高くして2次的な防御効果を持つ。

こうした海岸林は普段は景観や環境保全に有用であり、稀に來襲する津波に対しても効果を発揮するから、環境・防災両面に役立つ魅力的な対策と言える。

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。密度を高くして植えた樹木群落は、生長とともに個体間の競争が起こり、樹冠部で太陽光を得られなくなった個体はいずれ枯衰する。樹木群落の樹高・幹径・立木密度・葉や枝の割合などは時間(林齢)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機能の時間変化を考察した。

2. 自己間引き林分の生長モデル

(1) 数理生態学モデル

植物、動物の個体数や個体重は、環境の制約が無けれ

ば指数関数的に増大する。すなわち、生物の個体重を x 、時間を t 、個体の生長率を λ とすると

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

となる。有限の環境条件では生長の限界があり飽和する。 x の上限値を x_* とし、式(1)の x を $x_* - x$ で置き換えると、

$$\frac{dx}{dt} = -\lambda(x_* - x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、上式で $-\lambda = k$ と置き直した解は収量漸減の法則を示す次式の Mitscherlich 式となる(南雲・箕輪, 1990)。

$$x = x_* \{1 - [1 - (x_0/x_*)] \exp[-k(t-t_0)]\} \quad \dots\dots (3)$$

ここに、添字 0 は初期値を示す。

式(2)で、 x を $1/x$ 、 x_* を $1/x_*$ と逆数変換を行うと、Logistic 型生長曲線の微分方程式が得られる。

$$\frac{1}{x} \frac{dx}{dt} = -\lambda \left(1 - \frac{x}{x_*}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

この解は次式で与えられる。

$$x = \frac{x_*}{1 + [(x_* - x_0)/x_0] \exp(-\lambda(t-t_0))} \quad \dots\dots (5)$$

一方、式(2)において $x \rightarrow \ln x$ 、 $x_* \rightarrow \ln x_*$ と対数変換を行うと、Gompertz 型生長曲線の微分方程式が得られる。

$$\frac{d \ln x}{dt} = -\lambda (\ln x_* - \ln x) \quad \dots\dots\dots (6)$$

この解は、次式となる。

$$\left(\frac{x}{x_*}\right) = \left(\frac{x_0}{x_*}\right)^{\exp(-k(t-t_0))} \quad \dots\dots\dots (7)$$

(2) 林分のシステム論的生長

林学では、樹種構成・年齢構成などにおいて均一で一つの単位となる森林部分を林分と呼ぶ。林分の生長に上限があるのは、個体間の密度効果と考えられる。樹木は動物と異なって動けないので密度効果はより明確な形で

1 正 会 員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科
2 学生会員 名古屋工業大学大学院 社会学専攻
(元鹿児島大学工学部学生)

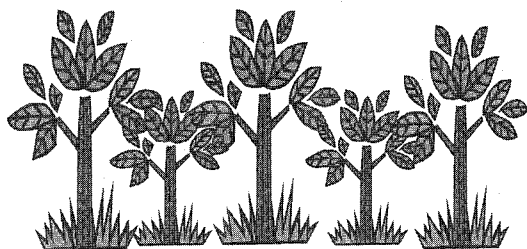


図-1 自己間引き - 優勢木と被圧木の発生の模式図

発現する。林木が生長し、隣り合う林木と樹冠部が接するようになると、種内競争が始まる。本来、生長そのものは式(1)のように個体重の大きいものほど生長量は大きくなる。1つの個体木が隣の個体より少し遅れた生長をとると太陽の受光量が少なくなり、その結果が累積して両者の差が開く。その結果、優勢木と被圧木が生じて自己間引きが発生する(図-1)。

上記 Gompertz 型生長曲線である式(7)は増加型と減少型の時間変化が表現可能である。Khilmi (1967) は、林冠閉鎖後の樹木密度 N の減少を式(7)と同型の次式で表した。

$$\left(\frac{N}{N_*}\right) = \left(\frac{N_0}{N_*}\right)^{\exp(-k(t-t_0))} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 N_0 、 N_* は、それぞれ、樹木密度の初期値、上限値、 k は生長速度に関するパラメーターである。自己間引きをしながら生長し、それぞれの生育条件での上限密度 N_* が実現されている純群落の樹木平均個体重 w と N_* の間には

$$wN_*^{3/2} = \text{const.} \dots\dots\dots (9)$$

という最大密度曲線の $3/2$ 乗則が樹種を問わず広く成立する(依田, 1971)。図-2 は小田 (1992) が、九十九里浜クロマツ林で測定した立木密度 N と平均個体重 w の関係を示したもので上記の $3/2$ 乗則と呼ばれる最大密度曲線が現実の林分の生長特性をよく説明することがわかる。

林分の平均直径 d_0 や平均樹高 h は、次元的考察から樹木個体重 w あるいは樹木幹体積 v と $w \sim v \sim d_0^2 h$ の関係にあることから、式(9)を考慮すると最大立木密度 N_* に対して $d_0 N_*^{1/2} = \text{const.}$ 、 $h N_*^{1/2} = \text{const.}$ となる。 d_0 と N_* がべき乗関係で結ばれることは、平均直径 d_0 も式(8)と同様 Gompertz 式で表現できることを意味する。図-3 は平均直径 d_0 と立木密度 N の関係を示したものである。現実には自己間引きは最大密度曲線に到達する前から起こっている。樹木の生長に伴い幹体積の増加とともに樹木密度が減少しながらこの最大密度曲線に漸近していく(図-4)。この生長プロセスをモデル化した

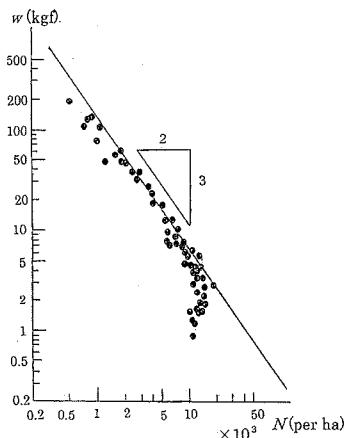
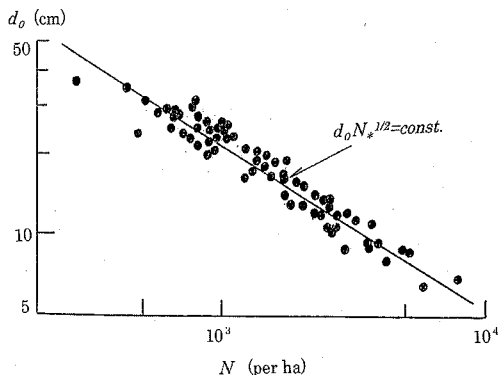
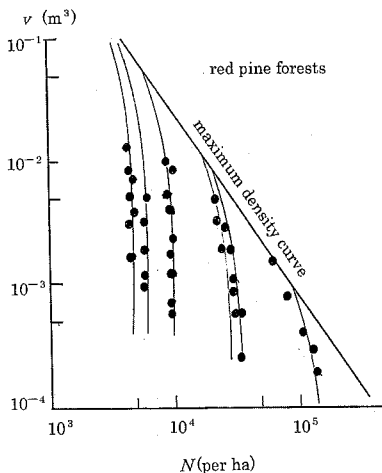


図-2 立木密度と平均個体重の関係(小田, 1992)

図-3 アカマツ天然林の平均直径 d_0 と立木密度の関係の自然間引きの経過に伴う変化(依田, 1971)図-4 自己間引きの $3/2$ 乗則を表す特性曲線と生長とともに特性曲線に至る間引きの経路(依田, 1971)

ものが次節に示す箕輪のモデルである。

(3) 箕輪の樹林密度・単木直径間の時間発展モデル

海岸林の津波防潮林としての機能を時系列的に評価する場合には、上記の樹木個体間の競合開始から最大密度に至るまでの林分生長過程をモデル化する必要がある。箕輪 (1982, 1983) は、林齢 t とともに変化する平均幹材積 $v(t)$ と樹木密度 $N(t)$ の関係を記述する理論を展開した。まず両者の関係を式 (9) を修正した次式で表す。

$$v(t)N(t)^\beta = K(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 β は両対数紙上での最多密度曲線の傾きを表す定数で、樹種によって特有の値をとるとされる。依田の提唱した最多密度曲線上では式 (9) に示すように $\beta=1.5$ となる。樹木器官の相似性を考慮すると $\beta=1.5$ が得られ、この時に式 (10) の左辺も無次元となることから 1.5 を普遍定数として採用して良いと考えられる。上式 $K(t)$ は時間とともに増大し $\lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = K_*$ の定数となる。

$K(t)$ の時間発展を

$$K(t) = K_* \left(\frac{K_0}{K_*} \right)^{\exp(-\gamma kt)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表し (γ は生長速度に関するパラメータ)、また樹木密度 $N(t)$ も同様に式 (8) の Gompertz 式に従うと仮定する。

$$\frac{N(t)}{N_*} = \left(\frac{N_0}{N_*} \right)^{\exp(-kt)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

上式より

$$\exp(-kt) = \frac{\ln(N(t)/N_*)}{\ln(N_0/N_*)} \quad \dots\dots\dots (13)$$

これを式 (11) に代入して両辺の対数を取り、さらに式 (10) に代入して両辺の対数を取り、 $v(t) = C d_0^3(t)$ (C は形状定数) とすると、 $d_0(t)$ と $N(t)$ のトラジェクトリを表す式が得られる。

$$3 \ln d_0(t) + \ln C = \ln K_* - \beta \ln N(t) - \left(\frac{\ln(N(t)/N_*)}{\ln(N_0/N_*)} \right)^\gamma \ln(K_*/K_0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、右辺最終項は林分が最多密度に至る時間的变化をあらわす。十分時間が経過するとこの項は 0 に近づき、式 (9) の最多密度曲線に漸近する。

3. 海岸防災林への森林生長モデルの適用

まず、理論の前提条件に近い理想的な森林に対して、箕輪モデルの適用性を検討した結果を示す。

図-5 は、ストロームツの単純木・無間伐林分データのデータに基づいて箕輪が式 (14) の適用性を検討した結果を、再整理して図に表現したものである。パラメータは、

本数密度に関する式 (12) 中の N_0 、 N_* と自己間引き係数 k 、ならびに式 (11) 中の K_0 、 K_* 、 γ である。式 (12) 中の係数 $k=0.017$ はほぼ普遍的に適用できるとされている。初期本数密度 N_0 は観測初期値である林齢 12 年の本数密度とし、終局的な漸近本数密度 N_* は林齢 51 年のものを採用した。式 (11) 中のパラメータについて $v \sim N$ の関係を示す観測データにあてはめ、 $\ln(K_*/K_0)=1.275$ 、 $\gamma=8.644$ の値を得た。図-5 から、理論値の曲線は一部のパラメータに対してチューニングを行っているとはいえ、自己間引きを起こしながら生長を続け最多密度曲線に至る林分の観測データを高い精度で再現している。こうした理想的な環境下の林分に対して理論値は実測値をよく説明することがわかる。

次に、渡辺ら (1987) が福島県の全 67 箇所のクロマツ海岸林に対して行った観測データを用いて、箕輪モデルの適用性を検討した。計算パラメータは、初期樹木密度 $N_0=10,000$ 本/ha、最終漸近樹木密度 (林齢 100 年) $N_*=500$ 本/ha、 $\ln K_*=9.95$ とした他は、上述の図-5 で設定したものと同じ値を使った。図-6 に樹木密度と

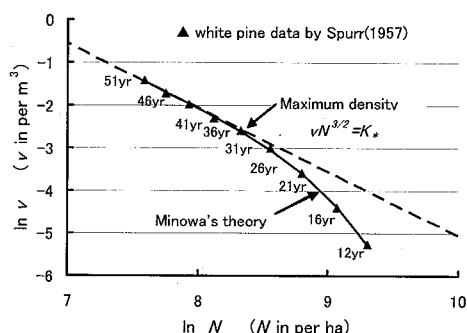


図-5 箕輪の理論の単純木・無間伐林分データへの適用 (原図の本数密度 N 、平均幹材積 v をそれぞれ 1 ヘクタールあたり本数、立方メートルに修正して表示)

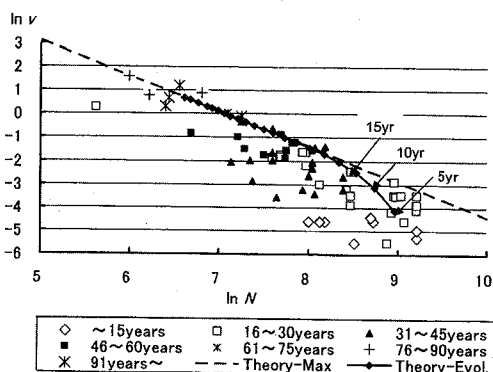


図-6 福島県林業試験場によるクロマツ海岸林データに対する箕輪の理論の適用

平均幹材積の関係について観測値とモデルによる計算値を比較した結果を示す。ここで調査した海岸林は、人工間伐の施業も一部なされている。さらに林分によって土壌条件に優劣があり、潮風害・虫害などの影響も混入していると考えられる。これらを考慮すると、理論値は観測データを概ね説明していると考えて良い。

4. 海岸林の津波減災能力の林齢に伴う変化

(1) 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、半無限の樹木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、流体運動は樹木群落から付加応力 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。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{F}{\rho} \quad (15)$$

$$F = \rho \frac{C_D}{2} d_0 N u |u| \quad (16)$$

ここに、 ρ は水の密度、 C_D は樹木の抗力係数、 d_0 は樹木の径、 η は水位、 N は単位面積当りの樹木本数（樹木密度）である。線形解を得るために、式 (16) 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。

$$\frac{F}{\rho} = \frac{4}{3\pi} C_D d_0 N \hat{u} = D u \quad (17)$$

ただし、

$$D = \frac{4}{3\pi} C_D d_0 N \hat{u} \quad (18)$$

式 (15) ~ (18) と連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -h \frac{\partial u}{\partial x} \quad (19)$$

より、最終的に次式が得られる。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + D \frac{\partial \eta}{\partial t} = gh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (20)$$

水位変動 η を次式のような正弦波

$$\eta = A_0 \exp(-k_i x) \cos(k_r x - \sigma t) \quad (21)$$

で与え (A_0 は入射波の振幅、 σ は周波数)、これを式 (20) に代入すると、波高減衰率 k_i は

$$k_i = \frac{\sigma}{\sqrt{2gh}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{D}{\sigma} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \approx \frac{\sigma}{2\sqrt{gh}} \left(\frac{D}{\sigma} \right) \quad (22)$$

となる。最終項は D/σ 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 (18) 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、

$$k_i = \frac{2}{3\pi} C_D d_0(t) N(t) \hat{u} / \sqrt{gh} \quad (23)$$

で表されることがわかる。

なお、式 (21) の η の解を式 (19) 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。

$$u = \sqrt{gh} \frac{A_0}{h} \left[1 + \left(\frac{D}{\sigma} \right)^2 \right]^{-1/4} \exp(-k_i x) \quad (24)$$

$$\times \cos(k_r x - \sigma t + \varepsilon)$$

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

(2) 海岸林の林齢に伴う津波減衰能力の変化

前節で津波減衰能力が、式 (23) 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 $d_0(t)$ 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。

2.(3) で示したように、箕輪の自己間引き林分の生長モデルに基づけば、幹径 $d_0(t)$ と樹木密度 $N(t)$ の時系列的な関係は式 (14) で与えられる。これら $N(t)$ と $d_0(t)$ を式 (23) 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 (23) 中の $\hat{u}$ は式 (24) の振幅から次式で近似した。

$$\hat{u} = \frac{A_0}{h} \sqrt{gh} \quad (25)$$

図-7 は、波高減衰率 k_i の林齢に伴う変化を示したものである。本計算では、初期値として林齢5年、樹木密度 $N_0 = 10,000$ 本/ha、樹木直径 $d_0 = 7$ cm の海岸林を設定した。式 (14) 中のパラメータは、図-5 で用いたものと同じとし、水深 $h = 2.0$ m とした。図-7 から次の

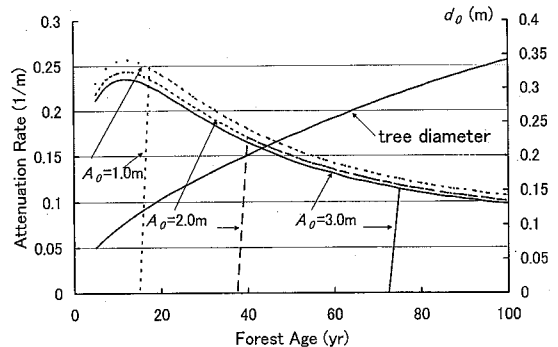


図-7 海岸林による波高減衰率の林齢に伴う変化

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、樹木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-7の結果の見直しを検討する。直径 d_0 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。

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{1}{4} \rho C_D \bar{u}^2 d_0 (A_0 + h)^2 \\ &= \frac{1}{4} \rho g C_D d_0 A_0^3 (A_0 + h)^2 / h \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (26)$$

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目的で、樹木の倒伏条件が検討されている(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_0 の2乗にほぼ比例する。

$$M_{cr} = \alpha d_0^2 \dots\dots\dots (27)$$

比例定数 α 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、 α の値を $5.88 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ として式(26)による津波の作用モーメントが式(27)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, 3.0 mの時、樹木直径 d_0 がそれぞれ0.125, 0.200, 0.292 m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-7中では0で表示した。これによると、津波振幅 A_0 が1.0 m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、津波振幅 A_0 が3.0 m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。

5. 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林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。津波減災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ろう。

謝辞：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。

参 考 文 献

- 小田隆則(1992)：保育・密度管理・更新技術，日本の海岸林，pp. 395-408.
- 建設省河川局治水課(1994)：河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)，山海堂，144p.
- 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.
- 南雲秀次郎・箕輪光博(1990)：測樹学，現代林学講義，地球社，243p.
- 箕輪光博(1982)：林木の生長に関する理論的考察(I)，log-Mitcherlich式の理論，日林誌，Vol.64，No.12，pp. 461-467.
- 箕輪光博(1983)：林木の生長に関する理論的考察(II)，自己間引きモデルの検討，日林誌，Vol.65，No.4，pp. 135-142.
- 依田恭二(1971)：森林の生態学，築地書館，331p.
- 渡辺次郎・富樫誠・新井賛(1987)：海岸防災林に関する研究，—クロマツ海岸林の実態と施行改善試験—，福島県林業試験場研究報告，pp. 105-122，1987.
- Khilmi, H. F.(1967)：物理生態学序説—生物圏のサイバネティックス—，太田邦昌監訳，築地書館，237p.