海岸林の幹直径の分布特性と津波による樹木倒伏率

Trunk Diameter Distributions of Coastal Forests and Assessments of Falling-down Ratio by Tsunamis

浅野敏之¹・三谷敏博²・三嶋俊樹³

Toshiyuki ASANO, Toshihiro MITANI and Toshiki MISHIMA

Recently, coastal forests have received much attention because they provide both environmental and tsunami mitigation benefits. Individual trees in a coastal forest have distributed trunk diameters, so their endurance strength against tsunami fluid force will vary. In order to assess the tsunami attenuation performance of the forest, the trunk diameter distribution is essential information. This study examines the applicability of the Weibull distribution to describe the trunk diameter distributions, and discusses the time varying characteristics of the Weibull parameters as the forest grows up. Furthermore, for a model forest possessing the distributed trunk diameters, a mathematical model to quantify the tsunami attenuation rates including tree falling down effects is proposed.

1. はじめに

海岸林は、ふだんは景観や環境保全に役立ち、稀に来襲する津波に効果を発揮するため、環境・防災両面に役立つものとして注目を集めている。海岸林を構成する個々の樹木は個体間競争によって生長に差が生じ、その幹直径などは統計的分布に従う。津波が来襲した時の防潮林の減災性能は、津波による倒伏にどの割合の樹木が耐えられるかで決まるため、幹直径の分布を明らかにしておくことは重要な課題である。本研究ではこうした観点から、林分の幹直径の分布式とそのパラメータを調べ、樹木倒伏を考慮した海岸林の津波防潮機能を検討する。

2. 林分の幹直径の分布特性

林分の中では日照を求めて競争が生じるため、ある程度以上生長が後れた個体は、被圧を受けて枯死し、あるいは人間の手によって間伐されてしまう。筆者らは、樹木群落の生長特性を考慮して、林齢とともに変化する海岸林の津波防潮機能を考察した(浅野・岩塚, 2006)。この研究では、林分の構成樹木は任意の時点で同じ直径を持つと仮定したが、同齢林であっても個々の樹木は生長に差が生じ、樹木直径は分布する。個体のばらつきを表現する最も簡単な分布は、左右対称な正規分布であるが、林分の中の個体の幹直径分布を調べると、最頻値より小さい方が短く、大きな方に長い尾を引く非対称な分布となる。木梨(1978)、箕輪・白石(1982)らの研究から、林分の幹直径は次式の Weibull 分布に従うことが明らかにされている。

$$f(x, t) = \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{x-B}{A} \right)^k \right] \dots \dots (1)$$

図-1 林分の幹直径を記述する Weibull 分布のパラメータ

1 正会員 工博 鹿児島大学教授工学部海洋土木工学科
2 関西電力(株)電力技術研究所構築研究室
3 元・鹿児島大学工学部海洋土木工学科学生

ここで、独立変数 x は樹木直径であり、 t は林齢である。 A , B , k はそれぞれ尺度、位置、形状母数で、林齢 t の関数となる。形状パラメーター k は $k=3.6$ で正規分布となり、 $1 < k < 3.6$ で正の歪み、 $k > 3.6$ で負の歪みとなる。木梨 (1978) は、スギとヒノキの胸高直径に関する九大演習林と国有林の調査結果を解析し、Weibull 分布の 3 つのパラメーターが林齢とともにどのように変化するかを調べた。さらに翌年には林業試験所九州支場の調査結果を追加考察している (木梨, 1979)。 k は 1.45 ~ 4.01 の値を取ることで、林齢とともに k は減少し、幹径の確率密度関数の正方向への歪みが増加することを示している。

図-1 は木梨 (1978, 1979) の報告したスギ林分に対するデータを再解析し、林齢 t と木梨の求めた Weibull パラメーターとの関係を調べたものである。最小二乗法により、以下のようなパラメーター A , B , k と林齢 t の回帰式を求めた (木梨も回帰式を示しているが次式とは一部異なる)。

$$A = (0.243t + 5.207) / 100 \dots\dots\dots (2)$$

$$B = (0.255t - 0.500) / 100 \dots\dots\dots (3)$$

$$k = 0.0174t + 3.605 \dots\dots\dots (4)$$

上式中の B は林分内の最小直径であり、 $A+B$ は非超過確率 63 パーセントの樹木直径を意味する。よって式 (2), (3) は、樹木が林齢 t とともに肥大することを表している。樹木直径は林学では通常 cm 単位で表されるが、ここでは後述の津波による樹木倒伏率を評価する関係上、(2), (3) 式の A , B は m 単位で表している。こうした回帰式は全体の傾向を示したもので、図-1 からわかるように結果にはかなりのばらつきが認められる。

図-2 は木梨のデータから林齢と樹木密度の関係を調べたものである。林分データには自然林のみならず間伐林も含まれるが、林齢とともに自己間引きなどにより樹木密度が減少することが読み取れる。図-2 のデータでは、樹木密度 $N > 0.2 \text{ m}^{-2}$ と $N < 0.2 \text{ m}^{-2}$ で分布傾向が

異なることがわかる。そこで、後者のデータ群に対して回帰分析を行ったところ次式を得た。

$$N = -0.0019t + 0.198 \dots\dots\dots (5)$$

以上の取り扱い、分布パラメーターの年代的变化を観測データから決める経験的手法であり、多くの研究で用いられている。Westfall et al. (2004) は、North Carolina 州など合衆国南東岸海岸に広範に広がるマツ林の直径分布の林齢に伴う変化を解析し、Weibull 分布パラメーターの林齢と地位係数 (林地の生産力を表す示数) による変化を考察している。これ以外の手法としては、林分を直径階ごとにクラス分けし、一定年ごとの成長や伐採・枯死を遷移確率行列で表現するマルコフ過程のアプローチがある。この手法は簡明であり、遷移確率行列をより簡略化したレスリーモデルによる研究が開発されている (Usher, 1966)。しかし、年代とともに林分環境条件が変化する場合には適用できず、遷移確率行列を場所や環境条件を問わず一般的に与えることは容易でない (Vanclay, 1994)。一方、確率密度関数を従属変数とする Focke-Planck 方程式によって、林分成長を記述する方法も提案されている (例えば鈴木, 1966, 梅村・鈴木, 1974)。この方法では直径分布関数そのものの時間的成長が求まるが、係数関数の平均成長速度や枯死率を林齢 t と直径 D の関数として与える必要があり、重厚な基礎データが必要である。

3. 海岸林の胸高直径分布の解析ならびに観測

林野庁 (2004, 2005) は津波危険地帯にある海岸林の林分内容の把握を目的として、宮崎県「一つ葉海岸」、和歌山県「煙樹ヶ浜」、静岡県「千本松原」、秋田県「風の松原」の 4 箇所でもマツ林の胸高直径・樹高・枝下高などの測定調査を行っている。本研究では、まずこのデータをもとに海岸林の胸高直径分布を解析調査した。Weibull 分布のパラメーター推定は大別して、図式推定法 (確率紙法)、最小 2 乗法、積率法、最尤法があるが (合田, 1991)、以下では積率法により求めることにした。すなわち、第 1 積率 (平均値 $\bar{x}$)、第 2 積率 (分散 σ^2)、第 3 積率 m_3 から、Weibull 分布の母数 A , B , k を求めた。

一つ葉海岸のクロマツ林の分布範囲は、宮崎市新別府、同市塩路、佐土原町下那珂にまたがっているが、標本としては環境条件が均一で、林齢が同じ条件のものを取り出す必要がある。ここでは佐土原町のプロット 7-18 と宮崎市塩路のプロット 19-27 のデータを用いた。どちらもクロマツ単層の壮齢林である。平均立木密度は 1520 ~ 1960 本/ha、平均胸高直径は 15.0 ~ 18.2 cm とほぼ揃っている。ただし、平均樹高はプロット 13-18、プロット 25-27 がそれ以外のものより最大 60% 程度高い。

図-2 林齢と樹木密度の関係

図-3 一つ葉海岸の胸高直径分布と Weibull 分布との比較

図-4 吹上浜クロマツ林の胸高直径分布と Weibull 分布との比較

この胸高直径の観測値の分布と、それに対応する Weibull 分布を示したものが図-3 である。標本数が 258 本と少ないために、この結果からは分布形状の詳細を議論することができない。一つ葉海岸以外の海岸林データについても、同様の解析を試みたが、均一な条件の標本数が少ないために、分布形状を厳密には議論できなかった。

そこで、鹿児島県吹上浜海岸のマツ林において胸高直径を観測し、その分布を調査した。観測は 2006 年 12 月に行い、全部で 924 本のマツの胸高直径を測定した。海岸からの風を直接受ける最前列のマツを除き、海岸から 200 m ～ 250 m の範囲に位置する環境条件が均一と考えられるマツを選んだ。図-4 にその結果を示す。標本数を多くとったため、幹直径の分布形状が Weibull 分布でよく表現できることがわかった。実測値の分布を最もよく表現する k パラメーターとして $k=2.3$ が得られた。 $k<3.6$ より度数分布は大きい方に長い裾野を引くことがわかる。

4. 幹直径分布を考慮した津波による樹木倒伏率モデル

林学の分野で木材資源となる樹種に対する知見である樹木幹直径の Weibull 分布が、海岸林のマツ林に対しても成立することが確かめられた。しかし、海岸林のマツ

図-5 林齢に伴う幹直径分布の変化

に対する Weibull 分布パラメーター A , B , k と林齢 t との関係についての既往の研究は見あたらなかった。そこで本節では、木梨のスギ林に対する知見を準用し、海岸林の津波防潮機能を概念的に記述するモデルを考察することにする。

図-5 は式 (2) ～ (4) で記述される Weibull 分布パラメーターの林齢による変化を考慮した時の幹直径分布を示したものである。このような海岸林に津波が来襲する時の樹木倒伏率と津波の減衰について考察する。津波による樹木の破壊は、柳澤ら (2006) によれば折損・傾倒・根返り・抜根・侵食流出の形態があるとされる。このうち、折損と侵食流出以外は、樹木に作用する流体力の根周りモーメントで外力が記述できるのでこれを倒伏と総称し、以下ではこの破壊形態について検討する。

ドライベットの陸上部に波高 η_i の津波が幹直径 d の樹木に作用する時の、樹木の底面周りの作用モーメントは次式で与えられる。

$$M_0 = \frac{1}{4} \rho g C_D \eta_i^3 \quad (6)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 C_D は抗力係数である。建設省河川局治水課 (1994) は、樹木のある河道断面の洪水流に対する通水能の評価を目的として、樹木の引倒し試験を実施し、次式のような樹木の倒伏限界モーメント M_{cr} と樹木直径 d との関係を得ている。

$$M_{cr} \approx \alpha d^2 \quad (7)$$

上式の α の値は樹種によって異なるが、前述の河道内の樹木の引き倒し試験では平均的に $\alpha = 5.88 \times 10^5 \text{ kg/s}^2$ 程度の値が得られている。この河川工学の知見を準用すると、式 (6) に示される津波流体力による作用モーメントと、式 (7) の倒伏限界モーメントの大小関係から、樹木直径分布を有する海岸林がどの割合で津波によって倒伏されるかを見積もることができる。いま、 $C_D = 2.0$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ を代入すると、倒伏限界

の樹木胸高直径 d_{cr} は

$$d_{cr} = 0.0083 \eta_t^3 \dots \dots \dots (8)$$

となる (0.0083 は長さを m で表した場合の次元付き量)。

海岸林は図-5 に示すように、林齢とともに変化する幹直径分布を持っているが、式 (8) で表される d_{cr} より小さい樹木は津波によって倒伏すると考えられる。式 (1) において、 x を最小直径 B から倒伏限界直径 d_{cr} まで積分すると、津波による樹木の倒伏率 F として次式が得られる。

$$F = 1 - \exp[-((d_{cr} - B)/A)^k] \dots \dots \dots (9)$$

上式の d_{cr} に (8) 式を代入すると、倒伏率 F を求めることができる。すなわち、倒伏率 F は津波波高 η_t の関数であり、Weibull 分布パラメーターを介して林齢 t の関数となる。その結果を示したものが図-6 である。上段の図は、横軸に林齢を、パラメーターに津波波高をとったものである。林齢とともに樹木幹径が増大し、津波外力に耐え倒伏率が減少することがわかる。下段は同じ結果を横軸に津波波高をとって示したものである。

次に津波で倒伏する樹木は、津波減衰には機能しないと仮定し、倒伏を考慮した場合の海岸林の津波減衰効果を以下のように評価した。

津波減衰に有効に作用する残存木の平均幹直径 d_{ef} は式 (1) の Weibull 分布から次式で与えられる。

$$d_{ef} = \frac{\int_{d_{cr}}^{\infty} x \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right] dx}{\int_{d_{cr}}^{\infty} \frac{k}{A} \left(\frac{x-B}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-B}{A}\right)^k\right] dx} \dots (10)$$

上式の分母は津波来襲後の残存率 $P = 1 - F$ を表している。したがって、来襲後の樹木密度 N^* は $N^* = PN$ となる。

図-7 は、さまざまな来襲波高を持つ津波に対して、残存木の平均幹直径 d_{ef} の林齢に伴う変化を示したものである。林齢の増加に伴い個々の樹木は肥大していくので、平均幹直径が増加することは当然であるが、津波来襲によって林分内の幹直径の小さい部分が倒伏すると、残存木の平均幹直径が増加する結果が示されている。

樹林密度 N^* は林齢の増加に伴い、自己間引きによって減少する (図-8)。一方、若齢林では幹直径が小さいため、津波による樹木倒伏によって残存樹木密度は津波波高とともに減少し 0 に近づく。この結果、図-8 に示すように、残存する樹木密度は特定の林齢で極大値を持つことになる。

海岸林による津波減衰機能を平均幹直径 d_{ef} を持つ残存木の幹部だけで評価すると、指数減衰係数で表記される波高減衰率 k_t は次式で求められる (浅野・岩塚, 2006)。

図-6 津波による樹木倒伏率
(上段、横軸：林齢、下段 横軸：津波波高)

図-7 津波減衰に有効な平均幹直径の林齢に伴う変化

図-8 さまざまな林齢の海岸林に対する津波来襲時の残存樹木密度

図-9 樹木の倒伏を考慮した津波波高減衰率の林齢に伴う変化 (横軸：林齢)

図-10 樹木の倒伏を考慮した津波波高減衰率の林齢に伴う変化 (横軸：津波波高)

$$k_i = \frac{2}{3\pi} C_D d_{ef} N^* \dots \dots \dots (11)$$

上式の d_{ef} には図-7, N^* には図-8 で示した特性が入り, その積として波高減衰率 k_i の特性が決まってくる. 両者が組み合わさった結果, 図-9 に示すように津波波高減衰率は特定の林齢で極大値を持った曲線となる. 図-10 は同じ結果を横軸に津波波高をとって示したものである. 津波波高の増加とともに海岸林が倒伏され, 波高減衰率が減少することが示されている.

5. ま と め

本研究は, 海岸林の津波減災機能を評価するためには, 津波来襲時にどの割合で海岸林が津波流体力に耐えるかを定量化することが重要であるとの観点に立ち, これを林齢に伴う幹直径分布の変化から考察したものである. 本研究で得られた結果をまとめると以下の通りである.

1) 木材資源価値のある樹種に対して得られた林学の知見である幹直径の Weibull 分布が, 海岸林のマツ林に対しても成立することが, 現地調査の結果から確かめられた.

2) 林齢とともに幹直径分布が変化する海岸林モデルに対して, 津波が来襲する時の樹木倒伏率を算定し, これに樹木直径と樹木密度の時間的生長に伴う変化を組込んで, 樹木の倒伏を考慮した津波波高減衰率の林齢による変化を記述するモデルを提示した.

謝辞：本研究を行うにあたり鹿児島大学農学部森林管理学講座の寺岡行雄准教授からご教示を頂いたことに謝意を表する.

参 考 文 献

- 浅野敏之・岩塚雄大(2006): 森林生態学に基づいた津波防潮林の防災機能の評価, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1081-1085.
- 柿村武夫・鈴木太七(1974): 確率過程としての林分の遷移(V), 日本林学会誌, 56巻, pp. 195-204.
- 木梨謙吉(1978): 人工林の直径分布について(I)-ワイブル分布のパラメーターと年齢-, 89回日本林学会論文集1978, pp. 59-60.
- 木梨謙吉(1979): 人工林の直径分布について(II)-ワイブル分布のパラメーターと年齢・直径・本数との関係-, 90回日本林学会論文集, pp. 95-96.
- 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.
- 合田良実(1991): 港湾構造物の耐波設計(増補改訂), 鹿島出版会, 333p.
- 鈴木太七(1966): 確率過程としての林分遷移(I), 日本林学会誌, pp. 436-439.
- 箕輪光博・白石則彦(1982): 収穫表調整法に関する研究(I), -ワイブルパラメーターの逐次決定法-, 93回日本林学会論文集, pp. 125-128.
- 柳澤英明・越村俊一・後藤和久・今村文彦・宮城豊彦・林一成(2006): マングローブ林内を遡上した津波の挙動と樹木の破壊条件, -2004年インド洋大津波によるタイ Khao Lak での被害調査-, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 231-235.
- 林野庁(2004): 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報告書, 119p.
- 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報告書, 109p.
- Usher, M. B.(1966): A matrix approach to the management of renewable resources, with special reference to selection forests, J. Applied Ecology, Vol. 3, pp. 355-367.
- Vancly, J. K.(1994): Modelling Forest Growth and Yield, Chpt. 3 Size class models, CAB International Pub, pp. 34-56, 312p.
- Westfall, J. A., H. E. Burkhart and H. L. Allen (2004): Young stand growth modeling for intensively managed loblolly pine plantations in southeastern U. S., Forest Science, Vol. 50, No.6, pp. 823-835.