

# 津波の力に対する海岸林の抵抗性を評価する

鳥田宏行

## はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波により、東北から関東にかけての沿岸部を中心に甚大な被害が発生した。この津波に対し、海岸林は津波エネルギーを減衰させ、海からの漂流物を捕捉するなど、程度の差は様々であるが住宅などの被害を軽減させた。これらの機能は、一般的には防潮機能と呼ばれ、飛砂防止機能と並んで海岸林の重要な基本的機能となっている。海岸林がこの防潮機能を発揮するためには、海岸林を構成する各立木が根返りや幹折れなどの被害を受けずに残存することが重要であるが、今回の津波に対してはクロマツ海岸林自体にも被害が発生した。報告によれば、ある一定範囲の直径サイズにおいては、直径が相対的に大きな個体で幹折れが多く発生している例や根返りが多く発生する例など、被害状況は場所ごとに異なっている。しかし、結果として生じた被害状況が異なるとしても、その背後には共通したメカニズムが存在するはずであり、そのメカニズムを定式化することで、これらの被害状況に関する差異の説明や被害の予測などが、ある程度可能になると考えられる。そこで本研究では、簡易モデルを用いて立木の被害発生に関するメカニズムを定式化し、被害が発生するときの流速を一つの指標として、海岸林を構成する各立木の津波に対する抵抗性を定量的に評価し、その有用性を検証した。

## 簡易モデルの概略

本モデルでは、津波について深さ方向に速度勾配がない一様流を仮定し、立木の樹冠形状は円錐とし、幹の形状は地表から枝下高まで及び枝下高から梢までを、それぞれ円錐台、円錐と仮定した(図-1)。

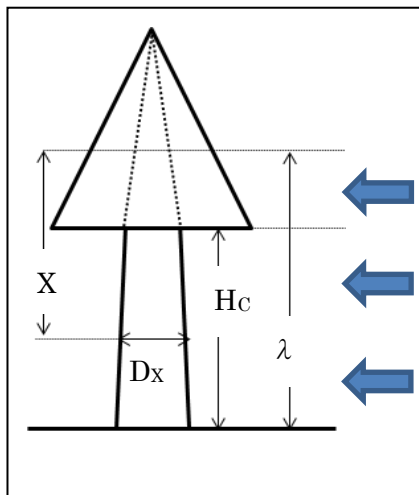


図-1 モデルの模式図

λ: 浸水深(津波の高さ-地盤高), X: 水面からの距離, H<sub>C</sub>: 枝下高, D<sub>X</sub>: Xにおける直径

立木が津波によって受ける力、すなわち流体力( $F$ )は、一様流を仮定して水に沈んでいる幹部および樹冠部の投影面積を $S$ とすれば、(1)式で表すことができる。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho S u^2 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 $u$ : 流速,  $C_D$ : 抗力係数,  $\rho$ : 流体の密度を表す。この流体力は、根元には根返りを引き起こす倒伏モーメント $M_\lambda$ 、樹幹部には曲げモーメント $M_X$ を発生させる。この曲げモーメント $M_X$ により樹幹内には曲げ応力が生じる。 $X$ における曲げ応力 $\sigma_X$ は以下のように表すことができる。

$$\sigma_X = \frac{|M_X|}{Z_X} \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 $Z_X$ は断面係数であり、深さ $X$ における直径 $D_X$ を用いると $\pi D_X^3/32$ となる。

本モデルでは、流速をゼロから徐々に増加させて樹幹応力の最大値 $\sigma_{max}$ および $M_\lambda$ を計算し、野外実験で得られた $R$ (根返り抵抗モーメント)と $MOR$ (曲げ強さ)との値を比較し、 $M_\lambda > R$ かつ $\sigma_{max} < MOR$ ならば根返りが発生、 $M_\lambda < R$ かつ $\sigma_{max} > MOR$ ならば幹折れが発生、

$M_d > R$  かつ  $\sigma_{max} > MOR$  ならば根返りと幹折れが同時に発生すると推定した。この被害が発生するときの流速が限界流速であり、立木の津波に対する抵抗性を示している。モデルの検証に際しては、実際に津波被害を受けた青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林のデータを用いた（図-2）。現地調査の結果では、津波の痕跡高は最大で 8.5m であった。以下の検証では、この痕跡高は一定とし最大値を用いた。

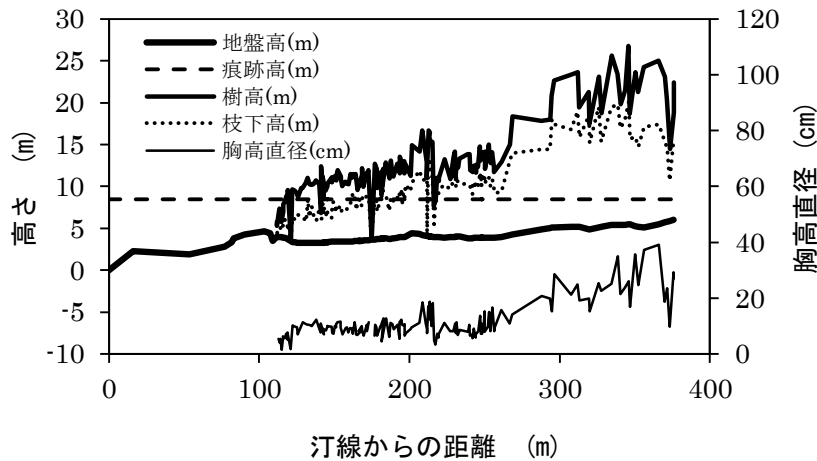


図-2 青森県三沢市織笠のクロマツ海岸林の林分構造  
計算では、津波の高さは一定として、最大痕跡痕 8.5m の値を用いた。

### 結果

#### 1. 限界流速

汀線からの距離に対する限界流速の分布と汀線から 10m 区間毎の本数被害率を示す（図-3）。限界流速は、今回の調査地における津波の高さ 8.5 m に対する各立木の津波に対する抵抗性を示しており、この値が大きいほど抵抗性が高いと考えられる。汀線からの距離 110~160 m 区間では、相対的に限界流速

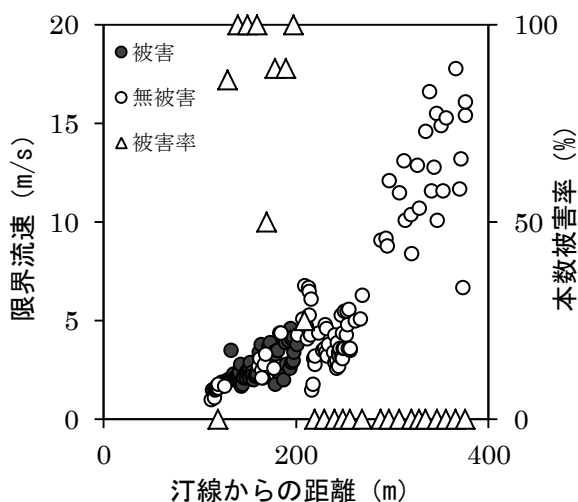


図-3 立木の限界流速

の値が小さく、これ以降は距離 240 m 前後の区間で一度低下するものの、徐々に限界流速の値が大きくなって行く傾向があった。この結果を現地調査の結果と比べてみると、汀線からの距離 120~160 m 区間は被害が集中しており、限界流速の値が小さいところで実際に被害が集中している結果となった。ただし、林縁 110 m 付近は、計算上は限界流速が小さいにもかかわらず実際の調査では被害が発生していなかった。被害形態は、根返り（傾きを含む）、幹折れ、根返り幹折れ同時の 3 つに分類される。計算の結果では、被害形態としては根返りが 74%、幹折れが 17%、根返り幹折れ同時が 9% となり、根返りが大勢となった。現地調査においても、根返り被害は被害木全体の 86% であり、根返り被害が大勢を占めた傾向は一致した。

#### 2. 枝下高および形状比

限界流速と枝下高の関係を図-4a に示す。これによると林縁部を除けば、被害立木は、枝下高約 6 m

以下の立木において多く、限界流速も相対的に小さいことが示され、枝下高は立木の津波に対する抵抗性に影響する一つの因子であることが示唆された(図-4a)。さらに枝下高と浸水深の関係を調べるため、浸水深が枝下高よりも高くなる(立木の樹冠に津波が達した： $\lambda \geq Hc$ )場合と、低くなる場合(立木の樹冠に津波は達しない： $\lambda < Hc$ )について、限界流速を区別しその分布を調べると、樹冠部にも津波が達した立木は、被害が発生した区間付近に集中し、限界流速も小さく抵抗性が低くなることが示された(図-4b)。

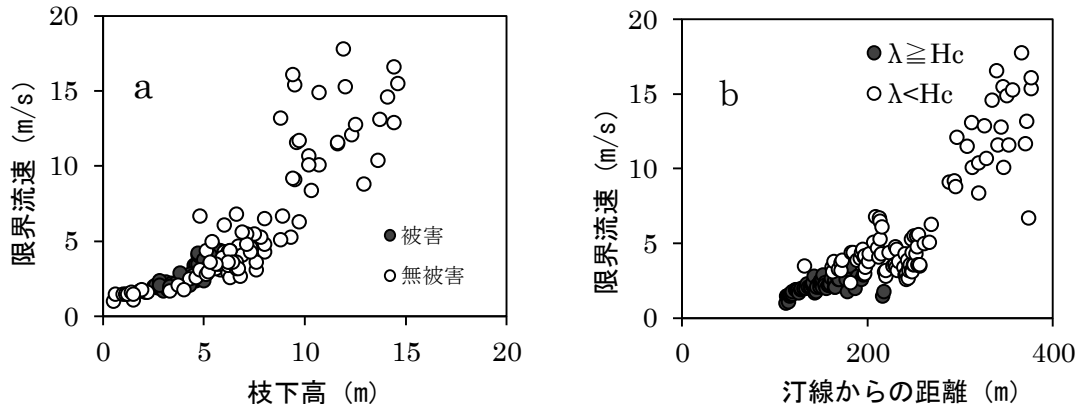


図-4 枝下高と限界流速の関係

森林における風雪害では、形状比が大きくなると被害を受けやすくなる傾向が示される場合もあるが、今回の解析結果では、形状比に関係なく限界流速が小さな立木に被害が集中した(図-5)。現地調査の結果では、被害発生の有無は形状比よりも枝下高が強く影響していた。

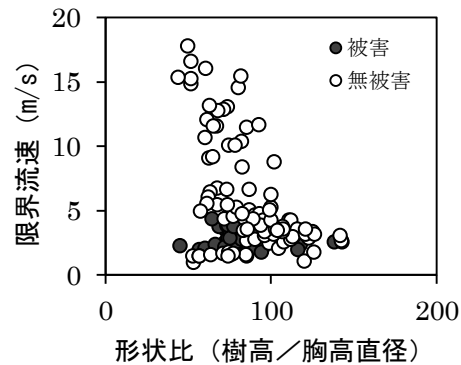


図-5 形状比と限界流速の関係

### おわりに

林縁部の風衝形をなした立木では、樹冠部は完全に水中にあり限界流速が小さいにもかかわらず実際の調査では被害が発生していなかった。原因としては、津波時は深さ方向に速度勾配が生じ、地面近くでは津波の速度が小さく林縁部の立木は被害を免れた可能性や、林縁部の立木の幹の剛性が影響した可能性等が考えられ、この点については更なる検討が必要であろう。

林縁部の立木を除けば、限界流速が小さい立木において、実際に被害が発生しており、本モデルによる解析は、津波に対する海岸林の抵抗性を評価していると考えられる。また、本モデルによる被害形態の解析結果は、現地との定性的な一致を得ており、被害形態の要因の解明においても物理的な根拠を提示することができると思われる。

(森林環境部環境グループ)