

## 風による林木の動揺を再現する—新しい風害リスクモデルの基礎として—

## Reconstructing the tree sway motion by wind -as the basis of a new wind damage risk model-

鈴木 覚\*<sup>1</sup>Satoru SUZUKI\*<sup>1</sup>

\* 1 森林総合研究所

Forestry and forest products research institute, Tsukuba 305-8687

**要旨**：林木の固有振動数よりも低い周波数領域は周波数応答特性値が低く、固有振動数よりも高い周波数領域においては、周波数応答特性値が高かった。このことは、エネルギーの大きい風速の低い周波数領域は林木の動揺に変換される効率が低いことを意味し、風の物理的エネルギーの影響を受けにくくなっていると考えられた。また、周波数応答特性は風速が大きくなるとほとんど相似形になり、風速の振幅が大きいほど周波数応答特性が大きな値になる傾向がみられた。以上の関係を用い、さらにランダム位相を動揺のパワースペクトル密度に与えて動揺の時間変動データを再現した。このような林木の動揺の時間変動を再現し、そのピーク値から倒木リスクを計算するアルゴリズムを新たな風害リスクモデルとして提案した。

**キーワード**：林木の動揺、風害リスクモデル、パワースペクトル密度、周波数応答特性、風速変動

**Abstract**: The frequency response characteristic (FRC) is low in the frequency range lower than the natural frequency ( $f_n$ ) of the tree, and is high in the frequency range higher than  $f_n$ . This means that the lower frequency range of wind speed with high energy has a low efficiency to convert to the sway of trees, and is considered to be less susceptible to the energy of the wind. The shape of FRC became almost similar when the wind speed increased, and the magnitude of FRC tended to become larger as the amplitude of the wind speed increased. Using the relationship mentioned above, the random phase was given to the power spectral density of the tree sway to reconstruct the time course of tree saying. We have proposed a new wind damage risk model that reconstruct the time course of tree sway and estimate the peak value.

**Key-word**: tree sway, wind damage risk model, power spectral density, frequency response characteristic, wind fluctuation

## I はじめに

倒木のリスクを推定するには、地形条件や過去の罹災履歴から経験的、統計的に推定されるほか、力学モデルによる推定がある。力学モデルによる計算では、外力因子である風況予測とセットで行われる。GALESモデルにおいて、林木に作用するモーメントが上空の風の運動量から推定される(1)。また、HWindモデルにおいては、風速の鉛直分布を推定して林木に働く風荷重が推定される(2)。どちらも、風の時間変動は考慮に入れられておらず、瞬間的に生じる最大値を推定するため、突風率を乗算して推定している。また、立木に対しては、風荷重による樹冠の変形や幹のたわみは考慮されておらず、風力係数を乗算してその効果がモデル計算に取り込まれている。

一方、現実の現象は、風が時間変動し、それに対する応答として樹木は動揺している。このとき、林木は風の

時間変動に対して、従属的に同じ周期で動揺するばかりでなく、特に林木の固有振動数と一致する周期で動揺していることがわかっている(3)。このことは、サイズ、樹冠形状、平均風速が同じであっても、風速の周波数分布が異なれば動揺の仕方が異なり、逆に、同じ風速の周波数分布であったとしても動揺特性が異なれば、異なった動揺を示すことを意味する。こうした林木の動揺において、動揺の振幅は林木に働くモーメントに比例し、振幅の最大値が最大モーメントとなる(4)。

本研究では、風速変動から林木の動揺を再現することによって、林木に作用するモーメントの大きさや時間変動を評価するアルゴリズムを構築すること、およびそれによる風害リスク推定の可能性を明らかにすることを目的とする。

## II 方法

### 1.調査地および測定内容

茨城県東海村の村松海岸林で動揺および風速の測定を実施した。樹種はクロマツ (*Pinus thunbergii*) であった。海風の強かった 2016 年 4 月 1 日のデータを用いて計算した。風速は試料個体の真上で測定できなかったため、およそ 10m 汀線側の林縁近くに 12m のポールを設置し、その先端で測定した (Model5103, R.M.Young company)。周囲の樹高は最大で 5m であった。風速と動揺は 10Hz で測定し、データロガーに記録した

(CR3000, Campbell scientific inc.)。動揺はひずみゲージ (KFG-1-120-D16-23) で測定した。ひずみゲージはアルミ製の治具に貼り付け (5)、治具を林木の胸高にねじで固定した。動揺測定を行ったクロマツは樹高 8m、胸高直径 10cm であった。

風速の時間変動を  $x(t)$ 、動揺の時間変動を  $y(t)$  とし、 $x(t)$  のフーリエ変換から計算したパワースペクトル密度をそれぞれ  $S_w(f)$ 、および  $S_s(f)$  とする。風が林木に風荷重を与え、それによって林木が動揺する一連のシステムを線形システムと捉え (図-1) (6)、変換特性を周波数領域で表したものを本研究では周波数応答特性 ( $H(f)^2$ ) と呼ぶ。周波数応答特性は(1)式で表される。

$$H(f)^2 = \frac{S_s(f)}{S_w(f)} \quad (1)$$

ここで、 $H(f)$ は

$$H(f) = \sqrt{H_1 \cdot H_2} \quad (2)$$

であり、伝達関数として知られる  $H_1$  と  $H_2$  (7) の相乗平均である。ここで、 $H_1$  および  $H_2$  は(3)式および(4)式で示される。

$$H_1 = \frac{G_{xy}}{S_w(f)} \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{S_s(f)}{G_{xy}} \quad (4)$$

ここで、 $G_{xy}$  は  $x(f)$  と  $y(f)$  のフーリエ変換のクロススペクトルである。風速と動揺は同期させて記録したが、

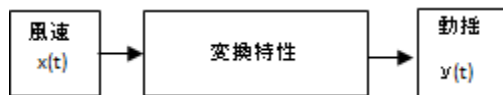


図-1. 風速と動揺の関係を表す模式図

本研究では変換特性を介して結合された線形システムとして扱う。

Fig.1. Schematic diagram showing the relationship between wind speed and tree sway

In this study, both are treated as a linear system combined through transformation properties.

両者の測定位置が 10m 程度離れているため、線形システムの入力と出力が因果関係として同時ではない。そのため、それぞれ 10 分間の平均スペクトルを計算して、平均値から周波数応答特性を計算した。平均スペクトルは 102.4 秒間ごとにフーリエ変換を行い、アンサンブル平均した。

### III 動揺の時間変動を再現するアルゴリズムの提案

ここで、風速の時間変動から動揺の時間変動を推定するアルゴリズムを提案する (図-2)。風速のパワースペクトル密度から動揺のパワースペクトル密度への変換を表すのが (1) 式における周波数応答特性である。風速の時間変動あるいはパワースペクトル密度と周波数応答特性から動揺のパワースペクトル密度を計算し、さらにそれを逆変換することによって動揺の時間変動を再現する。このとき、周波数応答特性はゲインに関する関係式であり、位相データを含まないため、位相をランダムに生成し、付与する。このようにして動揺の時間変動が計算できれば、その最大値から林木に作用するモーメントを推定できる。本アルゴリズムの特徴は、動揺の特性を反映した動揺の時間変動を再現することができ、風力係数や突風率等の仮定条件の少ないアルゴリズムであることにある。ただし、再現される動揺の時間変動は動揺のパワースペクトル密度に示される周波数分布を反映しているという意味での再現であり、実際に観測される動揺を再現するものではない。

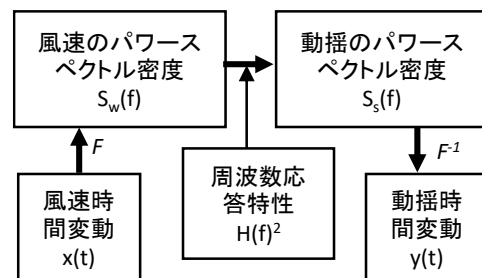


図-2. 動揺の時間変動を再現するアルゴリズム

$F$ はフーリエ変換、 $F^{-1}$ はフーリエ逆変換。

Fig.2. Proposed algorithm that reconstruct the time course of a tree sway

$F$  represents Fourier transform, and  $F^{-1}$  represents Fourier inverse transform.

## IV 結果

### 1.風速とスペクトルの関係

無風状態から 13m/s 程度まで増速する過程 (図-3) における動揺のパワースペクトル密度の変化を図-4 に示す。風速のパワースペクトル密度は高周波数側で値が小さく、風速が大きくなるにしたがって、全周波数帯がほぼ平行に大きくなった(図-4a)。動揺のパワースペクトル密度は風速が大きくなると、0.1Hz 付近と 0.4Hz 付近が立ち上がり、その後に 1.5Hz 付近が立ち上がっていた。0.4Hz は自由振動したときの周波数と同じであり、試料個体の固有振動数である。このように、風速が大きくなると低周波数側から高周波数側に揺れの強度が増していく様子が見られた。更に、風速が 8m/s 以上になると、スペクトル形状がほとんど相似になった(図-4b)。周波数応答特性の

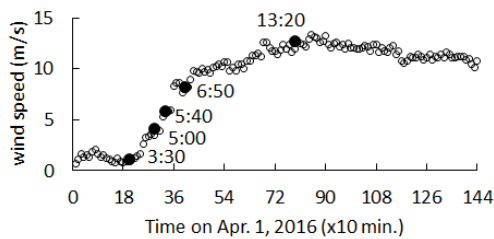


図-3. 平均風速の変化

○ : 平均風速, ● : 図-4 で図示するデータ

Fig.3. Time course of average wind speed

○ : average wind speed, ● : data shown in Fig.4

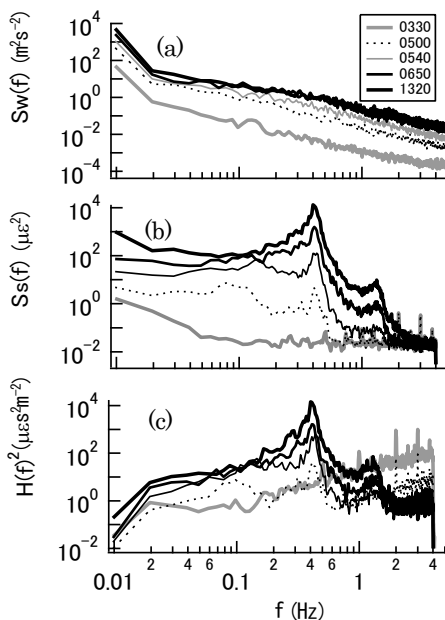


図-4. 図-3 に示した時間における風速(a), 動揺(b), 周波数応答特性(c)のスペクトル

Fig.4. Spectrum for wind(a), sway(b) and Frequency response character(c) in the time shown in fig.3

スペクトルは 0.1Hz 付近の立ち上がりはわずかであり、0.4Hz 付近のピークが明瞭だった(図-4c)。

## 2. スペクトル積分値と風速

パワースペクトル密度の全周波数帯の積分値は平均振幅に相当する。動揺のパワースペクトル密度積分値 ( $\Sigma S_s(f)$ ) は風速が 6m/s よりも大きいとき、周波数応答特性のパワースペクトル密度積分値 ( $\Sigma H(f)^2$ ) の 2.9 乗に比例していた (図-5)。動揺の場合は風速 8m/s 以上の範囲で風速のパワースペクトル密度積分値 ( $\Sigma S_w(f)$ ) の 2.9 乗に比例していた。

## 3. 周波数応答特性のスペクトル形状の推定

風速が 8m/s 以上では動揺のパワースペクトル密度のスペクトル形状がほぼ相似になっていたことから (図-4), 風速 10m/s 以上のときの周波数応答特性のパワースペクトル密度をアンサンブル平均し、スペクトル形状の基準とした ( $H_{std}(f)^2$ )。また、風速の大きい範囲において、周波数応答特性の積分値が風速のパワースペクトル密度積分値の 2.9 乗に比例していたことから、(5)式で任意の  $S_w(f)$  における、 $H(f)^2$  を計算した。

$$H(f)^2 = \frac{4.0 \times 10^{-8} \cdot \Sigma S_w(f)^{2.9}}{\Sigma H_{std}(f)^2} H_{std}(f)^2 \quad (5)$$

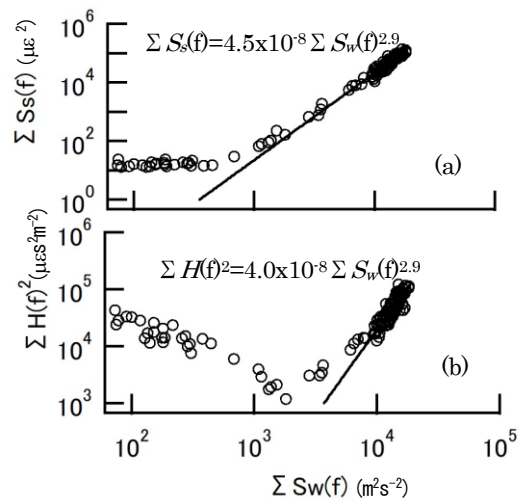


図-5. 風速のパワースペクトル積分値と動揺(a)および周波数応答特性(b)の積分値の関係

Fig.5. Relationship between integral power spectrum for wind and tree sway(a), and frequency response characteristics(b)

## 4. 時間変動データの再現

ランダム位相を付与して動揺の時間変動データを生成する場合、位相が変われば時間変動データも変わる。そこで、10m/s以上の風速であった87データのそれぞれについて、ランダム位相で1000回時間変動データを生成させた。時間変動の最大値の頻度分布をみると正規分布していた(図-6)。一方、現実に記録された動揺データの最大振幅が正規分布のどの位置にあるか、下側確率を計算した。その結果、発生頻度は下側確率0.4を最大に、階級によるばらつきが見られた(図-7)。

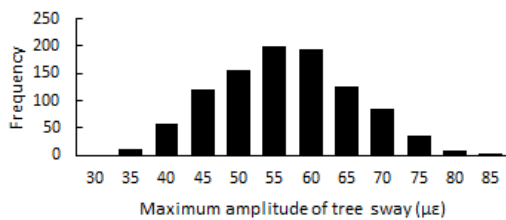


図-6. 反復計算による最大振幅の発生頻度分布

Fig.6. Frequency distribution of maximum amplitude calculated repeatedly

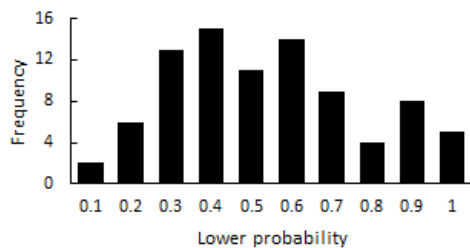


図-7. 測定値の下側確率の頻度分布

Fig.7. Frequency distribution of the lower bound probability of observed data

## V 考察

動揺のパワースペクトル密度と周波数応答特性値の形状を比較すると、林木の固有振動数よりも低い周波数領域では周波数応答特性が相対的に低く、固有振動数よりも高い周波数領域では、周波数応答特性値が相対的に高かった。このことは、風が大きなエネルギーをもつ低周波数領域で動揺への変換効率が低く、逆に固有振動数よりも高い周波数領域では、効率よく林木の動揺に変換されることを示している。このような特性は、風のエネルギーが樹体に及ぼす力学的な影響を回避することにつながっており、外力環境において林木が生存するための一つの戦略とも捉えられる。

風害リスクを評価するには、林木に作用するモーメントを推定する必要がある。時間変動する動揺において、動揺振幅の最大値を推定することと等しい。現実に記録

された最大振幅の下側確率の頻度分布は全階級で一定ではなかった。その原因として、実際の動揺の位相分布がランダムでない可能性が考えられた。本研究で提案した風害リスクモデルにおいては、ランダム位相で複数回発生させた最大振幅に対し、確率点を定めることによって推定値を確定するのが現実的方法である。そのため、実際の動揺の位相分布を検討することにより、さらに動揺の最大振幅の推定精度を高められる可能性がある。また、頻度分布の中央値を設定すれば、平均的に動揺振幅の最大値を再現できると期待できるが、リスク評価においてはおよそ半数で過小評価される。このように、リスク評価にあたっては、林分の生態的あるいは林業経営の重要性を考慮して確率点を決定するのがよいと考えられた。

**謝辞:** 現地観測にあたって、(国研)日本原子力研究開発機構東海研究開発センターの関係各位に多くの協力をいただいた。記して謝意を表したい。本研究は(国研)森林研究・整備機構 森林保険センターからの受託研究「森林気象害のリスク評価手法に関する研究」で得られた成果の一部である。

## 引用文献

- (1) Gardiner AB, Quine PC (2000) Management of forests to reduce the risk of abiotic damage. *Forest Ecol Manag* 135: 261-277
- (2) Peltra H, Kellomäki S, Välsämen, Ikonen VP(1999)A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29:647-661
- (3) 鈴木覚・野口宏典・後藤義明・吉武孝・坂本知己 (2010) 海岸クロマツ林における樹木の動揺の特徴. *海岸林学会誌* 9(2):97-102
- (4) Suzuki S, Sakamoto T, Noguchi H(2016) Wind damage risk estimation for strip cutting under current and future wind conditions based on moment observations in a coastal forest in Japan, *J. For. Res.* 21: 223-234
- (5) 野口宏典・鈴木覚・坂本知己 (2009) 任意の水平方向からの負荷に対する樹幹ひずみの測定方法. *海岸林学会誌* 8(2):80-85
- (6) 石崎澁雄 (1977) 耐風工学, 朝倉書店, 東京, 156pp.
- (7) 金井浩 (1999) 音・振動のスペクトル解析. コロナ社, 東京, 328pp.