

クロマツ海岸林における樹木の動揺の特徴

鈴木覚 1* · 野口宏典 1 · 後藤義明 1 · 吉武孝 1 · 坂本知己 1

Characteristics of tree sway in a Pinus thunbergii Coastal Forest

Satoru Suzuki^{1*}, Hironori Noguchi¹, Yoshiaki Goto¹, Takashi Yoshitake¹ and Tomoki Sakamoto¹

Abstract:We observed the acceleration of stem motion under windy conditions in a *Pinus thiunbergii* coastal forest in Ibaraki, Japan. We aimed to understand the sway characteristics of the trees and of simultaneous movement between trees. Every tree swayed with an obvious spectral peak in field measurements. The frequency of the spectral peak was the natural frequency and same as that observed in free vibration tests. Synchronization was observed between neighboring tree in a NS direction of tree sway. It was suggested that the collision and contact of leaves, branches and stems were avoided or declined by the synchronization of tree sway. The sway amplitudes for wind directions were different. The largest amplitude was observed for wind that had a primary frequency direction.

1 はじめに

海岸防災林は強風環境を反映した独特の偏形がみられるように(村井 et al., 1992), 生育環境のなかでも風環境との関係が相対的に重要である. 風環境と林木との関係をみたとき, 風圧力を受けて樹体内部に生じた応力によって, 樹形の形成が影響を受ける(Morgan and Cannell, 1994; Bruchert and Gardiner, 2006). 周囲の個体との関係としては, たとえば, 風上側の樹木の陰になることで風の影響を防ぎつつ, 一方で光資源を獲得するためには樹高を高めた方が有利であるという, いわゆるトレードオフの関係として風環境に対する適応が生存戦略にもなっていると考えられている(King, 1986).

海岸防災林で特に重要な要素として追加的に考慮しなければならないのは、その立木密度の高さに起因する周囲の個体との衝突や接触である.一般的に、海岸防災林の造成では1万本/ha程度植栽されるため、きわめて立木密度が高く、強風環境下では周囲の個体と衝突、接触が頻発することが予想される.個体同士の衝突や接触は幹、枝、葉に損傷をもたらす危険性があり、個体の維持には不利な条件と考えられる.そこで、本研究では、個体や個体の集合としての振る舞いを動揺として観測し、風環境への応答を明らかにすること、ならびに海岸防災林の維持、形成に関わる機構の一端を明らかにすることを目的とした.

2 方法および観測地概要

観測は(独)日本原子力研究開発機構東海研究開発 センター原子力科学研究所内の村松海岸林において 行った. 観測地付近の海岸線はほぼ南北方向に伸び ており、 汀線から幅 100m にわたる砂浜と標高 10m 程度の砂丘がつづいている. その後方に最大林帯幅 が 800m のクロマツ林 (Pinus thunbergii) が造成され ている. 樹高は林縁から徐々に増加して 100m 内陸 側でおよそ10mである.本研究において、林縁から 内陸に向かって列状に8個体とって動揺加速度を観 測した(表 1). それらを林縁から順に $P1\sim P8$ とし、 P7 と P8 の間には成長の悪い個体が 1 個体あったが 観測対象とはしなかった. P1~P8 において個体間の 地際距離は平均 1.06m (変動幅 0.57m~1.72m) で、 おおむね東から西の方向に P1 から P8 が一列に並ん でいた. 観測地付近を代表する風速および風向とし て、観測地点からおよそ 1500m 離れて設置されてい る, 気象観測装置による地上高 40m の観測値を使用 した. 風向は北東および北西の頻度が突出して高く, 風向別平均風速では北東の風が最も強いので、主と して北東風が海風として海岸林の成長や樹形に影響 していると考えられた(図1-(a),図1-(b)).

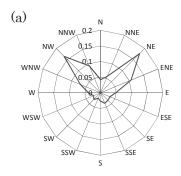
表1:試料の形状

	樹高	地際直径	胸高直径		
	(m)	(cm)	(cm)		
P1	3.3	5.0	4.2		
P2	3.8	3.5	2.5		
P3	4.7	5.0	3.5		
P4	4.5	4.0	3.5		
P5	4.4	4.5	3.0		
P6	5.1	5.0	4.0		
P7	5.3	4.0	3.3		
P8	5.7	4.5	2.6		

¹独立行政法人森林総合研究所

Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan

^{*}Corresponding author : satorusk @ ffpri.affrc.go.jp



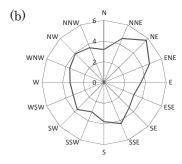


図 1: 観測地の風向発生頻度 (a) および風向ごとの 平均風速(b) (測定期間: 2008 年 1 月 1 日~ 2008 年 12 月 31 日)

動揺加速度は±2G まで測定可能な静電容量式の 2 軸加速度センサー(ADXL311,Analog Devices)を用 いた. 出力にコンデンサを取り付けてローパスフィ ルタ (-6dB/oct) を構成し, 測定帯域を調節することが 可能である. 本研究では 23Hz をカットオフ周波数 とした. 周辺回路やセンサ格納容器を含む加速度計 の総重量をおよそ 50g に抑え、立木の動揺に影響を 与えないよう配慮した. 加速度計は幹の地上高 250cm に、東西および南北方向にセンサーの 2 軸が 対応するように取り付けた.動揺加速度は樹幹の運 動だけでなく、樹幹の傾斜による重力加速度も含ん で検知する.変位と傾斜は同位相で変化し,変位と 運動の加速度は逆位相で変動する. 従って, 重力加 速度と運動の加速度は逆位相になるため、動揺加速 度は運動の加速度よりも小さく測定される. しかし ながら,運動の加速度と重力加速度の振幅の大きさ はほぼ比例すると考えられるので, 動揺加速度は相 対的な動揺の大きさを表していると考えてよい.

まず、2008 年 2 月 21 日に全個体を対象に自由振動試験を行った. 試験は幹の地上 220cm に張ったロープで立木を牽引してたわませ、解放したあとの動揺を 100Hz でデータロガー(es8,TEAC)に記録した. 一部を除いて5回測定し、FFT 法で動揺の周波数応答を解析後、アンサンブル平均を計算した(日野、1977).

次に、2008 年 2 月 21 日から 2008 年 2 月 25 日まで、動揺を連続して計測した. 対象としたのは P1,P2、P7,P8 の 4 個体であった. データは 100Hz で記録した. 記録した信号は、データ長を 1024 とし、データ長の半分を重複させながら次々に FFT 法で動揺の周波数応答を解析し、116 データセットのアンサンブ

ル平均を求めて、それを 10 分間の平均パワースペクトル密度として計算した. また、2 個体のデータを用いて、10 分間のコヒーレンスおよびフェーズを計算した.

3 結果と考察

3.1 固有振動数の測定

外力を加えて幹をたわませたとき、幹の傾斜による 重力加速度を検知するため、加速度計は傾斜方向に よってプラスあるいはマイナスの値を示す.動揺加 速度の時刻歴波形は解放直前に最大の振幅を示し、 解放後は減衰して徐々に 0 になる (図 2).

こうして観測した時刻歴波形を周波数領域に変換 することによって動揺加速度信号を構成する周波数 分布を知ることができる. また, 動揺加速度の時刻 歴波形において, ある時点と数周期経過後の振幅の 比から減衰比を求めた. 海岸林のクロマツは幹が大 きく偏形しているものが多く, 動揺の方向によって 特性が異なる可能性が考えられる. そこで, 東西方 向および南北方向に自由振動させたときの測定値か らパワースペクトル密度を求め、ピークとなる周波 数を計測した(表2).スペクトルピークは一部の個 体に, 方向によって最大 0.1Hz の差がみられた. し かし、スペクトル形状は、いずれの個体、いずれの 方向でもおおむね一山型のスペクトル形状を示した. その頂点の周波数が1次の固有振動数と考えられ、 樹高の高いものほど固有振動数が小さくなる傾向が 見られた. また, 明瞭でないものもあったが, 2~3Hz 付近にも2次の固有振動数と考えられるピークが見 られた (図3). 林木を片持ち梁に見立て, 個体ごと のヤング率を一定と仮定すれば, 固有振動数は $DBH \cdot h^{-2}$ に比例する. 2 方向で測定した 1 次の固有 振動数の平均値は、Moore らが複数の樹種で求めた 関係式ともよく一致していた(図 4)(Moore and Maguire, 2004).

自由振動試験では隣接個体と衝突や接触が発生しないように配慮したが、立木密度が高いため一部の個体では完全には接触を排除できなかった。その影響は減衰比にあらわれており、隣接個体との接触がない場合の減衰比に対して、接触が顕著であったP5とP7の減衰比は2~3倍に増加していた(表2).隣接個体と接触がある場合は、衝突や接触によって動

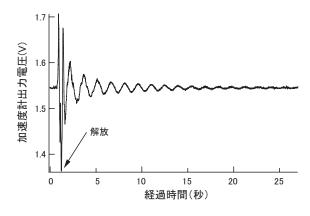


図2:自由振動試験における動揺の時刻歴波形

表2:自由振動試験による1次の固有振動数および減衰比

	動揺方向	n	固有振動数	減衰比	減衰比の S.D.
P1	NS	5	0.98	0.036	0.0031
	EW	5	0.98	0.040	0.0064
P2	NS	5	0.83	0.035	0.0010
	EW	5	0.88	0.033	0.0061
P3	NS	5	0.68	0.039	0.0034
	EW	5	0.78	0.037	0.0038
P4	NS	5	0.64	0.034	c 0.0073
	EW	5	0.54	0.053	c 0.0063
P5	NS	5	0.68	0.087	c 0.0110
	EW	5	0.68	0.092	c 0.0126
P6	NS	5	0.59	0.055	c 0.0075
	EW	5	0.64	0.037	c 0.0090
P7	NS	5	0.59	0.102	c 0.0154
	EW	3	0.68	0.090	c 0.0085
P8	NS	5	0.64	0.065	c 0.0029
	EW	5	0.64	0.034	c 0.0088

c:隣接個体との接触あり

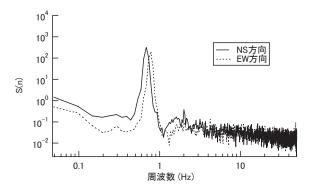


図 3:自由振動試験で計測したパワースペクトル 密度の例 (P3)

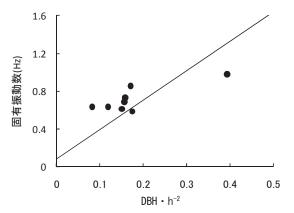


図 4:クロマツの固有振動数 (実線: Moore らが 導いた関係式による直線)

揺が急激に減少するため、減衰比が大きくなったと 考えられた. 隣接個体との接触がない場合の減衰比 は 0.03-0.04 程度であり、Sitka spruce などの値である $0.04 \sim 0.16$ よりも若干小さかった(Moore and Maguire、2004). Moore らの値は樹高 10 m以上のものであり、個体サイズや樹種による相違が考えられた. 隣接個体と接触がある場合の減衰比は Sitka spruce の場合最大 2 倍の増加が報告されているのに対し(Gardiner、1995)、本論は増加の割合が大きかった.本論の対象地は個体密度が大きいため、隣接個体と強く衝突、接触すると予想され、減衰比の増加が大きくなったと推察される.

3.2 自然の風における動揺

自然の風における動揺は、風速が 3.4ms⁻¹ のときはピ ークが認められず,4.0ms⁻¹になると1次の固有振動 数に一致するスペクトルピークが立ち上がり, 風が 強くなるにしたがって低周波数側から盛り上がって 順次高次のスペクトルピークが出現していた. この とき観測した1次以外のスペクトルピークは2~3Hz 付近および 4~5Hz付近であった(図5). これらス ペクトルピークは P7 および P8 のようなサイズの大 きな個体で明瞭であったが、個体サイズの小さい P1 と P2 には 2 次のピークしか観測されなかった. ここ でみられた3次のスペクトルピークは自由振動の観 測結果には表れなかったものである. 自由振動試験 では、隣接した個体との衝突や接触を避けるため牽 引を弱めて解放時の振幅を小さくせざるを得ず,信 号が小さくなって高次のスペクトルピークがノイズ に埋もれて検出できなかったのが原因と考えられる.

観測地は NE 風が卓越し、かつ平均風速も最大であるため、NE 風に適応した林帯が形成されていると考えられる. そこで、NE、SE、SW、NW の4風向における動揺について検討した. なお、同程度の風速でそろえるため、 $5.0\sim5.6 \mathrm{ms}^{-1}$ の時の風向ごとのパ

ワースペクトル密度の全周波数領域における積分値 を計算した(図6).パワースペクトル密度の積分値 は、個体ごとの加速度振幅2乗値の時間平均を表し ており、センサーの取り付け高度である 250cm にお ける動揺の大きさの個体間比較が可能である. P7や P8 は樹高に対して低い位置にセンサーが取り付け られているため、動揺が小さいと予想されたが、P7 にそのような傾向は認められなかった. また、林縁 に位置する P1 よりも P2 の方が動揺が大きかった. 表1に示したように樹高の高いものでも DBH が大 きいとは限らないことに加え,樹高の高いものほど 重心が高く, 風圧力を高い位置で受けることが一因 と考えられる. また, 周囲の個体との位置関係, 大 小関係などによる風あたりの強さの違いも関与して いると推察される.しかし、パワースペクトル密度 の積分値が NE 風のときに最大で、NW 風が最小、 SE および SW 風はほぼ同じ大きさで NE と NW の中 間の大きさであるという傾向は4個体とも一致して いた.NE 風のときの動揺は他の風向よりも突出して 大きく、特に P7 で顕著であった. 風速に大きな差が ないにもかかわらず風向によって動揺の大きさに差 がある原因は、①樹冠の風あたりに風向による差が ある可能性,②特定風向のときに動揺しやすい個体 間関係が形成されている可能性, ③個体の動揺特性 として特定方向の減衰比が小さい可能性が考えられ る. これらのうち、隣接個体と接触がない P1~P3 の減衰比に動揺方向による差がみられなかったこと から、③が第一の原因とは考えにくい。①について 検討すると、たとえば NW や SW 風のような陸風の 場合、樹高が高い陸側の個体が風を遮るので海側の 個体の動揺は小さくなり、NE および SE 風のような 海風の場合は、逆に風を遮るものがなく風あたりが 強くなって動揺が大きくなる可能性がある. ②につ いて検討してみる. 風による動揺は、周囲の個体と 衝突や接触を生じさせる.それによって風のエネル ギーを消費させ、影響を減少させることにもなるが (Rudnicki et al., 2001), 同時に幹, 枝, 葉に損傷をも たらす可能性がある. 海岸林のように立木密度が高 い場合は、衝突しやすい幹、枝、葉は繰り返し損傷 を受け, 互いに干渉しにくい配置, 形態が形成され る可能性があろう. 本論の観測地のように卓越風向 の発生頻度が極端に高く,かつ風速が大きい場合は, 卓越風向のとき衝突しにくい幹、枝、葉の配置にな る可能性ある. その場合, 衝突がないときの減衰比 は小さいため、結果的に動揺が大きくなったと推察 される. 本論では①か②かの特定はできないが、今 後個体、幹、枝、葉の形状や分布と動揺を併せて調 べることによって、原因を明らかにできると考えら れる.

風が吹いたときに隣接個体との衝突を避けるには、動揺を最小限に抑えるか、あるいは周囲と同じように動揺することによって、周囲と相対的な位置関係を保つしかない。ここで、周囲と同じように動揺するとは、風が到達して動揺するまでの時間が同じで、かつ同一方向に互いに比例した量の動揺をすることであり、本論ではこうした状態を同期していると表現する。NE 風について P1 と P2 および P7 と P8 の個体間で、コヒーレンスとフェーズを計算した(図

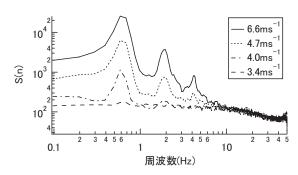


図 5: 風速によるパワースペクトル密度の変化の例 (P8)

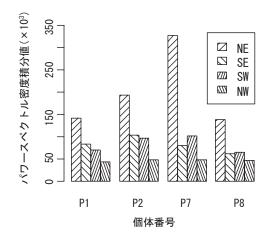


図 6: 風向別のパワースペクトル密度積分値

7). コヒーレンスは周波数領域でみた 2 信号の相関 係数であり、フェーズは2信号間の位相のずれを示 す. NS 方向におけるコヒーレンスは低周波数側から 0.4Hz 程度まで高かった (図 7-(a)). このときのフェ ーズはマイナスなので、NE 風のときに P2 が P1 の 風下になるため位相が遅れたことを意味している (図 7-(b)). 位相のずれ量を検討してみる. 計算時 の 40m 高度における平均風速の NS 成分は 3.8ms⁻¹ なので、風速鉛直分布をべき分布で仮定し、海岸の 一般的なべき乗数である 1/8 を使って樹冠上の風速 を推定すると、およそ3.0ms⁻¹になる.このとき、0.1Hz から 0.4Hz の風は波長が 7.5m から 30.0m に相当する ので、P1-P2 間のフェーズである-16.7〜-27.3°の位相 のずれに相当する風程は 0.47m~1.39m である. 同様 に P7-P8 間で計算すると、1.92m~3.22m である. NE 風に対して個体間距離は P1-P2 間, P7-P8 間それぞ れ 0.7m と 1.4m であることから、P7-P8 間の位相の ずれが若干大きいものの、おおむね現実の個体間配 置に応じた位相のずれが検出された. コヒーレンス が高いので動揺振幅は比例していると考えてよく, かつフェーズの符号や位相のずれ量が現実の個体間 配置を正しく反映していたことから、動揺の方向と 応答時間も等しいと考えられる.従って、P1-P2、 P7-P8 は 0.4Hz 程度よりも低周波数側で同期して動 揺していたと考えられる. なお, 1Hz ないし 2Hz 以

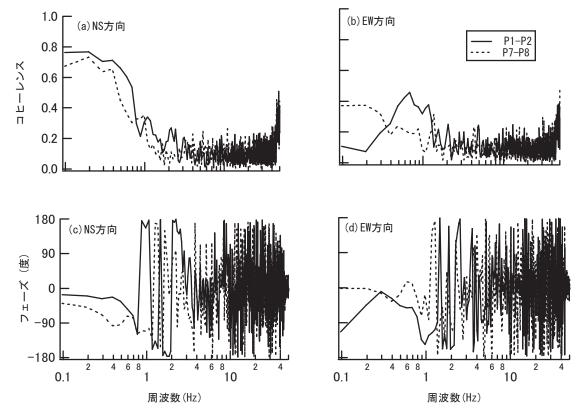


図7:NE風における2個体間のコヒーレンスとフェーズ

上の周波数領域はコヒーレンスがほぼ 0 であり、そ の領域のフェーズは意味を持たない. 一方, EW 方 向では P1-P2 が 0.6Hz を中心にした周波数領域, P7-P8 は 0.3Hz 以下の周波数領域で比較的コヒーレ ンスが大きく, フェーズは P1-P2 が大きく変動して いるのに対して P7-P8 はほぼ 0 であるなど異なる傾 向がみられた.しかし、どちらもコヒーレンスが最 大で 0.4 程度に過ぎなかったことから, EW 方向では 個体間の動きに相関が小さく, 同期した動きは顕著 でないといえる (図 7-(c)および図 7-(d)). 加速度信 号が小さいためコヒーレンスの形状が検出できなか った SW 風を除いて, EW 方向よりも NS 方向のコヒ ーレンスが大きいこと, NS 方向のコヒーレンスが低 周波数領域で大きいことは、SE, NW 風についても 観測された. 従って、測定した2組の2個体同士は NS 方向で動揺を同期させながら、互いの衝突や接触 を回避している可能性が示唆された.

4 まとめ

自由振動試験による 1 次の固有振動数は 0.54Hz~0.98Hz に分布しており、樹高が高いほど低下する傾向がみられた. 自然の風においても自由振動試験で観測された固有振動数をもって動揺していたが、風速が大きくなると、さらに高次の固有振動数の動揺も顕著になっていた.

風向ごとの動揺は卓越風向のときに振幅が大きかった. その原因は特定できなかったが、樹冠への風あたりが卓越風向のときに強いために動揺が大きく

なった可能性,あるいは,卓越風向のときに近傍の 個体と衝突や接触が少ない個体間関係が形成され, 実質的に減衰比が低下した可能性が考えられた.

個体間の関係をみるため、近傍の個体同士の動揺加速度のコヒーレンスとフェーズを2組の2個体間で求めた. どちらも、NS 方向では低周波数領域で同期しながら動揺しており、そうすることによって個体同士の衝突と損傷の発生を抑制して個体の維持が図られている可能性が示唆された.

5 謝辞

現地観測および気象データの取得にあたって,(独) 日本原子力研究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.

引用文献

- [1] Bruchert, F., Gardiner, B., 2006. The effect of wind exposure on the tree aerial architecture and biomechanics of Sitka spruce (Picea sitchensis, Pinaceae). Am. J. Bot. 93, pp.1512-1521.
- [2] Gardiner, B.A., 1995. The interactions of wind and tree movement in forest canopies. In: Coutts, M.P., Grace, J. (Eds.), Wind and trees. Cambridge university press, Cambridge, 485pp.
- [3] 日野幹雄, 1977. スペクトル解析. 朝倉書店, 東京.300pp.
- [4] King, D.A., 1986. Tree Form, Height Growth, and

- Susceptibility to Wind Damage in Acer Saccharum. Ecology 67, pp. 980-990.
- [5] Moore, J., Maguire, D., 2004. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. Trees - Structure and Function 18, pp.195-203.
- [6] Morgan, J., Cannell, M.G., 1994. Shape of tree stems- a re-examination of the uniform stress hypothesis. Tree Physiol, pp.49-62.
- [7] 村井 宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也(Eds.), 1992. 日本の海岸林—多面的な環境機能とその活用. ソフト サイエンス社, 東京.513pp.
- [8] Rudnicki, M., Silins, U., Lieffers, V.J., Josi, G., 2001. Measure of simultaneous tree sways and estimation of crown interactions among a group of trees. Trees -Structure and Function 15, pp.83-90.

〔受付 平成22年9月1日, 受理 平成22年12月10日〕