

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82105

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14764

研究課題名(和文) 樹木間の枝葉の衝突もたらず樹形形成機構の解明

研究課題名(英文) The influence of collision between trees on formation of tree shape

研究代表者

後藤 義明 (Goto, Yoshiaki)

国立研究開発法人森林総合研究所・森林災害・被害研究拠点・拠点長

研究者番号：20353683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：茨城県村松及び愛知県西の浜のクロマツ海岸林を対象に樹木動揺の観測を行った。調査個体は明瞭な固有振動数を持っており、個体間の距離が大きいほど固有振動数の差が大きかった。個体同士は風のエネルギーの強い周波数領域で同時に同じ方向へ揺れることによって、衝突を回避・軽減していた。また、個体間の距離が大きいほど固有振動数の差が大きかったことから、固有振動数付近では、両者の距離に応じて固有振動数を調整することによって衝突を回避・軽減している可能性が示唆された。周辺空間の大きさに応じて個体ごとに作用するモーメントが異なり、空間の大きさに応じて、固有振動数が調整されながら樹形が形成されている可能性が考えられた。

研究成果の概要(英文)：The sway of *Pinus thunbergii* trees was investigated in Muramatsu coastal forest, Ibaraki Prefecture and Nishinohama coastal forest, Aichi Prefecture. The investigated trees showed clear natural frequencies, and the larger the distance between individuals, the greater the difference in natural frequencies. Collision was avoided by swaying in the same direction at the same time in the strong frequency domain of wind energy. Also, it was suggested that the possibility of avoiding or reducing the collision by adjusting the natural frequency according to the distance between the individual in the vicinity of the natural frequency. The moment acting on investigated trees varied depending on the size of the surrounding space. The possibility that the tree shape was regulated in part by the size of the surrounding space through the moment and the natural frequencies was suggested.

研究分野：森林の気象災害防止

キーワード：樹形 強風 衝突 風力 固有振動数

### 1. 研究開始当初の背景

樹形は、幹・枝・葉への資源配分と枝葉の空間分布で表現できる。資源配分はパイプモデルで、さらに空間分布のうち枝葉を伸ばす過程は光資源獲得ペースのモデルで説明できる。しかし、周囲に樹木がある場合は自由に枝葉の延伸はできず、延伸を制限する過程を経て樹形が形成されているはずである。

延伸を制限する過程として、個体同士の境界では生理的メカニズムと物理的メカニズムとによって空間の棲み分けが行われる。生理的メカニズムとは環境の外力に順応して伸長成長や肥大成長を生理的に調整するものであり、接触形態形成と呼ばれる。一方、物理的メカニズムとは風で動揺したときの枝葉同士の衝突であり、時として枝葉の損傷を伴う。

強風時には樹冠投影面積の2割の面積で枝葉が衝突しており、樹木が密集している場合や強風環境では、延伸を制限する要因として物理的メカニズムの寄与が大きいと考えられる。しかし、その生態学的な役割の解明はほとんど進んでいない。

### 2. 研究の目的

孤立した樹木と森林の樹木の樹形が異なるように、森林では他の個体に囲まれているため自由に枝葉を広げられない。個体同士の枝葉が接する境界では生理的メカニズムと物理的メカニズムとによって枝葉の延伸が制御されていると考えられ、そのうち物理的メカニズムである「個体間の枝葉の衝突」を本研究の主題とする。

枝葉の衝突は風による樹木の動揺によって生じることから、本研究では動揺計測を行い振動特性とクロススペクトルから衝突のしやすさを数値化する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 調査地およびセンサー設置

互いに隣接する一団の樹木群に試験地を設定し、それぞれの樹幹にひずみセンサーを取り付けた。自由振動試験で個体ごとの固有振動数を計測し、自然の風環境下の動揺観測で個体ごとの振幅と動揺方向、および2個体間の動揺の相関と位相のずれをクロススペクトル解析で検討した。

樹木動揺観測を茨城県村松海岸のクロマツ海岸林で行った。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。その後方に最大の林帯幅が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いる。そこに3×3の9個体からなる調査木群を設定した(図1)。いずれの個体も樹高はおよそ8mであった。

また、愛知県栽培漁業センター(田原市小中山町一膳松)におけるクロマツ林でも樹木動揺観測を行った。観測地付近はマツ材線虫

病によって上層木がほぼ全滅したあと天然更新した林であった。上層樹高はおよそ6mであった。林内の10個体にひずみセンサーを取り付け、動揺を観測し、各個体に作用するモーメントを計算した。

#### (2) クロススペクトル解析

3×3樹木群内における任意の2個体の動揺からクロススペクトル、コヒーレンス、フェーズを計算した。コヒーレンスから動揺の方向と大きさの相関、フェーズから動揺のタイミングのずれが計測できる。コヒーレンスが十分大きく、フェーズから計算されるずれが個体の位置関係に一致するとき動揺が同一方向へ同時に生じたと判断される。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徐々に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分間の平均スペクトルとして計算した。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。

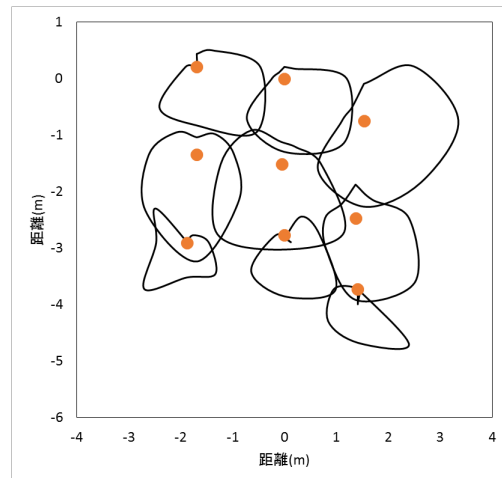


図1 調査木群の配置および樹冠投影図  
 橙色の点が幹の位置を、実線が樹冠を地表面へ投影した輪郭である。

#### (3) 動揺計測

ひずみゲージ(KFG-1-120-D16-23、共和電業)を金属製の治具に貼り付けてひずみセンサーとした。ひずみセンサーは、樹幹の1.3mの高さに北面と西面に一つずつ取り付け、NS方向およびEW方向のひずみを別個に記録した。測定は100Hzでロガー(EDS-400A、共和電業)に記録した。

### 4. 研究成果

#### (1) 調査個体の動揺状況

調査個体を自由振動させたときの動揺を記録し、それをフーリエ変換すると、明瞭な複数のピークを示した(図2)。最も低周波数側に最大のピークを示し、その周波数が調査個体の固有振動数と考えられた。3×3の9個体は0.33Hz~0.49Hzの固有振動数を持つ

ていた(表1)。

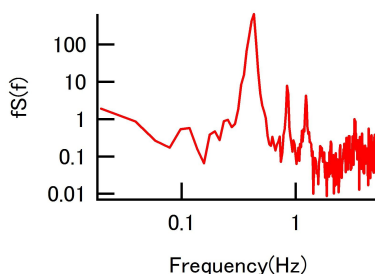


図2 Tree2において観測された自由振動時の動揺スペクトル

表1 調査個体の固有振動数

	固有振動数(Hz)
Tree1	0.46
Tree2	0.44
Tree3	0.46
Tree4	0.49
Tree5	0.45
Tree6	0.46
Tree7	0.33
Tree8	0.38
Tree9	0.36

また、隣接した樹木同士の動揺の関係を検討した。動揺振幅の個体間の相関を見ると、風速変動のエネルギーの大きい周波数領域である0.05Hz以下の低い周波数領域で高く、固有振動数付近ではそれほど大きくなかった(図3)。また、0.4Hz以下の周波数領域では隣接した樹木同士の動揺の時間的なずれを表すフェーズがほぼ0度であったことから、両者はほとんど同時に動揺していると考えられた(図4)。したがって、固有振動数よりも低い周波数範囲では時間的なずれがほとんど無く同じ方向へ動いており、特に風速変動のエネルギーの大きい、さらに低い周波数範囲ではほぼ同じ振幅で同時に動揺していたことがわかった。

以上のことは、特に風のエネルギーの強い周波数領域では互いに同じ周波数で同時に揺れることによって、個体間距離を一定に保って生育していることを示していると考えられた。その結果として枝葉の衝突が回避・軽減されていると考えられ、特に密な林ではこのようなメカニズムを通して樹形が調整されていると考えられた。

一方で、固有振動数付近では、コヒーレンスがおおよそ0.1と小さく、かつフェーズが45°程度であり、0.05Hz以下の低周波数領域と異なる関係が見られた。固有振動数付近は調査個体の振幅が大きい領域であるが、両者の動揺が同時に同じ方向へ生じていた0.05Hz以下の低周波数領域とは異なった戦略がとられて枝葉の衝突が回避・軽減されている可能性が考えられた。そこで、個体間の距離と固有振動数との関係を検討することとした。

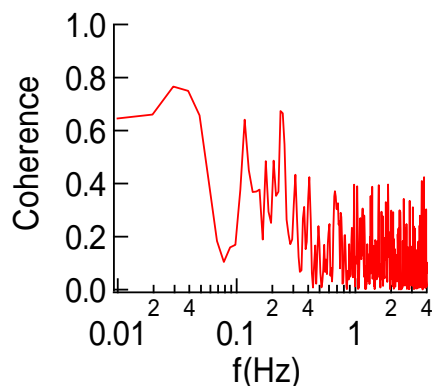


図3 調査個体同士の動揺のコヒーレンス

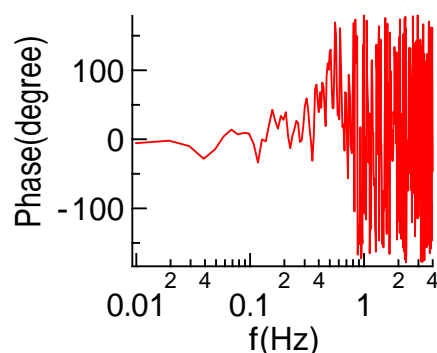


図4 調査個体同士の動揺のフェーズ

## (2) 個体間の距離と固有振動数

隣接した個体同士に固有振動数( $f_n$ )に差があると、振動周期が異なるためばらばらに動揺して互いに接近しあう瞬間が生じ、両者が衝突する可能性が高まる。このことは、個体間の距離が大きい場合、互いの固有振動数を近づける必要性は少なく、逆に個体間の距離が小さいほど互いの固有振動数を揃えて風などの外力に対して同時に往復運動することによって互いの衝突を回避する必要性が生じることを意味する。この仮説が正しいならば、個体間距離と固有振動数の差には相関が見られるはずであり、個体距離が大きいほど隣接個体同士の振動特性に差が大きいと予想される。そこで、個体間距離と個体間の固有振動数の差を検討した。その結果、決定係数( $r^2=0.25$ )は大きくないものの、個体間距離が大きいほど個体間の固有振動数の差が大きくなる傾向が見られた(図5)。ここで、個体間距離に関わらず固有振動数に差のほとんど無い個体も見られた。固有振動数は個体のサイズ、材質、質量分布で決まるため個体ごとの生存戦略を反映して固有振動数に差がみられた個体があった一方で、観測対象のクロマツ林は同時に植栽されたため、固有振動数が揃いやすい状況があったと考えられ、そうした状況が反映されたものと考えられた。

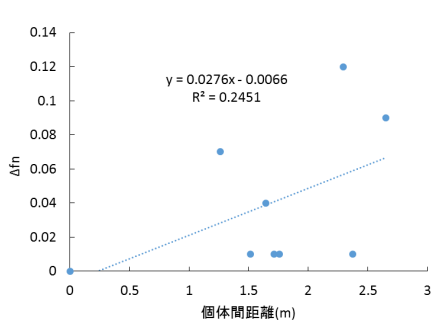


図5 個体間距離と固有振動数の差

### (3) 個体間の距離と作用するモーメント

倒木等によって生じた空間がなく、伐採等による人為的な変更もない場合、個体間の距離と作用するモーメントとの関係を検討した。その結果、各調査個体に対して風上側の隣接木までの距離と調査個体に働いたモーメントとの関係には相関がみられなかった(図6)。一方で、各調査個体に対して風下側の隣接木までの距離と働いたモーメントとの関係には、弱いながらも相関がみられ(図7)、隣接木までの距離が大きくなるほどモーメントが小さくなっていった。

Uniform stress theory によれば、作用した応力の分布が均等になるように樹木は成長するとされており、各調査個体に作用したモーメントは樹形形成に影響するはずである。このことは、隣接木との距離によって成長が異なる可能性があることを示している。以上のことは、図5において個体間距離があるほど固有振動数に差が見られたことを成長の面から捉えたものといえる。

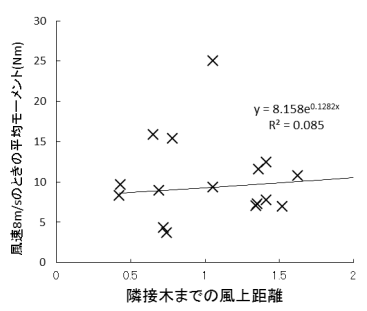


図6 調査個体の風上側の隣接木までの距離と作用したモーメント

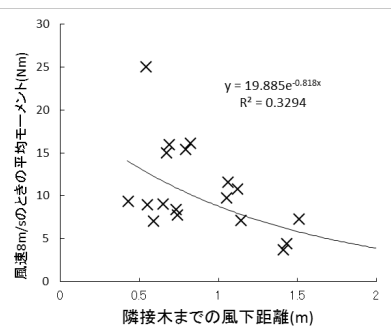


図7 調査個体の風下側の隣接木までの距離と作用したモーメント

### (4) まとめ

各調査個体は明瞭な固有振動数を持っていた。さらに、個体同士の動揺の関係を検討したところ、風のエネルギーの強い周波数領域で互いに同時に同じ方向へ揺れることにより、衝突を回避・軽減していた。一方、固有振動数付近では、両者の距離に応じて固有振動数を調整することによって衝突を回避・軽減している可能性が示唆された。

周辺の空間と力の関係において、風下側隣接木との距離が大きいほどモーメントが小さかった。このように周辺個体との位置関係によって、局所的に作用するモーメントが異なっており、それが樹形の違いをもたらしている可能性が考えられた。

以上のように、周辺空間の大きさに応じて個体ごとに作用するモーメントが異なり、互いに異なる固有振動数をもちながら樹形を形成している可能性が考えられた。衝突を回避できるように樹形形成されるのであれば、空間の大きさや個体のサイズに応じた許容される固有振動数の差があると考えられ、その範囲内において樹形形成が調整されているはずである。許容される固有振動数の差の存在を示すことによって樹木の動揺と個体間関係の樹形形成への影響をさらに明確化できると考えられる。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

SUZUKI Satoru、SAKAMOTO Tomoki、NOGUCHI Hironori、Wind damage risk estimation for strip cutting under current and future wind conditions based on moment observations in a coastal forest in Japan, Journal of Forest Research、査読有、Vol.21、2016、doi:10.1007/s10310-016-0539-0

〔学会発表〕(計1件)

鈴木 覚、林建二郎、樹木に作用する流体力とその重心位置の測定手法に関する検討、平成28年度日本海岸林学会三沢大会、平成28年10月6日～10月8日、三沢市公会堂(青森県三沢市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤 義明 (Goto, Yoshiaki)

国立研究開発法人森林総合研究所・森林災害・被害研究拠点・拠点長

研究者番号: 20353683

(2)研究分担者

鈴木 覚 (Suzuki, Satoru)

国立研究開発法人森林総合研究所・森林防災

研究領域・室長

研究者番号： 50353735