

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14937

研究課題名(和文)なぜ多層林は風害に強いのか？葉分布構造の変化履歴と樹木振動工学・風力学の統合

研究課題名(英文) Why uneven-aged stands are resistant to wind damage? Integration of canopy dynamics, vibration engineering and wind dynamics

研究代表者

水永 博己 (Mizunaga, Hiromi)

静岡大学・農学部・教授

研究者番号：20291552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：多層構造を持つ異齢林は風害を受けにくいことが報告されているが、その科学的な根拠は十分とはいえない。現在開発されている風害力学モデルは単層林を対象としており、多層林に適応できる風害力学モデルが重要となる。本研究では、多層林を含む多様な森林構造に適用できる風害リスク評価モデルの構築に貢献することを目的とした。このため、多層林を含む様々な林冠構造の把握と林冠構造と風速および個体成長プロセスのリンケージ、風害被害の伝播形態予測、様々な樹冠構造を持つ個体抵抗性の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：There is a long argument that vulnerability against strong wind in uneven-aged forests is less than that in even-aged forests, but few scientific evidences have been found yet. Such limited findings do not sufficiently lead to the conclusions of beneficial aspects in uneven-aged forests in order to reduce wind damage. To overcome the weakness of epidemiological approaches the mechanistic models for the wind damage have developed. However the models have targeted to the simple structured stands, but so far there is no model for complex structured stands. Our objectives are to contribute the the suitable mechanistic model for evaluating the risks in various forest types including uneven-aged forest. We linked the canopy topography, growing process of trees and wind velocity distribution, established the model for the propagation process of damages in the stand, and evaluated the resistance of trees including various crown architectures.

研究分野：造林学

キーワード：多層林 林冠 風害 伝播 振動

## 1. 研究開始当初の背景

地球スケールでの気候変動により極端な突発気象現象が増加する可能性が高いとされている (IPCC5)。熱帯ストームの頻度は減少するものの、大型のストームの数が増加することが予測されている。このように、気候変動による台風の大型化が懸念される中で、風害に強い森林構造の解明は重要である。

欧州では一斉林に比較して多層構造を持つ異齡林は風害を受けにくいことが報告されている (Ruel 2010, Hanewinkel et al. 2014) が、同時に彼らはこの結果の不確かさがあることも指摘している。

このような多層構造の森林の風害を経験的な観察で比較することは、イベントの稀な減少であることや、関与する外部要因・内部要因の多様であることなどの理由から明確な答えを出すことは困難である。

現在開発されている Forest-Gales

(Gardiner 2008) などの風害力学モデルは単層林を対象に開発されたものであり、単純な林冠構造にしか適用できない (Mitchell 2013)。すなわちメカニスティックなアプローチも現状では複雑な林冠構造の森林に適用できないため、多層林が持つ風害抵抗性のメカニズムは謎のままである。

## 2. 研究の目的

本研究では、多層林を含む多様な森林構造に適用できる風害リスク評価モデルの構築に貢献することを目的とした。この目的達成のために、次の3つの評価モデルの開発を狙いとした。さらに、メカニスティックモデル以外の方法として観察データの解析から、多層林の風害抵抗性を検証した。

(1) 森林の風害抵抗性は個体の成長プロセスの結果生じる個体抵抗性と林冠の凹凸による風速の緩和の両面から検討する必要がある。多層林の複雑な林冠構造は樹木個体の成長プロセスの結果生じたものであり、個体の成長は複雑な林冠構造が創出する微気象の影響を強く受ける。すなわち多層林では葉の分布構造と森林内の個体の成長プロセスと森林内の微気象が互いに密接にかかわりあっている。このため、三者をリンクした解析が必要になる。そこで複雑な葉分布構造を評価することで、森林内の微気象と樹木の成長配分を同時に予測するモデルの開発を狙いとした。

(2) 強風時の被害がどのように始まり連鎖 (拡大) していくのかという短期間の動的プロセスの分析が限られているため、被害推定の精度が向上しないという問題点が指摘されている。しかし膨大な計算処理が必要であるため、多様な林分の空間配置などを考慮した解析は少ない。そこで森林内の被害の伝播を効率的に予測するモデルを開発することを狙いとした。

(3) 個体の風害抵抗性を評価する場合、従来の森林風害推定力学モデルでは、樹木のしなりや、樹冠形状の変形が考慮されていない問題点があった。経時的な風速変動に伴う樹木の変形や受風面積の変化は耐風性に変化を与えるはずである。そこで幹のヤング率を組み込んだ樹木の挙動をシミュレーションすることで、耐風性を予測するモデル開発を狙いとした。

また多層林のような複雑な林冠構造の森林では、葉分布や幹構造が多様な個体で構成される。また単層林であっても、造林履歴に伴う葉構造や幹構造が異なる。森林管理に伴う樹木の成長過程の違いによって風害リスクがどのように変化するかを明らかにすることはリスクヘッジにおいて重要な情報である。そこで樹齡とアロメトリーに基づいた葉分布や幹構造の異なる樹木を再現することで耐風性を評価するモデルを開発した。

## 3. 研究の方法

(1) 三次元葉分布構造の測定と微気象及び個体成長プロセスの評価：地上レーザースキャナーを用いて葉分布の三次元構造を測定した。様々な森林タイプの測定を目指して、針葉樹単層林、針葉樹多層林、落葉広葉樹林、熱帯モンスーン林などで測定を行った。解析ユニットは 20cm~60cm 立方のボクセルとして、葉面積密度を計測した。

スロベニアの Silver fir と Norway spruce の混交林および岐阜県関ヶ原町のスギ・ヒノキ林において構造の複雑さの異なる針葉樹林のレーザースキャンデータを用いて、森林内の光三次元マップを作成し、多層林における稚樹と上木の成長過程を明らかにした。

さらに静岡大学天竜フィールド内の樹齡や局所密度の異なるヒノキ人工林を対象に調査を行った。まず、UAV による林分の空撮画像から SfM (Structure from Motion) ソフトによって林冠地形の DSM を 0.2m ユニットで作成し、その上部の風速分布の経時変化を LES (Large Eddy Simulation) ソフトにより予測し、風圧や風速勾配の変化を予測した。地上レーザースキャンによる樹木位置、胸高直径、林冠サイズの測定や FAKKOP によるヤング率の測定などから得られたパラメータを組み合わせて個体の風害抵抗性を計算し風害発生予測を行った。

(2) 森林内の被害の伝播と立木配置による森林の脆弱性の評価：ゲーム理論やコンピュータサイエンス技術等を統合した Agent-based modelling 手法に既存研究から得られた森林被害に関する理論および風況パラメータを組み込み、森林風害の発生と連鎖のシミュレーションを行った。

ゲームのルールとして、立木エージェントと強風エージェントを想定し、「1: 立木が被害を受けると、その風下側にある立木が脆弱になる。2: 個体の風上側が全て除去される

と林縁木以外は必ず倒れる。3：強風エージェントは樹木にあたると被害を起こす力が弱くなる。」の三つを仮定して 500step を計算を 200 回繰り返して計算した。

(3) 樹木の耐風性の評価：基礎となる樹形データをヒノキ立木 6 本の地上レーザースキャンにより取得した。得られた点群を基に、幹は長さ 50cm 以下の円柱セグメントの積み上げとして、樹冠部は植物面積密度を付与した 20cm ボクセルの集合体としてモデル化した。樹冠全体で受ける風荷重を基に幹セグメントにかかる回転モーメントを算出し、多自由度の振動方程式を解くことで経時的な樹木変形を再現した。幹にかかる応力の計算から、幹折れ及び根返りが起きる限界風速を求めた。幹の形質、樹冠幅、植物面積密度、曲げヤング係数、抗力係数などを変化させた数値実験を行い、高い耐風性を実現するための樹形や力学特性を抽出した。

さらにヒノキを対象に、樹齢とアロメトリーに基づいた形質に適度にばらつきを持たせて樹木を生成し、樹木の経年成長が耐風性に与える影響を評価した。樹木は、樹齢 10 ~ 70 年において 5 年刻みに、1000 本ずつ生成した。樹木生成は、幹（樹高、形状比、細りを付与）、樹冠形状（立木密度の影響を踏まえて陽樹冠形状、枝下高、樹冠幅を付与）、樹冠内の枝葉分布（植物面積密度を付与した 20cm ボクセルの集合体として表現）の順に行った。幹を円断面の片持ちテーパ梁と仮定し、樹冠全体で受ける風荷重と樹冠重量から樹木の風によるたわみを算出し、幹にかかる応力の計算から幹折れ及び根返りが起きる限界風速を求めた。これらの計算に基づき、樹木の成長に伴う風害リスクの変化を示しつつ、風害リスクを低減するための樹木形質の抽出を行った。

(4) 観測値を用いた統計解析：カナダ・ケベック州の Black spruce と Balsam fir の混交林において、2006 年に発生した風害被害について解析した。異齢林 21 プロット、同齢林 22 プロットを比較し、K 平均クラスター手法でプロットを 3 区分した後、ロジスティック回帰分析を行った。

#### 4. 研究成果

(1) 三次元葉分布構造の測定と微気象及び個体成長プロセスの評価：地上レーザースキャン法による葉の三次元分布測定法を様々な森林タイプに適用した。森林タイプの異なるスロベニアの植物体面積密度の縦断面図を図 1 に示した。同齢林タイプの森林は林冠層が水平的に連続するのに対して、択伐林タイプでは葉層は水平的には不連続であり垂直方向に幅広く分布していることがわかる。同齢林タイプの吸光係数は択伐林タイプの 2 倍から 3 倍で、林床の相対照度は 5% 未満であった。一方で択伐林タイプでは 15% 以上の相

対照度と予測された。多層林は同齢林より多くの葉面積指数を有していたにもかかわらず、葉層の水平方向のクラスター化に起因して林床は明るかった。すなわち多層林のクラスター構造が森林の持続的更新を担保していた。

群状伐採がおこなわれたヒノキ林の林冠トポグラフィーを UAV 画像から再現した。林

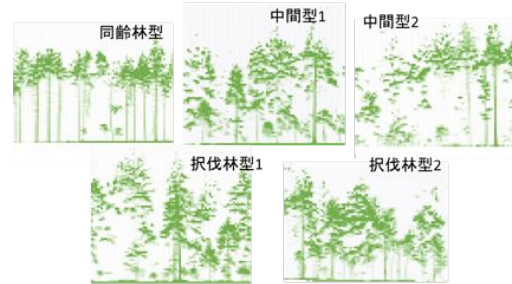


図-1 スロベニア異齢林の植物体面積密度縦断面図

冠トポグラフィーと数値流体力学モデル LES をリンクして林冠表面上の風速を予測した（図 2）。風速分布に群状伐採のギャップの影響は大きくなかった。壁が多い山岳地形ではギャップの風速分布に及ぼす影響はマスクされたためであった。すなわち林冠構造の風速分布に及ぼす影響は、森林が成立する地形次第で貢献度が異なることを示している。

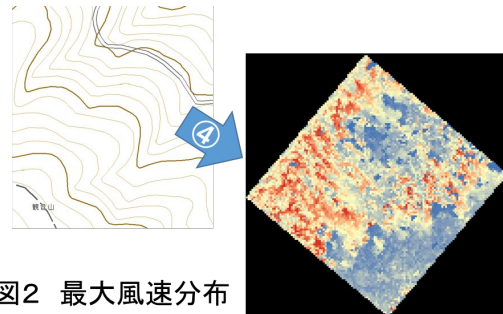


図2 最大風速分布

(2) 森林内の被害の伝播と立木配置による森林の脆弱性の評価：ゲーム理論による森林の伝播の状態を予測した（図-3）。単層林の場合、林縁での耐風性が高く、林縁から林内への距離が長くなると被害までに要する

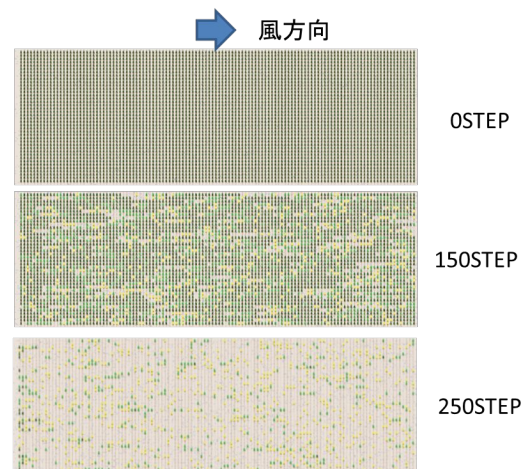


図3 被害の伝播予測

色が淡くなるほど健全度エージェントが小さくなる

時間は短縮し、耐風性が低下したことを示した。このことは樹木の個体抵抗性に関わらず樹木の位置が被害のあるなしに影響をすることを示唆した。この傾向は、風洞実験や野外計測結果と類似していることから、動的プロセスに着目した風害発生メカニズムの解析について本手法は有効であることが示唆された。また、風向に対し立木の配置を変えると、被害の発生場所や連鎖状態が異なることが確認された。

(3) 樹木の耐風性の評価：長さ0.2mの円錐体セグメントの集合体として、経時変化する風速に対応した樹木動揺を再現した(図-4)。

この結果、直径と樹冠のサイズのアロメトリーが個体に被害をもたらす限界風速と関係が深いことを力学的観点から明らかにした(図-5)。

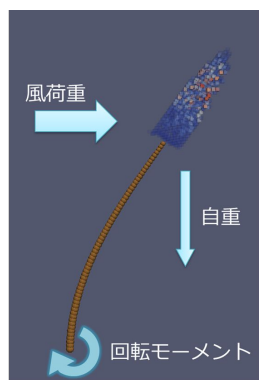


図4 樹体振動モデル

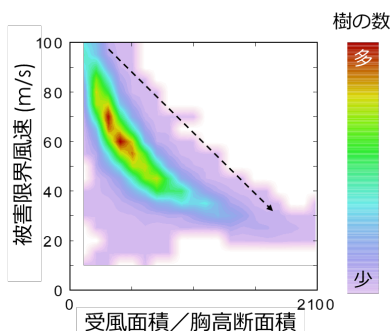


図5 限界風速と受風面積の関係

樹形のアロメトリーを反映した片持ちテーパー梁による静的な耐風性の評価では、林齢に伴って個体の抵抗性が低下し、高齢では幹折れの限界風速が転倒の限界風速より小さくなった。また個体の耐風性に関与する要因として、従来から用いられている形状比の有効性が確認された。

(4) カナダ・ケベック州での被害データの解析結果、密度が高い森林では多層林の細長い個体は単層林のそれよりやや被害を受けやすかった。多層林由来の個体の耐風性が優れるケースは、十分に個体が露出した場合であると考察した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Mochizuki, T., Marod, D., Trieu, D.T., Mizunaga, H. 2018 Interspecific differences in the hierarchical cluster structure of leaves within tree crowns in Indochina, *Tropics* 27. 1. 1-24 査読有

DOI:10.3759/tropics.MS17-07

Kamimura, K., Barry A. Gardiner, Shinya Koga 2017 Observations and predictions of wind damage to *Larix kaempferi* trees following thinning at an early growth stage. *Forestry* 90:4-1:530-540 査読有  
DOI: 10.1093/forestry/cpx006

Takaharu Mochizuki and Hiromi Mizunaga 2016 Evaluation of Three-Dimensional Leaf Distribution within a Closed Canopy Based on Low-Cost Laser Scanning Data during Leafless Season *Journal of Forest Planning* 21: 1-11 査読有

[学会発表](計 9 件)

南光一樹・鈴木覚・勝島隆史・南野亮子・上村佳奈・水永博己 アロメトリーに基づく樹木生成を通じたヒノキの耐風性の経年変化の推定 2018年 日本森林学会

小谷野開多 水永博己 林冠トポグラフィに基づく風害リスク評価 SfM技術とLESのリンケージ 2018年 日本森林学会

Kamimura, Kana・Waldron, Kaysandra・Carl, Bergeron・Ruel, Jean-Claude・Mizunaga, Hiromi 北方異齢林における風害 2018年 日本森林学会

水永博己 大きい林分材積成長量と明るい林床の折り合いのつけかたを探る。 2017年 日本森林学会

南光一樹 鈴木覚 藤島隆史 南野亮子 上村佳奈 水永博己 樹木の耐風性に及ぼす樹形や力学特性の影響についての数値実験 2017年 日本森林学会

上村 佳奈 ゲーム理論による森林風害連鎖メカニズムの解明 2017年 日本森林学会

Hart, E., Sim, K., Gardiner, B., Kamimura, K. A hybrid method for feature construction and selection to improve wind-damage prediction in the forestry sector. 2017年 The Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)

Mizunaga Hiromi Does complexity of

leaf arrangement moderate the impact of drought stress? 2016年, 10<sup>th</sup> IUFR01.05 International workshop on Uneven-aged silviculture.

Nanko, K. Simulation of dynamic tree sway based on physical vibration theory. 2016年, Plant Trait Workshop, Interdisciplinary German-Japanese Symposium, iJaDe

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等  
なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

水永 博己 (MIZUNAGA, Hiromi)  
静岡大学・農学部・教授  
研究者番号: 20291552

### (2)研究分担者

南光 一樹 (NANKO, Kazuki)  
国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所・森林防災研究領域 気象害・防災林研究室・主任研究員  
研究者番号: 40588951

上村 佳奈 (KAMIMURA, Kana)  
信州大学・農学部・助教  
研究者番号: 40570982

内田 孝紀 (UCHIDA, Takanori)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号: 90325481

### (3)連携研究者

### (4)研究協力者