

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H03024

研究課題名(和文) 強風雨時に発生する立木倒伏の動的メカニズムの解明とモデル構築

研究課題名(英文) Analyzing and modeling for dynamic mechanism of tree failure caused by strong wind and rain

研究代表者

上村 佳奈 (Kamimura, Kana)

信州大学・学術研究院農学系・准教授

研究者番号：40570982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：近年、大型台風などによる甚大な森林被害は国内外で毎年報告されている。しかし、森林内の立木がどのように破壊(倒伏や幹折れなど)されるのか、そのメカニズムは解明されていない。本研究では、立木の地上部(樹幹)、根、根周辺の土壌の振動と変位、及び降雨・風速・風向を同時に観測することで、倒伏要因の解明を試みた。その結果、風圧に対する立木の力学的な応答が明らかになった。特に立木はまず樹冠を振動させることで根元まで到達するエネルギーを抑制していた。また立木を支持する力学的に優勢な根の存在が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は強風に対する立木の力学的反応について、地上部だけでなく地下部も含めた包括的研究を実施した。これまで立木倒伏の動的、力学的メカニズムは、地上部のみで議論されることが多く、地上下部(樹冠、樹幹、根)を含めた包括的なメカニズムを明確にしたことに本研究の学術的意義がある。また本研究結果から立木倒伏に関する新たな知見を提示することができ、風害を軽減するための森林管理に寄与できることに社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Catastrophic wind damage in forests has been reported not only in Japan but also in other countries. However, how trees in forests are damaged by winds remains unknown. Our research aimed to understand the mechanism of tree damage (uprooting) in forests focusing on tree oscillation by winds. We attached the strain gauges and IMU sensors to the tree stems, roots, and soil, which provided the dynamic behavior of tree during strong winds. We found that swaying the crowns reduced the impact from wind, and then less energy reached to the roots. We also found dominant roots, which mechanically support a tree to prevent uprooting.

研究分野：森林科学

キーワード：森林風害 立木振動 根系支持力 耐風性 台風

1. 研究開始当初の背景

近年、大型台風やハリケーンなどの突発的気象現象による大規模な森林被害が国内外で発生している。日本では、2004年に約48千ha(被害額342億円)、2018年には2.5千ha(被害額20億円)の森林が破壊され(林野庁発表「林野関係被害の発生状況」より)、2019年の台風15号ではこれまでに経験したことのない強風と降雨によって、千葉県を中心に甚大な森林被害が発生した。このような森林風害は欧州でも温帯低気圧による強風により増加傾向にある。さらに地球温暖化の影響で台風などの熱帯低気圧の変性が予測されており、森林被害は更に甚大になると予想される。今後はこれまで台風の被害が少なかった地域にも被害が発生する可能性もあり、強風雨による森林被害発生の解明は国内外において緊急に取り組むべき課題である。

一方、森林風害に関する殆どの既存研究がやや強い風での樹幹上1~2点の観測のみで議論しており、さらに実際に破壊が発生する根系を考慮した研究は皆無であるため、「なぜ風によって立木が倒伏するのか」という根本的なメカニズムの解明には至っていない。

2. 研究の目的

本研究は、台風などで発生する強風雨による立木破壊(倒伏)の動的メカニズムの解明を目的とした。特に樹冠から根元への振動の伝達プロセスの解明、立木周辺土壌の崩壊プロセスの解明、立木の倒伏メカニズムの解明とモデル化、を中心に研究を実施した。

3. 研究の方法

観測プロットを森林総合研究所・千代田試験地(茨城県かすみがうら市)の1995年に植栽された26年生のスギ(樹高約20m)5本(A~E)を対象として設置した。

2020年秋に立木の振動を観測するため、木の地上(樹幹)・地下部(根)にひずみゲージを設置した。また樹幹の地上高6mの位置及び根の周辺土壌に慣性計測装置(IMU)を設置した。根系については土壌を破壊せずに目視で確認できないため、まず地中レーダを使って対象木の根を地表面から探索し、根に設置するひずみゲージと土壌に埋没するIMUセンサーの位置を決定した(図1)。これらのセンサーからは5Hzでデータを収集した。降雨からの振動への影響と土壌中の含水率による根鉢(根と周辺土壌)の崩壊程度(土壌の動き)を観察するため、雨量計を設置し、さらに土壌水分センサーを用いて異なる深度と樹幹からの距離毎に土壌の含水率を計測した。プロット横にある観測タワーの地表から22mの高さ(樹冠上)に超音波風速計を設置した(10Hzでロギングを実施)。

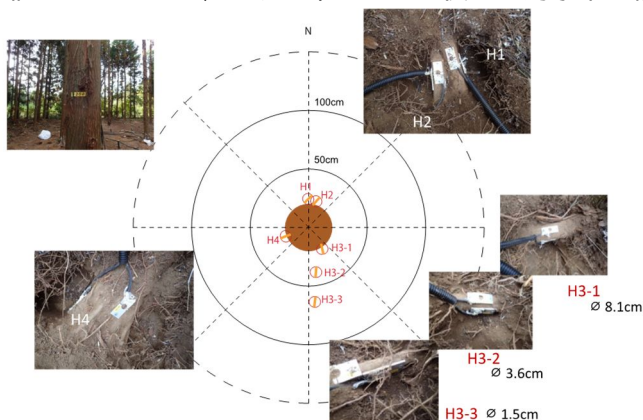


図1 対象木Dの主要な根の位置、及び根に設置したひずみゲージ

対象木の成長により樹幹や根に設置したひずみゲージの反応が変化する。そのため、毎年木の成長が止まった後(秋)に対象木5本全てについて、ワイヤーを樹幹(高さ3mの位置)にかけて8方向(北、北東、東、南東、南、南西、西、北西)に5段階の力で引っ張り、かかった力に応じた樹幹と根の歪み(ひずみゲージからの出力)を計測し、根元の回転モーメントを算出した。回転モーメントとひずみゲージからの出力は直線関係にあるため、この結果を元に観測で得たひずみゲージからの出力を回転モーメントへ変換した。

ひずみゲージからの出力はノイズが多いことから、まずハイパスフィルターを使ってデータを処理した。次に処理データを10分毎にスペクトル解析し、立木の振動周期立木全体の風に対する応答を明らかにしている(現在、計算中)。IMUセンサーの出力についてはオイラー角を使ってセンサーの姿勢のずれを調整し、樹冠下部の位置情報を得た。さらにプロット内の5本それぞれに風がどのように当たるのか、流体シミュレーションによって明らかにした。

4. 研究成果

(1) 根元の回転モーメントに対応した根の反応

観測木を8方向に5段階の力で引っ張り、かけた力と樹幹の傾きから計算した根元の回転モーメントと根の反応（ひずみ具合）を解析した。図2は対象木Dの樹幹を北方向へ引っ張った時に生じた根元の回転モーメントと根のひずみ具合を表している。H3-1、H3-2、H3-3は同一の根であるが、樹幹からの距離が異なる（図1を参照）。

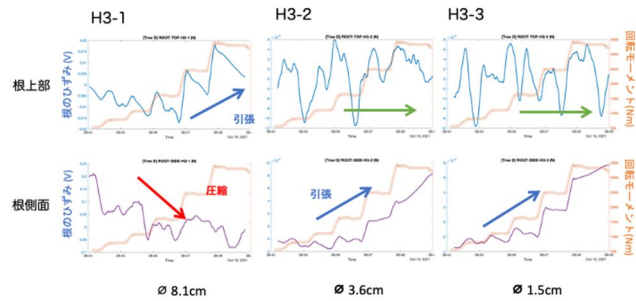


図2 対象木Dの樹幹を北方向へ引っ張った時の、根元の回転モーメントの増加に応じた根H3の上部および側面のひずみの変化（ひずみゲージからの出力値（V）を使用）

このような試験を全対象木で実施した結果、同一の根でも部位により圧縮力、引っ張り力、または無反応が混在していた。また根の上部と側面においても部位及び引っ張る方向によって多様な反応を示した。さらに全ての観測木の結果を解析したところ、どの方向の力がかかってもほぼ必ず反応する根の存在を確認した。このことから、力学的に優勢な根の存在が示唆された。

本結果の一部は、上村佳奈, 南光一樹, 勝島隆史, 平野恭弘, 谷川東子, 石川仁 (2022) 立木根鉢の風に対する力学的反応. 第133回日本森林学会大会 において発表した。

(2) 数値解析による樹木群周りの流体力学的解明

5本の対象木周辺の空気の流れ場について、数値解析（Computational Fluid Dynamics: CFD）手法により解明した。具体的にはまず対象木の位置と大きさ（およその樹高、直径、樹冠長さ）から計算環境を作成した。数値計算コード OpenFOAM を用い、公開コード RAMS を使った定常計算から、風向、風速が及ぼす速度分布、圧力分布、抗力を算出した。

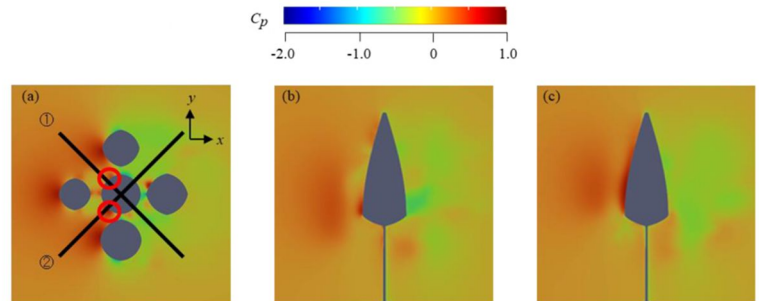


Fig.3 Pressure distribution (10 m/s, $\alpha = 0$ deg, $z = 10$ m) (a)XY plane, (b)cross section 1, (c)cross section 2

図3 主流速度 10m/s に設定した場合の圧力分布

結果として、隣接する立木間の距離が短い場合は下流に向かって流れる風速が増加するため、下流側に位置する立木への圧力も増加した。また風向に対して立木の位置が対称である場合、上流側に位置する立木の樹冠サイズが、下流側に位置する立木の抗力係数を決定する要因となることが明らかになった（図3）。

この結果は、北瀬尚士, 上村佳奈, 西尾悠, 石川仁 (2024) 数値解析による樹木群まわりの流体力学的解明. 日本機械学会関東学生会第63回学生会卒業研究発表講演会にて発表した。

(3) 立木振動および樹幹傾倒データを用いた立木倒伏メカニズムの解明

本研究の観測プロットと同じ試験林内の観測プロット（科研費基盤研究(C)17K07836）において、樹幹部のみにひずみゲージ、IMU センサーを設置し、立木上部の振動観測を実施した。観測期間中に大型台風24号（2018年）が発生し、観測プロット内に倒伏被害が発生した。

倒伏時の立木振動を解析した結果、樹冠同士の衝突程度により風を受けた際の振動エネルギーが減衰し、倒伏が起こりにくくなることが示唆された（図4）。また立木は風を受けて振動するものの、その振動周期は一定ではなくある程度の周期範囲で発生していた。しかし台風の強風によって倒伏する際はその範囲から外れ、風の振動

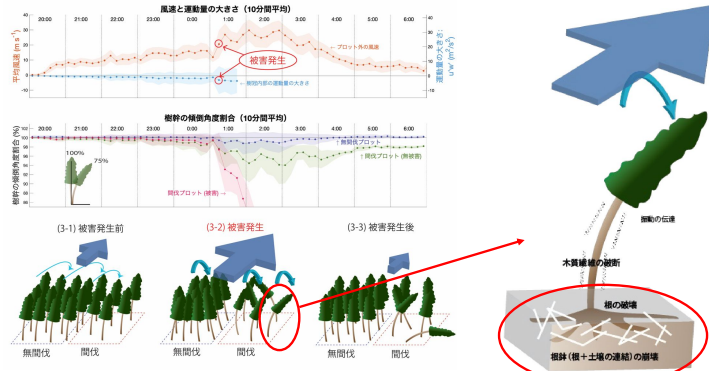


図4 2018年台風24号の強風により観測プロットに被害が発生した時の風速と観測木の傾倒程度

周期に近づいたことが明らかになった。また倒伏時の根元の回転モーメントを解析した結果、力学的に優勢な根の破断または集団の根の破断が発生していたことが確認できた。この研究結果は、本研究課題の地下部の振動観測へと連結し、今後両観測データを解析することで力学的に優勢な根を明確にできる。

本結果は、Kana Kamimura, Kazuki Nanko, Asako Matsumoto, Saneyoshi Ueno (2023) Dynamic behavior of trees during 1.5-year observation. IUFRO 8.03.06: The 10th International Wind and Trees Conference 及び Kana Kamimura, Kazuki Nanko, Asako Matsumoto, Saneyoshi Ueno, James Gardiner, Barry Gardiner (2022) Tree dynamic response and survival in a category-5 tropical cyclone: The case of super typhoon Trami. Science Advances 8, eabm7891 において発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 M. Murakami, H. Abe, H. Aono and H. Ishikawa	4. 巻 17
2. 論文標題 Effects of gusty flow on aerodynamic performance of multicopter drone propellers in hovering flight	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2014jfst0050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 平野恭弘, 南光一樹, 土居龍成, 西村澗, 秋山哲矢, 谷川東子	4. 巻 30
2. 論文標題 2020年7月に倒木化した岐阜県大湫町神明大杉の根系状況	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 根の研究	6. 最初と最後の頁 65-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3117/rootres.30.65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kana Kamimura, Kazuki Nanko, Asako Matsumoto, Saneyoshi Ueno, James Gardiner, Barry Gardiner	4. 巻 8(10)
2. 論文標題 Tree dynamic response and survival in a category-5 tropical cyclone: The case of super typhoon Trami	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1126/sciadv.abm7891	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 伊藤香絵, 石井達哉, 榎本俊治, 石川 仁	4. 巻 86
2. 論文標題 エアシールドによる高周波数音の低減	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.19-00374	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kamimura, K., Nanko, K., Matsumoto, A., Ueno, S., Gardiner, J., Gardiner, B.
2. 発表標題 Tree dynamic behavior with forestry activities and a category-5 tropical cyclone
3. 学会等名 The EGU General Assembly 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南光一樹、上村佳奈、松本麻子、上野真義
2. 発表標題 台風時の立木曲げモーメントの変化と倒伏プロセス
3. 学会等名 日本生態学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南光一樹
2. 発表標題 Forest, as a modulator of rain and wind
3. 学会等名 Japanese-French Frontiers of Science (JFFoS) Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村佳奈, 南光一樹, 勝島隆史, 平野恭弘, 谷川東子, 石川仁
2. 発表標題 立木根鉢の風に対する力学的反応
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大川佐知、上村佳奈
2. 発表標題 人にとって快適な風環境を作る防風林とは
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kudo, Y. Shibasaki and H. Ishikawa
2. 発表標題 Behavior of Vortex Connections in the Wake Behind a Circular Disk
3. 学会等名 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯健太郎、石川 仁、佐藤誠司
2. 発表標題 二次元複合噴流の特性に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2021年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上村佳奈、南光一樹、松本麻子、上野真義
2. 発表標題 2018年台風24号による強風下での立木倒伏プロセス
3. 学会等名 第132回日本森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西尾俊、堀川香子、石川仁
2. 発表標題 軸対称物体後流の可視化実験
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Naruse, T. Ishii, H. Oinuma, S. Kusuda, Y. Ooba, K. Hirakwa and H. Ishikawa
2. 発表標題 The Effect of Intake Length on Aerodynamic Characteristics under Inlet Distortion
3. 学会等名 The 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Inter-Noise2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kana Kamimura, Kazuki Nanko, Asako Matsumoto, Saneyoshi Ueno
2. 発表標題 Dynamic behavior of trees during 1.5-year observation
3. 学会等名 The 10th International Wind and Trees Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上村佳奈、南光一樹、松本麻子、上野真義
2. 発表標題 風環境に対応した立木振動の変化
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 北瀬尚士, 上村佳奈, 西尾悠, 石川仁
2. 発表標題 数値解析による樹木群まわりの流体力学的解明
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第 63 回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 上田悠馬, 平野恭弘, 安江恒, 米田明日香, 池野英利, 藤堂千景, 山瀬敬太郎, 大橋瑞江, 壇浦正子, 谷川東子
2. 発表標題 クロマツ2 段水平根の年輪解析に基づく発達順序の解明
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	勝島 隆史 (Katsushima Takafumi) (00611922)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	
研究分担者	谷川 東子 (Tanikawa Toko) (10353765)	名古屋大学・生命農学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	南光 一樹 (Nanko Kazuki) (40588951)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	平野 恭弘 (Hirano Yasuhiro) (60353827)	名古屋大学・環境学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	石川 仁 (Ishikawa Hitoshi) (90311521)	東京理科大学・工学部機械工学科・教授 (32660)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University of Liverpool			
フランス	IEFC			
ドイツ	Albert-Ludwigs University			