

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05667

研究課題名（和文）山岳地に伐採区をどのように配置するか？風に伴うギャップ拡大リスクの定量的評価

研究課題名（英文）How should harvesting areas be allocated in mountainous areas? A quantitative evaluation of the risk of gap enlargement due to wind

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：山岳林の風によるインパクトを低減するための伐採区の配置手法を検討するために、「風によるギャップ拡大はどの程度生じやすくなるのか」を明らかにすることを目的とした。皆伐地に隣接する森林内の個体は、周囲のギャップ率や樹高が高くなるほど被害を受けやすかった。樹木に生じる風荷重は林縁からの距離だけでなく微地形の影響が示唆された。森林内の林冠ギャップと風害発生との関係について、隣接木同士の支えあいの影響が示唆された。ヒノキ林縁木の耐風性獲得は個体サイズの増加によるものであり、伐採後数年間は林縁木の耐風性獲得は顕在化しないと考えられた。皆伐後の新しい林縁木には水ストレスが生じやすいことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気象の極端現象の増加に伴い、森林に対する風害の増大が懸念されている。各地で促進されている皆伐更新は植被構造をドラスティックに改変するため、周辺森林への風攪乱を増大させる危険がある。森林のギャップ拡大パターンをゲーム理論等で再現するところみはあるが、拡大メカニズムがブラックボックスとなっているため、様々な環境要因を反映した実用的な評価にはほど遠い。林業現場での伐採区の配置について、気象害のリスク軽減の視点での研究は限られている。本研究は気象攪乱の視点から考えて、択伐あるいは間伐から大面積皆伐までの施業リスクを定量的に評価することで、伐採区デザイン技術を提案しようとする研究に位置付けられる。

研究成果の概要（英文）：To investigate the design of harvesting areas to reduce wind impact on forests in mountainous regions, this study aimed to clarify the mechanism of wind-induced gap expansion. Trees in forests adjacent to clear-cut areas were found to be more susceptible to wind damage as the nearby gap rate and tree height increased. The wind load on trees was influenced not only by the distance from the forest edge but also by micro-topography. Mutual support among adjacent trees played a significant role in the impact of small canopy gaps on wind damage. The resistance of edge trees to wind damage in cypress forests increased with the size of individual trees. However, this wind resistance did not become apparent until several years after logging. Additionally, new edge trees created after clear-cutting were prone to water stress.

研究分野：造林

キーワード：ギャップ拡大現象 風ストレス 伐採区 幹振動 樹液流速

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球スケールでの気候変動による極端気象現象の増加が予想されており (IPCC5), 最近では日本に上陸する SSHS カテゴリ-4 以上の台風が増加している。風による森林への影響は、樹木の成長抑制や生理ストレスに伴う立枯れから、風倒・幹折れなどの物理的ダメージまで多様であり、深刻な生態系機能の低下をもたらす場合がある。とくに森林が多く分布する山岳地は複雑な地形を持つため風環境の空間変異は大きい。現在日本の各地で促進されている皆伐更新は植被構造をドラスティックに改変するため、周辺森林への風のインパクトを増大させる危険がある。しかしながら周囲の地形や植被構造とリンクした風によるストレスを評価するツールは未だ開発されておらず、伐採区周囲の森林や樹木に及ぼすリスクを量的に評価するまでに至っていない。

さらに、伐採地に隣接する森林や樹木が風によるダメージを受ける場合があることは古くから知られており、ギャップの拡大現象は様々な森林タイプでも知られている。しかしながら、こうしたギャップによる負の影響の発生は不安定な現象であり、どのような場所でどのようなギャップで生じるのかわかっていない。ギャップに面する林縁個体は風害に対して抵抗性が高いことが知られている。すなわち、ギャップは風害リスクを高める可能性がある一方で個体の風害抵抗性を促進する。生理的にはギャップによる光環境の変化が成長を促進する一方で、ギャップに面した個体が強い季節風によって立枯れや成長抑制を生じる例がみられる。このようにギャップと風と樹木の関係は単純ではなく、ギャップ拡大現象のリスクと環境やギャップ属性との量的な関係はブラックボックスとして残っている。

2. 研究の目的

森林のギャップ構造や景観構造と風に対する森林の耐性との関係性を評価し、風による森林へのインパクトを低減するための伐採区の配置手法設計に資することを目的とし、「風によるギャップ拡大はどのような条件でどの程度生じやすくなるのか」の謎に物理的・生理的両面から答えることにある。すなわち、ギャップのサイズや形状が周辺の森林や樹木の風ストレスに及ぼす影響を、ギャップ成立からの時間に伴う個体の抵抗性獲得過程や多様な地形環境の影響を考慮して、個体から森林スケールまで定量的に評価することにある。

3. 研究の方法

本研究は次の3項目に分けて行った。

(1) 皆伐地に隣接する森林の風害リスク評価

統計的解析: 2018年に静岡県富士宮市上井出国有林内に生じた二回の風害被害 (Jebi, Trami) について、台風前後で撮影した UAV 画像を用いて、ギャップと台風害の受けやすさの関係を解析した。解析対象地は3haと10haの皆伐地のギャップ縁を含む16haとした。画像から作成したDCHMをもとに、Watershed法で単木分離を行い、各時期のギャップ位置と形状を比較することで被害木を特定した。

この被害発生に周囲の林冠ギャップの存在が影響しているかどうかを検証するために、それぞれの台風をランダム効果とし、対象木より風上側のギャップ率や被害木の属性を説明変数、対象木の被害の有無を目的変数とした二項分布でのGLMMで解析した。

振動計測: 皆伐地に隣接するヒノキ林で、林縁からの距離が異なる7個体について幹に生じるヒズミを2年間連続計測し、根元に生じる回転モーメントをインタクトで計測した。林外風速と回転モーメントの関係が林縁からの距離によってどのように異なるのかを解析した。またスギ林とヒノキ林で間伐を実施して、林内に創出したギャップが幹の振動様式に及ぼす影響を調べた。

(2) 林縁木の耐風性獲得プロセス

林縁状態になってからの経過時間が1~42年まで異なる4つのヒノキ林において、林縁木と林内木について幹折れに関わるヤング率の指標値としての応力伝播速度をFakkopで測定し、最大耐回転モーメントを引張試験により計測した。

(3) ギャップ隣接木の生理ストレス評価

ヒノキ林の林縁木の一部を伐採し、新しい林縁木を創出した。伐採前後の樹液流速の変化を計測し、古い林縁木と新しい林縁木で水ストレスを比較した。さらに皆伐後2~3年のヒノキ林縁木と林内木について、水分供給の立場から樹冠部と幹下部の樹液流速を計測した。

(4) 山岳地の風況シミュレーションと風害リスク評価

ベトナムのQuang Tri省の山岳地100Km²を対象に、ランドサットデータを用いてRandom Forestアルゴリズムにより風害跡地を特定した。また地形を基にシミュレートした風速分布と森林の発達段階と地形を組み合わせる風害推定モデルを作成した。

4. 研究成果

(1) 皆伐地に隣接する森林の風害リスク評価

初回の画像による DCHM をもとに 4050 本の木が分離され、このうち Jebi の台風では 331 本、Trami では 756 本の被害が観測された。

対象木に近い 10 m 以内のギャップ率だけではなく、10 ~ 20 m あるいは 30 ~ 40 m 離れた場所のギャップ率も被害率を高めた(表 1)。このことは 30 m 以上離れた gap も被害率に関与することを意味する。さらに樹高が高くなるほど樹冠面積が小さくなるほど被害が起こりやすくなった。このことは形状費が個体の抵抗性に関わっている可能性とともに、風面に露出することが風害を受けやすくしている可能性も考えられる。

被害発生の有無を風況シミュレータで予測した風速分布との関係を表 2 に示した。水平方向の風速の大きさは被害発生の推定のためのベストモデルに含まれず、上向きの風速が生じる場所で被害が発生しやすく、下降風が生じる場所で被害が発生しにくかった。このことは剥離が生じる場所に風害が起きやすいことを示す。

ヒノキ林で幹に生じた回転モーメントの変動をスペクトル解析したところ、周波数が 0.1 Hz ~ 0.3 Hz で振幅が大きくなった。この周波数は林縁からの距離や風速とは無関係であった。発生した回転モーメントは風速が大きいほど大きくなった。林縁から 5 m の位置で回転モーメントが最も大きくなり、林縁から 20 m 付近あるいは 40 m 以上の個体の回転モーメントは小さかった(図 1)。ただし、本調査地は林縁から 15 m 以上の位置はやや凹地となっており、単に林縁からの距離だけでなく微地形の影響も風荷重に影響することが考えられた。

表 1 被害発生とギャップ率の GLMM 解析結果

説明変数	係数	p 値
0 ~ 10 m Gap	0.6	9.23×10^{-3}
10 ~ 20 m Gap	1.7	1.98×10^{-10}
30 ~ 40 m Gap	1.46	7.19×10^{-14}
樹高	0.06	5.49×10^{-6}
樹冠面積	-0.003	1.64×10^{-2}

表 2 被害発生と林冠上推定風速の関係

説明変数	係数	p 値
上向き風速	3.90	10^{-16}
下向き風速	-6.66	10^{-16}

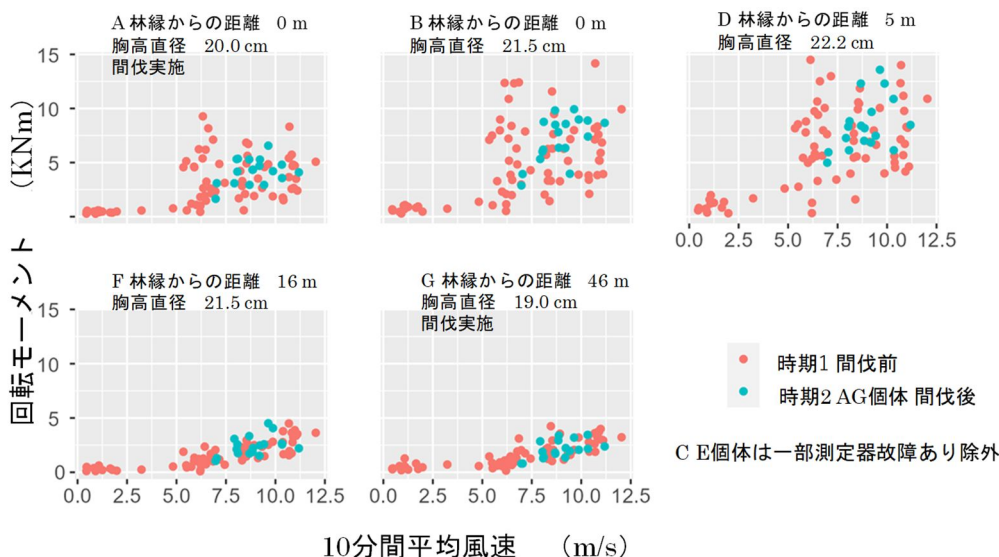


図 1 10 分間平均風速と回転モーメント

また対象個体の隣接木を一本間伐した前後で回転モーメントはあまり変化しなかった。しかし、スギ林内の個体を孤立状態まで間伐した場合、振幅が大きくなり被害が発生した。このことは弱度間伐の場合の風荷重の増加は無視できるが、強度間伐の場合には無視できないことを意味する。さらに森林内のギャップは風の乱れに影響するだけではなく、隣接木同士の支えあい効果が大きいことを明らかにした。

(2) 林縁木の耐風性獲得プロセス

最大耐回転モーメントと幹の D^2H の関係は直線関係にあり、森林によってやや直線関係が異なったが、全ての森林で林内木と林縁木の違いは有意ではなかった(図 2)。Pinus pinaster では林縁木の根が風当たりの強い環境に適応して、高い抵抗性を持つことが知られているが、ヒノキの場合林内から林縁へと環境が変化しても根への投資というアロメトリックパターンの変

化が起こらないことが考えられる。幹のヤング係数の指標値となる応力伝播速度は林縁木で小さい傾向にあり、特に長い間林縁で生育した個体は応力伝播速度が遅かった(図3)。こうした林縁木の応力伝播速度の低下は富士宮市上井出国有林内の風害跡地でもみられた。すなわち、幹の

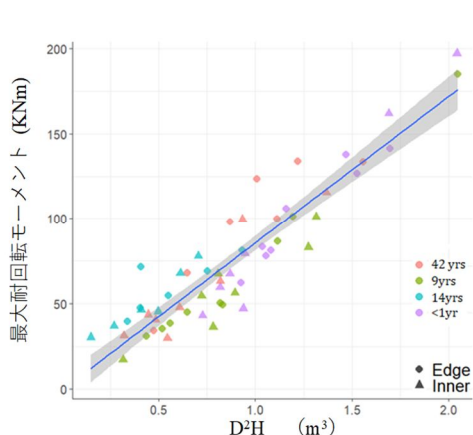


図2 林縁木と林内木の最大回転モーメント

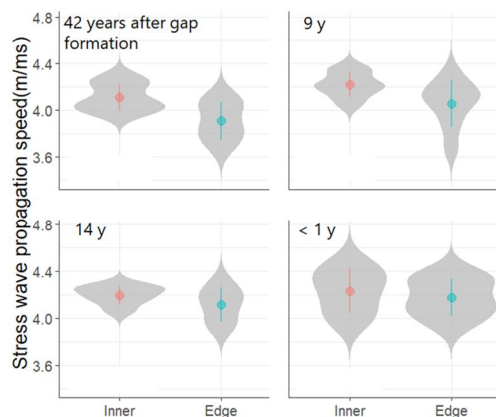


図3 林縁木と林内木の応力伝播速度

物理特性から評価する幹折れ抵抗性はむしろ林縁木の方が小さかった。しかし、林縁木の幹の断面積成長量は林内木より大きく、ヒノキの林縁木の場合は個体サイズを大きくすることで風害抵抗力を高めていることがわかった。なお、肥大成長量の違いによる抵抗性獲得の効果が顕在するには林縁環境になってからの時間が必要であり、さらに伐採時の樹齢が高い場合は林縁木の抵抗性獲得により時間がかかると考えられる。

(3) 新しい林縁木と古い林縁木について飽差に対する樹液流速を比較したところ、伐採1か月後までは両者に違いはみられなかった。しかし冬季を経た9か月後に、新しい林縁木は樹液流速度が小さかった。林縁木のキャピテーション頻度は冬季に風速とともに増加したが、林内木のキャピテーション頻度は小さかった。林縁環境では冬季にキャピテーション頻度が高く、この通水阻害が樹液流速の低下をもたらしたと示唆された。

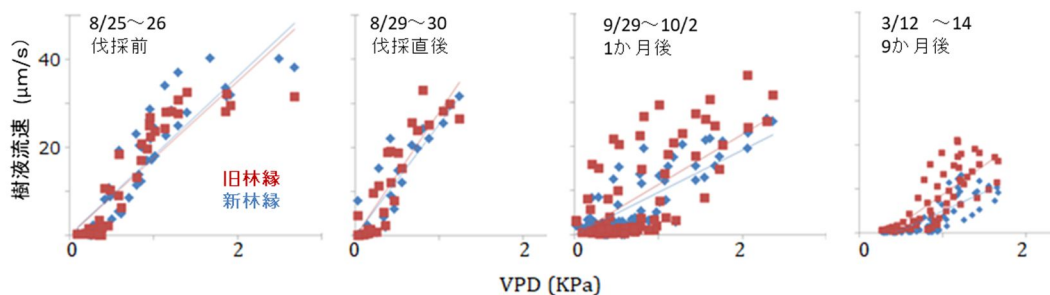


図4 旧林縁と新林縁の樹液流速

皆伐による林縁創出2年目の森林で、2022年7月21日22日の2日間の樹液流速の時間変化を見ると、日中の最大樹液流速度は、 $13.48 \mu\text{m/s}$ とセンサー間で大きく異なり、その差は3.5倍を超えた。林内木の樹液流速度は、いずれも林縁木より高かった(図5)。このことは林縁創出後の通水阻害が2年以上継続している可能性に加え、林縁創出時のストレスにより個体の葉量が減少した可能性もある。日積算樹液流速樹冠部の日積算樹液流速度と下部樹液流速度は直線関係にあり、その傾きは個体によって異なったが、この傾きと林縁木か林内木かの違いは反映されなかった。

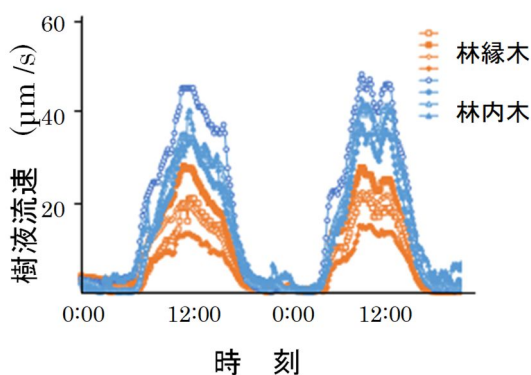


図5 7月晴天日の樹液流速の日変化

(4) ベトナムのアカシアハイブリッド植栽地の風害予測のベストモデルは、土壌型、樹高、南からの風速、傾斜、標高によって構成されたモデルだった(表 3).

表 3 風害発生確率の予測モデル

説明変数	(AIC = 309.66)			
	係数	推定値	標準誤差	有意確率
切片	8.869		2.946	0.003
土壌型	-0.809		0.334	0.015
林齢	-0.919		0.329	0.005
優占木の樹高	3.009		1.050	0.004
南からの推定最大風速	0.252		0.152	0.097
傾斜	0.043		0.021	0.044
標高	-0.007		0.002	0.003

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kamimura Kana, Nanko Kazuki, Matsumoto Asako, Ueno Saneyoshi, Gardiner James, Gardiner Barry	4. 巻 8
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Minh NT, Koyano K, Mizunaga H	4. 巻 33
2. 論文標題 ASSESSING WIND DAMAGE RISK IN COMPLEX TERRAIN USING AN AERODYNAMIC MODEL IN ACACIA HYBRID PLANTATIONS IN QUANG TRI, VIETNAM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JOURNAL OF TROPICAL FOREST SCIENCE	6. 最初と最後の頁 501～515
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.26525/jtfs2021.33.4.501	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 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔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	榎本 正明 (Naramoto Masaaki) (10507635)	静岡大学・農学部・准教授 (13801)	
研究分担者	上村 佳奈 (Kamimura Kana) (40570982)	信州大学・学術研究院農学系・准教授 (13601)	

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			
ベトナム	ベトナム国立林業大学			