

林木に作用する風圧力の推定

鈴木 覚, 吉武 孝, 後藤義明 (森林総合研究所)

要旨: 林木に作用する風圧力は受風面積と風速の二乗との積で計算される。ここで、林分では個体同士が接することによって樹冠は複雑に変形し、個体同士が互いに被陰しあうため不均一な林内風速分布が形成される。従って、林分において個体に作用する風圧力を推定するには、樹冠形状の変形と風速の不均一さを評価しなければならない。そこで、筑波山系に試験地を設定して、林木の三次元的な位置と樹高を計測し、平均的な樹冠形状を与えることによって個体ごとの受風面積を推定した。さらに、林内で観測した風速の鉛直分布と風上側の葉層の体積との関係を導くことによって、間伐による立木密度の変化を反映した風速の鉛直分布を推定した。個体ごとに求めた受風面積と風速の鉛直分布の積から林木に作用する風圧力を推定した。

キーワード: 風害, 受風面積, 林内風速, 風圧力

I はじめに

近年の厳しい林業事情から人工林の保育や管理が十分に行えない状況にある。そのため、間伐適期を過ぎた放置林が大量に発生し、その整備が喫緊の課題となっている。限られた労力、費用で放置林を効率的に整備する必要があり、それが従来よりも強度な間伐を行う動機になっている。しかし、こうした施業では従来より一時に多くの立木を伐採するため、残存木に対する風害の発生が懸念されている。

一方、地球温暖化に伴う海面温度の上昇がハリケーンの強大化をもたらすと以前から予測されてきたが、強大化(1)と発生頻度の増加(2)は現実には報告されるようになった。

以上のように、保育・管理不足による森林の脆弱化と気候変動による風害リスクの増大は同時進行しており、風害リスクを軽減できる森林管理手法を開発し、風害に強い森林を整備していく必要がある。

強風による幹折れや根返りは、風が衝突することによって生じた風圧力が、樹幹や根系の耐力を上回ったときに発生する。つまり、風害の発生は風圧力と耐力との大小関係によって判定可能である。そこで、本研究では力学的な風害発生過程に基づく風害リスク評価を視野に、林木に作用する回転モーメントを推定することを目的とする。

II 方法

林木に作用する風圧力は(1)式で示される。

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A \cdot U^2 \quad (1)$$

ここに、 F は風圧力、 ρ は空気の密度、 C_d は抗力係数、 A は受風面積、 U は風速である。ここで、受風面積は樹冠の鉛直平面への投影面積である。本研究では、 C_d を 1.0、 ρ を 1.293kgm^{-3} として計算した。孤立木の場合は、 A や U の計算は容易であるが、林分では個体同士が接しているため困難を伴う。すなわち、林分では個体同士が接しているため枝葉を自由に延伸させることができず、樹冠の形状は個体配置を反映して複雑に変形し、さらに個体同士が被陰しあうことによって、不均一な林内の風環境が形成される。従って、林分としての風害リスクを評価するには、樹冠形状の変形と風速の不均一さを織り込む必要がある。

本研究では、樹冠形状をモデル化することによって、変形を加味した林木の受風面積を推定した。トータルステーション (GPT-3005hiper, Topcon) で根元位置を3次元で特定し、樹高と樹冠長をバーテックスで測定した (Vertex IV, Haglof Inc.)。林木の配置および樹高の情報に対して、平均的な形状を与えることによって、林木ごとに樹冠形状を推定した。モデルに与えた条件は次の通りである。

1. 樹冠は三角錐
2. 頂点のなす角は 50°
3. 樹冠の分布は樹高の $1/2$ まで
4. 葉が枝の先端に 80cm の厚さで分布する
5. 個体の樹冠同士が接触する場合、接触がないと仮定した場合に予想される樹冠形状において、両者が交わる平面まで樹幹が形成される。

頂点のなす角は試験地における任意の林木6本の梢端の写真から読み取った平均値である。樹冠長比は $20 \text{m} \times 20 \text{m}$ で設定した標準地の全個体の平均値である。枝先における

Satoru SUZUKI, Takashi YOSHITAKE, Yoshiaki GOTO (Forestry and forest products research institute, 1 Matsunosato Tsukuba, Ibaraki, 305-8687)

Estimation of wind load on trees in a forest

葉の分布は任意の枝 20 本の平均値である。

林内風速の鉛直分布は林内に 17m の気象観測塔を建設し、8 高度 (17.2m, 14.5m, 11.0m, 9.3m, 7.4m, 5.6m, 2.0m, 1.0m) で風速を測定した (3002, R. M. Young Company), 8 高度のなかで最上部は林冠上に位置し、風向も同高度で測定した。風速および風向は 5 秒ごとにサンプリングし、10 分間の平均風速をデータロガー (CR10X, Campbell Scientific Inc.) に記録した。

以上の立木の位置や気象観測は筑波共同試験地内 (茨城森林管理署 217 林班く 1 および、く 6 小班) で行った。小班の面積は合計 1.29ha, 平均傾斜 30° で、1973 本の林木があり、内訳は 1367 本がヒノキ、570 本はスギ、その他 36 本であった。ただし、本研究で解析対象とした範囲はすべてヒノキである。寺崎式で選木を行い、材積間伐率 15% および 35% の 2 回の間伐を行った。一回目の間伐は 2008 年 10 月、二回目の間伐は 2009 年 2 月に行った。なお、本稿では簡便のため一回目間伐後を間伐 (一)、二回目間伐後を間伐 (二) と表記した。標準地の林木 45 本の平均樹高は 14.7m, 平均胸高直径は 22.6cm, 平均枝下高 7.3m であった。

III 結果と考察

1. 受風面積 小班内の林木の分布を図-1 に示す。微少な地形の起伏があるととも、部分的に立木密度の低い場所もみられた。そこで、本研究では傾斜が均一で比較的立木密度が一定している範囲 (図中白枠) を選んで解析対象とした。モデルで推定した、ある 10m×10m の領域における樹冠分布の水平断面と鉛直平面への投影図を図-2 に示す。水平断面では、隣接した個体と樹冠が接触していない個体は円形で示されているが、接触している個体同士は互いの位置関係を反映して樹冠の変形が表現されている。また、梢端から遠くなると同心円状に葉層が表されている。このような水平断面を高さ方向に蓄積すると立体的な樹冠の分布が得られ、鉛直平面への投影によって鉛直投影図になり、同時に葉層の厚さも推定できる。平均受風面積は間伐率を上げるにしたがって上昇していた (表-1)。これは、小さい個体が優先的に選木されて間伐され、成長のよい大型の個体が残される傾向があるため、一本あたりの受風面積が増加したものである。

2. 風速分布 林内風速の鉛直分布は樹冠上で最も強く、葉の密度が高い 7m 付近まで減少し、それよりも低い位置で再び風速が大きくなっていった (図-3)。このような S 字の形状に似た分布は典型的な林内風速の鉛直分布であ

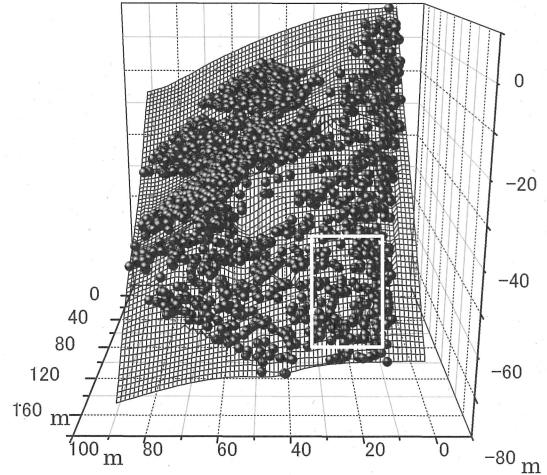


図-1. 小班における個体の根元位置と計算した範囲 (●: 根元位置、白枠: 計算範囲)

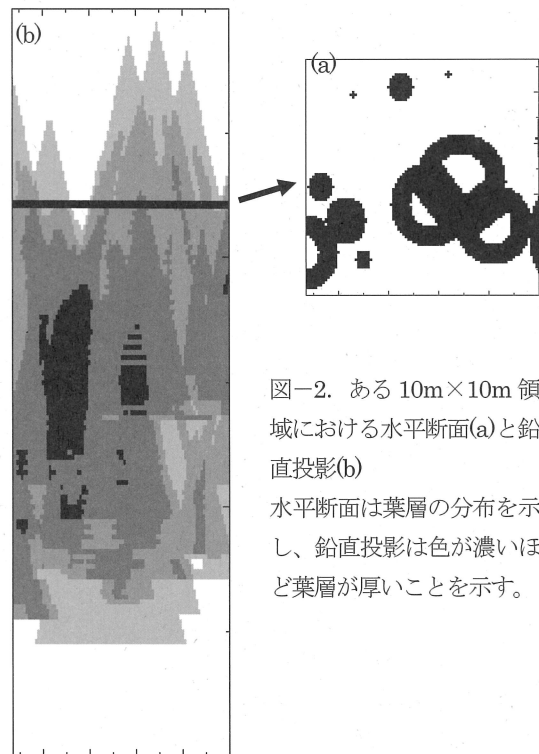


図-2. ある 10m×10m 領域における水平断面(a)と鉛直投影(b)
水平断面は葉層の分布を示し、鉛直投影は色が濃いほど葉層が厚いことを示す。

表-1. 平均受風面積の推定

	間伐前	間伐(一)	間伐(二)
平均受風面積(m ²)	17.5	19.8	21.6
標準偏差(m ²)	7.3	6.7	5.6

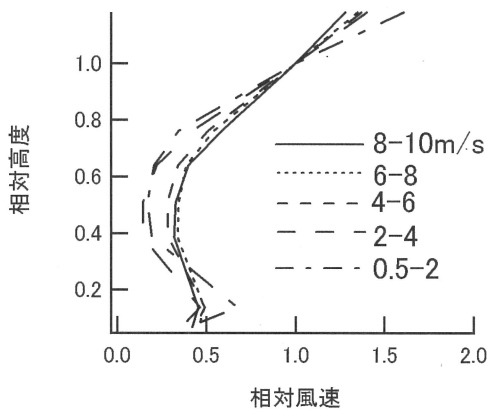


図-3. 2009年3、4月に観測された風速の鉛直プロフィール

る(近藤, 1994)。本研究では林木に作用する力を推定するのであり、その場合は、樹冠が分布する位置の風速がわかればよい。樹冠下の風速は樹幹に作用することになるが、その値は無視できる。従って、本研究においては1hから0.5hまでの4高度の測定値を、(2)式に当てはめた(Kaimal and Finnigan, 1994)。

$$\frac{\overline{u_z}}{\overline{u_h}} = e^{-v_e \left(1 - \frac{z}{h}\right)} \quad (2)$$

ここで、hは樹高、zは高度(ただしz<h)、u_hならびにu_zは高度hおよびzにおける風速、v_eは係数である。v_eは葉面積指数と相関があるといわれていることから、本研究では葉面積指数と相関すると思われる葉層体積を用いて、v_eの特性を検討した。ここで、葉層体積とは、葉の分布する空間の、ある領域における体積であり、受風面積推定に用いたモデルから推定可能である。v_eは0.5hから1hまでの4高度における風速データを用いて最小二乗法により決定した。また、斜面に対して正対する方向からの風に対して最も風害が発生しやすいことから、本研究において斜面方位に対して±45°の方向からの風を解析した。

v_eは、間伐前から間伐(一)、間伐(二)と、立木密度が減少するに従って小さくなり、さらに間伐前後に関わらず、風速が大きくなるほどv_eは減少していた(図-4)。これらを指数関数で回帰したときの係数および決定係数を表-2に示す。v_e切片は間伐前、間伐(一)、間伐(二)それぞれ、7.54、6.72、5.20であり、間伐率が大きくなるに従って小さくなった。また、風速階の中心にv_eを与えて最小風速階に対する相対v_eを計算し、すべてのデータを一つの指数関数で回帰したとき、回帰曲線(a=1.02, b=-0.017)の決定係数は0.75であった。相対v_eの

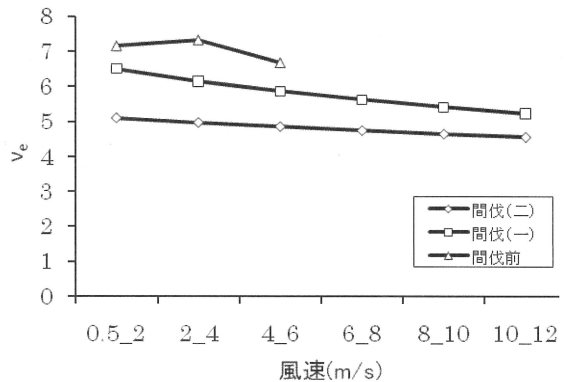


図-4. 間伐前後における風速に対するv_eの変化

表-2. v_e=a・exp(b・u_h)で回帰したときの係数

	a	b	R ²
間伐前	7.54	-0.034	0.51
間伐(一)	6.72	-0.043	0.99
間伐(二)	5.20	-0.023	1.00

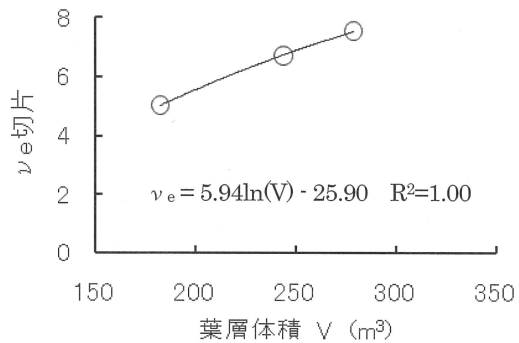


図-5. 葉層体積に対するv_e切片

回帰曲線における決定係数が十分大きいことから、間伐の有無ならびに間伐率にかかわらず、一つの式で表せるものと考えた。

次に、v_e切片と葉層体積の関係を検討した。ここで、風向に対応させるため、気象観測を行った位置を原点に、斜面方位に対して±45°方向をそれぞれ一辺とする正方形の領域を設定し、その領域の上空に存在する葉層の体積を計算した。このとき、一辺を斜距離で10mとして計算した。間伐前、間伐(一)、間伐(二)の葉層体積に対するv_e切片を図-5に示す。決定係数が高く、葉層体積からv_e切片が良好に推定可能と考えられた。

以上、葉層体積から切片を求め、相対v_eの回帰曲線を使うことによって、個体毎の風速に応じたv_eが得られる。

3. 風圧力推定 個体ごとに、樹幹を基点に斜面方位に対して $\pm 45^\circ$ 方向に $10\text{m} \times 10\text{m}$ の方形領域を設定して葉層体積を推定し、 v_e の推定と風圧力計算を行った。図-1の白枠内の個体として、間伐前、間伐(一)、間伐(二)それぞれ134個体、94個体、64個体の計算を行った。個体あたりの風圧力およびモーメントともに間伐率が大きくなるに従って増加した(表-3)。一方、樹高に対する風心の高さとして求めた平均風心高比は、間伐前後、ならびに間伐率の大小にかかわらず、ほぼ一定していた。平均風心高比に変化が生じないのは、強風の進入によって樹冠に作用する風速の絶対値は大きくなって、風速の鉛直分布に大きな変化がないためと推察される。

モーメントの変化を、間伐前に対する間伐後のモーメントの比として個体ごとにみても、間伐(一)は77%(72個体)が1割未満の増加にとどまり、3割以上増加するものはなかった(図-6a)。一方、間伐(二)は1~2割増加するものが全体の50%(32個体)であり、3割以上上昇するものが3個体あった(図-6b)。

謝辞

観測塔建設、選木ならびに間伐の際には、森林総合研究所実験林室の木村英雄氏、鈴木利明氏、杉山正幸氏、軽部勲夫氏、岡本守氏、森林総合研究所千代田苗畑非常勤職員の軽部顕氏、鴻巣繁夫氏、杉山吉男氏にお世話になった。記して謝意を表する。

引用

- (1) Emanuel, K., 2005. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years Nature 436, 686-688.
- (2) 近藤, 純., 1994. 水環境の気象学 一地表面の水収支・熱収支一. 朝倉書店, 東京.pp.368.
- (3) Kaimal, J.C., Finnigan, J.J., 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford University Press, New York.pp.289
- (4) Saunders, M.A., Lea, A.S., 2008. Large contribution of sea surface warming to recent increase in Atlantic hurricane activity. Nature 451, 557-560.

表-3 風圧力、モーメント、風心高比の間伐による変化

	間伐前	間伐(一)	間伐(二)
平均風圧力(N)	1077.9	1387.4	1664.0
平均モーメント(Nm)	12363.8	15966.2	18973.2
平均風心高比	0.76	0.76	0.75

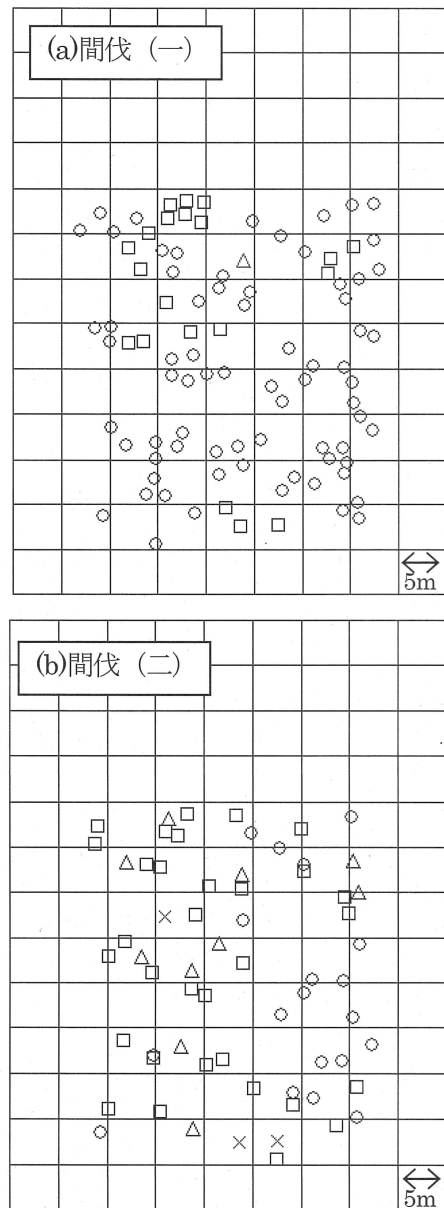


図-6 間伐(一)(a)および間伐(二)(b)における間伐前に対するモーメントの比
($\circ < 1.1$, $1.1 \leq \square < 1.2$, $1.2 \leq \triangle < 1.3$, $1.3 \leq \times$)