特 集

風関連災害(風が引き起こす様々な災害)

間伐にともなう森林風害リスクの風洞実験による評価

Evaluation of Forest Wind Damage Risk after Thinning by Wind Tunnel Experiment

鈴木 寛*

Satoru SUZUKI

1. はじめに

森林と風関連災害との関係を検討する時、森林によって防止・軽減する災害と、森林そのものが被害を受ける災害との2つの見方がある。

風関連災害を防止・軽減するための森林として、最も身近なものは防風林であろう。家の敷地や農地の外周、道路や鉄道沿いに樹木を帯状に配置することによって、強風から家屋、道路、鉄道の被害を防止したり、農地の微気候の改善に活用されている¹⁾。また、海岸沿いには海岸防風林が主にクロマツで造成されており、白砂青松と言われるような日本の原風景を形作ってきた。これらの海岸林は、多くの場合景観を形成するために植栽されたのではなく、海からの強風、飛砂、飛来塩分を食い止め²⁾、内陸側の農地や宅地を厳しい気象環境から守るため、あるいは居住、営農不可能であった不毛の土地を農地、居住地とするために長い年月をかけて植栽されてきたのである³⁾。

一方、森林そのものが被害を受けたとき、人的被害や財産への損害が伴う場合は「災害」と表現され、その場合の強風による災害を「風害」と表現している。一方、原生的な森林や人為的な改変を行わないことを管理目標とした森林が強風の被害を受けた場合は「攪乱」と表現され、この場合、強風による樹木被害は森林生態系の維持メカニズムの一つと位置づけられる。すなわち、森林分野におい

ては森林が被害を受けるとそれが必ずしも災害とは認識されず、人の手で植栽や保育が行われる人工林における被害が「風害」である。

人工林では健全な森林を育成するため、収穫までの間に何度か間伐を行って樹木の本数密度を調整する。その時に現場では風害が発生しないかどうかに注意が払われる。林業者は間伐後の数年間に風害が発生しやすいこと、収穫期にあるような成熟した森林が被害を受けやすいことを知っているからである。こうした、風害に対して脆弱である期間は間伐後5年程度続くことが分かっている⁴⁾。風害が発生すると、それまでの数十年間におよぶ保育が水泡に帰すばかりでなく、被害木の処理と再造林に多大なコストを費やすことになり、林業経営に及ぼす影響は極めて大きい。また、風害で地表面が大きく荒らされると山腹崩壊が発生しやすいと指摘されており⁵⁾、国土保全上の問題でもある。さらに建築物や道路、電力線などのインフラ設備に倒木が二次的の被害をおよぼすことがあり、生活安全上の問題でもある。

1979年から2013年までの年ごとの風害による被害面積の推移を見てみると、風害は年ごとの被害面積に大きな変動があり、時間的に不均一に発生する特徴があることがわかる(図1)。時折発生する大きな被害はいずれも台風によるもので、最大の被害面積を記録したのは九州

* 国立研究開発法人 森林総合研究所 森林防災研究領域 気象害・防災林研究室 室長
Laboratory Head, Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute

北部で大面積の森林被害を生じさせた T9119 によるものであり、2 番目は北海道で発生した T0418 による被害である。T9119 と T0418 は北海道において史上空前の森林被害をもたらした洞爺丸台風 (T5415) と経路が酷似しており、九州を通過した後日本海を北東へ進み、北海道西部に到達した台風であった。単木的な被害から斜面すべての林木が被害を受けるようなもの (図 2) まで発生規模と発生地の分布は様々である。大面積の被害は十年あるいはそれ以上に一度という頻度であって、そうした事態への対応を林業経営や森林管理に内部化する意識は生まれにくいのが実情である。しかしながら、大面積の被害は「孫の代に収穫する」林業の時間軸において、決して無視できるほど頻度が小さいわけではない。

間伐方法として、通常は成長の悪い林木を個別に選んで単木的に抜き切りする定性的点状間伐 (以下、点状間伐と表記する) が行われる。その他、植栽列の 1 列ないし 2 列をすべて伐採し、それを数列おきに繰り返す列状間伐や比較的小さい面積の伐採を多数行う群状間伐がある。点状間伐では 1 本ずつ成長や形質の良し悪しを判断して間伐対象を決定し、それらを抜き切りしなければならないのに対し、列状間伐における伐採列は原則として成長等の良し悪しに関係なく機械的に決められて伐採される。また、間伐を実施する際は、間伐方法だけでなく間伐率も決めなければならない。間伐率が大きいほど一度に大量の伐採ができるので経済効率性は高いが、伐採による林冠の穴を多く作ることになるので風害リスクは高まる。このように、間伐方法、間伐率ともに施業の省力化や経済効率性を高めようすると風害リスクが高まる関係にある。近年では林業の採算性の悪化や林業従事者の高齢化により、選木、伐採、搬出が容易で経済効率性の高い列状間伐の実施が増えてきている⁸⁾。さらに、従来よりも間伐率を高める傾向が顕著であり、従来の間伐率を大幅に上回る強度間伐が実施されるようになってきた⁹⁾。このように風害発生を気にしながらも、実際には省力化や経済性にもとづいて間伐方法が選択される傾向にある。その原因は間伐に伴う風害リスクが事例的、定性的に述べられるのみで定量的に示されておらず、間伐方法を選択する上で風害リスクが考慮できる状況にないことが考えられる。

そこで、本研究では点状間伐、群状間伐、列状間伐を対象に、間伐実施後の残存木にもたらされる風害リスクを定量的に示し、風害リスクの観点から間伐方法の優劣を明らかにするのが目的である。

図 1 風害による民有林の被害面積
森林国営保険事業統計書⁷⁾をまとめたものである。

図 2 T9119 による大分県で発生した風害

2. 方法

2. 1 風洞装置

実験は森林総合研究所のエッフェル型風洞で行った。測定洞のサイズは幅 1.2m 高さ 1.6m 長さ 10m であった。ラフネスブロックや乱流格子を樹木模型の風上側に配置して図 3、図 4 のように風況を調整した。

2. 2 樹木模型

樹木模型を試験管用ブラシで作成した。3000 本/ha で植栽後 20 年程度が経過して最初の間伐時期に達した状態を想定し、1.8m 間隔で植栽され樹高が 9.6m に成長した針葉樹林を縮尺 1/60 で模し、樹木模型の高さ 16cm、樹冠長 (ブラシの毛の部分の長さ) 8cm、樹木模型同士の間隔 3cm とした (図 5)。ブラシの毛の投影面積を葉面積にみたて、LAI に相当する値を 6.4 に調整した。

一部の模型は幹の部分で矩形断面の ABS 樹脂で作成し、そこにひずみゲージ (列状間伐の実験では KFGS-IN-120-CI-11、共和電業、点状・群状間伐の実験では SKF28219、共和電業) を貼り付けた (図 5)。ABS 樹脂で幹を作成した樹木模型は列状間伐の実験で 3 個、点状・群状間伐の実験では 20 個用いた。ひずみゲージは風の流線と正対面

図3 風洞内における乱流強度の鉛直分布
縦軸は高さ(z)の模型高さ(h)に対する比。

図4 風洞内における風速の鉛直分布
zにおける風速(U(z))の高さ3.8hにおける風速(U(3.8h))に対する比

図5 樹木模型

ひずみゲージのない樹木模型(左)とひずみゲージを貼り付けたモーメント測定用の樹木模型(右)

および裏面に取り付けた。模型樹木に作用するモーメントをひずみ量から求めた。ひずみ量は樹木模型に与えたモーメントに比例しており、切片0の直線で良好に回帰できた(図6)。点状・群状間伐の実験に用いた樹木模型20個も切片0の直線で良好に回帰でき、比例係数は $1.09 \times 10^{-5} \sim 1.19 \times 10^{-5}$ であり、いずれも変動係数は0.99以上だった。ABS樹脂製の樹木模型の固有振動数は15Hzであった。風洞に風を起こすと樹木模型は細かく振動し、振幅の中心は風下側に生じていた(図7)。また、風速を大きくするほど振幅中心の風下側へのずれが大きかった。

図6 樹木模型におけるひずみとモーメントの関係
ひずみとモーメントの関係は列状間伐の実験で用いた3個の樹木模型で測定したものである。回帰直線は#1: $y=1.21 \times 10^{-4}x$, #2: $y=1.14 \times 10^{-4}x$, #3: $y=1.13 \times 10^{-4}x$ であった。変動係数はいずれも0.99以上であった。

図7 風を与えたときの樹木模型の振動の様子
破線が振幅の中心である。

このような、振幅中心の風下側へのずれ、および風速に比例したずれの発生は屋外における現実の樹木にも見られる現象である¹⁰⁾。本研究では樹木模型の振動を計測するが、瞬時値ではなく、平均モーメントとして振幅の中心のずれを計算し、それで間伐方法同士の比較を行った。モーメントの測定は100Hzで20秒間行い(EDX-2000A, 共和電業)平均モーメントを計算した。ここで、各模型は樹冠部の大きさやブラシの毛の量が少しずつ異なるため、同じ風速を与えたとしても同じモーメントが測定されるとは限らない。そのため、無間伐の状態で測定した平均モーメントを基準値とし、伐区を設けたときに測定した値について基準値に対する比(以下、相対モーメントと表記する)を計算し、個体間比較を行った。また、間伐方法間の比較および風害リスクの大きさの表現のため、間伐方法ごとに限界風速の無間伐に対する比を計算した。この値を本稿では相対限界風速と表記する。相対限界風速は(1)式で示される。

図8 列状間伐における樹木模型の配置例

4残1伐における植栽列90°(左)と植栽列45°(右)
写真の上から下方向が風洞内の風が流れる方向であった。

図9 点状・群状間伐における樹木模型の配置例

点状間伐(左)および5×5の群状間伐(右)の様子。写真の上から下方向が風洞内の風が流れる方向であった。

表1 実験対象とした列状間伐の種類

間伐有無・ 間伐方法	列状間伐 における 種類	植栽列と風向 の角度	n
無間伐	—	45°, 90°	3
列状間伐	2残1伐	90°	3
	3残1伐	90°	3
	4残1伐	45°, 90°	3
	3残2伐	45°, 90°	3
	4残2伐	90°	3
	5残2伐	90°	3

注：nは3個の樹木模型を同時に用いて測定した回数である。
植栽列が風向に対して90°の場合は、植栽列と風の流線方向が直交している場合である。

$$\frac{W_{thin}}{W_{ref}} = \frac{1}{\sqrt{a}} \quad (1)$$

ここで、 W_{thin} は間伐後の限界風速、 W_{ref} は無間伐の場合の限界風速である。 a は相対モーメントである。なお、相対限界風速において間伐後における残存木の風力係数と受風面積が無間伐と同一であることが仮定されている。また、限界風速は林冠上空の風速を指し、相対限界風速が小さくなることは、林木の強度が下がることを意味しているわけでない。

2. 3 実験対象とする間伐方法

(1) 列状間伐

方形植栽を想定して、樹木模型は縦横26個ずつ正方形の交点の位置に配置し、植栽列が風向に対して正対するように設置した。この配置を本稿においては植栽列が風向に対して90°の場合と表記する。風の流線と直交に1列ないし2列の樹木模型を取り除き、列状間伐を模倣した(図8)。2～5列を残存列として周期的に伐採列を設けた(表1)。また、植栽列に斜めに風が吹いた場合を想定して、正方格子を45°傾けた状態の配置も設けた(図8)。

表2 実験対象とした点状間伐および群状間伐

間伐有無・ 間伐方法	伐区サ イズ	植栽列と 風向の角 度	n		
			1列 目	2列 目	3列 目
無間伐	-	90°	14		
点状	1×1	90°	8	6	6
群状	2×2	90°	6	6	6
	3×3	90°	6	6	6
	4×4	90°	6	6	6
	5×5	90°	10	6	6
	7×7	90°	13	6	6
	9×9	90°	12	6	6
	11×11	90°	9	-	-

注：nは20個の樹木模型を同時に用いて測定した回数である。

この配置を本稿では植栽列が風向に対して45°の場合と表記する。植栽列が風向に対して45°の場合は無間伐、4残1伐、3残2伐の3通りを行った。

ひずみゲージを取り付けた樹木模型を残存列の風上側1列目に配置してモーメントを測定した。

(2) 点状・群状間伐

点状間伐として1本の林木を抜き切りした場合を模して、樹木模型1個体を取り除いた(図9)。群状間伐として2×2～11×11の正方形に伐区を設けた場合を設定した(図9)。群状間伐では伐区の各辺が風向に対して直交または平行するように設けた。伐区の風下側において、伐区に面した1列目とさらに風下側の2列目と3列目にひずみゲージを貼り付けた樹木模型を配置してモーメントを測定した。ただし、11×11は1列目のみの測定であった。

3. 結果

3. 1 列状間伐

残存列数の配置は1伐、2伐ともに2残～4残の3種類の列状間伐で実験したが、1伐の3種類において平均モ

ーメントは $3.7 \times 10^4 \text{ Nm} \sim 3.9 \times 10^4 \text{ Nm}$ の範囲にあり、相対モーメントはいずれも1.4であった。また、2伐の3種類における平均モーメントは $4.7 \times 10^4 \text{ Nm} \sim 4.8 \times 10^4 \text{ Nm}$ の範囲にあり、相対モーメントはいずれも1.8であった。このように、2伐は1伐よりも平均モーメントおよび相対モーメントが大きかったが、伐採列数が同じであれば残存列数による違いはわずかであった(図10)。残存列数に関わらず1伐と2伐でひとまとめに考えたとき、無間伐、1伐、2伐の3群間に有意差($p < 0.01$)が検出された。

次に、植栽列が風向に対して 45° の場合を検討すると、平均モーメントの大きさは無間伐 <1 伐 <2 伐であり、大きさの順番は植栽列が風向に対して 90° の場合と一致していた(図11)。しかし、相対モーメントは4残1伐、3残2伐ともに植栽列が風向に対して 90° の場合よりも大きかった。そこで、無間伐、4残1伐、3残2伐について、植栽列が風向に対して 45° の場合の 90° の場合に対する比を計算した(表3)。無間伐の場合は平均モーメントが1割増加したが、 90° の場合との間に有意差は検出されなかった($p > 0.05$)。一方、4残1伐および3残2伐は、いずれも 90° の場合よりも平均モーメントがおおよそ5割増加し、いずれも有意差が検出された。

3. 2 点状間伐および群状間伐

平均モーメントおよび相対モーメントが無間伐よりも増加した範囲として、相対モーメントが1.3以上であった樹木模型の面的な広がりを検討すると、点状間伐の場合は伐区の風下側に面した1個体のみ相対モーメントの増加がみられ、それ以外の樹木模型に増加はなかった(図12)。さらに、群状間伐においてモーメントの増加した範囲は、 2×2 のとき風下側1列目のみ、 $3 \times 3 \sim 5 \times 5$ は2列目まで、 7×7 と 9×9 は3列目まで増加しており、伐区が大きいほどモーメントが増加する範囲が風下側に広がっていた。また、左右方向を検討すると、伐区幅よりも左右1個体分広い範囲で平均モーメントの増加がすべての群状間伐に見られた、しかし左右の2列目まで増加したものはなかった。群状間伐の場合は伐区のサイズが大きくなるほど伐区の風下側に面した樹木模型の平均モーメントおよび相対モーメントが大きくなる傾向が見てとれる。そこで、伐区一辺の長さを樹木模型の高さで除した値を伐区サイズの無次元スケールとし、それを横軸に伐区風下側の1列目、2列目、3列目の平均値を縦軸にプロットした(図13)。その結果、1列目、2列目、3列目のいずれも伐区が大きくなるほど平均モーメントおよび相対モーメントが急激に大きくなったあと漸増する様子がみら

図10 列状伐採の種類ごとの平均モーメントおよび相対モーメント

括弧の値は相対モーメントであり、無間伐を1とする相対値である。誤差線は標準誤差である。Tukeyの方法による多重比較検定を行った(a, b, c: $p < 0.01$)。

図11 植栽列が 45° のときの無間伐および列状伐採の種類ごとの平均モーメントおよび相対モーメント

括弧は相対モーメントであり、無間伐を1とする相対値である。誤差線は標準誤差である。*: 植栽列が 90° の場合と有意差が検出された($p < 0.05$)。有意差の検定はt検定で行った。

表3 植栽列が 45° の場合の平均モーメントの 90° の場合に対する比

無間伐	4残1伐	3残2伐
1.10	1.47	1.52

れた。

そこで、漸近値を推定するため、 c_0 、 c_1 、 c_2 を回帰係数とする(2)式

$$y = c_0 + c_1 \cdot \exp\left(\frac{-(x - \text{const.})}{c_2}\right) \quad (2)$$

で列ごとに回帰したとき、1列目は3.4hで漸近値の9割

点状間伐

-	-	-		-	-	-
2.2 (1.0)	1.8 (1.0)	2.9 (1.1)	3.1 (1.6)	2.6 (1.1)	1.9 (1.0)	2.3 (1.0)
2.2 (1.0)	1.9 (1.0)	3.0 (1.1)	2.1 (1.0)	2.7 (1.1)	2.0 (1.0)	2.5 (1.0)
2.0 (1.0)	1.8 (1.0)	2.5 (0.9)	2.0 (1.0)	2.4 (1.0)	2.0 (1.0)	2.4 (1.0)

3×3群状間伐

— — —			伐区			— — —		
2.4 (1.0)	2.4 (1.0)	3.0 (1.3)	4.6 (2.3)	4.9 (2.7)	4.0 (2.5)	2.0 (1.5)	1.4 (1.1)	1.3 (1.0)
2.5 (1.0)	2.5 (1.0)	2.9 (1.2)	2.7 (1.2)	2.8 (1.4)	2.3 (1.3)	1.9 (1.3)	1.5 (1.1)	1.3 (1.1)
2.5 (1.0)	2.5 (1.0)	2.5 (1.0)	2.4 (1.1)	2.2 (1.1)	2.0 (1.2)	1.6 (1.2)	1.5 (1.1)	1.3 (1.0)

風向
↓

2×2群状間伐

伐区			伐区				
-	-	-	伐区		-	-	-
2.7 (1.0)	2.4 (1.0)	2.6 (1.2)	3.9 (2.1)	3.4 (2.2)	2.1 (1.3)	1.5 (1.1)	1.9 (1.0)
2.7 (0.9)	2.5 (1.0)	2.6 (1.1)	2.3 (1.1)	1.9 (1.2)	2.0 (1.2)	1.5 (1.0)	1.9 (1.0)
2.8 (1.0)	2.5 (1.0)	2.3 (1.0)	2.2 (1.1)	1.7 (1.1)	1.6 (1.0)	1.4 (1.0)	1.9 (1.0)

4×4群状間伐

-	-	-	伐区				-	-	-
2.8 (1.0)	2.8 (1.0)	3.7 (1.4)	6.2 (2.6)	6.7 (3.2)	6.1 (3.3)	4.6 (2.9)	2.3 (1.5)	1.4 (1.0)	1.8 (1.0)
2.8 (0.9)	2.9 (1.0)	3.5 (1.2)	3.3 (1.3)	3.6 (1.5)	3.2 (1.6)	2.3 (1.4)	2.3 (1.4)	1.6 (1.1)	2.0 (1.0)
2.9 (1.0)	3.0 (1.0)	3.0 (1.1)	2.9 (1.1)	2.6 (1.2)	2.3 (1.1)	1.9 (1.1)	1.7 (1.1)	1.6 (1.1)	2.0 (1.0)

3×3群状間伐における図示した範囲

5×5群状間伐

-	-	-	伐区				-	-	-
2.5 (0.9)	2.9 (1.0)	3.9 (1.6)	6.5 (3.1)	6.1 (3.3)	5.8 (3.9)	5.0 (3.9)	3.6 (3.7)	2.1 (1.8)	1.5 (1.1)
2.3 (1.0)	3.1 (1.1)	3.9 (1.4)	3.8 (1.3)	4.0 (1.5)	3.8 (1.6)	3.3 (1.7)	2.5 (1.5)	2.4 (1.5)	1.7 (1.2)
2.4 (1.0)	3.1 (1.1)	3.2 (1.1)	3.4 (1.2)	3.0 (1.2)	2.6 (1.1)	2.3 (1.2)	1.9 (1.2)	1.7 (1.1)	1.6 (1.0)

7×7群状間伐

-	-	-	伐区				-	-	-
2.6 (1.0)	3.2 (1.1)	4.6 (1.8)	7.8 (3.6)	7.4 (3.8)	6.5 (4.2)	5.4 (4.2)	4.5 (4.5)	5.6 (4.4)	5.3 (3.8)
2.4 (1.0)	3.2 (1.1)	4.4 (1.5)	4.3 (1.5)	4.6 (1.8)	4.2 (1.8)	3.7 (1.9)	3.1 (1.9)	3.0 (1.8)	2.2 (1.5)
2.5 (1.1)	3.1 (1.1)	3.4 (1.2)	3.5 (1.3)	3.3 (1.3)	2.9 (1.2)	2.5 (1.2)	2.1 (1.2)	2.0 (1.2)	1.8 (1.2)

9×9群状間伐

-	-	-	伐区				-	-	-
2.1 (0.9)	2.4 (1.0)	6.0 (2.3)	12.0 (4.2)	12.1 (4.9)	10.4 (4.9)	8.4 (4.4)	7.1 (4.7)	5.8 (4.6)	4.8 (4.9)
1.5 (1.1)	2.2 (1.2)	4.1 (1.8)	5.2 (1.8)	5.7 (2.0)	5.5 (2.0)	4.9 (1.9)	4.7 (2.0)	4.0 (2.0)	3.4 (2.1)
1.5 (1.1)	2.1 (1.2)	2.8 (1.2)	3.8 (1.3)	4.1 (1.4)	3.8 (1.4)	3.4 (1.3)	3.2 (1.4)	2.8 (1.4)	2.3 (1.4)

11×11群状間伐

-	-	-	伐区				-	-	-
2.3 (1.0)	2.5 (1.1)	6.0 (2.6)	12.6 (4.9)	14.7 (5.3)	12.8 (5.2)	10.7 (5.0)	8.6 (4.5)	7.5 (4.9)	6.4 (5.0)

図 12 点状および群状間伐における伐区の風下側における樹木模型の平均モーメントと相対モーメント
着色部分が相対モーメント 1.3 以上の模型である。

図13 伐区サイズに対する平均モーメントの変化

図14 伐区サイズに対する相対限界風速

に到達し、漸近値は $13.3 \times 10^4 \text{ Nm}$ (相対モーメント=6.5) であった。また、2列目、3列目の漸近値はそれぞれ $5.5 \times 10^4 \text{ Nm}$ (相対モーメント=3.0)、 $3.3 \times 10^4 \text{ Nm}$ (相対モーメント=1.7) であった。

3. 3 間伐方法ごとの相対限界風速

点状・群状間伐において伐区が大きくなると限界風速は急減し、およそ1hで限界風速が5割小さい値になると推定された(図14)。その後も伐区が大きくなるにしたがって減少が続き、図11における回帰線の漸近値のときに0.39まで減少すると推定された。

列状間伐は植栽列が風向に対して90°の場合は、1伐と2伐におけるいずれの残存列の列状間伐であっても、点状・群状間伐より相対限界風速が大きかった。しかし、植栽列が風向に対して45°の場合は点状・群状間伐より相対限界風速が小さかった。

4. 考察

列状間伐において、1列の伐採列を設けた2残1伐、3残1伐、4残1伐は互いに平均モーメントの差が小さかった。このことは、3残2伐、4残2伐、5残2伐の2列伐採同士の場合も同様であった。しかし、1伐の相対モーメントは無間伐に対して4割増加であったのに対して、2伐は8割の増加であった。以上のことから、列状間伐では残存木に作用するモーメントに残存列数はほとんど影響せず、伐採列数が主に影響すると考えられた。Gardinerらは風洞実験で3残1伐、6残2伐の2種類の列状間伐を模して実験を行い、作用するモーメントを測定した。それによると、伐採列風下側1列目のモーメントは3残1伐よりも6残2伐の方が増加したと報告しており、本研究の結果と一致していた¹¹⁾。しかし、Gardinerらにおいて伐採列の風下側の残存列1列目から3列目までモーメントにほとんど差がなかったのに対して、本研究では点状間伐のときに1列目は2列目や3列目より明らかにモーメントが大きかった(図12)。結果の相違は、伐採によって風速に変化があった範囲の空間分布が異なったことを示していると考えられるが、空間分布の違いが生じた理由を明らかにするには、伐採列周辺の風流を検討し、伐採時における風況変化を詳細に調べる必要があると考えられた。

植栽列と風向の関係では、1伐、2伐のいずれも、植栽列が風向に対して45°の場合は90°の場合よりもモーメントが5割大きくなっていた。植栽列が風向に対して45°の関係にあると、ある個体の風上側には格子における対角の位置の林木が風上側の隣接木となる。この場合の隣接木との距離は、格子における隣り合った交点にある隣接木との距離よりも長くなる。その結果、林木に対して相対的に広い空間が風上側に開くことになり、林内に侵入した風が林木に風荷重をもたらしやすい可能性が考えられた。このような、林冠に開いた空間ができた場合に風害が発生しやすいことはスウェーデンにおけるノルウェースプルース林の被害調査で確認されており¹²⁾、シトカスプルース林でモーメントを測定した結果からもわかっている¹¹⁾。このことは、林地の主風向に対して斜めに伐採列を設けた場合、伐採列を増やしたのと同様の影響がもたらされることを意味する。風害は台風の強風に起因することが多く、被害地の面的分布、被害の程度、被害地の地形条件等を統計的に解析すると、斜面方位が南西から南東にかけての南方を主とする斜面で被害が発生しやすいことが明らかになっている¹³⁾。これは、台風による強風と正対する斜面のリスクが高いことを示しており、

そのような斜面で列状間伐を行う場合は伐採列数を少なくするとともに、等高線に沿って伐採列を設けることによって、モーメントの増加を抑制する必要があると考えられた。

モーメントが増加する範囲は、点状間伐と 2×2 の群状間伐までは風下側 1 列、 5×5 の群状間伐までは風下側 2 列目まで、 7×7 の群状間伐以上は少なくとも風下側 3 列目までモーメントの増加が見込まれた (図 12)。このように伐区が大きいくほどモーメントが増加する範囲が広がっていた。しかし、1 列目に比べて 2 列目、3 列目の平均モーメントは十分小さく (図 13)、それは 1 列目による防風効果によるものと考えられた。したがって、風害リスクの面では伐区に面した 1 列目を主に考慮すべきと考えられた。また、伐区が大きくなるとモーメントが指数関数的に増加していたことから (図 13)、1 列目のモーメントを小さくするには伐区を小さくするのが有効と考えられた。本研究で観測されたモーメントの急増とその後の漸増は、樹木模型を多数並べた中に様々なサイズのギャップを作って樹木模型に作用するモーメントを測定した Gardiner らの実験においても同様な結果が示されている¹¹⁾。伐区が大きくなるとモーメントが指数関数的に増加することは、もし 1 列目の林木が強風を受けて倒木した場合、その影響は伐採列を 1 列増やしたに等しく、新たに 1 列目になった林木は、1 列目の防風効果に守られなくなった影響と、より大きな伐区に面することになった影響によって、モーメントが急増することを意味する。したがって、間伐をたとえ小さい伐区、少ない列数で行うとしても、間伐後に風に弱い個体が 1 列目に残存しないように選木あるいは伐区の設定をする必要があると考えられた。特に、列状間伐の場合は機械的に伐採列が決められるのが一般的であるが、風害リスクを低減させるには部分的な伐採個体の調整が必要と考えられた。

本研究においては、点状・群状間伐の伐区を 1 つ設けた場合についての実験であった。現実には目標とする間伐率を達成するように、複数の伐区が設けられることになる。その場合、間伐率を高くするほど伐区同士が接近せざるを得ず、風上側の伐区の影響でモーメントが増加した範囲に隣の伐区が作られる可能性が高まる。このような場合の影響は本研究では明らかではなく、さらなる検討が必要である。

伐区を大きくしていくと大面積皆伐へと行き着く。大面積皆伐は生態系や土壌流出等への影響が懸念されているが、経済性の観点から合理的であるとの理由で採用されることもある伐採方法である。伐区の大きさに対する

平均モーメントの大きさの関係 (図 13) において、回帰線の漸近値は伐区を広げていった場合の最大値と考えられ、それは大面積皆伐した場合の残存木の 1 列目に作用するモーメントと考えてよいだろう。1 列目の回帰線において、 $3.4h$ で漸近値の 9 割に到達し、モーメント比の漸近値は 6.5 であった。漸近値から相対限界風速を計算すると 0.39 であり、大面積皆伐における残存木 1 列目は風に対して極めて脆弱であると考えられた。ここで計算した値は回帰線を外挿して推定したものであるため、さらに研究を進めて推定精度を高める必要がある。しかし、測定値のある $2h$ の範囲であっても相対モーメントは 5.0 に達し、相対限界風速がおおよそ 0.45 に下がっていたことから、大面積皆伐で生じた 1 列目が強風に脆弱であることは明らかである。

実験したすべての間伐方式を相対限界風速で比較すると、植栽列が風向に対して 90° の場合の列状間伐は、点状・群状間伐より相対限界風速が大きく、植栽列が風向に対して 45° の場合は点状・群状間伐より相対限界風速が小さかった (図 14)。このように、間伐方法によって風害リスクに差があったが、間伐方法の違いによる差は相対限界風速にすると 0.1 以内であって、むしろ伐区の大きさが相対限界風速の低下に顕著に影響していると考えられた。特に $1h$ までの範囲で相対限界風速が 0.5 付近まで急激に低下し、それより伐区の高い範囲は緩やかに低下していた。したがって、 $1h$ よりも伐区の高い範囲では風害リスクに劇的な違いは無く、いくら伐区を大きくしても相対限界風速がせいぜい 0.1 低下するのみである。このことは、間伐にともなう風害リスクを明らかに低下させるには伐区のサイズが $1h$ 以内の範囲で調整する必要があることを示している。

本研究は間伐後数年以内において風害リスクが高まることを解決すべき問題として捉え、間伐方法ごとのリスクを評価したものであった。しかし、間伐を行って立木密度を減らした林では、林木の肥大成長や根系の成長が改善して強風に強い形状になるため¹⁴⁾、長期的に見た場合はむしろ風害リスクが減と考えられている¹⁵⁾。そのため、森林管理において成長の早い段階で定性的点状間伐を行って、早めに風害に強い林木を育てることも提案されている¹⁶⁾。間伐は避けられるもの、あるいは避けるべきものではないことを考えれば、間伐のメリットや間伐のタイミングを考慮しながら、施業体系に組み入れる必要があると考えられる。さらに、現場で選択された間伐方法に対して、実際に風害が発生するかどうかは、間伐方法に由来する風害リスクだけでなく、台風などの強風が森

林を襲う確率、地形条件および林木の生育状況によって左右されるものである。したがって、本研究で示した間伐方法の風害リスクだけでなく、他の条件と総合的に判断する必要がある。

5. おわりに

森林管理において間伐は不可欠の施業であるが、風害リスクを高める施業でもある。現場では様々な間伐方法が実施されているが、間伐方法を選択するにあたって経済性などが重視され、風害リスクは十分考慮されていないのが現状である。そのような状況の下、本研究は間伐方法による風害リスクを定量化することを目的として進められた。その結果以下のことが明らかとなった。

1. 列状間伐において、残存列数と伐採列数に様々な組み合わせがあるが、風害リスクに残存列数はほとんど影響せず、伐採列数の影響が大きかった。したがって、風害リスクを低減させるためには伐採列数を少なくする必要があると考えられた。
2. 列状間伐において、植栽列と風向の角度が斜めになると風害リスクが高まっていた。台風の強風が吹きやすい場所では、想定される風向と直交に伐採列を設定することによって、風害リスクが軽減できると考えられた。
3. 点状・群状間伐において、伐区に面した1列目の樹木模型のモーメント増加が顕著だった。したがって、1列目に風に弱い林木が残らないように伐区を設定する必要があると考えられた。
4. 限界風速は伐区の一辺のサイズが1h以内で急減していたことから、強風の襲来確率が高いところは伐区を小さくすることによって風害リスクの低減が可能であると考えられた。

参考文献

- 1) 佐藤 隆光, 「防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究」北海道大学大学院農学研究科邦文紀要, 第24巻, 第2号, pp. 113-164, (2002)
- 2) 村井 宏, 石川 政幸, 遠藤 治郎, 只木 良也, 「日本の海岸林—多面的な環境機能とその活用」, ソフトサイエンス社, (1992)
- 3) 梅津 勘一, 「日本の海岸林の成り立ちと推移—庄内海岸林を中心に—」, 樹木医学研究, 第20巻, 第2号, pp. 104-111, (2016)
- 4) Cremer, W., Myers J., van der Duys, F., and Craig E.,

“Silvicultural lessons from the 1974 windthrow in radiata pine plantations near Canberra”, Australian Forestry, Vol. 44, pp. 274-292, (1977)

- 5) 諫本 信義, 高宮 立身, 「1991年9月, 台風19号により発生した大分県における森林被害の要因解析」森林立地, 第34巻, pp. 98-105, (1992)
- 6) (社)兵庫県治山林道協会, 「風倒木被害と再度災害防止対策」, (社)兵庫県治山林道協会, (2008)
- 7) 農林水産省
[http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sinrin_hoken/\(2017.5.13\)](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/sinrin_hoken/(2017.5.13))
- 8) 木幡 靖夫, 「高性能林業機械による列状間伐の繰り返しについて」森林利用学会誌, 第21巻, 第1号, pp. 15-20, (2006)
- 9) 独立行政法人 森林総合研究所四国支所, 「強度間伐施業のポイント」, 独立行政法人 森林総合研究所四国支所, (2013)
- 10) 鈴木 覚, 野口 宏典, 後藤 義明, 吉竹 孝, 坂本 知己, 「クロマツ海岸林における樹木の動揺の特徴」, 海岸林学会誌, 第9巻, 第2号, pp. 97-102, (2013)
- 11) Gardiner B., Stacey G., Belcher R., and Wood C., “Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability”, Forestry, Vol. 70, No. 3, pp. 233-252, (1997)
- 12) Valinger, E., and Pettersson, N., “Wind and snow damage in a thinning and fertilization experiment in Picea abies in southern Sweden”, Forestry, Vol. 69, No. 1, pp. 25-33, (1996)
- 13) 三浦 覚, 松本 陽介, 真下 育久, 「台風15号(昭和56年)により東京大学北海道演習林に発生した風害の要因解析」, 東京大学農学部演習林報告, 第73号, pp. 139-160, (1984)
- 14) Peltola, H., and Kellomaki, S., “A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand age.”, Silva Fennica, Vol. 27, No. 2, pp. 99-111, (1993)
- 15) Achim, A., Ruel, J., and Gardiner, B., “Evaluating the effect of precommercial thinning on the resistance of balsam fir to windthrow through experimentation, modelling and development of simple indices”, Can. J. For. Res., Vol. 35, pp. 1844-1853, (2005)
- 16) Cameron, A., “Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality”, Forestry, Vol. 75, No. 1, pp. 25-35, (2002)