



Title	北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形
Author(s)	渋谷, 正人; 浦田, 格; 鳥田, 宏行 他
Citation	森林立地, 53(2), 53-59 https://doi.org/10.18922/jjfe.53.2_53
Issue Date	2011
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67794
Rights	@2011森林立地学会 本文データは学協会の許諾に基づきJ-STAGEから複製したものである。渋谷 正人, 浦田 格, 鳥田 宏行, 飯島 勇人 (2011) 北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形. 森林立地, 53(2) : 53-59.
Type	journal article
File Information	53_KJ00007730200.pdf



北海道中央部の針葉樹人工林における風倒被害と樹形

渋谷 正人^{1,*}・浦田 格²・鳥田 宏行³・飯島 勇人⁴¹北海道大学農学研究院環境資源学部門森林資源科学分野・²北海道大学農学院環境資源科学専攻森林資源科学講座・³北海道総合研究機構森林本部林業試験場・⁴山梨県森林総合研究所

本研究では、樹木あるいは林分の風倒抵抗性に対する樹形の効果について検討するため、北海道中央部で2004年に風倒被害のあった地域の針葉樹人工林で、被害の発生と樹形の関係について調査した。カラマツ、トドマツ、エゾマツ人工林を対象に、風倒後2~4年後に、被害林と無被害林で調査し、形状比、樹冠長率(樹冠長と樹高の比)、相対風心高(風心高と樹高の比)について検討した。カラマツ人工林とトドマツ人工林では、平均形状比は被害林分と無被害林分で分離し、無被害林分で小さかった。樹冠長率と相対風心高の結果から、カラマツ人工林とトドマツ人工林の無被害林分では、被害林分よりも樹冠が大きい傾向が明らかだった。エゾマツ人工林でも、形状比、樹冠長率、相対風心高については類似した傾向が認められた。これらの結果は、樹形と風倒抵抗性には明確な関係があることを示し、形状比が小さく樹冠の大きい樹木がより風倒抵抗性が高いといえる。また風倒被害の発生と樹形の関係は、ある閾値を境に被害確率が急激に変化する関係と考えられた。風倒確率を低減させるためには、林分管理が必要であり、樹形は林分密度に強く影響されるので、人工林の風害リスク管理には密度管理が重要である。

キーワード：針葉樹人工林、樹冠サイズ、形状比、風倒

Masato Shibuya, Tsutomu Urata, Hiroyuki Torita and Hayato Iijima : Windthrow damage and tree shape in coniferous plantations in central Hokkaido, northern Japan. Japanese Journal of Forest Environment 53:53-59, 2011.

We investigated the relationship between windthrow damage and tree shape in coniferous plantations that had suffered windthrow in 2004 in central Hokkaido, northern Japan, to examine the effect of tree shape on the resistance of trees and stands to windthrow. We investigated the following tree-shape parameters in damaged and undamaged plantations of *Larix kaempferi*, *Abies sachalinensis*, and *Picea jezoensis*, major plantation species in Hokkaido, 2-4 years after the windthrow: slenderness ratio (H/D ratio), crown length/tree height ratio (C_L ratio), and the height of the center of gravity of the wind load/tree height ratio (H_w ratio). In *L. kaempferi* and *A. sachalinensis* plantations, mean H/D ratios were distinct between damaged and undamaged plantations; the mean H/D ratio was lower in undamaged plantations than in damaged plantations. Based on differences in C_L and H_w ratios, the crown size of *L. kaempferi* and *A. sachalinensis* trees was larger in undamaged plantations than in damaged plantations. In *P. jezoensis* plantations, similar tendencies in H/D , C_L , and H_w ratios were observed. These data suggest a definite relationship between tree shape and resistance to windthrow, whereby trees with small slenderness ratios and large crowns are more resistant to windthrow. It is also suggested that vulnerability of coniferous plantations to windthrow changes drastically at thresholds in H/D and C_L ratios. Therefore, coniferous plantations should be managed to reduce windthrow risk. Because tree shape is heavily influenced by stand density, risk management on plantations should include density control initiatives.

Key words : Coniferous plantation, Crown size, Slenderness ratio, Windthrow

1. はじめに

強風は世界各地で森林被害の主要な要因となっている(Savill, 1983)。日本においては、台風により頻度高く壊滅的な被害が生じ(Kamimura and Shiraishi, 2007)、また今後地球温暖化傾向が続くなら台風被害はより破壊的になると予測されている(Oouchi *et al.*, 2006)。したがって、風害を軽減するリスク管理が不可欠であり(Gardiner and Quine, 2000)、とくに風害を受けやすい針葉樹人工林には対策が必要である(Chiba, 2000; Wilson and Oliver, 2000)。

風害の発生には、気象条件、地形、土壌タイプ、林況など多くの要因が影響する。これらの要因のうち、林況だけが、密度管理などの保育作業により制御可能である(Kamimura

and Shiraishi, 2007)。風害の発生や程度に影響する林分要因として、樹種(Ruel, 2000; Nicoll *et al.*, 2006)、密度(Blackburn and Petty, 1988)、樹高あるいは林齢(Savill, 1983; Foster, 1988; Fujimori, 1995; Quine, 1995)、樹形(Cremer *et al.*, 1982; Wilson and Oliver, 2000; Mason, 2002)があげられる。これらのうち、樹形は樹木に作用する風荷重に強く影響し、また密度管理によって制御可能なため、重要な要因である(Kilpatrick *et al.*, 1981; Rollinson, 1988)。

風倒被害に関しては、形状比(H/D 比; H : 樹高, D : 胸高直径)が、樹木あるいは林分の抵抗性を表す指標として有効とされている(Cremer *et al.*, 1982; Mitchell, 2000)。一般に、形状比の小さい樹木がより安定的で(Wilson and Oliver, 2000; Mason, 2002)、より風倒に対する抵抗性が高いとされ

* 連絡・別刷請求先(Corresponding author): 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 北海道大学農学研究院環境資源学部門森林資源科学分野: Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources, Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

E-mail: shibuya@for.agr.hokudai.ac.jp

1 Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources, Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University

2 Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

3 Forestry Research Department, Hokkaido Research Organization

4 Yamanashi Forest Research Institute

(2011年1月31日受付, 2011年5月18日受理)

ている (Blackburn and Petty, 1988; Ancelin *et al.*, 2004)。

また、針葉樹人工林では、形状比の小さい樹形は密度の低い林分で生じ、同時に個体レベルでは樹冠が大きい樹形となる (Kilpatrick *et al.*, 1981; Rollinson, 1988)。したがって、風倒被害は疎な針葉樹人工林で起こりづらと考えられ (水井・畠山, 1984; 諫本・高宮, 1992; 鳥田, 2006), 風倒確率を低減するために林分保育が推奨されている (Cremer *et al.*, 1982; Blackburn and Petty, 1988; Wilson and Oliver, 2000)。

一方、高密度で無間伐の針葉樹人工林の風倒抵抗性が高いとする研究例もある (Gardiner *et al.*, 1997; Cucchi *et al.*, 2005)。密度の高い人工林では、林冠表面に凸凹がなく平坦で、乱流の発生が抑えられる (Mitscherlich, 1973; Richter, 1975)。また隣接する個体の樹冠が接触することで、風による樹木の揺れが抑えられ (Balckburn *et al.*, 1988; Wood, 1995), さらに高密度なため、林内への風の流入が妨げられる (Slodičák, 1995; Cucchi *et al.*, 2005)。

このように、密度と樹形について、樹木の風倒抵抗性に関し、一見互いに両立しない主張がなされている (Savill, 1983)。また風害と樹形の関係については、諫本・高宮 (1992) の観察的な研究では、風害被害率に関する多変量解析の結果の中で断片的に指摘されていたり、Cremer *et al.* (1982) や Polley (1995) では、風害に関する総説の中の一要因として扱われ、樹形の影響が体系立って検討されていない。本研究では、樹形と樹木の風倒被害に関し相互に両立しない主張について確かめるためと、風倒抵抗性に対する直接的な樹形の効果を確かめるため、地形などの効果をできるだけ排除し、針葉樹人工林の樹形と風倒被害の関係について検討を行った。密度は林齢や成長段階が異なると直接比較できないが、形状比などの樹形要素は林齢によらず意味が明確で比較可能と考えられるためである。本研究の具体的な検討項目は、1) 風倒被害の発生と樹形の間には、どのような関係が存在するのか、2) 風倒被害と樹形に関係があるのなら、風倒抵抗性が高いとできる具体的な樹形要素値が存在するのかを明らかにすることである。風倒抵抗性の高い具体的な樹形要素値が見いだせれば、風倒リスク管理への応用が期待できる。

2. 調査地と方法

2.1 調査地

調査地は北海道中央部の支笏湖周辺に位置する国有林千歳地域と支笏地域で行った (北緯 $42^{\circ}45' \sim 42^{\circ}50'$, 東経 $141^{\circ}20' \sim 141^{\circ}35'$)。これらの地域では、カラマツ (*Larix kaempferi*), トドマツ (*Abies sachalinensis*), エゾマツ (*Picea jezoensis*), アカエゾマツ (*Picea glehnii*) が主要な造林樹種となっている。2004年9月の18号台風により、当地域の人工林では壊滅的な被害が生じた。被害形態は、ほとんどの林分で風倒被害であり、幹折れ害は稀であった。これは当地域が火山性土壌であり、樹木の根系が浅いためである (Koizumi *et al.*, 2007)。風害後、傾斜木、風倒木、幹折れ木とも速やかに処理が行われ搬出されたが、健全な個体は、天然更新のための母樹として積極的に保残された。本研究では、カラマ

ツ人工林33林分 (調査時27~56年生), トドマツ人工林21林分 (同40~72年生), エゾマツ人工林25林分 (同50~91年生) で調査を行った (表-1~3)。ほとんどのアカエゾマツ人工林はまだ若齢なため、被害は稀であった。風害に対する地形の効果を抑えるため、ほぼ平坦地あるいは緩斜地 (斜度 5° 以下) の林分を調査対象とした。調査林分は、次の3つの被害程度に区分した: 激害林分 (被害率80~90%以上と推察され、ほぼ全壊状態、一部測定可能な立木が残る林分、被害率は被害面積から推定), 中害林分 (被害率が50%前後の林分、被害率は切り株数と立木数から推定), 無被害林分 (ほとんどの個体が健全な林分) (表-1~3)。これら以外の被害程度の林分、例えば被害率が中害と無被害の間であるような林分はみられなかった。被害が大きかった林分では、被害木の処理後すぐに地植えが行われた林分が多く、そのため、すべての激害林分の被害率は不明である。被害形態も不明な林分が多いが、幹折れ害はひじょうに稀であったため、対象林分は風倒被害を受けたものとして調査を行った。

2.2 方法

2004年の風害後2~4年にあたる2006~2008年の秋期に、調査林分に残存する健全木を対象に、胸高直径、樹高と枝下高 (H_b) の測定を行った。各林分で14~30本の優占個体を測定した (表-1~3)。林縁木と、樹形に欠点 (例えば樹冠の偏奇など) のある個体は対象としなかった。測定結果から、次にあげる樹木の風倒抵抗性に関連すると考えられる樹形要素を求めた:

$$\text{形状比} = 100 \times \frac{H}{D}$$

$$\text{樹冠長率} = \frac{H - H_b}{H}$$

$$\text{相対風心高} = \frac{\{H_b + (H - H_b)/3\}}{H}$$

本研究では、風荷重の重心 (風心) は、樹冠の頂端から $2/3$ の高さにあると仮定した (小泉, 1987)。また、被害林分における風害後の残存木は、被害木よりも風倒抵抗性が高かったと推察される。本研究では各樹形要素の平均値を検討対象としたが、被害林分においては、林分内で風倒抵抗性が高かった個体の平均値が求められていると考えられる。

樹形要素間の相関分析を積率相関係数によって検討した。平均樹高は、林分の成長段階の指標とされる上層高と密接な関係があり (真辺, 1974; 渋谷ら, 1997; 石橋, 2006), 成長段階の指標として利用されることもあり (安藤, 1962), 本研究では林分成長段階を表すものと仮定した。平均樹高と樹形要素との関係は、例えば形状比は、密度管理の仕方によって、ある樹高に対して様々な値をとることが可能であるため、平均樹高と樹形要素の相関分析は行わなかった。解析には統計ソフト R を用いた (R Development Core Team, 2008)。

3. 結果

平均形状比は、カラマツ人工林で53~83, トドマツ人工林で54~86, エゾマツ人工林で53~78であった (表-1~3)。

表-1. カラマツ人工林の林況

林分 ^a	林齢 (年)	被害度	D^b (cm)	H^b (m)	H_b^b (m)	H/D 比 ^b	C_L 率 ^b	H_w^b	測定木 本数
5238ろ	45	S	27.3±5.2	20.5±0.9	12.7±1.3	78±15	0.38±0.07	0.75±0.05	20
5240ろ	44	S	27.8±5.2	20.5±1.8	12.1±1.4	76±12	0.41±0.06	0.73±0.04	25
5245に	27	S	16.5±3.2	13.0±1.1	7.1±1.0	81±11	0.45±0.08	0.70±0.05	30
5245ほ	27	S	19.1±3.0	14.2±1.4	8.3±0.9	76±10	0.41±0.09	0.73±0.06	30
5246ろ	47	S	28.9±5.0	21.6±1.5	12.7±1.2	77±13	0.41±0.07	0.73±0.05	20
5293い	51	S	20.9±2.6	16.8±0.9	11.0±1.4	82±12	0.35±0.07	0.77±0.05	17
5309は	47	S	22.0±2.4	17.2±1.3	10.7±1.3	79±9	0.38±0.06	0.75±0.04	20
5316い	47	S	23.5±3.2	17.3±1.8	11.6±1.9	75±11	0.33±0.08	0.78±0.06	20
5335ろ	42	S	17.4±2.8	13.9±1.5	9.9±1.6	81±13	0.29±0.08	0.81±0.05	20
5374に	51	S	25.8±3.1	20.6±1.0	13.3±1.3	81±9	0.36±0.06	0.76±0.04	20
5244へ	45	M	30.7±4.2	21.1±1.5	11.9±1.3	70±9	0.43±0.06	0.71±0.04	30
5245ろ	47	M	32.0±5.8	21.7±1.8	12.0±1.6	70±11	0.44±0.08	0.70±0.05	25
5248に	44	M	23.5±2.9	19.3±1.1	12.2±1.3	83±9	0.37±0.07	0.75±0.04	20
5309ろ	48	M	27.0±4.1	18.6±1.2	10.4±1.2	71±10	0.44±0.07	0.71±0.05	20
5226は	50	U	35.6±5.1	20.1±1.3	10.1±1.4	57±7	0.49±0.08	0.67±0.05	30
5226に	50	U	36.2±5.1	19.8±1.4	10.1±1.5	56±8	0.49±0.08	0.68±0.05	30
5226ほ	49	U	37.0±3.9	22.9±1.4	12.2±1.4	62±5	0.47±0.06	0.69±0.04	25
5244ろ	56	U	45.2±6.2	23.6±1.8	9.6±1.7	53±6	0.59±0.07	0.60±0.05	20
5247ろ	55	U	35.5±5.2	24.0±1.3	12.6±1.5	69±8	0.47±0.07	0.69±0.05	20
5247は	56	U	36.8±5.8	24.5±1.7	12.8±1.8	68±11	0.48±0.08	0.68±0.05	20
5247に	52	U	35.8±5.3	24.4±1.3	11.8±1.5	69±9	0.52±0.06	0.66±0.04	17
5349ろ	53	U	33.2±4.7	20.8±1.1	12.1±1.4	64±8	0.42±0.07	0.72±0.05	30
5350ろ	53	U	34.2±4.8	20.6±1.8	11.6±1.5	61±5	0.43±0.07	0.71±0.05	25
5350は	49	U	33.1±5.1	18.7±1.3	10.0±1.3	58±8	0.46±0.08	0.69±0.05	30
5351ろ	44	U	32.0±5.7	19.9±1.4	10.3±1.9	64±9	0.48±0.11	0.68±0.07	30
5354ろ	50	U	35.6±5.4	20.6±1.5	10.8±1.4	59±7	0.47±0.07	0.68±0.05	30
5355ろ	45	U	31.9±4.0	19.3±1.4	10.0±1.2	61±8	0.48±0.07	0.68±0.05	30
5358ろ	46	U	30.5±4.7	19.4±1.2	11.0±1.2	65±8	0.43±0.07	0.71±0.05	30
5358は	45	U	31.1±5.0	19.0±1.3	10.4±1.1	62±9	0.45±0.05	0.70±0.04	30
5375に	51	U	33.5±4.1	19.7±1.1	11.1±1.4	60±6	0.44±0.07	0.71±0.05	30
5377ろ	49	U	32.3±4.1	18.6±1.5	10.2±1.3	58±6	0.45±0.07	0.70±0.05	30
5378は	49	U	32.5±5.1	19.0±1.2	10.5±1.8	60±8	0.45±0.09	0.70±0.06	30
5379は	49	U	32.8±3.9	19.1±1.1	10.4±1.0	59±6	0.45±0.06	0.70±0.04	30

略号； D ：胸高直径， H ：樹高， H_b ：生枝下高， H/D 比：形状比， C_L 率：樹冠長率， H_w ：相対風心高， S ：激害， M ：中害， U ：無被害。

^a 国有林の林小班名，5378か小班には調査プロットを2箇所設置。

^b 平均値±標準偏差。

各樹種の全データを対象とすると，すべての樹種で，平均形状比は平均樹高にともない減少した(図-1a, 2a, 3a)。カラマツ人工林では，被害程度によって，平均形状比は異なっていた。激害林分では平均形状比は75以上であり，中害林分では1林分を除いて70前後，無被害林分では70未満であった(図-1a)。トドマツ人工林でも，平均形状比は被害程度によって異なっていた。激害林分では平均形状比は70以上であり，無被害林分では70未満であった(図-2a)。エゾマツ人工林の激害・中害林分では，平均形状比は60より大きかった。無被害林分では，2林分を除いて，平均形状比は激害・中害林分より小さかった(図-3a)。平均形状比は，全樹種で，被害林分と無被害林分で分離する傾向が認められた(図-1a, 2a, 3a)。

平均樹冠長率は，カラマツ人工林で0.29～0.59，トドマツ人工林で0.34～0.71，エゾマツ人工林で0.32～0.48であった(表-1～3)。すべての樹種で，平均樹冠長率は平均形状比と

負の相関があった(図-1b, 2b, 3b)。カラマツ人工林とトドマツ人工林では，無被害林分の平均樹冠長率は，激害林分あるいは中害林分よりも大きい傾向があった。カラマツ人工林では，被害林分と無被害林分はおおよそ0.45が境界となっており(図-1b)，トドマツ人工林では0.55であった(図-2b)。エゾマツ人工林の平均樹冠長率についても類似した傾向が認められるが，被害林分と無被害林分の間に明瞭な境界値はみられなかった(図-3b)。

平均相対風心高は，カラマツ人工林で0.60～0.81，トドマツ人工林で0.52～0.78，エゾマツ人工林で0.68～0.79であった(表-1～3)。全樹種で，平均相対風心高は平均形状比と正の相関があった(図-1c, 2c, 3c)。カラマツ人工林では，無被害林分の平均相対風心高は，激害林分や中害林分よりも小さく，境界値はおおよそ0.7であった(図-1c)。同じ傾向がトドマツ人工林でも認められ，境界値は0.65である(図-2c)。類似した傾向がエゾマツ人工林でもみられるが，やや判然とし

表-2. トドマツ人工林の林況

林分 ^a	林齢 (年)	被害度	D^b (cm)	H^b (m)	H_b^b (m)	H/D 比 ^b	C_L 率 ^b	H_w^b	測定木 本数
5213に	47	S	25.2±5.2	17.7±1.4	9.4±2.0	72±12	0.47±0.12	0.69±0.08	30
5214ち	43	S	24.0±5.5	16.3±1.6	8.5±1.7	71±15	0.48±0.10	0.68±0.07	30
5217ほ	44	S	19.7±4.2	13.7±1.2	7.4±0.9	71±11	0.46±0.08	0.70±0.05	30
5273は-1	51	S	27.7±5.0	20.0±1.3	12.6±1.9	74±13	0.37±0.09	0.75±0.06	30
5273は-2	51	S	29.4±6.2	20.1±2.2	11.8±1.6	71±15	0.41±0.08	0.73±0.05	14
5301ろ	45	S	21.1±5.4	14.5±1.8	6.8±1.6	72±14	0.53±0.11	0.65±0.07	30
5357は	40	S	16.4±2.6	12.3±1.5	6.2±1.6	75±7	0.49±0.14	0.68±0.09	20
5357に	72	S	23.8±5.8	19.5±2.1	12.8±2.3	86±16	0.34±0.11	0.77±0.07	30
5450ほ	45	S	24.2±5.5	17.6±1.8	10.4±1.7	75±13	0.40±0.10	0.73±0.07	25
5456は	47	S	24.5±5.2	17.5±1.6	10.7±1.1	73±10	0.38±0.08	0.74±0.05	30
5457に	47	S	25.9±6.6	18.4±2.3	10.2±1.9	74±13	0.44±0.11	0.71±0.07	30
5459ほ	48	S	25.6±6.6	18.0±2.3	10.1±1.9	73±15	0.44±0.09	0.71±0.06	30
5460に	49	S	26.1±5.7	17.8±2.2	10.1±1.8	70±10	0.44±0.07	0.71±0.05	20
5460と	49	S	29.0±6.6	20.2±2.1	11.8±1.9	72±12	0.41±0.10	0.73±0.06	30
6181ほ	41	S	21.7±4.2	16.6±1.8	10.6±1.5	79±13	0.36±0.11	0.76±0.08	30
6181-1	41	S	23.0±5.6	16.2±1.6	9.4±1.2	74±15	0.42±0.10	0.72±0.07	30
6181-2	41	S	20.0±4.8	16.7±2.1	11.0±1.5	86±13	0.34±0.08	0.78±0.06	30
5447は	72	U	43.6±6.4	23.1±1.8	9.1±2.2	54±6	0.61±0.10	0.60±0.06	25
5448に	46	U	33.1±5.7	19.1±1.4	6.0±1.7	59±6	0.68±0.09	0.54±0.06	30
5449に	45	U	31.5±5.6	18.9±1.3	5.4±1.7	61±10	0.71±0.09	0.52±0.06	25
5452は	45	U	31.0±4.7	20.4±1.5	9.0±2.2	67±8	0.56±0.10	0.63±0.07	30

略号と添え字については、表-1を参照。

表-3. エゾマツ人工林の林況

林分 ^a	林齢 (年)	被害度	D^b (cm)	H^b (m)	H_b^b (m)	H/D 比 ^b	C_L 率 ^b	H_w^b	測定木 本数
5254い	77	S	28.6±5.9	20.4±2.1	13.8±1.5	73±9	0.32±0.08	0.79±0.05	30
5257ろ	71	S	26.3±8.6	17.1±2.8	9.7±1.5	69±14	0.42±0.10	0.72±0.07	30
5258い	84	S	27.0±7.4	19.3±2.0	11.3±1.7	74±14	0.41±0.08	0.73±0.05	30
5264は	70	S	32.2±7.3	22.3±2.2	14.1±1.5	72±12	0.36±0.07	0.76±0.05	25
5273に	81	S	30.1±4.5	20.7±1.7	14.0±1.6	70±8	0.33±0.06	0.78±0.04	30
5276い	78	S	28.1±7.5	18.8±1.7	11.9±0.7	70±13	0.36±0.08	0.76±0.05	20
5279に	73	S	28.5±8.3	17.6±2.4	9.0±2.0	65±11	0.48±0.10	0.68±0.07	30
5281い	75	S	26.6±6.9	17.2±2.3	10.0±1.8	67±10	0.41±0.09	0.73±0.06	30
5283い	74	S	33.0±4.4	21.0±1.7	13.1±1.4	64±7	0.37±0.07	0.75±0.05	30
5300は	52	S	19.0±5.0	13.7±1.5	9.0±1.1	75±12	0.34±0.09	0.77±0.06	30
5302い	72	S	27.6±7.1	18.8±1.9	12.1±1.6	71±14	0.35±0.10	0.76±0.07	30
5304は	91	S	28.7±5.8	20.6±2.0	13.9±2.0	74±13	0.33±0.08	0.78±0.06	30
5306ろ	91	S	30.9±6.8	19.7±1.7	12.5±1.8	66±11	0.36±0.09	0.76±0.06	30
5310ろ	72	S	23.4±5.9	15.6±2.0	8.6±1.0	69±11	0.44±0.09	0.70±0.06	30
5323い	85	S	26.4±5.3	17.0±1.7	10.6±1.1	66±10	0.37±0.09	0.75±0.06	30
5274へ	50	M	21.3±4.9	16.2±1.4	9.8±0.7	78±11	0.39±0.05	0.74±0.03	30
5303は	不明	M	30.1±8.4	20.7±2.2	12.9±2.0	72±15	0.37±0.10	0.75±0.07	30
5215は	82	U	40.3±6.8	24.2±1.4	14.6±1.3	61±8	0.39±0.06	0.74±0.04	30
5215に	不明	U	36.4±7.3	23.7±1.5	15.0±1.6	67±12	0.37±0.07	0.75±0.05	30
5216は	51	U	24.8±4.9	17.4±1.3	10.0±1.7	72±13	0.42±0.12	0.72±0.08	30
5217は	59	U	31.7±5.1	18.7±1.3	9.8±1.3	60±8	0.47±0.08	0.68±0.05	30
5240い	65	U	40.1±10.3	21.4±2.1	11.1±1.2	56±12	0.48±0.06	0.68±0.04	30
5264に	68	U	43.5±10.3	23.7±1.8	12.6±2.3	57±11	0.47±0.09	0.69±0.06	30
5269ろ	不明	U	42.0±8.3	21.4±1.9	12.0±2.3	53±9	0.43±0.11	0.71±0.08	30
5274は	90	U	41.0±8.6	23.8±1.6	15.0±1.3	60±10	0.37±0.07	0.75±0.04	30

略号と添え字については、表-1を参照。

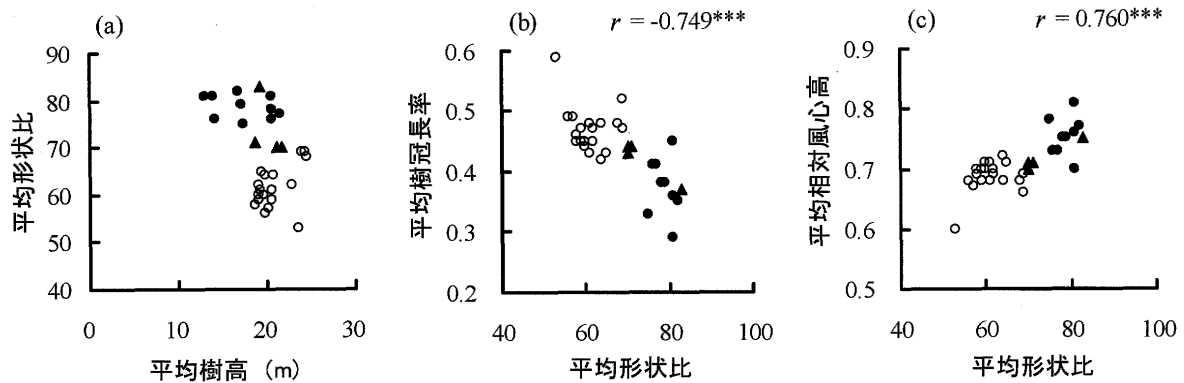


図-1. カラマツ人工林の樹形要素

(a) 平均形状比, (b) 平均樹冠長比, (c) 平均相対風心高, ●: 激害林分, ▲: 中害林分, ○: 無被害林分, r : 積率相関係数, ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$.

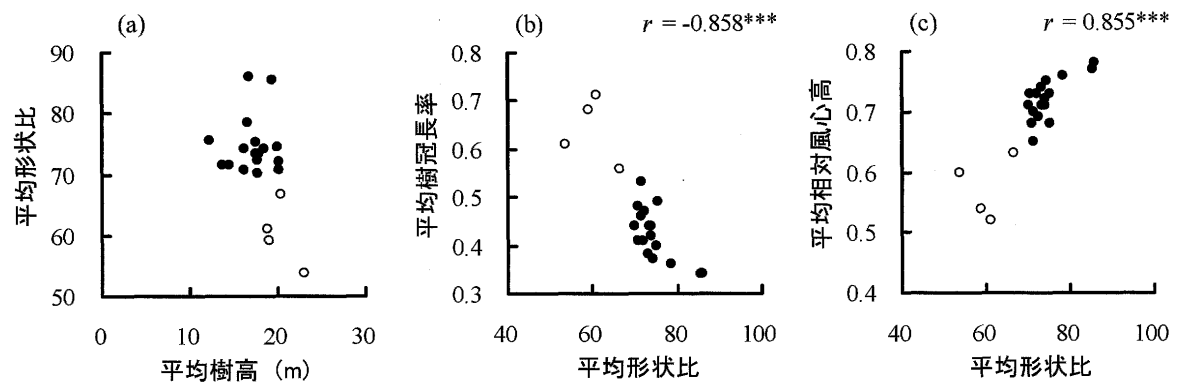


図-2. トドマツ人工林の樹形要素

説明については, 図-1を参照。

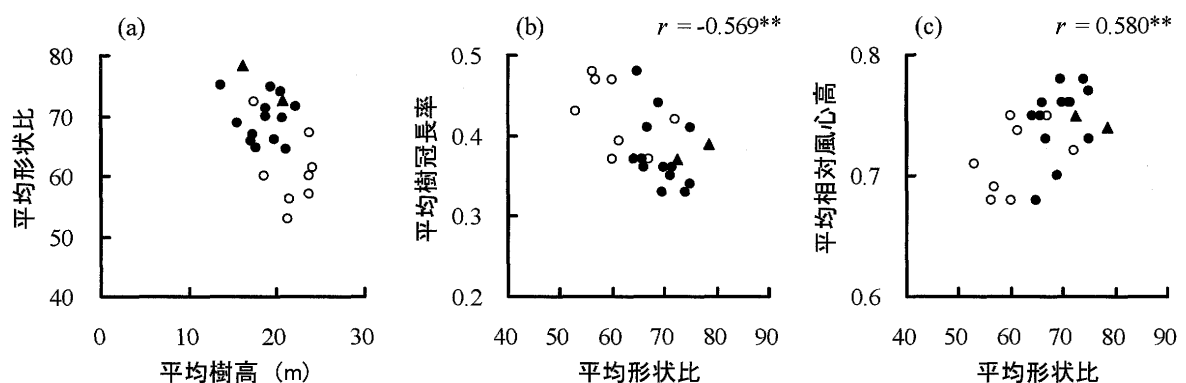


図-3. エゾマツ人工林の樹形要素

説明については, 図-1を参照。

なかった(図-3c)。

4. 考 察

調査対象とした3樹種すべてで, 平均形状比は無被害林分よりも被害林分で大きい傾向が認められた(図-1a, 2a, 3a)。本研究は, 2004年の風害の2~4年後に行っており, 被害林分では, 被害後の直径成長の促進により形状比は低下

しただろうと推測される。さらに被害林分での測定木は, 風倒抵抗性が高かったと推察される。それにも関わらず, 被害林分と無被害林分の間で平均形状比に差がみられた。カラマツ人工林とトドマツ人工林では平均形状比の差は明瞭で, 平均形状比70未満の林分で風倒抵抗性が高かった(図-1a, 2a)。エゾマツに関しては, 被害林分と無被害林分の平均形状比に明瞭な境界値はなかったが, 平均形状比60以下の林分は明

らかに風倒抵抗性が高かった(図-3a)。諫本・高宮(1992)は、日本のスギ(*Cryptomeria japonica*)とヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)の人工林の風害について、被害率80%以上の林分の平均形状比は70以上であり、被害率20%以下の林分の平均形状比はおおよそ60であることを報告している。またヨーロッパやニュージーランドでは、形状比70以下の樹木は風害に強いとされている(Cremer *et al.*, 1982; Polley, 1995; Ruel, 1995)。本研究の結果は、エゾマツ人工林を除いて、これらの先行研究と一致している。したがって、樹木の風倒抵抗性と形状比の関係は基本的には種特異的であろうが、地域や樹種に関係なく、平均形状比70以下の針葉樹人工林は風倒抵抗性が高い可能性が考えられる。また、被害の発生と平均形状比との関係は、カラマツとトドマツで被害林分と無被害林分間に明瞭な境界値が認められた(図-1a, 2a)ように、平均形状比の変化にともなって徐々に被害確率が変化するのではなく、ある閾値があり、それを境に急激に被害確率が変化するという関係のようであった。その閾値が、カラマツとトドマツでは70であり、エゾマツでは60といえそうである(図-1a, 2a, 3a)。

カラマツ人工林とトドマツ人工林では、被害林分よりも無被害林分で樹冠長率が大きい傾向があった(図-1b, 2b)。エゾマツ人工林では、ほとんどの無被害林分で平均樹冠長率は0.4以上であり(表-3)、カラマツ人工林やトドマツ人工林と同じような樹冠長率であった(図-3b)。これらのことから、平均樹冠長率の大きい林分で風倒抵抗性が高いといえ、カラマツ人工林では平均樹冠長率0.45以上で、トドマツ人工林では0.55以上のとき抵抗性が高いといえる。平均樹冠長率と風倒被害の発生についても、ともに徐々に変化する関係ではなく、ある閾値の前後で被害の発生率が急激に変化する傾向があると考えられる。平均相対風心高は、平均形状比との関係では平均樹冠長率と逆の傾向を示した(図-1c, 2c, 3c)。これらのことをまとめると、樹冠長率が大きく、それにともない相対風心高の低い樹形が風倒抵抗性の高い樹形といえる。風による樹木の転倒モーメントは、樹冠の受風面積と風心高に比例する(Mayhead, 1973; 小泉, 1987)。Gardiner *et al.* (1997)は、樹冠が大きいと風による転倒モーメントが増大し、風倒に対する安定性に負に影響することを示している。しかしながら、本研究では、樹冠長率の大きい樹木の風倒抵抗性が高く、大きな限界抵抗モーメントを持っている(Urata *et al.*, 2011)と推測された。樹冠サイズは、樹木の根系の広がり重量に比例的であり(Smith, 1964)、そのため樹冠が大きいと風倒抵抗性が増大するのではないかと考えられる(Peltola and Kellomäki, 1993)。

被害林分の残存木は、風倒木に比べると風に対する抵抗性が高いと考えられ、また2004年の風害後直径成長が大きくなっていると推測される。それにも関わらず、カラマツ人工林とトドマツ人工林では、被害林分と無被害林分で平均形状比や平均樹冠長率といった樹形に差が認められた。したがって、林冠閉鎖後の間伐実施段階にある針葉樹人工林の樹形と風倒抵抗性の間には明確な関係があると結論でき、平均形状

比や平均樹冠長率には、風倒被害の発生について閾値が存在するといえる。平均形状比の閾値は両樹種で70であり、平均樹冠長率では、カラマツが0.45、トドマツが0.55であった(図-1, 2)。本研究では、エゾマツでは何故樹木の抵抗性と樹形の関係が明瞭ではないのか検討できなかった。エゾマツの無被害林分の平均胸高直径は37.5 cmで、被害林分(27.5 cm)より大きく、この傾向はカラマツ(34.5 cmと24.5 cm)、トドマツ(34.8 cmと24.0 cm)でも同じであった。このことから、2004年の風害時には、エゾマツの無被害林分は被害林分より疎な状態であったと考えられるが、平均形状比、平均樹冠長率、平均相対風心高の差は明確ではなかった。この結果には、器官量配分パターン、樹冠形、樹冠の抗力係数などの樹種特性の違いや、林分保育経路の違いが影響しているのではないかと考えられる。

本研究の観察的な結果は、形状比の小さい樹木がより安定的で風倒抵抗性が高いとする既存研究(Wilson and Oliver, 2000; Mason, 2002)と一致する結果であったが、カラマツとトドマツに関しては、風倒被害確率を低減できる具体的な平均形状比値と平均樹冠長率値を得ることができた。密度が低いと形状比が小さく樹冠が大きいという人工林における密接な関係(Kilpatrick *et al.*, 1981; Rollinson, 1988)を考慮すると、針葉樹人工林の風倒被害を軽減するためには、無施業とするのではなく積極的な管理が推奨され、密度管理が重要である。しかし、人工林では間伐直後は風害の危険性が高いため(Cremer *et al.*, 1982; Achim *et al.*, 2005)、密度管理は成長初期段階から行うのが望ましい。そして密度管理の目安として、例えば平均形状比を70未満に維持することが推奨される。

本研究では、無間伐林分を調査対象とすることができなかった。そのため、樹形と風倒抵抗性について、広い密度域と広い生育段階に渡った徹底した解析はできなかった。樹形と風倒抵抗性の一般的な傾向については、別稿にて報告する予定である。

引用文献

- Achim, A., Ruel, J.-C., Gardiner, B.A., Laflamme, G., and Meunier, S. (2005) Modelling the vulnerability of balsam fir forests to wind damage. *Forest Ecology and Management* 204:35-50.
- Ancelin, P., Courbaud, B., and Fourcaud, T. (2004) Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *Forest Ecology and Management* 203:101-121.
- 安藤 貴 (1962) アカマツ天然生除伐試験林の解析(第2報)本数密度を中心とした解析. 林業試験場報告147:45-77.
- Blackburn, P., and Petty, J.A. (1988) Theoretical calculations of the influence of spacing on stand stability. *Forestry* 61:235-244.
- Blackburn, P., Petty, J.A., and Miller, K.F. (1988) An assessment of the static and dynamic factors involved in windthrow. *Forestry* 61:29-43.
- Chiba, Y. (2000) Modelling stem breakage caused by typhoons in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *Forest Ecology and Management* 135: 123-131.
- Cremer, K.W., Borough, C.J., McKinnell, F.H., and Carter, P.R. (1982) Effects of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forest Science* 12:244-268.
- Cocchi, V., Meredieu, C., Stokes, A., de Coligny, F., Suarez, J., and Gardiner, B.A. (2005) Modelling the windthrow risk for simulated forest stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 213:184-196.

- Foster, D.R. (1988) Species and stand response to catastrophic wind in central New England, USA. *Journal of Ecology* 76:135–151.
- Fujimori, T. (1995) Relationships between stand ages and wind resistances of stand —Forest damage by Typhoon 7 in 1959 in the Tokyo Regional Forestry Office, Japan. *Journal of Japanese Forestry Society* 77:602–605.
- Gardiner, B.A., and Quine, C.P. (2000) Management of forests to reduce the risk of abiotic damage —a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management* 135:261–277.
- Gardiner, B.A., Stacey, G.R., Belcher, R.E., and Wood, C.J. (1997) Field and wind tunnel assessments of the implications of respacing and thinning for tree stability. *Forestry* 70:233–252.
- 諫本信義・高宮立身 (1992) 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* 34:98–105.
- 石橋 聡 (2006) 長伐期化に対応したカラマツ人工林収獲予想表の作成. *北方林業* 58:49–56.
- Kamimura, K., and Shiraiishi, N. (2007) A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *Journal of Forest Research* 12:162–176.
- Kilpatrick, D.J., Sanderson, J.M., and Savill, P.S. (1981) The influence of five early respacing treatments on the growth of Sitka spruce. *Forestry* 54:17–29.
- 小泉章夫 (1987) 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究. *北海道大学演習林研究報告* 44:1329–1415.
- Koizumi, A., Oonuma, N., Sasaki, Y., and Takahashi, K. (2007) Difference in uprooting resistance among coniferous species planted in soils of volcanic origin. *Journal of Forest Research* 12:237–242.
- 真辺 昭 (1974) トドマツ密度管理図 (北方林業叢書53). 69pp, 北方林業会, 札幌.
- Mason, W.L. (2002) Are irregular stands more windfirm? *Forestry* 75:347–355.
- Mayhead, G.J. (1973) Some drag coefficients for British forest trees derived wind tunnel studies. *Agricultural Meteorology* 12:123–130.
- Mitchell, S.J. (2000) Stem growth responses in Douglas-fir and Sitka spruce following thinning: implications for assessing wind-firmness. *Forest Ecology and Management* 135:105–114.
- Mitscherlich, G. (1973) Wald und Wind. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 144:76–81.
- 水井憲雄・畠山末吉 (1984) カラマツ人工林の台風被害と耐風性. *北海道立林業試験場研究報告* 22:1–9.
- Nicoll, B.C., Gardiner, B.A., Rayner, B., and Peace, A.J. (2006) Anchorage of coniferous trees in relation to species, soil type, and rooting depth. *Canadian Journal of Forest Research* 36:1871–1883.
- Oouchi, K., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Mizuta, R., Kusunoki, S., and Noda, A. (2006) Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses. *Journal of Meteorological Society of Japan* 84:259–276.
- Peltola, H., and Kellomäki, S. (1993) A mechanistic model for calculating windthrow and stem breakage of Scots pines at stand edge. *Silva Fennica* 27:99–111.
- Polley, V.H. (1995) Beurteilung der mechanischen Stabilität der Waldbäume auf der Grundlage der Bundeswaldinventur. *Forst und Holz* 50: 594–597.
- Quine, C.P. (1995) Assessing the risk of wind damage to forests: practice and pitfalls. In: Wind and trees. Coutts M.P., and Grace J. (eds), 485pp, Cambridge University Press, Cambridge, 379–403.
- R Development Core Team (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- Richter, J. (1975) Sturmschäden bei der Fichte im Sauerland. *Der Forst- und Holzwirt* 30:106–108.
- Rollinson, T.J.D. (1988) Respacing Sitka spruce. *Forestry* 61:1–22.
- Ruel, J.-C. (1995) Understanding windthrow: silvicultural implications. *Forestry Chronicle* 71:434–445.
- Ruel, J.-C. (2000) Factors influencing windthrow in balsam fir forests: from landscape studies to individual tree studies. *Forest Ecology and Management* 135:169–178.
- Savill, P.S. (1983) Silviculture in windy climates. *Forestry Abstract* 44:473–488.
- 渋谷正人・矢島 崇・松田 強 (1997) シラカンバ林の密度管理図—成長にともなう平均材積-密度関係の推移にもとづく密度管理図の修正—. *北海道大学演習林研究報告* 54:202–211.
- Slodičák, M. (1995) Thinning regime in stands of Norway spruce subjected to snow and wind damage. In: Wind and trees. Coutts M.P., and Grace J. (eds), 485pp, Cambridge University Press, Cambridge, 436–447.
- Smith, J.H.G. (1964) Root spread can be estimated from crown width of Douglas fir, lodgepole pine, and other British Columbia tree species. *Forestry Chronicle* 40:456–473.
- 鳥田宏行 (2006) 2002年台風21号により北海道十勝の防風保安林に発生した風害の要因解析. *日本森林学会誌* 88:489–495.
- Urata, T., Shibuya, M., Koizumi, A., Torita, H., and Cha, J.Y. (2011) Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting. *Journal of Forest Research*. DOI 10.1007/s10310-011-0249-6.
- Wilson, J.S., and Oliver, C.D. (2000) Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Canadian Journal of Forest Research* 30:910–920.
- Wood, C.J. (1995) Understanding wind forces on trees. In: Wind and trees. Coutts M.P., and Grace J. (eds), 485pp, Cambridge University Press, Cambridge, 133–164.