

カラマツ林の力学的解析による風害予測

鳥田 宏行^{*1}・渋谷 正人²・小泉 章夫²

本研究では、カラマツの人工林の長伐期化に対する風害リスクを検討するため、植栽密度や本数密度管理の違いが強風に対する抵抗性へ及ぼす影響を、力学モデルによって評価した。抵抗性の評価には、風害（幹折れ、根返り）が発生するときの高度 10 m における風速を限界風速とし、この値を指標に検討を行った。その結果、被害形態は、すべて根返りとなった。全体的な傾向として、施業タイプとしては、中庸仕立て（収量比数 0.7~0.8）よりも疎仕立て（収量比数 0.6~0.7）タイプが強風に対する抵抗性が高く、疎植タイプで抵抗性が高いことが示された。また、すべての施業タイプにおいて、強風に対する抵抗性は経年変化を示し、成長過程の一時期（林齢 20~30 年）に低下傾向を示すが、その後、樹高成長速度が鈍るころから抵抗性が回復する傾向が示唆された。強風に対する抵抗性をもっとも低下する時期は、樹高成長が旺盛な時期でもあり、形状比がもっとも大きくなる時期とほぼ一致した。本研究では、施業タイプの差異が抵抗性に及ぼす影響は、地位指数が高い立地で大きい傾向が示された。

キーワード：形状比，限界風速，植栽密度，地位指数，風害

Hiroyuki Torita,^{*1} Masato Shibuya,² and Akio Koizumi² (2010) Wind Damage Prediction in Japanese Larch Stands Using a Mechanistic Model. J. Jpn. For. Soc. 92: 127–133. It is important to be able to assess the risk of wind damage to stands in a long rotation forestry operation. In this study a mechanistic model was used to examine the effect of different planting densities and thinning frequencies on the resistance of Japanese larch stands to wind damage. Critical wind speeds at a height of 10 m above ground level required to cause uprooting or stem breakage was used as the index of resistance to wind damage. All wind damage to trees was uprooting. The resistance of stands at lower planting densities was higher than that of stands at higher planting densities. Differences in thinning frequency affected stand resistance: management for a low yield index ($R_y=0.6\sim0.7$) increased the resistance of stands compared with management for a high yield index ($R_y=0.7\sim0.8$). As stand age increased, resistance to wind damage decreased until a tree was 20~30 years of age. Thereafter, resistance to wind damage increased as stand age increased. This 20- to 30-year period coincided with the period during which slenderness ratios (H/D) were the highest of all growing stages. Differences in a long rotation forestry operation at high site index had a strong effect on the resistance to wind damage.

Key words: critical wind speed, planting density, site index, slenderness ratio, wind damage

I. は じ め に

北海道のカラマツ人工林は、従来、30 年を目安に短伐期施業が想定されていたが、近年の需要構造の変化や、大径材化に対する加工技術の向上により、長伐期への指向が高まっている。しかしながら、長伐期施業へ移行すれば、当然ながら台風などの強風に晒される機会が増えるため、風害発生リスクの高まりが懸念される。たとえば、カラマツの主要生産地の一つである北海道東部は、たびたび襲来する台風により甚大な森林被害が発生しており（山根ら、1982；水井・畠山、1984；鳥田、2006）、このような地域における長伐期化を成功させるためには、台風襲来間隔はもとより、林分の強風に対する抵抗性の経年変化を検討する必要がある。

これまで、森林の気象害に関する研究は、広範な被害地を対象にした統計的な解析（三浦ら、1984；Jalkanen and Mattila, 2000；Mitchell *et al.*, 2001；Lanquaye-opoku and Mitchell, 2005；Scott and Mitchell, 2005；鳥田、2006）

や林分レベルでの研究（Cremer *et al.*, 1982；Slodicak and Novak, 2006）により、被害要因や間伐効果などの解明がなされてきた。また、力学的な見地からは、立木の引倒し試験（Smith *et al.*, 1987；Fredericksen *et al.*, 1993；Peltola *et al.*, 2000；Nicoll *et al.*, 2005, 2006）により、根系の根返り抵抗モーメントが具体的な数値として示されている。近年では、これらの成果をもとに立木の風害に関する力学モデルとして、GALES（Gardiner *et al.*, 2000）やHWIND（Peltola *et al.*, 1999）が開発され、被害リスクの予測や軽減に関する知見が得られるようになった。しかし、これらのモデルでは、根系の支持力に関するパラメータなどは、引倒し試験により決定されているため、対象地域や樹種が限定的であり、さまざまな樹種や施業体系の人工林の風害に対する抵抗性解明には適用は困難である。

本研究では、火山灰土壌地帯である北海道東部のカラマツ人工林の長伐期化に対する風害リスクを予測するため、強風への抵抗性に対する施業の影響を、力学モデルを用いて検討した。

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail：torita-hiroyuki@hro.or.jp

¹ 北海道立総合研究機構森林研究本部 〒079-0198 美瑛市光珠内町東山（Hokkaido Research Organization, Forest Research Department, Higashiyama, Koushunai, Bibai 079-0198, Japan）

² 北海道大学農学研究院森林資源科学分野 〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目（Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Nishi-9, Kita-ku, Sapporo 060-8589, Japan）

（2009 年 7 月 18 日受付；2009 年 12 月 27 日受理）

樹木の風害としては幹折れ害と根返り害が主要である。そこで本研究では、施業体系によって、樹形が変化することを考慮し、幹折れ害、根返り害の発生する限界風速を林齢ごとに求め、風害を軽減するためのカラマツ人工林管理について考察した。

II. モデルの概要

1. 樹幹のたわみと応力

風による樹幹のたわみは、樹幹形状を截頭円錐と仮定した片持ち梁における理論式を用いて解析した(澤田, 1983)。樹幹に作用する外部荷重としては、樹冠を三角形と仮定し、風による水平荷重 W と雪氷(冠雪, 着氷など)などによる垂直荷重 P が重心部位 G に作用するものとする(図-1)。このとき、樹高を H 、枝下高を H_c とすれば、荷重中心の高さ(風心高) L は、次式で表現される(Chiba, 1994)。

$$L = H_c + \frac{H - H_c}{3} \quad (1)$$

次に細り係数 τ (本研究では 3 mm/m と仮定した) および細り比 α を、胸高直径 D 、根元直径 D_0 、風心高直径 D_L を用いて以下のように定義する。

$$\tau = \frac{1}{2} \frac{D_0 - D}{1.3} = \frac{1}{2} \frac{D_0 - D_L}{L} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{D_L}{D_0} \quad (3)$$

これらから、任意の地上高 x における幹の直径 D_x は、(4) のようになる。

$$D_x = D_0 - 2x\tau = (1 - \beta x_R) D_0 \quad (4)$$

$$(\beta = 1 - \alpha, x = x_R L \quad (0 \leq x_R \leq 1))$$

さらに $X = 1 - \beta x_R$ とおけば、(4)式は(5)式のようにになる。

$$D_X = X D_0 \quad (\alpha \leq X \leq 1) \quad (5)$$

X における断面積 A_x 、断面係数 B_x 、断面2次モーメント I_x は、

$$A_x = X^2 A_0 \quad (A_0 = \pi D_0^2 / 4) \quad (6)$$

$$B_x = X^3 B_0 \quad (B_0 = \pi D_0^3 / 32) \quad (7)$$

$$I_x = X^4 I_0 \quad (I_0 = \pi D_0^4 / 64) \quad (8)$$

曲げモーメント M_x は、水平荷重 W と垂直荷重 P を用いて

$$M_x = -(1 - x_R) L W - (\delta - y) P \quad (9)$$

ここで、 δ は荷重点での水平変位である。

曲げによる基礎微分方程式は、

$$EI_x \frac{d^2 y}{dx^2} = -M_x \quad (10)$$

よって、(8)、(9) および (10) 式から、(11) 式が得られる。

ここで E は、ヤング係数を表し、 $\phi = \frac{L}{\beta} \sqrt{\frac{P}{EI_0}}$ とする。

$$X^4 \frac{d^2 y}{dX^2} + \phi^2 y = \phi^2 \left(\frac{LW}{\beta P} (X - \alpha) + \delta \right) \quad (11)$$

(11) 式の一般解は、

$$y = X \left(A \cos \frac{\phi}{X} + B \sin \frac{\phi}{X} \right) + \lambda (X - \alpha) + \delta \quad (12)$$

ここで、 $\lambda = LW/\beta P$ 、 A および B は、積分定数である。

境界条件、 $x=0$ 、 $X=1$ 、 $y=0$ を (12) 式に代入すると、

$$A \cos \phi + B \sin \phi = -(\delta + \beta \lambda) \quad (13)$$

もう一つの境界条件、 $x=0$ 、 $X=1$ 、 $dy/dx=0$ より、

$$A(\cos \phi + \phi \sin \phi) + B(\sin \phi + \phi \cos \phi) = -\lambda \quad (14)$$

(12)、(13)、(14) 式より、

$$y = \frac{1}{\phi} X \left[(\delta + \beta \lambda) \left(\sin \frac{X-1}{X} \phi - \phi \cos \frac{X-1}{X} \phi \right) - \lambda \sin \frac{X-1}{X} \phi \right] + \lambda (X - \alpha) + \delta \quad (15)$$

(15) 式に $X=\alpha$ 、 $y=\delta$ を代入して、荷重点での水平変位 δ を求めると、

$$\delta = \frac{\alpha \beta (\sin \gamma - \gamma \cos \gamma) \lambda}{\beta \sin \gamma + \alpha \gamma \cos \gamma} \quad (16)$$

ここで、 $\gamma = \beta \phi / \alpha$ である。

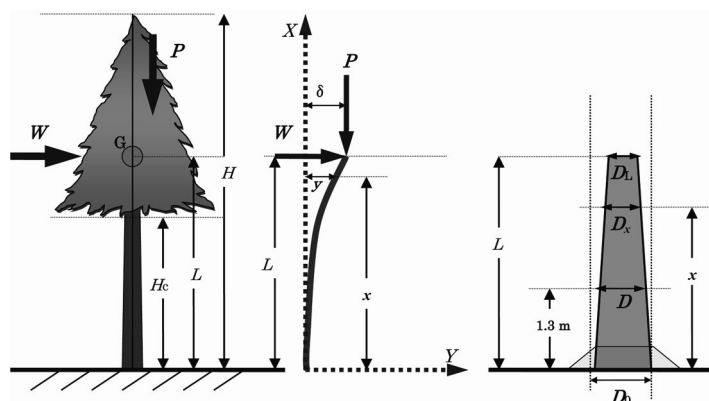


図-1. モデルの概略

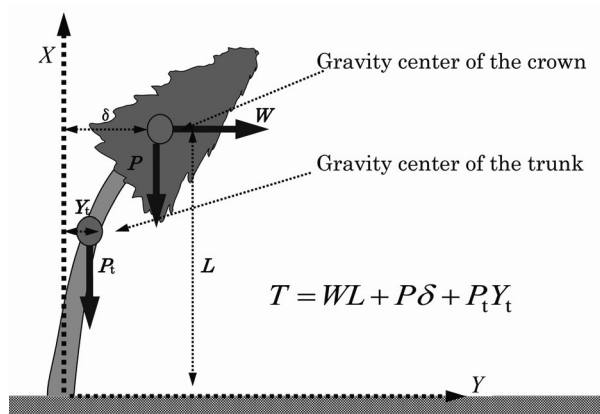


図-2. 根元の回転モーメント

曲げ変形過程において発生する圧縮応力 σ_{cx} と引張応力 σ_{tx} は、以下のように表すことができる。

$$\sigma_{cx} = \frac{P}{A_x} + \frac{M_x}{z_x} \quad (17)$$

$$\sigma_{tx} = -\frac{P}{A_x} + \frac{M_x}{z_x} \quad (18)$$

ヤング係数および曲げ強さ MOR (modulus of rupture) は、それぞれ $E=11.1$ GPa, $MOR=46.4$ MPa とした (小泉, 1987)。

2. 風による外部荷重 W および P

外力である風による水平荷重 W は、一般に抵抗係数 C_d を用いると、

$$W = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 S \quad (19)$$

であり、 ρ は空気密度 (1.225 kg/m³)、 S はクローネの断面面積 (対風面積)、 U は風速を表す。樹木の抵抗係数 C_d は、カラマツでは求められていないため、同じ針葉樹である Scots pine の値 0.29 (Mayhead, 1973) を用いた。風速は、森林内の複雑な風速分布を再現するのではなく、遮蔽物のない場所での風速分布を用いた。この場合の風速は、一般的に知られているように対数分布に従う (e.g., Stull, 1988)。

$$U_x = \frac{U^*}{\kappa} \ln \left(\frac{x-d}{z_0} \right) \quad (20)$$

ここで、 x は地表面からの高さ、 U^* (m/s) は摩擦速度、 κ はカルマン定数 (0.4)、 z_0 (m) は粗度、 d (m) は地面修正量である。シミュレーションでは、 $z_0=0.01$ 、 $d=0$ とした。クローネの投影面積 S は、三角形と仮定し、 $S=0.5 \times$ 樹冠幅 (CW) \times 樹冠長 ($H-H_c$) とした。枝下高 H_c (m) は本数密度 n (本/ha) と樹高 H (m) より以下の式から求めた (Kanazawa, 1985)。

$$H_c = \frac{H^{b+1}}{a(n^{-1/2} \times 100)^b + H^{b+1}} \quad (a=176.28, b=2.97) \quad (21)$$

樹冠幅 CW (m) は、収量比数 R_y に比例すると仮定し、平均立木間距離 $100/\sqrt{n}$ と R_y の積 ($CW=100/\sqrt{n} \cdot R_y$) によって求めた。

幹に加わる外力である垂直荷重 P (N) は、 $P=(m_i+m_c)g$ (m_i : 雪氷の質量 kg, m_c : 樹冠質量 kg, g : 重力加速度 m/s²) で表すことができる。ここでは台風時の暴風を想定しているので、 P は自身の樹冠の重さのみである。樹冠質量 (生枝葉の質量) m_c については、森林の生産力に関する研究第2報 (四大学および信大合同調査班, 1964) のデータを参考に、胸高直径 D (cm) との関係式 $m_c=0.15D^2$ ($r=0.86$) から求めて推定した。

3. 樹木に作用する回転モーメント T

樹木に加わる回転モーメント T は、根本に作用すると仮定し、 W と P によるモーメントと幹荷重 P_l によるモーメントの合計とする (図-2)。

$$T = WL + p\delta + P_l Y_l \quad (22)$$

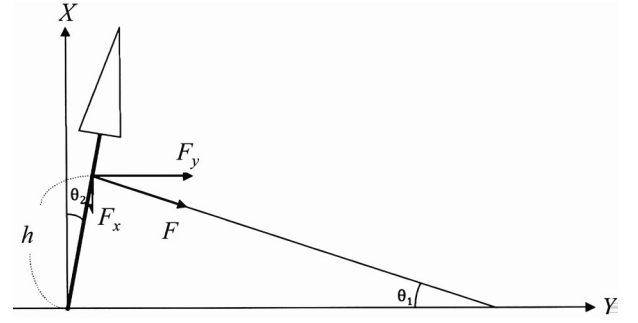


図-3. 引倒し試験の概要

$P_l(N)$ は、樹冠重の場合と同様に既存の文献データ (森林の生産力に関する研究第Ⅱ報 (四大学および信大合同調査班, 1964)) を参考に、生幹重 m_l (kg) と材積 DH^2 (m³) の関係式 $m_l=304.2 DH^2$ ($r=0.99$) を求め、 $P_l=m_l g$ より推定した。 Y_l は幹の重心の変位を表し、幹を円錐と仮定して、(15)式に $X=1-\beta H/4L$ ($x=H/4$) を代入して求めた。

4. 根系による根返り抵抗モーメント R

根系による抵抗モーメント R は、野外における立木の引倒し試験によって求めた。火山灰土に広く覆われた十勝におけるカラマツの引倒し試験は、すでに報告例 (鳥田, 2009) があるが、対象としたカラマツ立木の胸高直径は、12~17 cm 程度の範囲であり、本研究で扱う胸高直径 10~50 cm の範囲には合致しない。そこで、報告例と同様に火山灰土に覆われた平坦地の林 (十勝管内士幌町) にて、胸高直径 24~40 cm の立木の引倒し試験 (6本) を実施した。立木の根元に加わる回転モーメント (根系による抵抗モーメント) R は、図-3 に示すように、引倒し荷重が加わる幹の位置を h とし、引倒し荷重 F の水平成分 F_y と垂直成分 F_x を用いて、以下の式から計算した。

$$\begin{aligned} R &= F_y h \sin \theta_2 + F_x h \cos \theta_2 \\ &= Fh (\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2) \\ &= Fh \cos (\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (23)$$

(23) 式から求めた根系による根返り抵抗モーメント R (kNm) と胸高直径 D (cm) との関係式は以下のようであった。

$$R = 0.01 D^{2.64} \quad (r=0.99) \quad (24)$$

5. シミュレーションの概要

植栽木の成長段階に応じて、どのように林分の風害に対する耐性が変化するかを明らかにするため、各林分の平均値 (平均樹高、平均胸高直径) に相当する立木に対し、風が直接あたった状態を想定して検討を行った。したがって、立木間の遮蔽効果などは考慮していない。

林分の成長予測に関しては、カラマツ人工林の手引き (2007) を参考に、各施業タイプ (表-1) における平均胸高直径と上層樹高を求め (表-2)、上層樹高 DTH (m) は以下の式 (石橋, 2006) により平均樹高 H_m (m) に変換した。

$$H_m = 0.60971 \times DTH^{1.11905} \quad (25)$$

表-1. 施業タイプの概略

1) 特等地

施業タイプ	特疎1000	特疎1500	特疎2000	特疎2500	特中1500	特中2000	特中2500
植栽本数密度(本/ha)	1000	1500	2000	2500	1500	2000	2500
間伐回数	4	5	6	7	4	5	7
最終本数密度(本/ha)	225	250	250	275	325	350	350

2) II 等地

施業タイプ	II 疎1000	II 疎1500	II 疎2000	II 疎2500	II 中1500	II 中2000	II 中2500
植栽本数密度(本/ha)	1000	1500	2000	2500	1500	2000	2500
間伐回数	2	3	4	5	2	3	5
最終本数密度(本/ha)	425	475	500	500	600	600	600

施業タイプの特は、特等地を示し地位指数は29, 同様にIIは、II 等地を示し地位指数は21である。

表-2. 成長予測に関する資料

特疎1000			特疎1500			特疎2000			特疎2500			特中1500			特中2000			特中2500		
林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径
(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)
16	17.3	0.173	12	13.9	0.131	5	6.3	0.060	8	9.8	0.086	15	16.5	0.152	12	13.9	0.123	9	10.9	0.095
20	20.2	0.204	15	16.5	0.157	10	11.9	0.107	10	11.9	0.105	20	20.2	0.187	15	16.5	0.146	10	11.9	0.103
22	21.5	0.217	16	17.3	0.164	14	15.7	0.141	11	12.9	0.112	21	20.9	0.193	17	18.1	0.158	13	14.8	0.124
25	23.2	0.242	20	20.2	0.199	15	16.5	0.151	15	16.5	0.145	25	23.2	0.223	20	20.2	0.180	15	16.5	0.139
30	25.6	0.275	23	22.1	0.219	19	19.5	0.181	20	20.2	0.183	30	25.6	0.251	24	22.7	0.203	17	18.1	0.151
35	27.5	0.311	25	23.2	0.236	20	20.2	0.190	25	23.2	0.221	35	27.5	0.284	25	23.2	0.211	20	20.2	0.172
40	29.0	0.340	30	25.6	0.270	24	22.7	0.220	26	23.7	0.227	40	29.0	0.308	30	25.6	0.241	23	22.1	0.190
42	29.5	0.350	32	26.4	0.282	25	23.2	0.229	30	25.6	0.257	44	30.0	0.323	35	27.5	0.263	25	23.2	0.203
45	30.2	0.369	35	27.5	0.304	30	25.6	0.267	35	27.5	0.288	45	30.2	0.328	40	29.0	0.291	29	25.2	0.226
50	31.1	0.398	40	29.0	0.336	32	26.4	0.279	40	29.0	0.320	50	31.1	0.356	45	30.2	0.312	30	25.6	0.233
55	31.9	0.423	42	29.5	0.347	35	27.5	0.301	45	30.2	0.347	55	31.9	0.376	50	31.1	0.341	35	27.5	0.261
60	32.5	0.443	45	30.2	0.367	40	29.0	0.332	47	30.6	0.356	60	32.5	0.392	55	31.9	0.361	40	29.0	0.291
65	32.9	0.458	50	31.1	0.396	45	30.2	0.356	50	31.1	0.371	65	32.9	0.404	60	32.5	0.378	45	30.2	0.314
70	33.3	0.470	55	31.9	0.420	46	30.4	0.360	55	31.9	0.394	70	33.3	0.413	65	32.9	0.390	50	31.1	0.339
75	33.6	0.480	60	32.5	0.437	50	31.1	0.381	60	32.5	0.413	75	33.6	0.420	70	33.3	0.400	55	31.9	0.360
80	33.8	0.487	65	32.9	0.451	55	31.9	0.404	65	32.9	0.428	80	33.8	0.426	75	33.6	0.407	60	32.5	0.376
			70	33.3	0.461	60	32.5	0.426	70	33.3	0.439				80	33.8	0.413	65	32.9	0.389
			75	33.6	0.469	65	32.9	0.442	75	33.6	0.447							70	33.3	0.398
			80	33.8	0.476	70	33.3	0.455	80	33.8	0.454							75	33.6	0.405
						75	33.6	0.465										80	33.8	0.410
						80	33.8	0.473												

II 疎1000			II 疎1500			II 疎2000			II 疎2500			II 中1500			II 中2000			II 中2500		
林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径	林齢	上層樹高	胸高直径
(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)	(年)	(m)	(m)
10	8.6	0.089	17	13.1	0.124	15	11.9	0.108	12	10.0	0.088	21	15.1	0.141	18	13.6	0.121	15	11.9	0.103
15	11.9	0.123	20	14.6	0.141	20	14.6	0.132	15	11.9	0.106	25	16.8	0.159	20	14.6	0.131	20	14.6	0.125
20	14.6	0.148	25	16.8	0.163	25	16.8	0.158	17	13.1	0.115	30	18.5	0.177	25	16.8	0.150	22	15.6	0.131
23	16.0	0.160	30	18.5	0.187	28	17.9	0.170	20	14.6	0.132	35	19.9	0.191	28	17.9	0.159	25	16.8	0.144
25	16.8	0.171	35	19.9	0.207	30	18.5	0.181	24	16.4	0.150	40	21.0	0.208	30	18.5	0.168	30	18.5	0.160
30	18.5	0.192	40	21.0	0.222	35	19.9	0.203	25	16.8	0.155	45	21.9	0.223	35	19.9	0.185	35	19.9	0.177
35	19.9	0.209	45	21.9	0.238	40	21.0	0.220	30	18.5	0.178	50	22.5	0.236	40	21.0	0.199	40	21.0	0.190
38	20.6	0.217	50	22.5	0.253	45	21.9	0.238	33	19.4	0.188	55	23.1	0.246	45	21.9	0.210	45	21.9	0.204
40	21.0	0.225	55	23.1	0.266	50	22.5	0.253	35	19.9	0.197	60	23.5	0.253	50	22.5	0.223	50	23.7	0.216
45	21.9	0.241	60	23.5	0.275	55	23.1	0.265	40	21.0	0.216	65	23.8	0.259	55	23.1	0.234	51	22.7	0.219
50	22.5	0.256	65	23.8	0.282	60	23.5	0.275	45	21.9	0.232	70	24.1	0.264	60	23.5	0.245	55	23.1	0.229
55	23.1	0.269	70	24.1	0.288	65	23.8	0.282	47	22.2	0.236	75	24.3	0.267	65	23.8	0.254	60	23.5	0.241
60	23.5	0.278	75	24.3	0.293	70	24.1	0.287	50	22.5	0.245	80	24.5	0.270	70	24.1	0.261	65	23.8	0.251
65	23.8	0.286	80	24.5	0.296	75	24.3	0.291	55	23.1	0.258				75	24.3	0.266	70	24.1	0.259
70	24.1	0.292				80	24.5	0.295	60	23.5	0.270				80	24.5	0.270	75	24.3	0.265
75	24.3	0.296							65	23.8	0.279							80	24.5	0.270
80	24.5	0.300							70	24.1	0.285									
									75	24.3	0.291									
									80	24.5	0.295									

各施業タイプにおける間伐指針は、収量-密度図の収量比数を目安とし、疎仕立の場合は収量比数が約0.7、中庸仕立てでは収量比数が約0.8に達したときに約30%までの

間伐を行って、間伐後の収量比数がそれぞれ0.6, 0.7程度になるように計画されている。

ある風速 U に対して、回転モーメント T , 圧縮応力 σ_{α} ,

根返り抵抗モーメントを (22), (17) および (24) 式から求めた。圧縮応力は、根元から風心高 ($x_R=0\sim1$) までの高さについて計算し、最大値を求めた。ここで、 $T < R$ かつ $\sigma_{\alpha} < \text{MOR}$ ならば立木は風害を受けないため、 $T > R$ かつ $\sigma_{\alpha} < \text{MOR}$ (根返り), あるいは $T < R$ かつ $\sigma_{\alpha} > \text{MOR}$ (幹折れ) に至るまで更に風速 U を増加させ、そのときの地上高 10 m の風速を限界風速として求めた。

III. 結果と考察

1. 林齢と限界風速

今回のシミュレーションの結果では、すべての施業タイプにおいて、圧縮応力は曲げ強さ 46.4 MPa に達せず、根返り害が発生すると予測された (図-4)。過去の台風被害の調査結果においても、カラマツの被害形態は根返りが多く (水井・畠山, 1984; 鳥田, 2006), シミュレーション結果と同様な傾向を示している。限界風速は、特等地 (地位指数 29) では林齢 20 年前後で一旦減少するが、その後林齢とともに増加する傾向を示した (図-5)。これは、強風による根返り抵抗性 (以後抵抗性と表記する) が林齢とともに変化し、特等地においては林齢 20 年前後でもっとも被害を受けやすいことを示唆している。特等地におけるカラマツ林の台風の要因解析の結果 (鳥田, 2006) では、林齢が 20~30 年生の林分で被害を受けやすく、それ以降はしだいに被害を受けにくくなる傾向が示されており、本結果の傾向と一致している。II 等地 (地位指数 21) では、特等地と同じく抵抗性が経年変化する傾向は同様であり、林齢 20~30 年付近では、林齢 40 年以降より抵抗性は小さかった (図-6)。また、II 等地では、林齢 30 年以後の限界風速の増加は、特等地ほど大きくはなく、緩やかな増加傾向を示した。

抵抗性が経年変化する現象は、樹高成長速度と直径の肥大成長速度の差異に起因していると推察される。(22) 式に示したように回転モーメントは、樹高成長に応じて大きくなるため樹高の成長は根返りを促進し、一方、根返り抵抗モーメントは、(24) 式に示したように直径成長に応じて大きくなるため、直径の成長は根返りを抑制する。したがって、樹高成長が著しい時期は抵抗性が相対的に低く、樹高成長が緩慢になると、直径成長による根返り抑制効果が顕在化し、抵抗性が増大するものと考えられる。

2. 施業タイプと限界風速

全般的に疎仕立て施業タイプは、中庸仕立て施業タイプよりも抵抗性が高い傾向が示された (図-5, 6)。また、この傾向は、II 等地よりも特等地で顕著であり、地位指数 (樹高成長速度) が高い場所では、間伐による直径の肥大成長促進効果が抵抗性を高めるのに重要であることが示唆される。植栽密度が抵抗性に与える影響に関しては、同一の仕立てタイプ内では、植栽密度は低い方が抵抗性は高い傾向があり、この傾向も特等地においてより顕著である (図-5, 6)。結論として、抵抗性を高くするには、植栽密度を低くし疎仕立て施業を実施することが効果的であり、その効果

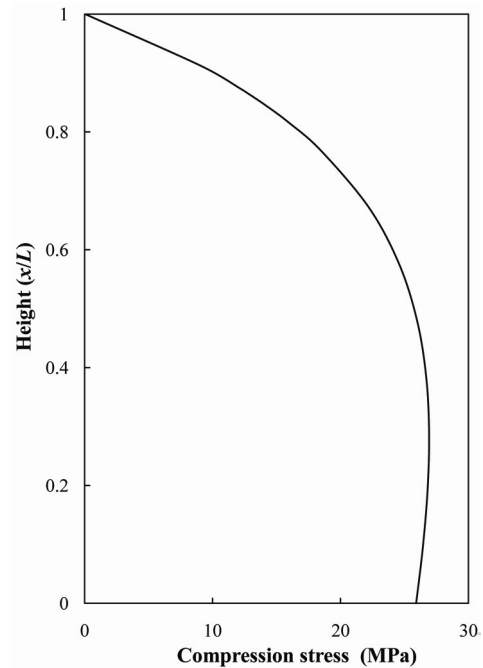


図-4. 圧縮応力の分布

特中 2500, 17 年生, 樹高 15.5 m の計算例。

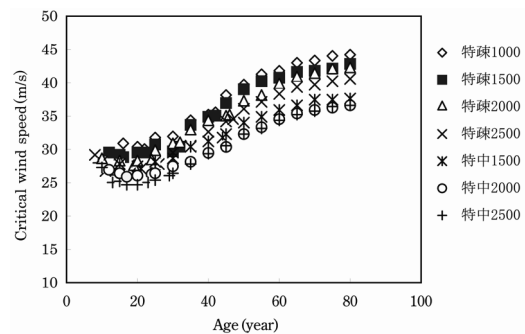


図-5. 特等地における限界風速の経年変化

は地位指数が高い立地ほど大きいと考えられる。

3. 形状比の経年変化と限界風速

これまでの多くの研究により、形状比 (樹高/胸高直径) が小さい林分では、気象害 (風・雪) に対する抵抗性が高いことが報告されている (e.g., Cremer *et al.*, 1982; Blackburn and Petty, 1988; Gardiner *et al.*, 2000)。一方、形状比が高い林分は抵抗性が小さく、特に、形状比が 100 を超えるような林分は非常に抵抗性が低いとされる (e.g., Wang *et al.*, 1998; Lekes and Dandul, 2000; Slodicak and Novak, 2006)。本研究では、形状比が 100 を超える施業タイプは、特中 2500 と II 中 2500 の 2 タイプであった (図-7, 8)。特中 2500 では、およそ林齢 10~30 年, II 中 2500 では林齢 20 年の一時期に、形状比が 100 を超える。これらの林齢は、ちょうど限界風速が最も低下する時期におよそ一致し、全施業タイプの中でも限界風速がもっとも低いことから、形状比は強風に対する抵抗性の指標であることが示された。一方、地位指数別に形状比がもっとも小さくなる施業パ

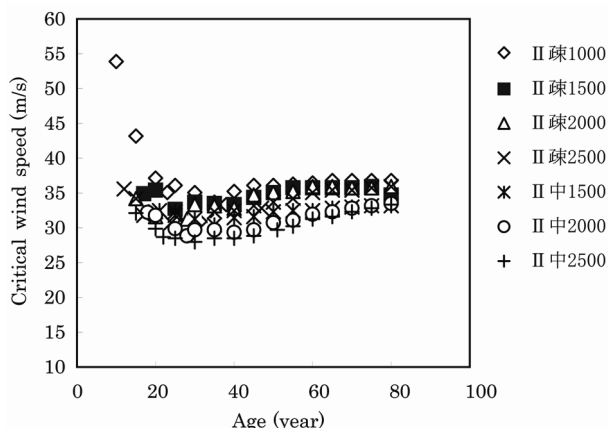


図-6. II 等地における限界風速の経年変化

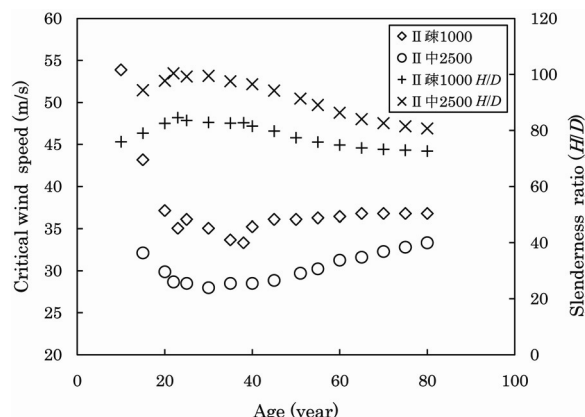


図-8. II 等地の限界風速と形状比の経年変化

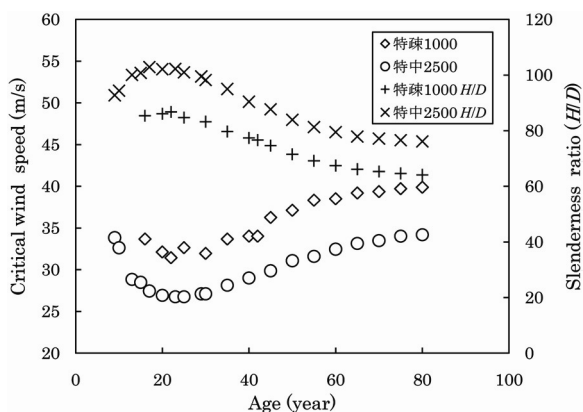


図-7. 特等地の限界風速と形状比の経年変化

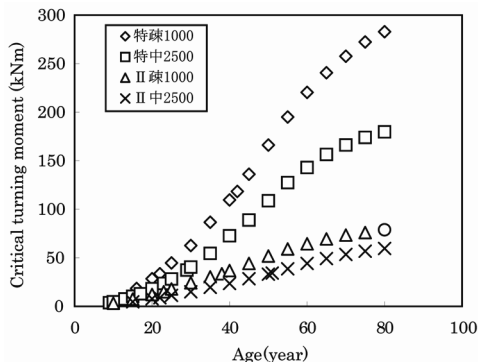


図-9. 限界回転モーメントの経年変化

ターンである特疎 1000, II 疎 1000 は, 特中 2500 および II 中 2500 の 2 タイプ同様に, 一時的な限界風速の低下がみられるが, 限界風速は常に特中 2500 および II 中 2500 よりも高いレベルを維持しており, 低植栽密度で疎仕立て管理の施業タイプが形状比を小さく, 根返りに対する抵抗性を高めることが示唆された。

4. 回転モーメントの経年変化

根返り発生時の回転モーメント (限界回転モーメント) の経年変化の例を図-9 に示す。限界回転モーメントは, 根返り抵抗モーメントに等しく (24) 式から求められる。したがって, 本数密度の影響を強く受け, 地位指数が同じならば, 直径成長を促す施業タイプほど限界回転モーメントは大きくなることが示された。また, 施業の差異が限界回転モーメントに及ぼす影響は, 地位指数が高い場合の方が大きく, その傾向は林齢の増加とともに顕著になった。

IV. まとめと今後の課題

本研究では, カラマツの人工林の長伐期化に対する風害リスクを検討するため, 植栽密度や本数密度管理の違いが強風に対する抵抗性へ及ぼす影響を力学モデルによって評価した。その結果, 地位指数が同じならば, 植栽密度は低く, 中庸仕立てよりも疎仕立てで管理する施業タイプが強風に

対する抵抗性が高いことが示された。また, すべての施業タイプにおいて, 強風に対する抵抗性は経年変化を示し, 成長過程の一時期に最小値となった後, 樹高成長速度が鈍る頃から抵抗性が回復する傾向が示された。これらの結果を 2002 年に十勝地方で発生した台風被害の要因解析結果 (鳥田, 2006) と比較すると, 被害を受けやすい林齢や樹高成長速度が鈍る頃から抵抗性が回復する傾向は一致しており, 現実とのある程度の適合性は得られたと考えられる。しかしながら, 本研究では, 各施業タイプの林齢ごとの抵抗性は, あくまで平均値 (樹高, 胸高直径など) をもつ立木を林分の代表値とし, 立木間の風の遮蔽効果を考慮せず, 立木に直接に風が当たった場合を想定してシミュレーションを行っている。したがって, 今後, さらに現実的な抵抗性の評価を行うには, 林内の風速環境を考慮し, 各施業タイプにおける成長ステージごとに本数被害率などを検討する必要がある。また, 基礎研究に関する問題として, 計算に必要な各係数についての詳細な検討も今後必要であると考えられる。特に, 風荷重を求める際の重要な値である抵抗係数は, 野外での観測が困難なため, これまで比較的小さなサイズの樹木を用いたモデル風洞実験によって求められてきた (Mayhead, 1973; Rudnicki *et al.*, 2004; Vollsinger *et al.*, 2005; 石川, 2005)。そのため, 樹高が 20 m を超えるような立木に対しても, 普遍性が存在するか否かについては明らかではない。今後, 樹木の抵抗係数についても,

新たな進展が望まれる。

本研究を進めるにあたり、北海道立林業試験場の真坂一彦氏、今博計氏、阿部友幸氏には調査にご協力をいただいた。深く感謝いたします。なお、本研究は科研費（基盤研究 C）の助成を一部受けたものである。

引用文献

- Blackburn, P. and Petty, J.A. (1988) Theoretical calculations of the influence of spacing on stand stability. *Forestry* 61 : 235–244.
- Chiba, Y. (1994) A mechanistic analysis of devastating damage by typhoons in sugi plantations in terms of stem breakage. *J. Jpn. For. Soc.* 76 : 481–491.
- Cremer, K.W. and Borough, C.J. (1982) Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. *N. Z. J. For. Sci.* 12 : 244–268.
- Fredericksen, T.S., Hedden, R.L., and Williams, S.A. (1993) Testing loblolly pine wind firmness with simulated wind stress. *Can. J. For. Res.* 23 : 1760–1765.
- Gardiner, B.A., Peltola, H., and Kellomäki, S. (2000) Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol. Model.* 129 : 1–23.
- 北海道立林業試験場 (2007) カラマツ人工林施業の手引き. 91 pp, 北海道立林業試験場.
- 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.
- 石川 仁 (2005) 樹木の流体力学特性の実験的解明. *ながれ* 24 : 485–490.
- Jalkanen, A. and Mattila, U. (2000) Logistic regression models for wind and snow damage in northern Finland based on the national forest inventory data. *For. Ecol. Manage.* 135 : 315–330.
- Kanazawa, Y., Kiyono, Y., and Fujimori, T. (1985) Crown development and stem growth in relation to stand density in Even-aged pure stands (II). Clear-length model of *Cryptomeria japonica* Stands as a function of stand density and tree height. *J. Jpn. For. Soc.* 67 : 391–397.
- 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. *北大演研報* 44 : 1329–1415.
- Lanquaye-opoku, N. and Mitchell, S.J. (2005) Portability of stand-level empirical windthrow risk models. *For. Ecol. Manage.* 216 : 134–148.
- Lekes, V. and Dandul, I. (2000) Using airflow modelling and spatial analysis for defining wind damage risk classification (WINDARC). *For. Ecol. Manage.* 135 : 331–344.
- Mayhead, G.J. (1973) Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agric. Meteorol.* 12 : 123–130.
- Mitchell, S.J., Hailemariam, T., and Kulis, Y. (2001) Empirical modeling of cutblock edge windthrow risk on Vancouver Island, Canada, using stand level information. *For. Ecol. Manage.* 154 : 117–130.
- 三浦 覚・松本陽介・真下育久 (1984) 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. *東大演報* 73 : 139–160.
- 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. *北海道林試研報* 22 : 1–9.
- Nicoll, B.C., Achim, A., Mochan, S., and Gardiner, B.A. (2005) Does steep terrain influence tree stability? A field investigation. *Can. J. For. Res.* 35 : 2360–2367.
- 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. *Can. J. For. Res.* 36 : 1871–1883.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., and Ikonen, V.-P. (1999) A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.* 29 : 647–661.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., and Granander, M. (2000) Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *For. Ecol. Manage.* 135 : 143–153.
- Rudnicki, M., Mitchell, S.J., and Novak, M.D. (2004) Wind tunnel measurements of crown streamlining and relationships for three conifer species. *Can. J. For. Res.* 34 : 666–676.
- 澤田 稔 (1983) 風および冠雪による針葉樹幹の変形. *林業試験場北海道支場研究資料* 128. 18 pp, 林業試験場北海道支場.
- Scott, R.E. and Mitchell, S.J. (2005) Empirical modeling of windthrow risk in partially harvested stands using tree, neighbourhood, and stand attributes. *For. Ecol. Manage.* 218 : 193–209.
- Slodick, M. and Novak, J. (2006) Silvicultural measures to increase the mechanical stability of pure secondary Norway spruce stands before conversion. *For. Ecol. Manage.* 224 : 252–257.
- Smith, V.G., Watts, M., and James, D.F. (1987) Mechanical stability of black spruce in the clay belt region of northern Ontario. *Can. J. For. Res.* 17 : 1080–1091.
- Stull, R.B. (1988) An introduction to boundary layer meteorology. 670 pp, Kluwer Academic Publishers.
- 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. *日林誌* 88 : 489–495.
- 鳥田宏行 (2009) カラマツの風害に関する力学的評価. *日林誌* 91 : 120–124.
- Vollsinger, S., Mitchell, S.J., Byrne, K.E., Novak, M.D., and Rudnicki, M. (2005) Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationships for several hardwood species. *Can. J. For. Res.* 35 : 1238–1249.
- Wang, Y., Titus, S., and LeMay, V.M. (1998) Relationships tree slenderness coefficients and tree or stand characteristics for major species in boreal mixedwood forests. *Can. J. For. Res.* 28 : 1171–1183.
- 山根玄一・菊地 健・寺沢和彦 (1982) 昭和 56 年 15 号台風によるカラマツ林の風害 (II) —単木の根系—. *日林北支講* 31 : 45–47.
- 四大学および信大合同調査班 (1964) 森林の生産力に関する研究 第 II 報. 60 pp, 日本林業技術協会.