



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	風倒被害を軽減するトドマツ・カラマツ人工林の管理指針
Author(s)	浦田, 格; 渋谷, 正人; 鳥田, 宏行
Citation	北海道大学演習林研究報告, 69(1), 1-10
Issue Date	2013-01-10
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/52011
Type	departmental bulletin paper
File Information	RBHUF69-1_001.pdf



風倒被害を軽減するトドマツ・カラマツ 人工林の管理指針

浦田 格¹, 渋谷 正人^{2*}, 鳥田 宏行³

Management guidelines for reducing windthrow damage in
Abies sachalinensis and *Larix kaempferi* plantations
by

URATA Tsutomu¹, SHIBUYA Masato^{2*}, TORITA Hiroyuki³

要 旨

北海道中央部の支笏湖周辺の平坦地に位置するトドマツ人工林とカラマツ人工林を対象に、林分の平均形状比を用いて、風倒被害を軽減するための林分管理指針を検討した。林分調査データと、各樹種の林分密度管理図を利用して、平均形状比－平均樹高関係を収量比数（ R_y ）ごとに求め、それらと調査林分の平均形状比を比較した。その結果、両樹種で、風倒被害林分と無被害林分で R_y 値に差があり、被害林分で R_y 値が大きかった。境界値はトドマツで $R_y=0.7$ で、カラマツで $R_y=0.4$ であった。この結果と林分密度管理図によって、風倒被害を軽減するための林分管理指針を、樹種ごとに検討した。その管理指針によれば、風倒被害を軽減するためには若齢時からの密度管理が重要であり、またトドマツ、カラマツ人工林の一般的な疎仕立て管理よりさらに低密度での管理が必要であることが明らかとなった。さらに調査対象地域は風害を受けやすい地域であるため、本研究で検討した管理指針は、北海道の他地域の平坦地にも適用可能であろうと考えられた。

キーワード：管理指針，形状比，風倒，林分密度管理図

2012 年 2 月 10 日受付, Received Feb. 10, 2012

2012 年 11 月 15 日受理, Accepted Nov. 15, 2012

1. 北海道大学大学院農学院環境資源学専攻森林資源科学講座造林学分野

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

2. 北海道大学農学研究環境資源学部門森林資源科学分野造林学研究室

Laboratory of Silviculture, Research Group of Forest Resource Science, Division of Environmental Resources,
Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University *shibuya@for.agr.hokudai.ac.jp

3. 北海道立総合研究機構林業試験場

Forestry Research Department, Hokkaido Research Organization

I. はじめに

風害により森林では壊滅的な被害が生じ、林分が消滅することもある。とくに風害を受けやすい針葉樹人工林では対策が不可欠である (Chiba, 2000; Wilson and Oliver, 2000)。風害の発生には、気象、地形、土壌、林況など多くの要因が影響する (Savill, 1983; Ruel, 1995) が、人為的に容易に制御可能な要因は林況であり、密度管理などの保育作業により、風害発生に強く影響する樹形を制御できる (Kilpatrick *et al.*, 1981; Cremer *et al.*, 1982; Rollinson, 1988; Mason, 2002; Kamimura and Shiraishi, 2007)。

前報 (渋谷ら、2011) では、2004 年に風害のあった北海道支笏湖周辺の針葉樹人工林で、風倒被害を受けた林分と無被害林分では平均形状比や平均樹冠長率に差があり、風倒被害の発生と樹形には明瞭な関係があることを報告した。平均形状比は、トドマツとカラマツ両樹種で、被害林分は 70 以上であり、無被害林分は 70 未満であった。平均樹冠長率でも被害林分と無被害林分に境界値が認められ、トドマツでは 0.55 を境に無被害林分で大きく、カラマツでは境界はおおよそ 0.45 であった。つまり、平均形状比が小さく、平均樹冠長率の大きい林分で風倒被害が生じていなかった。また Urata *et al.* (2012) は、アカエゾマツ人工林での樹木の引き倒し試験により、幹重が同じなら、樹冠重の大きい個体で根返り抵抗性が大きいことを示していて、渋谷ら (2011) の観察的結果と同じ傾向を報告している。さらに、形状比が小さい樹形あるいは林分で風倒が少ないことは、日本のスギやヒノキの人工林 (諫本・高宮、1992) や、ヨーロッパとニュージーランドの針葉樹人工林における観察的研究でも報告されていて (Cremer *et al.*, 1982; Polley, 1995; Ruel, 1995)、形状比や樹冠長率を適切に管理することによって、樹木の風倒抵抗性を向上させられる可能性が考えられる。

人工林の管理指針を検討するときによく用いられる林分密度管理図には、形状比に関する情報が含まれている。林分密度管理図中の等平均樹高線は上層高階ごとに求められ、またある林分の平均胸高直径は等平均直径線から読みとることができる。これらの要素から、林分の平均的な形状比に関する情報が得られる。林分密度管理図は、樹

種ごと、地域ごとに作成されているが、本研究で検討対象とする北海道のトドマツ人工林とカラマツ人工林についても作成されている (真辺、1974; 日本林業技術協会、1999)。

本研究では、前報 (渋谷ら、2011) の結果を踏まえ、北海道のトドマツ人工林とカラマツ人工林を対象とし、林分の平均形状比を用いて、風倒被害を軽減する林分管理指針について検討した。前報 (渋谷ら、2011) では、樹冠長率も風倒抵抗性との強い関係が認められたが、林分密度管理図には樹冠長率に関する情報が含まれていないため、形状比によって検討を行った。また前報 (渋谷ら、2011) では、エゾマツ人工林の調査結果も報告したが、他の樹種に比較し、被害林分と無被害林分の差が判然としなかったこと、およびエゾマツ人工林の林分密度管理図が作成されていないため、本研究では検討対象としなかった。

II. 調査地と方法

1. 調査地

調査地は、北海道中央部の支笏湖近くの国有林千歳地域と支笏地域 (北緯 42°45'~42°50'、東経 141°20'~141°35') のトドマツとカラマツの人工林である。風害は 2004 年 9 月に発生し、調査はその 2~4 年後に行った。被害形態は、すべての林分で風倒と推測される。また被害の発生に対する地形の効果を抑えるため、ほぼ平坦あるいは緩傾斜地 (斜度 5°以下) の林分を対象とした。被害があった林分では、被害木の処理後すぐに地拵えが行われたため、詳細な被害率は不明である。本研究の対象とした林分は、すべて間伐が行われていた林分であった。トドマツでは、被害面積率から推定される被害率が 80~90%以上である激害林分が 17 林分 (調査時の林齢 40~72 年生) と、被害のなかった無被害林分が 4 林分 (林齢 45~72 年生) 含まれる (表 1)。カラマツでは、激害林分が 10 林分 (林齢 27~51 年生)、本数被害率が 50%前後であった中害林分が 4 林分 (林齢 44~48 年生)、無被害林分が 19 林分 (林齢 44~56 年生) 含まれている (表 1)。各林分では、風害後残存した優占木を対象に胸高直径、樹高、枝下高を測定し、トドマツ人工林での測定本数は 14~30 本、カラマツ人工林では 17~30 本であった (詳細は渋谷ら、

表 1. 調査林分の概況

樹種	被害度*	林分数	林齢** (年)	平均胸高直径** (cm)	平均樹高** (m)	平均形状比**
トドマツ	激害	17	41-72	16.4-29.4	12.3-20.2	70-86
	無被害	4	45-72	31.0-43.6	18.9-23.1	54-67
カラマツ	激害	10	27-51	16.5-28.9	13.0-20.6	76-82
	中害	4	44-48	23.5-32.0	18.6-21.7	70-83
	無被害	19	44-56	30.5-45.2	18.6-24.5	53-69

* 激害:被害率80~90%以上、中害:被害率50%前後、無被害:被害なし。

** 各平均値の範囲(最小-最大)を示す。
詳細については渋谷ら(2011)を参照。

2011 を参照)。

2. 方法

調査林分の測定で、平均樹高と平均胸高直径、および平均形状比が得られた(表 1)。また林分密度管理図からは、上層高と収量比数(Ry)ごとの平均胸高直径を読みとることができる。風倒被害を軽減する林分管理指針を求めるためには、調査林分の平均形状比と Ry 値との関係が必要であり、被害林分と無被害林分で Ry 値が分離すれば、その Ry 値を用いて林分管理指針を求めることができる。

一般的には、Ry 値が一定でも、平均形状比は林分の成長あるいは上層高(あるいは平均樹高)により変化すると考えられる。そのため、まず林分成長にともなう Ry 値ごとの平均形状比の変化を、林分密度管理図によって検討する必要がある。また調査林分では平均樹高が得られ、林分密度管理図では上層高が使用されている。このため、林分密度管理図の情報を調査林分に適用するためには、上層高を平均樹高へ変換する必要がある。これらの処理は、以下の手順で行った。

- ① 林分密度管理図を用いて、各等平均樹高線上で Ry 値ごとの平均胸高直径を求める。
- ② 後述する式(1)、(2)により上層高を平均樹高へ変換し、平均樹高と①で求めた平均胸高直径の比を求め、その(平均樹高/平均胸高直径)比と平均樹高の関係を Ry 値ごとにまとめる。
- ③ ある林分の平均形状比と(平均樹高/平均胸高直径)比は一致しない可能性が考えられる。そのため、調査林分のデータを用いて、平均形状比ー(平均樹高/平均胸高直径)比関係を求め、その関係を利用して、②の Ry 値ごとの(平均樹高/平均胸高直径)比ー平均樹高関係を、

Ry 値ごとの平均形状比ー平均樹高関係へと変換する。

- ④ この平均形状比ー平均樹高関係と、調査林分の平均形状比とを比較し、林分管理指針について検討する。

林分密度管理図としては、トドマツについては真辺(1974)が作成した図を、カラマツについては日本林業技術協会(1999)による図を用いた。上層高については、トドマツ密度管理図(真辺、1974)では、樹高の高い個体 250 本/ha の平均樹高が使用されているが、北海道地方カラマツ林分密度管理図(日本林業技術協会、1999)では、被圧木、枯損木を除いた平均樹高が使用されている。トドマツの上層高と平均樹高の関係は、次式によって算出した(真辺、1974)。

$$H_m = -1.355 + 1.049H_d - 0.00316H_d\sqrt{N} \quad (r^2 = 0.95, n = 246) \quad (1)$$

ここで、 H_m : 平均樹高 (m)、 H_d : 上層高 (m)、 N : 立木密度 (本/ha) である。カラマツについては、まず上層高の定義が曖昧なので、本研究では、トドマツと同様樹高の高い個体 250 本/ha の平均樹高と定義することとした。さらに平均樹高と上層高の関係は、次式によった(滝谷、私信)。

$$H_m = 0.666H_d^{1.101} \quad (r^2 = 0.96, n = 2432) \quad (2)$$

この関係は、北海道内の 80 年生までの林分を含むカラマツ人工林 2,432 林分の毎木調査結果から求められたもので、調査は北海道立総合研究機構林業試験場と北海道水産林務部森林室を中心として

行われている（滝谷、私信）。この式には、真辺による（1）式と異なり、林分の混み合い度に関連する項が含まれていず、 R_y 値に関わらずある上層高に対して一定の平均樹高が推定される式となっている。上層高を樹高上位 250 本/ha の平均樹高としたカラマツ人工林の上層高と平均樹高の関係が真辺（1973）によって求められているが、この式はカラマツ高齢級人工林のデータがなかった時期に求められたものであり、本研究には不相当と判断した。

Ⅲ. 結果

表 2 に、林分密度管理図から読みとった上層高別収量比数別の平均胸高直径と、（1）、（2）式により上層高から推定された平均樹高を示した。上層高階 12～28m に対し、トドマツでは $R_y : 0.5 \sim 0.9$ 、カラマツでは $R_y : 0.4 \sim 0.8$ について示した。これが林分管理指針の基礎となる関係である。当然平均胸高直径は R_y 値が大きいほど小さいが、トドマツの平均樹高は、同じ上層高に対して R_y 値が大きいほど小さくなっている。 $R_y=0.5$ と $R_y=0.9$ で比較すると、上層高 12m に対して平均樹高は 10.1m と 8.7m であり、上層高 26m に対しては

24.8m と 23.3m となっている。 $R_y=0.5$ の方が平均樹高が 1.4～1.5m 高くなっている。カラマツでは、推定式の性質上、平均樹高は R_y 値の影響は受けていない。

トドマツ、カラマツ両樹種とも、平均形状比と（平均樹高／平均胸高直径）比はそれほど大きく乖離しない（図 1）が、有意な回帰が得られた。平均形状比を y 、（平均樹高／平均胸高直径）比を x とすると、回帰式は

$$\text{トドマツ} : y = 1.07x - 2.37 \quad (r^2 = 0.989, \quad p < 0.01)$$

$$\text{カラマツ} : y = 1.03x - 0.40 \quad (r^2 = 0.996, \quad p < 0.01) \quad (3)$$

であった。

表 2 の結果から、林分密度管理図上での（平均樹高／平均胸高直径）比を求め、その値を（3）式に代入し、平均形状比を求め、 R_y 値ごとに平均樹高との関係を示したのが図 2 である。両樹種とも、 R_y 値が大きいと平均形状比は大きくなり、とくにトドマツで R_y 値間の違いが明瞭であった。各 R_y 値を示す線と平均形状比の関係をみると、全体的にカラマツの方が平均形状比が大きい傾向が

表 2. 林分密度管理図による上層高別収量比数（ R_y ）別の平均胸高直径（ D_m ）と平均樹高（ H_m ）

1) トドマツ

上層高 (m)	R_y									
	0.5		0.6		0.7		0.8		0.9	
	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)
12	16.7	10.1	15.2	9.9	13.6	9.7	11.8	9.3	9.6	8.7
14	20.7	12.2	18.9	12.0	16.8	11.7	14.6	11.4	11.9	10.8
16	24.7	14.3	22.6	14.1	20.2	13.8	17.6	13.5	14.3	12.9
18	29.2	16.4	26.6	16.2	23.8	15.9	20.6	15.6	16.8	15.0
20	33.6	18.5	30.7	18.3	27.4	18.0	23.8	17.7	19.4	17.1
22	38.2	20.6	34.9	20.4	31.2	20.1	27.0	19.7	22.1	19.2
24	43.0	22.7	39.2	22.5	35.1	22.2	30.4	21.8	24.9	21.3
26	47.8	24.8	43.7	24.6	39.0	24.3	33.8	23.9	27.8	23.3
28	52.8	26.9	48.2	26.7	43.1	26.4	37.3	26.0	—	—

上層高28m、 $R_y0.9$ については平均胸高直径、平均樹高は決定できなかった。

2) カラマツ

上層高 (m)	R_y									
	0.4		0.5		0.6		0.7		0.8	
	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)	D_m (cm)	H_m (m)
12	15.4	10.3	14.7	10.3	13.9	10.3	13.1	10.3	12.2	10.3
14	18.2	12.2	17.3	12.2	16.4	12.2	15.5	12.2	14.4	12.2
16	21.0	14.1	20.0	14.1	18.9	14.1	17.8	14.1	16.7	14.1
18	23.7	16.0	22.6	16.0	21.4	16.0	20.2	16.0	18.8	16.0
20	26.4	18.0	25.2	18.0	23.8	18.0	22.5	18.0	21.0	18.0
22	29.2	20.0	27.8	20.0	26.3	20.0	24.8	20.0	23.3	20.0
24	32.0	22.0	30.4	22.0	28.9	22.0	27.2	22.0	25.5	22.0
26	34.8	24.1	33.1	24.1	31.3	24.1	29.6	24.1	27.7	24.1
28	37.3	26.1	35.7	26.1	33.8	26.1	31.9	26.1	29.8	26.1

ある（図 2）。またトドマツでは、平均樹高が大きくなると平均形状比は低下するが、カラマツでは増加している（図 2）。

トドマツ調査林分の平均形状比をみると、激害林分の Ry 値は 0.7 より大きく、無被害林分はおよそ 0.7 以下であった（図 2）。無被害林分では、1 林分だけ平均形状比が大きく、その林分を除くとおよそ 0.6 以下であった（図 2）。トドマツでは、

激害林分と無被害林分で Ry 値に差がみられた。カラマツでは、激害林分は Ry 値は 0.55 以上であり、中害林分は、1 林分を除いて 0.4～0.5 であり、無被害林分は 0.4 以下であった（図 2）。カラマツでも、トドマツと同様に、被害林分と無被害林分間で Ry 値が分離する傾向がみられた（図 2）。

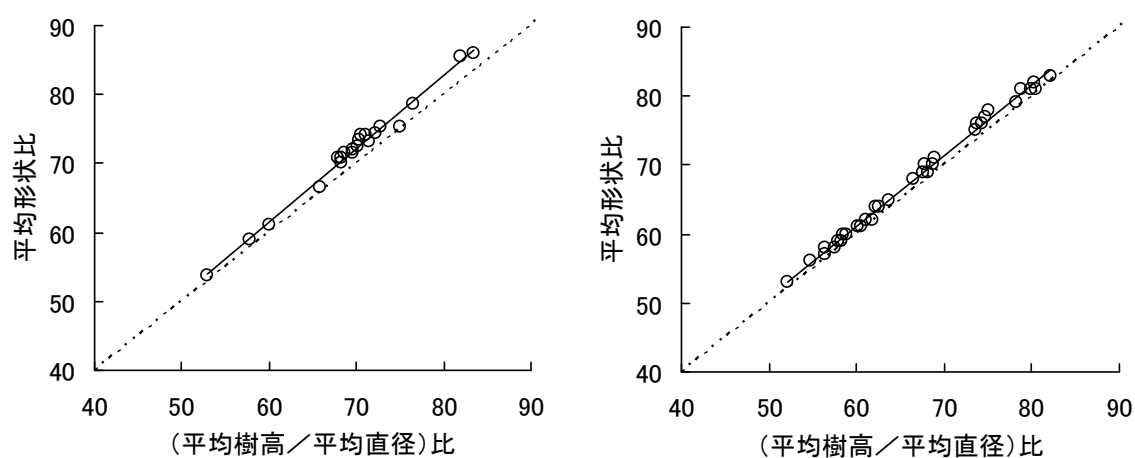


図 1. トドマツ人工林(左図)とカラマツ人工林(右図)の平均形状比と(平均樹高/平均胸高直径)比の関係

回帰式：トドマツ $y = 1.07x - 2.37$ ($r^2 = 0.989$, $p < 0.01$),

カラマツ $y = 1.03x - 0.40$ ($r^2 = 0.996$, $p < 0.01$),

破線は $y=x$.

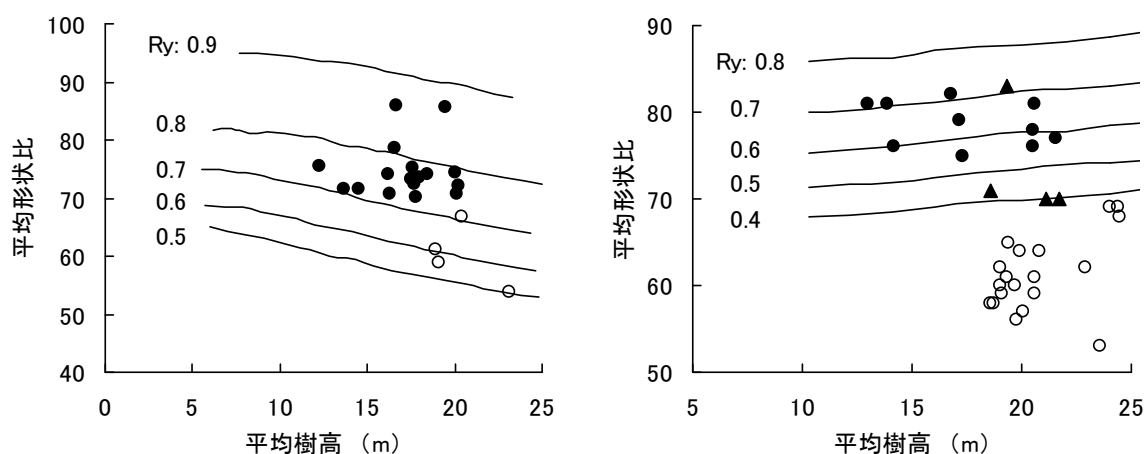


図 2. トドマツ人工林(左図)とカラマツ人工林(右図)の平均形状比と平均樹高の関係

Ry: 収量比数, ●: 激害林分 (被害率 80~90%以上), ▲: 中害林分 (被害率 50%前後), ○: 無被害林分.

IV. 考察

これまでも、形状比が小さい樹木あるいは林分で風害抵抗性が高いことは、世界中の針葉樹人工林で観察されている (Savill, 1983; MacCurrach, 1991; Ruel, 1995)。具体的な形状比値としては、Cremer *et al.* (1982) や Polley (1995) は 70 以下で風害を受けづらいつし、Ancelin *et al.* (2004) は形状比 60 未満で樹冠長率 75% 以上の場合風害抵抗性が高いとしている。日本の例としては、Ry 値で示されているが、水井・畠山 (1984) は、カラマツ若齡林 (林齡 16~31 年生) では $Ry > 0.7$ で被害確率が増大することを報告している。諫本・高宮 (1992) は、スギとヒノキについて $Ry > 0.7$ で被害率が高いことを示している。前報 (渋谷ら, 2011) では、トドマツ人工林とカラマツ人工林で、平均形状比 70 未満の林分が風倒被害を受けなかったことを報告したが、形状比が小さい林分あるいは混んでいない林分で風害を受けづらいつというのは、世界中で観察される共通の事実であるといえよう。従って、林分の平均形状比を制御し、風害抵抗性を向上させるという考え方は適切であると考えられる。

図 2 に示したように、トドマツ人工林、カラマツ人工林両方で、被害林分と無被害林分で Ry 値が分離する傾向が認められた。被害林分と無被害林分の境界は、トドマツでは $Ry = 0.7$ 、カラマツでは $Ry = 0.4$ とできそうである (図 2)。ただしトドマツでは、無被害林分の平均形状比の分布から判断して、 $Ry \leq 0.6$ の場合風倒に対してより安全であるといえそうである (図 2)。佐々木 (1983) は、本研究と同じ地域のトドマツ人工林とカラマツ人工林の風害調査を行い、風害を避けるためには、トドマツでは $Ry \leq 0.5$ 、カラマツでは $Ry \leq 0.4$ で管理することが必要としている。トドマツ人工林に関しては、本研究の結果よりもさらに小さな Ry 値が提唱されているが、カラマツについては同じ Ry 値が結論されている。いずれにしても、風倒被害を軽減、あるいは風倒被害確率を低減するためには、従来言われている針葉樹人工林の疎仕立て管理 (Ry 値 0.5~0.6 で管理) か、あるいはそれ以下の低密度とすることが必要であると結論される (図 2)。

一般に、針葉樹人工林でも若齡林では風害を

受けづらく、成長にともなつて樹高が高くなると風害を受けやすくなる (Gardiner and Quine, 2000)。風害を受けやすくなる樹高としては、Moore and Quine (2000) は 12m、Slodičák (1995) は 15m、Blackburn and Petty (1988) と Mayer *et al.* (2005) は 18m をあげている。北海道のトドマツ人工林とカラマツ人工林では、風害を受けやすくなる樹高についての明確な報告はないようであるが、風害を受けやすくなる以前に Ry 値を所定以下に抑えなければならない。ここで図 2 の結果に従って、林分管理指針を検討したが、Ry 値は、トドマツでは $Ry \leq 0.7$ 、カラマツでは $Ry \leq 0.4$ とすることが必要といえる (図 2) が、トドマツではより安全性の高い管理とするために $Ry \leq 0.6$ の場合についても検討し、カラマツでは $Ry \leq 0.4$ だと蓄積の低下が大きいのので、風倒確率は増大してしまうが、 $Ry \leq 0.5$ の場合についても検討した。植栽本数を 2,000 本/ha とし、所定の Ry 値を超える時点で間伐を行うこととし、収量比数の変化量で 0.1 の間伐とした。間伐方法は下層間伐とし、林分密度管理図 (真辺, 1974; 日本林業技術協会, 1999) を利用して 45~59 年生までの管理指針を表 3 に示した。初回間伐時の上層高は 6.7~11.5m であり、まだ風害確率が高くないだろうと考えられる段階から間伐が開始されている。当然であるが、より Ry 値が低い管理で間伐時期が早く、間伐回数も多くなっている。とくに、カラマツでは初回間伐が 10~12 年生時であり、若齡時に頻度高く間伐が必要で、早期からの密度管理が必要となっている。このような段階の間伐は採算性が悪いので、植栽本数を減らすなどの対応が必要であると考えられる。トドマツでは、上層高が 18~20m くらいで密度を 400 本/ha 前後にしなければならず、カラマツでは上層高 17~19m で 350 本/ha 以下の密度にする必要がある (表 3)。これまでの北海道カラマツ人工林の施業指針では、疎仕立てでも、上層高 19m で約 600~650 本/ha の密度とされており (北海道立林業試験場, 2007)、表 3 に示した管理指針は明らかに低密度な管理となっている。風倒被害を軽減するためには、従来の管理指針では不適切であるといえる。鳥田 (2006) は、北海道十勝地方のカラマツ防風林では、風倒抵抗性を向上させるには 35~45 年生に達する以前に 400 本/ha 以下

の密度とする必要性を示しており、表 3 に示した指針は、この基準を満足する指針となっている。トドマツでは、一般的な疎仕立て林分で、上層高 17～18m で 600～700 本/ha の密度とされ（北海道林業改良普及協会、1988）、表 3 の管理指針はそれよりも疎な指針となっている。

カラマツの林分密度管理図（日本林業技術協会、1999）では、上層高が被圧木と枯損木を除いた立木の平均樹高とされていて、定義が曖昧である。本研究では、カラマツについても上層高を樹高上位 250 本/ha の平均樹高と定義したが、本研究で使した林分密度管理図の上層高は、この定義の上層高に直すと、図に示された上層高値よりも高くなると考えられる。このことが、図 2 に示した Ry 値ごとの平均形状比に影響している可能

性が考えられる。上層高の定義が曖昧だと、本研究のような定量的な検討をする場合林分密度管理図を利用しづらい。人工林の高齢化が進んで、立木密度が少ない林分も増えてきているという状況もあり、明確に定義された上層高を使用した林分密度管理図の改訂が必要と考えられる。

またカラマツ人工林の平均樹高は（2）式によって推定したが、この式には Ry 値と関連のある項が含まれていない。一般に上層高の成長は密度には影響されないとされる（Cremer *et al.*, 1982 ; Rollinson, 1988）が、Ry 値の大きい混んだ林分では被圧木が増えるため、上層高が同じでも、平均樹高は低くなると考えられる。トドマツの平均樹高の推定式（1 式）には立木密度が含まれていて、Ry 値が大きくなると平均樹高が低くなる（表 2）。

表 3. 風倒被害を軽減するためのトドマツ・カラマツ人工林の管理指針

1) トドマツ管理指針: $0.6 \leq Ry \leq 0.7$ の場合

林齢 (年)	上層高 (m)	間伐前		間伐木		間伐後		間伐率 (%)	
		Ry	D_m (cm)	本数 (本/ha)	材積 (m^3/ha)	密度 (本/ha)	Ry	D_m (cm)	本数 材積
26	11.5	0.7	12.7	590	22	1310	0.6	14.3	31 14
32	14.0	0.7	17.0	390	33	890	0.6	18.8	30 15
41	17.0	0.7	22.0	270	42	610	0.6	24.6	31 14
59	20.8	0.7	29.0	187	58	410	0.6	32.5	31 14

2) トドマツ管理指針: $0.5 \leq Ry \leq 0.6$ の場合

林齢 (年)	上層高 (m)	間伐前		間伐木		間伐後		間伐率 (%)	
		Ry	D_m (cm)	本数 (本/ha)	材積 (m^3/ha)	密度 (本/ha)	Ry	D_m (cm)	本数 材積
22	9.3	0.6	10.8	570	16	1360	0.5	12.8	30 17
26	11.3	0.6	14.1	405	23	925	0.5	15.5	30 17
32	13.8	0.6	18.7	273	31	627	0.5	20.5	30 17
44	17.7	0.6	24.1	196	41	430	0.5	26.6	31 16
56	20.4	0.6	31.5	135	56	135	0.5	34.8	31 16

3) カラマツ管理指針: $0.4 \leq Ry \leq 0.5$ の場合

林齢 (年)	上層高 (m)	間伐前		間伐木		間伐後		間伐率 (%)	
		Ry	D_m (cm)	本数 (本/ha)	材積 (m^3/ha)	密度 (本/ha)	Ry	D_m (cm)	本数 材積
12	8.3	0.5	9.7	510	13.5	1370	0.4	10.3	27 20
15	10.0	0.5	12.1	370	18	980	0.4	12.7	27 21
19	12.3	0.5	15.0	250	22.5	700	0.4	15.7	26 20
24	15.1	0.5	18.7	180	30	485	0.4	19.6	27 21
32	18.5	0.5	23.2	130	34	340	0.4	24.5	28 19
51	23.0	0.5	29.1	87	48	235	0.4	30.6	27 20

4) カラマツ管理指針: $0.3 \leq Ry \leq 0.4$ の場合

林齢 (年)	上層高 (m)	間伐前		間伐木		間伐後		間伐率 (%)	
		Ry	D_m (cm)	本数 (本/ha)	材積 (m^3/ha)	密度 (本/ha)	Ry	D_m (cm)	本数 材積
10	6.7	0.4	8.2	600	10	1320	0.3	8.7	31 24
13	8.6	0.4	10.7	400	13.5	880	0.3	11.2	31 24
16	10.8	0.4	13.7	260	18	600	0.3	14.3	30 24
21	13.6	0.4	17.5	175	25	405	0.3	18.3	30 25
29	17.2	0.4	22.5	120	33	268	0.3	23.6	31 25
45	22.0	0.4	29.1	78	44	175	0.3	30.5	31 24

略号: Ry: 収量比数, D_m : 平均胸高直径。

植栽本数は 2,000 本/ha とし、間伐方法は下層間伐、間伐によって収量比数が 0.1 減るようにした。
地位指数は、トドマツでは阿部 (1989) による 24 を採用し、カラマツでは猪瀬ら (1992) による 21 を採用した。

(2) 式からは、そのような関係は求められないが、この点は本研究の欠点の一つであろう。しかし、上層高を樹高上位 250 本/ha の平均樹高とし、さらに高齢級人工林のデータも解析対象として含んでいる (1) 式のような平均樹高の推定式がないため、現状では致し方ないであろう。

本研究の測定対象木は、風害後に残存した優占木であった。このため、調査林分の平均形状比と平均樹高は優占木の平均値であり、林分全体の平均値ではない。これに対し、(1)、(2) 式から求められる平均樹高は林分全体の平均値である。トドマツ、カラマツとも無被害林分は疎な林分であったため、被圧木はほとんどなく、測定木の平均値は林分の平均値に近いといえる。これに対し、被害林分では被圧木があり、測定されていない。林分全体の平均値を考えると、一般に優占木よりも被圧木の方が形状比が大きく (Cremer *et al.*, 1982)、優占木の平均的な形状比より林分の平均的な形状比の方が大きい (Rollinson, 1988)、図 2 に比較すると、平均樹高は低くなるが、平均形状比は大きくなるのではないかと推察される。このため、林分全体の平均値を考慮した場合、被害林分と無被害林分の差が大きくなるのではないかと考えられる。ただ、その場合でも、風倒被害の軽減のためには相当疎な管理としなければならないということは不変であろうと考えられる。

また本研究の調査対象地域は、トドマツに関しても、カラマツに関しても、北海道内で地位指数が最も低い地域の一つとなっている (山根、1983; 北海道立林業試験場、2007)。表 1 に示したように、平均樹高は最高でもトドマツで 23.1m、カラマツで 24.5m であった。しかし、例えばカラマツでは、北海道の地位の高い地域での高齢林分 (林齢 55~80 年生) では、平均樹高が 26~33m の林分が多く (岩崎・渋谷、未発表)、本研究の調査林分は平均樹高が低いといわざるを得ない。このことが平均形状比に影響し、地位の高い地域と比較すると、本研究の平均形状比 (図 2) は小さい可能性も考えられ、今後他地域との比較も必要である。

本研究の調査地域は、火山噴出物が厚く積もった土壌であり、樹木の根系の深さは浅く (Koizumi *et al.*, 2007)、度々風害を受けている地

域である (佐々木、1983)。北海道の中でも風害を受けやすい地域であるといえ、被害形態は風倒が卓越している (佐々木、1983)。このため、表 3 に示した指針は、安全性の高い指針になっていると考えられ、北海道の他の地域の平坦地に位置するトドマツ人工林、カラマツ人工林にも十分に適用可能であると考えられる。

さらに、人工林が長伐期化すると、風害の累積確率は急激に増大し、シトカトウヒ人工林の例では、林齢 65 年以降では累積風害確率は 1.0 とされている (Gardiner and Quine, 2000)。北海道でも、人工林の高齢化が進んでおり、風害対策は不可欠であり、若齢時からの適切な密度管理が重要である。

本研究の調査は、北海道森林管理局と石狩森林管理署に許可をいただいた。お礼申し上げます。また北海道立総合研究機構林業試験場の滝谷美香さんには、カラマツ人工林の平均樹高と上層高の関係をご教示いただき、使用を許していただいた。お礼申し上げます。

引用文献

- 阿部信行 (1989) トドマツ人工林間伐の体系化に関する基礎的研究. 北海道林試研報 26:1-95.
- Ancelin, P., Courbaud, B., and Fourcaud, T. (2004) Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. *For. Ecol. Manage.* 203: 101-121.
- Blackburn, P., and Petty, J.A. (1988) Theoretical calculations of the influence of spacing on stand stability. *Forestry* 61: 235-244.
- Chiba, Y. (2000) Modelling stem breakage caused by typhoons in plantation *Cryptomeria japonica* forests. *For. Ecol. Manage.* 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. *NZ J. For. Sci.* 12: 244-268.
- Cucchi, 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.). *For. Ecol. Manage.* 213: 184–196.
- Gardiner, B.A., and Quine, C.P. (2000) Management of forests to reduce the risk of abiotic damage –a review with particular reference the effects of strong winds. *For. Ecol. Manage.* 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.
- 北海道林業改良普及協会（1988）トドマツ人工林間伐の手引. 103pp, 北海道林業改良普及協会.
- 北海道立林業試験場（2007）カラマツ人工林施業の手引き. 91pp, 北海道立林業試験場.
- 猪瀬光雄・阿部信行・山根玄一・佐野 真・石橋聡（1992）カラマツの地位指数曲線の改訂. 北方林業 44: 24–26.
- 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.
- Kamimura, K., and Shiraishi, N. (2007) A review of strategies for wind damage assessment in Japanese forests. *J. For. Res.* 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.
- Koizumi, A., Oonuma, N., Sasaki, Y., and Takahashi, K. (2007) Difference in uprooting resistance among coniferous species planted in soils of volcanic origin. *J. For. Res.* 12: 237–242.
- MacCurrach, R.S. (1991) Spacing: an option for reducing storm damage. *Scot. For.* 45: 285–297.
- 真辺 昭（1973）北海道カラマツの密度管理図. 61pp, 北方林業会.
- 真辺 昭（1974）トドマツ密度管理図. 69pp, 北方林業会.
- Mason, W.L. (2002) Are irregular stands more windfirm? *Forestry* 75: 347–355.
- Mayer, P., Brang, P., Dobbertin, M., Hallenbarter, D., Renaud, J.-P., Walthert, L., and Zimmermann, S. (2005) Forest storm damage is more frequent on acidic soils. *Ann. For. Sci.* 62: 303–311.
- 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.
- Moore, J., and Quine, C. (2000) A comparison of the relative risk of wind damage to planted forests in Border Forest Park, Great Britain, and the Central North Island, New Zealand. *For. Ecol. Manage.* 135: 345–353.
- 日本林業技術協会（1999）人工林林分密度管理図. 22 図, 日本林業技術協会.
- Polley, V.H. (1995) Beurteilung der mechanischen Stabilität der Waldbäume auf der Grundlage der Bundeswaldinventur. *Forst und Holz* 50: 594–597.
- Rollinson, T.J.D. (1988) Respacing Sitka spruce. *Forestry* 61: 1–22.
- Ruel, J.-C. (1995) Understanding windthrow: silvicultural implications. *For. Chron.* 71: 434–445.
- 佐々木昌治（1983）風害に強い森林の造成. 北方林業 35: 173–177.
- Savill, P.S. (1983) Silviculture in windy climates. *For. Abstr.* 44: 473–488.
- 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: 53–59.
- 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.), Cambridge University Press, 436–447.
- 鳥田宏行（2006）2002 年台風 21 号により北海道十勝の防風林に発生した風害の要因解析. 日林誌 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. *J. For.*

- Res. 17: 65–71.

We examined management guidelines for reducing windthrow damage in *Abies sachalinensis* and *Larix kaempferi* plantations located near Lake Shikotsuko in central Hokkaido, Japan, based on mean slenderness ratios of the plantations. The mean slenderness ratio–mean height relationships of the two species were determined from stand inventories and stand density-control diagrams, using the relative yield index (Ry), and the mean slenderness ratios of the plantations were compared to these relationships. For both species, differences in Ry were observed between windthrown and intact plantations, and the Ry of windthrown plantations was larger than that of intact plantations. The threshold of Ry between windthrown and intact plantations was 0.7 for *A. sachalinensis* and 0.4 for *L. kaempferi*. We prepared management guidelines for reducing windthrow damage for both species based on the thresholds, using stand density-control diagrams. Density control of young plantations is necessary to reduce windthrow damage, and stands must obviously be maintained at a lower density than the general guidelines for the sparse management of *A. sachalinensis* and *L. kaempferi* plantations. Because the plantations investigated were in a region that is vulnerable to windthrow damage, the management guidelines established in this study should be applicable to other regions of Hokkaido.

Key words: management guideline, slenderness ratio, stand density-control diagram, windthrow