

第5章 林木の冠雪害抵抗性指数としての形状比および限界降雪量の意義と

ボカスギの限界降雪量の推定法

第1節 林木の冠雪害抵抗性指数としての形状比および限界降雪量の意義と問題点

冠雪害抵抗性の指標値として形状比が国内（例えば、高橋啓二，1977；石川ら，1986）はもとより外国（1975；Gill, 1974；Cremer et al., 1983）でも広く用いられている。この理由は、第2章で述べたように、冠雪害の発生と形状比の間に一定の関係が認められたこと、さらに形状比の計算が容易なことなどによるものである。しかし、形状比だけでは冠雪害の発生の有無を十分に説明できないことも指摘されており（例えば、高橋啓二，1977；石川ら，1987），より普遍的な冠雪害抵抗性指数の創出が求められている。このような理由から、冠雪害の発生機構を力学的に解析し、冠雪荷重とそれを支える林木の耐力との相互関係から限界降雪量を求め、これを林木の冠雪害抵抗性の指数とすることが提案された（遠藤ら，1986；中谷，1991）。

そこで、林木の冠雪害抵抗性指数としての形状比や限界降雪量の力学的な意義や問題点などにについて検討した。

1. 形状比の冠雪害抵抗性指数としての意義と問題点

冠雪した樹木の最大耐力（座屈荷重）は幹の形状、幹の強度性質および根元の回転係数の影響を受けることが明らかにされており、これらの関係は(4.1.5)式で与えられている。この式によれば、幹の耐力は幹の断面二次モーメントに比例し、断面二次モーメントは根元直径の4乗に比例することから、その耐力は樹高が同じであれば直径の大きな立木ほど大きくなるといえる。しかし、直径の増大に伴って単木あたりの葉量も大きくなることことから、直径の増大に伴って冠雪荷重も大きくなると考えられる。その結果、幹の耐力が大きくても、直ちに、冠雪害抵抗性が大きくなるとは判断できない。その理由は、冠雪害抵抗性は幹の耐力と冠雪荷重の相対的な力関係によって決まると考えられるからである。したがって、林木の冠雪害抵抗性を表す指数としては幹の耐力と冠雪荷重の相対関係をあ

らわすものが望ましい。そこで、林木の冠雪害抵抗性指数を冠雪荷重に対する幹の座屈荷重の比で表すことにした。

$$I_R = P_{c,r} / S_L \quad (5.1.1)$$

ここで、 I_R は冠雪害抵抗性、 $P_{c,r}$ は座屈荷重、 S_L は冠雪荷重である。この式は、 I_R 値が1より小さいほど冠雪害抵抗性が小さいことを、反対に I_R 値が1より大きいほど冠雪害抵抗性が大きいことを示す。

形状比が冠雪害抵抗性の指数となりうる場合の条件を検討するために、以下のような仮定をおき、第4章の冠雪害のモデルをさらに簡素化した。

a) 幹の座屈荷重を算出するに当たり、根元部の拘束条件が固定端であり、根元はモーメントが付加されても回転しない（すなわち $\mu = 0$ ）。

b) 林木の樹高に対する荷重点高（樹冠の重心高）の比が一定である。

c) 個体の葉量は枝下直径の2乗に比例し（吉良，1965），さらに根元直径が枝下直径に比例する。

d) 冠雪量は葉量に比例する。

仮定a)とb)から、座屈荷重は、(4.1.6)式に $\mu = 0$ を代入し γ_c を求め、(4.1.5)式により与えられる。特にこの場合の γ_c は、立木の細りを示す α 、 β のみから決定されるので、(4.1.5)式は次のように表すことができる。

$$P_{c,r} = \alpha_1^2 E I_0 / (K_1 H)^2 \quad (5.1.1)$$

ここで、 $P_{c,r}$ は座屈荷重、 α_1^2 は幹の細りによって決まる定数、 E は樹幹ヤング率、 I_0 は断面二次モーメント、 K_1 は樹高に対する荷重点高の比、 H は樹高である。

また、仮定c)から、個体の葉量と根元直径の間には次のような関係がなりたつ。

$$\begin{aligned} W_L &= K_2 D_B^2 \\ &= K_3 D_0^2 \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

ここで、 W_L は葉量、 D_B は枝下直径、 D_0 は根元直径、 K_2 と K_3 はそれぞれ比例定数である。さらに、仮定d)から冠雪量と葉量および根元直径の関係は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 S_L &= K_4 W_L \\
 &= K_5 D_0^2
 \end{aligned}
 \tag{5.1.3}$$

ここで、 K_4 、 K_5 はそれぞれ比例定数である。

(5.1.1)、(5.1.3)式から、冠雪害抵抗性の指数 I_R は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 I_R &= \frac{P_{cr}}{S_L} = \frac{\alpha_1^2 E I_0}{(K_1 H)^2} \cdot \frac{1}{K_5 D_0^2} \\
 &= \frac{\alpha_1^2 \pi}{64 K_1^2 K_5} (H/D_0)^{-2} E
 \end{aligned}
 \tag{5.1.4}$$

この式から、 I_R は (H/D_0) の 2 乗に反比例し、樹幹ヤング率に比例するといえる。

H/D_0 は形状比に相当することから、幹の細りや樹幹ヤング率などが一定であれば、冠雪害抵抗性は形状比によって決まる。したがって、a) から d) の仮定条件が成り立ち、かつ幹の細りやヤング率等の変動が小さい場合においては、形状比が冠雪害抵抗性の指標となる。

しかし、樹幹ヤング率はスギ品種によって異なることが確認されたことから (表-16, 17, 19), 例え形状比が同じであっても、品種によって樹幹ヤング率に差異があれば、品種によって被害率にも差異が認められることが示唆される。ボカスギとマスマスギの形状比がほぼ等しいのにボカスギの被害率が大きかったのも (表-7, 9), 形状比では説明できなかったが、樹幹ヤング率を考慮に入れると被害率の差異が説明できる。同様に表-8~10におけるタテヤマスギとボカスギの被害率の差異も樹幹ヤング率により説明できる。さらに、頼成 (表-17) における樹幹ヤング率の変動係数は 23~33% の範囲にあり、品種によってバラツキの程度が異なっていた。また、吉峰 (表-19) における樹幹ヤング率の変動係数は 10~22% の範囲にあった。このような樹幹ヤング率の個体変動が、第 2 章 2 節において被害木と健全木の判別が形状比だけでは十分説明できなかった一因となっていたことが考えられた。また、同じボカスギであっても樹幹ヤング率が加齢にともなって 2 倍以上変動する (図-29) ことから、冠雪害を受け始めるときの形状比は加齢に伴い次

第に大きくなることが予測される。このような傾向がラジアータマツ林において認められている (Cremer, 1982)。したがって、冠雪害抵抗性の指数としては樹幹ヤング率を考慮したものが望まれる。

また、a) から d) の 4 つの仮定条件のうちで、とくに現実の林木と大きく異なると思われるのは b) である。一般に、枝下高は若齢林や低密度の林で低く、高齢林や高密度の林では高くなる傾向がある。その結果、樹冠の重心高の樹高に対する比は、若齢林や低密度林で低いのに対し、高齢林や高密度林では高くなる傾向があり、生育段階や林分構造により変化する。ただし、樹冠の重心高の樹高に対する比の変動は同一林分内の方が林分間よりも小さいことが予想される。さらに、a) については、林木の耐力に及ぼす根系の支持力の影響は根元直径が小さくかつ荷重点が低い林木で大きくなる傾向が認められた (図-37) ことから、とくに幼齢期の林木ではその耐力を推定する上で根元の回転係数の影響を無視できないと考えられた。さらに、d) では冠雪荷重が葉量に比例すると仮定したが、冠雪荷重を測定した結果、冠雪荷重は葉量の 0.86 乗に比例する傾向があった。ここで、冠雪荷重が葉量に比例すると仮定した冠雪荷重を 1 とすると、葉量の 0.86 乗に比例する^と仮定した冠雪荷重^比は、葉量が 10kg の場合には 0.72、葉量が 20kg の場合には 0.66 となる。したがって、冠雪害抵抗性は形状比の 2 乗に反比例し、樹幹ヤング率に比例するが、同時に直径が大きくなるほど大きくなるといえる。

さらに、枝打ち前後の冠雪害抵抗性を比較した場合、枝打ち直後は枝打ち直前に比べて葉量の減少に伴い冠雪荷重も減少することから、冠雪害抵抗性が大きくなると予測されるが、形状比は枝打ち前後の値が同じであり、冠雪害抵抗性の変化を評価できない。

以上のことから、形状比が林木の冠雪害抵抗性の指数として用いることができるのは、同一林分内など樹幹ヤング率の変動が比較的小さな場合などに限定されるものと考えられる。

2. 限界降雪量の冠雪害抵抗性指数としての意義と問題点

前項では、冠雪荷重に対する幹の耐力の比を林木の冠雪害抵抗性の指数として用いたが、

より一般的な指数として遠藤ら(1986)、中谷ら(1991)は冠雪害が発生するときの降雪量(限界降雪量)を採用している。この指数は形状比に比べてより客観的な冠雪害抵抗性を表すことができるのに加えて、対象とする林木の限界降雪量が過去の最大降雪量を越えるように施業目標をたてる場合などにも活用できよう。ただし、遠藤ら(1986)と中谷(1991)はともにこの限界降雪量を算出するのに必要な被害発生時の冠雪荷重を林木の座屈荷重から推定しているが、冠雪害のモデルや計算法に違いがある。このうち、遠藤ら(1983)は冠雪と林木自体の重量が幹のそれぞれの高さに分布荷重として作用するものとして、林木の座屈荷重をエネルギー法を用いて解析した。この解析を進めるに当たり、①樹冠形は円錐体であり、冠雪荷重が樹冠投影面積に比例して増加する、②幹形は円錐体で、その樹幹ヤング率は林齢や幹の高さに関わらず一定である、かつ③林木の根元は冠雪荷重によるモーメントによって回転しないなどの仮定をおいた。しかし、現実の林木では、冠雪荷重は樹冠投影面積よりもむしろ葉量との相関が高く(表-12)、幹形は生育段階が進むほど円錐形とはかけ離れた形状になり、樹幹ヤング率は林齢や幹の高さによって大きく変化し(図-31)さらに根元の拘束条件が林木のサイズによって変化する(図-33~36)などの傾向が認められた。したがって、①から③の仮定条件下では、スギの耐力を精度良く推定できないものと考えられた。

そこで、中谷(1991)は樹幹解析や層別刈り取り法などによって測定された幹形、葉の垂直分布、樹幹ヤング率および根元の回転係数などデータを用いて林木の座屈荷重を推定する数値計算法を開発して、この方法で冠雪害発生時の冠雪荷重求め、さらに冠雪荷重と葉量および降雪量の関係式(松田, 1981)から限界降雪量を推定した。このようにして求められた限界降雪量は次式で示されている。

$$HN_s = 13.75A / (1 + 0.485A) \quad (5.1.5)$$

ここで、 HN_s は限界降雪量(cm)、 $A = \log_{10}(P_{cr}/W_L)$ 、 P_{cr} は座屈荷重(kg)、 W_L は単木の葉量(kg)である。 HN_s は値が大きいほど冠雪害抵抗性が大きいことを示す。

以上のように、限界降雪量は幹形状、幹の強度特性および根系の支持力などから求めら

れる林木の耐力からばかりではなく、樹冠形や葉量を含めた冠雪荷重も含めて総合的に評価できる指標値といえる。この手法を用いることにより、冠雪害の回避を目指した森林施業の効果を評価することが可能となった。

しかし、この限界降雪量を算出するためには、個体の葉量や葉の垂直分布などの冠雪荷重に関わる要因と、幹形、樹幹ヤング率および根元の回転係数などの林木の耐力に関わる多くの要因が必要であるが、これらの要因の測定には多くの労力や林木の伐倒を伴う。そのため、限界降雪量を冠雪害抵抗性の指数として実用に供するためには、これらの要因を簡単に推定することが必要である。

第2節 ボカスギ林木の限界降雪量の推定法

ボカスギは富山県における主要な造林品種であるが、冠雪害抵抗性が小さくこれまでも大きな被害を受けている。そこで、本節ではボカスギ林木を対象とした限界降雪量の推定法について検討した。まず、林木の基本的な要素である樹高、胸高直径および林齢などから冠雪荷重や林木の耐力に関わる要因を推定する式を求め、様々な大きさの林木の限界降雪量が容易に求めることができる推定法について検討し、つぎにこの推定法を用いて、被害木判別の有効性、限界降雪量と林木の大きさ、林齢および形状比との関係などについて検討した結果について述べる (Kato・Nakatani; 印刷中)。

1. 方法

(1) モデルの概要

本研究では幹が折損する時の冠雪荷重を分布荷重条件下における林木の座屈荷重を用いることにし、これを中谷の数値計算法(1991)によって推定した。また、座屈荷重の計算に必要な樹幹ヤング率の垂直分布、回転モーメントに対する根系の抵抗力あるいは葉の垂直分布などの多くの強度要因を図-42に示した手順で推定し、限界降雪量を求めた。

a) まず、林齢、樹高、胸高直径および生枝下高などの基本的要素をコンピュータに入力する。

b) これらの基本的要素から幹形、自重の垂直分布、樹幹ヤング率の垂直分布および根系の支持力などの強度要因を推定する。

c) 冠雪害発生時の冠雪荷重を先の強度要因から計算される座屈荷重より推定する。

d) 冠雪荷重と降雪量および葉量の関係式から、限界降雪量を推定する。

なお、林齢、樹高、胸高直径および枝下高などの基礎要素と幹形、自重の垂直分布、樹幹ヤング率の垂直分布および根系の支持力などの強度要因の関係については、表-21に示す6カ所のボカスギ林分の資料を用いて検討した。また、限界降雪量による被害判別の有効性を検討するため、北屋敷（18年生）と荒館の被害林分と氷見市堀田の28年生の被害林分を調査し資料を得た。

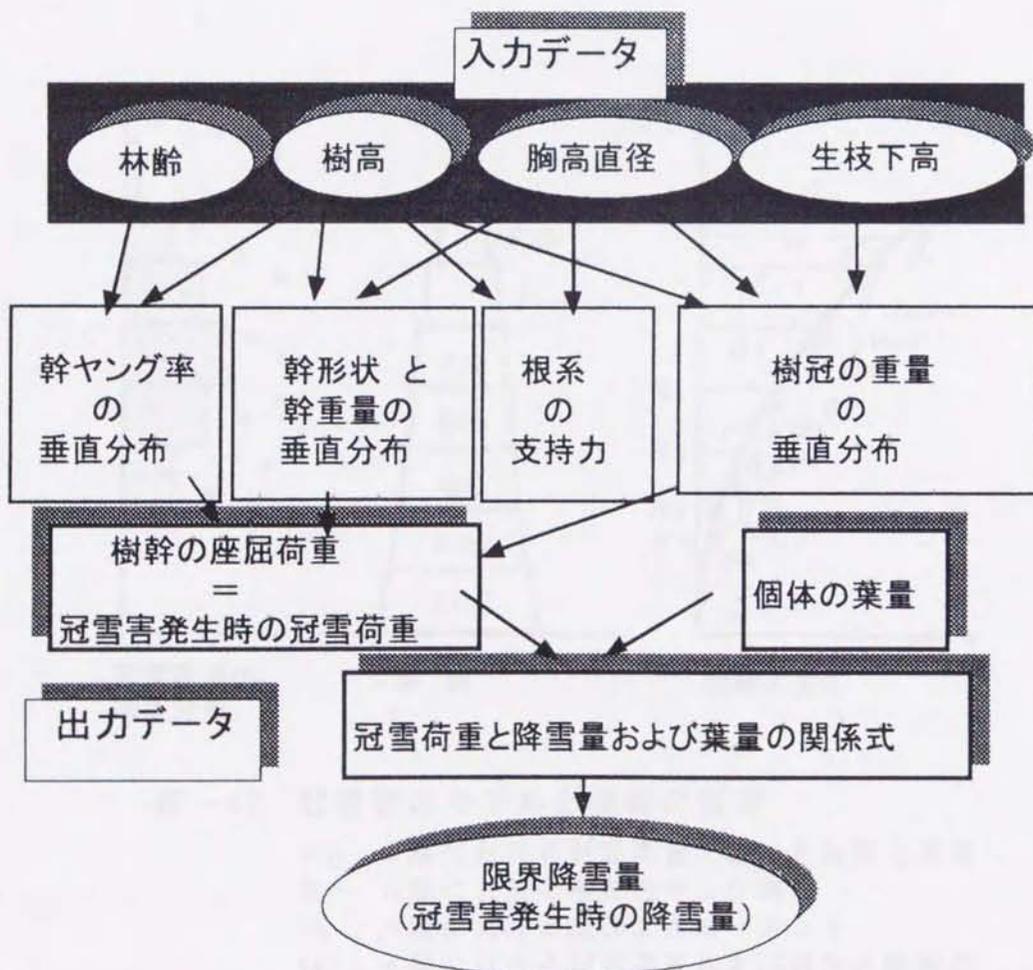


図-42 林木の限界降雪量の推定手順

表-21 ポカスギの幹形および幹・枝・葉の垂直分布の調査に用いた供試木の概要

調査地	林齢 (年生)	本数	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	葉乾重 (kg)
頼成	12	6	5.6-16.3	4.1-9.0	3.3-17.1
北屋敷	18	7	12.6-19.0	9.6-13.3	9.7-21.5
北屋敷	23	7	14.8-23.3	13.1-17.4	13.1-28.7
荒館	25	8	21.1-30.7	16.6-20.7	21.2-44.8
上中	25	8	23.0-33.6	18.4-21.0	18.9-42.7
峰坪野	33	9	13.9-32.9	16.6-22.0	5.2-43.7

注 北屋敷, 荒館, 上中の資料の一部は相浦(1988)による。

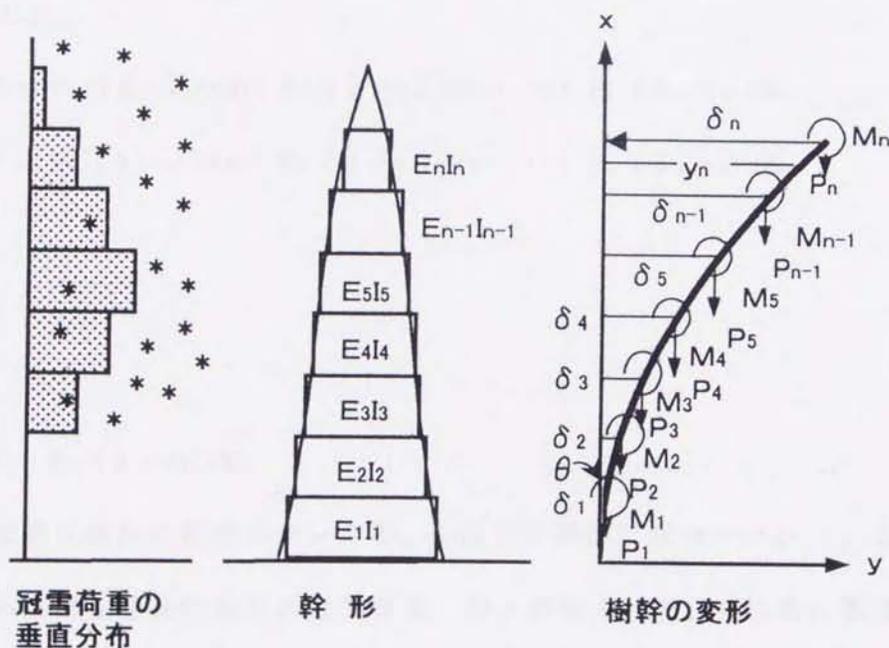


図-43 冠雪害のモデルと樹幹の仮定

- P_n : n 層における冠雪荷重, 樹幹と樹冠の荷重
- E_n : n 層における樹幹のヤング率
- I_n : n 層における断面二次モーメント
- M_n : n 層における冠雪荷重および樹幹と樹冠の荷重によって生ずる回転モーメント
- δ_n : n 層における樹幹の撓み
- θ : 樹幹基部における回転角度

(2) 冠雪荷重に対する幹の抵抗性

林木の冠雪害モデルを図-43に示した(中谷, 1991)。このモデルでは冠雪荷重と自重が分布荷重として付加されるものとし、幹の座屈荷重を中谷の数値計算法によって推定することにした。この座屈荷重を計算するに当たり、次の仮定を置いた。

a) 幹は断面が漸次変化する n 個の短い円柱を重ねたもので構成され、冠雪荷重と自重とその短柱の最上部に作用する。

b) 幹の基部における回転角 θ は基部における回転モーメントに比例して増大する。回転モーメントは冠雪荷重、幹および樹冠の重量の水平変位によって生ずる。 θ と M_0 との間の比例定数を μ とする。

座屈荷重を計算するにあたり、中谷(1991)は幹の各部位におけるたわみ曲線を以下の微分方程式で表した。

$$E_1 I_1 \frac{dy^2}{dx^2} = P_1 (\delta_{1-y_1}) + M_1 + P_2 (\delta_{2-y_1}) + M_2 + \dots + P_n (\delta_{n-y_1}) + M_n$$

$$E_2 I_2 \frac{dy^2}{dx^2} = P_2 (\delta_{2-y_2}) + M_2 + P_3 (\delta_{3-y_2}) + M_3 + \dots + P_n (\delta_{n-y_2}) + M_n$$

$$E_n I_n \frac{dy^2}{dx^2} = P_n (\delta_{n-y_n}) + M_n \quad (5.2.1)$$

ここで、 E_n は第 n 番目の短柱のヤング率、 I_n はその断面二次モーメント、 δ_n はその部位のたわみ量、 P_n は第 n 番目の短柱の冠雪荷重、幹と樹冠の生重、 M_n は第 n 番目の短柱の曲げモーメントである。b) の仮定から θ と μ の間の式はつぎのように表される。

$$\theta = \mu M_0 = \mu (\sum M_n + \sum P_n \delta_n) \quad (5.2.2)$$

(3) 冠雪荷重と限界降雪量

中谷(1991)は限界降雪量を推定するにあたり、松田式(1981)を用いて冠雪荷重を推定しているが、この式を用いた場合には過大推定となる傾向があることが指摘されている(中谷, 1991; 嘉戸ら, 1993)。そこで、本研究では、ボカスギの冠雪量と降雪量および

葉量の関係を第3章4節の実験式(3.4.3)で表すことにした。これを再掲すると次の通りである。

$$S_L = 10^A \cdot W_L^{0.86} \quad (5.2.3)$$

ここで、 S_L は冠雪荷重(kg)、 $1/A = 7.563/S_F + 0.663$ 、 S_F は降雪量(kg/m²)、 W_L は葉量(kg)である。

冠雪害発生時の冠雪量が座屈荷重と等しいとすると、限界降雪量 S_{cr} は葉乾重と降雪量から求められる。座屈荷重 P_{cr} を(5.2.3)式の S_L に代入し、この式を変形すると、次式から冠雪害が発生するときの降雪量 S_F を表す限界降雪量 S_{cr} (kg/m²)を求めることができる。

$$S_{cr} = 7.563A / (1 - 0.663A) \quad (5.2.4)$$

ここで、 $A = \log(P_{cr} / W_L^{0.86})$ である。

この研究では(5.2.3)式から冠雪荷重が葉量の0.86乗に比例するものと仮定した。

(4) 幹形

6ヶ所の調査地における45本の供試木を対象に樹幹解析を行い、幹形を調べた(表-21)。一般に大きさの異なる林木の幹形を比べる場合には相対幹形が用いられている。相対幹形は、樹高と樹高の1割の高さの直径をそれぞれ1とおくことにより現実の幹形を相対化したもので、こうすることによって幹の大きさとは無関係に幹形の比較ができるようになる。そこで、全供試木を対象に相対高1/20の間隔で相対直径を求め、これと樹高および胸高直径の重回帰式を各相対高毎に求めた。この重回帰式は次式で示される。

$$RD_{0.n} = a_1 \cdot H + a_2 \cdot D + a_3 \quad (5.2.5)$$

ここで、 $RD_{0.n}$ は樹高の $n/10$ の部位における相対直径である。各相対高における重回帰式の係数を表-22に示した。以下の計算では、この式から各相対高における相対直径を求め、これらの点をつなぐことによって幹曲線を得た。なお、胸高部位の相対直径(RD_{BH})は地上1.3mに最も近い2つの相対直径から比例配分によって計算した。そして、樹高の1割の

高さの直径 $D_{0.n}$ を次式から求めることにした。

$$D_{0.n} = RD_{0.n} \cdot D / RD_{BH} \quad (5.2.6)$$

このようにして求めた幹曲線の精度を検討するため、各相対高における直径の推定値と測定値を比較した。その際、適合精度の計算には次の式を用いた。

$$PR = ss/md \cdot 100 \quad (5.2.7)$$

$$ss^2 = \sum (ed-od)^2/n \quad (5.2.8)$$

ここで、PR は幹曲線の適合精度、md は20ヶ所の相対高における直径の平均値、ed は各相対高における直径の推定値、od は各相対高における直径の測定値、n は相対高の数である。この結果、供試木45本における適合精度の平均値は6.1%であった。このように適合度が比較的良好だったので、幹曲線の推定には上述の方法を用いることにした。

表-22 各相対高における相対直径(RD_n)と樹高(H)および胸高直径(D)の重回帰係数 ($RD_n = a_1 \cdot H + a_2 \cdot D + a_3$)

相対高	重回帰係数			r^2	d. f.
	a1	a2	a3		
0.00	0.048	-0.011	0.963	0.773	42
0.05	0.003		1.076	0.103	42
0.10			1.000		
0.15	0.004	-0.003	0.935	0.165	42
0.20	0.008	-0.005	0.879	0.302	42
0.25	0.009	-0.005	0.835	0.361	42
0.30	0.010	-0.005	0.767	0.432	42
0.35	0.012	-0.005	0.702	0.649	42
0.40	0.016	-0.006	0.631	0.677	42
0.45	0.018	-0.007	0.582	0.739	42
0.50	0.021	-0.008	0.527	0.770	42
0.55	0.021	-0.009	0.484	0.780	42
0.60	0.023	-0.010	0.422	0.753	42
0.65	0.023	-0.011	0.375	0.795	42
0.70	0.024	-0.012	0.318	0.840	42
0.75	0.025	-0.012	0.250	0.842	42
0.80	0.023	-0.012	0.182	0.835	42
0.85	0.021	-0.010	0.021	0.831	42
0.90	0.018	-0.009	0.067	0.752	42
0.95	0.008	-0.005	0.039	0.569	42
1.00			0.000		

(5) 樹幹ヤング率

ボカスギの樹幹ヤング率が林齢および幹部位によって大きく変動することを第4章2節で述べた。この結果によると、林齢10年生のヤング率は20tonf/cm²程度で、高さによる変動は小さかったが、林齢の増加にともなってヤング率も大きくなる。また、その増加率は部位によって異なり根元と梢端で小さく、幹の中央部で大きくなる傾向があった(図-31)。なお、樹幹ヤング率は年輪幅と関係が深いといわれているが、両者間における相関係数は幹部位や林齢に比べて年輪幅の方が小さかったこと(中谷・嘉戸ら, 1988)、前年までの幹形が推定できないと年輪幅が求められないことなどの理由から、年輪幅を考慮に入れなかった。そこで、各林齢毎の各部位における樹幹ヤング率を次式のような相対高の2次式で近似した(図-31)。

$$E_n = b_1 \cdot RH^2 + b_2 \cdot RH + b_3 \quad (5.2.9)$$

表-23 各林齢における樹幹ヤング率(E)と相対高(RH)の2次回帰式の係数(E = b₁ · RH² + b₂ · RH + b₃)

林齢	b ₁	b ₂	b ₃	r ²	d. f.
10	-28.0	34.0	14.0	0.237	20
11	-32.6	38.0	15.0		
12	-37.2	42.0	16.5		
13	-41.8	46.0	18.0		
14	-46.4	50.0	19.5		
15	-51.0	54.0	21.0	0.299	31
16	-59.2	61.8	21.4		
17	-67.4	69.4	21.8		
18	-75.6	77.4	22.2		
19	-83.8	85.2	22.6		
20	-92.0	93.0	23.0	0.552	41
21	-81.3	99.2	23.2		
22	-88.8	105.4	23.4		
23	-110.6	111.6	23.6		
24	-116.8	117.8	23.8		
25	-123.0	124.0	24.0	0.652	48
30	-144.0	144.0	24.0		
35	-164.0	164.0	24.0		

ここで、 E_n は n 年生の樹幹ヤング率、 RH は樹高に対する相対高、 b_1 、 b_2 、 b_3 は各林齢毎に決まる係数である。これらの係数を林齢10～25年生までの間で1年毎に求めた(表-23)。なお、ボカスギ林では40年生ごろまで冠雪害の発生が認められるので、25～35年生までの樹幹ヤング率の推定式を10年生から25年生における回帰式の係数と林齢の関係を求めて、これらの関係から外挿により得た。また林齢が35年生を越える場合のヤング率は35年生と等しいものと仮定した。この結果、35年生の樹幹ヤング率は根元と梢端で24tonf/cm²、幹中央部で65tonf/cm²と推定された。これまでの調査(中谷, 1991)によると、幹中央部におけるヤング率は28年生のボカスギで50～60tonf/cm²、38年生のタテヤマスギでは70tonf/cm²と報告されていることから、表-23の値はほぼ妥当な範囲にあると考えられた。

(6) 根元の回転係数

根系の支持力を表す根元の回転係数(μ)は品種間に有意な差異が見られなかったものの、林分によって大きく変化することがわかった(図-34～36)。この結果から、根系の支持力が林分によって大きく変化し、この影響を受けて冠雪を受けた林木の耐力が低下し

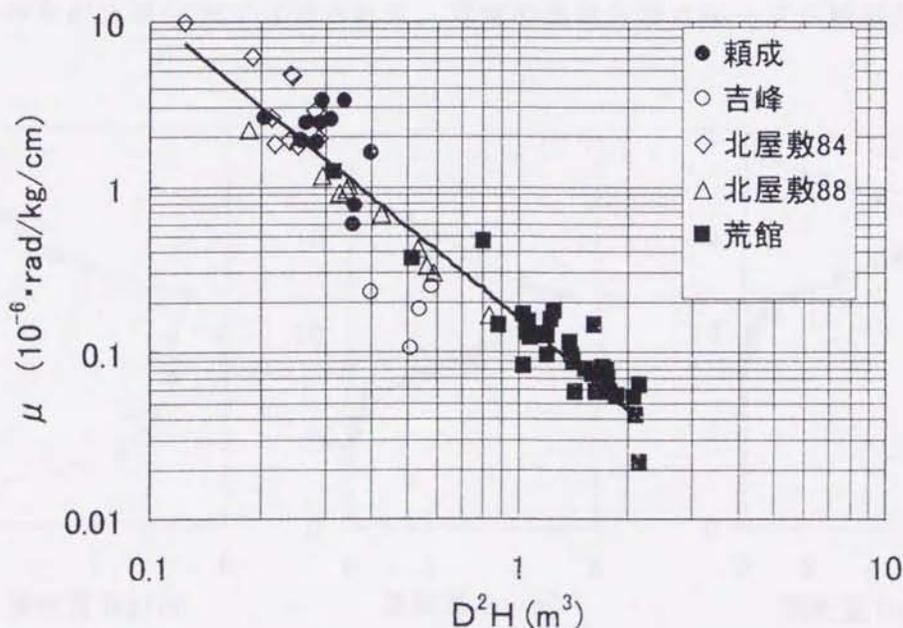


図-44 ボカスギ5林分における D^2H と根元の回転係数(μ)の関係

たりあるいは被害形態も変化することが考えられる。ただし、根系の支持力に関する調査事例が少ないことから、いずれの品種についても平均的な値が明らかになっていないので、ここでは全てのボカスギのデータを用いて（図-44）、 D^2H から μ を推定することにした。 D^2H (m^3) と μ ($rad/kgf/cm$) との関係式は以下の通りである。

$$\mu = 0.163(D^2H)^{-1.816} \cdot 10^{-6} \quad r^2 = 0.911 \quad d. f. = 67 \quad (5.2.10)$$

(7) 葉量とその垂直分布

冠雪荷重下の林木の耐力は荷重点の高さによって大きく変化することから、荷重点と密接に関係する葉量の垂直分布はその耐力を推定する上で重要である。この垂直分布を高さの関数で表すことができれば、耐力計算がより簡単になる。そこで、富山県における最も代表的なスギ品種であるタテヤマスギにおける葉量の垂直分布は正規分布で近似できることが報告されていることから（阪上，1985）、ボカスギのそれについても正規分布で近似できるか否かについて表-21に示した6ヶ所の調査地における層別刈り取りのデータを用いて検討した。このデータから得られたボカスギ葉量（絶乾重量）の垂直分布の一例を図-45に示した。この結果によると、頼成および北屋敷（18年生）のように20年生頃までの若い林では葉量の分布が正規分布で近似された。荒館の葉量分布はモードが梢端側に少し片

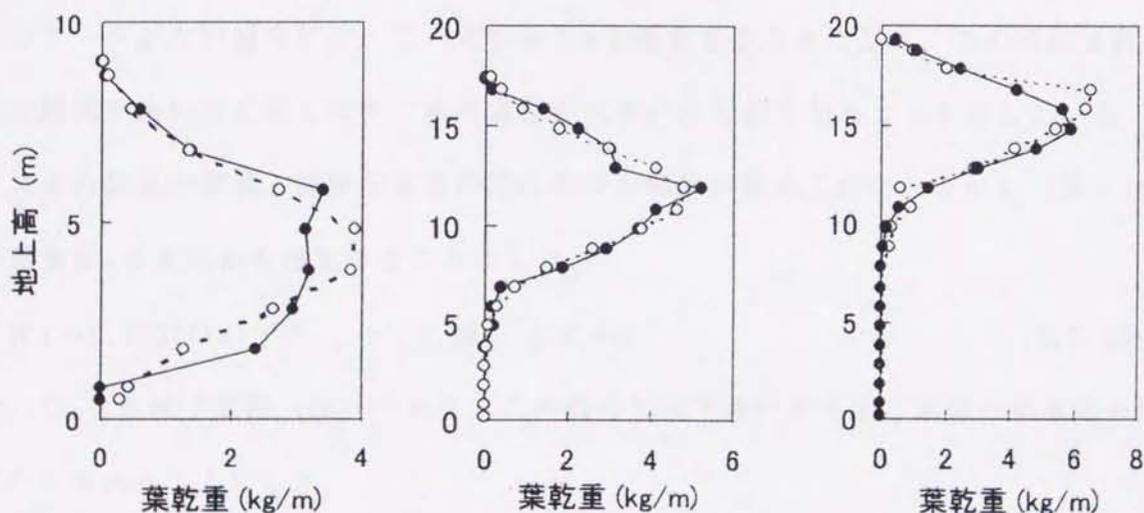


図-45 ボカスギの葉乾重の垂直分布
●：測定値，○：理論値（正規分布）

寄る傾向があり、統計的な検討を行うと厳密には正規分布とみなすことができない。しかし、正規分布よりも適合度が良くかつパラメータに一定の法則性があるような分布型を見いだすことができなかったことと、分布型を決めるパラメータが3つと少なかったことから、本報告では葉の垂直分布を正規分布で近似することにした。そして、冠雪荷重は各部位の葉量の0.86乗に比例し、それぞれの部位の幹に負荷するものとした。

葉量の垂直分布は次式で示すことができる。

$$F_i = \frac{W_L \cdot h}{s \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - G)^2}{2s^2}\right) \quad (5.2.11)$$

ここで、 F_i は x_i 層の葉量 (kg)、 h は層の幅 (m) である。また W_L は単木当たりの葉量 (kg)、 s は葉量の垂直分布の標準偏差 (kg/m)、 G は葉量の重心高 (m) である。

つぎに、この垂直分布を算出するのに必要である枝下高、単木の葉量、葉量の垂直分布の標準偏差、葉量の重心高の推定法を述べる。これらは表-21に示した6ヶ所の調査地における45本の供試木データを用いて検討した。

枝下高 H_B を次式から推定することにした。

$$H_B = 0.052 \cdot H^{2.122} \cdot D^{-0.359}, \quad r^2 = 0.893, \quad d. f. = 42 \quad (5.2.12)$$

ここで、 H は樹高 (m)、 D は胸高直径 (cm) である。限界降雪量の計算に際し生枝下高 (m) のデータがない場合には、この式から H_B を推定することにした。この式によれば、枝下高は樹高が高いほど高くなり、胸高直径が大きいほど低くなることを示している。

ボカスギの個体の葉量と生枝下直径の間に密接な関係が認められたことから (図-15)、個体の葉量 W_L を次式から推定することにした。

$$W_L = 0.100 (D_B)^{1.925}, \quad r^2 = 0.901, \quad d. f. = 43 \quad (5.2.13)$$

ここで、 D_B は生枝下直径 (cm) であり、この値は生枝下高に相当する部位の幹直径を幹曲線式から求めることにした。

層厚1 mとした場合の葉量の垂直分布の標準偏差 s (kg) を次式から推定した。

$$s = 0.139L + 0.503, \quad r^2 = 0.851, \quad d. f. = 41 \quad (5.2.14)$$

ここで、 L は樹冠長(m)であり、これは樹高から枝下高を差し引いて求めた。

また、葉量の重心高 G (m)を次式で示した樹高と胸高直径の重回帰式で近似した。

$$G = 1.02H - 0.104D - 2.704, \quad r^2 = 0.978, \quad d.f. = 42 \quad (5.2.15)$$

この式から明らかなように、重心高は樹高にともなって大きくなり、直径が大きいほど低くなる傾向があるといえる。

(8) 幹と樹冠の重量

表-21に示した45本の供試木を層厚1mで切り分け、各層毎に生の幹、枝および葉の重量を測定し、材積を計算した。これらの結果から求めた生の幹の密度は平均で $912\text{kg}/\text{m}^3$ であった。そこで、この値に各層の材積を掛けて各層の生幹の重量を計算した。また、生の葉量と枝重から成る樹冠の生重量は、供試木の平均値から葉乾重の3.2倍とした。

3. モデル計算例

本章で検討した限界降雪量の推定法を用いて、林木の冠雪害抵抗性に影響する強度特性と限界降雪量について試算した(表-24)。この結果から、樹高と胸高直径が同じであれば、幹曲線、幹重および樹冠重が等しくなることがわかる。また、形状比が同じであれば、幹の重量に対する樹冠重の割合は加齢に伴って小さくなる傾向がある。表-24から樹高20mで胸高直径25cmのボカスギにおける幹重に対する樹冠重の割合を求めてみると18%となった。これに対して、同じ大きさのドイツトウヒのそれは50%と見積もられている(Peltola et al., 1997)。したがって、林木の大きさが同じであれば、ボカスギの樹冠の重量はドイツトウヒのそれに比べて小さいといえる。

また、林齢15と25年生におけるボカスギの樹幹ヤング率の範囲はそれぞれ $21\sim 35\text{tonf}/\text{cm}^2$ と $24\sim 55\text{tonf}/\text{cm}^2$ で、幹内の平均ヤング率はそれぞれ27と $43\text{tonf}/\text{cm}^2$ であった。この結果、ボカスギのヤング率は一般的なスギの値やドイツトウヒの値に比べて小さかった。さらに、根元の回転係数は $0.6 \cdot 10^{-7} \sim 7.1 \cdot 10^{-7} \text{rad}/\text{kgf}/\text{cm}$ であり、大きな木ほど小さくなる傾向が認められることから、大きな林木ほど根系の支持力が大きいといえる。幹の耐力に及ぼす根元の回転係 μ の影響をみるために、表-24に示したのとおなじ大きさの木の座

屈荷重を $\mu = 0$ として計算すると 150~344kg となった。これらの結果から、根元が固定されてモーメントを受けても回転しない場合に比べると、根元の回転を考慮した場合の幹の耐力は 10% 程度低下するといえる。

4. 結果と考察

(1) 限界降雪量と冠雪害の関係

本章で検討した限界降雪量の推定法が被害木と健全木の判別にどの程度有効であるのか検討した。表-25に示した北屋敷、荒館および神代の3箇所の林分において、被害木と健全木の限界降雪量を林齢、樹高、胸高直径および生枝下高から推定し、その結果を図-46に示した。ここで、被害発生時の実際の降雪量に比べて被害木の限界降雪量の推定値が小さく、かつ健全木の限界降雪量が大きい傾向があるならば、この推定値は妥当であったといえる。そこで、限界降雪量による被害判別結果と現実の被害結果の関連性を Yates の補

表-24 林木の強度要因と限界降雪量の計算例

林木	I	II	III	IV	V
林木の要素 (入力データ)					
林齢	15	25	25	25	25
樹高(m)	14	14	14	20.0	20.0
胸高直径(cm)	20.0	17.5	20.0	25.0	28.6
強度要因 (出力データ)					
形状比	70	80	70	80	70
生枝下高	4.7	4.9	4.7	9.9	8.7
樹冠の重心高(m)	9.5	9.8	9.5	15.6	14.7
葉乾重(kg)	18	14	18	22	28
幹の生重量(kg)	158	126	158	390	485
樹冠の生重量(kg)	57	44	57	72	91
根元の回転係数 ($\times 10^{-7}$ rad/kgf/cm)	4.4	7.1	4.4	2.3	0.6
根元のヤング率(tonf/cm ²)	21	24	24	24	24
相対高0.5の高さ(tonf/cm ²)	35	55	55	55	55
幹ヤング率					
座屈荷重(kg)	147	132	239	174	329
限界降雪量(kg/m ²)	30	36	72	28	59

正による χ^2 検定を行った。

荒館において、被害木で限界降雪量が降雪量 ($53\text{kg}/\text{m}^2$) よりも小さな林木、被害木であつてかつ限界降雪量が降雪量よりも大きい林木、健全木であつてかつ限界降雪量が降雪量よりも小さな林木および健全木であつてかつ限界降雪量が実際の降雪量より大きな林木に区分した (表-26)。これらから被害判別の適中率を求めるたところ、83%と高い値が得られた。また χ^2 値は18.58となり、1%水準で統計的に有意性が認められた。

また、北屋敷では、被害木で限界降雪量が降雪量 ($48\text{kg}/\text{m}^2$) よりも小さな林木は17本、被害木であつてかつ限界降雪量が降雪量よりも大きい林木が1本、健全木であつてかつ限界降雪量が実際の降雪量より大きな林木は12本および健全木であつてかつ限界降雪量が降雪量よりも小さな林木は17本であつた。この結果から、被害判別の適中率は60%といえる。

表-25 限界降雪量を推定した冠雪害の被災林分の概要

調査地	林齢 (年生)	平均胸 高直径 (cm)	平均 樹高 (m)	被害 発生月	本数 被害率 (%)	降雪量 (kg/m^2)
北屋敷	22	17.6	13.4	1988. 1	23	48
荒館	25	27.3	19.2	1984.12	48	50
神代	25	30.2	19.5	1985.12	69	58

表-26 荒館調査地における限界降雪量別および被害有無別の本数

		限界降雪量		計
		$\leq 53\text{kg}/\text{m}^2$	$> 53\text{kg}/\text{m}^2$	
被害木	測定本数	19	2	21
	期待本数	(11.6)	(9.8)	
健全木	測定本数	6	20	26
	期待本数	(14.3)	(12.2)	
計		25	22	47

また、 χ^2 値を求めると4.96となり、5%水準で統計的に有意性が認められた。これらのことから、調査地3、4では、限界降雪量の推定値はほぼ妥当な範囲にあったと判断され、限界降雪量を用いた被害判別は概ね有効な方法であると考えられた。

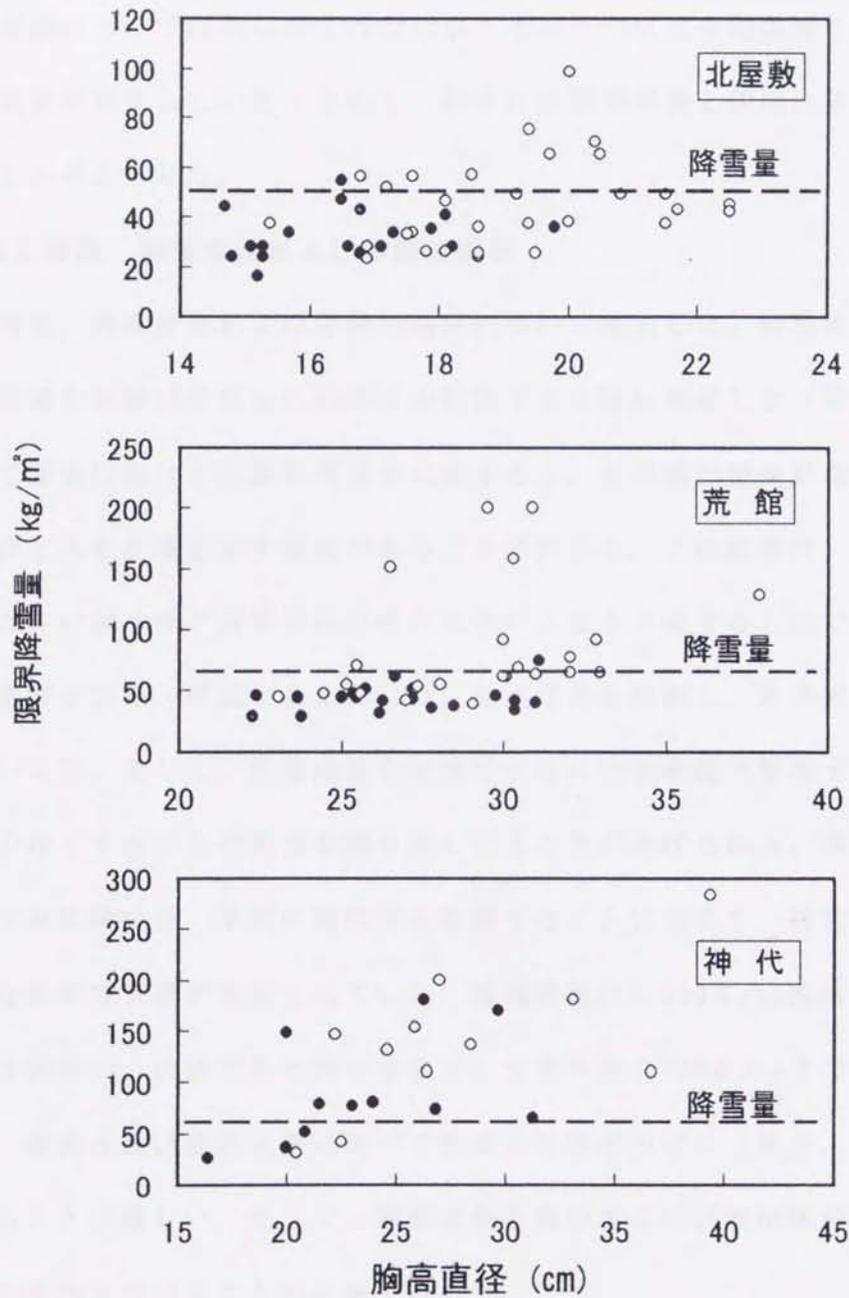


図-46 冠雪害が発生したボカスギ林分における被害木と健全木の限界降雪量および実際の降雪量の関係
○：健全木，●：被害木

一方、神代では、適中率が55%と低く、 χ^2 値は0.00であった。ただし、図-46から降雪量を実際の値よりも少し高くすると、被害木と健全木との分離が良くなる傾向が見られる。そこで、降雪量を80kg/m²として同様の解析を行ったところ適中率は77%と高く、かつ、その χ^2 値は6.47で5%水準で有意であった。このように被害木の限界降雪量が高い傾向が見られた原因については明らかではないが、その一つには平均風速3~8mといった気象条件下で被害が発生していたことから、林木には冠雪荷重と同時に風圧も付加されたことによることが考えられた。

(2) 限界降雪量と樹高、胸高直径および林齢の関係

限界降雪量と樹高、胸高直径および林齢の関係について検討した。限界降雪量と樹高および胸高直径の関係を林齢15年生から30年生の範囲で5年毎に推定した(図-47)。これから、林齢が同じ場合における限界降雪量を比較すると、その値は樹高が低くかつ胸高直径が大きな林木ほど大きな値を示す傾向があることがわかる。この結果は、樹高が小さくかつ胸高直径が大きい林木ほど冠雪害抵抗性が大きいことを示唆するものである。これらの結果から、冠雪害を防止・軽減するためには、樹高成長を抑制し、直径成長を促進させる施業が有効といえる。そして、直径成長を促進させるには低密度で管理すること、すなわち植栽本数を少なくすることや間伐を繰り返すことがあげられる。実際に昭和30年頃までのボカスギ林施業では、早期に電柱材を収穫することに加えて、冠雪害を回避する目的で次のような低密度管理が実施されていた。植栽本数は2,000本/ha程度であり、間伐は15年生以後に3回行い、伐期である35年生までに立木本数を750本/haまでに減らすものであった。一方、樹高成長は直径成長に比べて密度の影響が少なく(田中, 1996)、施業によって制御することが難しい。そこで、樹高成長を抑制するには地位区分をおこなって地位の高い所での造林を避けることが必要であろう。

つぎに、限界降雪量と林齢の関係について検討した。一例として樹高14m、胸高直径20cmの林木の場合について、林齢15, 20, 25年生における限界降雪量を試算すると、それぞれ35, 59, 90kg/m²となった。この結果から、林木の大きさが同じであれば林齢が高いほ

ど冠雪害抵抗性が大きくなるといえる。この主な原因は林齢の増大に伴って樹幹ヤング率が大きくなることによるものであった（図-31）。

(3) タテヤマスギとボカスギの限界降雪量の比較

一般に、タテヤマスギはボカスギに比べて冠雪害抵抗性が大きいといわれている。この

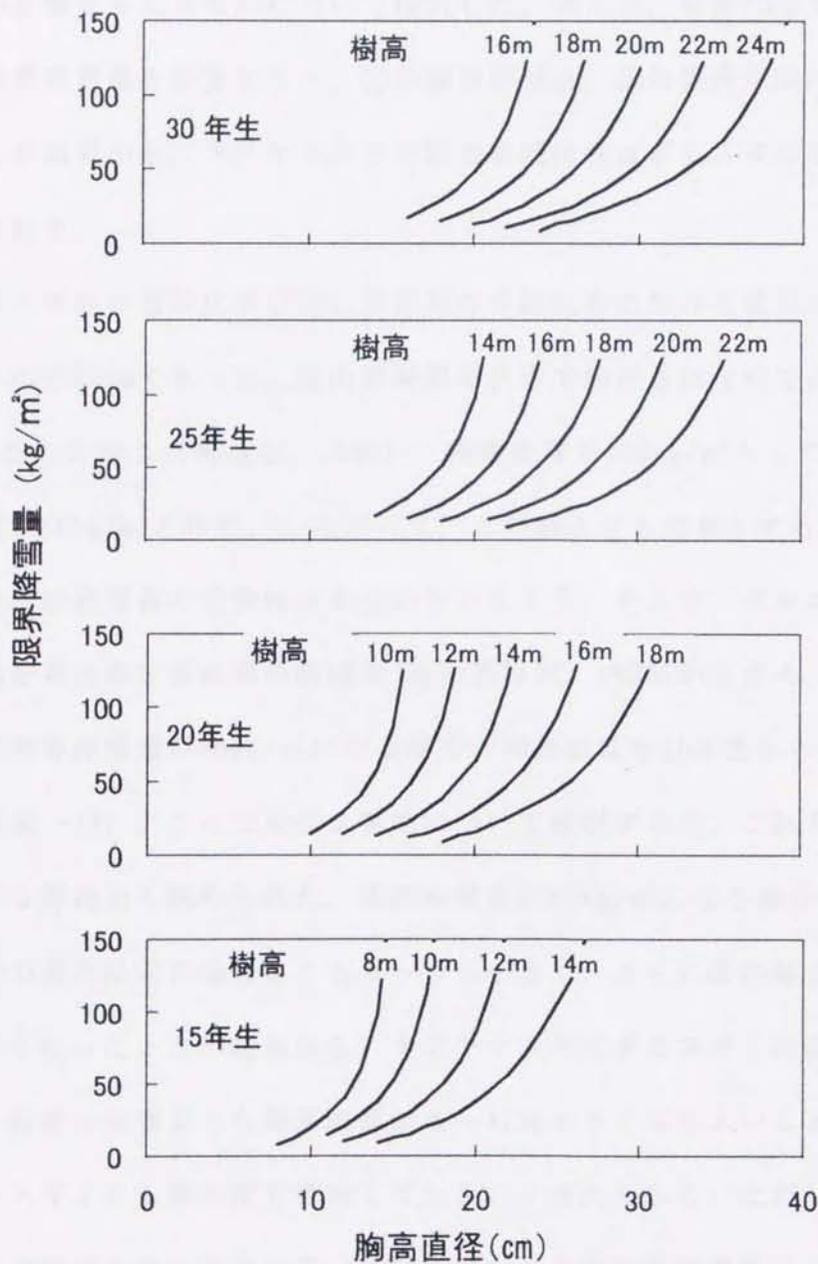


図-47 限界降雪量の推定値と樹高および胸高直径の関係

原因として、タテヤマスギはボカスギに比べて林齢が同じであれば樹幹ヤング率が20～50%大きく(表-16, 17, 19), 葉量が20～35%小さい傾向(図-15, 16)があったことが考えられる。そこで、①ボカスギの樹幹ヤング率および葉量の場合、②ボカスギよりも樹幹ヤング率が20%大きい場合、③ボカスギよりも樹幹ヤング率が20%高くかつ葉量が20%少ない場合について限界降雪量を求め、このような樹幹ヤング率や葉量の差異が冠雪害抵抗性にどの程度の影響を与えるのかについて検討した。例えば、林齢15年生で樹高14m, 胸高直径20cmの限界降雪量を計算すると、①の場合が35cm, ②の場合が51cm, ③の場合が85cmとなった。この結果から、タテヤマスギの冠雪害抵抗性はボカスギのそれに比べて大きいことが示唆される。

また、ボカスギ林の造林比率が高い県西部の丘陵地帯における過去20年間の日最大降雪深を調べたところ60cmであった。富山県高岡市伏木で測定された例では新積雪の密度が106kg/m³であったことから(菊地ら, 1995), 降雪密度を100kg/m³として荷重に換算すると、日最大降雪量が60kg/m²となる。したがって、この値よりも対象とする林木の限界降雪量が大きい場合には冠雪害の危険性は小さいといえよう。そこで、ボカスギの1～3等地における平均樹高を富山県主要樹種の収穫表(富山県林試, 1965)から求め、先ほどの①～③の条件において限界降雪量が60kg/m²になる場合の胸高直径を15年生から35年生まで5年毎に試算した(表-27)。ここで地位2等地について検討するが、これとほぼ同様の傾向が1等地および3等地でも認められた。限界降雪量が60kg/m²になる場合の胸高直径を比べてみると、②の場合は①の場合よりも6～9%小さく、さらに③の場合は①の場合よりも16～17%小さくなった。この結果から、タテヤマスギはボカスギと同様の冠雪害抵抗性を有するには、前者は後者よりも胸高直径が6～17%小さくてもよいことから、タテヤマスギの方がボカスギよりも高密度で管理しても良いと考えられる。ただし、この直径の差異が具体的にどの程度の立木密度の違いになるのかは今後の検討課題である。また、ここでは林分の平均木の限界降雪量を60kg/m²としたが、平均木よりも小さな林木の限界降雪量はさらに小さくなることが予想されるので、被害を防止するためには平均値をさらに大き

くする必要がある。

(4) 限界降雪量と形状比の関係

冠雪害を受けたボカスギ林において林分被害率と林分の平均形状比の関係について検討した結果によると、林分被害率は平均形状比が70以下の林分で小さく、71以上の林分では大きくなる傾向があった(表-2)。そこで、このように被害率が形状比70付近で変化する原因について検討した。林齢が異なる樹高15mの林木の限界降雪量と形状比の関係についてみると、いずれの林齢においても、限界降雪量と形状比の間には反比例的な関係が認められ、かつ限界降雪量は形状比70以上で急激に低下していることがわかる(図-48)。このことは、林木の形状比が70以上になると冠雪害抵抗性が急激に低下することを示唆するものと考えられた。

(5) まとめと課題

ボカスギ林木を対象に冠雪害抵抗性の推定法について検討した。この手法は個々の林木の冠雪害抵抗性を限界降雪量(冠雪害が発生する時の降雪量)であらわすこととし、これを樹高、胸高直径、枝打ち高および林齢などから推定するものである。この結果、林木に加わる外力が冠雪荷重だけの場合には、この手法が林木の冠雪害抵抗性を評価するのに有効であり、ボカスギの間伐および枝打ち効果を評価するのに役立つと考えられた。また、

表-27 ボカスギの1~3等地の林分において平均木の限界降雪量が
60kg/m²になる場合の平均胸高直径

林齢 (年)	1 等地				2 等地				3 等地			
	樹高 (m)	① (cm)	② (cm)	③ (cm)	樹高 (m)	① (cm)	② (cm)	③ (cm)	樹高 (m)	① (cm)	② (cm)	③ (cm)
15	11.2	17.7	16.5	15.1	9.6	16.2	15.2	14.1	7.9	13.0	12.5	11.6
20	14.4	20.7	19.1	17.6	12.3	17.5	16.3	15.0	10.1	14.6	13.7	12.7
25	17.1	23.5	21.5	19.9	14.7	19.8	18.2	16.9	12.1	16.2	15.1	14.0
30	19.6	26.4	24.2	22.5	16.8	22.3	20.5	18.9	14.1	18.4	17.0	15.7
35	21.8	28.5	26.4	24.2	18.8	23.9	22.1	20.4	15.9	20.0	18.5	17.1

注 ①ボカスギの場合、②ボカスギよりも幹ヤング率が20%大きい場合、
③ボカスギよりも幹ヤング率が20%大きくかつ葉量が20%少ない場合

幹の細り、樹幹ヤング率、葉量などのパラメータが得られればボカスギ以外のスギ品種にも適用が可能と考えられた。

ボカスギのようなクローンではしばしば冠雪害によって共倒れ現象を引き起こし、将棋倒し状態になることが知られており、冠雪荷重の他に隣接木の圧力が加わるために被害がより大きくなる場合がある（藤森，1987）。本章で検討した限界降雪量の推定法は個体の抵抗性を対象としたものであって、共倒れを生じた場合のような林分自体の冠雪害抵抗性を求めるものではない。しかし、たとえクローンからなる林分であっても個々の林木の冠雪害抵抗性が大きいならば、林分の冠雪害抵抗性も大きいことが予想されることから、個々の林木の限界降雪量を推定することにより林分の冠雪害抵抗性も類推することが可能と考えられる。

今後の検討課題として、推定精度をさらに高めるためにも次のような点について検討すべきと考えられる。まず、樹幹形と葉量の垂直分布を樹高、胸高直径などの重回帰式から別個に推定したが、樹幹形と葉量の垂直分布の関係にパイプモデルなどの理論的な考えを導入すべきであろう。さらに冠雪荷重は降雪量や葉重だけでなく、雪質にも関係があるとされており、この点についてもさらに検討が必要と考えられる。

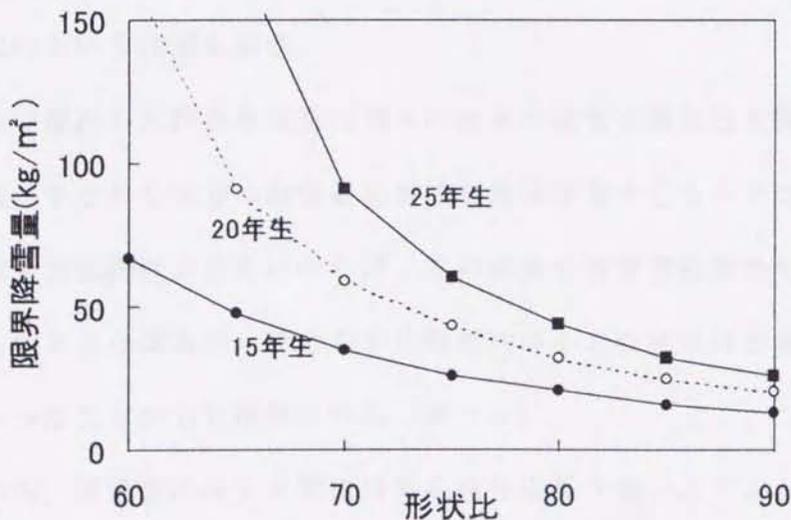


図-48 林齢が異なる樹高の林木の限界降雪量と形状比の関係

第6章 森林施業による冠雪害の軽減効果

第1節 間伐による冠雪害の軽減効果

林木の冠雪害の危険性は低密度林分の方が高密度林分よりも、同一林分内では優勢木の方が劣勢木・中庸木よりも小さい傾向がある(藤森, 1987)。これは冠雪害抵抗性が胸高直径の増大に伴って大きくなることによるものである。したがって、冠雪害を防止・軽減するためには、林木間の密度による競争を緩和させて林木の直径成長を促す施業法すなわち間伐が有効と考えられる。これまでも、密度管理が冠雪害を防止する上で有効であることはすでに指摘されている(例えば Cremer et al., 1983; 片岡ら, 1983b; 小野寺ら, 1986; 藤森, 1987)。

間伐によって冠雪害抵抗性がどの程度向上するかを実際に林分を用いて検討するためには、間伐率の異なる固定試験地において検討することが望ましい。しかし、現実には間伐率のみが異なり他の条件がほぼ同一とみなせるような複数の試験地を設けることは困難な場合が多いこと、かつ冠雪害の発生には地形の影響を受けるため、例え林況が等しくてもわずかな立地環境の違いによって被害率に違いが生じる問題もある。また、固定試験地による実験では実験期間が年単位で長期になり、しかも、冠雪害の発生時期や被害の程度を予め設定できないという問題もある。

また、第5章で検討した限界降雪量は個々の林木の冠雪害抵抗性を評価するものであって、林木の集団、すなわち林分の冠雪害抵抗性を直接評価するものではない。しかし、個々の林木の冠雪害抵抗性が大きいならば、その林分の冠雪害抵抗性も大きくなるものと考えられる。このような傾向は、林分の平均形状比が小さな林分ほど冠雪による被害率が小さい傾向があったことから推測される(表-2)。

以上のことから、冠雪害に対する間伐効果を林分成長予測システムと冠雪害抵抗性の評価表を用いてシミュレーションによって検討することが有効であると考えられる。

本章ではまず第5章で検討した限界降雪量の推定法を用いて、実際の冠雪害と間伐との

関係について間伐試験地の資料をもとに検討した。つぎに、ボカスギのシステム収穫表を用いて種々の間伐を行った場合についての成長予測を行い、間伐方法や間伐強度の違いによる冠雪害抵抗性の変化について比較検討した。

1. 解析方法

(1) 間伐試験地

解析に用いた間伐試験林は北屋敷と岩崎の2カ所のボカスギ間伐試験地であり、両者は約1 km離れている(図-1)。北屋敷は1983年(18年生)に面積がそれぞれ0.06haの間伐区と無間伐区が設定され、植栽本数は2,000本/haで、間伐区では1984年4月に本数率で27%、1988年には10%の間伐を行った。収量比数は間伐前が0.67、間伐後が0.53であった。無間伐区では植栽後一切の除間伐が行われておらず、本数の減少は全て冠雪害によるものであった。1983年から10年間、生育状態や被害状態を継続調査したところ、顕著な被害が2度発生した。そこで、この試験地において、現実の冠雪害と間伐の関係について検討することとした。

また、岩崎は1973年(15年生)にA区(0.09ha)とB区(0.11ha)が設定され、植栽本数はともに2,700本/haであった。1973年に両区において本数で約35%の間伐が実施され、その後は弱度の間伐が試験区毎に繰り返された。この試験地では生育状態や被害状態を1973年から22年間継続して調査したが、冠雪害の発生は全く認められていない。

両試験地において胸高直径を毎木調査し、樹高をサンプル調査して樹高曲線を求め、これから各林木の樹高を推定した。両試験地の概要は表-28に示したとおりである。

(2) 冠雪害抵抗性指数

林木の冠雪害抵抗性を限界降雪量で評価することにし、第5章で検討した限界降雪量の推定法を用いて算出した。

(3) システム収穫表

最も一般的な林分成長予測法は林分密度管理図を用いる方法である。林分密度管理図は林分密度、材積、平均胸高直径、平均樹高などの関係が一つの図に示されているなど優れ

たものであるが、平均値や総量しか予測できないことや上層間伐のように間伐によって林分高が著しく変化する場合には適用できないなどの制約がある。近年、材積、平均胸高直径、平均樹高に加えて、直径分布まで予測できるシステムが開発されており、それらはシステム収穫表と呼ばれている。これはパソコンとの対話によって、林分の成長を予測するシステムであり、現在、11種類のプログラムが開発されている。ここでは田中（1995）の「シルブの森」を利用して、ボカスギ林の成長予測を行い、林分構造の変化を検討することにした。なお、ボカスギのシステム収穫表の成長パラメータは既に求めてあるものを用いた（嘉戸・田中, 1996）。

表-28 ボカスギ間伐試験地の概要

北屋敷試験地			間伐区				無間伐区			
測定年 (年)	林齢 (年)	立木本数 (本/ha)	間伐本数 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 (m ³ /ha)	立木本数 (本/ha)	平均胸高直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 (m ³ /ha)
1983	18	1883	500	16.1	11.3	220	1900	15.5	10.9	200
1983	18	1383		16.4	11.5	170				
1985	20	1383		17.8	12.9	215	1900	16.5	12.2	241
1987	22	1216		19.3	14.2	252	1800	17.6	13.6	305
1988	23	1199	116	20.1	14.9	276				
1989	24	1083		20.8	15.6	288	1350	19.2	15.0	293
1991	26	1083		22.2	16.9	342	1300	20.7	16.4	353
1993	28	1066		23.8	18.3	424	1267	22.3	17.6	472

岩崎試験地			A区				B区				
測定年 (年)	林齢 (年)	立木本数 (本/ha)	間伐本数 (本/ha)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 (m ³ /ha)	立木本数 (本/ha)	間伐本数 (本/ha)	平均直径 (cm)	平均樹高 (m)	林分材積 (m ³ /ha)
1973	15	2575	908	13.8	9.6	187	2419	905	13.5	9.7	170
1977	19	1667	230	18.4	11.8	255	1514	476	18.7	12.2	247
1981	23	1437	150	21.7	13.9	352	1038	9	23.5	14.4	306
1985	27	1287	149	24.3	15.7	439	1029	77	26.9	16.3	442
1989	31	1138	116	28.0	17.3	559	952	0	31.1	18.0	593
1992	34	1138	207	29.4	18.4	651	952	152	32.6	19.5	700
1995	37	931	0	32.5	19.0	626	800	0	34.7	20.1	682

2. 結果と考察

(1) 間伐試験地による検討

① 被害状況

北屋敷における被害本数の推移をみると、被害形態は大半が幹折れで、根返り、幹曲りは少なかった（表-29）。この結果から冠雪害が恒常的に発生しており、なかでも1988年1月と1994年1月の被害が大きかったことがわかる。これらの被災時における降雪深の日最大値はそれぞれ41、50cmと多かった。しかし、1984年12月と1985年12月にも降雪深が40cmを越えた日があったが、そのときの被害は軽微であった。この原因については明らかではないが、冠雪害の発生には雪質のほか林木や地形などの気象以外の要因も同時に関与しているためと考えられた。

間伐区と無間伐区の本数被害率を比較すると、1988年1月は間伐区1%、無間伐区25%で、処理間に大きな差異が認められた。また、1994年1月のそれは間伐区50%、無間伐区65%であった。これらのことから間伐区の方が無間伐区よりも被害率が小さかったといえる。つぎに冠雪害と林木の大きさとの関係について検討した。1988年と1994年における健全木

表-29 北屋敷試験地における年最大積雪深と冠雪害木の推移

年度	林齢 (年)	降雪深の最大値 (cm)	被害本数 (被害率)	
			間伐区 (本/ha) (%)	無間伐区 (本/ha) (%)
1984/85	19	46	0 (0)	0 (0)
1985/86	20	43	167 (12)	84 (9)
1986/87	21	25	0 (0)	0 (0)
1987/88	22	41	17 (1)	450 (25)
1988/89	23	15	0 (0)	0 (0)
1989/90	24	34	0 (0)	17 (1)
1990/91	25	27	0 (0)	33 (3)
1991/92	26	18	0 (0)	17 (1)
1992/93	28	30	17 (1)	17 (1)
1993/94	28	50	534 (50)	818 (64)

と被害木の直径階別本数を見ると、1988年の無間伐区および1994年の間伐区では、被害は優勢木で少なく、中庸木や劣勢木に多い傾向が認められた（図-49）。このような傾向はこれまでにも指摘されている（嘉戸ら, 1982）。これらのことから、直径成長を促進させることによって冠雪害の発生を抑制させることが可能と考えられる。ただし、1994年の無間伐区では個体の大きさと被害の間に明瞭な関係が認められなかった。

②成長と被害

間伐による直径成長の促進効果を検討するための前提条件として、間伐以外の要因による本数の減少がないこと、各処理区間の成長量に著しい差がないことがあげられる。冠雪害による本数減少が比較的少なかった1983年から1987年までの4年間の資料を用いて、間伐区と無間伐区の材積成長量を比較した結果、この4年間の成長量は間伐区で104m³/ha、無間伐区では117m³/haとなり、後者の方が10%程度大きかった。しかし、一般に間伐率が低い場合には無間伐と同じ程度の成長量を維持し、間伐率が大きくなるほどha当たりの材積成長量が減少する傾向が認められていることから、両処理区の成長量には著しい差がな

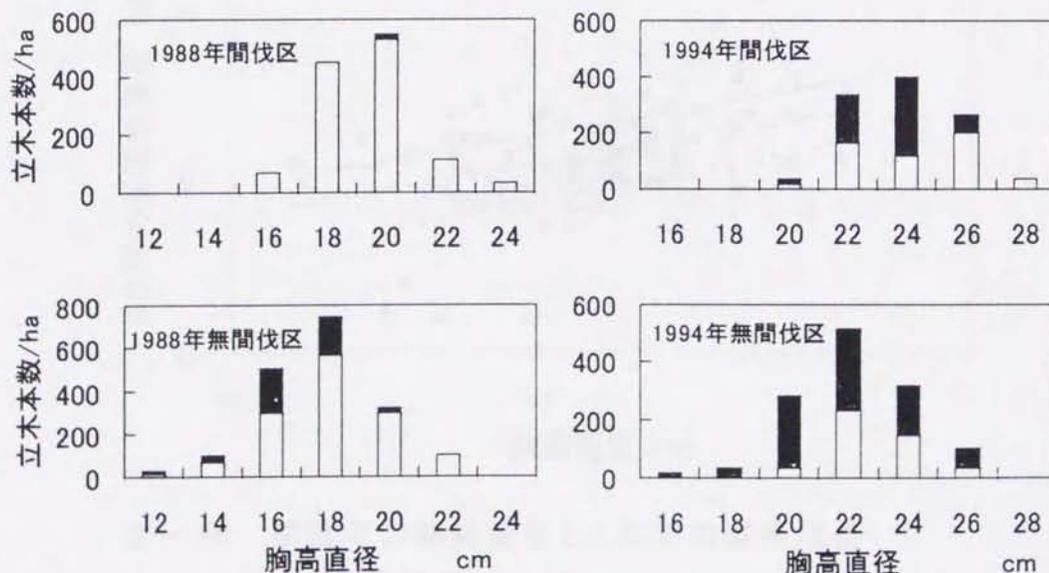


図-49 1988年と1994年の被災時における北屋敷試験地の健全木と被害木の直径階別本数
□:健全木, ■:被害木

いと考えられた。

つぎに被害の有無と直径成長との関係について検討した。1983年における直径（期間のはじめの直径，以下，期首直径と呼ぶ）とその後4年間の直径成長量を間伐区の健全木，無間伐区の健全木および被害木の3つに分けて示した（図-50）。これによると，その平均成長量が最も大きいのは間伐区の健全木であり，ついで無間伐区の健全木，同区の被害木の順であった。そこで，これらの成長量に有意差があるかどうかについて，期首の胸高直径と定期直径成長量との共分散分析により検定した。この分析法を用いたのは期首の胸高直径が大きいほど定期成長量も大きい傾向があり，直径成長を比較するためには期首の胸高直径の影響を取り除く必要があるためである。この結果，回帰係数（ $F=0.51$; $d.f.=2, 175$ ）には有意な差異がなかったが，修正平均（ $F=25.13$; $d.f.=2, 177$ ）に1%水準で有意な差異が認められた。同様に，1987年から1993年までの定期成長量について比較しても，

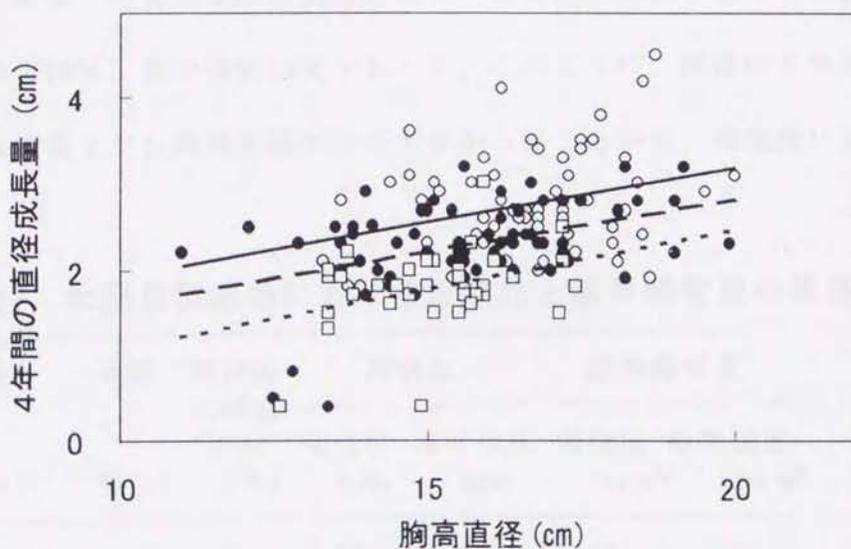


図-50 期首年の胸高直径と4年間の直径成長量(y)の関係

- | | | |
|--------|------------|----------------------|
| ○----- | : 間伐区の健全木 | $y = 0.125x + 0.680$ |
| ●----- | : 無間伐区の健全木 | $y = 0.123x + 0.365$ |
| □..... | : 無間伐区の被害木 | $y = 0.137x + 0.279$ |

健全木の直径成長量が被害木のそれよりも大きい傾向が認められた。以上のことから、期首の胸高直径が同じであれば、その直径成長量が大きな林木は小さな林木よりも被害を受けにくい傾向があったといえる。

③間伐区と無間伐区の冠雪害抵抗性の比較

間伐区と無間伐区における冠雪害抵抗性の推移を比較検討した。各処理区における平均胸高直径と平均樹高から平均形状比と平均限界降雪量を計算した(表-30)。まず平均形状比についてみると、間伐区の値は無間伐区の値に比べて小さい傾向がみられた。また、両区においても形状比は林分の成長に伴い漸増するが、無間伐区の方がより大きくなる傾向がある。そして両区の平均形状比の差異は間伐4年後まで拡大する傾向を示し、それ以後には大きな変化が認められなかった。この結果から、間伐区の冠雪害抵抗性は無間伐区の値よりも大きく、冠雪害に対する間伐効果は本試験の間伐率においては間伐4年後頃に最も大きくなると考えられた。

1983年から1987年までの4年間における間伐後の樹高成長率と胸高直径成長率を表-28から求め比較した結果、樹高成長率は間伐区23%、無間伐区25%であったのに対し、胸高直径成長率は間伐区18%、無間伐区14%であった。このように、間伐区と無間伐区における成長率の差異は樹高よりも胸高直径の方が大きかったことから、処理間における形状比

表-30 北屋敷試験地における形状比と限界降雪量の推移

年度 (年)	林齢 (年生)	間伐後 の経過 年数 (年)	形状比		限界降雪量	
			間伐区 (m/m)	無間伐区 (m/m)	間伐区 (kg/m ²)	無間伐区 (kg/m ²)
1983/84	18	0	70	70	54	53
1985/86	20	2	72	74	55	50
1987/88	22	4	74	77	56	46
1989/90	24	6	75	78	54	46
1991/92	26	8	76	79	51	43
1993/94	28	10	77	79	49	44

の差異は主に直径成長の違いによるといえる。

両処理区の平均形状比は1983年にはともに70で、その後は林齢の増加に伴って増大する傾向を示した。ポカスギ林では平均形状比が70を越えると冠雪害の危険性が急に大きくなることが報告されていることから（嘉戸ら、1992）、この試験地では調査開始当初から冠雪害の危険性が大きかったといえる。また、平均形状比が増加傾向を示したのは林齢と樹高の増加に伴う競争密度効果により直径成長率が樹高成長率よりも小さくなったことによるものと考えられた。

1983年の資料から求めた平均限界降雪量は間伐区および無間伐区ともほぼ同じ値であったが、その後1987年までの平均限界降雪量の推移には差異がみられ、間伐区では林齢の増加に伴って徐々に増大したのに対し、無間伐区では反対に減少傾向を示した。そして処理間における限界降雪深の差異は間伐4年後に最も大きくなった。この原因は形状比の場合と同様に処理間における直径成長の差異に起因すると考えられた。

なお、間伐区における1983年から1987年までの冠雪害抵抗性の変化は、形状比を指標とした場合には林齢の増加にともなって低下すると判断されるのに対し、限界降雪量を指標とした場合には反対に抵抗性が向上すると判断された。この主な原因は、樹幹の強度性能が林齢の増大に伴って向上する傾向があるのに対して、形状比を指標とした場合には樹幹のヤング率の変化を考慮していないためと考えられる。

限界降雪量の1987年以後における推移についてみると、無間伐区だけでなく間伐区においても減少する傾向がみられた。この原因として、1987年以後の立木本数の減少割合が小さかったために、その後の直径成長率が樹高成長率よりも小さくなる傾向があったことがあげられる。これに加えて、一時的に多量の降雪があったために1994年1月には間伐区においても大きな被害となったことが推測された。

岩崎における形状比と限界降雪量の変化についてみると、平均形状比はA区、B区とも65以下で推移していた（表-31）。また、平均限界降雪量は19年生以降において両試験区とも90kg/m²以上で推移していた。これらのことから、この試験地は北屋敷の近くに位置

するにもかかわらずこれまでに一度も冠雪害が発生しなかったのは、冠雪害抵抗性が大きかったことによると考えられた。この試験地で冠雪害抵抗性が大きかったのは間伐が繰り返し行われたことに加えて、樹高成長が北屋敷よりも小さかったことがあげられる。なお地位指数は岩崎が20mであるのに対し、北屋敷では22mである。

以上のように、間伐区の冠雪害抵抗性が無間伐区のそれよりも大きい傾向は形状比と限界降雪量のいずれの指標を用いて評価した場合についても認められた。したがって、冠雪害抵抗性を向上させるうえで間伐は有効な施業といえる。また北屋敷では1994年に間伐区においても大きな被害を受けたが、これを未然に防止するためには間伐の回数を増やすかまたはさらに強度の間伐を行うことが必要であったといえる。なお、間伐の回数や強度は地位や樹齢に応じて変化させるべきものと考えている。

このように間伐は冠雪害抵抗性の向上に寄与することが示されたが、そのほかに間伐の役割としては同一林分内では優勢木の冠雪害抵抗性が劣勢木のそれに比べて大きい傾向を示したことから(図-49)、下層間伐によって冠雪害抵抗性の小さな林木を事前に取り除くことは将棋倒し式の被害の拡大をおさえる間接的な効果があると考えられる。このような将棋倒し式の被害を減らすためには、間伐によって樹木間の距離を広げることが必要と指摘されている(Cremer et al. 1983)。

表-31 岩崎試験地における形状比と限界降雪量の推移

年度 (年)	林齢 (年生)	形状比		限界降雪量	
		A区 (m/m)	B区 (m/m)	A区 (kg/m ²)	B区 (kg/m ²)
1973/74	15	70	72	54	53
1977/78	19	64	65	102	92
1981/82	23	64	61	>150	>150
1985/86	27	64	61	>150	>150
1989/90	31	62	58	>150	>150
1992/93	34	59	60	>150	>150
1995/96	37	58	58	>150	>150

(2) 成長予測システムを用いた間伐による冠雪害抵抗性の向上に関する検討

前節では間伐によって冠雪害抵抗性を高めることができることを示したが、間伐の有無の2種類しか設定されておらず、間伐方法や間伐率の違いによって冠雪害抵抗性がどのように変化するかについて検討ができなかった。そこで、表-28に示した北屋敷の無間伐区18年生の林分を対象に、選木方法、間伐率および間伐回数等を変えた場合の成長予測をシステム収穫表を用いて行い、間伐方法の違いによる成長と冠雪害抵抗性の予測値を比較した(表-32)。なお、下層間伐は直径の小さい方から順に、上層間伐は直径の大きい方から順に、全層間伐は各直径階から一定の割合で選木して伐採するものとした。

まず、選木方法と冠雪害抵抗性の関係について検討するために、無間伐(予測1)および18年生で材積間伐率を10%から40%まで10%きざみで4通り変化させて上層間伐(予測2, 5, 8, 11)、全層間伐(予測3, 6, 9, 12)、下層間伐(予測4, 7, 10, 13)を行った場合における林分の平均限界降雪量を求め、これを間伐強度別に示したのが図-51である。その結果によると、平均限界降雪量が最も大きかったのは下層間伐であり、つづいて全層間伐、上層間伐、無間伐の順であった。このような間伐方法による差異は材積間伐率が大きいほど顕著であった。これらのことから、間伐強度が同じ条件下においては下層間伐が冠雪害抵抗性を高めるのに最も適しているといえる。つぎに、間伐方法毎に冠雪害抵抗性と間伐強度との関係について検討した。ここで、下層間伐を例に取り上げると、この林分においては材積率10%の間伐を行っても冠雪害抵抗性を向上させることができないことがわかった。また、材積率20%の間伐では、冠雪害抵抗性は間伐後に僅かに増大するが、5~6年後に低下し始めるので、再度、間伐を行う必要があると判断された。この林分において1回の間伐で冠雪害抵抗性を向上させるには材積率30%以上の強度の間伐が必要のようである。同様に全層間伐、上層間伐についても間伐強度が大きいほど限界降雪量が大きくなった。これらのことから、間伐強度が大きいほど冠雪害に対する間伐効果も大きくなるといえる。

つぎに、間伐時期と冠雪害抵抗性の関係について検討した。材積率20%の下層間伐を18

年生（予測7），21年生（予測14），24年生（予測15）に行った場合と無間伐（予測1）の場合における限界降雪量を比較すると，林齢の若い時期に間伐するほど冠雪害抵抗性が大きくなる傾向があった（図-52）。これは，若い時期に間伐した方が直径成長に対する効果が大きくなり，その結果，冠雪害抵抗性も大きくなるためであると考えられた。換言すれば，いったん間伐遅れの林分になると冠雪害抵抗性を当初の水準まで戻すことは困難であることを示唆している。

ところで，冠雪害対策を考慮に入れた間伐モデルを作成するにあたり，対象とする林分の限界降雪量や間伐強度および回数を決める必要がある。限界降雪量の設定に当たり過去の気象条件が一つの目安になると考えられる。小矢部市の過去20年間における日最大降雪深を調べたところ，その最大値は60cmであった。そこで，降雪の密度を $0.1\text{g}/\text{cm}^3$ として，この林分の平均限界降雪量が $60\text{kg}/\text{m}^2$ 程度になるように間伐することにした。また，この林分では1回の間伐で冠雪害抵抗性を向上させるためには材積率30%以上の強度の間伐が必要であることを先に述べた。この場合には本数で42%の林木を伐採する必要がある。しかし，強度の間伐は風害の危険性を助長する傾向があるため，弱度の間伐を繰り返し実施することが望ましいとされている（Cremer et al., 1983）。そこで，材積率20%程度の下層間伐を2～3回繰り返す例（予測16, 17）を図-53に示した。なお，林分内の全ての林木の限界降雪量を $60\text{kg}/\text{m}^2$ 以上にするためには，平均限界降雪量を $100\text{kg}/\text{m}^2$ 以上になるように密度管理を行う必要がある。ここでシミュレーションに用いた北屋敷調査地は地位指数が22mと成長のよいところであるので，15年生前後から強度の間伐を繰り返し実施しなければ冠雪害を回避できないと考えられた。

以上に示したように，冠雪害抵抗性は樹高と胸高直径および林齢の相互の関係によって変化する。このうち，胸高直径は林分密度の管理によって制御することが可能であるが，樹高は人為的な制御は難しい。そのため，冠雪害抵抗性を同じレベルで維持するためには，樹高成長の良い林分ほど強度の間伐を実施する必要がある。そのためには，対象林分の地位の把握や将来の成長予測などが必要であり，システム収穫表の活用が求められる。

表-32 間伐方法の違いによる成長と冠雪害抵抗性の予測値

予測	林齢 (年生)	立木 本数 (本/ha)	平均 直径 (cm)	平均 樹高 (m)	林分 材積 (m ³ /ha)	収量 比数	間伐率		平均限界 降雪量 (kg/m ²)	平均 形状比 (m/m)	選木方法
							本数 (%)	材積 (%)			
予測 1	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	無間伐
	23	1900	17.9	14.0	351	0.78	0	0	43	78	
	28	1900	19.4	16.8	502	0.87	0	0	30	87	
予測 2	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	上層間伐
	18	1784	15.2	10.6	179	0.58	6	10	55	70	
	23	1784	17.7	13.8	320	0.73	0	0	45	78	
予測 3	28	1784	19.6	16.7	473	0.83	0	0	32	85	全層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1710	15.4	10.8	179	0.57	10	10	54	70	
予測 4	23	1710	18.0	13.9	319	0.72	0	0	47	77	下層間伐
	28	1710	20.0	16.7	471	0.83	0	0	35	84	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 5	18	1590	15.9	11.1	179	0.55	16	10	54	70	上層間伐
	23	1590	18.6	14.2	318	0.70	0	0	50	76	
	28	1590	20.6	17.0	467	0.80	0	0	37	83	
予測 6	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	下層間伐
	18	1657	15.0	10.5	159	0.52	13	10	54	70	
	23	1657	17.7	13.7	293	0.67	0	0	47	77	
予測 7	28	1657	19.9	16.5	444	0.79	0	0	37	83	上層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1520	15.4	10.8	159	0.50	20	20	54	70	
予測 8	23	1520	18.3	13.9	292	0.66	0	0	51	76	全層間伐
	28	1520	20.6	16.7	441	0.77	0	0	40	81	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 9	18	1332	16.2	11.3	159	0.47	30	20	56	70	下層間伐
	23	1332	19.4	14.4	290	0.62	0	0	57	74	
	28	1332	21.8	17.1	437	0.74	0	0	46	78	
予測 10	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	上層間伐
	18	1503	14.8	10.4	139	0.46	21	30	53	70	
	23	1503	17.7	13.6	263	0.61	0	0	49	77	
予測 11	28	1503	20.2	16.4	412	0.74	0	0	41	81	全層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1330	15.4	10.8	139	0.44	30	30	54	70	
予測 12	23	1330	18.6	13.9	262	0.59	0	0	56	75	下層間伐
	28	1140	21.3	16.7	409	0.72	0	0	47	78	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 13	18	1100	16.6	11.6	140	0.40	42	30	57	70	上層間伐
	23	1100	20.2	14.6	262	0.55	0	0	65	72	
	28	1100	23.2	17.3	407	0.68	0	0	60	75	
予測 14	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	全層間伐
	18	1328	15.3	11.0	120	0.37	30	40	53	72	
	23	1328	17.8	13.5	235	0.55	0	0	53	76	
予測 15	28	1328	20.7	16.3	380	0.69	0	0	48	79	下層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1140	15.4	10.8	120	0.38	40	40	54	70	
予測 16	23	1140	19.0	13.9	234	0.53	0	0	63	73	全層間伐
	28	1140	22.1	16.6	378	0.67	0	0	60	75	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 17	18	923	16.7	11.6	120	0.34	51	40	57	69	下層間伐
	23	923	20.8	14.7	233	0.49	0	0	73	71	
	28	923	24.4	17.3	377	0.63	0	0	81	71	
予測 18	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	上層間伐
	21	1900	16.9	12.7	285	0.73	0	0	49	75	
	21	1302	18.0	13.5	228	0.53	32	20	49	75	
予測 19	28	1302	21.7	17.3	424	0.71	0	0	42	80	下層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	24	1900	18.1	14.6	376	0.79	0	0	40	81	
予測 20	24	1258	19.7	15.6	301	0.58	34	20	41	79	下層間伐
	28	1258	21.6	17.6	411	0.67	0	0	38	81	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 21	18	1330	16.2	11.3	159	0.47	30	20	56	70	下層間伐
	21	1330	18.3	13.3	238	0.57	0	0	58	73	
	21	927	19.3	14.0	190	0.42	30	20	57	73	
予測 22	28	927	24.6	17.9	393	0.63	0	0	66	73	下層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1330	16.2	11.3	159	0.47	30	20	56	70	
予測 23	21	1330	18.3	13.3	238	0.57	0	0	58	73	下層間伐
	21	927	19.3	14.0	190	0.42	30	20	57	73	
	26	927	23.3	16.8	331	0.58	0	0	69	72	
予測 24	26	708	24.3	17.5	281	0.46	24	15	67	72	下層間伐
	28	708	26.0	18.5	340	0.52	0	0	74	71	

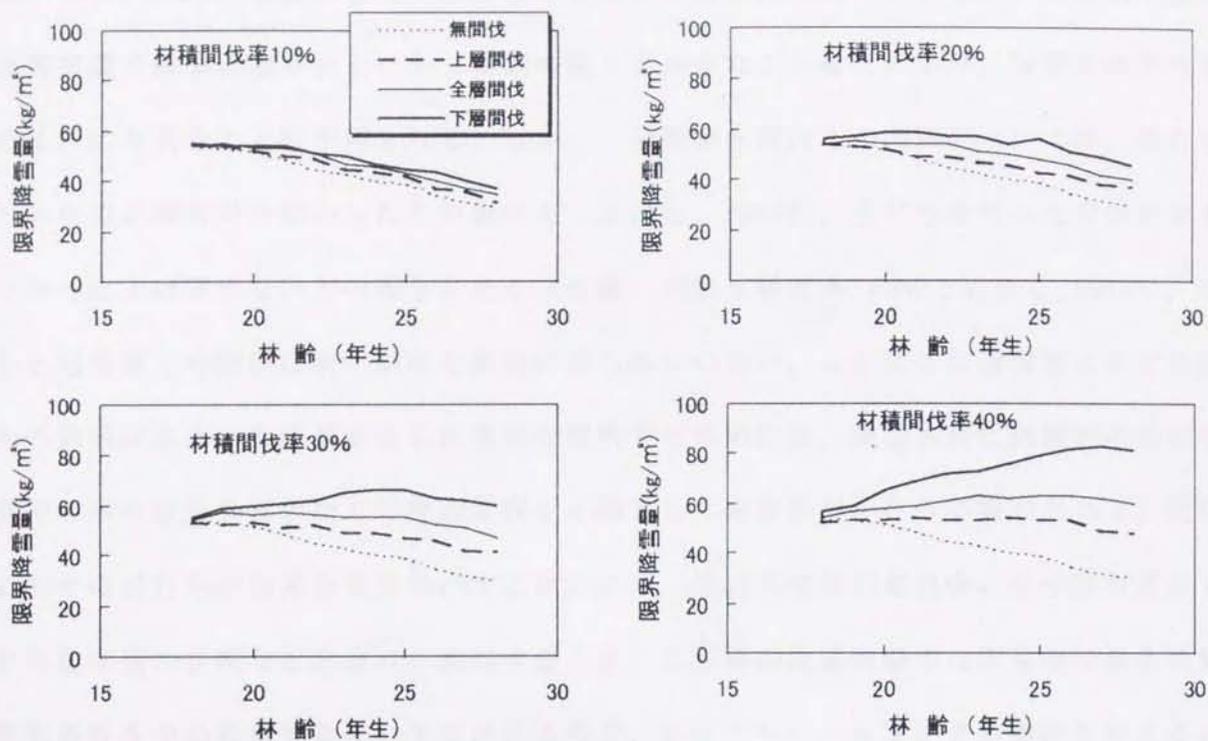


図-51 間伐方法および間伐強度と冠雪害抵抗性の関係

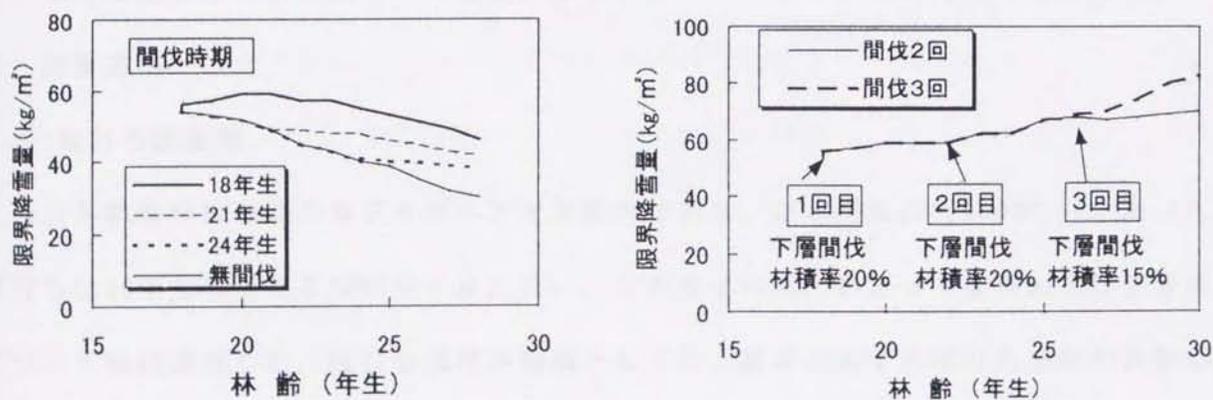


図-52 間伐時期と冠雪害抵抗性の関係

図-53 平均木の限界降雪量を最大降雪量(60kg/m²)以上にするための間伐例

第2節 枝打ちによる冠雪害の軽減効果

枝打ちは、本来、無節の優良材を生産するために行われるものであるが、枝葉量の減少が冠雪荷重の減少に寄与すること、樹冠の偏りが小さなことなどにより、冠雪害抵抗性を高めるのに有効なことが予測される。しかし、冠雪害と枝打ちの関係については、枝打ちを行った方が被害が少なかったとの報告と（三代ら、1982）、枝打ちを行った方が被害が少なかったとは言えないとの報告もあり（佐藤、1971；福井県、1982；石井ら、1980）、枝打ちと冠雪害との関係は未だ明確な結論は得られていない。このように冠雪害に対する枝打ちの効果に異なった結果が生じた原因を究明するためには、調査された試験林の枝打ち強度や林木の成長の良否などの要因を詳しく調査して比較検討を行う必要がある。冠雪害に対する枝打ちの効果を明らかにするためには、枝打ち強度の組み合わせや枝打直後と枝打ち数年後の状況などを分けて検討すること、この種の施業試験では冠雪害の発生時期や降雪条件を予め設定できない欠点があるので、シュミレーションによる検討を加える必要があると考えられる。

そこで、枝打ち直後における枝打ち強度と冠雪害抵抗性の関係および枝打ち後の成長に伴う冠雪害抵抗性の変化について施業試験とシュミレーションを併用して検討した。

1. 解析方法

(1) 枝打ち試験地

枝打ち試験地は取越のカワイダニスギ若齢林であり、立木密度は2,000本/haであった。枝打ちは10年生に当たる1991年4月に行い、その後4年間にわたって被害および生育状況について継続調査した。枝打ち強度の指標としては、樹高に対する枝打ち高率や地際からの高さが用いられているが、幹の成長との関係を比較する場合には不都合なことが多い。こうした比較をする場合には、同化器官である葉量の除去率を指標にするのが最も正確であるとされている（藤森、1975）。そこで、枝打ち強度は葉量除去率であらわすこととし、葉量除去率0、50、75および95%の4つの処理区を設定した（表-33）。なお、各個体の葉量は以下の方法で推定した。供試木を伐倒して、層別刈り取り法に準じた方法で、層厚

表-33 枝打ち試験地の概要

葉量 除去率 (%)	枝打 率* (%)	供試 木数 (本)	1991年4月の平均値			1994年10月の平均値		
			樹高 (m)	胸高直径 (cm)	形状比 (m/m)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	形状比 (m/m)
95	58	10	6.5	10.0	65	8.2	12.3	66
76	42	26	5.9	8.9	66	7.9	12.7	62
50	24	25	6.1	9.2	67	8.6	13.8	62
0	0	14	6.5	9.8	66	9.2	15.5	59

*枝打ち率 = (枝打ち前の樹冠長 - 枝打ち後の樹冠長) / 枝打ち前の樹冠長 × 100%

50cmとして葉、枝、幹に切り分け、各々の乾燥重量を測定した。この供試木の幹の断面積と梢端からのその部位までの積算葉重との間に比例関係が認められたので、この関係を用いて各個体の枝打ち前後の葉量を推定した。さらに、1994年10月に4処理区においてそれぞれ1本ずつの供試木を伐倒し、葉、枝、幹の層別の重量を測定し、樹幹析解をした。なお供試木は調査開始時の樹高および胸高直径がほぼ等しいものを選定した。

(2) 解析方法

樹幹の最大耐力を座屈荷重から推定するため中谷(1991)の数値計算法を用いた。まず樹幹が小さな短柱を積み重ねたものから成りたち、冠雪荷重が葉の乾燥重量の0.86に比例して増加し、枝を介して各々の短柱の中心に付加され、樹幹および枝葉の重量も各々の短柱に作用するものと仮定した。樹幹のヤング率は小泉の加力挺子試験法(1986)を用いて立木状態のまま10本について測定した。

冠雪害抵抗性を限界降雪量(kg/m²)で示すが、これは、冠雪量と葉量(以下全て乾重で表した。)および降雪量の間関係を利用して、その立木が冠雪により座屈するときの降雪量を表すものである。したがって、この値が大きいほど冠雪害抵抗性が大きいことを表す。

根系の支持力を示す根元の回転係数(μ)をボカスギ、タテヤマスギ、マスヤマスギなどの立木の荷重試験の値から推定した。μと林木の大きさは次式で示される。

$$\mu = 0.172(D^2H)^{-1.518} \cdot 10^{-6} \quad (r^2=0.739, n=118) \quad (6.1.1)$$

ここで、Dは胸高直径(cm)、Hは樹高(m)である。この式から、各供試木の μ を計算したところ $1.81 \cdot 10^{-6} \sim 4.64 \cdot 10^{-6} \text{rad/cm/kgf}$ であった。

2. 結果と考察

(1) 枝打ち直後における枝打ち強度と冠雪害抵抗性の関係

枝打ち直後における葉量除去率と限界降雪量の関係について、シミュレーションにより検討した。シミュレーションに用いたのは、枝打ち試験地の10年生と14年生の無処理区のカワイダニスギ2本(K1, K2)と生育段階の異なるボカスギ4本(B1~B4)である。これらの供試木の概要を表-34に、葉重(乾燥重量重)の垂直分布を図-54に示した。カワイダニスギの樹幹ヤング率は10本の供試木の平均値が 35tonf/cm^2 であったことから、計算にはこの値を用いた。なお、供試木B4は樹幹ヤング率以外の条件が試料木B3と同じで、樹幹ヤング率が 49tonf/cm^2 の場合である。

これらの供試木の葉量除去率を葉量の重量比で表し、これと限界降雪量の関係を図-55に示した。この結果、10年生のカワイダニスギの限界降雪量は葉量除去率に関係なくほぼ一定であった。また、14年生のカワイダニスギの限界降雪量も葉量除去率が90%まではほぼ一定であり、それを越えてもわずかに増大しただけであった。これと同様の傾向が12年生のボカスギでも認められた。これらの結果から、若齢林では品種に関係なく枝打ちを実施しても冠雪害抵抗性がほとんど向上しないと考えられた。

表-34 枝打ちのシミュレーションに用いた林木の概要

供試木	品種	林齢 (年生)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	枝下高 (m)	葉乾量 (kg)	樹幹ヤ ング率 (tonf/cm^2)	根元の回 転係数 (rad/cm/kgf)
K1	カワイダニスギ	10	6.6	11.0	0.3	17	35	1.52×10^{-5}
K2	カワイダニスギ	14	9.5	16.6	0.5	23	35	1.66×10^{-6}
B1	ボカスギ	12	8.4	14.8	2.3	15	35	1.90×10^{-6}
B2	ボカスギ	18	13.3	18.2	4.3	21	35	5.09×10^{-7}
B3	ボカスギ	25	19.3	26.2	7.3	31	35	9.53×10^{-8}
B4	ボカスギ	25	19.3	26.2	7.3	31	49	9.53×10^{-8}

一方、18年生および25年生のボカスギの限界降雪量は葉量除去率の増大に伴って大きくなる傾向が認められた。また、供試木の大きさや葉量の垂直分布が等しい場合には、樹幹ヤング率が大きい方の限界降雪量が大きく、かつ枝打ち効果も顕著になることが明らかになった。以上のことから、枝打ちによって冠雪害抵抗性を向上させる効果は生育段階が進むほど大きくなるといえる。

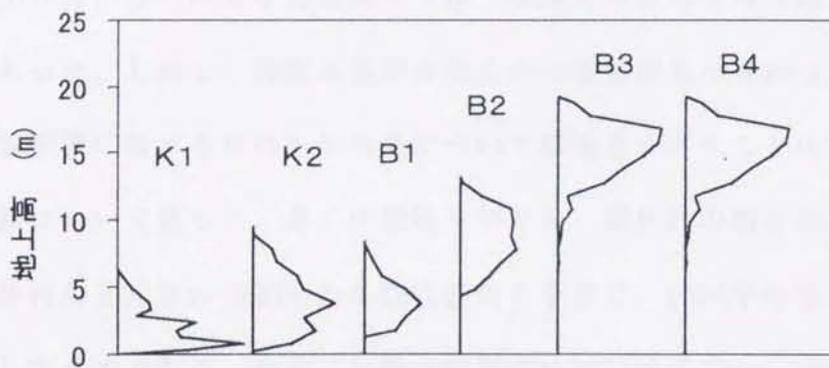


図-54 供試木の葉量の垂直分布

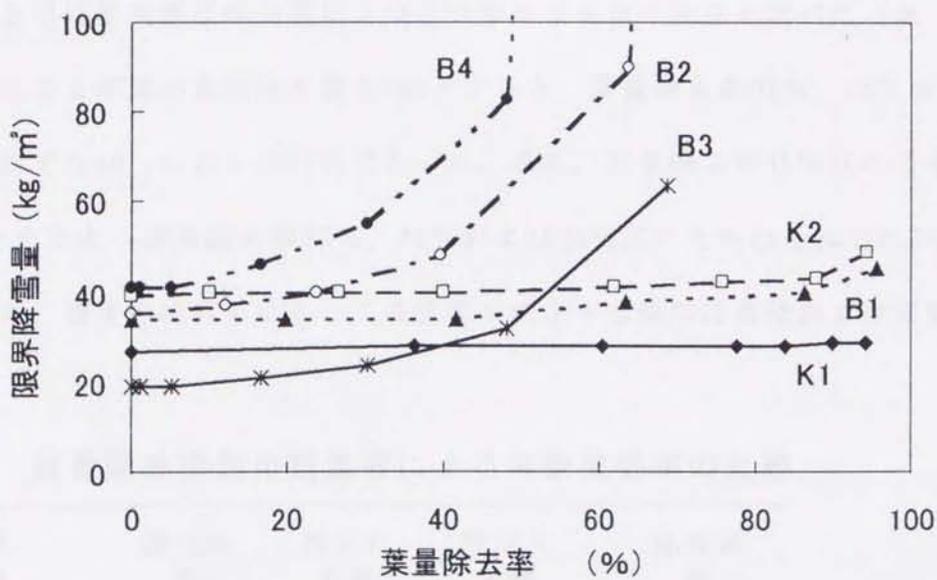


図-55 枝打ち直後の葉量除去率と限界降雪深の関係

(図中のアルファベットは供試木を示す)

(2) 枝打ち後の被害状況と冠雪害抵抗性の変化

①被害状況

枝打ち強度と冠雪害の関係を検討する目的で4年間の被害状況を調べ、表-35に示した。葉量除去率95%区は被害率が30%で、被害が最も大きかった。葉量除去率75%区と50%区はともに被害率が12%で差がなかった。一方、葉量除去率0%区ではまったく被害の発生が認められなかった。この結果を見る限りでは、強度の枝打ちを行った区ほど被害率が高くなるようであった。しかし、調査本数が少なくかつ被害率も小さかったことから、表-35の結果から冠雪害に対する枝打ちの効果について結論をくだすことは早計と考えられた。また、被害形態について見ると、多くは根返りであり、幹折れの割合が小さかった。これらの被害木は枝打ち2年後の1993年の冬期に幹曲りを生じ、1994年の冬期に根返りや幹折れを引き起こしたものである。なお、日最大降雪深は1993年が30cm、1994年が50cmであった。

②枝打ち強度と成長

枝打ち強度と平均胸高直径成長量および平均樹高成長量の関係を調べた(表-36)。葉量除去率0%区の4年間の直径成長量を100とすると、葉量除去率95%、76%および25%区のそれはそれぞれ40、67および81%であった。また、葉量除去率0%区の4年間の樹高成長量を100とすると、葉量除去率95%、76%および25%区のそれはそれぞれ59、73および89%であった。強度の枝打ちによって成長量が低下する傾向は直径および樹高とも同じ

表-35 葉量除去率別の冠雪害による本数被害率の比較

葉量 除去率 (%)	調査木 数 (本)	幹折れ 木数 (本)	根返り 木数 (本)	総被害 率 (%)
95%	10	1	2	30
76	25	0	3	12
50	26	0	3	12
0	14	0	0	0

表-36 葉量除去率別の平均胸高直径成長および
平均樹高成長の比較

葉量除去率 (%)	胸高直径 '94.10 (cm)	4年間 成長量 (cm)	樹高 '94.10 (m)	4年間 成長量 (m)
95%	12.3	2.3	8.2	1.7
76%	12.7	3.8	7.9	2.0
50%	13.8	4.6	8.6	2.4
0%	15.5	5.7	9.2	2.8

であったが、とくに直径成長の低下が顕著であった。一般に葉量除去率が50%を越えると直径成長が低下するとされている（藤森，1975；浅井ら，1986）。このような傾向が長期間続くと、強度の枝打ち区では対照区に比べて細長な樹幹となり、冠雪害抵抗性が低下することが考えられた。

③成長量の低下と冠雪害抵抗性

枝打ちによる成長量の低下と冠雪害の関係について検討した。1994年10月に葉量除去率95%、76%、50%および0%の4つの処理区において供試木を1本ずつ伐倒し、樹幹形および幹、枝および葉の垂直分布を調べた（図-56）。なお供試木は調査開始時の樹高および胸高直径がほぼ等しいものを選定した。この4本の供試木についてヤング率を35tonf/cm²として限界降雪量を計算した（表-37）。この結果によると、枝打ち直前の限界降雪量は58kg/m²であったが、その4年後には葉量除去率95%区において34kg/m²に、76%区では51kg/m²また50%区では54kg/m²にそれぞれ低下したのに対し、葉量除去率0%区で4年後に微増した。したがって、限界降雪量によって冠雪害抵抗性を評価すると、枝打ち強度が大きいほど冠雪害抵抗性が小さくなるといえる。また、形状比は樹冠ヤング率に大きな差異がない場合には、冠雪害抵抗性の相対値を表すことができるので、各区の平均形状比を比較してみた（表-33）。この結果によると、葉量除去率95%区では枝打ち直後の形状比

に対して4年後の形状比はほとんど変化しなかったのに対し、葉量除去率が小さな区ほど4年後の形状比が小さくなる傾向が認められた。したがって、形状比から判断しても、枝打ち強度が大きいほど冠雪害抵抗性が小さくなると思われる。

なお、この試験林では幹折れが少なく、根返りが多かった。根返りを生じやすいのは、第4章3節で述べたように、根系の支持力が小さいかつ根元直径に対する荷重点直径の比(α)が0.4~0.6の範囲にあった場合であった。そこで、限界降雪量の計算に用いた μ 値を調べてみたところ、 $1.66\sim 4.64\cdot 10^{-6}$ の範囲にあったことから、各供試木とも根系の支

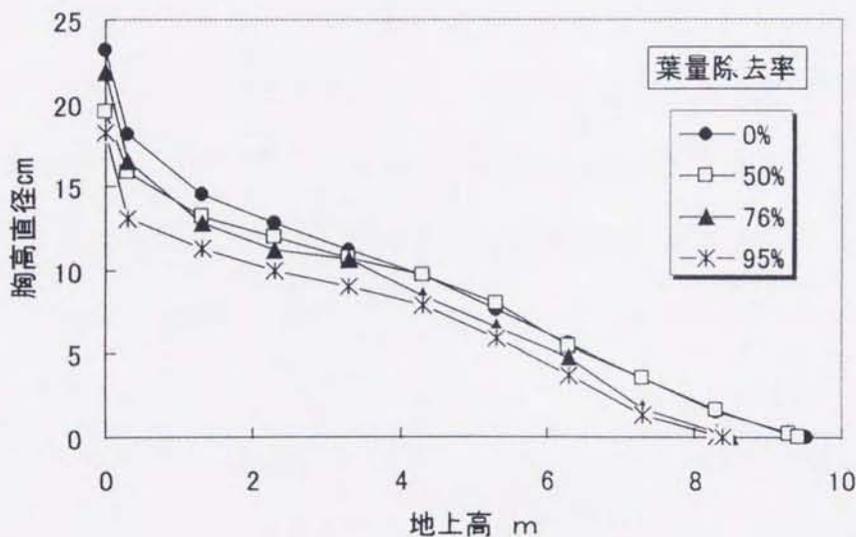


図-56 葉量除去率の異なる林木の枝打ち4年後の樹幹形の比較

表-37 葉量除去率が異なる供試木の枝打ち4年後の限界降雪量の比較

葉量除去率 (%)	1991年4月		1994年10月			
	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	葉乾重 (kg)	限界降雪量 (cm)
95	6.6	9.0	8.4	11.3	8.8	34
76	6.5	9.4	8.5	12.8	14.2	51
50	6.5	9.2	9.4	13.2	17.2	54
0	6.4	8.8	9.5	14.5	23.2	61

持力が小さかったといえる。また、各供試木の樹冠の重心を荷重点高と仮定して α を求めてみると、何れも0.44~0.60の範囲内にあり、根返りの危険性が大きかったことがわかった。

以上のことから、カワイダニスギ若齢林において強度の枝打ちを行うと直径成長が抑制されるため、冠雪害抵抗性が低下傾向を示すことがわかった。したがって、冠雪害危険性がある地域では葉量除去率が50%を越えるような強度の枝打ちは避けるべきと考えられた。