

スギの冠雪害抵抗性の要因解析

—人工冠雪装置による実験—

中島 清⁽¹⁾・新田隆三⁽²⁾・藤森隆郎⁽³⁾・勝田 稯⁽⁴⁾

Kiyoshi NAKASHIMA, Ryuzo NITTA, Takao FUJIMORI and Masaki KATSUTA

: Experimental Analysis of Resistance to Snow Load on Crown

in *Cryptomeria japonica* D. DON.

— Tests by using an apparatus for artificial snow load on crown —

要 旨: スギにおける冠雪害抵抗性品種・系統の選抜, 検定に必要な評価基準を確立するために, サンプスギ, ミョウケンスギ, ボカスギ, ムラスギの4品種について, 短時間に大量の湿降雪をもたらす人工冠雪実験装置を用いて冠雪害を再現し, 被害形態と樹冠特性の関係から抵抗性要因の解析を試みた。人工冠雪実験装置により, サンプスギ, ミョウケンスギ, ボカスギで幹折れ, 幹の大曲り, 梢端曲りのそれぞれ典型的な冠雪の被害形態を再現することができた。一方, ムラスギでは最大 66.8 kg の冠雪が形成されたにもかかわらず, 梢端及び幹のわん曲は認められなかった。積算降雪量と冠雪量との間には, 降雪重量が 0~700 kg の範囲で, きわめて高い相関をもつ直線関係が認められ, 各直線の回帰係数で示される降雪の捕捉効率には, 有意な品種間差が認められた。葉量の個体間差を除くため, 単位枝葉量あるいは単位葉量当たりの冠雪量(冠雪量/乾重量)と降雪量との関係から求めた降雪の捕捉効率は, サンプスギのみ有意に高い値となったが, 他の3品種についてはそれぞれの品種間に有意差は認められなかった。これらのことから, 降雪の捕捉効率は樹冠全体での捕捉効率と, 単位枝葉量あるいは単位葉量当たりの捕捉効率の, 少なくとも二つの要素が関係していることがわかった。また, 冠雪量と幹の傾倒・わん曲との関係にも品種間差が認められたが, 枝の下垂性を示す指標と考えられる樹冠投影面の変形については, 品種間差は顕著でなかった。一方, 樹冠形については, 樹冠頂角, 枝の着生角度, 枝の本数(枝密度), 枝葉量の垂直分布, 枝の乾重量に占める緑枝の割合とその分布, 梢端部の枝及び幹の直径と幹の乾重量の垂直分布に品種間差が認められ, とくに樹冠頂角, 枝葉の乾重量とその垂直分布が冠雪量に影響を与える重要な要因であることが明らかになった。

1. は じ め に

近年, 冠雪による森林被害が各地で多発しているが, とくにスギ造林地における冠雪害は森林生産に壊滅的被害を与えることが多い。これまでも被害発生とともに被害林分の調査が行われ, 被害形態や被害程度等から被害の発生要因の解析が試みられている。その結果, 被害の発生しやすい気象条件や立地条件, 保育方法等についての知見が集積されてきており, また, 品種・系統による被害差異についても過去の調査事例がまとめられている¹²⁾¹³⁾²⁴⁾。しかし, 多くの調査事例では, 調査対象林分に試験地として検定用に準備された林分が少ないこと, 立地, 保育等の条件が一定でなく, しかも, 十分な数の品種, 本数が得られないことなど, 被害の発生要因, 被害の品種・系統間差異などを論議するには不十分

1988年8月18日受理

環境—1 Forest Environment—1

(1) 元造林部(現熱帯農業研究センター)

技術—1 Forestry Technology—1

(2) 森林環境部(元防災部)

(3) 生産技術部(元造林部)

(4) 企画調整部(元造林部)

な点が多い。

冠雪害を防除する方法としては、危険地域を区分するとともに¹⁹⁾、保育を中心とする育林的防除技術を確立する必要がある、また、危険地域に植栽しうる抵抗性個体を選抜、育成することが考えられる。既往の調査では被害形態、被害程度に品種・系統間差異が認められている事例が多く^{4)5)11)~13)26)30)33)34)41)48)50)54)56)}、抵抗性個体を選抜、育成することが可能であると考えられる。

冠雪害に抵抗性を示す品種・系統あるいは個体を選抜するためには、抵抗性の選抜基準、検定手法の確立が必要であり、そのためには抵抗性要因の詳細な解析を行い、的確な選抜基準を確立することが不可欠である。冠雪害の発生には、気象条件や林分構造、保育形式や手入れの程度等が関係しているといわれ^{1)~3)13)19)22)23)27)29)31)35)~39)45)~47)51)52)54)~56)}、抵抗性要因を解析するには、これらの要因との関係も考慮する必要がある。冠雪害が発生するときの気象条件や林分構造等については、これまでに行われた被害調査報告から推察されるように、多くの要因と様々な条件が複雑に絡みあっていることが多い¹²⁾¹³⁾。しかし、実際にいろいろな条件の下で発生する冠雪害を実験的に再現し、被害の発生機構を解析することはきわめて困難である。センサー（小試験地）方式で抵抗性を検定する方法も考えられているが⁷⁾、一般に冠雪害は少雪あるいは寡雪地帯で、しかも、局所的、突発的に発生することから、この方式では抵抗性の検定でさえ相当な歳月を要するものと思われる。

一方、冠雪害には、幹折れ、幹曲がり、根返り等があり、これらが複合された形で発生することがしばしばみられることから、冠雪害に対する抵抗性機構も一様ではないと考えられる。既往の報告で被害形態と樹冠の形態、幹の曲げ強度特性などから抵抗性要因を解析した事例もあるが^{6)8)~10)14)~16)18)34)35)49)50)54)58)}、かかわる要因が多く十分には解明されていない。そこで、早急に抵抗性の要因解析を行うためには、単純化した条件のもとで冠雪害を実験的に再現し、被害発生にかかわる要因の解析を行う必要がある。

本実験はこうした観点から、冠雪害の発生機構と被害形態の解析及び抵抗性の要因解明を早急に行うため、人工冠雪実験装置²⁸⁾を用いて、まず、冠雪による各種の被害形態を再現し、冠雪量と密接な関係にあると考えられる樹冠特性、とくに樹冠の形状、樹冠内の枝葉密度、冠雪による樹冠の変形などを中心にした抵抗性要因の解析を行った。本報では、人工冠雪実験装置による冠雪被害形態と、樹冠特性の関係及び被害形態と冠雪量の関係などについての解析結果を報告する。

なお、本実験を遂行するに当たり、貴重な実験材料を提供して頂いた新潟県林業試験場、及び実験に際して有益な助言と多大な協力を頂いた林業試験場十日町試験地の渡辺成雄元主任、大関義男主任研究官、庭野昭二技官に厚くお礼申し上げる。

II. 材 料 と 方 法

1) 実験材料

本実験では、新潟県林業試験場村上実験展示林、スギ地方品種植栽試験地に植栽されている 30 品種のなかから、樹冠形、枝葉量に外観的な特徴がみられたサンプスギ、ミョウケンスギ、ボカスギ、ムラスギの 4 品種を選んで使用した。この展示林は昭和 38~39 年に植栽されたもので、これまでに除伐 2

回、枝打ち 1 回 (昭和 56 年に地上 4 m まで) が行われ、18 年生時における生育状況、及び形質が 16 品種について調査されている⁴²⁾。その報告によれば、品種別の平均樹高はサンプスギ、ミョウケンスギ、ボカスギ、ムラスギでそれぞれ 9.5, 10.6, 8.2, 8.1 m であり、胸高直径では 15.2, 15.9, 13.5, 13.2 cm, 形状比は 62, 67, 61, 61 であった (サンプスギは枯損が多い)。本実験ではこの 4 品種のなかから、偏倚が少なく、典型的な樹冠形を示す 1 個体を選んで用いた (Table 1)。品種内での個体間差、品種間差については別途報告する予定である。

2) 人工冠雪実験装置

人工冠雪実験装置は Photo. 1 に示すように、4 本の柱で支えた鋼鉄製のフルイ (2.5×2.5×0.4 m, 網目 1 cm²) を地上 5.5 m の位置に吊し、2 台の自振モーター (550 W, 3 000 r.p.m.) で振動を与えるようにした装置である²⁸⁾。実験中は周囲 3 方向をシートで囲って、風の影響を避けるようにした。樹体の支持は、水平方向に互いに 120° の角度で開脚する三脚型支持台を作り、その中心部の穴に幹の元口を入れて固定するようにした。3 本の脚の下にはそれぞれ台秤を置き、樹体及び冠雪量を経時的に測定できるようにした。実験は午前、午後にわたったので、温度条件は必ずしも一定していない。

3) 実験方法

実験は昭和 59 年 1 月 31 日から 2 月 2 日にかけて、林業試験場十日町試験地において行った。実験に先立って、梢端部から 4 m の位置で幹を切断し、切断部より上部 1 m の範囲にある枝を除去した。また、梢端から枝の着生部位まで、及び枝先までの垂直距離と、幹から枝先までの水平距離、さらに、枝の着生部位での幹直径と枝直径とを測定した。

切断した梢端部 4 m を鉛直に三脚台の上に乗せ、台から高さ 1 m の位置を針金で固定した。この状態で、3 台の秤の目盛をすべて 0 に合せ、樹冠上部及び正面から降雪前の状態を写真に撮影した。一定量の雪ブロック (約 50~100 kg) をフルイの中に入れ、樹冠表面に水を均等に撒布しながら自振モ-

Table 1. 冠雪実験に用いた材料
Materials used for this experiment

品 種 名 Cultivar	樹高 Height	胸高直径 D.B.H.	形状比 H/D	葉の乾重量* Dry weight of leaves	枝の乾重量* Dry weight of branches	枝本数* Number of branches	幹の乾重量** Dry weight of stem
	m	cm		kg	kg	本	kg
サンプスギ Sanbusugi	9.9	17.5	57	2.354	0.525	82	1.656
ミョウケンスギ Myokensugi	14.5	18.0	81	3.012	0.343	62	1.639
ボカスギ Bokasugi	88.9	17.0	52	4.649	1.470	68	3.904
ムラスギ Murasugi	9.8	15.0	65	2.589	0.484	66	1.883

* 樹冠長 3 m についての測定値

Measures in crown length of 3 m from the top.

** 樹冠長 3.5 m についての測定値

Measures in crown length of 3.5 m from the top.



Photo. 1. 人工冠雪実験装置
Apparatus for artificial snow load on crown.

ターで雪をふり落した。フルイの中の雪ブロックが湿雪で固まっているときには、シャベルやデッキブラシで雪塊を砕いて、雪粒のふり落しを助けた。一定量の雪が落下するまでの時間、その間に撒布した水の量及び冠雪量をそれぞれ1回の降雪ごとに測定し、樹冠上部と正面から写真の撮影を行った。また、1回目の降雪後に樹冠の傾倒方向を一定にするため、落雪しないよう十分に注意して、わずかではあるが位置の修正を行った。降雪は通例6回行い、それぞれの降雪ごとに上述の各項目の測定を行い、最後に冠雪をすべて払い落した状態で、樹冠及び幹の回復状態を調べた。すべての降雪実験を終了した後、枝葉生重量、幹生重量の測定を行い、サンプル(約200g)を採取してそれぞれの乾重量の推定を行った。枝葉重量については、針葉部分と緑枝-1(当年生緑枝)、緑枝-2(緑枝-1と褐色枝の間)、褐色枝の各部分に分けて測定を行った。幹の傾倒、樹冠投影面の変化等については撮影した写真から求めた。

III. 結 果

1. 人工冠雪実験による被害形態の解析

1) 降雪重量—冠雪量の関係

Fig. 1 は人工冠雪実験装置での人為的な降雪と、樹冠に捕捉された冠雪量の関係を表したものである。積算降雪重量は、毎回降らせた雪の量と樹冠表面に散布した水の量の和を積算したもので、樹冠上に降らせた雪と水の総重量を示す。一方、冠雪量は樹冠上に捕捉された雪と水の総重量を示す。したがって、両者の相関が直線的に有意であれば、回帰係数は降らせた雪の量に対する樹冠上に捕捉された雪の割合、つまり捕捉効率を示すことになる。

Fig. 1 をみると、各品種ごとの回帰直線の相関係数はいずれも有意 (1% 水準) であり、積算降雪重量と冠雪量の間にはきわめて高い相関が認められる。この範囲 (0~700 kg) の降雪重量では、品種により一定の比率で冠雪量が増大することが分かる。また、各品種ごとに求めた回帰係数は、サンプスギとミョウケンスギ、ミョウケンスギとムラスギの間では有意にならなかったが、その他の品種間ではいずれも 1% 水準で有意差がみられ (Table 2)、降雪の捕捉効率に明確な品種間差のあることが分かった。また、回帰係数では有意差の認められなかったサンプスギとミョウケンスギ、ミョウケンスギと

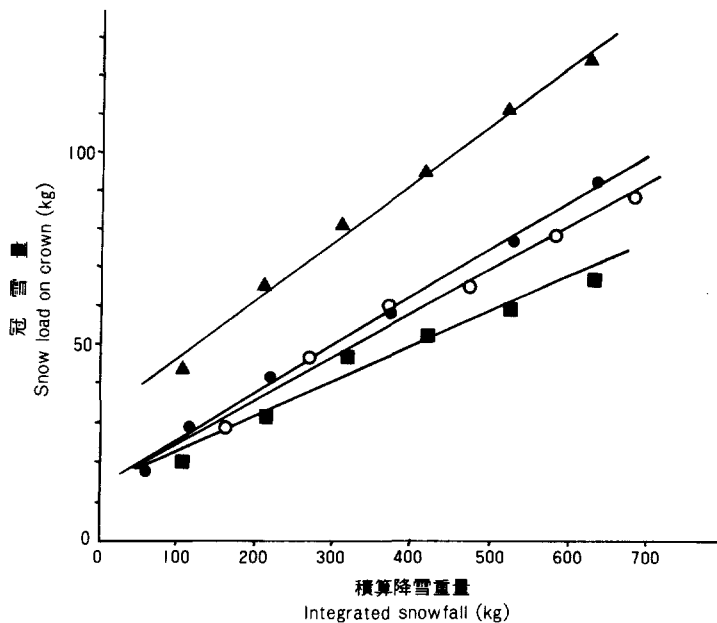


Fig. 1. 人工冠雪実験装置における積算降雪重量と冠雪量の関係

Relations between integrated snowfall and snow load on crown in an apparatus for artificial snow load on crown.

- | | |
|---|--|
| ● Sanbusugi $y=13.4+0.122x$ $r=0.9981^{**}$ | ○ Myokensugi $y=15.3+0.109x$ $r=0.9896^{**}$ |
| ▲ Bokasugi $y=31.6+0.151x$ $r=0.9970^{**}$ | ■ Murasugi $y=13.8+0.088x$ $r=0.9843^{**}$ |

Table 2. 積算降雪重量—冠雪量の回帰係数 (b) 及び回帰定数 (a) の t-検定
T-test of significance on regression coefficient (b) and fixed number (a) of regression lines between integrated snow fall and snow load on crown

品 種 名 Cultivar	サンブスギ Sanbusugi	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
	回帰係数 Regression coefficient (b)			
サンブスギ Sanbusugi		1.576 ^{NS}	4.377***	4.077**
ミヨウケンスギ Myokensugi	1.696 ^{NS}		4.373***	1.878 ^{NS}
ボカスギ Bokasugi	—	—		6.516***
ムラスギ Murasugi	—	4.312**	—	
	回帰定数 Fixed number (a)			

ムラスギについて、回帰定数の有意差を検定したところ、サンブスギとミヨウケンスギの間では有意差が認められず、品種間に差のないことが確かめられたが、ミヨウケンスギとムラスギの間では有意（1%水準）となり、降雪初期の捕捉効率に違いのあることが分かった。

Fig. 1 は、測定に用いた樹冠全体での降雪の捕捉効率を示したものである。しかし、後述するように（枝葉量の項）、ほぼ同一条件下の試験地で生育したものでも、枝葉量に品種特性としての差異がみられる。そこで、この枝葉量の差による影響を除くため、単位枝葉量、単位葉量（乾重量、kg）当たりの冠雪量に換算して示したのが Fig. 2, 3 である。これらの関係でも、品種ごとに求めた回帰直線にきわめて高い有意な相関（1%水準）が認められるが、Fig. 1 の樹冠全体の捕捉効率では最も高い値を示したボカスギと、最も低いムラスギが、単位枝葉量、単位葉量で表すとほぼ同じ直線となり、ミヨウケンスギを加えた3者の回帰係数に有意差が認められなかった（Table 3, 4）。一方、サンブスギの回帰係数はこれら3品種に比べて有意（1%水準）に高く、葉や枝が雪を捕捉するのにきわめて効率的な構造や配置をしているものと考えられる。また、Fig. 1～3 で明らかなように、ボカスギの高い捕捉効率は、単位葉量あたりの降雪の捕捉効率が高いためではなく、単木あたりの葉量が多いためであることが分かる。

このように降雪量に対する冠雪量の割合、いわゆる捕捉効率には、葉や枝の形態や構造で決まる単位枝葉量、あるいは単位葉量あたりの捕捉効率と、樹冠層を形成する葉や枝の量によって決まる樹冠全体の捕捉効率の、少なくとも二つの重要な要素のあることが分かった。

2) 冠雪による幹の傾倒・わん曲

冠雪が形成されると梢端部はある方向に曲がりはじめ、幹のわん曲点は冠雪の発達とともに梢端部から樹冠中、下部へと移行し、わん曲した幹の上面に沿って受雪面が形成される。この受雪面上でさらに冠雪が発達し、次第に幹の傾倒が進行する（Photo. 2）。この様子を4品種で模式的に示したのが Fig. 4 である。この図は各降雪ごとに正面から撮影した写真をもとに、幹の形状を重ね合せたものである。各降雪時に樹体にかかっている冠雪量はそれぞれの品種により一定ではないが、降雪を繰り返すごと

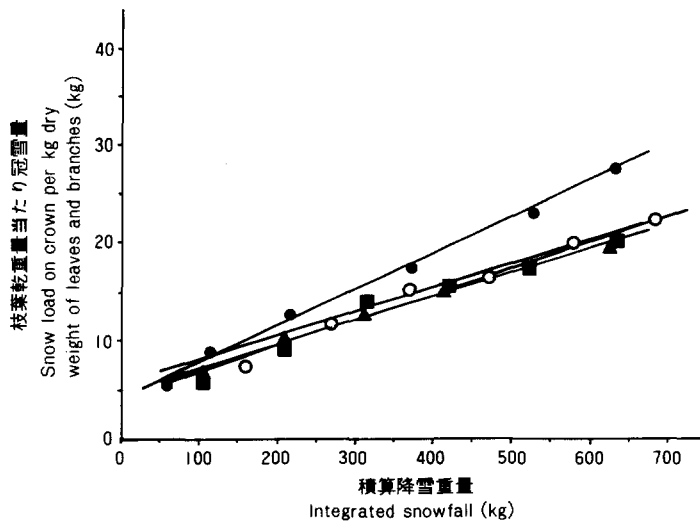


Fig. 2. 積算降雪重量と枝葉乾燥重量 (kg) 当たり冠雪量の関係

Relations between integrated snowfall and snow load on crown per kg dry weight of branches and leaves.

● Sanbusugi	$y = 4.06 + 0.037x$	$r = 0.9980^{**}$	○ Myokensugi	$y = 3.84 + 0.027x$	$r = 0.9899^{**}$
▲ Bokasugi	$y = 4.93 + 0.024x$	$r = 0.9970^{**}$	■ Murasugi	$y = 4.08 + 0.026x$	$r = 0.9849^{**}$

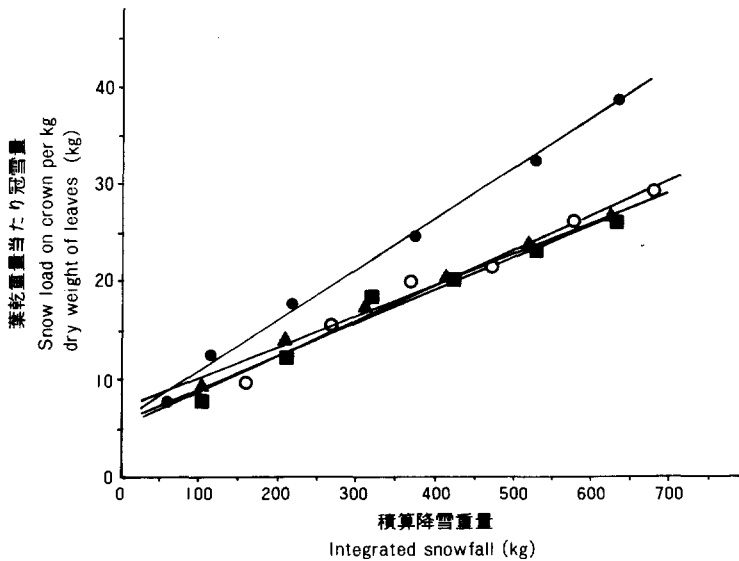


Fig. 3. 積算降雪重量と葉乾燥重量 (kg) 当たり冠雪量の関係

Relations between integrated snowfall and snow load on crown per kg dry weight of leaves.

● Sanbusugi	$y = 5.70 + 0.052x$	$r = 0.9981^{**}$	○ Myokensugi	$y = 5.05 + 0.036x$	$r = 0.9897^{**}$
▲ Bokasugi	$y = 6.79 + 0.032x$	$r = 0.9972^{**}$	■ Murasugi	$y = 5.41 + 0.034x$	$r = 0.9843^{**}$

Table 3. 積算降雪重量—単位枝葉量（乾重量）当たり冠雪量の
回帰係数のt-検定T-test of significance on regression coefficient between integrated snow
fall and snow load on crown per kg dry weight of leaves and branches

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	4.134**	8.348***	4.289**
ミヨウケンスギ Myokensugi		1.645 ^{NS}	0.471 ^{NS}
ボ カ ス ギ Bokasugi			0.871 ^{NS}

Table 4. 積算降雪重量—単位葉量（乾重量）当たり冠雪量の
回帰係数のt-検定T-test of significance on regression coefficient between integrated snow
fall and snow load on crown per kg dry weight of leaves

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	5.184***	9.087***	5.194***
ミヨウケンスギ Myokensugi		1.224 ^{NS}	0.460 ^{NS}
ボ カ ス ギ Bokasugi			0.509 ^{NS}

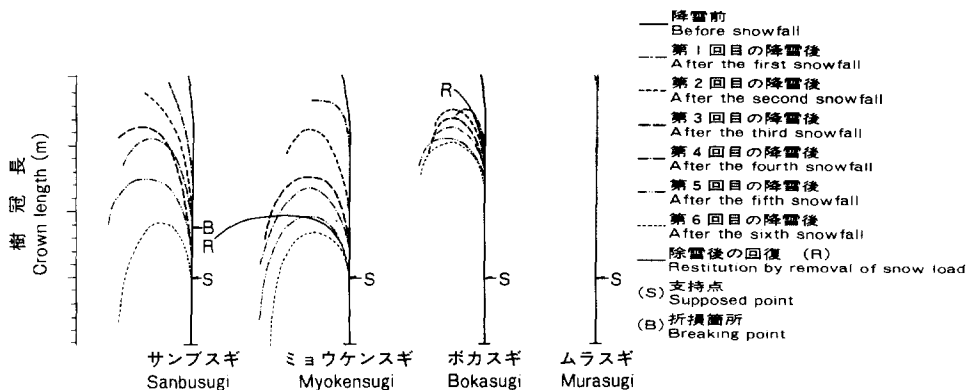


Fig. 4. 人工冠雪装置での冠雪による幹の傾倒・わん曲を示す模式図

Diagrams of the stem bending by snow load on crown in an apparatus for
artificial snow load.



Photo. 2. 人工冠雪実験装置による冠雪の発達と幹のわん曲（ミョウケンスギの例）
Development of snow crowning and the stem bending in an apparatus for artificial snow load on crown in case of Myokensugi.

- | | |
|--|---|
| A : 降雪開始前
Before snowfall | C : 第3回降雪後（同 46.5 kg）
After the third snowfall (do. 46.5 kg) |
| B : 第1回降雪後（冠雪量 29.0 kg）
After the first snowfall (snow load on crown 29.0 kg) | D : 第5回降雪後（同 78.5 kg）
After the fifth snowfall (do. 46.5 kg) |
| | E : 第6回降雪後（同 88.0 kg）
After the sixth snowfall (do. 88.0 kg) |

に、梢端部や幹の部分で傾倒が進行する様子を知ることができる。

冠雪害の主な被害形態には、梢端部の曲がりや幹の大曲がり、折れ、根返り等がみられるが、今回の冠雪実験では、幹の折れ、幹の大曲がり、梢端部の曲がりの各被害形態を、それぞれサンプスギ、ミョウケンスギ、ボカスギで再現することができた (Photo. 3)。サンプスギは、降雪開始とともに梢端部の傾倒が始まり、2 回目の降雪以降、幹のわん曲は次第に大きくなって、6 回目の降雪で梢端が地上に付き、その直後に矢印で示した位置 (梢端から 220 cm) で幹折れが発生した。ミョウケンスギも梢端のわん曲が降雪開始直後から始まり、冠雪量の増加とともに幹が急速に大きくわん曲した。6 回の降雪で梢端が地上に達したため実験を終了したが、幹折れには至らなかった。この後、冠雪をすべて払い落した結果、Fig. 4 に示したように、ほぼ水平の状態にまでしか回復しなかった。ボカスギでは、梢端部のわん曲は比較的早くから始まったが、幹のわん曲点の位置は梢端から約 100~150 cm 付近に止まり、それより下方へは進まなかった。6 回の降雪で 4 品種中最大の 124 kg の冠雪が形成されたにもかかわらず、大きな幹曲がりには至らなかった。一方、ムラスギでは、6 回の降雪で 66.8 kg の冠雪量に達したが、梢端部の傾倒は認められなかった。

つぎに、梢端部及び幹のわん曲の程度を冠雪量との関係で表したのが Fig. 5 である。幹のわん曲による梢端の移動には水平方向と垂直方向の移動があるが、ここでは垂直方向の移動距離を、降雪開始前の状態から梢端の下垂した距離 (垂下量) で示し、わん曲の程度を表す指標とした。

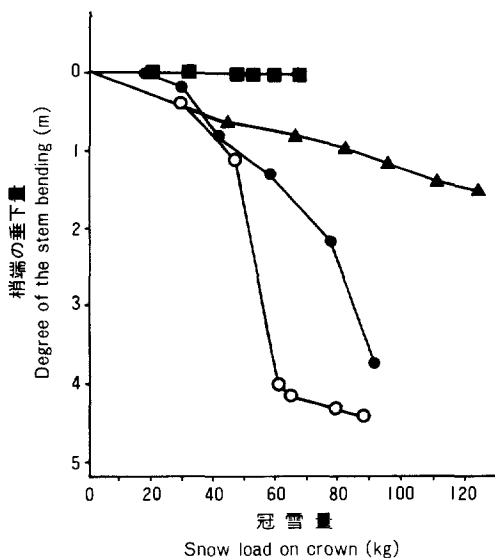


Fig. 5. 冠雪量と梢端の垂下量の関係

Relations between snow load on crown and degree of stem bending. The degree of stem bending was shown by a vertical dropping of tree top.

● Sanbusugi ○ Myokensugi ▲ Bokasugi ■ Murasugi

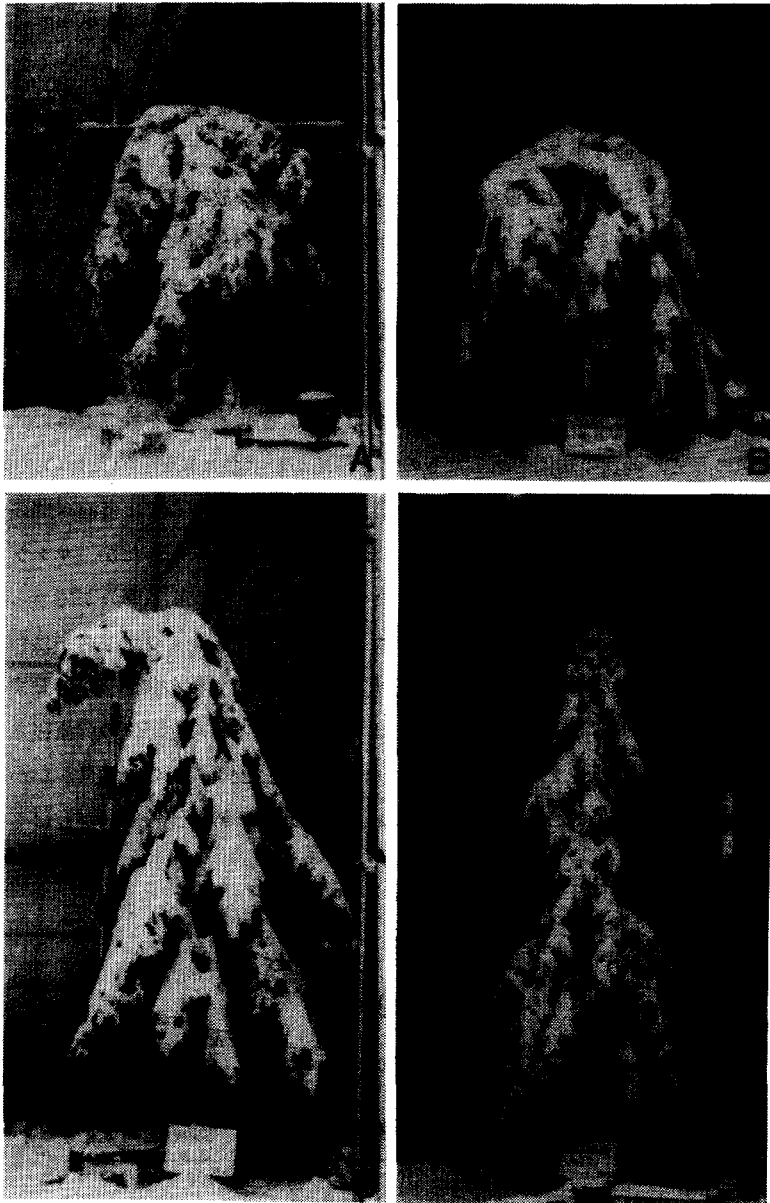


Photo. 3. 人工冠雪実験装置による冠雪被害形態の再現（最終降雪直後）

Different types of snow damages by snow crowning in an apparatus for artificial snow load on crown (After the last snowfall).

- | | |
|--|-------------------------|
| A : サンプスギ（この直後に幹折れ，冠雪量，91.0 kg） | C : ボカスギ（同，124.0 kg） |
| Sanbusugi (After the last snowfall. Snow load on crown, 91.0 kg) | Bokasugi (do. 124.0 kg) |
| B : ミョウケンスギ（同，88.0 kg） | D : ムラスギ（同，66.8 kg） |
| Myokensugi (do. 88.0 kg) | Murasugi (do. 66.8 kg) |

この図をみるとサンプスギ、ミョウケンスギでは、冠雪量が 30 kg を越えるあたりから大きくわん曲し、梢端の垂下量も急速に増加しているのが分かる。とくに冠雪量が 40 kg~60 kg にかけての範囲で、ミョウケンスギの垂下量の増加が著しい。しかし、60 kg 以上の冠雪量ではほとんど変化がみられないのは、わん曲部位が幹を支えている部位 (Fig. 4 の S 点) に接近したためと考えられる。このとき、梢端はすでに支持台を通りすぎて地上に達していた。サンプスギではミョウケンスギでみられるような急激な下垂はみられないが、冠雪量が 30 kg 以上になるとほぼ放物線状に垂下量が増大し、100 kg を越えた付近で幹折れを起こしている。サンプスギの場合、これがわん曲の限界であったと考えられる。一方、ボカスギでは梢端の垂下量は少なく、冠雪量の増加に対しても、サンプスギ、ミョウケンスギのような急激な変化はみられずに、ほぼ直線的に推移している。

冠雪により幹が傾倒・わん曲したときにどの部位でわん曲しているか、つまり、わん曲部位の幹直径と、そのときの冠雪量との関係を示したのが Fig. 6 である。図は冠雪量を独立変数に、わん曲部位の幹直径を従属変数にして、両者の関係を示したもので、梢端がわずかに傾倒しただけのムラスギを除き、高い相関をもつ直線的な関係 (1, 5% 水準で有意) が認められた。そこで、各直線間の有意差を検討したところ (Table 5)、サンプスギとボカスギの間では有意にならなかったが、サンプスギとミョウケンスギ、ミョウケンスギとボカスギの間ではそれぞれ有意差 (1, 5% 水準) が認められ、わん曲部位の幹直径の変化にも品種間差のあることが分かった。サンプスギ、ミョウケンスギはわずかな冠雪量でも幹がわん曲し、冠雪量の増加に伴い幹直径の大きな部位にまでわん曲部位が移動することから、幹がわん曲しやすい性質であると考えられる。このような冠雪量とわん曲部位の幹直径との関係は、幹の材質の強度を示す指標と考えられる。一方、ボカスギは最大 124 kg もの冠雪量がかかっても、わん曲部位は幹直径の比較的小さい幹の上部に限られていたことから、幹が比較的曲がりにくい性質である

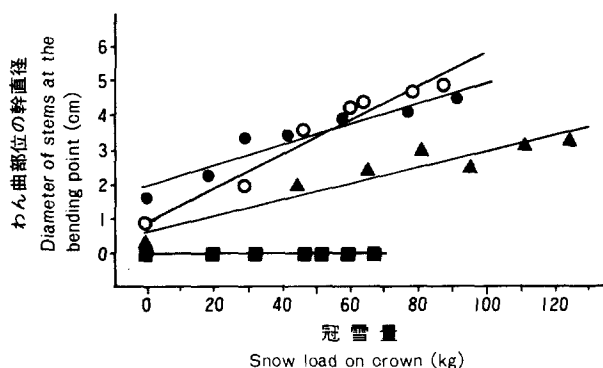


Fig. 6. 冠雪量とわん曲部位の幹直径の関係

Relations between snow load on crown and stem diameter at the bending point.

- Sanbusugi $y = 2.29 + 0.025x$ $r = 0.9466^{**}$
- Myokensugi $y = 1.04 + 0.048x$ $r = 0.9466^{**}$
- ▲ Bokasugi $y = 1.39 + 0.015x$ $r = 0.8950^{*}$
- Murasugi

Table 5. わん曲部位での幹直径と冠雪量の回帰係数のt-検定

T-test of significance on regression coefficient between snow load on crown and stem diameter at bending point

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	2.471*	1.667 ^{NS}
ミヨウケンスギ Myokensugi		3.845**

ことが分かる。

3) 冠雪による樹冠投影面の変形

冠雪が形成されると、梢端部や枝が下垂して樹冠投影面も変化する。Fig. 7 は、各品種ごとの樹冠投影面の変形の様子を模式的に示したものである。この図は、降雪開始前、第2回、第4回、そして最後の第6回の降雪後の樹冠投影面を、樹冠の上部から撮影した写真をもとに、重ね合せたものである。サンブスギ、ミヨウケンスギ、ボカスギは冠雪の発達に伴って投影面は縮小し、投影面の中心が幹の中心部から幹の傾倒方向に向かって徐々に移動してくることが分かる。ミヨウケンスギでは4品種中、最も著しい変形がみられ、降雪の早い段階で縮小・変形している。ボカスギでも投影面は縮小・変形するが、幹の中心部からのズレはわずかであった。ムラスギでは投影面の縮小・変形が最も少なく、しかも正円に近い形で縮小している。

Fig. 8 は冠雪量と樹冠投影面積の関係を示したもので、降雪で形成される受雪面の大きさを表すと考えられる。降雪開始前の樹冠投影面積は品種による差が相当大きい、いずれも冠雪の発達とともに減少する傾向がある。サンブスギ、ボカスギは第5回目の降雪直後に一時的な増加が認められる。サンブスギではこの直後に幹折れが発生しており、ボカスギもこれとよく似た状態にあることから、風等の条件が加わると危険な状態になるものと推察される。

Fig. 9 は、降雪前の、各品種ごとの樹冠投影面積の違いを除くために、降雪前の投影面積を100とした相対樹冠投影面積と冠雪量の関係を示したもので、枝の下垂性を示す指標になると考えられる。相対値で示した投影面の変化では、40 kg の冠雪量で約40%まで急激に減少したミヨウケンスギを除き、サンブスギ、ボカスギ、ムラスギの各品種間にはほとんど差が認められない。

2. 冠雪量にかかわる樹冠特性の解析

1) 樹冠形の解析

選定したスギ4品種について、冠雪害抵抗性の重要な要因と考えられる樹冠形について、とくに樹冠の外形、樹冠頂角、枝の着生角度などの形質に差異が認められるかどうかを比較、検討した。

樹冠形の回帰式：樹冠の外形を数量的にとらえ、品種間差を検討するため、樹冠を構成する主要な枝を選び、梢端から枝先までの垂直距離を独立変数とし、幹から枝先までの水平距離を従属変数とする回帰直線によって各品種の樹冠外形を表した（Fig. 10, 11 及び Table 6, 7）。Fig. 10 は梢端から樹冠長 3 m の範囲内に着生する 14～16 本の枝葉について求めた回帰直線である。各品種ごとの回帰直線の

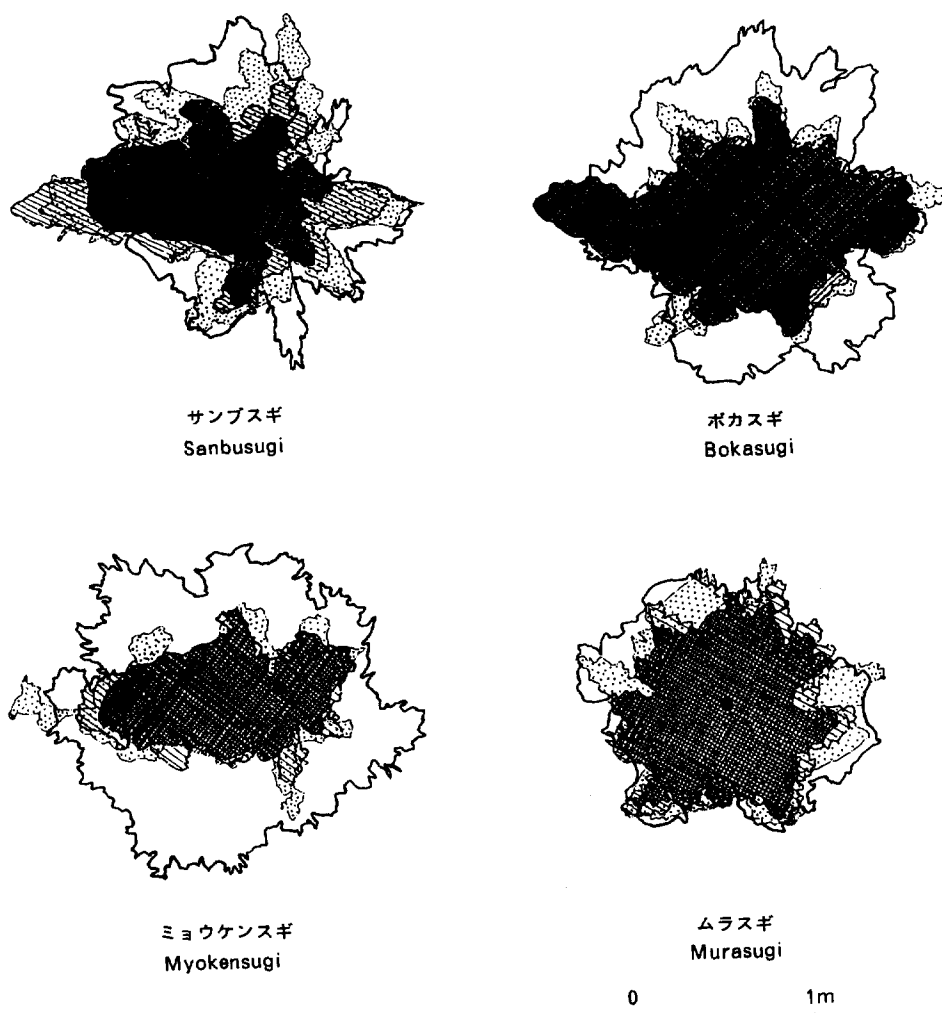


Fig. 7. 冠雪による樹冠投影面の変化
Changes of crown outline in orthographic projection by snow crowning.

- | | |
|---|--|
| 降雪前
Before snowfall | 第 6 回目の降雪後
After the sixth snowfall |
| 第 2 回目の降雪後
After the second snowfall | 樹幹軸
Stem axis |
| 第 4 回目の降雪後
After the fourth snowfall | |

相関係数はいずれも有意（1% 水準）であり、梢端及び幹から枝先までの垂直、水平距離から求めた回歸直線で樹冠の外形をよく表現することができた。しかし、樹冠の細り、つまり樹冠頂角の大きさの指標となる回歸係数について有意差を検定したところ（Table 6）、明確な品種間差は見い出されなかった。そこで、冠雪初期に、梢端の傾倒・わん曲と受雪面の形成に重要な働きをする梢端部 1.5 m の範

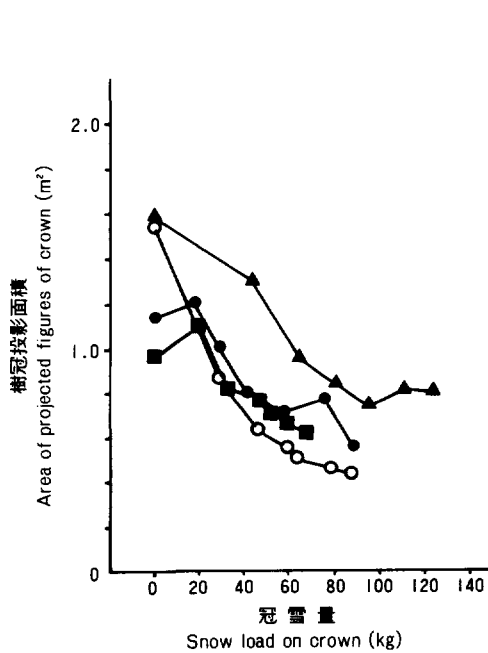


Fig. 8. 冠雪量と樹冠投影面積の関係
Relations between snow load on crown
and area of projected figures of crown.

● Sanbusugi ○ Myokensugi
▲ Bokasugi ■ Murasugi

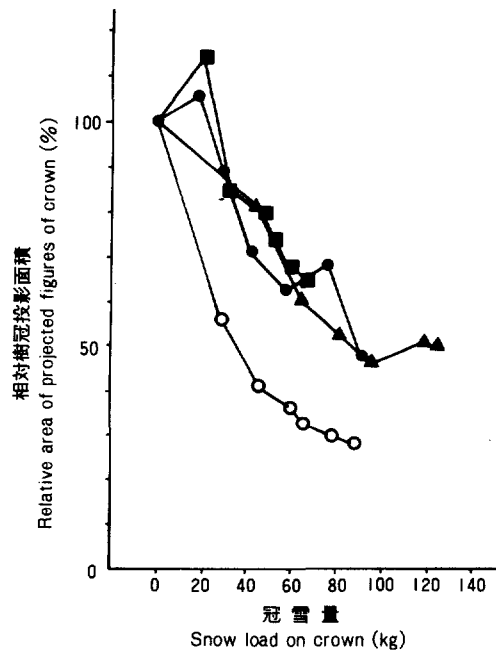


Fig. 9. 冠雪量と相対樹冠投影面積の関係
Relations between snow load on crown
and relative area of projected figures
of crown.

● Sanbusugi ○ Myokensugi
▲ Bokasugi ■ Murasugi

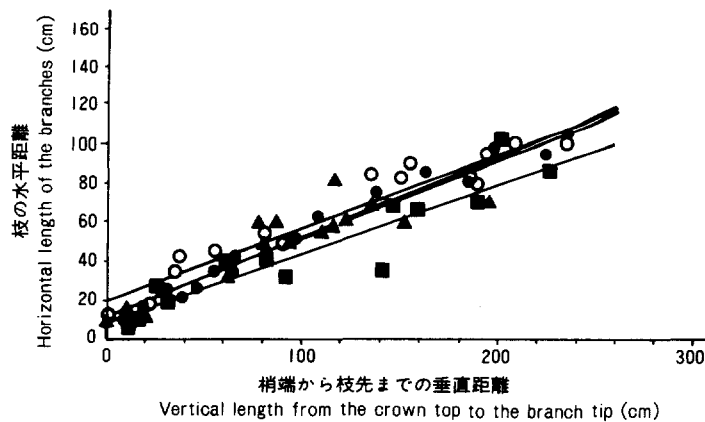


Fig. 10. 樹冠形を示す回帰直線 (梢端部 3 m)

Regression lines of the crown shape in crown length of 3 m from the top.

● Sanbusugi $y=10.7+0.414x$ $r=0.9869^{**}$ ○ Myokensugi $y=20.0+0.374x$ $r=0.9630^{**}$
▲ Bokasugi $y=11.7+0.403x$ $r=0.9475^{**}$ ■ Murasugi $y=9.66+0.349x$ $r=0.9198^{**}$

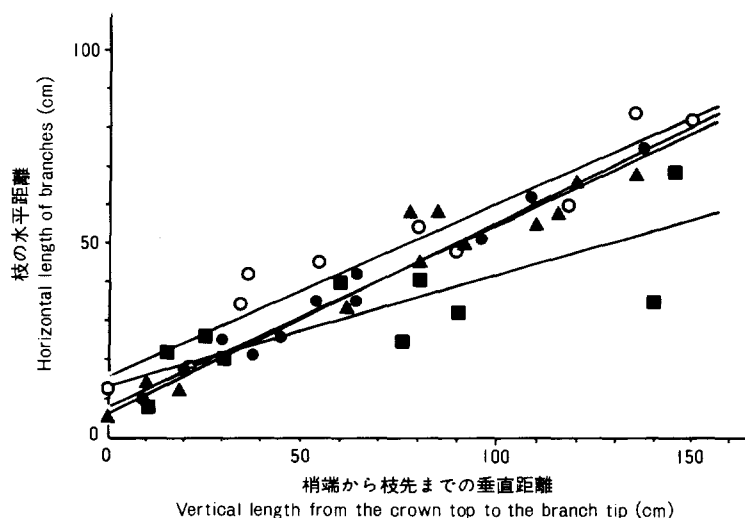


Fig. 11. 樹冠形を示す回帰直線 (梢端部 1.5 m)

Regression lines of the crown shape in crown length of 1.5 m from the top.

- Sanbusugi $y=6.17+0.497x$ $r=0.9821^{**}$ ○ Myokensugi $y=15.5+0.449x$ $r=0.9605^{**}$
 ▲ Bokasugi $y=7.66+0.476x$ $r=0.9610^{**}$ ■ Murasugi $y=12.9+0.290x$ $r=0.8462^{**}$

Table 6. 樹冠形 (Fig. 10) の回帰係数の t-検定

T-test of significance on regression coefficient of crown shape shown in Fig. 10

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	1.226 ^{NS}	0.300 ^{NS}	1.482 ^{NS}
ミヨウケンスギ Myokensugi		0.633 ^{NS}	0.495 ^{NS}
ボ カ ス ギ Bokasugi			0.495 ^{NS}

Table 7. 樹冠形 (Fig. 11) の回帰係数の t-検定

T-test of significance on regression coefficient of crown shape shown in Fig. 11

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	0.710 ^{NS}	0.319 ^{NS}	2.184*
ミヨウケンスギ Myokensugi		0.431 ^{NS}	2.016*
ボ カ ス ギ Bokasugi			2.441*

囲内に着生する 9~11 本の枝葉について, Fig. 10 と同様に, 各品種の回帰直線を求めたものが Fig. 11 である。Fig. 11 でも各回帰直線の相関係数はいずれも有意 (1% 水準) となり, しかも, 各直線の回帰係数にはサンプスギ, ミョウケンスギ, ボカスギとムラスギとの間で有意差 (5% 水準) が認められた (Table 7)。Table 8 は Fig. 10, 11 で示した各品種ごとの直線の回帰係数から樹冠頂角を求めたものである。樹冠長 3 m について求めた樹冠頂角では, ムラスギが最も小さいが, 各品種間に大きな違いはみられない。梢端部 1.5 m について求めた樹冠頂角では, ムラスギは他の 3 品種に比べて明らかに小さいことが分かる。これらの結果から, 冠雪初期の樹幹の傾倒に関係すると考えられる梢頭部 1.5 m の樹冠形は, 冠雪害抵抗性の品種・系統間差を評価するうえで一つの重要な形質になると考えられる。

枝本数・枝密度の垂直分布: Fig. 12 は梢端 3 m の樹冠を 50 cm 幅の水平な層に分割し, 各層内の枝本数と, 樹冠全体について求めた樹冠長 1 m 当たりの枝本数を, それぞれの品種ごとに示したものである。全枝本数, 枝密度ではサンプスギが他の 3 品種に比べて著しく多く, 他の 3 品種間には大きな差は認められない。枝本数の垂直分布をみると, サンプスギは樹冠各層でかなりのバラツキがみられ, ムラスギ, ボカスギでは梢端に多く, 下部ほど少ない傾向がみられる。しかし, 明確な品種間差は認められない。

枝直径の垂直分布: Fig. 13 は各品種ごとの枝直径の垂直分布を梢端からの距離を独立変数に, 枝直径を従属変数にした回帰直線で示したもので, いずれも相関係数は有意 (1% 水準) である。各品種の回帰係数は, ボカスギと他の 3 品種との間で有意差 (0.1% 水準) がみられたが (Table 9), ボカスギを除く 3 品種の間では有意差は認められなかった。ボカスギは他の 3 品種に比べて枝が太く, しかも, 幹の下部に着生する枝ほど他の品種に比べて太いことが分かる。

枝の着生角度: 枝の着生部位と枝先を結ぶ直線が幹軸となす角度を枝の着生角度とし, 各供試木の樹冠を梢端から 1 m の幅で上, 中, 下の 3 層に区分して, 降雪前に正面から撮影した写真から, 各樹冠層ごとに 5~10 本の枝を選んで枝の着生角度を求めた。Table 10 は各品種について樹冠層ごとの枝の着生角度を平均値で示したものである。梢端を含む樹冠上層部は 1~2 年生の枝の占める割合が高く,

Table 8. 回帰係数から求めた樹冠頂角
Crown top angle calculated from regression coefficients

品 種 名 Cultivar	樹冠長 3 m Crown length 3 m from the top	樹冠長 1.5 m Crown length 1.5 m from the top
サ ン プ ス ギ Sanbusugi	22.5°	24.6°
ミ ヨ ウ ケ ン ス ギ Myokensugi	20.5	24.2
ボ カ ス ギ Bokasugi	21.9	25.5
ム ラ ス ギ Murasugi	19.2	16.2

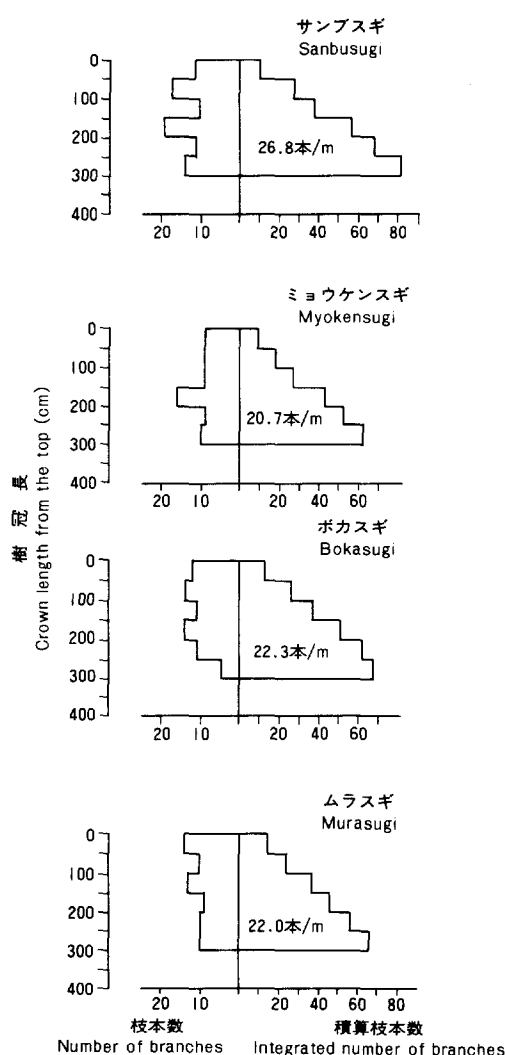


Fig. 12. 枝本数の垂直分布 (梢端部 3 m)
Vertical distribution of the number of
branches in crown length of 3 m from
the top.

とボカスギ、ムラスギの間に違いがみられ、サンブスギとミョウケンスギでは 0~100 cm の樹冠層で緑枝が多い。幹の乾重量についてもボカスギは他の 3 品種に比べて多く、2 倍以上であったが、他の 3 品種については乾重量、及びその垂直分布に明らかな差異は認められなかった。

枝あたり平均葉量の垂直分布: 降雪の捕捉効率が葉量に比例すると仮定すると、葉量が多い枝ほどかかる冠雪荷重も大きいと考えられる。したがって、枝当たりの平均葉量は、枝の直径や強度とともに、枝の下垂性の指標になりうると考えられる。Fig. 15 は梢端から 3 m の樹冠を 50 cm 幅の水平な層に

枝の着生角度は中、下層部に比べてどの品種でも小さく、統計的にも有意な差がみられる。樹冠全体について平均した枝の着生角度はムラスギが最小、ボカスギが最大であった。各樹冠層別に品種間差を検討した結果では (Table 11), ボカスギとムラスギでは上、中、下のすべての層で、また、サンブスギとムラスギの上、中層、サンブスギとボカスギの中、下層、サンブスギとミョウケンスギ及びミョウケンスギとムラスギの中層、ミョウケンスギとボカスギの下層でそれぞれ有意差が認められた。

2) 枝葉量及び幹直径の垂直分布

枝葉量の違いは、すでに述べたように (1-1 項)、降雪の捕捉効率にかかわる主要な要因と考えられる。そこで、枝葉量の垂直分布について、枝、葉、幹の乾重量、枝当たりの平均葉量等に分けて測定し、これらの形質についての品種間差を検討した。

枝、葉、幹の乾重量の垂直分布: 樹冠を梢端から 50 cm 幅の水平な層に分け、それぞれの層の枝、葉、幹の乾重量の垂直分布を Fig. 14 に示す。枝の乾重量は緑色の部分 (緑枝-1, -2) とそれ以外の部分 (褐色枝) に区分して示した。葉の乾重量では、ボカスギが他の 3 品種に比べてとくに多く、梢端から 100~150 cm の樹冠層での違いが著しい。一方、ムラスギでは 0~150 cm の樹冠層の葉の乾重量は比較的少なく、201~300 cm の樹冠層で多い。枝の乾重量の垂直分布についても葉の乾重量とほぼ同じ傾向が認められるが、緑枝の垂直分布にはサンブスギ、ミョウケンスギ

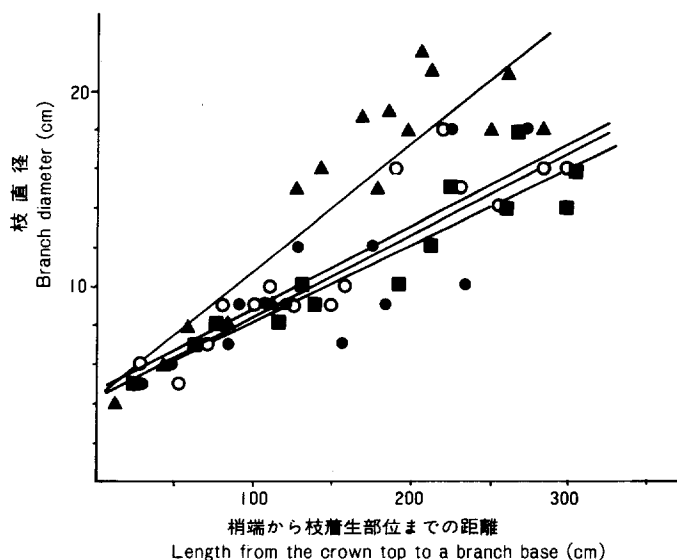


Fig. 13. 枝直径の垂直分布についての回帰直線

Regression lines on the vertical distribution of branch diameters.

- Sanbusugi $y=4.23+0.041x$ $r=0.8299^{**}$ ○ Myokensugi $y=4.58+0.042x$ $r=0.9091^{**}$
 ▲ Bokasugi $y=4.30+0.065x$ $r=0.9116^{**}$ ■ Murasugi $y=4.34+0.039x$ $r=0.9327^{**}$

Table 9. 枝直径の回帰係数のt-検定

T-test of significance on regression coefficient of branch diameter

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サンブスギ Sanbusugi	0.077 ^{NS}	2.187 ^{***}	0.241 ^{NS}
ミヨウケンスギ Myokensugi		2.487 ^{***}	0.403 ^{NS}
ボカスギ Bokasugi			2.823 ^{**}

Table 10. 枝の平均着生角度

Mean angle of main branches

品 種 名 Cultivar	梢頭からの距離 Length from the top (cm)			平均 Mean
	0~100 cm	101~200 cm	201~300 cm	
サンブスギ Sanbusugi	35.4°	42.6°	48.3°	42.1°
ミヨウケンスギ Myokensugi	30.8	55.4	46.8	44.3
ボカスギ Bokasugi	37.0	59.1	65.7	53.9
ムラスギ Murasugi	22.9	39.4	51.4	37.9

Table 11. 枝の着生角度の t-検定

T-test of significance on mean angle of main branches

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	U 0.9872 ^{NS}	0.3374 ^{NS}	3.9594 ^{**}
	M 4.0297 ^{**}	5.1113 ^{**}	4.1336 ^{**}
	L 0.2801 ^{NS}	3.7331 ^{**}	0.5714 ^{NS}
ミヨウケンスギ Myokensugi	U 0.9695 ^{NS}	0.9695 ^{NS}	1.6986 ^{NS}
	M 0.9220 ^{NS}	0.9220 ^{NS}	4.1336 ^{**}
	L 5.8271 ^{**}	5.8271 ^{**}	1.1340 ^{NS}
ボ カ ス ギ Bokasugi	U 2.8885 [*]		2.8885 [*]
	M 4.9251 ^{**}		4.9251 ^{**}
	L 4.9251 ^{**}		4.9251 ^{**}

U: 樹冠上層 (0~100 cm)

Upper part of the crown (0~100 cm from the top)

M: 樹冠中層 (101~200 cm)

Middle part of the crown (101~200cm from the top)

L: 樹冠下層 (201~300 cm)

Lower part of the crown (201~300 cm from the top)

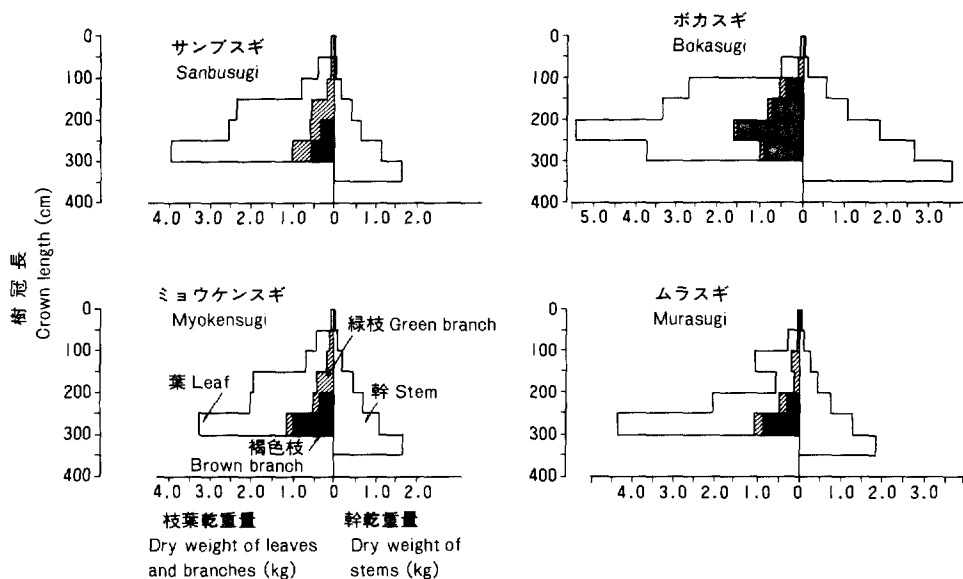


Fig. 14. 幹, 枝, 葉の乾重量の垂直分布 (梢端部 3 m)

Vertical distribution of dry weight of stems, branches and leaves.

分け、各層ごとの枝の平均直径と、枝当たり平均葉量の垂直分布を示したものである。枝当たりの平均葉量は乾重量で示した。樹冠の上層部（0～100 cm）では平均葉量に品種間差は認められないが、下層（101～300 cm）になるほど平均葉量に大きな差異が認められた。サンプスギでは下層での平均葉量が他の品種に比べて少ないが、ボカスギではとくに中、下層の葉量が多く、太い枝に多量の葉が着生していることが分かる。

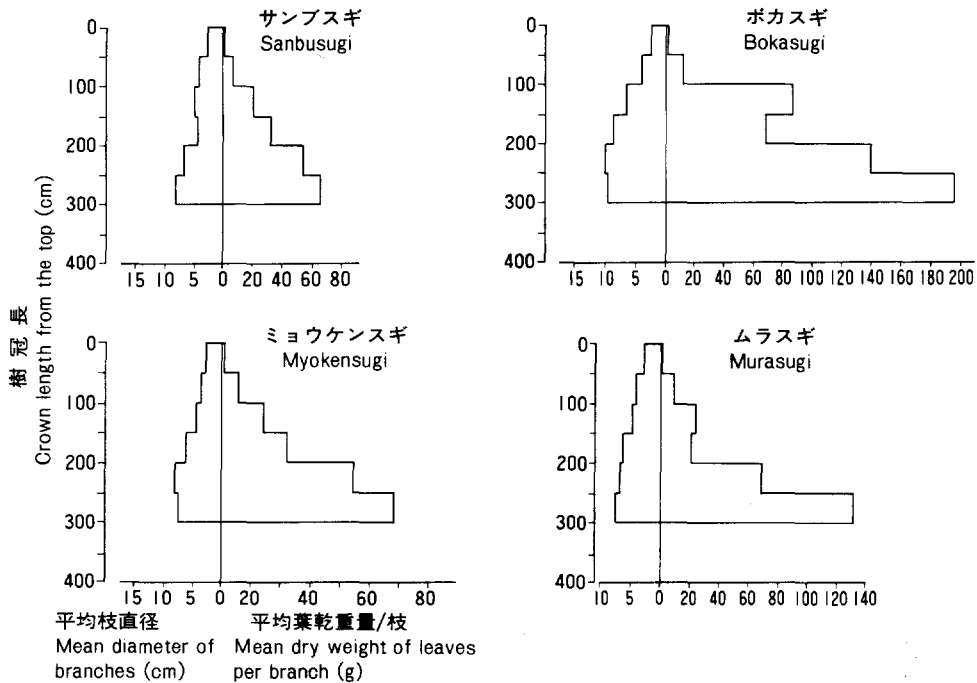


Fig. 15. 枝の平均直径と枝当たりの平均葉量の垂直分布

Vertical distribution of mean diameter of branches and mean dry weight of leaves per branch.

Table 12. 幹直径の回帰係数の t-検定

T-test of significance on regression coefficient of stem diameter

品 種 名 Cultivar	ミヨウケンスギ Myokensugi	ボカスギ Bokasugi	ムラスギ Murasugi
サ ン ブ ス ギ Sanbusugi	1.394 ^{NS}	6.678***	1.971 ^{NS}
ミヨウケンスギ Myokensugi		6.037**	0.744 ^{NS}
ボ カ ス ギ Bokasugi			5.005***

幹直径の垂直分布：幹直径の大きさとその垂直分布は冠雪に対する幹の抵抗力を推定する指標の一つになると考えられる。Fig. 16 は梢端からの垂直距離を独立変数とし、幹の直径を従属変数とする回帰直線を示したものであり、各直線の相関係数はすべて有意（1% 水準）である。しかし、各品種の回帰係数については、ボカスギと他の 3 品種との間でのみ有意差（0.1% 水準）がみられる（Table 12）。ミヨウケンスギの胸高部位での形状比は高かったが（Table 1）、樹冠部ではサンブスギ、ムラスギと統計的に有意な差は認められなかった。

以上、枝葉量に関する測定結果から、選定された 4 品種では、以下のような形態上の特徴が確認され

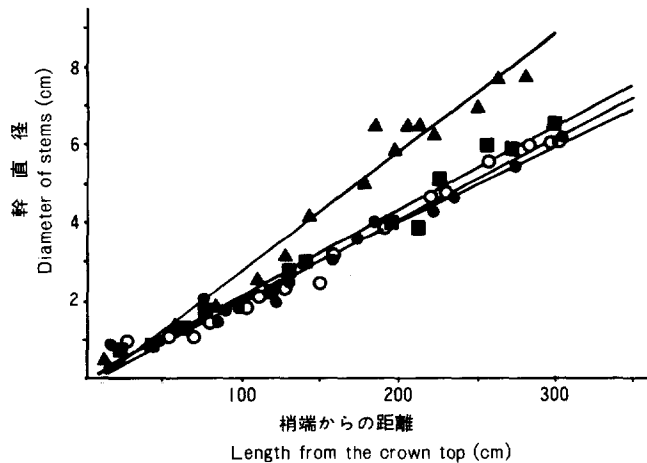


Fig. 16. 幹直径の垂直分布についての回帰直線
Regression lines on the vertical distribution of stem diameters.

- Sanbusugi $y = -0.01 + 0.195x$ $r = 0.9896^{**}$
- Myokensugi $y = -2.03 + 0.210x$ $r = 0.9919^{**}$
- ▲ Bokasugi $y = -3.46 + 0.304x$ $r = 0.9848^{**}$
- Murasugi $y = -1.27 + 0.218x$ $r = 0.9900^{**}$

る。サンプスギでは葉量の割に枝本数が多く、樹冠上部で緑枝が多い。ボカスギでは枝直径、幹直径が大きく、枝と葉の乾重量、枝当たりの平均葉量及び幹の乾重量が多い。ムラスギでは枝数が少なく、樹冠上部の枝と葉の乾重量も少ない。

IV. 考 察

1. 樹冠量と樹冠形

樹冠頂角や枝の着生角は、降雪の捕捉効率に影響する要因の一つと考えられる。四手井²⁰⁾、高橋(敏)²³⁾は模型実験から、頂角が大きいものほど積雪量も多いことを報告している。また、片岡ら¹⁰⁾も、冠雪に対する抵抗性要因として樹冠頂角が小さいことを指摘している。今回の実験で使用了4品種の梢端3mについて求めた樹冠頂角では、統計的に有意な品種間差は認められなかったが、梢端1.5mではムラスギのみ、他の3品種との間で有意差(5%水準)が認められた。降雪の捕捉効率でみるかぎり、ムラスギは4品種の中で最も低い値であり、梢端部での樹冠頂角の小さいことが、冠雪量を少なくする一つの要因として働いているものと推察される。しかし、樹冠頂角に明らかな差異が認められなかったサンプスギ、ミョウケンスギとボカスギの間でも、降雪の捕捉効率を表す回帰直線に品種間差が認められ、また、単位枝葉量、単位葉量当たり冠雪量でみた場合には、サンプスギのみ他の3品種との間に明らかな差異が認められた。これらの結果から、捕捉効率には樹冠頂角のほかに他の大きな要因が関係していると考えられる。

枝の着生角度は、同一個体内でも樹冠の上、中、下の各層で異なり、下層ほど大きい傾向がある。そこで、各層ごとに着生角度をみると品種間に明らかな差異が認められた。このことから、枝の着生角度

は樹冠頂角とともに品種特性を示す指標になりうるものと考えられる。とくに降雪初期の捕捉効率を表す回帰定数の値と、枝の着生角度との間には密接な関係が認められ、枝の着生角度が大きなボカスギは4品種の中でもとくに回帰定数が多い。一方、枝の着生角度が小さいムラスギ、サンプスギではこの値が小さい。しかし、この関係も回帰係数についてみると、必ずしもきれいな関係はみられない。この理由の一つとして、枝の特性には枝当たりの葉量や針葉の形態、あるいは枝の下垂性等にみる力学的強度等を考慮する必要があるため、冠雪が発達するにつれ、両者の間には明瞭な関係が認められなくなるものと思われる。

樹冠頂角、枝の着生角度は降雪初期の捕捉効率にかかわる重要な要因と考えられるが、冠雪が発達し、枝葉が完全に冠雪のなかに埋没した状態では、渡辺ら⁵⁷⁾が指摘しているように、樹冠頂角の違いによる効果はほとんどなくなり、冠雪による樹冠外部形態の変化、つまり樹冠梢端部の傾倒・わん曲により引き起こされる幹のわん曲・受雪面の形成や枝の下垂の程度がより重要になるものと考えられる。

2. 冠雪量と枝葉量

冠雪害の抵抗性要因として枝葉量、とくに葉量や枝密度と冠雪量との関係がこれまでに指摘されている。松田⁴⁰⁾は冠雪量と葉量（乾重）の関係を調べ、両者の間には $\log W_{\text{snow}} = A + B \log W_L$ (W_{snow} : 冠雪量, W_L : 葉量) の関係があることを見だし、降雪重量ごとの冠雪量は葉量によって決まると報告している。また、片岡ら¹⁰⁾は葉量に品種間差が認められ、葉生重量と冠雪量との間に高い相関のあることを指摘しており、嘉戸ら¹⁴⁾も冠雪荷重が葉量に比例することを報告している。渡辺ら⁵⁷⁾⁵⁸⁾は枝葉の切りすかしや枝打ちによる葉量の減少が、冠雪害を軽減するのに著しい効果のあることを、また、中島ら²⁵⁾も梢端部 1.5 m の範囲内にある枝葉量を調節した実験で、枝すかしの効果を認めている。一方、枝本数と冠雪量の関係について、四手井²⁰⁾は模型実験をもとに、樹冠が密になるほど各々の枝葉に付着する冠雪量は減少し、各枝葉が支える冠雪荷重も減少するが、樹冠全体としては冠雪総量が増加することを、それとは反対に、樹冠が疎で着枝数が少ないものほど冠雪量は少ないことを示した。樹冠内に着生する枝本数は 1 m 当たり 20 本程度³⁸⁾といわれている。今回の実験で供試した4品種の中ではサンプスギの枝本数（1 m あたり 26.8 本）はこれに比べてかなり多いが、他の3品種については顕著な差は認められない（20.7～22.3 本/m）。また、サンプスギは枝本数が多い割に葉量がそれほど多くないため、枝あたり葉量はむしろ4品種のなかでは最も少ない。このように、枝本数と冠雪量との間には枝に着生する葉量のほか、針葉の形態や樹冠内での配置等が関係すると考えられるため、枝本数のみを採用あげて論議することには問題がある。今回使用した4品種について、葉量あるいは枝と葉を込みにした枝葉量と冠雪量の関係を降雪の捕捉効率でみると、単木当たりの冠雪量で表した場合には枝葉量の多いボカスギで最大であったが、枝葉量に大きな違いのない他の3品種の間では明確でなかった。単位枝葉量、単位葉量当たりの冠雪量では、サンプスギのみ有意に大きな値となり、他の3品種については互いに有意な差異は認められなかった。単木当たりでみた冠雪量が著しく多いボカスギの特徴は、枝葉量が極端に多いというこの品種の特性¹⁰⁾²¹⁾⁵¹⁾によるものであり、これは、枝葉の構造や樹冠内での配置などよりは、枝葉量、とりわけ葉量が大きく働いていることを示している。一方、葉量が4品種のなかで最も少ないサンプスギは、単位枝葉量、単位葉量当たりの冠雪量では、4品種中最も高い捕捉

効率をもつ品種であり、葉の構造や枝葉の配置などが降雪を捕捉するのにきわめて効率的にできていると考えられる⁶⁾¹⁰⁾⁴⁸⁾。今回使用した4品種については、枝葉量、降雪重量—冠雪量、降雪重量—単位枝葉量あるいは単位葉量当たり冠雪量の関係などから、枝本数の品種間差よりは葉量の差、あるいは、枝葉の形態や構造、樹冠内での配置などの違いが冠雪量の品種間差に大きく働いているものと考えられる。このように、降雪の捕捉効率には、枝や葉の形態や構造で決まる単位葉量、単位枝葉量当たりの捕捉効率と、樹冠を構成する全枝葉量で決まる樹冠全体での捕捉効率の、少なくとも二つの主要な要因を考慮する必要があると考えられる。

3. 枝の形態的特性と枝の下垂性

冠雪したとき、枝が急速に下垂して樹冠全体の投影面積—受雪面—を縮小できるかどうかは抵抗性の主要な要因と考えられる。4品種について、枝の下垂性に関係すると考えられる枝直径、枝平均葉量の垂直分布、緑枝と褐色枝の割合、及びその垂直分布に、品種特性と考えられる差異が認められた。しかし、枝の下垂性の指標とした冠雪の発達による樹冠投影面の変形については、絶対値で表した投影面積では品種間差が認められたが、相対値で表した変化には、ミョウケンスギを除いた3品種間の差異は明らかでなかった。ボカスギは枝密度が高く、枝が太くて下垂しにくい性質²¹⁾といわれ、また、渡辺ら⁵⁷⁾も、冠雪したときジスギに比べてボカスギは枝葉の拡がりに時間を要し、樹冠投影面の変化も拡大したままであったことを報告している。また、原³²⁾は枝の強度を“枝折度”で表し、産地・系統間に有意な差が認められることを報告している。本実験の結果はこれらの報告とは異なるが、これには冠雪量がある一定値を越えてさらに増大しても、枝の下垂はそれ以上には大きくならないこと²²⁾や、きわめて短時間に多量の冠雪が形成され、そのために、品種間差が認められなくなったものと考えられる。一方、投影面の変化からみた枝の下垂性は、樹冠のなかで最も外部にまで出た枝についての性質であり、梢端の傾倒・わん曲のきっかけとなる梢端部の枝の特性を示してはいない。事実、ミョウケンスギで冠雪量がわずかな段階から投影面が急速に縮小しているにもかかわらず、幹が大曲りをしたことからも、投影面の変化のみで枝の特性を捉えることは困難であると考えられる。

4. 幹のわん曲性と幹直径の垂直分布

本実験で典型的な冠雪の被害形態である幹折れ、幹の大曲り、梢端曲りを再現することができた。4品種の中ではミョウケンスギが最も幹曲りを起こしやすい性質があり、サンプスギ、ボカスギは比較的わん曲しにくく、そのため、幹折れを起こす危険性が高いと考えられる。これまでの被害調査でもボカスギ、サンプスギは幹の強度が小さく、幹折れが多発するといわれており¹⁰⁾²¹⁾⁴⁰⁾、今回の実験結果はこれを裏付けたといえる。一方、56豪雪時、兵庫県では被害が比較的少なかったとされるミョウケンスギは⁵⁰⁾、今回の実験では幹の極端な大曲りを起こした。また、これとは別に枝葉量を調節した実験²⁵⁾でも、対照とした無処理の個体で今回の実験同様、大きな幹曲りが観察された。これらのことから、この品種が冠雪にきわめて弱いことが分かる。

幹の傾倒・わん曲性、つまり幹のわん曲しやすさは、冠雪しやすさ—捕捉効率—とともに、冠雪荷重に対する幹の抵抗性の要因になりうると考えられる。今回使用した4品種間で、幹直径の垂直分布に有意な品種間差が認められた。一方、冠雪量とわん曲部位の幹直径との間にも明らかな品種間差が認めら

れ、同じ冠雪量ではサンプスギ、ミョウケンスギはボカスギに比べて幹の太い部位でわん曲することが分かった。幹の強度について今回は調べていないが、既往の報告の中には品種間差が認められている例があり⁴⁾⁸⁾¹⁵⁾¹⁶⁾³⁴⁾⁴⁹⁾⁵³⁾、幹のわん曲性は抵抗性の一つの要因になりうると考えられる。一方、幹のわん曲には梢端部の形質が重要なポイントになると考えられる。降雪初期の冠雪により、梢端部での傾倒・わん曲が始まり、わん曲した樹冠の上面に受雪面が形成され、この受雪面の上でさらに冠雪が発達するといわれる⁹⁾。この梢端部の傾倒を引き起こす要因として、樹冠内での葉量の不均衡な分布や枝の長さの不齊等と被害との関係が論議されている¹⁷⁾⁴³⁾⁴⁶⁾⁴⁷⁾。4品種についてみた梢端部の枝葉量の垂直分布には、梢端から0～150 cmの樹冠層での葉量と、緑枝と褐色枝の割合に品種間差異が認められた。樹冠投影面からみた樹冠の平面的な偏りは、冠雪前と冠雪による変形後との間には必ずしも密接な因果関係は認められなかった。幹が大曲りしたミョウケンスギでは、比較的早い段階ですでに投影面に偏りができているが、これは幹のわん曲による変形である。一方、ほとんど直立したままであったムラスギの投影面の変化は、幹を中心とした正円に近い形でほぼ均等に縮小している。これらのことから、冠雪しても梢端が直立し、わん曲しない性質は抵抗性のきわめて重要な要因であり、これには梢端部の葉量と枝の性質が関係していると推察される。

V. あ と が き

本報告では、雪の捕捉効率、幹の傾倒、及び樹冠投影面の変形を中心に、冠雪による被害形態と関連をもつと考えられる樹冠形に関するいくつかの要因について解析を試みた。今回の実験では供試した品種を樹冠形に特徴をもつ4品種にしぼっているが、それでも、この実験装置により典型的な冠雪の被害形態を再現することができ、いくつかの要因解析を行うことができた。その結果、樹冠形では樹冠頂角、枝の着生角度、緑枝の割合、枝葉及び幹の乾重量、枝直径、幹直径の垂直分布に品種間差が認められ、そのうち、樹冠頂角、緑枝の割合及び枝葉量の垂直分布は抵抗性に結びつく重要な形質であることを明らかにした。また、冠雪量との関係から、降雪の捕捉効率には少なくとも樹冠全体での捕捉効率と、単位枝葉量あるいは単位葉量当たりの捕捉効率の二つの異なる要素のあることを明らかにした。これらのことから、この実験装置を用いて樹冠形に基づく抵抗性の評価を行うことは可能であると考えられる。現在、引き続き品種・系統数及び品種・系統当たりの個体数を多くして実験を行っており、今後、本報告では触れなかった他の要因との関係も含めて、冠雪害抵抗性の要因解析を行う予定である。

引 用 文 献

- 1) 石井 弘・片桐成夫・三宅 登・赤塚金治：小地域内のスギ人工林における冠雪被害分布，日林誌，63，451～457，（1981）
- 2) 石井 弘・片桐成夫・三宅 登：昭和53年1月異常降雪によって冠雪害をうけたスギ人工林の解析，林分内被害の特徴，島根大農研報，16，65～72，（1982）
- 3) 石川県農林水産部：造林木雪害対策技術研究会報告（56豪雪による森林被害状況とこれからの育林技術），pp. 44，（1981）
- 4) 石森英次・南茂利作・土田博澄：雪害木の強度試験（スギ品種別の実大材の強度について），56豪雪による福井地方の森林被害調査報告書（福井県），200～203，（1982）

- 5) 伊藤輝勝：スギ冠雪害抵抗性育種に関する調査，冠雪害防止技術に関する調査（昭和56年度調査の概要報告，福島県林試），12～14，（1982）
- 6) 太田 昇・伊藤克郎・佐々木文夫：＜むごたらしい台湾坊主のツメアト＞冠雪害と育種母材の選出，林木の育種，78，13～15，（1973）
- 7) 大庭喜八郎：林木育種の進め方，林業試験場場報，204，1～4，（1981）
- 8) 片岡健次郎・栗田稔美：スギ地方品種の耐雪性について（予報）一曲げ強度の比較一，日林東北支誌，32，（1980）
- 9) 片岡健次郎・栗田稔美：スギ地方品種の耐雪性について（第一報）一曲げ強度の比較一，昭和56年度林業試験場東北支場研究発表会記録（東北支場年報，23），109～114，（1981）
- 10) 片岡健次郎・村井正文・栗田稔美・遠田 武・井沼正之：スギ在来品種の冠雪量と樹冠形態（予報），94回日林論，721～722，（1983）
- 11) 勝田 柁：スギ在来品種における冠雪被害差異一福井県での調査事例と樹冠形評価の試み，94回日林論，719～720，（1983）
- 12) 勝田 柁・松田 清：冠雪害におけるスギ品種・系統間での被害差異(1)，林木の育種，131，12～17，（1984 a）
- 13) 勝田 柁・松田 清：冠雪害におけるスギ品種・系統間での被害差異(2)，林木の育種，132，20～24（1984 b）
- 14) 嘉戸昭夫・平 英彰：冠雪害の発生機構（Ⅲ）一ボカスギ，マスマスギの冠雪荷重一，96回日林論，447～448，（1985）
- 15) 嘉戸昭夫・平 英彰・中谷 浩：スギ3品種の冠雪害の差異と立木強度，富山県林試研報，11，7～16，（1986）
- 16) 北川 始：耐雪性スギ品種の強度試験(3)，滋賀県森林センター昭和56年度業務報告書，12～14，（1982）
- 17) 窪田 豊：冠雪害の実態について，林木の育種，88，11～13，（1974）
- 18) 栗田稔美・遠田 武：スギ品種系統別の雪害発生の一事例一植栽後11年までの経過から一，日林東北支誌，29，101～104，（1978）
- 19) 佐伯正夫・杉山利治：林木の冠雪害危険地域，林試研報，172，117～137，（1965）
- 20) 四手井綱英：地物の形と冠雪，林試研報，54，122～132，（1952）
- 21) 杉山利治・佐伯正夫：昭和35年12月末の大雪による北陸地方の森林の冠雪害調査報告．林試研報，154，73～95，（1963）
- 22) 高橋善平：冠雪の研究（第一報），スギの冠雪に就て，林試研報，54，140～148，（1952）
- 23) 高橋敏男：冠雪による林木の被害一機構とその分布一，雪と生活，5，22～29，（1953）
- 24) 塚原初男：スギの雪害実態からみた耐雪性育種の可能性，林木の育種，106，20～23，（1978）
- 25) 中島 清・勝田 柁：スギ冠雪害抵抗性の要因解析（Ⅱ）一梢端部枝葉量と樹冠の傾倒の関係一，97回日林論，387～389，（1986）
- 26) 日本林業技術協会：56豪雪による森林被害の実態調査報告書，pp. 111，（1982）
- 27) 新田隆三：56豪雪冠雪害をもたらした気象条件の多様性，94回日林論，727～728，（1983）
- 28) 新田隆三・渡辺成雄・大関義男・庭野昭二：人工冠雪実験の特徴と可能性，95回日林論，311～312，（1984）
- 29) 野表昌夫：豪雪地帯の造林技術（Ⅷ）一スギ人工林の林分密度と雪害一，新潟県林試研報，28，25～34，（1986）
- 30) 野原勇太・大河原昭衛・児玉武男・青山安蔵：スギの耐雪性品種に関する研究（第一報）スギの葉型ならびに樹型と冠雪量について，林試研報，116，75～104，（1963）

- 31) 橋詰隼人: 鳥取大学ひる山演習林のスギ造林地におけるスギカミキリの被害と雪害について, 鳥取大農演報, 13, 71~77, (1981)
- 32) 原 雅継: スギ耐雪性育種の早期検定・枝の耐折性とその容積密度の産地・系統間差異, 林木の育種研究発表会講演集, 66~69, (1972)
- 33) 原 雅継: 雪害とスギ品種の現状から, 林木の育種, 121, 5~11, (1981)
- 34) 原 雅継: スギ品種間の被害と特性, 56 豪雪による福井地方の森林被害調査報告書 (福井県編), 129~199, (1982)
- 35) 平川 昇・今井辰雄: 福島県における異常降雪による冠雪害について (第3報) —被害の発生要因一, 日林東北支誌, 35, 72~74, (1983)
- 36) 福井県: 56 豪雪による福井地方の森林被害調査報告書, pp. 225, (1982)
- 37) 福島県林業試験場: 冠雪害防止技術に関する調査 (昭和 56 年度調査の概要) —豪雪による森林被害の発生機構と今後の対策に関する研究, pp. 24, (1982)
- 38) 藤森隆郎: 枝打ちの技術体系に関する研究, 林試研報, 273, 13~16, (1975)
- 39) 藤森隆郎・清野嘉之・山口 清: 冠雪害に対応した密度管理の検討一岐阜県 56 豪雪被害地調査例一, 94 回日林論, 725~726, (1983)
- 40) 二見鎌次郎・梶谷 孝: 島根県における昭和 53 年 1 月 3 日の異常降雪によるスギ幼壮齡林冠雪害の調査, 島根県林試研報, 31, 1~23, (1981)
- 41) 舟山悦郎・高野栄一・横溝康志・谷沢恒夫・高久健一・小川圭一・伊沢浩一: 八溝地域における冠雪害とスギの品種, 33 回日林関東支論, 61~62, (1981)
- 42) 本間英樹: 村上実験展示林における総合試験, 新潟県林試業務報告 (昭和 57 年度), 83~86, (1982)
- 43) 松田正宏: 冠雪害の実態とその軽減対策, 福井県林試報告, 19, 40~44, (1980)
- 44) 松田正宏: 冠雪害に関する研究 (Ⅱ) スギの冠雪量について, 日林誌, 63, 328~330, (1981)
- 45) 松田正宏: スギ造林木の形状比と冠雪被害形態, 94 回日林論, 723~724, (1983)
- 46) 三代千里: 56 豪雪によるスギ冠雪被害について (第1報), 石川林試研報, 12, 1~21, (1982)
- 47) 三代千里: 56 豪雪によるスギ冠雪被害について (第2報), 石川林試研報, 14, 1~7, (1984)
- 48) 八重樫良暉・草葉敏郎: 冠雪による産地別スギ造林木の被害, 林木の育種, 77, 8~9, (1973)
- 49) 矢野進治: アイチスギの 2 品種における冠雪害と材の強度の関係, 31 回日林関西支論, 117~120, (1980)
- 50) 矢野進治: 冠雪害に関する基礎研究, 兵庫県林試業務報告 (昭和 56 年度), 16~17, (1982)
- 51) 山口 清・中谷和司・戸田清佐・肥垣津登: 56 豪雪におけるスギ造林地の冠雪害実態調査, 岐阜県寒冷地林試研報, 5, 33~71, (1982)
- 52) 山根正伸: 昭和 60 年 2 月に発生した神奈川県における森林の冠雪被害について, 神奈川県林試研報, 13, 35~46, (1986)
- 53) 山本福寿・汰木達郎・今田盛生・荒上和利・中井武司: スギの冠雪害に関する研究 (Ⅱ) —冠雪害の品種間差と材質一, 93 回日林論, 251~252, (1982)
- 54) 汰木達郎・今田盛生・荒上和利・山本福寿・中井武司: スギの冠雪害に関する研究 (Ⅲ) —疎密度と被害一, 日林九支論集, 36, 59~60, (1983)
- 55) 林木育種協会: 福島県・栃木県の雪害調査報告書, pp. 19, (1981)
- 56) 林野庁: 冠雪害抵抗性育種に関する調査報告書, pp. 25, (1983)
- 57) 渡辺成雄・大関義男: 冠雪の研究 (第2報) スギの冠雪比較試験, 林試研報, 169, 121~139, (1964)
- 58) 渡辺成雄・大関義男: 冠雪害の実験的研究, 森林立地, 23 (2), 40~44, (1981)

Experimental Analysis of Resistance to Snow Load on Crown in *Cryptomeria japonica* D. DON.

—Tests by using an apparatus for artificial snow load on crown—.

Kiyoshi NAKASHIMA⁽¹⁾, Ryuzo NITTA⁽²⁾, Takao FUJIMORI⁽³⁾ and Masaki KATSUTA⁽⁴⁾

Summary

The relation between types of damage caused by snow load on crown and morphological features of the tree crown was examined for the purpose of making criteria for selecting and testing resistant cultivars or lines of *Cryptomeria japonica* D. DON by using an apparatus for artificial snow load on crown which enabled the reproduction of unusual snow-precipitation. The materials used for this experiment were four *Cryptomeria japonica* cultivars; Sanbusugi, Myokensugi, Bokasugi and Murasugi.

Typical damage by snow load on crown, such as stem breakage, stem bending and crown-top bending, were reproduced artificially by an apparatus for snow load on crown in Sanbusugi, Myokensugi and Bokasugi, respectively. No damage, however, was caused on Murasugi despite a maximal snow load of 66.8 kg/tree to the crown. It was also noticed that there were linear relations with high correlation coefficients between integrated snowfall and snow load on crown within wide range of 0 to 700 kg of integrated snowfall, and that there were significant differences among cultivars in snow-catching efficiency, which was expected as regression coefficients between integrated snowfall and snow load on crown. The snow-catching efficiency, which was calculated from the relation between integrated snowfall and snow load on crown per kg dry weight of branches and leaves, was significantly high in Sanbusugi, while there were no significant differences among the other cultivars. These efficiency values indicated that the two important factors effecting snow catching efficiency were the morphological structure of the crown and the weight of branches and leaves.

The relation between snow load on crown and stem bending differed remarkably among cultivars. There were no significant differences among three of the cultivars (Myokensugi being the exception) in the change of crown outline in orthographic projection under increasing snow load, which indicated a degree of branch bending due to snow fall. In the morphological features of the crown, there were differences among cultivars in crown-top angle, branch angle, the number of branches in the crown (branch density), the vertical distribution of dry weight of branches and leaves, the ratio of green branches to total branches in dry weight, and the vertical distribution of stem and branch diameters and of dry weight of stem. Among these features of the crown, it was confirmed that crown-top angle, dry weight of branches and leaves and its vertical distributions were the most important factors, which produced a great effect upon snow load on crown.

Received August 18, 1988

(1) Former Silviculture Division (Tropical Agriculture Research Center)

(2) Forest Environment Division (ex. Forest Influences Division)

(3) Forestry Technology Division (ex. Silviculture Division)

(4) Research Coordination Division (ex. Silviculture Division)