

第1節 冠雪害の発生機構

1. 冠雪害の発生に関わる冠雪荷重要因

スギの冠雪害抵抗性は品種によって異なることが古くから知られており、その一因として樹冠の形状や枝の垂下性に関わりがあると考えられてきた(武田, 1958; 渡辺・大関, 1964)。そこで、富山県内の主要スギ品種を対象に冠雪荷重を測定した結果、冠雪荷重は樹冠(葉量)や降雪量などの影響を受けるが、葉量が同じ場合にはいずれの品種間においても顕著な差異が認められなかった(図-11, 表-13)。同様の傾向は中島ら(1984)も認めている。したがって、冠雪荷重に及ぼす樹冠の形状や針葉形などの影響はあまり大きくないことが推測され、冠雪荷重の比較や推定には樹冠の大きさ(葉量)と降雪量が重要な要因になると考えられた。ただし、葉量には品種間差異が認められ、ボカスギはタテヤマスギに比べて相対的に葉量が多い(図-15, 16)ことから、ボカスギの冠雪荷重はタテヤマスギの葉量よりも大きくなると考えられた。また、カワイダニスギは葉の現存量が40 ton/haにも達することから(相浦, 1996)、カワイダニスギの冠雪荷重はボカスギと同等あるいはそれ以上になることが推測される。これらのことから、葉量の大きな品種ほど冠雪荷重も大きくなると考えられた。

また、個体当たりの冠雪荷重と葉量との関係について検討した結果、冠雪荷重は葉量の0.86乗に比例して増加する傾向が認められた。これは、個体当たりの冠雪荷重は葉量が多いほど大きくなるが、単位葉量当たりの冠雪荷重は個体の葉量が大きくなるほど低下することを示している。また、この実験では葉量の大きな供試木は樹冠長も大きい傾向があったことから、単位葉量当たりの冠雪荷重は梢端部で大きく、樹冠の下部ほど小さくなることを示唆される。このような傾向は冠雪荷重を推定する上で重要と考えられた。

なお、冠雪荷重に関してはさらに検討すべき課題も多い。その一つは、冠雪荷重の測定に用いた供試木の葉量は多くが15kg以下であり、実際の被害木のそれに比べて小さかった

ことがあげられる（表-11）。さらに、冠雪荷重は葉量や降雪量が同じであっても大きく変動することが判明した（図-19）ことや冠雪害の危険度が降雪量や降雪回数だけでは説明できないことなどから（佐伯・杉山，1966），冠雪荷重と葉量，降雪量の関係に雪質や気象要因がどの程度影響するのかについて数量的に把握することが必要である。このようなことが明らかになれば，冠雪荷重の推定精度を高めることができるほか，冠雪害の危険地域の推定にも役立つものと考えられる。

## 2. 冠雪害に関わる林木の耐力要因

冠雪荷重を受けた林木の最大耐力は樹幹形，樹幹の強度的性質（樹幹ヤング率），根系の支持力の3つの強度要因から計算される座屈荷重から推定できることが明らかにされている（沢田，1983；中谷・嘉戸ら，1984）。そこで本研究では，まず，これらの3つの強度要因とスギ品種，林齢および個体の大きさ等との関係について検討した。座屈荷重は直径の4乗および樹幹ヤング率に比例し，荷重点高の2乗に反比例しする（(4.1.5)式）。これより，耐力の大きな林木の条件として，①直径が大きいこと，②荷重点高が低いこと，③樹幹ヤング率が大きいことおよび④根系の支持力が大きいことなどがあげられる。林木の平均胸高直径は，地位や林齢が同じであれば，立木密度が低いほど大きくなることが知られており，さらに，直径が大きくなるほど，荷重点高がより低くなる傾向があることが(5.2.15)式からわかる。したがって，林分の冠雪害抵抗性を向上させる森林施業法は，立木を低密度で管理することにより樹幹の耐力を増大させることが最も有効な方法と考えられる。

富山県内に植栽されている主なスギ品種を対象に同齢林分において樹幹ヤング率を測定した結果，品種間に大きな差異があり，なかでもボカスギ樹幹ヤング率が他品種よりも著しく小さいことが確認された（表-16，17，19）。ボカスギは材の強度的性質が小さい品種であることがこれまでも報告されている（佐々木ら，1983）。ボカスギのこのような特徴は植栽環境よりも遺伝的な性質によるものといえる。したがって，樹幹形状が同じであればボカスギの樹幹耐力は他の品種に比べて相対的に小さい傾向があり，これがボカス

ギの冠雪害抵抗性が小さい最も大きな原因と考えられた。さらに、同じボカスギであっても林齢が高くなるほど、樹幹ヤング率が大きくなる傾向が認められた。このような傾向は他のスギ品種や樹種でも認められており、一般的な傾向といえる。この原因は若齢期において樹幹が強度の小さな未成熟材で形成されていたのに対し、加齢に伴って強度の大きな成熟材の割合が次第に増加することによると考えられている。また、ボカスギの樹幹ヤング率の垂直的な分布についてみると、10年生では高さによる変動が小さいが、林齢が高くなるにつれて根元部および梢端部と樹幹中央部と差異が大きくなる傾向があり、25年生では1.7~2.2倍の差異になった（中谷・嘉戸ら、1988）。これは、樹幹耐力の算出にあたって林齢や樹幹部位による樹幹ヤング率の変動を考慮する必要があることを示唆するものである。なお、ボカスギでは樹幹ヤング率と年輪幅の間に明瞭な関係が認められなかったことから（中谷・嘉戸ら、1988）、立木の密度管理などによって樹幹ヤング率を大きくさせる可能性が小さいと考えられた。

本研究では根系の支持力を根元の回転係数で評価することにし、根元の回転係数と林木の大きさとの関係、および根元の回転係数の品種間および林分間差異について検討した。この結果、根系の支持力は林木のサイズが大きいほど大きいこと、林木のサイズが同じであれば品種間に差異が認められなかったが、林分によって顕著な差異があった。本研究では、根系の支持力がどのような因子と関わりがあるかについては明らかにできなかったが、冠雪害によるボカスギの根返り被害は土壌の浅い林分や急傾斜地の林分に多い傾向が認められたことから（嘉戸ら、1993）、土壌の深さや斜面傾斜と根系の支持力との間に密接な関係があることが示唆された。

一般に、冠雪害の形態は幹折れ、幹曲がり、梢端折れなどのように幹の強度に関係する折損タイプの被害と、根返りや傾幹など根系の支持力に関係する根返りタイプの被害とに大別され、若い林では根返りタイプの被害が多い傾向があり、林齢が増すにつれて折損タイプの被害が増加する傾向が認められている（藤森、1987）。そこで、これらの被害形態の違いを力学的な手法を用いて検討した（第4章）。その結果、樹幹形、樹幹のヤング値

や曲げ応力および根系の支持力などの値が得られるならば、被害形態が予測できることが判明した。また、樹幹ヤング率や根系の支持力の小さな林木は根返りタイプの被害を生じる傾向があり、反対に樹幹ヤング率と根系の支持力が大きい場合において折損タイプの被害となることもわかった。また、冠雪荷重の荷重点の位置が高い場合には折損タイプの被害を、反対に低い場合には根返りタイプの被害となる傾向が認められた。このことは着雪体である枝葉の垂直分布の仕方によって被害形態が変化することを暗示している。すなわち、枝葉が梢端のみに分布する場合の被害形態は梢端折れとなり、これよりも枝葉の重心が低くなれば幹折れとなる場合が多く、さらに低くなると根返りタイプの被害に変化すると考えられた。以上のことから、林齢の若い林において根返りタイプの被害の割合が高くなるのは、幹のヤング率や根系の支持力が小さく、かつ樹冠の重心も低いことによると考えられた。

以上のことから、根元の回転係数は、とくに小さな林木において、樹幹耐力を算出する上で無視できない要因であるとともに被害形態を左右する要因と考えられた。

### 3. 冠雪害抵抗性指数

冠雪荷重を受けた林木の樹幹耐力は林木のサイズが大きいほど大きくなるが、同時に葉量も大きくなることから冠雪荷重も大きくなることが予測された。したがって、林木の冠雪害抵抗性指数としては冠雪荷重または樹幹耐力の一方を示すだけでは不十分であり、両者のバランスを表すものが望まれる。そこで、中谷（1991）は冠雪荷重と樹幹耐力の関係からスギ林木が折損するときの降雪量（限界降雪量）を求め、これを冠雪害抵抗性の指数とすることを提案し、遠藤ら（1988）もほぼ同様な試みを行っている。

しかし、限界降雪量を算出するには多くの要因について測定する必要があること、かつ測定にあたって多くの労力を必要とすることから、限界降雪量を冠雪害抵抗性の指数として実用化をはかるには、算出方法をより簡素化する必要がある。本研究ではボカスギを対象に樹高、胸高直径および林齢などから樹幹形、樹幹ヤング率、根系の支持力および葉量の垂直分布などの強度要因を算出し、これらの強度要因から冠雪荷重や樹幹の耐力を計算

することにより限界降雪量を推定する手法を開発した。この手法を用いることにより、異なる林分間、異なる林齢間における個々の林木の冠雪害抵抗性を予測したり、施業による冠雪害抵抗性の変化を把握することができるようになった。ボカスギと同様に他のスギ品種についても樹高、胸高直径および林齢と強度要因との間の諸関係が明らかにできれば、他の品種の冠雪害抵抗性を推定することも可能となるであろう。また、本研究で開発した冠雪害抵抗性の推定法とシステム収穫表などの林分の成長予測システムを併用することにより、冠雪害の防止・軽減を目指した密度管理手法の検討が可能になったと考えられる。

なお、限界降雪量を推定する上で未だ検討を要する問題点も残っている。例えば、限界降雪量が実際の降雪量よりも大きかったにもかかわらず被害が発生したことがあげられる(図-46)。これは冠雪荷重に風圧が加わったことが考えられることから、鉛直荷重と横荷重が同時に作用する新たな力学的モデルの検討も必要と考えられた。今後は限界降雪量の推定精度をさらに向上させることが課題の一つである。とくに、降雪の性質なども考慮に入れた冠雪荷重の推定方法、樹冠形の推定法など冠雪荷重に関わる面での検討が必要と考えられる。

## 第2節 冠雪害の防除対策への提言

冠雪害を防除するためには、①冠雪害の危険な地域を避けて造林すること、②冠雪量が小さくて、かつ樹幹耐力の大きい品種を選ぶこと、③冠雪量を小さくして、かつ樹幹耐力が大きくなるような施業を行うことなどが考えられる。このうち、①については造林を実施する上で重要な課題ではあるが、林木の冠雪害危険度分布図として既に作成されていることから、ここではスギ品種の選択および森林施業の関係から防除対策について検討した。

まず、本研究で取り上げたスギ5品種の冠雪害抵抗性について比較した。スギ葉量の現存量はカワイダニスギとボカスギが最も多く、ついでタテヤマスギであった。リョウワスギとマサヤマスギについては葉量に関する報告がないが、枝下直径が同じ場合における葉量を比較するとこれらの品種はその他の品種に比べて多くはなかったこと、葉の生産性効率

の品種による差異が小さいといわれている（相浦，1997）ことから，成長量が相対的に小さなリョウワスギやマシヤマスギは他の3品種に比べて葉の現存量が小さいことが推測される。したがって，林木サイズが同じ場合における各品種の冠雪荷重は次の順になると考えられる。

カワイダニスギ≧ボカスギ>タテヤマスギ>リョウワスギ≧マシヤマスギ

また，各品種の樹幹ヤング率を比較すると次の順であった（表-16，17，19）。

リョウワスギ≧マシヤマスギ>タテヤマスギ>カワイダニスギ>ボカスギ

さらに，タテヤマスギ，ボカスギおよびマシヤマスギの根系の支持力には差異が認められなかったことから，カワイダニスギやリョウワスギについても顕著な差異がないものと考えられた。これらの結果を総合して考えると，各品種の冠雪害抵抗性は以下の順になると考えられる。

マシヤマスギ≧リョウワスギ>タテヤマスギ>カワイダニスギ>ボカスギ

以上のことから，冠雪害の防除だけを目的とした場合には，葉量が少なくかつ樹幹ヤング率が大きいマシヤマスギやリョウワスギといった品種が推奨される。しかし，リョウワスギやマシヤマスギはボカスギに比べて成長量や挿し木の発根性などの面で劣るとされており，現在のところ造林はごく一部に限定されている。また，タテヤマスギ（実生）はボカスギよりも冠雪害抵抗性が大きく，冠雪害対策上からみると低標高地帯に適する品種と考えられるが，この品種は標高300m以下においてスギカミキリの被害率が極めて高くなることが報告されている（西村，1995）。さらに，近年，県西部の丘陵地帯では冠雪害抵抗性の小さなボカスギの造林が激減し，かわってカワイダニスギの植栽が進められている。この理由は，カワイダニスギがボカスギよりも冠雪害抵抗性が大きいといわれていること，さらにボカスギと同様に成長量が大きくかつ挿し木繁殖が容易なこと等によるものである。しかし，心材部が暗褐色（黒心）であること，枝の付け根から下部の幹にくぼみができて真円でない等の欠点がある。そのほか，25年生以降の人工林がまだ少ないこともあって，この壮齢林よりも高齢の林分における冠雪害抵抗性や成長状態に関する資料が不足してい

るなどの問題もある。以上のことから、スギ品種の選定にあたっては冠雪害抵抗性が大きいという特徴に加えて、成長の良否や虫害の被害などを考慮に入れて総合的に判断する必要がある。

冠雪害危険地帯において新植あるいは再造林を行う場合には、冠雪害抵抗性の大きな品種を選択することが最良の方法ではあるが、既存の造林地においては冠雪害の危険性を軽減する施業が不可欠である。冠雪害の防除するための施業の方法としては、冠雪荷重が小さく、樹幹耐力が大きい林木を育成することが求められる。樹幹耐力を大きくするためには、樹高成長よりも直径成長が大きく、さらに樹幹ヤング率や根系の支持力が大きな（根元の回転係数が小さいこと）林木に育てることが考えられるが、施業によって樹高成長を抑制したり樹幹ヤング率を高めたりすることがあまり期待できないことから、直径成長を促進する施業が中心となるであろう。一般に直径成長は立木密度が低いほど大きくなることが知られており、直径成長を促進するには低い植栽密度や間伐が有効と考えられる。そこで、第6章において、ボカスギの冠雪害に対する間伐の効果について検討した結果、冠雪害抵抗性を高める間伐方法として次のようなことが明らかになった。

- ①間伐率が同じであれば全層間伐や上層間伐よりも下層間伐を採用すること。
- ②選木方法が同じならば間伐率を大きくすること。
- ③間伐時期を早めるほど効果が大きいこと。
- ④樹冠偏倚のものは冠雪害抵抗性が小さいので間伐で除去すること。

そこで、ボカスギのシステム収穫表（嘉戸・田中，1995）と第5章で開発した限界降雪量の推定法を用いて、冠雪害を考慮した地位指数20mと24mの間伐指針を作成した（表-38, 39, 40）。一般に冠雪害が降雪深50cm以上の場合に発生することが多いことから、各林木の限界降雪量が50kg/m<sup>2</sup>以下にならないように立木の密度管理をすることとした。なお、地位指数20mおよび24mは地位を3段階に分けた場合における2等地（中）と1等地（上）にそれぞれ相当し、地位指数24mについては植栽本数が1,500本/haと2,000本/haの場合について示した。とくに植栽本数が2,000本/haの場合については強度の間伐を5回繰り返し

たが、限界降雪量 $50\text{kg}/\text{m}^2$ 以下の林木がかなり生じることになる。したがって、ボカスギの冠雪害の危険性を軽減するためには、1等地よりも2等地に植栽した方が、その後の密度管理が無理なく実施できると考えられた。また、木材生産を中心に考えた場合、表-39、40および41のような間伐を行うと、かなり疎な密度管理になり年輪幅が広がって心持ち正角の生産には適しないので、生産目標は大径材を目指した施業になるであろう。そのためには伐期も70~80年に設定する必要があると考えられた。

冠雪荷重は葉量が多いほど大きくなることから、葉量を減少させることにより、冠雪害抵抗性を向上させることが考えられる。そこで、冠雪害に対する枝打ちの効果を枝打ち直度と枝打ち数年後とに分けて検討した(第6章)。まず枝打ち直後では、樹高の大きな林木の冠雪害抵抗性は強度の枝打ちを行うほど大きくなる傾向が認められた。しかし、樹高10m程度の比較的若い林分では葉量除去率が90%を越えるような実用的でない極めて強度の枝打ちを行わない限り、冠雪害抵抗性を高めることができなかつた。枝打ち後の冠雪害抵抗性の推移について見ると、葉量除去率が50%を越えるような強度の枝打ちを行った場合には直径成長の低下を招き、そのために冠雪害の危険性が多くなることが考えられた。そこで、冠雪害の危険地域では、強度の枝打ちは冠雪害を防除するうえで得策ではないと考えられた。



表-38 地位指数20m、植栽本数2,000本/haにおける間伐モデル

(全て下層間伐)

林齢	本数		平均	平均	平均	材積 (m <sup>3</sup> /ha)	収量指数	平均木	限界降雪量50kg/m <sup>2</sup> 以下の		限界降雪量60kg/m <sup>2</sup> 以下の	
	本数 (本/ha)	間伐率 (%)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	形状比 (m/m)			限界降雪量 (kg/m <sup>2</sup> )	本数 (本/ha)	本数割合 (%)	本数 (本/ha)	本数割合 (%)
15年間伐前	1800		14.7	9.0	61	145	0.56	58	381	21	1001	56
15年間伐後	1350	25	15.6	9.3	60	124	0.48	67	0	0	69	5
20年間伐前	1350		18.6	12.0	65	226	0.60	80	88	6	88	6
20年間伐後	1013	25	19.7	12.4	63	210	0.51	140	0	0	0	0
28年間伐前	1013		24.2	16.0	66	369	0.66	160	8	1	66	7
28年間伐後	810	20	25.3	16.4	65	344	0.58	186	0	0	0	0
38年間伐前	810		29.9	19.8	66	541	0.70	256	0	0	26	3
38年間伐後	689	15	30.8	20.1	65	490	0.64	326	0	0	0	0
50年	689		34.8	23.0	66	706	0.73	180	14	2	65	9

表-39 地位指数24m、植栽本数2,000本/haにおける間伐モデル

(全て下層間伐)

林齢	本数		平均	平均	平均	材積 (m <sup>3</sup> /ha)	収量指数	平均木	限界降雪量50kg/m <sup>2</sup> 以下の		限界降雪量60kg/m <sup>2</sup> 以下の	
	本数 (本/ha)	間伐率 (%)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	形状比 (m/m)			限界降雪量 (kg/m <sup>2</sup> )	本数 (本/ha)	本数割合 (%)	本数 (本/ha)	本数割合 (%)
15年間伐前	1800		16.5	10.8	65	217	0.65	55	479	27	1049	58
15年間伐後	1170	35	17.8	11.3	63	167	0.51	64	0	0	419	36
19年間伐前	1170		20.4	14.1	69	271	0.62	60	359	31	718	61
19年間伐後	878	25	21.4	14.4	67	226	0.52	67	67	8	426	49
25年間伐前	878		25.6	18.0	70	397	0.64	72	184	21	395	45
25年間伐後	702	20	26.6	18.3	69	346	0.57	80	8	1	219	31
32年間伐前	702		31.1	21.7	70	555	0.67	86	92	13	217	31
32年間伐後	562	20	32.3	22.0	68	480	0.59	101	0	0	0	0
41年間伐前	562		37.4	25.4	68	722	0.69	119	0	0	8	1
41年間伐後	449	20	39.0	25.7	66	625	0.61	155	0	0	0	0
50年	449		43.5	28.2	65	830	0.67	148	57	13	0	0

表-40 地位指数24m、植栽本数1,500本/haにおける間伐モデル

(全て下層間伐)

林齢	本数		平均	平均	平均	材積 (m <sup>3</sup> /ha)	収量指数	平均木	限界降雪量50kg/m <sup>2</sup> 以下の		限界降雪量60kg/m <sup>2</sup> 以下の	
	本数 (本/ha)	間伐率 (%)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	形状比 (m/m)			限界降雪量 (kg/m <sup>2</sup> )	本数 (本/ha)	本数割合 (%)	本数 (本/ha)	本数割合 (%)
15年間伐前	1350		17.9	10.8	60	189	0.56	86	181	13	181	13
15年間伐後	1013	25	19.0	11.1	58	160	0.48	107	0	0	0	0
19年間伐前	1013		21.6	13.9	64	257	0.57	90	33	3	181	18
19年間伐後	810	20	22.5	14.2	63	224	0.50	102	0	0	0	0
25年間伐前	810		26.2	17.8	68	378	0.62	89	27	3	130	16
25年間伐後	648	20	27.2	18.1	67	328	0.54	102	0	0	0	0
32年間伐前	648		31.2	21.5	69	509	0.64	96	78	12	78	12
32年間伐後	518	20	32.3	21.8	67	439	0.56	110	0	0	0	0
41年間伐前	518		37.2	25.2	68	654	0.65	120	47	9	111	21
41年間伐後	415	20	38.7	25.5	66	564	0.57	153	0	0	7	2
50年	415		43.2	28.0	65	749	0.63	151	26	6	69	17

## 要 旨

林木の冠雪害は多量の降雪が枝葉に付着・堆積し、その荷重によって林木が折損する代表的な気象災害の一つである。この被害の危険性は、北陸地方、とりわけ富山県の里山で高いことが指摘されている。この被害を防除・軽減するためには、間伐や枝打ちなどにより林木の冠雪害抵抗性を高めることが有効とされている。そのためには、冠雪害に対する林木の抵抗性を評価する指数が不可欠である。従来から形状比（樹高/胸高直径）が冠雪害抵抗性の指数として広く用いられてきたが、近年、冠雪害の発生の有無を形状比だけで説明することができないことが指摘されている。中谷(1991)は冠雪害の発生機構を力学的に解析し、単木の冠雪害抵抗性を評価する新しい指数を提案した。この指数は限界降雪量と呼ばれており、冠雪害が発生するときの降雪量を示すものである。しかし、この限界降雪量を求めるためには、冠雪荷重や林木の耐力に関する数多くの要因を測定する必要がある、その測定には多大な労力を要する。

そこで、本研究では、①単木の樹高、胸高直径および林齢から限界降雪量を容易に推定できるように中谷の手法を改良し、②改良した限界降雪量の推定手法を用いて冠雪害に対する品種の選択、間伐および枝打ちの影響について検討するため、富山県内のスギ人工林を対象に、被害調査、冠雪荷重実験、林木の耐力実験、施業試験を実施した。その結果は以下の通りである。

1. 被害形態は幹折れ、幹曲りなどの折損タイプの被害と傾幹および根返りといった根返りタイプの被害とに大別された。しかし、冠雪害の危険性が高い里山地域に位置するボカスギ人工林の被害の約90%が幹折れであり、他の被害は少なかった。

2. 被害林分における幹折れ率と関係が深い要因は立木密度に深く依存する平均形状比や収量比数などと、立地要因と密接に関係する斜面方位や地形開放度等であった。根返り率と関係が深い要因は平均樹高、斜面傾斜角、土壌の深さおよび斜面方位等であった。

3. 気象条件や立地条件が等しい同一林分内における被害木の形状は健全木と比べてサ

イズが小さくかつ形状比が大きい個体であった。

4. 品種別の同齡林で比較すると、冠雪害はマシヤマスギ林で最も少なく、ついでタテヤマスギであり、ボカスギでは多い傾向がみとめられた。しかし、品種による被害率の差異は林分の平均形状比を用いても説明できなかつた。

5. 冠雪荷重は気温が低下傾向にあり、かつ湿度が高い場合に増大しやすい傾向があつた。冠雪荷重は降雪量の増加に伴って増えるが、その増加率は冠雪量の増加にもなって減少傾向を示した。

6. 富山県内の主要なスギ品種を対象に冠雪荷重を測定した結果、葉量が同じであれば各品種の冠雪荷重には有意な差異が認められなかつた。しかし、林木のサイズが同じであればボカスギはタテヤマスギよりも葉量が相対的に多いので、冠雪荷重も多いことが推測され、これらの差異が両品種の冠雪害抵抗性が異なる一因と考えられた。

7. 葉量が同じであれば冠雪荷重は降雪量が大きいほど大きい傾向を示すが、増加の強度は気象条件によって大きく変動した。そこで、冠雪荷重が最も多かつた期間の資料を用いて、冠雪荷重を葉量と降雪量から推定する式を求めた。

8. 冠雪荷重を受けた林木の最大耐力（座屈荷重）が樹幹形、樹幹ヤング率および根系の支持力から計算出来ることが明らかになった。

9. 樹幹ヤング率の品種や林齡による変動を調べた。その結果、樹幹ヤング率に品種による顕著な差異が認められ、大きな品種としてマシヤマスギが、また小さな品種としてボカスギがあげられた。タテヤマスギ、リョウワスギおよびカワイダニスギの樹幹ヤング率はマシヤマスギとボカスギの中間の性質を持つと考えられた。このような樹幹ヤング率の差異が品種による冠雪害抵抗性の違いの一要因となっていることが考えられた。ただし、同じ品種であっても、樹幹ヤング率は加齡に伴って梢端部と根元部を除いた部位において特に大きくなる傾向が認められた。この結果から、樹幹形が同じであっても、冠雪害抵抗性が林齡によって変化することが推測された。

10. 根系の支持力は個体サイズによって変化し、樹幹の耐力に及ぼす影響は小さなサイ

ズのものほど大きいことがわかった。しかし、個体のサイズが同じであれば品種による差異は認められなかった。また、林木の形状、材のヤング係数、曲げ破壊応力および根元の回転係数などが得られると、根返りタイプの被害かあるいは折損タイプの被害を生じたかの判別ができることがわかった。

11. 冠雪害抵抗性を表す指数として形状比が広く用いられているが、なぜ形状比が冠雪害抵抗性となりうるのかについては明らかになっていない。そこで、形状比（樹高/胸高直径）の力学的な意義と冠雪害の関係について検討した結果、冠雪害抵抗性の指数として用いることができるのは樹幹の細り、樹幹ヤング係数などの個体および林分変動が小さい場合に限られることがわかった。

12. 中谷は冠雪害が発生するときの限界降雪量を推定する方法を提案し、この限界降雪量を冠雪害抵抗性の指数として用いており、この限界降雪量は幹の座屈荷重と冠雪荷重の推定式から求められている。しかし、座屈荷重を計算するためには冠雪荷重や林木の耐力に関する多くの要因が必要であり、これらの要因を求めるには多大な労力を必要とする。そこで、林木の樹高、直径および林齢からこれらの要因を推定するための推定式を求め、林木の限界降雪量をより容易に算出できるように中谷の方法を改良した。

13. ボカスギ林において間伐区と無間伐区の林木の冠雪害抵抗性を限界降雪量により評価した結果、冠雪害に対して適切な間伐が有効であることが実証された。また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成長予測を行い、間伐方法やその強度による冠雪害抵抗性の変化について比較検討した。間伐効果は、間伐強度（材積間伐率）が同じであれば下層間伐が全層間伐や上層間伐に比べて大きいこと、強度の間伐ほど大きいこと、間伐時期が早いほど大きいことを明らかになった。

14. 枝打ち直後の冠雪害抵抗性は、若くて樹高の低い林木で枝打ち効果が小さく、樹高の大きな林木で大きかった。葉量除去率の大きな強度の枝打ちはその後の直径成長を低下させ、冠雪害抵抗性を低下させることがわかったが、葉量除去率が50%以下の枝打ちであれば冠雪害抵抗性を著しく低下させる可能性が小さいと考えられた。

15. 以上を総合すると、スギ人工林の冠雪害の防除対策として、①降雪量や気温などから冠雪害危険地帯区分を行い、その危険地をさけて造林すること、②冠雪荷重が小さくかつ樹幹耐力の大きい品種を選ぶこと、③樹幹耐力を大きくするための間伐指針を作成して密度管理を行うこと、などが必要と考えられた。

## 謝 辞

本論文を取りまとめるに当たり、山形大学農学部教授塚原初男博士には終始、懇切な御指導と御助言をいただいた。また、本論文の校閲を賜った岩手大学農学部教授中村 勉博士、弘前大学農学生命科学部教授卜藏健治博士、帯広畜産大学畜産学部教授土谷富士夫博士、山形大学農学部教授中島勇喜博士には数々の御教示をいただいた。また山形大学名誉教授北村昌美博士には終始温かい御支援と御助言をいただいた。さらに、京都府立大学教授田中和博博士にはスギの成長予測手法について懇切に御指導いただいた。慎んで深謝の意を表す。

富山県林業技術センター平 英彰博士（現新潟大学大学院教授）、中谷 浩博士には本研究の共同研究者として調査や解析に際し多大な協力をいただいた。また、高橋理平博士には本研究の取りまとめにあたって適切なお助言をいただいた。相浦英春氏にはスギの樹幹解析や葉量に関する貴重なデータを提供していただいた。そして、西村正史博士、沢田隆司氏、安田 洋氏、長谷川幹夫氏、岡本敏光氏には研究実施にあたって多くの助言と協力をいただいた。さらに、富山県林業技術センターの多くの上司・同僚には、本研究を遂行の御便宜と野外実験の御協力をいただいた。これらの方々に対して心から感謝を申し上げます。

## 文 献

- 相浦英春：ポカスギ人工林の生産力，富山林業技術センター研究報告1，11-19，1988
- 相浦英春：氷見市鉢木地内に成立するカワイダニスギ若齢林の生産力と生育経過，富山林業技術センター研究報告10，59-68，1997
- 安藤 貴：密度管理，農林出版社，246pp.，1968
- 浅井達弘・菊沢喜八郎・福地稔・水谷栄一：カラマツ人工林の枝打ち試験．北海道林業試験場研究報告 20，45-61. 1986
- Cremer, K. W., Borough, C. J. Carter: Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 12(2), 244-268, 1982
- Cremer, K. W., Carter, P. R., and Minko, G.: Snow damage in Australian pine plantations. *Aust. For.*, 46(1), 56~66, 1983
- 遠藤八十一，大関義男，庭野昭二：冠雪による樹木の折損と樹形についての力学的関係，98回日林論，333-334, 1987
- Ffolliott, P. F., Thompson, J. R.: Snow damage in Arizona ponderosa pine stands. U. S. D. A. For. Ser. Res. Note Rocky Mnt. For. and Range Exp. Stn. No RM322pp., 1976
- 藤森隆郎：枝打ちの技術体系に関する研究，林試研究報告273，1-74，1975
- 藤森隆郎：冠雪害と施業，61年春の被害地調査の結果から，林業技術(12) No. 537，7-10，1985
- 藤森隆郎：冠雪害と林分構造（石川ら：冠雪害－発生のしくみと回避法－，101pp），林業科学技術振興所，30-51, 1987
- 福井県：56豪雪による福井地方の森林被害調査報告書，福井県，225pp.，1982
- 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壮令林の冠雪害の調査，島根県林試研報 31，1-23，1981
- Gill, D: Snow damage to boreal mixedwood stands in northern Alberta, *For. Chron.*

50(2), 70-73, 1974

豪雪地帯林業技術開発協議会：雪に強い森林の育て方，日本林業調査会，138pp.，1984

石橋秀弘：強風下のスギ人工林雪害．雪氷 51：91-99，1989

石井 弘・片桐成夫・三宅登・赤塚金治・高見宗臣：昭和53年1月異常降雪によって被害を受けたスギ人工林の解析，島根大農研報 14，50～59，1980

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(12)，451～457，1981

石川正幸：雪害，380-395，（坂口勝美編：スギのすべて.629pp.，），全林協，1983

石川政幸，新田隆三，勝田 柁，藤森隆郎：冠雪害－発生のしくみと回避法－，101pp.，林業科学技術振興所，1987

苅住昇：樹木根系図説．誠文堂新光社，1121pp.，1979

片岡健次郎，栗田稔美，大原偉樹，森麻須夫：アカマツ保育形式比較試験地の冠雪害，林試東北支場だより，249，1～4，1982

片岡健次郎，村井正文，栗田稔美：スギ在来品種の冠雪量と樹冠形態（予報），94回日林論，721-722，1983a

片岡健次郎・栗田稔美・大原偉樹・森麻須夫：アカマツ保育形式比較試験地の冠雪害，林試東北支場だより 249，1-4，1983b

嘉戸昭夫，平 英彰：冠雪害をうけたボカスギ林の解析，93回日林論，259～260，1982

嘉戸昭夫，平 英彰：冠雪害の発生機構（Ⅲ）－ボカスギ，マスヤマスギの冠雪荷重，96回日林論，447～448，1985

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，富山林試研報11，7-15，1986

嘉戸昭夫，中谷 浩，平 英彰：根系の支持力が冠雪荷重下の立木の耐力に及ぼす影響と被害形態の判別，日林誌 70(7)，301-308，1988

Kato, A.: Snow damage of sugi plantations in Japan. Proc. Japan and New Zealand

symposium on forestry management planning. 137-146, 1989

嘉戸昭夫：樹木の冠雪・着雪調査法（日本雪氷学会北海道支部：雪氷調査法，244pp.），

北海道大学図書刊行会，121-126，1991

嘉戸昭夫・中谷浩・平英彰：ボカスギ林の冠雪害と林木および地形要因の関係．日林誌 7

4(2)．301-307，1992

嘉戸昭夫・平英彰・中谷浩：スギの冠雪量推定．41回日林中支論，89-92，1993

嘉戸昭夫・田中和博：ボカスギのシステム収穫表の成長パラメータ．中部森林研究 45，4

3-46，1997

Kato, A., Nakatani, H.: An approach for estimating resistance of Japanese cedar to

snow accretion damage. Forest ecology and management special issues

(in prep.).

勝田 稯・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，

12-17，1984a

勝田 稯・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，

20-24，1984b

菊地勝弘・大畑哲夫・東浦将夫：降雪現象と積雪現象（基礎雪氷額講座Ⅱ），古今書院，

272pp.，1995

吉良竜夫：樹形のパイプモデル，北方林業 192，69-74，1986

小泉章夫・上田恒司：立木の曲げ試験による材質評価（第1報），木材誌 32(9)，669-676，

1986

小泉章夫：生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究，北大演研報 44(4)，1329-

1413，1987

継田視明・川村恵洋・屋代 真・谷口 謙：スギ造林木の強度，木材誌 30(7)，530-537，

1984



- 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(9)，328-330，  
1981
- 松田正宏：スギ人工林の冠雪害発生機構に関する研究，福井県総合グリーンセンター研報  
8，309-346，1988
- Merkel, O.: Schneebruch im Fichtenbestand bei 40jähriger Auslesedurchforstung.  
Allge. Fortz., 30(3314), 663-665, 1975
- 中島 清・勝田 柁・新田隆三：スギ品種による冠雪被害形態の差異，61年度研究成果選  
集，46～47，林試，1986a
- 中島 清・勝田 柁：スギ冠雪害抵抗性の要因解析（Ⅱ）—梢頭部枝葉量と樹幹の傾倒の関  
係，97回日林論，387～389，1986b
- 中島 清・新田隆三・藤森隆郎・勝田 柁：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—，森林総合研究所研究報告，356, 2-28, 1989
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰・飯島泰男・澤田 稔：スギ造林木の冠雪荷重による樹幹  
の変形と耐力，木材学会誌 30，866～893，1984
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・長谷川益夫・相浦英春・飯島泰男：材木の冠雪害に関する樹木力学  
的研究（第3報）強度的性質の樹幹内分布，富山県林業技術センター研究報告 1，25  
-33，1988
- 中谷 浩：林木の冠雪害に関する樹木力学的研究，富山林業技術センター研究報告 4，  
1-54，1991
- 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
- 新田隆三：冠雪害の発生条件（石川ら：冠雪害—発生のしくみと回避法—，101pp），林  
業科学技術振興所，3-21，1987
- 野表昌夫：多雪地帯の育林技術と雪害軽減効果，森林立地，XXX（1），20-23，1988
- 小野寺弘道・大原偉樹・栗田稔美・片岡健次郎・森麻須夫ほか：異常降雪によって冠雪害

- を受けたアカマツ人工林の解析 (I), 日林東北支誌 39, 100-101, 1987
- Peltola, H., Nykanen, M., Kellomaki, S.: Model computations on the critical combination of snow loading and windspeed for snow damage of scots pine, Norway spruce and Birch sp. at stand edge. Forest ecology and management, 95, 229-241, 1997
- Petty, J. A. and Worrell, R.: Stability Coniferous Tree Stems in Relation to Damage by Snow, Forestry 54, 115-128, 1982
- 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
- 阪上俊郎: タテヤマスギ幼齡林の生産力, 富山林試研究報告 8, 9-16, 1982a
- 阪上俊郎: 16年生タテヤマスギ実生林分とサシキ林分の生産力, 富山林試研究報告 8, 17-27, 1982b
- 阪上俊郎: 高海拔地に植栽されたタテヤマスギの成長と生産力, 富山林試研究報告 10, 16-23, 1984
- 阪上俊郎: タテヤマスギ壯齡林の生産力, 富山林試研究報告 11, 18-24, 1986
- 阪上俊郎: スギの葉の垂直分布 - 3つの分布関数の適合性 - . 33回日林中支講, 191-194, 1985
- 三代千里: 56豪雪によるスギ冠雪被害について I, 石川県林試報 12, 1~21, 1982
- 佐々木 光・角谷和男・瀧野真二郎: スギ36品種の力学的性質, 木材研究 17, 192-205, 1982
- 佐藤啓祐: 樹幹の形態と雪害, 林業技術11(452), 10-13, 1979
- 佐藤啓祐: 枝打ちしたスギ幼齡林に発生した冠雪害の一事例. 日林東北支部会誌 22, 104-108, 1971
- Satterlund, D.: Snow catch by conifer crowns. Water resources research, 3(4), 1967
- 沢田 稔: 風および冠雪による針葉樹幹の変形, 林試北支場研究資料, No. 128, 18pp., 1983

- 四手井綱英：地物の形と冠雪．林試研報 54, 122-139, 1952
- 四手井綱英：雪圧による林木の雪害，林試研報 73, 1～89, 1954
- 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
- 平 英彰：リョウワスギ，ミオスギ，カワイダニスギの樹幹解析について．富山林試研究  
報告 6, 26-60, 1980
- 平 英彰・嘉戸昭夫・中谷浩：スギの根元曲り抵抗性．日林誌 72(1), 27-33, 1990
- 高橋啓二：造林地の冠雪害とその対策（わかりやすい林業解説シリーズ61），日林協，  
1-46, 1977
- 高橋喜平：スギの冠雪に就いて．林試研究報告 54, 140-148, 1952
- 高橋敏男・高橋喜平：地物の大きさと冠雪．林試研究報告，54, 117-121, 1952
- 武田繁後：林木の冠雪害と雨氷害．雪氷 20, 9-14, 1958
- 田中和博：林分表と樹高曲線から将来の林分表と樹高曲線を予測するシステム（シルブの  
森）（木平勇吉：システム収穫表プログラム，198pp.），東京農工大学環境資源学科，  
22-32, 1995
- 田中和博：森林計画学入門 ー1996年版ー，森林計画学会出版局，192pp.，1996
- 谷 誠，阿部敏夫，服部重昭・片岡孝ら：冠雪による折損に樹幹形状が及ぼす影響，96回  
日林論，443-444, 1985
- 富山県林業試験場：富山県主要樹種林分収穫表．33pp.，富山県林業試験場，1965
- 渡辺 宏：新森林航測テキストブック．日本林業技術協会，258pp, 1980
- 渡辺成雄，大関義男：冠雪の研究（第2報），林試研報，No.169, 121-139, 1964
- 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
- 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（Ⅲ）  
ー冠雪害の品種間差異と材質ー，93回日林論，251-252, 1982

矢野進治：冠雪害に関する基礎的研究（I）スギ品種による力学的強度の差異および供試

材料の寸法・形状の検討，兵庫林試研報 22，19-39，1980

矢野進治：冠雪害に関する基礎的研究，兵庫県林試業報，56年度，16～17，1982

矢野進治：スギの品種による違い（豪雪地帯林業技術開発協議会：雪に強い森林の育て方，  
138pp.），日本林業調査会，68-72，1984

依田恭二：森林の生態学．築地書院，331pp.，1971

## Summary

A snow accretion damage to sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) stands is common in Japan, especially in low altitude of Toyama prefecture. An index as a measure of the tree resistance to the snow load is necessary to carry out within silvicultural treatments such as thinning or pruning to reduce the damage. Nakatani (1991) proposed an approach to calculate a critical snowfall that is a new index for measuring the resistance to the damage on individual tree and indicates an amount of snowfall causing the damage.

In this study, the Nakatani's approach was further developed in order to make easier an estimation of the critical snowfall. The effects of selection of the cultivars, thinning and pruning on the damage to sugi stands of Toyama prefecture with respect to tree height, stem diameter and age were evaluated by using the developed approach and consequently the critical snowfall was estimated.

1. Tree damage caused by snow accretion loads on the tree crown was divided into two types; one type was stem failure such as breakage and bending of tree stems, another type was roots failure such as uprooting and leaning. In Bokasugi stands in Toyama prefecture, 90% of damaged trees had stem breakage and the percentage of damaged tree for other types was negligible.

2. The percentage of stem failure in the stands was closely correlated with stand factors such as the mean height/diameter(H/D) ratio of all the trees, the relative yield index (Ry) and site factors such as the slope direction and the exposure. Percentage of uprooting in the stand was closely correlated with mean tree height, inclination on slope and depth of soil.

3. The damaged trees had smaller diameter and larger H/D ratio than undamaged trees in the stands with the same weather and site conditions.

4. There were significant differences in percentage of damaged trees among three sugi cultivars; Bokasugi, Tateyamasugi and Masuyamasugi. Bokasugi was the most sensitive cultivar and Masuyamasugi was the less sensitive cultivar to the snow damage. Tateyamasugi was the middle sensitive cultivar between the other two cultivars. The differences in the percentage of damaged trees among three sugi cultivars could not be explained by the different values of mean H/D ratio.

5. There was a tendency for the snow load accreted on the tree crown to increase its proportion to snowfalls under the conditions of lower air temperature and higher relative humidity. The snow load on the tree crown tended to increase with the dry foliage mass of individual tree, although the increment of the snow load per the dry foliage mass decreased with the dry foliage mass of the tree.

6. No significant difference was found in the snow loads on the tree crown among the seven sugi cultivars (i.e. Bokasugi, Tateyamasugi, Ryouwasugi, Masuyamasugi, Kawaidanisugi and Zasanbo) planted in Toyama prefecture if the effect of the foliage mass of individual tree was eliminated. However, it was observed that the snow loads were larger in Bokasugi than in Tateyamasugi, because the foliage mass of Bokasugi was 10-20% greater than that of Tateyamasugi.

7. The increment of the snow load on the tree crown varied with the weather conditions, although the snow load tended to increase with the snowfall. The empirical equation to estimate the snow load with the dry foliage mass and snowfall was examined by using the data on the snow loads when the snow load per the foliage mass showed the largest values.

8. The mechanistic model of the snow accretion damage for trees assumed that a failure occurred on a tapered column, by receiving intensively an eccentric compressive load of snow accumulated on an asymmetric crown, having a round cross-section with evenly distributed elastic properties. A vertical loading test of trees by pulling them down were carried out at sugi stands to test the validity of the mechanistic model. The result showed that experimental values of the tree resistance to the snow loads coincided with the buckling load of the tree stem. The buckling load was calculated theoretically from the physical characteristics such as the stem form, the modulus of elasticity for the stem and the degree of support for the stem by the roots.

9. Variations of the modulus of elasticity for the stem among five cultivars regarding different ages were examined in order to evaluate the effect against the resistance of the stem. As a result, significant differences among the cultivars were found. Masuyamasugi had larger value of the modulus of elasticity for the stem than bokasugi. Tateyamasugi, Ryouwasugi and Kawaidanisugi showed the intermediate value between Masuyamasugi and Bokasugi in the modulus of elasticity for the stem. The modulus of elasticity for the stem of Bokasugi tended to

increase with tree age, especially at the parts of stem except the stem base and shoot.

10. The degree of support for the stem by the roots changed with tree size and the effect of the degree of support for the stem by the roots on the buckling load of the standing tree increased as the heights of the loading point became lower. There was no significant difference in the degree of support for the stem by the roots among the cultivars even if the tree size of each cultivar is the same. The critical loads for tree uprooting and breakage were estimated from the stem form, the mechanical properties of wood, and the degree of support for the stem by the roots in order to distinguish between uprooting and stem breakage.

11. Although H/D ratio is widely used in Japan, Europe and Australia as an index of resistance for tree to the snow damage, my study did not support this idea. The relation between H/D ratio and the tree resistance to the snow damage were analyzed by using the mechanical model for snow damage. The results showed that we could use the ratio as the index only in the case when the variations within and between the sites for the elasticity of tree stem are small.

12. Nakatani (1991) proposed a new approach for estimating the critical snowfall causing the snow damage by the relation between the buckling load of stem, which were calculated from the physical characteristics, and the empirical equation that estimated snow loads accreted on the crown from the foliage mass and the snowfall. However, it is impossible to measure the physical characteristics without felling trees and further laborious procedure. In the case of applying the critical snowfall to the index as the resistance of a tree to the snow damage, it is necessary to get the data of the physical characteristics easily. In this study, the Nakatani's original approach was further developed in order to make easier a calculation of the critical snowfall for single tree by using empirical equations to estimate the physical characteristics from tree height, stem diameter and age. An evaluation of the developed approach was based on example computations.

13. It was found that the thinning in sugi stands reduced a risk of the snow damage, because the critical snowfall of the average tree size was larger in the thinned stand than in the unthinned stand several years later after the thinning.

Future number and tree height of each diameter class for several Bokasugi stands thinned by various methods and various intensities several years after thinning were simulated by

using the system yield table. Then, the critical snowfalls of trees for those stands were estimated and compared with each other. The results showed that the resistance of individual trees was larger in the stand thinned from low diameter classes than in the stand thinned from above diameter classes and in the stand thinned equally from each diameter class under the such condition as thinning intensity being a constant. In addition, the resistance of individual trees tended to increase with thinning intensity and as the timing of the thinning was early if thinning methods were the same.

14. The effect of pruning to the snow damage immediately after pruning was examined by simulating the relations between the critical snowfall and percentage of the removed branches of individual trees. From this result, it was found that the critical snowfall of the tree, especially mature tree, increased with the percentage of the removed branches. Field examinations suggested that the critical snowfall of individual tree several years after heavier pruning decreased, because heavier pruning lead to reduce the diameter growth of the stem. However, it was considered that the tree resistance to the snow damage did not reduce due to the general pruning below 50% of branches was cut off.

15. In order to prevent trees from the snow damage, the following principles should be considered:

① The site classification should be made based on the snow damage potential regard to the local climate and topography.

② The cultivars having the characteristics of the small snow load on the tree crown and the large resistance of the stem to the snow load should be selected.

③ The stand density should be controlled in order to set a canopy ceiling to the critical snowfall of trees at above the maximum of snowfall in each site.