

スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定と
その応用に関する研究

嘉戸 昭夫

Study on the Approach for Estimating Resistance of Japanese Cedar
to Snow Accretion Damage and its Application

Akio KATO

スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究

嘉 戸 昭 夫

目 次

第1章 序論	2
第1節 研究の背景	2
第2節 既往の研究	2
第3節 研究の目的と方向	5
第4節 調査林分の概況	5
第2章 冠雪害に影響する林木・林分および立地要因	7
第1節 被害形態と林木のサイズの関係	8
第2節 冠雪害と林分要因および立地要因の関係	9
第3節 冠雪害と林木形状の関係	14
第4節 冠雪害と品種	15
第3章 冠雪に影響する要因と冠雪荷重の推定	17
第1節 冠雪の発達と気象要素の関係	17
第2節 冠雪荷重と樹冠要因の関係および冠雪荷重の品種間比較	20
第3節 葉量の品種間比較	23
第4節 スギの冠雪荷重の推定	25
第4章 冠雪荷重を受けた林木の耐力	29
第1節 林木の耐力の評価法	29
第2節 樹幹の強度要因の品種間および林分間比較	32
第3節 根系の支持力の品種間・林分間比較と被害形態の判別	37
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	42
第1節 林木の冠雪害抵抗性指数として形状比および限界降雪量の意義と問題点	42
第2節 ボカスギ林木の限界降雪量の推定法	45
第6章 森林施業による冠雪害の軽減効果	54
第1節 間伐による冠雪害の軽減効果	54
第2節 枝打ちによる冠雪害の軽減効果	61
第7章 総合考察	65
第1節 冠雪害の発生機構	65
第2節 冠雪害の防除対策への提言	67
要 旨	70
謝 辞	71
文 献	72
Summary	75

第1章 序論

第1節 研究の背景

スギはヒノキと並ぶ我が国における最も重要な造林樹種の一つであり、北海道南部から九州までの全国各地に広く植栽されている。このスギ人工林における代表的な気象災害は風害と雪害である。雪害の全気象災害に占める金額の割合を1961～1997年の森林国営保険事業の統計書で見ると10%と低いが、これを成林したとみられる16年生以上の林分についてみると30%にも達している（林野庁，1998）。過去20年間に発生した大きな雪害として56豪雪（1980年12月から81年1月）と61豪雪（1986年3月）があげられるが、これらの被害額は全国でそれぞれ740億円と260億円に達するもので、その大半がスギ人工林における被害であった（石川，1983；石川ら，1987）。このように雪害が森林・林業に及ぼす経済的損失は大変に大きいものがある。

スギ人工林の雪害は雪圧害と冠雪害に大別されている（石川，1983；Kato，1989）。

雪圧害は、積雪中に埋もれた林木が積雪の沈降圧や、斜面上の積雪の移動圧などによって折損したり、根元曲りを生じたりする被害である。したがって、この被害は林木が埋雪し易い環境下で発生するという理由から、積雪の多い日本海側の多雪・豪雪地帯に限定され、かつ15年生以下の幼齢期に多いという特徴がある。雪圧害に関しては、国立林試（現森林総合研究所）、山形大学、各県の林業試験場などで精力的に研究がなされ、その発生機構や防止対策について数多くの研究成果が発表されている。

一方、冠雪害は多量の降雪が一時的に樹冠に付着し、その荷重に耐えられなくなった林木が折損する被害である。この被害は一般に10～30年生の林分に多いといわれているが、70年生以上の林分での発生例も報告されている（藤森，1987）。冠雪害は雪圧害に比べて林齢の高い林分でも発生することから経済的な損失が極めて大きくなる特徴がある。また冠雪害の危険度が全国で最も高い地域は北陸地方とりわけ富山県西部の里山地域とされ、その発生頻度は10年に5回以上といわれている（佐伯・杉山，1965）。これは、樹冠に着雪し易い湿雪が降る回数や一回当たりの降雪量が多いことによるものである。しかし、56豪雪では日本海側から太平洋側までの広い地域で、

さらに、61豪雪では太平洋側の地域を中心に被災したように、通常積雪のない太平洋側の地域であっても数年に1度の大雪によって甚大な災害が起きることがある。また、冠雪害の発生頻度が10年に1回程度の低い地域であっても、林業は収穫までに標準で40から50年を要するため、伐期までの間には冠雪害の危険に何度も遭遇することが推測される。冠雪害に関する研究も国公立の試験研究機関などで多くの研究が行われている。しかし、この被害は突発性の気象災害であるため、被害実態に関する報告が中心となり、未だに発生機構の解明が十分に進んでいない。

近年、森林に対する期待は多様化し、木材生産だけでなく環境保全、水源涵養、保健休養といった公益的機能面が特に重要視されつつある。一般に公益的機能の高い森林は気象災害や生物害に強くかつ蓄積の高い林といわれている。したがって、高度な公益的機能を確保するためには、森林の荒廃を招かないように持続的な森林施業を確立することが必要と考えられる。

以上のことから、国内の林業を振興する上から、また森林の公益的機能を重視する上からも冠雪害の発生機構を解明し、その防除対策を確立することが必要と考えられる。

第2節 既往の研究

冠雪害についての体系的な研究は第二次世界大戦後に開始され、冠雪害の発生機構から防止対策まで幅広い研究がなされ、これらは四手井ら（1954）、高橋啓二（1977）、豪雪地帯林業協議会（1984）、石川ら（1987）などによってとりまとめられている。

これらの結果によれば、林木の冠雪害を未然に回避する方法として、①冠雪害の危険地帯での造林を避けること、②森林施業により林木および林分の冠雪害抵抗性を向上させることおよび③冠雪害抵抗性の高い品種を造林することが考えられている。このうち、②および③の方法を用いて冠雪害を未然に防除しようとするためには、林木あるいは林分の冠雪害抵抗性を定量化することが必要となる。ここでは本論文に関係が深い冠雪害抵抗性に関する研究についてみるにとどめる。

林木の冠雪害抵抗性を表す指数として形状比（樹高／胸高直径）が日本（例えば高橋啓二，1977；石

川ら, 1987), ドイツ (Merkel, 1975), カナダ (Gill, 1974) およびオーストラリア (Cremer et al., 1983) などの各国で広く用いられている。この理由は、冠雪害が発生した林分の実態調査から、形状比と冠雪害の間に一定の関係が認められていること (Cremer et al., 1983; 嘉戸ら, 1992), さらに形状比の算出方法が容易であることなどによるものである。

しかし、形状比が大きくても被害を受けなかった個体や林分が存在したとの報告も多い (高橋啓二, 1977; 石井ほか, 1980; 二見・梶谷, 1981)。これは、冠雪害の発生には、気象要因、立地要因、林木要因などの複数の要因が関与しているため、一つの要因だけでは冠雪害の発生を説明することができないためと考えられる。また、冠雪害の発生には形状比の他に幹偏倚、径級や立木の配置などの因子も影響していることが指摘されている (松田, 1988)。さらに、スギ人工林における冠雪害発生時の形状比 (以下限界形状比と呼ぶ) は一定ではなく、林分の林齢または平均樹高が高いほど大きな値となることが報告されている (佐藤啓介, 1979; 山口ら, 1981; Cremer et al., 1982)。この原因として、林木の耐力が林木の大きさにも関係するためという指摘や幹の強度特性の変化に起因するという指摘がある (石川, 1983; Cremer et al., 1982)。

以上のように被害林分の実態調査から、一般には形状比が大きいほど被害率が高くなる傾向はあるものの、冠雪害の発生を形状比だけでは十分説明することができないことが明らかになってきた。そこで、幹の強度特性に関する調査も実施されるようになり、幹の強度特性がスギ品種によって異なることが示され (山本ら, 1982; 矢野, 1982), 各品種の生育状態や幹の強度特性によって被害形態の差がかなりよく説明された。しかし、被害の発生を説明するには、冠雪量の多少を支配する他の要因についての解析も同時に必要なことが指摘されている (勝田・松田, 1984a, 1984b)。

林木の冠雪害は冠雪荷重とそれを支える幹の耐力との力関係で生じることから、冠雪害の発生機構を力学的な手法により解析しようとする試みが諸外国で行われている (Petty・Worrell, 1981; Peltola et al., 1997)。しかし、Petty・Worrell (1981) の解析では、幹に生ずる応力を一定と仮定しており、現実の立木条件に適應できるものとは考えられなかった。

日本でもほぼ同時期に冠雪害の力学的な解析が行われ、沢田 (1983) は林木の冠雪害を長柱の偏心圧縮による破壊とみなしたモデルを提案した。このモデルでは非対称な樹冠に雪が付着した場合を想定しており、幹が均質な強度的性質をもった円錐台からなり、冠雪が樹冠の重心に集中的に作用すると仮定して力学的な解析を行った。その後、継田ら (1984) や谷ら (1985) もほぼ同様の解析を行っている。筆者ら (中谷・嘉戸ら, 1984) は沢田のモデルの妥当性を立木の荷重試験により検証し、冠雪荷重に対する林木の最大耐力である座屈荷重が幹形、幹の強度特性および根系の支持力から推定できることを明らかにした。

さらに、遠藤ら (1987) は冠雪荷重と樹冠の自重が枝を通して各高さの幹に、さらに幹の自重も各高さの幹に分布荷重として負荷される場合の幹の座屈荷重をエネルギー法を用いて解析した。この解析では、幹形と樹冠形を2つの円錐体で近似し、幹ヤング率を林齢や幹の高さの違いに関わらず一定と仮定した。そして、冠雪荷重が幹の最大耐力 (座屈荷重) に達したときに冠雪害が発生するものとして、このときの降雪量 (以下限界降雪量と呼ぶ) を冠雪害抵抗性の指数として用いた。したがって、降雪量がこの限界降雪量を越えた場合に林木の冠雪害が発生し、降雪量が限界降雪量より小さい場合には冠雪害が発生しないと判断される。ただし、このモデルでは幹形および樹冠形を円錐体と仮定していること、幹の材質を均質なものと仮定しており、現実の林木に近いものとはいえなかった。

その後、中谷 (1991) は現実の幹形で、各高さにおける自重 (幹+枝+葉) および冠雪の重さと幹のヤング率が与えられ、かつ根系の支持力が既知の場合における座屈荷重を求める数値計算法を開発した。さらに、この方法で冠雪害発生時の冠雪量を求め、冠雪量と降雪量の関係式から限界降雪量を算出した。こうして求めた限界降雪量は形状比に比べて林木の冠雪害抵抗性を高い精度で評価できると考えられ、多くのスギ品種やヒノキなどの他の針葉樹にも応用できることが期待されている。ただし、この手法では、冠雪荷重を計算するために個体の葉量が、また幹の耐力を求めるために葉量の垂直分布、幹形、幹ヤング率および根系の支持力などの多くの要因を測定する必要がある。これらの要因の測定には多くの

労力や機材が必要であり、林木を伐倒しないで測定することは困難である。そこで、限界降雪量を冠雪害抵抗性の指数として実用化するためには、冠雪量や幹の耐力に関わる要因を容易に求める手法の開発が必要である。

また、限界降雪量の推定精度を上げるためには、冠雪荷重を精度良く推定することも重要である。冠雪の発達の方に関する研究が1950年代の初めに実施された(高橋敏男・高橋喜平, 1952; 四手井, 1952; 高橋喜平, 1952)。その結果、冠雪荷重をもたらすような異常冠雪は降雪時の気温が+から-に推移したあと0℃より僅かに低い状態が持続し、その間には日射がなく、風も弱い場合に限られることが報告された(高橋喜平, 1952)。ただし、その後、56豪雪では冠雪害が強風下で発生した場合や-3℃以下の低温下でかつ多量の降雪下で発生した場合などが観察され、これまで考えられていたよりも多様な気象条件のもとでも被害が起きることが明らかにされた(新田, 1987)。また外国でも風速3 m以上の条件下で発生することが報告されている(Gill, 1974; Cremer et al., 1983)。その後、冠雪荷重の測定は渡辺ら(1964)に引き継がれ、冠雪荷重のスギ品種間比較が実施された。また、ダグラスモミとホワイトパインを対象に冠雪荷重と降雪量の関係式が求められ、両者はシグモイド曲線で近似された(Satterlund and Haupt, 1966)。松田(1981)は、スギの枝に付着した冠雪を測定し、冠雪荷重と降雪量および葉量の関係式を求めた。その後、高橋喜平(1952)の測定装置に改良を加えて、自然降雪条件下におけるスギ樹冠の冠雪荷重を測定し、冠雪荷重と降雪量の関係が調査された(片岡ら, 1983a; 嘉戸ら, 1985)。しかし、自然降雪条件下での実験では異常冠雪の状態を再現できにくいので、人工降雪装置を開発し(新田ら, 1984)、スギの冠雪荷重に幹の変形などに関する実験(中島ら, 1986a, 1986b, 1989)が実施された。

以上のことから、冠雪荷重に関する研究は開始されてから長期間を経ているが、冠雪荷重の推定式は枝レベルで求められただけで、大きな樹冠を有する一般の林木の冠雪荷重を推定するには不十分と考えられた。

つぎに、冠雪害と森林施業の関係について述べる。冠雪による被害率が立木密度の高い林分ほど大きく

なる傾向がスギだけではなく(石川ら, 1987)、ボンデローサパイン(Ffoliott et al., 1976)、アカマツ(片岡ら, 1982)、ラジアータパイン(Cremer et al., 1983)においても認められており、冠雪害を軽減するうえで間伐・密度管理の重要性が指摘されている。このような傾向が認められるのは、立木密度の影響は樹高に対しては小さいが、密度が高くなるほど胸高直径が小さくなる結果、冠雪害抵抗性が低下したためと考えられている。しかし、降雪環境やスギ品種などの違いに応じて、間伐方法や間伐時期を変えることが求められるが、これらに関する具体的な提言は少なかった。

冠雪害対策として冠雪荷重を小さくすることが有効であることから、枝打ちと被害の関係が検討されたが、適正な枝打ちを繰り返すことにより被害率が低下したとの報告(三代, 1982; 野表, 1988)と通常の枝打ちでは著しい効果は認められなかったとの報告(佐藤, 1971; 石井ら, 1980; 福井県, 1982)があり、未だ結論が出ていない。一口に枝打ちといっても、枝打ち強度によってその効果も変わることが予想される。すなわち、強度の枝打ちを行えば冠雪荷重が小さくなるが、その後は肥大成長が著しく低下するために、それに伴って冠雪害抵抗性も低下することが考えられる。それゆえ、冠雪害に対する枝打ち効果を検討するにあたっては、まず枝打ち直後と枝打ち数年後に分けて、それぞれについて枝打ち強度によって冠雪害抵抗性がどのように変化するかを検討する必要があると思われる。

以上のように、林木の冠雪害に関して様々な方面から調査研究がなされ、林木の冠雪害抵抗性は形状比や幹の強度特性などの個々の要因だけを取り上げただけでは不十分で、その発生機構の全容を明らかにすることができないことや各要因間の影響の程度を比較することも困難であることも判ってきた。このようなことから、冠雪害の発生機構を力学的な手法で解析がおこなわれ、新たな冠雪害抵抗性指数として限界降雪量が提案された。しかし、この限界降雪量を求めるには多くの要素が必要であり、これを冠雪害抵抗性指数として活用するためにはさらに容易に求める方法を検討する必要がある。

また、冠雪害は突発的な気象災害であるために被害時の降雪状況や冠雪量に関するデータが得にくいことや、仮に冠雪害を予測した施業試験地を設定し

でもその場所で冠雪害が起きるとは限らないことなど、野外調査だけでは降雪環境や品種などに応じたきめ細かな冠雪害防除対策を確立できないと思われる。そこで、野外調査と併せてシミュレーションによる検討が考えられる。それに先だて、林木の成長予測法と冠雪害抵抗性評価法を開発しておくことが必要である。

第3節 研究の目的と方向

本研究では、品種の選択、密度管理および枝打ちなどの林木保育によって冠雪害抵抗性の高い林分に誘導するための育林技術を明らかにし、冠雪害危険地帯における施業体系の確立を最終目標としている。そこで、まず、野外調査と併せて力学的な手法により冠雪害の発生機構を解析し、一般的なスギ林木の冠雪害抵抗性を冠雪荷重と幹の耐力の関係から定量化する手法を提案した。つぎに、間伐や枝打ちに関する施業試験やシミュレーションを行い、これらの施業による冠雪害抵抗性の影響を限界降雪量により定量化し、冠雪害の回避を目指した施業法を検討した。

本論文は7章よりなり、第1章は序論とし、第2章ではまず被害形態および被害林木の特徴について述べた。つぎに、富山県において被災林分の調査を行い、冠雪害の発生に関する林木要因、林分要因および立地要因の関係について解析した。

第3章では、実際のスギ樹冠を用いて冠雪荷重を測定し、冠雪荷重と気象要因の関係、冠雪荷重の富山県の主要品種間における差異について検討し、さらに単木の冠雪荷重の推定式を提案した。

第4章では、冠雪荷重を受けた幹の耐力の評価法について検討し、幹ヤング率および根系の支持力が幹の耐力に与える影響および品種・林分による差異について検討した。

第5章では、形状比の冠雪害抵抗性指数としての力学的な意義と問題点について検討した後、冠雪害抵抗性指数として提案された限界降雪量を測定が容易な樹高、胸高直径、樹齢などから直接推定する手法について検討した。

第6章では、冠雪害の回避を目指した間伐や枝打ち法を検討するため、施業試験と併せてシミュレーションを行い、施業法の違いによる冠雪害抵抗性の違いを第5章の限界降雪量の推定法を用いて比較検

討した。

第7章では、冠雪害の発生機構を冠雪荷重と林木の耐力との関連で考察し、つづいて被害防止・軽減するための提言を行い総合的な考察を加えた。

第4節 調査林分の概況

調査は富山県内の北緯36°35′から36°50′，東経137°22′から137°50′の範囲に含まれる12ヶ所と1地区で行った(図-1)。各調査地で行った調査内容の概要を表-1で示し、詳細は以下の通りである。

①荒館

氷見市荒館に位置し、1984年12月29日に冠雪害を受けた25年生のボカスギ林である。標高は50m、斜面方位は北向き、傾斜は22°、土壌はBd型、年平均最大積雪深は40cmであった。立木密度は1,050本/haである。1985年4月に被害調査と毎木調査を行った。また、林分の中で小さな個体から大きな個体まで合計で7本を選び、層厚1mで層別刈り取り法により幹、枝、葉を測定して乾燥重を求めた。その後、層厚1m毎に樹幹解析用の円盤を採取して幹形を調べた。さらに地上高1.3、4.3、7.3、10.3および13.3mの部位の丸太を採取して林齢・部位別の材の強度試験を行った。また、同年5月に幹折れ木18本の幹形調査、荷重試験による根系の支持力の測定および生丸太の強度試験をおこなった。

②仏生寺・神代地区

1985年12月16日から17日にかけての湿雪によって、

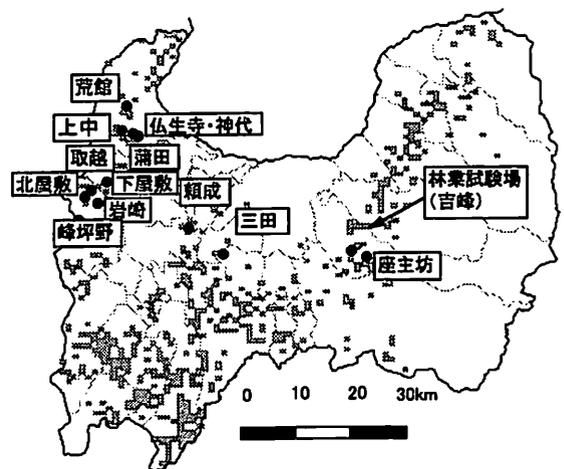


図-1 調査地の位置
●調査地；■スギ林

氷見市や高岡市のスギ林で冠雪害が発生した。なかでも被害の大きかった氷見市仏生寺および神代地区約600haを対象に、ボカスギ林40箇所では被害調査を行った。それらの標高は10～100mで、年平均最大積雪深は約90cmであった。林齢は18～40年生で冠雪害を受け易いとされている齢級を対象とした。これらの林分は電柱材生産を主目的にされたもので、植栽密度は1,000～2,000本/haで富山県における一般的なタテヤマスギ造林地の2,500～3,000本/haよりも少ない。

③蒲田

氷見市蒲田にあるボカスギとタテヤマスギの28年生の混植林分であり、1985年12月16日から17日にかけての湿雪によって冠雪害を受けた。標高は50m、斜面方位は北東向き、傾斜は35°、土壌型はB_{D(d)}で、年平均最大積雪深は約90cmであった。立木密度は1,025本/haで、調査本数はボカスギ16本、タテヤマスギ26本である。

④上中

氷見市仏生寺上中にある25年生のボカスギ林である。標高は130m、斜面方位は北東向き、傾斜は15°、土壌はB_D型、年平均最大積雪深は100cmであった。立木密度は1,050本/haである。幹、枝、葉の層別刈

り取り調査と樹幹解析を行った。

⑤峰坪野

小矢部市峰坪野の33年生のボカスギ林である。標高は100m、斜面方位は北西、傾斜は5°、土壌はB_D型、年平均最大積雪深は100cmであった。1980/81年の豪雪によって冠雪害を受けた。1981年4月に2箇所のプロットを設け、被害調査と毎木調査を行うとともに立木位置図を作成した。また、供試木10本について幹、枝、葉の層別刈り取り調査と樹幹解析を行った。

⑥北屋敷

小矢部市北屋敷のボカスギ間伐試験地で、標高は100m、斜面方位は東向き、傾斜は30°、土壌はB_{D(d)}、年平均最大積雪深は100cmであった。18年生に当たる1984年4月間伐区と無間伐区を隣接して設定し、1994年まで冠雪害および成長について継続調査した。大きな被害は1988年1月と1994年1月に発生した。1984年4月と1988年4月に立木の荷重試験による根系の支持力の測定を実施した。被害木について折損部に近い非破壊部から曲げ試験用の丸太（長さ2.5m）を採取し、実験室において生材の状態での中央集中荷重方式（スパン2m）により曲げ試験を行って求めた。18年生時と22年生時にそれぞれ供試木7本

表-1 調査地の概要

調査地	標高 (m)	林齢 (年生)	スギ品種*	調査・試験	備考
①荒館	50	25	B	被害調査, 強度試験 葉量と幹形調査	第2, 4, 5章
②仏生寺・神代	10～100	18～40	B	被害調査	第2章
③蒲田	50	28	T, B	被害調査	第2章
④仏生寺上中	130	25	B	葉量と幹形調査	第5章
⑤峰坪野	100	31, 33	B	被害調査, 葉量と幹形調査	第2, 5章
⑥北屋敷	100	18～28	B	被害調査, 強度試験 間伐試験, 葉量と幹形調査	第2, 4, 5, 6章
⑦取越	180	10～14	K	枝打ち試験	第6章
⑧岩崎	80	15～38	B	間伐試験	第6章
⑨下屋敷	140	25	K	強度試験	第4章
⑩頼成	100	12, 14	T, B, M	被害調査, 強度試験	第2, 4, 5章
⑪三田	70	20	T, B, M	被害調査	第2章
⑫吉峰 (林業試験場)	230	6, 16 22	T, B, M R	冠雪調査, 強度試験	第3, 4章
⑬座主坊	350	28	K	強度試験	第4章

* T: タテヤマスギ, B: ボカスギ, M: マスヤマスギ, R: リョウワスギ, K: カワイダニスギ

ずつについて幹、枝、葉の層別刈り取り調査と樹幹解析を行った。

⑦取越

小矢部市岩崎取越に位置するカワイダニスギの枝打ち試験地である。標高は180m、斜面方位は北西向き、傾斜は15°、土壌型はB_{D(d)}で、年平均最大積雪深は120cmであった。10年生に当たる1991年4月に試験地を設定し、1994年10月まで被害状況と成長について調査した。幹、枝、葉の重量測定と樹幹解析を1991年4月に1本、1994年10月に4本について行った。また、幹ヤング率を測定した。

⑧岩崎

小矢部市岩崎に位置するボカスギの間伐試験地である。標高は100m、斜面方位は西向き、傾斜は25°、土壌型はB_Dで、年平均最大積雪深は100cmであった。15年生にあたる1973年に2箇所の試験地が設定され、1995年まで被害と成長について継続調査が行われている。

⑨下屋敷

小矢部市下屋敷の25年生のカワイダニスギの林分である。標高は150m、斜面方位は北東、傾斜は5°、土壌型はB_{D(d)}、年平均最大積雪深は110cmであった。32本の供試木について、加力梃子試験（小泉、1987）による立木の非破壊曲げ試験をおこない立木状態のまま幹ヤング係数を測定した。

⑩頼成

砺波市頼成の県民公園内にあるタテヤマスギ（実生）、ボカスギ（挿し木）、マスマスギ（挿し木）の見本園である。標高は100m、斜面方位は北向き、傾斜は5°、土壌型はB_{D(d)}、A層は浅かった。年平均最大積雪深は100cmであった。12年生にあたる1980/81年にいわゆる56豪雪によって冠雪害を受けた。1981年4月にタテヤマスギ0.78ha、ボカスギ1.0ha、マスマスギ1.05haを対象に被害調査、毎木調査を行った。また、各品種6本ずつ計18本について、幹、葉、枝重の測定と幹析解をした。さらに、1982年の8、9月に立木の鉛直荷重試験を行い、その後で供試木32本を持ち帰り実大材の荷重試験を行ない、ヤング率を調べた。

⑪三田

八尾町三田にある1954年植栽のタテヤマスギ、ボカスギ、マスマスギの品種展示林である。標高は70m、斜面方位は東南、傾斜は15°、土壌型はB_{D(d)}

であった。年平均最大積雪深は90cmである冠雪害は1973年12月の大雪で発生した。1974年4月にタテヤマスギ41本、ボカスギ49本、マスマスギ28本について被害調査が富山県林業試験場で実施されたが、公表されなかった。

⑫吉峰（林業試験場）

立山町吉峰にある富山県林業技術センター林業試験場の品種見本園である。標高は230m、斜面方位は北西、傾斜は5°、土壌型はB_{D(d)}、年平均最大積雪深は130cmであった。1983年に6年生の幼齢林で、タテヤマスギ実生とサシキ（上市2号）、ボカスギおよびリョウワスギの樹幹ヤング率や根系の支持力を測定した（平・嘉戸ら、1990）。16年生にあたる1983年9月にタテヤマスギ、ボカスギ、マスマスギを対象に、立木の鉛直荷重試験を行い、その後で供試木を持ち帰り実大材曲げ試験をおこなった。また、22年生時にボカスギ、タテヤマスギ、マスマスギ、リョウワスギを対象に、加力梃子試験（小泉、1987）による立木の非破壊曲げ試験をおこない幹ヤング係数を測定した。1999年1月10日に冠雪害を受けたボカスギとタテヤマスギの12年生林分で被害調査を行った。なお、冠雪荷重試験は全て吉峰の林業試験場の構内で行った。

⑬座主坊

立山町座主坊の県有林にある28年生のタテヤマスギ林である。標高は350m、斜面方位は北東向き、傾斜は23°、年平均最大積雪深は170cmである。1984年9月に、15本の供試木について立木の鉛直荷重試験や根系の支持力試験などを行った後に、供試木を持ち帰り実大材曲げ試験をおこなった。

第2章 冠雪害に影響する林木・林分および立地要因

冠雪害の危険性が全国で最も高いといわれている富山県の里山地帯を中心に被害林分の調査を行った結果にもとづき、本章の前半ではまずスギ林木の主な被害形態とその特徴について述べる。ついで後半では冠雪害の発生に影響する林木・林分要因、立地要因および品種の差異などについて解析し、冠雪害の発生が形状比（樹高／胸高直径）によってどの程度説明できるのかについて検討した結果について述べる。

第1節 被害形態と林木のサイズの関係

林木の冠雪害の発生機構を検討する上で、被害形態を把握し、それぞれの被害形態に関係する林木要因や立地要因を明らかにすることが必要であろう。そこで、冠雪害をうけた林分において毎木調査を行い、主な被害形態とその特徴および被害形態と林木のサイズの関係などについて述べる。

1. 調査方法

冠雪害を受けた12~40年生までの44ヶ所のボカスギ林で毎木調査を行い、胸高直径、樹高および被害形態などについて調べた。全調査林分のうちの40ヶ所が1985年12月に冠雪害を受けた仏生寺・神代地区で調査したものであり、その他は1980/81年に被害を受けた頼成1林分と峰坪野2林分および1984年に被害を受けた北屋敷1林分である。

冠雪害の被害形態は破壊形態や被害部位などによって10種類以上に区分される場合もあるが、梢端の曲がりや折れおよび枝の折れや抜けなどの軽微な被害を除けば、基本的には幹の損傷による幹折れや幹曲りと根系の損傷による根返り（傾倒直後の斜立木を含む）の3つの形態に大別される（Kato, 1989）。

幹折れは、冠雪荷重の増加に伴って幹が変形し、折損する被害である。折損部位の違いによって、さらに梢端折れ、幹折れ（図-2 a）、根元折れ（図-2 b）に区分される。梢端折れはその後の生育に与える影響が小さいことから、被害として取り扱わない場合もある。また、破壊形態の違いによって、幹折れ、幹割れ、幹裂けなどに細分化されることもある。ボカスギでは幹折れに割れや裂けを伴う場合が多い。

幹曲り（図-2 c）は、自力で回復できないほど幹が変形したものの、折損まで至らなかったものである。根元曲り（図-2 d）は冠雪荷重や積雪の沈降による冬季の幹の傾倒や根系の損傷だけでなく、生育期の立ち直りに起因する被害であり、幹曲りと発生機構が異なる。

根返り（図-2 e）は、根系の損傷によって林木が倒伏する被害であり、幹の強度よりも根系の支持力が小さい場合に生ずる。したがって、この被害は重度の根抜けといえる。また、樹体は倒伏しないまでも根元から大きく傾いたものを傾幹または根浮きなどと呼んでおり、これらも根返りの一つといえる。



図-3 被害形態別の本数割合

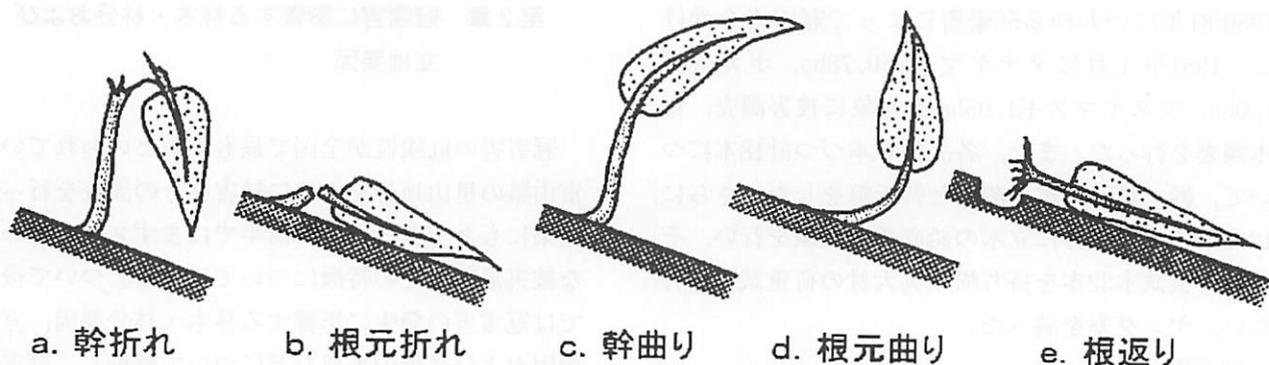


図-2 スギ冠雪害の主な被害形態

豪雪地帯の若い林では根元割れがしばしば認められる。これは根元曲りにそって割れが生じるもので、折損させようとする力が根元付近に加わった幹折れの一つと考えられる。

2. 結果と考察

44カ所のボカスギ林における全被害木に占める被害形態毎の本数割合を比較すると、発生割合が最も大きいのは幹折れで、全体の87%であった(図-3)。幹曲りの割合は12年生の林分で90%を越えたものの、他の林分では発生頻度が低かった。これまでの報告でも若い林に幹曲りの被害が多い傾向が報告されている(二見・梶谷, 1981; 藤森, 1987)。根返りの割合は林分による変動が大きく、被害木の半数を占める林分があった反面全く発生しなかった林分も多かった。この原因として、根返り被害は林木要因の他に、土壌や斜面の傾斜度などの立地要因の影響を大きく受けるためと考えられた。なお、本調査では15年生未満の林分が少なかったこともあり、幼齡林の被害形態の特徴を把握できなかったが、少なくともIV齡級以降のボカスギ林分では被害形態と林齡の間に明瞭な関係が認められなかった。

林分の平均胸高直径が大きくなるのに伴って各被害形態別の平均直径も大きくなるが、同一林分内では健全木の平均直径が平均直径よりも大きい傾向が見られた(図-4)。根返り木は健全木より大きい場合と小さい場合とがあり、明瞭な傾向が認められなかった。幹折れ木や幹曲がり木の平均直径は健全木や根返り木より小さい傾向が認められた。以上のことから、平均よりも大きな個体が被害を受けにくく、平均よりも小さな直径の個体が幹折れや幹曲がりなどの被害を受ける傾向があり、林木のサイズと被害形態の間に一定の関係があることが判った。このように同一林分内の優勢木で被害が少なく、中庸木や劣勢木で被害が多い傾向がこれまでも報告されている(高橋啓二, 1977)。

第2節 冠雪害と林分要因および立地要因の関係

冠雪害の発生には気象、立地、林分など複数の要因が関与していることが指摘されている(佐伯・杉山, 1965; 石川ら, 1987)。気象要因がほぼ等しい地域においては冠雪害の発生には立地要因や林分要因などがより大きく影響するものと考えられる。また、スギの冠雪害は幹折れ・幹曲りなどの幹の損傷

にともなうものと、根返り・傾幹といった根系の損傷に起因するものに大別されるが、このような被害形態の違いは発生機構の差異に起因するものと推測される。

そこで、ボカスギの造林率が比較的高くかつ立地の変化に富む地域を対象に、幹折れおよび根返りの発生と林分要因および立地要因の関係について検討を行った。

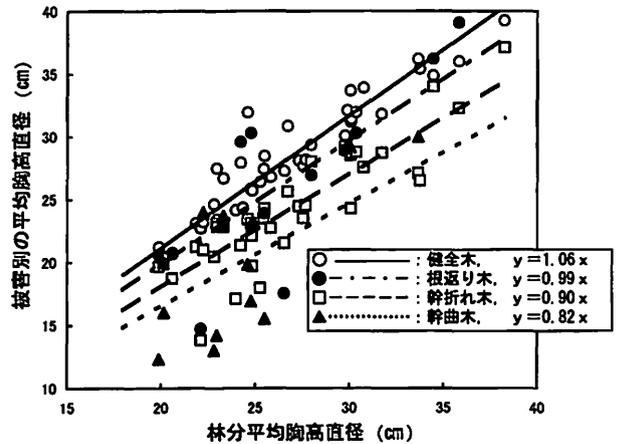


図-4 林分の平均胸高直径と被害別の平均胸高直径の関係

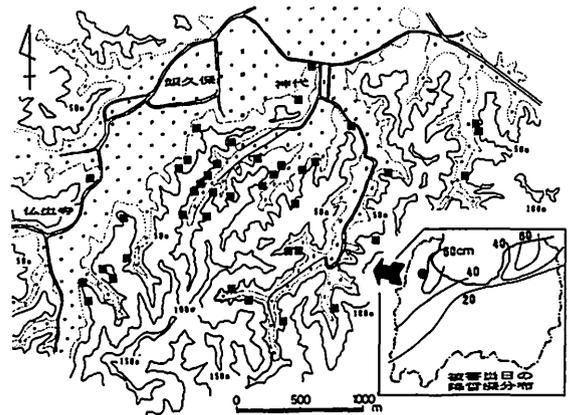


図-5 ボカスギの冠雪害調査林分の位置と降雪分布
■：調査地

1. 調査地と方法

(1)調査地

調査地は仏生寺・神代地区の約600ha内に点在する40箇所のボカスギ林分である(図-5)。調査林分の大きさは一辺が樹高にほぼ対応するように20×20mを基本としたが、面積の小さな林分11箇所では20×15mとした。それらの標高は10~100mで、その平均値は36mと低い。林齢は18~40年生で冠雪害を受け易いとされている齢級(石井ら, 1981; 高橋1977)を対象とした。これらの林分は電柱材生産を主目的に植栽されたもので、植栽密度は約1,000~2,000本/haで富山県における一般の造林地2,500~3,000本/haよりも少ない。

(2)調査方法

無被害地から激害地までを含むように調査林分を選定し、胸高直径と被害形態の有無について毎木調査した。各調査木の樹高は、直径階毎に数本ずつ樹高を測定して得た樹高曲線から推定した。被害形態は幹折れ(幹の割れ, 裂けも含む), 幹曲り, 根返りの3つに区分した。

各調査林分の幹折れ木の本数百分率と根返り木の本数百分率(以下幹折れ率および根返り率とよぶ)を従属変量に、林分および立地要因を説明変量として、数量化I類により解析した。林分要因として林齢, 平均樹高, 平均胸高直径, 平均形状比(個体の形状比を平均した値), 立木密度および収量比数(タテヤマスギの密度管理図より求めた)を、また立地要因としては斜面方位, 地形開放度, 斜面傾斜角, 土壌(A層)の深さをとりあげた。なお, 地形開放度(渡辺, 1980)とは周囲がその地点より高い山で囲まれていない開放角度(水平角)のことで、この値が180度以下であれば谷状あるいは凹地形, 180度では平衡斜面, 180度以上の場合は尾根状あるいは凸地形と見なすことができる。なお, 平均形状比, 平均樹高, 平均胸高直径を同時に解析に用いた場合には3者がいわゆる閉じた関係になるので、平均形状比を入れて平均樹高と平均胸高直径をはずした8要因の場合と平均樹高と平均胸高直径を入れた9要因の場合について計算した。

2. 結果と考察

(1)被害状況

聞き取り調査によると、被害は1985年12月17日の午前中に発生した。調査林分に最も近い伏木測候所

(調査地より9km東側で富山湾沿いにある)における被害当日の気象状況は図-6のとおりである。降雪は16日の夕方から始まり、17日午前9時までの降雪深は58cmで、これを降水量に換算すると55mmであった。この間の気温は0℃前後で推移しており、湿雪により冠雪害が発生したものとみられる。10分間の最大風速は3~8m/sで降雪中としては強かった。風向は17日午前1時までが南~南西であったが、その後、北~北東に変化した。幹折れ木の本数割合は総被害木の90%を占めた。幹曲りと根返りのそれはそれぞれ3%, 7%と少なかった。ボカスギの典型的な被害は割れや裂けを伴った幹折れとされているが(杉山・佐伯, 1963), この調査でも同様の傾向が認められた。

(2)幹折れの発生に關する要因

幹折れ率と林分および立地要因との関係について解析し、その結果を表-2に示した。なお、幹曲りは幹が損傷する点が幹折れと同じであり、かつ被害

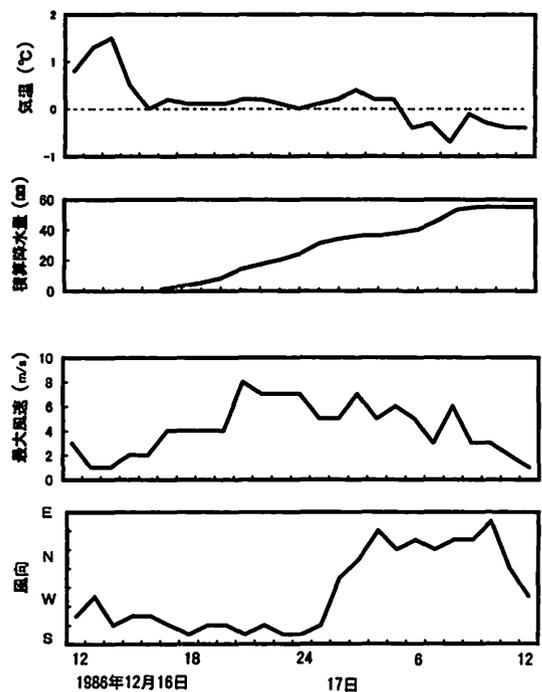


図-6 仏生寺・神代地域における冠雪害発生時の気象(伏木測候所)

率も小さかったので、以下の解析では幹折れに含めた。平均形状比を含む場合を解析1、平均樹高と平均胸高直径を入れた場合を解析2とした。この結果、幹折れ率の変動のうちの約60%は平均形状比を含む8要因または平均樹高を含む9要因で説明された。

解析1と2を通して、偏相関係数が最も高くかつレンジも大きかった要因は平均形状比であった。スコアから幹折れは平均形状比が大きいほど受け易い傾向があったといえる。

ただし、これまでも指摘されているように調査地による被害率の差異は形状比だけでは十分説明できなかった(高橋, 1977; 石井ら, 1981; 石川ら, 1987)。

また、平均形状比以外の林分要因で幹折れ率と関係が深かったのは収量比数(解析1, 2)と立木密度(解析2)であった。平均形状比と収量比数および立木密度の相関係数はそれぞれ0.48, 0.47で、平均形状比は密度の高い林分ほど大きくなる傾向があった。このため立木密度の偏相関係数は形状比を入れた場合に比べてそれを外した場合の方が高くなったものと考えられる。なお、冠雪害抵抗性は林木の大きさそのものとも関係があるとの報告があるが(山口ら, 1982; 石川ら, 1987; 石橋, 1989)、本調査地では平均樹高や平均胸高直径は偏相関係数およびレンジの値がともに小さかったことから、幹折れの主要因とは考えられなかった。

幹折れ率と関係の深い立地要因は斜面方位、地形開放度であった。斜面方位のスコアから、幹折れ率は北向き斜面で最も低く、南や東向き斜面で高い傾向が認められた。被害が発生した17日午前中の風向は北ないし北東であったことから、被害は風上側で少なく、風下側に多かったといえる。

強風下における冠雪害と斜面方位の関係については、①風向に直角する斜面や風上側斜面の方が林木に冠雪荷重とこれに加えて風圧も作用したため、風下側斜面よりも被害が多くなったとの報告(石橋, 1989)と、②風圧を直接受ける風上側斜面では樹冠の動揺により冠雪の発達を抑制されたのに対し、風下側斜面では風が弱められて冠雪し易くなったために被害率が高くなったとの報告(杉山・佐伯, 1963; 高橋, 1977; 石井ら, 1981)とがある。また、強風下で降雪が枝葉から落下しないためには気温が0℃以上であることが必要とされている(石井ら, 1981)。

本調査地では被害時の気温がマイナスであったこと(図-6)、被害が風上側で少なく風下側に多かったことから、斜面方位により被害率に著しい偏りが認められた原因は②によるものと考えられる。

一般に、北陸地方では降雪時に南ないし南西の風が卓越するため、冠雪害が北や東向き斜面に集中する傾向があるといわれているが(杉山・佐伯, 1963)、本調査地ではこれとはほぼ反対側の南向き斜面で被害が多かった。これは降雪初期には南寄りの風であったものが、被害時には北寄りに変化したことによるものと考えられる。このような風向の変化は低気圧の移動にともなう場合に見られるが(石川ら, 1987)、当日の極東天気図上には低気圧の存在が認められなかった。しかし、このような富山湾の沿岸部における局所的な大雪(図-5)は近くに天気図上に表されない泡沫的な小低気圧が発生した場合に多い(福田, 1961)ことから、このような小低気圧の移動に伴って、風向も南から北に変化し、その時点で被害に至ったものと推測される。

地形開放度のスコアは90度以下の方が91度以上の場合よりも大きい傾向があり、周囲の3/4以上が山で囲まれたような谷沿いや凹地形の林分で被害率が高かったといえる。このような原因として凹地形の林分では風下側斜面と同様に風速が弱められたため冠雪しやすくなったことが考えられる。

(3)根返りの発生に関する要因

根返り率に関する要因について解析し、その結果を表-3に示した。林分要因に形状比を含む場合を解析3、平均樹高と平均胸高直径を含む場合を解析4とした。重相関係数は解析4の方が解析3より高く、根返り率の変動のうちの約80%が形状比を除く9要因で説明された。

林分要因のなかで偏相関係数が高くかつスコアのレンジが大きいのは平均樹高(解析4)であった。スコアから根返り率は平均樹高が21m以上の林分で最も高く、ついで15m以下、16~20mの順であった。冠雪荷重を受けて樹幹が変形した場合にその根元に生ずる回転モーメントは冠雪荷重とその重心の水平変位との積で表される(嘉戸ら, 1988)。一般に、樹高が高いほどその水平変位が大きくなり、それに伴って回転モーメントも大きくなること、小さな林木ほど小さな回転モーメントで根返りしたために(嘉戸ら, 1988)、被害率と樹高との関係が線形になら

なかったことが考えられる。なお、形状比の偏相関係数とスコアのレンジがともに小さく、根返りの発生に及ぼす形状比の影響は小さかったといえる。このことは、形状比が根返りの危険を表す指標となり得ないことを示唆するものである。

要因のなかで偏相関係数が高く、かつスコアのレンジが大きい要因は斜面傾斜角、土壌の深さおよび斜面方位（解析4）であった。スコアから、根返りは傾斜が急で、土壌が浅いほど発生しやすく、とくに斜面傾斜角が31度以上で、かつ土壌の深さが30cm

表-2 幹折れ率と林分および立地要因の関係についての数量化I類による解析結果

要 因	カテゴリー	例数	解析 1			解析 2		
			スコア	レンジ	偏相関係数	スコア	レンジ	偏相関係数
林 齢 (年)	~25	16	-1.1			-3.7		
	~30	15	0.9	2.0	0.053	0.9	11.6	0.218
	31~	9	0.4			7.9		
平均樹高	~15	6				-6.8		
	~20	27				4.1	16.9	0.254
	21~	7				-2.1		
平均胸高 直径 (cm)	~25	10				-10.1		
	~30	20				6.1	16.2	0.264
	31~	10				-2.1		
平均形状 比 (m/m)	~65	14	-18.3					
	~70	13	5.4	32.7	0.642			
	70~	13	14.4					
立木密度 (本/ha)	~800	13	-0.6			-16.8		
	~1200	19	-1.5	6.1	0.125	1.1	41.5	0.519
	1201~	8	4.6			24.7		
収量比数	~0.70	13	1.4			-1.4		
	~0.80	22	-6.4	30.9	0.452	-5.6	34.0	0.493
	0.81~	5	24.5			28.4		
斜面方位	N	13	-17.3			-14.6		
	E	9	10.4	29.8	0.529	15.0	29.6	0.463
	S	6	12.5			7.1		
	W	12	4.7			1.0		
地形開放 度 (度)	~90	24	8.4			12.3		
	~180	10	-1.3	26.7	0.491	-20.3	32.6	0.513
	180~	6	-3.1			-15.4		
斜面傾斜 度 (度)	~20	13	0.7			8.9		
	~30	15	8.7	20.3	0.371	5.9	25.9	0.453
	31~	12	-11.6			-17.0		
土壌の深さ	~30	10	-3.4	7.5	0.205	-8.3		
	~50	19	3.9			1.8	12.8	0.218
	51~	11	-3.6			4.5		
重相関係数					0.786		0.784	

以下の林分で危険性が高かったといえる。根返り率が土壌が浅いほど高くなるのは土壌が浅いほど根系の発達が地表近くに制限されるためではないかと考えられる。また斜面傾斜角が急なほど根返りが多くなる理由として、傾斜が急になるのに伴って土壌も

浅くなることがあげられているが(高橋, 1977), 土壌の深さを一定とみなしてもなお相関が高かったことから, 根系の形態や分布など根系の支持力に関わる要因が急斜地と緩斜地とで異なることも考えられる。

表-3 根返り率と林分および立地要因の関係についての数量化I類による解析結果

要 因	カテゴリー	例数	解析 3			解析 4		
			スコア	レンジ	偏相関係数	スコア	レンジ	偏相関係数
林 齢 (年)	~25	16	-0.5			0.3		
	~30	15	0.6	2.5	0.288	-0.8	1.6	0.236
	31~	9	2.0			0.6		
平均樹高	~15	6				2.3		
	~20	27				-1.8	6.7	0.693
	21~	7				4.9		
平均胸高 直径(cm)	~25	10				-2.5		
	~30	20				0.5	3.9	0.370
	31~	10				1.4		
平均形状 比(m/m)	~65	14	-1.5					
	~70	13	0.3	2.8	0.274			
	70~	13	1.3					
立木密度 (本/ha)	~800	13	1.3			-1.7		
	~1200	19	-0.5	2.2	0.189	-0.3	3.8	0.309
	1201~	8	-0.9			2.1		
収量比数	~0.70	13	1.7			2.5		
	~0.80	22	-1.0	2.7	0.346	-1.3	3.8	0.473
	0.81~	5	0.0			-0.8		
斜面方位	N	13	-2.1			-1.2		
	E	9	-0.7	4.2	0.473	-1.4	3.1	0.439
	S	6	1.3			1.1		
	W	12	2.1			1.7		
地形開放 度(度)	~90	24	-0.2			0.4		
	~180	10	1.0	1.6	0.178	0.3	2.4	0.271
	180~	6	-0.6			-2.0		
斜面傾斜 度(度)	~20	13	-4.8			-4.8		
	~30	15	1.2	8.5	0.703	1.6	8.0	0.743
	31~	12	3.7			3.2		
土壌の深さ	~30	10	5.9			5.9		
	~50	19	-2.0	7.9	0.644	-1.2	7.9	0.638
	51~	11	-2.0			-2.7		
重相関係数					0.800		0.872	

第3節 冠雪害と林木形状の関係

気象条件や立地条件などがほぼ等しいとみられる林分内においても、冠雪害を受けた林木と受けない林木とが存在する。そこで、どのような形状の林木が被害を受けやすいのかについて検討した。

1. 調査地と方法

調査地は北屋敷22年生と荒館25年生の2カ所である。北屋敷では全林木の胸高直径を測定するとともに、健全木17本と被害木20本を対象に樹高、胸高直径、形状比、幹の細りを調べた。荒館では全林木（健全木26本、被害木19本）を対象に樹高、胸高直径、形状比、枝下高、幹の細りを毎木調査した。なお、幹の細りは高さ1～6 mの間における平均値（cm/m）である。

2. 結果と考察

各調査地の胸高直径階別本数分布をみると、北屋敷では被害木が劣勢木や中庸木に多く、優勢木で少ない傾向が認められ、冠雪害と胸高直径の間に密接な関係があることが示唆された（図-7）。同様の傾向はこれまでも報告されている（嘉戸・平, 1982）。一方、荒館では被害が優勢木で少ない点が北屋敷と共通するものの、被害率と胸高直径の関係は北屋敷ほど明瞭ではなかった。これらのことから、冠雪害の発生には林木の大きさが関係しているようであるが、この要因だけでその発生機構を説明できなかった。

そこで、各調査地毎に健全木と被害木に区分し、この区分に影響する林木形状について線形の判別分析法を用いて解析した。説明要因は、北屋敷で樹高、胸高直径、形状比、幹の細りの4つ、荒館ではこれらに枝下高を加えた計5つである。また、樹高、胸高直径および形状比を同時に用いて解析すると閉じた関係になるので、形状比を外した場合（解析1）と樹高と胸高直径を外した場合（解析2）とに分けて解析した。いずれの調査地においても、被害木は健全木に比べて胸高直径および細りが小さく、形状比が大きくなる傾向があった（表-4）。

ここで取り上げた説明要因で健全木と被害木に判別できるのか検討した。ウイルクスの Λ 値はグループ間の変動を表現する量であり、この値が0に近いほどグループ間に差があることを、また1に近いほど差がないことを示す。そこで、この値を利用してグループ間に差があるかどうかを検定した結果、北

屋敷の解析1では1%水準で、解析2では5%水準で、また荒館では解析1および2で1%水準で統計的有意差が認められた（表-5）。したがって、いずれの試験地においても健全木のグループと被害木のグループの間には林木形状に違いがあったと言える。そこで、これらの説明要因が判別に役立っているかどうかを調べるために、ウイルクスの Λ を利用して、各要因の寄与の検定をした。その結果、統計的に有意との判定された要因は、北屋敷では胸高直径と形状比であったのに対し、荒館では樹高、胸高直径、形状比および幹の細りの4変量であった。ここでは判別関数の値が正のときには健全木に、負のときには被害木に属することから、胸高直径が大きくて他の要因が小さい場合には健全木、反対に胸高直径が小さくて他の要因が大きい場合には被害木と判別される。これらのことから、被害木に共通する樹幹の形状はサイズが小さくかつ細長であるといえるが、調査地によって変量の寄与の程度が異なっていた。この原因については、降雪環境の差異によるものか、あるいは林木強度特性の差異によるものか明らかではない。

解析1と解析2の正答率を比較すると、北屋敷では解析1の方が大きく、荒館ではほぼ等しかった。このことから、同一林分内における健全木と被害木

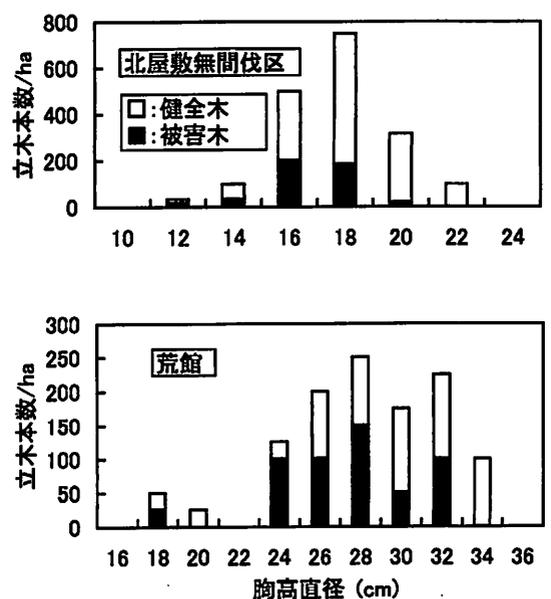


図-7 被害林分における胸高直径階別本数分布

表一 4 冠雪害の被災林分における健全木と被害木の
樹幹形状の平均値の比較

	標本数 (本)	樹 高 (m)	胸高直径 (cm)	形状比	枝下高 (m)	細 り (cm/ m)
北屋敷						
健全木	17	14.77	19.08	77.35		1.08
被害木	20	13.81	16.91	81.82		1.04
t 値		3.07**	5.28**	2.28*		0.54
荒館						
健全木	26	19.26	28.29	69.29	10.69	1.23
被害木	19	20.09	26.54	76.08	12.69	1.13
t 値		0.84	1.43	4.51**	3.73*	1.42

*, **はそれぞれ危険率5,1%水準で統計的に有意性を示す。

表一 5 冠雪害の被災林分における健全木と樹幹形状
による判別分析の結果

		北 屋 敷		荒 館	
		解析 1	解析 2	解析 1	解析 2
判別係数	樹 高	-0.90		-1.28**	
	胸高直径	1.65**	1.13**		
	形 状 比		-0.24**		-0.53**
	枝 下 高			-0.59	-0.46
	幹 細 り	-4.07	-3.87	-5.55**	-6.10**
	定 数	-12.55	23.48	8.47	51.80
正答率 (%)	健 全 木	71	65	92	92
	被 害 木	80	65	92	95
ウィルクスのΛ		0.60**	0.81*	0.46**	0.43**

*, **はそれぞれ危険率5,1%水準で統計的に有意性を示す。

の判別に形状比よりも胸高直径あるいは樹高といった林木の大きさそのものが関係する場合もあることがわかった。この点は林分間における解析結果（表一 4）とは異なっていた。この原因は明かではないが、例え林木の大きさが同じであっても冠雪荷重に対する林木の耐力が林分によって異なることも考えられた。

第 4 節 冠雪害と品種

スギの冠雪害抵抗性は品種によって差異があることが知られている（勝田・松田, 1984a, 1984b）。

富山県産のスギ品種についても、ボカスギがリョウワスギよりも被害率が高く冠雪害の抵抗性に違いがあったことが報告されているが（杉山・佐伯, 1963）、同一林分に試験地を設け、比較検討した例は少ない。そこで、代表的な品種であるタテヤマスギ、ボカスギ、マシヤマスギの雪害抵抗性について比較検討した。

1. 調査地と方法

調査地は頼成、吉峰、三田および蒲田の 4 箇所である（表一 6）。頼成と三田にはそれぞれ 3 品種、蒲田にはタテヤマスギとボカスギが植栽されている。

被災直後に各々の調査地において被害調査を行った。

2. 結果と考察

各調査地の生育状態と本数被害率を表一7～10に示した。頼成における総被害率を比較すると、タテヤマスギが最も高く、ついでボカスギ、マスヤマスギの順であった。吉峰ではボカスギの方がタテヤマスギよりも被害率が高かった。三田で総被害率が最も高かったのはボカスギで、ついでマスヤマスギ、タテヤマスギの順であった。蒲田ではボカスギの方がタテヤマスギよりも被害率が高かった。まず、マスヤマスギとボカスギの被害率を比較すると2ヶ所の林分ともボカスギの方が高かった。同様の傾向は、矢野(1982, 1984)も認めている。また、これら2品種の形状比は頼成および三田とも大きな差がなかったことから、両品種の被害率の差異は形状比に起因するものではないと考えられた。

つぎに、ボカスギとタテヤマスギを比較すると、ボカスギの被害率が低くなったのは4ヶ所の林分のうちの1ヶ所であったことから、後者の方が冠雪害抵抗性が大きいと考えられた。蒲田では両品種の形状比がほぼ等しいことから、この林分における両品種間の被害率の差異は形状比以外の要因に起因することが示唆された。また、頼成、吉峰と三田における形状比はいずれもタテヤマスギの方が大きかっ

たことから、タテヤマスギとボカスギの被害率の差異は形状比の大小では説明できなかった。

タテヤマスギとマスヤマスギを比較すると、頼成と三田で正反対の傾向が認められ、どちらが冠雪害抵抗性が高いのかこの調査では明かにならなかった。形状比はタテヤマスギの方がマスヤマスギよりも大きくなることから、両品種の被害率の差異を形状比だけでは説明できなかった。

以上のように、品種間における被害率の差異は形状比の違いによって十分説明できなかったことから、冠雪害の発生機構を解明するためには幹の強度特性や冠雪量などを総合的に検討することが必要と考えられた。

表一6 冠雪害の品種間比較を行った調査地の概要

調査地	林齢 (年生)	標高 (m)	斜面方位	傾斜度		被災年月
				(度)		
頼成	12	100	北	5		1980/12
吉峰	12	232	北	5		1999/1
三田	20	70	南東	15		1973/12
蒲田	28	50	南	35		1985/12

表一7 頼成における冠雪害の品種間比較

品 種	林 齢 (年)	密 度 (本/ha)	樹 高 (m)	直 径 (cm)	形状比 (m/m)	被 害 率		
						幹折れ	幹曲り	計
						(%)		
タテヤマスギ	12	1840	5.7	9.2	62	9	27	36
ボカスギ	12	1915	7.0	12.5	56	1	13	14
マスヤマスギ	12	2504	5.4	9.7	56	1	2	3

表一8 吉峰における冠雪害の品種間比較

品 種	林 齢 (年)	密 度 (本/ha)	樹 高 (m)	直 径 (cm)	形状比 (m/m)	被 害 率		
						根返り	幹曲り	計
						(%)		
タテヤマスギ	12	4864	8.6	11.1	77	0	0	0
ボカスギ	12	4693	8.8	12.3	72	13	21	44

表-9 三田における冠雪害の品種間比較

品 種	林 齡 (年)	密 度 (本/ha)	樹 高 (m)	直 径 (cm)	形状比 (m/m)	被 害 率		
						幹折れ (%)	幹曲り (%)	計
タテヤマスギ	20	3154	10.6	14.0	76	17	0	17
ボカスギ	20	3062	9.0	13.3	68	53	18	71
マシヤマスギ	20	4100	6.2	9.8	64	4	18	22

表-10 蒲田における冠雪害の品種間比較

品 種	林 齡 (年)	密 度 (本/ha)	樹 高 (m)	直 径 (cm)	形状比 (m/m)	被 害 率		
						幹折れ (%)	幹曲り (%)	計
タテヤマスギ	28	1025	17.2	27.0	64	9	0	9
ボカスギ	28	1025	17.0	27.5	62	56	0	56

第3章 冠雪の発達に影響する要因と冠雪荷重の推定

樹木の冠雪害は多量の降雪が樹冠に付着・堆積し、この樹冠着雪量（冠雪荷重）が幹の耐力を越えた場合に発生すると考えられる。したがって、林木の冠雪害抵抗性を力学的な手法を用いて評価するためには、個体当たりの冠雪荷重や幹に作用する冠雪荷重の垂直的な分布状態などについての知見が不可欠である。しかし、造林地に生育している林木の冠雪荷重を直接測定することは困難であるため、冠雪荷重を精度良く推定するための手法の開発が必要である。そのためには、まず、冠雪荷重の増減にどのような気象要素が関係しているのか、あるいは冠雪荷重が樹冠要因や品種によってどの程度変化するのかなどについて明らかにする必要がある。

そこで、本章では、スギの冠雪荷重と気象要素および樹冠形状の関係、スギ品種による冠雪荷重の比較などについて調査を行い、これらの結果をもとに冠雪荷重の推定法について検討を行った。

第1節 冠雪の発達と気象要素の関係

冠雪は降雪が樹冠に付着・堆積する現象であって、冠雪害が多量の降雪があった場合に発生する傾向があることから、降雪量は冠雪荷重を左右する最も重

要な気象要因と考えられる。しかし、冠雪害は気温が+から-に移行し、ミゾレやヌレ雪が枝葉に付着して凍結するときには発生し易いといわれていることから（佐伯・杉山, 1965; 高橋, 1977; 新田, 1987）、例え降雪量が同じであったとしても冠雪荷重が他の気象要素の影響を受けて変化することが推測される。

そこで、これまでにスギ林木の冠雪荷重を測定したなかで、降雪量や降雪回数が比較的多くかつ降雪時の気温の変化が大きかった年度を対象に、冠雪の発達と気温、日照時間などの気象要素の関係について検討した。

1. 材料と方法

冠雪が発達するときの気象条件を検討する目的で、1982/83から1990/91年までの9冬期間にわたって、吉峰（標高230m）においてスギの冠雪荷重を測定した。これらの期間のなかで降雪が多くかつ気温の変動が最も大きかった1983/84年における測定資料を用いて、冠雪荷重と気象要素の関係について検討した。この年は56豪雪に次ぐ大雪となり、とくに1月15日から18日、1月22日から28日および2月5日から9日の3つの期間に多量の降雪があり、これらの積算降雪量はそれぞれ60, 110および80kg/㎡であった。以下、これらの降雪を、1月15日の降雪、1月22日の降雪および2月5日の降雪と呼ぶことにした。

冠雪荷重の測定には図-8に示す装置を用いた(嘉戸, 1991)。この測定の手順は以下の通りである。まず、スギの梢端部を5~8mの長さに切り、下枝を除去した幹を冠雪測定台の中央にある垂直な鉄パイプに差込み、パイプの下部に固定したロードセルで冠雪した供試木の全重量を1時間毎に測定記録した。この値から冠雪のない状態の重量を差し引いて冠雪荷重を算出した。1983/84年の供試木は16年生のボカスギ5本であり、その樹高は7~10mであった。また、冠雪荷重と葉量の関係について調べるために、下枝を除去して樹冠長を2~6mとした。したがって、葉量の小さな供試木では梢端部2mにだけ葉が着生していたのに対し、葉量の大きな供試木では梢端から6mの範囲に葉が着生していた。冠雪荷重の測定後、葉量を梢端から1m毎に切り分け、105℃で乾燥して絶乾重を求めた。以後、葉量は全て絶乾重で表した。降雪量は90cm四方の水平な板に積もった雪の重量をロードセルで1時間毎に測定して、1m²当たりの値に換算して得た。なお、日照時間は最寄りアメダス観測点であって、当林業試験場の東北約10kmにある上市町東種(標高296m)のデータを用いた。

2. 結果と考察

個体当たりの冠雪荷重は降雪量や樹冠の大きさ(葉量)によって大きく変化することから(松田, 1981), 冠雪の発達の程度を比較する場合には同じ供試木または葉量の等しい供試木を用いることが望まれる。そこで、一例として葉量4.5kg(後日測定)の供試木をとりあげ、1月15日の降雪、1月22日の降雪および2月5日の降雪における積算降雪量と冠雪荷重、気温および日照時間の関係を2時間毎の値で示した(図-9)。なお、この図では冠雪荷重と気温および日照時間の関係を対比し易くするため、気温および日照時間の変化を時系列ではなく積算降雪量との関係で示した。

この図における積算降雪量と冠雪荷重の曲線の傾きは冠雪の増加比を表しており、この傾きが右上がりであつ傾きが急なほど冠雪の発達の程度が大きいことを、また傾きが右下がりであつ傾きが急なほど冠雪の減少の程度が大きいことを示している。この冠雪の増加比について注目すると、降雪開始から積算降雪量10kg/m²の間において大きくなる傾向が各降雪において認められた。さらに、1月22日の降雪

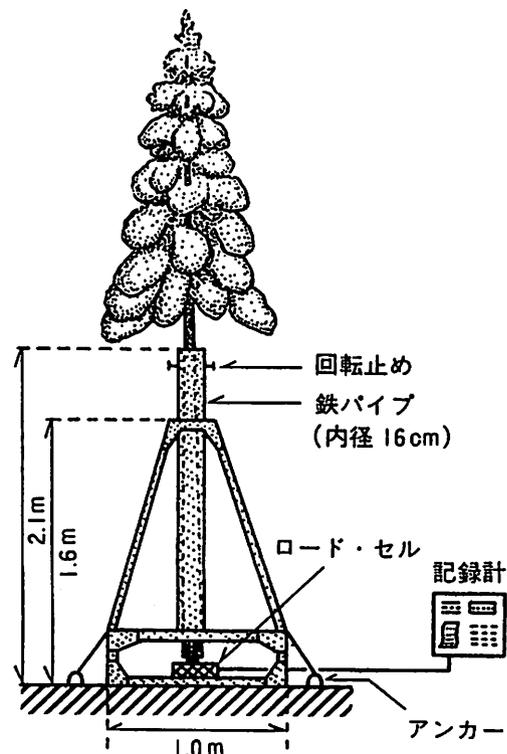


図-8 冠雪荷重の測定法

では冠雪増加比が積算降雪量21~35および55~65 kg/m²のときにも大きな値を示した。そこで、冠雪増加比が大きくなったときの気象要素を調べてみると、いずれの場合も気温が+から-に変化しかつこの間に日射がなかったことがわかった。このような条件下において、冠雪害の危険性が大きくなることがこれまでも指摘されている(例えば、新田, 1987)。これらのことから、気温が低下する傾向を示した後に、0℃付近で推移するとき、冠雪が発達し易いといえる。

これに対して、冠雪が著しく減少したときを積算降雪量で示すと、1月15日の降雪では60kg/m²のとき、1月22日の降雪では20, 50および110kg/m²のときであった。これらのときの気象条件についてみると、いずれの場合も気温が-から+に上昇しかつ日照時間が長かったことが判明した。これらの結果から、日射の影響で気温が0℃度以上に上昇すると冠雪の

融解がすすむために、例え降雪があっても冠雪があまり発達しないものと考えられた。

ところで、2月5日の降雪における冠雪増加比は1月15日の降雪における値に比べて著しく小さくなる傾向が積算降雪量が10kg/m²以上になったときに認められた。そこで、これらの降雪における気象要素を比較してみたところ、日照時間には著しい差異はなかったが、気温に違いが認められ、2月5日の降雪の平均気温は1月15日の降雪のそれよりも約2度低いことがわかった。一般に、冠雪は低温になるほど大きくなりやすい傾向がある(高橋喜平, 1952)ことから、両降雪における気温の差異が冠雪荷重に影響したことが考えられた。

そこで、気温が冠雪荷重に及ぼす影響について検討した。図-10は先に示した葉量4.5kgのスギの3回の降雪における冠雪増加比と気温の関係を示したものである。なお、冠雪増加比は2時間当たりの降雪増加量に対する冠雪増加量の比で表した。また、この図では2時間当たりの降雪量が1kg/m²未満の場合や冠雪が減少した場合を除いた。これは降雪量が小さいと冠雪増加比が異常に大きな値となる場合があることや冠雪が増加する場合だけを対象とし、減少する場合を除いたためである。この結果によると、冠雪増加比は平均気温が低い場合に小さく、平均気温が高くなるほど大きくなる傾向がいずれの降雪においても認められた。そこで、3回の降雪を込みにして冠雪増加比と平均気温の相関係数を算出したところ、0.466 (d.f.=61) となり1%水準で統計的に有意な値が得られた。両者間の回帰式から、平均気温が0℃における冠雪増加比は-5℃の値に比べて約2倍になり、冠雪荷重が気温の変化によって大きく変動することがわかった。同時に、冠雪増加比の変動に対する平均気温の寄与率(r^2)は約20%と小さかったことから、冠雪の増加は気温の変動だけでは説明できないことも示唆された。

以上のことから、3回の降雪の中で1月15日の冠雪荷重が最も大きくなったのは、冠雪の発達しやすい気温のもとで多量の降雪があったこと、加えて冠雪荷重を著しく減少させるような気温の上昇や日射があったことがあげられる。これに対して、1月22日の降雪において冠雪荷重が大きならなかったのは、冠雪の発達しやすい気温のもとで多量の降雪があったが、日射の影響を受けて冠雪が繰り返し減

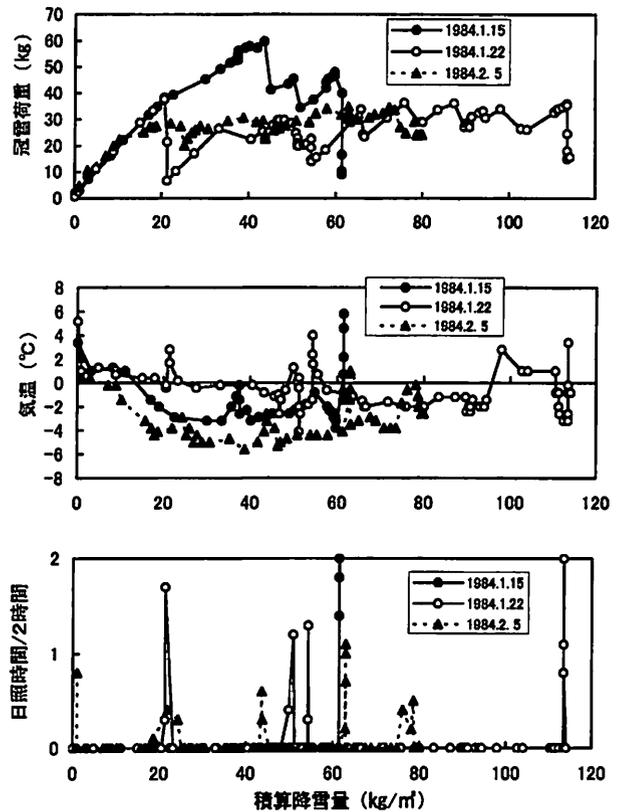


図-9 積算降雪量と冠雪荷重および気象要素の関係 (供試木葉量4.5kg)

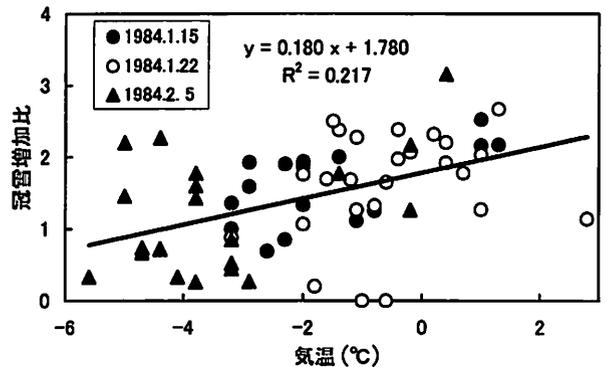


図-10 2時間当たり降雪量が1kg以上あるときの冠雪増加比(冠雪増加量/降雪増加量)と気温の関係(供試木葉量4.5kg)

少したことがあげられる。また、2月5日の降雪では、多量の降雪があったものの、降雪時の気温が低かったために、冠雪が発達しなかったことが考えられた。

第2節 冠雪荷重と樹冠要因の関係および

冠雪荷重の品種間比較

スギの冠雪害抵抗性は品種・系統によって異なり、富山県内に植栽されているスギ品種の中では、ボカスギがリョウワスギやマスヤマスギなどよりも冠雪害を受け易いことが報告されている(嘉戸ら, 1986; 杉山・佐伯, 1963; 矢野, 1982; 矢野, 1984)。このように冠雪害抵抗性に品種間差異が認められるのは、品種により冠雪荷重や林木の耐力に違いがあるためと考えられる。ボカスギはクマスギに比べて冠雪荷重が多い傾向が認められ、この原因が枝葉量や枝の垂下性の差異によることが指摘されている(渡辺・大関, 1964)。そして、ボカスギは単位葉量当たりの冠雪荷重がミョウケンスギやムラスギと等しいが、ボカスギの葉量が相対的に多いため個体当たりの冠雪荷重が他のスギに比べて多いことも報告されている(中島ら, 1989)。これらの結果から、ボカスギは冠雪荷重の大きい品種と判断されるが、これまでの調査においては本数や品種も限られていることから、同様の傾向が他の品種間においても見られるも

のか検討する必要がある。

ここでは、富山県内に植栽されている主なスギ品種を対象に冠雪荷重の測定を行ない、冠雪荷重に品種間差異があるのか、ある場合にはどのような樹冠要因と関係しているのかなどについて検討した結果について述べる。

1. 材料と方法

冠雪荷重は前節と同様の装置(図-8)を用いて測定した。なお、冠雪荷重は降雪中であっても気温や風の影響で減少することがあったので、冠雪荷重の比較に当たってはそれぞれの降雪における最大値を用いることにした。

供試木のスギ品種・系統、本数および大きさなどを調査年度別に示した(表-11)。1984/85年度から4年間、ボカスギ、タテヤマスギ、マスヤマスギ、リョウワスギ、カワイダニスギのうちの2品種ずつの組合せで、各品種につき6本ずつ冠雪荷重を測定した。1990/91年度はボカスギ、タテヤマスギ、マスヤマスギ、リョウワスギおよび座主坊1号の5品種・系統について2本ずつ測定した。なお、タテヤマスギは実生で、他は全て挿し木で繁殖したものである。座主坊1号はタテヤマスギ系統の一つで、初期成長が良い特徴を有する。

冠雪荷重の測定後、各供試木の葉量および樹冠投

表-11 冠雪荷重の品種比較に用いた供試木の概要

調査年度	品種	供試木数	樹齢 (年)	樹冠長 (m)	樹冠投影 面積 (㎡)	葉量 (kg)	枝着生角 (度)	積算枝長 (m)
1984/85	ボカスギ	6	17	3.0-5.6	3.7-4.9	3.2-8.6		
	タテヤマスギ	6	22	3.3-5.3	3.7-10.2	2.4-13.3		
1985/86	マスヤマスギ	6	18	3.1-8.1	2.1-8.9	2.9-11.6		
	タテヤマスギ	6	18	5.0-6.6	4.0-10.1	5.3-14.7		
1986/87	ボカスギ	6	22	3.3-6.2	3.5-4.5	4.7-10.7		
	カワイダニスギ	6	14	3.5-4.6	5.3-7.5	4.5-10.6		
1987/88	タテヤマスギ	6	25	2.9-4.5	3.1-6.2	2.3-6.7		
	リョウワスギ	6	20	3.0-6.0	3.8-8.5	3.9-11.8		
1990/91	ボカスギ	2	25	4.8-4.9	3.7-4.4	8.2-10.5	64-66	35-37
	タテヤマスギ	2	26	4.8-5.0	5.1-6.2	7.9-10.3	63-66	43-49
	マスヤマスギ	2	22	4.5-4.7	2.7-3.0	9.2-10.0	64-65	35-39
	リョウワスギ	2	22	4.5-4.8	3.2-4.9	8.6-9.3	66-67	38-39
	座主坊1号	2	13	4.4-4.5	2.5-2.5	7.3-8.0	73-74	37-38

影面積を測定した。葉量は梢端から 1 m 毎に切り分け、105℃で乾燥して絶乾重を求めた。以後、葉量は全て絶乾重で表すことにした。1991年はこれらに加えて、枝の本数、全ての枝の長さとその枝の着生角度（枝の基部から20cmの位置における枝と幹の間の角度で、その値が小さいほど、枝が上向きなことを示す）も測定した。

3. 結果と考察

(1)冠雪荷重と樹冠要因

冠雪荷重と葉量、樹冠投影面積、枝の着生角度および積算枝長などの樹冠要因の関係を検討した。各要因の変動をできるだけ大きくするため、ボカスギ、タテヤマスギ、マシヤマスギ、リョウワスギおよび座主坊1号の5品種を解析に用いた。冠雪調査を1990/91年に行い、積算降雪量が15kg/m以上であった降雪を対象に、重回帰分析を行った。表-12は個体当りの冠雪荷重と4つの樹冠要因との単相関係数、偏相関係数および重相関係数を示したものである。この結果によると、冠雪荷重の変動に対する4要因の寄与率は1月14日が44%と低かったものの、他は67~81%と高かった。葉量、樹冠投影面積、積算枝長などの樹冠の大きさに関わる要因と冠雪荷重の間に正の相関が認められた。これらのなかで葉量の間に密接な関係があることはこれまでも報告されており（松田, 1981; 片岡ら, 1983a; 嘉戸ら, 1985）、冠雪荷重は樹冠投影面積や積算枝長よりも葉量を基準に比較する方がより正確な結果が得られると考えられた。

中島ら（1989）は、枝の着生角度と降雪初期の捕捉率の間に関係があったこと、ボカスギは個体当り

の冠雪荷重が大きく、かつ枝の着生角度も大きかったことを報告している。今回の調査でも冠雪荷重と枝の着生角度の偏相関係数は正の値を示し、冠雪荷重は枝のつき方が水平に近いほど大きい傾向を示したが、いずれも有意性は認められなかった。したがって、冠雪荷重に対する着生角度に関わる要因に比べて小さいと考えられた。なお、ボカスギの枝の着生角度は他の品種のそれに比較して顕著な差異が認められず、中島ら（1989）の結果と異なっていた。この点に関しては、さらに供試木を増やして検討する必要があると思われる。

(2)スギ品種による冠雪荷重の比較

冠雪荷重は葉量や樹冠投影面積など樹冠の大きさの影響を受けることが確認された。そこで、各品種の冠雪荷重を比較するにあたっては樹冠の大きさの影響を考慮する必要がある。ここでは、葉量が等しい場合における冠雪荷重について比較した。ボカスギ、タテヤマスギ、マシヤマスギ、リョウワスギおよびカワイダニスギにおける冠雪荷重と葉量の関係の一例を図に示した（図-11）。この図によると、個体当りの冠雪荷重は葉量と高い正の相関を示すが、葉量が等しい場合には各品種の冠雪荷重に顕著な差異が認められなかった。冠雪荷重は供試木数が少ないため明言はできないが、葉量が同じ場合にはボカスギ、タテヤマスギ、マシヤマスギ、リョウワスギおよび座主坊1号の冠雪荷重には著しい差異が認められないようであった（図-12）。

このような傾向が他の降雪（積算値で20kg/m以上）においても認められるものか否かを検討するために、冠雪荷重と葉量の共分散分析を行なった（表

表-12 冠雪荷重と林木の形質との関係（1991年調査）

調査日	平均冠雪荷重 (kg)	偏相関係数 (単相関係数)				重相関係数
		葉量	樹冠投影面積	枝着生角度	積算枝長	
1月7日	73	0.814*	0.010	0.302	0.410	0.888**
		(0.831**)	(0.456)	(-0.404)	(0.541)	
1月18日	57	0.444	0.703	-0.044	0.119	0.899**
		(0.606)	(0.854**)	(-0.568)	(0.640)	
2月24日	52	0.783*	-0.021	0.450	0.173	0.817*
		(0.744*)	(0.267)	(-0.212)	(0.353)	
1月5日	51	0.789*	0.468	0.498	0.127	0.877**
		(0.767**)	(0.592)	(-0.341)	(0.535)	
1月14日	49	0.451	0.174	-0.021	0.062	0.662**
		(0.618)	(0.468)	(-0.451)	(0.387)	

*, ** はそれぞれ 5, 1%水準で統計的に有意を表す。

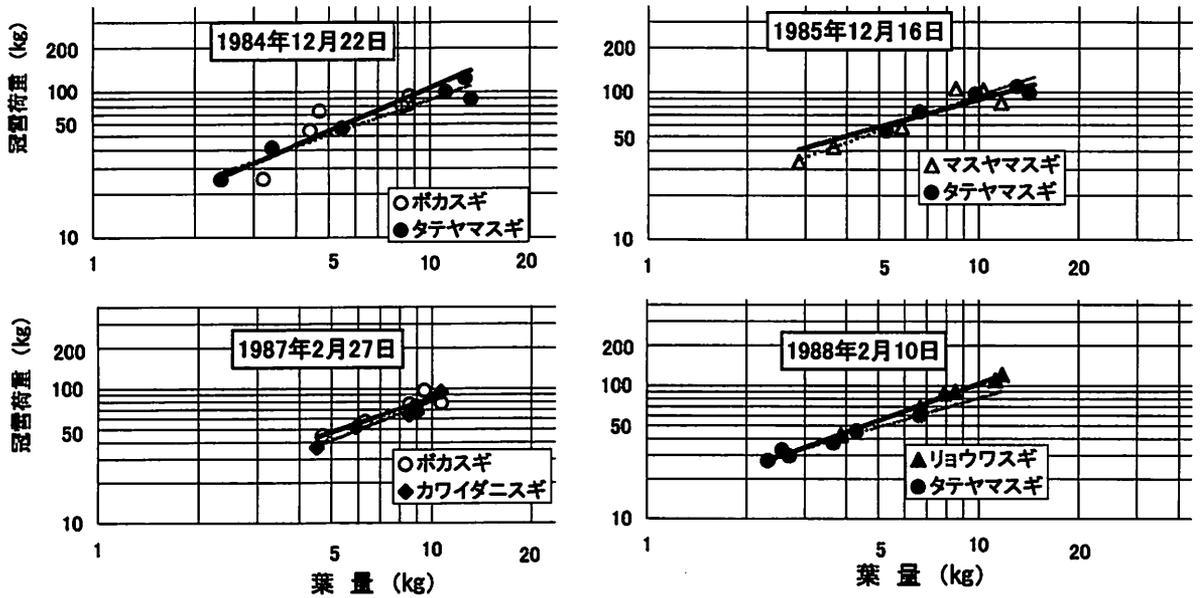


図-11 ボカスギ, タテヤマスギ, マスヤマスギ, リョウワスギおよびカワイダニスギの冠雪荷重の比較

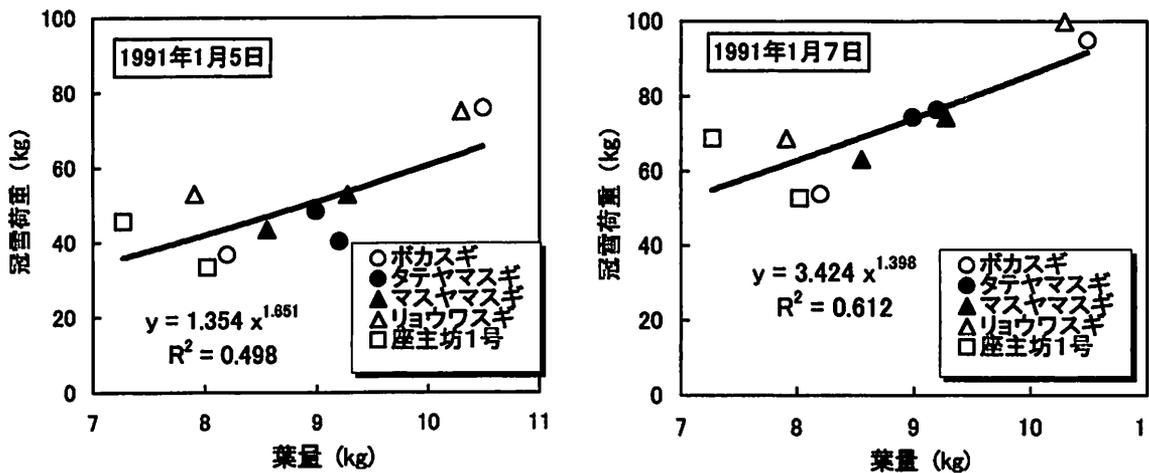


図-12 ボカスギ, タテヤマスギ, マスヤマスギ, リョウワスギおよび座主坊1号の冠雪荷重比較

一13)。この結果、いずれのスギ品種の組合せについても統計的に有意な差異が認められなかった。また、ボカスギとマスヤマスギの組合せについては既に報告したように(嘉戸ら, 1985), 有意差が認められたのは11回の降雪のうちの1回だけであった。以上のことから、ここで取り上げた6品種・系統の冠雪荷重は、葉量が同じであればほぼ等しいものと考えられた。片岡ら(1983a)もボカスギとタテヤマスギの生枝葉量当りの冠雪荷重には顕著な差異が無かったことを報告している。ただし、これらの品種

の冠雪荷重よりもリョウワスギのそのの方が若干大きかったことも同時に指摘している点が今回の結果と異なっている。

渡辺ら(1964)はボカスギの冠雪荷重がクマスギのそれに比べて1.4~1.8倍であったことを報告している。この原因については本報でクマスギを取り上げなかったので明かではないが、渡辺らは単位葉量当りの冠雪荷重ではなく樹冠投影面積当りの値を用いており、比較方法が異なることにも関係があると考えられた。

第3節 葉量の品種間比較

前節において、葉量が同じであれば冠雪荷重に顕著な品種間差異がないことが明らかになった。しかし、冠雪荷重は葉量の増加に伴って大きくなることから、葉量に品種間差異があれば、冠雪荷重にも品種間差異が認められることが考えられる。そこで、本節では、葉量の品種比較を行った。

1. 調査方法

葉量の各品種間差異について検討するため次の資料を用いた。

(1) 類成調査地のスギ品種見本園 (12年生時) において、タテヤマスギ、ボカスギおよびマスヤマスギそれぞれ6本ずつ計18本を伐倒し、層厚1mとして葉量を調べた。個体の葉量は D^2H (胸高直径の2乗×樹高) と密接な関係があるが、両者の関係式の係数は林分によって変化するのに対し、葉量と生枝下直径の関係は、林分の違いに関係なく一本の関係式で表すことができるとされている (吉良, 1965)。そこで、以下の解析では個体の葉量を生枝下直径 (D_B) を基準に比較することにした。

表-13 スギ品種間における冠雪荷重と葉量の共分散分析の結果

調査年月日	調査品種 (冠雪荷重 (kg))		回帰係数		修正平均	
			F - 値	自由度	F - 値	自由度
ボカスギ&タテヤマスギ						
1984年12月22日	(25~94)	(42~124)	0.32	1, 8	0.00	1, 9
1985年1月8日	(12~45)	(12~63)	0.11	1, 8	0.29	1, 9
1985年1月15日	(28~64)	(18~122)	0.29	1, 8	0.29	1, 9
1985年1月31日	(18~64)	(18~96)	0.05	1, 8	0.53	1, 9
1985年2月15日	(29~73)	(20~84)	0.27	1, 8	0.00	1, 9
1985年2月22日	(28~45)	(18~84)	0.00	1, 8	0.00	1, 9
マスヤマスギ&タテヤマスギ						
1985年12月16日	(34~104)	(55~109)	0.93	1, 7	0.00	1, 8
1985年12月18日	(19~52)	(27~62)	0.72	1, 7	1.97	1, 8
1985年12月20日	(16~52)	(25~78)	0.06	1, 7	0.40	1, 9
1985年12月24日	(17~57)	(33~86)	0.05	1, 7	1.29	1, 9
1986年1月24日	(19~75)	(42~80)	3.97	1, 8	0.00	1, 9
1986年1月26日	(11~58)	(24~74)	0.63	1, 8	0.02	1, 9
1986年2月17日	(19~60)	(37~71)	0.13	1, 8	1.94	1, 9
ボカスギ&カワイダニスギ						
1986年12月22日	(27~54)	(26~44)	3.27	1, 8	1.74	1, 9
1986年12月29日	(44~73)	(35~70)	0.02	1, 8	4.56	1, 9
1987年1月11日	(40~73)	(31~75)	0.00	1, 8	3.56	1, 9
1987年1月14日	(39~73)	(15~80)	1.94	1, 8	1.34	1, 9
1987年1月20日	(36~79)	(34~90)	0.18	1, 8	0.21	1, 9
1987年1月25日	(34~59)	(21~60)	0.73	1, 8	1.06	1, 9
1987年2月1日	(35~67)	(38~68)	0.64	1, 8	0.13	1, 9
1987年2月27日	(45~97)	(37~95)	0.02	1, 8	1.98	1, 9
リョウワスギ&タテヤマスギ						
1988年1月10日	(24~53)	(24~77)	0.22	1, 8	0.00	1, 9
1988年1月23日	(24~69)	(35~97)	0.85	1, 8	0.07	1, 9
1988年2月3日	(21~42)	(32~110)	2.37	1, 8	3.27	1, 9
1988年2月10日	(27~60)	(43~120)	4.38	1, 8	3.86	1, 9

(2)前節で冠雪荷重測定に用いたタテヤマスギ、ボカスギ、マスマスギ、リョウワスギ、カワイダニスギなどの供試木を対象に、個体当たりの葉量を生枝下直径との関係を用いて比較した。

(3)富山県内におけるスギの葉の現存量調査はタテヤマスギ8林分(阪上, 1982a; 阪上, 1982b; 阪上, 1984; 阪上, 1986)とボカスギ3林分(相浦, 1988)で行われている。これらに未発表の資料をくわえて、タテヤマスギ11林分とボカスギ6林分の葉量を個体当たりおよび林分当たりの重量を用いて比較検討した。

2. 結果と考察

頼成のスギ品種展示林における個体の葉乾重(W_L)と生枝下直径(D_B)の関係を両対数グラフに示した(図-13)。log(W_L)とlog(D_B)の間に線形の関係があり、両者の相関係数はタテヤマスギ0.957、ボカスギ0.987、マスマスギ0.986と高い値を示した。そこで、各品種のlog(D_B)とlog(W_L)の関係について共分散分析を行った結果、回帰係数($F=0.36$; $d.f.=2, 12$)および修正平均値($F=1.79$; $d.f.=2, 14$)にも品種間には有意な差異が認められなかった。したがって、ここでは生枝下直径が同じ場合の葉乾重には品種間差異がなかったといえる。

冠雪荷重を測定した供試木の葉量と生枝下直径の関係を示した(図-14)。なお、これらは冠雪荷重を測定するために樹冠のサイズを調節した後の値で、いわば梢端部における葉量と生枝下直径の関係を示したものである。この図によると、生枝下直径が等しいならばボカスギ、タテヤマスギおよびマスマスギの葉量には顕著な違いが見られないようであった。リョウワスギは生枝下直径を測定した供試木が2本しかなかったため断定はできないが、これらの葉量はボカスギ、タテヤマスギおよびマスマスギとほぼ等しいようであった。これらに比べ、カワイダニスギの葉量は若干大きい傾向がみられた。そこで、このような葉量の違いが有意な差異といえるかどうかを検討するために、リョウワスギを除く4品種について、log(D_B)とlog(W_L)の共分散分析を行った。その結果、回帰係数($F=0.53$; $d.f.=3, 46$)および修正平均値($F=2.42$; $d.f.=3, 49$)にも有意な差異が認められなかった。したがって、梢端部に限ってみると、生枝下直径が等しいならばいずれの品種間においても葉量に顕著な差異がなかったとい

える。

このような傾向が梢端部だけでなく全樹冠部を含めた場合にも認められるものか検討するため、タテヤマスギ11林分、ボカスギ6林分における個体当たりの葉量と生枝下直径の関係を調べた(図-15)。この図によると、生枝下直径が同じであれば、ボカスギの葉量がタテヤマスギのそれよりも大きくなる傾向が見られた。そこで、両品種の葉量と生枝下直径について共分散分析を行った結果、回帰係数($F=0.79$; $n=1, 161$; $p<0.1$)には差異がなかったが、修正平均($F=52.32$; $n=1, 162$; $p>0.01$)に有意な差異が認められた。そして、図中の回帰式から、生枝下直径が5cmの場合にはボカスギの葉量はタテヤマスギのそれよりも約25%大きく、生枝下直径が20cmの場合にはボカスギの葉量がタテヤマスギのそれよりも約50%大きくなることがわかった。

一般に単位面積当たりの葉量は収量比数の増大に伴って増加し、樹冠が閉鎖したと考えられている収量比数0.8以上の林分では密度や林齢、地位などに無関係にはほぼ一定の値を保つとされている(安藤, 1968)。そこで、林分レベルで葉量を比較するため、ボカスギ6林分とタテヤマスギ11林分におけるha当りの葉量と収量比数の関係を調べた(図-16)。この図によると、収量比数が同じであればボカスギの方がタテヤマスギより大きくなり、このような傾向は収量比数が大きくなるほど顕著であった。そこで、林

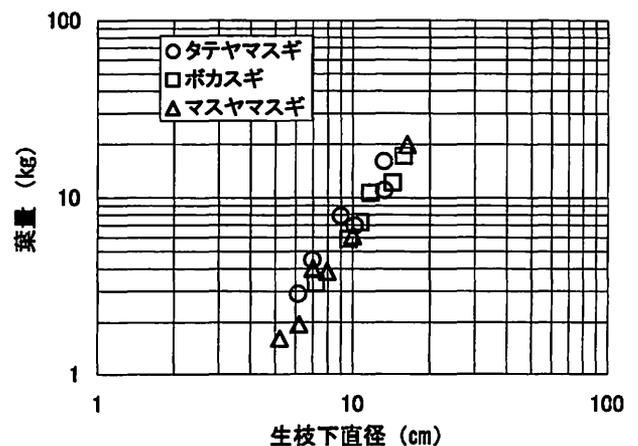


図-13 頼成における個体の葉量と生枝下直径の関係

分葉量と収量比数について共分散分析を行った結果、修正平均 ($F=2.25; n=1, 14; p<0.1$) には有意な差異がなかったが、回帰係数 ($F=8.24; n=1, 13; p>0.01$) に有意な差異が認められた。そして、両品種の回帰式から収量比数0.8以上の ha 当り葉量を求めると、ボカスギは31~38ton/haであったのに対し、タテヤマスギは24~28ton/haとなり、両者間に大きな差異があることがわかった。

カワイダニスギの葉量の調査事例は少ないが、22年生の林分では約45ton/haであったことが報告されている(相浦, 1997)。葉量が極めて多いのは閉鎖直後であること、さらに列状植栽されていたことなどの特殊な事情にもよると考えられるが、これらを考慮に入れても、カワイダニスギはボカスギと同等もしくはそれ以上の葉量を有すると考えられる。

マスマスギおよびリョウワスギの葉量については明らかになっていないが、これらの成長は一般にタテヤマスギよりも緩慢であることから、葉の生産性効率の品種による差異が小さいことを考慮すると(相浦, 1997)、マスマスギおよびリョウワスギの葉量はタテヤマスギと同じもしくは少し小さいものと推測される。

以上のように、葉量を個体当りの値および ha 当りの値で比較しても、ボカスギはタテヤマスギよりも大きい傾向があり、さらに冠雪荷重は葉量に伴って増加することから、ボカスギの冠雪荷重はタテヤマスギのそれよりも大きくなると推測された。したがって、ボカスギはタテヤマスギよりも個体当りの冠雪荷重が大きく、冠雪害の危険性を高める一因になっていると考えられた。中島ら(1989)はボカスギの冠雪量が多いのは枝葉の構造や配置の差異よりも、個体当りの葉量が極端に多いことによるためと述べている。片岡ら(1983)も、ボカスギが個体当りの葉量の多い品種の一つであり、そのため個体の冠雪量も多くなることを指摘している。カワイダニスギはボカスギとほぼ同等の葉量を有することから冠雪荷重の大きな品種と考えられる。さらに、マスマスギおよびリョウワスギの冠雪荷重はタテヤマスギのそれとほぼ同程度ないし少し小さいと推測された。

第4節 スギの冠雪荷重の推定

冠雪害に対する林木の抵抗性を力学的な手法で定

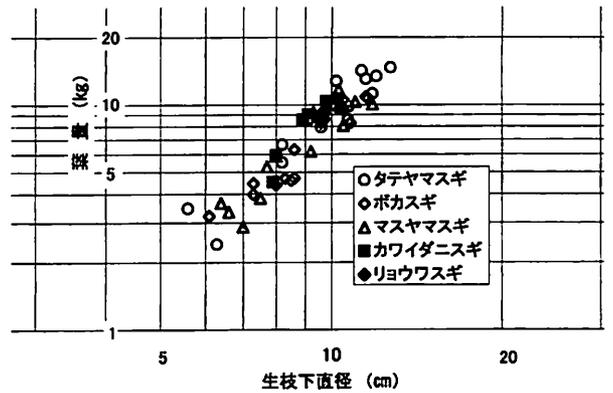


図-14 冠雪荷重測定木の葉量と生枝下直径の関係

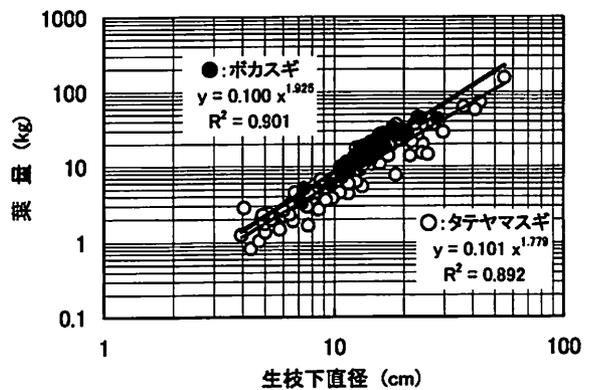


図-15 タテヤマスギ11林分とボカスギ6林分における個体の葉量と生枝下高の関係

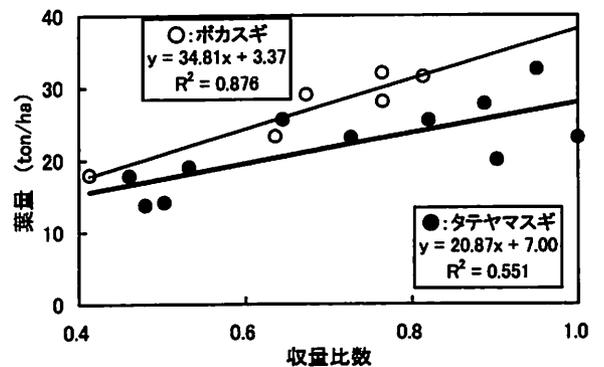


図-16 タテヤマスギ11林分とボカスギ6林分における ha 当たりの葉量と収量比数の関係

量的に評価するためには冠雪荷重と樹幹の耐力の資料が不可欠である(中谷,1991)。しかし、林木の冠雪荷重は直接測定することが困難であるため、冠雪荷重を降雪要因と樹冠要因から推定する方法が用いられている(松田,1981, 武田,1958)。ここでは、スギ樹冠に付着する冠雪荷重を降雪量および葉量の関係から推定する方法を検討し、さらにこの推定式の有効性をボカスギ被害林分において検証した。

1. 材料と方法

冠雪荷重の測定方法は本章1節と同じ装置(図-8)を用いて、吉峰(標高232m)において1982/83年から1989/90年の8ヶ年の間に行った。供試木数は1982/83年, 1988/89および1989/90年が各6本ずつ, 1983/84から1987/88年までは各12本ずつである。なお、測定に用いたスギはボカスギ, タテヤマスギ, マスヤマスギ, リョウワスギ, カワイダニスギの5品種である。この5品種は葉量が等しい場合の冠雪荷重に品種間の差異が認められなかったので(表-13), ここでは全品種を一括して取り扱った。また、冠雪荷重測定の終了後、供試木を層厚1m毎に切断して葉量を測定した。葉量は1982/83年の供試木が1.2~5.5kgで、他の年度の供試木は2.4~14.7kgであった。

2. 結果と考察

(1)冠雪荷重と葉量および降雪量の関係

松田(1981)は各降雪量毎の冠雪荷重 S_L と葉量 W_L の関係を次式で近似した。

$$\log(S_L) = A + B \cdot \log(W_L) \quad (3.4.1)$$

この式の係数 A は降雪量に伴って増加し、係数 B は降雪量に関係なくほぼ一定(0.97)の値を示すことを報告した。

そこで、これと同様の傾向が本調査においても認められるか否かについて検討した。降り始めからの積算降雪量が15kg/m²以上であった51回の降雪を調査対象とし、各降雪における最大冠雪荷重と葉量を対数変換して、両者の間の相関係数および回帰係数を計算した。

その結果、各降雪において最大冠雪荷重と葉量の間には正の相関が認められ、51回の降雪うちの47回について1%水準で統計的に有意性が認められた(図-17)。しかし、(3.4.1)式における係数 A の値は降雪量と同じ場合でも各降雪によってその差が大きかった(図-18)。また、係数 B も0.45~1.48の範囲

にあり、変動が大きかった。ただし、その値の大部分が1未満であったことから、大半の降雪において、葉量が大きいほど単位葉量当りの冠雪荷重は減少する傾向があったといえる。また、葉量の小さな供試木は梢端部のみに葉が着いているのに対し、葉量の大きな供試木は梢端部から樹冠下部まで葉が着いていたことから、単位葉量当りの冠雪荷重は梢端部で大きく、樹冠下部ほど小さくなる傾向があったといえる。同様の傾向はこれまでもモデル実験により認められている(四手井,1952)。

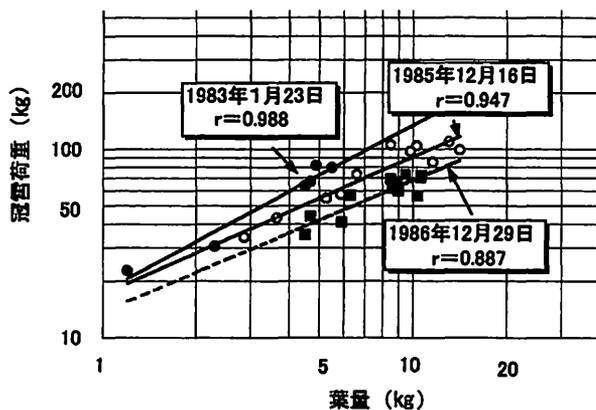


図-17 個体の葉量と冠雪荷重の関係

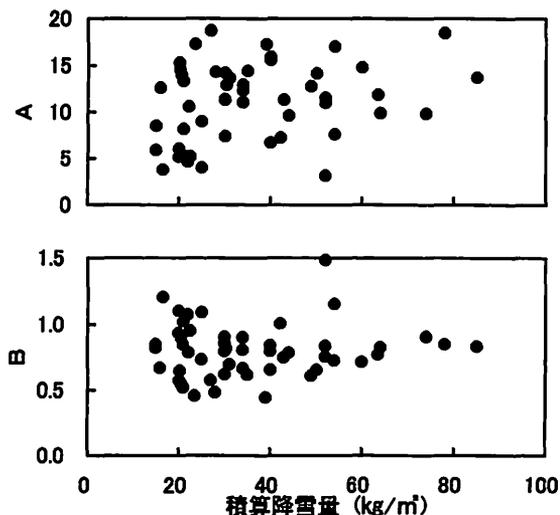


図-18 冠雪荷重と葉量の関係式の係数 A , B と降雪量の関係

以上のことから、冠雪荷重と葉量の関係式の係数 A と B は各降雪においてかなり変動するといえる。その原因は明らかではないが、雪質や雪の降り方などの違いに起因することも考えられた。

つぎに、冠雪荷重と葉量の推定式を冠雪荷重が最も多かった降雪の資料を用いて検討した。供試木の葉量は測定年度によって異なるため各降雪における冠雪荷重をそのまま比較できない。そこで、各年度において共通の葉量を有しかつその値が最も大きかった葉量 5 kg の供試木を対象に、冠雪荷重と葉量の関係を調べた結果によると、その最大値は 72 kg であった(図-19)。これは1983年1月20日から23日にかけて積算値で 78 kg/m² の降雪があったときに測定されたものである。なお、降雪の比重は 0.09 で当地としては平均的な値であった。この降雪における各供試木の冠雪荷重と降雪量の関係を調べた(図-20)。冠雪荷重は降雪量の増加に伴って増大し、途中で一旦減少した。これは気温がプラス 2℃まで一時的に上昇したことによるものである(嘉戸・平, 1985)。その後は、気温がマイナスとなり冠雪荷重が降雪に伴って再び増加した。そこで、冠雪の一部が落下した影響を取り除くため、落雪直前の冠雪荷重と落雪後に再び同じ冠雪荷重に達したときの値を直接結び、各供試木の冠雪荷重を降雪量 5 kg/m² 毎に 10~55 kg/m² の範囲で求めた(図-21)。

以上のようにして得られた冠雪荷重と葉量を対数変換して回帰式を求めた(表-14)。この結果によると、係数 B は平均 0.86 となり図-17の値よりもかなり変動が小さかった。また係数 A は降雪量に伴って増大する傾向があり、次の逆数式で近似された(図-22)。

$$1/A = 7.563 / S_F + 0.663 \quad (3.4.2)$$

ここで、 S_F は降雪量 (kg/m²) である。

そこで、係数 A を (3.4.2) 式から求め、 B は 0.86 で一定として、冠雪荷重 S_L を次式から推定することとした。

$$S_L = 10^A \cdot W_L^{0.86} \quad (3.4.3)$$

(2)冠雪荷重推定式の有効性

冠雪荷重の推定式 (3.4.3) は葉量が 1.5~5 kg と小さな木から得られたものである。しかし、冠雪害の危険性が高い 20~30 年生のボカスギ林における 1 本当たりの葉量の平均値は 20~30 kg である。そのため (3.4.3) 式が 20~30 年生のスギにも適合できる

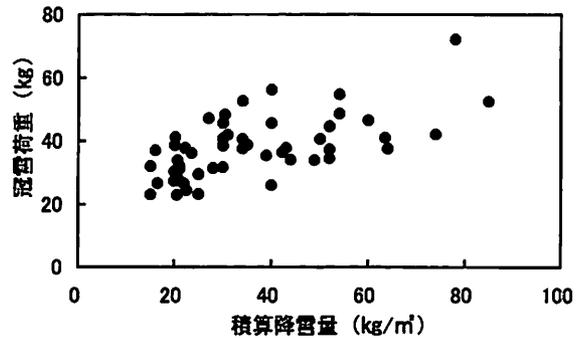


図-19 51回の降雪における葉量 5 kg の供試木の冠雪荷重の比較

ものかどうか明らかにしておく必要がある。

そこで、この推定式の有効性について検討するため、図-8よりさらに大きな供試木の冠雪荷重も測定ができる幹を乗せる台を作成し、この台を含む荷重の変化を 4 個のロードセルで測定し、冠雪荷重を求めた。供試木は胸高直径 24 cm、樹高 13 m のボカスギで、この木の梢端から 7.6 m の長さ部分の樹冠に付着する冠雪荷重を測定した。この供試木の葉量を測定した結果、26 kg であった。冠雪測定は、1993 年 12 月から 1994 年 3 月まで 4 ヶ月間行った。この期間中で降雪が多かった 1994 年 1 月下旬における冠雪荷重と降雪量の関係の測定値と推定値を比較した(図-23)。なお、測定の途中で風などの影響を受けて、樹冠から冠雪が落下した場合には、落下直前の冠雪荷重と落下後に再び同じ冠雪荷重に達したときの値を直接結び、冠雪荷重と降雪量の関係を検討した。この結果、推定値の方が測定値より大きい場合や推定値の方が小さい場合もあり、推定値と測定値の差の平均値は -18%~+30% であった。このような差が生じた原因としては冠雪荷重の推定にあたって降雪の質的な要素を加味していないことが考えられた。しかし、この調査期間内で最も降雪が多かった 1 月 28 日における測定値と推定値の差の平均値は 3% と小さく、冠雪害が起きるのは極めて多い降雪によるものであることから、今回求めた推定値を冠雪害と関連づけて解析を行うことが概ね妥当と考えられた。

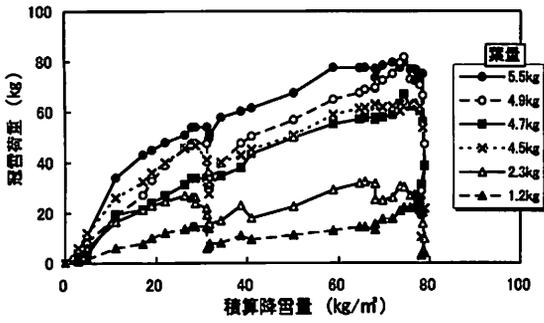


図-20 冠雪荷重が最大となった1983年1月の降雪における各供試木の冠雪荷重と降雪量の関係

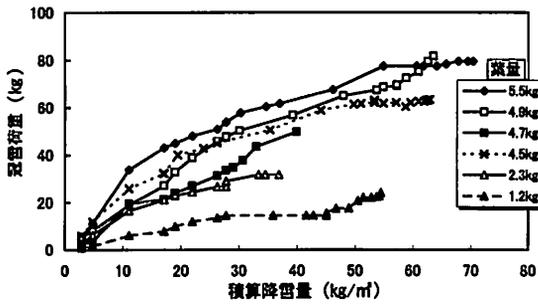


図-21 図-20において冠雪落下の影響を取り除いた後の冠雪荷重と積算降雪量の関係

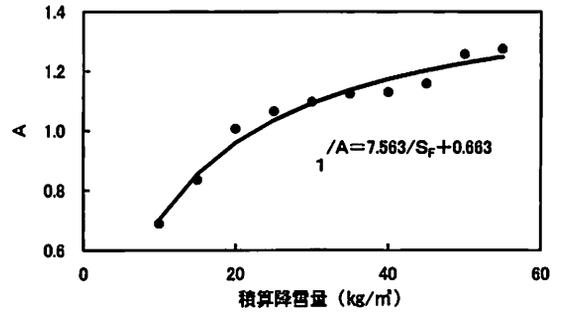


図-22 表-14における冠雪荷重と葉量の関係式の係数 A と積算降雪量の関係

表-14 冠雪荷重の最大値を示した降雪期間における冠雪量(対数)と葉量(対数)の回帰係数と相関係数関係

降雪量 (kg/m ²)	回帰係数 A*	回帰係数 B*	相関係数 r	供試木数 n
10	0.690	0.915	0.929	6
15	0.836	0.912	0.924	6
20	1.006	0.795	0.924	6
25	1.065	0.812	0.954	6
30	1.096	0.854	0.980	6
35	1.124	0.875	0.985	6
40	1.129	0.907	0.993	6
45	1.159	0.898	0.995	5
50	1.257	0.839	0.996	4
55	1.276	0.816	0.999	4

*: A, B は回帰式 $\log(S_L) = A + B \log(W_L)$ の係数

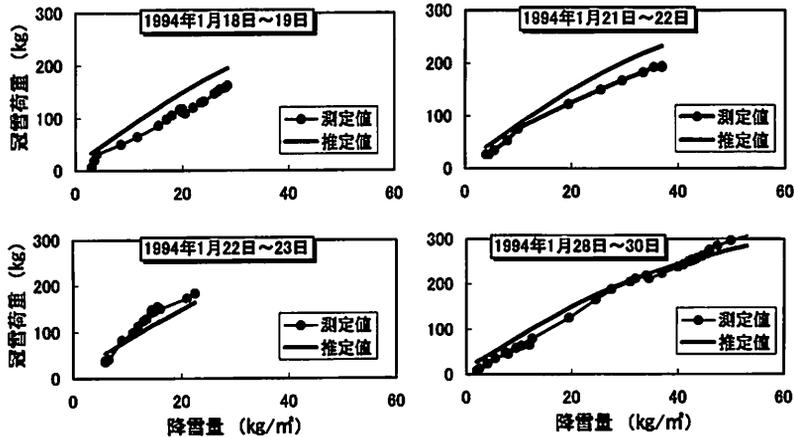


図-23 葉量26kgのスギの冠雪荷重の測定値と推定値の比較

第4章 冠雪荷重を受けた林木の耐力

林木の冠雪害は枝葉に雪が付着し、その荷重によって幹が折れたり曲がったりする被害である。この防止対策としては、着雪しにくくするか、着雪してもそれに耐える丈夫な林木に育てることである。そのためには、第3章で検討した降雪量と冠雪荷重の関係に加えて冠雪害が発生するときの冠雪荷重すなわち幹の耐力を明らかにする必要がある。これが明らかになれば個々の林木の冠雪害抵抗性を定量化することが可能となり、冠雪荷重に耐える林木を育成するための施業指針を得ることができると考えられる。このような考えに基づき冠雪荷重を受けた林木の耐力の評価法について解析した(中谷・嘉戸ら, 1984)。

本章ではさらに調査林分を増やして、その耐力に関与する幹の強度的性質および根系支持力の品種および林分変動について検討した。

第1節 林木の耐力の評価法

冠雪荷重を受けた林木の耐力の評価法に関しては既に報告済みであるが、林木の耐力に関与する要因の品種および林分変動の検討に不可欠である。そこで、冠雪害の発生機構の力学的解析とこの解析の妥当性の検証結果についてのべる(中谷・嘉戸ら, 1984)。

1. 冠雪害発生機構の力学的解析

林木の冠雪害は、力学的観点にたてば、次のような場合に発生するものと考えられる。

- a) 冠雪荷重と風荷重が同時に作用する場合
- b) 冠雪荷重が樹冠軸から偏心して作用する場合
- c) 元湾曲のある幹に冠雪荷重が作用する場合
- d) これらが複合して作用する場合

沢田(1983)は、b)の条件下で発生する冠雪害を長柱の偏心圧縮による林木の破壊として、林木の根元を固定端条件とみなして解を与えた。しかし、林木の根元は根張りの程度によっては半固定端となつて、根元に加わるモーメントの増大に伴って回転する場合が多く認められた。

したがって、筆者ら(中谷・嘉戸ら, 1984)は次のような仮定をおき、根元を半固定端条件として解析した(図-24)。

- a) 冠雪荷重は樹冠重量と冠雪重量の和とし、幹軸より e だけ偏心した重心部位 G に集中荷重 P

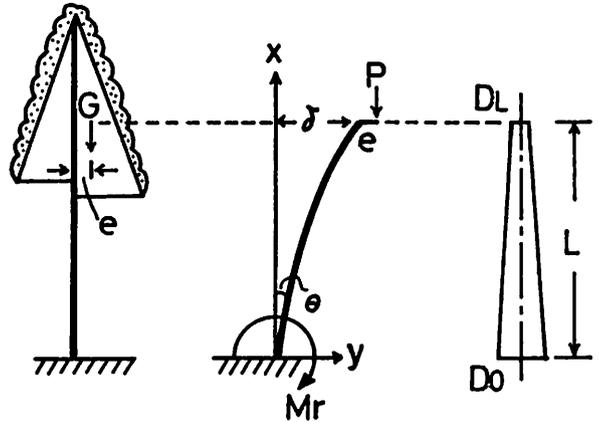


図-24 冠雪害の力学的モデル

G : 冠雪荷重の重心, e : 冠雪荷重の偏心量
 P : 冠雪荷重, θ : 根元の回転角度, L : 冠雪荷重の荷重点高, δ : 荷重点の水平変位, D_0 : 根元直径, D_L : 荷重点直径

として加わる。

b) 幹は一定のテーパを持った円形断面の通直な柱(截頭円錐体)とし、強度特性は均一である。

c) 林木の根元はモーメントに比例した回転変位を生じ、この関係は次式で示される。

$$\theta = \mu M_0 = \mu \delta P \tag{4.1.1}$$

ここで、 θ は回転変位、 M_0 は根元のモーメント、 μ は M_0 と θ の間の比例定数(以下根元の回転係数と呼ぶ) および δ は荷重点の水平変位である。

d) 樹冠の偏心量により幹は横方向に曲げ応力を生じる。荷重の増大に伴い曲げ応力も増大し、幹の曲げ強さを越えたときに折損する。この時の外力(冠雪荷重)が幹の耐力に相当する。

この力学的モデルを解析した結果、荷重点における幹の水平変位 δ 、任意の高さにおける水平変位 y と曲げ応力 σ_x は次式で示された(中谷・嘉戸ら, 1984)。

$$\delta = \left[\frac{\gamma}{\alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma} - 1 \right] e \tag{4.1.2}$$

$$y = \left[\frac{\alpha \gamma - X_0 \{ \alpha \gamma \cos \gamma_0 + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma_0 \}}{\alpha \{ \alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma \}} \right] e \tag{4.1.3}$$

$$\sigma_x = \left[\frac{K_0 \alpha \gamma^2 \{ \alpha \gamma \cos \gamma_0 + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma_0 \}}{Z_0 L X_0^2 \{ \alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_0 \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma \}} \right] e \tag{4.1.4}$$

ここで、 γ は $(\beta / \alpha) \cdot \phi$ 、 β は $1 - \alpha$ 、 α は細り比 (D_L / D_0)、 D_0 は幹の根元直径、 D_L は荷重点高における幹直径、 ϕ は $(L / \beta) (\sqrt{P} / \sqrt{E I_0})$ 、 L は荷重点高、 E は幹の曲げヤング率、 I_0 は根元の断面二次モーメント ($D_0^4 \cdot \pi / 64$)、 K_0 は $E I_0 / L$ 、 X_0 は $1 - \beta \cdot x / L$ 、 γ_0 は $(1 - X_0) \cdot \alpha \cdot \gamma / (X_0 \beta)$ 、 Z_0 は根元の断面係数である。

(4.1.4)式は幹の曲げ応力が偏心量に比例することを表していることから、偏心量の大きさは幹の耐力に影響を与えているといえる。しかし、現実には冠雪時の樹冠の偏心量を測定するのは困難なことから、偏心量のない状態、すなわち冠雪荷重が幹軸に鉛直に加わる場合の耐力(座屈荷重)を指標値として用いることにした(中谷・嘉戸ら, 1984)。この座屈荷重 P_{cr} は、次式で与えられる。

$$P_{cr} = \alpha^2 \gamma_s^2 E I_0 / L^2 \quad (4.1.5)$$

ここで、 γ_s は次式を満足する場合の γ 値である。

$$\tan \gamma / \gamma = -1 / (\beta / \alpha - \mu \alpha \gamma^2 E I_0 / L) \quad (4.1.6)$$

なお、根元を固定端条件とみなしたときの座屈荷重は、(4.1.6)式に $\mu = 0$ を代入し γ_s を求め、(4.1.5)式により与えられる。特にこの場合の γ_s は、林木の細りを示す α 、 β のみから決定される(沢田, 1983)。

このように林木の座屈荷重は、直径、細り、冠雪荷重の重心の高さ、樹幹ヤング率および根元の回転係数によって決定される。また、冠雪害の発生機構としてより一般的な偏心圧縮の場合には、これらの因子に加えて曲げ破壊応力とともに偏心量そのものが林木の耐力に重要な意味をもつといえる。

2. 試験方法

前節の力学的解析の妥当性を検討するため、林木の荷重試験、幹の強度試験および根系による幹支持力試験などを実施した。

(1) 林木の荷重試験

林木の荷重試験を頼成のスギ14年生林分、吉峰の16年生林分および座主坊の28年生林分の3箇所で行った(表-15)。

これまで行われた林木の荷重試験は、林木に傾斜荷重を加えるものが大半であった(中峠・松田, 1982)。この方法によると水平、鉛直の両荷重が同時に加わり、かつ荷重の増大に伴う水平変位の増大によって傾斜角度が変化する。この傾斜角度の変化は無視し得ないものであり、そのため妥当な耐力評価が困難

になると考えられる。

そこで本研究では、林木に鉛直荷重のみを加えるために図-25のような荷重方法を採用した。所定の長さまで手動ウインチA(商品名:チルホール)のワイヤーを送りだしたのちに、林木の上部に連結されたワイヤーが鉛直に達するまで手動ウインチBで巻きとるものである。この試験はでき得る限り小さな水平変位の状態から測定を始め、所定の変位で荷重と幹各部の水平変位を測定し、最後に折損させた。なお、幹各部から錐下した鉛直線の移動量を、地上60cmに設置したスケール(1mm精度)により測定し、水平変位を求めた。また、幹が転倒しないように根系が支持する力(以下、根系支持力と呼ぶ)を測定する目的で、根元の回転変位を幹60cm高に打った釘の水平移動量で測定した。

林木の荷重試験の荷重点高は樹高の50~80%に設定した。これは、冠雪荷重の重心高の推定が困難なことおよび条件範囲をひろげて前述した力学的解析の適用範囲を検討するためである。荷重をかけて供試木が折損ないしは倒伏したのちに伐倒し、幹各部の直径(根元から1m間隔)、折損高などを測定した。なお、幹は解析で仮定したような一定のテーパーを必ずしも持った円形断面の柱(截頭円錐体)とはなっていない。そのため、根張りの影響の大きい根元直径を除外し、根元上部から荷重点高までの測定直径に対し、高さ直径間に最小二乗法を適用して、実際の幹形に最も近いテーパー柱を求めた。以後の林木に関する計算は、全てこのようにして測定し求めたテーパー柱によって行った。

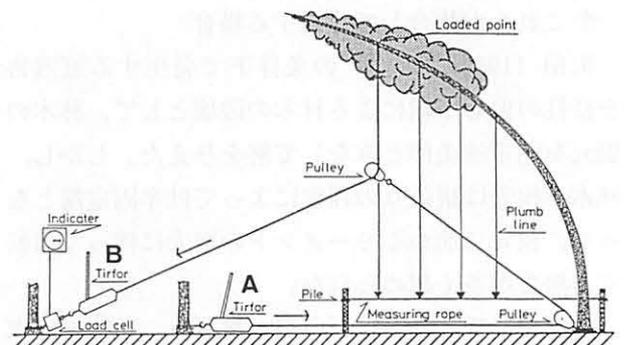


図-25 林木の鉛直荷重試験

(2)幹の強度試験

林木に関する試験を終了したのち、折損部に近い幹の非破壊部から強度試験用資料（長さ2.5m）を採取した。幹の強度試験は実大材試験機を用いて中央集中荷重方式により、スパン2mで曲げ試験を行った。冠雪害をできるだけ忠実に現すため生丸太の状態試験をすすめたが、試験体を安定させるために、支点網板に接する丸太部位を平滑に仕上げ、それ以外は特別な加工を行っていない。なお、最大応力、比例限度力の計算にはスパン中央の断面寸法を使用した。また、ヤング率の計算には、丸太を円形断面のテーパー梁とみなした。

3. 結果と考察

(1)林木の耐力の推定

各供試木の幹形状、樹幹ヤング率および根元の回転係数を(4.1.5)式に代入し、それぞれの座屈荷重を計算した。この結果から得られた値と林木の荷重試験における最大値の関係を示した(図-26)。この図から、林木の荷重試験における最大荷重は150~1,000kgまで広く分布しているが、最大荷重と座屈荷重の値はほぼ一致し、両者の間に高い相関が認められた。同様の傾向は、継田ら(1984)や谷ら(1985)によっても確認されている。そして各調査地の回帰直線間にも有意な差異が認められなかった。これらのことから、林木耐力は林分が違っても、幹形状、幹の強度特性、根系の支持力の3要因によって推定が可能と考えられた。しかし、全供試木を込みにした場合における耐力の変動に対する寄与率(r^2)は約70%にすぎなかった。この原因として、一般的な測定誤差に加えて、幹を截頭円錐体に修正する際に生じた誤差、幹や樹冠の自重、偏心量、幹の強度特性を一定と仮定したことにより生じることが考えられた。

(2)林木の形状と折損高

林木の荷重試験による折損高と座屈理論から求めた折損高の関係について検討した。林木の荷重試験によって折損した供試木を対象に、座屈時の応力分布を(4.1.4)式から求め、その最大応力部位を折損部位の推定値とした。荷重試験による折損部位の測定値とその推定値との間には1%水準で有意な相関が認められ(図-27)、測定値と推定値とがほぼ一致しているといえる。これは林木の荷重試験の妥当性を示すものと考えられた。なお、測定値と推定

値とが完全に一致しなかった原因として、本来曲線である幹形を直線で近似したこと、他に実際の幹では高さにより強度特性が変化するのに対し幹のヤング率や曲げ強度を一定と仮定したことなどが考えられる。

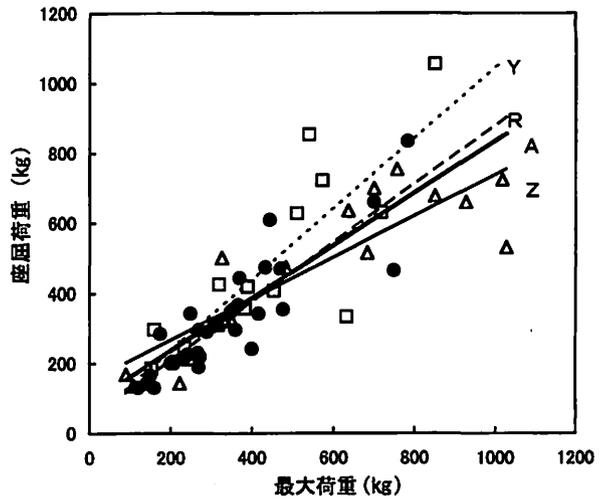


図-26 林木の鉛直荷重試験における最大荷重 (P_m) と座屈荷重 (P_{cr}) の関係

- --- : 頼成 (R) $P_{cr} = 40 + 0.844P_m, r = 0.879$
- : 吉峰 (Y) $P_{cr} = 32 + 1.018P_m, r = 0.825$
- △ - · - · : 座主坊 (Z) $P_{cr} = 150 + 0.089P_m, r = 0.866$
- : 全体 (A) $P_{cr} = 87 + 0.750P_m, r = 0.884$

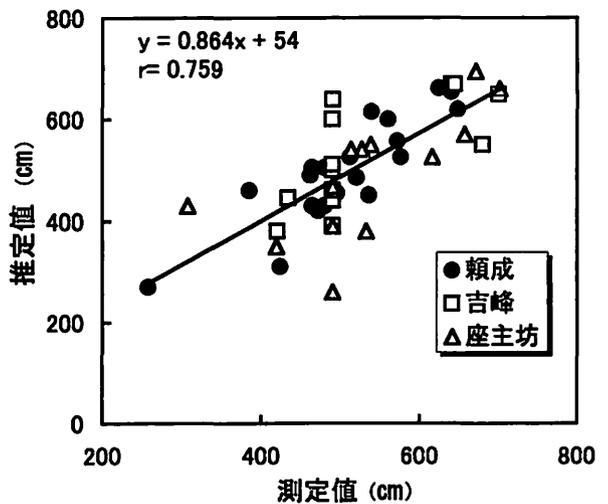


図-27 折損高の測定値 (x) と推定値 (y) の関係

つぎに林木の形状と折損高の関係について検討した。幹の細り比 α （荷重点高直径／根元直径）と折損高比（折損高／荷重点高）の回帰直線は座屈理論から求めた折損高の推定曲線とほぼ一致していることがわかった（図-28）。なお根元直径は先に示したテーパ柱から求めた。この図から、折損位置は幹の細り比が小さいほど高くなる傾向がみられ、細りが折損高に影響していることが明らかになった。すなわち、幹のうらごげが強いほどあるいは荷重点高が高いほど折損位置は高くなるといえる。

第3節 樹幹の強度特性の品種間および林分間比較

前節において、冠雪荷重下の幹の耐力が幹形状、幹の強度特性（とくに樹幹ヤング率）および根系の支持力（根元の回転係数）によって計算される幹の座屈荷重で近似できることを示した。このことは、幹の強度特性が林木の冠雪害抵抗性を評価するうえで重要な要因であることを示唆するものである。そこで、スギ樹幹の強度要因について品種間および林分間によって比較検討した。

1. 調査方法

幹の強度試験は延べ10箇所の林分において（表-15）、3つの試験方法 a), b), c) を用いて行った。

a) この方法は第4章1節に示した通りであり、幹を2.5mの長さに玉切りし、実験室に持ち帰り、万能試験機を用いてスパン2mとして中央集中荷重方式により生材条件で曲げ試験を行うものである。この試験では丸太の曲げヤング率のほか最大応力、比例限度、テトマイヤー係数などを調べた。以下では、この調査法を実大材試験と呼ぶ。

b) これは加力梃子に人がおら下がることにより林木に曲げモーメントを負荷させて樹幹ヤング率を測定するものである（小泉・上田，1986）。この方法は林木を伐採することなく測定できる利点がある反面、樹幹ヤング率の測定が高い部位や枝が密生する部位でできないこと、風がある場合には不向きなことなどの欠点もある。今回の調査ではいずれも地上1.3m付近の樹幹ヤング率を測定した。以下、これを加力梃子試験と呼ぶ。

c) 伐倒した供試木を高さ1.3m、4.3m・・・と3m間隔で長さ1m、厚さ1cmの梃目板を採取し、無欠点部より2試料まで、 $1 \times 1 \times 16$ cmの曲げ試験体

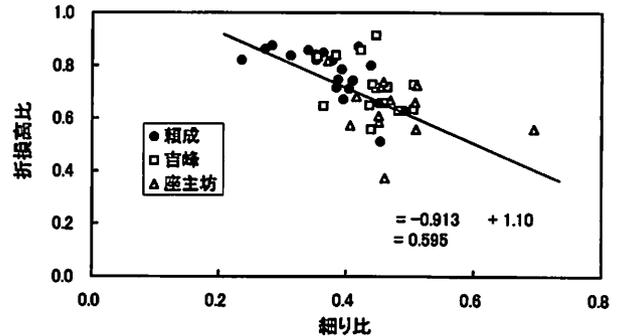


図-28 樹幹の細り比（荷重点直径／根元直径： α ）と折損高比（折損高／荷重点高： y ）の関係

を髓より半径方向に連続的に作成し、これらの試験体を以後飽水状態を保ち、スパン14cmとして中央集中条件下で曲げ試験を行うものである。以後、この試験を小試験体曲げ試験と呼ぶ。この試験により各年輪のヤング率を求め、小泉（1987）が行ったように、幹を同心円状の年輪からなる層構造と見なし、次の手順で樹幹ヤング率を計算するものである。

各年輪の髓からの距離、ヤング率をそれぞれ $r_1, r_2, \dots, r_n, E_1, E_2, \dots, E_n$ とおくと

$$i \text{ 年輪層の断面二次モーメントは次式で表される。} \\ I_i = \pi (r_i^4 - r_{(i-1)}^4) / 4 \quad (4.2.1)$$

さらに、幹の全体剛性は次式で示される。

$$EI = E_1 I_1 + E_2 I_2 + \dots + E_n I_n$$

ここで、 EI は幹の全体剛性である。

$$\text{また、} I = \pi r_n^4 / 4 \text{ より} \quad (4.2.2)$$

樹幹ヤング率 E は次式によって得られる。

$$E = \sum (E_i I_i) / I \quad (4.2.3)$$

2. 結果と考察

(1) 品種による比較

一般に幹内における強度特性は、いわゆる未成熟材部において小さく、加齢とともに大きくなり、成熟材部に至って安定する傾向がある。また、後ほど詳しく検討するが、幹部位によっても強度特性が変動する傾向が認められている。したがって、樹幹

ヤング率の品種間比較に際しては林齢や測定部位をそろえる必要がある。

吉峰の6年生林分においてタテヤマスギ実生、ボカスギ、リョウワスギおよびタテヤマスギサシキ(上市2号)の生丸太(長さ80cm)を対象に樹幹ヤング率を測定した結果について述べる(平・嘉戸ら, 1990)。測定した各品種の樹高、根元直径および樹幹ヤング率の平均値を表-16に示した。この調査地では、リョウワスギの樹幹ヤング率が最も大きく、ボカスギのそれは最も小さかった。タテヤマスギの樹幹ヤング率はこれらの中間の値であり、実生とサシキの間には顕著な差異が見られなかった。そこで、樹幹ヤング率について分散分析をした結果、品種間に1%水準で統計的に有意な差異($F = 7.23; d.f. = 3, 18$)が認められた。なお、根元直径および樹高には品種による差異が見られなかった。

次に、頼成の14年生林分における樹幹の強度特性について比較検討した。長さ2mの生丸太のヤング

率、比例限応力、最大応力およびテトマイヤー係数の品種別平均値を表-17に示した。これらの丸太の採取部位は地上2~5mの高さであった。この結果、樹幹ヤング率には品種間差異が認められ、マスマスギは3品種の中で最も大きな値を示し、最も小さなボカスギの約1.5倍の値であった。タテヤマスギはこれら2品種の中間の値であった。

これらの品種間差を検定するための分散分析の結果を表-18に示した。この結果から、品種間に1%水準で統計的に有意な差異が認められたので、さらに各品種間で最小有意差を求めたところ、マスマスギはボカスギと1%水準で、タテヤマスギとは5%水準でそれぞれ有意性が認められた。比例限応力および最大応力についてもマスマスギが最大で、ついでタテヤマスギ、ボカスギの順であった。これらについて分散分析したところ、いずれも、品種間に5%水準で有意性が認められた。また、テトマイヤー係数は0.5から1の範囲で変動し、破壊までの荷

表-15 林木の耐力に関する調査地の概要と供試木本数

調査地	頼成	吉峰			北屋敷		荒館	座主坊	岩崎	下屋敷
林齢(年生)	14	6	16	21	18	22	25	28	31	25
供試木本数(本)										
1. 林木荷重試験	32		16					15		
2. 幹強度試験										
a. 実大材試験	32	22	16		10	11	18	15		
b. 加力梃子試験				86		45	27		48	32
c. 小試験体試験						7	8			
3. 根系支持力試験	32	54	16		10	11	18	15		
ボカスギ	○	○	○	○	○	○	○		○	
タテヤマスギ	○	○	○	○				○		
マスマスギ	○		○	○						
リョウワスギ		○		○						
カワイダニスギ		○								
標高(m)	100	230			100		50	350	100	150
傾斜度(度)	5	5			30	35	23	30	5	
樹高(m)	9.0	2.8	10.7	12.7	10.2	13.4	19.7	10.8	17.3	10.9
胸高直径(cm)	16.7	6.4	16.6	19.9	15.0	17.6	26.6	15.9	28.0	16.2
形状比(m/m)	54	44	64	63	68	76	74	69	62	67
土壌の深さ(cm)	40	26	44	44	68	31				
土壌の堅さ(mm)	24	17			16	16	12	7		

重とたわみとの関係が直線的で塑性域が無い場合には0.5、塑性域が明瞭に表れるほど1に近くなる。この係数を比較するとタテヤマスギとボカスギはほぼ同値であるが、マスヤマスギはこれらよりも低かった。分散分析の結果、品種間に1%水準で有意性が認められた。以上のことから、ボカスギは小さな荷重でも変形しやすく、復元力も小さくてかつ塑性域が明瞭な品種といえる。同様の傾向は佐々木ら(1983)も認めている。一方、マスヤマスギは曲げたり、破壊したりするのに大きな荷重が必要で、か

つ塑性域がはっきりしない品種といえる。タテヤマスギはこれら2品種の中間的な強度特性を有するようである。

以上のように6年生および14年生林分では材質特性に顕著な品種間差違が認められたが、同様の傾向が林齢の異なる場合においても認められるものか否かを検討するため、吉峰の22年生の調査地で加力挺子法を用いて樹幹ヤング率を調べた。各品種の供試木の概要と樹幹ヤング率の平均値を表-19に示した。なおこの表には比較のために、近年、富山県におい

表-16 吉峰調査地(6年生)における根元直径、樹高および樹幹ヤング率の3品種別平均値

スギ品種	林 齢	調査 本数	根元直径 (cm)		樹 高 (m)		樹幹ヤング率 (tonf/cm ²)	
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
タテヤマスギ (実生)	6	6	7.0	1.52	2.82	0.56	13.1	4.29
ボカスギ	6	6	5.8	0.86	2.94	0.37	9.1	0.86
リョウワスギ	6	5	6.1	0.35	2.66	0.08	18.8	5.22
タテヤマスギ (上市2号)	6	5	6.7	1.57	2.85	0.37	14.7	1.83

表-17 頼成調査地(14年生)における生丸太の材質特性の3品種別平均値

品 種	ヤング率 (10 ³ kgf/cm ²)	比例限応力 (kgf/cm ²)	最大応力 (kgf/cm ²)	テトマイヤー係数
ボカスギ	26.4	104	266	0.72
タテヤマスギ	31.2	138	305	0.69
マスヤマスギ	40.3	143	312	0.60

表-18 頼成調査地における3品種の生丸太の材質特性についての分散分析結果

要 因		自 由 度	平 方 和	平均平方	F
ヤング率	品種	2	1035.64	517.83	6.07**
	誤差	29	2474.41	85.32	
比例限応力	品種	2	9844.4	4922.2	3.79**
	誤差	29	37647.3	1298.2	
最大応力	品種	2	13663.2	6831.6	3.95**
	誤差	29	47230.8	1749.3	
テトマイ ヤー係数	品種	2	0.061	0.031	6.49**
	誤差	29	0.139	0.0048	

表一19 吉峰調査地（22年生）と下屋敷調査地（25年生）における胸高直径，樹高および胸高部位における樹幹ヤング率の品種間比較

スギ品種	林 齢	調査 本数	根元直径 (cm)		樹 高 (m)		樹幹ヤング率 (tonf/cm ²)	
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
ボカスギ	22	18	25.6	2.96	13.9	1.70	35.6	7.98
マスマスギ	22	20	18.9	3.90	12.2	1.72	57.6	5.74
リョウワスギ	22	23	15.9	2.46	10.9	1.18	51.2	7.26
タテヤマスギ	22	25	20.4	0.97	14.0	0.97	55.9	11.30
カワイダニスギ	25	32	16.4	2.08	10.6	1.19	42.0	9.44

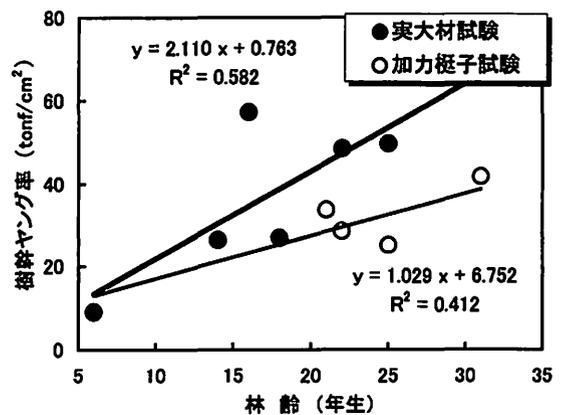
てボカスギの代わりに造林が進められているカワイダニスギの下屋敷25年生調査地における値も併せて示してある。この結果によると，樹幹ヤング率の平均値が最も大きいのはマスマスギで，つづいてタテヤマスギ，リョウワスギの順であったが，これらの値は50~60tonf/cm²で大きな差異がなかった。しかし，これらの品種の樹幹ヤング率はボカスギのそれの1.4~1.6倍であり，品種間差異が大きいことがわかった。そこで，分散分析を行ったところ1%水準で品種間に有意な差異 ($F = 25.37$; $d.f. = 3, 83$) が認められた。このように，樹幹ヤング率はマスマスギが大きく，ボカスギで小さい傾向がこれまでも報告されており (片岡ら, 1983; 矢野, 1984)，全国的にみてもボカスギは樹幹ヤング率が小さい品種，マスマスギは大きい品種と判断される。また，カワイダニスギの樹幹ヤング率の平均値はボカスギのそれよりも大きいものの，マスマスギ，タテヤマスギ，リョウワスギのそれよりも小さかった。また，角材での強度試験の結果 (平, 1980) によると，ヤング率はマスマスギで大きく，ボカスギで小さく，その中間にタテヤマスギ，リョウワスギ，カワイダニスギが位置していたことが報告されている。

以上の結果を総合すると，樹幹ヤング率が最も大きい品種はマスマスギで，つぎにリョウワスギまたはタテヤマスギといえる。ただし，これらの品種のヤング率は林分によって順位が変動したため，どの品種の値が大きいかは明にならなかった。その次に樹幹ヤング率が大きかった品種はカワイダニス

ギで，ボカスギが最も小さい品種と考えられた。冠雪荷重を受けた林木の耐力は (3.1.5) 式から根系の支持力が大きい場合 ($\mu = 0$) にはヤング率に比例することから，ヤング率以外の条件が一樣ならばボカスギの耐力は他の品種の60~70%程度と推定される。このように，ボカスギの樹幹ヤング率が他の品種に比べて小さいことが冠雪害抵抗性が小さい一因であると考えられた。

(2)部位および林齢による比較

ボカスギの樹幹ヤング率の平均値を林齢別に示した (図一29)。この図の実大材試験の結果に注目すると，生丸太の樹幹ヤング率は加齢に伴って大きくなる傾向がみられるが，同じ林齢でも林分によって変



図一29 ボカスギの樹幹ヤング率 (y) と林齢 (x) の関係

動も大きいことがわかる。ポカスギは単一クローンであり遺伝的性質が等しいとされていることから、樹幹ヤング率の変動原因は遺伝的性質よりはむしろ立地環境や施業歴の差異に起因するものと考えられた。また、樹幹ヤング率は実大材試験の結果の方が加力挺子試験の結果よりも大きくなる傾向があった。この主な原因は、前者では幹の中央部あるいは上部の材を対象にヤング率を測定したのに対し、後者では1.3m付近のヤング率を測定したことから、測定部位の違いによる影響が考えられた。

そこで、樹幹ヤング率が林齢や部位の違いによってどの程度変動するのかを検討するため、荒館において小試験体による曲げ試験を行い、各年輪毎のヤング率を調べた。この結果から高さの異なる部位における樹幹ヤング率を計算し、その経年変化の一例を図-30に示した。まず各高さ毎にみると樹幹ヤング率は林齢の増加に伴って大きくなる傾向がみられる。しかし、その増大の程度は部位によって異なるようである。例えば、1.3mの高さの樹幹ヤング率は15年生以後に頭打ち傾向がみられ約25tonf/cm²であったのに対し、4.3mや7.3mの部位における樹幹ヤング率は林齢とともに増大し、20年生時には約55tonf/cm²に達し、同林齢における1.8mの部位のそれの約2倍になった。これらの結果から、高い部位に位置するほど樹幹ヤング率の増加率が大きいといえる。

荒館の8本の供試木における樹幹ヤング率と幹の高さとの関係を林齢10年生より5年間隔で示した(図-31)。なお高さは各林齢における樹高に対する比(相対高)である。林齢10年生では樹幹ヤング率に高さによる差はほとんど認められず、ほぼ20tonf/cm²であった。これまで指摘されてきた未成熟材の分布を考えると、幹上部のヤング率は低下するはずであるが、高さが増すにつれヤング率の年輪当たりの増分が大きくなり、初期値も高いため幹の高さによる差が生じていない。15年生では胸高部位の樹幹ヤング率の上昇は小さく26tonf/cm²であった。これは根張りによる繊維傾斜の影響のためと考えられる。胸高部位より上の樹幹ヤング率は樹高の9割以上で若干低くなっているものの、ほぼ同レベルで推移し32tonf/cm²となった。20年生では、高さ方向の差が目立ちはじめ中央部では44tonf/cm²に対し、両端では約30tonf/cm²にすぎなかった。伐採した25年生では樹幹ヤング率は上下の差が顕著になり、胸高部位で約

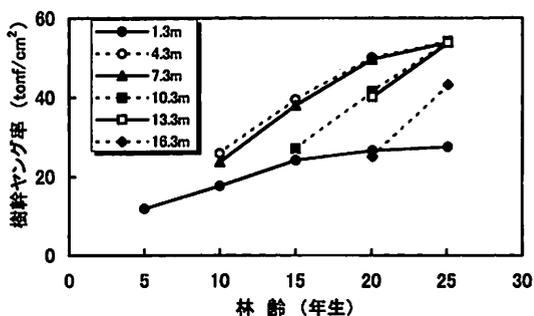


図-30 樹幹ヤング率の地上高別の径年変化

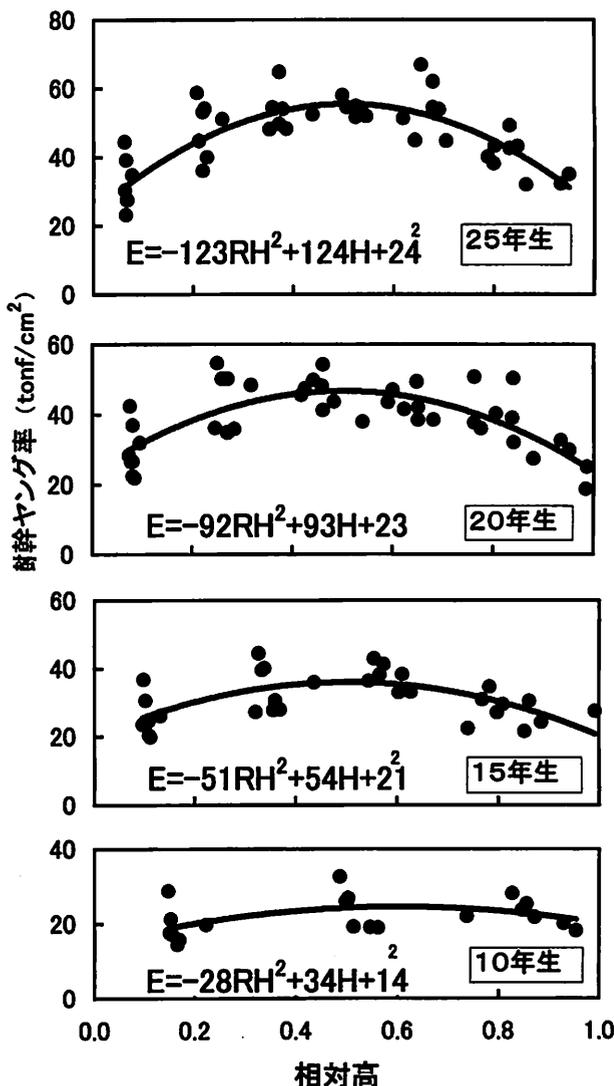


図-31 氷見市荒館の樹幹ヤング率 (E) と相対高 (RH) および林齢の関係

30tonf/ cm²となり、4.3mでは48tonf/ cm²、7.3から13.3mまでがほぼ一定で52tonf/ cm²、それより上部になると低下がはじまり16.3mで30tonf/ cm²となった。そして、各林齢における樹幹ヤング率の高さ方向の変動は相対高の2次曲線で近似された。このように樹幹ヤング率は加齢にともなって幹部位により約1.7倍の違いが認められたことから、冠雪荷重下における幹の耐力の推定に際しては幹の高さによる樹幹ヤング率の変動を考慮する必要がある。

第4節 根系の支持力の品種間・林分間比較と被害形態の判別

根系の支持力の品種間・林分間比較と樹幹の耐力に対する影響について検討した。また、根系の支持力は冠雪害の一形態である根返りや傾幹に関与すると考えられることから、力学的な手法を用いて根返りと幹折れの被害形態の判別を試みた結果について述べる。

1. 調査方法

調査地は頼成、吉峰16年生、座主坊、北屋敷（18および23年生時）および荒館の延べ6箇所のスギ林分である（表-15）。齢級はⅢからⅥ齢級で、いずれの林分も冠雪害の発生しやすい齢級であった（高橋、1977）。表中の土壌の深さはA層とB層の合計値で示した。また、土壌の堅密度を山中式土壌硬度計で測定した。

根系の支持力を根元の回転係数（ μ ）で表した。これは、林木が冠雪荷重を受けると根元部はそこに加わる曲げモーメント M_0 に比例して回転角 θ を生じるという仮定条件から、(4.1.1) 式では次のように定義されている。

$$\theta = \mu M_0$$

なお、 μ は単位モーメント当りの幹の回転角度を表すので、この値が小さいほど根系の支持力が大きいことを表す。

根元の回転係数に関する資料のうち頼成、吉峰、座主坊については第4章1節に示した林木の荷重試験の資料を用いた。試験方法は第4章1節に述べたとおりで、樹高の5～8割の部位にワイヤーを取り付け、手動ウインチ（チルホール）で徐々に鉛直荷重 P を加え、随時、これと荷重点の水平変位 δ および根元の回転角 θ を測定した（図-32左）。このときの M_0 は次式で示される。

$$M_0 = P \delta \tag{4.3.1}$$

また、北屋敷（18、22年生とも）と荒館では、地上2～2.5mの部位に徐々に傾斜荷重を加え、随時、その荷重と根元の回転角 θ を測定して根系の支持力を簡易的に求めた（図-32右）。この方法では、林木の変形に伴ってワイヤーの傾斜角度も変化するため、ワイヤーの傾斜角度と荷重点の水平変位もあわせて測定した。この場合の根元に加わるモーメントは次式で示される。

$$M_0 = P (L \cos a + \delta \sin a) \tag{4.3.2}$$

ここで、 P は傾斜荷重、 L は荷重点の高さ、 a はワイヤーの傾斜角度である。

なお、実験による根元のモーメント M_0 と回転角 θ の関係は、 M_0 が小さい時には、 θ は M_0 の増加に伴って直線的に大きくなる傾向がある（中谷・嘉戸ら、1984）。そこで θ と M_0 との間に最小二乗法を適用して直線回帰式を求め、その式の傾きを μ とした。

冠雪害の被害形態は幹折れや幹曲がりのような幹の損傷による被害と根返りや傾幹のような根系の損傷によって生じる被害に大別される。4章1節に示したように頼成、吉峰、座主坊の3箇所において林

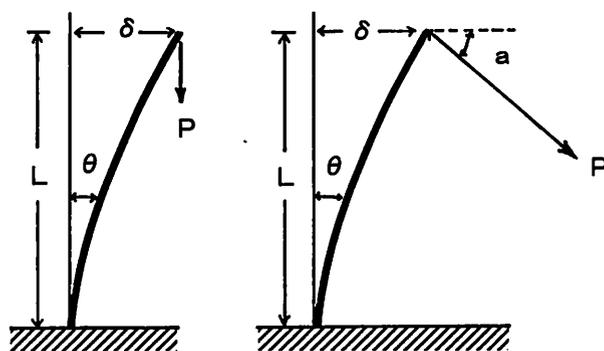


図-32 根系支持力の測定法

（左）垂直荷重試験、（右）傾斜荷重試験
 P ：ワイヤーの荷重、 θ ：根元の回転角度
 L ：荷重点高 δ ：荷重点の水平変位
 a ：ワイヤーの傾斜角度

木の鉛直荷重試験を行なって、各供試木の被害形態を調べた。そして、根返りした林木の根返りモーメント M_r を(4.3.1)式を用いて算出した。また、座主坊では幹折れ木を対象に傾斜荷重(図-32左)を加えて根返りさせ、根返りモーメント M_r を(4.3.2)式から算出した。

2. 結果と考察

(1)品種間・林分間による比較

樹冠に冠雪荷重が加わった場合における根系の支持力を表す根元の回転係数について主なスギ品種間で比較した。吉峰の6年生林分においてタテヤマスギ実生、タテヤマスギサシキ、ボカスギおよびリョウウスギの根元の回転係数(μ)と根元直径の関係を調べた結果を図-33に示した(平・嘉戸ら, 1990)。 μ 値は根元直径が大きくなるに従って直線的に減少する傾向が認められることから、根系支持力は根元直径が大きくなるのに従って大きくなるといえる。これは根元直径が大きいほど根量も大きくなるためと考えられた。そこで、根元直径が同じ場合の μ 値を比較したが品種間には有意な差異は認められなかった。

しかし、林齢が高くなるのに従って林木のサイズが大きくなり、 μ 値が小さくなってゆくと同時に、各品種の根系の形態の差も顕著になり、それによって品種間の根系の支持力に差異が生じることも考えられる。そこで、頼成の14年生林分でタテヤマスギ(実生)、ボカスギ、マサヤマスギの μ 値を比較した。なお、吉峰の6年生林分では林木のサイズが小さくかつ変動も小さかったので個体のサイズを根元直径で表したが、個々の林木の根量と胸高直径の二乗×樹高(D^2H)間に相対成長関係が認められていることから(依田, 1971)、以下の解析では、林木サイズを D^2H で表すこととし、これと根元の回転係数 μ の関係を用いて、根系の支持力の品種および林分による差違について検討した。

頼成におけるスギ3品種の両対数グラフ上の μ 値は D^2H が大きいにほど小さくなる傾向が認められ(図-34)、大きな林木ほど根系の支持力も大きくなること示唆された。また、林木サイズが同じ場合の μ 値を比較するとボカスギが最も大きく、ついでマサヤマスギ、タテヤマスギの順であった。しかし、 $\log(D^2H)$ と $\log(\mu)$ の共分散分析をおこなった結果、回帰係数($F=0.043$; $d.f.=2, 27$)および修正

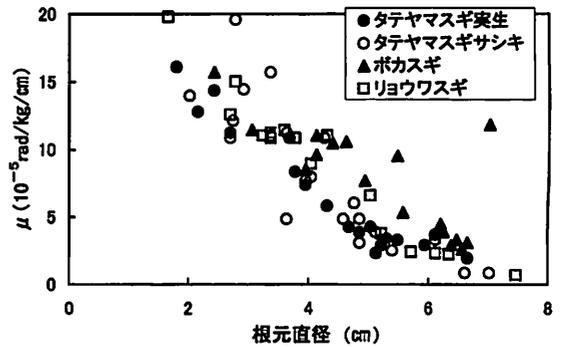


図-33 吉峰6年生林分における3品種の根元の回転係数(μ)の比較

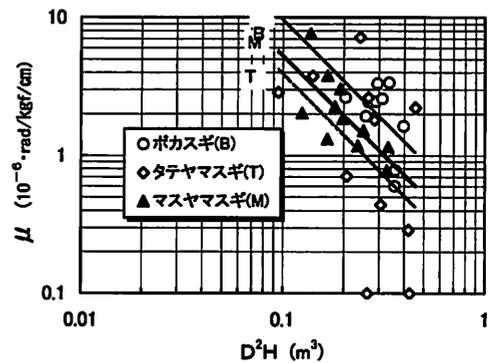


図-34 頼成における3品種の D^2H と根元の回転係数(μ)の比較

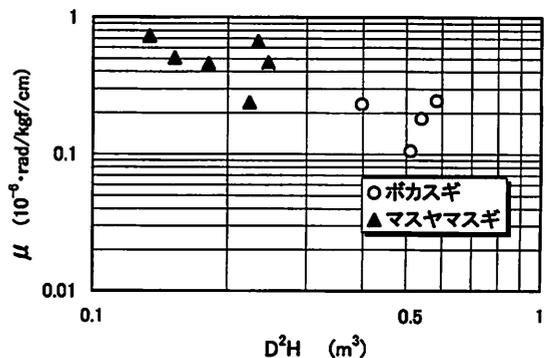


図-35 吉峰16年生林分における3品種の D^2H と根元の回転係数(μ)の比較

平均 ($F=2.922$; $d.f.=2, 29$) についても 5%水準で有意性が認められなかった。また、16年生の吉峰におけるボカスギとマサヤマスギの μ 値を比較したが (図-35), この調査地でも、回帰係数 ($F=0.555$; $d.f.=1, 7$) および修正平均 ($F=0.280$; $d.f.=1, 8$) に有意性が認められなかったことから、林木のサイズが同じであれば根系の支持力には品種による差異がないと考えられた。

以上のように、ここで取り上げたスギ品種における根系の支持力には顕著な差異が認められなかったことから、立地条件や林木サイズが同じであれば、スギ品種のいかにかわらず根系の支持力が等しいと見なしても実用上は大きな問題がないと考えられた。

以上のように、根系の支持力には明瞭な品種間差異が認められなかったことから、タテヤマスギ、ボカスギ、マサヤマスギを込みにして根系の支持力の林分間差異について検討した。6箇所の調査地における μ と D^2H の関係を両対数グラフに示した (図-36)。まず北屋敷における18年生と23年生の μ を比較すると、これらの平均値間に有意な差異が認められたものの、林木サイズを考慮した場合には有意な差異が認められなかったことから、18年生と23年生における μ 値の差異は成長段階の違いによるもので、林木サイズと立地環境が同じであれば根系の支持力に差異がないことが示唆された。つぎに、林木サイズが等しい場合の μ 値を比較すると、吉峰や座主坊の方が北屋敷18年生と23年生林分および頼成よりも小さい傾向がみられた。そこで、 $\log(\mu)$ と $\log(D^2H)$ の共分散分析をおこなった結果、回帰係数 ($F=0.835$; $d.f.=5, 106$) には有意性が認められなかったものの、修正平均 ($F=9.754$; $d.f.=5, 111$) に 1%水準で有意性が認められた。したがって、根系の支持力は林分によって異なり、吉峰、座主坊で大きく、北屋敷18年生と23年生林分、頼成で小さかったといえる。

以上のことから、根系の支持力は林分によって大きく変動することが明らかになった。根系の支持力は根鉢の土壌重量、根鉢表面土壌の粘着力、根系のせん断力および根系の摩擦抵抗を総合したものと考えられており (荏住, 1979), 土壌条件と密接な関連がある。しかし、今調査で取り上げた土壌の深さや堅密度だけでは根系の支持力の林分間差違を説明

することができなかった (表-15)。

(2)根系の支持力が林木の耐力に及ぼす影響

鉛直荷重に対する林木の最大耐力は、座屈荷重によって推定できることを先に示した。ここでは座屈荷重に対する根系の支持力 (μ) の影響について (4.1.5) 式を用いて検討した。

一例として生育段階の異なる北屋敷18年生と荒館における林木の最大耐力 P_{cr} と根元の回転係数 μ との関係を示した (図-37)。両調査地の P_{cr} は表-20に示した調査地の平均値をもとに (4.1.5) 式を用いて算出した。この結果によると、林木の耐力は、根系の支持力の低下 (μ の増加) にともなって急激に低下することがわかる。このような傾向は荷重点が低いほど顕著である。したがって、冠雪荷重が梢端に集中する場合には林木の耐力に及ぼす μ の影響を考慮にいれなくてもよいが、冠雪荷重が幹の下部に作用する場合にはその影響を無視することはできないと考えられる。

つぎに、林木の耐力は根系の支持力を考慮した場合としない場合とでどの程度異なるのかについて検討した。林木の耐力を求めるにあたって、冠雪荷重の重心高を明らかにする必要がある。そこで北屋敷18年生と荒館においてそれぞれ8本の供試木を選び、層厚1mとして層別刈り取り法に準じて葉の重量を測定した結果、樹高に対する葉量の重心高は北屋敷が根元から60%、荒館が80%であった。そこで、樹冠の重心を冠雪荷重の重心すなわち北屋敷では樹高の60%の高さ、荒館では樹高の80%の高さと仮定して、それぞれの P_{cr} を計算した結果、荒館の P_{cr} は μ が0の場合に589kg、 μ が林分の平均値 $1.01 \cdot 10^{-7}$ rad/kgf/cmの場合に553kgであった。後者は前者より6%低下したにすぎないことから、この林分の耐力は根元が回転しないものとみなしても大差はないようであった。一方、北屋敷の P_{cr} は、根元が回転しない場合 ($\mu = 0$) には257kg、 μ が林分の平均値 $31 \cdot 10^{-7}$ rad/kgf/cmの場合には184kgとなり、後者は前者より28%低くなった。したがって、北屋敷では根系の支持力の影響を受けて、林木の耐力が実際にはかなり低下しているものと考えられた。以上から冠雪に対する耐力は根元直径が小さくかつ荷重点が低い林木の方が根系の支持力の影響を受けやすいといえる。これらのことから、幼齢期は根元直径が小さくかつ荷重点が低いので、根系の支持力の強

い木に育てること、即ち植栽密度を低くして肥大成長を促進する施業が望ましいと考えられた。

(3)根返りモーメント

冠雪害には、幹折れや曲がりなどのほかに根返りや傾幹など根系の支持力に起因する被害形態がある。これは林木が冠雪荷重を受け幹が変形していく過程において、幹に加わる曲げ応力が破壊応力に達する前に、根元に根返りを起こすモーメントを越える力が加わったときに発生する現象と考えられる。

座主坊および頼成の荷重試験で得られた根返りモーメント M_r と D^2H の関係を対数で示し、各調査地毎にみると、 $\log(M_r)$ と $\log(D^2H)$ の間に正の相関が認められたことから (図-38)、大きな林木ほど根返りしにくい傾向があるといえる。しかし、 D^2H と根返りモーメントとの関係は林分によってそれぞれ異なっており、この図の場合は座主坊の根系の支持力の方が頼成のそれよりも大きいといえる。一般に個体の根量は D^2H と密接な関係があることが知られていることから (依田, 1971)、両調査地の根系の支持力の差異は根量以外の差異、たとえば立地条件の差異などに起因することが考えられた。

つぎに、両林分の根返りモーメントと根元の回転係数との関係を示したのが (図-39) である。この図において、根元の回転係数が大きいほど根返りモーメントが小さくなる傾向が認められたことから、冠雪荷重を受けても根元が回転しにくい林木は根返りも発生しにくいといえる。また、座主坊の方が頼成より根元の回転係数の値が小さくかつ根返りモーメントが大きい林木が多かったことから、前者の方が後者よりも根系の支持力が大きな木が多かったといえる。しかし、この図から、根元の回転係数が同じであれば根返りモーメントには林分による差異がないようであった。これを明らかにするために、座主坊と頼成について $\log(M_r)$ と $\log(\mu)$ の共分散分析を行ったところ、回帰係数 ($F=2.525$; $d.f.=1, 19$) および修正平均 ($F=2.301$; $d.f.=1, 18$) についても 5%水準で有意性が認められなかった。

以上の結果から、両調査地の資料を一括して取り扱っても大きな問題はないようであり、両林分の根返りモーメントと根元の回転係数の関係は 1本の回帰線で示すことができ、根返りモーメントを根元の回転係数から推定できると考えられた。両林分から求めた根返りモーメントの根元の回転係数の回帰式

は次式で示される。

$$M_r = 31.842 \mu^{-.610} \tag{4.3.3}$$

($r^2 = 0.828$; $d.f. = 21$)

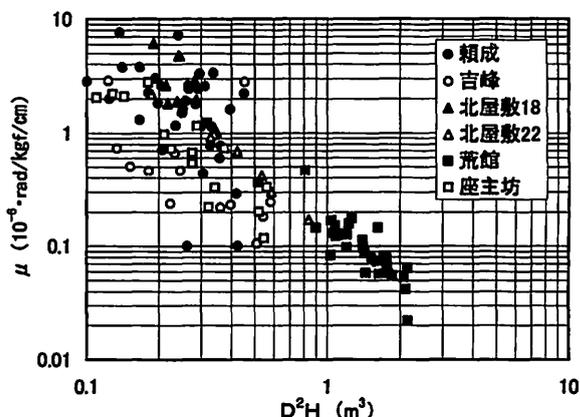


図-36 根元の回転係数 (μ) の林分間比較

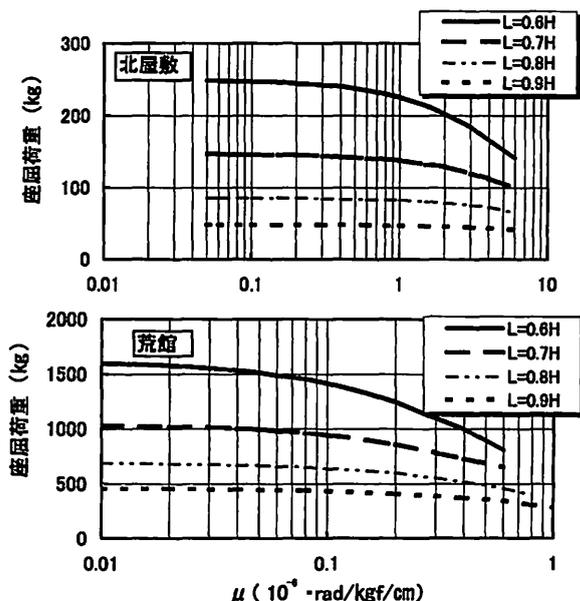


図-37 北屋敷と荒館における林木の座屈荷重に及ぼす根元の回転係数 (μ) の影響

(4)被害形態の判別

冠雪荷重 P を受けた林木は、 P の増大につれて大きく変形し、かつ幹に生じる曲げ応力 σ_x も増大し、これが木材の破壊応力を越えた時に幹が折損する。しかし、変形の増大は根元のモーメントも同時

$$M_o = (\delta + e) P \quad (4.3.4)$$

に増大させる。ここで、 e は偏心量である。したがって、 $\sigma_x = \sigma_{max}$ となる前に、 M_o が先に述べた根返りモーメントに達するならば、幹は根返りするであろう。このことは、事前に曲げ破壊応力や根返りモーメントが与えられるならば、幹折れに要する冠雪荷重 (P_b)、根返りに要する冠雪荷重 (P_u) が推定しうることを示唆している。そして、幹折れ荷重か根返り荷重のいずれか小さいほうで幹折れか根返りが決定されると考えられる。

P_b は (4.1.4) 式に $\sigma_x = \sigma_{max}$ を代入し、この式を満足する場合の P の値からえられる。

また、 M_r は (4.1.2)、(4.3.4) 式より

$$M_r = (\delta + e) P = \gamma e P / (\alpha \gamma \cos \gamma + (\beta - \mu K_o \alpha^2 \gamma^2) \sin \gamma) \quad (4.3.5)$$

P_u は (4.2.3) 式を満足する場合の P の値から得られる。そこで、鉛直荷重試験に供した林木を対象に、個々の林木の形状、幹の強度特性、根系の支持力などから P_b と P_u を求め、この結果から被害形態の判別を試みた。解析に用いたものは、根返りや幹折れが生ずる前に試験を中止した7本を除く56本である。各供試木の M_r は (4.3.3) 式に個々の μ 値に代入して求めた。また荷重点の偏心量 e はこの実験において実測できなかったが、その値は比較的小さいと考えられたので、0~100cmの範囲で10cm毎に変化させて P_u と P_b を求めた。二つの供試木(No.1, No.2)について e を変化させた場合の P_u と P_b の計算結果を示した(図-40)。 P_u および P_b は e が大きくなるほど小さくなる傾向を示すが、左図は e の大きさにかかわらず P_u が P_b より小さいことので、幹折れタイプと判断された。なお P_u と P_b の値が e の変化にともなって入れ替わったのは、供試木56本中4本であったことから、被害形態に及ぼす偏心の影響は小さいと考えられた。

e を10cmとした場合の被害形態の判別結果と実験結果との集計表を示した(表-20)。この判別法による適中率は88%、誤りが5%、 P_u と P_b が等しく

判別できなかったものが7%であった。また判別ができなかったものを誤りに含め、判別結果と実験結果との独立性の検定をおこなったところ χ^2 値が16.43となり、1%水準で有意性が認められた。以上のことから、樹幹の形状、樹幹ヤング率と曲げ破壊応力および根元の回転係数が得られると、力学的手法によって林木に冠雪荷重が加わった場合に根返りを生ずるのか、または幹折れを生ずるのかを判断することが可能と思われる。

被害形態の判別結果(表-20)から被害形態の判別指数を計算し、それと幹の細り比 α の関係を示し

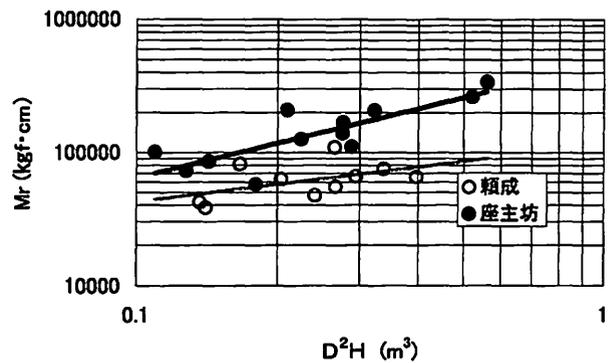


図-38 根返りモーメント (M_r) と D^2H の関係

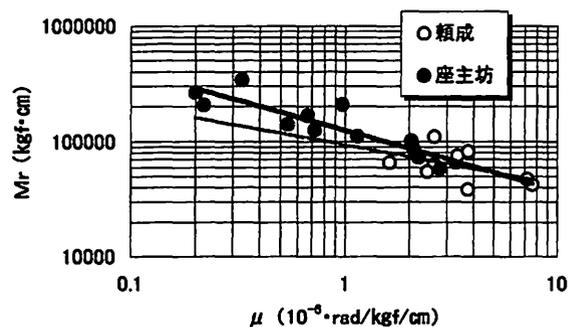


図-39 根返りモーメント (M_r) と根元の回転係数 (μ) の関係

た(図-41)。ここで、被害形態の判別指数を P_b/P_u で表すこととし、この値が1より小さい場合には根返りを、1より大きい場合には幹折れと判断できる。この結果から、 α が小さい場合には幹折れ被害を、大きい場合には根返りを生ずる傾向があることがわかる。 α は根元直径に対する荷重点の直径比であるから、荷重点が同じであれば幹が梢殺形の場合は幹折れを、また完満なものは根返りを、また完満度が同じであれば荷重点が高い場合には幹折れを、荷重点が低い場合には根返りを助長する傾向があると考えられる。

一般に若齢林では根返り、幹折れとも発生するが、壮齢林では根返りが少なく、被害の大半が幹折れで占められることが多い(高橋, 1977)。この一因として、林齢が高いほど径級が大きくなるので根元の回転係数が小さくなり、その結果、根返りしにくくなることがあげられる(図-38, 39)。加えて、林齢が高くなるほど枝の枯れ上がりが進み、冠雪の荷重点が高くなるためと考えられる。

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になどについ

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)は樹幹の形状、樹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、樹幹の耐力は樹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

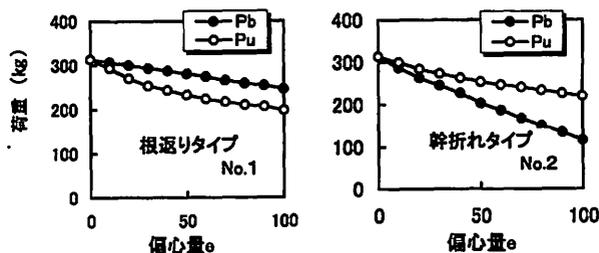


図-40 根返り荷重 P_u と幹折れ荷重 P_b の推定結果の一例

供試木の概要

No	D_o (cm)	D_L (cm)	L (m)	E (tonf/cm ²)	μ (10 ⁻⁶ rad/kgf/cm)	σ_{max} (kgf/cm ²)
1	15.5	9.4	3.7	79.3	7.64	373
2	14.9	7.2	4.3	28.9	2.02	278

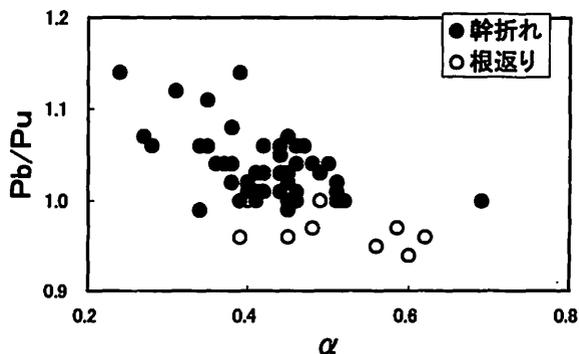


図-41 被害形態の判別係数 (P_b/P_u) と幹の細り比 (α) の関係

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樹幹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。

$$I_R = P_{cr}/S_L \quad (5.1.1)$$

ここで、 I_R は冠雪害抵抗性、 P_{cr} 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) 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。

c) 冠雪量は葉量に比例する。

仮定 a) から、座屈荷重は、(4.1.6) 式に $\mu = 0$ を代入し γ_s を求め、(4.1.5) 式により与えられる。特にこの場合の γ_s 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。

$$P_{cr} = \alpha^2 E I_R / (K_1 H)^2 \quad (5.1.1)$$

ここで、 P_{cr} は座屈荷重、 α^2 は幹の細りによって決まる定数、 E は樹幹ヤング率、 I_R 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 b) 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。

$$W_L = K_2 D_B^2 = K_3 D_o^2 \quad (5.1.2)$$

ここで、 W_L は葉量、 D_B は枝下直径、 D_o 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 c) 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。

$$S_L = K_4 W_L = K_5 D_o^2 \quad (5.1.3)$$

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。

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{P_{cr}}{S_L} = \frac{\alpha^2 E I_o}{(K_1 H)^2} \cdot \frac{1}{K_5 D_o^2} \\ &= \frac{\alpha^2 \pi}{64 K_1^2 K_5} (H/D_o^2)^{-2} E \end{aligned} \quad (5.1.4)$$

この式から、 I_R は (H/D_o^2) 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_o^2 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 c) の仮定条件が成り立ち、かつ幹の細り、ヤング率および樹高に対する荷重点高の比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りうる。

表一20 林木の荷重試験による被害形態別本数と力学的な計算による被害形態別本数の関係

		計算による判別本数			計
		幹折れ木	根返り木	判別不可	
観察本数	幹折れ木	42	2	3	47
	根返り木	1	7	1	9
	計	43	9	4	56

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、樹高に対する荷重点高の比は林分によって大きく変動することが考えられる。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、仮定 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。また、c)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場合の冠雪荷重比を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を求め、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), $A = \log (P_{cr}/W_L)$, 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, 2000)。

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

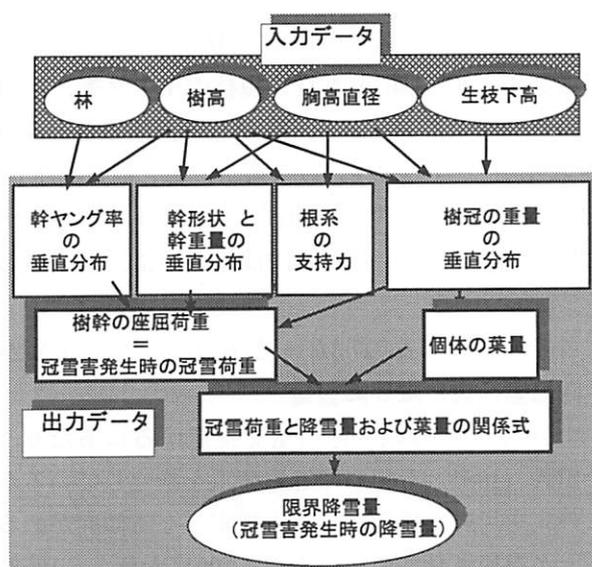


図-41 林木の限界降雪量の推定手順

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。

(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、冠雪荷重と自重とが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、ボカスギの冠雪荷重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。

$$S_L = 10^4 \cdot W_L^{0.86} \quad (5.2.3)$$

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。

表-21 ボ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

北屋敷、荒館、上中の資料の一部は相浦（1988）による。

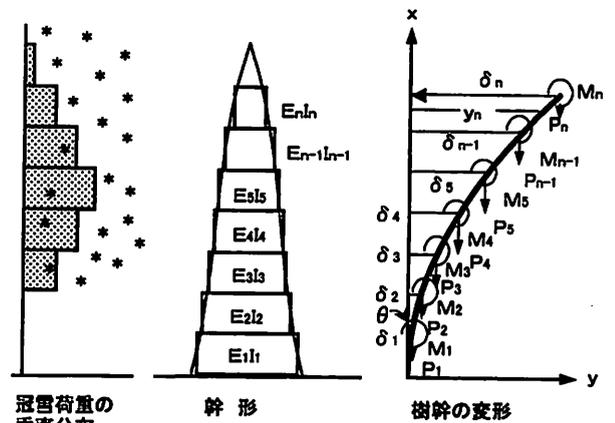


図-43 冠雪害のモデルと樹幹の仮定

- 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 : 樹幹部における回転角度

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

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とおくことによって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。

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

ここで、 $RD_{o,n}$ 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 ($RDBH$) 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 $D_{o,n}$ を次式から求めることにした。

$$D_{o,n} = RD_{o,n} \cdot D / RDBH \quad (5.2.6)$$

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かったので、幹曲線の推定には上述の方法を用いることにした。

(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。これによると、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

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.
	a_1	a_2	a_3		
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		

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)。

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

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 (m³)と μ (rad/kgf/cm)との関係式は以下の通りである。

$$\mu = 0.163(D^2H)^{-1.816} \cdot 10^{-6} \quad (5.2.10)$$

($r^2=0.911$, $d.f.=67$)

(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よ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。

表-23 各林齢における樹幹ヤング葉(E)と相対高(RH)の2次回帰式の係数
($E = b_1 \cdot RH^2 + b_2 \cdot RH + b_3$)

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		

枝下高 H_B を次式から推定することにした。

$$H_B = 0.052 \cdot H^{2.122} \cdot D^{-0.359} \quad (5.2.12)$$

$(r^2 = 0.893; d.f. = 42)$

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。

$$W_L = 0.100 (D_B)^{1.925} \quad (5.2.13)$$

$(r^2 = 0.901; d.f. = 43)$

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/m) を次式から推定した。

$$s = 0.139L + 0.503 \quad (5.2.14)$$

$(r^2 = 0.851; d.f. = 41)$

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。

$$G = 1.02H - 0.104D - 2.704 \quad (5.2.15)$$

$(r^2 = 0.978; d.f. = 42)$

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 1 m 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912kg/m³であったので、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20 m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ウヒのそれに比べて小さい。

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21~35tonf/cm³と24~55tonf/cm³で、幹内の平均ヤング率はそれぞれ27と43tonf/cm³であった。この結果、ボカスギのヤング率

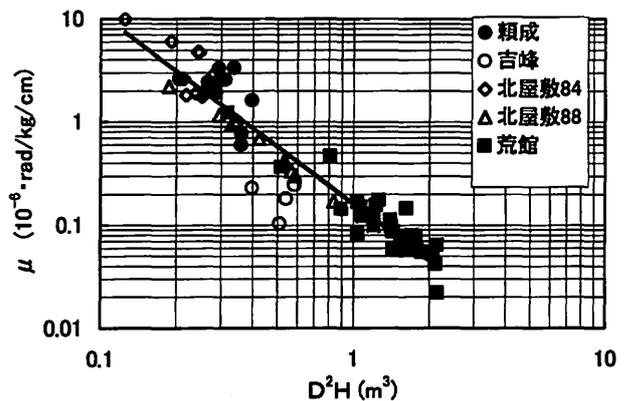


図-44 ボカスギ5林分における D^2H と根元の回転係数 (μ) の関係

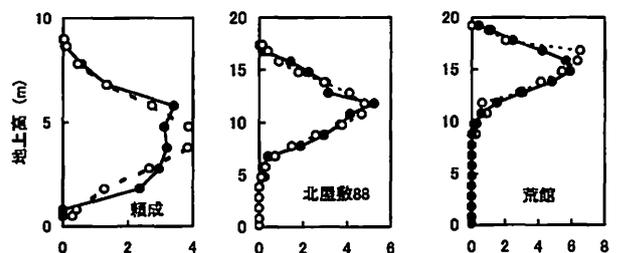


図-45 ボカスギの葉乾重の垂直分布
●：測定値，○：理論値 (正規分布)

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の高さの幹ヤング率 (tonf/cm)	35	55	55	55	55
座屈荷重 (kg)	147	132	239	174	329
限界降雪量 (kg/m ²)	30	36	72	28	59

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 $0.6 \cdot 10^{-7}$ ~ $7.1 \cdot 10^{-7}$ rad/kgf/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

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 平均 被害		発生年月	本数 被害率 (%)	降雪量 (kg/m ²)
		高直径 (cm)	樹高 (m)			
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

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 kg/m²) よりも小さな林木、被害木であってかつ限界降雪量が降雪量よりも大きい林木、健全木であってかつ限界降雪量が降雪量よりも小さな林木および健

全木であっ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(48kg/m²)よりも小さな林木は17本、被害木であってかつ限界降雪量が降雪量よりも大きい林木が1本、健全木であっ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ってかつ限界降雪量が降雪量よりも小さな林木は17本であった。この結果から、被害判別の適中率は60%といえる。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、北屋敷と荒館では、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。

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、

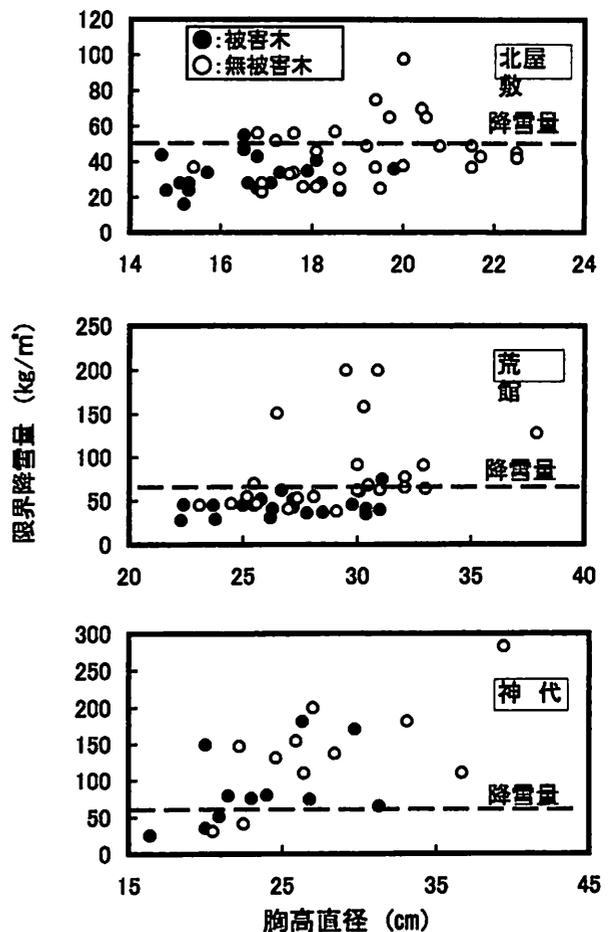


図-46 冠雪害が発生したボカスギ林分における被害木と健全木の限界降雪量および実際の降雪量の関係
○：健全木、●：被害木

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 (kg/m ²)		計
		≤53	>53	
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

すなわち植栽本数を少なくすることや間伐を繰り返し行うことがあげられる。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小さく(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/㎡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/㎡であったことから(菊地ら, 1995)、降雪密度を100kg/㎡として荷重

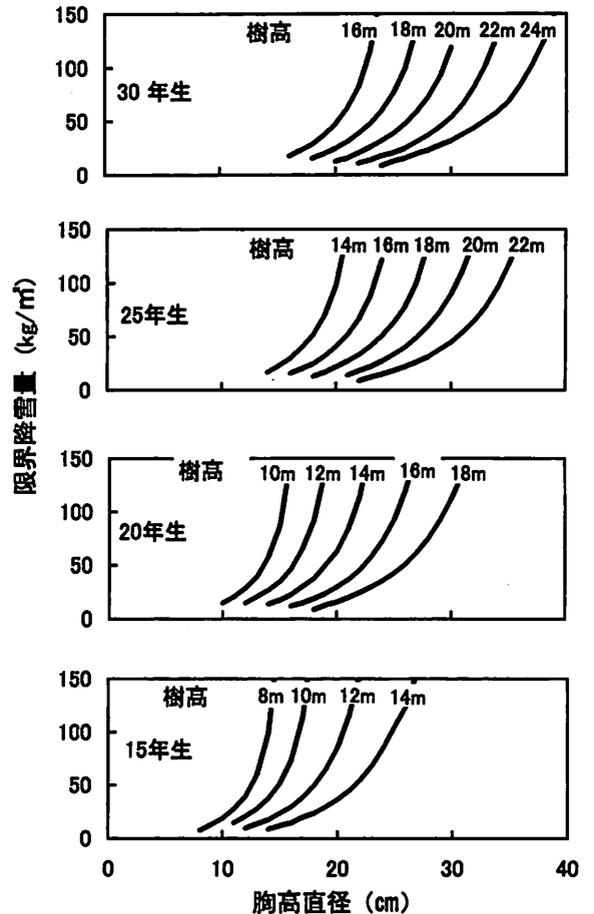


図-47 限界降雪量の推定値と樹高および胸高直径の関係

に換算すると、日最大降雪量が60kg/㎡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/㎡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/㎡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のが予想されるので、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、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

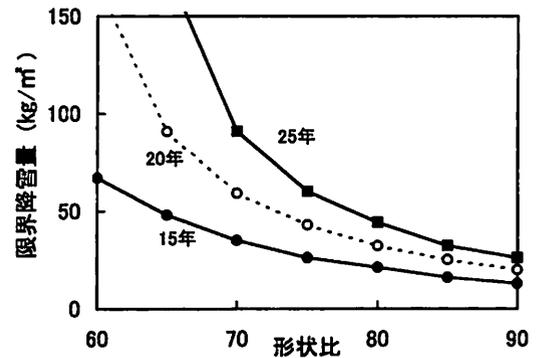


図-48 林齢が異なる樹高の林木の林木の限界降雪量と形状比の関係

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)	樹高 (m)	1 等地			2 等地			3 等地				
		平均胸高直径(cm)			平均胸高直径(cm)			平均胸高直径(cm)				
		①	②	③	①	②	③	①	②	③		
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

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

(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關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、雪質にも關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。

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の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の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關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1km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關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	林齢(年生)	立木本数(本/ha)	間伐本数(本/ha)	平均高直径(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	林齢(年生)	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、1988年1月と1994年1月の被害が大きく、冠雪害が恒常的に発生していることがわかる(表-29)。なお、被害形態は大半が幹折れで、根返り、幹曲りは少なかった。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

図-49から直径成長が促進された個体ほど冠雪害の発生が抑制されたことが推測されたが、この様な傾向を確認するためにさらに検討を行った。図-50は1983年における期首直径とその後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

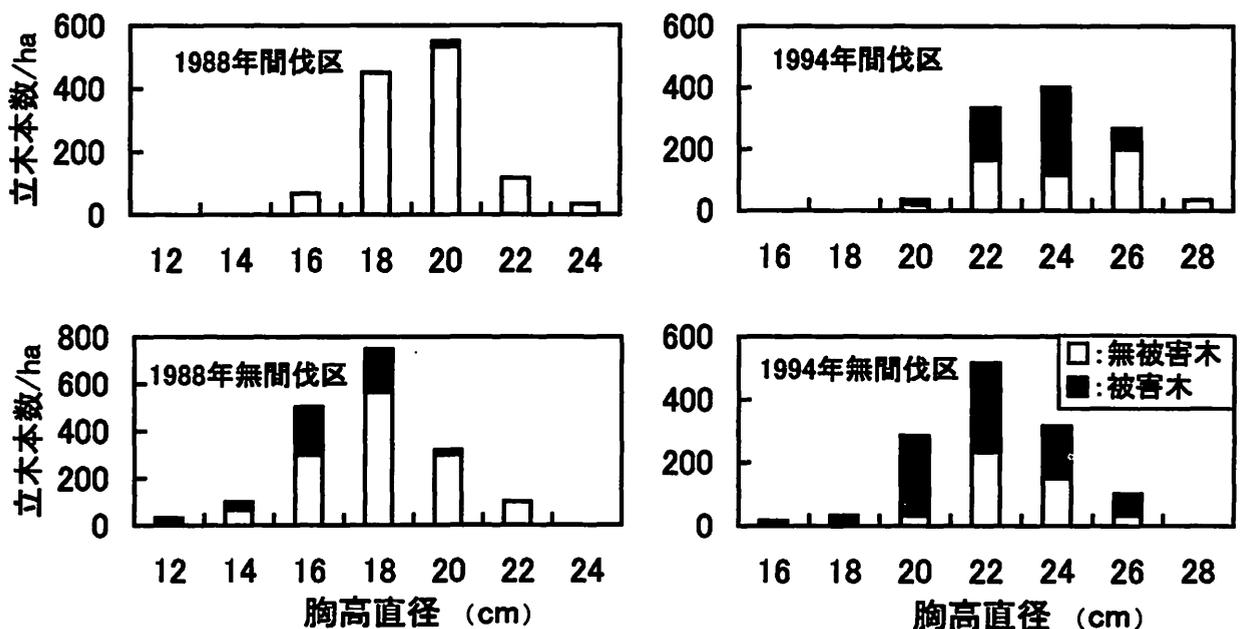


図-49 1988年と1994年の被災時における北屋敷試験地の健全木と被害木の直径階別本数
□：健全木，■被害木

害木の3つに分けて示したものである。この図によると、期首直径が大きいほどその後の直径成長量が大きくなるものの、期首直径が同じであれば間伐区が最も大きく、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、期首の胸高直径の影響を取り除くために、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。

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。ボ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量の差異は間伐4年後に最も大きくなった。この原因は形状比の場合と

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 (年)	林齢 (年生)	降雪深 (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)

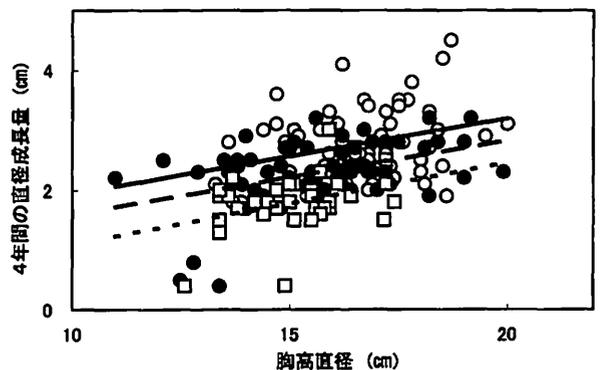


図-50 期首年の胸高直径 (x) と4年間の直径成長量 (y) の関係

- ：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 ($y = 0.137x + 0.279$)

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、その他の間伐の役割として次のことが考えられる。すなわち、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もあると考えられる。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-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 の年数 (年)	形状比 (m/m)		限界降雪量 (kg/m ²)	
			T	C	T	C
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

T：間伐区，C：無間伐区

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 (m/m)		限界降雪量 (kg/m ²)	
		A区	B区	A区	B区
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

A区とB区は間伐率と間伐率が異なる。

(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。すなわち、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 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 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 $60\text{kg}/\text{m}^3$ 以上にするためには、平均限界降雪量を $100\text{kg}/\text{m}^3$ 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

予 測	林 齡 (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 (cm)	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	1590	15.9	11.1	179	0.55	16	10	54	70	
予測 4	23	1590	18.6	14.2	318	0.70	0	0	50	76	下層間伐
	28	1590	20.6	17.0	467	0.80	0	0	37	83	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 5	18	1657	15.0	10.5	159	0.52	13	10	54	70	上層間伐
	23	1657	17.7	13.7	293	0.67	0	0	47	77	
	28	1657	19.9	16.5	444	0.79	0	0	37	83	
予測 6	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	全層間伐
	18	1520	15.4	10.8	159	0.50	20	20	54	70	
	23	1520	18.3	13.9	292	0.66	0	0	47	76	
予測 7	28	1520	20.6	16.7	441	0.77	0	0	37	81	下層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1332	16.2	11.3	159	0.47	30	20	56	70	
予測 8	23	1332	19.4	14.4	290	0.62	0	0	57	74	上層間伐
	28	1332	21.8	17.1	437	0.74	0	0	46	78	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 9	18	1503	14.8	10.4	139	0.46	21	30	53	70	全層間伐
	23	1503	17.7	13.6	263	0.61	0	0	49	77	
	28	1503	20.2	16.4	412	0.74	0	0	41	81	
予測 10	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	下層間伐
	18	1330	15.4	10.8	139	0.44	30	30	54	70	
	23	1330	18.6	13.9	262	0.59	0	0	56	75	
予測 11	28	1140	21.3	16.7	409	0.72	0	0	47	78	上層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	1100	16.6	11.6	140	0.40	42	30	57	70	
予測 12	23	1100	20.2	14.6	262	0.55	0	0	65	72	全層間伐
	28	1100	23.2	17.3	407	0.68	0	0	60	75	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 13	18	1328	15.3	11.0	120	0.37	30	40	53	72	下層間伐
	23	1328	17.8	13.5	235	0.55	0	0	53	76	
	28	1328	20.7	16.3	380	0.69	0	0	48	79	
予測 14	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	上層間伐
	18	1140	15.4	10.8	120	0.38	40	40	54	70	
	23	1140	19.0	13.9	234	0.53	0	0	63	73	
予測 15	28	1140	22.1	16.6	378	0.67	0	0	60	75	下層間伐
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
	18	923	16.7	11.6	120	0.34	51	40	57	69	
予測 16	23	923	20.8	14.7	233	0.49	0	0	73	71	下層間伐
	28	923	24.4	17.3	377	0.63	0	0	81	71	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 17	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	下層間伐
	18	1330	16.2	11.3	159	0.47	30	20	56	70	
	21	1330	18.3	13.3	238	0.57	0	0	58	73	
予測 18	21	927	19.3	14.0	190	0.42	30	20	57	73	下層間伐
	28	927	24.6	17.9	393	0.63	0	0	66	73	
	18	1900	15.4	10.8	199	0.63	0	0	54	70	
予測 19	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 20	28	927	23.3	16.8	331	0.58	0	0	69	72	下層間伐
	28	708	24.3	17.5	281	0.46	24	15	67	72	
	28	708	26.0	18.5	340	0.42	0	0	74	71	

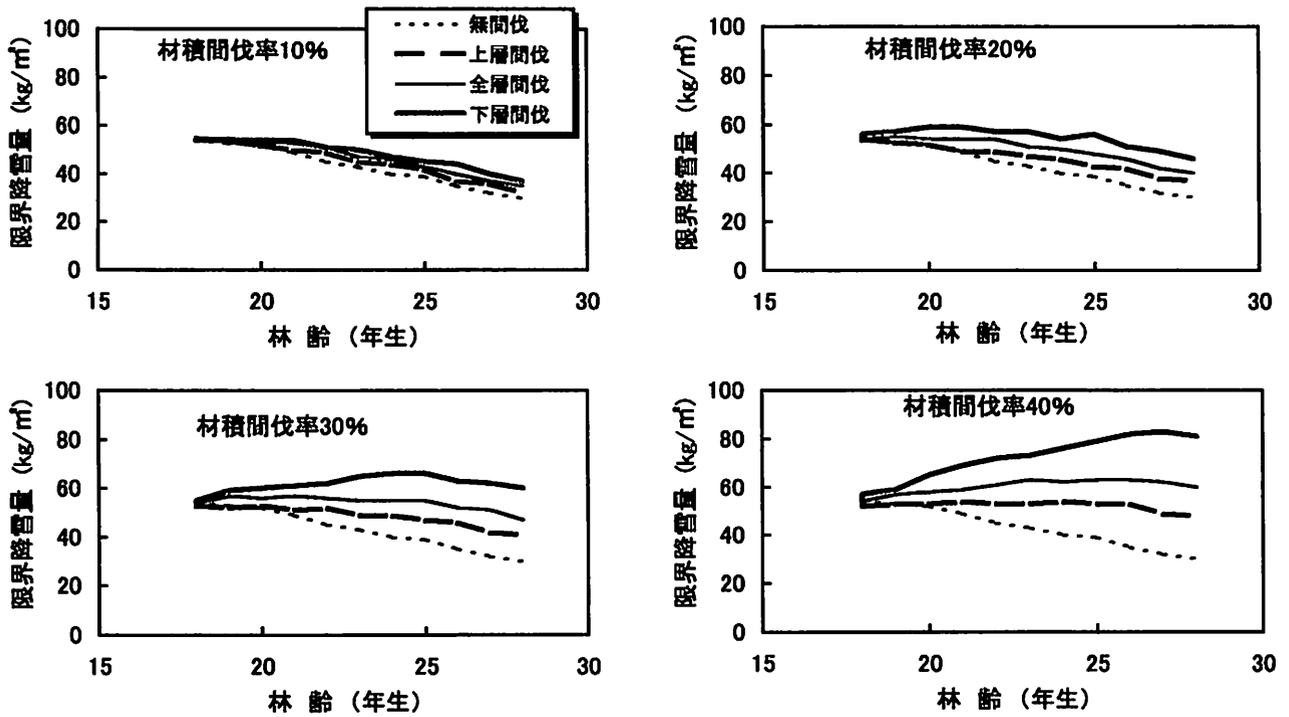


図-51 間伐方法および間伐強度と冠雪害抵抗性の関係

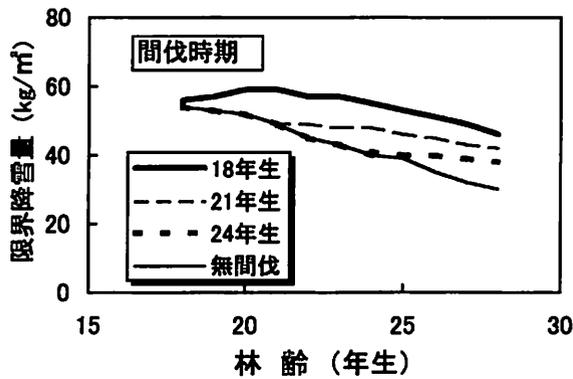


図-52 間伐時期と冠雪害抵抗性の関係

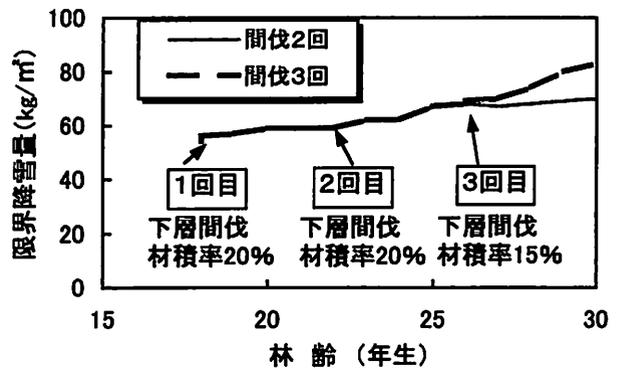


図-53 平均木の限界降雪量を最大降雪量 (60kg/m²) 以上にするための間伐例

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ち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, シミュ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ミュ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(表一33)。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) 調査方法

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。

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

$$(r^2=0.739, n=118)$$

表一33 枝打ち試験地の概要

葉量 除去率 (%)	枝打ち 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

表-34 枝打ちシミュレーションに用いた林木の概要

供試木	品 種	林 齢	樹 高	胸高直径	枝下高	葉乾量	樹幹ヤ ング率	根元の回 転係数
		(年生)	(m)	(cm)	(m)	(kg)	(tonf/cm ³)	(rad/kgf/cm)
K 1	カワイダニスギ	10	6.6	11.0	0.3	17	35	1.52×10^{-5}
K 2	カワイダニスギ	14	9.5	16.6	0.5	23	35	1.66×10^{-6}
B 1	ボカスギ	12	8.4	14.8	2.3	15	35	1.90×10^{-6}
B 2	ボカスギ	18	13.3	18.2	4.3	21	35	5.09×10^{-7}
B 3	ボカスギ	25	19.3	26.2	7.3	31	35	9.53×10^{-8}
B 4	ボカスギ	25	19.3	26.2	7.3	31	49	9.53×10^{-8}

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 $1.81 \cdot 10^{-6} \sim 4.64 \cdot 10^{-6}$ rad/kgf/cm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/cm³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/cm³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

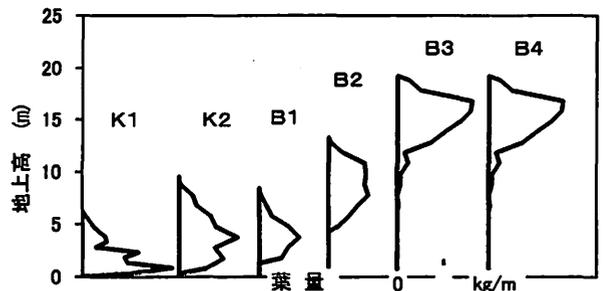


図-54 供試木の葉量の垂直分布

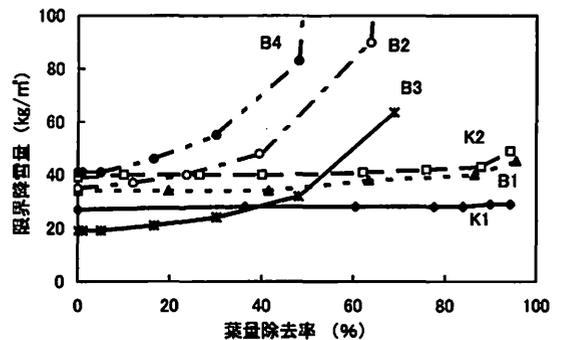


図-55 枝打ち直後の葉量除去率と限界降雪深の関係 (図中のアルファベットは供試木を示す)

害抵抗性がほとんど向上しないと考えられた。

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。

(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い樹幹となり、冠雪害抵抗性が低下することが考えられた。

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

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/cmf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考えられる。

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くかつ根元直径

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。

第7章 総合考察

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と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40ton/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

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

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		葉乾重 (kg)	限界降雪量 (cm)
	樹高 (m)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	胸高直径 (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

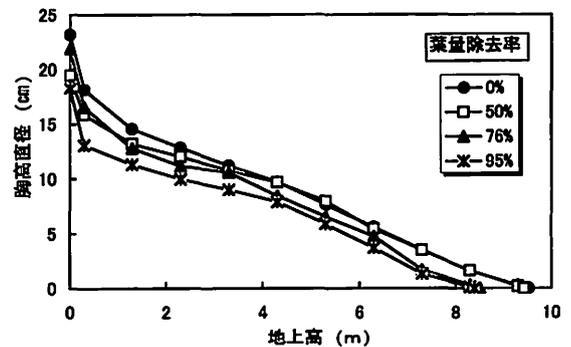


図-56 葉量除去率が異なる林木の枝打ち4年後の樹幹形の比較

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が示唆される。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に報告されている(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って考えられている。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くほど大きくなるが、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、かつ測定にあつ

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の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。リョウワスギとマシ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、この壮齡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。冠雪害を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/m²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50kg/m²以

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	立木 本数 (本/ha)	本数 間伐率 (%)	平均 胸高直径 (mm)	平均 樹高 (m)	平均 形状比 (m/m)	材積 (m ³ /ha)	収量比数	平均木 限界降雪量 (kg/m ²)	限界降雪量 50kg/m ² 以下の		限界降雪量 60kg/m ² 以下の	
									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	0	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	立木 本数 (本/ha)	本数 間伐率 (%)	平均 胸高直径 (mm)	平均 樹高 (m)	平均 形状比 (m/m)	材積 (m ³ /ha)	収量比数	平均木 限界降雪量 (kg/m ²)	限界降雪量 50kg/m ² 以下の		限界降雪量 60kg/m ² 以下の	
									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	0	0
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	立木 本数 (本/ha)	本数 間伐率 (%)	平均 胸高直径 (mm)	平均 樹高 (m)	平均 形状比 (m/m)	材積 (m ³ /ha)	収量比数	平均木 限界降雪量 (kg/m ²)	限界降雪量 50kg/m ² 以下の		限界降雪量 60kg/m ² 以下の	
									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	10	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	24	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	111	0	0	0	0
41年間伐前	518		37.2	25.2	68	654	0.65	120	47	90	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

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-38、39および40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後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%を超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った。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%を超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排除するうえで得策ではないと考えられた。

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. 品種別の同齢林で比較すると、冠雪害はマス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った。
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った。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、葉量と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った。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多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っ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齢による変動を調べた。その結果、樹幹ヤング率に品種間に顕著な差異が認められ、大きな品種としてマヤマスギが、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ドニスギの樹幹ヤング率はマ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、樹幹ヤング率は加齢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、冠雪害抵抗性が林齢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、樹幹ヤング係数および樹高に対する荷重点高の比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蔵建治博士、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ご助言をいただいた。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, 小林裕之氏, 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る。

文 献

- 相浦英春：ボ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，*日林論* 98, 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 RM 32, 2pp. (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* 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(坂口勝美編：スギのすべて629pp.)，*全林協*，380-395 (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-)，*林業科学技術振興所*，101pp. (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)，*日林論* 94, 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，*日林論* 93, 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 -, 日林論 96, 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 74 (2), 301-307 (1992)
- 嘉戸昭夫・平 英彰・中谷 浩: スギの冠雪量推定, 日林中支論 41, 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, 43-46 (1997)
- Kato,A., Nakatani,H.: An approach for estimating resistance of Japanese cedar to snow accretion damage. Forest ecology and management 135, 83-96 (2000)
- 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 (1984a)
- 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 (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, 農林水産省林業試験場, 46-47 (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, 日林論 97, 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 -, 森総研研究報告 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, 日林論 95, 311-312 (1984)
- 新田隆三: 冠雪害の発生条件 (石川ら: 冠雪害 - 発生のおくみと回避法 -, 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, X X X (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 -, 日林中支講 33, 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.R, Haupt, H.F.: Snow catch by conifer crowns. Water resources research 3 (4), 1035-1039 (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: 林木の冠雪害と雨水害, 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 - 1996年版 -, 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, 日林論 96, 443-444 (1985)
- 富山県林業試験場: 富山県主要樹種林分収穫表, 富山県林業試験場, 33pp. (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) - 冠雪害の品種間差異と材質 -, 日林論93, 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)

Study on the approach for estimating resistance of Japanese cedar to snow accretion damage and its application

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.