

ボカスギとタテヤマスギの若齢林における冠雪害に対する立木密度の影響

嘉戸 昭夫

Effects of stand density on snow damage in young stands of Boka-sugi and
Tateyama-sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don)

Akio KATO

冠雪害に対する立木密度の影響を検討する目的で、ボカスギとタテヤマスギのそれぞれについて植栽密度が異なる低密度 (1,500本/ha)、中密度 (3,000本/ha) および高密度 (5,000本/ha) の3つの試験区を設けた。冠雪害は植栽後の18年間に8回観察された。これらの被害はすべて日降雪深40cm以上のときに発生した。被害木の冠雪荷重は葉乾重の11から15倍と推定された。ボカスギの被害は高密度区や中密度区で甚大であったが、低密度区では軽微であった。試験区間における被害の差異は主に形状比の差異に起因していると考えられた。これらの結果から、ボカスギの冠雪害を防除するには低密度植栽が有効なことが示唆された。また、樹種間の差異については、タテヤマスギはボカスギに比べて被害が軽かった。タテヤマスギはボカスギよりも樹幹ヤング率が大きかったことから、両品種間の被害の差異は樹幹強度の差異に因るものと考えられた。

1. はじめに

冠雪とは林木の枝や葉 (樹冠) に付着あるいは堆積した雪やその現象をさしている (石川ら, 1987)。冠雪が異常に発達すると、この荷重に林木が耐えることができなくなって幹折れや根返りなどの冠雪害をひきおこす (図-1)。この被害は付着力の大きな湿雪が多量に降った場合に発生しやすいとされ、富山県西部の里山が我が国で最も冠雪害の危険な地帯といわれている (佐伯・杉山, 1965)。また、耐雪性はスギ品種によって差異があり (石川ら, 1987; 高橋, 1977)、富山県の代表的なスギ品種の中ではボカスギが冠雪害を生じ易いものに対してタテヤマスギは生じ難いこと (嘉戸, 2001)、同じボカスギであっても立木密度が低い林分や平均形状比が小さい林分では冠雪害を生じ難い傾向があること (嘉戸ら, 1992) などが明らかにされている。

しかし、ボカスギについては、冠雪害に対して安全な立木密度はどの程度なのか、タテヤマスギについては冠雪害に対して危険な立木密度はどの程度なのか明らかにされていない。これらの事柄について検討するには、降雪環境が等しいところに立木密度だけが異なる固定試験地を設けて、生育状況や冠雪害の被害を調査することが最良の方法と考えられる。

本報告は、植栽密度が異なるボカスギとタテ



図-1 ボカスギ高密度区の冠雪害 (12年生)

ヤマスギの若齢林において冠雪害に対する立木密度の影響について調査検討したものである。

2. 調査方法

2.1 試験地

試験地を富山県中新川郡立山町吉峰の富山県農林水産総合技術センター森林研究所 (以下森林研究所という) 構内に設けた (図-2)。標高は230m、北向き斜面で、傾斜は3度である。この試験地は1987年6月植栽のボカスギとタテヤマスギの2品種からなり、品種毎に低密度区 (植栽密度1,500本/ha)、中密度区 (同3,000本

/ha) および高密度区 (同5,000本/ha) の3試験区が設定された。なお、林縁部の立木は密度が低くなるため、胸高直径が大きくなる傾向がある。そこで、このような影響などを取り除くため、各密度試験区の林縁部1列を調査対象から除外して、生育調査や被害調査などを行った。

2.2 生育調査

全調査木の胸高直径を11~18年生まで毎年調査した。樹高は11および14年生時にサンプル木について測定し、試験区毎に樹高曲線式を求め、これらの式から各個体の樹高を推定した。18年生の樹高は全木について測定した。このようにして求めた値から、各試験区における平均樹高を算出した。なお、11、14および18年生以外の年次における平均樹高は樹高測定した2時点の値を案分して求めた。18年生の樹高から各試験区の地位を調べたところ、いずれも1等地と推定された。

各試験区の平均形状比は平均胸高直径に対する平均樹高の比から算出した。2003年3月に、ボカスギの中密度区と高密度区において下層間伐を、また、タテヤマスギの中密度区と高密度区で列状間伐 (2残1伐と3残1伐) を行った。

2.3 被害調査

降雪のたびに冠雪害の有無を確認し、被害形態や被害率は毎年3月にまとめて調査した。被害形態は幹折れ、幹曲がり、根返りの3区分とした。なお、幹曲がりには樹幹の上部が大きく撓みかつ幹折れしていないものとした。

2.4 気象および冠雪荷重調査

冠雪害発生時における気象状況を把握するため、当試験地から200m離れた森林研究所の気象観測器で気温、湿度、降水量、積雪深、降雪深、風向風速などを計測した。

葉量と冠雪荷重の関係を検討する目的で、スギ樹冠に付着する冠雪荷重を測定した。測定方法は、図-3に示すとおりで、長さ1~3mに切断したスギの梢端部をワイヤーで吊り下げ、冠雪した梢端部の荷重を10分間隔で測定し、この値から冠雪していないときの梢端部の重量を差し引いて冠雪荷重を求めた。調査に用いたスギ梢端部の葉の乾燥重量 (葉量) は1.2~4.8kgであった。なお、冠雪荷重は葉量の増加に伴って増大することから (松田, 1981; 嘉戸, 2001),

葉量1kgあたりの冠雪荷重に換算して年次間の比較をした。

被災時における冠雪荷重を推定する目的で、2001年4月に各試験区において、それぞれ径級が異なる6本の供試木 (合計36本) を伐倒して葉の現存量を測定した。

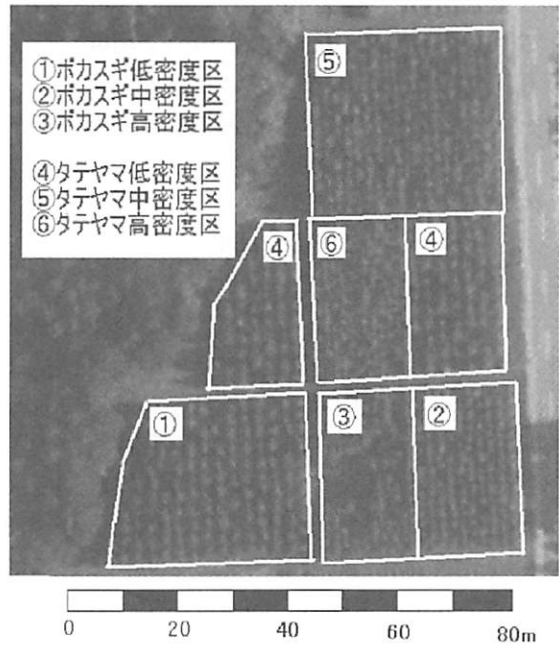


図-2 立木密度試験地



図-3 冠雪荷重測定

2.5 樹幹ヤング率調査

冠雪荷重を受けた立木の樹幹耐力は樹幹形状、樹幹ヤング率および根系の支持力（根元の回転係数）から推定できることが報告されている（澤田，1983；中谷ら，1984；中谷，1991；嘉戸，2001）。そこで，1999年11月，樹幹ヤング率を各試験区につき10～11本の供試木を選び測定した。また，2007年11月，前回と同じ供試木のなかで残っていたものについて樹幹ヤング率を測定した。この調査では，立木を破壊することなく樹幹ヤング率が測定できる加力挺子法（小泉，1987）を用いた。

3. 調査結果

3.1 冠雪害発生と気象

表-1は本試験地における冠雪害の発生履歴を示したものである。冠雪害の発生回数は軽微なものを含めて合計8回観察された。最初の冠雪害は1999年1月7日～10日（12年生時）の大雪（日最大降雪深44cm）によりボカスギ高密度区において発生し，2月2日～3日（同63cm）の2回目の大雪でさらに拡大した。2000年2月にはタテヤマスギ中密度区と高密度区で，軽微な被害が発生した。2001年1月にはボカスギ高密度区で被害があり，ボカスギ中密度区，タテヤマスギ高密度区でも軽微な被害があった。2002年1月にはボカスギ中密度区および高密度区で軽微な被害が発生した。2005年1月中旬，下旬および2月上旬の3度の大雪により，ボカスギの全ての試験区とタテヤマスギの高密度区で被害が発生した。このときには，ボカスギの高密度区だけではなく中密度区や低密度区で被害が発生し，とくに中密度区の被害率が高かった。

つぎに，冠雪害発生時の気象状況について検討した。図-4は1998年12月～2006年3月の8冬期間のボカスギの試験区における冠雪害発生の有無と午前9時気温および日降雪深（15cm以上）の関係を示したものである。ここで，日降雪深は午前9時から翌日の午前9時までの降雪深であり，午前9時気温は翌日の午前9時の値である。なお，午前9時の気温を用いたのは，降雪調査の日界が午前9時であり，午前9時から翌日の午前9時までの平均気温の算出が煩雑なこと，午前9時の気温と日平均気温の相関が高いことなどの理由による。

この図から，冠雪害は日降雪深が40cm以上でかつ午前9時気温が-4～0℃の範囲の場合に

発生したことがわかる。したがって，冠雪害は降雪深が多くかつ降雪時としては高温下で生じたといえる。つぎに，ボカスギが冠雪害を生じるか否かを分ける判別関数を9時気温 T と日降雪深 S の関係から求めた。

$$Z = -0.610T + 0.279S - 11.8 \quad (1)$$

なお， $Z > 0$ の場合は冠雪害発生， $Z < 0$ の場合は非発生と判別される。説明変数の係数が判別に寄与しているか否かを調べた結果，日降雪深が1%水準で統計的に有意となったのに対し，気温については5%水準で有意性が認められなかった。したがって，日降雪深が冠雪害発生の決め手になるといえる。これは，大雪になるときの気温が-4～0℃の一定範囲にあったためと考えられた。

3.2 被害形態

最初に冠雪害が発生した12年生のボカスギ高密度区の被害状況を図-1に示した。冠雪によって各林木の梢端部が一斉に北ないし北東方向へ曲がりはじめ，冠雪荷重の増加に伴って樹幹が大きく撓んで，最終的には小群状に折り重な

表-1 立木密度試験地における冠雪害の発生履歴

林齢 (年生)	冠雪害発生の降雪期間	最大日降雪深 (cm)	被災試験区
12	1999年1月7日～10日 1999年2月2日～3日	44 63	ボカスギ高密度区
13	2000年2月15日～18日	40	タテヤマスギ中密度区 タテヤマスギ高密度区
14	2001年1月11日～14日	43	ボカスギ高密度区 ボカスギ中密度区 タテヤマスギ高密度区
15	2002年1月2日～4日	65	ボカスギ中密度区 ボカスギ高密度区
18	2005年1月7日～15日 2005年1月19日～21日 2005年1月30日～2月2日	55 45 54	ボカスギ中密度区 ボカスギ高密度区 ボカスギ低密度区 タテヤマスギ高密度区

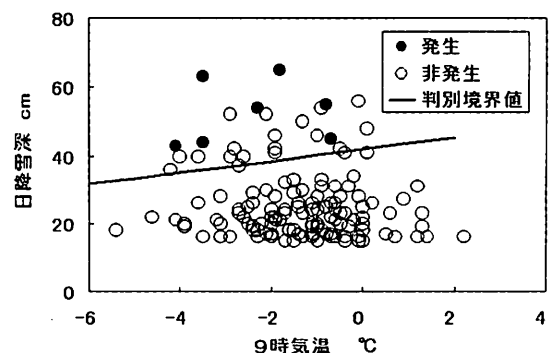


図-4 冠雪害発生と日降雪深および9時気温の関係

るように幹曲がりや根返りを生じた。したがって、被害木の分布様式はランダム分布ではなく、集中分布といえる。このような現象は共倒れ現象またはドミノ的現象とよばれ、ボカスギ林(嘉戸・平, 1982)だけではなくオーストラリアのラジアータマツ林 (Cremar et al, 1983) でも認められている。

なお、12年生における被害形態別の割合は幹曲がり62%、根返り38%であり、幹折れは認められなかった。また、18年生におけるボカスギ高密度区や中密度区の冠雪害でも共倒れ現象が認められた。被害形態の割合は幹曲がり53%、根返り23%で、幹折れ19%で、幹曲がりや根返りに加えて、幹折れも認められた。

3.3 本数被害率と立木密度

表-2は冠雪害が発生したときの本数被害率と林分要因の関係を示したものである。ボカスギの本数被害率を同一林齢毎に比較すると、本数被害率は立木密度が高い試験区で高く、立木密度が低い試験区で低い傾向が認められた。なお、本数被害率と立木密度の関係は複数の林齢を混みにすると不明瞭になった。

試験区毎に見ると、高密度区では冠雪害の発生時期が早く、15年生までに植栽本数の約70%が被害を受けた。また、中密度区では16年生で間伐を行ったものの、残存木の肥大成長を促すことができず、18年生時に全体の30%を超える林木が折損した。これらに対し、低密度区では無間伐であったが、本数被害率は7%と低かった。

表-2 立木密度試験地の本数被害率と林分概要

調査項目	林齢	ボカスギ			タテヤマスギ		
		低密度区	中密度区	高密度区	低密度区	中密度区	高密度区
本数被害率 %	12	0.0	0.0	45.3	0.0	0.4	0.6
	13	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	2.4
	14	0.0	1.8	30.4	0.0	0.5	1.3
	15	0.0	3.8	1.8	0.0	0.0	0.0
	18	6.7	33.3	18.6	0.0	0.0	2.3
立木密度本/ha	12	1,416	2,923	4,676	1,500	2,937	4,882
	13	1,402	2,923	2,324	1,500	2,924	4,853
	14	1,402	2,923	2,324	1,500	2,797	4,706
	15	1,318	2,718	1,618	1,402	2,709	4,471
	18	1,248	1,615	1,265	1,402	1,924	2,559
平均直径 cm	12	18.6	13.7	11.7	14.9	11.8	10.8
	13	19.6	14.6	12.9	15.8	12.6	11.3
	14	20.6	15.4	14.0	16.8	13.4	11.9
	15	21.1	16.0	15.0	17.5	13.9	12.2
	18	23.7	19.7	18.7	19.5	15.7	13.5
平均樹高 m	12	9.3	8.4	8.5	8.1	7.3	7.7
	13	10.3	9.4	9.6	8.9	8.2	8.4
	14	11.4	10.4	10.6	9.8	9.0	9.1
	15	12.1	10.9	11.0	10.3	9.4	9.5
	18	13.9	12.8	11.9	11.9	10.4	10.4
平均形状比 m/m	12	50	61	73	54	62	71
	13	53	64	74	56	65	74
	14	55	67	76	58	67	77
	15	57	68	73	59	68	78
	18	59	65	64	61	66	77
収量比数	12	0.49	0.68	0.84	0.45	0.62	0.80
	13	0.54	0.74	0.67	0.50	0.67	0.84
	14	0.59	0.78	0.72	0.54	0.70	0.87
	15	0.60	0.78	0.62	0.54	0.71	0.88
	18	0.65	0.69	0.58	0.61	0.65	0.74

タテヤマスギの本数被害率を同一林齢で比較すると、ボカスギと同様に、立木密度の高い試験区で高くなる傾向が見られた。ただし、タテヤマスギの本数被害率は1~3%と低く、タテヤマスギの耐雪性はボカスギのそれに比べて明らかに大きいと考えられた。このような傾向はこれまでも報告されている(嘉戸, 2001)。

3.4 本数被害率と林分要因

図-5は、ボカスギが被災した12, 14および18年生における本数被害率と林分要因の関係を示したものである。この図から、本数被害率と相関が高かった林分要因は平均形状比であったこと、平均形状比60以上で冠雪害の危険性が高くなることが指摘された。なお、1985年12月に冠雪害を受けた氷見市のボカスギ林での調査結果によると、本数被害率は平均形状比が65以上になると急激に高くなることが報告されている(嘉戸ら, 1992)。このように、平均形状比が大きいほど被害率が増加する傾向は、ラジアータマツ林 (Cremar *et al.*, 1983) でも報告されている。

収量比数が高いほど本数被害率も高くなる傾向がみられたが、両者の相関係数は本数被害率と平均形状比の関係よりも低い傾向が見られた。これは、18年生時における高密度区のように、雪害や間伐で密度が低下しても、すぐには被害前の林分材積までに回復できなかったためと推測された。

被災した林齢毎に見ると本数被害率と平均胸高直径の間に関連性が見られたが、被災した全ての林齢を混みにした場合には、本数被害率と平均胸高直径の相関は低かった。また、本数被害率と平均樹高の相関は、林齢毎に見た場合でも3つの林齢を混みにして見た場合でも低かった。

図-6は、タテヤマスギが被災した12, 13, 14および18年生における本数被害率と林分要因の関係を示したものである。この図から、本数被害率と最も密接な林分要因は平均形状比であり、ついで収量比数、平均胸高直径の順であることがわかった。なお、本数被害率と平均樹高には密接な関係が認められなかった。

このように、ボカスギだけでなくタテヤマスギ

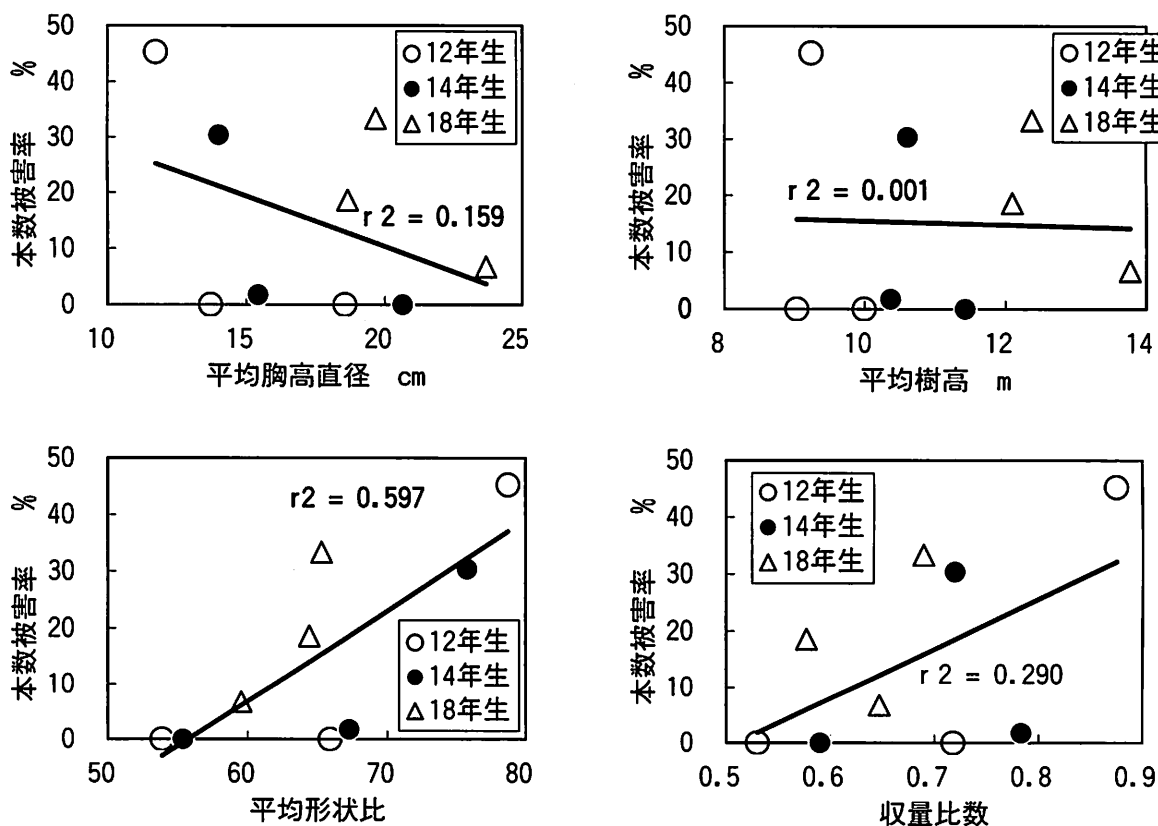


図-5 ボカスギの本数被害率と林分要因の関係

についても、本数被害率と平均形状比の間に密接な関連性が認められたことから、冠雪害の発生には林木のサイズや林分の相対密度よりも林木形状の影響が大きいと考えられた。

つぎに、ボカスギとタテヤマスギの平均形状比を密度試験区毎に比較した結果、ボカスギはタテヤマスギと同等もしくは小さい傾向があった。ちなみに、18年生の形状比について平均値の差の検定を密度試験区毎に行った結果、中密度区および高密度区ともボカスギの方がタテヤマスギよりも1%水準で小さいと判断された。これらのことから、ボカスギがタテヤマスギよりも被害率が高い傾向を示した原因は平均形状比以外の影響と考えられた。

3.5 本数被害率と林木要因

冠雪害と林木要因の関係について大きな被害を受けたボカスギの中密度区と高密度区を対象に検討した。図-7は、12年生の高密度区と18年生の中密度区における胸高直径階別および形状比階別の本数被害率を示したものである。この

図から、本数被害率と胸高直径の間に密接な関係があり、胸高直径が小さいほど本数被害率が高くなる傾向が認められた。ただし、両者の関係は試験区毎に分離しており、胸高直径16cmの本数被害率は12年生の高密度区で0%であったのに対し、18年生の中密度区では60%と大きな違いがみられた。

本数被害率と個体の形状比の間にも密接な関連性が認められ、形状比が大きいほど本数被害率が高くなる傾向があった。また、12年生の高密度区と18年生の中密度区を混みにして見ると、本数被害率と個体の形状比の関係は分離することはなく、重なり合うことがわかった。そして、形状比が70を越えると40%以上の個体が折損する傾向が認められた。

3.6 冠雪害発生時の冠雪荷重

図-8は、12年生(1998年12月)から18年生(2005年3月)までの7冬期間における主な降雪日における葉量1kg当たり冠雪荷重を示したものである。この図から、冠雪害発生日における葉量

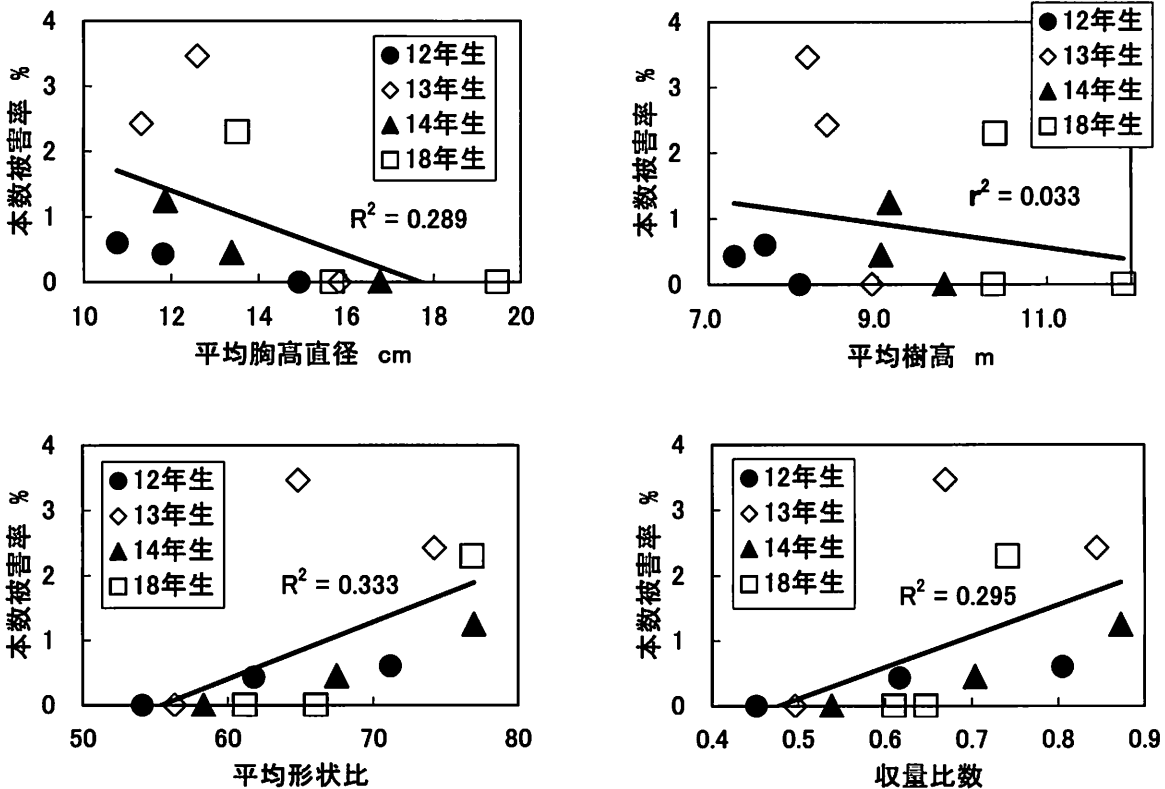


図-6 タテヤマスギの本数被害率と林分要因の関係

1kg当たりの冠雪荷重は11~15kgで、非発生日の値よりも大きい傾向が見られたが、同時に、年次変動もあったため冠雪荷重だけで被害率の大きさを説明することができなかった。

林木当たりの冠雪荷重はその葉量に伴って増加する傾向があることが指摘されている(松田, 1981; 嘉戸, 2001)。そこで、14年生時(2001年4月)に葉量の現存量調査を行い、ボカスギとタテヤマスギの葉量を比較した。図-9は個体の胸高直径と葉量の関係を示したものである。この結果、ボカスギの葉量は胸高直径の約2.5乗に比例し、タテヤマスギのそれは胸高直径の約2乗に比例する傾向が認められた。ただし、葉量と胸高直径を対数変換して、共分散分析を行ったところ、両品種間には有意な差異が認められなかった。したがって、胸高直径が等しい場合には、両品種の葉量に顕著な差異がないと考えられた。

3.7 樹幹ヤング率の品種比較

樹幹耐力の一要因である樹幹ヤング率を測定し、品種間および立木密度間で比較した。表-3は13年生と21年生における各密度試験区における平均樹幹ヤング率とその標準偏差を示したものである。まず、ボカスギ13年生の3つの密度試験区間の樹幹ヤング率について分散分析した結果は $F=0.33$ ($p=0.72$)となり、密度試験区間に有意な差異が認められなかった。また、18年生の樹幹ヤング率は13年生のその約1.6倍となったが、分散分析した結果は $F=1.18$ ($p=0.33$)となり、密度試験区間には有意な差異が認められなかった。

タテヤマスギの平均樹幹ヤング率は高密度区で少し高いものの、分散分析の結果は $F=2.37$ ($p=0.11$)となり、密度試験区間に統計的に有意な差異が認められなかった。また、18年生の樹幹ヤング率は13年生のその約2倍となったが、分散分析した結果は $F=0.929$ ($p=0.41$)となり、密度試験区間に有意な差異が認められなかった。

このように、両品種とも、樹幹ヤング率は林齢が高くなるほど大きくなる傾向が認められたが、現在のところ樹幹ヤング率に対する立木密度の影響は小さいようであった。なお、樹幹ヤング率は若齢期に小さく加齢に伴って大きくなることが知られている(中谷ら, 1988; 中谷, 1991)。

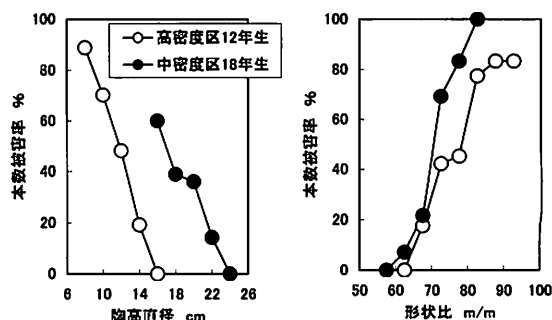


図-7 ボカスギ密度試験区における胸高直径階別および形状比階別の本数被害率

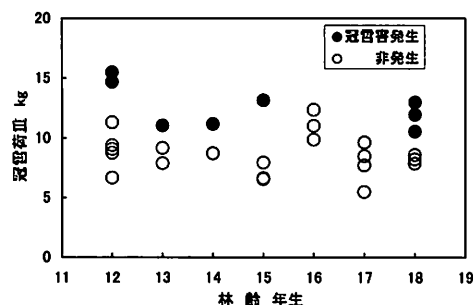


図-8 冠雪害の発生の有無と葉乾重1kg当たりの冠雪荷重

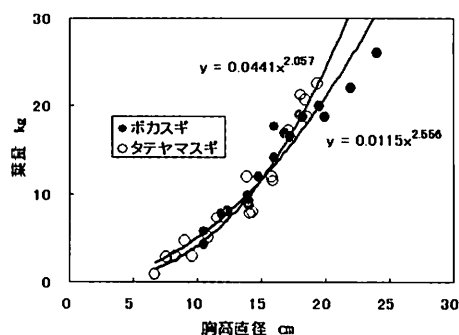


図-9 14年生における胸高直径と葉量の関係

一方、13年生におけるボカスギとタテヤマスギの平均樹幹ヤング率を比較すると、前者の方が後者の62%で小さかった。そこで、両品種の全ての密度区を対象に分散分析した結果は $F=15.36$ ($p<0.01$)となり、両品種間に統計的に有意な差異が認められた。21年生ではボカスギの平均樹幹ヤング率はタテヤマスギのその約50%となり、両者の差異が大きくなった。分散分析した結果は、 $F=86.89$ ($p<0.01$)となり、品種間に統計的に有意な差異が認められた。このようにボカスギの樹幹ヤング率がタテヤマスギのそれよりも小さい傾向はこれまでも報告されている(中谷, 1991; 嘉戸, 2001)。

表-3 樹幹ヤング率の平均値と標準偏差の比較

林齢 (西暦)	試験区	ボカスギ (Mpa)			タテヤマスギ (Mpa)		
		本数	平均値	標準偏差	本数	平均値	標準偏差
13年生	低密度区	10	1736	± 315	10	2716	± 722
	中密度区	10	1731	± 364	10	2617	± 626
(1999年)	高密度区	11	1830	± 271	11	3196	± 621
21年生	低密度区	9	1948	± 227	8	3763	± 526
	中密度区	2	1902	± 38	5	3909	± 793
(2007年)	高密度区	9	2199	± 327	8	4315	± 1067

4. 考察

4.1 冠雪害と気象条件

ボカスギ試験区における冠雪害は日降雪深40cm以上で、かつ午前9時気温 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$ の場合に発生する傾向が認められ、冠雪害が発生するか否かには日降雪深が決め手になっていることがわかった(図-4)。佐伯・杉山(1965)は、本試験地と平均最大積雪深が同じ21~100cmの地域においては、日降雪深が30cm以上でかつ気温が $-3\sim 3^{\circ}\text{C}$ 範囲の場合に冠雪害の危険性が高いと述べている。また、Paatalo(2000)はフィンランドを含む国内外での調査事例などから、冠雪害発生に関わる最も重要な要因は降雪深であり、この値が大きいほど危険性が高いこと、さらに気温が $-3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ の場合に最も冠雪が発達し易いことを指摘している。以上のように、冠雪害が発生しやすい気象条件は、降雪深や気温の範囲が若干異なっているものの、降雪時としては高温下(0°C 付近)で多量の降雪が有るといえる点はいずれも共通しているといえる。

ボカスギ林は富山県西部の丘陵帯に造林されており、その大半が標高200m以下に分布する。過去の気象資料から、この地域では日降雪深が40cm以上でかつ午前9時気温が $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$ の日数が10年間に2~4回もあり、冠雪害の危険性が高いことが再確認された。ただし、図-4では冠雪害発生日と同様の気温と降雪深であっても、被災しなかった日も多く認められた。冠雪害発生の予測精度をさらに高めるためには、日降雪深や午前9時気温以外の要因を加えることや、降雪が数日間にわたる場合には積算降雪量を用いることなども必要であろう。一方、タテヤマスギの各試験区ではいずれも微害であったことか

ら、冠雪害の発生と降雪深および午前9時気温の関係については明らかにできなかった。

4.2 冠雪害発生時の冠雪荷重

スギ樹冠の冠雪荷重を測定した結果、冠雪害発生時における冠雪荷重は葉乾重1kg当たり11~15kgであった(図-8)。長井(1982)は1980年12月下旬の56豪雪によって被災したボカスギ林において健全な立木に付着した小枝ひと塊の冠雪荷重を調べている。その結果は、冠雪荷重の平均値が枝葉生重の5.23倍であった。この調査では枝葉生重が用いられているので、これを葉の乾燥重量に換算してみた。当試験地における現存量調査の結果をもとに、枝葉生重 x と葉量(絶乾重) y の関係を調べたところ、次式で近似された。

$$y = 0.349x \quad (r^2 = 0.992, n = 36)$$

この結果から、56豪雪で被災した林分の冠雪荷重は葉乾重1kg当たり15kgと推定された。嘉戸ら(1988)は1985年12月下旬の大雪で幹折れしたボカスギの樹幹形、樹幹ヤング率、根元の回転係数などを測定して樹幹耐力を算出し、この値から幹折れに要する冠雪荷重を推定している。これによると、幹折れ木の冠雪荷重の平均値は486kgであり、その平均木の葉乾重は相対成長関係から31kgであった。これらから冠雪荷重は葉乾重1kg当たり15.5kgと推定された。以上のことから、冠雪害発生時における冠雪荷重は葉乾重1kg当たり15kg程度と考えられた。これらに比べると本調査地の冠雪荷重は同程度ないし若干小さな値であったといえる。

なお、冠雪荷重調査の結果、被災時の冠雪荷重は非災害時のそれよりも大きくなる傾向が認

められたが(図-8), 冠雪荷重だけで本数被害率の多少を説明することができなかった。この原因については明らかではないが, 供試木の葉量が小さい場合には冠雪し易くかつ落雪もし易い傾向が見られたことから, 供試木の大きさやその形状が調査年度によって不揃いであったことが考えられた。

ボカスギとタテヤマスギの葉量を比較したところ, 胸高直径が同じ場合には両品種間に有意な差異が認められなかった(図-9)。これまでに, ボカスギとタテヤマスギの冠雪荷重は葉量が等しい場合には顕著な差異が無いことが指摘されている(嘉戸, 2001)ことから, 冠雪荷重にも大きな差異がなかったことが推測された。なお, 14年生のボカスギ高密度区における平均木の葉量は9.8kg(図-9)であり, 同じ年度における葉量1kg当たりの最大冠雪量は11.2kg(図-8)であったことから, 平均木の冠雪荷重は110kgと推定された。

4.3 植栽密度

ボカスギの高密度区では12年生で冠雪害を受けはじめ, 15年生までに植栽木の約70%が折損した(表-2)。また, 中密度区では18年生時に33%もの林木が折損した(表-2)。一方, 低密度区では18年生時に7%の林木に雪害が認められただけであった(表-2)。これらのことから, 耐雪性の小さなボカスギは3,000本/haを越える高密度の植栽は危険であるが, 1,500本/ha程度の低密度植栽であれば冠雪害の発生を軽減させることが可能と考えられた。かつてボカスギの電柱材生産が盛んであった昭和10年代の植栽本数は約1,000~2,000本/haと低密度であったことが報告されている(富山県山林協会, 年代不明; 平・嘉戸1993)。これは35年前後の早期に径級の大きな電柱材を生産することに加えて冠雪害の軽減を考慮したためとされている。ただし, 本調査地では低密度区においても18年生時に冠雪害が発生しはじめており, すでに防除対策が必要になっている。

一方, タテヤマスギは植栽密度5,000本/haの高密度区でも大きな冠雪害を受けなかったことから, 最大日降雪深65cm程度ではボカスギのような激害は発生しないようである。タテヤマスギは富山県内の多雪・豪雪地帯に植栽されており, 梢端折れなどの軽微な被害は頻繁に起こるが, 56豪雪時でもボカスギのような激害の発

生は少なかった。したがって, タテヤマスギの植栽密度は従来どおり2,500~3,000本/haとすれば, 若齢期における冠雪害の危険性は小さいと考えられた。

4.4 冠雪害と林分要因

冠雪害と林分の平均胸高直径, 平均樹高, 平均形状比および収量比数などの林分要因の関係について検討した(図-5, 6)。この結果, 本数被害率と相関が最も高い要因はボカスギも, タテヤマスギも平均形状比であった。よって, 冠雪害の発生には林木形状の方が林木のサイズや林分の相対密度よりも密接に関係すると考えられた。同様の傾向はラジアータマツ林やボンデローザマツ林でも認められており, 林分の耐雪性の指数として平均形状比が海外でも用いられている(Cremar *et al.*, 1983; Paatalo, 2000)。

平均形状比を用いてボカスギの若齢林の冠雪害を防除する場合には, その値が60以下になるように密度管理を行うことが必要と考えられた。ただし, 本試験地の地位は18年生の樹高から1等地と推測されたことから, 低密度区であっても平均形状比を60以下になるように密度管理することは容易ではないと考えられた。

しかし, ボカスギはタテヤマスギよりも平均形状比が小さい場合であっても, 本数被害率が大きかったことから(表-2), これらの品種間の耐雪性の差異は平均形状比では説明できなかった。

4.5 冠雪害と林木要因

ボカスギの試験区を対象に胸高直径階別および形状比階別の本数被害率を調べたところ(図-7), 冠雪害は胸高直径と密接な関連しており, 本数被害率は径級の大きな個体ほど低い傾向が認められた。このように, 同一林分において径級の大きな林木の被害率が低い傾向はラジアータマツ林(Cremar *et al.*, 1983)でも観察されており, 一般的な傾向といえる。ただし, ラジアータマツ林では被害率が平均的な径級の林木で最も高く, 小さな径級では低い傾向があった。この原因として, 小さな径級の林木が周囲の林木の樹冠下で保護されたためと考えられている。

冠雪害は形状比とも密接な関係があり, 本数被害率は形状比の大きな林木ほど高くなる傾向があった。そして, 本数被害率と形状比の関係は立木密度や生育段階が異なる二つの試験区で

も重なり合うことがわかった。一方、本数被害率と胸高直径の関係はそれぞれの試験区毎に認められるもので、それぞれ分離していた。これらの結果から、個々の林木の耐雪性の指標としては、形状比の方が胸高直径よりも適していると考えられた。

以上のことから、冠雪害を軽減するためには、形状比の大きな林木の除去や間伐による残存木の肥大成長の促進が有効と考えられる。この場合の目安としては、形状比70以上になると40%以上の林木が被災する傾向がみられたことから、少なくとも65以下になるように施業を行う必要がある。なお、同じ林分にあっては径級の小さな林木ほど形状比が大きくなる傾向があるので、小径木を中心に除間伐することになる。

4.6 品種間差に関わる強度要因

同一品種の場合、林分間の耐雪性は平均形状比と、林分内の単木の耐雪性は形状比と密接に関連することが確認された。しかし、ボカスギとタテヤマスギとの耐雪性の差異は平均形状比だけでは説明できなかった。そこで、冠雪害の品種間差異に関わる強度要因について検討した。

澤田(1983)は林木の冠雪害を長柱の座屈による破壊とみなして、その発生機構を力学的な手法を用いて検討している。中谷ら(1984)はこの解析の妥当性を立木荷重試験により検証し、冠雪荷重に対する林木の樹幹耐力が樹幹形、樹幹ヤング率および根元の回転係数(根系の支持力を表す指数)などから推定できることが明らかにした。さらに、このモデルに冠雪荷重が樹幹直径の2乗に比例して増加する、根元が固定端となるなどの仮定を置くと、林木の耐雪性は概ね樹幹ヤング率に比例し、形状比の2乗に反比例することが報告されている(嘉戸, 2001)。

本試験地で葉量を測定した結果、個体当たりの葉量は胸高直径の2~2.5乗に比例しており、胸高直径が同じであれば葉量に品種による差異がなかった(図-9)。この結果から、個体当たりの冠雪荷重は樹幹直径の2乗にほぼ比例し、林木の耐雪性は樹幹ヤング率に比例し、形状比の2乗に反比例すると仮定しても大きな誤りはないと考えられた。また、樹幹ヤング率は同一品種でかつ同一林齢の場合立木密度の影響が小さくほぼ一定であった(表-3)。この場合には、林木の耐雪性は主として形状比の影響によって変動することになり(表-2, 図-7)、本数

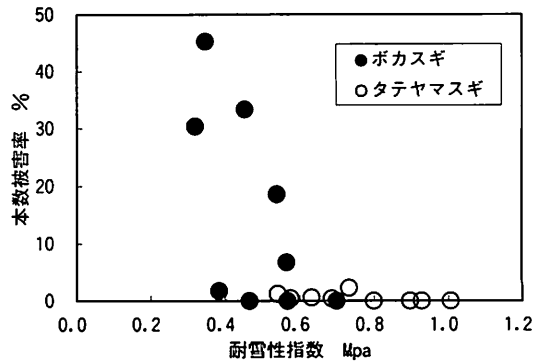


図-10 平均木の耐雪性指数(樹幹ヤング率/平均形状比の2乗)と本数被害率の関係

被害率と形状比の間に密接な関係が認められたものと考えられた。

一方、ボカスギとタテヤマスギは形状比も樹幹ヤング率も異なっていたので、これらの要因を同時に考慮した耐雪性の指標が必要である。そこで、(樹幹ヤング率/平均形状比の2乗)を耐雪性の指数として、この指数値を12, 14および18年生の試験区において算出した。この指数値と林分被害率の関係は図-10の通りである。なお、12年生と14年生の樹幹ヤング率は13年生における測定値を用いた。図-10から、①耐雪性指数値が約0.5Mpaよりも小さい場合に冠雪害が発生し、本数被害率はこの指数値が小さいほど高くなる傾向があること、②品種内における耐雪性の差異と品種間における耐雪性の差異が同時に評価できそうなこと、などが指摘された。これら結果から、各品種内の密度試験区間における本数被害率の差異は主に樹幹形状の差異に起因するものであり、また品種間の本数被害率の差異は主に樹幹ヤング率の差異に起因するものと考えられた。

なお、この耐雪性指数(樹幹ヤング率/平均形状比の2乗)を用いても本数被害率の変動をすべて説明できなかった。その原因として、ここで用いた耐雪性指数が冠雪荷重や樹幹耐力の推定にあたって多くの仮定を設けていること、冠雪荷重や樹幹耐力の個体変動を考慮していないことなどがあげられる。さらに、図-1に示したように激害林分では共倒れ現象が観察されたことから、林木には冠雪荷重に加えて隣接木の荷重も負荷され、被害率がより高くなった可能性が考えられた。このような共倒れ現象は樹高がそろった高密度林分で発生し易いことが指摘さ

れている (Cremar *et al*, 1983; 石川ら, 1987)。クローンであるボカスギは実生繁殖のタテヤマスギに比べて直径や樹高の個体変動が小さい傾向があることから、共倒れ現象が起きやすいことが考えられた。

4.7 冠雪害防除対策

スギ林の冠雪害防除対策として、本調査から得られた事項に既存の文献等から得られた事項を加えると、以下のようにまとめることができる。

- (1) ボカスギを造林する場合には、日降雪深40cm以上の回数ができるだけ少ないところを選定する。
- (2) ボカスギは植栽密度を1,500本/ha程度の疎植とし、個体の形状比が65以下、平均形状比が60以下になるように低密度管理を行う。
- (3) タテヤマスギは耐雪性が大きいので、ボカスギのような疎植、低密度管理を行う必要はない。
- (4) タテヤマスギは生産目標に応じて植栽密度、間伐の強度や回数などを変える必要があるが、一般的には植栽密度を3,000本/ha以下とし、平均形状比が75以下になるように密度管理する。

5. おわりに

ボカスギとタテヤマスギの植栽試験地において冠雪害と密度の関係について比較検討した。その結果、冠雪害の危険性は高密度林分ほど大きいことが再確認されたが、耐雪性が小さなボカスギであっても低密度管理によって危険性が低下することが実証された。また、品種によって耐雪性に差異があることが再確認され、その原因として樹幹ヤング率の品種間差異の影響が大きいことが示唆された。

本試験地における冠雪害は日降雪深が40～65cmの範囲で生じたものである。しかし、56豪雪のように降雪強度が80～100cmと大きい場合には、本調査地で提案した平均形状比の基準値では冠雪害を防除できない恐れがある。また、試験地の地位によって樹高成長が異なることから、成長の良い林分ほど間伐の時期を早め、間伐強度を上げることによって、形状比を小さくする必要があるだろう。ただし、形状比を小さくすれば、樹幹が梢殺形になり利用価値が下がる。したがって、間伐を含む施業体系については、

冠雪害だけではなく育林や伐出費用も加味した総合的な検討を行う必要があるだろう。

引用文献

- Cremar, K.W., Cater, P.R. and Minko, G. (1983) Snow damage in Australian pine plantations. *Aust. for.*, 46 (1), 56-66
- 石川政幸・新田隆三・勝田 柁・藤森隆郎 (1987) 冠雪害 — 発生のおくみと回避法 —, わかりやすい 林業研究解説シリーズ83, 林業科学技術振興所, 101pp.
- 嘉戸昭夫・平 英彰 (1982) 冠雪害をうけたボカスギ林の解析, 日林講93, 259-260
- 嘉戸昭夫・中谷 浩・平 英彰・相浦英春 (1988) ボカスギの幹折れに要する冠雪荷重, 富山県林技セ研報1, 1-6
- 嘉戸昭夫・中谷 浩・平 英彰 (1992) 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
- 嘉戸昭夫 (2001) スギ人工林における耐雪性の推定とその応用に関する研究, 富山県林技セ研報4, 1-77
- 小泉章夫 (1987) 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
- 松田正宏 (1981) 冠雪に関する研究 (II) スギの冠雪量について, 日林誌 63 (9), 328-330
- 長井真隆 (1982) 56豪雪 (1980-1981年) における屋敷林のスギ異常着雪害と気象条件, 富山市科学分センター研報 4, 5-15
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰・飯島泰男・沢田 稔 (1984) 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
- 中谷 浩・嘉戸昭夫・長谷川益夫・飯島泰男・相浦英春 (1988) 林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, 富山県林技セ研報1, 25-35
- 中谷 浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究, 富山県林技セ研報4, 1-54
- 大阪営林局 (1942) 多雪地方の収穫及造林に関する協議会記録, 94-101
- Päatalo Marja-Leena (2000) Snow damage to scots pine, Norway spruce and birch (Model approaches), University of Joensuu Faculty of Forestry Research Note 102, 40pp.
- 佐伯正夫・杉山利治 (1965) 林木の冠雪害危険地域, 林試研報172, 117-137

澤田 稔 (1983) 風および冠雪による針葉樹幹の変形, 林試北海道支場研究資料128, 18pp.
平 英彰・嘉戸昭夫 (1993) ボカスギ林業, 林業技術, 12-16
高橋啓二 (1977) 造林地の冠雪害とその対策,

わかりやすい林業研究解説シリーズ61, 林業科学技術振興所, 47pp.
富山県山林協会 (年代不明) 富山県に於けるボカ杉造林の紹介, 1-8

Summary

The effects of stand density on snow damage were examined in young stands of Boka-sugi and Tateyama-sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) . Three study plots with different density (1500 trees/ha, 3000 trees/ha, 5000 trees/ha) were established for each cultivar. The snow damage was observed eight times for 18 years after the planting. Snow damage always occurred when the snow fall became more than 40cm per day. The snow load on the crown of the damaged tree was estimated to be 11 to 15 times of the dry weight of its whole leaves. Boka-sugi was seriously damaged in the high-density and the middle-density plots, while it was slightly damaged in the low-density plot. These results could imply that the height/diameter ratio plays an important role in occurrence of the snow damage. The result suggests that low-dense Boka-sugi stands are effective to prevent the snow damage. Tateyama-sugi stands, on the other hand, had less damage than Boka-sugi stands. It may be because Tateyama-sugi has larger Young's modulus than Boka-sugi, so that Tateyama-sugi is stronger against the snow damage than Boka-sugi.