

ボカスギ樹冠における冠雪荷重の垂直分布の推定

嘉戸 昭夫

Estimation of a vertical distribution of snow accretion load on the crown of Boka - sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don)

Akio KATO

ボカスギは冠雪害抵抗性が低いスギクロンである。ボカスギの樹冠における冠雪荷重の垂直分布を明らかにする目的で、冠雪荷重を7冬期間にわたって測定した。単木の冠雪荷重は、気温がプラスからマイナスに変化し、日射が少なく、風が弱い条件下で、降雪水量の増加に伴って直線的に増大する傾向が観察された。また、単木の冠雪荷重はその葉量と密接な関係があった。葉量が26kgのサンプル木の場合、冠雪荷重は降雪水量58mmで308kgに達した。降雪水量と単木の葉量を関数として単木の冠雪荷重を推定する経験式を導いた。この経験式を用いて、単木の冠雪荷重の垂直分布を推定し、冠雪荷重の垂直分布形状が葉量の垂直分布形状とほぼ一致する傾向を見出した。葉量の垂直分布をワイブル分布で近似することにより、様々な樹木サイズにおける冠雪荷重の垂直分布を推定できることがわかった。

1. はじめに

林木の冠雪害は、降雪が枝や葉に付着や堆積した雪の荷重(冠雪荷重)によって樹体が折損する現象である。この被害の発生頻度は北陸地方、とりわけ富山県西部の里山で高いことが指摘されている(佐伯・杉山 1964)。この地域において冠雪害の危険性が高い理由として、降雪時の気温が0 に近いいため樹冠着雪しやすい湿雪が降ること、材質が脆弱とされているボカスギが多く植栽されていることなどがあげられている(嘉戸 2009)。

林木の冠雪害の発生メカニズムを力学的な側面から検討しようとする場合には、樹冠にどの程度の冠雪荷重が負荷されるのか、樹幹耐力の限界はどの程度なのかといった基本的な情報が不可欠である。

筆者ら(中谷ら 1982; 嘉戸 2001)は、冠雪荷重に対するスギの樹幹耐力を定量化する目的で、冠雪害を長柱の座屈と仮定して解析を行った。その結果、スギ樹冠における冠雪荷重の垂直分布が明らかにできれば、樹幹耐力が樹幹形、樹幹ヤング率および根系の支持力などから推定できることがわかった。同様の研究は、継田ら(1984)や遠藤ら(1987)も行っている。

一方、スギの冠雪荷重については主に国立林試(現独立行政法人森林総合研究所)で実施され、

高橋(1952)はスギ樹冠に着雪しやすい気象条件があること、渡辺・大関(1964)や片岡ら(1983)は冠雪荷重が品種によって異なること明らかにした。また、枝葉の冠雪荷重を調べた事例として松田(1982)や長井(1982)の報告があげられる。しかし、スギ樹冠における冠雪荷重の垂直分布について調査した事例はない。

そこで、筆者ら(1993)はボカスギ樹冠上の冠雪荷重を実測し、冠雪荷重が最大になったときのデータをもとに、降雪水量や葉量から単木の冠雪荷重を推定する経験式を導いた。さらに、葉量の垂直分布を正規分布で近似することにより、様々な樹木サイズにおける冠雪荷重の垂直分布を推定する方法を提案した(Kato・Nakatani 2000)。ただし、これらの調査には樹冠のサイズの小さな供試木が用いられていたため、現実の林木の大きさのものでも同様の傾向が認められるものか確かめる必要があった。

本調査では、冠雪害抵抗性が低いスギクロンであるボカスギを対象に、葉量が先の調査に使用したのと同程度の供試木に加えて現実の林木に近い大きさのものをを用いて冠雪荷重測定を合計7冬期間行った。このデータをもとに新たに単木の冠雪荷重を推定する経験式を導いた。さらに、この経験式を用いて、単木の冠雪荷重の垂直分布を推定した。

2. 調査方法

冠雪調査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 - 森林研究所構内で行った。標高は約230mで、調査実施年までの30年間(1979~2008年)における最大積雪深の平均値は109cmである。

冠雪荷重の測定は図 - 1 に示した台秤型と吊り下げ型の二つを用いて行った。台秤型の測定装置は木製の載台の上に鉄製の檜を載せ、檜の中央にある円筒にボカスギの供試木の幹を差し込んだものである。そして、供試木、檜および冠雪を加えた重量(A_L)を載台の四隅に設置した圧縮型のロ - ドセル(定格100kgfまたは500kgf)の値を1時間間隔で測定記録した。冠雪荷重(S_L)は、 A_L から樹冠が乾いているときの供試木と檜、載台を合計した重量を差し引いて求めた。なお、台秤型の装置が風圧で転倒しないように単管パイプで補強し、さらに雪が載台に載らないように防雪シートで覆いをした。

吊り下げ型の測定装置は建設用の単管パイプで鉄棒状の檜を組み、その先端に取り付けた水平な単管パイプに引っ張り型のロ - ドセル(定格20kgfまたは50kgf)を取り付け、その下に供試木を吊り下げたものである。供試木と冠雪を合計した重量をロ - ドセルで測定し、1時間間隔で記録した。冠雪荷重(S_L)は供試木に冠雪を加えた重量から樹冠が乾いているときの供試木の重量を差し引いて算出した。

調査期間中の降雪水量、気温、日射量および風速などの気象関係のデータは冠雪調査地から

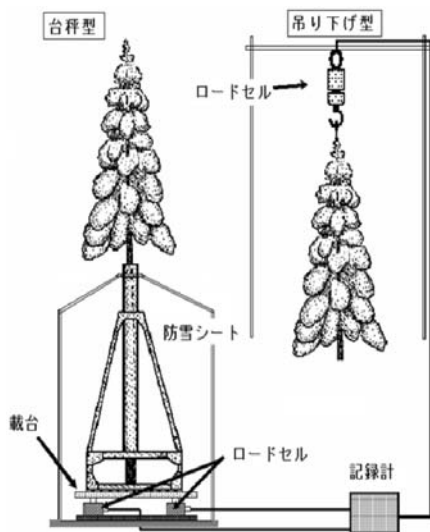


図 - 1 冠雪荷重の測定法

約50m離れた森林研究所の露場で測定した。なお、降雪量は降水開始時からの雨と雪の合計値を累積し、これを降水に換算した値(以下、降雪水量と呼ぶ、単位mm)で表した。

表 - 1 に示したように、最初の4冬期については、現実林の葉量を有する供試木の冠雪荷重を台秤型の装置で測定した。調査年次は寒候期の越年後の年で示した。残りの3冬期については、葉量が異なる複数の供試木を用いて冠雪荷重を測定した。葉量の小さな供試木の測定には吊り下げ型の装置を、大きな供試木については台秤型の装置を用いた。

単木当たりの冠雪荷重と葉量の関係だけではなく梢端からの積算葉量と積算冠雪荷重の関係もあわせて検討するために、樹冠長を変えることによって単木当たりの葉量を調節した。一例として、図 - 2 に1999年の供試木(E1~E5)の葉の垂直分布を示した。樹冠を陽樹冠と陰樹冠

表 - 1 供試木の概要

調査年次*	供試木	測定法	葉乾重 kg	樹冠長 m
1994	A	台秤型	25.7	7.7
1995	B	台秤型	12.8	5.2
1997	C	台秤型	14.0	6.3
1998	D	台秤型	22.2	6.7
1999	E1	台秤型	23.2	7.5
1999	E2	台秤型	8.9	5.0
1999	E3	台秤型	5.9	4.3
1999	E4	吊り下げ型	2.5	3.0
1999	E5	吊り下げ型	0.5	1.3
2000	F1	台秤型	18.2	6.3
2000	F2	台秤型	8.7	5.0
2000	F3	吊り下げ型	2.9	2.8
2000	F4	吊り下げ型	1.1	2.0
2000	F5	吊り下げ型	0.6	1.0
2008	G1	台秤型	11.9	4.3
2008	G2	台秤型	10.0	3.9
2008	G3	台秤型	5.5	3.4
2008	G4	吊り下げ型	4.6	2.8
2008	G5	吊り下げ型	2.4	2.5
2008	G6	吊り下げ型	2.2	1.6

*調査年次は寒候期の越年後の年で示した。

表 - 2 葉量調査木の概要

調査地	林齢	供試木 本	樹高 m	胸高 直径 cm	枝下高 m	葉量 kg
頼成	12	6	5-9	9-13	1-2	6-17
吉峰1	14	6	9-11	11-17	3-5	4-17
吉峰2	14	6	10-11	11-20	2-3	8-20
吉峰3	14	6	9-12	14-24	3-3	9-26
北屋敷1*	18	7	10-13	13-19	3-5	10-22
北屋敷2	23	7	13-17	15-23	2-6	13-29
荒館*	25	8	17-21	21-31	7-11	21-45
仏生寺*	25	8	18-21	23-34	6-11	19-43
南谷	33	8	17-22	18-22	8-13	14-46

*相浦(1988)報告

に大別すると、今回使用した供試木はいずれも陽樹冠であった。最も小さなE1は樹冠長が1.3m、葉量0.5kg、大きなE5は樹冠長7.2m、葉量23.7kgであった。なお、梢端から1m毎の葉量密度は梢端からの距離が同じ場合には顕著な違いはなかった。また、枝の長さは樹冠の下部ほど長かった。

つぎに、単木の冠雪荷重を推定する経験式を導き、これを葉量の垂直分布データに適用して、冠雪荷重の垂直分布を調べた。この解析で用いたボカスギの葉の垂直分布データは、既存のデータ(相浦 1988)に加えて、筆者らが調べた未発表のデータを用いた。これらのデータは地上高0.3mから梢端に向かって、層厚1mで層別切り取り法によって得られたものである。なお、解析に用いた葉量は全て乾燥重量で表示した。

スギの冠雪荷重は葉量と密接な関係があること(松田1982; 嘉戸ら1993)、葉の垂直分布が正規分布(阪上1985; 相浦1994; 松浦1994)で近似されていることなどから、冠雪荷重の垂直分布も正規分布に近いことが推定された。本調査では陽樹冠だけを用い陰樹冠における調査を行っていないが、陰樹冠においても陽樹冠と同様の傾向があるものと仮定して検討した。

ワイブル分布は正規分布に似ているがそれとは異なる分布を表現できる。そこで、ボカスギにおける冠雪荷重の垂直分布の傾向を調べるため、この垂直分布がワイブル分布に従うと仮定

して累積分布関数で近似した。ここで、梢端から任意の部位までの樹幹長を樹高に対する百分率で表した相対樹幹長を $x(\%)$ 、梢端から x までの累積冠雪荷重を $K(x)$ とすると次式で示される。

$$K(x) = S_L (1 - \exp(-(x/d)^c)) \quad (1)$$

なお、 S_L は単木当たりの冠雪荷重、 c 、 d はワイブル分布の定数である。

また、階層の幅を b とすると、各階層における冠雪荷重 $G(x)$ は次のワイブル確率密度関数から求めることができる。

$$G(x) = S_L \cdot c/d (x/d)^{c-1} \cdot \exp(-(x/d)^c) \cdot b \quad (2)$$

ここで、 $G(x)$ は冠雪荷重のワイブル確率密度。

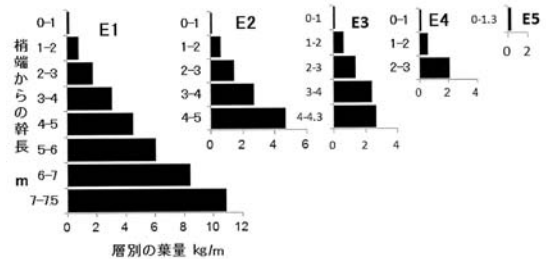


図 - 2 供試木E1~E5の葉量の垂直分布

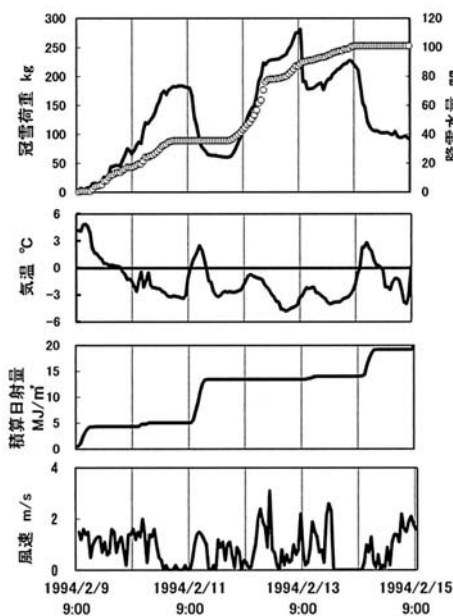


図 - 3 供試木Aの冠雪荷重と気象要素の推移 (1994年2月9日~15日)

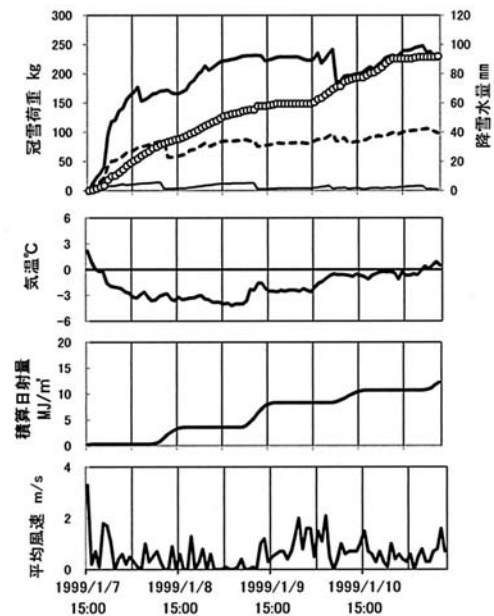


図 - 4 供試木E1, E2, E5の冠雪荷重と気象要素の推移 (1999年1月7日~11日)

3. 結果

3.1 冠雪荷重と気象条件

冠雪荷重と気象要素の時系列データをを用いて、冠雪しやすい気象条件について検討した。図-3は1994年2月における調査事例、図-4は1999年1月における調査事例である。冠雪荷重が降雪水量の増加に伴って増大した期間についてみると、図-3では、1994年2月9日から11日まで、12日から13日まで、13日から14日までの3期間であった。このうち、9日から11日までの降雪期間は、気温はプラスからマイナスに変化し、その後は-3まで低下した。また、この間の日射量は降雪当初を除いて少なく、平均風速も2m/s以下で弱かった。他の2期間についても、気温がマイナス、日射量が少なく、かつ微風という条件は共通していた。また、図-4において冠雪荷重が増大した1999年1月7日の気象条件について見ると、図-3の降雪当初と同様であり、気温がプラスからマイナスに変化したのち、マイナスのまま推移し、日射がほとんどなく、風が弱かった。

一方、冠雪荷重が短時間に著しく減少したのは、図-3では1994年2月11日11時～18時と同14日11時～18時の2期間であり、両期間とも気温がマイナスからプラスに変化し、かつ日射量が多い(5~8MJ/m²)、という共通点が認められた。図-4でも葉量が小さいE5は日射があるたびに落雪を繰り返した。ただし、葉量大きいE1では冠雪荷重の著しい減少は見られなかった。このような図-3と図-4の差異は前者の気温がプラスになったのに対し、後者の気温が概ね-2以下で推移したことが影響したと考えられた。

以上のことから、冠雪荷重が大きくなるときの気象条件は、降雪水量が多いことに加えて、気温がプラスからマイナスに変化し、日射量が少なくかつ微風で推移する場合といえる。

3.2 単木における冠雪荷重

図-3や4に示したように、気象要素の変動に伴って冠雪荷重が複雑に変化していた。そのため、冠雪荷重の変動を一つのモデルで表現することは難しいと考えられた。ただし、降雪初期において、気温がプラスからマイナスに変化し、日射量が少なくかつ風が弱い場合に限定すれば、冠雪荷重と降雪水量の間に密接な関係があることが推測された。

そこで、調査年次毎に、冠雪荷重が降雪水量の増加に伴って単調に増大しかつ冠雪荷重が最大値を示すまでの期間を選び、冠雪荷重と降雪水量の一時間データをプロットしたのが図-5である。この図から、冠雪荷重は降雪水量の増加に伴ってほぼ単調に増大し、降雪水量が同じ

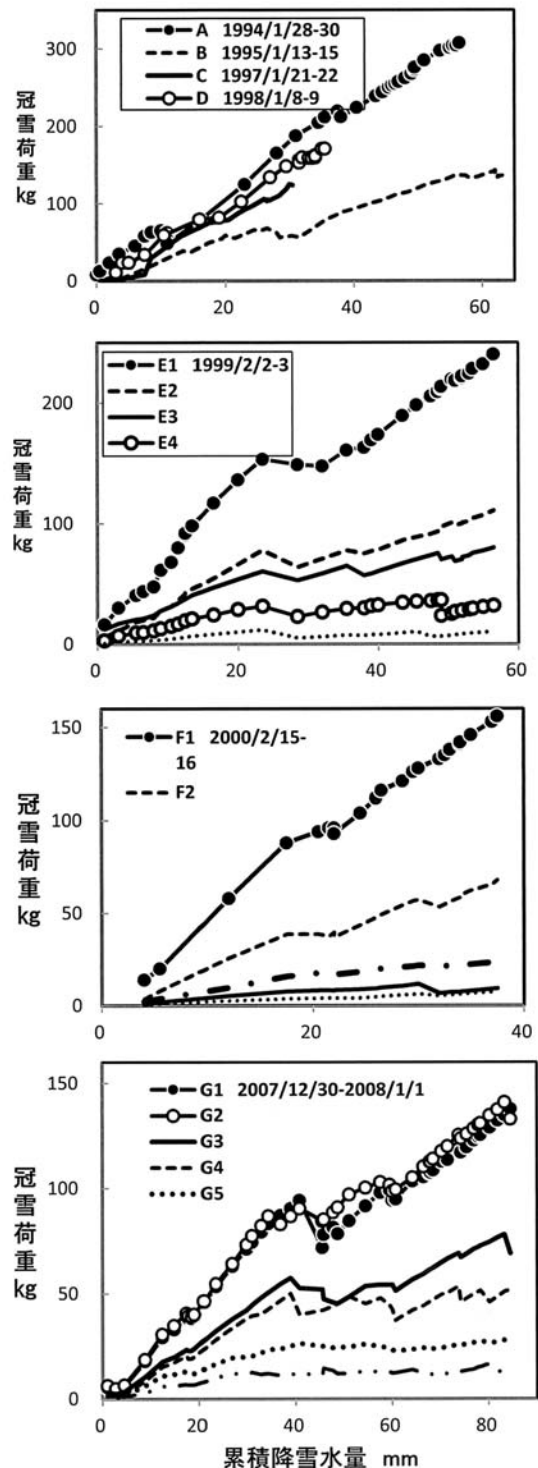


図-5 単木の冠雪荷重と累積降雪水量の関係

場合には葉量が大きいほどが大きくなる傾向が認められた。本調査において冠雪荷重が最大になったのは、供試木 A(葉量26kg)が降雪水量58mmのときに記録した308kgであった。

これらのデータを使って、各供試木の葉量 W_L (kg) と降雪水量 F (mm) を説明変数として、冠雪荷重 S_L (kg) を推定するための経験式を最小二乗法により導いた。なお、解析に用いた冠雪荷重と降雪水量の1時間毎のデータ数は各々672であり、各気象要素の頻度分布は図-6のとおりであった。50%のデータは気温が-2~0の範囲にあり、全体の26%は-3以下であった。日射量はデータの大半が0.2MJ/m²/h以下で、1.0を超えたのは0.7%と少なかった。平均風速はほとんどが3m/s以下であった。これらのデータから求めた経験式は次式のとおりである。

$$S_L = 0.454 W_L^{1.068} F_S^{0.733}, \text{ d.f.} = 669 \quad (3)$$

また、冠雪荷重の測定値と予測値の相関が高く、決定係数 (r^2) は0.966であった。この結果から、冠雪荷重はほぼ葉量に比例して増加すること、降雪水量に伴って増加するが、その増加率は降雪水量が増加するにつれて徐々に低下する傾向があることなどが示唆された。

単木の葉量が測定されている場合には、(3)式より冠雪荷重が推定できる。しかし、葉量は胸高直径や樹高と違って、調査には多大な労力と時間が必要である。そこで、表-2のデータを用いて、単木の葉量 W_L と葉量の推定によく利用される相対成長式を求めると次のとおりであった。

$$W_L = 0.209 D^{1.74} H^{-0.256}$$

$$r^2 = 0.903, \text{ d.f.} = 59, p < 0.01 \quad (4)$$

$$W_L = 0.153 D_B^{1.77}$$

$$r^2 = 0.867, \text{ d.f.} = 60, p < 0.01 \quad (5)$$

$$W_L = 0.232 (D^2 H)^{0.510}$$

$$r^2 = 0.855, \text{ d.f.} = 59, p < 0.01 \quad (6)$$

これらの中では(4)式の適合度が高かった。また、(5)式は葉量推定で最も汎用性が高いとされているパイプモデルに基づく相対成長式である。(6)式も葉量推定にしばしば利用される相対成長式であるが、9林分を込みにしたために(5)式よりも決定係数が小さかった。このような傾向はこれまでも指摘されている(吉良1965)。

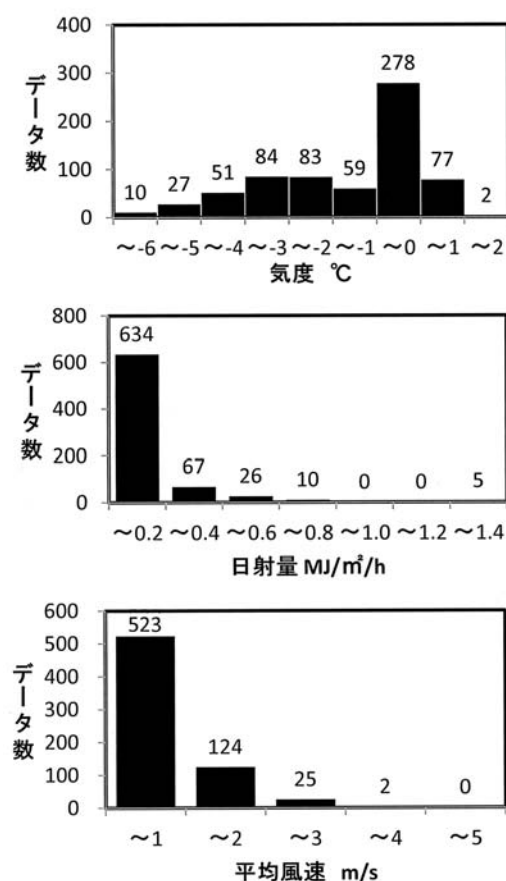


図-6 冠雪荷重推定に用いたデータの気象要素の頻度分布

3.3 冠雪荷重の垂直分布の推定

(3)式は一定の降雪水量のもとでは、単木当たりの葉量と冠雪荷重の関係を示すものであるが、この式が一本の林木における梢端部から枝下高までの積算葉量と積算冠雪荷重の関係においても成り立つと仮定して、冠雪荷重の垂直分布を推定した。まず、表-2の全供試木を対象に、葉の垂直分布の測定値を使って、梢端から任意の層の下部までの樹幹長と積算葉量を求め、これを(3)式に代入することにより梢端から任意の層までの積算冠雪荷重を算出した。任意の層までの積算冠雪荷重から一つ上の層までのそれを差し引くことにより各層における冠雪荷重を算出して、冠雪荷重の垂直分布を推定した。

図-7は、降雪水量を40mmとした場合の積算冠雪荷重と層別冠雪荷重(冠雪荷重の垂直分布)の推定例である。この結果から、吉峰では、樹下高が低かったため、冠雪が梢端から根元近くまで分布し、冠雪荷重の最大層は樹幹のほぼ中央部に位置していたと推定された。一方、南谷のように枝下高が高くなると、冠雪荷重の分布

幅は梢端から樹幹の中央部付近までとなり、冠雪荷重の最大層も梢端側に偏る傾向が認められた。

このような傾向をよりの確に把握する目的で、冠雪荷重の垂直分布をワイブル分布で近似し、図-7に示した。この図から、冠雪荷重の垂直分布はワイブル分布によく適合することがわかった。定数 c は形状の母数と呼ばれ、 d を一定にして c を大きくすると正規分布に近づき、 $c = 3.6$ では正規分布となる(木梨 1978; 阿部 1982)。図-7の例はいずれの供試木も正規分布に極めて近いものの、 c 値が2.43~2.98の範囲にあったことから、正規分布よりも少しだけ梢端側に偏っていると判断された。また、 d は尺度の母数と呼ばれ、 c が一定の場合には d が小さくなるほど分布の尖度が大きくなることが知られている。図-7でも、 d 値が小さい供試木で尖度が大きかった。

そこで、表-2のすべての供試木を対象に、降雪水量40mmの場合における冠雪荷重の垂直分布にワイブル累積分布関数を当てはめて、(1)式の定数 c と d を算出し、これらと林木要因の関係について検討した。なお、降雪水量によって積算冠雪荷重や層別冠雪荷重は変化するが、各層における冠雪荷重の形状は変化しない。

定数 c と胸高直径 D 、樹高 H 、枝下高 H_B 、および冠樹長 L の関係についてステップワイズ法で変数選択した結果、次の回帰式が得られた。

$$c = -0.0536L + 3.45$$

$$r^2 = 0.115, \text{ d.f.} = 60, p < 0.01 \quad (7)$$

この式から、 c 値は樹冠長が長くなるほど僅かに小さくなることが示唆された(図-8)。なお c は2.1~3.9の範囲にあり、平均値が2.98であった。

つぎに、 $\log d$ と $\log D$ 、 $\log H$ 、 $\log H_B$ および $\log L$ の関係をについてステップワイズ法で変数選択した結果、次の回帰式が得られた。

$$\log d = 1.83 - 0.396 \log H_B$$

$$r^2 = 0.850, \text{ d.f.} = 60, p < 0.01 \quad (8)$$

この式から、 d 値は枝下高が高くなるほど小さくなる傾向があるといえる(図-8)。

図-9は表-2の林分における優勢木を対象に冠雪荷重の垂直分布を葉量の垂直分布の測定値から推定した場合と林木要因から推定した場合を比較したものである。なお、林木要因から推定した場合は、まず、(4)式を用いて胸高直径と樹高から単木の葉量を求め、これと降雪水量を(3)式に代入して冠雪荷重を算出した。さらに、(7)式を用いて樹冠長からワイブル分布の定数 c 、(8)式を用いて枝下高から d を求めて、冠雪荷重の垂直分布を推定した。この図から、両者の冠雪荷重の垂直分布における傾向は、北屋敷2のようかけ離れたものもあったが、多くの供試木において類似する傾向が認められた。ただし、両方の推定方法の間に統計的に有意差がないというほどの高い精度ではなかった。

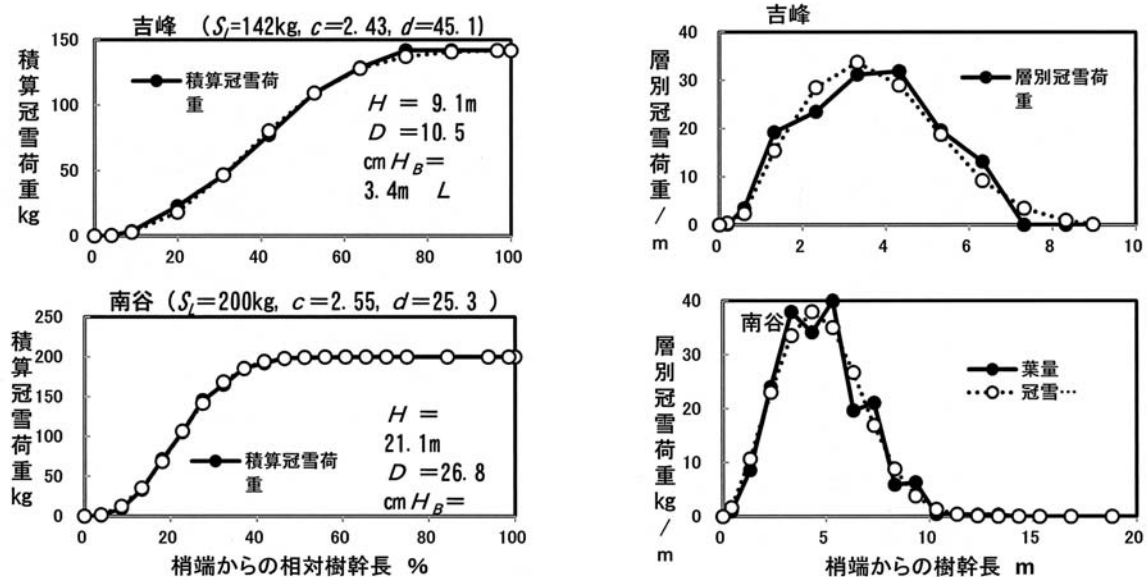


図-7 葉量が測定された林木における冠雪荷重の垂直分布の推定例 (降雪水量40mm)

4. 考察

4.1 冠雪が増大する気象条件

高橋(1952)は、冠雪害が発生するほどに冠雪が異常に増大するのは気温が0よりも僅かに低く(-0.3~-0.7)かつ風が弱い状態が持続するなかで多量の降雪がある場合に限定されると述べている。フィンランドでは大きな冠雪は気温が-3~+0.6の範囲で形成され、降雪水量50~60mmで冠雪害が発生するとしている(Päätaalo *et al.* 2000)。ボカスギ林における冠雪害は日平均気温が-4~2の範囲でかつ降雪水量が40mm以上の場合に発生する傾向があった(嘉戸 2007)。

本調査で冠雪荷重が大きくなったのは、降雪水量が多いことに加えて、気温がプラスからマイナスに変化し、日射量が少なく、かつ風速が弱いという条件がそろった場合であった(図-3, 4)。このような条件下で冠雪荷重が大きくなる

のは、気温がプラスからマイナスに移行する場合にミゾレや湿雪が枝葉に凍着して、雪の付着強度が大きくなったこと(新田 1987)、日射量が少なく風速が弱い場合には、雪の付着力の低下や樹体の動揺がないので、冠雪が樹冠から落下しにくいこと(高橋 1952)、などによると考えられる。

ただし、新田(1983)は56豪雪における冠雪害発生時の気象条件を分析した結果、気温が0よりも僅かに低く、風が弱く、多量の降雪という気象条件下で発生した事例のほか、気温が0~2のプラス域において湿雪と強風(4~10 m/s)の組み合わせで発生した事例や、付着量が小さい乾雪の場合であったものの日降雪深150cmという大雪と無風という条件がそろったことによる事例などを紹介し、冠雪害の発生条件が多様なことを指摘した。従来、気温がプラス域の場合には冠雪害が発生しないとされてき

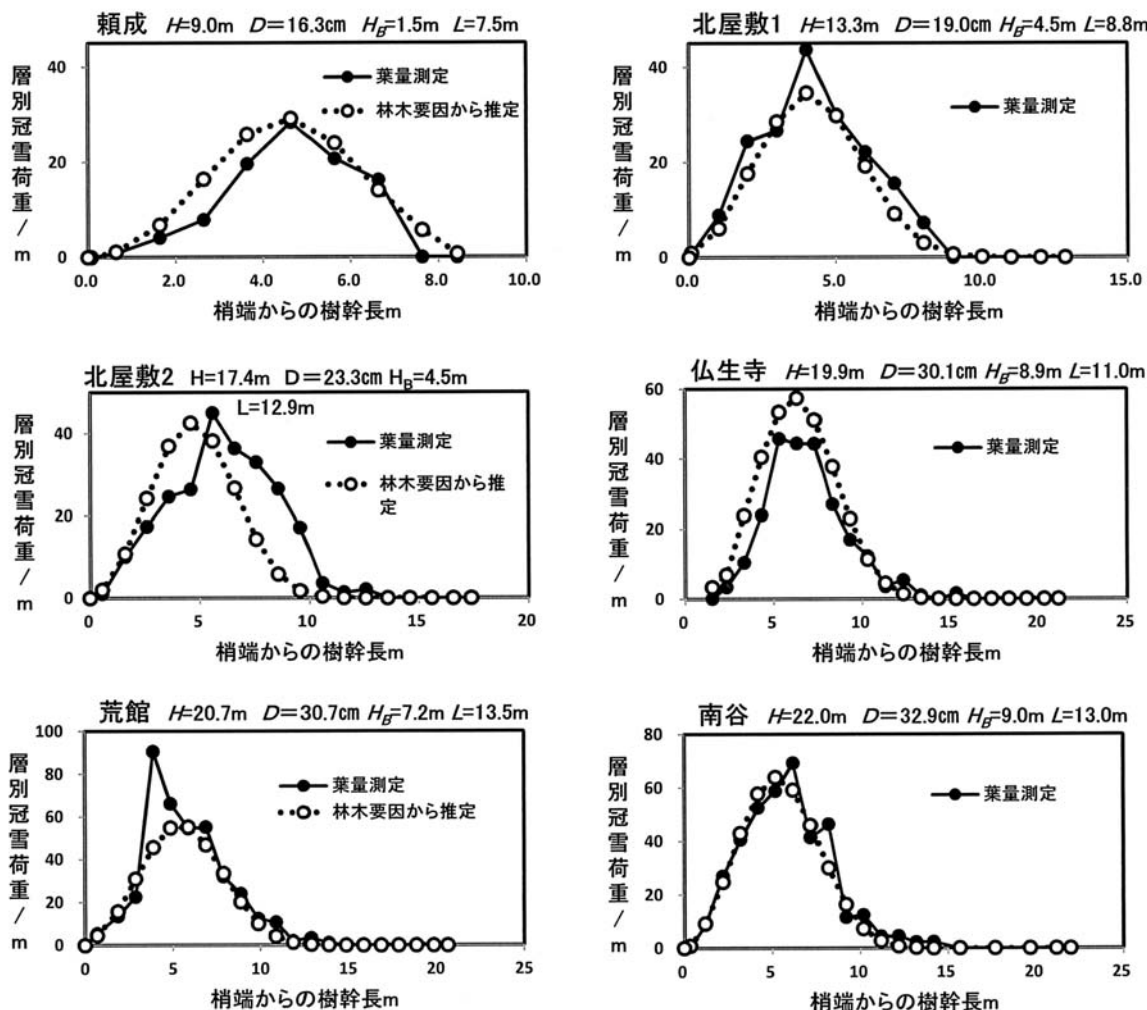


図-9 冠雪荷重の垂直分布を葉量の垂直分布の測定値から推定した場合と林木要因から推定した場合の比較

たが、風が湿雪の水分蒸発潜熱を奪い続けると凍着すること、冠雪が大きくなると風で樹体が揺れにくくなること、さらに風速に比例して実質的な降雪強度を大きくさせることなどによって激害が起きたと推測されている(新田 1987)。

日本海側で冠雪害が湿雪と強風の組み合わせで起きるのは、寒冷前線が通過して季節風が吹きだす初日に湿った大雪が降る場合と考えられている(新田 1987)。このときの季節風の風向は富山県北西部では西、中央部や北東部では南西となるが、富山県南部では風が弱くなる傾向がある(舟田 1993)。これらのことから、冠雪害抵抗性が低いスギクロンであるボカスギの造林比率が高い富山県北西部では湿雪と強風の組み合わせによる冠雪害も考えられるので、過去の被害状況を再検討することが必要である。一方、富山県南部に位置する本調査地付近では、湿雪と強風という組み合わせの被害は少ないと考えられた。

4.2 単木の冠雪荷重

気温がマイナスで、日射量が少なくかつ微風という気象条件が持続する中で多量の降雪があった期間を中心に、単木の冠雪荷重をその葉量と降雪水量から推定する(3)式を導いた。まず、この経験式と筆者ら(1988)が先に求めた冠雪荷重の推定式を比較した。ここで、便宜上(3)式を新式、筆者ら(1988)が先に求めた式を旧式と呼ぶことにした。図-10は新式と旧式で単木の葉量が5kgの場合と25kgの場合の冠雪荷重を計算して比較したものである。この図から、冠雪荷重が降雪水量に伴って増加する傾向は新式も旧式もほぼ同じであった。ただし、降雪水量が60mm以下についてみると、新式の推定値は旧式のそれに比べて小さい傾向が見られた。このように、新式の推定値が旧式のそれよりも小さかったのは、旧式は冠雪荷重が最も大きくなったときのデータだけから算出されたのに対し、新式の算出には冠雪荷重が大きくなったときだけでなく、一部に冠雪荷重が減少したときのデータも使用したことによるものと考えられた(図-5)。

高橋(1952)は、スギ幼齢木の冠雪荷重を測定し、冠雪荷重が異常に大きくなった事例(以下、異常冠雪と呼ぶ)を紹介している。この供試木は樹高5.8m、胸高直径10cm、樹冠長3.44m、樹

冠投影面積2㎡であり、降雪水量60mmのときに冠雪荷重が44kgに達したと報告している。そこで、本調査で得られた経験式を用いて冠雪荷重を推定した場合に異常冠雪のレベルに達するものか否かについて検討した。ただし、高橋の報告書には葉量が記載されていないので、葉量を推定する必要があった。そこで、表-1のデータを用いて、葉量 W_L を樹冠長 L との関係から推定する次の回帰式を算出した。

$$W_L = 0.455 L^{1.96} \quad r^2 = 0.900, \text{ d.f.} = 18, \text{ p} < 0.01 \quad (9)$$

この式から、樹冠長3.44mの場合の葉量は5.2kgと推定された。そこで、葉量を5.2kg、降雪水量を60mmとして(3)式を用いて計算した結果、冠雪荷重は52kgと推定され、異常冠雪時の測定値を超えた。ただし、ボカスギは葉量が多い品種とされているので(相浦 1988)、葉量を先の推定値から10~20%差し引いて冠雪荷重を求めてみたところ42~47kgと推定された。この場合でも高橋が異常冠雪の事例として示した冠雪荷重とほぼ同程度となった。

以上のことから、本調査で得られた冠雪荷重の推定式を用いると異常冠雪に近いレベルの重量が得られることがわかった。

ところで、スギ林内で樹冠着雪の仕方を観察すると、樹冠の上部すなわち陽樹冠に比べ下部の陰樹冠の方が、冠雪量が少ない場合も見受けられるので、この点についてはさらに調査が必要と考えられる。

4.3 単木における冠雪荷重の垂直分布

葉量の垂直分布の測定値を用いて単木における冠雪荷重の垂直分布を推定した。この冠雪荷重の垂直分布をワイブル分布で近似して、その

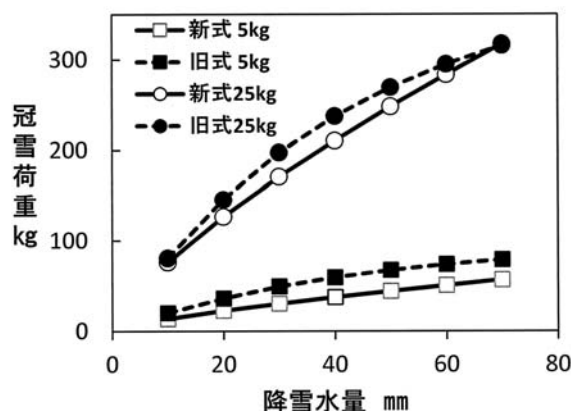


図-10 冠雪荷重推定値の比較

定数から垂直分布の形状を調べた(図-7, 8)。その結果, ワイブル分布の d 値から, 冠雪荷重の分布形状は正規分布よりも僅かに梢端側に偏った分布傾向があり, このような傾向は, (7)式から, 樹冠長が長い林木ほど顕著になることが示唆された。また, (8)式から, d 値は枝下高と密接な関係があり, 枝下高が高いほど小さくなる傾向があることがわかった。この結果から, 枝下高が高い木ほど分布の尖度が大きい, すなわち葉量がある高さに集中的に分布する傾向が強くなるといえる。

葉量の垂直分布データは入手が簡単ではないので, 測定が容易な林木要因から冠雪荷重の垂直分布を推定する方法について検討した。まず, (4)式を用いて胸高直径と樹高から単木の葉量を求め, これと降雪水量を(3)式に代入して冠雪荷重を算出した。さらに, ワイブル分布の c と d を(7)と(8)式から求めて, 冠雪荷重の垂直分布を推定した。このような手順で推定された冠雪荷重の垂直分布は葉量の垂直分布の測定値を用いて推定された場合と類似した傾向が認められた(図-9)。この結果から, 胸高直径, 樹高, 樹冠長および枝下高から, ささまざまな林木サイズの冠雪荷重とその垂直分布が推定できることが示唆された。ただし, この場合の推定精度は葉量の測定値を用いて推定した場合と遜色がないほど高いものではなかった。冠雪荷重の垂直分布の推定精度を高めるには, まず, 葉量の推定精度を高めることが必要と考えられた。

(3)式から, 単木の冠雪荷重はその葉量にほぼ比例することが示唆されたことから, 冠雪荷重の垂直分布の形状は葉量の垂直分布とほぼ一致することが推測された。よって, ボカスギの葉量の垂直分布も正規分布よりも僅かに梢端側に偏った形状と考えられた。葉量の垂直分布が正規分布に近いことが, タテヤマスギ林(阪上, 1985), カワイタニスギ林(相浦, 2002), マスヤマスギ林(松浦, 2002)などでも認められている。

スギ林の葉の垂直分布と林齢との関係については, 若いスギ林木では林冠が閉鎖されるまでの間, 葉の垂直分布は梢端から下方に向かって増加し, 樹冠の基部付近で最大に達し, 林冠が閉鎖した後, 葉の最大値は樹冠の真ん中付近で発生する傾向が認められている(Hashimoto 1991)。本調査においても, 葉の最大層は林冠が未閉鎖

であった頼成では樹冠の真ん中より低かったが, 加齢に伴って樹冠の真ん中より少し梢端側に上昇した。さらに, 生育段階が進むと, 図-7の南谷のように, 葉量の最大層が樹高の75%の高さに分布するようになると考えられた。同様の傾向はヒノキ高齢林で認められている(秋元ら, 2010)。また, 富山県内のヒノキ林では, 葉量の最大層が樹高の80%を超える事例も報告されている(相浦 1994)。コジイ林の調査例でも樹高の80%の高さに葉が集中していたことが報告されている(齋藤ら, 2001)。

5. おわりに

現実のボカスギに近い葉量を有する林木を用いて7冬期にわたって冠雪荷重を測定し, 単木の冠雪荷重を降雪水量と葉量から推定する経験式を求めた。この結果, 日射量が少なくかつ風速が弱い条件下におけるボカスギ林木の冠雪荷重とその垂直分布が推定された。この式から推定した冠雪荷重は, 降雪水量60mm以内の範囲において, 筆者らが先に求めた値よりも少し小さかった。なお, 本調査の冠雪荷重の推定式は隣接木の影響がないところで得られたものである。しかし, 実際の林分内では隣接木の影響で, 葉量当たりの冠雪荷重が樹冠の上部と下部とでは異なることも考えられる。また, 冠雪害は気温がプラス域であっても湿雪と強風の組み合わせによっても発生する場合もある。今後はこれらの点についても検討が必要である。

本研究を進める上で, ボカスギの葉量データを提供していただいた当研究所の相浦英春氏をはじめ, 実験機材の運搬や設置にご協力下さった職員の皆さんに感謝の意を表します。

引用文献

- 相浦英春(1988)ボカスギ人工林の生産力. 富山林業技術センタ - 研究報告 1:11 - 19
 相浦英春(1994)氷見市小滝地内に成立するヒノキ壯齡林に関する調査. 富山林業技術センタ - 研究報告8:32 - 42
 相浦英春(2002)カワイタニスギ若齡林の成長と生産力. 富山林業技術センタ - 研究報告15:1 - 12
 阿部信行(1982)ワイブル分布とその利用例. 光珠内季報52:14 - 17

- 遠藤八十一・大関義男・庭野昭二(1987)冠雪による樹木の折損と樹形についての力学的関係. 98回日林論:333 - 334
- 舟田久之(1993)富山県の降雪分布. 天気40 : 243-253
- Hashimoto(1991): Canopy development in young sugi(*Cryptomeria japonica*) stands in relation to changes with age in crown morphology and structure. *Tree Physiol.* 8 :129 - 143
- 片岡健次郎・村井正文・栗田稔美(1983)スギ在来品種の冠雪量と樹冠形態(予報). 94回日林論:721 - 722
- 嘉戸昭夫(2001)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. 富山林業技術センタ - 研究報告14:1 - 77
- 嘉戸昭夫(2009)冠雪害リスクが高いスギ林分と林木の特徴. 森林資源管理と数理モデル8:45 - 61
- 嘉戸昭夫・平英彰・中谷浩(1993)スギの冠雪量推定. 41回日林中支論:89 - 92
- Kato, A., Nakatani, H.(2000)An approach for estimating resistance of Japanese cedar to snow accretion damage. *Forest ecology and management* 135: 83 - 96
- 木梨謙吉(1978)森林調査詳説.660pp, 農林出版, 東京
- 吉良竜夫(1965)樹形のパイプモデル. 北方林業 192:69 - 74
- 継田視明・川村恵洋・屋代 真・谷口諷(1984)スギ造林木の強度. 木材誌 30(7) 530 - 537
- 松田正宏(1981)冠雪に関する研究() スギの冠雪量について. 日林誌 63(9)328 - 330
- 松浦崇遠(2002)同一林地内に植栽されたボカスギとマスヤマスギの生産力と葉層の垂直分布. 富山林業技術センタ - 研究報告15:13 - 24
- 長井真隆(1982)66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 - 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
- 新田隆三(1987)冠雪害の発生条件(石川政幸・新田隆三・勝田 柁・藤森隆郎:冠雪害 - 発生のしくみと回避法 -.101pp.) わかりやすい林業研究解説シリ - ズ83, 林業科学技術振興所, 1 - 22
- Päätao 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
- 阪上俊郎(1985)スギの葉の垂直分布について - 3つの分布関数の適合性 -.33回日林中支講: 191 - 194
- 齊藤哲・佐藤保・小南 陽亮・永松大(2001)コジイ壮齢二次林における葉の垂直分布. 日林九支研論文集54, 75 - 76
- 高橋喜平(1952)スギの冠雪に就いて. 林試研究報告 54:140 - 148
- 渡辺成雄・大関義男(1964)冠雪の研究(第2報)スギの冠雪比較実験. 林試研報169:121 - 139

Summary

Boka - sugi is a clone of Japanese cedar (*Criptomeria japonica*) with low resistance to snow accretion damage. In order to capture a vertical distribution of snow load on the crown of Boka - sugi , I measured snow load on the sampled trees over the seven winter seasons. Based on our observation , I found that the snow load per tree increased linearly as accumulated snowfall increases under such conditions that the air temperature changed from positive to negative , solar radiation is low and/or wind is weak. Also , the snow load per tree was shown to be closely related with its foliage mass. In the case of the tree leaf mass of 26 kg , the snow load reached 308 kg (58mm in the snow water equivalent) . I derived an empirical equation to estimate the snow load per tree as a function of the accumulated snowfall and foliage mass per tree. Using the derived empirical equation , I estimated the vertical distributions of the snow load , and found that the vertical distribution of the snow load tended to be biased to the upper side of the tree crown. I derived a distribution function for the vertical distribution of the snow load in various trees sizes by approximating the vertical distribution of foliage mass by the Weibull distribution.