

ボカスギの幹折れに要する冠雪荷重

嘉戸昭夫*¹, 中谷 浩*²平 英彰*¹, 相浦英春*¹

Estimation of snowload required to cause stem failure in Boka-sugi stand

KATO, Akio*¹, NAKATANI, Hiroshi*²TAIRA, Hideaki*¹ and AIURA, Hideharu*¹

The snow damage of trees was considered as a failure of tapered column receiving an eccentric compressive load of snow accumulated on an asymmetric crown, the snowloads to cause breakage stem for 18 damaged trees in 25-year-old Bokasugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) stand were estimated. In the absence of the lever arm (the horizontal displacement of the center of gravity of snowloaded crown from the stem axis), the snowload for each sample tree may be calculated from a buckling load of the stem. The buckling load was calculated using measured the stem forms, the mechanical properties of the wood, and the μ -value which indicated the resistance of the roots to the turning moment. The DBH, the height, the modulus of elasticity of the wood and μ -value for the sample trees were on average 26.6cm, 20.5m, 49400kg f/cm² and 1.43×10^{-7} rad/kg · cm, respectively. The loading point for each damaged tree was assumed be 78% of the tree height, equivalent to the mean of the center of gravity of the crown obtained from the another samples. The mean snowloads required for the failure were estimated at 486kg f. The influence of the lever arm (e) to the snowload causing stem breakage was investigated. The result showed that the lever arm reduced the snowload by 14% if e=50cm, and by 26% if e=100cm.

冠雪害を長柱の偏心圧縮による破壊と見なして、幹折れに要する冠雪荷重を立木の耐力から推定した。樹冠に偏心がない場合の立木の耐力(座屈荷重)は樹幹形、材のヤング係数および根系の支持力の3要因から算出される。そこで、冠雪害をうけた25年生のボカスギ林において、被害木18本を対象に3要因を測定して座屈荷重を求め、この値から幹折れを引き起こすのに要した冠雪荷重を計算した。供試木の胸高直径、樹高、材のヤング係数、根元の回転係数の平均値はそれぞれ26.6cm、20.5m、49400kg f/cm²、 1.43×10^{-7} rad/kg · cmであった。荷重点高を樹冠の重心高(樹高の78%の部位)として求めた冠雪荷重の平均値は486kg fであった。また折損に要する冠雪荷重と偏心量の関係について検討した結果、その荷重は偏心がないときの荷重(座屈荷重)に比べて偏心量が50cmの場合には14%、100cmの場合には26%低下した。

* 1 林業試験場

* 2 木材試験場

1. はじめに

従来から林木の耐雪性を表わすのに形状比（樹高／胸高直径）がよく用いられている。しかしながら、形状比と冠雪害との間には関連性が認められているものの、その程度は必ずしも強くないとの指摘¹⁾や被害木の形状比の値が個体や林分によって異るとの報告²⁾もある。この点に関して筆者ら⁴⁾が実験的に検討し、形状比は樹幹形だけが異なる場合には冠雪荷重を受けた林木間の耐力の差を評価しうるが、材のヤング係数や根系の支持力なども異なる場合には、耐雪性の指標として用いることができないことを指摘した。

また、形状比は冠雪荷重に対する立木の耐力の一指徴であって、もう一方の発生要因である冠雪荷重そのものを表すことができないことから、耐雪性の指標としては不十分であると考えられる。

以上のことから形状比にかわる耐雪性の指標としては冠雪荷重と立木耐力の二つの要因を考慮したものが望まれる。そのためにはまずこれらの要因に関する資料の集積が不可欠である。しかし、冠雪荷重に関しては、冠雪の発達しやすい気象条件^{2,3)} やスギの葉枝重量と冠雪荷重との関係⁶⁾ などについては明らかにされているが、被害時の冠雪荷重に関する報告は数編⁸⁻¹⁰⁾あるにすぎない。これは、冠雪害の発生現場に遭遇する機会がきわめて少ないこと、対象物が大きくて測定が困難なことなどによるものと考えられる。

そこで、本報告では冠雪害を受けたボカスギを対象に、樹幹形、材の強度的性質および根系の支持力などを測定して立木の耐力を算出し⁴⁾、この値から被害を引き起こすのに要した冠雪荷重を推定した。

2. 材料と方法

2.1 調査地

調査地は昭和59年12月下旬に冠雪害を受けた氷見市荒館の25年生のボカスギ林である（図-1）。地形は凹型の斜面で、尾根部から少し下がったところにある。斜面方位は北東向き、傾斜は22度、標高は50mである。調査地の大きさは20×40mで、胸高直径、樹高、被害の有無などについて毎木調査した。なお、この調査地の平均胸高直径は27.3cm、平均樹高は19.2cm、ha当りの立木本数は1163本、材積は

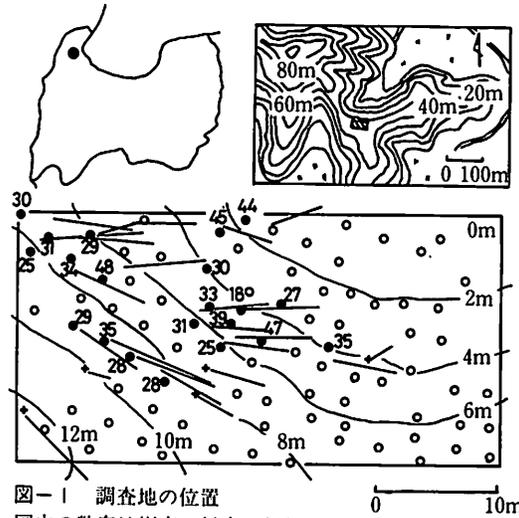


図-1 調査地の位置

図中の数字は樹高に対する折損高の百分率

○：健全木 ●：幹折れ木 +：幹曲り木

638m³/haであった。また、収量比数は0.86と比較的こみあった林分であった。

2.2 被害木の耐力

昭和60年5月中旬、幹折れした21本のうちの18本について、根系の支持力をあらわす根元の回転係数 μ 、樹幹形、材の強度的性質の順に調査した。根元の回転係数の測定方法はつぎのとおりである。まず、地上2~2.5mの部位にワイヤーを取り付け、手動ウインチで徐々に大きな負荷を与え、随時、その荷重 P と根元の回転角 θ をくりかえし測定した。この場合の根元に加わるモーメント M_0 は荷重点の水平変位を δ 、荷重点の高さを h 、ワイヤーが水平線となす傾斜角度を ψ とすると、次式で示される。

$$M_0 = P (h \cos \psi + \delta \sin \psi)$$

なお、根元の回転係数 μ は 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、その式の回帰係数とした⁴⁾。

根系の支持力を調査したのち、根元から伐倒して高さ1m毎に幹の細りを測定し、ついで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中央集中荷重方式（スパン2m）により曲げ試験を行なって、曲げヤング係数、最大応力を算出した。なお、試験丸太の中央直径は11.1~15.1cmの範囲で、平均値は13.3cmであった。

さらに、調査地内で上述の供試木とは別に8本の立木を伐倒して層別刈取り法に準じて葉や枝の重量

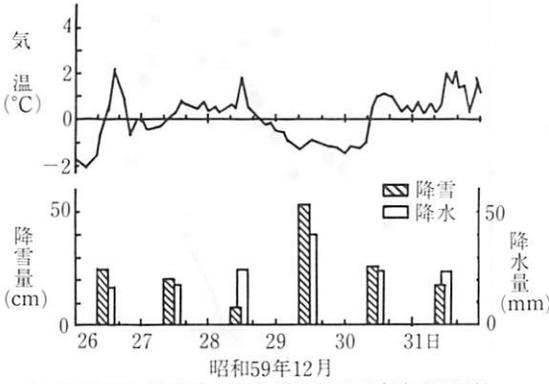


図-2 被害時の気象 (氷見地域気象観測所)

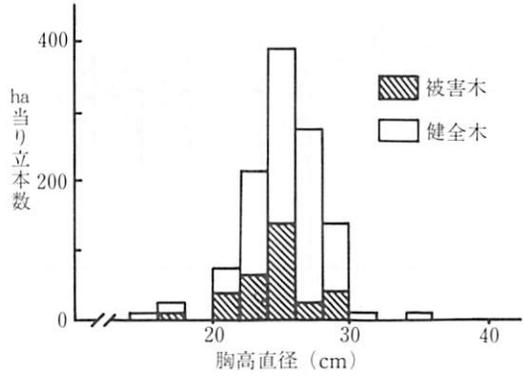


図-3 胸高直径と被害との関係

を測定し、樹冠の重心高を調べた。

3. 結果と考察

3.1 被害状況

今回の冠雪害は氷見市荒館のほか、熊無、一刎、早借などの同市の北西部を中心に発生した。被害発生時の気象状態は、調査地より北に3kmの氷見地域気象観測所(標高7m)の資料によると図-2のとおりである。図中の降雪量および降水量は前日午前9時から当日9時までの値である。同月21日から降り続いた雪も27~28日にかけて小康状態となったが、28日の午後から再び降りをはじめ、29~30日にかけての大雪で被害が発生した。28~30日の最大風速は3mで、風向は西北西ないし南西であった。また、気温は28日の午後(1.8℃)から下がりをはじめ、同日の18時から30日の8時までの38時間、0から-1.6℃の状態がつづいた。被害の発生条件は、気温が+から-へ移行し、その後の気温で-3℃以上で、かつ風速が3m以下であるとされている^{2,3)}。したがって、きわめて冠雪害の発生しやすい条件下にあったといえる。被害率は全本数の28%で、被害木の81%が幹折れ、残りが幹曲りであった。図-3に直径と被害の関係を示した。小矢部市のボカスギ林では被害木が小径木に多い傾向があったが¹¹⁾、この調査地では両者の間に明瞭な関係が認められなかった。

石井¹²⁾は冠雪害の強さをあらわすのに折損部直径を用いている。この調査地の最大値は27cmで、平均値は22.3cmであった。この値は近年で最も被害が大きいのといわれている56豪雪の値¹³⁾よりも大きかったことから、かなり激しい被害であったといえる。

被害木の分布様式は集中的な傾向があり、折損部は数本ずつ重なりあって倒れていた(図-1)。また折損部の倒伏方向はその木の東側が多く、これは林地の傾斜方向ではなく被害時の主風の風下側にあたる。したがって、気象観測の資料によると最大風速が3mと小さかったが、風の影響を受けて被害が発生したものと考えられる。一般に冠雪害は風下側に位置する谷間や凹地に多い²⁾とされており、本調査地の場合もこれと一致する。これらのことから、今回の被害は立木要因のほかに地形要因とも関係が深かったものと考えられる。

折損高は樹高の18~47%の部位で、その平均値は33%と低かった。立木にその木の冠雪荷重とは別に将棋倒し的に隣接木の荷重が幹の下部に加わった場合には低い位置で幹折れが生ずることが考えられる。しかし、立木の位置関係から折損木のうちで隣接木の影響をまったく受けていないと判断されるものでも折損部位が低い傾向を示した(図-1)ことから、このような傾向を示す原因は単に将棋倒し現象によるものとは考えられなかった。同様の傾向は他のボカスギ林¹¹⁾においても確認しており、折損高が低いのはボカスギの特徴と考えられた。

3.2 樹冠の重量と重心高

葉と枝を合わせた生重量WBL(kgf)および葉の乾重量WL(kgf)と胸高直径の2乗×樹高(D²・H:cm²・m)との間に、次の相対生長式が認められた。

$$WBL = 0.09917 \times (D^2 H)^{0.7134} \quad (1)$$

$$WL = 0.04721 \times (D^2 H)^{0.6781} \quad (2)$$

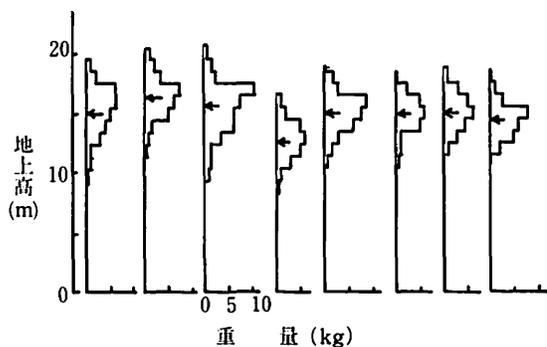


図-4 葉乾重の垂直分布
矢印は葉の重心を示す

冠雪荷重の荷重点高を次の方法で推定した。冠雪荷重と葉重量との間にはほぼ比例関係が認められている^{6,7)}。このような条件下で冠雪荷重がその重心に集中荷重として加わるものとすれば、冠雪荷重の重心高と葉重量のそれとは等しくなる。葉の垂直分布を調べた結果(図-4)、葉乾重の重心高は樹高の73~80%の部位で、その平均値は78%であった。そこで、立木の耐力を計算するにあたって、各折損木の荷重点を樹高の78%の部位とした。

3.3 冠雪荷重の推定

3.3.1 樹冠に偏心が無い場合

冠雪害を長柱の偏心圧縮による立木の破壊ととらえると、荷重点に偏心が無い場合に立木の耐力が最大となり、そのときの耐力は座屈荷重より求められる⁴⁾。そこで、幹折れ木を対象に樹幹形、材の強度的性質および根元の回転係数などから立木の座屈荷重を算出し、この値を冠雪荷重とした。幹形を円錐台と見なした場合の座屈荷重 P_{cr} は次式から得られる。

$$P_{cr} = \alpha^2 \cdot \gamma^2 \cdot EI_0 / L^2$$

ここで、 γ は次式を満足する場合の値である。

$$\tan \gamma / \gamma = -1 / (\beta / \alpha - \mu \alpha \gamma^2 EI_0 / L)$$

表-1 供試木の樹幹形、材の強度的性質および根元の回転係数の平均値

測定項目	平均値	変動係数(%)
樹高 (m)	20.5	7.5
胸高直径 (cm)	26.6	10.3
根元直径 (cm)	27.6	7.6
細り比 (D_L / D_0) [*]	0.47	6.7
材のヤング係数 (kgf/cm^2)	49,400	15.4
材の曲げ破壊応力 (kgf/cm^2)	302	11.6
根元の回転係数 ($10^{-7} \text{rad/kg}\cdot\text{cm}$)	1.43	94.1

* : D_L は樹高の78%の部位の直径, D_0 は根元直径を表わす

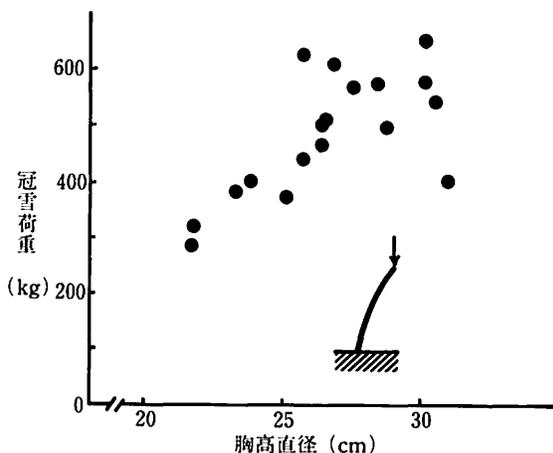


図-5 座屈荷重から求めた幹折れに要する冠雪荷重

α : 細り比 (根元直径 D_0 に対する荷重点直径 D_L の比)

β : $1 - \alpha$

I_0 : 根元の断面二次モーメント ($D_0^4 \cdot \pi / 64$)

L : 荷重点高

E : 曲げヤング係数

μ : 根元の回転係数 (この値が小さいほど根系の支持力が大きいことをしめす)

供試木の樹幹形、材の強度的性質および根元の回転係数の平均値は表-1のとおりである。なお、樹幹は根元付近の形状がナイロイドに近く、必ずしも円錐台ではない。そこで、根元直径を除いて地上1m毎に直径を測定し、高さと直径間に最小二乗法を適用して、実際の樹幹形にもっとも近いテーパ柱を求め、細り比を得た。以後、座屈荷重はすべてこうして得たテーパ柱から算出した。ヤング係数は個体差が大きく、その最大値と最小値とでは約2倍のひらきがあった。また、この林分とボカスギ幼齢林¹⁴⁾を比較すると、前者のヤング係数が後者の約2倍、前者の根元の回転係数は後者の約20分の1であった。したがって、幼齢林に比べて、材の強度的性質および根系の支持力ともかなり大きいようである。

各供試木の樹幹形、材のヤング係数および根元の回転係数から座屈荷重を算出し、図-5に示した。その結果によると、折損に要する冠雪荷重は286~650kgfの範囲で、平均で486kgfと推定された。長井¹⁵⁾は56豪雪によって冠雪害を受けたボカスギの枝の着雪重量を測定し、その平均値が小枝の重量の5.23倍であったと報告している。これと同じ割

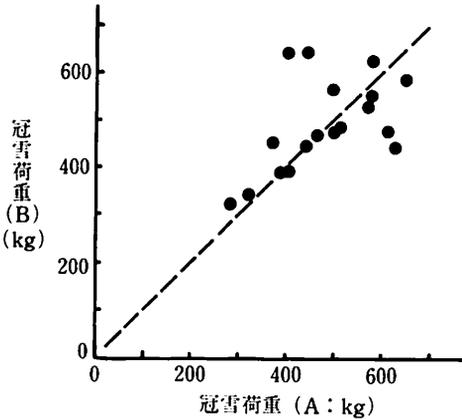


図-6 座屈荷重から求めた冠雪荷重(A)と葉枝重量から求めた冠雪荷重(B)
(B)は葉枝生重の5.23倍(長井、1982)として求めた。

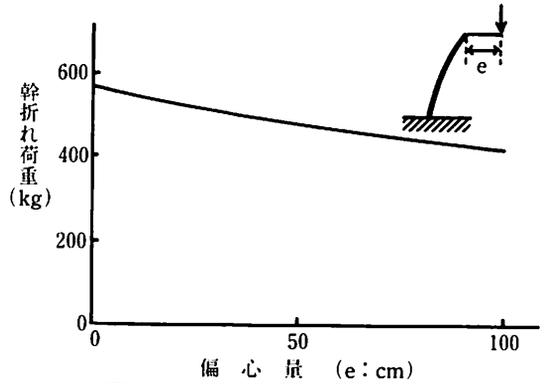


図-7 幹折れ荷重と偏心量との関係

Do=28.9cm, Di=13.3, L=16.67m,
E=52500kg/cm², $\sigma_{max}=273\text{kg/cm}^2$, $\mu=8.2 \times 10^{-8}$

合で着雪したものと仮定し、葉枝の生重量を(1)の相対生長式を用いて求めて、各供試木の冠雪荷重を推定すると、319~638kg fとなり、その平均値は488kg fであった。また筆者ら⁶⁾は降水量に換算して累積で80mmの降雪量があったときに、ボカスギの冠雪荷重が葉乾重の約15倍であったという測定結果を得ている。そこで葉乾重を(2)の相対生長式から計算して、それぞれの冠雪荷重を推定すると317~613kg fで、平均値は474kg fであった。

このように3つの方法で求めた結果はおおむね一致した(図-6)ことから、被害木はほぼ耐力に相当する冠雪荷重を受けており、たとえ将棋倒し現象を伴わなくとも、かなり危険な状態にあったと思われる。なお、今回得られた冠雪荷重は同じボカスギを対象に推定された値⁹⁾の約60%である。ここでは立木の耐力を算出するにあたって樹冠や幹の重量を考慮に入れなかったが、葉枝の生重量は平均で93kg fもあったので、冠雪荷重は座屈荷重から得た値よりもさらに小さかったことが考えられる。

ところで、冠雪荷重は直径にもなって増大する傾向があるが、両者の相関係数($r=0.59$)は低く、同じ胸高直径の木であっても冠雪荷重の固体変動が大きかった(図-5)。そこで、樹幹のヤング係数を一定(49400kg f/cm²)として同様の計算をすると、両者の間に高い相関($r=0.83$)が認められたことから、冠雪荷重の変動が大きい一因としてヤング係数の差異による影響が考えられた。

3.3.2 樹冠が偏心している場合

これまでは樹冠に偏心がなかったものと仮定して、幹折れに要する冠雪荷重を立木の最大耐力から推定したが、実際には多かれ少なかれ偏心しており、これが冠雪害の重要な発生要因であるとの指摘^{2,7)}もある。そこで、立木の耐力におよぼす偏心の影響について検討した。冠雪荷重Pを受けた立木は、Pの増大に伴って大きく変形し、同時に樹幹に生じる曲げ応力 σ_{max} も増大する、そしてこの応力が材の曲げ破壊応力 σ_{max} に達したときに樹幹が折損する。この場合の幹折れ荷重Pbは次式¹⁾に $\sigma_x = \sigma_{max}$ を代入し、この式を満足する場合のPの値から得られる。

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

ここで、e: 偏心量, Z₀: 根元における幹の断面係数

$$\gamma = \frac{L}{\alpha} \sqrt{\frac{P}{EI_0}} \quad K_0 = \frac{EI_0}{L} \quad \gamma_0 = \frac{(1-X_0)\alpha}{X_0\beta} \gamma$$

図-7は一例として幹折れ荷重と偏心量との関係を示したものである。なおこれは平均的な樹幹形、材の強度的性質および根元の回転係数を有する供試木についての計算結果である。この木の場合、偏心がない場合に比べて、偏心量が10cmの場合の幹折れに要する冠雪荷重は3%低下するだけであるが、50cmでは14%、100cmでは26%も低下することになる。同様の傾向は他の供試木についても認められたことから、樹冠がシンメトリーでなかったり、根元曲り

を生じている場合などには、立木の耐力に及ばず偏心の影響が大きいと考えられた。これに加えて風が関与している場合や将棋倒しが起こった場合には、図-7の結果よりもさらに小さな荷重で折損するものと考えられる。

4. おわりに

冠雪害を生じたボカスギを対象に、樹幹形、材の強度的性質および根系の支持力を測定して立木の耐力を算出し、この値から幹折れに要した冠雪荷重を推定した。その平均値は486kg fで、樹冠の重量や荷

重点の偏心量を考慮した場合には、その荷重がさらに小さな値を示すことがわかった。このように、幹折れに要する冠雪荷重を立木の耐力から算出する見通しを得たが、さらに調査地を増やして葉枝重や気象条件などから推定した冠雪荷重との比較検討が必要と考えられる。また、荷重点に偏心がある場合についても検討したが、折損荷重に及ばず偏心の影響を明らかにするためには冠雪時の偏心量がどの程度のものなのかを把握しなければならない。これらについては今後の課題としたい。

文 献

- 1) 石井 弘・片桐成夫・三宅 登・赤塚金治・小地域内のスギ人工林における冠雪被害分布, 日林誌, 63(12), 451~457, (1981)
- 2) 高橋啓二: わかりやすい林業解説シリーズ61 造林地の冠雪害とその対策, 日林協, 12~14, (1977)
- 3) 石川政幸・新田隆三・勝田 征・藤森隆郎: わかりやすい林業解説シリーズ86 冠雪害, 日林協, 11~20, (1987)
- 4) 中谷 浩・嘉戸昭夫・平 英彰・飯島泰男・沢田 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(11), 886-893, (1984)
- 5) _____: 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究(第2報) 林分間における耐力の差異について, 木材と技術, 66, 1~6, (1986)
- 6) 嘉戸昭夫・平 英彰: 冠雪害の発生機構(III) ボカスギ・マスヤマスギの冠雪荷重, 96回日林論, 447-448, (1985)
- 7) 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)
- 8) 長井真隆: 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, 富山市科学文化センター研究報告, 4, 5~15, (1982)
- 9) 武田繁後: 林木の冠雪害と雨水害, 雪水学会誌, 20(1), 9~14, (1958)
- 10) 堀田 庸・真下育久・中尾辰雄・新谷安則・長友忠行: 1984年1月に熊本県下で発生した冠雪害について, 28(2), 19~28, (1986)
- 11) 嘉戸昭夫・平 英彰: 冠雪害を受けたボカスギ林の解析, 93回日林論, 259-260, (1982)
- 12) 石井 弘・片桐成夫・三宅 登: 冠雪害折損木の折損部直径による『冠雪強度』の推定, 93回日林論, 257~258, (1982)
- 13) 藤森隆郎: 冠雪害と施業, 林業技術 537, 7~10, (1986)
- 14) 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, 富林試研報 11, 7~17, (1986)