

## 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究 (第4報)

被害林分に対する力学的解析の適用性

中谷 浩\*<sup>1</sup>, 嘉戸昭夫\*<sup>2</sup>, 相浦英春\*<sup>2</sup>

### Structural Mechanics Study on the Damage of Tree Stems Caused by Snow Accumulating in the Crown IV.

Application of the structural mechanics method to snow damaged stands

NAKATANI, Hiroshi\*<sup>1</sup>, KATO, Akio\*<sup>2</sup> and AIURA, Hideharu\*<sup>2</sup>

In this report we examined the difference of resistance performance of tree stems between damaged and remaining trees in snow damaged stands, in order to confirm the application of the structural mechanics method to the damage of tree stems caused by snow accumulating in the crowns.

We measured shape of the trunk, Young's modulus and the constant " $\mu$ " for root system for all trees in snow damaged Bokasugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands (25-year-old).

The results are summarized as follows:

The damaged trees had no significant difference to remaining trees for diameter at breast height, height of trees and the ratio of taper of stem. But the stem-form coefficient of damaged trees was higher than that of remaining trees.

The snow load estimated from crown leaf weight by use of Matsuda's equation averaged 617kg, and had no difference between damaged and remaining trees.

Provided that stems have the same mechanical properties, the averaged buckling load of stem of remaining trees and damaged trees are 747kg and 571kg respectively.

The ratio of snowload to buckling load of damaged trees was larger than that of remaining trees. That is to say, the data of structural mechanics showed that damaged trees had small resistance against snow damage. This result indicates that structural mechanics approach is very effective to find the way of reducing the snow damage.

林木の冠雪害抵抗性に対する力学的手法の適用性を検討する目的で、現実の被害林分調査を行い健全木と被害木間の樹幹耐力の差異について検討した。被害林分は25年生ボカスギ林分であり、樹幹形状に加えて樹幹のヤング率、根元の回転係数を全ての立木に関して測定した。

結果は以下のとおりである。

胸高直径、樹高、細りには被害木、健全木間に差は認められなかった。しかし形状比は被害木で高く、有意差が認められる。冠雪荷重を樹冠葉量から松田の推定式により比較した結果、健全木と被

---

本報告の一部は第97回日本林学会大会(宇都宮)で発表した。

\* 1 木材試験場

\* 2 林業試験場

害木間に差はなく、全平均では617kgと計算された。

樹幹の強度的性質が全林木とも同じであると仮定すると、樹幹の座屈荷重は健全木平均747kgに対し被害木平均は571kgとなった。したがって、座屈荷重に対する冠雪荷重の比は被害木で大きくなり、被害木の雪害抵抗性の低さが力学的手法により明らかにされた。この結果は、力学的手法の適用が冠雪害軽減方法の解明に有効であることを示している。

### 1. はじめに

既報<sup>1,2)</sup>では立木のモデル荷重試験により樹幹の鉛直荷重に対する耐力が座屈荷重で近似できることを明らかにした。本報告では冠雪害林分における健全木と被害木間の樹幹耐力の差異を比較し、現実の冠雪害に対する力学的手法の適用性を検討した。

### 2. 被害林分の概況

調査林分は昭和59年12月28日から29日にかけて冠雪害を受けた富山県氷見市荒館のボカスギ25年生林分である。地形は凹型の斜面で、尾根部から少し下がった所であり、斜面方位は北東向き、傾斜22度、標高50mである。

調査地より北に3kmの所にある氷見地域気象観測所の資料によると、当時の気温は+1.8～-1.6℃、風速0.5m/秒と一般に指摘されている冠雪の発達しやすい状態にあり、約53cmの降雪が記録されている。

被害調査は、20×40mの調査区域を設定し行った。被害状況、冠雪荷重の推定等については既報<sup>3)</sup>で報告されている。ここでは被害の大きい半分の区域(20×20m)を対象に、健全木と被害木間の力学的差異を検討することとした。

本調査プロット内には立木47本があり、被害は折損18本、幹曲がり3本であった。このうち、幹曲がり木は今後まだ生育できる可能性が認められたため測定対象から外し、折損木に限定した。この中には隣接木の折損の影響をうけ共倒れとなったと思われるものも認められた。このような場合、当然力学的な扱いもかえる必要があるが、被害経過の状況が十分に把握できないため特に区別して扱わなかった。

### 3. 調査方法

冠雪被害林分において折損木と健全木が混在するには、降雪量の違い、あるいは立木の側になんらかの違いがあったと考え得る。降雪量の地形による違

いは、被害調査報告<sup>4,5)</sup>に数多く見られるが、このような20m四方という小さな領域ではほぼ同一の降雪条件と考えられることから、ここでは立木側の要因について検討することとした。

プロット内の全立木について、立木位置、胸高直径、樹高、枝下高(枯れ上がり)に差がある場合は上、下の枝下高)、枝張幅等を測定し、さらに被害木については折損方向、折損高、折損部直径、割れの長さなど雪害に関する一般的な項目を測定した。また本調査では力学的手法の冠雪害に対する適用性を検討する目的から以下の項目を追加した。

樹幹形状に関しては、樹幹を一定の細りをもつ円錐台におきかえるため、被害木については樹梢部まで1m間隔で、健全木では測定の困難さもあり6m高さまで1m間隔で直径を測定した。

樹幹の強度的性質を求めるため、被害木では折損部の近くより長さ2.5mの丸木を採材し、スパン2.2m、中央集中荷重条件により生材状態で曲げ試験を行い求めた。健全木については、伐倒できないため、小泉ら<sup>6)</sup>による立木曲げ試験方法により曲げヤング率を求めた。

根元の回転係数に関しては、立木あるいは折損残木の引張試験を行って求めた。高さ3m部位にワイヤーをかけチルホールにより傾斜荷重を加えた。回転角は根元(約60m高さ)に設置した1/100mm精度の変位計を用いて測定した。荷重点水平変位は小さいため根元へのモーメントは水平荷重成分のみを用いて計算した。なおここでは被害木と健全木との間に樹冠の重量に基づくモーメントの違いが影響する可能性がある。

### 4. 結果と考察

#### 4.1 立木形状の違い

被害木、健全木の立木形状の分布と分散分析法により平均値の有意差を検定した結果を図-1に示す。胸高直径、樹高は全体平均でそれぞれ27.1cm、

19.7mであり、ともに被害木と健全木間に有意差は認められない。しかし冠雪害抵抗性の指標としてよく使われる形状比（樹高/胸高直径）で表すと、有意水準1%レベルで差が認められる。健全木の平均は71、被害木の平均は77であり、形状比の高い立木は被害を受けやすいという、多くの報告<sup>7-9)</sup>の結

果と一致する。

胸高直径と形状比の関係を図-2に示したが、林分内の形状比の分布は胸高直径が小さいほど大きくなる傾向にある。一般に胸高直径の大きい立木は樹高も高いが、図-1の分布に示されるように樹高に比べ胸高直径のばらつきが大きい。したがって形状

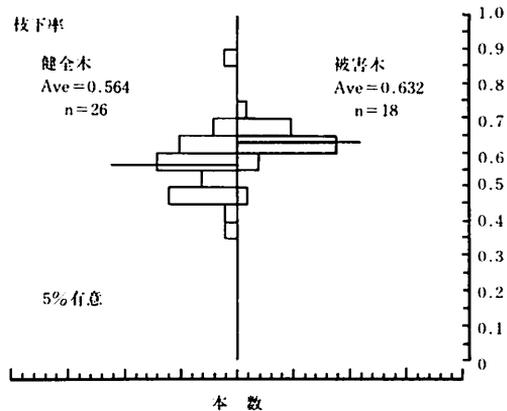
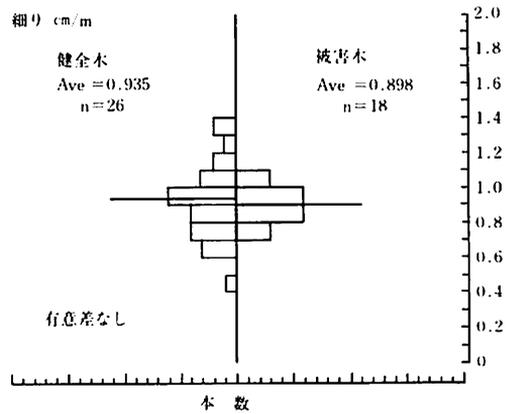
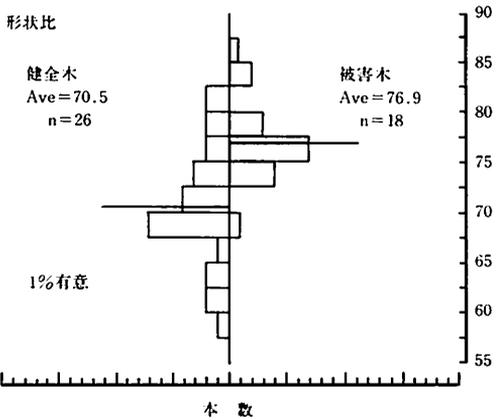
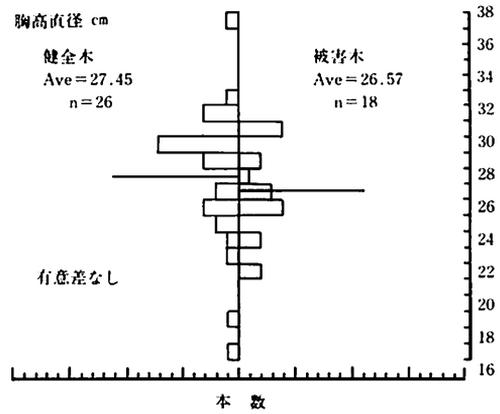
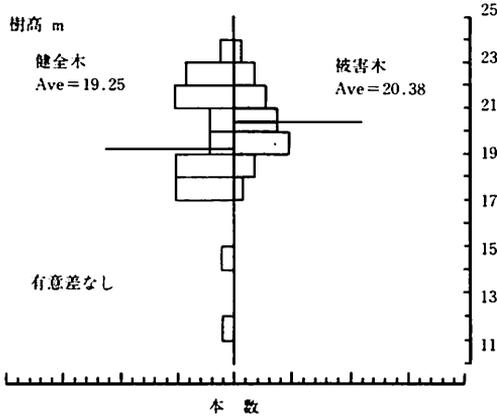


図-1 立木形状因子の分布状況

比は胸高直径が小さいほど大きくなる傾向にある。中齢木<sup>10)</sup>あるいは劣勢木<sup>11)</sup>に被害が多い場合には、胸高直径と形状比の両者に被害木と健全木間の違いが認められるが、この林分では各直径階で形状比の高い立木が選択的に被害を受けている。

立木の耐力にとって重要な因子と思われた細り率には、有意差が認められなかった。健全木の方がばらつきが大きいですが、これは樹幹直径の測定位置が被害木に比べて少ないため誤差が大きく現れたものと思われる。

枝下率は5%レベルで有意な差があり、被害木はいずれも枝下が高く冠雪荷重の重心も高いものと考えられる。

4.2 樹幹ヤング率, 根元の回転係数の違い

樹幹ヤング率, 根元の回転係数の分布を図-3に示した。

樹幹ヤング率は、被害木平均56tf/cm<sup>2</sup>, 健全木平均30tf/cm<sup>2</sup>と被害木の方が2倍近くも高い結果(1%レベルで有意)が得られた。試験方法による差を無視できるとすれば、被害木が折損高近く健全木が胸高部位での測定であることから、この結果は前報<sup>12)</sup>で指摘した樹幹下部でヤング率が小さいという結果に起因したものと考えられる。25年生時では胸高部と樹高の3~8割部では樹幹ヤング率に1.7倍の違いがあるとしていることから、健全木で得られた樹幹ヤング率を1.7倍して被害木曲げヤング率と比較す

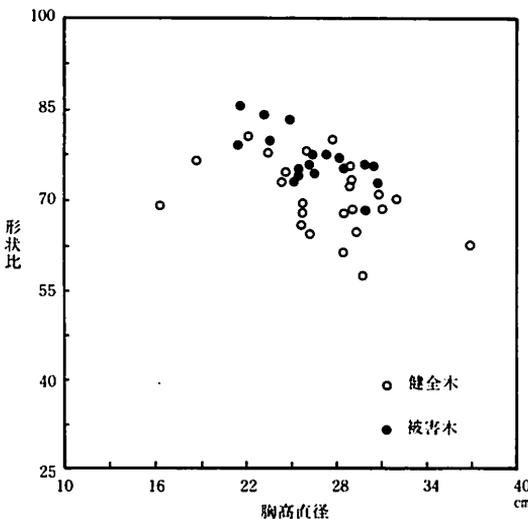


図-2 胸高直径と形状比の関係

ると樹幹ヤング率に有意な差は認められなかった。

樹幹ヤング率の高さ方向変動が耐力に及ぼす影響は今後検討を加えることとし、ここでは健全木と被害木間の耐雪性能の相対比較が目的であることから樹幹ヤング率は一定(被害木の平均55.9tf/cm<sup>2</sup>)と考えて、以下の検討を進めていく。

根元の回転係数については、健全木、被害木ともに他の4倍程度大きい立木が各1本存在するが、これを含めても有意差は認められなかった。また既報<sup>12)</sup>で得られた値に比べ極めて小さく、樹幹耐力に関してはあまり影響を持たないと考えられる。

4.3 冠雪荷重の違い

力学的手法の適用のためには、樹冠着雪量すなわち冠雪荷重が既知でなければならない。しかし、本条件では直接測定は行われなかったため、自然降雪状態における冠雪荷重の測定結果<sup>13-15)</sup>を用いることとした。これらの報告には冠雪量の推定式もいく

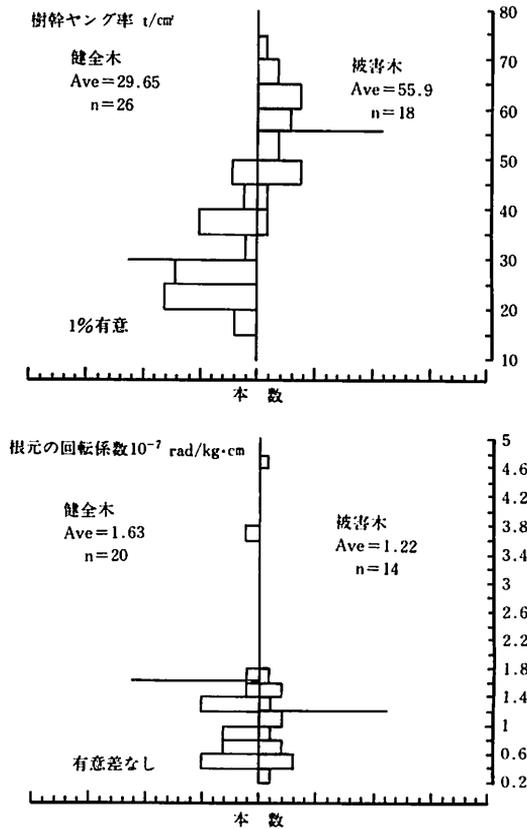


図-3 樹幹ヤング率, 根元の回転係数の分布

つか与えられており、推定値は異なるものの冠雪量が樹冠の枝葉量に比例しているという点で一致している。ここでは降雪量との関係式も与えられている松田<sup>14)</sup>の推定式を利用した。

松田による冠雪量推定式は以下の通りである。

$$W = 10^A \times wl^B \dots\dots\dots(1)$$

W : 冠雪量 (g)

wl : 乾葉量 (g)

A, B は定数であり

$$1/A = 13.75/HN + 0.485$$

B = 0.972 (降雪量によって異なるようであるが、ここでは平均をとった)

HN : 降雪深 (cm)

樹冠葉量については、被害林分のプロット外において被害調査に先立ちボカスギ林分の生産力調査として測定したものをを用いた。詳細は相浦によって既に報告されている<sup>16)</sup>。

胸高直径を幅広く 8 本の立木を選定し伐採後 1 m ごとに層別刈り取りを実施した。一般に得られる胸高直径の 2 乗×樹高 (D<sup>2</sup>H : cm<sup>2</sup>・m) と乾葉量 (wl : kgf) との関係から次式が得られた。

$$wl = 0.04721 \times (D^2H)^{0.6781} \dots\dots\dots(2)$$

また、冠雪荷重は冠雪量と樹冠重量の和となるが、樹冠重量としては幹を除いた枝葉重量のみをとることとした。枝葉生重量 (wc : kgf) についても D<sup>2</sup>H との関係から次式が得られた。

$$wc = 0.09917 \times (D^2H)^{0.7134} \dots\dots\dots(3)$$

胸高直径、樹高については、全立木について得られていることから、式(1)から(3)を用いることによ

て、各立木の冠雪荷重の推定値が与えられる。

計算された本林分における冠雪荷重の分布を図-4に示す。立木あたりの冠雪荷重の総平均は617kgfであり、このうち樹冠重量94kgfをひいた523kgfが冠雪重量となる。被害木、健全木間には有意な差は認められなかった。

#### 4.4 樹幹耐力の違い

冠雪荷重に関して被害木と健全木間に差がない限り、被害の有無は立木の耐力側に何らかの差があったものと考えなければならない。耐力側の問題は、樹冠の偏倚及び荷重点の高さ等荷重の負荷形態に関するものと樹幹の強度的性質及び細り、直径等の樹幹自体に関するものに分けて考えられる。

まず、荷重点の高さについては、冠雪量が前式のように葉量によっているならば、荷重点の高さもまた葉量の重心と考えるのが適当と思われる。8本の葉量測定木の乾葉量の重心は樹高の73~80%の部位であり平均78%となった。しかし、葉量測定木の枝下高は37~58%に対しプロット内の立木の枝下高は平均59%である。したがって葉量測定木の重心をそのまま用いるのも疑問があるため、耐力計算における荷重点高は樹高の78%部位、および樹高と枝下高の中間でとった場合の2条件について検討した。

計算に必要な根元の回転係数 ( $\mu$  : rad/kgf・cm) は全立木について測定されていないが、既報<sup>2)</sup>で示したと同様に根元直径 (D<sub>0</sub> : cm) との相関が認められることから、未測定立木は次の回帰直線式より計算した。

$$\log_{10}\mu = -5.59 - 0.0385D_0 \quad r = -0.76 \dots\dots(4)$$

樹幹ヤング率は4.2で述べたように、被害木の平均値を全ての立木に適用した。

図-5に健全木、被害木別の座屈荷重分布を示した。なお、直径データの不備な立木が被害木にあり座屈荷重計算では除外している。荷重点高(重心高)を樹高の78%にとった場合、被害木571kgfに対し健全木747kgfであり5%レベルで有意差が認められる。

枝下高と樹高の中間を重心高とした場合には1%レベルで有意差が認められた。健全木の場合重心高が平均78.2%であり座屈荷重も前者とあまり変わらないが、被害木では枝下高が高く重心高も82%とあがるため座屈荷重は496kgfに低下し、その結果有意差のレベルが上がっている。

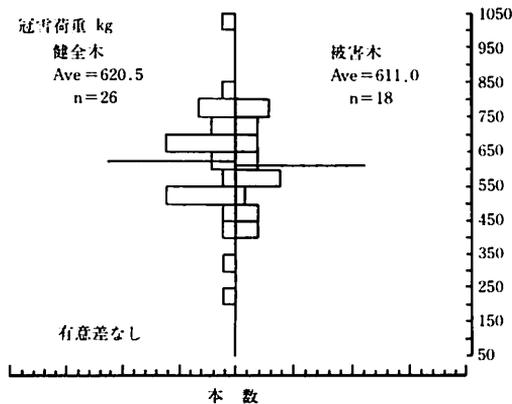


図-4 冠雪荷重の分布状況 (松田式)

いずれの荷重条件をとろうとも樹幹の座屈荷重には被害木と健全木間に有意な差があると見なし得る。被害発生の有無は冠雪荷重と樹幹耐力との優劣によると考えられることから、図-6に両荷重条件での冠雪荷重と座屈荷重の比の分布を示した。重心高を枝下と樹高の間にとる条件において、健全木に枝下高の非常に高い立木(樹高の88%)が存在しており、この立木では冠雪荷重の推定式が他と同一とは見なせないため、除外している。この結果、両荷重条件とも1%レベルで有意な差が認められた。健全木では座屈荷重の約90%の冠雪荷重、被害木は座屈荷重の約110ないし130%の冠雪荷重を受けることによって、一つの林分内において被害の有無が分かれていることが示されている。しかもこの関係は樹幹の耐力の差に起因して生じたものと考えられる。ここでこの解析は、座屈荷重という樹幹が耐え得る理想的な最大荷重であること、多くの枝を通して負

荷をうける分布荷重に近い冠雪荷重を集中荷重条件に置き換えていること、さらには樹幹の強度的性質を全て同一かつ均質に仮定するなど現実の条件とは異なることも多い。また、冠雪荷重も十分な精度の値を与えているとはいえない。したがって、得られた荷重、耐力は必ずしも現実的な値ではない可能性もある。しかし、被害木と健全木間に存在する樹幹耐力の相対的な違いは明らかであり、冠雪被害林分に対する力学的手法の導入の適用性が確認されたものと思われる。

5. おわりに

林木の冠雪害抵抗性に対する力学的手法の適用性を検討する目的で、現実の被害林分調査を行い健全木と被害木間の力学的差異について解析した。結果は以下のとおりである。

- 1) 胸高直径、樹高、細りには被害木、健全木間に

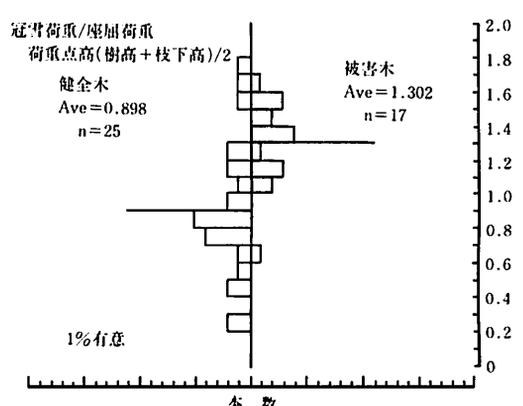
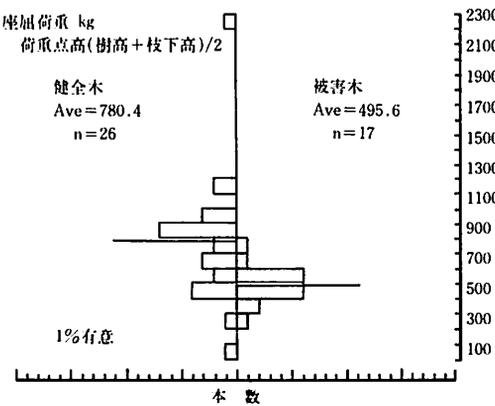
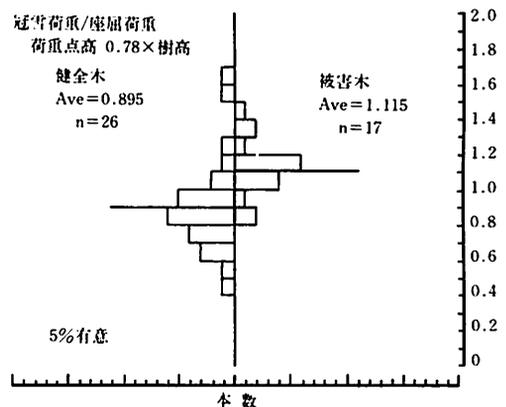
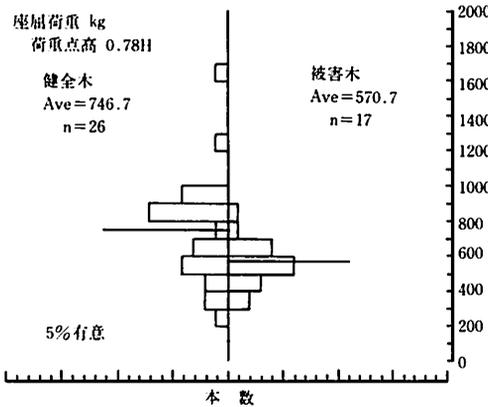


図-5 座屈荷重の分布状況

図-6 力学的手法による被害の解析

差が認められない。しかし林木の個体形状比は、被害木で高く有意差が認められる。

2) 冠雪荷重を樹冠葉量から松田の推定式により比較した結果、健全木と被害木間に差は認められなかった。樹冠重量を除いた冠雪重量は平均して523kgと計算された。

3) 樹幹の強度的性質が全林木とも同じであると仮定すると、樹幹の座屈荷重は健全木平均747kgに対し被害木平均は571kgとなった。この結果、座屈荷重に対する冠雪荷重の比を雪害抵抗性の指標にとると、有意水準1%で差が認められ、力学的手法により被害発生の有無を明らかにできたと思われる。

#### 文 献

- 1) 中谷 浩, 嘉戸昭夫, 平 英彰, ほか2名: 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, Vol.30, No.11, 886-893 (1984)
- 2) 中谷 浩, 嘉戸昭夫, 平 英彰: 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究(第2報), 木材と技術, No.66, 1-6 (1986)
- 3) 嘉戸昭夫, 中谷 浩, 平 英彰, 相浦英春: ホカスギの幹折れに要する冠雪荷重, 富林技研報, No.1, 1-6 (1988)
- 4) 佐伯正夫, 杉山利治: 林木の冠雪害危険地域, 林試研報, No.172, 117-136 (1965)
- 5) 広島林試育林部: 雪害地の実態調査, 広島林試研報, No.14, 61-91 (1979)
- 6) 小泉章夫, 上田恒司: モーメント負荷試験によるカラマツ立木の材質予測, 日本木材学会北海道支部講演集, No.16, 5-8 (1984)
- 7) 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, 島根林試研報, No.31, 1-23 (1981)
- 8) 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, 岐阜寒冷地林試研報, No.5, 33-71 (1982)
- 9) 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, No.154, 73-95 (1963)
- 10) 石井 弘, 片桐成夫, 三宅 登, ほか2名: 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, No.14, 50-59 (1980)
- 11) 嘉戸昭夫, 平 英彰: 冠雪害をうけたホカスギ林の解析, 第93回日本林学会大会発表論文集, 259-260 (1982)
- 12) 中谷 浩, 嘉戸昭夫, 長谷川益夫, ほか2名: 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究(第3報), 富林技研報, No.1, 25-33 (1988)
- 13) 高橋喜平: スギの冠雪について, 林試研報, No.54, 140-148 (1952)
- 14) 松田正宏: 冠雪に関する研究(II), 日林誌, Vol.63, 328-330 (1981)
- 15) 嘉戸昭夫, 平 英彰: 冠雪害の発生機構(III) 第96回日本林学会大会発表論文集, 447-448 (1985)
- 16) 相浦英春: ホカスギ人工林の生産力, 富山林技研報, No.1, 11-19 (1988)