ヒノキ生枝の衝撃強さ

時光博史^{*,1}

時光博史：ヒノキ生枝の衝撃強さ 日林誌 89: 131~134, 2007 ヒノキ立木 1 本の生枝から採取した 101 の試料について、振り子式衝撃試験機によって衝撃曲げ仕事量を測定した。測定された仕事量は試料直径の 3 乗に比例した。また 72 試料は完全に折れ、これについての仕事量は枝の試料断面積に比例した。その結果、林内では小径の枝が折れ難いことが示唆された。強風によって枝が折れることは否定されなかった。
キーワード：枝の断面積、強風、樹冠、衝撃曲げ仕事量

Tokimitsu, H.: Impact Strength in Green Branches of a Hinoki Tree. J. Jpn. For. Soc. 89: 131~134, 2007
Impact bending work was measured for 101 green samples extracted from branches of a Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) tree with the pendulum type impact tester. The measured work was proportional to the 3rd power of a sample diameter. Seventy-two samples among the lot were broken completely, and the measured work for them was proportional to each cross-sectional area. The result suggested that it was hard for a small branch to be broken in a stand. It was not denied that Hinoki branches would be broken by a strong wind.

Key words: cross-sectional area of branch, crown, strong wind, work in impact bending

I. はじめに

単木の成長は樹冠の葉量に左右され、樹冠の形状や表面積は樹幹の成長速度の指標とされている(梶原, 2000)。この樹冠の形状は上部が円錐体、下部が円柱体とみなされ(小出, 1942)、あるいは樹冠幅の変化が樹冠下部で小となる関数が当てはめられている(梶原, 1973)。また樹冠下部で樹冠幅の変化が少ない理由は閉鎖が十分な森林では陽光量を満度に利用して下枝は枯れ上がり、林冠は一定の厚さを保つため(河原, 2001)と考えられている。このことは葉量の減少による枝の伸張阻害が樹冠幅を安定させることを示唆している。

樹冠幅の安定をゆるやかな変化として説明するこの推論に対抗する仮説は枝折れという短時間の変化であろう。幹着生部での枝折れについては、生枝が硬化する冬季に枝中央に鉛直荷重を付加した破壊実験を行った結果、スギの破壊はすべて枝の基部に生じ、曲がりきったあと引きちぎられるか幹からえぐりとられる。また同じ荷重でカラマツは 100%、スギは 20% の枝が折れ、一方、ヒノキは折れないことが報告されている(森岡ら, 1995)。

一方ビューフォート風力階級表では地上 10 m の風速が秒速 17.2~20.7 m で小枝が折れる(浅井ほか, 2004)とされている。強風による枝の破壊は樹冠の形状が変わるほどのものであるだろうか。しかし、この間に答える生枝の動荷重による破壊試験は行われていない。そこで日本の主要造林樹種であり、静荷重による枝折れがまれなヒノキについて、

標準的な振り子式試験機による生枝の衝撃曲げ試験を行った。

II. 材料と方法

1. 試料の採取方法と試料の大きさ

平成 16 年 9 月 6 日に広島県三次市のヒノキ単層林に生立する胸高直径 20 cm、樹高 17 m の立木 1 本を伐倒した。地上高 0.2 m の位置の年輪数は 35、生枝下高は 8 m、幹と枝葉の生重合計は樹幹 1 m 当たり 19 kg であった。なお試料採取の翌日 7 日には台風 18 号が広島県を通過し、最大瞬間風速は秒速 60.2 m を記録したが、試料採取日に強風は感じられなかったため、この台風による試料への負荷はない。

次に伐倒木から 22 本の生枝を切り取った。切り取った生枝の長さは最大 3.11 m、葉付き枝の生重は最大 4.43 kg であった。さらに各生枝の基部 10 cm を切除し、残った枝主軸から長さ 30 cm の円柱状の材料を 127 個採取した。材料は乾燥を防ぐために衝撃曲げ試験までビニール袋に保存した。

材料は形状と生重 w を計測後、衝撃曲げ試験に供した。127 の材料の一部は試験機の容量以上のエネルギーを必要とすると思われ、これらを用いると試験機に重大な故障を引き起こす恐れがあったので(米倉製作所, 1997)、26 の材料を試験対象から除き、残る 101 を試料とした。

試料の形状は長さ l と、元口と末口それぞれの直交する 2 方向について、皮付き径と木部直径を測定した。この長径は直交する短径に対して皮付き径で平均 7%、最大 22% 大

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: tokimitsu05983@pref.hiroshima.jp

¹ 広島県立林業技術センター (728-0015 三次市十日市町 168-1)

Hiroshima Prefectural Forestry Research Center, 168-1 Tokaichi-machi, Miyoshi 728-0015, Japan.
(2006 年 1 月 10 日受付; 2006 年 10 月 31 日受理)

図-1. 試料断面積 s と試料生重 ${}_nw$, 試料絶乾重 ${}_zw$ の関係

図-3. 試料断面積 s と試料含水率 a の関係

図-2. 試料断面積 s と樹皮断面積 b の関係

図-4. 試料断面積 s と木部比重 $({}_mw/{}_mv)$ の関係

であり、木部直径で平均 11%，最大で 31% 大であった。また試料それぞれの平均値を試料直径 d ，木部直径 ${}_md$ と呼んだ。試料直径 d は 0.8～2.8 cm の範囲にあり、枝先端からの距離 x に対して次式のとおり 1.3% の大きさであった。木部直径 ${}_md$ は枝先端からの距離 x の 1.1% であった。

$$d=0.013x \quad (1)$$

2. 試料の他の属性

試料は生材で衝撃曲げ試験を行った後に 85～105℃ で 6 日間乾燥して試料絶乾重 ${}_zw$ を測定した。さらに樹皮をはぎとって再度 105℃ で絶乾し、木部絶乾重 ${}_mw$ を求めた。このとき樹皮をはぎとることが困難な試料については内樹皮が斑点状に木部に残る程度まで樹皮を削り取った。さらに樹皮を除いた木部の気乾状態の体積を水中への浸漬によって求めた。試料の水中への浸漬による増水量 ${}_zv$ ，浸漬前後の試料の重量の差を吸水量 ${}_kv$ として記録した。

次に試料生重 ${}_nw$ から試料絶乾重 ${}_zw$ を差し引いて試料含水量 a とした。また水の密度は 1 g/cm^3 とみなして、観測された増水量 ${}_zv$ と木部への吸水量 ${}_kv$ の和 $({}_zv+{}_kv)$ を材料の木部体積 ${}_mv$ とした。これらの値によって樹皮を除いた木部比重 $({}_mw/{}_mv)$ を算出した。試料含水率は試料含水量 a と試料絶乾重 ${}_zw$ の比 $(a/{}_zw)$ とした。

101 試料についての試料断面積 $s (\pi d^2/4)$ と試料生重 ${}_nw$ ，試料絶乾重 ${}_zw$ の関係を図-1 に，樹皮断面積 $b (\pi(d^2-{}_md^2)/4)$ の関係を図-2 に，試料含水率 $(a/{}_zw)$ との関係を図-3 に，木部比重 $({}_mw/{}_mv)$ との関係を図-4 に示した。

このうち試料生重 ${}_nw$ ，試料絶乾重 ${}_zw$ と樹皮断面積 b は試料断面積 s との間に比例関係が認められた。それぞれの比例定数と寄与率 R^2 は試料生重 ${}_nw$ で 0.031 ($R^2=0.97$)，試料絶乾重 ${}_zw$ で 0.016 ($R^2=0.99$)，樹皮断面積 b で 0.30 ($R^2=0.95$) であった。

また試料含水率 $(a/{}_zw)$ は平均 1.07 で 0.70～1.42 の範囲にあり，木部比重 $({}_mw/{}_mv)$ は平均 0.61 で 0.52～0.77 の範囲にあった。図-4 から，試料含水率 $(a/{}_zw)$ と木部比重 $({}_mw/{}_mv)$ は小径の試料で高いものがあつたが，試料の断面積によって変化するとはいえなかつた。なお比重算出の誤差要因となる木部の吸水量 ${}_kv$ は平均して木部絶乾重 ${}_mw$ の 3% と小さかつた。

3. 衝撃曲げ試験の方法

試料が生材の状態で，木材シャルピー衝撃試験機(株)米倉製作所製 JISZ2101 準拠 100 (J) による衝撃曲げ試験を行い，衝撃曲げ仕事量 Q を記録した。この試験機のハンマーの重量は 10.91 kgf，衝撃速度は秒速 4.61 m，試料を架設するスパンは 24 cm，衝撃曲げ仕事量の上限は 100 (J) であつた。

た。一方 JIS による木材の試験方法の衝撃曲げ試験においては、一辺の長さ 2 cm の正方形断面で 30 cm の長さの無欠点の試料について、試料の断面積 1 cm^2 当りの衝撃曲げ吸収エネルギー $Q/4 \text{ (J/cm}^2\text{)}$ を記録することになっている。しかし本研究で用いた試料の断面積は一定ではなかった。そこで試験機に示された位置エネルギーの差として算定される衝撃曲げ仕事量 Q を (J) 単位で記録した。

III. 結果と考察

1. 試料の変化

図-5 に衝撃曲げ試験後の 101 試料の変化を示した。試料は試験機のハンマーの打撃を受けると音を発して試験機を通過し、移動するハンマーと同じ方向に移動し、くの字に折れた。移動した距離は試料によって異なり、変形した試料では樹皮と木部の両方もしくは木部のみに枝を 2 分する方向に亀裂が認められた。

また試料の変化は A～C の三つの型に分けられた。A 型では 2 試料が試験機近傍に落下し、樹皮、木部とも破壊された。B 型では 72 試料が大きく移動し、くの字に変形した。試料中央の破壊は樹皮と木部であったものと、木部だけが破壊され、樹皮の破壊は目視では認められないものがあった。A 型と B 型のもののうち、1 試料は完全に 2 分され、他のものは、くの字に折れた内側では樹皮と木部の一部分が 2 分されずに残った。木部だけ破壊された試料は比較的小径であった。C 型の 27 試料には試料中央の破壊が目視では認められなかった。しかし B 型と C 型で樹皮がみかけ上破壊されていないもののなかには、樹皮を剥ぐ時点で裂け目が樹皮にあると指先で感じられるものがあった。裂け目の方向は破壊方向と同一とは限らなかった。なお C 型のうち 2 試料は中央部以外の位置で樹皮、木部とも 2 分されたが、破壊の位置が打撃を受けた試料の中央位置とは異なるので、打撃を受けた後に後方の壁に激突して折れたとみなした。

2. 試料の大きさと衝撃曲げ仕事量 Q の関係

試料の大きさの指標として試料断面積 s の値と衝撃曲げ仕事量 Q の関係を図-6 に示した。衝撃曲げ仕事量 Q は A 型の 2 試料で 87～99 (J)、B 型の 72 試料で 4～61 (J)、C 型

の 27 試料で 0.6～16 (J) であった。試料断面積 s はそれぞれ A 型で $4.6\sim 4.8 \text{ cm}^2$ 、B 型で $0.5\sim 6.1 \text{ cm}^2$ 、C 型の 27 試料で $0.2\sim 1.3 \text{ cm}^2$ であった。

また B 型 72 試料の分布について図から読み取ると三つの集団に分かれた。衝撃曲げ仕事量 Q が 40 (J) 以上で試料断面積 3 cm^2 を超える大径の 17 試料、衝撃曲げ仕事量 Q が 40 (J) 未満で試料断面積 s が $2.5\sim 4 \text{ cm}^2$ の 22 試料、試料断面積 s が 2.5 cm^2 未満で小径の 33 試料である。後者 2 集団の衝撃曲げ仕事量 Q についての境界はおおむね 20 (J) であった。

さらに B 型では衝撃曲げ仕事量 Q は試料断面積 s と次式の関係があった ($R^2=0.87$)。

$$Q = 10.6 s \quad (2)$$

C 型では衝撃曲げ仕事量 Q は試料断面積 s と次式の関係があった ($R^2=0.82$)。

$$Q = 8.7 s^{1.46} \quad (3)$$

A 型は試料数が 2 個と少ないので、多くの試料から求められた式 (2) と式 (3) のいずれかを適用することとして図から読み取ると、衝撃曲げ仕事量 Q と試料断面積 s との関係は式 (3) の関係にあると思われた。そこで改めて A 型と C 型を合わせて衝撃曲げ仕事量 Q と試料断面積 s との関係を求めると次式の関係があった ($R^2=0.92$)。

$$Q = 8.9 s^{1.48} \quad (4)$$

3. 考察

式 (4) は折れなかった C 型に対応するので、試験機を通過するまで試料を曲げるための衝撃曲げ仕事量を表すと考えられた。また式 (2) は折れた B 型に対応するので、試料を破壊するための衝撃曲げ仕事量を表すと考えられた。ここで式 (2) と式 (4) によって算出される衝撃曲げ仕事量 Q を比較すると、試料断面積 s が 1.4 cm^2 以下では、式 (4) の値は式 (2) の値よりも小となった。このことは試料断面積 s が 1.4 cm^2 以下では、試料を破壊する仕事量よりも小さい仕事量で試料が曲げられ試験機を通過することを意味する。折れなかった C 型の試料断面積 s が 1.3 cm^2

図-5. 衝撃曲げ試験による試料の変化

図-6. 試料断面積 s と衝撃曲げ仕事量 Q の関係

以下であったことは、この推論を支持する。また折れたが試験機近傍に落下して移動しなかった A 型では、試験機通過に要する衝撃曲げ仕事量が試料の衝撃曲げ破壊に要する仕事量とほぼ等しかった、と考えることができる。さらに A 型で観察された仕事量は試験機の計測可能上限である 100 (J) に近い値であり、試験機近傍に落下して B 型の落下位置と明らかに異なったので、B 型とは異なり試験機を通過する間に完全に折れたとはいえないと考えられた。

さらに試料の枝は固定された試験機上にあつて、これを折るハンマーの質量と速度の低下に対応する衝撃曲げ仕事量 Q が試験により求められた。本試験は現実の林内において、強風によって木が揺れるときに上部ほど振幅が大きく、隣接木と接触する（藤森, 1984）場合に生じる枝の破壊を説明するものであると考えると、地上から離れた林冠において細い枝がより太い枝や幹との衝撃によって破壊されることが考えられる。この 2 者の一方の質量が十分大である場合には、2 者のうちより小であるものの質量と 2 者の相対的な速度が、試験におけるハンマーに対応する衝撃曲げ仕事量に対応する値を与えると考えられる。ただし試験機における試料を架設した条件を同じとした場合である。

試験機のハンマーなど速度をもった物質の運動エネルギーは質量 m と速度 v によって $mv^2/2$ で示されるので、この運動エネルギーを式(2)の左辺に代入すると次式となった。

$$mv^2/2 = 10.6 s \quad (5)$$

この式 (5) に試料生重 w すなわち試料の 30 cm 当たりの質量 m が試料断面積 s と 0.031 s の関係があつたことによって質量 m に 0.031 s を代入すると

$$0.031 sv^2/2 = 10.6 s \quad (6)$$

となり、両辺の試料断面積 s を消去して速度 v を求めると秒速 26 m となった。このことは長さ 30 cm の試料と同じ質量をもつ物質が秒速 26 m の速度をもって試験機と同等の条件下で試料に衝撃を与えると試料が破壊されることを意味する。また式 (6) の両辺から試料断面積 s は消去されるので、試料生重 w に比例した質量による衝撃を仮定すると、試料が破壊される速度は試料断面積 s にはよらないといえる。なお、一般に材料の破壊強度には速度依存性がある

り、速度が増すにつれ強度は増加する傾向があることから、得られた推定値とは若干の違いが生ずる可能性がある。

また、算出の前提とした試料の質量は長さ 30 cm の場合である。したがって試料に衝撃を与える物質の質量がその 4 倍になると、折れる速度は 2 分の 1 の秒速 13 m へと変化する。ヒノキの枝が折れる秒速はこのような値の近傍にあると試算されるので、ビューフォート風力階級表において小枝が折れる風速は秒速約 20 m とされることは不合理ではない。

さらに広島県において秒速 30 m 以上の強風は再現周期 2~4 年（齊藤ら, 2004）で観察されている。ヒノキ生枝が林分内で衝撃を受けて破壊され、樹冠の形状が変わるほど変化するという可能性は否定できなかった。また以上の結果と考察は 1 立木から採取した試料のみによっており、試験機の制約によって 100 (J) 以上の衝撃曲げ仕事量については試験できなかった。今後研究を進めて、風害の増大が危惧されるヒノキ一般についての結論を求めたい。

最後にシャルピー衝撃試験機の使用にご配慮いただき、材料の強度についてご教示いただいた広島県立林業技術センターの資源利用部沖田日出男部長ほか、測定に協力していただいた堀越廣司氏ほかの皆様へ感謝申し上げます。

引用文献

- 浅井富雄・内田英治・河村 武 (2004) 増補平凡社版気象の事典. 556 pp, 平凡社, 東京.
- 藤森隆郎 (1984) 枝打ち基礎と応用一. 180 pp, 日本林業技術協会, 東京.
- 梶原幹弘 (1973) モデル樹冠による林冠の投影面積, 表面積および体積の計算. 日林誌 55: 316-319.
- 梶原幹弘 (2000) 樹冠からみた林木の成長と形質一密度管理と林型による異同一. 139 pp, 森林計画学会出版局, 東京.
- 河原輝彦 (2001) 林冠. (林業百科事典. 日本林業技術協会編, 丸善, 東京). 1060.
- 小出良吉 (1942) 枝打に関する研究 (第 5 報) “樹冠に就いて” 其の 1. 日林誌 24: 16-28.
- 森岡 昇・オンウォナ アジマン シアウ・近藤 稔 (1995) 林木生枝の冬季硬化と雪折れの可能性一スギ造林木の場合. 43 回日林中支論: 141-144.
- 齊藤 哲・小南陽亮 (2004) 西南日本における強風の再現周期の広域的特徴. 日林誌 86: 105-111.
- 米倉製作所 (1997) J 木材シャルピー衝撃試験機取扱説明書. 8 pp, 米倉製作所, 大阪市.