

大屋町“あけのべドーム”に用いられたスギ材およびヒノキ材の強度試験

永井 智

Satoshi NAGAI

Strength tests of Sugi and Hinoki wood used as the structural materials of Akenobe dome
in Oya town

I はじめに

兵庫県では、県産木材の需要拡大と新たな流通システムの構築を目指すと同時に、公共建築物の木造化を推進しているところである。このような中、養父郡大屋町では、山村地域である町内の林業生産活動の活発化、地域材のPR、そして地域の活性化などを目的とし、大屋町立あけのべ自然学校に全天候型運動場「あけのべドーム」（延べ面積1,296m²、平屋建）を建築、平成13年3月に竣工した。その木材総使用量は約280m³、構造部材数だけでもスギ材、ヒノキ材それぞれ1800、700本余りに及ぶ。近年、大型の木造建築物には集成材が多用される傾向にあるが、大屋町では、地域の素材業者、木材業者や建築業者の活用を図るため、構造材には集成材を使用せず無垢材を選択した。地域の森林組合が立木の調達から部材の納品までを請け負い、地域の建設業者と工務店により施工が行われた。

ドーム建築に際し、当センターでは大屋町役場からの依頼を受け、部材の性能試験を行ったのでその結果について報告する。

本試験を行うにあたり、大屋町役場産業課 松岡信行、西垣節夫氏、大屋町森林組合 千葉義雄、北脇 実氏、(有)三竿修一建築研究所 三竿修一氏、当センター木材利用部 山田直也氏をはじめ多くの方々のご協力を頂いた。ここに深謝する。

II 試料と方法

1. 供試材

あけのべドームの構造材には、養父郡大屋町産のスギ材（公称約50年生）およびヒノキ材（同80年生）が使用されている。

まず、構造材に製材される前段階の調査として、森林組合により当センターに搬入されたスギ素材丸太13本について動的ヤング係数の測定を行った。

次に、製材、人工乾燥、モルダージ仕上げされ、森林組合

の倉庫内に棧積みされていたスギおよびヒノキ仕上げ材の中から、部材の形状ごとに材を無作為に抜き取り試験に供した。供試本数はスギ材、ヒノキ材それぞれ82、43本である。

なお、トビグサレ材や割れ、狂いの顕著な材はあらかじめ丸太あるいは製材、乾燥後の段階で除去されている。

2. 試験方法

(1) スギ素材丸太

各供試丸太について、元口・末口周囲長、材長、重量を測定し、次式により丸太の密度を算出した。

$$\rho = 16\pi w / (P_1 + P_2)^2 / l \quad (1)$$

ρ ：密度（g/cm³）、 π ：円周率、 w ：重量（g）、

P_1 ：元口周囲長（cm）、 P_2 ：末口周囲長（cm）、

l ：材長（cm）

次に、図-1に示すように、中央部で支持された供試丸太の一方の木口面をハンマーで打撃し、もう一方の木口面付近でマイクロフォンによりとらえた縦振動波をFFTアナライザ（リオン（株）製SA-74）に取り込み、一次の固有振動数を求め、次式により縦振動法による動的ヤング係数を算出した。

$$E_{fr} = 4l^2 f^2 \rho / g \quad (2)$$

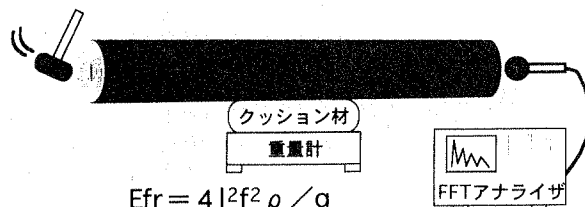
E_{fr} ：縦振動法による動的ヤング係数（gf/cm²）

l ：材長（cm）、 f ：一次固有振動数（Hz）、

ρ ：密度（g/cm³）、 g ：重力加速度（cm/s²）

(2) スギ、ヒノキ仕上げ材

素材丸太を粗挽き、人工乾燥後、モルダージ仕上げされた



$$E_{fr} = 4l^2 f^2 \rho / g$$

E_{fr} ：縦振動法による動的ヤング係数

l ：材長、 f ：一次固有振動数、 ρ ：密度、 g ：重力加速度

図-1 動的ヤング係数測定方法

スギ、ヒノキ仕上げ材について、寸法および密度の測定を行うとともに、前項の(2)式により動的ヤング係数を算出した。さらに、各供試材の中央部および両端から約30cmの部位において高周波式含水率計により含水率の測定を行い、その平均値を算出した。

また、スギ材については、無作為に選択した片方の木口面において「針葉樹の構造用製材の日本農林規格」(以下JAS)に準拠した平均年輪幅(以下平均年輪幅)の測定を行った。さらに、髓から4方向の材縁までのうち、最も多くの年輪を含む1方向を目視により判断し、材に含まれる最大年輪数(以下最大年輪数)として記録した。一方ヒノキ材の年輪測定については、年輪数が多かったうえ、各年輪が明瞭に観察できず、個々の材の動的ヤング係数測定の合間に短時間でそれを測定することが困難であったため行なわなかった。

なお、仕上げ材の強度試験については、フォークリフトによる供試材の移動、重量計への供試材の積み降ろし、寸法、年輪幅、含水率の測定、ハンマーによる木口面の打撃、パーソナルコンピュータへのデータの打ち込みなどに合わせて常時6名程度が活動し、2日間で10時間程度が費やされた。

Ⅲ 結果と考察

1. スギ素材丸太の動的ヤング係数

スギ素材丸太において動的ヤング係数を測定した結果を表-1に示す。1番玉、2番玉(以上)の区分については、元口に根張り部の認められる丸太を1番玉、認められない丸太を2番玉(以上)とした。供試材数が少ないものの、概ね2番玉(以上)の方が1番玉よりも大きい値を示していることがうかがえる。これには、丸太内半径方向においてヤング係数は髓から樹皮側に向かって大きくなる傾向に

表-1 スギ素材丸太の番玉と動的ヤング係数の関係

| 番玉 | 末口直径 (cm) | 材長 (cm) | 動的ヤング係数 (tonf/cm ²) |
|-------|-----------|---------|---------------------------------|
| 1 | 31.4 | 423.0 | 60.0 |
| 1 | 31.5 | 421.0 | 61.4 |
| 1 | 28.2 | 428.0 | 64.4 |
| 1 | 33.2 | 431.0 | 68.2 |
| 1 | 40.4 | 433.0 | 69.4 |
| 1 | 29.5 | 407.0 | 74.2 |
| 平均値 | 32.4 | 423.8 | 66.3 |
| 2(以上) | 22.4 | 408.5 | 66.4 |
| 2(以上) | 20.5 | 409.0 | 75.3 |
| 2(以上) | 25.0 | 401.0 | 75.4 |
| 2(以上) | 22.4 | 409.0 | 77.4 |
| 2(以上) | 22.3 | 411.0 | 84.2 |
| 2(以上) | 22.8 | 406.5 | 91.6 |
| 2(以上) | 23.5 | 404.5 | 103.0 |
| 平均値 | 22.7 | 407.1 | 81.9 |

ある(1、2)こと、地上高の高い部位から得られた丸太の方が髓により近い部位から比較的大きいヤング係数を示す(2)こと、そして動的ヤング係数は材内の平均的ヤング係数を示す(3、4)ことが影響しているものと考えられる。

2. スギ仕上げ材の材質

スギ仕上げ材の材質測定結果について、断面寸法および背割りの有無をもとに区分し表-2に示す。

平均年輪幅および最大年輪数についてみると、各区分とも、最大、最小値に大きな差異が認められる。これには、それぞれの材が採取された番玉の違いや、異なった林分から採材したことによる樹齢あるいは品種の違いなどが影響しているものと思われるが、その詳細は明らかでない。

含水率については、ハンディタイプの高周波式含水率計による測定結果であり、材の断面寸法の大きさから見ても測定精度は決して高くはないものと思われるが、あくまでも参考値として掲載した。傾向としては、13.5cm角無背割り材あるいは断面寸法の大きい20cm角背割り材においてやや乾燥不十分な材が存在していることがうかがえる。一方、13.5cm角背割り材に関しては比較的良好に乾燥されていたものと思われる。

密度については、スギ材の場合、髓から樹皮側へと小さ

表-2 スギ仕上げ材の材質測定結果

| 供試材数 (本) | 20cm角 | 13.5cm角 | 13.5cm角 | |
|---------------------------------|-------|---------|---------|------|
| | 背割り材 | 背割り材 | 無背割り材 | |
| | 25 | 27 | 30 | |
| 平均年輪幅 (mm) | 平均値 | 6.6 | 5.1 | 5.0 |
| | 最大値 | 9.5 | 6.4 | 8.3 |
| | 最小値 | 3.2 | 3.4 | 3.0 |
| | 標準偏差 | 1.4 | 0.8 | 1.3 |
| 変動係数 (%) | 平均値 | 21.6 | 14.7 | 25.1 |
| | 最大値 | 29.5 | 25.0 | 27.1 |
| | 最小値 | 54 | 39 | 44 |
| | 標準偏差 | 9.5 | 5.3 | 6.7 |
| 最大年輪数 (年) | 平均値 | 32.3 | 21.0 | 24.6 |
| | 最大値 | 17.7 | 12.9 | 19.5 |
| | 最小値 | 30.0 | 28.6 | 47.3 |
| | 標準偏差 | 4.4 | 5.3 | 8.3 |
| 含水率 (%) | 平均値 | 25.2 | 41.3 | 42.4 |
| | 最大値 | 0.38 | 0.42 | 0.46 |
| | 最小値 | 0.51 | 0.60 | 0.72 |
| | 標準偏差 | 0.04 | 0.06 | 0.07 |
| 密度 (g/cm ³) | 平均値 | 9.88 | 14.1 | 15.7 |
| | 最大値 | 69.6 | 76.2 | 69.5 |
| | 最小値 | 113.0 | 97.2 | 93.1 |
| | 標準偏差 | 17.3 | 11.8 | 12.5 |
| 動的ヤング係数 (tonf/cm ²) | 平均値 | 24.9 | 15.5 | 18.0 |
| | 最大値 | 24.9 | 15.5 | 18.0 |
| | 最小値 | 53.2 | 56.3 | 39.5 |
| | 標準偏差 | 17.3 | 11.8 | 12.5 |
| 変動係数 (%) | 平均値 | 24.9 | 15.5 | 18.0 |
| | 最大値 | 24.9 | 15.5 | 18.0 |

くなる傾向にある(5)ことから、その平均値は断面寸法の大きい20cm角材で小さく、13.5cm角材で大きいという傾向が得られている。それぞれの区分における密度のばらつきには、木材実質における密度の違いと含水率のばらつきの双方が影響しているものと思われる。

動的ヤング係数については、公称樹齢が約50年と比較的高樹齢であったこと、また、部材の断面寸法が13.5cm角あるいは20cm角と比較的大きかったことから、その平均値は10.5cm正角材(約30年生、全乾法による平均含水率約17%)を用いて行った結果(6)と比較してやや大きい傾向にあった。すなわち、心持ち正角材の場合、断面寸法の大きい材の方が、ヤング係数の大きい樹皮側の部分を多く含むため、動的ヤング係数が大きくなる傾向にあるものと思われる。ただし、20cm角材の場合、断面寸法がより大きいにもかかわらず、動的ヤング係数の平均値はさほど大きくなかった。20cm角材には主として1番玉が製材されたものと思われるが、前節に述べたように、1番玉は素材丸太実質のヤング係数が小さい傾向にあるため、仕上げ材においても上述のような結果が得られたものと思われる。その一方、20cm角材の最大値は13.5cm角材よりも大きい値を示しているが、これはⅢ、4節に後述するとおり、年輪幅が他の供試材と比べて著しく小さい数本の材から得られた結果である。3区分のうち、比較的良好に乾燥されていたと思われる13.5cm角背割り材においてヤング係数は大きい値を示す傾向にあった。

3. ヒノキ仕上げ材の材質

ヒノキ材の含水率、密度、動的ヤング係数の測定結果を表-3に示す。短辺7.5~15cm、長辺12~30cmの範囲における6種類の断面寸法の材(心持ち材・心去り材あわせて43本、いずれも無背割り材)について試験を行ったが、表-3にはこれらを一括した値を掲載した。公称樹齢が約80年と高樹齢であったことにもよるとと思われるが、スギ材と比較した場合、動的ヤング係数は明らかに大きい値を示している。含水率については、心持ち無背割り材が多かったためか、やや乾燥不十分な材が含まれていたものと思われる。

表-3 ヒノキ仕上げ材の材質測定結果

| | 含水率 (%) | 密度 (g/cm ³) | 動的ヤング係数 (tonf/cm ²) |
|----------|---------|-------------------------|---------------------------------|
| 平均値 | 18.4 | 0.50 | 104.3 |
| 最大値 | 35.5 | 0.61 | 131.3 |
| 最小値 | 7.2 | 0.43 | 75.8 |
| 標準偏差 | 5.8 | 0.04 | 14.8 |
| 変動係数 (%) | 31.7 | 7.76 | 14.2 |

(供試材数: 43本)

4. スギ仕上げ材における平均年輪幅、最大年輪数と動的ヤング係数の関係

機械等級区分を行うことなく、現場において積積み状態のまま目視的に個々の材のヤング係数を推定可能かどうか、あるいは、少なくともヤング係数が小さく構造用材としての利用が不適である材を目視的に判断、除去することが可能かどうかについて、平均年輪幅、最大年輪数と動的ヤング係数の関係をもとに検討した。

平均年輪幅と動的ヤング係数の関係を図-2に示す。13.5cm角材について見ると、平均年輪幅の大きい材ほど動的ヤング係数が小さい傾向がうかがえる。しかしながら、現場において平均年輪幅を測定し、その結果をもとに材のヤング係数を推定すること、あるいは不適材を除去することはきわめて困難であると思われる。例えば、平均年輪幅が約5mmの材の動的ヤング係数は50~100tonf/cm²の範囲に大きくばらついている。逆に、動的ヤング係数が60tonf/cm²に満たない材の平均年輪幅も4~7mmの範囲に大きくばらついており、その範囲の平均年輪幅を持つ材には100tonf/cm²に近い値を示すものも認められる。

次に、最大年輪数と動的ヤング係数の関係を図-3に示す。13.5cm角材について見ると、最大年輪数の大きい材ほど動的ヤング係数が大きい傾向がうかがえる。しかし、平均年輪幅と同様、最大年輪数をもとにしたヤング係数の推定や不適材の除去は容易ではない。

なお、断面寸法の大きい20cm角材については、図-2、3ともに、13.5cm角材よりも明らかに高い相関が認められているが、これは年輪幅が他の供試材と比べて著しく小さい数本の材の影響によるものである。供試材数が増加した場合、果たして目視によりヤング係数の推定を行うこと、あるいは不適材の除去を行うことが可能であるかどうかにか

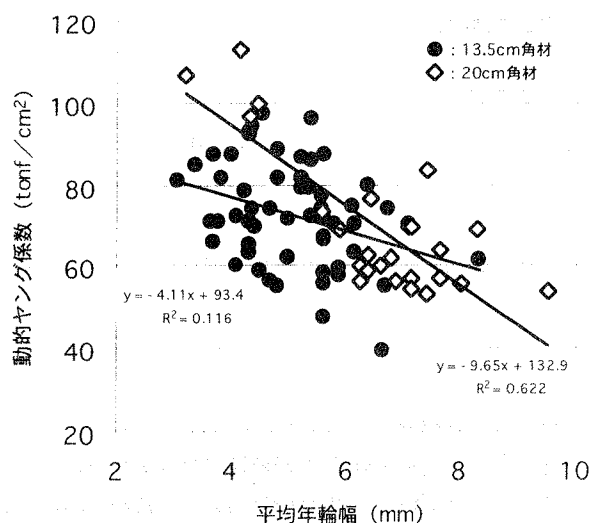


図-2 JAS平均年輪幅と動的ヤング係数の関係

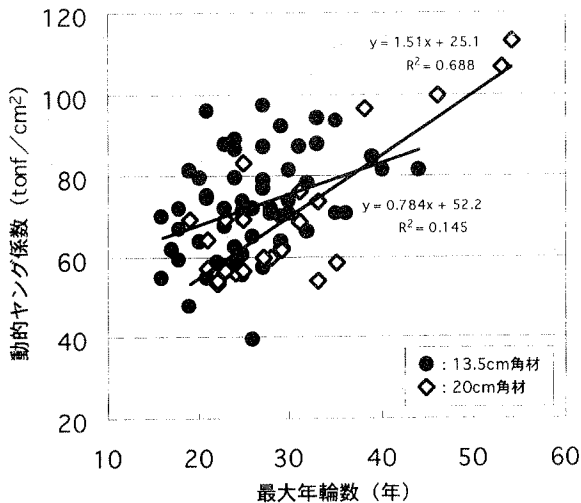


図-3 材縁までの最大年輪数と動的ヤング係数の関係

は疑問がある。

5. 含水率と動的ヤング係数の関係

含水率については上述したように、測定精度は決して高くはないものの、スギ材（密度補正約0.37）で8割弱、ヒノキ材（同0.42）で6割強の部材が含水率20%以下を示していた。より適正に含水率が管理された材を揃えるためには、材質や形状に応じた乾燥スケジュールのより詳細な検討が必要であろう。ただし、含水率が30%以下になると強度値は増加するものの、断面の大きな実大材は形状の小さな材に比べて含水率の変化に対する強度値の変化が小さい（7）。また、素材丸太と乾燥後プレナ仕上げされた心持ち直角材のヤング係数がほぼ同様であったという報告（6）も認められる。さらに、本結果にも見られるように、仕上げ材のヤング係数はスギ材で40～110tonf/cm²、ヒノキ材で75～130tonf/cm²と大きくばらついている。

これらを合わせて考えた場合、素材段階で機械等級区分を行い、構造材としての強度性能を満たすことが可能であるとみなすことができる丸太のみを構造用材に製材し、それらの材について慎重に含水率管理を行うことにより、材の寸法安定性を向上させるとともに、乾燥によるヤング係数の増大を期待するという方法が理想的であると思われる。

IV おわりに

住宅の品質確保の促進等に関する法律の施行により、建築物に関する規定が従来の仕様規定から性能規定へと改正された。それに伴い、木質建材に関する規格も従来の製造規格から性能規格へと改正された。これらの改正により、

木造建築物における設計の自由度は増大し、多様な材料の採用が可能となった。本県における重要施策である公共建築物の木造化を今後一層すすめるためには、設計側に対して木材の強度性能のばらつきを把握したうえで設計を行うってもらうこと、対して材料提供側は、たとえ無垢材であろうと、機械等級区分により強度性能が保証・表示された「エンジニアードウッド」（8）を供給できる体制を整えていくことが重要であると考えられる。設計側に、材料、とくに無垢材を安心して、かつ継続的に使用してもらうためには、機械等級区分による全数調査、さらには集成材と同等あるいはそれ以上の含水率管理が必要であろう。

縦振動法により測定した動的ヤング係数と曲げヤング係数の間にはきわめて高い相関が認められ（6）、さらに前者は角材のみならず丸太のような形状においても測定精度が高いことから、その手法の活用を本県においても推進する意義は大きいと考える。しかしながら、現実問題としてⅡ.2.（2）項に述べたように、製材の機械等級区分でさえ手作業で行うことはきわめて非効率であり、ましてや丸太段階での機械等級区分となると、材積、重量がさらに大きくなるため、測定に費やされる労力は一層大きいものとなる。

以上のことから、強度的に合理的な製材および効率的なエンジニアードウッドの供給の第一歩は、自動化された素材丸太のグレーディングマシン（9）の活用であると考えられる。

V 摘要

（1）大屋町立あけのべ自然学校の全天候型運動場「あけのベドーム」の建築に際し、スギ材およびヒノキ材の強度試験を行った。

（2）高周波式含水率計による含水率測定結果によれば、無背割り材において乾燥不十分な材がやや認められたが、背割り材では比較的良好に乾燥されていた。

（3）スギ材（公称樹齢約50年）の動的ヤング係数の平均値は13.5cm角背割り材でやや高く約75tonf/cm²、13.5cm角無背割り材および20cm角背割り材で約70tonf/cm²であった。

（4）ヒノキ材（公称樹齢約80年）の動的ヤング係数の平均値は約105tonf/cm²であった。

（5）素材丸太におけるヤング係数の測定、その値をもとにした合理的な製材、そして製材後における含水率管理を徹底することにより、無垢材においても強度等級のより高いエンジニアードウッドの増産が可能になるものと思われる。

引用文献

- (1) 中谷 浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究. 富林技研報 4 : 1-54.
- (2) 永井 智・山田範彦・山田直也・前田雅量 (1998) 兵庫県内産スギ材の材質 (第1報) - 年輪幅、容積密度、ヤング率および比ヤング率の樹幹内変動 -. 兵庫森林技研報 45 : 17-29.
- (3) 有馬孝禮・早村俊二・丸山則義・宮沢俊輔・古沢信 (1990) 木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価. 材料 39 : 1228-1234.
- (4) 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・川井安生・岡崎泰男・中谷 浩 (1997) 秋田県産スギ材の強度特性 (第1報) - 丸太のヤング率 -. 木材学会誌 43 : 46-51.
- (5) 深沢和三 (1967) スギ樹幹内の材質変動に関する研究 - 産地を異にする林木樹幹の未成熟材などの区分とその材質特徴 -. 岐大農研報 25 : 47-127.
- (6) 永井 智 (2000) スギ素材丸太から正角仕上げ材に至る過程におけるヤング係数の変動. 兵庫森林技研報 48 : 5-10.
- (7) 鷺見博史 (1998) 木材は乾かして使う. p.37, 産調出版, 東京.
- (8) 林 知行編著 (1998) エンジニアードウッド. 218pp, 日刊木材新聞社, 東京.
- (9) 田岡秀昭 (2001) 原木グレーディングについて. 月刊ワイド 木材流通と経営の情報誌 147 : 2-5.