

立木段階での材質・性能予測に関する研究

2017年度～2019年度

小林寛生*・豊嶋 勲*・上田耕大

要 旨

県産スギ材について、立木段階で製材のヤング率、含水率を予測するため、立木の応力波伝播速度と製材後のヤング率、含水率の関係データ群を構築し、その実用性の評価を行った。応力波伝播速度の測定方法として、樹幹表面で応力波伝播速度の測定を行うセンサーの直線配置と樹幹内の対角線で測定する斜め配置の2つの方法で行った。その結果、以下のことが明らかになった。林分の一定数の立木の応力波伝播速度測定により、林分のヤング率分布を推定することができる。これに基づき、応力波伝播速度中央値を境に JAS 等級を区分したところ、E70 を中心としたグループと E90 を中心としたグループにうまく分けることができた。また、個体毎のヤング率も一定の精度で推定可能であった。含水率については、ヤング率よりもばらつきが大きく、おおまかに 120 %以下の立木を抽出することが可能であった。さらに苗木段階での高ヤング率品種を選抜する指標を得るため、壮齢期のヤング率分布が明らかな東加茂 2 号と東加茂 3 号の 3 年生苗木に応力波伝播速度法を適用したところ、高ヤング率品種の東加茂 2 号において、応力波伝播速度が有意に高いことが示された。

大径木由来の平角材について心去り材と心持ち材での性能の比較では、心去り材は JAS 目視等級 3 級材の割合が多く、曲げ強度が低かった。目視等級 1 級材同士で比較した場合は、同等の曲げ強度を有した。

I はじめに

公共建築における木材利用の推進が法律で示されて以来、市町村有林単位の限定的な林分からの木材で建築物を建造する事例が増加してきている。また、公共建築物に用いる構造材には JAS 材が指定される場合も多い。これらのことから、材料を効率的に確保するために、立木の段階で材質・性能を把握することが必要である。立木段階での材質評価については、応力波や超音波など高い周波数帯の振動法を用いることにより、林分単位でのヤング率評価を行い、立木の在庫管理に役立つ研究が行われている（名波ら 1992、池田ら

2000）。また、応力波を利用した含水率評価については、林分内での葉枯らし材の含水率変化の測定に応力波伝播速度を用いる方法に応用された事例（桐林ら 2017）がある。しかし、実施例は少なく、またスギは地方により材質の特徴が異なるため、県産スギ材の立木段階での材質・性能の評価には県産材データベースが必要である。そこで本研究では、県産スギの立木段階での材質・性能予測を行うための応力波伝播速度と諸性質との関係データベースを構築し、これを使用した立木評価を行った。

また、応力波伝播速度法は、測定対象の材の大

Hiroo KOBAYASHI, Isao TOYOSHIMA, Koudai UEDA: Evaluation of young's modulus and moisture content of Sugi tree (*Cryptomeria Japonica*) using stress wave velocity method.

本研究の一部は、第 69 回日本木材学会（2019）で発表した。

* 現新城設楽農林水産事務所

きを問わないことから、苗木や若齢時における立木のヤング率測定に適用を試みた事例がある(宮下ら 2009, 桐林 2015)。本研究では、今後実施される県産エリートツリーの挿し木苗選抜等に際し、高ヤング率クローンの選抜への応力波伝播速度法の適用可能性を検討した。ここでは、これまでにヤング率等性能が明らかにされている本県のスギ精英樹クローンを用いて、苗木段階での材質・性能評価が立木段階での材質・性能をどこまで表現しているかを調べた。

一方、本県の人工林の8割以上が10齢級以上の高齢級に達しており、その中でも戦後に多く植栽されたスギは高齢級化に伴い大径化が進んでいる。しかし、本県のスギ大径材は、その特性が明らかとされていないことから利用が進んでおらず、その有効な活用方法の開発が急務となっている。大径材の利用法の一つとして心去りでの平角材2丁取りがある。そこで、心去り平角材について、曲げ強度試験を実施し、その特性を調査した。

II 方法

1. 立木段階での材質・性能予測技術開発

新城市上吉田の森林・林業技術センター内の55年生スギ林分を試験地とした。2018年4月にこの林分から56本のスギを任意に選び、地際300 mm高から立木の表面を1000 mm上がった地点の直径(ここでは d_1 とする)、地際300 mm高の根元径(d_2)、樹幹の応力波伝播速度を測定した。応力波伝播速度の測定は、応力波伝播時間測定器(SPT-10、飯田工業株)を使用し、その間の樹幹表面で成長方向に平行にセンサーを配置して測定されたL方向の応力波伝播速度(V_p)とセンサーの片方を対角に配置したLR方向の応力波伝播速度(V_d)を得た(図-1)。 V_d は、 V_p のように樹幹表層のみ

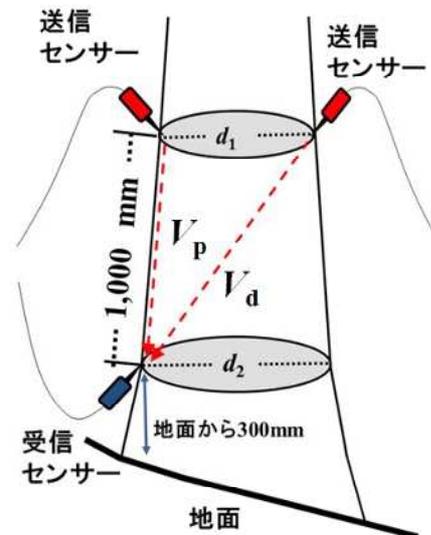


図-1 立木の応力波伝播速度測定

ではなく、含水率の推定ができるよう応力波が樹幹内部を通過することを意図したものである。

2018年7月に試験地を皆伐し、長さ4 mの1番玉を試験材として採取した。直ちに、丸太の形状、重量、縦振動法による動的ヤング率(E_{log})を測定した。含水率は測定した重量と体積からみかけの密度を求めた。この時点での丸太の含水率(MC_{log})は、後述するように製材後乾燥させてから、製材の全乾密度から求めた。丸太は幅120 mm、梁せいは任意で心持ちの平角材を製材した。気乾含水率まで乾燥後、曲げ試験を実施し、曲げヤング率(以下MOE)、曲げ破壊強度(以下MOR)を求めた。試験後、全乾法により試験時の含水率を求めた。これらより、応力波伝播速度と E_{log} 、MOE、 MC_{log} の関係を求めた。

2. 苗木、若齢木での材質・性能予測技術開発

2018年6月に、仮植えしたスギ精英樹クローンの2年生苗を9ヶ月間苗畑で育成した。クローンは、愛知県産のスギ精英樹である東加茂2号(以下H2)及び東加茂3号(以下H3)の2系統を用いた。2019年3月に、苗を掘りとり、枝葉や木化していない部分は剪定ばさみで切り落とした後、苗の樹幹部の応力波伝播速度を測定した。センサー間の距離

は概ね150 mmとし、樹幹の伝播時間、センサー間距離、樹幹重量の測定の後、全乾法により含水率を測定した。

3. 心去り平角材の曲げ性能評価

60年生及び85年生の県産スギ大径材（末口径420 mm～550 mm、平均461 mm、長さ4000 mm）を用い、62本の丸太から85本の心去り平角材を得た。採材は側面定規とした。また、過去の研究成果（豊嶋 2017）から、同寸法の60年生心持ち材100本を対照として用いた。

気乾含水率まで天然乾燥し120×240×4000 mmに仕上げた後、節の全数調査を行い、製材の日本農林規格（平成19年8月29日農林水産省告示第1083号）（以下JAS）に基づき目視等級付けを行った。

曲げ試験については、財団法人日本住宅・木材技術センターの「構造用木材の強度試験マニュアル」に従い、スパン3600 mmの3等分点4点荷重法とし、試験体が破壊するまで荷重を加えた。試験機は実大強度試験機（UH-1000kN、（株）島津製作所）を用い、荷重速度は30 mm/minで载荷した。これらの試験結果からMOE、MORを求めた。これら曲げ性能値は含水率調整及び寸法効果調整を行った。その調整式は以下の通り。

【寸法効果調整係数】

$$MOE : ((1+2.4h^2(E/G)(3L^2-4a^2))/((1+2.4h_0^2(E/G)(3L_0^2-4a_0^2)))$$

h : 試験材の梁せい、h₀ : 150 mm、E/G : 15

L : 試験材のスパン、a : 荷重点支点距離

L₀ : 18h₀、a₀ : 6h₀

$$MOR : (h(S+0.2L)(h_0(S_0+0.2L_0))^{0.2}$$

h : 試験材の梁せい、h₀ : 150 mm

L : 試験材のスパン、S : 荷重点間距離

L₀ : 18h₀、S₀ : 6h₀

【含水率調整係数】

$$MOE : 1.14/(1.14-0.02 \cdot M)$$

$$MOR : 1.25/(1.75-0.0333 \cdot M)$$

M : 試験時の含水率(%) 20以上はすべて20、10以下はすべて10とする。

III 結果と考察

1. 立木段階での材質、性能予測技術開発

図-2 (a) に立木の応力波伝播速度 (V_p)、図-2 (b) に動的ヤング率 (E_{log}) の度数分布を示す。V_pは、2407 m/s～3577 m/s、E_{log}は5.5 kN/mm²～10.2 kN/mm²の範囲にあった。両者ともに正規分布と仮定した場合、V_pの中央値は、3.0×10³ m/s、5%下限値は2.6×10³ m/s、E_{log}の中央値は8.0 kN/m

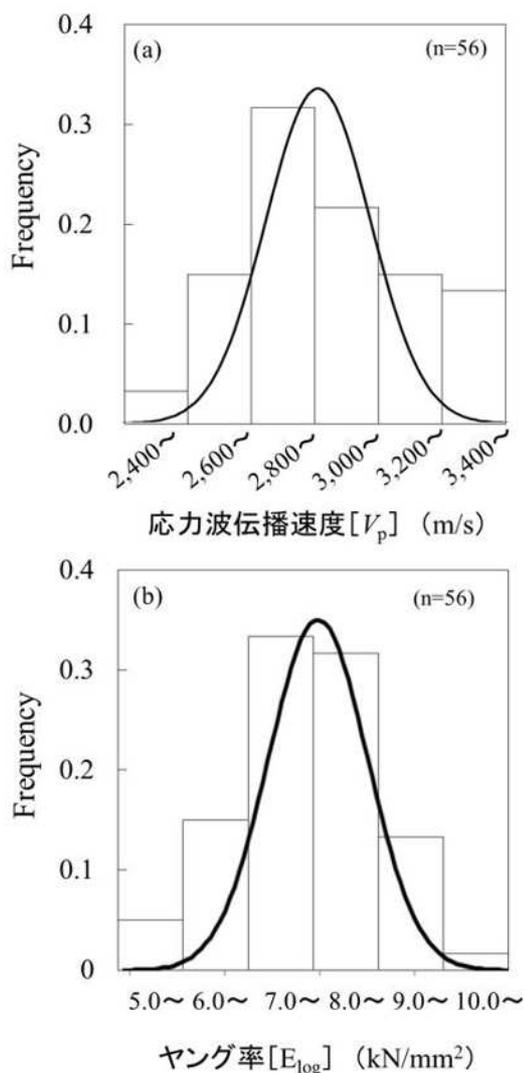


図-2 立木の伝播速度 V_p及びヤング率の度数分布：(a) V_p、(b) ヤング率

m²、5%下限値は6.1 kN/mm²となった。

図-3に胸高直径 (d₁) とV_pの関係を示す。V_pは直径が大きくなるに従い低下し、両者には相関が認められた (p<0.01)。これは、池田ら (2000) が示したように、成長の良い立木は年輪間の幅が広がることで晩材率が低下し、相対的に見かけの密度が低くなることが考えられた。

図-4にV_pとE_{log}の関係を示す。V_pが大きくなるに従いE_{log}は高くなり、両者の間には相関が認められた (p<0.01)。

以上のことから、県産スギの林分において一定数の立木の応力波伝播速度を測定することで林分

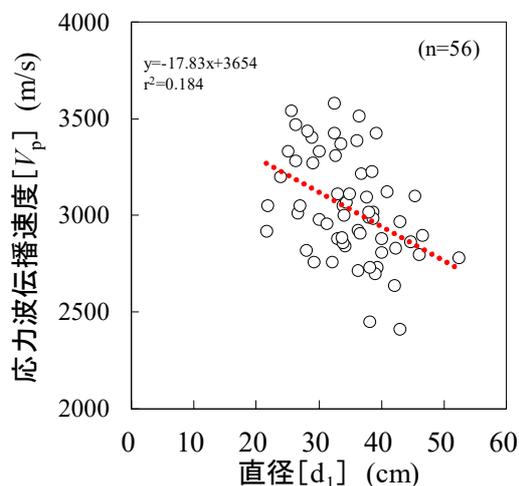


図-3 直径と応力波伝播速度 [V_p] の関係

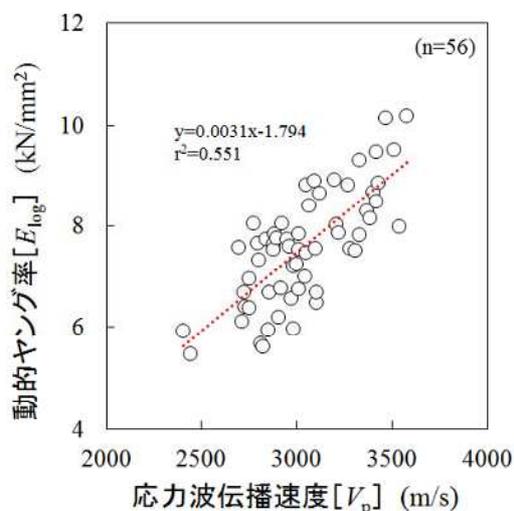


図-4 立木の応力波伝播速度と丸太の動的ヤング率の関係

の動的ヤング率分布を推定することができ、個々の立木についても丸太の動的ヤング率を一定の精度で推定することが可能であることが示された。

この関係データ群による立木の等級区分法の評価として、先に示したV_pの中央値3000 m/sを基準として丸太の動的ヤング率の大小を区分した結果を図-5 (a) 及び (b) に示す。V_pが3000 m/s未満のクラスでは丸太JAS等級でE_r70が約80%、3000 m/s以上のクラスではE_r90が約60%になった。これにより、1グレード異なる丸太を採取できる立木をV_pの大小からかなりの精度で分類可能であることが示された。

次にV_pと製材のMOEの関係を図-6に示す。MOEは6.1 kN/mm²~10.9 kN/mm²の範囲にあり、中央値は8.7 kN/mm²、5%下限値は6.6 kN/mm²であった。この値は県産スギ材の平均値8.1 kN/mm² (愛

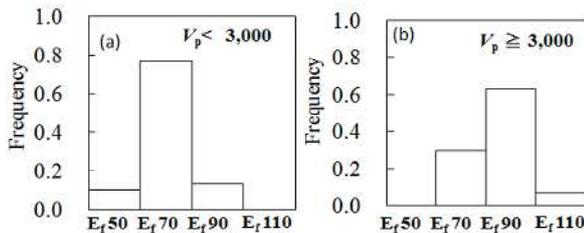


図-5 応力波伝播速度 [V_p] の中央値で2区分した丸太のJAS等級分布
(a) V_p < 3,000m/s (b) V_p ≥ 3,000m/s

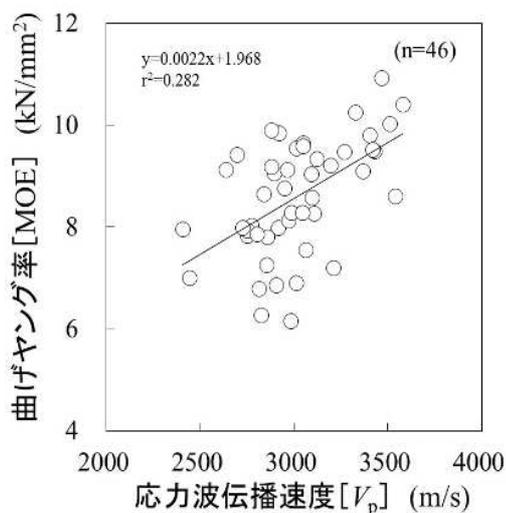


図-6 立木の応力波伝播速度と製材の曲げヤング率の関係

知県産材利用の手引き作成検討委員会2017)より6%ほど高いデータ群となった。両者の関係は丸太の場合と同様に相関が認められた ($p < 0.01$)。一方で、MOEのy軸の変動は丸太の場合より増加し、バラツキが大きくなった。個々のMOEを立木段階で予測するのは精度が低下すると考えられた。

ここでは、同様に林分全体での仕分けとして、先に示した V_p の中央値3000 m/sを境に分類した結果を図-7に示す。 V_p が3000 m/s未満のクラスではE90以上が68%、 V_p が3000 m/s以上のクラスではE90以上が87%と V_p の区分基準を設定することで高いグレードの製材品を得る割合を増加させることが可能なことが示された。

次に応力波伝播速度による含水率分類については、図-8にセンサーの片方を対角に配置したLR

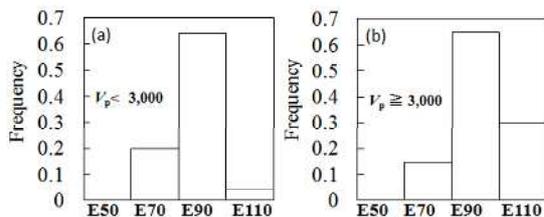


図-7 応力波伝播速度 [V_p]の中央値で2区分した製材のJAS等級分布
(a) $V_p < 3,000$ m/s (b) $V_p \geq 3,000$ m/s

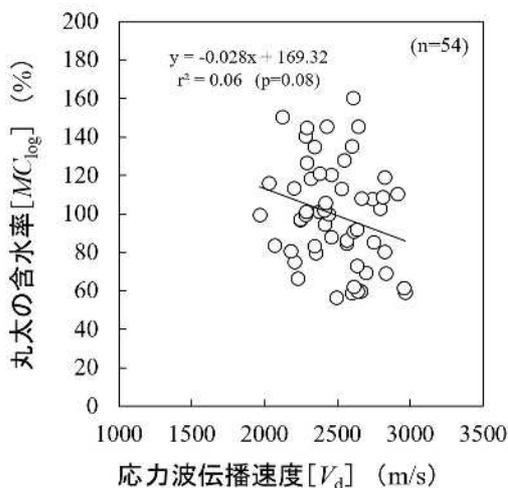


図-8 立木の応力波伝播速度 V_d と丸太の含水率の関係

方向の応力波伝播速度 (V_d) と含水率 (MC_{log}) の関係について示す。 MC_{log} が低くなるに従い V_d は小さくなる傾向が見られたが、有意な相関が認められなかった ($p = 0.08$)。応力波伝播速度は、ヤング率と含水率の両方の影響が含まれている。この V_d は測定方向がLR方向であるため、L方向のヤング率の影響を大きく受けていると考えられる。

そこで、L方向のヤング率の影響を緩和することを試みた。L方向のヤング率 (E_L) は以下の式で表される。

$$E_L = \rho \cdot V_p^2 \quad (1)$$

ρ : 樹幹のみかけの密度

また、LR方向のヤング率 (E_{LR}) は以下の式で表されるものとする。

$$E_{LR} = \rho \cdot V_d^2 \quad (2)$$

ここでは、(1)の ρ と同一であるものとする。さらにL方向のヤング率の影響を除くために以下により係数 (k) を求めた。

$$k = (E_{LR}/E_L) = (\rho \cdot V_d^2) / (\rho \cdot V_p^2) = V_d^2 / V_p^2 \quad (3)$$

係数 k と V_d を乗じた値 ($k \cdot V_d$) を用いて、($k \cdot V_d$) と MC_{log} の関係を図-9に示す。

両者の関係はいくらかバラツキが改善している

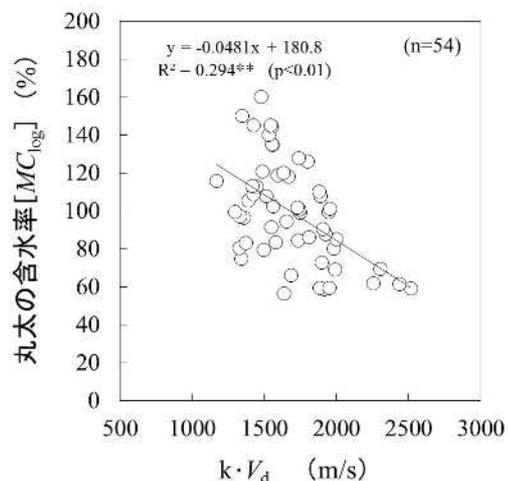


図-9 $k \cdot V_d$ と含水率の関係

ように見られ、有意な相関が認められた ($p < 0.01$)。 $k \cdot V_d$ について正規分布を仮定した場合、中央値は 1635 m/s、下限値は 1168 m/s であった。この関係データ群による立木での含水率区分の評価として、中央値 1635 m/s を基準として含水率の大小を区分して行う。その結果を図-10 (a) 及び (b) に示す。 $k \cdot V_d$ が 1635 m/s 以上のクラスでは含水率 120 % 以上は少なく、全体の 8 % 程度に減少させることができた。しかし、1635 m/s 以下のクラスでは、含水率 120 % 未満の立木が約 60 % も含まれてしまった。このため、含水率については大まかに 120 % 以下を抽出する程度にとどまった。

2. 苗木、若齢木での材質・性能予測技術開発

表-1 に H2 及び H3 の苗木樹幹の応力波伝播速度 (V_d) と樹幹含水率、容積密度を示す。2 標本の平均値の差を検定した結果、H2 は H3 より応力波伝播速度が 1 % 有意で大きく、容積密度は H3 が 1 % 有意で H2 より大きかった。図-11 に苗木の根

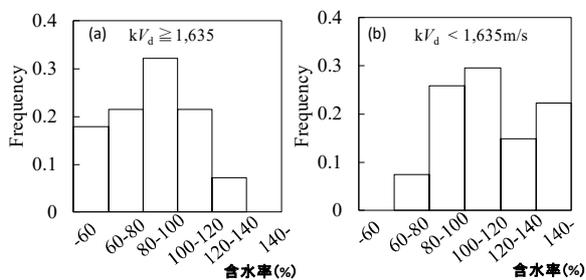


図-10 $k \cdot V_d$ の中央値で 2 区分した丸太の含水率の度数分布
(a) $k \cdot V_d < 1,635 \text{ m/s}$ (b) $k \cdot V_d \geq 1,635 \text{ m/s}$

表-1 苗木樹幹の応力伝播速度、含水率、容積密度

| クローン | 応力波伝播速度 [V_d] (m/s) | | 含水率 (%) | | 容積密度 (g/cm^3) | | |
|------|----------------------------|--------|------------|-----|-----------------------------|---------|------|
| | n | 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 | 平均値 | 標準偏差 |
| H2 | 27 | 1290** | 45 | 196 | 35 | 0.406 | 0.04 |
| H3 | 27 | 1216 | 37 | 186 | 36 | 0.446** | 0.05 |

** 1% 有意を表す

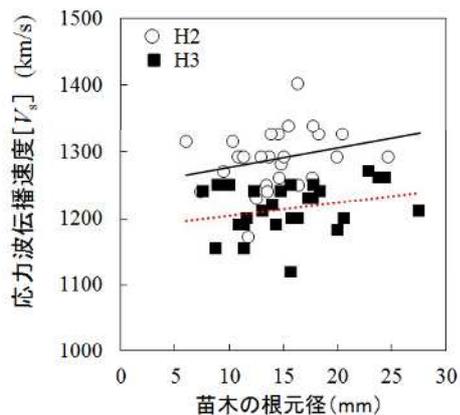


図-11 苗木根径と苗木樹幹の応力波伝播速度の関係

元径と V_d の関係を示す。両系統ともいずれにおいても有意な関係ではなかった。これにより成長の良否がこの段階では影響していないことがわかる。

この 2 クローンの 25 年生時のヤング率は、H2 が 8.8 kN/mm^2 、H3 が 6.7 kN/mm^2 であること (豊嶋ら 1998) が報告されている。また、山下ら (2002) は 18 種のスギ品種のマイクロフィブリルアングル (以下 MFA) の変動パターンを調べた結果、どの品種も、成熟期にかけて狭くなることを報告している。MFA の減少はヤング率の上昇に関係していることから、どのスギ品種も樹幹の外側に向かいヤング率が向上することを示している。H2 と H3 では 3 年生時の未成熟期で既に V_d に明確な差が示されたことから、苗木の応力波伝播速度を測定することで将来的にヤング率の高い品種を選別できる可能性が示された。今後実施されるエリートツリーの選抜において、材の剛性が地域の固有種と同程度以上であることが条件とされている。この場合、本研究の H2 の応力波伝播速度データを目安とすることができる。

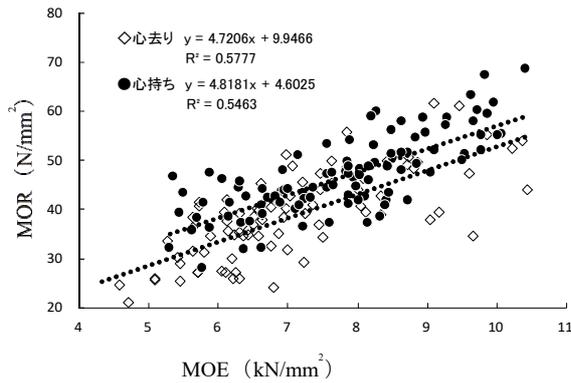
3. 心去り平角材の曲げ性能評価

表-2 に試験体の各種測定値の平均値及び MOR

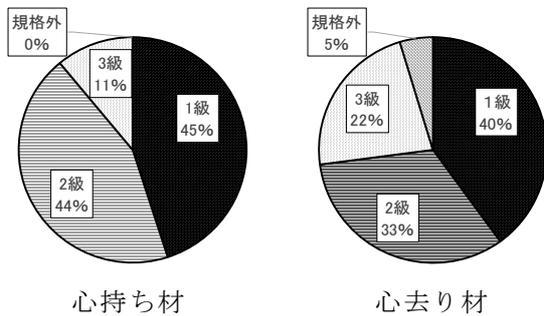
表一 各試験材区分の平均MOEと平均MOR及びTL_{0.75,0.95}

| 試験材 | 樹齢 (年生) | 試験体数 (n) | 平均 全乾比重 | 平均MOE (kN/mm ²) | 平均MOR (N/mm ²) | TL _{0.75,0.95} (N/mm ²) |
|------|------------|-------------|------------|--------------------------------|-------------------------------|---|
| 心去り材 | 85 | 51 | 0.32 | 7.6 | 41.6 | 24.2 |
| | 60 | 34 | 0.31 | 6.1 | 33.7 | 23.4 |
| 心持ち材 | 60 | 100 | 0.34 | 8.1 | 49.9 | 32.8 |

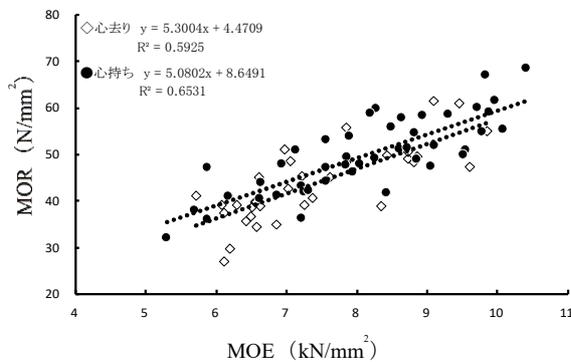
MOE: 曲げヤング率は含水率15%における値に補正
MOR: 曲げ破壊強度は含水率15%における値に補正



図一 12 心去り材と心持ち材のMOEとMORの関係



図一 13 目視等級区分の割合



図一 14 平角材1級のMOEとMORの関係

の75%信頼水準の95%下側許容限界 (TL_{0.75,0.95}) を示す。なお、TL_{0.75,0.95}は正規分布を想定した。TL_{0.75,0.95}はすべての試験区分で平成12年国土交通省告示1452号におけるスギ無等級材の基準強度である22.2 N/mm²を上回った。平均値の比較で心持ち材と比べ心去り材は、MOE、MORのいずれも低い値を示し、両者のMOEとMORの関係式 (図一12) には統計的に差がみられた (切片p<0.01、共分散分析)。これは、今回使用した心去り材は心持ち材より欠点が多いためであると考えられた。目視等級区分の割合を図一13に示す。心去り材では特に3等級材の割合が多かった。また、貫通節や流れ節が多くみられ、節周りの繊維の乱れや目切れ、死節による断面の減少などが曲げ強度に影響したと思われる。

そこで、両者の曲げ性能評価を等しく行うため、目視等級1級のみを試験材を取り出し、節の影響を最小限とした。そのMOEとMORの関係を図一14に示す。この場合、MOEとMORの関係は心去り材と心持ち材間で有意な差はなかった (傾きp=0.8、切片p=0.03、共分散分析)。なお、すべての目視等級1級の試験体のMORは国交省告示における目視等級1級材の基準強度である27.0 N/mm²を上回っていた。

以上から、心去り材の平角について、一応の強度があることが確認できた。ただし、使用に際しては節等の状況に留意する必要があると考えられた。

【引用文献】

- 愛知県産材利用の手引き作成検討委員会（2017）
愛知県産材利用の手引き.
- 飯島泰男・園田里美・青井秀樹（2011）構造用木材の強度評価法および基準値算出法.（構造用木材の強度試験マニュアル. 公益財団法人日本住宅・木材技術センター）
- 池田潔彦・有馬孝禮（2000）応力波伝播速度による立木材質の評価と適用（第2報）. 木材学会誌46：189-196
- 桐林真人（2015）県産スギ材の材質及び強度に優れた品種の選抜. 鳥取県林業試験場平成26年度業務報告：21-22
- 桐林真人・藤本高明（2017）応力波伝搬時間計測によるスギ葉枯らしの乾燥行程の観察. 木材工業72：95-98
- 国土交通省（2000）告示第1452号
- 宮下久哉・織田春紀・半田孝俊（2009）若齢時におけるスギクローンの材質評価. 木材学会誌55：136-145
- 名波直道・中村昇・有馬孝禮・大熊幹章（1992）
応力波による立木の材質測定（第1報）—測定方法と応力波の伝播経路—. 木材学会誌38：739-756
- 農林水産省（2007）告示第1083号
- 豊嶋勲・浅岡郁雄・近藤和幸・大林育志・池田敦・柳田浩二・原田直勝・仲田健夫（1998）
精英樹の強度等特性に関する研究. 愛知県森林セ報35：7-14
- 豊嶋勲（2017）県産スギ材の性能評価に関する研究. 愛知県森林セ報54：15-23
- 山下香菜・平川泰彦・藤澤義武・中田了五（2000）
スギ18品種の丸太ヤング率に及ぼすマイクロフィブリル傾角と密度の影響. 木材学会誌46：510-522