

# スギ大径材の利用に関する研究

2012 年度～2014 年度

鈴木祥仁・大林育志\*

## 要 旨

スギ大径材の利用拡大を図ることを目的に、材質及び加工・乾燥・強度特性を調査した。胸高直径 40cm 以上のスギの高さ別の材質を調査したところ、容積密度は髓から約 15 年輪までが高く未成熟材の特徴を示し、その外側は根元部を除きほぼ一定の密度であった。生材の含水率は材中心部及び辺材部で高く、心材の含水率は根元部で高かった。平角 2 本取りの心去り製材をしたところ、心去り材は木表方向に曲がったが、中心を挽いてから製材した心去り材は心持ち材と同程度の曲がりであった。平角材の乾燥で半数が含水率 20%を下回るまでの期間は、中温人工乾燥が約 20 日、天然乾燥が約 240 日で、人工乾燥では密度の低い心去り材の乾燥が速かった。心去り材の表面割れは心持ち材と比較して長さ、幅ともに小さくなったが、人工乾燥が天然乾燥よりも表面割れ抑制に効果があった。心去り材の曲げ強度は心持ち材と差は認められず、めり込み強度は密度と関係し低い傾向があった。合わせ梁として、幅広のラミナの積層面を荷重方向と平行にした集成材の曲げ性能は、集成材の日本農林規格を満たした。

## I はじめに

愛知県内の森林資源は成熟期を迎え、人工林蓄積は年々増加している。人工林面積の 38%を占めるスギ林では 51 年から 55 年の蓄積が最大となっており（愛知県 2014）、今後も生産される木材の大径化が進むことが予想される。木材の大径化は、大断面の梁桁材など従来よりも多様な製材品が得られる可能性がある一方で、心去り製材した場合の製材・乾燥などの加工工程や、強度に与える影響について明らかになっていない点がある。大径材からは幅広の板が製材できるが、これをラミナとして幅方向に積層・接着した平角集成材は、従来の平角集成材と比べて、製造工程が少なく意匠性に優れている。

本研究では、スギ大径材の材質特性を明らかにするとともに、大径材を心去り製材した場合の、製材及び乾燥工程における特性や品質について調査した。また、合わせ梁として、幅広のラミナを

荷重方向が積層面と平行になるよう接着した平角集成材を製作し、強度特性を調べた。

## II 材料と方法

### 1. 材質特性の解明

森林・林業技術センター試験林（新城市上吉田）の林齢約 55 年のスギ人工林から、胸高直径 40cm 以上のスギ立木を 12 本選び、2012 年 11, 12 月に 6 本を、2013 年 5, 6 月に 6 本をそれぞれ伐採した（表 - 1）。伐採高さは 0.2m とし、伐倒後長さ 4.2m に造材し、樹高を測定した。原木の元口から厚さ 10cm の円盤試料を採取し、円盤の上面で長径及びその直角方向の 4 方向で年輪幅を測定後、短径の放射方向を長さとする接線方向 30mm、繊維方向 20mm の試験体を 2 体調製した。1 体は心材、移行材、辺材別に、別の 1 体は 5 年毎に分割し質量測定後、全乾法により含水率を求めた。質量測定までの作業は基本的に立木 1 本ごとに伐採当日中

Yoshihito SUZUKI, Yasuyuki, Yasuyuki OHBAYASHI: Development and utilization of large Sugi (*Cryptomeria japonica*) wood

\* 2014 年 3 月退職

表-1 試験材料の概要

立木	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	原木数	うち心去り	伐採時期 乾燥方法
1	48.0	-	5	2	
2	40.0	25.7	5	2	
3	41.7	28.9	5	2	2012/11, 12 人工乾燥
4	42.7	30.0	5	2	
5	46.0	30.4	6	2	
6	43.1	31.1	6	2	
7	40.5	31.3	6	2	
8	41.6	30.5	6*	2	
9	41.6	-	6	2	2013/5, 6 天然乾燥
10	53.2	30.9	6	3	
11	44.9	27.3	5	2	
12	40.5	-	5	2	

-: 未測定, \*: 5番玉 3m材

に行い、生立木の含水率との差を少なくなるようにした。5年毎の試験体は浮力法により体積を求めたのち全乾し、含水率及び容積密度を求めた。高含水率域における水分量の指標として、容積密度から材組織の占める割合を求め、材組織以外の部分を水が占める割合を水分飽和率として算出した。

円盤採取後の原木は、製材前に質量を測定し、縦振動法により原木の縦振動ヤング係数 ( $E_{fr}$ ) を求めた。原木質量は容量 200kgf のロードセル 4 個の上に鋼板を置き、データロガー (株式会社東京測器研究所, TDS-302) で計測し、固有振動数は FFT アナライザ (リオン株式会社, SA-77) を使用し 5Hz 単位で測定した。原木の細りとして、末口径の元口径との差を長さで除した値を細り率として求めた。なお、1 番玉は根元付近の細りが大きいため、元口径から 0.2-0.8m 間隔で長径、短径を測定し、区間ごとの細り率を求めた。材積は断面を

楕円とする欠頂円錐として算出し、質量と材積から生材密度を求めた。

## 2. 加工特性及び強度性能の調査

### (1) 製材特性の調査

試験林から採取した原木は、伐採後約 2 か月後に製材を行った。末口径が概ね 30cm 以上の原木を心去りで、残りを心持ちで正角 (仕上がり寸法 120 mm) 及び平角 (同 120mm×150, 180, 210, 240 mm) に製材した。製材時の余裕寸法は 2012 年材では 10-14mm、2013 年材では仕上げ残しを少なくするため 12-15mm とした。心去り製材の木取りは原木の片面を中心定規、反対面を側面定規とし、2012 年材では側面定規を、2013 年材では中心定規を先に製材した (図-1)。

製材後の材は電子天秤で質量を、ノギス又は曲尺で幅を測定し生材密度を求め、縦振動法により固有振動数を測定し生材  $E_{fr}$  を求めた。製材後の曲がり、平角の広い面の曲がり (Bow) と狭い面の曲がり (Crook) に分け、Bow は樹皮側を正、Crook は元口径から見て時計方向を正とし、材長における矢高を測定した。

### (2) 乾燥特性の調査

2012 年材の製材は中温人工乾燥を行い、乾燥特性を調査した。蒸気式木材乾燥装置 (株式会社新柴設備, SKD-15LPD) を使用し、目標含水率を 20% とし、乾球温度 60°C、乾湿球温度差 3°C から乾燥を始め、最終的に乾球温度 73°C、乾湿球温度差 15°C とした。21 日間の乾燥後に一旦取出し重量を測定後、推定含水率が 20%以上と見込まれる材

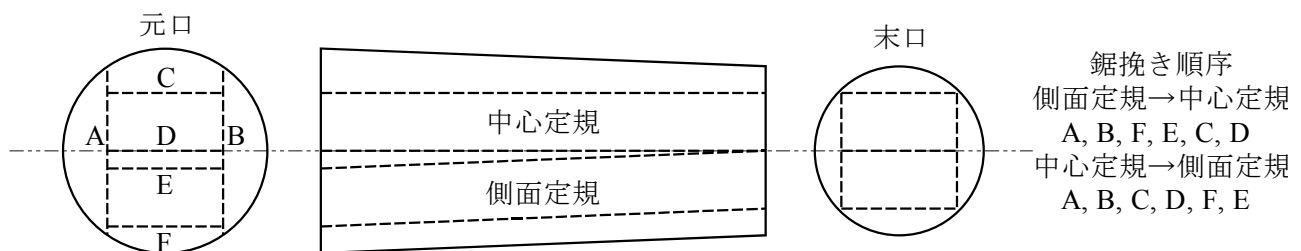


図-1 製材時の木取り

について 7.5 日間追加の乾燥を行った (表- 2)。乾燥終了後、重量、及び曲がり を測定した。人工乾燥後 6 か月屋内で養生を行い、モルダーで規定寸法に仕上げ、表面割れを測定した。乾燥過程における含水率は、強度試験後に全乾法で求めた含水率をもとに各時点の重量から算出した。乾燥速度は含水率の対数の日当たりの減少量として求め、日当たり含水率乗率に変換した。

2013 年材の製材は天然乾燥特性を調査した。天然乾燥は、当初 1 か月は通風のある屋内で、その後は屋根付きの屋外に置き、約 1 週間おきから乾燥後期では 2 か月おきに重量を計測し、栈積みの上下を入れ替えた。乾燥開始から 15 か月後、曲がりの測定を行い、モルダーで規定寸法に仕上げ表面割れを測定した。

### (3) 強度性能の評価

2012 年材および 2013 年材の製材を乾燥、表面仕上げ後、縦振動法により製材  $E_{fr}$  を測定し、「構造用木材の強度試験マニュアル」(財団法人日本住宅・木材技術センター, 2011) に従い曲げ性能の測定を行った。実大強度試験機 (株式会社島津製作所, UH-G1000kNIR) を使用し、3 等分点 4 点荷重

法でスパンを材せいの 18 倍としたが、材せいが 210mm を超える試験体は、210mm と同じスパンとした。載荷速度 20mm/min で試験体が破壊するまで荷重を加え、荷重及びスパン中央のたわみを変位計を接続したデータロガー (株式会社東京測器研究所, TDS-601A) により 1 秒間隔で測定した。試験時の質量から密度を求め、寺澤 (1994) に従い含水率 15%の密度に換算した。最大荷重から曲げ強さ  $f_m$  を、最大荷重の 10%から 40%までの荷重及びたわみの増分から曲げヤング係数  $E_m$  を算出した。 $E_m$  及び  $f_m$  は飯島ら (2011) に従い試験体の寸法及び荷重条件により調整後、次の式で含水率 15%のときの値に調整した。

$$P_2 = P_1 \frac{\alpha - \beta M_2}{\alpha - \beta M_1}$$

$P_1, P_2$ : 含水率  $M_1, M_2$  における特性値の測定値

$M_1, M_2$ : 含水率 (%)

$\alpha, \beta$ : 含水率定数

ヤング係数 :  $\alpha=1.44, \beta=0.0200$

曲げ強さ :  $\alpha=1.75, \beta=0.0333$

曲げ性能試験に使用した試験体から、損傷のなかった端部を切り出し、めり込み性能の試験を行った。試験体の長さは材せいの 6 倍又は約 1000mm とした。実大強度試験機を使用し、試験体の中央に長さ 90mm の鋼製加圧板を置き、毎分 10mm の速度でヘッド移動量が約 25mm に達するまで加圧した。荷重が上昇を始めた点を原点としたヘッド移動量から変形量を求め、変形量 20mm における荷重からめりこみ強さ  $f_{c,90}$  を算出した。また、荷重変形曲線とその直線部分を変形増加方向に 2mm 移動した直線との交点における荷重からめりこみ降伏強さ  $f_{c,90,y}$  を、荷重変形曲線の直線部分の傾きからめりこみ剛性  $K_{c,90}$  を算出した。

強度特性値について一般化線形モデル (GLM) を作成し、赤池情報量基準 (AIC) によるモデル選択で評価した。 $E_m, f_m, f_{c,90}$  及び  $f_{c,90,y}$  をそれぞれ目的変数とし、説明変数として密度、 $E_{fr}$ 、番玉、

表- 2 人工乾燥スケジュール

	乾球温度 (°C)	乾湿球差 (°C)	時間	備考
当初乾燥	70	0	12	昇温, 蒸煮
	60	3	72	
	61	4	72	
	63	6	72	
	65	8	72	
	67	10	72	
	69	12	72	
	70	13	72	
	-	-	36	放冷
	計			504
追加乾燥	70	0	2	昇温
	70	13	36	
	71	14	72	
	73	15	72	
	-	-	36	放冷
計			180	乾燥時間

製材区分等を用いた。目的変数の分布は正規分布を仮定した。

### 3. 利用法の開発

幅広のラミナを使用し、合わせ梁として積層面と平行方向に曲げ荷重がかかる平角集成材を作成した。集成材の幅方向積層数は一般的なラミナ厚 30mm の 4 層、及びより薄いラミナ厚 24mm の 5 層とした。積層数 4 の集成材は森林・林業技術センター構内で 2010 年 12 月に伐採し、製材・天然乾燥したスギ板を、積層数 5 の集成材は 2012 年材製材時の側板を天然乾燥したものを材料とした。ラミナは表面仕上げ後、縦振動法により測定した  $E_{fr}$  に従い、ラミナを等級区分した。平角の断面は幅 120mm、高さ 150–300mm とし、基本的に高さと同じ幅のラミナの同一等級構成としたが、一部は異等級構成とした。また、歩留りの向上を目的に、幅はぎラミナを積層数 4 では第 2, 3 層に、積層数 5 では第 2, 4 層に使用した集成材も製作した

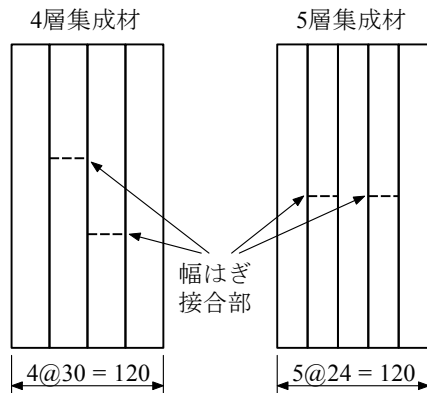


図-2 集成材の構成

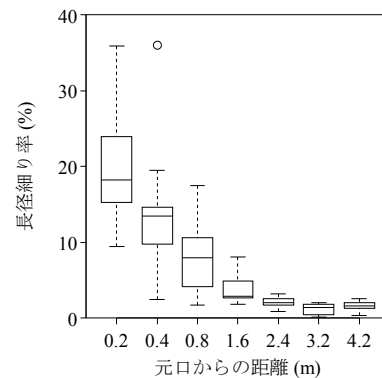
(図-2)。なお、幅はぎの接着は行わなかった。接着はレゾルシノール接着剤を  $250\text{g/m}^2$  塗布し、コールドプレス (株式会社セイブ CP400×4700) を使用し、 $600\text{kPa}$  の圧力で 20 時間以上圧縮した。表面仕上げ後、縦振動法により製材  $E_{fr}$  を測定し、曲げ性能の測定を前述の方法で行った。 $f_m$  及び  $E_m$  は飯島ら (2011) に従い、JAS に定める荷重条件と実験条件との調整を行った。

すべての統計解析は R version 3.0.2 (R Core Team 2013) を使用した。

## III 結果

### 1. 材質特性の解明

試験林の伐採した立木は胸高直径 40.0–53.2cm、樹高 25.7–31.3m で、4.2m の原木が 5–6 本採材できた。原木の細り率は 2 番玉が最も小さく 1%未



箱内の横線は中央値、上下の辺は第 3・第 1 四分位数、縦線は最大・最小値間の範囲、個別点は外れ値を示す

図-3 1 番玉の細り率

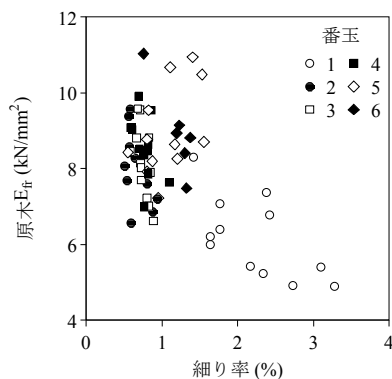


図-4 原木の細り率と  $E_{fr}$

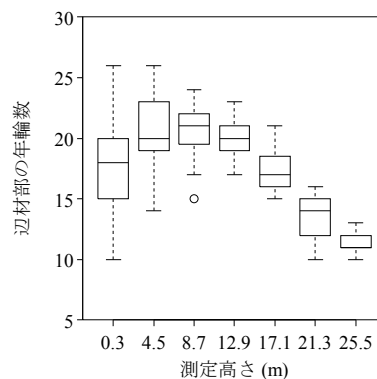
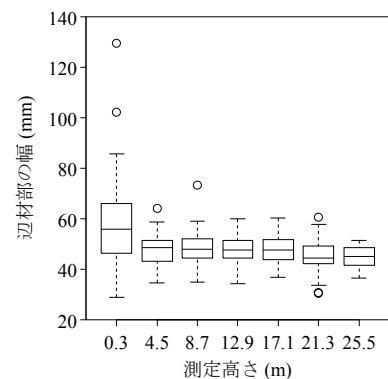


図-5 辺材部の年輪数及び幅



満で、上の番玉ほど増加する傾向であったが、1番玉は顕著に大きく約1.5–3%であった。1番玉の区間ごとの細り率は、元口から0–200mmで最も大きく平均9%で、長径の細り率では平均20%とより大きかった。元口から2400mm以上では細り率は0.8%、長径の細り率は1.2%となり、他の番玉と同程度になった (t-test,  $p > 0.1$ ) (図-3)。原木の縦振動ヤング係数  $E_{fr}$  は1番玉が他の番玉と比較して顕著に小さく (Tukey,  $p \leq 0.001$ )、2番玉と比較して23%小さかった。原木の細り率と  $E_{fr}$  の関係では、1番玉で細り率が大きくなると  $E_{fr}$  が小さくなる関係が認められた (adjusted  $R^2 = 0.361$ ) (図-4)。

年輪数を心材と辺材に区分した結果、辺材の年輪数は根元 ( $H = 0.3m$ ) から4番玉元口 ( $H = 12.9m$ ) までは約20年であったが、それ以上の高さでは年輪数が減少し、早い年数で心材化する傾向が認め

られた (図-5)。一方、辺材幅は根元を除き高さに関わらず約45–50mmであった。なお、根元では根張りに相当する辺材の年輪幅が広く、辺材幅が広がった。

伐採直後の含水率は辺材部で200%以上、中心付近の1–5年輪部で高く約150%であった。水分飽和率は辺材部でほぼ100%と飽和に近かったほか、1–5年輪部で約60–80%であった (図-6)。水分飽和率は辺材の内側の移行材部で小さくなるも

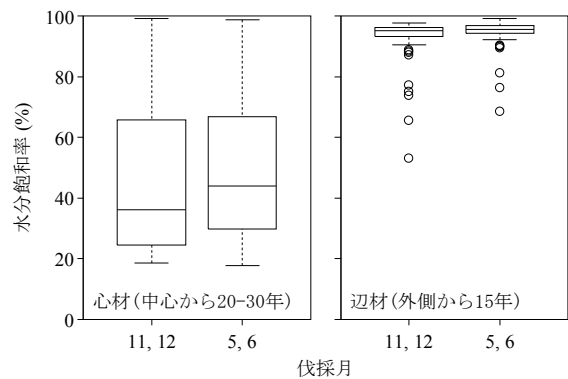


図-7 時期別の水分飽和率 ( $H = 4.4-12.8m$ )

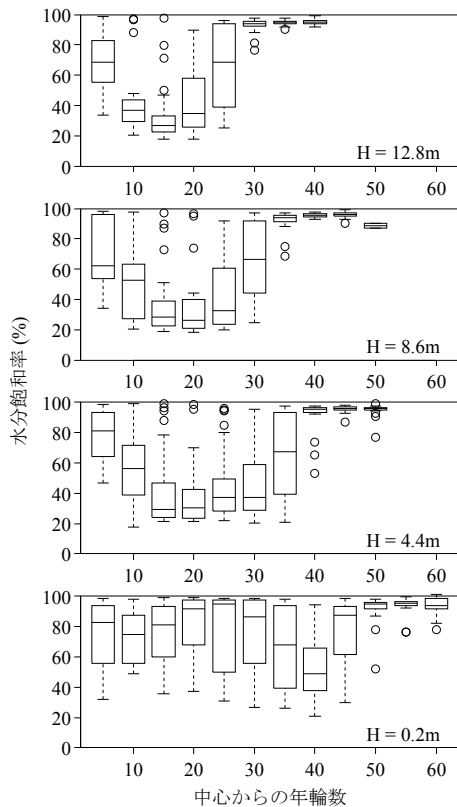


図-6 部位別の水分飽和度

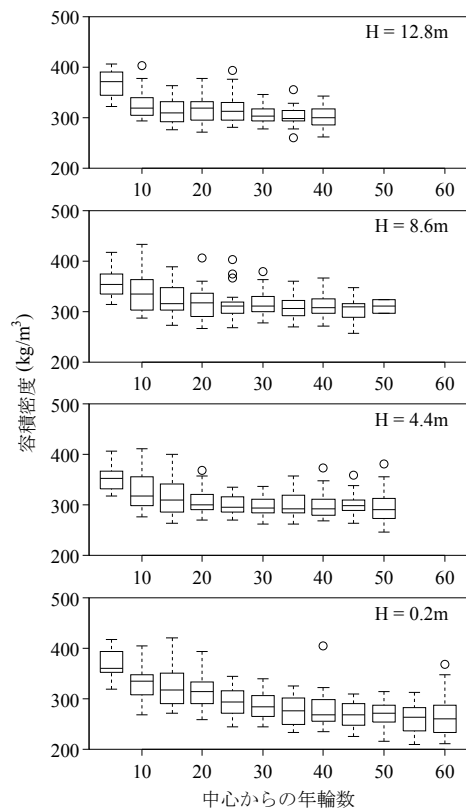


図-8 部位別の容積密度

の、さらに内側の心材部では立木別、高さ別に水分飽和率に差が認められた。高さ別では根元部が上部と比較して特に高かった。立木別では目視で黒心材に区分されたものの水分飽和率が高かった。心材部及び辺材部の水分飽和率は初冬と初夏との伐採時期による有意差は認められなかった(図-7)。

容積密度は中心付近の1-5年輪部で最も高く外側ほど減少し、根元部以外は15-20年より外側では差が認められなかった。根元部は20年より外側においても密度の減少が認められ、31年より外側では上部の同じ年輪部より有意に小さかった(図-8)。

## 2. 加工特性及び強度性能の調査

### (1) 製材特性の調査

製材の結果、1、2番玉はすべて心去り製材を行い、3番玉の1本で心去り製材が可能であった。製材後の生材密度は2番玉に比べて1番玉が大き

い傾向があった(Tukey,  $p = 0.079$ ) (図-9)。

製材後の曲がり、心去り材で樹皮側に矢高が生じる曲がり(Bow)が認められ、矢高が心持ち材の平均2.8mmと比較して6.2mmと2倍以上大きかった(Tukey,  $p \leq 0.001$ ) (図-10)。心去りのうち中心定規と側面定規との差は認められなかったが、心去り材で先に製材した1番は2番と比較してBowが大きく(Tukey,  $p \leq 0.001$ )、製材順2番のBowは心持ち材と比較して有意な差はな

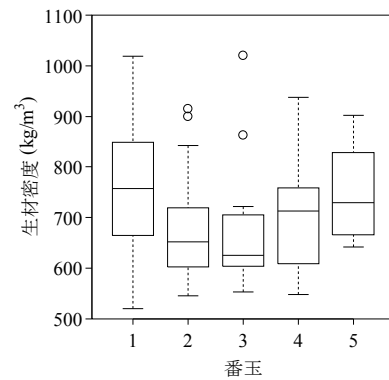


図-9 製材後の生材密度

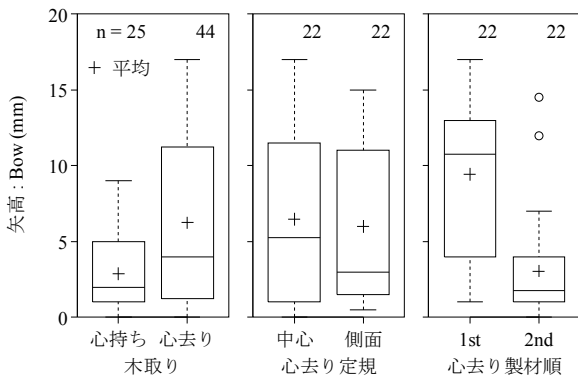


図-10 平角製材後の曲がり : Bow

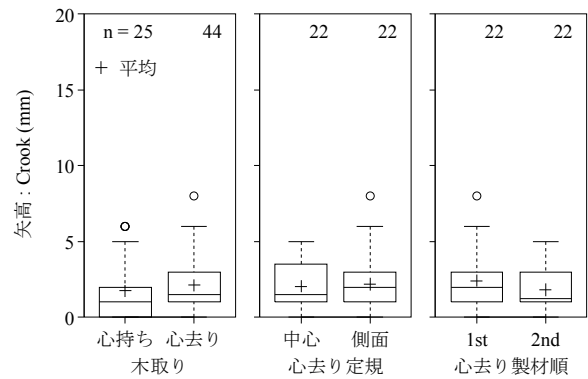


図-11 平角製材後の曲がり : Crook

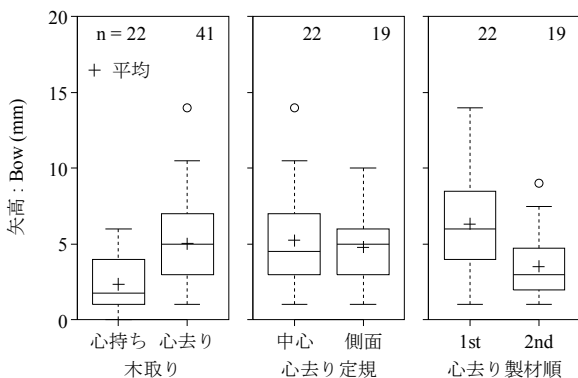


図-12 平角乾燥後の曲がり : Bow

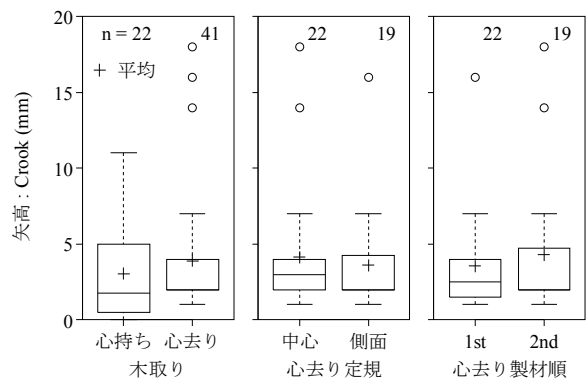


図-13 平角乾燥後の曲がり : Crook

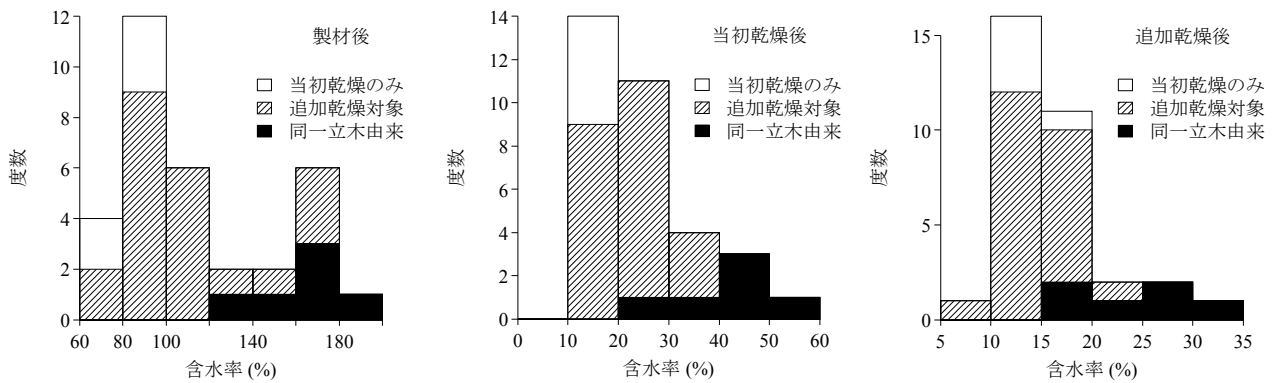


図-14 人工乾燥平角の各段階における含水率頻度分布

かった。Crookは多くが3mm以下と小さく、心去り材と心持ち材との差は認められなかった(図-11)。乾燥後のBowは心去り材が平均5.0mmと乾燥前より小さくなったが、心持ち材より大きかった。また、心去り材製材順1番のBowは乾燥後も2番より大きかった(図-12)。乾燥後のCrookは一部で大きな曲がり角が認められたが、多くは5mm未満と小さかった(図-13)。Bow及びCrookともに乾燥前と乾燥後との間に有意な相関が認められ、

特にBowの相関が強かった( $\text{adjusted } R^2 = 0.541$ )。

## (2) 乾燥特性の調査

人工乾燥では21日間の乾燥後に平角の半数弱が含水率20%を下回った。追加の8日間の乾燥後に平角の85%が含水率20%未満になり、20%を大きく超えたのは同じ立木由来の材であった(図-14)。その後、屋内養生4か月後にはほとんどが20%以下の含水率になった。乾燥速度は平角が平角より大きかったが、平角の材せいによる差は認

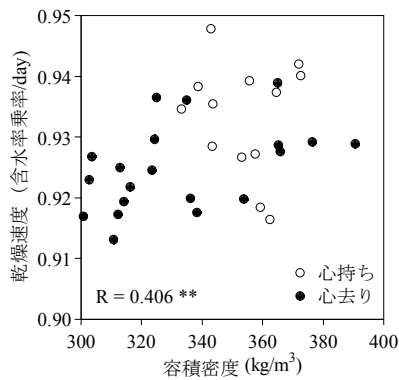


図-15 容積密度と乾燥速度(当初乾燥)

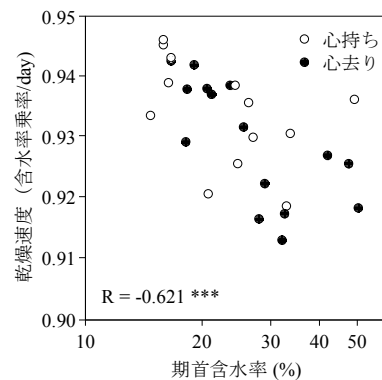


図-16 期首含水率と乾燥速度(追加乾燥)

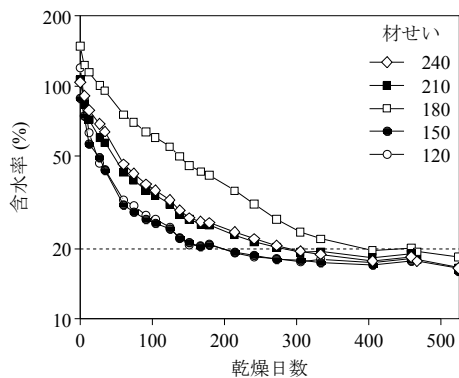


図-17 天然乾燥における含水率中央値経過

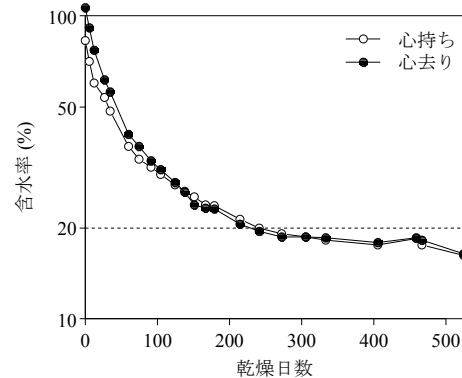


図-18 平角の含水率中央値経過

められなかった (Tukey,  $p > 0.1$ )。当初乾燥では、乾燥速度は容積密度との負の相関が認められ ( $R = -0.406$ )、心去り材の乾燥速度が心持ち材より有意に大きかった (Tukey,  $p \leq 0.001$ ) (図- 15)。追加乾燥では、乾燥速度は乾燥前の期首含水率との相関が認められ ( $R = 0.621$ )、心去り材と心持ち材との乾燥速度の差はなかった (Tukey,  $p > 0.1$ ) (図- 16)。

天然乾燥では、半数が含水率 20%を下回ったのは、正角は乾燥開始 198 日後、平角は 234 日後であったと推定された (図- 17)。正角は乾燥開始 303 日後に全数が含水率 20%以下になったが、平角の全数が含水率 20%以下になったのは、乾燥開始 15 か月後に表面仕上げし、屋内保管を開始した以降であった。乾燥速度は乾燥開始 12 日後、60 日後の時点で変化が認められ、乾燥開始後 12 日までが最大であった。平角の乾燥速度の心去り材と心持ち材との差は 12-60 日後の期間のみで差が認

められ (Tukey,  $p \leq 0.01$ )、心去り材が大きくなった (図- 18)。生材含水率の高かった 1 本の立木由来の製材は乾燥初期の 12 日後まで他より乾燥速度が小さく、124 日後以降は逆に乾燥速度が大きくなる傾向が認められた。

表面仕上げ後の表面割れは心持ち製材となる 3 番玉以降が長さ、最大幅ともに大きかった (図- 19)。また、人工乾燥材は天然乾燥材よりも表面割れの長さ、最大幅が小さく、心去りの人工乾燥材では表面割れは非常に小さかった (図- 20)。心去り材の表面割れは、木裏面の髓に沿って発生するものが多かったが、幅は小さかった。一部では、表面割れは木表面中央にも認められ、天然乾燥材では人工乾燥材より長さ、幅ともに大きかった。

### (3) 強度性能の評価

試験時の含水率は人工乾燥の 2012 年材は 12.0%、天然乾燥の 2013 年材は 16.5%であった。3 番玉の心持ち材 1 本において曲げ試験中に荷重点間の外

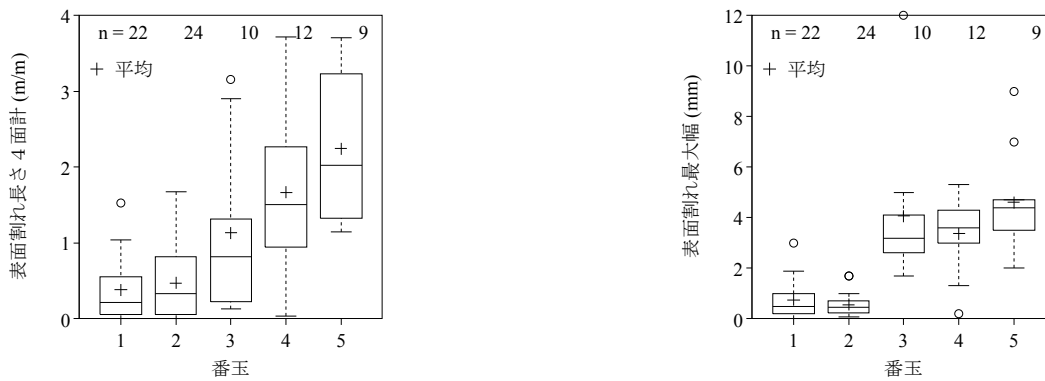


図- 19 表面仕上げ後の表面割れ：番玉別

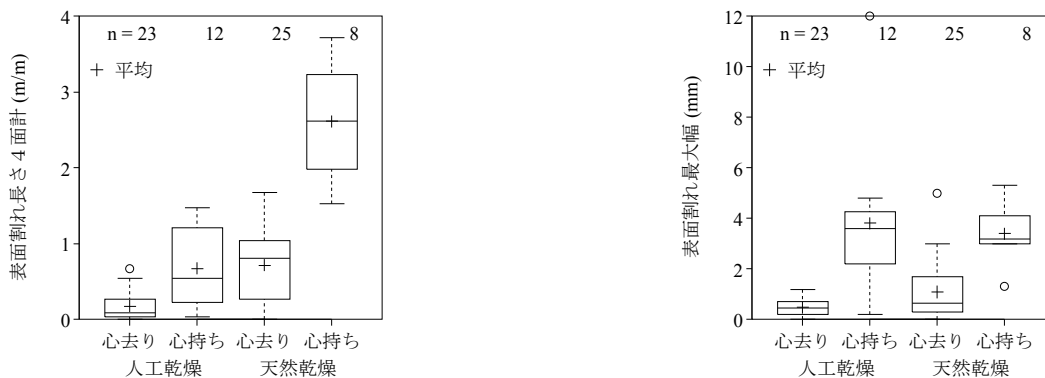


図- 20 表面仕上げ後の表面割れ (4 番玉以下)：製材・乾燥区分別



で折れ、曲げ強さ  $f_m$  が著しく低かったものが認められた。これは、折損部を巻き込んだものとみられ、解析対象から除外した。

製材  $E_{fr}$  と原木  $E_{fr}$  との関係は、特に 1 番玉において違いが認められ、1 番玉と 2-4 番玉とを区別した場合に回帰直線の決定係数が大きくなった (図-21)。1 番玉は製材  $E_{fr}$  が原木  $E_{fr}$  より約 1.3Gpa 大きかったのに対し (t-test,  $p \leq 0.001$ )、2 番玉では差がなく ( $p > 0.05$ )、3-4 番玉では製材  $E_{fr}$  が原木  $E_{fr}$  より約 0.5Gpa 小さかった ( $p \leq 0.01$ )。製材  $E_{fr}$  は乾燥前の生材  $E_{fr}$  に対して約 10%大きくなり、両者に非常に強い相関が認められた (adjusted  $R^2 = 0.948$ ) (図-22)。製材方法の違いによる製材  $E_{fr}$  への影響は認められなかった。曲げヤング係数  $E_m$  は製材  $E_{fr}$  と強い相関が認められた (adjusted  $R^2 = 0.811$ ) (図-23)。 $E_m$  を目的変数とする GLM のモデル選択の結果、 $E_{fr}$  のほかに  $E_m$  に影響を及ぼす

要因として、密度は負の効果、番玉順は正の効果 が認められた。

$f_m$  は  $E_m$  と相関が認められたものの、相関の度合いは弱かった (adjusted  $R^2 = 0.114$ )。 $f_m$  を目的変数とする GLM のモデル選択の結果、 $E_m$  のほかに番玉順に負の効果 が認められた。また、心去り材の  $f_m$  についてモデル選択の結果、製材方法の効果が認められ、中心定規挽きは側面定規より  $f_m$  が約 4N/mm<sup>2</sup>大きかった (図-24)。

$E_m$  により製材 JAS の機械等級区分に従って等級区分したところ、ほとんどの材が E70 又は E90 に区分された。告示で定められた JAS 機械等級区分別の基準強度と比較すると、E50 の 1 本、E110 の 3 本はすべて上回ったが、E70 は 42 本中 1 本、E90 は 37 本中 6 本が基準強度を下回った (図-25)。基準強度を下回ったものは 1 番玉以外のすべての番玉で認められた。

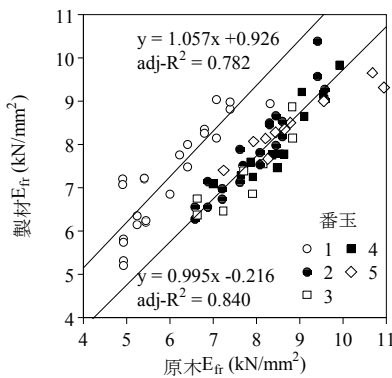


図-21 原木  $E_{fr}$  と製材  $E_{fr}$

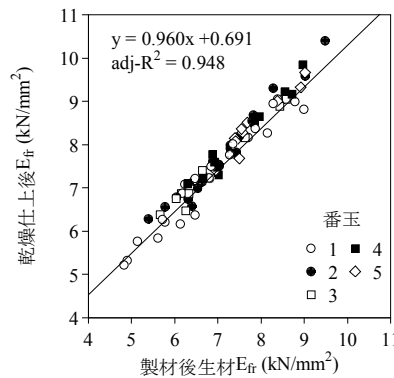


図-22 生材  $E_{fr}$  と製材  $E_{fr}$

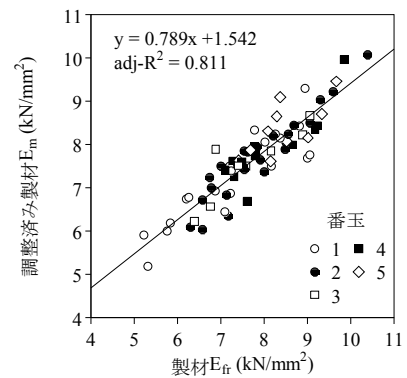


図-23  $E_{fr}$  と曲げヤング係数  $E_m$

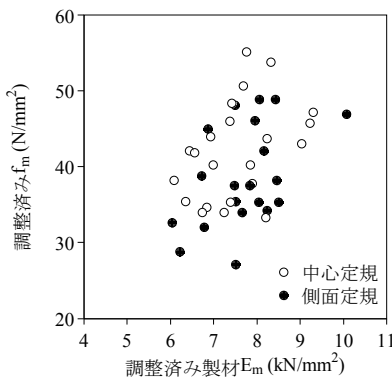


図-24 定規別曲げ強さ  $f_m$

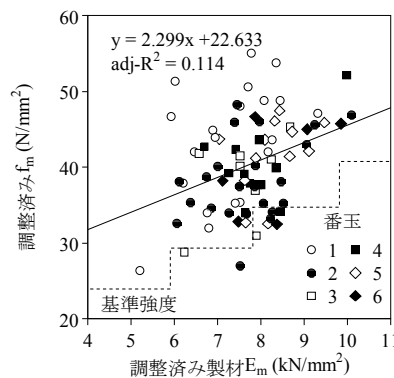


図-25  $E_m$  と曲げ強さ  $f_m$

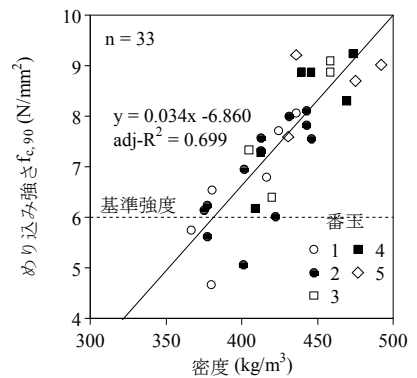


図-26 密度とめり込み強さ

材中間部のめり込み性能の試験において、すべての試験体が 20mm の変形まで破壊が生じなかった。めり込み強さ  $f_{c,90}$  の平均は  $7.5\text{N/mm}^2$  で、既往の事例（山裾・岸本，2013）と同程度であった。また、密度が大きいほど大きくなる相関を示した（adjusted  $R^2 = 0.699$ ）（図- 26）。国土交通省告示で定められた基準強度を下回った試験体は 33 本中 4 本で、すべて 1,2 番玉の心去り材であった。めり込み降伏強さ  $f_{c,90,y}$ 、めり込み剛性  $K_{c,90}$  も密度との相関が認められたが、 $f_{c,90}$  より弱かった。 $f_{c,90}$ 、 $f_{c,90,y}$  それぞれを目的変数とする GLM のモデル選択の結果、 $f_{c,90}$ 、 $f_{c,90,y}$  は密度のほかに特定の立木に有意な効果が認められた。

### 3. 利用法の開発

集成材の  $E_{fr}$  は構成するラミナ断面面積による  $E_{fr}$  の加重平均と非常に強い相関を示した（図- 27）。調整済み曲げヤング係数（ $E_{m-adj}$ ）は  $E_{fr}$  の約 96% の値を示し、 $E_{fr}$  と強い相関が認められた（図- 28）。全木ラミナを使用した積層数 4 の集成材は、側板を使用した積層数 5 の集成材より密度が大きく、 $E_{fr}$ 、 $E_{m-adj}$  が低い傾向にあった。同一等級構成集成材の  $E_{m-adj}$  は、集成材 JAS に定める曲げヤング係数下限値及び平均値を上回り、調整済み曲げ強さ（ $f_{m-adj}$ ）は集成材 JAS に定める曲げ強さ下限値を上回った（図- 29）。異等級構成の  $E_{m-adj}$  及び  $f_{m-adj}$  においても、ラミナ  $E_{fr}$  の加重平均をラミナ等級と

仮定して区分した同一等級構成集成材の前記基準値を満たした。幅はぎラミナの有無による  $E_{m-adj}$  及び  $f_{m-adj}$  の差は認められなかった。

## IV 考察

### 1. 材質特性の解明

原木の形状で 1 番玉の細り率が他の番玉と比較して大きかったことは、根元付近の径が特に大きいためであり、この傾向は大径になるほど顕著になると考えられた。1 番玉の元口付近では、中心定規で製材した場合、製材 JAS の目視等級区分構造用製材 1 級の繊維走向の傾斜比 1/12 を超える部位があることが推定できた。1 番玉の原木の縦振動ヤング係数が 2 番玉以上と比較して小さかったことはスギ材について繰り返し指摘されている（小泉ら 1997）が、23%の低下は小泉ら（1997）の 5-10%、椎葉ら（2011）の 19%と比較して大きかった。1 番玉は細り率が大きくなると  $E_{fr}$  が低下する関係が認められたが、 $E_{fr}$  に影響を及ぼす要因と機構について明らかにしていく必要があると考えられる。

辺材幅が高さに関係なかったことは、大径になるほど心材率が高くなることを示唆し、直径 50cm における心材率は 65%程度で、製材ではさらに高くなると試算される（図- 30）。スギの心材は一般的に耐腐朽性能が高いとされており、大径材は材質の安定した成熟材が心材化していくため、より

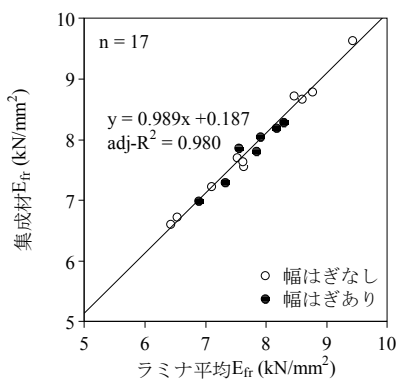


図- 27 ラミナ平均  $E_{fr}$  と集成材  $E_{fr}$

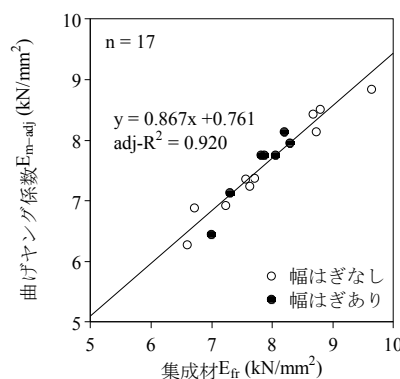


図- 28  $E_{fr}$  と曲げヤング係数

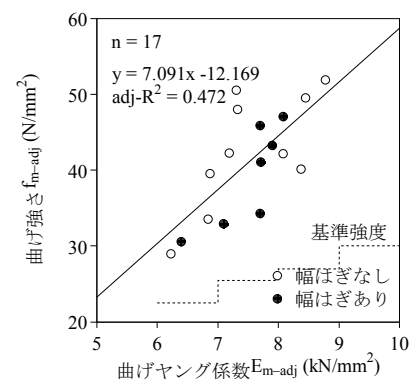


図- 29 曲げヤング係数と曲げ強さ

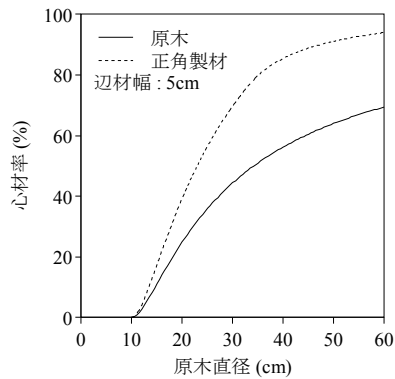


図-30 心材率の推定

高価値の木材が得られることが期待できる。

辺材部及び心材部に含まれる水分量について、伐採時期による差が認められなかったことは、既報(池田 2006)と同じ結果を示し、含水率に限れば伐採時期を考慮しなくてもよいと考えられる。ただし、夏季伐採では伐採後速やかに搬出し、天然乾燥では虫害やカビの発生に注意が必要である。

容積密度が樹幹中心付近で高かったことは、スギの未成熟材の特性を示し、密度が一定となる15-20年から外側はおおよそ成熟材に相当し、材質として安定すると考えられる。しかし、高さ0.2mの根元部では成熟材部でも外側になるほど密度の低下が認められたことから、強度性能の低下が推測される。この部分は繊維傾斜も大きいことから、強度を必要としない用途への利用を考慮する必要がある。

## 2. 加工特性及び強度性能の調査

### (1) 製材特性の調査

製材後の生材密度が1番玉で大きかったことは、根元における心材部の含水率が高いことが影響していると考えられる。

心去り材の樹皮側への曲がりや、心持ち材より大きかったが、樹幹内に残留している成長応力によると考えられた。奥山ら(1975)は、繊維方向の残留応力は、樹心で圧縮応力を示し、半径上樹心から0.6-0.8のあたりで逆転し、引張応力となる、としている。したがって、心持ち材では材面の表

裏で応力が釣り合っているため曲がりやが少ない一方、心去り材では樹皮側の引張応力と髓側の圧縮応力の不均衡から樹皮側に曲がりやが生じたと考えられる。心去り材の曲がりやの矢高から曲率を求め、木表面と木裏面の長さの差から歪みの量を求めたところ、北原ら(1986)の樹皮側と髓側の歪みの差ほどは大きくなかった。これは、残留していた成長応力の一部解放によって曲がりやが生じ、残りの応力は材内に残留していることを示すと考えられた。

心去り材の製材順における曲がりやの違いについて、1番目の製材は木表側、中心側の順で鋸断したため残留応力による曲がりやが生じたのに対して、2番目は中心挽きで応力が解放された後に製材したため曲がりやが小さくなったと考えられる。したがって、心去り製材を行う場合、中心挽きしたあと両側面の鋸断を行うことで曲がりやを減少できることが示唆された。

### (2) 乾燥特性の調査

人工乾燥において当初乾燥速度が容積密度と負の相関があったことは既往の事例(寺澤 1994)と同じ傾向であった。追加乾燥で乾燥速度が期首含水率と相関があったことは、含水率が低下し減率乾燥第二段の段階であったと考えられた。天然乾燥において平衡含水率に近くなると乾燥速度が小さくなったことは、屋外保管では気象の影響を受け乾燥速度が小さくなることを示した。乾燥期間短縮のためには、乾燥後半は屋内保管又は人工乾燥を検討すべきと考えられる。心去り材の乾燥速度が人工乾燥や天然乾燥の初期で心持ち材より大きかったことは、心去り材の容積密度が心持ち材より小さかったことが原因として考えられた。人工乾燥、天然乾燥ともに生材含水率が特に高く、特定の立木由来のいわゆる黒心材が含まれていたが、他と比較して乾燥に要する時間が特に長かった。乾燥コストの面では、含水率の特に高い原木

からは大断面の製材ではなく、乾燥の容易な製材品を生産するのが望ましい。

中温人工乾燥を行った心去り材の表面割れが小さかったことから、心持ち材で行われている表面割れ抑制のための高温セット処理の必要はないことが示唆された。心去り材は高温セット処理を行うと大きな内部割れが生じることがある（小林2014）ことから、高温セット処理は避けたほうがよいと考えられる。天然乾燥では心去り材でも木表側の広い材面に表面割れが認められたことから、中温人工乾燥では弱い表面セットが形成され、割れの抑制に働いたと考えられた。

### （3）強度性能の評価

製材のヤング係数は原木のヤング係数と相関があることは一般的に認められているが、1番玉と2-4番玉とで異なる回帰が認められたことは、原木 $E_{fr}$ から製材ヤング係数の推定において、1番玉か否かを考慮する必要があることが示唆された。1番玉の製材 $E_{fr}$ が原木より大きくなった要因の一つとして、 $E_{fr}$ の低い原木外側が製材時に除去されたことが仮定として考えられたが、製材時の側板から得られたラミナの $E_{fr}$ は1番玉由来で低いものが一部あるほかは2番玉以降と大差はなかったため、主な要因ではないと判断された。したがって、前述のとおり細り率の大きい1番玉の形状が原木 $E_{fr}$ の低さに影響を与えていることが主要因であると考えられた。原木の含水率の分布状態との関係を含め今後明らかにすべき点であると考えられる。

製材 $E_{fr}$ は製材後に測定した生材 $E_{fr}$ との相関が強かったことから、製品の強度性能を精度よく把握するためには、製材後の測定が有効であることが示唆された。乾燥後の $E_{fr}$ が大きくなったことは、乾燥に伴う収縮により材の密度が大きくなったためと考えられる。

曲げヤング係数 $E_m$ で $E_{fr}$ との強い相関のほかに

密度に負の効果が認められたことは、密度が高い材は未成熟材の断面割合が大きく、全体のヤング係数を示す $E_{fr}$ と比較して、材外側のヤング係数の影響を受ける $E_m$ が小さくなったためと推測された。番玉順に正の効果が認められたことは、上の番玉では密度に節の増加の影響があるためと想定されるが、詳細は検討する必要がある。

曲げヤング係数による等級区分の結果、ほとんどの製材がE70又はE90に区分されたことは、愛知県産スギと同様の傾向を示していると考えられる（「愛知県産材利用の手引き」作成検討委員会2015）。曲げ強さではE70及びE90の等級区分において、5%以上が基準強度を下回る結果となった。1番玉には基準強度を下回ったものがなく、 $f_m$ は番玉順に負の効果が認められたことから、ヤング係数による曲げ強さの評価にあたっては番玉順の考慮の必要性が示唆された。番玉順の曲げ強さへの影響として節の増加による想定されるが、詳細は検討する必要がある。

心去り材の製材方法別の曲げ強さについては、 $E_m$ の効果のほかに、中心定規が側面定規より $f_m$ が約10%大きくなる効果が認められたが、理由については今後の検討が必要である。心去り材の製材方法については既往の文献においても側面定規の曲げ性能が向上するという事例や、差が認められないとする事例の両方がある。椎葉ら（2011）は丸太と製材した平角との縦振動ヤング係数の比較において、1番玉の心去り側面定規挽き製材が2番玉の心持ち製材より縦振動ヤング係数の増加が大きいことから、側面定規挽きが強度性能を向上させる有効な製材方法だとしている。しかしこれは、前述において中心定規、側面定規に関わらず1番玉からの製材のヤング係数が原木より大きくなることと同様である可能性がある。したがって、心去り平角の製材においては中心定規、側面定規に関わらず、効率・歩留りを考慮して行って支障

がないと考えられる。

めりこみ性能は密度が高くなると大きくなる相関があり、大径材の心去り材は密度の高い未成熟材の割合が小さくなるため、めり込み性能では不利であるといえる。ただし、基準強度との比較では、心去り材でも密度の高いものを選別することで、基準強度を上回ることが可能であることが示唆された。また、密度のほかに立木毎にめり込み性能の大小が認められたことから、めり込みに有利な品種が存在する可能性も考えられた。なお、現行のめり込み基準強度については、無欠点小試験体による部分圧縮試験で得られた比例限度応力の平均値の1.5倍の値とされており(長尾 2013)、本試験のめり込み強さとは算出方法が異なることに留意が必要である。

### 3. 利用法の開発

合わせ梁として、曲げ応力を受ける方向が積層面に平行になるよう用いられる集成材を製作したが、積層数4及び積層数5ともに集成材JASの同一等級構成集成材に規定する曲げ性能を満たした。大径材からは材せいの大きい製材が得られるが、乾燥に時間と経費を要することから、30-40mm程度の仕上がり厚のラミナに製材し、積層することにより、乾燥コストの軽減と材面割れの抑制が可能であると考えられる。積層数についてラミナを厚くし3層、2層と少なくした場合、製作工程における効率化、接着剤使用量削減が図れる利点がある一方、乾燥コストの増加やJASに規定される曲げ強さ基準値が低くなるなどの不利な面がある。したがって、ラミナ原料となる原木の品質と製品の必要性能との関係により積層数が決定されるのが望ましいと考えられる。

異等級構成集成材のヤング係数はラミナのヤング係数の平均とほぼ等しく、集成材JASの基準を満たしたことから、ラミナヤング係数の平均により等級区分しても支障がないことが示唆された。

幅はぎラミナの有無による性能差がなかったことから、幅はぎにより強度性能は低下しないと考えられる。異等級構成や幅はぎは、製品が求める性能確保の自由度や、歩留りの向上に有効であるものの、集成材JASに規定がないため、性能認定に必要なデータ収集を今後も進めていく必要がある。

### 引用文献

- 「愛知県産材利用の手引き」作成検討委員会(2015)  
愛知県産材利用の手引き. 愛知県農林水産部  
農林基盤局林務課
- 愛知県農林水産部農林基盤局林務課 (2014) 平成  
25年度愛知県林業統計書. 愛知県農林水産部  
農林基盤局林務課
- 飯島泰男, 園田里見, 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. 財団法人日本住  
宅・木材技術センター 79-98
- 池田潔彦, 星川健史, 渡井純 (2015) スギ中・大  
径木による新しい集成材“積層接着合わせ梁”  
の開発. あたらしい林業技術 603. 静岡県経  
済産業部振興局研究調整課
- 池田潔彦 (2006) 同一林分内で各月の新月, 満月  
に伐倒したスギの生材含水率. 静岡県林技セ  
報 34(1): 25-30
- 北原龍士, 堤壽一, 松尾毅 (1986), 成長応力から  
みた樹木の変形現象, 宇大演報 21: 49-60
- 小林功 (2014) 大断面製材の乾燥. 木材工業 69(11):  
498-503
- 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(1): 46-51
- 長尾博文 (2013) 構造用木材としての製材(12) 製  
材の基準強度. 住宅と木材 426, 4-5.

農林水産省告示（2013）製材の日本農林規格.

農林水産省告示（2012）集成材の日本農林規格.

奥山剛，木方洋二(1975)，薄膜除去法によって測定した樹幹の残留応力分布について，材料 (24)264 : 55-58

R Core Team (2013) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, <http://www.R-project.org/>

椎葉淳・荒武志朗・森田秀樹（2011）大径材から得られたスギ側面定規挽き製材の力学的性能（第 1 報）曲げ性能．木材学会誌 57(4) : 234-241

寺澤眞（1994）木材乾燥のすべて．海青社

山裾伸浩・岸本勇樹（2013）和歌山県産スギ，ヒノキのせん断強度およびめり込み強度．和歌山農林水研報 1: 131-142

財団法人日本住宅・木材技術センター（2011）構造用木材の強度試験マニュアル.