

## 県産スギ大径材から採材した枠組壁工法構造用製材の強度特性

石田洋二・松元 浩・小倉光貴

**要旨**：石川県産のスギ大径材から採材した 204 材（断面 38×89mm）の曲げ試験体 275 体および縦圧縮試験体 119 体、206 材（断面 38×140mm）の曲げ試験体 70 体および縦圧縮試験体 70 体、210 材（断面 38×235mm）の曲げ試験体 28 体および縦圧縮試験体 51 体に対し強度試験を行った。その結果、204 材の曲げ強度および縦圧縮強度について目視等級ごとに算出した 5% 下限値は、それぞれの基準強度を満足した。206 材および 210 材については、十分なサンプル数を確保できなかった目視等級を除き、曲げ強度および縦圧縮強度の目視等級ごとの 5% 下限値はそれぞれの基準強度を満足した。曲げ強度および縦圧縮強度は、①縦振動法によるヤング係数と正の相関関係が認められ、②試験体の木目の種類（心持ち、板目、追い柱）と加力方向の組合せの違いにより差が認められた。これらの因子は共通して、丸太の髓を含むかその付近から採材された材の強度が低く、髓から離れた位置から採材された材の強度は高く安定する傾向を示していた。ただし、その傾向は比較的幅の狭い 204 材および 206 材で顕著であり、幅広い 210 材では限定的であった。

**キーワード**：スギ、枠組壁工法構造用製材、曲げ強度、縦圧縮強度

### I はじめに

2015 年の「枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格（以下、ツーバイフォー材の JAS）」の改正によりスギ等の国産材の新たな樹種区分が設定され、また近年の SPF 製材価格の高騰も相まって国産材ツーバイフォー材への関心が高まっている。一方、北陸には国産材ツーバイフォー材の生産拠点がなく、輸送コストの低減や地元産材利用への関心から、県産スギを利用したツーバイフォー材を望む声も上がっている。そこで、県産スギ大径材から製材したツーバイフォー材の強度特性（曲げ強度および縦圧縮強度）とその影響因子を評価したので報告する。

### II 試験方法

#### 1. 材料

末口径 30.7~47.9cm、材長 4 m の石川県産スギ丸太 36 本を供試材とした（表-1）。すべての丸太の末口面には、髓から同心円状に半径 50mm ごとに色分けしてペイントした。図-1 の木取りを基本として、寸法型式 204 材（以後、204）、寸法型式 206 材（以後、206）および寸法型式 210 材（以後、210）を製材した。204 は 15 本の丸太から粗挽き断面 45×105mm の製材を 277 本、206 は 6 本の丸太から粗挽き断面 45×155mm の製材を 70 本、210 は 15 本の丸太から粗挽き断面 45×250mm の製材を 77 本得た。得られた全ての製材について、先述の丸太末口面のペイントを参照しそれぞれの採

材位置（製材断面中心点の髓からの距離）を計測した後、人工乾燥（中温乾燥：乾球温度 70℃、湿球温度 68~50℃で 216 時間）を行った。乾燥後、204 は断面寸法 38×89mm、206 は 38×140mm、210 は 38×235mm に仕上げ加工した。仕上げ後の 4 m 材について、ツーバイフォー材の JAS に基づく甲種枠組材の目視等級区分を行うとともに、縦振動法によるヤング係数（以後、 $E_{tr}$ ）を測定した。204 からは 275 体の曲げ試験体（38×89×1780mm）および 119 体の縦圧縮試験体（38×89×225mm）を作製した。206 からはそれぞれ 70 体の曲げ試験体（38×140×2800mm）および縦圧縮試験体（38×140×325mm）を作製した。210 からは 28 体の曲げ試験体（38×235×4000mm）および 51 体の縦圧縮試験体（38×235×325mm）を作製した。強度試験体の概要を表-2 にまとめる。

#### 2. 曲げ試験

曲げ試験は、試験体の狭い面に対して加力するエッジワイズ方式で行った。204 は曲げ試験用の治具を装着した圧縮試験機（前川試験機製作所製、A-300L-B1）を用いて、全スパン 1602mm、ロードスパン 534mm の 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。206 および 210 は、実大試験機（島津製作所製、UH-1000kNXR）を用いて、206：全スパン 2520mm、ロードスパン 840mm、210：全スパン 3760mm、ロードスパン 1253mm として実施した。荷重速度は破壊に至るまで 3 分以上となるようにした。試験終了後、破壊試験体より長さ 30mm の試験体を採取し、

全乾法により含水率を求めた。曲げ試験における曲げヤング係数および曲げ強度は、ASTM D1990 にしたがって含水率 15%時の値に調整した (10～23%の範囲)。さらに、210 の曲げ試験では、全スパン＝梁せいの 16 倍としたため、曲げヤング係数は「構造用木材の強度試験マニュアル」((公財) 日本住宅・木材技術センター) に、曲げ強度は ASTM D1990 にしたがって標準条件 (全スパン＝梁せいの 18 倍) 時の値に調整した。

### 3. 縦圧縮試験

縦圧縮試験は、先述の圧縮試験機を用いて、荷重の最大値に達するまで 1 分以上となる荷重速度で載荷した。試験終了後、破壊試験体より長さ 30mm の試験体を採取し、全乾法により含水率を求めた。縦圧縮強度は、ASTM D1990 にしたがって含水率 15%時の値に調整した (10～23%の範囲)。

## III 結果および考察

### 1. 製材の目視等級

各寸法型式の 4 m材における木目の種類別の目視等級の出現頻度分布を図-2 に示す。図中では、採材された試験体表面に現れた木目の種類 (心持ち、板目 (広い面が板目の二方桎)、追い桎) ごとに示した。板目および追い桎では、いずれの寸法型式も 2 級が最も多く、次いで 3 級又は等級外が多く、特級、1 級は少なかった。心持ちでは、206 および 210 では他の木目とほぼ同様の分布であったが、204 では等級外が最も多かった。前報 (石田ら 2021) の 204 の製材試験で得られた 668 本を目視等級区分した結果では、下位の等級 (3 級以下) に格付けられた決定因子として、「節又は穴」と「反り」が 8 割超を占めていた。そこで、図-3 に寸法型式別の「節又は穴」および「反り」のみに関する等級の比率を丸太半径方向の距離区分別に示す。204 では「節又は穴」は髄から外側に向かうにつれて下位の等級が増加し、距離区分 100～150mm でピークとなったのち、最外層の 150mm～では減少した。一方、「反り」は髄から 100mm までの距離区分で下位の等級が多く、100mm から外側では大きく減少した。206 および 210 では「節又は穴」の下位の等級は全距離区分でわずかであるが、「反り」は 204 と比べて下位の等級が全体的に多く、髄から 100mm より外側でも多く現れた。丸太内の半径方向における節の分布は一般的に、髄付近の組織は枝の多い樹冠材に由来する

ので、節が多く現れるが、その径は小さく生き節である場合が多い。枝は放射状に伸びているため髄から離れるほど節の出現密度は減少するが、個々の節径は大きくなり、また生育過程の種々の外的影響から、品質上不利な欠け、抜け、腐れ、入り皮を伴う節 (ツーバイフォー材の JAS では不健全な節といい、等級判定上より重視される) や穴となって現れやすくなる。しかし、さらに外側の組織になると、樹冠下の枝の少ない部分 (枝下材) に移行するので、節の出現は著しく減少する。よって、204 の「節又は穴」が、髄から 100～150mm を中心に下位の等級が多かったのは、このような丸太内の節の分布が影響したものと考えられる。また、材幅の狭い 204 では材面に対する節の相対面積が大きいため、「節又は穴」の等級への影響が大きかったが、206 や 210 など幅広になると節の相対面積が小さくなるため、等級を大きく引き下げるほどの影響はなかったと推察される。しかし、反りの点では材が幅広になるほど影響が大きくなると考えられ、206 や 210 では採材位置の髄からの距離によらず「反り」による等級低下の可能性があったことが分かった。また一方で、「節又は穴」および「反り」の両方に共通して、いずれの寸法型式においても、採材位置が髄から離れるほど 1 級以上の上位の等級の割合が大きくなる傾向も認められ、丸太の外周付近からは高品質な材の獲得が期待できる。

### 2. 非破壊試験

髄から概ね 20 年輪の組織は未成熟材と呼ばれ、仮道管長、細胞壁厚や細胞壁成分の分子的構成が成熟途上にあり、強度性能が成熟材より低下するとされる (例えば、伏谷 1985)。採材位置の丸太半径方向の距離区分別に  $E_{tr}$  を見ると (図-4)、髄から 50mm までの  $E_{tr}$  は、これより外側に比べて低い傾向が見られた。表-1 の丸太半径 100mm 内の年輪数が平均で 21 であることから、髄から 50mm の範囲に断面中心が含まれるように採材された製材は断面積に占める未成熟材の割合が大きく、 $E_{tr}$  が低い値を示したものと考えられる。ただし、210 では髄から 50mm 区間の  $E_{tr}$  と隣接する 50～100mm 区間の  $E_{tr}$  との差 ( $p < 0.05$ ) が 204 や 206 (いずれも  $p < 0.01$ ) ほど大きくなかった。210 の材幅になると、材縁部に成熟材を含む割合が増えるためと考えられる。

### 3. 曲げ強度

各寸法型式における目視等級別の曲げ強度分布を図-5に示す。なお、204 および 206 については、曲げ試験体長さの範囲のみを対象に評価した目視等級で示している。目視等級ごとの曲げ強度の平均値は、204 では等級が上位ほど高く、下位に向かうにつれて低い傾向であり、等級と曲げ強度はよく対応していた。206 および 210 では特級の平均値は最も高いが、206 の2級以下、210 の1級以下はほぼ同じであった。5%下限値は、各目視等級の強度値データを正規分布と仮定し、信頼水準 75%における 95%下側許容限界値として求めた値である。サンプル数不足となる 206 の1級、210 の特級および1級を除き、5%下限値は国土交通省がスギ枠組材の目視等級に応じて定める基準強度（平成12年建設省告示第1452号）を満足する結果であった。206 の1級で著しく強度が低かった（ $17.3\text{N/mm}^2$ ）個体については、心持ち材であり、曲げ引張側材縁部に複数の流れ節を持つものであった。各寸法型式における目視等級別の曲げヤング係数の分布を図-6に示す。206 の1級以外は、曲げヤング係数の平均値は基準弾性係数（（一社）日本ツーバイフォー建築協会 2018）を満足した。なお、206 の1級で曲げヤング係数が著しく低い値（ $4.6\text{kN/mm}^2$ ）を示す個体は、上記の著しく曲げ強度が低かったものと同一個体であった。

図-7に示すように、各寸法型式の4m材時点の  $E_{fr}$  と曲げ強度の関係は正の相関関係が認められた（204:  $R^2=0.357$ 、206:  $R^2=0.423$ 、210:  $R^2=0.426$ ）。よって、非破壊試験により得られる  $E_{fr}$  は、曲げ強度を予測する際に有効な指標になると考えられる。先述の206の1級に格付けされながら曲げ強度が著しく低かった個体は、 $E_{fr}$  でも最も低い値（ $4.5\text{kN/mm}^2$ ）として現れており、強度性能を担保するためには目視等級に加えて  $E_{fr}$  を組み合わせることが有効と考えられる。さらに、図-4に示したように、丸太の髄から50mmの範囲では  $E_{fr}$  が低い傾向があることから、この部分以外から採材することで、曲げ強度性能の優れたツーバイフォー材が得やすいと考えられる。

本試験の木取りでは、204 および 206 の木目は心持ち、板目、追い柱のいずれかとなる。210 については、中央部のタイコ材からのみ採材したため、心持ちおよび板目のいずれかとなる。そこで、

木目の種類と加力方向の関係から、心持ち加力、柱目加力（板目の狭い面への加力）、追い柱木表加力、追い柱木裏加力の4通りに分類し、それぞれの曲げ強度を比較した。図-8に示すように 204 および 206 では、曲げ強度の平均値は追い柱木裏加力が最も高く、心持ち加力が最も低かった。曲げ破壊は多くの場合、加力面の反対側となる引張側で起こるため、追い柱木裏加力では、強度性能が優れる成熟材が引張側に位置することが有利に働いたと考えられる。一方、204 や 206 の心持ちでは、その断面において髄付近の未成熟材が占める割合が大きく、また節が材縁部に流れ節として現れやすい領域であることから、強度低下を招きやすかったと考えられる。210 では、心持ち加力と柱目加力に差がなかった。これは、210 は幅広であるため、心持ちであっても材縁部は成熟材を含み、また節の少ない領域にあたる可能性が高く、曲げ強度の低下が起こりにくかったことが要因と考えられる。このことは、床根太など横架材としての利用が想定され、曲げ強度性能が重視される場合が多い210では有利な特質と考えられる。

各寸法型式における破壊形態は、204 では曲げ80.7%、せん断1.1%、曲げとせん断の複合16.0%、圧縮2.2%、206 では曲げ70.0%、曲げとせん断の複合21.4%、圧縮8.6%、210 では曲げ67.9%、曲げとせん断の複合32.1%であった。

### 4. 縦圧縮強度

各寸法型式における縦圧縮強度分布を図-9に示す。縦圧縮試験体の長さは短いため、試験体自体の目視等級評価が困難であることから、ここでは目視等級による区別は行っていない。各寸法型式の強度値データを正規分布と仮定し、信頼水準75%における95%下側許容限界値として求めた5%下限値は、スギ枠組み材の特級に対して定められた縦圧縮の基準強度を全て満足する結果であった。

図-10に示すように、各寸法型式の4m材時点の  $E_{fr}$  と縦圧縮強度との間には正の相関関係が認められた（204:  $R^2=0.622$ 、206:  $R^2=0.567$ 、210:  $R^2=0.551$ ）。曲げ試験結果と同様に、非破壊試験により得られる  $E_{fr}$  は、縦圧縮強度を予測する際に有効な指標になると考えられる。また、図-4に示したように、丸太の髄から50mmまでの範囲では  $E_{fr}$  が低い傾向があることから、この部分以外から採材することで、縦圧縮強度性能の優れたツーバ

イフォー材が得やすいと考えられる。

試験体の木目の種類別の縦圧縮強度を図-11に示す。204 および 206 については、縦圧縮強度は追い柵が心持ちよりやや高く ( $p < 0.05$ )、板目は他の木目と差がなかった。追い柵は木取りの関係から比較的髄から離れた位置から採材されるため、成熟材を多く含むことから強度が高く、心持ちは未成熟材を多く含むことから強度が低い傾向が現れたと考えられる。一方、210 では板目と心持ちの有意差はなかった。210 では心持ちでも材縁部が成熟材を含む可能性が高いため、強度低下が緩和されたと考えられる。204 および 206 は軸力が要求されるたて柵材としての利用が想定されるため、縦圧縮強度が低下する傾向のある心持ちを避ける採材が有利と考えられる。心持ち以外の板目と追い柵については、両者の間で縦圧縮強度に有意差がなく、また先述のとおり目視等級の出現頻度分布もほぼ同様であったことから、たて柵材として 204 や 206 を生産・使用する上では、板目と追い柵の違いに大きな影響はないと考えられる。

## 引用文献

- ASTM D1990: Standard practice for establishing allowable properties for visually-graded dimension lumber from in-grade tests of full-size specimens(2013)
- 公益財団法人 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
- 昭和 49 年 7 月 8 日農林省告示第 600 号 枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格(平成 27 年 3 月 9 日改正、最終改正 令和 2 年 6 月 1 日)
- 石田洋二・松元 浩・小倉光貴(2021) 県産スギ大径材から採材した枠組壁工法構造用製材の品質調査: 石川県林業試験場研究報告 No. 52: 15-18
- 伏谷賢美(1985) 木材の科学・2 木材の物理: 152-153
- 平成 12 年建設省告示第 1452 号 木材の基準強度  $F_c$ 、 $F_t$ 、 $F_b$  及び  $F_s$  を定める件(平成 27 年 6 月 30 日改正)
- 一般社団法人 日本ツーバイフォー建築協会編(2018) 2018 年枠組壁工法建築物構造計算指針: 140

表-1 供試丸太の概要

本数	区分	末口直径 (cm)	末口年輪数	半径100mm年輪数	丸太密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	丸太 $E_r$ ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )
36	最大値	47.9	87	34	871	11.2
	平均値	39.3	56	21	648	8.1
	最小値	30.7	33	10	477	6.6
	変動係数 (%)	10.9	26.2	32.2	15.1	13.1

丸太  $E_r$ : 丸太の縦振動法によるヤング係数

表-2 強度試験体の概要

寸法型式	4 m材(強度試験体の採材前)			曲げ試験体数	縦圧縮試験体数	
	本数	区分	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			$E_r$ ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )
204	277	最大値	555	13.1	275	119
		平均値	396	9.5		
		最小値	295	5.6		
		変動係数 (%)	10.8	16.3		
206	70	最大値	420	12.4	70	70
		平均値	369	8.5		
		最小値	305	4.5		
		変動係数 (%)	7.2	21.2		
210	77	最大値	505	12.1	28	51
		平均値	402	9.0		
		最小値	307	6.4		
		変動係数 (%)	11.6	14.8		

$E_r$ : 4 m材の縦振動法によるヤング係数

注: 204および210の一部、206の全部の曲げ試験体と縦圧縮試験体は、同一の4 m材から重複して採材した。

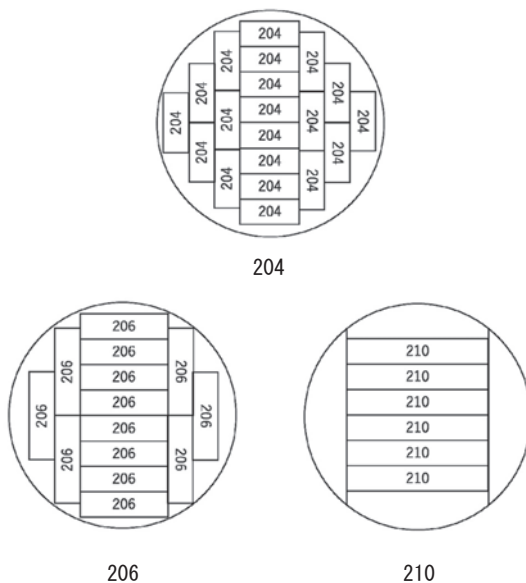
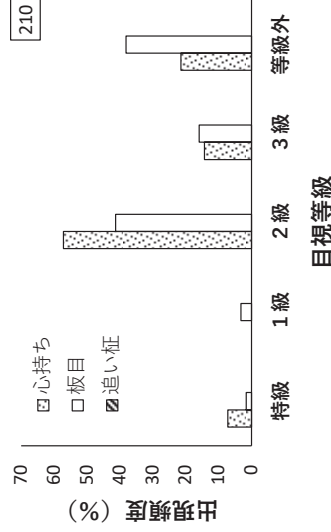
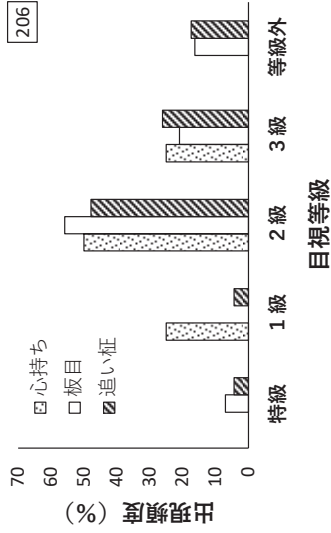
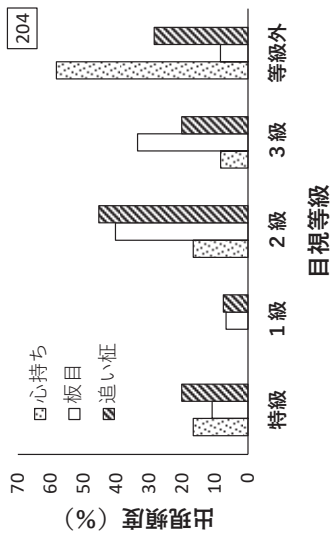
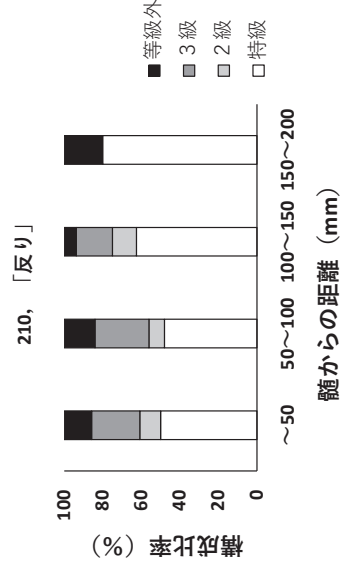
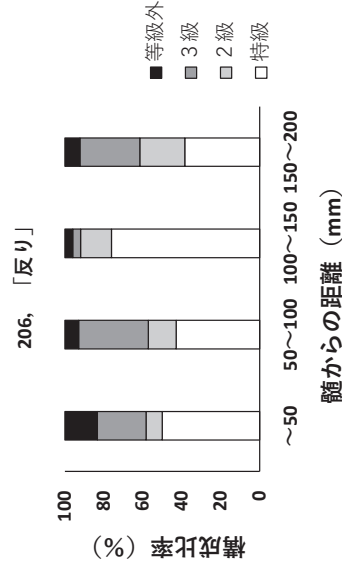
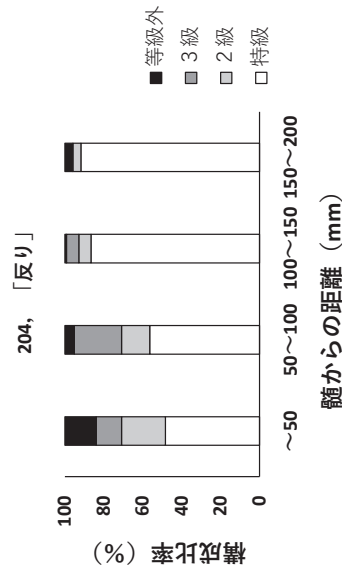
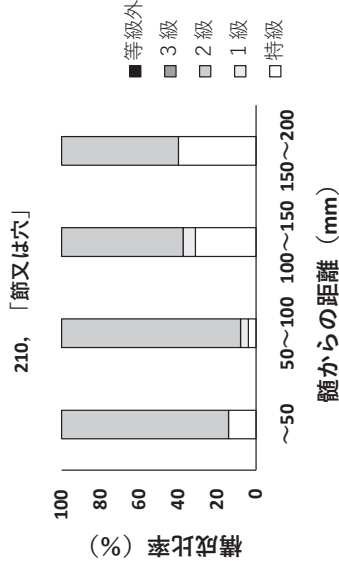
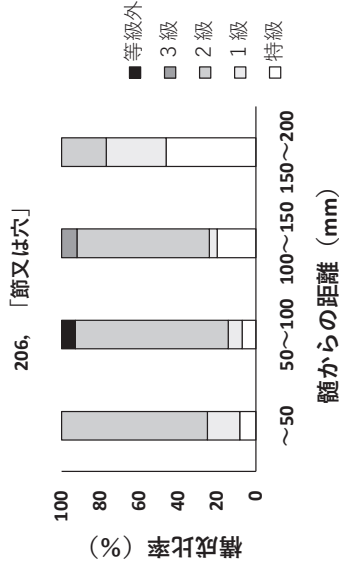
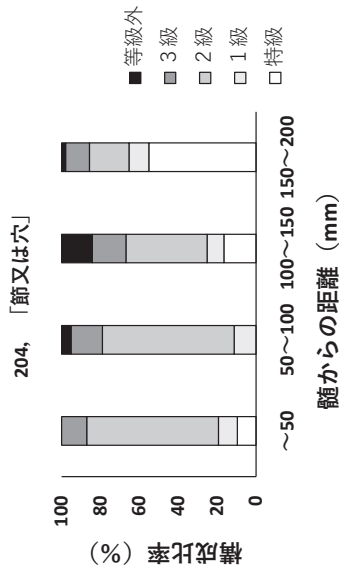


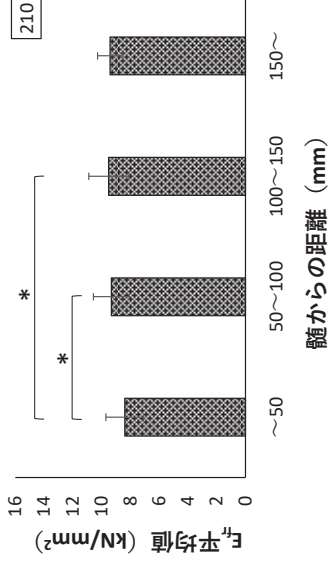
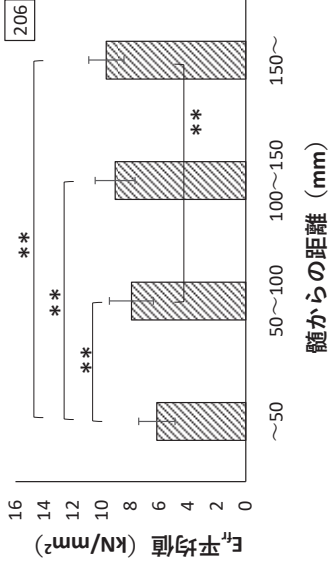
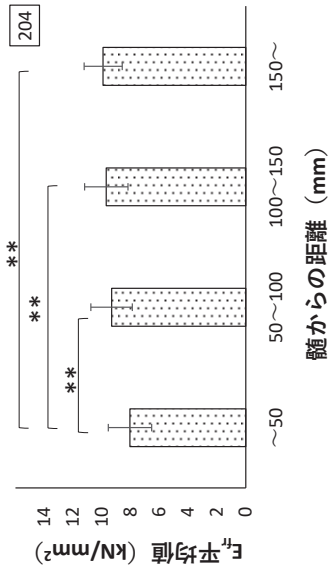
図-1 基本木取り図



図一2 木目の種類別の目視等級の出現頻度分布 (左: 204、中: 206、右: 210)

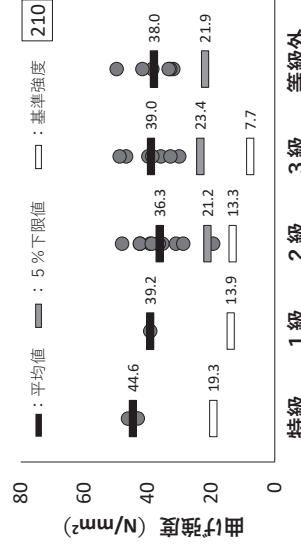
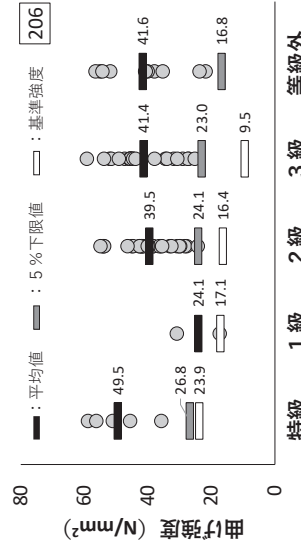
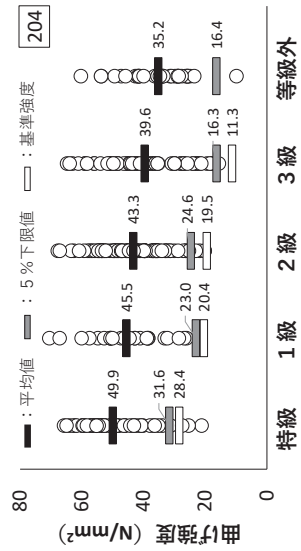


図一3 「節又は穴」および「反り」に関する丸太半径方向の距離区分別の目視等級構成比率 (左: 204、中: 206、右: 210)

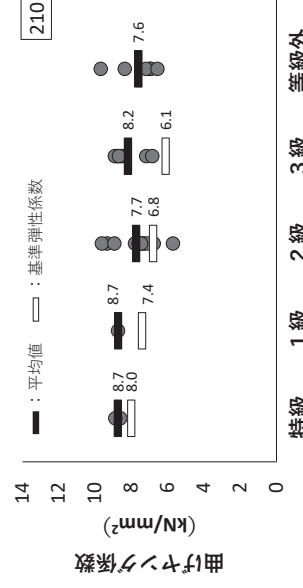
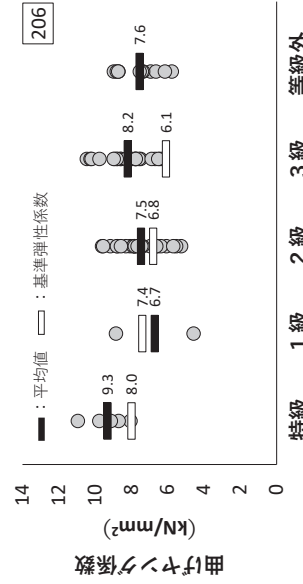
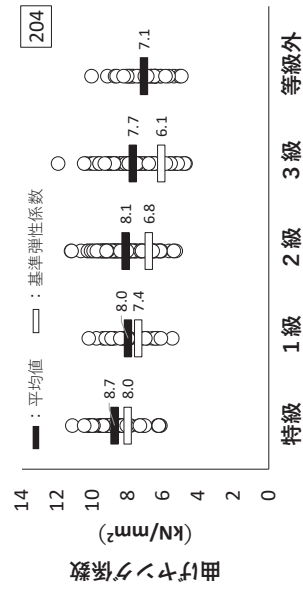


図—4 4 m製材における丸太半径方向の距離区分別の E<sub>fr</sub> (左 : 204、中 : 206、右 : 210)

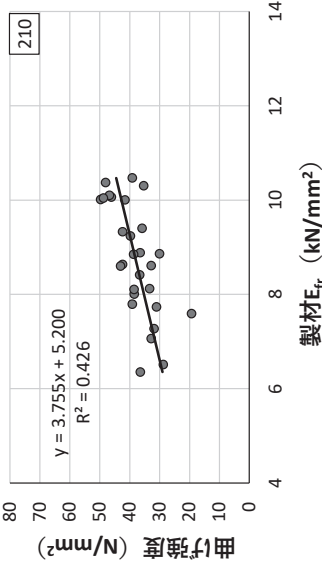
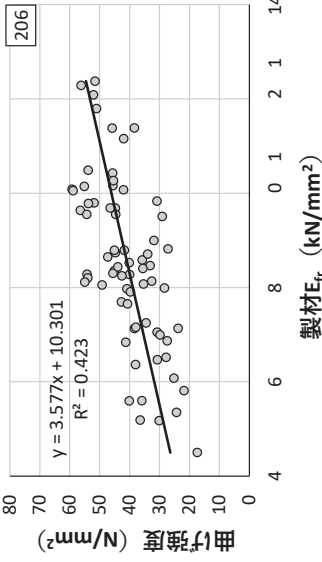
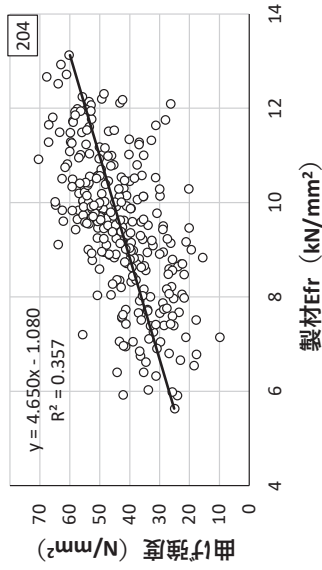
\* : p<0.05, \*\* : p<0.01 有意差あり (一元配置分散分析、Tukey-Kramer の多重比較)、エラーバーは標準偏差



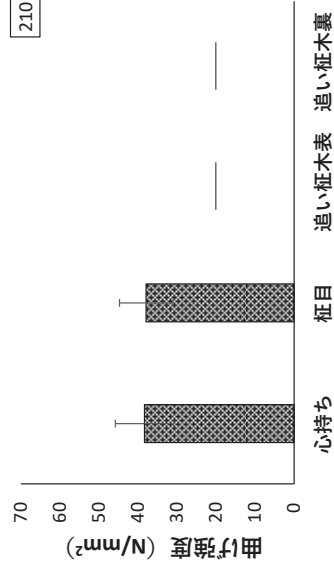
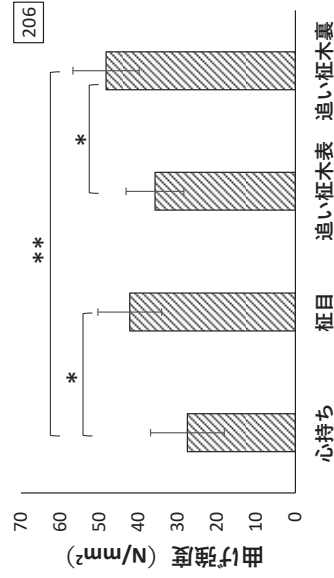
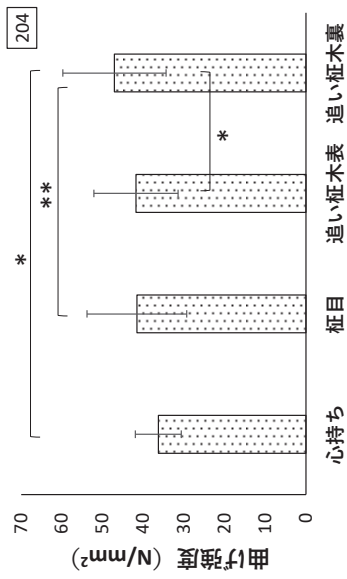
図—5 目視等級別の曲げ強度 (左 : 204、中 : 206、右 : 210)



図—6 目視等級別の曲げヤング係数 (左 : 204、中 : 206、右 : 210)

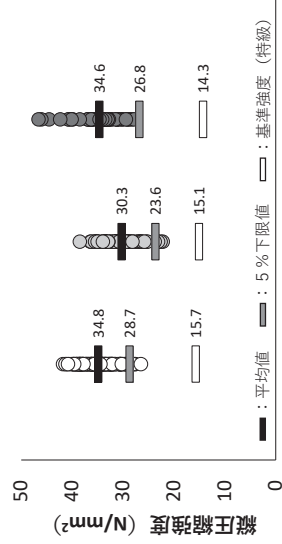


図—7  $E_{fr}$  (4 m材時点) と曲げ強度の関係 (左 : 204、中 : 206、右 : 210)

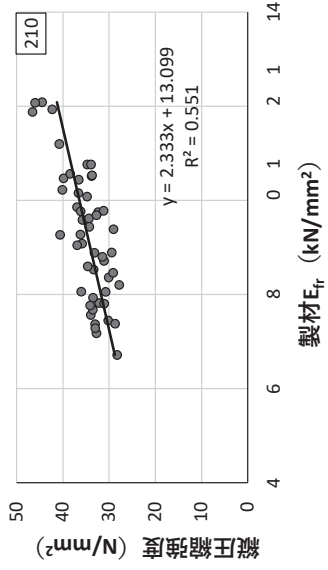
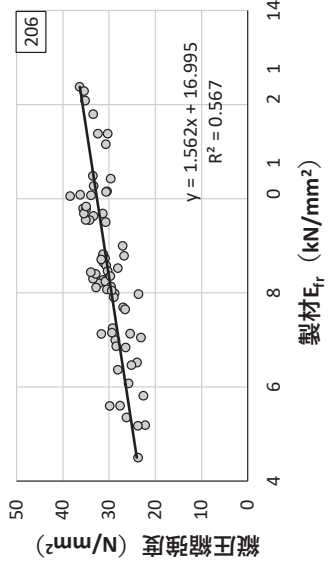
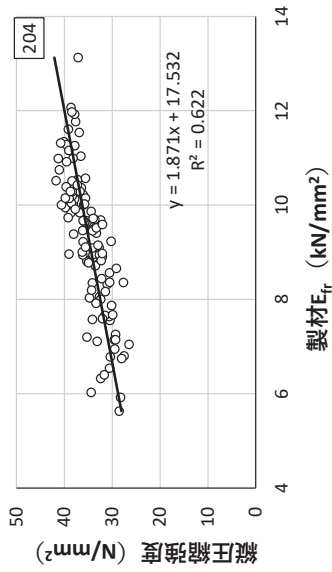


図—8 加力方向別の曲げ強度平均値の比較 (左 : 204、中 : 206、右 : 210)

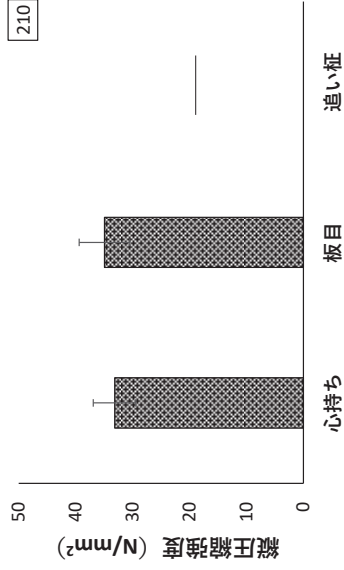
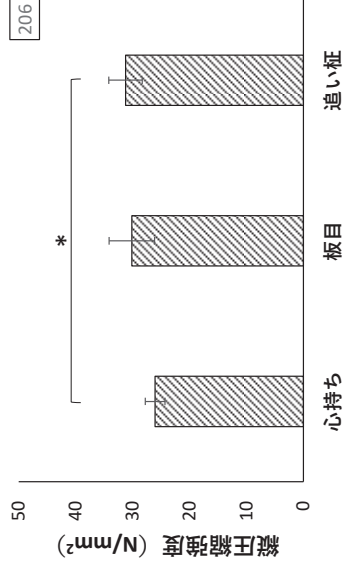
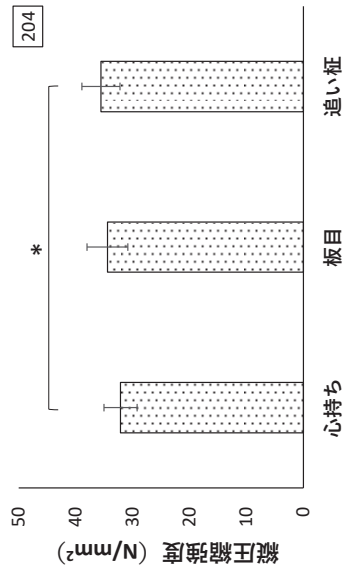
\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$  で有意差あり (一元配置分散分析、Tukey-Kramerの多重比較)、エラーバーは標準偏差



図—9 寸法型式別の縦縮強度



図—10  $E_{fr}$  (4 m材時点) と縦圧縮強度の関係 (左: 204、中: 206、右: 210)



図—11 木目の種類別の縦圧縮強度平均値の比較 (左: 204、中: 206、右: 210)

\*:  $p < 0.05$  で有意差あり (一元配置分散分析、Tukey-Kramer の多重比較)、エラーバーは標準偏差