

人工造林カラマツ7林分から得られた正角の 実大曲げ強度性能

橋 爪 丈 夫
吉 田 孝 久
武 井 富喜雄

要 旨

長野県産カラマツ人工造林木の強度性能を明らかにする目的で、信州大学農学部、農林水産省森林総合研究所とのプロジェクトの一部として、正角の実大材曲げ強度性能を検討した。試験材は長野県下7林分から得られたものである。曲げ試験用として仕分けられた315体の正角の実大材曲げ試験から得られた主な結果は次のとおりである。

- ① 7林分からの正角の曲げ強さは平均で、A (65年生) : 541、E (44年生) : 482、C (55年生)・F (40年生)・G (75年生)・B (50年生) : 447~426、D (42年生) : 395kgf/cm²の順であった。最も高樹齢であるが、高海拔地に生育し、成長が悪く中庸な値を示した林分Gとあて材の影響で曲げ強さが高めになったと考えられる林分Eを除くと高樹齢の林分からの正角ほど曲げ強さが大きくなる傾向が認められた。
- ② 同一産地の林分AとC (白田営林署管内)、BとD (伊那営林署管内)の比較では曲げ強さ及び曲げヤング係数とも樹齢の高い林分からのものの方が明らかに高かった。
- ③ 曲げ強さは四方桁>二方桁>心持ちの順であり、林分ごとにみてもその傾向は顕著であった。但し、荷重方向が他と異なった林分Dの二方桁(木表荷重)は心持ちと同程度、林分Fの四方桁(一部木表荷重)は二方桁と同程度であり、このことは曲げ強さに与える荷重方向の影響が大きいことを示すものであった。
- ④ 曲げ強さは平均値でみると、番玉が上がるほど値が下がる傾向にあり、これは7林分に共通していた。曲げヤング係数も傾向としては同様であったが、林分別では曲げ強さほど顕著ではなかった。
- ⑤ 密度と曲げ強さの関係は全体で相関係数 $r=0.496^{**}$ (**:危険率1%で有意) が得られ、曲げヤング係数と密度の関係も全体では $r=0.606^{**}$ と高い関係が認められた。
- ⑥ 平均年輪幅と曲げ強さの関係は全体では $r=-0.168^{**}$ であったが、無欠点試験で認められるほどではなかった。繊維傾斜と曲げ強さの関係は全体で $r=-0.308^{**}$ であった。
- ⑦ 曲げ強さと4材面評価の最大単独節径比、集中節径比との関係はそれほど高くなかったが、曲げ破壊試験における引張り面の最大単独節径比及び集中節径比との関係は高かった。
- ⑧ 曲げ強さと随から曲げ試験における引張り面中心までの距離、及び年輪数との関係は、全体でそれぞれ $r=0.456^{**}$ 及び $r=0.495^{**}$ と比較的高い関係が認められた。
- ⑨ 曲げヤング係数と曲げ強さの関係は全体で $r=0.592^{**}$ と高く、6林分で1%水準で有意であった。
- ⑩ 目視による強度性能評価の指標である平均年輪幅、4材面全長評価の最大単独節径比及び集中節径比と曲げ強さの関係は統計的には1%水準で有意であったが、実用的には十分とは考えられず、視覚的等級区分の限界を示すものと考えられた。
- ⑪ 死荷重載荷法により得られた曲げヤング係数及び縦振動法によるヤング係数は曲げ強さ

との関係が $r = 0.526^{**}$ 及び 0.643^{**} であり、ともに曲げ強さを安定して推定することが可能なことが示された。

- ⑫ JAS 目視等級区分の甲Ⅱ及び乙種による格付けで、各等級の曲げ強さの 5% 下限値は目視等級区分製材に対する許容応力度を 3 倍した基準強度をすべての等級で満たしていた。
- ⑬ JAS 機械的等級区分の結果では、等級区分の効果は明白であった。ただし、機械等級区分製材の許容応力度を 3 倍した基準強度との関係では、各等級の曲げ強さの 5% 下限値は下位等級 (E50、E70) ではそれを満たしていたが、上位等級ではそれに及ばなかった。

1. はじめに

信州カラマツ造林木は肥大成長に伴う材質の変動が大きい。随からおよそ 11~19 年輪までの樹幹の中心にあたる随周辺部は未成熟材部¹⁾とよばれ、その部分の強度は外周部よりも低く、しかもその変動が大きい²⁾。しかし、高樹齢の大径材になれば、仮道管も長く、らせん木理傾向も少なく、かつ、木材実質を示す密度も大きな成熟材部の占める割合が大きくなる。したがって、高樹齢の大径材においてはねじれ、割れや曲がりの少ない角類や板類が得られることが予想される^{3,4)}。

重松⁵⁻¹¹⁾は、このことを実証するために、東信、中信、及び南信地方において樹齢あるいは径級の異なる 7 林分を選定し、林分ごとに番玉及び木取り方法の違いによる正角の品等区分を行った。

この様にして、1979 年から 1986 年にかけて、長野県内の 7 林分、合計 72 本の供試木から総数 575 本の正角が製材され、目視による用材品等区分に供された後、信州大学で保管状態にあった。

その後 (1989 年)、これら正角の実大材強度試験を実行することになり、長野県林業総合センターが実大材曲げ試験を、農林水産省森林総合研究所が実大縦引張り試験を、また、曲げ試験終了後の健全部から採取した試験体を用いて、実大縦圧縮試験並びに JIS 規格による無欠点小試験体の圧縮、曲げ試験を信州大学農学部が担当して行った。

本研究は、研究途上に急逝された (1992 年 2 月) 故重松頼生信州大学農学部教授によって進められた“重松プロジェクト”のうち、共同研究として長野県林業総合センターが担当した実大材曲げ破壊試験の結果をまとめたものである。

本稿では、はじめに林分 (樹齢)、木取り、番玉によるカラマツ正角の曲げ強さ、曲げヤング係数及び材質指標 (密度、平均年輪幅、繊維傾斜、最大単独節径比、集中節径比) の傾向を明らかにした。次に材質指標と曲げ強さ及び曲げヤング係数との関係を林分及び木取り別に検討し、さらに目視及び非破壊的手法を用いたヤング係数測定による曲げ強さの推定について考察した。そして試験結果に対して針葉樹構造用製材の日本農林規格¹²⁾及び日本建築学会の木質



図-1 供試木を得た林分の位置及び林分記号

構造設計基準¹³⁾による評価を行った。

なお、プロジェクト全体の成果は近く信州大学農学部演習林報告にとりまとめられる予定である。

2. 試験方法

2.1 供試木を得た林分の概況と供試木

2.1.1 供試木を得た林分の概況

供試木を得た林分の長野県における位置を図-1に、概況を表-1に示した。林分は上伊那郡（伊那営林署管内：3箇所、駒ヶ根営林署管内：1箇所）、諏訪郡（諏訪営林署管内：1箇所）、南佐久郡（白田営林署管内：2箇所）の3地域7林分で、すべて国有林である。

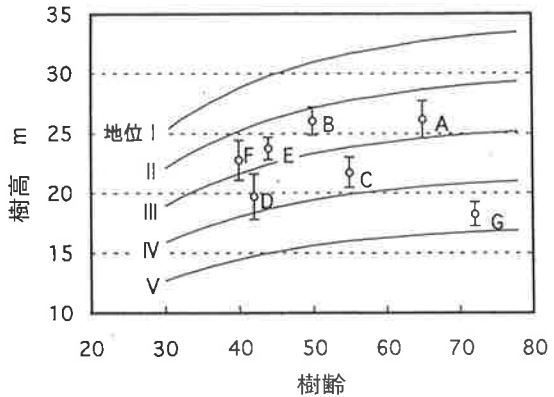


図-2 供試木の樹齢と樹高の関係

地位別樹高曲線：“カラマツ人工林・長伐期施業の手引き”¹⁴⁾

表-1 供試木を得た林分の概況

記号	所在地	林 齢	海拔高 m	立地の傾斜 度	土 壤 条 件	地位 *	備 考
A	白田営林署管内 大曲国有林 104林班ほ小班	65	1200	N 緩傾斜	B _ℓ Dd 火山灰・土壌 深・軟・適	II~III	高齢大径材は用材品等に優れる。 伐倒：1979.11
B	伊那営林署管内 上伊那郡 長谷村黒河内事業所 231林班い小班	50	1450~1820	26~28° SW 急傾斜	B _E 古生凝灰岩 砂壤土、浅・軟・適	II~III	成長：非常によい 沢沿い、開けた方向に枝の発達 伐倒：1980.11
C	白田営林署管内 北相木国有林 28林班ら小班	55	1440~1470	25~35° SW 急傾斜	B _D 古生層、砂岩粘板岩 砂壤土、深・軟・適	III~IV	風強い、偏心成長 さらに長伐期必要 伐倒：1986.12
D	伊那営林署管内 上伊那郡 長谷村黒河内事業所 232林班い小班	42	1420~1590	W 急傾斜	B _E 古生層粘板岩 砂壤土、浅・軟・適	III~IV	成長は極めて良い 若干丸みが多い ねじれ大 伐倒：1981.11
E	駒ヶ根営林署管内 大鹿村大河原国有林 81林班ぬ小班	44	1090	15~35° N 緩傾斜	B _E 結晶片岩 壤土、浅・軟・適	II~III	成長は極めて良い 風当たり、偏心成長顕著 圧縮アテ 伐倒：1982.11
F	諏訪営林署 東俣国有林 127林班ろ小班	40	1500	ES 中~急傾斜	B _ℓ Dd 安山岩、砂壤土 中・軟・適	II~III	丸み大 伐倒：1983.11
G	伊那営林署管内 入笠山国有林 220林班ろ小班	75	1810~1940	E 中傾斜	B _D (d) 古生凝灰岩 砂壤土 浅・軟・適	IV~V	心持ち主体 伐倒：1984.12

*：地位別樹高曲線¹⁴⁾によった。

これらの林分において供試木を選定し、伐倒後樹高を測定した。選定した供試木はすべて優勢木である。7 林分から得られた供試木の樹齢と樹高の関係を図-2に示した。図中に地位別樹高曲線¹⁴⁾を示した。これから林分 A、B、E、F は地位 II~III (以下地位上)、C 及び D は地位 III~IV (同地位中)、G は IV~V (同地位下) と判断できる。G は高樹齢であるが、高海拔地であり、その生

表-2 林分別供試木の樹高、胸高直径、枝下高

区 分	林分	供 試 木 番 号															平均値	標準 偏差	変動 係数 (%)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
樹高 (m)	A	28	25	26	27	28	24	25										26.1	1.6	6.0
	B	25	27	25	26	26	25	28										26.0	1.2	4.4
	C	23	20	22	21	23	24	21										21.7	1.3	5.8
	D	21	22	19	22	18	22	19	21	21	21							19.7	1.9	9.6
	E	24	22	24	24	22	25	24	24	24	24							23.7	0.9	4.0
	F	24	22	22	21	22	21	21	23	22	26	25	24	25	22	21		22.7	1.7	7.3
	G	19	19	18	19	20	18	19	17	17	17	18	19	17				18.2	1.0	5.6
胸高直径 (cm)	A	44	42	44	44	42	44	43										43.3	1.0	2.2
	B	42	39	40	40	36	37	40										39.1	2.0	5.2
	C	36	34	34	34	36	44	38	34	36	40							36.6	3.3	8.9
	D	34	42	40	38	34	36	38	34	38	38							37.2	2.7	7.3
	E	38	36	32	30	30	30	30	30	34	32							32.2	2.9	9.0
	F	34	36	30	32	33	32	33	34	40	43	36	37	30	36	36		34.8	3.5	10.1
	G	32	30	30	30	36	30	34	32	30	28	32	32	30				31.2	2.1	6.7
枝下高 (m)	A	10	9	14	13	16	12	13										12.4	2.4	19.1
	B	14	12	13	12	14	14	14										13.3	1.0	7.2
	C	10	7	9	8	7	7	7	9	5	7							7.6	1.4	18.8
	D	9	10	9	10	10	7	8	8	8	6							8.5	1.4	15.9
	E	10	10	11	13	11	13	9	13	13	11							11.4	1.5	13.2
	F	13	11	11	12	11	11	11	13	13	14	14	10	13	8	10		11.7	1.7	14.4
	G	13	5	6	5	6	5	5	6	6	5	7	7	6				6.3	2.1	33.9

表-3 供試木の完満度及び枝下高率

林分	供試木 本数	完 満 度			枝下高率 (%)		
		平均値	標準 偏差	変動 係数 (%)	平均値	標準 偏差	変動 係数 (%)
A	7	0.604	0.039	6.5	47.6	8.5	17.8
B	7	0.666	0.045	6.7	51.2	4.6	9.0
C	10	0.595	0.043	7.3	35.0	6.4	18.1
D	10	0.532	0.059	11.1	43.2	6.5	15.0
E	10	0.742	0.074	10.0	48.1	5.8	12.0
F	15	0.658	0.068	10.4	51.3	6.0	11.6
G	13	0.585	0.031	5.3	34.6	11.1	32.0

完満度 = 樹高 (m) / 胸高直径 (cm)
枝下高率 = 枝下高 / 樹高 × 100 (%)

育条件が他の林分と明らかに異なる。Gを除く6林分をカラマツの一般的な林分とすれば、樹齢別ではAが65年生の高樹齢林分、B及びCが50～55年生の中樹齢林分、D、EおよびFが40～44年生の比較的若い林分（若齢林分）と3グループに分けることができる。また、AとCおよびBとDは同一産地であり、同一産地における樹齢による強度の比較できる。そしてD、EおよびFはほとんど同樹齢であって、産地間の比較が可能である。

2.1.2 供試木

供試木の樹高、胸高直径、枝下高を表-2に、完満度および枝下高率を表-3に示した。また、胸高直径、枝下高および完満度を樹齢との対応で図-3に示した。供試木は立木で各林分7～15本で、計72本である。

胸高直径は65年生のAがすべて40cm以上と大径材であり、中樹齢のBとCでは明らかにBの方が成長がよい。また、若齢のD、EおよびFではDが成長が良く、Eが3林分の中では悪い。しかしながら、これら6林分からの供試木はすべて胸高直径30cm以上の大径木であり、A、B、DおよびFは成長が極めてよく、CおよびEもカラマツ林分として成長のよいものと判断できる。一方高海拔地のGについては明らかに他の6林分と異なり成長の悪い林分である。

図-3に示した枝下高は、ほぼ地位に対応しており、地位の高いA、B、EおよびFが高く、地位の低いGが最も低い傾向にあった。

地位が上位のA、B、E、Fの4林分のなかでは完満度はEが最も高く、BおよびFが中間であり、Aが低い。なお、完満度が低いほど、樹高生長に対して直径生長が旺盛でうらごけな立木であることを示す。地位が中位のC及びDでは明らかにDの完満度が低くうらごけであった。地位の低いGは完満度ではA及びCと同程度であった。

2.2 試験体の採取および仕分け

2.2.1 試験材の調整と経緯

各供試木は現地で伐倒後3.2mに玉切り、丸太下部から、樹幹解析、らせん木理等の調査のための円板を採取し、最終的に3.05mの丸太とした。製材は12.0×12.0cmの断面の正角木取りとし、丸太の末口径により4丁取り（四方桁）、2丁取り（二方桁）、1丁取り（心持ち）とした。これらの正角は1979年から1986年にかけて重松⁵⁻¹¹⁾により用材の品等区分に関する試験に供され、信州大学農学部において保管されていたものである。

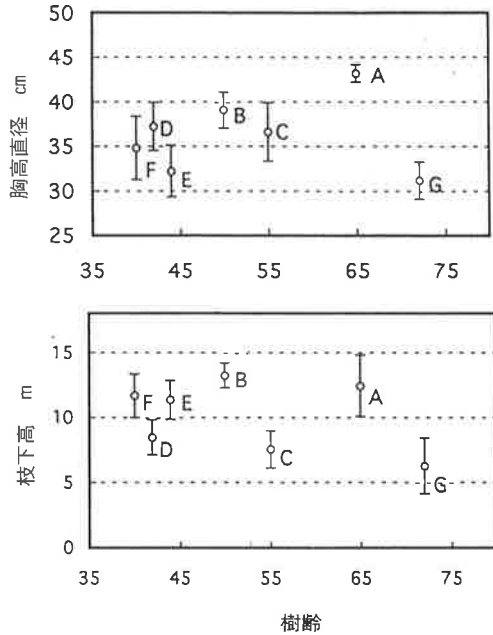


図-3 胸高直径及び枝下高の林分別比較

表-4 試験材の仕分け

林分	正角本数	曲げ用*	引張り用
A	69	38	31
B	82	43	39
C	98	53	45
D	79	42	37
E	73	39	34
F	89	50	39
G	85	50	35
	575	315	260

*：短柱圧縮及びJIS用試験体は曲げ試験終了材より採取した。

2.2.2 試験材の仕分け

1989年、信州大学農学部で保管されていた正角を長野県林業総合センターに運び、次の方法で実大材曲げ試験用、実大材引張り試験用に分けた。

4丁取りの場合：曲げ及び引張り用各2本とした。

3丁取りの場合：曲げ用2本及び引張り用1本とした。

2丁取りの場合：曲げ及び引張り用各1本とした。

1丁取りの場合：番玉の下の方から曲げ用、その上を引張り用として繰り返した。

試験材の仕分けと同時に、死荷重載荷法によるたわみ試験から非破壊による曲げヤング係数、打撃試験¹⁵⁾(基本振動数測定)により動的ヤング係数を測定した。

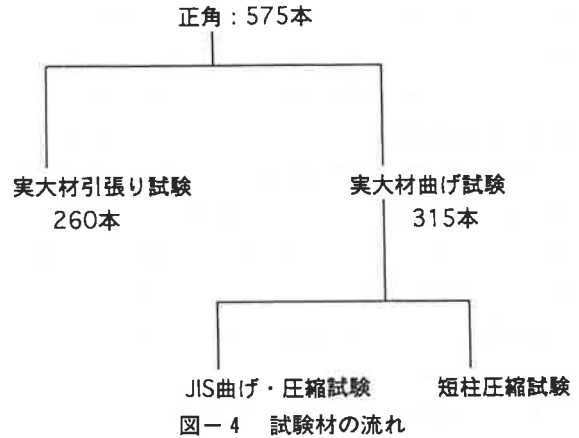


図-4 試験材の流れ

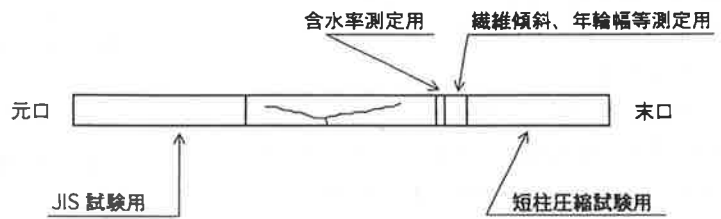


図-5 実大材曲げ破壊試験終了後の試験材の取り扱い

実大材曲げ破壊試験用および実大材引張り試験用に仕分けされた本数の内訳を表-4に、試験材の流れを図-4に示した。曲げ破壊試験終了後、破壊した試験材から図-5に示すように正角の元口からJISの曲げ、圧縮の試験用、末口から短柱圧縮試験用、破壊近傍から含水率測定用、及び繊維傾斜測定用の試験片を採材した。なお、曲げ破壊形態により試験材によっては短柱圧縮試験用の材料が得られないものもあった。

2.3 欠点調査及び強度に影響を与える因子の測定

2.3.1 欠点調査

欠点調査は曲げ及び引張り試験前に欠点調査表を作製し、節については位置、長径、短径及び接線径を記録した。また、丸み及び腐れ等も記録した。

2.3.2 強度に影響する因子の測定

- (1) 密度：実大材曲げ破壊試験および実大材引張り試験直前の重量と体積から求めた。
- (2) 繊維傾斜：曲げ破壊試験終了材から図-5に示した方法で採取した厚さ10cmの試験片の両木口面に平行な基準線を引き、一方の面から割裂し、他方の面上の割裂線と基準線のずれを図-6に示すように基準線を4等分して5箇所測定し、その平均値を長さ1mに対する傾斜mm/mに換算した。

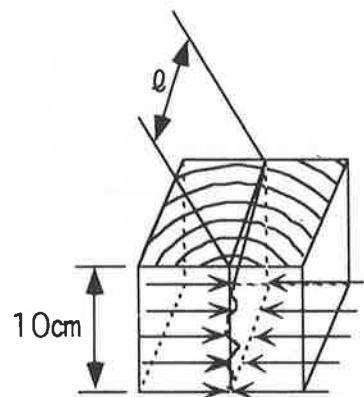


図-6 繊維傾斜及び平均年輪幅の測定
 繊維傾斜 (mm/m) : 5箇所測定値の平均値を長さ1mあたりに換算した。
 平均年輪幅 (mm) : $l / (l \text{に含まれる年輪数})$

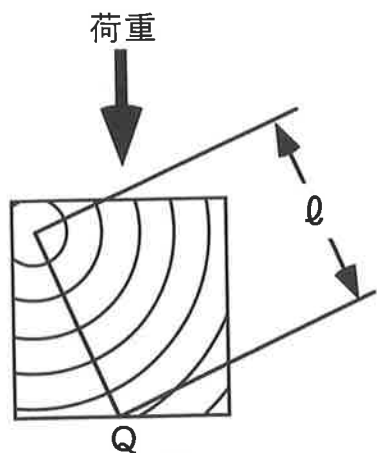


図-7 随と引張り面中心までの距離及び引張り面中心までの年輪数の測定法

Q：引張り面中心

随と引張り面中心までの距離 (DP) (mm)： l の長さ

随と引張り面中心までの年輪数 (NAP)： l に含まれる年輪数

測定精度：0.01mm) を用いて計測し、次式によって死荷重載荷による静的曲げヤング係数 ($E_{dw} : \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$) を算出した。

$$E_{dw} = (\Delta P \times L^3) / (48 I \times \Delta y)$$

ここで、 L ：スパン (cm)、 I ：断面2次モーメント (cm^4)

縦振動による方法は試験体を材軸方向に自由に振動させるように支持台と試験体の間にクッション材を置き、一方の木口面をハンマーで軽く打撃することによって試験体を縦振動させ、他方の木口面近傍に設置したマイクロフォンで材中を伝播した弾性波を縦振動音としてとらえ、FFT スペクトルアナライザに入力した。この時得られた固有振動数 ($f_r : \text{Hz}$) と試験体の密度 ($\rho : \text{g/cm}^3$) から次式により縦振動法による動的縦ヤング係数 ($E_{fr} : \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$) を算出した。

$$E_{fr} = 4 L^2 \times f_r^2 \times \rho / g$$

ここで、 L ：材長 (cm)、 g ：重力加速度 (cm/sec^2)

- (3) 平均年輪幅：繊維傾斜を測定したものと同一試験片を用い、図-6に示すように木口における完全年輪数とそれらの含まれる長さから求めた。
- (4) 随から引張り面中心までの距離および年輪数：実大材曲げ破壊試験において引張り側材面の幅方向の中心と随までの距離を同一木口試験片を用いて図-7に示す方法で測定した。木口上に随が存在しないものについては年輪の状況から随の位置とそこに含まれる年輪数を推定した。
- (5) 節の解析：節径比、集中節径比の測定は針葉樹構造用製材の日本農林規格¹²⁾に従った。
- (6) 含水率：試験時の含水率は図-5に示した含水率測定用試片により JIS Z 2101の含水率の測定に従い、全乾法により求めた。

2.4 非破壊的方法によるヤング係数の測定

1989年、試験材の仕分けと同時に、死荷重載荷法によるたわみ試験から非破壊による曲げヤング係数、打撃試験¹⁵⁾ (縦振動法) により動的ヤング係数を測定した。

死荷重載荷による方法は、試験体をスパン270cmで単純支持し、スパン中央に死荷重 ($\Delta P : \text{kgf}$) として30kgの重錘を載荷した。そのとき生じた曲げたわみ量 ($\Delta y : \text{cm}$) をデジタルダイヤルゲージ (ストローク：50mm、

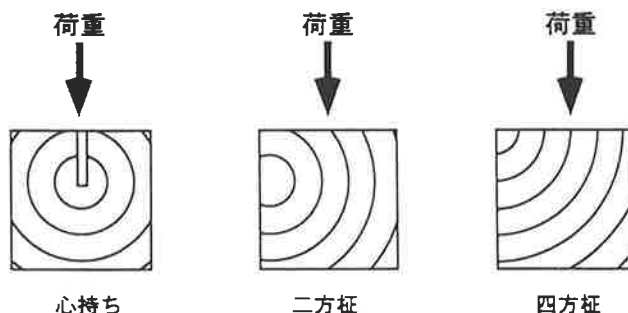


図-8 曲げ破壊試験における荷重のかけ方の基準

2.5 実大材曲げ強度試験

2.5.1 荷重方向

実大材曲げ破壊試験における荷重方向は図-8に示すように次の基準で決定した。

心持ち：背割りの逆面を引張り側に配置した。

二方桁：正直面荷重とした。

四方桁：木表側が引張り面にくるように配置した（木裏荷重）。

ただし、林分Dの二方桁のすべて（12試験体）は木裏側が引張り面にくるように配置した。また、林分Fの四方桁については支点到当たる部分に丸みがあるものがあり、安定してセットできない6試験体は木表荷重とした。

実大材曲げ破壊試験のスパン条件は図-9に示すようにスパン270cm、3等分点荷重で行った。試験機はTCM-30000（ミネベア製）を用い、クロスヘッドスピード5mm/minで行い、破壊荷重から曲げ強さ（ σ_b : kgf/cm²）を、比例限度荷重に対するスパン270cmでのたわみから曲げヤング係数（ E_b : 10³kgf/cm²）を求めた。

$$\sigma_b = 3 a \times P_m / (b \times h^2)$$

$$E_b = \Delta P \times a \times (3L^2 - 4a^2) / (4bh^3 \Delta y)$$

ここでa：荷重点間距離（cm）、 P_m ：破壊荷重（kgf）、b：正角幅（cm）、h：正角高さ（cm）、 ΔP ：比例域内における上限荷重と下限荷重の差（kgf）、 Δy ： ΔP に対応するスパン中央部のたわみ（cm）、L：スパン（cm）。

3. 結果と考察

3.1 林分別曲げ強度性能

林分別に正角の曲げ強さ、曲げヤング係数および主な測定項目の平均値及び標準偏差を表-5及び表-6に示した。曲げ強さと曲げヤング係数についてはその分布を正規分布と仮定して5%下限値（=平均値-1.645×標準偏差）も示した。また、曲げ強さ、曲げヤング係数、平均年輪幅及び密度

表-5 林分別曲げ破壊試験結果

林分	樹齢	正角本数	曲げ強さ (σ_b)				曲げヤング係数 (E_b)				* σ_b/E_b
			平均値 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	標準偏差 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ×10 ³ kgf/cm ²	
A	65	38	541	129	23.8	329	105.4	10.6	10.0	88.0	0.0051
B	50	43	426	124	29.2	221	90.2	15.6	17.3	64.5	0.0047
C	55	53	447	94	21.1	292	95.6	12.9	13.5	74.4	0.0047
D	42	42	395	123	31.3	192	89.3	15.7	17.6	63.5	0.0044
E	44	39	482	130	27.0	268	107.1	14.5	13.5	83.3	0.0045
F	40	50	439	115	26.2	250	90.8	15.3	16.9	65.6	0.0048
G	72	50	426	107	25.2	249	95.8	17.4	18.2	67.2	0.0044
全体		315	448	123	27.5	246	95.9	16.0	16.7	69.6	0.0047

*：曲げ強さの平均値を曲げヤング係数の平均値で除した値である。

表-6 林分別主な測定項目

林分	樹齡	正角本数	区分	密度 g/cm ³	平均 年輪幅 mm	繊維傾斜 mm/lm	最大節徑比 %	集中節徑比 %	試験時 含水率 %
A	65	38	平均值	0.531	3.23	46.9	33.0	41.1	13.3
			標準偏差	0.038	0.43	25.5	9.6	11.2	0.7
B	50	43	平均值	0.472	4.22	65.2	34.2	50.4	12.8
			標準偏差	0.035	0.52	33.2	10.6	13.8	0.4
C	55	53	平均值	0.448	3.48	57.2	25.6	34.0	13.9
			標準偏差	0.025	0.55	25.8	7.7	10.3	0.7
D	42	42	平均值	0.475	5.03	59.6	25.8	33.1	12.6
			標準偏差	0.036	0.92	31.6	7.4	13.0	0.6
E	44	39	平均值	0.515	4.44	62.7	22.8	37.6	14.4
			標準偏差	0.040	0.90	21.7	7.6	13.7	0.5
F	40	50	平均值	0.468	4.15	35.4	32.7	46.7	12.3
			標準偏差	0.032	0.62	19.3	8.9	13.1	0.4
G	72	50	平均值	0.489	2.75	60.5	24.4	39.7	12.3
			標準偏差	0.047	0.76	23.5	6.5	8.2	0.6
全体	315		平均值	0.483	3.87	55.1	28.3	40.4	13.1
			標準偏差	0.045	0.99	27.7	9.4	13.2	0.9

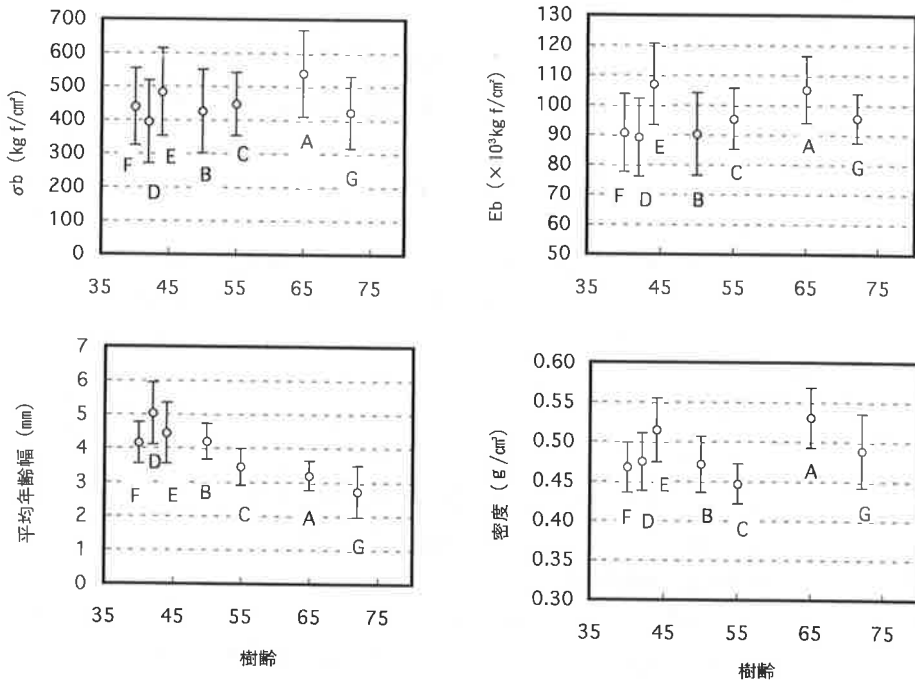


図-10 曲げ強さ (σ_b)、曲げヤング係数 (E_b)、平均年輪幅および密度の林分比較
A~G: 林分

について平均値と標準偏差の範囲を樹齢との対応で図-10に示した。表-6に示すように試験時の含水率は林分別の平均値で12.3%~14.4%の範囲にあり、試験結果の含水率補正はしなかった。また、供試材は製材後数年以上経過しており、長野県林業総合センターに移してからは室内に保存したので、完全に気乾状態であり、2%程度の差は試験を実施した季節の平衡含水率の違いによるものと思われる。

3.1.1 樹齢による曲げ強度性能の比較

表-5及び図-10に示すように一般的な林分としての、A~Fにおいて、若齢林分(40~44年生)であるF、D及びEでは、曲げ強さは平均でそれぞれ439、395及び482kgf/cm²で樹齢が近いにも関わらずかなり異なっていた。中齢林分(50及び55年生)のB及びCは同様にそれぞれ426及び447kgf/cm²であり、値を見る限りにおいて若齢林分と大差がなかった。一方、高樹齢の65年生のA林分が最も曲げ強さの値が高く、平均で541kgf/cm²であった。

曲げヤング係数については林分間における違いの傾向は曲げ強さとほとんど同様であったが、林分Aからの正角が、曲げ強さに認められたように突出しておらず、平均値では林分Eが最も高かった。

図-10に示すように林分B、F、D及びEは正角の平均年輪幅の平均値が4mm以上と成長のかなり良い林分であり、特にDでは平均で5mmを超えており、極めて成長の良いものである。従って、Dでは、各正角に占める未成熟材の割合が高く、その結果、曲げ強さが最も低かったものと思われる。加えて二方桁の荷重方向が林分Dだけ木表荷重であったことも影響していると思われる。また、林分Eは表-1に示したように風の影響を受け、偏心成長が著しく、圧縮アテが認められる正角が多く、近い樹齢の林分と比較すると密度も高い。針葉樹で認められる圧縮アテ材は、正常材に比べて一般に木化が進み、密度が高く、そのために曲げ破壊係数や圧縮強さが正常材よりも高い¹⁵⁾。このため曲げ強さおよび曲げヤング係数が高くなったものと考えられる。

一方、林分の中では最も高樹齢であるG(伊那営林署管内、72年生)については産地が高海拔であり、地位も低く、成長が悪く、年輪幅が狭く、未成熟材の占める割合は少ないものの、成長が遅いため、晩材形成が、一般林分の成熟材ほどでなく、曲げ強さおよび曲げヤング係数とも中庸の値を示したものと思われる。既往¹⁶⁾の比較的近似した試験結果でも一般的な3林分からの正角の曲げ強さは高樹齢材からのものが曲げ強度性能が高く、本試験と同様な傾向を示していた。さらに海拔1920mの天然林からの正角の結果¹⁶⁾では曲げ強さ及び曲げヤング係数は平均で369kgf/cm²、 75.9×10^3 kgf/cm²と明らかに低かった。従って、本試験の林分Gの結果は、その天然性林からのものに比べればはるかに優れており、一般的な林分と高海拔天然生林との中間的な強度的性能と考えられた。

重松¹⁷⁾は広範なカラマツ材質試験の結果から、信州カラマツ造林木における3ないし4齢級からの肥大成長は、単にその径径が大きくなるだけでなく、仮道管が長く、らせん木理が比較的少ないため強度的に優れた良質材の生産となることを示している。本研究の結果でも、A~Fの一般的な林分において年輪幅が広く、二方桁における荷重方向が他と異なる林分Dとアテ材の影響が考えられた林分Eを除くと、高樹齢になるほど曲げ強度性能の高い正角が得られることを示していた。

3.1.2 同一産地における樹齢の差の検討

林分AとCは白田営林署管内、BとDは伊那営林署管内で図-2に示したように地位は異なるが同一産地とみなして、おのおのを比較した。白田営林署管内の65年生のAと55年生のCでは明らかに曲げ強さおよび、曲げヤング係数ともAの方が高い。同様に伊那営林署管内の50年生のBと42年生のDでは曲げ強さ及び曲げヤング係数ともBの方が高い。同一産地で比較すれば樹齢が上がるほど

曲げ強度性能の高い正角が得られることが示された。

3.1.3 産地間による検討

林分D（伊那営林署管内、42年生）、林分E（駒ヶ根営林署管内、44年生）、林分F（諏訪営林署管内、40年生）はほぼ樹齢が等しいのでこの3林分で比較した。曲げ強さ、曲げヤング係数ともに平均値ではE > F > Dの順で、特にEが突出している。前述したようにEはあての影響が考えられ、またDが極めて成長が良く、正角の平均年輪幅の平均が5mmを超えていることなどを考慮すると、この差と産地による違いを結びつけるには無理があると思われる。

3.1.4 木取り別にみた林分比較

曲げ強さ及び曲げヤング係数を林分木取り別に図-11に示した。図に示すように、曲げ強さは林分Dの心持ちと二方桁、林分Fの二方桁と四方桁は同程度であるが、傾向としては心持ち < 二方桁 < 四方桁の順に曲げ強さが増加しており、林分A、B、E、Gはその傾向が顕著である。林分Dの二方桁は荷重方向が木表荷重であり、この結果心持ちと二方桁が同程度となったものと思われる。また、Fの四方桁のうち6試験体は支点となる部分の丸みのため荷重方向が木表荷重となっておりその影響も現れているものと思われる。曲げヤング係数は林分B、D、Gにおいてその傾向（心持ち < 二方桁 < 四方桁）が顕著であり、林分AおよびCは木取り区分による差が少なく、Eは心持ちと二方桁が同程度という結果であった。林分Fについては四方桁で逆転しているが、Fの四方桁の場合、径級に対して少し無理な木取りをしており、丸みが多いものが多い、曲げ強さの結果とあわ

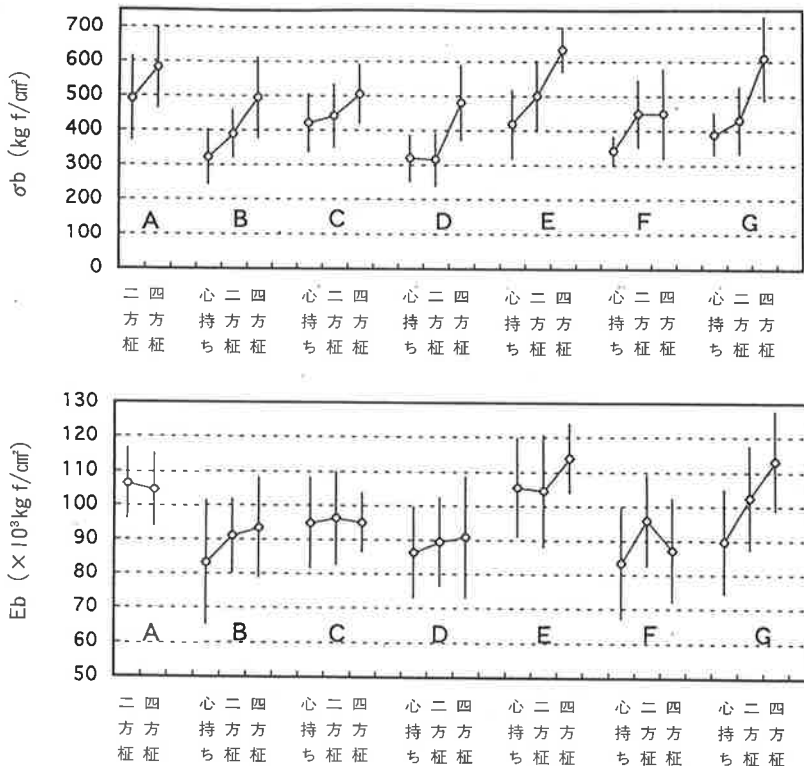


図-11 曲げ強さ (σ_b) 及び曲げヤング係数 (E_b) の林分木取り別比較
A~G: 林分

せてその影響と考えられる。

曲げ試験における荷重方向が、林分Dを除いて二方桁は柵目面荷重であり、四方桁は木表側が曲げ試験の引張り側にきていることから、四方桁に丸みの多かった林分Fを除けば曲げ強さでは二方桁と四方桁の差が顕著に現れたものと考えられる。

3.1.5 番玉別にみた林分比較

曲げ強さ及び曲げヤング係数の番玉別の林分比較を図-12に示した。曲げ強さは明らかに番玉が上がるほど値が下がる傾向にあり、このことは7林分すべてに共通である。曲げヤング係数については曲げ強さほど傾向は顕著ではなかった。曲げヤング係数は林分Aについてはほとんど変化がないが、正角がIV番玉までであり、すべて四方桁あるいは二方桁で、心持ちが採材できる5番玉以降は欠落していることも影響しているものと思われる。

密度、平均年輪幅、最大単独節径比及び集中節径比の番玉別林分比較を図-13に示した。測定項目のなかでは密度及び平均年輪幅の変動では各林分に共通的特徴はみだせなかった。繊維傾斜については、林分によりその程度に差はあるが、番玉が上がるほど大きくなる傾向にあった。また、最大節径比及び集中節径比も同様に番玉が上がるにつれて大きくなる傾向にあった。

番玉が上がるに従い、曲げ強さが下がるのは上記の繊維傾斜及び節の影響の他に、番玉が低いほど四方桁が多く、上部ほど二方桁及び心持ちが多くなるという木取りの影響に加えて、上部ほど樹幹に占める未成熟材の割合が高くなるためと考えられる。

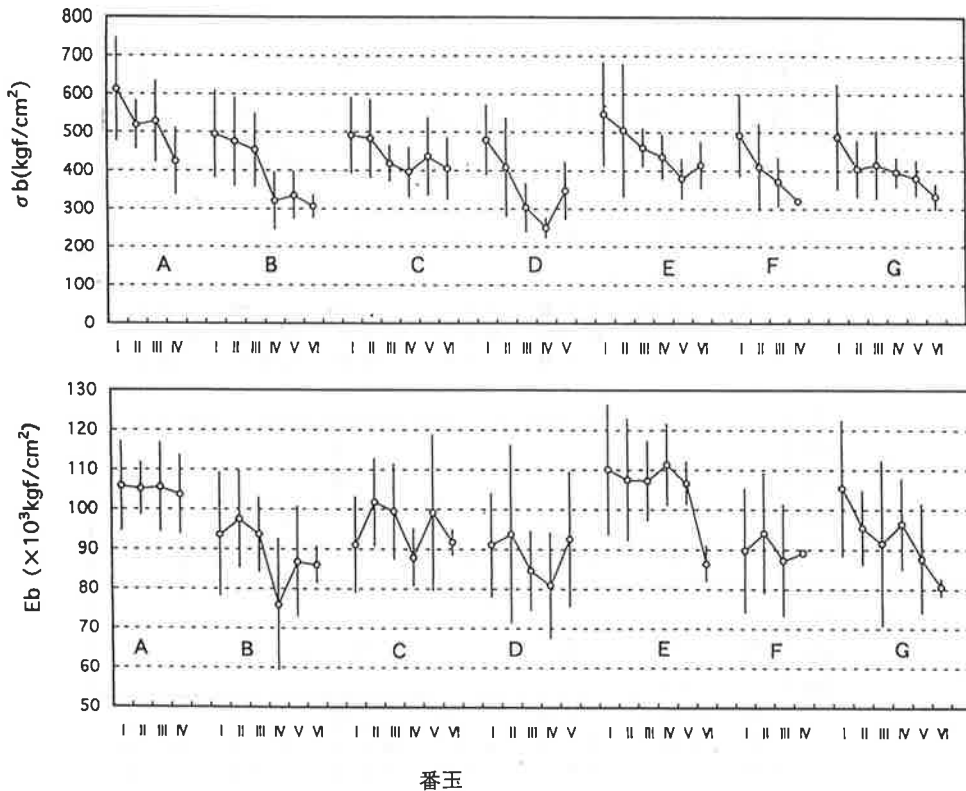


図-12 曲げ強さ (σb) 及び曲げヤング係数 (Eb) の林分番玉別比較
A~G: 林分

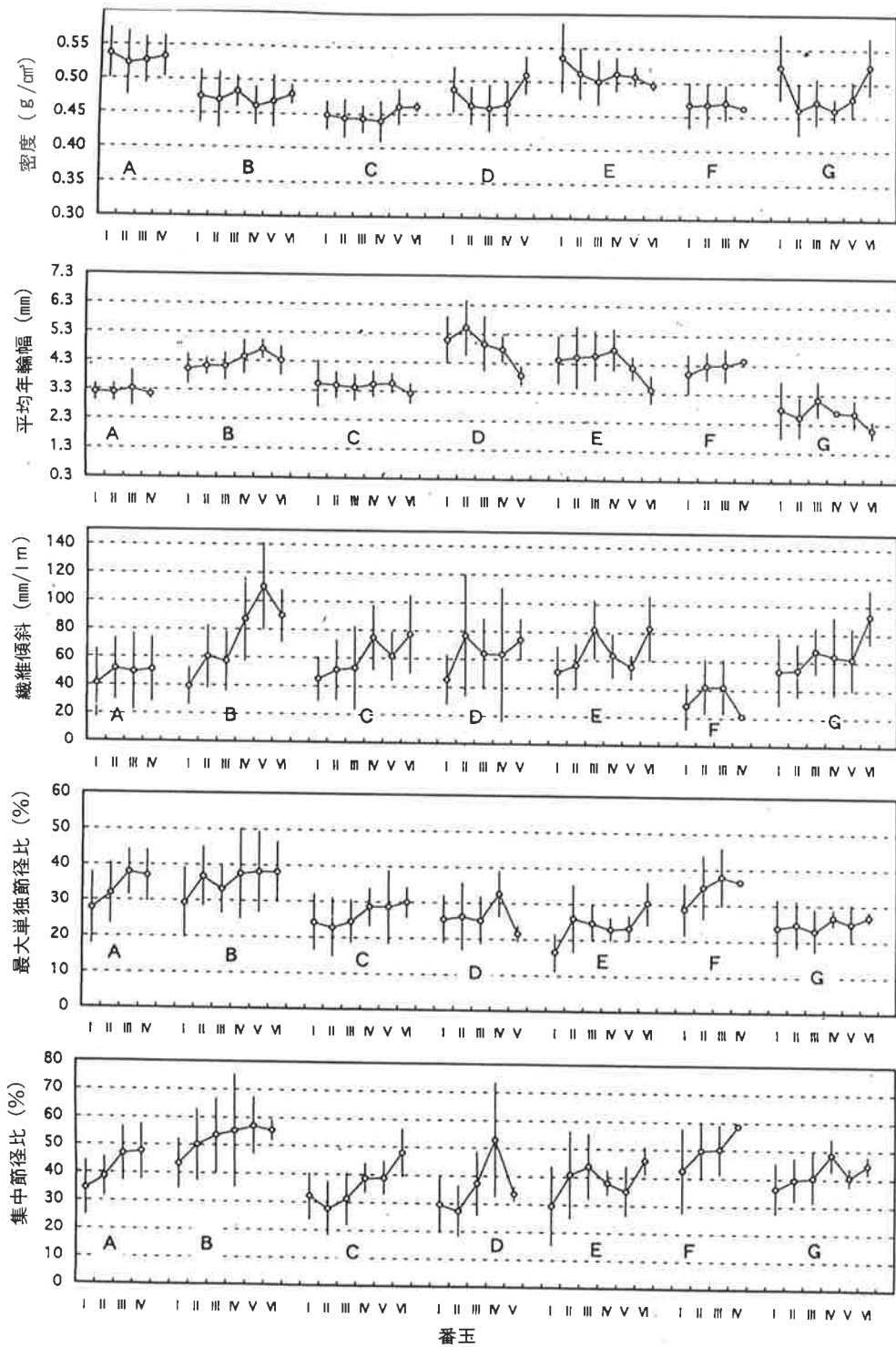


図-13 密度、平均年輪幅、繊維傾斜、最大単独節径比及び集中節径比の林分番玉別比較
A~G: 林分

3.2 林分を考慮しない曲げ強度性能

ここでは林分を考慮しないで検討する。

3.2.1 曲げ強度性能の木取り別比較

曲げ強さ及び曲げヤング係数については荷重方向が他と異なった林分Dの二方桁の12試験体、林分Fの四方桁のうち6試験体を除く297試験体について考察する。心持ち、二方桁、四方桁の木取り別の曲げ強さ及び曲げヤング係数の平均値および標準偏差を表-7に、そしてこれらの関係を図-14に示した。

曲げ強さは明らかに心持ち<二方桁<四方桁の順になっており、四方桁は5%下限値でも300 kgf/cm²を超えていた。

試験方法の2.5で示したとおり、荷重方向は林分Dを除いて二方桁は柾目荷重、四方桁は木裏荷重に統一している。従って、二方桁については平均的な値、四方桁については曲げ試験における引張り側に成熟材部がくることになり、高い値となることが予想できる。既往の荷重方向について検討した結果¹⁰⁾では木裏荷重と木表荷重の差は平均で二方桁については107kgf/cm²、四方桁については89kgf/cm²であった。本試験の曲げ強さの結果は当然のことと考えられる。

一方曲げヤング係数は、曲げ強さのような顕著な傾向は示さず、平均値では二方桁の方が四方桁よりも値が僅かに高く、これも既往¹⁰⁾の結果と一致した。

表-7に示すように曲げヤング係数に対する曲げ強さの比は心持ち<二方桁<四方桁の順になっていた。この値が大きいほど曲げヤング係数の値に対して曲げ強さが大きいことになり、四方桁の値が明らかに高いのは、荷重方向の影響によるものと考えられる。

表-7 木取り別曲げ破壊試験結果

木取り*	正角 本数	曲げ強さ (σ_b)				曲げヤング係数 (E_b)				** σ_b/E_b
		平均値 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	平均値 $\times 10^3$ kgf/cm ²	標準偏差 $\times 10^3$ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 $\times 10^3$ kgf/cm ²	
心持ち	93	383	86	22.5	241	92.9	16.9	18.2	65.2	0.0041
二方桁	99	448	103	22.9	279	98.8	14.0	14.2	75.6	0.0045
四方桁	105	527	123	23.4	324	97.5	16.4	16.8	70.5	0.0054
全体	297	456	121	26.6	256	96.5	16.0	16.6	70.1	0.0047

* : 二方桁については林分Dの12試験体、四方桁については林分Fの6試験体を除いてある。

** : 曲げ強さの平均値を曲げヤング係数の平均値で除した値である。

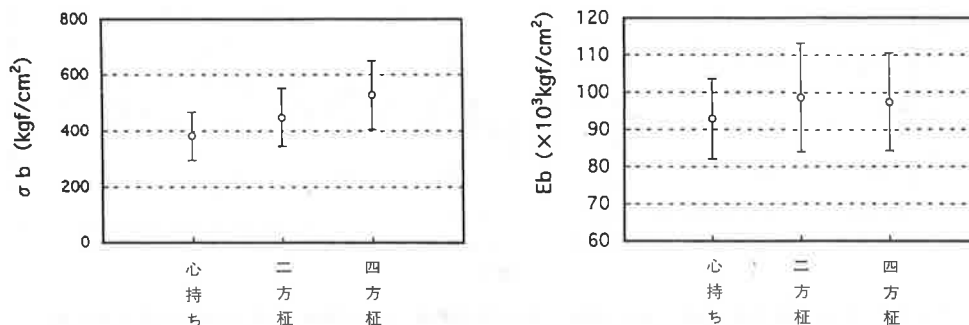


図-14 曲げ強さ (σ_b) 及び曲げヤング係数 (E_b) の木取り別比較

表-8 木取り別主な測定項目

木取り	正角本数	区分	密度 g/cm ²	平均 年輪幅 mm	繊維傾斜 mm/1m	最大節径比 %	集中節径比 %
心持ち	93	平均值	0.477	3.84	64.8	25.5	42.4
		標準偏差	0.037	1.13	27.0	7.4	10.8
二方桁	111	平均值	0.480	3.70	58.2	29.6	41.6
		標準偏差	0.042	0.95	27.0	10.1	14.6
四方桁	111	平均值	0.492	4.05	43.9	29.4	37.4
		標準偏差	0.051	0.87	24.7	9.5	13.1
全体	315	平均值	0.483	3.87	55.1	28.3	40.4
		標準偏差	0.045	0.99	27.6	9.4	13.2

表-9 番玉別曲げ破壊試験結果

番玉	* 正角 本数	曲げ強さ (σb)				曲げヤング係数 (Eb)				** σb/Eb
		平均值 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	平均值 ×10 ³ kgf/cm ²	標準偏差 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ×10 ³ kgf/cm ²	
I	102	518	123.2	23.8	316	97.7	16.7	17.1	70.2	0.0053
II	61	465	123.2	26.5	262	100.4	14.5	14.4	76.5	0.0046
III	61	433	97.7	22.6	272	96.5	15.4	15.9	71.3	0.0045
IV	33	383	83.2	21.7	246	92.7	17.3	18.7	64.1	0.0041
V	26	379	75.2	19.8	255	92.5	16.3	17.6	65.7	0.0041
VI	14	377	74.3	19.7	254	87.0	5.6	6.4	77.8	0.0043
全体	297	456	121.2	26.6	256	96.5	16.0	16.6	70.1	0.0047

* : 二方桁については林分Dの二方桁(12試験体)、林分Fの丸みのため荷重方向を変えた6試験材を除いてある。

** : 曲げ強さの平均値を曲げヤング係数の平均値で除した値である。

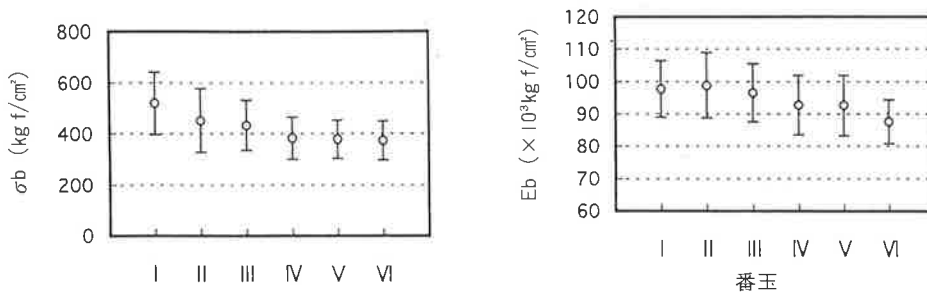


図-15 曲げ強さ (σb) 及び曲げヤング係数 (Eb) の番玉別比較

主な測定項目の木取り別比較を表-8に示した。密度は心持ち<二方桁<四方桁の順に大きくなる傾向が認められたのに対して、平均年輪幅は木取りによる傾向は認められなかった。これは素材が大径材であり、丸太の径により木取りが決まり、四方桁および二方桁は番玉の下の方から、心持ちは上の方から木取られる。その結果、四方桁および二方桁はカラマツの特徴である初期成長の旺盛な部分と、その後の安定した部分を含むことになる。一方心持ちは番玉が上の方なので、間伐材等と異なり、年輪幅はそれほど大きくならない結果、平均年輪幅は同程度になったものと考えられる。

繊維傾斜は心持ち>二方桁>四方桁の順になる傾向にあった。既往の研究¹⁹⁻²³⁾によれば、カラマツの幹におけるらせん木理傾角は随から左旋回で発達して数年輪目で最大角度に達し、その後ゆるやかに減少経過をたどるのが一般的パターンである。基本的に心持ち>二方桁>四方桁の順に随から遠い部分をより含むことになるから、繊維傾斜の木取りによる傾向は説明できる。最大単独節径比は心持ちが少なく、二方桁と四方桁が同程度であったが、集中節径比は心持ち>二方桁>四方桁の傾向にあった。

3.2.2 曲げ強度性能の番玉別比較

ここでも3.2.1と同様に曲げ強さ及び曲げヤング係数については297試験体で、密度等の材質指標については315試験体で検討する。

曲げ強さ及び曲げヤング係数の番玉別比較を表-9及び図-15に示した。図に示すように曲げ強さはI番玉が強く、平均値では番玉が上がるのに従い、IV番玉までは減少し、それ以上ではほぼ同様

表-10 番玉別主な測定項目

番玉	正角本数	区分	密度 g/cm ³	平均年輪幅 mm	繊維傾斜 mm/1 m	最大節径比 %	集中節径比 %	比例制限割合 %
I	107	平均値	0.494	3.88	42.1	25.7	36.1	69.5
		標準偏差	0.050	1.02	20.6	8.8	12.5	9.8
II	69	平均値	0.473	3.97	54.1	29.3	39.9	72.2
		標準偏差	0.043	1.06	25.8	10.0	14.0	10.7
III	66	平均値	0.479	3.93	58.4	29.5	42.4	73.3
		標準偏差	0.041	0.94	26.4	9.0	12.4	11.5
IV	34	平均値	0.478	3.94	67.6	31.4	46.3	75.8
		標準偏差	0.044	0.88	30.2	9.2	14.1	12.0
V	26	平均値	0.480	3.54	71.9	27.7	42.0	75.1
		標準偏差	0.033	0.89	28.8	9.3	10.0	12.0
VI	13	平均値	0.484	3.35	83.9	31.5	48.7	69.8
		標準偏差	0.029	0.80	24.2	6.8	7.3	9.4
全体	315	平均値	0.483	3.87	55.1	28.3	40.4	72.0
		標準偏差	0.045	0.99	27.6	9.4	13.2	11.0

な値であった。一方5%下限値で見るとばらつき
の関係からI番玉が突出しているのに対して、II
~IV番玉は236~255kgf/cm²とほとんど近い値で
あり、曲げヤング係数は全体としては番玉が上がる
に従い、平均値は下がる傾向にあったが、I番玉
よりもII番玉の方が、またIV番玉よりもV番玉
の方が値が高かった。5%下限値ではVI番玉が標
準偏差が小さかったことから最も高い値となった
が、試験材数が最も少ないことを考慮すべきである。

各測定項目の番玉別比較を表-10及び図-16に示
した。測定項目の中で傾向が認められたものは繊維
傾斜で、番玉があがるほど繊維傾斜が増大した。
また、最大単独節径比および集中節径比も番玉が
上がるほど大きくなる傾向にあった。

3.2.3 曲げ強度性能の木取り番玉別比較

ここでも、297試験体について考察する。

曲げ強さと曲げヤング係数の木取り番玉別比較
を表-11に、そしてその関係を図-17に示した。木
取りの3区分とも番玉が上がるほど曲げ強さはそ
の値が低くなる傾向にあるが、心持ちちは四方桁、
二方桁ほど顕著ではない。一方曲げヤング係数も
傾向としては心持ちおよび二方桁は同様な傾向を
示したが、四方桁については、III番玉までは増加
傾向にあった。表-11の曲げ強さの曲げヤング係
数に対する比率は四方桁のI番玉が突出して高く、
番玉が上がるに従い減少する。この四方桁におい
て認められる傾向は曲げ試験における荷重方向の
影響、すなわち曲げ破壊試験における引張り側に
木表側がきているためと考えられる。

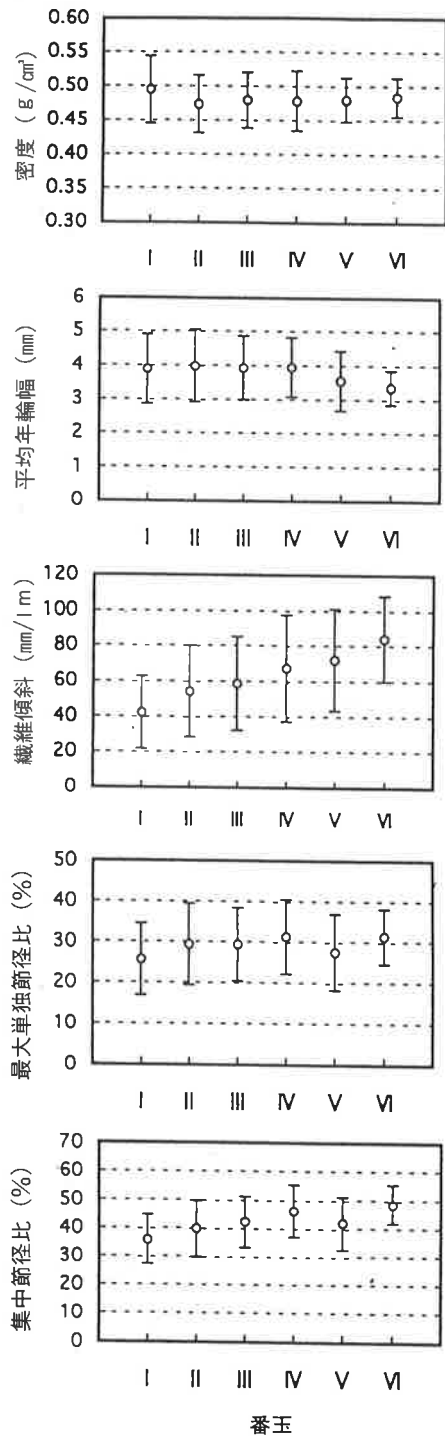


図-16 密度、平均年輪幅、繊維傾斜、
最単独大節径比及び集中節径比
の番玉別比較

表-11 木取り番玉別曲げ破壊試験結果

木取り	番玉	正角本数	曲げ強さ (σ_b)				曲げヤング係数 (Eb)				σ_b/Eb *
			平均値 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	平均値 $\times 10^3$ kgf/cm ²	標準偏差 $\times 10^3$ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 $\times 10^3$ kgf/cm ²	
心持ち	I	11	414	80.1	19.4	282	97.7	18.1	18.5	67.9	0.0042
	II	9	407	131.6	32.3	191	98.8	13.3	13.5	76.9	0.0041
	III	21	382	72.3	18.9	263	90.1	16.3	18.1	63.2	0.0042
	IV	18	363	82.4	22.7	227	92.1	20.8	22.6	57.8	0.0039
	V	21	381	79.2	20.8	251	94.8	17.3	18.2	66.4	0.0040
	VI	13	373	76.1	20.4	248	87.5	5.4	6.2	78.6	0.0043
二方桁	I	21	488	116.4	23.8	297	101.2	15.4	15.2	75.9	0.0048
	II	31	447	96.6	21.6	288	100.3	12.7	12.6	79.4	0.0045
	III	29	452	100.1	22.2	287	99.7	14.5	14.5	75.9	0.0045
	IV	13	410	79.8	19.5	278	95.2	11.7	12.3	76.0	0.0043
	V	5	369	54.1	14.7	280	83.0	4.3	5.2	75.9	0.0044
四方桁	I	70	544	120.0	22.1	346	96.6	16.7	17.3	69.2	0.0056
	II	22	511	134.4	26.3	290	100.2	17.4	17.3	71.6	0.0051
	III	11	480	91.0	19.0	330	100.3	11.2	11.1	82.0	0.0048
	IV	2	386	58.0	15.0	291	81.6	0.8	1.0	80.3	0.0047
全体		297	456	121.2	26.6	256	96	16.0	16.6	70.1	0.0047

*: 曲げ強さの平均値を曲げヤング係数の平均値で除した値である。
二方桁については林分Dの二方桁 (12試験体)、林分Fの丸みのため荷重方向を変えた四方桁の6試験材を除いてある。

3.3 各測定項目と曲げ強度性能との関係

3.3.1 林分別検討

各測定項目と曲げ強さ及び曲げヤング係数の関係を示す単相関係数を林分別に表-12及び表-13に示した。

(1) 密度との関係

密度と曲げ強さの関係は7林分とも有意な関係が認められたが、その程度は異なっており、A~Fを一般的な林分とみなすとき、樹齢50年以上のA、B、およびCでは関係が低く、40~44年生のD、E及びFで比較的高い関係が認められた。そして、生長の悪い林分Gにおける関係が最も高かった。

表-12に示すように、曲げヤング係数と密度との関係は林分Aを除けば相関係数は0.5以上であり、特に林分Fについては突出して高かった。

(2) 平均年輪幅との関係

平均年輪幅と曲げ強さとの関係は

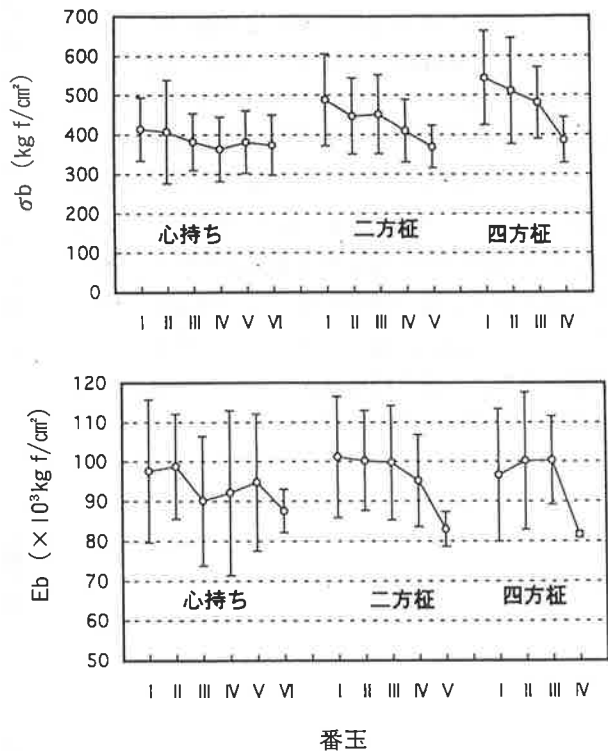


図-17 曲げ強さ (σ_b) 及び曲げヤング係数 (Eb) の木取り番玉別比較

表-12 林分別各測定因子と曲げ強さの関係(単相関係数)

木取り	本数	密度	平均年輪幅	繊維傾斜	最大単独節径比		引張り面最大単独節径比		集中節径比		引張り面集中節径比		随-引張り面中心		曲げヤング係数
					中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	距離 ¹⁾	年輪数 ¹⁾	
A	38	0.328 *	-0.057	-0.422 **	-0.212	-0.158	-0.465 **	-0.375 *	-0.199	-0.122	-0.452 **	-0.409 **	0.552 **	0.583 **	0.394 *
B	43	0.324 *	-0.406 **	-0.441 **	0.164	-0.120	-0.470 **	-0.566 **	-0.158	-0.290	-0.447 **	-0.488 **	0.423 **	0.576 **	0.642 **
C	53	0.370 **	-0.023	-0.316	-0.476 **	-0.295 *	-0.505 **	-0.551 **	-0.340	-0.338	-0.469 **	-0.543 **	0.244	0.203	0.460 **
D	42	0.433 **	0.148	-0.360 *	-0.222	-0.413 **	-0.059	0.000	-0.317 *	-0.497 **	-0.115	-0.134	0.597 **	0.643 **	0.612 **
E	39	0.505 **	-0.341 *	-0.066	-0.361 *	-0.366 *	-0.525 **	-0.686 **	-0.332 *	-0.545 **	-0.575 **	-0.664 **	0.477 **	0.638 **	0.469 **
F	50	0.604 **	-0.330 *	-0.223	-0.611 **	-0.458 **	-0.423 **	-0.584 **	-0.407 **	-0.406 **	-0.352 **	-0.581 **	0.207	0.260	0.645 **
G	50	0.651 **	0.034	-0.298	-0.245	0.076	-0.551 **	-0.484 **	-0.525 **	-0.254	-0.516 **	-0.589 **	0.512 **	0.470 **	0.602 **
全体	315	0.496 **	-0.168 **	-0.308 **	-0.189 **	-0.173 **	-0.443 **	-0.454 **	-0.267 **	-0.296 **	-0.433 **	-0.481 **	0.456 **	0.495 **	0.592 **

1) : 曲げ試験における引張り面中心までの随からの距離及び年輪数

* : 危険率5%で有意、** : 危険率1%で有意

表-13 林分別各測定因子と曲げヤング係数の関係(単相関係数)

木取り	本数	密度	平均年輪幅	繊維傾斜	最大単独節径比		引張り面最大単独節径比		集中節径比		引張り面集中節径比		随-引張り面中心	
					中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	距離 ¹⁾	年輪数 ¹⁾
A	38	0.274	-0.337 *	-0.436 **	-0.202	-0.247	-0.122	-0.049	-0.118	0.084	-0.108	-0.022	-0.118	0.021
B	43	0.557 **	-0.238	-0.220	0.001	-0.153	-0.189	-0.357 *	-0.005	-0.137	-0.025	-0.229	0.082	0.208
C	53	0.567 **	-0.250	0.100	-0.384 **	-0.325	-0.145	-0.237	-0.264	-0.218	-0.066	-0.206	0.014	0.085
D	42	0.602 **	-0.026	-0.208	-0.293	-0.267	-0.239	-0.133	-0.168	-0.140	-0.099	0.002	0.045	0.084
E	39	0.613 **	-0.067	-0.135	-0.206	-0.211	-0.090	-0.339 *	-0.303	-0.275	-0.172	-0.136	0.047	0.066
F	50	0.834 **	-0.127	-0.175	-0.265	-0.193	-0.073	-0.084	0.029	-0.074	0.056	-0.055	-0.058	-0.060
G	50	0.535 **	-0.025	-0.020	-0.226	0.053	-0.443	-0.195	-0.531 **	-0.277	0.364 *	-0.372 **	0.189	0.138
全体	315	0.606 **	-0.160 **	-0.130 *	-0.200 **	-0.199 **	-0.223 **	-0.246 **	-0.178 **	-0.169 **	-0.151 **	-0.232 **	0.088	0.167 **

1) : 曲げ試験における引張り面中心までの随からの距離及び年輪数

* : 危険率5%で有意、** : 危険率1%で有意

林分B、E及びFで認められるものの、それほど高くなく、曲げヤング係数との関係も有意な関係は林分Aについて認められるだけであった。

(3) 繊維傾斜との関係

繊維傾斜との関係は曲げ強さではA、B及びDに認められ、曲げヤング係数では林分Aについて認められる程度であった。

(4) 節との関係

節と曲げ強さの関係では検討した中では曲げ試験における引張り面の節径比及び集中節径比との関係が、総じて高かったが、林分Dだけは4材面評価のそれらとの関係の方が高かった。曲げ強さに比較して節と曲げヤング係数との関係ははるかに低いものとなった。

(5) 随から曲げ試験における引張り面中心の距離及び年輪数との関係

随から引張り面までの距離と年輪数は林分CとFを除いて有意な相関関係が認められた。このことは曲げ応力を最も受ける引張り面が随から離れた位置にあるほど曲げ強さはその値が高いことを示している。また、カラマツのように生長がよく、未成熟材部が顕著な樹種は、曲げ応力を受ける横架材等に使用する場合、有利な使い方があることを示している。一方、引張り面中心からの距離及び年輪数と曲げヤング係数との関係は曲げ強さと異なり、有意な関係が認められた林分はなかった。

(6) 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

曲げヤング係数との関係は、最も安定した関係と認められるが、林分Aにおいては $r = 0.394^{**}$ と最も低かった。これは表-5に示すように曲げ強さ/曲げヤング係数の比が他の林分に比べて高く、曲げヤング係数に対して曲げ強さの値が高い林分であり、その影響も考えられる。

3.3.2 木取り別検討

各測定項目と曲げ強さ及び曲げヤング係数の関係を示す単相関係数を木取り別に表-14及び表-15に示した。

(1) 密度との関係

曲げ強さと密度との関係は心持ち<二方桁<四方桁の順に高くなり、二方桁及び四方桁では比較的高い関係が認められた。曲げヤング係数については傾向は同じであるがその関係は曲げ強さとの場合よりもはるかに高かった。

(2) 平均年輪幅との関係

平均年輪幅と曲げ強さの関係はそれほど強くなく、心持ちでは有意な関係は認められず、二方桁及び四方桁で有意な関係が認められた。曲げヤング係数との関係では二方桁について $r = -0.416^{**}$ と比較的高い関係が認められたが、四方桁についてはそれほどではなく、心持ちについては有意な関係は認められなかった。

(3) 繊維傾斜との関係

繊維傾斜との関係は、曲げ強さの二方桁だけに有意な関係が認められた。これは二方桁が桁目面荷重のためと考えられる。曲げヤング係数との間には有意な関係は認められなかった。

(4) 節との関係

節との関係は引張り面の最大単節径比及び集中節径比との関係が4材面におけるそれよりも高い傾向にあるが、曲げ強さ、曲げヤング係数とも二方桁における関係が低かった。これは桁目面荷重が、心持ち及び四方桁よりも繊維傾斜の影響を受けること、また、引張り面にお

表-14 木取り別各測定因子と曲げ強さの関係 (単相関係数)

木取り	本数	密度	平均年輪幅	繊維傾斜	最大単独節径比			引張り面最大単独節径比			集中節径比			引張り面集中節径比			随-引張り面中心		曲げヤング係数
					中央区間	全区間	中央区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	距離 ¹⁾	
心持ち	93	0.287 **	-0.138	-0.112	-0.382 **	-0.416 **	-0.304 **	-0.378 *	-0.212 *	-0.332 **	-0.298 **	-0.383 **	0.029 *	0.203 *	0.565 **				
二方桁	111	0.485 **	-0.290 **	-0.300 **	-0.116	-0.247 *	-0.174	-0.266 **	-0.020	-0.221 *	-0.136	-0.278 **	0.306 **	0.371 **	0.574 **				
四方桁	111	0.575 **	-0.300 **	-0.167	-0.260 **	-0.230 *	-0.499 **	-0.488 **	-0.320 **	-0.250 *	-0.475 **	-0.467 **	0.271 **	0.472 **	0.729 **				
全体	315	0.496 **	-0.168 **	-0.308 **	-0.189 **	-0.173 **	-0.443 **	-0.454 **	-0.267 **	-0.296 **	-0.433 **	-0.481 **	0.456 **	0.495 **	0.592 **				

1) : 曲げ試験における引張り面中心までの随からの距離及び年輪数
* : 危険率5%で有意, ** : 危険率1%で有意

表-15 木取り別各測定因子と曲げヤング係数の関係 (単相関係数)

木取り	本数	密度	平均年輪幅	繊維傾斜	最大単独節径比			引張り面最大単独節径比			集中節径比			引張り面集中節径比			随-引張り面中心	
					中央区間	全区間	中央区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	中央区間	全区間	距離 ¹⁾
心持ち	93	0.528 **	0.092	-0.120	-0.382 **	-0.369 **	-0.145	-0.316 **	-0.303 **	-0.299 **	-0.057	-0.336 **	0.036	0.054				
二方桁	111	0.610 **	-0.416 **	-0.165	-0.157	-0.244 *	-0.058	-0.200 *	-0.043	-0.109	0.057	-0.093	0.038	0.149				
四方桁	111	0.675 **	-0.205 *	-0.067	-0.163	-0.131	-0.388 **	-0.248 *	-0.165	-0.129	-0.307 **	-0.265 **	0.125	0.291 **				
全体	315	0.606 **	-0.160 **	-0.130 *	-0.200 **	-0.199 **	-0.223 **	-0.246 **	-0.178 **	-0.169 **	-0.151 **	-0.232 **	0.088	0.167 **				

1) : 曲げ試験における引張り面中心までの随からの距離及び年輪数
* : 危険率5%で有意, ** : 危険率1%で有意

る節が、柁目面のため流れ節となり、その評価が曖昧になるということも影響していると思われる。

(5) 随と曲げ試験における引張り面中心までの距離と年輪数との関係

曲げ強さとの関係は、木取りで区分した場合、全体でみるよりも相関係数が低い、これは木取りが同じ場合、随から引張り面中心までの距離及び年輪数の範囲が少ないためと考えられる。曲げヤング係数との関係は曲げ強さとの関係と比較するとはるかに低い。

(6) 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

曲げ強さとの関係は、すべての木取りで、関係は高く、特に四方柁において高い関係が認められた。

3.4 目視及び非破壊的手法を用いたヤング係数測定による曲げ強さの推定

目視による強度性能評価の指標である 4 材面評価の節径比 (最大単独節径比 (KL)、集中節径比 (SKL))、及び平均年輪幅 (AW) と曲げ強度性能 (曲げ強さ (σ_b), 曲げヤング係数 (E_b)) の間の単相関係数 (r) を表-16 に示した。また、本試験で測定した曲げ破壊試験における随と引張り面の中心までの距離及び年輪数との関係も同表に示した。

KL と E_b 、SKL と E_b との間における相関係数は、それぞれ $r = -0.199^{**}$ 、 $r = -0.169^{**}$ であり、KL と σ_b 、SKL と σ_b との間でも相関係数はそれぞれ $r = -0.173^{**}$ 、 $r = -0.296^{**}$ であり、あまり高い相関関係は認められなかった。しかしながら、表-12 及び 13 に示したとおり、引張り面に限れば単独最大節径比及び集中節径比と σ_b との間には $r = 0.4$ 以上の相関関係が認められており、引張り面に限れば節の影響は高いといえる。

平均年輪幅と E_b 、及び σ_b との間では相関係数は $r = -0.160^{**}$ 及び $r = -0.168^{**}$ であり、表に示したように負の相関が得られ、統計的には有意であったが、実用性を考えると十分とはいえない。

一方、表-17 に示すように随と引張り面中心との距離、及び年輪数と σ_b との間の相関係数は $r = 0.456^{**}$ 及び $r = 0.495^{**}$ となり、比較的高い正の相関関係が認められた。このうち随と引張り

表-16 目視による評価因子と曲げ強度性能との間の単相関係数

	$\rho^{1)}$	$E_b^{2)}$	$\sigma_b^{3)}$
KL ⁴⁾	0.065	-0.199 **	-0.173 **
SKL ⁵⁾	-0.006	-0.169 **	-0.296 **
AW ⁶⁾	-0.139 *	-0.160 **	-0.168 **
DP ⁷⁾	0.191 **	0.088	0.456 **
NAP ⁸⁾	0.280 **	0.167 **	0.495 **

1): 密度
 2): 曲げヤング係数
 3): 曲げ強さ
 4): 最大単独節径比
 5): 集中節径比
 6): 平均年輪幅
 7): 随から引張り面中心までの距離
 8): 随から引張り面中心までの年輪数
 : 危険率 1% で有意、 : 危険率 5% で有意
 n = 315

表-17 非破壊試験により求めたヤング係数と曲げ強度性能との間の単相関係数

	$\rho^{1)}$	$E_b^{2)}$	$\sigma_b^{3)}$
Edw ⁴⁾	0.581 **	0.622 **	0.526 **
Efrl ⁵⁾	0.618 **	0.794 **	0.643 **
E_b ²⁾	0.551 **		0.591 **

1)-3): 表-16 注に同じ
 4): 死荷重載荷法によるヤング係数
 5): 縦振動法によるヤング係数
 : 危険率 1% で有意、 : 危険率 5% で有意
 n = 312

面中心までの距離と σb との関係を図-18に示した。随からの距離あるいは年輪数が小さい場合は引張り側が未成熟材、大きい場合は成熟材と考えることができ、この結果はカラマツ造林木のように初期生長が旺盛で、未成熟材部の顕著な樹種の特徴と考えることができる。また、正角を横架材等に使う場合、成熟材部を引張り側にすれば、それだけでも曲げ強さに対しては有利な使い方となる。

信州大学農学部から長野県林業総合センターに試験材を移動した直後に、非破壊試験として死荷重載荷による静的曲げヤング係数 (Edw) 及び縦振動法による動的縦ヤング係

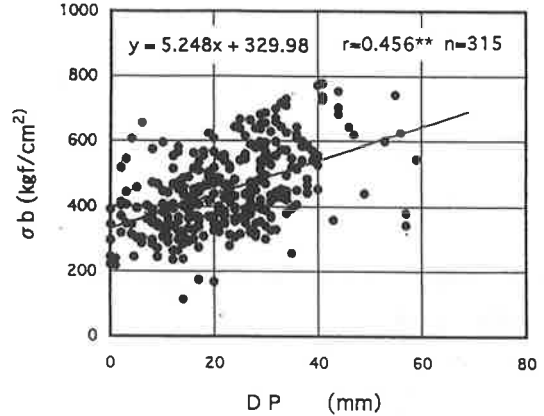


図-18 随から引張り面中心までの距離 (DP) と曲げ強さ (σb) の関係

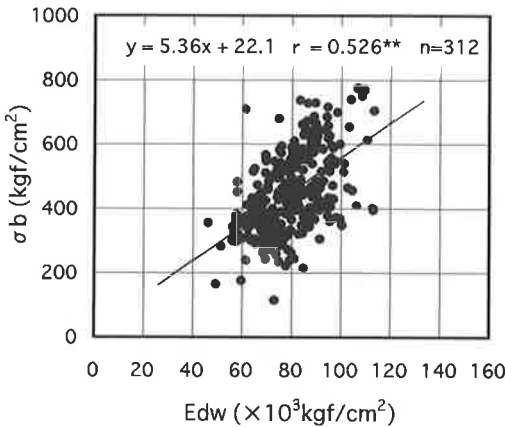


図-19 死荷重載荷法によるヤング係数 (Edw) と曲げ強さ (σb) の関係

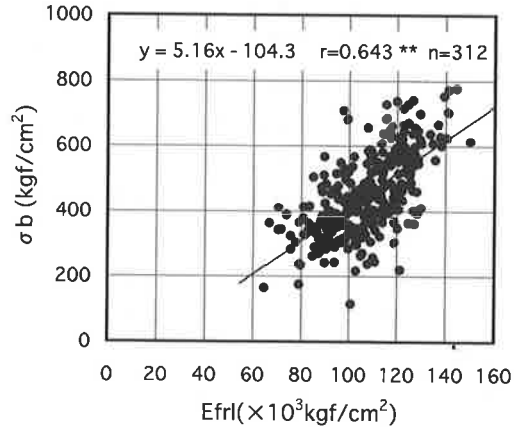


図-20 縦振動法によるヤング係数 (Efrl) と曲げ強さ (σb) の関係

数 (Efrl)、の測定を行った。これら2種類のヤング係数と曲げ強さの関係を図-19及び図-20に示した。また、これらの関係を示す単相関係数 (r) 及び2種類の非破壊試験によるヤング係数と曲げ破壊試験により求めた曲げヤング係数 (Eb) との関係を示すそれを表-17に示した。以上の図及び表に示した相関分析に用いたデータは、非破壊により求めたヤング係数の3データに欠落があり、それを除いた312試験体である。

2種類の非破壊試験は試験材をビニールシートで覆い、屋外に保存されていたものを林業総合センターに移動した直後に行ったものであり、その後室内に保存して数年間かけて行った曲げ破壊試験時とは含水率のばらつきの程度が異なると思われるが Edw 及び Efrl と Eb の間の相関係数は $r = 0.622^{**}$ 、 0.794^{**} であり、安定して比較的高い相関関係が認められた。また、Edw 及び Efrl と σb との間に得られた単相関係数は、それぞれ、 $r = 0.526^{**}$ 、 0.643^{**} であり、3種類の中では Efrl と σb との関係が最も高く、これは Eb と σb との間に得られた相関係数 $r = 0.591^{**}$ よりも高かった。

以上のことから、目視によるカラマツ実大材 (正角) の曲げ強さの推定は4材面評価の節径比

(最大単独節径比、集中節径比)及び年輪幅ではその信頼性は低い、曲げ応力を受ける方向を限定して、引張り側の節径比で評価すればその信頼性は向上することが明らかとなった。また、同様に曲げ応力を受ける方向を限定すれば、引張り面に対する随の位置によってある程度曲げ強さの推定が可能であることが示された。

一方、非破壊試験により得られた2種類のヤング係数、すなわち死荷重載荷による静的曲げヤング係数 (E_{dw}) 及び縦振動法による動的縦ヤング係数 (E_{fr1}) については曲げ強さを安定して評価することができることが示された。

3.5 針葉樹の構造用製材の日本農林規格¹²⁾及び木質構造設計基準¹³⁾によるカラマツ正角の曲げ強度性能の評価

我が国では、構造用に用いる木質材料の製造方法及びその強度性能評価法は、日本農林規格によってその規定が設けられている。そのなかで針葉樹製材に関するものは1991年に制定された「針葉樹の構造用製材の日本農林規格 (以下 JAS)¹²⁾」である。JAS では構造用製材のうち節、丸み等の欠点により等級区分するものを目視等級区分製材とし、その中で主として梁等の高い曲げ性能を必要とする部分に使用するものを甲種構造材とし、さらにその断面の大きさによって構造用 I (木口の短辺が36mm未満及び木口の短辺が36mm以上で木口の長辺が90mm未満のもの) 及び構造用 II (木口の短辺及び長辺がそれぞれ、36mm以上及び90mm以上のもの) に分類している。また、目視等級区分製材の内、主として柱等の圧縮性能を必要とする部分に使用するものを乙種構造材としている。目視等級区分製材に対する等級格付けは欠点の程度により、1級、2級、3級に格付けされる。一方目視等級区分製材に対して、機械等級区分製材の規定があり、これは機械によりヤング係数を測定し、等級区分するものをいう。この等級区分は曲げヤング係数で行われ、曲げヤング係数を $20 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ の区間ごとに、 $40 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 以上 $60 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 未満のものを E50 と表示し、同様に、E70、E90、E110、E130、E150 として、曲げヤング係数により、6 区分を与えている。

JAS の改正を受けて、1992年目視等級区分製材の1級、2級及び機械等級区分製材に対して建設省より許容応力度が与えられ (平成4年1月31日付け、建設省住指発第16号)、さらに1996年目視等級区分製材の3級に対しても許容応力度が与えられた (平成8年5月2日付け、建設省住指発第19号)。

そこで、本試験で用いたカラマツ正角に対して、3種類、すなわち目視等級区分 (節と年輪幅で格付けした。) の甲種構造材の構造用 II (以下甲 II)、乙種構造材、そして機械等級区分製材の3種類の格付けを行い、その曲げ強度性能の JAS による評価を行った。なお、ここでは荷重方向が異なった林分 D の二方桁のすべて (12試験体) および林分 F の四方桁の一部 (6試験体) は除いて 297試験体で検討した。

甲 II によって格付けした正角の曲げ強度性能の平均値、標準偏差、変動係数、正規分布と仮定した場合の5%下限値 (平均値 - 標準偏差 $\times 1.645$) を表-18に示した。また、許容応力度の3倍を基準曲げ強さとして表中に示した。表に示すように等級別出現割合は1級、2級、3級それぞれ、5.4、45.8、32.3%であり、1級はわずかで、規格外も16.5%であった。曲げ強さについては、平均値で1級、2級、3級及び格外が、それぞれ 554kgf/cm^2 、 478kgf/cm^2 、 435kgf/cm^2 及び、 403kgf/cm^2 であり、等級に依っていた。標準偏差は3級および格外が 120kgf/cm^2 を超えており、変動係数は明らかに上位等級のものが小さかった。この結果、5%下限値はすべて基準曲げ強さを上回っていたがその差は下位等級ほど小さくなった。また、曲げヤング係数は1級、2級、3級それぞれ、平均値では $106.7 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $96.8 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $96.3 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ であり、2、3級はほぼ同じで、

5%下限値ではばらつきの関係から逆転した。

乙種で格付けした結果を甲IIと同様に表-19に示した。1級、2級、3級の出現割合は52.5%、33.7%、13.5%であり、甲IIの格付けと異なり1級の出現割合が50%を超え、規格外はわずか1試験体であった。これは節の制限値が、甲IIに対して、乙種の方がかなり緩和されているためである。基準曲げ強さとの関係では5%下限値でも十分それを満たしていた。

JASの機械等級区分製材の格付けに従い全数を、曲げヤング係数で等級区分した結果を表-20に、さらに、木取り別に格付けした結果を表-21に示した。表-20に示すように曲げ強さの平均値は明らかに上位等級のものが高く、等級区分の効果は明らかであるが、5%下限値と基準曲げ強さを比較すると下位等級のE50、E70では基準値を上回っているが、E90、E110、E130では基準曲げ強さ以下であった。これを表-21で木取り別でみると心持ち及び二方桁では5%下限値が基準強度を上回っているものはE70だけであり、E90以上の上位等級はすべて基準強度に達していなかった。一方四方桁では、すべての等級で5%下限値が基準曲げ強さ以上であった。二方桁については曲げ破壊試験における荷重のかけ方が桁目面荷重であり、木裏荷重であれば、基準曲げ強さを満たす可能性がある。逆に四方桁でも、荷重方向が異なれば、基準曲げ強さを下回ることが十分に予想できる。

目視等級区分製材に対して機械等級区分製材の上位のものは高い許容応力度が与えられていて、表-20に示すようにE90の基準曲げ強さは300kgf/cm²であり、この値は表-18及び表-19に示した甲II及び乙種の1級の基準曲げ強さそれぞれ、285kgf/cm²、225kgf/cm²を超えている。本試験の結果、JAS機械等級区分の格付けでは心持ち及び二方桁（桁目面荷重）では、許容応力度から誘導した

表-18 JAS等級（甲II）別曲げ強さ

JAS等級	正角本数	本数割合%	曲げ強さ					曲げヤング係数			
			平均値 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	基準曲げ強さ kgf/cm ²	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	標準偏差 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ×10 ³ kgf/cm ²
1級	16	5.4	554	113.0	20.4	368	285	106.7	11.8	11.1	87.2
2級	136	45.8	478	108.8	22.8	299	255	96.8	16.1	16.7	70.3
3級	96	32.3	435	121.8	28.0	234	225	96.3	15.3	15.9	71.2
格外	49	16.5	403	121.4	30.1	203	—	92.4	16.7	18.0	65.0
全体	297	100.0	456	121.2	26.6	256	—	96.5	16.0	16.6	70.1

*：平成8年5月23日付け、建設省住指発第195号、住宅局建築指導課長名通達の長期許容応力度を3倍した。
二方桁については林分Dの二方桁（12試験体）、林分Fの丸みのために荷重方向を変えた四方桁の6試験体は除外して集計した。

表-19 JAS等級（乙）別曲げ強さ

JAS等級	正角本数	本数割合%	曲げ強さ					曲げヤング係数			
			平均値 kgf/cm ²	標準偏差 kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 kgf/cm ²	基準曲げ強さ* kgf/cm ²	平均値 ×10 ³ kgf/cm ²	標準偏差 ×10 ³ kgf/cm ²	変動係数 %	5%下限値 ×10 ³ kgf/cm ²
1級	156	52.5	471	119.1	25.3	276	225	97.8	16.4	16.8	70.8
2級	100	33.7	442	111.3	25.2	259	195	95.5	14.9	15.6	70.9
3級	40	13.5	431	142.1	33.0	197	165	94.0	16.6	17.7	66.7
格外	1	0.3	307	—	—	—	—	83.6	—	—	—
全体	297	100.0	456	121.2	26.6	256	—	96.5	16.0	16.6	70.1

*：平成8年5月23日付け、建設省住指発第195号、住宅局建築指導課長名通達の長期許容応力度を3倍した。
二方桁については林分Dの二方桁（12試験体）、林分Fの丸みのために荷重方向を変えた四方桁の6試験体は除外して集計した。

表-20 JAS 機械等級区分別曲げ強さ

JAS 等級	正角本数	本数割合 %	曲げ強さ kgf/cm ²	標準偏差	変動係数	5%下限値	基準曲げ強さ*
E30	1	0.34	176	—	—	—	
E50	4	1.35	279	67.4	24.2	168	135
E70	36	12.12	367	65.8	17.9	259	210
E90	134	45.12	423	104.5	24.7	251	300
E110	98	33.00	510	105.6	20.7	336	390
E130	24	8.08	592	105.3	17.8	419	465
	297	100.00	456	121.2	26.6	256	—

*：平成8年5月23日付け、建設省住指発第195号、住宅局建築指導課長名通達の長期許容応力度を3倍した。二方桁については林分Dの二方桁（12試験体）、林分Fの丸みのために荷重方向を変えた四方桁の6試験体は除外して集計した。

表-21 木取り別 JAS 機械等級区分別曲げ強さ

木取り	JAS 等級	正角本数	曲げ強さ kgf/cm ²	標準偏差	変動係数	5%下限値	基準曲げ強さ*
心持ち	E30	1	176	—	—	—	
	E50	2	300	—	—	—	135
	E70	12	329	49.4	15.0	248	210
	E90	47	365	74.7	20.4	242	300
	E110	26	432	66.7	15.5	322	390
	E130	5	502	94.3	18.8	347	465
二方桁	E70	9	341	45.7	13.4	265	210
	E90	48	424	99.7	23.5	260	300
	E110	33	486	83.8	17.3	348	390
	E130	9	549	73.3	13.4	428	465
四方桁	E50	2	257	—	—	—	135
	E70	15	414	59.7	14.4	316	210
	E90	39	490	99.9	20.4	326	300
	E110	39	583	96.0	16.5	425	390
	E130	10	677	66.5	9.8	567	465

*：平成8年5月23日付け、建設省住指発第195号、住宅局建築指導課長名通達の長期許容応力度を3倍した。二方桁については林分Dの二方桁（12試験体）、林分Fの丸みのために荷重方向を変えた四方桁の6試験体は除外して集計した。

基準強度を満たすには無理があり、四方桁では木裏荷重であったことから基準曲げ強さを満足していたものと判断できる。

一方、日本建築学会の木質構造設計基準・同解説¹³⁾によればカラマツは針葉樹Ⅲ類に属し、曲げの長期許容応力度として上級構造材、普通構造材にそれぞれ105kgf/cm²、85kgf/cm²を与えている。これらの値は実大材の曲げ強さに置き換えるとその3倍、すなわち315及び266kgf/cm²となる。

表-18の甲Ⅱによる等級区分では、曲げ強さの5%下限値が1級は上級構造材の値を十分満たし、2級はほぼそれを満たすという結果であった。これに対して3級は普通構造材の値をも下回っていた。また、表-19の乙種による区分結果では、1及び2級が普通構造材の値を満たしていたが、3級はそれ以下であった。

表-20に示すように機械的に等級区分した場合は5%下限値の評価でE110及びE130が上級構造材の値を、E70及びE90が普通構造材の値をほぼ満たしていると考えられる。また、曲げヤング係数についても上級構造材、普通構造材にそれぞれ、 $90 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 、 $80 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ を与えており、これは平均値から誘導されたものであるから、表-18及び表-19の目視等級区分でもすべての等級で上級構造材の値を満足していると考えられた。

4. 結論

長野県産カラマツ人工造林木の強度性能を明らかにするプロジェクトの一部として実大材曲げ強度性能を検討した。供試木はA：白田（65年生）、B：伊那（50年生）、C：白田（55年生）、D：伊那（42年生）、E：駒ヶ根（44年生）、F：諏訪（40年生）、G：伊那（75年生）の7林分から得られた73本で、これらを3.2mに玉切り、それぞれの番玉の丸太下部から調査用円盤を採取したのち、末口径に応じて製材し、丸太の12×12cmの断面で長さ305cmの正角を1丁取り（心持ち）、2丁取り（二方桁）、4丁取り（四方桁）した。これらの正角は1979年から1986年にかけて順次製材され、重松により用材の品等区分⁵⁻¹¹⁾の試験に供され、信州大学農学部で保管されていた。これらの材料を用い強度的な試験を信州大学（実大材圧縮及びJISによる試験）、農林水産省森林総合研究所（実大材引張り試験）及び長野県林業総合センター（実大材曲げ試験）でプロジェクトとして1989年より行った。その中で曲げ試験用として仕分けられた315体の正角の実大材曲げ試験を荷重方向を心持ち：背割りの反対面を引張り側、二方桁：桁目面荷重、四方桁：木裏荷重に統一して行った。ただし、林分Dの二方桁はすべて木裏荷重、林分Fの四方桁で丸みのため試験材のセットができなかった6試験体については木表荷重とした。実大材曲げ試験の結果得られた主な結果は次のとおりである。

4.1 林分（樹齢）別曲げ強度性能の比較

- ① 7林分からの正角の曲げ強さは平均で、A（65年生）：541、E（44年生）：482、C（55年生）・F（40年生）・G（75年生）：447～426、D（42年生）：395kgf/cm²の順であった。最も高樹齢であるが、高海拔地に生育し、成長が悪く中庸な値を示した林分Gとあて材の影響で密度が高く、曲げ強さが高めになったと考えられる林分Eを除くと高樹齢の林分ほど曲げ強さが高くなる傾向が認められた。
- ② 同一産地の林分AとC（白田営林署管内）、BとD（伊那営林署管内）の比較では曲げ強さ及び曲げヤング係数とも樹齢の高い林分からのものの方が明らかに高かった。
- ③ 産地間の検討は樹齢がほぼ同じで産地の異なる林分D、E、Fの比較では曲げ強さ及び曲げヤング係数ともE>F>Dの順であったが、この差と産地による違いを結びつけることはでき

なかった。

4.2 木取り別比較

- ① 曲げ強さは四方桁>二方桁>心持ちの順であり、林分ごとにみてもその傾向は顕著であった。ただし、荷重方向が他と異なった林分Dの二方桁は心持ちと同程度、林分Fの四方桁は二方桁と同程度であり、このことは曲げ強さに与える荷重方向の影響が大きいことを示すものである。一方曲げヤング係数についてはこの傾向は顕著ではなく、全体で見ると心持ちが低く、二方桁及び四方桁では僅かに二方桁の方が値が高かった。
- ② 全体として、密度は心持ち<二方桁<四方桁の順に大きくなる傾向が認められたが、平均年輪幅では傾向を示さなかった。繊維傾斜は心持ち>二方桁>四方桁、最大単独節径比は心持ちが少なく、二方桁と四方桁が同程度となったが、集中節径比では心持ち>二方桁>四方桁の順になった。

4.3 番玉別比較

- ① 曲げ強さは平均値では番玉が上がるほど曲げ強さの値が下がる傾向にあり、7林分に共通していた。曲げヤング係数も傾向としては同様であったが林分別では曲げ強さほど顕著ではなく、全体でみてもI、II、III番玉ではその差が少なかった。
- ② 密度、平均年輪幅は番玉による差は比較的少なかった。繊維傾斜、最大単独節径比、集中節径比は番玉が上がるほど大きい傾向を示した。

4.4 材質指標と曲げ強さ、曲げヤング係数の関係

- ① 密度と曲げ強さの関係は全体で相関係数 $r = 0.496^{**}$ が得られたが、5林分で危険率1%で有意、2林分で5%水準で有意であった。木取り別では、いずれも1%水準で有意であったが、相関係数は心持ち<二方桁<四方桁の順であった。曲げヤング係数と密度の関係は全体では $r = 0.606^{**}$ と高い関係が認められ、林分Aでは5%水準でも有意な関係は認められなかったが、残りの林分は1%水準で有意であり、相関係数も0.5以上と高く、木取り別でも高い関係が認められた。
- ② 平均年輪幅と曲げ強さの関係は全体では $r = -0.168^{**}$ であったが、林分別では1%水準及び5%水準で有意な林分はそれぞれ1及び2だけであった。木取り別では二方桁および四方桁で1%水準で有意であったが、心持ちは有意な関係は認められなかった。平均年輪幅と曲げヤング係数との関係も全体で $r = -1.60^{**}$ であったが、有意な関係は林分Aで認められただけであった。木取り別では二方桁で1%、四方桁で5%水準で有意な関係が認められた。
- ③ 繊維傾斜と曲げ強さの関係は全体で $r = -0.308^{**}$ であったが、1%水準、5%水準で有意な林分はそれぞれ2及び1であり、木取り別では二方桁において1%水準で有意であった。繊維傾斜と曲げヤング係数との関係は全体で $r = -0.130^{*}$ (*:危険率5%で有意、以下同じ)であり、1林分で1%で有意な関係が認められただけで、木取り別では有意な関係は認められなかった。
- ④ 節との関係

曲げ強さと4材面評価の最大単独節径比、集中節径比との関係は、中央区間及び全区間とも全体では1%水準で有意であったが、相関係数はそれほど高くなかった。しかし、曲げ強さと引張り面の最大単独節径比及び集中径比の関係は中央区間及び全区間で $r = 0.4$ 以上であり、6林分で1%水準で有意な関係が認められ、木取り別では四方桁で関係が強く、二方桁で低かった。曲げヤング係数と節との関係は全体でみると曲げ強さとの関係に比較してかなり低

かった。

⑤ 随と曲げ試験における引張り面中心までの距離及び年輪数との関係

随と引張り面中心までの距離および年輪数と曲げ強さの関係は全体でそれぞれ $r=0.456^{**}$ および $r=0.495^{**}$ と比較的高い関係が認められ、5林分で1%水準で有意であった。一方曲げヤング係数との関係は低く、5%水準でも有意な林分はなかった。

⑥ 曲げヤング係数と曲げ強さとの関係

曲げヤング係数と曲げ強さの関係は全体で $r=0.592^{**}$ と高く、6林分で1%水準で有意、残り1林分で5%水準で有意であった。

4.5 目視及び非破壊的手法を用いたヤング係数測定による正角の曲げ強さの推定

① 目視による強度性能評価の指標である平均年輪幅、4材面全長評価の最大単独節径比及び集中節径比と曲げ強さの関係は相関係数でそれぞれ、 $r=-0.168^{**}$ 、 $r=-0.173^{**}$ 及び $r=-0.296^{**}$ であり、統計的には1%水準で有意であったが、実用的には十分とは考えられず、視覚的等級区分の限界を示すものと考えられる。

② 非破壊により求めた曲げヤング係数である死荷重載荷法により得られた曲げヤング係数及び縦振動法によるヤング係数と曲げ強さの関係は $r=0.526^{**}$ 及び 0.643^{**} であり、曲げ強さを安定して評価できることが示された。

4.6 JAS及び木質構造設計基準によるカラマツ正角の曲げ強度性能の評価

① 目視等級区分の甲IIによる格付けでは1、2、3級及び格外の出現割合はそれぞれ、5.4、45.8、32.3及び16.5%であった。また、乙種による格付けでは1、2、3級及びはそれぞれ、52.5%、33.7%、13.5%であり格外は1試験体だけであった。各等級の曲げ強さの5%下限値は目視等級区分製材に対する許容応力度を3倍した基準強度をすべての等級で満たしていた。

② 機械的等級区分の結果では、等級区分の効果は明白であったが、機械等級区分製材の許容応力度を3倍した基準強度との関係では各等級の曲げ強さの5%下限値は下位等級（E50、E70）ではそれを満たしていたが、上位等級では基準強度に及ばなかった。また、これを木取り別にみると心持ち及び二方桁では下位等級のE70で基準強度を満たしているだけであった。一方四方桁についてはすべての等級で基準強度を満たしていた。これは荷重方向の影響が大きく、二方桁についても木裏荷重であれば基準強度を満たすことが予想される。一方四方桁についても荷重方向を逆にすれば基準強度を下回ることが予想できる。

③ 日本建築学会のカラマツの許容応力度を3倍した基準曲げ強さ（上級構造材：315kgf/cm²、普通構造材：255kgf/cm²）との比較では5%下限値で上級構造材の値を満たすのは甲IIにおける1及び2級、機械等級区分のE110及びE130であった。また、普通構造材の値は乙の1及び2級、機械等級区分のE70及びE90で満たしていた。甲IIの3級及び乙種の3級は普通構造材の基準曲げ強さを下回った。

4.7 試験結果からいえる利用、育林上の指針

① カラマツは未成熟材の顕著な樹種であり、正角、平角等として利用する場合、その中には必ず、成熟材と未成熟材が含まれる。試験の結果は梁桁等の曲げ応力を受ける部材として利用する場合、引張り側に成熟材部（木表側）がくるように使うべきであることを示していた。

② 実大材である本研究の結果は、随周辺部は未成熟であり強度的性能が劣るが、随から離れるに従い強度性能は著しく向上するという既往のカラマツ材質に関する研究成果から予想されるものであった。一方、平均年輪幅と曲げ強さの関係では無欠点材に認められるほどの関係は実

大材では認められないことから、大径化が見込める林分に対しては高樹齢とし、より大径材とするべきであると考え。

5. おわりに

本稿は、信州大学農学部及び農林水産省森林総合研究所と共同研究として実施した“重松プロジェクト”の実大材曲げ試験の結果をとりまとめたものである。曲げ試験で得られた結果が、必ずしも圧縮、引張り強度性能と傾向を同じにするとは限らず、それらについては本試験の結果も含めて信州大学農学部演習林報告にまとめられる予定である。

最後に、貴重な試験の機会を与えてくださり、試験にあたり指導を得た故重松頼生信州大学農学部教授、試験及び本稿をまとめるに当たりご指導を得た共同研究者である信州大学農学部、徳本守彦教授、同中野達夫教授、武田孝志助手、森林総合研究所中井孝元特性科長、同田中俊成材料性能研究室長、同長尾博文研究官、データ整理に協力を得た近藤かよこ、五味妙子の皆さんに厚く感謝します。また、長野営林局からいただいた多大な協力に対して感謝します。

引用文献

- (1) 塩倉孝義：針葉樹樹幹材における未成熟材の区分とその範囲、木材学会誌、28(2)、85-90 (1982)
- (2) 塩倉孝義：カラマツ材の品質に関する基礎研究 (第 2 報) 樹幹内のカラマツ材の曲げ特性について、農学集報、16(2)、91-98 (1973)
- (3) 重松頼生：カラマツ造林木の材質、とくに成長と関連して (I)、木材工業、45(10)、445-451 (1990)
- (4) 重松頼生：カラマツ造林木の材質、とくに成長と関連して (II)、木材工業、46(1)、9-16 (1991)
- (5) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X I) -用材の品等区分(1)、30回日林中支講、193-198 (1982)
- (6) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X II) -用材の品等区分(2)、31回日林中支講、241-246 (1983)
- (7) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X III) -用材の品等区分(3)、33回日林中支講、101-104 (1985)
- (8) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X IV) -用材の品等区分(4)、34回日林中支講、91-94 (1986)
- (9) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X VII) -用材の品等区分(5)、34回日林中支講、95-98 (1986)
- (10) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X VIII) -用材の品等区分(6)、35回日林中支講、147-150 (1987)
- (11) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X X IX) -用材の品等区分(7)、35回日林中支講、151-154 (1987)
- (12) 農林水産省監修：“針葉樹の構造用製材の日本農林規格並びに解説”、全国木材組合連合会、P.1-79 (1991)
- (13) 日本建築学会編：“木質構造計算基準・同解説”、丸善、P.155-169 (1995)
- (14) 片倉正行他：“カラマツ人工林・長伐期施業の手引き”、長野県林務部、P.8-12 (1991)
- (15) 田中俊成：各種比破壊的手法による製材品の強度評価、木材工業技術短信、9(2)、1-12 (1991)
- (16) 橋爪丈夫、武井富喜雄、吉田孝久：カラマツ等県産材の需要開発に関する総合研究-県下 4 林分から得られたカラマツ正角の実大材曲げ強度-、長野林総七研報 6、79-97 (1992)
- (17) 著者代表 伏谷賢美：“木材の物理”、文永堂、P.157 (1985)
- (18) 重松頼生：カラマツの材質試験 (X I X) -肥大成長に伴う材質の変動について、28日林中支講、253-258 (1980)
- (19) 三上進：カラマツの材質育種に関する研究-旋回木理の遺伝的改良-、林試研報、NO.64、7-152 (1988)
- (20) 小沢勝治：針葉樹の旋回木理と乾燥ねじれ、京大農学部学位論文、1-100 (1984)

- (21) 中川伸策：カラマツ樹幹内における旋回木理の分布とその出現型、林試研報、248、97-120 (1972)
- (22) 重松頼生、安本善次：カラマツの材質試験 (I) -回旋木理と収縮率の樹幹内分布-、19回日林中支講、92-95 (1970)
- (23) 重松頼生、中谷秀樹：カラマツの材質試験 (5) -未成熟材における回旋木理の現れ型-、21回日林中支講、56-60 (1973)

