ラミナ特性や断面構成が同等の曲げヤング係数を有する 異樹種異等級構成集成材の曲げ性能に及ぼす影響^{*1}

大野英克^{*2, 3, 4}, 亀山雄攄^{*2}, 鈴木寿幸^{*2}, 吉田佳右^{*4}, 松本かほる^{*4},
石栗 太^{*4}, 横田信三^{*4}, 飯塚和也^{*4}, 吉澤伸夫^{*4}

Effect of Lamina Property and Lamination Pattern on Bending Properties of Laminated Lumber Composed of Several Softwoods with the Same Modulus of Elasticity^{*1}

Hidekatsu OHNO^{*2, 3, 4}, Yuusaku KAMEYAMA^{*2}, Hisayuki SUZUKI^{*2},
Keisuke YOSHIDA^{*4}, Kahoru MATSUMOTO^{*4}, Futoshi ISHIGURI^{*4},
Shinso YOKOTA^{*4}, Kazuya IIZUKA^{*4} and Nobuo YOSHIZAWA^{*4}

In the present study, bending properties (modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), bending work (W), and Janka plastic modulus (Z)) were investigated for 10-ply laminated lumber composed of several softwood species. Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) laminae were used for the inner 8 layers, and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) or karamatsu (*Larix Kaempferi* Carriere) laminae were used for the outermost 2 layers. In addition, laminated lumber members composed of 10 sugi laminae were also produced. In order to obtain the same MOE in all laminated lumber members, laminae were graded and then arranged for manufacturing the laminated lumber. Although the MOE showed almost the same value in all laminated lumber members, significant differences in MOR, W , and Z were recognized among the types of laminated lumber. In all types of laminated lumber, W and Z were mainly effected by deflection at the plastic region. In addition, W and Z were effected by the bending property of species forming the inner layers as well as that of the species forming the outermost layers.

Keywords : laminated lumber, modulus of elasticity, modulus of rupture, bending work, Janka plastic modulus.

本研究では、等価断面法により曲げヤング係数(MOE)を同等とした内層にスギ、最外層にヒノキもしくはカラマツ材を用いた異樹種異等級構成集成材並びにスギ同一樹種同一等級構成集成材を作製し、曲げ性能を調査した。その結果、集成材のMOEがほぼ等しくても、曲げ強度(MOR)、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、断面構成により違いが認められた。曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、断面構成にかかわらず、塑性域たわみ量に特に強く影響を受けた。MOEの同等な異樹種異等級構成集成材における曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、最外層のヒノキもしくはカラマツ特有の曲げ性能に強く影響を受けるとともに、加えて内層に配置したスギの曲げ性能にも影響を受けることが示唆された。

^{*1} Received April 15, 2009; accepted November 13, 2009. 本研究の一部は第59回日本木材学会大会(2009年3月, 松本)において発表した。

^{*2} 栃木県林業センター Tochigi Prefectural Forestry Research Center, Utsunomiya 321-2105, Japan

^{*3} 東京農工大学大学院連合農学研究科 Graduate School of Agricultural Science, Tokyo University of Agriculture and Technology, Fuchu 183-8509, Japan

^{*4} 宇都宮大学農学部 Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, Utsunomiya 321-8505, Japan

1. 緒 言

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) は、日本固有の樹種であり、本州から九州まで天然分布している。また、人工林の蓄積量も増加し、その有効利用が課題である。しかしながら、スギ材は他の針葉樹材に比べて、曲げヤング係数 (MOE) が低いことが報告されている¹⁾。また、心材含水率が高い品種が多く、そのバラツキも大きいことから、材の乾燥において障害になることが指摘されている²⁾。このように、スギ材は、構造材として加工及び利用する上で難点がある。一方、集成材は、ラミナの等級区分及び積層効果による特性 (MOE や比重などの因子) の平均化³⁾、欠点の除去・分散及び乾燥の簡易化が期待できる材料である。集成化によって、前述したスギ材の難点解消が期待される。しかしながら、スギ材のみの集成材では、MOE が低いことが報告されている⁴⁾。このような、スギ集成材の MOE の低さを補うため、外層に、内層のスギラミナよりヤング係数が高い樹種のラミナを配置した、異樹種構成集成材の研究が行われている。森園ら⁵⁾ 及び城井ら⁶⁾ は外層にベイマツを用いた異樹種構成集成材を作製し、MOE 及び曲げ強度 (MOR) が増加することを明らかにしている。また、林・宮武⁴⁾ は、最外層にベイマツ LVL を用いた複合集成材を作製し、MOE が増加することを明らかにしている。

集成材の研究では、MOE を予測する方法として、等価断面法⁷⁾ が多く用いられている⁸⁻¹⁰⁾。また、MOR の予測方法については、小松¹¹⁾ は、任意断面構成集成材の最大モーメント推定の研究において、多層積層梁の概念によって誘導した推定式を報告し、林ら⁹⁾ はモンテカルロシミュレーションによる予測結果について報告している。このように、曲げ性能の指標としては、MOE 及び MOR が代表的である。一方、曲げ仕事量は、木材が荷重により破壊されるまでの間に吸収されるエネルギーであり、この値が大きいほど構造材料として耐力があることが指摘されている¹²⁾。吉原・黒瀬¹³⁾ は、圧縮加工した木材の曲げ物性を調査した結果、圧縮加工によって、密度、ヤング率、比例限度応力等は上昇したが、曲げ仕事量は減少したことを報告している。しかしながら、地震力などの大きな荷重が加わり、部材に応力が発生する場面を考えると、その荷重に抵抗する部材の MOR が極端に高性能な特別な場合を除き、一般的には曲げ仕事量が大きい方が、より大きな変形でも破壊が発生しないことになるため、構造用部材としては曲げ仕事量が大きい方が望ましいことを

指摘している¹³⁾。一方、ヤンカ靱性係数とは、比例限度点以降の破壊に至る塑性域における単位荷重当たりのたわみ量であり、この値が大きいほど靱性及び変形性能が高いことを表し、曲げ仕事量にも大きな影響を及ぼすことが考えられる¹²⁾。これらのことから、曲げ仕事量 (W) やヤンカ靱性係数 (Z) は、実用上、重要な指標であると考えられるが、集成材において評価した例はほとんどない。

本研究では、MOE 以外の曲げ性能 (MOR, W 及び Z) にも優れたスギ材を主体とした集成材の開発を目指し、等価断面法により MOE を一定として、内層にスギ、最外層にヒノキもしくはカラマツを用いた異樹種異等級構成集成材を作製し、その曲げ性能を調査した。併せて、スギ同一樹種同一等級構成集成材を作製し、比較検証した。さらに、事前に、製材 3 樹種の曲げ性能を把握し、その樹種特性や断面構成が、異樹種異等級構成集成材の曲げ性能に及ぼす影響を調査した。

2. 材料と方法

2.1 製材の作製

供試木として、栃木県産のスギ、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) 及びカラマツ (*Larix kaempferi* Carrière) の長さ 3.7~4.1 m の主に 1 もしくは 2 番玉の丸太を使用した。スギは末口径 300 mm、ヒノキ及びカラマツは末口径 200~300 mm であった。これらの丸太から、樹種特性を把握するために、3 樹種の製材を作製した。製材及び後述する集成材用ラミナは、3 樹種ともに心去り材として採取した。スギの製材及び異樹種異等級構成集成材用のラミナは、随を除き、主に心材部から木取りした。特に、高い MOE が必要となる同一樹種同一等級構成集成材用のラミナについては、主に辺材部から木取りした。また、ヒノキ及びカラマツの製材及び異樹種異等級構成集成材用のラミナは、随を除いた、すべての部位から木取りした。なお、試作する集成材がモデル化した小さな断面寸法であるため、曲げ性能に影響を及ぼすような欠点を出来る限り排除する目的で、25 mm 以上の大きな節を有するラミナは除外した。全ての製材及び集成材用ラミナの材質因子の主な調査結果を Table 1 に示す。製材及び集成材の断面は、住宅構造用の梁材である中断面集成材を想定し、その 3 分の 1 モデル (材幅 40 mm × 材背 100 mm) とした。粗挽後、製材及び集成材用ラミナは、蒸気式乾燥し、乾燥スケジュールは、乾球温度及び湿球温度を、初期は 50~47℃、末期は 65~48~45℃ とした。なお、3 樹種ともに、

Table 1. Qualities of solid lumber and lamina.

Section	Species	Size of cross section (mm)	Sample number	Moisture content (%)		E_{tr} (GPa)		Average annual ring width (mm)		Knot area ratio (%)		Fiber orientation (%)	
				Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.	Avg.	Std.
Solid lumber	Sugi	40×100	28	11.8	1.0	7.6	1.5	4.2	1.3	0.4	0.3	0.8	0.7
	Hinoki		32	13.1	1.1	11.6	1.6	3.9	1.3	0.4	0.2	0.8	0.8
	Karamatsu		30	14.6	1.9	10.6	1.7	4.5	1.4	0.4	0.2	1.2	1.0
Lamina	Sugi	48×10	568	12.4	0.5	8.6	1.9	2.7	1.0	0.3	0.3	1.4	0.9
	Hinoki		42	12.1	0.4	13.7	0.3	2.7	0.8	0.2	0.2	1.3	0.8
	Karamatsu		40	11.8	0.4	13.7	0.4	2.5	1.0	0.3	0.2	1.8	1.1

Note: Moisture content was measured by the oven-drying method; E_{tr} , dynamic modulus of elasticity; Knot area ratio was calculated from total knot area divided by total surface area of lumber or lamina; Avg., average; Std., standard deviation.

小さな断面寸法及び心去り材を用いたことから、同様の温度設定とし、乾燥時間は、製材及び集成材用ラミナの厚みと乾燥速度の違いによって調整した(72~216時間)。乾燥後、モルダー加工により、寸法を幅40×高さ100×長さ2070 mmに調整した。試験体本数は、スギ28体、ヒノキ32体及びカラマツ30体とした。加工後、FFTアナライザー(エーティーエー HG2001)を用いて縦振動法による動的ヤング係数(E_{tr})を測定するとともに、破壊試験後に試験体の一部を採取し、全乾法により含水率を測定した。

2.2 集成材の作製

2.1で述べた3樹種の丸太から、ラミナを作製した。ラミナは、人工乾燥後、モルダー加工して寸法を、幅48×高さ10×長さ3650 mmに調整した。3樹種合わせて900本準備し、全てのラミナについて、2.1で述べた方法に準じて含水率及び E_{tr} を測定した。この中から、断面構成に適合するラミナをスギ、ヒノキ及びカラマツで、それぞれ568, 42及び40本選定した。これらの等級区分したラミナを用いて、10プライのスギ同一樹種同一等級構成集成材(タイプA)及び異樹種異等級構成集成材(タイプB及びC)を作製した(Fig. 1)。なお、ラミナの選定は、断面構成毎の設定値に対して、標準偏差が概ね±0.3 GPaとなるようにした。また、タイプAの最外層ラミナは、選定範囲(標準偏差が概ね±0.1 GPa)を狭くした(Table 2)。なお、全ての集成材のMOEが同等(10.7 ± 0.2 GPa)となるように、等価断面法⁷⁾を用いて断面構成を設定した。接着は、水性高分子イソシアネート系接着剤(光洋産業 KR-134A)に架橋剤(光洋産業 AX-200)を加え、塗布量を片面当たり250 g/m²で両面塗布して行った。積層は、回転コンポーザーを用い、圧力1 MPaに

Fig. 1. Types of solid and laminated lumber.

Note: Figures in parentheses indicate dynamic modulus of elasticity of each lamina in laminated lumber; n , number of sample; size of lumber, 40 by 100 by 2070 mm.

設定し、常温で40分圧縮した。解压後、1週間以上養生し、幅40×高さ100×長さ2070 mmに加工し、タイプA、B及びCで、それぞれ24, 21及び20体作製した。

2.3 試験方法

曲げ試験は、製材及び集成材ともに、集成材の日本農林規格¹⁴⁾に記載されている曲げA試験に準じて行った。複合型実大強度試験機(前川試験機製作所 IPA-100R)を使用し、下部支点スパン1800

Table 2. Values of dynamic modulus of elasticity in each layer of laminated lumber.

Lamina position	Type A				Type B				Type C			
	Avg.	C.V.	Min.	Max.	Avg.	C.V.	Min.	Max.	Avg.	C.V.	Min.	Max.
1st and 10th	10.7 (10.7)	0.9	10.4	11.0	13.7 (14.0)	2.2	13.4	14.4	13.7 (14.0)	2.9	12.9	14.5
2nd and 9th	10.4 (10.7)	3.8	10.0	11.4	7.9 (8.0)	1.3	7.5	8.1	8.0 (8.0)	1.3	7.8	8.2
3rd and 8th	11.1 (10.7)	4.5	9.9	11.8	7.5 (7.5)	1.3	7.3	7.7	7.6 (7.5)	2.6	7.3	7.8
4th and 7th	10.3 (10.7)	6.8	9.8	11.8	6.9 (7.0)	2.9	6.6	7.3	6.9 (7.0)	2.9	6.6	7.8
5th and 6th	10.4 (10.7)	4.8	9.8	11.8	5.9 (6.0)	10.2	4.4	7.1	5.9 (6.0)	6.8	5.1	7.1

Note: Avg., average; C.V., coefficient of variation; Min., minimum; Max., maximum; Figures in parentheses indicate the setting value by calculation; Type A-C, see Fig. 1.

mm, 上部荷重点間の距離400 mm, 試験載荷速度 20 mm/min に設定し, 4 点荷重方式で行った。たわみは, 変位計 (東京測器研究所 SDP-200D) を試験体側部 (梁背) の中立軸に設置し測定した。荷重面は, 製材では柃目面を, 集成材 (ラミナの積層面が板目面) では板目面を主体とした。なお, 本研究は, 比較的小さな断面における曲げ破壊試験であり, 上部荷重点及び下部支点のプレート幅 (試験体と接地するフラット面の幅) は, それぞれ120 mm 確保されており, 上部荷重点及び下部支点の各4点において, 過度のめり込みは観察されなかった。曲げ試験は, 破壊するまで荷重を加え続け, ほぼ全部の試験体が最大荷重点において破壊した。その時の最大荷重から MOR を算出した。なお, 最大荷重の10~40%の範囲の弾性直線から最大荷重に対する1%荷重に相当する値を超えた直近下位値を比例限度点に決定した。曲げ仕事量 (W) は, 荷重-たわみ曲線の原点, 破壊 (最大) 荷重点及び破壊 (最大) たわみ点で囲まれた面積¹²⁾ とし, 荷重とたわみの計測点 (サンプリング間隔0.02 kN 毎のたわみ量を測定)

を用い, 台形近似として積分し求めた。ヤンカ靱性係数 (Z) は, 比例限度点以降, 破壊 (最大荷重) に至る塑性域におけるたわみ量の増分を荷重の増分で除した係数¹²⁾ として求めた。なお, 検定方法については, 得られたデータが正規分布と仮定して, t 検定を行った。

3. 結果と考察

3.1 製材の曲げ性能

3.1.1 3 樹種の曲げ性能 (MOE, MOR, W 及び Z) の比較

Table 3 に, 得られた製材の曲げ性能を示す。MOE では, ヒノキ及びカラマツ製材がスギ製材より, 母平均の差の検定の結果, 1%水準で有意に高い値を示した。MOR では, ヒノキ製材が他の2樹種より, 母平均の差の検定の結果, 1%水準で有意に高い値を示した。Fig. 2 に典型的な荷重-たわみ曲線を示す。曲げ仕事量では, ヒノキ製材が他の2樹種と比較して, 母平均の差の検定の結果, 1もしくは5%水準で有意に大きい値を示した。猪瀬・渋

Table 3. Average values of static bending properties in solid and laminated lumber.

Factor	Solid lumber												Laminated lumber											
	Sugi ($n=28$)				Hinoki ($n=32$)				Karamatsu ($n=30$)				Type A ($n=24$)				Type B ($n=21$)				Type C ($n=20$)			
	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.	Avg.	C.V. (%)	Max.	Min.
ρ (g/cm ³)	0.37	9.5	0.45	0.33	0.47	5.0	0.53	0.43	0.49	7.6	0.58	0.42	0.43	1.7	0.44	0.41	0.40	2.9	0.42	0.38	0.42	3.4	0.44	0.38
MOR (MPa)	49.2	16.9	65.1	29.9	65.3	18.1	81.9	40.1	52.6	29.5	76.2	20.1	60.2	7.4	71.3	50.2	55.9	8.6	63.3	44.6	51.9	15.2	62.2	33.3
MOE (GPa)	7.57	18.6	10.62	4.83	10.67	13.0	13.13	8.15	10.06	16.7	14.10	6.79	9.87	13.8	12.63	4.56	9.76	6.5	11.41	8.77	10.05	10.4	11.32	6.79
W (J)	347	44.9	712	137	480	49.4	900	138	292	66.1	825	43	398	34.2	719	186	511	40.2	963	165	270	43.7	523	73
Z ($\times 10^{-3}$ mm/N)	8.31	24.7	13.63	4.76	6.42	29.9	12.26	3.01	5.81	33.1	11.12	3.42	7.01	27.8	11.61	4.47	10.48	38.7	18.66	6.56	5.84	27.9	9.10	3.61
Maximum load (kN)	9.38	16.9	12.40	5.70	12.45	18.1	15.60	7.64	10.03	29.5	14.52	3.82	11.46	7.4	13.58	9.56	10.65	8.6	12.06	8.50	9.89	15.2	11.84	6.34
<i>Pro. lim. load</i> (kN)	5.07	22.5	8.30	3.26	6.68	29.5	10.42	3.44	5.40	30.1	10.92	3.10	6.72	21.0	9.08	3.98	6.07	12.5	7.24	4.58	5.65	29.1	9.72	3.10
Plastic region load (kN)	4.31	24.8	6.20	2.06	5.76	15.6	7.34	3.50	4.63	42.1	8.08	0.42	4.74	36.4	8.12	0.82	4.58	28.7	6.66	1.60	4.23	33.3	6.34	1.18
<i>Max. def.</i> (mm)	58.7	26.0	109.5	35.0	58.1	28.6	89.0	27.5	44.3	38.7	91.5	17.0	54.8	18.4	80.0	39.5	68.1	28.6	110.0	36.0	43.4	26.7	69.0	21.5
<i>Pro. lim. def.</i> (mm)	22.8	18.0	32.0	14.0	20.9	26.2	29.5	10.5	17.5	22.6	25.5	9.5	22.3	27.1	35.0	13.0	20.8	18.2	28.5	13.5	18.4	40.3	38.0	8.5
<i>Pla. reg. def.</i> (mm)	35.9	40.0	81.5	15.5	37.3	34.6	63.0	17.0	26.8	57.0	72.0	4.5	32.5	39.9	60.5	4.5	47.4	42.4	93.0	10.5	25.0	43.4	47.5	4.5

Note: n ; number of sample; Avg., average; C.V., coefficient of variation; ρ , air-dried density; MOR, modulus of rupture in static bending; MOE, modulus of elasticity in static bending; W , bending work; Z , Janka plastic modulus; *Pro. lim. load*, proportional limit load; *Max. def.*, Maximum deflection; *Pro. lim. def.*, proportional limit deflection; *Pla. reg. def.*, plastic region deflection; Type A-C, see Fig. 1.

Fig. 2. Load-deflection curve of solid lumber.

谷¹⁵⁾は、スギ品種の一つであるヤブクグリにおいて、曲げ仕事量が大きな値を示す場合、破壊に達するまでのたわみ量が著しく大きい傾向を示すことを指摘している。また、曲げ仕事量が同じでも‘最大荷重は大きいが最大たわみ量が小さいもの’と‘最大荷重は小さいが最大たわみ量が大きいもの’があると指摘されている¹²⁾。本研究では、ヒノキ製材の最大荷重、比例限度荷重及び塑性域荷重（比例限度荷重を超えて最大荷重、すなわち破壊に至るまでの塑性域における荷重の増分）が他の2樹種より、母平均の差の検定の結果、1%水準で有意に高い値を示し、スギ製材とカラマツ製材との間には、5%水準で有意差は認められなかった。一方、最大たわみ量、比例限度たわみ量及び塑性域たわみ量（前述した塑性域におけるたわみ量の増分）では、カラマツ製材が他の2樹種より、母平均の差の検定の結果、1もしくは5%水準で有意に低い値を示し、スギ製材とヒノキ製材との間には、5%水準で有意差が認められなかった。以上のことから、ヒノキ製材の曲げ仕事量が最も大きい値を示したのは、ヒノキ製材の最大荷重が、他の2樹種より大きい値であったことが要因と考えられた。一方、ヤンカ靱性係数では、スギ製材が他の2樹種よりも、母平均の差の検定の結果、1%水準で有意に高い値を示した。3樹種間において、スギ製材は塑性域たわみ量が大きく、塑性域荷重が小さかったことから、最もヤンカ靱性係数が大きな値を示したと考えられた。

3.1.2 密度とMOE及び曲げ性能(MOR, W 及び Z)の関係

Fig. 3に密度とMOE及び曲げ性能の相関図を示す。一般に、MOEとMORの間に、有意な正の相

Fig. 3. Relationships among air-dried density, modulus of elasticity in static bending (MOE), bending work, Janka plastic modulus, and modulus of rupture in static bending (MOR) in solid lumber.

Note: r_s , correlation coefficient of Sugi; r_h , correlation coefficient of Hinoki; r_k , correlation coefficient of Karamatsu; r_t , correlation coefficient of total; *, significance at 1% level; **, significance at 5% level; n.s., no significance.

Legends: ○, Sugi; □, Hinoki; △, Karamatsu.

関関係が認められることが知られている¹⁶⁻¹⁹⁾。本研究でも、樹種個別のMOEとMORの間には1%水準で有意な正の相関関係が認められ、従来の報告と一致している。また、一般に、密度とMORの間には正の相関関係が認められている¹⁾。本研究でも、樹種個別の密度とMORの間に1もしくは5%水準で有意な正の相関が認められ、MORは密度に影響を受けていることが改めて確認された。

同様に、MOEと密度の間にも正の相関関係が一般的に認められている。しかしながら、実際には、MOEは、樹種によって差が認められるマイクロフィブリル傾角に影響される²⁰⁾。このため、MOEと密度の間に相関関係が認められない場合がある。石栗ら²¹⁾は、アカマツ及びカラマツ材では、MOEと密度の間に相関関係が認められたが、スギ及びヒノキ材では、MOEと密度の間に相関関係が認められなかったことを報告している。本研究において、樹種個別のMOEと密度との間に5%水準で有意な相関関係は認められなかったことから、樹種個別のMOEは、密度の影響を受けにくいと考えられる。

さらに、MOE、密度、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数との間の関係について検証した。その結果、MOEと曲げ仕事量、密度と曲げ仕事量の間には2樹種で、1もしくは5%水準で正の有意な相関関係が認められ、MOEとMOR、密度とMORは正の有意な関係にあることから、最大荷重が曲げ仕事量に影響することが要因と推測された。一方、MOEとヤンカ靱性係数の間では1樹種でのみ、5%水準で負の有意な相関関係が認められたが、弾性域及び塑性域におけるたわみ性能の相関関係など、今後、詳細な調査が必要である。

前述のとおり、製材のMOEとMORとの間、密度とMORとの間では、いずれの樹種においても、有意な相関関係が認められたことから、さらに生産現場における指標として実用性の高い因子であるMOEと密度を説明変数とし、MOR及び曲げ仕事量を目的変数とした重回帰分析をした。その結果、いずれの樹種においても両者の間には1もしくは5%水準で正の有意な重相関関係が認められた(Table 4)。同様に、ヤンカ靱性係数を目的変数とした重回帰分析の結果、スギ及びヒノキ製材では、5%水準で非有意であった。この結果から、樹種個別で考えた場合、MOR及び曲げ仕事量は、MOE

と密度に影響を受けるが、ヤンカ靱性係数は、MOEと密度以外の因子に影響を受けることが考えられる。

さらに、樹種間を越えた製材全体として検証した場合、樹種個別では関係が認められなかったMOEと密度との間、密度とヤンカ靱性係数との間にも1%水準で有意な相関関係が認められ、結果として、すべてに有意な相関関係が認められた。このことは、製材全体で検証したことで、樹種個別では差異が少なかった樹種特有の密度やMOEの範囲が拡張され、統計学上、因子間相互の影響が反映し易くなったことによると考えられる。

3.1.3 曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数と荷重及びたわみ量の関係

Table 5に、曲げ仕事量と荷重及びたわみ量との間の相関係数を示す。その結果、スギ製材の曲げ仕事量は、塑性域における指標(荷重及びたわみ量)に強く影響され、ヒノキ及びカラマツ製材の曲げ仕事量は、比例限度及び塑性域、両方の指標(荷重及びたわみ量)に影響されることが考えられる。また、曲げ仕事量と塑性域たわみ量との相関係数は、全ての樹種で特に高い値を示した。Table 6に、ヤンカ靱性係数と荷重及びたわみ量との間の相関係数を示す。全ての製材のヤンカ靱性係数と塑性域たわみ量との間に、1%水準で有意な正の相関関係が確認された。以上の結果から、樹種の違いにかかわらず、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、塑性域たわみ量に強く影響されることが確認された。

3.2 集成材の曲げ性能

3.2.1 MOR、MOE及び密度の関係

Table 3に得られた集成材の曲げ性能を示す。併せて、Fig. 4に典型的な荷重-たわみ曲線を示す。なお、この結果は、通し(NJ)ラミナを用いて集成材を作製した場合のものである。既往の研究において、フィンガージョイント(FJ)ラミナは、NJ

Table 4. Multiple correlation coefficients among air-dried density, modulus of elasticity in static bending (MOE), modulus of rupture in static bending (MOR), bending work and Janka plastic modulus in solid and laminated lumber.

Y	X ₁	X ₂	r					
			Solid lumber			Laminated lumber		
			Sugi	Hinoki	Karamatsu	Type A	Type B	Type C
MOR	ρ	MOE	0.779**	0.694**	0.682**	0.325 ^{n.s.}	0.592*	0.227 ^{n.s.}
W	ρ	MOE	0.483*	0.519*	0.585**	0.532*	0.179 ^{n.s.}	0.222 ^{n.s.}
Z	ρ	MOE	0.326 ^{n.s.}	0.290 ^{n.s.}	0.565**	0.375 ^{n.s.}	0.581*	0.209 ^{n.s.}

Note: r, multiple correlation coefficient; Y, criterion variable; X₁ and X₂, explanatory variable; ρ , air-dried density; W, bending work; Z, Janka plastic modulus; **, significance at 1% level; *, significance at 5% level; ^{n.s.}, no significance; Type A-C, Fig. 1.

Table 5. Correlation coefficients between bending work and load or deflection in solid and laminated lumber.

Species		Maximum		Proportional limit		Plastic region	
		Load	Def.	Load	Def.	Load	Def.
Solid lumber	Sugi	0.775**	0.931**	0.431*	0.255 ^{n.s.}	0.693**	0.916**
	Hinoki	0.906**	0.985**	0.832**	0.739**	0.446*	0.953**
	Karamatsu	0.847**	0.972**	0.581**	0.546**	0.800**	0.950**
Laminated lumber	Type A	0.699**	0.959**	-0.208 ^{n.s.}	-0.325 ^{n.s.}	0.542**	0.914**
	Type B	0.580**	0.988**	-0.153 ^{n.s.}	-0.161 ^{n.s.}	0.490*	0.989**
	Type C	0.829**	0.990**	0.414 ^{n.s.}	0.345 ^{n.s.}	0.398 ^{n.s.}	0.824**

Note: Def., deflection; **, significance at 1% level; *, significance at 5% level; ^{n.s.}, no significance; Type A-C, see Fig. 1.

Table 6. Correlation coefficients between Janka plastic modulus and load or deflection in plastic region in solid and laminated lumber.

Species		Proportional limit		Plastic region	
		Load	Deflection	Load	Deflection
Solid lumber	Sugi	0.083 ^{n.s.}	0.476*	0.080 ^{n.s.}	0.716**
	Hinoki	0.699**	0.659**	0.161 ^{n.s.}	0.900**
	Karamatsu	0.060 ^{n.s.}	0.374*	-0.026 ^{n.s.}	0.468**
Laminated lumber	Type A	0.303 ^{n.s.}	0.240 ^{n.s.}	-0.205 ^{n.s.}	0.411*
	Type B	0.255 ^{n.s.}	0.328 ^{n.s.}	-0.126 ^{n.s.}	0.737**
	Type C	0.398 ^{n.s.}	0.355 ^{n.s.}	0.106 ^{n.s.}	0.687**

Note: **, significance at 1% level; *, significance at 5% level; ^{n.s.}, no significance; Type A-C, see Fig. 1.

Fig. 4. Load-deflection curve of laminated lumber.

Note: Type A-C, see Fig. 1.

ラミナよりも破壊たわみが低いこと²²⁾や MOR 及び引張強度が低いこと⁶⁾, また最外層の FJ 部の先行破壊⁹⁾, FJ 先端部に接するラミナへの応力集中²³⁾などが報告されていることから, ラミナに FJ を用いた場合には, MOR, 曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は, 本研究の結果と比較して, 低い値を示すことが推測される。なお, 目標とした MOE と差が大きい試験体が得られた要因としては, ラミナ選定に

は設定値に対して範囲 (標準偏差 ± 0.3 GPa) を有していることや, ラミナの E_{tr} は縦振動法による測定値であり, 通常その値は静的破壊試験による MOE よりも大きな値を示す傾向があること, さらに小断面のラミナを用いたために, 許容した節等の欠点が想定以上に影響を及ぼしたなどが考えられた。

MOR では, タイプ A はタイプ B 及び C と比較して, 母平均の差の検定の結果, 1% 水準で有意に高い値を示した。また, 全ての集成材の MOE を分散分析した結果, 5% 水準で有意な差は認められないことが確認された。これらの結果から, 等価断面法を用いれば, ラミナが異樹種や異等級で構成されていても, 集成材の MOE を設定範囲にほぼ制御できるが, MOR においては, 最外層に配置したラミナの影響によって, 断面間で差が認められることが確認された。林・宮武⁴⁾は, スギ集成材の外層に LVL を積層した複合集成材を作製し, その曲げ物性を調査した結果, LVL の積層によって, MOE の増加は顕著であったが, MOR の増加はそれほど顕著でなかったことを報告している。また, 作製した集成材の MOR は, MOE の高い LVL ラミナに応力が集中し, 応力分担が大きくなるために, LVL 単体の MOR よりも, 高くならないことを指摘している。後藤ら²⁴⁾は, コナラ材とスギ材の異樹種複

合 LVL の強度特性試験において、最外層にコナラ単板を構成することによって、MOE は顕著に向上するが、MOR は MOE ほど明確な向上が認められないことを報告し、その理由を林・宮武⁴⁾と同様に、最外層部分に構成したコナラ単板への応力分担が大きくなっているためと推察している。本研究においても、タイプ B においては、MOR の値は、ヒノキ製材の MOR の値より 15% 程度低い値を示しており、林・宮武⁴⁾及び後藤ら²⁴⁾の指摘と一致している。

また、製材と同様に、MOE と密度を説明変数とし、MOR、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数を目的変数とした重回帰分析をした結果、製材の結果とは反対に、ほとんどの関係において 5% 水準で有意な関係は認められなかった (Table 4)。このことから、本研究で用いた MOE を同等とした異樹種異等級構成集成材では、MOE と密度が、MOR、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数に及ぼす影響は低いことが示唆された。

3.2.2 曲げ仕事量と荷重及びたわみ量の関係

曲げ仕事量 (Table 3) において、タイプ B は他の集成材と比較して、母平均の差の検定の結果、1 もしくは 5% 水準で有意に高い値を示し、タイプ A はタイプ C と比較して、1% 水準で有意に高い値を示した。このように、断面構成によって曲げ仕事量に違いが認められた。集成材の曲げ仕事量の断面間の大小関係は、最大たわみ量及び塑性域たわみ量の断面間の大小関係と同様の傾向であった。一方、全ての集成材で、比例限度たわみ量を分散分析した結果、5% 水準で有意差が認められなかったことから、集成材の曲げ仕事量は、塑性域たわみ量に大きく影響を受けることが確認された。

さらに、曲げ仕事量と荷重及びたわみ量との関係を詳細に調査した (Table 5)。いずれの集成材においても、曲げ仕事量と比例限度における指標 (荷重及びたわみ量) との間では、5% 水準で有意な相関関係が認められなかった。一方、曲げ仕事量と塑性域及び最大荷重時における指標 (荷重及びたわみ量) との間では、タイプ C の塑性域荷重との関係を除き、1 もしくは 5% 水準で有意な正の相関関係が認められた。特に、曲げ仕事量と塑性域のたわみ量及び最大荷重時のたわみ量との相関係数は、それぞれ同様に高い値を示した (Fig. 5)。なお、塑性域のたわみ量と最大荷重時のたわみ量には高い相関関係があり、両因子の曲げ仕事量に及ぼす影響は同程度と考えられる。いずれにしても、集成材の曲げ仕事量は断面構成にかかわらず、塑性域たわみ量に強く影響されることが確認された。この結果は、製材の結果

Fig. 5. Relationship between plastic region deflection and bending work in laminated lumber of Type B.

Note: r , correlation coefficient; **, significance at 1% level.

と同様であった。また、タイプ B 及び C ともに、それぞれヒノキ及びカラマツ製材とは異なる傾向を示し、スギ同一種構成によるタイプ A と同様の傾向を示していることから、タイプ B 及び C の曲げ仕事量は、内層のスギラミナの特性に影響されていることが考えられる。以上のことから、集成材の曲げ仕事量は、最外層及び内層に配置したラミナの樹種特性の両方に影響を受けることが明らかとなった。結果として、曲げ仕事量の高い集成材を作製するには、最外層ラミナの MOE のみを指標にするだけでなく、高い MOR かつ塑性域たわみ量に優れた、高い曲げ仕事量を有するヒノキの様な樹種を最外層及び内層にも配置することが効果的であることが示唆された。

3.2.3 ヤンカ靱性係数と荷重及びたわみ量の関係

ヤンカ靱性係数 (Table 3) において、タイプ B は他の集成材よりも、母平均の差の検定の結果、1% 水準で有意に高い値を示した。全ての集成材の塑性域荷重を分散分析した結果、5% 水準で非有意であったが、タイプ B の塑性域たわみ量は、他の集成材よりも母平均の差の検定の結果、1% 水準で有意に高い値を示した。これらのことから、各集成材のヤンカ靱性係数の違いは、塑性域たわみ量の違いに影響を受けることが確認された。

また、タイプ B とヒノキ製材、タイプ C とカラマツ製材のヤンカ靱性係数を比較すると、いずれの集

成材も製材より大きい傾向を示し、タイプBで顕著であった。このことは、最外層ラミナの靱性に、内層のスギの高い変形性能が加味することによって、集成材の靱性性能が向上したと考えられる。これは、スギ製材が塑性域たわみ量に優れた特性を有し、3樹種の中で最もヤンカ靱性係数が大きかったことから裏付けられる。

Table 6に、ヤンカ靱性係数と荷重及びたわみ量との間の相関係数を示す。いずれの集成材においても、ヤンカ靱性係数と比例限度の指標（荷重及びたわみ量）及び塑性域荷重との間には5%水準で有意な相関関係は認められず、塑性域たわみ量に強く影響されていることが確認された。得られた結果から、高いヤンカ靱性係数を有する集成材を作製するには、内層にスギの様な高いヤンカ靱性係数を有する、すなわち、塑性域の変形性能に優れた樹種を配置した上で、最外層に、内層と同等以上の塑性域の変形性能（たわみ量）に優れたヒノキの様な樹種を配置することが効果的であることが示唆された。

4. 結 論

本研究では、スギ、ヒノキ及びカラマツ製材の曲げ性能を調査した上で、開発する異樹種異等級構成集成材の曲げ性能を調査した。併せて、ラミナの特性や断面構成がその集成材の曲げ性能に及ぼす影響を調査した。得られた結果は以下のとおりである。

1. 製材のMOE, MOR, 曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、3樹種間で差異が認められた。MOE, MOR, 曲げ仕事量は、ヒノキが最も大きい値を示し、ヤンカ靱性係数は、スギが最も大きい値を示した。また、樹種にかかわらず、曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、塑性域たわみ量に強く影響されることが確認された。
2. 異樹種異等級構成集成材でも、等価断面法によって、任意にMOEを設定できることが確認された。しかしながら、MOR, 曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数は、断面構成間で有意差が認められた。
3. 集成材の曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数において、断面構成にかかわらず共通して、塑性域たわみ量に強く影響を受けることが確認された。
4. 集成材の曲げ性能は、最外層のヒノキもしくはカラマツ特有の曲げ性能に強く影響を受けるだけでなく、加えて内層に配置したスギの曲げ性能にも影響を受けることが示唆され、組合せた樹種の相違によって、MOR, 曲げ仕事量及びヤンカ靱性係数に差異が生じることが明らかとなった。
5. 曲げ仕事量の高い集成材を作製するには、最外層ラミナのMOEのみを指標にするだけでなく、高いMORかつ塑性域たわみ量に優れた、高い曲げ仕事量を有するヒノキの様な樹種を最外層及び内層にも配置することが効果的であることが示唆された。
6. ヤンカ靱性係数の高い集成材を作製するには、内層にスギの様な高いヤンカ靱性係数を有する樹種を配置した上で、最外層に、内層と同等以上の塑性域の変形性能（たわみ量）に優れたヒノキの様な樹種を配置することが効果的であることが示唆された。

なお、本報告は、実大材の3分の1のサイズにモデル化した試験体による実験であり、寸法効果の影響を含むことが予測される。また、通しラミナを用いた集成材での結果であり、FJラミナを用いた場合と異なる結果であることも予測される。今後は、これらのことを考慮しながら、実大材サイズでの試験を行う必要がある。

文 献

- 1) 佐々木 光, 角谷和男, 瀧野真二郎: 木材研究・資料 No. 17, 192-205 (1983).
- 2) 平川泰彦, 中田了五, 藤澤義武: 木材工業 59 (4), 159-165 (2004).
- 3) 林 知行: 木材工業 47 (4), 155 (1992).
- 4) 林 知行, 宮武 敦: 木材学会誌 37, 200-205 (1991).
- 5) 森園真子, 山角達也, 村田 忠, 森 俊宏: 鹿児島県工業技術センター研報 No. 16, 57-60 (2002).
- 6) 城井秀幸, 藤本登留, 村瀬安英, 河野貴可: 九大農学芸誌 No. 60, 13-34 (2005).
- 7) 宮武 敦: “木質科学実験マニュアル”, 日本木材学会編, 文永堂出版, 東京, 2000, p. 205.
- 8) 和田 博, 坂野三輪子, 河崎英治, 新居稔弘, 手束昭一: 木材学会誌 42, 369-375 (1995).
- 9) 林 知行, 板垣直行, 小黒正次, 中島靖雄, 町田初男: 材料 51 (4), 373-378 (2002).
- 10) Yang, T. H., Wang, S. Y., Lin, C. J., Tsai, M. J.: Constr. Build. Mater. 22 (4), 487-493 (2008).
- 11) 小松幸平: 木材学会誌 43, 934-939 (1997).
- 12) 北原覺一: “木材物理”, 森北出版, 東京, 1966, pp. 79-191.
- 13) 吉原 浩, 黒瀬智之: 木材工業 63 (5), 214-217 (2008).
- 14) “集成材の日本農林規格”, 農林水産省告示第1152号 (2007).

- 15) 猪瀬 理, 渋谷昌資: 愛媛大農演林報 No. 12, 77-88 (1975).
- 16) 中井 孝: 木材工業 39(11), 42-46 (1984).
- 17) 小松幸平, 堀江和美, 黄 権煥: 木材学会誌 44, 368-374 (1998).
- 18) 徳田迪夫, 田中勝也, 鈴木直之: 三重大農演林報 No. 16, 81-95 (1988).
- 19) 宮島 寛: 北大農演林報 No. 42, 1089-1115 (1984).
- 20) 増田 稔: “新編 木材工学”, 養賢堂, 東京, 1985, pp. 140-162.
- 21) 石栗 太, 横田信三, 飯塚和也, 斎藤孝一, 吉澤伸夫: 宇都宮大農演林報 No. 40, 69-76 (2004).
- 22) 森 光正, 伏谷賢美, 佐藤敬一, 高津正治: 木材工業 41(11), 513-517 (1986).
- 23) 卞 熙燮, 伏谷賢美, 島田勝広, 松藤 剛, 佐藤敬一: 木材学会誌 39, 590-597 (1993).
- 24) 後藤崇志, 池渕 隆, 古野 毅, 中山茂生: 木材工業 59(2), 61-66 (2004).