

和歌山県産スギ, ヒノキ大径材から製材されたラミナを活用した 横架材の開発

山裾伸浩・一岡直道・粟田香名子・東山貢

和歌山県林業試験場

Development of Beams Using Laminas Processed from Large Diameter Logs of Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) Produced in Wakayama Prefecture

Nobuhiro Yamasuso, Naomichi Ichioka, Kanako Awata and Mitsugi Higashiyama

Wakayama Forestry Experiment Station

緒 言

和歌山県では森林資源の成熟に伴い、スギ、ヒノキの大径化が進みつつある。大径材の活用方法に関して、小曲がりのある原木、いわゆるB材については、断面の比較的小さな間柱や筋かいの他、集成加工用のラミナ生産が有効と考えられる。また、「和歌山県木材利用方針」(2021)に基づく公共施設の木造化推進のため、中大規模建築物に対応可能な構造材の開発が求められている。

ラミナを集成加工した構造用の材料として、ラミナを厚さ方向に積層接着した構造用集成材があり、厚さ30mm程度のラミナが使用されることが多い。しかし、もっと厚みのあるラミナの活用については、いくらか平割積層材に関する開発事例(岩崎, 2008), (今井ら, 2021)はあるものの、比較的少ないのが現状である。

そこで、大径材から製材されたラミナを活用した、品質の確かな横架材(梁, 桁)の開発を目的として、径級が概ね30cm以上の和歌山県産スギ及びヒノキ原木、並びに製材された数種類の断面寸法を持つラミナについてヤング係数等の評価を行うとともに、これらのラミナを活用した種々の積層パターンで構成される横架材を製作し、曲げ強度性能の評価を行ったので報告する。

材料および方法

1. 県産スギ, ヒノキ原木及び製材されたラミナの性能評価

1) 県産スギ, ヒノキ原木の性能評価

公称長さ4mの和歌山県産スギ原木81本(末口径級30cm以上)及びヒノキ原木42本(同26cm以上)を用い、重量、材長、末口及び元口直径(ともに短径と長径の平均値)並びに簡易型強度測定器(株式会社エーティーエー製HG2020sp)で縦振動による動的ヤング係数を測定した(図1)。その後、一般的な厚さ30mm程度のラミナの他、より厚みのあるラミナの活用を検討するため、表1に示す4種類の断面寸法に製材加工した。なお、ラミナの断面寸法は原木毎に1種類のみ採用した。



図 1 原木の測定状況

表 1 供試するラミナの断面寸法

〔原木からの製材後〕			〔乾燥、選別及びモルダー加工後〕		
厚さ (mm)	×	幅 (mm)	厚さ (mm)	×	幅 (mm)
37	×	120	33	×	110
52	×	120	48	×	110
68	×	120	63	×	110
55	×	170	48	×	157

2) 横架材用ラミナの性能評価

製材直後の各ラミナについて、動的ヤング係数及び高周波式含水率計（株式会社ケット科学研究所製 HM-520）による含水率の測定を行った。続いて、蒸気式乾燥機による人工乾燥を行った後、改めて含水率の測定を行い、横架材の製作に不向きな腐れ、損傷及び曲がりの著しいラミナを目視により選別、除外してから、モルダーで表 1 に示す断面寸法に加工し、動的及び曲げヤング係数を測定した。なお、曲げヤング係数の測定については主にグレーディングマシン（飯田工業株式会社製 MGFE-251-1）を用い、厚さの影響でグレーディングマシンを使用できなかったラミナについては支点間距離 3,900mm の中央載荷方式で行った（図 2）。



〔グレーディングマシン〕



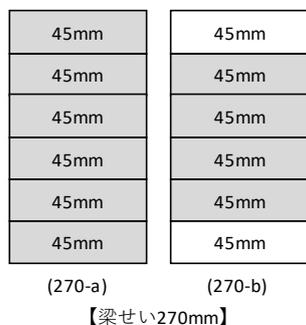
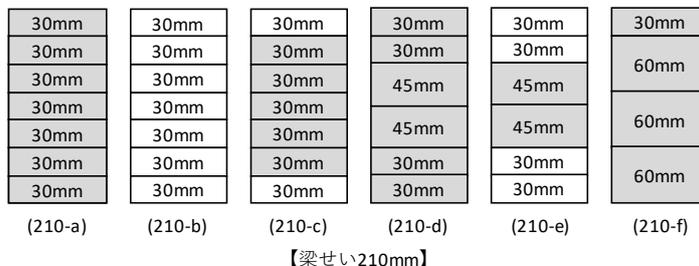
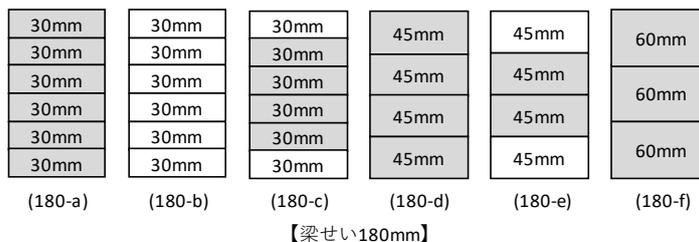
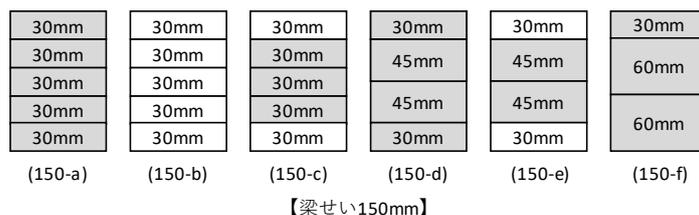
〔中央載荷方式〕

図 2 曲げヤング係数の測定方法

2. ラミナを活用した横架材の性能評価

あらかじめ動的及び曲げヤング係数を測定したラミナを、水性高分子イソシアネート樹脂接着剤（光洋産業株式会社製 KR ボンド）を用い、コールドプレスで圧力 0.7MPa で圧縮することによって、図 3 に示す 22 種類の積層パターンで各 5 体、合計 110 体の横架材（積層材）を製作した。図 4 はその一例である。なお、製作に当たっては図 3 に示す各ラミナの厚さ+1mm（31mm、46mm 及び 61mm）に改めて表面仕上げを行ってから積層し、接着完了後にモルダーで所定の断面寸法へ加工した。また、「構造用集成材の日本農林規格」（以下、集成材 JAS）の規定を参考に、梁せい方向の中央から外側に向かってラミナの曲げヤング係数が高くなるよう配置し、一部（図 3 の 150-f 及び 210-f）を除いて対称異等級の構成とした。なお、当研究では全て縦継ぎのない通しラミナを使用した。

そして，横架材の動的ヤング係数を測定してから，万能型材料試験機を用いて4点荷重方式による曲げ強度試験を実施し，曲げヤング係数及び曲げ強度を測定した（図5）．曲げ強度試験の荷重点間及び支点間距離について，梁せい150mmの場合は600mm及び2,700mm，同180mmの場合は720mm及び3,240mm，同210mm以上の場合は840mm及び3,780mmとした．また，使用機器について，梁せい150mmの場合は株式会社島津製作所製AG-10TD（容量100kN），同180mm及び210mmの場合は株式会社島津製作所製AG-250kNX（容量250kN），及び同240mm及び270mmの場合は株式会社東京衡機製造所製A094101（容量1,000kN）をそれぞれ用いた（使用機器のうちAG-250kNX及びA094101は兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センター所有）．



■ : スギ
□ : ヒノキ
※ 枠内はラミナの厚さ

図3 製作した横架材（積層材）の積層パターン
※材長は全て4m，材幅は梁せい240mm以下の場合105mm，梁せい270mmの場合150mm



[180-e] [240-a] [270-b]

図 4 製作した横架材の一例



図 5 曲げ強度試験

(株式会社東京衡機製造所製 A094101)

結果および考察

1. 県産スギ, ヒノキ原木及び製材されるラミナの性能評価

1) 県産スギ, ヒノキ原木の性能評価

原木の測定結果は表 2 のとおりであった。原木の動的ヤング係数について、「素材の日本農林規格」(以下, 素材 JAS) の縦振動ヤング係数区分に準じた等級区分を行ったところ, 図 6 のとおりとなり, スギは Ef90 をピークに Ef50~Ef110, ヒノキは Ef110 をピークに Ef90~Ef150 の間で分布していた。

表 2 原木の測定結果

樹種		材長 (m)	平均直径 (cm)	密度 (g/cm ³)	動的ヤング係数 (kN/mm ²)
スギ (n=81)	平均値	4.16	37.8	0.719	8.00
	最大値	4.40	43.9	0.986	10.84
	最小値	4.03	33.7	0.453	4.88
	標準偏差	0.07	2.1	0.125	1.32
ヒノキ (n=42)	平均値	4.13	33.9	0.634	10.92
	最大値	4.27	38.6	0.852	14.37
	最小値	4.02	30.0	0.461	8.63
	標準偏差	0.04	2.1	0.103	1.27

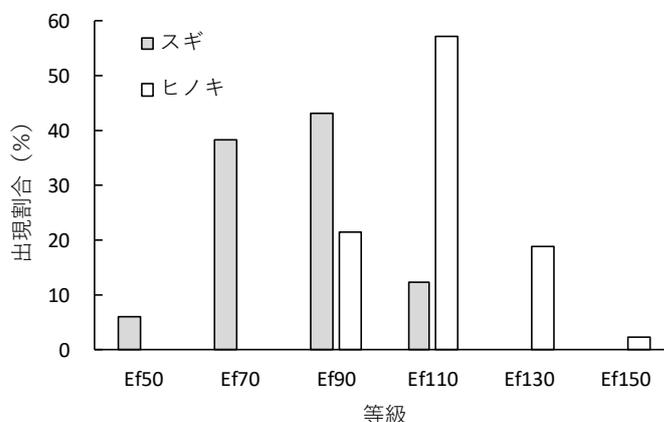


図 6 原木の動的ヤング係数に基づく等級区分 (素材 JAS 基準)

2) 横架材用ラミナの性能評価

製材直後におけるラミナの含水率及び動的ヤング係数の測定結果を表3に示す。なお，表中には腐れ，損傷及び曲がりの著しいものなど，横架材の製作に不向きなラミナのデータも含まれている。含水率については，スギがヒノキに比べて約2倍の数値であった。

原木の動的ヤング係数と製材されたラミナの平均動的ヤング係数の関係を図7に示す。両者の値は近似しており，スギで相関係数 $R^2=0.71$ ，ヒノキで $R^2=0.76$ の非常に高い相関が得られた。このことから，原木段階においてヤング係数を測定することで，製材されるラミナのヤング係数も推測が可能と考えられた。

表3 製材直後におけるラミナの含水率及び動的ヤング係数測定結果

樹種	断面寸法		数量	上段：使用した原木の本数		含水率 ² (%)	動的ヤング係数 (kN/mm ²)
	厚さ (mm)	幅 (mm)		下段 () : 原木1本当たり ラミナ数量	下段 () : 原木1本当たり ラミナ数量		
スギ (n=663)	37 × 120	120	309	28 (11.0)	平均値	80.2	7.94
					最大値	128.7	12.30
					最小値	32.5	3.55
					標準偏差	23.6	1.69
	52 × 120	120	148	19 (7.8)	平均値	73.0	7.57
					最大値	123.3	11.49
					最小値	25.5	4.72
					標準偏差	24.3	1.35
	68 × 120	120	123	22 (5.6)	平均値	76.5	8.44
					最大値	129.7	11.63
					最小値	27.3	4.95
					標準偏差	23.7	1.45
55 × 170	170	83	12 (6.9)	平均値	75.6	8.45	
				最大値	122.5	11.92	
				最小値	42.0	4.50	
				標準偏差	19.0	1.37	
ヒノキ (n=352)	37 × 120	120	263	27 (9.7)	平均値	35.7	10.69
					最大値	65.7	14.48
					最小値	19.0	6.91
					標準偏差	6.2	1.63
	52 × 120	120	56	8 (7.0)	平均値	35.8	10.90
					最大値	82.7	15.18
					最小値	25.3	8.32
					標準偏差	8.9	1.60
	68 × 120	120	16	3 (5.3)	平均値	34.5	10.26
					最大値	48.3	12.00
					最小値	28.2	8.74
					標準偏差	5.8	0.88
55 × 170	170	17	4 (4.3)	平均値	38.5	11.09	
				最大値	48.3	13.87	
				最小値	33.7	8.38	
				標準偏差	3.9	1.48	

²ラミナの両端約500mm及び中央部において高周波含水率計を用いて測定した平均値

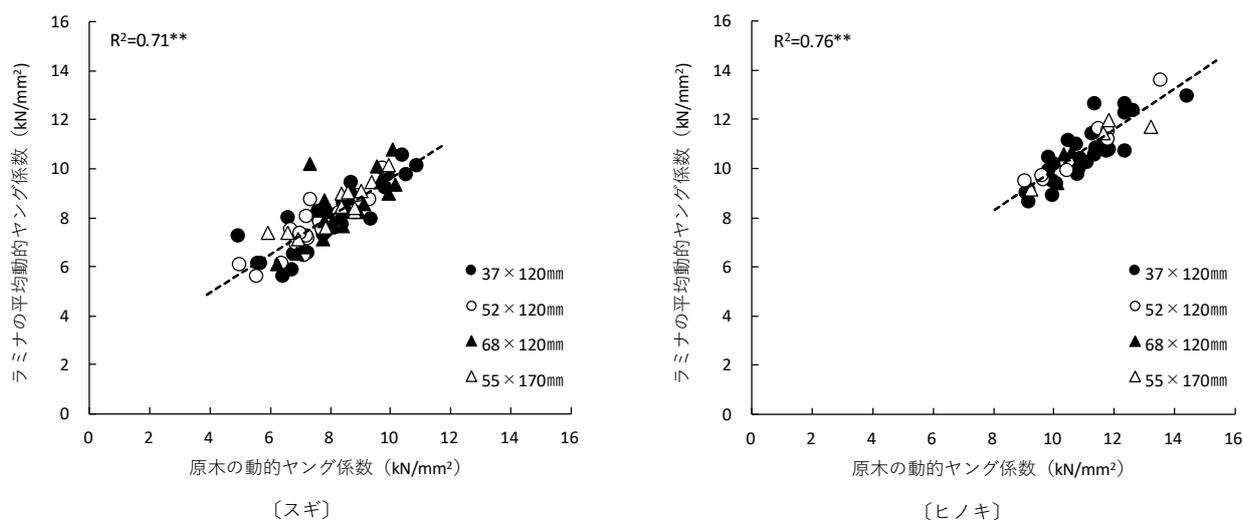


図 7 原木の動的ヤング係数と製材されたラミナの平均動的ヤング係数の関係
** : 1%水準で有意

乾燥、選別及びモルダー加工後におけるラミナの含水率並びに動的及び曲げヤング係数の測定結果を表 4 に示す。ラミナの曲げヤング係数について集成材 JAS に準じた機械等級区分を行ったところ、スギは L80 をピークに L40～L110、ヒノキは L110 をピークに L80～L140 の間で分布していた (図 8)。また、ラミナの動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係を図 9 に示す。曲げヤング係数の方が動的ヤング係数に比べ低い数値となる傾向があったが、スギで相関係数 $R^2=0.84$ 、ヒノキで $R^2=0.84$ の非常に高い相関が得られた。一般的にラミナの曲げヤング係数は長さ方向に連続して曲げ荷重を与えることができるグレーディングマシンでの測定が求められるが、今回の研究で用いた、例えば 60mm のような厚みのあるラミナの場合、通常のグレーディングマシンでは対応が困難であるため、縦振動による動的ヤング係数を活用できる可能性が示唆された。

表 4 乾燥、選別及びモルダー加工後におけるラミナの含水率及びヤング係数測定結果

樹種	断面寸法		数量	含水率 ^Z (%)	動的ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)
	厚さ (mm)	幅 (mm)				
スギ (n=453)	33 × 110	214	平均値	9.9	10.00	8.68
			最大値	13.8	14.03	11.66
			最小値	7.5	5.22	4.93
			標準偏差	0.8	1.73	1.36
	48 × 110	84	平均値	10.0	8.95	7.83
			最大値	14.3	13.10	10.98
			最小値	8.0	5.83	5.16
			標準偏差	1.1	1.42	1.15
	63 × 110	80	平均値	10.2	9.85	9.19
			最大値	17.2	13.14	12.25
			最小値	8.7	6.06	5.72
			標準偏差	1.4	1.51	1.47
	48 × 157	75	平均値	10.4	9.98	8.60
			最大値	20.2	13.29	11.56
			最小値	8.2	6.69	5.69
			標準偏差	2.4	1.47	1.39

(表4の続き)

樹種	断面寸法		数量	含水率 ^Z (%)	動的ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	
	厚さ (mm)	幅 (mm)					
ヒノキ (n=247)	33 × 110		183	平均値	8.7	12.88	11.36
			最大値	10.7	16.49	13.94	
			最小値	5.1	8.96	8.17	
			標準偏差	0.8	1.64	1.25	
			48 × 110	38	平均値	10.2	12.44
	最大値	13.2	17.17		15.78		
	最小値	8.2	8.41		8.72		
	標準偏差	1.3	1.87		1.64		
	63 × 110	13	平均値		9.8	12.24	11.18
	最大値		13.0	13.78	12.72		
	最小値		8.2	10.97	10.20		
	標準偏差		1.5	0.73	0.60		
	48 × 157		13	平均値	10.2	13.54	13.18
	最大値	12.3		16.88	15.35		
	最小値	8.5		10.77	10.37		
	標準偏差	1.1		1.62	1.34		

^Zラミナの両端約500mm及び中央部において高周波含水率計を用いて測定した平均値

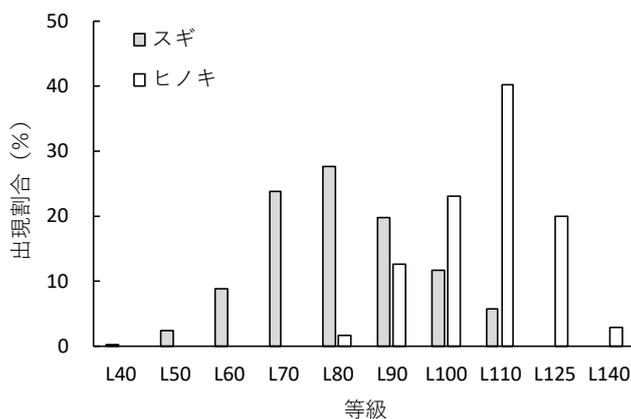


図8 ラミナの曲げヤング係数に基づく等級区分 (集成材 JAS 基準)

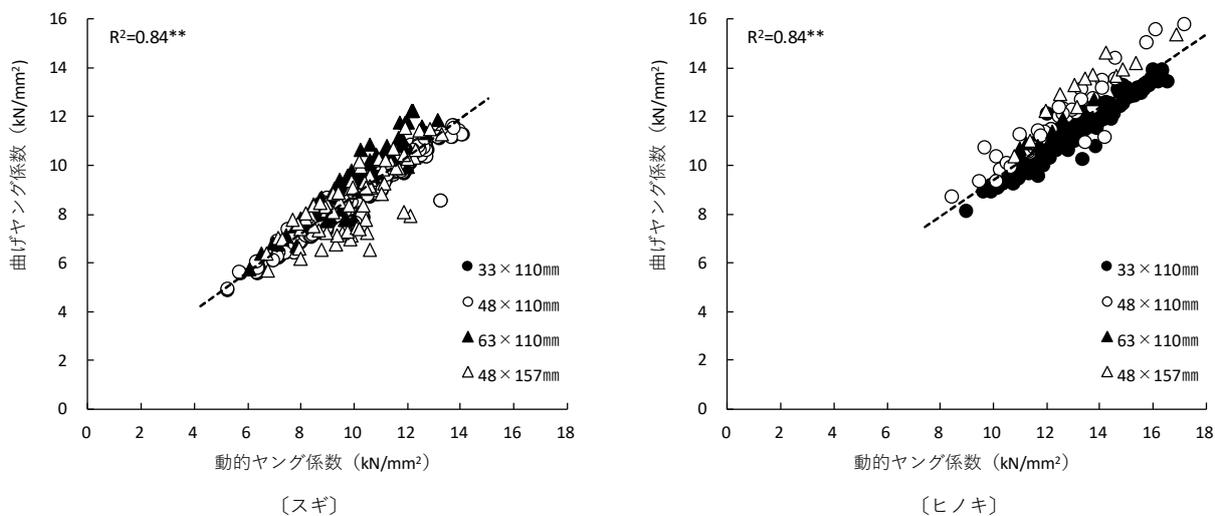


図9 ラミナの動的ヤング係数と曲げヤング係数の関係

** : 1%水準で有意

2. ラミナを活用した横架材の性能評価

横架材の曲げ強度試験結果は表5のとおりであった。横架材の曲げヤング係数と曲げ強度の関係は図10のとおりであり、相関係数 $R^2=0.43$ であった。一方、横架材を構成するラミナの平均動的ヤング係数と横架材の曲げ強度の関係は図11のとおりで、相関係数 $R^2=0.42$ であったことから、図10の場合とほぼ同じ相関が認められた。これらの結果から、ラミナの動的ヤング係数でも横架材の曲げ強度性能を十分コントロールできる可能性が認められた。

表5 横架材の曲げ強度試験結果

積層パターン ²	等級 (集成材JAS基準)	構成ラミナの 樹種・厚さ×数量	積層パターン ² 別 (各n=5) の平均値					
			構成ラミナ		横架材			
			平均動的 ヤング係数 (kN/mm ²)	平均曲げ ヤング係数 (kN/mm ²)	動的ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	
150-	a	E65-F225 ~ E95-F270	スギ30mm×5	9.70	8.54	9.31	9.46	46.8
	b	E95-F270 ~ E105-F300	ヒノキ30mm×5	12.86	11.33	13.08	12.68	72.5
	c	E75-F240 ~ E105-F300	スギ30mm×3, ヒノキ30mm×2	11.22	9.61	10.92	11.12	60.4
	d	E55-F200 ~ E95-F270	スギ30mm×2, スギ45mm×2	9.32	8.28	9.19	8.66	50.0
	e	E75-F240 ~ E95-F270	スギ45mm×2, ヒノキ30mm×2	11.43	9.93	11.19	10.98	68.0
	f	E60-F210 ~ E90-F255	スギ30mm×1, スギ60mm×2	9.78	8.97	9.80	9.13	60.3
180-	a	E65-F225 ~ E95-F270	スギ30mm×6	9.48	8.22	9.10	9.45	51.0
	b	E95-F270 ~ E105-F300	ヒノキ30mm×6	12.74	11.33	13.18	12.64	73.8
	c	E85-F255 ~ E105-F300	スギ30mm×4, ヒノキ30mm×2	11.01	9.53	10.56	10.84	48.6
	d	E55-F200 ~ E85-F255	スギ45mm×4	8.76	7.91	8.75	8.34	50.0
	e	E85-F255 ~ E120-F330	スギ45mm×2, ヒノキ45mm×2	11.17	10.24	11.39	11.72	63.1
	f	E55-F200 ~ E95-F270	スギ60mm×3	9.99	9.64	10.19	9.62	52.5
210-	a	E65-F225 ~ E95-F270	スギ30mm×7	10.15	8.86	9.73	9.57	44.5
	b	E95-F270 ~ E105-F300	ヒノキ30mm×7	12.64	11.29	12.79	12.56	71.8
	c	E85-F255 ~ E105-F300	スギ30mm×5, ヒノキ30mm×2	10.84	9.42	10.40	10.63	50.2
	d	E65-F225 ~ E95-F270	スギ30mm×4, スギ45mm×2	10.45	9.14	10.00	9.73	49.3
	e	E75-F240 ~ E105-F300	スギ45mm×2, ヒノキ30mm×4	11.90	10.30	11.36	11.88	59.6
	f	E60-F210 ~ E90-F255	スギ30mm×1, スギ60mm×1	9.77	9.12	9.71	9.01	55.0
240-	a	E65-F225 ~ E95-F270	スギ60mm×4	9.85	9.02	9.52	9.36	55.5
	b	E85-F255 ~ E95-F270	スギ60mm×2, ヒノキ60mm×2	10.93	9.91	10.54	10.58	59.2
270-	a	E65-F225 ~ E95-F270	スギ45mm×6	10.15	8.70	9.96	9.42	54.1
	b	E85-F255 ~ E120-F330	スギ45mm×4, ヒノキ45mm×2	11.02	10.35	10.59	10.79	58.6

²図3参照

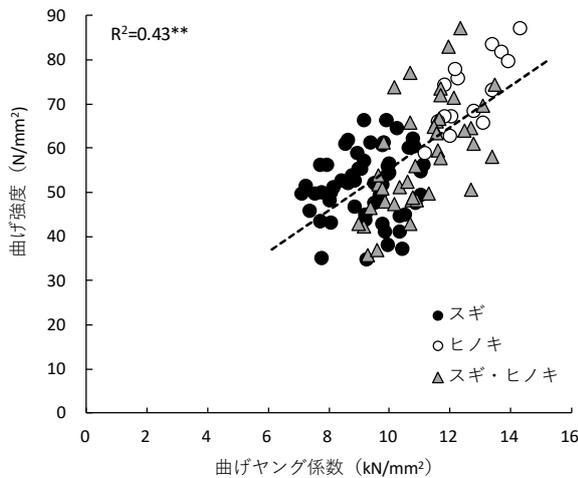


図10 横架材の曲げヤング係数と曲げ強度係数の関係
** : 1%水準で有意

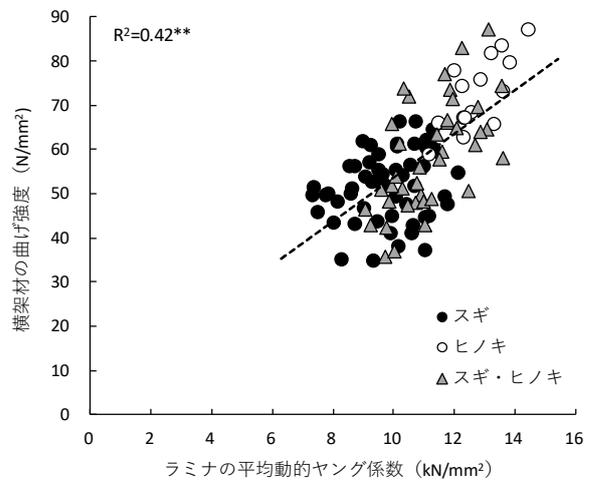


図11 ラミナの平均動的ヤング係数と横架材の曲げ強度の関係
** : 1%水準で有意

横架材の樹種構成別における曲げ強度試験結果を表6に示す。ヒノキ単独の構成が最も高く，ヒノキを外層に用いた構成ではスギ単独の場合と比べて曲げ強度性能が高くなる傾向にあった。このことから，横断面の構成を外層ヒノキ，内層スギとすることで，スギ単独の場合と比べて曲げ強度性能を向上させた横架材の製作が可能であることが認められた。また，今回の横架材で，集成材 JAS の規定による最も高い等級は E120-F330 で曲げ基準強度 33.0N/mm² であるのに対し，それよりもかなり強度性能が低い等級も含まれている全横架材の曲げ強度の最小値が 35.0N/mm² であったことから，曲げ強度は全て集成材 JAS の基準強度を大きく上回っており，十分な曲げ強度性能を有していることが確認できた。

表6 横架材の樹種構成別における曲げ強度試験結果

樹種		動的ヤング係数	曲げヤング係数	曲げ強度
		(kN/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
スギ (n=55)	平均値	9.57	9.25	51.7
	最大値	12.16	11.10	66.4
	最小値	7.37	7.11	35.0
	標準偏差	1.15	1.08	7.7
ヒノキ (n=15)	平均値	13.02	12.63	72.7
	最大値	14.79	14.30	87.1
	最小値	10.89	11.15	58.8
	標準偏差	0.96	0.92	8.0
スギ・ ヒノキ (n=40)	平均値	10.87	11.07	58.5
	最大値	13.80	13.47	87.1
	最小値	8.74	8.97	35.7
	標準偏差	1.26	1.22	12.3
全体 (n=110)	平均値	10.51	10.37	57.0
	最大値	14.79	14.30	87.1
	最小値	7.37	7.11	35.0
	標準偏差	1.65	1.66	11.9

さらに，過去に和歌山県産の無垢スギ平角材を対象として実施した試験結果と比較するため，心持ち平角材（西野・山裾，2002）及び心去り平角材（一岡ら，2024）の曲げ強度性能データを下記の参考1に示す。今回の横架材における曲げ強度性能は，無垢スギ平角材のデータと比べて高い数値が得られた。これは，今回の横架材が梁せい方向の中央から外側に向かってラミナの曲げヤング係数が高くなるよう配置されており，また，スギ単独の構成であっても最外層には少なくとも L70 以上のラミナが使用されていることで，低い強度等級ラミナの曲げ強度性能を補うことができたことによるものと推察される。

参考1 和歌山県産の無垢スギ平角材を対象とした曲げ強度性能データ

	心持ち平角材 ^z (n=260)		心去り平角材 ^y (n=160)	
	曲げヤング係数 ^x	曲げ強度 ^x	曲げヤング係数 ^x	曲げ強度 ^x
	(kN/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
平均値	8.41	45.6	7.81	39.5
最大値	13.88	74.9	11.64	61.1
最小値	4.59	20.2	4.50	17.0
標準偏差	1.29	9.2	1.46	9.4

^z (西野・山裾，2002) による

^y (一岡ら，2024) による

^x 「構造用木材の強度試験マニュアル」(公益財団法人日本住宅・木材技術センター，2011)に準拠し目標含水率が15%になるように調整

ここで、ラミナ厚さの違いによる横架材の生産性について考察する。薄くした場合は、乾燥が容易となる一方、製材時の鋸屑や乾燥後の表面仕上げ時におけるカンナ屑の発生量が多くなり、原木からの歩留まり低下につながるとともに、接着層が増えることで多くの接着剤が必要となる。一方、厚くした場合は、鋸屑やカンナ屑の発生量及び接着剤の使用量を抑えられる反面、乾燥に要する時間やコストが増加するとともに、グレーディングマシンでの曲げヤング係数測定が困難となる。以上のことから、今回の研究に関しては厚さ 45mm の場合が生産性の観点からバランスの取れた寸法であると考えられた。ただし、横架材の梁せいは一般的に 30mm 刻みで使用されることが多いため、厚さ 30mm のラミナが最も効率的に対応できることに比べ、本研究のように厚さ 45mm や 60mm のラミナを使用する場合、求められる梁せいによっては異なる厚さのラミナを組合せて対応しなければならないことに留意する必要がある。

摘 要

1. 和歌山県産スギ原木（末口径級 30cm 以上）及びヒノキ原木（同 26cm 以上）の動的ヤング係数に基づき、素材 JAS に準じて等級区分を行ったところ、スギは Ef90 をピークに Ef50～Ef110、ヒノキは Ef110 をピークに Ef90～Ef150 の間で分布していた。
2. ラミナの曲げヤング係数に基づき、集成材 JAS に準じて等級区分を行ったところ、スギは L80 をピークに L40～L110、ヒノキは L110 をピークに L80～L140 の間で分布していた。
3. 原木段階での動的ヤング係数の測定によって、ラミナのヤング係数も推測が可能と考えられた。
4. 22 種類の積層パターンで各 5 体、合計 110 体の横架材を製作、曲げ強度試験を行ったところ、ラミナの動的ヤング係数で横架材の曲げ強度性能をコントロールできる可能性が認められた。
5. 横断面の構成を外層ヒノキ、内層スギとすることで、スギ単独で用いる場合と比べて曲げ強度性能を向上させた横架材の製作が可能である。
6. 今回の横架材は全て集成材 JAS の基準強度を上回っており、十分な曲げ強度性能を有していた。

当研究を遂行するに当たり、ラミナの加工、乾燥及びグレーディングで株式会社山長商店、積層接着による横架材の製作で丸紀木材工業株式会社、並びに横架材の曲げ強度試験で兵庫県立農林水産技術総合センター森林林業技術センターに、それぞれご協力いただいた。深く感謝申し上げます。

引用文献

- 今井信・吉田孝久・奥原祐司・山口健太. 2021. 心去り平割材を利用した高剛性・高強度梁桁材の乾燥及び強度性能. 長野県林業総合センター研究報告. 35 : 153-168.
- 一岡直道・岡本憲治・山裾伸浩・東山貢. 2024. 和歌山県産スギ心去り平角材の曲げ強度性能. 和歌山県農林水産試験研究機関研究報告. 12 : 43-51.
- 岩崎晶一. 2008. スギ平割積層材の開発. 公立林業試験研究機関研究成果選集. 5 : 71-72.
- 構造用木材の強度試験マニュアル. 2011. 付録 3. 2 調整法に対する提案式. (1) ASTM D 1990-07. 公益財団法人日本住宅・木材技術センター : 88-90.
- 西野芳樹・山裾伸浩. 2002. 県産柱・横架材の強度性能に関する研究. 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告. 4 : 1-10.