

資料

県産スギラミナの強度特性に基づく構造用集成材の生産性評価

永井 智・山田直也\*<sup>1</sup>・平野岩夫\*<sup>2</sup>・上川 篤\*<sup>3</sup>・永峰佳幸\*<sup>4</sup>・塩谷卓一\*<sup>5</sup>

Satoshi NAGAI, Naoya YAMADA, Iwao HIRANO, Atsushi KAMIKAWA, Yoshiyuki NAGAMINE and Takuichi SHIOTANI

Estimation of the productivity of the structural glulam based on the strength property of Sugi laminae cultivated in Hyogo prefecture

キーワード：構造用集成材、ラミナ、丸太、スギ

I はじめに

わが国における平成 21 年次の集成材の総生産量は約 125 万 m<sup>3</sup> であり、そのうち木造軸組工法住宅に使用される中断面集成材は約 46% (約 58 万 m<sup>3</sup>)、小断面集成材は約 40% (約 50 万 m<sup>3</sup>) を占める (1)。建築用材のプレカット化が進む中、大手住宅メーカーや地域ビルダーを中心に、乾燥材で狂いや曲がり少なく、強度も安定している集成材の利用が柱や梁で進んだ結果、平成 11 年からの 10 年間で中断面集成材および小断面集成材の生産量はそれぞれ 4.7 倍および 2 倍に増加している (1)。

このような中、国産材の利用を拡大して CO<sub>2</sub> の排出量を削減しようとする全国的な機運の高まりに、欧州材をはじめとした外材の長期的な高騰が重なり、従来外材を主用してきた国内集成材メーカーの中から、国産材を原料とする集成材の生産を本格化させる企業が現れてきた (2, 3)。その結果、集成材生産量に占める国産針葉樹材の使用比率は、平成 17 年次までの 11% 前後での推移から、平成 18 年次以降は 17% 前後へと、さらに平成 21 年次には 22% 台へと増加している (1)。ただし、その品目は管柱、通し柱や土台等の小断面集成材が中心であり、梁・桁等中断面集成材でのシェアはわずかにすぎない (3, 4)。すなわち、国産材集成材市場が外材集成材の進出に対抗するためには、スギやヒノキによる梁・桁集成材の生産を考えていく必要がある (5)。近年、本県における複数の集成材メーカーも、スギ対称異等級構成集成材 (中断面；以下中断面材と略記) の JAS 認定を取得している。今後、横架材へのスギ材利用を県下で推進するために、県産スギラミナによる中断面材の生産性を

検討することはきわめて有意義である。

そこで本研究では、県産スギラミナの強度特性やそのばらつきの程度、生産可能な中断面材の強度等級、等級の高い中断面材を効率的に生産するための丸太等級区分の有効性などについて検討、試算および評価を行った。併せて、同一等級構成集成材 (小断面；以下小断面材と略記) の生産性についても機械等級区分に基づき検討を加えた。

本報告の一部は第 57 回日本木材学会大会 (2007 年 8 月、広島) にて報告した (2)。

II 材料と方法

1. 供試丸太と等級区分

供試丸太は、兵庫県宍粟市内の木材市場に集積された市内産のスギ元玉 (4m 材 75 本、末口直径 24~36cm) および二番玉以上 (4m 材 75 本、末口直径 22~32cm；以下二番玉と略記)、計 150 本である。

まず、元口・末口周囲長、長さ、重量を測定し (写真 1A)、次式により丸太の密度を求めた。

$$\rho = m / \{ \pi [p_b / (2\pi)]^2 + \pi [p_t / (2\pi)]^2 \} / 2 \times l \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここで、 $\rho$ ：丸太の密度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $m$ ：丸太の重量 (kg)、 $\pi$ ：円周率 (3.14)、 $p_b$ ：元口周囲長 (m)、 $p_t$ ：末口周囲長 (m)、 $l$ ：丸太長さ (m)。

さらに、縦振動法により丸太の固有振動数を求め、次式により動的ヤング係数 (Efr) を測定した。

$$Efr = 4l^2 f^2 \rho / 10^9 \quad \dots \text{式 (2)}$$

ここで、Efr：丸太の動的ヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)、 $f$ ：丸

\*<sup>1</sup> 現 光都土木事務所  
 \*<sup>2</sup> 東亜林業株式会社  
 \*<sup>3</sup> 株式会社山崎木材市場  
 \*<sup>4</sup> 山崎木材株式会社  
 \*<sup>5</sup> 衣笠木材株式会社

太の固有振動数 (Hz)。

測定された Efr をもとに、元玉および二番玉のそれぞれについて  $7\text{kN/mm}^2$  未満、 $7\sim 8\text{kN/mm}^2$ 、 $8\sim 9\text{kN/mm}^2$ 、 $9\text{kN/mm}^2$  以上の 4 等級に区分し、区分ごとに木口面全面にカラーマーキングを施した。

## 2. ラミナの作製と等級区分

製材は、曲げヤング係数が比較的大きい樹皮側の部位 (6, 7, 8) が優先的にラミナとして生産されるように、すなわち背板の産出量が最小となるように行われた。元玉 571 枚、二番玉 371 枚、計 942 枚のラミナ ( $134\times 35\text{mm}$ ) が製材され、人工乾燥後、風通しのよい軒下にて約 1 ヶ月間養生された (写真 1B)。ラミナは、色分けされた丸太等級区分単位で (写真 1C) モルダ加工機 ( $125\times 32\text{mm}$ ) および連続送り式グレーディングマシン (飯田工業㈱、MGFE-251; 以下 GM と略記) に投入された後、木口面に通し番号が記された。GM は、スパン 1,200mm の中央集中荷重方式が直列したものであり、投入側中央荷重部で 0.5mm の初期たわみを加え、出口側中央荷重部で 7mm の最終たわみを加えたとき、そのたわみ差と反力 (荷重) 差の関係から、曲げヤング係数が長さ方向 (両端 600mm を除く)

で連続的に測定される仕組みとなっている。GM により算出された仮の材内平均曲げヤング係数 (MGE) が大小異なるラミナ 20 枚を抽出し、スパン 2,800mm の中央集中荷重方式で、初期荷重 10kg 時と最終荷重 30~50kg 時のたわみ差をもとに静的曲げヤング係数 (MBE) を測定した (集材材 JAS の曲げ B 試験 (9) を参考; 写真 1D)。ここでスパンを 2,800mm としているのは、MGE と MBE のラミナ内における測定部位を一致させるためである。そして、MGE を独立変数 (X)、MBE を従属変数 (Y) とする線形回帰式 ( $Y=1.073X+1.590$ ,  $R^2=0.912$ ) によりすべての MGE を校正し、これをラミナの曲げヤング係数 (MOE) として諸解析に供した。

## III 結果と考察

### 1. 丸太のヤング係数

本県産のスギ丸太や構造用製材における既往のデータ (8) から、Efr の平均値は  $7\text{kN/mm}^2$  を超えるものと予想していた。また、少数派であると予想した強度等級の低い丸太 (およびそこから生産されるラミナ) を効率的に除去し、多数派であると予想した強度等級の高い丸太 (およびラミナ) を効率的に抽出するため、丸太区分の最低等級を「 $7\text{kN/mm}^2$  未満」に設定して Efr の測定を行った。しかしその平均値は、元玉で  $6.57\text{kN/mm}^2$ 、二番玉で  $6.93\text{kN/mm}^2$ 、総合で  $6.75\text{kN/mm}^2$  であり、いずれも  $7\text{kN/mm}^2$  を下回る結果となった (表 1)。

Efr が  $7\text{kN/mm}^2$  以上を示した丸太の割合は、元玉で 32.0%、二番玉で 46.7%、総合で 39.3%であった。同じく  $8\text{kN/mm}^2$  以上を示した丸太の割合は、元玉で 10.7%、二番玉で 29.3%、総合で 20.0%、 $9\text{kN/mm}^2$  以上の割合は、元玉で 2.7%、二番玉で 8.0%、総合で 5.3%であった (表 1)。これらの平均値や割合について元玉と二番玉を比較すると、いずれも二番玉の値の方が元玉の値よりも大きくなっている。この理由としては、1) 採取地上高の高い二番玉の方が元玉よりもヤング係数が大きい傾向にある (10, 11) こと、2) 元玉では根張り部分の二次的なテーパーが存在するため、元口と末口の周囲長をもとに算出する材積は過大評価され、それに伴ってヤング係数が過小評価される (11) ことが挙げられる。今回は、現場における測定項目の簡素化を目的に、すべての丸太について元口・末口 2 ヶ所の周囲長をもとに材積を求めた (式 (1)) ため、元玉で材積が過大評価され、密度ひいては Efr が過小評価された可能性がある。

なお、テーパーの存在や細り率の影響による材積算出誤差を低減させる方法としては、元口・中央・末口の 3 ヶ所の周囲長測定に基づく算出が提案されている (11)。ただし、剥皮丸太と皮付き丸太ではヤング係数が大きく異

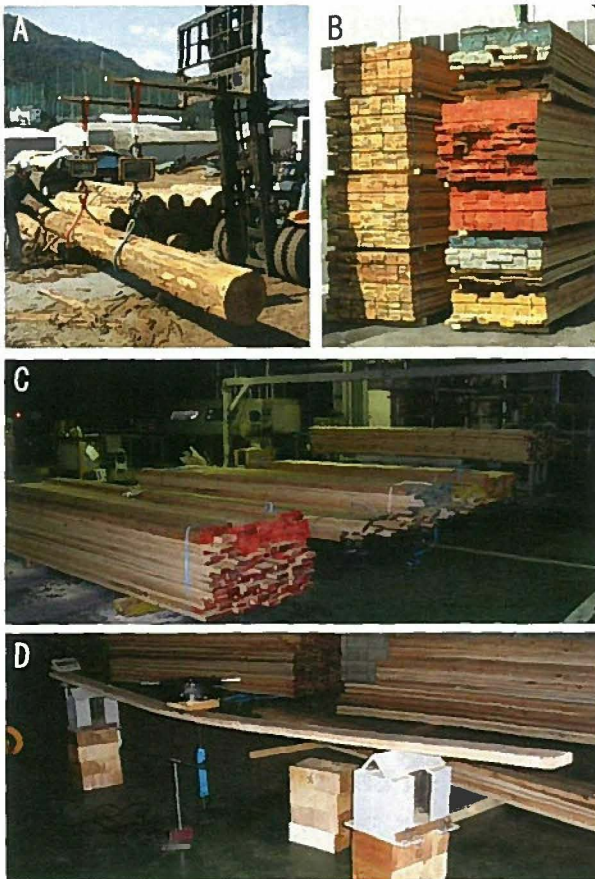


写真 1 供試材

A: 丸太 Efr の測定、B: ラミナの養生、C: 二次加工と MGE の測定、D: MBE の測定



表 1 丸太の Efr と Efr 区分単位での丸太・ラミナ頻度

番玉 (本数) 平均 Efr (kN/mm <sup>2</sup> )	元玉 (75 本)				二番玉 (75 本)				元玉・二番玉総合 (150 本)						
	6.57				6.93				6.75						
Efr による 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	7 未満	7~8	8~9	9 以上	元玉 計	7 未満	7~8	8~9	9 以上	二番 玉計	7 未満	7~8	8~9	9 以上	総合 計
丸太数(本)	51	16	6	2	75	40	13	16	6	75	91	29	22	8	150
番玉内での 頻度(%)	68.0	21.3	8.0	2.7	100	53.3	17.3	21.3	8.0	100	60.7	19.3	14.7	5.3	100
生産ラミナ 枚数(枚)	376	126	54	15	571	212	50	81	28	371	588	176	135	43	942
番玉内での 頻度(%)	65.8	22.1	9.5	2.6	100	57.1	13.5	21.8	7.5	100	62.4	18.7	14.3	4.6	100

表 2-1 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (元玉、実数)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	丸太数 (本)	MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 区分単位でのラミナ枚数(枚)										計
		3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12 以上	
元玉 7 未満	51	4	20	35	73	123	87	25	8	1	0	376
元玉 7~8	16	0	0	3	10	9	37	46	19	2	0	126
元玉 8~9	6	0	0	0	0	2	8	26	14	3	1	54
元玉 9 以上	2	0	0	0	0	1	2	1	2	4	5	15
全元玉	75	4	20	38	83	135	134	98	43	10	6	571

表 2-2 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (元玉、割合)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	各 MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 以上のラミナが全ラミナに占める割合(%)						
	5 以上	6 以上	7 以上	8 以上	9 以上	10 以上	11 以上
元玉 7 未満	93.6	84.3	64.9	32.2	9.0	2.4	0.3
元玉 7~8	100	97.6	89.7	82.5	53.2	16.7	1.6
元玉 8~9	100	100	100	96.3	81.5	33.3	7.4
元玉 9 以上	100	100	100	93.3	80.0	73.3	60.0
全元玉	95.8	89.1	74.6	51.0	27.5	10.3	2.8

表 3-1 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (二番玉、実数)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	丸太数 (本)	MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 区分単位でのラミナ枚数(枚)										計
		3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12 以上	
二番玉 7 未満	40	1	8	27	70	47	49	9	1	0	0	212
二番玉 7~8	13	0	0	1	3	5	11	22	6	2	0	50
二番玉 8~9	16	0	0	0	3	10	13	32	18	4	1	81
二番玉 9 以上	6	0	0	2	2	2	3	1	10	4	4	28
全二番玉	75	1	8	30	78	64	76	64	35	10	5	371

表 3-2 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (二番玉、割合)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	各 MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 以上のラミナが全ラミナに占める割合(%)						
	5 以上	6 以上	7 以上	8 以上	9 以上	10 以上	11 以上
二番玉 7 未満	95.8	83.0	50.0	27.8	4.7	0.5	0.0
二番玉 7~8	100	98.0	92.0	82.0	60.0	16.0	4.0
二番玉 8~9	100	100	96.3	84.0	67.9	28.4	6.2
二番玉 9 以上	100	92.9	85.7	78.6	67.9	64.3	28.6
全二番玉	97.6	89.5	68.5	51.2	30.7	13.5	4.0

表 4-1 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (元玉・二番玉総合、実数)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	丸太数 (本)	MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 区分単位でのラミナ枚数(枚)										計
		3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12 以上	
総合 7 未満	91	5	28	62	143	170	136	34	9	1	0	588
総合 7~8	29	0	0	4	13	14	48	68	25	4	0	176
総合 8~9	22	0	0	0	3	12	21	58	32	7	2	135
総合 9 以上	8	0	0	2	2	3	5	2	12	8	9	43
全総合	150	5	28	68	161	199	210	162	78	20	11	942

表 4-2 Efr 区分単位でのラミナの機械等級別頻度 (元玉・二番玉総合、割合)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	各 MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 以上のラミナが全ラミナに占める割合(%)						
	5 以上	6 以上	7 以上	8 以上	9 以上	10 以上	11 以上
総合 7 未満	94.4	83.8	59.5	30.6	7.5	1.7	0.2
総合 7~8	100	97.7	90.3	82.4	55.1	16.5	2.3
総合 8~9	100	100	97.8	88.9	73.3	30.4	6.7
総合 9 以上	100	95.3	90.7	83.7	72.1	67.4	39.5
全総合	96.5	89.3	72.2	51.1	28.8	11.6	3.3

表 5-1 Efr7kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太におけるラミナの機械等級別頻度 (実数)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	丸太数 (本)	MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 区分単位でのラミナ枚数(枚)										計
		3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12 以上	
元玉 7 以上	24	0	0	3	10	12	47	73	35	9	6	195
二番玉 7 以上	35	0	0	3	8	17	27	55	34	10	5	159
総合 7 以上	59	0	0	6	18	29	74	128	69	19	11	354

表 5-2 Efr7kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太におけるラミナの機械等級別頻度 (割合)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	各 MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 以上のラミナが全ラミナに占める割合(%)						
	5 以上	6 以上	7 以上	8 以上	9 以上	10 以上	11 以上
元玉 7 以上	100	98.5	93.3	87.2	63.1	25.6	7.7
二番玉 7 以上	100	98.1	93.1	82.4	65.4	30.8	9.4
総合 7 以上	100	98.3	93.2	85.0	64.1	28.0	8.5

表 6-1 Efr8kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太におけるラミナの機械等級別頻度 (実数)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	丸太数 (本)	MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 区分単位でのラミナ枚数(枚)										計
		3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12 以上	
元玉 8 以上	8	0	0	0	0	3	10	27	16	7	6	69
二番玉 8 以上	22	0	0	2	5	12	16	33	28	8	5	109
総合 8 以上	30	0	0	2	5	15	26	60	44	15	11	178

表 6-2 Efr8kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太におけるラミナの機械等級別頻度 (割合)

Efr 区分 (kN/mm <sup>2</sup> )	各 MOE(kN/mm <sup>2</sup> ) 以上のラミナが全ラミナに占める割合(%)						
	5 以上	6 以上	7 以上	8 以上	9 以上	10 以上	11 以上
元玉 8 以上	100	100.0	100.0	95.7	81.2	42.0	18.8
二番玉 8 以上	100	98.2	93.6	82.6	67.9	37.6	11.9
総合 8 以上	100	98.9	96.1	87.6	73.0	39.3	14.6

なり、前者が後者よりも約 20%大きかったという報告もある (12)。したがって、実用レベルで丸太を機械等級区分する場合は、樹皮の有無や材積計算方法によってヤン

グ係数が異なる値を示すということをよく理解し、採用した計算方法から得られるヤング係数について適正に評価することが重要となるであろう。

## 2. ラミナ生産における丸太等級区分の有効性

Efr が  $7\text{kN/mm}^2$  未満である丸太の頻度が高かったことに伴い、そこから生産されたラミナの頻度も高かった（総合で 588/942 枚、62.4%；表 1）。ただし、Efr  $7\text{kN/mm}^2$  未満の丸太から生産された全ラミナの平均 MOE は  $7.3\text{kN/mm}^2$  と  $7\text{kN/mm}^2$  を上回っており、集成材 JAS のラミナ等級 L50 相当（ $\text{MOE}5\text{kN/mm}^2$  以上）をクリアしたラミナは元玉で 93.6%（表 2-2）、二番玉で 95.8%（表 3-2）、総合で 94.4%（表 4-2）に達した。一方、Efr が  $7\text{kN/mm}^2$  以上を示した丸太では、生産されたラミナの 100% が L50 相当（ $\text{MOE}5\text{kN/mm}^2$  以上）をクリアしていたうえ、98% 以上が L60 相当（ $\text{MOE}6\text{kN/mm}^2$  以上）を、93% 以上が L70 相当（ $\text{MOE}7\text{kN/mm}^2$  以上）をクリアしているなど（表 5-2）、低位等級ラミナを生産が効果的に抑制できていることがうかがえた。その一方、Efr が  $7\text{kN/mm}^2$  未満の丸太の中にも、L80 や L90 といった上位等級のラミナが少なからず混在していることは明らかであった（表 2-1、3-1、4-1）。

針葉樹構造用製材（心持ち角）を生産する場合、通常 1 本の丸太から 1 本の構造材を生産するため、丸太と構造材におけるヤング係数の相関は比較的高く、丸太段階での等級区分が実用レベルにおいて非常に有効であると考えられた（8、13）。これに対し、集成材用ラミナに関しては 1 本の丸太から複数のラミナが生産される。本試験では元玉で平均 7.6 枚、二番玉で平均 4.9 枚のラミナが生産された。したがって、髓付近や樹皮側から得られるラミナの MOE には大きなばらつきが存在する（6、7、8）と思われる。

以上を踏まえると、丸太の等級区分は、低位等級ラミナの産出抑制を重視する仕分けの方法として有効であると考えることができる。具体例を挙げると、製材工程と集成加工工程の双方を配備した集成材工場の場合、低位等級ラミナの産出は強度等級の高い集成材生産の妨げとなる。このような場合、Efr の測定により等級区分された丸太を購入することで、製材時に MOE の小さいラミナが産出されることを抑制でき、ラミナの利用率を高めることができるであろう。一方、MOE の大きいラミナの量

的確保を重視する場合は、丸太の等級区分を行わず、ラミナ製材後にヤング係数の全数測定を行い、必要とする上位等級ラミナを抽出することが効率的であると考えられた。ただしこの場合、産出される低位等級ラミナの用途は別途検討されなければならない。

## 3. ラミナのヤング係数

全ラミナの MOE の度数分布および頻度分布を図 1 に示す。頻度分布は、それぞれの等級以上のラミナが全ラミナに対して占める割合として表している。MOE の平均値と標準偏差は、元玉で  $8.01 \pm 1.64\text{kN/mm}^2$  ( $n=571$ )、二番玉で  $8.04 \pm 1.69\text{kN/mm}^2$  ( $n=371$ )、総合で  $8.02 \pm 1.66\text{kN/mm}^2$  ( $n=942$ ) であり、その平均値やばらつきの傾向は元玉と二番玉でほぼ同様であった。スギ樹幹内では、髓付近よりも樹皮側の方が曲げヤング係数が大きく、地上高が高くなるほど曲げヤング係数の大きい部位が髓に近づいて存在している傾向にある（6、7、8）。したがって、材内の平均的なヤング係数を表す（11、14）Efr や、心持ち角材の曲げヤング係数は、概して元玉の方が二番玉よりも小さい傾向となる（8、10、11）。これに対し、今回のラミナについては、曲げヤング係数が比較的大きい樹皮側の部位から優先的に製材が行われている。すなわち、背板端材の産出量が最小となり、髓付近から寸足らず材が端材として産出されるような製材方法である。この場合、末口直径が相対的に大きい元玉の方が、より樹皮側に近い部位からラミナを製材し始めることができる。このような製材方法を採用したことで、元玉と二番玉のラミナの MOE に顕著な差異が表れなかったのかもしれない。

## 4. 構造用集成材の生産性評価

集成材 JAS では、各種の理化学検査（はく離、ブロックせん断、含水率、曲げ、引張り、ホルムアルデヒド放散量試験など）および外面検査によって合否・格付基準が定められており（9）、ラミナの曲げヤング係数のみで合否を判定できるものではない。しかしながら、ラミナの MOE は、集成材の強度等級（EO-FO）ごとに定められ

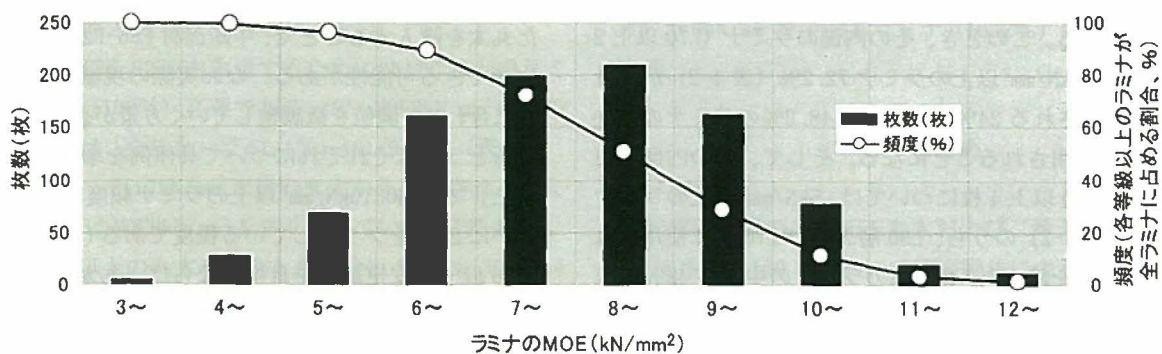


図 1 MOE の度数分布と頻度分布



表 7 対称異等級構成集成材（8層）を生産するために必要なラミナ等級とその枚数（9）

集成材の強度等級	ラミナの機械区分による等級と必要枚数(枚)										
	L140	L125	L110	L100	L90	L80	L70	L60	L50	L40	L30
E120-F330	2		2		4						
E105-F300		2		2		4					
E95-F270			2		2		4				
E85-F255				2		2		4			
E75-F240					2		2		4		
E65-F225						2		2	4		
E65-F220						2		2		4	
E55-F200							2		2		4

ている積層ラミナの機械区分等級（L.O）に直接的に関係する因子となる（9）。そこで本節では、供試ラミナが備えている MOE のばらつきの傾向をもとに、生産が可能と思われる構造用集成材の強度等級を推定し、その生産性を評価した。

### （1）中断面材の生産性

図 1 の結果をもとに、中断面材（幅 120mm×高さ 240mm、ラミナ厚さ 30mm×8 層）の各強度等級に必要なラミナの積層構成を想定し（表 7）、MOE の大きいラミナを優先的に活用しつつ、余剰材や使用不可材の産出が最小となるような生産効率性についての試算を行った。

まず、県内産のスギ構造用製材（正角・平角合わせて 1,373 本）の平均動的ヤング係数（7.26kN/mm<sup>2</sup>）（8）に近似した強度等級 E75-F240 を生産するためには、最外層で求められる L90 以上のラミナが 2/8 枚、その内側（中間層に相当）で求められる L70 以上が 2/8 枚、そしてその内側（内層に相当）で L50 以上が 4/8 枚必要である（表 7）。つまり、MOE が 9kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度が 25% 以上であり、かつ、7kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度が 25% プラス 25% で合計 50% 以上であることが望ましい。これに対し、「全元玉」（表 2-2）、「全二番玉」（表 3-2）、「全総合」（表 4-2）いずれの場合も、MOE が 9kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度は 25% をクリアし、7kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度も 50% をクリアしている。そこで、丸太を等級区分せず、E75-F240 のみを生産すると想定し、次のような試算を行った。MOE9kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ（全ラミナの 28.8%；表 4-2）のうち、24% を最外層の L90 以上 2 枚に使用すると仮定する。このとき、その内側のラミナ（L70 以上 2 枚）には、7kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ 72.2%（表 4-2）から最外層に使用される 24% を除いた、48.2% のラミナの中から 24% が使用されることになる。そして、その内側に使用される L50 以上 4 枚については、5kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ 96.5%（表 4-2）のうち、L90 層および L70 層に使用される合計 48% を除いた、48.5% のラミナの中から 48% が使用される。実際のラミナ枚数をあてはめていくと、L90 層に 226/942 枚、L70 層にも 226/942 枚、L50 層に 452/942 枚で E75-F240 を 113 体生産することができ、5kN/mm<sup>2</sup> 以

上のラミナ 5/942 枚が余剰材となり、33/942 枚が 5kN/mm<sup>2</sup> 未満で使用不可材となる。すなわち、E75-F240 のみを生産すると想定した場合、丸太等級区分を行わずとも、5kN/mm<sup>2</sup> 未満の使用不可材は 3.5%、5kN/mm<sup>2</sup> 以上での余剰材は 0.5% にとどまり、96.0% のラミナが使用可能と試算された。

次に、強度等級 E85-F255（表 7）を生産するためには、同様の考え方で、L100 以上のラミナ頻度が 25% 以上、L80 以上のラミナ頻度が 50% 以上であることが望ましい。「全元玉」（表 2-2）、「全二番玉」（表 3-2）、「全総合」（表 4-2）で MOE が 10kN/mm<sup>2</sup> 以上の頻度は 10.3~13.5% であるため、丸太等級区分を行わずに E85-F255 を主力生産しようとする、MOE の大きいラミナが不足し、MOE の小さいラミナが余剰することが想定される。これは、本章 2 節で例示した「低位等級ラミナの産出が強度等級の高い集成材生産の妨げとなる」ケースに相当する。そこで、Efr が 7kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太を選別した場合（表 5-1、5-2）、「元玉 7 以上」、「二番玉 7 以上」、「総合 7 以上」のすべてにおいて、MOE が 10kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度は 25% を、8kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度は 50% をクリアしている（表 5-2）。表 5-1、5-2 をもとに上述と同様の試算を行った結果、Efr が 7kN/mm<sup>2</sup> 以上の丸太（全体の 39.3%）を選別し、E85-F255 のみを生産すると想定した場合、L60 未満の使用不可材は 1.7%（6/354 枚）、L60 の余剰材は 1.1%（4/354 枚）であり、97.2%（344/354 枚）のラミナで 43 体が生産可能となった。つまり、本章 2 節で例示した集成材工場のケースでは、等級区分された丸太を購入することで、中断面材 E85-F255 を効率的に生産できる可能性がある。なお実際の現場では、生産実態に合わせて閾値を微調整していく方策が必要であろう。元玉と二番玉それぞれについて具体例を挙げる。「元玉 7 以上」での MOE10kN/mm<sup>2</sup> 以上のラミナ頻度は 25.6% とわずかに 25% をクリアしている程度である（表 5-2）ため、L100 以上の安定調達を目指すならば、丸太等級区分の閾値をやや高め（例えば 7.1~7.2kN/mm<sup>2</sup>）に設定することも必要であろう。一方、「二番玉 7 以上」で MOE10kN/mm<sup>2</sup> 以上の割合は 30.8% とやや余裕がある（表 5-2）ため、

丸太等級区分の閾値をやや低め(例えば6.8~6.9kN/mm<sup>2</sup>)に設定することが可能かもしれない。これらの場合、丸太の利用率が元玉では32.0%から少し低下し、二番玉では46.7%からさらに増加することになる(表1)。

強度等級E95-F270(表7)を生産するためには、L110以上のラミナ頻度が25%以上、L90以上のラミナ頻度が50%以上であることが望ましい。丸太等級区分を行い、Efr7kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合でも、MOE11kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は7.7~9.4%(表5-2)であり、E95-F270の主力生産は実質上不可能である。さらに、Efr8kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合(表6-1、6-2)、丸太の利用率がきわめて低くなる(元玉で10.7%、二番玉で29.3%、総合で20.0%;表1)うえ、MOE11kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度も11.9~18.8%(表6-2)にとどまっている。したがって、E95-F270の主力生産は実質上不可能である。

## (2) 小断面材の生産性

次に、小断面材(幅120×高さ120mm、ラミナ厚さ30mm×4層)を想定した試算を行ってみる。小断面材は中断面材と異なり、目視等級区分ラミナのみによる生産も可能である(9)が、ここでは目視等級区分について考慮していない。

最も低い等級であるE55-F225を生産するためには、L60以上のラミナが4/4枚(100%)必要である(9)。MOE6kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は「全総合」で89.3%、841/942枚(表4-1、4-2)である。つまり、管柱を想定した小断面材の主力生産を行う場合、約10%の使用不可材が発生する可能性がある。なお、Efrにより全体の39.3%にあたる7kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合は、その98.3%、348/354枚のラミナが使用可能になる(表5-1、5-2)。

強度等級E65-F255を生産するためには、L70以上のラミナが4/4枚(100%)必要である(9)。MOE7kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は「全総合」で72.2%、680/942枚(表4-1、4-2)であり、30%近くのラミナが使用不可材となる。Efr7kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合、93.2%、330/354枚のラミナが使用可能(表5-1、5-2)となる。Efr8kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太のみを選別した場合は、96.1%、171/178枚のラミナが使用可能(表6-1、6-2)となるが、丸太の利用率は全体の20.0%にすぎない(表1)。

強度等級E75-F270を生産するためにはL80以上のラミナが4/4枚(100%)必要である(9)。MOE8kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は「全総合」で51.1%、481/942枚(表4-1、4-2)である。Efr7kN/mm<sup>2</sup>未満の丸太から生産されるラミナの約70%はMOE8kN/mm<sup>2</sup>をクリアしていない(表4-2)。Efr7kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合は85.0%、301/354枚のラミナが使用可能(表5-1、5-2)、Efr8kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太を選別した場合は87.6%、156/178枚のラミナが使用可能(表6-1、6-2)と試算された。

小断面材の場合、L60、L70、L80といったラミナ等級単位での生産が可能である(9)ため、需要に応じて生産する強度等級を決定することが可能である。表4-1によれば、強度等級E55-F225(L60)、E65-F255(L70)、E75-F270(L80)、E85-F300(L90)、E95-F315(L100)の生産可能性はあるが、上位強度等級の生産性は低いであろう。なお、E105-F345(L110)の生産が可能なラミナの頻度はわずかに3.3%、31/942枚(表4-1、4-2)であるため、実質的に生産可能な最上位等級はE95-F315(MOE10kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ使用、その頻度11.6%、109/942枚;表4-1、4-2)であり、その生産可能量は100本中10本程度となるだろう。

## (3) 中断面材と小断面材の複合生産性

宍粟産材が備えているMOEを最大限に生かしつつ、余剰材の産出を抑えた試算事例を以下に示す。上述したとおり、中断面材で主力生産が可能な最上位等級はE85-F255であり、丸太等級区分(Efr7kN/mm<sup>2</sup>以上の丸太利用)を行うことによってその生産性は高まるが、丸太の利用率は39.3%に過ぎない。そこで、残る60.7%のEfr7kN/mm<sup>2</sup>未満の丸太およびそこから生産されるラミナ588枚から、その他の中断面材(8層)あるいは小断面材(4層)を生産する場合について試算してみる。

中断面材の強度等級E75-F240(表7)を生産するためには、L90以上のラミナ頻度が25%以上、L70以上のラミナ頻度が50%以上であることが望ましいが、Efr7kN/mm<sup>2</sup>未満でMOE9kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は7.5%にとどまっている一方、MOE7kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は59.5%に及ぶ(表4-2)ことから、上位等級ラミナが不足するだろう。そこで、さらに下位等級のE65-F225(L80以上:L60以上:L50以上=2枚:2枚:4枚)あるいはE65-F220(L80以上:L60以上:L40以上=2枚:2枚:4枚)であれば、Efr7kN/mm<sup>2</sup>未満でMOE8kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は30.6%、6kN/mm<sup>2</sup>以上のラミナ頻度は83.8%となり(表4-2)、安定生産の可能性がみえてくる。

また、Efr7kN/mm<sup>2</sup>未満で小断面材を生産する場合は、強度等級E55-F225(L60)、E65-F255(L70)、E75-F270(L80)を安定的に生産できる可能性がある(表4-2)。ただし、MOEが6kN/mm<sup>2</sup>を下回るラミナ(16.2%)は使用不可材となる。

## IV まとめ

宍粟市内産のスギ元玉丸太および二番玉(以上)丸太各75本、計150本について縦振動法により動的ヤング係数(Efr)を測定した。製材、乾燥、モルダ加工されたラミナ942枚について、連続送り式グレーディングマシンにより仮の材内平均曲げヤング係数(MGE)を測定した



後、MGE 値が大小異なる 20 枚のラミナを抽出し、重量載荷により静的曲げヤング係数 (MBE) を測定した。MGE を独立変数、MBE を従属変数とする線形回帰式によりすべての MGE を校正し、これをラミナの曲げヤング係数 (MOE) とした。そして、Efr および MOE をもとに、丸太段階での機械等級区分の有効性、JAS 対称異等級構成集成材 (中断面；中断面材) および同一等級構成集成材 (小断面；小断面材) の生産性などについて試算、評価を行った。得られた結果を要約すると次の(1)~(6)のようになる。

- (1) Efr の平均値は、元玉で  $6.57\text{kN/mm}^2$ 、二番玉 (以上) で  $6.93\text{kN/mm}^2$ 、総合で  $6.75\text{kN/mm}^2$  であった。
- (2) MOE の平均値は、元玉で  $8.01\text{kN/mm}^2$  ( $n=571$ )、二番玉 (以上) で  $8.04\text{kN/mm}^2$  ( $n=371$ )、総合で  $8.02\text{kN/mm}^2$  ( $n=942$ ) であった。
- (3) 丸太等級区分は MOE の小さいラミナの産出抑制に効果的である。ただし、Efr が小さい丸太の中にも L70、L80、L90 相当の MOE を備えたラミナは少なからず混在している。したがって、MOE の大きいラミナの量的な確保を重視する場合、丸太等級区分は有効でない。
- (4) Efr の測定を行わず、すべてのラミナをもとに中断面材 (幅  $120\times$  高さ  $240\text{mm}$ 、 $30\text{mm}\times 8$  層を想定) の E75-F240 のみを生産する場合、96% のラミナが利用可能と試算された。さらに上位等級の E85-F255 のみを生産する場合、Efr が  $7\text{kN/mm}^2$  以上の丸太を選別 (全体の 39.3%) することで、97.2% のラミナが利用可能と試算された。
- (5) 小断面材 (幅  $120\times$  高さ  $120\text{mm}$ 、 $30\text{mm}\times 4$  層を想定) の場合、L60、L70、L80 といったラミナ等級単位での生産が可能であるため、需要に応じて生産する強度等級を決定することが可能である。生産量の多少は生じるが、E55-F225、E65-F255、E75-F270、E85-F300、E95-F315 の生産可能性がある。
- (6) 生産現場の方針や需要動向に応じて、異なった強度等級 (E85-F255 と E65-F225) の中断面材を複合的に、あるいは中断面材と小断面材を複合的に生産できる可能性がある。

横架材市場で主流を占める中断面材は、より強度等級の高い (たとえば E105-F300 や E120-F330) スプルースやオウシュウアカマツである。したがって、スギ材を活用しつつ、これらの外材と同等級の中断面材を生産するためには、異樹種ラミナ (15、16、17) やスギ圧密ラミナ (18) との複合化が必要であるだろう。逆に、今回生産可能と試算された強度等級のスギ中断面材を積極的に活用するためには、構造的な信頼性を裏付けた木造軸組工法を併せて提案していく必要があるだろう。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、以下の各社に多大なるご協力をいただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。東亜林業㈱ (供試丸太および試験場所の提供、強度試験の協力)、㈱山崎木材市場 (試験場所の提供、強度試験の協力)、山崎木材㈱ (試験場所の提供、丸太からラミナへの製材、強度試験の協力)、㈱乃むら木材山崎工場 (ラミナの乾燥と養生)、衣笠木材㈱片山工場 (ラミナのモルダー加工と機械等級区分)。

## 引用文献

- (1) (財)日本住宅・木材技術センター (2010) “木材需給と木材工業の現況 (平成21年版)”。(財)日本住宅・木材技術センター，東京，199pp.
- (2) 永井 智・平野岩夫・上川 篤・永峰佳幸・塩谷卓一 (2007) 兵庫県内産スギ材の強度性能 (II) - 構造用集成材へのラミナ供給効率性 -。第57回日本木材学会大会研究発表要旨集，広島，PD011.
- (3) (社)日本木造住宅産業協会 (2010) “木造軸組住宅における国産材利用の実態調査報告書”，第2版。(社)日本木造住宅産業協会，東京。
- (4) 林野庁 (2011) 平成22年度 森林・林業白書。林野庁HP.
- (5) (財)日本住宅・木材技術センター (2009) “木材需給と木材工業の現況 (平成20年版)”。(財)日本住宅・木材技術センター，東京，212pp.
- (6) 中谷 浩 (1991) 林木の冠雪害に関する樹木力学的研究。富山林技研報4：1-54.
- (7) 永井 智・山田範彦・山田直也・前田雅量 (1998) 兵庫県内産スギ材の材質 (I) - 一年輪幅，容積密度，ヤング率および比ヤング率の樹幹内変動 -。兵庫森林技研報45：17-29.
- (8) 永井 智 (2006) “兵庫県産スギ材の材料性能 - エンジニアードウッド生産技術マニュアル”。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，兵庫，26pp.
- (9) (社)日本農林規格協会 (2007) “集成材の日本農林規格”。(社)日本農林規格協会，東京，82pp.
- (10) 長尾博文・中井 孝・田中俊成・鈴木広明・野々田稔郎 (1990) スギ造林木における曲げ強度性能の垂直分布 - スギ心持ち正角の場合 -。第40回日本木材学会大会 (つくば) 研究発表要旨集，p. 383.
- (11) 小泉章夫・飯島泰男・佐々木貴信・川井安生・岡崎泰男・中谷 浩 (1997) 秋田県産スギ材の強度特性 (第1報) 丸太のヤング率。木材学会誌43 (1)：46-51.
- (12) 高田克彦・平川泰彦 (2000) 剥皮によるニホンカ



- ラマツ丸太材の動的ヤング係数の変動. 木材工業55(8) : 352-356.
- (13) 永井 智 (2000) スギ素材丸太から正角仕上げ材に至る過程におけるヤング係数の変動. 兵庫森林技研報48 : 5-10.
- (14) 有馬孝禮・早村俊二・丸山則義・宮沢俊輔・古沢信 (1990) 木材の打撃音分析によるヤング係数と水分変動の評価. 材料39 (444) : 1228-1234.
- (15) 藤田和彦・井道裕史・加藤英雄・長尾博文・平松靖・新藤健太・宮武 敦・松岡秀尚・吉田徳之・神谷文夫 (2009) スギ・ペイマツラミナを使用した異樹種集成材の強度性能. 日本木材加工技術協会第27回年次大会 (熊本) 講演要旨集, pp. 33-34.
- (16) 橋爪丈夫・伊藤嘉文・吉田孝久 (2009) スギ及びカラマツによる異樹種積層集成材の製造と強度性能. 長野県林業総合センター研究報告23.
- (17) 森田秀樹・松元明弘・荒武志朗・藤元嘉安・吉田利生・野辺寛成・柏崎健治 (2009) スギおよびヒノキを用いた異樹種構造用集成材の開発. 木材工業64(9) : 411-415.
- (18) 永井 智・平野岩夫・上川 篤・永峰佳幸・塩谷卓一 (2007) スギ圧密ラミナを複合した構造用集成材の曲げ性能. 第57回日本木材学会大会研究発表要旨集, 広島, D10-0900.