

品質・性能の確かな人工乾燥材の安定供給に 向けた適正乾燥条件の検討

● 実施団体 ●

一般社団法人 全国木材組合連合会

〒100-0014 東京都千代田区永田町2-4-3

事業目的

心持ち材の人工乾燥では、100℃超の高温・低湿度条件の乾燥前処理（以下、高温セット処理）を採用する工場が多い。しかし、処理条件やその後の乾燥条件によっては、内部割れの発生や熱劣化による強度性能の低下に対する懸念を建築関係者から指摘される場合がある。

そこで、本事業では、国内の主要な樹種である、スギ、ヒノキおよびカラマツの心持ち材について、品質・性能の確かな人工乾燥材の安定供給を目的として、割れが少なく強度低下のない適正乾燥条件を検討するとともに、仕上がり含水率のばらつきを少なくするための選別方法や木口シール等による材端部の割れの抑制等について検討した。

実施した項目

- 1 検討委員会の開催
- 2 乾燥試験
 - 2.1 適正乾燥条件の検討
 - 2.2 乾燥前選別による仕上がり含水率のばらつき抑制効果の検証
 - 2.3 木口シールが材端部に発生する割れおよび材長方向の含水率分布に及ぼす影響の検討
- 3 乾燥材の強度試験

実施体制

- 有識者 九州大学
秋田県立大学 木材高度加工研究所
国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所
- 委員 地方独立行政法人 北海道立総合研究機構 林産試験場
栃木県林業センター
長野県林業総合センター
静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター
石川県農林総合研究センター 林業試験場
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
岡山県農林水産総合センター 森林研究所
愛媛県農林水産研究所林業研究センター
大分県農林水産研究指導センター 林業研究部
熊本県林業研究・研修センター
宮崎県木材利用技術センター

以上の委員構成で検討委員会とした。

1 検討委員会の開催

- ・令和3年 6月17日 試験設計・分担確認（オンライン）
- ・令和3年11月17日 進捗状況報告（オンライン併用）
- ・令和4年 1月20日 結果報告、とりまとめの検討（オンライン）

2 乾燥試験

2.1 適正乾燥条件の検討

国産針葉樹の代表であるスギ（心持ち正角、心持ち平角）、ヒノキ（心持ち正角）およびカラマツ（心持ち正角）について、高温セット処理を活用して、割れが少なく強度低下のない適正な乾燥条件を検討した。また、ヒノキ（心持ち正角、心持ち平角）およびカラマツ心持ち正角については、特許技術である100℃未満の中温領域の熱風減圧乾燥についても検討した。

2.2 乾燥前選別による仕上がり含水率のばらつき抑制効果の検証

スギについて、乾燥前のみかけの密度、心材色、ガンマ線等を活用した乾燥前選別が、人工乾燥材の仕上がり含水率のばらつきに及ぼす影響を検討した。

2.3 木口シールが材端部に発生する割れおよび材長方向の含水率分布に及ぼす影響の検討

一部の乾燥条件において、シリコンシーラントによる木口シール等の処理を施し、乾燥材の材端部に発生する割れおよび材長方向の含水率分布に及ぼす影響について検討した。

2.4 割れの測定方法

乾燥材に現れた材面割れは、目視により長さと幅を測定した。また、強度試験体に隣接した部分から採取した含水率測定用試験片について、画像解析ソフトImageJを用いて横断面に現れたすべての割れ（節の割れを除く）の長さを計測した。

3 乾燥材の強度試験

人工乾燥されたスギ・ヒノキ正角（仕上げ断面寸法：105mm×105mm）、カラマツ正角（仕上げ断面寸法：120mm×120mm）、スギ・ヒノキ平角（仕上げ断面寸法：105mm×180mm）について、実大曲げ試験を実施した。なお、各条件の試験体数は原則的に40本以上とした。曲げ試験の荷重条件は、図1に示したように、支点間距離を材せい h の18倍とした3等分点4点荷重方式とした。実大曲げ試験の様子を写真1に示した。

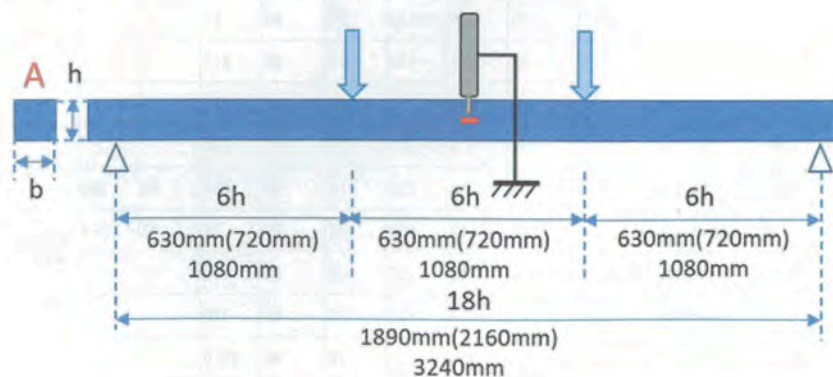


図1 実大曲げ試験方法

（上段の長さ：スギ・ヒノキ正角（カラマツ正角）、下段の長さ：スギ・ヒノキ平角）



写真1 実大曲げ試験の様子（スギ心持ち平角）

実施した
結果

1 乾燥試験

表1に乾燥条件の一覧表を示した。スギおよびヒノキは製材の日本農林規格を参考にSD15、カラマツは冬季間の室内の平衡含水率とねじれを考慮し含水率10%を目標に乾燥した。仕上がり含水率は、スギでは10条件のうち7条件、ヒノキでは9条件のうち2条件で平均含水率が15%超となった。カラマツは12条件のうち平均含水率が10%未満となったのは3条件であった（表2～4）。表2と3の変動係数を比較すると、スギはヒノキの2～3倍程度と大きく、仕上がり含水率のばらつきが顕著であった。その中で、100℃未満の中温領域の熱風減圧乾燥により、割れが少なく含水率傾斜も小さなヒノキ心持ち正角および心持ち平角乾燥が生産可能であることが実証され（ヒノキ7、9）、カラマツ心持ち正角に対しても、乾燥スケジュール改良の余地は残されているものの、割れが少なく含水率傾斜の小さい乾燥が実現可能であることを期待される成果が示された。

表1 乾燥スケジュール

スケジュール番号	材種	乾燥日数 (日)	蒸煮		ドライグセット		乾燥		再乾燥		備考
			温度(℃)	時間(h)	温度(℃)	時間(h)	温度(℃)	時間(h)	温度(℃)	時間(h)	
スギ1	心持ち正角	13.8	95	8.7	120	25	90	298.5			
スギ2	心持ち正角	22.5	95	8.7	120	25	90	298.5	90	207	再乾燥開始時に、60℃、70℃、80℃で1時間ずつのステップ含む
スギ3	心持ち正角	3.7	95	8.5	120	24	90	57			
スギ4	心持ち正角	10.1	95	8.5	120	24	90	211			
スギ5	心持ち平角	12.7	95	6.6	120	18	90	281			
スギ6	心持ち平角	12.0	95	6	120	18	90	264			
スギ7	心持ち平角	19.5	95	6	120	18	90	264	90	180	
スギ8	心持ち平角	19.5	100	12	120	20	90	76	90	359	高温セット処理時間に110℃と100℃で1時間ずつのステップを含む
スギ9	心持ち平角	5.3	100	12	120	20	90	96			
スギ10	心持ち平角	21.0	95	8	120	20	90	476			
ヒノキ1	心持ち正角	3.0	95	6.5	120	20	90	46.6			高温セット処理時間に110℃と100℃で1時間ずつのステップを含む
ヒノキ2	心持ち正角	3.9	95	6.5	120	14	90	74			
ヒノキ3	心持ち正角	20.1	70	6.5	-	-	60-70	476			
ヒノキ4	心持ち正角	95.5	95	6	120	12			60	210	再乾燥前に天然乾燥86日実施
ヒノキ5	心持ち正角	30.7	95	6	120	9	60	721			

スケジュール 番号	材種	乾燥日数		蒸煮		ドライングセット		乾燥		再乾燥		備考
		(日)	温度(°C)	時間(h)	温度(°C)	時間(h)	温度(°C)	時間(h)	温度(°C)	時間(h)		
ヒノキ6	心持ち直角	8.0	95	6	120	12	90	174				
ヒノキ7	心持ち直角	7.3	90	18	98	24	65-85	133				調湿24時間含む。中温セット処理および乾燥時に減圧併用
ヒノキ8	心持ち直角	5.7	95	10	120	18	90	108				
ヒノキ9	心持ち平角	8.0	90	18	98	30	65-85	145				調湿24時間含む。中温セット処理および乾燥時に減圧併用
カラマツ1	心持ち直角	16.8	95	10	115	18	90	374				乾燥工程には、高温セット処理終了後おおむね1時間あたり10°Cのステップを含む
カラマツ2	心持ち直角	29.0	85	4	110	9	70	682				
カラマツ3	心持ち直角	28.3	85	4	110	9	70	666				
カラマツ4	心持ち直角	27.9	95	3	130	5	70	662				
カラマツ5	心持ち直角	28.4	85	4	105	12	70	665				
カラマツ6	心持ち直角	27.5	95	3	120	10	70	647				
カラマツ7	心持ち直角	28.4	85	4	100	18	70	659				
カラマツ8	心持ち直角	30.3	90	8	110	18	80-90	295	40-50	406		
カラマツ9	心持ち直角	32.7	100	1	110	9	70	156	40-50	618		蒸煮時に加圧、高温セット処理および乾燥時に減圧併用
カラマツ10	心持ち直角	32.5	100	1	110	6	70	156	40-50	618		
カラマツ11	心持ち直角	8.3	75-82	12	97	24	65-70	164				中温セット処理および乾燥時に減圧併用
カラマツ12	心持ち直角	11.6	70-82	14	92-97	24	65-70	240				

注1) 乾燥日数に冷却時間は含まれていない

注2) ドライングセットは高温セット処理または中温セット処理を示す

表2 スギの仕上がり含水率

スケジュール番号	スギ1	スギ2	スギ3	スギ4	スギ5	スギ6	スギ7	スギ8	スギ9	スギ10
平均値	12.0	11.9	18.6	19.2	17.7	25.3	18.6	16.0	19.2	13.9
最小値	7.1	5.9	12.4	9.1	7.9	10.1	7.9	5.9	11.8	7.6
最大値	25.0	28.0	32.3	52.4	42.7	69.2	51.6	49.3	41.0	41.8
標準偏差	3.85	5.76	4.32	8.36	7.68	11.61	10.05	9.51	6.51	8.15
変動係数(%)	32.2	48.6	23.2	43.5	43.5	45.8	54.0	59.3	33.9	58.7

表3 ヒノキの仕上がり含水率

スケジュール番号	ヒノキ1	ヒノキ2	ヒノキ3	ヒノキ4	ヒノキ5	ヒノキ6	ヒノキ7	ヒノキ8	ヒノキ9
平均値	16.2	16.1	12.6	14.3	11.8	12.7	11.9	13.1	9.7
最小値	12.2	13.5	10.5	11.3	9.1	8.5	7.9	10.0	7.8
最大値	19.2	19.6	15.5	16.6	14.7	17.0	16.5	19.2	13.1
標準偏差	1.77	1.26	1.28	1.28	1.08	1.73	2.47	2.40	1.39
変動係数(%)	10.9	7.8	10.2	9.0	9.2	13.6	20.8	18.4	14.3

表4 カラマツの仕上がり含水率

スケジュール番号	カラマツ1	カラマツ2	カラマツ3	カラマツ4	カラマツ5	カラマツ6	カラマツ7	カラマツ8	カラマツ9	カラマツ10	カラマツ11	カラマツ12
平均値	10.3	9.8	10.0	11.3	9.3	11.4	9.6	13.3	10.3	10.4	15.4	15.0
最小値	6.7	7.8	7.1	7.2	6.8	7.4	6.7	8.9	8.3	8.0	11.6	8.3
最大値	14.7	12.4	12.4	16.7	12.2	15.7	12.5	24.8	14.7	12.9	24.5	21.2
標準偏差	2.01	1.27	1.40	2.79	1.42	2.44	1.70	4.05	1.59	1.37	2.92	3.15
変動係数(%)	19.6	12.9	14.0	24.7	15.2	21.5	17.7	30.4	15.4	13.2	19.0	21.0

2 乾燥前選別による仕上がり含水率のばらつき抑制効果の検証

2.1 重量選別による心材率と明度を加えた前選別の可能性（スギ3、4）

今回試験に用いた心材率・明度判定システムは、黒心材を判別するために開発されたシステムであることから、黒心材でないスギの心辺材の境界の判別は現状では難しく、明度を用いて評価を行った（写真2）。仕上がり含水率と明度との相関関係は低いものの、今後、明度の閾値や心材率の計測技術を向上させることで、選別効果の向上が期待される（図2）。

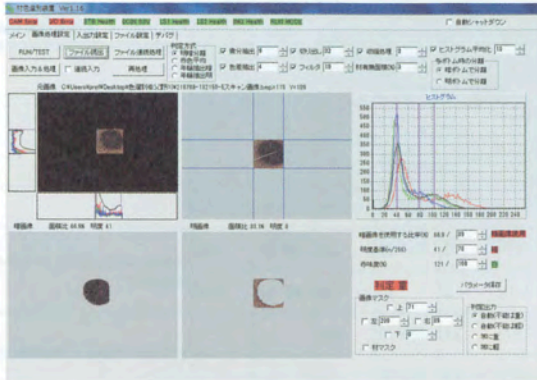


写真2 心材率・明度判定システム画面

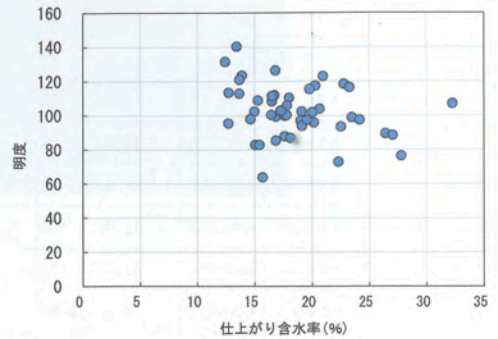


図2 仕上がり含水率と明度との関係（スギ3）

2.2 ガンマ線による密度測定を利用した選別（スギ6、7）

木材の密度測定用に開発されたガンマ線測定装置を用いて、乾燥前の試験体のガンマ線検出量を測定した。ガンマ線検出量は、乾燥前のみかけの密度よりも仕上がり含水率との決定係数が高く、乾燥前選別に有効な指標となりうることが示された（写真3、図3）。

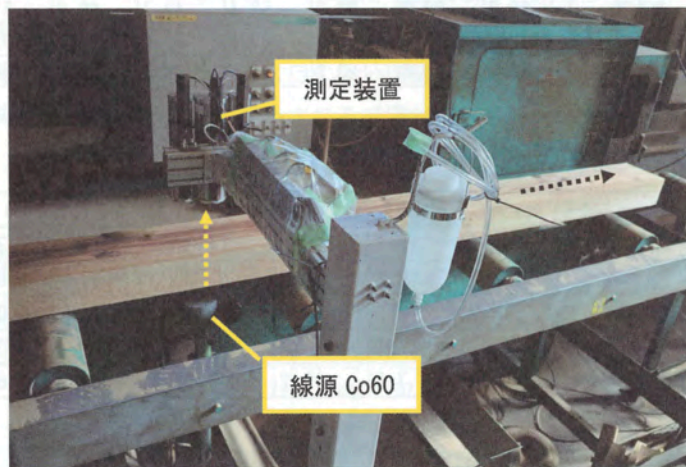


写真3 ガンマ線測定の様子

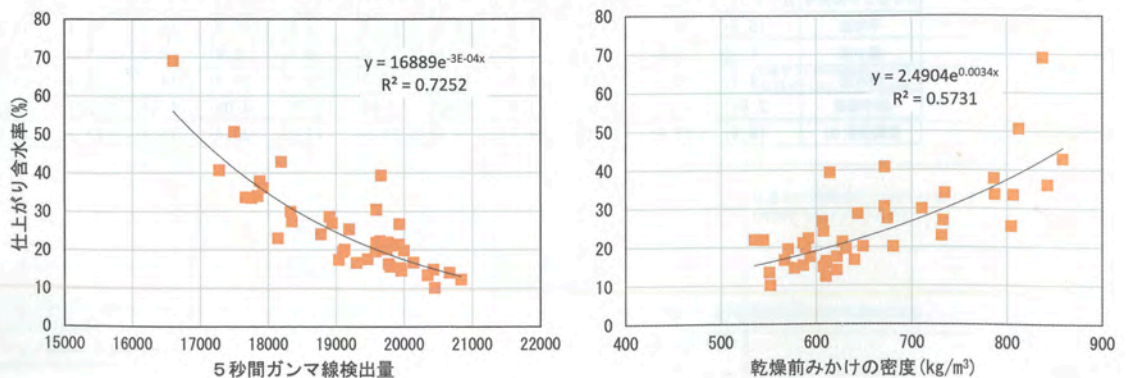


図3 ガンマ線検出量および乾燥前みかけの密度と仕上がり含水率との関係（スギ6）

3 木口シールが材端部に発生する割れおよび材長方向の含水率分布に及ぼす影響

3.1 スギ心持ち平角での検討事例（スギ8、9）

スギ心持ち平角に、①木口のみシール、②木口シール+アクリル板、③木口シール+合板、④木口+材面シール、⑤木口+材面シール+アクリル板、⑥木口+材面シール+合板、の6種類の方法を試した(写真4)。その結果、図4に示したように、①や④に加えて合板やアクリル板をビス留めするタイプの方が材端部に発生する割れの低減や材長方向の含水率の傾斜の低減に効果的であった。



写真4 木口シールの例（左写真：木口シール+アクリル板、右写真の左：木口シール+合板、右写真の右：木口シールのみ）

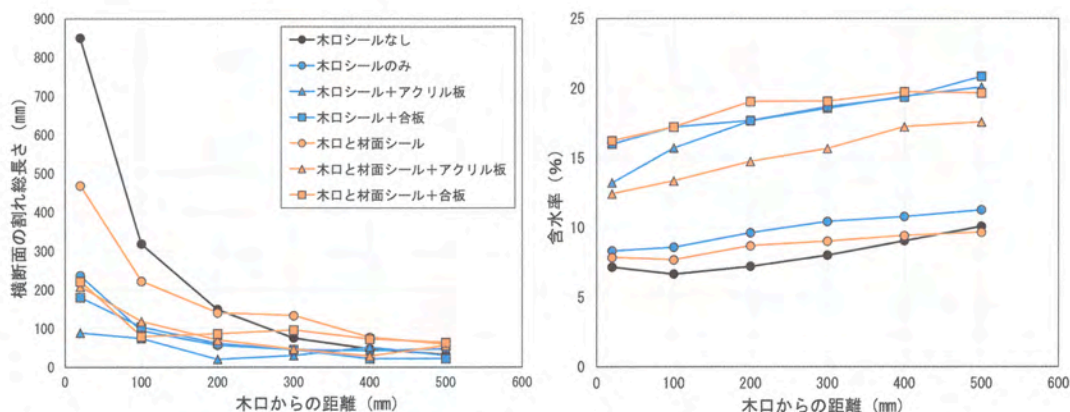


図4 木口シールの違いによる材長方向の横断面の割れ総長さ(左)および含水率(右)の分布(スギ8)

3.2 ヒノキ心持ち正角に対する適用事例（ヒノキ7）

試験体の両木口面の髓付近の部分を除き、木口面と材面15cm程度をシリコンシーラントでシール(写真5)したヒノキ心持ち正角について、中温領域の熱風減圧乾燥を行った結果、写真6および図5に示したように、割れが少なく、材長方向および横断面内の含水率傾斜も小さな乾燥が可能であった。これは、木口シールだけでなく乾燥方法による効果も現れたものと考えられる。

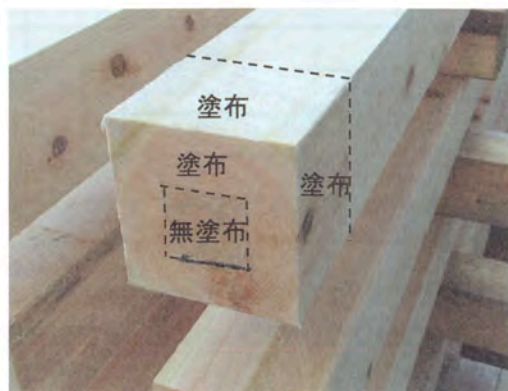


写真5 木口シール方法(ヒノキ7)

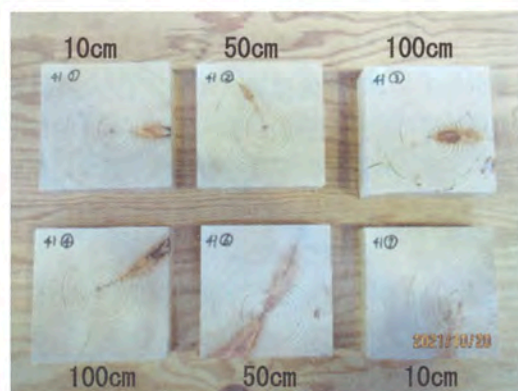


写真6 材長方向の断面内割れの様子(ヒノキ7、数値は木口からの距離)

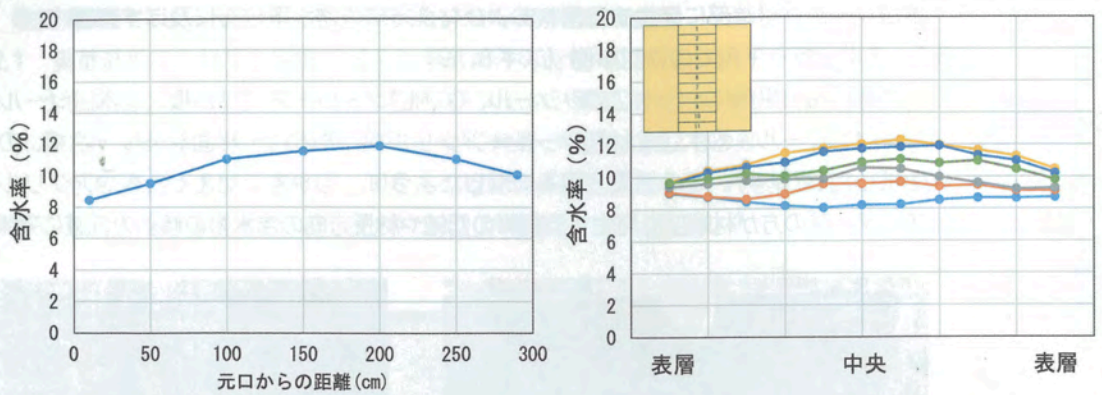


図5 材長方向 (左) および断面内 (右) の含水率分布 (ヒノキ)

4 強度低下のない適正乾燥条件の検討

①スギ心持ち正角 (スケジュール番号: スギ3、4、図6)

人工乾燥前のみかけの密度 (重量) によって2グループに選別し、いずれも推奨乾燥条件 (高温セット処理: 120℃で24時間、人工乾燥温度: 90℃) で乾燥した。高密度グループ (211時間) の人工乾燥時間は低密度グループ (57時間) の約4倍にもかかわらず、曲げヤング係数に対する曲げ強度に違いは認められず、基準強度をほぼ満足していた。

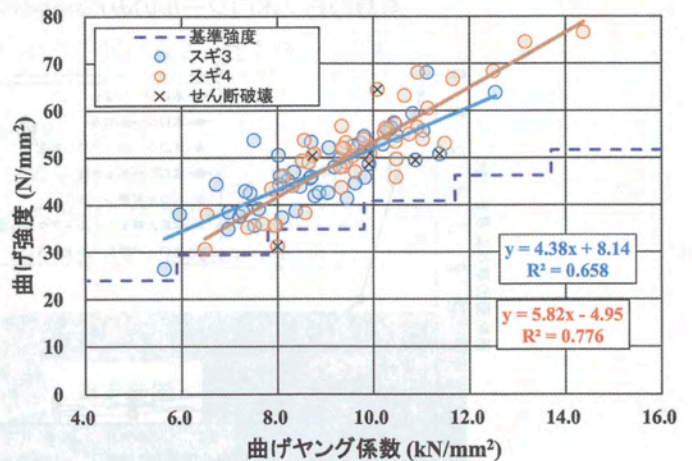


図6 強度試験結果 (スギ3,4)

②スギ心持ち平角 (スケジュール番号: スギ8、9、図7)

人工乾燥前のみかけの密度 (重量) によって2グループに選別し、いずれも推奨乾燥条件 (高温セット処理: 120℃で18時間、人工乾燥温度: 90℃) で乾燥した。高密度グループ (435時間) の人工乾燥時間は低密度グループ (96時間) の約4.5倍にもかかわらず、曲げヤング係数に対する曲げ強度に違いは認められず、基準強度をほぼ満足していた。

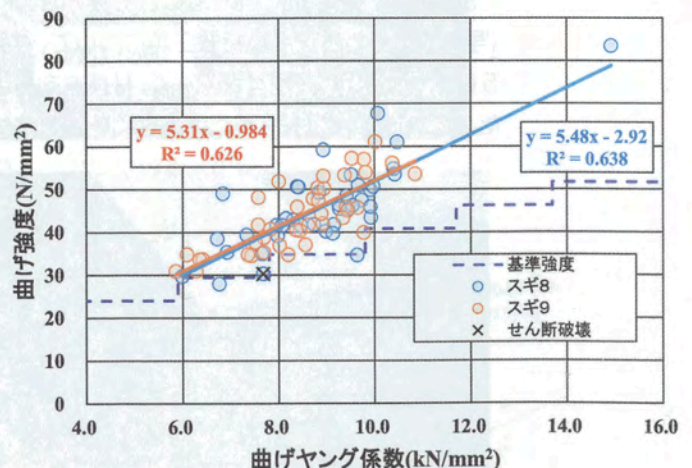


図7 強度試験結果 (スギ8,9)

③ヒノキ心持ち正角（スケジュール番号：ヒノキ1～3、図8）

推奨乾燥条件（高温セット処理:120℃で18時間、人工乾燥温度:90℃）の曲げ強度について、高温セット時間を短くした乾燥条件（高温セット処理時間:12時間）および高温セットなしの中温乾燥条件（人工乾燥温度:60-70℃）の曲げ強度と比較したところ、3者の平均値に有意差はなく、基準強度をほぼ満足していた。

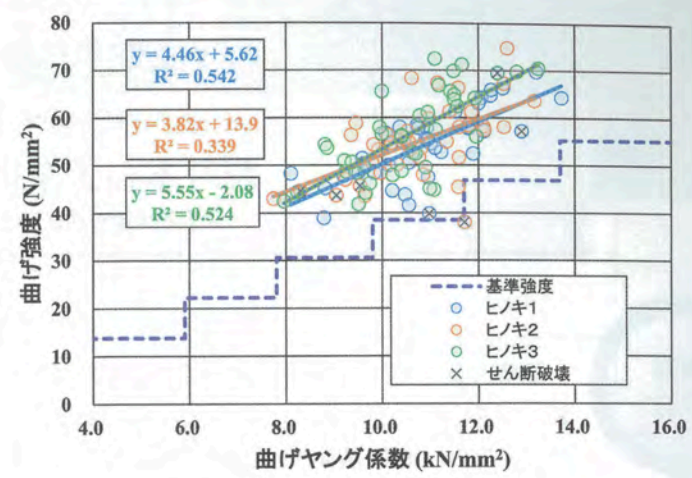


図8 強度試験結果（ヒノキ1～3）

④カラマツ心持ち正角（スケジュール番号：カラマツ1～12、図9）

常圧の蒸気式乾燥機を用いて、高温セット処理の温度や時間を変化させて乾燥試験を行った（カラマツ1-7）結果、乾燥条件によっては曲げ強度の向上は認められたものの、いずれの乾燥条件においても基準強度を満足しない試験体が数多くみられた。一方、圧力操作が可能な乾燥機を用いて、減圧条件下で乾燥された試験体（カラマツ9-12）の曲げ強度は常圧に比べて基準強度を満足する試験体の割合が高く、今後、適正な乾燥条件を見出す可能性が示された。

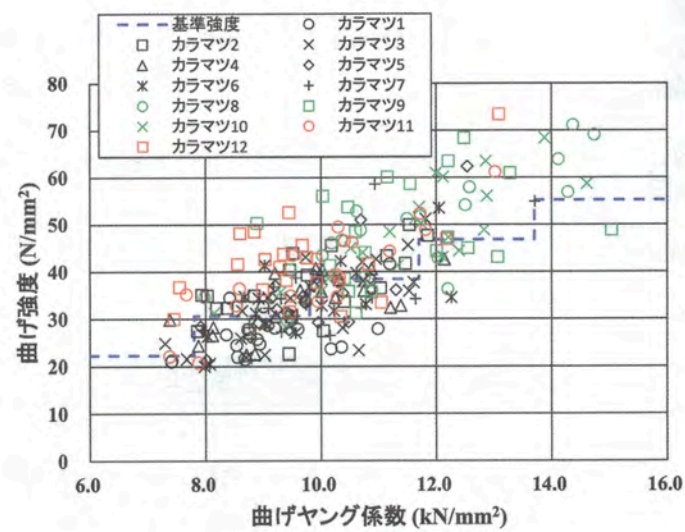


図9 強度試験結果（カラマツ1～12）

今後の
課題・展開
等

- ①スギとヒノキについては、既往の知見から得られている高温セット処理を用いた推奨乾燥条件で乾燥した材の強度性能は、基準強度をおおよそ満足していた。心持ち正角を対象として、これまでに得られた成果を冊子等にまとめ、普及していく予定である。
- ②特許技術である100℃未満の中温領域における熱風減圧乾燥を、ヒノキ心持ち正角、ヒノキ心持ち平角およびカラマツ心持ち正角に適用を試みたところ、ヒノキについては割れが少なく含水率傾斜が小さく、強度的にも問題のない乾燥が可能であることが実証された。カラマツについては、適正な乾燥条件の候補が見つかったことから、引き続き検討を進める必要がある。
- ③特にスギについては、仕上がり含水率のばらつきを小さくするための選別方法および材端部に発生する割れの抑制技術について引き続き検討する必要がある。