

令和2年度 木材製品の消費拡大対策のうち

CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業

スギ心去りログ材に適した乾燥スケジュール等の開発事業報告書

令和4年2月

一般社団法人 木のいえ一番協会

目 次

はじめに	1
第1章 事業の概要	2
1 背景及び目的	2
2 乾燥スケジュール等検討委員会の構成	2
3 事業実施体制	3
4 事業スケジュール	4
5 乾燥スケジュール等検討委員会の開催	5
第2章 事業の実施状況	6
1 試験の流れ	6
2 心去り平角の製材・乾燥コスト等調査	16
2.1 製材コスト等の調査方法	16
2.1.1 製材試験	16
2.1.2 製材歩止りと生産性	17
2.1.3 製材コスト	17
2.2 製材コスト等の調査結果	19
2.2.1 木取りと生産品目	19
2.2.2 製材歩止り	21
2.2.3 生産性	21
2.2.4 製材コスト	22
2.2.5 まとめ	24
2.3 乾燥コストの調査方法	25
2.3.1 乾燥スケジュール	25
2.3.2 乾燥コスト（直接費）の試算	27
2.4 乾燥コストの調査結果	28
2.4.1 乾燥コスト（直接費）の試算結果	28
2.4.2 まとめ	29
3 心去り平角の品質・強度性能調査	30
3.1 品質・強度性能の調査方法	30
3.1.1 曲げヤング係数	30
3.1.2 目視等級区分	30

3.1.3	寸法変化及び反り・曲がり	30
3.1.4	含水率	30
3.1.5	内部割れ	31
3.1.6	強度性能	33
3.2	品質・強度性能の調査結果	37
3.2.1	曲げヤング係数	37
3.2.2	目視等級区分	39
3.2.3	寸法変化及び反り・曲がり	41
3.2.4	含水率	44
3.2.5	内部割れ	46
3.2.6	強度性能	77
3.2.7	まとめ	84
4	ログハウス実験棟の建設	86
4.1	ログハウス実験棟の建設目的	86
4.2	ログハウス実験棟の位置	86
4.3	ログハウス実験棟の概要	86
4.3.1	図面	86
4.3.2	建設	88
4.3.3	経年変化調査	89
4.3.4	まとめ	89
第3章	まとめ	92
第4章	今後の課題・展開等	94

はじめに

国内のスギ人工林は高齢級化が進み大径材の供給が増加している。製材工場では心持ち平角を製材する機会が増えつつあり、一部では心去り平角を扱う工場も現れ始めている。今後はさらに大径化が進むことから、必然的に心持ちから心去りへ移行する流れが広まると思われる。

大径材から製材された心去り平角は、国産材割合の低いログ材や梁・桁材への利用が有力と考えられる。そこで昨年度に、品質・性能の優れたスギ心去りログ材の開発を行い、乾燥割れが少なく強度を担保した乾燥スケジュールを提案した。このスケジュールは高温セット処理＋天然乾燥＋2次乾燥を組み合わせた乾燥法（いわゆる大分方式）であるが、乾燥工程が3段階にわかれて手間がかかり、乾燥時間が長いという問題が残された。

このような背景のもと、引き続き今年度は木構造振興株式会社による助成事業「令和2年度木材製品の消費拡大対策のうちCLT建築実証支援事業のうちCLT等木質建築部材技術開発・普及事業」(課題名：スギ心去りログ材に適した乾燥スケジュール等の開発事業)により、福島県産スギ心去りログ材の乾燥スケジュール等の技術開発を行った。本事業では、森林総合研究所及び栃木県林業センターの有識者、福島県の地元関係業者等から構成される「乾燥スケジュール等検討委員会」を設置し、行政機関の協力のもと、福島県産スギ心去り平角の製材・乾燥・強度試験を実施し、さらに試験体を用いてログハウス実験棟を建設した。

昨年度の乾燥スケジュール(高温セット処理＋天然乾燥＋2次乾燥)をベースに、高温セット処理または天然乾燥を省略したスケジュールを設定し、各スケジュールの製材・乾燥コスト、仕上がり品質や強度性能等を比較した。その結果、いずれのスケジュールも強度性能に問題はなかったが、天然乾燥を省略したスケジュールでは比較的大きな内部割れの発生が懸念された。ログハウス実験棟の経年劣化については継続的な調査が今後も必要であるが、今回の一連の試験によって、品質・性能の優れた心去りログ材に適した乾燥スケジュールの方向性が確立できたと思われる。本事業の成果が国産材ログハウス等への新たな需要創出、さらには国産材の利用拡大に寄与することを期待したい。

乾燥スケジュール等検討委員会

委員長 渡辺 憲

第1章 事業の概要

1. 背景及び目的

スギを中心とするわが国人工林は、高齢級化・大径材化が進行している。このことは、持続可能な林業経営や林業の成長産業化の観点だけでなく、温室効果ガスの森林吸収源対策上からも問題となっている。利用期の人工林を収穫して再造林する循環利用により、成長力が旺盛で二酸化炭素吸収力の高い若い人工林を増やすことが必要である。また、収穫した木材を建築物として利用することは、二酸化炭素の長期間貯蔵にも寄与する。

しかしながら、国産材の供給システムや技術開発等は中・小径木が中心となっている。国産材比率の低い横架材や羽柄材等への有効活用など新たな需要創出とともに、生産コストや品質・性能を確保するための技術開発が必要となっている。

このため、昨年度は、国産材の利用の少ないログ材及び梁・桁にも応用可能な心去り平角の乾燥スケジュールの開発に取り組んだ。

その結果、① スギ心去りログ材（平角）には、高温セット処理後に1か月の天然乾燥を入れたいわゆる大分方式が適していること、② 心持ち材に多く用いられている高温セット処理+中温乾燥は内部割れが多発し、心去り材には適さないことが明らかになった。

今年度は、昨年度の大分方式を基に、品質・性能・コストの観点から、スギ心去りログ材（平角）により適した乾燥スケジュールの開発事業を実施した。

なお、この事業は、ログ材のみに限らず、心去り梁・桁等の生産にも活用できる汎用性の高いものである。

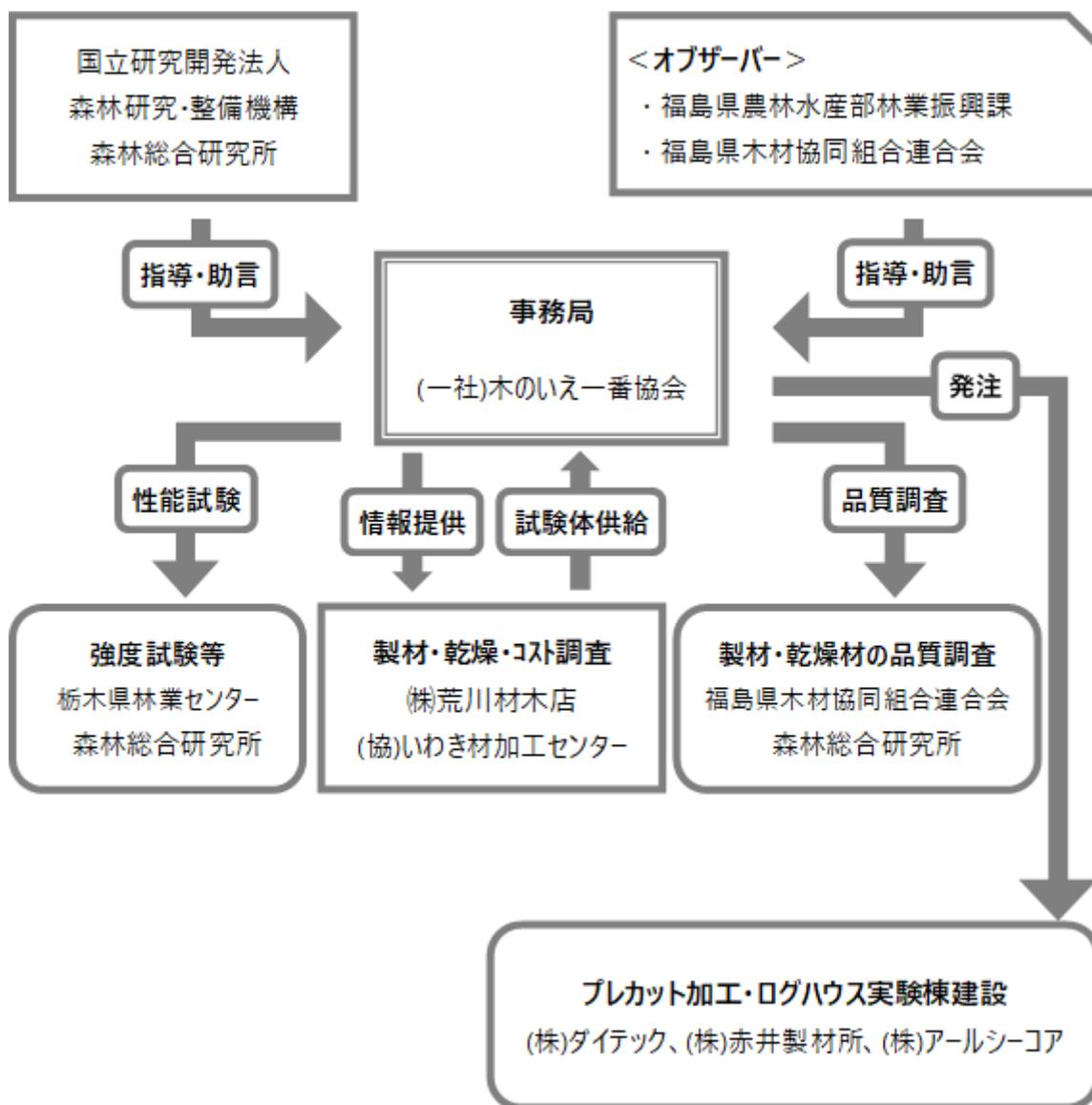
2. 乾燥スケジュール等検討委員会の構成

区 分	氏 名	所 属
委員長	渡辺 憲	森林総合研究所 木材乾燥研究室 主任研究員
委 員	長尾 博文	森林総合研究所 構造利用研究領域 研究専門員
	松村 ゆかり	森林総合研究所 木材機械加工研究室 主任研究員
	大谷 直希	栃木県林業センター 木材研究部 主任
	鈴木 裕一	福島県木材協同組合連合会 会長、(株) 赤井製材所 代表取締役
	荒川 仁弥	(協) いわき材加工センター副理事長、(株) 荒川材木店 代表取締役
	倉持 秀一	(株) 赤井製材所 ログ&ティンバー事業部長

委員	鈴木 柁司	(株) 赤井製材所
	池田 均	(一社) 木のいえ一番協会 技術開発委員長
	井谷 真由美	(株) アールシーコア BESS 事業本部 商品開発部 技術開発 主査

区分	氏名	所属
オブザーバー	矢吹 秀明	福島県 農林水産部 林業振興課 課長
	佐藤 守	福島県木材協同組合連合会 専務理事

3. 事業実施体制



4. 事業スケジュール

	令和3年度(2021年)												令和4年(2022)																	
	5月			6月			7月			8月			9月			10月			11月			12月			1月		2月			
	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬	上旬	中旬	下旬
乾燥スケジュール等検討委員会						第1回 (28・29)																		第2回 (13・14)						
スギ心去り平角の生産・乾燥コスト等調査						丸太購入			心持ち・心去り平角の製材						3種類の乾燥条件の実施						修正挽、モルダ加工									
スギ心去り平角の品質・強度性能調査						平角製材品の品質調査									平角乾燥材の品質調査						強度性能調査									
ログハウス実験棟の建設																					プレカット加工						建設			
事業報告書の作成及び成果の普及																														報告書の作成等

5. 乾燥スケジュール等検討委員会の開催

検討委員会は2回実施し、主な内容は以下の通りである。

◇ 第1回乾燥スケジュール等検討委員会の開催

<1日目> 日 時：令和3年6月28日（月）、13：00～16：00

場 所：福島県いわき市 いわきワシントンホテル 3階カメラ

参加者：14名

主な内容：
・昨年度事業の成果報告、今年度事業の概要・流れの説明
・製材の歩増し量及び製材方法等
・今年度実施の乾燥条件及び試験方法・測定項目
・ログハウス実験棟案の説明等

<2日目> 日 時：令和3年6月29日（火）、9：00～12：00

場 所：福島県いわき市 赤井製材所、荒川材木店、いわき材加工センター

参加者：14名

主な内容：各事業実施事業者との打合せ、実験棟建設候補地の検討等

◇ 第2回乾燥スケジュール等検討委員会の開催

<1日目> 日 時：令和3年12月13日（月）、13：30～16：00

場 所：福島県いわき市 いわきワシントンホテル 3階カメラ

参加者：15名

主な内容：
・事業の進捗状況、流れ
・全体の試験概要及び結果（製材・乾燥スケジュール・強度性能等）
・ログハウス実験棟の概要・調査項目等

<2日目> 日 時：令和3年12月14日（火）、9：30～12：00

場 所：福島県いわき市 赤井製材所

参加者：15名

主な内容：プレカット工場及びログハウス実験棟建設予定地の視察等



検討委員会の開催状況



ログハウス実験棟建設予定地の視察

第2章 事業の実施状況

1. 試験の流れ

まず初めに試験の流れを表1-1に示す。荒川材木店及びいわき材加工センターにて丸太の調達、製材、グレーディング、乾燥、再度のグレーディング、挽き直し・仕上げ加工を行った後、栃木県林業センターで強度試験を実施した。また、一部の仕上げ加工した試験体は、赤井製材所にてログ加工を施し、同敷地内にログハウス実験棟を建設した。各工程における試験体数及び調査項目は表1-1のとおりである。

丸太の調達では、心去り平角の2丁取りに適した径のスギ丸太130本を用意した。軽便送材車付帯鋸盤を用いて製材し、製材にかかるコストを調査した(写真1-1)。その後、グレーディングマシンを用いて静的ヤング係数及び重量を全数測定し(写真1-2)、一部の試験体については反り・曲がり測定した。

乾燥試験では図1-1に示す3つの乾燥スケジュールを設定した。目標含水率はログ材に要求される20%以下である。各スケジュール85本の試験体を用意し、選び方についてはグレーディング時に重量が100kgを超える試験体を除外し、スケジュール間で重量とヤング係数がほぼ等しくなるように試験体を選別した(写真1-3)。約2か月間かけてすべての乾燥試験を行い(写真1-4～1-6)、それぞれの乾燥スケジュールにかかるコストを調査した。乾燥後に再びグレーディングを行い、一部の試験体は反り・曲がり測定した(写真1-7)。

乾燥後のグレーディングの重量に偏りが生じないように、乾燥スケジュール①から85本中60本を、乾燥条件①及び②から85本中75本をそれぞれ抜き取り、挽き直し・仕上げ加工を行った(写真1-8)。外面検査を実施し(写真1-9)、この中から重量に偏りが生じないように各条件40本の試験体を選び、曲げ試験体を作製して強度試験を行った(写真1-10)。その際、切片を切り出し(写真1-11)、含水率及び内部割れの発生量を測定した(写真1-12、写真1-13)。乾燥試験、グレーディング、外面検査及び強度試験の実施日を図1-2に示す。

強度試験に使用しなかった試験体のうち、乾燥条件①16本、乾燥条件②③各12本をログ加工し、これらを壁に使用したログハウス実験棟を建設し(写真1-14)、ログ材の含水率の測定、表面割れ・木口割れ等の調査を行った。

表 1-1 試験の流れ

工程	試験体数(本)	調査項目
1. 丸太の調達	130 (丸太)	重量、寸法
2. 製材	260	製材コスト
3. グレーディング	260	重量、ヤング係数、寸法、反り・曲がり
4. 乾燥試験	255	乾燥コスト
5. グレーディング	255	重量、ヤング係数、寸法、反り曲がり
6. 挽き直し、仕上げ加工	210	品質調査
7. 強度試験	120	曲げ強度、含水率、内部割れ
8. ログ加工、実験棟の建設	40	含水率、木口割れ、表面割れ、接合部の浮き等



図 1-1 乾燥スケジュール

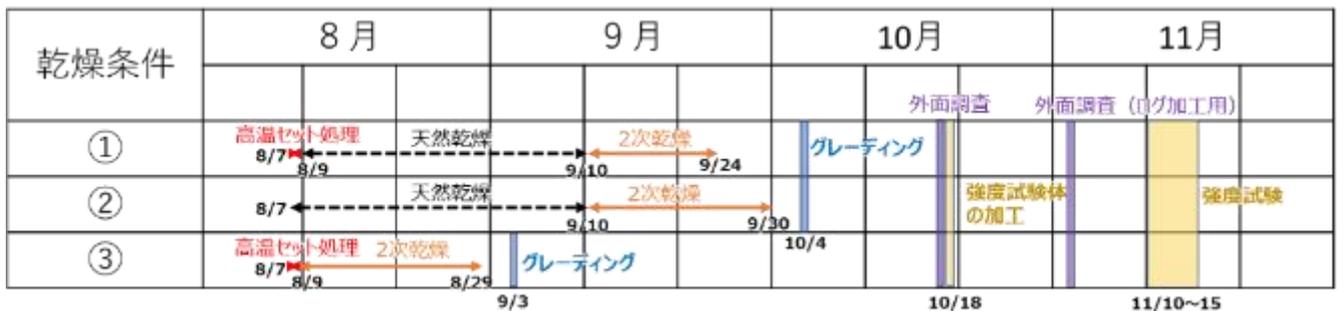


図 1-2 乾燥試験～強度試験の行程



写真 1-1 軽便送材車付帯鋸盤による製材



写真 1-2 グレーディングの様子



写真 1-3 選別前の試験体（乾燥条件ごとにスプレーで色付け）



写真 1-4 乾燥試験（乾燥前の積み込み）



写真 1-5 乾燥試験（高温セット処理後の取り出し）



写真 1-6 天然乾燥（倉庫で養生）



写真 1-7 曲がり、反りの測定



写真 1-8 仕上げ加工に用いた全自動四面鉋盤（MPL-43、宮川工機（株）製）



写真 1-9 外面検査の様子



写真 1-10 強度試験



写真 1-11 切片の採取と曲げ試験体の作製

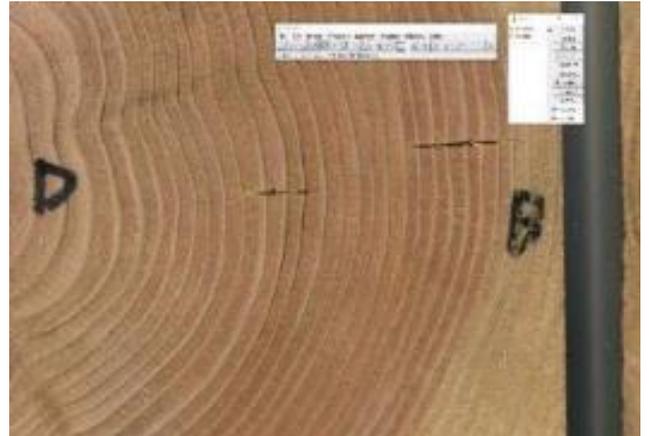


写真 1-12 内部割れの測定

(切片をスキャナーで取り込み (左)、画像上で内部割れの長さを測定 (右))



写真 1-13 全乾法による含水率測定 (恒温器を用いて試験体を全乾にし (左)、重量を測定 (右))



写真 1-14 建設したログハウス実験棟

2. 心去り平角の製材・乾燥コスト等調査

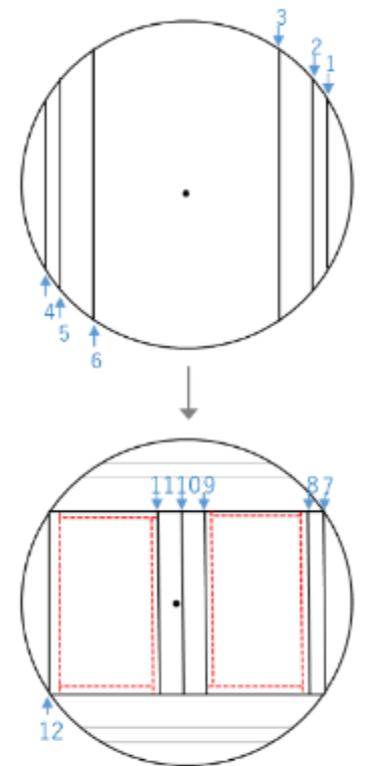
2.1 製材コスト等の調査方法

2.1.1 製材試験

心去り平角の製材コスト等を検討するため、製材試験を実施した。荒川材木店道作工場において、福島県産スギ丸太 130 本を図 2.1.1-1 に示す木取りで製材した（写真 2.1.1-1）。丸太の材長は 4 m、径級は 38 cm が 69 本、40 cm が 52 本、42 cm が 9 本であった。

大割工程に使用した製材機械は、軽便送材車付帯鋸盤（いわゆる台車）（石田エンジニアリング、1200 型）（写真 2.1.1-2）であった。大割工程にかかる人員は、送材車に乗るオペレータ 1 名と送材車の先で製品の振り分けや補佐を行う 1 名の計 2 名であった。

ログ材を想定した最終仕上寸法が 113×190 mm であることから、平角の乾燥後の仕上寸法を 120×200 mm とし、乾燥後の寸法が 130×210 mm 程度となるように収縮・変形量を想定して、製材寸法（粗挽寸法）は昨年度と同様の 135×215 mm とした。



1→：挽材順 ---：修正挽き

図 2.1.1-1 製材木取り



写真 2.1.1-1 製材前の丸太



写真 2.1.1-2 軽便送材車付帯鋸盤（台車）

2.1.2 製材歩止りと生産性

丸太 20 本分の大割工程の製材作業をデジタルビデオカメラで撮影し（写真 2.1.2-1）、製材時間を測定するとともに、木取りと挽材順を記録した。

全ての丸太から取った副製品の寸法（厚さ、幅、長さ）と数量を記録し、製材歩止り（粗挽）を算出した。また、130 本の丸太を実際に製材するのに要した時間を記録し、生産性を検討した。

2.1.3 製材コスト

製材コストについては、製材試験により計算した歩止り、製材時間から推計した年間生産可能量、その他聞き取り調査による工場の概要等から前提条件を設定し、製材品 1 m³（粗挽き寸法）あたりの製造原価を計算した。今回の試算は、表 2.1.3-1 に示す内容について前提条件を設定し、原木代は原木の購入に係る費用、製造経費としては、人件費、電力費、機械に係る修理費・消耗品費等を計上した。今回の条件では、減価償却費は含めないこととした。原木代①と製造経費②の合計から副製品収入③を引いたものを生産量で除した値が製材品 1 m³（粗挽き寸法）あたりの製造原価となる。なお、製材工程以外の労務費（販売経費・管理費等）は考慮していない。



写真 2.1.2-1 製材作業（大割工程）の撮影

試算に用いた具体的な数値は、原木代は A 材一般材の価格として 15,000 円/m³、工場稼働日数は 1 日 7 時間・年間 250 日とし、人件費は製造業平均水準の額として 400 万円/人・年を使用した。電力費については、工場全体の電力費から実際に製材にかかる分だけを把握することは難しいため、機械の出力数と東北電力（高圧電力）の基本料金・単価から推計した。今回の試算においては、減価償却費は考慮していないが、施設・機械修理費や消耗品費を算出するために設備導入費の値を使用することから、大割工程で使用する送材車付帯鋸盤（台車）のラインを 5 千万円と仮定した。調査工場における実際の生産工程では、板や原盤の耳摺り等の小割作業についてはツイン帯鋸盤ラインのダブルエッジ等で行うなど、他の木取りの場合と厳密に機械や人員の条件を分けて設定することが難しかったため、小割工程の人員を 3 名と仮定して計 5 名とし、機械出力は送材車付帯鋸盤ライン（帯鋸盤、送材車、チップ等）の合計出力数とした。また、チップ等の副産物収入は製品 1 m³あたり 5,000 円とした。

表 2.1.3-1 製材コスト（製造原価）の算定方法

	費目	算定基礎
原木代 ①	原木代	
製造経費 ②	工場労務費	人件費（工場全体、製材部門）
	電力費	出力数から計算
	減価償却費	導入額から計算
	施設・機械修理費	導入額の2%
	消耗品費	鋸歯・刃物・機械油類・フォークリフト燃料等。帯鋸機械の3%
副産物収入③		チップ、おが粉の生産量・販売価格

2.2 製材コスト等の調査結果

2.2.1 木取りと生産品目

心去り平角の木取りは、図 2.1.1-1 に示したように、片側から背板を落とした後、板と厚い原盤を取り、180 度回転して反対側からも板と原盤を取り、90 度回転して、たいこ材から 2 本の平角を取った。たいこ材からの取り方は、図 2.1.1-1 の例では、背板を落とした後、板を一枚取り、製材寸法より大きめの平角を 1 本取り、髓付近から板を 2 枚取り、180 度回転して背板を落として 2 本目の平角を取った。この後、それぞれの平角について 4 面とも修正挽きを行い、135×215 mm に寸法を調整した。

130 本の丸太から製材した副製品の寸法と数量を表 2.2.1-1 に示す。心去り平角を取った周りと中心部から、厚さ 21、35、49 mm、幅 105～300 mm の板または原盤が計 740 枚取れた（写真 2.2.1-1～3）。耳付き板はダブルエジャで規定の幅に耳摺りし、背板からはテーブル帯鋸盤で 21 mm 厚の板を取った。それぞれの用途としては、21 mm 厚は貫、胴縁、羽目板等、35 mm は間柱、野縁、桢板等、49 mm 厚は間柱、垂木、ラミナ等で、無節のものについては役板として仕分けられた。

表 2.2.1-1 副製品の寸法と数量

等級	長さ	厚さ	幅	数量	材積		
特	4000	49	300	14	0.823		
			255	52	2.599		
			255	47	2.349		
			225	52	2.293		
			225	21	0.926		
			195	32	1.223		
			165	13	0.420		
			135	25	0.662		
			35	215	3	0.090	
		185		21	0.544		
		165		28	0.647		
		135		19	0.359		
		120		10	0.168		
		21		155	95	1.237	
			135	33	0.374		
			105	12	0.106		
		役	4000	49	300	1	0.059
					255	9	0.450
					225	7	0.309
					195	7	0.268
185	1				0.036		
165	2				0.065		
35	215			2	0.060		
	165			17	0.393		
	135			14	0.265		
21	155			94	1.224		
	135			39	0.442		
	105			63	0.556		
ラミナ	4000			49	135	7	0.185

740 19.131



写真 2.2.1-1 49 mm 厚の原盤



写真 2.2.1-2 副製品（耳摺り前）



写真 2.2.1-3 背板

2.2.2 製材歩止り

丸太 130 本分の生産品目の材積を合計し、粗挽の製材歩止りを算出した。丸太の材積と製材品全体の材積、平角 260 本分の材積、及び歩止りを表 2.2.2-1 に示す。製品全体の歩止りは 62.0%、平角の歩止りは 38.0%で、昨年度の 62.6%、37.0%とほぼ同等であった。副製品のうち、21.6%は役物の品質であった。

表 2.2.2-1 製材歩止り

	材積 (m ³)	歩止り (%)
丸太	79.485	—
製品全体	49.311	62.04
心去り平角	30.186	37.98

2.2.3 生産性

心去り平角木取りの丸太 20 本の、1 本あたりの製材時間の平均値は 8 分 17 秒で、そのうち送材車に丸太を乗せて挽き始めるまでが 39 秒、平角の修正挽きを行っている時間が約 3 分であった。昨年度の調査では、1 本あたりの製材時間は 10~11 分、うち修正挽きの時間が約 4 分であった。今回は、心去り平角を取る大割工程の手順にオペレータが習熟したことに加え、副製品の寸法の組み合わせ等から効率的に製材しやすい径級 38~40 cm の丸太が 9 割以上を占めていた(昨年度は 8 割) ことから、製材能率が向上したと推測される。

実際の生産工程において製材作業に要した時間と生産性を、表 2.2.3-1 に示す。丸太 130 本を製材するのに 21.5 時間を要した。1 時間あたりに生産される製材品材積及び平角材積はそれぞれ、2.29 m³、1.40 m³であり、平角の生産性としては、昨年度の 1.16 m³/h より向上した。これらの値から、今回使用した設備規模における心去り平角の年間生産可能量は、2,457 m³と試算できた。ただし、これは大割工程の生産性のみから試算した結果であるため、実際に原木消費量が増加した場合には、小割工程の製材能率や端材処理等にかかる手間も考慮する必要がある。

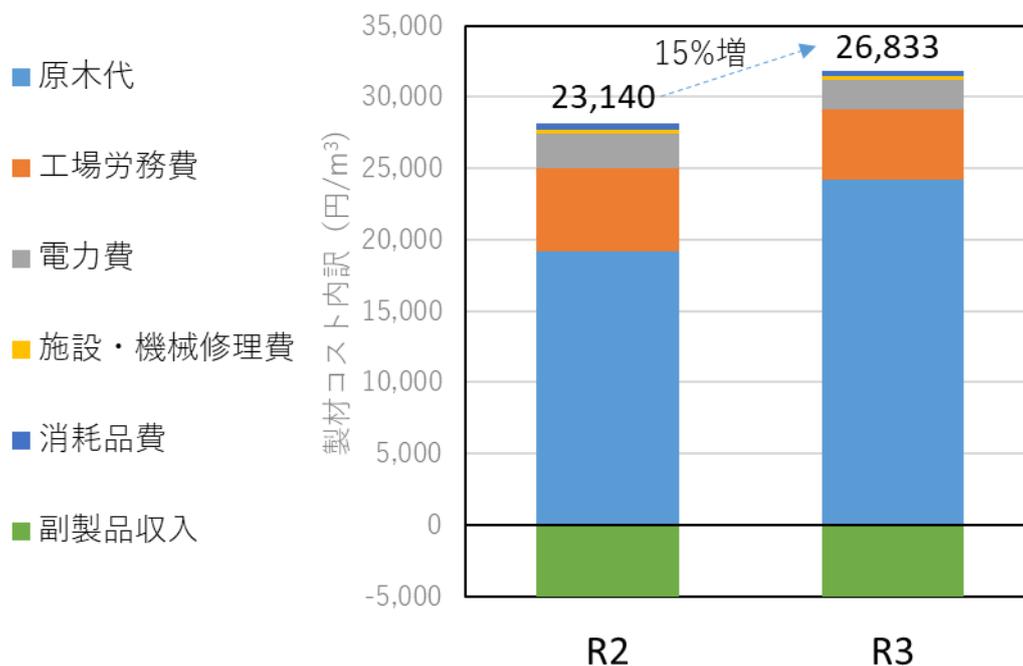
表 2.2.3-1 製材時間と生産性

丸太本数 本	製材時間 h	製材品材積 m ³	平角本数 本	平角材積 m ³	生産性 m ³ /h	平角生産性 m ³ /h
130	21.5	49.31	260	30.19	2.29	1.40

2.2.4 製材コスト

コストについては、前提条件と算出方法を示した上で検討することが重要である。今回の試算は、2.1.3 の項で示した前提条件と算出方法で行った。原木消費量については、実際の製材時間（表 2.2.3-1）から計算して 6,500 m³/年とした。原木に対する平角の歩止りは表 2.2.2-1 に示したとおり 62.0%とした。

昨年度と今年度の心去り平角の製材コストの試算結果を図 2.2.4-1 に示す。原木価格が 12,000 円/m³ から 15,000 円/m³ に上昇したことによりコストは 26%増となるが、大割工程の生産性向上により原木消費量が増加すると仮定すると、トータルでは 15%の増加と試算できた。

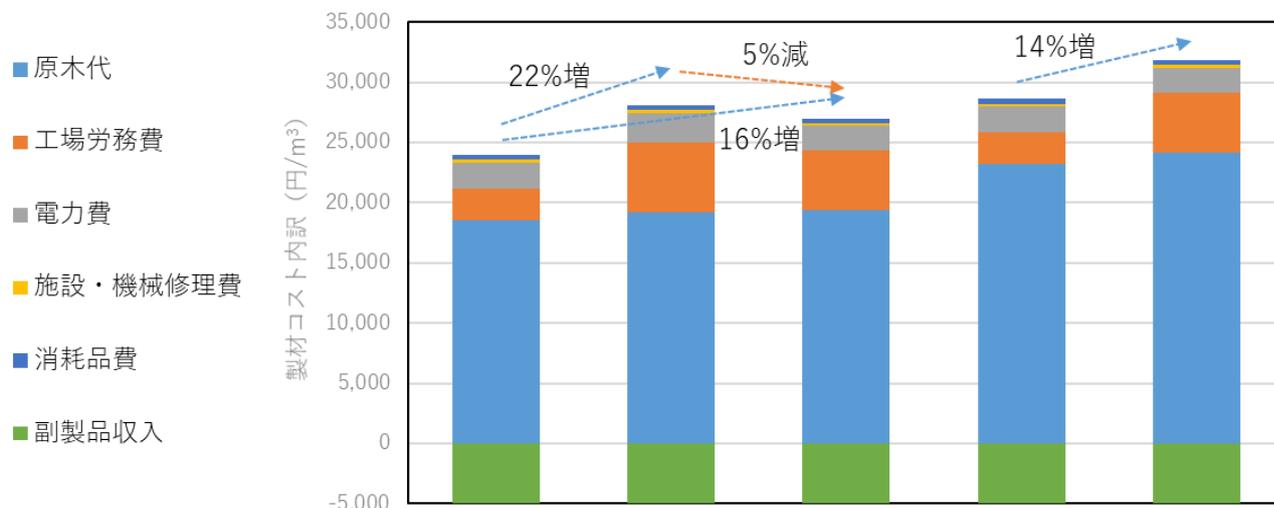


< 前提条件 >

原木消費量 (m³/年)	5,500	6,500
原木価格 (円/m³)	12,000	15,000
人員 (名)	5	5
機械出力 (kW)	250	250
歩止り (%)	62.6	62.0

図 2.2.4-1 心去り平角の製材コストの試算結果

昨年度の結果を踏まえ、心持ち平角・心去り平角について原木価格や生産性（原木消費量）の影響を比較した。前提条件と試算結果を図 2.2.4-2 に示す。原木価格 12,000 円/m³ のとき、心去り平角の生産性が向上するとコストは 5%減少すると試算できた。製材品の製造原価に占める原木価格の割合が大きいため、原木価格上昇の影響は大きくなるが、昨年度の試算では心去り平角が心持ち平角に比べて 22%のコスト増であったのに対し、今年度の試算では 14%増であり、生産性の向上によるコスト削減の効果も確認できた。ただし、今回は大割工程の生産性向上により生産可能量が増加すると仮定して試算を行ったが、実際には、原木消費量が増加すると小割や端材処理の工程のコストが増加する可能性もある。



木取り	心持ち	心去り	心去り	心持ち	心去り
製材機械（大割工程）	ツイン	台車	台車	ツイン	台車
原木価格（円/m ³ ）	12,000	12,000	12,000	15,000	15,000
原木消費量（m ³ /年）	12,000	5,500	6,500	12,000	6,500
人員（名）	5	5	5	5	5
機械出力（kW）	500	250	250	500	250
歩止り（%）	64.6	62.6	62.0	64.6	62.0

図 2.2.4-2 製材コスト試算結果の比較

2.2.5 まとめ

福島県産スギ大径材 130 本から心去り平角を 2 丁取る木取りで製材試験を行い、製材歩止りや生産性を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 製材歩止り（粗挽き寸法）は、製品全体で 62%、心去り平角のみでは 38%であった。
- 2) 心去り平角木取りの製材手順にオペレータが習熟したことに加え、副製品の寸法の組み合わせ等から効率的に製材しやすい径級 38～40 cm の丸太が 9 割以上を占めていたこと等から、昨年度に比べて大割工程の生産性が向上した。
- 3) 製材コストは、原木価格の上昇により増加したが、生産性向上により原木消費量が増加すると仮定すると、昨年度の心去り平角より 15%増、今年度の条件下で心持ち平角と比較すると 14%増と試算された。

2.3 乾燥コストの調査方法

2.3.1 乾燥スケジュール

2.1.1 で製材した長さ約 4 m、断面寸法 135×215 mm のスギ心去り平角 260 本のうち、255 本を 3 グループ各 85 本に選別して乾燥試験に供した。選別方法については、グレーディング時に重量が 100 kg を超える試験体を除外し、スケジュール間で重量とヤング係数がほぼ等しくなるように仕分けた。

3 つの乾燥スケジュールの概要と詳細をそれぞれ図 1-2、図 2.3.1-1 に示す。乾燥条件①は、昨年度検討した乾燥スケジュールの中で最も仕上がり品質が良かった乾燥条件である。高温セット処理後に 1 か月間の天然乾燥を行い、その後 70℃の中温で 2 次乾燥するスケジュールであり、大分方式と呼ばれている。天然乾燥については、8 月上旬から 9 月上旬にかけて 1 か月間、屋根のある倉庫に試験体を保管した。温湿度計 (TR-72wf、(株)ティアンドデイ製) を用いてこの期間の温湿度を測定した。1 年間通してみると比較的乾燥しやすい時期 (図 2.3.1-1) に天然乾燥を行ったため、乾燥が進みにくい冬季に同様の天然乾燥を行う場合には乾燥期間を 2~3 か月間ほど設ける必要があると考えられる。

乾燥条件②は、乾燥条件①から高温セット処理を除いたスケジュールであり、両者を比較することによって高温セット処理による表面割れの抑制効果を検証した。乾燥条件③は、乾燥条件①から天然乾燥を除くことによって乾燥日数の短縮を図ったスケジュールである。

乾燥条件①②③ともに蒸煮処理は 95℃、8 時間共通とし、仕上がり含水率がログ材に要求される 20%以下となるように、2 次乾燥の時間を調整した。なお、高温セット処理には高温タイプの蒸気式乾燥機 (新柴設備製、容量 45 m³) (写真 2.3.1-1) を用いて他の材種のものと同様に混載乾燥を行い (写真 1-4)、2 次乾燥には同社製の中温タイプの蒸気式乾燥機 (容量 60 m³) を用いた。

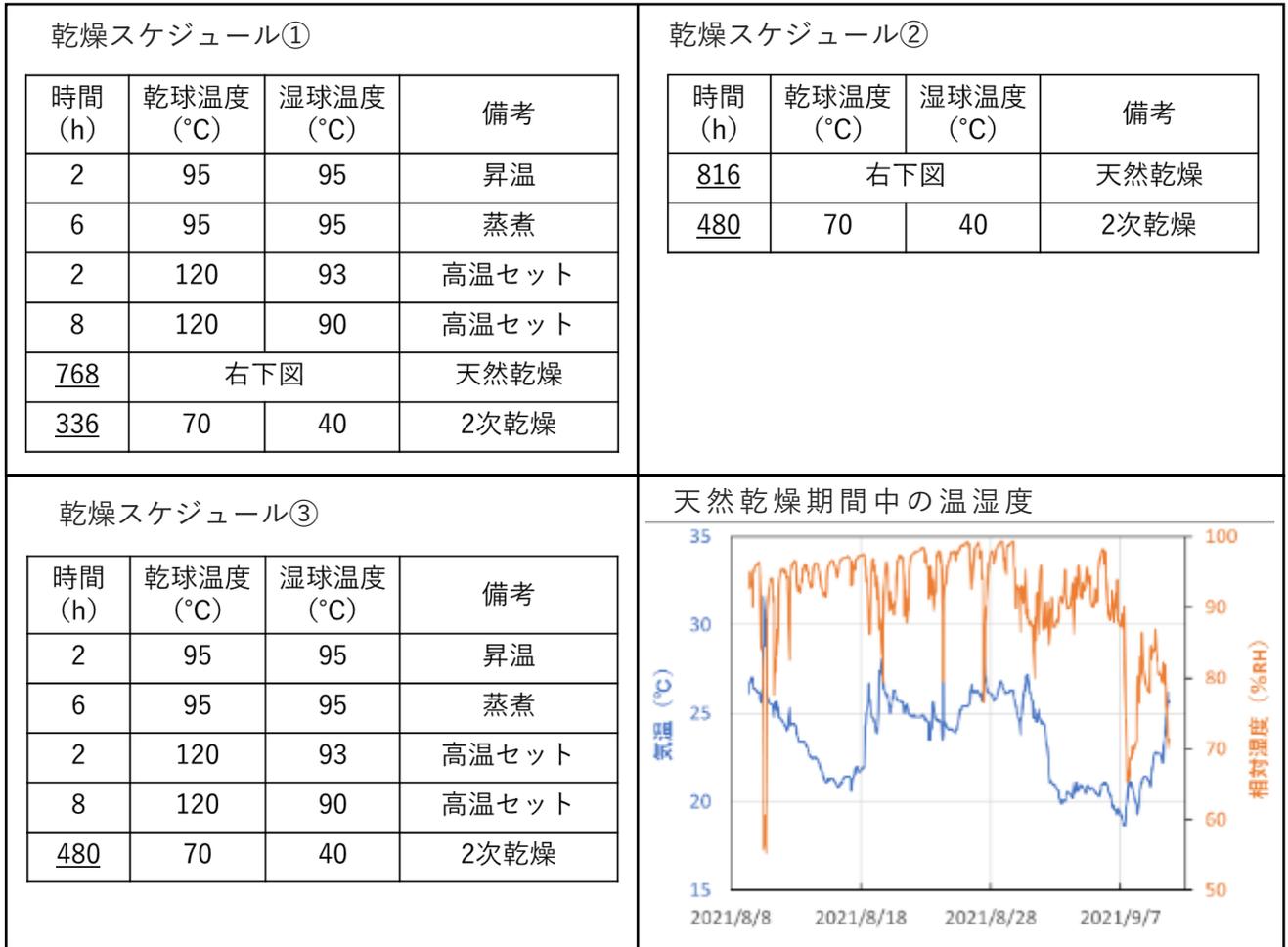


図 2.3.1-1 乾燥条件①②③のスケジュール詳細



写真 2.3.1-1 高温セット処理に使用した高温タイプの蒸気式乾燥機

2.3.2 乾燥コスト（直接費）の試算

乾燥コストは主に直接費（エネルギー費）、人件費、設備の償却費、の3つの費目で構成される。人件費は 2,000 円/m³ が目安とされており、設備の償却費については乾燥材の生産量や購入時の補助金の額によって大きく異なるので、ここでは乾燥コストの試算から除くこととした。また、主要3費目以外に一般管理費や乾燥設備の導入に伴う借入金の金利などが乾燥コスト全体の10%ほどかかるとされているほか、製品の歩止りも乾燥コストに影響を及ぼす大きな要因であることに注意したい。

直接費は乾燥機の運転に使用した燃料費、電力費、水道費の合計である。今回乾燥試験を実施した工場では、複数の乾燥機を同時に運転しており、個別に流量計が設置されていないため、燃料、電気、水道の使用量を直接測定できなかった。そこで、乾燥スケジュールの各ステップ（図 2.3.1-2）に対する単位時間、単位立米当たりの燃料費、電力費、水道費を過去の測定データ¹⁾（容量 28 m³、高温タイプの蒸気式乾燥機を使用）から流用し、これに各ステップの時間と試験体の体積を乗ずることによって直接費を算出した。なお、試算に使用した燃料、電力量、水道料の単価は実態に即して表 2.3.2-1 のとおりとした。

表 2.3.2-1 コスト試算に用いた燃料、電力量、水道の単価

費目	単価	備考
燃料	65.4 (円/ℓ)	A 重油、小型ローリー納入、東北局、2020 年 11 月
電力	14.74 (円/kW)	東北電力・高圧電力、2020 年 4 月以降
水道	238 (円/m ³)	30 mm 径、従量使用量

【文献】

- 1) 齋藤周逸 (2020) : 私信

2.4 乾燥コストの調査結果

2.4.1 乾燥コスト（直接費）の試算結果

乾燥コストにおける直接費は乾燥機や材の容量によって異なり、さらに乾燥時期が異なれば同じ乾燥機を使用しても大きく変わる。したがって、今回の試算結果はあくまで参考程度のものであり、理解したい。

各乾燥条件の直接費を図 2.4.1-1 に示す。乾燥条件①では 4,860 円/m³、乾燥条件②では 5,583 円/m³、乾燥条件③では 6,535 円/m³ と試算された。乾燥条件①に比べて②③の直接費が高い理由は、2次乾燥の期間を6日間長くしたことによる。乾燥条件②の乾燥スケジュールは乾燥条件③の高温セット処理を天然乾燥に置き換えたものであり、この高温セット処理を省略した分だけ乾燥条件②の直接費は③より低くなった。このように乾燥条件によって直接費に立米当たり千円から2千円ほどの差が生じたが、直接費以外の費用（天然乾燥に必要な土地代や材の搬送等に係る人件費）や機会損失を考慮すると、乾燥条件①と②③のトータルコストの差はかなり縮まると推察される。

直接費の内訳をみると、燃料費が全体の半分以上を占めており、燃料を重油から木質燃料に転換すれば直接費を大幅に削減することが可能である。電力費と水道費については、乾燥条件①に比べて乾燥条件②③の試算値が高く、2次乾燥の期間が6日間長いことが影響していた。

昨年度に、スギ心持ち平角の乾燥試験（120℃10時間の高温セット処理+90℃の中温乾燥320時間）を実施し、その直接費の試算値は8,039円/m³であった。この値は、今回直接費が最も高く試算された乾燥スケジュール③より約1,500円/m³高く、心去り平角用に開発した今回の乾燥スケジュールの方が直接費を低く抑えられた。ただし、乾燥時間は乾燥スケジュール③の方が約1.5倍長いので、一概に今回の乾燥スケジュールの方が乾燥コストを抑えられるとは言い切れず、設備の償却費等を含むトータルコストについては別途精査する必要がある。

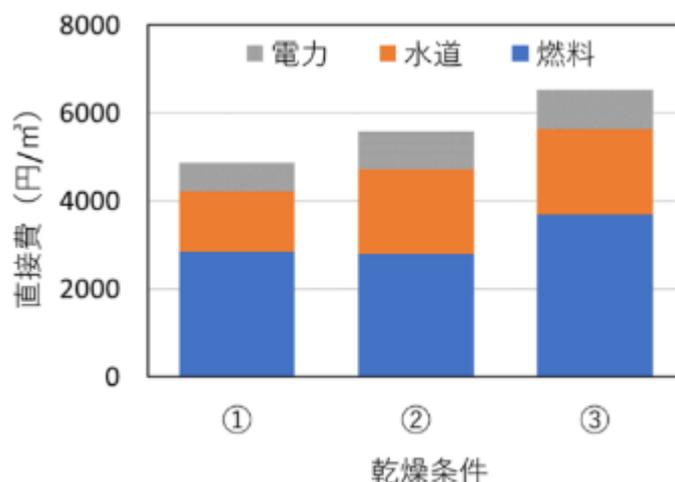


図 2.4.1-1 乾燥コスト（直接費）の試算結果

2.4.2 まとめ

昨年度検討した乾燥スケジュールの中で最も仕上がり品質が良かった乾燥条件①をベースにして、①から高温セット処理を省略した乾燥条件②、①から天然乾燥を省略した乾燥条件③の計 3 条件でスギ心去り平角の乾燥試験を行った。それぞれの乾燥条件に対して、乾燥スケジュールの各ステップの乾湿球温度から乾燥コスト（直接費）を試算した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 乾燥条件①、②、③でそれぞれ 4,860 円/m³、5,583 円/m³、6,535 円/m³ と試算され、乾燥条件①の直接費が最も低かった。乾燥条件①に比べて②③の直接費が高い理由は、2 次乾燥の期間が 6 日間長いことによる。また、高温セット処理を天然乾燥に置き換えることによって乾燥条件②の直接費は③より低く試算された。
- 2) 直接費以外の費用（天然乾燥に必要な土地代や材の搬送等に係る人件費）や機会損失を考慮すると、乾燥条件①と②③のトータルコストの差はかなり縮まると推察される。

3. 心去り平角の品質・強度性能調査

3.1 品質・強度性能の調査方法

3.1.1 曲げヤング係数

人工乾燥前のスギ心去り平角 260 本、人工乾燥後・モルダー仕上げ前のスギ心去り平角 255 本について、一般社団法人全国木材検査・研究協会が認証した機械等級区分装置（MGN-T01、飯田工業製、認証番号：JLIRA-Em-2-2）を用いて曲げヤング係数を測定した。その際、「製材の日本農林規格（以下、JAS）」の機械等級区分構造用製材の試験方法に基づき、荷重条件としてフラットワイズ(平使い)荷重、スパンを 3000 mm とした 3 等分点 4 点荷重方式を採用し、第 1 荷重、第 2 荷重としておおよそ 2.36 kN、9.44 kN を負荷し、それぞれの荷重時のたわみ量を計測し、曲げヤング係数を算出した。

3.1.2 目視等級区分

人工乾燥・モルダー加工後の心去り平角 210 本について、「製材の日本農林規格」の目視等級区分構造用製材の甲種構造材 II の品質基準にしたがって等級付けを実施した。本等級付けは一般社団法人全国木材検査・研究協会の外部委託機関（第三者検査機関）である福島県木材協同組合連合会の格付検査員によって実施され、その際、2 級以下の製材については等級を決定づける因子（表 3.1.2-1）も記録した。

3.1.3 寸法変化及び反り・曲がり

人工乾燥前の心去り平角 260 本、人工乾燥後・モルダー仕上げ前の心去り平角 255 本について、厚さ・幅をノギスで測定した。また、製材直後の 24 本と各乾燥条件につき 20 本について、曲がり・反りを水糸と定規で測定した。

3.1.4 含水率

仕上げ加工後及び強度試験後にそれぞれ試験体から切片を採取し、全乾法で含水率を測定した。含水率測定に使用した試験体及び切片は以下の通りである。乾燥試験後に各乾燥条件 85 本のうち 40 本（計 120 本）を強度試験用に抜き取った。このとき、40 本の含水率が 85 本全体を代表するよ

表 3.1.2-1 等級を決定づける因子

1	節 狭い材面
2	節 広い材面 材縁
3	節 広い材面 中央
4	集中節 狭い材面
5	集中節 広い材面 材縁
6	集中節 広い材面 中央
7	貫通割れ 木口
8	貫通割れ 材面
9	目まわり
10	繊維走行傾斜
11	平均年輪幅
12	腐朽 程度軽
13	腐朽 程度重
14	曲がり
15	丸身
16	その他

うに、グレーディング時に測定した重量にしたがって順位を付けてまんべんなく試験体を抜き取った。その後、挽き直し・仕上げ加工を行い、2021年10月18日に曲げ試験体を作製し、そのときに試験体の隣接部から切片を採取した（写真 1-11、図 3.1.4-1）。約1か月後の11月10日～15日に強度試験を行い、試験後に試験体の中央付近から切片を採取した。採取後すみやかに切片の重量を測定し、温度約105°Cの恒温器内で切片を全乾にした（写真 1-13）。その後再び重量を測定し、全乾法によって各切片の含水率を算出した。

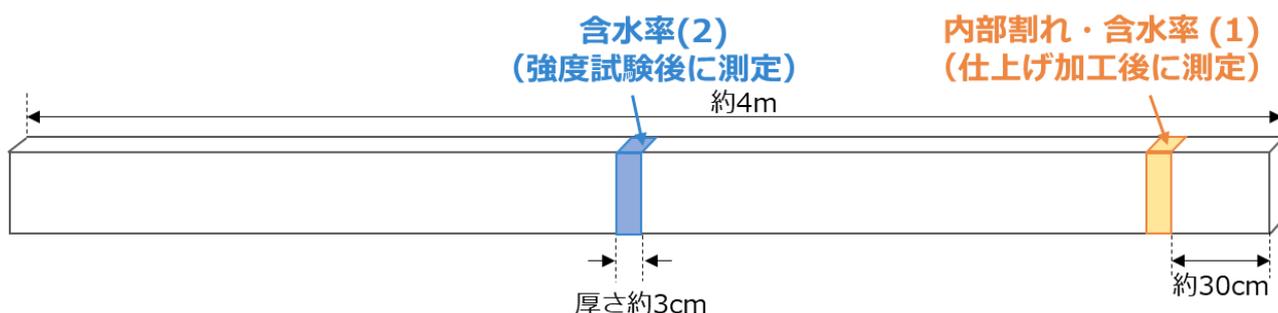


図 3.1.4-1 含水率測定及び内部割れ測定用切片の採取位置

乾燥後（グレーディング時）の含水率が仕上げ加工後の含水率に等しいと仮定し、乾燥前後の重量と仕上げ加工後の含水率から乾燥前の含水率を推定した。仕上げ加工によって表層の含水率の低い部分が削り取られた後に全乾法で含水率を測定しているためこの仮定は正しくないが、実際の値は推定値より低いことに留意しつつ、参考値として使用する分には問題ないと判断した。

さらに、強度試験に使用しなかった試験体のうち、ログ加工用に乾燥条件①から16本、乾燥条件②③からそれぞれ12本を抜き取った。これらの含水率を把握するため、ログ加工時に長さを切り揃えた際に隣接部から切片を採取し、全乾法で含水率を測定した。

3.1.5 内部割れ

仕上げ加工後及びログ加工時に含水率を測定した切片（強度試験後の切片を除くすべての切片）を用いて、横断面にみられる内部割れを測定した。測定手順は以下の通りである。

デジタルスキャナを用いて、切片の木口面（片面）の画像を撮影し、JPEG形式の電子ファイルとして保存した。仕上げ加工後の切片は栃木県林業センターにて、ログ加工時の切片は森林総合研究所にて、撮影にはそれぞれの機関が保有するスキャナを使用した。撮影条件は200 dpiのカラーとし、その他の条件はスキャナの性能次第とした。

撮影した画像を画像解析ソフト ImageJ に取り込み、木口面にみられるすべての内部割れの長さを測定し、その合計値（これ以降、総長さと呼ぶ）を算出した（図 3.1.5-1）。

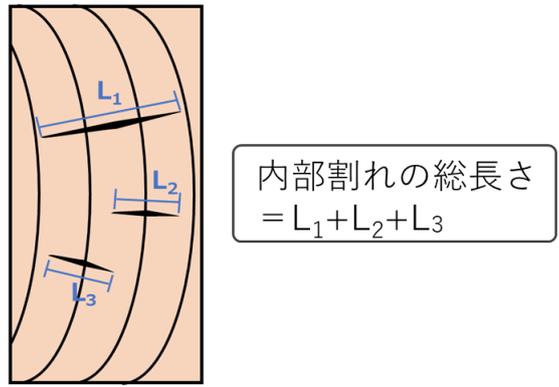


図 3.1.5-1 内部割れの模式図と総長さ

さらに、ログ加工を施した際にログ材の表面に割れが出現するかどうかを切片の画像を用いて仮想的に評価した。画像解析ソフト GIMP を用いて、角ログの断面図（図 3.1.5-2）を切片の画像に重ね合わせ、表面割れ及び内部割れが角ログの外縁部にかかるかどうかを目視で判断した（写真 3.1.5-1）。

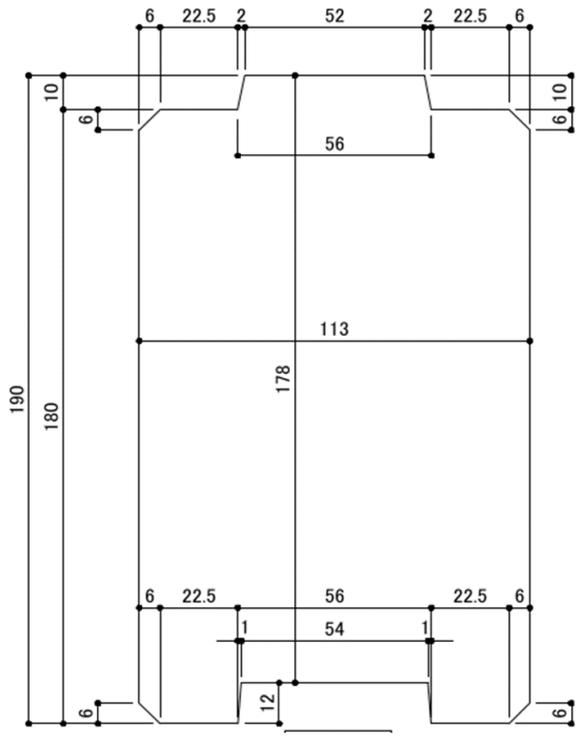


図 3.1.5-2 角ログ（I型ログ）の寸法（単位：mm）



写真 3.1.5-1 GIMP を用いた角ログの断面図と切片画像の重ね合わせ
(左の試験体は角ログの外縁部に割れがかかっている)

3.1.6 強度性能

人工乾燥後にモルダー仕上げされたスギ心去り平角 255 体から、3 乾燥条件の供試材をそれぞれ 40 体ずつ、合計 120 体の強度試験用の供試材(断面寸法：120 mm×200 mm、材長：4000 mm + α)として選別した。なお、選別の際、3 乾燥条件の人工乾燥前の曲げヤング係数及び人工乾燥後の重量の分布がおおよそ等しくなるように留意した。

すべての供試材は栃木県林業センターへ搬入された後、図 3.1.6-1 の流れにしたがって試験を実施した。まず、図 3.1.6-2 にしたがって、すべての供試材から曲げ試験体、含水率・内部割れ測定用試験体(1) (3.1.5 の切片に相当する) をそれぞれ 1 体ずつ採取し、曲げ試験体については縦振動法によるヤング係数及び TGH 法によるヤング係数とせん断弾性係数を測定した後、曲げ試験に供した。また、含水率・内部割れ測定用試験体は採取直後に木口面のスキャナ画像を 200 dpi の JPEG 形式の電子ファイルとして保存した後、全乾法により含水率(MC(1))を測定した。さらに、曲げ試験終了後の試験体から含水率測定用試験を採取し、全乾法により含水率(MC(2))を測定した。

曲げ試験は、図 3.1.6-3 に示したように、スパンを材せい(200 mm)の 18 倍(3600 mm)とした 3 等分点 4 点荷重方式で実施した。

縦振動法・TGH 法による測定及び曲げ試験の様子を写真 3.1.6-1、3.1.6-2、3.1.6-3 に示した。

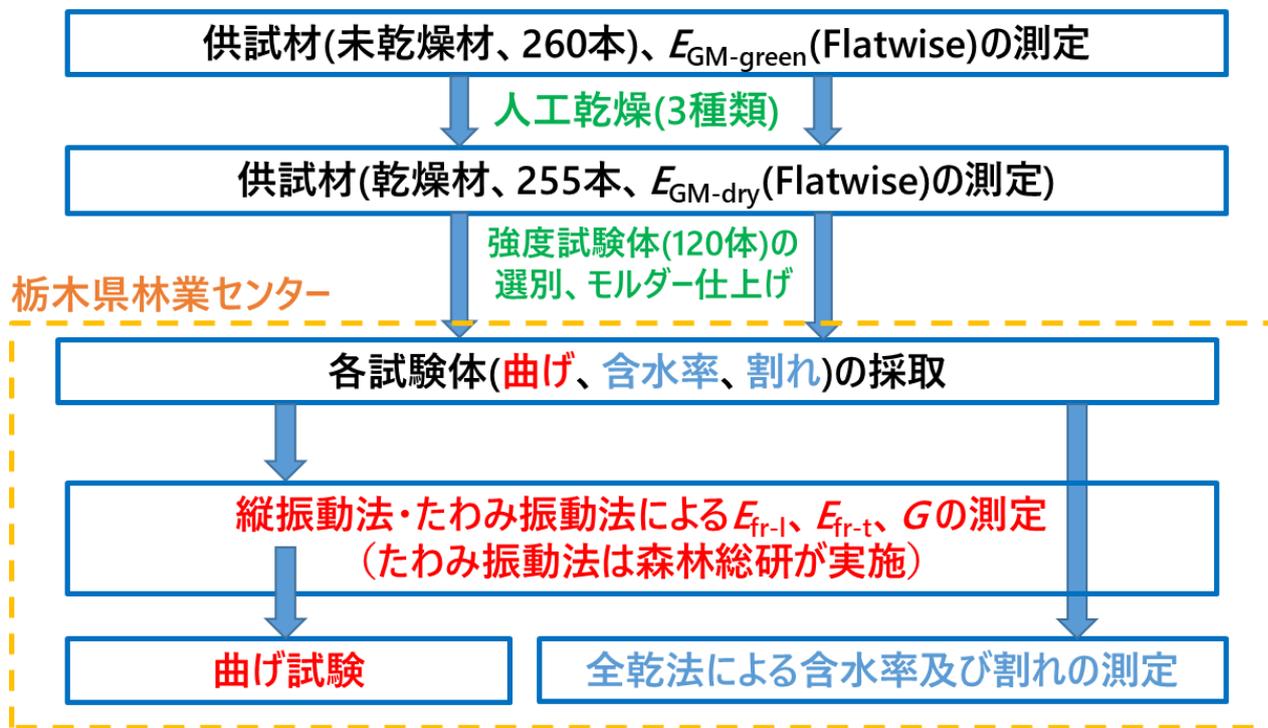


図 3.1.6-1 スギ平角の強度試験の流れ

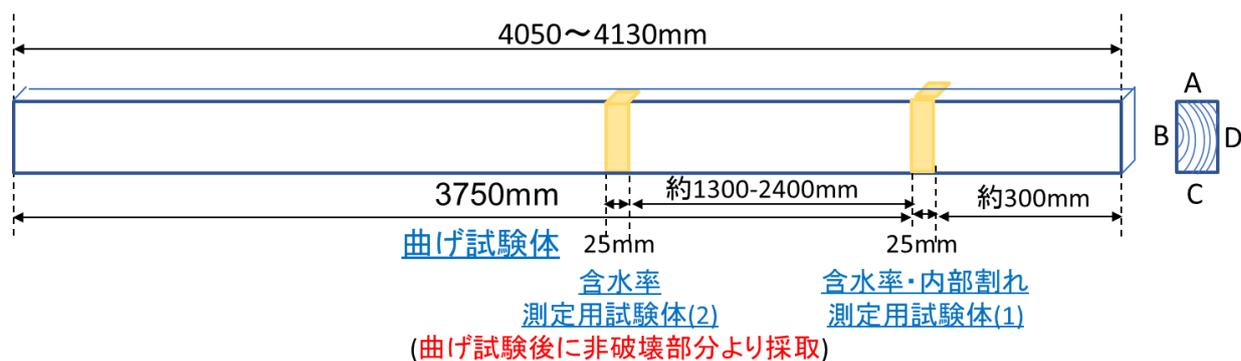


図 3.1.6-2 供試材から各試験体の採取方法

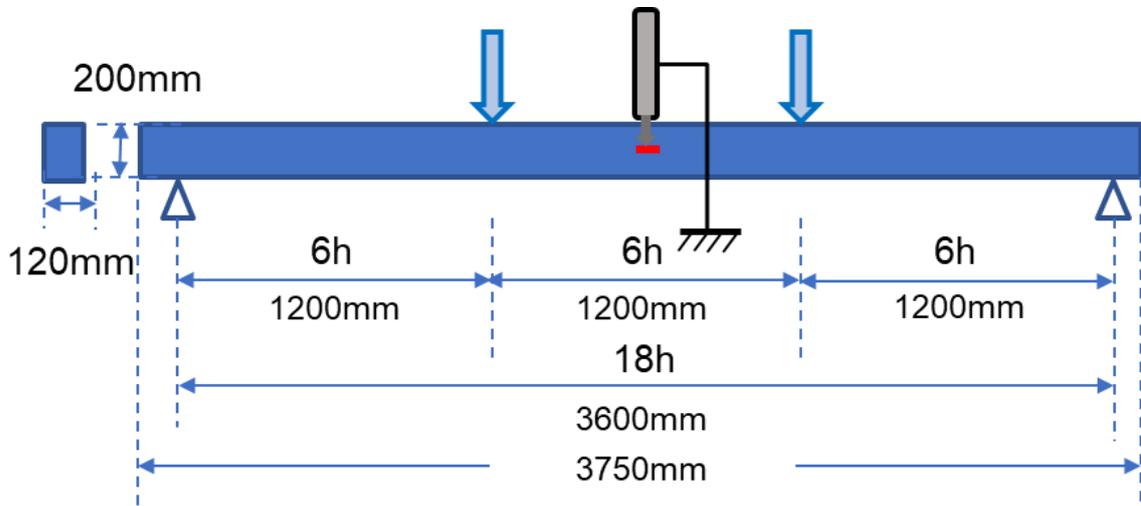


図 3.1.6-3 曲げ試験方法



写真 3.1.6-1 縦振動法による測定の様子



写真 3.1.6-2 TGH 法による測定の様子



写真 3.1.6-3 曲げ試験の様子

3.2 品質・強度性能の調査結果

3.2.1 曲げヤング係数

機械等級区分装置を用いて測定した人工乾燥前のスギ心去り平角 260 本、人工乾燥後のスギ心去り平角 255 本の重量及び曲げヤング係数(E_{b-g} :人工乾燥前の曲げヤング係数、 E_{b-d} :人工乾燥後の曲げヤング係数)を乾燥条件ごとに表 3.2.1-1 に示した。乾燥条件①、②、③において、人工乾燥前の重量の平均値と変動係数はほぼ同等であり、適正なグループ化が実施されたことが示されている。また、仕上がり含水率の違いの影響と考えられるが、人工乾燥後のスギ心去り平角の曲げヤング係数は各乾燥条件でそれぞれ 9%、12%、15%と増加していた。

人工乾燥後のスギ心去り平角の曲げヤング係数の分布及び JAS の機械等級ごとにみた比率を図 3.2.1-1、図 3.2.1-2 に示した。スギ心去り平角の曲げヤング係数の平均値は 7.76 kN/mm^2 であり、全国の平均値に比べてやや高い値であった。JAS の機械等級ごとの比率でみると E70 と E90 とで全体の約 90%を占め、特に梁・桁等の横架材を想定したときに有利と考えられる E90 以上の等級は 47.5%であった。

表 3.2.1-1 機械等級区分装置で測定したスギ心去り平角の重量及び曲げヤング係数

乾燥条件①	乾燥前	重量(kg)	$E_{b-g}(\text{kN/mm}^2)$	乾燥後	重量(kg)	$E_{b-d}(\text{kN/mm}^2)$
	Mean	69.0	7.02	Mean	44.4	7.62
	Min.	47.1	5.08	Min.	35.6	5.69
	Max.	100.9	9.35	Max.	61.0	10.24
	CV (%)	19.1	16.2	CV (%)	12.3	16.1
乾燥条件②	乾燥前	重量(kg)	$E_{b-g}(\text{kN/mm}^2)$	乾燥後	重量(kg)	$E_{b-d}(\text{kN/mm}^2)$
	Mean	70.1	6.93	Mean	42.8	7.77
	Min.	50.8	5.20	Min.	34.7	6.07
	Max.	98.5	9.60	Max.	53.2	10.63
	CV (%)	18.9	14.2	CV (%)	10.3	13.6
乾燥条件③	乾燥前	重量(kg)	$E_{b-g}(\text{kN/mm}^2)$	乾燥後	重量(kg)	$E_{b-d}(\text{kN/mm}^2)$
	Mean	69.0	7.10	Mean	42.1	8.15
	Min.	52.3	4.74	Min.	34.7	5.19
	Max.	96.6	9.33	Max.	54.2	10.34
	CV (%)	15.5	16.1	CV (%)	9.7	15.1

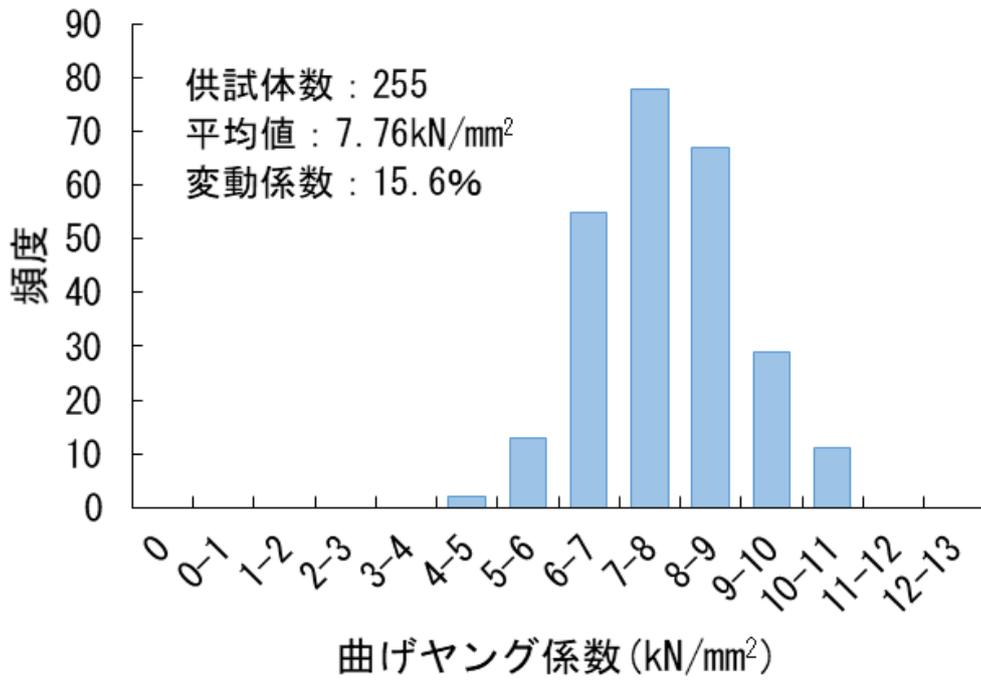


図 3.2.1-1 スギ平角乾燥材の曲げヤング係数の分布

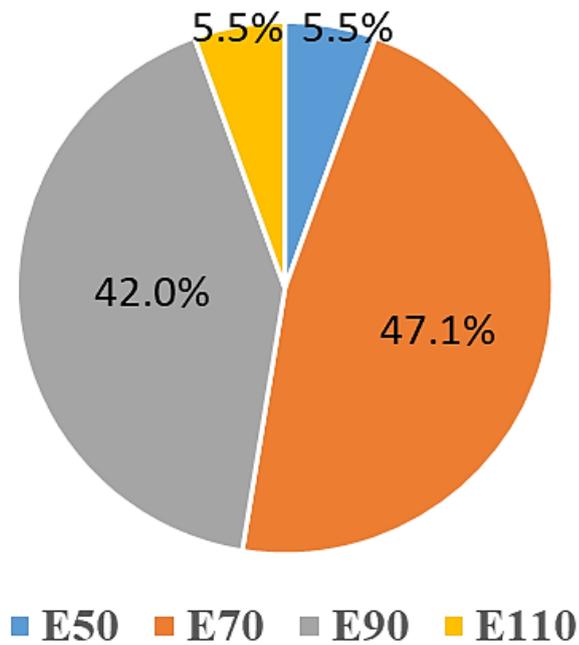


図 3.2.1-2 スギ平角乾燥材の機械等級の比率

3.2.2 目視等級区分

甲種構造材Ⅱの品質基準にしたがった心去り平角 210 本の各等級の割合を図 3.2.2-1 に示した。約 70%が 2 級以上であった。昨年度の人工乾燥前の心去り平角 166 本の等級割合は、1 級 28.3%、2 級 52.4%、3 級 14.5%、等級外 4.8%で、約 80%が 2 級以上であった。甲種構造材Ⅱでは 1 級の比率が少ないこと、また横架材の断面寸法は、曲げ強度やせん断強度よりもたわみ制限、すなわち曲げヤング係数によって決定される場合がほとんどであるため、一般に梁・桁などの大きな断面の横架材は 2 級が使用される。今年度の心去り平角は昨年度のものよりもやや 2 級以上の割合が少なかったが、全体の約 7 割は 2 級以上であり、梁・桁などの横架材として十分利用できると思われる。

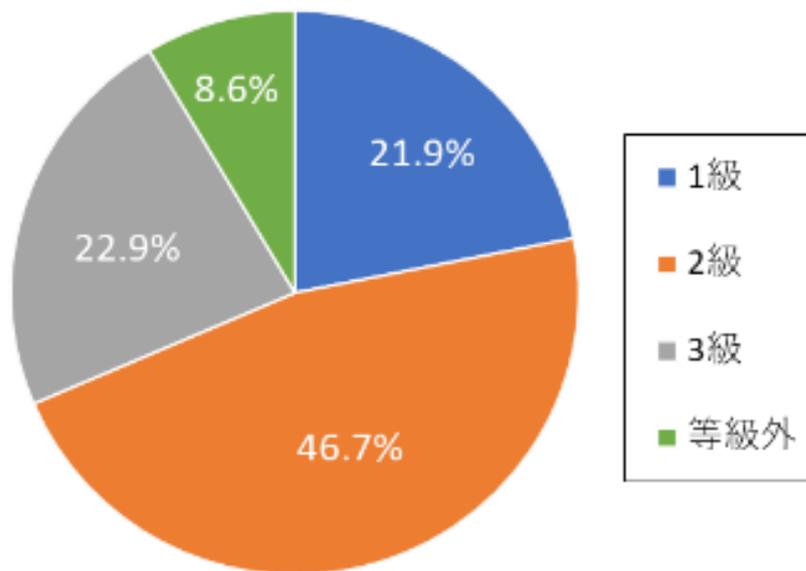


図 3.2.2-1 心去り平角の各等級の割合

甲種構造材Ⅱの 2 級以下の製材について、等級を決定づける因子（表 3.1.2-1）を図 3.2.2-2 に示した。広い材面の材縁部における単独節径比によって決定されているのが 83.0%と最も多く、この要因としては木裏側の広い材面に現れる流れ節が挙げられる。流れ節の評価方法は通常の節とは異なるため、これらの節径の評価も影響していると考えられる。昨年度の人工乾燥前の心去り平角の等級を決定づける因子は、狭い材面の単独節径比及び広い材面の材縁部における単独節径比による場合が合わせて 86.8%であり、今回の心去り平角についても両者の合計は 91.5%であった。その他に分類された要因は、虫、くされが各 1 本であった。

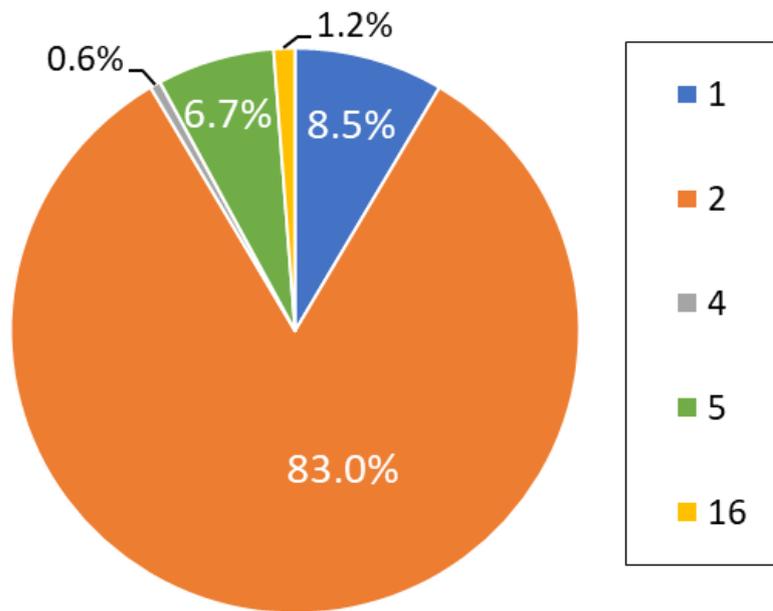


図 3.2.2-2 心去り平角の等級を決定づける因子

各乾燥条件の、各等級の割合及び等級を決定づける因子の割合を図 3.2.2-3、図 3.2.2-4 に示す。乾燥条件によって、等級を決定づける品質への影響はなかった。

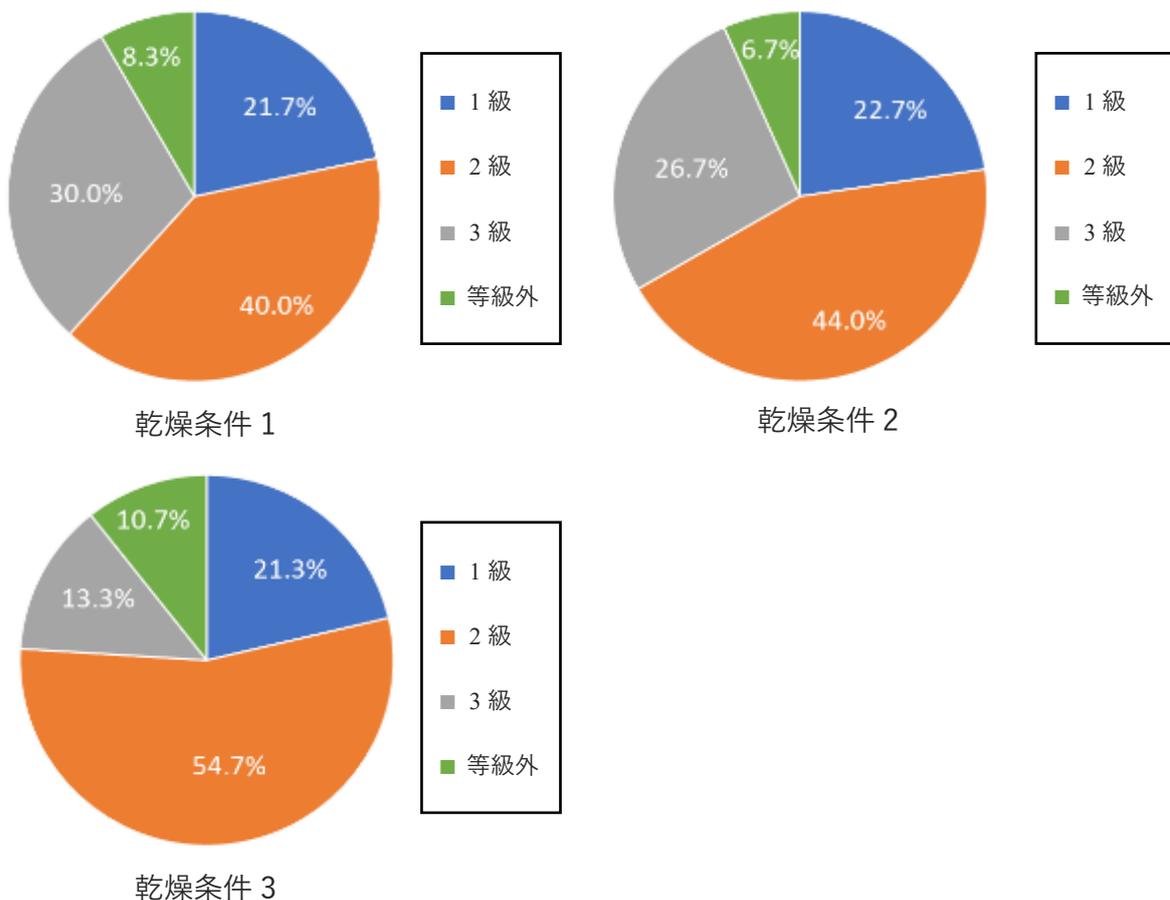


図 3.2.2-3 心去り平角の各等級の割合（乾燥条件別）

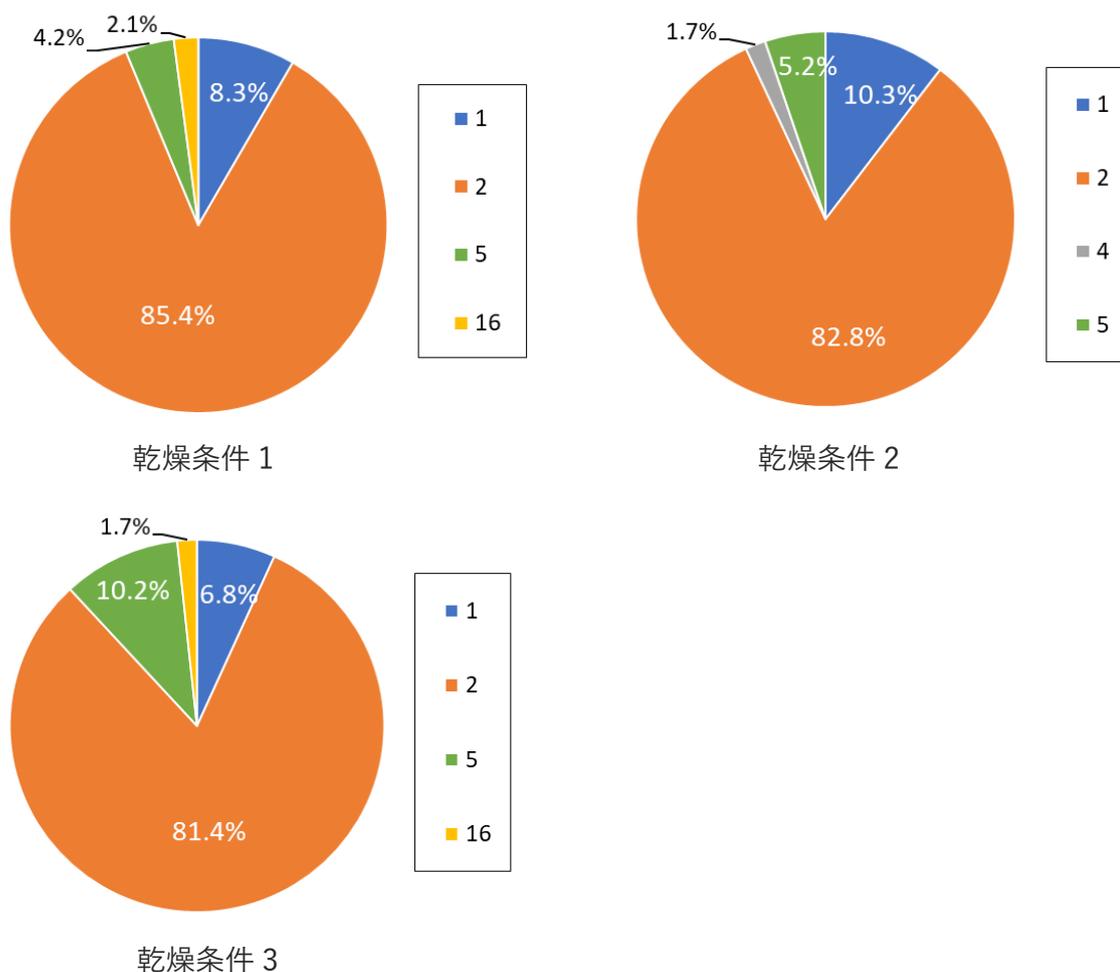


図 3.2.2-4 心去り平角の等級を決定づける因子（乾燥条件別）

3.2.3 寸法変化及び反り・曲がり

製材直後の心去り平角 260 本、人工乾燥後の心去り平角 255 本の乾燥条件別の幅、厚さの測定結果を表 3.2.3-1 に示した。製材寸法（粗挽）は 135×215 mm で、乾燥後の目標寸法を 130×210 mm としていた。人工乾燥後の平均寸法は、厚さ 130.95～132.36 mm、幅 208.16～209.71 mm で、幅方向は目標寸法より若干小さくなっていた。

各乾燥条件における、厚さ方向と幅方向の収縮率を表 3.2.3-2 に示した。厚さ、幅ともに乾燥条件③の収縮率が最も大きかった。強度試験を行った試験体（各乾燥条件 40 本）の全乾法による含水率（MC(1)）と収縮率との関係を図 3.2.3-1、3.2.3-2 に示した。全体的な傾向はいずれの乾燥条件も同じであった。ただし、乾燥条件①②に比べて③では含水率が繊維飽和点以上で収縮率の小さな試験体が少なく、このことが乾燥条件③の平均収縮率が大きくなった理由であると考えられる。

製材直後の心去り平角 24 本、及び各乾燥条件につき 20 本の人工乾燥後の反り・曲がりの測定結果を表 3.2.3-3 に示す。製材時に修正挽きを行っているため、製材直後の反り・曲がりは平均 2 mm 程度と小さかった。人工乾燥後の反り・曲がりは製材直後よりも増加する傾向があったが、乾燥条件による違いは認められなかった。

表 3.2.3-1 心去り平角の寸法

乾燥条件	厚さ (mm)				幅 (mm)			
	製材直後		人工乾燥後		製材直後		人工乾燥後	
		①	②	③		①	②	③
測定本数	260	85	85	85	260	85	85	85
平均値	135.71	132.36	131.72	130.95	214.87	209.71	208.78	208.16
最小値	132.42	128.99	129.34	128.84	210.15	204.95	204.50	202.58
最大値	139.54	135.91	135.98	134.58	216.75	214.99	212.84	213.81
標準偏差	0.76	1.47	1.46	1.24	0.78	2.20	2.17	2.25

表 3.2.3-2 心去り平角の収縮率

乾燥条件	厚さ方向 (%)			幅方向 (%)		
	①	②	③	①	②	③
測定本数	85	85	85	85	85	85
平均値	2.45	2.97	3.48	2.44	2.83	3.12
最小値	-0.47	-0.07	0.79	0.12	0.89	0.74
最大値	4.42	7.27	5.40	4.22	4.43	5.06
標準偏差	1.14	1.17	0.89	0.92	0.91	0.92

表 3.2.3-3 心去り平角の反り・曲がり

乾燥条件	反り (mm)				曲がり (mm)			
	製材直後		人工乾燥後		製材直後		人工乾燥後	
		①	②	③		①	②	③
測定本数	24	20	20	20	24	20	20	20
平均値	2.08	4.45	4.10	2.75	1.79	2.75	3.80	2.70
最小値	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0
最大値	5.0	11.0	9.0	7.0	2.0	10.0	17.0	9.0
標準偏差	1.14	2.80	2.10	1.89	0.41	1.97	4.26	1.63

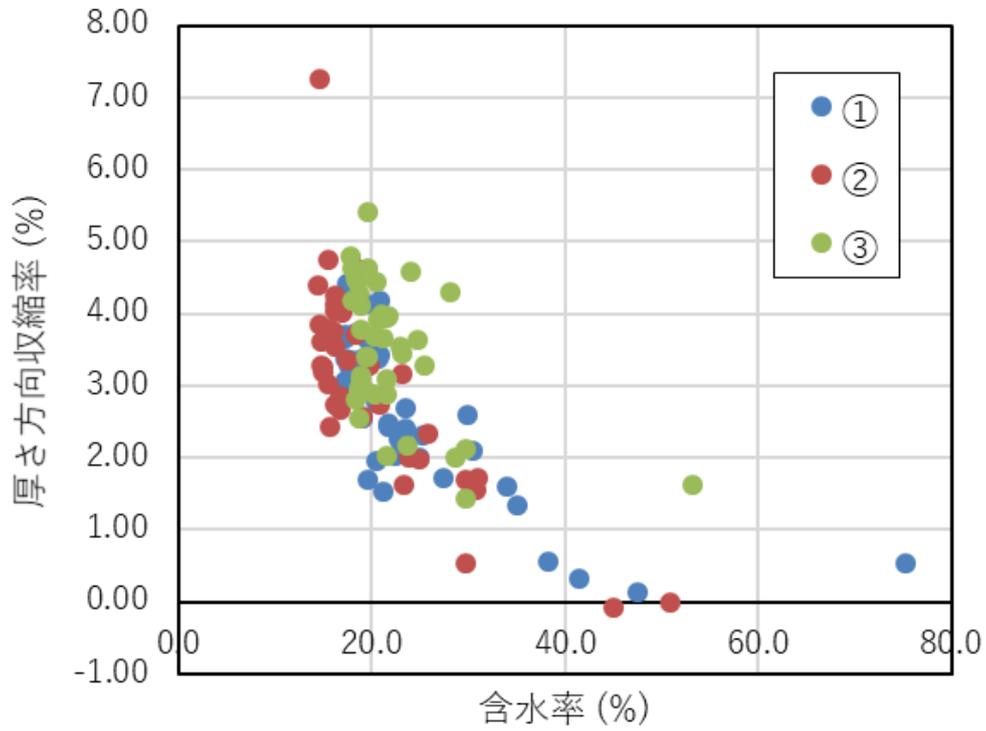


図 3.2.3-1 心去り平角の含水率と厚さ方向収縮率の関係

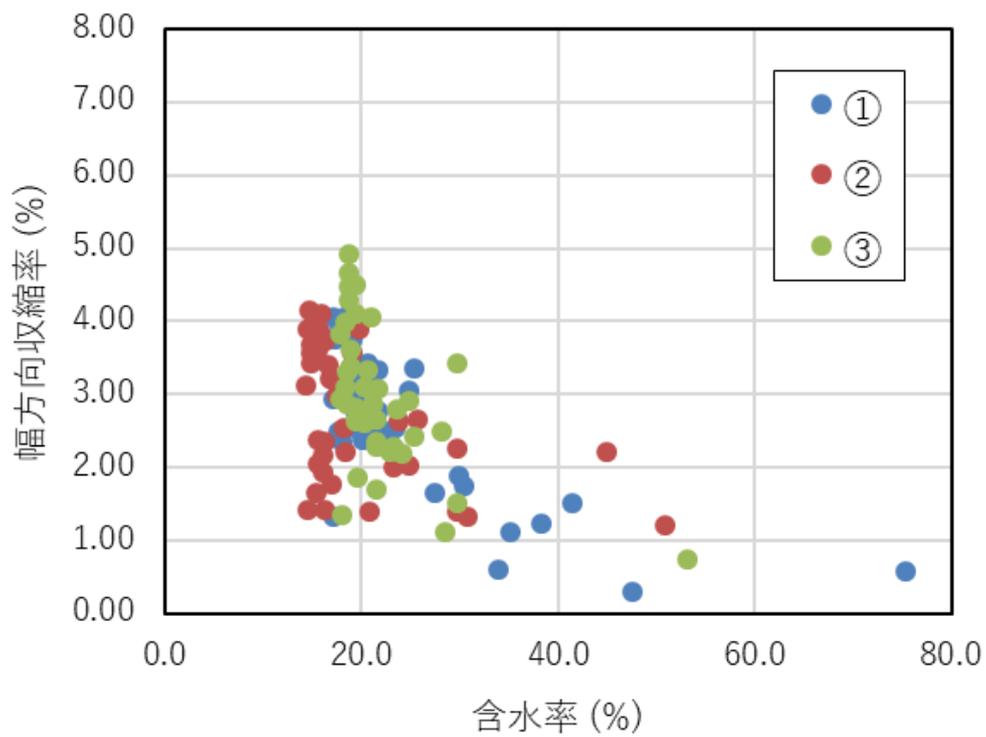


図 3.2.3-2 心去り平角の含水率と幅方向収縮率の関係

3.2.4 含水率

乾燥条件ごとに仕上げ加工後及び強度試験後の含水率分布をそれぞれ図 3.2.4-1、図 3.2.4-2 に、それらの基本統計量を表 3.2.4-1 に示す。仕上げ加工後の含水率は、乾燥条件①の平均が最も高く 24.5%、乾燥条件②が最も低く 20.2%であった。いずれの乾燥条件も 20%付近を中心に右側に裾の広い分布であった。また、中央値が 16.5%~20.7%と平均値より数パーセント低く、一部の含水率の高いデータに平均値が引っ張られていることがわかる。

一方、強度試験後の含水率の平均値は 14.1%~18.7%となり、仕上げ加工後の含水率と同様、3条件の中で乾燥条件①の平均が最も高かった。ただし、いずれの乾燥条件も大部分の試験体では含水率が目標値の 20%を下回っており、昨年度の乾燥試験でみられた含水率 10%を下回る過乾燥材の割合も少なかったことから、3条件ともに概ね適切な含水率範囲に収まったと考えられる。

仕上げ加工後に比べて強度試験後の平均含水率は約 6%低かった。1か月間の養生にしては含水率が低下しすぎに思われたため、含水率の測定法やデータを見直したが、養生による含水率低下以外に特段の理由は見当たらなかった。

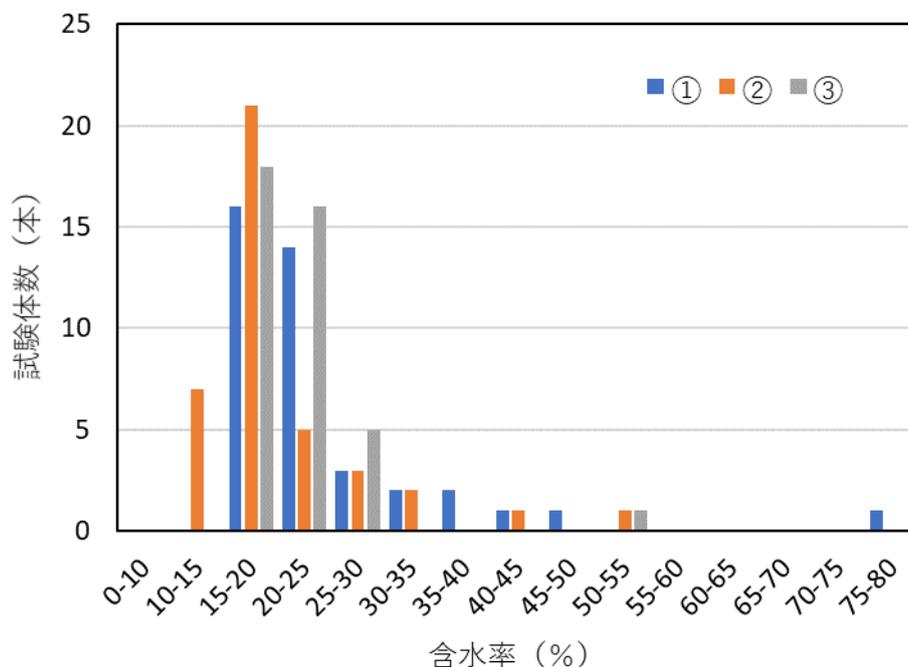


図 3.2.4-1 各乾燥条件における仕上げ加工後の含水率分布

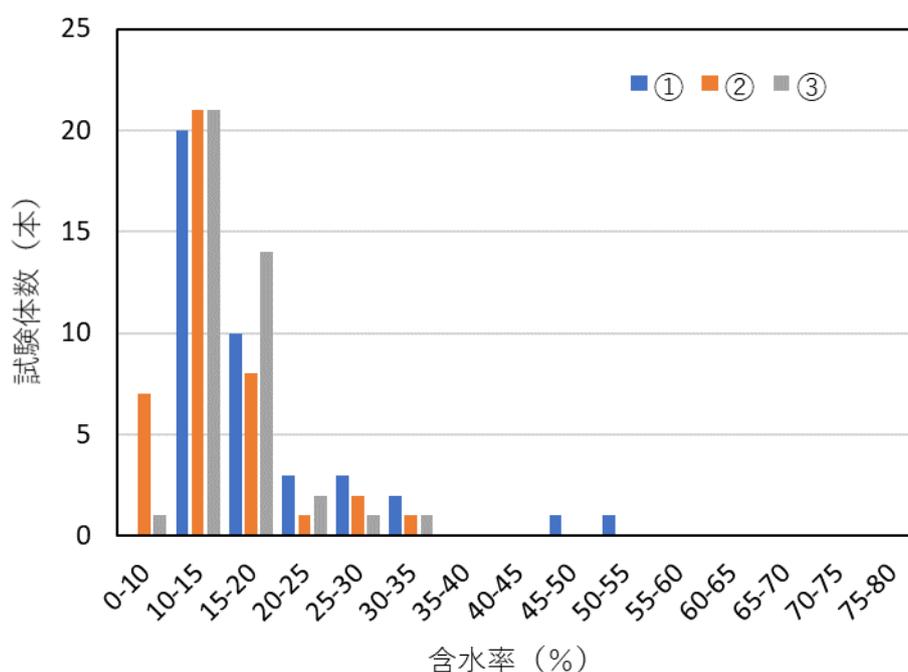


図 3.2.4-2 各乾燥条件における強度試験後の含水率分布

表 3.2.4-1 各乾燥条件における仕上げ加工後及び強度試験後の含水率

乾燥条件	仕上げ加工後の含水率 (%)			強度試験後の含水率 (%)		
	①	②	③	①	②	③
平均値	24.5	20.2	22.1	18.7	14.1	15.2
中央値	20.7	16.5	20.4	15.1	12.2	14.3
標準偏差	10.8	8.0	5.9	9.3	5.4	4.8
最大値	75.3	50.9	53.2	55.0	32.4	33.9
最小値	17.2	14.4	17.8	10.6	8.4	9.8

乾燥前の推定含水率を乾燥条件ごとに表 3.2.4-2 に示す。この推定値は実際の含水率より若干高い値を示すことに注意したい。乾燥条件間で平均値に大きな差はみられなかった。いずれも最小値と最大値の差が 150%程度あり、含水率のばらつきが非常に大きいことがわかる。また、乾燥前の平均含水率は 93.9%~100.6%と推定された。昨年度用いた試験体の乾燥前の推定含水率は平均 79.9%~93.4%であったことから、今回用いた試験体の含水率は昨年度より 10%程度高かったと考えられる。

表 3.2.4-2 各乾燥条件における乾燥前の推定含水率

乾燥前の推定含水率 (%)			
乾燥条件	①	②	③
平均値	93.9	97.6	100.6
中央値	91.2	91.7	97.0
標準偏差	33.7	37.5	30.9
最大値	207.2	207.8	216.1
最小値	43.5	50.6	55.3

ログ加工時に試験体の隣接部から採取した切片の含水率を表 3.2.4-3 に示す。乾燥条件によって含水率に差はみられず、平均値は 14.9%~16.5%、中央値は 13.3%~13.8%、最大値は約 30%、最小値は約 10%であった。

表 3.2.4-3 各乾燥条件におけるログ加工時の含水率

含水率 (%)			
乾燥条件	①	②	③
試験体数	16	12	12
平均値	14.9	16.5	16.1
中央値	13.8	13.3	13.6
標準偏差	3.4	6.9	6.0
最大値	23.6	30.7	29.2
最小値	11.2	10.2	9.8

3.2.5 内部割れ

スキャナで撮影した切片の横断面画像を写真 3.2.5-1~写真 3.2.5-42 に示す。昨年度と同様、表面割れは長辺の板目部分に、内部割れは断面内の中央付近に長辺と垂直方向に発生する傾向がみられた。また、大径材から心去り平角を 2 丁取りしたが、一部の試験体には髄が含まれており、髄割れが散見された。

表 3.2.5-1 に表面割れ及び内部割れが発生した試験体数を乾燥スケジュールごとに示す。乾燥条件間で試験体数に差は認められず、乾燥条件①で 40 本中 8 本に、乾燥条件②で 9 本に、乾燥条件③で 7 本に表面割れが発生した。乾燥条件①については昨年度に同じスケジュールで乾燥試験を

実施しており、そのときは 22 本中 1 本に表面割れが見られ、昨年度に比べて今回は表面割れの発生する試験体の割合が大きかった。

表面割れの発生した試験体数は乾燥スケジュール①と②でほぼ同じであったことから、心去り平角では高温セット処理を施さなくても、表面割れはそれほど発生しないことが示された。これは心持ち平角には無い利点である。ただし裏を返すと、今回の 120°C10 時間の高温セット処理は表面割れの抑制にあまり効果がなかった可能性があり、処理時間を長くすることが可能かどうか検討する余地が残されている。

内部割れの発生した試験体数は、乾燥条件①で 40 本中 11 本、乾燥条件②で 19 本、乾燥条件③で 25 本であった。乾燥条件③が最も内部割れが発生しやすく、半数以上の試験体に内部割れが見られた。通常は、高温セット処理を施すと、表面割れが抑制されるのに対して内部割れが発生しやすくなる。しかし、今回の結果では乾燥条件②に比べて高温セット処理を行った乾燥条件①の方が内部割れの発生した試験体数が少なく、この原因については不明である。

内部割れの総長さ（表 3.2.5-2）については、乾燥条件①で平均 13.9 mm、乾燥条件②で平均 21.4 mm、乾燥条件③で平均 52.6 mm であった。天然乾燥を省略した乾燥条件③の内部割れ総長さは乾燥条件①②の 2 倍以上であり、2 次乾燥の前に天然乾燥を行うことによって、内部割れの発生が大きく軽減されることが明らかとなった。時間をかけて緩やかに乾燥することによって乾燥応力の発生が抑えられ、かつ発生した乾燥応力が天然乾燥中に緩和されたのではないかと推察される。

写真 3.2.5-29～写真 3.2.5-42 の横断面画像から見て取れるように、乾燥スケジュール③は内部割れの発生量が比較的多く、長辺を横切る大きな内部割れが散見された。ログ工法は耐力壁相互の交さ部において耐力壁の最上部から土台等までを貫く通しボルトで連結するため、雨水が侵入した場合にこれらの内部割れを伝わって腐れが進行するなどの恐れがある。したがって、乾燥条件③のスギ心去りログ材を使用する場合には雨水の侵入への対策を講じる必要があると考えられる。

含水率と内部割れの総長さの関係を乾燥条件ごとに示す（図 3.2.5-1～図 3.2.5-3）。全体的に繊維飽和点以上では内部割れは発生せず、試験体の含水率が 20%を下回るあたりから急激に内部割れ総長さに増加する傾向がみられた。ただし、乾燥条件③においては含水率 20%以上の試験体においても相当量の内部割れが発生しており、これは昨年度と異なる結果であった。

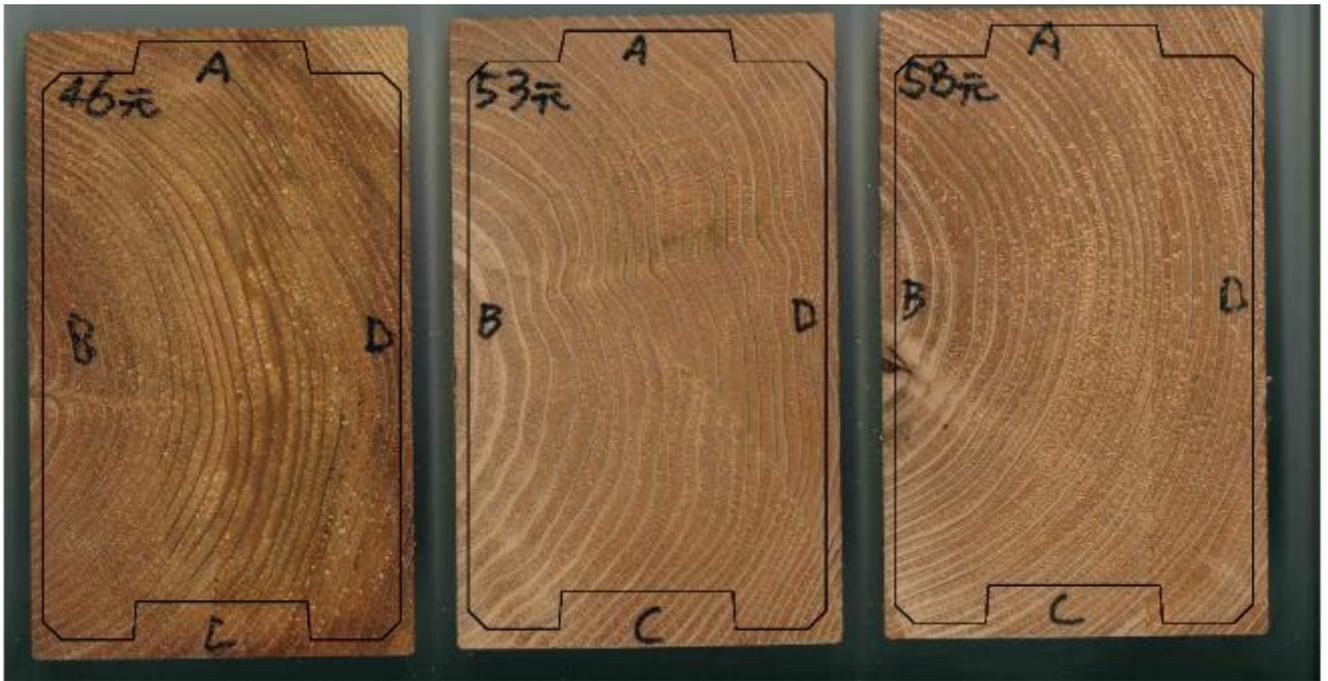


写真 3.2.5-1 乾燥スケジュール①の切片画像（その1）と重ね合わせた角ログ断面図

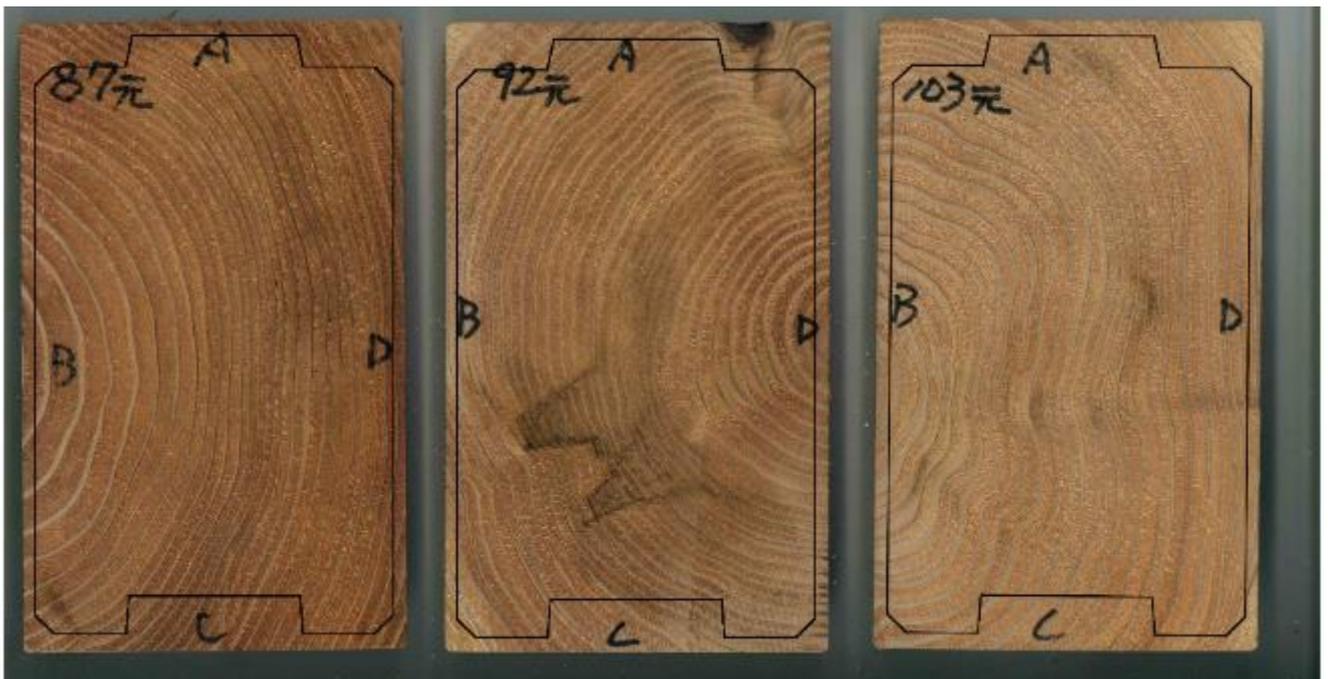


写真 3.2.5-2 乾燥スケジュール①の切片画像（その2）と重ね合わせた角ログ断面図

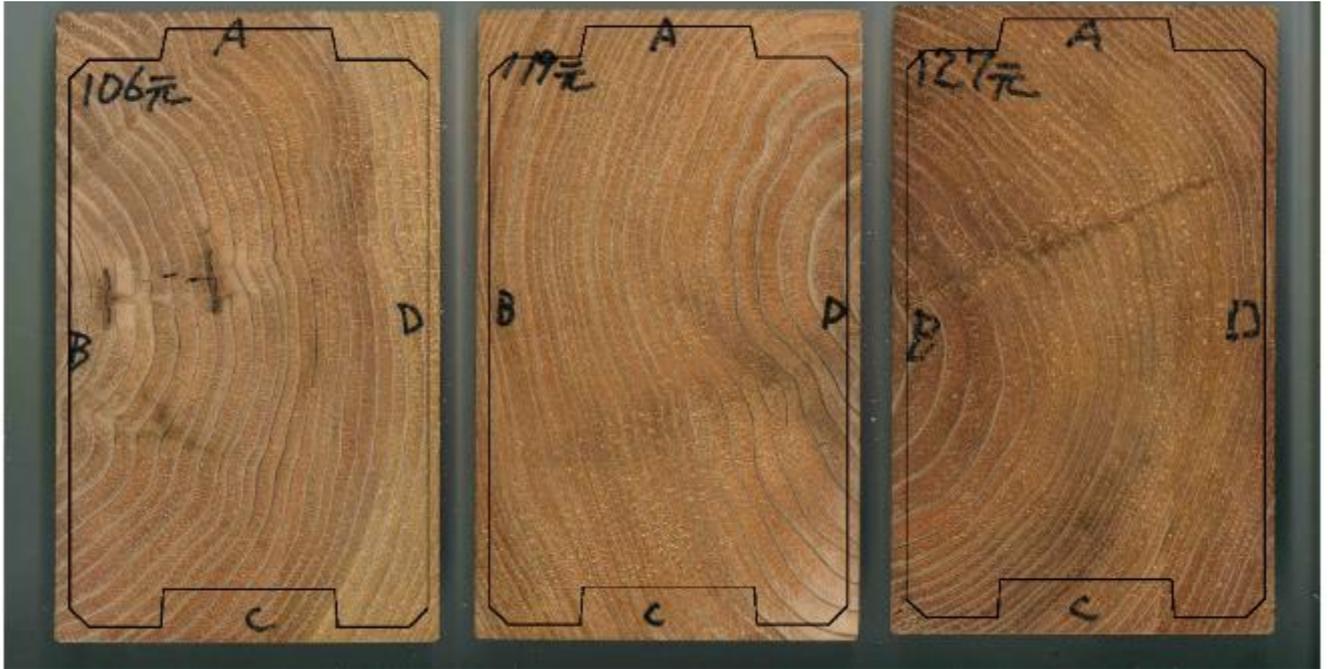


写真 3.2.5-3 乾燥スケジュール①の切片画像（その 3）と重ね合わせた角ログ断面図

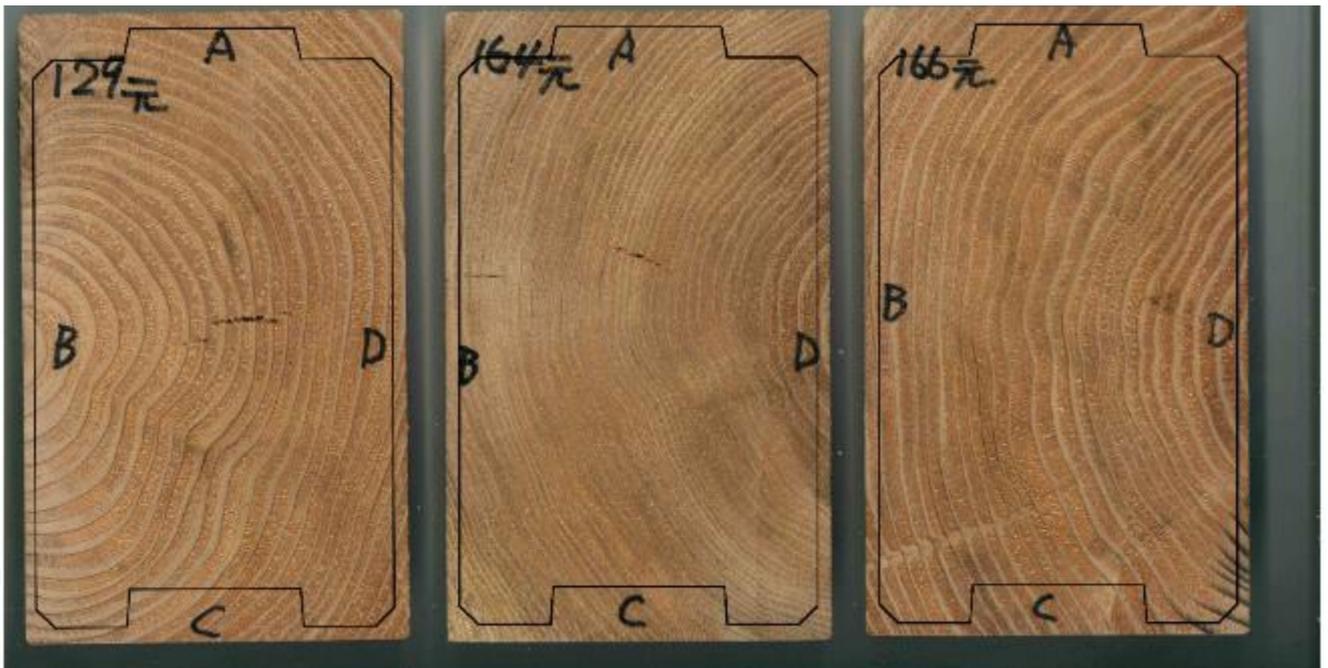


写真 3.2.5-4 乾燥スケジュール①の切片画像（その 4）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-5 乾燥スケジュール①の切片画像（その 5）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-6 乾燥スケジュール①の切片画像（その 6）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-7 乾燥スケジュール①の切片画像（その 7）と重ね合わせた角ログ断面図

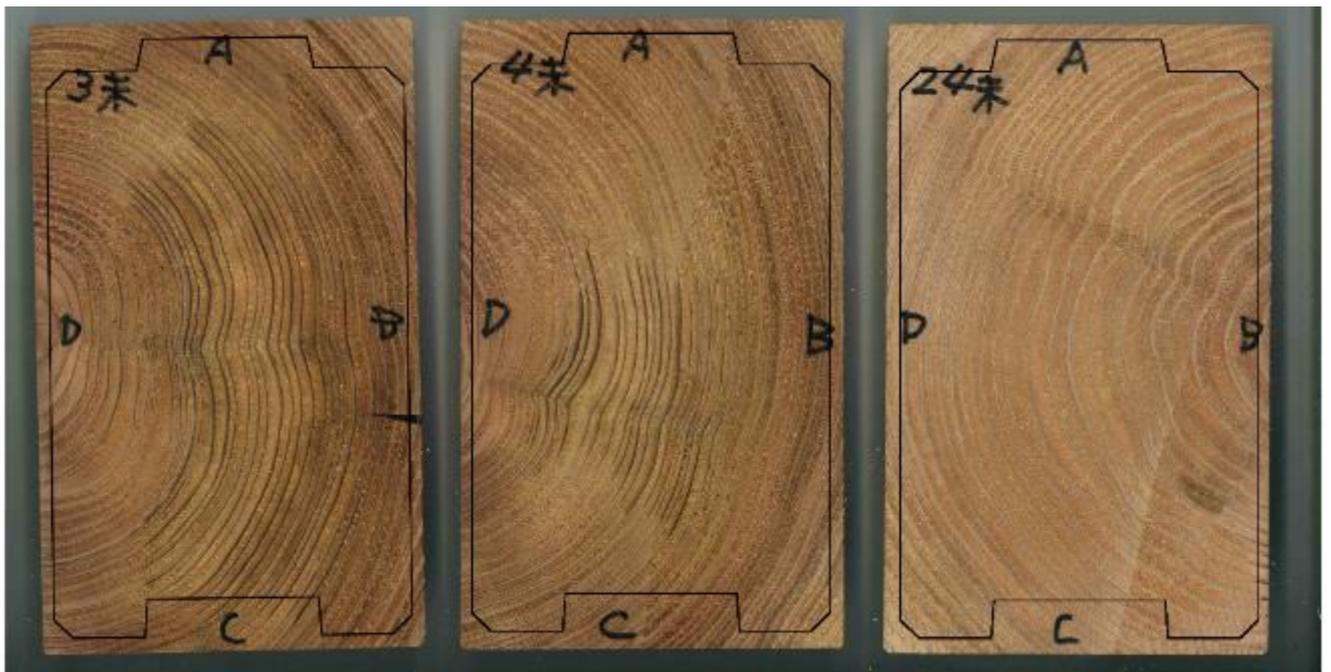


写真 3.2.5-8 乾燥スケジュール①の切片画像（その 8）と重ね合わせた角ログ断面図

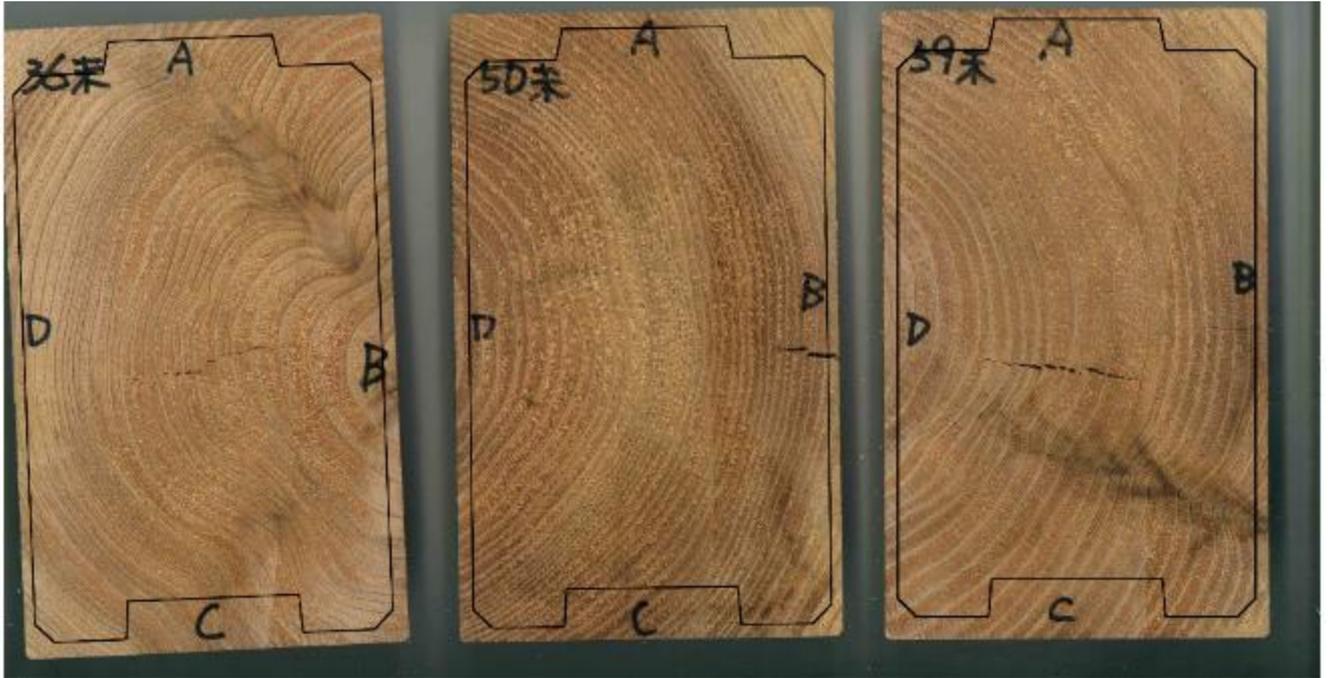


写真 3.2.5-9 乾燥スケジュール①の切片画像（その 9）と重ね合わせた角ログ断面図

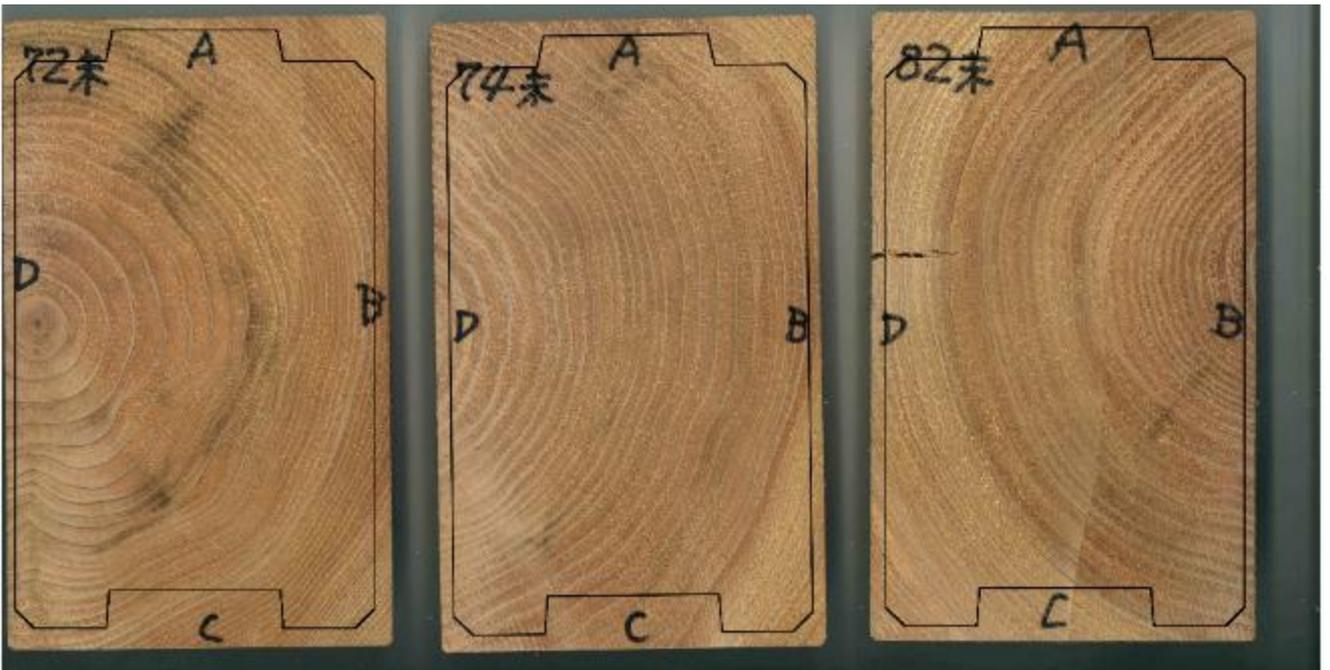


写真 3.2.5-10 乾燥スケジュール①の切片画像（その 10）と重ね合わせた角ログ断面図

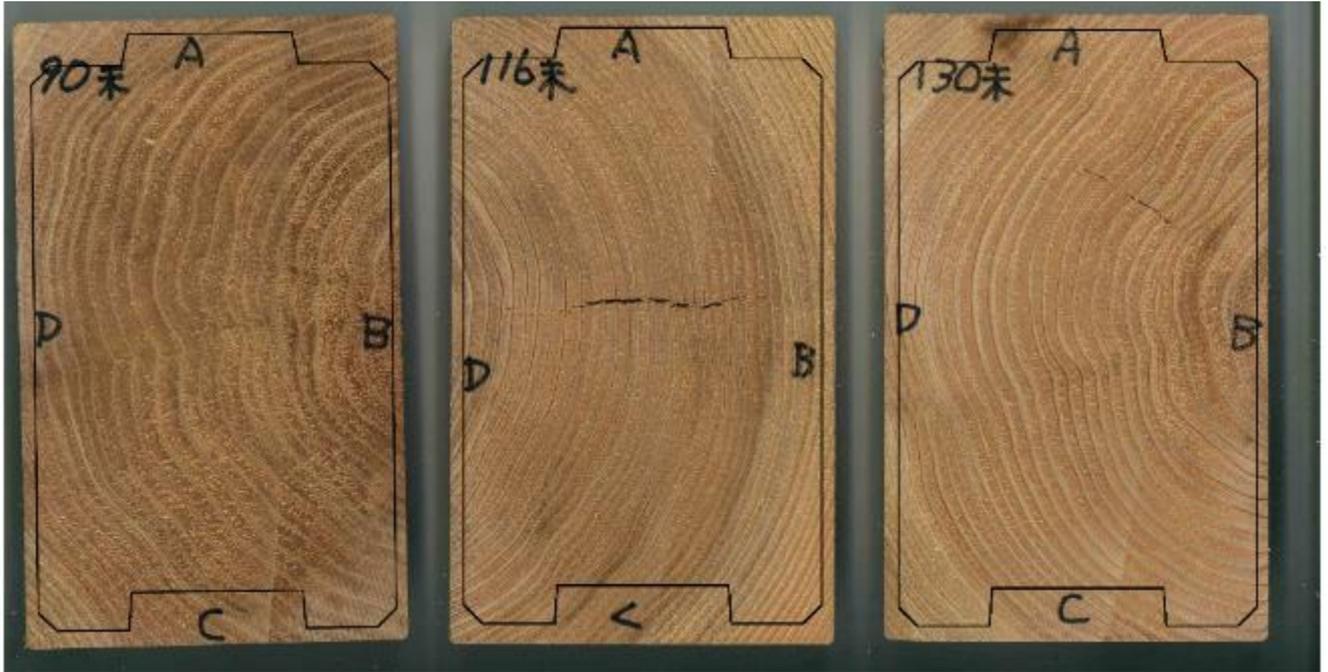


写真 3.2.5-11 乾燥スケジュール①の切片画像（その 11）と重ね合わせた角ログ断面図

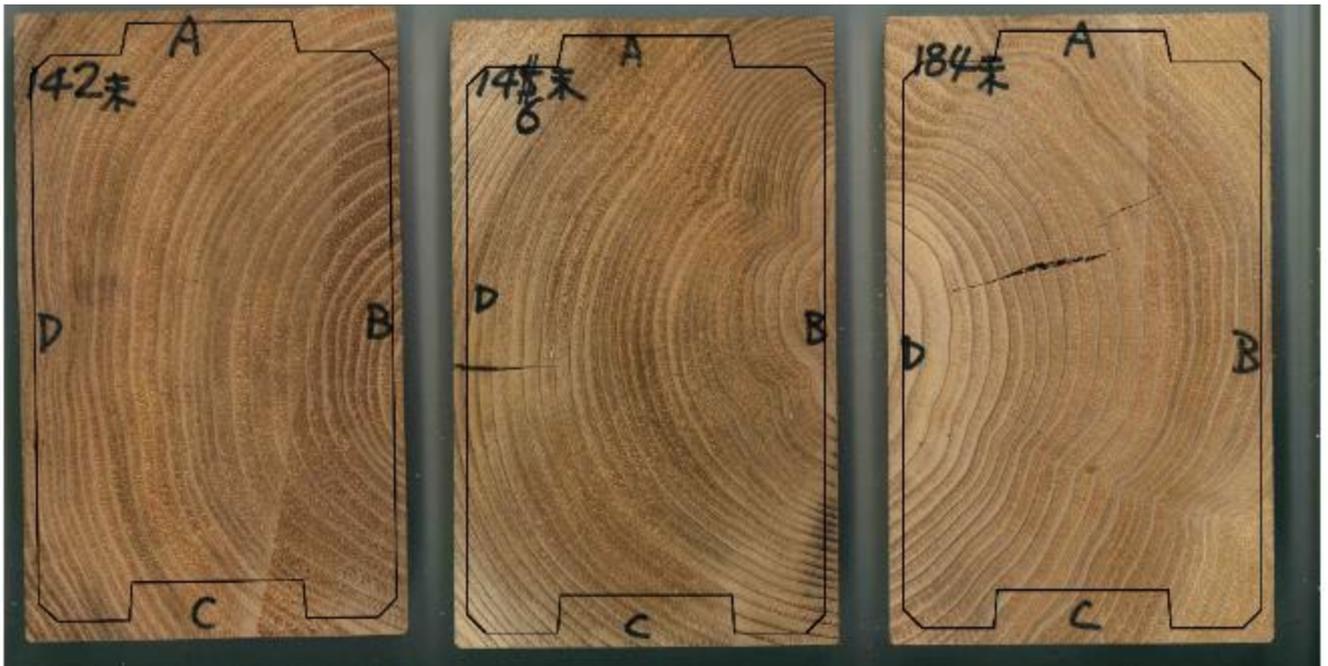


写真 3.2.5-12 乾燥スケジュール①の切片画像（その 12）と重ね合わせた角ログ断面図

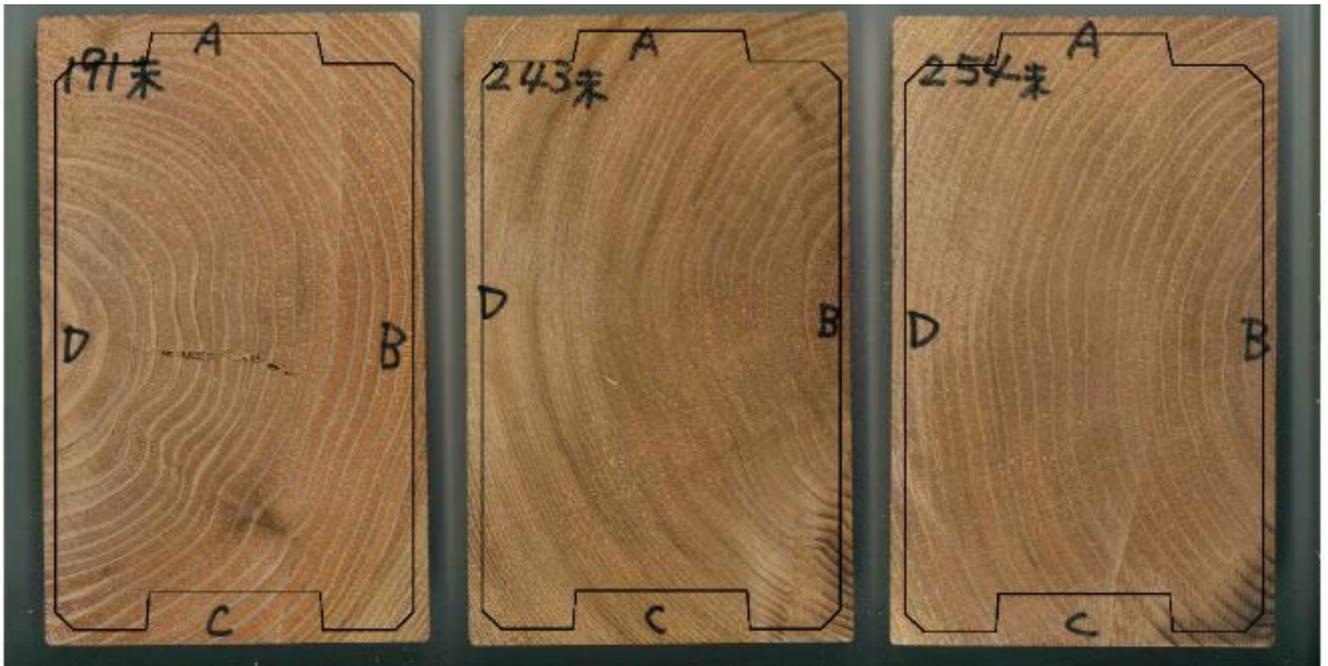


写真 3.2.5-13 乾燥スケジュール①の切片画像（その 13）と重ね合わせた角ログ断面図

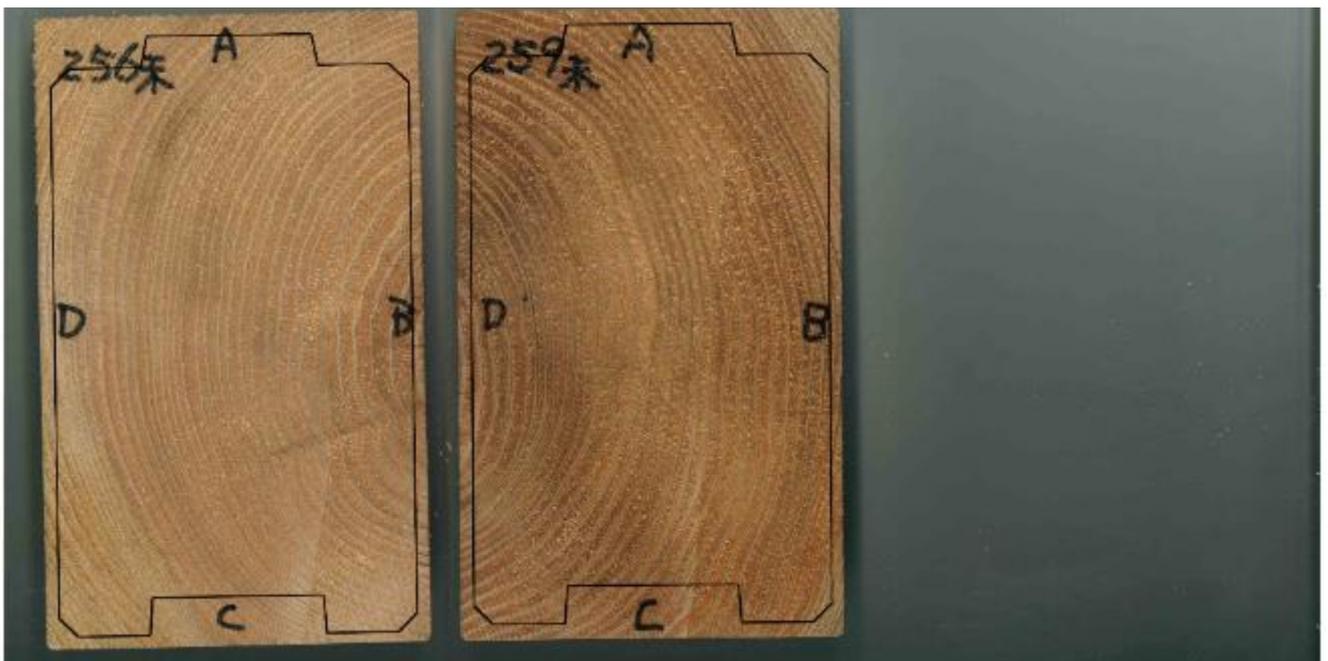


写真 3.2.5-14 乾燥スケジュール①の切片画像（その 14）と重ね合わせた角ログ断面図

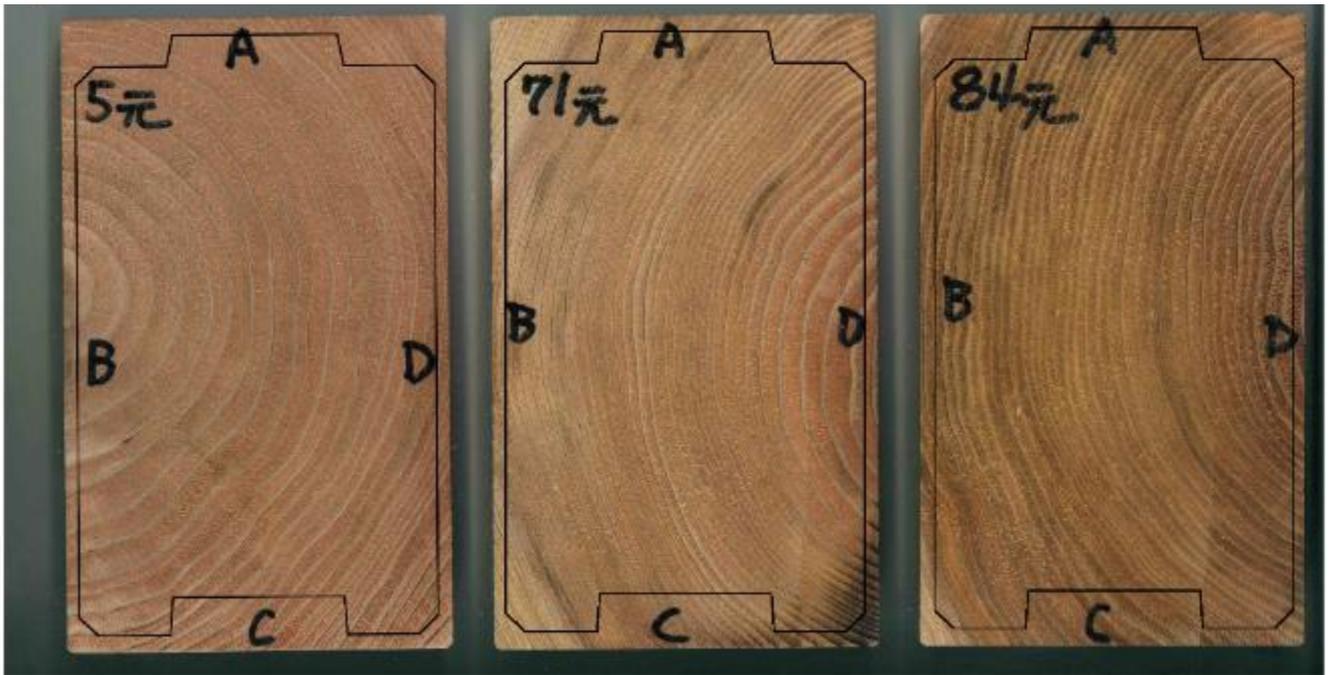


写真 3.2.5-15 乾燥スケジュール②の切片画像（その 1）と重ね合わせた角ログ断面図

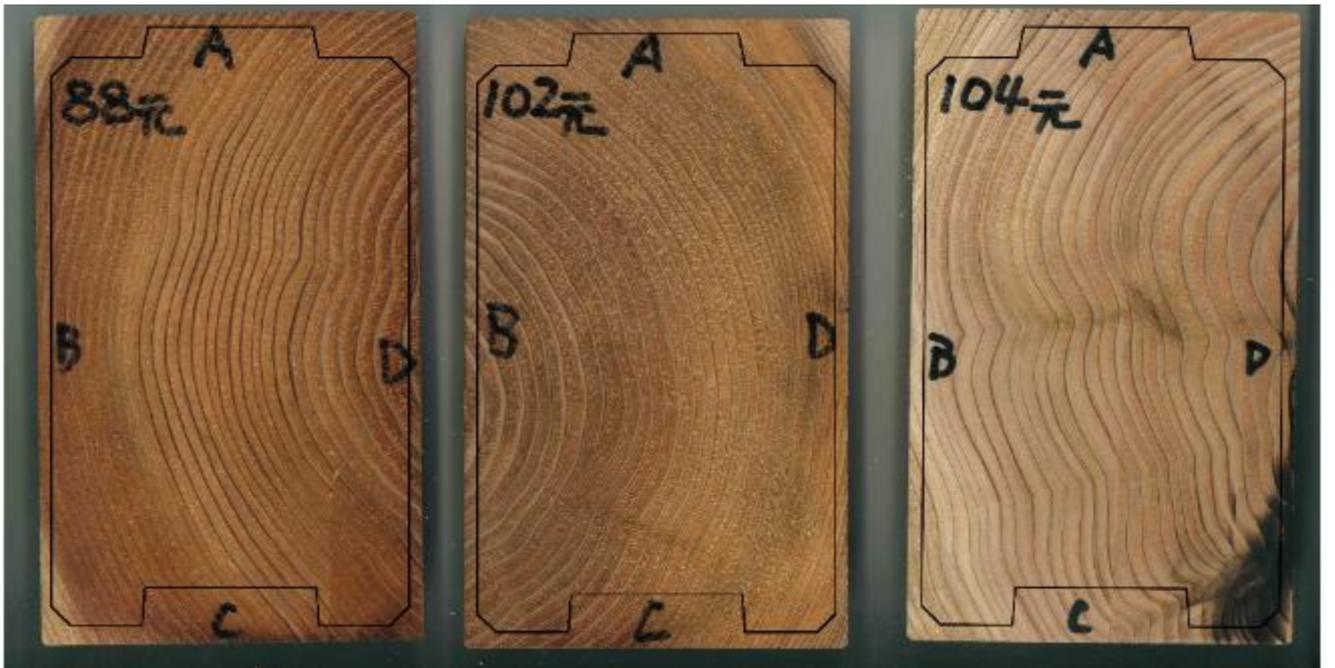


写真 3.2.5-16 乾燥スケジュール②の切片画像（その 2）と重ね合わせた角ログ断面図

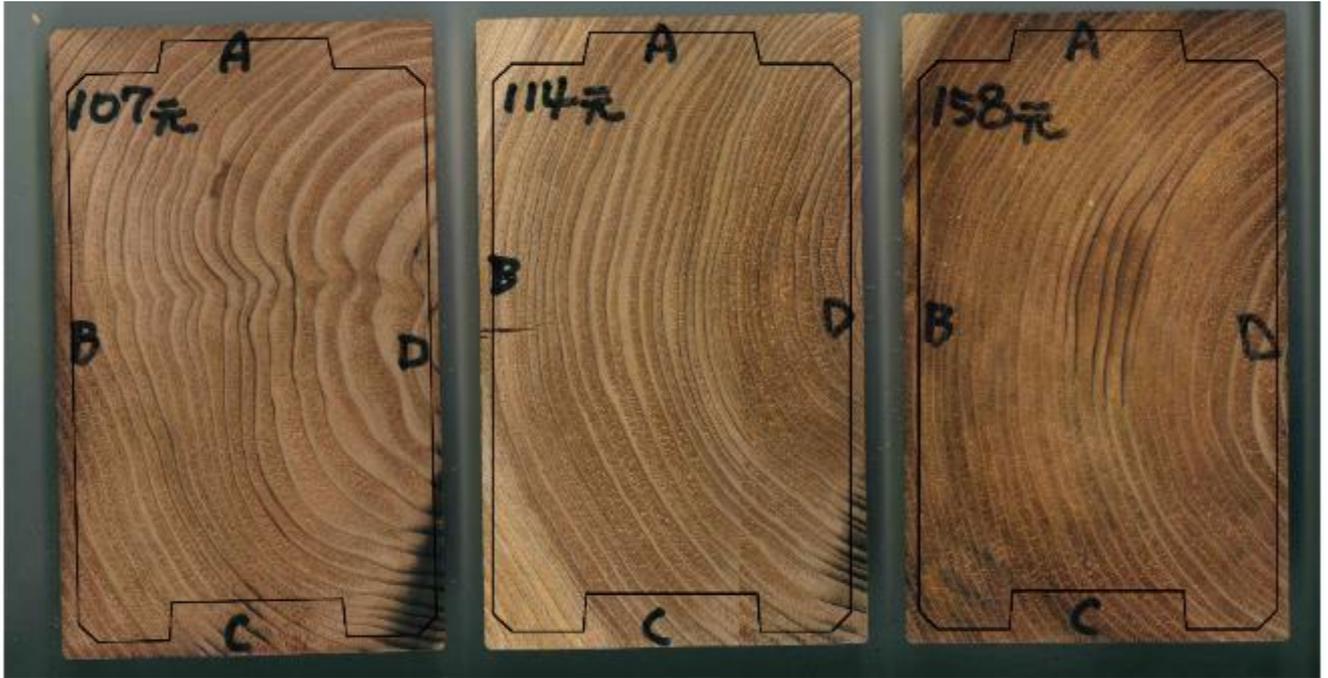


写真 3.2.5-17 乾燥スケジュール②の切片画像（その 3）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-18 乾燥スケジュール②の切片画像（その 4）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-19 乾燥スケジュール②の切片画像（その 5）と重ね合わせた角ログ断面図

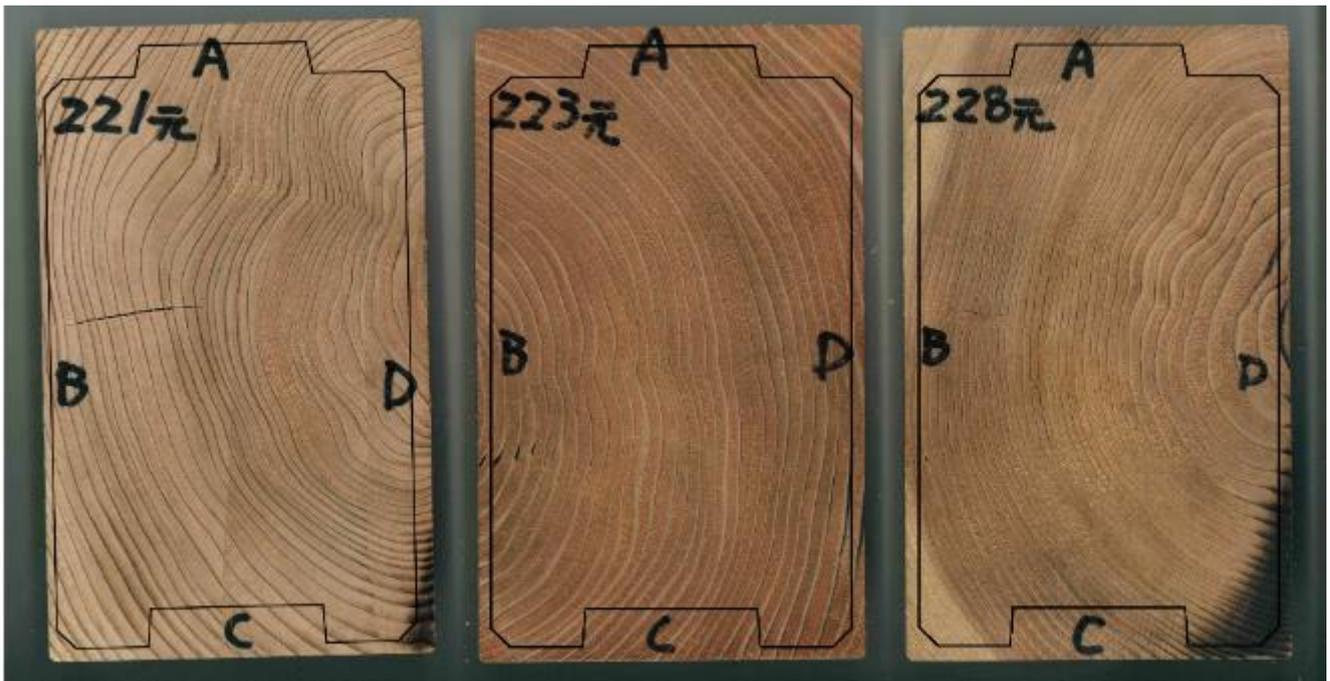


写真 3.2.5-20 乾燥スケジュール②の切片画像（その 6）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-21 乾燥スケジュール②の切片画像（その 7）と重ね合わせた角ログ断面図

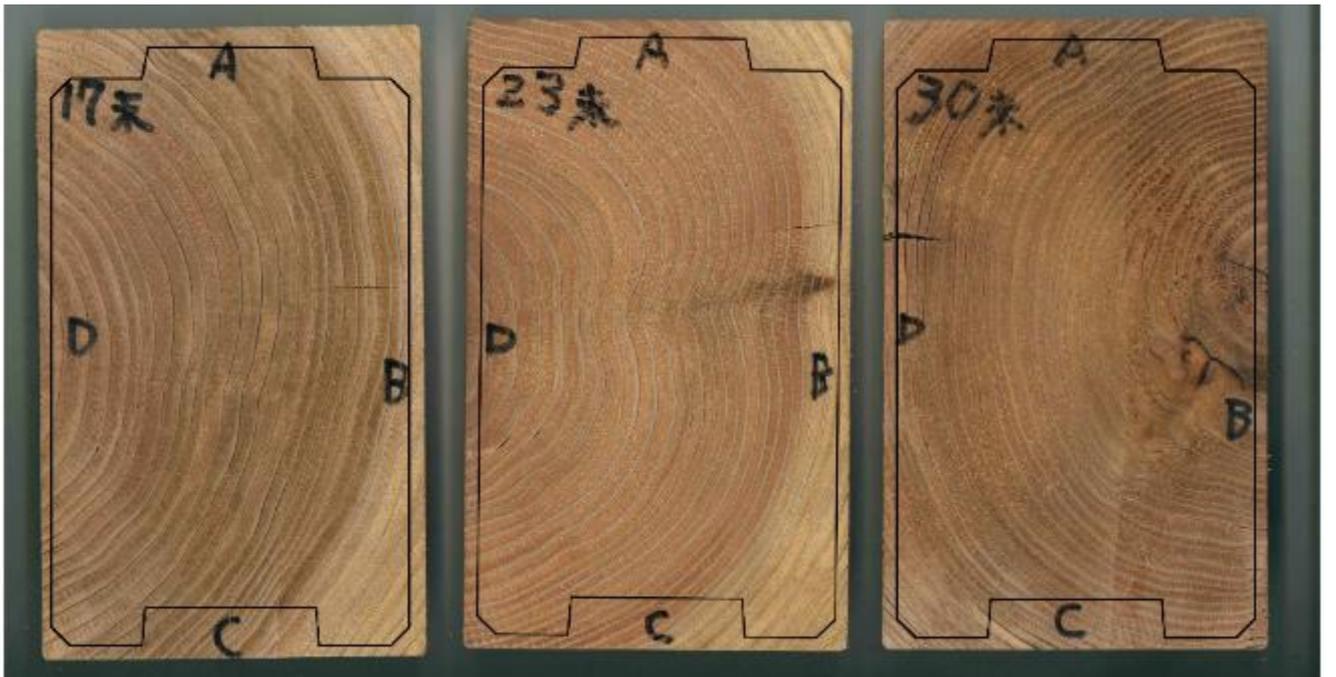


写真 3.2.5-22 乾燥スケジュール②の切片画像（その 8）と重ね合わせた角ログ断面図

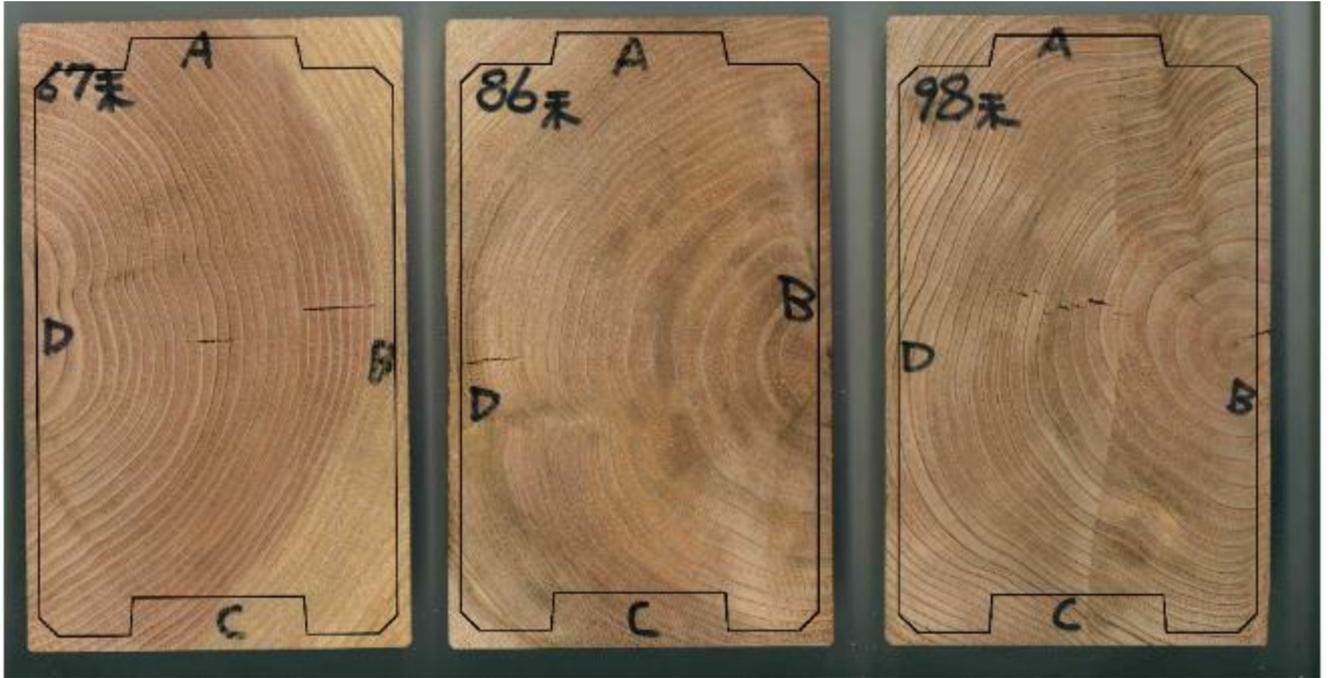


写真 3.2.5-23 乾燥スケジュール②の切片画像（その 9）と重ね合わせた角ログ断面図

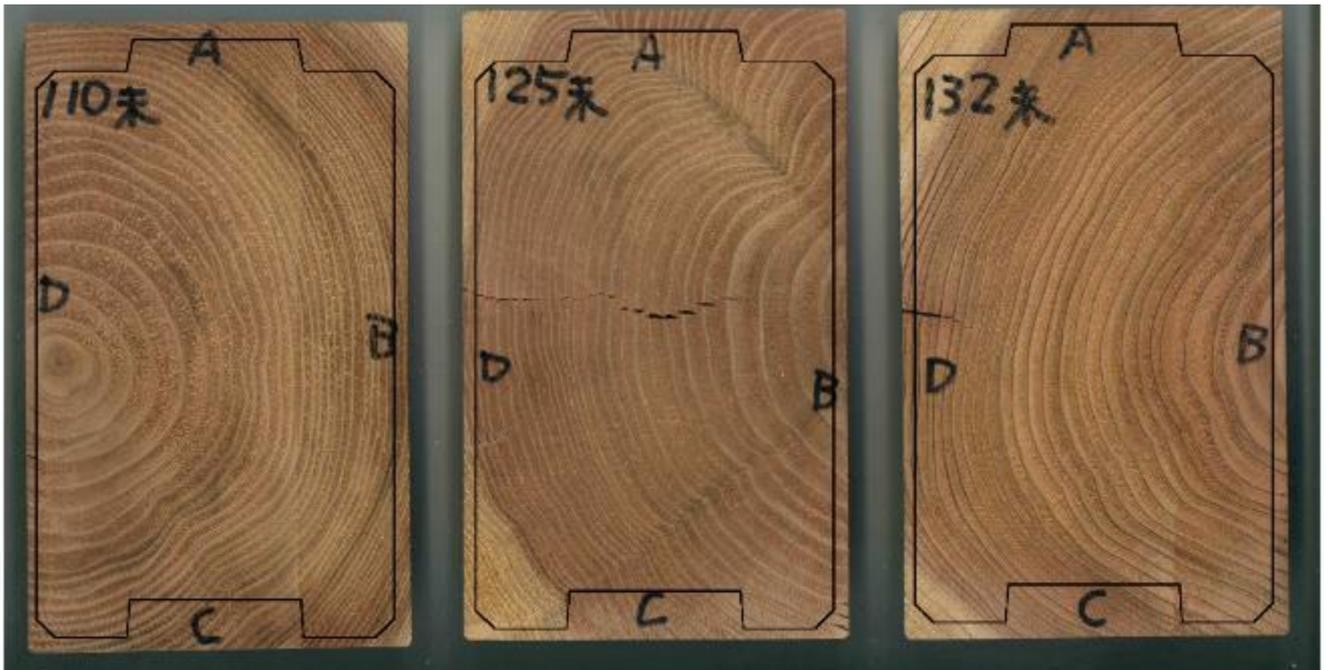


写真 3.2.5-24 乾燥スケジュール②の切片画像（その 10）と重ね合わせた角ログ断面図

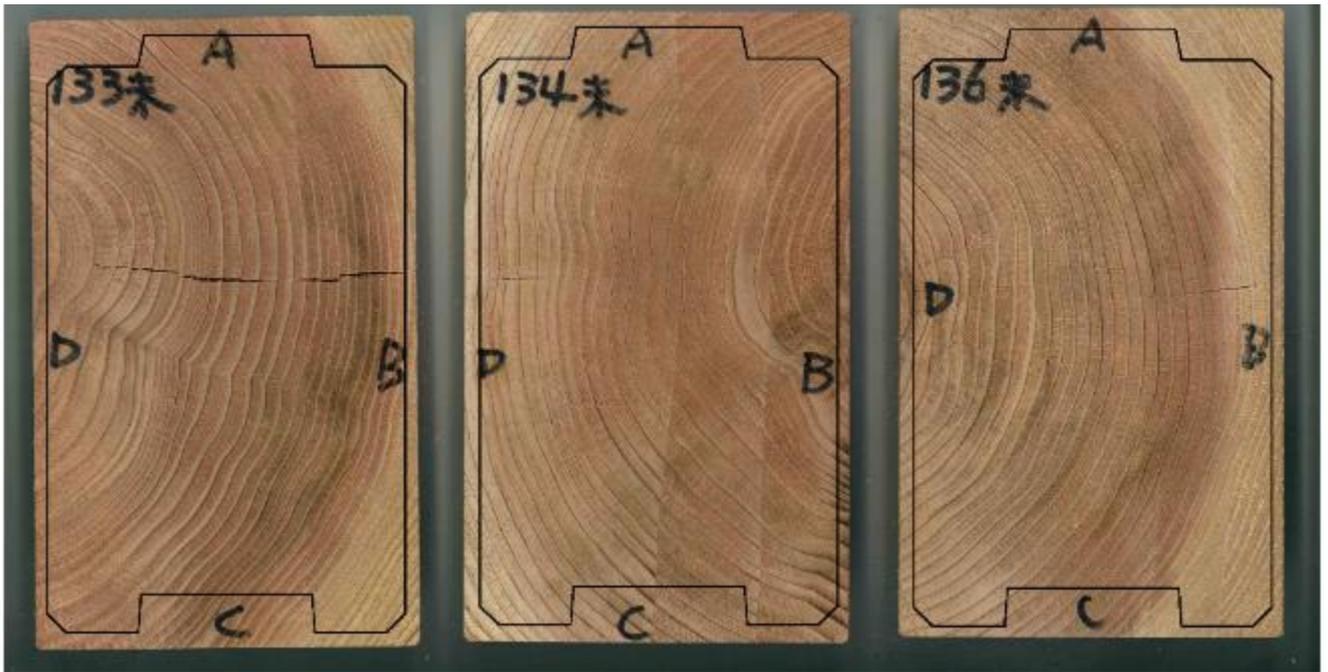


写真 3.2.5-25 乾燥スケジュール②の切片画像（その 11）と重ね合わせた角ログ断面図

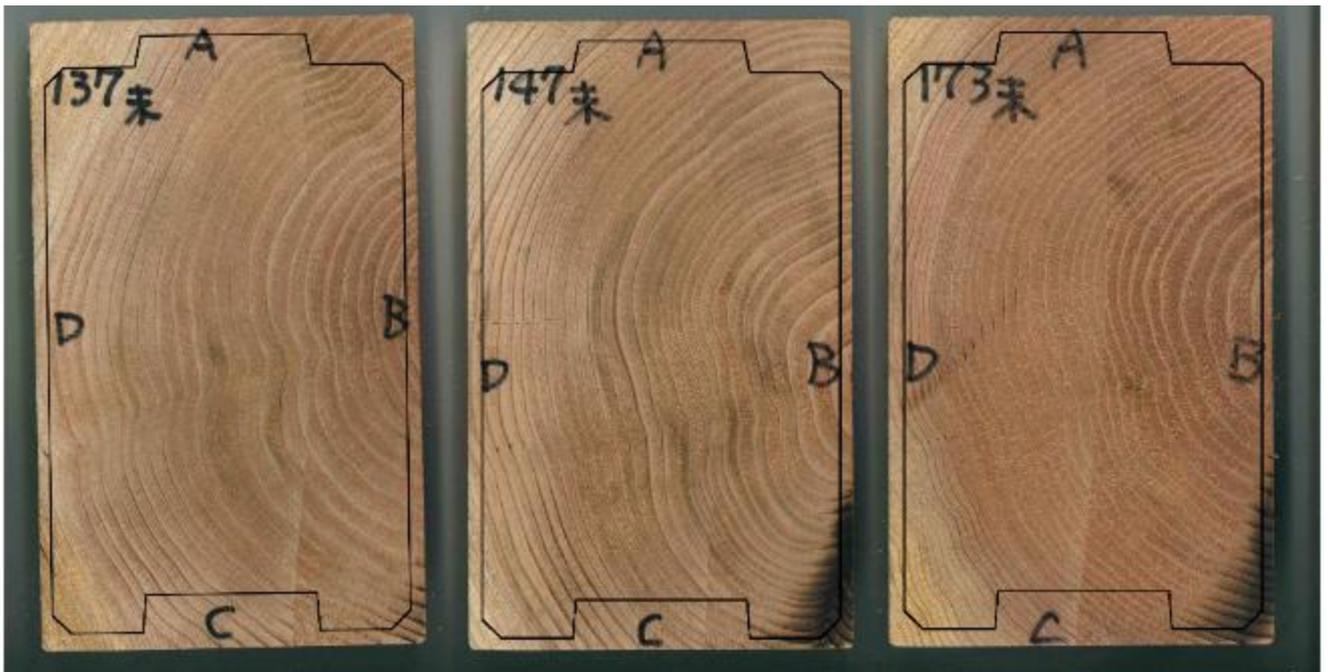


写真 3.2.5-26 乾燥スケジュール②の切片画像（その 12）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-27 乾燥スケジュール②の切片画像（その 13）と重ね合わせた角ログ断面図

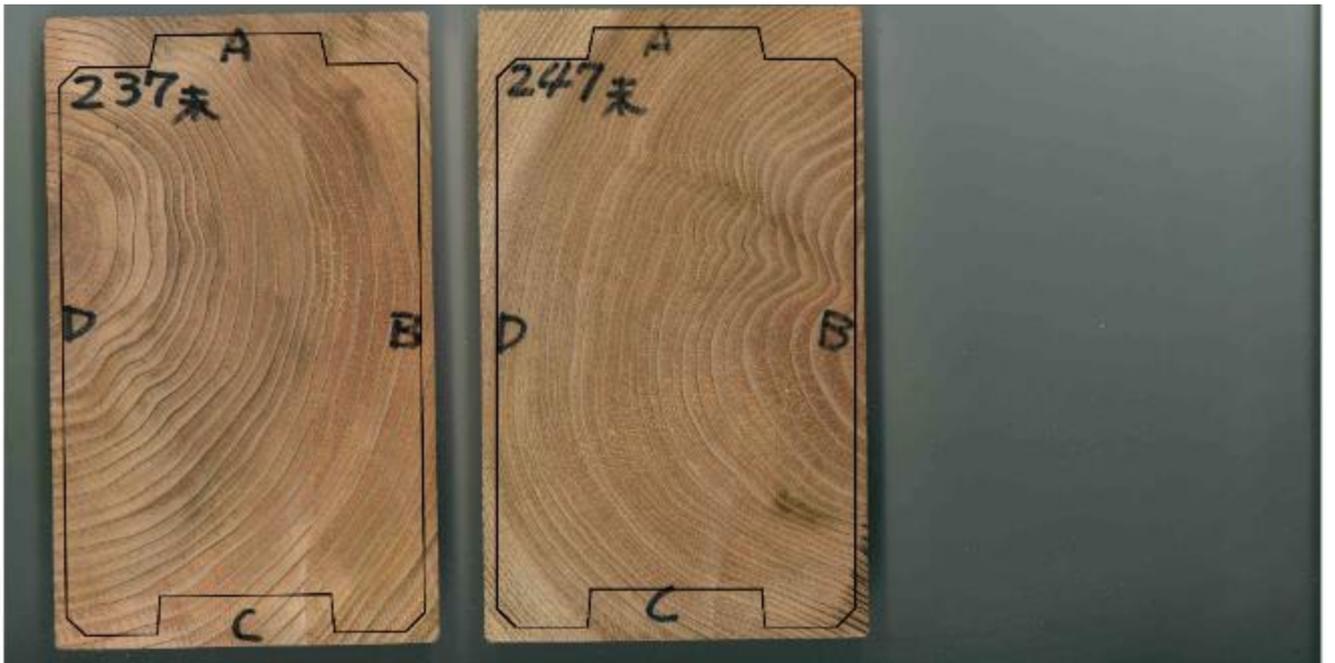


写真 3.2.5-28 乾燥スケジュール②の切片画像（その 14）と重ね合わせた角ログ断面図

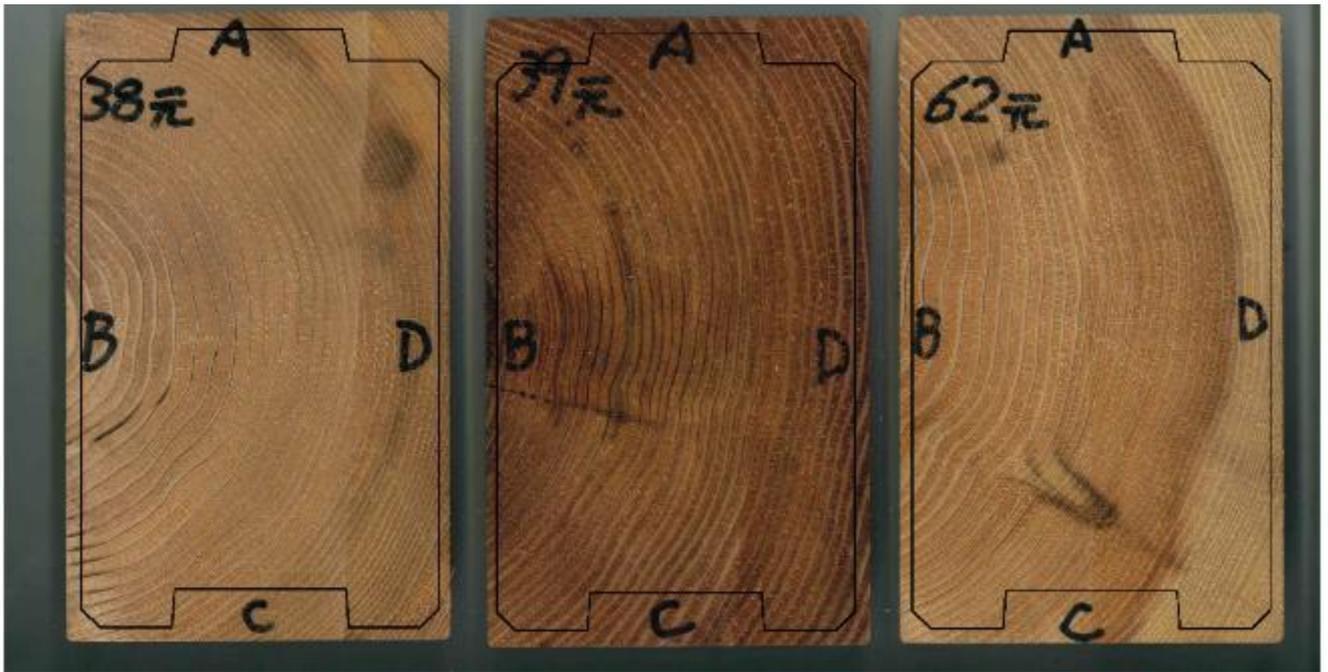


写真 3.2.5-29 乾燥スケジュール③の切片画像（その 1）と重ね合わせた角ログ断面図

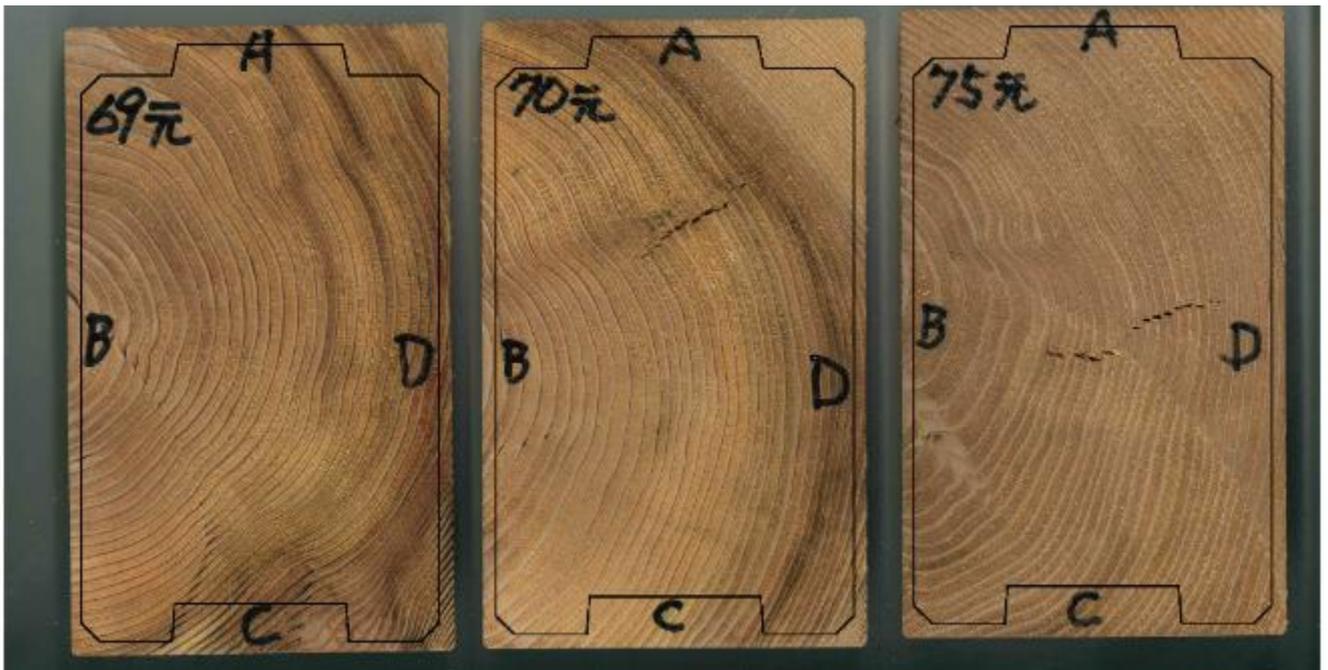


写真 3.2.5-30 乾燥スケジュール③の切片画像（その 2）と重ね合わせた角ログ断面図

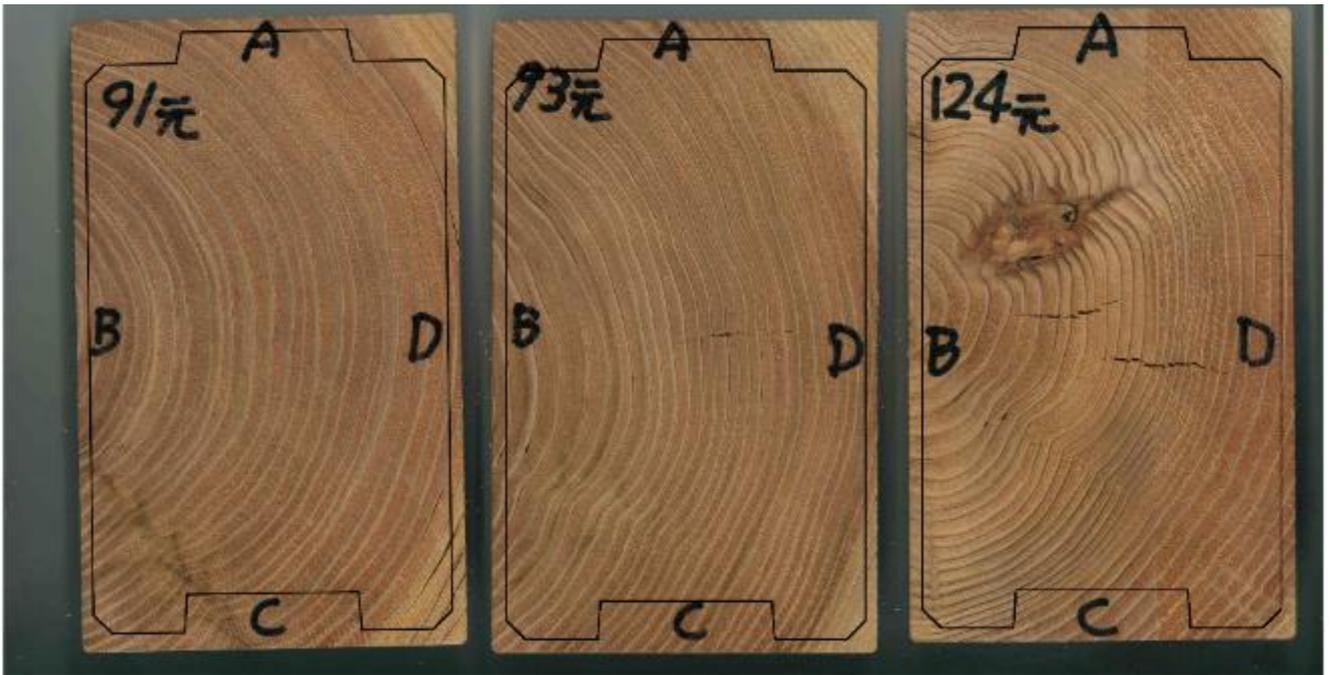


写真 3.2.5-31 乾燥スケジュール③の切片画像（その 3）と重ね合わせた角ログ断面図

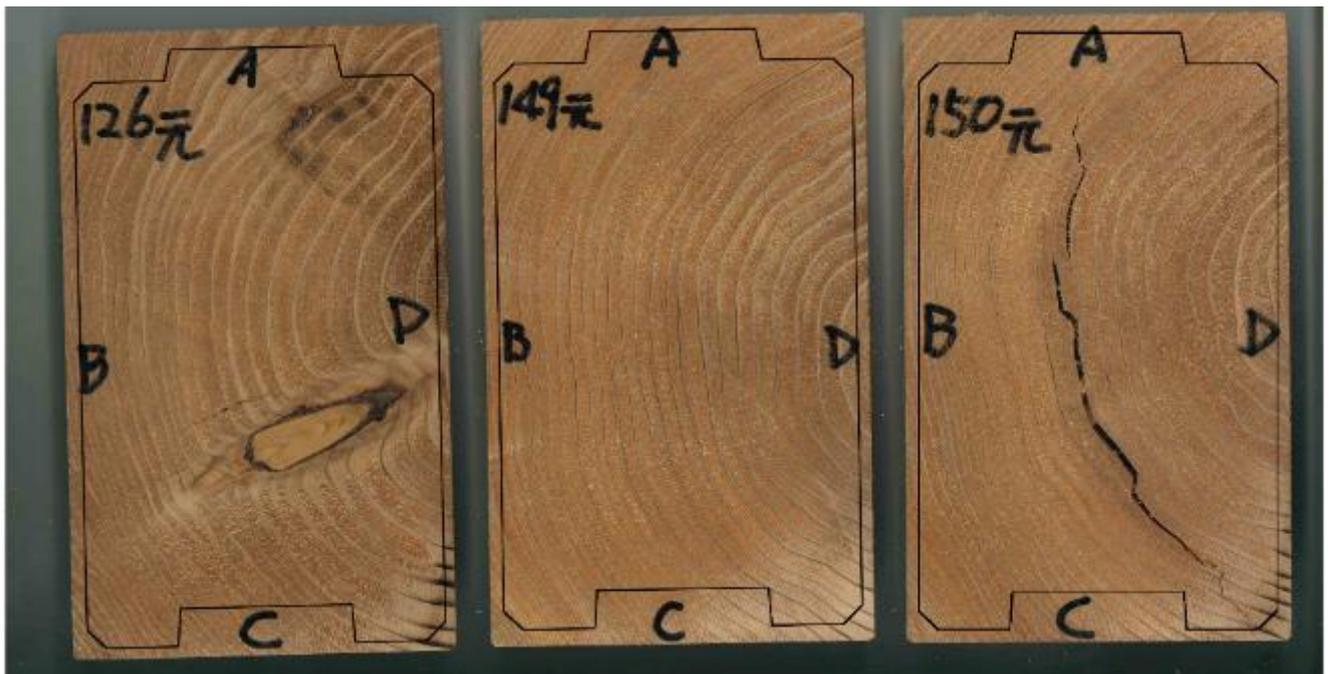


写真 3.2.5-32 乾燥スケジュール③の切片画像（その 4）と重ね合わせた角ログ断面図

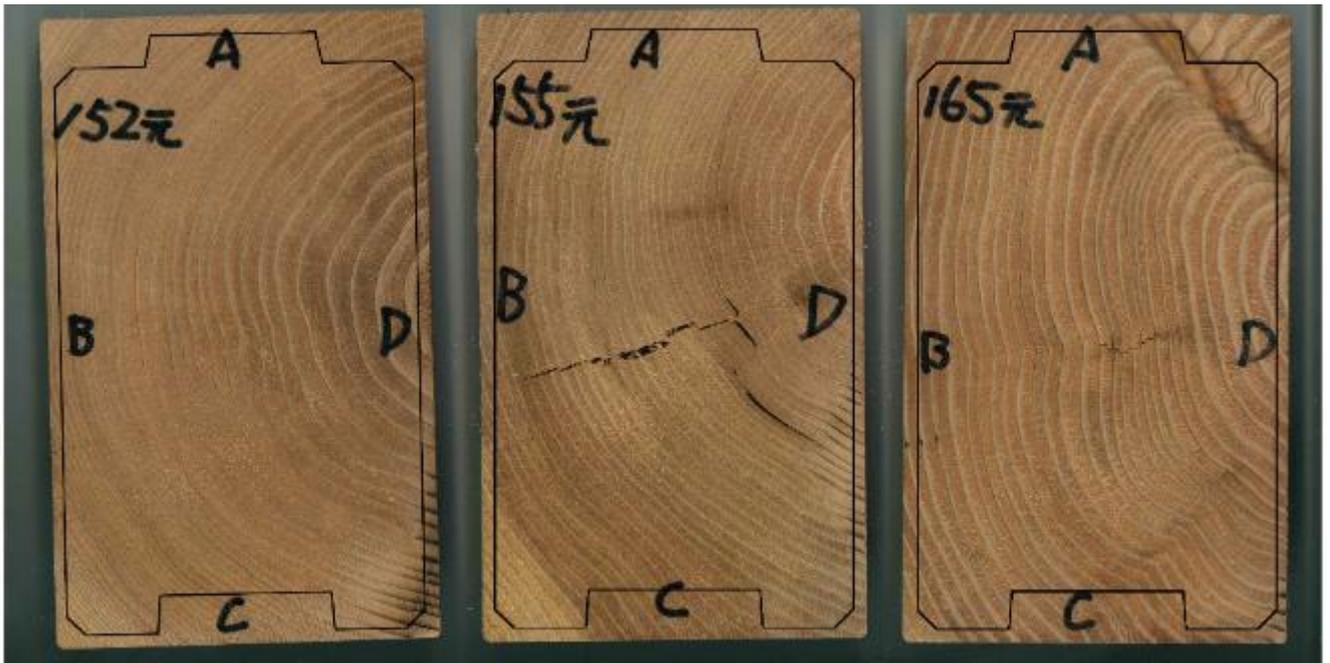


写真 3.2.5-33 乾燥スケジュール③の切片画像（その 5）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-34 乾燥スケジュール③の切片画像（その 6）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-35 乾燥スケジュール③の切片画像（その 7）と重ね合わせた角ログ断面図

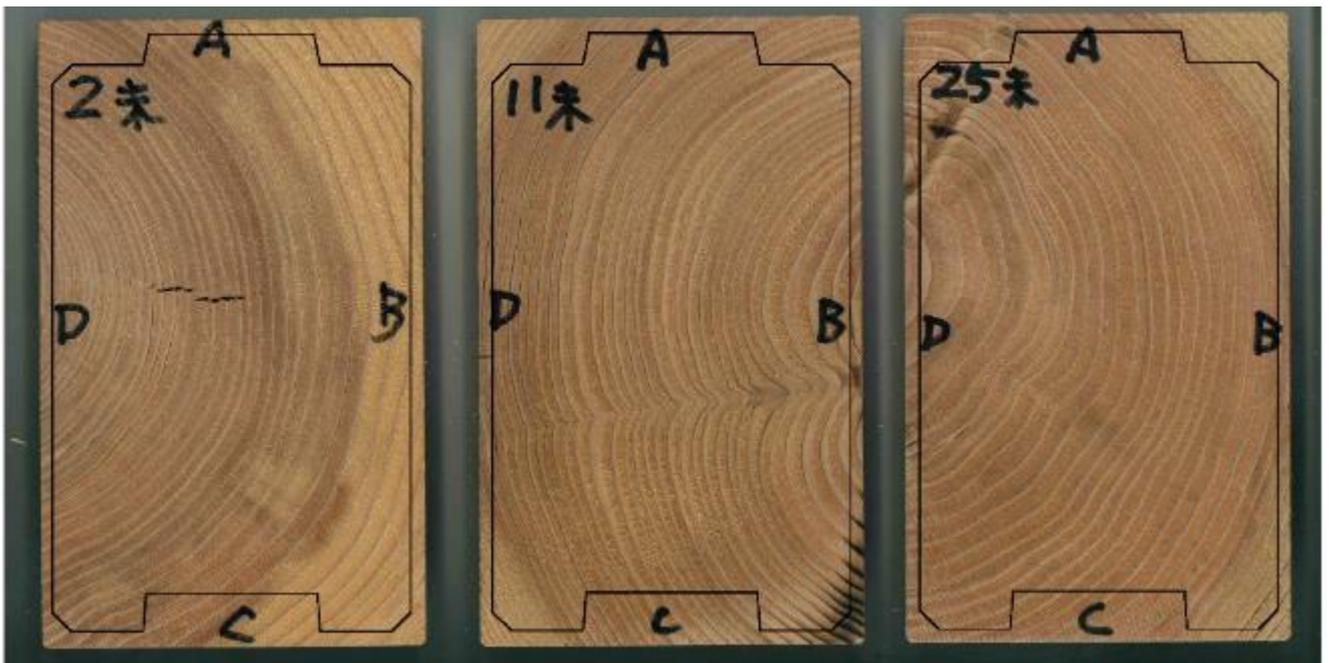


写真 3.2.5-36 乾燥スケジュール③の切片画像（その 8）と重ね合わせた角ログ断面図

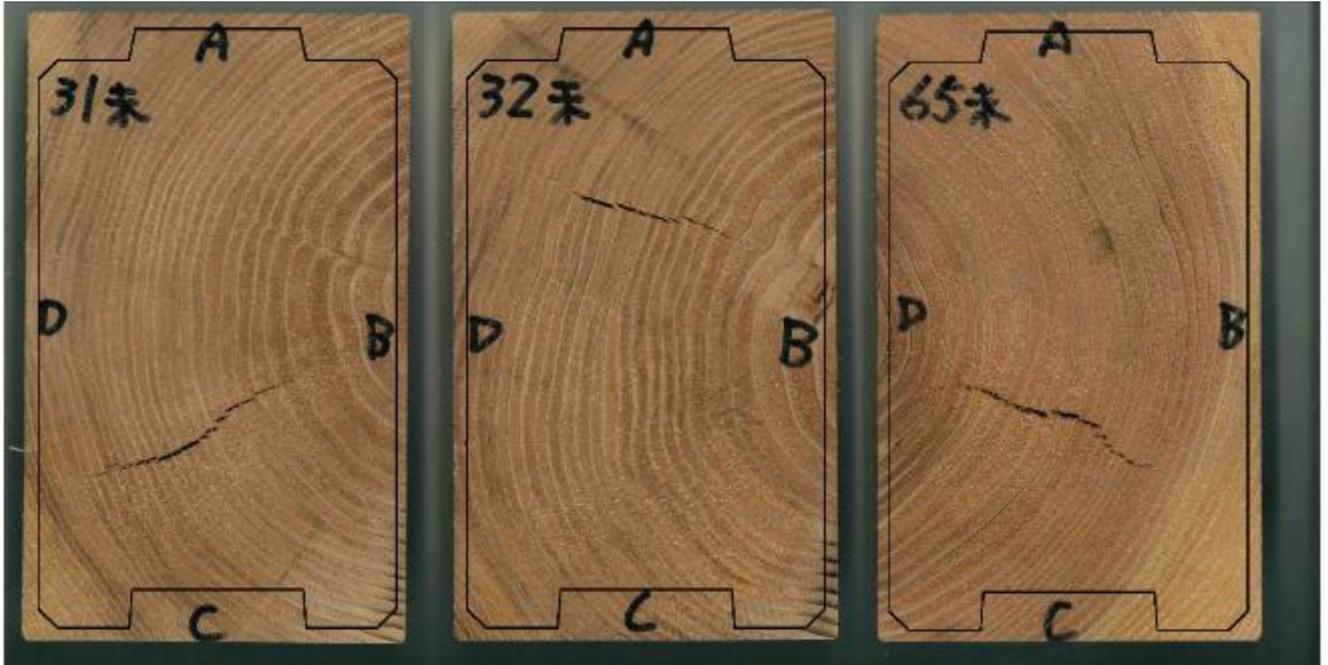


写真 3.2.5-37 乾燥スケジュール③の切片画像（その 9）と重ね合わせた角ログ断面図

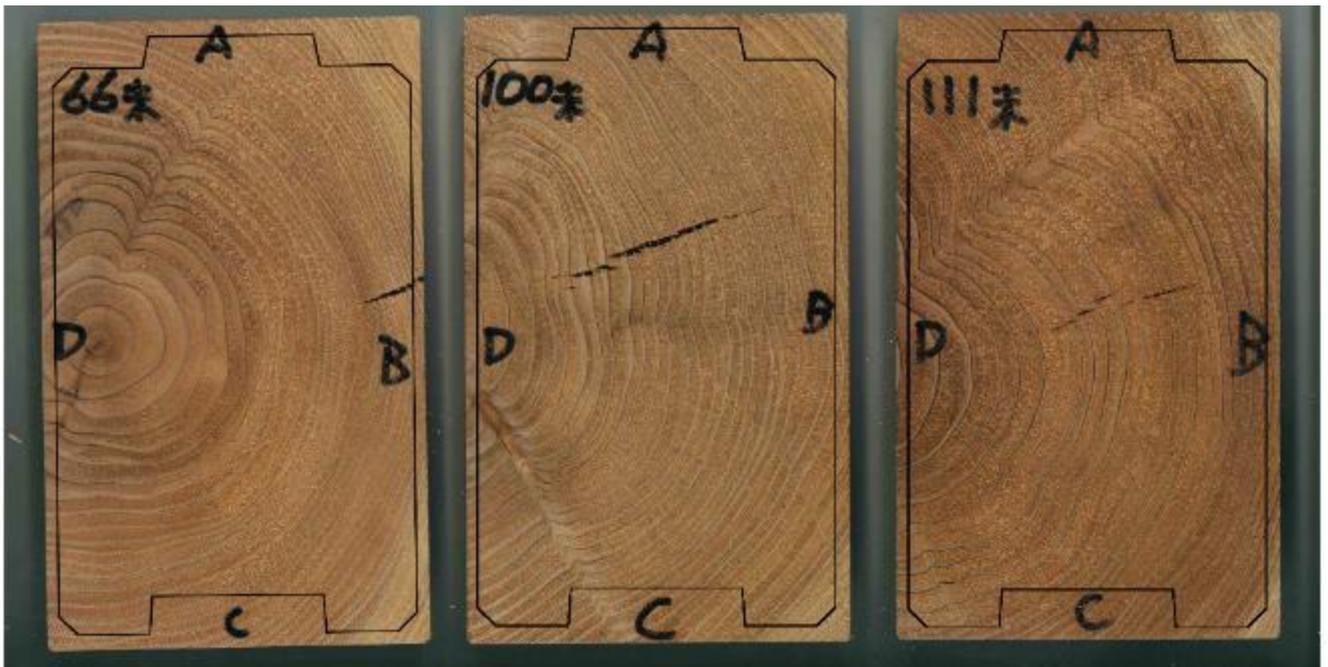


写真 3.2.5-38 乾燥スケジュール③の切片画像（その 10）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-39 乾燥スケジュール③の切片画像（その 11）と重ね合わせた角ログ断面図

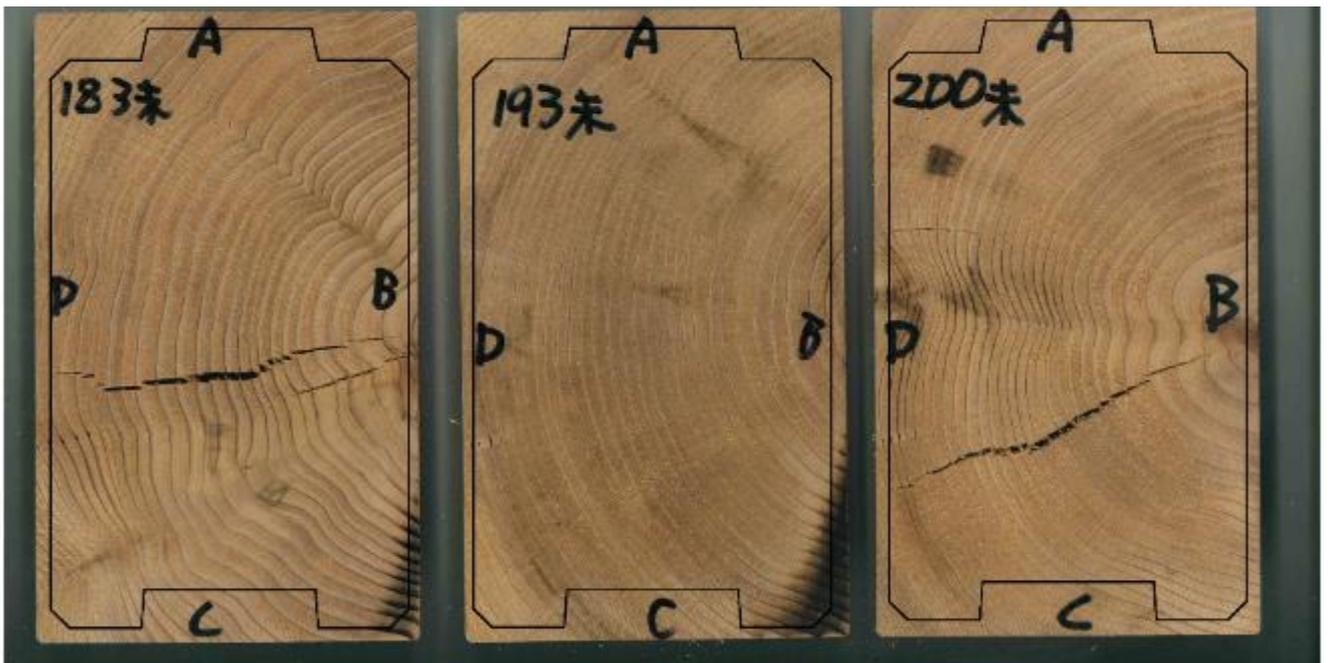


写真 3.2.5-40 乾燥スケジュール③の切片画像（その 12）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-41 乾燥スケジュール③の切片画像（その 13）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-42 乾燥スケジュール③の切片画像（その 14）と重ね合わせた角ログ断面図

表 3.2.5-1 各乾燥条件における表面割れ、内部割れが見られた試験体の数

(表中の数字は、割れが見られた本数/全試験体数)

乾燥条件	①	②	③
表面割れ	8/40	9/40	7/40
内部割れ	11/40	19/40	25/40

表 3.2.5-2 各乾燥条件の内部割れ総長さ

内部割れ総長さ (mm)			
乾燥条件	①	②	③
平均値	13.9	21.4	52.6
中央値	0	0	47.8
標準偏差	26.3	30.7	51.2
最大値	106.7	109.0	154.6
最小値	0	0	0

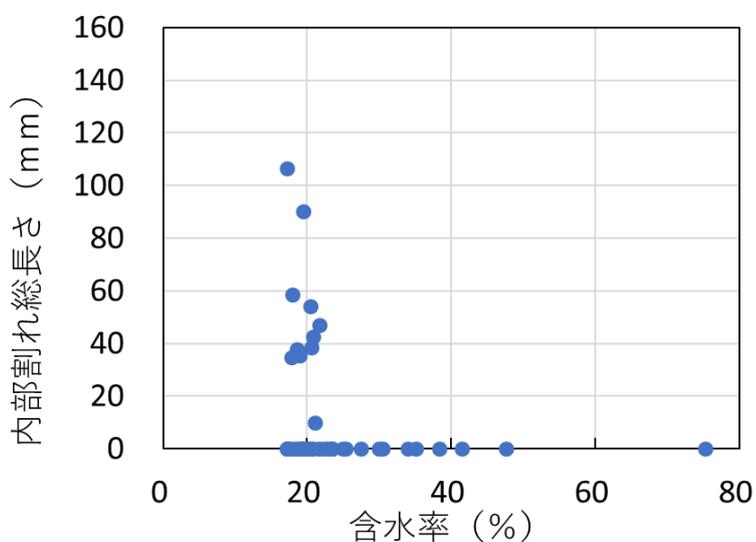


図 3.2.5-1 含水率と内部割れ総長さの関係 (乾燥条件①)

ログ加工によって内部割れが表面に出現する試験体数は、乾燥スケジュール①、②、③それぞれ40本中1本、5本、6本であった。乾燥条件①が最も少なく、この傾向は表3.2.5-1の内部割れが発生した試験体数と同じである。

ここでは仮想的にログ加工を行った場合に割れが表面に現れるかどうかを評価したが、実際にログ加工を施す際に材内部の応力状態が変化して割れが進展する可能性がある。したがって、今回の評価だけでは不十分であり、実際にログ加工を行い、さらには施工後も割れの挙動を追跡する必要がある。

表 3.2.5-3 各乾燥条件における表面割れ、内部割れが角ログの外縁部にかかる試験体数
(表中の数字は、内部割れが角ログの外縁部にかかる試験体数/全試験体数)

乾燥条件	①	②	③
表面割れ	7/40	7/40	7/40
内部割れ	1/40	5/40	6/40

ログ加工時に試験体の隣接部から採取した切片の横断面画像を写真3.2.5-43～写真3.2.5-52に、内部割れ総長さの測定結果を表3.2.5-4に示す。乾燥条件①では内部割れは見られず、乾燥条件②で平均3.0mm、乾燥条件③では7.7mmであった。仕上げ加工時に採取した切片に比べて全体的に内部割れの発生量が少なかった。

横断面画像に角ログの断面図を重ね合わせ、内部割れと表面割れがそれぞれ角ログの外縁部にかかる試験体数をカウントした結果を表3.2.5-5に示す。表面割れが角ログの外縁部にかかる試験体数は、乾燥条件①で16本中3本、乾燥条件②で12本中6本、乾燥条件③で12本中4本であったのに対して、角ログの外縁部にかかる内部割れは無かった。

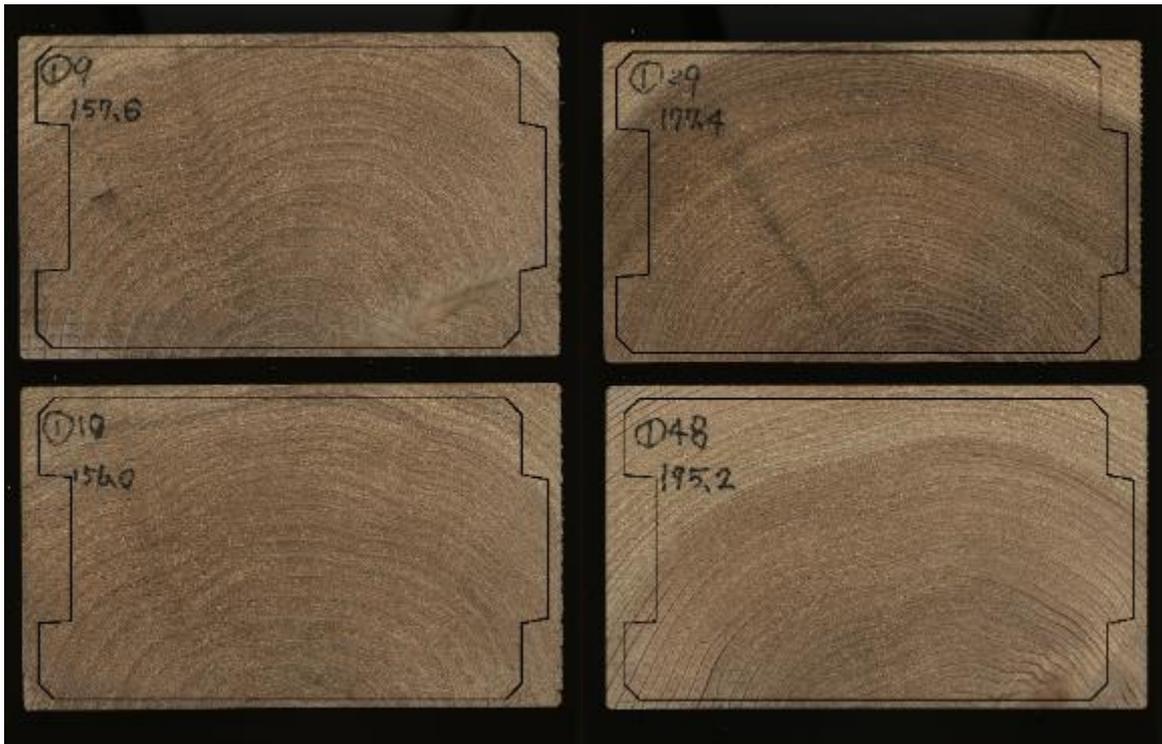


写真 3.2.5-43 乾燥スケジュール①の切片画像（ログ加工時その1）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-44 乾燥スケジュール①の切片画像（ログ加工時その2）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-45 乾燥スケジュール①の切片画像（ログ加工時その3）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-46 乾燥スケジュール①の切片画像（ログ加工時その4）と重ね合わせた角ログ断面図

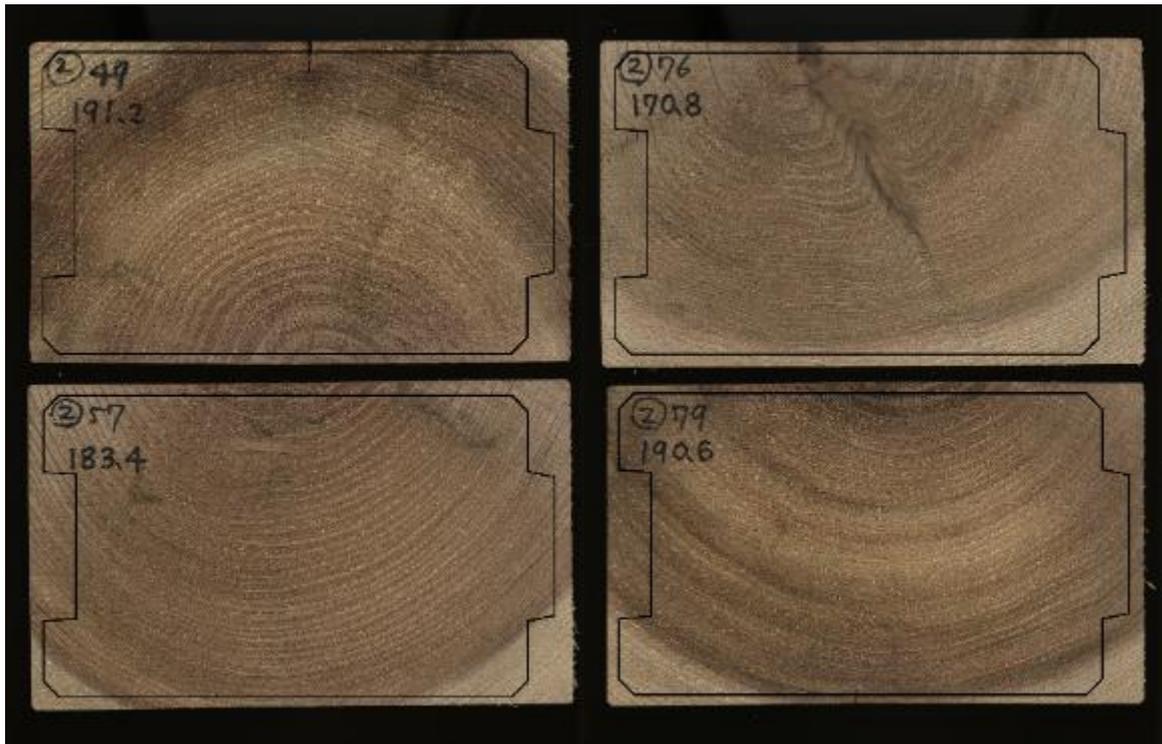


写真 3.2.5-47 乾燥スケジュール②の切片画像（ログ加工時その 1）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-48 乾燥スケジュール②の切片画像（ログ加工時その 2）と重ね合わせた角ログ断面図

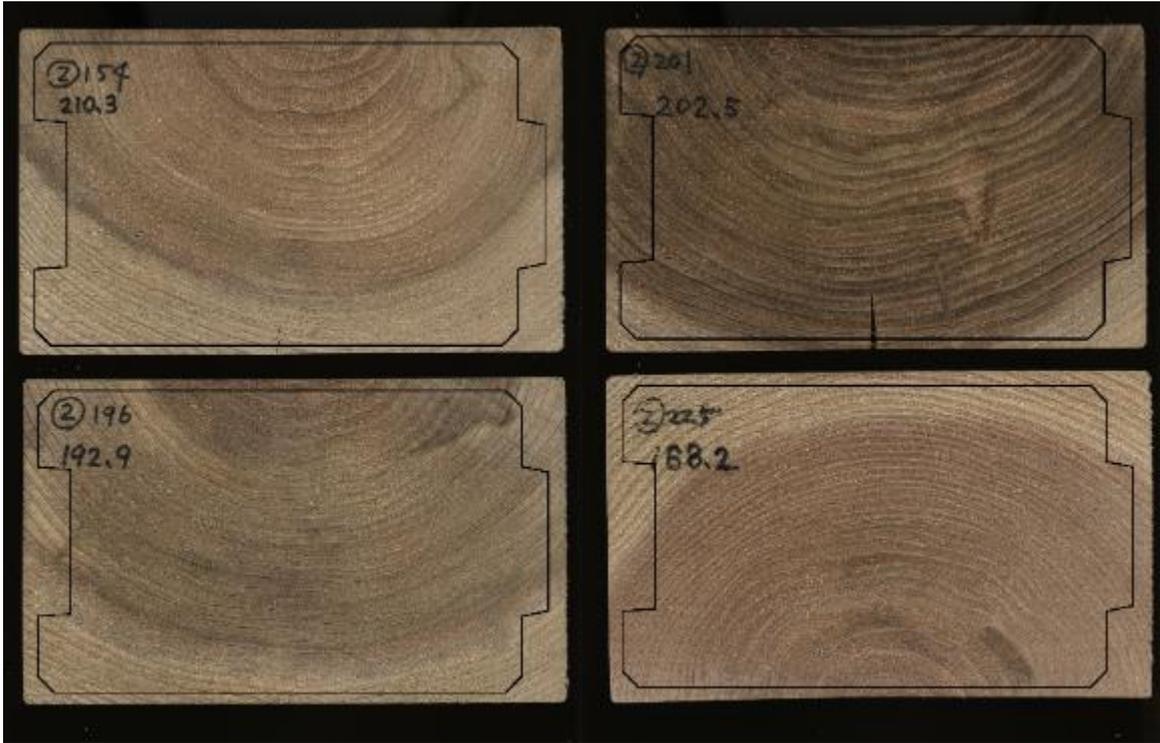


写真 3.2.5-49 乾燥スケジュール②の切片画像（ログ加工時その 3）と重ね合わせた角ログ断面図

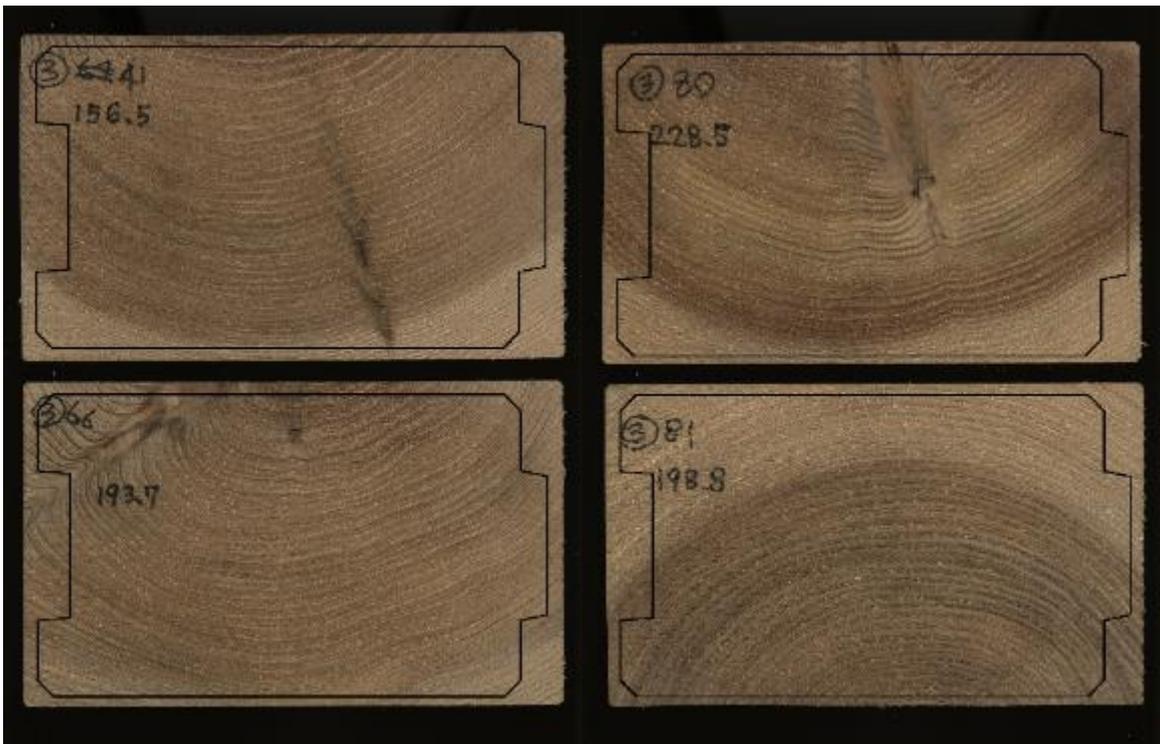


写真 3.2.5-50 乾燥スケジュール③の切片画像（ログ加工時その 1）と重ね合わせた角ログ断面図

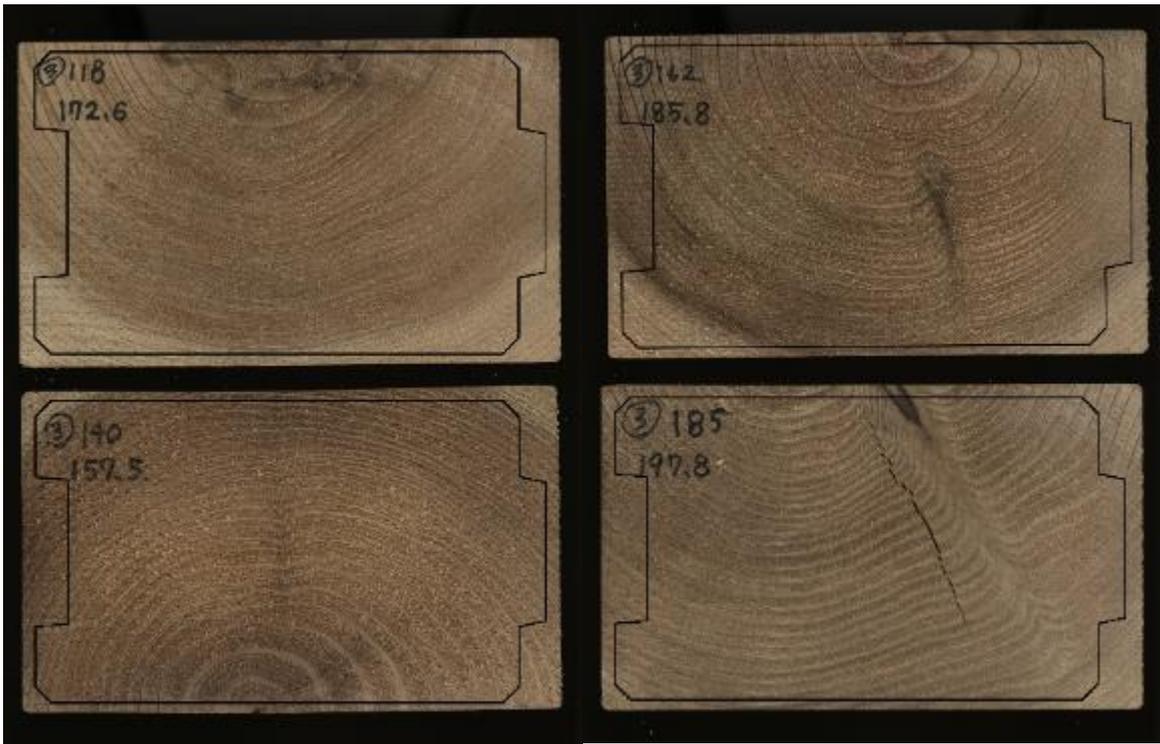


写真 3.2.5-51 乾燥スケジュール③の切片画像（ログ加工時その 2）と重ね合わせた角ログ断面図



写真 3.2.5-52 乾燥スケジュール③の切片画像（ログ加工時その 3）と重ね合わせた角ログ断面図

表 3.2.5-4 各乾燥条件の内部割れ総長さ（ログ加工用切片）

内部割れ総長さ（mm）			
乾燥条件	①	②	③
試験体数	16	12	12
平均値	0	3.0	7.7
中央値	0	0	0
標準偏差	0	6.9	23.8
最大値	0	21.4	86.4
最小値	0	0	0

表 3.2.5-5 各乾燥条件における表面割れ、内部割れが角ログの外縁部にかかる試験体数（ログ加工用切片。表中の数字は、内部割れが角ログの外縁部にかかる試験体数/全試験体数）

乾燥条件	①	②	③
表面割れ	2/16	6/12	3/12
内部割れ	0/16	0/12	0/12

3.2.6 強度性能

スギ心去り平角の曲げ試験結果を乾燥条件ごとに表 3.2.6-1～表 3.2.6-3 に示した。

これらの表には、含水率補正なしに得られた各特性値に加えて、ASTM D1990 にしたがって含水率 15%に補正した縦振動法によるヤング係数、曲げヤング係数、曲げ比例限度、曲げ強度、及び含水率の変化に伴う膨潤・収縮による体積変化を無視して算出した含水率 15%時の密度も示した。ただし、ASTM D1990 による補正については規格の内容にしたがって含水率 15±5%の範囲で実施した。すなわち、含水率が 20%を上回る試験体は含水率 20%、含水率が 10%を下回る試験体は含水率 10%として補正した。ここで、表中の記号は、 $MC(1)$ ：図 3.1.6-2 の含水率・内部割れ測定用試験体(1)から得られた全乾法による含水率、 $MC(2)$ ：図 3.1.6-2 の含水率・内部割れ測定用試験体(2)から得られた全乾法による含水率、 ρ ：密度、 $\rho-15$ ：含水率 15%時の密度、 E_{fr-t} ：縦振動法によるヤング係数、 $E_{fr-t-15}$ ：含水率 15%時の縦振動法によるヤング係数、 $E_{fr-t-flat}$ ：TGH 法によるヤング係数(平使い)、 $G_{fr-t-flat}$ ：TGH 法によるせん断弾性係数(平使い)、 $E_{fr-t-edge}$ ：TGH 法によるヤング係数(縦使い)、 $G_{fr-t-edge}$ ：TGH 法によるせん断弾性係数(縦使い)、 E_{app} ：みかけの曲げヤング係数、 E_{app-15} ：含水率 15%時のみかけの曲げヤング係数、 σ_{bp} ：曲げ比例限度、 σ_{bp-15} ：含水率 15%時の曲げ比例限度、 δ_{bp} ：曲げ比例限度時のたわみ、 σ_b ：曲げ強度、 σ_{b-15} ：含水率 15%時の曲げ強度、 δ_b ：曲げ強度(最大応力)時のたわみ、及び破壊形態：各形状で破壊した試験体数を表

している。なお、破壊形態は、曲げ破壊 B、せん断破壊 S(写真 3.6-1)、曲げ+せん断 BS、圧縮破壊 S を表している。また、曲げ破壊以外で破壊したものも少なからずあったが、本事業ではすべて最大荷重から最大曲げ応力、すなわち曲げ強度として算出した。

従来の研究より、木材に人工乾燥時の温度による熱劣化や内部割れが生じた場合、曲げ試験結果において、曲げヤング係数に対する曲げ強度の低下やせん断破壊の確率が増加することが報告されているとともに、健全な乾燥材と比較して塑性領域が小さくなることにより、最大応力時のたわみの減少や曲げ強度に対する比例限度力の比率の増加が挙げられる。そこで、曲げ強度に対する比例限度力の比(σ_{bp}/σ_b)についても算出し、併せて表内に示した。

曲げ試験体採取時に測定した全乾法による含水率 $MC(1)$ をみると、乾燥条件①、乾燥条件②、乾燥条件③のそれぞれの平均値は 24.5%、20.2%、22.1%であり、想定した含水率よりもやや高い値であった。一方、曲げ試験後の非破壊部分で測定した全乾法による含水率 $MC(2)$ をみると、乾燥条件①、乾燥条件②、乾燥条件③のそれぞれの平均値は 18.7%、14.1%、15.2%であり、製材の基準強度の標準含水率である 15%に近く、強度試験体として適切な含水率と言えた。ただし、含水率を測定した位置と時期は異なるものの、 $MC(1)$ と $MC(2)$ とでこのような大きな差異が見られた明確な要因は不明である。なお、各乾燥条件内及び各乾燥条件間における含水率の差異は小さいため、後述する曲げヤング係数や曲げ強度の比較においては、含水率によって補正した値(E_{app-15} 、 σ_{b-15})を用いることとした。

昨年度の成果から強度的に低下しないことが確認されている乾燥条件①で乾燥された心取り平角の曲げ試験結果に基づいて、高温セット処理を省略した乾燥条件②、及び天然乾燥を省略した乾燥条件③で乾燥されたそれぞれの曲げ試験結果を比較した。

まず、不適切な乾燥によって発生する内部割れを評価する手法として今年度の事業で採用した TGH 法によるせん断弾性係数に注目すると、 $G_{fr-t-flat}$ 、 $G_{fr-t-edge}$ のいずれについても乾燥条件②でやや高い傾向がみられるものの 3 乾燥条件間で明確な違いは認められなかった。乾燥条件③の内部割れの総長さは、それ以外の乾燥条件に比べて明らかに長い結果ではあったが、せん断弾性係数にそのような傾向は認められなかった。その要因として、今年度の内部割れは昨年度に比べて明らかに小さく、この程度の内部割れを、非破壊的に測定するせん断弾性係数で検出することが難しかったことが考えられるが、この点については、今後、再度検討していくことが必要であろう。

次に、曲げ強度を除き、乾燥条件によって影響を受けるであろう、せん断破壊した試験体数(S)、最大応力時のたわみ δ_b 、曲げ強度に対する比例限度力の比(σ_{bp}/σ_b)に注目すると、乾燥条件①はそれ以外の乾燥条件に比べて、せん断破壊した試験体数(乾燥条件①、②、③:2 体、4 体、5 体)は少なく、 δ_b (乾燥条件①、②、③:94.5 mm、83.2 mm、81.9 mm)は大きく、 σ_{bp}/σ_b (乾燥条件①、②、③:0.79、0.86、0.85)は小さかった。すなわち、内部割れの総長さと同様、乾燥条件①は乾燥による熱劣化の影響も小さな傾向を示していた。

曲げ試験結果より、スギ心去り平角の含水率 15%時の曲げヤング係数(E_{app-15})の平均値は、乾燥条件①、乾燥条件②、乾燥条件③でそれぞれ 8.20 kN/mm²、8.12 kN/mm²、8.35 kN/mm²と小さな範囲に収まっており、曲げヤング係数が高温等による乾燥条件の影響をほとんど受けないという既往の研究を考慮すると、人工乾燥前にグレーディングマシンによって測定した供試材の曲げヤング係数に基づいて振り分けた結果が適切であったことが認められる。

含水率 15%時に補正したスギ心去り平角の曲げ強度(σ_b-15)を各乾燥条件で比較すると、乾燥条件①、乾燥条件②、乾燥条件③のそれぞれの平均値は 40.7 N/mm²、39.7 N/mm²、39.9 N/mm²とほぼ同等であった。また、各乾燥条件の曲げ強度を正規分布と仮定して信頼水準 75%における下側 95%許容限界値(5%下限値)を算出すると、乾燥条件①、乾燥条件②、乾燥条件③でそれぞれ 25.9 N/mm²、25.6 N/mm²、27.8 N/mm²と、平均値と同様に明確な違いは認められず、ほぼ同等であった。

各乾燥条件のスギ心去り平角の曲げ強度(σ_b-15)の累積頻度曲線を図 3.2.6-1 に示した。3 乾燥条件の曲線はほぼ重なっており、明確な違いは認められなかった。

表 3.2.6-1 スギ平角の曲げ試験結果(乾燥条件①)

乾燥条件①	ρ (kg/m ³)	MC(1) (%)	MC(2) (%)	E_{fr-l} (kN/mm ²)	$E_{fr-l-flat}$ (kN/mm ²)	G-flat (kN/mm ²)	$E_{fr-l-edge}$ (kN/mm ²)	G-edge (kN/mm ²)	E_{app} (kN/mm ²)	
Mean	384	24.5	18.7	8.08	8.05	0.66	8.32	0.62	7.77	
Min.	303	17.2	10.6	6.12	6.05	0.46	5.86	0.42	5.58	
Max.	528	75.3	55.0	10.57	10.61	0.96	10.86	0.89	10.22	
S,D,	46.2	10.91	9.45	1.29	1.27	0.11	1.40	0.10	1.24	
CV(%)	12.0	44.5	50.7	16.0	15.7	16.1	16.8	16.1	15.9	
乾燥条件①	σ_{bp} (N/mm ²)	δ_{bp} (mm)	σ_b (N/mm ²)	δ_b (mm)	破壊形態 n=40	σ_{bp}/σ_b	$\rho-15$ (kg/m ³)	$E_{fr-l-15}$ (kN/mm ²)	E_{app-15} (kN/mm ²)	σ_b-15 (N/mm ²)
Mean	31.3	57.0	40.0	94.5	B=30	0.79	372	8.20	7.88	40.9
Min.	19.0	39.8	20.8	49.6	S=2	0.61	312	5.92	5.41	21.9
Max.	49.5	69.0	55.0	159.7	BS=8	1.00	428	11.35	11.09	58.4
S,D,	5.97	6.69	7.99	22.4	C=0	0.09	31.5	1.43	1.35	8.18
CV(%)	19.1	11.7	20.0	23.7		11.9	8.5	17.4	17.1	20.0

表 3.2.6-2 スギ平角の曲げ試験結果(乾燥条件②)

乾燥条件②	ρ (kg/m ³)	MC(1) (%)	MC(2) (%)	E_{fr-l} (kN/mm ²)	$E_{fr-r-flat}$ (kN/mm ²)	G-flat (kN/mm ²)	$E_{fr-l-edge}$ (kN/mm ²)	G-edge (kN/mm ²)	E_{app} (kN/mm ²)	
Mean	374	20.2	14.1	8.32	8.16	0.70	8.49	0.66	7.97	
Min.	310	14.4	8.4	6.59	6.45	0.45	6.85	0.43	6.26	
Max.	461	50.9	32.4	11.71	11.36	0.97	11.38	0.96	10.85	
S,D,	35.9	8.12	5.50	1.22	1.15	0.11	1.15	0.09	1.10	
CV(%)	9.6	40.1	39.1	14.7	14.1	16.0	13.6	14.3	13.7	
乾燥条件②	σ_{bp} (N/mm ²)	δ_{bp} (mm)	σ_b (N/mm ²)	δ_b (mm)	破壊形態 n=40	σ_{bp}/σ_b	$\rho-15$ (kg/m ³)	$E_{fr-l-15}$ (kN/mm ²)	E_{app-15} (kN/mm ²)	σ_b-15 (N/mm ²)
Mean	34.8	61.1	40.9	83.2	B=26	0.86	377	8.12	7.79	39.7
Min.	22.7	41.9	24.7	42.3	S=4	0.58	325	6.15	6.34	24.9
Max.	51.8	81.7	55.9	127.7	BS=10	1.00	452	10.85	10.10	57.2
S,D,	6.49	9.28	8.09	23.3	C=0	0.11	34.3	1.09	1.00	7.69
CV(%)	18.7	15.2	19.8	28.0		13.3	9.1	13.5	12.9	19.3

表 3.2.6-3 スギ平角の曲げ試験結果(乾燥条件③)

乾燥条件③	ρ (kg/m ³)	MC(1) (%)	MC(2) (%)	E_{fr-l} (kN/mm ²)	$E_{fr-r-flat}$ (kN/mm ²)	G-flat (kN/mm ²)	$E_{fr-l-edge}$ (kN/mm ²)	G-edge (kN/mm ²)	E_{app} (kN/mm ²)	
Mean	373	22.1	15.2	8.41	8.30	0.67	8.62	0.64	7.99	
Min.	307	17.8	9.8	4.96	5.17	0.47	5.35	0.46	4.77	
Max.	467	53.2	33.9	12.05	11.55	0.96	12.10	1.01	11.21	
S,D,	35.5	6.01	4.84	1.47	1.38	0.13	1.46	0.10	1.30	
CV(%)	9.5	27.2	31.9	17.5	16.7	19.2	16.9	15.1	16.2	
乾燥条件③	σ_{bp} (N/mm ²)	δ_{bp} (mm)	σ_b (N/mm ²)	δ_b (mm)	破壊形態 n=40	σ_{bp}/σ_b	$\rho-15$ (kg/m ³)	$E_{fr-l-15}$ (kN/mm ²)	E_{app-15} (kN/mm ²)	σ_b-15 (N/mm ²)
Mean	33.9	59.6	40.3	81.9	B=25	0.85	373	8.35	7.94	39.9
Min.	21.7	42.4	27.6	42.5	S=5	0.64	315	5.38	5.18	25.8
Max.	51.5	78.2	58.0	125.3	BS=10	1.00	477	11.30	10.52	53.7
S,D,	6.11	8.12	7.36	18.9	C=0	0.10	35.4	1.43	1.26	6.60
CV(%)	18.0	13.6	18.2	23.1		12.1	9.5	17.2	15.9	16.6



写真 3.2.6-1 セン断破壊した試験体

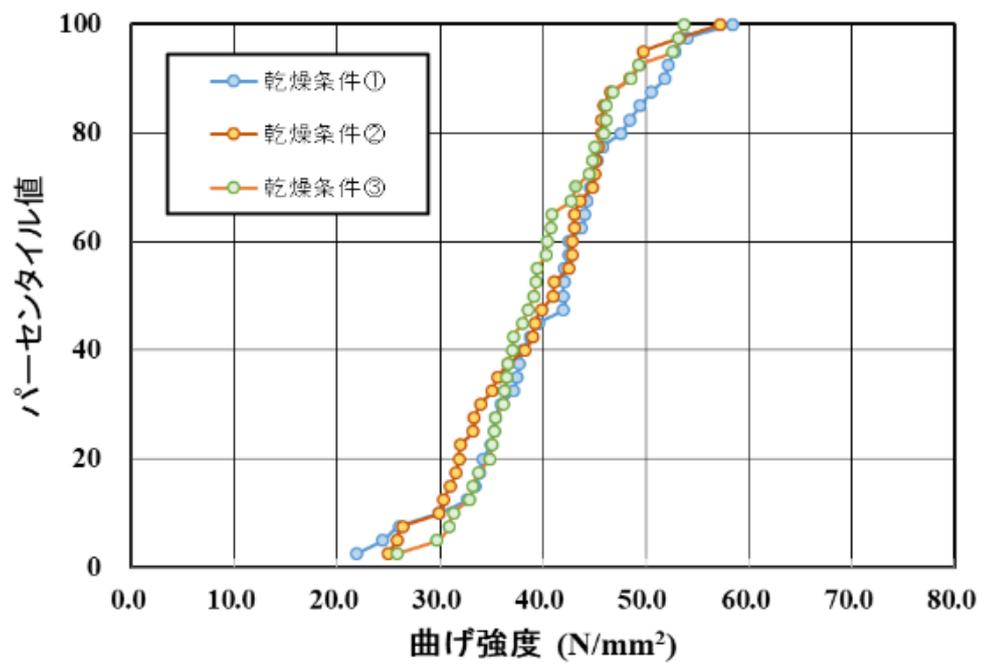
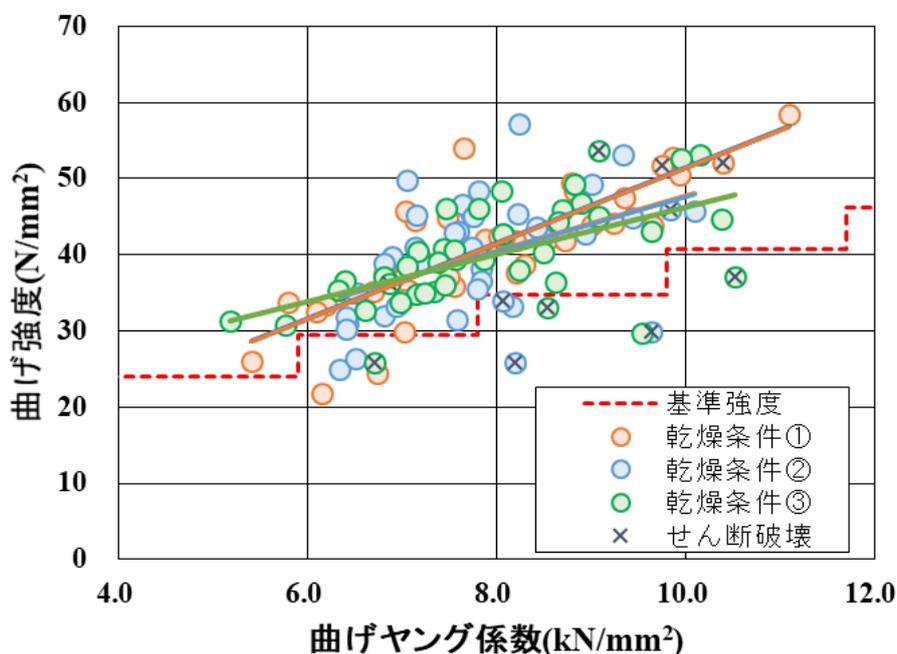


図 3.2.6-1 スギ平角の曲げ強度 (σ_{b-15}) の累積頻度曲線

含水率 15%時に補正したスギ心去り平角のみかけの曲げヤング係数(E_{app-15})と曲げ強度(σ_{b-15})との関係を図 3.2.6-2 に示した。ここで、赤の破線は「製材の日本農林規格」の機械等級区分構造用製材における各等級のスギの曲げ基準強度を示している。また、プロット内にある×印は曲げ試験においてせん断破壊 S を生じた試験体である。

それぞれの乾燥条件において、基準強度を下回った試験体がいくつか認められるが、昨年度の結果(図 3.2.6-3)とは大きく異なり、ほとんど試験体の曲げ強度が基準強度以上であり、それぞれの回帰直線に違いがみられない。また、乾燥条件①～③の回帰直線は、乾燥条件①と乾燥スケジュールはほぼ同じである昨年度の心去り④の回帰直線とほぼ同等であることが認められる。さらに、基準強度を下回っているほとんどの試験体が曲げ破壊ではなく、せん断破壊していることは昨年度と同じであるが、そのような試験体の比率は圧倒的に小さく、今年度のいずれの乾燥条件も強度的な観点からみて適切なスケジュールであったことが示された。



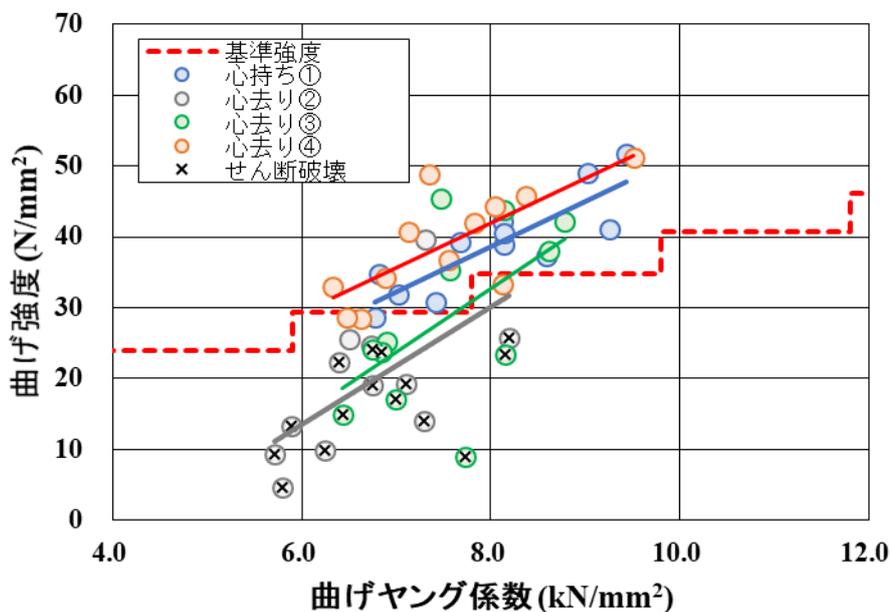


図 3.2.6-3 曲げヤング係数(E_{app-15})と曲げ強度(σ_b-15)との関係 (昨年度の結果)

スギ心去り平角について、内部割れ総長さとの関係を図 3.2.6-4 に示した。昨年度の結果とは異なり、曲げ強度と内部割れ総長さとの間に明確な関係は認められなかった。ただし、せん断破壊した試験体は内部割れを生じた試験体で発生する傾向は認められた。また、曲げ試験時の加力方向であり、かつせん断破壊と関連する縦使い方向で測定したせん断弾性係数($G_{fir-edge}$)と内部割れ総長さとの関係を図 3.2.6-5 に示した。内部割れの発生によって曲げ荷重時のせん断変形が増加し、せん断弾性が小さくなることを予想したが、これらの相互間に明確な関係は認められなかった。これらの点について、今年度の乾燥条件がスギ心去り平角の乾燥方法としておおよそ適切スケジュールであったために昨年度と比較して内部割れが小さかったことが影響したと推察される。

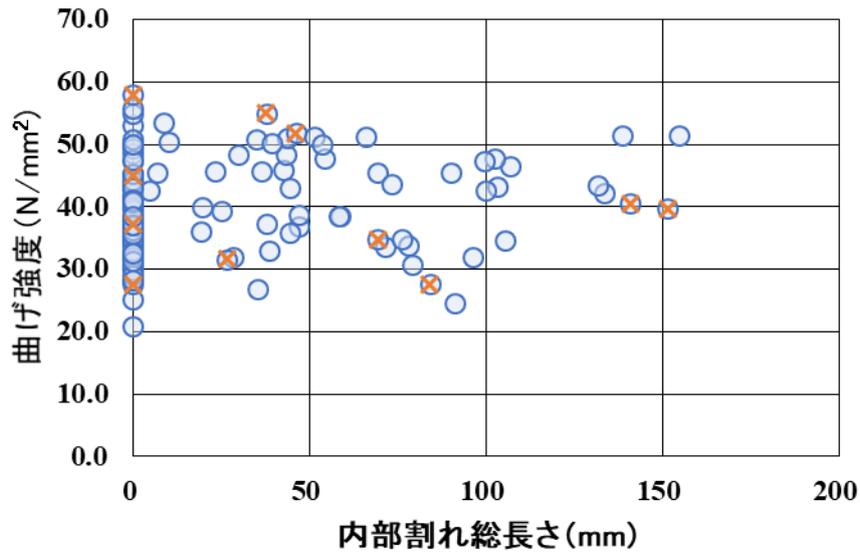


図 3.2.6-4 内部割れ総長さ と 曲げ強度 (σ_b-15) との関係

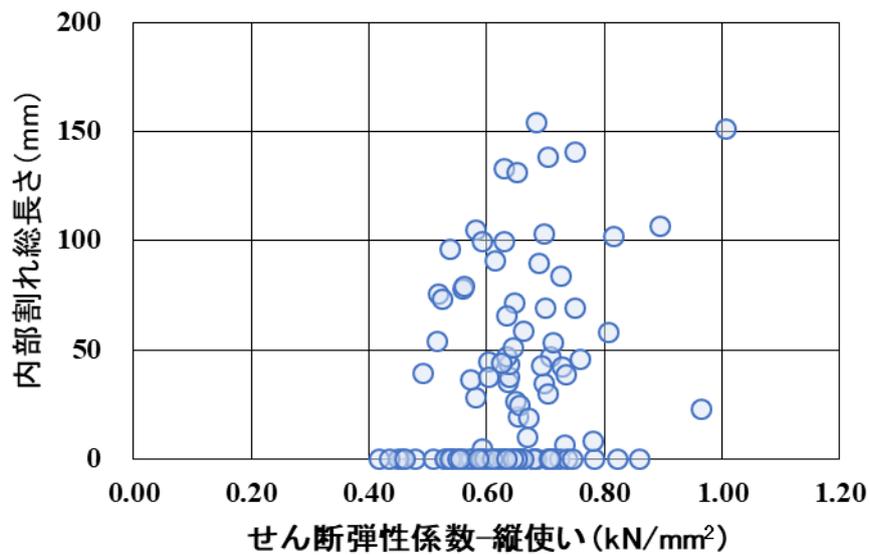


図 3.2.6-5 せん断弾性係数-縦使い ($G_{fr-t-edge}$) と 内部割れ総長さ との関係

3.2.7 まとめ

スギ心去り平角の乾燥割れを抑制し、強度を低下させない人工乾燥方法を開発することを目的に、次の3種類の乾燥スケジュールを設定した。乾燥条件①は、120°C10時間の高温セット処理後に1か月間の天然乾燥を行い、その後70°Cの中温で2次乾燥するスケジュールである。乾燥条件②は、乾燥条件①から高温セット処理を除いたスケジュールである。乾燥条件③は、乾燥条件①から天然乾燥を除くことによって乾燥日数の短縮を図ったスケジュールである。

これら 3 種類の乾燥スケジュールを用いて乾燥試験と強度試験を行い、仕上がり品質及び曲げ強度性能について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 仕上げ加工後の平均含水率は、乾燥条件①が最も高い 24.5%、乾燥条件②が最も低い 20.2% であり、目標含水率の 20% よりも少し高めであった。その後 1 か月間の養生によって、いずれの乾燥条件も大部分の試験体は含水率 20% を下回り、昨年度の乾燥試験でみられた含水率 10% を下回る過乾燥材の割合も少なく、3 条件ともに概ね適切な含水率範囲に収まった。
- 2) 表面割れの発生した試験体数は乾燥スケジュール①と②でほぼ同じであったことから、高温セット処理を施さなくても、心去り平角では表面割れがそれほど発生しないことがわかった。ただし、今回用いた 120°C10 時間の高温セット処理は表面割れの抑制にあまり効果がなかった可能性があり、高温セット処理の時間を長くすることが可能かどうか検討する余地が残されている。
- 3) 天然乾燥を省略した乾燥条件③の内部割れ総長さは乾燥条件①、②の 2 倍以上であり、2 次乾燥の前に天然乾燥を行うことによって、内部割れの発生が大きく軽減されることが明らかとなった。乾燥スケジュール③は内部割れの発生量が比較的多く、長辺を横切る大きな内部割れが散見されたことから、乾燥スケジュール③のログ材を使用する場合には雨水の侵入等に留意する必要があると考えられる。
- 4) 昨年度、スギ心去り平角の乾燥方法として適切と判断された乾燥条件①(120°Cの高温セット処理 10 時間+天然乾燥 1 か月+70°Cで人工乾燥)について再度試験を実施した結果、昨年度と同様、基準強度を満足させる適切な乾燥スケジュールであることが確認された。また、乾燥条件①から高温セット処理を省略した乾燥条件②、及び天然乾燥を省略した乾燥条件③の強度試験結果から、乾燥条件①と比較して、せん断破壊した試験体数(S)、最大応力時のたわみ δ_b 、曲げ強度に対する比例限応力の比(σ_{bp}/σ_b)にやや違いは認められたものの、ほぼ同等の曲げ強度が得られることがわかった。
- 5) 曲げ強度と内部割れ総長さとの関係について検討した結果、昨年度の結果とは異なり、明確な関係は認められなかった。また、せん断弾性係数と内部割れ総長さの間にも明確な関係は認められなかった。この点について、今年度の乾燥条件がスギ心去り平角の乾燥方法として適切スケジュールであり、内部割れが大きく強度を低下させるようなスケジュールで乾燥された人工乾燥材でなかったことが影響したと推察される。

4. ログハウス実験棟の建設

4.1 ログハウス実験棟の建設目的

ログ材の乾燥条件による建設後の反り、ねじれ、浮き等の挙動の違いを確認するため、比較対象として心持ちログ材、及び乾燥条件①②③の心去りログ材を使用したログハウス実験棟を建設した。

また、建設時にログ材の含水率の測定、表面割れ・木口割れ等の調査を行い、今後、セトリング量、実勘合部の浮き・ねじれ、水染み等の経年変化調査を定期的実施することとした。

4.2 ログハウス実験棟の位置

ログハウスの建設地は、実験棟の管理や今後の各種測定の利便性等を勘案し、ログ材のプレカット及びログハウス実験棟の建設を委託した福島県いわき市の赤井製材所敷地内とした（図 4.2-1）。なお、赤井製材所とは、土地賃貸借契約書を締結し 30 m²を借地した。



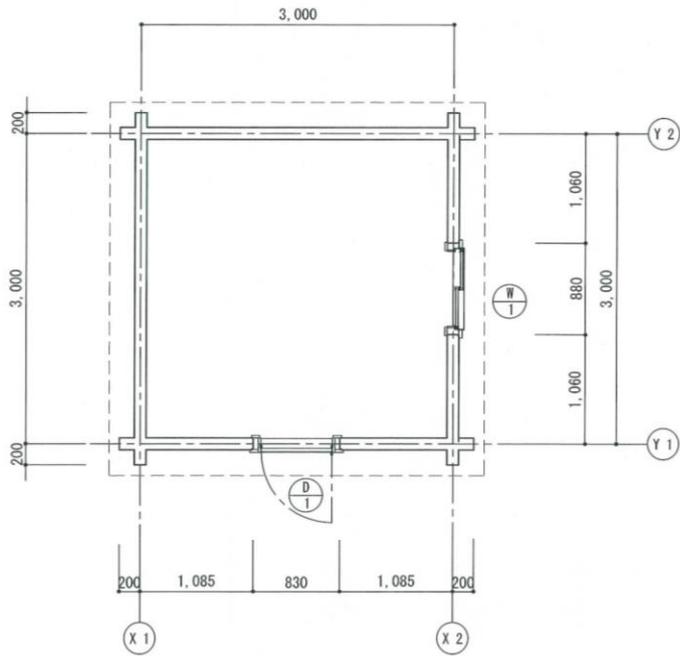
図 4.2-1 ログハウス実験棟の位置図（福島県いわき市小川町下小川字広畑 167-2 番地）

4.3 ログハウス実験棟の概要

4.3.1 図面

基礎は実験棟ということからコンクリートブロックによる簡易基礎、構造は丸太組構法・平屋建て、建築面積は約 13 m²、延床面積 9 m²、屋根は板金とした。

ログ壁の構成は、上部から心持ちログ材 3 段、乾燥条件①のログ材 4 段、乾燥条件②及び③のログ材をそれぞれ 3 段ずつ使用した。また、床は構造用合板、ログ壁以外の棟木、矢切等は心持ち材を使用した（図 4.3.1-1、図 4.3.1-2）。



建具リスト

D1	ノダ E-12型 開き勝手R
W1	サーモスA 引違い窓 07405

図 4.3.1-1 ログ実験棟・平面図

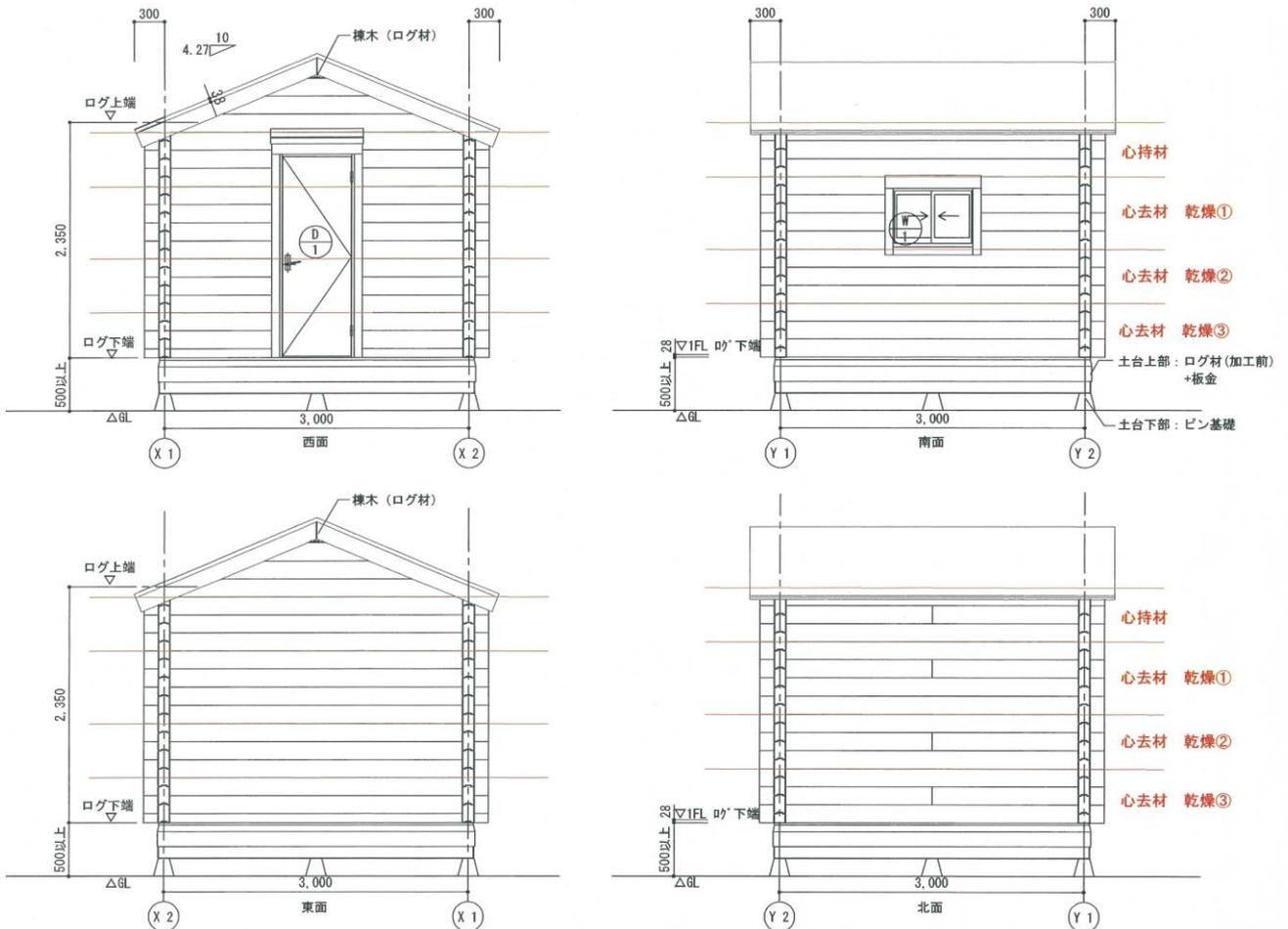


図 4.3.1-2 ログ実験棟・立面図

4.3.2 建設

ログハウス実験棟の建設は、令和4年1月17日に基礎～ログ壁の組上げ・野地板の設置までを作業員5人（人力）により7時間（ログ材の含水率・木口割れ等の計測を含む）で仕上げた。屋根については屋根業者の都合で後日となったが、トータルで1日足らずで完成した（写真 4.3.2-1）。



土台(枠組み)



土台（床板）



土台細部



ログ組上げ(1)



ログ組上げ(2)



ログ組上げ(3)



ログ組上げ－1段目



ログ組上げ－5段目



ログ組上げ－13段目



ログ組上げ－矢切部分



ログ組上げ－上棟



完成

写真 4.3.2-1 ログハウス実験棟の建設

4.3.3 経年変化調査

ログハウス実験棟に使用した心持ちログ材及び乾燥条件①②③の心去りログ材については、建設時に① 含水率（含水率計による）、② 表面割れ（幅 1 mm 以上）、③ 木口割れ（幅 1 mm 以上）等を測定・記録するとともに、④ セトリング量（ログ部分の総高さ測定）、⑤ 実勘合部の浮き・ねじれ、⑥ 水染み等の有無を確認・記録した（写真 4.3.3-1）。

反りは全てのログ材において 3 mm 以下であり、反りやねじれで実勘合部に浮き、ねじれが出た箇所はなかった。また、心去り材の内部割れは少なく、表面割れはほとんどが木表側の割れであった。

今後、定期的（建設 3 か月後、1 年間ごとに 6 年間）に含水率、表面割れ、木口割れ、セトリング量、実勘合部の浮き・ねじれ、水染み等の経年変化を測定し、乾燥条件①②③の心去りログ材の有効性等を検証していくこととする。

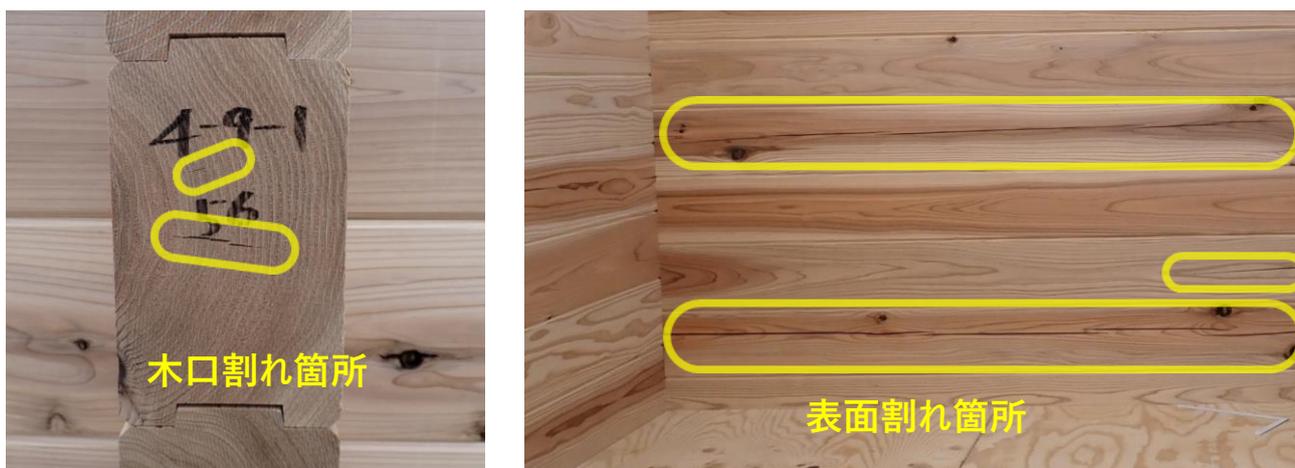


写真 4.3.3-1 木口割れ、表面割れの箇所

4.3.4 まとめ

- 1) ログハウス実験棟（平屋建て・床面積 9 m²）の建設は、心持ちログ材 16 本、心去り材ログ材（乾燥スケジュール①16 本、乾燥スケジュール②12 本、乾燥スケジュール③12 本）を使用して 1 日弱で完成した。
- 2) 心去り材は心持ち材に比べ表面割れ・内部割れが少なく、節の出も少ないという材面特性を持っている。ログハウス実験棟では心去りログ材の木表を内装側に配置したことから、写真 4.3.4-1 にみられるように、心持ち材に比べ節などが少ない心去り材特有のきれいな表面仕上がりとなった。

- 3) 心持ち材及び乾燥条件①②③の心去り材について、建設後の挙動の違いを確認するため、含水率や表面割れ・木口割れ等の経年変化を定期的に調査することとしており、心去りログ材の有効性・優位性等の検証には今少し時間が必要である。



写真 4.3.4-1 実験棟の内部

第3章 まとめ

福島県産スギ心去りログ材の乾燥スケジュールを確立することを目的に、3つの乾燥スケジュールを設定し、スギ大径材から採材された心去り平角を対象に製材・乾燥・強度試験を行った。製材・乾燥コスト、仕上がり品質や強度性能等を比較検証した結果、以下の知見が得られた。

1. 製材

福島県産スギ大径材から製材寸法 135×215 mm の心去り平角を 2 丁取る木取りで製材試験を行い、製材歩止りや生産性を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 製材歩止り（粗挽き寸法）は、製品全体で 62%、心去り平角のみでは 38%であった。
- 2) 心去り平角木取りの製材手順にオペレータが習熟したことに加え、副製品の寸法の組み合わせ等から効率的に製材しやすい径級 38～40 cm の丸太が 9 割以上を占めていたこと等から、昨年度に比べて大割工程の生産性が向上した。
- 3) 製材コストは、原木価格の上昇により増加したが、生産性向上により原木消費量が増加すると仮定すると、昨年度の心去り平角より 15%増、今年度の条件下で心持ち平角と比較すると 14%増と試算された。

2. 乾燥

昨年度検討した乾燥スケジュールの中で最も仕上がり品質が良かった乾燥条件①(120°Cの高温セット処理 10 時間+天然乾燥 1 か月+70°Cで人工乾燥)をベースにして、①から高温セット処理を省略した乾燥条件②、①から天然乾燥を省略した乾燥条件③の計 3 条件でスギ心去り平角の乾燥試験を行い、乾燥コスト及び仕上がり品質を比較検証した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 乾燥スケジュールごとに乾燥コスト（直接費）を試算した結果、乾燥条件①、②、③でそれぞれ 4,860 円/m³、5,583 円/m³、6,535 円/m³と試算された。乾燥条件①の直接費が最も低かったが、直接費以外の費用（天然乾燥に必要な土地代や材の搬送等に係る人件費）や機会損失を考慮すると、乾燥条件①と②③のトータルコストの差はかなり縮まると考えられる。
- 2) 仕上げ加工後の平均含水率は、乾燥条件①が最も高い 24.5%、乾燥条件②が最も低い 20.2%であり、目標含水率の 20%よりも少し高めであった。その後 1 か月間の養生によって、いずれの乾燥条件も大部分の試験体は含水率 20%を下回り、昨年度の乾燥試験でみられた含水率 10%を下回る過乾燥材の割合も少なく、3 条件ともに概ね適切な含水率範囲に収まった。

- 3) 表面割れの発生した試験体数は乾燥スケジュール①と②でほぼ同じであったことから、高温セット処理を施さなくても、心去り平角では表面割れがそれほど発生しないことがわかった。ただし、今回用いた 120°C10 時間の高温セット処理は表面割れの抑制にあまり効果がなかった可能性があり、高温セット処理の時間を長くすることが可能かどうか検討する余地が残されている。
- 4) 天然乾燥を省略した乾燥条件③の内部割れ総長さは乾燥条件①、②の 2 倍以上であり、2 次乾燥の前に天然乾燥を行うことによって、内部割れの発生が大きく軽減されることが明らかとなった。乾燥スケジュール③は内部割れの発生量が比較的多く、長辺を横切る大きな内部割れが散見されたことから、乾燥スケジュール③のスギ心去りログ材を使用する場合には雨水の侵入等に留意する必要があると考えられる。

3. 強度

スギ心去り平角の強度を低下させない人工乾燥方法を開発することを目的に 3 種類の乾燥スケジュールの曲げ強度性能について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 昨年度、スギ心去り平角の乾燥方法として適切と判断された乾燥条件①(120°Cの高温セット処理 10 時間+天然乾燥 1 か月+70°Cで人工乾燥)について再度試験を実施した結果、昨年度と同様、基準強度を満足させる適切な乾燥スケジュールであることが確認された。また、乾燥条件①から高温セット処理を省略した乾燥条件②、及び天然乾燥を省略した乾燥条件③の強度試験結果から、乾燥条件①と比較して、せん断破壊した試験体数(S)、最大応力時のたわみ δ_b 、曲げ強度に対する比例限応力の比(σ_{bp}/σ_b)にやや違いは認められたものの、ほぼ同等の曲げ強度が得られることがわかった。
- 2) 曲げ強度と内部割れ総長さとの関係について検討した結果、昨年度の結果とは異なり、明確な関係は認められなかった。また、せん断弾性係数と内部割れ総長さの間にも明確な関係は認められなかった。この点について、今年度の乾燥条件がスギ心去り平角の乾燥方法として適切なスケジュールであり、内部割れが大きく強度を低下させるようなスケジュールで乾燥された人工乾燥材でなかったことが影響したと推察される。

今後は、高温セット処理の時間を長くするなど、より短い期間での乾燥スケジュールの開発を目的に、どの程度まで可能なのか明らかにすることが実務的に求められよう。また、曲げ試験時の含水率に問題はなかったが、人工乾燥終了時の含水率は想定よりもやや高かった。この点について、仕上がり含水率をもっと低かった場合に同様の結果に得られたかを今回の結果から憶測することは困難であり、今後の課題である。

第4章 今後の課題・展開等

今回の事業により、現時点でのスギ心去り平角に適した乾燥スケジュールを確認できたが、一方で課題も多く残された。

1. スギ心去り平角に適した製材システムの構築

今回の送材車付帯鋸盤による製材では、心去り平角木取りの製材手順にオペレータが習熟したことに加え、効率的に製材しやすい径級 38~40 cm の丸太の割合が高かったことから、昨年度に比べて大割工程の生産性が向上した。今後、生産量を増やして製材コストを下げるためには、修正挽きや小割・耳摺りの工程も含めた効率的な製材システムの構築が必要である。

2. 効率的なスギ心去り平角の乾燥スケジュールの確立

今回実施した乾燥条件①②③では、曲げ強度に明確な違いは認められず、3種類とも基準強度をほぼ満足した。ただし、天然乾燥を省略した乾燥条件③では、①②に比べ内部割れの量が2倍以上発生しており、基準強度はほぼ満足しているものの、通しボルトを使用するログ材等での用途での検証が必要である。また、実用上は過乾燥に仕上げられる場面も想定されるのに対して、今回の試験では人工乾燥終了時の含水率が想定よりもやや高かったので、さらに低含水率まで乾燥したときの内部割れ発生量について検証する必要がある。

3. スギ心去りログ材の実用化に向けて

ログハウス実験棟では、乾燥条件①②③のログ材及び比較対象として心持ちログ材を使用し、今後、定期的な調査により心去りログ材の経年変化や優位性等を検証することとしており、結果を得るには少し時間が必要である。

令和2年度 木材製品の消費拡大対策のうち
CLT 建築実証支援事業のうち CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業
スギ心去りログ材に適した乾燥スケジュール等の開発事業報告書

令和4年2月

一般社団法人 木のいえ一番協会
〒150-0045 東京都渋谷区神泉町 22-2 神泉風来ビル 2階
TEL. 03-5790-6360 Email. info@kinoie-1ban.or.jp

