

高耐久性部材の開発

— 過熱水蒸気処理材の寸法安定性，強度性能，材色について —

奥原祐司・吉田孝久・今井信・山口健太・小池直樹・吉川達也・丸山淳治*・桑山知子**

環境への負荷が低い製品使用が今後期待されることから，県産針葉樹 4 樹種（カラマツ，アカマツ，スギ，ヒノキ）を木材改質処理装置により過熱水蒸気処理し，製品化に必要な処理方法と処理材の諸性能を検討した。

その結果，(1) 過熱水蒸気処理により含水率は 1~2% となり，収縮率は，4 樹種とも幅（接線方向）及び厚さ（半径方向）で 6% 前後となった。(2) 吸水率は，中温乾燥材に比べ過熱水蒸気処理材の方が 5 割程度低下していた。また，カラマツの吸水率は，他の樹種に比べ低い結果となった。(3) 曲げ強さは，中温乾燥材に比べ過熱水蒸気処理材の方が低かった。(4) 過熱水蒸気処理材の材色は，明度が低下し黒色化した。また，カラマツについてはこの傾向が強かった。(5) 乾湿繰り返し試験における寸法変化では，中温乾燥材に比べ過熱水蒸気処理材の寸法安定性が高かった。

キーワード：過熱水蒸気，寸法安定性，材色，高耐久性

緒言

第 1 章 過熱水蒸気処理材の処理方法の検討と基本的材質の把握

1 試験方法

- 1.1 供試材
- 1.2 乾燥及び過熱水蒸気処理方法
- 1.3 収縮率試験
- 1.4 吸水率及び膨潤率試験
- 1.5 曲げ強度試験
- 1.6 材色調査
- 1.7 乾湿繰り返し試験

2 試験の結果

- 2.1 収縮率及び全乾密度
- 2.2 吸水率及び膨潤率
- 2.3 曲げ強度性能
- 2.4 材色
- 2.5 乾湿繰り返しによる寸法変化

第 2 章 アカマツの辺材と心材別の過熱水蒸気処理特性

1 試験方法

- 1.1 供試材
- 1.2 乾燥及び過熱水蒸気処理方法
- 1.3 吸水率及び膨潤率試験
- 1.4 乾湿繰り返し試験
- 1.5 曲げ強度試験

2 試験の結果

- 2.1 吸水率及び膨潤率
- 2.2 乾湿繰り返しによる寸法安定性
- 2.3 曲げ強度性能

まとめ

結言

緒言

木材を屋外で使用する場合は，劣化（腐る，燃える，狂う）を抑制するため，木材保存剤（防腐剤や塗料）の使用や化学加工処理された木製品が多く存在する。また，木材は湿度変化に応じて水分を吸放出する機能があるものの，寸法安定性が他の材料と比較すると低いとされている。このため，これまで多くは防水性の薬剤を木材に塗布したり注入したりすることにより寸法安定性を高めてきた。

しかし，近年，薬剤等を使用せずに寸法安定性を高める方法として熱処理^{1), 2)}が登場し，既に外装材に多く使用されている^{3), 4), 5)}。

今後，県産カラマツやアカマツ等を過熱水蒸気処理した木材は，環境への負荷が低い木製品として期待されることから，本研究では過熱水蒸気処理材による高耐久性部材の開発を目的とした。

これまでに，スギについては，ヒルデブランド（株）が開発した木材改質処理装置（スーパーヒートコンディショナー）を使用し，窒素ガス環境下において処理温度の変化に伴う寸法安定性試験⁶⁾は実施しているが，スギ以外の樹種については試験を実施していない。このため，県内で多く生産されるカラマツ，アカマツ，スギ，ヒノキについても過熱水蒸気処理による高耐久性部材の開発を目指して，その処理方法と諸性能を検討した。

なお，本研究は県単課題（木製屋外構造物の劣化

*モカウッドジャパン株式会社

**株式会社テオリアランバーテック

調査と高耐久性部材の検討)及び(株)テオリアランバーテックとの技術協力により実施した。

第1章 過熱水蒸気処理材の処理方法の検討と基本的材質の把握

1 試験方法

1.1 供試材

長野県産のカラマツ、アカマツ、スギ、ヒノキの丸太から製材された厚さ40mm×幅120mm×長さ4,000mmを供試材とした。

1.2 乾燥及び過熱水蒸気処理方法

以下の3条件について4樹種同時に各条件で処理した。

条件1は、「前処理」として蒸煮と減圧を繰り返す蒸煮減圧処理を3回実施した後に「減圧乾燥」により供試材をほぼ全乾状態にし、その後、引き続き電熱ヒーターにより最高温度220℃の「過熱水蒸気処理」を実施した(表-1)。

条件2は、時間を短縮するため条件1から「前処理」を除いた処理とした(前処理は、装置内を複数回蒸煮減圧により脱気し、その後、水蒸気に置き換え温度制御の精度を高めるもの)。

条件3は、過熱水蒸気処理を行わず中温乾燥のみを表-2のスケジュールで実施した。

なお、条件1及び2は、当センターが所有するヒルデブランド(株)製のスーパーヒートコンディショナーHD03/SHC-I, 条件3はスーパーミニドライヤーHD74/MHを使用した(写真-1)。

表-1 過熱水蒸気処理等スケジュール

項目	圧力 (kPa)	乾球温度 (°C)	時間 (h)
前処理	-80	-	3
減圧乾燥	-80	90	72
熱処理	10	220	15

※220℃は最高温度

表-2 中温乾燥スケジュール

項目	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	時間 (h)
蒸煮	80	80	8
中温乾燥	80	80→50	149
調湿	70	63	24



写真-1 左: HD74/MH, 右: HD03/SHC-I

1.3 収縮率試験

試験材は図-1 のとおりエンドマッチの供試材を切り出し、それぞれの条件で処理した。

処理前後の試験材(条件1, 条件2, 条件3を各10枚)の中央部において、図-2 のとおり幅(接線方向)及び厚さ(半径方向)とし、収縮率を次式より算出した。また、収縮率を測定した材から試験片を切り出し全乾密度及び含水率を測定した。

$$\text{収縮率(\%)} = (L_1 - L_2) / L_1 \times 100$$

L₁: 生材の幅及び厚さ

L₂: 過熱水蒸気処理・中温乾燥後の幅及び厚さ

単位: mm

【条件1】 前処理 過熱水蒸気処理	初期 含水率	【条件2】 過熱水蒸気処理	初期 含水率	【条件3】 中温乾燥	120
1,300	Σ	1,300	Σ	1,300	
4,000					

図-1 エンドマッチにより切り出した試験材

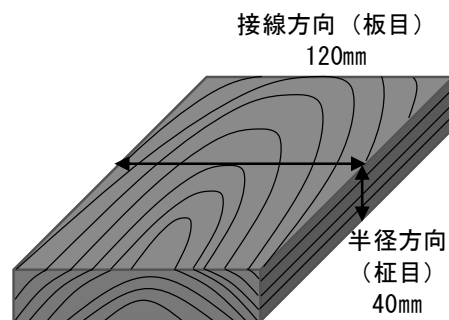


図-2 試験材の計測箇所

1.4 吸水率及び膨潤率試験

エンドマッチにより処理された供試材から条件 2 (過熱水蒸気処理) と条件 3 (中温乾燥) を試験材とした。

試験材の寸法は 30×105×400 mm に整形し、優良木質建材等の品質性能評価基準 K-1 熱処理壁用製材⁷⁾ (以下、基準という) を参考に図-3 のとおり浸漬直前に 2 方向の寸法 (接線方法 3 箇所及び半径方向 3 箇所) と質量を測定した。次に水中 (10~25℃) に 24 時間浸漬後、試験材を布で水気を取り除き質量と寸法を測定した。その後、70℃ の恒温乾燥機中で浸漬前の質量の 100~110% の範囲となるよう乾燥した。乾燥後、試験材の質量、寸法を測定し、吸水率及び膨潤率は次式により算出した。

なお、寸法は 3 箇所の平均値とし、合否判定基準は、浸漬前と乾燥後の寸法の差が ±1 mm 以下である。

$$\text{吸水率 (\%)} = (W2 - W1) / W1 \times 100$$

W1 : 浸漬前質量 W2 : 浸漬後質量

$$\text{膨潤率 (\%)} = (S2 - S1) / S1 \times 100$$

S1 : 浸漬前面積 S2 : 浸漬后面積

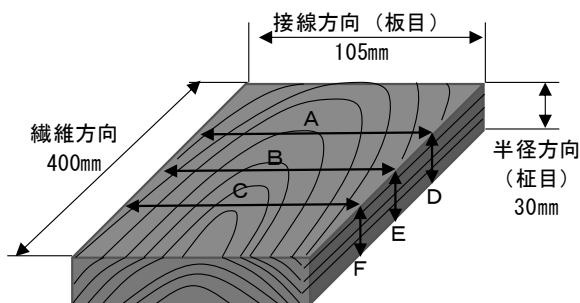


図-3 試験材の測定箇所

1.5 曲げ強度試験

条件 1~3 により処理された供試材から無欠点試験片 (30×30×480 mm) に整形し、恒温恒湿室 (温度 20℃, 湿度 65%, EMC 11.7%) において 3 カ月間調湿後、ミネベア製万能引張圧縮試験機 (最大荷重 50kN) を使用し、JIS Z2101(2009) 「曲げ試験」 に準じて、中央集中荷重方式、荷重速度は 5 mm/分、中央部のたわみ値はストローク値として実施した (図-4)。

試験により得られたデータから見掛けの曲げヤング係数 (E_{b-ap}) (以下、曲げヤング係数という) 及び曲げ強さ (σ_b) を次式により算出した。

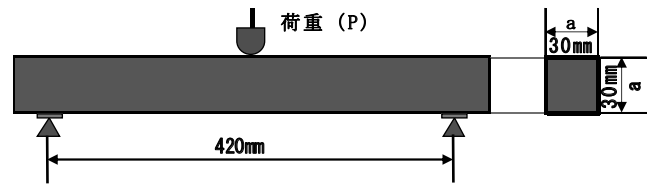


図-4 曲げ強度試験の方法

$$E_{b-ap} = \frac{\Delta P l^3}{48 I \Delta y} \quad \sigma_b = \frac{P_m l}{4Z}$$

l : 支点間距離 (mm)

Z : 断面係数 $Z = \frac{a^3}{6}$ (mm³)

I : 断面 2 次モーメント $I = \frac{a^4}{12}$ (mm⁴)

ΔP : 比例限度領域における上限と下限荷重との差 (N)

Δy : ΔP に対応するスパン中央のたわみ (mm)

P_m : 最大荷重 (N)

1.6 材色調査

条件 1~3 により処理された供試材から屋外用 (12 本) 及び屋内用 (12 本) の試験材 (30×100×215 mm) を切り出した。

試験期間は、2019.11.12~2021.1.14 の 429 日間、当センター木材強度試験棟の南側の屋外 (昼間日陰にならない場所) の地上高 75 cm 机上に試験材を設置した (写真-2)。約 30 日ごとに供試材を屋内に移動し、コニカミノルタ製色差計 (CR-300) で早材部 (一部晩材部含む) を 3 回測定し、 L^* , a^* , b^* の値をそれぞれ平均した (図-5)。

また、比較用として、屋内 (半日は日光が入るが、直接、試験体には当たらない場所) にも試験材を机上に設置し同様に測定した (写真-3)。

なお、次式により 429 日間経過した色差を算出した。

$$\Delta E^*ab = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

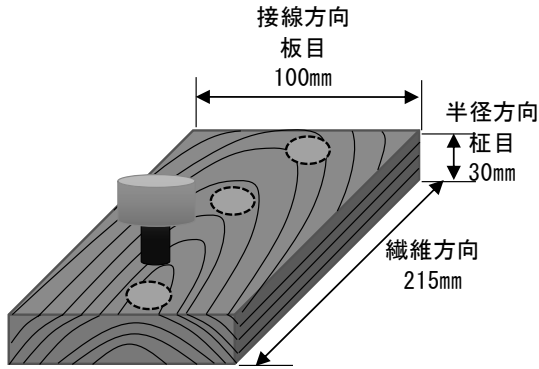


図-5 試験材の測定箇所



写真-2 屋外に設置した試験材



写真-3 屋内に設置した試験材

1.7 乾湿繰り返し試験

各条件で処理された供試材から 30×105×200 mmの試験材を切り出した。試験材は、含水率を安定させるため、恒温恒湿器（いすゞ製作所 HPAV-210-20）において、温度 40℃、湿度 65%、EMC11.2%の環境下で3か月間調湿した。調湿後、試験材の中央部付近の節や割れがない部分において接線方向を幅、半径方向を厚さとして寸法をノギスにより測定した（図-3）。その後、高湿環境下（温度 40℃、湿度 92%、EMC20.3%）と低湿環境下（温度 40℃、湿度 48%、EMC8.1%）を2回繰り返し、同様の方法で測定した（各環境下では1週間に1回質量を測定し質量変化が1g以内になるまで続けた）。

なお、以下により膨張率と収縮率を求めた。

膨張率(%) = $(L_3 - L_1) / L_1 \times 100$ ・・・高湿環境

L₁ : EMC11.2%時の2回の平均幅及び平均厚さ

L₃ : EMC20.3%時の2回の平均幅及び平均厚さ

収縮率(%) = $(L_1 - L_2) / L_1 \times 100$ ・・・低湿環境

L₁ : EMC11.2%時の2回の平均幅及び平均厚さ

L₂ : EMC8.1%時の2回の平均幅及び平均厚さ

2 試験の結果

2.1 収縮率及び全乾密度

生材からの過熱水蒸気処理及び中温乾燥後の含水率を図-6に示す。

過熱水蒸気処理材の処理直後の含水率は1~2%であった。中温乾燥材の含水率にバラツキがあるのは、カラマツの含水率を15%にするための中温乾燥スケジュールであったことから他の樹種は低い含水率となった。

生材からの収縮率を図-7~10に示す。

収縮率は過熱水蒸気処理により4樹種の幅方向及び厚さ方向は、当然ではあるが中温乾燥材よりも仕上がり含水率の低かった過熱水蒸気処理材の方が大きくなった。

過熱水蒸気処理材（条件1、条件2）は、含水率がほぼ全乾になりその収縮率の平均値は、幅方向（接線方向）、厚さ方向（半径方向）の順に、カラマツ 6.3%、6.0%、アカマツ 6.8%、6.5%、スギ 5.3%、6.4%、ヒノキ 5.6%、4.4%であった。

4樹種の全乾密度を図-11に示す。過熱水蒸気処理により4樹種ともに中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が低くなった。

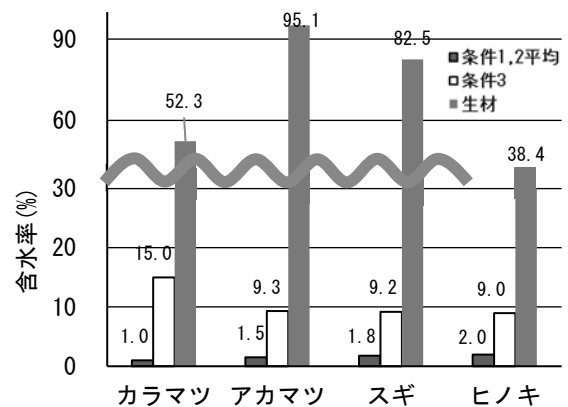


図-6 各樹種の含水率

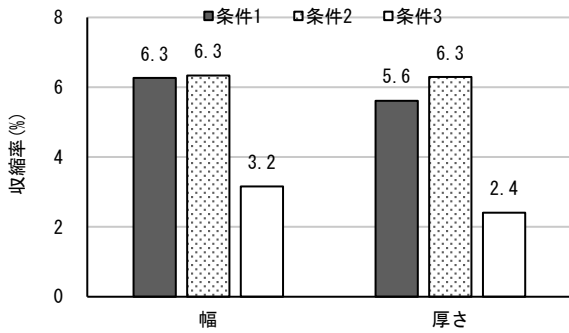


図-7 カラムツの収縮率 (n=10)

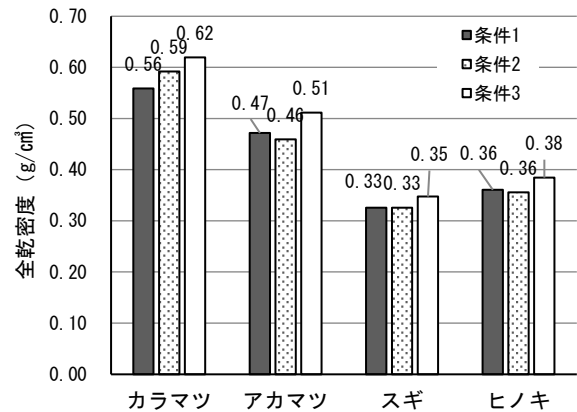


図-11 4樹種の処理後の全乾密度 (n=10)

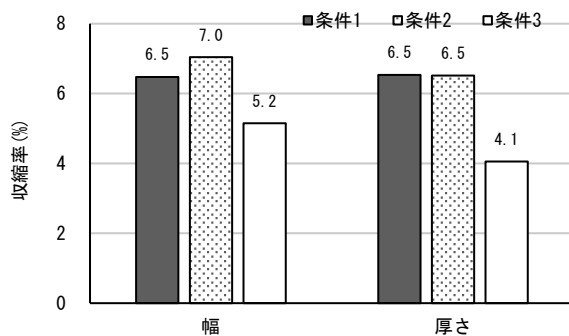


図-8 アカマツの収縮率 (n=10)

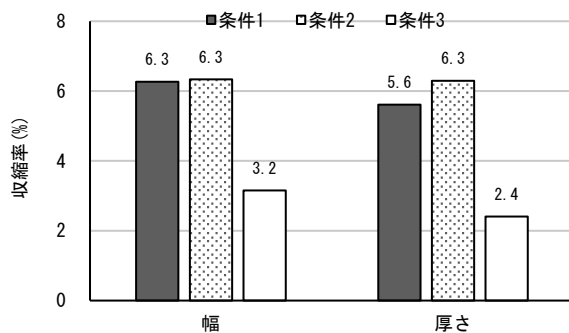


図-9 スギの収縮率 (n=10)

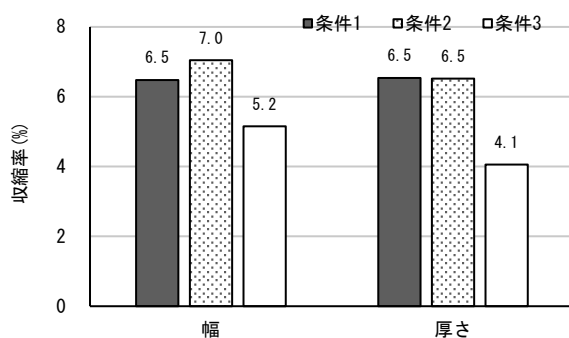


図-10 ヒノキの収縮率 (n=10)

2.2 吸水率及び膨潤率

アカマツの中温乾燥材の1枚以外の試験材は、接線方向及び半径方向の長さが基準の ± 1 mm以下となり、寸法安定性基準を満たした。基準を満たさなかったアカマツの中温乾燥材は、青変菌による変色が見られたことから、心材よりも辺材が多かったことが要因と推測する。エンドマッチした一方の過熱水蒸気処理材は基準を満たしたことから、過熱水蒸気処理による寸法安定性が向上したと思われる。

基準を満たさなかった1枚のアカマツの供試材を除いた4樹種の吸水率及び膨潤率を図-12及び13に示す。

4樹種ともに中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が吸水率及び膨潤率は低い結果となった。特にアカマツの過熱水蒸気処理材のバラツキは、中温乾燥材よりも小さく過熱水蒸気処理により吸水機能が低下したと推測される。

谷内ら⁸⁾はスギ材について「過熱水蒸気処理を行うと吸水率と膨潤率が大幅に減少し、特に220℃処理では、無処理に比べ吸水率及び膨潤率が7割程度減少する」としている。本試験での過熱水蒸気処理材(条件1)と中温乾燥材(条件3)の減少率は、表-3のとおりであり、スギの減少率は、吸水率が17%、膨潤率が50%であり、谷内らの結果とはやや異なった。原因については、心辺材の違いによる影響が大きいものと思われるが、このことについては第2章で検討する。

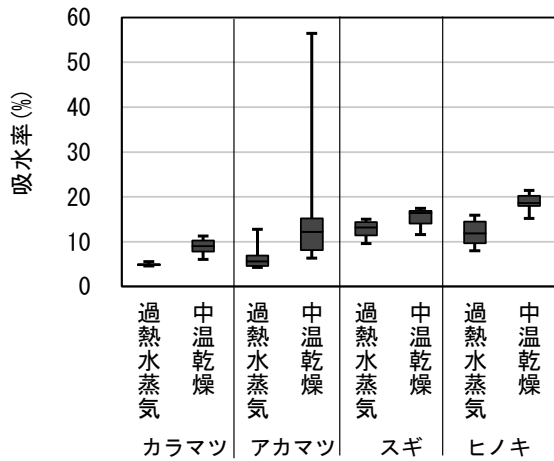


図-12 4 樹種の吸水率 (n=6)

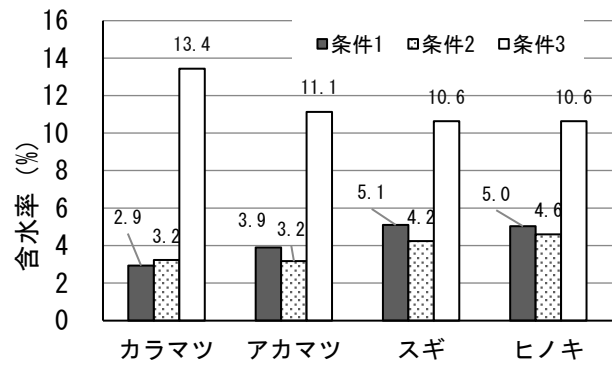


図-14 調湿後の各樹種の含水率 (n=3)

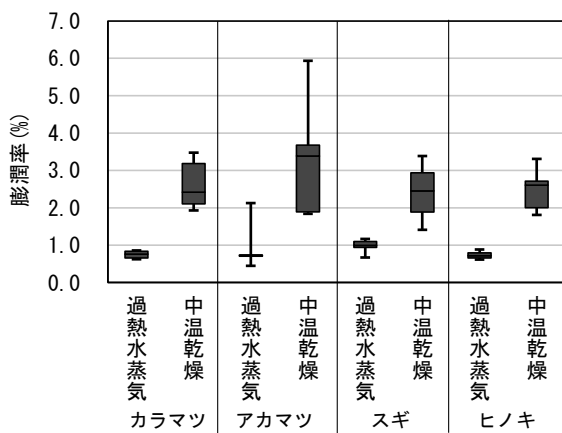


図-13 4 樹種の膨潤率 (n=6)

表-3 中温乾燥材と比較した
吸水率と膨潤率の減少率

	吸水率	膨潤率
カラマツ	45%	65%
アカマツ	66%	82%
スギ	17%	50%
ヒノキ	36%	66%

2.3 曲げ強度性能

調湿後の曲げ試験時における含水率を図-14 に示す。

恒温恒湿室において EMC 11.7% になるように 3 カ月間調湿した結果、処理後の含水率が 1~2% であった 4 樹種の過熱水蒸気処理材は、含水率が 2.9~5.1% までの上昇であった。一方、中温乾燥材の含水率は 10.6~13.4% であり、EMC 11.7% に収束した。

曲げ試験結果を表-4~7 及び図-15~18 に示す。

4 樹種とも過熱水蒸気処理材 (条件 1, 条件 2)

表-4 カラマツ曲げ試験結果

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)			曲げ強さ (N/mm ²)		
	条件1	条件2	条件3	条件1	条件2	条件3
個数	30	30	30	30	30	30
平均値	10.99	10.40	11.24	61.2	52.6	89.5
最小値	9.06	6.27	5.82	23.2	13.1	46.6
最大値	12.64	13.65	14.61	83.7	86.7	112.2
標準偏差	0.90	1.91	2.26	13.66	17.82	16.66
変動係数 (%)	8.19	18.42	20.08	22.34	33.90	18.63
5%下限値	-	-	-	35.63	19.27	58.32

表-5 アカマツ曲げ試験結果

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)			曲げ強さ (N/mm ²)		
	条件1	条件2	条件3	条件1	条件2	条件3
個数	30	30	29	30	30	29
平均値	10.42	10.00	10.93	52.2	50.0	97.8
最小値	7.50	7.08	8.92	32.2	15.8	73.3
最大値	13.63	12.96	13.01	83.7	77.4	118.8
標準偏差	1.70	1.58	1.09	13.99	14.62	11.57
変動係数 (%)	16.35	15.82	9.93	26.78	29.26	11.83
5%下限値	-	-	-	26.09	22.65	76.15

表-6 スギ曲げ試験結果

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)			曲げ強さ (N/mm ²)		
	条件1	条件2	条件3	条件1	条件2	条件3
個数	30	30	30	30	30	30
平均値	6.26	5.94	6.42	37.2	34.1	59.4
最小値	4.10	4.10	3.34	16.1	11.5	26.9
最大値	7.54	8.10	8.51	56.4	53.3	85.5
標準偏差	0.87	0.94	1.17	10.97	10.38	12.73
変動係数 (%)	13.83	15.89	18.30	29.52	30.44	21.42
5%下限値	-	-	-	16.67	14.69	35.63

表-7 ヒノキ曲げ試験結果

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)			曲げ強さ (N/mm ²)		
	条件1	条件2	条件3	条件1	条件2	条件3
個数	30	30	30	30	30	30
平均値	7.89	7.61	7.80	58.3	57.2	73.0
最小値	5.61	5.10	4.27	29.4	18.3	39.9
最大値	9.89	9.94	10.44	75.0	77.1	90.9
標準偏差	1.22	1.28	1.91	11.45	13.65	12.82
変動係数 (%)	15.49	16.79	24.51	19.64	23.88	17.56
5%下限値	-	-	-	36.92	31.67	49.03

は、中温乾燥材（条件3）よりも曲げ強さの平均値が低かった。

過熱水蒸気処理材（条件1）と中温乾燥材（条件3）の曲げ強さについてスチューデントのt検定を行った結果、4樹種とも有意であった（カラマツ $t(58) = 7.19$, $p < .001$; アカマツ $t(56) = 14.15$, $p < .001$; スギ $t(58) = 7.25$, $p < .001$; ヒノキ $t(58) = 4.66$, $p < .001$ ）。

4樹種の曲げ強さのグラフからもわかるとおり、全ての樹種において、過熱水蒸気処理により曲げ強さが低下した。

中温乾燥材と比較した低下率は、カラマツは約30%、アカマツは約50%、スギは約40%、ヒノキは約20%であった。また、曲げヤング係数のグラフ（図15~18）から4樹種とも過熱水蒸気処理による影響は見られないと推測する。

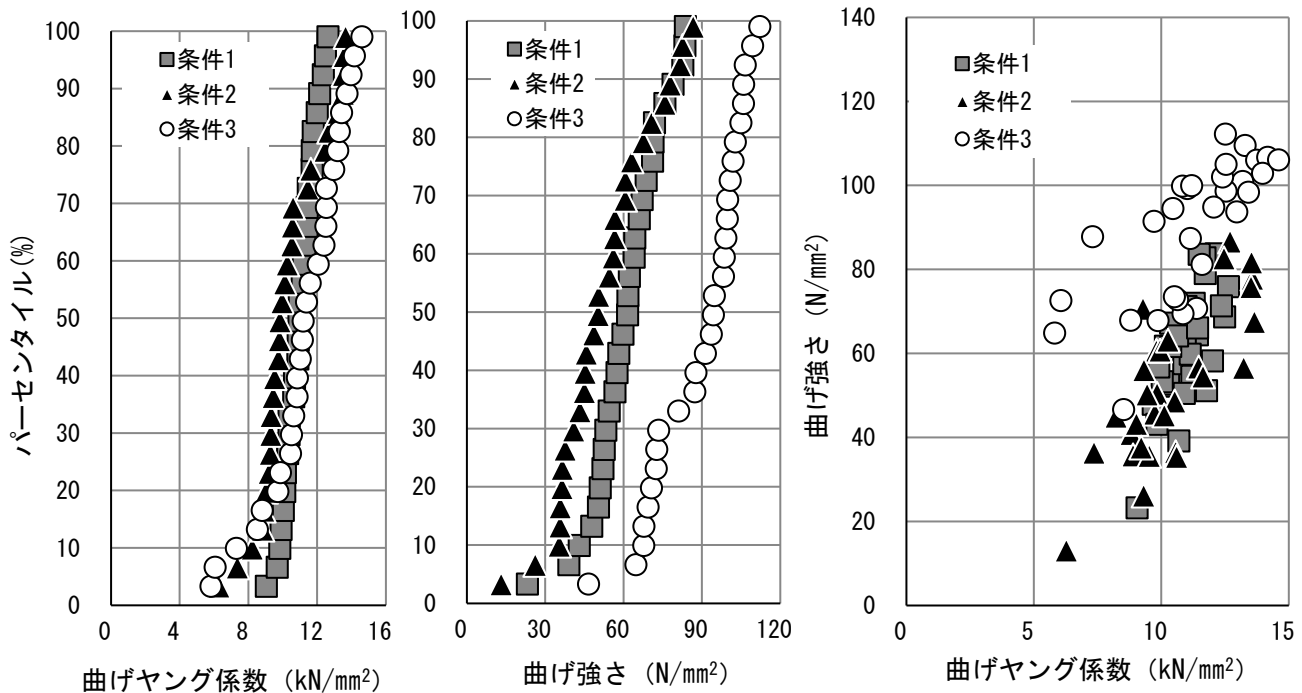


図-15 カラマツの強度性能 (n=30)

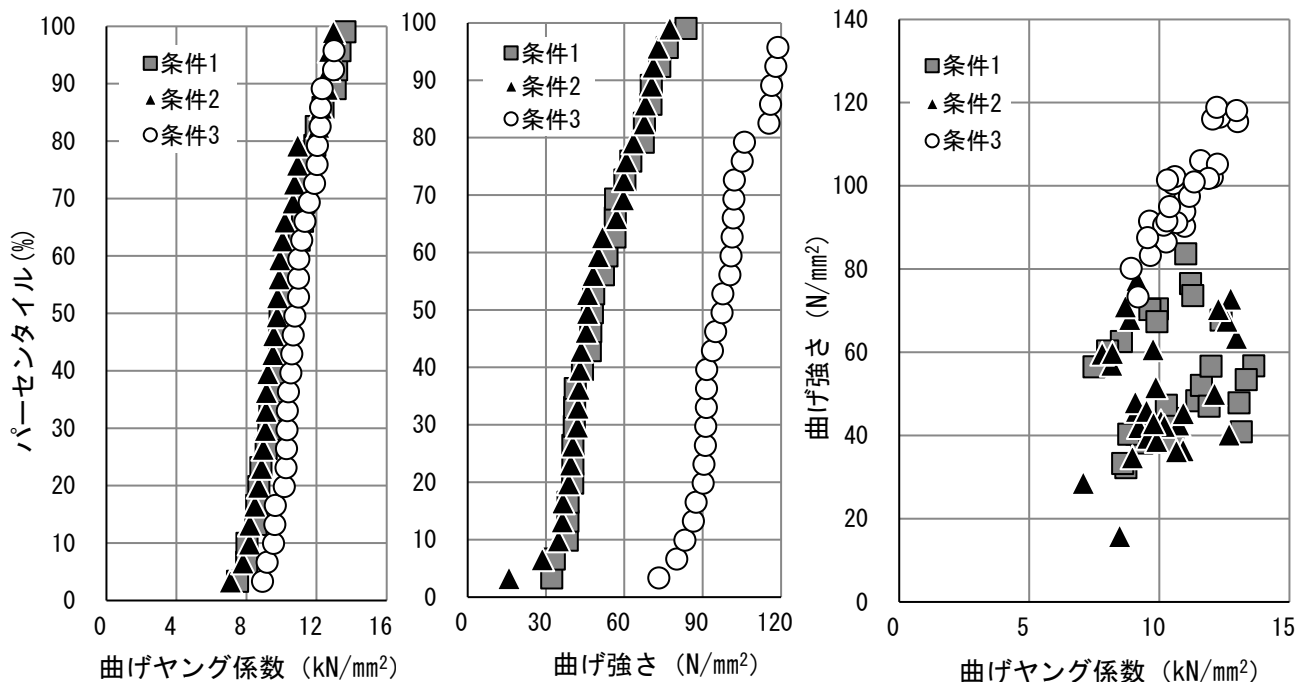


図-16 アカマツの強度性能 (n=30) ※中温乾燥のみ (n=29)

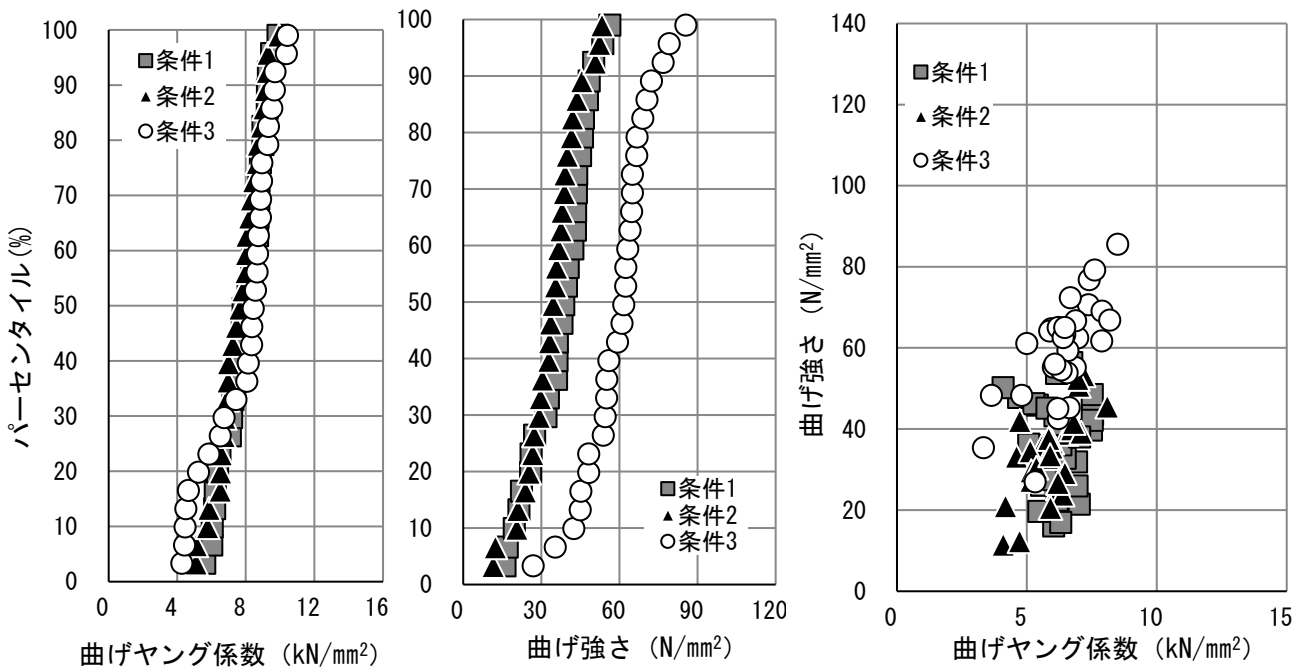


図-17 スギの曲げ性能 (n=30)

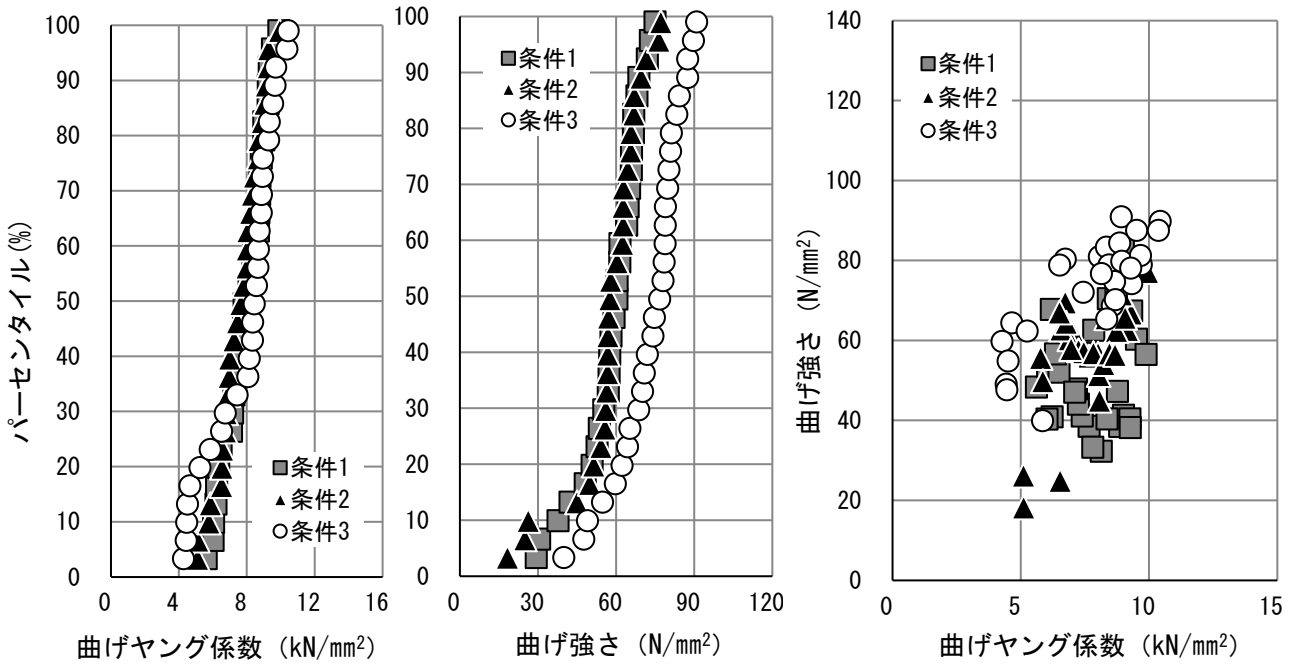


図-18 ヒノキの曲げ性能 (n=30)

2.4 材色調査

2.4.1 処理後の材色

条件1と条件2の材色はほぼ同じ状態であったため、ここでは、条件1（過熱水蒸気処理材）と条件3（中温乾燥材）の比較で検討する。

過熱水蒸気処理により明度は、中温乾燥材に比べて低下し黒色化が進んだ。特にカラマツにおいてはこの傾向が強かった（図-19・20）。

2.4.2 屋内及び屋外における材色変化

屋外及び屋内に設置した4樹種における初期値と429日経過後の明度（ L^* ）を図-19・20に示す。

4樹種とも過熱水蒸気処理材は明度が増加した。一方、中温乾燥材は明度が減少した。つまり屋外に設置した過熱水蒸気処理材は、時間の経過とともに黒色から灰色へ変化し、中温乾燥材は白色から灰色へと変化した。また、この変化は屋内より屋外の方が大きかった。

屋外及び屋内に設置した4樹種における初期値と429日経過後の a^* （赤み）と b^* （黄み）の関係を図-21～28に示す。

屋外におけるカラマツとアカマツの過熱水蒸気処理材は、中温乾燥材と比較すると a^* （赤み）と b^* （黄み）の変化が少なかった。

屋外及び屋内に設置した4樹種における初期値と429日経過後の色差（ ΔE^*_{ab} ：色差が大きいと色が大きく変化したことになる）を図-29・30に示す。

屋外における色差は、中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が少ない結果となり、色の変化が少ない。また、屋内における過熱水蒸気処理材は、4樹種ともに色差の変化が少なく、過熱水蒸気処理材を屋内で使用する場合は、塗装品と遜色ない製品として扱えるものと思われる。

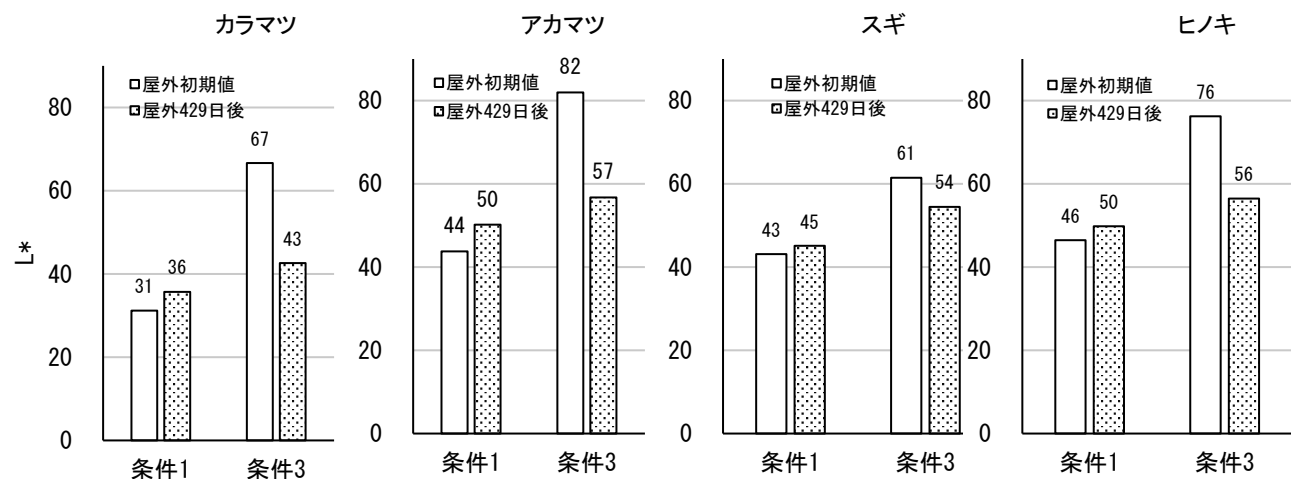


図-19 屋外における樹種別の明度変化 L^* (n=1)

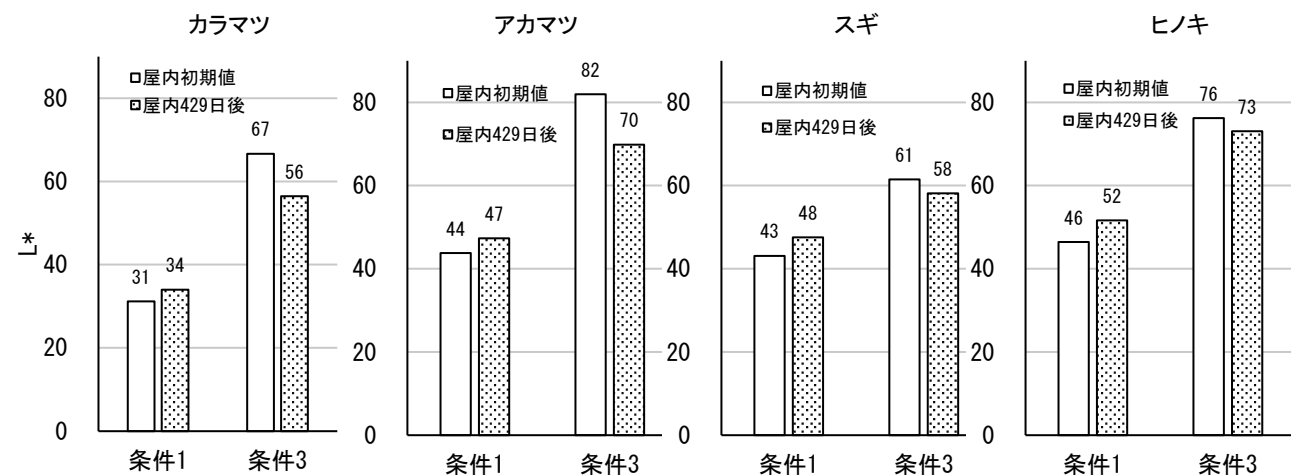


図-20 屋内における樹種別の明度変化 L^* (n=1)

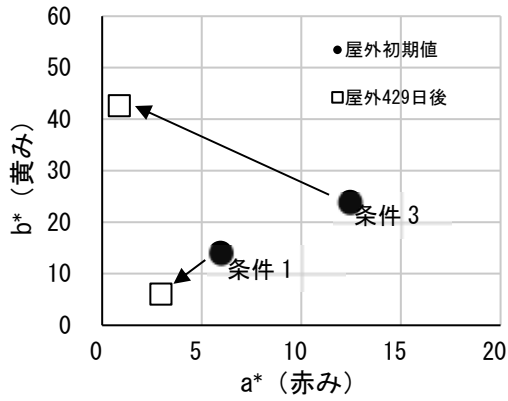


図-21 カラマツの屋外の a*b*(n=1)

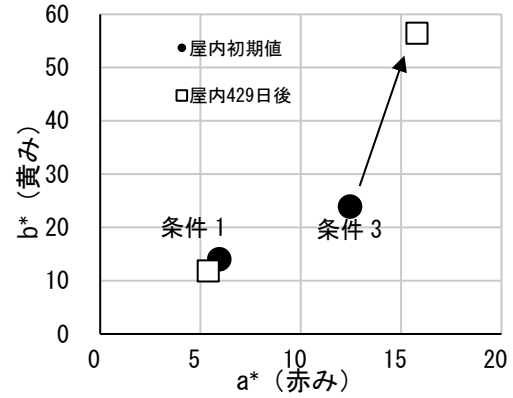


図-22 カラマツの屋内の a*b*(n=1)

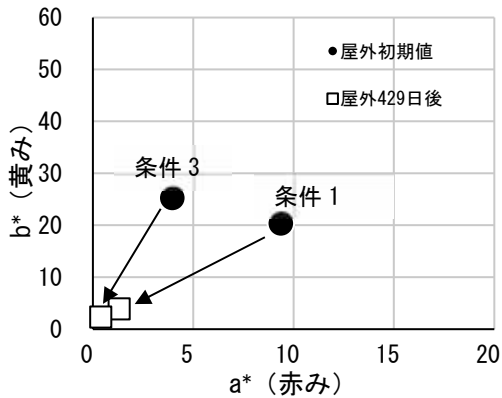


図-23 アカマツの屋外の a*b*(n=1)

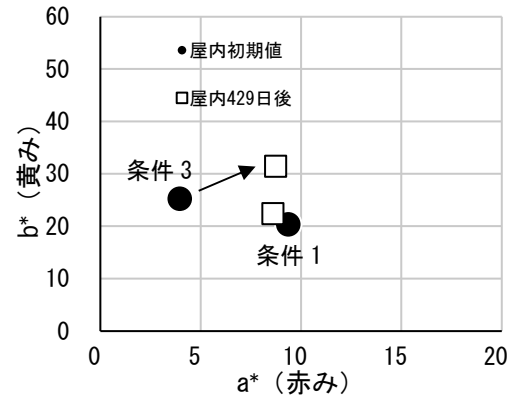


図-24 アカマツの屋内の a*b*(n=1)

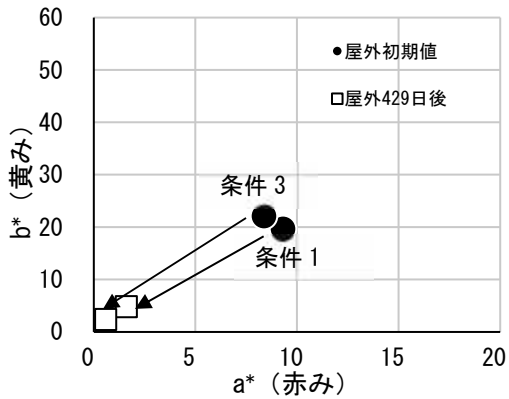


図-25 スギの屋外の a*b*(n=1)

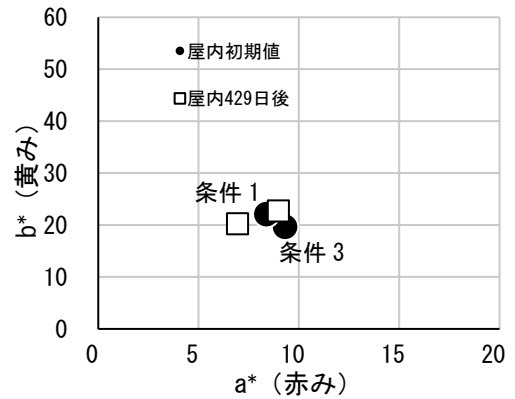


図-26 スギの屋内の a*b*(n=1)

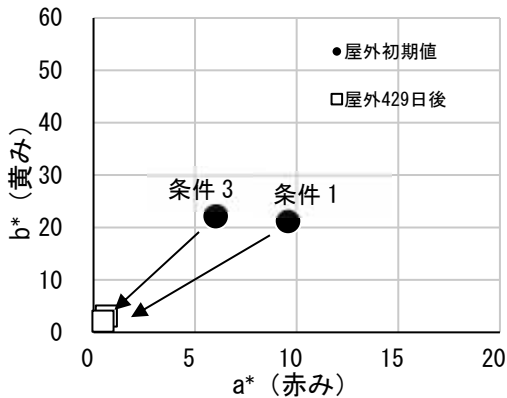


図-27 ヒノキの屋外の a*b*(n=1)

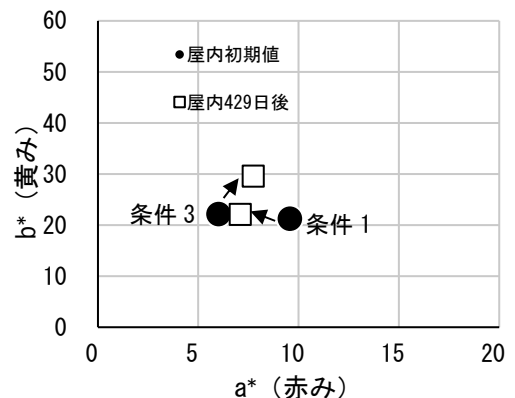


図-28 ヒノキの屋内の a*b*(n=1)

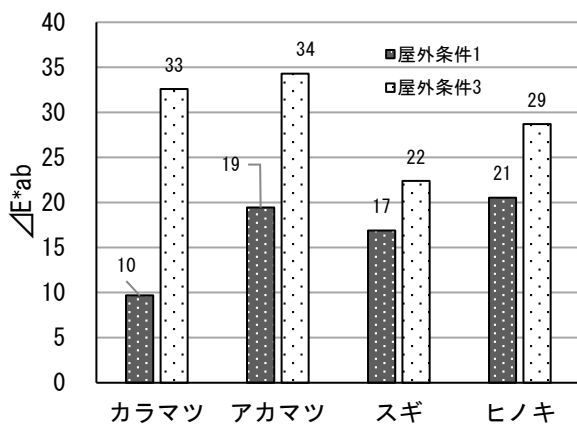


図-29 4樹種の屋外における色差 (n=1)

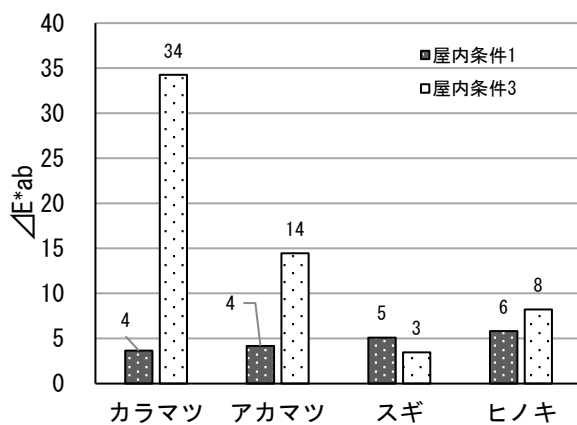


図-30 4樹種の屋内における色差 (n=1)

2.5 乾湿繰り返し寸法変化

幅（接線方向）及び厚さ（半径方向）の膨張率及び収縮率は図-31・32（上から最大値，第1四分位点，中央値，第3四分位点，最低値）に示す。何れも中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の収縮率及び膨張率は低い結果となった。また，収縮率では，過熱水蒸気処理により4樹種ともバラツキが小さくなり，特に辺材を多く含むアカマツの過熱水蒸気処理効果は大きいと推測する。なお，中温乾燥材において，幅（接線方向）：厚さ（半径方向）=2：1に膨張率及び収縮率がなっていないものは，接線方向が完全な板目ではなく追い桎部分が含まれていることが要因と推測する。

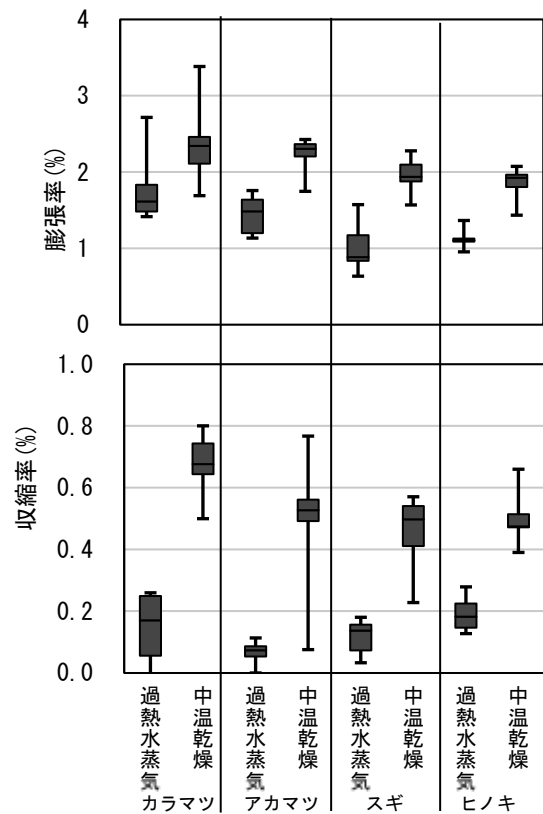


図-31 幅方向の膨張率(上図)と収縮率(下図) (n=3)

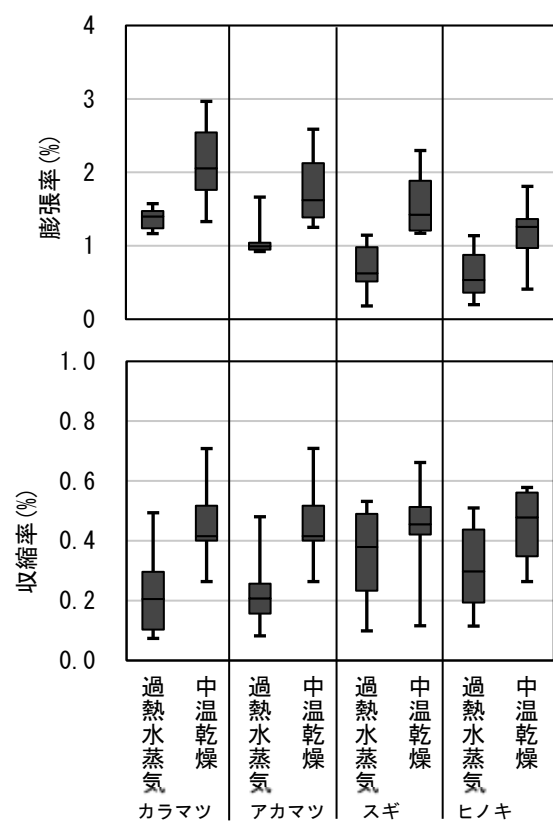


図-32 厚さ方向の膨張率(上図)と収縮率(下図) (n=3)

第2章 アカマツの辺材と心材別の過熱水蒸気処理特性

1 試験方法

1.1 供試材

供試材は、アカマツ丸太(写真-4~8)4本(末口平均径46~50cm,長さ4m,2本が健全な丸太であり,残り2本は松くい虫による被害地域の丸太(以下,被害木という))からデッキ材を想定した108枚の板目材(40×120×4000mm)を製材し,各処理を行った(過熱水蒸気処理92枚,中温乾燥16枚,内各8枚はエンドマッチ【丸太4本×2枚】)。

また,製材後に木取り図により心材と辺材を区分した。なお,エンドマッチした供試材は全て辺材とした(表-8)。

表-8 供試材一覧

区分	条件2 (過熱水蒸気処理)	条件3 (中温乾燥)	計
心材	27	8	35
心材と辺材が混在	44	0	44
辺材	21	8	29
計	92	16	108



写真-4 アカマツ丸太
(左から No. 1, 2, 3, 4)



写真-5 No. 1 (被害木)

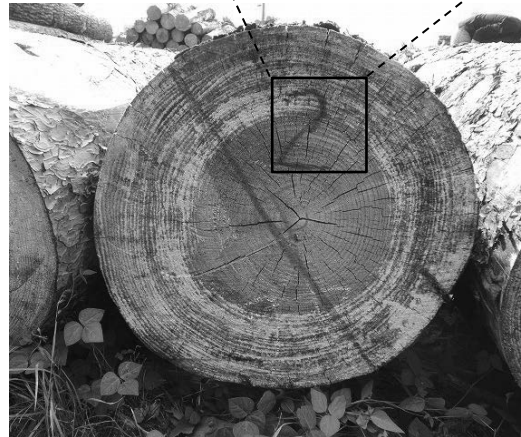


写真-6 No. 2 (被害木)



写真-7 No. 3 (健全木)



写真-8 No. 4 (健全木)

1.2 乾燥及び過熱水蒸気処理方法

「第1章 1.2 乾燥及び過熱水蒸気処理方法」と同じとする。

1.3 吸水率及び膨潤率試験

「第1章 1.4 吸水率及び膨潤率試験」と同じとする。なお、膨潤率は以下のとおり体積から長さに変更し計算した。

$$\text{吸水率(\%)} = (W2 - W1) / W1 \times 100$$

W1：浸漬前重量 W2：浸漬後重量

$$\text{膨潤率(\%)} = (L2 - L1) / L1 \times 100$$

L1：浸漬前寸法 L2：浸漬後寸法

1.4 乾湿繰り返し試験

試験材は、条件2と3の処理後にデッキ材を想定して30×105×400mmに整形し、接線方向(板目)を幅、半径方向(柾目)を厚さとして試験材の中央部付近で節や割れがない部分をノギスで測定した(図-33)。その後、恒温恒湿器(いすゞ製作所HPAV-210-20)において、低湿環境下(温度40℃、湿度48%、EMC8.1%)に置き、1週間に1回質量を測定し質量変化が1g以内になるまで継続した。この時、再度寸法を測定した。その後、高湿環境下(温度40℃、湿度92%、EMC20.3%)に温湿度環境を切り替え同様に測定した。

なお、以下により膨張率と収縮率を求めた。

$$\text{膨張率(\%)} = (L_3 - L_1) / L_1 \times 100 \dots \text{高湿環境}$$

L₁：EMC11.2%時の平均幅及び平均厚さ

L₃：EMC20.3%時の平均幅及び平均厚さ

$$\text{収縮率(\%)} = (L_1 - L_2) / L_1 \times 100 \dots \text{低湿環境}$$

L₁：EMC11.2%時の平均幅及び平均厚さ

L₂：EMC8.1%時の平均幅及び平均厚さ

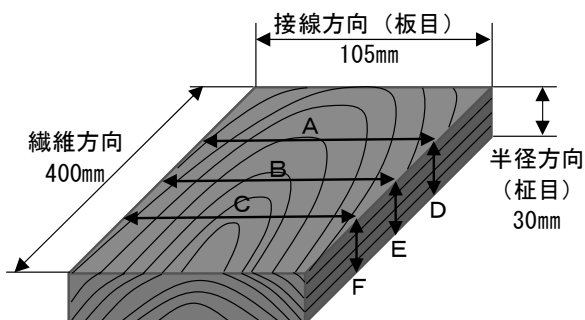


図-33 寸法測定箇所

1.5 曲げ強度試験

条件2と3の処理後に試験材を30×105×740mmに整形し、恒温恒湿室(温度20℃、湿度65%、EMC11.7%)で約2ヶ月間調湿した。

曲げ強度試験は、ミネベア製万能引張圧縮試験機(最大荷重50kN)を使用し、デッキ床材の施工を想定し、下部支点間距離(スパン)540mm、荷重点間距離180mmの3等分点4点荷重により実施した。載荷方向はフラットワイズ(板目材は木表荷重)、載荷速度は5mm/min、スパン中央の全体のたわみを測定し曲げヤング係数を算出した(図-34)。また、試験終了後、非破壊部分から含水率試験片を切り出し全乾法による含水率と全乾密度を測定した。

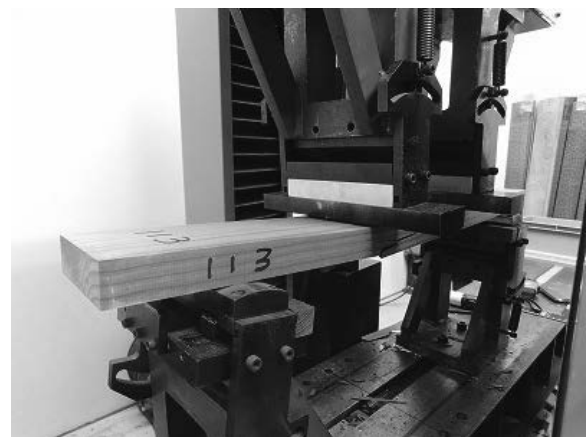
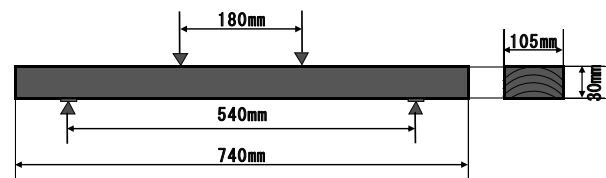


図-34 曲げ試験方法

2 試験の結果

2.1 吸水率及び膨潤率

過熱水蒸気処理材及び中温乾燥材の全ての試験材は、乾燥後の測定により幅(接線方向)及び厚さ(半径方向)ともに±1mm以下となり寸法安定基準を満たした。

エンドマッチした過熱水蒸気処理材と中温乾燥材に注目して、その吸水率を図-35に、膨潤率を図-36・37に示す。

吸水率の中央値では、過熱水蒸気処理材は中温乾燥材の4分の1程度であり、過熱水蒸気処理により吸水機能が低下していた。

過熱水蒸気処理材の心材と辺材の違いによる吸

水率及び膨潤率は、中央値では心材の方が低い傾向となった(図-38~40)。

膨潤率も吸水率と同様に、幅及び厚さともに中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が低い結果となった。

過熱水蒸気処理材の心材は、辺材に比べて吸水率及び膨潤率が小さくなったことから、過熱水蒸気処理材の心材は寸法安定性がより高いものと思われる。

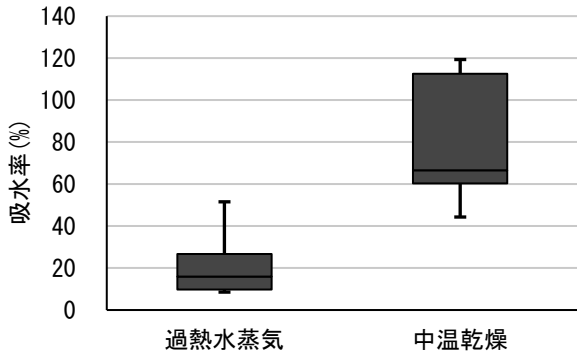


図-35 エンドマッチした辺材の吸水率 (n=8)

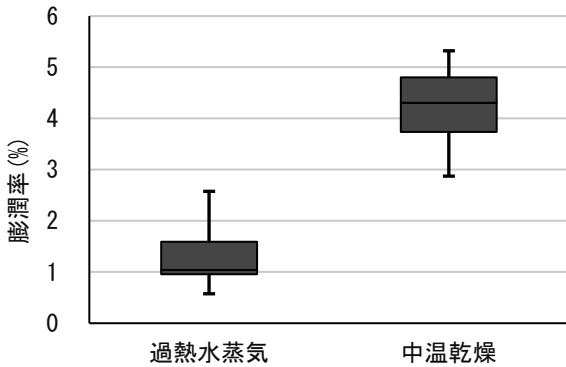


図-36 エンドマッチした辺材の幅方向の膨潤率 (n=8)

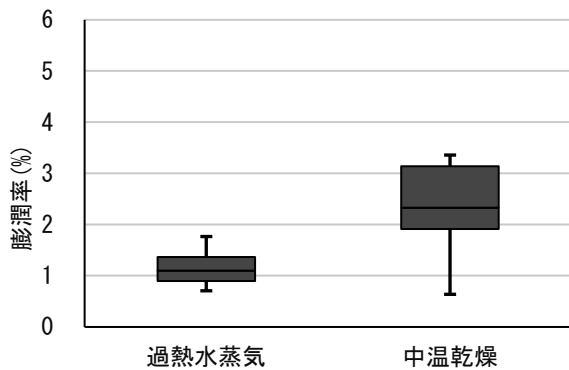


図-37 エンドマッチした辺材の厚さ方向の膨潤率(n=8)

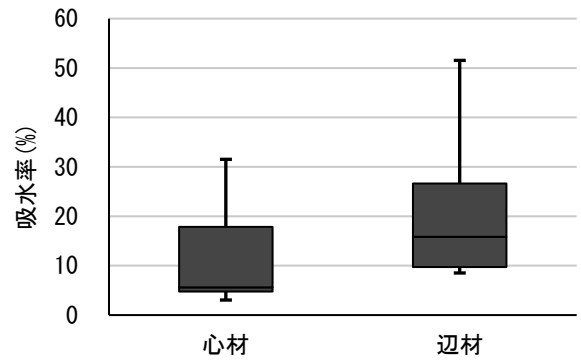


図-38 熱処理した心辺材の吸水率 (n=8)

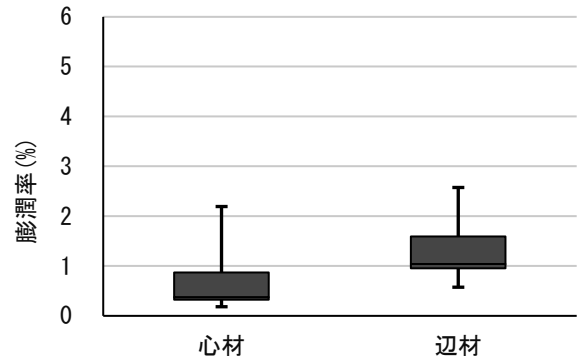


図-39 過熱水蒸気処理材の幅方向の膨潤率 (n=8)

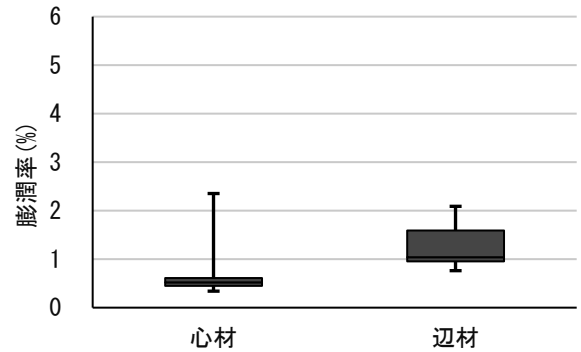


図-40 過熱水蒸気処理材の厚さ方向の膨潤率 (n=8)

2.2 乾湿繰り返しによる寸法安定性

エンドマッチした8枚の板材(辺材のみ)の幅方向と厚さ方向の膨張率及び収縮率を図-41・42に示す。

低湿環境から高湿環境にした時の寸法変化は、幅方向で中温乾燥材が3.93mm増、これに対して過

熱水蒸気処理材が 2.74 mm増であった。また、厚さ方法では中温乾燥材が 0.71 mm増、過熱水蒸気処理材が 0.48 mm増であった。

収縮率及び膨張率は、幅及び厚さ方向において、中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の低い結果となった。

高湿及び低湿環境下における過熱水蒸気処理材と中温乾燥材の幅方向の膨張率及び収縮率についてウェルチの t 検定を行った結果、有意であった

(高湿環境下の幅 $t(14) = 6.37, p < .001$; 低湿環境下の幅 $t(14) = 3.95, p = .009$)。このことから過熱水蒸気処理により処理材の幅は、中温乾燥材よりも膨張率及び収縮率が低下し、寸法安定性が付与できた。

過熱水蒸気処理した心材と辺材における幅方向と厚さ方向の膨張率及び収縮率を図-43・44 に示す。

膨張率及び収縮率ともに心材と辺材に大きな差は見られなかった。

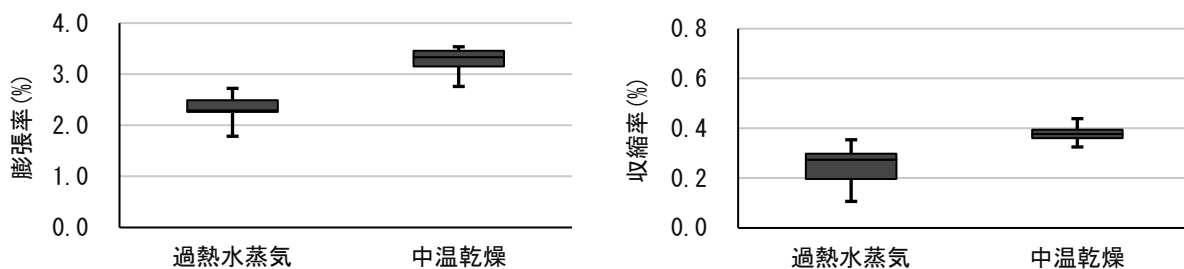


図-41 エンドマッチした辺材における幅（接線方法）の膨張率と収縮率 (n=8)

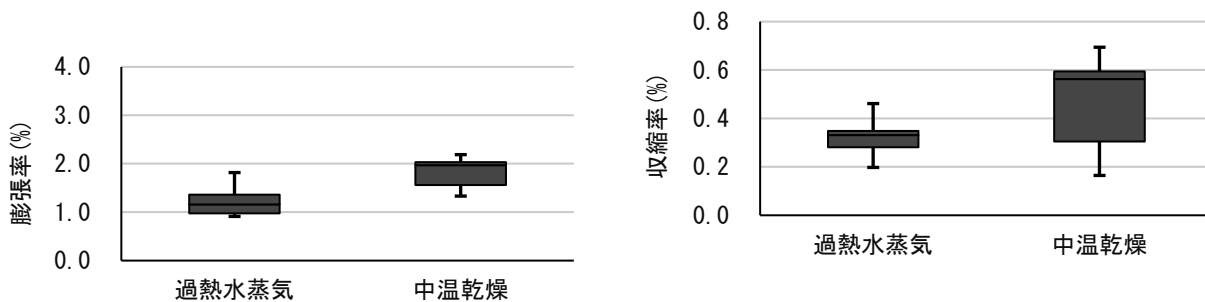


図-42 エンドマッチした辺材における厚さ（半径方法）の膨張率と収縮率 (n=8)

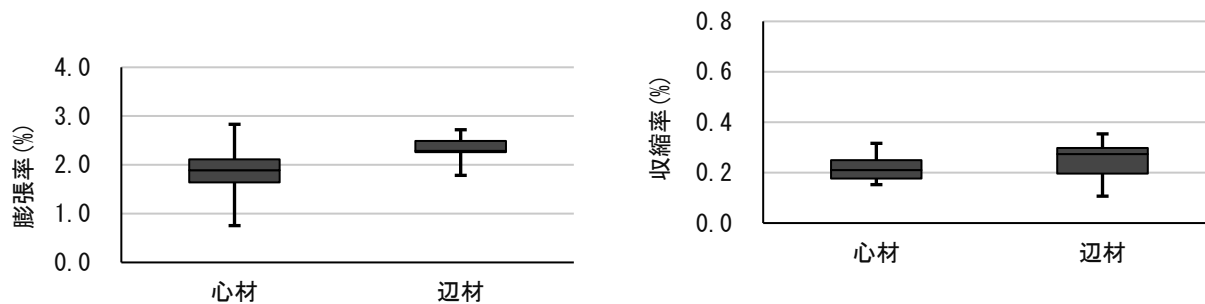


図-43 心材と辺材における幅（接線方法）の膨張率と収縮率 (n=8)

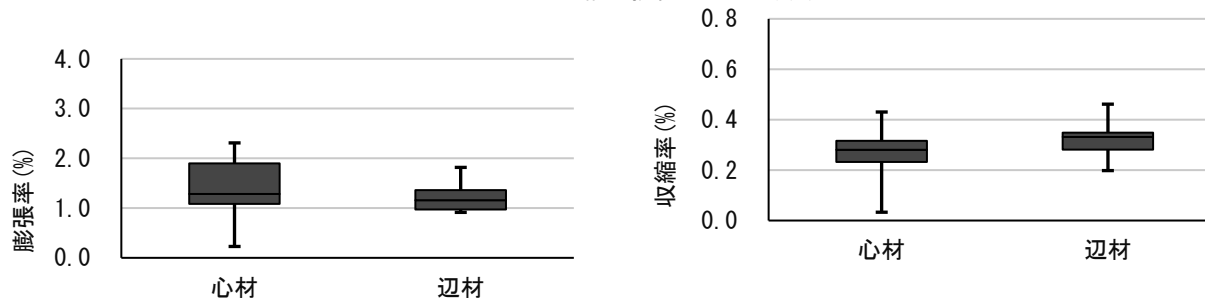


図-44 心材と辺材における厚さ（半径方法）の膨張率と収縮率 (n=8)

2.3 曲げ強度性能

エンドマッチした試験材(辺材のみ)の全乾密度を図-45に示した。過熱水蒸気処理材と中温乾燥材の全乾密度に大きな差は見られなかった。

エンドマッチした試験材(辺材のみ)の曲げ試験結果を表-9・10に、過熱水蒸気処理材及び中温乾燥材の全108枚の曲げヤング係数と曲げ強さの関係を図-46に示す。

曲げヤング係数と曲げ強さは、相関関係にある。

曲げ強さについて、過熱水蒸気処理材は、中温乾燥材と比較すると平均値で2割程度低かった。過熱水蒸気処理材と中温乾燥材の曲げ強さについてスチューデントのt検定を行った結果、有意であった($t(14) = 2.41, p = .03$)ため、過熱水蒸気処理により曲げ強さが低下したと考えられる。

過熱水蒸気処理材の曲げ強さが低下することから、使用時には支点間(根太間隔)を工夫することにより対応することが望まれる。

丸太別過熱水蒸気処理材の曲げヤング係数と曲げ強さの分布を図-47・48に示す。

No.3の丸太は他の丸太よりも低い数値となったが、被害木であっても曲げ強さ等が健全木と変わらない結果であった。

心材のみの材、心材と辺材が混在している材、辺材のみの材を区分した全乾密度と曲げヤング係数の関係を図-49に曲げヤング係数と曲げ強さの関係を図-50に示す。

全乾密度、曲げヤング係数、曲げ強さにおいて、心材と辺材に大きな違いは見られなかった。

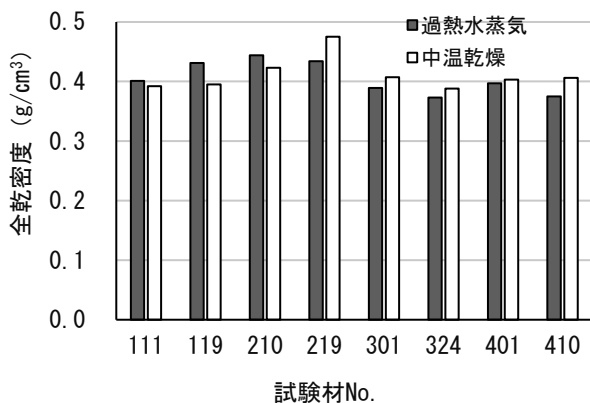


図-45 辺材の全乾密度

表-9 過熱水蒸気処理材の曲げ試験結果 (n=8)

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	含水率 (%)	全乾密度 (g/cm ³)
平均値	10.12	46.9	8.4	5.9	0.406
最小値	6.46	28.2	5.0	5.5	0.373
最大値	11.47	65.3	11.8	6.2	0.444
標準偏差	1.58	13.77	2.48	0.26	0.03
変動係数(%)	15.6	29.4	29.4	4.5	6.8
5%下限値	—	16.7	—	—	—

表-10 中温乾燥材の曲げ試験結果 (n=8)

	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	含水率 (%)	全乾密度 (g/cm ³)
平均値	9.86	61.8	11.5	10.7	0.411
最小値	8.30	42.8	7.8	10.4	0.388
最大値	11.01	77.0	14.1	10.9	0.475
標準偏差	1.09	10.79	1.98	0.17	0.03
変動係数(%)	11.0	17.5	17.1	1.6	6.8
5%下限値	—	38.2	—	—	—

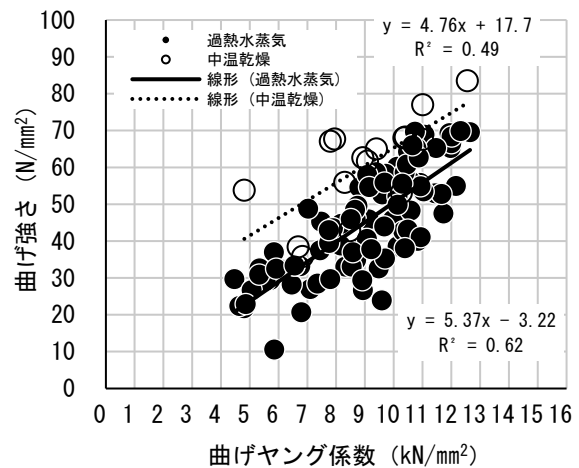


図-46 曲げヤング係数と曲げ強さ (n=108)

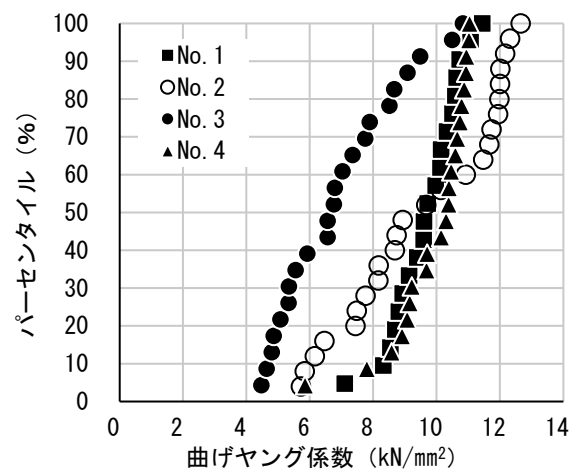


図-47 丸太別の曲げヤング係数 (n=108)

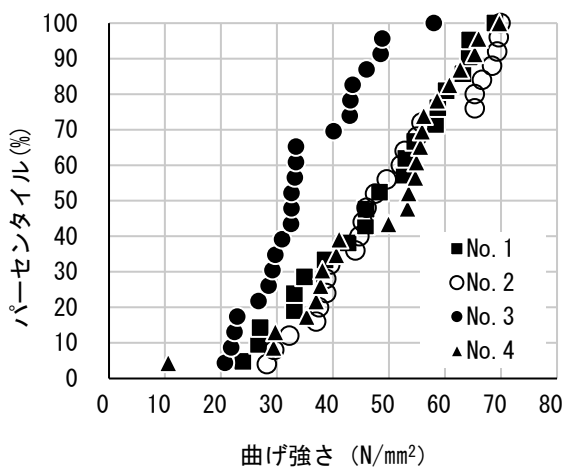


図-48 丸太別の曲げ強さ (n=108)

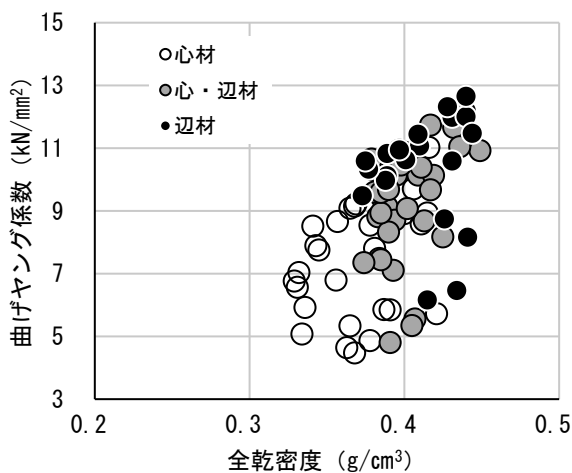


図-49 全乾密度と曲げヤング係数 (n=90)

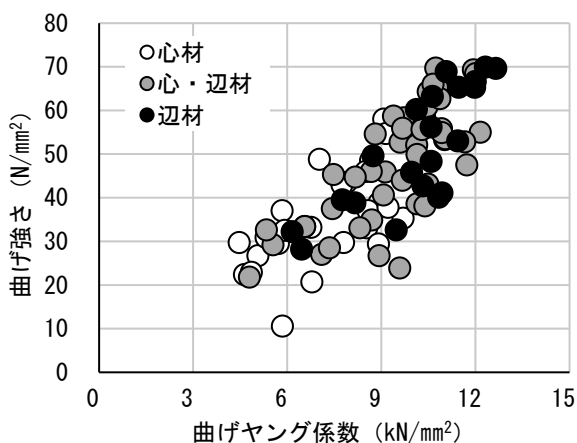


図-50 曲げヤング係数と曲げ強さ (n=108)

まとめ

第 1 章 過熱水蒸気処理材の処理方法の検討と基本的材質の把握

収縮率及び全乾密度

- ・ 過熱水蒸気処理材の処理直後の含水率は 1~2%であった。
- ・ 過熱水蒸気処理材の収縮率の平均値は、幅方向、厚さ方向の順に、カラマツ 6.3%, 6.0%, アカマツ 6.8%, 6.5%, スギ 5.3%, 6.4%, ヒノキ 5.6%, 4.4%であった。
- ・ 全乾密度は、4 樹種ともに中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が低くなった。

吸水率及び膨潤率

- ・ アカマツの中温乾燥材の 1 枚以外の試験材は、接線方向及び半径方向の長さが基準の ± 1 mm 以下となり、寸法安定性基準を満たした。
- ・ 基準を満たさなかったアカマツの中温乾燥材は、心材よりも辺材が多かったことが要因と推測する。
- ・ エンドマッチした一方のアカマツの過熱水蒸気処理材は基準を満たし、過熱水蒸気処理による寸法安定性が向上したと思われる。
- ・ 4 樹種ともに中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が吸水率及び膨潤率は低い結果となった。
- ・ 特にカラマツの過熱水蒸気処理材は吸水率が低かった。

曲げ強度性能

- ・ 4 樹種とも過熱水蒸気処理材は、中温乾燥材よりも曲げ強さの平均値が低かった。
- ・ 中温乾燥材と比較した低下率は、カラマツは約 30%, アカマツは約 50%, スギは約 40%, ヒノキは約 20%であった。
- ・ 曲げヤング係数は、4 樹種とも過熱水蒸気処理による影響は見られないと推測する。

材色調査 (429 日後)

- ・ 過熱水蒸気処理により L^* (明度) は、中温乾燥材に比べて低下し黒色化が進んだ。
- ・ 特にカラマツは、黒色化の傾向が強かった
- ・ 4 樹種とも過熱水蒸気処理材は明度が増加し、一方、中温乾燥材は L^* (明度) が減少した。
- ・ 屋外に設置した過熱水蒸気処理材は、時間の経過とともに黒色から灰色へ変化し、中温乾燥材は白色から灰色へと変化した。

- ・屋外におけるカラマツとアカマツの過熱水蒸気処理材は、中温乾燥材と比較すると a^* (赤み) と b^* (黄み) の変化が少なかった。
- ・屋外における色差は、中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の方が少ない結果となり、色の変化が少ない。
- ・屋内における過熱水蒸気処理材は、4 樹種ともに色差の変化が少なく、過熱水蒸気処理材を屋内で使用する場合は、塗装品と遜色ない製品として扱えるものと思われる。

乾湿繰り返し寸法変化

- ・中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の収縮率及び膨張率は低い結果となった。

第 2 章 アカマツの辺材と心材別の過熱水蒸気処理特性

吸水率及び膨潤率

- ・過熱水蒸気処理材及び中温乾燥材の全ての試験材は、乾燥後の測定により幅及び厚さともに ± 1 mm以下となり寸法安定基準を満たした。
- ・吸水率の中央値では、過熱水蒸気処理材は中温乾燥材の 4 分の 1 程度であり、過熱水蒸気処理により吸水機能が低下していた。
- ・過熱水蒸気処理材の心材と辺材の違いによる吸水率及び膨潤率は、中央値では心材の方が低い傾向となった。
- ・過熱水蒸気処理材の心材は、辺材に比べて吸水率及び膨潤率が小さくなったことから、過熱水蒸気処理材の心材は寸法安定性がより高いものと思われる。

乾湿繰り返しによる寸法安定性

- ・収縮率及び膨張率は、幅及び厚さ方向において、中温乾燥材よりも過熱水蒸気処理材の低い結果となった。
- ・過熱水蒸気処理した心材と辺材における幅方向と厚さ方向の膨張率及び収縮率ともに心材と辺材に大きな差は見られなかった。

曲げ強度性能

- ・過熱水蒸気処理材と中温乾燥材の全乾密度に大きな差は見られなかった。
- ・曲げ強さについて、過熱水蒸気処理材は、中温乾燥材と比較すると平均値で 2 割程度低く、過熱水蒸気処理により曲げ強さが低下したと考えられる。

- ・過熱水蒸気処理により被害木であっても曲げ強さ等が健全木と変わらない結果であった。
- ・全乾密度、曲げヤング係数、曲げ強さにおいて、心材と辺材に大きな違いは見られなかった。

結言

本試験では「過熱水蒸気処理材の処理方法の検討と基本的材質の把握」と「アカマツの辺材と心材別の過熱水蒸気処理特性」について実施してきたが、今後は、過熱水蒸気処理のスケジュールの検討や耐久性試験を実施する予定である。

謝辞

本試験を行うに当たり、データ整理等にお手伝い頂いた当センター非常勤職員の蒲原静子氏に深く感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 桃原郁夫, 熱処理と耐久性, 木材保存 Vol.31-1, pp.3-11, (2005)
- 2) 村井まどか, 熱処理木材の気象劣化と塗装, 木材工業 Vol.76 No.4, pp.122-128, (2021)
- 3) 伊藤貴文・増田勝則, 過熱蒸気処理による木材への耐朽性付与, 奈良県森林技術センター研究報告 38 号, pp.45-51, (2009)
- 4) 森田珠生, サーモウッド処理木材, 木材保存 Vol.44-3, pp.146-147, (2018)
- 5) 酒井温子・佐藤敬之・金沢吉昭, 窒素雰囲気下で熱処理された木材の野外耐久性, 木材保存 Vol.38-3, pp.111-116, (2012)
- 6) 吉田孝久, 窒素ガス熱処理材の材質特性—平衡含水率・寸法安定性・材色—, 長野県林業総合センター平成 20 年度業務報告, pp.118-119, (2009)
- 7) 公益社団法人日本住宅・木材技術センター優良木質建材等品質性能評価基準「K-1 熱処理壁用製材」, pp.150-152, (2022)
- 8) 谷内博規・高橋功, スギ材への熱処理条件が強度性能と寸法安定性に及ぼす影響, 岩手県林業技術センター研究報告第 26 号, pp.5-9, (2018)

参考資料 (材色データ)

屋外 測定日	条件1							条件2							条件3						
	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^*_{ab}	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^*_{ab}	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^*_{ab}
11月12日	K3-1	31.16	5.94	14.04	15.24	34.7		K2-2	31.87	5.97	14.16	15.37	35.4		K6-3	66.64	12.45	23.90	26.95	71.9	
12月16日	K3-1	34.38	7.47	13.82	15.71	37.8		K2-2	35.42	7.84	14.05	16.08	38.9		K6-3	55.45	19.03	27.56	33.49	64.8	
1月15日	K3-1	37.62	5.62	13.80	14.90	40.5		K2-2	38.38	6.22	14.20	15.50	41.4		K6-3	55.62	14.34	25.82	29.53	63.0	
2月17日	K3-1	39.54	5.48	12.83	13.95	41.9		K2-2	41.51	6.11	13.18	14.52	44.0		K6-3	56.27	12.93	24.00	27.26	62.5	
3月13日	K3-1	42.17	4.98	12.24	13.22	44.2		K2-2	43.88	5.56	12.65	13.82	46.0		K6-3	56.94	9.84	56.94	57.78	81.1	
5月12日	K3-1	43.00	4.93	12.00	12.98	44.9		K2-2	45.71	5.26	13.37	14.36	47.9		K6-3	57.86	6.39	57.86	58.21	82.1	
6月10日	K3-1	42.66	4.93	12.49	13.42	44.7		K2-2	46.29	5.22	13.12	14.12	48.4		K6-3	57.08	5.62	57.08	57.35	80.9	
7月15日	K3-1	40.52	3.67	7.69	8.52	41.4		K2-2	45.12	3.64	7.86	8.67	45.9		K6-3	46.61	1.82	46.61	46.64	65.9	
8月11日	K3-1	41.50	2.79	5.85	6.48	42.0		K2-2	45.90	2.83	6.01	6.64	46.4		K6-3	46.11	1.41	46.11	46.13	65.2	
9月16日	K3-1	37.68	2.88	5.50	6.20	38.2		K2-2	39.91	3.37	6.38	7.21	40.6		K6-3	44.47	1.33	44.47	44.49	62.9	
10月15日	K3-1	36.36	2.62	5.11	5.75	36.8		K2-2	38.37	3.23	6.16	6.95	39.0		K6-3	40.87	1.09	40.87	40.89	57.8	
11月24日	K3-1	35.11	2.61	5.03	5.67	35.6		K2-2	37.33	2.98	5.84	6.56	37.9		K6-3	42.17	0.99	42.17	42.18	59.6	
12月21日	K3-1	35.59	2.83	5.52	6.20	36.1		K2-2	37.58	3.24	6.86	7.58	38.3		K6-3	42.19	0.94	42.19	42.20	59.7	
1月14日	K3-1	35.68	2.96	6.01	6.70	36.3	9.7	K2-2	37.63	3.29	6.71	7.47	38.4	9.8	K6-3	42.60	0.87	42.60	42.61	60.2	32.6
11月12日	A1-1	43.76	9.36	20.37	22.42	49.2		A1-2	39.64	8.67	16.89	18.99	44.0		A2-3	81.95	3.95	25.25	25.56	85.8	
12月16日	A1-1	51.87	9.51	23.35	25.21	57.7		A1-2	46.58	8.75	19.50	21.37	51.3		A2-3	77.01	7.47	31.74	32.60	83.6	
1月15日	A1-1	55.74	6.82	21.79	22.83	60.2		A1-2	49.88	6.90	19.51	20.70	54.0		A2-3	76.76	5.86	27.06	27.69	81.6	
2月17日	A1-1	58.69	6.63	19.88	20.96	62.3		A1-2	53.11	6.82	18.72	19.92	56.7		A2-3	76.83	6.04	22.92	23.70	80.4	
3月13日	A1-1	59.96	5.66	17.68	18.56	62.8		A1-2	55.54	6.11	17.59	18.62	58.6		A2-3	75.54	4.66	17.87	18.47	77.8	
5月12日	A1-1	61.69	4.73	14.89	15.62	63.6		A1-2	56.11	5.54	15.95	16.88	58.6		A2-3	74.08	3.27	11.97	12.41	75.1	
6月10日	A1-1	62.47	4.54	13.51	14.25	64.1		A1-2	57.79	5.40	15.01	15.95	60.0		A2-3	74.01	3.15	10.12	10.60	74.8	
7月15日	A1-1	56.92	2.46	7.27	7.67	57.4		A1-2	54.30	3.46	8.90	9.55	55.1		A2-3	64.24	0.76	4.73	4.79	64.4	
8月11日	A1-1	56.57	1.97	5.46	5.81	56.9		A1-2	53.45	2.83	6.92	7.47	54.0		A2-3	62.37	0.65	3.33	3.39	62.5	
9月16日	A1-1	53.17	1.89	4.79	5.15	53.4		A1-2	50.67	2.92	6.56	7.18	51.2		A2-3	59.56	0.63	2.89	2.96	59.6	
10月15日	A1-1	51.28	1.58	4.10	4.40	51.5		A1-2	49.36	2.56	5.93	6.46	49.8		A2-3	57.75	0.54	2.49	2.55	57.8	
11月24日	A1-1	50.54	1.46	3.77	4.04	50.7		A1-2	48.30	2.27	5.38	5.84	48.7		A2-3	57.11	0.42	2.13	2.17	57.2	
12月21日	A1-1	49.75	1.44	3.88	4.14	49.9		A1-2	47.46	2.21	5.52	5.94	47.8		A2-3	56.73	0.41	2.36	2.39	56.8	
1月14日	A1-1	50.17	1.31	3.89	4.10	50.3	19.4	A1-2	47.90	2.10	5.20	5.60	48.2	15.8	A2-3	56.71	0.39	2.32	2.36	56.8	34.3
11月12日	S1-1	43.09	9.31	19.68	21.77	48.3		S1-2	41.95	8.10	18.88	20.54	46.7		S4-3	61.46	8.38	22.12	23.65	65.9	
12月16日	S1-1	50.60	10.04	24.40	26.38	57.1		S1-2	51.43	7.77	21.11	22.49	56.1		S4-3	65.87	8.43	25.12	26.49	71.0	
1月15日	S1-1	57.50	6.22	21.38	22.26	61.7		S1-2	54.82	5.55	18.64	19.45	58.2		S4-3	68.17	5.89	21.56	22.35	71.7	
2月17日	S1-1	61.08	5.67	18.39	19.25	64.0		S1-2	58.87	5.25	15.67	16.52	61.1		S4-3	70.61	5.52	18.32	19.13	73.2	
3月13日	S1-1	62.78	4.69	15.84	16.52	64.9		S1-2	61.05	4.34	13.50	14.18	62.7		S4-3	71.48	4.33	15.09	15.70	73.2	
5月12日	S1-1	64.43	3.88	14.14	14.67	66.1		S1-2	63.00	3.51	12.93	13.40	64.4		S4-3	72.56	2.88	10.37	10.76	73.3	
6月10日	S1-1	64.71	3.90	13.52	14.07	66.2		S1-2	62.68	3.66	12.93	13.44	64.1		S4-3	73.44	2.75	8.71	9.14	74.0	
7月15日	S1-1	58.70	2.12	6.83	7.15	59.1		S1-2	57.79	2.32	6.70	7.09	58.2		S4-3	62.97	0.88	4.16	4.25	63.1	
8月11日	S1-1	56.75	1.86	5.61	5.91	57.1		S1-2	55.76	1.99	5.86	6.19	56.1		S4-3	61.97	0.85	3.10	3.22	62.1	
9月16日	S1-1	51.08	1.96	5.24	5.59	51.4		S1-2	48.25	2.47	6.58	7.03	48.8		S4-3	58.01	0.87	2.70	2.83	58.1	
10月15日	S1-1	48.44	1.74	4.58	4.90	48.7		S1-2	45.13	2.20	5.74	6.15	45.5		S4-3	56.00	0.72	2.22	2.33	56.0	
11月24日	S1-1	46.02	1.69	4.46	4.77	46.3		S1-2	42.24	2.17	5.90	6.29	42.7		S4-3	54.78	0.68	2.03	2.14	54.8	
12月21日	S1-1	45.02	1.71	4.88	5.18	45.3		S1-2	41.33	2.23	6.19	6.58	41.9		S4-3	54.61	0.96	2.27	2.47	54.7	
1月14日	S1-1	45.09	1.61	4.80	5.06	45.4	16.9	S1-2	41.40	2.13	5.99	6.36	41.9	14.2	S4-3	54.46	0.59	2.33	2.40	54.5	22.4
11月12日	H1-1	46.43	9.57	21.25	23.31	52.0		H1-2	44.61	9.10	20.31	22.26	49.9		H1-3	76.21	6.01	22.18	22.98	79.6	
12月16日	H1-1	56.48	8.94	24.18	25.78	62.1		H1-2	52.95	8.83	22.39	24.06	58.2		H1-3	73.71	8.24	28.93	30.08	79.6	
1月15日	H1-1	60.19	6.25	21.04	21.95	64.1		H1-2	56.67	6.27	19.66	20.64	60.3		H1-3	74.32	5.84	23.98	24.68	78.3	
2月17日	H1-1	63.05	6.00	18.49	19.44	66.0		H1-2	60.10	5.99	17.63	18.62	62.9		H1-3	75.14	5.90	20.18	21.02	78.0	
3月13日	H1-1	64.43	4.84	15.65	16.38	66.5		H1-2	61.85	5.02	15.32	16.12	63.9		H1-3	74.75	4.60	16.10	16.75	76.6	
5月12日	H1-1	66.75	3.56	12.85	13.33	68.1		H1-2	64.04	4.01	13.03	13.63	65.5		H1-3	74.58	3.34	11.17	11.66	75.5	
6月10日	H1-1	67.91	3.29	11.07	11.55	68.9		H1-2	64.44	3.98	12.25	12.88	65.7		H1-3	75.84	2.81	8.41	8.87	76.4	
7月15日	H1-1	61.06	1.30	4.95	5.12	61.3		H1-2	60.92	2.05	5.92	6.26	61.2		H1-3	64.42	0.90	4.02	4.12	64.5	
8月11日	H1-1	60.23	0.98	3.96	4.08	60.4		H1-2	59.23	1.54	4.53	4.79	59.4		H1-3	62.81	0.76	3.04	3.13	62.9	
9月16日	H1-1	55.13	0.94	3.33	3.46	55.2		H1-2	52.87	1.62	4.07	4.38	53.0		H1-3	59.73	0.74	2.47	2.58	59.8	
10月15日	H1-1	52.96	0.84	2.77	2.90	53.0		H1-2	50.42	1.41	3.44	3.72	50.6		H1-3	57.70	0.59	2.01	2.09	57.7	
11月24日	H1-1	50.79	0.79	2.62	2.74	50.9		H1-2	48.11	1.29	3.30	3.54	48.2		H1-3	56.78	0.52	1.76	1.84	56.8	
12月21日	H1-1	49.84	0.76	2.94	3.04	49.9		H1-2	47.36	1.21	3.40	3.61	47.5		H1-3	56.74	0.50	1.92	1.99	56.8	
1月14日	H1-1	49.81	0.64	3.09	3.15	49.9	20.5	H1-2	47.24	1.19	3.29	3.50	47.4	19.0	H1-3	56.45	0.47	2.11	2.17	56.5	28.7

K: カラマツ, A: アカマツ, S: スギ, H: ヒノキ

条件1: 前処理+過熱水蒸気処理

条件2: 過熱水蒸気処理

条件3: 中温乾燥

屋内 測定日	条件1							条件2							条件3						
	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^* ab	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^* ab	試験体 No.	L*	a*	b*	c*	E*	ΔE^* ab
11月12日	K4-1	31.16	5.94	14.04	15.24	34.7		K4-2	31.87	5.97	14.16	15.37	35.4		K7-3	66.64	12.45	23.90	26.95	71.9	
12月16日	K4-1	34.38	7.47	13.82	15.71	37.8		K4-2	35.42	7.84	14.05	16.08	38.9		K7-3	55.45	19.03	27.56	33.49	64.8	
1月15日	K4-1	37.62	5.62	13.80	14.90	40.5		K4-2	38.38	6.22	14.20	15.50	41.4		K7-3	55.62	14.34	25.82	29.53	63.0	
2月17日	K4-1	39.54	5.48	12.83	13.95	41.9		K4-2	41.51	6.11	13.18	14.52	44.0		K7-3	56.27	12.93	24.00	27.26	62.5	
3月13日	K4-1	30.98	5.06	9.97	11.18	32.9		K4-2	29.49	4.70	9.38	10.49	31.3		K7-3	62.76	12.42	62.76	63.97	89.6	
5月12日	K4-1	32.47	5.02	10.69	11.81	34.6		K4-2	30.45	4.75	9.86	10.94	32.4		K7-3	61.71	12.94	61.71	63.06	88.2	
6月10日	K4-1	32.73	5.09	11.02	12.14	34.9		K4-2	30.87	4.70	10.05	11.10	32.8		K7-3	60.72	13.62	60.72	62.23	86.9	
7月15日	K4-1	32.86	5.45	11.48	12.70	35.2		K4-2	30.96	5.00	10.72	11.83	33.1		K7-3	59.26	15.76	59.26	61.32	85.3	
8月11日	K4-1	33.34	5.48	11.60	12.82	35.7		K4-2	31.27	5.02	10.50	11.64	33.4		K7-3	58.23	15.96	58.23	60.38	83.9	
9月16日	K4-1	33.71	5.43	11.81	13.00	36.1		K4-2	31.57	4.97	10.83	11.92	33.7		K7-3	56.97	16.06	56.97	59.19	82.2	
10月15日	K4-1	34.05	5.63	11.76	13.04	36.5		K4-2	31.72	5.17	10.80	11.98	33.9		K7-3	56.91	16.25	56.91	59.18	82.1	
11月24日	K4-1	34.21	5.51	11.87	13.09	36.6		K4-2	32.00	5.03	10.82	11.94	34.2		K7-3	56.37	16.29	56.37	58.68	81.4	
12月21日	K4-1	33.90	5.52	11.81	13.03	36.3		K4-2	31.96	4.98	10.75	11.84	34.1		K7-3	56.01	16.06	56.01	58.27	80.8	
1月14日	K4-1	34.00	5.40	11.80	12.98	36.4	3.7	K4-2	32.02	4.79	10.76	11.78	34.1	3.6	K7-3	56.42	15.80	56.42	58.59	81.3	34.3
11月12日	A3-1	43.76	9.36	20.37	22.42	49.2		A2-2	38.14	8.67	16.89	18.99	42.6		A4-3	81.95	3.95	25.25	25.56	85.8	
12月16日	A3-1	51.87	9.51	23.35	25.21	57.7		A2-2	37.95	8.75	19.50	21.37	43.6		A4-3	77.01	7.47	31.74	32.60	83.6	
1月15日	A3-1	55.74	6.82	21.79	22.83	60.2		A2-2	38.57	6.90	19.51	20.70	43.8		A4-3	76.76	5.86	27.06	27.69	81.6	
2月17日	A3-1	58.69	6.63	19.88	20.96	62.3		A2-2	39.27	6.82	18.72	19.92	44.0		A4-3	76.83	6.04	22.92	23.70	80.4	
3月13日	A3-1	42.38	9.11	19.77	21.76	47.6		A2-2	39.54	8.51	17.91	19.83	44.2		A4-3	75.84	5.72	25.86	26.49	80.3	
5月12日	A3-1	44.68	8.32	20.41	22.04	49.8		A2-2	41.12	8.10	18.38	20.09	45.8		A4-3	75.09	5.84	26.33	26.97	79.8	
6月10日	A3-1	45.45	8.30	20.87	22.46	50.7		A2-2	42.30	7.90	18.69	20.29	46.9		A4-3	73.97	6.44	27.59	28.34	79.2	
7月15日	A3-1	45.84	8.90	21.97	23.70	51.6		A2-2	42.36	8.36	19.58	21.29	47.4		A4-3	73.13	7.76	29.76	30.75	79.3	
8月11日	A3-1	46.30	8.84	22.02	23.73	52.0		A2-2	42.91	8.51	19.70	21.46	48.0		A4-3	72.36	8.13	29.95	31.04	78.7	
9月16日	A3-1	46.70	8.88	22.47	24.16	52.6		A2-2	43.33	8.73	20.67	22.43	48.8		A4-3	70.85	8.69	31.13	32.32	77.9	
10月15日	A3-1	47.00	8.99	22.49	24.22	52.9		A2-2	43.46	8.46	20.08	21.79	48.6		A4-3	70.69	8.96	31.46	32.71	77.9	
11月24日	A3-1	47.11	8.93	22.41	24.12	52.9		A2-2	43.54	8.34	19.95	21.62	48.6		A4-3	70.43	8.91	31.37	32.61	77.6	
12月21日	A3-1	47.18	8.73	22.28	23.93	52.9		A2-2	43.67	8.10	19.70	21.30	48.6		A4-3	69.95	8.85	31.23	32.46	77.1	
1月14日	A3-1	47.32	8.61	22.39	23.99	53.1	4.2	A2-2	43.60	7.97	19.53	21.10	48.4	6.1	A4-3	69.81	8.74	31.43	32.62	77.1	14.4
11月12日	S7-1	43.09	9.31	19.68	21.77	48.3		S2-2	41.95	8.10	18.88	20.54	46.7		S7-3	61.46	8.38	22.12	23.65	65.9	
12月16日	S7-1	50.60	10.04	24.40	26.38	57.1		S2-2	51.43	7.77	21.11	22.49	56.1		S7-3	65.87	8.43	25.12	26.49	71.0	
1月15日	S7-1	57.50	6.22	21.38	22.26	61.7		S2-2	54.82	5.55	18.64	19.45	58.2		S7-3	68.17	5.89	21.56	22.35	71.7	
2月17日	S7-1	61.08	5.67	18.39	19.25	64.0		S2-2	58.87	5.25	15.67	16.52	61.1		S7-3	70.61	5.52	18.32	19.13	73.2	
3月13日	S7-1	42.74	7.64	17.65	19.23	46.9		S2-2	42.29	7.20	17.47	18.90	46.3		S7-3	57.80	10.64	21.91	24.36	62.7	
5月12日	S7-1	45.10	6.95	18.47	19.73	49.2		S2-2	43.88	6.80	18.10	19.33	48.0		S7-3	58.11	9.89	21.56	23.72	62.8	
6月10日	S7-1	45.91	6.85	18.92	20.12	50.1		S2-2	44.73	6.69	18.57	19.74	48.9		S7-3	58.48	9.38	21.68	23.62	63.1	
7月15日	S7-1	46.26	7.37	19.91	21.23	50.9		S2-2	45.13	7.15	19.51	20.77	49.7		S7-3	58.86	9.78	23.00	24.99	63.9	
8月11日	S7-1	46.84	7.32	20.05	21.34	51.5		S2-2	45.44	7.26	19.50	20.80	50.0		S7-3	58.44	9.69	22.51	24.50	63.4	
9月16日	S7-1	47.16	7.29	20.29	21.56	51.9		S2-2	45.73	7.17	19.86	21.11	50.4		S7-3	58.36	9.35	22.91	24.75	63.4	
10月15日	S7-1	47.47	7.35	20.32	21.61	52.2		S2-2	45.90	7.27	19.91	21.20	50.6		S7-3	58.28	9.48	23.01	24.89	63.4	
11月24日	S7-1	47.48	7.25	20.20	21.46	52.1		S2-2	46.08	7.04	19.73	20.95	50.6		S7-3	58.17	9.39	22.99	24.83	63.2	
12月21日	S7-1	47.39	7.09	20.13	21.34	52.0		S2-2	45.93	6.97	19.66	20.86	50.4		S7-3	58.00	9.21	22.82	24.61	63.0	
1月14日	S7-1	47.55	6.95	20.21	21.37	52.1	5.1	S2-2	46.04	6.76	19.69	20.82	50.5	4.4	S7-3	58.11	8.98	22.70	24.41	63.0	3.5
11月12日	H5-1	46.43	9.57	21.25	23.31	52.0		H4-2	44.61	9.10	20.31	22.26	49.9		H2-3	76.21	6.01	22.18	22.98	79.6	
12月16日	H5-1	56.48	8.94	24.18	25.78	62.1		H4-2	52.95	8.83	22.39	24.06	58.2		H2-3	73.71	8.24	28.93	30.08	79.6	
1月15日	H5-1	60.19	6.25	21.04	21.95	64.1		H4-2	56.67	6.27	19.66	20.64	60.3		H2-3	74.32	5.84	23.98	24.68	78.3	
2月17日	H5-1	63.05	6.00	18.49	19.44	66.0		H4-2	60.10	5.99	17.63	18.62	62.9		H2-3	75.14	5.90	20.18	21.02	78.0	
3月13日	H5-1	47.68	7.62	19.79	21.21	52.2		H4-2	45.93	7.81	18.81	20.37	50.2		H2-3	78.31	5.02	23.28	23.81	81.9	
5月12日	H5-1	49.52	6.95	20.24	21.40	53.9		H4-2	47.50	7.36	19.40	20.75	51.8		H2-3	77.66	5.24	24.40	24.96	81.6	
6月10日	H5-1	50.26	6.70	20.56	21.62	54.7		H4-2	48.13	7.02	19.69	20.90	52.5		H2-3	76.70	5.54	25.77	26.36	81.1	
7月15日	H5-1	50.69	7.40	21.72	22.95	55.6		H4-2	48.70	7.64	20.99	22.34	53.6		H2-3	76.16	6.88	28.15	28.98	81.5	
8月11日	H5-1	51.06	7.49	21.75	23.00	56.0		H4-2	48.91	7.79	21.00	22.40	53.8		H2-3	75.23	7.42	28.45	29.41	80.8	
9月16日	H5-1	51.33	7.41	22.15	23.35	56.4		H4-2	48.97	7.72	21.34	22.69	54.0		H2-3	74.05	7.89	29.57	30.61	80.1	
10月15日	H5-1	51.41	7.55	22.18	23.43	56.5		H4-2	49.22	7.83	21.31	22.70	54.2		H2-3	73.65	8.21	29.78	30.89	79.9	
11月24日	H5-1	51.42	7.46	22.08	23.31	56.5		H4-2	49.19	7.67	21.17	22.52	54.1		H2-3	73.31	8.15	29.74	30.84	79.5	
12月21日	H5-1	51.67	7.25	22.08	23.24	56.7		H4-2	49.30	7.48	21.10	22.38	54.1		H2-3	73.15	7.98	29.56	30.62	79.3	
1月14日	H5-1	51.63	7.10	22.06	23.17	56.6	5.8	H4-2	49.36	7.27	21.04	22.26	54.1	5.1	H2-3	73.05	7.75	29.56	30.56	79.2	8.2




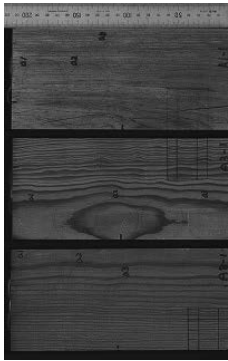

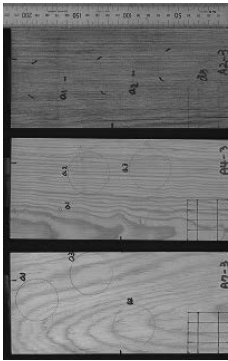


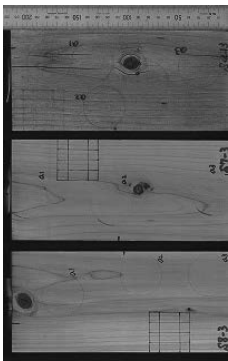
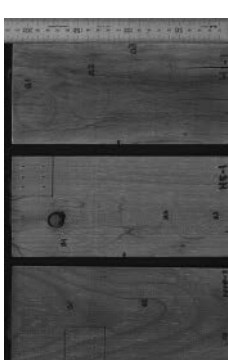
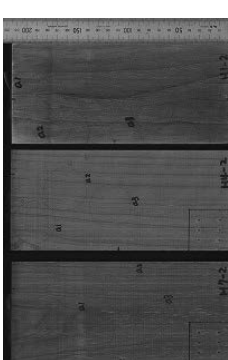
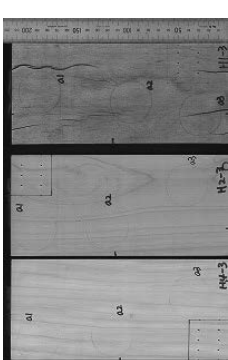
K: カラマツ, A: アカマツ, S: スギ, H: ヒノキ

条件1: 前処理+過熱水蒸気処理

条件2: 過熱水蒸気処理

条件3: 中温乾燥

材色変化

樹種	条件 1	条件 2	条件 3
カラマツ			
アカマツ			
スギ			
ヒノキ			

上段：屋外に設置した 429 日後

中段：屋内に設置した 429 日後

下段：暗幕内に設置した 429 日後（ほぼ初期値）