

アカマツの利用開発に関する研究

— 蒸気式，蒸気・圧力併用型乾燥，及び天然乾燥による正角の乾燥と強度特性について —

田畑衛・今井信・吉田孝久

長野県産アカマツ丸太から製材した心持ち正角について，蒸気式，蒸気・圧力併用型乾燥，及び天然乾燥を行い，乾燥時間の短縮と割れの抑制を目的とした乾燥スケジュールの検討を行った。蒸気式は5.3日で平均10.9%，蒸気・圧力併用型は3.3日で平均12.0%であった。材面割れについては，乾燥直後で蒸気式が平均433cm，蒸気・圧力併用型が532cmで，天然乾燥の1,174cmに比べ高温セットにより低く抑えられてはいるものの，他の樹種よりも依然として大きく，更なる乾燥条件の検討が必要であった。

キーワード：アカマツ，蒸気式，蒸気・圧力併用型，材面割れ，曲げ強さ

1 緒言

長野県の主要な針葉樹の一つであるアカマツは民有林人工林面積の14%を占め，その樹齢も50年生以上が大半を占めている。一方，マツ材線虫病による被害量（枯損量）が毎年6万m³を超えており，アカマツ材を有効利用するための技術開発や需要拡大が緊急の課題となっている。そこで，平角などの構造材への利用を促進することを目的として，蒸気式乾燥機を用いた乾燥試験に取り組んでいるが，乾燥に伴う材面割れや内部割れが他の樹種よりも多く発生し，これらを抑制する乾燥スケジュールが確立出来ない¹⁾。

このため，従来の温度と湿度のほか，圧力制御が可能な蒸気・圧力併用型乾燥機を検討に加え，割れを抑制しつつ乾燥時間の短縮を図るための乾燥試験を正角を用いて実施した。

2 試験の方法

2.1 試験体

長野県産アカマツ丸太 36本（末口径 28～30cm）から145mm×145mm×4,000mmの心持ち正角36体を製材し，寸法（幅，厚さ，長さ），重量，含水率計含水率，縦振動法による動的ヤング係数（以下，Efr）を測定した。測定後正角をEfrの分布が等しくなるよう3つのグループ（各12体）に分け，蒸気式，蒸気・圧力併用型（以下，圧力併用型），及び天然乾燥の試験体とした。

2.2 乾燥試験

蒸気式は当センター所有の蒸気式木材乾燥機（(株)新柴 SK-IF10LHP）を用いて，表-1のとおり蒸煮・高温セットの後，96時間の中温乾燥を行った（合計約5.3日）。圧力併用型はヒルデブランド(株)の乾燥機（HD03/SHD）により，同表のとおり加減圧処理を加えた蒸煮，減圧下での高温セットの後，-80kPaの減圧下で48時間の中温乾燥を行った（合計約3.3日）。

表-1 乾燥スケジュール

蒸気式（高温セット中温型）			
乾球温度 （°C）	湿球温度 （°C）	処理時間 （h）	備考
95	95	8	蒸煮処理
110	90	24	高温セット
90	60	96	中温乾燥
計128h(約5.3日)			

蒸気・圧力併用型（高温セット中温型）				
圧力 （kPa）	乾球温度 （°C）	湿球温度 （°C）	処理時間 （h）	備考
-85～100	(120)	(120)	8	蒸煮(加減圧前処理)
-30	110	(90)	24	高温セット/減圧処理
-80	90	(60)	48	中温乾燥/減圧処理
計80h(約3.3日)				

人工乾燥終了後，寸法，重量，含水率計含水率，Efr，材面割れ長さ，ねじれを測定し，当センター内の天乾場で後述の天然乾燥材と共に1年間の養生を行った。

天然乾燥は，前述の天乾場においてコンクリート製の重りを載せて2月初旬から1年間乾燥した。なお，含水率の経過を把握するため，製材直後，及び乾燥開始から2，3，4，5，6，

7, 8 か月後の重量を計測した。

以上の3通りの乾燥方法で乾燥した正角について、1年間の養生後、及び乾燥後における寸法、重量、含水率計含水率、Efr、材面割れ長さ、ねじれを測定した。更に、材端から1.5mの位置で鋸断し、厚さ約30mmの試験片を各2枚採取し、1枚は放射方向の内部割れ長さと同乾法による含水率を、もう1枚は断面における含水率傾斜を測定した。

2.3 曲げ強度試験

1.5mの位置で鋸断後の長さ2.5mの試験体について、モルダーで120mm×120mmに仕上げて長さを2,400mmに揃え、養生後に行った計測と同じ項目について測定した。更に、当センター所有の実大材強度試験機((株)島津製作所UH-1000kNA)を用いて、下部支点間距離2,160mm、上部荷重点間距離720mmの3等分点4点荷重方式、載加速度10mm/minで曲げ試験を行った。

2.4 色差試験

含水率試験片を採取した全試験体の残りの部分(約1.4m)について、4面のうち節や材面割れが比較的少ない面の辺材部において、L*a*b*表色モードの色彩値(L*, a*, b*)を、ミノルタ(株)CR-300色彩色差計を用いて1試験体につき3か所測定した。

3 試験の結果と考察

3.1 含水率と含水率傾斜

測定結果の概要を表-2に、全乾法による含水率を図-1に、養生後の材内の水分傾斜を図-2に示した。また、天然乾燥材の乾燥期間中の含水率の経過を図-3に示した。

人工乾燥直後の全乾法含水率は、蒸気式が10.9%(9.6~13.9%, 変動係数11.0%), 圧力併用型が12.0%(7.8~15.6%, 変動係数15.4%)で、圧力併用型の方がバラツキが大きかった。また、両人工乾燥材は過乾燥となっており、乾燥スケジュールの改良が必要と思われた。

天然乾燥については、3ヶ月後(5月初旬)に20%を下回り、4ヶ月後(6月初旬)以降17%

~18%で推移したことから、4カ月程度で平衡含水率に達したと判断された。

1年養生後の全乾法含水率の平均値は天然乾燥が17.2%, 蒸気式と圧力併用型が13.6%と13.9%で、人工乾燥材にヒステリシス現象が確認され、材内の水分傾斜についても同様の傾向が認められた。

3.2 収縮率、ねじれ

乾燥直後の幅・厚さの収縮率は、蒸気式が2.83%(2.17~3.30%), 圧力併用型が3.47%(1.63~5.24%)と圧力併用型の方がやや大きかった。なお、収縮率と含水率、及び全乾時密度との関係を求めたが、図-4及び図-5のとおり明確な関係は認められなかった。養生後の収縮率は蒸気式、圧力併用型、天然乾燥に大差はなく、いずれも2%台となった。

ねじれについては、人工乾燥材の乾燥直後、及び天然乾燥材を加えた養生後においても、乾燥方法の違いによる大きな差は認められなかった。また、人工乾燥材のねじれは養生後に含水率の増加に伴い減少していた。

3.3 材面割れ、内部割れ

材面割れ長さ、内部割れ長さ及びねじれの平均値と最大値及び最小値を図-6に示した。

人工乾燥直後の材面割れは蒸気式で平均433cm/4m・4面、圧力併用型で平均532cm/4m・4面発生し、圧力併用型の方がやや多かったが、統計的な有意差は見られなかった(t検定, p>0.05)。

養生後の材面割れは、人工乾燥材は天然乾燥材に比べ少なくかつ養生後に半減しており、高温セット法による材面割れ防止効果が認められた。しかし、既存データ¹⁾と同程度の発生量で他樹種に比べて多く、内部割れが顕著に発生した試験体も認められたことから、乾燥スケジュールの更なる検討が必要と考えられた。

なお、含水率及び収縮率と材面割れ、及び含水率と内部割れとの関係を求めたが、図-7~図-9のとおり明確な関係は認められなかった。

表-2 計測結果の概要

乾燥スケジュール	全乾法含水率 (%)			含水率計含水率 (%)			縦振動ヤング係数 Efr(kN/mm ²)			幅及び厚さの収縮率 (%)		材面割れ長さ(cm)		内部割れ	ねじれ (mm/4m)		
	乾燥前 ^{※1}	乾燥直後 ^{※1}	養生後	乾燥前	乾燥直後	養生後	乾燥前	乾燥直後	養生後	乾燥直後	養生後	乾燥直後	養生後	養生後	乾燥直後	養生後	
蒸気式	平均	72.8	10.9	13.6	43.0	4.6	10.3	8.72	9.27	9.17	2.83	2.61	433	243	15.7	21	16
	標準偏差	25.7	1.2	0.4	16.3	1.4	1.8	1.64	1.12	1.12	0.35	0.47	225	157	24	10	8
	変動係数 (%)	35.3	11.0	3.0	37.9	30.6	17.3	18.8	12.1	12.2	12.5	18.0	52.0	64.8	155.6	47.8	51.9
	最小	32.5	9.6	13.1	27.0	3.0	7.5	5.34	7.05	6.87	2.17	1.90	169	20	0	10	7
	最大	124.0	13.9	14.4	81.0	7.5	13.0	11.78	11.37	11.03	3.30	4.02	889	450	55.8	41	31
	データ数	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	17	24	12	12	12	12
蒸気圧力併用式	平均	57.5	12.0	13.9	41.1	4.7	11.3	8.79	9.76	9.72	3.47	2.78	532	282	21.2	20	16
	標準偏差	21.7	1.9	0.6	13.4	1.5	1.7	1.77	2.05	1.98	0.71	0.69	210	190	37	6	5
	変動係数 (%)	37.7	15.4	4.2	32.6	33.0	15.4	20.2	21.1	20.3	20.4	24.8	39.5	67.4	173.6	32.7	33.7
	最小	35.2	7.8	12.6	27.5	2.5	9.0	5.54	6.50	6.73	1.63	1.68	161	0	0	10	7
	最大	114.5	15.6	14.9	72.0	7.0	14.5	12.57	14.09	13.96	5.24	4.49	828	580	129.8	29	27
	データ数	12	12	12	12	12	12	12	12	12	20	24	12	12	12	12	12
天然乾燥	平均	64.1	17.2	17.2	50.9	14.7	14.7	8.83	9.38	9.38	2.33	2.33	1174	1174	0.0	0.0	19
	標準偏差	20.4	0.3	0.3	20.2	1.6	1.6	1.43	1.18	1.18	0.50	0.50	282	282	0.0	0.0	7
	変動係数 (%)	31.8	1.9	1.9	39.7	10.6	10.6	16.2	12.5	12.5	21.6	21.6	24.1	24.1	0.0	0.0	34.4
	最小	33.8	16.7	16.7	28.5	12.5	12.5	6.78	7.83	7.83	1.20	1.20	670	670	0.0	0.0	11
	最大	104.1	17.7	17.7	93.5	18.5	18.5	11.62	11.80	11.80	3.19	3.19	1520	1520	0.0	0.0	33
	データ数	12	12	12	12	12	12	12	12	12	24	24	12	12	12	12	12

(※1養生後の全乾法による含水率から逆算)

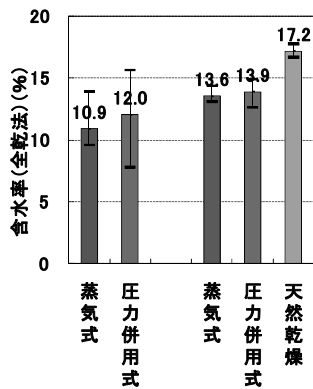


図-1 含水率(全乾法)
人乾直後* 1年養生後
※人乾直後は養生後の値から算出

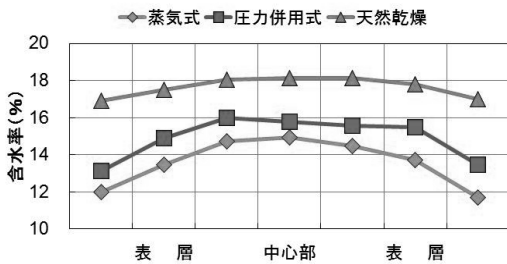


図-2 1年養生後の材内の水分傾斜(平均値)

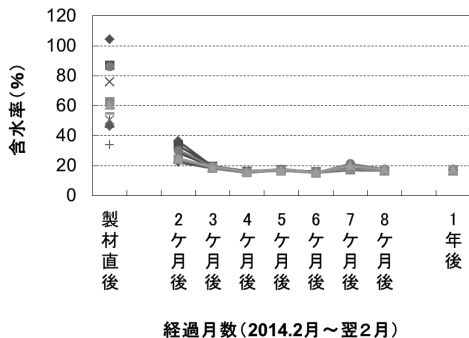


図-3 天然乾燥材の含水率経過図

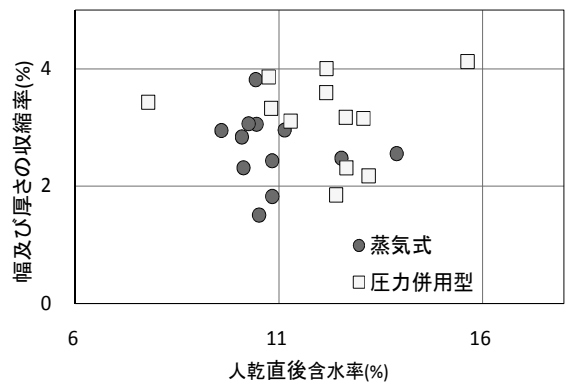


図-4 人乾直後含水率と収縮率との関係

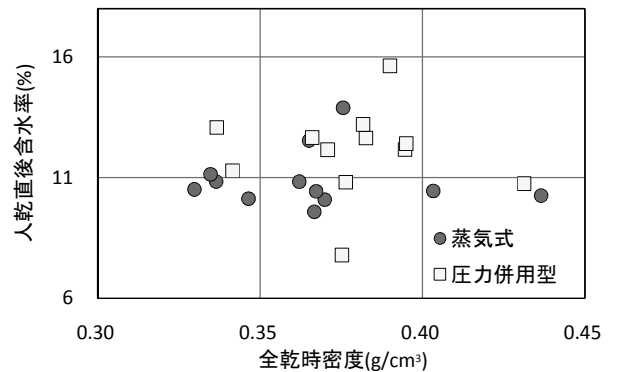


図-5 全乾時密度と人乾直後の含水率との関係

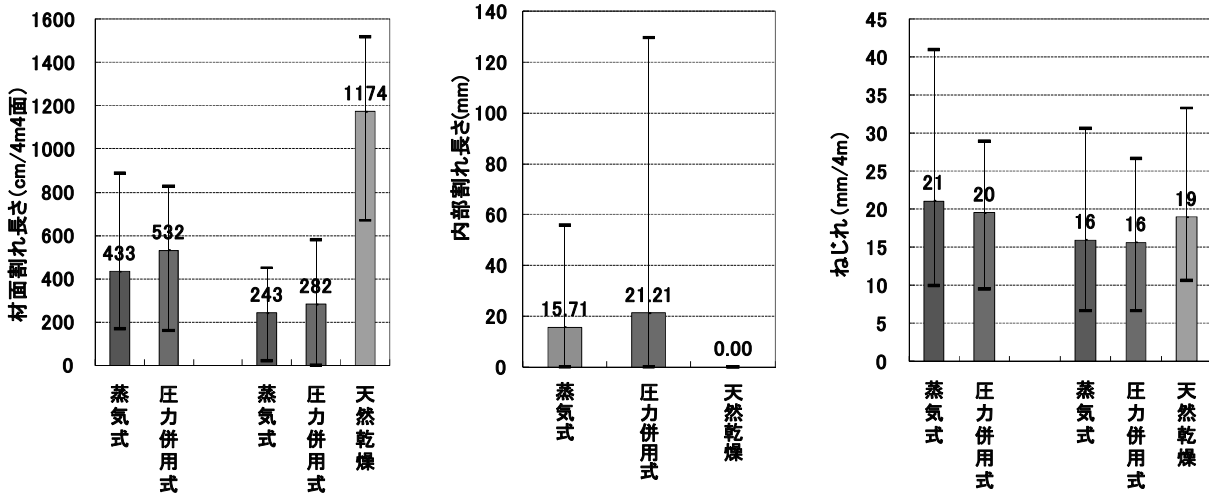


図-6 材面割れ、内部割れ、ねじれの平均値と最大値及び最小値

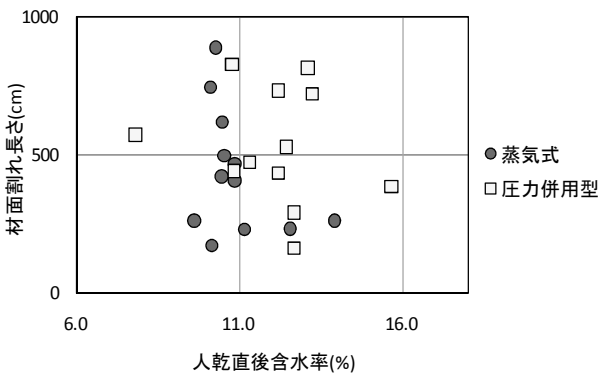


図-7 人乾直後含水率と材面割れ長さとの関係

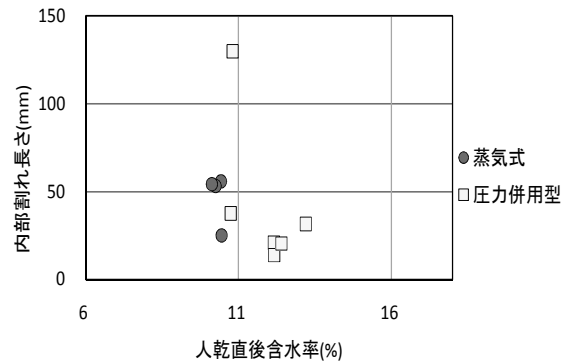


図-9 人乾直後含水率と内部割れとの関係

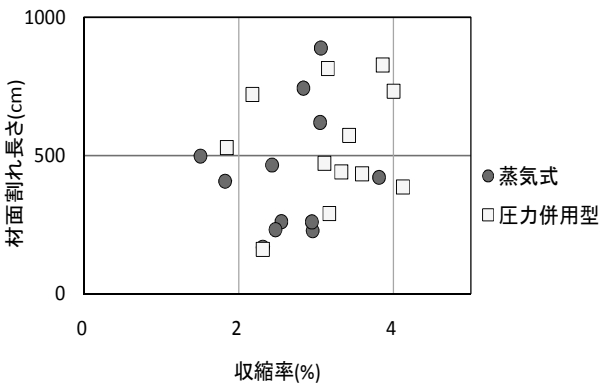


図-8 収縮率と材面割れ長さとの関係

3.4 曲げ強さ

曲げ強度試験結果を表-3に示し、乾燥方法ごとのMOEとMORの平均値と最大値及び最小値を図-10に、真の曲げヤング係数(MOE)と曲げ強さ(MOR)の関係を図-11に示した。

アカマツ無等級材の基準強度 28.2N/mm^2 は、蒸気式では6体、圧力併用型で3体、天然乾燥で3体が満たさなかった。また、機械等級区分

の基準強度においては、蒸気式乾燥で1体が満たさなかったが、曲げ強さに統計的な差は認められなかった。なお、破壊形態は全て輪生節からの曲げ破壊であった(写真-1)。

3.5 色差

乾燥方法別の材色 ($L^*a^*b^*$ 表色系) の測定結果を表-4に、明度 (L^*) を図-12に、赤み (a^*) と黄み (b^*) との関係を図-13に、2材間

の色差を表-5に示した。また、各乾燥方法別の代表的な試験体を写真-2に示した。L*は明るさを示す明度軸（Z軸）であり、0に近いと黒、100に近いと白を表す。また、a*（X軸）は緑

～赤を表しマイナスは緑、プラスは赤を表す。一方、b*（Y軸）は青～黄を表し、マイナスは青、プラスは黄を表す。

表-3 曲げ強度試験結果

乾燥方法	含水率 (全乾法) (%)	縦振動 ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)	見かけの 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	真の 曲げヤング係数 (kN/mm ²)	割れ長さ (cm/2.4m4面)	最大 割れ幅 (mm)
蒸気式	平均	13.6	8.95	30.5	8.58	8.83	194
	標準偏差	0.4	1.22	7.8	1.03	1.37	124
	変動係数(%)	3.0	13.6	25.7	12.0	15.5	63.9
	最小	13.1	6.83	20.1	6.50	6.71	0
	最大	14.4	11.73	44.1	10.53	11.83	415
	データ数	12	12	12	12	12	12
圧力併用式	平均	13.9	9.19	34.5	8.74	8.76	273
	標準偏差	0.6	1.82	7.5	1.75	2.14	118
	変動係数(%)	4.2	19.8	21.7	20.1	24.4	43.1
	最小	12.6	6.61	19.5	6.42	6.20	95
	最大	14.9	12.98	44.7	12.53	13.28	420
	データ数	12	12	12	12	12	12
天然乾燥	平均	17.2	8.85	35.2	8.41	9.03	606
	標準偏差	0.3	1.08	8.2	0.92	1.44	215
	変動係数(%)	1.9	12.3	23.2	10.9	15.9	35.5
	最小	16.7	7.58	22.5	7.34	7.11	240
	最大	17.7	11.55	46.2	10.07	11.71	920
	データ数	12	12	12	12	12	12
5%下限値			18.4				

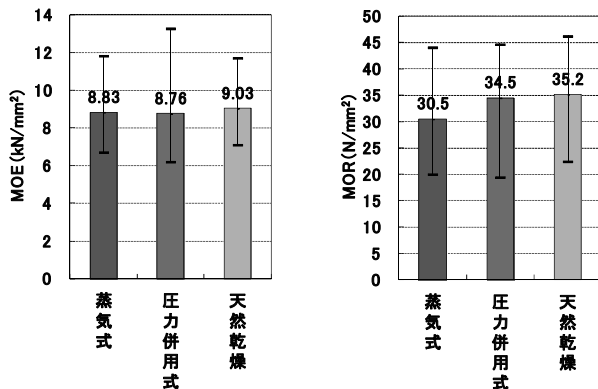


図-10 乾燥方法別の MOE、MOR

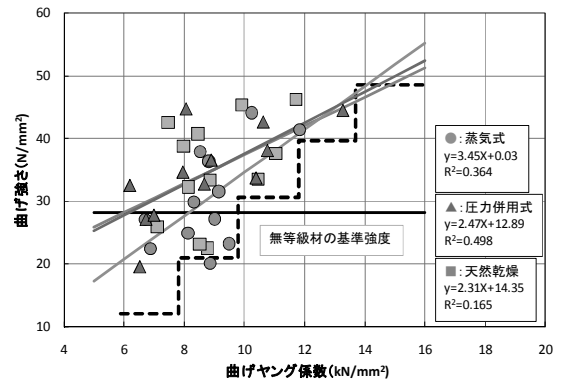


図-11 MOEとMORの関係



写真-1 節からの曲げ破壊状況

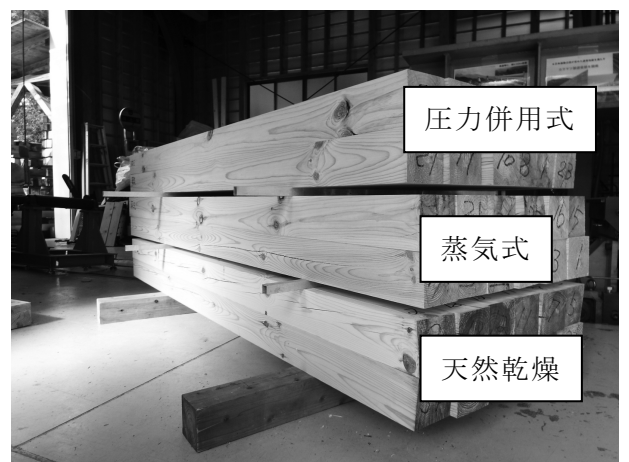


写真-2 材色の代表的な試験体

表-4 材色 (L*a*b*表色系) の測定結果

	蒸気式			蒸気・圧力併用型			天然乾燥		
	L*(明度)	a*(赤み)	b*(黄み)	L*(明度)	a*(赤み)	b*(黄み)	L*(明度)	a*(赤み)	b*(黄み)
平均	81.13	4.95	26.29	77.17	6.25	27.27	85.07	4.17	22.77
標準偏差	1.53	0.85	1.12	1.25	0.53	1.22	1.84	1.08	1.84
変動係数	1.89	17.25	4.27	1.61	8.49	4.48	2.17	25.98	8.06
最小	78.35	3.91	25.04	75.04	5.48	24.64	81.09	2.95	20.74
最大	83.30	6.51	28.92	78.63	7.10	29.50	87.60	6.28	25.97
データ数	12	12	12	12	12	12	12	12	12

明度については天然乾燥>蒸気式>圧力併用型の順であり、天然乾燥したものが最も白に近かった。黄みと赤みについては乾燥方法に違いが認められ、天然乾燥はバラツキが大きくかつ黄と赤が淡いが、人工乾燥のいずれもバラツキが小さくなり、蒸気式、圧力併用型の順に黄と赤が共に濃くなる傾向が認められた。2材間の色差については天然乾燥と圧力併用型の色差が最も大きく、圧力併用型は蒸気式よりも乾燥に伴う変色が大きかった。

表-5 2材色間の色差 (ΔE^*ab)

	蒸気式	蒸気・圧力併用型	天然乾燥
蒸気式	-	4.28	5.34
蒸気・圧力併用型	-	-	9.32
天然乾燥	-	-	-

4 まとめ

長野県の主要な針葉樹であるアカマツを平角等の構造材に利用するため、正角を用いて蒸気式及び蒸気・圧力併用型乾燥機による人工乾燥と天然乾燥を行い、乾燥後の含水率や乾燥に伴う形状変化、割れ、曲げ強さ、色差を計測し比較した。

蒸気式で5.3日、圧力併用式で3.3日の高温セット・中温乾燥を実施した結果、蒸気式で平均10.9%、圧力併用式で平均12.0%となり、圧力併用式の方がバラツキはやや大きかった。また、人工乾燥後1年間養生したものと同期間天然乾燥したものの含水率は、人工乾燥では13.6%と13.9%、天然乾燥は17.2%で、ヒステリシス現象が認められた。

人工乾燥後の収縮率については、圧力併用型の平均値及びバラツキが大きく、材面割れ長さや内部割れ長さについても圧力併用型の平均値の方が大きかった。また、人工乾燥材の材面割れ長さは天然乾燥材に比べて著しく少なく、高温セット法による材面割れ防止効果が認められた。

曲げ強さについては、乾燥方法別の違いは認められなかった。また、乾燥後の材色については乾燥方法による違いが認められ、特に天然乾燥と圧力併用型との違いが最も大きかった。

今回行った試験において、蒸気・圧力併用型乾燥機による乾燥においては、仕上り含水率のバラツキや乾燥に伴う収縮や材面割れが蒸気式よりも大きく発生したことから、更なる乾燥ス

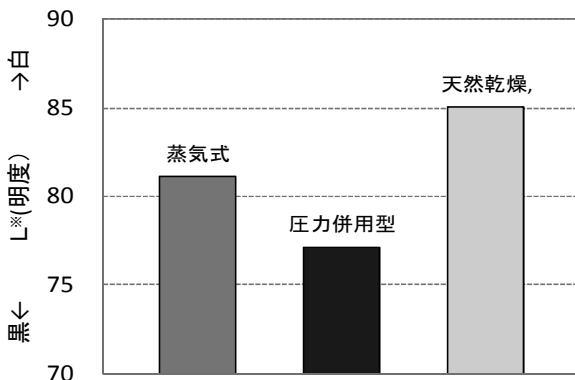


図-12 乾燥方法別の明度 (L*)

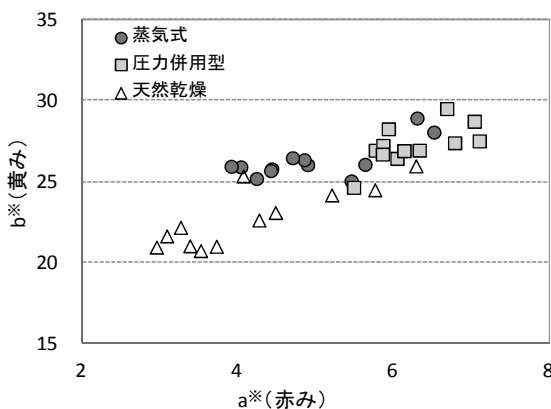


図-13 乾燥方法別の彩度 (a*とb*)

ケジュールの検討が必要であった。

引用文献

- 1) 吉田孝久・柴田直明・今井信・山内仁人・松本浩(2013) 安全・安心な乾燥材生産技術の開発 (I) -材面割れ及び内部割れの少ない乾燥スケジュールの開発-, 長野県林総セ研報 27, 107-122
- 2) 吉田孝久・今井信・柴田直明・山内仁人・高野弑夫(2015) 県産材の高品質乾燥技術の開発(1)-スギ桁材の乾燥方法別乾燥特性-, 長野県林総セ研報 29, 95-106

別表 計測結果一覧

乾燥区分	No.	乾燥前				乾燥後			
		全乾時密度 ※1	全乾法含 水率※2	含水率計 含水率	Efr	全乾法含 水率※1	含水率計 含水率	Efr	幅及び厚さ の収縮率
		(g/cm ³)	(%)	(%)	(kN/mm ²)	(%)	(%)	(kN/mm ²)	(%)
蒸気式	1	0.36	91.9	53.0	9.02	10.8	4.5	8.69	2.43
	3	0.38	32.5	28.5	8.21	13.9	7.5	9.49	2.55
	6	0.37	78.9	55.5	8.65	12.5	4.5	8.84	2.48
	9	0.34	90.3	30.5	9.71	10.8	4.0	9.31	1.82
	13	0.33	124.0	31.0	10.40	10.5	3.0	8.97	1.51
	14	0.40	101.8	46.5	11.78	10.4	4.5	11.37	3.05
	15	0.33	59.2	81.0	7.56	11.1	3.5	8.85	2.96
	16	0.37	71.5	35.0	9.14	10.1	4.5	9.81	2.84
	25	0.37	56.9	39.5	8.11	10.4	5.5	9.41	3.82
	26	0.44	65.8	57.5	9.48	10.3	7.0	10.95	3.06
	31	0.35	51.5	27.0	5.34	10.1	3.0	7.05	2.31
	35	0.37	49.8	30.5	7.25	9.6	4.0	8.54	2.95
	蒸気・圧 力併用型	4	0.37	55.6	31.0	7.90	12.2	4.0	8.84
8		0.34	114.5	51.5	9.14	13.1	5.0	8.07	3.15
10		0.39	57.2	34.0	9.97	12.2	5.5	10.62	4.00
17		0.38	52.8	35.0	10.23	12.6	6.0	11.67	3.17
19		0.39	35.2	72.0	8.37	15.6	4.5	9.72	4.12
20		0.37	39.4	27.5	5.54	12.7	3.5	6.50	2.31
21		0.38	38.7	37.5	9.29	10.8	3.5	10.72	3.33
23		0.38	52.9	59.0	9.17	13.2	7.0	10.47	2.18
27		0.34	81.7	45.5	6.82	11.3	2.5	7.07	3.11
28		0.40	46.5	32.5	7.84	12.4	5.0	9.23	1.85
33		0.43	57.5	37.0	12.57	10.7	7.0	14.09	3.86
36	0.38	58.2	31.0	8.66	7.8	2.5	10.08	3.43	
天然乾燥	2	0.37	104.1	57.0	9.41				
	5	0.38	87.1	56.0	10.38				
	7	0.38	48.2	36.5	7.23				
	11	0.38	76.0	52.5	10.03				
	12	0.41	50.4	42.0	6.78				
	18	0.38	86.3	36.5	9.01				
	22	0.41	33.8	28.5	8.94				
	24	0.39	58.2	53.5	9.18				
	29	0.40	55.1	93.5	8.00				
	30	0.39	46.5	35.0	8.16				
32	0.37	62.6	84.5	7.28					
34	0.42	60.3	35.5	11.62					

※1 含水率試験片の値

※2 養生後の全乾法による含水率を用いて計算で求めた値

		養生後						
材面割れ 長さ	ねじれ	全乾法含水 率	含水率計 含水率	幅及び厚さ の収縮率	Efr	材面割れ 長さ	内部割れ	ねじれ
(cm)	(mm/4m)	(%)	(%)	(%)	(kN/mm ²)	(cm)	mm	(mm/4m)
466	20.0	13.4	11.0	2.88	8.69	290	0	11
261	10.0	14.4	11.5	2.45	9.51	110	0	8
232	10.5	14.2	11.0	2.17	8.75	65	0	8
407	10.0	13.6	8.0	2.67	9.42	380	0	7
498	11.0	13.7	7.5	2.23	9.08	425	0	9
620	20.5	13.7	12.5	2.51	11.03	395	25.2	16
228	18.0	13.6	10.0	2.41	8.64	120	0	11
744	25.0	13.1	9.5	2.76	9.90	370	0	19
421	32.5	13.1	11.5	3.40	9.22	160	55.8	25
889	24.0	13.2	13.0	2.70	10.76	450	53.3	23
169	41.0	13.4	8.0	2.52	6.87	20	54.3	31
260	31.0	13.2	10.5	2.61	8.16	125	0.0	25
434	29.0	13.9	10.0	3.20	8.75	205	21.0	27
815	14.5	14.4	12.5	3.09	8.16	535	0	16
733	10.0	14.4	11.5	3.45	10.52	580	14.0	7
290	19.0	14.3	13.5	3.08	11.63	10	0	12
386	9.5	14.9	11.0	3.77	9.76	80	0	12
161	23.0	13.5	9.0	2.46	6.73	0	0	20
441	18.0	13.8	11.0	2.62	10.50	275	129.8	12
721	22.5	14.2	14.5	1.94	10.52	315	31.6	15
472	21.0	13.5	9.5	2.24	7.09	260	0	15
529	23.5	13.8	10.0	2.12	9.22	275	20.5	20
828	16.0	13.5	13.0	3.01	13.96	394	37.7	13
573	29.0	12.6	10.0	2.41	9.83	454	0	20
		17.2	13.5	1.77	8.68	1345	0	21
		16.9	14.5	2.47	10.04	1220	0	12
		16.7	13.5	2.09	7.98	906	0	15
		17.1	15.0	2.73	10.01	1520	0	16
		17.2	15.5	2.69	8.04	1051	0	13
		17.7	12.5	1.86	9.36	1470	0	25
		17.2	13.5	2.57	10.14	1472	0	24
		17.1	15.0	2.23	10.43	1205	0	11
		17.4	16.0	2.34	9.14	890	0	33
		16.8	14.5	2.78	9.09	915	0	21
		17.0	14.0	2.79	7.83	670	0	16
		17.7	18.5	1.67	11.80	1420	0	20