

高温セット法を利用した隠岐産クロマツ平角の人工乾燥と強度性能評価*

石橋正樹・中山茂生

Studies on the Kiln Drying Technology by the High-temperature Setting Method and Strength Properties of Kuromatsu(*Pinus thunbergii* Parl.) Flat Squares Grown in Okinoshima-cho, Shimane Prefecture

ISHIBASHI, Masaki and NAKAYAMA, Shigeo

要 旨

隠岐産クロマツ心持ち平角の乾燥技術の確立と強度性能の把握を目的として、乾燥前処理としての高温セットと各種乾燥法を組み合わせた乾燥試験および実大曲げ試験を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 今回行ったいずれの乾燥方法においても、含水率のバラツキを抑え、仕上がり含水率を20%以下に揃えることができた。
2. 乾燥後の収縮率において、高温セットと天然乾燥の組み合わせは、高温セットを行わない天然乾燥とほぼ同等の収縮率であることが分かった。
3. 高温セットを施すことで、材面割れを天然乾燥と比較して1/3以下に抑制し、品質の向上につながることが分かった。
4. 高温セットを施すことで、炉出し後の材面割れ量をピークとし、徐々に割れが閉じる傾向にあり、高温セットと中温間けつ運転の組み合わせが最も材面割れが少なかった。
5. 目視等級区分の結果、1, 2級材が全数の約90%を占め、仕上げ加工時の動的ヤング係数 (E_{tr}) によって機械等級区分を行った結果、E110以上が約70%を占めた。
6. 曲げヤング係数 (MOE) および曲げ強度 (MOR) の平均値は、それぞれ10.77kN/mm² (標準偏差1.95kN/mm²), 37.5N/mm² (同10.7N/mm²) であった。仕上げ加工時の動的ヤング係数 (E_{tr}), MOEはそれぞれ、MORとの間に高い正の相関関係が認められた。

キーワード：クロマツ，平角，高温セット，含水率，割れ

I はじめに

本県のマツ資源は針葉樹の4割を占める23250千m³の蓄積を有し、なかでも隠岐島は「隠岐の黒松」の産地として知られ、特に本県のマツの蓄積量の84%がアカマツであるのに対し、隠岐島では95%をクロマツが占めている。また、クロマツは住宅の内装材として用いられる他、

平角は梁桁材として昔から好まれている。

近年、建築用材である木材に対して、品質の保証を求める動きがある¹⁾。本研究では、隠岐産クロマツ平角の乾燥材としての品質確保、寸法精度あるいは強度性能の明確化を目的として、これまでスギに対して多く用いられてきた材面割れ抑制方法である高温セット法^{2), 3)}を

*本報の一部は2010年度日本木材学会大会（京都）にて発表した。

用いた乾燥前処理をクロマツに対して行った。その後、天然乾燥あるいは中温乾燥させ、その仕上がり状態について検討し、強度試験を行った。

II 試験方法

1. 供試材

末口径級27~30cm、長さ4.1mの島根県隠岐産クロマツ原木96本を用いて、平均年輪幅、曲がり、心材率、細り度を調査した後、仕上がり寸法120×210×4000mmの平角を目標として粗挽き状態で150×240×4100mmに製材した。製材後、元口部から80mm入った箇所から含水率測定用試験片（厚さ20mm）を採取し、全乾法で初期含水率を測定し、重量による並び替えの結果軽い方から8番目および16番目の供試材については長辺方向を13分割し、含水率傾斜を測定した。

2. 乾燥

製材後の平角について天然乾燥および人工乾燥を行った。人工乾燥装置には、収容能力約7.7m³の高温蒸気式乾燥装置（榊新柴設備製「SKD-045PJr」）を用いた。人工乾燥を行う供試材は乾燥前に出来るだけ材表面の乾燥を進めないよう、基本的に前日製材した材を使用した。試験条件ごとに24本を乾燥、全部で96本を試験に供した。

乾燥スケジュールの概要を表1に示す。乾燥条件Bは高温セット後に天然乾燥を行うスケジュールであり、Cは高温セット後に中温乾燥を行うスケジュールである。Dは高温セットの後、日中の8時間のみ中温条件で運転し、夜間において運転を停止する間けつ運転のスケジュールである。

人工乾燥終了後、重量、寸法、木材水分計（㈲エーデス機械産業製「DELTA-200XL」）による含水率、木口割

表1 乾燥スケジュールの概要

乾燥条件	供試材本数	乾燥方法	初期蒸煮	高温セット DBT/WBT	乾燥工程 DBT/WBT
A	24	天然乾燥			—
B	24	高温セット + 天然乾燥			—
C	24	高温セット + 中温乾燥	95℃ 12hr	120℃/90℃ 24hr	90℃/60℃ 288hr
D	24	高温セット + 中温間けつ			90℃/60℃ 288hr

注：高温セット+中温間けつは日中の8hrのみ運転

れ、材面割れ、曲がり、ねじれ、縦振動法による動的ヤング係数（以下、 E_{fr} と記す）を測定した。各乾燥条件において重量により選定した2本の供試材について両木口面から20cm内側の位置を基本とし、含水率測定用試験片を出来るだけ節を避けて採取し、全乾法で人工乾燥終了後の含水率を測定した。

その後、供試材を屋外の屋根付き天然乾燥土場で養生し、重量、寸法、含水率計含水率、木口割れ、材面割れの経時変化をおおむね1ヶ月おきに測定した。

経時変化が安定した時点で同様に重量、寸法、含水率計含水率、木口割れ、材面割れ、 E_{fr} を測定し、重量により選定した2本の供試材の両木口面から20cm内側の位置より含水率測定用試験片を採取して、含水率傾斜を全乾法で測定した。

3. 材面割れと木口割れの測定

供試材の材面割れと木口割れの測定は、4材面に発生した肉眼で確認できた全ての割れについて、その最大幅と割れ長さを鋼尺（測定精度は最大幅で0.5mm、割れ長さについては1mm）で測定した。

4. ねじれ、曲がりの測定

ねじれは、鋼材定盤上に平角の3隅を固定したときに、他の1隅が平面から離れた距離をねじれ量とし、鋼尺（1mm精度）で測定した。

曲がりは、発生した材面に水糸を張り、最大の矢高を鋼尺（1mm精度）で測定した。

5. 内部割れの測定

養生後のそれぞれのグループから E_{fr} の値により選別した8番目および16番目の供試材について、繊維方向に10cm毎に切断し、切断面のスキャン画像に対しimageJ 1.43u（NIH）を用いて画像解析を行い、割れ個数、割れ延長及び割れ面積を測定した。

6. 動的ヤング係数 (E_{fr}) の測定

E_{fr} の測定を丸太時、製材直後、炉出し後、天然乾燥・養生終了時、仕上げ加工後に行った。また、みかけの密度を算出するため、丸太時には末口径、元口径、長さおよび重量を測定した。同様に、製材直後、乾燥終了時、

養生終了時、仕上げ加工後では寸法、重量を測定した。 E_{tr} の測定には、リオン(株)製「精密騒音計NL-14」及び日本電気三栄(株)製「シグナルプロセッサDP6102 (FFTアナライザ)」を使用した。

仕上げ加工後の E_{tr} に基づいて、製材の日本農林規格(JAS)に準拠して⁴⁾、機械等級区分を行った。

7. 平角の外観調査

養生終了後、モルダーで120×210×4000mmの平角に加工した。仕上げ加工後の平角について、平均年輪幅、曲がり、丸身、節を調査し、製材の日本農林規格(JAS)に準拠し、目視等級区分を行った。

8. 実大曲げ試験

曲げ試験には実大強度試験機(容量1000 kN、前川試験機製作所製「IPA-100R-F」)を使用し、「構造用木材の強度試験法」⁵⁾に準拠し3等分4点荷重方式(全スパン3780mm)で定速ストローク制御により載荷し、変位計(ひずみゲージ式変位計SDP-200D)により材中央部のたわみを測定した。曲げヤング係数(以下、MOEと記す)、曲げ強度(以下、MORと記す)を測定した。破壊した供試材から含水率試験片を採取し、全乾法により試験時の含水率を求めた。

III 結果と考察

1. 素材の外観特性

表2に素材の外観特性調査結果を示す。平均年輪幅の平均値は3.7mm(標準偏差0.7mm)であった。曲がり、心材率、細り度の平均値はそれぞれ10.7%、15.8%、87.2%であった。

表2 素材の外観特性調査結果

	平均年輪幅 (mm)	曲がり率 (%)	心材率 (%)	細り度 (%)	偏心率	
					元口(%)	末口(%)
平均値	3.7	10.7	15.8	87.2	8.7	8.3
標準偏差	0.7	6.4	6.9	5.0	4.5	4.0
変動係数 (%)	18.1	59.7	43.7	5.7	51.8	48.0
最大値	5.9	26.7	37.7	98.6	26.5	17.3
最小値	2.3	0.0	3.8	73.1	0.0	0.0

2. 間けつ運転における木材温度

高温セットと中温乾燥の間けつ運転である乾燥条件Dにおいて、JISKタイプ熱電対を用いて人工乾燥中の木材の表面温度と中心温度を測定した。熱電対は、材の中心部までドリルにより穿孔し、これを挿入した後に耐熱シリコンにより密封、固定した。その結果を図1に示す。

運転停止から翌日の運転開始までの間に表面温度、中心温度とも70℃付近にまで低下した(中温乾燥設定域での最低温度70.8℃)。また、表面温度において、運転開始直後、設定温度である90℃に15分程度で到達するが、中心温度においては、日中の8時間の運転においても設定温度である90℃に達することはなかった(中温乾燥域での最高温度86.3℃)。

3. 乾燥条件別の仕上がり含水率

乾燥条件の違いによる供試材の乾燥経過を図2に示す。含水率は、実大曲げ試験後に採取した含水率試験片の全乾法含水率から換算して求めた。乾燥前含水率の平均値において含水率に差が生じた原因は、伐採から製材までの期間の違いによるものと思われる。高温セット法を用いた後、中温乾燥を行ったC、間けつ運転を行ったDについては、炉出し直後にそれぞれ10.3%、12.3%まで低下し、その後養生3ヶ月間はほぼ横ばいであった。高温セット法により前処理のみを行ったBについては、炉出し直後は35.3%であったが、その後の天然乾燥において徐々に低下し、3ヶ月目には天然乾燥のAとほとんど差がなくなり、Aは4ヶ月、Bについては6ヶ月で20%を下回った。いずれのグループについても、含水率のバラツキを抑え、仕上がり含水率を20%以下に揃えることができた。

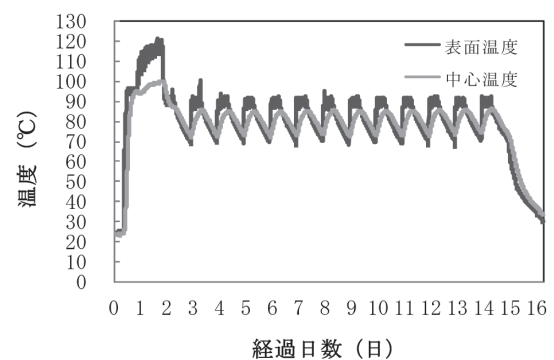


図1 間けつ運転による人工乾燥中の材温の推移

4. 養生後の水分傾斜

各乾燥条件において養生後の材内含水率傾斜を測定した結果を図3に示す。どの条件においても凸型の含水率傾斜を示した。Bについては高温セット直後の中央部は27%程度であったため、その後の天然乾燥期間において20%以下まで低下したと考えられる。どの乾燥条件においても良好な仕上がりであった。

5. 収縮率の変化

各乾燥条件における供試材幅方向中央部の収縮率の変化を図4に示す。C、Dは養生終了までにそれぞれ約4.0%、3.3%で安定した。Bにおいては養生後には2.5%で安定した。Aでは2.3%であることから、収縮率について、Bは天然乾燥であるAとほぼ同等の収縮率であった。

6. ねじれ量、曲がり量の変化

図5に乾燥条件の違いによるねじれ量と曲がり量の推移を示す。クロマツはその樹種特性において特にらせん木理に起因するねじれが大きいとされていることから、各供試材に対して重しを載せることで圧縮を行った（人工乾燥時750kg/m²、天然乾燥および養生時110kg/m²）。Aにおいては天然乾燥後にそれぞれ3.2mm、2.5mmのねじれ、曲がりが生じた。Bにおいて高温セット処理後のねじれ、曲がりはわずかであったが、養生後は3.1mm、2.5mmであった。Cについては養生後のねじれ量、曲がり量はそれぞれ4.9mm、6.3mmであった。同様にDについてのそれは6.3mm、4.4mmであった。高温セットと天然乾燥を組み合わせたBにおいて、従来の天然乾燥であるAと同等の仕上がりであった。また繊維走行傾斜比とねじれ量、曲がり量において相関はみられなかった。

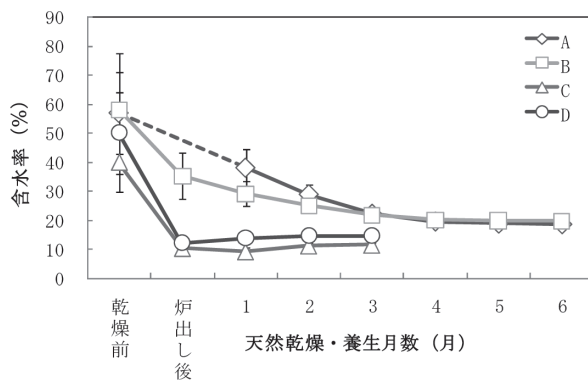


図2 乾燥条件ごとの乾燥経過
※エラーバーは標準偏差を示す

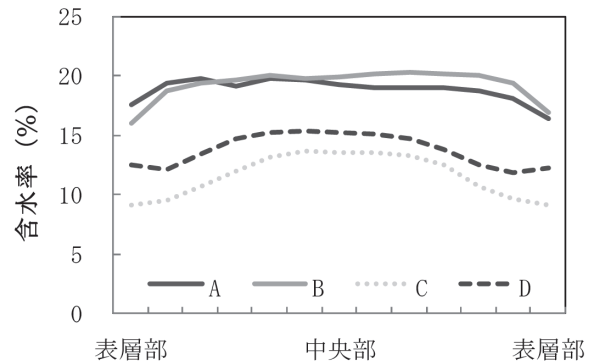


図3 乾燥条件ごと平角高さ方向の含水率傾斜

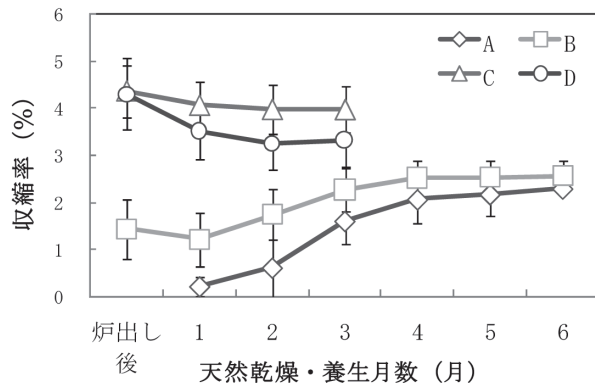


図4 炉出し後から養生終了までの収縮率の変化
※エラーバーは標準偏差を示す

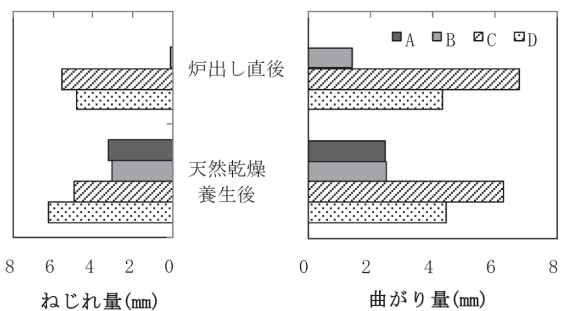


図5 ねじれ量と曲がり量の推移

7. 乾燥による内部割れ

図6に乾燥条件の違いによる内部割れ面積の比較を示す。C、Dにおいては材の両端部より80cmまでは中心と比較して多くの内部割れが確認できたが、中央部の内部割れは比較的少なく抑えることができた。Bにおいては両端部より20cm入ったところから少なく抑えることができた。

8. 乾燥による材面割れ

図7に供試材1本当たりの材面割れ面積の推移を示す。Aにおいては天然乾燥が進むにつれて徐々に材面割れが伸長していき、含水率が20%前後の時点でほぼ安定した。

Bにおいては、炉出し直後の材面割れが認められたものの、その時点をピークとして徐々に減少していく傾向

が見られた。6ヶ月の天然乾燥を終えた時点で、BはAの材面割れ面積のほぼ1/3に抑えることができた。C、DについてもBと同様に、炉出し後が最も割れ面積が大きく、その後減少した。最も割れが少なかったのはDであった。これらは高温セットの効果と考えられる。

9. 動的ヤング係数 (E_{fr})

乾燥条件ごとの違いによる E_{fr} の測定結果を表3に示す。乾燥前と比較して、炉出し後、天然乾燥・養生終了後に、Cにおいて他の供試体と有意差がみられた(多重比較)。これは、炉出し後の含水率の違いが E_{fr} に影響しているものと推察される。

仕上げ加工後の E_{fr} より求めた機械等級区分の結果を図8に示す。出現率はE70が1.3%、E90が27.5%、E110が41.3%、E130が22.5%でE150が7.5%であった。

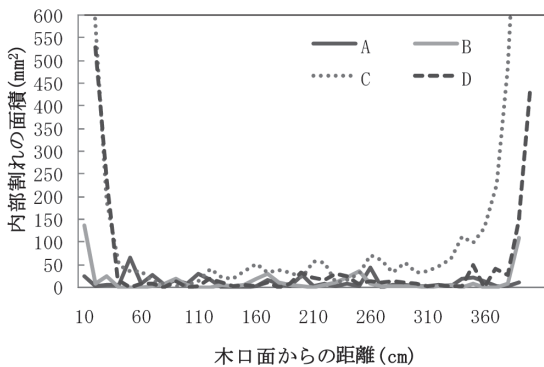


図6 内部割れの材長方向分布

表3 各測定時の E_{fr}

乾燥条件		丸太時	製材直後	炉出し後	天然乾燥・養生後	仕上げ加工後
A	平均値	10.89	10.26	11.31	10.62	
	標準偏差	1.60	1.77	1.87	1.88	
B	平均値	11.18	10.51	10.66	11.60	10.98
	標準偏差	2.02	1.66	1.94	1.67	1.74
C	平均値	10.83	10.35	12.30	12.42	11.57
	標準偏差	1.19	1.44	1.72	1.74	1.74
D	平均値	10.76	10.35	11.35	11.34	10.60
	標準偏差	1.52	1.44	1.78	1.77	1.59

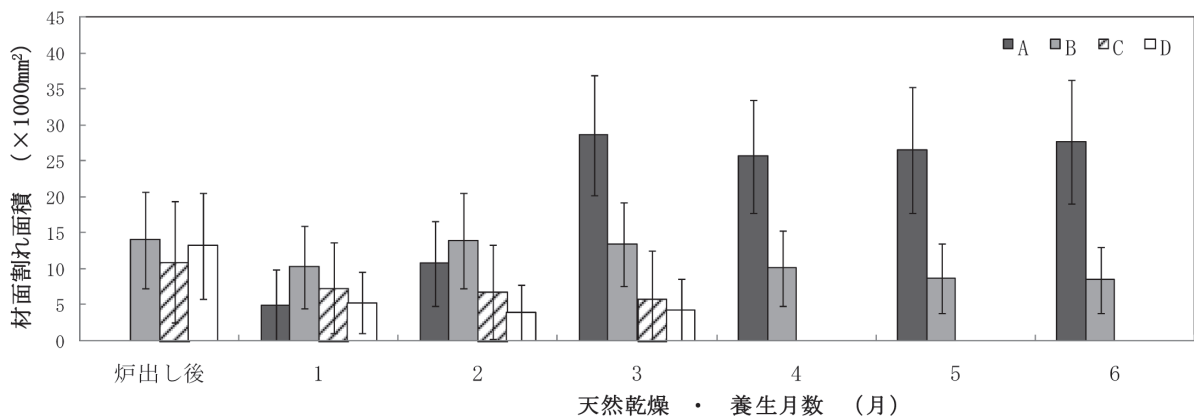


図7 供試材1本当たりの材面割れ面積の推移

※エラーバーは標準偏差を示す

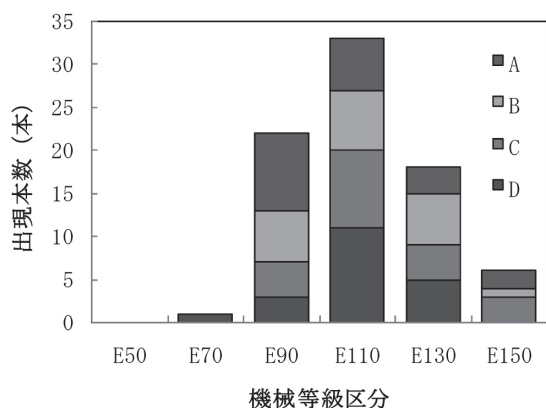


図8 機械等級区分結果

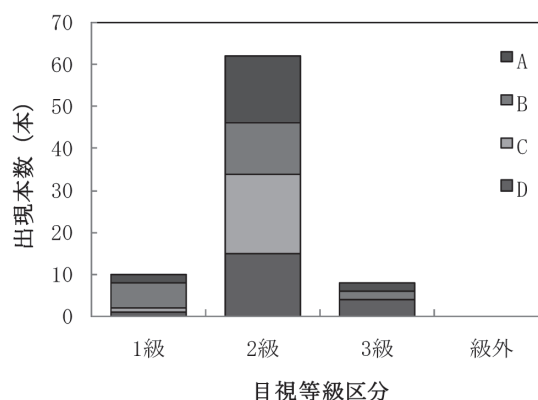


図9 目視等級区分結果

10. 平角の外観調査

目視等級区分の結果，1級が12.5%，2級が77.5%，3級が10.0%で級外は現れなかった。1，2級材で全数の90%を占めた（図9）。

11. 実大曲げ試験

供試材全数の曲げ試験結果を表4に示す。MOEおよびMORの平均値は，それぞれ10.77kN/mm²（標準偏差1.95kN/mm²），37.5N/mm²（同10.7N/mm²）であった。なお，試験時の含水率の平均値は，16.5%（標準偏差3.8%）であった。MOEとMORの間には高い正の相関関係が認められた（図

10）。各グループ間の差について統計的仮説検定（多重比較）を行った結果，MOEにおいてCについて他のグループとの間に有意差がみられ高い値を示した。これは， E_{tr} の結果と同様に炉出し後の含水率の違いがMOEに影響しているものと推察される。

単回帰分析の結果，MORに影響の大きい因子は，MOEと仕上げ時の E_{tr} であり，それぞれ0.771と0.793で有意水準1%で高い相関が認められた。また，一般的に密度が高ければMORが向上するといわれているが⁶⁾本結果でもその傾向が認められた。平均年輪幅とMORとの間に負の相関が認められた（表5）。

表4 実大曲げ試験の結果

	密度 (kg/m ³)	含水率 (%)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)
平均値	542	16.5	10.77	37.5
最大値	707	21.6	15.21	62.2
最小値	466	9.5	6.14	16.3
標準偏差	42	3.8	1.95	10.7
変動係数(%)	7.7	23.4	18.1	28.6

注：密度は試験時の密度値

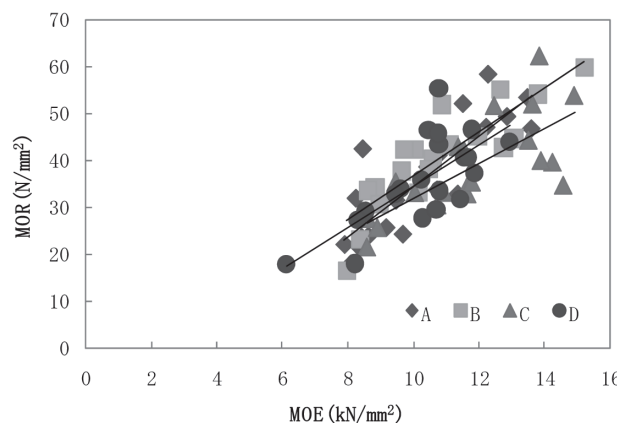


図10 MORとMOEの関係

表5 MORと各因子の相関係数

	MOR	平均 年輪幅	含水率	密度	最大節 径比	E_{fr}	MOE	材面割れ 面積
MOR	1.000	-0.533 **	0.088	0.545 **	-0.175	0.793 **	0.771 **	0.003
平均年輪幅		1.000	0.179	-0.272 *	0.142	-0.525 **	-0.459 **	0.184
含水率			1.000	0.353 **	-0.044	-0.015	-0.098	0.436 **
密度				1.000	-0.020	0.676 **	0.559 **	0.246 *
最大節径比					1.000	-0.227 *	-0.233 *	0.113
E_{fr}						1.000	0.947 **	0.019
MOE							1.000	-0.008
材面割れ面積								1.000

注：最大節径比は広い材面の材縁節を示す

注： E_{fr} は仕上げ時の E_{fr} を示す

Note. *: 有意水準5%, **: 有意水準1%

IV おわりに

隠岐産クロマツ平角を供試材として、乾球温度120℃、湿球温度90℃の高温セット法を用いて乾燥前処理を行い、その後天然乾燥、中温乾燥および間けつ運転による中温乾燥を実施した。また比較対象として、高温セットを行わずに天然乾燥も行った。その結果、全供試材の仕上がり含水率は全乾法で平均値16.5%となった。高温セットを行った供試材は材面割れが少なく、材面割れを天然乾燥の1/3程度に抑えることができた。また、炉出し後の材面割れ量をピークに、徐々に割れが閉じていく傾向が見られた。これは、製品としての品質を担保でき、信頼性の向上につながる。

本報の結果から、クロマツ平角についても高温セット法による乾燥前処理が材面割れに対して有効に働くことが分かった。また、高温セット法による乾燥前処理と天然乾燥を組み合わせることで、内部割れ、材面割れを抑制し、なおかつねじれや曲がりを従来の天然乾燥と同等まで抑えたクロマツ平角の乾燥が行えることが分かった。

謝 辞

この研究を進めるにあたりまして島根県中山間地域研究センター嘱託職員福島亮氏、八幡優子氏には多大なご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 林野庁(2011)平成23年版 森林・林業白書。(社)全国林業改良普及協会:20-26.
- 2) 石橋正樹・藤田 勝(2009)島根県産スギ正角材の高品質乾燥技術の確立と強度性能評価. 島根中山間セ研報5:65-71.
- 3) 石橋正樹, 藤田 勝(2011)島根県産スギ平角の高品質乾燥技術の確立と強度性能評価. 島根中山間セ研報7:51-57.
- 4) (社)日本農林規格協会(2009)製材の日本農林規格.
- 5) (財)日本住宅・木材技術センター(1999)構造用木材の強度試験法.
- 6) (社)日本木材加工技術協会(2008)木材乾燥講習会テキスト:14.

Studies on the Kiln Drying Technology by the High-temperature Setting Method and
Strength properties of Kuromatsu(*Pinus thunbergii* Parl.) Flat Squares
Grown in Okinoshima-cho, Shimane Prefecture

ISHIBASHI, Masaki and NAKAYAMA, Shigeo

ABSTRACT

We dried flat squares of Kuromatsu (*Pinus thunbergii* Parl.) grown in Okinoshima-cho, Shimane Prefecture, by applying the high-temperature setting method in combination with various other drying methods; subsequently, we evaluated the strength properties of these flat squares conducting by performing a full-size bending test. The results are as follows:

1. A less than 20% dispersion in moisture content was achieved with all drying methods.
2. The shrinkage of flat squares observed after subjecting it to a combination of air drying and high-temperature setting was almost similar to that observed after subjecting it to only air drying.
3. The number of surface checks in flat squares subjected to a combination of air drying and high-temperature setting was limited to less than one-third of that in flat squares that was subjected to only air drying, thereby indicating that the former method affords a better quality of flat squares.
4. The surface checks tended to close gradually while the flat squares was being subjected to high-temperature setting, whereas the size of checks was maximum after air drying. Further, the least surface checking was observed when the flat squares was subjected to a combination of high-temperature setting and intermittent moderate-temperature drying.
5. On the basis of visual grading, 90% of the total flat squares was classified as being of the 1st or 2nd grade. On the other hand, the mechanical grading results that were obtained by subjecting the flat squares to a finishing treatment at a modulus of dynamic elasticity using frequency (E_{fr}) of over E110 indicate that approximately 70% of the total flat squares.
6. The average values of the modulus of elasticity (MOE) and the modulus of rupture (MOR) were 10.77 kN/mm² (standard deviation of 1.95 kN/mm²) and 37.5 N/mm² (standard deviation of 10.7 N/mm²), respectively. It was observed that both finishing E_{fr} and MOE are closely correlated to MOR.

Keywords : *Pinus thunbergii*, flat square, high-temperature setting, moisture content, check.