

減圧下における高温セット処理条件と材面割れの関係（予備的検討）

研究期間：令和元年度～5 年度
奥原祐司・吉田孝久・山口健太※

カラマツ心持ち正角材の減圧下における高温セット処理条件と材面割れ発生関係を探るため、4 条件の高温セット処理（A：蒸気高温セット 110℃18 時間、B：減圧蒸気高温セット 130℃6 時間、C：減圧蒸気高温セット 120℃12 時間、D：減圧蒸気高温セット 101℃24 時間）を行い、材面割れの発生状況を調査した。その結果、減圧下における条件 C での高温セット処理が、現在推奨されている条件 A での蒸気高温セットと同程度の材面割れ防止効果があった。また、その他の減圧蒸気高温セット処理（条件 B、条件 D）においても材面割れ防止効果があることが明らかとなり、減圧下における高温セット処理による材面割れ防止が可能であることが示唆された。

キーワード：カラマツ、心持ち材、高温セット処理、減圧蒸気高温セット

1 緒言

現在、高齢化した森林からは、大径材が生産されており、これらから製材される断面の大きな心持ち構造材の製品化が県内においても期待されている。

このような状況の中で、針葉樹の心持ち材の人工乾燥は、樹種を問わず材面割れ防止の高温セット処理（ドラインセット）が必須条件となっており、乾燥現場においては当センターで取り組んできた成果^{1)~4)}が広く反映されている。

しかし、この高温セット処理は、主に蒸気式木材乾燥機が使用されており、この燃料源となる灯油価格は年々上昇⁵⁾して、今後、乾燥コストの上昇が懸念される（図-1）。一方で、高温セット処理を含めた過度な高温乾燥は、熱劣化による強度の低下が指摘されている^{6)~11)}。この2つの課題を解決するため、減圧下における乾燥で乾燥時間の短縮が期待できる蒸気圧力併用型木材乾燥機による試験を実施してきた^{12)~18)}。

本研究では、カラマツ心持ち無背割り材について、材面割れの少ない減圧下における高温セット処理スケジュール（以下、減圧蒸気高温セットと表記）を検討した。



図-1 灯油価格の推移

2 試験方法

2.1 供試材

2.1.1 丸太

東信地域で生産されたカラマツ 30 本（末口径 22 cm～23.5 cm、長さ 4m、写真-1）を供試材とした。

丸太は、通直な材が多く、かつ、偏心が少ない丸太が多かった。

素材の JAS の縦振動ヤング係数試験（吊り下げ式）を参考に製材業者の土場において実施した。

丸太の形状測定の結果を表-1 に示す。縦振動ヤング係数の平均値は 12.94 kN/mm²であった。また、素材の JAS の縦振動ヤング係数区分による分布を図-2 に示す。最も多かったのは Ef130 であった。

表-1 丸太の測定結果

	末口			元口		
	短径 (cm)	長径 (cm)	年輪 数	短径 (cm)	長径 (cm)	年輪 数
平均値	21.1	22.0	47	23.4	24.3	51
最小値	20.0	20.5	40	21.5	22.5	44
最大値	22.0	23.5	55	25.5	27.0	61
標準偏差	0.67	0.82	4.4	0.93	0.99	4.2
変動係数(%)	3.16	3.73	9.3	3.95	4.07	8.2
個数	30	30	30	30	30	29

	長さ (m)	縦振動 周波数 (Hz)	質量 (kg)	見かけ の密度 (kg/m ³)	Ef (kN/mm ²)
平均値	4.099	501.3	127.0	765	12.94
最小値	4.072	464.8	103.5	667	10.57
最大値	4.146	544.9	152.0	848	15.75
標準偏差	0.0	22.5	11.6	45.3	1.38
変動係数(%)	0.4	4.5	9.1	5.9	10.65
個数	30	30	30	30	30

※現 北アルプス地域振興局林務課

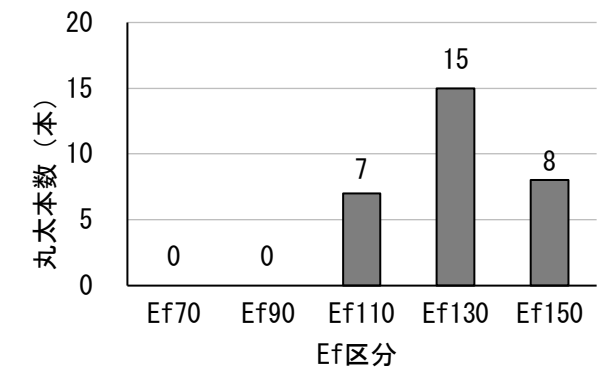


図-2 丸太の縦振動ヤング係数分布



写真-1 丸太の状況

2.1.2 製材品

丸太から 145×145×4,000 mmの心持ち正角材を一丁取りで 30 体製材し、図-3 のとおり、両木口部分をクロスカット後、4 分割し、下記の 4 条件の処理に供した。なお、試験材の木取り位置は、正角ごとに木口から ABCD, BCDA・・・の順とした。また、全ての木口部分は、シリコンによりコーキングした。

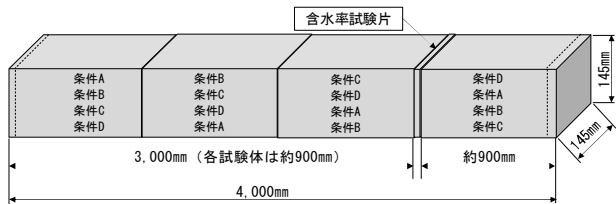


図-3 試験体の寸法と採材位置

2.2 高温セット処理条件

蒸煮処理を含めた蒸気高温セット処理、減圧蒸気高温セット処理の条件を表-2 に示す。なお、減圧蒸気高温セット処理の湿球温度の()内の数値は、圧力制御時の想定湿球温度であり、湿球温度制御は出来ない仕様である。

条件Aは、蒸気式木材乾燥機（ヒルデブランド社製：HD 7 4 /MH-H）により、現在推奨されている蒸気高温セット処理⁴⁾を実施した。

一方、減圧蒸気高温セットについては、この試験に先立ち実施した乾球温度 110℃圧力-45kPa（湿球温度 80℃）で 6 及び 9 時間処理したところ、材面割れ防止効果が少なかった¹⁷⁾ことから次の条件とした。

条件Bは、高温による時間短縮を目的として乾球温度 130℃と圧力-30kPa（湿球温度 90℃）で 6 時間処理した。

また、**条件C**は、乾球温度 120℃と圧力-30kPa（湿球温度 90℃）で 12 時間処理し、条件 B よりも乾球温度を 10℃下げて処理時間を 2 倍にした。

さらに、**条件D**は、乾球温度 101℃と圧力-53kPa（湿球温度 75℃）で 24 時間処理し、熱劣化による曲げ強さの低下防止を考慮した。

なお、条件 B, C, D は、蒸気圧力併用型木材乾燥機（ヒルデブランド社製：HD 0 3 / SHD-I）により実施し、蒸煮処理は加圧状態（100kPa）により温度 120℃で 1 時間実施した。

また、条件 B, C, D は、それぞれの条件につき 1 試験体に熱電対を挿入し、深さ 1 cm, 3 cm, 7 cm の材温を測定した。

表-2 高温セット処理条件

条件	蒸煮処理			高温セット処理			
	温度 (℃)	圧力 (kpa)	時間 (h)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	圧力 (kpa)	時間 (h)
条件 A	90	—	8	110	80	—	18
条件 B	120	100	1	130	(90)	-30	6
条件 C	120	100	1	120	(90)	-30	12
条件 D	120	100	1	101	(75)	-53	24

2.3 高温セット処理後の乾燥方法

高温セット処理後、条件 A～D までの全ての試験材を当センターの蒸気式木材乾燥機を用いて、同時に表-3 のスケジュールにより 70℃中温乾燥を実施した。

中温乾燥は、各条件から 3 体のモニター材の質量を定期的に測定し、推定含水率が 12%を下回った時点で終了とした。

表-3 中温乾燥条件

ステップ	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	温度差 (°C)	時間 (h)
1	40	28	12	12
2	45	32	13	12
3	50	36	14	12
4	55	40	15	12
5	60	44	16	12
6	65	48	17	12
7	70	52	18	12
8	70	50	20	12
9	70	45	25	12
10	70	40	30	348

合計456時間（19日間）

2.4 材面割れの測定

材面割れの測定は、高温セット処理後、中温乾燥後、整形後に行った。

材面割れの幅の測定は、4材面の中で最大割れ幅をクラックスケール又はノギスにより0.1mm単位で測定した。

材面割れの長さの測定は、幅1mm以上の割れを対象にコンベックスにより4材面の割れの長さを1cm単位で測定し、その合計（総延長）とした。

なお、整形は、モルダーにより120×120×1,000mmとした。

4条件の割れの比較は、Microsoft® Excel® for Microsoft 365 MSO 64ビット及び4Steps エクセル統計（第4版）を使用し、ノンパラメトリック多重比較には、Steel-Dwass 法により確認し、危険率1%で有意差があるときは「**」、危険率5%で有意差があるときは「*」と標記した。

2.5 含水率と水分傾斜の測定

高温セット処理後に1条件当たり3体（気乾密度が高い材、中程度の材、低い材）について、長さ方向の中央部において試験片を切り出し、全乾法による含水率測定と中央1/3区間を9分割して水分傾斜を測定した（図-4）。

また、整形後に1条件当たり4体について、長さ方向の中央部において試験片を切り出し、全乾法による含水率と中央1/3区間を7分割して水分傾斜を測定した。

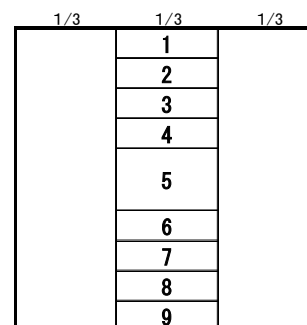


図-4 水分傾斜試験片の採材位置（9分割）

3 試験結果

3.1 乾湿球温度と材温の経過

既往の文献より高温セットがかかる材の軟化温度は表層温度が100°C以上と判断¹⁾し、以下の結果を考察した。

条件A（乾球温度110°C、湿球温度80°C、18時間）の乾湿球温度の経過を図-5に示す。現在推奨されている蒸煮温度90°Cを8時間実施し、その後、乾球温度110°C、湿球温度80°Cを18時間実施した。

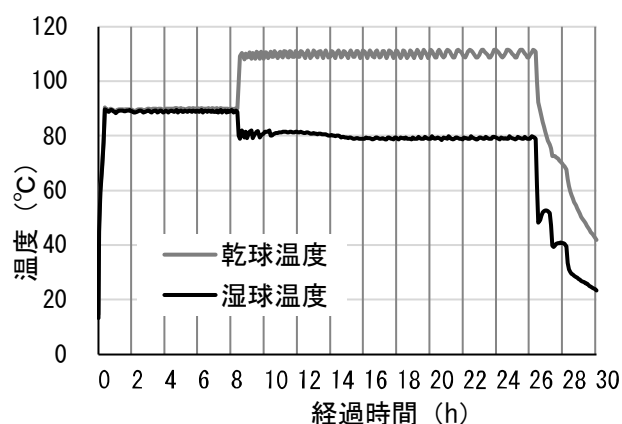


図-5 条件Aの温度経過

条件B（乾球温度130°C、湿球温度90°C、6時間）の乾湿球温度及び材温の経過を図-6に示す。

蒸煮は圧力100kPaで1時間実施した結果、乾球温度は120°C弱となり、表面から1cmの深さの温度は100°Cを超えていた。また、表面から3cmの深さの温度は約80°C、7cmの深さでは約60°Cであった。

その後、減圧蒸気高温セットに移行すると表面から1cmの深さの温度は、100°Cを一旦下回るが、その後100°C以上を保持していた。この時点で表層部は軟化が進んでいたものと思われる。

また、表面から3cmの深さの温度が100°C以上になったのは、蒸煮開始から5時間経過後であり、その後、100°C以上を4.5時間保持していた。

一方、表面から 7 cm の深さの温度が 100℃ 以上になったのは、蒸煮開始から 7 時間経過後であり、その後、100℃ 以上を 2.5 時間保持していた。

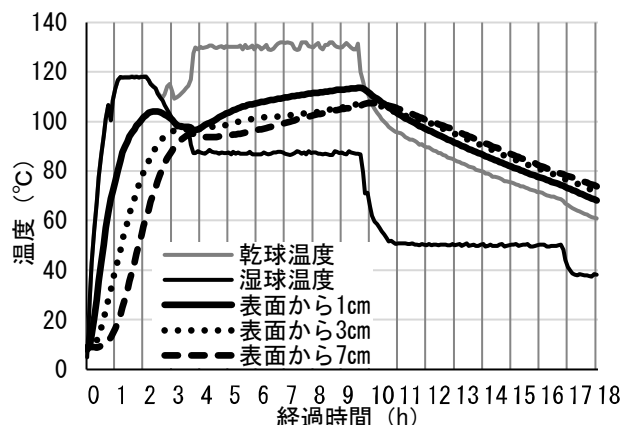


図-6 条件Bの温度経過

条件C (乾球温度 120℃, 湿球温度 90℃, 12 時間) の乾湿球温度及び材温の経過を図-7 に示す。

蒸煮は条件 B と同様であった。その後、減圧蒸気高温セットに移行すると、条件 B と同様に表面から 1 cm の深さの温度は、100℃ を一旦下回るが、その後 100℃ 以上を保持していた。条件 B と同様にこの時点で表層部は軟化していたものと思われる。

また、表面から 3 cm の深さの温度が 100℃ 以上になったのは、蒸煮開始から 7 時間経過後であり、その後、100℃ 以上を 8.5 時間保持していた。

一方、表面から 7 cm の深さの温度が 100℃ 以上になったのは、蒸煮開始から 9 時間経過後であり、その後、100℃ 以上を 6.5 時間保持していた。

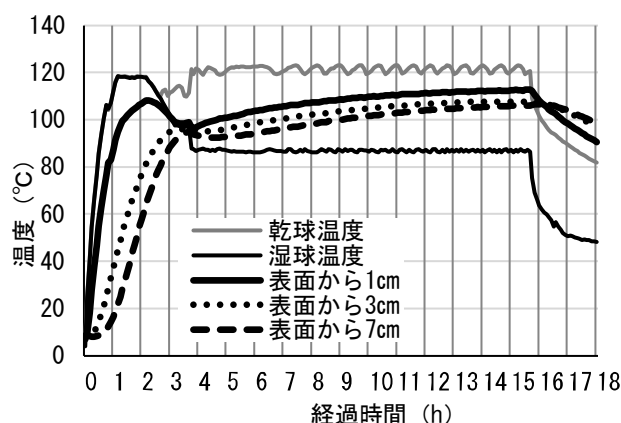


図-7 条件Cの温度経過

条件D (乾球温度 101℃, 湿球温度 75℃, 24 時間) の乾湿球温度及び材温の経過を図-8 に示す。

蒸煮は条件 B と同様であった。その後、減圧蒸気

高温セットに移行すると、表面から 1 cm の深さの温度は、100℃ を保持することは出来なかった (最高温度 96℃)。このため、表層部の軟化は起きていなかったものと思われる。

また、表面から 3 cm 及び 7 cm の深さの温度も 100℃ を超えることは無く、表面から 3 cm 及び 7 cm の深さの最高温度は、それぞれ 93℃, 92℃ であった。

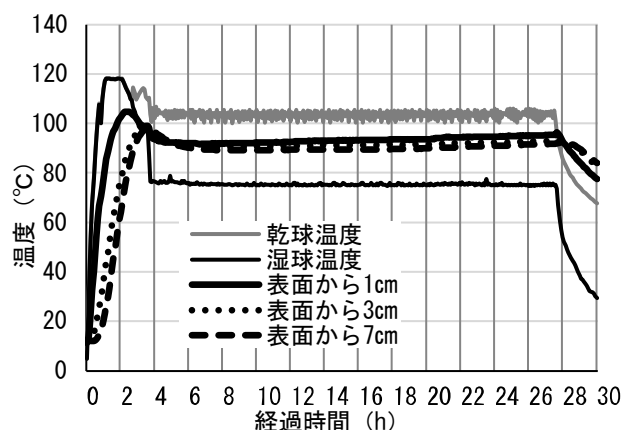


図-8 条件Dの温度経過

中温乾燥における乾湿球温度経過を図-9 に示す。

高温セット処理により表面が乾燥していることから、乾燥初期は、材表面が結露しないように含水率変化に注意しながらヒーター弁のみを操作し、スプレー弁は閉じたまま温度制御を実施した。含水率 15% までの中温乾燥日数は 18 日間となった。

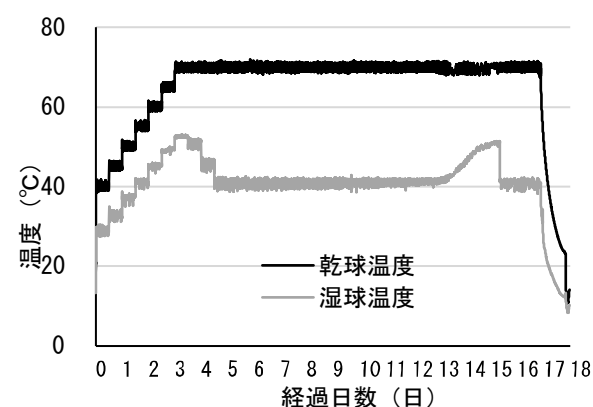


図-9 中温乾燥の乾湿球温度経過

3.2 材面割れ

高温セット処理後、中温乾燥後、整形後の条件別の割れの総延長（材長 1m、かつ、4面の合計値）及び4面内の最大割れ幅を表-4 及び表-5 に、また、整形後の割れ総延長（材長 1m、かつ、4面の合計値）及び4面内の最大割れ幅を図-10 及び図-11 に示す。

整形後の割れ総延長の平均値を見ると条件 A に対して条件 B, C, D 何れも減圧蒸気高温セット効果があったと思われ、特に、条件 C の平均値が最も低い結果となった。

条件 C について、材面割れ総延長分布（図-12）を見ると割れが多い試験体と少ない試験体の 2 極化していた。

以上のことから、今回の試験条件の中では、条件 C が材面割れ抑制効果に有望と思われるが、今回は 1m 短尺材での試験であることから、今後、実大材（3m 材）による結果確認が必要と思われる。

表-4 各処理後の割れ総延長結果

割れ総延長 (cm)	高温セット処理後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	81.6	191.5	167.6	183.2
最小値	3	68	10	58
最大値	328	308	387	371
標準偏差	74.5	63.3	88.8	85.2
変動係数 (%)	91.3	33.0	53.0	46.5
個数	23	23	23	23
割れ総延長 (cm)	中温乾燥後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	81.5	93.6	51.5	94.1
最小値	0	16	0	2
最大値	156	158	145	208
標準偏差	38.2	33.9	42.2	49.8
変動係数 (%)	46.9	36.2	81.9	52.9
個数	23	23	23	23
割れ総延長 (cm)	整形後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	77.6	78.4	42.3	68.3
最小値	0	0	0	0
最大値	125	103	100	120
標準偏差	29.5	29.2	38.5	43.0
変動係数 (%)	38.1	37.3	91.1	62.9
個数	23	23	23	23

表-5 各処理後の最大割れ幅結果

割れ最大幅 (mm)	高温セット処理後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	2.5	2.5	2.7	3.2
最小値	0.1	0.7	0.2	0.3
最大値	5.0	4.0	6.0	6.0
標準偏差	1.6	1.1	1.5	1.6
変動係数 (%)	66.1	42.8	54.9	49.2
個数	23	23	23	23
割れ最大幅 (mm)	中温乾燥後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	3.3	2.6	1.4	2.5
最小値	0.0	0.4	0.0	0.3
最大値	6.7	4.9	4.7	6.7
標準偏差	1.9	1.3	1.3	1.9
変動係数 (%)	57.2	49.0	95.8	76.5
個数	23	23	23	23
割れ最大幅 (mm)	整形後			
	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
平均値	3.0	2.5	1.4	2.2
最小値	0.0	0.0	0.0	0.0
最大値	6.7	4.9	5.3	6.4
標準偏差	1.8	1.4	1.5	1.9
変動係数 (%)	58.9	56.5	108.2	86.4
個数	23	23	23	23

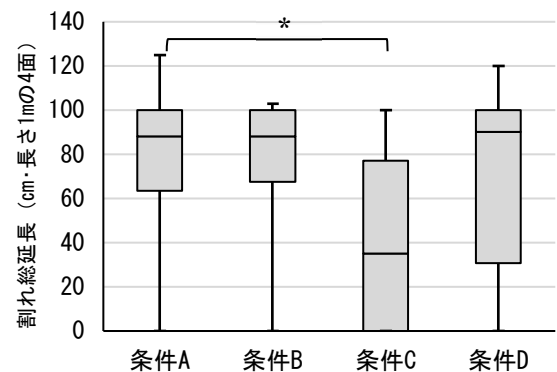


図-10 整形後の条件別の割れ総延長

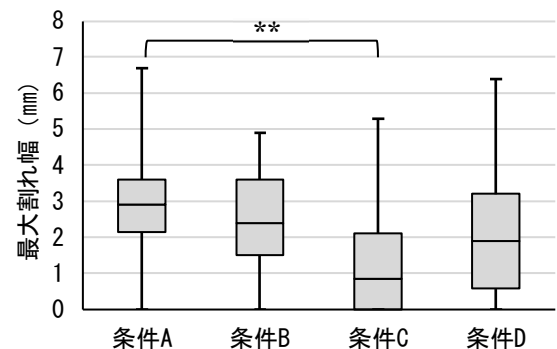


図-11 整形後の条件別の最大割れ幅

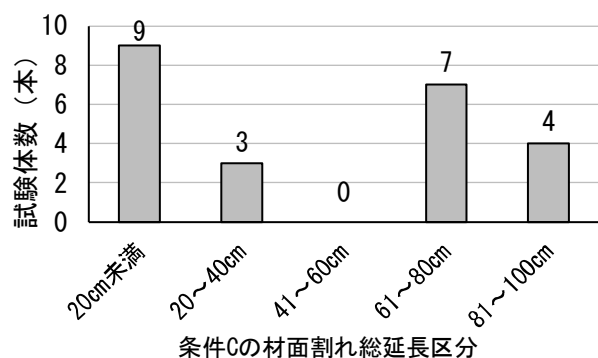


図-12 条件Cの整形後の割れ総延長分布

3.3 含水率

既往の文献より蒸気高温セットがかかったと判断される含水率は 20～25%，表層含水率が 10～15%と判断し²⁾，以下の結果を考察する。

高温セット処理後の条件A，B，C，Dの平均含水率は，それぞれ 30.8%，30.2%，29.1%，27.2%であった。条件Dが最も低い平均含水率となったが，条件B及び条件Cの平均含水率は大差ない結果となった。また，条件B，C，Dの乾球温度の違いはあるが，処理時間の長短も平均含水率に影響したと思われる。

水分傾斜について図-13 から図-16 に示す。水分傾斜も平均含水率と同様の傾向になり，条件Dの表層含水率は，条件B及び条件Cよりも低い結果となった。また，いずれの条件でも密度が低い試験体の含水率が低い結果となっていた。

なお，図中の「低い」，「中」，「高い」の平均全乾密度は，それぞれ， 435kg/m^3 ， 475kg/m^3 ， 535kg/m^3 であった。

減圧蒸気高温セットである条件B及び条件Cにおいて，表面にドラインセットがかかるとと思われる含水率 20～25%よりも高く，また，表層含水率も同様に 10～15%よりも高いことから減圧蒸気高温セット時間の延長が必要と思われる。

条件Dにおいては，含水率は低いものの前述のとおり表層の温度が 100°C に達していないことから表層部の軟化が進まずドラインセットがかかることは期待できないと判断した。

今後，材面割れ防止効果をより高めるためには含水率をさらに低下させることが必要である。従って，減圧蒸気高温セット処理時の乾球温度（材温），または，その処理時間の検討が必要と思われる。

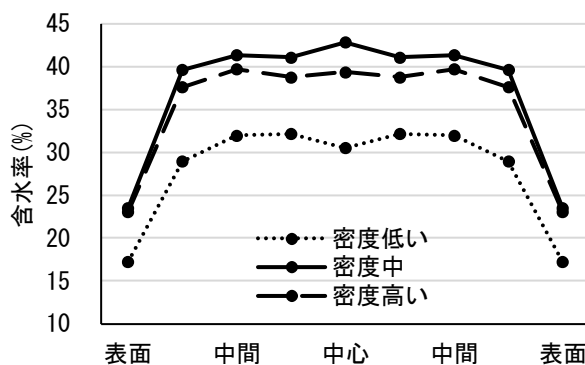


図-13 条件Aの蒸気高温セット後の水分傾斜

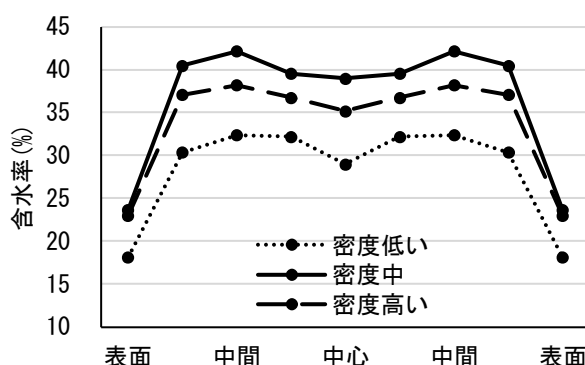


図-14 条件Bの減圧蒸気高温セット後の水分傾斜

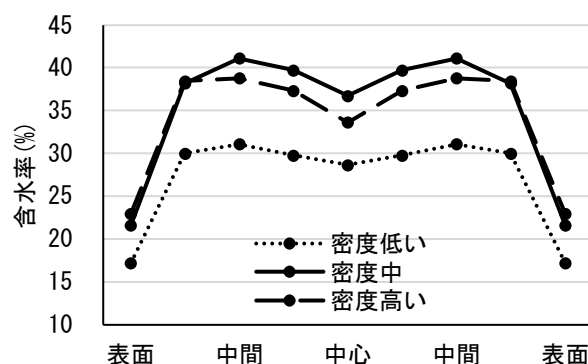


図-15 条件Cの減圧蒸気高温セット後の水分傾斜

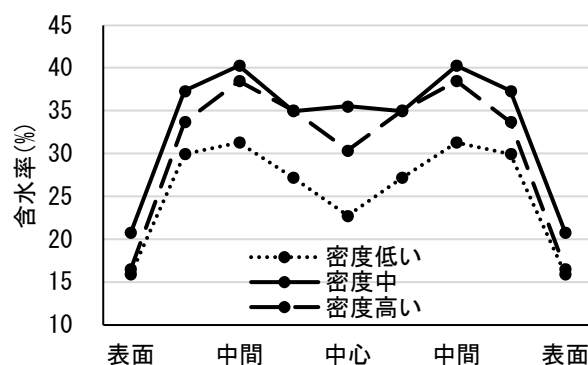


図-16 条件Dの減圧蒸気高温セット後の水分傾斜

中温乾燥から半年間養生した整形後の含水率を表-6に示す。各条件とも含水率は約12%となっていた。

条件Cの水分傾斜を図-17に示す。水分傾斜の少ない含水率に仕上がっていた。また、他の条件も同様の水分傾斜となっていた。

表-6 整形後の含水率

	条件A	条件B	条件C	条件D
単位：%				
平均値	12.5	12.6	12.4	12.4
最小値	13.5	13.9	13.4	13.4
最大値	11.8	11.9	11.8	11.3
標準偏差	0.7	0.9	0.7	0.9
変動係数（%）	5.8	6.7	5.4	7.6
個数	4	4	4	4

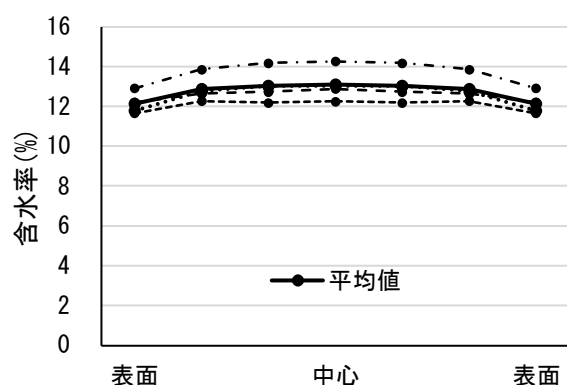


図-17 整形後6カ月経過の条件Cの水分傾斜

4 まとめ

カラマツ心持ち正角材の減圧下における高温セット処理条件と材面割れ発生関係を探るため、4条件の高温セット処理を行い、材面割れの発生状況を調査した。

その結果、減圧下における条件C（減圧蒸気高温セット120℃12時間）での高温セット処理が、現在推奨されている条件Aでの蒸気高温セットと同程度の材面割れ防止効果があった。

また、その他の減圧蒸気高温セット処理（条件B、条件D）においても材面割れ防止効果があることが明らかとなり、減圧下における高温セット処理による材面割れ防止が可能であることが示唆された。

今後、材質劣化有無の確認を含めた、最適な減圧蒸気高温セット処理を確立し、これを含めた減

圧乾燥スケジュールを開発する必要がある。

なお、本研究は、県単課題「蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの確立（R1～R5）」により実施した。

謝辞

本研究を行うに当たり、データ入力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。

参考文献

- 1) 吉田孝久，橋爪丈夫，徳本守彦，武田孝志，印出晃，スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について，長野県林業総合センター研究報告第18号，pp.125-141，（2004）
- 2) 吉田孝久，柴田直明，今井信，山内仁人，松本浩，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－，長野県林業総合センター研究報告第27号，pp.111-122，（2013）
- 3) 吉田孝久，伊東嘉文，松本寿弘，佐藤明利，武井富喜雄，ストックヤードにおける針葉樹構造材の天然乾燥－各前処理を行った構造材の天然乾燥－，長野県林業総合センター研究報告第24号，pp.151-169，（2010）
- 4) 柴田直明，吉田孝久，今井信，守口海，安全・安心な乾燥材生産技術の開発（3）－カラマツ高温乾燥材の曲げ強度性能改善に向けた更なる検討－，平成23年度長野県林業総合センター業務報告，pp.102-103，（2012）
- 5) 資源エネルギー庁，石油製品価格調査1.給油所小売価格調査（ガソリン，軽油，灯油）1990年（平成2年）8月27日～【週次ファイル】.xls，閲覧日：令和6年12月24日，https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html#headline1
- 6) 石原亘，土橋英亮，高梨隆也，川合慶拓，大橋義徳，藤原拓哉，乾燥条件がカラマツの性状に及ぼす影響（第1報）乾燥温度と曲げ強度の関係，木材工業 Vol.77，No.9，pp.345-349，（2022）

- 7) 石原亘, 土橋英亮, 高梨隆也, 川合慶拓, 大橋義徳, 吉田孝久, 松元浩, 長尾博文, 乾燥条件がカラマツの性状に及ぼす影響 (第 2 報) 乾燥条件が心持ち正角材の表面割れと曲げ強度に与える影響, 木材工業 Vol. 78, No. 3, pp. 98-103, (2023)
- 8) 石原亘, 土橋英亮, 高梨隆也, 川合慶拓, 大橋義徳, 吉田孝久, 松元浩, 長尾博文, 藤本登留, 乾燥条件がカラマツの性状に及ぼす影響 (第 3 報) 高温セット条件が心持ち正角材の材面割れと強度に与える影響, 木材工業 Vol. 78, No. 8, pp. 298-304, (2023)
- 9) 柴田直明, 吉田孝久, 山内仁人, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発 (Ⅱ) - 過度の高温乾燥材の強度特性 (4) 曲げ強度特性 -, 長野県林業総合センター研究報告第 29 号, pp. 75-94, (2015)
- 10) 今井信, 柴田直明, 吉田孝久, 山内仁人, 守口海, 安全・安心な乾燥材生産技術の開発 (Ⅲ) - カラマツ推奨・非推奨乾燥材の強度特性 (2) 曲げ強度性能 -, 長野県林業総合センター研究報告第 28 号, pp. 63-69, (2014)
- 11) 「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ, 安全・安心な乾燥材の生産・利用マニュアル, pp. 18-19, (2012)
- 12) 田畑衛, 今井信, 吉田孝久, 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 -, 長野県林業総合センター研究報告第 30 号, pp. 101-109, (2016)
- 13) 山口健太, 吉田孝久, 奥原祐司, 今井信, 田畑衛, 蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの確立 (1), 長野県林業総合センター研究報告第 34 号, pp. 95-106, (2020)
- 14) 山口健太, 吉田孝久, 今井信, 奥原祐司, カラマツ・スギ大径 A 材丸太の戦略的製品開発に関する研究 - 心持ち無垢梁桁材の乾燥特性及び強度特性の解明 -, 長野県林業総合センター研究報告第 35 号, pp. 111-123, (2021)
- 15) 山口健太, 奥原祐司, 小池直樹, 吉川達也, 蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの検討 - カラマツ心持ち平角材の含水率 -, 令和元年度長野県林業総合センター業務報告, pp. 88-89, (2020. 6)
- 16) 山口健太, 吉田孝久, 今井信, 奥原祐司, 蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの検討 (2) - カラマツ心持ち正角材の圧力高温セット後の含水率 -, 令和 2 年度長野県林業総合センター業務報告, pp. 76-77, (2021. 6)
- 17) 山口健太, 奥原祐司, 小池直樹, 吉川達也, 蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの検討 (1) - カラマツ心持ち正角材の圧力高温セット+減圧乾燥 -, 令和 3 年度長野県林業総合センター業務報告, pp. 80-81, (2022. 6)
- 18) 山口健太, 奥原祐司, 小池直樹, 吉川達也, 蒸気・圧力併用型乾燥機を用いた県産材乾燥スケジュールの検討 (1) - カラマツ心持ち正角材の圧力高温セット+減圧乾燥後の強度試験 -, 令和 3 年度長野県林業総合センター業務報告, pp. 82-83, (2022. 6)