

熊本県林業研究・研修センター研究報告 No. 50-2

中大規模木造建築物用構造材の合理的な組合せ乾燥に関する研究

令和3年度～令和5年度（単県）

中村 圭子

川中 守

要 旨

スギ大径材から生産可能な大断面の平角材の乾燥方法について、乾燥による内部割れ抑制や乾燥時間の短縮化を目的に、蒸煮減圧処理と高周波減圧乾燥の組合せ乾燥の検証を行った。

スギ心持ち平角材の組合せ乾燥試験では、低含水率材は、組合せ乾燥により短時間での乾燥が可能となったが、高含水率材は、この組合せ乾燥を用いても時間を要する結果となった。そこで、高含水率のスギ心持ち平角材は、この組合せ乾燥に天然乾燥を追加し、約4か月の天然乾燥後、含水率を20%まで下げることができ、高周波乾燥時間の短縮が可能となった。

スギ心去り平角材では、蒸煮減圧処理と高周波減圧乾燥の組合せにより、乾燥時間が短縮できる可能性が示唆された。

なお、いずれの試験でも、材断面の内部割れは殆ど確認されず、減圧乾燥による効果と考えられた。

はじめに

スギ人工林の高齢級化とともに、直径30cmを超える大径の丸太（以下、大径材）の供給量が増加しており、大径材から、大断面の心持ちの正角、平角及び心去りの正角、平角などを生産することができるようになってきている。今後、こうした断面の大きな製材品を中大規模木造建築物の構造材や住宅の横架材など一般建築用材としての利用拡大が求められる。

しかし、大断面材では建築用材として不可欠な乾燥がより難しいという課題があり、現在、普及している高温セット処理と中温乾燥又は天然乾燥との組合せ乾燥方法では、「熱劣化による内部割れの発生」や「乾燥時間の長さ」が敬遠され、大径材の利用拡大が進まない一因となっている。これらのことから、大径材から生産される断面の大きな製材品の信頼性を高める乾燥法の確立が求められている。

そこで、本研究では、大断面材のスギ平角材の合理的な組合せ乾燥として、短い処理時間である程度の水分除去と成長応力緩和による乾燥時の変形抑制効果を持つ乾燥の前処理である『蒸煮減圧処理』と、減圧下の内部加熱により短時間で材内部の水分除去に効果的な仕上げ乾燥が期待できる『高周波減圧乾燥』を組合せた乾燥方法の検証、また天然乾燥を組み合わせることにより、信頼性を高める乾燥法の確立を試みた。

第1章 スギ心持ち平角材の組合せ乾燥試験（蒸煮減圧処理＋高周波減圧乾燥）

1. はじめに

スギ心持ち材の乾燥では、乾燥前処理として高温セット処理、仕上げ乾燥として中温乾燥又は天然乾燥による乾燥スケジュールが広く用いられている。この乾燥法の特徴としては、材表層部に形成される引張セットによる材面割れ抑制効果が挙げられる。一方、材の品質は、スケジュールによっては過乾燥

となる材があり、断面の大きな平角材などの場合には乾燥に時間を要し、高温に晒される時間が長くなると、過乾燥による内部割れの発生や強度性能の低下などが懸念される。以前、当センターで取り組んだ研究¹⁾では、低含水率材を乾燥させる場合でも219時間となった。また天然乾燥の場合にはさらに長期間を要することが課題となる。

そこで、材を高温に晒される時間を短くし、内部割れ等の材質劣化の抑制が期待できる乾燥方法として、蒸煮減圧処理と高周波減圧乾燥の組合せ乾燥試験を行い、材の内部割れ抑制効果と乾燥時間の短縮化について検証を行った。

2. 試験方法

供試材はスギ心持ち平角材（標準寸法：135×255×4000 mm）2本、高含水率材を1本、低含水率材を1本ずつとした。供試材を材長の中央部で鋸断し、片方の2m試験材は蒸煮減圧と高周波減圧の組合せ乾燥に、もう一方の2m試験材を高周波減圧のみによる乾燥試験に供試した（図-1）。試験装置は蒸煮減圧装置（CBK-600，株式会社ヤスジマ製）と高周波減圧乾燥装置（HTD-1，株式会社ヤスジマ製）を用いた。蒸煮減圧の処理スケジュールは前半の熱処理と後半の水分除去の2つの工程に分けられ、熱処理時の飽和水蒸気温度は120℃程度、後半の減圧工程の管内圧力は真空度150Torrに設定とした。処理時間はスケジュール前半の蒸煮400分、後半の減圧240分とした。また、高周波減圧試験は2mに鋸断した4体すべての試験体（蒸煮減圧後2体および無処理2体）を同じスケジュール（表-1）により乾燥した。乾燥終了は、乾燥機を適宜止めて測定し、低含水率材の含水率が15%以下になるまでとした。また各試験後、木口から約30 cmの位置から厚さ2 cm程の試片2枚を採取し横断面方向の含水率分布を全乾法により測定した。

3. 結果と考察

高周波減圧乾燥時の各試験材の含水率の経時変化を図-2に示す。高含水率材の初期（生材）の含水率は138.73%、低含水率材は65.52%であった。組合せ乾燥材は、蒸煮減圧処理により高周波乾燥開始時点で、生材に比べ含水率が低下し、高含水率材が106.14%、低含水率材が65.52%となっていた。

高周波減圧乾燥後は、低含水率材では、高周波のみ乾燥（生材）13.33%、組合せ乾燥11.70%であり、どちらも乾燥終了7日目には15%以下に低下していた。しかし高含水率材では、高周波のみ（生材）が84.32%、組合せ乾燥でも約50%と15%まではさらに倍近くの時間を要すると推定された。

高周波乾燥組合せ乾燥と高周波減圧乾燥のみで処理した材の各処理段階で切り出した試験片の横断面（長辺方向）の含水率分布（全乾法）の結果を図-3に示す。低含水率材では組合せ乾燥、高周波減圧乾燥のみの場合も、水分傾斜の少ない仕上がりとなったが、蒸煮減圧と組み合わせることで、さらに短時間で乾燥が可能になると考えられる。また、高含水率材は、前処理（蒸煮減圧）により含水率が低下し前処理の有効性はみられたが、さらに短期間の天然乾燥との組み合わせや高周波減圧乾燥スケジュールの検討が必要であると考えられた。

乾燥終了後、木口から30 cmのところ切り出した試験片の断面写真を図-4に示す。断面における割れは少なく、内部割れが高含水率材の組合せ乾燥材の左角付近に1か所、材面割れが低含水率材の高周波のみ乾燥材の中央部下に1か所みられた程度であった。

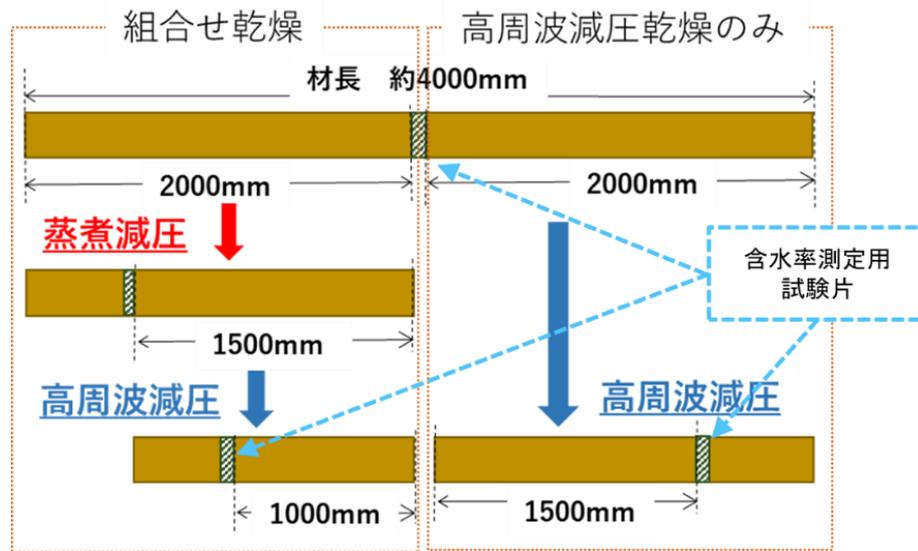


図-1 試験材の処理工程

表-1 高周波減圧乾燥スケジュール

	真空設定 (Torr)	材温設定 (°C)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	STEP タイマー (時間)	発振サイクル(分)		[参考] 水の沸点(°C) (真空設定下限値時)
	下限	上限	上限	上限		発振	発振停止	
ステップ-1	600	70	60	73	8	7	3	約94
ステップ-2	500	70	60	73	6	7	3	約89
ステップ-3	380	70	60	73	6	7	3	約82
ステップ-4	140	80	70	48	167	7	3	約57

※大気圧では、760Torr

合計 187

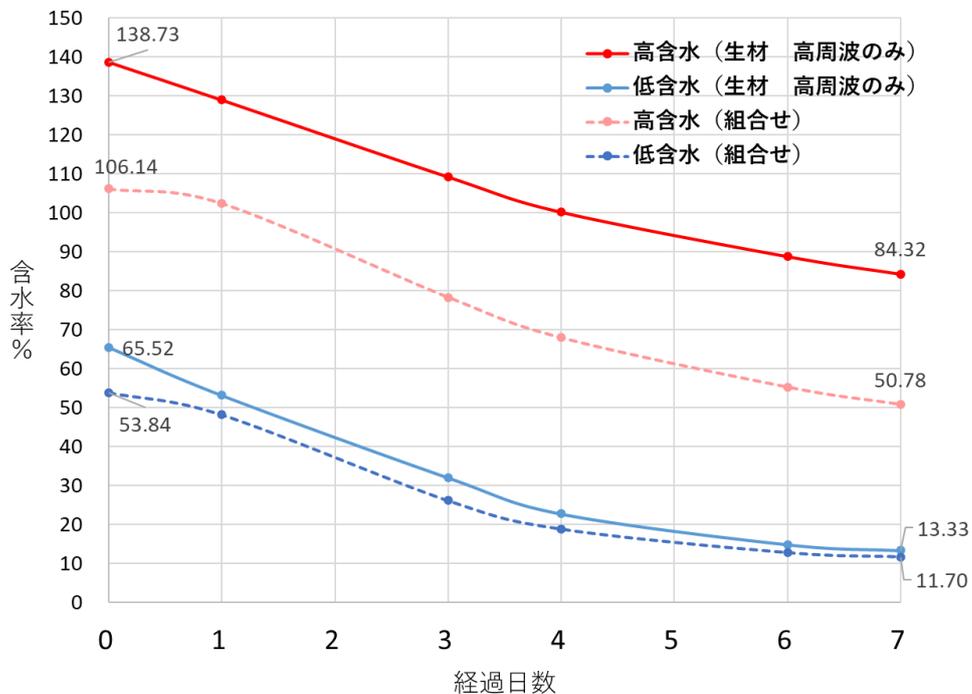


図-2 スギ心持ち材の高周波減圧乾燥による含水率の経時変化

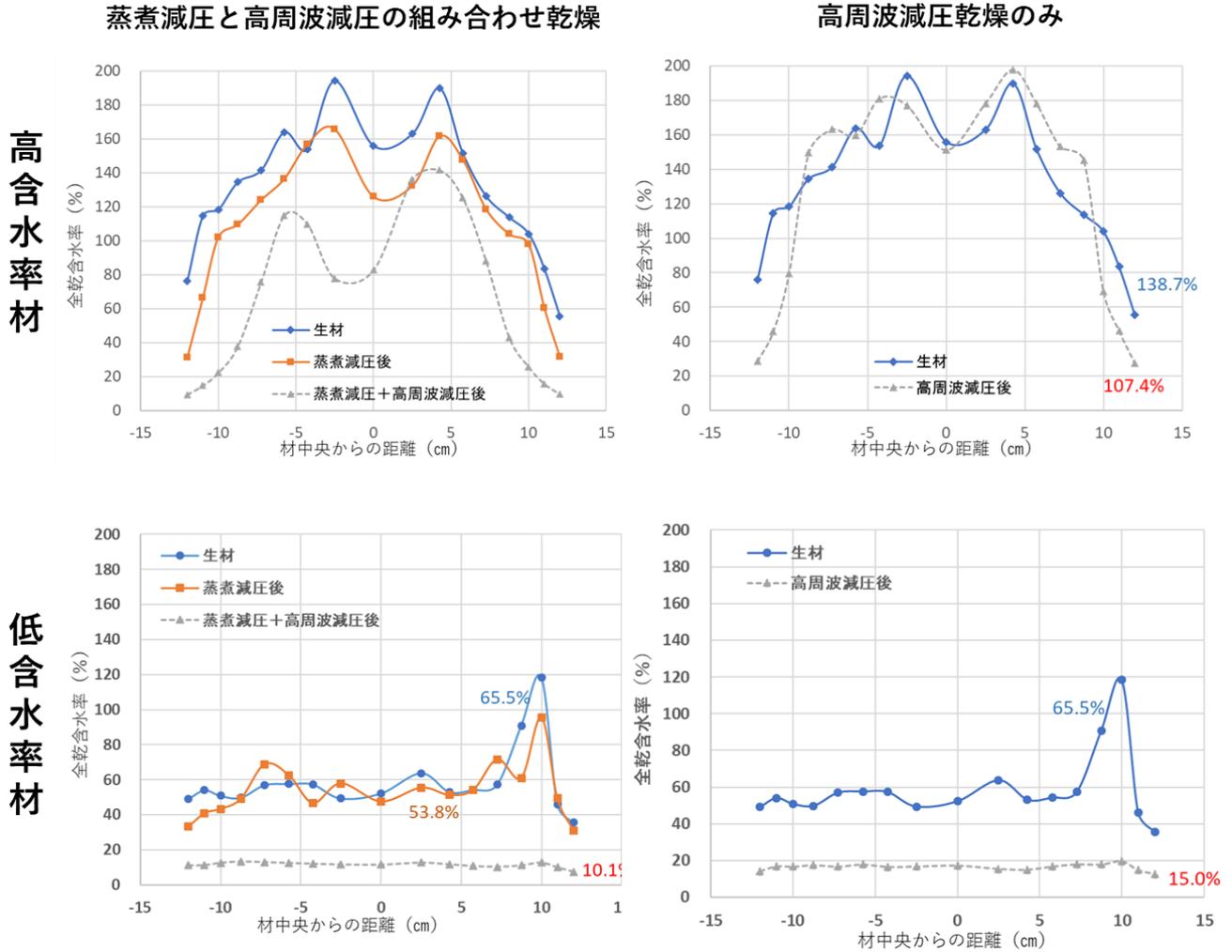


図-3 スギ心持ち材の各処理段階での試験材横断面（長辺）の含水率分布

乾燥後の含水率試験材（スギ心持ち平角）

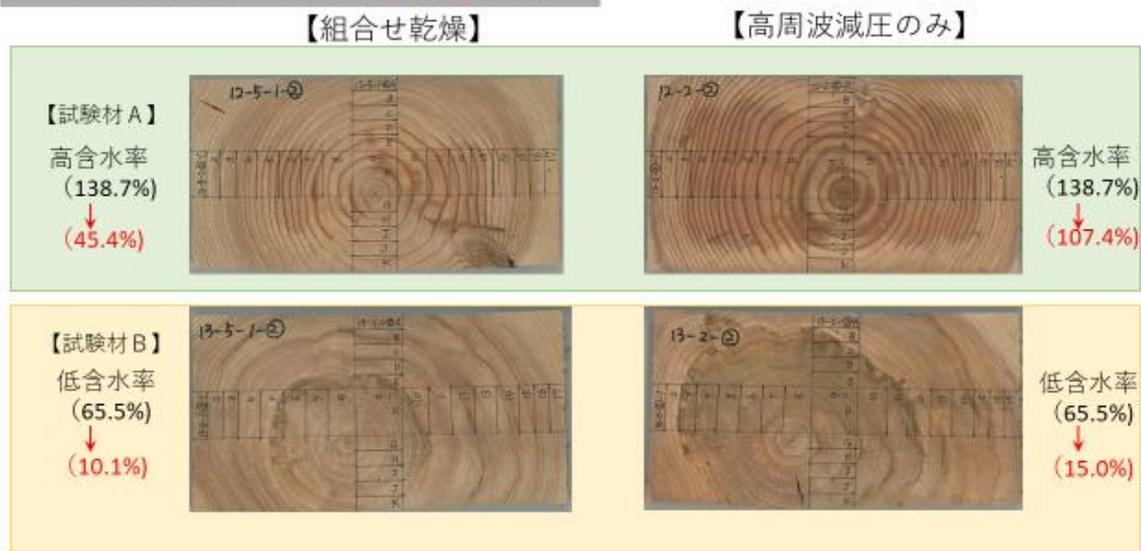


図-4 スギ心持ち材の高周波減圧乾燥終了後の含水率試験片の断面写真

第2章 スギ心去り平角材の組合せ乾燥試験（蒸煮減圧処理＋高周波減圧乾燥）

1. はじめに

スギ材の大径化が進み、直径 40 cmを超えるような大径材からは、心を外した心去り平角材の生産も可能となっていることから、心去り材について蒸煮減圧処理と高周波減圧乾燥の組合せ乾燥の効果検証を行った。

2. 試験方法

供試材はスギ心去り平角材（標準寸法：135×255×4000 mm）2本、高含水率材を1本、低含水率材を1本ずつとした。供試材は第1章スギ心持ち材と同様の処理工程、試験装置により乾燥試験を行った（図-1）。蒸煮減圧の処理スケジュールも熱処理時の飽和水蒸気温度は120℃程度、減圧工程の管内圧力は真空度150Torrに設定し、処理時間はスケジュール前半の蒸煮400分、後半の減圧240分とし、第1章スギ心持ち材の試験と同様である。また、高周波減圧試験は2mに鋸断した4体すべての試験体（蒸煮減圧後2体および無処理2体）を同じく表-1のスケジュールにより乾燥した。乾燥終了は、乾燥機を適宜止めて測定し、低含水率材の含水率が15%以下になるまでとした。また各試験後、木口から約30cmの位置から厚さ2cm程の試片2枚を採取し横断面方向の含水率分布を全乾法により測定した。

3. 結果と考察

高周波減圧乾燥時の各試験材の含水率の経時変化を図-5に示す。高含水率材の初期（生材）の含水率は96.11%、低含水率材は44.01%であった。組合せ乾燥材は、蒸煮減圧処理により含水率が低下し、高周波減圧乾燥開始時は高含水率材が55.52%、低含水率材が38.33%となっていた。

高周波減圧乾燥後は、低含水率材では、高周波のみ乾燥（生材）が11.74%、組合せ乾燥が10.29%で、どちらも乾燥終了7日目には15%以下に低下していた。高含水率材では、高周波のみ（生材）が21.08%、組合せ乾燥が8.85%となっていた。組み合わせ乾燥では高含水率材も15%以下まで低下し短期間で乾燥していた。また、高周波乾燥のみに比べても推定約96時間の短縮効果が認められた。

蒸煮減圧処理と高周波乾燥の組合せ乾燥と高周波減圧乾燥のみで処理した材の各処理段階で切り出した試験片の横断面（長辺方向）の含水率分布（全乾法）の結果を図-6に示す。組合せ乾燥の材は、含水率7.5%まで低下していたのに対し、高周波減圧乾燥のみの材は、含水率29.4%となった。蒸煮減圧と組み合わせることで、短時間での乾燥が可能になることが示唆された。

乾燥終了後、木口から30cmのところ切り出した試験片の断面写真を図-7に示す。断面において内部割れも材面割れもどちらもみられなかった。

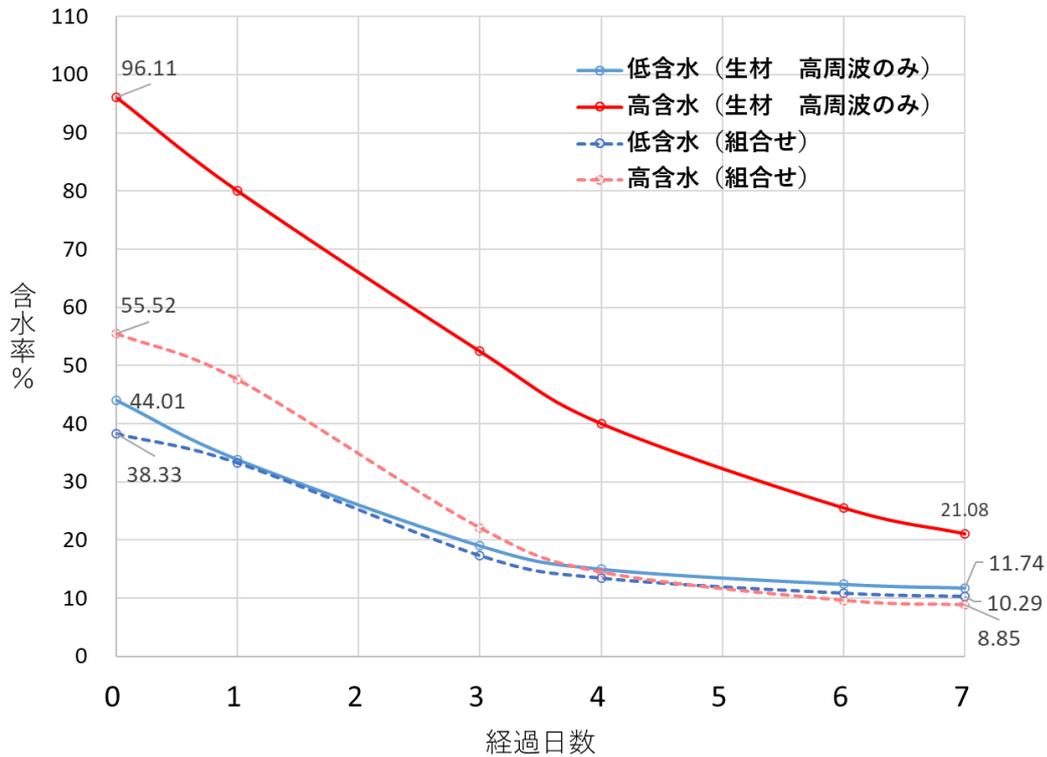


図-5 スギ心去り材の高周波減圧乾燥による含水率の経時変化

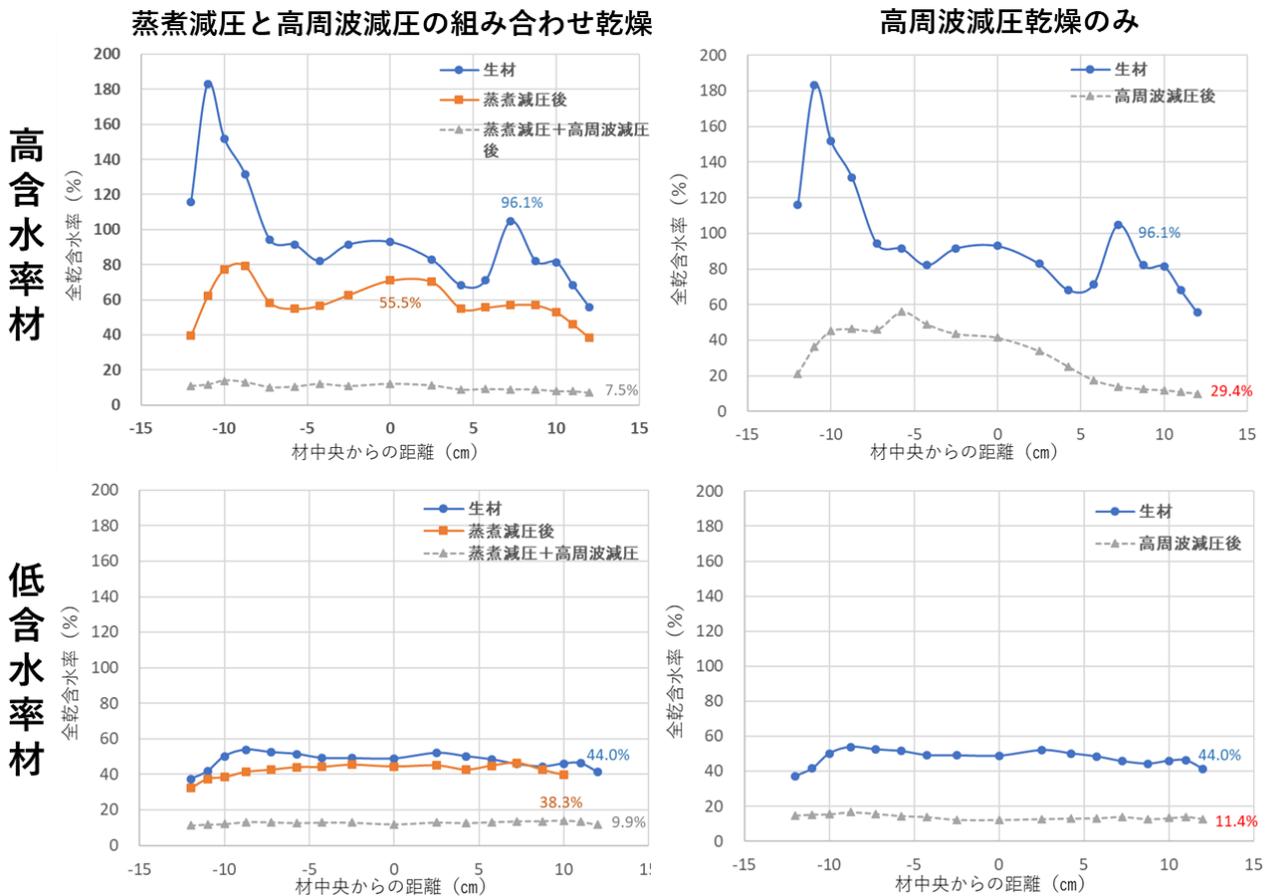


図-6 スギ心去り材の各処理段階での試験材横断面 (長辺) の含水率分布

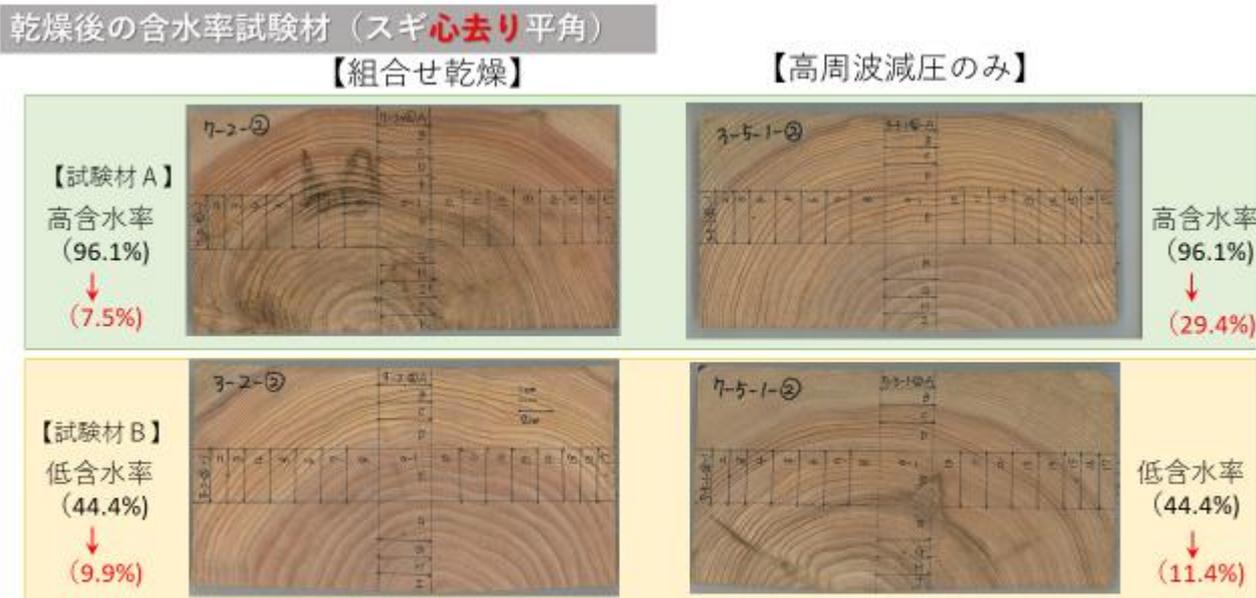


図-7 スギ心去り材の高周波減圧乾燥終了後の含水率試験片の断面写真

第3章 スギ心持ち平角材の組合せ乾燥試験 (蒸煮減圧処理+天然乾燥+高周波減圧乾燥)

1. はじめに

スギは生材時の含水率のばらつきが大きく、高含水率の材も多く出現する。第1章のスギ心持ち材の組合せ乾燥試験において、高含水率の材は、今回の組合せ乾燥を用いても目標の含水率15%に達するには長時間を要する結果となった。そこで、この組合せ乾燥の高周波減圧乾燥(仕上げ乾燥)の前に天然乾燥を追加した組合せの乾燥を試行しその効果の検証を行った。

2. 試験方法

供試材は、スギ心持ち平角材(標準寸法:135×255×4000mm)2本(NO.1、NO.2)とした。2023年5月にNO.1を材長の中央部で鋸断し、2m材AとBを採取し、同年7月にNO.2から2m材CとDを採取した。

NO.1の材Aは、鋸断後直ぐに蒸煮減圧処理を行い、試験棟内で7か月間天然乾燥して、高周波減圧の組合せ乾燥とし、材Bは、鋸断後4ヵ月天然乾燥して蒸煮減圧処理、さらに天然乾燥3ヵ月後(合計天然乾燥7ヵ月)に高周波減圧の組合せ乾燥に供試した。

NO.2の材Cは、鋸断後直ぐに蒸煮減圧処理し、5か月間天乾して、高周波減圧の組合せ乾燥とし、材Dは、4ヵ月天乾後、蒸煮減圧処理、さらに天乾1ヵ月後(合計天乾5ヵ月)に高周波減圧の組合せ乾燥に供した。各試験材の処理工程を図-8に示す。

蒸煮減圧処理は、前半を飽和蒸気温度120℃による蒸煮400分、後半を真空度150Torrによる減圧240分とした。蒸煮処理後は、供試材の木口から30cmの位置から厚さ2cm程度の試片2枚を採取し、全乾法で平均含水率と含水率分布を調べた。高周波減圧乾燥は、蒸煮減圧処理と天然乾燥後で長さ1.4mとなっており、A、B、C、Dの合計4体を2023年12月に同時に乾燥した。乾燥終了は、乾燥機を適宜止めて測定した試験体重量による推定含水率が全ての試験体において15%以下になるまでとした。乾燥スケジュールは表-2のスケジュールとし、乾燥時間は、ステップ4の時間が28時間となった。高周波減圧乾燥後の含水率試片の採取位置は、木口から30cmの位置とした。

3. 結果と考察

各試験材の処理時期と処理段階の含水率測定の結果を図-9示す。NO.1、NO.2いずれの材も天然乾燥後、高周波減圧乾燥前の段階でNO.1は14%程度、No.2は20%前後になっていた。天然乾燥の効果は、試験材Bの切断後4か月の期間でもみられ、含水率18.16%まで低下していた。天然乾燥の場合、冬季開始に比べ夏季に乾燥した方が含水率の低下が進んだとの報告がある²⁾。今回の試験は、5月、7月の試験開始としており、天然乾燥の時期が夏季であり、乾燥の期間もより短くなったと推察される。天然乾燥での含水率低下が進んだことで、高周波減圧乾燥は48時間と短時間での乾燥が可能となったと思われる。

各処理段階の材横断面の含水率分布の結果を図-10に、乾燥試験後の含水率試験片の断面写真を図-11に示す。いずれの試験材も水分傾斜もなく15%以下に乾燥していた。試験材に内部割れは確認されなかったことから、減圧による低温乾燥の効果と思われる。しかし、材面の割れが横断面の中央付近に長さ3cm程度見られたことから、今後も蒸煮減圧処理、天然乾燥、高周波乾燥のスケジュール調整や天然乾燥中の材の管理方法の検討が必要である。

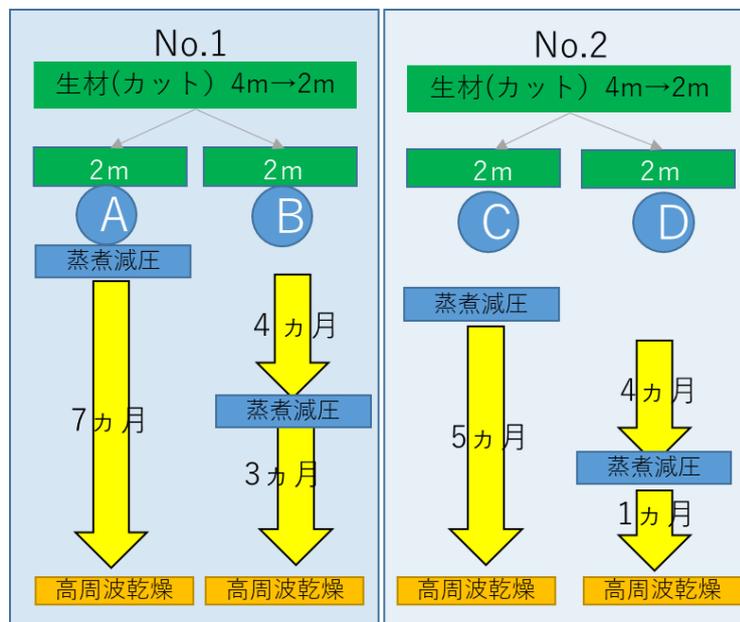


図-8 天然乾燥を追加した組合せ乾燥試験材の処理工程

表-2 各処理段階の含水率結果

	真空設定 (Torr)	材温設定 (°C)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	STEP タイマー (時間)	発振サイクル(分)		[参考] 水の沸点(°C) (真空設定下限値時)
	下限	上限	上限	上限		発振	発振停止	
ステップ-1	600	70	60	73	8	7	3	約94
ステップ-2	500	70	60	73	6	7	3	約89
ステップ-3	380	70	60	73	6	7	3	約82
ステップ-4	140	80	70	48	28	7	3	約57

年月	NO. 1		NO. 2	
R5年5月	生材カット A 112.01 蒸煮 72.49	生材カット B 112.01 天乾4ヵ月		
R5年6月	天乾7ヵ月			
R5年7月			生材カット C 78.91 蒸煮 64.64	生材カット D 78.91 天乾4ヵ月
R5年8月			天乾5ヵ月	
R5年9月		蒸煮前 18.16 蒸煮 18.77 天乾3ヵ月		
R5年10月				
R5年11月				蒸煮前 26.16 蒸煮 26.16
R5年12月	高周波前 14.35 高周波 10.29	高周波前 14.11 高周波 10.9	高周波前 18.73 高周波 11.05	天乾1ヵ月 23.2 高周波 12.35

図-9 試験材の処理時期と各段階の含水率

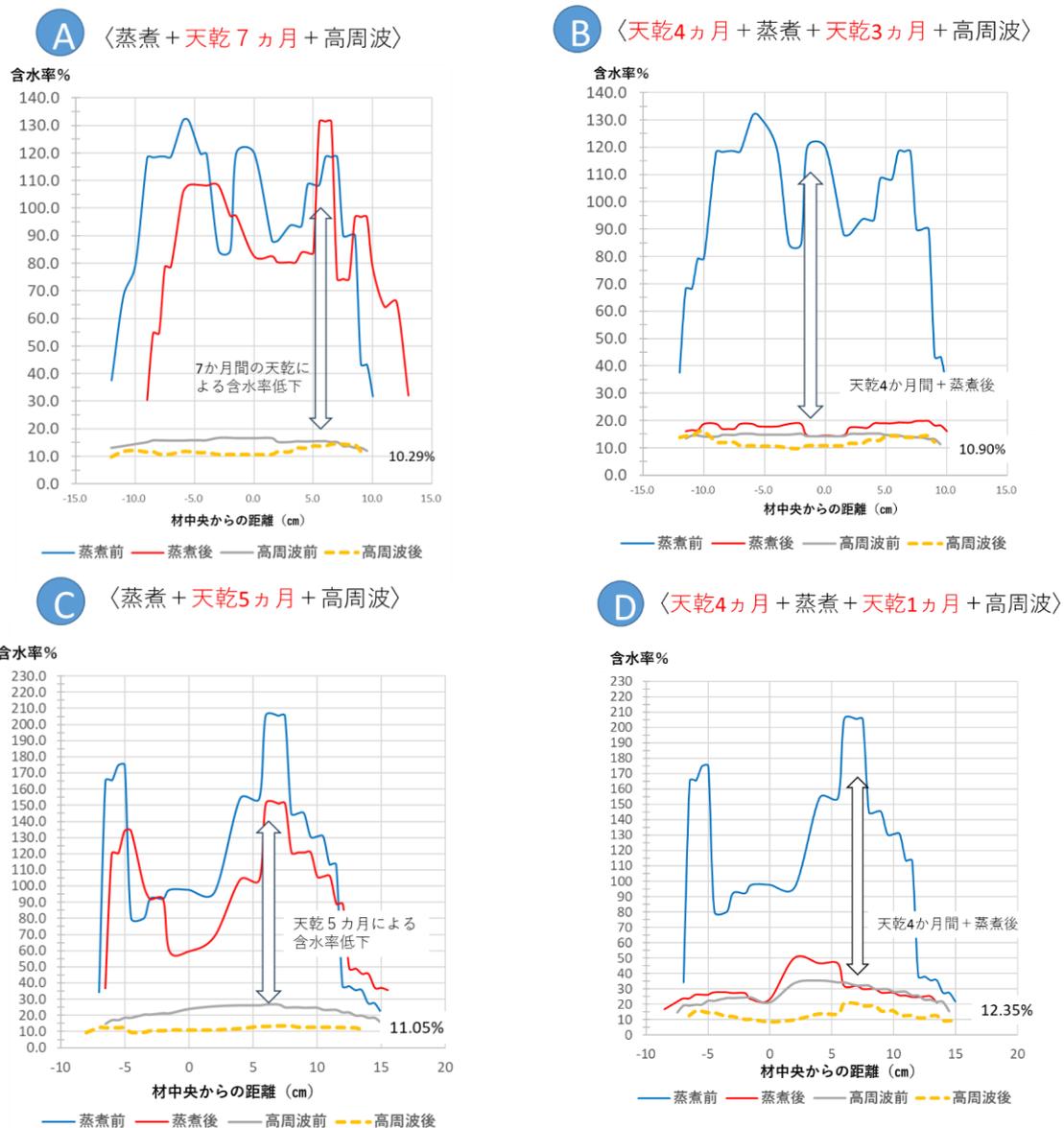


図-10 天然乾燥との組合せ乾燥の各処理段階での試験材横断面（長辺）の含水率分布

乾燥後の含水率試験材

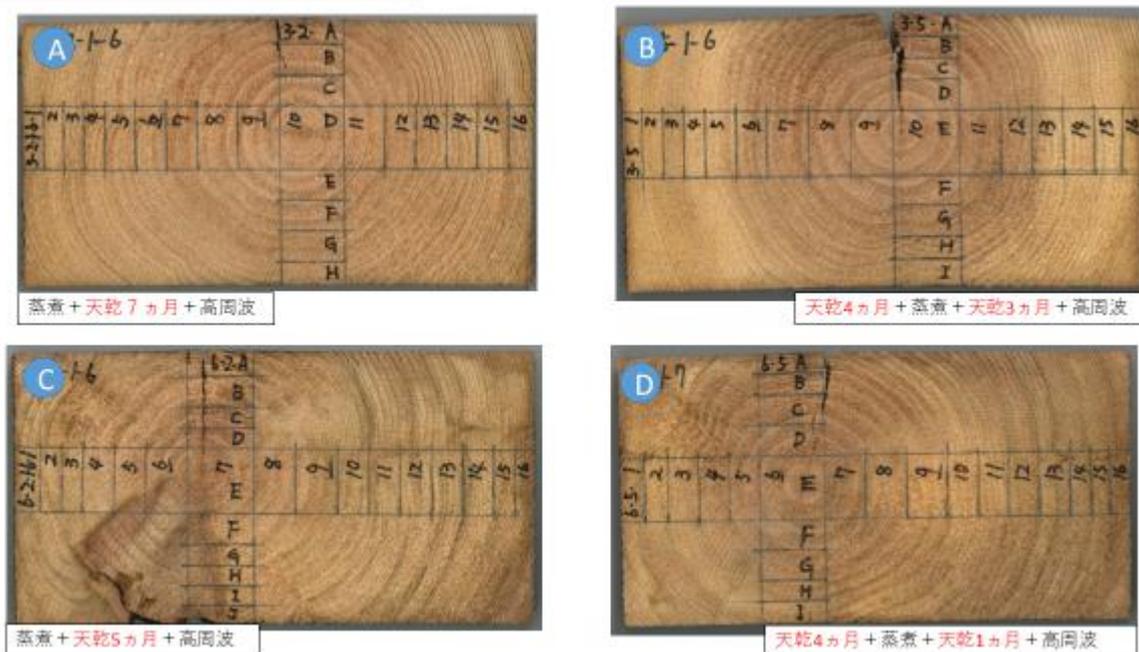


図-11 乾燥前含水率計指示値と乾燥後全乾法含水率の関係

第4章 まとめ

中大規模木造建築物の構造材や住宅の横架材など建築用材として、用途拡大が求められるスギ大径材から生産可能な大断面の平角材（心持ち材及び心去り材）の乾燥について、乾燥による内部割れ抑制や乾燥時間の短縮化を目的に、低含水率材と高含水率材を用いて蒸煮減圧処理と高周波減圧乾燥の組合せ乾燥試験を行った。さらに高含水率の心持ち材については、天然乾燥を追加した組合せ乾燥試験に取組み、以下の結論を得た。

- 1) 低含水率の平角材については、スギ心持ち及び心去り材ともに組合せ乾燥において蒸煮減圧処理11時間、高周波減圧187時間で合計198時間となり、過去に行った高温セット処理＋中温乾燥の組合せが219時間であったのに対し21時間の短縮が可能であることが確認された。
- 2) 高含水率の平角材については、心去り材では、組合せ乾燥による乾燥時間短縮の効果（高周波のみ乾燥に比べ約96時間短縮）がみられたが、心持ち材の場合には、乾燥が長時間となる結果であった。
- 3) 高含水率の心持ち平角材については、組合せ乾燥に天然乾燥を追加することで、仕上げ乾燥前の含水率が下がり、短期間で乾燥が可能となった。（天然乾燥は4か月程度でも有効と示唆された）
- 4) 今回の組合せ乾燥において、材の内部割れは殆どみられなかったことから、減圧による低温乾燥の効果と考えられる。

なお、本報告に関連して既に発表を行っている。^{2) 3)}

第5章 今後の課題

今後、大径材の製材により断面の大きい構造材の増加が見込まれることから、各種の人工乾燥、天然乾燥などの組み合わせ乾燥の検討は重要であり、高周波減圧乾燥もその選択肢として乾燥スケジュール等更なる検証が必要と思われる。今回の研究結果を実際の現場で活用していくためには、特に下記内容についてさらなる検討が必要であると考え。

- 1) 心持ち材の高含水率材については、組み合わせ乾燥でも時間を要することから、天然乾燥の追加により高周波減圧乾燥の時間短縮が可能であることが明らかになったが、今回の天然乾燥は夏季の期間に実施したもので、冬季など時期を変えた試験や天然乾燥期間の更なる短縮化に向けたデータ蓄積と検討が必要である。
- 2) 天然乾燥を組合せた試験材では、内部割れはみられなかったものの、材面割れが発生していたことから、材面割れの発生時期を明らかにし、材の保管など対策の検討も必要である。
- 3) 今回の乾燥法は、高額な施設で構成され、電気代などコスト面で割高となることが考えられることから、さらなるデータ蓄積によりコスト削減に向けた乾燥スケジュール等の検討が必要と考えられる。また、燥設備の導入に向けては、地域の核となる事業者での取り組みや各地域での共同利用する取り組みの検討が必要である。

参考文献

- 1) 中村ほか (2022) 長く断面寸法の大きい構造材の乾燥に関する研究 熊本県林業研究・研修センター研究報告書
- 2) 渡井ほか (2013) スギ心持ち製材の天然乾燥におけるドライグセット処理の効果 静岡県農林技術研究所研究報告
- 3) 中村ほか：第28回日本木材学会九州支部大会, P-5 (2022)
- 4) 中村ほか：第67回日本木材学会大会研究発表要旨集 E15-P-05 (2023)