

スギ心持ち正角に対する
蒸気・高周波複合乾燥に関する研究

2016年

寺西 康浩

目次

第1章 序言	1
1 研究の背景	1
1.1 国産針葉樹材利用の必要性	1
1.2 国産針葉樹製材に対する乾燥の必要性	2
2 本研究の目的と構成	2
第2章 蒸気・高周波複合乾燥法の開発	4
1 蒸気・高周波複合乾燥法に関する基礎的研究の概説	4
1.1 はじめに	4
1.2 高周波加熱による乾燥期間の短縮効果	5
1.3 高周波加熱時のさん積み形態が加熱効率に及ぼす影響	7
1.4 インピーダンス整合の有無による加熱効率および乾燥効率の違い	13
1.5 スギ正角を加熱する際の適正な高周波加熱出力	18
2 スギ心持ち正角に対する蒸気・高周波複合乾燥	23
2.1 高温セット時間が内部割れの発生に及ぼす影響	23
2.1.1 はじめに	23
2.1.2 材料と方法	24
2.1.3 結果と考察	28
2.2 高温セット後の乾燥条件が内部割れ発生に及ぼす影響	34
2.2.1 はじめに	34

2. 2. 2	材料と方法	34
2. 2. 3	結果と考察	37
3	まとめ	45
第3章	蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の耐朽性および耐蟻性	47
1	蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の耐朽性	47
1. 1	はじめに	47
1. 2	材料と方法	47
1. 3	結果と考察	48
2	蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の野外耐久性	60
2. 1	はじめに	60
2. 2	材料と方法	60
2. 3	結果と考察	62
3	まとめ	72
第4章	蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の薬剤浸潤	74
1	高温セット法で乾燥したスギ正角への薬剤浸潤と注入後の割れ	74
1. 1	はじめに	74
1. 2	材料と方法	74
1. 3	結果と考察	79

2	中温域での蒸気・高周波複合乾燥法で乾燥したスギ正角への薬剤浸潤	91
2.1	はじめに	91
2.2	材料と方法	92
2.3	結果と考察	96
3	まとめ	109
	第5章 総括	111
	引用文献	113
	謝辞	118

第1章 序言

1 研究の背景

1. 1 国産針葉樹材利用の必要性

わが国の人工林面積は、森林全体の4割程度を占めており、それらの大半は戦後植林されたものである。戦後の植林は、荒廃した国土に森林を造成することにより、早期に国土の保全や水源かん養を図るとともに、需要の見込まれた建築用製材を得ることが目的とされた。このため、生長が比較的早く、通直な材が採材しやすい針葉樹が多く植林されることとなった。2012年での人工林蓄積量は約30億 m^3 となり、主要樹種の面積構成比はスギが44%、ヒノキが25%、カラマツが10%となっている¹⁾。また、これら資源のうち、伐採して木材として利用可能となる概ね50年生以上の高齢級の人工林が年々増加している。高齢級の人工林は、2006年度末時点で人工林面積の35%を占めるにすぎないが、現状のまま推移した場合、10年後には6割にまで増加すると見込まれている²⁾。このように、わが国の人工林資源は、スギを中心に、量的に充実しつつあり、これまでの造林・保育による資源の造成期から間伐や主伐による資源の利用期へと移行する段階にある。

一方、木材需要に対する国産材の供給量は1967年の5274万 m^3 をピークに減少傾向を続けている¹⁾。これは、安定的に供給される外材との競争や、林業経営の採算性が悪化したことによる林業生産活動の停滞によるものと考えられる。2011年の供給量は1937万 m^3 で、これは同年の木材需要全体の26.6%を占めるに留まっている¹⁾。林業生産活動の停滞により、森林所有者の経営意欲が衰退したことから保育や間伐等の施業が十分に行われず放置される森林も見られるようになった。

このような状況を受け、政府は2009年に、我が国の森林・林業を早急に再生する指針として「森林・林業再生プラン」を策定した。このプランでは、今後10年間を目途に、施業の集約化や路網の整備、効率的かつ安定的な林業経営の基盤づくりを進めるとともに、木材の安定供給と利用に必要な体制を構築することにより、「10年後の木材自給率50%以上」を目指している³⁾。森林資源の有効的利用、森林の適切な整備・保全と多面的機能の発揮、林業・木材産業と山村地域の振興といった、現在の森林・林業が抱える課題を解決するための一つの方策として、国産材の利用の推進が求められる。

1. 2 国産針葉樹製材に対する乾燥の必要性

前項で述べたように、国内の人工林に蓄積されている立木は針葉樹が多く、それらは建築用製材への利用が期待される。我が国では、古くから木造住宅の建築が行われてきたが、このときの木材乾燥は、建築工期中に自然と乾燥が進むことを利用するものであった。例えば、未乾燥材を建築現場で長期間静置して割れや変形などをある程度発生させ、修正加工を行った後に部材として使用した。柱や梁など、断面寸法の大きな部材が不十分な乾燥状態で使用されたとしても、大工が適宜修正加工を行った。

しかし、近年、建築工期の短縮や現場加工を省略してコストの削減を図るなど、建築の合理化・効率化が求められるようになり、木材の継手・仕口加工を工場で行うプレカット加工が急速に普及している。各部材にプレカット加工を行う際には、高い寸法精度が求められることから、使用環境における平衡含水率付近にまで水分量が調節されて寸法安定性のある乾燥材が求められるようになった。国産針葉樹材を建築用製材として利用するためには、製材工場での適切な乾燥処理が求められている。

建築用製材の乾燥方法としては、まず、従前から採用されている天然乾燥および温度100℃未満での熱風乾燥（以降、中温乾燥と称する。）が挙げられる。しかし、建築用製材として広く用いられているスギ材には心材の生材含水率が高いものがあり⁴⁾、かつ、そのばらつきも大きいことが知られている。そのため、在来工法向けのスギ心持ち正角を天然乾燥や中温乾燥によって所定の含水率に調節するためには、乾燥に時間がかかる、内部に水分が残る、乾燥処理後の含水率がばらつくなどの問題が生じやすい^{5,6)}。これらのことから、スギ心持ち正角に対する乾燥は経費が嵩み、また、品質の揃った乾燥材が生産され難い状況にある。

2 本研究の目的と構成

前節で述べたように、国産針葉樹材の建築用製材への利用が期待されるなか、人工林における主要樹種であるスギに対する効率的な乾燥方法や条件の検討が求められている。これを受け、著者は、スギ心持ち正角の乾燥における時間短縮と仕上がり品質の向上を目的として、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波加熱による内部加熱を複合する乾燥方法に着目した。乾燥中に高周波加熱を行うと、材内部の蒸気圧が増大し、材内部と表層との間に生じる蒸気圧差が水分移動の駆動力として作用することで速やかな水分除去が期待される⁷⁾。スギ心持ち正角に対する、この乾燥方法（以降、蒸気・高周波

複合乾燥法⁵⁾と称する。)の優位性と実務的な乾燥条件が明らかとなれば、国産針葉樹材の効率的な利用の一助となる可能性がある。しかし一方で、高周波による過度な加熱(熱処理)を行った場合、近年普及し始めている高温セット乾燥^{5,8)}において不適切なスケジュールを与えた場合と同様、材の強度性能、生物劣化抵抗性、薬剤浸潤性など、製材としての品質やその後の加工性に悪影響を及ぼす危険性もある⁹⁻¹³⁾。

以上のことから、本研究は、蒸気・高周波複合乾燥法によって、スギ心持ち正角を短時間で乾燥できることを明らかにして、その技術を確立させるとともに、得られた製材の品質を評価することを目的としている。本論文は次の5章から構成されている。

本章では、国産針葉樹材利用の必要性和国産針葉樹製材に対する乾燥の必要性を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、高周波加熱による乾燥期間の短縮効果、高周波発振器内の整合回路改良による加熱効率の低減抑制効果など、著者がこれまでにやってきた蒸気・高周波複合乾燥技術に関する基礎的な研究結果を概説するとともに、スギ心持ち正角に対する短期間で割れの発生が少ない実務的な乾燥スケジュールを明らかにした。

第3章および第4章では、蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の品質を評価した。本乾燥法、あるいは高温セット乾燥が製材の強度性能に及ぼす影響については、既に幾つかの検討¹⁴⁻¹⁷⁾がみられることから、ここでは、本乾燥法が製材の生物劣化抵抗性と薬剤浸潤性に及ぼす影響を検討した。すなわち、第3章では蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の耐朽性、耐蟻性を評価した。第4章では蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の薬剤浸潤性について評価した。

最後に、第5章では、本論文の総括的なまとめを行った。

第2章 蒸気・高周波複合乾燥法の開発

1 蒸気・高周波複合乾燥法に関する基礎的研究の概説

1. 1 はじめに

前章でも述べたように、スギ材には心材の生材含水率が高いものがあり⁴⁾、かつ、そのばらつきも大きいことが知られている。例えば、著者ら¹⁸⁾は、奈良県産スギ心持ち正角とヒノキ心持ち正角（断面寸法はともに12cm角用。以降、本章では「心持ち正角」を「正角」と略す。）の生材含水率を調べ、ヒノキ正角の生材含水率が28～55%の範囲に分布する一方で、スギ正角のそれは43～168%の範囲に分布したことを報告している。このような水分状態にあるスギ正角を天然乾燥や中温乾燥によって含水率20%等、所定の含水率に調節するためには、乾燥に時間がかかるとともに、乾燥後の含水率がばらつくなどの問題が生じやすい^{5,6)}。著者ら¹⁸⁾は、上述した生材含水率範囲を示したスギ正角を製材工場の屋内施設で天然乾燥させた結果、夏季（7月中旬乾燥開始、乾燥期間の平均気温24.4℃）であっても、90日間の乾燥で含水率20%程度に調節された材は、生材含水率が80%以下のもののみで、生材含水率が80%を超える材を含水率20%程度に調節するためには乾燥期間をさらに延長する必要があることを報告している。また、小野ら¹⁹⁾は、同様の生材含水率範囲を示したスギ正角（断面寸法12cm角用）に対し、温度80℃での中温乾燥を行った結果、14日間の乾燥で含水率20%程度に調節された材は、生材含水率が80%以下のもののみで、生材含水率が80%を超える材を含水率20%程度に調節するためには乾燥期間をさらに延長する必要があることを報告している。スギ正角の乾燥材を生産する工場では、生産効率の関係上、概ね7日間程度での人工乾燥処理技術が求められていることから、従前から適用されている方法では効率的な乾燥材生産が行えない状況にあった。

この現状を受け著者は、スギ正角の乾燥における時間短縮と仕上がり品質の向上を目的として、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波加熱による内部加熱を併用する蒸気・高周波複合乾燥法に注目した。この技術は、1947年頃から「高周波乾燥」として、主に広葉樹板材について谷²⁰⁾、山本ら^{21,22)}によって試みられ、同時期には高周波加熱による成形合板の製作も盛んに行われ、短時間に硬化する接着剤や電極の配列方法、加熱時間の決定などについても多くの実用研究がなされている。しかし、1960年頃から蒸気式乾燥機の整備が進み、これに用いる乾燥スケジュールが発達したことから、乾燥材

が計画的に生産されるようになったため、「高周波乾燥」はあまり取り上げられなくなり、発展をみなかった²³⁾。

その後、高周波加熱は主に接着分野に利用されたが、1977年以降になると、減圧下で高周波を印加すれば沸点温度が低下し、割れ、落ち込みなどの損傷が発生しにくく、しかも乾燥時間の短縮が可能になることが明らかとなり²⁴⁾、再度、高周波加熱を用いた木材乾燥技術が見直された²³⁾。また、この頃から高周波発振器は自動同調化等の装置改良・開発が進み、信頼性の高いものとなった。

そこで著者は、スギ正角を対象とした蒸気・高周波複合乾燥法の技術開発に取り組むことにした。本節では、高周波加熱による乾燥期間の短縮効果、高周波発振器内の整合回路改良による加熱効率の低減抑制効果、加熱の際の適正な高周波出力といった、著者がこれまでに行ってきた蒸気・高周波複合乾燥に関する基礎的な研究結果を概説する。

1. 2 高周波加熱による乾燥期間の短縮効果²⁵⁾

スギ正角の乾燥において、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波加熱による内部加熱を併用したときの乾燥期間短縮効果を明らかにするため、2種類の乾燥試験を行った。

一方の乾燥試験では、電気式熱風乾燥機(大日エンジニアリング製、収容材積 1.5m³、電気ヒータ加熱と水の噴霧により温湿度を任意に制御でき蒸気式乾燥機と同等の性能を有する)と高周波発振器(富士電波工機(株)製 FDY-620 型、周波数 13.56MHz、出力 6kW)を組み合わせた装置を使用した。この装置の模式図を図 2-1 に示した。乾燥機内に設置したアルミ電極間に、スギ正角 6 体(12.5×12.5×180cm、背割り材、生材含水率 52~96%、両木口にシール処理)を 3 段 2 列にさん積みし、温度 60℃、相対湿度 80%の条件下で高周波加熱を行いながら、仕上がり含水率 20%を目標に乾燥を進めた。乾燥中、光ファイバー温度センサー((株)高岳製作所製 FT-1110)を用いて試験材の内部温度を計測し、この内部温度が 90~95℃の範囲となるよう高周波の印加・休止を繰り返した。

もう一方の試験は、比較対照として高周波加熱は行わず、中温乾燥による外部加熱のみでの乾燥を行った。恒温恒湿器(タバイエスペック(株)製プラチナス S シリーズ PR-4S)内に、スギ正角 4 体(12.5×12.5×90cm、背割り材、生材含水率 45~84%、両木口にシール処理)をさん積みし、スギ正角に対する標準的なスケジュール²⁶⁾(初期:温度 50℃、相対湿度 87%、終期:温度 60℃、相対湿度 43%)により仕上がり含

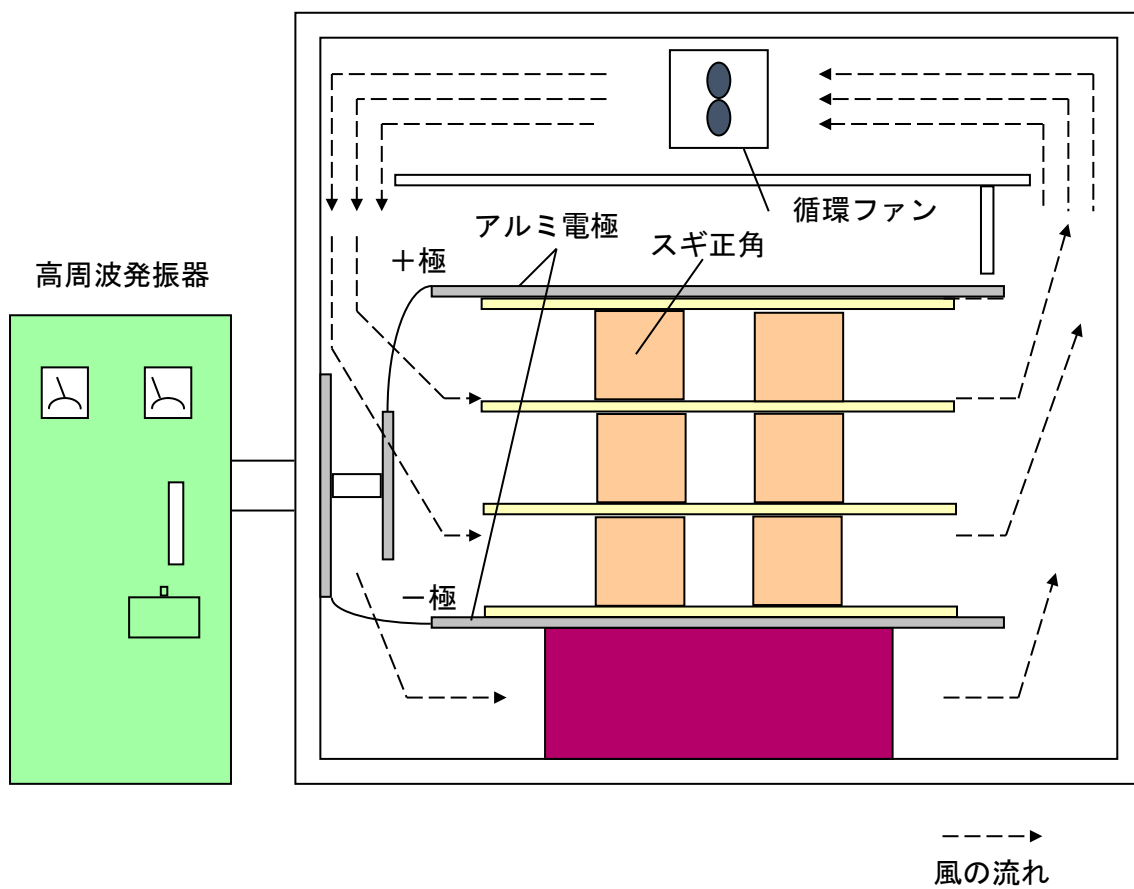


図 2 - 1 乾燥装置の模式図

含水率 20%を目標に乾燥を進めた。両試験とも、乾燥期間中、適宜試験材の質量を測定して平均の含水率が 20%となるまでの時間を把握するとともに、乾燥後には試験材の含水率を全乾法により求めて、両試験での差を比較した。

結果、図 2-2 に示すように、蒸気・高周波複合乾燥を行った条件では、試験開始直後から含水率が著しく低下し、72 時間後には全ての試験材が 20%前後となった。平均乾燥速度は 0.76%/時間であった。これに対し、中温乾燥を行った条件では、含水率低下が緩やかで、72 時間後の含水率は 35~70%であった。試験開始から 72 時間までの平均乾燥速度は 0.18%/時間であった。また、この条件では、試験材の平均含水率が 20%となるまでに 360 時間を要した。このように、中温乾燥による外部加熱に高周波加熱を複合させることによって乾燥期間を約 1/5 にまで大幅に短縮できることが示された。これは、高周波加熱によって試験材内部の温度が最大 95℃に加熱され、試験材表層（約 60℃と推測）との間に大きな蒸気圧差が生じたためと推測される。この蒸気圧差が駆動力となって試験材内部の水分は水蒸気の形で速やかに表層へ移動し、引き続いて、試験材表層と外周との圧力差によって表面から蒸散する機構が想定される²⁷⁾。

さらに、両乾燥試験における、生材含水率と仕上がり含水率との関係を比較したところ、蒸気・高周波複合乾燥を行った条件では、生材含水率（52~96%）にばらつきがみられたにもかかわらず、仕上がり含水率（12~24%）は、全て、製材の日本農林規格（JAS）で定められる含水率基準²⁸⁾を満たした。これに対し、中温乾燥を行った条件では、仕上がり含水率は 13~30%の範囲にあり、不十分な乾燥状態の試験材も見られた。この違いも高周波による内部加熱の影響が考えられる。蒸気・高周波複合乾燥において、高周波加熱によって与えられる熱量は、誘電体損失が大きい材ほど多くなり、誘電体損失は含水率が高いほど大きくなる²³⁾。そのため、乾燥の進行した材よりも乾燥の遅れている材が選択的に加熱され、このとき、乾燥の遅れている材では速やかな乾燥がなされるものと推測される。結果、短時間での乾燥にもかかわらず、仕上がり含水率のばらつきが小さくなったと考えられる。

以上の結果から、蒸気・高周波複合乾燥は、中温乾燥に比べて乾燥時間が大幅に短縮され、かつ、生材含水率のばらつきに左右されずに良好な仕上がり含水率状態が得られることが明らかとなった。

1. 3 高周波加熱時のさん積み形態が加熱効率に及ぼす影響²⁵⁾

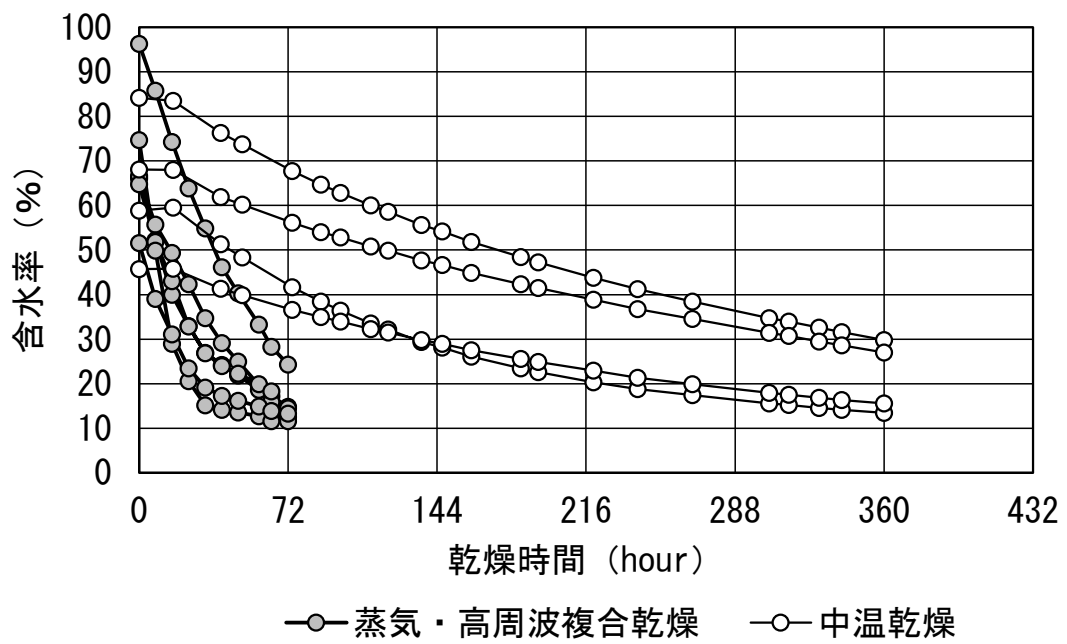


図 2 - 2 蒸気・高周波複合乾燥および中温乾燥の乾燥経過 (スギ正角)

前項で示したように、スギ正角に対して蒸気・高周波複合乾燥を行った場合、中温乾燥を行った場合に比べて乾燥時間が大幅に短縮され、また、生材含水率のばらつきに左右されずに良好な仕上がり含水率状態が得られることが明らかとなった。しかし一方で、蒸気・高周波複合乾燥には高周波加熱での電力消費や高周波発振器導入にかかる経費が必要で、場合によっては、乾燥経費高騰を引き起こす恐れがある。そこで、高周波加熱での消費電力量に直接影響を及ぼすと考えられる高周波加熱効率を低減させないための検討を幾つか行った。本乾燥法では、一般に行われているように、乾燥中に機内の空気を均一に循環させる都合上、被乾燥物をさん積みする際にはさん木を用いる。ここでは、さん木を用いたさん積みによって高周波加熱電極間にエアギャップが生じることに着目し、これが高周波加熱効率に及ぼす影響を明らかにするため、さん積みの形態と高周波加熱効率との関係を調べた。

前項の検討で用いた乾燥機（図2-1）を本検討でも使用した。乾燥機内に設置したアルミ電極間に、スギ正角6体（12.5×12.5×180cm、背割り材、生材状態、両木口にシール処理）をさん積みした。このときのさん積み形態は、図2-3に示すように、1段6列、2段3列および3段2列の3種類を設定した。また、さん積みの際に使用するさん木の厚さを変化させ、0（密着状態）、5、10、15、25、および35mmの6種類を設定した。各さん積み形態で設置されたスギ試験材に対し、60分間の高周波加熱をそれぞれ行った。加熱前後における試験材の質量および材温（材中心部の温度を繊維方向に5か所で測定）と、高周波発振器に投入した電力量を測定し、材温上昇および含有水分蒸発に消費した熱量に対する投入された電力量の熱量換算値の比である加熱効率（ E ）を式2-1のように算出した。

$$E = \frac{H_1 + H_2 + H_3}{H_e}$$

$$= \frac{V \cdot \rho_0 \cdot C(t_2 - t_1) \times 1000 + W_r(t_2 - t_1) + W_v \cdot q}{W \times 860} \quad \dots \text{式2-1}$$

ここで、 H_1 は木材実質の昇温に要した熱量（kcal）、 H_2 は含有水分の昇温に要した熱量（kcal）、 H_3 は含有水分の蒸発に要した熱量（kcal）、 H_e は高周波発振器に投入した電

力量の熱量換算値 (kcal)、 V は材積 (m^3)、 ρ_0 は全乾密度 (g/cm^3)、 C は木材の比熱 (kcal/kg \cdot °C)、 t_1 は加熱前の材温 (°C)、 t_2 は加熱後の材温 (°C)、 W_f は試験材に含まれる水分量 (kg)、 W_v は蒸発した水分量 (kg)、 q は水の蒸発潜熱 (kcal/kg)、 W は高周波発振器に投入した電力量 (kWh) である。

なお、式 2-1 中の C および q は、次に示す式 2-2²⁹⁾、式 2-3³⁰⁾により求めた。

$$C = 0.266 + 0.00058(t_1 + t_2) \quad \dots \text{式 2-2}$$

$$q = 539.1 - 0.6428(t_2 - 100) - 0.000837(t_2 - 100)^2 \quad \dots \text{式 2-3}$$

結果、図 2-4 に示すように、いずれのさん積み形態においても、密着状態 (さん木厚さ 0mm) の加熱効率がさん木を挿入した場合のそれと比較して、最も高い加熱効率を示したとはいえなかった。これは高周波加熱時の加熱効率が、密着時に理論的最大値である 0.5 前後^{22,23)}を示し、電極間にエアギャップが存在することにより低下する²³⁾という通説と異なるものである。この理由は、高周波発振器内の回路 (整合回路) の調整状態によるものと考えられ、次のように説明される。一般に、木材接着における高周波加熱ではエアギャップを存在させる必然性はなく、また、高周波減圧乾燥では空気を循環させるメリットが小さいこと、放電しやすくなることなどから、電極と被加熱物は密着状態とし、この時に高効率での加熱が行えるよう、整合回路が調整されている。この調整は、整合回路上のコイルのインダクタンスとコンデンサのキャパシタンスを変化させて行う (以降、このような整合回路の調整を「インピーダンス整合」と称する。)。一方で、本検討ではインピーダンス整合の状態を把握することが技術的に不可能であったなか、1段6列積みではさん木厚さ 5mm、2段3列積みおよび3段2列積みではさん木厚さ 10mm の場合において、最もインピーダンス整合された状態にあったと推測される。この試験結果は、高周波発振器内の整合回路の状態がスギ正角に対する加熱に影響を及ぼした偶然的な現象といわざるを得ない反面、エアギャップの存在が必ずしも加熱効率の低下を引き起こさないことを示唆している。

以上のことから、乾燥機内の空気を循環させる都合上、さん木を挿入することによって電極間にエアギャップを生じさせても、その状態においてインピーダンス整合させることができれば高い加熱効率での高周波印加が可能と考えられた。

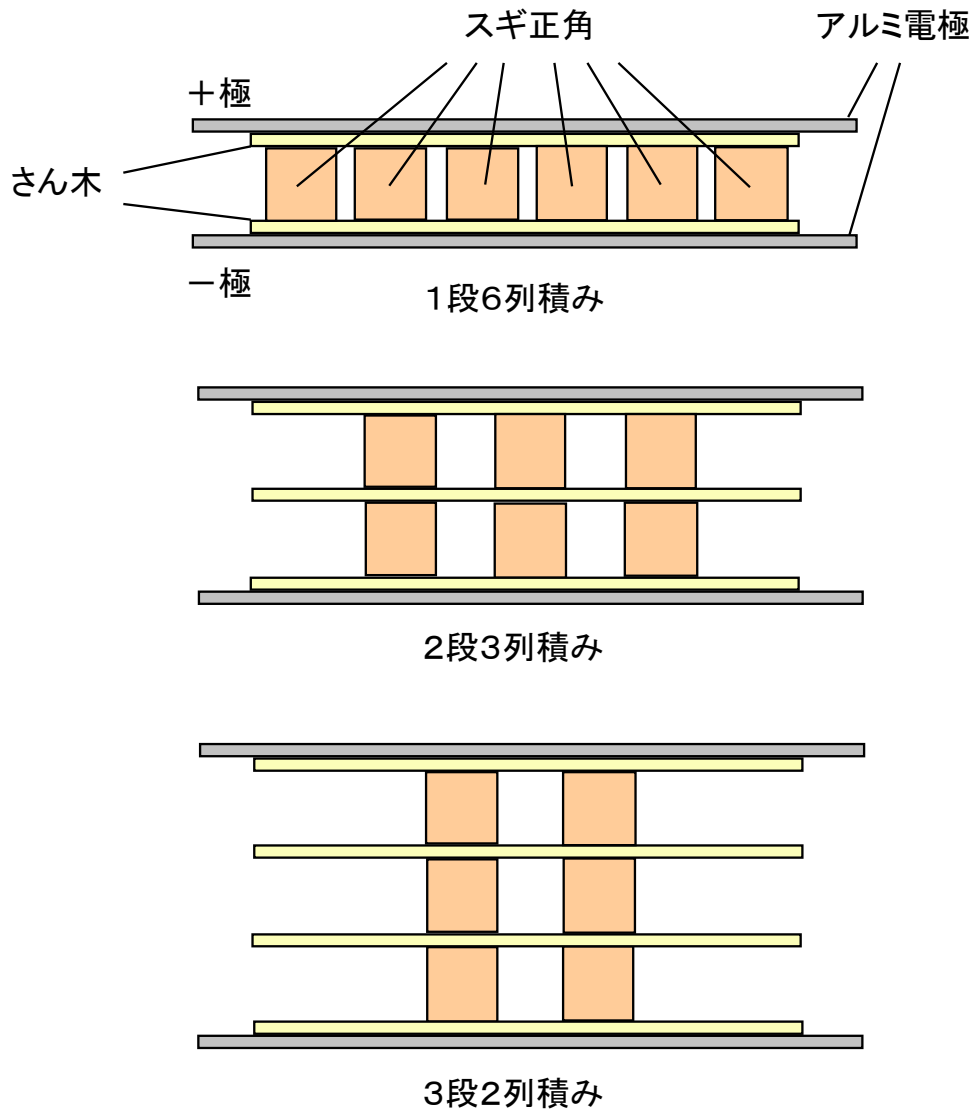
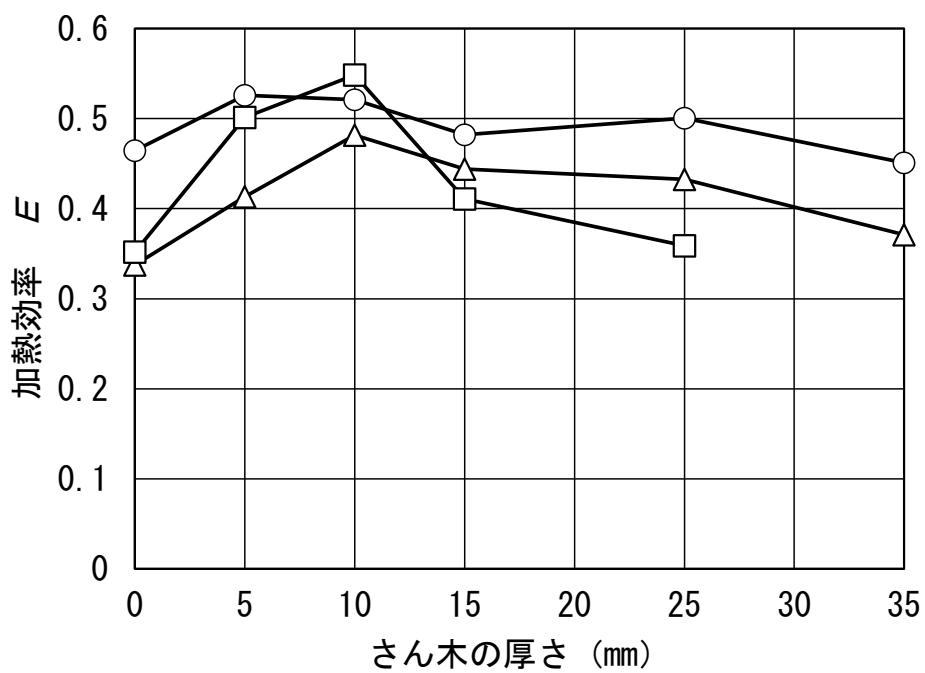


図 2 - 3 さん積み形態



○— 1段6列積み △— 2段3列積み □— 3段2列積み

図2-4 各さん積み形態におけるさん木厚さと加熱効率との関係

1. 4 インピーダンス整合の有無による加熱効率および乾燥効率の違い³¹⁾

一般に、木材乾燥用の高周波発振器の整合回路は、除き去るべき水分が多く含まれている乾燥開始時にインピーダンス整合されるよう設計・調整されている。従前からの整合回路の模式図を図2-5 (a) に示す。発振管側のコイルのインダクタンス (L_1) およびコンデンサのキャパシタンス (C_1) からなる電源インピーダンス (Z_0 (固定値)) と、負荷側のコイルのインダクタンス (L_2 、 L_3) およびコンデンサのキャパシタンス (C_2 、 C_3 、 C_4) からなる負荷インピーダンス (Z_R) が等しいとき、インピーダンス整合の状態にある。この時、発振管側の周波数 (f_1) と負荷側の周波数 (f_2) が共振状態にあり、陽極電流は最大値を示して最大の高周波出力が得られる³²⁾。高周波加熱中、被加熱物の水分変化 (C_4 の変化) にあわせて可変コンデンサのキャパシタンス (C_2) を自動で変化させ、理想的には $f_1 = f_2$ となるよう同調する。

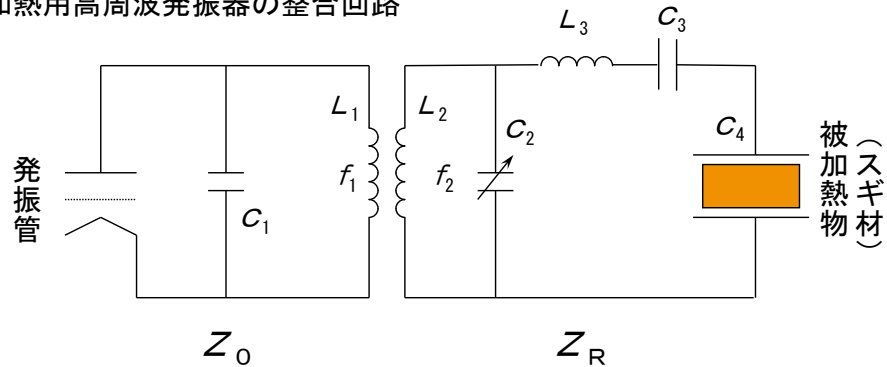
しかし、スギ材は生材含水率の高いものがあり、乾燥過程で水分量が著しく変化する。このことから、乾燥期間中、 C_4 は大きく変化すると予想される。また、前項の結果から、さん積みの形態が変化した場合にも C_4 は大きく変化すると考えられる。したがって、蒸気・高周波複合乾燥法でスギ材を加熱・乾燥させる場合、 C_2 の調整のみではインピーダンス整合した状態が常に作り出されているとは考えにくく、 Z_R が Z_0 に等しくないときは、反射損失がある³³⁾。この反射損失を可能な限り防ぐことにより、乾燥経費の節減が可能と考えられる。

そこで、本検討では、さん積み形態の違いや乾燥中の水分変化に伴う C_4 の変化に対して、常時インピーダンス整合した状態が確保できるよう整合回路を改良した。すなわち、従前からの高周波発振器では固定値あるいはタップ継ぎ換え式であったコイルおよびコンデンサを、可変式に改良した (図2-5 (b) の赤色で示した回路)。また、負荷側回路上には反射損失が把握できる通過型電力計を設置した。このような整合回路を有する高周波発振器を用い、さん積み形態が異なった場合でも常に高い効率での加熱が行えるか否かを調べるとともに、乾燥期間中、常に高い加熱効率を維持することによって、どの程度の経費削減が見込めるかを検証した。

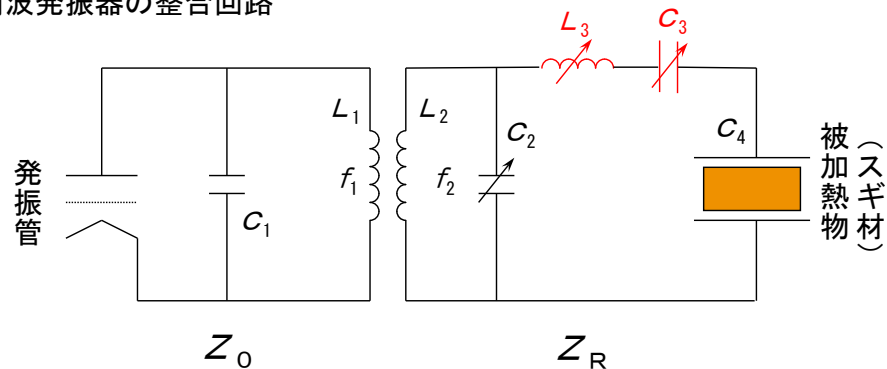
本検討では、前項までの検討で使用した乾燥機と、整合回路を改良した高周波発振器 (山本ビニター(株)製、周波数 13.56MHz、出力 7kW) を組み合わせた乾燥装置を用いた。この装置で2種類の試験を行った。

一方の試験では、さん積み形態が異なっても常に高い効率での加熱が行えるか否かを

(a)一般の木材加熱用高周波発振器の整合回路



(b)改良した高周波発振器の整合回路



(赤色で示した回路が今回改良した部分)

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

$$Z_0 = F(L_1, C_1)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2) \left(C_2 + \frac{C_3 \cdot C_4}{C_3 + C_4} \right)}}$$

$$Z_R = F(L_2, L_3, C_2, C_3, C_4)$$

L_1 は発振管側のコイルのインダクタンス(H)、 C_1 は発振器側のコンデンサのキャパシタンス(F)、

L_2, L_3 は負荷側のコイルのインダクタンス(H)、 $C_2 \sim C_4$ は負荷側のコンデンサのキャパシタンス(F) (C_4 は被加熱物が設置されたコンデンサ)、

Z_0 は電源インピーダンス(Ω)、 Z_R は負荷インピーダンス(Ω)、

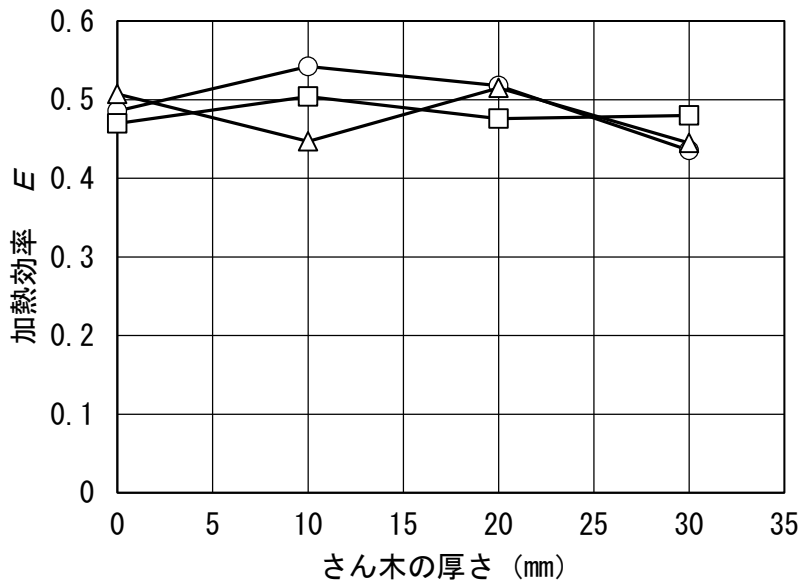
f_1 は発振管側の周波数(Hz)、 f_2 は負荷側の周波数(Hz)

図 2 - 5 一般の木材加熱用高周波発振器の整合回路と改良した整合回路の模式図

調べるための検討を行った。乾燥機内に設置したアルミ電極間に、スギ正角 6 体 (12.5 × 12.5 × 180cm、背割り材、生材状態、両木口にシール処理) を厚さ 30mm のさん木を用いてさん積みした。さん積み形態は 1 段 6 列、2 段 3 列および 3 段 2 列の 3 通り (図 2-3) を設定した。それぞれのさん積み形態において、通過型電力計から読みとれる反射波(kW)が 0 となるように C_2 、 C_3 および L_3 を調節してインピーダンス整合させた。さん木厚さを 30mm から、20、10、0mm (密着状態) と変化させ、さん木厚さを変える毎にインピーダンス整合させた場合 (以下、整合加熱条件という) と、一般機を想定した場合、すなわち、 C_3 および L_3 をさん木厚さ 30mm でインピーダンス整合させた時の値に固定し、さん木厚さを変える毎に C_2 のみを変化させて同調した場合 (以下、不整合加熱条件という) について、それぞれ 60 分間の加熱を行った。両条件について、加熱前後の試験材質量および材温と、高周波発振器に投入した電力量を測定し、前項での検討と同一の方法で加熱効率 (E) を求めた。

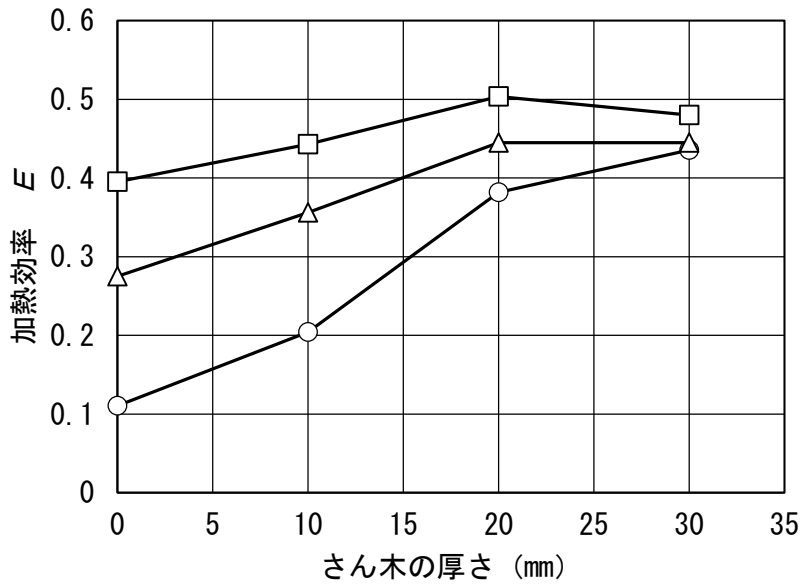
結果、図 2-6 (a) に示すように、整合加熱条件での加熱効率は、さん積みの形態およびさん木厚さの違いに因らず、0.44~0.55 であった。理論的な最大加熱効率が 0.50 程度である^{22,23)}ことから、整合加熱条件の全てで高い加熱効率が得られたと判断された。これに対して、不整合加熱条件での加熱効率は、いずれのさん積み形態においても、さん木厚さが薄くなるほど低下した (図 2-6 (b))。この原因は、さん木厚さ 30mm での状態を基準にさん木厚さが薄くなるほど C_4 が増加してインピーダンスのずれ ($Z_0 \neq Z_R$) が生じ、 C_2 のみの調整では、インピーダンスのずれは解消されず反射損失が生じたためと推測される。また、加熱効率の低下は、1 段 6 列積みの場合が最も大きく、さん木厚さ 0mm (密着状態) での加熱効率は 0.11 となった。これは、さん木厚さ 30mm での加熱効率 (0.44) に対して約 75% の低下であった。また、2 段 3 列積み、3 段 2 列積みの順に加熱効率の低下は小さくなり、3 段 2 列積みの場合、最大で 20% 程度の低下であった。このように、さん積み形態の違いで加熱効率の低下に差が見られた。この現象は、 C_4 の変化、すなわち、さん積み形態やさん木厚さに応じて電極間に生じるエアーギャップ量の変化に起因すると考えられる。各さん積み形態において、さん木厚さ 30mm でのエアーギャップ量に対する、他のさん木厚さでのエアーギャップ量の比 (以下エアーギャップ比という) を求め、この値と加熱効率との関係を調べたところ、整合加熱条件の加熱効率は、エアーギャップ比が変化してもほぼ一定の値を示す一方で、不整合加熱条件では、エアーギャップ比が小さくなるほど加熱効率は低下し、エアーギャ

(a) 整合加熱条件



○ 1段6列積み △ 2段3列積み □ 3段2列積み

(b) 不整合加熱条件



○ 1段6列積み △ 2段3列積み □ 3段2列積み

図2-6 各さん積み形態におけるさん木厚さと加熱効率との関係

ップ比と加熱効率との間には良好な一次の関数関係 ($y = 0.5616x - 0.0652$ 、 $r = 0.9233$) がみられた。

以上のことから、蒸気・高周波複合乾燥を行う際、さん木を使用することによって、電極間にエアギャップが生じても、可変コイルおよび可変コンデンサを調節してインピーダンス整合すれば加熱効率の低下を防止できることが明らかとなった。また、インピーダンス整合を完全には行わない一般機を想定した場合、さん積み形態やさん木厚さが異なるなど、電極間に生じるエアギャップ量が加熱効率の良い状態から乖離するほど、加熱効率は低下することが示された。

また本検討では、乾燥期間中、常に高い加熱効率を維持することによって、どの程度の経費削減が見込めるかも調べている。スギ正角 12 体 ($12.5 \times 12.5 \times 180\text{cm}$ 、背割り材、生材含水率 62~123%、両木口にシール処理) を乾燥前の質量の平均に差が見られないよう 2 つのグループに仕分けし、このグループ毎での乾燥試験を行った。前述した試験でも用いた乾燥装置内に試験材 6 体ずつを厚さ 20mm のさん木を用いて 1 段 6 列にさん積みした。乾球温度 60℃、相対湿度 70% の一定条件下で高周波加熱を行った。各試験材のうち、いずれかの材温が 90~95℃となるよう高周波の印加を調節しながら 80 時間の乾燥を行った。このとき、一方は C_2 、 C_3 および L_3 を調節して、常時インピーダンス整合しながら乾燥した (以下、整合乾燥条件という)。他方は一般機を想定して C_3 および L_3 を固定し、陽極電流値が最大となるよう C_2 のみを変化させながら乾燥した (以下、不整合乾燥条件という)。両乾燥条件について、乾燥前後の試験材質量および高周波発振器に投入した電力量を測定し、含有水分の蒸発のみに消費した熱量に対する投入電力量の熱量換算値の比である乾燥効率 (E_D) を式 2-4 により求めた。

$$E_D = \frac{W_v \cdot q}{W \times 860} \quad \dots \text{式 2-4}$$

ここで、 W_v は蒸発した水分量 (kg)、 q は水の蒸発潜熱 (kcal/kg)、 W は高周波発振器に投入した電力量 (kWh) である。

なお、式 2-4 中の q は、式 2-3³⁰⁾により求めた。

結果、両条件とも、試験材の含水率は生材含水率のばらつきに左右されることなく 80 時間で全て 20%前後となる一方、投入電力量は両条件で差がみられた。表 2-1 に示すように、不整合乾燥条件は整合乾燥条件に比べ多くの電力を要した。これは、一般

機を想定した不整合乾燥条件では、乾燥期間中、常にインピーダンス整合した状態が得られず、反射損失が生じたためである。整合乾燥条件の乾燥効率（0.217）は、不整合乾燥条件のそれ（0.182）に比べ2割程度高い値を示した。

以上のことから、乾燥中において、可変コイルおよびコンデンサを調節して常時インピーダンス整合すれば、乾燥経費を節減できることが示された。

なお、本検討により、被乾燥材のさん積み形態の違いや乾燥中の水分変化に伴う負荷インピーダンスの変化に対して、常時インピーダンス整合した状態が確保できるよう整合回路を改良することの優位性が示された。この技術は、2001年2月に「誘電加熱方法及び装置」として特許登録され、全国で30基程度導入されている実用の蒸気・高周波複合乾燥機に適用されている。

1. 5 スギ正角を加熱する際の適正な高周波加熱出力³⁴⁾

前項までの検討により、高周波加熱による乾燥期間の短縮効果が明らかとなり、また、高周波印加時の加熱効率を低減させない手法が明らかとなった。このような中、スギ正角を加熱する際の適正な高周波加熱出力が明らかとなれば、実務においても再現性の高い加熱・乾燥が行える。スギ材を加熱する際の高周波加熱出力については、高周波減圧乾燥において幾つかの設定例が見られる^{23,35-37)}が、それらは、本研究で取り上げている蒸気・高周波複合乾燥と比較して、乾燥機内の温湿度条件や圧力条件が大幅に異なる。このため、それら既往の研究結果から本乾燥法での高周波加熱出力を類推することは困難と考えられる。そこで、スギ正角を蒸気・高周波複合乾燥する場合の適正な高周波加熱出力を定めることを目的に、異なる高周波加熱出力および乾燥機内温湿度条件下でスギ正角を加熱し、そのときの高周波加熱出力と材内部の温度変化との関係について調べた。

前項で用いた乾燥機を使用し、乾燥機内に設置したアルミ電極間に、スギ正角12体（12.5×12.5×180cm、背割り材、初期含水率63～114%、両木口にシール処理）を2段6列にさん積みした。試験材12体のうち、4体には光ファイバー温度センサー（(株)高岳製作所製 FT-1110）を挿入し、材温を測定した。

乾燥機内の乾湿球温度条件として、乾球温度は60、70および80℃の3条件を設定した。乾湿球温度差は全て5℃とした。それぞれ蒸気のみで試験材を12時間加熱した。このときの材温はおおよそ湿球温度に達していた。その後、高周波加熱を開始し、いず

表 2 - 1 整合乾燥条件および不整合乾燥条件における
乾燥効率 (E_D) とそれに関連する因子

試験条件	蒸発した水分量 (W_V)	水分の蒸発に 要した熱量	投入電力量 (W)	乾燥効率 (E_D)
整合乾燥条件	42.02kg	23298kcal	124.8kw	0.217
不整合乾燥条件	40.96kg	22750kcal	145.6kw	0.182

れかの材温が 95℃になるまで加熱した。高周波加熱出力は、8.2～20.3kW/m³の範囲で 5 条件設定した。全ての条件において、材温を 95℃まで加熱するのに要した時間および電力量を求め、それらを比較した。なお、ここでいう高周波加熱出力とは、陽極電流 (A) と真空管にかかる電圧 (V) を乗じたものを試験材の材積 (m³) で除したものである。また、全ての条件において、高周波の印加は、前項と同じ手法を用いてインピーダンス整合させて行った。

この試験結果として、高周波加熱出力と試験材の材温を 95℃まで加熱するのに要した時間および投入電力量との関係を図 2-7 に示す。試験材に含まれる水分量の違いによりそれぞれの材温上昇には差がみられたが、ここでは、高周波加熱出力をパラメータとして、最も速く加熱された材の温度が 95℃となるまでに要した時間および投入電力量の関係を示している。高周波加熱出力が小さくなると加熱に要した時間は増加し、この関係は一次関数的な関係を示さず、特に、乾球温度が 60℃の条件では、指数関数的な増加傾向を示した。この傾向は、高周波加熱出力と試験材の材温を 95℃まで加熱するのに要した投入電力量との関係においても同様にみられた。これらの理由は、以下のように説明される。

材に投下された高周波エネルギーは、材温の上昇、放熱などの熱損失、水分蒸発時の潜熱に費やされると考えられるが、加熱当初は材温と乾燥機内温度との差が小さいため、放熱量および水分蒸発量は少ないので材温の上昇が著しい。一方、材温の上昇が進むと乾燥機内との温度差が大きくなる。このため、熱伝導率と温度差の積で決定される放熱量が増大する。また、材内と乾燥機内との蒸気圧差が大きくなるため、水分蒸発量も大きくなる。特に、高周波加熱出力が小さい場合、投下された高周波エネルギーに対する放熱と蒸発潜熱の占める割合が大きくなり、材温上昇速度は著しく減少する。

適正な高周波加熱出力を考える際、材内と乾燥機内との蒸気圧差が水分蒸発の駆動力となる⁷ことを考慮すると、昇温工程は、速く、かつ少ない電力量で行い、以後、大きな蒸気圧差を長く維持することが望ましい。一方、過剰な出力条件では、さん木が配置されている部位とそうでない部位の磁束密度差により極端な加熱むらが起こる恐れがあり、例えば、内部割れなどの損傷が懸念される。したがって適正な高周波加熱出力は、加熱に要する時間および投入電力量が増大する手前から材の損傷がない範囲で設定すべきある。材温を 95℃まで加熱した今回の検討において、最低限確保すべき高周波加熱出力は、乾球温度が 60℃と 70℃の場合では約 14kW/m³、乾球温度が 80℃の場合は

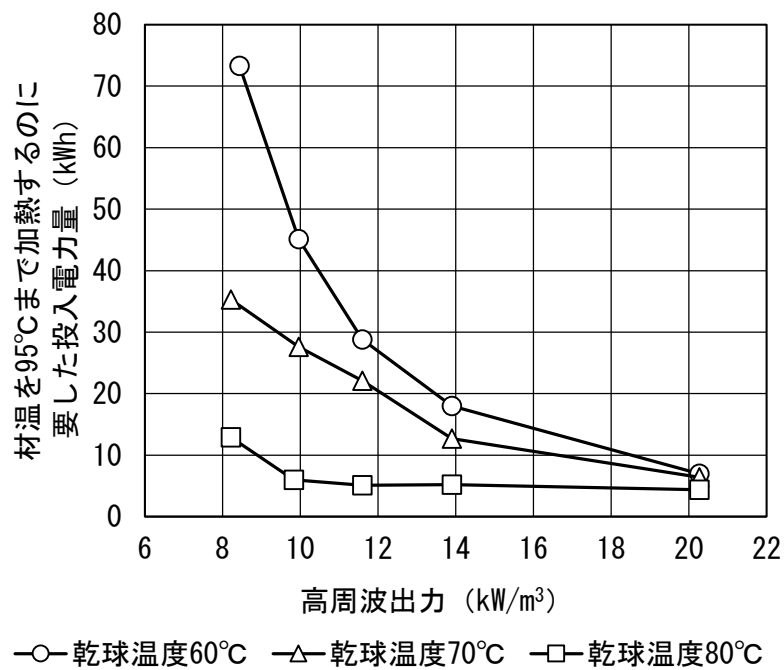
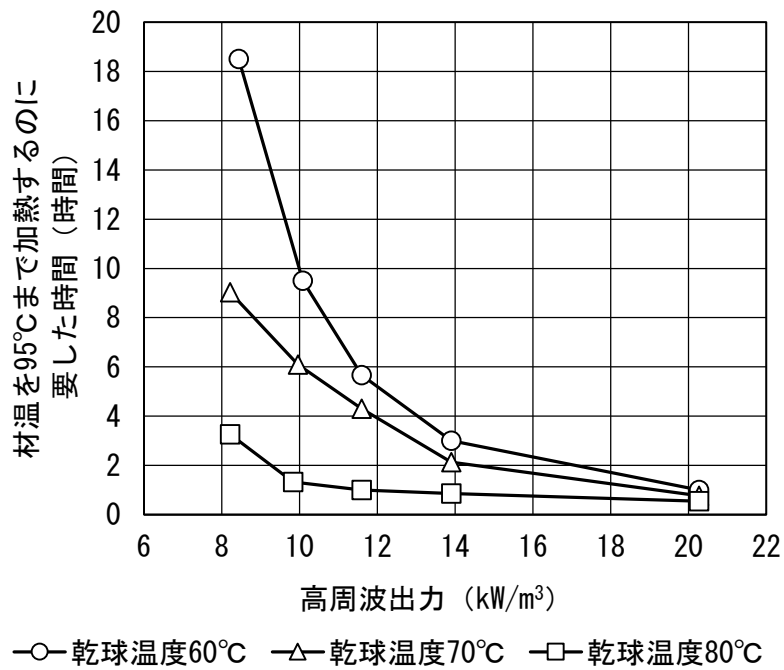


図 2-7 高周波出力と、スギ正角の材温を 95°Cまで加熱するのに要した時間および投入電力量との関係

約 10kW/m³と判断された。

なお、本検討での高周波加熱出力は、広く一般に用いられている単位材積あたり (kW/m³) で設定したが、スギ材のように初期含水率のばらつきが大きい樹種を対象とする場合には、乾燥機に搬入される材の初期含水率が極端に異なると、加熱挙動に差が生じることも予想される。現場で高周波加熱出力を決定する際には、含有水分量を加味した設定が求められる。これに対する方策としては、スギ正角では乾燥前の質量と生材含水率の間には良好な一次の関係が認められる¹⁹⁾ことから、高周波加熱出力を単位質量あたり (W/kg) で設定すれば再現性の高い加熱が行える。そこで、スギ正角に対する実務的な乾燥スケジュールを検討している次節では、高周波加熱出力の設定を単位質量あたり (W/kg) で行っている。

2 スギ心持ち正角に対する蒸気・高周波複合乾燥

2. 1 高温セット時間が内部割れの発生に及ぼす影響³⁸⁾

2. 1. 1 はじめに

前節で示したように、スギ心持ち正角に対する乾燥において、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波による内部加熱を併用した場合、乾燥期間が大幅に短縮されること、生材含水率のばらつきに左右されずに良好な仕上がり含水率状態が得られることが明らかとなった。また、高周波発振器内の整合回路を改良したところ、加熱効率の低減が抑制できることが明らかとなった。さらに、スギ材を加熱する際の適正な高周波加熱出力が把握された。これらの知見をもとに、乾燥機メーカーでは実用機の試作と実証試験が行われた。このとき、設備導入費の削減を目的としたこれまでにない新しい仕様が開発されるとともに、乾燥経費も従前の乾燥法と比べて遜色ない水準であることが確認された^{39,40)}。このような取り組みを受け、**2000**年に蒸気・高周波複合乾燥機が実用化され、現在、正角あるいは平角を量産する製材工場などへの導入が進みつつある。これらの詳細な経緯は山本^{39,40)}の報告に見られる。

ところで近年、温度 100℃以上の高温処理を活用した、無背割りの心持ち材に対する乾燥方法が提案されている。この方法は高温セット乾燥と称されており^{5,8)}、初期に高温低湿条件を与えることによって乾燥が急速に進行するとともに、材表面には引張りセットが形成され、これが表面割れ抑制に一定の効果を有することが明らかとなっている⁴¹⁾。このような、無背割りの心持ち材に対する乾燥技術の発展により、無背割りの乾燥材がハウスメーカーから強く望まれるようになり、現在ではこの材料が一般化しつつある⁸⁾。このことを受け、蒸気・高周波複合乾燥においても、高温セット乾燥と同様の乾湿球温度条件が採用されるようになり、無背割りの心持ち正角や平角をさらに短時間で、かつ、割れの発生が少ない状態に乾燥させるための検討が行われている^{42,43)}。

一方、無背割りの心持ち正角を高温セット処理後も高温条件下で長く乾燥すると、内部割れが生じる場合がある。内部割れが多く存在すると、製品や接合部の強度に影響を及ぼすことが指摘されている^{9,10)}。そこで、無背割りのスギ心持ち正角に対する高温セット乾燥において、内部割れの発生が少ない処理条件の検討が進められた結果、高温セット処理後の乾球温度を調節することで内部割れの発生を抑制できることが示された⁴⁴⁾。しかし、外部加熱のみによる高温セット乾燥と、外部加熱と内部加熱が同時に行われる蒸気・高周波複合乾燥を比較すると、水分除去のメカニズムは両者で異なる⁴⁵⁾と

されていることから、適切な乾燥条件を設定するための考え方はそれぞれ異なる可能性がある。蒸気・高周波複合乾燥における、乾燥条件が内部割れの発生に及ぼす影響については、技術資料が十分に蓄積されていない。

そこで、無背割りのスギ心持ち正角に対する内部割れの発生が少ない蒸気・高周波複合乾燥条件を明らかにするため、本乾燥法における、高温セット時間、高温セット後の乾湿球温度条件および高周波加熱条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を検討した。これらのうち、本項では、高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を述べる。

2. 1. 2 材料と方法

2. 1. 2. 1 材料

奈良県産のスギ心持ち無背割り正角 72 体を使用した。いずれも、木口断面は 13.5×13.5cm で、長さは約 400cm であった。乾燥前の質量の平均に差が見られないよう、3つのグループに仕分けした。これは、スギ正角において、乾燥前の質量と生材含水率の間には良好な一次の関係が認められる¹⁹⁾ことから、仕分けされた材料の生材含水率の平均がグループ間で差が見られないよう配慮したものである。

2. 1. 2. 2 方法

高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を調べるため、図 2-8 に示す方法に従い試験を進めた。今回設定したグループ数（水準）は 3 であったため、本実験では図 2-8 に示す方法を 3 回繰り返すこととした。まず、仕分けされたスギ正角 24 体を乾燥装置（山本ビニター(株)製 MDW-8SR）に搬入し、初期蒸煮（95℃）および高温セットを行った。高温セット条件は、既往の研究^{41,44)}で表面割れの抑制効果が示されている乾球温度 120℃、湿球温度 90℃とし、表 2-2 に示すとおり、処理時間を水準ごとに変化させた。高温セット後、材料を一旦乾燥装置内から取り出し、このときの質量を測定した。高温セット前後の質量から、質量の減少割合を求めた。この後、材料を繊維方向中央部付近で切断し、長さ 180cm の試験材を 2 体ずつ採取した。切断面はエポキシ樹脂系接着剤で直ちにシール処理した。併せて、長さ 3cm の試片を 2 体ずつ採取し、このうち 1 体については、木口断面に見られる内部割れの長さを測定した。残る 1 体については、全乾法により試片の含水率および含水率分布を測定した。この含水率を、高温セット後における試験材の含水率とみなした。また、試験材の質量を測定し、この質量と、既に求めている高温セット前後における質量の減少割合から、試験材

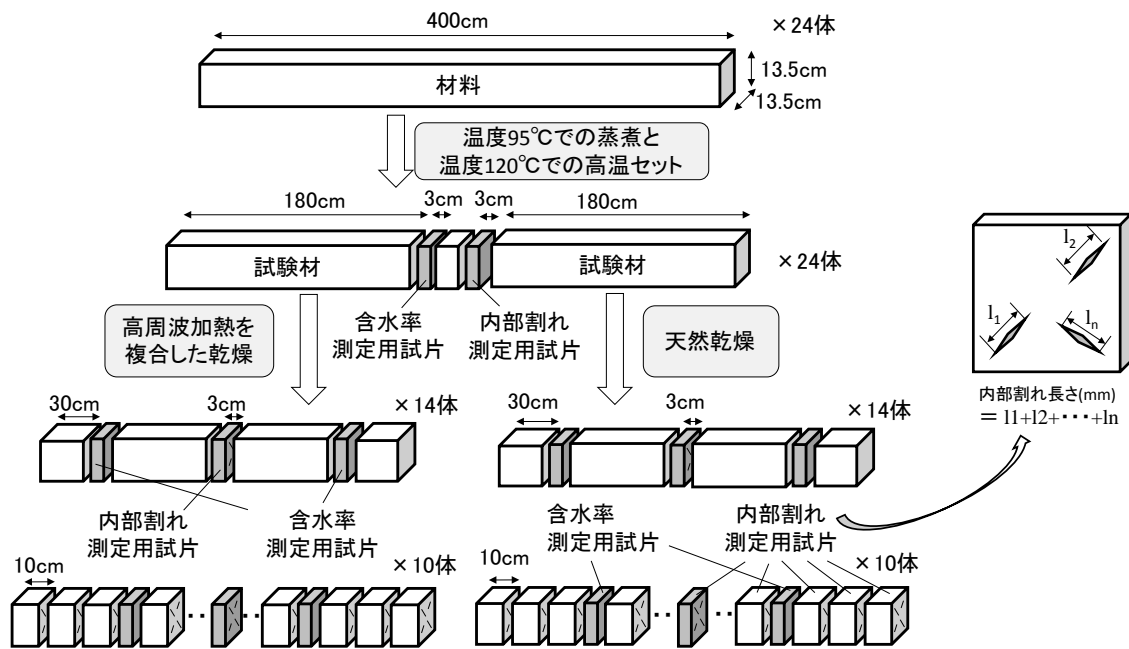


図 2-8 高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を調べるための試験手順

表 2-2 乾燥条件 (A, B, C, AA, BB, CC)

試験条件	蒸煮	高温セット 乾球温度/湿球温度 処理時間	高温セット後の中温乾燥 乾球温度/湿球温度 処理時間	試験材数
A		120°C/90°C 12時間	90°C/60°C 52 ^{a)} , 71 ^{b)} , 124 ^{c)} 時間	各24体
AA			天然乾燥	
B	95°C	120°C/90°C	90°C/60°C	
BB	8時間	24時間	46 ^{a)} , 93 ^{b)} , 139 ^{c)} 時間	
C		120°C/90°C	90°C/60°C	
CC		36時間	42 ^{a)} , 95 ^{b)} , 137 ^{c)} 時間	
			天然乾燥	

a) : 乾燥前の密度が軽いグループ(8体)、b) : 乾燥前密度が中庸のグループ(8体)、
c) : 乾燥前密度が重いグループ(8体)

(長さ 180cm) の乾燥前質量を推定した。推定された乾燥前質量は、後述する高周波加熱出力の算出根拠に用いた。

高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を詳しく調べるため、本報では、高温セット直後における内部割れの発生状況を調べるのに加え、乾燥後における内部割れの発生状況も調べた。高温セット後、同一の正角から採取した 2 体の試験材のうち、1 体については、比較検討のため、屋外での天然乾燥を行った。奈良県森林技術センター(奈良県高市郡高取町)の実験棟前に屋根を付けて積みし、乾燥を開始した。乾燥期間は、2009 年 10 月から 2010 年 9 月までの約 11 ヶ月間とした。この期間の平均気温は 16.2℃、平均湿度は 82.0%であった。

残る 1 体については、表 2-2 に示した中温乾燥条件下で高周波加熱を行い、推定含水率が 20%以下となるまで乾燥した。このとき、乾燥前質量の大小に応じて、スギ試験材 24 体をさらに 3 つのグループに仕分けし、このグループごと(8 試験材ごと)に乾燥を行った。これは、実務上でも見られるように、試験材の乾燥前含水率には大きなばらつきが生じており、それらを一度に乾燥させると乾燥後の含水率にも大きなばらつきが生じると予測されたためである。乾燥条件が内部割れの発生に及ぼす影響を正確に調べるためには、試験材の乾燥後含水率を可能な限り均一に調整する必要がある。そこで、今回の検討では、ほとんどのスギ試験材が含水率 20%以下に乾燥されるよう、乾燥前の質量の類似した試験材ごとに乾燥を行った。

なお、今回の実験操作では、高周波加熱を複合した中温乾燥は 8 体ずつ順次 3 回行ったことから、高温セットの操作と高周波加熱を複合した中温乾燥の操作との間に、一部の試験材を待機させる必要が生じたが、その際には試験材の含水率変化が可能な限り小さくなるようシートに包み、直射日光を受けない屋内で保管した。

スギ試験材に対する高周波加熱の方法は、図 2-9 に示すように、試験材を 4 列 2 段に積みし、積み内に電極板を配置するとともに、電極板と高周波発振器をリード線で接続した。高周波加熱出力は、先に推定した試験材の乾燥前質量をもとに設定した。すなわち、乾燥前質量の合計(8 試験材)に対して 1kg あたり 15W の出力とした。また、高周波加熱スケジュールは 20 分間の印加と、60 分間の休止を 1 つのステップとし、これを乾燥終了まで繰り返した。ただし、高周波加熱中、材中心部の温度が 105℃に達した時点でそのステップでの印加を終了した。材中心部の温度は光ファイバー温度計(安立計器(株)製 FL-2000)により測定した。

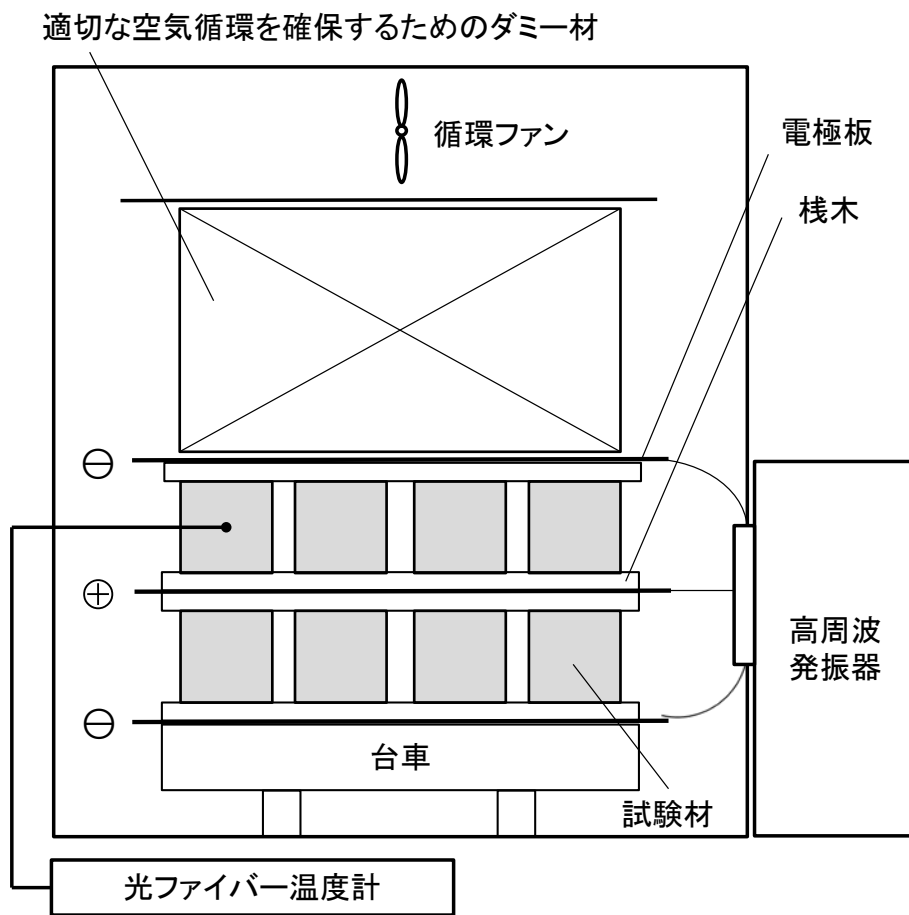


図 2 - 9 試験材のさん積方法

乾燥後、各試験材に発生した表面割れの長さと同最大幅を測定した。また、図 2-8 に示すように、各条件へ供した試験材 24 体のうち、14 体については、繊維方向中央部より長さ 3cm の試片を切り出し、この試片の木口断面に見られる内部割れの長さを測定した。併せて、乾燥後の含水率を測定するための試片（長さ 3cm）を切り出し、試験材の含水率を全乾法で把握した。残り 10 体については、繊維方向中央部における内部割れの発生状況と試験材の含水率を調べるとともに、試験材を長さ 10cm ごとに切断し、全ての切断面で観察される内部割れの長さを測定することにより、内部割れ発生量の繊維方向の分布も調べた。

2. 1. 3 結果と考察

試験条件 A~C と AA~CC における、乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率を表 2-3 に示す。いずれの試験条件においても、乾燥後の含水率は、おおよそ目標どおり 20%以下に調節されていた。また高温セット時間の長い条件（C,CC）では、他の条件に比べ、高温セット後の含水率が低くなる傾向が見られた。

高温セット後に採取した試験片（長さ 3cm）に見られた内部割れの長さを高温セット処理時間ごとに図 2-10 に示す。内部割れの長さの平均は、高温セット 36 時間で最も大きく、24 時間、12 時間の順に小さくなった。このように、スギ材では、高温セット処理時間の違いにより内部割れの発生量に差が見られた。その原因は、試験材に発生した内部応力の違いによるものと考えられる。徳本ら⁴⁶⁾は、高温セット後のスギ心持ち正角において、断面方向の含水率分布とひずみ分布との関係を明らかにしており、表層の含水率が 15%を下回ったときに表層と内層との応力転換が生じていたことを報告している。図 2-11 に示されるように、今回の検討においても、高温セットを 36 時間および 24 時間行った条件では、表面から 5mm の部位の含水率は 15%あるいはそれ以下で、多くの材で表層と内層との応力転換が生じたと推測される。また、高温セットを 24 時間行った条件に比べると、36 時間行った条件では、表面から 10~15mm 内側の部位の含水率が低く、繊維飽和点を大きく下回る部位が見られた。表層の引張りセットが、すでに繊維飽和点以下に達した内層の本来の収縮を拘束し、引張り応力が生じて内部割れが多く発生したと推測された。

乾燥後における内部割れの発生状況を試験条件ごとに図 2-12 に示す。この図では、試験材（180cm）の繊維方向中央部より切り出した試片（長さ 3cm）の木口断面に見ら

表 2-3 乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率

(単位: %)

	試験条件								
	A			B			C		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
乾燥前	40.9	75.4	132.0	48.3	81.1	130.8	46.7	81.2	172.6
高温セット後	25.5	44.0	84.6	25.4	45.1	82.8	17.3	37.3	85.5
乾燥後	7.8	12.3	23.9	5.7	14.7	33.5	6.0	11.8	26.5

	AA			BB			CC		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
	乾燥前	39.5	76.1	122.3	44.7	73.9	123.6	42.7	74.2
高温セット後	23.7	44.6	76.8	22.3	39.3	73.3	16.9	32.5	57.4
乾燥後	14.9	16.6	20.1	13.0	15.2	18.7	11.7	13.7	15.8

注: 各試験条件とも、試験材数は24体

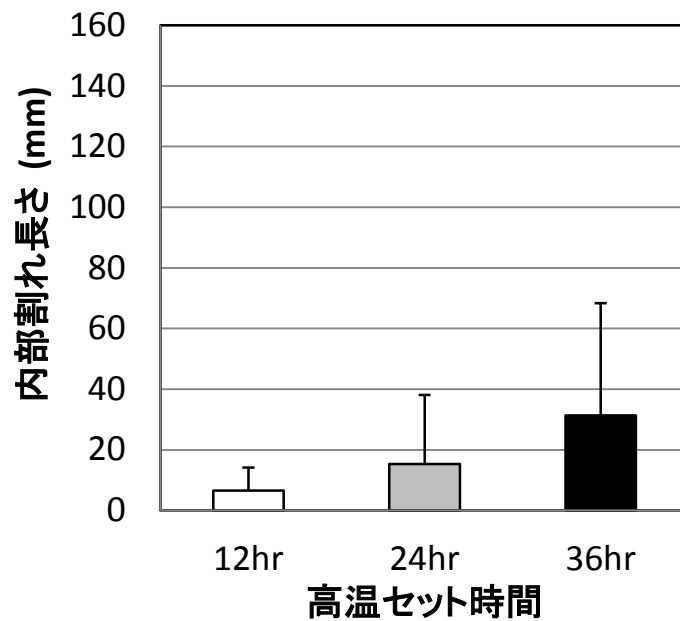


図 2-10 高温セット後における内部割れ長さ

注: 各試験条件とも、試験材数は 24 体

注: エラーバーは標準偏差を示す

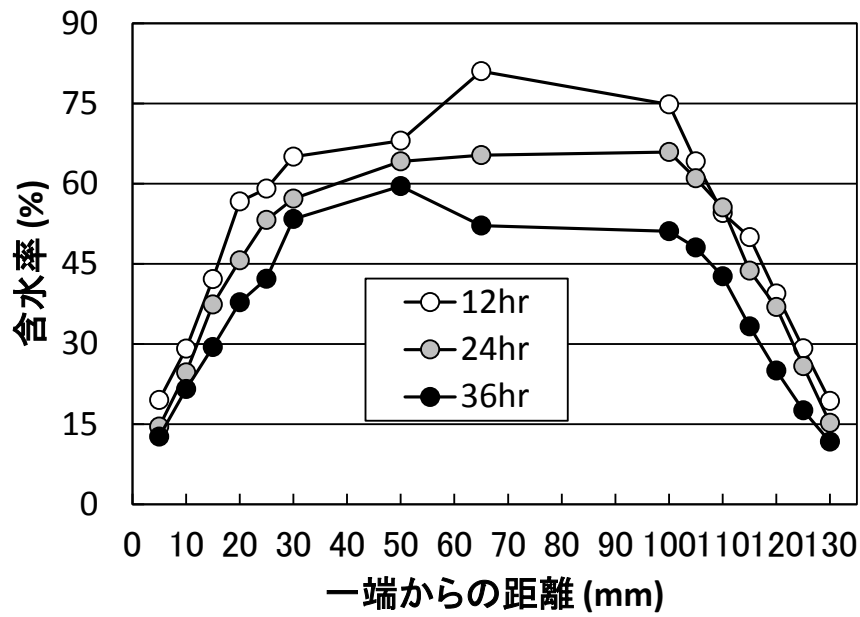


図 2 - 1 1 高温セット後の含水率分布

注：各試験条件とも、試験材数は 24 体

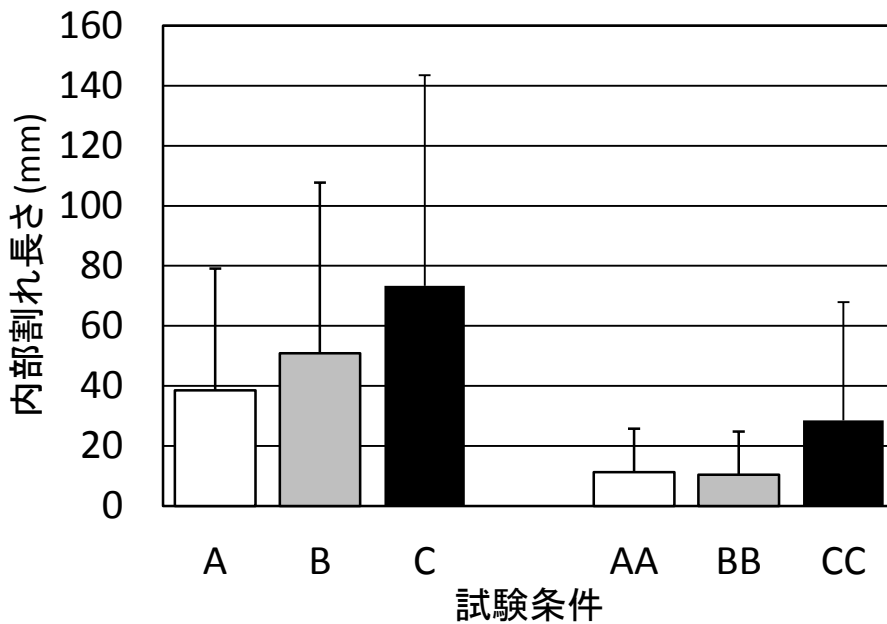


図 2 - 1 2 乾燥後における内部割れ長さ（試験材の繊維方向中央部での結果）

注：各試験条件とも、試験材数は 24 体

注：エラーバーは標準偏差を示す

れた内部割れの測定結果を示している。高温セット後に中温乾燥条件下で高周波加熱を行った試験条件 (A,B,C) では、C に発生した内部割れ長さが最も大きく、次いで B、A の順に小さくなった。高温セット後に天然乾燥を行った試験条件 (AA,BB,CC) では、CC に発生した内部割れ長さが最も大きく、BB、AA の順に小さくなった。

また、本報では内部割れ発生量の繊維方向の分布も調べている。高温セット後に中温乾燥条件下で高周波加熱を行った試験条件 (A,B,C) での結果を図 2-13 に示す。内部割れの長さは、いずれの試験条件においても木口部分でかなり大きく、木口から繊維方向に 10cm の位置で急激に小さくなり、20cm の位置からは繊維方向にほぼ一定になる傾向が見られた。繊維方向 20~170cm の位置における内部割れの発生量を試験条件間で比較すると、高温セット処理時間が長い C は、A および B に比べ、内部割れが大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は、図 2-12 に示した試験材の繊維方向中央部より切り出した試片 (長さ 3cm) での検討結果と概ね同様であった。本検討において、高温セット後の中温乾燥条件および高周波加熱条件は A~C で一定であること、また、高温セット後の天然乾燥条件は AA~CC で一定であることから、乾燥後の内部割れ長さの大小は、高温セット後における内部割れの発生状況が反映され、それらが進展したものと考えられた。高温セット時間を操作することにより乾燥後における内部割れの発生量を調節できることが示された。

高温セット後に中温乾燥条件下で高周波加熱を行った試験条件 (A,B,C) について、乾燥後における表面割れの発生状況を図 2-14 に示す。表面割れの長さは A で最も大きく、B、C の順に小さくなった。また、A での表面割れは、B および C に比べ、幅の広いものの割合が多かった。印出ら⁴⁷⁾はスギ心持ち無背割り正角に対し処理時間の異なる高温セット (乾球温度 120℃、湿球温度 90℃) を行い、高温セットを 12 時間行った材は、高温セットを 24 時間行った材に比べて引張りセットの形成が不十分であったことを報告している。今回の検討においても、B や C に比べると、高温セット時間の短い A では、材表層に十分な圧縮応力が形成されず、その後の乾燥過程において、既に発生していた表面割れが閉じなかったか、新たな表面割れが発生したと推測された。

以上の結果から、スギ材では、高温セット時間が長くなるほど内部割れが多く発生するが、高温セット時間を調節することにより、木口付近を除く繊維方向のほとんどの部位において内部割れの発生を抑制できることが示された。一方で、高温セット時間が短すぎると材表層と内層との応力転換が不十分で、表面割れが多く発生する危険性が懸念

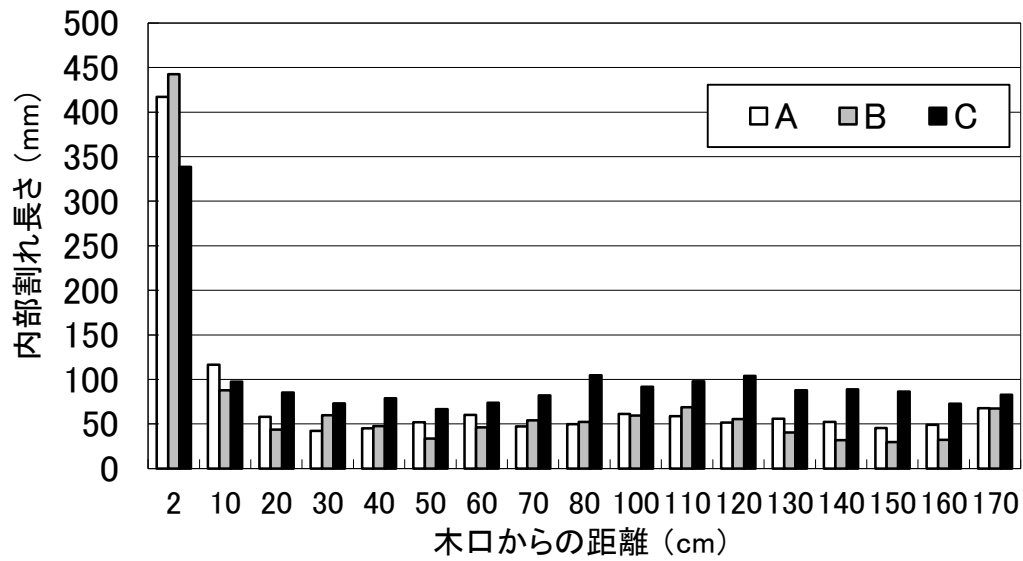


図 2 - 1 3 乾燥後における内部割れ長さ（試験材の繊維方向分布）

注：各試験条件とも、試験材数は 10 体

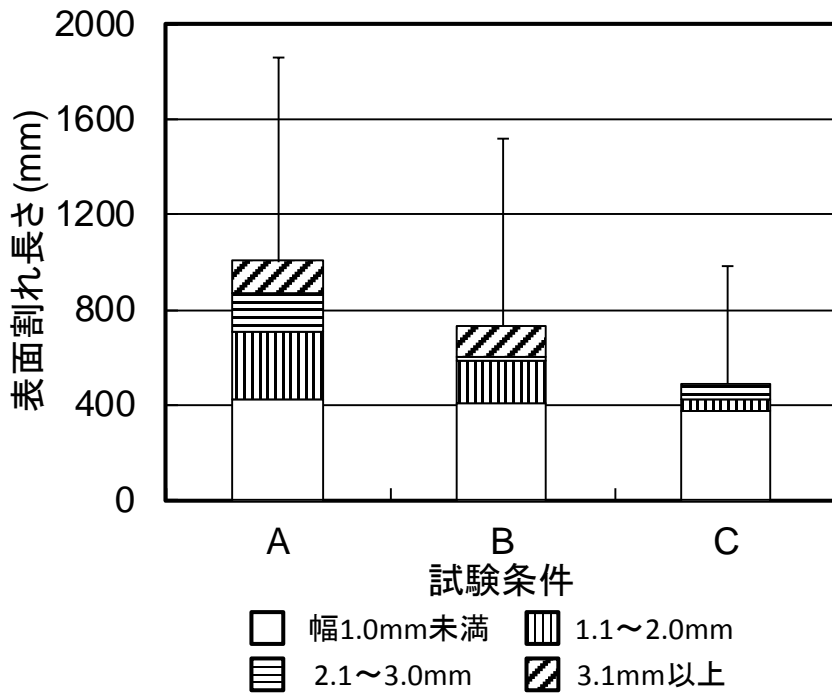


図 2 - 1 4 乾燥後における表面割れ長さ

注：各試験条件とも、試験材数は 24 体

注：エラーバーは標準偏差を示す

された。

スギ材に対する適切な高温セット時間を考える場合、高温セットの主な目的の一つである表面割れの低減を実現させるとともに、内部割れの発生を抑制して材料強度に及ぼす影響を可能な限り少なくする必要がある。これらのことから、スギ材に対する適切な高温セット時間は、今回の検討では、**24 時間 (B)** と判断された。

なお、今回の結果から、木口から繊維方向 **10cm** までの部位については、内部割れの発生を制御することは困難と考えられた。正角の木口部分に内部割れが存在したまま製品として使用された場合、例えば、接合部の耐力に影響を及ぼす恐れがある。今回検討したような乾湿球温度条件での高温セットを用いて構造材を乾燥させる場合、建物の部材として使用される長さに対して、少なくとも、**10cm** 以上の余尺を両木口に設定する必要があると考えられた。

2. 2 高温セット後の乾燥条件が内部割れ発生に及ぼす影響⁴⁸⁾

2. 2. 1 はじめに

前項では、スギ心持ち正角を対象に、蒸気・高周波複合乾燥法における高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を明らかにした。しかし、内部割れの発生が少ない蒸気・高周波複合乾燥条件を具体的に提案するためには、高温セット条件が内部割れの発生量に及ぼす影響に加え、高温セット後の乾湿球温度条件および高周波加熱条件が内部割れの発生量に及ぼす影響についても明らかにする必要がある。ここでは、前項での検討に引き続き、無背割りのスギ心持ち正角に対する内部割れの発生が少ない蒸気・高周波複合乾燥条件を明らかにすることを目的に、本乾燥法における、高温セット後の乾湿球温度条件および高周波加熱条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を検討した。

2. 2. 2 材料と方法

2. 2. 2. 1 高温セット後の乾湿球温度条件が内部割れの発生に及ぼす影響

奈良県産のスギ心持ち無背割り正角 36 体を使用した。いずれも、木口断面は 13.5×13.5cm で、長さは約 400cm であった。それぞれから、図 2-15 に示すように、長さ 180cm の試験材を 2 体ずつ採取した。試験材の片側の木口面はエポキシ樹脂系接着剤で直ちにシール処理した。併せて、図 2-15 に示す①～③ の位置で長さ 3cm の含水率測定用試片を採取し、全乾法によりこれら試片の含水率を求めた。試験材に隣接する 2 つの含水率測定用試片の平均値を試験材の乾燥前含水率とみなした。乾燥前含水率の平均に差が見られないよう、試験材 72 体を、それぞれ、3 グループに仕分けした。このとき、同一個体から得た試験材が同じグループに仕分けされないようにした。高温セット後の乾湿球温度条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を調べるため、表 2-4 に示す条件での乾燥試験を行った。具体的な手順としては、まず、仕分けされたスギ正角 24 体を乾燥装置（山本ビニター(株)製 MDW-8SR）に搬入し、温度 95℃での初期蒸煮 8 時間と、乾球温度 120℃、湿球温度 90℃での高温セットを 24 時間行った。なお、今回設定した高温セット時間は、前項での検討で明らかとなった、本乾燥法において適切と判断された条件である。高温セット後、試験材を一旦乾燥装置内から取り出し、このときの質量を測定した。

高温セット後、表 2-4 に示した異なる乾湿球温度条件下で高周波加熱を行い、推定含水率が 20%以下となるまで乾燥した。このとき、乾燥前密度の大小に応じて、ス

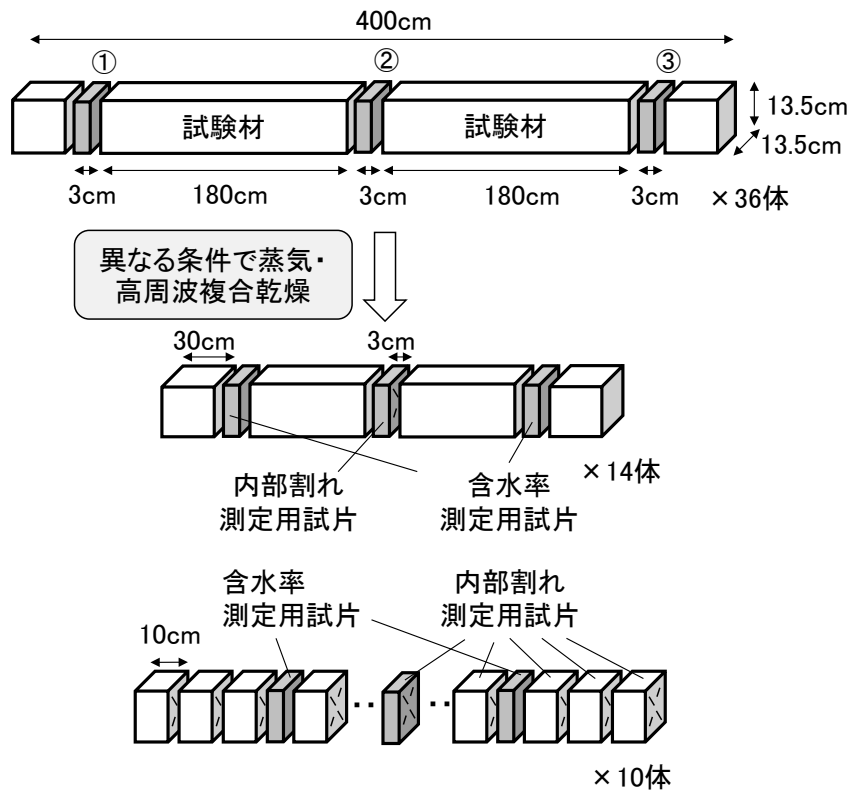


図 2-15 高温セット後の乾湿球温度条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を調べるための試験手順

表 2-4 乾燥条件 (D, E, F)

試験条件	蒸煮	高温セット 乾球温度/湿球温度 処理時間	高温セット後の中温乾燥 乾球温度/湿球温度 処理時間	試験材数
D			90°C/80°C 40 ^{a)} , 77 ^{b)} , 147 ^{c)} 時間	
E	95°C 8時間	120°C/90°C 24時間	90°C/60°C 35 ^{a)} , 81 ^{b)} , 131 ^{c)} 時間	各24体
F			110°C/80°C 21 ^{a)} , 72 ^{b)} , 86 ^{c)} 時間	

a): 乾燥前の密度が軽いグループ(8体)、b): 乾燥前密度が中庸のグループ(8体)、
c): 乾燥前密度が重いグループ(8体)

ギ試験材 24 体をさらに 3 つのグループに仕分けし、このグループごと (8 試験材ごと) に乾燥を行った。これは、前項での検討と同様、乾燥条件が内部割れの発生に及ぼす影響を正確に調べるためには、試験材の乾燥後含水率を可能な限り均一に調整する必要があることに配慮したものである。

スギ試験材に対する高周波加熱の方法は前項と同様の方法で行った。すなわち、試験材を 4 列 2 段に積み重ね、積み重ね内に電極板を配置するとともに、電極板と高周波発振器をリード線で接続した。高周波加熱出力は、乾燥前における試験材質量の合計 (8 試験材) に対して 1kg あたり 15W の出力とした。また、高周波加熱スケジュールは 20 分間の印加と、60 分間の休止を 1 つのステップとし、これを乾燥終了まで繰り返した。ただし、高周波加熱中、乾球温度を 90°C に設定した条件 (D,E) では材中心部の温度が 105°C に達した時点でそのステップでの印加を終了した。乾球温度を 110°C に設定した条件 (F) では材中心部の温度が 125°C に達した時点でそのステップでの印加を終了した。材中心部の温度は、各グループにおいて平均的な乾燥前質量であった試験材を対象に、光ファイバー温度計 (安立計器(株)製 FL-2000) により測定した。

乾燥後、各試験材に発生した表面割れの長さおよび最大幅を測定した。また、図 2-15 に示すように、各条件へ供した試験材 24 体のうち、14 体については、長さ方向中央部より繊維方向 3cm の試片を切り出し、この試片の木口断面に見られる内部割れの長さを測定した。併せて、繊維方向 3cm の試片を 2 体切り出し、試験材の含水率を全乾法で把握した。残り 10 体については、長さ方向中央部における内部割れの発生状況と試験材の含水率を調べるとともに、試験材を長さ 10cm ごとに切断し、全ての切断面で観察される内部割れの長さを測定することにより、内部割れ発生量の繊維方向の分布も調べた。

2. 2. 2. 2 高周波加熱による制御材温が内部割れの発生に及ぼす影響

奈良県産のスギ心持ち無背割り正角 18 体を使用した。いずれも、木口断面は 13.5×13.5cm で、長さは約 400cm であった。2.2.2.1 と同じ方法で、長さ 180cm の試験材を 36 体採取した。また、含水率測定用試片を採取し、試験材の乾燥前含水率を推定した。乾燥前含水率の平均に差が見られないよう、試験材を 2 グループに仕分けした。このとき、同一個体から得た試験材が同じグループに仕分けされないようにした。

高周波加熱で調整される材温の違いが内部割れの発生に及ぼす影響を調べるため、2 グループに仕分けされたスギ正角に対し、材温の調節条件が異なる乾燥をそれぞれ行っ

た。このときの乾湿球温度条件および材温の調節条件は表 2-5 に示した。高周波加熱方法と高周波加熱出力の設定は、2.2.2.1 と同じ方法とした。ただし、この検討で用いた試験材数は 1 条件あたり 18 体であったため、高周波加熱を複合した中温乾燥の操作は、乾燥前含水率の類似した 6 試験材ごとに行った。そのため、棧積み方法は 3 列 2 段とした。高周波加熱スケジュールは 2.2.2.1 と同じく 20 分間の加熱と、60 分間の休止を 1 つのステップとしたが、一方の条件では材中心部の温度が 125℃に達した時点でそのステップでの印加を終了した。残る一方の条件では、材中心部の温度が 105℃に達した時点でそのステップでの印加を終了した。なお、高周波加熱で消費する電力量は両条件 (G,H) でほぼ同じとなるようにした。

乾燥後、2.2.2.1 と同じ方法で、表面割れの発生状況、含水率および長さ方向中央部における内部割れの発生状況を調べた。また、各条件へ供した試験材 18 体のうち、10 体については、内部割れの繊維方向の分布も調べた。

2. 2. 3 結果と考察

2. 2. 3. 1 高温セット後の乾湿球温度条件が内部割れの発生に及ぼす影響

試験条件 D~F における、乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率を表 2-6 に示す。いずれの試験条件においても、乾燥後の含水率は、おおよそ目標どおり 20%以下に調節されていた。

乾燥後における内部割れの発生状況を試験条件ごとに図 2-16 に示す。この図では、試験材の繊維方向中央部より切り出した試片 (長さ 3cm) の木口断面に見られた内部割れの測定結果を示している。図 2-16 によると、F で発生した内部割れ長さが最も大きく、次いで E、D の順に小さくなった。また、本検討では内部割れ発生量の繊維方向の分布も調べている。これを、試験条件ごとに図 2-17 に示す。内部割れの長さは、いずれの試験条件においても木口部分でかなり大きく、木口から繊維方向に 10cm の位置で急激に小さくなり、20cm の位置からは繊維方向にほぼ一定になる傾向が見られた。繊維方向 20~170cm の位置における内部割れの発生量を試験条件間で比較すると、乾球温度の高い F で内部割れが大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は、図 2-16 に示した試験材の繊維方向中央部より切り出した試片 (長さ 3cm) での結果と概ね同様であった。本検討において、高温セット条件は D~F で一定であることから、乾燥後における内部割れの発生量の大小は高温セット後の乾燥条件に影響されたと考えられ

表 2-5 乾燥条件 (G, H)

試験条件	蒸煮	高温セット 乾球温度/湿球温度 処理時間	高温セット後の中温乾燥 乾球温度/湿球温度 処理時間 高周波加熱時の目標材温	試験材数
G			90°C/60°C 25 ^{a)} , 70 ^{b)} , 96 ^{c)} 時間	各18体
	95°C 8時間	120°C/90°C 24時間	105°C 90°C/60°C 25 ^{a)} , 69 ^{b)} , 96 ^{c)} 時間	
H			125°C	

a) : 乾燥前の密度が軽いグループ(6体)、b) : 乾燥前密度が中庸のグループ(6体)、
c) : 乾燥前密度が重いグループ(6体)

表 2-6 乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率 (D, E, F)

(単位: %)

	試験条件								
	D			E			F		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
乾燥前	43.0	77.2	138.9	41.1	80.1	133.1	47.1	77.4	151.4
高温セット後	17.0	36.7	84.9	17.7	38.9	78.3	17.1	38.2	97.3
乾燥後	7.7	15.8	24.9	6.8	14.1	26.1	5.6	13.8	32.8

注: 各試験条件とも、試験材数は24体

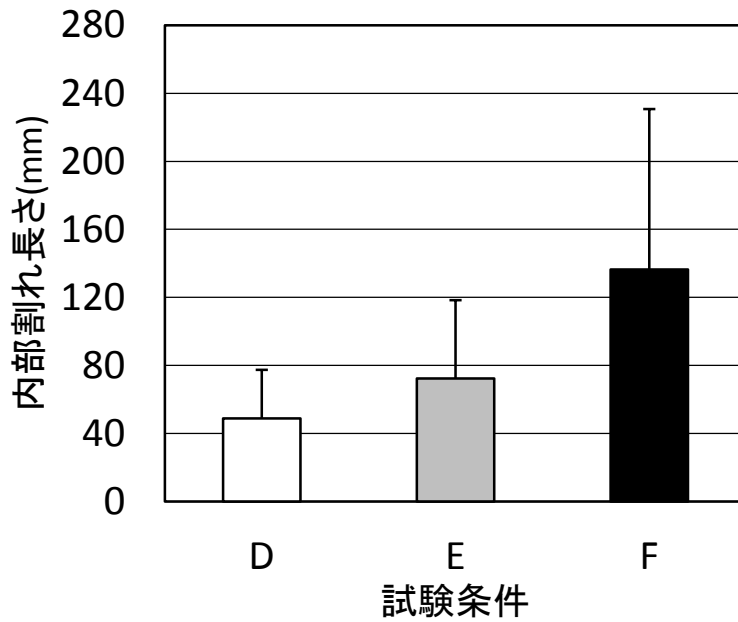


図2-16 乾燥後における内部割れ長さ (D, E, F)
(試験材の繊維方向中央部での結果)

注：各試験条件とも、試験材数は24体

注：エラーバーは標準偏差を示す

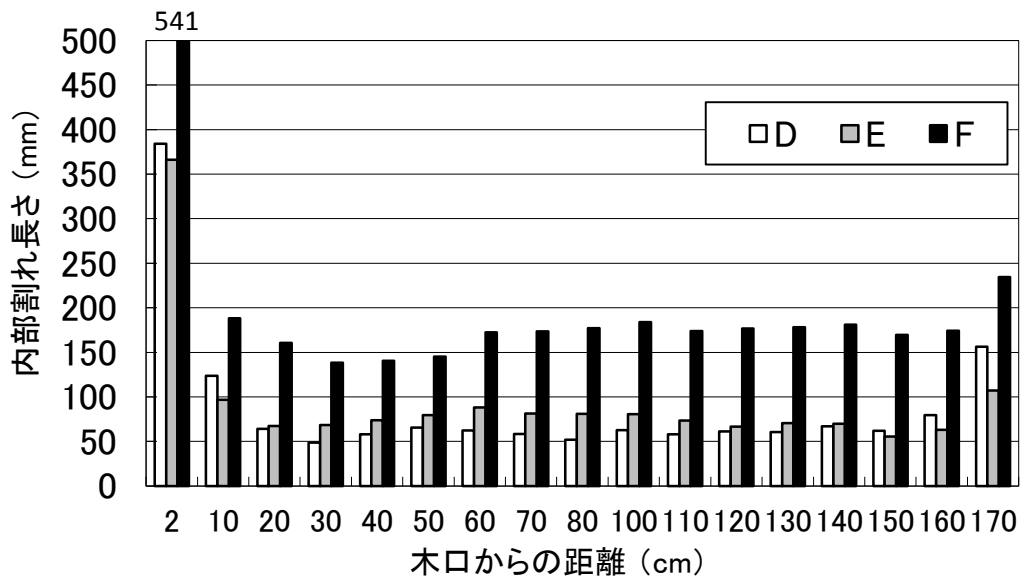


図2-17 乾燥後における内部割れ長さ (D, E, F)
(試験材の繊維方向分布)

注：各試験条件とも、試験材数は10体

る。高周波加熱を行わない高温セット乾燥において、高温セット後に乾球温度を低下させると、内部の応力の発生を抑えることができ、結果として内部割れを抑制できることは既に知られている⁴⁴⁾。高温セット後に高周波加熱を行いながら乾燥を進めた今回の検討においても、高温セット後の乾湿球温度条件を調節することにより、乾燥後における内部割れの発生量を制御できることが示された。なお、吉田ら⁴⁴⁾は、スギ心持ち無背割り正角に対し、高温セット後の乾球温度を110℃に設定した条件で平均含水率20%以下まで乾燥を進めたところ、木口から100cm離れた位置での断面に発生した内部割れ長さは平均で約60mmであったことを報告している。これに対して、今回の検討において、高温セット後の乾球温度を110℃に設定した上で高周波加熱を行ったFでは、吉田らが計測した位置と同様の部位に平均で100mmを超える内部割れが見られた。吉田らの報告と今回の検討を単純に比較することは困難ではあるものの、一つの可能性として、今回行ったFでは、材温が125℃まで加熱されて材内部では急激な乾燥が進み、大きな引張り応力が発生して内部割れが多くなったと推測される。高周波加熱による制御材温が内部割れの発生に及ぼす影響については2.2.3.2でも考察する。

乾燥後における表面割れの発生状況を図2-18に示す。表面割れの長さはDで最も大きく、E、Fの順に小さくなった。また、DとEを比べると、Dでは幅の広い表面割れが多く発生していたことから、内部割れの発生が少なく、さらに、表面割れの発生も少ない条件として、Eが考えられたが、両者に発生した割れ長さには大きなばらつきが見られており、EがDよりも適切な条件とまではいえなかった。

このように、スギ材では、高温セット後の乾球温度を110℃に設定すると内部割れが多く発生するが、乾球温度を90℃に調節することにより、木口付近を除く繊維方向のほとんどの部位において内部割れの発生を抑制できることが本乾燥法においても示された。なお、表面割れの発生状況は試験条件間で明らかな差はみられなかったことから、今回の検討では、表面割れの抑制にも配慮した乾湿球温度条件を定めるまでには至らなかった。今回検討を行った乾球温度90℃での試験条件DおよびEで発生した表面割れは、既往の研究結果^{44,49)}と比較して多いとはいえないものの、今後更なる検討を行い、高温セット後の乾湿球温度条件と表面割れの発生との関係を明らかにする必要がある。

2. 2. 3. 2 高周波加熱による制御材温が内部割れの発生に及ぼす影響

試験条件GおよびHにおける、乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率を表2

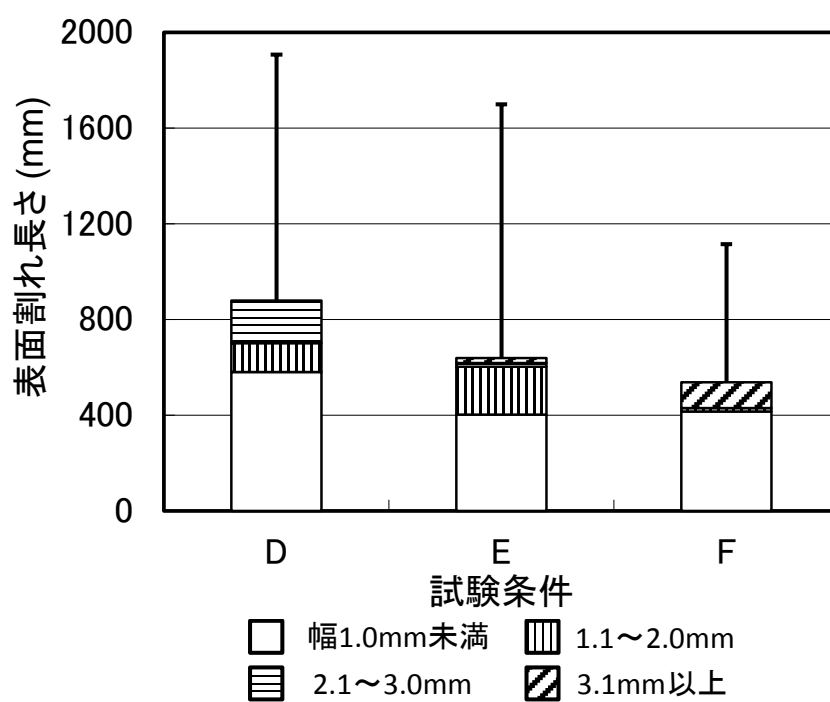


図2-18 乾燥後における表面割れ長さ (D, E, F)

注：各試験条件とも、試験材数は24体

注：エラーバーは標準偏差を示す

－ 7に示す。両試験条件において、乾燥後の含水率は、おおよそ目標どおり 20%以下に調節されていた。

乾燥後における内部割れの発生状況を試験条件ごとに図 2－19に示す。この図では、試験材の繊維方向中央部より切り出した試片（長さ 3cm）の木口断面に見られた内部割れの測定結果を示している。図 2－19によると、H で発生した内部割れ長さは G でのそれに比べて大きかった。また、内部割れ発生量の繊維方向の分布を試験条件ごとに図 2－20に示す。2.2.3.1 での結果と同様、内部割れの長さは、木口から 20cm の位置からは繊維方向にほぼ一定になる傾向が見られた。繊維方向 20～170cm の位置における内部割れの発生量を試験条件間で比較すると、制御した材温の高い H で内部割れが大きくなる傾向が見られた。これらの傾向は、図 2－19に示した試験材の長さ方向中央部より切り出した試片（長さ 3cm）での結果と概ね同様であった。本検討において、高温セット条件およびその後の乾湿球温度条件は G と H で一定であることから、乾燥後における内部割れの発生量の大小は高周波加熱によって調節される材温に影響されたと考えられた。材温 125℃を目標に高周波加熱された H では、材内部と表層との間に生じる蒸気圧差が G よりも大きかったと推測され、この間に材内部では急激な乾燥が進み、より大きな引張り応力が材内部に発生したと考えられる。

乾燥後における表面割れの発生状況を図 2－21に示す。G に発生した表面割れの長さが H でのそれに比べて僅かに大きかったが、両者の間に顕著な差は認められなかった。

以上のように、スギ材では、高周波加熱中の制御材温を 125℃に設定すると内部割れが多く発生するが、制御材温を 105℃に調節することにより、木口付近を除く繊維方向のほとんどの部位において内部割れの発生を抑制できることが示された。高周波加熱中の材温が乾燥後における表面割れの発生状況に及ぼす影響は小さいとみなされることから、今回の検討においては、高周波加熱中の適切な目標材温は 105℃（G）と判断された。

表 2-7 乾燥前、高温セット後および乾燥後の含水率 (G, H)

(単位: %)

	試験条件					
	G			H		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
乾燥前	79.1	110.1	167.1	72.3	110.2	129.9
高温セット後	19.1	44.5	88.9	20.9	43.3	66.0
乾燥後	8.7	17.6	34.1	6.7	13.2	23.5

注: 両試験条件とも、試験材数は18体

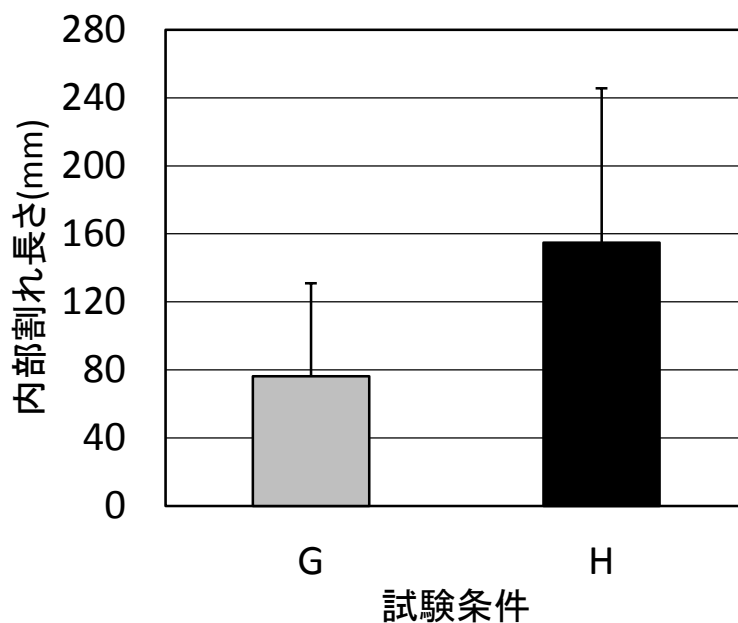


図 2-19 乾燥後における内部割れ長さ (G, H)
(試験材の繊維方向中央部での結果)

注: 各試験条件とも、試験材数は 18 体

注: エラーバーは標準偏差を示す

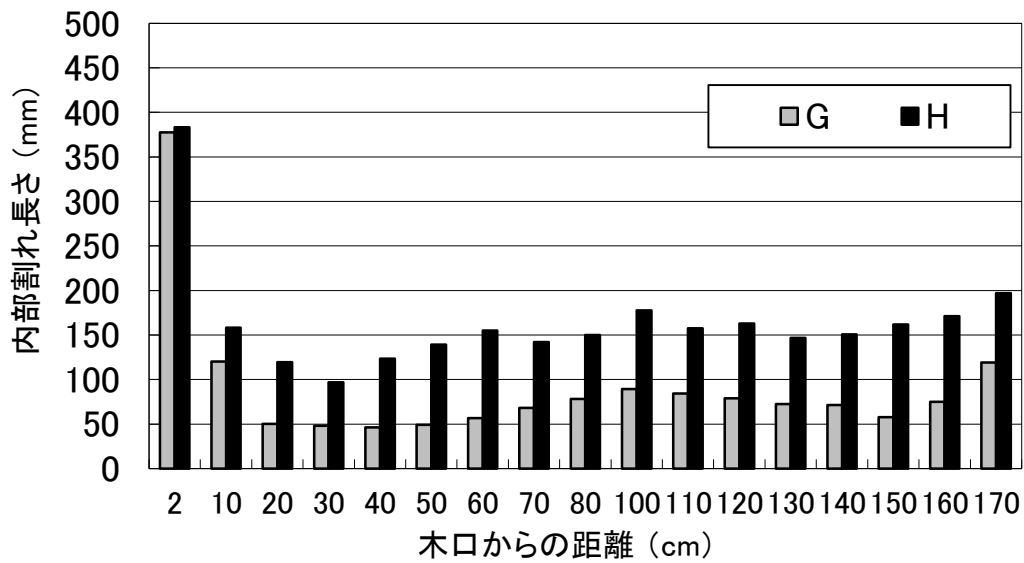


図 2 - 2 0 乾燥後における内部割れ長さ (G, H)
(試験材の繊維方向分布)

注：各試験条件とも、試験材数は 10 体

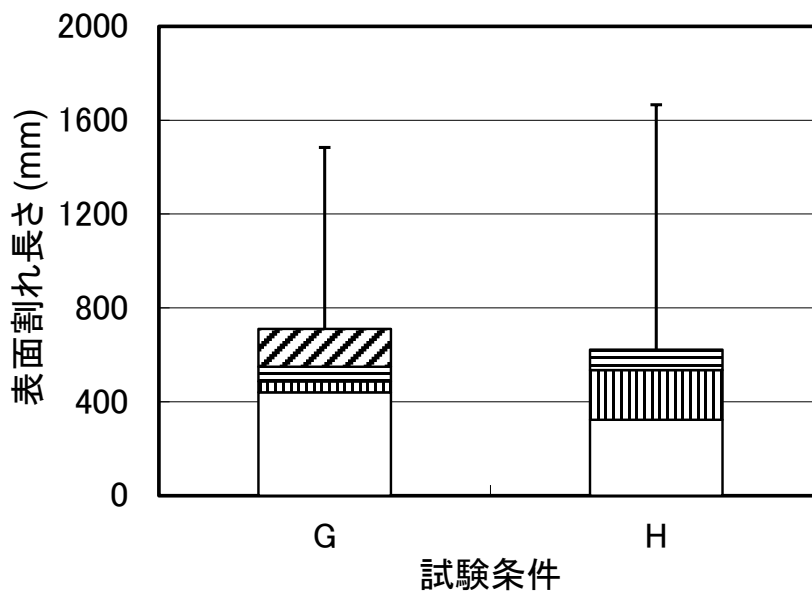


図 2 - 2 1 乾燥後における表面割れ長さ (G, H)

注：各試験条件とも、試験材数は 18 体
注：エラーバーは標準偏差を示す

3 まとめ

針葉樹構造用製材に対する効率的な乾燥方法の確立が求められているなか、スギ心持ち正角の乾燥における時間短縮と仕上がり品質の向上を目的として、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波加熱による内部加熱を併せて行う蒸気・高周波複合乾燥法に着目した。本章では、まず、高周波加熱による乾燥期間の短縮効果、高周波発振器内の整合回路改良による加熱効率の低減抑制効果、加熱の際の適正な高周波加熱出力といった、著者がこれまでに行ってきた蒸気・高周波複合乾燥に関する基礎的な研究結果を概説した。それらを要約すると以下のとおりである。

- (1) 高周波加熱による乾燥期間の短縮効果を調べたところ、蒸気・高周波複合乾燥は、従前から用いられている中温乾燥に比べて乾燥時間が大幅に短縮され、かつ、生材含水率のばらつきに左右されずに良好な仕上がり含水率状態が得られることが明らかとなった。
- (2) 高周波加熱時のさん積み形態が加熱効率に及ぼす影響を調べたところ、乾燥機内の空気を循環させる都合上、さん木を挿入することによって電極間にエアギャップを生じさせても、その状態においてインピーダンス整合させることのできる回路構造を付与することで高い加熱効率での高周波印加が可能と示唆された。
- (3) さん積み形態の違いや乾燥中の水分変化に伴う負荷インピーダンスの変化に対し、常時、電源インピーダンスと整合した状態が確保できるよう負荷回路のコイルを可変式に改良した高周波発振器を用いて、インピーダンス整合の有無による加熱効率および乾燥効率の違いを調べたところ、電極間にエアギャップが生じても、可変コイルおよびコンデンサを調節してインピーダンス整合すれば加熱効率の低下を防止できることが明らかとなった。また、常時インピーダンス整合した状態で乾燥を進めた場合、インピーダンス整合を完全には行わない一般機を想定した場合に比べて高周波加熱で消費される電力量を節減できることが示された。
- (4) スギ正角を加熱する際の適正な高周波加熱出力を調べたところ、高周波加熱出力が小さくなると加熱に要する時間および投入電力量は指数関数的に増大する場合が見られた。材温を 95℃まで加熱した今回の検討において、最低限確保すべき高周波加熱出力は、乾球温度が 60℃と 70℃の場合では約 14kW/m³、乾球温度が 80℃の場合は約 10kW/m³と判断された。

次に、近年、市場から求められている無背割りのスギ心持ち正角に対する内部割れの発生が少ない実務的な蒸気・高周波複合乾燥スケジュールを明らかにするため、本乾燥法における、高温セット時間、高温セット後の乾湿球温度条件および高周波加熱条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (5) 高温セット時間が内部割れの発生量に及ぼす影響を検討したところ、高温セット直後において、内部割れは既に発生しており、高温セット時間が長くなるほど多くの内部割れが発生した。また、乾燥後に見られた内部割れ長さの大小は、高温セット直後における内部割れの発生状況が反映され、それらが進展したものと考えられた。高温セット時間が長すぎると内部割れが多く発生したが、高温セット時間を調節することにより、木口付近を除く繊維方向のほとんどの部位において内部割れの発生を抑制できることが示された。高温セット時間が短すぎると材表面層と内層との応力転換が不十分で、表面割れが多く発生したことを併せて考えると、スギ材に対する内部割れの発生が少ない高温セット時間は 24 時間と判断された。
- (6) (5)に続いて、高温セット後の乾湿球温度条件および高周波加熱条件が内部割れの発生量に及ぼす影響を検討したところ、高温セット後の乾球温度を 110℃に設定すると内部割れが多く発生したが、乾球温度を 90℃に調節することにより、木口付近を除く繊維方向のほとんどの部位において内部割れの発生を抑制できることが示された。また、高周波加熱中の制御材温を 125℃に設定すると内部割れが多く発生したが、制御材温を 105℃に調節することにより、内部割れの発生を抑制できることが示された。この結果と、(5)に示した結果から、スギ心持ち無背割り正角に対する内部割れの少ない蒸気・高周波複合乾燥条件、すなわち、温度 120℃での高温セットを 24 時間行い、その後、90℃での乾燥を進める際に、高周波加熱によって材温を 105℃程度に調節するという条件を見出した。

第3章 蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の耐朽性および耐蟻性

1 蒸気・高周波複合乾燥を行った製材の耐朽性⁵⁰⁾

1.1 はじめに

第1章で述べたように、建築用製材品は乾燥材であることが求められており、製材工場の多くは人工乾燥機を導入して乾燥材を生産している。人工乾燥法には幾つかの種類があり、従前までは温度100℃未満の熱風を使用する中温乾燥が主流であった。しかし、第2章で述べたとおり、近年では、乾燥時間の短縮や経費削減を目的に、乾燥工程の一部で100℃以上の熱風を使用する高温セット乾燥や蒸気・高周波複合乾燥（以下、本検討では「複合乾燥」と称する）が普及している。これらの方法は、スギおよびヒノキの正角や平角の乾燥に積極的に適用されている。

一方で、100℃以上の温度域で人工乾燥を行うと、木材成分が変化し、木材の耐朽性に影響を及ぼすことが指摘されている。例えば、栗崎ら¹²⁾は、終始100℃以上の温度域で乾燥したスギ材に対してオオウズラタケによる室内強制腐朽試験を行ったところ、天然乾燥や中温乾燥を行ったものに比べて心材の質量減少率が大きく、乾燥処理によって耐朽性が低下したことを報告している。

複合乾燥を施した木材の耐朽性については研究例がない。しかし、複合乾燥は高周波加熱により材温を100℃程度に調節するため、木材の耐朽性に影響を及ぼす恐れがある。また、高温セット乾燥では100℃以上の熱風で木材を外部から加熱することに対し、複合乾燥では高周波加熱により木材内部からも加熱を行うため、材の表層や内部など、部位ごとの耐朽性が乾燥方法によって異なる可能性もある。

そこで、スギおよびヒノキ正角から採取した繊維方向に連続した試験体それぞれに高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥および複合乾燥を施し、乾燥方法の違いによる心材耐朽性の差異を材の部位別に調べた。

1.2 材料と方法

1.2.1 試験材の乾燥

奈良県内の製材工場より購入した生材状態のスギ正角8体（11.5×11.5×300cm、無背割り材、初期含水率46～129%）およびヒノキ正角8体（12.5×12.5×300cm、無背割り材、初期含水率35～39%）を使用した。

これらの材料1本あたりから繊維方向に750mmの試験材を4体ずつ採取し、それぞれを高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥および複合乾燥の4種の方法で乾燥した。乾燥スケジュールは実用化されている方法に準拠した。詳細は表3-1のとおりである。

なお、乾燥後における試験材の含水率は、いずれの乾燥方法においても概ね20%以下であった。

1. 2. 2 室内強制腐朽試験

4種の方法で乾燥した試験材に対して、JIS Z 2101:1994の17に準拠して室内強制腐朽試験を実施した。図3-1に示すように、それぞれの試験材の木口部、材中央層部および材中央部の心材部分から節や割れ等の欠点を含まない20×20×20mmの試験片をそれぞれ24体ずつ採取した。この中から12体ずつをオオウズラタケとカワラタケに対して供試した。腐朽期間は8週間とした。

なお、対照として20×20×20mmのブナ辺材を両菌に対して12体ずつ供試した。8週間後の平均質量減少率は、オオウズラタケに供試したもので32.9%（標準偏差3.83）、カワラタケに供試したもので41.5%（標準偏差5.47）であった。両菌の活性は良好であり、本試験が有効であることを確認した。

1. 3 結果と考察

1. 3. 1 スギ材の乾燥方法および材の部位による耐朽性の差

スギ材のオオウズラタケによる質量減少率を図3-2に示す。高温セット乾燥および複合乾燥を施した試験片の平均質量減少率は、いずれの部位においても、中温乾燥および天然乾燥のそれよりも大きな値であった。次に、乾燥方法および材の部位を因子とする二元配置の分散分析を行った結果、材の部位の水準間については差があるとはいえなかった（ $P > 0.01$ ）が、乾燥方法の水準間については差がみられた（ $P < 0.01$ ）。さらに、乾燥方法の水準間についてTukeyの方法により多重比較したところ、表3-2のとおりであった。すなわち、中温乾燥と天然乾燥の間には差があるとはいえなかった（ $P > 0.01$ ）が、高温セット乾燥および複合乾燥については中温乾燥および天然乾燥との間に差（ $P < 0.01$ ）がみられた。

スギ心材中の抗菌性成分は水や熱の影響を受けやすいとされており¹³⁾、乾燥処理により抽出成分が揮散・分解すると考えられている¹¹⁾。高温セット乾燥および複合乾燥を施した材の平均質量減少率が大きな値を示した主な原因としては、中温乾燥および天

表 3-1 各乾燥条件

(a) 高温セット乾燥

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	乾燥時間(時間)
1	98	98	12
2	120	90	24
3	110	80	60
計			96

(b) 中温乾燥

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	乾燥時間(時間)
1	85	85	48
2	85	82	24
3	85	81	72
4	85	78	48
5	85	76	60
計			252

(c) 天然乾燥

2002年11月中旬から2003年3月中旬までの約4ヶ月

年月	月平均気温(°C)	月平均湿度(%RH)
2002年11月	8.2	82.6
2002年12月	5.6	85.1
2003年1月	2.5	79.7
2003年2月	3.9	82.4
2003年3月	6.2	76.7

(d) 蒸気・高周波複合乾燥

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	乾燥時間(時間)	高周波加熱
1	80	80	12	
2	80	70	114	材温が90~100°Cとなるよう加熱 加熱時間は25時間
計			126	

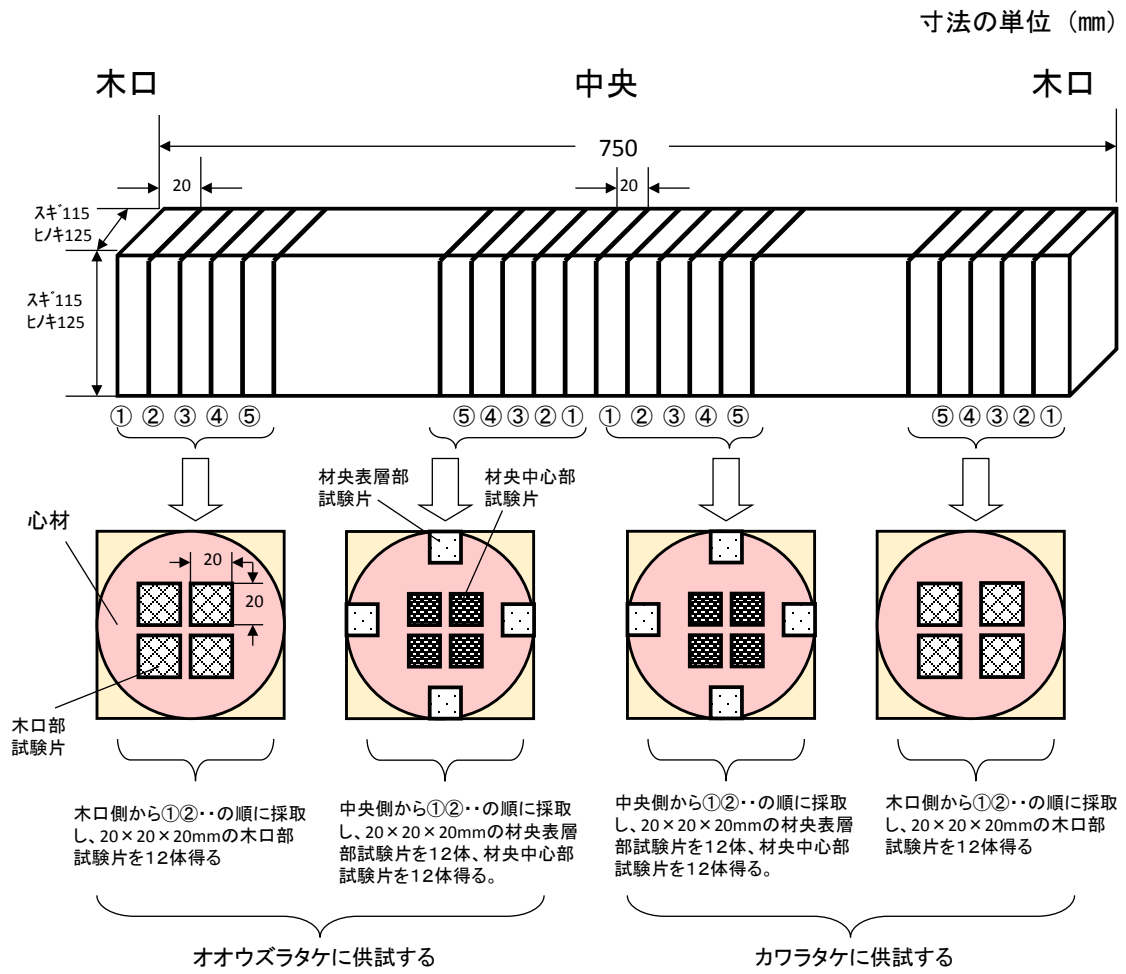


図 3 - 1 試験片の採取方法

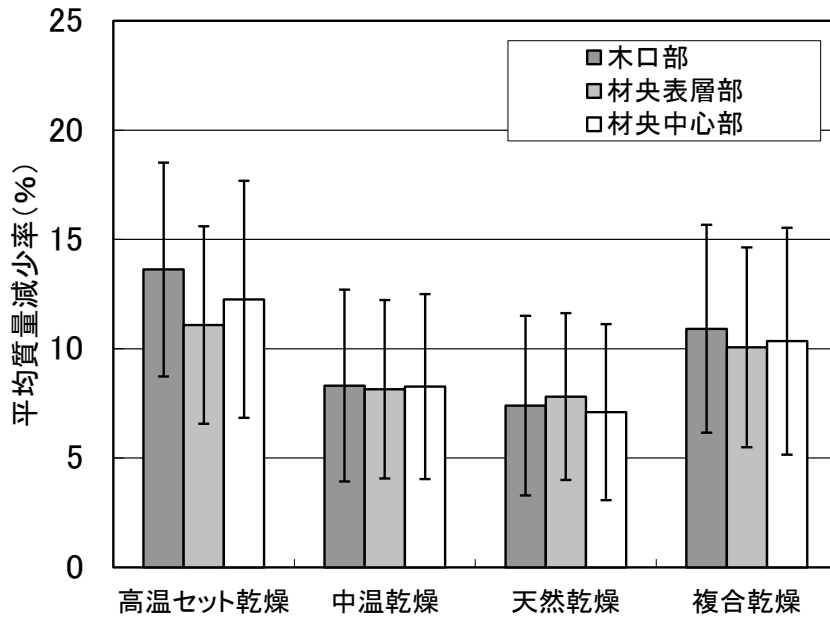


図3-2 スギ乾燥材のオオウズラタケによる平均質量減少率

注：エラーバーは標準偏差を示す

表3-2 乾燥方法間の平均質量減少率の差

(スギ材のオオウズラタケによる結果)

(単位：%)

	高温セット乾燥	中温乾燥	天然乾燥	複合乾燥
高温セット乾燥		4.1*	4.9*	1.9*
中温乾燥	—		0.8	2.2*
天然乾燥	—	—		3.0*
複合乾燥	—	—	—	

* : Tukey の方法により、危険率 1% で差がみられる

然乾燥に比べ乾燥温度が高く、抽出成分の揮散・分解が促進されたためと考えられる。

スギ材のカワラタケによる質量減少率を図3-3に示す。オオウズラタケによる質量減少率と同様に、乾燥方法および材の部位を因子とする二元配置の分散分析を行ったところ、乾燥方法の水準間に差があるとはいえなかった ($P > 0.01$)。しかし、材の部位の水準間には差がみられた ($P < 0.01$) ので、Tukey の方法により多重比較したところ、木口部および材中央層部と材中央部との間に差がみられた ($P < 0.01$)。

この原因は、木口部および材中央層部は切削面に近く、製材後から常に抗菌性成分が揮発し続けているとともに、これらの部位は乾燥処理による水分蒸発の通路となっているため、より多くの抗菌性成分がこの水分により揮散・分解したと考えられる。

1. 3. 2 ヒノキ材の乾燥方法および材の部位による耐朽性の差

ヒノキ材のオオウズラタケによる質量減少率を図3-4に示す。乾燥方法および材の部位を因子とする二元配置の分散分析を行ったところ、因子間で交互作用がみられたので、乾燥方法の水準間および材の部位の水準間で差があるかどうかは明らかではなかった。そこで、乾燥方法と材の部位の組み合わせによる相乗効果および相殺効果の存在を調べた。すなわち、乾燥方法と材の部位一対の組を水準とした一元配置の分散分析を行ったところ、水準間に差がみられた ($P < 0.01$)。Tukey の方法により多重比較すると、表3-3のとおり、いくつかの水準で差がみられたが、明らかな傾向は認められなかった。

ヒノキ材のカワラタケによる質量減少率を図3-5に示す。高温セット乾燥および中温乾燥を施した試験片の平均質量減少率は、天然乾燥および複合乾燥を施した試験片の平均質量減少率に比べやや大きな値であった。乾燥方法および材の部位を因子とする二元配置の分散分析を行った結果、乾燥方法の水準間に差がみられ ($P < 0.01$)、また、材の部位の水準間についても差がみられた ($P < 0.01$)。

乾燥方法の水準間について Tukey の方法により多重比較したところ、表3-4のとおりとなった。すなわち、複合乾燥と天然乾燥の間には差があるとはいえなかったが、高温セット乾燥および中温乾燥については複合乾燥および天然乾燥との間に差がみられた ($P < 0.01$)。

中温乾燥を施した材の平均質量減少率が複合乾燥を施した材のそれよりも大きな値を示した原因は、中温乾燥は加熱温度が複合乾燥よりも低いものの、乾燥時間が複合乾燥の2倍以上長いので、この間に多くの抗菌成分が揮散・分解し続けた可能性がある。

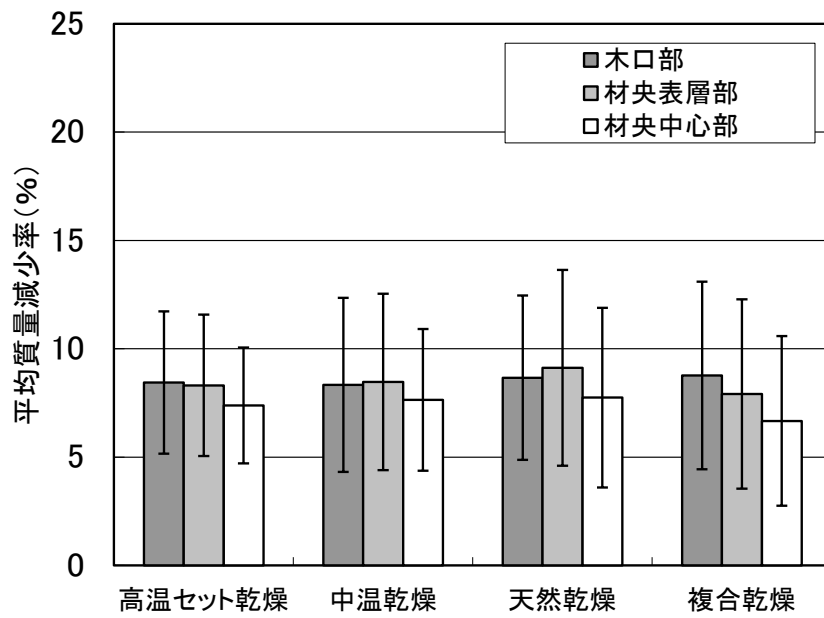


図3-3 スギ乾燥材のカワラタケによる平均質量減少率
注：エラーバーは標準偏差を示す

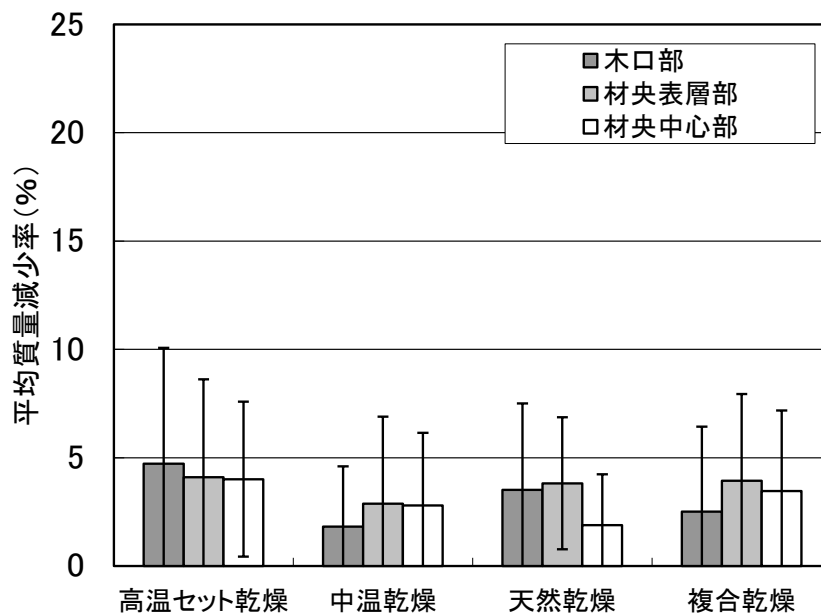


図3-4 ヒノキ乾燥材のオオウズラタケによる平均質量減少率

注：エラーバーは標準偏差を示す

表3-3 乾燥方法と材の部位を一对とする組間の平均質量減少率の差
(ヒノキ材のオオウズラタケによる結果)

(単位：%)

		高温セット乾燥			中温乾燥			天然乾燥			複合乾燥		
		木口部	材中央層部	材中央中心部	木口部	材中央層部	材中央中心部	木口部	材中央層部	材中央中心部	木口部	材中央層部	材中央中心部
高温セット乾燥	木口部	-	0.63	0.72	2.91*	1.86	1.93	1.21	0.91	2.84*	2.22*	0.79	1.27
	材中央層部	-	-	0.87	2.28*	1.22	1.30	0.58	0.28	2.21*	1.58	0.16	0.64
	材中央中心部	-	-	-	2.19*	1.14	1.21	0.49	0.19	2.12*	1.49	0.07	0.55
中温乾燥	木口部	-	-	-	-	-1.06	-0.98	-1.70	-2.00	-0.07	-0.70	-2.12*	-1.64
	材中央層部	-	-	-	-	-	0.76	-0.65	-0.95	0.98	0.36	-1.06	-0.58
	材中央中心部	-	-	-	-	-	-	-0.72	-1.02	0.91	0.28	-1.14	-0.66
天然乾燥	木口部	-	-	-	-	-	-	-	-0.30	1.63	1.00	-0.42	0.64
	材中央層部	-	-	-	-	-	-	-	-	1.93	1.30	-0.12	0.36
	材中央中心部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.63	-2.05	-1.57
複合乾燥	木口部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.42	-0.94
	材中央層部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.48
	材中央中心部	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* : Tukey の方法により、危険率 1%で差がみられる

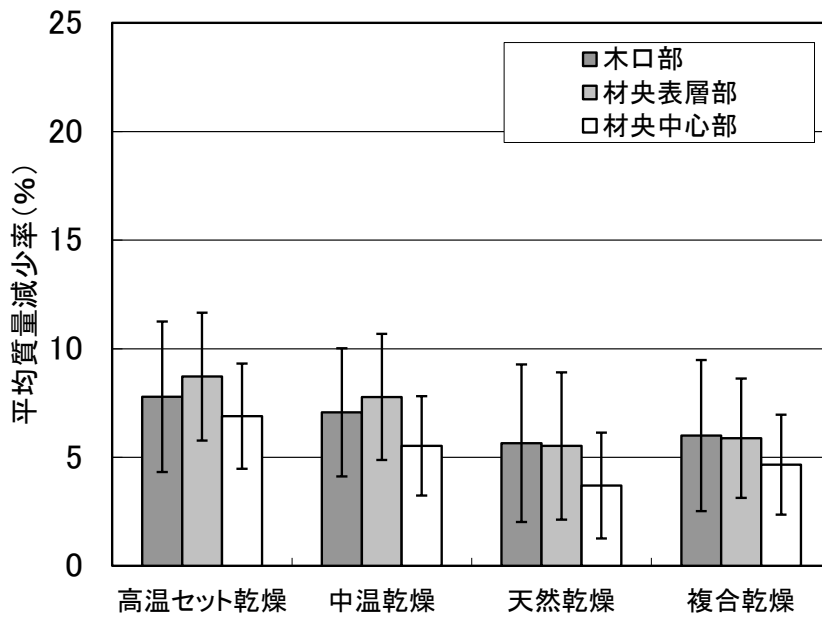


図3-5 ヒノキ乾燥材のカワラタケによる平均質量減少率
注：エラーバーは標準偏差を示す

表3-4 乾燥方法間の平均質量減少率の差
(ヒノキ材のカワラタケによる結果)

(単位: %)

	高温セット乾燥	中温乾燥	天然乾燥	複合乾燥
高温セット乾燥	-	1.0*	2.8*	2.3*
中温乾燥	-	-	1.8*	1.3*
天然乾燥	-	-	-	0.6
複合乾燥	-	-	-	-

* : Tukeyの方法により、危険率1%で差がみられる

しかし、前述したスギ材の室内強制腐朽試験ではこのような現象はみられなかった。加熱温度および加熱時間と各種抗菌成分の揮散・分解の関係については、今後、さらに検討が必要である。

また、材の部位の水準間についても Tukey の方法により多重比較したところ、木口部および材中央層部と材中央中心部との間に差がみられた ($P < 0.01$)。この結果はスギ材のカワラタケによる腐朽の場合と類似していた。

1. 3. 3 乾燥方法および材の部位の違いによるスギ、ヒノキ材の耐用年数の推定

1. 3. 1 および 1. 3. 2 で説明したように、オオウズラタケおよびカワラタケによる室内強制腐朽試験を実施したところ、乾燥方法の違いにより、また材の部位の違いにより平均質量減少率に差が認められる場合があった。そこで、平均質量減少率の差異が実用上問題か否かについて若干の考察を行う。

室内強制腐朽試験における平均質量減少率と野外杭試験における耐用年数との間には関数関係が認められている^{51,52)}。オオウズラタケにおける材の耐用年数と質量減少率との関係について、松岡ら⁵¹⁾が式 3-1 を、中村⁵²⁾が式 3-2 を提案している。また、カワラタケにおける材の耐用年数と質量減少率との関係について、松岡らが式 3-3 を提案している⁵¹⁾。

$$y = 5.57 - 0.09x \quad \dots \text{式 3-1}$$

$$y = \frac{a}{(x+b)} + c \quad \dots \text{式 3-2}$$

$$y = 5.74 - 0.11x \quad \dots \text{式 3-3}$$

ここで、 x は平均質量減少率 (%)、 y は耐用年数 (年)、 a 、 b 、 c は定数 ($a=7\sim 9$ 、 $b=-1\sim 1$ 、 $c=1.5\sim 2$) である。

以上の 3 式を用い、前述の分散分析において各因子で差がみられた水準について、耐用年数を推定した。ただし、松岡らや中村が実施した野外杭試験は $30\times 30\times 600\text{mm}$ の試験材を用いた結果であるので、推定された耐用年数はスギ、ヒノキ正角のそれを直接示すものではない。また、接地環境におかれた杭と非接地環境で用いる建築用製材品では活動する生物も劣化速度も異なる。しかし、室内強制腐朽試験の結果から耐用年数を

知る手段は少なく、式 3-1～式 3-3 による推定に頼らざるを得ないのが現状である。

各式で求められた耐用年数について、乾燥方法別に整理した結果を表 3-5 に、材の部位別に整理した結果を表 3-6 に示す。表 3-5 によると、スギ材の耐用年数について式 3-1 で求めた場合、乾燥方法の違いによる差は耐用年数全体の 10%未満であった。式 3-2 で求めた場合、推定された耐用年数に範囲があるので一概にはいえないが、高温セット乾燥を施した材が他の材に比べやや短い値となった。また、ヒノキ材の耐用年数について式 3-3 で求めた場合、乾燥方法の違いによる差は耐用年数全体の 5%程度であった。また、表 3-6 によると、スギ材、ヒノキ材とも、各部位間による耐用年数の違いはほとんど認められなかった。

以上から、スギ、ヒノキ材とも乾燥方法や材の部位が異なっても耐用年数に大差はみられないと判断された。

表 3-5 室内強制腐朽試験による試験材の平均質量減少率と推定した耐用年数
(乾燥方法別に整理した結果)

(a) スギ正角

乾燥方法	室内強制腐朽試験 (オオウズラタケ)による 平均質量減少率(%)	式3-1 ^{注2} により 求められる 耐用年数(年)	式3-2 ^{注3} により 求められる 耐用年数(年)
高温セット乾燥	12.3 ^{注1}	4.5	2.0~2.8
中温乾燥	8.2 ^{注1}	4.8	2.3~3.3
天然乾燥	7.4 ^{注1}	4.9	2.3~3.4
複合乾燥	10.4 ^{注1}	4.6	2.1~3.0

注1:各部位(木口部、材中央層部、材中央中心部)の平均値

注2:式3-1は本章1.3.3を参照

注3:式3-2は本章1.3.3を参照

(b) ヒノキ正角

乾燥方法	室内強制腐朽試験 (カワラタケ)による 平均質量減少率(%)	式3-3 ^{注5} により 求められる 耐用年数(年)
高温セット乾燥	7.8 ^{注4}	4.9
中温乾燥	6.8 ^{注4}	5.0
天然乾燥	5.0 ^{注4}	5.2
複合乾燥	5.5 ^{注4}	5.1

注4:各部位(木口部、材中央層部、材中央中心部)の平均値

注5:式3-3は本章1.3.3を参照

表 3-6 室内強制腐朽試験による試験材の平均質量減少率と推定した耐用年数
(材の部位別に整理した結果)

(a) スギ正角

材の部位	室内強制腐朽試験 (カワラタケ)による 平均質量減少率(%)	式3-3 ^{注2} により 求められる 耐用年数(年)
木口部	8.5 ^{注1}	4.8
材中央層部	8.5 ^{注1}	4.8
材中央中心部	7.4 ^{注1}	4.9

注1:各乾燥法(高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥、複合乾燥)の平均値

注2:式3-3は本章1. 3. 3を参照

(b) ヒノキ正角

材の部位	室内強制腐朽試験 (カワラタケ)による 平均質量減少率(%)	式3-3 ^{注4} により 求められる 耐用年数(年)
木口部	6.6 ^{注3}	5.0
材中央層部	7.0 ^{注3}	5.0
材中央中心部	5.2 ^{注3}	5.2

注3:各乾燥法(高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥、複合乾燥)の平均値

注4:式3-3は本章1. 3. 3を参照

2 蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の野外耐久性⁵³⁾

2. 1 はじめに

近年、心持ち無背割りの製材品を人工乾燥する方法として、乾燥工程の一部で 100℃以上の熱風を使用する高温セット乾燥や蒸気・高周波複合乾燥（以下、本検討では「複合乾燥」と称する）が普及しているなか、前節でも述べたとおり、100℃以上の温度域で人工乾燥を行うと、木材成分が変化し、木材の耐朽性に影響を及ぼすことが指摘されている。既往の研究において、被乾燥材の耐朽性や耐蟻性が低下したという報告^{12,54)}と、顕著な変化は認められなかったとする報告^{50,55,56)}がある。

しかしこれらの報告では、耐朽性や耐蟻性は室内試験で評価されており、野外試験の報告はみあたらない。本検討では、同一材料から複合乾燥材と天然乾燥材を調整し、それらから採取した試験体を用いて室内耐朽性試験、野外耐朽性試験および野外耐蟻性試験を行い、複合乾燥を行ったスギ心材の生物劣化抵抗性について考察した。

2. 2 材料と方法

2. 2. 1 試験材の乾燥

生材状態のスギ心持ち正角 4 体（奈良県産、13.5×13.5×400cm、無背割り材）それぞれを長さ方向の中央部で 2 分割し、一方の試験材には複合乾燥を、残る一方には天然乾燥を行った。複合乾燥は川上産吉野材販売促進協同組合（通称「川上さぷり」、奈良県吉野郡川上村）にて、表 3-7 に示すスケジュールで行った。乾燥後の含水率は 20% 以下と推定された。また、天然乾燥は川上サプリー内の屋根つきの屋外に棧積みして行った。乾燥期間は 2007 年 9 月～11 月の約 3 か月間であった。

2. 2. 2 室内耐朽性試験

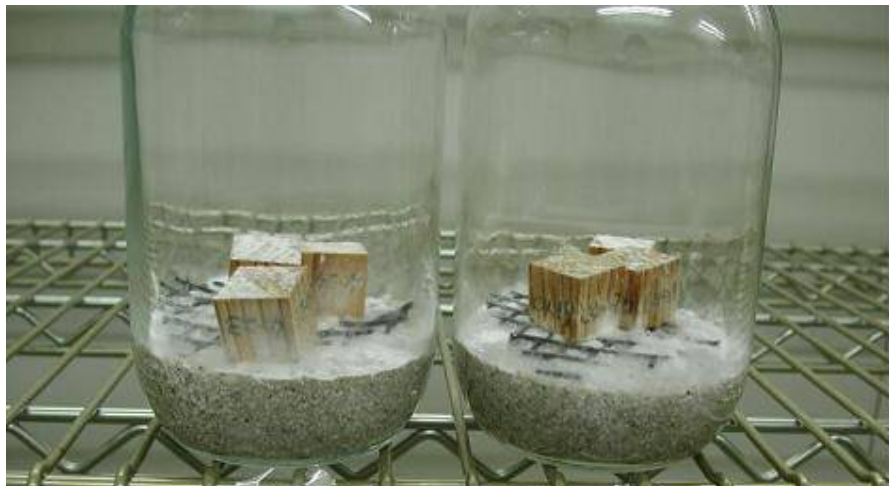
JIS Z 2101:2009 の 26 に準拠して室内耐朽性試験を行った。すなわち、それぞれの試験材から心材部で割れや節等の欠点を含まない 20×20×20mm の試験片を 24 体ずつ採取した。この中から、12 体ずつをオオウズラタケとカワラタケに対して供試した。試験の様子を図 3-6 に示した。腐朽試験期間は 60 日とし、腐朽による質量減少率を求めた。なお対照として、中温乾燥を行ったスギ辺材も両菌に対して 12 体ずつ供試した。

2. 2. 3 野外耐朽性試験

室内耐朽性試験では、試験片は培養瓶内で単一の担子菌により分解されるのに対し

表 3-7 複合乾燥のスケジュール

ステップ	乾球温度(°C)	湿球温度(°C)	時間(時間)	備考
1	95	95	10	・蒸煮
2	120	90	20	・高温セット
3	85	80	約120	・材温が90~105°Cとなるよう高周波の印加、停止を調節



左：複合乾燥を行ったスギ心材 右：天然乾燥を行ったスギ心材

図 3-6 室内耐朽性試験の様子（供試菌：カワラタケ）

て、自然界ではそこに生息する多種類の生物による攻撃を受ける。そこで本検討では JIS K 1571:2010 の 5.2.3 に準拠して、野外耐朽性試験も実施した。すなわち、それぞれの試験材から心材部で割れや節等の欠点を含まない 30×30×600mm の試験体を 11～18 本ずつ採取した。2008 年 1 月に奈良県森林技術センター明日香実験林（奈良県高市郡明日香村）にて、図 3-7 に示すように、試験体を半分の長さまで地中に埋め込み、試験を開始した。この試験地ではヤマトシロアリも生息している。試験開始後、1 年に 2 回引き抜き、表 3-8 に示すヤマトシロアリによる食害を加味した評価基準⁵²⁾に従って、試験体の頭部、地際部および底部で被害度の判定を行った。なお対照として、中温乾燥を行ったスギ辺材 15 体についても同様に実施した。

2. 2. 4 野外耐蟻性試験

本検討では複合乾燥に伴う耐蟻性の変化は野外試験で評価した。すなわち、それぞれの試験材から心材部で割れや節等の欠点を含まない 30×30×350mm で一端を約 50mm 削って杭状とした試験体を 7 本ずつ採取した。対照として、中温乾燥を行ったスギ辺材 7 体についてもスギ心材と同じ形状に加工した。2007 年 12 月にイエシロアリ生息地（和歌山県日高郡美浜町）において、図 3-8 に示すように、それぞれの試験体を近接した位置に埋め込み、その周囲に誘蟻のためのスプルーヌ杭を設置して試験を開始した。1 年および 2 年経過時に、JIS K 1571:2010 の 5.3.2 に準拠して、表 3-9 に示す評価基準に従って、食害度の判定を行った。

2. 3 結果と考察

2. 3. 1 室内耐朽性試験

60 日間の腐朽試験終了時点で、オオウズラタケは試験片の全表面を厚く被覆した。一方カワラタケは、図 3-6 にみられるように、天然乾燥した試験片よりも複合乾燥した試験片をより厚く被覆する傾向がみられた。両菌による質量減少率を表 3-10 に示す。同一個体ごとに比較すると、オオウズラタケに供試した場合、複合乾燥した試験片は、天然乾燥した試験片に比べ腐朽による質量減少率が有意に大きかった ($P < 0.05$)。この傾向は、4 体の正角材全てにおいて確認された。また、カワラタケに供試した場合、2 体の正角材について同様の結果が確認された。一般に、針葉樹材に対しては褐色腐朽菌による被害が顕著であることから⁵⁷⁾、褐色腐朽菌であるオオウズラタケによる結果を重視すると、複合乾燥によりスギ心材の耐朽性は低下したと判断された。



図 3 - 7 野外耐朽性試験の様子
(奈良県高市郡明日香村)

表 3 - 8 野外耐朽性試験における被害度の調査基準⁵¹⁾

被害度	肉眼観察される腐朽又はヤマトシロアリの被害
0	健全
1	全面的に微弱な、あるいは部分的に軽度の被害
2	かなり広範囲な軽度、あるいは極めて局部的に激しい被害
3	2の状態が、さらに深部へ達する激しい被害
4	全面的に激しい深部へ達する被害
5	材が崩壊する被害



図 3 - 8 野外耐蟻性試験の様子
(和歌山県日高郡美浜町)

注：斜線入りの矢印は試験体、白矢印は誘蟻杭

表 3 - 9 野外耐蟻性試験における食害度の調査基準

食害度	観察状態
0	健全
10	表面の一部に浅い食害
30	表面の一部に内部までの食害
50	内部の広い範囲に食害
100	食害によって形が崩れる

表 3-10 室内耐朽性試験による質量減少率

(a) オオウズラタケ (単位: %)

試験体NO.	スギ心材						対照(スギ辺材)		
	複合乾燥			天然乾燥			中温乾燥		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
正角材 1	5.0	10.7 *	19.0	0.0	0.0	0.1	31.4	42.0	51.9
正角材 2	7.4	26.5 *	36.8	0.0	8.9	19.1			
正角材 3	15.1	22.1 *	33.4	5.1	12.7	25.2			
正角材 4	3.0	16.9 *	25.8	0.0	0.3	4.4			

(b) カワラタケ (単位: %)

試験体NO.	スギ心材						対照(スギ辺材)		
	複合乾燥			天然乾燥			中温乾燥		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大
正角材 1	0.9	2.9 *	6.3	0.0	0.0	0.4	11.0	16.6	23.5
正角材 2	4.9	9.7 n.s	14.6	0.3	6.9	11.0			
正角材 3	5.4	10.5 n.s	16.4	8.7	13.8	20.4			
正角材 4	9.2	11.3 *	15.0	0.5	6.7	10.6			

* 天然乾燥材に対して有意確率5%で差があることを示す。

n.s. 天然乾燥材に対して有意確率5%で差があるとはいえないことを示す。

注: 検定方法は対応のないT検定を用いた。

2. 3. 2 野外耐朽性試験

いずれの試験体についても、観察した3部位の中で最も被害の大きかったのは地際部で、被害原因は腐朽とヤマトシロアリによる食害であった。そこで試験体の暴露期間と地際部の平均被害度との関係を図3-9に示す。JIS K 1571 : 2010 の5.2.3に準拠して平均被害度が2.5となることを耐用年数と定義し、それぞれのグラフから耐用年数を決定した。具体的には、耐用年数を迎えたと思われる暴露期間前後の3~4回の調査結果から、最小二乗法により暴露期間と平均被害度との関係を与える一次式を求め、この式より平均被害度が2.5となる暴露期間を算出した。耐用年数の算出に用いた近似式は、図3-9において、一次直線(破線)の形で示した。図3-9によると、複合乾燥材の耐用年数と天然乾燥材のそれとの間に明らかな差がみられたのは正角材1のみであった。すなわち、正角材1では、複合乾燥材の耐用年数は2.3年であり、天然乾燥材の3.3年に比べ短かった。これに対し、正角材2~4については、両者の耐用年数に明らかな差は認められず、また、正角材2~4について、天然乾燥材の耐用年数は1.9~2.3年と判定されたが、それらは、正角材1についての複合乾燥材の耐用年数2.3年に比べ同等もしくは短かった。このように、野外耐朽性試験での耐用年数は、乾燥方法よりも個体差に影響される場合があった。

さらに、室内耐朽性試験での質量減少率と野外耐朽性試験での耐用年数との関係を図3-10に示す。オオウズラタケによる結果の場合、天然乾燥材のうち質量減少がほとんど認められず耐用年数が3.3年と判定された個体(正角材1)を除くと、天然乾燥材、複合乾燥材とも、質量減少率の大小に関わらず耐用年数は2年前後であった。ここで、同じ試験地で行われた既往の研究結果と今回の結果を比較する。中村⁵²⁾は、国産材5樹種、北米産材9樹種および南洋・北洋材等9樹種を用い、今回著者らが行った検討と同様の方法で室内および野外耐朽性試験を行い、室内耐朽性試験での質量減少率と野外耐朽性試験での耐用年数との関係を調べている。それによると、辺材や、一般に耐朽性が劣るとされている樹種の心材は、オオウズラタケによる質量減少率が10~30%の範囲にあり、それらの耐用年数は2~3年の範囲にある。今回得られた結果は、この中村の報告とほぼ一致している。このことから、室内耐朽性試験で質量減少がほとんど認められないような、比較的耐朽性の高い個体については、複合乾燥することによって耐用年数がやや短くなる場合があるものと考えられる。一方で、耐朽性が中程度の個体については、乾燥方法の違いによって質量減少率に違いが認められた場合であっても野外試

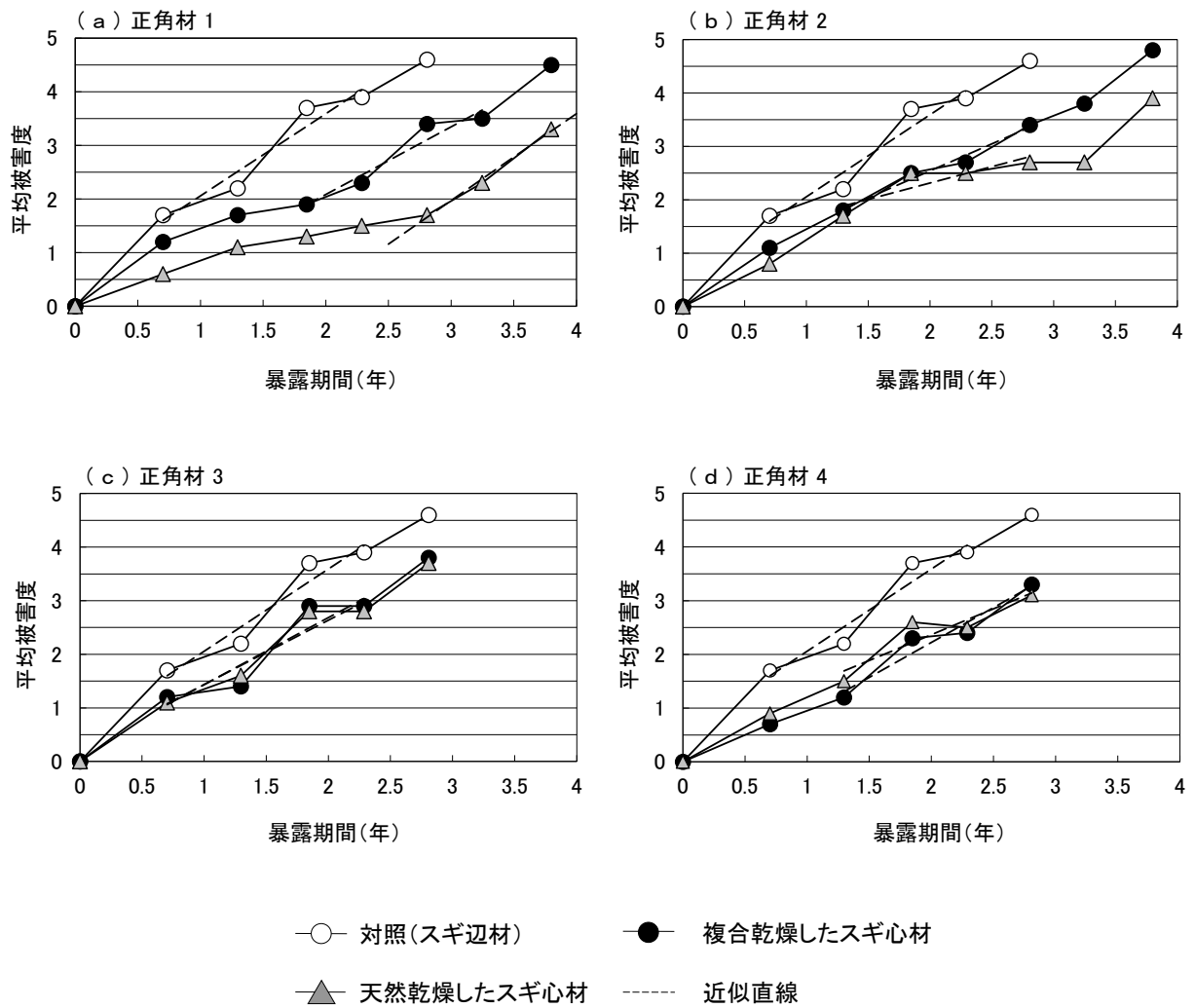
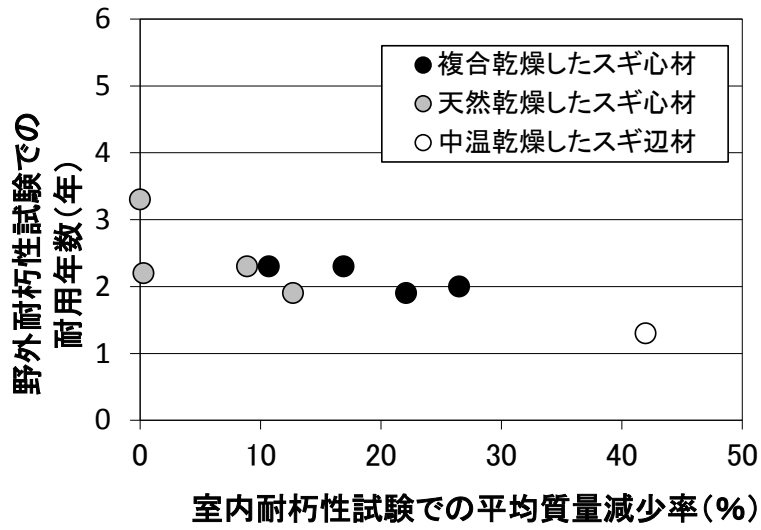


図 3-9 野外耐朽性試験体の暴露期間と平均被害度との関係
(試験体の地際部での結果)

(a) オオウズラタケ



(b) カワラタケ

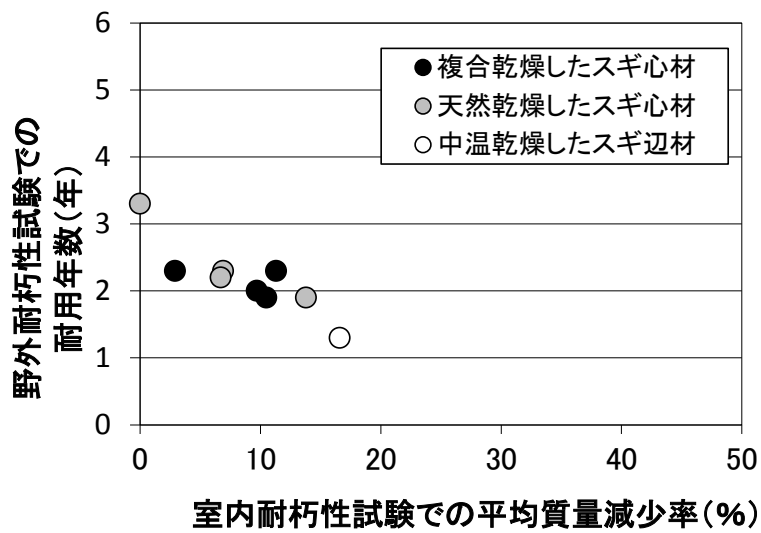


図3-10 室内耐朽性試験での平均質量減少率と
野外耐朽性試験での耐用年数との関係

験から得られる耐用年数に大きな差は生じないと考えられた。この傾向は、カワラタケによる結果についても同様と判断した。

2. 3. 3 野外耐蟻性試験

設置から2年経過した試験体の様子を図3-11に示す。いずれの試験体にも地際部あるいは底部にシロアリによる食害がみられた。さらに一部の試験体には腐朽も観察された。スギ辺材および誘蟻のためのスプルーす杭の被害は著しく、2年経過時に平均食害度が60以上となった。スギ心材については、表3-11に示したように、複合乾燥材、天然乾燥材ともに2年経過時の平均食害度は30~50であった。また、同じ年数が経過した両者の食害度を比較すると、明らかな差は認められなかった。



図3-11 野外耐蟻性試験2年経過後の試験体の様子

- (a) 複合乾燥したスギ心材（正角材3）
- (b) 天然乾燥したスギ心材（正角材3）
- (c) 中温乾燥したスギ辺材
- (d) 誘蟻のためのスプルー材

表 3 - 1 1 野外耐蟻性試験による食害度

(a) 複合乾燥したスギ心材

試験体No.	食害度					
	1年目			2年目		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
正角材 1	0	10.0 n.s	30	30	48.8 n.s	100
正角材 2	0	12.9 n.s	30	30	43.3 n.s	50
正角材 3	0	6.3 n.s	10	30	41.4 n.s	50
正角材 4	0	1.4 n.s	10	10	30.0 n.s	50

n.s. 同じ年数経過した天然乾燥材に対して、有意確率5%で差があるとはいえないことを示す。

注: 検定方法は Mann-WhitneyのU検定を用いた。

(b) 天然乾燥したスギ心材

試験体No.	食害度					
	1年目			2年目		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
正角材 1	0	3.8	10	30	32.9	50
正角材 2	0	8.6	30	30	44.0	50
正角材 3	0	4.4	30	30	40.0	50
正角材 4	0	6.7	30	30	40.0	50

3 まとめ

蒸気・高周波複合乾燥による加熱（熱処理）が製材の耐朽性および耐蟻性に及ぼす影響を明らかにするため、スギおよびヒノキ正角から採取した繊維方向に連続した試験体それぞれに高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥および蒸気・高周波複合乾燥を施し、乾燥方法の違いによる心材耐朽性の差異を材の部位別に調べた。また、同一材料から蒸気・高周波複合乾燥材と天然乾燥材を調整し、それらから採取した試験体を用いて野外耐朽性試験および野外耐蟻性試験を行い、蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の生物劣化抵抗性について考察した。それらの検討から以下の結論を得た。

- (1) 高温セット乾燥、中温乾燥、天然乾燥および蒸気・高周波複合乾燥を施したスギおよびヒノキ正角の心材部分について、乾燥方法の違いによる耐朽性を材の部位別に調べたところ、オオウズラタケおよびカワラタケによる室内強制腐朽試験の結果、乾燥方法の違いより、また材の部位の違いにより質量減少率に差が認められるものがあった。相対的に高い質量減少率がみられたのは、乾燥温度が高い場合、乾燥（加熱）時間が長い場合、切削面に近い部位の場合で、その原因としては、木材中の抗菌成分の揮散・分解が推測された。
- (2) (1)の室内強制腐朽試験の結果をもとに野外界地条件での杭材の耐用年数を推定したところ、スギ材、ヒノキ材とも乾燥方法の違いによる大幅な低下はみられず、材の部位の違いによる耐用年数の違いもほとんど認められなかった。スギ、ヒノキ正角などの建築用製材品が野外界地条件ほど過酷な環境下で使用される場合はほとんどないことを考えると、スギ、ヒノキ建築用製材品を乾燥する際、高温セット乾燥や蒸気・高周波複合乾燥など、比較的高温域の人工乾燥法を用いても、大幅な耐朽性の低下を危惧する必要はないと判断した。
- (3) 天然乾燥および蒸気・高周波複合乾燥を施したスギ正角の心材部分に対し、室内耐朽性試験、野外耐朽性試験および野外耐蟻性試験を行い、蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の生物劣化抵抗性について調べたところ、室内耐朽性試験において、蒸気・高周波複合乾燥によるスギ心材の耐朽性の低下が認められた。これに対し野外耐朽性試験においては、蒸気・高周波複合乾燥した材の耐用年数が天然乾燥した材のそれよりも明らかに低かったのは4個体中で1個体だけであった。また野外耐蟻性試験においては、蒸気・高周波複合乾燥した材と天然乾燥した材との間に

耐久性に関する明らかな差は認められなかった。

なお、今回用いたスギ心材の野外耐朽性試験での耐用年数は、スギ辺材のそれと比べると長いものの、耐久性が高いとはいえない。接地環境や高湿度雰囲気等、腐朽や蟻害が生じるおそれのある場所でスギ材を長期間使用する場合には乾燥方法に関わらず木材保存剤による処理等で耐久性を高める措置が必要となる。

第4章 蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材の薬剤浸潤

1 高温セット法で乾燥したスギ正角への薬剤浸潤と注入後の割れ⁵⁸⁾

1. 1 はじめに

スギ材は辺材の耐朽性が低く、心材についても中程度⁵⁷⁾であるため、スギ材を建物の土台や外構材として長期間使用する場合には、乾燥処理および薬剤の加圧注入による保存処理が必要となる。また、心材の薬剤浸透性は「やや良好」に区分されることが多いが⁵⁷⁾、なかには浸透性がかなり悪い材もみられる。酒井ら⁵⁹⁾は、スギの大断面材（木口断面16.5×16.5cm）について、薬剤の加圧注入前に温度80℃での中温乾燥を行い、含水率を20%程度にまで低下させても、インサイジングを実施しない場合には製材のJAS²⁸⁾のK3区分で定められた薬剤浸潤度の基準を満たすのは全体の2/3～1/2であったことを報告している。また、薬剤注入前に、中温乾燥に加えてインサイジングを行うと、注入量や浸潤度が向上し、供試したすべての材料が製材のJASのK3区分に定められた浸潤度の基準を満たしたことも報告されている⁵⁹⁾。

一方、これまでも触れたように、スギ材には心材の初期含水率が高いものがあり⁴⁾、これを天然乾燥や中温乾燥によって所定の含水率に調節するには、長い乾燥時間が必要となる^{5,6)}。このため、近年では、乾燥時間が短く、かつ、無背割り材であっても表面割れが発生しにくい高温セット乾燥や蒸気・高周波複合乾燥法（以下、本検討では「複合乾燥」と称する）をスギ材に適用させる場合が増えている。

しかし、高温セット乾燥や複合乾燥を行った材料に薬剤の加圧注入を行うと、水が含まれることにもない、材の表層に形成された引張セットが開放され、寸法変化等が生じることが懸念される。そこで本検討では、薬剤注入前の乾燥工程で高温セット乾燥や複合乾燥を実施した場合の薬剤注入量や薬剤浸潤度、また、注入後の工程で発生する寸法変化や表面割れについて、主に中温乾燥を実施した場合と対比させて報告する。

1. 2 材料と方法

1. 2. 1 材料

奈良県吉野郡十津川村産のスギ心持ち正角12体（木口断面は16.5×16.5cmで仕上がり時に15.0×15.0cmを想定、長さ400cm）を使用した。スギ材の辺材と心材を比べると、一般に、心材の方が乾燥も薬剤注入も困難である。得られる結果を辺心材の比率に

かわらず、全てのスギ材に適用できるように、今回は、ほとんどの部位が心材からなる正角を使用した。

注入薬剤は、銅・アゾール化合物系木材保存剤（以下、CUAZ と称する。）を使用した。薬剤は水道水で希釈して、製材の JAS で規定する K3 用の作業液とした。

1. 2. 2 方法

1. 2. 2. 1 試験体の調製

スギ心持ち正角 12 体のそれぞれから、図 4-1 に示すように、繊維方向 750mm の試験体を 5 体ずつ採取した。併せて、図 4-1 に示す a~f の位置で繊維方向 20mm の試片を採取し、全乾法によりこれら試片の含水率を把握した。試験体の初期含水率は、隣接する 2 つの試片の含水率の平均値より 51~229% と推定された。また、試験体の全乾質量は、初期含水率と質量より推定した。試験体の採取後、両木口面はエポキシ樹脂系接着剤で直ちにシール処理した。これは、試験体の木口面を封じることで木口面からの乾燥や薬剤侵入を避け、実大材において乾燥と薬剤注入が困難となる、木口面の影響をほとんど受けない部位を想定した試験を行うためである。

1. 2. 2. 2 薬剤注入前乾燥

薬剤注入前の乾燥方法が薬剤の注入量および浸潤度に及ぼす影響を調べるため、同一の正角から採取した 5 試験体に対し、異なる乾燥方法を用いて含水率が 20% 以下となるまで乾燥した。今回用いた乾燥方法は、天然乾燥 (LT)、中温乾燥 (MT)、高温セット乾燥 (HT) および複合乾燥 (HF) である。それぞれの乾燥条件を表 4-1 に示した。また、長さ 400cm の正角から各乾燥法の試験体を 1 体ずつ採取するため、図 4-1 に示すような試験体の割り付けを行った。このとき、天然乾燥および中温乾燥を行う試験体については表面割れが生じないように、あらかじめ幅約 3mm、深さ 82mm の背割りを施した（背割りを施した試験条件には「-K」を付けて示す）。高温セット乾燥および複合乾燥については、一般的に実施されているように無背割りの状態としたが、試験体に背割りを施すと背割りから薬剤が試験体内部に浸潤し注入量が高くなることも予想されたため、背割りの有無が注入量に及ぼす影響を確認し、乾燥方法による注入量の差異を正確に把握するため、高温セット乾燥を行う試験体については無背割り材とともに背割りを施した試験体も用いた（以下、無背割り材の試験体を用いた高温セット乾燥による試験条件を「HT」、背割りを施した試験体を用いた高温セット乾燥による試験条件

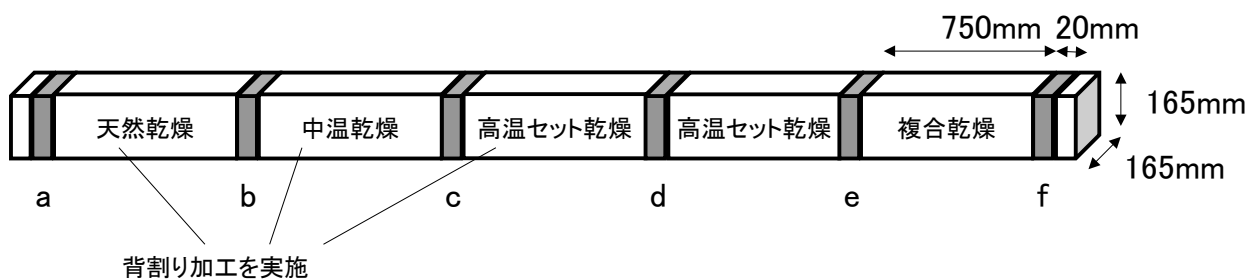


図 4 - 1 試験体の採取方法

各乾燥条件は表 4 - 1 を参照

表 4 - 1 乾燥条件

乾燥方法	試験体 供試体数 (体)	試験体 背割りの 有無	試験条件 の略称	蒸煮 (D. B. T. (°C)/ W. B. T (°C)) (時間 (時間))	→	高温セット (D. B. T. (°C)/ W. B. T (°C)) (時間 (時間))	→	乾燥 (D. B. T. (°C)/ W. B. T (°C)) (時間 (時間))	備考
天然乾燥	12	あり	LT-K	—		—		—	乾燥期間は2009年 11月より約11ヵ月間
中温乾燥	12	あり	MT-K	80/80 12	→	なし	→	80/77~70 540	
高温セット 乾燥	12	あり	HT-K	90/90 12	→	120/90 24	→	90/60 195	
高温セット 乾燥	12	なし	HT	90/90 12	→	120/90 24	→	90/60 195	
複合乾燥	12	なし	HF	90/90 12	→	120/90 24	→	90/60 149	「乾燥」ステップに 高周波加熱を実施

D. B. T. : 乾球温度、W. B. T. : 湿球温度

を「HT-K」と称する)。

乾燥操作中、適宜、試験体の質量を測定した。このときの質量と 1.2.2.1 で推定した全乾質量から試験体の含水率を算出し、推定含水率が 20%以下となった時点で乾燥操作を終了した。なお、試験体の質量を測定する際、LT-K 以外の条件では、試験体を一旦乾燥機内から取り出した。表面割れの発生など、試験体を乾燥機から取り出すことによる影響を可能な限り防ぐため、質量の測定を終了した試験体は直ちに乾燥機内に戻した。同様の理由により、蒸煮中および高温セット処理中の質量の測定は行わなかった。

乾燥後、手押しかんな盤および自動一面かんな盤を用いて試験体の木口断面を 15.4×15.4cm に調製した。この寸法は、薬剤注入とその後の乾燥が終了し、製品として完成させる際に若干の表面切削により木口断面を 15.0×15.0cm に仕上げることを想定している。

1. 2. 2. 3 インサイジング

スギ心持ち正角に対して薬剤の加圧注入による保存処理を行うにあたり、製材の JAS に定める薬剤浸潤度の基準を安定的に満たすためには、インサイジングの実施が有効である⁵⁹⁾。そこで本報においても、注入前乾燥後（寸法調製済）の試験体に対し、刃傷の深さが 1cm、長さが約 1.5cm、密度が 4000 個/m²のインサイジングを行った。

1. 2. 2. 4 木材保存剤の注入

インサイジングを行った試験体の質量、繊維方向長さおよび 4 材面における繊維と直角方向の寸法（以下、繊維と直角方向の寸法を、単に、寸法と称する。また、このときの寸法を「注入前の寸法」と称する。）を測定した後、CUAZ 作業液を加圧注入した。注入スケジュールは、試験体を作業液に浸漬させた状態で、50hPa の減圧を 30 分間行い、引き続き 1.3MPa の加圧を 2 時間行った。注入後、試験体は作業液から取り上げ、滴下が収まるまで約 1 時間静置させた後、質量を測定した。注入量（ S ）は、式 4-1 により算出した。

$$S = \frac{W_a - W_b}{V_b} \quad \dots \text{式 4-1}$$

ここで、 S は薬剤注入量 (kg/m³)、 W_a は薬剤注入後の質量 (kg)、 W_b は薬剤注入前の質量 (kg)、 V_b は薬剤注入前の材積 (m³) である。

1. 2. 2. 5 薬剤注入後乾燥

いったん乾燥した後に薬剤が注入された正角に対し、注入された薬剤の変質を防ぎながら、溶媒の水を除去する条件を把握するため、本報では2種類の中温乾燥スケジュールを用いて薬剤注入後の試験体を乾燥した。すなわち、1条件あたりの12試験体のうち、6体については排気口を完全に開いた送風乾燥器内で乾燥した。送風乾燥器内の温度は60℃、相対湿度は18%であった。残りの6体については、温度60℃、相対湿度85%に調節した恒温恒湿器内で乾燥した。なお、前者の乾燥スケジュールは、低湿度の雰囲気下で溶媒の水を速やかに除去することを意図したものである。また、後者の乾燥スケジュールは、スギ正角に対する一般的な中温乾燥スケジュールを参考に、比較的高湿度の雰囲気下で溶媒の水を緩やかに除去することを意図したものである。いずれの乾燥スケジュールとも、乾燥期間は130時間とした。

1. 2. 2. 6 最終寸法と薬剤浸潤度の測定

木材保存剤を注入後、2条件で乾燥した試験体について、温度20℃、相対湿度65%に調節した室内で含水率15%を目標に養生を行った。約6ヵ月が経過し、質量が平衡に達したことを確認した後、4材面の寸法（以下、この寸法を「養生後の寸法」と称する。）を測定した。この寸法と「注入前の寸法」から、寸法変化率（注入前と養生後との違い）を式4-2、式4-3および式4-4のように算出した。

①背割り材（LT-K,MT-K,HT-K）に対する寸法変化率の算出

$$D_{c0} = \frac{d_{c0} - d_{b0}}{d_{b0}} \times 100 \quad \dots \text{式4-2}$$

$$D_c = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{d_{ci} - d_{bi}}{d_{bi}} \times 100 \quad \dots \text{式4-3}$$

②無背割り材（HT,HF）に対する寸法変化率の算出

$$D_c = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \frac{d_{ci} - d_{bi}}{d_{bi}} \times 100 \quad \dots \text{式4-4}$$

ここで、 D_{c0} は背割り面の寸法変化率(%)、 d_{c0} は養生後における背割り面の寸法(mm)、 d_{b0} は注入前における背割り面の寸法(mm)、 D_c は背割りのない面の寸法変化率(%)、

$d_{c1} \sim d_{c4}$ は養生後における背割りのない面の寸法 (mm)、 $d_{b1} \sim d_{b4}$ は注入前における背割りのない面の寸法 (mm) である。

このとき、試験体に発生した割れの状況をあわせて観察した。ひきつづき、両端 50mm 以内の部位と節のある部位を避け、繊維方向に 20mm の試片を 1 体ずつ採取した。この試片の木口面にクロムアズロール S 溶液を噴霧し、薬剤浸潤部分を呈色させた²⁸⁾。製材の JAS において、K3 区分では、辺材部分の浸潤度が 80%以上で、かつ、材面から深さ 10mm まで、すなわち、横断面の外周部 0~10mm の範囲における心材部分の浸潤度が 80%以上であることを基準としている²⁸⁾。今回使用した材料はほとんどが心材部分であったため、本報では、浸潤度を、横断面の外周部 0~10mm の範囲における薬剤浸潤で表すこととし、式 4-5 により算出した。

$$P = \frac{A_c}{A} \times 100 \quad \dots \text{式 4-5}$$

ここで、 P は浸潤度 (%)、 A は最終寸法 (150×150mm) から 10mm 内側までの範囲 (mm²)、 A_c は最終寸法から 10mm 内側までの範囲におけるクロムアズロール S 溶液呈色面積 (mm²) である。

この浸潤度が 80%以上の場合、K3 区分の基準を満たしたと判断した。なお、ここでいう横断面の外周部 0~10mm とは、2.2.2 で 154×154mm に調製した木口断面を最終的に 150×150mm に寸法仕上げすることを想定し、この想定位置から 10mm 内側までの範囲とした。この測定対象範囲に辺材部がごくわずかに含まれた試験体も認められたが、すべての辺材部に薬剤が浸潤していた。

1. 3 結果と考察

1. 3. 1 薬剤注入前の含水率分布と薬剤の浸潤状況

5 つの条件で乾燥した試験体の薬剤注入前の含水率を表 4-2 に示す。いずれの条件においても、試験体全体の含水率は、おおよそ目標どおり、20%以下に調節されていた。また、試験体の含水率分布を図 4-2 に示す。図 4-2 では、薬剤注入前の試験体全体の含水率が最大値を示すものが含まれる材料 No.25 の個体を例に、繊維方向に連続し

て採取した試験体での結果を示した。この図によると、最も内部まで均一に乾燥がなされたのは LT-K による場合であった。HF についても内部の含水率はかなり低下していた。これに対し、内部に高含水率の部位が広く残存したのは HT および HT-K による場合であった。しかし、それらの場合においても、横断面の外周部 0~10mm の範囲では含水率は 20%以下の部位がほとんどであった。また、背割りを施した試験体では背割りが開いたが、いずれの試験体においても顕著な表面割れは発生しなかった。

次に、薬剤の浸潤状況を、図 4-2 と同じく材料 No.25 の個体について、図 4-3 に示す。図 4-3 によると、LT-K および MT-K では外周部 0~10mm のほとんどの範囲に薬剤が浸潤していた。これに対し、HT、HT-K および HF の場合、図中の矢印で示したように、インサイジングの刃傷と刃傷の間に、薬剤が未浸潤の部位がみられた。また、背割りからの浸潤状況についても、LT-K や MT-K よりも HT-K の方が浸潤範囲は小さかった。含水率が高いと浸潤不良が生じることが知られている^{57,59)}。しかし、乾燥方法によらず、図 4-2 で示したように、注入時点の含水率は、少なくとも外周部 0~10mm においてはほぼ 20%以下であり、さらに、内部の含水率が低くなった HF の薬剤浸潤範囲が HT、HT-K のそれとほぼ同様のことから、HT、HT-K および HF に見られた浸潤不良の原因として、含水率の影響は考えにくい。一方、酒井ら⁵⁹⁾は、温度 80℃での中温乾燥を行った試験体について、薬剤は背割りやインサイジングの刃傷から主たる通路と考えられる早材部仮道管の放射壁に存在する有縁壁孔を通じて接線方向へ浸潤することを報告している。今回、温度 120℃での高温セット処理を用いて乾燥した HT、HT-K および HF の浸潤状況から、たとえば、それら試験体では接線方向の浸潤経路の閉鎖または縮小などが生じていることが推定された。心材の浸透および透過性を低下させる要因として、たとえば高温セット時の壁孔の閉鎖、壁孔への抽出成分の沈着等が挙げられるが⁶⁰⁾、詳細については、今後の検討課題とする。

以上は、材料 No.25 についての結果であるが、他の個体においても同様の傾向がみられた。

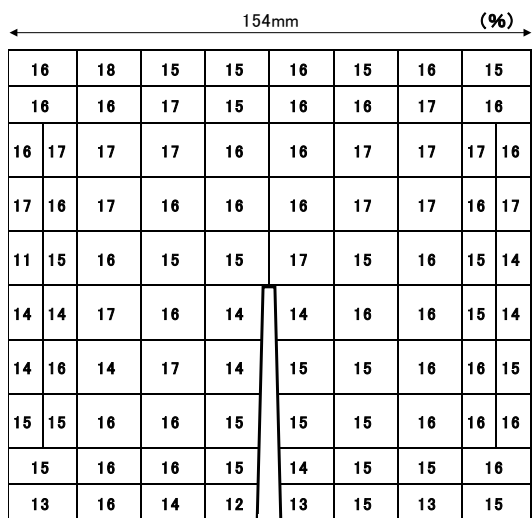
1. 3. 2 乾燥方法による薬剤注入量および浸潤度の差異

12 個体から得られたすべての試験体の薬剤注入量を試験条件ごとに図 4-4 に示す。なお、図 4-4 には、注入量を試験条件ごとに比較するため、多重比較の結果についても示している。まず HT-K に着目すると、その注入量は LT-K および MT-K でのそれに

表 4 - 2 薬剤注入前の含水率

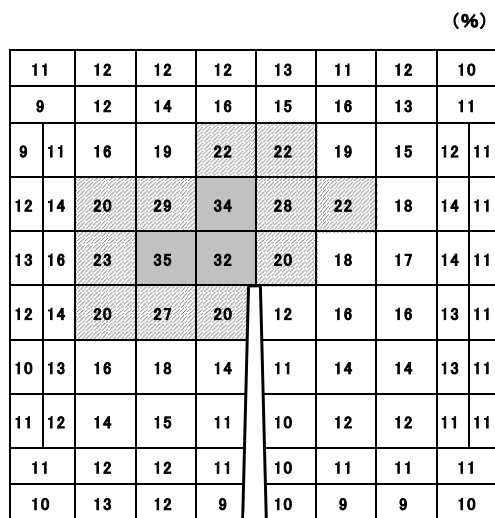
試験条件	薬剤注入前の含水率 (%)		
	最小	平均	最大
LT-K	15.5	16.3	17.3
MT-K	14.1	16.7	20.4
HT-K	12.0	16.3	20.1
HT	12.0	16.5	21.2
HF	11.7	17.5	23.8

試験条件の略称は表 4 - 1 を参照



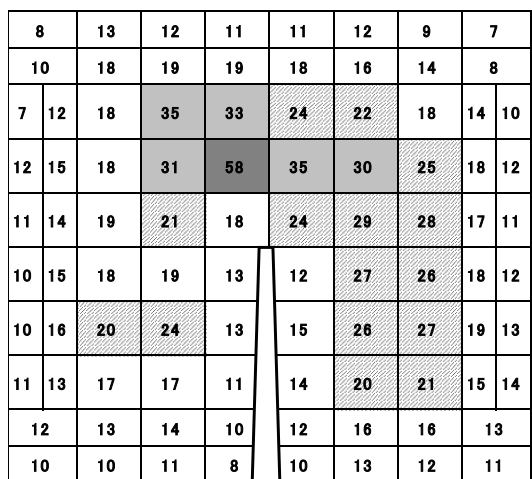
LT-K(材料No.25)

(%)



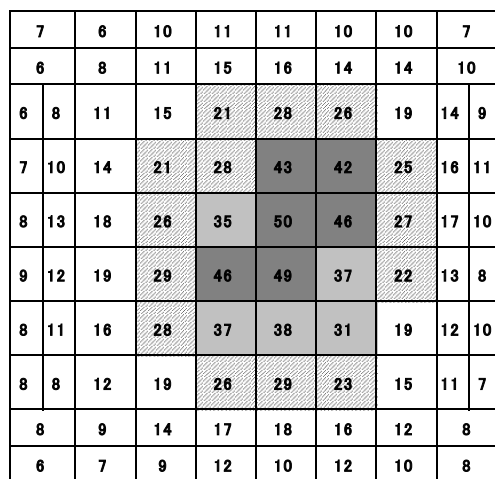
MT-K(材料No.25)

(%)

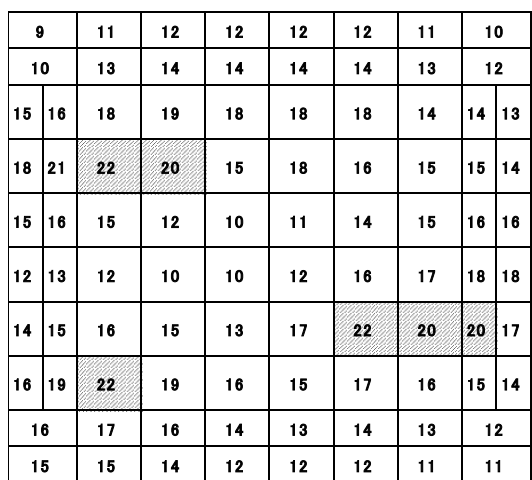


HT-K(材料No.25)

(%)



HT(材料No.25)



HF(材料No.25)

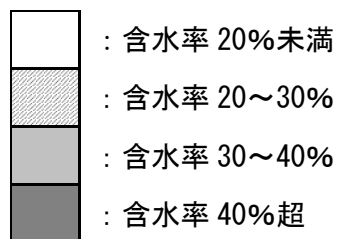
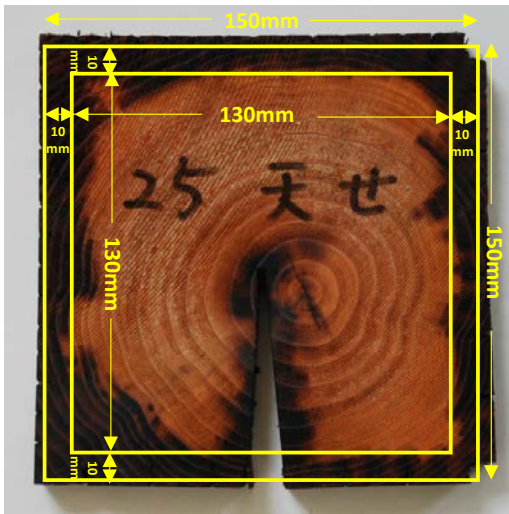


図4-2 薬剤注入前の含水率分布
(材料 No. 25 での結果)

試験条件の略称は表4-1を参照



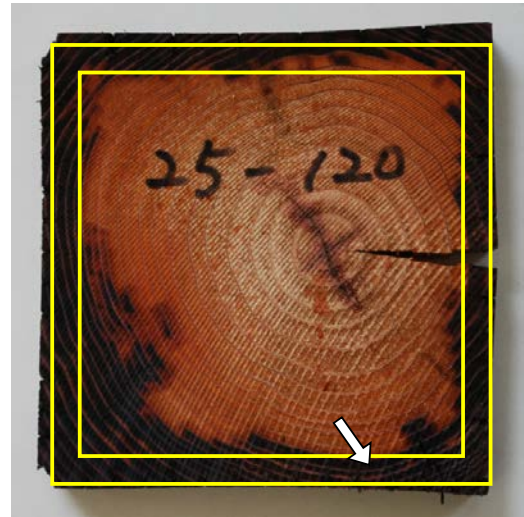
LT-K



MT-K



HT-K



HT



HF

図4-3 薬剤の浸潤状況
 (材料 No. 25 での結果)
 白矢印は薬剤が未浸潤の部位を示す
 試験条件の略称は表4-1を参照

比べて有意に少なく ($p < 0.01$)、さらに、HT および HF のそれらに比べて差があるとはいえなかった。この結果は、試験条件間における薬剤注入量の差異が、背割り加工にともなう薬剤進入経路の拡大によるものとはいえないことを意味している。次に、HT および HF に着目すると、それらの注入量は LT-K あるいは MT-K でのそれに比べて有意に少なかった ($p < 0.01$)。これらの結果から、薬剤注入量の差異が背割り加工の違いによるのではなく、乾燥方法の違いによると結論した。HT および HF の注入量が少なかった原因は、たとえば 1.3.1 でも述べた、浸潤経路の閉鎖または縮小が推定された。

薬剤浸潤度を試験条件ごとに図 4-5 に示す。なお、図 4-5 では、注入量の検討と同様、多重比較の結果についても示している。また、HT-K は注入量に及ぼす背割りの影響を調べるために設定した条件であり、現状のところ、背割りを施した高温セット乾燥材はほとんど市場に流通していないので、ここでの詳細な考察は割愛する。まず、LT-K、MT-K、HT および HF での浸潤度に着目すると、それらの平均値はそれぞれを比較しても統計的に差があるとはいえなかった。次に、各試験体の浸潤度それぞれについて着目すると、いずれの試験条件においても、製材の JAS の基準値を満たした試験体がほとんどであったが HT および HF において、同一個体 (材料 No.26) の 1 試験体ずつが製材の JAS の基準の境界値あるいはそれ以下の値を示した。これは、前述したように薬剤浸潤経路の閉鎖または縮小が推定されることに加え、図 4-3 でもみられるように、薬剤注入後の乾燥もしくは養生中に生じた表面割れの影響で木口断面がより大きく変形し、木口断面を 15.0×15.0cm に最終仕上げする際に薬剤浸潤部分が多く削り落とされると想定されたためである。薬剤注入後の乾燥における寸法変化および表面割れについては 1.3.3 でさらに考察する。

今回の検討では、製材の JAS に定められる浸潤度の基準を満たさなかった材は 12 個体中 1 個体のみであったが、高温セット処理条件の違いや材料の薬剤浸透性のばらつきによっては浸潤度がさらに低下し、数多くの材料が基準を満たさなくなる危険性も考えられる。今後、たとえば、処理温度を 120°C よりも低く設定する、あるいは処理時間を短くするなど、薬剤の浸潤度を低下させない高温セット処理条件を検討する必要がある。また、所定の薬剤浸潤を確保するため、インサイジングの密度を増加させるなどの工夫も必要になる。

1. 3. 3 乾燥方法による寸法変化と表面割れ発生状況の差異

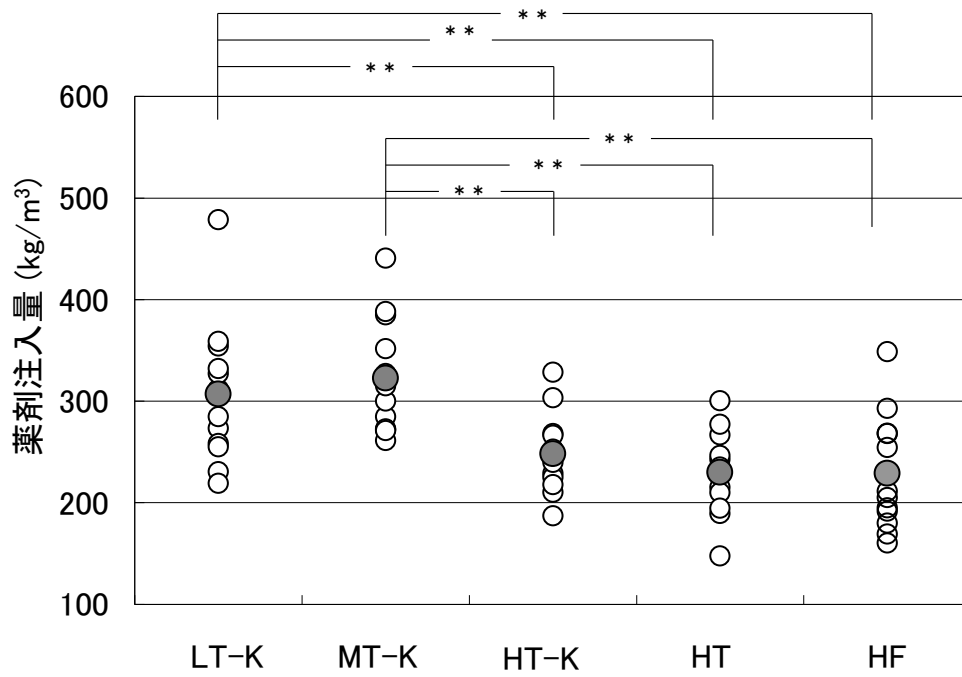


図 4-4 乾燥方法が薬剤注入量に及ぼす影響

試験条件の略称は表 4-1 を参照

** : Tukeyの方法により、危険率1%で差がみられる

● : 平均値

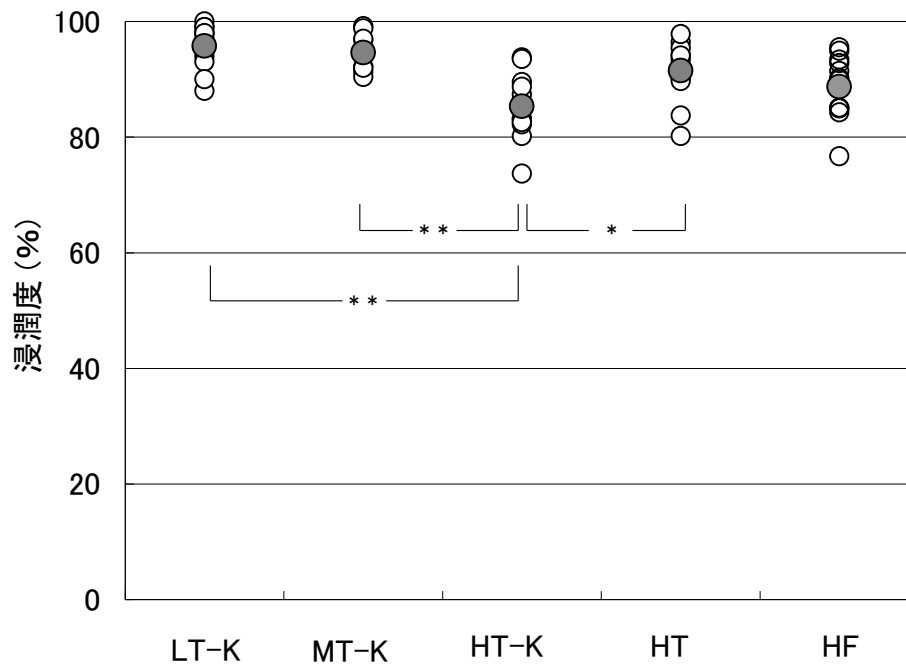


図 4 - 5 乾燥方法が浸潤度に及ぼす影響

試験条件の略称は表 4 - 1 を参照

** : Tukeyの方法により、危険率1%で差がみられる

* : Tukeyの方法により、危険率5%で差がみられる

● : 平均値

「薬剤注入前の寸法」と「養生後の寸法」との変化率について、注入前の乾燥条件、注入後の乾燥条件および寸法を測定した部位に背割りを含むか否かを分けて整理した結果を図4-6に示す。なお、図4-6ではスギ心持ち正角（木口断面15.0×15.0cm用）を計画的に乾燥させる場合に採択されることが多いと思われるMT-K、HTおよびHFによる結果を示している。まず、MT-Kにおける、背割りのない面での寸法変化率に着目すると、薬剤注入後に温度60℃、相対湿度18%で乾燥させた試験体では、1%前後の収縮を示したものが多く見られた。また、温度60℃、相対湿度85%で乾燥させた試験体では、その後の3ヵ月の養生期間中に発生した表面割れの影響により寸法が増加した個体が一部見られるものの、1%前後の収縮を示したものが多く見られた。小野ら¹⁹⁾はスギ心持ち正角（木口断面12.0×12.0cm、背割り材）に対し温度80℃の中温乾燥で含水率を20%以下に調整した後、室内での静置期間中に背割りを含まない面で約1%の収縮がみられたことを報告している。今回行ったMT-Kでの結果は、この既往の研究結果と概ね一致していると考えられる。一方、HTおよびHFでの寸法変化率に着目すると、寸法の増加したものが多く見られた。特に、温度60℃、相対湿度85%の雰囲気下で乾燥した試験体でこの傾向が顕著であった。これは、図4-7に示すような、比較的大きな表面割れの発生によるものであった。図4-6では、図4-7でみられるような表面割れが発生した辺の寸法変化率を塗りつぶしのマーカで示しているが、小さな割れを含めると、温度60℃、相対湿度85%の雰囲気下で乾燥したHTおよびHFでの試験体各6体のうち、5体ずつに表面割れが発生していた。注入前の時点では、いずれの試験体にも顕著な表面割れは発生していなかったため、図4-7にみられるような表面割れは、注入後の乾燥工程もしくは養生中に発生したものである。表面割れが発生した要因の一つに、注入前の乾燥における高温セット処理によって材表層に形成された圧縮応力が、注入時の濡れとその後の高湿度下における乾燥によって、一部開放した可能性が考えられる。徳本ら⁶¹⁾は、高温セット乾燥後に屋外で波板の覆いのもと5~6年間保管された無背割りのスギ心持ち正角に残留する応力を調べた結果、屋外での過酷な温湿度条件のもとでの長期間にわたる乾湿繰り返しによって、引張セットの減少に起因する材表層の圧縮応力の減少が認められることを報告している。本検討では、試験体に残留する応力の測定を行っていないが、表面割れの発生は、このような現象が関与し、結果として材表層における接線方向の破壊に足る引張応力が発生したと推測される。注入後の割れの発生は、薬剤の未浸潤部分が表面に露出することになるので、避けなけれ

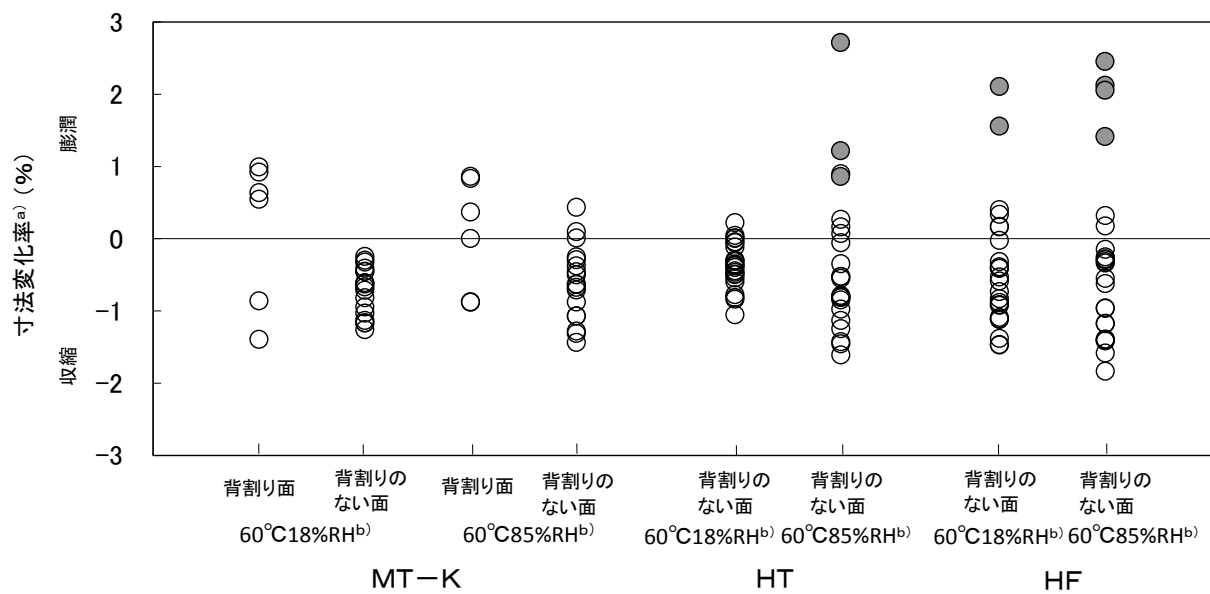


図 4-6 試験材の寸法変化に及ぼす影響

a) : 「薬剤注入前の寸法」と「養生後の寸法」との変化率

b) : 薬剤注入後の乾燥条件

薬剤注入前の乾燥条件の略称は表 4-1 を参照

● : 表面割れが発生した材面、○ : 表面割れの発生が見られなかった材面

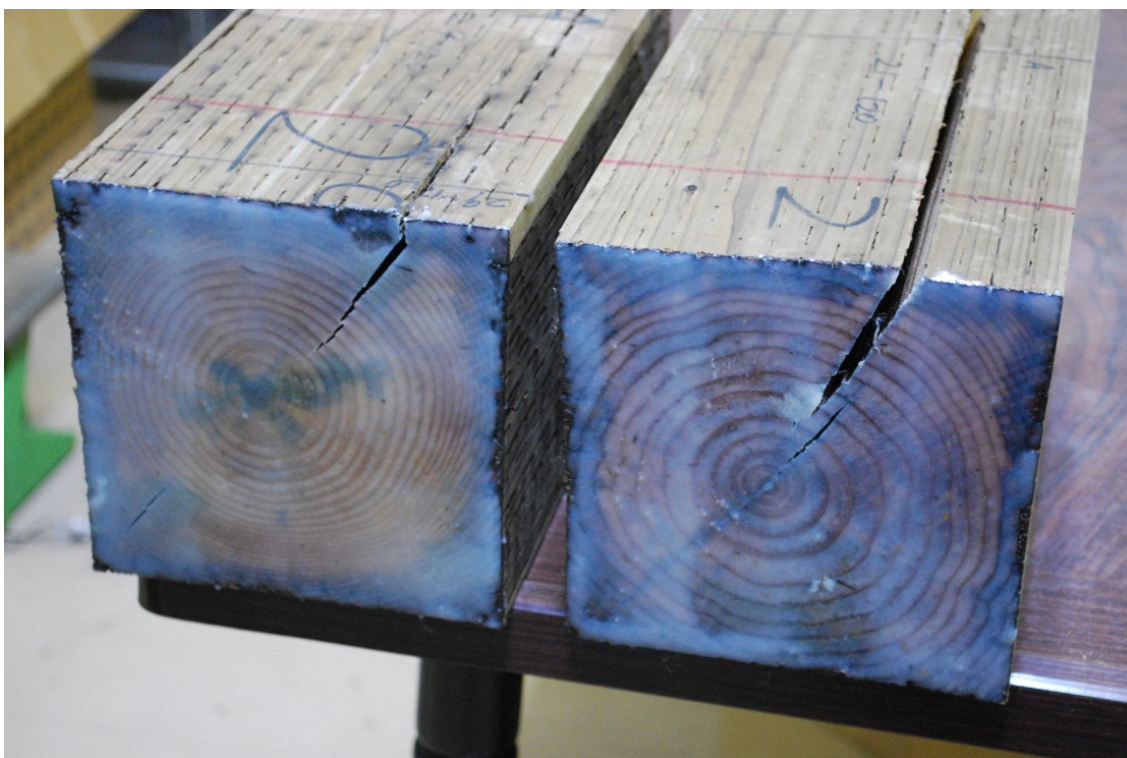


図 4 - 7 表面割れ発生の様子

(薬剤注入前の乾燥方法はHT)

薬剤注入前の乾燥条件の略称は表 4 - 1 を参照

ばならない課題である。また、その割れが進展して大きな寸法変化が生じると最終仕上げ時の表面切削範囲の増加にもつながり、最終製品における薬剤浸潤度を低下させる原因にもなる。この割れと寸法変化を防ぐためには、注入後の乾燥条件について、たとえば、表面割れが発生しにくいスケジュールを定めること、あるいは、薬剤注入を行う材料に対しては、乾燥方法を問わず、注入前に背割りを施すことが肝要であると考えられた。

2 中温域での蒸気・高周波複合乾燥法で乾燥したスギ正角への薬剤浸潤⁶²⁾

2.1 はじめに

スギ材を住宅や公共建築物の構造材として長期間使用可能とするためには、保存処理されたスギ大断面心持ち正角を適切に製造する方法を開発する必要がある。スギ心持ち正角に所定の耐久性を付与させるためには、製材後（薬剤注入前）の乾燥、インサイジング、加圧注入処理および注入処理後の乾燥といった、一連の工程を適切に組み合わせる必要がある。

スギ心持ち正角に対する乾燥法としては、これまでに、温度100℃未満で処理を進める中温乾燥（以下、MTと称する）が用いられてきたが、近年では、前章までにも触れたように、高温セット乾燥（以下、HTと称する）が普及している。この乾燥法は、乾燥初期に温度100℃以上の高温かつ低湿条件（以下、高温セット処理と称する）を与えることにより、無背割りの心持ち正角であっても、表面割れの少ない製品を短期間で生産できることが知られている⁴¹⁾。また、高温セット乾燥と同様の乾湿球温度条件下において高周波加熱を併せて行う蒸気・高周波複合乾燥（以下、HFと称する）も普及し始めている。

一方、スギ材に対し、100℃を超える温度での加熱あるいは乾燥を長く行った場合、常温あるいは温度100℃未満で処理したものに比べ、薬剤注入量が低下することが指摘されている^{63,64)}。しかし、スギ材に対する最近のHTでは、内部割れ発生の低減⁴⁴⁾を目的に高温セット処理は24時間程度とし、その後、温度100℃未満で乾燥を進めるスケジュールが多く採用されている。このような、実務上用いられている乾燥スケジュールで処理したスギ材の薬剤注入性を調べた報告は少ない。このため、前節では、実務上用いられているスケジュールでHTあるいはHFを行った奈良県産スギ心持ち無背割り正角の薬剤注入量や薬剤浸潤度を調べた。結果、それらの方法で乾燥したスギ心材も、天然乾燥あるいはMTを行ったものよりも注入量が低くなることが示された。また、HTやHFを行った無背割り材では、注入後の乾燥や養生時に、表面割れとそれにとまなう寸法変化を生じたものが見られた。

この2つの問題点は、保存処理製材の品質に大きな影響を与えるため、再確認および解決に向けた検討が求められる。まず、異なる乾燥方法で調製されたスギ心材への薬剤注入量については、同じ樹種でも材料の産地の違いによっては注入量、浸潤度のばらつき具合が異なる⁵⁷⁾ことから、これまでの検討で使用した奈良県産材に加えて他の地域の

材についても同様の試験を行い、産地の異なるスギに共通した問題であるかどうかを把握するための資料を引き続き収集する必要がある。一方で、乾燥に要する日数が短く、かつ、注入量の低下を引き起こさない方法を探すことも重要である。そのような乾燥法としては、第2章の1.2で取り扱った、温度100℃未満での中温乾燥に高周波加熱を併せて行う乾燥法²⁵⁾（以下、MFと称する。）が考えられる。MFは、高周波加熱により材内部の蒸気圧を高め、材内部から表層への水分移動と、同時平行的に進行する中温乾燥による表面からの水分蒸散によって乾燥を進める⁶⁵⁾ことにより、高温セット処理を用いずに大断面スギ材を短時間で乾燥させることが期待される。

また、注入後の乾燥や養生時に表面割れが生じる点については、薬剤注入前の正角に背割りを施すことで表面割れの発生を抑制できる可能性がある⁶⁶⁾が、最終的に製品として完成させるための表面切削に必要な歩増し量を適切な値に設定するため、注入後の工程で発生する背割りの開きなどの寸法変化を把握しておく必要がある。

そこで本検討では、背割り加工を行った奈良県産スギ心持ち正角および大分県産スギ心持ち正角を対象に、薬剤注入前の乾燥として、HT、HFおよびMFを行い、乾燥に要した日数を把握するとともに、薬剤注入量や浸潤度、また、注入後の工程で発生する寸法変化を調べ、MTを行った場合と対比させて考察を行った。

2.2 材料と方法

2.2.1 材料

薬剤注入前の乾燥方法が薬剤注入量および浸潤度に及ぼす影響を調べるため、奈良県産のスギ心持ち正角9体と、大分県産のスギ心持ち正角（品種：ヤブクグリ）9体を使用した。いずれも、木口断面を16.5×16.5cmとした。これは低層の公共建築物などへの使用が期待される仕上がり寸法15.0×15.0cmの構造材を想定している。長さは400cmとした。また、ほとんどの部位が心材からなる正角を使用した。これは、スギ材の辺材と心材を比べると、心材の方が乾燥も薬剤注入も困難である⁵⁷⁾ため、得られる結果を辺心材の比率にかかわらず、全てのスギ材に適用できるよう配慮したものである。

注入薬剤は、前節での検討と同様、CUAZを使用した。薬剤は水道水で希釈して、製材のJAS²⁸⁾で規定するK3用の作業液とした。

2.2.2 方法

2. 2. 2. 1 試験体の調製

前述した奈良県産および大分県産スギ心持ち正角各 9 体を使用した。それぞれから、図 4-8 に示すように、繊維方向 750mm の試験体を 4 体ずつ採取した。併せて、図 4-8 に示す a~e の位置で繊維方向 20mm の含水率測定用試片を採取し、全乾法によりこれら試片の含水率を求めた。試験体の初期含水率を隣接する 2 つの含水率測定用試片の含水率の平均値より求めた。なお、試験体の全乾質量は、初期含水率と質量より推定した。試験体を採取した後、両木口面をエポキシ樹脂系接着剤で直ちにシール処理した。

2. 2. 2. 2 薬剤注入前乾燥

同一の正角から採取した 4 試験体に対し、異なる乾燥方法を用いて含水率が 20% 以下となるまで乾燥した。今回用いた方法は、MT、MF、HT および HF である。MF は、本検討で新たに取りあげた乾燥方法で、高温セット処理を用いずに大断面スギ材を短時間で乾燥させることが期待される方法である。それぞれの乾燥条件を表 4-3 に示す。また、長さ 400cm の正角から各乾燥法に供する試験体を 1 体ずつ採取するため、図 4-8 に示すような試験体の割り付けを行った。各試験体には、あらかじめ、幅約 3mm、深さ 82mm の背割りを施した。なお、HT および HF は、高温セット処理によって表面割れが生じにくくなるため、一般には心持ち無背割り材に適用される。しかし、前節で示したように、HT あるいは HF によって乾燥した心持ち無背割り材に薬剤を注入した場合、注入後の乾燥もしくは養生中に表面割れが発生するおそれがある。注入後の割れの発生は、薬剤の未浸潤部分が表面に露出することになるので、避けなければならない。そこで本検討では、HT および HF に供する試験体についても背割りを施した。乾燥操作中、適宜、試験体の質量を測定した。このときの質量と 2.2.2.1 で推定した全乾質量から試験体の含水率を算出し、推定含水率が 20% 以下となった時点で乾燥操作を終了した。

乾燥後、試験体の木口断面を 15.4×15.4cm に調製した。この寸法は、薬剤注入とその後の乾燥が終了し、製品として完成させる際に若干の表面切削により木口断面を 15.0×15.0cm に仕上げることを想定している。

2. 2. 2. 3 インサイジング

スギ心持ち正角に対して薬剤の加圧注入による保存処理を行うにあたり、製材の JAS に定める薬剤浸潤度の基準を安定的に満たすためには、インサイジングの実施が有効である⁵⁹⁾。本検討においても、注入前乾燥後（寸法調製済）の試験体に対し、刃傷の深

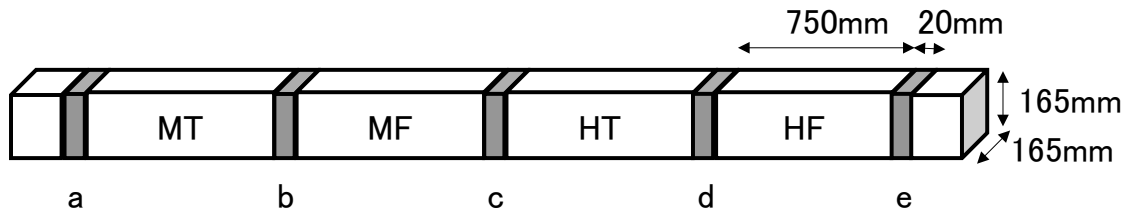


図 4 - 8 試験体の採取方法

乾燥方法の略称 (MT, MF, HT, HF) は表 4 - 3 を参照

表 4 - 3 乾燥条件

乾燥方法	試験条件の略称	試験体数(体) (奈良県産) (大分県産)	蒸煮 (D.B.T./W.B.T.) (時間)	→	高温セット処理 (D.B.T./W.B.T.) (時間)	→	乾燥 (D.B.T./W.B.T.) (時間) (高周波加熱の有無)
中温乾燥	MT	9 9	80°C/80°C 12時間	→	—	→	80°C/77~70°C 466時間
中温域での 蒸気・高周波複合乾燥	MF	9 9	80°C/80°C 12時間	→	—	→	80°C/77~70°C 350時間 高周波加熱を実施
高温セット乾燥	HT	9 9	90°C/90°C 12時間	→	120°C/90°C 24時間	→	90°C/60°C 72時間
高温セット処理 の工程を有する 蒸気・高周波複合乾燥	HF	9 9	90°C/90°C 12時間	→	120°C/90°C 24時間	→	90°C/60°C 72時間 高周波加熱を実施

D.B.T.: 乾球温度、W.B.T.: 湿球温度

さが 10mm、長さが約 15mm、密度が 4000 個/m²のインサイジングを行った。

2. 2. 2. 4 木材保存剤の注入

インサイジングを行った試験体の質量、繊維方向長さおよび 4 材面における繊維と直角方向の寸法（以下、このときの寸法を「注入前の寸法」と称する。）を測定した後、CUAZ 作業液を加圧注入した。注入スケジュールは、試験体を作業液に浸漬させた状態で、50hPa の減圧を 30 分間行い、引き続き 1.3MPa の加圧を 2 時間行った。注入後、試験体は作業液から取り上げ、滴下が収まるまで約 1 時間静置させた後、質量を測定した。注入量は、前節に示した、式 4-1 により算出した。

2. 2. 2. 5 薬剤注入後の乾燥

薬剤が注入された材料に対する乾燥は、注入された薬剤の変質を防ぎながらの操作が求められる。本報では、乾球温度 60℃、湿球温度 55～45℃での一般的な中温乾燥スケジュールを用いて薬剤注入後の試験体を乾燥した。乾燥期間は約 6 日間とした。この乾燥が終了した後、試験体の質量と 4 材面の寸法（以下、このときの寸法を「再乾燥後の寸法」と称する。）を測定した。この寸法と「注入前の寸法」から、寸法変化率（注入前と再乾燥後との違い）を式 4-6 および式 4-7 のように算出した。また、この後、試験体を室内で約 2 か月間養生させた。

$$D_{r0} = \frac{d_{r0} - d_{b0}}{d_{b0}} \times 100 \quad \dots \text{式 4-6}$$

$$D_r = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{d_{ri} - d_{bi}}{d_{bi}} \times 100 \quad \dots \text{式 4-7}$$

ここで、 D_{r0} は背割り面の寸法変化率(%)、 d_{r0} は再乾燥後における背割り面の寸法(mm)、 d_{b0} は注入前における背割り面の寸法(mm)、 D_r は背割りのない面の寸法変化率(%)、 $d_{r1} \sim d_{r4}$ は再乾燥後における背割りのない面の寸法(mm)、 $d_{b1} \sim d_{b4}$ は注入前における背割りのない面の寸法(mm)である。

2. 2. 2. 6 調湿後の寸法と薬剤浸潤度の測定

約 2 か月間の養生の後、試験体の両端 50mm 以内の部位と節のある部位を避け、繊維方向に 20mm の試片を 2 体ずつ採取した。この試片を乾球温度 30℃、湿球温度 26.5℃（相対湿度 76%）の恒温恒湿器内に静置し、含水率 15%を目指して調湿させた。約 6

日間調湿させ、質量がほぼ平衡に達したことを確認してから、1 体に対しては 4 材面の寸法（以下、このときの寸法を「調湿後の寸法」と称する。）を測定した。この寸法と「注入前の寸法」から、寸法変化率（注入前と調湿後との違い）を前節に示した式 4-2 および式 4-3 により算出した。残る 1 体は木口面にクロムアズロール S 溶液を噴霧し、薬剤浸潤部分を呈色させた²⁸⁾。本検討における浸潤度は、前節と同様、15.4×15.4cm に調製した木口断面を最終的に 15.0×15.0cm に寸法仕上げすることを想定し、この想定位置から 10mm 内側までの範囲における薬剤浸潤度を測定した。薬剤浸潤度は、前節に示した、式 4-5 により算出した。薬剤浸潤度が 80% 以上の場合、製材の JAS で規定する K3 区分の基準を満たしたと判断した。

2. 3 結果と考察

2. 3. 1 薬剤注入前の含水率と薬剤の浸潤状況

4 つの方法で乾燥した試験体の薬剤注入前の含水率を表 4-4 に示す。いずれの条件においても、試験体全体の含水率は、おおよそ目標どおり、20% 以下に調節されていた。また、試験体の含水率分布を調べたところ、いずれの乾燥方法においても内部までほぼ乾燥がなされていた。横断面の外周部 0~10mm の範囲では含水率は 20% 以下の部位がほとんどであった。次に、薬剤の浸潤状況を図 4-9 に示す。この図では、材料 No.42（奈良県産）および No.94（大分県産）の個体を例に、繊維方向に連続して採取した試験体での結果を示している。産地の違いによらず、MT および MF では外周部 0~10mm のほとんどの範囲に薬剤が浸潤していた。これに対し、HT および HF の場合、図中の白矢印で示したように、外周部 0~10mm の範囲に、薬剤が未浸潤と推測される部位が認められた。背割りからの浸潤状況についても、MT や MF よりも HT と HF の方が浸潤範囲は小さかった。奈良県産材を試験体とした酒井らの検討⁵⁹⁾において、薬剤は、背割りやインサイジングの刃傷から主たる通路と考えられる早材部仮道管の放射壁に存在する有縁壁孔を通じて接線方向へ浸潤することが推定されており、また、前節での検討において、高温セット処理を用いて乾燥した場合に、この浸潤経路の閉鎖または縮小が推定され、浸潤不良の存在する材料が出現する危険性が示されている。今回の検討により、同様の理由と推定される浸潤不良の危険性が同一産地で改めて示されるとともに、産地の異なるスギ材に対しても同様の結果が示された。以上は、材料 No.42（奈良県産）および No.94（大分県産）についての結果であるが、他の個体においても同様の

表 4 - 4 薬剤注入前の含水率

試験条件	薬剤注入前の含水率(%)					
	奈良県産材			大分県産材		
	最小	平均	最大	最小	平均	最大
MT	14.3	16.8	18.8	16.4	17.8	19.6
MF	13.7	16.3	21.8	14.9	17.1	18.6
HT	9.6	14.7	23.7	14.8	17.2	20.7
HF	12.4	15.1	17.7	11.9	16.5	19.1

試験条件の略称は表 4 - 3 を参照

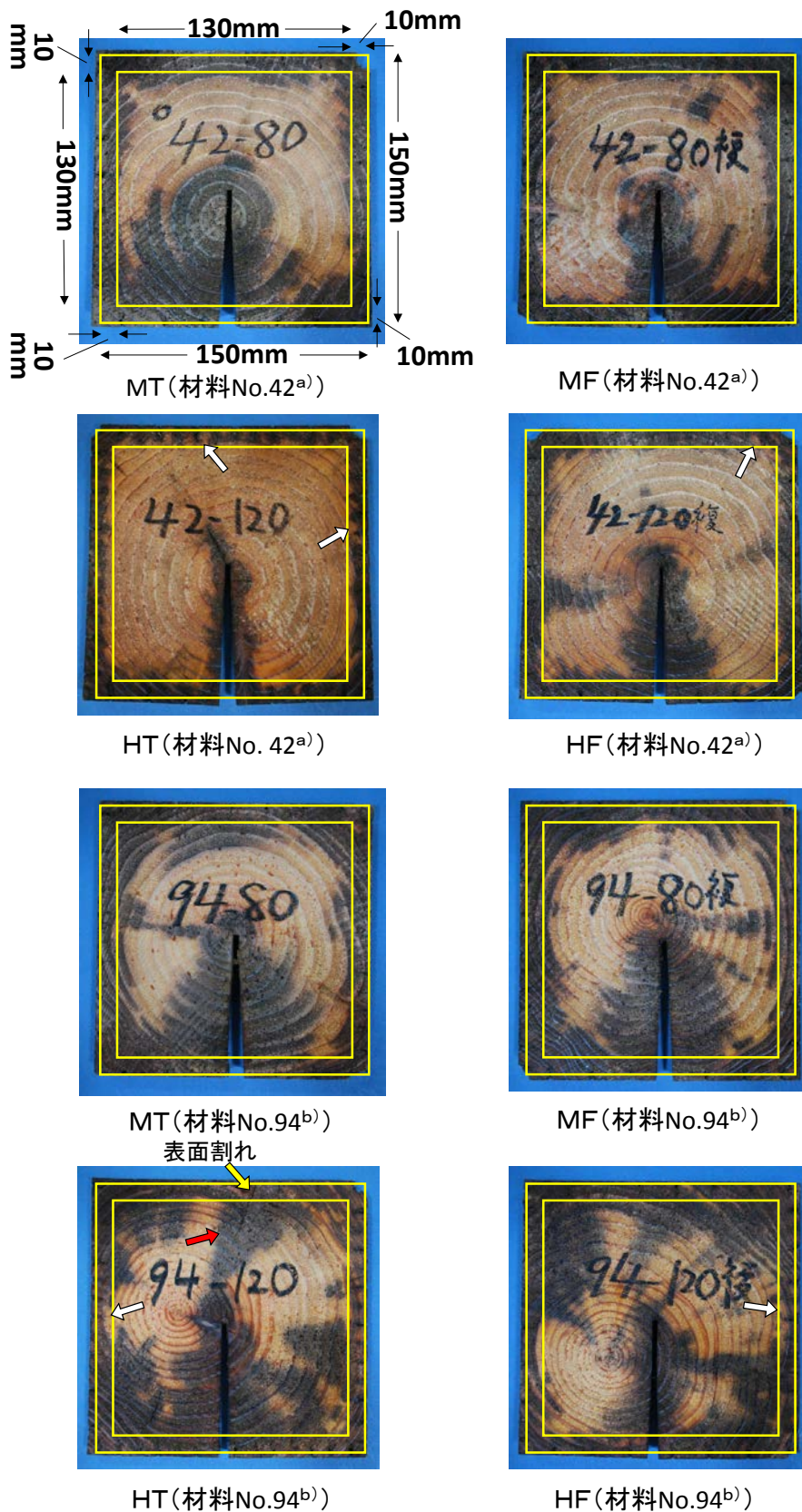


図 4 - 9 薬剤の浸潤状況 (材料 No. 42 および 94 での結果)

試験条件の略称は表 4 - 1 を参照。a) 奈良県産材、b) 大分県産材、白矢印は薬剤が未浸潤の部位を示す。赤矢印は表面割れからの薬剤浸潤が推定された部位を示す。

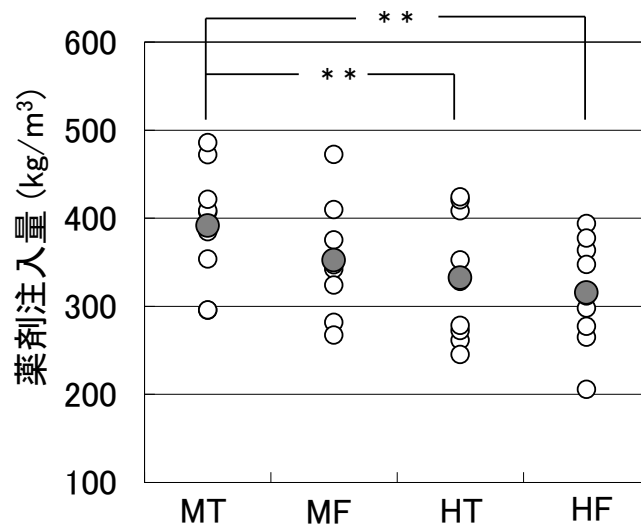
傾向が見られた。ただし、大分県産の試験体では HT や HF で表面割れが発生しているものが見られた (図 4-9 HT No.94)。HT では 9 体中 4 体に、HF では 9 体中 3 体に表面割れが発生していた。それらの試験体では、図 4-9 中の赤矢印で示すような、割れを經由した薬剤浸潤が見られた。

2. 3. 2 乾燥方法による薬剤注入量および浸潤度の差異

奈良県産材 9 個体および大分県産材 9 個体から得たすべての試験体の薬剤注入量を図 4-10 に示す。なお図 4-10 には、注入量を試験条件ごとに比較するため、多重比較の結果についても示している。奈良県産材では、注入量の平均は MT が最も多く、MF、HT、HF の順に少なくなった。HT および HF の注入量は MT のそれに比べ有意に少なかった ($p < 0.01$)。この結果は、前節での検討結果とも一致した。次に、大分県産材では、注入量の平均は、奈良県産材と同様、MT が最も多かった。MF、HT、HF の注入量の平均は MT のそれに比べて僅かに少なかったが、注入量について有意な差は認められなかった。HT および HF で乾燥した大分県産材の外周部 0~10mm の範囲に薬剤が未浸潤と推測される部位が存在していたこと (図 4-9) から、乾燥方法による影響が全く見られなかったとは考えにくく、HT および HF に発生した表面割れから薬剤が浸潤した結果、MT との間に差が認められなかったと推測された。参考として、表面割れからの薬剤浸潤が推測された試験体を除いた注入量の平均を算出したところ、HT では約 $330\text{kg}/\text{m}^3$ 、HF では約 $340\text{kg}/\text{m}^3$ であった。これらは、図 4-10 に示される全ての試験体での平均 (HT : 約 $360\text{kg}/\text{m}^3$ 、HF : 約 $370\text{kg}/\text{m}^3$) よりも少なかった。このように、薬剤注入前の乾燥で HT および HF を用いた場合、MT よりも薬剤注入量が低くなる現象が奈良県産材で改めて確認された。表面割れからの薬剤浸潤が推測されない大分県産材にも薬剤注入量の低下が疑われた。

試験体の薬剤浸潤度を図 4-11 に示す。なお図 4-11 では、注入量の検討と同様、多重比較の結果についても示している。まず、奈良県産材では、浸潤度の平均値は、MT および MF で高く、HT および HF はそれらに比べて低かった。HT の浸潤度は、MT および MF のそれに比べ、有意に低かった ($p < 0.01$)。次に、大分県産材では、浸潤度の平均値は、MT および MF で高く、HT および HF は、MT および MF に比べて僅かに低かったが、両者の間に有意な差は認められなかった。これは、前述したように、表面割れからの薬剤浸潤が影響を及ぼしたと推測された。また、各試験体の浸潤

a) 奈良県産材



b) 大分県産材

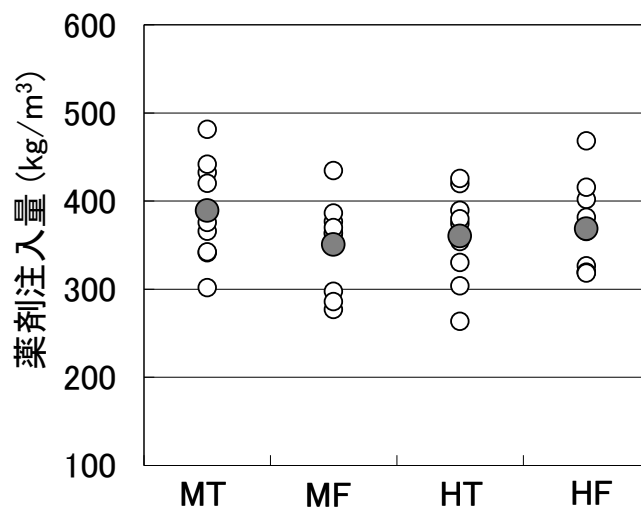


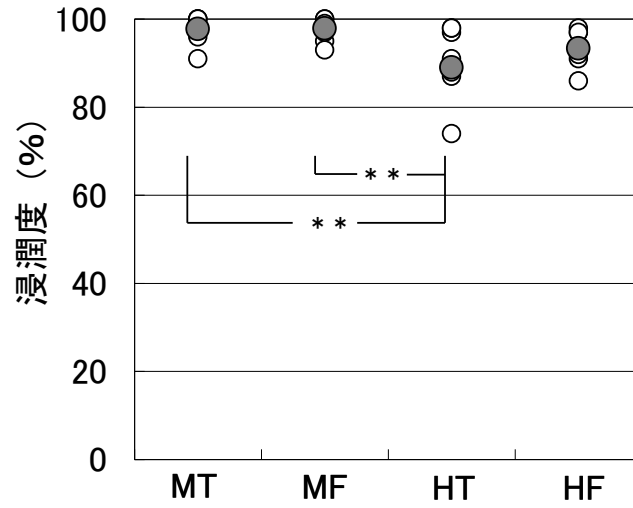
図4-10 乾燥方法が薬剤注入量に及ぼす影響

試験条件の略称は表4-3を参照

** : Tukeyの方法により、危険率1%で差がみられる

● : 平均値

a) 奈良県産材



b) 大分県産材

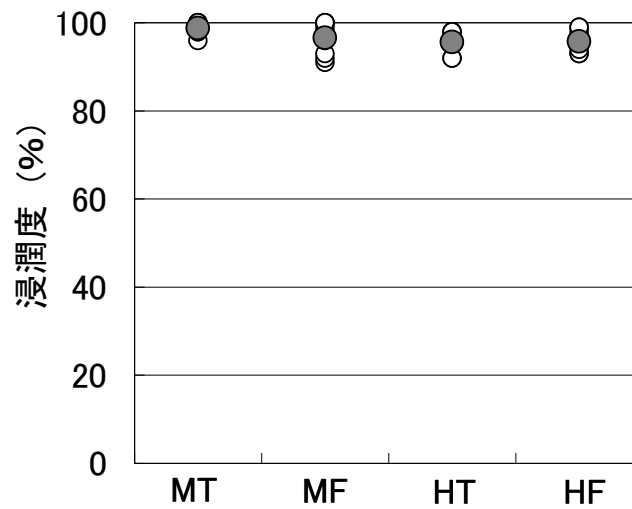


図 4-1-1 乾燥方法が浸潤度に及ぼす影響

試験条件の略称は表 4-3 を参照

** : Tukeyの方法により、危険率1%で差がみられる

● : 平均値

度については、奈良県産材のほとんどが製材の JAS の基準値を満たしたが、HT で乾燥し、図 4-9 にも示した材料 No.42 (奈良県産) から得た試験体のみが基準以下の値を示した。大分県産材の場合、全て試験体が製材の JAS の基準値を満たした。このように、HT で乾燥した材のなかには、製材の JAS に定められる浸潤度の基準を満たさなかったものが認められた。ただ、そのような材の出現割合は高くなく、今回の検討では奈良県産の 9 個体中で 1 体、前節での検討では 12 個体中で 1 体であった。HT は MT に比べて乾燥時間が短いなど、生産効率の観点からみると優れた乾燥方法であること、また、そのような理由で多くの事業所での乾燥に採択されており、保存処理材の原材料として入手しやすいことから、今回の結果だけで HT で乾燥された材を避けるのは必ずしも合理的とはいえないが、適切な保存処理がなされたスギ心持ち正角材を効率的に得るためには、製造工程でより高い品質管理が必要と考えられた。例えば、今回観察された薬剤注入量と浸潤度との関係を表した図 4-12 に示されるように、注入量が低い材料は浸潤度も低い傾向が認められることから、注入量から浸潤度を予測するなどの管理を行うことが考えられる。また、製材の JAS に定められる所定の薬剤浸潤を確保するため、インサイジング密度をさらに高くすることも考えられる。

2. 3. 3 薬剤注入後の寸法変化

各試験体における、「注入前の寸法」と「再乾燥後の寸法」との変化率 (D_{r0} 、 D_r) および「注入前の寸法」と「調湿後の寸法」との変化率 (D_{c0} 、 D_c) について、寸法を測定した位置に背割りを含むか否かで区分した結果を図 4-13 に示す。奈良県産材での変化率 (D_{r0} 、 D_r) について、背割りのない面 (D_r) では、試験条件によらず、寸法変化はほとんど見られなかった。これに対して、背割りを施した面 (D_{r0}) ではいずれの条件とも寸法の増加が認められた。このとき、いずれの条件の試験体においても、注入後新たに発生した表面割れは存在しなかったことから、この寸法変化は、注入前と再乾燥後の含水率の違いにより、背割りが開いたことによると考えられた。両者の含水率を比べたところ、注入前の含水率 (表 4-4) に比べると、再乾燥後における試験体の平均含水率は高く、MT では 23.0%、MF では 19.9%、HT では 22.9%、HF では 21.1% であった。そのため、背割りが開いた状態で仕上がったと推測される。一方、再乾燥後に養生と調湿を行うことで含水率は約 15% まで低下し、「注入前の寸法」と「調湿後の寸法」との変化率 (背割りを施した面、 D_{c0}) は、「注入前の寸法」と「再乾燥後の寸法」

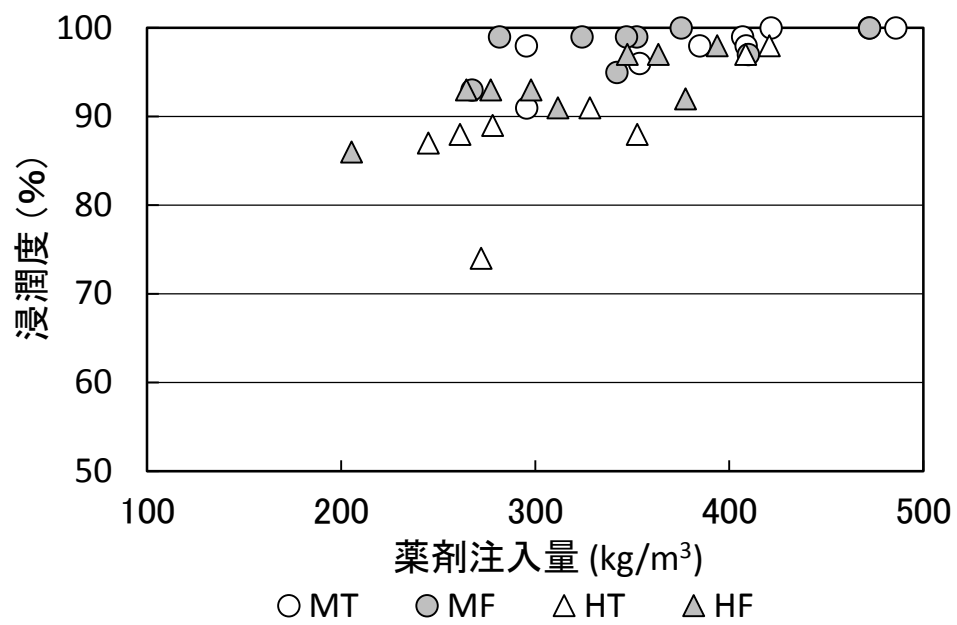


図 4 - 1 2 薬剤注入量と浸潤度との関係（奈良県産材での結果）

試験条件の略称は表 4 - 3 を参照

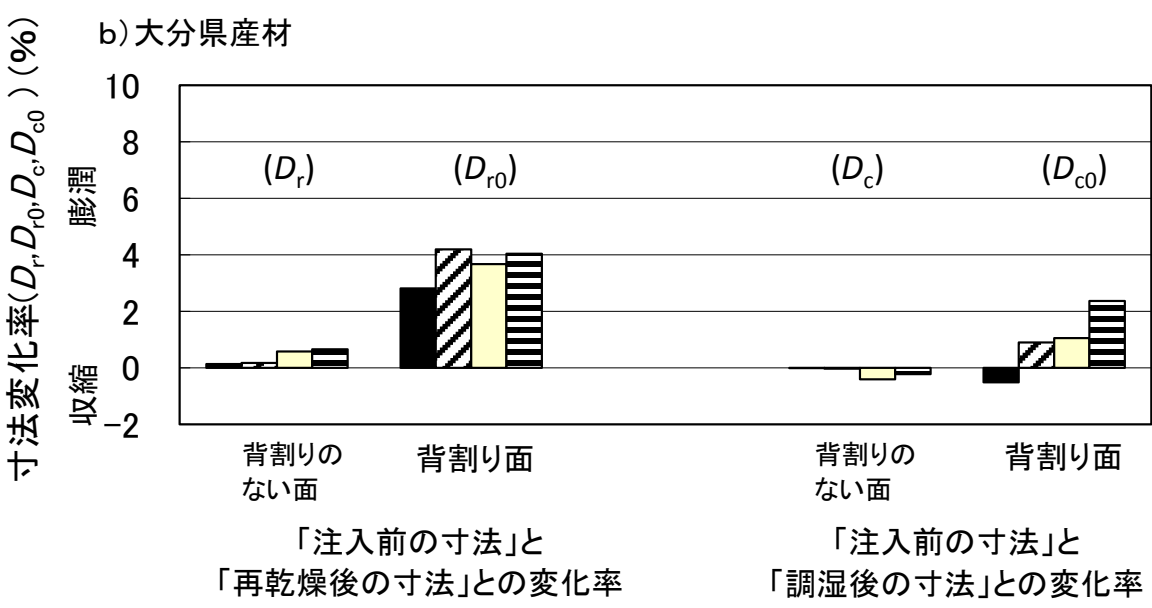
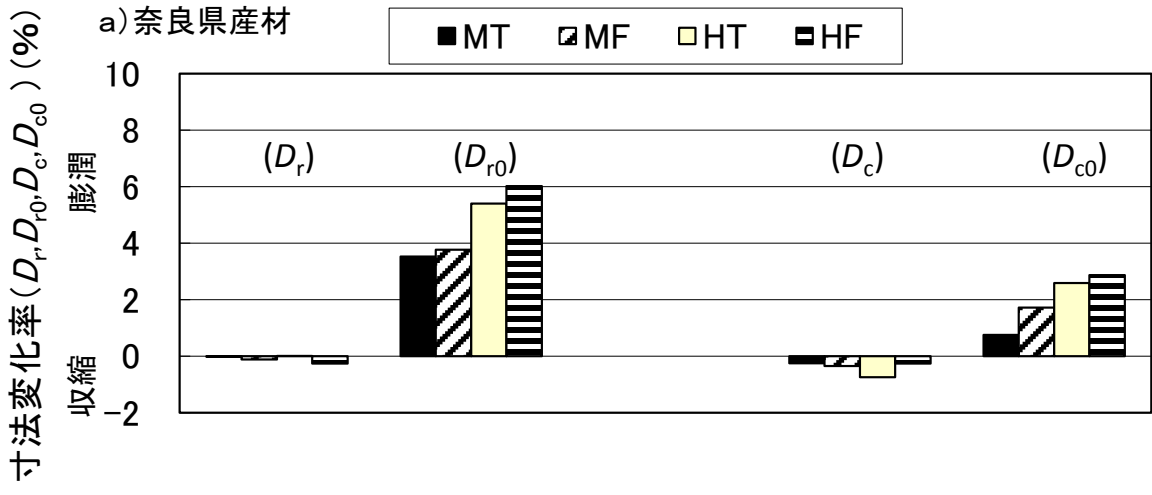


図 4-13 薬剤注入前の乾燥が試験材の寸法変化に及ぼす影響
 D_{r0} 、 D_r 、 D_{c0} 、 D_c は本章 2.2.2.5 および 2.2.2.6 をそれぞれ参照
 薬剤注入前の乾燥条件の略称は表 4-3 を参照

とのそれ（背割りを施した面、 D_{t0} ）よりも小さくなった。これは背割り幅の減少によるものと推測される。以上は、奈良県産材についての結果であるが、大分県産材においても概ね同様の傾向がみられた。

このように、材料にあらかじめ背割りを施すことにより、注入前に高温セットを用いた方法で乾燥したものであっても、薬剤注入による濡れと再乾燥を受ける工程での新たな表面割れの発生を防止できることが示された。一方で、注入後の乾燥工程や養生時において、背割りを施した面には比較的大きな寸法変化が見られたため、それらの工程で十分な含水率管理を行わずに最終の表面切削を行うと背割りを施した面の寸法変化が製品出荷後に発生するおそれがあるので注意が必要である。

2. 3. 4 薬剤注入前の乾燥に要する日数

薬剤注入前に4つの方法で乾燥した際の、試験体の含水率経過を図4-14に示す。この図では、図4-9と同じく、材料No.42（奈良県産）およびNo.94（大分県産）での結果を示している。図4-14によると、HTとHFの含水率低下が速く、奈良県産材、大分県産材とも、約4日間で含水率20%前後に調節された。また、MFの含水率低下は、HTやHFに比べ、ほとんど変わらないか僅かに緩やかで、奈良県産材では約4日間、大分県産材では約5日間で含水率20%前後に調節された。これらに対し、MTの場合、奈良県産材では約10日間、大分県産材では約12日間の乾燥を要した。

すべての試験体における、乾燥前含水率と含水率約20%に調節されるまでの所要日数との関係を図4-15に示す。まず、奈良県産材での結果に着目すると、乾燥前含水率の大小に応じて所要日数にばらつきが見られたが、乾燥前含水率がいずれの範囲であってもMFでの所要日数はMTでのそれよりも短く、また、HTおよびHFの所要日数と比べても、ほとんど変わらないか僅かに長い程度であった。以上は、奈良県産材についての結果であるが、大分県産材においても概ね同様の傾向がみられた。

このように、薬剤注入前の乾燥工程にMFを適用することで、HTやHFと概ね同様の期間でスギ心持ち正角を乾燥できることが示された。既往の研究において、MTに比べると、HTやHFはエネルギーコストが大きくなるものの、乾燥日数が短いため、乾燥装置の回転率が高くなり、設備費や人件費を含めた乾燥コストは小さく^{67,68)}、同じ容量の乾燥装置で比較すれば月産量も多くなる試算結果がある⁶⁷⁾。本報ではコスト試算は行っていないが、MFがHTやHFと概ね同様の期間でスギ心持ち正角を乾燥できるこ

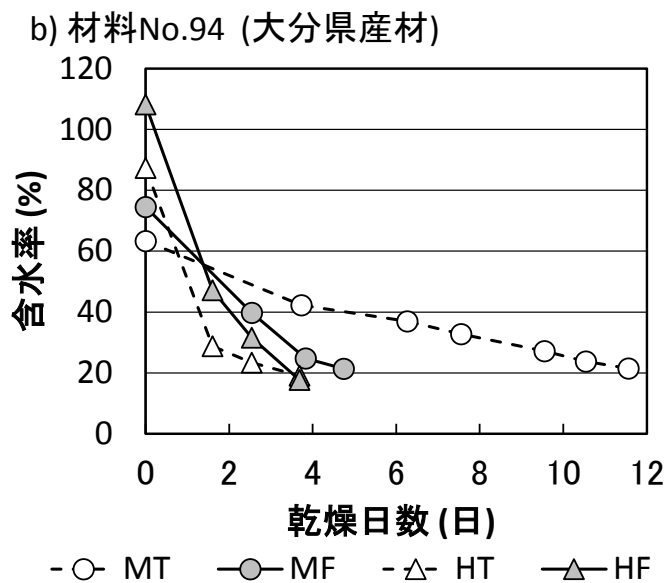
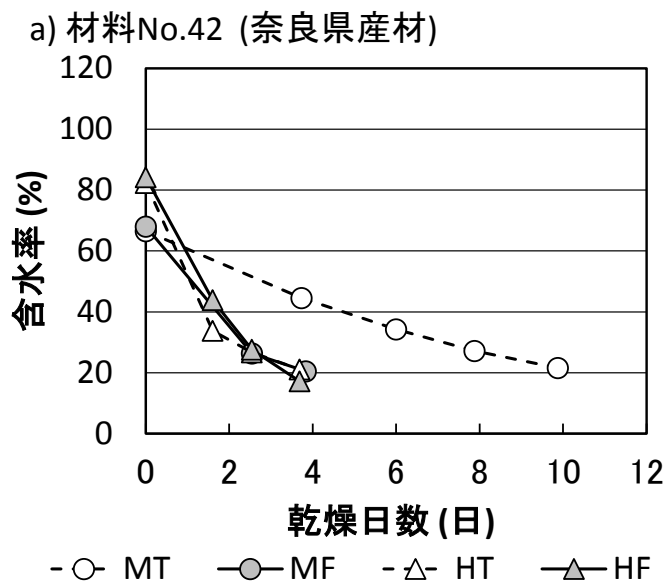


図4-14 薬剤注入前の乾燥経過

(材料 No. 42 (奈良県産材) および 94 (大分県産材) での結果)

薬剤注入前の乾燥条件の略称は表4-3を参照

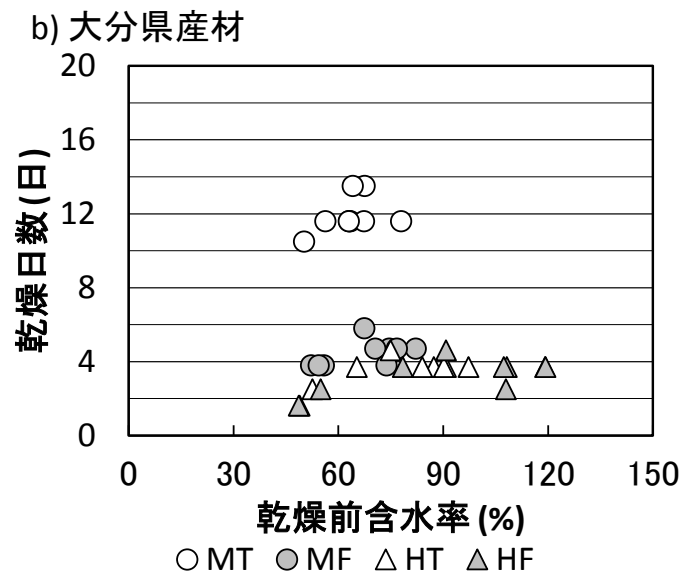
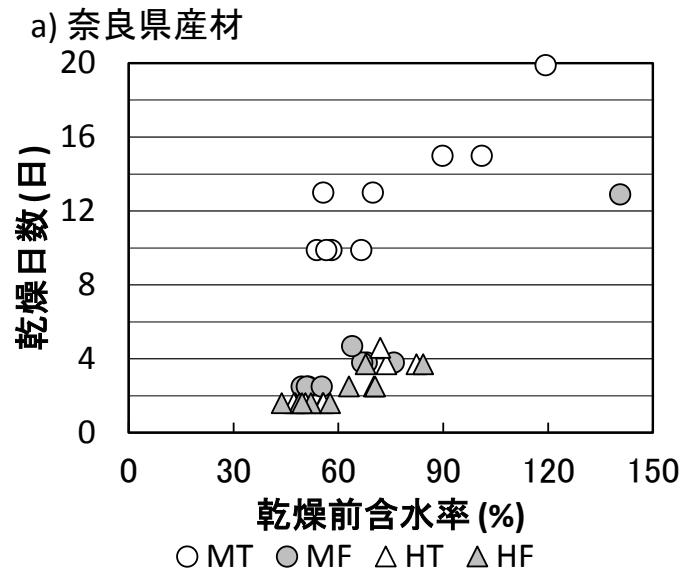


図4-15 乾燥前含水率と含水率約20%に調節されるまでの所要日数との関係
薬剤注入前の乾燥条件の略称は表4-3を参照

とが示されたことから、この乾燥法においても、**MT** に比べ、低コストで薬剤注入前の乾燥を行える可能性がある。また、既に示したように、**MF** では、いずれの試験体においても、外周部 0~10mm のほとんどの範囲に薬剤が浸潤していたこと、薬剤注入量と浸潤量が **MT** と比較して有意な差が見られなかったことも考え合わせると、**MF** は、保存処理されたスギ大断面心持ち正角の製造において有用な乾燥法となる可能性がある。

3 まとめ

スギ材を長期優良住宅等で構造材として使用していく際に必要となる、保存処理スギ製材について、保存処理前の乾燥方法が保存処理製材の品質に及ぼす影響を検討した。その結果、高温セット乾燥あるいは蒸気・高周波複合乾燥したスギ心材への薬剤注入において、以下に示す2つの問題点が見いだされた。

- (1) 高温セット乾燥あるいは蒸気・高周波複合乾燥したスギ心材は、浸潤経路の閉鎖等が推定され、天然乾燥あるいは中温乾燥したものよりも薬剤注入量が低くなる。
- (2) 高温セット乾燥あるいは蒸気・高周波複合乾燥した無背割り材の中には、注入後の乾燥工程や養生時に、表面割れとそれに伴う寸法変化が生じたものがあつた。これを所定の寸法に仕上げるためには薬剤浸潤部分を多く切削することとなり、製材のJASに定められる浸潤度の基準を満たさなくなる場合がある。

この2つの問題点を再確認するため、これまでの検討で使用した奈良県産材に加えて他の地域の材についても同様の試験を行い、産地の異なるスギに共通した問題であるかどうかを調べた。また、問題解決策を示すため、乾燥に要する日数が短く、かつ、注入量の低下を引き起こさない可能性のある中温域での蒸気・高周波複合乾燥法によってスギ正角を乾燥し、このときの薬剤浸潤を調べた。結果、次の結論を得た。

- (3) 高温セット乾燥あるいは高温セット処理の工程を有する蒸気・高周波複合乾燥を行った奈良県産スギ心材および大分県産スギ心材に浸潤不良と推測される部位が認められた。このことは、産地の異なるスギ材に共通した問題点であると考えられた。また、中温乾燥したものよりも薬剤注入量や浸潤度が低くなる場合が改めて確認された。これらの乾燥法を用いて保存処理されたスギ心持ち正角を製造する場合、薬剤注入量から薬剤浸潤量を予測するなど所定の薬剤浸潤量を確保するための十分な品質管理が必要と考えられた。
- (4) 心持ち正角にあらかじめ背割りを施すことにより、薬剤注入前に高温セット処理を用いた方法で乾燥したものであつても、注入による濡れと再乾燥を受ける工程での新たな表面割れの発生を防止できることが示された。一方で、注入後の乾燥工程や養生時において、背割りを施した面の寸法変化を防ぐための十分な含水率管理が

必要と考えられた。

- (5) 薬剤注入前の乾燥で中温域での蒸気・高周波複合乾燥法を用いた場合、浸潤不良や、薬剤注入量および浸潤度の低下が見られない材料を短時間で調製できることが明らかとなった。

第5章 総括

国産針葉樹材の建築用製材への利用が期待されるなか、人工林における主要樹種であるスギに対する効率的な乾燥方法や条件の検討が求められている。これを受け、著者は、スギ心持ち正角の乾燥における時間短縮と仕上がり品質の向上を目的として、蒸気式乾燥による外部加熱に、高周波加熱による内部加熱を複合する乾燥方法に着目した。本研究では、このような乾燥方法（蒸気・高周波複合乾燥法）を用いて、スギ心持ち正角を短時間で乾燥できることを明らかにして、その技術を確立させるとともに、得られた製品の品質を評価することを目的としている。

第1章では、国産針葉樹材利用の必要性と国産針葉樹製材に対する乾燥の必要性を述べ、本研究の目的を示した。

第2章では、スギ正角に対する乾燥試験および加熱試験から、蒸気・高周波複合乾燥は、従前から用いられている中温乾燥に比べて乾燥時間が約1/5にまで大幅に短縮され、かつ、生材含水率のばらつきに左右されずに良好な仕上がり含水率状態が得られることを示した。また、高周波発振器の整合回路を改良することで、さん積み形態の変化や乾燥にともなう水分変化に起因する加熱効率の低下を防止できることを明らかにし、改良前の一般機を想定した場合に比べて高周波加熱で消費される電力量を2割程度節減できることや、スギ正角を加熱する際の最低限確保すべき高周波加熱出力が約10～14kW/m³であることを示した。さらに、近年、市場から求められている無背割りのスギ心持ち正角に対する乾燥において、割れの発生が少ない乾湿球温度条件および高周波加熱条件、すなわち、温度120℃での高温セットを24時間行い、その後、90℃での乾燥を進める際に、高周波加熱によって材温を105℃程度に調節するという条件を見出し、この乾燥条件を実務で活用可能な蒸気・高周波複合乾燥スケジュールの一つとして提案した。

第3章では、蒸気・高周波複合乾燥したスギ心材等に対する耐朽性試験および耐蟻性試験から、乾燥に伴う木材中の抗菌成分の揮散・分解が原因と推測される耐朽性の低下が室内強制腐朽試験において認められたものの、野外耐朽性試験および野外耐蟻性試験での耐用年数に明らかな低下は認められず、蒸気・高周波複合乾燥による生物劣化抵抗性の大幅な低下を危惧する必要はないとの結論を得た。

第4章では、蒸気・高周波複合乾燥したスギ心材の薬剤浸潤に関する試験から、高温

セット処理の工程を有する蒸気・高周波複合乾燥を行ったスギ心材には、浸潤経路の閉鎖等が推定され、天然乾燥あるいは中温乾燥したものよりも薬剤注入量が低くなることが明らかとなった。また、この方法で乾燥した無背割り材の中には、注入後の乾燥工程や養生時に、表面割れとそれに伴う寸法変化が生じたものがみられ、これを所定の寸法に仕上げるためには薬剤浸潤部分を多く切削することとなり、製材の JAS に定められる浸潤度の基準を満たさなくなる場合があった。高温セット処理の工程を有する蒸気・高周波複合乾燥法を行ったスギ心持ち正角で保存処理木材を製造する場合、所定の薬剤浸潤量を確保するための十分な品質管理が必要である。また、注入による濡れと再乾燥を受ける工程での新たな表面割れの発生を防止するため、心持ち正角にあらかじめ背割りを施す必要もある。

一方で、薬剤注入前の乾燥で中温域での蒸気・高周波複合乾燥法を用いることで、浸潤不良や薬剤注入量および浸潤度の低下が見られない材料を短時間で調製できることが明らかとなった。

以上のとおり、本研究では、スギ製材に蒸気・高周波複合乾燥法を適用させることで、品質の安定した乾燥材を効率的に生産できることが明らかとなった。また、実務で活用可能な蒸気・高周波複合乾燥スケジュールの一つを提案することができた。さらに、スギ製材に対して木材保存処理を行うなど、乾燥後の加工性について制御が求められる場合においても、これに対応した乾燥技術を示すことができた。

スギは、わが国の最も重要な森林資源の一つである。これを有効に利用することは、森林の適切な整備・保全と多面的機能の発揮、林業・木材産業と山村地域の振興といった、現在の森林・林業が抱える課題を解決するための一つの方策となり得るであろう。本研究による一連の成果が、スギ材の有効利用の一助となることを期待して総括とする。

引用文献

- 1) 林野庁編：森林・林業白書 平成 27 年度版，一般社団法人全国林業改良普及協会 (2015)
- 2) 林野庁編：森林・林業白書 平成 22 年度版，社団法人全国林業改良普及協会 (2010)
- 3) 林野庁編：森林・林業白書 平成 24 年度版，社団法人全国林業改良普及協会 (2012)
- 4) 平川泰彦，藤澤義武，中田了五，山下香菜：関東育種基本区から選抜されたスギ精英樹クローンの材質に関する解析資料．森林総合研究所研究報告 **2**(1),65-74(2003).
- 5) 黒田尚宏：スギ心持ち材乾燥のための基礎研究の展開．木材学会誌 **53**(5),243-253(2007).
- 6) 黒田尚宏：木材の乾燥に関する研究の現状と課題．木材学会誌 **51**(1),10-12(2005).
- 7) 小林好紀，川井安生，三浦泉：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法（第 1 報）－スギ正角材の材内圧力と水分状態－．木材学会誌 **46**(4),282-290(2000)
- 8) 吉田孝久：木材の高温乾燥研究の変遷－高温高湿スケジュールから高温低湿スケジュールへ－.木材工業.63(9),400-405(2008)
- 9) 井道裕史，長尾博文，加藤英雄：乾燥に伴う内部割れがスギ製材品のせん断強度に及ぼす影響.木材工業 60(4),170-174(2005)
- 10) 小原誠，山之内清竜，福留重人：乾燥割れを有するスギ心持ち構造材の評価について.鹿児島県工業技術センター研究報告 **20**,71-77(2006)
- 11) 桃原郁夫：熱処理と耐久性.木材保存,31(1),3-11(2005)
- 12) 栗崎宏，塚本英子，水本克夫：高温乾燥したスギ心材のオオウズラタケに対する耐朽性.木材保存,27(2),61-66(2001)
- 13) 栗崎宏，塚本秀子，鷺岡雅：地域産スギ主要 3 品種の耐朽性と薬剤注入性比較.日本木材学会中部支部大会講演要旨集,5,64-65(1995)
- 14) 武田孝志，野田政子，徳本守彦，印出 晃，伊藤嘉文，吉田孝久：高温セット法によるスギ心持ち柱材の人工乾燥（IV）－乾燥スケジュールと曲げ及び接合強度－.第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版：E220945(2003).
- 15) 和多田浩樹，池田実：安全・安心な乾燥材生産技術の開発－近畿・北陸地方産スギの内部割れと強度性能の関係説明（II）.福井県総合グリーンセンター林業試験部業務報告,49,19-25(2010)

- 16) 和多田浩樹：安全・安心な乾燥材生産技術の開発－近畿・北陸地方産スギの内部割れと強度性能の関係解明（Ⅲ）.福井県総合グリーンセンター林業試験部業務報告,50,13-18(2011)
- 17) 藤田和彦, 加藤英雄, 井道裕史, 長尾博文：スギ心持ち無背割り正角材の強度性能に及ぼす乾燥条件の影響.日本建築学会大会学術講演梗概集 CD-ROM 版：22335(2012).
- 18) 寺西康浩, 小野広治, 久保 健：建築用製材品の天然乾燥. 奈良県林試木材加工資料 **26**,30-35(1997)
- 19) 小野広治, 寺西康浩, 沖中玲子, 久保 健：スギ柱材の熱気乾燥と修正挽き材の寸法変化. 奈良県林試研報 **27**,22-28(1997)
- 20) 谷恵吉郎：“第2章 第5節 木材乾燥の経済的研究”.最新の高周波応用 第2集.東京, (株) コロナ社, 1951, 45-52.
- 21) 山本 孝:高周波による木材加工に関する研究.東京大学演習林報告.41,183-228 (1951)
- 22) 山本 孝：“第1章 第1節 高周波応用の展望”.最新の高周波応用 第2集.東京, (株) コロナ社,1951,2-19.
- 23) 寺澤 眞, 金川 靖, 林 和男, 安島稔:木材の高周波真空乾燥.滋賀,海青社,1998.
- 24) 金川 靖, 寺沢 眞, 伊藤基信:木材の高周波減圧乾燥(1).木材工業.33(6),241-246 (1978)
- 25) 寺西康浩, 小野広治, 沖中玲子, 久保 健：高周波加熱併用乾燥法の実用化試験(第1報)－高周波加熱併用乾燥法の乾燥特性と加熱効率に及ぼすさん木厚さの影響.奈良県林試研報.28,29-33 (1998)
- 26) 木材活用事典編集委員会編:木材活用事典.東京, (株) 産業調査会事典出版センター,1994.191
- 27) 川井安生：高周波・熱気複合乾燥におけるスギ材内部の水分移動に関する研究. 京都大学博士論文.2004
- 28) 農林水産省告示第 1920 号：“製材の日本農林規格”. 農林水産省,2013
- 29) 林業試験場監修：改訂 3 版木材工業ハンドブック.東京,丸善株式会社,1982,111.
- 30) 井上 敏, 小谷政雄, 玉虫文一, 富山小太郎編：岩波理化学辞典 増訂版.東京,株式会社岩波書店,1958,296.
- 31) 寺西康浩, 小野広治, 沖中玲子, 松山將莊, 山本康二, 永田恒雄, 児玉順一, 斎藤武

- 彦：高周波加熱併用乾燥法の実用化試験（第2報）－インピーダンス整合の有無による加熱効率および乾燥効率の違い.奈良県林試研報.28,34-40(1998)
- 32) 宇都宮敏男, 青木昌治, 駒宮安男, 飯島泰蔵, 河野照哉, 曾根悟 編：電気工学事典.東京,朝倉書店.1983.
- 33) 物理学辞典編集委員会編：物理学事典.東京,培風館.1984.
- 34) 寺西康浩, 小野広治, 岡崎 旦, 山本泰司, 上田 守:高周波加熱併用乾燥法の実用化試験（第3報）－スギ柱材を乾燥する際の適正な高周波出力と効果的な高周波印加時期の検討.奈良県森技セ研報.30,47-52(2000)
- 35) 社団法人全国木材組合連合会編：わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル.東京,全国木材協同組合連合会,2003.
- 36) 金川 靖, 安島 稔, 林 和男：局所的水蒸気爆砕法によるスギ材の乾燥性改善－実大材における処理回数の影響－.木材工業.51(6),255-258(1996)
- 37) 野地清美, 政岡尚志, 須崎健太, 金川 靖, 藤原新二:爆砕高温高周波減圧乾燥法によるスギ柱材の乾燥特性.木材工業.51(1),13-18(2002)
- 38) 寺西康浩, 海本 一, 松元 浩, 吉田孝久, 古田裕三：スギ心持ち正角に対する蒸気・高周波複合乾燥（I）－高温セット時間が内部割れの発生に及ぼす影響－.木材工業.（印刷中）
- 39) 山本泰司：高周波・蒸気複合乾燥機の開発.木材工業. 56(11), 519-521(2001)
- 40) 山本泰司：木材工業における最近の高周波加熱応用.木材工業.57(9),380-385(2002)
- 41) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本登留：カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性－高温低湿乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響－.木材工業.55(8),357-362(2000)
- 42) 寺西康浩, 海本 一, 久保 健：スギ梁材に対する高温乾燥条件および高周波・蒸気複合乾燥条件の検討.奈良県森技セ研報.36,43-52(2007)
- 43) 寺西康浩, 海本 一, 黒田尚宏：高周波加熱を活用した多品目同時乾燥技術の開発.日本木材加工技術協会第27回年次大会要旨集,13-14(2009)
- 44) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 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.材料 53(4),364-369(2004)
- 45) 川井安生, 小林好紀, 石丸 優, 則元 京：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法（第6報）スギ正角材内部の水分移動における複合乾燥と高温乾燥との差異.木材学会誌 50(1),18-23(2004)

- 46) 徳本守彦, 武田孝志, 吉田孝久: スギ心持ち無背割り柱材における高温セット処理後の乾燥スケジュールが内部応力に及ぼす影響. 材料 54(4), 365-370(2005)
- 47) 印出 晃, 檜原正規, 徳本守彦, 武田孝志, 吉田孝久, 伊東嘉文, 秋山俊夫: 高温セット法によるスギ心持ち柱材の人工乾燥 (I) - 初期高温セット時間の割れに及ぼす影響 - 第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版: F221515(2003).
- 48) 寺西康浩, 海本 一, 松元 浩, 吉田孝久, 古田裕三: スギ心持ち正角に対する蒸気・高周波複合乾燥 (II) - 高温セット後の乾燥条件が内部割れの発生に及ぼす影響 - 木材工業. (印刷中)
- 49) 寺西康浩, 海本 一, 大森 拓: スギ柱材の高温乾燥における重量選別の効果. 奈良県森技セ研報 40, 21-26(2011)
- 50) 寺西康浩, 酒井温子, 岩本頼子: 4 種類の方法で乾燥したスギ、ヒノキ正角材の耐朽性. 木材工業 61(6), 248-253 (2006)
- 51) 松岡昭四郎, 雨宮昭二: 野外杭試験における耐用年数と室内試験における重量減少率との関係について. 木材工業, 28(3), 108-111 (1973)
- 52) 中村嘉明: 野外杭試験と室内耐朽性試験の関係. 木材保存, 17(1), 17-25 (1991)
- 53) 寺西康浩, 酒井温子, 南本明弘: 蒸気高周波複合乾燥を行ったスギ心材の野外耐久性 - 室内耐朽性試験結果との対比 - 木材工業 68(7), 301-304 (2013)
- 54) Shuichi Doi, Masakazu Aoyama, Shigeru Yamauchi: Changes of decay and termite durabilities of Japanese larch (*Larix leptolepis*) wood due to high-temperature kiln drying processes. J. Wood Sci., 51, 526-530 (2005)
- 55) 松元 浩, 桃原郁夫, 大村和香子, 齋籐周逸: 能登ヒバ材の乾燥温度による耐久性の変化. 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 682 (2004)
- 56) 橋本 茂, 吉村 剛, 在原重信, 梅山明美: 徳島すぎの心材色・乾燥方法の違いによる耐蟻性. 第 55 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版: Q61415 (2005)
- 57) 公益社団法人日本木材保存協会編: 木材保存学入門改訂 3 版. 東京, 公益社団法人日本木材保存協会, 2012.
- 58) 寺西康浩, 酒井温子, 海本 一, 増田勝則, 田中陽子, 伊藤貴文, 桃原郁夫, 矢田茂樹, 藤本登留, 蒔田 章, 茂山知己, 山口秋生, 手塚大介: 大断面スギ心材の乾燥と薬剤注入 (第 2 報) - 高温セット法で乾燥した正角材への薬剤浸潤と注入後の割れ. 木材学会誌 60(3), 177-185 (2014)

- 59) 酒井温子, 寺西康浩, 海本 一, 増田勝則, 田中陽子, 伊藤貴文, 桃原郁夫, 矢田茂樹, 藤本登留, 蒔田 章, 茂山知己, 山口秋生, 手塚大介: 大断面スギ心材の乾燥と薬剤注入 (1) 注入時の含水率とインサイジングが薬剤浸潤に及ぼす影響. 木材保存 37(1),12-19 (2011)
- 60) 大越 誠: “新編 木材工学”, 中戸莞二編, 養賢堂, 東京, 1985, 98.
- 61) 徳本守彦, 北原 誠, 武田孝志, 細尾佳宏, 吉田孝久: 高温セット法で乾燥したスギ正角材の内部応力 – 屋内保管と屋外保管の相違 –. 材料 59(4), 279-284(2010).
- 62) Yasuhiro TERANISHI, Haruko SAKAI, Hajimu KAIMOTO, Katsunori MASUDA, Yoko TANAKA, Takafumi ITOH, Ikuo MOMOHARA, Shigeki YATA, Noboru FUJIMOTO, Akira MAKITA, Tomomi SHIGEYAMA, Akio YAMAGUCHI, Daisuke TEZUKA, Yuzo FURUTA :
Drying and Impregnation for Heavy Timbers of Sugi Heartwood III – Preservative penetration observed on boxed-heart square timber of Sugi, dried with either the high-temperature setting treatment or the medium-temperature drying adding radio-frequency heating –. Journal of The Society of Materials Science, Japan, (in press)
- 63) 栗崎 宏, 水本克夫: 高温乾燥したスギ材の薬剤注入性評価. 第 51 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 556(2001)
- 64) 井手友海, 佐々木ふみ, 伊田純一郎, 大越 誠, 古田裕三: スギ材の液体浸透性に及ぼす乾燥温度の影響 – 有縁壁孔の閉鎖率との関係 –. 第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版 : C15-P-AM05(2012).
- 65) 川井安生, 小林好紀, 石丸 優, 則元 京: 高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法 (第 5 報) 高周波加熱と熱気乾燥の複合効果. 木材学会誌 49(6), 408-415(2003)
- 66) 栗崎 宏, 明道裕司, 米澤尚美, 谷口弘聡: 背割りなどの干割れ防止加工の保存処理スギ丸棒の耐久性への寄与. 第 59 回日本木材学会大会研究発表要旨集 CD-ROM 版 : N15-1015(2009).
- 67) 社団法人全国木材組合連合会編: わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル改訂新版. 東京, 全国木材協同組合連合会, 2006.
- 68) 中嶋 康, 飯島泰男: 乾燥方法が異なるスギ心持ち正角材の表面割れおよび乾燥コスト分析. 木材工業 68(12), 570-575(2013)

謝 辞

本論文の作成にあたり終始変わらぬご指導と激励を賜りました京都府立大学大学院生命環境科学研究科 古田裕三教授に心から感謝いたします。

本論文の取りまとめにあたり多くのご教示をいただきました、京都府立大学大学院生命環境科学研究科 松村和樹教授、同 川田俊成教授、同 宮藤久士准教授に深く感謝の意を表します。

研究の遂行および論文の作成にあたり、多くのご助言とご協力をいただきました、奈良県森林技術センター 伊藤貴文所長、同 海本 一副所長、奈良県奈良の木ブランド課 酒井温子係長、奈良県森林技術センター元副所長 小野広治氏に深く感謝の意を表します。また、奈良県森林技術センターの皆様からも、多くの激励とご協力をいただきました。厚くお礼申し上げます。特に、桑山智恵氏には日常の研究業務に多大なご協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

最後に、十分な業務が行えるよう、陰で支えてくれた妻と息子に感謝します。