

地域産材を活用した規格木材を生産するための乾燥技術の開発・改良（Ⅰ）

ーヒノキ柱材の複合乾燥法の開発ー

河崎弥生・野上英孝

1. はじめに

近年、木造住宅の建築に様々な形で関与すると思われる法律が、大幅に改正もしくは新たに制定される等、大きく変化している。まず、平成10～12年に建築基準法が50年ぶりに大改正され、仕様規定から性能規定へと建築の基本理念が大きく変革された。この改正によって、建築物の設計に多様性が認められるようになった反面、使用する部材については「性能が明確に担保された製品」であることが必要不可欠になったと考えられる。続いて平成12年には住宅の品質確保の促進等に関する法律、平成13年には消費者契約法、平成18年には住生活基本法、さらに平成19年には特定住宅瑕疵担保責任の履行の確保に関する法律が、相次いで制定された。これら一連の法律の制定によって、木造住宅についても、供給者は施主（消費者）に対して良質な住宅を提供し、一定期間、所定の性能を担保する責任があることが明確に示されたと考えられる。さらに、平成19年6月には、再び構造計算や建築確認に関して建築基準法の改正が行われ、建築確認等に大きな影響を与えている。

このような状況下において、木造住宅の主要構造部材である製材品についても、今後、強度、乾燥状態など、必要とされる性能を厳格に担保しなければならなくなったと考えられ、製材業界には、迅速で適切な対応が求められる。

本県の製材業界は、昭和60年頃から、全国に先駆けて乾燥材の生産に取り組み、乾燥材先進県の地位を確立してきた。しかし、三重県には既に生産量で後れを取り、急速に乾燥材の生産基盤を整備した宮崎県にも劣勢に立たされている。さらに、北関東、南東北地域にも乾燥材の一大産地が形成されるなど、全国各地で乾燥材生産が本格的に開始されている。このような状況下において、岡山県の乾燥材生産が、何とか現状維持が図られていけばよいと考えるならば、今後、乾燥材産地としての地位は相対的に低下していくと思われる。しかし、本県における近年の乾燥材生産基盤の整備状況を見ると、少しずつ前向きな改善が図られつつはあるが、乾燥装置の新たな導入台数などから勘案すると、今後、乾燥材の新興地域のように生産量が急増する可能性は少ない。

このような背景の中で、本県の製材業界が乾燥材生産に関して、今後も先進的地位を維持していくためには、他の地域に先駆けて、乾燥材の多くを品質・性能が厳格に担保された「規格木材」として供給できる体制を、いち早く確立することが、一つの活路開拓の道であると考えられる。

本研究課題は、乾燥材の品質・性能を現在よりも高度なレベルで担保し、他県との産地間競争

に打ち勝つことができるように、方法論としては期待されるものの具体的な手法が明らかになっていない乾燥技術に関しては新たに開発を行い、改良の可能性や必要性が指摘されている問題点等については、適切な改良を行うことを目的としたものである。

本研究課題の実施期間は5年間となっており、当初の計画としては、以下のような項目について検討を行う計画になっている。ただし、これらの項目については、研究実施過程において必要に応じて変更することも念頭に置いている。

- ①ヒノキ柱材・土台材（心持ち・無背割り）の複合乾燥法の開発
- ②ヒノキ平角材（心持ち・無背割り材）の複合乾燥法の開発
- ③スギ平角材（心持ち・無背割り）の複合乾燥法の開発
- ④低コスト乾燥法（天然乾燥、予備乾燥）と複合乾燥との組み合わせ乾燥法の検討
- ⑤「規格木材生産のための乾燥技術マニュアル（仮称）」の作成

まず初年度である平成19年度は、この中から、ヒノキ柱材（心持ち・無背割り）の複合乾燥を選択し、開発に取り組んだ。

2. 試験方法

ヒノキ柱材について、4回の複合乾燥試験を行った。

1) 試験装置

乾燥には、当センターが平成14年度に導入した複合型乾燥実験装置（オープンラボ）を用いた。本装置は、熱風加熱、高周波加熱、減圧を複合的に組み合わせできる実験用木材乾燥装置である。

2) 供試材

岡山県内産の寸法135×135×3050mmのヒノキ柱材（心持ち・背割り無し）を、1実験当たり25本を標準として供試した。さらに、これとは別に、長さ方向に分割した短尺材を、変色測定用試験材として用いた。試験材の心材率は概ね80～90%の範囲にあり、心材色は岡山県産ヒノキに多く見られるピンクがかかった赤色系である。また、乾燥前の重量選別は行っていない。

なお、試験に際しては、通常の生産現場では、製材直後には乾燥を開始できない場合が多いという取り扱い条件を勘案し、製材後一定期間を経過させ、材表面がやや乾燥しかけた状態にしてから乾燥を開始した。

3) 乾燥スケジュール

乾燥スケジュールは、4回の試験でそれぞれ特徴を持たせた。基本的な考え方としては、すべての試験で、乾燥工程全体を100℃未満の温度域としながら、なるべく変色と割れを抑制する方法を

探求するものとした。また、4回の試験ともに熱風減圧乾燥を基本としている。

実験1（実験の通し番号：複合乾燥 H19-1-1）は最も標準的と考えられる条件、実験2（実験の通し番号：複合乾燥 H19-1-2）は実験1より全体的な時間の短縮を図った厳しい条件である。さらに、実験3（実験の通し番号：複合乾燥 H19-1-3）はドライングセットのみの時間短縮を図った条件、実験4（実験の通し番号：複合乾燥 H19-1-4）は初期蒸煮について時間の短縮を行った条件である。乾燥スケジュール基本構成は、それぞれ90℃付近で初期蒸煮を行い、100℃未満でドライングセット処理を行った後、65℃前後の中温乾燥を行う乾燥方法である。

ここには、最も標準的な乾燥スケジュールである実験1の条件を示す。90℃で初期蒸煮を行い、それに続くドライングセット工程が24時間、その後の中温乾燥への移行は緩やかにを行い、さらに中温乾燥時の条件変更も緩やかに行うタイプであり、総乾燥時間は約7.5日間である。

[実験1（複合乾燥 H19-1-1）の複合乾燥スケジュール]

①蒸煮

90℃ * 16hr

②ドライングセット

乾球95~98℃、湿球85℃

減圧あり * 24hr

③乾燥

乾球65℃付近、湿球60~40℃

減圧あり

*急速な条件変化 * 120hr

④調湿

乾球65℃付近、乾湿球温度差2℃前後 * 24hr

減圧あり

④総乾燥時間

184hr（約7.5日間）

ヒノキ柱材の複合乾燥については、現段階では、乾燥特性を十分には把握できていないため、用いるべき最適な乾燥条件を理論的に構築することは困難である。したがって、これまで実施してきたスギ材の複合乾燥と同様に、今回も試行錯誤を繰り返す中で、少しずつ良好な乾燥スケジュールを構築するというを基本的な姿勢とした。

なお、ここに示した乾燥条件を採用した背景や具体的な作業工程などについては、平成18年度に作成した「木材の複合乾燥のための技術的ガイドライン」に記載している。

4) 測定

a. 乾燥前の測定

乾燥前に、試験材の重量、含水率（モコ2による）、寸法、材面の状況などを測定した。また、短尺試験材については、測色色差計を用いて材色を測定した。測色方法は、2度視野拡散受光方式で、スポット径は10mmとした。

b. 乾燥後の測定

乾燥終了後には、まず長尺材の状態では重量、含水率（モコ2による）、材面割れなどを測定した。変色測定用短尺試験材については、所定の方法により、材色の測定を行った。測定したのは、乾燥終了時の材表面、さらにそれをプレーナーによって約2mm鉋削した材面の合計2回である

その後、長尺材は材長方向に分割して、5カ所の位置から小試片を採取し、全乾重量法による含水率や水分分布の測定を行った。さらに、切断した断面において内部割れの発生量などを測定した。

切断して短尺になった試験材については、一部を屋根付きの天然乾燥場において養生し、材面割れ等の経過観察を行った。

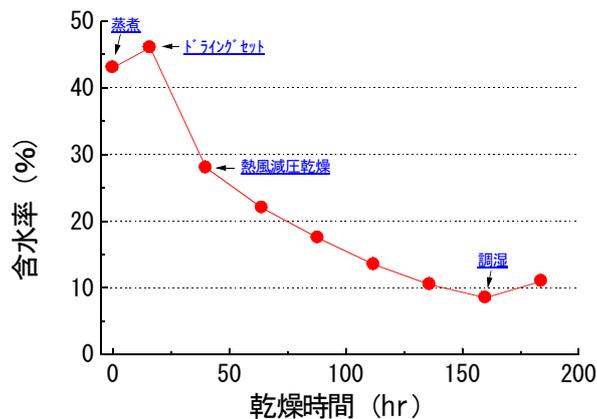
3. 試験結果

ここには、標準的な乾燥条件である実験 H19-1-1の乾燥結果について示す。

1) 乾燥経過

乾燥室内に設置したロードセルによって測定を行った試験材単体の乾燥経過の一例を、第1図に示した。このデータには、これまでと同様に、ロードセルの熱特性による測定誤差が内在していると思われるが、大まかな乾燥経過は把握可能であると判断している。

初期蒸着で、わずかに含水率が増加し、その後のドラインゲットを生じさせる段階で約16～17%程度の含水率低下が見られる。さらに、その後の熱風減圧乾燥工程では、緩やかな乾燥条件の変更に合わせて、順調に乾燥が進行している。また、最終段階の調湿工程では、含水率の上昇が見られる。



第1図 実験1の乾燥経過の概略（ロードセル試験体）

2) 初期含水率及び仕上がり含水率

試験材の初期含水率と乾燥後の仕上がり含水率を、第1表に示した。全乾重量法による含水率（全乾含水率）で、ロット平均で乾燥前に平均32.1%であったものが、乾燥終了時に10.2%に仕上がった。標準偏差は、初期には7.2%であったものが、仕上がり時には1.4%まで減少し、かなり小さいと判断される。ちなみに、乾燥後の含水率は、最高が12.9%、最低で7.6%であり、ロット全体がかなり均一な状態に仕上がっていると判断される。

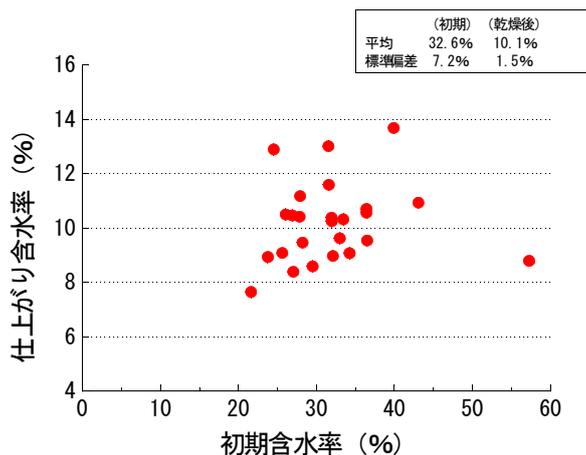
さらに、個体の平均重量は、乾燥前に30.118kgであったものが、乾燥によって25.153kgに減少した。標準偏差は、乾燥前が2.47kgであったものが、乾燥によって1.98kgに減少している。

また、高周波式木材水分計モコ2による測定（水分計含水率）では、ほとんどの材が9～12%の範囲にあり、含水率計でも、均一な仕上がり状態と判断された。

第1表 実験1における試験材の乾燥前後の含水率と重量

	全乾含水率 (%)		重量 (kg)	
	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後
最 高	57.3	12.9	34.443	28.718
平 均	32.1	10.2	30.118	25.153
最 低	21.7	7.6	26.338	20.232
標準偏差	7.2	1.4	2.47	1.98
変動係数	22.5	14.5	8.20	7.87

初期含水率と仕上がり含水率との関係を、第2図に示した。初期含水率が高い個体が、仕上がり含水率もやや高い傾向にあるが、スギ材のように明確なものではない。今回の乾燥スケジュールは、初期含水率のばらつきが多少あっても、結果として、仕上がり含水率が比較的揃う条件であったと考えられる。



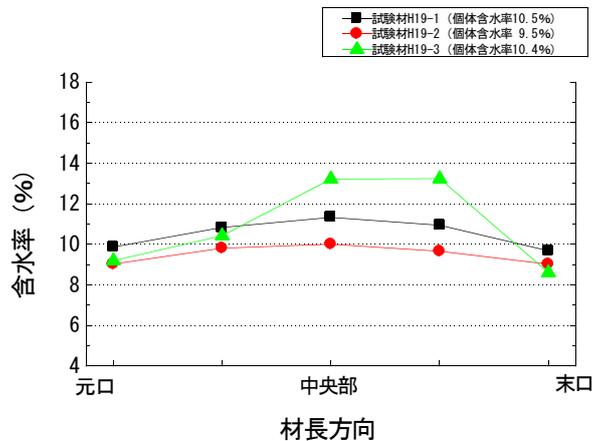
第2図 乾燥前後の試験材の含水率（全乾重量法）

3) 水分分布の状態

a. 材長方向の水分分布

人工乾燥終了時の材長方向の水分分布を、第3に示した。各測定箇所含水率は、断面の平均含水率である。全体的に材長方向の水分傾斜は小さく、最も大きい水分傾斜が観察された個体平均含水率（測定断面5箇所の含水率を平均して求めた個体全体の含水率）が10.4%の試験材 H19-3においても、4%程度に留まっている。その他の試験材 H19-1及び H19-2では2%程度に留まり、材長方向の水分傾斜は、かなり小さいと判断される。また、これまでの筆者の経験では、中温乾燥材においては元口付近の方が末口付近よりも含水率が多少高い状態に仕上がるが多かったが、今回の結果では一定の傾向は見られなかった。

また、これらの試験材は、全体的に一般的な高温乾燥材と比較して水分分布が小さいと判断されるが、今回採用した乾燥スケジュールなど、複合乾燥（熱風減圧乾燥）の良好な特徴が現れていると考えられる。



第3図 乾燥終了時の材長方向の水分分布

b. 断面方向の水分分布

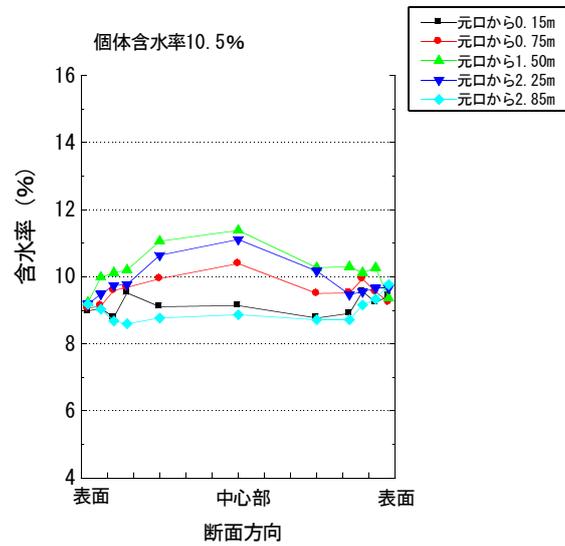
第3図に示した個体の断面方向の水分分布を、第4図～第6図に示した。

試験材 H19-1は個体含水率が10.5%であるが、断面方向の水分傾斜は材端部ではやや凹型、材中央部では凸型が観察されるが、全体的に水分傾斜は小さい。最も大きな水分傾斜が認められる材中央部においても、僅かに3%程度の傾斜に留まっている。また、表面には吸湿の履歴が認められ、乾燥末期の調湿の効果が認められる。このような水分傾斜での仕上がり状態は、今回採用した複合乾燥の特徴の一つと考えられる。

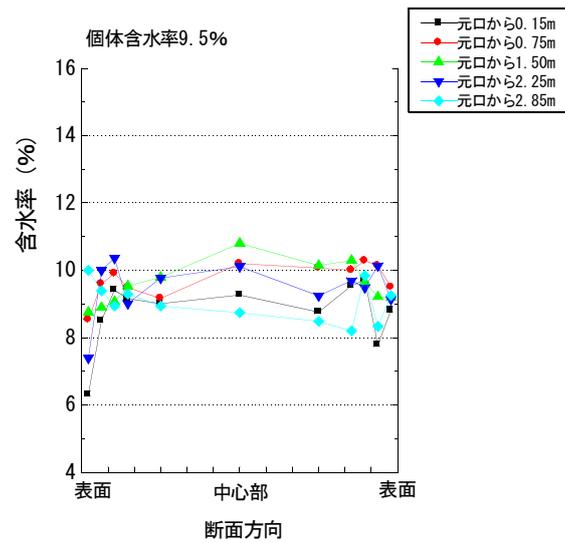
試験材 H19-2は個体含水率9.5%の材であるが、表面に含水率が低い部分が認められる。しかし、全体には、断面方向の水分傾斜は少ない状態にあると判断される。

一方、試験材 H19-3では、材中央部で4%の傾斜を有する凸型の水分分布が確認された。個体平均含水率は10.4%であり、前述の H19-1と変わらないが、材長方向の水分傾斜がやや大きかったことを勘案すると、材長方向の水分傾斜が大きな個体は断面方向の水分傾斜も大きくなりがちであることを示唆するものであろう。ただ、表面の含水率は概ね8～10%の範囲にあり、表面が極端に過乾燥状態ではないため、乾燥後の養生期間も短縮することが可能であると考えられる。

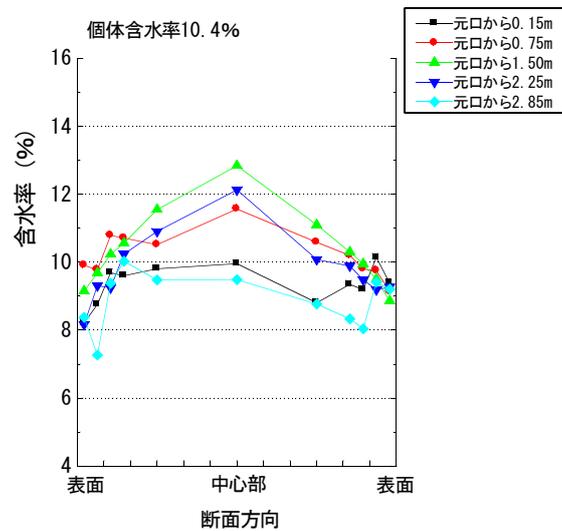
乾燥末期の調湿が養生処理に与える影響については、養生過程の含水率や寸法変化の状態を、今後詳細に追跡調査する必要があるが、これまでに実施したスギ材の実験結果では、当初予想された材面割れを助長するという現象は観察されず、養生処理に対して一定の良好な効果を与えるものと考えている。



第4図 試験材 H19-1の断面方向の水分分布



第5図 試験材 H19-2の断面方向の水分分布



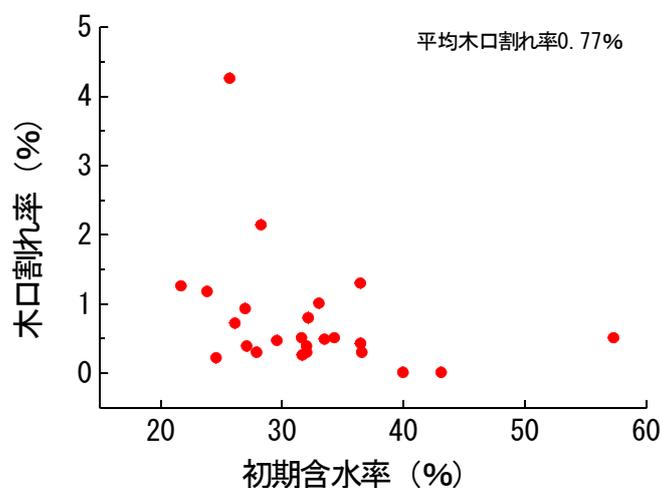
第6図 試験材 H19-3の断面方向の水分分布

4) 材面割れと木口割れの発生状況

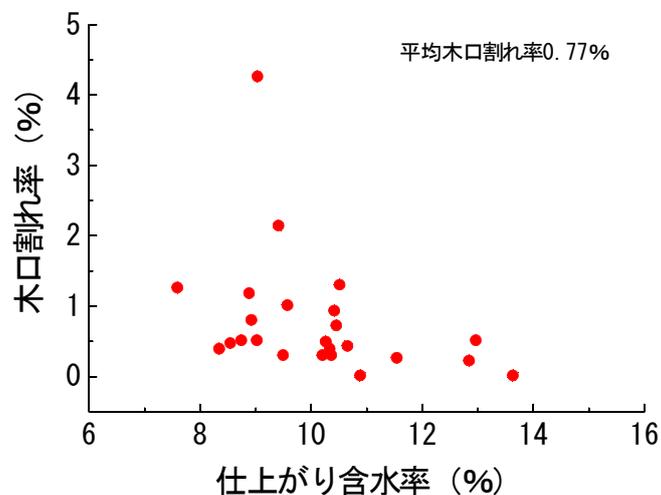
本実験では、材面割れの発生は、全ての個体において認められなかった。なお、材面割れの測定に際しては、これまでの実験で行ったように、材面に単独に発生した割れを、ヘアークラック状のものは言うに及ばず、閉塞している割れであってもなるべく詳細に見てカウントするように努めている。

今回の実験で材面割れの発生が認められなかったことから、乾燥初期のドライグセットによって材面割れの発生を抑制するという目的は、今回採用した条件を用いれば、ほぼ達成可能であると判断される。

木口割れ率と初期含水率、木口割れ率と仕上がり含水率との関係を、第7図及び第8図に示した。木口割れ率は、4材面の総長さに対する発生した木口割れ長さの合計を百分率で表したものである。なお、ここでいう木口割れは、木口から材面に及んでいる割れについて、材面部の割れ長さをカウントしたものである。木口割れの測定に当たっては、材面割れと同様に、ヘアークラック状のものは言うに及ばず、閉塞している割れであってもなるべく詳細に見てカウントした。



第7図 初期含水率と木口割れ率との関係



第8図 仕上がり含水率と木口割れ率との関係

木口割れ率と初期含水率との関係では、一部、初期含水率が低い個体の中に木口割れの発生量が多いものが見られるが、全体的には、一定の傾向は見られない。また、木口割れ率と仕上がり含水率との間にも、同様に明確な傾向は見受けられない。初期含水率が低い個体の中に少し大きな木口割れが生じたのは、乾燥前に木口面がすでに乾燥しており、乾燥初期に木口割れを誘発することが

あったためであろう。

また、木口割れ長さの絶対量としても、接合部の加工等に対して、それ程大きな影響を与えることが無いレベルではないかと判断される。しかし、さらに木口割れを抑制する改良は必要であり、湿球温度、減圧度などについて、今後、さらに検討が必要であると考えられる。

5) 内部割れの発生状況

各試験材に発生した内部割れの長さを第9図に示した。内部割れは、前述した断面方向の水分分布を測定する試験片を採取した5箇所的位置で、別に採取した試験片を用いて測定した。図中に示す内部割れの値は、これら5断面に発生していた内部割れの長さを合計したものである。なお、内部割れの測定に際しては、小さなものでも丹念に対象とするように努めた。

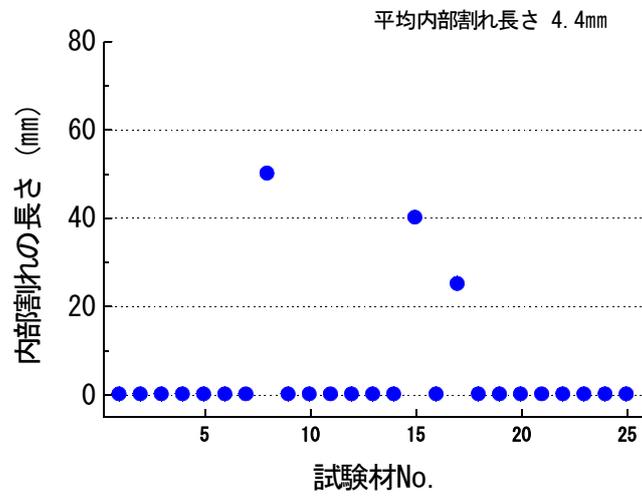
図に示すように、内部割れが発生したのは、25個体中、3個体のみである。最も大きな内部割れが発生したのは試験材 H19-8であるが、5断面に発生した内部割れの長さの合計は約50mmに留まり、またその幅も1mm以下であり、発生の程度は軽微であると判断される。なお、この個体の初期含水率は34.4%でロット平均をやや上回り、仕上がり含水率は9.0%でロット平均をやや下回っている状態にある。

各試験材に発生した内部割れの長さとの初期含水率との関係を、第10図に示した。初期含水率と内部割れの間には、一定の傾向は見られない。

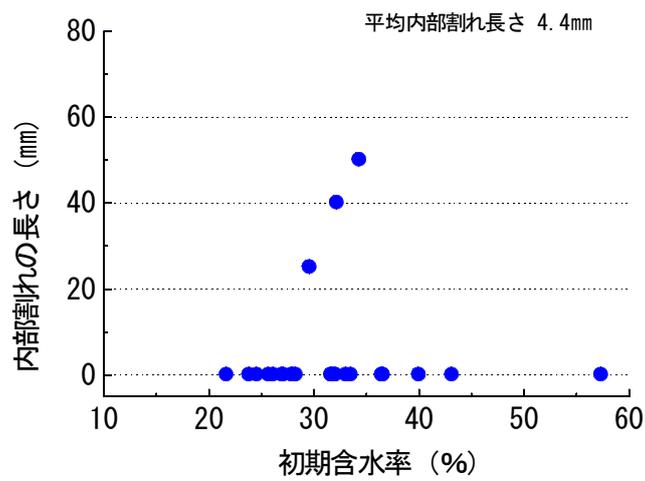
各試験材に発生した内部割れの長さとの仕上がり含水率との関係を第11図に示した。仕上がり含水率が低い個体の中に、内部割れの発生量が大きい個体があることが見て取れる。しかし、全体的に見て、一定の傾向があるとは思われない。

また、内部割れが発生した箇所を精査すると、節や腐れが影響しているように思われるケースが多かった。

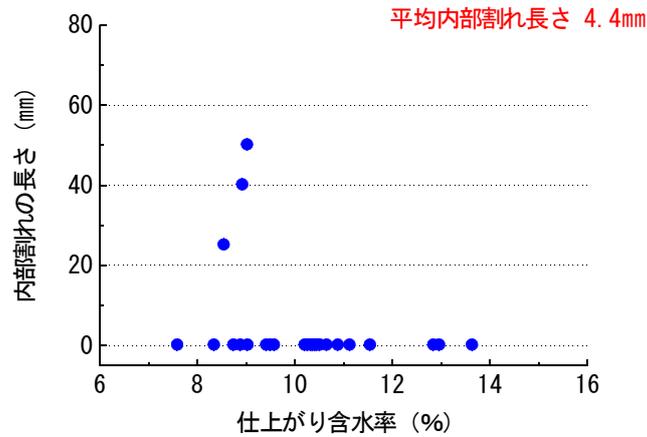
これらの結果から、今回の複合乾燥の乾燥スケジュールは、内部割れの抑制という視点からも、概ね妥当なものであると判断される。



第9図 切断した5断面に発生した内部割れの長さ



第10図 切断した5断面に発生した内部割れの長さと初期含水率との関係

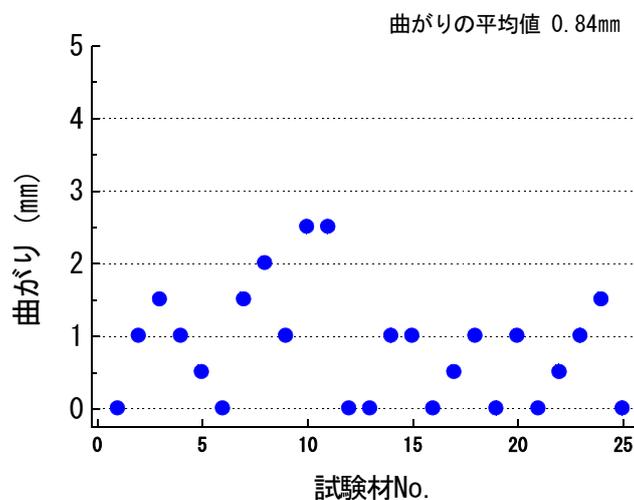


第11図 切断した5断面に発生した内部割れ長さと仕上がり含水率との関係

6) 曲がり

各個体の曲がりの発生量を第12図に示した。最も大きな曲がりは2.5mmであり、2個体に生じていた。しかし、ロット全体の平均値は約0.84mmであり、全体的に小さいと判断される。また、初期含水率や仕上がり含水率と曲がりの発生量との間には、一定の関係は見受けられない。

この実験では、乾燥時に通常行う油圧プレスによる荷重は行わなかったが、良好な結果が得られた。このことには、乾燥条件が良好なものであったことと併せて、試験材自体も比較的良好な材質であったことも影響しているかも知れない。



第12図 各個体における曲がりの発生状況

7) 変色の発生量

材色測定用試験材（赤心材）の乾燥前、乾燥後および表面仕上げ後における材色の状態を、第2表及び第3表に、平均値で示した。ここで用いているのは、 $L^*a^*b^*$ 表色系で、明度指数 L^* は明るさ、クロマティックネス指数 a^* は赤みの成分、クロマティックネス指数 b^* は黄色みの成分を表現するものである。

さらに、材色試験片の測定ポイントごとの辺材と心材の明度指数 L^* 、クロマティックネス指数 a^* 、クロマティックネス指数 b^* の複合乾燥による変化を、第13図及び第14図に示した。

まず、辺材では、明度指数 L^* は乾燥によって値が小さくなり、明るさが減少している。さらに、約2mm鉋削し、表面仕上げを行った新しい材面でも乾燥前より2.06小さくなり、明度が乾燥前の状態には回復していない。クロマティックネス指数 a^* は乾燥によって1.01大きくなり、赤み成分が少し増加している。しかし、表面仕上げ面では0.16の増加に留まり、赤色化はほとんど進行していない。一方、クロマティックネス指数 b^* も、乾燥によって2.31大きくなり、黄色み成分が増加している。しかし、表面仕上げ後の材面では0.83に留まり、わずかに黄色化が見られ程度である。これらを総合すると、辺材では、乾燥によって明度がやや減少するものの、色相には大きな変化は見られないと判断される。

心材においては、明度に関しては、辺材同様に、乾燥によって低下するものの、表面仕上げ面では乾燥前とほとんど変わらない状態である。クロマティックネス指数 a^* は乾燥によって0.83小さくなり、表面仕上げ面ではさらに大きい1.36の減少となり、乾燥前の赤みには回復せず多少退色が進行した状態にある。一方、クロマティックネス指数 b^* は、乾燥によって3.40増加し、仕上げ表面でも2.98増加した状態で、黄色化が進行している。これらを総合すると、心材では、乾燥によって明度の低下はほとんど見られないものの、心材色を形成する赤み成分がやや減少し、一方で黄色化がやや進行すると判断される。

これらを総合すると、乾燥材が実際に使用される表面鉋削後の材面の変色は、 ΔE^* では、辺材が2.23、心材が3.28であり、絶対値としては大きなものではないと判断される。

ヒノキ材は、ヒノキ特有のピンクがかかった心材色と明るい辺材とのコントラストが好まれるが、今回の試験材は、一般的な中温乾燥材と比較しても、それ程変わらない状態にあると判断された。

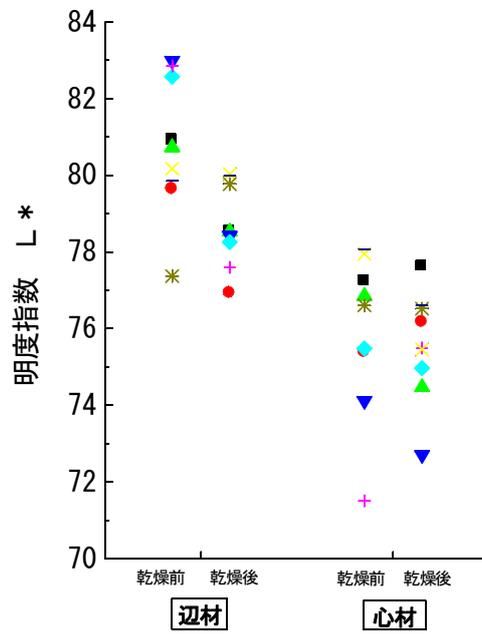
また、機器による測定はしていないが、ヒノキ特有の香りも十分に残存し、材色とも相まって、「ヒノキ材特有の風合いが、商取引上遜色がない程度には保持されている」との、木材業界関係者等の評価を得ている。

第2表 複合乾燥による辺材色の変化

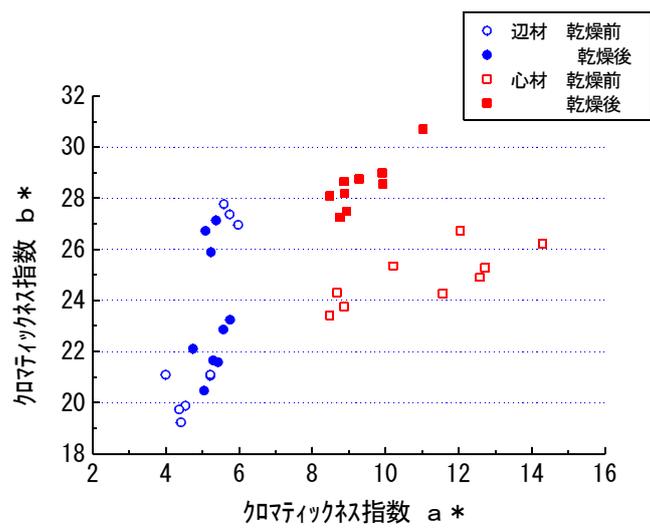
	測定値			変化した値	
	乾燥前	乾燥後	表面仕上げ後	乾燥後	表面仕上げ後
L *	80.89	74.43	78.73	- 6.36	-2.06
a *	5.15	6.16	5.31	1.01	0.16
b *	22.65	24.96	23.48	2.31	0.83
$\Delta E *$				6.84	2.23

第3表 複合乾燥による心材色の変化

	測定値			変化した値	
	乾燥前	乾燥後	表面仕上げ後	乾燥後	表面仕上げ後
L *	76.26	73.40	76.12	- 2.86	-0.14
a *	10.15	9.32	8.79	- 0.83	-1.36
b *	25.38	28.78	28.36	3.40	2.98
$\Delta E *$				4.52	3.28



第13図 明度指数 L^* の乾燥による変化



第14図 クロマティックネス指数 a^* 及び b^* の乾燥による変化

4. 実験結果のまとめ

本実験の目的は、ヒノキ材の場合、乾燥仕上がり時の変色など、特に風合いを重視した仕上がりを望む声が、業界には依然として強く存在することを踏まえて、なるべくヒノキの特有の風合いを残存させることが可能な乾燥方法と乾燥スケジュールを探求することにあった。その一つの方法として、中温域（100℃未満）の条件を用いた熱風減圧乾燥を取り上げ、実験を行った。

その結果、次のような結果が得られた。

- ①仕上がり含水率は良好で、水分傾斜も比較的小さい。
- ②材面割れは全く発生せず、木口割れも接合に大きな問題を生じさせるほど大きくはなかった。
- ③内部割れも皆無ではなかったが、発生は極めて軽微なものであった。
- ④乾燥による変色も、辺材、心材ともにそれ程大きくなり、従来の中温乾燥と遜色ない程度に抑制できることが確認された。

これらを結果を総合的に判断すると、今回の乾燥結果は概ね良好であり、当初の目的を達せするための一定の方向性は得られたと考えられる。しかし、今後、変色を抑制しながら、さらに乾燥時間の短縮化をどのように図るかという課題等も残されており、継続して研究が必要である。

5. おわりに

本県の製材業界は、かねてより乾燥材の生産に取り組み、乾燥材先進県の地位を確立してきた。その過程では、生産基盤の充実化とともに、乾燥スケジュール等の技術開発に対しても熱心な取り組みがなされてきた。岡山県の製材業界が、近年急速に乾燥材の生産基盤を整備した南九州地域や北関東地域などに対抗して、今後も乾燥材先進地として歩むためには、他の地域に先駆けて、乾燥材の多くを品質・性能が厳密に担保された「規格木材」として供給できる体制を、いち早く確立することが重要である。

本研究課題は、乾燥材の品質・性能を現在よりも高度なレベルで担保し、他県との産地間競争に打ち勝つことができるように、新たな技術開発を行うことを目的としたものである。

本年度は、当地域の主力製品であるヒノキ柱材のさらなる品質の向上を目指して、新たな乾燥方法と乾燥条件の開発に取り組み、一定の成果を得た。

平成20年度も、当初の研究計画に基づきながら、平成19年度の研究成果も踏まえた上で、試験研究を実施する予定である。