

品確法に対応するための高品質乾燥材の生産技術の開発（V）

ーオープンラボ装置によるスギ平角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、建築物の安全性等が話題となり、平成18年6月に新たに施行となった「住生活基本法」においても、第8条第1項に住宅関連業者の責任が明記され、住宅施策は量から質の時代へと転換が図られている。ちなみに、条文には「住宅関連業者は、住宅の設計、建設、販売及び管理の各段階において住宅の安全性その他の品質又は性能を確保するために必要な措置を適切に講ずる責務を有する。」と記載され、住宅関連業者は本来のエンドユーザーである施主に対して、所定の品質が担保された住宅を提供する義務を有すると解釈できる。

この理念を遂行するために重要な役割を果たすと思われる法律が、既に「住宅の品質確保の促進等に関する法律（品確法）」や「消費者契約法」として施行されている。これらの法律には、消費者保護の視点が強く反映されており、住宅の不具合に対しても、これまでよりも強い関心が持たれるようになってきている。実際に、品確法が施行されて以降、当センターに対する技術相談の中にも、住宅の不具合に関連すると思われる案件が着実に増加しつつある。

このような状況下において、木造住宅の主要部材である製材品の品質管理についても、これまでよりも一段と厳しい対応が求められるように変化しつつあり、乾燥材についてもこれまでよりも高品質な仕上がり状態が求められるようになりつつある。乾燥処理は、木材の寸法安定性を確保する上で最も基本的な加工処理であり、強度性能や耐久性との関係も深く、木材の品質を担保する上では必要不可欠なものである。

本研究課題は、品確法に対応できる高品質乾燥材の生産技術について、現状の技術の検証も含め、新たな技術開発を行うことを目的として、5年計画の研究課題として設定されたものである。

研究期間の初年度には、建築業界はどのような品質の乾燥材を求めているのかという点を調査するとともに、県内の製材工場において、新しい手法として採用され始めている高温乾燥法を用いて生産された高温乾燥材の品質を分析し、問題点の抽出等を行った。

2年目には、人工乾燥材を生産している各製材工場の乾燥装置、乾燥スケジュール、乾燥工程などを調査し、乾燥材の高品質化を図るための改良方法などを検討した。さらに、高温乾燥では内部割れや大きな変色の発生を問題点として指摘する声もあるため、より良質な高温乾燥材の生産を目的として、実験機による高温乾燥試験を行った。

3年目には、木材業界が、今後、技術開発を行うための基礎資料を得ることを目的として、オー

ブンラボ装置（複合型乾燥装置）を用いて、複合タイプの乾燥法によるスギ柱材の乾燥試験を行い、開発の方向性などについて検討した。

4年目に当たる昨年度は、同様にオープンラボ装置を用いて、主に複合乾燥によるスギ柱材の中温域（100℃未満）におけるドラインゲットの可能性について検討するとともに、複合乾燥そのものの特徴についても把握につとめた。この結果、スギ柱材の複合乾燥法について、ある程度適合すると考えられる乾燥条件を見出した。

本年度は5年目に当たり、本研究課題の最終年度である。本年度は、スギ柱材の複合乾燥条件のさらなる探求を行うとともに、スギ平角材の複合乾燥法についても検討を行った。ここには、主に、スギ平角材の研究成果を記載することとする。また、これとは別に、これまで5年間の研究成果を取りまとめた「木材の複合乾燥のための技術的ガイドライン」を作成し、関連業界へ配布することとした。

2. 試験方法

スギ平角材について、2回の乾燥試験を行った。

1) 試験装置

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

試験に用いた材は、スギ平角材で、心持ち・背割り無し状態の材である。寸法は、仕上げを120mm×240mm×3mを想定した、約140mm×260mm×3.2mの粗挽き状態の材である。また、製材後あまり日数が経過していない生材状態の材料を用いた。

心材色は赤色系の材と黒褐色系が混在しており、心材率は概ね80%以上と比較的高い状態であった。また、ほとんどが1番玉もしくは2番玉の原木であろうと思われる。

2回の試験用として32本を準備し、各試験1回あたり、15本の平角材を供試した。また、残りの2本（赤心系）を材色測定用として短尺試験材に加工し、各試験時に混載した。

3) 乾燥スケジュール

乾燥スケジュールは、2回の試験ともに、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。

実験1（実験の通し番号：複合乾燥 H18-2-1）は厳しい条件の熱風減圧乾燥、実験2（実験の通し番号：複合乾燥 H18-2-2）は同様に熱風減圧乾燥で、実験1よりは緩やかな条件である。概略は、それぞれ90℃付近で初期蒸煮を行い、100℃未満でドラインゲット処理を行った後、80℃前後

の中温乾燥を行う乾燥方法である。

実験1はドライグセット工程が2日間で、その後の中温乾燥も短時間で厳しい条件へと移行させる厳しいタイプであり、総乾燥時間は約10.5日間である。一方、実験2はドライグセット工程を3日間に延長させ、その後の中温乾燥も徐々に厳しい条件へと移行させる緩やかなタイプであり、総乾燥時間は約11.5日間である。

[実験1（複合乾燥 H18-2-1）の複合乾燥スケジュール]

①蒸煮

90℃ * 17hr

②ドライグセット

乾球 95~98℃、湿球 85℃

減圧あり * 48hr

③乾燥

乾球 80℃付近、湿球 75~55℃

減圧あり

* 急速な条件変化 * 192hr

④総乾燥時間

257hr（約10.5日間）

[実験2（複合乾燥 H18-2-2）の複合乾燥スケジュール]

①蒸煮

90℃ * 19hr

②ドライグセット

乾球 95~98℃、湿球 85℃

減圧あり * 72hr

③乾燥

乾球 80℃付近、湿球 75~55℃

減圧あり

* 緩やかな条件変化 * 192hr

④総乾燥時間

283hr（約11.5日間）

複合乾燥は、現段階では乾燥特性自体を詳細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、現在の知見の最善を尽くしても困難であると言わざるを得ない。したがって、今回も試行錯誤を繰り返す中で、少しずつ適当な乾燥スケジュールを構築する作業を

行うということを基本的な姿勢とした。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、別途作成した「木材の複合乾燥のための技術的ガイドライン」を参考にさせていただきたい。

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。

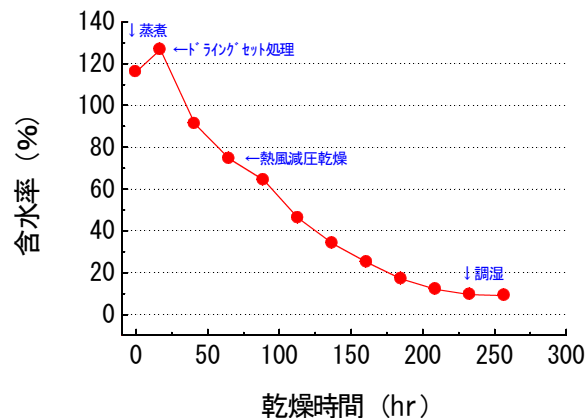
切断して短尺になった試験材については、一部を屋根付きの天然乾燥場において養生し、材面割れ等の経過観察を行った。

3. 実験1（実験 H18-2-1）の試験結果

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1-1図に示した。このデータには、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。

初期蒸煮で、わずかに含水率が増加し、その後のドラインセットを生じさせる段階で約50%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、乾燥条件を緩やかな状態から短時間で厳しい状態に変化させた初期ステップにおける乾燥速度はやや遅いが、その後は順調に乾燥が進行している。しかし、その後は乾燥条件を変化させなかったために、乾燥末期には次第に乾燥速度が減少するという経過をたどった。これらの乾燥経過は、全体的に見れば、与えた乾燥条件に敏感に反応しており、概ね当初から予想された範囲の挙動である。



第 1-1 図 実験 1 の乾燥経過の概略

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 1-1 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 100.7 %であったものが、乾燥終了時に 11.1 %に仕上がった。標準偏差は、初期には 21.97 %であったものが、仕上がり時には 11.12 %に減少したが、依然として大きいと判断される。これは、6.3 %という過乾燥な個体がある一方で、28.5 %という個体に代表されるように、まだ高含水率の材が存在するためである。

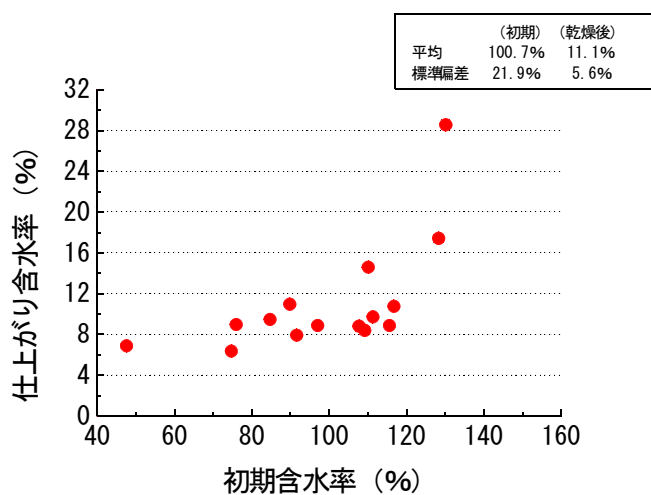
個体の平均重量は、乾燥前に 74.472kg であったものが、乾燥によって 41.321kg に減少した。標準偏差は、乾燥前が 10.61kg であったものが、乾燥によって 5.02kg まで減少した。

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 ~ 15 %の範囲にあったが、一部の高含水率材は 25 ~ 30 %の範囲を示した。

初期含水率と仕上がり含水率との関係を、第 1-2 図に示した。初期含水率が高い個体が、概ね仕上がり含水率も高い傾向にある。特に、初期含水率が 130 %前後の個体では、仕上がり含水率が高くなることが知られる。しかし、多くの個体の仕上がり含水率は 10 %前後にあり、断面が大きなスギの平角材の乾燥状態としては、乾燥日数等と勘案すると、比較的揃っていると判断される。

第 1-1 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	117.0	28.5	101.568	56.610
平 均	100.7	11.1	74.472	41.321
最 低	47.9	6.3	58.038	34.994
標準偏差	21.97	11.12	10.61	5.02
変動係数	21.82	50.17	14.25	12.14



第 1-2 図 乾燥前後の試験材の含水率 (全乾重量法)

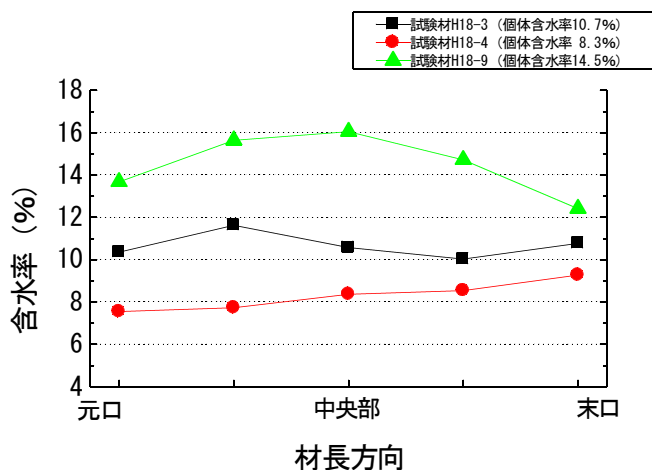
3) 水分分布の状態

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 1-3 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、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 14.5 % の試験材 H18-9 でも、4 % 以下に留まっている。

また、一般的な中温乾燥材においては、元口付近の方が末口付近よりも概して含水率が高い状態に仕上がる傾向が見られるが、今回の結果では一定の傾向は見られない。

これらの試験材は、全体的に、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等、複合乾燥の特徴が現れていると考えられる。



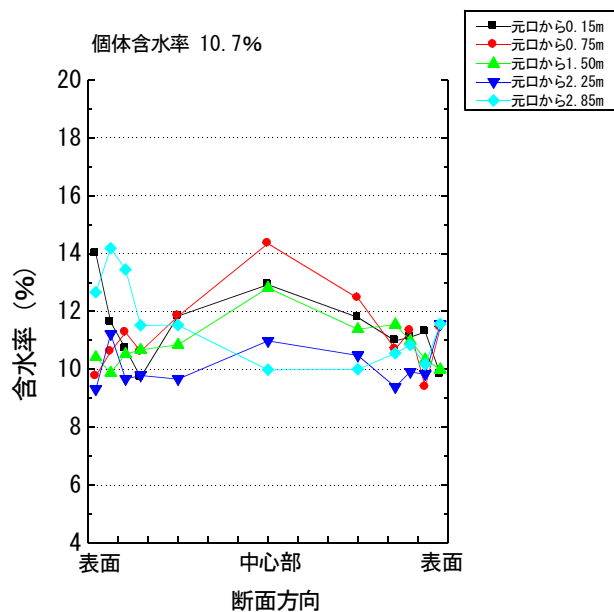
第 1-3 図 乾燥終了時の材長方向の水分分布

b. 断面方向の水分分布

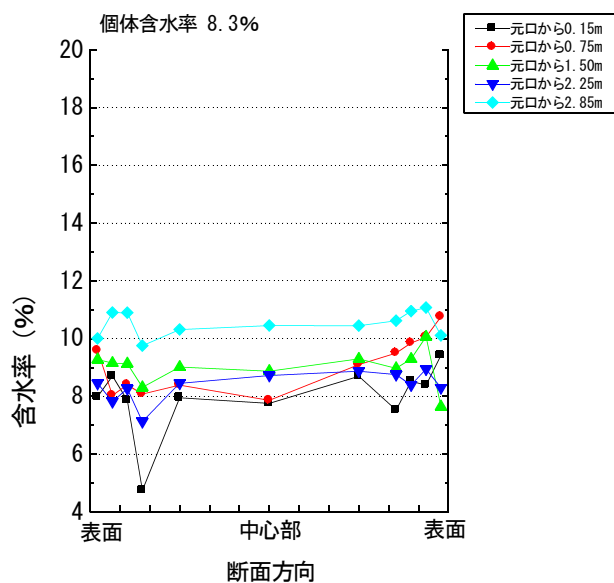
第 1-3 図に示した個体の断面方向の水分分布を、第 1-4 図～第 1-6 図に示した。試験材 H18-3 は個体含水率が 10.7 % であるが、断面方向の水分傾斜は材端部ではやや凹型、材中央部では凸型が観察されるが、全体的に水分傾斜は小さい。また、表面には吸湿の履歴が認められ、乾燥末期の調湿の効果が認められる。高温乾燥材では、同レベルの個体含水率の材料でも、これよりもかなり大きな水分傾斜が存在することを確認しているが、今回の緩やかな水分傾斜は、今回採用した複合乾燥の特徴の一つと考えられる。

試験材 H18-4 は個体含水率 8.3 % の材であるが、断面方向の水分傾斜は極めて少ない。この個体は一旦過乾燥状態まで乾燥が進行したものと推察されるが、調湿工程で表面に吸湿が生じ、結果と

して水分傾斜が小さい状態で仕上がったものと考えられる。

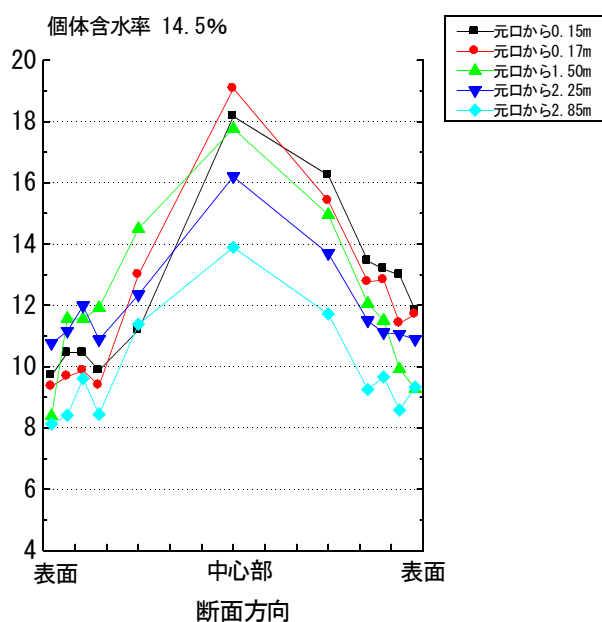


第 1-4 図 試験材 H18-3 の断面方向の水分分布



第 1-5 図 試験材 H18-4 の断面方向の水分分布

一方、試験材 H18-9 では、すべての断面で凸型の水分分布が確認された。個体平均含水率は 14.5 % であるので、他の個体と比較するとやや高いが、最大で約 10 % の水分傾斜が存在する。しかし、表面の含水率は 8 ~ 12 % の範囲にあり、表面が極端に過乾燥状態でないため、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、これまでの実験結果では、材面割れを助長することもなく、養生処理に一定の効果をもたらすと判断している。



第 1-6 図 試験材 H18-9 の断面方向の水分分布

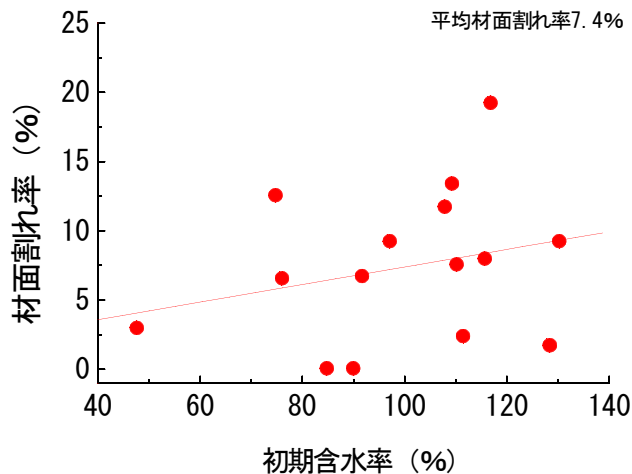
4) 材面割れと木口割れの発生状況

材面割れ率と初期含水率、材面割れ率と仕上がり含水率との関係を、第 1-7 図及び第 1-8 図に示した。材面割れ率は、4 材面の総長さに対する発生した割れ長さの合計を百分率で表したものである。材面割れは、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した。

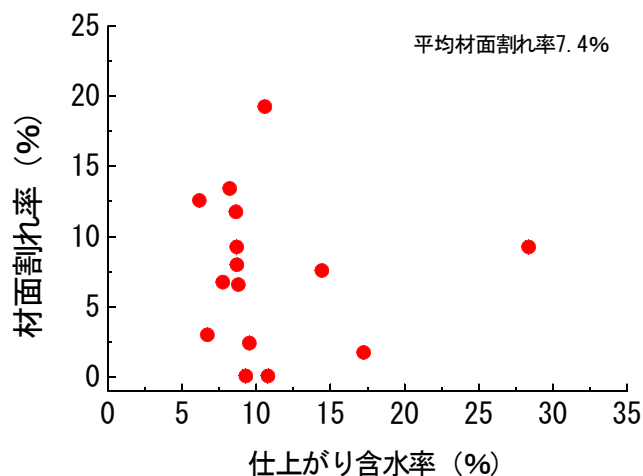
全く材面割れが発生しなかったのは 2 個体のみで、他の個体には何らかの材面割れが発生した。全体の傾向としては、初期含水率が高い個体の方が、低い個体と比較して材面割れが大きくなることが認められた。しかし、材面割れと仕上がり含水率との間には一定の傾向は認められなかった。

発生した量としては、大きな個体もあり、材面割れ抑制のためのドラインセット処理が適切で

はないと判断される。同様なドラインゲット処理方法を柱材に適用した場合には、今回の平角材よりも材面割れが抑制できたことを勘案すると、柱材とは異なる処理条件を探求する必要があると考えられる。

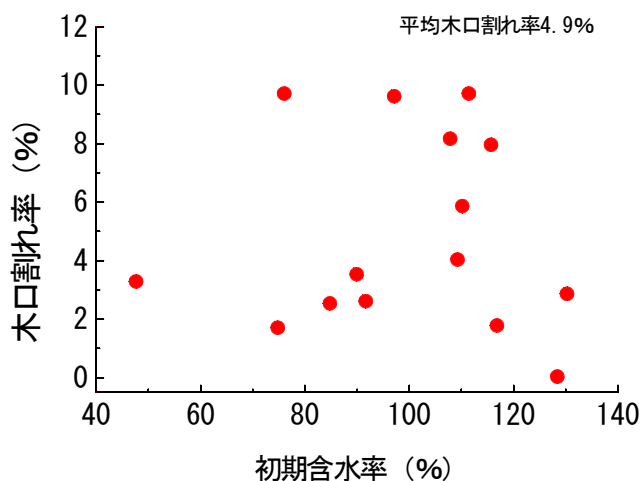


第 1-7 図 初期含水率と材面割れ率との関係

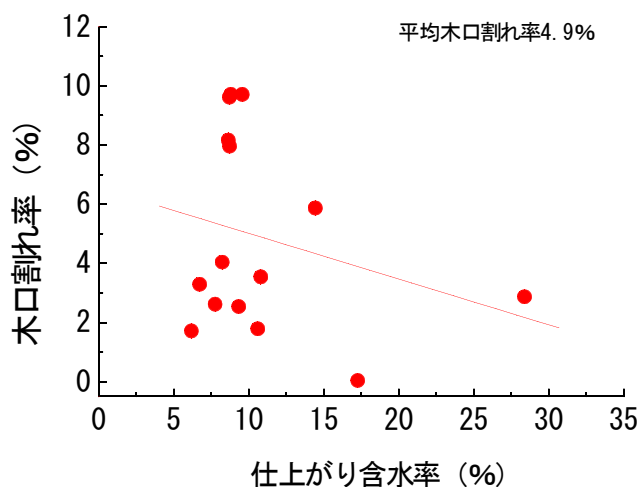


第 1-8 図 仕上がり含水率と材面割れ率との関係

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 1-9 図及び第 1-10 図に示した。木口割れ率は、材面割れ率と同様に 4 材面の総長さに対する発生した割れ長さの合計を百分率で表したものである。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。なお、木口割れの長さは、材面割れと同様に、ヘアークラック状のものには言うに及ばず、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 1-9 図 初期含水率と木口割れ率との関係



1-10 図 仕上がり含水率と木口割れ率との関係

木口割れ率は、初期含水率との間には一定の傾向は見られないが、仕上がり含水率との間には弱い相関が見られる。また、木口割れ長さの絶対量としては、接合部の加工等を勘案すると、大きいと判断される個体も見受けられる。これらの状態を総合的に勘案すると、初期含水率が比較的高い個体の中で乾燥速度が大きな個体に木口割れが発生しやすいのではないかと推察される。具体的には、辺材率が比較的高く、初期の含水率としては高いが、乾燥速度は大きい個体がこれに該当すると考えられ、これらの個体に対応するためには、初期の乾燥条件を改良する必要があると考えられる。今回の乾燥条件は、ドラインセットの時間も平角材用としては短く、その後の乾燥工程でも急速に厳しい条件に移行させている。おそらく、このことが、木口割れを増大させる要因の一つとなったのではないかと考えている。湿球温度、減圧度などについて、今後の検討が必要である。

5) 内部割れの発生状況

これまでのスギ柱材の実験では、内部割れは、節周辺部の剥離に起因するものが若干の個体に認められたのみで、単独に発生したものはほとんど観察されなかったが、今回のスギ平角材においては、何らかの内部割れが全体の 2/3 の個体に発生した。これは、柱材とは明らかに異なる状況である。

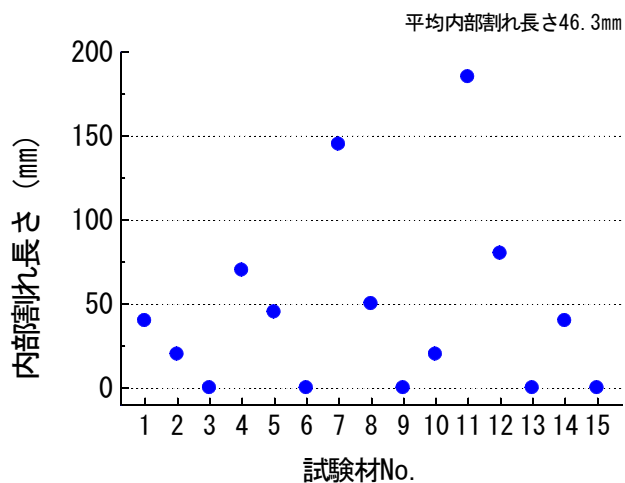
各試験材に発生した内部割れの長さを第 1-11 図に示した。内部割れは、前述した断面方向の水分分布を測定する試験片を採取した 5 箇所位置で、別に採取した試験片を用いて測定した。図中に示す内部割れの値は、これら 5 断面に発生していた内部割れの長さを合計したものである。なお、内部割れの測定に際しては、小さなものでも丹念に対象とするように努めた。

図に示すように、最も大きな内部割れが発生したのは試験材 H18-11 であり、5 断面に発生した内部割れの長さの合計は 185 mm に達していた。この個体の初期含水率は 97.3 % で、ロット平均を下回っている。次いで大きな内部割れが発生した個体は H18-7 であり、長さは 145 mm である。この個体の含水率は 108.1 % で、ロット平均をやや上回るものの、際立って含水率が高い個体ではない。なお、これらの内部割れの幅は、1 ~ 2 mm 程度のものが大半であり、最大でも 3 mm に留まっていた。

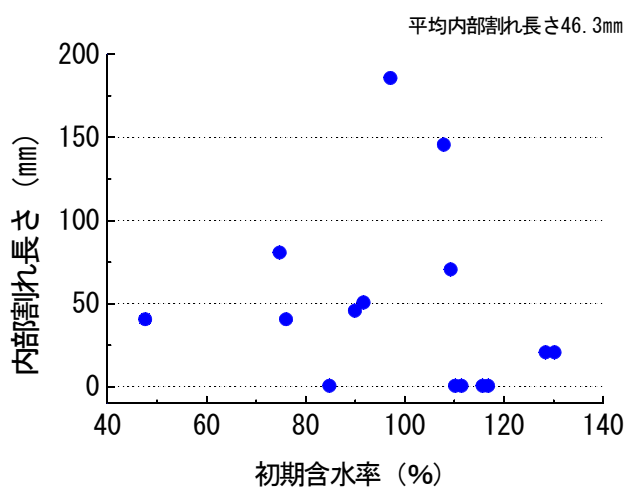
各試験材に発生した内部割れの長さとの関係を、第 1-12 図に示した。初期含水率と内部割れの間には、一定の傾向は見られない。

各試験材に発生した内部割れの長さとの関係を第 1-13 図に示した。仕上がり含水率が低い個体の方が、高い個体よりも内部割れの発生量は大きい傾向が見て取れる。すなわち、内部割れが生じるような乾燥条件下に木材が置かれた場合には、低含水率まで乾燥させるほど内部割れが大きくなると言える。このことは、高温乾燥において一般的に指摘されている知見と類似しているが、ここで重要なのは中温域の複合乾燥においても、乾燥スケジュールの選択によっては内部割れが発生するという点である。この結果から、今回の複合乾燥スケジュールは、内部割れを

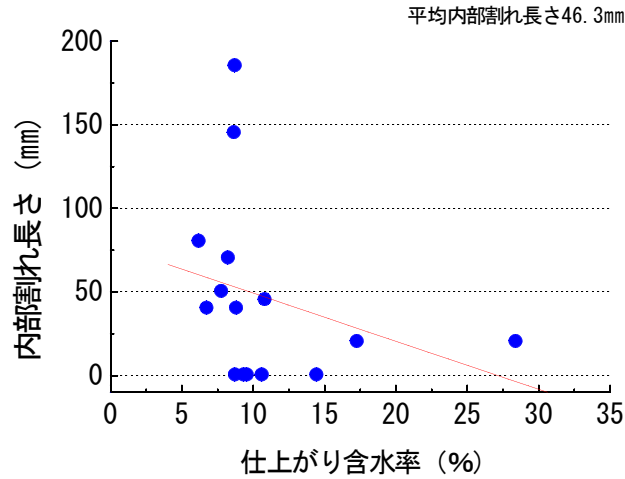
完全に抑制できるものではなく、改良が必要であると判断される。詳細には、これらの内部割れが、乾燥工程のいつの時点で、どのようなメカニズムで発生したものかという点について、検討を行う必要がある。



第 1-11 図 切断した 5 断面に発生した内部割れの長さ



第 1-12 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



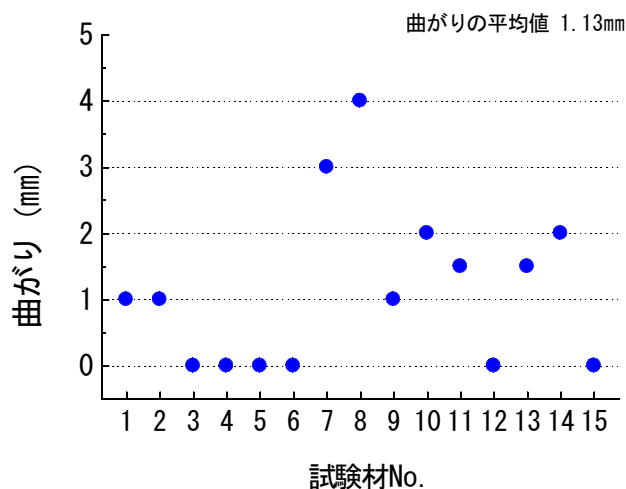
第 1-13 図 切断した 5 断面に発生した内部割れ長さと仕上がり含水率との関係

6) 曲がり

各個体の曲がりの発生量を第 1-14 図に示した。発生した曲がりのロット全体の平均値は約 1.13 mm であり、小さいと判断される。3～4 mm の曲がりが発生した個体もあったが、これらは偏心材から木取りされた材であった。

乾燥に際しては、油圧プレスによって载荷しているが、これが曲がりの抑制に一定の良好な効果を与えていると考えられる。しかし、载荷によって人工乾燥時に曲がりを抑制できたとしても、人工乾燥後の養生期間あるいは使用後に、载荷による拘束が解放されて狂いが発生することもあり、今後の挙動を確認しておく必要があると考えている。

木材乾燥の現場では、曲がりの過度な抑制について疑念を示す声も聞かれる。すなわち、経営的な視点に立てば、あて材や偏心材から木取りした製材品であっても、工場から出荷する時点で曲がりが発生していなければ、一義的には通直材と見なされることもある。したがって、乾燥時に载荷して曲がり等が発生するのを抑制することは経営的には価値があることであり、選択されて当然と思われる手法である。しかし、それらの材に、出荷後に狂いが発生しないという保証はなく、品質を担保するという視点においては、問題点を内在しているとも考えられる。「乾燥によって曲がる材は、あえて曲がりを発せさせた上で修正挽きを行い、選別した形で出荷するのが本来取るべき方法ではないか」との意見も、一部においては聞かれる。この議論に対する判断は難しく、最終的には各製材工場の経営理念に委ねられる内容のものであろう。



第 1-14 図 各個体における曲がりの発生状況

7) 実験 1 (実験 H18-2-1) のまとめ

この実験の主たる目的は、これまでの柱材と異なり、無背割りのスギ心持ち平角材に対して、材面割れ抑制のために、中温域（100℃未満）でのドライグセット形成の可能性を探求することであり、そのための複合乾燥法の特徴を検討することであった。また、主要な課題として、曲げ荷重に対する耐力が求められる材料として、特に内部割れを極力抑制することも、念頭に置いた実験であった。

今回の実験結果を総合的に考察すると、今回用いた複合乾燥条件では、無背割りのスギ心持ち平角材には十分な対応ができないと判断される。しかし、仕上がり状態は、改良の余地も無いほど全く問題にならないレベルとまでは考えられず、各因子の条件設定をさらに工夫すれば、当初の目的を達成できる可能性があることを示唆するものであると判断される。本来、複合乾燥法に関しては、乾燥に関与する関連因子の数が多いため、基礎実験には時間を要すると思われるが、この結果を踏まえて、実験 2 を行うこととした。

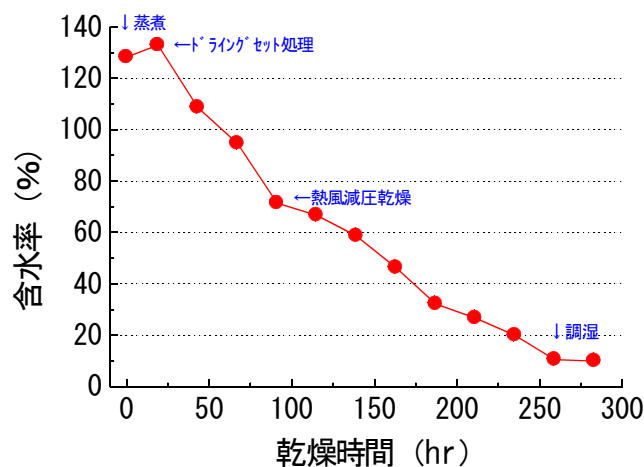
4. 実験 2（実験 H18-2-2）の試験結果

実験 2 は、2-3) に記載した乾燥スケジュールに示したとおり、材面割れを抑制するためにドライングセットの時間を 48hr から 72hr に延長し、内部割れを抑制するために乾燥条件の移行を緩やかに改良した条件を採用したものである。乾燥時間は、実験 1 と比較して、ドライングセットを延長した時間に相当する 24hr だけ長く、全体で 283hr である。

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 2-1 図に示した。このデータには、実験 1 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。

初期蒸煮で、わずかに含水率が増加し、その後のドライングセットを生じさせる段階で約 60 % 程度の含水率低下が見られる。ドライングセット時間が延長されたため、この期間の含水率低下は実験 1 と比較して 10 % 程度大きい。その後の熱風減圧乾燥工程は、乾燥条件を緩やかに変化させたため、全体的に緩やかではあるが、乾燥後期まで極端に乾燥速度が小さくならない状態で乾燥が進行している。実験 1 では、ドライングセット後に一気に厳しい状態に変化させたため、熱風減圧乾燥初期から中期の乾燥速度は大きかったが、次第に乾燥速度が減少するという経過をたどったが、これと比較すると、今回乾燥条件を緩やかに変更したことが着実に乾燥経過に反映されていることが見て取れる。



第 2-1 図 実験 2 の乾燥経過の概略

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 2-1 表に示した。全乾重量法による含水率（全乾含水率）で、乾燥前に平均 88.1 %であったものが、乾燥終了時に 9.0 %に仕上がった。標準偏差は、初期には 22.71 %であったものが、仕上がり時には 1.87 %にまで大きく減少した。これは、ロット全体の平均含水率が 9 %と、やや過乾燥ぎみな状態まで乾燥したとは言え、ロット内の含水率むらが小さい良好な仕上がりである。なお、初期含水率はロット平均で、実験 1 よりも約 12 %程度低かった。

個体の平均重量は、乾燥前に 69.358kg であったものが、乾燥によって 40.159kg に減少した。標準偏差は、乾燥前が 10.78kg であったものが、乾燥によって 3.51kg まで減少した。

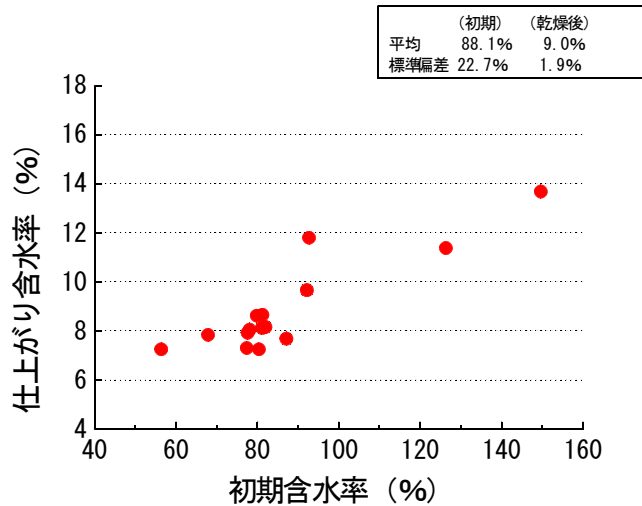
高周波式木材水分計モコ 2 による測定（水分計含水率）では、ほとんどの材が 9 ~ 13 %の範囲にあった。

第 2-1 表 実験 2 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	149.9	13.6	91.432	46.466
平 均	88.1	9.0	69.358	40.159
最 低	56.6	7.2	57.782	33.244
標準偏差	22.71	1.87	10.78	3.51
変動係数	25.80	20.78	15.54	8.74

初期含水率と仕上がり含水率との関係を、第 2-2 図に示した。初期含水率が高い個体が、概ね仕上がり含水率も高い傾向にある。しかし、初期含水率が 150 %の個体でも 13.6 %に仕上がっており、良好な乾燥状態である。このことは、今回採用した乾燥スケジュールが、高含水率材であっても十分に含水率を低下させることができる時間を確保したものであったことを示すものであろう。

これらの点を踏まえると、今後、時間短縮の可能性があるととも考えられる。



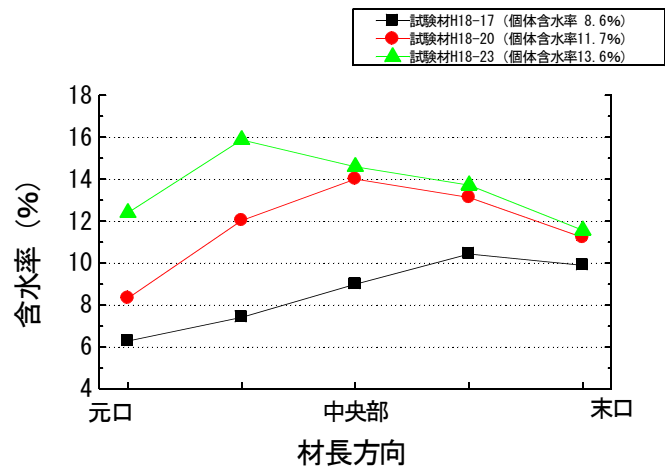
第 2-2 図 乾燥前後の試験材の含水率（全乾重量法）

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 2-3 に示した。各測定箇所含水率は、実験 1 と同様に、断面の平均含水率である。今回の結果も全体的に材長方向の水分傾斜は小さく、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 13.6 % の試験材 H18-23 でも、4 % 程度に留まっており、最も大きな材長方向の水分傾斜が見られた試験材 H18-20 においても 6 % である。また、中温乾燥に見られることがある元口付近の方が末口付近よりも含水率が高い状態に仕上がる傾向は、今回は見られない。

これらの試験材は、実験 1 と同様に、高温乾燥材と比較すると、全体的に水分分布が小さいと判断され、複合乾燥の特徴が現れていると考えられる。なお、実験 1 と今回の実験 2 との間に、明確な差は見られない。



第 2-3 図 乾燥終了時の材長方向の水分分布

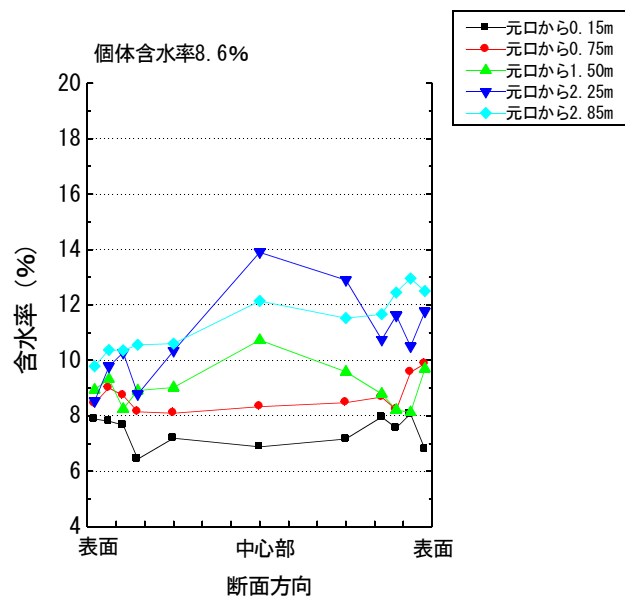
b. 断面方向の水分分布

代表的な個体の断面方向の水分分布を、第 2-4 図～第 2-6 図に示した。試験材 H18-17 は個体含水率が 8.6 %であるが、断面方向の水分傾斜は材端部ではほぼフラットな状態、材中央部ではやや凸型が観察されるが、全体的に水分傾斜はさほど大きくない。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。高温乾燥材では、同レベルの個体含水率の材料でも、これよりもかなり大きな水分傾斜が存在することを確認しているが、今回の緩やかな水分傾斜は、今回採用した複合乾燥の特徴の一つと考えられる。

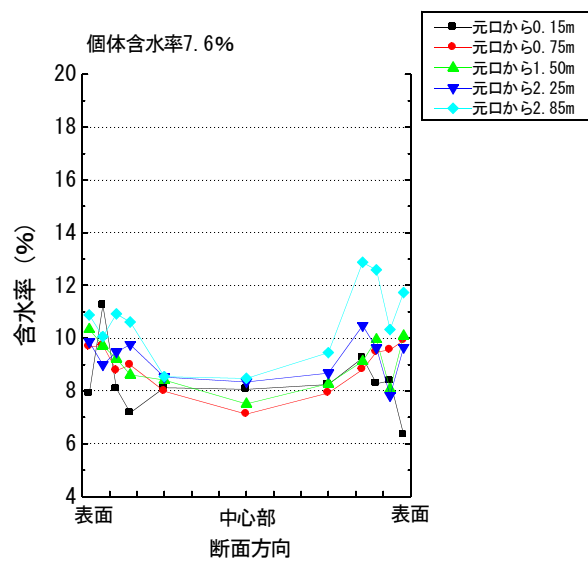
試験材 H18-19 は個体含水率 7.6 %の材であるが、断面方向の水分傾斜は全体的に凹型になっている。この個体は仕上がり時点よりも低含水率まで乾燥が進行した後に、調湿工程で表面に吸湿が生じ、結果として凹型の水分傾斜がに仕上がったものと考えられる。

一方、試験材 H18-20 では、多くの断面で凸型の水分分布が確認された。個体平均含水率は 11.8 %であるので、前述の 2 個体と比較するとやや高いが、材中央部では最大では約 9 %の水分傾斜が存在する。また、材端部と材中央部における含水率傾斜には差が認められ、材端部の方が材中央部よりも概して水分傾斜は小さい。しかし、全体的に見れば、材表面の含水率は 7 ～ 13 %の範囲にあり、表面が極端に過乾燥状態でないため、乾燥後の養生期間は短縮できる可能性が高いと考えられる。

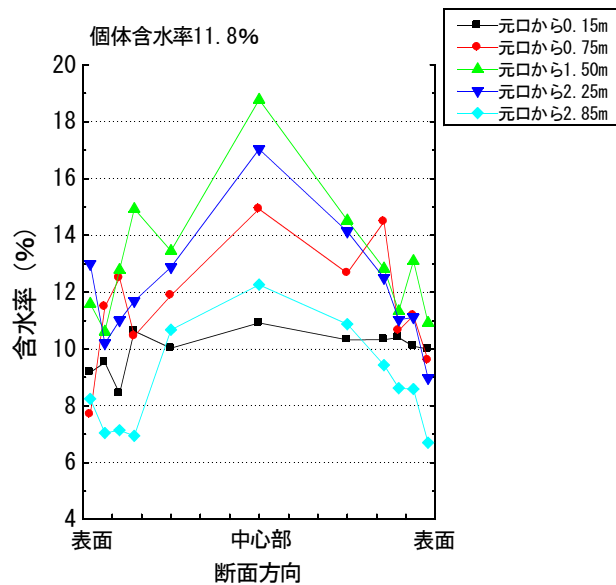
乾燥末期の調湿が養生処理に与える影響については、前述したように、養生過程の含水率や寸法変化の状態を、今後詳細に追跡調査する必要があるが、この実験においても、養生期間に材面割れを助長するという挙動は観察されず、養生処理に一定の効果をもたしていると判断される。



第 2-4 図 試験材 H18-17 の断面方向の水分分布



第 2-5 図 試験材 H18-19 の断面方向の水分分布



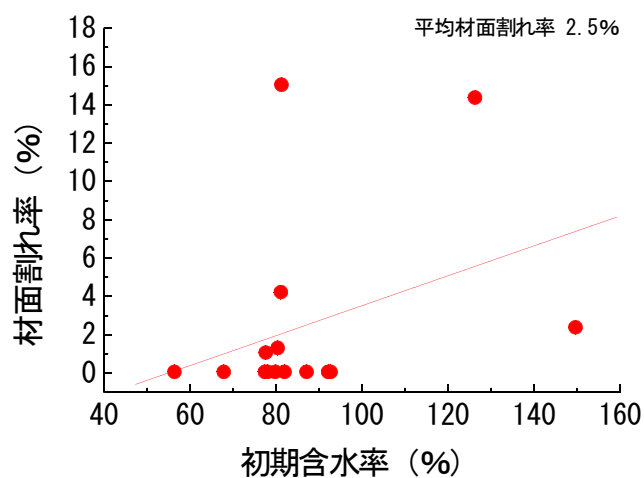
第 2-6 図 試験材 H18-20 の断面方向の水分分布

4) 材面割れと木口割れの発生状況

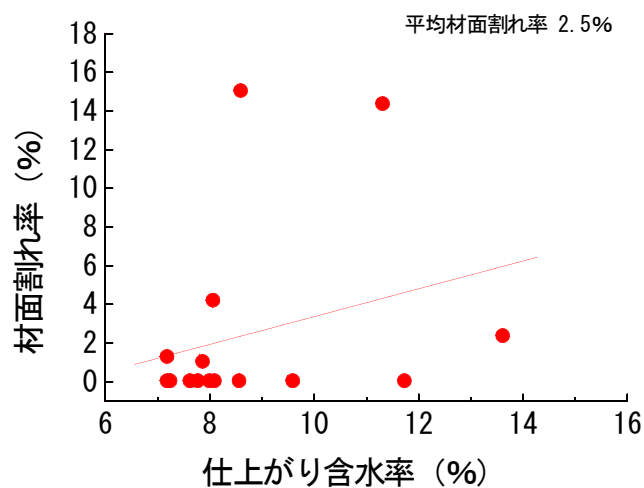
材面割れ率と初期含水率、材面割れ率と仕上がり含水率との関係を、第 2-7 図及び第 2-8 図に示した。材面割れ率は、4 材面の総長さに対する発生した割れ長さの合計を百分率で表したものである。材面割れは、実験 1 と同様に、材面に単独に発生した割れを、ヘアークラック状のものや、閉塞している割れであってもなるべく詳細に観察して、割れとしてカウントした。

今回の実験では、全く材面割れが発生しなかった個体が全体の 60 % に達し、僅か 13 % であった実験 1 とは、大きく異なる結果となった。また、2 個体は材面割れ率が 15 % 前後に達していたが、その他の個体は、発生しても量的には少なかった。全体の傾向としては、初期含水率が高い個体の方が、低い個体と比較して材面割れが大きくなることが認められた。また、材面割れと仕上がり含水率の間にも、弱いながらも、仕上がり含水率が高い個体に材面割れが多く発生している傾向が認められた。

大きな材面割れが発生した個体には、部分的にシミ材（枝打ちの不良などによって発せする変色、或いは軽度の腐朽）状態の箇所や大きな節などがあり、これらが材面割れの発端になった可能性がある。材面割れの発生をさらに減少させるためには、このような材を包含したロットを前提とした材面割れ抑制のためのドライグセット処理条件を見出すか、あるいは材面割れのリスクが高い材を予め選別するなどの対策が必要となろう。



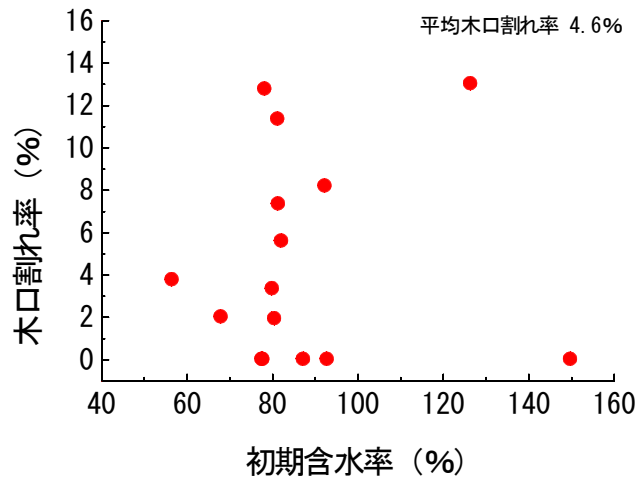
第 2-7 図 初期含水率と材面割れ率との関係



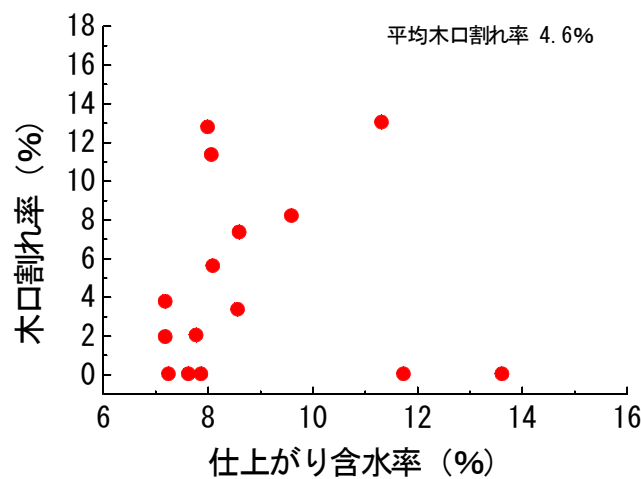
第 2-8 図 仕上がり含水率と材面割れ率との関係

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 2-9 図及び第 2-10 図に示した。木口割れ率は、材面割れ率と同様に 4 材面の総長さに対する発生した割れ長さの合計を百分率で表したものである。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。また、木口割れの長さは、材面割れと同様に、ヘアークラック状のものや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 2-9 図 初期含水率と木口割れ率との関係



2-10 図 仕上がり含水率と木口割れ率との関係

木口割れ率は、初期含水率、仕上がり含水率との間に、ともに一定の傾向は観察されない。また、ロットの平均木口割れ率は 4.6 % で、実験 1 の 4.9 % と比較して僅かに小さいが、大まかな傾向は

変わらない。木口割れ率 4.6 % という値は、長さに換算すると 3 m 当たり 13.8 cm である。これは、木口シールの際に木口端部から材面にも 20 cm シール材を塗布しておるが、この範囲内におさまっている程度の割れ長さである。すなわち、木口割れ抑制のためのシールが一定の効果を果たしていることは明らかであり、この程度の木口割れは、抑制対策が取られても生じてしまう割れとも考えられ、許容されてしかるべきレベルのものであるとも思われる。しかし、接合部の加工等を勘案すると、中には大きい木口割れと判断される個体も見受けられ、これらをさらに減少させるために、今後、さらに木口シールの方法や乾燥時の減圧条件などに工夫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 2-11 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。内部割れの測定に際しては、実験 1 と同様に、小さなものでも丹念に対象とするように努めた。

今回の実験では、内部割れが全く発生しなかった個体が全体の 53 % を占め、平均内部割れ長さも 9.5 mm に留まっていた。これは、全体の 2/3 の個体に内部割れが発生し、平均内部割れ長さも 46.3 mm と大きかった実験 1 とは、明らかに異なる仕上がり状態である。すなわち、今回の状態は、節周辺部の剥離に起因するもの等が多く、単独に発生したものは少ないというこれまで実験してきた柱材の仕上がり状態と類似している。

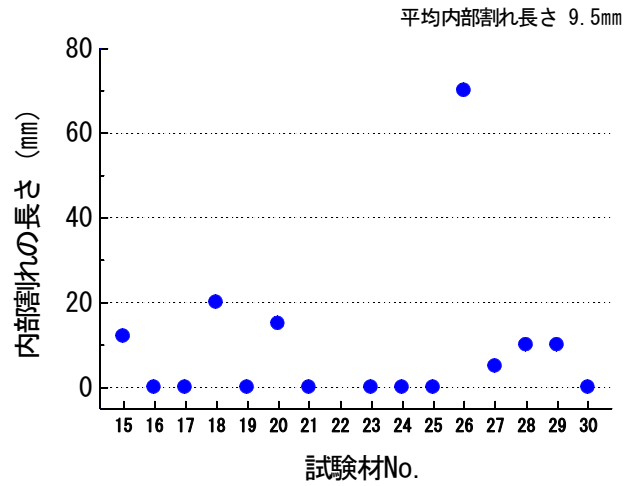
図に示すように、最も大きな内部割れが発生したのは試験材 H18-26 であるが、それでも 5 断面に発生した内部割れの長さの合計は 70 mm に留まっている。この個体の初期含水率は 81.4 % で、ロット平均を下回っている。この個体は、いわゆるシミ材であり、変色部分に割れが発生しているように思われた。また、各個体に発生した内部割れの幅は、1 ~ 2 mm 程度のものが大半であり、最大でも 3 mm 程度に留まっていた。

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 2-12 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。

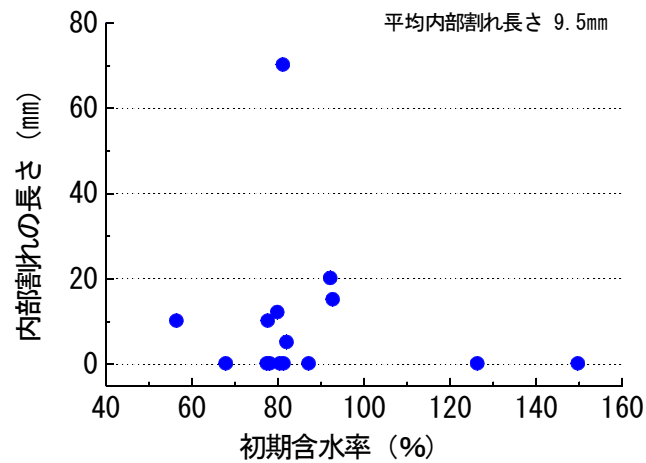
各試験材に発生した内部割れの長さとの仕上がり含水率との関係を第 2-13 図に示した。材面割れ長さとの仕上がり含水率との間には、同様に一定の傾向は見受けられない。

今回の内部割れの状況は、全体的に発生量が少なく、特に大きな個体には材質的な問題があったことなどを勘案すると、全体的に見て軽微なレベルであると判断される。しかし、軽微ではあっても発生していることは事実であり、さらに乾燥条件等の改良が必要であろう。実験 1 の結果と今回の結果を総合的に勘案すると、ドラインセット後の熱風減圧乾燥時に、急速に厳しい条件に移行をはかることは内部割れを助長することにつながるように思われ、今後の乾燥条件の改良の際にお

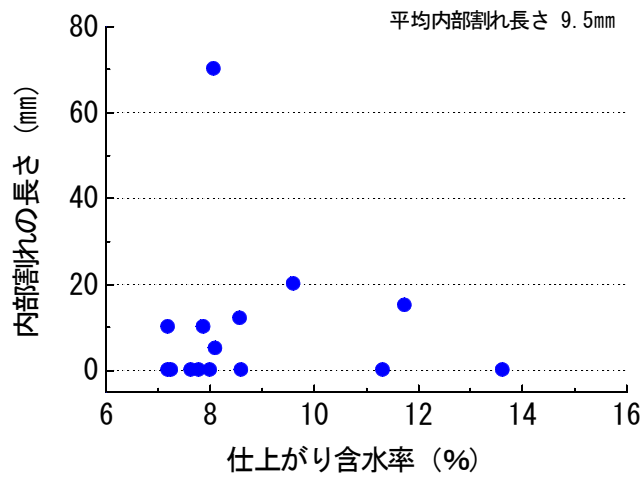
ける一つのポイントとなると考えられる。



第 2-11 図 切断した 5 断面に発生した内部割れの長さ



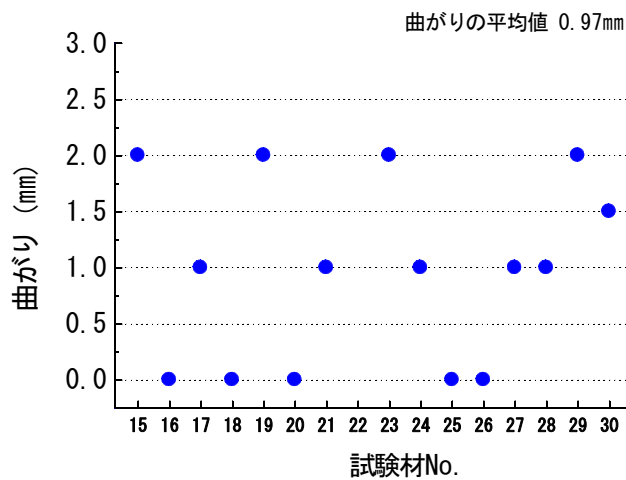
第 2-12 図 切断した 5 断面に発生した内部割れの長さと初期含水率との関係



第 2-13 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 2-14 図に示した。最も大きな曲がりが発生した個体であっても 2 mmに留まり、ロット全体の平均値は約 0.97 mmである。この値は、一般的な中温乾燥と比較しても、小さいと判断され、今回の乾燥条件が狂いを抑制するという点においては、問題は無いと考えられる。



第 2-14 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 2-2 表及び第 2-3 表に示した。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。

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。しかし、約 2 mm 鉋削し、表面仕上げを行った新しい材面では、表面とは逆に乾燥前より 4.58 も大きくなり、明度が改善されたことが分かる。クロマティックネス指数 a^* は乾燥によって 2.45 大きくなり、赤み成分が増加している。しかし、表面仕上げ面では 0.50 の増加に留まり、赤色化はわずかな程度である。一方、クロマティックネス指数 b^* も、乾燥によって 3.83 大きくなり、黄色み成分が増加している。さらに、表面仕上げ後の材面では 6.52 とさらに黄色化が見られる。これらを総合すると、辺材では、乾燥によって明度が上昇するものの、やや黄色化が進行すると判断される。

一方、心材では、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よりも値が大きくなっている。クロマティックネス指数 a^* は乾燥によって 1.89 小さくなり、表面仕上げ面でも 1.22 減少し、乾燥前の赤みには回復せず退色が進行している。一方、クロマティックネス指数 b^* は、乾燥によって 1.35 減少しているが、仕上げ表面では逆に 1.21 増加して黄色化が進行している。これらを総合すると、心材では、乾燥によって明度が上昇するものの、心材色を形成する赤みがやや減少し、やや黄色化すると判断される。

第 2-2 表 複合乾燥による辺材色の変化

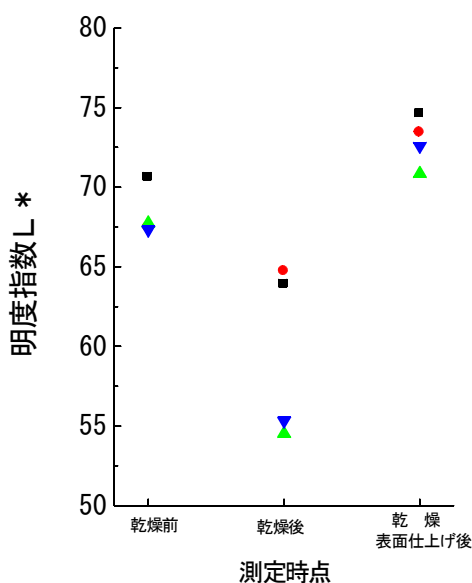
	測 定 値			変化した値	
	乾燥前	乾燥後	表面仕上げ後	乾燥後	表面仕上げ後
L^*	68.28	59.61	72.86	- 8.67	4.58
a^*	5.61	8.06	6.11	2.45	0.50
b^*	17.27	21.10	23.79	3.83	6.52
ΔE^*				9.78	7.98

第 2-3 複合乾燥による心材色の変化

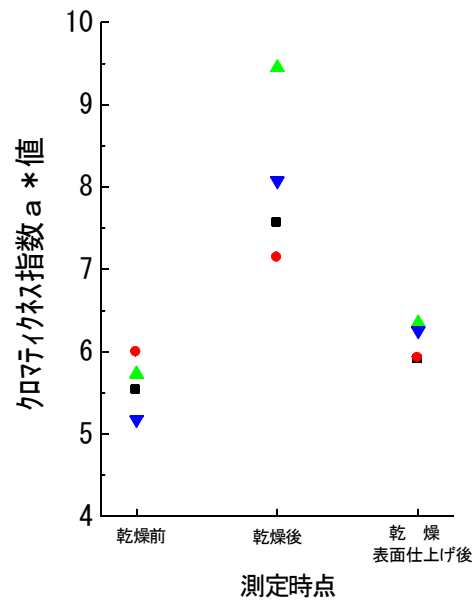
	測 定 値			変化した値	
	乾燥前	乾燥後	表面仕上げ後	乾燥後	表面仕上げ後
L *	58.71	48.67	61.82	- 10.04	3.11
a *	10.49	8.61	9.27	- 1.89	- 1.22
b *	18.95	17.60	20.16	- 1.35	1.21
$\Delta E *$				10.31	3.55

しかし、これらの変色の度合いは、高温乾燥と比較すると小さなものであり、視覚的にはスギ特有の材色が十分に残存している状態である。乾燥後の材色については、木材関連業界の関係者に評価を依頼したが、中温域の乾燥材と遜色ない仕上がりであるとする回答が多かった。このことから、変色を抑制するという視点においては、今回の複合乾燥条件は、ある程度当初の目標を達し得ていると判断される。

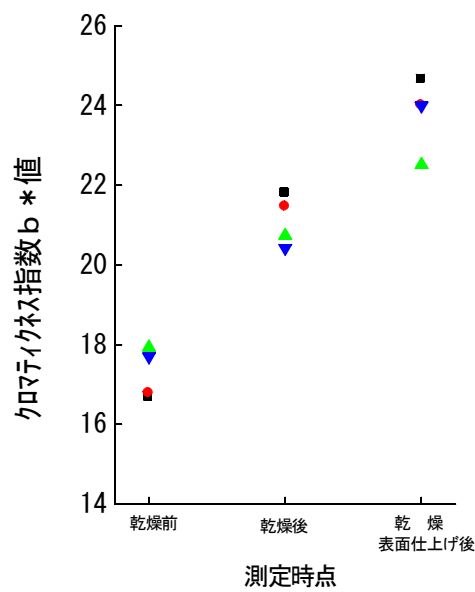
辺材の明度指数 L*、クロマティックネス指数 a*、クロマティックネス指数 b* の材色試験材ごとの乾燥による変化を、第 2-15 図～第 2-17 図に示した。



第 2-15 図 辺材の明度指数 L* の乾燥による変化

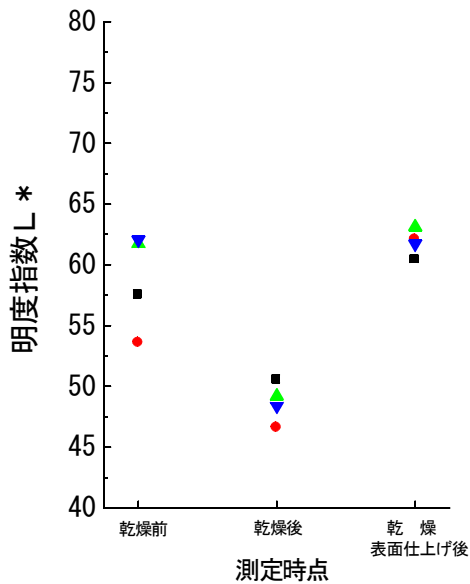


第 2-16 図 辺材のクロマティックネス指数 a^* の乾燥による変化

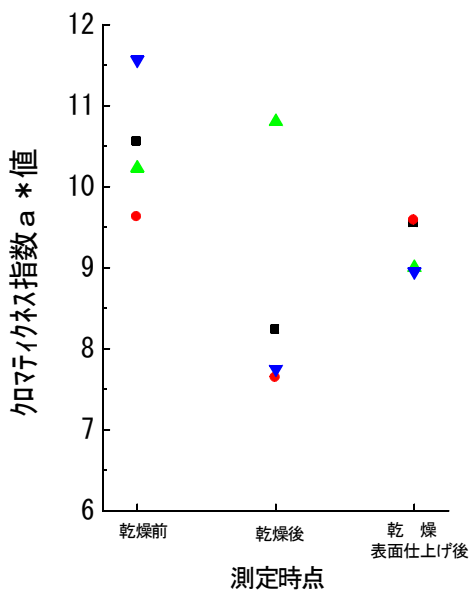


第 2-17 図 辺材のクロマティックネス指数 b^* の乾燥による変化

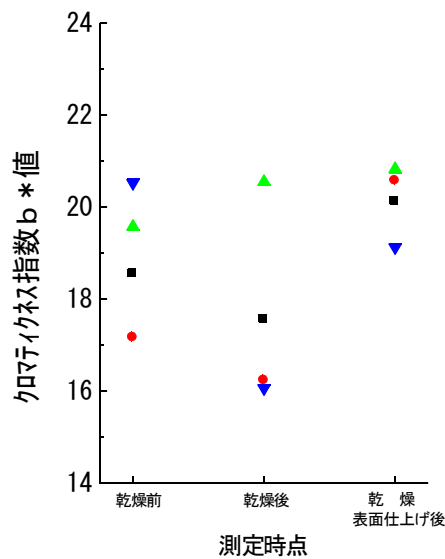
さらに心材の明度指数 L^* 、クロマティックネス指数 a^* 、クロマティックネス指数 b^* の材色試験材ごとの乾燥による変化を、第 2-18 図～第 2-20 図に示した。



第 2-18 図 心材の明度指数 L^* の乾燥による変化



第 2-19 図 心材のクロマティックネス指数 a^* の乾燥による変化



第 2-20 図 心材のクロマティクネス指数 b^* の乾燥による変化

8) 実験 2 (実験 H18-2-2) のまとめ

この実験の主たる目的は、これまでの柱材と異なり、無背割りのスギ心持ち平角材に対して、材面割れ抑制のために、中温域（100℃未満）でのドラインセット形成の可能性を探求することであり、そのための複合乾燥法の特徴を検討することであった。また、主要な課題として、曲げ荷重に対する耐力が求められる材料として、特に内部割れを極力抑制することも、念頭に置いた実験である。

前回の実験 1 では、採用した複合乾燥条件では、無背割りのスギ心持ち平角材には十分な対応ができないと総合判断された。すなわち、含水率は一部の個体を除いて概ね 15%以下に仕上がったものの、材面割れとともにこれまで経験しなかった内部割れも発生し、大きな問題点を残した。しかし、仕上がり状態は、改良の余地も無いほど全く問題にならないというレベルとは考えられず、各因子の条件設定をさらに工夫すれば、当初の目的を達成できる可能性があることを示唆するものであると判断した。

このような結果を受けて、本実験 2 では、材面割れを抑制するためにドラインセットの時間を 48hr から 72hr に延長し、さらに内部割れを抑制するために乾燥条件を緩やかに改良した条件を採用した。乾燥時間も、実験 1 と比較して、ドラインセットを延長した時間に相当する 24hr 長く、全体で 283hr とした。

その結果、柱材で得られていた良好な仕上がりまでには達し得ないまでも、材面割れは大きく減少した。さらに、懸念された内部割れも皆無ではなかったが、大きく減少した。また、乾燥による変色も従来の中温乾燥と遜色ない程度に抑制できることも確認された。これらを総合的に判断すれば、今回の乾燥条件は、心持ち・背割り無し状態のスギ平角材の複合乾燥法の乾燥スケジュールとして、一定のレベルに達していると判断される。しかし、さらに材面割れや内部割れを減少させ、高品質化を図るためには、さらなる乾燥条件の探求が必要である。これらの問題点については、平成19年度から開始される新たな研究課題において、発展的に取り上げる計画である。

5. まとめ

本研究課題は、品確法に対応できる高品質乾燥材の生産技術について、現状の技術の検証も含め、新たな技術開発を行うことを目的として、5年計画の研究課題として設定されたものであった。すなわち、製材業界に対して、製造業者としての最低限の義務である「品質が担保できた乾燥材」を生産するための技術を整備することを念頭に置いたものである。ここで、誰のために品質を担保する必要があるのかという点については、現状においては様々な議論があるが、本来は最終的なエンドユーザーである施主に対して行われるべきものである。すなわち、製品の評価は、それを製造あるいは販売する者によって行われるべきものではなく、使用する者によって最終的に評価が行われるべきものである。また、この議論とは別に、前述したように、製造業が守るべき最低限の義務として、必要な性能が担保されるべきであることは言うまでもないことであり、この性能が満足できてこそ、初めて「製品」と言えるものになるのではないかとも考えられる。しかし、乾燥材生産の現状を見ると、この点が必ずしも共通認識になり得ていないと思われるケースも、残念ながら散見すると言わざるを得ないように思われる。

本研究課題の5カ年の研究期間において、まず初年度には、建築業界はどのような品質の乾燥材を求めているのかという点を調査するとともに、県内の製材工場において、新しい手法として採用され始めている高温乾燥法を用いて生産された高温乾燥材の品質を分析し、問題点の抽出等を行った。高温乾燥の現場には、内部割れ、含水率のばらつきなどの問題点があった。

2年目には、人工乾燥材を生産している各製材工場の乾燥装置、乾燥スケジュール、乾燥工程などを調査し、乾燥材の高品質化を図るための改良方法などを検討した。さらに、高温乾燥では内部割れや大きな変色の発生を問題点として指摘する声もあるため、より良質な高温乾燥材の生産を目的として、実験機による高温乾燥試験を行った。その結果、乾燥後期の温度を下げる方法の効果などについて明らかにした。この結果、他の情報提供などと相まって、最近ようやくこの手法を採用する企業も現れるようになった

3年目には、複合タイプのオープンラボ乾燥装置の整備が整い、これを用いて複合タイプの乾燥

法によるスギ柱材の乾燥試験を行い、開発の方向性などについて検討した。これは、木材業界が今後行う技術開発のための基礎資料を得ることも、同時に目的としたものである。ただ、複合乾燥法自体が新たな乾燥方法であるため、試行錯誤が続いたが、この時期に、スギ柱材の乾燥条件について、一定の方向性は見出した。

4年目も、同様にオープンラボ装置を用いて、主に複合乾燥によるスギ柱材の中温域（100℃未満）におけるドライグセットの可能性について検討するとともに、複合乾燥そのものの特徴についても把握につとめた。その結果、スギ柱材の複合乾燥法について、ある程度適合すると考えられる乾燥条件を見出した。変色を抑制して、材面割れ、内部割れが全く発生しない乾燥材を得る確率（成功率）は70%程度にまで向上した。

最終年度である本年度は、スギ柱材の複合乾燥条件のさらなる探求を行うとともに、スギ平角材の複合乾燥法についても検討を行った。スギ柱材については、成功率が約80%程度まで向上した。一方、スギ平角材については、まだ、割れの抑制において若干問題点を残してはいるものの、一定の方向性は見出せた段階にある。

これらの成果を踏まえ、「木材の複合乾燥のための技術的ガイドライン」を作成し、関連業界へ配布することとした。このガイドラインは、今後、製材業者等が高品質な乾燥材生産をめざして複合乾燥に取り組もうとする際に参考になる内容となっている。さらに、その際に当センターのオープンラボ乾燥装置の利用がなされると予想されるが、その技術仕様書としても使用できるものである。

本県における乾燥材の生産は、乾燥設備を着実に導入することにより、近年まで順調に増加傾向をたどってきた。ただ、本県の場合、乾燥材の生産量を、今後、短期間に倍増させるというような取り組みは、原木の事情から判断しても、ほぼ困難であろう。

しかし、一方では、九州圏域をはじめとして、乾燥材の生産量が急速に増加している地域が出現している。これらの地域は、概して資源量が豊富で、一定の品質の原木を、短縮ルートで、しかも大量に入手可能な条件を具備している。今後は、それに併せて乾燥設備を充実さえすれば、容易に乾燥材の生産量増大が可能である。現に、乾燥材を大量に生産することによって、乾燥材の新興地域ながらも短期間に乾燥材ブランドを確立した地域がある。この最も代表的な事例が、都城地域を抱える宮崎県であろう。

この状況下において、本県がこれまで同様、乾燥材先進県の地位を占め続けるためには、乾燥材の着実な増産と併せて乾燥材の品質にこだわり、より一層の高品質化に取り組むことも必要であろう。この点については、既に各所で述べてきた通りである。さらに、地域の一体となった発展を念頭に置くのであれば、地域として目標とする乾燥材の品質レベルを明確にし、それを担保するための規格の共有化が必要であろう。このことにより、乾燥材生産と流通の効率化等も図りやすくなる

と考えられる。

平成19年度からは、新たな木材乾燥関連の研究課題に取り組む予定である。実施に当たっては、このような状況を念頭に置いて計画を立案し、着実に遂行したいと考えている。