

# 連続含水率分布計測によるスギ心持ち柱材の高温乾燥

坂井 正孝, 橋本 彰

## High Temperature Drying of Sugi Boxed-Heart Square Timbers by Continuous Measurement of Moisture Content Distribution

Tadayuki SAKAI, Akira HASHIMOTO

スギ心持ち柱材の高温乾燥中の含水率分布を連続的に計測することができる計測システムを開発し、含水率の挙動と表面割れ、内部割れの乾燥損傷等の関係を検討した。以下にその概要を示す。

- 1) 材内含水率分布は、電気抵抗値より推定した各層の含水率情報から逆投影法によって再構築できた。
- 2) 被乾燥材の中心温度が蒸煮温度98℃に達するまでには、約4～5時間必要であり、蒸煮処理時間は、12時間とした。
- 3) 高温処理された被乾燥材には、表層部に引張のドライイングセットが形成されていることが視覚的に確認でき、高温処理時間は6時間程度必要である。
- 4) 仕上がり含水率は、乾燥時間が長くなると当然低くなるが、内部の含水率は、かなりの高含水率領域が残存していることが判明した。

### 1. はじめに

近年、住宅建築分野では、品質・性能の確かな製材として乾燥材への要望が大きいことから、梁、桁、柱類など木造住宅の主要構造部材に対しては、低コストで寸法安定性の優れた材料が求められている。これら構造部材としてスギ材を利用していく場合、従来の中温乾燥法では、初期含水率が高いことから乾燥に長時間要するとともに、表面割れなどの乾燥損傷が発生し易く<sup>1)</sup>、スギ材は難乾燥材の一樹種であると言われている。

最近、スギ等構造材の乾燥方法として、中温乾燥時に発生する乾燥損傷を低減する目的に、従来よりも高い100℃以上の温度を使用する高温乾燥スケジュールが確立され<sup>2)</sup>、広く木材業界に普及しつつある。しかし、生産現場では、乾燥中の木材重量を計測することにより、その時の含水率等を推定しながら、これら乾燥スケジュールの調整を行い、より高品質な乾燥材の生産に努めているのが現状である。小田ら<sup>1)</sup>は、高温乾燥中における含水率の挙動と乾燥損傷の関係を報告しているが、含水率の測定は、乾燥

機をそのつど停止し、被乾燥材から小試験片を採取して行っているにすぎない。

ところで、木材の含水率を乾燥中連続的に計測する方法としては、被乾燥材のロードセルによる重量や電気抵抗等を計測する等、様々な方法<sup>3~6)</sup>が提案されているが、実用化<sup>7)</sup>されているものは少ない。また、これらの方法では、柱類など比較的断面の大きい構造材内部の含水率分布を計測することは、不可能である。

筆者らは、以前、この含水率分布を明らかにすることを目的に、スギ心持ち柱材の1横断面に対して数カ所の電気抵抗を経時的に計測し、その部位の含水率を推定すると共に、コンピュータ・トモグラフィの原理(CT断層画像)<sup>8)</sup>を応用した連続的に材内含水率分布を測定する方法<sup>9, 10)</sup>を開発している。

本研究では、この手法を適用することによって、高温乾燥中の含水率分布を連続的に計測し、表面割れや内部割れなど乾燥損傷の少ない乾燥スケジュール(蒸煮、高温、乾燥の各工程の処理時間の決定)を検討した。

2. 実験方法

2.1 含水率分布測定試験

供試材は、県産スギ心持ち正角材（12角×長さ45～50cm）、初期含水率40～140%を用いた。

乾燥温度は、常温、40、60、80、100、120℃の6条件とした。各乾燥条件における仕上がり含水率は成り行き（約19～55%）とし、乾燥に要した日数は約3～30日間であった。なお、実験は、2回繰り返した。

供試体の生材時含水率は、試験体端部より内側の部位で厚さ30mmの木口切片を1枚採材し、乾燥終了後の含水率は、実験終了後、直ちに、電気抵抗測定用電極の挿入部周辺から厚さ30mmの木口切片を2枚採材し、これらを5×5の25分割した各小試片をJIS Z2102に準拠して求めた。ただし、乾燥終了時の含水率は、これらの平均値とした。

図1に示すように材内温度は、材幅・材厚方向の2ヶ所で、側面より12、36、60、84、108mmの位置（表層、中間層、中心層）にそれぞれ径2×深さ60mmの下穴をあけ、各層にT型熱電対（径0.3mm）挿入して測定した。なお、熱電対挿入部は、シリコンコーキング剤にてシールした。また、材内温度の測定と同様に各層の電気抵抗は、径2×長さ20mmのステンレス製木ねじを電極に用い、4線方式にてこの間を測定した。計測インターバルを約20分～2時間とし、各計測値は、データロガーを介してパソコンに収録した。

含水率分布の算出は、先ず、電気抵抗値に対する

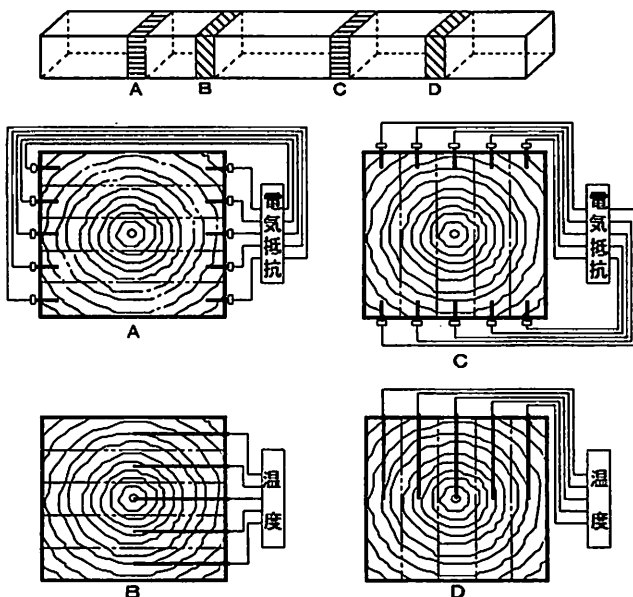


図1 含水率分布の計測概要

同一層における含水率との検量線を求め、次に、コンピュータ・トモグラフィの画像復元法の1種である逆投影法によって、これら各層の含水率情報を5×5の25分割された含水率分布として表示した。

2.2 高温乾燥試験

供試材は、県産スギ心持ち正角材12角×長さ380cmから3個体（材長100cm）を採材し、1条件当たり6体とした。うち1試験体は電気抵抗測定用に供した。これら供試体の選別は、同一個体から重複しないようにランダムイズし、各実験条件の生材含水率がほぼ等しくなるようにした。なお、実験に際しては、各々両木口面をシールして用いた。

乾燥過程を乾燥初期（蒸煮処理）、中期（高温処理）、末期（乾燥処理）に分け、それぞれの高湿乾燥条件は表1のとおりである。乾燥中期・末期における処理時間を決定するにあたっては、前過程で最も損傷等が少なく、最良と思われる処理条件を次過程の固定条件とした。なお、乾燥装置には、蒸気式高温乾燥機（容積0.8m<sup>3</sup>）を用いた。

電気抵抗の測定部位、および、その他の供試体における含水率分布の計測は、被乾燥材の冷却後、2.1項と同様に求めた。

内部割れは、含水率分布計測用試験片を用い、その横断面を画像解析することによって割れの累積面積を求め、横断面積に対する比率で評価した。ただし、内部割れのうち、心割れと推察できるものは、評価から除外した。

表面割れは、発生した長さや幅から、面積（長さ×幅）を求め、4材面の割れ面積を累積した。さら

表1 高温乾燥条件

乾燥過程	乾燥条件	処理時間(h)
乾燥初期 (蒸煮)	条件0 1	蒸煮 6
	条件0 2	蒸煮12
	条件0 3	蒸煮24
	条件0 4	蒸煮60
乾燥中期 (高温)	条件0 5	蒸煮12+高温 6
	条件0 6	蒸煮12+高温 12
	条件0 7	蒸煮12+高温 24
乾燥末期 (乾燥)	条件0 8	蒸煮12+高温6+乾燥24
	条件0 9	蒸煮12+高温6+乾燥48
	条件1 0	蒸煮12+高温6+乾燥60
	条件1 1	蒸煮12+高温6+乾燥72

乾燥初期（蒸煮処理）；乾球温度 98℃,湿球温度98℃  
 乾燥中期（高温処理）；乾球温度120℃,湿球温度99℃  
 乾燥末期（乾燥処理）；乾球温度105℃,湿球温度99℃  
 実験回数；1～3回繰り返し

に、割れの横断面形状をV字型と仮定して、その深さ、幅の寸法は横断面の画像解析より求めた。

2.3 ドライイングセット形成試験

供試材、乾燥装置は、2.2項と同様であり、1条件当たり2本とし、ドライイングセット形成の乾燥条件を表2に示した。乾燥前後の含水率分布は、試

表2 高温セット形成乾燥条件

乾燥条件	処理時間(h)
条件1	蒸煮12+高温 6
条件2	蒸煮12+高温24

蒸煮処理；乾球温度 98℃,湿球温度98℃  
高温処理；乾球温度120℃,湿球温度99℃

験体端部より内側の部位で厚さ30mmの木口切片を採材して2.1項と同様に求めた。

ドライイングセット形成試験片は、含水率測定試験片の近傍より厚さ3mmの木口薄片を採材した。次に、この試験片は、温度50℃の恒温乾燥器にて重量が十分に平衡に達するまで数時間乾燥を行い、20℃、65%RHの恒温恒湿室にて24時間養生した後、ドライイングセット形成状況を定性的に観察した<sup>13)</sup>。

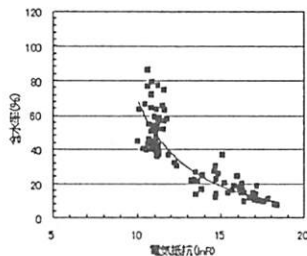
3. 結果と考察

3.1 材内含水率分布計測システムの開発

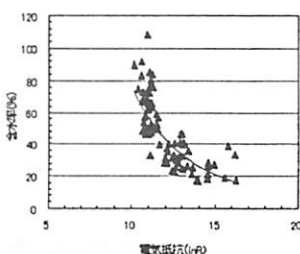
3.1.1 含水率に対する検量線

各層の含水率と電気抵抗の関係を図2に示す。この測定精度は、乾燥による断面寸法の変化や割れなどの乾燥損傷によって低下することが予測されたが、本実験においては、これらを見逃すこととした。しかし、明らかに異常値と思われるものは除外した。

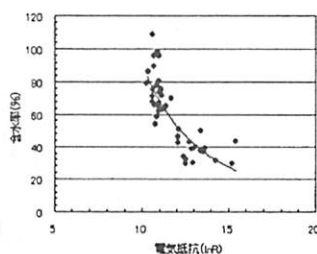
木材の電氣的性質は、含水率が高くなると電気



(a) 表層



(b) 中間層



(c) 中心層

図2 含水率と電気抵抗の関係

抵抗の変化が小さく一定になる<sup>11)</sup>と言われており、本実験においても図2のとおり同様な結果を得た。しかし、運転中の乾燥スケジュールの変更は、繊維飽和点以下の低含水率域に達してから行われることが多く、高含水率領域の推定に対しては、推定精度が低くても乾燥操作上影響が少ないと考えられる。

このようなことから、電気抵抗値から含水率を求める検量線(実験式)は、目的変数に含水率(%),説明変数に電気抵抗値(RΩ)の自然対数(x=lnR)として、試行錯誤的に最小二乗法によって数種類の実験式を求め、比較的相関係数の高い累乗曲線を選んだ。各層の含水率の推定値は、次式で得られる。

$$MC_{表層} = 130274x^{-3.277}$$

$$MC_{中間層} = 144521x^{-3.271}$$

$$MC_{中心層} = 86407x^{-2.979}$$

3.1.2 含水率分布の演算

医療用などのCT断層画像は、相当数の投影画像から再構成を行っているが、本実験では、角材などに最も簡易で適用し易い図1に示す2方向からの投影情報とし、各検量線より求めた含水率から逆投影法によって、2次元の含水率分布として表示している。図3は、表1の乾燥条件10における乾燥室内冷却後、炉出し直後の含水率分布を示す。

材内含水率分布の推定は、全乾法に比較してもほ

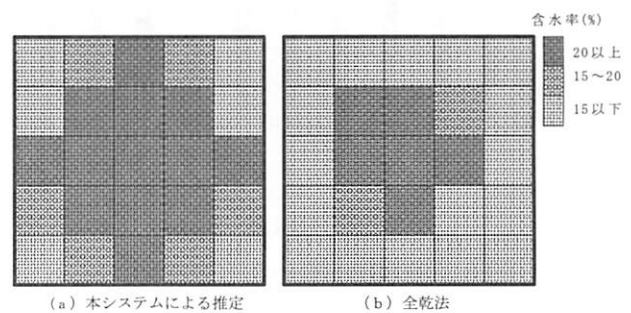


図3 高温乾燥終了時の含水率分布例

ぼ満足するものが得られ、木材を鋸断することなく、内部の含水率分布および、その経時変化などを連続的かつ視覚的に評価できることが示唆された。

本実験では、このシステムを併用しながら高温乾燥試験における含水率変動について検討した。

3.2 高温乾燥における各処理の乾燥特性

3.2.1 蒸煮処理

乾燥条件03における材温と処理時間の関係を図4、含水率分布測定用小試片に対する蒸煮処理前後の含

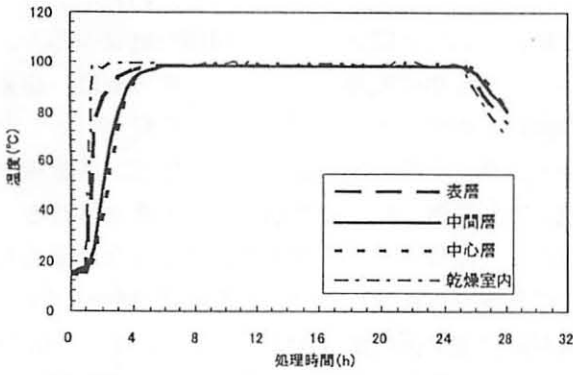


図4 蒸煮処理中の材温と処理時間の関係

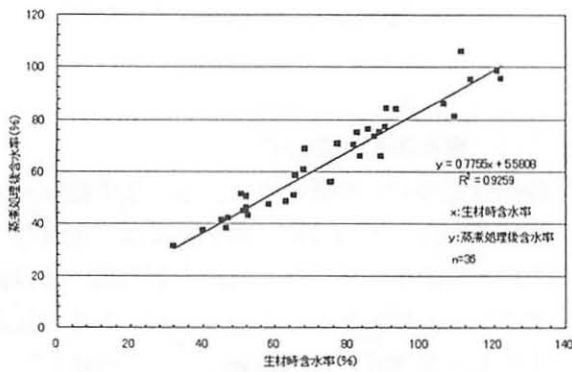


図5 蒸煮処理前後の含水率変化

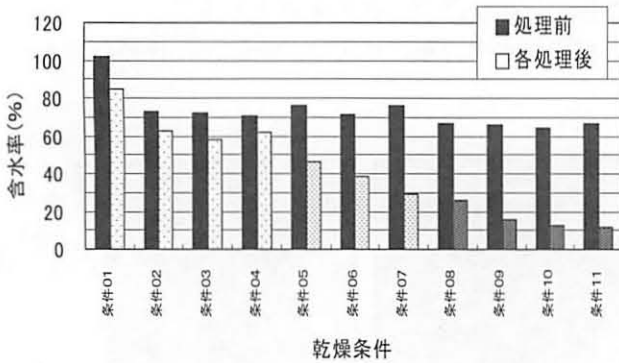


図6 各処理前後の含水率変化

注)

高温乾燥条件

条件 01 ~ 04 : 蒸煮処理、条件 05 ~ 07 : 高温処理、  
条件 08 ~ 11 : 乾燥処理

水率変化を図5、乾燥条件毎に対する各処理前後の断面含水率を図6、乾燥条件と表面割れ、内部割れの関係を図7、8に示す。なお、図7中には、内部割れの凡例を示した。

図4から明らかなように、乾燥室内は、蒸煮処理の初期段階で直ちに所定温度98°Cに達しているが、柱材など大断面材の中心温度がその温度に達するには、約4~5時間が必要となることが明らかとなった。

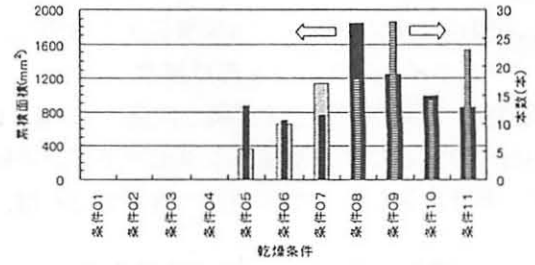


図7 乾燥条件と表面割れの関係

注)

高温乾燥条件

条件 01 ~ 04 : 蒸煮処理、条件 05 ~ 07 : 高温処理、  
条件 08 ~ 11 : 乾燥処理

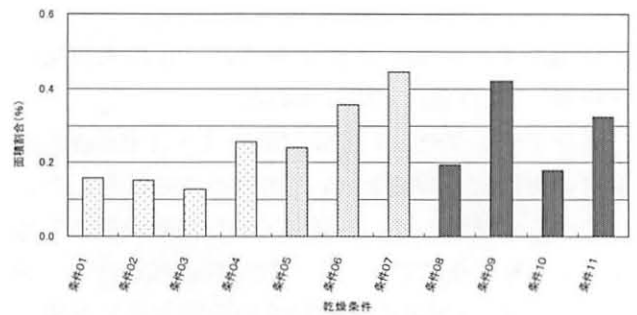
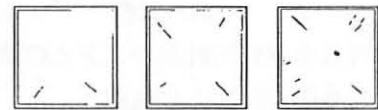


図8 乾燥条件と内部割れの関係

注)

1) 面積割合の凡例



0.19      0.40      0.65

2) 高温乾燥条件

条件 01 ~ 04 : 蒸煮処理、条件 05 ~ 07 : 高温処理、  
条件 08 ~ 11 : 乾燥処理

しかし、この材中心部の昇温に要する立ち上がり時間は、乾燥機の大きさによっても変動することが予測され、実際の乾燥スケジュールを作成する場合には、詳細な検討が必要と思われる。

図5に示す含水率低減の効果は、処理時間に影響されなく直線的な関係が認められた。また、当処理による脱水効果は、高含水率材の方が低含水率に比べて大きくなり、初期含水率の平準化に繋がることが明らかとなった。

また、いずれの乾燥条件に対しても図6~8に示す処理後の試料平均含水率、表面割れと内部割れの出現には明確な差異が認められなかった。したがって、以後の蒸煮処理条件は、初期含水率・材温の均一化や蒸気消費量など処理コストの点から、処理時間を12時間と固定した。

### 3.2.2 高温処理

スギ柱材などの心持ち材は、接線方向と半径方向の収縮率の差によって、乾燥中、材表面には割れの危険性があり、従来の低・中温乾燥法では、表面割れの抑制や防止することが難しいとされていた。しかし、近年、この表面割れを抑制することを目的とした高温乾燥法が普及してきており、藤本ら<sup>12)</sup>は、乾燥中の表面割れや内部割れの発生機構について詳細な検討を加えている。

この乾燥法の特徴は、木材内部を高含水率状態に保ちながら、表層部の含水率を急激に低下させることである。

本実験における乾燥条件05での試験結果を図9に示す。その結果、内層部の含水率は30%以上の高含水率であるのに対して、表層部の含水率は30%以下となっており、乾燥材はドライイングセット状態にあることが推察される。

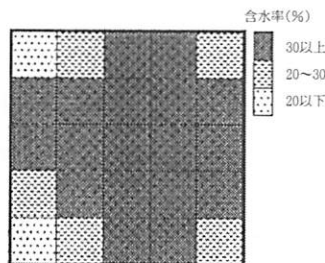


図9 高温処理後の含水率分布例

さらに、詳細に高温処理によるドライイングセットの形成を定性的に検討することとし、写真1に表2の乾燥条件1における高温処理前後の断面、図10にその時の含水率のコンタマップを示す。

写真1の上段は、生材時における木口薄片である。これからは、木口面内に乾燥による内部応力がなく、変形として発生していないことが明らかである。しかし、下段の処理後の木口薄片は、表層部が伸張し、

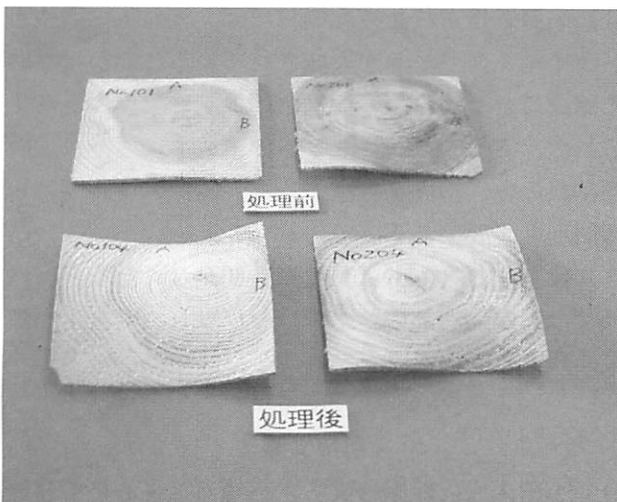
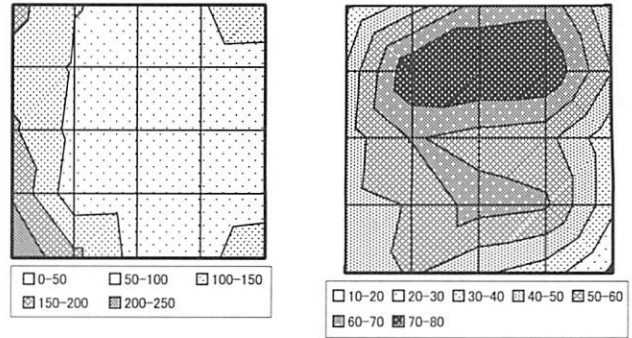


写真1 高温処理前後の断面



(a) 生材時 (b) 高温処理後

図10 高温処理前後の含水率コンタマップ

3次元的に変形している。これは、3.2.2項で述べたように高温処理を施すことによって表層部に引張応力、内部に圧縮応力が入り、所謂、ドライイングセットの形成が視覚的に確認できた。これらのことから、高温処理は、表面割れの抑制に繋がると考えられる。

次に、木口断面の含水率分布を見ると、生材時は、表層部含水率が60~240%とバラツキが大きく、スギの特徴的な含水率状態を示している。

高温処理は、このような材料を乾球温度120℃、湿球温度98℃程度の高湿高温条件において表層部の含水率を選択的に繊維飽和点近傍まで低下させると共に、内部を50~90%の高含水率状態にしている。これが、表層部に引張のドライイングセットを形成することになる。

因みに、乾燥条件2に関して、変形は乾燥条件1と同程度あり、見掛け上の差異は認められなかったが、含水率傾斜は、長時間処理を施していることから、さらに含水率傾斜が強くなっていることが伺えた。

図7から、表面割れは、本数が10.5~13本とほぼ一定であるが、供試材1本当たりの累積面積が360~1,139mm<sup>2</sup>と処理が長時間化すると伸張する傾向が見られた。これは、表面割れ1本当たりに換算すると28~99mm<sup>2</sup>である。また、横断面に表れる表面割れを画像解析によって計測すると、その平均寸法は、深さ19×幅2.6mmであった。因みに、図11に示す高温乾燥後の横断面に発生する乾燥損傷例を観察すると、表面割れの寸法は深さ20×幅3.0mmである。このように、高温処理における表面割れは、極端な大きなものが発生しないという特徴があり、このことは、吉田ら<sup>2)</sup>も同様な報告をしている。

一方、内部割れの面積割合は、乾燥条件05~07が

各々0.24, 0.36, 0.44%と処理が長時間化すると増加する傾向が見られた。これは、乾燥が進み被乾燥材の含水率が低下していくと、ドライイングセット時とは逆に表層部に圧縮応力、内部に引張応力が作用し始め、内部割れが進行すると考えられる。

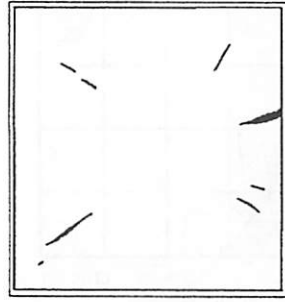


図11 高温処理後の横断面画像例

以上のことから表面割れや内部割れの乾燥損傷を考慮して、以後の乾燥条件に対する高温処理時間は6時間と固定した。

今回、高温乾燥によって発生する内部割れがプレカット加工にどの程度の影響を及ぼすかについては検討していないが、今後は、これらのことも考慮して高温処理時間を決定していく必要があると思われる。

### 3.2.3 乾燥処理

乾燥条件10における乾燥中の0（乾燥開始時）、12（蒸煮処理後）、18（高温処理後）、78（乾燥処理後）時間後の含水率分布を図12に示す。

図6に示すように乾燥条件08～11の仕上がり平均含水率は、各々25.7, 15.3, 12.9, 11.9%と乾燥時間が長くなると減少していくことが明らかで、所定の含水率に達していくものと思われる。しかし、材内含水率分布は、図12に示すように内部に高含水率領域が残存している。また、図3に示す被乾燥材を空冷した後の含水率分布(a)からは、表層部が15%以下に達しているが、内部が未だ20%以上の未乾燥

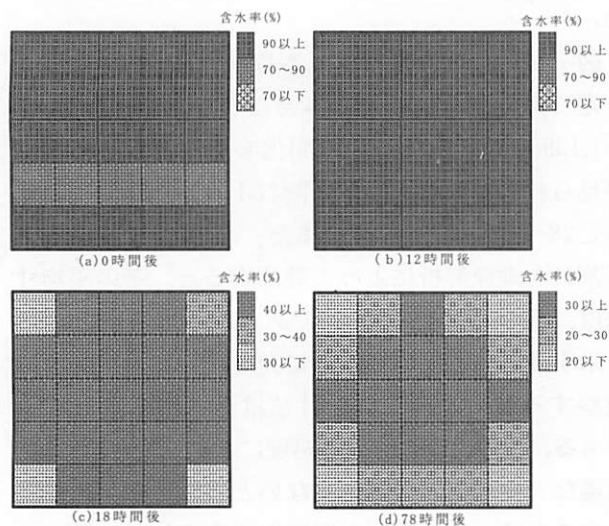


図12 高温乾燥中の含水率分布例

部分が残存していると推定される。さらに、全乾法(b)で詳細に検討すると断面平均が15%にもかかわらず、表層部が10%以下、内部が13～51%とかなり高含水率、かつ、バラツキが大きいと判明した。

図7に示す乾燥条件08～11における表面割れについては、供試材1本当たりの累積面積が102～37 mm<sup>2</sup>に減少している。これは、乾燥が進行するに伴い、表層部に圧縮応力が作用することから表面割れが縮み、見掛け上、割れが小さくなったように観察されたと考えられる。

図8に示す乾燥条件08～11における内部割れについては、明確な傾向が見られなかったが、その割合は0.18～0.42%程度で、凡例が示すように、その後の加工等で影響を与えるような大きさではないように思われた。

## 4. おわりに

スギ心持ち柱材の高温乾燥スケジュールを確立することを目的として、乾燥中の含水率分布を連続的にモニタリングを行い、含水率の挙動と表面割れ、内部割れの乾燥損傷等の関係を検討した。以下にその概要を示す。

1) 材内含水率分布は、電気抵抗値より推定した各層の含水率情報から逆投影法によって再構築できた。このことは、木材を鋸断することなく、内部の含水率分布やその経時変化などを連続的かつ視覚的に評価できることを示している。

2) 被乾燥材の中心温度が蒸煮温度98℃に達するまでには、約4～5時間必要であり、蒸煮処理時間は、初期含水率、材温の均一化や蒸気消費量など処理コストの点から12時間とした。

3) 高温処理された被乾燥材には、表層部に引張のドライイングセットが形成されていることが視覚的に確認でき、これが表面割れの抑制に繋がると考えられた。ドライイングセットの形成や表面割れ、内部割れの乾燥損傷を考慮すると、高温処理時間は6時間程度必要である。

4) 仕上がり含水率は、乾燥時間が長くなると当然低くなるが、内部の含水率は、かなりの高含水率領域が残存していることが判明した。

## 引用文献

- 1) 小田久人, 蛭原啓文ら, 宮崎産スギ心持ち材の高温低湿乾燥過程における含水率変動 (第2報)

- 含水率分布および含水率の推移, 木材学会誌, Vol.51, No.4, 227-233, 2005
- 2) 吉田孝久, 橋爪丈夫ら, カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性, 木材工業, Vol.55, No.8, 357-362, 2000
  - 3) 信田聡, 建築用製材の水管理システム 水分グレーダーの開発, 木材工業, Vol.43, No.8, 8-13, 1988
  - 4) 佐道健, 木材用水分グレーダーの開発研究会 その経緯と成果, 木材工業, Vol.45, No.9, 404-408, 1990
  - 5) 祖父江信夫, 木材の非破壊検査, 木材学会誌, Vol.39, No.9, 973-979, 1993
  - 6) 日本木材学会編, 木材の科学と利用技術V 21 世紀に向けた木材乾燥技術
  - 7) 住友林業ホームページ, ニュースリリースより
  - 8) 飯沼武, コンピュータ断層撮影法 (CT), 電気通信学会誌, Vol.64, No.4, 401-408, 1981
  - 9) 坂井正孝, 橋本彰, 日本木材学会中部支部大会講演要旨集, 40-41, 1998
  - 10) 坂井正孝, 橋本彰, 日本木材加工技術協会 第19回年次大会講演要旨集, 2001
  - 11) 寺澤眞, 木材乾燥のすべて, 海青社, p.639-641
  - 12) 藤本登留, 高温乾燥におけるスギ心持ち正角材でのセット形成機構, 平成13年度日本木材学会レオロジー研究会 木材と水研究会, 木材乾燥シンポジウムスギ心持ち正角材高温乾燥, 要旨
  - 13) 田村紘, 金川靖ら, スギ心持ち断面における収縮異方性に及ぼす蒸煮処理の影響, 木材工業, Vol.58, No.2, 56-60, 2003

#### Summary

A measurement system was developed which could continuously measure the moisture content distribution during the high temperature drying of sugi boxed heat square timber, and the action of moisture content and relationships such as drying damage such as surface cracks and the internal cracks were examined. The results obtained in this study were as follows:

- 1) A moisture content distribution could restructure inverse-projection methods from the moisture content information of each layer estimated than electric resistance value.
- 2) The center temperature of boxed heat square timbers reached a steaming temperature of 98°C, after about 4-5 hours, and steaming treatment time was set at 12 hours.
- 3) It was confirmed that drying-set of tensile was formed by a surface part visually in boxed heat square timbers which it dealt with in the high temperature, and high temperature management required about 6 hours.
- 4) Of course the final moisture content is lower when drying time is long, but it was proven that a considerable high moisture content area remained on the inside.