

宮崎県産スギ心持ち柱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^{*1}

小田久人^{*2}, 蛭原啓文^{*2}, 迫田忠芳^{*2}, 藤本登留^{*3}, 村瀬安英^{*3}

Variation in Moisture Content of Sugi Boxed Heart Timber in Miyazaki Prefecture during Kiln Drying under High Temperature and Low Humidity II.[†]

Distribution and change of moisture content^{*1}

Hisato ODA^{*2}, Yoshifumi EBIHARA^{*2}, Tadayoshi SAKODA^{*2},
Noboru FUJIMOTO^{*3} and Yasuhide MURASE^{*3}

Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) boxed heart timbers from Miyazaki prefecture were kiln-dried at low humidity under two high-temperature conditions. The distribution of moisture content, changes in moisture content and the generation of internal checks were examined. Our findings are summarized as follows:

- 1) In the examination with an intermediate period of steaming, a large difference in moisture content was observed depending on green timber weight. Each layer of timbers of 34 to 36 kg had a moisture content of about 6%, and layers of timber of 37 to 39 kg had a final moisture content ranging from about 6 to 40%.
- 2) In the examination with a surface-drying stage at a dry-bulb temperature of 75°C and a wet-bulb temperature of 68°C, variation of moisture content in the cross section were almost equalized during the steaming process that followed this stage.
- 3) The amount of moisture content reduction per hour during drying at a dry-bulb temperature of 120°C was about equal at 1.2 to 1.6% for both drying methods.
- 4) Internal checks seemed to be generated near moisture content of 30 to 40%.

Keywords: sugi, kiln-dry, high temperature, moisture content, internal check.

宮崎県産スギ心持ち柱材を2種類の高湿乾燥スケジュールにより人工乾燥し、含水率分布と含水率の推移および内部割れの発生状況を調べたところ、以下の結果が得られた。

- 1) 中間蒸煮を行った試験では、生材重量によって材内の含水率分布に大きな差が見られた。最終的な各層の含水率は34-36 kgの材で各層とも6%で、37-39 kgの材は表層が6~15%、中心部が17~40%であった。
- 2) 乾燥初期に乾球温度75°C、湿球温度68°Cの表層乾燥ステージを設けた試験では、これに引き続く蒸煮工程で横断面内の含水率のばらつきが解消された。
- 3) 加熱温度120°Cの工程における1時間あたりの含水率減少量は、両乾燥スケジュールとも1.2

[†] Report I: *Transaction of MRS-J* **29**, 2495-2498 (2004).

^{*1} Received September 21, 2004; accepted January 24, 2005.

^{*2} 宮崎県木材利用技術センター Miyazaki Prefectural Wood Utilization Research Center, Miyakonjo 885-0037

^{*3} 九州大学大学院農学研究院 Graduate Schools of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812-8581

～1.6%であり, ほぼ等しかった。

- 4) 内部割れは, 含水率40～30%付近で発生するものと推察された。

1. はじめに

スギ材の最も大きな需要先は在来軸組工法の構造材である。真壁工法から大壁工法への変化などによって求められる構造材の品質も変化し, 高品質の乾燥材が要求されている。

ところで, スギ材は, 生材含水率のばらつきが大きいことが知られている¹⁾。特に心材部は品種間, 産地間で大きなばらつきが見られる²⁾。このことが心持ち柱材に製材したときに初期含水率や重量の変動となって現れ, 均一な乾燥仕上がりを阻害する要因となっている。また, 心持ちであるが故に表面割れを抑制することは, 従来の乾燥技術では困難とされてきた。近年, これらの問題点を克服する乾燥方法として高温低湿乾燥法³⁾が提案され, 実用に供されている。しかし, 生産現場では試行錯誤しながら乾燥スケジュールの調整を行っているのが現状である。一般的な高温低湿乾燥法では, 初期蒸煮の後乾球温度を120℃, 湿球温度を90℃とし, 所定の時間維持した後乾球温度を100℃程度に低下させる⁴⁾。この場合, 120℃を維持する時間によっては内部割れが発生することが分かっている^{4,5)}。

筆者らは, 内部割れを抑制する方法として, 蒸煮工程の前段階に乾球温度75℃, 湿球温度68℃とする「表層乾燥ステージ」を設けることを提案し, スギ心持ち柱材の最適乾燥スケジュールの検討を行ってきた⁶⁾。この「表層乾燥ステージ」の目的は次とおりである。すなわち, 表層の含水率傾斜を緩和するために比較的緩やかな乾燥を行い, 高温低湿工程での引張セットを緩和することである。このことにより, 内層の乾燥収縮段階の引張応力が小さくなり, 内部割れが抑制される。表層乾燥ステージを取り入れたスケジュールは, 宮崎県内の製材工場内部割れ抑制に有効であるとして, スギ心持ち柱材の乾燥に用いられている。

引張セットや応力緩和として従来から取り入れられている中間蒸煮を行ったときの含水率分布の変動については, 既報⁷⁾で報告した。そこで, 本研究では, 中間蒸煮試験(試験A)と表層乾燥ステージを含む試験(試験B)を対照させながら, 蒸煮, 高温低湿の各工程を追って含水率分布の変動, 含水率の変化などについて詳細な検討を行った。

2. 材料及び方法

2.1 材料

供試材は宮崎県産スギ心持ち柱材(130×130×3000 mm)を用いた。供試体数は試験Aでは生材重量が34～36 kgと37～39 kgの2グループにそれぞれ7本ずつ, 計14本とし, 試験Bは生材重量が27～31 kg, 32～34 kg, 37～39 kgの3グループにそれぞれ7本ずつ, 計21本である。

各重量グループごとに1本ずつ, Fig. 1に示す方法で乾燥試験体, 含水率測定用試験片ならびに含水率分布測定用試験片を木取った。残りの供試材は, 含水率分布測定用試験片を除く方法で木取った。なお, Fig. 1は試験Aの場合を示しているが, 試験Bは末口側と元口側に2分割し, 中央部から各測定用試験片を木取った。試験材の長さは, 試験Aで約1 m, 試験Bで約1.5 mである。試験Aでは木口にシリコン樹脂でコーティングしたが, 試験Bでは比較的長い木口のため, 木口のコーティングは行っていない。

2.2 乾燥スケジュール

両試験の乾燥スケジュールをTable 1に示す。すなわち, 試験Aは中間蒸煮を行うスケジュールであり, 一方の試験Bはスケジュールの初期に乾球温度75℃, 湿球温度68℃の表層乾燥ステージを含むスケジュールである。

2.3 測定方法

両試験とも所定時間経過後, 各重量グループ2ないし3本ずつ試験材を順次取り出した。この時, 同一供試材の元口側, 中央部, 末口側の試験材を取り出した。乾燥過程の取り出し時間は, 試験Aでは28時間, 43時間, 67時間, 98時間, 170時間及び211時間であり, 試験Bでは18時間, 36時間, 60時間, 70時間, 110時間及び135時間である。重量測定後, 中央部で含水率測定試験片と含水率分布測定用試験片

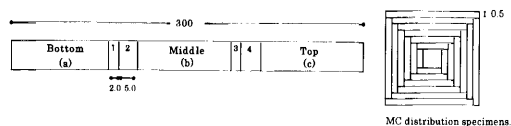


Fig. 1. Preparation of test specimens (test A).

a, b, c: Test specimens.

1, 3: MC specimens.

2, 4: MC distribution specimens.

Unit: cm

Table 1. Drying schedule.

Test A						Total time
Time (hr)	6	22	15	24	72	72
DBT (°C)	90	120	95	120	110	105
WBT (°C)	90	95	95	95	90	90
EMC (%)	-	3.7	-	3.7	4.5	5.7
Test B						Total time
Time (hr)	18	18	34	65		
DBT (°C)	75	90	120	110		
WBT (°C)	68	90	95	85		135
EMC (%)	10.1	-	3.7	5.6		

DBT: Dry bulb temperature, WBT: Wet bulb temperature.
EMC: Equilibrium moisture content.

を切り出し、全乾法による含水率を求めた。内部割れは、含水率試験片採取直後の木口断面を写真撮影し、観察した。なお、取り出したそれぞれの段階を経過時間に従って試験AでステージA, B, C, D, E, Fとし、試験BでステージU, V, W, X, Y, Zとした。また、試験材のうち一組は重量を継続して測定し、最終的に含水率を全乾法によって求めた。さらに、試験Aにおいては、中央部試験材で材表面から髓の間の中間付近で無欠点小試験体 (T30 mm × R30 mm × L30 mm) を1試験材あたり2個ずつ作製し、その時点の体積と全乾重量から容積密度数を求めた。その際、10本の試験材を無作為に選んだ。

3. 結果と考察

3.1 含水率分布の変動

両試験の生材時の含水率分布を Fig. 2, Fig. 3 に示す。重量区別の含水率分布は、1層目から4層目付近までは80%程度で変わらないが、中心部に近くなるに従い生材重量の重い方が含水率が高い。すなわち、生材重量の重い材は中心部付近により多くの水分を含んでいることが分かる。また、元口側と末口側の含水率分布は、本研究で用いた試験材ではほとんど差が見られなかった。容積密度数は290~384 kg/m³の範囲にあり、平均値は331 kg/m³であった。容積密度数と生材重量の間の相関係数は $r = 0.09$ であり、有意な相関関係は見られないため、生材重量の差は含水率の差によって生じたものと推察される。

両試験の乾燥経過に伴う含水率分布の変動を Fig. 4, Fig. 5 に示す。試験Aでは、重量区分にかかわらず各試験材とも、ステージAで1層目から3層目にわたって大きく含水率が減少しているが、4層目から中心部にかけては生材含水率に比べ大きな変化はない。中間蒸煮後となるステージBでは1, 2層目

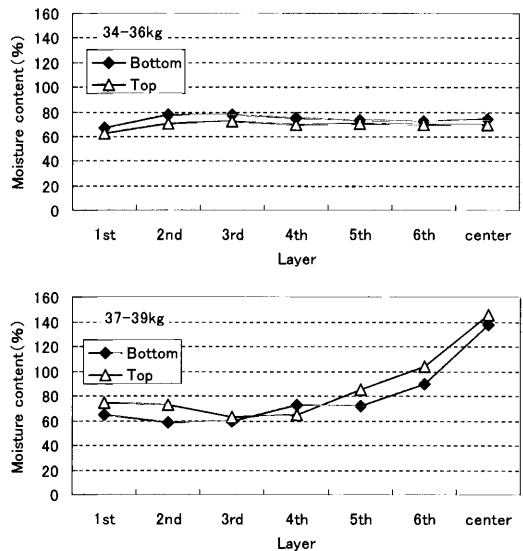


Fig. 2. Moisture content of each layer in cross sections of green timbers in test A.

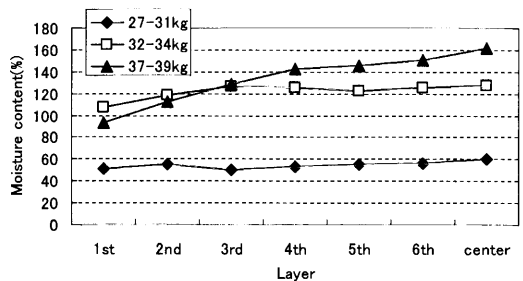


Fig. 3. Moisture content of each layer in cross sections of green timbers in test B.

でやや含水率が上昇する材が多く、ステージCで中心部を除く各層で含水率の減少が見られる。ステージDでは1層目から3層目の含水率は各試験材とも7%~11%である。これに対し、4層目と中心部の含水率は34-36 kgの材で8~11%と21~41%であり、37-39 kgの材で15~19%と65~107%となり、生材重量によって大きく含水率が異なる。ステージE, Fと経過時間の進行に従い、各層と同時に中心部の含水率も減少する。最終的な各層の含水率は34-36 kgの材で各層とも6%で、37-39 kgの材で表層が6~15%、中心部が17~40%であった。

一方、蒸煮工程の前段階に乾球温度75°C、湿球温度68°Cの表層乾燥ステージを設けた試験Bでは、含水率分布の変化が大きく異なっている。すなわち、表層乾燥ステージのステージUで、各層の含水率は

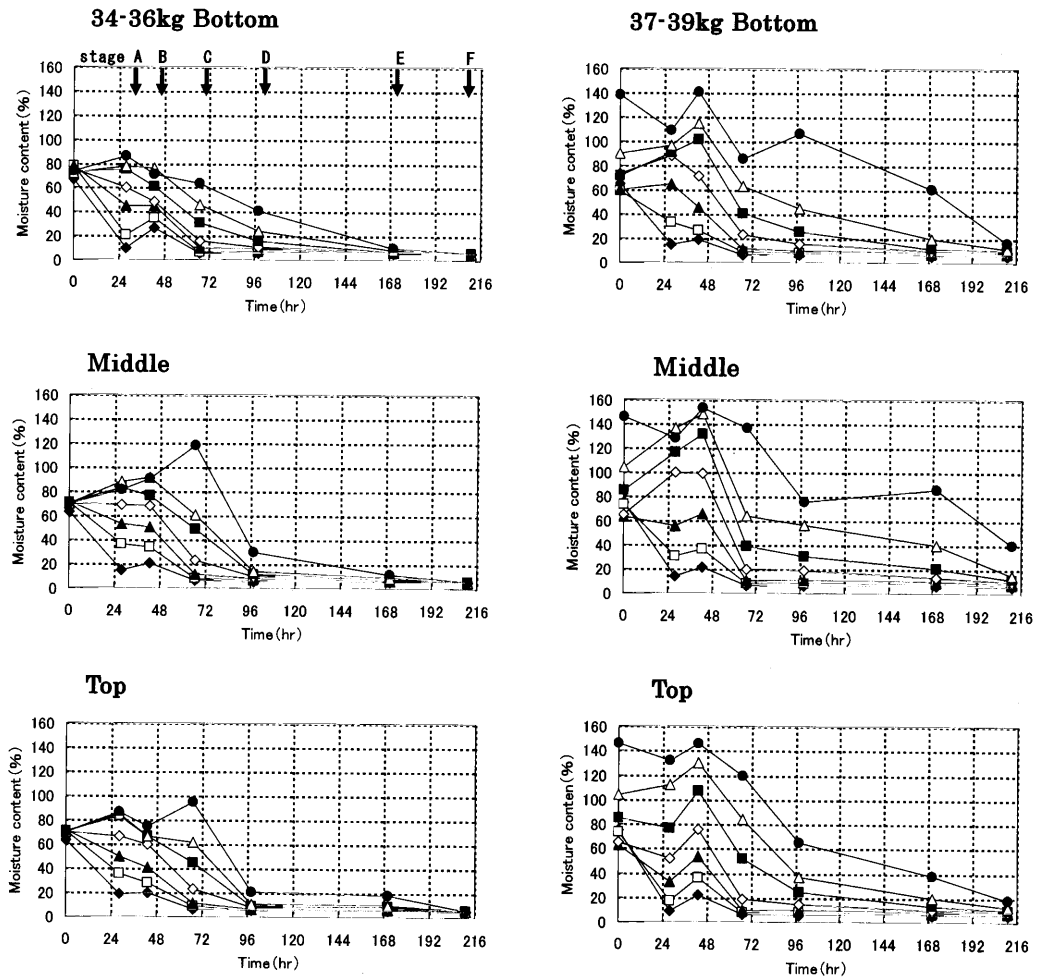


Fig. 4. Change of distribution of moisture content in test A.

Legend: ◆; 1st layer, □; 2nd layer, ▲; 3rd layer, ◇; 4th layer, ■; 5th layer, △; 6th layer, ●; center.

わずかに減少している材が多いが、中心部の含水率は大きな変化は見られない。蒸煮工程のステージVでは、特に37-39 kgのグループにおいて、生材時より中心部含水率との差が小さくなる。このことは、緩やかな乾燥条件において、材中心部付近の水分が表層へ移動することと、蒸煮によって表層の含水率が上昇した結果、各部位の含水率のばらつきが解消されたと考えられる。さらに、乾燥が進行する乾球温度120℃のステージWでは、1層目から3層目にわたって大きく含水率が減少し、ステージXに進むと中心部の含水率も減少する。その後、乾球温度が110℃に低下するステージY, Zでは、表層の含水率より中心部含水率の減少が目立つ。末口側、元口側それぞれの最終的な含水率は、重量が27-31 kgの

試験材は表層が共に5%, 中心部が20%, 22%であり、また、32-34 kgの試験材は表層が6%, 11%で、中心部が68%, 87%であった。さらに、37-39 kgの試験材は表層が共に7%, 中心部が58%, 54%であった。中心部の含水率は、末口側よりも元口側の方が同程度かやや高い傾向を示した。

スギ心持ち柱材の含水率分布の変動を乾燥スケジュールの進行に応じて調べた結果、設定温度の違いによって含水率分布が異なることが明らかとなった。すなわち、表層乾燥ステージとその後の蒸煮処理によって含水率分布は表層と中心部の傾斜が小さくなり、ばらつきが解消された。その後の乾燥工程では、表層乾燥ステージの有無に係わらず、表層から内部に向かって含水率が低下する含水率分布を示

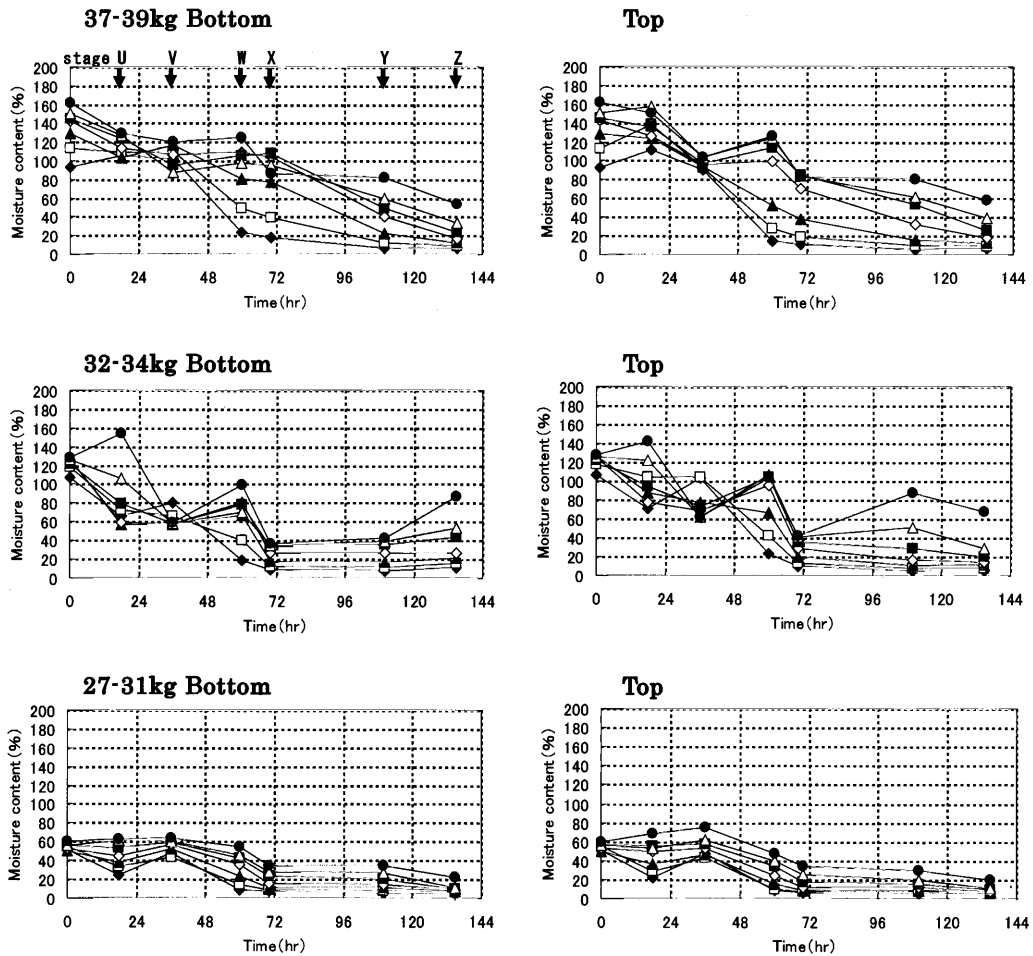


Fig. 5. Change of distribution of moisture content in test B.
 Legend: ◆; 1st layer, □; 2nd layer, ▲; 3rd layer, ◇; 4th layer, ■; 5th layer, △; 6th layer, ●; center.

しながら乾燥が進行した。既報⁹⁾では、表層乾燥ステージを設けた試験材は、設けない試験材と比較して内部割れ長さが小さくなることを報告した。表層乾燥ステージと蒸煮の工程で、表層乾燥無しスケジュールに比べ材中心部から表層に向かって水分が移動しやすくなった結果、含水率の傾斜が小さくなり内部割れ長さが小さくなったものと考えられるが、詳細は不明であり今後の検討が必要である。

3.2 含水率の変化

試験A, Bの乾燥経過時間と含水率の関係を各重量グループごとに Fig. 6, Fig. 7 に示す。試験AのステージAとCの含水率変化は、34-36 kg の材で77%から47%へ30%の減少と、49%から26%へ23%の減少であり、また、37-39 kg の材で94%から62%へ32%の減少と、64%から45%へ19%の減少であった。

共に中間蒸煮でやや増加している。乾球温度120℃の2工程をあわせた46時間で34-36 kg のグループでは53%減少し、37-39 kg のグループでは49%減少した。両グループの1時間あたりの含水率減少量は1.2%, 1.1%であった。最終的な含水率は、両グループそれぞれ7%, 15%であり、110℃と105℃の工程を通算した114時間で19%, 30%の含水率減少であった。また、最終的な含水率減少は70%, 79%であり、120℃の工程で全体の3/4~2/3が減少した。

次に、試験Bでは表層乾燥ステージを設けた結果、ステージVまでは含水率に大きな変化は見られない。ステージWとXの乾球温度120℃の工程で含水率が大きく減少した。この両ステージを合わせた34時間の含水率の変化は、生材重量が27-31 kg の材で66%から38%へ28%の減少、32-34 kg の材で104%

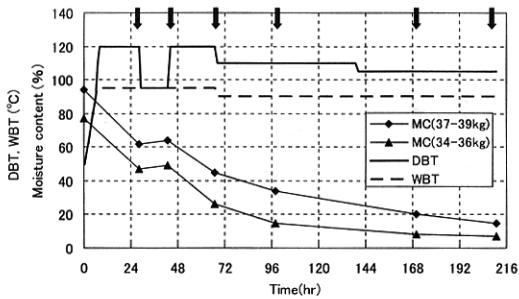


Fig. 6. Drying schedule and change of moisture content in test A.

Legend: ↓; stage A, B, C, D, E, F.

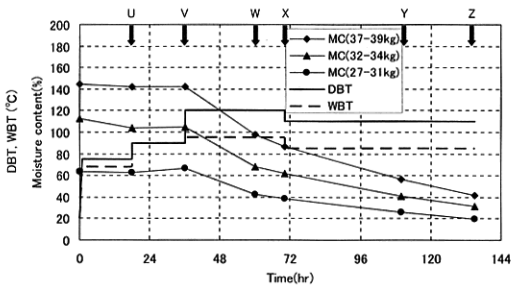


Fig. 7. Drying schedule and change of moisture content in test B.

Legend: ↓; stage U, V, W, X, Y, Z.

から62%へ42%の減少であり、37-39 kgの材で142%から87%へ55%の減少であった。1時間あたりの減少量は、それぞれ0.8%, 1.2%, 1.6%であった。これらの工程に続くステージY, Zは乾球温度100°Cの工程であり、合わせた65時間の1時間あたりの含水率減少量は、生材重量別にそれぞれ0.3%, 0.5%, 0.7%であった。最終的な含水率は20%, 31%, 42%であったが、このばらつきは初期含水率の差異によるものと考えられる。すなわち、生材重量別の初期含水率はそれぞれ63%, 112%, 144%であり、この差異がそのまま最終的な含水率の差異に現れたものと考えられる。

3.3 内部割れの発生状況

両試験における木口断面の様子を Fig. 8, 9 に示す。内部割れは、試験Aの34-36 kgの材で乾球温度が120°Cから110°Cへ下げたステージCから見られ始め、この時の含水率は26~38%であった。その後、乾燥工程の進行に従って含水率が低下すると、より幅の広い内部割れが現れた。また、37-39 kgの材ではステージEから見られ始め、この時の含水率は16~28%であった。

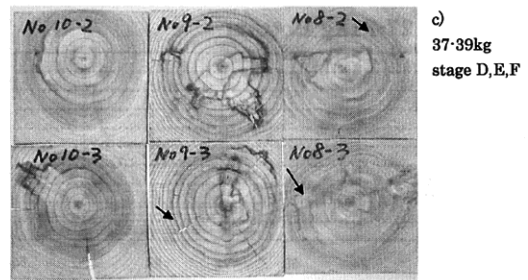
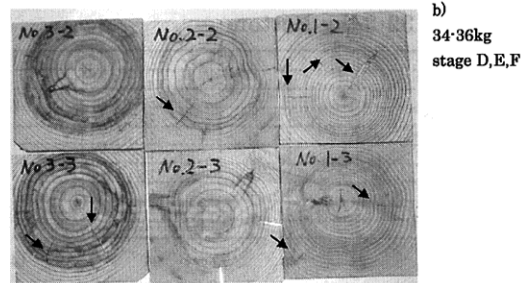
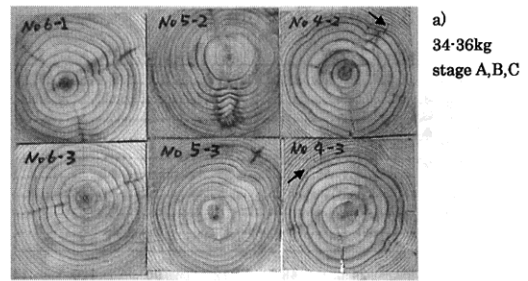


Fig. 8. States of internal checks of cross sections in test A.

一方の試験Bでは、27-31 kgの材が120°CのステージWで発生が認められ、32-34 kgの材はステージXで、また、37-39 kgの材はステージYで認められた。この時の含水率はそれぞれ28%, 27%, 39%であった。

これらのことから、内部割れは含水率40~30%付近で発生するものと推察される。

4. おわりに

宮崎県産スギ心持ち柱材を2種類の高湿乾燥スケジュールで乾燥試験を行った。乾燥経過に伴う含水率分布と含水率の推移および内部割れの発生状況について検討した。結果を要約すると次のとおりである。

- 1) 生材重量によって含水率分布に大きな差が見られた。中間蒸煮を行った試験では、中間蒸煮後に表層の含水率が上昇する材が多かった。最終

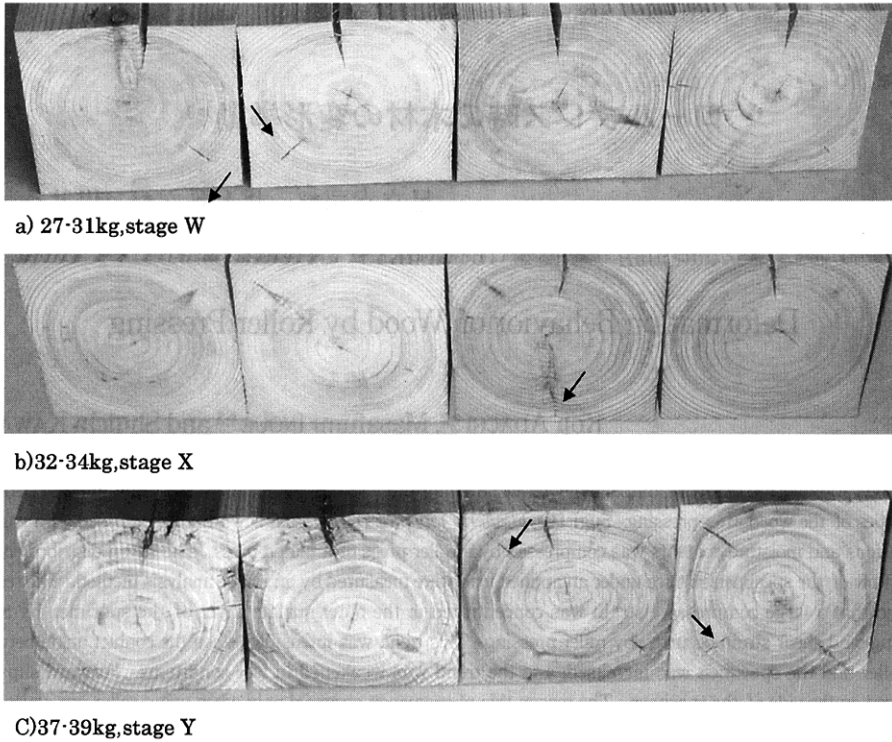


Fig. 9. States of internal checks of cross sections in test B.

的な各層の含水率は34-36 kgの材で各層とも6%で、37-39 kg材で表層が6~15%、中心部が17~40%であった。

- 2) 乾球温度75℃、湿球温度68℃の表層乾燥ステージを設けた試験では、これに引き続き蒸煮工程で横断面内の含水率のばらつきが解消された。最終的な各層の含水率は、表層が5~7%、中心部が22%~87%であった。
- 3) 生材重量が32 kg以上の材の乾球温度120℃の工程における1時間あたりの含水率減少は、両スケジュールとも1.2%~1.6%であり、ほぼ等しかった。
- 4) 両スケジュールとも内部割れが発生する含水率は40~30%付近であったが、その大きさに差異は見られなかった。

文 献

- 1) 三輪雄四郎：“木材の科学と利用技術II，5．ス

ギ”，1991，pp10-13.

- 2) 林野庁：“平成5~6年度林業試験研究報告書”，pp59-117 (1997).
- 3) 吉田孝久，橋爪丈夫，藤本登留：木材工業 55，357-362 (2000).
- 4) 齋藤周逸，吉田孝久：“わかりやすい乾燥材生産技術マニュアル”，全国木材組合連合会，2000，pp. 24-39.
- 5) 小田久人，蛭原啓文，迫田忠芳，藤本登留，村瀬安英：木材工業 59，255-262 (2004).
- 6) 小田久人，蛭原啓文，迫田忠芳，藤本登留，村瀬安英：日本木材加工技術協会第21回年次大会講演要旨集，東京，2003，pp20-21.
- 7) Oda, H., Ebihara, Y., Sakoda, T., Fujimoto, N., Murase, Y.: *Transaction of Materials Research Society of Japan* 29, 2495-2498 (2004).