

爆砕高温高周波減圧乾燥経過中の表面解放ひずみの変化<sup>\*1</sup>野地清美<sup>\*2</sup>, 政岡尚志<sup>\*2</sup>, 後藤純一<sup>\*3</sup>,  
藤原新二<sup>\*3</sup>, 金川 靖<sup>\*3</sup>Change of Released Surface Strain during Drying  
with High Temperature Heating by Radio Frequency  
under Vacuum after a Local Steam Explosion TreatmentKiyomi NOJI<sup>\*2</sup>, Hisashi MASAOKA<sup>\*2</sup>, Jun'ichi GOTOU<sup>\*3</sup>,  
Shinji FUJIWARA<sup>\*3</sup> and Yasushi KANAGAWA<sup>\*3</sup>

Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) square lumber was dried at high temperature of about 70 or 90°C by the radio-frequency heating under vacuum 18.6 kPa (140 mmHg) after a local steam explosion treatment. Drying time could be shortened to about one half of the drying time in the usual radio-frequency vacuum drying at 40 to 50°C. Slight pith checking occurred during the 120°C-steam explosion. A few surface checks were observed.

Test pieces were taken out at several stages of drying, and were examined in regard to the few surface checks by measuring changes of released surface strain and moisture content distribution through the thickness during drying. Surface tension stress, which was observed from changes of surface strain, increased from the middle stage of drying, and then tended to reverse to compression stress at the final period of drying. Observing the influence of pretreatment or its absence on drying stress at the surface zone, tension stress tended to be reduced by the steam explosion pretreatment. The amount of tension strain is lower with than without pretreatment. The moisture content gradient through the thickness was very shallow, and the occurrence of drying stress was therefore reduced. The moisture content at the surface zones and the core declined before the middle stage of drying. This indicated that surface stress was changed into compression stress at the final stage of drying.

**Keywords:** sugi, local steam explosion, released surface strain, radio-frequency vacuum drying, prong test.

120°C水蒸気加熱による爆砕処理後に高温高周波減圧乾燥法でスギ芯持ち、無背割り、断面寸法 110×110 mm、材長 3 m 柱材を処理した結果、表面割れの発生が少なかった。その要因を検討した結果、乾燥経過中の材表面の解放ひずみ変化からみた乾燥応力の変化は、乾燥中期から引張応力が増加して、その後圧縮応力に転換する傾向を示した。爆砕処理の有無が表層部の乾燥応力へ与える影響は、爆砕処理をすることによって引張応力が小さくなる傾向であった。厚さ方向の含水率傾斜が非常に少ないことが乾燥応力の発生を軽減し、乾燥経過中の表層と中心部が、中間部

<sup>\*1</sup> Received June 28, 2001: accepted November 30, 2001. この報告の一部は第51回日本木材学会大会 (2001年4月, 東京) において発表した。

<sup>\*2</sup> 高知県立森林技術センター Kochi Prefectural Forestry Technology Center, Tosayamada 782-0078

<sup>\*3</sup> 高知大学農学部 Faculty of Agriculture, Kochi University, Nankoku 783-8502

よりも先行して乾燥することが、表層において発生した引張応力が乾燥末期には圧縮応力へ転換する要因になっていると考えられる。

## 1. 結 言

住宅の品質確保に関する法律、いわゆる品確法が施行されて、木材乾燥の必要性はますます高まりをみせているが、従来と大きく異なるのは表面割れに対する要求が非常に厳しくなっていることである。したがって、割れ発生を極力抑えて歩留まりを考慮した乾燥技術の確立が急がれるところである。木材乾燥方式で現在最もシェアの高い蒸気式乾燥では、近年乾燥初期から高温低湿な設定条件を与えることによって材色変化や表面割れ発生を抑制する効果がみられ<sup>1)</sup>、その設定条件を基本にして内部割れの発生をできる限り抑えた乾燥スケジュールの検討が行われている。また、ほかの乾燥方式としてスギ芯持ち柱材の透過性改善に有効な乾燥前処理技術である爆砕処理と高周波減圧方式を複合させた乾燥方法があるが、この方式を用いてスギ柱材を含水率20%前後まで乾燥させた場合、材温を40~50°C温度域に設定して3~5日間を要する<sup>2-4)</sup>。しかし、この乾燥法の普及を阻んでいるのは、乾燥コストが高い点が大きな要因である。そこで、乾燥コストを軽減させるために近年の蒸気式乾燥法における高温化傾向をこの方式に取り入れて、従来よりも高温域(70~90°C)で乾燥を行った結果、約半分程度まで乾燥所要日数を短縮することができた<sup>5)</sup>。また、この際に表面割れの発生を非常に少なく仕上げるのが可能であった。本報では、表面割れの発生が少ない要因について、乾燥経過中の材表面解放ひずみの変化と厚さ方向の含水率傾斜の変化を中心に測定して検討した。

これまで、スギ芯持ち無背割り柱材の表面乾燥応力については金川<sup>6)</sup>、藤本<sup>7)</sup>らによって測定されているだけで、乾燥経過中の表面解放ひずみ変化を測定した事例は少ない。それは、乾燥が進行するにしたがって表面割れが発生して乾燥応力が解放されるために、ひずみゲージによる計測ができないためであ

る。しかし、爆砕処理をして高周波減圧乾燥を行うこの方式では表面割れ発生が爆砕処理をしない場合よりも少ないために、ひずみゲージを用いた乾燥応力の変化を測定することが可能であった。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

2 から3 か月間葉枯らし処理された高知県産スギ芯持ち、無背割り、断面寸法110×110 mm、材長3 mの柱材について、Table 1 に示すように製材直後に重量と心材率ができる限りばらつかないように30本をサンプリングした。今回の葉枯らし処理された柱材は、初期含水率が50から74%の範囲で、一般的に言われているように処理をしていない生材より低い傾向であった。1回の試験には、3 mの柱材を2本使用し、Fig. 1 に示すとおり50 cm長さの試験材を5本採取して、50 cm長さの試験材としては合計10本を供した。

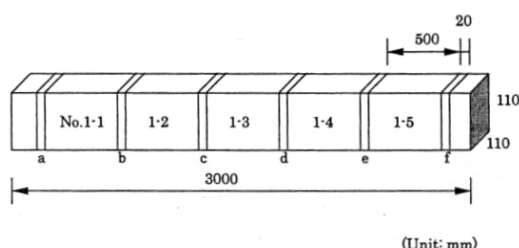


Fig. 1. Cutting diagram of specimens.

Notes: 1-1~1-5: Test specimens, a, b, c, d, e, f: MC specimens. Time to take out test specimens when performing pretreatment. No. 1-1: before pretreatment, No. 1-2: after pretreatment. No. 1-3: after three hours of drying, No. 1-4: at about 25% MC. No. 1-5: at about 15% MC at the end of drying.

Table 1. Basic properties of sugi lumber before drying.

	Moisture content (%)	Densities (g/cm <sup>3</sup> )	Proportion of heart wood (%)
Mean	63	0.64	88
Max.	74	0.66	95
Min.	50	0.61	81
CV (%)	14.5	2.7	6.2
N	30	30	30

Note: 110 mm×110 mm×300 cm.

## 2.2 前処理および乾燥条件

乾燥前の処理である爆砕処理条件は、まず120°Cの加圧水蒸気によって缶内温度が120°Cに達してから1時間加熱して一気に解圧する1回目の爆砕処理を行い、その後は再び缶内温度が120°Cに達してから加熱時間を5分間とする爆砕処理を10回繰返し、合計11回の処理回数とした。その処理後に実施する高温高周波減圧乾燥条件は、表面から深さ5 mmの位置に挿入した光ファイバ温度センサ(ノーテック社製)にて材温を70°C一定となるように高周波印加を制御し、缶内圧力は18.6 kPa(140 mmHg, 沸点約58°C)とした。高周波の発振は、陽極電流0.42 A、発振サイクルを9分発振、1分停止とした。

## 2.3 実験方法

50 cm長試験材による実験は、爆砕処理をして高温高周波減圧乾燥をする場合を8回、爆砕処理をせずに高温高周波減圧乾燥をする場合を5回の計13回行った。乾燥経過中の解放ひずみと含水率傾斜の変化を測定して、120°C水蒸気による爆砕処理の表面割れに対する効果を検討した。解放ひずみの変化については、ひずみゲージ(NEC 三栄製10 mm長, N11-FA-120-11-VM5T)とくし形試験片による2種類で検討した。

乾燥経過中の測定時期は爆砕処理をする場合が5回、爆砕処理をしない場合は4回とした。5回の内訳は、爆砕処理前、爆砕処理後、乾燥開始3時間後(およそ含水率30~50%)、含水率25%前後、および目標含水率である15%前後で、3 m長柱材から各1本ずつ、計2本の50 cm長試験材を取り出した。

### 2.3.1 ひずみゲージによる解放ひずみの測定

50 cm長試験材を取り出した直後に、表面にひずみゲージを貼って解放ひずみを測定する場合、材温が高いために材温変化に影響されて本来の解放時のひずみの変化を正確に測定できない。したがって、取り出した状態ができる限り保持できるようにフィルムでラッピングをして、材温が常温に低下するまで室内で保管した。その後、ひずみゲージを材長中央部4材面に接線方向に貼って材長方向厚さ約2 cmに切り取って、各材面のゲージの両端を鋸で約3 cmの切込みを入れて解放させ、そのときのひずみの変化を測定した。

### 2.3.2 くし形試験片による応力測定

材温を低下させてからひずみゲージにより解放ひずみを測定する方法が、基本的に問題がないか確認するために、前述のひずみゲージ用試験片を採取する実験とは別に、乾燥経過中に試験材を取り出した時点で材長中央位置において厚さ1 cmの試験片を

採取して、くし形に加工し、直後の最外層くし形の開く方向と、前項で述べたゲージによるひずみ変化を比較検討した。

### 2.3.3 厚さ方向の含水率傾斜の測定

ひずみゲージ用試験片に隣接する箇所から、厚さ方向の含水率傾斜測定用の横断面材を採取して、表面から中心部に向かって5, 5, 10, 10, 10 mm厚さに分割し、残った中心部を加えて6分割として厚さ方向の含水率傾斜を求めた。

### 2.3.4 実大長材への乾燥法の適用

実大サイズである3 m長柱材について、この乾燥法による表面割れ抑制機構が適用可能かどうかを検討するために、3 m長の柱材4本を用いて、120°C加圧水蒸気による爆砕処理のみの実験を行った。爆砕処理条件は、120°C加圧水蒸気で、1回目の爆砕処理までの加熱時間を1時間、その後の加熱時間を5分間として、合計31回の爆砕処理を、所要時間約4時間で実施した。爆砕処理試験後に、元口側から材長方向に向かって元口側木口面、750, 1500, 2250, 3000 mm(末口側の木口面)入った位置の5箇所における芯割れ発生状況をみた。

## 3. 結果と考察

### 3.1 ひずみゲージによる測定方法の妥当性

ひずみゲージにより測定した爆砕処理前後および乾燥経過中の表面解放ひずみの変化をみる前に、各時期に取り出した試験材の材温を室温まで低下させてから、ひずみゲージを貼り付けて材表面の解放ひずみ変化を測定する方法の妥当性を検討した。乾燥経過中の各時期(爆砕処理前後、乾燥開始3時間後(含水率およそ30~50%)、含水率約25%時、約15%時)に50 cm長試験材を取り出して、すぐに材長中央位置から厚さ約1 cmの横断面材を採取して、くし形に加工した。加工直後の最外層くし形の形状変化を、Fig. 2に示す。含水率約39%時には、最外層のくし形はわずかに外側に開いて、逆に中心部と最外層との中間にあるくし形は内側に傾いていた。これは、この含水率域で最外層には引張応力が、また中間層には圧縮応力が作用していることを示している。つぎに、含水率約28%時には、最外層のくし形は内側に、中間層のくし形は外側に傾き、最外層には圧縮応力が働き、中間層には引張応力が働いていることが認められた。さらに、乾燥が進行して含水率約16%時には、含水率約28%時点の傾向がさらに強くなり、最外層には圧縮応力、中間層には引張応力の発生がそれぞれ認められた。

また、試験材を各時期に取り出した直後の乾燥応

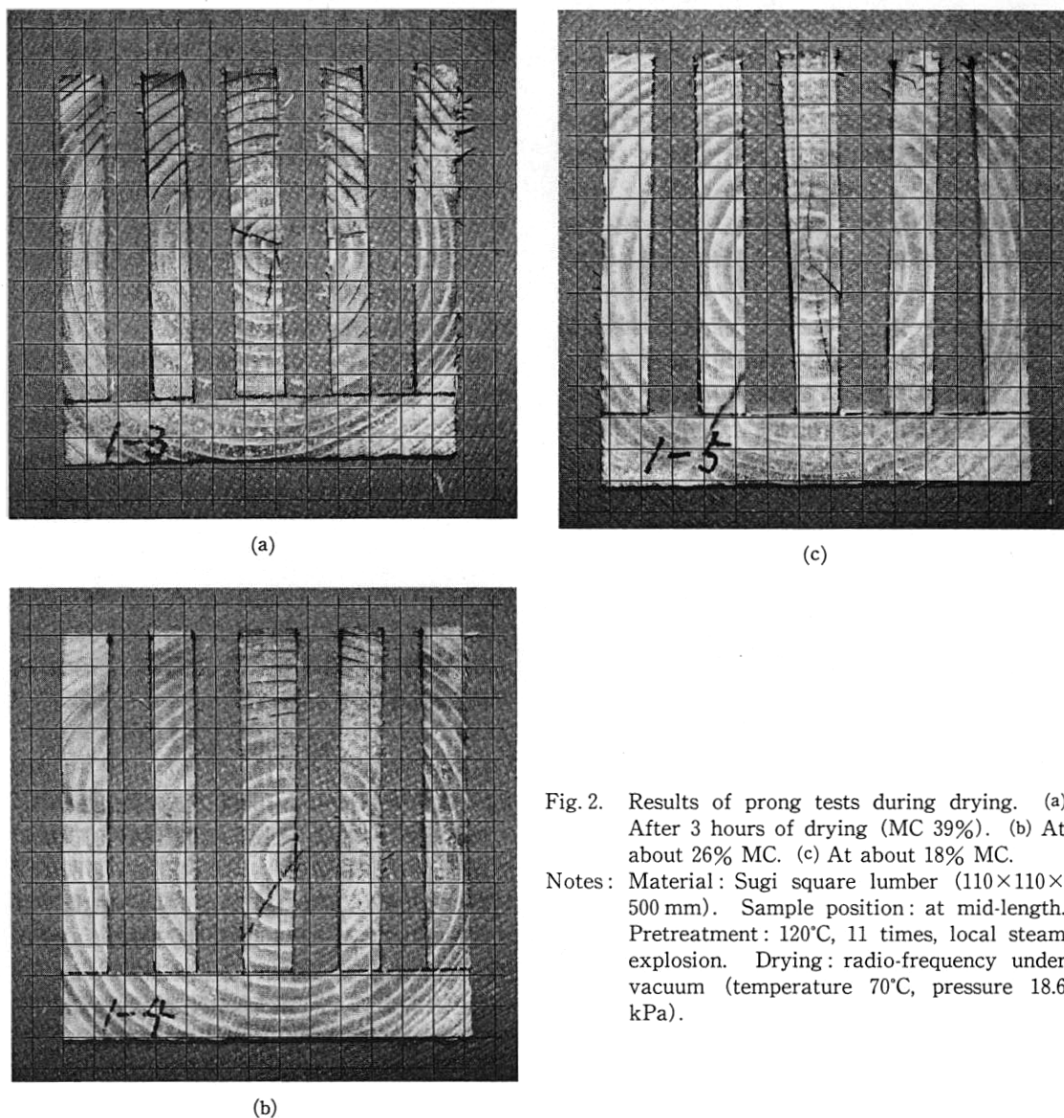


Fig. 2. Results of prong tests during drying. (a) After 3 hours of drying (MC 39%). (b) At about 26% MC. (c) At about 18% MC.

Notes: Material: Sugi square lumber (110×110×500 mm). Sample position: at mid-length. Pretreatment: 120°C, 11 times, local steam explosion. Drying: radio-frequency under vacuum (temperature 70°C, pressure 18.6 kPa).

力の状態を維持するために、その後フィルムでラッピングをして材温を室温まで冷却するが、この工程中に応力転換を示すほどの応力変化が表層に作用するとは考えにくい。

しかし、このくし形試験でのくし形の傾きの傾向だけでは、単純には乾燥応力の傾向を判断することはできない。なぜなら、同じ引張応力の層内でもその外層が内層よりも引張応力が小さい場合を仮定すると、解放後には外層は内側に傾き、圧縮応力を受けていると判断することが可能であるからである。

Fig. 3 に示している爆砕処理前後および乾燥経過中のひずみゲージによる材表面の解放ひずみの変化をみると、くし形試験における加工直後の最外層の

傾きとほぼ一致することから、両結果が矛盾していないと評価して、乾燥経過中に表面の乾燥応力は引張応力から圧縮応力に転換していると考え、このひずみゲージによる測定法の妥当性が認められた。したがって、これからはひずみゲージでの試験結果をもとに乾燥応力の傾向を考察する。

### 3.2 爆砕処理前後および乾燥経過中の解放ひずみの変化

爆砕処理前後および乾燥経過中の材表面解放ひずみの変化について、材温を低下させてから計測したひずみゲージによる表面解放ひずみの変化をもとに検討する。爆砕処理の有無別に材表面の解放ひずみの変化を、Fig. 3, 4 に示す。爆砕処理の有無にかか



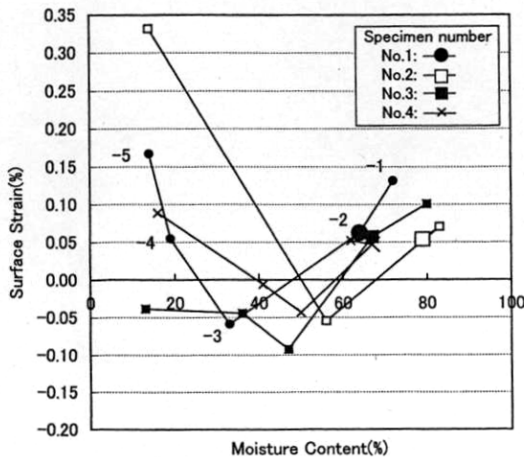


Fig. 3. Change of released surface strain with pretreatment in drying.

Notes: Each point is the mean released surface strain of 4 surfaces. Large points show released surface strain after pretreatment. -1: before pretreatment (110×110×500 mm), -2: after pretreatment (110×110×500 mm), -3: after 3 hours of drying (110×110×500 mm), -4: at about 25% MC (110×110×500 mm), -5: at about 15% MC (110×110×500 mm).

わらず、いずれの試験材においても、高温高周波減圧乾燥を開始して含水率が50から30%付近までは解放ひずみは縮む傾向を示して、引張応力が増大していった。そうして、この含水率域付近でそのピークが現れた。さらに、乾燥が進行すると今度は解放ひずみが伸びる傾向、すなわち圧縮応力を示し始めて、含水率が40から20%付近が応力転換時期であることが示唆された。その後の乾燥過程では、解放ひずみの変化は伸びを示して圧縮応力がさらに増大する傾向であった。

爆砕処理前の生材時に、材表面の応力が圧縮応力を示している。一般的に、何も処理をしない生材時に材表面の接線方向解放ひずみが伸びて圧縮応力側にあるのは、立木時に材内部に蓄積された成長応力を示しているからである。すなわち、接線方向の成長応力は樹幹の最外周部で最大圧縮応力が働いて、中心に向かうにしたがってその応力が低下して、中心から半径の約3分の1付近において応力がほぼなくなる。さらに中心部に向かって引張応力に転換して、中心部で最大となると言われている<sup>8)</sup>。今回使用した試験材は、芯持ち105 mm 柱材を一本製材できる末口径16から18 cmの原木から採取されたものであるので、製材品の表層部には接線方向の成長応力

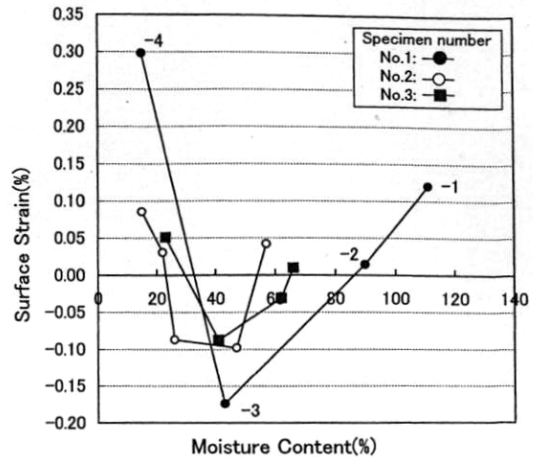


Fig. 4. Change of released surface strain without pretreatment in drying.

Notes: Each point is the mean released surface strain of 4 surfaces. -1: before drying (110×110×500 mm), -2: after 3 hours of drying (110×110×500 mm), -3: at about 25% MC (110×110×500 mm), -4: at about 15% MC (110×110×500 mm).

が圧縮応力側に位置することになるから、処理前の材表面の解放ひずみが伸びて圧縮応力を示したのである。

また、爆砕処理後には圧縮応力が減少する傾向であったが、一般的に木材が湿潤状態で加熱されるとき顕著に軟化されて応力が緩和されることは知られており、今回は爆砕処理時の120℃水蒸気加熱によって応力緩和がおり、表面の解放ひずみが減少したと考える。

一般的に、芯持ち柱材における乾燥応力発生要因としては、主として厚さ方向の含水率傾斜と収縮異方性があげられる。厚さ方向の含水率傾斜については、乾燥経過中に発生する含水率分布の違いが厚さ方向の収縮のミスマッチを生じさせて乾燥応力を発生させる。また、収縮異方性に関しては、いくら厚さ方向の含水率傾斜を軽減させても、接線方向と半径方向の収縮率の違いから乾燥応力が発生して表面割れ等を生じさせることになる。したがって、両要因を軽減させてはじめて、乾燥応力の発生を抑制することが可能となり、表面割れや内部割れの発生を軽減できる。今回、乾燥経過中の材表面解放ひずみの変化を計測することによって、表面の乾燥応力が引張応力から圧縮応力に転換することが判明したが、このことが材表面の割れ発生を抑制している要因の一つであると考えられる。

### 3.3 芯割れと乾燥応力

爆砕処理は、120℃水蒸気による約1時間の初期蒸煮工程と、その後短時間（約4分から6分間のサイクル）に加圧、解圧の繰り返しを行って、局所的に壁孔を破壊する工程で構成されている。この処理により、スギの透過性を改善して乾燥性の向上が期待できることは知られているが、同時に軽微な芯割れが発生することも指摘されている<sup>3)</sup>。この120℃水蒸気による加熱蒸煮工程により発生する芯割れが、乾燥応力にどのように影響を与えているかを検討するために、爆砕処理の有無と高温高周波減圧乾燥との組み合わせで実験した結果を、Fig. 3とFig. 4に示す。

これらを説明する前に、50 cm長試験材での芯割れの発生状況を木口面でみると、Fig. 5に示すとおり爆砕処理前には芯割れがみられなかった材が、処理後には明らかに十字型の軽微な芯割れが発生していた。処理前からすでに芯割れがわずかに発生していた材に対しては、その割れが拡大したり、新たな方向に芯割れが発生していることが認められた。芯割れの発生の程度は、木口面が最も大きく、材長中央位置にも芯割れが軽微ではあるが認められた。この芯割れは、その後の高周波減圧乾燥中には収縮によりほとんどが閉じる傾向を示した。また、爆砕処理をしない場合の高周波減圧乾燥だけでは、芯割れの発生は認められなかった。

このように、爆砕処理の有無によって芯割れの有無や程度に違いがみられる試験材で、乾燥経過中の解放ひずみの変化を比較すると、引張応力側である解放ひずみの値に明らかに違いがみられた。すなわち、爆砕処理をしない場合ピークが0.09から0.18%と、爆砕処理をした場合よりも約1.5から2倍の解放

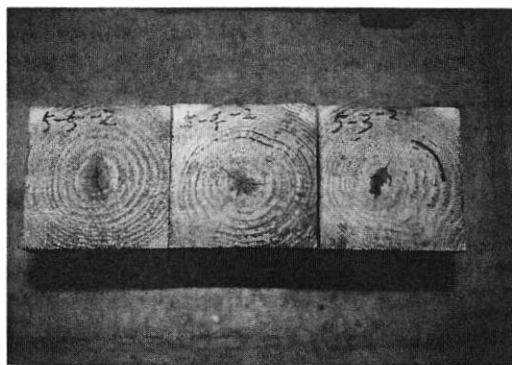


Fig. 5. Pith check after pretreatment.

Notes: Material: Sugi square lumber (110×110×500 mm), Pretreatment: 120℃, 11 times, local steam explosion.

ひずみであった。このことから、この芯割れがその後の乾燥による中心部の収縮を容易にさせて、収縮異方性により発生する材表面の引張応力を軽減させて、表面割れの発生を抑制させていることが示唆された。

### 3.4 含水率傾斜と乾燥応力

爆砕処理前後および乾燥経過中の厚さ方向含水率傾斜の変化を、Fig. 6に示す。生材時には表層部が45%前後なのに対して、材中心部では100%とかなりの含水率傾斜がみられたが、爆砕処理後には表層部の含水率はわずかに上がったものの、その他の位置では10から20%前後低下して、含水率傾斜も少し緩和されていた。爆砕処理をした後、高周波減圧乾燥を開始してから3時間後には、表層部と中心部の含水率が30%以上も急激に減少し、その他の位置でも20%前後低下した。このため、含水率傾斜も全体で20%以内とさらに緩和され、全体の平均含水率もこの時点で約32%と大きく減少して乾燥が急激に進行した。その後の乾燥経過のうち全体含水率が17%前後、13%前後の段階では、表面から10 mmまでの層の含水率は15から10%前後で推移してほとんど変化がみられず、乾燥が先行していた表層と中心部よりも中間部を中心に乾燥が進み、全体的にはほぼ含水率傾斜の少ない良好な仕上がりになっていた。爆砕処理をせずに高周波減圧乾燥した場合の乾燥経過中の含水率傾斜の変化と、爆砕処理をした場合とを比較すると、爆砕処理をした場合の爆砕処理後の表層部含水率変化以外には、ほとんど違いは認められなかつ

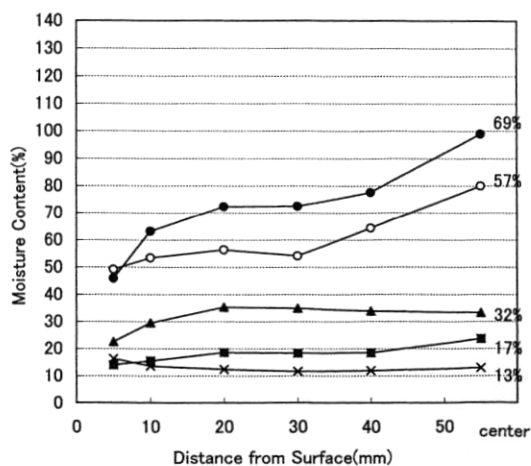


Fig. 6. Moisture content gradient in the thickness direction in drying.

Notes: ●: before pretreatment, ○: after pretreatment, ▲: after 3 hours of drying, ■: at about 25% MC, ×: at about 15% MC.

た。

芯持ち柱材の表面割れの発生には、接線方向と半径方向の収縮異方性と厚さ方向の含水率傾斜の2要因が大きく関係している。それらの要因によって、材表面に引張の乾燥応力が発生して表面割れを生じさせるが、高周波減圧乾燥法では前述したとおり厚さ方向の含水率傾斜が非常に少ないために、含水率傾斜が要因で発生する引張応力は軽減されていると言える。

含水率傾斜と乾燥応力の関係を推察すると、乾燥初期には表層部と中心部の含水率がまず繊維飽和点以下になり引張応力が発生し、乾燥が進まない中間部には圧縮応力が生じる。その後乾燥が進んで乾燥中期から末期にかけては、中間部を中心に乾燥するために応力が転換して、中間部には引張応力が作用し、逆に表層と中心部には圧縮応力が働くと考えられる。また、全体の平均含水率の減少経過と表層の乾燥応力の変化をみると、含水率が50から30%の範囲になって引張応力のピークが現れ、含水率が40から20%前後には応力転換がみられ、そのときの表層含水率は20%前後になっていることが示唆された。

### 3.5 実大長材への乾燥法の適用

3 m 長柱材を用いた爆砕処理のみの試験における処理後の木口面の状況をみると、前述した50 cm 長試験材と同様に、十字型の軽微な芯割れの発生が認められた。

材長方向の位置別の芯割れ発生状況をみると、両端木口面の芯割れが最も顕著に確認でき、その他の位置では10 mm 前後の長さの芯割れがみられ、材長中央位置まで芯割れが進行していたことが認められた。しかし、その芯割れの材表面への割れ発生方向は各位置で異なっていて、同一方向の芯割れが木口から材長中央方向に向かってしだいに進行していったとは言えない。しかし、3 m 長柱材においても、この120°C水蒸気加熱による爆砕処理が成長応力を緩和させて、軽微な芯割れを発生または進行させていることが確認できたことから、前述した50 cm 長試験材での実験結果同様に表面割れ抑制要因の一つとして芯割れがあると考えられる。

## 4. 結 論

スギ芯持ち、無背割り、断面寸法110×110 mm、

材長3 mの柱材を、爆砕高温高周波減圧法を用いて乾燥した際に、表面割れを非常に少なく仕上げる事ができたが、その要因を検討した結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 乾燥経過中の材表面の解放ひずみ変化からみた乾燥応力の変化は、乾燥の進行によって全体の平均含水率が50%から30%付近になるまでは引張応力が増加し、その後圧縮応力に転換する傾向であった。
- 2) 爆砕処理の有無による乾燥応力への影響は、応力変化の傾向には大きな違いはみられなかったが、引張応力は爆砕処理をした方が小さくなる傾向であった。この点と圧縮応力に転換することが、表面割れを抑制している。爆砕処理によって発生する軽微な芯割れが、収縮異方性を軽減させ、この異方性により発生する乾燥応力を抑制し、最終的には表面割れ発生を抑える効果があると考えられる。
- 3) 乾燥経過中の厚さ方向の含水率傾斜が非常に少ないことが、含水率傾斜が要因で発生する乾燥応力を軽減させて、表面割れの発生を抑えていると考えられる。また、含水率傾斜の変化は表層と中心部が先行して低下して、中間部が遅れて乾燥する。この含水率変化が、表層において引張応力から圧縮応力への応力転換を生じさせる要因になっていると考えられる。

## 文 献

- 1) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本登留: 木材工業 55 (8), 357-362 (2000).
- 2) 金川 靖, 林 和男, 渋谷昌資, 安島 稔: 木材工業 46(10), 468-472 (1991).
- 3) 金川 靖, 林 和男, 渋谷昌資, 安島 稔: 木材工業 47(8), 363-366 (1992).
- 4) 金川 靖, 林 和男, 渋谷昌資, 安島 稔, 青木弘栄: 木材工業 49(4), 166-170 (1994).
- 5) 野地清美, 政岡尚志, 須崎健太, 金川 靖, 藤原新二: 木材工業 57(1), 13-18 (2002).
- 6) 金川 靖: 木材工業 40(2), 66-70 (1985).
- 7) 藤本登留, 藤本知也, 河辺純一, 又木義博: 木材学会誌 40(7), 758-765 (1994).
- 8) 渡辺治人: 材料 12, 709-713 (1963).