

木材の燻煙熱処理*

—スギを中心に—

野村隆哉**

Smoke-dry Heat Treatment of Wood*
—on the Central Topic of Sugi Wood—

Takaya NOMURA**

(平成7年8月31日受理)

はじめに

近年の科学技術の進歩によって、木材の用途開発が進み、高次産業の原料として木材が使われるようになった。その消費量が飛躍的に増大する一方で、一次産品としての木材は相対的価値の下落を余儀なくされてきた。さらに、優良材の枯渇と木材の原料化によって、素材そのものの付加価値の低下は素材産業としての木材産業の低迷に拍車をかける結果となっている。

本来木材は、素材そのものが完成された製品として取り扱われなければならないならば、その価値は無に等しいものである。これまでの木材工業は、安価な森林資源を乱用して、工業製品を大量に生産してきた。しかし、より安価で大量生産が可能な代替品が出現するに及んで、木材を原料とする工業製品は市場経済の中での競争に耐えられなくなりつつある。そのしわ寄せが素材に集中し、素材産業の疲弊化とこれに伴う林業への資本の流れが停滞する中で、我が国の林業は閉塞状態にある。

これを打破するためには、まず、素材としての木材が完璧な製品として市場性を持たなければならない。そのためには、これまでのようにバラバラの流通ではなく、川上から川下まで統一された流れを作る必要がある。この流れの要になるものが、素材の厳密な規格化であり、製品化であろう。この規格化に欠かすことの出来ないのが含水率の均一化と寸法安定性である。

スギ材の規格化が困難な最大の原因は、高含水率であることと、個体間の含水率のバラツキが大きいこと、品種が多いこと、さらに、心辺材を含めた個体内のバラツキも大きいことである。

国際的な市場競争の中で、スギ材が生き残るためには、ただ単に素材としての価格が安いだけでなく、製品として完成されたものでなければならない。

しかし、コスト・パフォーマンスを考慮した上での乾燥技術は、従来の蒸気乾燥 (KD 法) しかないの

* 本報の内容は、京都大学木質科学研究所第50回公開講演会 (1995年5月, 宇治) において発表した。

** 物性制御分野 (Laboratory of Property Enhancement)

が現状である。最近、スギの乾燥技術や加工技術に関する新しい試みのいくつかが日本木材学会で発表されたが、生材丸太の燻煙熱処理がスギの持っている種々の欠点を製材前処理として除去する方法として近年注目され始めている¹⁾⁻¹⁰⁾。しかし、我が国では、木材の規格化はあまり重要視されず、もっぱら色や木理を大切にしてきた経緯がある。それゆえ、製材品の仕上がり含水率を厳密に規定するという考え方を定着させるためには、かなりの努力と、さらに、仕上がり含水率を揃えるための前処理として、この技術が受け入れられるためにはかなりの年月を必要とするであろう。スギの抱えている問題は、近い将来解決しなければならない。

生材丸太の燻煙熱処理は十数年前に氏家実氏によって実用化された¹¹⁾。この基本となる技術は木炭を焼く場合の前処理、ロクロ加工の際の荒削りした木地の調湿に用いられていた。氏家式燻煙熱処理法は、山で落雷により黒こげになった木を製材したところ、素直に製材でき、狂いも少なかったところから発想されたといわれている。当初の処理法は、辺材部まで黒こげにしてしまう方法が取られていたようである^{11),12)}。それゆえ、ケヤキなどの銘木を中心に処理されてきた。その後、対象をいろいろの樹種に広げ、寺沢、奥山、筆者等によって科学的に裏付けが行われ¹⁾⁻¹⁰⁾、今日に至っているが、まだまだ未解決の部分が多く、今後の研究が待たれている。同じような原理に基づく方式としては菅岡健司が開発した床に溝を作りその中に製材の廃材やおがくずを入れ、これをくすぶらせて処理する「古代人」と名付けられた方法もある。

燻煙熱処理の基礎概念

燻煙熱処理は、今の時点、木材乾燥の前処理として位置づけられる。この方法によって木材の完全乾燥が行われるためには、今後解決しなければならない問題点は多い。

これらの問題点の幾つかを示すと、以下のようなものがある。

- 1) 丸太の熱処理に、木材廃材を燃やして直接その燃焼ガスを用いるため、処理室の温度調節が難しい。
- 2) 処理室内の熱循環は自然循環のため、上下の温度勾配が出来る。このため、棧積みされた丸太に仕上がり含水率のバラツキが生ずる恐れがある。
- 3) 高含水率の生材丸太を恒率乾燥の範囲で処理するには、比較的容易であるが、連続して減率乾燥を行うには温度調節の点で、システムの改良、処理のメカニズムの解明が必要である。
- 4) 燃焼ガスの機能、木材に対する黒体輻射熱、遠赤外線の効果についての情報の不足。
- 5) 燻煙乾燥は、昔から行われてきた技術であるが、生材丸太への応用に対する科学的裏付けの不足。

この方法は、基本的には生材丸太の処理を行うのに適している。生材を用いるため、材中に含まれる水が熱媒体となり熱の伝播は速やかに行われると考えられる¹³⁾。さらに、高含水率である利点は、処理温度が100℃を越えても材重量の1/2から2/3存在する水のために、材温が100℃を越えることなく処理されることである。熱処理によって材温が上昇してくると、材中の水は水蒸気となって材外に排出されるが、この過程で材の応力緩和が起こる。すなわち、水の存在下では乾燥状態に比べ、リグニンの熱軟化点が下がることにより¹⁴⁾、細胞壁内、細胞間層に含まれているリグニンが軟化して動きやすくなり、成長過程でセルロース・ミクロフィブリルとリグニンの相互作用によって、細胞壁に生じた応力が緩和する。

また、材中から水が出ていく過程で、水分非平衡状態が作り出されるが、このような状態では木材のクリープ変化は水分平衡状態より大きくなることが明らかにされている^{15),16)}。応力緩和の場合も、材の歪みがセルルーズニングによって小さくなる。この結果、材の応力の緩和が促進されると考えられる。燻煙熱処理では、所定の最高温度に到達すると、外部からの空気の流入は遮断され、処理室は半密閉状態におかれる。初期の処理段階において、燃焼ガスの処理室への流入に伴い、温度が上昇すると、燃焼に伴う燃料および処理される材から発生する水蒸気によって処理室内は大量の蒸気で満たされる。材中の水は、上述したように、熱媒体として材温上昇に対して効果的に作用する。その結果、処理室内の飽和水蒸気圧に達するまで材中から水が排出される。しかし、一方で、煙突からの排気によって、常に水蒸気は外に出ていくため、

これを補うようにして材中から水は連続的に排出され、材重量は軽減する。処理される生材丸太は、皮付きのためと、特に、スギの場合は白線帯の存在のため、材外への水の排出は、ほとんどが木口から行われると考えられる。これまで明らかにされている板材の接線方向、半径方向からの水の蒸散は木口からの1/7から1/8であるが¹⁷⁾、皮付きの丸太の場合は、木口からの蒸散に限定してよいであろう。

処理室の温度が所定の最高温度まで上昇する過程において、材は高含水率であるため、この間材中からの水の排出は多い。次いで、処理室の温度が半密閉状態下において降下過程に入る。ここでは、処理材は高温の飽和水蒸気に満たされた雰囲気の中で、長時間処理される。この間に、材の応力緩和と、更なる含水率低下が進行するとともに、木材成分の熱変性、構造変化が起こり、材は改質される。燃焼室の燃料が消費し尽くされ、処理室内温度が低下し、材の内外温度がほぼ一定になったところで燻煙熱処理は終了する。

燻煙熱処理炉の概要および処理過程における処理室内および材内温度について⁷⁾⁻¹⁰⁾

燻煙熱処理炉の概要を図1に示す。処理炉は大きく分けて燃焼室と処理室の二つからなる。両者は隔壁で仕切られ、隔壁には燃焼ガスを処理室に流入、循環させるための穴が上部3個、中央2個および下部3個の、合計8個設けられている。丸太は台車に乗せられ処理室に導入される。装置全体は丸太の搬入口、燃焼室の燃料搬入口および煙道を閉じるとほぼ密閉状態となる。燃料を燃焼させる初期段階では、燃焼室側の空気取り入れ口および処理室側に設けられた煙突の煙道を全開にする。処理室内に急速に燃焼ガスが流入し、処理室内の温度が所定の温度域に到達する手前で燃焼室の空気の流入を止めると同時に煙道の開閉弁をわずかの開きにする。このような状態では外部からの空気の流入はわずかになるため、燃焼は抑えられ、不完全燃焼の状態でもゆるやかな燃焼が持続される。

通常、燃料の補給は行わないため、最初の燃料室への燃料投入量が処理を支配する。

シース熱電対および多点式温度測定器により測定した炉内温度測定位置(図2)は、材の搬入口から外側(熱電対番号1, 2, 3, 10)、中間(熱電対番号4, 5, 6, 11)、内側(熱電対番号7, 8, 9, 12)とし、搬入口から向かって左右および中央(Center)と位置付けした。丸太の中央位置で、材表面から深さ3 cm、丸太半径の1/2および中心にシース熱電対を挿入し、挿入口はコンパウンドでシールした後、材内温度測定を行った。

図3は図2に示した各測定位置における炉内の温度経過を示す。燃焼ガスの流入口は初め全開にしておき、処理炉内の温度が予定の温度に近づくと手動によって流入口の開閉扉を調節し、所定の最高温度で止まるように操作する。処理室内の最高温度の設定は、材の径級、処理量および初期含水率に基づいて、予備実験から予測して決められたものを用いる。最高温度までの到達時間は、外気の温度や用いる燃料の含水率等によって影響される。図中における山のピークが二つに分かれているのは、再調節のために一旦閉じた開閉扉を再び開いたためである。この操作は処理する材の径級や材積の多少、燃料の燃焼の度合いに

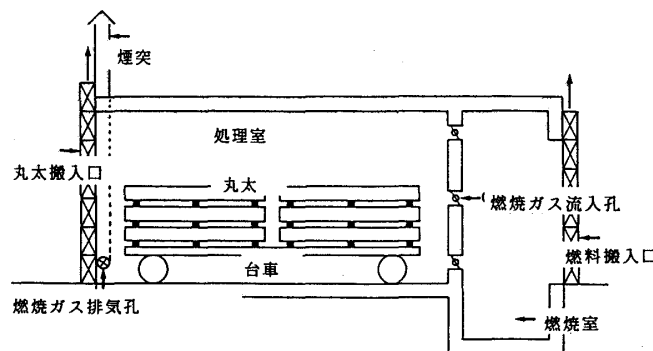


図1 燻煙熱処理装置の概略図

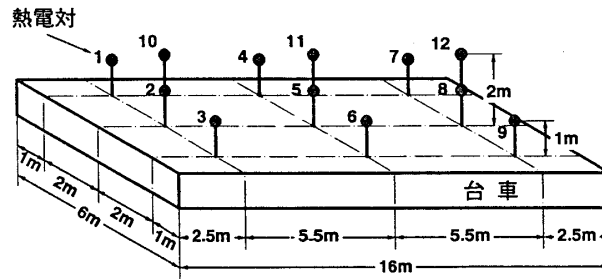


図2 台車上の熱電対の位置⁹⁾

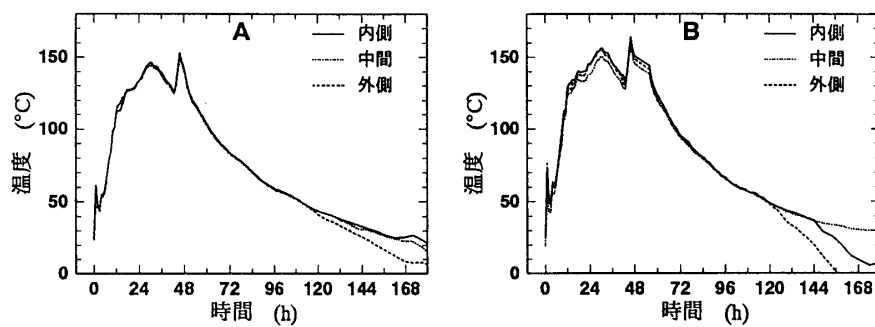


図3 燻煙熱処理における炉内温度の変化⁹⁾

A：台車 上 1 m の高さにおける 3 点の平均値。

B：台車 上 2 m の高さにおける 3 点の平均値。

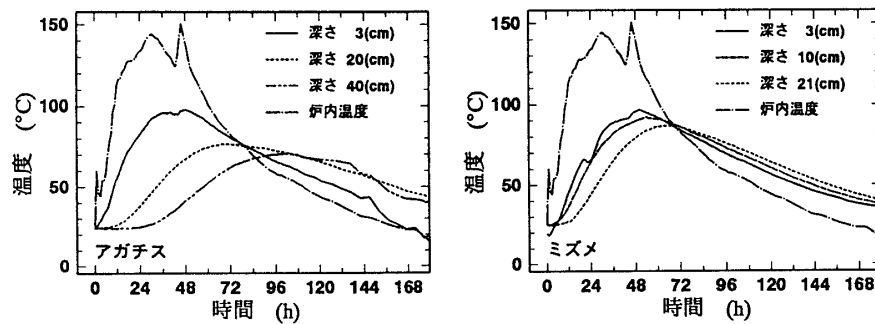


図4 丸太内部の温度と炉内温度の経時変化 (アガチスとミズメ)⁹⁾

よって、ある程度勸に頼って行なわれている。最初の温度ピーク位置までの温度上昇率は、台車 上 2 m のところで $4.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、1 m のところで、 $3.7^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で、同一高さでの温度上昇率は、台車 上 で全体にバラツキが少なく炉内温度は比較的安定している。燻煙熱処理後半における温度変動の大きいものは、過飽和の水蒸気が水に戻り、炉内に入っているシース熱電対と補償導線の結合部に水が付着したため絶縁不良を起こしたことによるトラブルが原因である。

図4に燻煙熱処理過程における材内温度経過の例を示す。処理室内における材外温度は急激に上昇するが、材内温度の上昇は、比較的緩やかである。アガチスの場合、丸太の中心部(深さ40cm)を除いて、材温は50時間から75時間にわたって 70°C から 100°C 以下に保たれる。ミズメの場合、丸太全体が 70°C 以上に保たれる時間は70時間から80時間に及ぶが、いずれの場合も材温は 100°C を超えることはない。この過程で材中のリグニンは熱軟化を起こすと考えられる¹⁴⁾。さらに、材温上昇にともない、材内の水が出ていく過程

において、材内は水分非平衡状態となるため、残留応力によるセル・ルーズニングはリグニンの熱軟化と競合して促進され、応力の緩和が進むと推定される。

材内における熱の伝導は、図5に示すように、材表面から中心の髓まで一定温度が伝わっていく時間と距離の間に、同一温度に対して、樹種によって異なり、直線的あるいは曲線的に変化する。これらの関係で共通していることは、材温が60℃を超えると、材内での熱伝導速度は低下し、材表面から中心部への温度の到達時間がより長くなる。これは材温の上昇とともに含水率が低下し、これが原因で材内の空隙が増加することに起因すると考えられるが、これらの詳細については樹種による組織構造の違い、含水率の材内分布等の面からさらに検討する必要がある。

図6はスギ丸太を処理した際の台車上各位置での温度分布と時間経過について、棧積みによる影響を見たものである。この実験では、小径木処理のため処理室の最高温度を140℃に調節した。各測定部位における温度変化過程での上下のバラツキは少ないが、各部位間の温度差は明確に現れる。特に、棧積みが一番下での温度は95℃～115℃と低温で、炉内温度分布に対して棧積みの影響が現れている。

各測定位置間における温度差は、図7に示すように、点火後、20時間以降に台車上と他の測定位置間との差が大きくなり、40時間後には最高温度と最低温度の差が約46℃となる。処理室内で温度が降下過程に入ると、時間とともに各測定位置での温度差は小さくなり、燻煙熱処理の終わりには5℃前後の範囲に収まる。この処理過程におけるスギ材内温度の時間変化を図8に示す。この場合も、材温は100℃を超えることがなく、90℃以上がほぼ40時間にわたって維持されている。材温の最高温度は、処理室の最高温度到達時間（約60時間後）に対して10時間遅れる。この時点では、処理室内温度はすでに降下過程に入っており、

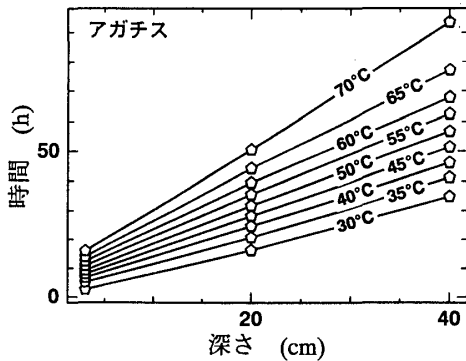


図5 測定点の深さと一定温度に到達する時間の関係⁹⁾

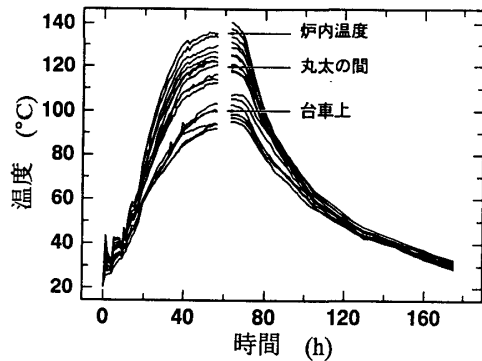


図6 処理室における異なる位置での温度経過¹⁰⁾

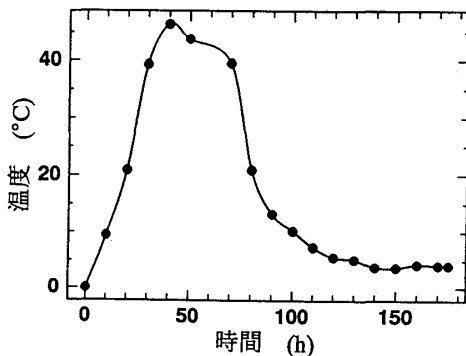


図7 処理室における最高温度と最低温度との差の経時変化¹⁰⁾

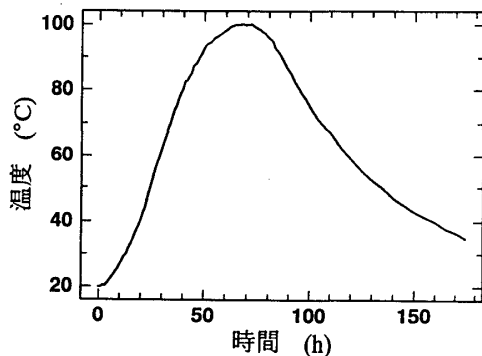


図8 スギ材中における温度経過（測定部位、材中心）¹⁰⁾

材内における半径方向での温度勾配は、昇温過程とは逆に中心部の温度が高く材表面は低い。このような状態では、処理室内の温度降下に対して、材表面付近の温度は、材の中心部の高い部分から材表面付近の温度の低くなった部分への熱の伝播によって、急速には下がらず、材中の温度勾配が緩やかな状態で下降する。それゆえ、燻煙熱処理前半における急激な昇温過程で、材の表面と内部の温度差によって新たに材内に生じた応力は、燻煙熱処理後半の緩やかな温度降下過程で緩和されると考えてよい。

図9は燻煙熱処理過程における材重量の変化を求めたものである。処理室内温度の上昇とともに、一旦、材の重量は増加し、室内温度が60℃に達した時点から減少し始める。温度上昇初期における材重量の増大は、燃料の木材から発生した水蒸気が材表面に付着し、材の表面温度が低いために水に戻り、この付着した水の量だけ増大したと考えられる。

室内温度が60℃以上の温度で、材の重量は急速に減少する。室内温度が最高温度に達した後、温度制御によって、処理室内の温度は降下するが、室内温度が再び60℃近辺に下がるまで急激な重量減少は持続する。60℃まで降下すると、それ以降の重量減少は緩やかになる。処理過程での重量減少の大部分は、処理室内が60℃以上最高温度までの温度域でなされることを示す。室内の温度降下が始まり、60℃以下になると、それまでに放出された水蒸気が一部水に戻り、処理室内は相対湿度100%の状態に移すことになると思われる。

図3の実験の場合を例にとって考えると、処理材の総材積は約40m³であり、試験に供した生材丸太の平均生材比重は0.9であるから重量は3.6Mgである。平均の重量減少率は約36%であるから、これが全て水とすると、約1.3Mgである。この水蒸気の総体積は約16Mlとなる。

温度に対する飽和水蒸気圧、飽和水分量(飽和絶対湿度)は指数関数的に増大することが知られている¹⁶⁾。150℃における飽和水蒸気圧および飽和水分量はそれぞれ約3400SI, 2370g/m³であり、内容積560m³の処理室では計算上約1.3Mgの飽和水分量となる。しかし、処理室は半密閉状態で常時、煙突からの自然排気されるため所定の飽和水蒸気圧に達しない。このため、処理室内の温度に見合った飽和水蒸気量の水が材中から排出可能な状態にある。材中からの水の蒸散に基づく重量減少は、図9に示したように、材内外の温度が60℃以上の温度域で急速に進行する。一方、煙突からの自然換気は、従来の自然換気型の乾燥炉で1.1~1.4km/hとされている。処理室内は、図11に示したように150℃近くに達するため、自然換気量は増大すると考えられる。今、仮に重量減少に見合う1300kgの水が60℃以上の温度域、約96時間内に自然換気によって外部に排出されたとすると、1時間当たり166.7klとなる。煙突の内径35cmで1/2の開口で行ったから、2本の煙突で961.6cm²の断面となり、自然換気は計算上17.3km/hである。煙道における流量を実測してはいないので、目視による観察に過ぎないが、実験過程ではこのような高速度の排煙は観察されなかった。温度降下過程において、処理室内温度の低下とともに、飽和水蒸気圧に相当する飽和水分量を

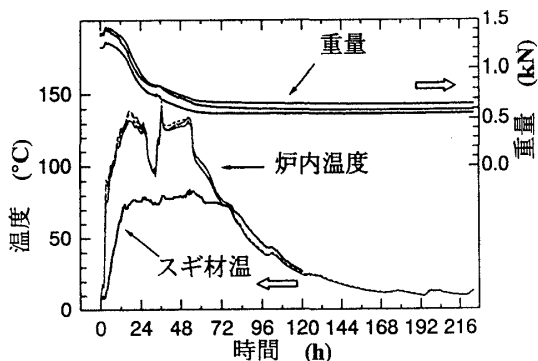


図9 スギの燻煙熱処理における炉内温度、材温および重量の経時変化

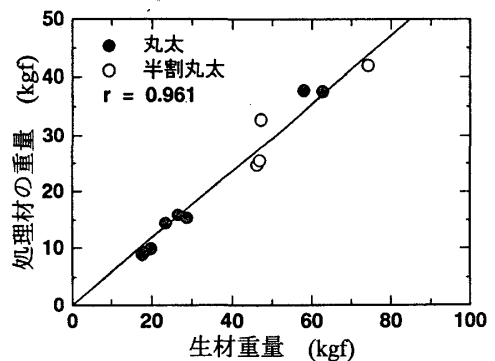


図10 燻煙処理前後の丸太重量の比較¹⁰⁾

超えるものは水に戻ると考えられる。それゆえ、処理室内は相対湿度100%に近い状態で推移する。この過程では、図12から明らかなように、材温は処理室の温度より高い状態にあるため、材内外に蒸気圧勾配が生じる。さらに、燃料の炭化により、炭の燃焼に移るため、燃焼ガスはCOおよびCO²のみとなる。それゆえ、処理室内の水のみ、排煙とともに煙道から出て行き、その分材内から水分が蒸散することで、材の重量も僅かずつ減少する。材温と処理室の温度が外気温度と等しくなった時点で、恒率乾燥処理としての燻煙熱処理は終了する。

図10に処理前後のスギ丸太および半割り丸太の重量の関係を示す。径級、形状が異なるにもかかわらず重量で比較すると、初期重量と処理後の重量の間には、高い正の相関で直線関係が成立する。温度を唯一の因子とした熱処理では、当然ながら径級が小さく、重量の少ないものが乾燥は早く進む。それゆえ、同一の処理時間では、含水率は低くなるはずである。しかるに、燻煙熱処理では、径級、形状に関係なく仕上がり含水率が一定となることが示された。この事実をさらに明確に確認するため、同一丸太から長さの異なる試料を作り、同様の処理をした後の結果を図11に示した。より高い相関で直線関係が得られ、しかも、丸太の初期含水率が異なれば、直線の勾配も異なることが明らかとなった。生材丸太の初期含水率が高いほど、処理効果が大きく、径級と初期含水率が同じであれば、長さに関係なく同じ含水率に上げることが出来る。

この結果は、燻煙熱処理によって、含水率の均一化が可能になり、その後の製材における寸法安定性に対する寄与は大きいと考えられる。

燻煙熱処理においては、処理過程のほとんどが高い相対湿度の中で行われるため、処理室の温度が短時間の間150~160℃の高温になっても材表面の乾燥割れは抑制される。さらに、材表面は樹皮で保護されているため、乾燥割れを防ぐことが考えられる。材温が60℃を超えると材内の水は水蒸気となって外に出る量は増大するが、その際周囲から気化熱を奪うため、材周辺の温度は低下し、材の乾燥割れを抑制する効果がある。

燻煙熱処理過程で、燃料から生ずる煙の効果については不明な点が多い。昔から木地師の間では、荒木取りした木地を乾燥するのに、サクラ材はサクラを燃やした煙、ケヤキ材はケヤキの煙と、同一樹種の煙が材の寸法安定性や乾燥に効果があると言いつづけてきた。このような経験則は、科学的裏付けがされないまま、今日まで無視されてきたが、本論の燻煙熱処理同様、多方面で見直しがなされるようになった。それゆえ、処理室内壁面における附着したタールやカーボンの黒体輻射熱に基づく遠赤外線の効果も無視出来ないと考えられる。すなわち、燻煙熱処理過程全体は、200℃以下の温度範囲にあり、この範囲内の黒

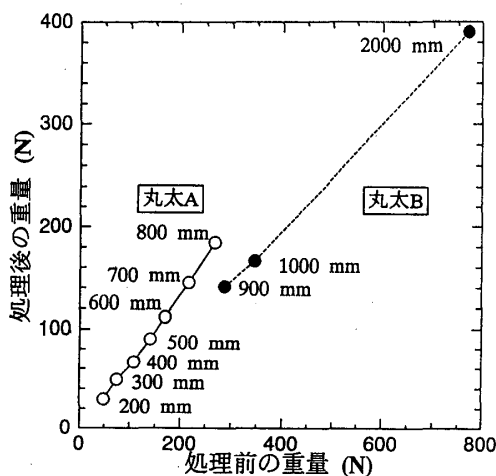


図11 長さの違いによる処理前後の重量の関係

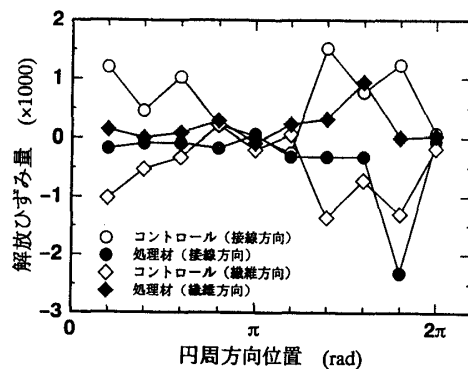


図12 イヌシデ材表面における開放ひずみ量⁹⁾

体放射における各温度の波長と分光放射エネルギーの関係を見ると、3 μm以上の遠赤外線だけが放射されていることになる¹⁹⁾。

遠赤外線の特徴は、輻射性が極めて強いため、熱源と被射体との間の空気層の温度上昇はほとんどない。また、被射面の色相に関係ない加熱特性を持ち、被射体の表面と内部の熱伝達の時間差が少ないという特徴を持つ²⁰⁾。このような熱特性を持つ遠赤外線が、炭化した燃料からと処理室内の壁面および浮遊するススからの輻射熱として材内への熱の伝播を効果的にし、燃料の消費に伴う熱エネルギーの低下を補い、均一加熱による材内部の温度のバラツキを緩和していると考えられる。

燻煙熱処理したスギ材の物性について^{5), 6), 10)}

燻煙熱処理によって材の応力がどのように変化するかを丸太表面の解放歪み量から見ることにする。図12は一例として、材表面の円周方向10か所における繊維方向、接線方向の解放歪量について燻煙熱処理したものと無処理のものとの比較を示す。4 m材を各2 mに玉切りし、一方を燻煙熱処理、他方を無処理とし、円周方向の各測定点は繊維方向で一致させてある。同じ丸太ではあるが測定部位が異なるので相対的な比較となる。

解放歪量の円周方向部位における変動から、丸太の内部応力は繊維方向、接線方向で、同一の円周上でも一定の応力分布をしているのではなく、部位によって大きさや応力の種類は異なる。樹木はこの例からもわかるように、材部各部位の応力を微調整しながら全体的に樹体を維持するための応力場を形成していると考えられる。このような丸太にあって、水分非平衡下での熱によるリグニンの軟化と応力によって個々の細胞壁に生じたセル・ルーズニングに基づく応力緩和は、丸太の形状に拘束された状態で行われる。このため、処理後の丸太の応力は、リグニンの熱軟化によって全体的には緩和されるが、形状による拘束のために、部分的には増大する場合があることを示している。すなわち、図において、繊維方向、接線方向とも解放歪量は、平均すると繊維方向で-524から+204、接線方向で+626から-365となり、処理によって解放歪量の絶対値は減少することから、応力は緩和されたと考えられる。しかし、平均値の符号は前者が負から正、後者が正から負に変わることにより、繊維方向では引張応力から圧縮応力に、接線方向ではその逆となる。さらに、部分的に見れば、処理によって全ての解放歪量の絶対値が小さくなるのではなく、大きくなる場合や、符号が入れ替わる場合もある。このことは上述したように、丸太全体の内部応力が燻煙熱処理によって緩和されるのではなく、部分的には、セル・ルーズニングに基づく応力緩和過程を経て、応力が増大する場合もあることを示している。それゆえ、図13に示したミズメやサワラの例のように、処理によって接線方向あるいは繊維方向の応力の平均値が増大するような場合も出てくる。成長応力に基づく応力の樹幹内分布については、改めて検討する必要があるが、燻煙熱処理によって解放歪量の絶対値は

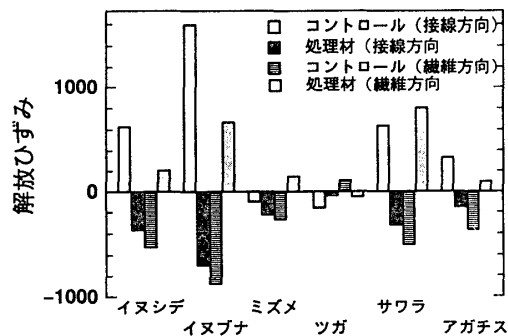


図13 繊維方向および接線方向の開放ひずみ⁹⁾

野村：木材の燻煙熱処理

一部の例外を除いて減少していることから、応力は緩和されたと考えられる。

スギ生材丸太を縦に半割りし、一方燻煙熱処理、他方を無処理として、それぞれから採取した試料について、試料採取直後の含水率および気乾含水率の平均値、最大最小値、標準偏差および分散を表1に示す。半割りしてから両者を野積み状態で放置したものを5ヶ月後に試料取りしたが、無処理材の心、辺材における試料採取直後の含水率は、それぞれ109.9%、100.3%と高い値を示した。一方、処理材の場合は、それぞれ39.4%、33.1%となり、無処理材の約1/3であった。同一丸太から採取した無処理材のバラツキは大きく、処理材のバラツキは小さいので、燻煙熱処理後は含水率を下げると同時に均一化をもたらしている。試料採取後、室温で20日間放置した後の気乾材の含水率は、無処理材でそれぞれ14.4%、23.7%に対して、処理材では10.2%、8.8%と、木材の繊維飽和点以下の値が得られた。これらの結果は、温度降下過程における長時間の緩和な温度降下による影響が現れたと推定される。さらに、燻煙熱処理過程において、ヘミセルロースの熱分解による低分子化とこれにともない生成された低分子の水可溶成分の流出による影響が考えられる²⁾。

表2は気乾材の三方向における平均収縮率の比較を示す。繊維方向、接線方向のいずれも処理材の値は無処理材より減少している。半径方向では、無処理材で心辺材の差が大きいのに対して処理材ではほぼ同じ値となっている。燻煙熱処理によって材の寸法安定性は向上すると考えられる。

表3は膨潤率の比較を示した。心材の繊維方向膨潤率は処理により減少するが、その他のものはいずれ

表1 スギ燻煙熱処理における処理、無処理材の試験材から採取直後の含水率および気乾含水率の比較

			平均含水率	試料数	最大含水率	最小含水率	標準偏差	分散
採取直後 含水率	無処理	辺材	100.3	133	194.4	40.9	36.27	1315.5
		心材	109.9	60	149.6	53.4	29.44	866.6
	処理	辺材	33.1	133	35.4	25.3	1.83	3.36
		心材	39.4	20	45.4	34.5	3.19	10.2
気乾材 含水率	無処理	辺材	23.7	133	91.3	11.7	16.21	262.8
		心材	14.4	60	17.9	12.5	1.31	1.72
	処理	辺材	8.8	133	10.2	8.0	0.45	0.20
		心材	10.2	20	10.9	9.4	0.47	0.22

表2 燻煙熱処理したスギ材の平均収縮率の無処理材との比較

		平均収縮率(%)		
		繊維方向	接線方向	半径方向
燻煙熱処理	辺材	0.135	2.362	1.221
	心材	0.101	1.837	1.233
無処理	辺材	0.195	3.364	1.750
	心材	0.176	2.347	1.083

表3 燻煙熱処理したスギ材の平均膨潤率の無処理材との比較

		平均膨潤率 (%)			
		繊維方向	接線方向	半径方向	体積膨潤率
燻煙熱処理	辺材	0.38	7.58	3.93	12.2
	心材	1.50	7.54	1.85	11.2
無処理	辺材	0.25	6.74	3.26	10.5
	心材	2.08	6.10	0.73	9.4

表4 スギ辺材の燻煙熱処理による曲げ強度

	最大荷重 (kgf)	最大たわみ量 (mm)	MOR (kgf/cm ²)	MOE (x10 ⁴ kgf/cm ²)	気乾比重(ρ)	MOR/ρ	MOE/ρ
無処理	48.6	9.0	850	84.5	0.45	1890	188
処理	42.9	9.5	776	82.6	0.38	2043	217
	-11.7%	+6.0%	-8.7%	-2.3%	-15.6%	+8.1%	+15.8%

注：測定条件 室温、
試片寸法30(L)cm x 2(R)cm x 0.9(T)cm
スパン長 180mm
試片数 30
荷重方向 接線方向
ヘッドスピード 10mm/min

も処理材の方が大きくなる。最大含水率は、無処理材の心辺材でそれぞれ平均199%、224%に対し、処理材ではそれぞれ平均241%、247%と、無処理材に比べて21%、10.3%増大する。この原因として考えられるのは、熱処理に伴う木材組成成分、特にヘミセルロースの熱分解により低分子の水可溶成分が増大し²⁾、膨潤処理過程でこれら低分子のものが水に溶出し、細胞壁にマイクロポイドが形成されたと考えられる。

表4は処理材、無処理材辺材の曲げ強度試験の結果を示した。処理によって最大荷重、ヤング率および曲げ強度は、それぞれ11.7%、2.3%、および8.7%減少し、最大たわみ量のみ6%の増加であった。処理材および無処理材の気乾比重は、それぞれ平均0.38および0.45である。これによって曲げの比強度、比ヤング率を両者で比較すると、燻煙熱処理材は比強度で8.1%、比ヤング率で15.8%の増加となる。

図14は丸太を縦挽きして、残留応力の解放による材の反り量から応力の緩和の度合いを間接的に比較した。丸太の引き割りの際の切り込み深さに対する木口の挽き道の開き幅の変化を求めたものである。材の挽き割りの際に残留応力によって生ずる曲がり、同一樹種では、丸太材表面での残留応力の大きさにそれほど違いはないので、直径の小さなものほど製材時の曲がり大きい⁴⁾。このため、スギの間伐材など小径木の製材歩留まりは低下し、生産効率を下げることになる。図に示されるように、曲がりによる開き

幅は、処理材では無処理材の1/2に低下する。この結果からも燻煙熱処理により材の残留応力は低減していることが示された。

図15は走査型電子顕微鏡による木口断面での処理、無処理材の細胞断面の比較である。処理材の切削面は、無処理材と比べて毛羽立ちもなく、細胞間層での剥離もほとんど観察されなかった。この結果から、燻煙熱処理は切削加工における表面性の改善にも役立ち、これによって塗装などの加工行程においても、表面仕上げの回数が削減できるため、加工のコスト・パフォーマンスを下げることになる。

図16および表5に燻煙熱処理による材色の変化および材色測定による無処理材との比較を示した。処理によって心辺材の色の差は少なくなり、表5からも、明るさの指標となるL*の値は処理材の辺材部において84.05から63.28に低下し、無処理材の心材部の値に近くなることが示された。さらに、赤色、緑色の度合いの指標となるa*の値は辺材部において約4倍となり、赤色の度合いが増加したことを示している。これらの結果は、スギ材の利用上欠点となっている心辺材の材色の差が熱処理によって緩和され、黒心材などの改良にとって有利になることが示された。

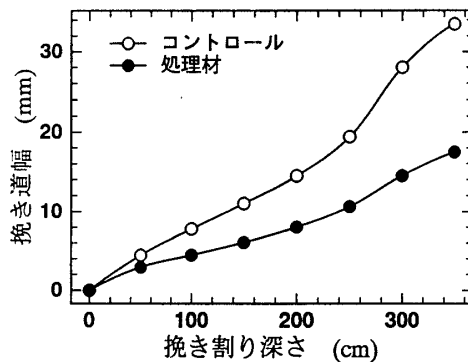


図14 スギ丸太半割り製材時の挽き道開き幅変化の比較

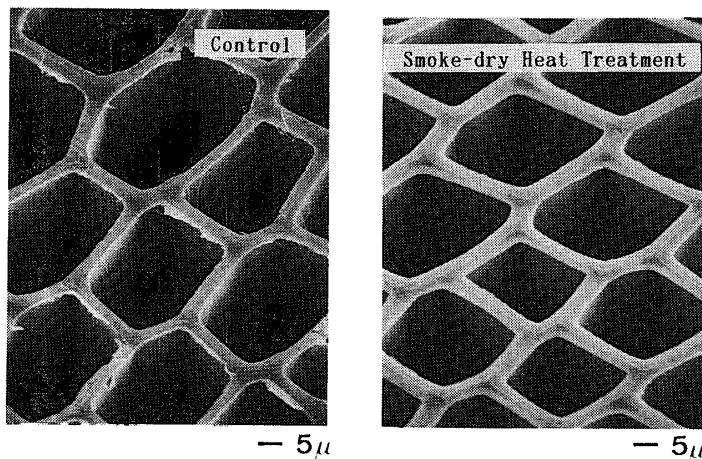


図15 走査型電子顕微鏡による木口断面の比較
注：左 無処理，右 燻煙熱処理

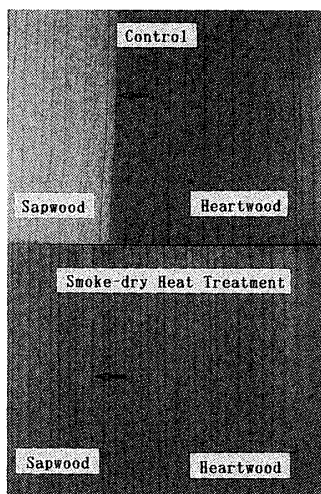


図16 燻煙熱処理材と無処理材の材色の比較
注：上 無処理材，下 燻煙熱処理材

表5 燻煙熱処理および無処理材の色差の比較

	心材			辺材		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
無処理	62.20	8.64	18.36	84.05	2.03	18.95
燻煙熱処理	58.85	10.18	20.35	63.28	8.22	17.92

おわりに

はじめに述べたように、我が国においてスギの蓄積が年々増えているにも関わらず、その有効利用が遅々として進んでいない。このような状況の中で、木材の燻煙処理は、乾燥前処理として、葉枯らしに勝る生材含水率の軽減、材内含水率の均一化に加え、応力の緩和による狂いの軽減、繊維飽和点を下げることによる木材の寸法安定性の向上、熱変化に基づく心辺材色および黒心の改良、加工性表面性の向上等、従来の木材乾燥技術に比べて極めて有効な技術であるばかりでなく、世界的な未利用樹の資源を生かすための方法としてもっとも適した技術であると考えられる。

しかし、この技術の裏付けとなる科学的な研究は十分ではなく、今後、明らかにして行かねばならない問題は多い。一人でも多くの研究者、技術者が燻煙熱処理に興味を持ち、確かな技術にすることによって、世界の森林資源を有効、適切に利用するための方途を確立すべきではないだろうか。

終わりにあたって、実験に協力いただいた瑞穂産業の石井幸男氏、ウイズの福原勝巳氏ならびに梅木敏幸氏、走査型電子顕微鏡写真の作成にご協力頂いた本学大学院生の渡辺宇外君、材色測定に御協力いただいた京都府立大学農学部の飯田生穂講師、コンピューターでの作図その他に多大の御協力いただいた本学大学院生の岸本芳昌君に深謝いたします。

文 献

- 1) 奥山 剛, 山本浩之, 村瀬 豊: 木材工業, 43, 359-363 (1988)
- 2) 奥山 剛, 山本浩之, 小林 功: 木材工業, 45, 63-67 (1990)

野村：木材の燻煙熱処理

- 3) Okuyama, T; Kanagawa, Y; Hattori, Y: Mokuzai Gakkaishi, 33(11), 837-843 (1987)
- 4) 野村隆哉：岐阜県新商品開発能力育成等事業報告書, (1993)
- 5) 野村隆哉：only 1 club, vol. 3, 1-3 (1994)
- 6) Nomura, T; Ishii, S: Proceedings of the 4th IUFRO conference on wood drying, 382-389 (1994)
- 7) 野村隆哉：第45回日本木材学会大会要旨集, 156 (1995)
- 8) 野村隆哉：木文研究, 1, 28-59 (1995)
- 9) 野村隆哉：木材学会誌投稿中
- 10) 同上
- 11) Woodmic, vol.3(7), 38-41 (1985)
- 12) 寺澤 真：Woodmic, vol.3(10), 28-31 (1985)
- 13) 理化学辞典, 岩波書店, 1317 (1971)
- 14) Goring, D.I.A: Pulp Pap. Mag. Can., 64(12), T 517-527 (1963)
- 15) Armstrong, L.D: Christensen, G. N: Nature, 191(4791), 869-870 (1961)
- 16) Armstrong, L.D: Wood Sci., 9, 81-86 (1972)
- 17) 木材工学, 梶田 茂編, 養賢堂, 410 (1961)
- 18) 材料と水分ハンドブック, 高分子学会, 高分子と吸湿委員会編, 共立出版, 141-143 (1968)
- 19) 高田幸一：セラミックス, 23, 310-315 (1988)
- 20) 大森豊明：セラミックス, 23, 294-299 (1988)