

〈資料〉

過熱蒸気処理による木材への耐朽性付与

伊藤貴文・増田勝則

槽内の温度のばらつきが小さい過熱蒸気処理装置を設計し、それを用いて加熱処理の条件と付与される耐朽性との関係を求めた。処理温度による差は明確であり、JIS K 1571に定める木材保存剤の性能基準値を満たすには、240℃では8時間、260℃では2時間の処理時間を要し、220℃・24時間あるいは、200℃・72時間の処理では、その基準値を満たすことはできなかった。過熱蒸気処理時の重量減少率と、抗菌操作時の重量減少率の間には密接な関係があり、それは処理温度や時間に関係なく、前者の減少率が高くなるほど、後者は低くなり、スギ辺材では過熱蒸気処理時の重量減少率が18%を超えたときに、上述の性能基準値を満たした。また、200℃や220℃の処理でもさらに処理時間を延長することで、高い耐朽性が付与できることが推定された。このように、木材保存剤に匹敵する耐朽性が発現する条件は、温度と時間の2つの因子で決定されることが確かめられた。さらに、樹種による差も明らかになり、樹種ごとに処理条件を決定する必要性が認められた。

1. はじめに

1990年代以降フィンランドやオランダなどのヨーロッパ諸国で、加熱処理による木材の改質に関する研究が開始された。これらの方法で処理された木材はサーモウッド、あるいはPlatoウッドなどと名付けられ、既に製品化されている¹⁾³⁾。我が国においても近年、それらの技術の導入や、エステック処理と呼ばれる処理技術により生産された、加熱処理木材が販売されている⁴⁾。加熱処理の主な目的は、耐朽性の向上と寸法安定性の付与であるが、その際の加熱条件は、木材の乾燥に通常用いる温度よりもはるかに高温である。加熱媒体はサーモウッド¹⁾のように過熱蒸気を用いるか、エステックウッド³⁾のように窒素ガスを始めとする不活性ガスを用いて、発火を防いでいる。また、Platoウッド³⁾やエステックウッド³⁾のように圧力容器を用いる場合と、サーモウッド¹⁾のように常圧下で蒸気を流しながら処理をする場合がある。

これら一連の熱処理木材について、その耐朽性など、性能評価に関する報告も近年多く見られる。しかし、耐朽性に関して報告されているデータには、かなりのばらつきがある。最高温度190℃で処理されたPlatoウッドは、EU規格による腐朽試験では高い耐朽性が認められたとの報告がある一方で、花田らによると、JIS K 1571による評価では、処理に伴い若干の耐朽性向上が認められるものの、質量減少率3%以下という木材保存剤の効力試験の合格基準にははるかに及ばない³⁾。また、酒井ら⁵⁾に

よるとエステックウッドでは、スギ辺材を220℃で24時間処理したときに、森田ら⁶⁾⁷⁾あるいは、荘保ら⁸⁾によると、サーモウッドでは237.5℃で5時間処理をすることにより、防腐剤の効力試験に合格する性能が発現したと報告されている。一方、Leら⁹⁾は、ベトナムではごく一般的な造林木であるStyrax tonkinensisというエゴノキ科の木材をチッ素ガス中で200℃、8時間処理したときに、木材保存剤の効力試験に合格する高い耐朽性が発現したと報告している。このように耐朽性の発現に必要とされる加熱処理条件については統一した見解が得られていない現状にある。これは、用いた樹種や加熱処理方法、耐朽性評価の方法や、評価に用いた腐朽菌の活性の違いなどによると推察されるほか、どの部位で温度測定をしたか、すなわち、材温か処理槽内の温度かなど、測定条件にも左右されているのではとも推察されるが、報告の中には、それらが不明であることも多い。さらには、処理温度と時間との相互関係について詳細に報告されている論文はなく、ここで引用した論文においても、処理温度は幅広く条件設定がされているが、処理時間についての考察は非常に少ない。

そこで、過熱蒸気を熱媒体とした処理装置の開発を行い、それを用いていくつかの樹種に対して加熱処理を施し、処理温度や時間が耐朽性に及ぼす影響について検討した。その結果、いくつかの興味ある結果が得られたので報告する。

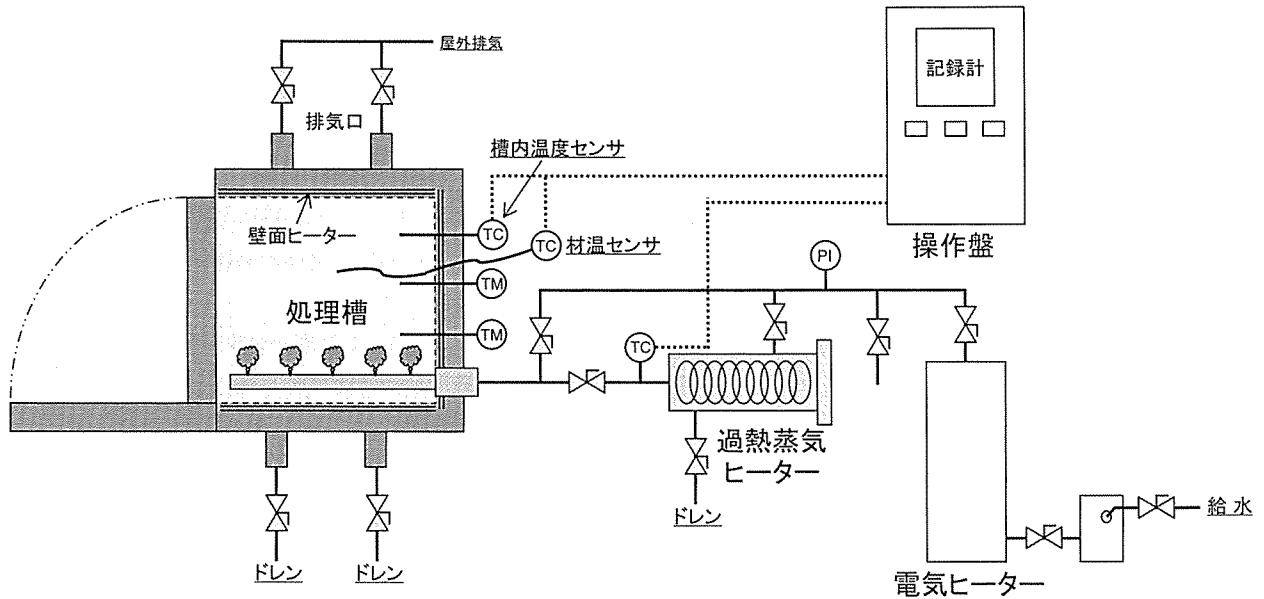


図1 加熱蒸気処理装置の概略フロー

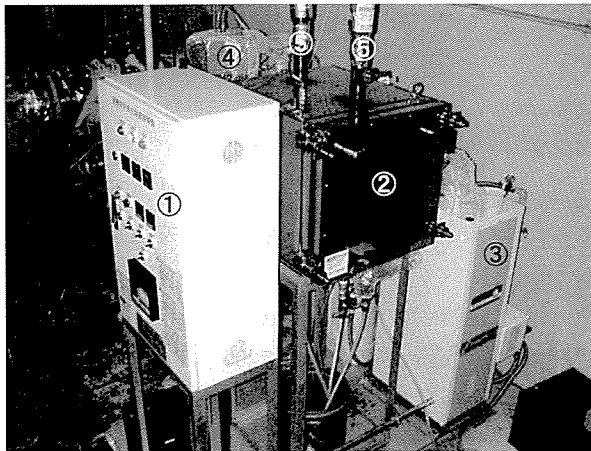


図2 過熱蒸気処理装置の外観

- ①操作盤、②処理槽、③電気ボイラー、
④過熱蒸気ヒーター、⑤排気口とダンパー

2. 材料および方法

2.1 木材試験片

スギ辺材を用い、まず、処理温度と時間および、耐候操作の有無が、耐朽性に与える影響について詳細な検討を行った。20mm (T) × 20mm (R) に切削加工したスギ辺材の試験材25本から、JIS K 1571に基づき、繊維方向10mmの試験片を切り出し、1試験条件当たり各試験材から2体ずつ、50体の試験片を作製して、1～25番と26～50番が対となるようにナンバリングを行った。

続いて、樹種による相違を見るために、供試木材として、スギ辺材の他、スギ、ヒノキ、ベイマツ、ベイツガ

とアルダーの心材を用いた。試験片の大きさや採取方法は、上述したスギ辺材とほぼ同様であるが、25本の試験材からの試験片採取は、1試験条件当たり1体ずつとし、25体の試験片を作製した。なお、いずれの試験片も過熱蒸気処理に供する前に105℃の送風式乾燥機で全乾状態にして、重量を測定した。

2.2 過熱蒸気処理装置の構造

内寸400mm (幅) × 400mm (高さ) × 450mm (奥行き) の処理槽を持つバッチ式の過熱蒸気処理装置を設計・導入した。その概略フローシートを図1に、外観を図2に示す。槽を構成する壁面の厚さは50mmで、内部に断熱材が入っている。さらに、前方の扉を除く5面の壁には、内側のステンレス板の直下に、合計で3kWの電気式ヒーターを装備した (壁面ヒーター、最高温度310℃)。蒸気発生源は7kWの電気ボイラーであり、その蒸気を5kWの電気ヒーター (過熱蒸気ヒーター、最高温度580℃) で加熱した後、処理槽に導入し、槽内の空気を過熱蒸気に置換するとともに、加温するよう設計した (槽内最高温度310℃)。なお、加温に関して入力する因子は、この2つのヒーター温度と、所定温度に達した後の維持時間である。過熱蒸気の導入は槽の下部にある左右2カ所のパイプからで、各パイプには直径3mm程度の細孔が均等な間隔で10箇所開けられており、槽内温度のばらつきを最小限にする工夫がなされている。槽の上部2箇所に排気口を設けたが、通常の使用ではダンパーを「閉」にして最小限度の排気をした。槽内の温度は上段、中段、下段の3カ所で測定できる。木材試験片を入れずに180～260℃の範囲で空運転をしたときには、槽内温度のば

らつきは3℃以内であった。槽内温度の他、材温測定ができるよう熱電対式の温度計があり、操作盤の切り替えスイッチにより、温度の制御を、材温または槽内温度のいずれにするかが選択可能である。ただし、本研究では後述するように材温で管理することにした。

2.3 過熱蒸気処理

材温を200~260℃、所定温度に達した後の維持時間を0.5~72時間として処理を行った。いずれの場合も25番のスギ辺材試験片を材温測定用に供した。板目面中央付近に、深さ約10mmで、熱電対と等しい直径1.4mmの穴を開け熱電対を差し込み、20mm (T) × 20mm (R) × 10mm (L) の試験片の中央部の温度を測定して、それを持って温度管理を行った。スギ辺材のみの試験では、一度に50体を、樹種による相違を見るための試験では、それぞれ25体、合計150体を、槽内の中央付近に各試験片が密着しないように入れた。試験開始時における壁面ヒーターの温度設定は材温の所定温度より10℃高くした。また、過熱蒸気ヒーターの温度設定は材温の所定温度の2倍にした。そのとき、いずれの場合も所定温度には約2時間で達した。ただし、200℃を超える処理では、材料自体が発熱し、制御ができなくなるので、材温が所定温度に達する10℃手前で、壁面ヒーターの温度を10℃、過熱蒸気ヒーターを50℃低く設定しなおし、材温が必要以上に上昇するのを抑制した。所定時間経過後には、過熱蒸気ヒーターを切り、生蒸気を槽内に入れ、試験片の温度が150℃以下になるまで放置後、取り出した。処理後105℃の送風式乾燥機に入れ、全乾状態での重量測定を行い、過熱蒸気処理に伴う重量減少率を求めた。

2.4 耐朽性の評価

スギ辺材のみを用いた試験では、1~12番と26~37番の試験片は、JIS K 1571に基づき、流水中での溶脱操作（8時間）と60℃での送風乾燥機での揮散操作（16時間）を1組として10回繰り返す「耐候操作」を実施した後、オオウズラタケ（1~12番）ならびにカワラタケ（26~37番）による「抗菌操作」に供した。13~24番と38~49番の試験片は耐候操作を行わず、それぞれオオウズラタケならびにカワラタケによる抗菌操作に供した。

また、樹種による差を見る試験では、いずれの試験片（1~24番）も耐候操作をした後、抗菌操作に供した。

抗菌操作には、900mlの広口瓶を用いた。石英砂を基材として瓶の底に入れ、それに培養液と若干のブナ木粉を加え、オートクレーブを用いて滅菌した後、振とうフラスコを用いて予め培養しておいたオオウズラタケ、カワラタケを培養液とともに広口瓶に注いだ。一定期間27℃で相対湿度が75%の培養室に置き、菌糸が成長する

のを確かめた後、EOガスで滅菌した試験片を1瓶当たり3個、投入した。このとき、基材である石英砂と試験片が直接触れないように耐熱性のプラスチックメッシュを敷き、その上に試験片の木口面が上下になるように乗せた。耐候操作後および、抗菌操作後の重量は、試験片を105℃の送風式乾燥機中で全乾状態にして測定し、耐候操作ならびに抗菌操作による重量減少率を求めた。

3. 結果と考察

3.1 スギ辺材での結果

3.1.1 過熱蒸気処理の条件と処理により生じる重量減少率との関係

過熱蒸気処理の条件とそれに伴う重量減少率との関係を図3に示す。温度が高くなるほど、また、処理時間が長くなるほど、重量減少率は大きくなった。特に、処理温度は重量減少率に極めて大きな影響を及ぼし、200℃、72時間の処理で発現する重量減少率は、220℃では約8時間、240℃では2時間、260℃では30分以内に得られた。処理時間との関係にあつては、いずれの処理温度でも8時間まではほぼ時間に比例して重量減少が大きくなった。それ以降重量減少率の伸びは鈍化するが、今回の試験で設定した処理時間の範囲内では、それが飽和したとは言えず、さらに処理時間を延長することでさらに高い

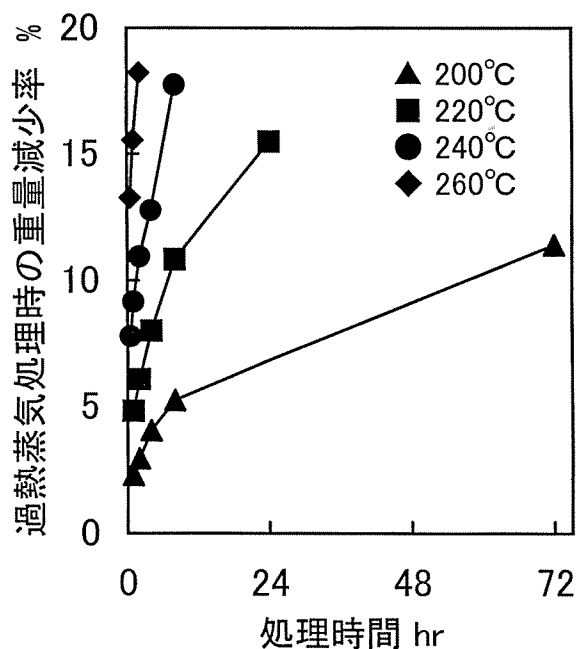


図3 過熱蒸気処理の条件とそれに伴う重量減少率との関係

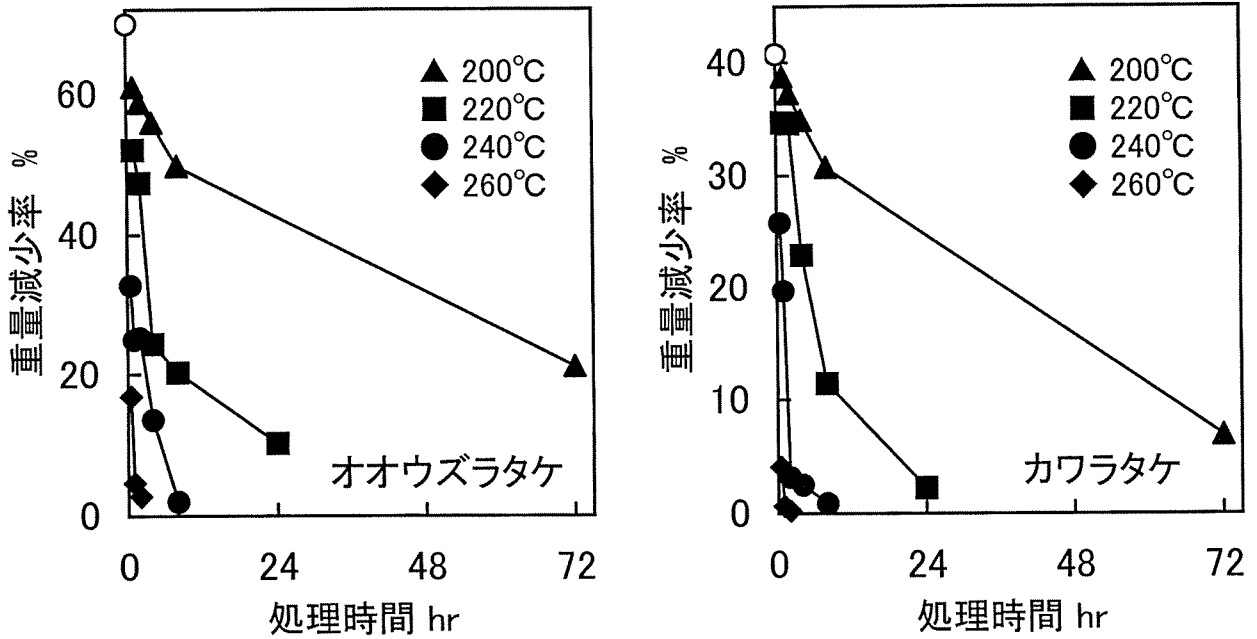


図4 過熱蒸気処理の条件と抗菌操作時の重量減少率との関係（耐候操作あり）

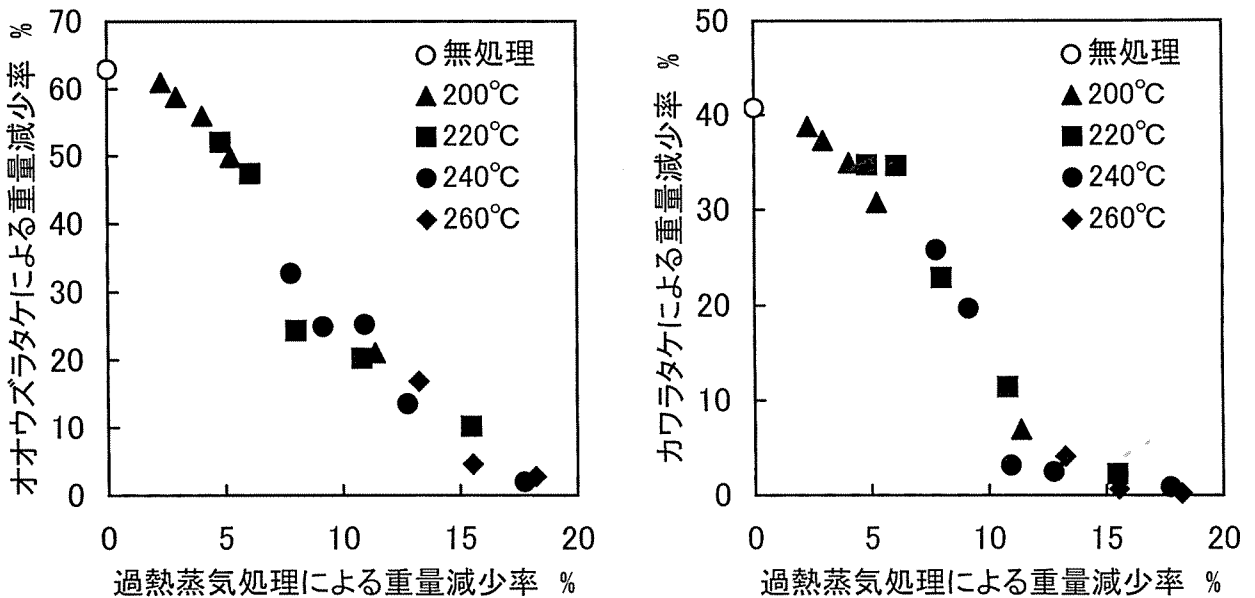


図5 過熱蒸気処理に伴う重量減少率と抗菌操作時の重量減少率との関係（対候操作あり）

重量減少率が得られる可能性がある。

3.1.2 過熱処理条件と耐朽性との関係

耐候操作をした後、オオウズラタケ、カワラタケによる抗菌操作をしたときの重量減少率と過熱蒸気処理条件との関係を図4に示す。処理温度が高いほど、短時間の処理で抗菌操作に伴う重量減少率は低くなった。JIS K 1571に規定された木材保存剤の性能基準値である3%以下の重量減少率が得られた処理条件は、240℃で8時間と、260℃で2時間のみであった。

過熱蒸気処理に伴う重量減少率と、耐候操作後に抗菌

操作を行ったときの重量減少率との関係を図5に示す。図から言えることは、処理温度に関係なく、両者の間には密接な関係があり、過熱蒸気処理時の重量減少率が高くなるほど、抗菌操作時の重量減少が少なくなる、すなわち、耐朽性が高くなっていることである。過熱蒸気処理時の重量減少率が、オオウズラタケでは18%、カワラタケでは15%を超えると、抗菌操作時の重量減少率が3%以下となり、木材保存剤の性能基準値を満たした。

上述したとおり、本研究で設定した処理条件では、木材保存剤の性能基準値を満たしたのは、240℃で8時間

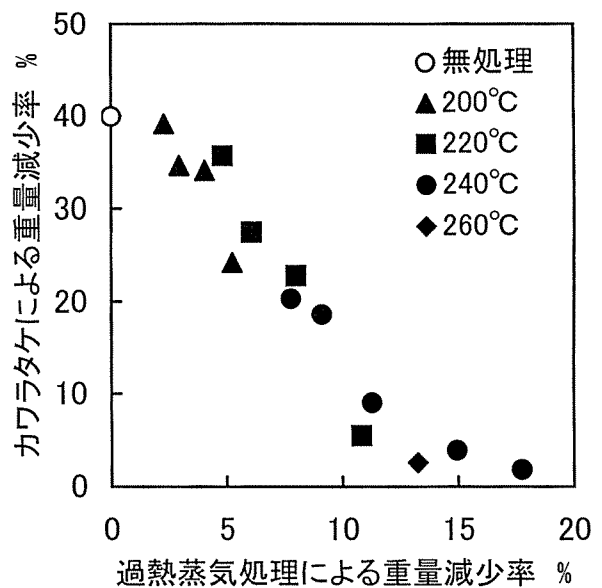
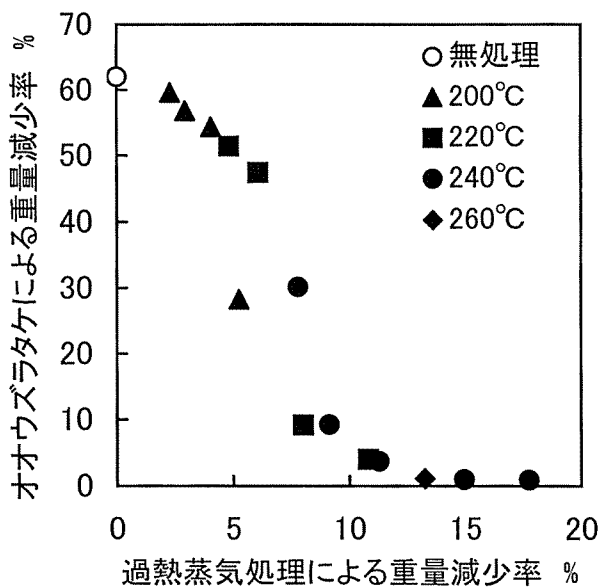


図6 過熱蒸気処理に伴う重量減少率と抗菌操作時の重量減少率との関係 (対候操作なし)

と、260°Cで2時間の処理の2条件のみであった。しかし、220°Cあるいは200°Cの処理においても、処理時間をさらに延長することで18%以上の重量減少率が得られる可能性があることも図4の結果から推定でき、200~220°Cの処理でも高い耐朽性が付与できる可能性が十分にある。したがって、木材保存剤で処理した木材と同等の耐朽性を付与する熱処理条件については、温度と時間の双方の因子で論じる必要がある。

3.1.3 耐候操作の有無が耐朽性に及ぼす影響

耐候操作の際の重量減少率は、無処理試験片では0.11%であったのに対して、過熱蒸気処理をした試験片では0.20~1.44%であり、過熱蒸気処理により水に可溶となる成分が増加したことは確かである。処理条件との関係にあつては、過熱蒸気処理の条件が厳しく、その際に生じる重量減少率が大きい試験片ほど、耐候操作時の溶脱量が少なくなる傾向が認められた。

耐候操作をしなかったときの、過熱蒸気処理に伴う重量減少率と抗菌操作に伴う重量減少率との関係を図6に示す。先に示した図5は耐候操作をしたときの結果であるが、両者を比較すると、カワラタケによる重量減少率は耐候操作の有無で大きな差は認められないのに対して、オオウズラタケでは耐候操作により、耐朽性が低下していることが分かる。それは、過熱蒸気処理に伴う重量減少率が8~15%の範囲で顕著であるが、15%を超える部分では、耐候操作による耐朽性の低下はほとんど認められず、処理条件を守れば、持続性のある耐朽性を得ることができると言える。また、過熱蒸気処理時の重量減少率が8%以上15%未満のグループと15%以上のグ

ープに分けて、先ほど述べた耐候操作時の重量減少率をそれぞれのグループごとに求めたところ、0.40%と0.24%となり、危険率5%で、グループ間には有意な差が認められた。

3.2 樹種の影響

240°Cで2~8時間過熱蒸気処理をした際の重量減少率を図7に示す。ベイマツ心材については、スギ辺材とほぼ同程度の値を示したが、他の針葉樹の心材は、処理に伴う重量減少率が大きくなった。心材は辺材よりも抽出成分が多いこと、その中には酸性成分が含まれ、熱

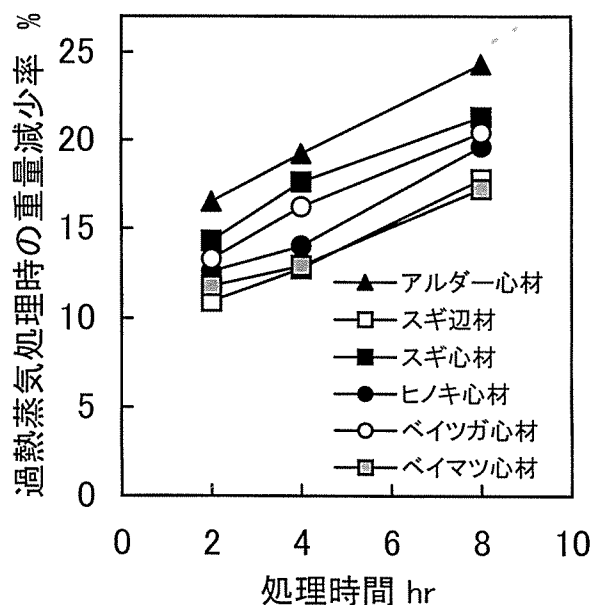


図7 過熱蒸気処理に伴う重量減少率と樹種との関係 (処理温度：240°C)

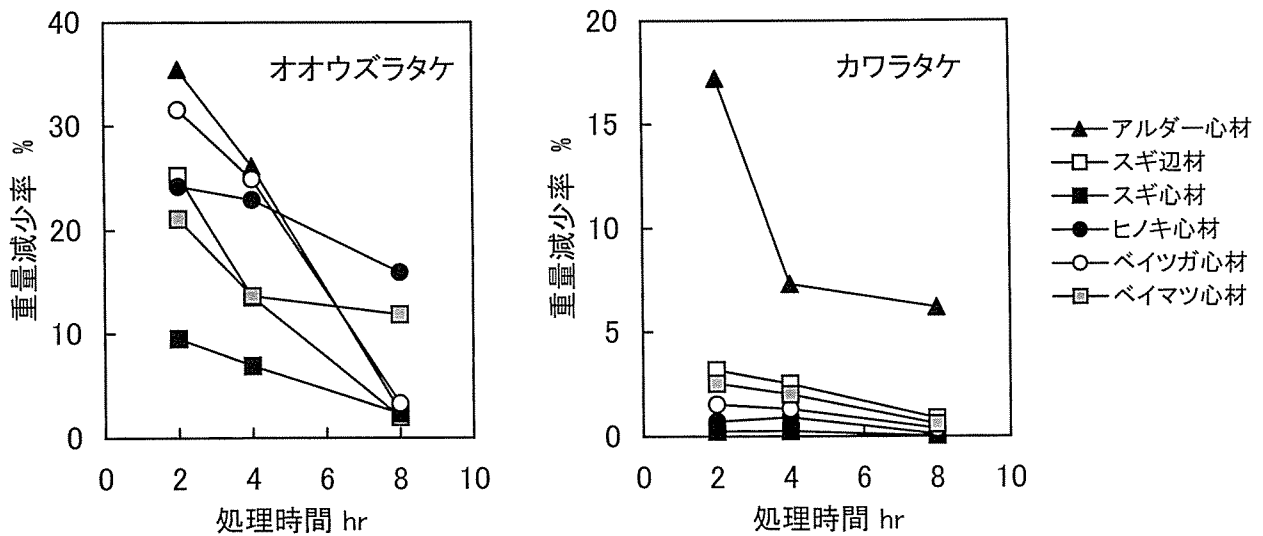


図8 抗菌操作時の重量減少率と加熱処理条件、樹種との関係（処理温度：240°C）

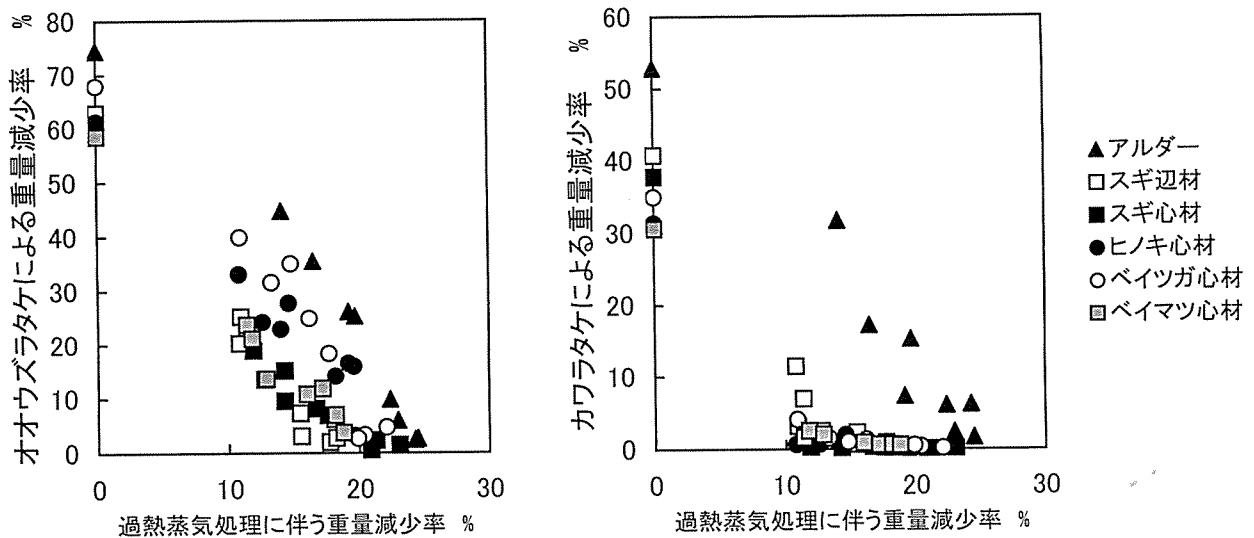


図9 過熱蒸気処理に伴う重量減少率と抗菌操作時の重量減少率、樹種との関係

分解が促進されることなどが原因と推定できる。また、広葉樹であるアルダー心材の重量減少率が針葉樹よりも大きくなった。別途試験を行ったブナ材においても、240°C 1時間の処理での重量減少率は12.5%で、スギ辺材よりも3%以上高くなったことから考えると、広葉樹の方が重量減少率が高くなる傾向にあると思われ、それは、ヘミセルロースの違いや、その含有量が一般に広葉樹の方が多くに関係していると推定できる。

図8には、240°Cの処理をした試験片について、抗菌操作をしたときの重量減少率を示す。今回の試験では、元来それぞれの樹種が持っている耐朽性が処理後に及ぼす影響を見ることも一つの目的であった。しかし、20mm

(T) × 20mm (R) × 10mm (L) の小さな試験片で耐候操作を実施したことや、素材の耐朽性評価時よりも抗菌操作の時間が12週間と長かったこともあって、針葉樹では無処理木材のオオウズラタケによる重量減少率が58.9% (ベイマツ心材) ~68.0% (ベイツガ心材)、カワラタケでは30.6 (ベイマツ心材) ~40.7% (スギ辺材) といずれの樹種でも極めて大きく、かつほぼ一定になり、素材が持っている抗菌力の影響を見ることはできなかった。しかし、過熱蒸気処理が耐朽性に及ぼす影響に関しては、樹種による差が歴然としていて、240°C、8時間の処理で、木材保存剤の性能基準値を満たせたのは、スギ辺材と心材のほかはベイツガ心材のみで、ヒノキ心材やベイマツ

心材ではオオウズラタケでの重量減少率において、アルダー心材ではカワラタケでの重量減少率において、基準値にははるかに及ばなかった。

図9には、200～260℃で過熱蒸気処理をした際に生じる重量減少率と、オオウズラタケ、カワラタケによる抗菌操作時の重量減少率との関係を示す。カワラタケではアルダーを除いて樹種間の差を見ることはできなかったが、オオウズラタケでは過熱蒸気処理時の重量減少率と耐朽性との関係が、樹種により異なることが明らかになった。過熱蒸気処理に伴う重量減少率を一定にして比較すると、スギ心材およびベイツ心材に比べて、ヒノキ心材やベイツガ心材では抗菌操作時の重量減少率が高く、耐朽性が付与しづらいことが明らかになった。このように樹種による差が見られた原因については不明であり、今後、成分的な分析を進めるなどして検討したい。

また、スギ辺材では過熱蒸気処理において、18%程度の重量減少率が見られたときに木材保存剤の性能基準値を満たしたが、スギを含めて針葉樹の心材では20%を超えるときに、アルダーでは25%付近で、それと同等の効力が発現することも分かった。

4. おわりに

近年、高温加熱処理による木材の改質が盛んに行われるようになり、製品も複数の企業から販売されている。ところが、どのような処理条件で木材保存剤と同等の耐朽性を付与できるかは、報告によりまちまちであった。また、温度等の測定方法が不明な報告や、加熱時間について検討されていない報告などが多く、著しく情報が不足している状況にあった。そこで、本研究では、槽内の温度ムラが小さい過熱蒸気処理装置を設計した上で、処理や測定の条件等をできる限り明示するとともに、加熱処理時の温度と時間が耐朽性に及ぼす影響や樹種による差について詳細に検討した。処理に伴い発現する耐朽性は、処理温度と時間に依存した。その一方で、加熱処理時の重量減少率と抗菌操作時の重量減少率とは、処理の温度や時間に関係なく、同一の線上にプロットできる関係にあり、前者の重量減少率が高くなると、後者が低くなり、スギの辺材では前者が18%を超えたときに、JIS K 1571に定められた木材保存剤の性能基準値を満たした。樹種による差や辺材と心材の差も認められ、心材では処理に伴う重量減少率が辺材よりもやや大きくなる一方で、それが20%を超えないと上述した性能基準を達成できない。広葉樹は針葉樹よりも処理に伴う重量減少率

が際だって大きくなった。

耐朽性が発現する機構や、耐朽性の発現において樹種による差が見られた理由については未検討であるが、持続性のある耐朽性を発現するためには、どのような処理条件を選択すべきかという観点では一つの指標を示すことができた。

なお、当研究は奈良県が実施した産業廃棄物税使途事業の一環として実施した。

引用文献

- 1) 桃原郁夫：熱処理と耐久性. 木材保存. 31 (1), 3-11 (2005)
- 2) Timo Aavakallio (吉村剛訳)：フィンランドにおける木材保存. 33 (5), 212-217 (2007)
- 3) 花田健之, 土居修一, 加文字栄治：Plato熱処理材の耐朽性・耐蟻性. 木材保存. 32 (1), 13-19 (2006)
- 4) 佐藤敬之：熱処理による木材の耐久性向上に関する技術開発. 木材保存. 30 (6), 269-272 (2004)
- 5) 酒井温子, 岩本頼子, 伊藤貴文, 佐藤敬之：窒素雰囲気下で熱処理された木材の耐朽性, 耐蟻性および吸湿性. 木材保存. 34 (2), 69-79 (2008)
- 6) 森田珠生, 荘保伸一, 山口秋生：熱処理木材の指標値としてのホロセルロース含有率と材色. 第23回日本木材保存協会年次大会論文集. 日本木材保存協会編. 東京, 2007-5, 日本木材保存協会. 2007, 32-36.
- 7) 森田珠生, 荘保伸一, 山口秋生, 今村祐嗣, 杉山淳司：230℃以上の高温熱処理木材における各種物性の発現. 第24回日本木材保存協会年次大会論文集. 日本木材保存協会編. 東京, 2008-6, 日本木材保存協会. 2008, 36-37.
- 8) 荘保伸一, 今村祐嗣：化学修飾機構を基盤においた高信頼性熱処理木材の開発. 地域材を利用した住宅用の新製品開発に関する発表会要旨集. 日本住宅・木材技術センター編. 東京, 2008-3, 日本住宅・木材技術センター. 2008, 14-22.
- 9) Le Xuan Phuong, Satoshi Shida, Yukie Saito, Ikuo Momohara : Effect of heat treatment on bending strength and decay resistance of *Styrax tonkinensis* wood. Wood Preservation, 32 (1), 7-12 (2006)

(2009年1月9日受理)

