

資料

スギ丸太の燻煙熱処理及びスギ板材の燻煙乾燥試験

中山 茂生*・池 淵 隆・後 藤 崇志・越 智 俊之・福 島 亮
可 部 淳**・栗 栖 利 寿**・三 浦 千恵子**

Smoke Heat-Treatment Test of Sugi Logs and Drying Test of Sugi Boards

Shigeo Nakayama*, Takashi Ikebuchi, Takashi Goto, Toshiyuki Ochi,
Akira Fukushima, Atsushi Kabe**, Toshinaga Kurisu**, Chieko Miura**

要 旨

島根県浜田市金城町内に設置されている丸太の燻煙熱処理試験装置と燻煙熱処理業務用施設を使用し、間けつ運転によるスギ丸太の燻煙熱処理及びスギ板材の燻煙乾燥試験を行い、以下の知見を得た。

1. 燻煙熱処理によりスギ丸太の含水率低減効果が認められ、特に辺材部において顕著であった。
2. 燻煙熱処理丸太から製材したスギ柱材の初期含水率は未処理の柱材と比較して低かったが、その後の天然乾燥期間の短縮には至らなかった。しかし、天然乾燥終了時の含水率のバラツキは燻煙熱処理丸太から得られた柱材の方が明らかに小さかった。
3. 柱材の天然乾燥試験において、燻煙熱処理丸太から得られた柱材の材面割れは未処理の柱材と比較して少ない傾向を示した。また、天然乾燥に際して、背割り加工を行うことにより材面割れの発生が大幅に減少した。
4. 柱材の強度試験を行ったところ、曲げヤング係数、曲げ強さ、縦圧縮強さのいずれも、燻煙熱処理丸太から得られた柱材と未処理の柱材との間に有意な差は認められなかった。
5. スギ板材の燻煙乾燥試験を行ったところ、初期含水率114.5%から燻煙乾燥後には6.6%となり、バラツキの少ない乾燥が可能であった。

I はじめに

地域材の地産地消による循環型林業を創出し中山間地域の振興を図るため、島根県浜田市金城町に地域材流通の拠点である浜田木材流通センターが開設されている。2002年6月、この流通センター地内に地域材の付加価値向上を目指して丸太の燻煙熱処理試験装置が設置され、さらに、2004年6月には燻煙熱処理業務用施設が稼働を始めている。

この燻煙熱処理試験装置及び燻煙熱処理業務用施設

(以下、試験装置及び業務用施設と記す)における丸太の処理能力はそれぞれ約10m³と100m³(50m³×2室)であり、従来の燻煙熱処理装置(佐々木ほか, 2004)とは異なり、燻煙熱処理室と燃焼室を分離して、燃焼室で製材廃材を燃焼させ発生した燃焼ガス、いわゆる燻煙を煙道を通して燻煙熱処理室へ導き、丸太の燻煙熱処理を行うものである。この装置の特長は、燃焼室が分離していることから火災の危険性が少なく、日中のみ製材廃材を燃焼させて夜間は消化できる点にある。

この報告の一部は、日本木材学会中国・四国支部第16回研究発表会(2004年11月, 徳島)において発表した。

* 現農林水産部林業課 ** 協同組合ヴァーテックス

本研究では、この特長を活かして間けつ運転によるスギ丸太の燻煙熱処理を行い、含水率の低減効果を検討した。また、柱材に製材して天然乾燥に供し、材面割れの発生状況を調査後、強度試験を行って燻煙熱処理が柱材の強度性能に及ぼす影響を検討した。さらに、この業務用施設は、燻煙乾燥施設としても応用できると考えられたため、スギ板材の燻煙乾燥試験も併せて実施した。

II 試験方法

1. 試験装置と業務用施設の概要

本試験では試験装置と業務用施設の2つの設備を使用した。試験装置（(株)益田機械製作所製）は、浜田木材流通センター地内に設置され、石央森林組合が所管している（写真-1）。その概要を図-1に示した。燻煙熱処理室（以下、熱処理室と記す）の寸法は間口1.8m×高さ2.1m×奥行き5.5mであり、丸太の処理能力は約10m³である。丸太の搬入はレール上に設置された台車1台により行われ、燃焼室で製材端材を燃焼させ発生した燃焼ガス（燻煙）を煙道を通して熱処理室へ導き、循環ファンにより室内を循環させて室内及び丸太を加熱する構造となっている。なお、燃焼室上部に設置された温水タンクから、必要に応じて手動で熱処理室にミスト状の水滴を噴霧し、一時的な加湿も可能な装置となっている。

業務用施設（(株)益田機械製作所製）は、浜田木材流通センターに隣接して設置され、協同組合ヴァーテックスが所管している（写真-2）。丸太の処理能力が100m³（50m³×2室）であること及び丸太の搬入を1室は台車で、他の1室はフォークリフトで行う点を除いて基本的な構造は試験装置と同様である。

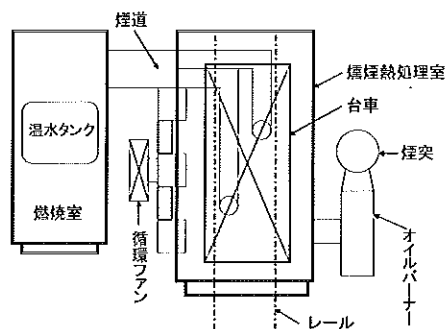


図-1 試験装置概要図（平面図）

2. 丸太の燻煙熱処理条件

スギ (*Cryptomeria japonica* D.Don) 丸太の燻煙熱処理試験は2回行った。1回目試験では、浜田市三隅町内の6齢級の同一林分から採取された末口径18cm、材長3.25mのスギ丸太60本を入手し試験材とした。丸太は初期含水率を測定するため3mに玉切った後、縦振動法によりヤング係数を測定し、ヤング係数の平均値と分散が等しくなるように30本ずつ2つのロットに分けて一方を燻煙熱処理用、他方を未処理用とした。燻煙熱処理用丸太30本を燻煙熱処理試験装置内に積積みをせずに積載し、2003年8月18日～22日の5日間、日中のみ製材端材を燃焼室で燃焼させ、夜間は消火する間けつ運転により燻煙熱処理（以下、熱処理と記す）を行った。熱処理丸太は熱処理室内の温度が低下するまで2日間養生した後取り出した。

2回目試験では、末口径18cm、材長3.2mの県産スギ丸太60本を入手し試験材とした。丸太は1回目試験と同様に3mに玉切った後、重量を測定し、重量の平均値と分散が等しくなるように30本ずつ2つのロットに分けて一方を熱処理用、他方を未処理用とした。熱処理用丸太30本を業務用施設内に積積みを行って積載し、2004年8月16日～21日の6日間、1回目試験と同様に間けつ運転により熱処理を行った。熱処理丸太は1日間養生した後取り出した。

3. 測定項目

1) 丸太材内温度と熱処理室内温度

1回目試験における材内温度の測定は、台車上に積載した丸太のうち、ロットの外周部に位置する上段2本、中段1本、下段2本の計5本について、材長方向の中央部に、ドリルにより7cmの深さまで穿孔し、K熱電対を挿入して測定した。挿入後、シリコングリースによりシールした。室内温度は、材内温度を測定した丸太5本の表面付近に計5箇所、K熱電対を取り付けて測定した。

2回目試験における材内温度と室内温度の測定は、ロットの外周部に位置する上段の3本について同様にK熱電対により測定した。

2) 丸太の含水率

1回目試験では、熱処理前に丸太末口から約25cmの

位置で厚さ3cmの円盤を採取し、心・辺材、白線帯別に全乾法により測定した。熱処理後、末口から40cmの位置で同様に厚さ3cmの円盤を採取して測定した。

2回目試験では、熱処理前に末口から約20cmの位置で同様に円盤を採取して測定し、熱処理後、末口から30cmの位置で円盤を採取して測定した。

3) 柱材の天然乾燥

1回目及び2回目試験において、熱処理丸太及び未処理丸太を13cm角柱材（1回目：13×13×250cm，2回目：13×13×260cm）に製材し、1回目試験では無背割り材の状態、2回目試験では背割り加工を行って天然乾燥に供した（写真-3）。天然乾燥期間は1回目試験では2003年10月～2004年4月までの7ヶ月間、2回目試験では2004年10月～2005年4月までの7ヶ月間とした。また、天然乾燥は当センター（飯南町）の屋外土場にて行い、天然乾燥期間中に発生した木口割れを含む材面割れ長さを測定した。なお、含水率は柱材の重量を毎回測定しておき、試験終了時の全乾法含水率から換算して求めた。

4) 柱材の強度試験

1回目試験において、天然乾燥終了後、モルダを使用して12×12×250cmの柱材に仕上げ加工し、スパン216cmの3等分点4点荷重方式により曲げ強度試験を行った（写真-4）。曲げ強度試験後、試験材の非破壊部分から材長48cmの縦圧縮試験材を採取し、短柱の縦圧縮試験を行った（写真-5）。なお、使用した試験機は（株）前川試験機製作所製IPA-100R-F（最大容量1000kN）である。

4. スギ板材の燻煙乾燥試験

末口径22cm，材長3mの県産スギ丸太20本を入手し、幅155mm×厚さ36mmの板材に製材し試験材とした。試験材82枚の両木口から23cmの位置で、長さ2cmの含水率試験片を採取し全乾法により初期含水率を求めた。そして、62.5cm間隔で棧木を入れて棧積みし、上部に圧縮のための重し（366kg）を積載した。業務用施設を使用して、2005年3月16日～27日までの12日間燻煙乾燥を行い、1日間養生した後取り出した（写真-6）。熱処理室内温度は日中80～100℃で推移し、夜間は40℃付近まで低下した。燻煙乾燥後、試験材の曲がり及び幅反

りを測定した後、板材の両木口から23cmの位置で同様に含水率試験片を採取して含水率を求めた。

III 結果と考察

1. 丸太材内温度と熱処理室内温度

1回目及び2回目試験における丸太材内温度と熱処理室内温度を図-2，図-3にそれぞれ示した。なお、室内温度は丸太表面付近で測定したため、図中の表記は表面温度としている。1回目試験では、5本の丸太について測定したが、このうち、材内温度と表面温度が最も高め及び低めに推移した試験材の温度経過を示した。1日目は表面温度、材内温度とも低めであったが、2日目以降は日中の表面温度は110℃～140℃、材内温度は75℃～95℃で推移し、夜間は表面温度、材内温度とも60℃付近まで低下した。2回目試験では、3本の丸太について測定したが、材内温度差が最大でも4℃弱であったため、試験材1本の温度経過のみ示した。表面温度、材内温度とも日を追って上昇する傾向であったが、日中の表面温度は60℃～90℃、材内温度は50℃～70℃で推移し、夜間は表面温度、材内温度とも40℃～60℃付近まで低下した。

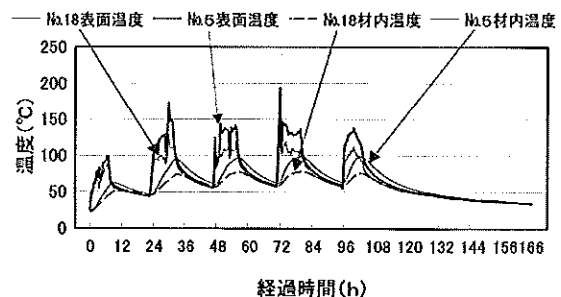


図-2 丸太材内温度と熱処理室内温度（1回目）

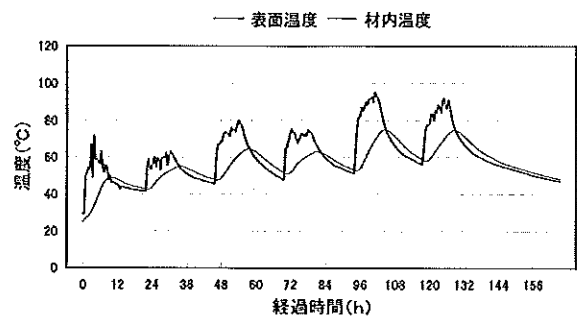


図-3 丸太材内温度と熱処理室内温度（2回目）

2. 丸太の含水率変化

1回目試験における積載位置による含水率の違いを表-1に示した。ロットの外周部に位置した丸太では、辺材部の含水率が100%を越える低下を示したのに対し、ロットの内部に位置した丸太のそれは49%であった。これは、1回目試験では積木を入れずに積載したため、内部に位置した丸太の材内温度が十分上昇しなかったことに起因すると考えられる。従って、丸太の熱処理においても適切な厚さの積木により積込みを行って、ロット内部の丸太であっても外周部の丸太と同様に材内温度が上昇するよう積載段階での配慮が必要である。

1回目及び2回目試験における丸太の含水率変化を表-2に示した。1回目及び2回目試験ともに心材部の含水率低下は少なかったが、辺材部では1回目試験で77%、2回目試験で86%と顕著な含水率低減効果が認められた。また、1回目試験におけるロットの外周部に位置した丸太及び2回目試験では心材部と辺材部の含水率差が小さくなる傾向が認められた。

燻煙熱処理によって発生する丸太の材面割れをおさえるためには、丸太表面の含水率を繊維飽和点以下にしないことが絶対条件であるとされている(奥山, 1996)。また、佐々木ほか(2004)は材面割れ深さを測定したところ、丸太の平均含水率が40%を下回ると材面割れが深くなることから、材面割れを避けるためには含水率を約50%程度にとどめる必要があると報告している。一方、

表-1 積載位置による含水率の違い(1回目試験)

積載位置	本数 (本)	部位	熱処理前 (%)	熱処理後 (%)	差 (%)
外周部	13	心材	58	49	9
		辺材	184	69	115
		平均	95	55	40
内部	17	心材	75	68	7
		辺材	184	135	49
		平均	104	85	19

注) 数値は平均値である。

表-2 丸太の含水率変化

試験	本数 (本)	部位	熱処理前 (%)	熱処理後 (%)	差 (%)
1回目	30	心材	67	60	7
		辺材	184	107	77
		平均	100	72	28
2回目	30	心材	88	71	17
		辺材	144	58	86
		平均	104	64	40

注) 数値は平均値である。

損傷の発生メカニズムについては、辺材部の含水率の減少によって心材部との差が小さくなり含水率分布が均一化された後、さらに処理時間の増加とともに辺材部の含水率が減少し、このことによって表層部(辺材部)に引張り応力が発生することによって生じることが明らかにされ、材内温度が60℃の場合では長時間の燻煙熱処理を行っても材への損傷が少ないことが判明している(石栗ほか, 2001)。

今回の試験における丸太の材面割れについては、試験材がいずれも皮付き丸太であり、1回目試験では一部樹皮が剥がれた部分において微細な割れが認められたものの、樹皮のある部分では目立った割れは少なく、2回目試験では目立った割れはほとんど認められなかった。

この結果から、ロットの外周部丸太の平均含水率が55%まで低下した1回目試験の温度条件ではもう1日程度、平均含水率が64%まで低下した2回目試験の温度条件ではもう2日程度熱処理時間を延長し、損傷をおさえながら、50%を下回る程度の含水率に上げることが望ましいと思われる。

3. 柱材の天然乾燥経過

柱材の天然乾燥経過を図-4に示した。熱処理材と未処理材の天然乾燥開始時の含水率は、1回目、2回目試験とも熱処理材の方が低い値であったが、天然乾燥6ヶ月後には23~25%と揃ってくる傾向であり、7ヶ月後にはいずれも20%以下まで低下した。目標仕上がり含水率20%とした時の熱処理による天然乾燥期間の短縮化は明確ではなかった。これは、2回の試験とも天然乾燥期間が冬期をまたいだことや本県の中山間地域でも最も寒冷な地域である飯南町における天然乾燥であったことも要因として考えられる。そのため引き続き、季節や場所を変えての測定が必要であろう。なお、天然乾燥終了時の含水率のバラツキは熱処理材の方が明らかに小さく、1回目試験の無背割り材では熱処理材と未処理材の標準偏差はそれぞれ1.4%と2.6%であり、2回目試験の背割り材のそれはそれぞれ1.0%と3.2%であった。

天然乾燥期間における材面割れの推移を図-5に示した。単位は試験材1m当たりの4材面に発生した材面割れの延長を表している。背割り材及び無背割り材ともに熱処理材が未処理材と比較して材面割れが少ない傾向を

示した。これは、柱材の辺材含水率が丸太段階での熱処理によって低下し、心材含水率もある程度低下したことによって、天然乾燥期間における心材部と辺材部の含水率傾斜が未処理材と比較して小さくなり、結果的に材表層部の引張り応力が緩和されることによって材面割れの発生が少なかったものと考えられる。また、背割り材は無背割り材と比べ、材面割れが大幅に少なかった。なお、モルダ加工後に材面割れが少なくなっているのは、材表層部を切削加工することにより、材表面の微細な割れが削り取られて消失したためである。この結果から、材面割れの少ない乾燥材を得るためには、熱処理後、製材し、背割り加工を行ってから天然乾燥するのが望ましいと言

える。

4. 柱材の強度性能

柱材の強度試験結果を表-3に示した。曲げヤング係数(MOE)、曲げ強さ(MOR)、縦圧縮強さ(σ_c)のいずれも、熱処理材と未処理材の間に有意な差は認められなかった。また、曲げ強度試験における試験材の破壊形態は、熱処理材と未処理材の間に相違点は認められず、柱の引張側が繊維に平行方向の引張応力によって引き離される引張型もしくは、柱の引張側に裂片状の破壊を起し、破壊面が繊維状にささくれる強靱型破壊(渡辺, 1978)であった。このことから、今回の温度域での5日~6日程度の熱処理では、柱材として利用する場合の強度面における実用上の問題はないと考えられる。

5. スギ板材の燻煙乾燥経過

スギ板材の燻煙乾燥経過を図-6に示した。試験材82枚の初期含水率平均値は114.5% (標準偏差30.6%)であり、燻煙乾燥後には6.6% (標準偏差2.0%)となり、バラツキの少ない乾燥が可能であった。また、燻煙乾燥後の板材の曲がり及び幅反りはそれぞれ0.12%, 0.80%であった。

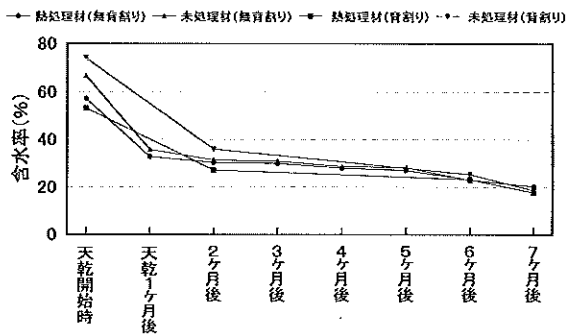


図-4 柱材の天然乾燥経過

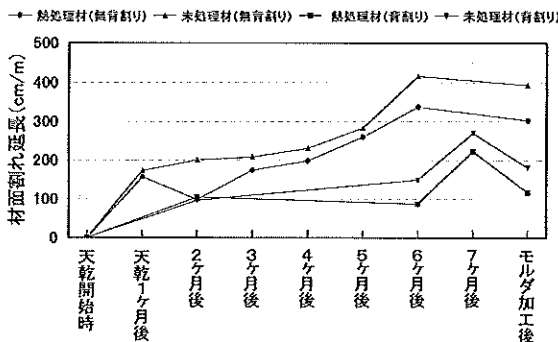


図-5 天然乾燥期間における材面割れの推移

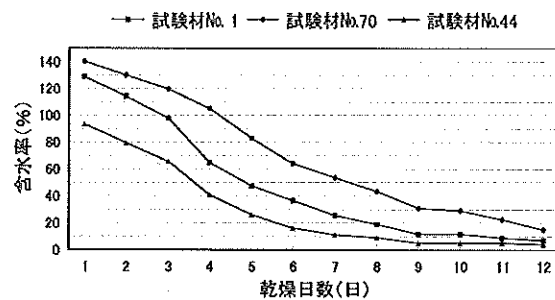


図-6 スギ板材の燻煙乾燥経過

表-3 柱材の強度試験結果

処理条件	試験体数	曲げ強度試験				縦圧縮試験			
		MC (%)	密度 (kg/m ³)	MOE (kN/mm ²)	MOR (N/mm ²)	MC (%)	密度 (kg/m ³)	σ_c (N/mm ²)	
燻煙熱処理材	30	Ave	18.2	459	5.61	41.5	15.1	456	25.6
		SD	1.0	14	0.65	5.4	0.6	18	2.1
未処理材	30	Ave	17.5	455	5.58	39.3	15.4	455	25.9
		SD	0.8	28	0.69	4.8	0.7	29	1.8

注) Ave: 平均値, SD: 標準偏差

IV おわりに

本県内に導入された試験装置と業務用施設を使用して、間けつ運転によるスギ丸太の燻煙熱処理及びスギ板材の燻煙乾燥試験を行い、以上のような知見を得た。燻煙熱処理に関する研究は、大学や独立行政法人あるいは公設試験研究機関等で実施され成果も多数報告されているが、間けつ運転による燻煙熱処理を行った事例は少ない。今後は、間けつ運転により丸太にできるだけ損傷を発生させずに、平均含水率が50%を下回る程度に仕上げる燻煙熱処理スケジュールを確立していく必要がある。また、燻煙熱処理は丸太の残留応力の低減に有効であり、広葉樹（ケヤキ）においても製材時の曲がり量が非常に少なくなると報告されていることから（奥山ほか，1987）、県産広葉樹においても本設備を用いた間けつ運転によりその効果を検証しておく必要がある。さらに、アカマツ丸太を屋外に放置する場合、燻煙熱処理を行うことにより、青変と穿孔虫被害防止の有効性が認められたとする報告（佐々木ほか，2004）もあることから、県産アカマツ丸太でもその効果を確認することは有意である。

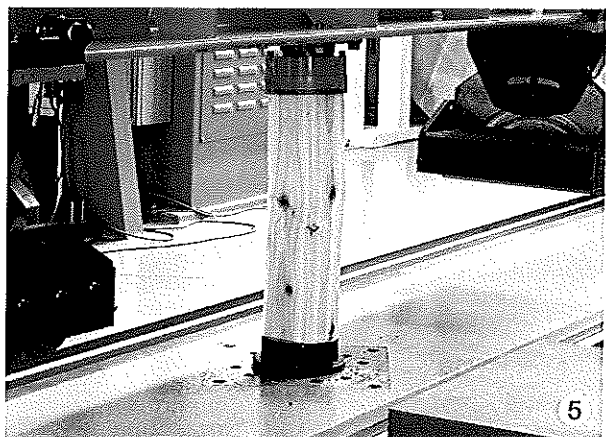
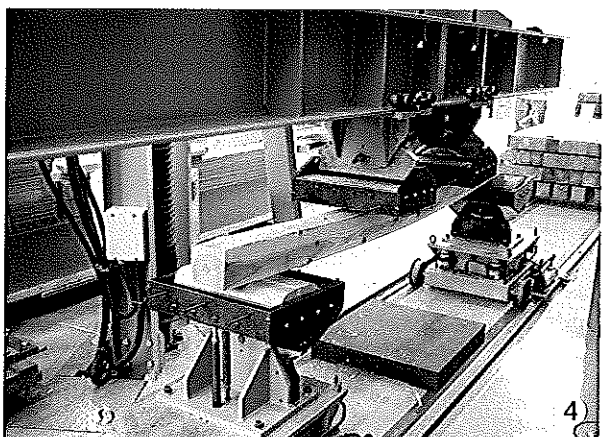
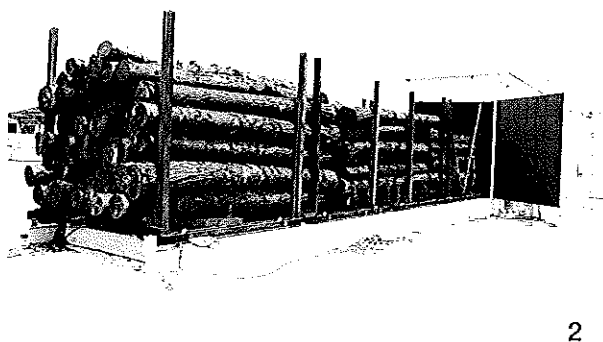
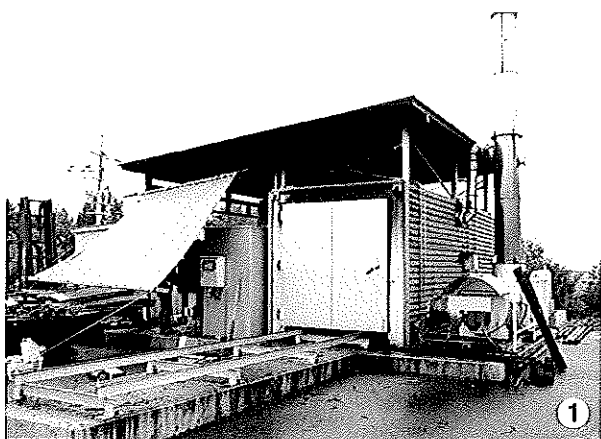
今後も燻煙熱処理及び燻煙乾燥の研究成果が蓄積され、その技術が普及されることにより、循環型林業の創出と中山間地域の振興につながっていくことを強く願うものである。

最後になりましたが、この研究を進めるにあたりまし

て木材利用グループ囑託職員名原俊顕氏には多大なご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 石栗 太，黒岩友人，為我井淳一，丸山さおり，安藤 實，横田信三，吉澤伸夫（2001）燻煙熱処理によるスギ（*Cryptomeria japonica* D.Don）およびカラマツ（*Larix kaempferi* Carriere）材の材質変化—処理温度と時間の影響—。材料50（12）：1357—1363。
- 奥山 剛，金川 靖，服部芳明（1987）直接熱処理による丸太内残留応力の低下。木材学会誌33（11）：837—843。
- 奥山 剛（1996）丸太の燻煙熱処理の得失について。日本木材学会木材と水研究会シンポジウム要旨集「高温熱処理木材の諸特性」：6—9。
- 佐々木幸敏，清川雄司，江刺拓司（2004）低位利用資源の有効利用に関する研究。宮城県林業試験場成果報告14：1—25。
- 佐々木幸敏，清川雄司，江刺拓司，佐藤夕子（2004）燻煙熱処理による乾燥前処理効果—含水率の予備的低減と製材歩止り向上効果—。宮城県林業試験場成果報告14：48—58。
- 渡辺治人（1978）木材理学総論。農林出版株式会社：539—540。



- 写真一 丸太の燻煙熱処理試験装置
 写真二 丸太の燻煙熱処理業務用施設と燻煙熱処理後の丸太
 写真三 柱材の天然乾燥
 写真四 柱材の曲げ強度試験
 写真五 短柱の縦圧縮試験
 写真六 燻煙乾燥したスギ板材（中央）

