

レーザーサイジングの構造用木材への応用に関する研究  
Study on applications of laser incising to structural lumber

安藤恵介  
Keisuke Ando

# 目次

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 既往の研究	1
1.2.1 レーザインサイジング	1
1.2.2 木材の乾燥	2
第 2 章 柱材の蒸気噴射乾燥	3
2.1 緒言	3
2.2 実験	3
2.2.1 材料	3
2.2.2 レーザインサイジング	5
2.2.3 蒸気噴射	5
2.3 結果と考察	6
2.3.1 材温変化	6
2.3.2 含水率変化	7
2.3.3 含水率分布	9
2.4 結言	9
第 3 章 柱材への保存処理薬剤の減圧加圧注入	11
3.1 緒言	11
3.2 実験方法	11
3.2.1 単一穴からの薬液浸潤実験	11
3.2.2 柱材全体へのインサイジングおよび薬液注入	12
3.2.2.1 インサイジング	12
3.2.3 薬剤の注入処理	14
3.2.4 注入量および浸潤断面関率	15
3.3 結果および考察	15
3.3.1 インサイジング穴の状態	15

3.3.2	単一穴からの浸潤	16
3.3.3	インサイジングパターンの決定	16
3.3.4	注入量	17
3.3.5	浸潤断面積率	18
3.4	結言	19
第 4 章	パッシブ注入材の溶脱性	21
4.1	緒言	21
4.2	実験	21
4.2.1	材料	21
4.2.2	保存処理薬液注入	22
4.2.3	評価方法	22
4.3	結果と考察	23
4.3.1	薬剤保持量と浸潤面積率	23
4.3.2	薬剤の溶脱性	24
4.4	結言	25
第 5 章	パッシブ注入材の蒸気噴射による再乾燥	26
5.1	はじめに	26
5.2	実験	26
5.2.1	材料	26
5.2.2	注入と再乾燥	27
5.2.3	評価方法	27
5.3	結果と考察	27
5.3.1	薬剤保持量と浸潤面積率	27
5.3.2	薬剤の溶脱と耐朽性	29
5.4	結言	30
第 6 章	柱材の部分圧縮強度に及ぼす影響	32
6.1	緒言	32

6.2	実験	32
6.2.1	材料	32
6.2.2	レーザインサイジング	33
6.2.3	部分圧縮試験	34
6.3	結果と考察	35
6.3.1	インサイジング密度の部分圧縮強度への影響	35
6.3.2	容積重変化の部分圧縮強度への影響	42
6.4	結言	43
第 7 章 柱材の曲げ強度に及ぼす影響		44
7.1	緒言	44
7.2	実験	44
7.2.1	材料	44
7.2.2	レーザインサイジング	45
7.2.3	曲げ強度試験	46
7.3	結果と考察	47
7.3.1	インサイジング密度の MOE への影響	47
7.3.2	インサイジング密度の MOR への影響	49
7.4	結言	50
第 8 章 結論		52
8.1	まとめ	52
8.2	今後の課題	53
文献		54
謝辞		59

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

木材は古くから人間生活に深く結びついた原材料のひとつであり、現代においても住宅・家具用資材、梱包材、製紙原料などに使われる重要な物質である。日本での木材需要の約40%、国産材需要の約55%が建築用材であり<sup>1)</sup>、木材需要において大きな割合を占めている。木材には構造用材として用いる場合に欠点となる、燃える、腐る、喰われる、狂うという特徴がある。これらの欠点を改善することができれば、木材の耐用年数は非常に長くなり、それに伴って住宅の寿命も延ばすことが可能となる。このために、木材の乾燥や化学的な高耐久化処理が行われており、これらを効率よく行うための前処理の一つにインサイジングがある。従来から行われているインサイジングとは、薬剤を木材の表面から均一に浸透させるために爪状の刃物により10~15 mmの深さの切り込みを所定の間隔で入れる方法である。この方法では、刃物の圧入深さに限界があり、圧入深さが大きくなると木材に与える損傷も大きくなり、刃物間隔を変えられないという短所がある。そこで、木材の損傷が少なく、希望の深さまで注入するためのインサイジングとして、CO<sub>2</sub>レーザを用いたレーザインサイジングが開発された。本研究では、レーザインサイジングを用いて、構造用木材に必要な乾燥、薬剤処理を効率的に行い、さらにインサイジングに伴う強度低下の程度を明らかにすることを目的とした。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 レーザインサイジング

Simpson はハードメープルの心材にレーザ光を用いて、直径と間隔を変えて穴あけを行い、乾燥速度に及ぼす影響を調査した。穴あけにより乾燥時間は70%以上短縮し、穴の間隔の影響が大きく穴径の影響は小さいことを明らかにした<sup>2)</sup>。Kamke らはCO<sub>2</sub>レーザの照射により、乾燥時間を15~27%短縮することができたが、曲げ強さが15%~25%低下する結果となったと報告している<sup>3)</sup>。Ruddick はCCA防腐剤の注入効果を高めるために、CO<sub>2</sub>レーザで深さ10mmの穴を13888個/m<sup>2</sup>の密度であけたが、カナダの木材防腐基準を満たすには28000個/m<sup>2</sup>の密度が必要であることを明らかにした<sup>4)</sup>。Goodell らはレッドスプルス心材の生材と気乾材に16.1個/in<sup>2</sup>と21.3個/in<sup>2</sup>の密度でインサイジングを行い、CCAを加圧注入し、その強度性能や浸潤を調べた結果、有意な強度低下は認められず、薬液はほぼ完璧に浸透していたと報告している<sup>5)</sup>。服部らはスギ、カラマツ、イゲム、ミズナラ、ホワイトセラヤ、キリの乾燥材にCO<sub>2</sub>レーザを照射し、その穴形状について

検討した<sup>6)</sup>。中嶋らは密度  $0.2\sim 0.8\text{ g/cm}^3$  の 6 種の木材に  $\text{CO}_2$  レーザを用いて穴あけを行い、照射条件と穴形状の関係を明らかにした<sup>7)</sup>。

### 1.2.2 木材の乾燥

木材は含水率変化に伴い寸法が変化するため、材料として利用するには乾燥が必要であり、使用時に欠点とならないように乾燥する必要がある。構造用材に関して言えば、昔の在来軸組工法では、木材を乾燥しないで使っていたが、完成までに乾燥することや使用中も家の機密性が低いことから、腐朽や蟻害はそれほど大きな問題にならなかった。しかし、構法の変化や工期の短縮化、プレカットの増加により、針葉樹製材の乾燥が大きな問題となってきた。在来軸組工法で用いられる構造材は主に心持ち材であり、乾燥に伴い材面に大きな乾燥割れが発生しやすく、内部まで乾燥することが難しいため、仕上がり含水率がばらつく。これらの問題を解決するために、様々な研究が行われてきた。

その一つが、 $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上の高温で乾燥する高温乾燥<sup>8-13)</sup>であり、実用化されてきている。高温乾燥は、乾燥初期に高温低湿状態で乾燥し、材の表面付近にドラインゲットと呼ばれる硬化層を形成することで、表面割れの抑制し、高温により乾燥速度を向上することができる。一方、内部割れや材色の変化といった問題が生じたため、高温セット後に温度を下げるといった対策についての検討も行われている。

熱気乾燥では材表面から乾燥が進むため、内部が高含水率となる傾向がある。このため、小林らは高周波加熱と熱気乾燥を複合した木材乾燥法<sup>14-19)</sup>を提案し、一部で実用化されている。

通常熱気乾燥は常圧下で行われるため、 $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上での乾燥は不可能である。そこで、小林らは  $100\text{ }^\circ\text{C}$  以上の過熱蒸気を用いた急速乾燥を試みており<sup>20-23)</sup>、3 日間程度でスギ柱材が乾燥できたと報告している。

## 第2章 柱材の蒸気噴射乾燥

### 2.1 緒言

スギ心持ち柱材は、生材含水率が高く、そのばらつきが大きいために、急速かつ均一に乾燥することが困難であり、乾燥中に割れなどの損傷が発生しやすい。これらの問題を解決するために、高温乾燥<sup>12,13)</sup>や高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法<sup>14-19)</sup>などが研究され、実用化され始めている。過熱蒸気を用いた乾燥<sup>24)</sup>や各種前処理技術との組み合わせ<sup>25,26)</sup>により、乾燥時間をどれだけ短縮できるかという試みも行われてきた。

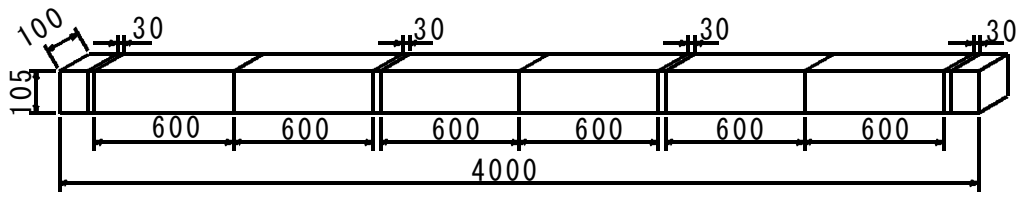
乾燥の前処理の一つとして、CO<sub>2</sub>レーザを用いた木材のインサイジング加工<sup>6,7)</sup>およびその応用<sup>27,28)</sup>に関する研究が行われてきている。その中で、スギ心持ち柱材にCO<sub>2</sub>レーザでインサイジングを施し、いくつかの乾燥法を試みた結果、誘電加熱による内部加熱乾燥を行うと、インサイジング穴が材内水分の排出孔として機能することで、乾燥促進効果が認められることも明らかになった<sup>29)</sup>。

以上を踏まえて、インサイジング穴を材内水分の排出孔のみならず、加熱時の熱媒体の通路として機能させるために、蒸気噴射プレスを用いて、高温蒸気をインサイジング穴に噴射・貫流させる蒸気噴射乾燥法を考案した。この章では、開発した蒸気噴射乾燥法の基本性能を明らかにするために、飽和水蒸気を用いた場合の材温変化と乾燥挙動について検討した。

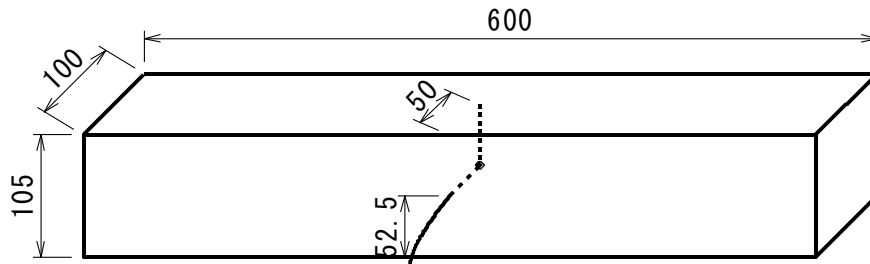
### 2.2 実験

#### 2.2.1 材料

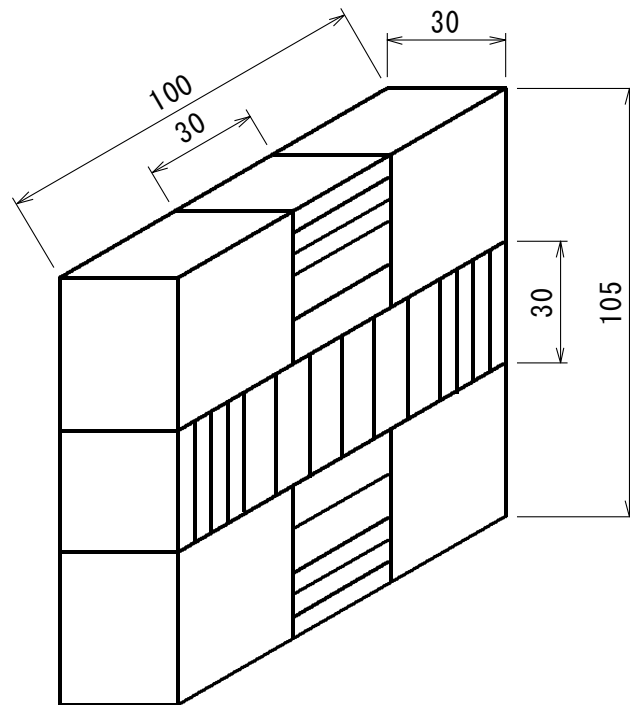
供試材には、一等小節として市販されている岩手県産のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)を使用し、105 mm 正角、長さ 4 m、心持ち、背割りなし、含水率約 75~170 %のものを 8 本用いた。Fig. 2.1 に示したように、供試材から 100 × 105 mm で長さ 600 mm の試験体と、含水率及び初期含水率分布測定用の試験片をそれぞれ切り出した。全ての試験体は、木口面をシリコン系建築用シーリング材でシールした。隣接する 30 mm の試験片(Fig. 2.1.c)の含水率とその分布を全乾法により求め、それを試験体の初期含水率および初期含水率分布とした。



a. Square lumber



b. Drying specimen



c. Test piece for moisture distribution

Fig. 2.1 Preparation of specimens and test pieces from square lumber.



## 2.2.2 レーザインサイジング

CO<sub>2</sub>レーザー(丸紅ロフィン(株)、RS-1700-SM)を用いて、4側面のうちの1面(100 × 600 mm)にパルスレーザー光を照射して、105 mm を貫通する穴をあけた。集光レンズには公称焦点距離 20 インチの ZnSe レンズを用い、焦点を照射面から 20 mm 試験体の内側に合わせ、パルス幅を 700 ms、Fig.2.2 に示したパターンで、密度 5000 と 10000 個/m<sup>2</sup>としてレーザーインサイジングを行った。

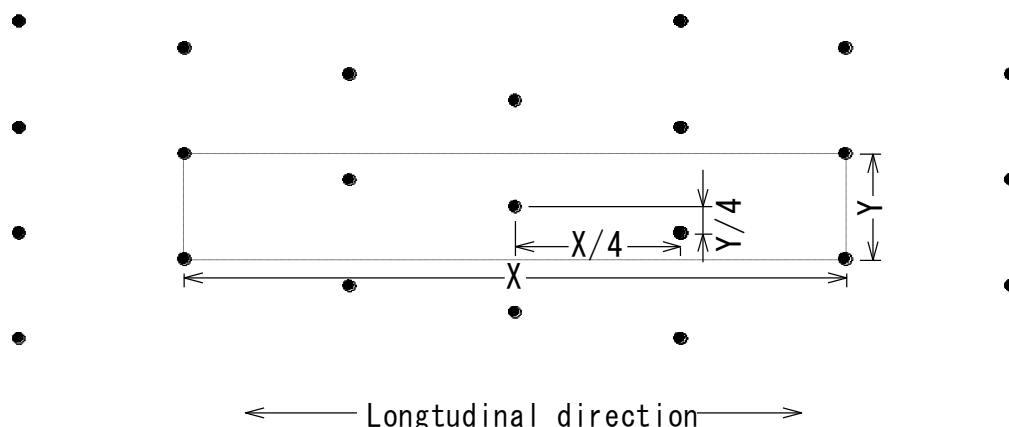


Fig. 2.2 Laser incising pattern.

Note: X:66.4, Y:12 (5000 holes/m<sup>2</sup>), X:50, Y:8 (10000 holes/m<sup>2</sup>)

Legend: ● is the location of laser incised holes.

## 2.2.3 蒸気噴射

蒸気噴射には小型蒸気噴射プレス(北川精機(株)、VH2-1449)を用いた。蒸気温度を 120, 140, 160 °Cとし、熱盤内での水蒸気の凝縮を防ぐために熱盤温度がこれらより数度高くなるように設定して、ほぼ飽和状態の蒸気をインサイジング穴に噴射した。レーザーインサイジングを施さないコントロール材を含めた3体の試験体を Fig. 2.3.の様に設置し、プレスの下部熱盤からインサイジング穴を貫流するように蒸気を噴射した。この図で試験体の両側に設置した試験体と同寸法のスギ柱材は、試験体を固定するとともに蒸気洩れを防ぐためのものである。試験中の材温は銅-コンスタンタン熱電対を用いて Fig. 2.1.b. に示した位置で連続的に測定し、加熱開始時から材温がほぼ一定になるまで加熱を行い、材温の挙動および加熱時間と含水率との関係を求めた。同一条件における繰り返しは3回とした。さらに、実際の乾燥での挙動を知るため、インサイジング密度 5000 個/m<sup>2</sup>の試験体については、120、140 °Cで各2体の試験体に目標含水率を 15 %として蒸気噴射を行い、重量変化を測定した。加熱中の試験体重量は、蒸気噴射を数回中断し、試験体

を取り出して測定した。また、乾燥後の含水率と含水率分布は、試験体の温度が十分に下がった後に、材温測定位置から 15 mm 離れた場所で、長さ 50 mm の含水率測定用試験片と Fig. 2.1.c に示した含水率分布測定用試験片を切り出し、全乾法により求めた。

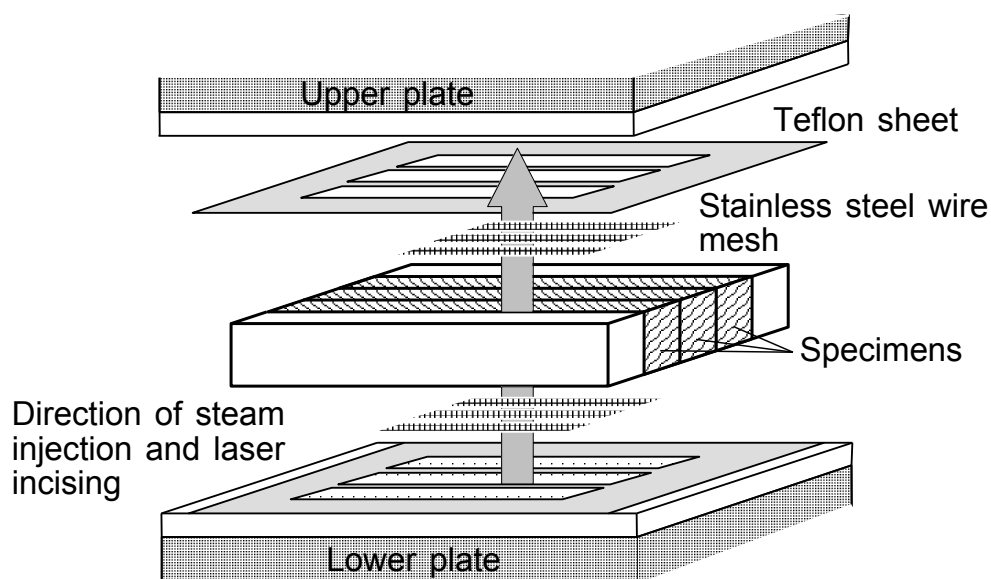


Fig. 2.3. Schematic diagram of steam injection drying

## 2.3 結果と考察

### 2.3.1 材温変化

蒸気噴射開始からの中心付近の材温変化の一例を Fig. 2.4. に示した。これより 120 °C で材温がほぼ一定となるのに要する時間は、インサイジング密度 5000 個/m<sup>2</sup> では約 20 分、インサイジング密度 10000 個/m<sup>2</sup> では 5 分程度であった。この時間は、蒸気温度が高いほど短くなり、蒸気温度が 140 °C ではインサイジング密度によらず 4 分程度で、蒸気温度 160 °C では数十秒程度と極端に短くなった。それに対し、インサイジングを施さなかった試験体の材温は、どの蒸気温度でも 20 分程度の短時間ではほとんど変化しないかわずかに上昇したのみであった。それ故、インサイジング穴は、そこに蒸気を貫流させることにより、熱媒体の通路として大きく機能することが明らかになった。

Fig. 2.4 に見られる材温が一定となっている時間帯の存在は、試験体内の自由水が沸点に達していることを意味する。このことは、蒸気噴射を停止し、材内の圧力が解放されると、直ちに材

温が 100 °Cに下がったことから確認できた。しかしながら、蒸気噴射中の材温は、蒸気温度 120 °Cでは数度、140 °Cの場合は約 5 °C、160 °Cの場合は 10 °C程度と、いずれもわずかに低く、蒸気温度には達していなかった。このことから、噴射された蒸気によって加熱・加圧される試験体中の自由水は、噴射蒸気圧よりもわずかに低い圧力で沸騰状態にあることが示唆された。

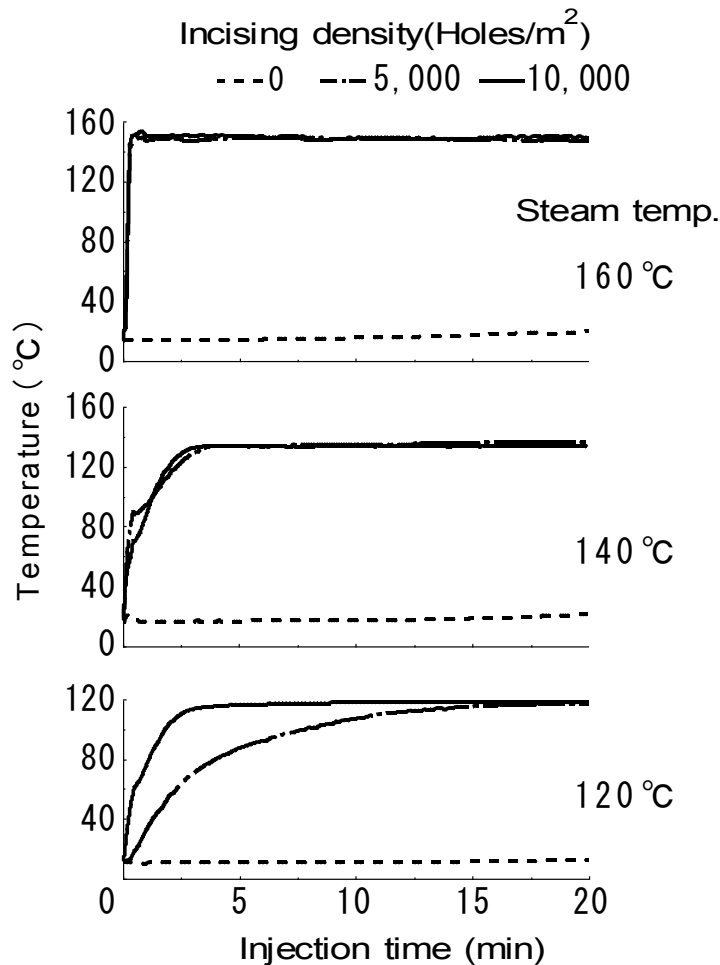
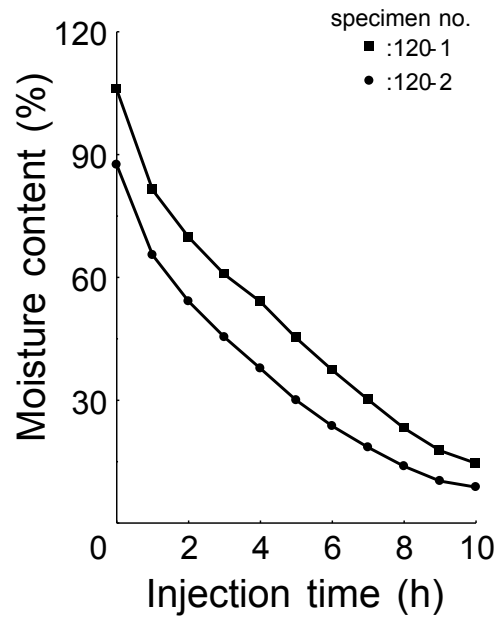


Fig. 2.4 Temperature changes in the center of specimen.

### 2.3.2 含水率変化

蒸気温度 120、140 °Cにおける 2 体の含水率変化を Fig. 2.5、Fig. 2.6 にそれぞれ示した。その結果、温度 120 °Cで 10 時間、140 °Cでは 6 時間で 15 %以下まで乾燥することができた。さらに、乾燥後の試験体は蒸気洩れを防ぐためのプレスによる圧縮により変形が見られたものの、表



面割れ、内部割れともほとんどみられない良好な状態であった。

Fig. 2.5 Changes of the moisture content of specimen at steam temperature of 120°C.

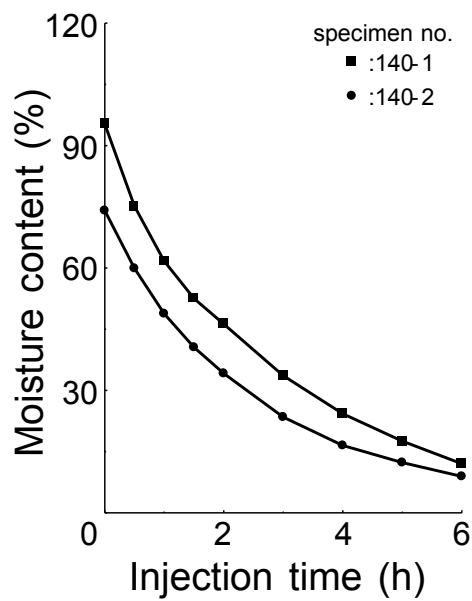


Fig. 2.6 Changes of the moisture content of specimen at steam temperature of 140°C.

### 2.3.3 含水率分布

Fig. 2.5 に示した 2 体の試験体の乾燥前後の断面における含水率分布を Fig. 2.7 に示した。乾燥前の含水率分布が大きく異なる試験体であったが、乾燥後にはインサイジング穴と直交方向、平行方向とも概ね緩やかな含水率傾斜となった。インサイジング穴と直交方向の分布には、表面付近に含水率の高い部分が認められたが、これは側面から 10 mm 程度までの部分を蒸気洩れを防ぐために、テフロンシートで覆ったことで、蒸気が流れなかったことによるものである。この傾向は蒸気温度 140 °C においても同様であり、蒸気噴射乾燥では、外部から内部まで均一な加熱が行えるという特徴が、乾燥後の表層と内部の含水率差が小さくなる傾向から裏付けられた。

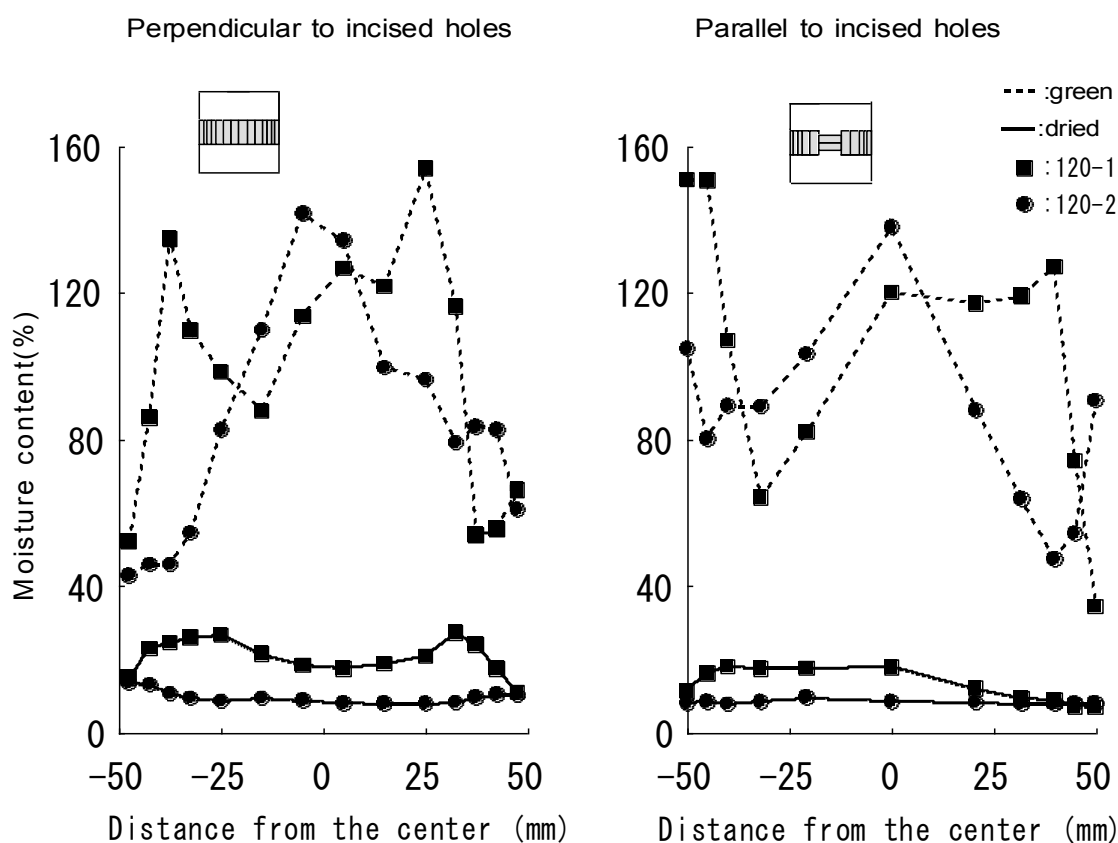


Fig. 2.7 Distribution change of moisture content. (10 hours drying by 120°C steam)

## 2.4 結言

インサイジング密度を 5000 と 10000 個/m<sup>2</sup>で貫通穴をあけるレーザーインサイジングを施したスギ柱材に 120, 140, 160 °C の飽和蒸気を噴射し、材温変化、含水率変化、含水率分布を調べ、以下の結果を得た。

1) 蒸気噴射により材温が上昇し、一定となるまでに、インサイジング密度 5000 個/m<sup>2</sup>、蒸気温

度 120 °C の条件で最も時間を要したとは言え、20 分以内で到達できたこと、160 °C ではその時間がわずかに数十秒しかかからなかったことから、蒸気噴射による加熱能力の高さが明らかに出来た。その際の材温は、蒸気温度よりも数°C から 10 °C 程度低く、蒸気温度が高いほど材温との差が大きい結果となった。このことから、噴射された蒸気によって、加熱・加圧され沸騰する試験体中の自由水は、噴射蒸気圧よりもわずかに低い圧力で沸騰状態にあることが示唆された。

2) 蒸気を連続して噴射し、乾燥を行った結果、蒸気温度 120 °C では 10 時間、140 °C では 6 時間で 15 % 以下まで、表面割れ、内部割れともほとんど見られない状態で乾燥することができた。

3) 蒸気噴射乾燥法は、材全体を均一に加熱できることから、乾燥後の表層と内部の含水率差を小さくできる優れた乾燥法であることが分かった。

以上のことから、レーザーサイジング材の蒸気噴射乾燥は、スギ心持ち柱材の急速乾燥法として有効であることが明らかになった。今後の課題は、過熱蒸気を用いた場合の挙動を明らかにすることや他の樹種への適用の可否について調べることである。

## 第3章 柱材への保存処理薬剤の減圧加圧注入

### 3.1 緒言

木材に防腐剤をより確実に注入するための前処理として、爪状の刃物を10～15 mm 圧入するインサイジングが行われている。この方法では、刃物の圧入深さ程度にしか薬液を木材中に浸潤させることができず、干割れなどで薬液浸潤深さ以上の大きな割れが生じた場合に、その部分すなわち内部から先に腐朽することが多い。また木材に刃物で損傷を与えることによる強度低下が大きく、高密度のインサイジングを必要とする難注入材等の場合には、必要な密度のインサイジングを施すことができず、十分な薬液の浸潤が得ることができない現状にある。このような問題を解決し、薬液の持つ耐朽性能を十分に発揮させるには、木材の損傷が少なく、希望の深さまでのインサイジングが可能な方法の開発が望まれる。これに応じて、ニードルインサイジング<sup>30-31)</sup>やレーザインサイジング<sup>4-6)</sup>の研究が行われてきているが、現在のところインサイジング深さは30 mm 程度にしか過ぎない。そこで、後者の方法に着目し、CO<sub>2</sub> レーザ光の木材への照射条件を検討することにより、100 mm 程度までの任意の深さでピンホールをあける技術を確立した。このような細く深い穴を通して薬液が注入できるならば、例えば柱材の中心部まで薬液の浸潤が得られるばかりでなく、インサイジング面を現状の4側面よりも少なくできる可能性もでてくる。また、レーザインサイジングは材料に機械的な力が加わらない非接触加工なので、インサイジングによる付随的な木材の破壊を伴わずに穴の間隔がかなり狭いインサイジングが行えるという利点もある。そこで本研究では、わが国在来の軸組工法の構造用材として用いられる柱材への保存処理を目的とし、難注入材を含めたスギ、ヒノキ、ベイマツ、ベイツガの4樹種の柱材に刃物インサイジングと2通りのレーザインサイジング方法によって柱材にインサイジングを施し、防腐・防蟻処理を行って、薬液の注入量と浸潤断面積率を測定し、それらのインサイジング方法の比較・検討を行った。

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 単一穴からの薬液浸潤実験

インサイジングパターンを決定するためには、まず、単一穴からの薬液の浸潤の程度を知る必要がある。そこで、ウレタン樹脂接着剤(商品名 オーシカダイナ 7020B)で全面をシールしたスギ(*Cryptomeria japonica* D.Don)、ヒノキ(*Chamaecyparis obtusa* Endl.)、ベイマツ(*Pseudotsuga menziesii* Franco)、ベイツガ(*Tuga heterophylla* Sarg.)の96 mm×96 mm×L500 mmの試験体(各樹

種 2 本ずつ)に、Table 3.1 に示した条件で単一穴をあけ、低毒性防腐・防蟻剤であるナフテン酸亜鉛(商品名 ニッサンクリーンII 認定番号 B-5002)を乾式法により注入した。注入条件は前排气減圧を 720 mmHg、窒素ガスによる加圧を 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>(一定)で 30 分、後排气は無しとした。その後、チップソーを用いてレーザーによる穴の中心軸を含む木口面を切り出し、キシレノールオレンジ(0.05 % W/V)でその面を呈色し、単一穴における繊維直交方向の浸潤長を測定した。次に、表面から深さ 10 mm 毎の穴に垂直な面で鋸断により縦断面を調整し、呈色後、繊維方向の浸潤長を測定した。

Table 3.1 Irradiating condition

Species	Power (W)	Irradiation time (ms)
Japanese cedar	1200	260
Japanese cypress	1200	170
Douglas fir	1200	190
Western hemlock	1200	200

Legend: focal length 20 inch, defocus length -20 mm

### 3.2.2 柱材全体へのインサイジングおよび薬液注入

#### 3.2.2.1 インサイジング

CO<sub>2</sub> レーザの照射条件および樹種は単一穴の場合と同じとし、90 mm×90 mm×L800 mm の柱材を各樹種につき 12 本用意した。試験体の内訳は各樹種ともそれぞれレーザーインサイジング用に 8 本、刃物インサイジング用に 2 本、インサイジングを施さないコントロール用に 2 本ずつとした。

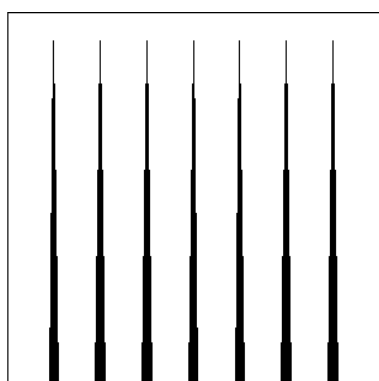
レーザーインサイジング用の試験体 8 本の内訳は、1 側面から反対の面に達しない程度にインサイジングを行い、1 面のみからのインサイジングで薬剤を材全体に浸潤させることを期待した一面型インサイジング用を 4 本、隣合う 2 側面のそれぞれの稜線に近い帯域から反対側の面に達しない深さまでインサイジングすることによって、加工面は 2 面に限られるが刃物インサイジングのような浸潤状態(シェル構造)が得られ、かつ任意に浸潤層の厚さを調節することを期待したシェル型インサイジング用に 4 本ずつとした。2 通りのインサイジング法のための試験体は Table 3.2 に示した密度用とその半分の密度用にそれぞれ 2 本ずつ供試した。なお、シェル型インサイ



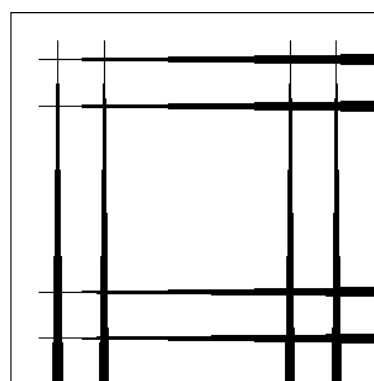
ジングは両側面から 30mm の範囲にインサイジングを行った。一面型インサイジングとシェル型インサイジングを行った柱材の断面の模式図を Fig. 3.1 に示した。

Table 3.2 Incising density and distance of incised holes

Species	Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )	Distance (mm)	
		a	b
Japanese cedar	5.0	100	8
Japanese cypress	5.0	100	8
Weastern hemlock	6.7	100	6
Douglas fir	44.4	15	6



Incised from one face



Incised from two faces (shell type)

Fig. 3.1 Two types of incising

刃物インサイジングは Table 3.3 に示した条件で 4 側面全てに施した。

Table 3.3 Condition of knife incising

Type	ZE-4C(Kikukawa)
Knife thickness (mm)	3
Diameter of knife circle (mm)	190
Incise depth (mm)	10
Number of axis	4
Feed speed (m/min)	20
Capacity (number/hour)	360
Incising density (holes/m <sup>2</sup> )	3463

### 3.2.3 薬剤の注入処理

今回使用した処理装置は工場で用いられている乾式処理装置で、その主な仕様は以下の通りである。

注薬缶: 1500 φ × 9000(l) 容量: 16 m<sup>3</sup>

耐圧 0 mmHg ~ 10 kgf/cm<sup>2</sup>

貯蔵槽: 1500 φ × 8164(l) 14.4 m<sup>3</sup>

計量槽: 1000 φ × 1950(l) 1.5 m<sup>3</sup>

圧入ポンプ: 形式 多段渦巻ポンプ

水量 × 揚程 25(l/min) × 15 kgf/cm<sup>2</sup>

真空ポンプ: 形式 水封式(ナッシュ型)

最大排気量 8.92 m<sup>3</sup>/min

封水量 32(l/min)

すべての試験体の両木口面をウレタン樹脂接着剤でシールし、シール剤硬化後、重量と含水率を測定し、ナフテン酸亜鉛(Zn として 0.39% W/V)を加圧注入した。前排気減圧 690 mmHg(減圧時間は到達まで)、加圧 2.5~5.0 kgf/cm<sup>2</sup>で 15 分、返液後缶外で重量測定を行い、再度缶内に入

れて、1時間ずつ断続的に合計約4時間の後排気を減圧600～700 mmHgの条件で行った。その後、水分が缶出しの工程で材表面に付着したため、次の作業に支障がない程度に風乾した。

### 3.2.4 注入量および浸潤断面積率

注入量は注入前後の重量を測定し、その差から求めた。

注入を終えた試験体の材端から長さ200 mmの箇所をチップソーで鋸断し、その断面(木口面)について浸潤面積を測定した。測定方法は、鋸断面にキシレノールオレンジを噴霧して、ナフテン酸亜鉛が浸潤した部分を発色させ、発色した部分と反応が見られなかった部分の境界を後の測定を容易にするために速やかにその輪郭を濃い鉛筆でトレースした。複写機にて呈色面を複写し、そのコピー上でデジタルプランイメーター(内田洋行株式会社製 KP-80N)を用いて浸潤面積を測定した。計測は3回行い、その平均値を浸潤面積とした。なお切り落とした長さ200 mmの部分を除く残りの長さ600 mmの部分は鋸断面をシールした後に学内に設置して暴露試験を開始した。

浸潤断面積率は次式により算出した。

$$\text{浸潤断面積率(\%)} = \frac{\text{浸潤面積}}{\text{木口面全体の面積}} \times 100$$

## 3.3 結果および考察

### 3.3.1 インサイジング穴の状態

レーザーインサイジングの穴の試験体表面での直径は各樹種とも1.5 mm前後であり、樹種間に差は認められなかった。しかし穴の深さは樹種間で大きな差があり、深さ85 mmを目標とした照射条件に対して、スギ、ヒノキではほとんどの穴が85 mmを超えているが、ベイマツでは75 mm前後となった穴が大半であった。これは予備実験での試験体と本実験での試験体との間に個体のばらつきと見なされる含水率や材の密度分布等の違いがあったためと思われる。またベイツガはいずれの穴も80～85 mm程度であった。また、刃物インサイジングでは長さ10 mm、幅1 mm未満、深さ約10 mmのすじ状のインサイジング跡が認められた。

### 3.3.2 単一穴からの浸潤

樹種毎の繊維方向と繊維直交方向の浸潤長を Table 3.4、3.5 にそれぞれ示した。表中の平均値は、それぞれ 8 個のレーザによる穴の中心から各方向への薬液の浸潤長の測定値から求めた。同一樹種でも試験体が異なる場合にはある程度の差があり、特にベイマツおよびベイツガには大きな浸潤長の差が認められた。

Table 3.4 Penetrated length with along the grain

Species	Average (mm)	Minimum (mm)
Japanese cedar	over 284*	175.0
Japanese cypress	194.6	40.0
Douglas fir	77.9	3.2
Western hemlock	130.9	16.2

Legend: \*:Penetrate from incised hole to end

Table 3.5 Penetrated length with across the grain

Species	Average (mm)	Minimum (mm)
Japanese cedar	— *	— *
Japanese cypress	4.3	0.4
Douglas fir	2.4	1.1
Western hemlock	2.2	0.4

Legend: \*:inability to distinguish colored area and heartwood color

### 3.3.3 インサイジングパターンの決定

インサイジングパターンの繰り返し最小単位となるパターン(基本パターン)を Fig 3.2.に示した。縦断面でみたインサイジング穴からの薬液浸潤の形は紡錘形と見なすことができるので、繊維方向の穴の間隔はその方向の浸潤長の 2 倍(a)、繊維直交方向の繰り返しはその方向の浸潤長

の2倍(b)とすることができるが、これでは穴と穴が繊維直交方向に連なって強度的に問題となる恐れがある。そこで、図に示したようにcをaの1/4、dをbの1/4として、穴が繊維直交方向に配列すると、紡錘形の浸潤部分が丁度重なり合うように連なる状態となる。これを基本パターンとして繊維および繊維直交方向に繰り返し並べていくことによって、材全体のインサイジングパターンが完成する。単一穴からの浸潤長の結果を踏まえて、材中に薬液をくまなく浸潤させられると予想されるインサイジングパターンを決定した。基本パターンの大きさおよびインサイジング密度は既に Table 3.2 示している。しかし、これらの密度は単一穴からの浸潤長の最小値を考慮して決定したことから、過剰な密度となっていることが予想され、さらに低い密度の場合でも薬液が十分浸潤すると思われるので、Table 3.2 中のインサイジング密度の半分の密度でもインサイジングを行った。

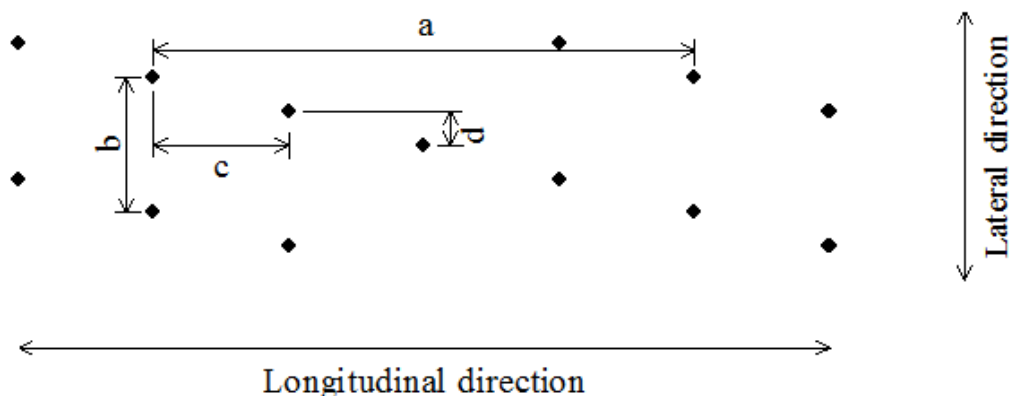


Fig. 3.2 Incising pattern

Legend: ● is the location of laser incised holes.

### 3.3.4 注入量

各樹種におけるインサイジング方法別の注入量の結果を Fig. 3.3 に示した。図中の値は、1 条件につき 2 本の試験体の平均値を取った。また横軸に記した\*は Table 3.2 の半分の密度でインサイジングした材を意味する。ヒノキの注入量は、インサイジングの種類や有無に関係なく、他の樹種に比べて多く、さらにレーザインサイジング材と刃物インサイジング及びコントロール材との差も明確に現れた。それに対してスギは、インサイジングの効果がヒノキの場合ほど顕著に認められなかったが、インサイジング密度にかかわらずレーザインサイジングを施すと、コントロールの約 1.5 倍の薬液が注入されることになる。ベイマツ及びベイツガの注入量はヒノキほど多

くないが、コントロール材や刃物インサイジング材と比較すると、インサイジング方法やインサイジング密度にかかわらずレーザインサイジング材は 2 倍近くの薬液が注入されていることが分かる。また、ベイマツはインサイジング密度や方法の違いによる浸潤状態の差(疎と密、一面型とシェル型)が最も明確に現れ、コントロール材、刃物インサイジング材、レーザインサイジング材の順に注入量が増加し、一面型とシェル型では材全体に浸潤させる目的の一面型インサイジング法の方が多くなり、さらにインサイジング密度の高い方が注入量が多くなった。このようにベイマツで大きな違いが認められたのは、ベイマツが注入が困難な材であり、コントロール材、刃物インサイジング材ではほとんど薬剤が浸潤せず、またインサイジング密度が半分になるとその影響が薬液浸潤に大きく現れたためと思われる。

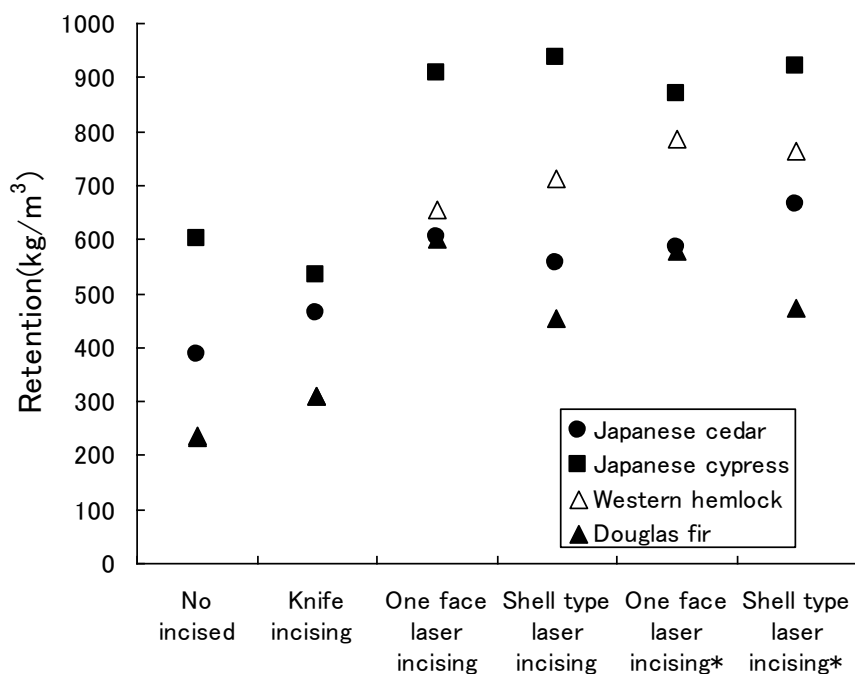


Fig. 3.3 Effect of incising on retention

Legend: \* means half incising density of listed table 3.2.

### 3.3.5 浸潤断面積率

各樹種におけるインサイジング方法別の浸潤断面積率の結果を Fig. 3.4 に示した。

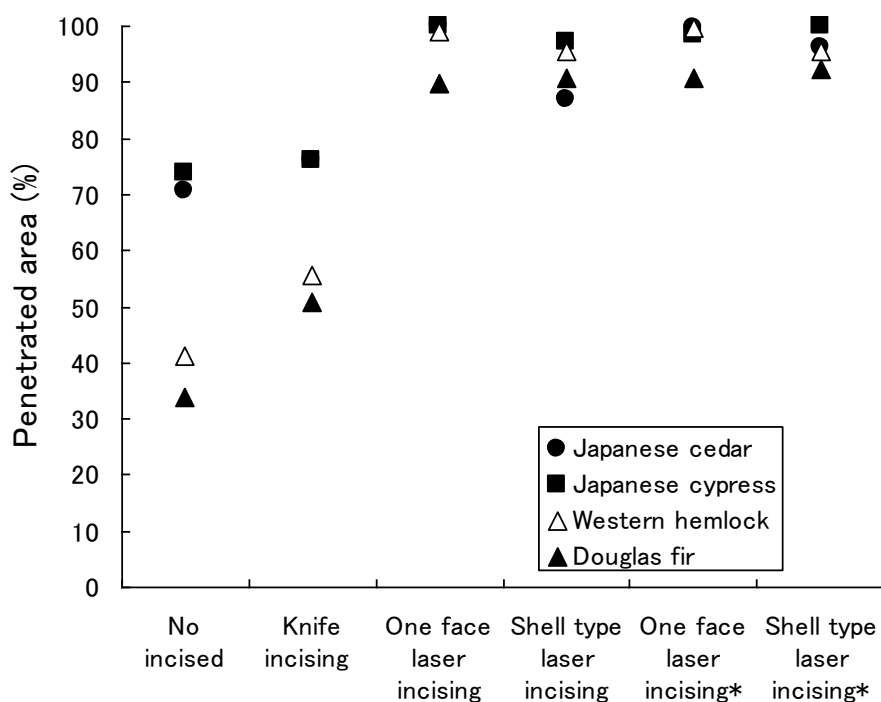


Fig. 3.4 Effect of incising on penetrated area.

Legend: see Fig. 3.3

コントロール材および刃物インサイジング材では、スギとヒノキは 70%、ベイマツとベイツガは 40 %前後であったのに対し、レーザインサイジングを行うことによって、4 樹種とも 85 %以上の浸潤断面積率となった。このことは、レーザインサイジングによって薬液の浸潤が大幅に促進されることを示している。

次に、2 種類のインサイジング法を比較すると、材全体に浸潤させる一面型インサイジングは、注入量同様、中心部は浸潤させないシェル型インサイジングよりも大きい値を示した。

しかし、インサイジング密度の差で見ると、Table 3.2 に示した密度でのインサイジングは、その半分の密度のものよりも大きな値をとると考えられたが、その傾向は認められなかった。これは、インサイジングの基本パターンを決める際に浸潤長の最小値を考慮して、若干密度を高め設定したために、その密度の半分のものでも十分な浸潤があったためと思われる。

### 3.4 結言

スギ、ヒノキ、ベイマツ、ベイツガの 4 樹種の柱材に刃物インサイジングと 2 通りのレーザイ

ンサイジングを施し防腐・防蟻処理を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) インサイジングを施さないか刃物インサイジングを施した場合に比べて、レーザーインサイジングを施すと、薬液を5割以上多く材中に浸潤させられることが分かった。
- 2) 一面型インサイジングによって材全体に、シェル型インサイジングによって材表面からある深さまでシェル構造状に薬液を浸潤させることができた。これにより、目的に応じて一面型インサイジング法とシェル型インサイジング法を使い分けることが可能となり、シェル型を用いると薬液の注入量を少なくすることができる。例えば、材が腐り難く、薬液が高価であり多く浸潤させたくない場合はある程度の浸潤層を持つシェル型インサイジング法を採用し、反対に腐り易く、割れが入りやすいなど薬液を多く浸潤させたい場合には、一面型インサイジング法を採用することができる。

ヒノキでは、薬液が多く入ったことでインサイジング密度の差があまり現れなかったことや、ベイマツにおいて予想以上に繊維直交方向の浸潤が認められないものがあったことから、基本パターン(インサイジング密度)の決定方法については、さらに検討の余地があると思われる。

また、今回の実験では、ベイマツとベイツガではインサイジング深さが目標の85 mmに達しておらず、特にベイマツの場合には、深さが75 mmまでに限られたために、照射面の反対側の表層部付近に浸潤していない層が認められた。これは試験体の含水率や比重等が予備試験のものとは異なっていたために、結果的にレーザーの照射エネルギーが不十分であったためと思われる。これからの課題としては、インサイジング密度決定方法の改善、穴の深さとレーザーの照射条件の関係をより正確に解明すること、さらにベイマツのインサイジング密度は $44.4 \times 10^3$  個/m<sup>2</sup>と非常に高く、このような高いインサイジング密度が必要とされる材があることから、インサイジング材の強度低下についての研究等が必要と思われる。

またこの実験と並行して、断面が90~95×210で長さが1.8 mのベンチ用材にレーザーインサイジングを施し、暴露試験体と同一条件で薬液注入を行い、この材を2本1組とした屋外用木製ベンチとして、本学キャンパス内に設置し、約10年間使用した。このベンチに対しても、今後評価を行う予定である。



## 第4章 パッシブ注入材の溶脱性

### 4.1 緒言

第2章において、レーザーインサイジング処理が薬剤注入の前処理として有効であること明らかにし、第3章において、レーザーインサイジング材の蒸気噴射乾燥は、スギ心持ち柱材の急速乾燥法として有効であることを明らかにした。また、蒸気噴射乾燥の特徴として、材内が噴射された蒸気によって、加熱・加圧され、自由水は、噴射蒸気圧よりもわずかに低い圧力で沸騰状態にあることが示唆された。このことは、蒸発する水分により材内の空気が排出されることが示唆されるため、水蒸気で満たされた木材を保存処理薬液中に浸漬することにより、外部から圧力を加えることなく薬液を注入することが可能となる。この注入法をパッシブ注入法と名付けた。パッシブ注入法については共同研究者である Islam らの報告があり<sup>32-36)</sup>、現在最も多く用いられ、かつ効果的な方法である減圧加圧法との比較においても有意差が見られない有効な注入法であるとされている。また、レーザーインサイジングによる穴を乾燥、薬剤注入と2回利用することになり、その点でも有用である。

この章ではパッシブ注入法を用いて保存処理薬剤を注入し、注入材の溶脱性を減圧加圧注入法との比較を行った。

### 4.2 実験

#### 4.2.1 材料

供試材には、密度が高く、きわめて注入性の低いバングラデシュ産の広葉樹である Sundri(*Heritiera fomes* Buch. -Ham.) の心材部(120×120×650 mm, 0.85g/cm<sup>3</sup>, 平均含水率 25%)を用いた。CO<sub>2</sub>レーザ(丸紅ロフィン(株)、RS-1700-SM)を用いて、120 mm を貫通する穴あけを Fig.4.1 に示したパターンを用いて、インサイジング密度 10000 個/m<sup>2</sup>として行った。なお、両木口は注入の際の薬剤浸透を防ぐため、インサイジング終了後ウレタン樹脂にてシールを施した。

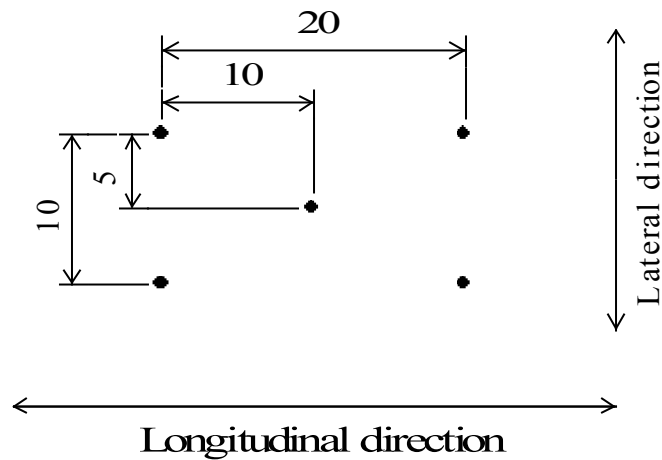


Fig. 4.1 Incising pattern used in this experiment.

Legend: ● is the location of laser incised holes.

#### 4.2.2 保存処理薬液注入

パンプ注入は小型蒸気噴射プレス(北川精機(株)、VH2-1449)を用いて、次の通りに行った。まず、110 °Cの飽和蒸気を120 °Cの熱盤により加熱し、20分間の蒸気噴射を行った後に重量測定を行い、直ちに1.03%の銅-アズール溶液中に12時間浸漬した。

減圧加圧注入は、1.03%の銅-アズール溶液中に浸漬し、で2.7 kPaで前排気を20分行った後に980.7 kPaで5時間30分の加圧を行い、除圧後2.7 kPaで10分間の後排気を行った。

#### 4.2.3 評価方法

薬剤保持量はそれぞれの注入法において、注入前後の質量差と薬液濃度から求めた。注入後の試験体は室内にて4週間養生した後に、試験体中央部から浸潤面積率測定用と溶脱試験用の試験体をそれぞれ切り出した。

浸潤面積の測定は、測定面積を120×120 mmとし、木口面およびインサイジングを施した面からの深さが0, 30, 60, 90, 120 mmのそれぞれの断面において行った。浸潤断面積測定用試験体を切り出した後に全乾状態とし、その後木口面についてはベルトサンダーで、その他の面については自動一面鉋盤を用いて仕上げ、クロムアズロール S を噴霧して呈色し、スキャナー(Epson, GT-9800F)を用いて取り込み、浸潤面積率を求めた。

溶脱試験はJIS K 1571<sup>38)</sup>の耐候操作に準じて行い、耐候操作による質量減少率を溶脱率とした。

### 4.3 結果と考察

#### 4.3.1 薬剤保持量と浸潤面積率

パッシブ注入と減圧加圧法における薬剤保持量の結果を Fig.4.2 に示した。わずかに減圧加圧注入法の方が高い値を示したが、両者の差に有意差は認められなかった。

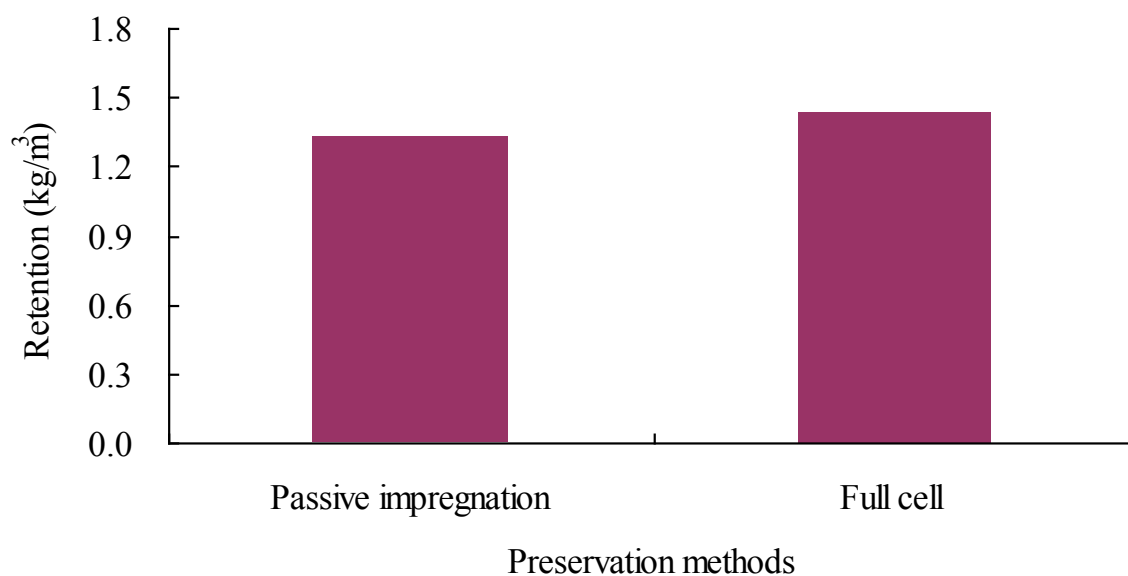


Fig. 4.2 Retention of preservative treated by passive impregnation and full cell methods.

浸潤面積率の結果を Fig.4.3 に示した。全ての面においてパッシブ注入法における浸潤面積率が高い結果となった。注入量に差が見られないことから、両者では薬剤の分布状態が異なり、パッシブ注入法では材内で薬剤が拡散し低濃度となることで、広範囲に薬剤が分布している可能性が示唆された。

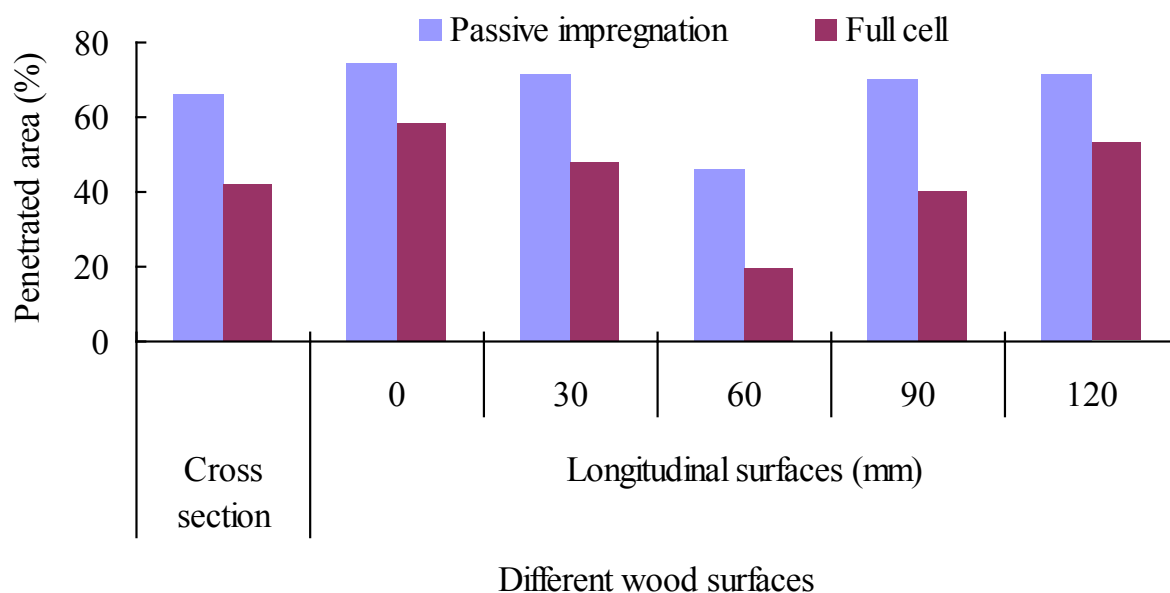


Fig. 4.3 Penetration of preservative on different surfaces of the wood treated by passive impregnation and full cell methods.

#### 4.3.2 薬剤の溶脱性

パッシブ注入と減圧加圧法における耐候操作による溶脱率を Fig.4.4 に示した。両者には有意な差が認められ、パッシブ注入によるものの方が溶脱が少ない結果となった。このことは処理材を外構部材等に用いる場合には大きな利点となる。この理由としては、浸潤面積率の結果からも示唆されたように、パッシブ注入では薬剤が低濃度で広範囲に分布していることが寄与しているものと考えられる。しかしながら、今回は呈色反応しか行っていないため、濃度分布を含めた蛍光 X 線分析によるマッピング等を行い、詳細に検討する必要がある。

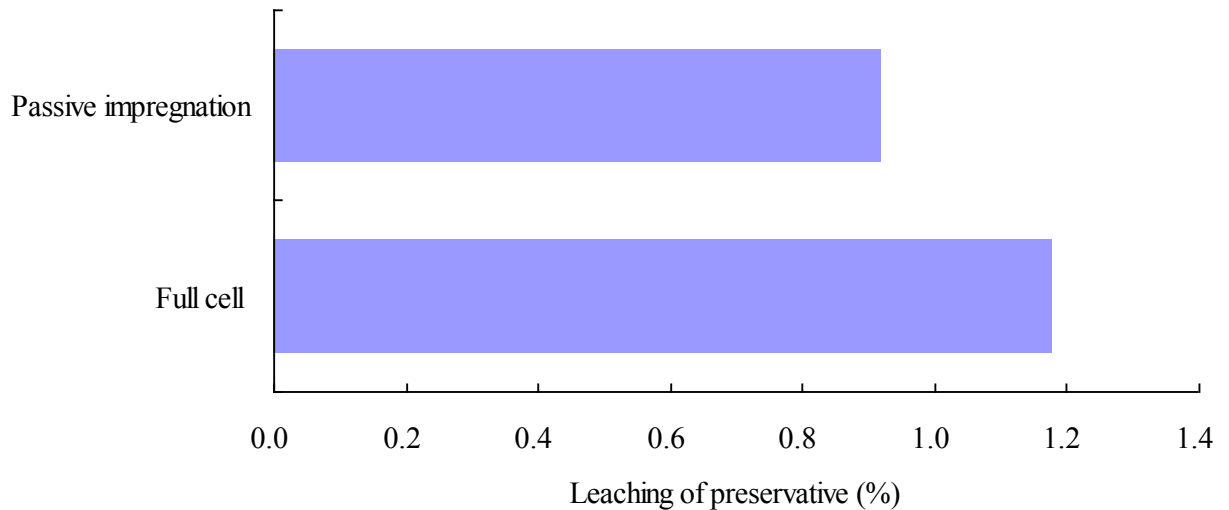


Fig. 4.4 Leaching of preservative from the wood treated by passive impregnation and full cell methods.

#### 4.4 結言

密度が高く、きわめて注入性の低いバングラデシュ産の広葉樹である Sundri の心材にパッシブ注入法と減圧加圧注入法を用いて、保存処理薬剤である 1.03 %の銅-アズール溶液を注入し、その注入特性と溶脱性の比較を行った結果、以下の結果を得た。

- 1) 両者の注入量には差は認められないが、浸潤面積率においてはパッシブ注入法の方が高くなった。
- 2) 耐候操作に伴う溶脱率はパッシブ注入法の方が低くなった。
- 3) これらの理由として、薬剤の分布状態が異なり、パッシブ注入では薬剤が低濃度で広範囲に分布していることが示唆された。

以上のことから、パッシブ注入法は減圧加圧方と比べて薬剤の溶脱性が低く、外構部材等に用いる場合に有効な注入法である可能性がある。しかし、今後、濃度分布を含めた蛍光 X 線分析によるマッピングや耐朽試験等を行い、詳細に検討する必要がある。

## 第5章 パッシブ注入材の蒸気噴射による再乾燥

### 5.1 はじめに

第4章において、レーザインサイジング材のパッシブ注入法が減圧加圧法と比べて薬剤の溶脱性が低く、外構部材等に用いる場合に有効な注入法である可能性があることを明らかにした。木材に水溶性の保存処理薬剤を注入した場合には、含水率が上昇するため、再乾燥が必要となる。保存処理木材の再乾燥に関する研究はいくつか行われているが<sup>39-42)</sup>、これらは主に処理材の力学特性変化に注目したものであり、乾燥方法について検討したものはない。そこで、この章では、パッシブ注入法を用いて材内部まで薬液を浸透させた処理材を、第2章で述べた蒸気噴射乾燥と天然乾燥を用いて再乾燥し、両者の比較を行った。

### 5.2 実験

#### 5.2.1 材料

供試材には心持ちで背割りのないスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)の柱材(120×120×4000 mm)の人工乾燥材(平均含水率13%)と生材(平均含水率115%)をそれぞれ3本用いた。各供試材から650 mmの試験体を4体ずつ、合計24体切り出した。CO<sub>2</sub>レーザ(丸紅ロフィン(株)、RS-1700-SM)を用いて、120 mmを貫通する穴あけをFig. 5.1に示したパターンを用いて、インサイジング密度2500個/m<sup>2</sup>として行った。なお、両木口は注入の際の薬剤浸透を防ぐため、インサイジング終了後ウレタン樹脂にてシールを施した。

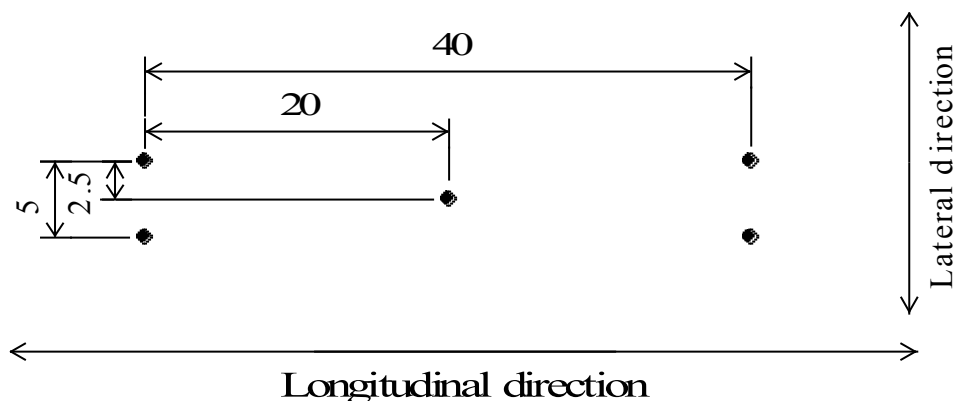


Fig. 5.1 Incising pattern used in this experiment.

Legend: ● is the location of laser incised holes.

## 5.2.2 注入と再乾燥

パッシブ注入は小型蒸気噴射プレス(北川精機(株)、VH2-1449)を用いて、次の通りに行った。まず、110℃の飽和蒸気を120℃の熱盤により加熱し、人工乾燥材については20分間の蒸気噴射を、生材については注入前の乾燥を含めて240分間の蒸気噴射を行った後に、重量測定を行い、直ちに1.03%の銅-アズール溶液中に6時間浸漬した。注入後の試験体は、半数の12本を蒸気噴射乾燥による再乾燥を行い、残りの12本は室内で30日間の天然乾燥を行った。蒸気噴射乾燥の条件は、110℃の飽和蒸気を140℃の熱盤により加熱し、16時間の蒸気噴射を行うものとした。

## 5.2.3 評価方法

薬剤保持量はそれぞれの注入法において、注入前後の質量差と薬液濃度から求め、乾燥終了後の試験体については蛍光X線分析装置(理学(株)、Rix 3000)を用いて、銅の蛍光強度の測定も行った。

注入・再乾燥後の試験体中央部から浸潤面積率測定用と耐朽性試験用試験体をそれぞれ切り出した。

浸潤面積の測定は、測定面積を120×120 mmとし、木口面およびインサイジングを施した面からの深さが0, 30, 60, 90, 120 mmのそれぞれの断面において行った。浸潤断面積測定用試験体を切り出した後に全乾状態とし、その後木口面についてはベルトサンダーで、その他の面については自動一面鉋盤を用いて仕上げ、クロムアズロール S を噴霧して呈色し、スキャナー(Epson, GT-9800F)を用いて取り込み、浸潤面積率を求めた。

耐朽性試験は JIS K 1571<sup>38)</sup>に準じて、耐候操作を行った後に、オオウズラタケ(*Fomitopsis palustris* (Berk. et Curt.) Gilbn. & Ryv. FFPRI 0507)とカワラタケ(*Trametes versicolor* (L. : Fr.) Pilát FFPRI 1030)を用いて行い、耐候操作による質量減少率を溶脱率として求め、さらに12週間培養後の質量減少率を求めた。

## 5.3 結果と考察

### 5.3.1 薬剤保持量と浸潤面積率

パッシブ注入による薬剤保持量は Fig.5.2 のようになり、人工乾燥材における薬液保持量(5.21 kg/m<sup>3</sup>)が、生材のもの(4.66 kg/m<sup>3</sup>)に比べて有意に高い値を示した。これは、パッシブ注入開始時の含水率が生材が平均38%であったのに対し、人工乾燥材が平均14%であったことによるものと思われ、パッシブ注入開始時の最適含水率を検討する必要がある。

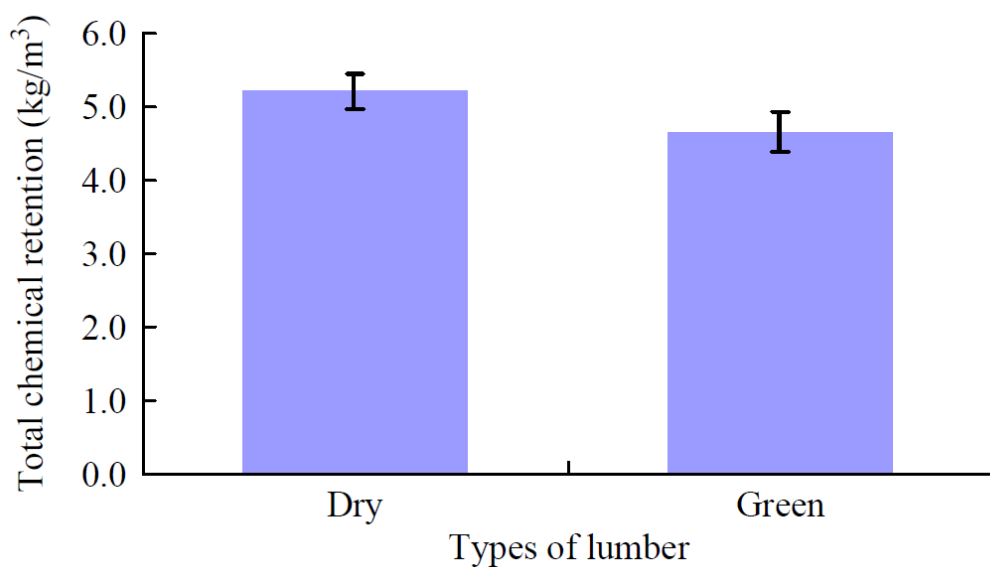


Fig.5.2 Total chemical retention in dry and green Japanese cedar lumber.

木口面における浸潤面積率と蛍光 X 線分析による銅の蛍光強度を Fig.5.3 に、インサイジング面からの深さの異なる面における浸潤面積率を Fig.5.4 に、それぞれ示した。

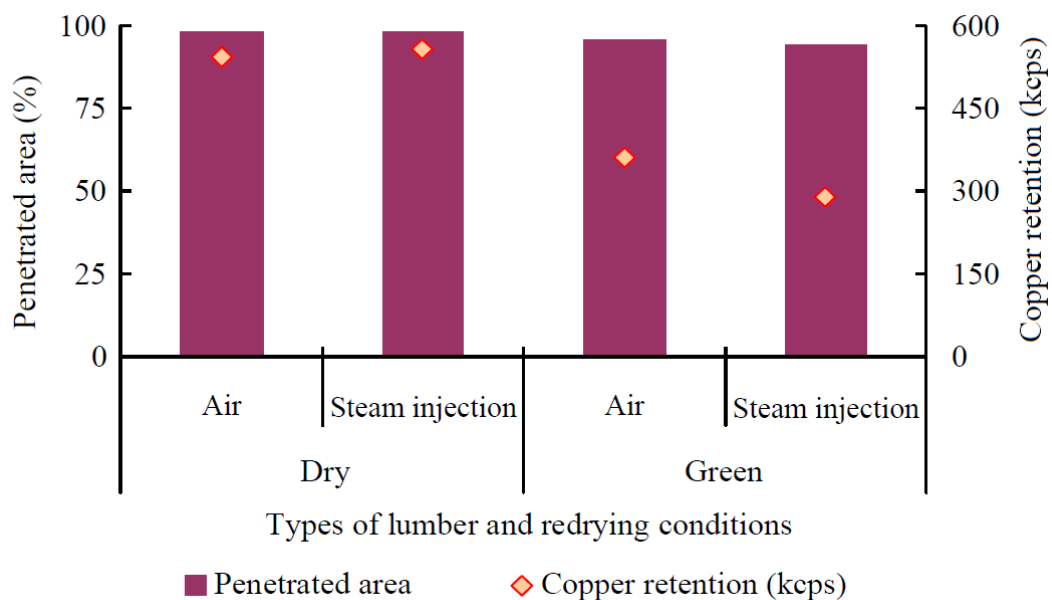


Fig.5.3 Preservative penetrated area on cross section and copper fluorescence intensity.



木口面における浸潤面積率はすべて 95 %以上と高い値となり、人工乾燥材と生材に差は認められなかった。銅の蛍光強度は人工乾燥材の方が高くなったが、これは薬剤保持量と同様にパッシブ注入開始時の含水率の違いによるものと思われる。また、再乾燥の方法による銅の蛍光強度には有意差は見られなかった。

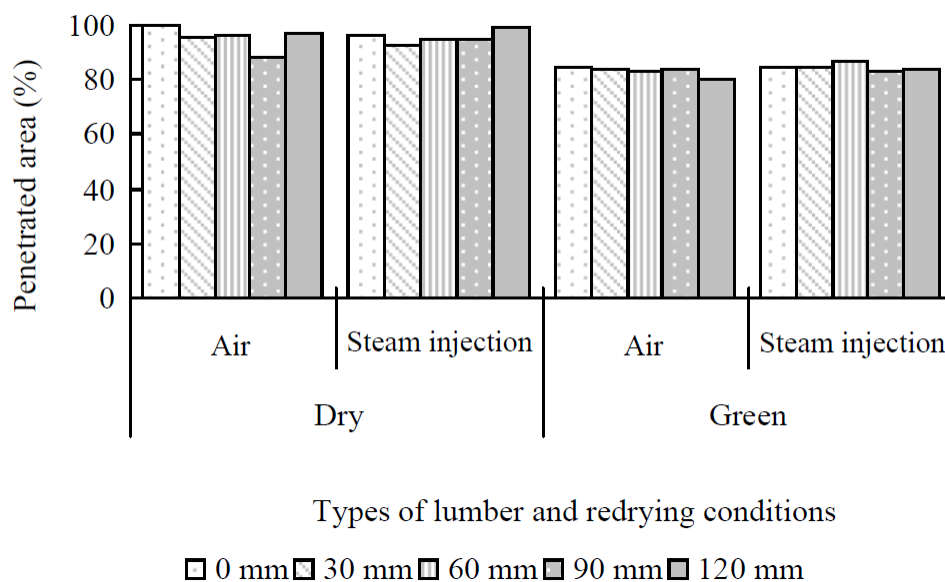


Fig.5.4 Preservative penetrated area longitudinal surfaces.

インサイジング面からの深さが 0,30,60,90,120 mm の面における浸潤面積率は、すべての面で 80 %以上と高い値となったが、インサイジング面からの深さによる違いは認められなかった。

### 5.3.2 薬剤の溶脱と耐朽性

耐候操作による溶脱率は再乾燥に天然乾燥を行ったものの方が蒸気噴射乾燥を行ったものに比べて有意に高く (Fig.5.5)、最も高かったものは生材を天然乾燥で再乾燥したもので、その溶脱率は 5.5 %であった。

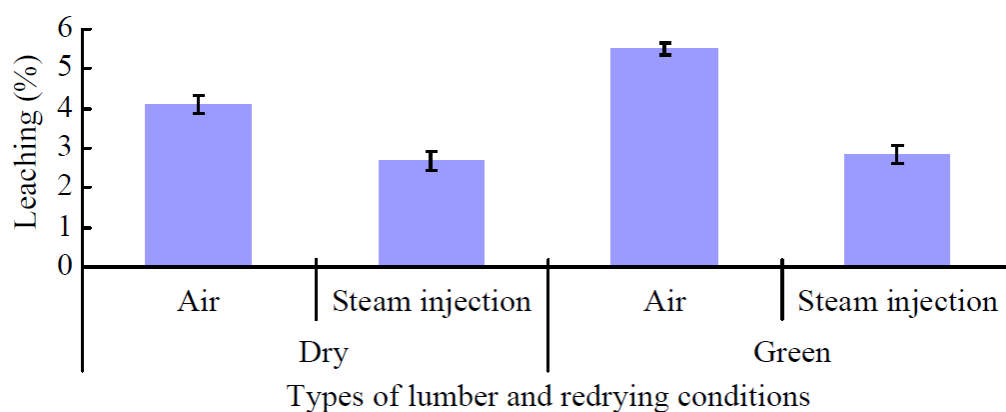


Fig.5.5 Leaching of preservative from the test material.

耐朽性試験の結果を Table 5.1 に示した。いずれの条件でも質量減少は低い値となっており、初期含水率及び再乾燥条件による違いは認められなかった。

Table 5.1 Mean mass loss of Japanese cedar lumber after 12-week exposure.

Lumber condition (initially)	Re-drying methods	Name of fungi	Mean mass loss (%)
Green	Air	<i>T. versicolor</i>	1.39(0.4)
		<i>F. palustris</i>	1.62(0.4)
	Steam injection	<i>T. versicolor</i>	1.13(0.2)
		<i>F. palustris</i>	1.51(0.5)
Kiln dried	Air	<i>T. versicolor</i>	1.12(0.3)
		<i>F. palustris</i>	1.35(0.3)
	Steam injection	<i>T. versicolor</i>	0.89(0.4)
		<i>F. palustris</i>	1.12(0.3)

Note: data in parentheses are the standard deviations.

#### 5.4 結言

レーザインサイジングを施した人工乾燥材および生材のスギ柱材に、1.03 %の銅-アズール溶液をパッシブ注入し、蒸気噴射乾燥と天然乾燥による再乾燥を行い、処理材の薬剤保持量、溶脱

性、耐朽性の比較を行った結果、蒸気噴射乾燥の方が溶脱性が低くなり、その他については両再乾燥法の上に大きな違いは見られなかった。このことから、蒸気噴射乾燥は、乾燥時間を短縮できるメリットもあることから、水溶性薬剤注入後の再乾燥法として有効であることが分かった。今後は再乾燥のために適した蒸気温度、熱盤温度などについて検討する必要がある。

## 第 6 章 柱材の部分圧縮強度に及ぼす影響

### 6.1 緒言

木材に防腐薬剤をより多くかつ確実に注入するための前処理として、爪状の刃物を 10~15 mm 圧入するインサイジングが行われている。この方法では、刃物の圧入深さ程度までしか木材中に薬剤を浸潤させることが出来ないため、その後の乾燥割れなどにより処理されていない内部が露出した場合に、その部位から腐朽が進行することがある。また、木材に刃物で損傷を与えることから、クラックの発生などにより強度低下とそのばらつきが大きく、高密度のインサイジングを必要とする難注入材では、必要な密度のインサイジングを施すことが困難で、十分な薬液の浸潤を得ることが難しい現状にある。これらの問題を解決するには、木材の損傷が少なく、希望の深さまでインサイジングが行える方法が不可欠である。そこで、ニードルインサイジングや金属加工用のレーザを用いたインサイジング<sup>4,5)</sup>が開発されてきたが、それらのインサイジング深さは高々 30 mm 程度に過ぎず、ニーズに対応できていなかった。そこで、CO<sub>2</sub>レーザの木材加工に適した光学系開発と照射条件の制御により、120 mm 前後の深さまでの任意の深さでピンホールをあける技術を開発した<sup>7)</sup>。この方法によるインサイジングを施すことにより、木材の急速乾燥<sup>29)</sup>や柱材や難注入材への注入量が多くてむらの少ない薬剤注入<sup>27,28)</sup>が可能となり、その過程で新たな注入法の開発も行い<sup>32-37)</sup>、実用化が期待されている。

レーザインサイジングは、従来のインサイジングと異なり、加工時には材料に機械的な力が加わらない熱加工であり、クラック等の欠点が少ないなど加工に伴う木材の損傷は少ない。ただし、難注入材ではかなり高いレーザインサイジング密度を必要とすることから、実用化するには強度への影響を明らかにする必要がある。しかしながら、レーザインサイジング材の強度に関する研究はほとんど行われていない。そこで、薬剤処理された木材が用いられる土台を想定し、レーザインサイジング密度が部分圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

### 6.2 実験

#### 6.2.1 材料

供試材には 4 面または 3 面無節のベイツガ(*Tsuga heterophylla* Sarg.)の柱材(約 110×110×3000 mm) 10 本を気乾状態で用い、その気乾密度、平均年輪幅および含水率を Table 6.1 に示した。1 本の柱材から長さ 400 mm の試験体 6 個を切り出し、断面を 100(R)×105(T) mm に仕上げた。これにより、供試試験体は 10 組の 60 個となる。60 個の試験体は、個体間のばらつきを軽減して

解析するために、1本の材より切断した6個の試験体に5通りのインサイジング密度とインサイジングを施さないコントロールの6条件を割り振った。

Table 6.1 Information on lumbers

Lumber No.	Air-dry density (g/cm <sup>3</sup> )	Average of ring width (mm)	Moisture content (%)
A	0.45	2.8	17.7
B	0.42	1.0	21.4
C	0.41	3.1	21.9
D	0.39	2.9	22.7
E	0.39	2.6	20.1
F	0.41	0.8	19.0
G	0.43	2.8	20.1
H	0.47	0.5	18.0
I	0.49	1.2	22.7
J	0.41	2.7	19.7

### 6.2.2 レーザインサイジング

レーザーの照射条件を調節することにより、木材に任意の深さの穴あけが可能となるが、ここでは最大の強度低下を起こすと思われる貫通穴を採用した。CO<sub>2</sub> レーザ(丸紅ロフィン(株)製、RS-1700-SM)を用いて、板目面(105×400 mm)にパルスレーザー光を照射して、100 mm を貫通する穴あけを行った。集光レンズには公称焦点距離 20 インチの ZnSe レンズを用い、レーザー出力 1500 W、パルス幅を 700 ms、焦点を照射面から 20 mm 試験体の内部に合わせてインサイジングを施した。なお、この条件による穴の直径は入り口側で 2 mm 弱、出口側では 0.5 mm 程度であった。インサイジングパターンには柱材への防腐薬剤の注入<sup>7)</sup> で用いた Fig. 6.1 に示したパターンを採用し、インサイジング密度は Table 6.2 に示したものとした。レーザーインサイジング後の試験体は、保存処理後のプレーナ仕上げを想定し、自動一面鉋盤により両側面を鉋削して 100×100 mm に仕上げ、インサイジング穴が側面に現れるように調整した。

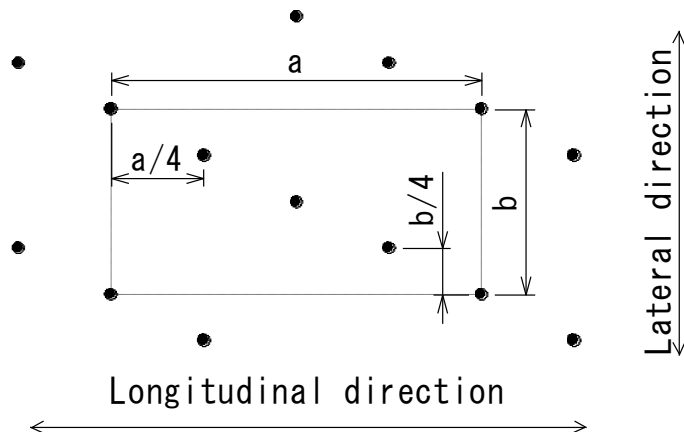


Fig. 6.1 Incising pattern used in this experiment.

Legend: ● is the location of laser incised holes.

Table 6.2 Incising density and pattern

Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )	Distance (mm)	
	A	b
2.5	200	8
10	50	8
20	40	5
40	20	5
80	12.5	4

Legend: a and b are referred in Fig. 6.2.

### 6.2.3 部分圧縮試験

部分圧縮試験に用いた強度試験機は、森林総合研究所所有のインストロン型万能試験機(TOM 5000X)で、最高荷重 10 t のロードセルを使用し、JIS Z 2101「木材の試験方法」<sup>11)</sup>に準拠して行い、辺長は実際の土台に近い 100 mm とした。試験時の試験体の変位を知るために、変位変換器

を加圧鋼板の両端に設置して、(株)東京測器研究所製自動デジタル測定器(TDS-301)で相対変位を記録し、その平均値を変位とした。加圧面はインサイジングを施した面またはそれに隣接する面とし、供試した 10 組の半数をそれぞれに割り付けた。これにより、同一条件での繰り返しは 5 回となった。インサイジング面(板目面)を加圧面とした試験体(試験体 A~E)の荷重方向はインサイジング穴と平行(「平行」と表記)となり、インサイジング面に隣接する面(まさ目面)を加圧面としたもの(試験体 F~J)の荷重方向はインサイジング穴と直交(「直交」と表記)となる。用いた加圧鋼板は 10×100×150 mm の軟鋼製で、クロスヘッドスピードは 1 mm/min とし、試験後に記録した荷重と変位から部分圧縮強度を求めた。試験時の様子を Fig. 6.2 に示した。なお、同規格では、測定項目を部分圧縮比例限度と辺長の 5 %部分圧縮強さの 2 点と定めているが、本実験ではこれらに加えて、より大きな荷重での強度を知るために、辺長の 10 %部分圧縮強さも求めた。

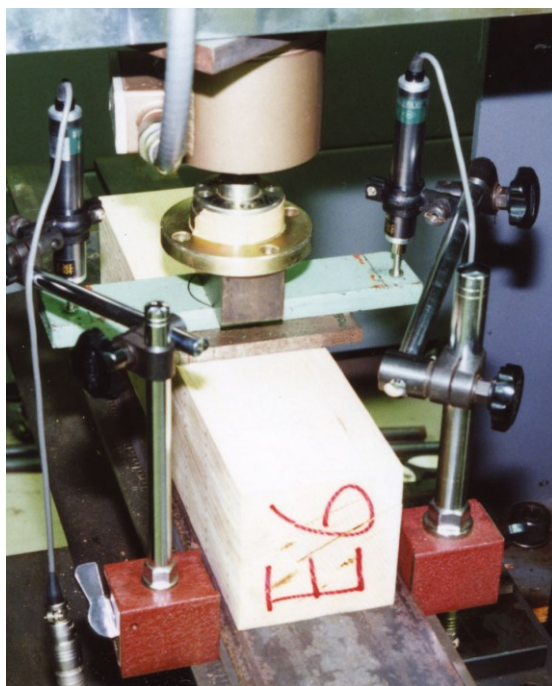


Fig. 6.2 Method of partial compression strength test.

### 6.3 結果と考察

#### 6.3.1 インサイジング密度の部分圧縮強度への影響

部分圧縮試験で得られた部分圧縮比例限度( $\sigma_{cp}$ )、辺長の 5 %部分圧縮強さ( $\sigma_{e5\%}$ )、辺長の

10 %部分圧縮強さ( $\sigma_{e10\%}$ )を、荷重方向別にインサイジング密度毎にまとめたものを、インサイジングを施さなかった試験体との強度差の検定結果と併せて、Table 6.3 に示した。インサイジング密度が部分圧縮強度に及ぼす影響については、荷重方向とインサイジング方向が平行な場合の結果を Fig. 6.3 に、両者が直交する場合の結果を Fig. 6.4 にそれぞれ示し、さらに、インサイジング密度毎の平均値を実線で、標準偏差を点線でそれぞれ図中に示した。これらから、荷重方向が平行の場合には、インサイジング密度が2 万個/m<sup>2</sup>で部分圧縮比例限度を除いて有意な強度低下が起こり始め、4 万~8 万個/m<sup>2</sup>では全ての部分圧縮強度で有意に低下することが、荷重方向が直交の場合には、8 万個/m<sup>2</sup>になると有意に低下することがそれぞれ分かった。

Table 6.3 Partial compression strength.

Loading Direction		Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )					
		0	2.5	10	20	40	80
$\sigma_{cp}$ (MPa)	Parallel	3.04	2.94	2.90	3.28	2.56*	1.80**
	Perpendicular	2.35	2.41	2.37	1.96	1.68	1.04*
$\sigma_{e5\%}$ (MPa)	Parallel	6.35	6.20	6.22	5.76*	4.88**	3.51**
	Perpendicular	5.31	5.53	5.05	4.93	3.70	2.15**
$\sigma_{e10\%}$ (MPa)	Parallel	7.41	7.35	7.05	6.64*	5.61**	3.76**
	Perpendicular	6.09	6.20	5.72	5.52	4.35	2.57**

Legend:  $\sigma_{cp}$ :Proportional limit.  $\sigma_{e5\%}$ :5% deformation.  $\sigma_{e10\%}$ :10% deformation.

\*:Significant at 5% level. \*\*:Significant at 1% level.



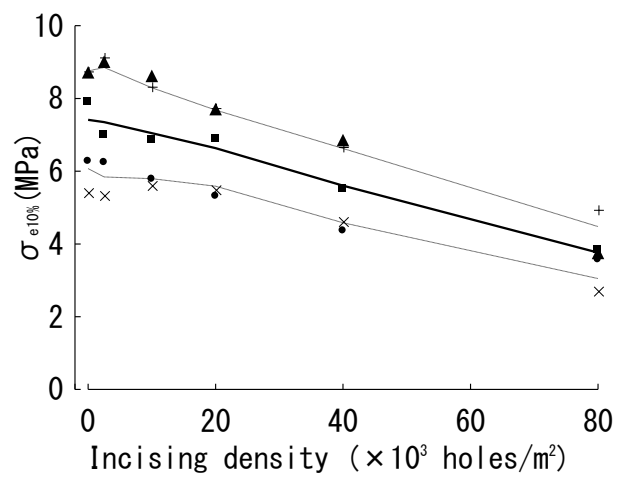
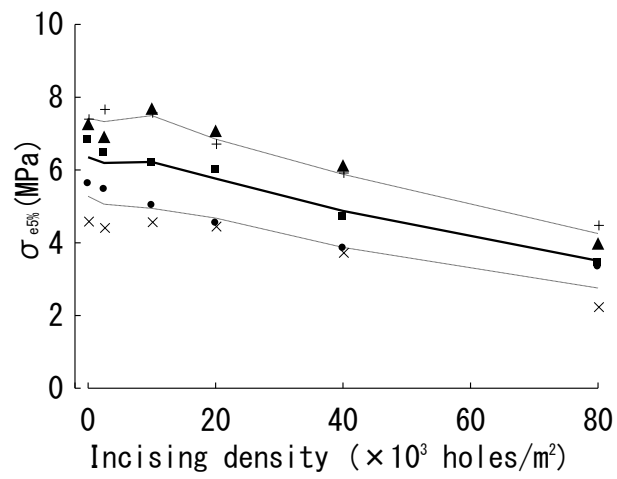
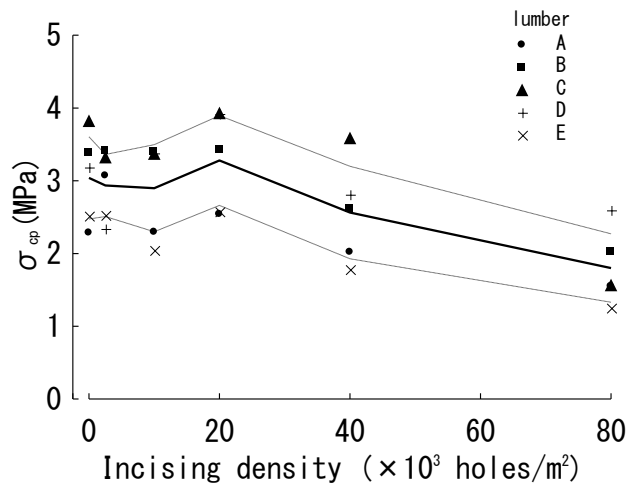


Fig. 6.3 Relationship between incising density and partial compression strength loaded parallel to incised holes.

Legend : Solid line and dotted lines express average and standard deviations, respectively.

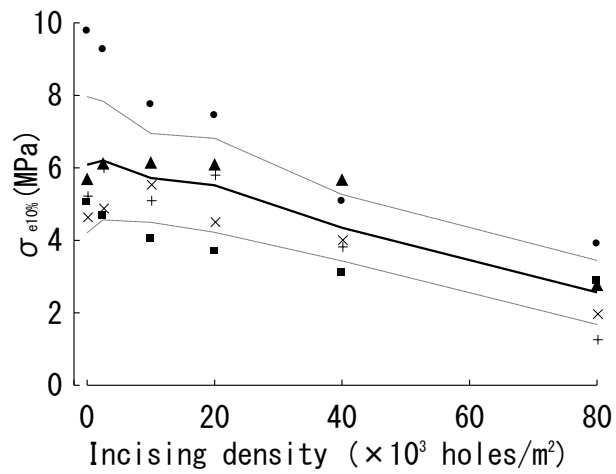
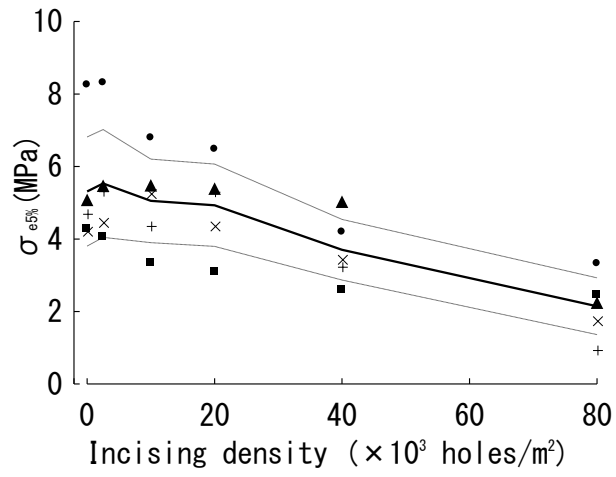
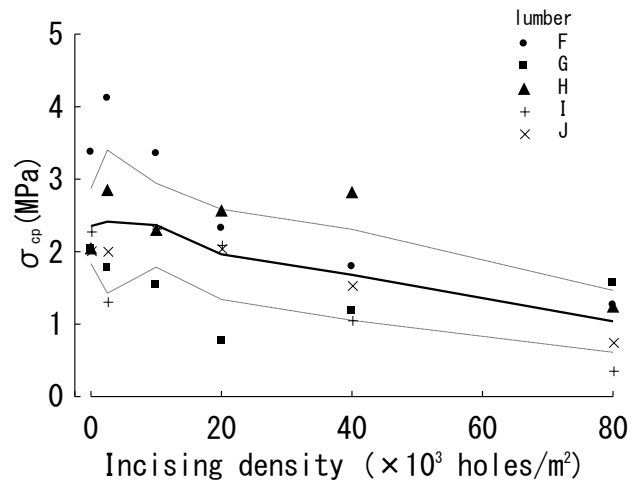


Fig. 6.4 Relationship between incising density and partial compression strength loaded perpendicular to incised holes.

Legend: See Fig. 6.3.

荷重方向が直交の場合に、インサイジング密度が 8 万個/m<sup>2</sup> になって始めて強度が低下すると判定された原因のひとつとして、インサイジングによる実質の消失が加圧面の幅方向に分布しているために、インサイジング穴を起点としてめくれあがるような形態の破壊が起きることがあげられる(Fig. 6.5)。このため圧縮試験中に加圧鋼板が傾くことが見られ、その結果、平均的な変位をとらえることができず、得られた強度値がばらついたためである。しかしながら、この現象は実際に土台として用いる場合にも起きることが考えられるので、荷重方向を直行にすることは望ましくないとと言える。以上のことから、インサイジング密度が 2 万個/m<sup>2</sup> までならば、インサイジングを行っても、部材の部分圧縮強度に有意な影響は現れと言える。また、図からも分かるように、試験体自体の個体差が大きいため、標準偏差が大きく、インサイジングによる強度低下傾向が現れ難くなっているものと思われる。そこで、インサイジングを施さなかった試験体を基準として求めた強度比に及ぼすインサイジング密度の影響を荷重方向毎に Fig.6.6、Fig.6.7 に示した。これらの図からインサイジング密度が高くなるにつれて強度が直線的に低下し、荷重方向がインサイジング方向と平行の場合は、直交の場合と比較して、標準偏差の比で 0.3~0.7 とそのばらつきが小さいことが分かった。

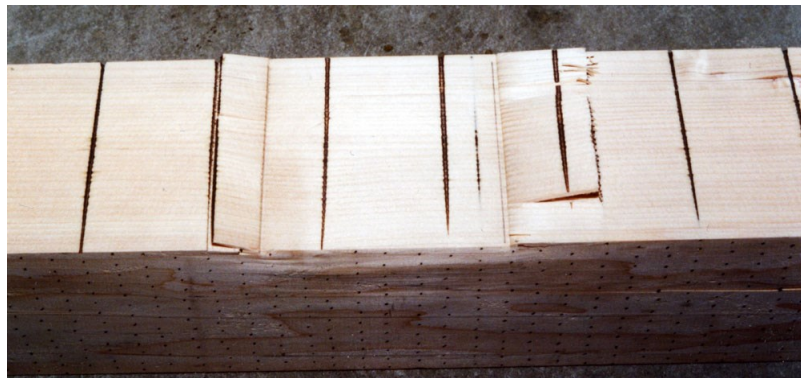


Fig. 6.5 Typical failure of partial compression strength test loaded perpendicular to incised holes.

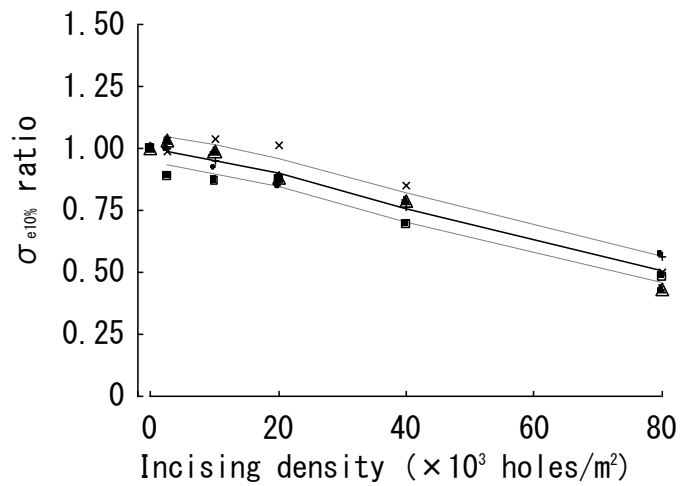
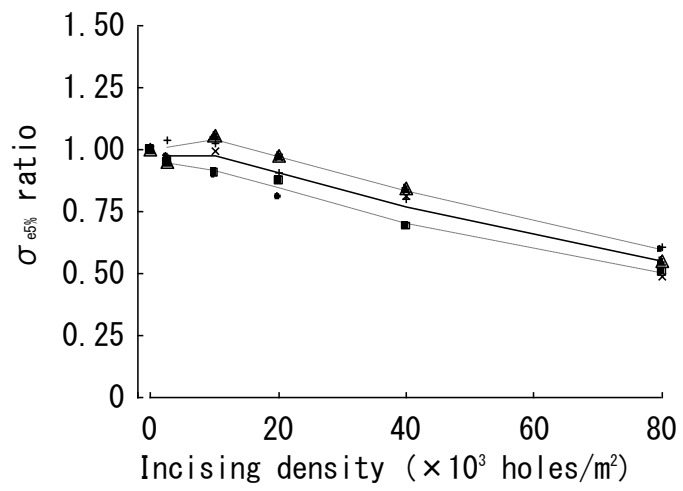
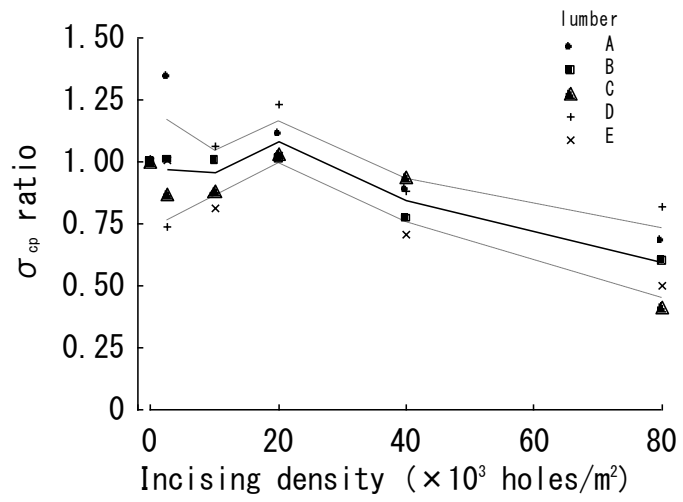


Fig. 6.6 Relationship between incising density and partial compression strength ratio loaded parallel to incised holes.

Legend: See Fig. 6.3.

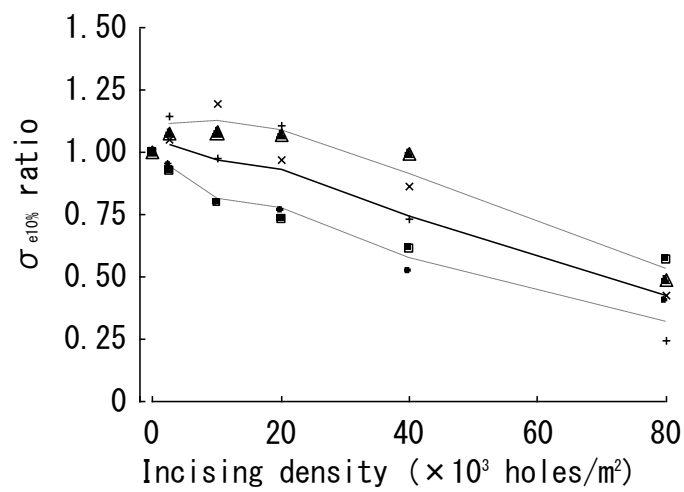
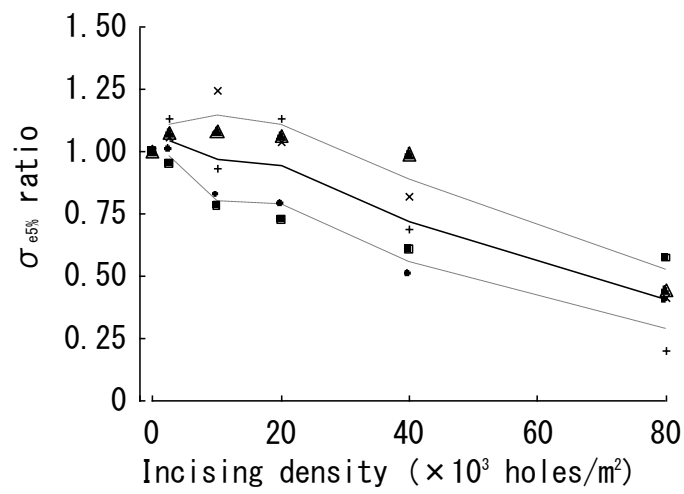
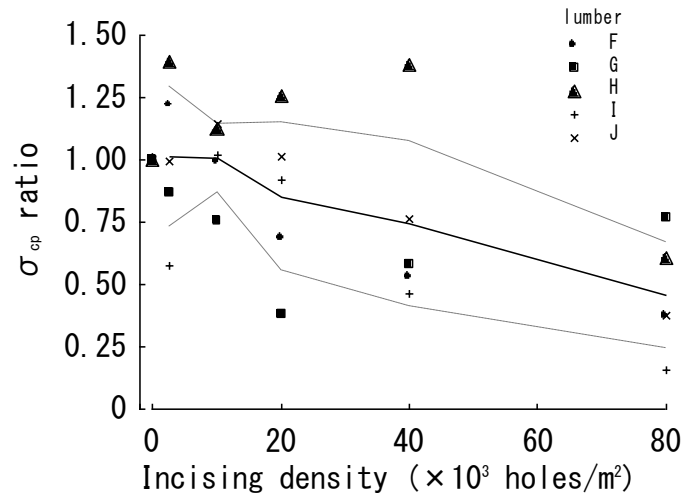


Fig. 6.7 Relationship between incising density and partial compression strength ratio loaded perpendicular to incised holes.

Legend: See Fig. 6.3.

### 6.3.2 容積重変化の部分圧縮強度への影響

インサイジング密度が高くなるにつれて強度比が直線的に低下するのは、インサイジングによって消失した実質量に関係するものと思われる。消失した実質量は試験体の容積重の低下量に相当することから、インサイジングを施さなかった試験体の容積重および強度を基準として、強度比の低下率との関係をインサイジング密度と強度比の直線関係が顕著であった辺長の 5 % 部分圧縮強度(荷重方向:平行)を例に Fig. 6.8 に示した。また、全ての条件での原点を通る直線で回帰した結果を Table 6.3 に示した。この結果から、比例限度荷重に関しては相関が低いですが、辺長の 5 % および 10 % 部分圧縮強度については、レーザインサイジングによる強度低下は容積重の減少率から予測することが可能であり、荷重方向がインサイジング方向と平行の場合は容積重減少率の約 2.0~2.2 倍、直交の場合で 2.6~2.7 倍となった。このように、同じ容積重変化の場合でも荷重方向が平行の場合の方が強度低下が小さいことが分かった。

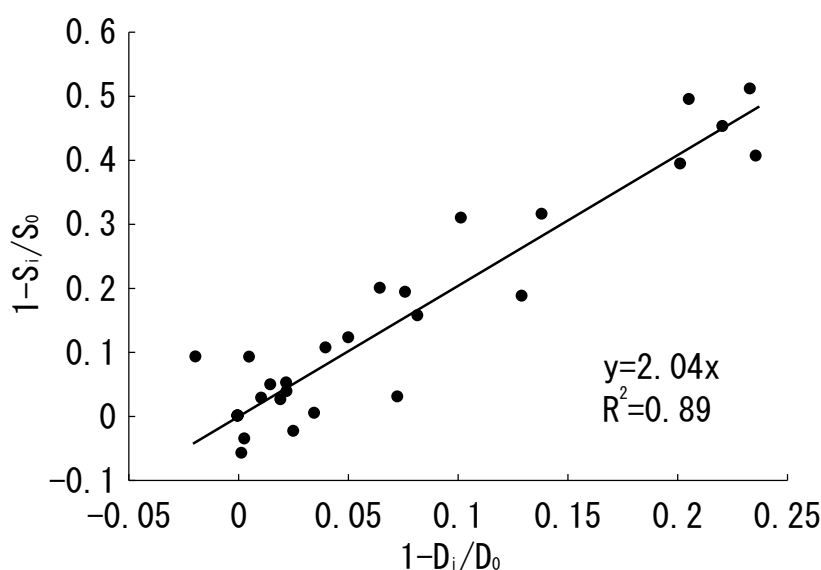


Fig. 6.8 Relationship between density change and partial compression strength change loaded to perpendicular direction.

Legend  $S_i$ :partial compression strength ( $\sigma_{e5\%}$ ) of incised lumber,  $S_0$ :partial compression strength of non-incised lumber,

$D_i$ :bulk density of incised lumber,  $D_0$ :bulk density of non-incised lumber

## 6.4 結言

ベイツガの柱材から切り出した試験体にインサイジング密度が8万個/m<sup>2</sup>までの範囲でレーザーインサイジングを施し、インサイジング面とそれに隣接する面から部分圧縮強度試験を行い、比例限度応力、辺長の5%圧縮強度、10%圧縮強度を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 2万個/m<sup>2</sup>までのインサイジング密度では、加重方向にかかわらずレーザーインサイジングは部分圧縮強度に大きな影響を及ぼすことはなかった。インサイジング密度が4万個/m<sup>2</sup>を超えると、荷重方向がインサイジング方向と平行な場合に部分圧縮強度が有意に低下し、部分圧縮強度が大きく低下することが分かった。また、その低下傾向は加重方向で異なり、インサイジング密度が8万個/m<sup>2</sup>では、全ての条件で有意な低下が認められた。
- 2) インサイジング密度が高い場合には、レーザーインサイジングによって消失した実質の量は無視できないほど容積重に影響し、インサイジング密度8万個/m<sup>2</sup>では20%以上となった。
- 3) レーザーインサイジングによる部分圧縮強度の低下は、容積重の低下に起因していると考えられ、比例限度荷重に関してはやや相関が低いものの、容積重の減少率から予測することが可能であった。荷重方向がインサイジング方向と平行の場合は最大で容積重減少率の約2.2倍、直交の場合で約2.7倍となり、同じ容積重変化の場合でも荷重方向が平行の場合の方が強度低下を引き起こし難いことが分かった。

## 第7章 柱材の曲げ強度に及ぼす影響

### 7.1 緒言

木材に保存処理薬剤や難燃処理薬剤をより多く注入するための前処理として、刃物によるインサイジングが行われている。この方法では、刃物の圧入深さに限界があり、圧入深さが大きくなると木材に与える損傷も大きくなる。そこで、木材の損傷が少なく、希望の深さまで注入するためのインサイジングとして、CO<sub>2</sub> レーザを用いたインサイジングを開発した<sup>6,7)</sup>。レーザインサイジングにより木材を急速に乾燥したり<sup>29)</sup>、難注入材などへの注入量が多くてむらの少ない薬剤注入<sup>27,28)</sup>が可能となり、その過程で新たな注入法も開発した<sup>32-37)</sup>。しかしながら、レーザインサイジング材の強度への影響に関する知見はほとんど得られていない。第6章では薬剤処理された木材が用いられる土台を想定し、レーザインサイジング密度が部分圧縮強度に及ぼす影響について検討した。その結果、インサイジング密度が4万個/m<sup>2</sup>を超えると、部分圧縮強度が明らかに低下し、その低下は容積重の減少率と相関が認められ、同じ容積重の減少でも荷重方向がインサイジング穴と平行の場合の方が強度低下は小さいことが分かった。

そこで、本論文ではレーザインサイジングが柱材の曲げ強度に及ぼす影響について検討した。

### 7.2 実験

#### 7.2.1 材料

供試材には心持ちで背割りのないスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don)の柱材(約105×105×3000 mm)の生材300本を用いた。個体間のばらつきを排除するために、予めすべての柱材をスパン長2700 mm、中央集中荷重196 Nにて載荷してヤング率を求め、ヤング率の平均値と標準偏差のグループ間差が最も小さくなるように60本ずつの5グループに分けた。このグループを密度の異なるインサイジングを施す4条件とインサイジングを施さないコントロールの5条件に割り振った。その結果はFig.7.1のようになった。



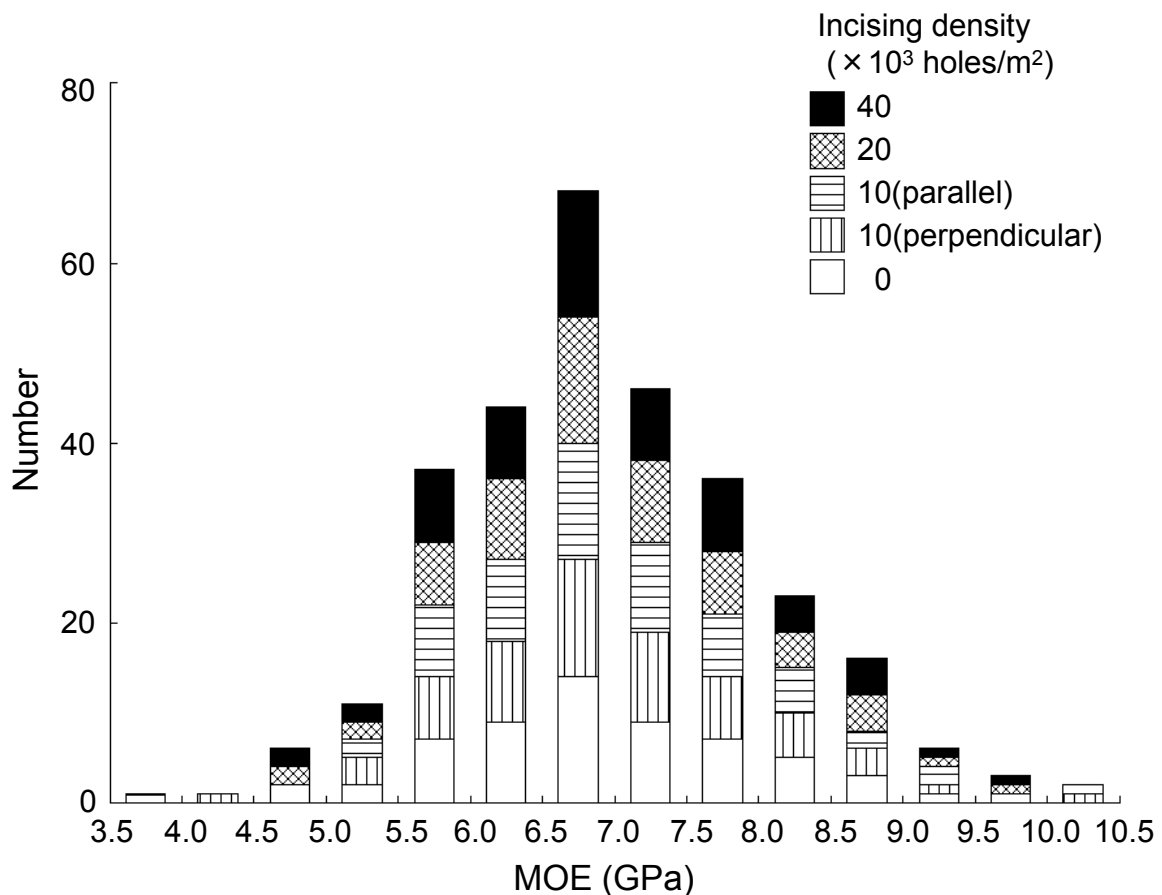


Fig. 7.1 Distribution of MOE for all samples.

### 7.2.2 レーザインサイジング

レーザの照射条件を調節することにより木材に任意の深さの穴あけが可能となるが、ここでの照射条件は最大の強度低下を起こすと思われる貫通穴があく条件を採用した。用いた CO<sub>2</sub> レーザは高速軸流型(丸紅ロフィン(株)製、RS-1700-SM)で、板目面(105×3000 mm)にパルスレーザ光を照射して、深さ 105 mm を貫通する穴あけを行った。集光レンズには公称焦点距離 20 インチの ZnSe レンズを用い、レーザ出力を 1600 W、パルス幅を 0.6~1.2 s、焦点を試験体表面から内部に 20 mm 入った位置に合わせて、材の側面から 5 mm までの範囲を除いて全面にインサイジングを施した。この条件による穴の直径はそれぞれ穴の入口側で 2 mm 弱、出口側で 0.5 mm 程度であった。インサイジングパターンには第 2 章の柱材への保存処理薬剤の注入や第 6 章で用いた Fig. 7.2 に示したパターンと同じものを採用し、そのインサイジング密度を Table 7.1 に示した。

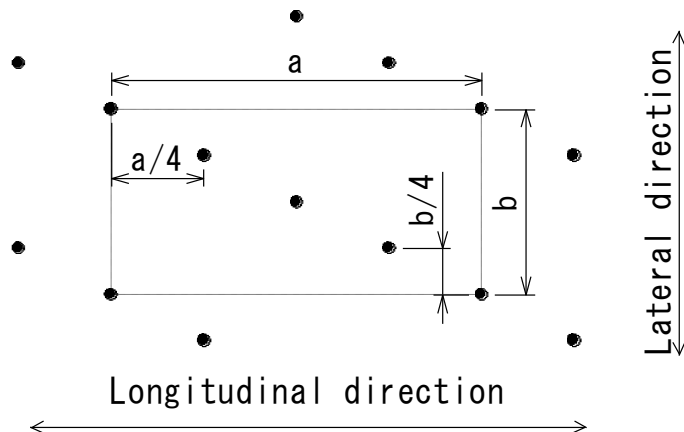


Fig. 7.2 Incising pattern used in this experiment.

Legend: ● is the location of laser incised holes.

Table 7.1 Incising density and distance of incised holes.

Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )	Distance (mm)	
	A	b
10	50	8
20	40	5
40	20	5

Legend: a and b are referred in Fig. 7.2.

### 7.2.3 曲げ強度試験

曲げ試験用の強度試験機は、森林総合研究所所有の万能引張り圧縮試験機（ミネベア(株)製、TCM1000）で、最大荷重 10 t のロードセルを使用し、スパン長 2700 mm、ロードスパン 900 mm、クロスヘッドスピード 19 mm/min とし、4 点荷重方式で行った。試験後、荷重-たわみ曲線から比例限荷重、最大荷重を読みとり、曲げヤング係数(以下、MOE という)および曲げ強さ(以下、MOR という)を算出した。インサイジング密度 1 万個/m<sup>2</sup> の試験体についてはインサイジングを

施した面あるいはインサイジング面に隣接する面をそれぞれ加圧面とする曲げ試験を行い、それ以外のインサイジング密度の試験体はインサイジングを施した面を加圧面とした曲げ試験のみ行った。インサイジング面を加圧面とした試験体の荷重方向はインサイジング穴と平行となり、インサイジング面に隣接する面を加圧面としたものの荷重方向はインサイジング穴と直交となる。インサイジング穴の直径は入口側の方が出口側より大きくなるが、今回は第6章と同様に入口側を加圧面とした。曲げ試験時の様子を Fig. 7.3 に示した。なお、含水率が MOE および MOR に影響を及ぼさないように、試験体の含水率を繊維飽和点以上となるように管理し、曲げ試験時の平均含水率は約 40 %であった。

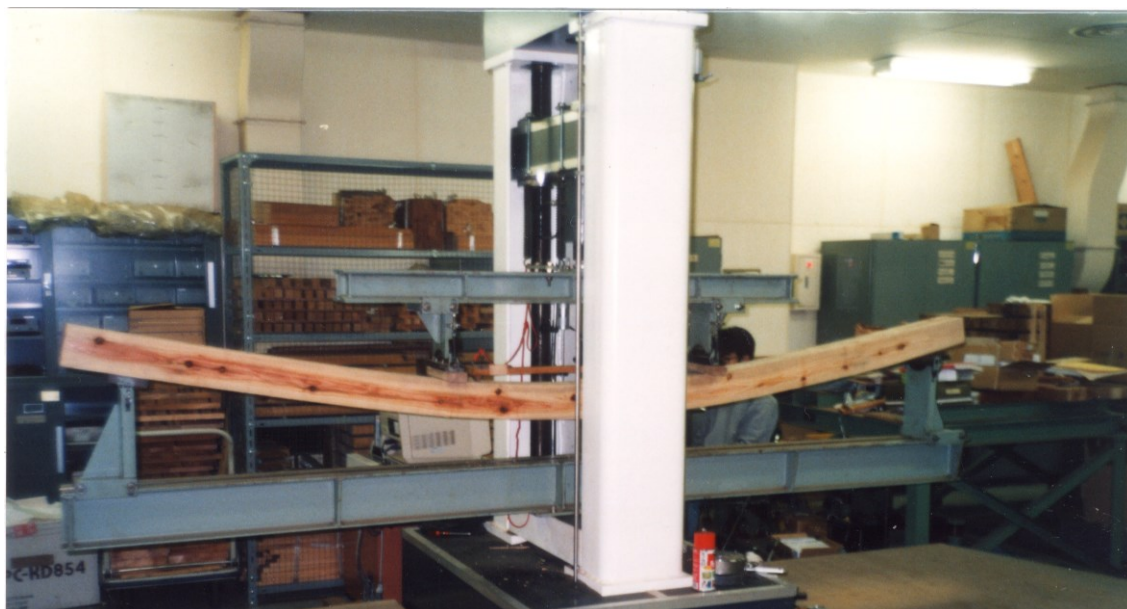


Fig. 7.3 Bending strength test.

## 7.3 結果と考察

### 7.3.1 インサイジング密度の MOE への影響

曲げ強度試験で得られた MOE のインサイジング密度による影響を Fig. 7.4. に示した。この結果から、インサイジング密度が 1 万個/m<sup>2</sup> では約 11 %、2 万個/m<sup>2</sup> では約 21 %、4 万個/m<sup>2</sup> では約 39 % とほぼ直線的に MOE が低下することが分かった。インサイジングを施したものと施さないものについて t 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意水準 1 % で平均値間に差が認められた。なお、インサイジング密度 1 万個/m<sup>2</sup> における比較では荷重方向の影響による平均

値の差は認められなかった。

インサイジングについては、製材の曲げ強さ及び曲げヤング係数の低下がおおむね1割を超えない範囲内とすることが規定されている<sup>9)</sup>ことから、インサイジングを施さなかった試験体のMOEの90%値に対してt検定を用いて平均値の差の検定を行った。その結果をTable 7.2に示した。インサイジング密度が1万個/m<sup>2</sup>の試験体のMOEは、インサイジングを施さない試験体の1割低下したものと差は認められなかったが、2万個/m<sup>2</sup>以上では有意水準1%で有意に低下することが分かった。以上のことから、レーザインサイジングを施した場合には、インサイジング密度1万個/m<sup>2</sup>以上では有意にMOEが低下し、2万個/m<sup>2</sup>以上のインサイジング密度では規定されている1割より大きなMOEの低下が起きることが明らかになったので、規定を満たすには、MOEから判断すると少なくとも2万個/m<sup>2</sup>を超えない範囲でレーザインサイジングを行う必要がある。

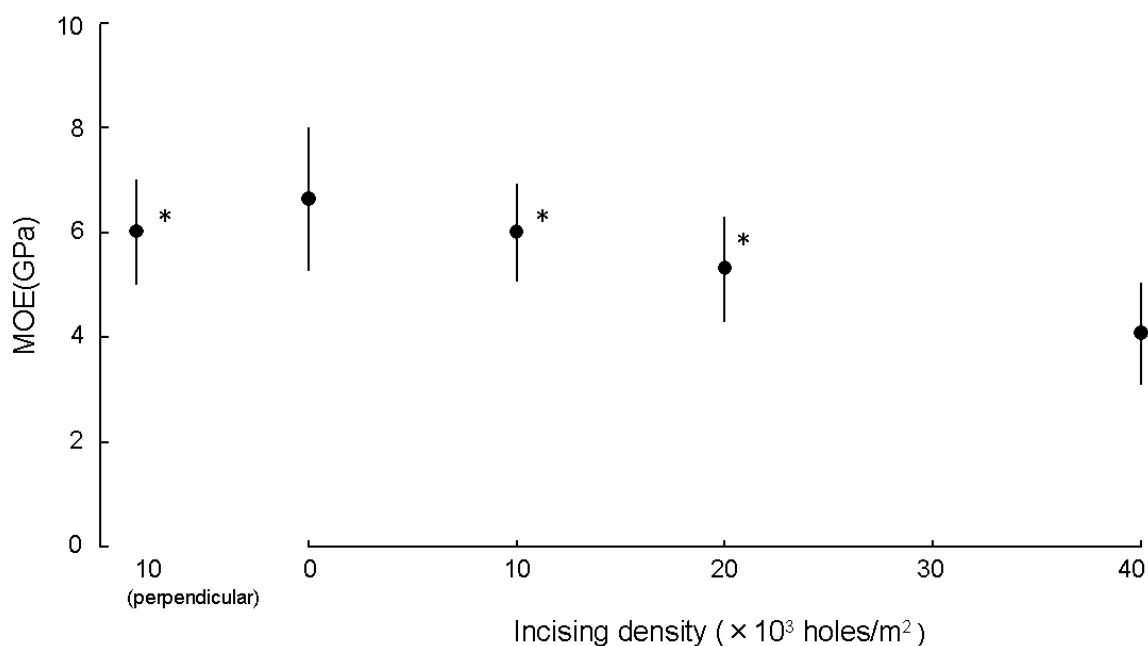


Fig. 7.4 Effect of incising density on MOE.

Legend : Symbols and vertical bars denote average and standard deviation., \*:significant at 1% level between no incised samples and incised samples.

Table 7.2 MOE of tested specimen.

	Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )				
	0 (90%)	10 (parallel)	10 (perpendicular)	20	40
MOE(GPa)	6.03	5.97	5.99	5.30*	4.08*

Legend: 0(90%): 90% value of no incised specimen, \*:Significant at 1% level.

### 7.3.2 インサイジング密度の MOR への影響

曲げ強度試験で得られた MOR のインサイジング密度への影響を Fig. 7.5 に示した。この結果からインサイジング密度が 1 万個/m<sup>2</sup>では荷重方向にかかわらず約 22~25 %、2 万個/m<sup>2</sup>では約 37 %、4 万個/m<sup>2</sup>では約 50 %と 1 万個/m<sup>2</sup>までに大きく低下し、それ以上の密度では比較的緩やかに強度が低下した。インサイジング施したものと施さないものについて t 検定を用いて平均値の差の検定を行ったところ、有意水準 1 %で平均値間に差が認められた。

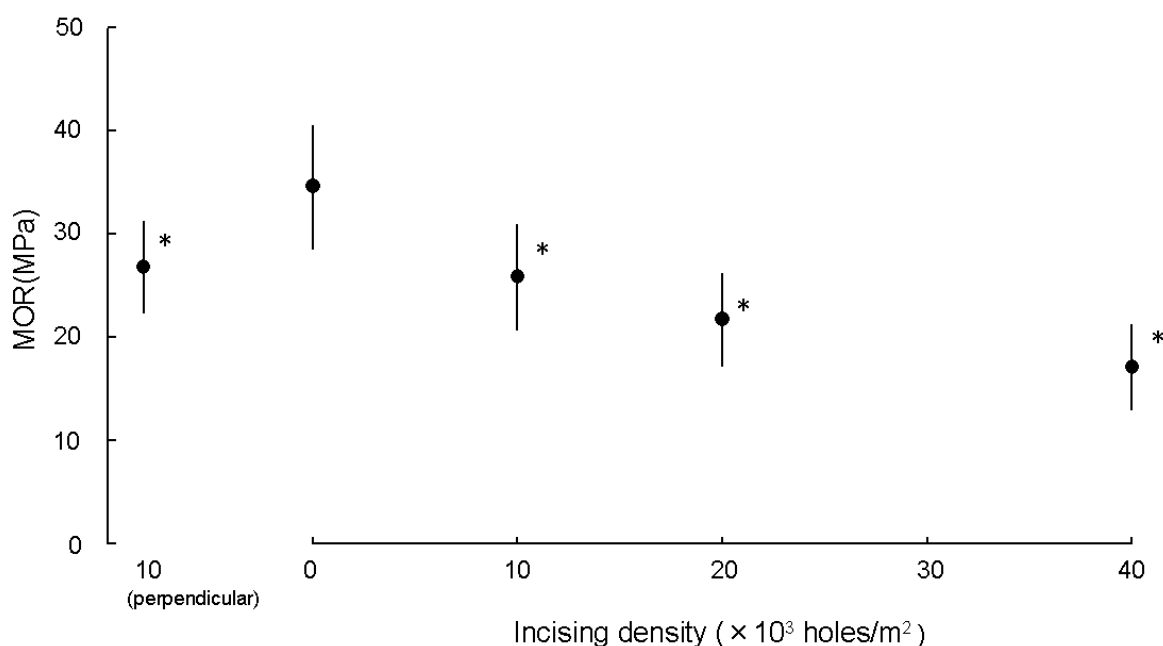


Fig. 7.5 Effect of incising density on MOR.

Legend: See Fig. 4.

MOR についても MOE 同様にインサイジングを施さなかった試験体の強度の 90 % 値に対して t 検定を用いて平均値の差の検定を行った結果、Table 7.3 のようになった。インサイジングを施した試験体の MOR はいずれもインサイジングを施さなかった試験体の 90 % 値に対して有意水準 1 % で有意な強度低下が認められた。以上のことから、レーザインサイジングを施した場合には、インサイジング密度 1 万個/m<sup>2</sup> 以上では有意に MOR が低下し、規定されている 1 割を上回る強度低下が起きることが明らかになったので、MOR から判断するとレーザインサイジングは少なくとも 1 万個/m<sup>2</sup> よりも低い密度で行う必要がある。今回用いたインサイジングパターンは柱材の薬液注入に用いたものであり、強度への影響を考慮していなかったことから、今後両者を考慮したインサイジングパターンを検討する必要がある。難注入材では 1 万個/m<sup>2</sup> 以上のインサイジング密度が必要なことから、確実な保存処理が必要な場合には、インサイジングによる強度低下を織り込んだ構造計算により設計する必要がある。

Table 7.3 MOR of tested specimen.

	Incising density ( $\times 10^3$ holes/m <sup>2</sup> )				
	0 (90%)	10 (parallel)	10(perpendicular)	20	40
MOR(MPa)	31.6	26.2*	27.4*	22.0*	17.4*

Legend: See Table 7.2.

#### 7.4 結言

スギの未乾燥柱材にインサイジング密度が 4 万個/m<sup>2</sup> までの範囲でレーザインサイジングを施し、曲げ強度試験により、MOE および MOR を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 今回用いたインサイジング密度の範囲では、全てのインサイジング密度においてインサイジングを施さなかった試験体に対して MOE、MOR とともに有意な低下が認められた。
- 2) インサイジング密度 1 万個/m<sup>2</sup> の試験体で、荷重方向をインサイジング方向に対して平行と直交で比較したところ、荷重方向の強度への影響は見られなかった。
- 3) インサイジング材について、製材の曲げ強さ及び曲げヤング係数の低下がおおむね 1 割を超えない範囲内とすることが規定されていることから、インサイジングを施さなかった試験体の MOE および MOR の 90% 値に対して比較を行った結果、インサイジング密度が 1 万個/m<sup>2</sup> にお

る MOE においては有意な差が認められなかったが、そのほかのインサイジング密度における MOE および MOR ではいずれも有意な低下が認められた。インサイジングによる低下をおおむね 1 割以内に抑えるには、インサイジング密度を 1 万個/m<sup>2</sup> 未満にする必要がある。

4) 今回用いたインサイジングパターンおよび密度の範囲では、MOR はインサイジング密度が 1 万個/m<sup>2</sup> までは大きく低下し、それ以上の密度では比較的緩やかに低下していたことから、強度を保証するインサイジング部材を用いるには、強度低下がおおむね 1 割以内となるインサイジング密度を用いるか、レーザインサイジングによる強度低下を織り込んだ構造計算により設計するかのどちらかの方法を取ればよい。今回用いたインサイジングパターンは柱材の薬液注入に用いたもので、強度への影響を考慮していなかったことから、両者を考慮したインサイジングパターンを検討する必要がある。

## 第8章 結論

### 8.1 まとめ

レーザーインサイジングを構造用木材である柱材への応用として、蒸気噴射乾燥、保存処理薬剤の減圧加圧注入、パッシブ注入材の溶脱性、薬剤注入後の蒸気噴射による再乾燥を取り上げ、さらにレーザーインサイジングが及ぼす柱材の強度への影響を明らかにすることを目的として、実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 柱材を貫通させたレーザーインサイジングを施したスギ柱材に 120, 140, 160 °C の飽和蒸気を噴射する蒸気噴射乾燥を行ったところ、材温が上昇し一定となるまでに、最も時間を要したインサイジング密度 5000 個/m<sup>2</sup>、蒸気温度 120 °C の条件でも 20 分以内であり、蒸気を連続して噴射し、乾燥を行った場合には、蒸気温度 120 °C では 10 時間、140 °C では 6 時間で、表面割れ、内部割れともほとんど見られない状態で含水率 15 % 以下までを下げる事ができた。この方法は材全体を均一に加熱できることから、乾燥後の表層と内部の含水率差を小さくできる優れた乾燥法であることが分かった。
- 2) スギ、ヒノキ、ベイマツ、ベイツガの 4 樹種の柱材に刃物インサイジングと 2 通りのレーザーインサイジングを施し防腐・防蟻処理を行った結果、インサイジングを施さないか刃物インサイジングを施した場合に比べて、レーザーインサイジングを施すと、5 割以上多くの薬液を材中に浸潤させることが分かり、目的に応じて一面型インサイジング法とシェル型インサイジング法を使い分けることで、薬液の注入量を調節できることが分かった。
- 3) 密度が高く、きわめて注入性の低いバングラデシュ産の広葉樹である Sundri の心材にパッシブ注入法と減圧加圧注入法を用いて、保存処理薬剤である 1.03 % の銅-アゾール溶液を注入し、その注入特性と溶脱性の比較を行った結果、両者の注入量には差は認められないが、浸潤面積率においてはパッシブ注入法の方が高く、薬剤の溶脱率はパッシブ注入法の方が低くなった。
- 4) レーザーインサイジングを施した人工乾燥材および生材のスギ柱材に、1.03 % の銅-アゾール溶液をパッシブ注入し、蒸気噴射乾燥と天然乾燥による再乾燥を行い、処理材の薬剤保持量、溶脱性、耐朽性の比較を行った結果、蒸気噴射乾燥の方が溶脱性が低くなり、その他については両再乾燥法の間には大きな違いは見られなかった。このことから、蒸気噴射乾燥は、乾燥時間を短縮できるメリットもあることから、水溶性薬剤注入後の再乾燥法として有効であることが分かった。
- 5) ベイツガの柱材から切り出した試験体にインサイジング密度が 8 万個/m<sup>2</sup> までの範囲でレーザーインサイジングを施し、インサイジング面とそれに隣接する面から部分圧縮強度試験を行った結果、



2 万個/m<sup>2</sup> までのインサイジング密度では、加重方向にかかわらずレーザインサイジングは部分圧縮強度に大きな影響を及ぼすことはなく、4 万個/m<sup>2</sup> を超えると、荷重方向がインサイジング方向と平行な場合に部分圧縮強度が有意に低下し、8 万個/m<sup>2</sup> では、全ての条件で有意な低下が認められた。

6) スギの未乾燥柱材にインサイジング密度が4万個/m<sup>2</sup>までの範囲でレーザインサイジングを施し、曲げ強度試験により、MOE および MOR を調べた結果、この範囲では、全てのインサイジング密度においてインサイジングを施さなかった試験体に対して MOE、MOR とともに有意に低下すること、インサイジングによる低下をおおむね 1 割以内に抑えるには、インサイジング密度を 1 万個/m<sup>2</sup> 未満にする必要があることが分かった。

## 8.2 今後の課題

レーザインサイジングの構造用木材への応用について取り組んできた。今後は実用化に向けて、さらに研究を進める必要がある。乾燥、注入、強度低下のすべてに関わることになるが、インサイジングパターンの検討が重要である。また、パッシブ注入で行っているように、インサイジング穴を複数回利用するようにより付加価値の高いレーザインサイジングの活用法についても検討する必要がある。

## 文献

- 1) 林野庁(編):平成 24 年版「森林・林業白書」, p.158,全国林業改良普及協会
- 2) Simpson, W.T.: Laser incising to increase drying rate of wood. *Wood and fiber science*, **19**(1), 9-25 (1987).
- 3) Kamke F. A., Peralta P. N. : Laser incising for lumber drying. *Forest Products Journal*, **40**(4):48-54 (1990).
- 4) Ruddick, J.N.R. : Laser incising of Canadian softwood to improve treatability. *Forest Products Journal*, **41**(4): 53-57 (1991).
- 5) Goodell B, Kamke FA, Liu J.: Laser incising of spruce lumber for improved preservative penetration. *Forest Products Journal*, **41**(9):48-52 (1991).
- 6) Hattori N, Kitayama S, Ida A, Noguchi M. : Incising of Wood with a 500 Watt Carbon-Dioxide Laser. *Mokuzai Gakkaishi*, **37**(8), 766-768 (1991).
- 7) 中嶋恒、安藤恵介、服部順昭、喜多山繁 : 木材のレーザインサイジング 木材の密度が穴形状に及ぼす影響、木材工業、**54**(8), 370-373 (1999)
- 8) 久保島吉貴、信田聡、岡野健 : 高温乾燥によるスギ材の機械的および色彩的性質の変化、木材工業、**53**(3), 115-119 (1998)
- 9) 河崎 弥生: 高温乾燥したスギ柱材中の水分分布と乾燥後の寸法変化、木材工業、**53**(4), 166-171 (1998)
- 10) 吉田孝久、橋爪丈夫、中嶋康、武田 孝志 : カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響(1) -曲げ強度特性-、木材工業、**54**(3), 122-125 (1999)

- 11) 中嶋康、武田孝志、吉田孝久、橋爪 丈夫：カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響(II)-縦圧縮強度特性-、木材工業、**54**(6), 265-268 (1999)
- 12) 吉田孝久、橋爪丈夫、藤本登留: カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性 -高温低温乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響-、木材工業、**55**(8), 357-362 (2000)
- 13) 久保島吉貴、信田聡: 高温乾燥によるスギ材(*Cryptomeria japonica* D.Don)の衝撃特性ならびにせん断特性の変化、木材工業、**56**(2), 64-68 (2001)
- 14) 小林好紀、川井安生、三浦泉：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第 1 報) スギ正角材の材内圧力と水分状態、木材学会誌、**46**(4), 282-290 (2000)
- 15) 川井安生、小林好紀、則元京：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第 2 報):高周波加熱下におけるスギ正角材内部の温度と圧力、木材学会誌 **47**(1),7-13 (2001)
- 16) 川井安生、小林好紀、則元京：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第 3 報)高周波加熱下におけるスギ正角材内部の圧力推移と水分移動、木材学会誌 **48**(3), 136-144 (2002)
- 17) KAWAI Yasuo , KOBAYASHI Yoshinori , NORIMOTO Misato : Hybrid drying with high-frequency heating and hot air under atmospheric pressure IV : water movement in *Cryptomeria japonica* wood during high-frequency heating, *Journal of wood science* **49**(1), 18-21 (2003)
- 18) 川井安生、小林好紀、石丸優、則元京：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第 5 報):高周波加熱と熱気乾燥の複合効果、木材学会誌 **49**(6), 408-415 (2003)
- 19) 川井安生、小林好紀、石丸優、則元京：高周波加熱と熱気を複合した木材乾燥法(第 6 報) スギ正角材内部の水分移動における複合乾燥と高温乾燥との差異、木材学会誌 **50**(1), 18-23 (2004)

- 20) 小林功、黒田尚宏、久田卓興、高橋保市：スギ心持ち無背割り柱材乾燥の前処理としての過熱蒸気処理の効果、*木材工業* **58**(6), 258-263 (2003)
- 21) 小林功、黒田尚宏、石川(本田)敦子：高温過熱蒸気によるスギ心持ち無背割り柱材の乾燥、*木材工業* **60**(9), 439-444 (2005)
- 22) 小林功、黒田尚宏、本田石川敦子：過熱蒸気処理と高周波加熱減圧との組み合わせによるスギ心持ち無背割り柱材の乾燥、*木材工業* **61**(8), 350-355 (2006)
- 23) 小林功：過熱蒸気の木材乾燥への利用、*木材工業* **65**(2), 52-57 (2010)
- 24) Ishikawa A., Kuroda N., Kato A. : In situ measurement of wood moisture content in high-temperature steam, *Journal of wood science*, **50**(1),7-14 (2004).
- 25) 金川靖、林和男、渋谷昌資、安島稔：局所水蒸気爆砕法によるスギ材の乾燥性改善、*木材工業* **47**, 363-366 (1992)
- 26) 齋藤周逸：蒸煮処理がスギ柱材の乾燥速度と寸法変化におよぼす効果、*木材工業*、**53**(12), 601-606 (1998).
- 27) 安藤恵介、中村彰、服部順昭、喜多山繁：木材のレーザーインサイジング -柱材への防腐薬剤の注入-、*木材工業*、**48**(7), 314-319 (1993).
- 28) 服部順昭、安藤恵介、喜多山繁、中村嘉明：木材のレーザーインサイジング-円柱材への水溶性染料の注入-、*木材学会誌*、**40**(12), 1381-1388 (1994).
- 29) Hattori N., Ando K., Kitayama S., Kubo K., Kobayashi Y. : Application of Laser Incising to Microwave Drying of Sugi Square Lumber with Black-Heart, *Forest Resources and Environment* **35**, 53-60 (1997).

- 30) A.Burmester : Influence of Incising on the Bending Strength, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **41**, 331-332(1983)
- 31) J.N.R.Ruddick: A comparison of needle and North American incising techniques for improving preservative treatment of spruce and pine lumber, *Holz als Roh- und Werkstoff*, **44**, 109-113 (1986)
- 32) Islam, Md. Nazrul; Ando, Keisuke; Yamauchi, Hidefumi; Hattori, Nobuaki : Passive impregnation of liquid in impermeable lumber incised by laser, *JOURNAL OF WOOD SCIENCE*, **53**(5),436-441 (2007)
- 33) Islam, M. Nazrul; Ando, Keisuke; Yamauchi, Hidefum; Hattori, Nobuaki : Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber, *WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY*, **52**(4), 343-350 (2008)
- 34) Islam, M. Nazrul; Ando, Keisuke; Yamauchi, Hidefum; Hattori, Nobuaki : Comparative study between full cell and passive impregnation method of wood preservation for laser incised Douglas fir lumber, *WOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY*, **52**(4), 343-350 (2008)
- 35) Md. Nazrul Islam; Ando, K.; Yamauchi, Hattori, N : Effects of species and moisture content on penetration of liquid in laser incised lumber by the passive impregnation method., *EUROPEAN JOURNAL OF WOOD AND WOOD PRODUCTS*, **67**(2), 129-133 (2009)
- 36) Islam, Md. Nazrul; Ando, Keisuke; Yamauchi, Hidefumi; Hattori, Nobuaki : Preservative treatment of Douglas-fir lumber by the passive impregnation method with copper azole, *EUROPEAN JOURNAL OF WOOD AND WOOD PRODUCTS*, **67**(1), 77-81 (2009)
- 37) Islam, Md. Nazrul; Ando, Keisuke; Yamauchi, Hidefumi; Hattori, Nobuaki : Effects of species and moisture content on penetration of liquid in laser incised lumber by the passive impregnation method, *EUROPEAN JOURNAL OF WOOD AND WOOD PRODUCTS*, **67**(2), 129-133 (2009)
- 38) JISK1571,木材保存剤－性能基準及びその試験方法

- 39) Barnes, H. M. : Effect of steaming temperature and CCA retention on mechanical properties of southern pine. *Forest Products Journal*, **35**, 31-32 (1985)
- 40) Lee, A.W. C. : Effect of CCA-treating and air-drying on the properties on Southern pine lumber and plywood, *Wood and Fiber Science*, **17**, 209-213 (1985)
- 41) Boone, R. S., Winandy, J. E. & Fuller, J. : Effects of redrying schedule on preservative fixation and strength of CCA-treated lumber , *Forest Products Journal*, **45**, 65-73 (1995)
- 42) Barnes, H. M., Linton, J. & Lindsey, G. B. : Effect of posttreatment steaming on the bending properties of southern pine treated with copper naphthenate , *Forest Products Journal*, **57**, 83-85 (2007)

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

全般にわたり格別なる御指導と御高配を賜りました東京農工大学大学院 服部順昭教授に甚大なる謝意を表します。

また、審査委員をしていただいた宇都宮大学農学部 横田信三教授、宇都宮大学農学部 石栗太準教授、東京農工大学大学院 近江正陽準教授、東京農工大学大学院 吉田誠準教授に深く感謝いたします。

研究当初に貴重な御教示を賜りました東京農工大学名誉教授 喜多山繁先生にも感謝申し上げます。本研究には蒸気噴射プレスがなければ成立しませんでした。その使用を快諾いただき、共同で研究して下さった当時の秋田県立大学木材高度加工研究所教授のK<sup>rs</sup>木材研究所 小林好紀先生と山内秀文准教授に心より感謝申し上げます。本当にありがとうございました。また、多くの実験もしていただいた Dr. MD. Nazrul Islam にも深く感謝申し上げます。

また、非常に多くの研究室の学生にもいろいろ助けていただきました。あまりにも人数が多すぎて書ききれませんが、どうもありがとうございました。