

水 蒸 気 処 理 に よ る
木 材 の 成 形 加 工
と そ の 応 用

1998 年

岐阜大学大学院連合農学研究科
生物資源科学
(岐阜大学)

伊 藤 洋 一

水蒸気処理による
木材の成形加工
とその応用

1998年

岐阜大学大学院連合農学研究科
生物資源科学
(岐阜大学)

伊藤洋一

水蒸気処理による
木材の成形加工
とその応用

伊藤洋一

水蒸気処理による木材の成形加工とその応用

序言	1
第1章 水蒸気処理による木材の圧縮成形加工	3
1. 緒言	3
2. 実験	5
2.1 高温高压プレス成形装置	5
2.2 スギ気乾材の圧縮成形と形状固定処理	7
2.3 圧縮成形角材の水分・熱回復試験	7
2.4 圧縮成形角材の表面性状試験	9
2.5 圧縮木材（小試験片）の回復と寸法安定性	9
2.6 圧縮木材の応力測定	12
2.7 圧縮木材の耐朽性試験	14
2.8 圧縮処理の応用による成形加工	15
3. 結果と考察	15
3.1 圧縮成形角材の水分・熱回復挙動	15
3.2 圧縮成形角材の表面性状	16
3.3 圧縮木材（小試験片）の回復と寸法安定性	19
3.4 圧縮木材の内部応力	23
3.5 圧縮木材の耐朽性	24
3.6 圧縮処理の応用による成形加工	25
3.6.1 縦圧入成形による四角柱・六角柱の製造	25
3.6.2 木材表面への形状の転写および表札・レリーフの製造	25
3.6.3 敷居・鴨居の製造	31
3.6.4 椀の製造	31
3.6.5 曲げ木の製造	31
3.6.6 集成パズルの製造	31
4. 結言	39
第2章 高压水蒸気による圧縮成形木材の永久固定化機構の検討	40
1. 緒言	40
2. 実験	41
2.1 抽出成分と寸法変化	41
2.2 クラーソン法によるリグニンの定量	41
2.3 走査型電子顕微鏡（SEM）による 圧縮木材の組織構造の観察	42
2.3.1 観察試料の作製	42
2.3.2 圧縮木材の組織構造の観察	42
2.4 透過型電子顕微鏡（TEM）による セルロースミクロフィブリルの観察	42
2.4.1 試料支持膜の作製	42
2.4.2 観察試料の作製	42
2.4.3 セルロースミクロフィブリルの観察	43

2.5	圧縮木材のX線回折と結晶性の評価	43
2.5.1	X線回折測定用試料の作製	43
2.5.2	X線回折測定用ペレットの作製	43
2.5.3	X線回折強度の測定	43
2.5.4	水蒸気処理圧縮木材の結晶化度の算出	43
2.6	セルロース繊維の形状固定	44
2.6.1	ビスコースレーヨン長繊維糸条の形状固定	44
3.	結果と考察	45
3.1	圧縮木材の抽出成分と寸法変化	45
3.2	圧縮木材の組織構造の観察	49
3.3	セルロースミクロフィブリルの変化	52
3.4	圧縮木材のX線回折と結晶性の評価	53
3.5	再生セルロース繊維の形状固定	56
3.5.1	ビスコースレーヨン長繊維糸条の形状固定	56
3.6	圧縮成形木材の永久固定化機構の検討	58
4.	結言	60
第3章 水蒸気処理による木材の成形加工実用化試験		61
1.	緒言	61
2.	実験	62
2.1	水蒸気処理による吸・放湿特性の変化	62
2.1.1	試験体	62
2.1.2	処理条件	63
2.1.2.1	熱気乾燥	63
2.1.2.2	圧縮処理	63
2.1.3	吸・放湿試験	64
2.1.3.1	吸・放湿試験の方法	64
2.1.3.2	吸・放湿試験における性能評価方法	65
2.2	水蒸気処理による木材の曲木加工	65
2.2.1	曲木軟化条件の検討	65
2.2.1.1	曲げ試験および曲げクリープ試験	66
2.2.1.2	曲げ破壊試験	67
2.2.2	曲木形状固定条件の検討	68
2.2.2.1	曲げ形状回復試験	68
2.2.3	曲木を使った製品の試作	71
3.	結果と考察	75
3.1	水蒸気処理による吸・放湿特性の変化	75
3.1.1	試験材の仕上がり含水率	75
3.1.2	吸・放湿試験における含水率変動	75
3.1.3	吸・放湿試験における寸法変化	77
3.1.4	吸・放湿試験における狂いの変化	81
3.1.4.1	ねじれ	81
3.1.4.2	縦ぞり	82

3.1.4.3 曲がり	83
3.1.4.4 幅ぞり	85
3.2 水蒸気処理による木材の曲木加工	86
3.2.1 曲木軟化条件の検討	86
3.2.1.1 曲げ試験および曲げクリープ試験	86
3.2.1.2 曲げ破壊試験	88
3.2.2 曲木形状固定条件の検討	89
3.2.2.1 曲げ形状回復試験	89
3.2.3 曲木を使った製品の試作	90
4. 結言	96
総括	98
文献	100
謝辞	104

序言

我が国は、国土面積の7割近くを森林が占め、世界的にも高い水準の森林率を維持してきた。これら森林資源が住宅資材や燃料として、国民の生活や経済の中で重要な役割を果たしてきたが、経済の高度成長期以降、非木質系建築資材の進出、製材品を中心とした輸入木材の増加などにより、森林の経済資源としての利用形態は大きく変わり、市場競争においても非常に厳しい状況にさらされている。

また、最近の国という枠を越えた環境破壊問題の一つに、熱帯林の減少がある。開発途上地域では、1981年から1990年までの10年間で、我が国の国土面積の約4.3倍に相当する1億6千万haが減少した¹⁾。このうちの95%に当たる1億5千万haは熱帯地域での減少であり、1981年に存在した熱帯林の8%が10年間で減少したことになる。その中で、我が国は産業用材（丸太、チップ、残材等）の輸入量は世界第一位、製材と合板（パーティクルボード、ファイバーボードを含む）の輸入量はそれぞれ世界第二位であり、国内消費の約8割を輸入に依存している。今日、経済的にも技術的にも世界有数の先進国となった我が国は、国際社会の一員として、より大きな役割を果たすことが求められており、世界の森林を保護する見地からも、国内森林資源の育成に力を入れていく必要がある。現在、我が国は1千万haに及ぶ人工林資源を有しており、これを適切に経営していくことは木材産業の活性化を促し、資源の有効利用にもつながる。

また、木材は生理学的な快適性の面からみても有用な材料であり²⁾、嗅覚³⁾・触覚⁴⁾⁵⁾・視覚⁶⁾から快い印象・感覚を受けることがわかっている。効果としては、緊張・不安・疲労・抑うつ・落ち込みを減少させる³⁾ことが挙げられる。これまで経験的に知られてきた木材の持つ快適感が科学的裏付けをもって明らかにされつつある。

最近、新たに発生してきた現代病に、シックハウス症候群と呼ばれているものがある。気密性の高い住宅内の空気汚染で起きる頭痛、目の痛み、アトピー性皮膚炎など多様な健康障害の総称である。症状が進むとひどい場合には、原因不明の孤独感や恐怖感に襲われて眠れなくなることもある。この症候群と関係が深いとされているホルムアルデヒド、トルエン、キシレンなどは今後建築

資材への使用が制限されることになると考えられる。したがって、これからは害の少ない薬品を使う処理方法、あるいは薬品を使わない処理方法が重要になってくるものと考ええる。この後者の代表的なものの一つに、水蒸気処理がある。

水蒸気処理は、樹脂や薬剤を使用しないので、人体や住環境に悪影響を与えることなく、木材特性を向上させ、製品を作ることができる処理である。

そこで、本論文では水蒸気処理を使った木材の圧縮成形加工とその永久固定のメカニズム、水蒸気処理の応用による木材性質の改善について論じた。また、民間企業に導入した水蒸気処理装置を使っの曲木製品開発を行い、作業上の問題点とその対策について検討した。

第1章 水蒸気処理による木材の圧縮成形加工

1. 緒言

我が国の森林資源は、戦後の拡大造林を中心として着実に増大し、人工林の面積は1千万haに達し、その蓄積は毎年約7千万 m^3 の割合で増加している。この人工林の7割は、35年生以下の生育途上の森林であり、保育、間伐が必要だが、人工林資源の成熟に見合った林業生産活動が活発に行われるならば、今後、一般材の供給量は飛躍的に増大する可能性がある⁷⁾。

したがって、国内製材品の質的向上および新たな加工方法の開発による国際競争力の確保が重要な課題になってきている。

現在、実用化に向けて研究されている技術としては、

- 1) 従来の切削、接着などの加工技術の枠を超え、木材を熱可塑化して加工する技術
- 2) 木材にさまざまな化学的処理を施すことにより耐腐朽、耐火、耐水性を向上する技術
- 3) 成分利用の分野において、木材の主要成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンのほか、抽出成分である精油、樹脂などを効率的に採取し、新たな工業用原料に利用する技術
- 4) 炭化物の分野において、効率的な木炭の製造や、木炭を土壌改良剤や水質浄化資材として利用する技術

があげられるが、その中で我々は木材に大変形を与えることによる利用方法に着目した。

これまで、木材を種々の方法で軟化した後で、木材に大変形を与える技術がいくつか開発されてきた。マイクロ波や水蒸気処理による木材軟化の技術もその例である。木材の表面物性や強度的性質を改善する目的でのマイクロ波加熱の応用は以前から行われており、比較的容易に木材に変形を与えることが可能となっている。その軟化機構には、水分および熱による木材主成分の粘弾性化があげられる。木材の曲げ加工では、水分と熱により材を短時間に軟化させた後、変形を与え、成形後に乾燥することにより、その形状を固定（ドラインゲット）している。

ところが、ドライイングセットされた材に再び水分と熱を与えると、変形の回復が起こる。熱水中で煮沸することにより、木材に与えた変形はほぼ完全に回復する。このことは、圧縮成形後の木材の利用範囲を著しく制限することになる。

そこで、変形を加えた木材の利用価値を高めるためには、変形の永久固定が課題となる。そのためには、水分の流入による分子運動の活性化を阻止するか、あるいは水分と熱の作用により弾性的に変形するミクロフィブリルにたまる応力が解放されれば良い。前者の場合、たとえば塗装などによって水分を木材中に入り込ませない処理をすればよいことになる。また、微視的には疎水性の物質が細胞壁中に存在してしまうことによっても、同じ状態が得られるはずである。ただし、この場合、木材本来の優れた特徴であるところの吸湿性や通気性などの性質を失うことになる。また、加工工程が多く、各段階の処理に時間がかかる欠点がある。後者の場合は、ミクロフィブリルを部分的に低分子化させる方法として、爆砕処理がある。

木材を爆砕処理したときの主要成分の構造変化の研究成果より、リグニンおよびヘミセルロースは水蒸気処理によって低分子化し、セルロースから分離されることが推定される。一方、セルロースは、高圧の水蒸気処理によってミクロフィブリル幅やミセル幅が増大する。また、結晶化度は増加し、結晶形態も不安定な $I\alpha$ 型から安定な $I\beta$ 型に変換される⁸⁾。

以上のことから、高圧の水蒸気による処理は短時間での変形の固定に有効であると推定される。そこで、高圧水蒸気中でプレスを使用して圧縮成形する加工方法を開発した。この方法は、木材の加熱による軟化と、圧縮成形、およびその変形の固定が同じ装置内で一連の操作で行うことができ、また薬品を使用しないため木材本来の特性を残したままで木材の成形加工が可能になる。また、マイクロ波処理と比較するとき、マイクロ波処理では前処理として木材を飽水状態にする必要があるが、この方法では高圧の水蒸気を使用しているため、前処理としての水の注入は必要としないという利点がある。また、マイクロ波処理では断面の大きな材では処理が不均一になり処理時間もかかるため、水分の蒸発に伴う軟化速度の減少などの不都合が起こり易い。これらのことから、高圧水蒸気処理は、丸太から切削をすることなく圧縮成形によって角材を

製造することに適すると考えた。

このように処理してできた材の用途としては、建材としての利用があげられる。しかも、この方法では、切削による柱の製造とは違い、小径木である間伐材から比較的太い角材を製造することができる利点がある。間伐材は、植栽後の年数が比較的短いので、一般に径の細いものが多い。したがって、現状では利用範囲が非常に限られ、全体の5割程度しか利用されていない⁹⁾。特に、国内で今後、供給が大幅に増大すると思われるスギは、品質的には一般材（並材）であることから、他の輸入材と用途が重なることも考えられ、価格の面でも改善が求められ、付加価値を持った材料の開発が急務である。

スギは針葉樹であるため、広葉樹と比較して軟らかく、早材と晩材の物理的特性に大きな違いが見られる。また、針葉樹を建材や内装材（インテリア材料）として利用するためには、湿気に対する寸法安定性などの材料特性を改善することが必要である。家具などのインテリア材料に使われる広葉樹の需要は、人間を取り巻く環境の生理的、情緒的な面において、木の重要性が科学的に理解されていくにつれて徐々に増加することが予想される。その一方で、良質広葉樹の蓄積量は次第に減少しており、今後広葉樹の代用品として針葉樹を利用することは非常に重要なことであると考えられる。この点で、針葉樹を圧縮することは、早材と晩材が存在することによる材質の不均一性をなくし、木材を一定の性質を持つ材料にすることになると思われる。

そこで本章では、間伐材の建材としての利用および材質の改良を目的として、高圧水蒸気中での圧縮成形加工と固定化の条件を検討した。

2. 実験

2.1 高温高圧プレス成形装置

圧縮処理は、我々がこの試験のために開発した高温高圧プレス成形装置（株日阪製作所製）で行った（Fig.1-1）。この装置は内径40cm、奥行き60cm、最大許容圧力2.0MPa（1MPa \approx 10kgf/cm²）の圧力容器中で最大14tの荷重をかけることができる。また、特殊な治具を付け換えることにより、板材の平面プレスをすることや最大20cmの直径の丸太を非切削で角材に圧縮成形することが可能である（Fig.1-2）。

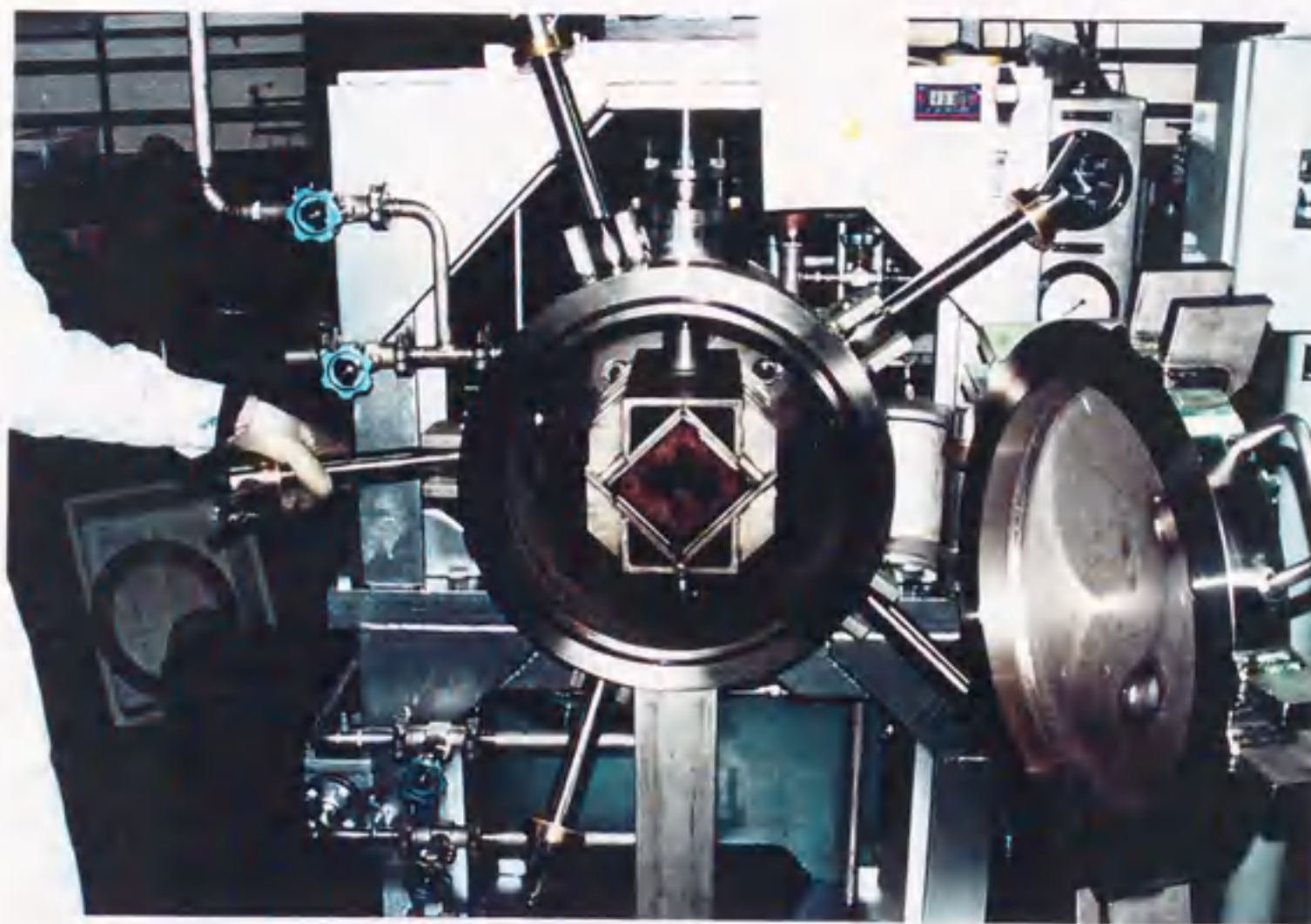


Fig.1-1. The apparatus to compressive-mold by the high-pressure steam.

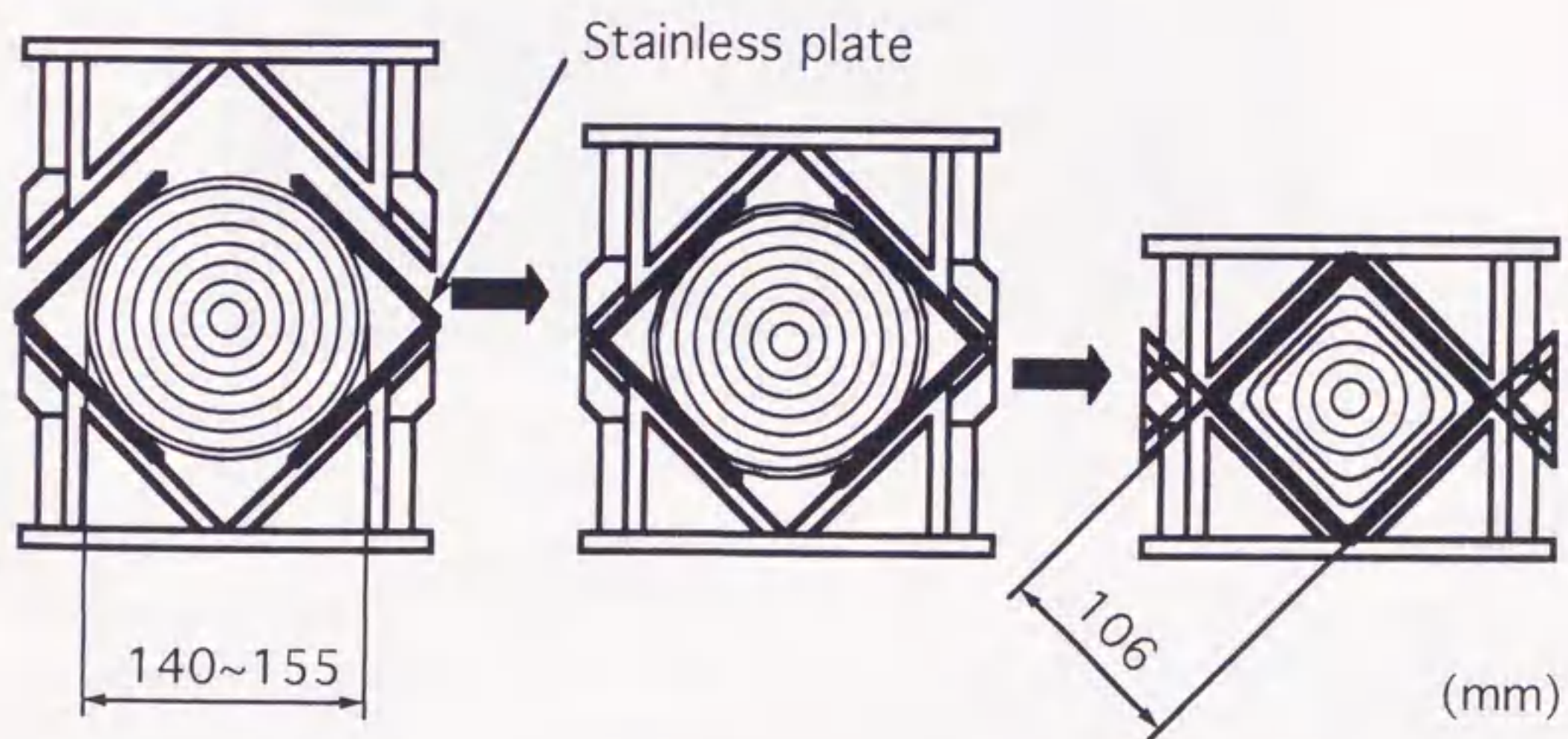


Fig.1-2. Compressive-molding from a log to square.

2.2 スギ気乾材の圧縮成形と形状固定処理

試験材料にはスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) 気乾材を用いた。気乾比重および平均年輪幅は、0.38および1.28mmであった。

実験に用いたスギ丸太材の直径は14.0~15.5cm、L方向(軸方向)は10.0cmである。これを処理装置に入れ、135~150℃の飽和水蒸気で1~3分間軟化させた。圧縮処理をした後に、飽和水蒸気圧を上げ、170~200℃で1~3分の固定処理を行い、水蒸気を排出した後に、常圧中に3分間放置してから試料を取り出した。処理に要する時間は、合計10~15分である。**Fig.1-3**に圧縮成形角材を示す。



Fig. 1-3. Thinnings before and after compressive-molding.

2.3 圧縮成形角材の水分・熱回復試験

試料は、各圧縮木材からL方向に厚さ1cmに切り出した2枚の木口切片を用い、一つはそのまま、もう一つは3×6個に等分して得られた試験片を熱水中で30分煮沸処理をし、回復状態を観察した(**Fig.1-4**)。なお、3×6個に等分した試験片については、木口切片内の位置により番号を決めた。

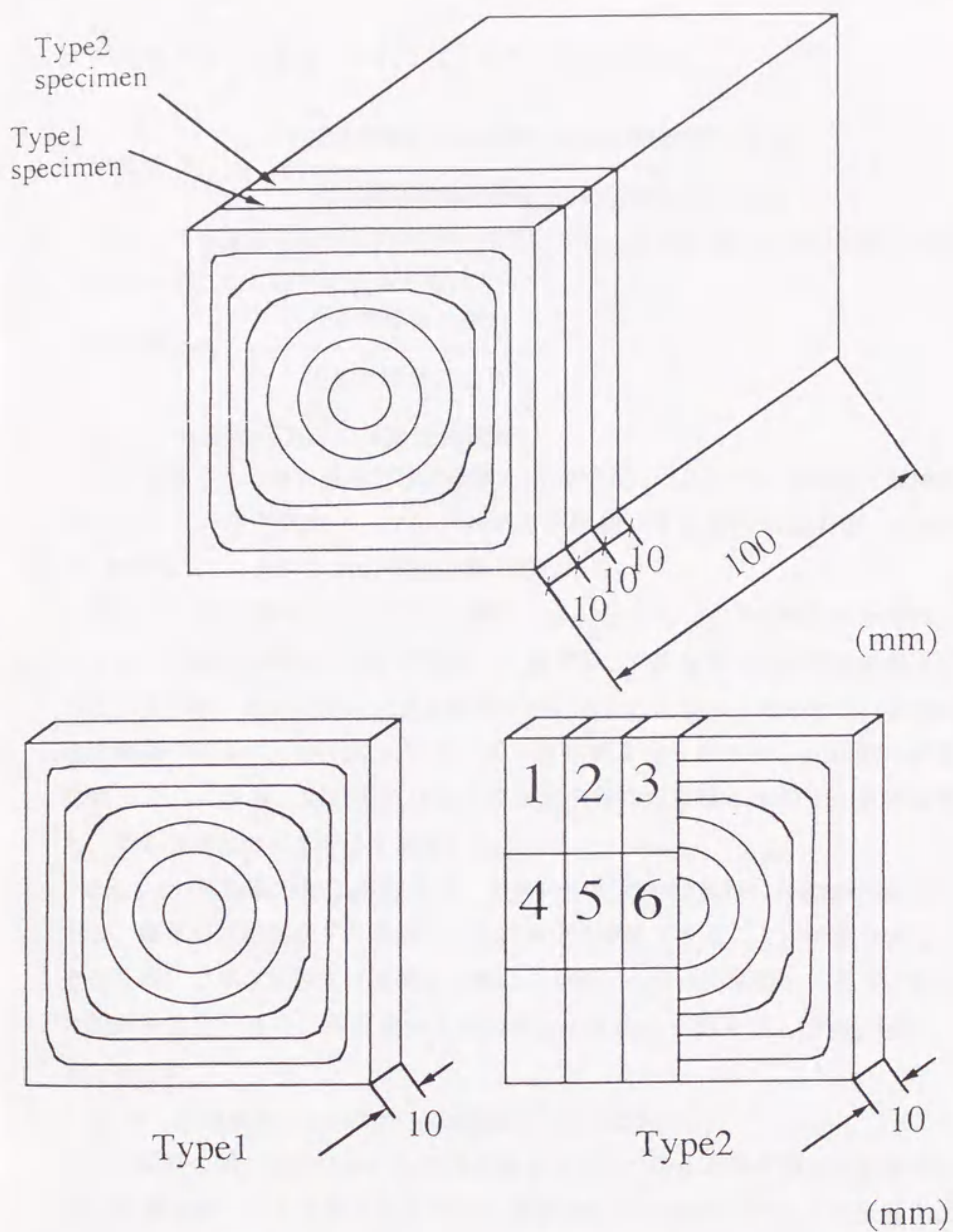


Fig. 1-4. Shapes of wood specimens for recovery test.

煮沸処理後の回復度については、次式により算出した。

$$\text{回復度} [\%] = \frac{\text{煮沸処理後の木口面積} - \text{圧縮処理後の木口面積}}{\text{圧縮処理前の木口面積} - \text{圧縮処理後の木口面積}} \times 100$$

また、 3×6 個に等分した試験片については、圧縮処理前の木口面積がわからないので、次に示す回復率を算出した。

$$\text{回復率} [\text{倍}] = \frac{\text{煮沸処理後の面積}}{\text{圧縮処理後の面積}}$$

2.4 圧縮成形角材の表面性状試験

圧縮処理された材の表面性状の改善を評価するために、ブリネル硬さ試験を行った。この硬さ試験は、ブリネル硬さ試験機（東京衡機製造所製 H-8025）を使用して、JIS Z 2101規格に準じて行った。

試料は、各圧縮木材からL方向に厚さ4 cmに切り出した木口切片を用いた。ここで、針葉樹の場合、早材と晩材で比重が著しく異なるため、硬さは表面に出てくる早材・晩材の別に大きな影響を受けることになる。そのため、試験には圧縮条件の異なる試料において、早・晩材部を取り混ぜて、27か所の測定を行った。この時、測定場所は試料の表面全体に、縦横1 cmのマス目を設定し、その交点において硬さを測定した。

Fig.1-2の圧縮成形加工を行えば、試料の中央部では良好に圧縮されるのに対し、端部では細胞がずれるため、圧縮率がやや低下することが予想される。そのため、ブリネル硬度は端部から順に3か所ずつ分けて測定し、それぞれの平均値を得た。また、樹皮側から順に4つの試験片を切り出し（Fig.1-5）、測定をした。

2.5 圧縮木材（小試験片）の回復と寸法安定性

同一試料の同一部分における回復状態および、寸法安定性を明らかにするため、試験材料（スギ気乾材）の同一年輪帯から同一断面のブロックを切り出し、水蒸気処理による圧縮加工を行った。このときの試験片の寸法は、 $20 (L) \times 20 (R) \times 30 (T) \text{ mm}$ であり、平均気乾比重は0.36である。

この試験片を 150°C の水蒸気によって3分間蒸煮した後、R方向に約10 mm

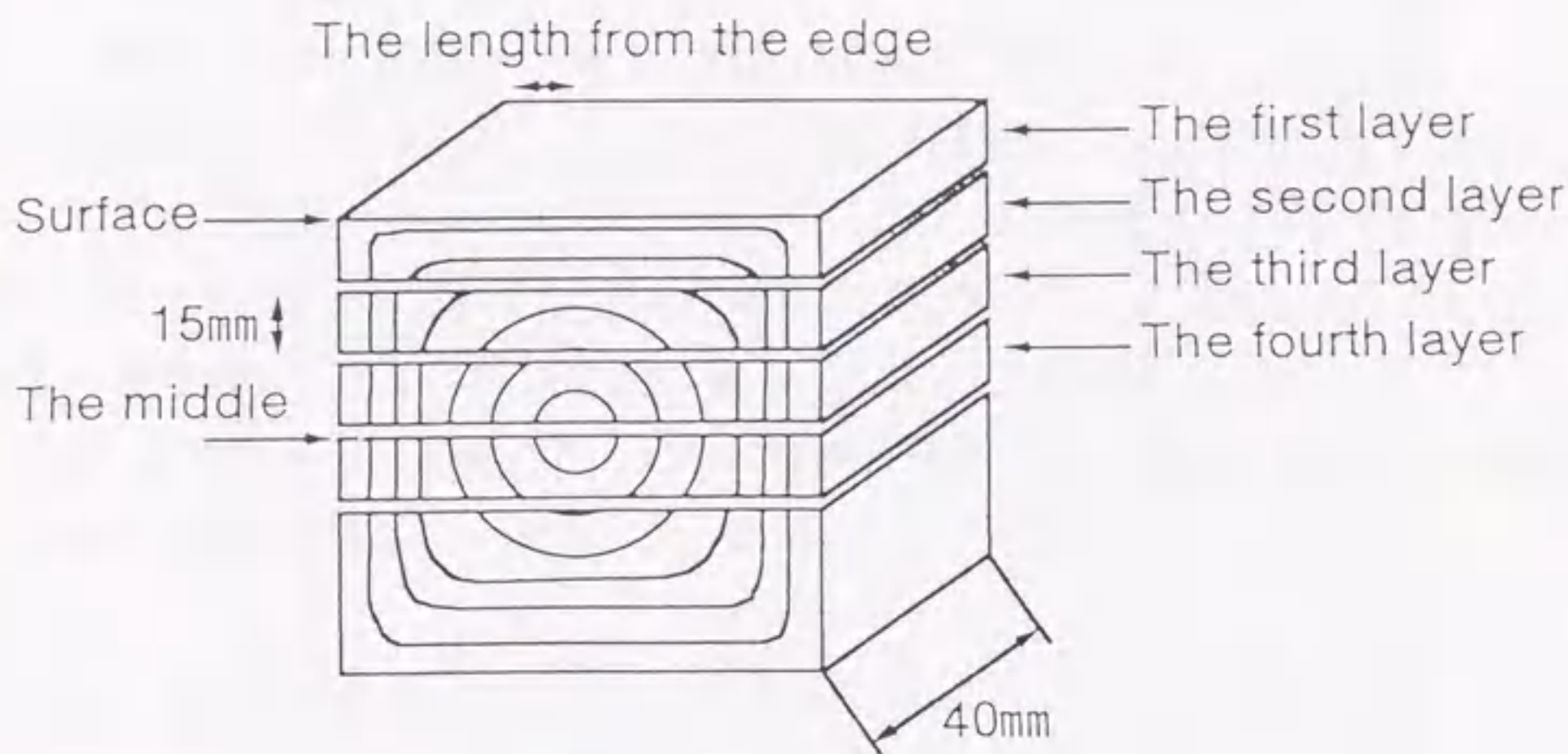


Fig. 1 - 5 . Specimens for the hardness test.

(圧縮セット量約50%)まで圧縮し、その後温度を160~200°Cに上げて1.5、3、6分の固定処理を行った。なお、圧縮処理時には圧縮セット量が50%になるようにディスタンスピースを設置して行った。

また、広葉樹材についても同様の処理を行った。これは、後述の固定のメカニズムの解明に関する実験で、ヘミセルロースとリグニンを抽出により取り除くためには広葉樹が適していると判断して実験を進めたため、同様の物性試験を行った。試験材料として、ハリギリ (*Kalopanax pictus* Nakai) を用い、試験片の寸法は、20 (L) × 20 (R) × 30 (T) mmであり、平均気乾比重は0.52である。

処理方法は、試験片を処理槽内に入れた後、アスピレーターで5分間処理槽を減圧し、その後150°Cの飽和水蒸気で3分間試験片を軟化させる。圧縮処理をした後に、飽和水蒸気圧を上げ、160~200°Cで2~8分の固定処理を行う。水蒸気を排出した後に、再びアスピレーターで5分間減圧し、試験片を取り出す。処理に要する時間は、合計20~25分である。なお、圧縮処理時には圧縮セット量が40%になるようにディスタンスピースを設置して行った (Fig. 1-6,7)。

このように処理した試験片に、乾燥、吸水および煮沸繰り返し試験を行った。乾燥（全乾）状態の寸法は、約2時間室温で風乾させたあとで $105 \pm 3^\circ\text{C}$ の恒温槽に試験片を入れ、約24時間乾燥し、シリカゲルを入れたデシケーター中で30分放冷した後に全乾寸法を測定した。吸水（飽水）状態の寸法は、デシケーターの中に入れた室温の蒸留水中に浸漬して、アスピレーターを用いて30分間減圧し、その後24時間放置したときの寸法を測定した。そして、これら一連の操作を7回繰り返した後に煮沸処理をした。煮沸後の寸法は、熱蒸留水中で30分煮沸した直後の寸法を測定した。

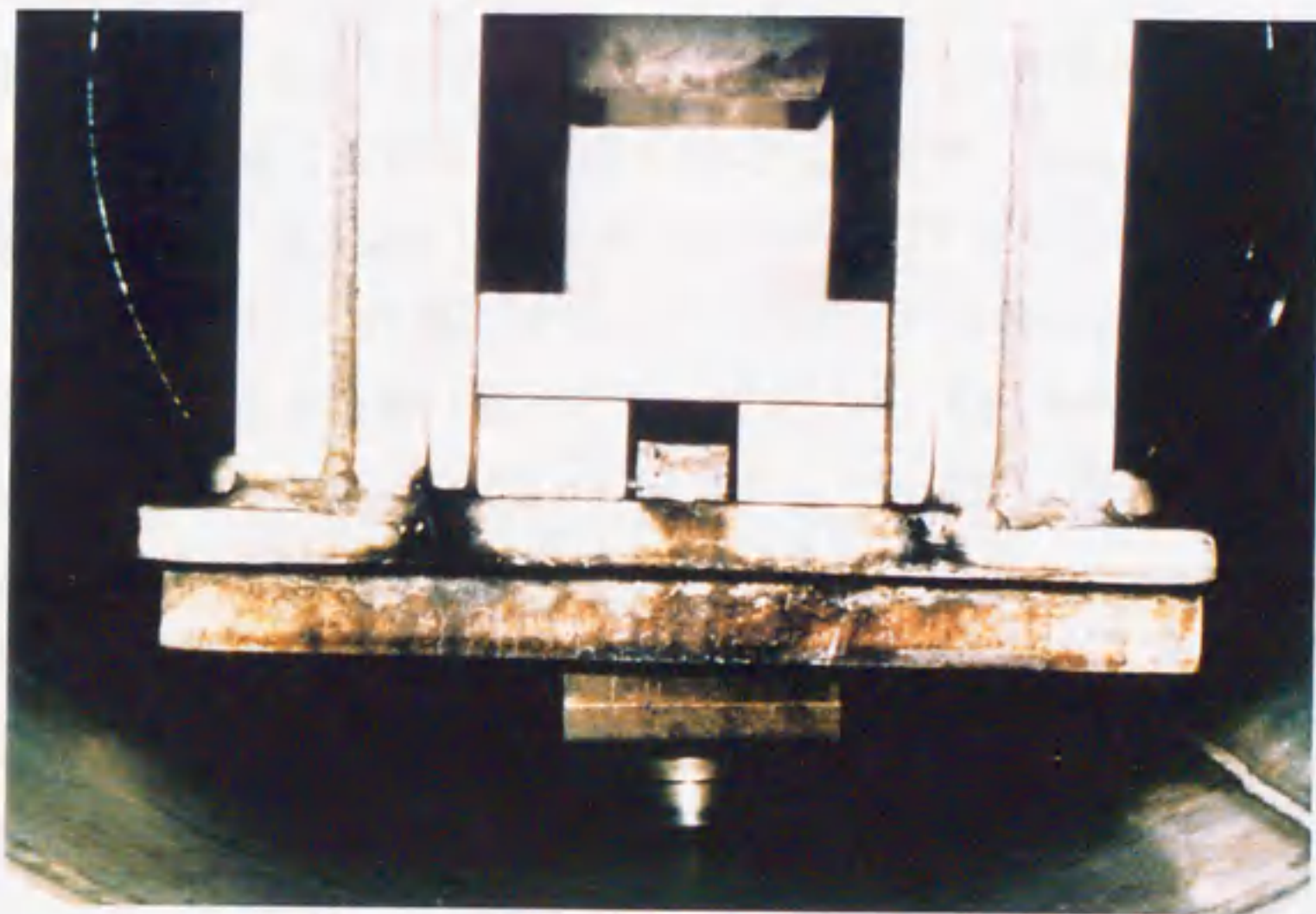


Fig. 1-6. Harigiri specimens and distance-bar to compressive-mold.

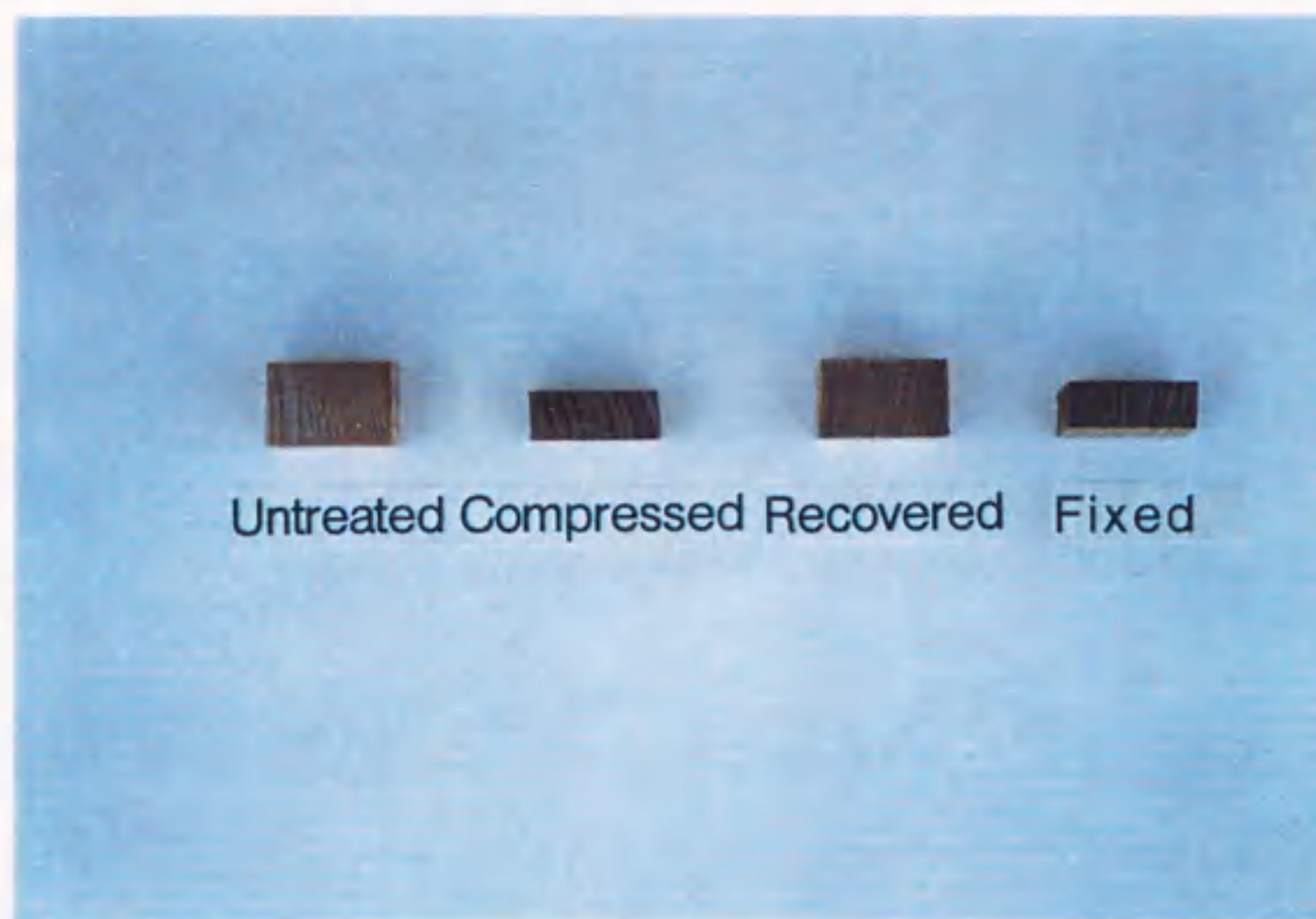


Fig. 1-7. The recovery and fixation of compressed wood.

Note : The size of the specimen is 20 (L) × 20 (R) × 30 (T) mm.

2.6 圧縮木材の応力測定

飽和水蒸気による固定処理温度と圧縮木材中に蓄積する内部応力との関係を調べるため、熱電対および新しく開発した応力センサー (**Fig. 1-8**) を使用して、水蒸気処理槽内の温度および圧縮処理の内部応力を測定した。開発した応力センサーは、センサーの内側にひずみゲージが取り付けられているタイプのもので、高温・高圧下での計測が可能である。測定には、**Fig. 1-9** に示すように試験体に熱電対と応力センサーを100mmの深さでL方向に差し込んだ。試験体の大きさは、300 (L) × 50 (R) × 100 (T) mmである。

圧縮条件は、軟化処理が150℃5分、圧縮セット量は66.6%である。固定処理温度は、200℃に設定した。その温度で80分間維持し、温度と内部応力を連続的に測定した。

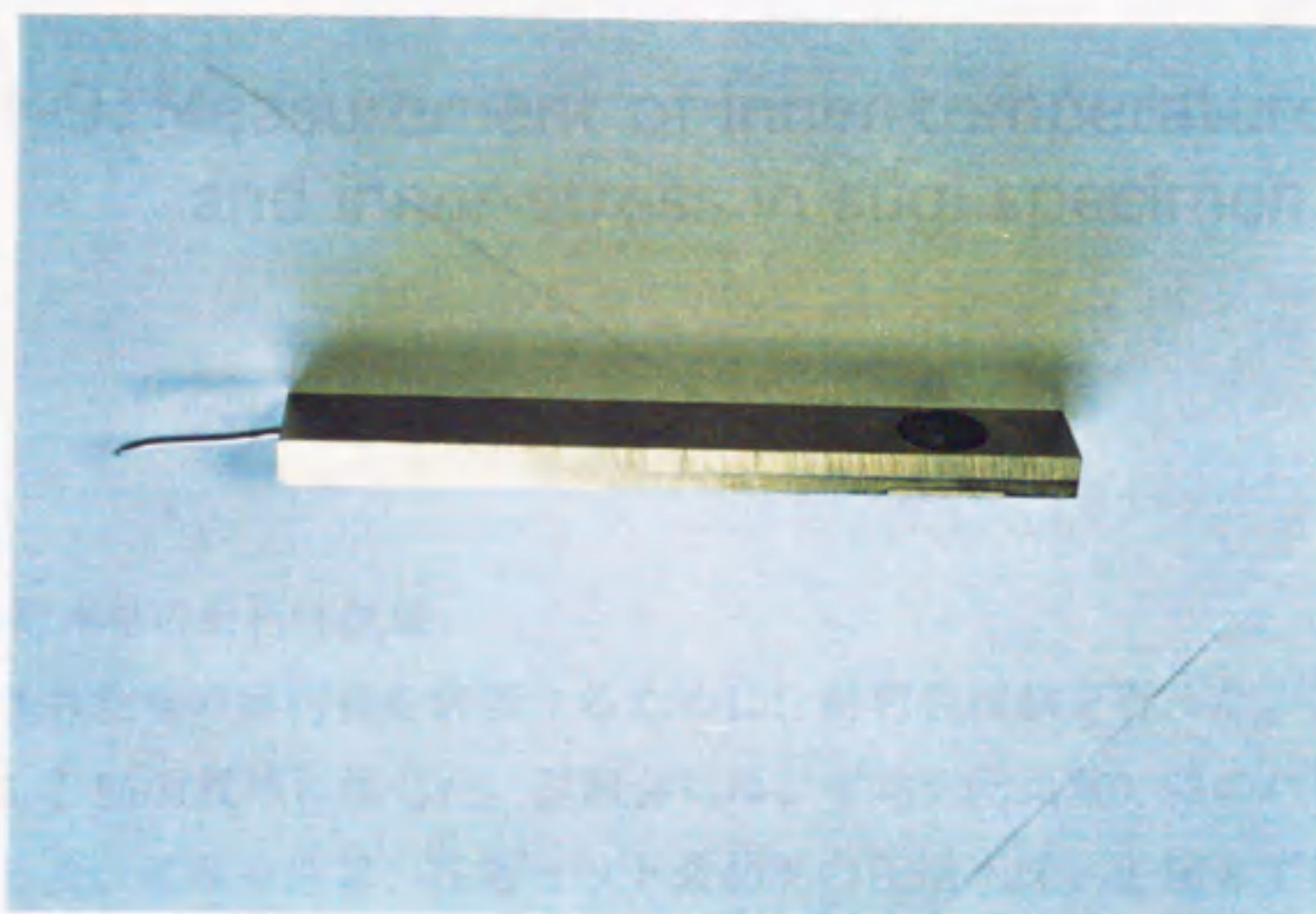
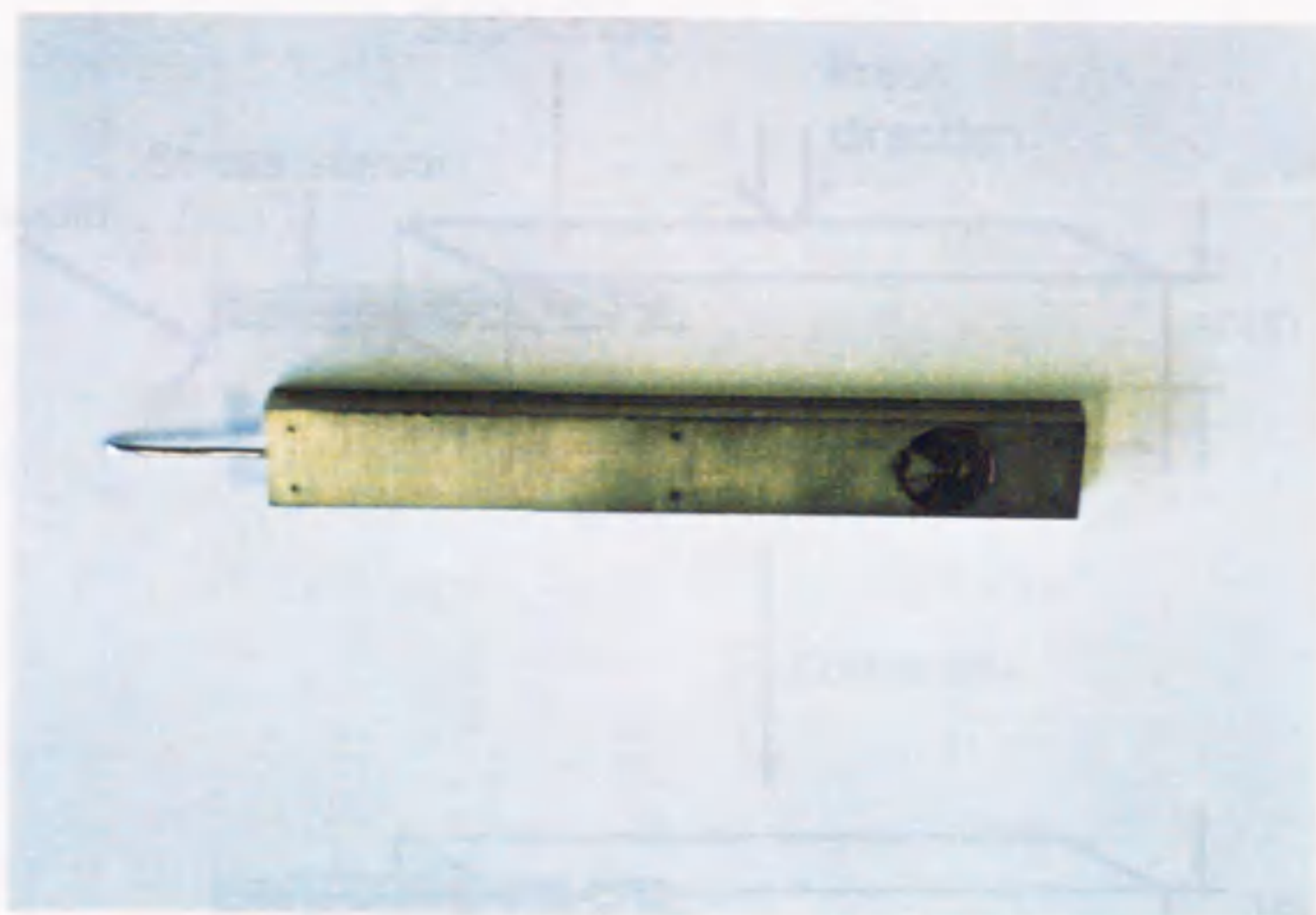


Fig. 1-8. The stress sensor (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.; PD-20HS) to measure the inner stress in compressed wood.

Note : The size of the sensor is 150 (Length) \times 20 (Width) \times 8 (Thickness) mm.

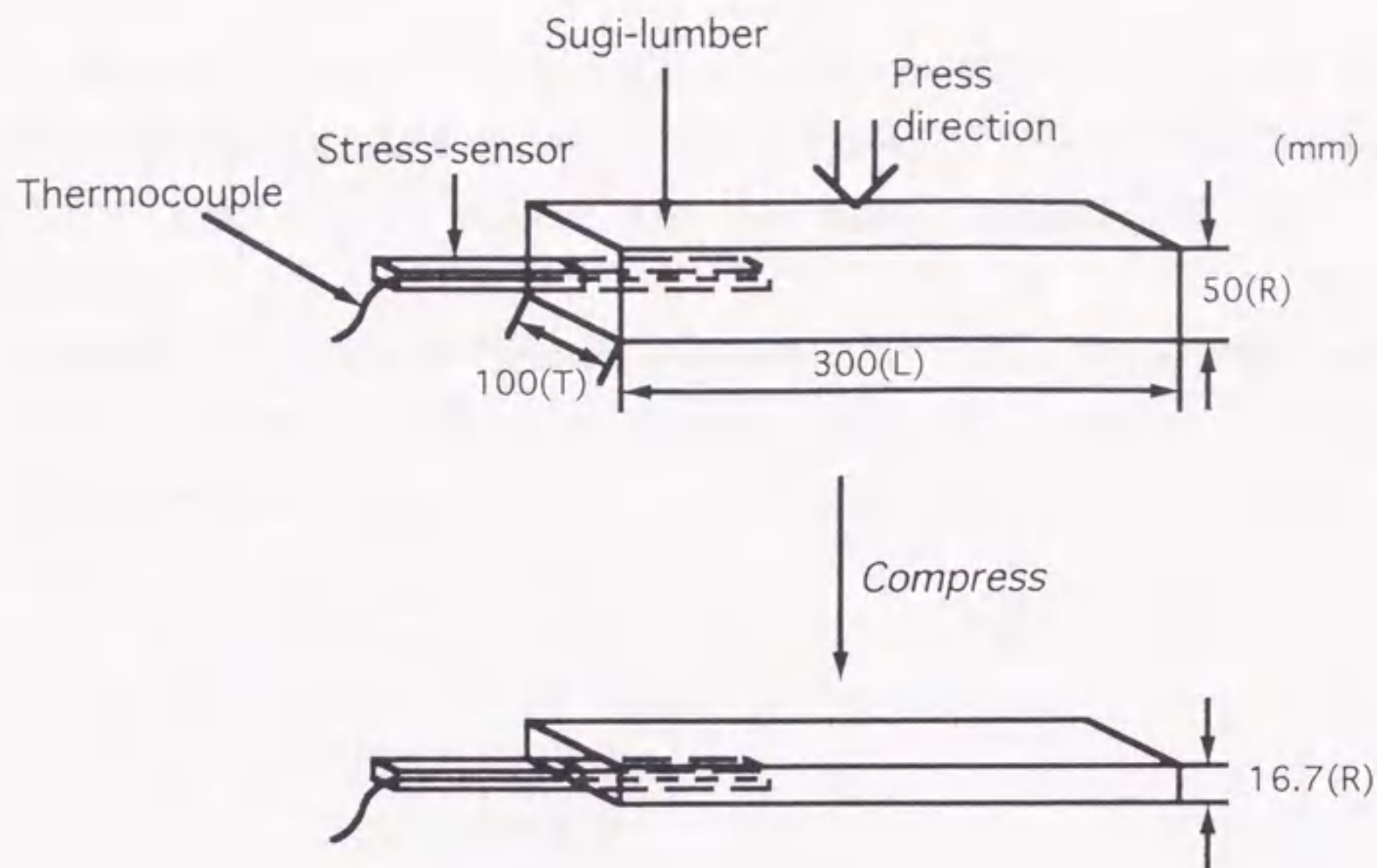


Fig. 1-9. Measurement of inner temperature and inner stress in sugi specimen.

2.7 圧縮木材の耐朽性試験

圧縮処理された材の耐朽性を評価するために、耐朽性試験を行った。この試験は、JIS Z 2101規格に準じた。試験体には、平均気乾比重0.52のハリギリ材を使用した。処理条件は、圧縮セット量40%の圧縮木材、圧縮せずに同じ時間水蒸気処理したもの、無処理材の3種類である。このほかに、対照材として標準的なブナ (*Fagus crenata* Blume) 辺材を使用し、計4種類の試験体を6体ずつ試験した。試験体寸法は、20 (L) × 10 (R) × 30 (T) mmである。圧縮木材については、20 (L) × 20 (R) × 30 (T) mmのものをR方向に圧縮セット量40%に圧縮した後、辺長は 10 ± 1 (R) mmの試験体を調製した。軟化水蒸気処理条件は150℃ 3分、固定水蒸気処理条件は200℃ 8分であ

る。腐朽操作は、 $26 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度70%以上で3か月間行った。培地は、培養瓶に石英砂250gと培養液80ml（グルコース4%、ペプトン0.3%、麦芽抽出物1.5%を含む水溶液）を入れ、調製した。使用した木材腐朽菌は、次の2種である。

褐色腐朽菌：オオウズラタケ *Tyromyces palustris* (Berk. et Curt.) Murr. FFPRI 0507

白色腐朽菌：カワラタケ *Coriolus versicolor* (L. ex Fr) Qu'el. FFPRI 1030

重量減少率（WL：Weight loss）は、次式により算出した。

$$WL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 [\%]$$

W₁：腐朽前の乾燥重量

W₂：腐朽後の乾燥重量

2.8 圧縮処理の応用による成形加工

高温高圧プレス成形装置に取り付ける治具を新たに開発することにより、種々の応用成形加工を行った。

3. 結果と考察

3.1 圧縮成形角材の水分・熱回復挙動

Table 1-1に、圧縮成形角材の圧縮セット量と回復度を示す。最初に、軟化処理条件を決定するための試験を行った。135℃で1分間の軟化処理では視覚的にも軟化が不十分であり、圧縮セット量は17.7~21.5%であった。これは、135℃で3分間でも同様であり、圧縮成形は不十分であった。これらに対して、150℃で3分間の軟化処理の時は、丸太より角材への成形は確実に Rowe れており、圧縮セット量は33.4~34.7%と高い値になった。よって、軟化処理には150℃で3分間の水蒸気をかけることとした。

次に、固定処理条件を決定するための試験を行った。試験は熱水中での回復試験を行い、L方向に厚さ1cmごとに切り出した圧縮成形材の木口試験片を熱水中で煮沸処理したときの回復度を測定した。Table 1-1より、固定処理温度が高くなるほど回復度は低くなり、変形が固定されていることがわかる。また、200℃の飽和水蒸気で3分間処理することによって、回復度は4.5

り、圧縮変形はほぼ固定されていることが明らかになった。

また、固定処理が不十分な圧縮成形材では、成形装置内より取り出す時点、即ち成形治具にかかっている負荷を解除した時点で、材内部より蒸気が噴出して割れを生じたものもあった。

次に、成形角材のどの位置が最も固定されているかを調べるために、 3×6 等分にした木口試片の位置による回復率の違いを調べ、その結果をTable 1-2に示した。一番高い回復率を示したのは位置番号4の試験片であり、一番低い回復率を示したのは位置番号5あるいは6の試験片であった。位置番号4の試験片は、固定処理温度が $170 \sim 190^{\circ}\text{C}$ の場合、回復率は1.4倍以上まで上昇しており、最も回復した部分と言える。一方、 200°C の場合回復率は0.96つまり元のかたちを維持しており、形状固定されていることがわかる。また、位置番号5あるいは6の木口試片については、全体を通して、回復率があまり変化していない。これは、この部分がほとんど圧縮されていないからである。丸太を角材に成形した際に一番圧縮される部分は、例えば位置番号4にあたる部分で、各表面部の中央部分である。この部分は、強く圧縮されているため、木目が非常に細くなっている。また、心材部（位置番号5あるいは6にあたる部分）はあまり圧縮されていないので、木目は処理前とほとんど変わらなかった。

3.2 圧縮成形角材の表面性状

Fig. 1-10は、圧縮成形角材の端部から順にブリネル硬さを測定して、同じ丸太から圧縮成形材と同じ寸法の無処理角材を切り出したものと比較した図である。圧縮成形角材の処理条件は、軟化水蒸気処理 135°C 1分、圧縮セット量17.7%、固定水蒸気処理 180°C 3分である。第1層（表層）端部の圧縮セット量があまり高くない部分は、中央部より硬さは低く、逆に第4層（中央断面）端部では圧縮セット量が高くなっているため、硬さも高くなっていることがわかった。この結果より、圧縮成形角材においては、無処理のものと比較して最大6.6倍まで硬さが向上したことがわかった。

この圧縮成形角材のブリネル硬さは、比重が0.6~0.8の広葉樹並の硬さに相当し、一般に柔らかいとされているスギ材においても、硬質広葉樹材に匹敵する硬度を得ることが可能となった。

Table 1-1. Compression set and set-recovery of compressively molded squares.

Softening process		Compression set (%)	Fixation process		Set -recovery (%)
Temp. (°C)	Time (min.)		Temp. (°C)	Time (min.)	
135	1	19.9	170	3	86.0
135	1	17.7	180	3	64.2
135	1	21.5	190	3	56.1
135	3	25.2	170	3	75.0
150	3	33.4	170	3	79.5
150	3	34.2	180	3	72.8
150	3	33.4	190	3	62.2
150	3	34.7	200	3	4.5

Table 1-2. The effects of steaming on set-recovery in type2 specimens.

Softening process		Compression set (%)	Fixation process		Set-recovery					
Temp. (°C)	Time (min.)		Temp. (°C)	Time (min.)	Location No.					
					1	2	3	4	5	6
150	3	33.4	170	3	1.05	1.01	1.06	1.45	0.93	0.96
150	3	34.2	180	3	1.03	1.01	1.08	1.42	1.08	1.00
150	3	33.4	190	3	1.01	1.01	1.09	1.40	1.10	1.00
150	3	34.7	200	3	0.96	0.95	0.92	0.96	0.93	0.91

Notes : Set-recovery = $\frac{\text{The cross-sectional areas after pressing}}{\text{The cross-sectional areas after recovery test}}$

Location No. shows in **Fig. 1-4.**

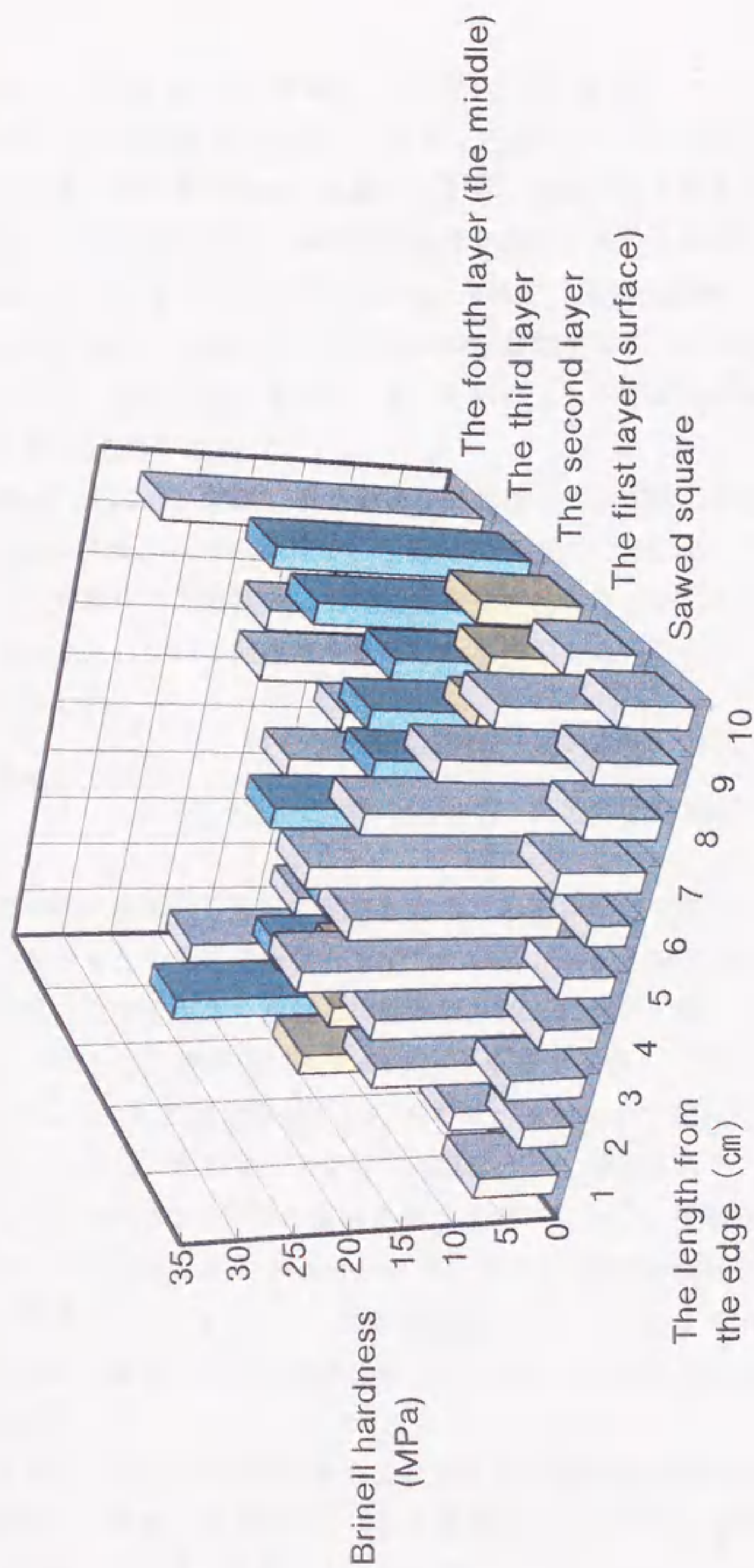


Fig. 1-10. The hardness of compressive molded square.

Notes : Compressive molded square was softened at 135°C for 1 min., and fixed at 180°C for 3 min. The compression set was 17.7 %.

3.3 圧縮木材（小試験片）の回復と寸法安定性

先に示したFig. 1-7では、ハリギリ圧縮セット材と無処理材との比較をした。左から順に無処理材、圧縮セット材、圧縮セット後水分と熱によって再び回復させた回復処理材、一番右が水分と熱を与えても回復しない固定処理材である。このときの圧縮セット量は43.5%で、回復処理材の回復度は85.5%であった。また、圧縮セット材が巨視的な破壊を示すことなく良好に圧縮されていること、また回復処理材は、水分と熱によってほぼ元の状態にまで回復している様子が観察された。

Fig. 1-11,12に、乾燥、吸水および煮沸繰り返し試験の結果を示す。

Fig. 1-11は、スギ試験片で、圧縮処理後190および200℃で2分間の固定処理をした試験片と、圧縮後に固定処理をせずにドラインセットした試験片の乾水繰り返しにおける回復度を比較したものである。ここで、回復度は次式により算出した。

$$\text{回復度} [\%] = \frac{\text{回復処理後の全乾寸法} - \text{圧縮処理後の全乾寸法}}{\text{圧縮処理前の全乾寸法} - \text{圧縮処理後の全乾寸法}} \times 100$$

この図で縦軸の0%は圧縮された木材の形状が完全固定されていること、100%はもとの形に戻ることを示している。ドラインセットしたものは、第1回目の吸水で大きく回復し、乾水繰り返しに伴い、徐々に回復度が大きくなった。そして、最終的にもとの寸法近くまで回復し、その回復度は80.7%であった。190℃で固定処理をしたものは、常温の水ではほぼ形状は固定されていた。しかし、熱水煮沸によって回復度が少し増加することがわかった。したがって、190℃の2分間の固定処理はまだ不完全で、圧縮時の応力が完全には抜けていないことがわかった。一方、200℃で固定処理をしたものは、最終的な回復度は-0.9%になり、全く回復はしなかった。いずれにしても、200℃で2分間の高圧水蒸気処理が圧縮木材の固定化に効果的であることが明らかになった。

また、200℃の固定処理をした試験片の回復度が負の値（-0.9%）を示した理由は、乾燥、吸水の繰り返しや煮沸によって材中の水可溶成分が抜けたことで試験片の体積が収縮したものと考えている。

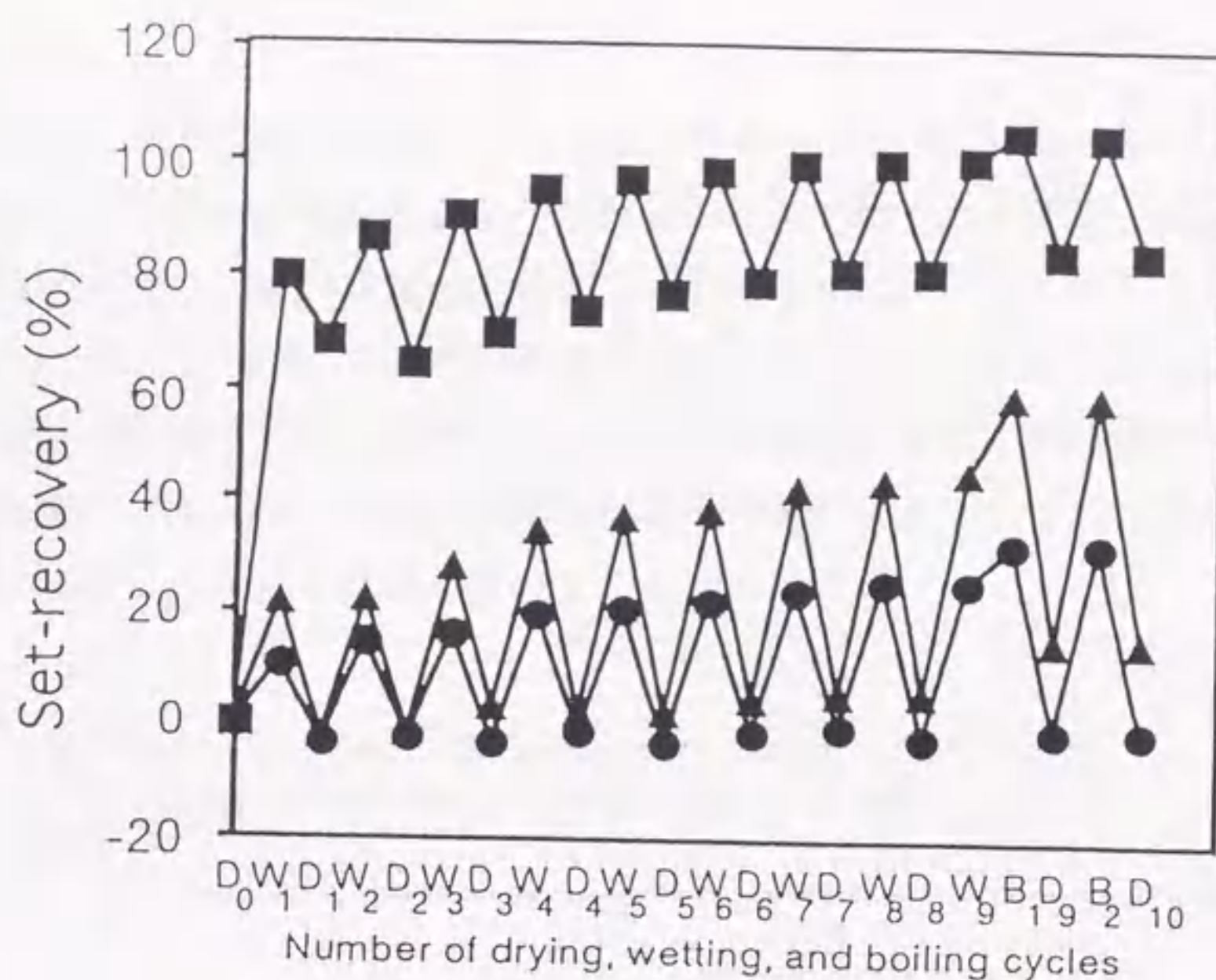


Fig. 1-11. Set-recovery for steamed compressed specimens after drying, wetting, and boiling cyclic test.

Legends : ■ : Steamed for 0 min in fixation process (Drying set).
 ▲ : Steamed at 190°C for 2 min in fixation process.
 ● : Steamed at 200°C for 2 min in fixation process.

Notes: Specimens were steamed at 150°C for 3 min in softening process. The compression set was 50%. "D", "W", "B" show oven-drying, wetting, and boiling.

また、乾燥状態と吸水状態との間の回復度の変動域は、固定された試験片の方がドラインゲットされている試験片より大きくなっているが、実際の寸法の変化幅は小さくなっている。この点について、Table 1-3に乾燥-吸水の繰返しとともに計算される膨潤-収縮の変化量" t "を示す。無処理材とドラインゲット材の" t "より、190°Cで2分および200°Cで2分の固定処理をしたものは、より大きい値を示した。これは、この条件のものが完全に形状固定されていないので、吸水による膨潤の際に細胞壁が肥厚することによる形態変化

量が大きくなったからと考える。また、200℃ 8分の"t"は190℃で2分および200℃で2分の固定処理をしたものより小さい値を示した。これは、水蒸気処理時間の増加、処理温度の上昇と共に細胞壁中のヘミセルロースのぬける量が多くなり、したがって親水基の量が少なくなったことで、吸水による膨潤の際に肥厚する量が徐々に減少したものと思われる。また、処理時間の増加と共に細胞壁中のセルロースの非晶領域が結晶領域に変化し、それによって親水基の量が減少したことも影響していると考えている。

Table 1-3. The amount of fluctuation "t"(mm) in swelling-shrinking calculated every time drying-water-adsorption is repeated.

water-drying-adsorption	unprocessed wood	Drying set	Fixation process		
			Temp.-Time (°C) (min.)		
			190-2	200-2	200-8
W2-D1	0.4	1.8	2.6	2.0	1.5
W3-D2	0.7	2.6	3.1	2.0	2.1
W4-D3	0.7	2.5	3.3	2.5	2.0
W5-D4	0.8	2.3	3.7	2.3	1.6
W6-D5	0.8	2.1	3.8	2.8	1.2
W7-D6	0.9	2.0	4.0	2.8	1.4
W8-D7	0.9	1.9	4.0	2.8	1.4
W9-D8	0.9	2.0	4.2	3.0	1.5
Average	0.8	2.1	3.6	2.5	1.6

Fig.1-12に、乾燥、吸水および煮沸繰り返し試験の結果最終的に得られた、ハリギリ試験片での固定処理温度および時間と回復度の関係を示す。圧縮後に固定処理をせずにドライグセットした試験片は、スギのときと同様に、第1回目の吸水で大きく回復し、乾燥・吸水繰り返しのに伴い、徐々に回復度が増加

した。そして、最終的に圧縮処理前の寸法近くまで回復し、その回復度は79.7%であった。一方、200℃の固定処理温度で8分間の固定処理をした試験片の回復度は、-6.4%になり、全く回復しなかった。これにより、広葉樹であるハリギリにおいてもスギのときと同様に、高圧水蒸気処理が圧縮木材の固定に効果的であることが明らかになった。最終的な回復度は固定処理温度が高くなるにつれて、処理時間が長くなるにつれて、減少することがわかった。

また、スギの場合と同様に、固定処理温度200℃で8分間の固定処理をした試験片の回復度は-6.4%になり、繰り返し試験後の寸法がもとの寸法を下回っていた。

このように、乾水繰り返し試験によって、スギ、ハリギリとも固定処理温度が高くなるにつれて、また固定処理時間が長くなるにつれて、形状の固定が達成されていることがわかった。

以上のことから、木材の加熱による軟化と、圧縮成形、およびその変形の固定が同じ装置内で短時間に行うことができること、即ち木材に急速に熱と水分を与え、容易に粘弾性変形を与え、さらに与えた変形の固定を短時間で行うことが可能となった。

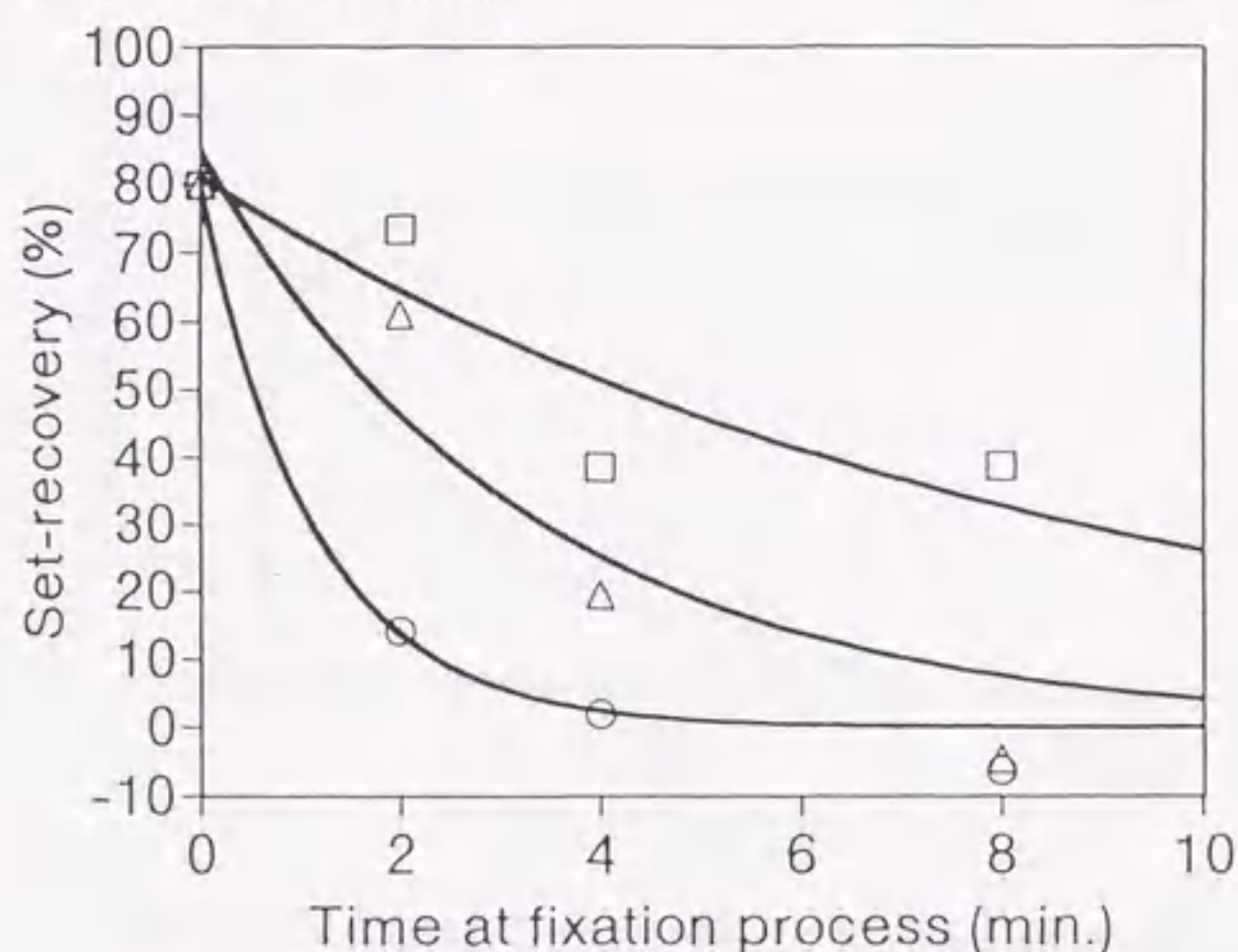


Fig. 1-12. The effects of steaming on the set-recovery.

Legends : Temperature at fixation process:

□:160°C, △:180°C, ○:200°C.

3.4 圧縮木材の内部応力

Fig. 1-13に圧縮木材中に蓄積する内部応力と水蒸気処理時間との関係について示す。水蒸気処理時間の増加と共に、内部応力は減少し、圧縮形状が固定されていることがわかる。材温が180°Cに達してから40分後に、内部応力は0になった。このとき、水蒸気をかけた状態で処理槽内のプレスをあげてみたところ、圧縮変形は固定されていた。また、圧縮セット量が66.6%のとき、プレスにかかる断面積あたりの応力は1.2MPaであった。

これまで報告されている内部応力の計測法としては、ワヒューらの方法¹⁰⁾がある。この方法は、圧力容器を貫通しているシリンダーの温度による膨張や圧力容器の側壁とシリンダーとの摩擦力を補正する必要があった。また、この方法は材全体に発生する内部応力の平均値しか算出できない方法であった。これに対し、本方法は小型のセンサーであり、処理材内部に直接取り付けられるので、それぞれの場所で発生する応力を個々に測定することができる。また、材内の水蒸気圧測定用温度センサーを併用しているので、特定箇所に発生する内部応力を正確に算出することができる。

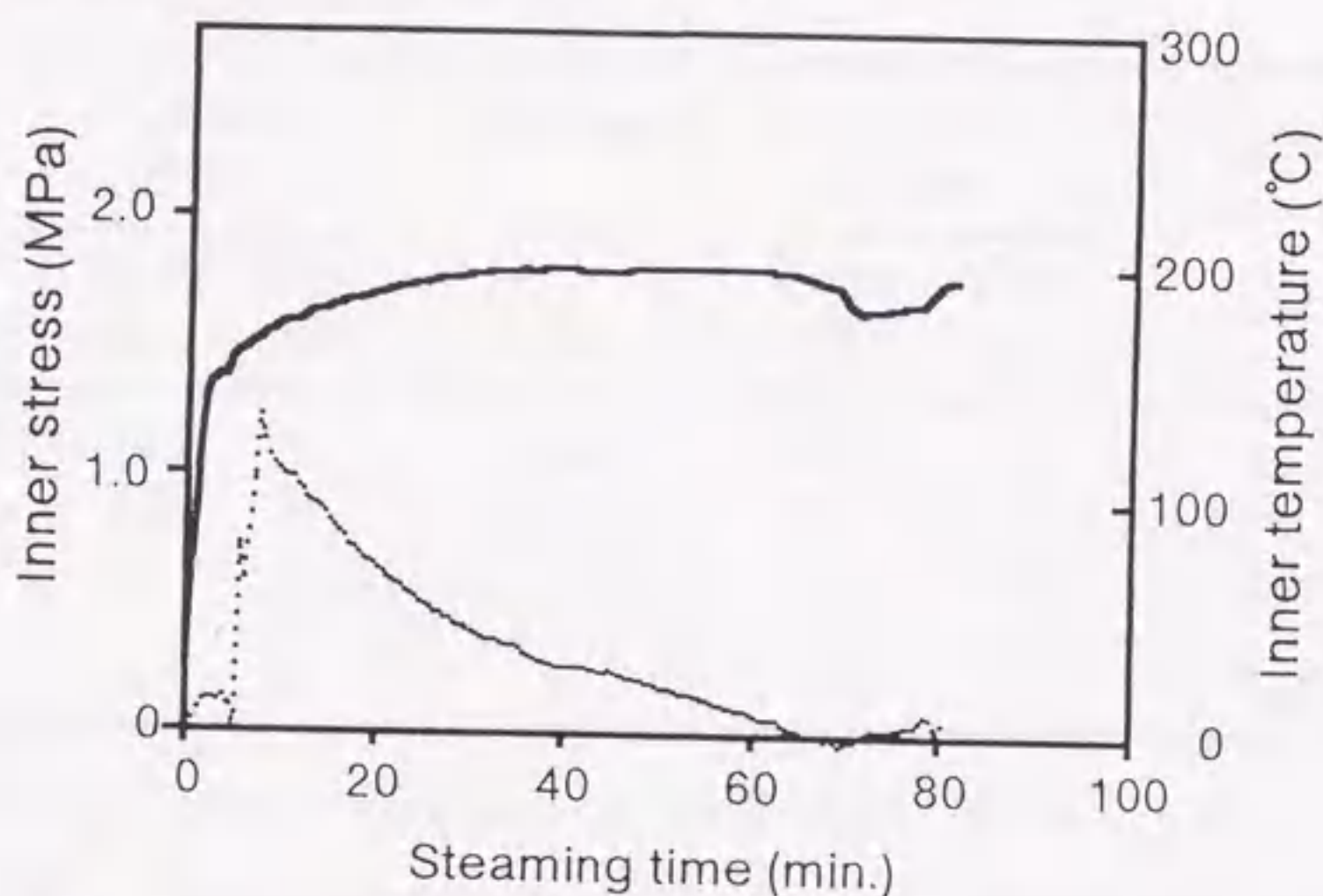


Fig.1-13. Inner temperature and inner stress in wood specimen, as a function of the steaming time.

Legends : — : Inner temperature,
 : Inner stress.

3.5 圧縮木材の耐朽性

水蒸気処理圧縮木材の耐朽性を評価するために、耐朽性試験を行った。結果をTable 1-4に示す。白色腐朽菌による重量減少率は、無処理のハリギリ材が約58%であるのに対して、圧縮木材では約17%で、1/3以下になった。また、褐色腐朽菌による重量減少率は、無処理のハリギリ材が約44%であるのに対して、圧縮木材では約22%で、ほぼ1/2となった。したがって、圧縮木材の耐朽性が向上したことがわかった。

また、白色・褐色腐朽菌ともに、圧縮セット量0%のものは、無処理のものと比較して重量減少率は低くなっているものの、セット量40%のものほどは低下しなかった。この理由は、圧縮することによって細胞内腔が密に詰まり、菌の増殖が妨げられたからであると考察した。

Table 1-4. The weight loss and compression set of compressed wood after biological resistance test.

Species	Softening process		Compression set (%)	Fixation process		Weight loss (WL) (%)	
	Temp. (°C)	Time (min.)		Temp. (°C)	Time (min.)	COV.	TYP.
Harigiri	150	3	40	200	8	16.9	22.3
Harigiri	150	3	0	200	8	40.7	37.4
Harigiri	0	0	0	0	0	57.7	44.2
Buna	0	0	0	0	0	67.6	54.1

Notes : COV. : *Coriolus versicolor* (L. ex Fr) Qu'el. FFPRI 1030

TYP. : *Tyromyces palustris* (Berk. et Curt.) Murr. FFPRI 0507

The control wood was used the sapwood of Buna.

3.6 圧縮処理の応用による成形加工

3.6.1 縦圧入成形による四角柱・六角柱の製造

鉄の引き抜き成形やプラスチックの押し出し成形と同様にスギ間伐材丸太より縦圧入成形による四角柱・六角柱の製造を行った。この手法は、最初が丸の状態から徐々に六角形や四角形に絞り込み、最終的に型枠の中に圧入する方法である。**Fig. 1-14**に示すように、圧入成形加工に使用される治具はオートクレーブ中に取り付けられる。供試された丸太は、直径約10cm、長さ約7cmである。**Fig. 1-15**にその製作手順を示す。この縦圧入方法の特徴は、処理材を型枠の中に入れてしまうことによって、圧開放時における加熱水の体積膨張による亀裂の発生を防ぐことができ、プレスをすぐに解放することができることである。したがって、装置内を大気圧に戻した直後に材を取り出すことが可能となる。この方法は、連続方式の実用プラントを考えるとときには有効な加工法となると思われる¹¹⁾。

3.6.2 木材表面への形状の転写および表札・レリーフの製造

スギ太鼓挽き丸太を圧縮するときにスパナなどの金属製の工具を置くことにより、形状の転写を行った。**Fig. 1-16**にその製作手順を示す。供試されたスギ太鼓挽き丸太は、接線方向に約半分の寸法に圧縮した。**Fig. 1-17**に示すように形状が転写された木材には、工具の側面に書かれている細かい文字についても容易に読みとれる程度にまできれいに転写されている。

次に、金属製の文字盤を板材の上に置き、プレスで圧縮することによって表札の製造を試みた。**Fig. 1-18**はその一例で、用いた材はブナである。また、**Fig. 1-19**に示すようにステンレス板に文字を切り抜き、背板や丸太の上にこの文字盤を置いて圧縮すると木目で文字を書くことが可能である。圧縮することで文字の形に浮いた部分をサンダーなどで削ることにより、文字が浮いたような意匠的加工が可能である¹¹⁾。

レリーフについても、アルミニウム板等で**Fig. 1-20**のような花の絵のデザインのプレス治具を作り、木材を圧入することによってこのような加工が比較的容易に行える。プレス治具をアルミニウムで製造することの利点は、① casting によって容易に細かい図柄を製作可能であること、② 高温条件下で強度の低下が著しく起こらないことである。

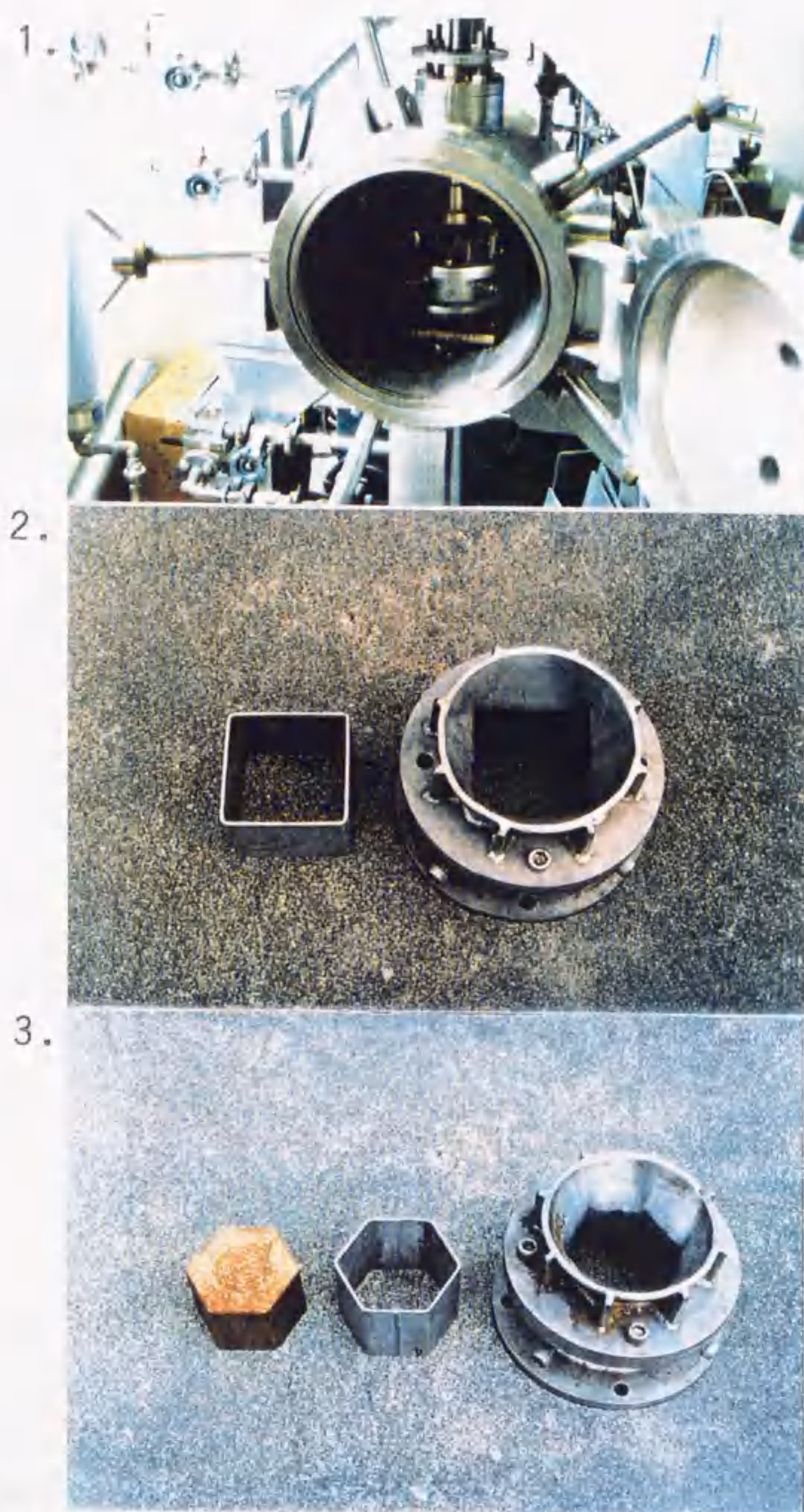


Fig. 1-14. The jigs for manufacturing process of compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

Note :

1. The jig set up the steam compressive-molding apparatus,
2. The jig for manufacturing of compressively molded square,
3. The jig for manufacturing of compressively molded hexagon.

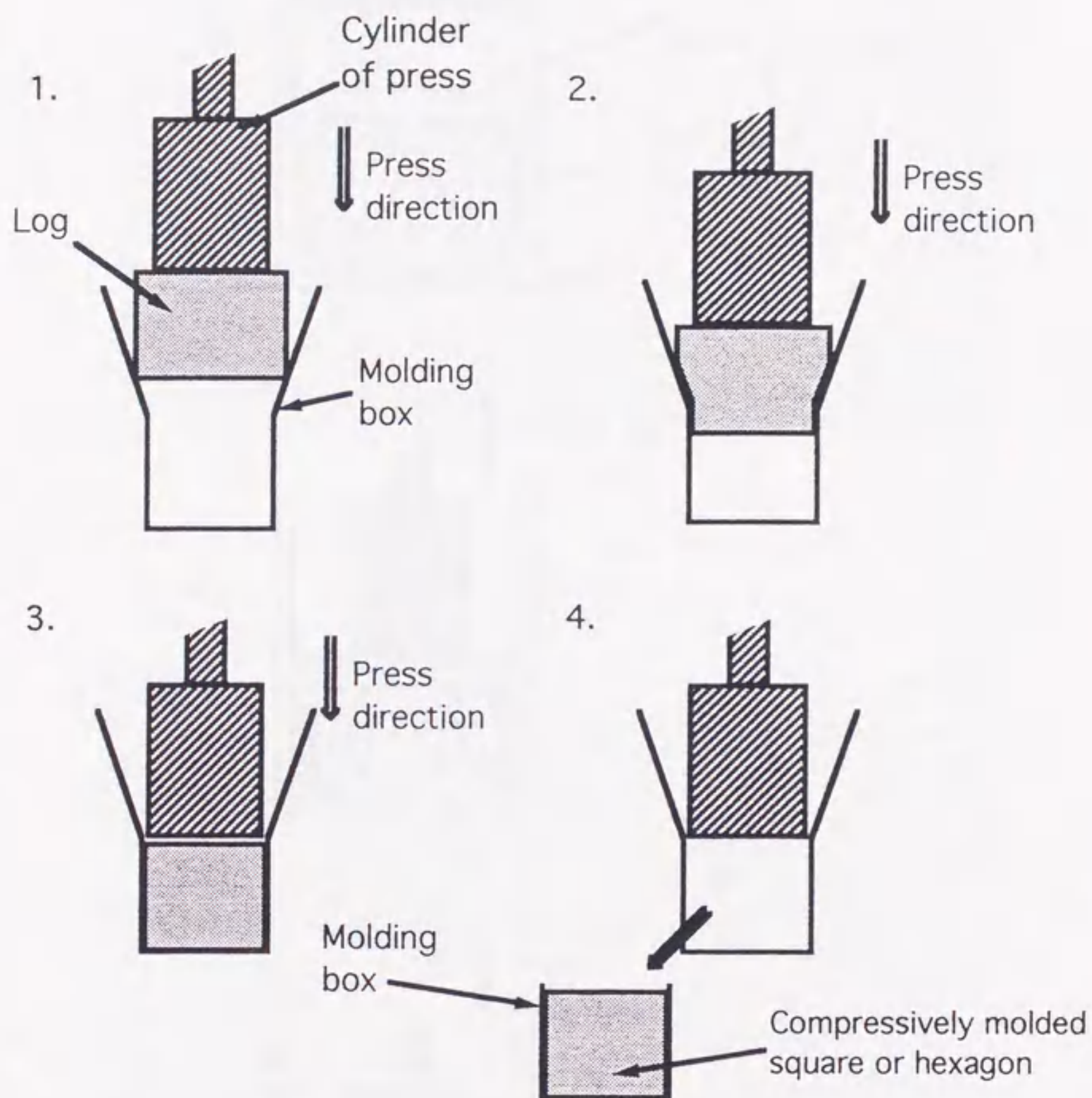


Fig. 1-15. The manufacturing process of compressively molded square and compressively molded hexagon under high temperature steam atmosphere.

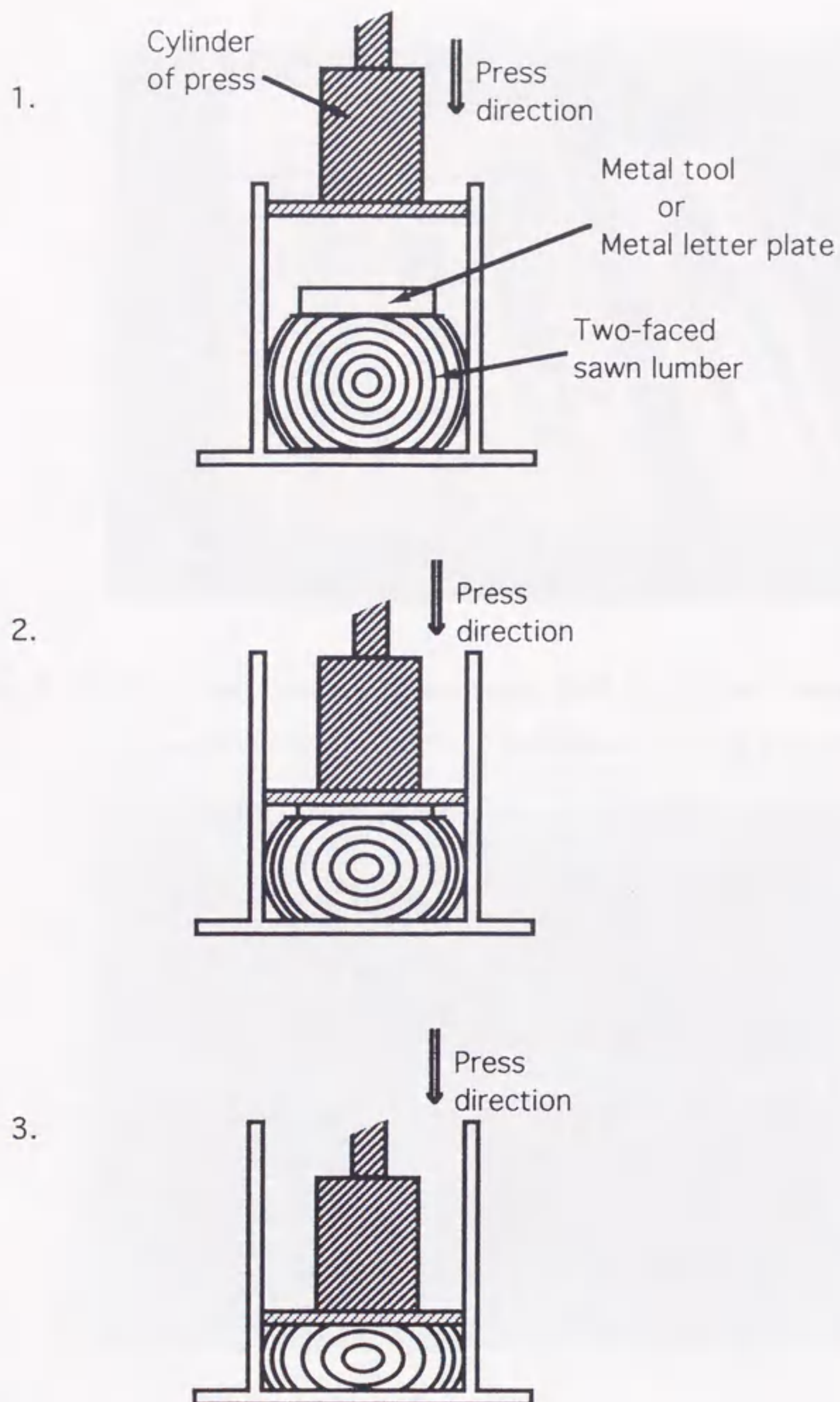


Fig. 1-16. The transcribing process by compressing under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-17. Two-faced sawn lumber transcribed the shape of metal tool by compressing under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-18. Lumber transcribed the letter by compressing under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-19. Lumber formed the letter by the grain.



Fig. 1-20. The jig and relieves manufactured by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

3.6.3 敷居・鴨居の製造

試験材料にミズナラ (*Quercus mongolica* var. *grosserrata* Rehder et Wilson) を用い、日本間に使用される敷居や鴨居の製造を試みた。Fig.1-21にその製作手順、Fig.1-22にその試作例を示す。圧縮により溝加工された部分は、特に圧密化されているので耐摩耗性が向上しており、非常に滑りが良くなる。また、水蒸気処理によってヘミセルロースの一部が分解されてフルフラール類が生じる。この作用により材色が暗色化し、水蒸気処理材に高級感を持たせることができた。

3.6.4 椀の製造

試験材料にスギを用い、Fig.1-23のような治具を用いて椀の製造を試みた。上下の治具を用いた場合、トーネットの強度が十分でなかったために薄板材から椀への製造には失敗したが、上部の治具のみの場合は厚板材から灰皿のような形状のものの製造が可能となった。Fig.1-24にその製作手順、Fig.1-25にその試作例を示す。椀の底部にあたる部分では、圧縮前の寸法に対して1/4くらいの寸法にまで圧縮されているため、割れが多少入っている。

3.6.5 曲げ木の製造

試験材料にスギを用い、曲げ木の製造を試みた。Fig.1-26にその試作例、Fig.1-27にその製作手順を示す。製造の際には、Fig.1-27に示すように下側にトーネットをあてて木材の伸びを防ぎ、木材全体を圧縮する方向に挽板を曲げて木材の曲面加工を行った。曲げ加工の際、トーネットやプレス面に加飾を施しておけば、木材表面にエンボス加工を施すことも可能となる¹¹⁾。Fig.1-26の試作品製造時には、ステンレスネットを張って曲面加工した。

3.6.6 集成パズルの製造

試験材料にスギを用い、集成パズルの製造を試みた。Fig.1-28にその製作手順を示す。直径35mmおよび直径25mmのスギの木球を図のように並べ、元の球の全体積の約半分の体積になるまで圧縮する。圧縮処理後は、Fig.1-29に示すように個々の球が球の置かれた方向に応じて複雑な形状に成形されることから、木材を用いた三次元ジグソーパズルとして使用することが可能となった

¹¹⁾。

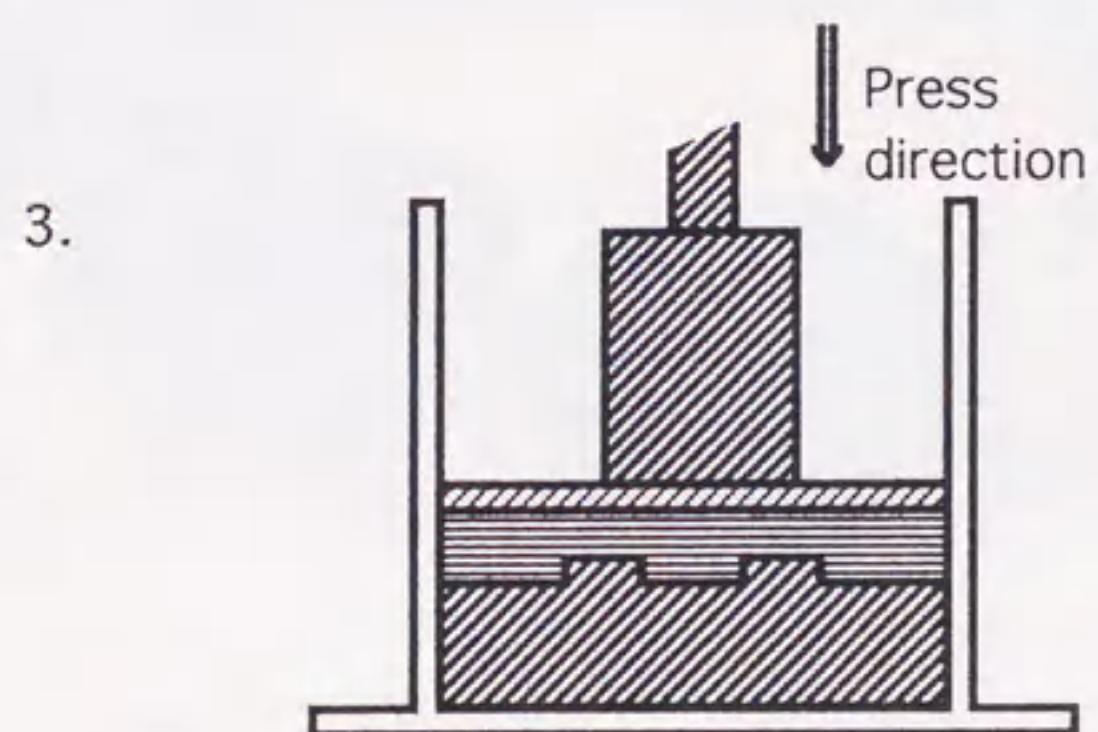
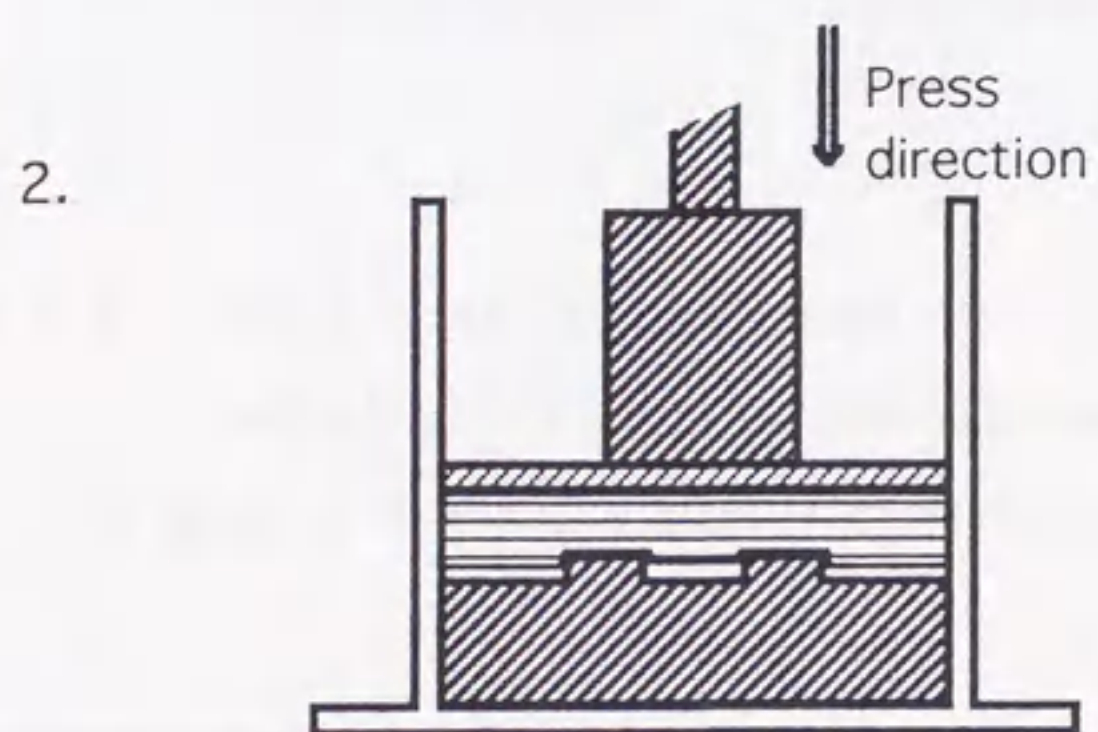
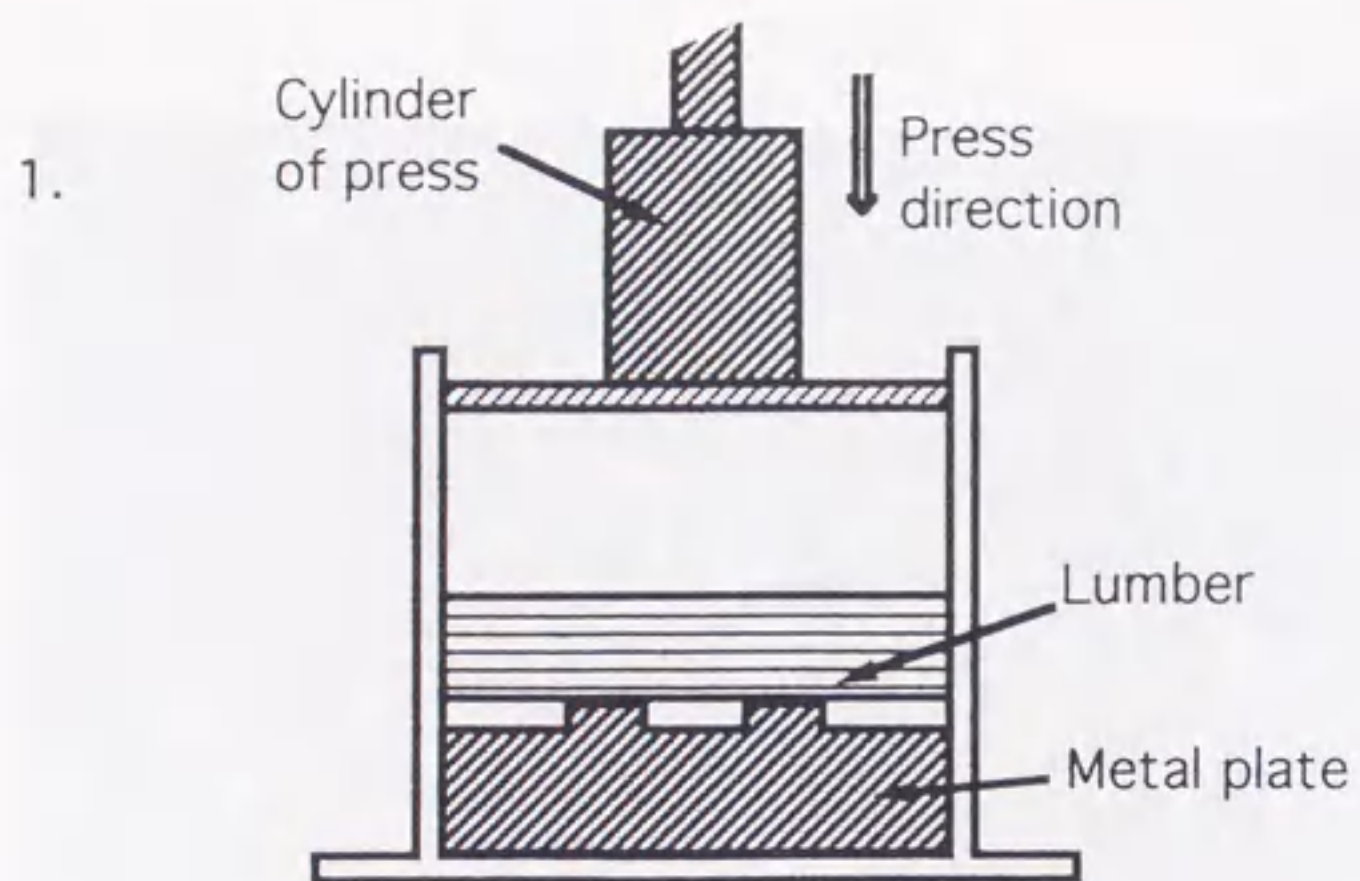


Fig. 1-21. The manufacturing process of the threshold by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-22. The threshold manufactured by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

Note : The species of wood is Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don).



Fig. 1-23. The jig for manufacturing wooden bowl by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

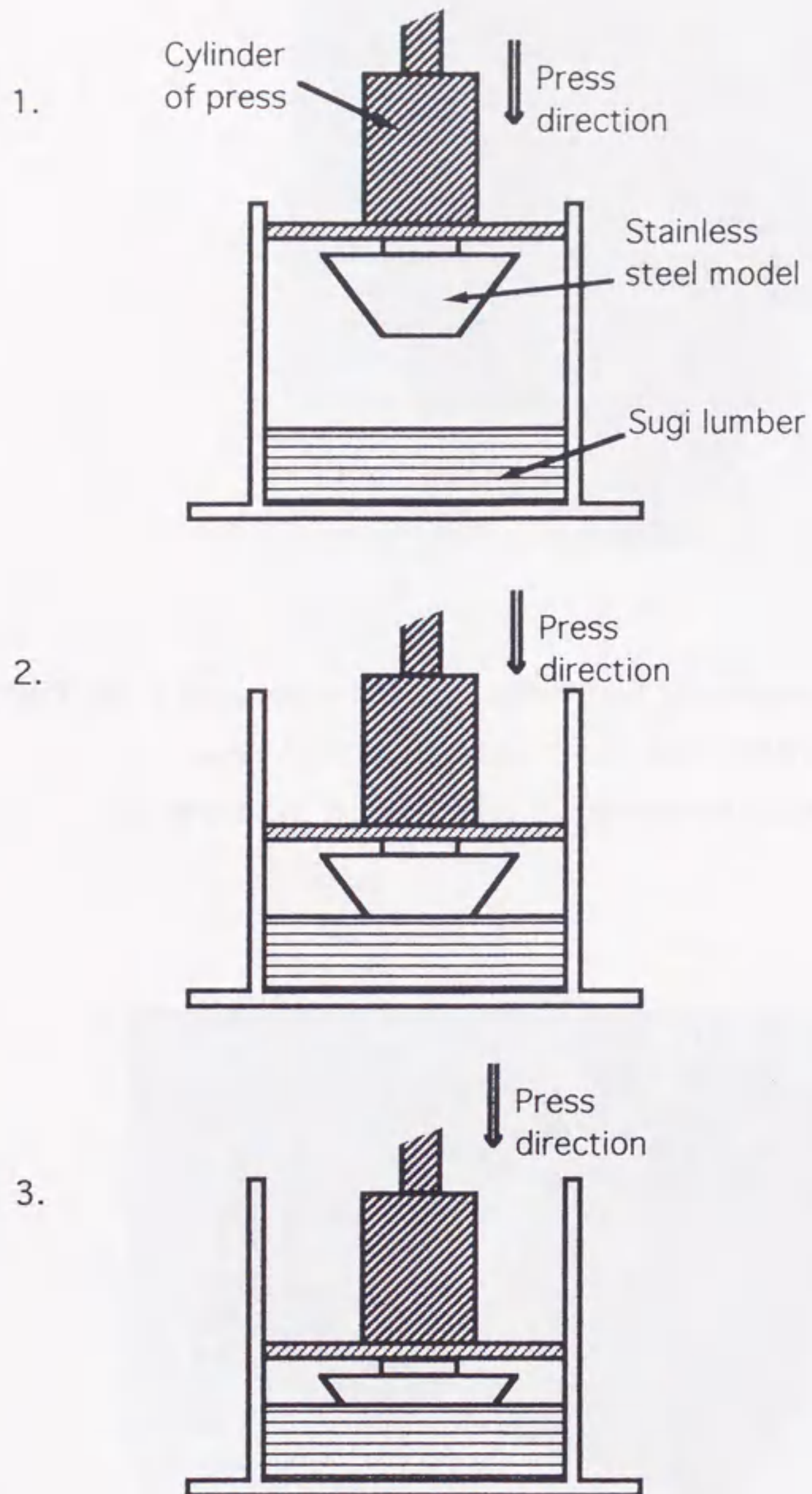


Fig.1-24. The manufacturing process of wooden bowl by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-25. The wooden bowl manufactured by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

Note : The species of wood is Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don).

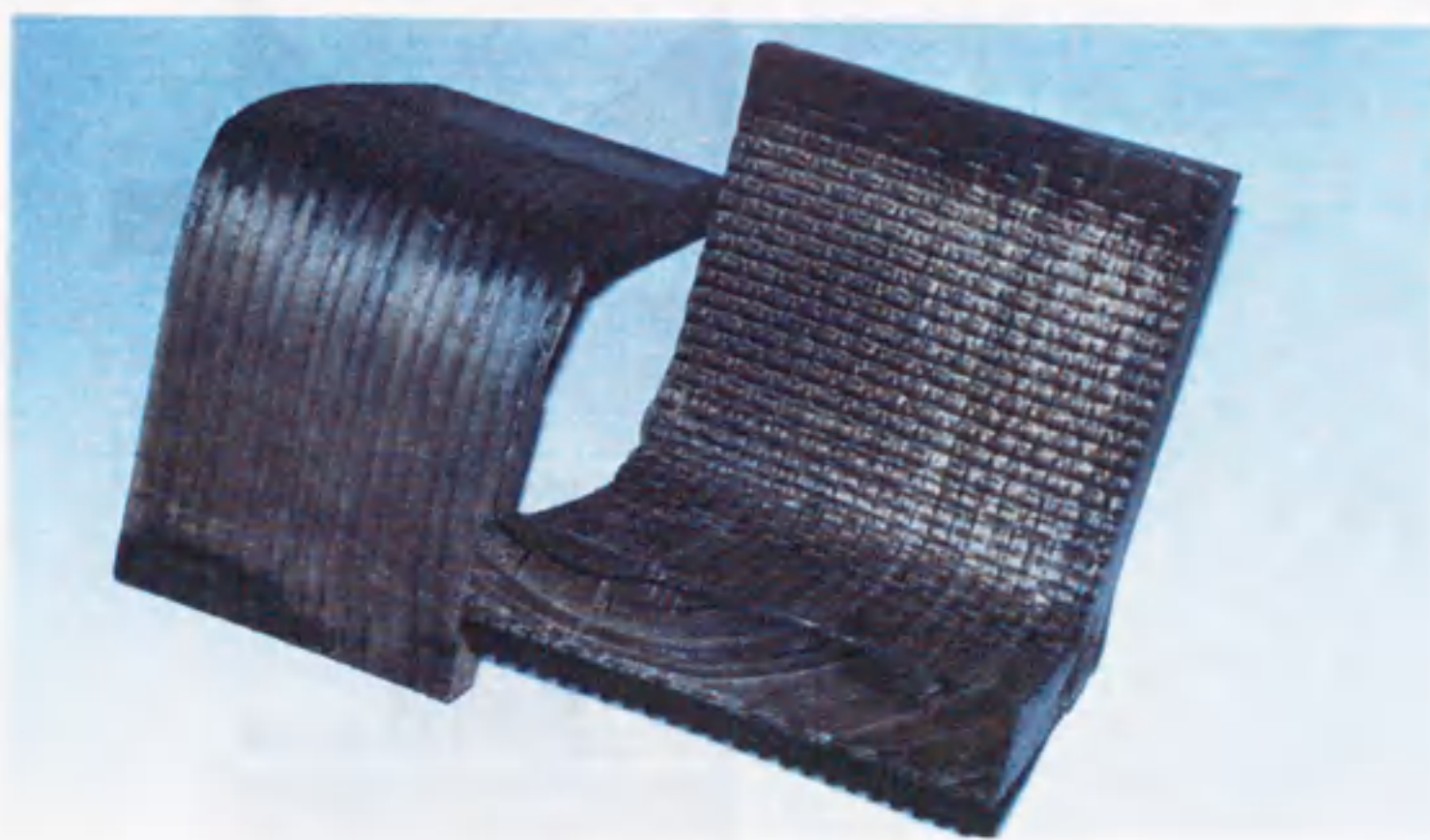


Fig. 1-26. The bentwood manufactured by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

Note : The species of wood is Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don).

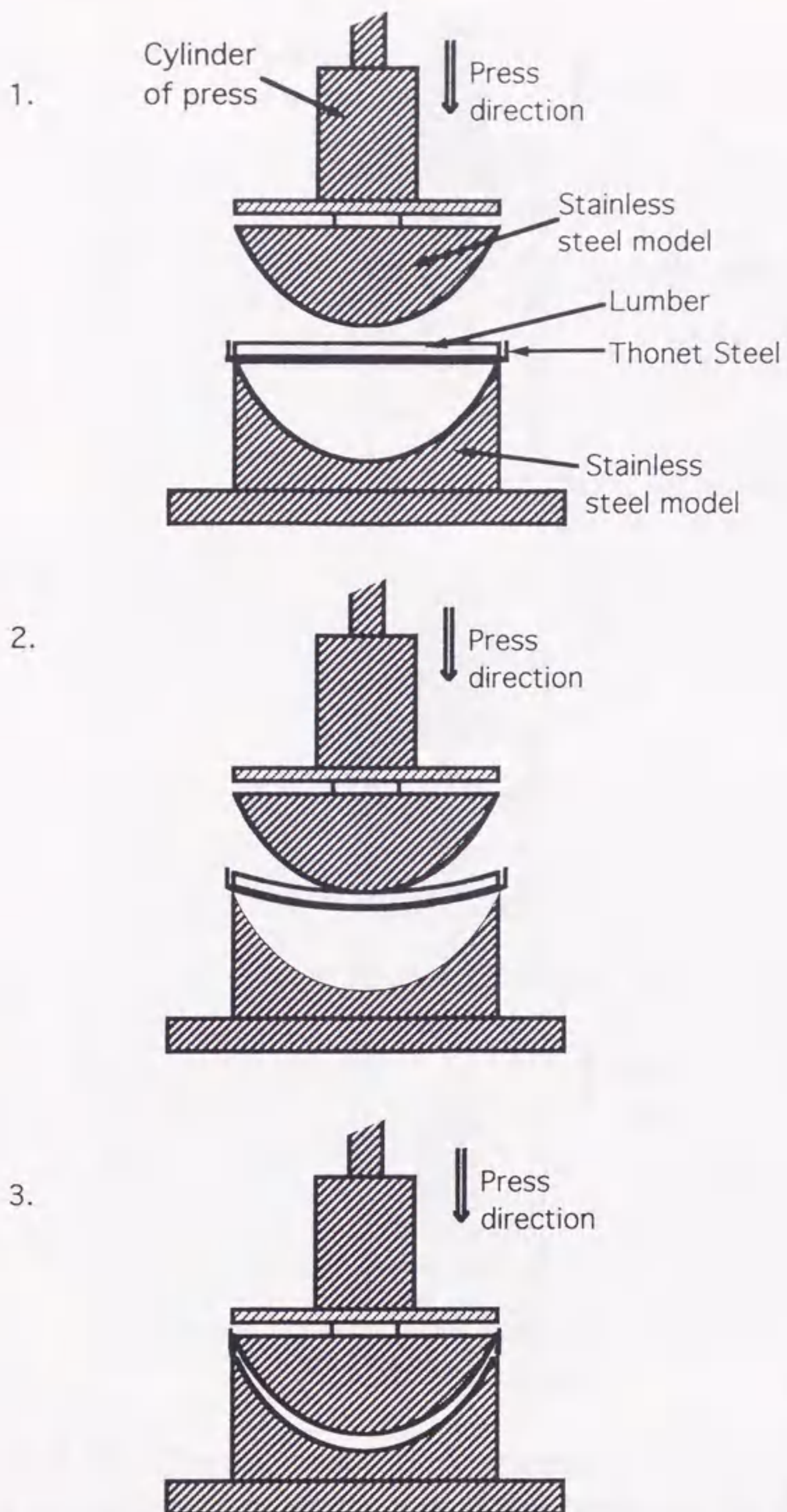


Fig. 1-27. The manufacturing process of bentwood under high temperature steam atmosphere.

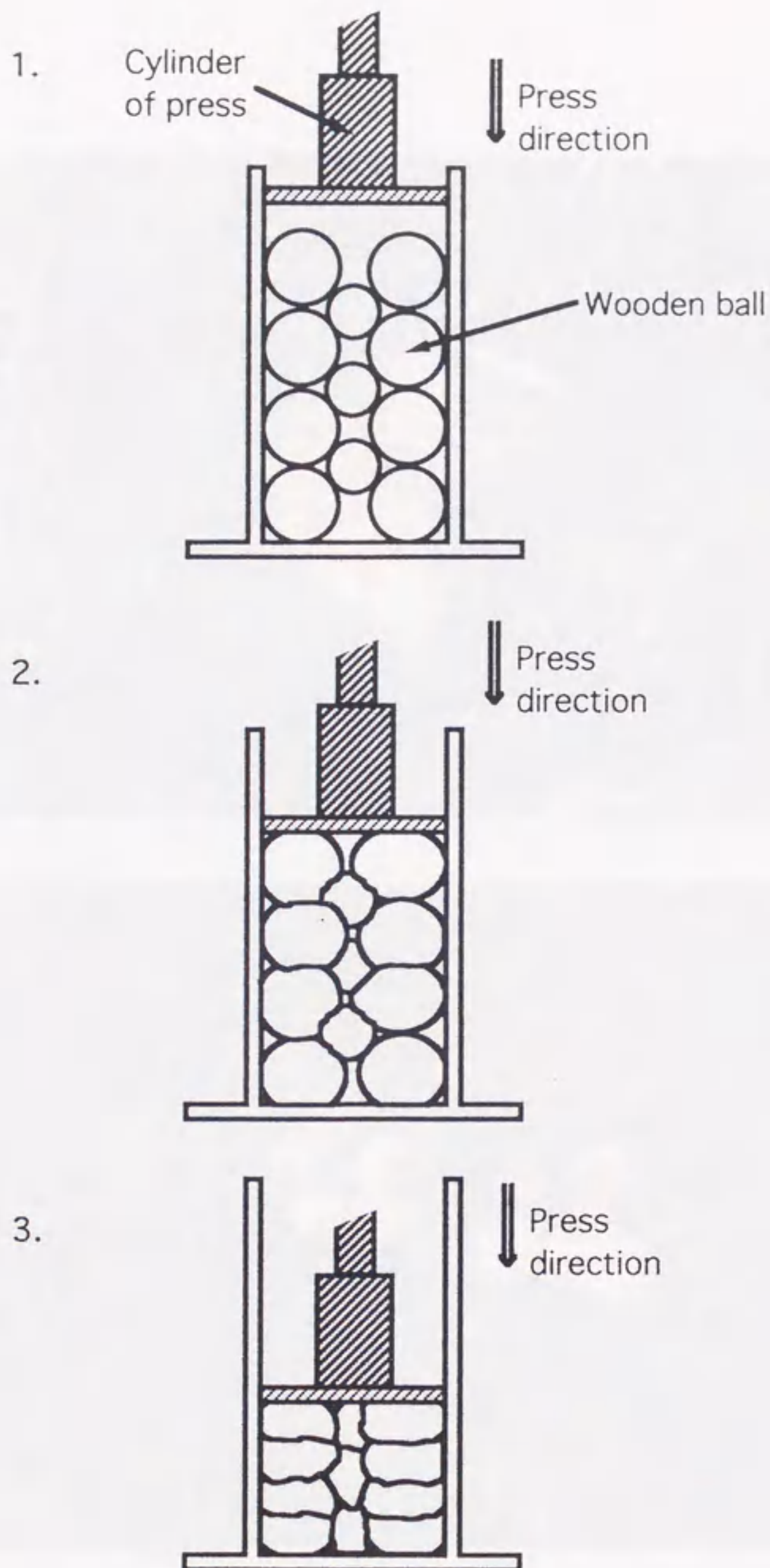


Fig. 1-28. The manufacturing process of the laminated puzzle by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.



Fig. 1-29. The laminated puzzle manufactured by compressive-molding under high temperature steam atmosphere.

Note : The species of wood is Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don).

4. 結言

間伐材の建材としての利用および材質の改良を目的として、高圧水蒸気中で圧縮成形加工を行い、その固定条件を検討した。その結果、次のことがわかった。

①考案した高温高圧プレス成形装置により、木材の軟化、圧縮、およびその変形の固定を一連の操作で短時間に行い、丸太から圧縮成形角材を製造することが可能になった。

②高圧水蒸気処理をした圧縮成形角材は、熱水煮沸による回復をしなくなり、成形材の永久固定が達成できた。

③圧縮木材は、巨視的な破壊を起こすことなく良好に圧縮できること、また回復処理材は、水分と熱によってほぼ元の状態にまで回復することを確認した。

④今回の試験のような直径15cmの丸太の形状固定条件は、飽和水蒸気を200℃で3分間かけることである。

⑤圧縮成形角材の表面硬さは、無処理のものと比較して最大6.6倍まで向上することがわかった。

⑥耐朽性については、圧縮木材は無処理のものと比べて重量減少率が1/2～1/3になっており、耐朽性が向上したことがわかった。

⑦考案した治具により、種々の応用成形加工が可能となった。

第2章 高圧水蒸気による圧縮成形木材の永久固定化機構の検討

1. 緒言

第1章では、針葉樹間伐材の有効利用をする目的で、オートクレーブ中での高圧水蒸気処理による丸太から柱材への非切削加工方法について提案した。この方法を用いれば、間伐材丸太から圧縮成形柱材を製造するためには、200℃で3分間の形状固定のための高圧水蒸気処理が必要となる。

この圧縮成形加工方法を採用した新しい装置を使うことで、圧力容器中で木材の加熱による軟化と、圧縮成形、およびその変形の固定が同じ水蒸気によって一段階で行うことができ、また薬品を使用しないため、木材本来の特性を残したままで木材の改質成形加工が可能となった。

圧縮変形の永久固定に関する主要な研究では、圧縮後の水蒸気処理や熱処理により寸法安定性が改善されるという報告^{12, 13)}がある。それらによると、寸法安定性の向上は、圧縮状態で再編成されるヘミセルロースと一部のリグニン分子の切断によるマトリックスの熱的可塑性によって生じ、ヘミセルロースの分解にはよらない。水蒸気処理による圧縮木材構造の固定は、リグニン-ヘミセルロースマトリックスの水蒸気軟化の結果によるものであるとされている。マトリックス中には結晶セルロースのマイクロフィブリルが存在し、マトリックスが軟化されるとマイクロフィブリルが運動するのである。つまり、このマトリックス中に内在する力の緩和とマイクロフィブリルの変形の回復が生じることによって、圧縮変形の固定が達成されると報告している。

本研究では、この点について別の観点により研究を進めた。圧縮変形を永久固定するためには、水分と熱による分子運動の活性化を阻止するかあるいは、弾性的に変形するセルロースマイクロフィブリルにたまる応力が解放されれば良い。マイクロフィブリルを部分的に低分子化させる方法としては、爆砕処理がある。これまでの爆砕処理に関する研究^{8, 34)}より、水蒸気処理によりセルロースの非晶部分およびヘミセルロースが短時間に加水分解されることや、爆砕処理をしなくても高温の水蒸気処理によりセルロースの結晶化度、マイクロフィブリル幅、ミセル幅が増加すること、そして結晶形態が不安定なI α 型から安定なI β 型に変換されることが明らかにされている。これらのことが、マイクロフィブリルにたまる応力の解放に有効であると我々は考えた。

そこで、本章では水蒸気処理木材の物理的性質および化学的性質を調べることで圧縮処理材が永久固定される際の機構について考察した。

2. 実験

2. 1 抽出成分と寸法変化

木材中のどの成分が圧縮木材の形状固定に関与しているのかを明らかにするために、第1章 2.5で水蒸気処理したハリギリ試験片を、熱水および1,4-ジオキサンを用い、それぞれ48時間のソックスレー抽出を行った。その際、

(1) 試験片のまま抽出したもの

(2) 試験片をウィレーミル（粉砕器 Type B 池本理化工業（株）製）で粉砕し、20メッシュ通過のものを抽出したもの

の2通りの方法で実験を行った。この理由は、(1)で形状固定に抽出物が影響を与えているかどうかを調べ、(2)で圧縮木材から抽出される成分量を調べるためである。

(1)では、抽出の際の重量減少を抽出後の試験片の重量をもとに算出したが、(2)では、抽出液を濃縮し、その後凍結乾燥して得られた抽出物重量をもとに算出した（凍結乾燥機は東京理化工業（株）製 EYELA Freeze Dryer FD-5、岩城硝子（株）製 Freeze Dryer FRD-50Mを使用した）。

2. 2 クラーソン法によるリグニンの定量

本実験では、リグニンの定量は吉原ら³⁵⁾の行った改良硫酸法によった。

試料は、抽出処理した木材試料（残渣）を用いた。この木粉0.2g（全乾）を精秤して100ml容三角フラスコに入れ、72%硫酸（比重1.64）を5ml加えて内容物が均一になるようにガラス棒で攪拌し、20℃で3時間放置した。次いで、内容物を蒸留水189mlで定量的に200ml容三角フラスコに移した。このとき硫酸濃度は3%である。

その後、シリコン栓で蓋をしてオートクレーヴ中で121℃、30分間加水分解を行った。加水分解を行った希釈硫酸溶液を放冷後、予め秤量してあるガラスフィルター（1G4）を用い、105±3℃で恒温になるまで乾燥し秤量した。

クラーソンリグニン（L）〔%〕は、次式により算出した。

$$L = \frac{W}{S} \times 100 [\%]$$

W：残留物重量 (g)

S：試料の全乾重量 (g)

2. 3 走査型電子顕微鏡 (SEM) による圧縮木材の組織構造の観察

2. 3. 1 観察試料の作製

圧縮木材および無処理材より、20 (L) × 5 (R) × 5 (T) mmの寸法の試験片を切り出し、室温の蒸留水を入れたデシケーターの中に浸漬した後アスピレーターを用いて30分間減圧し、その後24時間以上放置したときの飽水状態の試験片を試料とした。

試料には、十分乾燥させた後イオンスパッタリング装置 (日本電子製 FINE-COAT JFC-1100E) で金によるイオンスパッタリングを5～15分間行い、表面に金をコーティングした。

2. 3. 2 圧縮木材の組織構造の観察

走査型電子顕微鏡 (日本電子製 JSM-820) で木口断面および壁孔 (ピット) の観察を行い、写真を撮影した。観察時の加速電圧は、以下の通りである。

木口断面 : 10 kV

壁孔 (ピット) : 15 kV

2. 4 透過型電子顕微鏡 (TEM) による

セルロースミクロフィブリルの観察

2. 4. 1 試料支持膜の作製

支持膜の作製には、透過型電子顕微鏡用銅メッシュ (200または300メッシュ) を使用した。支持膜の作製方法は、滴下法を採用しコロジオン膜を張った

³⁶⁾
。

2. 4. 2 観察試料の作製

抽出処理した木材試料をウィレーミルで粉碎した後に、1, 4-ジオキサン：蒸留水 (1：1) の溶液中で十分膨潤させた後ホモジナイザー (日本精機 (株) 製 HOMOGENIZER AM-2) にかけて、6時間ホモジナイズし、その上澄み液中に存在するミクロフィブリルを観察用の試料とした。

先に作成した支持膜上に、上澄み液を1滴滴下した。自然乾燥した後、2~3%酢酸ウラニル水溶液を滴下させ、一層だけ残し、水溶液を除去した。

2. 4. 3 セルロースミクロファイブリルの観察

透過型電子顕微鏡（日立製作所製 H-800）を使い、加速電圧100kVで試料を観察し、1万倍で写真撮影した。観察試料はスギを用い、処理条件は第1章で明らかになった形状固定条件である200℃の飽和水蒸気を3分間かけたものと、無処理材の2種類である。

2. 5 圧縮木材のX線回折と結晶性の評価

2. 5. 1 X線回折測定用試料の作製

木材中のセルロースは大部分結晶状態にあり、他の成分は非晶状態にあるとされている^{37, 38)}。そこで、圧縮木材のX線回折図を得ることにより、セルロース成分の結晶化度を算出した。ハリギリ木粉は、試験片をウィレーミルで粉碎し、20メッシュを通過したものをを用いた。

2. 5. 2 X線回折測定用ペレットの作製

木粉0.5gを秤量し、錠剤成形器にかけ、油圧プレスで約200kgf/cm²に約20分間圧縮し、直径2.0cm、厚さ約1mmのペレットを作製した。

2. 5. 3 X線回折強度の測定

作製したペレットをX線回折装置（理学電機製 Geigerflex RAD-IC）の試料台に取り付け、X線回折強度を計測した。測定条件は、次の通りである。

X線出力	: 35kV、20mA
スリット	: D.S.=1°、R.S.=0.3mm、S.S.=1°
走査速度	: 1°/min
計測回折角度	: $2\theta = 5 \sim 45^\circ$

2. 5. 4 水蒸気処理圧縮木材の結晶化度の算出

結晶化度は、①高さ法³⁹⁾ および②面積法^{40, 41)}を用いて算出した。

①高さ法

$$\text{結晶化度} = \frac{(I_{002} - I_{am})}{I_{002}} \times 100 [\%]$$

I_{002} : $2\theta = 22.8^\circ$ における(002)面の干渉強度

I_{am} : $2\theta = 18^\circ$ 付近の極小値での干渉強度

②面積法

$2\theta = 5^\circ$ 、 18.5° 、 32° には結晶性のピークはないものとして、 $2\theta = 18.5^\circ$ 付近の極小値より 5° および 32° の強度間に線を引き、その上を結晶領域（それぞれ I_{cr1} 、 I_{cr2} とする）とし、それらの線と $2\theta = 5^\circ$ と 32° の強度間を結ぶ線で囲まれた三角形を非晶領域（ I_{am} とする）として、算出した。

$$\text{結晶化度} = \frac{(I_{cr1} + I_{cr2})}{(I_{cr1} + I_{cr2} + I_{am})} \times 100 [\%]$$

2. 6 セルロース繊維の形状固定

ここでは、セルロースのみからできているビスコースレーヨンモデル物質に用いた水蒸気処理を行った。処理の際には、各試料をテフロンのフィルムでカバーして自由収縮状態にしておいた。各試料は、木材を処理したのと同じ高温高圧プレス成形装置（（株）日阪製作所製）で処理した。

2. 6. 1 ビスコースレーヨン長繊維糸条の形状固定

試料は、再生セルロース（セルロースⅡ）であるビスコースレーヨン長繊維糸条（（株）クラレ製、500デニール/100フィラメント）である。この試料を直径13mmのステンレスパイプに巻き付けて、水蒸気処理を行った（Fig. 2-1）。処理温度は 130°C ～ 190°C で、処理時間は2分間である。

水蒸気処理後に、各試料を1ループごとに切り取り、水に浸漬させ、その開きを観察した。

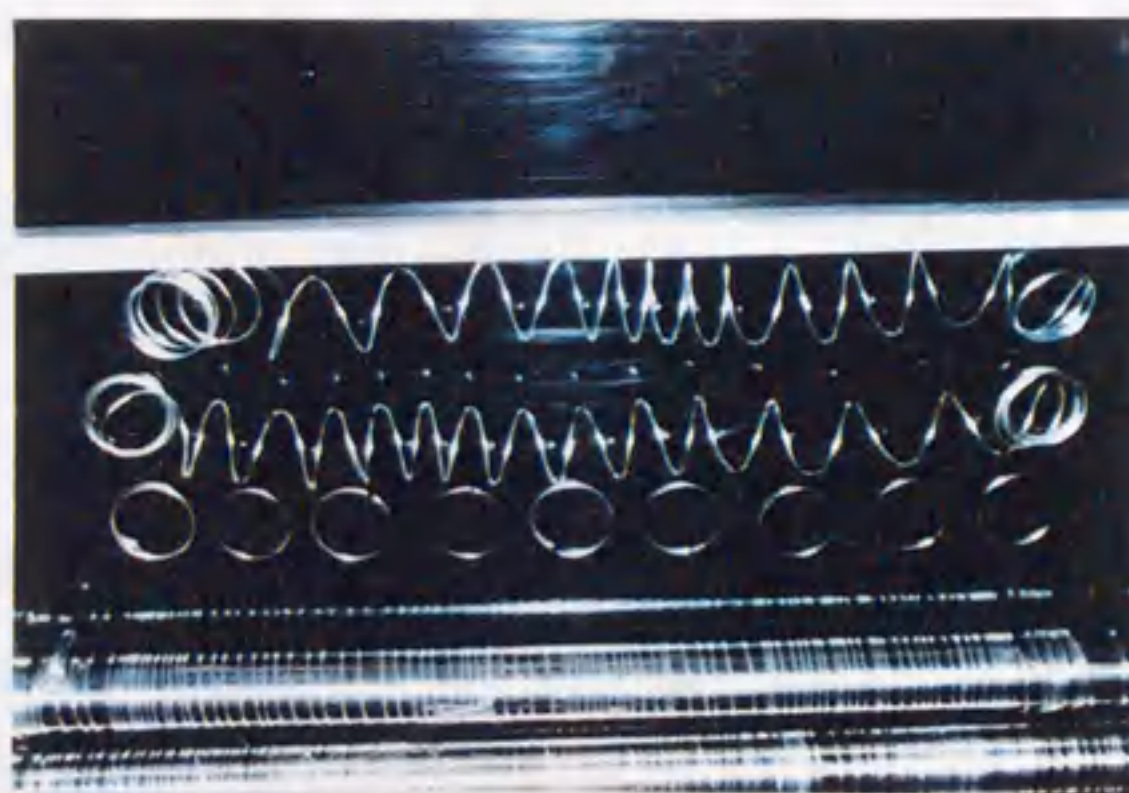


Fig. 2-1. Viscose rayon and stainless steel pipes to fix by steaming.

3. 結果と考察

3.1 圧縮木材の抽出成分と寸法変化

Table 2-1に、圧縮処理したハリギリ試験片を熱水およびジオキサンでソックスレー抽出を行ったときの重量減少、抽出終了後の回復度および残渣のクラソンリグニン量を示す。Table 2-1上段は、(1) 試験片のまま抽出したものの結果を示し、Table 2-1下段は、(2) 試験片をウィレーミルで粉砕してから抽出したものの結果を示す。(1) では、抽出の際の重量減少を抽出前後の試験片の重量減少をもとに算出したが、(2) では、抽出液を濃縮し、その後凍結乾燥して得られた抽出物重量をもとに算出した。Table 2-1中の水蒸気処理による重量減少とは、水蒸気処理の段階における重量減少の割合を表している。抽出処理では、熱水抽出でヘミセルロースを、ジオキサン抽出でリグニンを除くことを目的とした。

水蒸気処理と熱水抽出を合わせた、水による重量減少は処理と共に増加する傾向にあり、全部を合計した重量減少も、処理と共に増加する傾向にある。また、圧縮処理をしていないもの（抽出前圧縮セット量が0%のもの）としたも

の（圧縮セット量約40～50%）では、固定の条件が同じ場合には圧縮処理をしない方が重量減少が多くなる傾向があった。この理由は、圧縮をすることによって水蒸気の通りが悪くなり、熱処理されにくくなるということが考えられる。

Table 2-1における抽出残渣の回復度とは、圧縮処理段階の寸法を基準として、抽出後の試料の回復度を算出したものである。圧縮をした後、180℃の水蒸気で2分間あるいは4分間の固定処理をしたものは、回復度が48.3%、22.6%と完全には固定されていない。変形の固定がなされている180℃8分間、200℃2分間、4分間そして8分間のものでも、ヘミセルロースおよびリグニンはある程度除かれており、残存リグニン量では、200℃で4分間の固定処理をしたものは、もとのリグニン量16.9%の約1/2になっている。

Fig. 2-2に、ハリギリ圧縮木材の水およびジオキサン抽出による重量減少と回復度について示す。図中の数値は、乾燥、吸水および煮沸繰り返し試験後の回復度を示している。この図より、抽出物量が多くても形状は固定されており、また抽出物量と回復度の間に相関性がないこともわかる。固定処理200℃8分間の試験片の抽出物量が200℃4分のものと比べて減少したのは、一部のヘミセルロースがフルフラールとなって縮合しているからだと考えている。それに相当する量は、残存リグニン量に含まれていると思われる。

これらのことから、かなりのヘミセルロースおよびリグニンが抽出されていても形状の固定はなされており、抽出量が多くても圧縮形状は固定されていると言える。このことから、形状の固定にはヘミセルロース、リグニンは関与していないものと推定した。

これらのことをさらに詳しく分析するために、水蒸気処理した試験片を粉碎して木粉にしたのち同様の操作を行った。抽出処理後も形状が回復しなかった条件のものでも木粉にすることによって、例えば固定処理が200℃で4分間のものでは水蒸気処理と熱水抽出を合わせた、水による重量減少が31%、つまりヘミセルロースの大部分が除かれ、また、残存リグニン量が6.2%、つまりリグニンの半分以上が除かれても形状の固定がなされていると考えられる。このことから、固定のメカニズムにはヘミセルロースやリグニンではなく、セルロースが関与していると考えた。

Table 2-1. Contents of extractives and residual lignin in Harigiri (*Kalopanax pictus* Nakai) specimens.

Steaming conditions		Weight loss (WL)			Set-recovery in extractive residue (%)	Residual lignin in extractive residue (RL) (%)
Softening process	Fixation process	by Steam	by Boiling water	by Dioxane		
Temp. Time (°C) (min.)	Temp. Time (°C) (min.)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Non-milled specimens						
0	0	—	1.8	1.9	—	16.9
150	3	5.4	3.8	2.8	48.3	10.6
150	3	5.1	4.8	2.7	22.6	11.5
150	3	4.7	6.9	1.0	-3.5	11.4
150	3	8.6	4.0	2.1	3.7	10.4
150	3	15.8	4.3	2.0	-1.6	8.5
150	3	9.8	5.6	3.0	0.6	13.2
Milled specimens						
0	0	—	5.9	6.0	—	15.1
150	3	5.1	5.8	4.7	—	9.5
150	3	4.7	4.0	3.7	—	9.9
150	3	4.6	7.7	7.8	—	8.2
150	3	8.8	15.2	4.5	—	7.2
150	3	14.8	16.2	8.3	—	6.2
150	3	10.2	14.5	6.1	—	6.9

Note: Compression set = 40 (%)

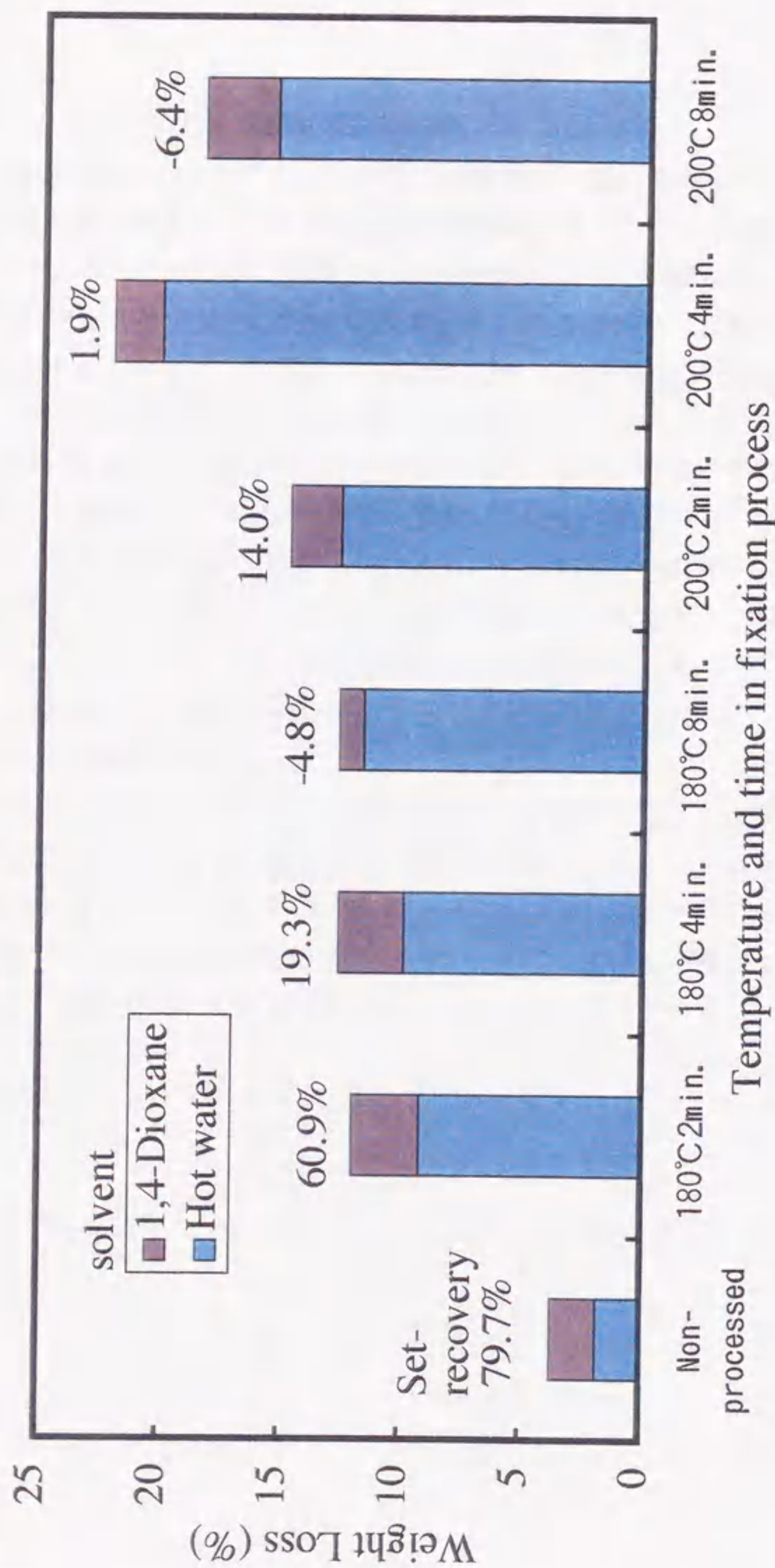


Fig. 2-2. The weight loss by extaction and set-recovery in Harigiri (*Kalopanax pictus* Nakai) specimens.

Note : The size of the specimen before compression-set is 20 (L) x 20 (R) x 30 (T) mm. Compression set was 40 %. Extractives by hot water contain the extractives caused by compression set. Inserted values in figure show the set-recovery after drying, wetting, and boiling cyclic test.

3.2 圧縮木材の組織構造の観察

Fig. 2-3に、ハリギリ圧縮木材（圧縮セット量43.5%）の木口断面と、無処理材の木口断面における走査型電子顕微鏡写真を示す。上部写真二つが無処理材である。このときの圧縮木材の処理条件は、軟化処理が150℃3分間で圧縮後の固定処理が200℃で8分間であった。この図から、圧縮木材では細胞壁が破壊することなく、なめらかに屈曲変形し、細胞内腔などの空隙がつまって、ハリギリ材が圧密化している様子が観察できる。

Fig. 2-4に、スギ圧縮成形角材の角にあたる部分の電子顕微鏡写真を示す。この圧縮成形角材の処理条件は、軟化処理が150℃3分間、圧縮セット量34.7%、固定処理が200℃で3分間であった。圧縮成形角材の角にあたる部分は、圧縮されている部分と、角材の角の方に逃げていく部分との境界となるところである。この写真では、細胞壁が破壊することなくなめらかに褶曲し圧縮されている部分と、あまり細胞壁が変形せず元の形状を維持している部分のコントラストが観察できる。

Fig. 2-5に、スギ材を高圧水蒸気によって固定処理した試験片の柃目面における壁孔（ピット）の走査型電子顕微鏡写真を示す。このときの処理条件は、軟化処理が150℃3分間、圧縮セット量34.7%、固定処理が200℃で3分間である。この写真では、壁孔室内部のトールスに裂け目が生じている。このことから、壁孔を通じて水蒸気の出入りがあったと考えている。

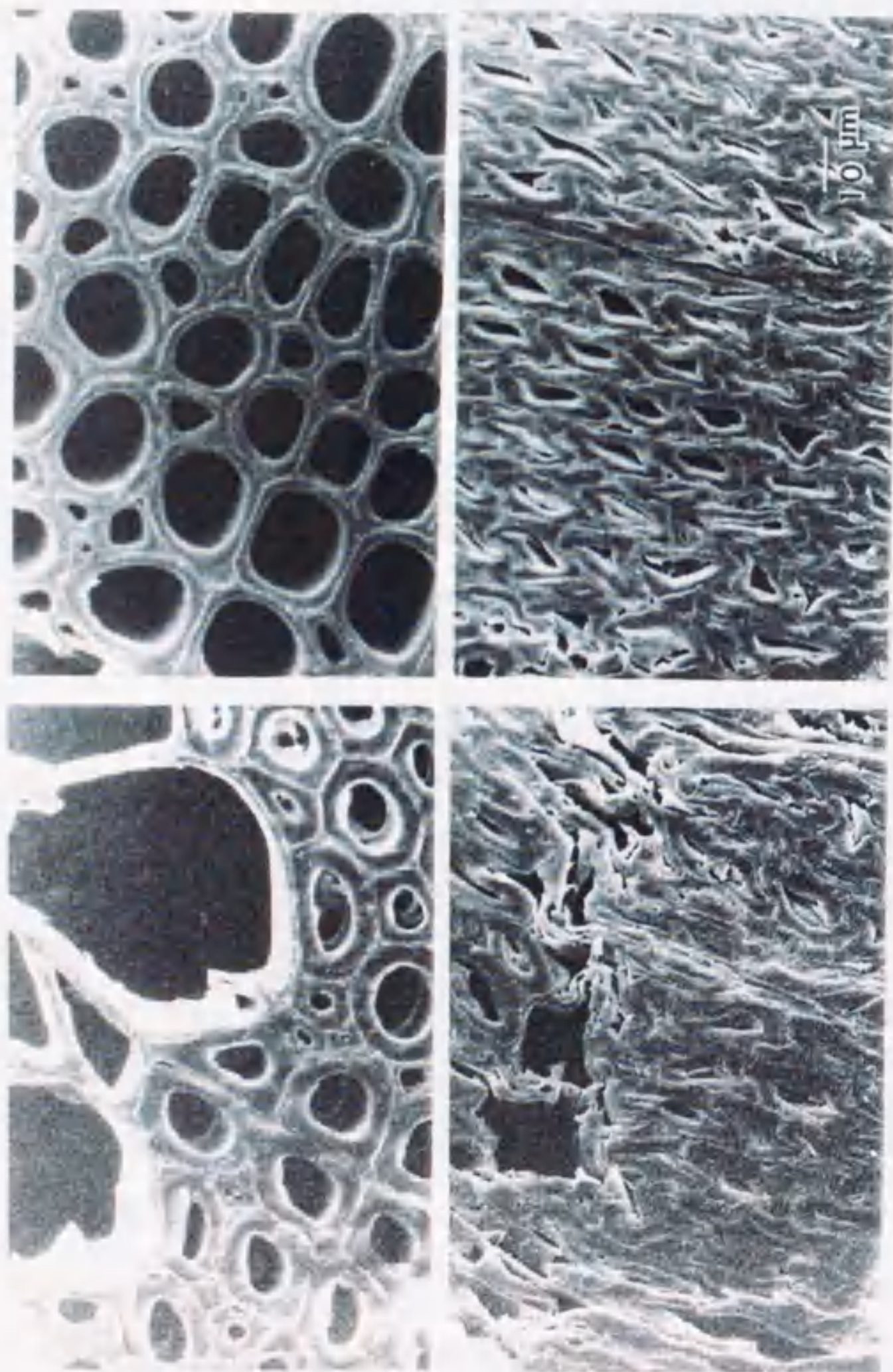


Fig. 2-3. Enlarged photomicrographs of cross-section of Harigiri (*Kalopanax pictus* Nakai) specimen before and after compression set.

Notes : The top two photomicrographs are non-processed wood, the bottom two photomicrographs are compressed wood. Compressed wood were steamed 150°C for 3 min in softening process, 200°C for 8 min in fixation process. Compression set was 43.5%.

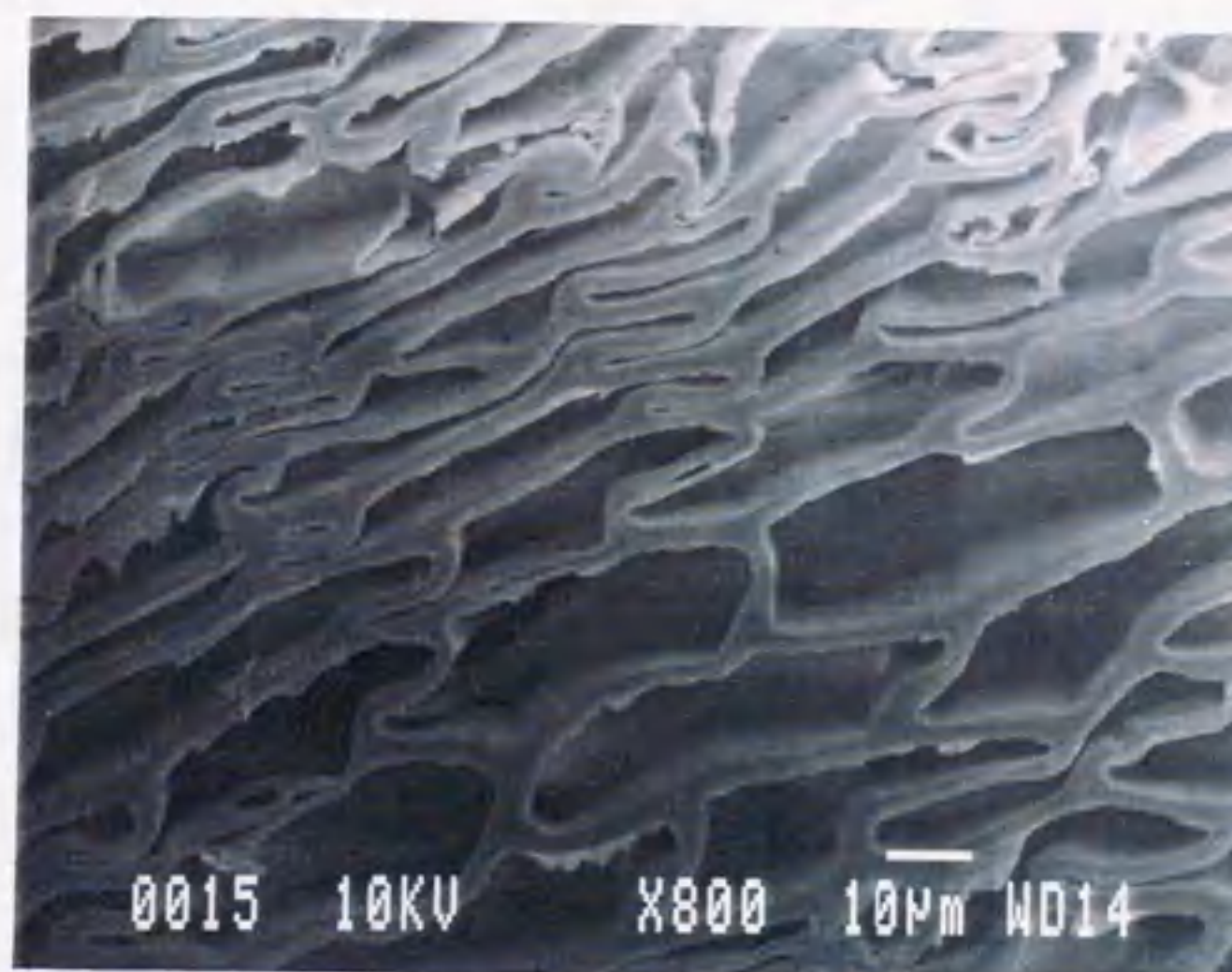


Fig. 2-4. The photomicrograph of cross-section of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) specimen after compressive-molding.

Notes : Compressed wood were steamed 150° C for 3 min in softening process, 200° C for 3 min in fixation process. Compression set was 34.7%.

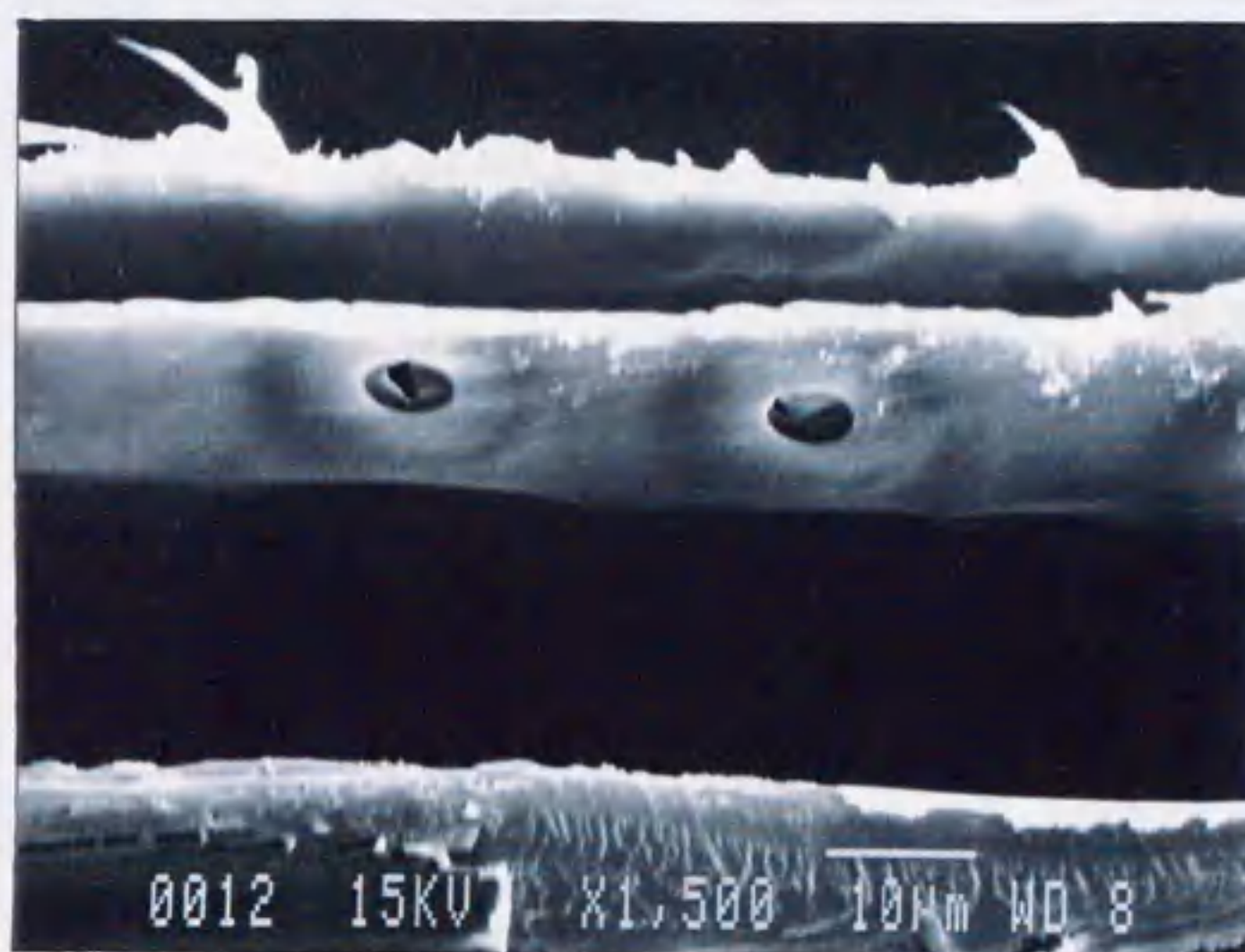


Fig. 2-5. The photomicrograph of radial face of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) specimen after compressive-molding.

Notes : Compressed wood were steamed 150° C for 3 min in softening process, 200° C for 3 min in fixation process. Compression set was 34.7%.

3.3 セルロースミクロフィブリルの変化

水蒸気処理圧縮木材のセルロースミクロフィブリルの観察は、酢酸ウラニルでネガティブ染色し、透過型電子顕微鏡を使用して行った。**Fig. 2-6,7**に水蒸気処理前後の電子顕微鏡写真を示す。

Fig. 2-7の水蒸気処理後のミクロフィブリル幅は、**Fig. 2-6**の水蒸気処理前の幅より太くなっていることがわかった。また、水蒸気処理前ではリグニンなどのセルロース以外の成分が試料中に残留しているが、水蒸気処理後はそれらが減少した様子も確認できた。このことから、高圧水蒸気処理によって、セルロースの結晶領域が増加するものと推測した。

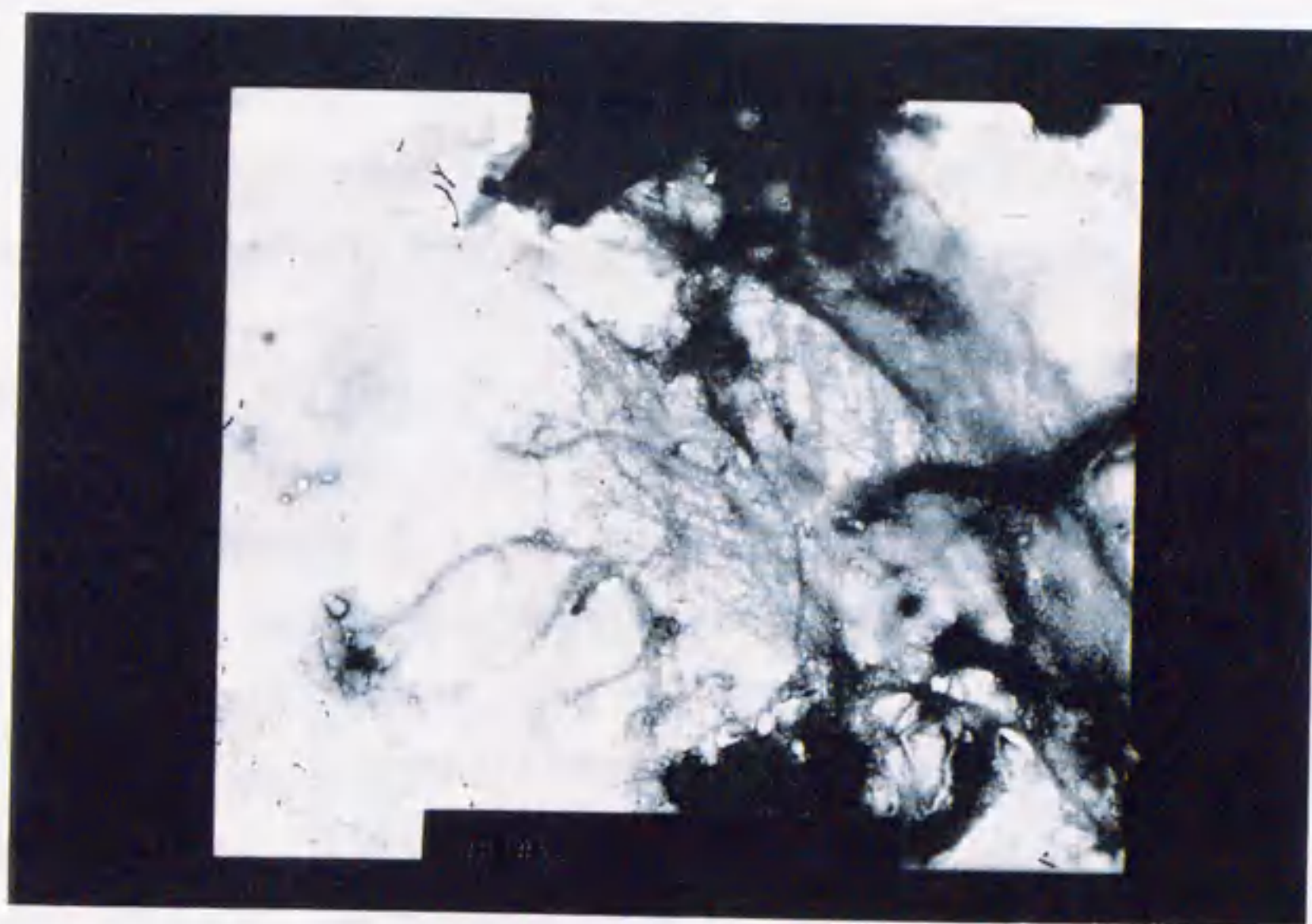


Fig. 2-6. The photomicrograph of a cellulose microfibril of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) non-processed specimen.

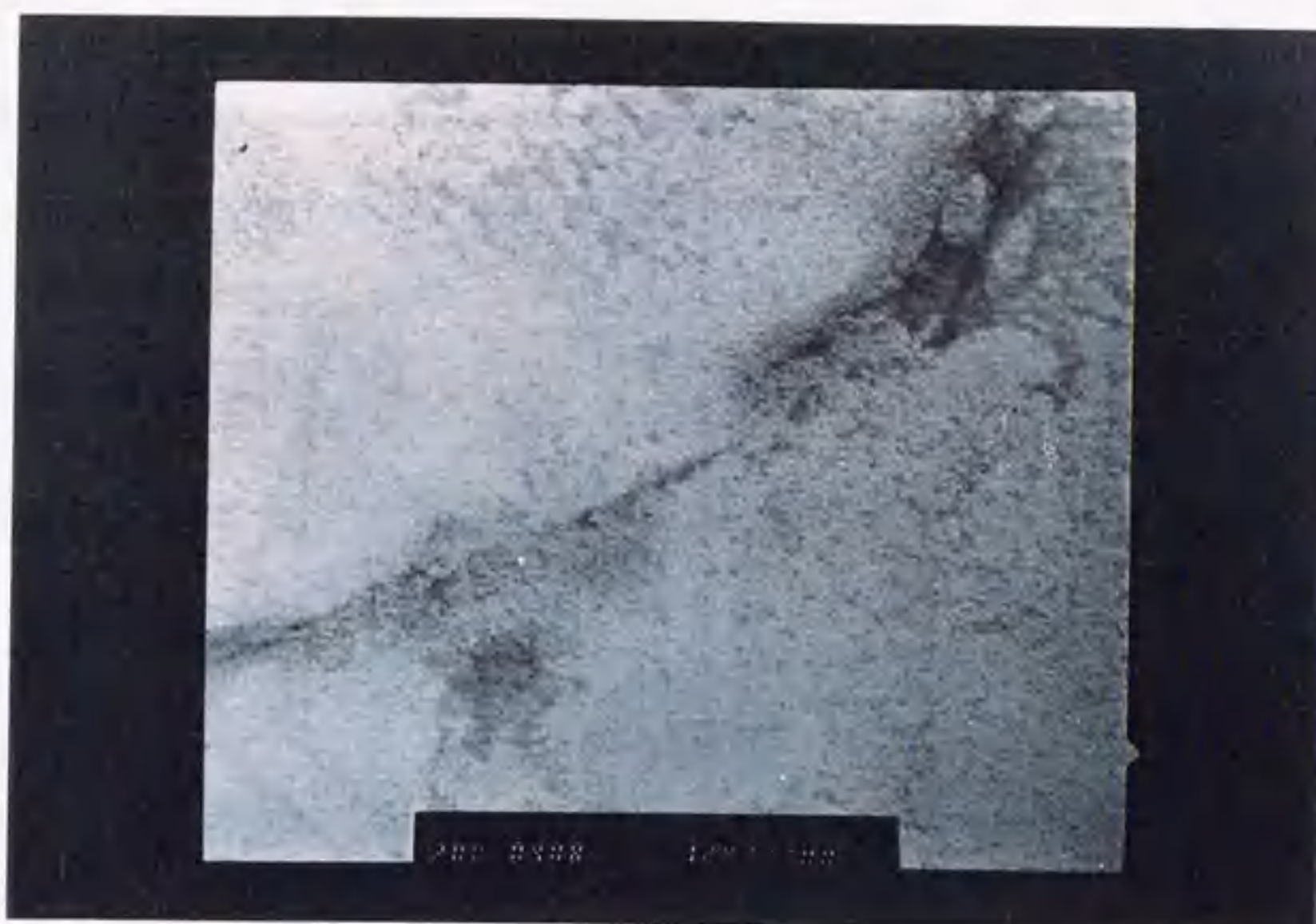


Fig. 2-7. The photomicrograph of a cellulose microfibril of Sugi (*Cryptomeria japonica* D.Don) specimen after compressive-molding.

Notes : Compressed wood were steamed 150° C for 3 min in softening process, 200° C for 3 min in fixation process. Compression set was 34.7%.

3.4 圧縮木材のX線回折と結晶性の評価

圧縮木材のX線回折図から、セルロース成分の結晶化度を算出し、結晶性の評価を行った。結晶化度は、(1) 高さ法、(2) 面積法で算出した。**Fig. 2-8**に、抽出残渣木粉における処理時間と回復度および結晶化度(CrI)の関係について示す。**Fig. 2-8 (a)**では、固定処理時間の増加と共にCrIが増加しているのがわかる。また、CrIの増加と共に抽出処理後の試験片の回復度は減少した。**Fig. 2-8 (b)**では、固定処理時間が4分間のときにCrIは最大値を示している。このCrIの挙動は、抽出処理後の試験片の回復度の挙動と一致するものである。即ち、CrIの増加と共に試験片の回復度は減少している。また、固定処理時間が8分間のときにCrIが減少した理由は、ヘミセルロースがフルフラールや5-ヒドロキシメチルフルフラールになり、縮合する³⁾からであると考察した。

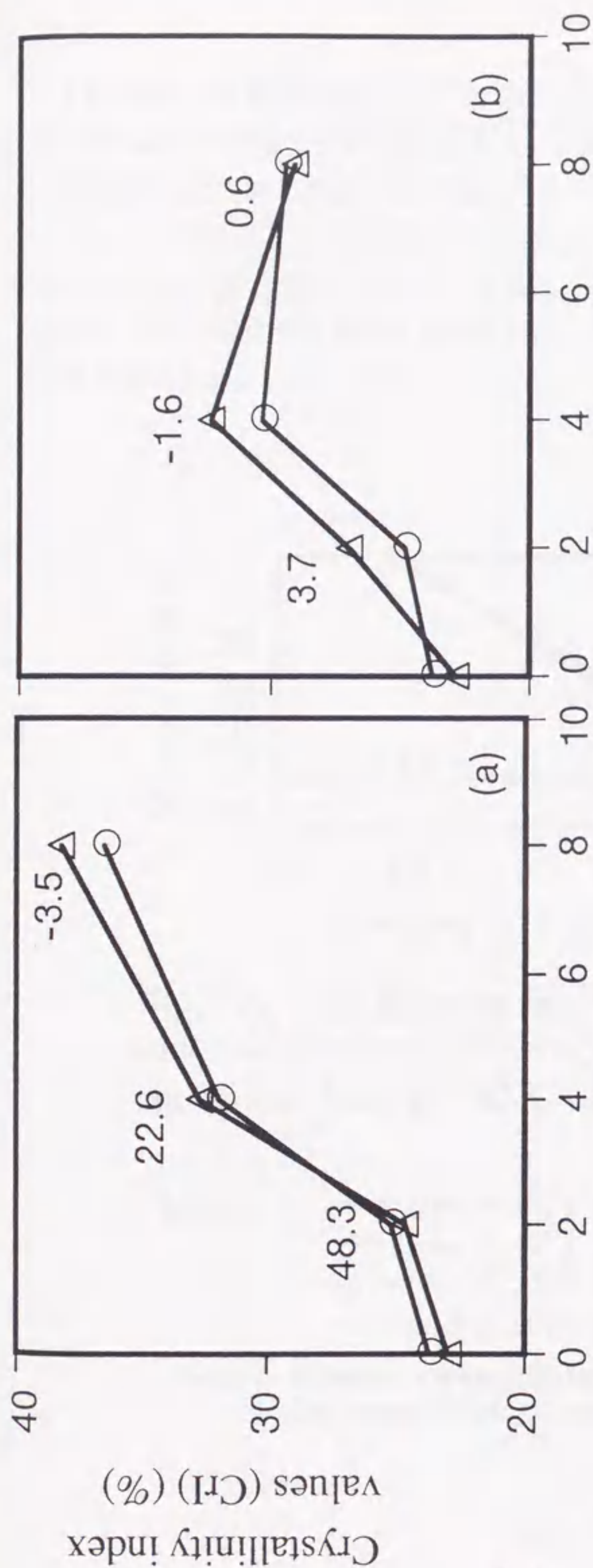


Fig. 2-8. The effect of time on the crystallinity index values in compressed specimens fixed at 180°C(a) and 200°C(b).

Legends: Δ : Segal's method
 \bigcirc : Area method

Notes: Specimens were softened at 150°C for 3 min. The compression set was 40%.
 Inserted values in figure show the set-recovery.

Fig. 2-9に、回復度と結晶化度 (CrI) の関係について示す。CrIと回復度は概ね直線的に変化し、CrIの増加とともに、回復度は減少する。また、固定処理温度が200℃のときは、180℃のときと比べてCrI値が低くても回復が抑えられることがわかった。回復度が0%になるときのCrI値は、固定処理温度が200℃のときは28~29%、180℃のときは36~37%になった。また、高さ法でも面積法でもCrI値に対する回復度の動きは、ほぼ同じであり、固定処理温度に依存していることがわかった。

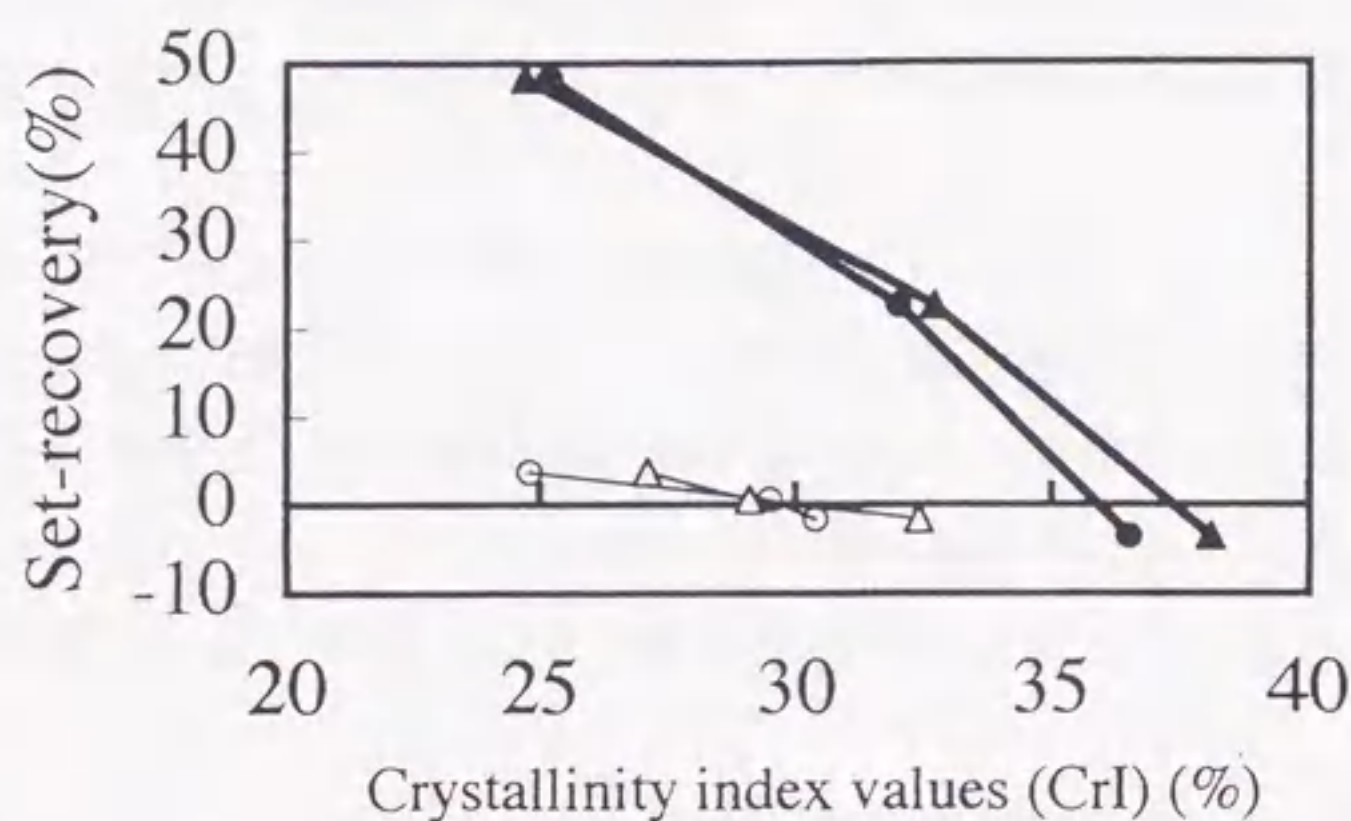


Fig. 2-9. The effect of the crystallinity index values on set-recovery in compressed specimens fixed at 180°C and 200°C.

Legends :
 —▲— Fixed at 180°C (Segal's method)
 —●— Fixed at 180°C (Area method)
 —△— Fixed at 200°C (Segal's method)
 —○— Fixed at 200°C (Area method)

Notes : Specimens were softened at 150°C for 3 min.
 The compression set was 40%.

これらの結果は、CrI増加の因子であるセルロース結晶領域の増加とともに圧縮木材の回復度が抑えられたことを示すものである。したがって、圧縮木材の永久固定化機構には、セルロースが関与しているものと考えられる。このことは、3.1の圧縮木材の抽出成分と寸法変化における考察で、形状の固定にはヘミセルロース、リグニンは関与していないとされることと考え合わせると、より事実に近いと考えられる。

そして、セルロース結晶領域が高温の水蒸気処理により、セルロースのパラクリスタリン領域の再配列または再配向によって増加する³¹⁾ことから、形状固定のメカニズムを以下のように考えた。即ち、圧縮変形によってひずみのかかったセルロース非晶領域が部分的に加水分解され、内部応力が解消すると共に変形した状態のまま、加水分解した成分が結晶領域に熱再配列するというものである。

3.5 再生セルロース繊維の形状固定

3.4までの実験により、セルロースが圧縮木材の形状の固定に関与していると考えられるが、木材は複合材料であるため、直接的にそれを証明することは難しいと思われる。そこで、セルロースのみからできているビスコースレーヨンモデル物質に用いて、水蒸気処理後の水浸漬による形状回復試験を行った^{14, 43, 44)}。

3.5.1 ビスコースレーヨン長繊維糸条の形状固定

Fig. 2-10に水浸漬後のビスコースレーヨン試料の様子を示す。水蒸気処理温度が低くなるほど、試料のループの開きが大きくなり、無処理のループの開きが最も大きくなっているのがわかる。ループの開き、即ち試料の一端と他端との距離については、**Fig. 2-11**に示す。無処理のものと水蒸気処理をしたものの間には明確な違いがあり、水蒸気処理をするだけでループの開きが1/2以下になることから、少なくとも処理の効果があることがわかる。また、水蒸気処理温度が180℃を越えるとループの開きがより小さくなり、形状固定が一層進んだことがわかった。この結果は、第1章のハリギリ試験片における回復度と形状固定水蒸気処理温度との関係(**Fig. 1-12**)と比較すると、形状固定が可能になる温度が180℃以上であることとよく一致する。

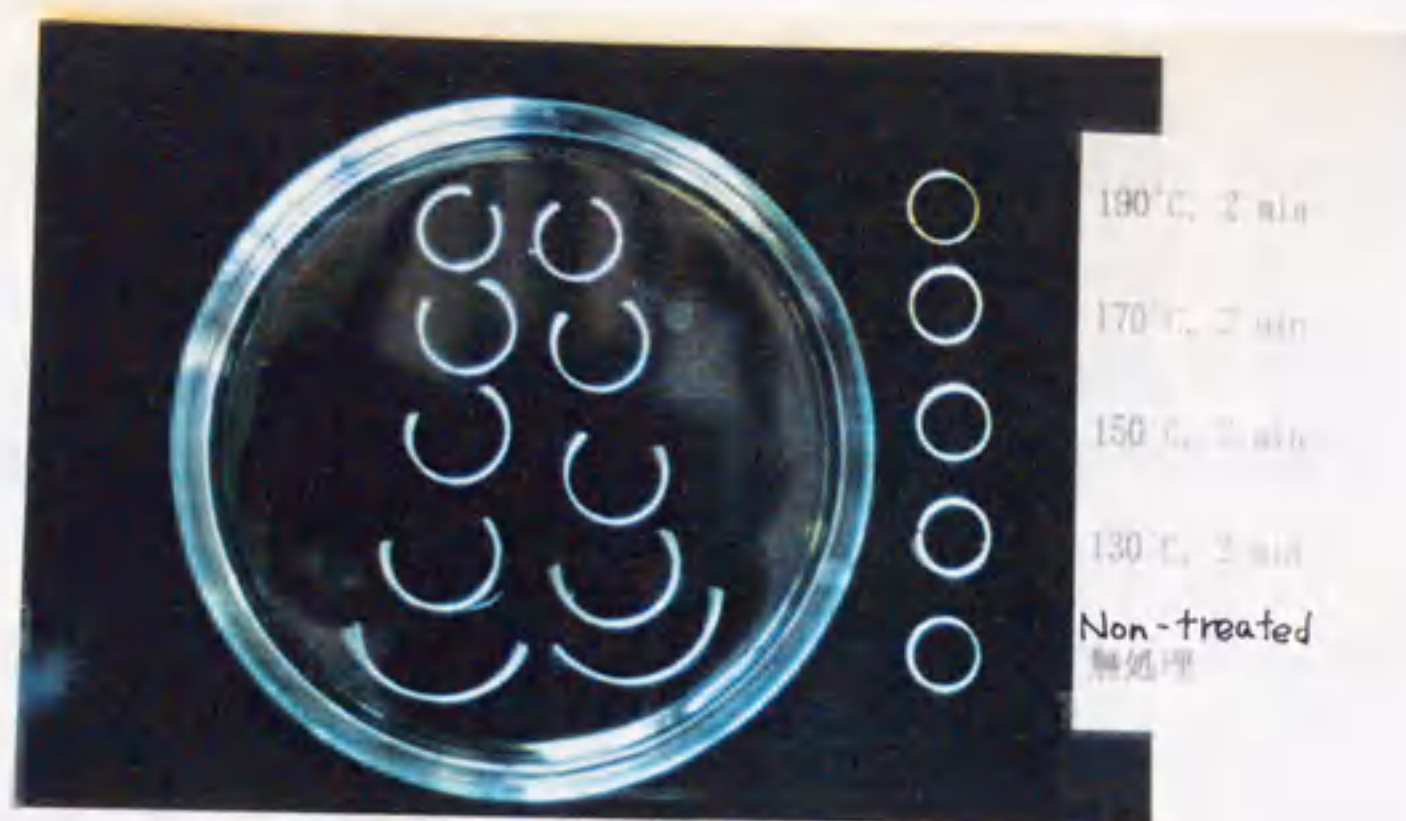


Fig. 2-10. Permanent fixation by steam treatment of viscose rayon.

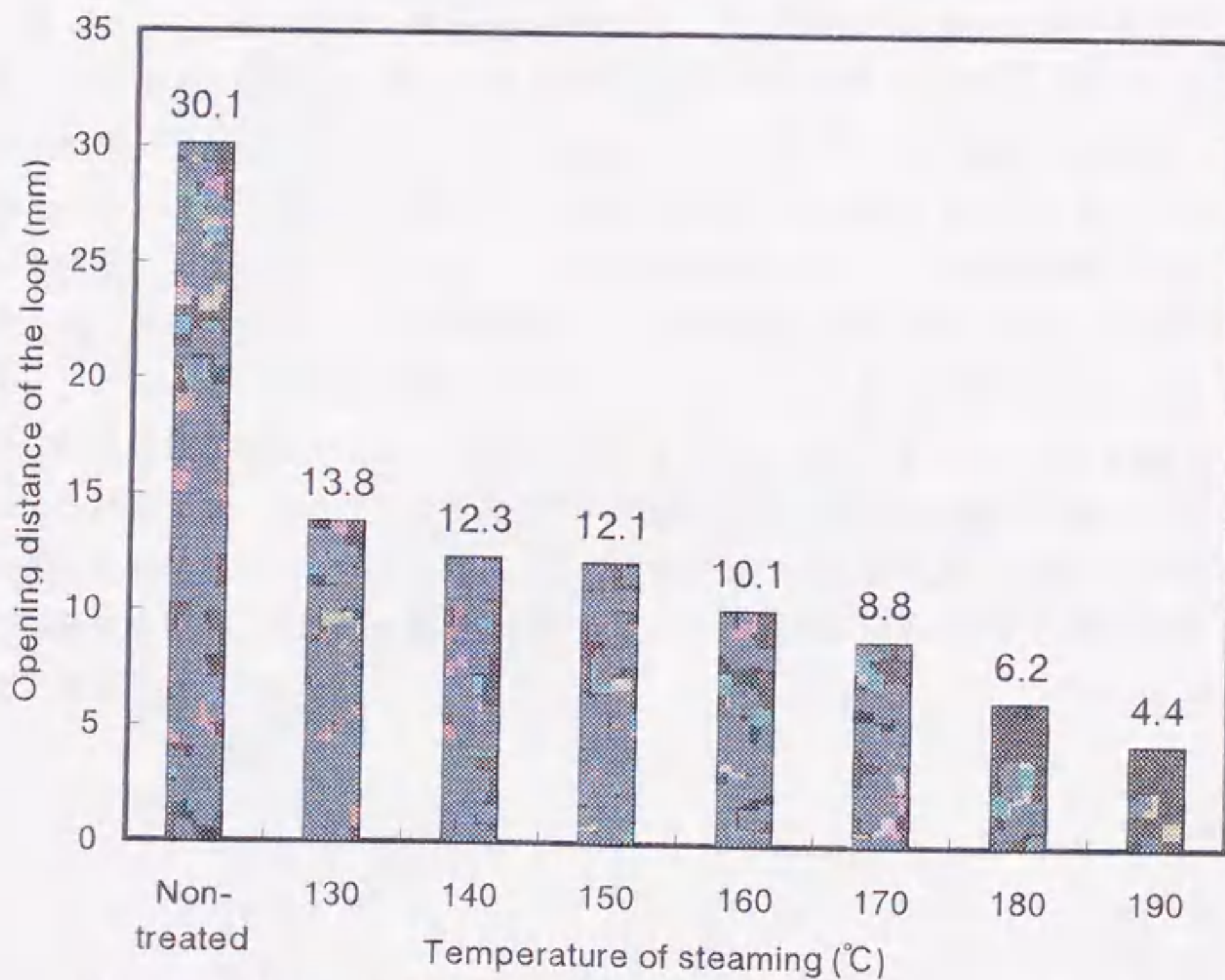


Fig. 2-11. Recovery by water-sorbing of the loop of viscose rayon.
Note: Inserted values in figure show the opening distance of the loop.

3.6 圧縮成形木材の永久固定化機構の検討

3.5までの結果から、セルロースが圧縮木材の形状の固定に関与していることはほぼ確からしいことと考えられる。このことは、我々がこれまでに起こってきたセルロース系繊維における水蒸気処理後の寸法安定性の向上によっても示唆される^{14, 43, 44)}。これをもとに圧縮成形木材の永久固定化機構について検討した。

木材に存在するセルロースは、結晶領域とパラクリスタリン領域の連続によって構成されと考えられている⁴²⁾。これを模式図で表すと、**Fig. 2-12. a)**のようになる。木材を軟化した後で圧縮成形などを行うことにより負荷をかけると、力がたまる場所はパラクリスタリン領域になる。各分子は**Fig. 2-12. b)**のように圧縮によってひずみがかかることによって、内部応力が蓄積される。

我々は、この内部応力を解放させる手段として、高圧の水蒸気処理が有効であると考えた。なぜならば、これまでの爆砕処理に関する研究^{8, 34)}より、①水蒸気処理によりセルロースの非晶部分およびヘミセルロースが短時間に加水分解されること、②爆砕処理をしなくても高温の水蒸気処理によりセルロースの結晶化度、ミクロフィブリル幅、ミセル幅が増加すること、③結晶形態が不安定な $I\alpha$ 型から安定な $I\beta$ 型に変換されることが明らかにされているからである。したがって、応力の解放は短時間で行われること、結晶形態の安定化とともに結晶領域が増加することが容易に想像できる。このことから、**Fig. 2-12. c)**のようにセルロースのパラクリスタリン領域が再配列または再配向によって結晶領域に変換されと考えられる。この再配列または再配向は、同時に内部応力の解放を伴い、最終的に熱再配列が達成され、圧縮成形木材の永久固定が可能となると推定される。

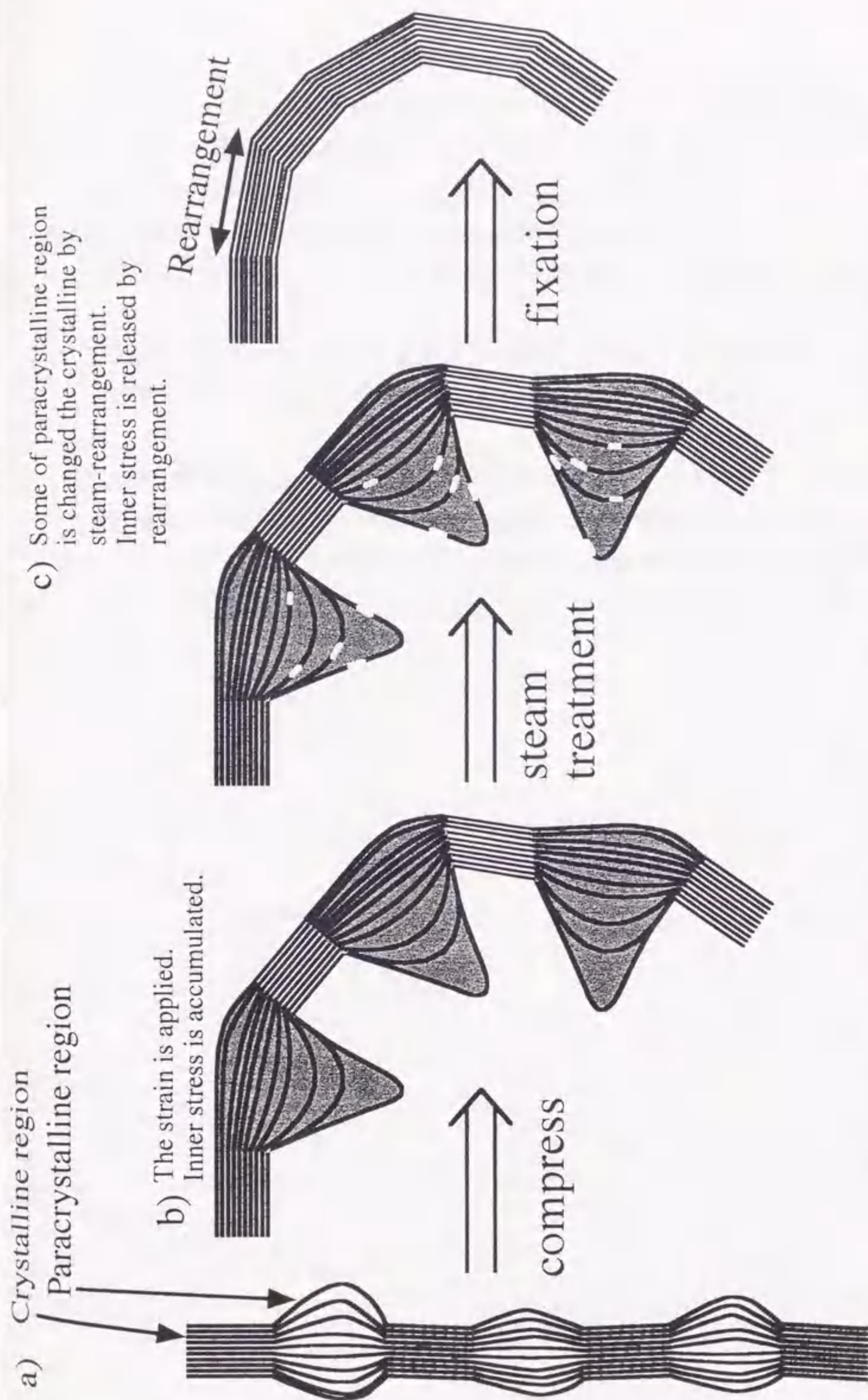


Fig. 2-12. The schematic diagram on the mechanism of the fixation of compressive transformation.

4. 結言

本章では、水蒸気処理木材の諸性質を調べることにより、圧縮木材が永久固定される際の機構について検討した。その結果、次のことがわかった。

①かなりの量のヘミセルロースおよびリグニンが抽出されていても形状の固定はなされており、抽出量が多くても圧縮形状は固定されている。

②高圧水蒸気処理によって、圧縮木材中のセルロースの結晶領域は増加する。

③圧縮木材中のセルロースの結晶領域の増加とともに、回復度は減少する。

④圧縮木材の永久固定化機構には、セルロースが関与しているものと考えられる。

⑤圧縮木材の永久固定化機構は、圧縮変形によってひずみのかかったセルロース非晶領域が部分的に加水分解され、圧縮によって蓄積された内部応力が解放されると共に変形した状態のまま、加水分解した成分が結晶領域に熱再配列するものと考察される。

第3章 水蒸気処理による木材の成形加工実用化試験

1. 緒言

第1章、第2章で述べたように、圧縮成形木材の形状固定に必要な水蒸気処理条件、および圧縮木材の諸性質が明らかとなった。これらをもとに、本章では、実用化のために必要な性能の検討および製品の試作を行った。

はじめに、水蒸気処理による吸・放湿特性の変化について検討した。木材を軟化圧縮し、その後の水蒸気処理または熱処理により寸法安定性を改善させる試みは、従来種々の方法で研究されている^{12, 14)}。水蒸気処理や熱処理は、薬剤を使用しない処理のため、近年の環境保全やリサイクルに対する認識が高まるにつれ、その重要性が増しつつある。最近では、ホットプレスを用いた水熱処理など既存の装置を有効に活用する方法も開発されている¹⁵⁾。しかし、実用化に向けては、処理可能な材の大きさや量産性など多くの問題を抱えている。これらのことを踏まえ、圧縮処理材を床仕上げ材として使用する場合を想定し、処理材の吸・放湿特性と寸法安定性についてその処理効果を熱気乾燥材と比較検討するとともに、処理の問題点について考察した。

次に、水蒸気処理による曲木加工について検討した。曲木は、木材を水と熱により軟化し、破壊することなく容易に変形できる原理を応用した技術である。その変形を維持するためには、変形させた状態で木材に与えられた水と熱を取り除く必要がある。これまでの曲木の製作においては、曲げた材料は、治具に取り付けたまま乾燥させていた。もし、完全に乾燥していない状態で治具を取り外すと、曲木は目的とする形にならず、また割れも生じる場合がある。そのため、治具を取り外すには数日から数週間を要する。したがって、これまで安定した生産を維持するためには、大量の治具をあらかじめ作っておく必要があった。これに対し、高圧水蒸気処理技術を導入することで、曲げ加工後約10分～1時間で曲げ変形を永久に固定することが可能になる。従って、必要となる治具は圧力容器に入る曲木の数量と曲げ加工中の曲木の数量だけにすることができるとができる。

製作日数の点では、水蒸気処理の採用により、製作日数を短縮することができる。これまで一般に用いられてきた軟化の方法は、温水浸漬や蒸煮加熱であ

るが、これらの方法では、水の沸点が100℃であるため、木材の温度も100℃以上にあげることとはできない。最近、曲木製作に導入された技術として、マイクロ波を照射させ木材の温度を約130℃にする方法がある^{20,21)}。この方法は、一般の方法より早く軟化できる。これと同様の効果が得られる方法として、水蒸気処理がある。木材は水蒸気を利用することで、軟化所要時間が短くなる。また、マイクロ波を含めたこれまでの曲げ加工方法では、木材の含水率は飽水状態に近いので、曲げたあとの乾燥に日数を要するが、高圧水蒸気を利用した場合、含水率は低下するため、乾燥日数を短縮できるメリットがある。

また、この方法は軟化と曲げたあとの形状固定の2工程で設備を兼用できるメリットを合わせ持つ。

デザインの幅を広げるという観点からも、水蒸気処理は有効である。これまでの手法における乾燥による曲木の固定は一時的なもので、水と熱を与えると元の形に戻るが、水分だけでも、変形が回復するため、曲木の両端を固定しておく必要がある。これに対し水蒸気処理では、曲げ変形を永久に固定することが可能なため、その必要がない。したがって、これまでの曲げ加工では不可能な形状の製品をつくることが可能になり、デザインの多様化を図ることができる。

これらのことに基づき、曲木製作に水蒸気処理を導入したときの軟化条件・形状固定条件の検討および曲木製作時の問題点について考察した。

2. 実験

2.1 水蒸気処理による吸・放湿特性の変化

2.1.1 試験体

実験に用いた供試材は、末口径30cm、長さ2.6mのミズナラ原木から木取った幅9cmの製材（板目木取り）である。Fig. 3-1に示すように、1枚の製材から熱気乾燥用2体（厚さ2.7cm）と圧縮処理用（厚さ3.7cm）2体の計4体を50cm長さで木取った。試験材の厚さが異なるのは、圧縮処理後に熱気乾燥材と同じ厚さに揃えるためである。これらの試験材を3枚の製材から同様に採取し、計12体を供試した。また、各試験材の両側から長さ約3cmの含水率測定用の試験片を取り、これらの試験片の含水率から各試験材の含水率を推定した。

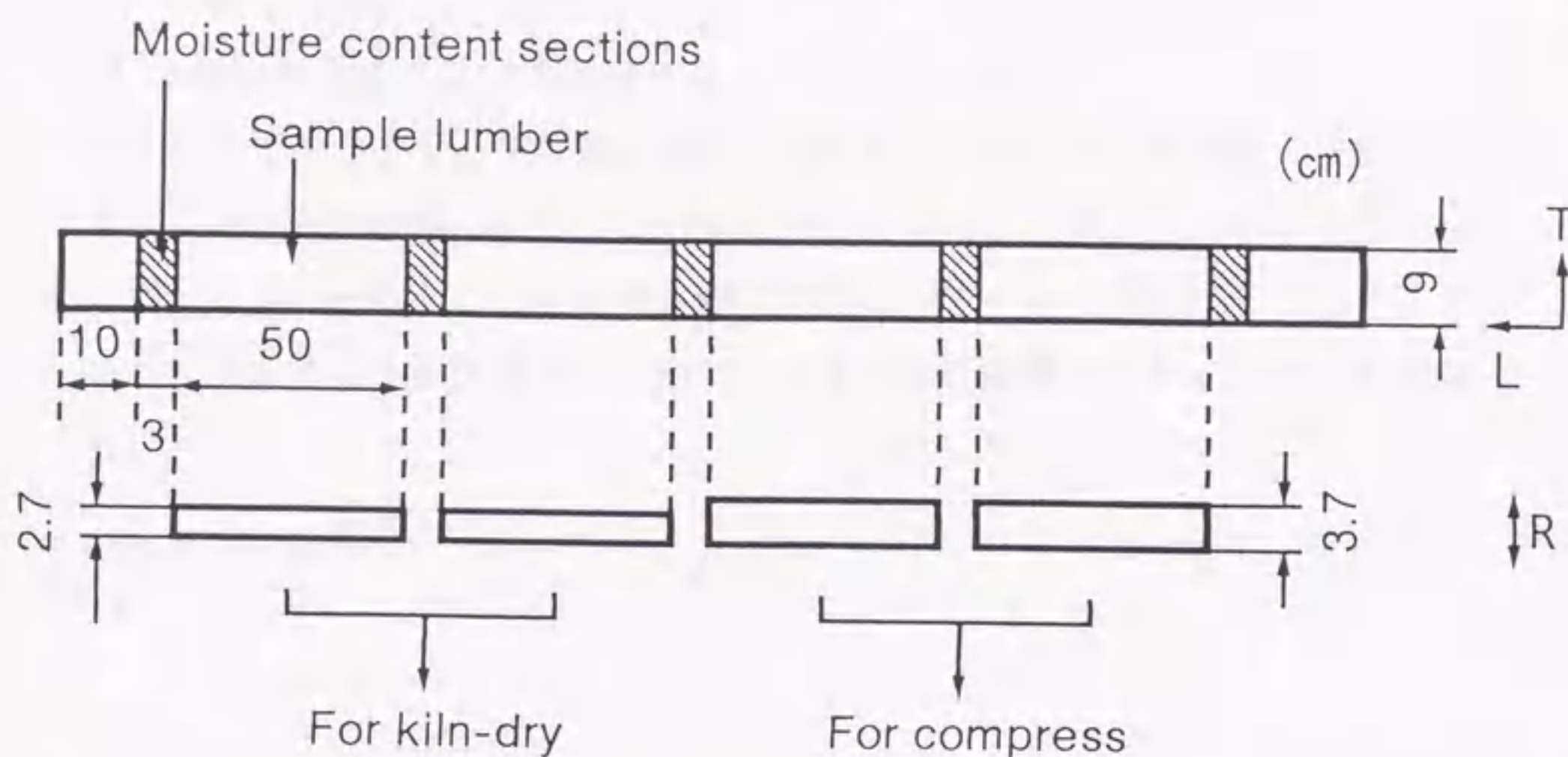


Fig. 3-1. Measurements of sample lumbers.

2.1.2 処理条件

2.1.2.1 熱気乾燥

熱気乾燥は、ミズナラにおける材厚2.5cm用の標準的な乾燥スケジュール（乾燥温度：45～80℃、乾湿球温度差：3～28℃、コンディショニング1日）を適用し、仕上がり含水率8%を目標にして、恒温恒湿槽で乾燥を行った。

2.1.2.2 圧縮処理

圧縮処理は、試験材の「軟化」、「圧縮」、「圧縮変形の固定」の3工程より構成される。本章では、軟化および固定処理には圧力容器（内径80cm、長さ170cm、最大許容圧力2.0MPa）を、圧縮にはホットプレス（電熱式、熱板面積2500cm²）を用いた。

試験材の「軟化」は、150℃の飽和水蒸気で5分間処理することによって行った。「圧縮」は、ホットプレス（熱板温度120℃）で試験材の厚さ方向（R方向）に行った。圧縮後の設定厚さは熱気乾燥材と表面積を同じにするため、2.7cmにした。試験材の圧縮に要した時間は1分間であった。圧縮後、設定厚

さに固定した状態で試験材をホットプレスで乾燥させた。目標とした仕上がり含水率は8%である。「圧縮変形の固定」は、試験材を再度圧力容器に入れ、180℃の飽和水蒸気で5分間処理することによって行った。このとき、5分以上の処理をすることは、不可能であると思われた。それは、試験材に内部割れや落ち込みなどの損傷が発生するためである。また、「軟化」および「圧縮変形の固定」時の水蒸気の昇圧時間、解圧時間はいずれも2分以内とした。

なお、本章では圧縮処理材の圧縮セット量および回復度を次式によって定義する。

$$\text{圧縮セット量} = \frac{T_0 - T_c}{T_0} \times 100 (\%)$$

$$\text{回復度} = \frac{T_R - T_c}{T_0 - T_c} \times 100 (\%)$$

T_0 : 圧縮処理前の厚さ

T_c : 圧縮処理後の厚さ

T_R : 圧縮変形の水分・熱回復処理後の厚さ

水分・熱回復処理は圧縮処理材の1体から長さ方向(L方向) 3 cmの試験片を6個切り出し、室温の水中に浸漬して1時間減圧した後、常圧に戻し24時間水中に放置し、さらに試験片を熱水中で1時間煮沸させることによって行った。

このような測定の結果、圧縮セット量は27%、水分・熱による回復度は10%であった。

2.1.3 吸・放湿試験

2.1.3.1 吸・放湿試験の方法

熱気乾燥材および圧縮処理材は、乾燥に対する養生の後、吸・放湿試験に供された。養生期間は、熱気乾燥材で6日間、圧縮処理材で12日間である。圧縮処理材に関しては、短期間で乾燥したことを考慮に入れ、養生期間を長くした。

この試験に供された試験材数は、各処理材とも5体ずつである。

試験材の寸法は、各処理材とも4材面についてプレーナをかけ、厚さ18~20mm、幅75mmに仕上げた。

吸・放湿試験は、吸湿から開始し、その後放湿を行い、終了した。吸湿条件の環境には、温度20℃、相対湿度85%の恒温恒湿室を使用した。一方、放湿条件は、温度60℃、相対湿度約9%の恒温恒湿槽を使用した。

2.1.3.2 吸・放湿試験における性能評価方法

吸・放湿試験中には、24時間おきに以下に述べる各測定項目を測定した。吸・放湿過程それぞれの終了判断は、吸湿条件下のものは試験材5体の含水率の平均値が15%、放湿条件下のものは含水率の平均値が4%とした。寸法変化については、試験材中央部の厚さ、幅を1/100mmまで測定した。

材の狂いについては、ねじれ、縦ぞり、曲がり、幅ぞりの測定を行った。ねじれは、一定の材面についてねじれ角度を1/100°まで測定した。縦ぞり・曲がりは、一定の材面についてそれぞれ厚さ・幅の寸法測定位置で、長さ方向スパン28cmのそり量（矢高）を1/100mmまで測定した。幅ぞりについては、表裏二材面について厚さ寸法測定位置で、幅方向スパン6cmのそり量（スパン中央部の矢高）を1/100mmまで測定した。

吸・放湿試験終了後は、寸法測定位置を中心とした試験片を5cm長さで木取り、全乾状態にして含水率および収縮量を求めた。また、その他に等間隔で試験片を計4片取り、同じく全乾状態にして含水率を求め、試験材の推定含水率を補正した。

2.2 水蒸気処理による木材の曲木加工

2.2.1 曲木軟化条件の検討

曲木を製作する際には、材料に損傷を発生させない適正な軟化条件を把握することが必要である。そこで、軟化のための水蒸気処理条件の違いによる、曲げ変形時の損傷、曲げ変形時の曲率および曲げ可能な材料厚さの関係を把握するため、数樹種について、曲げ試験および曲げクリープ試験を行い、曲げ加工適正樹種の選択基準を求めた。

2.2.1.1 曲げ試験および曲げクリープ試験

供試材料は、一般に曲木に適するとされているブナ、ヤチダモ、ハリギリ、ミズナラ、イタヤカエデ、ハルニレである。試験体形状は、各樹種とも柁目板の心材部とし、寸法は $20 \times 20 \times 500\text{mm}$ とした。

曲げ試験および曲げクリープ試験は、**Fig. 3-2**に示す圧力容器（（株）日立造船製、内径80cm、高さ170cm、最大許容圧力1.96MPa）中で 150°C の飽和水蒸気で16および32分間軟化処理した後取り出して、スパン16cmの4点荷重法で行った。荷重には5kgの鋼材を使用し、荷重面は木裏とした。

曲げたわみは、1/100mmの目盛り精度のダイヤルゲージを用いて、スパン中央部で測定した。

また、負荷10分後にクリープたわみ、負荷を取り除いた24時間後に残留たわみを測定した。試験体の個数は、1条件につき6個である。



Fig. 3-2. The autoclave to steam at high temperature.

2.2.1.2 曲げ破壊試験

供試材料は、広葉樹であるブナ、ヤチダモ、ハリギリ、ミズナラ、イタヤカエデ、ハルニレである。試験体形状は、各樹種とも柾目板の心材部とし、寸法は $20 \times 20 \times 320$ mmとした。

曲げ破壊試験は、オートクレーブ中で 150°C の飽和水蒸気で16、32分間軟化処理した後取り出して、スパン28cmの中央集中荷重法で行った (Fig. 3-3)。荷重面は木裏とした。試験体の個数は、1条件につき3個である。

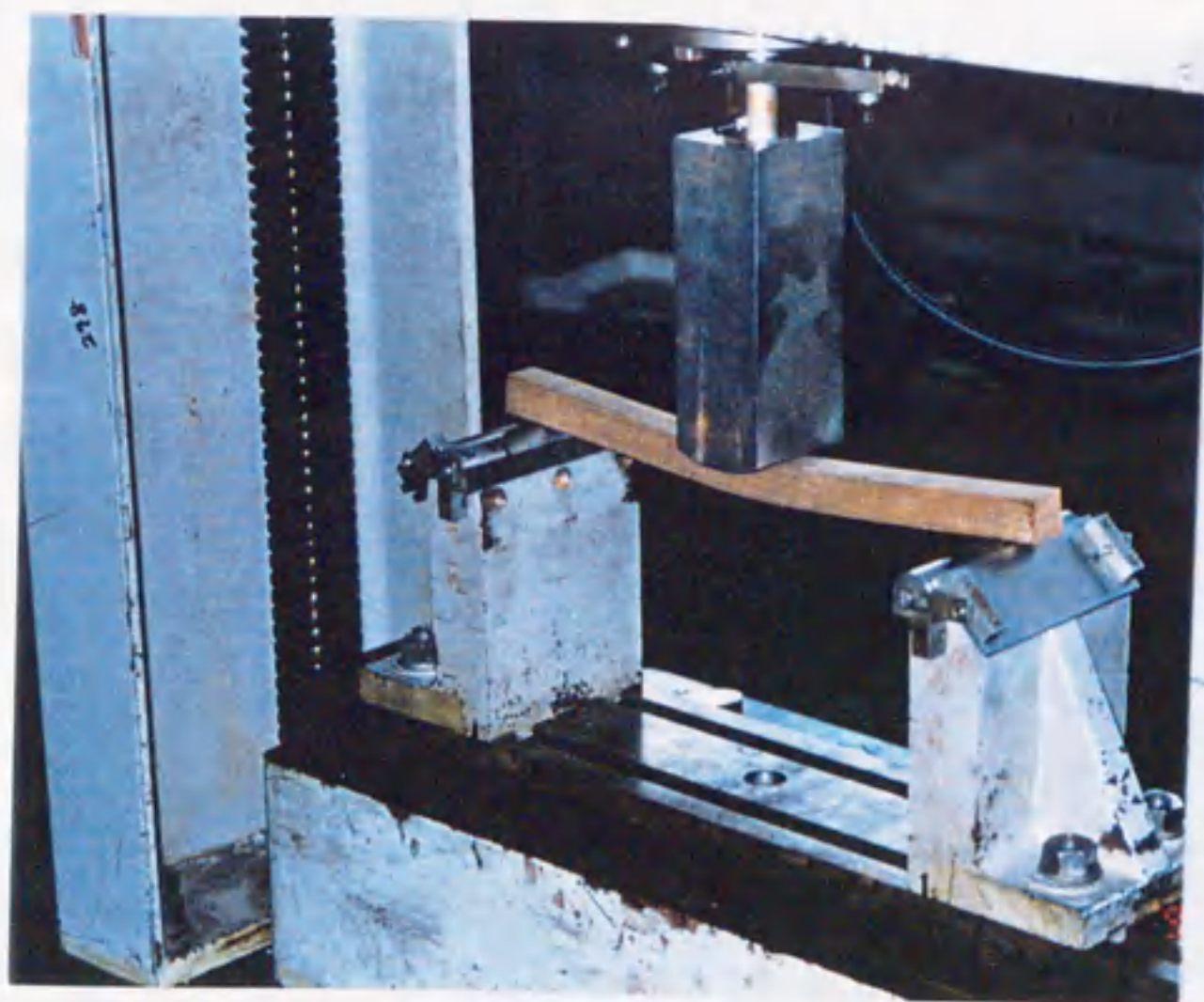


Fig. 3-3. Bending test after steaming.

2.2.2 曲木形状固定条件の検討

これまでの曲木の形状固定は、ドラインゲットと呼ばれる一時的なものであった。これは、水や熱を与えることにより、変形が回復する極めて不安定なものである。これまでは、製品にする際に曲げた形が元に戻らないように両端を他の材料と物理的に固定しなければならなかった。

これに対し、曲げ変形を与えた状態で高圧水蒸気処理を行えば、変形を永久固定することが可能になる。ここでは、適正な形状固定条件を検討し、また処理時の材料に発生する損傷について把握した。

2.2.2.1 曲げ形状回復試験

供試材料は、広葉樹であるブナ、ヤチダモ、ハリギリ、ミズナラ、イタヤカエデ、ハルニレである。試験体は、生材を使用し、各樹種とも柁目板の心材部で寸法は厚さ40×幅40×長さ800mmとした。

軟化処理は、**Fig. 3-2**の圧力容器中で150℃の飽和水蒸気で16分間処理する。曲げ加工時の曲率は、 $R=25\text{cm}$ とした(**Fig. 3-4**)。固定処理は、圧力容器中で160℃の飽和水蒸気で8~16分間処理した。このとき、i) 処理中に回復力が発生する、ii) 急激な圧力の増減は材の強度を低下させることから、水蒸気の導入には約2分、放出には約8分をかけた。

固定処理後、各試験体を恒温恒湿槽内で乾燥した。乾燥時の目標含水率は、10%とした。乾燥後各試験体に吸湿試験を行った。吸湿条件は、温度20℃、相対湿度85%、平衡含水率約18%の恒温恒湿室を使用した。試験体の乾燥時および吸湿試験中には、「試験体両端の間隔」²⁹⁾と「そり量」を調べた(**Fig. 3-5**)。そして、試験体両端の間隔からは、回復度を算出した。回復度は、次式により算出した。

$$\text{回復度}[\%] = \frac{\text{吸湿後の間隔} - \text{吸湿前の間隔}}{\text{曲げ加工前の間隔}(800\text{mm}) - \text{吸湿前の間隔}} \times 100$$

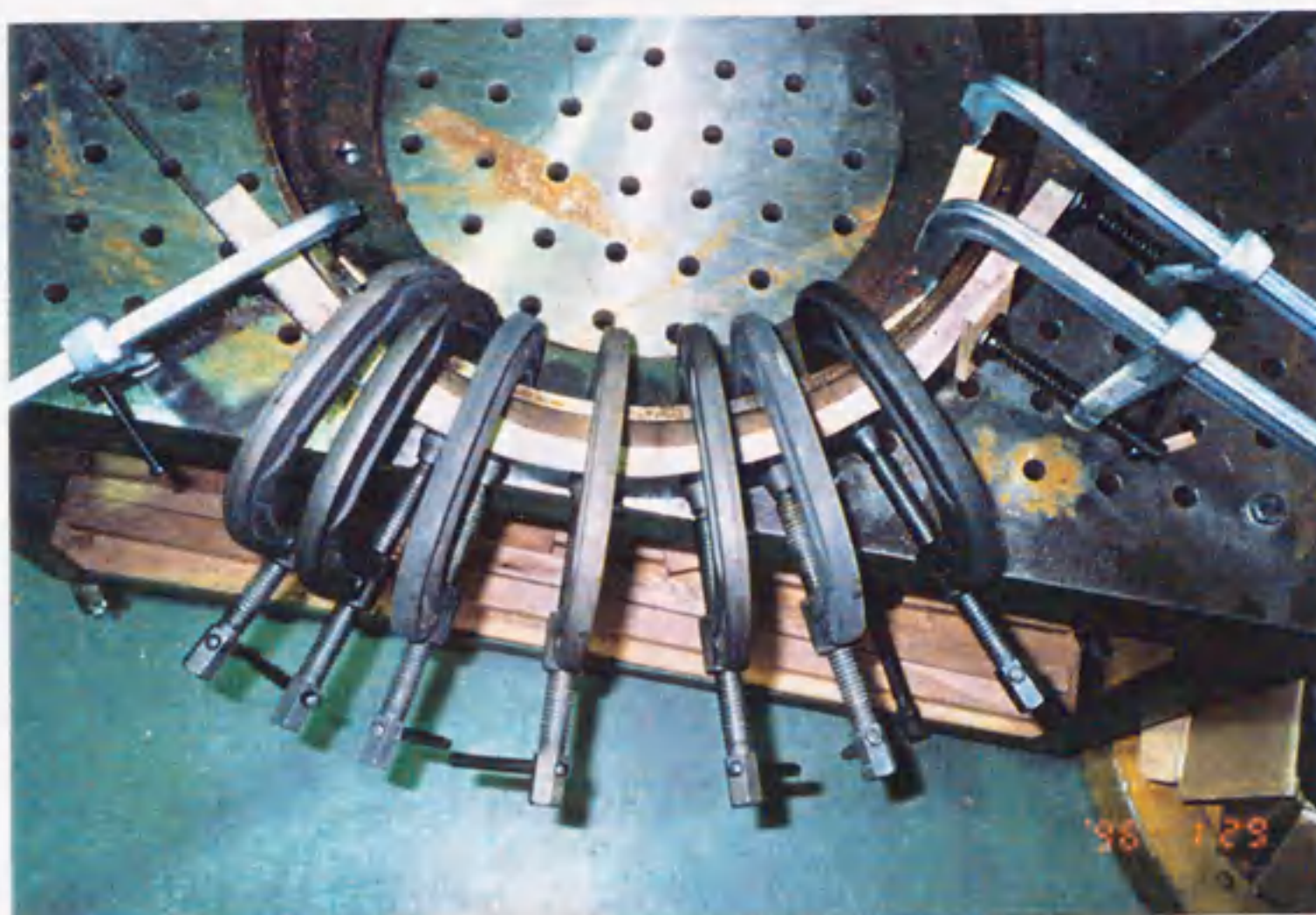


Fig. 3-4. Bending by using the frame ($R=25$ cm) to shape.

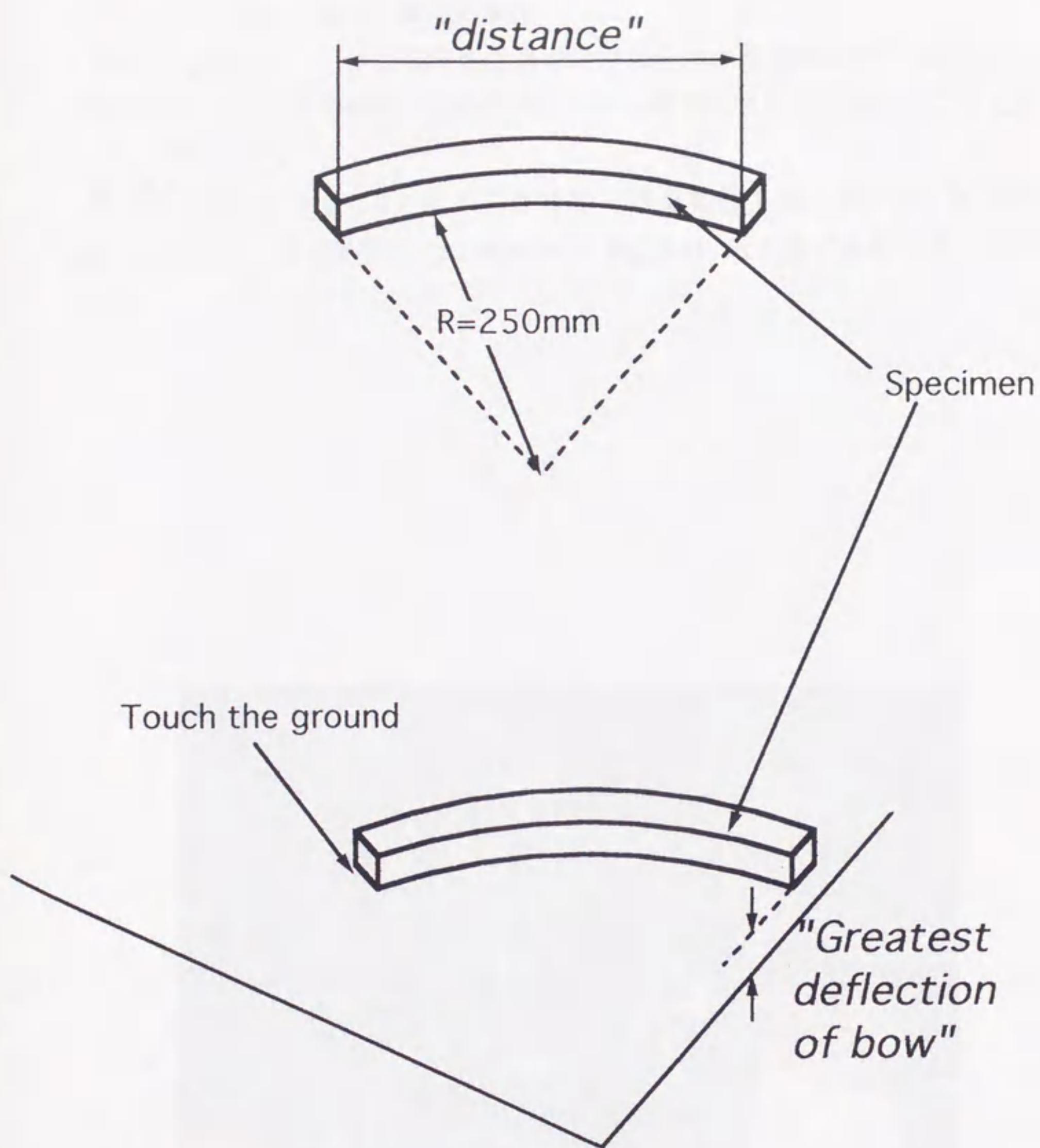


Fig. 3-5. Measuring items.

Note : "Greatest deflection of bow" is the distance from the ground.

2.2.3 曲木を使った製品の試作

試作品の製作は、①多品種少量生産の中での曲木の部分的活用³⁰⁾、②型枠にも可能なかぎり木材を利用、③金属製治具の効率的活用という基本的な考え方に沿って行った³¹⁾。

製品の試作は、**Fig. 3-6**に示す圧力容器（伊藤製缶工業（株）製、内径60 cm、長さ200 cm、最大許容圧力0.86 MPa）、**Fig. 3-7**に示す曲げ台を使用して行った。

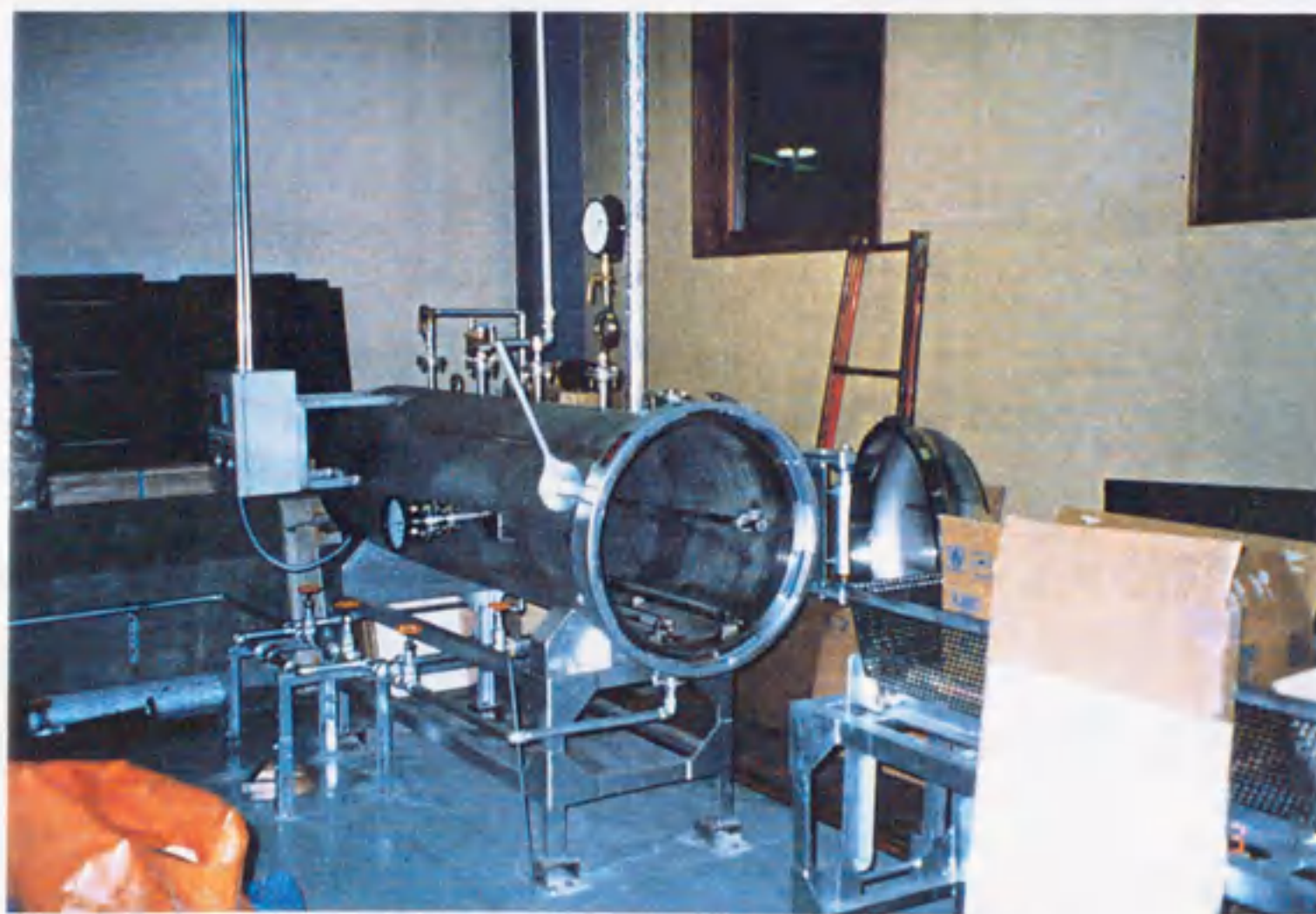


Fig. 3-6. The autoclave to steam at high temperature.

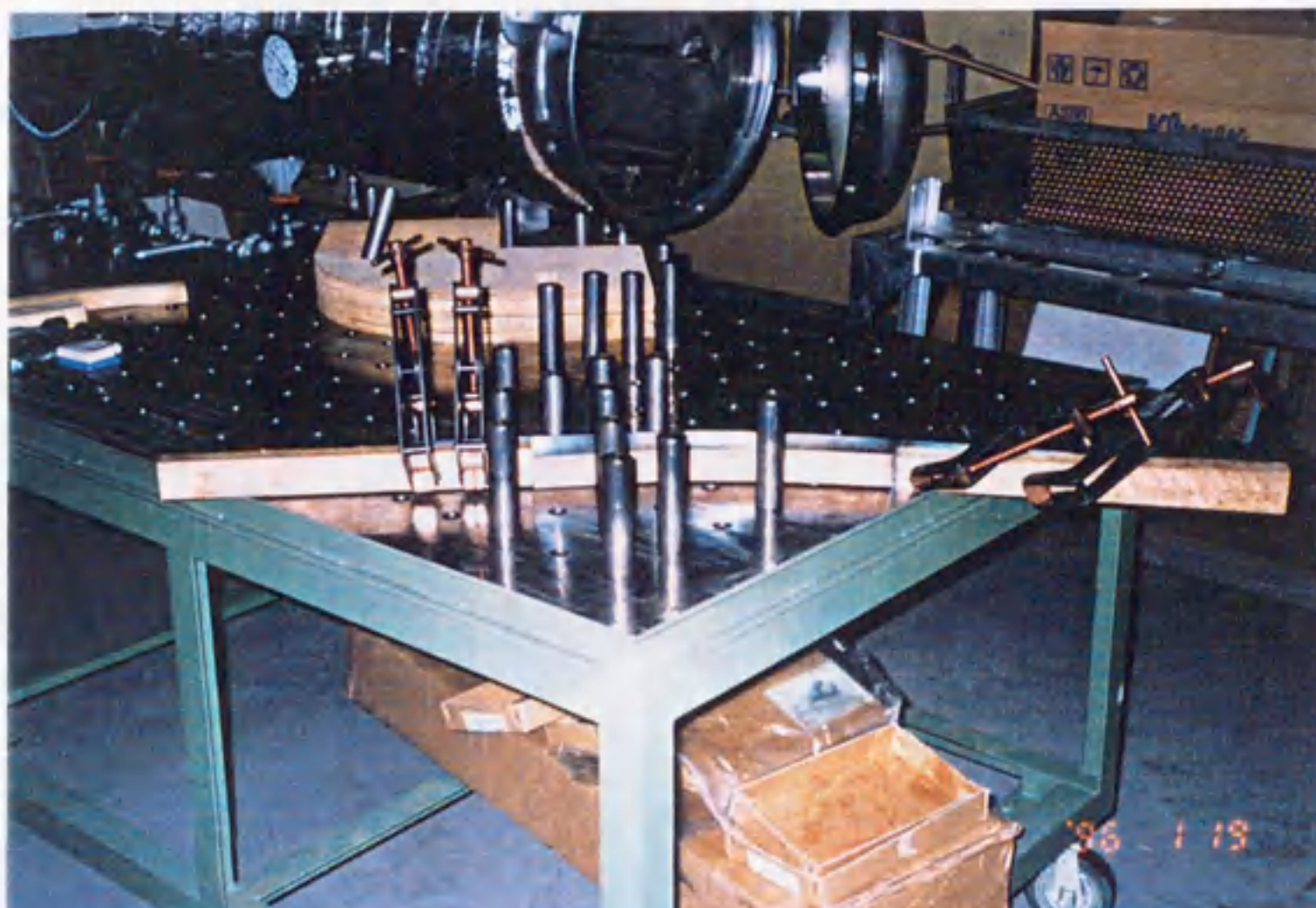


Fig. 3-7. The working table to bend.

使用樹種は回復試験の結果をもとに、ミズナラ・ヤチダモを採用した。材料を曲げる方法は、

- ① 帯鉄にハンドルを取り付け、材料をはさんで型枠に沿って曲げる方法
(**Fig. 3-8**)
- ② 上下の型枠をクランプやプレスではさみ込むことによって曲げる方法
(**Fig. 3-9**)

の2種類を採用した。

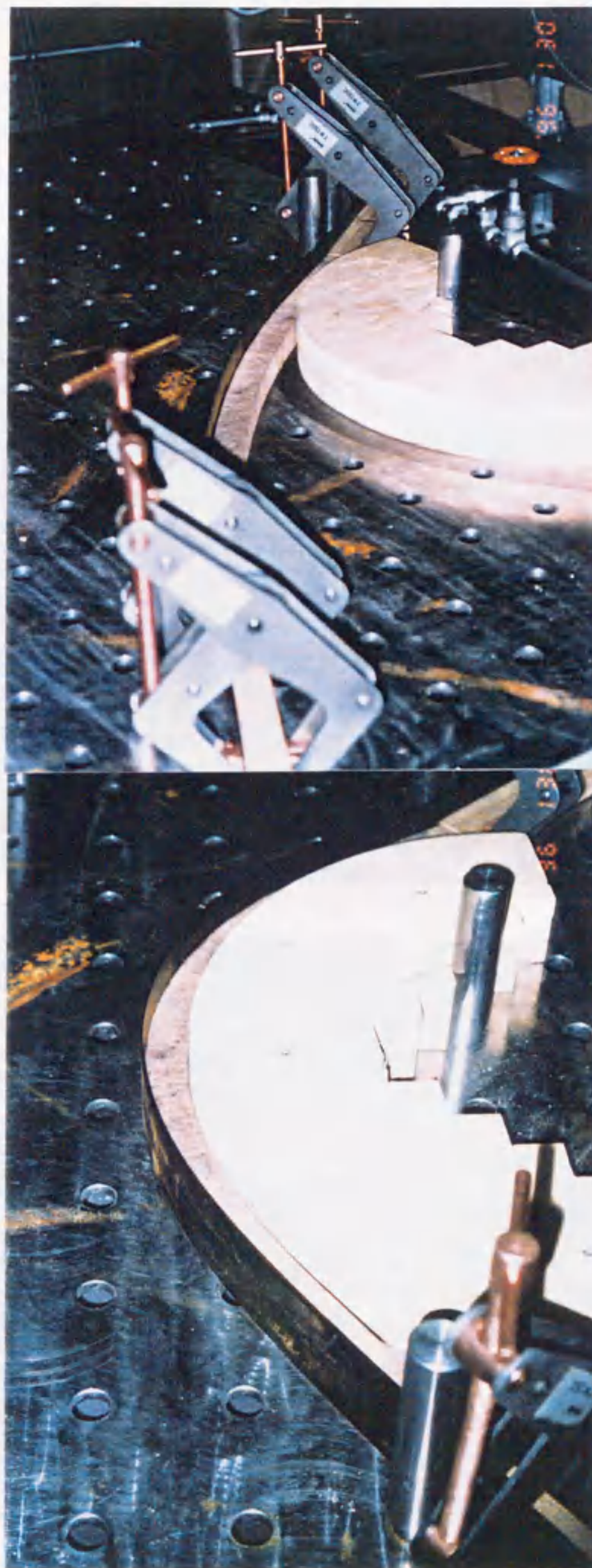


Fig. 3-8. The bending of Makanba specimen.

Notes : The size of specimen is 700 (L) \times 30 (R) \times 30 (T) mm.

The radius of curvature is 25 cm.



Fig. 3-9. The bending of Mizunara specimen.

Notes : The size of specimen is 1000 (L) × 30 (R) × 30 (T) mm.

The bending molds are used the lumber plywood.

3. 結果と考察

3.1 水蒸気処理による吸・放湿特性の変化

3.1.1 試験材の仕上がり含水率

処理した試験材の初期含水率は、熱気乾燥材が47.6%で圧縮処理材が45.2%であった。また、熱気乾燥に要した日数は14日間であった。

3.1.2 吸・放湿試験における含水率変動

各処理材の吸・放湿過程における含水率経過をFig.3-10に示す。吸湿に要した日数は、熱気乾燥材が約5日間（118時間）で圧縮処理材では約16日間（381時間）であった。一方、放湿に要した日数（時間）は、どちらの材も6日間（144時間）であった。

吸・放湿過程における含水率の増減および吸・放湿速度についてはTable 3-1に示した。吸湿過程において圧縮処理材の吸湿速度は、熱気乾燥材のそれに比べて低い数値を示した。一方、放湿過程においては両者の間に放湿速度の差はなかった。熱気乾燥材に対する圧縮処理材の吸湿速度より算出した抗吸湿能¹⁶⁾は、76.1%となった。以上から、圧縮処理材は熱気乾燥材に比べて吸湿反応が鈍いものと考えられる。これには、次のような理由があると考えている。

（1）主としてホットプレスによる加熱により、透湿性・吸湿性が低下したこと¹⁷⁾

（2）「軟化」、「圧縮」、「圧縮変形の固定」の3工程中に試験材中のヘミセルロースが放出され、水を取り込む成分も減少したこと

（3）圧縮による細胞の屈曲変形で水分の拡散速度が低下したこと

（4）水蒸気処理中に、セルロース結晶領域が増加した^{14, 18)} こと

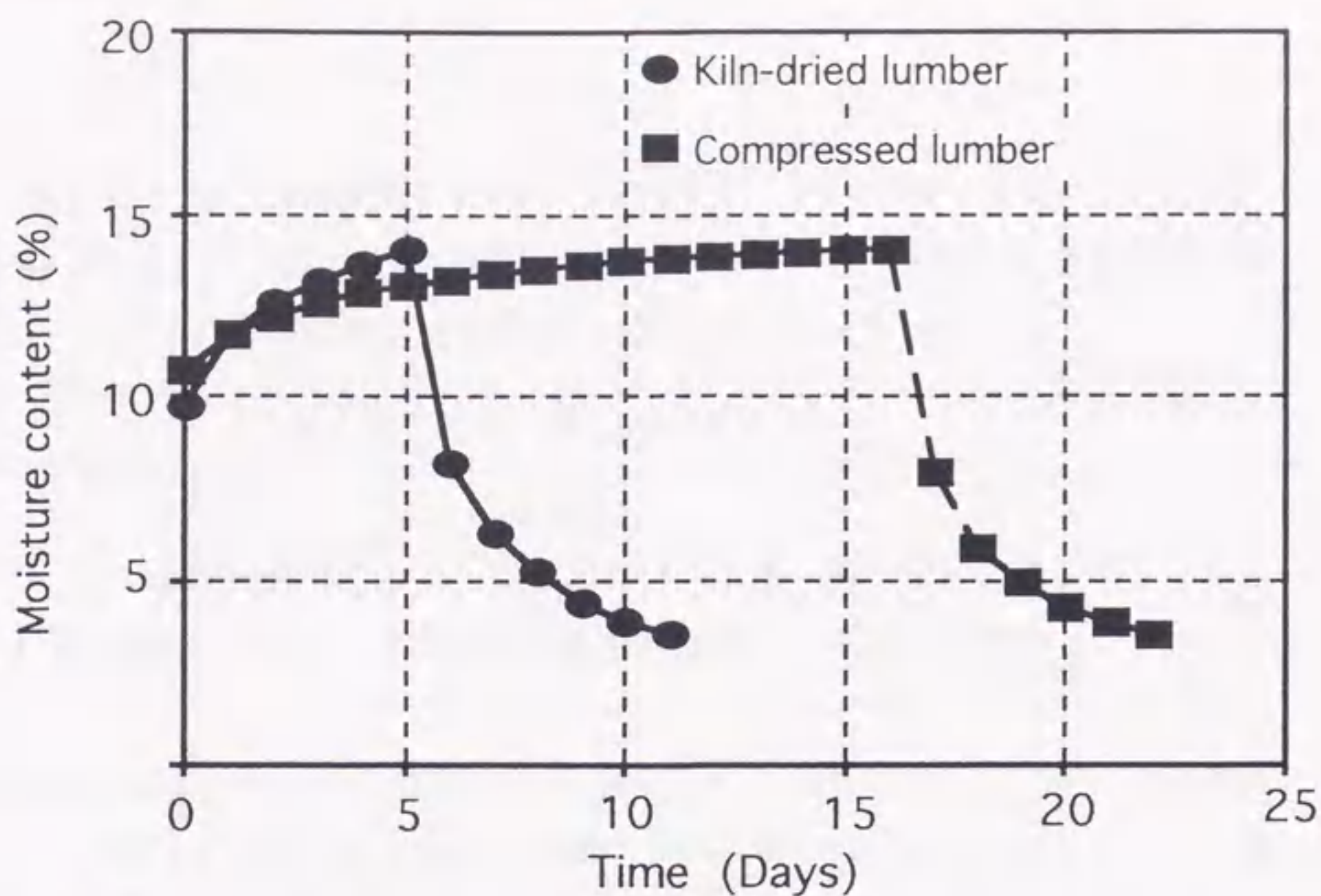


Fig. 3-10. Moisture content in process of adsorption and desorption.

Table 3-1. Ad-/De-sorption rate of kiln-dried and compressed lumber.

		Kiln-dry	Compress
Adsorption	Moisture content	9.8→14.1	10.8→14.1
	Adsorption rate	0.036	0.009
	Moisture excluding efficiency for kiln-dried lumber	—	76.1
Desorption	Moisture content	14.1→3.6	14.1→3.6
	Desorption rate	0.073	0.073
	Moisture excluding efficiency for kiln-dried lumber	—	0

Note : Moisture excluding efficiency (%) = $\frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$

S_0 : Ad-/De-sorption rate of kiln-dried lumber.

S : Ad-/De-sorption rate of compressed lumber.

3.1.3 吸・放湿試験における寸法変化

Fig. 3-11,12 に、吸・放湿過程における含水率と厚さ・幅寸法変化率の関係について示す。ここでの寸法変化率は、以下の式により求めた。

$$\text{寸法変化率} = \frac{\left| \text{変化後の寸法} - \text{変化前の寸法} \right|}{\text{変化前の寸法}} \times 100 \quad (\%)$$

ただし、変化前の寸法とは、吸湿あるいは放湿環境に置いた最初の寸法を示し、変化後の寸法とは、それぞれの環境に放置し、経過中に測定した寸法を示す。

Fig. 3-11,12 から、吸・放湿過程を通じて厚さ方向の寸法変化率は圧縮処理材の方が大きく、逆に幅方向の寸法変化率は圧縮処理材の方が小さいという結果になった。

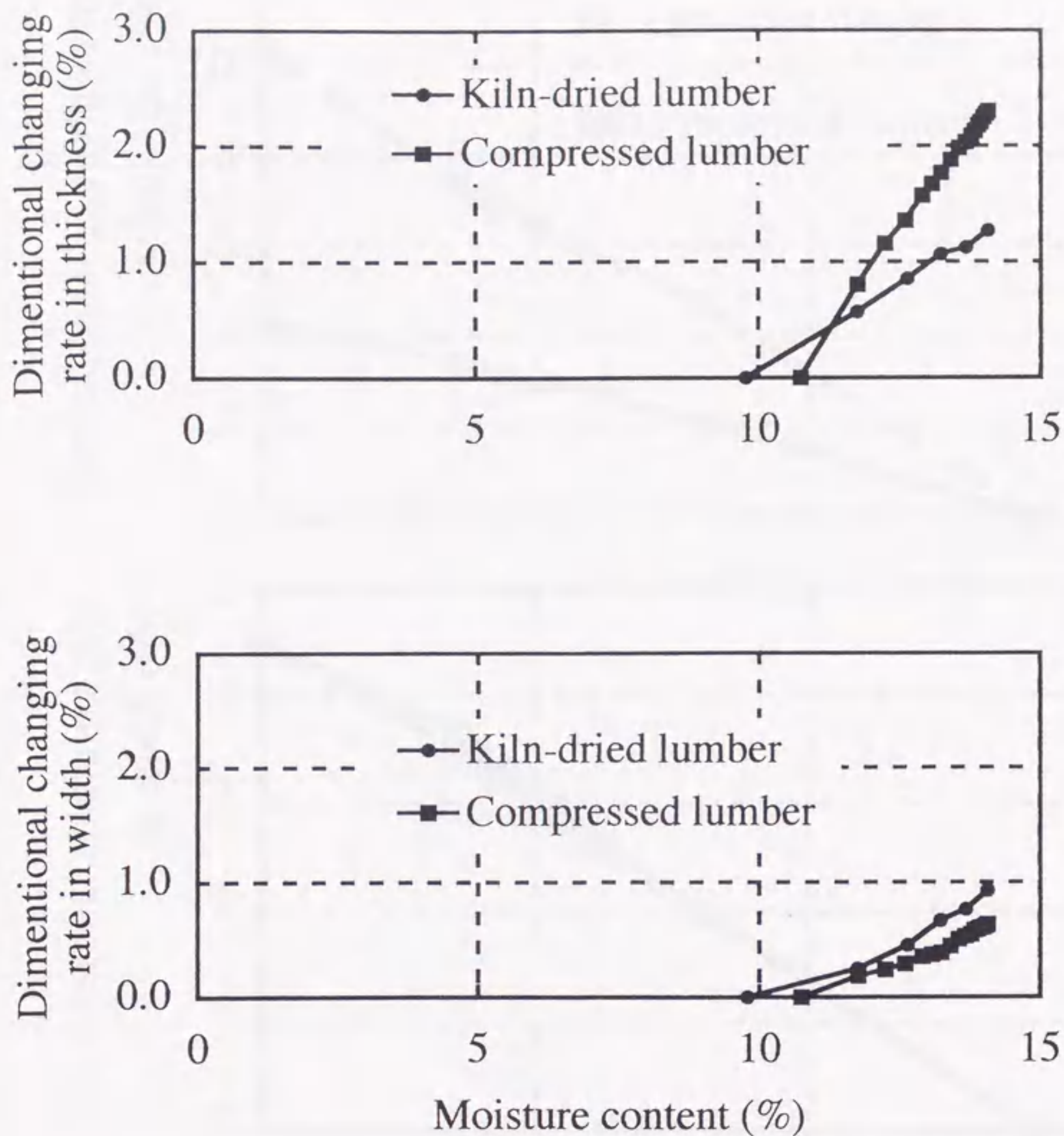


Fig. 3-11. Relation of moisture content to dimensional changing rate in process of adsorption.

Note : Dimensional changing rate (%) = $\frac{|T - T_o|}{T_o} \times 100$

T : Thickness or width after adsorption.

To : Thickness or width before adsorption.

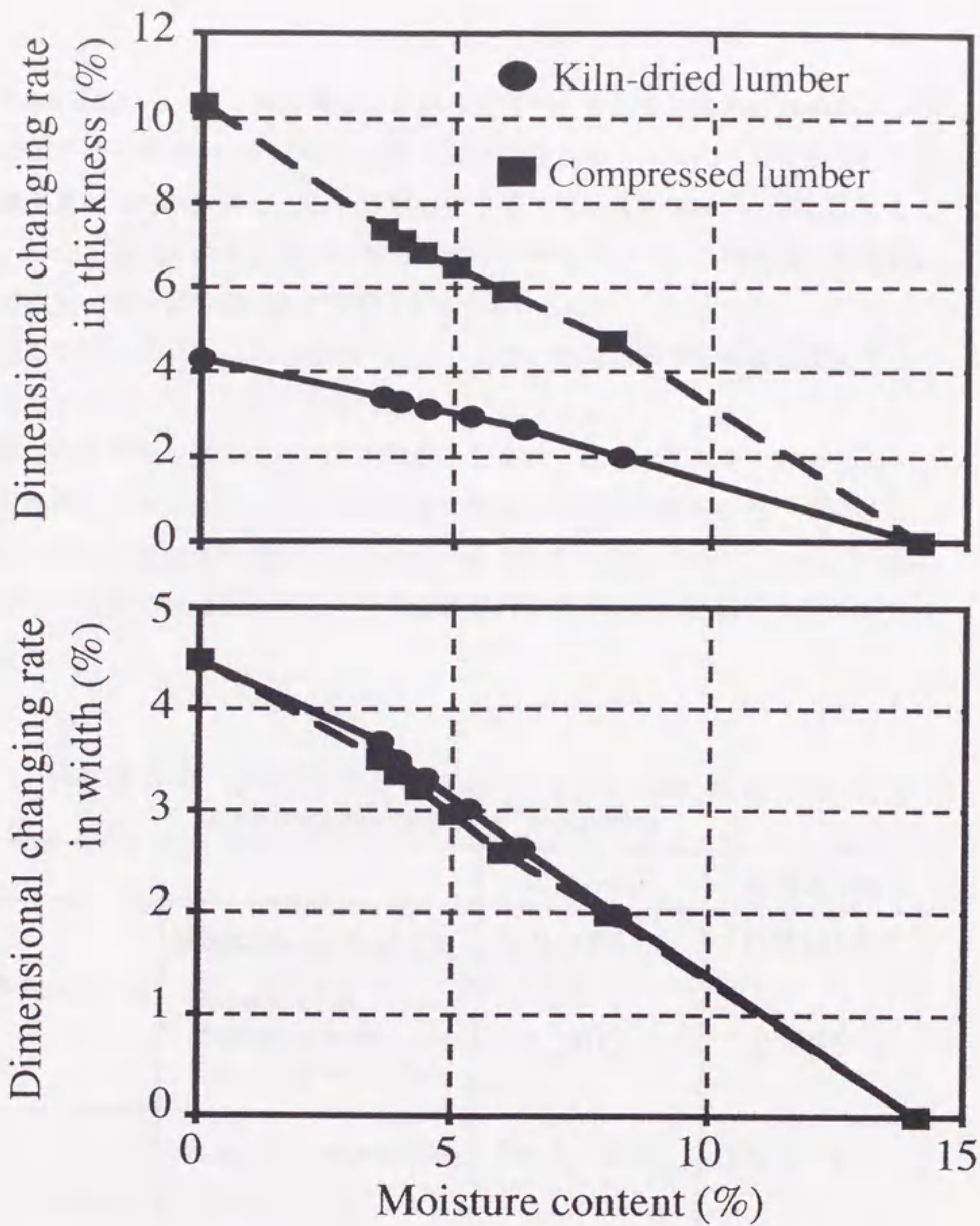


Fig. 3-12. Relation of moisture content to dimensional changing rate in process of desorption.

Table 3-2,3 に、吸・放湿過程における含水率と含水率1%あたりの厚さ・幅寸法変化率の関係について示す。厚さ方向の含水率1%あたりの寸法変化率は圧縮処理材の方が大きく、吸・放湿過程を通じて熱気乾燥材の2倍以上となった。また、幅方向の含水率1%あたりの寸法変化率では、圧縮処理材は熱気乾燥材に比べて吸湿で11.5%、放湿で4.6%減少した。

以上の結果より、圧縮処理材においては厚さ方向では寸法安定性は低下し、幅方向では向上する結果となった。

厚さ方向での寸法安定性低下の理由としては、我々のこれまでの研究より、熱板乾燥材においても、厚さ方向の寸法変化率は熱気乾燥材に比べて増加し、幅方向の寸法変化率は減少する¹⁶⁾結果が得られている。このことから、圧縮処理材の寸法安定性低下は、この熱板乾燥材の特性が主たる原因であると考えている。

Table 3-2. Dimensional changing rate of kiln-dried and compressed lumber (Thickness).

		Kiln-dry	Compress
Adsorption	Moisture content (%)	9.8→14.1	10.8→14.1
	Dimensional changing rate per 1% of m.c. (%)	0.296	0.695
Desorption	Moisture content (%)	14.1→3.6	14.1→3.6
	Dimensional changing rate per 1% of m.c. (%)	0.326	0.704
Shrinkage per 1% of m.c.		0.212	0.616

Table 3-3. Dimensional changing rate of kiln-dried

	and compressed	lumber (Width). Kiln-dry	Compress
Adsorption	Moisture content (%)	9.8→14.1	10.8→14.1
	Dimensional changing rate per 1% of m.c. (%)	0.217	0.192
Desorption	Moisture content (%)	14.1→3.6	14.1→3.6
	Dimensional changing rate per 1% of m.c. (%)	0.351	0.335
Shrinkage per 1% of m.c.		0.251	0.273

3.1.4 吸・放湿試験における狂いの変化

3.1.4.1 ねじれ

Fig. 3-13に、吸・放湿過程における含水率とねじれの関係について示す。吸湿過程においては、ねじれは各処理ともプラス側（左旋回）に移行し、逆に放湿過程では、マイナス側（右旋回）に移行した。各処理間のねじれ角度の最大変化量の差は、吸湿過程で 0.07° 、放湿過程で 0.12° でいずれも圧縮処理材の方が大きい。その値の差はわずかで、各処理間で含水率とねじれの関係に明確な差異はないものと考えられる。

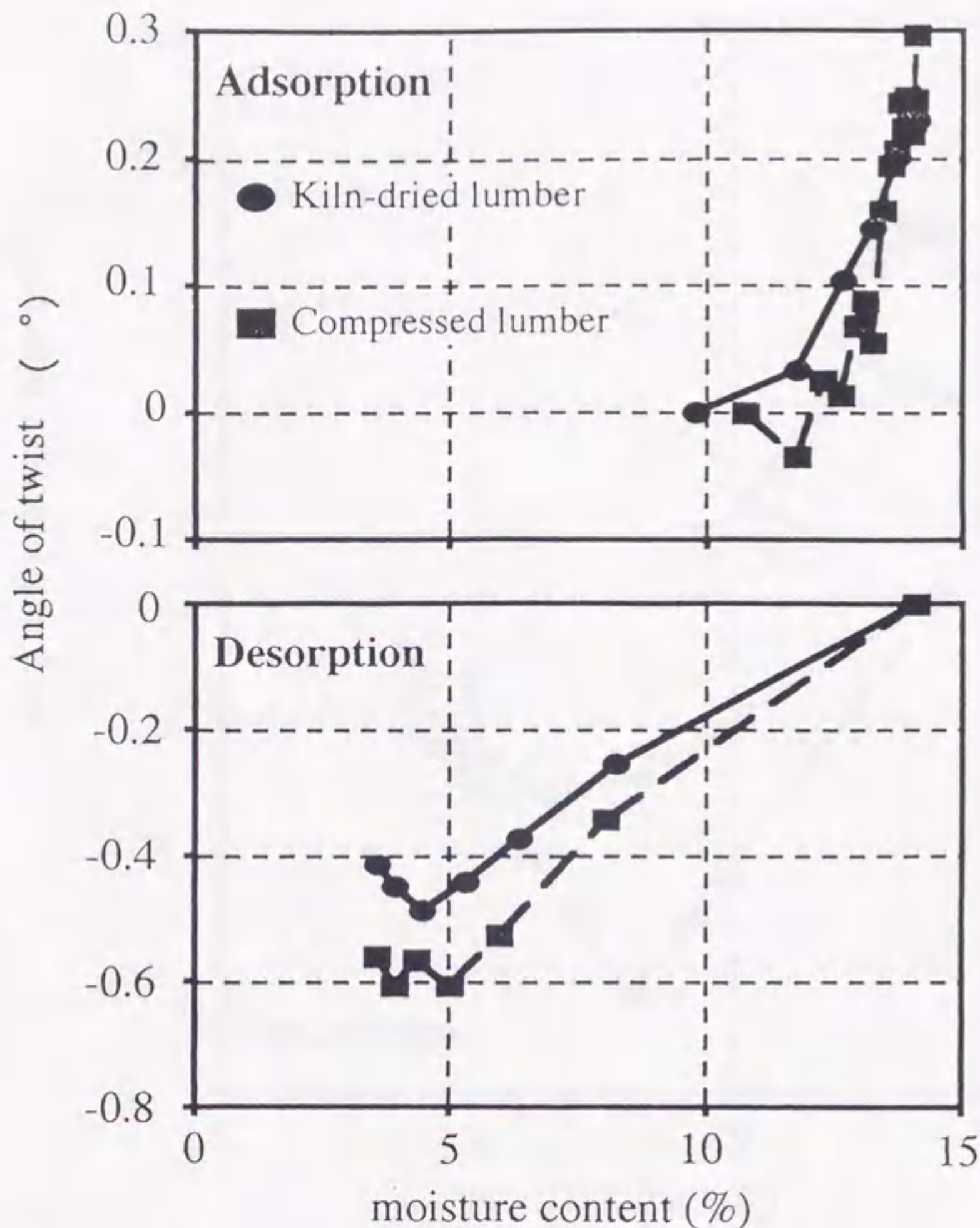


Fig. 3-13. Relation of moisture content to twist in process of adsorption and desorption.

3.1.4.2 縦ぞり

Fig. 3-14に、吸・放湿過程における含水率と縦ぞりの関係について示す。吸湿、放湿それぞれの過程において、圧縮処理材は縦ぞり矢高の最大変化量が熱気乾燥材の約2倍となった。熱板乾燥材と熱気乾燥材との間では、含水率と縦ぞりの関係について明確な差異が認められないという知見¹⁶⁾から、この現象は吸湿による圧縮変形の回復による影響と考えられる。

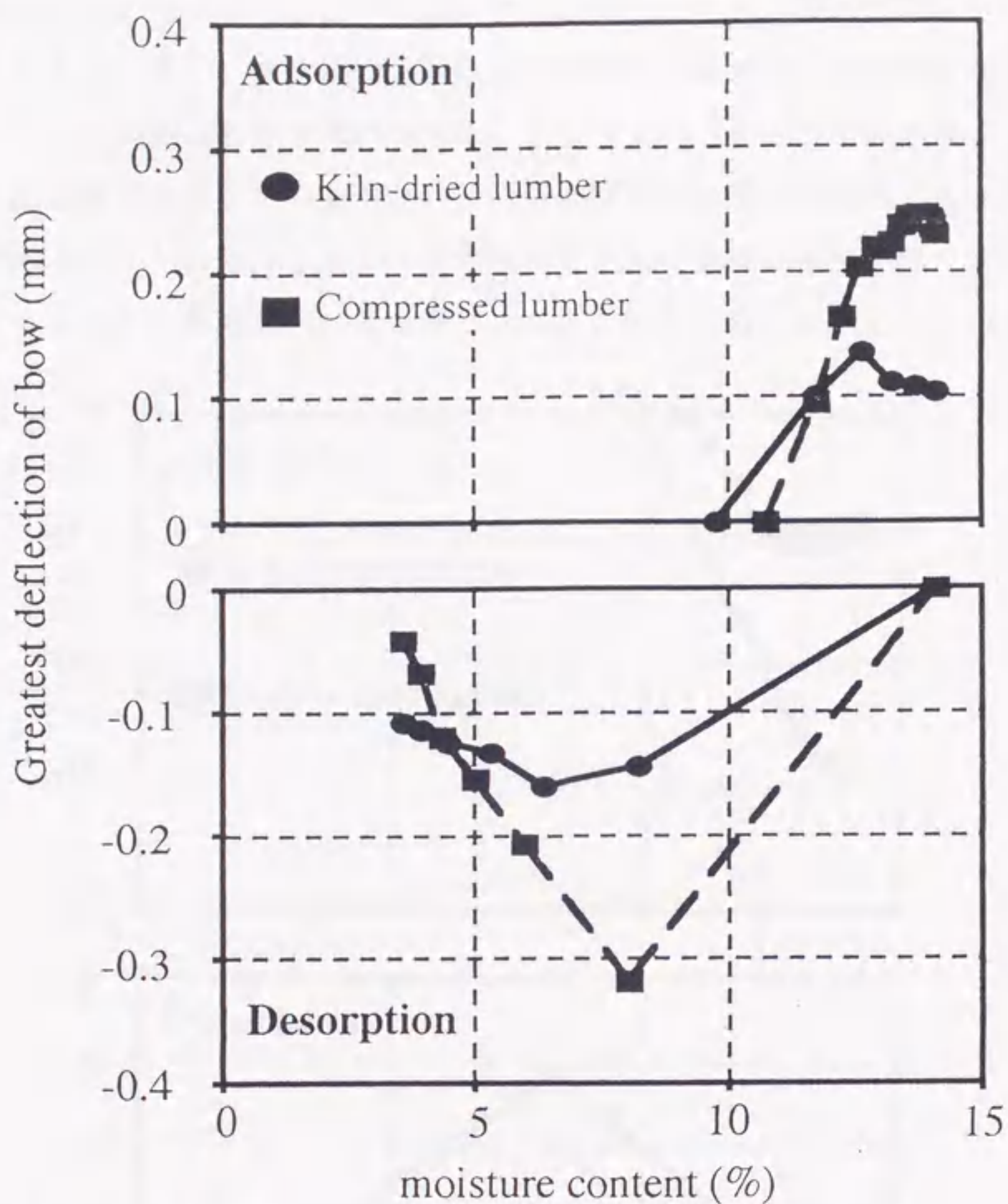


Fig. 3-14. Relation of moisture content to bow in process of adsorption and desorption.

3. 1. 4. 3 曲がり

Fig. 3-15に、吸・放湿過程における含水率と曲がりの関係について示す。吸湿過程において、圧縮処理材は曲がり矢高の最大変化量が熱気乾燥材の約 1/3 となった。放湿過程においては、曲がり矢高は初期にはプラス側に変化し、以降は減少傾向となった。減少期における変化量は、各処理材ともほぼ同じになった。

圧縮処理材において、曲がり矢高の変化は吸湿による回復の影響を受けないと考えられる。また、熱板乾燥材と熱気乾燥材との間では、含水率と曲がりの関係について明確な差異が認められないという知見¹⁶⁾から、圧縮処理材における吸・放湿過程を通じての曲がりの変化量の減少は、水蒸気処理によって得られるものと考えられる。しかし、放湿過程で熱気乾燥材と比べて変化量の変わらなかった含水率範囲もあることから、さらに検討の必要があると思われる。

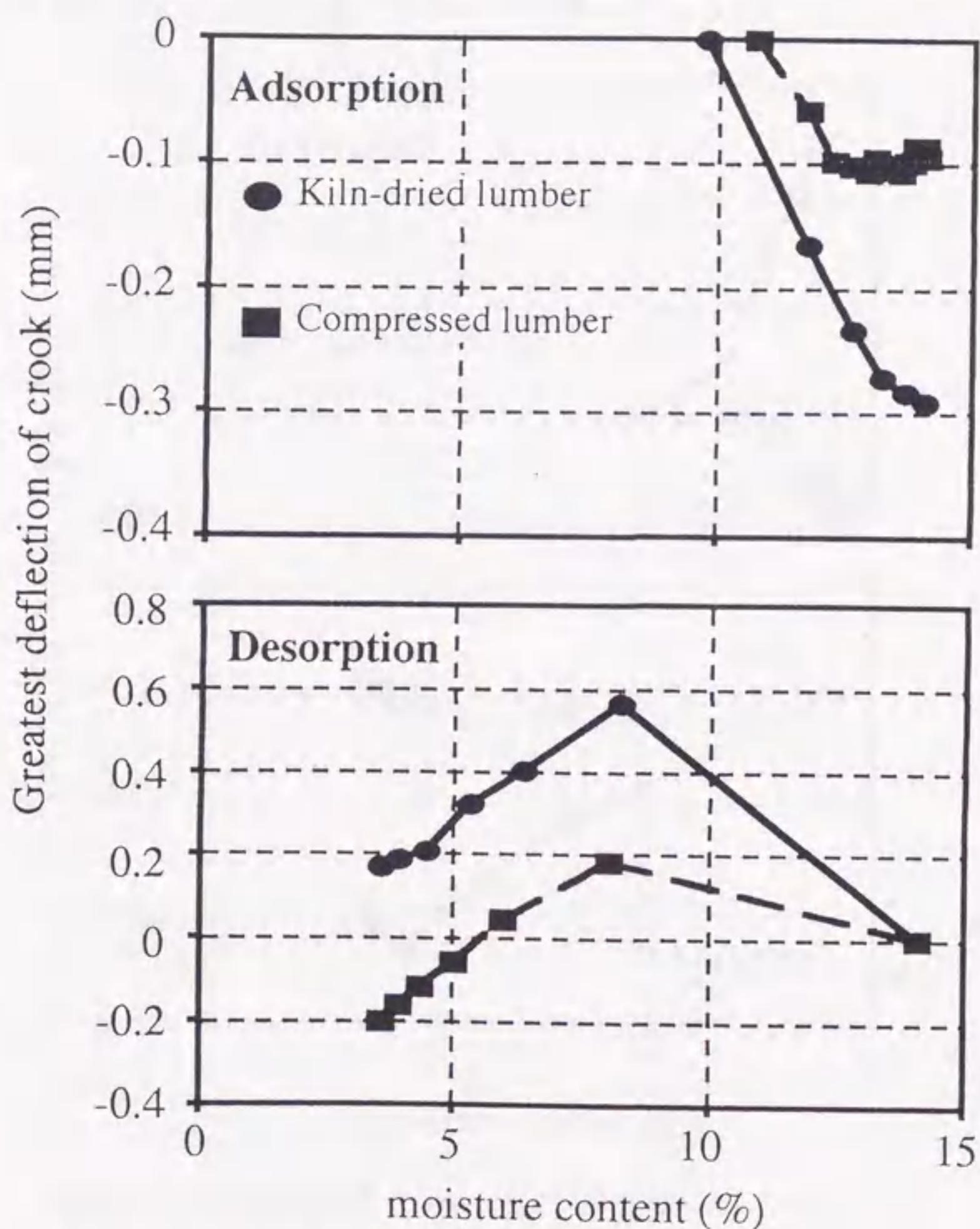


Fig. 3-15. Relation of moisture content to crook in process of adsorption and desorption.

3. 1. 4. 4 幅ぞり

Fig. 3-16 に、吸・放湿過程における含水率と幅ぞりの関係について示す。吸湿過程において、圧縮処理材は熱気乾燥材と全く異なる変化を示したが、これは吸湿による厚さ方向の寸法が回復することによる影響と考えられる。一方、放湿過程では、圧縮処理材は幅ぞり矢高の最大変化量が熱気乾燥材の約 1/10 となった。このことより、圧縮処理材は寸法の回復が収まれば幅ぞりの変化量は熱気乾燥材に比べて減少するものと考えられる。

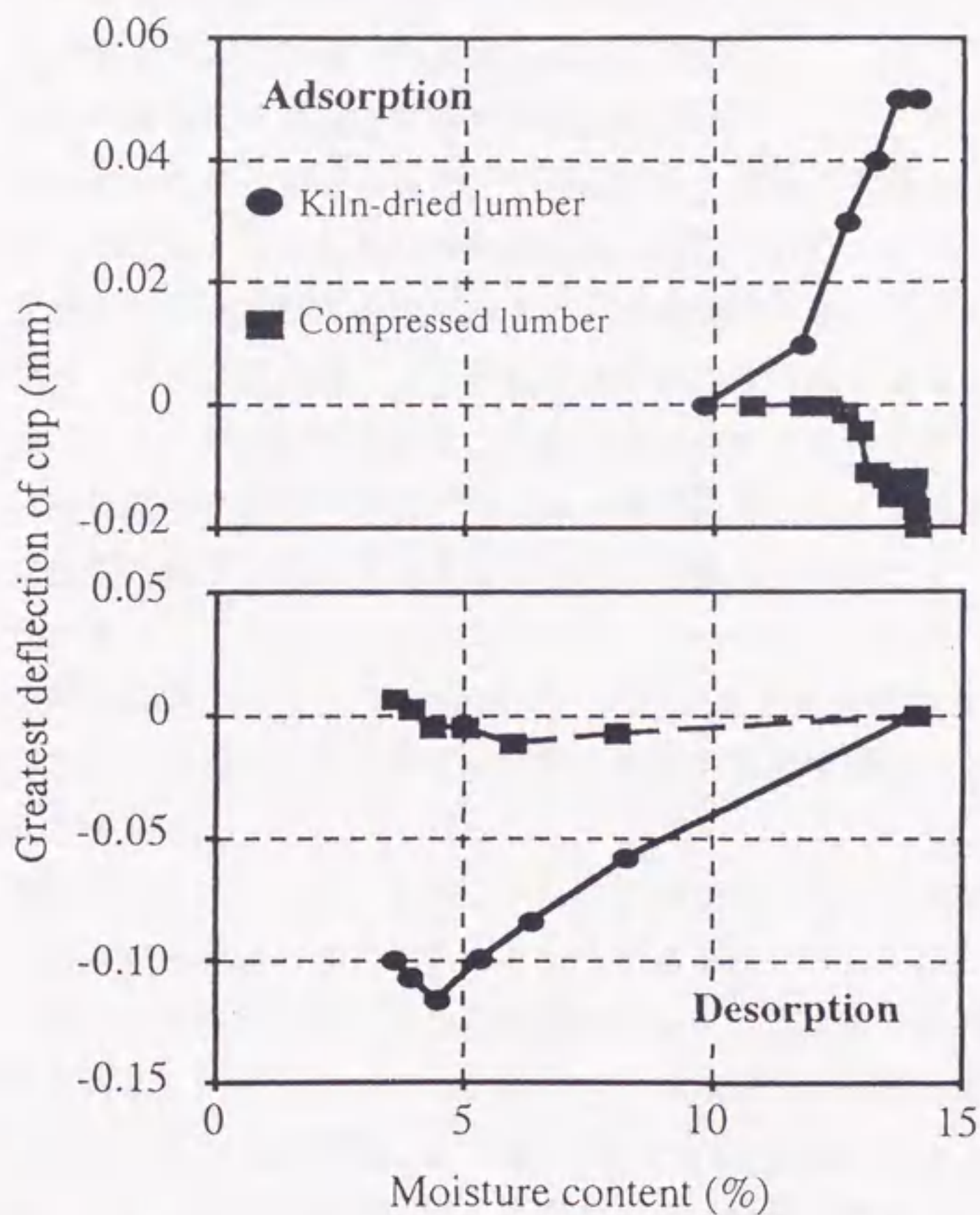


Fig. 3-16. Relation of moisture content to cup in process of adsorption and desorption.

3.2 水蒸気処理による木材の曲木加工

3.2.1 曲木軟化条件の検討

3.2.1.1 曲げ試験および曲げクリープ試験

曲げ試験の結果は、**Table 3-4**に示すとおりである。ヤング係数は、水蒸気処理後に大きく低下する。特に、ハルニレで低下が大きく、試験体によっては処理前の1/3以下になったものもあった。このヤング係数の低下により、木材は曲げやすい状態になっていると言える。

この結果を過去の熱水煮沸による軟化方法と比較する^{25, 28)}と、概ね

熱水処理時間 2 時間→水蒸気処理150℃16分

熱水処理時間 4 時間→水蒸気処理150℃32分

に相当するものと考えられる。したがって、従来の方法と比較して、軟化温度を高くすることにより軟化時間が大幅に短縮された。

樹種別に軟化の程度を見てみると、他の樹種と比べてハルニレ・ミズナラ・ヤチダモが水蒸気処理により軟化されやすくなったと言える。

曲げクリープ試験の結果は、**Table 3-5**に示すとおりである。

荷重を加えた直後の弾性たわみは、水蒸気処理により増大する。これは、ヤング係数の低下に由来するものである。弾性たわみはブナ・ミズナラ・ハルニレが大きい。

負荷10分後のクリープたわみは、ブナ・ミズナラが大きい。これらの樹種は、水蒸気処理後も曲げやすい状態を比較的長い時間保つことができる樹種であると言える。

残留たわみは、ブナ・ミズナラ・ハリギリが大きい。残留たわみは、クリープたわみが大きいときに増大するようである。

一般に、弾性たわみの大きな樹種はクリープが大きく、残留たわみも大きい傾向がある。ただし、ハルニレは弾性たわみが大きいにもかかわらず、クリープも残留たわみも比較的小さくなった。このことは、ハルニレが水蒸気処理後に曲げやすい状態を長く保つことができない樹種であることを示唆するものと考えられる。

Table 3-4. The effect of steaming time in bending test.

Species		Steaming condition	
		150 °C 16 min.	150 °C 32 min.
		before→after	before→after
Buna	Moisture content (%)	91→58	90→48
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	122 → 73 (60%)	122 → 79 (65%)
Yachi-damo	Moisture content (%)	108→68	102→65
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	128 → 55 (43%)	124 → 44 (36%)
Harigiri	Moisture content (%)	90→53	90→52
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	78 → 45 (58%)	58 → 33 (58%)
Mizu-nara	Moisture content (%)	84→56	80→55
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	114 → 58 (51%)	107 → 39 (37%)
Itaya-kaede	Moisture content (%)	91→62	91→58
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	104 → 66 (63%)	109 → 61 (56%)
Haru-nire	Moisture content (%)	99→69	98→66
	MOE ($\times 10^2$ MPa)	141 → 41 (29%)	131 → 50 (38%)

Note: Values in parentheses shows the proportion of the value after steaming to the one before steaming.

Table 3-5. The effect of steaming time in creep test.

Species	Steaming condition					
	150 °C 16 min.			150 °C 32 min.		
	Elastic bend (mm)	Creep bend (mm)	Remaining bend (mm)	Elastic bend (mm)	Creep bend (mm)	Remaining bend (mm)
Buna	1.94	1.15	0.59	1.86	1.13	0.58
Yachidamo	1.56	0.13	0.10	1.96	0.18	0.16
Harigiri	1.58	0.72	0.57	2.35	0.58	0.53
Mizunara	2.22	1.03	0.67	1.61	1.23	0.70
Itayakaede	1.01	0.07	0.06	1.86	0.09	0.08
Harunire	2.05	0.15	0.15	1.68	0.10	0.10

3.2.1.2 曲げ破壊試験

曲げ破壊試験の結果は、Table 3-6に示すとおりである。曲げ強さは、水蒸気処理後に低下している。しかし、無処理材との割合を比較すると各樹種共に90%程度の強度を維持しており、加工の段階での差し障りはないものと考えている。

Table 3-6. The effect of steaming time in bending test.

Species		Steaming condition		
		0 min.	150 °C 16 min.	150 °C 32 min.
Buna	Moisture content	88	55	57
	MOR	642	623	622
	MOE	122	73	79
	Limit bend	5.2	7.8	8.3
Yachidamo	Moisture content	98	65	63
	MOR	695	643	616
	MOE	119	57	44
	Limit bend	4.0	4.5	4.9
Harigiri	Moisture content	85	53	51
	MOR	520	479	466
	MOE	78	47	37
	Limit bend	3.8	4.5	5.2
Mizunara	Moisture content	87	58	52
	MOR	481	422	417
	MOE	114	60	47
	Limit bend	5.3	7.6	8.0
Itayakaede	Moisture content	89	62	64
	MOR	644	616	619
	MOE	104	68	64
	Limit bend	4.9	7.1	6.5
Harunire	Moisture content	95	71	64
	MOR	574	544	549
	MOE	141	51	50
	Limit bend	5.1	7.0	7.8

Note : Moisture content : (%)

MOR : ($\times 10^2$ MPa)

MOE : ($\times 10^2$ MPa)

Limit bend : (mm)

曲げヤング係数は、水蒸気処理後におおきく低下する。ヤチダモとハルニレは水蒸気処理による低下が大きく、無処理材の40%程度になった。これらの樹種は、水蒸気処理することにより特に曲げやすい状態になったことがわかる。

破壊たわみは、水蒸気処理により増大する。これは、ヤング係数の低下に由来するものである。ブナ・ミズナラ・ハルニレは、水蒸気処理によって破壊たわみが無処理材の約1.5倍になり特に大きくなった。これらの樹種は、他と比べて水蒸気処理による曲げ加工に適した樹種であることがわかった。

3.2.2 曲木形状固定条件の検討

3.2.2.1 曲げ形状回復試験

固定処理条件の検討については、160℃8分では全ての樹種で形状回復量が大きく、試験の対象とはならなかった。したがって、160℃16分での試験結果について検討を行った。

吸湿による曲げ形状回復試験の結果をTable 3-7に示す。吸湿させることにより、試験体両端の間隔は増大する。したがって、回復度は増加することになる。ヤチダモ・イタヤカエデについては、回復度は1%以内であり、吸湿時の動きは非常に安定していることがわかった。ミズナラ・ブナについては、回復度は1~2%になった。このときの試験体両端の間隔の変動幅は5~6mmである。この値は、曲木を材料として製品をつくることを想定した場合の許容限界ではないかと考えている。

Table 3-7. The effect of moisture adsorption in recovery test.

Time of moisture adsorption (day)	Set-recovery (%)					
	Buna	Yachidamo	Harigiri	Mizunara	Itayakaede	Harunire
7	1.6	0.3	4.2	1.3	0.3	4.9
28	1.9	0.6	5.4	1.6	0.7	6.5

Note : Set-recovery (%) = $\frac{Dr - Db}{Do - Db} \times 100$

Dr : The distance from specimen's edge to edge after recovery test

Db : The distance from specimen's edge to edge before recovery test

Do : The length before bending (=800mm)

Table 3-8に人工乾燥時および吸湿時のそりの大きさについて示す。ブナ・ミズナラ・イタヤカエデは、含水率の変動に対して、そり矢高量は低く抑えられていて、非常に安定していることがわかった。そり量については、曲木を部材とした製品をつくる場合の許容限界は3mm以内と考えている。

Table 3-8. The effect of moisture adsorption on greatest deflection of bow in recovery test.

		Greatest deflection of bow (mm)					
		Buna	Yachidamo	Harigiri	Mizunara	Itayakaede	Harunire
After kiln-dry		1	3	3	2	1	5
Time of moisture	7	1	2	5	1	1	2
adsorption (day)	28	1	2	6	1	1	-3

Note : "Greatest deflection of bow" is the distance from the ground.

3.2.3 曲木を使った製品の試作

試作品 (Fig. 3-17) は、(株) 匠芸の既製品をベースに設計した³²⁾。この試作品は、曲木を使うことにより構造を単純化することができた。したがって、椅子の重量を5~7kgまで軽量化することができた。この点では、座板の改良をすることにより、さらに軽くすることができると考えている。

歩留まりの点では、従来のムク材の削りだしに比べて約2割の材料が節約できることになった。



Fig. 3-17. The chairs manufactured for trial.

Note : The used species of wood are Mizunara, Yachidamo and walnut.

製作上の問題点としてあげられるのは、次の事柄である。

- ①曲木曲率のバラツキの発生
- ②水蒸気処理による色の変化（褐色化）
- ③帯鉄と木材の接触による金属汚染
- ④曲げ加工の失敗率（曲げることによる割れの発生）
- ⑤生材の管理方法（特に夏期）

①については、曲げる部分だけでなく、材料全体をおさえる型枠をつくること、曲げる部分の厚みを少なくして材料に弾力を持たせることで対処した。②については、固定処理温度を比較的低く設定したこともあって、製作に支障はなかった。③については、汚染された部分を削ることで対処したが、将来的には帯鉄に他の材料を巻き付け、接触を防ぐことや、汚染を消滅させる薬品を使用する必要があると考える。④については、軟化後なるべく時間を置かずに曲げること、最低2人で作業することで対処したが、基本的には曲げる部分に欠点（節・割れなど）の少ない材料を使用することが重要であると考え。⑤については、材料に散水しておくことが考えられるが、長期の保存は難しいと思われる。

現在の曲木1本当たりの製造所要時間は、**Fig. 3-18**のとおりである。実用化に向けては、曲げ作業時間の短縮は非常に重要な項目となる。この理由は、軟化した木材を数本曲げ加工した後、それらをまとめて固定処理していくと考えるからである。金属製治具の効率的な活用については、①帯鉄に取り付けることができる治具（**Fig. 3-19**）、②固定処理用治具（**Fig. 3-20**）を考案³³⁾し、試用した。①は、軟化処理や曲げ加工中の材料の伸縮に対応できるように設計した。②は、木製の型枠に比べて、曲木に発生する回復力を強力に抑えることが可能で、形状固定時の曲率が一定のときには効率的に使用できると考えている。

[A : Traditional way]

[B : Steam treatment]

$\frac{\text{The time required of B}}{\text{The time required of A}} \times 100 (\%)$

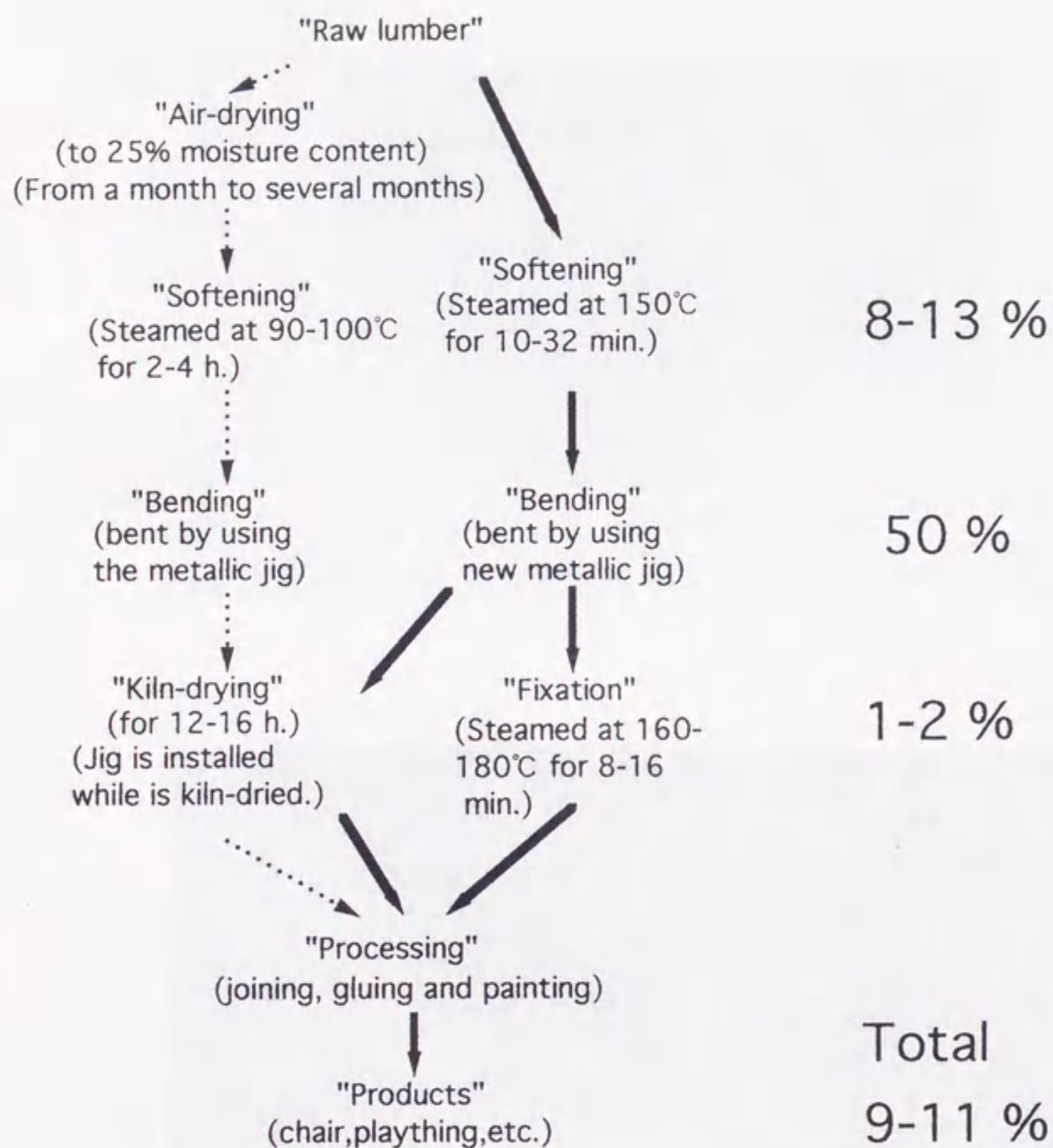


Fig. 3-18. The manufacturing process and the time required.

Note : The size of the specimen is 40 (T) × 40 (R) × 1000 (L) mm.

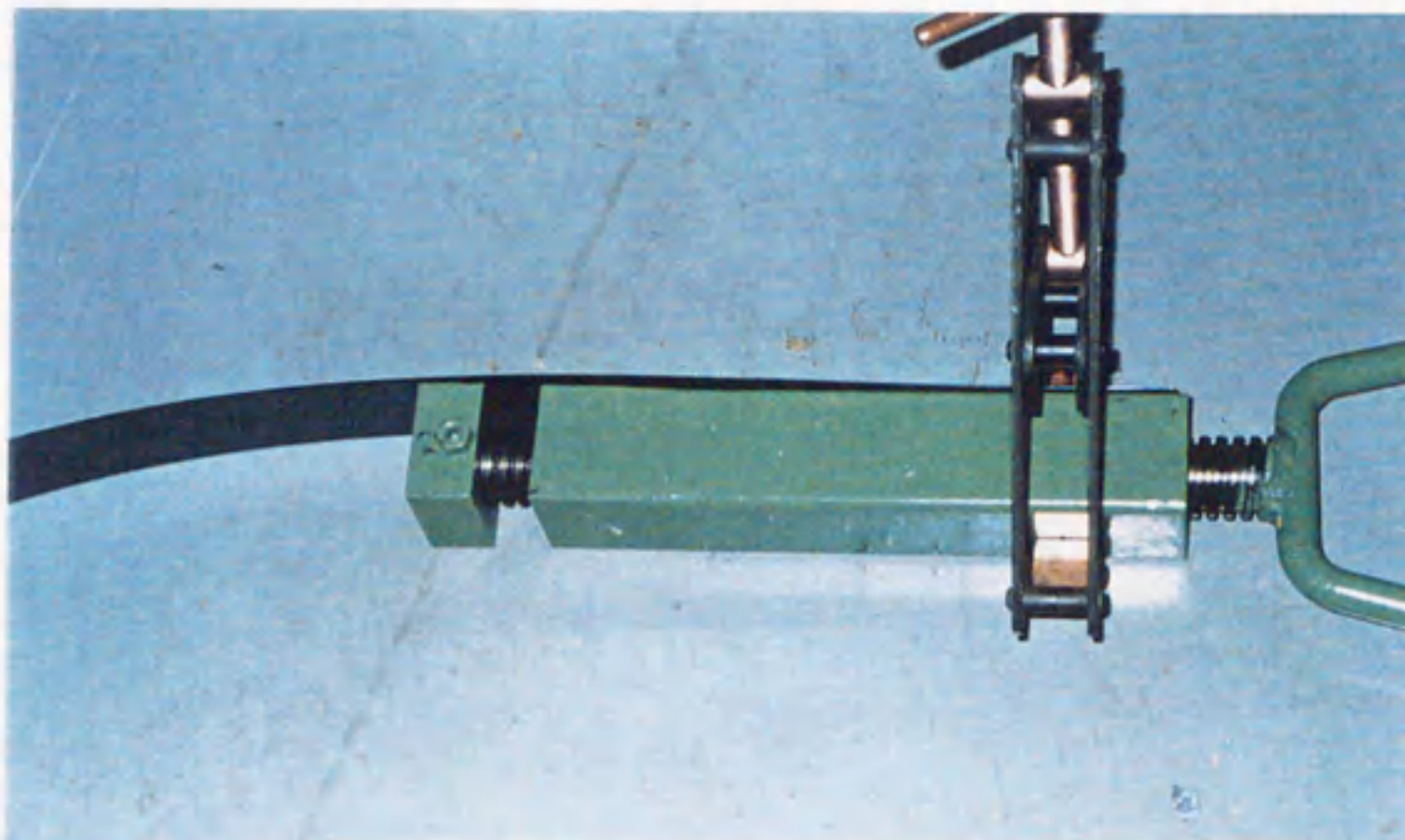
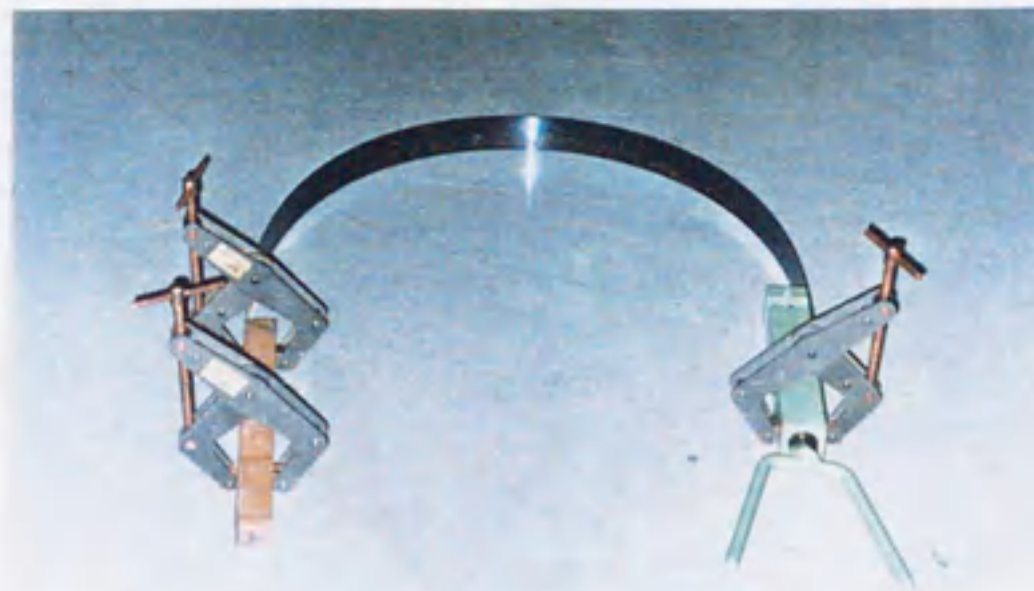


Fig. 3-19. The special-jig to bend.
Note : Jig is the installed type on a metal plate.

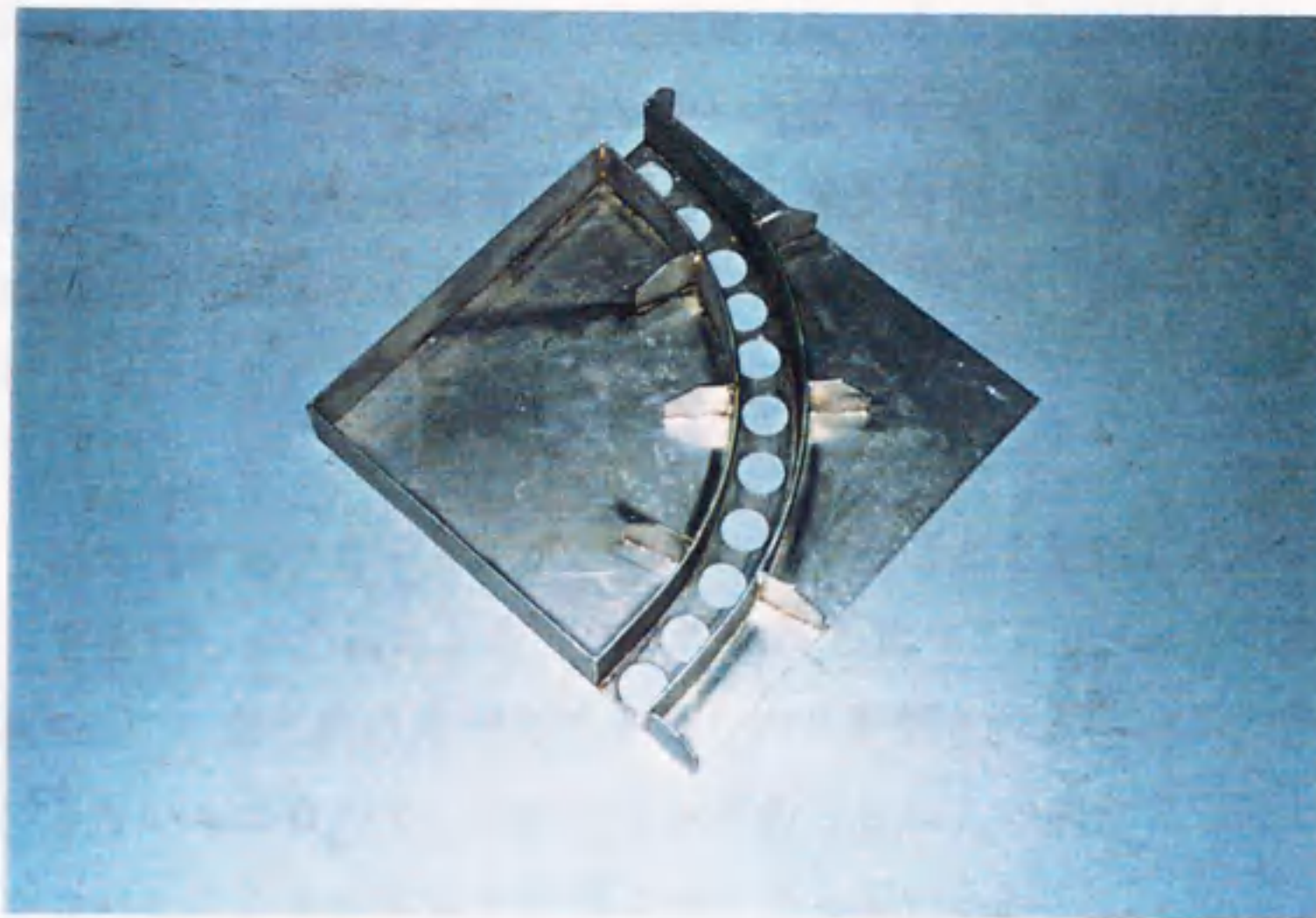


Fig. 3-20. The special-jig to fix the bending shape.

4. 結言

熱気乾燥材と圧縮処理材の吸・放湿試験では、次のような結果が得られた。

圧縮処理材は、熱気乾燥材と比べて吸湿速度は緩やかで、抗吸湿能は76.1%になった。しかし、放湿速度は変わらないという結果になった。また、吸湿による膨張、放湿による収縮は板厚方向で大きく、熱気乾燥材の2倍以上となった。一方、板幅方向では小さくなった。

圧縮処理材における狂いでは、曲がり矢高の変化量が減少することがわかった。

本章での圧縮処理材をフローリングとして使用することを想定した場合、処理後の厚さ（R方向）が20mmのとき、熱気乾燥材と比べて約0.7mm（実際の変化量は、約1.3mm）の変化量の差が出てくるものと予想される¹⁹⁾。この差は、実用上無視できないものなので、フローリングの「さね」の部分を工夫して、この変化量をカバーできるものにすればよいと考えている。

また、曲木製作に水蒸気処理を導入したときの軟化条件・形状固定条件を検討した結果、次のことがわかった。

①150℃の水蒸気処理により、木材を軟化するのに要する時間が大幅に短縮された。その度合いは、熱水煮沸による軟化方法と比較すると、1/7.5（約13.3%）である。

②ブナ・ミズナラ・ハルニレは、曲げ加工に適した樹種であると言える。ただし、ハルニレは水蒸気処理後に曲げやすい状態を長く保つことができない樹種である。

③曲げ形状回復試験の結果から、ブナ・ヤチダモ・ミズナラ・イタヤカエデは、含水率の変動に対して安定していることがわかった。

④金属製曲げ加工用治具については、考案した治具により曲げ加工時間をこれまでの約半分に短縮できた。

⑤試作品の製作については、曲木を使うことにより製品の構造を単純化することができた。したがって、椅子の重量を5~7kgまで軽量化することが可能となった。また、必要な材料の量は、これまでの製作方法と比較して約2割節約できた。

⑥製品の製作日数については、標準的な総製作日数をこれまでの9～11%に短縮できた。

水蒸気処理法は、軟化と形状固定の2工程で圧力容器やボイラー等の設備を兼用できるメリットを持つ。本章の試作品の製作段階では、家具メーカーに設備を導入し、試験を行った。また、水蒸気処理は有害な薬品を使用しない処理方法なので、廃液処理や製作の際の作業環境を考えた場合、環境と人間にやさしい処理方法であると言え、また実際に作業に携わった人達に好評を得た。

本章の試験により、水蒸気処理の条件が明らかになり、また曲木に要する作業時間も短縮することが可能となった。今後、形状固定処理後の人工乾燥装置を使った乾燥時間の把握、検討を行うことができれば、現場での作業の効率化は一層進むことになると考えている。

総括

本研究では、間伐材の建材としての利用および材質の改良を目的として、高圧水蒸気中での圧縮成形加工方法を考案し、高温高圧プレス成形装置を新たに開発した。そして、その装置を使用して、形状固定の条件を検討した。同時に、水蒸気処理木材の物理的性質および化学的性質を調べることで永久固定される際の機構を解明した。

その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 新たに開発した高温高圧プレス成形装置により、木材の軟化、圧縮、およびその変形の固定を一連の操作で短時間に行い、間伐材丸太から圧縮成形角材を製造することが可能となった。

(2) 圧縮成形角材は、形状固定の高圧水蒸気処理により、吸水による回復をしなくなり、成形材の永久固定ができた。

(3) 圧縮成形角材が回復しなくなる水蒸気処理条件は、今回の実験のような材の直径15cm程度の場合、200°Cで3分間の飽和水蒸気をかけることである。

(4) 走査型電子顕微鏡での観察により、圧縮の際に細胞壁は、なめらかに屈曲変形し、局所的な変形の集中、細胞相互の分離を起こすことなく、圧縮成形できることがわかった。

(5) 圧縮成形角材の表面硬さは、無処理のものと比較して最大6.6倍まで向上することがわかった。

(6) 耐朽性については、圧縮木材は無処理のものと比べて重量減少率が1/2～1/3になっており、耐朽性が向上したことがわかった。

(7) 高圧水蒸気処理によって、圧縮木材中のセルロース結晶領域が増加し、それとともに回復度は減少する。

(8) 圧縮木材の永久固定化機構には、セルロースが関与しているものと考えられる。

(9) 圧縮木材の永久固定化機構は、圧縮変形によってひずみのかかったセルロース非晶領域が部分的に加水分解され、圧縮によって蓄積された内部応力が解放されると共に変形した状態のまま、加水分解した成分が結晶領域に熱再配列するものと考察される。

また、本論文では水蒸気処理の応用による木材性質の改善について検討した。また、民間企業に導入した水蒸気処理装置を使つての曲木製品開発を行った。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) 圧縮処理材は、熱気乾燥材と比べて吸湿速度は緩やかで、抗吸湿能は76.1%になった。一方、放湿速度は変わらなかった。

(2) 吸湿による膨張、放湿による収縮は板厚方向で大きく、熱気乾燥材の2倍以上となった。一方、板幅方向では小さくなった。

(3) 圧縮処理材における狂いでは、ねじれ、縦ぞり、幅ぞりについては吸湿による厚さ方向の形状回復の影響が大きくなった。

(4) 曲げ形状回復試験の結果から、ブナ・ヤチダモ・ミズナラ・イタヤカエデは、含水率の変動に対して安定していることがわかった。

(5) 金属製曲げ加工用治具については、考案した治具により曲げ加工時間をこれまでの約半分に短縮できた。

(6) 試作品の製作については、曲木を使うことにより製品の構造を単純化することができた。したがって、椅子の重量を5~7kgまで軽量化することが可能となった。また、必要な材料の量は、これまでの製作方法と比較して約2割節約できた。

(7) 製品の製作日数については、標準的な総製作日数をこれまでの9~11%に短縮できた。

以上のような水蒸気処理による圧縮成形加工により、種々の応用加工および間伐材の有効利用が可能となった。

文献

- 1) 日本林業協会：“図説林業白書（平成8年度版）”，農林統計協会，93（1997）.
- 2) 宮崎良文：木材と快適性，科学と工業，70（11），453-458（1996）.
- 3) 宮崎良文，本橋豊，小林茂雄：精油の吸入による気分の変化（第2報），木材学会誌，38（10），909-913（1992）.
- 4) 宮崎良文，三輪雄四郎，菊池吉晃，濱治世：木材の接触感と官能評価，第44回日本木材学会大会研究発表予稿集，164（1994）.
- 5) 宮崎良文，三輪雄四郎，菊池吉晃，濱治世：木材への接触が自律神経反射に及ぼす影響，第44回日本木材学会大会研究発表予稿集，165（1994）.
- 6) 岡野健ほか8名：“木材居住環境ハンドブック”，114-183（1995）.
- 7) 日本林業協会：“図説林業白書（平成8年度版）”，農林統計協会，18-19（1997）.
- 8) Tanahashi, M.: Characterization and Degradation Mechanisms of Wood Components by Steam Explosion and Utilization of Exploded Wood., *Wood Research*, 77, 49-117（1990）.
- 9) 日本林業協会：“図説林業白書（平成8年度版）”，農林統計協会，132（1997）.
- 10) ワヒュー・ドイアント，師岡淳郎，則元京：高温・高圧水蒸気雰囲気での木材の粘弾性測定法，木材学会誌，44（2），77-81（1998）.
- 11) 伊藤洋一，棚橋光彦，河合祐和，重松幹二，篠田善彦：高圧水蒸気処理による木材の圧縮成形とその応用，岐阜大学農学部研究報告，60，121-127（1995）.
- 12) 井上雅文，則元京：熱処理による圧縮変形の永久固定，木材研究・資料，27，31-40（1991）.
- 13) Inoue, M., M. Norimoto, M. Tanahashi and R. M. Rowell.: Steam or heat fixation of compressed wood., *Wood and Fiber Sci.*, 25(3), 224-235(1993).
- 14) 伊藤洋一，棚橋光彦，重松幹二，篠田善彦：高圧水蒸気による木材の圧縮成形加工及びその固定（Ⅳ），日本木材学会中部支部研究発表会要旨集（富山），70-71（1992）.

- 15) 井上雅文, 門河倫子, 西尾治郎, 則元京: 木材中の水分を利用した水熱処理による圧縮変形の永久固定, 木材研究・資料, 29, 54-61 (1993).
- 16) 中島厚, 菅谷恵美子: 床素材の寸度安定化技術の検討, 林産試験場報, 8 (2), 1-8 (1994).
- 17) 則元京: 木材の熱および水蒸気処理, 木材工業, 49 (12), 588-592 (1994).
- 18) 棚橋光彦: 爆砕法による森林バイオマスの変換と総合利用, 木材研究・資料, 18, 34-65 (1983).
- 19) 伊藤洋一, 中島厚, 菅谷恵美子: 圧縮処理材と熱気乾燥材の吸・放湿特性, 林産試験場報, 9 (1), 1-7 (1995).
- 20) 則元京, 和田博, 長谷川賢司, 飯田生穂: マイクロ波加熱による木材の曲げ加工, 日本レオロジー学会誌, 8, 166-171 (1980).
- 21) 飯田生穂, 則元京: マイクロ波加熱による木材の曲げ加工-横方向のクリープ-, 日本レオロジー学会誌, 9, 162-168 (1981).
- 22) 青木務, 則元京: マイクロ波加熱による木材の曲げ加工-繊維方向曲げ加工材の水分回復-, 木材研究・資料, 17, 88-98 (1983).
- 23) 飯田生穂, 則元京, 今村祐嗣: マイクロ波加熱による木材の曲げ加工-横方向曲げ処理材の水分・熱回復-, 木材研究・資料, 17, 99-111 (1983).
- 24) M. Norimoto, C. Ota, H. Akitsu and T. Yamada: Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Heat Treatment., *Wood Research*, **79**, 23-33 (1993).
- 25) 小野寺重男, 高橋政治, 川口信隆: 輸入材と特産材の曲げ加工に関する研究 (1), 林産試験場月報, 206, 10-15 (1969).
- 26) 大久保勲, 北澤政幸, 穴沢忠, 斉藤藤市: 輸入材と特産材の曲げ加工に関する研究 (2), 林産試験場月報, 207, 11-15 (1969).
- 27) 米田昌世, 宮野力, 若井実: 輸入材と特産材の曲げ加工に関する研究 (3) 曲げ加工試験 (その1), 林産試験場月報, 208, 6-15 (1969).
- 28) 米田昌世, 宮野力, 若井実: 輸入材と特産材の曲げ加工に関する研究 (3) 曲げ加工試験 (その2), 林産試験場月報, 209, 11-14 (1969).

- 29) 渡辺昇, 関谷武, 新谷文美夫, 斉藤繁雄: 曲木技術に関する実用的研究, 日本木材学会北海道支部講演集, 11, 52-57 (1979).
- 30) 伊藤洋一: 水蒸気処理による曲げ加工, ウッディエイジ, 526, 7-9 (1997).
- 31) 伊藤洋一, 中井啓二郎, 津田博向: 水蒸気処理を使った曲木家具の開発, 日本木材学会北海道支部講演集, 29, 13-16 (1997).
- 32) 伊藤洋一, 中井啓二郎, 津田博向: 水蒸気処理による曲げ加工, 木材工業, 52 (2), 86-87 (1997).
- 33) 特許出願中: “木質材用曲げ加工治具および木質材の曲げ加工方法”.
- 34) Tanahashi, M., T. Goto, F. Horii, A. Hirai and T. Higuchi.: Characterization of steam-exploded wood III., *Mokuzai Gakkaishi*, **35**, 654-662 (1989).
- 35) 吉原一年, 小林武, 藤井利郎, 赤松勲: Klason lignin 定量法の改良法, 紙パ技協誌, 38 (4), 466-475, (1984).
- 36) 酒井俊男: “電子顕微鏡試料技術集”, 日本電子顕微鏡学会関東支部編, 誠文堂新光社, 5-10 (1970).
- 37) 原田浩: “木材の結晶・非晶構造モデルの構築”, 昭和 59 年度科学研究費補助金 (総合研究 A) 研究成果報告書, 1-154, (1985).
- 38) 後藤俊幸, 棚橋光彦, 原田浩, 樋口隆昌: 木材主要成分の X 線回折とセルロース成分の結晶性の評価, 木材研究・資料, 21, 102-107 (1985).
- 39) Segal, L., J.J. Creely, A.E. Martin, Jr. and C.M. Conrad.: An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer., *Textile Res. J.*, **29**, 786-794, (1959).
- 40) Jayme, G. and H. Knolle.: Beitrag zur empirischen röntgenographischen Bestimmung des Kristallinitätsgrades cellulosehaltiger Stoffe., *Das Papier*, **18**, 249-255, (1964).
- 41) Knolle, H. and G. Jayme.: Über ein digitales Verfahren zur empirischen Bestimmung der Röntgenkristallinität cellulosehaltiger Stoffe und seine Anwendung., *Das Papier*, **19**, 106-110, (1965).

- 4 2) Fengel, D. and G. Wegener. : "8.4. Models of the internal Cell Wall Structure". Wood : Chemistry, Ultrastructure, Reactions. Berlin · New York, Walter de Gruyter, 1984, p.236-238.
- 4 3) 棚橋光彦, 安藤里, 伊藤洋一, 篠田善彦, 井上雅文, 新居伸治: 高圧水蒸気によるセルロース系繊維の形状の固定化とその改質, 繊維学会予稿集, 144 (1991).
- 4 4) 棚橋光彦: 水蒸気処理による圧縮木材の固定及び主要成分の構造変化, 日本木材学会レオロジー研究会要旨集, 15-18 (1991).

謝辞

本論文を発表するにあたり、終始、御指導と激励を賜った岐阜大学農学部
の棚橋光彦教授、また、本論文のとりまとめに際し、多くのご教示を頂いた岐阜
大学大学院連合農学研究科の篠田善彦教授、静岡大学農学部の吉田弥明教授、
信州大学農学部の唐澤傳英教授、岐阜大学農学部の大橋英雄教授、元静岡大学
農学部の斉藤藤市教授に心から感謝の意を表します。

また、有益な御助言と御指導を賜った元北海道立林産試験場の山本宏氏、北
海道立林産試験場の川上英夫氏、伊藤勝彦氏、窪田實氏、河原田洋三氏、峯村
伸哉氏、大久保勲氏、瀧澤忠昭氏、米田昌世氏、中村史門氏、丸山武氏、中畠
厚氏、岐阜大学農学部の重松幹二助手、(株)日阪製作所の大田親義氏、京都大学
木質科学研究所の田中文男講師、井上雅文助手に心から感謝の意を表します。

北海道立林産試験場の沼田征志氏、幡多輝昭氏、上野英治氏、梅原勝雄氏、
中野隆人氏、藤本英人氏、秋津裕志氏、清野新一氏、大西人史氏、戸田正彦
氏、岐阜大学農学部の河合真吾助手、秋田県立農業短期大学付属木材高度加工
研究所の土居修一教授、(株)匠工芸の桑原義彦氏、中井啓二郎氏には、それぞ
れの立場から有益な御助言と御指導、激励を賜りました。ここに、深く感謝致
します。

岐阜大学農学部のバイオマス変換学研究室の皆さんには、さまざまな御助力
をいただきました。ありがとうございました。

また、実験装置を製作して下さった(株)日阪製作所および試料を提供して頂い
た刈谷木材工業(株)、(株)クラレの皆様に厚く御礼申し上げます。

