3次元加工に適した伸縮性と柔軟性のある 木材の開発とその物性^{*1}

中村晋平^{*2}, 二村伸一^{*2}, 前野和也^{*3}, 葭谷耕三^{*3}, 棚橋光彦^{*3}

Development of Stretchable and Flexible Wood which Possesses Optimum Properties for Three-Dimensional Molding^{*1}

Shimpei NAKAMURA^{*2}, Shinichi FUTAMURA^{*2}, Kazuya MAENO^{*3},
Kouzou YOSHITANI^{*3} and Mitsuhiro TANAHASHI^{*3}

A three-dimensional molding method has been developed to make wood an alternative resource of plastics. This method is an unprecedented way of wood processing which uses deep-draw wood molding. To establish this method, development of stretchable and flexible semi-fixed compressed wood which provides optimum properties for three-dimensional molding by deep drawing, and clarification of its best fabricating steaming conditions are necessary. In this study, semi-fixed compressed woods were fabricated from *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* under various temperature and time conditions, and their mechanical properties were examined. The results indicated that the best steaming conditions for *Cryptomeria japonica* were 2-hour preliminary softening at 110°C, followed by 1-hour softening at 150°C which provided 97.8% elongation. For *Chamaecyparis obtusa*, it was 2-hour preliminary softening at 110°C, followed by 1-hour softening at 140°C which provided 107.4% elongation.

Keywords: three-dimensional molding, high-pressure steam, deep drawing, stretchable wood, compressed wood.

木材の3次元成形加工技術は木材をプラスチック代替資源として活用することを可能とするものとして開発が行われている技術である。これは圧縮半固定材から得た単板を高温高压の水蒸気下で回復させながら深絞り的に成形する他に類を見ない技術であり、この技術の確立には原料となる伸縮性および柔軟性を有する半固定材の開発と、その最適な作製条件を検討することが重要である。本研究ではスギ (*Cryptomeria japonica*) およびヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*) を用いて高压水蒸気処理による様々な温度条件および時間条件で半固定材の作製を試みた。結果、圧縮半固定材は伸縮性および柔軟性に富んだ物性を示し、スギでは110°Cで2時間予備軟化を行なった後、150°Cで1時間軟化処理を行なったものが最適な物性 (伸び率97.8%) を示し、ヒノキでは110°C 2時間の予備軟化後、140°Cで1時間軟化処理を行なうのが最適 (伸び率107.4%) であった。

1. 緒 言

森林減少および地球温暖化が世界規模で問題視される一方で、戦後の植林推進により世界で有数の高

い森林率を誇る我が国は、木材の大部分を海外からの輸入に頼り、木材自給率が20%程度と国産材の利用率に乏しく¹⁾、国内の森林の荒廃を招く要因となっている。このような問題の解決には、間伐材などの未利用資源を中心とした国産材の有効活用を推進し、我が国の林業を活性化することで健全な森林育成を促進することが急務であり¹⁾、様々な木材利用技術の開発がなされてきた。代表的なものに、マイクロ波や水蒸気を用いて木材を軟化することで木材に大変形を与えた後、高温高压の水蒸気を用いてその形状を固定する技術が挙げられる^{2,3)}。これによ

^{*1} Received May 29, 2008; accepted July 18, 2008. 本研究の一部は第58回日本木材学会大会 (2008年3月, つくば) において発表した。

^{*2} 岐阜大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

^{*3} 岐阜大学応用生物科学部 Faculty of Applied Biological Sciences, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

り低密度で低強度の針葉樹を圧密化することで表面硬度や強度を付与することや、径が細く通直でない間伐材などの丸材を丸太のまま角材へと圧縮成形することなどを実現した。さらに、この圧縮技術に応用することで木材表面に文字や図柄を加飾する技術や積層単板を圧縮することでバインダーレスでトレイなどを成形する技術⁴⁾、さらには木粉をボットなどの形状へとバインダーレス成形する技術⁵⁾など、木材を3次元的に加工する技術の開発が行われてきた。

木材における変形加工は、上述の圧縮成形加工やトーネット法による曲げ加工などに限られ、金属の成形に用いられる深絞り加工などは困難であるとされてきた⁶⁾。木材は圧縮変形に対しては細胞壁を折りたたむことで大変形が可能であるが、引張変形に対しては複合細胞間層によって剥離を生じ、加工が困難であるために、トーネット法のような圧縮側での1次元的な曲げ加工に限られてきた。しかし、我々はドラインゲットした圧縮材が熱と水分により元寸法まで回復する特性⁷⁾を利用することで、木材に伸縮性を付与できれば、木材に深絞り加工を施すことが可能であると考えた。そこで、ドラインゲット材より単板を切り出し、これを水蒸気により軟化、回復させながら深絞りに加工した後形状固定処理を施すという新たな木材の3次元加工法の開発を試みた。この技術は木材単板を様々な形状へと成形することを可能とするとともに、圧縮を加えることで硬度の向上が同時に得られることから、プラスチック代替資源として木材を有効活用することを可能とする技術として期待できるものである。

これまでの研究で80~100℃の条件で木材を軟化し、圧縮を行なった場合、常温の水に濡れるだけで回復を生じてしまうことが示されており⁸⁾、これを3次元成形加工に用いるのは困難であることが見出されてきた。そこで軟化条件を圧縮木材の固定温度^{2,3,9)}に近づけることで、弱い条件では回復を生じない半固定材を得る必要がある。また、この加工が成形治具にセットした単板をプレスによって引き伸ばしながら行うという性質上、原料となる単板には高い伸縮性および柔軟性が要求される。すなわち、弱い力で大きく伸び、かつ伸展の過程で割れや裂けが生じないために、ある程度の強度を有した材の開発が必要であり、これらを得るための最適な作製条件の検討は急務である。

そこで本研究では、我が国の代表的な樹木であり、かつ密度が小さく圧縮が容易であるスギ (*Cryptomeria japonica*) およびヒノキ (*Chamaecyparis*

obtusa) を用いて様々な温度条件および時間条件下で半固定材の作製を行い、引張強度、伸び率の測定および曲げ試験を行うことでそれぞれの物性値を測定し、3次元成形加工に最適な半固定材が得られる作製条件の確立を目的とした。

2. 実験方法

2.1 供試材料

直径が600 mm以上の国産のスギおよびヒノキの丸太から髓を避け、L(繊維方向)×T(接線方向)×R(放射方向)=500×200×200 (mm)となるように切り出した正角材を本研究における試験材料として用いた。

2.2 木材の圧縮

2.2.1 異なる温度条件下による圧縮

木材の圧縮は大型圧縮成形装置 (HTP-50/250 (株) 日阪製作所製) を用い、高圧水蒸気処理による木材圧縮成形法^{3,4,9)} に準じて行なった。原料となるスギおよびヒノキを辺材部が下部に来るように装填し、R方向に圧縮を行なった。急激な昇温により表面の温度のみが上昇してしまうことを避けるため、設定した各温度条件による処理に先立って110℃、2時間の蒸煮を予備軟化処理として行なった。この時、昇温速度は約10℃/minとした。その後、さらに水蒸気を導入し、各設定温度まで装置内の温度を上昇させた。設定温度はそれぞれ110℃~180℃の範囲とし、設定温度に到達後、本軟化処理として1時間の蒸煮を行なった。処理後にプレスを行ない、スギで密度0.7 g/cm³、ヒノキで0.8 g/cm³を目標に圧縮した。直後に装置より水蒸気を排出し、プレスをかけたまま一晩放置することで放冷した後、圧縮半固定材を取り出した。

2.2.2 異なる軟化時間条件下での圧縮

2.2.2.1 合計軟化時間の検討

2.2.1で行なった圧縮により導き出された最適な軟化処理温度条件を用いて、予備軟化時間の検討を行なった。圧縮方法は上記で示した通りであるが、本試験では予備軟化時間をそれぞれ1時間、2時間、3時間と設定し、圧縮を行なった。予備軟化処理の温度は110℃、本軟化処理の温度は上記の試験で最適と導きだされた温度、処理時間は1時間として行なった。

2.2.2.2 軟化時間配分の検討

2.2.2.1の試験により導き出された最適な合計軟化処理時間を用いて、予備軟化および本軟化の時間配分の検討を行なった。なお、圧縮方法および温度条件は2.2.2.1に示したものと同様である。

2.3 物性の測定

2.3.1 引張強度および伸び率の測定

3次元加工に用いる上での適性を評価するため、半固定材の引張強度および伸び率の測定を行った。測定には万能試験機 (SV55型 (株)今田製作所製) を用い、R方向に荷重をかけることで行なった。上記で得られた半固定材から約3mm厚の板をRL面より切り出し、自然乾燥させてから、風乾状態の試験体としてL方向に15mm、R方向に50mmの長方形に切って試験体とした。試験体の上下両端10mmは試験の際に試験機のクリップで挟む部分となるため、測定した際に有効となる試験体の長さは30mmである。また、測定直前に30分以上常温の蒸留水に浸漬したものを湿潤状態の試験体とした。この時、クリップで保持する箇所の強度が湿潤により低下してしまうことを避けるために、保持部分のみを木工用ボンドとガムテープを用いて保護した状態で水中に浸漬し、測定時にはこれを除去してから行った。また、湿潤状態の試験体においては伸び率が大きく、装置の測定限界を超えてしまうことが想定されたため、試験体の寸法はR方向の長さを40mmとし、測定時に有効となる試験体長は20mmとなるようにした。これらの試験体を万能試験機にセットし、引張速度を10mm/minとして測定を行った。サンプルが破壊した際の最大荷重と伸びを測定し、伸び率を式(1)より、回復率を式(2)横引張強度を式(3)より、より算出した。この時、式(1)における L は有効試験体長 (mm)、 D は伸び幅 (mm)、式(2)における M は最大伸び幅 (mm)、式(3)における P は最大荷重 (N)、 A は試験体の断面積 (mm^2) また、最大伸び幅 M はそれぞれの圧縮率より有効試験体長の圧縮前の寸法を算出し、この値と実際の有効試験体長の差とした。

$$\text{伸び率} = \frac{D}{L} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$\text{回復率} = \frac{D}{M} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$\text{横引張強度} = \frac{P}{A} (\text{MPa}) \quad (3)$$

2.3.2 曲げ試験

半固定材および未処理材から15mm厚の板をRL面より切り出し、室温で風乾させてから (含水率約8%~11%) L方向に10mm幅に切断し、試験体とした。半固定材のR方向の長さは圧縮率によって差が生じているため、測定可能な長さに合わせて65mm以上とした。試験片を万能試験機にセットし、各試験体の長さに合わせてスパンをそれぞれ65~80

mmに設定し、荷重速度30mm/minでT方向に荷重をかけ、3点曲げ破壊試験を行った。その際の荷重およびたわみの変化を測定し、R方向におけるたわみ変形の特性を評価した。

2.4 3次元成形加工

半固定材から3mm厚の板をRL面より切り出し、この板をL方向に150mm、R方向に88mmに切断した。得られた単板より余分な部位を切り取りとった後、舟形成形加工用治具にセットし (Fig. 1), 小型圧縮成形装置^{3,9)}の中に入れた。120℃の水蒸気で軟化後、プレスを行なって深絞り的に加工し、180℃で10分間固定処理を行った。なお、軟化時間はスギで30秒、ヒノキで90秒とした。放冷後に取り出し、余分な部分をカットすることで成形物を得た。

Fig. 1. Sample and jig for three-dimensional molding.
(a): Specimen preparation for three-dimensional molding

Note: Vertical lines indicate wood graining
(b): Jig for three-dimensional molding

3. 結果と考察

3.1 スギにおける最適成形条件の検討

3.1.1 異なる温度条件による圧縮半固定材の成形

Table 1 にそれぞれの温度条件で成形した圧縮半固定材の圧縮率および平均密度を示した。全ての条件において密度 0.7 g/cm^3 前後まで圧縮することが可能あり、温度条件による圧縮率に対する大きな影響はみられなかった。また、130℃および160℃の処理条件で圧縮した材の密度は 0.8 g/cm^3 程度と他の条件よりも大きい値を示した。160℃で処理した材の内部には大きな節が存在していることが確認され、これが平均密度の増加の原因であると考えられる。一方で、130℃で処理した材の内部には局所的に密度の高い部分が見られたことに加え、木目にうねりが

Table 1. The properties of semi-fixed wood fabricated in various temperature conditions (Sugi).

	Compression Rate (%)	Density (g/cm ³)	Percentage Elongation (%)		Percentage Recovery (%)		Tensile Strength (MPa)	
			Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
untreated	—	0.31	3.2 ± 0.7	4.35 ± 1.1	—	—	2.87 ± 0.33	2.51 ± 0.24
110°C	57.1	0.62	50.1 ± 7.1	103.6 ± 17.0	38.5 ± 5.5	63.4 ± 10.4	1.20 ± 0.25	0.99 ± 0.22
120°C	62.9	0.73	75.9 ± 11.1	107.4 ± 21.9	44.7 ± 6.6	63.2 ± 12.9	1.25 ± 0.06	0.98 ± 0.34
130°C	62.5	0.79	—	—	—	—	—	—
140°C	63.6	0.71	79.2 ± 23.7	120.6 ± 19.3	45.3 ± 13.5	68.9 ± 11.0	1.26 ± 0.14	1.25 ± 0.25
150°C	59.1	0.64	64.3 ± 19.8	114.4 ± 18.8	45.9 ± 14.1	81.7 ± 13.4	1.46 ± 0.20	1.30 ± 0.20
160°C	64.4	0.8	37.4 ± 9.7	85.1 ± 24.9	20.8 ± 5.4	52.6 ± 13.8	0.81 ± 0.08	1.01 ± 0.27
170°C	62.2	0.67	5.5 ± 2.2	58.5 ± 21.1	3.4 ± 1.4	36.5 ± 13.2	1.09 ± 0.07	0.93 ± 0.24
180°C	64.7	0.67	3.4 ± 0.9	28.1 ± 11.7	1.9 ± 0.5	15.6 ± 6.5	0.83 ± 0.05	0.77 ± 0.14

Data given as mean ± standard deviation

Compression rate was calculated by the following equation where T_0 is initial thickness, and T_1 is thickness after compression.

$$\text{Compression rate} = \frac{(T_0 - T_1)}{T_0} \times 100$$

生じるなどの他の処理条件にはみられなかった異常が見受けられたため、以後の測定からは除外することとした。

それぞれの処理条件による圧縮半固定材の引張強度、伸び率および回復率を Table 1 に示した。120°C ~ 150°C で処理を施した材は特に高い伸び率を示しており、風乾状態でも寸法法の1.5倍以上、湿潤状態では2倍以上まで引き伸ばすことが可能である。未処理材は風乾状態、湿潤状態とも、ほとんど伸びることは出来ず、これは高压水蒸気を用いて木材を圧縮し、半固定材とすることで伸縮性を付与することが可能であることが示されたものである。160°C 以上で処理した材の伸び率、回復率は急激に低下しているが、これは処理条件が圧縮木材の固定処理に用いられる温度である180°C に近づくことで形状固定が生じたことに起因するものであると考えられる^{2,3,9)}。また、これらの材の表面には多くの抽出成分が付着していることが確認され、木材成分が何らかの分解を受けていることが示唆された。高温高压の水蒸気処理によってリグニン、ヘミセルロースの分解が生じることが報告されており¹⁰⁾、これらにより細胞壁が劣化したことで高温処理を施した材の引張強度が低下しているのもであると推察される。

比較的低温である110°Cおよび120°Cで処理した材は、やや低い引張強度を示し、軟化不足によって圧縮時に負荷が生じ、部分的に弱い箇所が生じている可能性が示唆される。また、これらは容易に回復を生じるが、圧縮時に負荷が生じ、強度が劣る箇所のみが引き伸ばされ、その箇所破壊が生じることで全体としては大きな伸び率を得られない。この伸びの不均一性は低い回復率からも推察できる。

140°Cおよび150°Cで処理した材においては高い引張強度と共に、高い伸び率を示した。これは140°C ~ 150°C の処理条件がスギ材を均一に程よく軟化し、かつ、処理による劣化を引き起こさない処理条件であったことを示すものである。また、材全体が高い引張強度を有していることから、引張の際に部分的に伸びて破壊するのではなく、材全体が均一に伸びることが可能であったために、高い伸び率を示したものである。伸び率では140°Cで処理したものが上回っているものの、回復率で上回る150°C材の方が圧縮率に対して効率よく伸びが得られること、また強度においても上回っていたことから、150°Cでの処理が最適であると判断した。

Fig. 2 には曲げ強度測定時の荷重-たわみ曲線を示した。未処理材は最も高い破壊荷重を示すものの、ほとんどたわみを生じないまま破壊される。一方で

Fig. 2. Load-deflection curve of semi-fixed wood fabricated in various temperature conditions (Sugi, air-dried).
Note: Specimen size (T = 15 mm, L = 10 mm, Span = 65 mm)

圧縮半固定材の荷重-たわみ曲線の傾きは緩やかで、170℃で処理したものを除き、全てが破壊されることなく曲がり続けていることから、非常に高い柔軟性が付与されていることが分かる。170℃で処理した材では形状の固定が起ころはじめていることから変形途中で破壊が生じたものであると考えられる。また、180℃で処理した材においては測定に必要なL幅が得られなかったために測定は行わなかったが、引張試験の結果から過剰の処理であったことが推察できる。材のたわみが15 mmを超えると材はほぼU字型に変形し (Fig. 3), 測定治具の隙間に引きずりこまれていくために15 mm 以降の荷重は治具との摩擦などが関わり山型の曲線を描いたものであると考えられる。曲げによる変形時には、荷重がかかっている箇所の外周部で伸びが生じ、内周側は圧縮されている。また、材の両端ではほとんど伸びが生じていないことが曲げ試験時に観察された木目の伸びより判断できる。実際に3次元加工にこれらの材を用いる際にも、このような不均一な変形が生じる。すなわち、どのような変形にも対応できる圧縮半固定材は全体が均一に圧縮され、安定して全体が破壊されることなく伸縮できる材であることが必要である。以上のことから引張試験および曲げ試験の全てにおいて安定して良好な結果を示した150℃の条

Fig. 3. Bent specimen of semi-fixed wood.

件が最適な軟化処理温度であると判断できる。

3.1.2 異なる時間条件による圧縮半固定材の成形

3.1.2.1 合計軟化時間の検討

3.1.1で示した最適温度である150℃を本軟化処理に用いた上で予備軟化時間を1～3時間に振り分けて成形した圧縮半固定材の物性を Table 2 および Fig. 4 に示す。引張強度では、予備軟化時間を2時間としたものが最も高い値を示した。これは、予備軟化時間を1時間としたものでは、軟化不足によって内部に負荷がかかり圧縮にバラつきがあることを示唆するものであり、3時間としたものでは処理時間が過剰になることで材の劣化が起これると同時に、部分的にセルロースの結晶構造の変化など、固定処理に近い現象^{2,3,9)}が生じているのではないかと推察される。これは伸び率、回復率が短時間処理のものと比べて低下していることから推察できる。1時間予備軟化を行なった材の伸び率、回復率は非常に高いが、値にバラつきが非常に大きいことから、軟化不足により材の内部に圧縮率のバラつきが生じていることが伺える。このようなバラつきは3次元加

Fig. 4. Load-deflection curve of semi-fixed wood fabricated in various time conditions (Sugi, oven-dried).

Note: Specimen size (T = 15 mm, L = 10 mm, Span = 80 mm)

Table 2. The properties of semi-fixed wood fabricated in various time conditions (Sugi).

	Percentage Elongation (%)		Percentage Recovery (%)		Tensile Strength (MPa)	
	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
110°C 1 h · 150°C 1 h	43.2 ± 21.3	96.2 ± 21.9	47.1 ± 23.2	105.1 ± 23.9	2.11 ± 0.78	1.57 ± 0.52
110°C 2.5 h · 150°C 0.5 h	72.4 ± 19.7	121.7 ± 34.2	60.9 ± 16.6	102.3 ± 28.8	1.82 ± 0.26	1.26 ± 0.39
110°C 2 h · 150°C 1 h	63.2 ± 10.7	97.8 ± 12.0	58.0 ± 9.8	89.7 ± 11.0	2.31 ± 0.28	1.97 ± 0.32
110°C 1.5 h · 150°C 1.5 h	11.9 ± 6.1	68.0 ± 27.9	8.5 ± 4.4	48.8 ± 20.0	1.30 ± 0.27	1.06 ± 0.32
110°C 3 h · 150°C 1 h	18.1 ± 12.9	96.2 ± 32.3	11.6 ± 8.3	61.9 ± 20.8	1.34 ± 0.39	1.32 ± 0.39

工時に割れや裂けを発生させるリスクを高めるものであり、好ましいものではない。これに対し、2時間の予備軟化処理を行なったものでは安定して高い伸び率や強度を示している。温度条件の検討の際に行った曲げ試験ではほとんどのサンプルが破壊されることなくU字型に変形した。そこで本試験では、サンプルを絶乾条件にして測定を行うこととした。絶乾条件で曲げ試験を行なうことで全てのサンプルで破壊が生じ、その結果をFig. 4に示した。3時間の予備軟化を行なったものでは傾きが小さく、小さい荷重で曲げが生じているものの10 mm程度で破壊が生じており、かつ破壊荷重も6.5 N程度と、他の条件を下回るものであった。1時間で処理したものは高い曲げ破壊荷重を示しているものの、10 mm程度で破壊が生じている。2時間処理の材は高い破壊荷重と共に、最も大きな変形を生じることが可能であり、引張試験の結果とあわせ、この条件で成形された圧縮半固定材が最も3次元加工に適したものであることが示唆された。

3.1.2.2 軟化時間配分の検討

上記により、合計軟化時間を3時間で行なうのが最適であることが示唆されたため、本試験では予備軟化時間および本軟化時間の配分の検討を行なった。Table 2に見られるように、予備軟化時間を2時間、本軟化処理を1時間に設定したものの引張強度が最も高い結果を示し、伸び率、回復率においても安定して高い数値を示した。予備軟化時間を2.5時間、本軟化を0.5時間と設定したものは高い伸び率を示したが、前項で論じた予備軟化1時間のものと同様に、値のバラつきが非常に大きいことに加え、引張強度がやや低い値を示しており、軟化不足による圧縮率のバラつきを生じていることがうかがえる。本軟化時間を1.5時間に設定した材においては、高温での処理時間が長いことで材の劣化が起こっていることに加え、形状固定が生じていることがうかがえ、3時間の予備軟化を行なったものと同様に過剰処理であることが示された。曲げ試験の結果では、2時間の予備軟化、1時間の本軟化によって得

られる圧縮半固定材が最も良好な値であることから (Fig. 4)、スギ材における3次元加工に適した圧縮半固定材の最適成形条件は予備軟化110℃ 2時間、本軟化150℃ 1時間の条件であると決定した。

3.2 ヒノキにおける最適成形条件の検討

3.2.1 異なる温度条件による圧縮半固定材の成形

スギにおける条件の検討から、120℃以下では処理温度が低すぎ、170℃以上では処理温度が高すぎるという知見が得られたため、ヒノキにおける条件検討では130℃～160℃の範囲で条件の検討を行なった。得られた材の圧縮率、平均密度および引張試験の結果をTable 3に示す。130℃の条件では目標密度まで圧縮が出来ず、軟化不足であった可能性を示唆するものであることに加え、伸び率においても140℃で処理したものを大きく下回り、3次元加工に用いるのには適さないと考えられる。引張強度においては130℃と140℃ではほぼ同等の値を示しているが、150℃以上では強度の低下が見られる。ヒノキでは150℃以上で処理した材に多くの抽出物が見られ、スギよりも低い温度で成分の分解が始まっていることが推察され、これが強度の低下の要因になっていると考えられる。また、伸び率、回復率ともに140℃が最も高い値を示しており、これが最適な条件であることを示唆するものである。曲げ試験の結果は、130℃および140℃の条件が最もよく曲がり、かつ140℃で処理したものが最も柔軟性を有していることを示している (Fig. 5)。以上のことから、物性を総合的に判断して安定した柔軟性および強度を有し、かつ十分な圧縮率が得られた140℃がヒノキの最適軟化温度であると決定した。

3.2.2 異なる時間条件による圧縮半固定材の成形

3.2.2.1 合計軟化時間の検討

本軟化処理を140℃ 1時間とし、110℃の予備軟化時間を1～3時間に設定して成形した半固定材の引張試験の結果をTable 4に、曲げ試験の結果をFig. 6に示す。3時間の予備軟化を行なったものでは、引張強度、伸び率ともに低下し、過剰処理であったことが示唆されている。1時間処理および2時間処理

Table 3. The properties of semi-fixed wood fabricated in various temperature conditions (Hinoki).

	Compression rate (%)	Density (g/cm ³)	Percentage Elongation (%)		Percentage Recovery (%)		Tensile Strength (MPa)	
			Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
untreated	—	0.38	4.1 ± 0.8	9.9 ± 2.7	—	—	5.05 ± 0.49	3.47 ± 0.18
130℃	45.7	0.70	25.0 ± 7.2	72.5 ± 19.4	29.8 ± 8.6	86.3 ± 23.0	2.71 ± 0.34	1.73 ± 0.30
140℃	53.2	0.85	36.3 ± 15.8	107.4 ± 19.2	31.6 ± 13.7	93.4 ± 16.7	2.63 ± 0.25	1.66 ± 0.49
150℃	52.2	0.84	22.1 ± 8.7	82.7 ± 22.2	20.3 ± 8.1	75.9 ± 20.3	2.01 ± 0.50	1.28 ± 0.49
160℃	50.9	0.80	17.9 ± 6.6	75.4 ± 21.2	17.1 ± 6.3	71.8 ± 20.2	2.14 ± 0.20	1.30 ± 0.39

Fig. 5. Load-deflection curve of semi-fixed wood fabricated in various temperature conditions (Hinoki, air-dried).

Note: Specimen size (T = 15 mm, L = 10 mm, Span = 80 mm)

の物性を比較すると、引張強度、伸び率においてはどちらも高い値を示している。しかしながら荷重-たわみ曲線では2時間処理のものが小さな荷重でよく曲がり (Fig. 6), 高い柔軟性を有していることが示された。以上のことから、ヒノキにおいても合計軟化時間は3時間が最適であると決定した。

3.2.2.2 軟化時間配分の検討

合計軟化時間を3時間とし、予備軟化処理時間と本軟化処理時間の配分をスギ材の時と同様に割り振って比較を行なった結果、引張強度では本軟化1時間および1.5時間のものが比較的高い値を示し、伸び率においては本軟化時間を1.5時間としたもの、回復率においては0.5時間としたものがやや高い値を示す結果となった。しかし、引張試験の結果を総合的に見ると全ての条件が良好な値を示し、大きな差が見られなかった。曲げ試験の結果では0.5時間としたものが他の条件よりも少ないたわみで破壊し、軟化不足であった可能性が示唆された (Fig. 6)。1.5時間としたものは、曲げに対する抵抗が1時間のものと比較するとやや高く、高温での処理時間が長いためにわずかに形状固定が開始されていることが示唆されている。曲げ試験では本軟化時間を1時

Fig. 6. Load-deflection curve of semi-fixed wood fabricated in various time conditions (Hinoki, air-dried).

Note: Specimen size (T = 15 mm, L = 10 mm, Span = 80 mm)

間としたものが、最も曲がりやすい性質を示していることから総合的に判断し、ヒノキ材における3次元加工に適した半固定材の最適成形条件は予備軟化110°C 2時間、本軟化140°C 1時間であると決定した。

3.3 3次元成形加工

得られた成形物およびその切断面を Fig. 7 に示す。伸縮性および柔軟性を有する圧縮半固定材を材料に用いることで、スギ材、ヒノキ材ともに単板を深絞り的に3次元加工することを実現した。切断面からもわかるように、単板が割れることなくほぼ直角近くまで変形されていることがわかる。また、成形と同時に圧縮を加えることで、成形前に3 mm 厚であった単板が成形後にはスギでは平均1.1 mm 程度、ヒノキでは1.4 mm 程度となり、平均密度もスギで1.13 g/cm³、ヒノキで1.31 g/cm³ まで増加している。このように単板に大幅な変形を加えると同時に密度の増加が得られることは、木材を自由な形状に加工すると同時に、成形物に高い強度を付与することが期待でき、プラスチック代替資源として木材を利用する可能性を広げるものであると考えられる。

Table 4. The properties of semi-fixed wood fabricated in various time conditions (Hinoki).

	Percentage Elongation (%)		Percentage Recovery (%)		Tensile Strength (MPa)	
	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
110°C 1 h · 140°C 1 h	30.4 ± 12.0	97.3 ± 25.7	33.4 ± 13.2	97.3 ± 28.2	2.68 ± 0.33	2.06 ± 0.73
110°C 2.5 h · 140°C 0.5 h	26.8 ± 14.2	115.1 ± 21.2	26.8 ± 14.2	115.1 ± 21.2	2.17 ± 0.36	1.40 ± 0.37
110°C 2 h · 140°C 1 h	36.3 ± 15.8	107.4 ± 19.2	31.6 ± 13.7	93.4 ± 16.7	2.63 ± 0.25	1.66 ± 0.49
110°C 1.5 h · 140°C 1.5 h	42.9 ± 10.8	134.5 ± 17.2	31.5 ± 7.9	98.9 ± 12.7	2.55 ± 0.23	1.46 ± 0.32
110°C 3 h · 140°C 1 h	27.1 ± 8.2	103.5 ± 35.3	19.1 ± 5.8	72.9 ± 35.3	2.28 ± 0.25	1.50 ± 0.53

Fig. 7. Product obtained by 3-dimensional molding.
 (a) : The appearance of the product before cutting off extra part
 (b), (c) : Cutaway views on lines shown

4. 結 論

本研究では木材の3次元成形加工に適した、柔軟性および伸縮性を有する材の開発および最適な成形条件の検討を行ない以下の知見を得た。

1. 軟化処理の温度が低い、もしくは処理時間が短いと材の軟化が不十分となり、材の圧縮にムラが生じるとともに、圧縮された形状が容易に回復してしまうことで、部分的に伸びを生じて破壊してしまうなどの問題点が生じる。
2. 処理温度が高温である、もしくは長時間の処理であると、材の劣化や形状の固定により強度低下、柔軟性、伸縮性の低下が生じる。
3. 本研究で得られた結果から、スギ材における最適な軟化処理条件は110℃ 2時間の予備軟化、150℃ 1時間の本軟化による合計3時間の処理、ヒノキ材における最適な軟化処理条件は110℃ 2時間の予備軟化、140℃ 1時間の本軟化による合計3時間の処理であると決定された。

4. このようにして成形された圧縮半固定材は伸縮性および柔軟性に富み、再び高圧水蒸気を用いて軟化することで深絞り的に加工することが可能であることが示された。

これらは、プラスチック代替資源として木材を加工、利用する技術であると同時に、国産スギ材やヒノキ材の用途を拡大することで利用率の向上を促し、健全な森林育成および地球温暖化防止に寄与できる木材利用技術として期待出来るものである。

文 献

- 1) “森林・林業白書 平成18年版国民全体で支える森林”, 林野庁編, 日本林業協会, 東京, 2006, pp. 16-22, 28-33, 71-76.
- 2) Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., Rowell, R. M.: *Wood and Fiber Sci.* **25** (3), 224-235 (1993).
- 3) Ito, Y., Tanahashi, M., Shigematsu, M., Shinoda, Y., Ohta, C.: *Holzforschung* **52** (2), 211-216 (1998).
- 4) 棚橋光彦: 木材工業 **53** (12), 589-594.
- 5) 丸山俊樹, Onwona-Agyeman, S., 大川伸吾, 重松幹二, 棚橋光彦: 第54回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, 2004, p. 449.
- 6) 喜多山繁: “木材の加工”, 日本木材学会編, 文永堂出版, 東京, 1991, pp. 61-62.
- 7) 井上雅文, 青木 務, 額川五郎: 木材研究・資料 No. 28, 59-71 (1992).
- 8) 櫻木邦和, 瀬戸直美, 馬淵隆平, 重松幹二, 棚橋光彦: 第47回日本木材学会大会研究発表要旨集, 高知, 1997, p. 95.
- 9) Kyomori, K., Onwona-Agyeman, S., Shigematsu, M., Shinoda, Y., Tanahashi, M.: *Trans. MRS-J* **28** (4), 1095-1098 (2003).
- 10) Tanahashi, M., Tamabuchi, K., Goto, T., Aoki, T., Karina, M., Higuchi, T.: *Wood Research* **75**, 1-12 (1988).