論文

木材バルクのホットプレスによる
複雑形状容器の成形

倉松 竜平* 飯塚 高志* 畑中 伸夫**

高倉 章雄* 金山 公三***

Fabricating Complex Cups by Hot Pressing from Wood

Ryohei KURAMATSU *, Takashi IIZUKA *, Nobuo HATANAKA **,

Norio TAKAKURA * and Kouzou KANAYAMA ***

(Received on March 31, 2008)

In this study, we attempted to manufacture wood-based products of arbitrary shapes and high strengths by allowing the cryptomeria to flow and harden in a metal mold without using a binder. Experimental results show that the wood has good liquidity owing to the maintenance of its moisture using the metal mold that remains sealed in a hot press. The good product along the metal mold shape was obtained under the following processing conditions : a molding pressure of 60-160 MPa, a molding temperature of 140-180°C and a moisture content of 10-50%. Moreover, the molding pressure that can be molded decreases at a high temperature and a high moisture content. The density of the obtained good product is 1.36 g/cm³, and the average Vickers hardness is 29.4HV0.1. In addition, the product obtained at a molding temperature of 160°C and a sealing time of 90 min does not facilitate shape recovery even if it boils with water for 30 min.

Key words: extrusion, hot pressing, wood, forming property, closed die, new forming process.

1. 緒言

近年では、石油系製品の大量使用に伴って埋蔵資源の枯渇が懸念され、その使用および廃棄の際の二酸化炭素の発生により地球温暖化の促進が深刻化している。そのため、循環型資源活用社会の構築を目指して様々な材料およびエネルギーの具体案が早急に求められる現状にある。

一方、樹木は大気中の二酸化炭素を固定して成長する。植物由来の材料が廃棄後の焼却や生分解において発生する二酸化炭素は再び植物に吸収されるため、樹木を原料とする木質素材は循環型材料として注目されている。このことから、木質素材の用途を拡大し、石油系製品の代替として幅広く使用することができれば、前記の環境問題の改善にも繋がる。

しかしながら、現在、木材製品は主に切削加工によって製造されているため、多くの切りくずや端材が生じるという歩留まりの問題がある。また、変形加工（塑性加工）による木材製品の製造も行われているが、これらは木材内の空孔を押しつぶす又は木材繊維を破壊しない範囲の変形が小さい加工に止まっており、細胞等の位置関係の変化を伴う大変形の加工法は開発されていない。

著者らは、木材粉末のみを素材として任意形状かつ高強度の成形体を得ることを試みてきた^{1)~4)}。その結果、木材の構成要素は、含有水分量が大きくなるにつれて熱軟化温度が下がり、流動性が向上するという性質を持つこと、また、木材粉末を加熱・圧縮したときに生じる自己接着性によって、接着剤を使用しなくても固形化した複雑形状の成形体を得られることが確認された⁴⁾。

本報では、木材粉末での圧粉・固形化技術を基に、木材バルクからそのまま複雑形状へとホットプレス成形を行う加工法について検討した。すなわち、木材バルクをコンテナ内に挿入し、これを圧縮、加熱すれば、圧縮による破壊、流動、再固形化のプロセスにより木材粉末と同様に成形が行えると考えられる。そこで、複雑形状の製品を得るための成形可能な加工条件を各成形因子について調査し、得られた成形体の機械的性質や耐水性について評価を行った。

* 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科 〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町

Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology Hashigami-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8585, Japan.

** 阿南工業高等専門学校機械工学科 〒774-0017 阿南市見能林町青木265

Anan National College of Technology

265 Aoki, Minobayashi-cho, Anan-shi, Tokushima 774-0017, Japan.

*** 産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Materials Research Institute for Sustainable Development

2266-98 Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan.

2. 木材バルクのホットプレス

2.1 木材粉末および含水率

実験にはスギ材を用いた。角材から、気乾状態で 60 g の直方体試験片 (約 30×40×100 mm) を切り出した。一般に木材は異方性材料であり、繊維の配向によってその変形能が大きく異なる⁵⁾。本実験においては試験片の長手方向 (圧縮方向) と繊維方向が垂直になるように切り出して実験に使用した。

木材の含水率は式(1)により、全乾重量法により算出した。

$$u = \frac{W - W_0}{W_0} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここで、 u は含水率(%), W は乾燥前の木材の重量, W_0 は送風乾燥機を用いて温度 110℃で 2 時間乾燥させたときの重量を用いる。また、木材を空气中に長時間放置した状態での含水率 (気乾含水率) は約 9~10%であった。気乾含水率以上の含水率にする場合は、木材を沸騰した蒸留水に入れ、そのまま常温に戻るまで保持し、その後、内部まで十分に含水した木材を乾燥機(110℃の送風空間)で乾燥させて含水率を変化させた。

2.2 実験装置

ホットプレス成形に用いた実験装置を Fig.1 に示す。(a) 成形金型は半割型と上下ポンチからなる。(b) 密閉金型は外

(a) goblet shape mold

(b) Airtight mold

Fig.1 Hot pressing device

型、加圧工具、開閉式コックによって構成されており、図に示すようにこの密閉金型内に(a)の成形金型を設置した。密閉金型の上下工具に O リングを付けることで、木材内の水分の脱出が極めて少ない密閉状態での実験ができる。実験は、木材を金型のコンテナ内に入れた後に上ポンチ、加圧工具を配置し、上方から加圧することで木材をコンテナ部から軸部および容器部へ通過させて成形を行った。

2.3 実験方法

時間の経過に伴う圧力、温度、ストロークの変化の例を Fig.2 に示す。実験手順は以下の通りである。

- ① まず、木材を成形金型のコンテナ内に入れる。バルブを開栓した状態で上ポンチおよび加圧工具をセットする。この状態をストローク $S=0$ mm として実験を開始する。
- ② 木材を加圧して所定の成形圧力 P を負荷し、この成形圧力を保持する。
- ③ バルブを閉栓して加熱を開始する。このときの時刻を $t = 0$ min とする。金型温度が所定の成形温度 T に達してからはその温度を保持する。なお、成形中におけるバルブの開栓時刻 t_0 を種々に変化させた。成形温度 T に達してから t_0 までの保持時間は、木材内の水分が木材の流動性および再固形化に影響 (水蒸気処理^{6)~8)}) を与える時間と考え、これを密閉・温度保持時間 t_s とした。 t_0 からの保持時間は、成形体および金型内から水分を排出するため時間と考え、この時間をドラインセット⁹⁾ 時間とした。
- ④ その後、常温まで冷却してから除荷し、成形品を取り出す。金型温度は事前に実験と同様の加熱条件で外型と金型内の温度関係を測定しておき、その値を用いた。

2.4 成形に及ぼす成形圧力、含水率の影響

Fig.3 に含水率 $u = 10\%$ 、成形温度 $T = 160^\circ\text{C}$ 、開栓時刻 $t_0 = 60$ min の条件で成形圧力を $P = 80 \sim 160$ MPa に変化した場合の成形過程におけるストロークの変化を示す。また、Fig.4 に成形圧力 $P = 80$ MPa、成形温度 $T = 160^\circ\text{C}$ 、開栓時刻 $t_0 = 60$ min の条件で含水率を $u = 10 \sim 110\%$ に変化した場合を示す。

Fig.3 に示すように、 $t = 0$ min で木材バルクに成形圧力が負荷されて木材が圧縮を受けてストロークが上昇する。そして、温度の上昇中に木材の熱軟化によりストロークが急

Fig.2 The parameters of the hot-pressing process

増する温度が存在することがわかる。このストロークの上昇量は、成形圧力が大きいほど大きくなる傾向が確認される。

Fig.4 から、含水率の増加に伴ってより低い成形温度においてストロークの上昇が生じていることがわかる。この傾向は、木材構成要素の含水率増加に伴う軟化温度の低下性質と一致しており、木材の含水率を大きくすることによって低い成形圧力で、コンテナ内の木材は良好な流動性を示し、金型内へ流動できることがわかる。

Fig.3 The effect of pressure on stroke

Fig.4 The effect of moisture content on stroke

成形中に、木材バルクがどのような変形をしているかを確認するために、含水率 $u = 10\%$ 、成形温度 $T = 160^\circ\text{C}$ 、成形圧力 $P = 120\text{ MPa}$ の条件において、変形途中の成形体を 15min 毎に取り出した。成形過程における成形体の様子を Fig.5 に示す。(a)直方体形状の素材は、(b) $t = 15\text{ min}$ においてコンテナ内に圧縮されて円柱状になり、(c) $t = 30\text{ min}$ において軸部を通過し、(d) $t = 45\text{ min}$ においてさらに金型内に流動し、そして、(e) $t = 60\text{ min}$ において金型に充填する。図より、ストロークの段階的の上昇は木材の流動が生じる温度と金型形状に依存していることがわかる。

2.5 成形可能条件

Table 1 に示す成形条件において得られた成形体は、Fig.6(a)~(c) に示すように、(a)金型形状に沿って十分に固形化をした『充填』、(b)先端部まで十分に材料が流動・固形化しなかった『充填不良』、(c)成形体に割れ、破損が生じ、一体として取り出されなかった『割れ・破損』の3種類に大別された。

Fig.7 に含水率 $u = 10\%$ の条件において、成形体に及ぼす成形圧力 P および成形温度 T の影響を示す。図より、低成形温度、低成形圧力の条件において充填不良が、高成形温度、高成形圧力の条件で割れ・破損が起こりやすくなり、この中間の条件において金型の隅々まで木材が充填した成形体を得られることが確認できる。

成形可能条件は、成形温度 $T \geq 140^\circ\text{C}$ の条件において存在し、高い成形温度ほど小さい成形圧力で良好な成形体を得られていることがわかる。また、割れ・破損が起こる原因として、高温では木材の構成要素が熱分解を起こすためであり、また、高圧力では成形体の土台部が金型へ固着しやすくなることが考えられる。

Fig.8 に、成形温度 $T = 160^\circ\text{C}$ の条件での成形体に及ぼす成形圧力 P および含水率 u の影響を示す。図より、低成形圧力、低含水率において充填不良が、高含水率において割れ・破損が起こりやすくなることが確認できる。また、高含水率になるほど低い成形圧力で金型の隅々まで充填した成形体を得られることがわかる。含水率 $u = 10\%$ の条件では木材が金型内に充填するために 100 MPa 以上の成形圧力を必要としていたのに対し、含水率を増加させるにつれて 80 MPa 以下の低い成形圧力でも木材が流動し金型への充填が可能になる。しかし、含水率 $u \geq 50\%$ 条件において、成形体に割れ・破損が生じやすくなる。これは、木材細胞の空隙間に存在する水分が成形中の木材の自己接着・固形化に悪影響をおよぼしやすいことや、開栓時の排水に伴う

Fig.5 The producing progression of wood bulk

収縮を起こしやすくすることに起因すると考えられる。

3. 成形体の評価

3.1 密度およびビッカース硬さ

得られた成形体の評価方法の 1 つとして、成形体の密度 ρ とビッカース硬さを測定した。成形体の密度は、アルキ

メデスの原理を利用して成形体の重量 M と、水中に吊るした状態での重量 M_b から体積 V を求めて算出した。

$$\rho = \frac{M}{M - M_b} = \frac{M}{V} \quad (2)$$

ビッカース硬さの測定は、HV0.05 の試験力で行った。密度およびビッカース硬さは Fig.9 に示すように、(a) グランドカッターを用いて成形体の中心断面が得られるように厚さ 5mm に切断・研磨し、(b) 原点 O から L 方向の軸上を 1mm 間隔にビッカース硬さを測定した。さらに、この試験体を数個に切断した個々の切片の密度を測定した。

Fig.10 に、成形圧力 $P = 100$ MPa、成形温度 $T = 160$ °C、含水率 $u = 10$ % の条件で得られた成形体について、各部の密度およびビッカース硬さ分布を測定した結果を示す。得られた成形体の全体密度は 1.36 g/cm^3 、平均ビッカース硬さは 29.4 HV0.1 であった。密度およびビッカース硬さは共に、各部の境界では若干の値の減少が見られ、軸部が最も低い値を示している。これは、各部の境界では材料の移動が大きいこと、および割型間への材料の流出が大きいことに起因していると考えられる。

木材バルクを素材とした場合には、木材粉末の成形体（平均ビッカース硬さ 24.1 HV0.05）よりも、成形体のビッカース硬さは、若干大きい値となった。これは、木材バルクを素材とすると、金型内において木材が完全に粉砕されず、成形後の成形体に数 mm 単位の繊維構造が残るためであると考えられる。

Fig.6 The products made from wood bulk

Fig.7 The effect of molding pressure and molding temperature on the products

Fig.8 The effect of molding pressure and moisture content on the products

(a) Cutting line (b) Sectional drawing of the product

Fig.9 Measuring point of Vickers hardness and density

Fig.10 Distribution of Vickers hardness and bulk density on the product

3.2 成形体の形状固定

成形体の形状固定評価として、煮沸試験を行った。密閉・温度保持時間 t_s を変化させて得られたそれぞれの成形体を、沸騰した蒸留水にて 30 分間煮沸を行い、煮沸後の成形体の形状回復や分解、および割れの発生などについて観察を行った。

Fig.11 に成形圧力 $P = 120 \text{ MPa}$ 、成形温度 $T = 160^\circ\text{C}$ 、含水率 $u = 10\%$ の条件で、密閉・温度保持時間 t_s を 4 種類 ($t_s = 5, 30, 60, 90 \text{ min}$) に変化させて得られた成形体の煮沸前後の写真を示す。

(a) $t_s = 5 \text{ min}$ の条件では、煮沸に対して成形体全体が形状の回復を起こして分解した。(b) $t_s = 30 \text{ min}$ では容器部が形状回復し分解した。(c) $t_s = 60 \text{ min}$ では成形体全体に細かい亀裂が発生したが、形状回復・分解はほとんど生じなかった。(d) $t_s = 90 \text{ min}$ の条件における成形体は亀裂や形状変

化が生じずに、煮沸に対してほぼ完全に形状固定が行われた。

このことから、木材のホットプレスによる成形体は密閉・温度保持時間 t_s の増加に伴って徐々に形状固定が起きていることが確認される。これは、木材内の水分によって金型内に充填した成形体に水蒸気処理が施され、成形体の固形化とその内部の応力緩和を引き起こしているためであると考えられる⁶⁾。

これらの結果から、密閉・温度保持時間 $t_s = 90 \text{ min}$ 以上の処理時間を設けることによって木材を形状固定(水蒸気処理)して、煮沸に伴った形状回復を抑制できることがわかる。

4. 結 言

密閉金型を用いて木材パルクのホットプレス成形を行い、複雑形状の成形体を得るための加工条件について検討した。その結果以下の知見を得ることができた。

- 1) 密閉状態においてホットプレスを行い、成形中に木材内の含有水分を保ちながら成形を行うことによって、木材は大きく流動性を発現する。
- 2) 成形圧力 $60 \sim 160 \text{ MPa}$ 、成形温度 $140 \sim 180^\circ\text{C}$ 、含水率 $10 \sim 50\%$ の条件内において、金型形状に沿った良好な成形体を取得できる。また、高温、高含水率条件下ほど低圧力での成形が可能となる。
- 3) 成形温度 180°C 以上では、熱分解により成形体に割れ・破損が生じやすい。また、含水率 50% 以上の条件では低い成形圧力で金型に充填するが、水分の排出時に収縮が生じ、成形体に割れ・破損が発生する。
- 4) 得られた良好な成形体の密度は、スギ木材の真密度(空隙を含まない木材の実質部の密度、約 1.5 g/cm^3) の 90% 以上であった。
- 5) 密閉状態の温度・圧力保持時間を設けることによって、成形体に水蒸気処理が施される。成形温度 160°C 、密閉・温度保持時間を 90 min の条件において得られた成形体は、蒸留水による煮沸を 30 分間行っても形状回復を起こさない。

参 考 文 献

- 1) 三木恒久・高倉章雄・金山公三・山口克彦・飯塚高志：機論 C, **69**-678 (2003), 206-212.
- 2) 三木恒久・高倉章雄・金山公三・山口克彦・飯塚高志：同上, **69**-679 (2003), 766-772.
- 3) 三木恒久・高倉章雄・金山公三・山口克彦・飯塚高志：同上, **70**-698 (2004), 2966-2972.
- 4) 倉松竜平・飯塚高志・畑中伸夫・高倉章雄・金山公三：57 回塑加連講論, (2006), 299-300.
- 5) 山下修・横地秀行・三木恒久・金山公三：平 19 塑加春講論, (2007), 307-308.
- 6) 東原貴志・師岡淳郎・廣澤修一・則元京：木材学会誌, **50**-3 (2004), 159-167.
- 7) 東原貴志・師岡淳郎・則元京：同上, **47**-3 (2001), 205-211.
- 8) 東原貴志・師岡淳郎・則元京：同上, **46**-4 (2000), 291-297.
- 9) 則元京：同上, **39**-8 (1993), 867-874.

Fig.11 The products after boiling