アクリル樹脂を含浸したバルク木材の押出し加工荷重に及ぼす ダイス角度の影響†

関 雅子* 田中 聡一** 三木 恒久*
重松 一典** 金山 公三*

Extrusion Properties of a Solid Wood Impregnated with Acrylic Resin: Effects of Die-angle on Extrusion Force

by

Masako SEKI*, Soichi TANAKA**, Tsunehisa MIKI*,
Ichinori SHIGEMATSU** and Kozo KANAYAMA*

Recently, a processing technique for applying plastic deformation to a solid wood has been developed. In this study, in order to clarify the effect of die-angle on the extrusion force of a solid wood, the extrusion load with or without lubricant for different die angle was investigated. Solid woods (Japanese cypress) were impregnated with thermoplastic binder (acrylic resin) to improve its fluidity during extrusion. To increase affinity with acrylic resin, the woods were hydrophobized by acetylation before the impregnation. Then the impregnated woods were extruded in a radial direction through the square-shaped dies having different angle ($2\alpha = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$). The results obtained were as follows: The extrusion load was clearly decreased by using the lubricant in every die angle. The results of the no-lubricant condition showed that the extrusion load increased with the decrease in die angle. On the other hand, the extrusion load was little affected by the die angle in the lubricant condition. These results indicated that the extrusion load was strongly affected by the friction between the wood specimen and the tapered die in the no-lubricant condition. Assuming that plane strain condition (no strain in the longitudinal direction of the material) applies to the extrusion, the experimental result was well explained by the theoretical result.

Key words:

Wood, Friction, Extrusion, Plastic forming, Die angle

1 緒 言

押出し加工は金属材料や樹脂材料において最も一般的な塑性加工法の一つである。木材を対象としたものでは、微細化して樹脂と混練・成形した木材プラスチック複合材料(混練型 WPC)が押出し加工材として最も汎用的に製造されている¹⁾。しかしながら、この従来技術では、木材の粉末化に大量のエネルギーを要すること等が課題となっている。

一方で、近年産総研では、木材を微細化せずにバルク状態(塊り状態)のまま流動する現象を見出した²⁾⁶⁾。あらかじめ木材中に水もしくは各種添加剤(熱硬化性樹脂及び熱可塑性樹脂)を含浸させることで、個々の細胞が成形時に軟化し、隣接する細胞間との滑りによる位置変化(すなわち流動現象)が引き起こされる。これまでにこの現象を利用して、押出し加工を含む各種塑性加工を検討し、様々な形状の成形が可能であることを確認した。

得られる成形体は、繊維の形状をある程度維持したまま成形されているため、素材の木目を活かした独特の意匠性や、比較的高い力学特性を有する。さらに、含浸する添加剤の種類や量によって、成形時の流動性や製品特性をある程度制御できることがこれまでに報告されている³⁾⁶⁾。

一方で、木材の流動成形は数 MPa~数 100MPa の比較的高圧力下で行われるため、摩擦の影響は無視できないと考えられる。実際に摩擦が原因と考えられる加工力の増大や、金型摩耗等の不具合が問題となっている。このような背景から、著者ら⁷⁾⁹⁾は、1MPa~11MPa の高圧力下における木材の摩擦特性に着目した基礎的な検討を行い、これまでに木材の変形状態と摩擦特性が密接な関係があること等を報告した⁹⁾。しかしながら、より実用的な観点から木材の塑性加工時における摩擦の影響について検討した例はない。

† 原稿受理 平成26年10月10日 Received Oct. 10, 2014 ©2015 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (独)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 名古屋市守山区下志段味 Materials Res. Inst. For Sustainable Development, Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST), Moriyama-ku, Nagoya, 463-8560.

** (独)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 名古屋市守山区下志段味 Materials Res. Inst. For Sustainable Development, Advanced Industrial Sci. and Tech. (AIST), Moriyama-ku, Nagoya, 463-8560.

Fig. 2 Schematic illustration showing measurement of the friction coefficient.

2・3 摩擦係数の測定

含浸試料を接触させる金属工具（材質：SKD11 合金工具鋼）は研磨によって仕上げ、含浸試料の摺動方向の平均粗さ R_a は $0.16\mu\text{m}$ 以下、最大高さ R_z は $0.70\mu\text{m}$ 以下とした。Fig. 2 に測定の概要を示す。上下の加圧盤に金属工具を固定し、表面温度を 150°C とした後、室温の含浸試料の表面（LR 面）を接触させた状態で 10 分間加熱した。その後、上下方向に加圧し、垂直荷重 N を一定に保ちながら、水平方向に一定速度（ 10mm/min ）でステムを移動させ、試験体を R 方向に摺動させるために必要な荷重 F を測定した。摩擦係数 μ の算出は前報と同様の方法で行った⁷⁾⁹⁾。すなわち μ_1 と μ_2 が等しいと仮定して、 $F_1 = F_2$ を考慮し、摩擦係数 μ は下式で算出した。ここで、 F_1 と F_2 はそれぞれ上と下の加圧板の荷重を示す。

$$\mu = \frac{F}{2F_1} \quad (1)$$

垂直荷重 N は、含浸試料内の細胞が塑性変形する荷重を採用し、 2.3kN （すなわち含浸試料との接触面における圧力は 4MPa ）とした。なお、摩擦係数測定時の含浸試料は元の厚さの 8% 以上圧縮された状態であった。潤

滑剤なしの条件は、金属工具の表面を測定前にアセトンを用いて洗浄し、潤滑剤ありの条件は押出し試験と同様の潤滑剤を表面に塗布した後、試験体を設置した。

3 結果および考察

3・1 押出し試験時の含浸試料の変形挙動

押出し試験中の含浸試料の変形挙動を把握するために、 5mm 間隔でパンチを停止し、金型を冷却後、含浸試料を取り出し観察した。観察後の試料は再びコンテナに投入し、再度加熱後にパンチを 5mm 降下させ、取り出して観察を繰り返した。ダイス角度が 50° のものを用いて、潤滑剤なしの条件で押出し試験を行った結果を Fig. 3(a) に示す。

パンチを押し込むと含浸試料が徐々に変形し、パンチ移動距離が $5\text{mm} \sim 25\text{mm}$ の間でダイス内の空間を充填した。また、含浸試料の RT 面の面積がパンチの移動に伴って徐々に小さくなったことから、細胞内腔の閉塞による圧密も生じていると考えられる。パンチ移動距離が 30mm の時点でダイス出口から試料が押出され始めた。

Fig. 3(b) は、押出し試験の終了後に取り出された含浸試料の外観写真を示す。ダイス出口から押出された含浸試料は、形状固定されることなく破壊した状態で得られた。また、押出し後の含浸試料からは、繊維方向の流動は観察されず、繊維直交方向のみに流動が生じたことが確認された。これは、ダイス角度が異なる条件や潤滑の有無に関わらず、同様であった。

さらに詳細に木材の押出し加工の特徴を把握するために、ダイスに残留した材料の木口断面を観察した (Fig. 4)。材料内部で流動が先進し、ダイス出口付近では年輪界に沿ってシェブロン割れが認められた ((a) 図中▼)。これらは金属材料の押出し加工でも一般的に認められる現象である。一方で、デッド領域は今回の実験の範囲内では認められなかった。ダイス壁面付近をさらに拡大すると (Fig. 4(b))、大部分の細胞で細胞壁の座屈などによる変形

Fig. 3 Appearances of the wood specimens impregnated with acrylic resin during (a) and after (b) the extrusion test. (2a: 50° , No-lubricant condition).

が認められた. また, 晩材の配列が乱されている部分 (Fig.4 (b)の右上の領域) もあり, この部分は押し出し試験中に細胞の位置変化が生じた (すなわち流動した) と考えられる.

Fig.5 はダイス角度が異なる金型を用いた押し出し試験時の荷重の挙動を示す. いずれのダイス角度においても, パンチ移動距離の増加に伴って荷重は増大する傾向を示し, ある時点から比較的定常状態となった. (d) $2\alpha=50^\circ$ の潤滑剤なしの結果と Fig.3 の観察結果を対応させると, ダイス内を含浸試料が充填する 30mm 未満の範囲では荷重が増加傾向となり, 含浸試料が押し出される 30mm 以上の領域では荷重が定常状態となることがわかった. 同様の検討からそれぞれの試験条件における押し出し開始時点を把握し, 図中の▽で示した. いずれのダイス角度においても, 含浸試料の押し出しが開始されると, 荷重が定常状態となった. また, ダイス角度が増加するほど▽までのパンチ移動距離が小さくなった理由は, ダイス角度が増大するほどダイスの入口から出口までのストロークが短くなるためである.

次に, 潤滑剤の有無で荷重を比較すると, いずれのダイス角度においても潤滑剤なしの条件と比べて潤滑剤ありの条件では押し出し中の荷重が著しく低下した. また, ダイス角度が小さい領域では, 潤滑剤の有無による差が大きくなった. 摩擦の影響はダイス角度が小さいほど大きくなるため, 潤滑による荷重低減の効果はダイス角度が小さいほど大きく表れたためと考えられる.

Fig.4 Optical micrographs of remaining material in the dies after the extrusion test. ($2\alpha: 50^\circ$, No-lubricant condition).

Fig.5 Load-displacement curves in the extrusion tests of the wood specimens impregnated with acrylic resin using the dies with different angle. ▽ represents a starting point of the extrusion.

3・2 含浸試料の押し出し荷重に及ぼす摩擦の影響

潤滑剤の有無による摩擦係数の違いを把握するために, 摩擦係数の測定を行った. 結果を Fig.6 に示す.

図中点線は、含浸試料が金属工具の上を摺動し始めた時点を示す。横軸のステム移動距離が 10mm~30mm の摩擦係数の平均を算出すると、潤滑剤なしでは $\mu_n=0.20$ 、潤滑剤ありでは $\mu_w=0.05$ となり、著しい違いが認められた。これらの摩擦係数の違いが、押出し荷重に及ぼす影響について以下に考察を行う。

Fig.6 Friction coefficient (μ) behavior of the wood specimens impregnated with acrylic resin.

Fig.7 Effect of die angle on the extrusion load. The plots represent the experimental results from Fig. 5. The lines are calculated results.

Fig.5 における、パンチ移動距離 50mm~60mm の荷重の平均を押出し荷重 F_e と定義し、Fig.7 のプロットで示した。

潤滑剤なしの条件では、ダイス角度の増加に伴って押出し荷重が低下した。一方で、潤滑剤ありの条件では、ダイス角度の違いによる押出し荷重に違いが認められなかった。

金属材料の押出し加工においては、ダイス角度の減少に伴い、ダイス壁面における摩擦の影響が増大し、押出し荷重が増大することが一般的に知られている^{12),13)}。この解釈は、含浸試料の押出し加工においても矛盾なく適用できるであろう。すなわち、本研究で使用したダイス角度が小さい領域の押出しに関しては、ダイス角度の減少とともにダイス壁面における摩擦の影響が増大したために押出し荷重が増大したと考えられる。一方で、潤滑剤ありの条件でこの傾向が認められなかった理由は、摩擦係数が著しく低下するために、押出し荷重に及ぼす摩擦の影響が小さくなったためと考えられる。したがって、ダイス角度がより小さい領域 (20° 未満) では摩擦の影響がさらに大きくなるため、潤滑剤ありの条件においても、押出し荷重が急激に増大する可能性がある。

一方で、金属材料等の押出し加工では、ダイス角度の増大によりデッド領域やせん断帯の形成によって押出し荷重が増大する^{12),13)}。そのため、押出し荷重が最小になる“最適ダイス角度”が存在する。本研究では、ダイス角が増大すると荷重が増大する現象については認められなかった。Fig.4 の観察結果からデッド領域が観察されなかったことから、本実験の範囲内では押出し荷重に及ぼすせん断の影響が小さいためと考えられる。したがって、木材の場合もダイス角度がより大きい領域 (50° 以上) では、デッド領域の形成等により、ダイス角度の増大により押出し荷重が増大すると予想される。

押出し荷重に及ぼすダイス角度の影響について考察を行うために、本実験で使用した矩形ダイスを利用した含浸試料の前方押出に関して、押出し荷重 P を解析的に以下のように算出した¹²⁾。

今回の実験では押出し試験中に木材の繊維方向に変形が認められなかったため (Fig.3)、平面ひずみ状態を仮定することができる。また、押出し方向応力 (σ_x) とその垂直応力 (σ_y) について、 σ_y が最小主応力、 σ_x が最大主応力であることを考慮して、トレスカの降伏条件を用いる。引用文献 12 を参考に、スラブ法を用いて板材の平面ひずみ押出しを解析すると、押出し応力 σ_{ext} は、

$$\sigma_{ext} = 2k \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^{\mu \cot \alpha} \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、 μ は摩擦係数、 α はダイス半角、 k はせん断降伏応力、 l_1 および l_2 はダイスの入口と出口の幅である。押出し荷重 P は、

$$P = l_1 b 2k \left(1 + \frac{1}{\mu \cot \alpha} \right) \left\{ \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^{\mu \cot \alpha} - 1 \right\} \quad (3)$$

と見積もられる。ここで、 b は含浸試料の L 方向の長さである。

実験結果から得られた押出し荷重 F_e および摩擦係数 μ ($\mu_n=0.20$ および $\mu_w=0.05$) を式(3)に代入した上で、最小二乗法により k を見積もると、 $k=1.65\text{MPa}$ が得られる。

これを用いて押出し荷重 P を計算した結果をFig.7の実線で示す.

Fig.7より, 平面ひずみ条件を仮定した解析による計算結果と, 押出し試験による実験結果は, 比較的良好一致を示した. このことは, 実験から得られる摩擦係数を用いて, 含浸試料の押出し荷重が解析的におよそ推測できることを示している. ただし, 式(3)に代入する摩擦係数 μ は実験によって得られた値 (Fig.6) であり, 押出し試験時の圧力や応力状態等の条件は考慮されていない. また, 今回用いた含浸試料は, 細胞内腔に余剰な樹脂が多く存在していた (Fig.4) ため, 樹脂の含有率が低い木材の押出し加工に対しても適用できるかは, 今後の検討課題である.

4 結 言

バルク木材の流動現象を押出し加工に適用した場合の加工荷重に及ぼすダイス角度の影響を明らかにすることを目的として, アセチル化処理後に熱可塑性樹脂 (アクリル樹脂) を含浸した木材を使用し, ダイス角度を $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ に変化させた金型を用いて半径方向に押出し試験を行った. また, これとは別に摩擦係数を測定し, 潤滑剤の有無による摩擦力の違いが押出し荷重に及ぼす影響を検討した.

得られた結果は以下の通りである.

- 1) いずれのダイス角度においても潤滑剤の塗布により押出し中の荷重が著しく低下した. 特に, ダイス角度が小さい領域 (ダイス角度 20°) では, 潤滑剤の塗布により押出し荷重は半分以下となった.
- 2) 潤滑剤なしの条件ではダイス角度が小さくなると押出し荷重が増大したが, 潤滑剤ありの条件ではダイス角度の違いによる押出し荷重に違いは認められなかった. すなわち, 潤滑剤なしの条件では押出し荷重に及ぼすダイス壁面における摩擦の影響が大きいが, 潤滑剤を塗布すると摩擦の影響は極めて小さくなる.
- 3) 実験で得られた押出し荷重は, 平面ひずみ状態を仮定した解析結果と, 比較的良好一致を示した. したがって, 本実験の範囲内では, 実験から得られる摩擦係数を用いて, 含浸試料の押出し荷重が解析的におよそ推測できる.

参 考 文 献

- 1) T. Okamoto, "Recent developments in wood/plastic composites. Extrusion of wood-based materials", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.49, No.6, pp.401-407 (2003).
- 2) O. Yamashita, H. Yokochi, T. Miki and K. Kanayama, "Producing cups from wood by extrusion using flow phenomenon of bulk wood", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineering A*, Vol.73, No.729, pp.583-588 (2007).
- 3) T. Miki, M. Seki, H. Sugimoto, I. Shigematsu and K. Kanayama, "Mechanical properties of wood plastic composites prepared by wood flow forming using low molecular phenol resin", *Proceedings of 11th pacific rim*

Bio-based Composite Symposium Bio-comp, pp.154-161 (2012).

- 4) T. Miki, M. Seki, I. Shigematsu and K. Kanayama, "Preparation of three dimensional products using flow deformability of wood treated by small molecular resins", *Advanced Materials Research*, Vol.856, pp.79-86 (2013).
- 5) T. Miki, "Plastic forming techniques of wood and wood-based materials using their fluidity", *Keikinnzoku*, Vol.64, No.6, pp.259-263 (2014).
- 6) M. Seki, T. Miki, S. Tanaka, I. Shigematsu and K. Kanayama, "Effect of thermoplastic binder on flow deformation behavior of wood", *Procedia Engineering*, Vol.81, pp.855-860 (2014).
- 7) M. Seki, T. Nakatani, H. Sugimoto, T. Miki, K. Kanayama and Y. Furuta, "Effect of anisotropy of wood on friction characteristics under high pressure conditions", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.61, No.4, pp.335-340 (2012).
- 8) M. Seki, H. Sugimoto, T. Miki, K. Kanayama and Y. Furuta, "Wood friction characteristics during exposure to high pressure: influence of wood/ metal tool surface finishing conditions", *Journal of Wood Science*, Vol.59, No.1, pp.10-16 (2013).
- 9) M. Seki, H. Sugimoto, T. Miki, K. Kanayama and Y. Furuta, "Wood friction characteristics during exposure to high pressure: influence of moisture content of wood", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.58, No.6, pp.302-308 (2012).
- 10) M. Wada and M. Fushitani, "Bending strength properties and dimensional stability in radial direction of acetylated wood-poly methyl methacrylate composites", *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.38, No.11, pp.1035-1042 (1992).
- 11) M. Okumura, N. Shiraishi, K. Sadoh and T. Yokota, "Temperature dependence of viscoelastic behavior of wood-PMMA composites", *The Society of Materials Science*, Vol.26, No.284, pp.71-77 (1977).
- 12) E.g., "Soseikakougaku", Ed. M. Oyane (1986) *yokendo*, pp.178-182, pp.194-199.
- 13) H. Kudo, H. Takahashi, K. Shinozaki and E. Tanaka, "Effects of die angle in forward extrusion", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.67, No.542, pp.392-400 (1964).