ロールプレスによる木材の横圧縮変形*1

井上雅文*2, 3, 足立幸司*2, 4, 大前宏輔*5, 小原光博*6, 金山公三*6

Roller Compression of Wood*1

Masafumi INOUE*2, 3, Koji ADACHI*2, 4, Kosuke OMAE*5,
Mitsuhiro KOHARA*6 and Kozo KANAYAMA*6

Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and balsa (*Ochroma lagopus* Sw) specimens in the air-dried condition were compressed using a roller press. We measured the frequency and degree of defects and fractures in the specimens caused by the compression.

The cell wall was sequentially compressed due to shear deformation. The specimens were densified in thickness and slightly elongated in width. As a result, alligatoring cracks, longitudinal splits, surface cracks, cup, crook and shear cracks occurred after roller pressing under extreme conditions. Both the frequency and the degree of alligatoring cracks, longitudinal splits and surface cracks increased in proportion to the thickness or the degree of compression of the specimen, or in inverse proportion to the size of the roller diameter. Moreover, the frequencies of the alligatoring cracks and the surface cracks had a positive relation to the contact angle, which was calculated from thickness, degree of compression and roller diameter. The macroscopic defects of sugi and balsa specimens tended to increase at, respectively, 8 and 12 or more degrees of contact angle.

Keywords: roller press, wood, compressive deformation, defects, contact angle.

スギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) およびバルサ (*Ochroma lagopus*) 材を、繊維方向にロールプレスすることによって横圧縮大変形し、加工材に生じる形状変化および破壊を観察し、それらの程度および頻度を測定した。

加工材は、ロール表面との摩擦によってロール間隙に引き込まれ、順次、せん断変形を受けながら圧縮された。走行方向に延展することはなく、細胞内腔の体積減少によって厚さ方向に圧密化された。幅方向には若干伸長した。

過度のロール圧縮によって木材に生じる特徴的な破壊として、ワニ口破壊、縦割れ、表面割れ、幅反り、縦反り、層はく離が確認された。ワニ口破壊、縦割れ、表面割れは、材料厚さ、圧縮率が大きい程、ロール径 (ϕ) が小さい程、その発生頻度が増加した。気乾状態のスギ材およびバルサ材において、ワニ口破壊、表面割れの発生頻度は、材料厚さ、ロールギャップ、ロール径から計算される圧入角 (θ) がそれぞれ 8° 、 12° 以上で増加した。

*1 Received February 25, 2004; accepted August 9, 2004. 本報の一部は、第49回日本木材学会大会 (1999年4月, 静岡) において発表した。

*2 京都市大学生存圏研究所 Research Institute of Sustainable Humansphere, Kyoto University, Uji 611-0011

*3 Present address: 東京大学アジア生物資源環境研究センター Asian Natural Environmental Science Center, The University of Tokyo, Tokyo 113-8657

*4 Present address: 秋田県立大学木材高度加工研究所 Institute of Wood Technology, Akita Prefectural University, Noshiro 016-0876

*5 朝日ウッドテック株式会社 Asahi Woodtec Co. Ltd., Osaka 595-0814

*6 独立行政法人産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Nagoya 463-8560

1. 緒 言

木材は、繊維と直角方向に圧縮加工することによって、強度的性質、表面硬さ、耐摩耗性などが飛躍的に向上し、材質が均質化される。また、化粧性が増し、高級感が付与される。加工材は、高級な広葉樹材にも勝る性質と質感を持ち、高級家具材、住宅内装用仕上げ材として利用できる¹⁾。

圧縮木材の製造に関する研究、開発では、これまで、主に、平板プレスが用いられている¹⁻⁵⁾。圧縮木材の製造は、比較的高い圧縮圧力を必要とするため、加工材の水平断面積で接触する平板プレスは大きかりな装置となる。これに対し、ロールプレス法では、加工材の局小部位を順次に変形するので接触面積が小さくなる。そのため、装置にかかる荷重は小さく、装置の小型化が可能となる。また、加工の連続化が容易となり、エネルギー的にも有利となる。

ロールプレスによる板圧延技術は、金属加工に広く利用されている機構で、金属材料を対象とした詳細な検討が行われている⁶⁾。近年、木材加工分野への適用が試みられ、実用化を目指した開発事例が増加している⁷⁻¹³⁾。その一方で、ロールプレスによる木材の横圧縮加工が木材の形態変化に与える影響を詳細に検討した例は認められない。木材は、金属材料と比べ、①延性に乏しい(繊維方向に伸張しない)、②不均質、異方性材料である(年輪、細胞構造)、③温度、水分条件によって変形能が著しく変化する、④弾性域を超えた大変形であっても塑性を示さず変形回復するなどの違いがあるため、金属加工分野での知見をそのまま木材に適用することは困難である。

本報では、ロールプレスによって木材を横圧縮大変形する場合に生じる特徴的な破壊について、その形態および発生条件について報告する。

2. 実験方法

2.1 供試材料

供試材料として、気乾密度が 0.34 g/cm^3 、平均年輪幅が 3.6 mm 、含水率が 18% のスギ(*Cryptomeria japonica* D. Don) および気乾比重が 0.19 g/cm^3 、含水率が 18% のバルサ(*Ochroma lagopus* Sw)材を用いた。試験片寸法は、3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 (放射方向, R) $\times$ 50, 100 (接線方向, T) $\times$ 240 (繊維方向, L) mm とした。主な試験では、各条件について、3体以上の試験片を供試した。

2.2 ロールプレス装置と木材のロール圧縮

本実験に用いたロールプレス機は、金属加工用の

2段式圧延機の構造を基本として設計、試作した。最大荷重は 50 kN で、最大トルク $7.5 \text{ kN}\cdot\text{m}$ を発生することができる。これを用いて、回転する金属ロール間に木材を繊維方向に挿入し、上下のロールの間隙であるロールギャップ (Fig. 1 中、H で示す) を通過させることによって、横圧縮変形を試みた。ロール径は、100, 150, 200, 250, 300 mm とし、ロールギャップは、圧縮率が $10, 20, 30, 40, 50, 60, 70\%$ となるように調整した。試験時の温度は約 20°C とし、ロール周速 ω は 0.2 rpm とした。加工後の試験片については、 $65\% \text{ RH}$ 下で養生して、寸法が安定したことを確認した後、以下の測定に供した。

2.3 加工材に生じる破壊の観察と測定

ワニ口破壊 (二枚板型破壊) 目視および音によって、破壊の発生を確認し、この時のロール最下点から試験片最後尾までの距離を測定し l_0 とした。ロール噛み込みから試験片最後尾までの距離 l_1 は、 l_0 から計算によって求めた。さらに、ロール通過後の試験片を最後尾から順次切削していき、試験片の分離を調べることによって、破壊の深度 (Fig. 1 中、a) を測定した。

縦割れ 上記と同様の方法で、破壊深度 (Fig. 3(b) 中、b) を測定した。

表面割れ ロール通過後の試験片に繊維方向に任意の直線を複数本描き、線上に現れる破壊の個数を測定した。これから単位長さ (100 mm) あたりの破

Fig. 1. Schematic diagram of lumber defects.

Notes: Defects of sugi and balsa, A: alligatoring crack, B: longitudinal split, C: surface cracks, D: Cup, E: Crook, F: Shear crack. T : Initial specimen thickness, H : roller gap, r : roller radius, θ : contact angle, a : length of alligatoring, l_a : projected length, l_b : contact arc, l_0 : distance from tail end of specimen to roller gap, l_1 : distance from tail end of specimen to contact point between specimen and roller.

壊頻度を計算した。

破壊箇所の顕微鏡観察 ロール入り口付近および破壊箇所の微細構造の変化を走査型電子顕微鏡(SEM)によって観察した。

3. 結果および考察

3.1 ロールプレスによる木材の横圧縮変形

加工材を繊維方向に沿って回転する一対の金属ロール間に挿入すると、加工材はロール表面との摩擦によってロール間隙に引き込まれ、厚さ方向に圧縮変形される。ただし、ロール径、ロールギャップに対して加工材厚さが大きい場合、初期の摩擦力が得られにくく、加工材を後方から押して噛み込ませる必要があった。

Fig. 2に、ロール圧縮過程の加工材木端面を示す。(a)において、下ロールが時計回転、上ロールが反時計回転することによって、加工材はロール間隙に引き込まれ、圧縮変形されながら右方向に移動する。(b)において、図中矢印で示すように、数本のせん断線が確認され、ロール入り口付近で加工材表面付近から変形が始まり、ロール間隙の減少に伴って、変形が中央部へと進展していく様子が観察される。極小的にはFig. 2(b)左下のロール接触面付近の拡大図に示すように、細胞壁の顕著な曲げ変形が観察される。

Fig. 2(a)の試験片上の罫書き線が示すように、変形後の長さ方向(繊維方向)の寸法変化はほとんど認められない。金属材料は、ロールプレスによって、板厚が減少するとともに、材料の進行方向に延展する。このため、この加工はロール圧延加工と称される。しかし、木材は中空のセル構造体であり、繊維方向に極めて伸長しにくい材料であるため、延展することはない。ロール加工による木材の板厚減少は、細胞壁の屈曲変形による細胞内腔の体積減少によって生じる。換言すれば、木材はロール加工によっても圧密化される。以上のことから、ロールプレスを用いた木材の圧縮加工を、ここではロール圧縮と呼ぶことにする。

金属材料の場合、ロール圧延によって幅方向に若干伸長するが、変形量が微小なため実用的には無視される⁹⁾。木材のロール圧縮においても、加工材の幅方向への伸長が認められ、例えば、圧縮率50%の場合、スギおよびバルサ気乾材では、それぞれ最大4.0%、2.2%伸長した。その程度は、ロール径、圧縮率などの加工条件の他、加工材断面の縦横比、年輪幅、年輪傾角などの加工材条件によっても差が認められるが、総じて、木裏側に比べ、木表側で若干

Fig. 2. Deformation behavior on the edge surface of balsa lumber. (a) deformation of the lumber; (b) cell wall deformation around the contact point between roller and lumber.

Notes: The upper side of the photograph corresponds to the roller side.

大きい伸長が認められた。

金属は、弾性域を超える大変形に対し、塑性を示すため、ロールギャップ通過時の変形の大半は、通過後も維持される。一方、木材は大変形によっても組織が流動しないため、Fig. 2(a)に示すように、ロール通過直後に、変形の一部は弾性的に回復する。例えば、厚さ10 mmの気乾および飽水状態の木材を、直径250 mmのロールを用いて、圧縮率50%で圧縮する場合、ロール通過後の加工材に残留する変形量は、約35%、10%であった。さらに、これらの大部分は、吸水によって回復した。これらの現象は、ロールプレスを用いて木材を圧縮変形する際の不都合の一つとなるであろう。対応策の一例が、塩崎ら⁹⁾によって提案されている。

3.2 ロール圧縮による木材の破壊

ロールプレスを用いて木材を圧縮大変形する際に、加工材に発生する特徴的な破壊は、Fig. 1のように整理される。

A. ワニ口破壊

Fig. 3(a)に示すように、加工材の後端部がロール入り口直前で厚さ方向にはく離する破壊が確認された。破壊形態が金属の板圧延におけるワニ口破壊(あるいは二枚板型破壊)と類似しているため、木材加工においてもワニ口破壊と呼ぶこととする。ただし、

Fig. 3. Typical defects of wood after roller pressing. (a) alligatoring crack; (b) longitudinal split; (c) surface cracks; (d) the shear crack.

金属加工でのワニ口破壊は、主に、ロール通過後、材料先端付近から板厚をほぼ二分するように割れる場合が多く、この発生機構は、残留応力や先進による圧延出口でのせん断力、板厚方向の引張応力に原因が求められている^{14, 15)}。一方、木材におけるワニ口破壊は、すべて加工材後端部で年輪界に沿って割

裂しており、ロール通過後の破壊は観察されなかった。加工材が薄い場合は、たいてい厚さ方向の中央部で割裂した。厚い場合には、割裂が複数箇所にも及ぶこともあり、表面付近から順次発生することが多かった。

木材におけるワニ口破壊の原因は、主に、ロール接触部周辺に発生する厚さ方向の引張応力によるものと考えられる。

B. 縦割れ

Fig. 3(b)に示すように、加工材が放射組織に沿って幅方向に割裂する縦割れが確認された。縦割れは、主に板厚方向の圧縮に伴うポアソン効果によって、加工材が幅方向へ伸長することによるものと考えられる。破壊は、主に、木表側から発生するが、これは木表側において幅方向への伸長がより著しいためである。また、圧縮率が高い試験片においては、縦割れが木裏側に及ぶ場合も観察された。繊維方向の割裂性の高いスギ材においては、木裏側に及ぶ縦割れが繊維方向に貫通し、加工材が幅方向に分割される場合もあった。

C. 表面割れ

Fig. 3(c)に示すように、ロール通過後の試験片の表面の一部あるいは全域に、繊維と直角方向に生じる短い断続的な表面割れが観察された。これは、通常の平板プレスでは生じない、ロール圧縮による特有の破壊である。Fig. 3(c)右下図は表面割れを木端面からSEM観察した結果である。破壊は、加工材表面から後端方向へ斜め方向に発生しており、深度は1mmを超える箇所が確認された。

表面割れは、Fig. 1において、加工材の繊維方向長さ(図中 l_a)が、ロール接触時にロールの円弧(図中 l_b)まで延伸されることによって発生する繊維方向の引張ひずみに起因するものと考えられる。

D. 幅反り

ロール通過後の加工材に木表が凹となる幅反りが観察された。平板プレスにおいても、変形回復に伴って、同様の幅反りが発生するが、年輪による円弧状の層構造を有する木材を圧密化する場合の宿命である¹⁷⁾。ロール圧縮の場合も、横拘束によって幅反りを軽減することができると予想される。

E. 縦反り

ロール通過後の加工材に縦反りが観察された。この現象は、平板プレスの場合にも観察される場合がある。

F. 加工材内部の層はく離

加工材表面から数mm内部に、断続的な層はく離が確認された。この破壊は、加工材がロールギャ

ップを通過し圧密されることによって, 見かけ上, 消滅するため, 定量化は困難であり, 進展距離, 頻度の測定はできなかった。Fig. 3(d)は, ロール圧縮を途中で停止し, 除荷した場合の末端断面であるが, 加工条件が著しい場合には, 表面の一部が剥離する場合もあった。

これは, ロールとの接触面から加工材の数 mm 内部側に発生する応力集中によって生じるせん断破壊であると推察される。

3.3 加工条件による破壊発生 の程度

スギ気乾材において, 試験片厚さ, 圧縮率がワニ口破壊, 縦割れ, 表面割れに及ぼす影響を Fig. 4 に示す。ワニ口破壊は, 厚さ 10 mm, 圧縮率 20% 以上で発生し, その破壊深度は厚さおよび圧縮率に比例して増大する。ただし, これは破壊発生時の加工材後端からロール入り口までの距離 l_1 を上回ることはない。縦割れは, 厚さ 10~20 mm, 圧縮率 10~30% 以上の試験片で急激に発生する。表面割れは, 厚さ 10 mm, 圧縮率 20% 以上で発生し, 発生個数は厚さおよび圧縮率に比例して増加する。また, 表面割れは木表側よりも木裏側で顕著である。これは, 幅反り¹⁶⁾の場合と同様に, 木裏側と木表側の変形量の

差に原因があると考えているが, ロール圧縮時に木表側よりも木裏側で, 繊維方向に発生する引張応力が大きいことを示している。これらの外, ロール径が小さくなるに従い, ワニ口破壊, 表面割れの増加する傾向にあった。

Fig. 1 に示すように木材表面とロールプレスの圧入角を θ , ロールの半径を r , 加工材の厚さを T , ロールギャップを H とすると, θ は, T, H, ϕ の関数として, 次式のように表される。

$$\cos \theta = 1 - \frac{T-H}{\phi}, \quad \phi = 2r \quad (1)$$

θ は, T が増加するほど, H および ϕ が減少するほど増大する。ここで H の減少は圧縮率の増大と同義である。すなわち, 上記破壊の発生頻度を圧入角 θ によって表現できる可能性が示唆される。

スギおよびバルサ気乾材に関して, ワニ口破壊, 縦割れ, 表面割れの発生 の程度および頻度と θ の関係を Fig. 5 に示す。スギ材では, 破壊の発生頻度と θ の間に明確な相関が認められ, ワニ口破壊, 縦割れ, 表面割れともに, 8° 以上で破壊が発生する。一方, バルサ材の場合, ワニ口破壊については, 破壊の発生頻度と θ の間に明確な相関が認められ, 12° 以上で破壊が発生する。縦割れ, 表面割れについて

Fig. 4. Degree and frequency of defects in sugi lumber after roller pressing for various specimen thicknesses (a) and degree of compression degrees (b). (A) length of alligatoring crack; (B) length of the longitudinal split; (C) frequency of occurrence of surface cracks.

Notes: Moisture condition of specimens: air-dry, roller diameter: 250 mm, compression degree: 50% (a), specimen thickness: 25 mm (b).

Fig. 5. Degree and frequency of defects in sugi (a) and balsa (b) lumber after roller pressing at various contact angles. (A) length of alligatoring crack; (B) length of longitudinal split; (C) frequency of occurrence of the surface cracks.

Notes: Thickness of the specimen: 3 to 45 mm, moisture condition of specimens: Air-dry, roller diameter: 150 to 300 mm, compression degree: 10 to 70%.

は、それぞれ 16° 、 12° 以上で破壊が発生する。ただし、一部の試験片において、 25° でも縦割れおよび表面割れが生じない場合もあり、これらは年輪傾角、細胞形態など、樹種固有の性質による影響が大きいものと考えられる。

4. 結 言

木材は、繊維方向にロール圧縮すると、順次、せん断変形を受けながら圧縮されるが、延展しないため、結果として圧密化された。また、それに伴い発生する特徴的な加工上の不具合が確認された。中でも、ワニ口破壊、縦割れ、表面割れの発生頻度は、加工条件（ロール径、加工材厚さ、圧縮率）から計算される圧入角 θ と相関性を有することが示唆された。樹種固有の組織構造によってバラツキが認められるものの、スギおよびバルサ気乾材においては、 θ が、それぞれ、 8° 、 12° 以下となる加工条件を設定することが妥当であると判断される。

木口付近の極小部位に発生するワニ口破壊は、二次加工時の泥挽き¹⁷⁾などを考慮すると、実用的には、ほとんど問題にはならないだろう。縦割れおよび幅反りは、平板プレスと同様¹⁷⁾、変形時の横拘束を行うことで抑制することができるだろう。これらに対し、加工材全面に発生する表面割れは、加工条件を制約する最大の因子となると予想される。加工材内部の層はく離は、外観上の欠点よりも強度性能への影響が大きいと考えられ、表面割れおよび縦反りの抑制方法と併せて今後の検討課題である。

謝 辞

本研究の一部は、平成11年度文部省科学研究費補助金（基盤研究B）によって行われた。

文 献

1) 井上雅文：APAST 17, 5-9 (1995).

- 2) 井上雅文, 門川倫子, 西尾治郎, 則元 京：木材研究・資料 29, 54-61 (1993).
- 3) 福田聡史, 高須恭夫, 小川健作：愛知県工業技術センター報告研究報告 33, 67-70 (1997).
- 4) 片見千代, 廣井徹磨, 西村 尚：塑性と加工 44 (513), 23-27 (2003).
- 5) 棚橋光彦：木材工業 53, 589-594 (1998).
- 6) 戸澤康壽：“板圧延”, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, 1993, pp. 13-107.
- 7) 伊藤貴文, 石原茂久：木材学会誌 43, 52-60 (1997).
- 8) 西岡久寛, 中村嘉明, 今村祐嗣, 飯田生穂：第16回日本木材保存協会年次大会論文集, 東京, 2000, pp. 33-38.
- 9) 塩崎宏行, 河瀬忠弘, 池田元吉, 三上昌夫：塑性と加工 42(486), 675-679 (2001).
- 10) 村井大輔, 西村 尚：村井大輔, 西村 尚：日本機械学会第9回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, 沖縄, 2001, pp. 171-172.
- 11) 徳田迪夫, 内迫貴幸, 鈴木直之：木材工業 58, 112-118 (2003).
- 12) 足立幸司, 井上雅文, 金山公三, 川井秀一：木材学会誌 49, 416-422 (2003).
- 13) 古山安之, 江越 航, 松浦 力, 山本 健：広島県立東部工業技術センター研究報告 16, 62-62 (2003).
- 14) 小野寺龍太, 大迫 宏, 古賀 守, 清水峯男：塑性と加工 25(276), 32-37 (1984).
- 15) 楊 希強, 荒牧 正俊, 小野寺 龍太, 奥井 徹, 横手達夫, 東田 賢二：塑性と加工 38(438), 642-646 (1997).
- 16) 井上雅文, 足立幸司, 川井秀一：木材学会誌 47, 198-204 (2001).
- 17) 井上雅文, 児玉順一, 山本康二, 則元 京：木材学会誌 44, 410-416 (1998).