スギ大圧縮プレス成形中に生じる年輪折り畳み現象*

北澤 君義^{*1}, 村上 和昌^{*2}Holding Phenomenon of Annual Ring in Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON.)
Specimen under Large Compression with Closed-Die Forging Method

Kimiyo KITA ZAWA and Kazumasa MURAKAMI

The large increase in strength properties of wooden specimens arises from a large compression using the closed-die forging method. Upon compression of a wooden specimen with inclined annual rings, folding of the annual rings takes place. Despite the knowledge of a fundamental deformation mode of the wooden specimen that was subjected to large compression perpendicular to grain, conditions leading to folding of annual rings are still debated. Here we report the holding behavior of annual rings in wooden specimens cut out from Sugi (Japanese Cedar, *Cryptomeria japonica* D. DON.) log, under large compression using the closed-die forging method. Our experiments demonstrated that, when the mean ring angle between the loading direction and an annual ring is less than 45° , holding occurs. Observations by scanning electron microscopy showed that the holding of latewood in the annual ring propagates to that in a neighboring annual ring via the rays. From these observations, we inferred that holding of annual rings propagates to the center of log. The validity of a general criterion for the determination of conditions leading to holding based on the inferred result was confirmed experimentally.

Key Words: Plastic Forming, Formability, Press Working, Compressed Wood, Holding of Annual Ring, Ring Angle, Sugi (Japanese Cedar), Wood Forming

1. 緒言

地球環境問題の観点から熱帯雨林等の天然木材の伐採が難しい状況にあるため、持続可能な木質資源である植林材の有効利用技術の開発が重要な課題の一つになっている。わが国では、戦後植林したスギが全植林材の約半分を占めるが、軟質・低強度材であるために、ブナ・ケヤキなどの天然広葉樹材の代替材としてスギを利用することは難しい。このような状況をふまえ、大圧縮強化の手法¹⁾²⁾を用いて、スギの高付加価値化・高度有効利用化を図る研究が盛んに行なわれはじめている^{4)~6)13)}。この場合、板目面の圧縮^{1)~7)13)}を主な対象にしているが、大圧縮強化によりスギの有効利用を図るという観点からは、柃目面、追柃面などの圧縮を含めた、いわゆる横圧縮（木材の軸方向細胞に垂直な方向への圧縮）全般における大圧縮変形挙動^{8)~11)}について検討する必要がある。

さて、スギなどの針葉樹の横圧縮成形の問題は、図1に示すように、年輪の晩材（夏材）の厚肉の仮道管と年輪の早材（春材）の薄肉の仮道管からなる細胞壁の集合体を仮道管に垂直な方向に圧縮する問題としてとらえることができる。図2(a)に示すように、板目面（LT面）を半径方向（R方向）に大圧縮成形すると、年輪が平坦化する。一方、同図(b)に示すように柃目面（LR面）を接線方向（T方向）に大圧縮成形

すると、その変形初期段階で年輪の座屈に起因した不整形変形が発生するため^{8)~11)}、板目面圧縮のように整直な状態での大圧縮成形は難しい。しかし、同図(c)に示すように柃目板の側壁を型で拘束した密閉鍛造方式で大圧縮成形すると、この不整形変形が抑止され、柃

Fig.1 Schematic illustration of a rectangular-shaped segment cut from a softwood tree, showing cellular arrangement.

* 原稿受付 1996年7月22日。

^{*1} 正員, 信州大学工学部 (〒380 長野市若里500)。

^{*2} 信州大学大学院。

Fig.2 Deformation modes of clear wood in large compression perpendicular to grain.

目板の大圧縮成形が可能になる。この場合、年輪が折り畳まれる現象が発生する。以下、この現象を年輪折り畳み現象と呼ぶことにする。板目板の圧縮は年輪の法線方向圧縮、柃目板の場合は年輪の接線方向圧縮となるため、年輪方向と圧縮方向との関係から、年輪折り畳み現象の発生条件が決まるものと思われる。この年輪折り畳み現象は大圧縮成形加工中に発現する基本的な変形モードの一つであり、成形品の品質を評価する上でもその変形モードの解明は重要になると思われるが、発生条件などを含めてその変形挙動については、ほとんど明らかにされていない。ところで、湿潤状態になると木材の熱軟化温度が著しく低下するため¹²⁾、成形荷重の大幅な低減化が期待できる。このため、実用上の観点からは、この熱軟化条件下のプレス成形中に生じる年輪折り畳み挙動が検討すべき対象となる。

そこで、本研究では、熱軟化条件下のスギ大圧縮プレス成形中に生じる年輪折り畳み変形の発生挙動を実験的に検討した。まず、年輪折り畳み現象の発生条件とその発生過程を実験的に明らかにした。次に、この結果をもとに年輪折り畳み発生機構のモデル化を行った。そして、このモデルから推論された結果を実験的に検証し、その有効性を明らかにした。さらに、得られた結果をもとに、スギ大圧縮プレス成形における年

輪折り畳み現象の発生判定を可能にする木取り設計指針について検討した。

2. 実験方法

2.1 試料木材 実験には、樹齢60年・直径約350mmの信州産のスギ丸太（生材）を用いた。そして、図3(a)に示すようにこの丸太の辺材（白太）部と心材（赤太）部から、一辺40mmの立方体形状の試験片を木取りし、試料木材とした。また、同じスギ丸太から同図中に示すように丸太の中心（髓）を中央に含むように試料木材（80mm×40mm×40mm）を木取りし、実験に用いた。同図(b)に示すように、試料木材の木口面における年輪の接線方向と圧縮方向のなす角 ϕ の平均値を平均年輪傾角 ϕ_m と呼ぶことにする。 $\phi_m = 0^\circ$ の場合は柃目材の圧縮、 $\phi_m = 45^\circ$ の場合は追柃材の圧縮、 $\phi_m = 90^\circ$ の場合は板目材の圧縮となる。ここでは、同図(b)に示すように一辺40mmの立

(a) Positions of specimens cut out from a Sugi log.

(b) Compression tangential ($\phi_m=0$), angle ($0 < \phi_m < 90^\circ$) and radial ($\phi_m=90^\circ$) to annual ring. ϕ_m : Mean ring angle.

Fig.3 Schematic illustration showing position of specimens with various mean ring angles, and their compression.

Table 1 Mean ring angles in Sugi specimens used.

Position of specimen	Mean ring angle ϕ_m ($^\circ$)
Sapwood	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90
Heartwood	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90

方体形状の試料木材において長さ20mm以上の年輪に対して年輪の端点A B間を結ぶ線分と圧縮方向のなす角を測定し、その平均値を ϕ_m とした。そして、表1に示す ϕ_m の目標値に対して $\pm 5.0^\circ$ の範囲内に入る試料木材のみを実験に用いた。

2.2 実験条件 湿潤状態では木材の熱軟化温度が著しく低下するため¹²⁾、成形荷重の低減化が期待できる。最も簡便にしかも安定した条件下で熱軟化状態が得られるのは、飽水状態の木材を煮沸して100℃とした場合である。そこで、図4に示すプロセスでこの試料木材を大圧縮成形した。まず、飽水状態の試料木材を30分間煮沸後、100℃の条件下で圧縮速度を60 mm/minに設定して密閉鍛造方式¹³⁾により元の厚さの1/2あるいは1/3の厚さになるまで大圧縮成形した。次に、この大圧縮成形された試験片の木口面をシリコンゴムシートを用いて封印し、型ジグ拘束のまま、雰囲気温度180℃の電気炉内で50分間の簡易水蒸気処理¹³⁾を施すことにより、大圧縮形状を永久固定した。そして、この永久固定材の木口面の年輪の変形挙動を調べ、年輪折り畳み現象の発生条件について検討した。また、永久固定材の木口面を鋭利な刃物でスライスし、細胞壁の変形状態を走査電子顕微鏡で観察した。

さらに、年輪折り畳み伝播方向を調べる目的で、大圧縮成形後に型ジグ拘束のまま試験片の木口面を解放

し、雰囲気温度120℃の電気炉内で乾燥させて圧縮セット材を作成した。そして、このセット材の折り畳み発生箇所にマーキングを施した後、煮沸して形状復元させ、折り畳み伝播方向を調べた。この場合、完全には形状復元しないため、圧縮前の端面(木口面)に格子をマーキングし、その復元状態をもとに年輪折り畳み伝播方向の物質座標(変形前の座標)表示を行った。

なお、試料木材の厚さHと圧縮量hを用いて、 h/H で定義される圧下率(%表示)を変形尺度として用いた。

3. 年輪折り畳み変形挙動

3.1 年輪折り畳み発生条件 辺材の大圧縮成形後の年輪の変形状態の外観を図5に示す。同図(a)に示すように、平均年輪傾角 $\phi_m = 45^\circ$ の場合には、年輪折り畳み現象が発生した。一方、同図(b)に示すように、 $\phi_m = 60^\circ$ の場合には年輪折り畳み現象は発生せず、大圧縮により年輪の傾斜が平坦化し、板目面圧縮材($\phi_m = 90^\circ$)に近い圧縮木材となった。辺材の場合、 $\phi_m = 45^\circ$ 以下の ϕ_m の条件では年輪折り畳み現象が発生し、 $\phi_m = 60^\circ$ 以上の条件では年輪折り畳み現象が発生せず、年輪が平坦化した。心材の場合も辺材の場合と同様に、 $\phi_m = 45^\circ$ 以下で折り畳み現象が発生した。従って、年輪折り畳み現象の開始条件は、 $\phi_m = 45^\circ$ と $\phi_m = 60^\circ$ の間に存在するものと考えられる。ところで、試料木材内では年輪が曲率を有している。図5(b)の $\phi_m = 60^\circ$ の試料木材内の変形前における年輪傾角 ϕ の最小値は、 ϕ_m の値よりも 10° 小さい、 $\phi = 50^\circ$ であったが、同図からも明らかなようにこの試料木材ではどの場所においても年輪折り畳み

Fig.4 Schematic diagrams showing fabrication process for large compressed specimen from a Sugi log.

Fig.5 Cross sectional views of compressed specimens showing the influence of mean ring angle, ϕ_m , on the deformation modes of Sugi in compression (Sapwood, Wet, 100℃, Reduction: 67%).

Fig. 6 Influence of the mean ring angle, Φ_m , on relationships between compression load, P , and displacement, h , in closed-die forging-type compression perpendicular to grain. (Sapwood, Wet, 100°C).

現象は発生していない。一方、図 5(a) の $\Phi_m = 45^\circ$ の試料木材内で年輪折り畳み現象が発生した場所の年輪傾角の最大値は、 $\Phi = 45^\circ$ であった。これらの結果から、年輪折り畳み現象の開始条件は、 $\Phi_m = 45^\circ$ に限りなく近いものと推察される。従って、年輪折り畳み現象は、 $\Phi_m = 45^\circ$ 以下で生じるものと考えられる。

3.2 年輪折り畳み過程 年輪折り畳み現象が年輪の座屈現象であれば、年輪が折り畳まれるたびに荷重ストローク線図上に荷重低下が現れるはずである。図 6 に、年輪折り畳み現象が発生した $\Phi_m = 45^\circ$ （追衾材）の場合と年輪折り畳み現象が発生しない $\Phi_m = 90^\circ$ （板目材）の場合の荷重ストローク線図を示す。 $\Phi_m = 45^\circ$ の荷重ストローク線図には荷重低下は現れていない。しかも、 $\Phi_m = 45^\circ$ と 90° の荷重増加パターンはほぼ類似しており、荷重ストローク線図の形から、年輪折り畳み現象の発生の有無を特定することは難しい。

もし、この現象が年輪の座屈現象であるとすれば、年輪の晩材部以外の部分（年輪の早材部）の変形の影響により、座屈変形に特有な荷重低下が相殺されている可能性がある。すなわち、年輪の晩材部とその周辺の早材部の変形が連動しながら、年輪折り畳み現象が生じるものと思われる。そこで、年輪折り畳み現象の発生した $\Phi_m = 45^\circ$ の試料木材における年輪折り畳み過程をビデオ撮影により調べた。図 7(a) に示す圧縮前の状態から僅かに圧縮した同図(b)の段階で A 点および B 点付近からすでに年輪の折り畳みが生じ、圧縮の進展に伴い、同図(c)に示すように年輪折り畳みが左隣の年輪へ同位相で伝播した。そして、さらに圧縮

Fig. 7 Progressive holding of annual rings in a sapwood specimen, showing the holding propagation to the neighboring annual ring (Mean ring angle Φ_m : 45° , Wet, 100°C).

を続けると、同図(d)に示すように、A 点より下の C 点近傍から別の年輪の折り畳みが発生し、左隣の年輪へ同位相で伝播した。

以上の結果から、年輪の晩材部の折り畳みが隣の年輪の晩材部にほぼ同位相で伝播し、これが繰り返されて年輪の折り畳みパターンが生じることがわかる。図 7 の年輪の早材部の幅の変化からも明らかのように、圧下の進展に伴い、早材部の体積収縮が上側で発生し、下側へ伝播している。年輪折り畳み現象は、この体積収縮領域で発生している。

4. 年輪折り畳み変形機構

4.1 年輪折り畳み変形の伝播機構 走査電子顕微鏡を用いて、平均年輪傾角 $\Phi_m = 45^\circ$ の試料木材の 1/2 圧縮時における年輪折り畳み凹凸部の細胞壁（仮道管）の変形状態（木口面）を観察した結果を図 8 に示す。同図(a-1)に示すように年輪折り畳み凹部では、年輪の晩材部の褶曲と隣の年輪の晩材部の褶曲がほぼ同位相となっている。早材部では細胞壁の圧壊が見られない部位と著しい圧壊が見られる部位が混在した複雑な変形状態となっており、放射組織（Rays；図 1 参照、木材の中心に至る組織）も褶曲している。これに対して、同図中の年輪折り畳み凹部の年輪界上の A 点近傍を拡大した同図(a-2)に示すように、晩材部では年輪界近傍を除くと細胞壁の圧壊は少なく、晩材部全体が曲げ変形している。さて、同図(a-1)に

(a-1) Concave side of the bent annual ring.

(a-2) The region designated by the rectangle in Fig. 8(a-1) under higher magnification.

(b-1) Convex side of the bent annual ring.

(b-2) The region designated by the rectangle in Fig. 8(b-1) under higher magnification.

Fig. 8 Scanning electron micrographs showing the holding propagation along the ray direction (Sapwood, Mean ring angle $\phi_m: 45^\circ$, Wet, 100°C , Reduction: 50%).

示した年輪折り畳み凹部の年輪界上のA点近傍の放射組織Bに着目し、この放射組織Bを右隣の年輪の年輪界まで辿ると、隣の年輪折り畳み凹部のC点に到達している。他の年輪折り畳み凹部についても同様にして

調べたところ、年輪折り畳み凹部の放射組織が隣の年輪折り畳み凹部に達していた。従って、年輪折り畳み凹部は、放射組織を介して隣の年輪に同位相で伝播するものと考えられる。

年輪折り畳み凸部においても、同図(b-1)に示すように年輪の晩材部の褶曲と隣の年輪の晩材部の褶曲がほぼ同位相になっている。また、同図中のG点近傍を拡大した同図(b-2)に示すように、晩材部では割れを伴うものの、細胞壁の圧壊は少なく、晩材部全体が曲げ変形している。これに対して、早材部の細胞壁は著しく圧壊している。さて、凹部と同様に同図(b-1)に示した年輪折り畳み凸部の年輪界上のD点近傍の放射組織Eに着目し、これを辿ると、右隣の年輪折り畳み凸部のF点に到達している。また、同様にして他の年輪折り畳み凸部についても調べたところ、年輪折り畳み凸部の放射仮道管が隣の年輪折り畳み凸部に達していた。

以上のように、年輪折り畳みの凹凸部は隣の凹凸部と同じ放射組織で連なっている。従って、以下のように、年輪折り畳み現象の伝播機構をモデル化することができる。すなわち、大圧縮成形過程において、ある年輪の晩材に折り畳み現象が発生すると、放射組織を介して隣の年輪の晩材に変形が伝播するため、同位相で折り畳みが伝播するものと考えられる。

4.2 年輪折り畳み現象の発生条件 図8からも明かなように、晩材部の周囲に存在する早材部の仮道管の圧壊を伴う環境下で年輪折り畳みが発生しているため、現象は極めて複雑である。そこで、問題を単純化して図9に示すように、第1近似として一本の年輪の晩材部の圧縮問題として考えることにする。この場合、年輪傾角 ϕ が 45° よりも大きくなると圧縮力 F の年輪法線方向成分 F_N が年輪接線方向成分 F_ϕ よりも大きくなるため、年輪の晩材部が法線方向に倒され、板目板($\phi=90^\circ$)の状態に近づく。一方、 ϕ が小さく

Fig. 9 Compressing force F acting on a wood specimen with inclined annual rings; the force component F_ϕ applied tangentially to the late wood, causes the ring to hold.

なると年輪の晩材を接線方向に圧縮する成分 F_ϕ が大きくなり、ある ϕ 以下の条件下で年輪の座屈、すなわち、年輪折り畳み現象が発生するはずである。実験結果によると、 $\phi_m = 45^\circ$ 以下の条件下で年輪折り畳み現象が発生した。 $\phi = 45^\circ$ の条件では $F_\phi = F_N$ となり、この角度よりも ϕ が小さい場合には $F_\phi > F_N$ となる。従って、この初等的なモデルからは、 F_ϕ 優位の条件下で年輪折り畳み現象が発生することが示唆される。実際には早材部の仮道管が晩材部の周囲に存在し、図8に示したようにその複雑な圧壊をとまなう環境下で晩材部の折り畳みが発生しており、この早材部仮道管の圧壊変形が一種の緩衝材のように晩材部に作用するため、座屈に特有な荷重低下現象が観察されなかったものと推察される。

4.3 モデルの実験的検証 放射組織が丸太の中心に至ることを踏まえると、上述の4.1の結果は年輪折り畳み現象が、丸太の中心を通る方向に伝播することを示唆している。また、前述の3.1で明らかにしたように $\phi_m = 45^\circ$ 以下の条件下で年輪折り畳み現象が発生していたことから、図10に示すように丸太の中心を含むように木取りされた試料木材を上下方向に圧縮する場合を考えると、年輪傾角 $\phi = 45^\circ$ 以下の条件となる領域Aでは、丸太の中心に向かって年輪折り畳み現象が発生し、 $\phi = 45^\circ$ より大きい条件となる領域Bでは年輪折り畳み現象は発生せず、年輪が平坦化、すなわち、板目化するはずである。以下、これら2つの項目について実験的に検討し、上述の年輪折り畳み変形機構に関するモデルの有効性を実験的に検証する。

まず、年輪折り畳み伝播方向について検討するために、圧縮セット法により大圧縮成形形状を一時的に固定し、年輪の折り畳み伝播場所にマーキングを施し、煮沸して形状復元させ、変形前の状態（物質座標系）で、年輪折り畳み伝播方向を調べた。その結果を図11

に示す。同図中の $\Delta\psi$ は、変形前の座標系において年輪折り畳み伝播方向と放射組織の方向とのなす角、すなわち、予想される伝播方向との角度差を意味する。さて、同図中に示すように、辺材と心材のいずれの場合ともに、 $\Delta\psi = 0^\circ$ となっており、モデルから推論された放射組織の方向に年輪折り畳み現象が伝播している。この結果は、上述のモデルから推論された結果にほかならない。なお、丸太の年輪が同心円のパターンにかなり近い場合には、年輪折り畳み現象が年輪法線方向に伝播するという近似が成立する。

次に、図10の条件で木取りされた試料木材を圧縮したところ、図12に示すように丸太の中心部に割れが発生したものの、年輪傾角 ϕ が 45° よりも大きい領域Bでは年輪折り畳み現象が発生せず、 $\phi = 45^\circ$ 以下の傾

(a) Sapwood

(b) Hartwood

Fig. 10 Holding regions in a rectangular specimen cut out from center location in a Sugi log, deduced from proposed mechanism of annual ring holding. A: Holding region. B: Flattening region (without folding).

Fig. 11 Experimental verification of the holding propagation along the ray direction. $\Delta\psi$ denotes the angle which the direction of holding propagation makes with the ray direction in the clockwise sense. If the holding propagate along the ray direction to the neighboring ring, then $\Delta\psi = 0$ (Wet, 100°C, Reduction : 67%).

Fig. 12 Remarkable holding of annual rings in a rectangular specimen cut out from center location in a Sugi log, in which holding occurs the deduced regions (Sapwood, Cross section, Wet, 100°C, Reduction: 54%).

域Aでは丸太の中心に向けて年輪折り畳みが生じた。この結果は、年輪折り畳み伝播に関する上述のモデルから予想された結果にほかならない。

以上のように年輪折り畳み機構のモデルから推論された結果は、いずれも実験結果と一致した。従って、提案したモデルにより年輪折り畳み現象を理解することができるものと考えられる。

4・4 木取り設計基準 上述の図12は、木取りされた木材内に年輪傾角 $\phi = 45^\circ$ 以下の部分が含まれていると年輪折り畳み現象が発生することを意味している。すなわち、平均年輪傾角 ϕ_m で記述されていた年輪折り畳み現象の発生条件を、年輪傾角 ϕ を用いた一般的な形で表わすことができる。このため、 ϕ が 45° よりも大きい条件になるように木取りを行うと大圧縮成形により年輪の傾斜が平坦化して板目面圧縮材に近い製品が得られ、 ϕ が 45° 以下の条件になるように木取りを行うと年輪の折り畳み変形が発生することになる。従って、この結果を木取り設計基準として用いることにより、スギの大圧縮プレス成形における年輪折り畳み現象の発生判定が可能になる。

5. 結言

本研究では、信州産のスギの大圧縮プレス成形における年輪の折り畳み現象の発生挙動を実験的の検討し、以下の結果を得た。

- (1) 平均年輪傾角 ϕ_m が 60° 以上の場合、年輪折り畳み現象は発生せず、大圧縮により年輪の傾斜が平坦化した。一方、 ϕ_m が 45° 以下の場合には、年輪折り畳み現象が発生した。年輪折り畳み現象は、 $\phi_m = 45^\circ$ 以下で生じるものと考えられる。
- (2) 年輪折り畳み現象は、大圧縮変形の初期段階で発生し、隣の年輪にほぼ同位相で伝播した。また、走査電子顕微鏡観察から、年輪折り畳み変形が放射組織を介して隣の年輪に伝播することが明らかになった。
- (3) 年輪折り畳み現象は、第1近似として、年輪に作用する圧縮力 F の年輪接線方向成分 F_ϕ が年輪法線方

向成分 F_N 以上の大きさとなる、 F_ϕ 優位の条件で発生するものと考えられる。

(4) 上述の結果をふまえ、いったん年輪の折り畳みが発生すると折り畳み形状が放射組織を介して隣の年輪に伝播する現象として、その伝播機構をモデル化した。このモデルを用いると、同位相の年輪折り畳み現象が生じるという実験結果を説明することができる。

(5) このモデルから、年輪折り畳み現象が丸太の中心を通る方向に伝播し、丸太中心を含む木取りをした場合に年輪傾角 ϕ が 45° 以下の領域で丸太の中心に向けてこの現象が発生することを推論した。そして、これらの推論結果が実験的に成立することを確認した。

(6) 平均年輪傾角 ϕ_m で記述されていた年輪折り畳み現象の発生条件を、年輪傾角 ϕ を用いた一般的な形で表わすことができる。この結果を木取り設計基準として用いることにより、スギ大圧縮プレス成形における年輪折り畳み現象の発生判定が可能になる。

参考文献

- (1) Stamm, A.J.: Wood and cellulose science, (1964), 343-358, The Ronald Press Co..
- (2) Seborg, R.M., Millet, M.A. and Stamm, A.J.: Heat-stabilized compressed wood-(Staypak), *Mechanical Engineering*, **67**-25(1945), 25-31.
- (3) 大河平行雄: スギ材における横圧縮強さについて, 木材学会誌, **1**-2(1955), 52-54.
- (4) Inoue, M., Norimoto, M., Otsuka, Y., and Yamada, T.: Surface compression of coniferous wood lumber, *Mokuzai Gakkaishi*, **36**-11(1990), 969-975.
- (5) Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., and Rowell, R. W.: Steam or heat fixation of compressed wood, *Wood and Fiber Science*, **25**-3(1993), 224-235.
- (6) 棚橋光彦: 高圧水蒸気による木材の圧縮成形加工, 第23回木材の化学加工研究会シンポジウム講演集, (1993), 9-14.
- (7) 劉一星, 則本京, 師岡淳郎: 木材の横圧縮大変形 (第1報) 応力-歪図と比重, 木材学会誌, **39**-10(1993), 1140-1145..
- (8) Bodig, J.: The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression, *Forest Products J.*, **15**-5(1965), 197-202.
- (9) Bodig, J., and Jayne, B.A.: Mechanics of wood and composites, (1993), 289-296, Krieger Pub.Co.
- (10) Goodman, J.R., and Bodig, J.: Orthotropic strength of wood in compression, *Wood Science*, **4**-2(1971), 83-94.
- (11) Easterling, K.E., Harrysson, R., Gibson, L.J., and Ashiby, M.F.: On the mechanics of balsa and other woods, *Proc. R. Soc. Lond.*, **A**, **383**(1982), 31-41.
- (12) Goring, D.A.I.: Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, **64** (1963), T517-T527.
- (13) 北澤君義, 寺澤正純: スギの大圧縮プレス成形 (第1報, 大圧縮強化に対する簡易水蒸気永久固定プロセスの影響), 平成8年塑性加工春季講演集, (1996), 368-369.