



Title	走査電子顕微鏡内での針葉樹材の横圧縮破壊過程の観察：IV 年輪傾角45度方向圧縮について
Author(s)	相内, 泰三; AIUCHI, Taizo
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 39(2), 237-244
Issue Date	1982-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21074
Type	departmental bulletin paper
File Information	39(2)_P237-244.pdf



走査電子顕微鏡内での針葉樹材の 横圧縮破壊過程の観察*

IV 年輪傾角 45 度方向圧縮について

相内 泰三**

An Observation of the Failure Process of Softwood
under Compression Perpendicular to the Grain
in the Scanning Electron Microscope*

IV On the 45°-Compression to Annual Rings

By

Taizo AIUCHI**

目 次

1. 序 言	237
2. 材料と実験方法	238
3. 結果と考察	238
4. 結 論	241
謝 辞	241
文 献	242
Summary	242
写 真 説 明	244
写 真	

1. 序 言

木材の横圧縮に関する力学的性質が圧縮方向に対する木口面での年輪の傾角により異なることは、これまでの強度試験の結果からすでによく知られている^{1~8)}。特に針葉樹材では、横圧縮強度は年輪が圧縮方向に 45 度傾いている場合 (45 度方向圧縮) が一般に最小値となる。さらにこの方向の応力-歪曲線も半径方向圧縮のそれとは極めて異なり、直線部分が極めて短かく、低荷重で変形が増大する傾向のあることが報告されている^{5,6)}。このように 45 度方向圧縮

* 1982 年 2 月 27 日受理 Received February 27, 1982.

** 北海道大学農学部林産学科 木材理学教室

** Laboratory of Wood Physics, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

については、針葉樹材の横圧縮強度のなかで極めて特殊な変形特性を示すにもかかわらず、組織構造的な立場からの変形・破壊特性に関する検討は少ない。

横圧縮強度試験に際しての破壊部の肉眼的観察により、針葉樹材の木口面では、早材部で年輪に沿った γ り破壊が起きることが森 (1931)¹⁾、GABER (1940)²⁾ および山井 (1955⁵⁾、1959⁶⁾) によって報告されている。一方、光学顕微鏡による観察は筆者の知り得る限りでは、FREY-WYSSLING と STÜSSI (1948)³⁾ および王 (1974)⁹⁾ の報告があるにすぎない。FREY-WYSSLING と STÜSSI は単純なモデルによる単位細胞の変形機構について検討しているが、細胞・組織の破壊過程についてはほとんど言及していない。最近、王は各圧縮段階における仮道管の変形状態を調べ、それが γ り変形しながら潰れるのを見出ししているが、組織全体の変形・破壊過程および細胞壁レベルでの変形挙動などについては観察していない。

そこでここでは、まず木口面での組織の変形・破壊過程を詳細に調べ、次に細胞および細胞壁の変形・破壊挙動を明らかにするとともに、それらに支配的に作用する応力やそれに対する細胞構造の応答について組織構造的な立場から論議することを目的とした。

なお、本稿は「北海道大学審査学位論文」の一部である。

2. 材料と実験方法

2.1 材 料

本実験において用いた樹種は前報¹⁰⁾と同様にトドマツ、エゾマツおよびカラマツである。試験片の形状と寸法は既報¹¹⁾に準じて、10 mm×5 mm×5 mm (試片中央部断面、2 mm×5 mm) に仕上げた。

2.2 観察と記録

動的および静的観察法は先の報告^{10,11)}で詳細に述べているので、ここでは簡単に記す。試験片を加圧装置に付着後、それを SEM (JSM-2) 鏡筒内にセットし、試験片に SEM 外から圧縮力を加えながらモニター TV で観察すると同時に VTR に記録した。

VTR に録画された像の写真撮影は、前報¹⁰⁾と同様にモニター TV の前にカメラをセットし、シャッター速度 1/15 秒で行った。

試験片の木口面に炭素と金を通常より厚めに蒸着し、全て加速電圧 15 kV で SEM 観察を行った。

3. 結果と考察

Fig. 1 (VTR からの写真) はトドマツ材の木口面における破壊過程を示す。荷重を加えると 1 年輪内の早材部に年輪にほぼ沿う相対的な γ りが起こる (Fig. 1-①)。この動きに伴って放射組織は早材部で横へずれながら座屈する (Fig. 1-②)。さらに圧縮を続けると早材仮道管は潰れ、破壊部が年輪にほぼ沿ってできる (Fig. 1-③)。この早材部での γ り現象は、早・晩材部が

圧縮方向と 45 度傾いて配列していることにより年輪方向にせん断応力が働くため起こるものと考えられる。

また、高橋 (1966)⁷⁾ は年輪傾角 70 度方向圧縮について早材部での接線方向の迂りを破壊後に観察している。さらに木材強度の立場からも金 (1948)¹²⁾、山井 (1959)⁶⁾ および沢田 (1963)¹³⁾ らが、針葉樹材の木口面内におけるせん断弾性係数が極めて低い値を示すことを指摘している。このように針葉樹材の早材部がせん断作用に弱いのは、KEYLWERTH (1951)⁴⁾ が指摘するように早材仮道管の木口面での形状によるものと推察する。

45 度方向圧縮の場合は半径方向圧縮の初期破壊¹⁰⁾ にみるような急激な破壊段階はなく、全体的に緩慢に変形・破壊が進行する (Fig. 1)。従って、各圧縮段階における細胞・組織の変形・破壊状態を詳細に観察することができる。Fig. 2 と 3 はトドマツ材とカラマツ材の 1 年輪内での各圧縮段階における変形・破壊状態の推移をそれぞれ示す。荷重を加えると 1 年輪内における早材部で接線方向に迂りを生じ、それに伴って放射組織は横へずれる (Fig. 2-①, 3-①)。また、早材仮道管も局部的に変形を起こす。例えば、Fig. 4 は Fig. 2-① の詳細を示す。放射組織に隣接する、あるいはそれから離れている仮道管 (矢印) は顕著に変形している。さらに圧縮すると放射組織は横へずれながら座屈し、早材仮道管は一系列に連続して潰れる (Fig. 2-② 矢印, 3-②)。これは早材部全体に散在的に起こる。この早材仮道管が一系列に連続して潰れる現象は、王 (1974)⁹⁾ が光学顕微鏡を用いて観察した結果と一致する。山井 (1955)⁵⁾ が明らかにした 45 度方向圧縮の応力-歪曲線にみる特異的な変形特性の発現は、早材部全体にわたる仮道管の連続した潰れによるものと推察する。ところで、放射組織に隣接する仮道管の変形は他の列のそれより先に起こる傾向があった (Fig. 2-②, 3-②, 5, 矢印)。これは放射組織の変形に強く影響されるためである。これについては後に詳細に述べる。圧縮の増大とともに仮道管の潰れは漸次増え、早材部に年輪界にほぼ沿う破壊部を形成した (Fig. 2-③, 3-③)。

これまでは圧縮の進行に伴う組織の変形・破壊状態の推移について述べてきたが、次に細胞および細胞壁レベルでの変形・破壊挙動について述べる。

年輪に対して 45 度方向の圧縮を受ける早材仮道管は明らかにせん断変形を起こす (Fig. 4, 5, 6)。このことは早材仮道管の変形がせん断応力に強く支配されていることを示す。また、せん断変形した仮道管の多くは半径壁よりも接線壁に顕著な変形を示す (Fig. 6, 矢印)。これは半径壁よりも接線壁の方が変形されやすいことを示唆する。この原因について組織構造的な立場から主に次の三点を考える。すなわち、(1) 半径方向と接線方向での細胞の配列状態の違い、(2) 細胞の横断面における幾何学的な形状の影響、(3) 半径壁と接線壁の構造的な違い (例えば半径壁は有縁壁孔を有し、かつ放射組織と隣接することなど) である。ここでは支配的な因子を検討する実験を行っていないので強く影響すると考える上述の因子を列記するのにとどめる。しかし、これは今後検討すべき課題である。

Fig. 7 はせん断変形を示す早材仮道管の代表的な例である。接線壁は逆対称に曲げられ、

細胞コーナー近くの引張側に微小な割れ(矢印)を生じる。また、それと反対側の圧縮側の壁には微細なおし潰れを生じる。これは細胞コーナーの壁の結合部に逆対称の曲げモーメントが働くためである。一方、半径壁には顕著な変形はみられない(Fig. 7)。これは接線壁の変形・破壊(微小な割れ)が先に起こることにより歪が解放されるためと推察する。

しかし、これとは反対に Fig. 8 に示す木口面で半径方向に長くのびた長方形の仮道管の場合は、半径壁が逆対称に曲げられ(矢印)、接線壁には顕著な変形がみられない。このことは、Fig. 7 と 8 を対照してみるとわかるように、木口面における仮道管の横断面形状がその変形に強く影響していることを示唆する。材料力学的な観点から考察してみると、この場合は半径および接線壁の強度と両方向の長さが影響するものと考え、上述の場合は後者の要因が大きいと推察する。

放射組織に隣接する仮道管の変形状態の詳細を Fig. 9 に示す。接線壁は逆対称に曲げられ、その引張側に微小な割れ(矢印)を生じる。しかし、半径壁および放射組織には顕著な変形はみられない。これは放射組織の高い剛性の影響を接線壁が受けるためと考える。すなわち、放射組織は Fig. 10 にみられるようにその接線断面ではほぼ円形状の放射柔細胞で主として構成されていることから、それは曲げに対して高い剛性を示すことが予想される。

一般に針葉樹材の隣接する仮道管壁は、リグニンなどを含む細胞間層により相互に強く結合された重複細胞壁の構造である。

仮道管壁が曲げ変形を受けている状態の詳細は Fig. 7, 9 にみられる。このような仮道管の変形・破壊挙動に明らかに示されるように、本実験条件下(室温、全乾状態)では仮道管壁はその変形中において隣接する細胞壁の間で、また細胞壁が集合する細胞コーナー部の結合部においても細胞間の分離はみられず、変形に際して仮道管壁は一体として挙動した。また、このことは気乾状態の試料においても同様であった¹⁴⁾。しかし、試料が湿潤状態下のとき、どのような挙動を示すかは不明であり、興味のある問題である。

以上の早材仮道管の単位細胞での変形・破壊様式の観察結果を模式的に示したのが Fig. 11 である。木口面における早材仮道管の形状を単純化した矩形モデル(Fig. 11-a)はせん断応力に支配され、その要素は曲げモーメント(Fig. 11-b)により逆対称に曲げられる。実際に観察された例では、接線壁の変形は Fig. 11 に示すとおりであったが、半径壁のそれは極めて小さく、



Fig. 10. Schematic drawing of a wood ray in tangential sectional view. The ray consists of ray parenchyma cells of round outline in cross section.

図に示すような変形 (Fig. 11-a, 点線の部分) を実験的には観察できなかった。しかし, 実際の組織内における細胞の変形機構を解析的に検討するためには, 単位細胞レベルではなく, 相互に隣接する細胞を考慮したより複雑なモデルを用いて行う必要がある。

4. 結 論

年輪に対して 45 度方向の圧縮を受ける針葉樹材の木口面における細胞・組織の変形・破壊過程を SEM を用いて観察して得られた結論は次のとおりである。

(1) 年輪傾角 45 度方向圧縮の破壊は, 圧縮方向に対して早・晩材部が 45 度傾いて配列しているためせん断応力の影響を受ける早材部の入り破壊である。

(2) 早材仮道管はこのせん断作用の影響を直接受け, 明らかなせん断変形を示した。さらに, せん断応力に強く支配された仮道管の多くは接線壁に顕著な変形がみられ, 半径壁には顕著な変化はない。これは半径壁よりも接線壁の方が変形されやすいことを示唆する。

(3) せん断変形を示す仮道管の接線壁は曲げモーメントにより逆対称に曲げられ, その引張側の壁には引張応力による微小な割れを, また圧縮側の壁には微細な圧潰を生じる。

(4) 本実験条件下 (室温・全乾状態) では, 隣接する仮道管壁は変形に際して細胞間層および壁の結合部で分離することはなく, 一体として挙動した。

(5) 放射組織はその構造に由来して高い剛性を有するため隣接する仮道管に局部的に影響を及ぼす。

(6) 年輪傾角 45 度方向圧縮における応力-歪曲線の特異的な変形特性の発現は, 本報告で観察された早材仮道管が一行に連続して潰れる破壊様式と関連すると思われる。

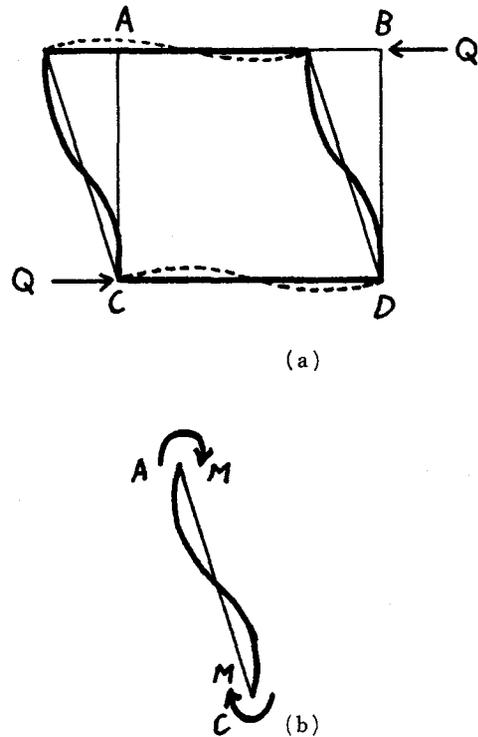


Fig. 11. Schematic representation of shearing deformation of an earlywood tracheid.

- (a) Deformed state of the tracheid subjected to shearing force.
 (b) Deflection of an element (AC) due to bending moments.

Q: shearing force, M: bending moments.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり, 終始適切な御指導を与えて下さった北海道大学農学部石田茂

雄教授に謹んで感謝の意を表します。また、本報告のとりまとめに際し、多くの御教示と御指導をいただいた北海道大学農学部沢田 稔教授ならびに深沢和三助教授に深く感謝致します。

文 献

- 1) 森 徹：建築雑誌，45 (546)，881 (1931).
- 2) E. GABER：Holz Roh-Werkstoff，3，222 (1940).
- 3) A. FREY-WYSSLING and F. STÜSSI：Schweiz. Zeit. Forst.，99，106 (1948).
- 4) R. KEYLWERTH：Holz Roh-Werkstoff，7，253 (1951).
- 5) 山井良三郎：農林省林業試験場研究報告，77，103 (1955).
- 6) 山井良三郎：同上，113，57 (1959).
- 7) 高橋 徹：木材誌，12(5)，203 (1966).
- 8) R. W. KENNEDY：F. P. J.，18(3)，36 (1968).
- 9) 王松永：木材誌，20(4)，172 (1974).
- 10) 相内泰三，石田茂雄：北大農学部演習林研究報告，38(1)，73 (1981).
- 11) T. AIUCHI and S. ISHIDA：Mokuzai Gakkaishi，24(7)，507 (1978).
- 12) 金 俊三：北大工学部彙報，1，144 (1948).
- 13) 沢田 稔：材料，12(121)，749 (1963).
- 14) 相内泰三：未発表.

Summary

Intermediate orientation of annual rings between the radial and tangential directions has been found to influence strength in compression perpendicular to the grain by many workers. Several workers have indicated that transverse compression strength of softwoods decreases to a minimum at an annual ring orientation of 45° to the direction of loading. This suggests that the mechanical properties of softwoods in transverse compression depend on the orientation of annual rings with respect to the direction of stress. However, the microscopical observation on the deformation and failure process of softwoods during 45° -compression is very few.

1. Failure process of softwoods under compression in the 45° -direction to annual rings

A series of SEM micrographs shown in Fig. 1 shows the failure process of a particular annual ring of Todomatsu wood during compression in the 45° -direction to annual rings. The earlywood layer was clearly observed to slide along the annual ring relative to one another with the progress of compression (Fig. 1-①, ②). As indicated by a few workers this shearing action is due to low shearing modulus of the transverse plane in softwood. And also the maximum shearing stress acts along planes which make an angle of 45 degrees with the compressive stress. As compression increased, failures of the earlywood layer developed along the annual ring (Fig. 1-③).

Fig. 3 shows failure development within an annual ring of Karamatsu wood compressed in the 45° -direction with annual rings. In the beginning of failure, rays located in the earlywood layer were observed to buckle with lateral displacement (Fig. 3-①, ②). This is due to shearing action of earlywood layer in the tangential direction. Earlywood tracheids were observed to crush in a row tangentially (Fig. 3-②). This observation agrees with one observed using optical microscope by Wang. As compression increased, such crushing of earlywood

tracheids occurred progressively (Fig. 3-③).

2. Deformation and failure process of the individual tracheids

A series of SEM micrographs shown in Fig. 2 show the failure process of earlywood tracheids of Todomatsu wood during compression. As compression progresses, tangential walls of earlywood tracheids were frequently observed to be deflected remarkably (Fig. 2-①, 4). Fig. 6 shows the deformed state of Ezomatsu wood compressed. Tangential walls of earlywood tracheids were deflected while radial walls were relatively unchanged. From these observations it is obvious that the resulting deformation of the individual tracheids is strongly affected by the shearing stresses.

Fig. 7 shows the details of the typical deformed state of a particular earlywood tracheids. Tangential walls of the tracheid subjected to shearing stresses were clearly observed to be deflected antisymmetrically. While radial walls of the tracheid were relatively unchanged. Such deflection of the cell walls is due to bending moments acting at the juncture of the cell wall. Therefore fine cracks (arrows) occurred on the tension sides near the cell corners of a double wall. Moreover this suggests that tangential walls of earlywood tracheids are more flexible than radial walls.

On the other hand, the deformed state of radially elongated tracheid in cross section (Fig. 8) is different from those described above. In this case radial walls of a particular earlywood tracheid were observed to be deflected remarkably (Fig. 8). Such differing deformation modes of earlywood tracheids may be due to differences in stiffness between radial and tangential walls.

In the case of the tracheids adjacent to the ray, tangential walls of them were frequently observed to be deflected (Fig. 5, 9). This may be due to the effect of the high stiffness of the ray which consists of ray parenchyma cells of round outline in cross section.

Explanation of photographs

- * The compressive force loaded is in a direction from top to bottom of each figure.
- * All the photographs show transverse surfaces of softwoods.
- Fig. 1.** SEM micrographs showing the failure process of Todomatsu wood during compression in the 45° direction to annual rings. Photographs were obtained from the TV images reproduced by the VTR. 1, 2: The earlywood layer is observed to slide along the annual ring relative to one another. 3: Failures of the earlywood layer develop along the annual ring.
- Fig. 2.** SEM micrographs showing failure development within an annual ring of Todomatsu wood compressed. 1, 2: Rays located in the earlywood layer are observed to buckle with lateral displacement. Earlywood tracheids are observed to crush in a row (arrows). 3: As compression increases, crushing of earlywood tracheids occurs progressively.
- Fig. 3.** SEM micrographs showing failure development within an annual ring of Karamatsu wood compressed. Note that earlywood tracheids are crushed in a row.
- Fig. 4.** SEM micrograph showing shearing deformation of earlywood tracheids (arrows) during compression.
- Fig. 5.** SEM micrograph showing shearing deformation of the earlywood tracheids (arrows) adjacent to the ray.
- Fig. 6.** SEM micrograph showing shearing deformation of earlywood tracheids (arrows) of Ezomatsu wood during compression. Note that tangential walls of the tracheids are deflected.
- Fig. 7.** The deformed state of an earlywood tracheid. Tangential walls are bent antisymmetrically and fine cracks (arrows) are seen near the cell corners. RW: radial wall.
- Fig. 8.** The deformed state of radially elongated tracheid in cross section. Note that radial walls of the tracheid are deflected remarkably (arrows). RW: radial wall, TW: tangential wall.
- Fig. 9.** The deformed state of an earlywood tracheid adjacent to the ray. Tangential walls are deflected and fine cracks (arrows) are seen near the cell corners. RW: radial wall.

