



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：III 半径方向圧縮について
Author(s)	相内, 泰三; AIUCHI, Taizo; 石田, 茂雄 他
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 38(1), 73-82
Issue Date	1981-03
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/21050">https://hdl.handle.net/2115/21050</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	38(1)_P73-82.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\*

III 半径方向圧縮について\*\*

相内泰三\*\*\* 石田茂雄\*\*\*

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

III On the Radial Compression\*\*

By

Taizo AIUCHI\*\*\* and Shigeo ISHIDA\*\*\*

## 目 次

1. 緒 言 .....	73
2. 材料と実験方法 .....	74
2.1 材 料 .....	74
2.2 実験方法 .....	75
3. 結果と考察 .....	76
4. 結 論 .....	78
5. 要 約 .....	79
文 献 .....	79
Summary .....	80
写真説明 .....	82
写 真 .....	

## 1. 緒 言

木材の力学的性質が荷重方向によって著しく異なることは、一般によく知られている。特に、横圧縮の場合は荷重方向に対する年輪走向に強く依存している。このような木材の力学的特性を正しく理解するためには、材料試験的アプローチ(応力-歪解析など)<sup>1)~6)</sup>、モデル解析

\* 1980年8月30日受理

\*\* 前報II: 北大演報 36, 623 (1979)

\*\*\* 北海道大学農学部林産学科 木材理学教室

Laboratory of Wood Physics, Dept. of Forest Products, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

的アプローチ<sup>7)~10)</sup> および組織構造的アプローチ (細胞・組織の変形・破壊の検討など)<sup>11)~14)</sup> などのような多くの異なるアプローチから検討し、データを蓄積し、それを総合的に究明する必要があるであろう。

一般に、木材の力学的性質に関する研究は、応力-歪曲線などを求める材料力学的な観点からの検討によるものが多く、この巨視的レベルにおける変形特性の発現の基になると考えられる細胞・組織の変形・破壊挙動に関する知見は未だ不十分である。しかし、木材の変形特性を十分に理解するため、破壊後の形態については古くから多くの関心が持たれてきた。

これまでの木材の横圧縮による破壊形態については、破壊後の表面の肉眼的観察<sup>1),2),4),15),16),17)</sup> および各圧縮段階における破壊状態の光学顕微鏡的観察<sup>12),18),19)</sup> の報告がある。しかし、これらの報告は破壊過程における観察ではなく、破壊後の観察に限られている。本来、変形・破壊は動的な現象であるから、その破壊過程を連続的に追跡することは重要である。

そこで、著者らは横圧縮荷重を受ける木材の木口面における細胞の変形・破壊過程を直接連続的に観察すること (以下、動的観察と呼ぶ) を試みてきた<sup>20),21)</sup>。前報<sup>21)</sup> で試料の調製法および走査電子顕微鏡 (SEM) とビデオテープレコーダ (VTR) を併用する観察と記録法の確立について報告した。

本報では、上述の方法により、半径方向圧縮による針葉樹材の木口面における細胞・組織の変形・破壊過程を動的に観察した結果について報告する。なお、45度方向、接線方向圧縮、横圧縮の総括については別に報告する。

## 2. 材料と実験方法

### 2.1 材 料

本研究において主として用いた供試樹種は、北海道大学雨竜地方演習林産のトドマツ (*Abies sachalinensis*) である。さらに、付随的に同演習林産のエゾマツ (*Picea jezoensis*) および北海道大学苫小牧地方演習林産のカラマツ (*Larix leptolepis*) を用いた。なお、これらの材はいずれも実験室内で1年以上経過した気乾材である。

試験片は、まず各気乾材から小片 (10 mm × 5 mm × 20 mm) を切り出し、その木口面を

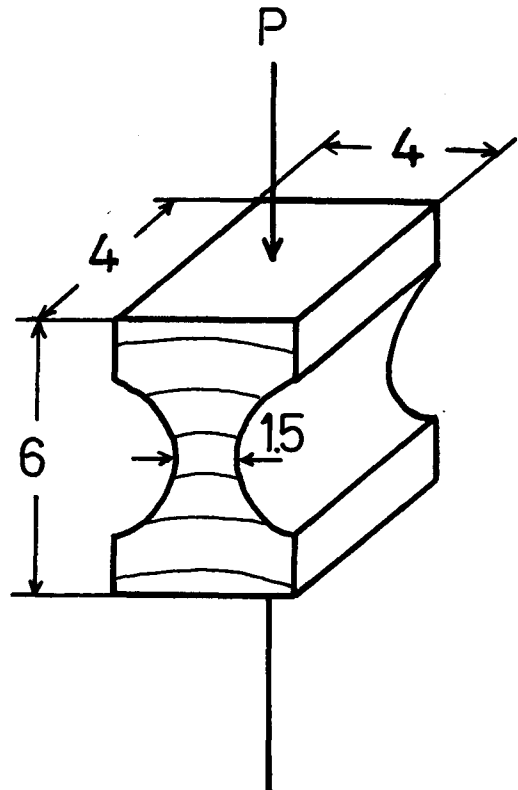


Fig. 1. Shape and dimensions of compression test specimen. (unit: mm)

前報<sup>21)</sup>で述べた方法で良好に仕上げ、1 昼夜実験室内に放置後、Fig. 1 に示すように 6 mm × 4 mm × 4 mm で、その中央部の幅が 1.5 mm の形状と寸法に仕上げた。試験片の中央部を半円形状に切欠いたのは、この中央部にひずみを集中させ、破壊過程の観察を容易に行うためである。

## 2.2 実験方法

動的観察法については前報<sup>21)</sup>で詳細に報告したので、ここでは簡単に述べる。Fig. 2 は SEM の試料室内に加圧装置(1)が設置された状態を示す。この加圧操作は SEM 外からコントロール棒(2)により手動で行われた。Fig. 3 は本研究で行われた動的観察のシステムを示す。

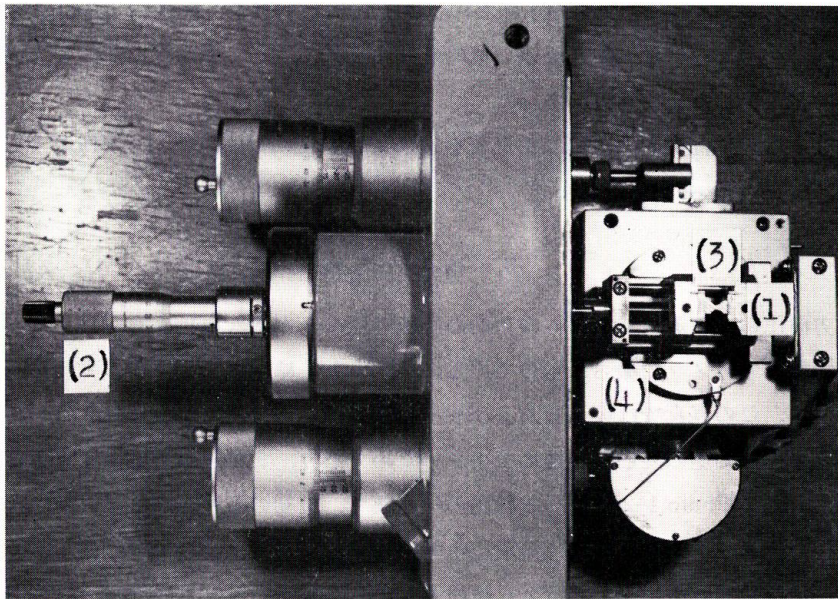


Fig. 2. Specimen stage.

1. compression stage, 2. guide rod, 3. specimen, 4. stationary stage

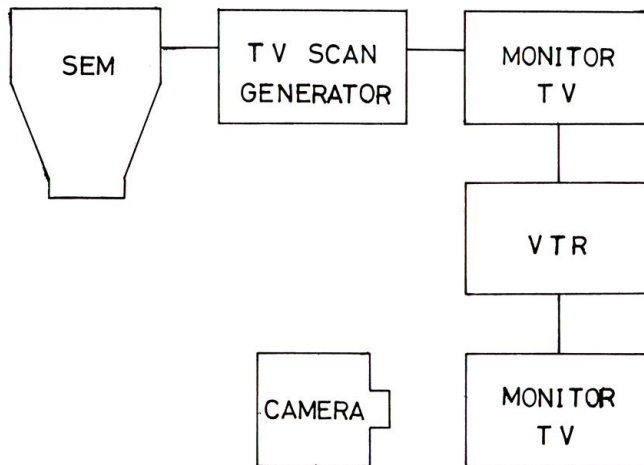


Fig. 3. Experimental assembly diagram.

SEM 内で起こる破壊現象の動的過程を TV 走査装置により 9 インチのモニター TV 上で観察すると同時にそれを VTR (SONY CV 2100) に録画し、後にその録画を 11 インチのモニター TV で繰り返し観察した。さらに、VTR 上の再生された録画像を静止写真として記録するため、標準カメラ (Nikon F, マクロレンズ使用,  $f: 3.5$ ) をモニター TV の前にセットし、シャッター速度  $1/15$  秒<sup>22)</sup> で TV 上の変化する現象を撮影した。フィルムは ASA 400 の Neopan 400 (富士フィルム) を用いた。

また、本研究では SEM 内で外力を受けて変化する試験片の状態をモニター TV 上で観察しながら途中で負荷を中断し、変形・破壊の状態を詳細に調べる方法 (以下、静的観察法と呼ぶ) も行った。この方法は変形・破壊経過の概略を知るうえで、また解像度において比較的劣る動的観察法を補足するうえで有効であった。

試験片の木口面は炭素一金の二重蒸着を通常より厚めに行い、SEM (JSM-2 型) は加速電圧 15 kV で観察を行った。

### 3. 結果と考察

半径方向圧縮によるトドマツ材の初期の破壊過程の一例を Photo 1 に示す。これは VTR 再生画像を標準のカメラで撮ったものである。Photo 1-1 は破壊発生直前の 1 年輪内の早材部の状態を示す。この写真では仮道管および放射組織には顕著な変化がみられない。これは破壊発生に至るまでの細胞の変形量が極めて小さいためであり、またそれを可視化することは非常に困難であった。Photo 1-2 は同一年輪内の早材部で、最初の破壊が起きた直後の状態を示している。この早材部での初期破壊は急激に生じた。早材仮道管は半径方向に潰れ、放射組織はそれぞれ座屈を起こしている。このような初期破壊の急激な発現は、Bodig<sup>12)</sup> および Kunesh<sup>18)</sup> の行った応力—歪曲線および荷重—変形曲線の連続記録に示される曲線上の最初の急激な変化 (直線域からの逸脱) と対応するものであろう。また、山井<sup>4)</sup> は応力—歪曲線の形状から半径方向圧縮においては弾性域から塑性域への転移が極めて急激であると報告している。これらの巨視的およびここで得られた微視的な結果とを合わせて判断すると、初期破壊の急激な進行は半径方向圧縮に際しての荷重方向に対する細胞の配列、すなわち半径方向への比較的規則的な配列に起因する特徴としてみなされる。

上述のように初期の破壊は非常に短時間内に起こるため、通常の VTR の送り速度でその詳細を肉眼的に観察することは困難であった。そこで VTR 上の動的な現象をストップ・モーションの操作により一時的に停止させ、その静止画像から初期の破壊過程を詳細に調べた。先の Photo 1 の初期破壊をこの方法を用いてもう少し詳しくみると、この初期破壊が試験片の両側面に位置する 1 つの仮道管の潰れ (Photo 1-2, 矢印) を起点として、それが接線方向へ瞬時に伝達する現象であることが明らかとなった。この現象を明らかに示しているのが Photo 2 である。これはエゾマツ材の早材部における初期破壊の進行過程の一部を示している。早材仮道

管が外側 (写真の右側) から接線方向に順次潰れていく過程が明らかにみられる。これらの観察から、半径方向圧縮における初期破壊が、試験片の両側面での細胞の潰れにより惹起される応力集中の結果起こるものと推察される。

Photo 3 (Plate 3) に Photo 1 に示した初期破壊の破壊後の状態の詳細を示す。放射組織は早材部で座屈を起こし、早材仮道管は半径壁の折損により半径方向に潰れている。さらに、Photo 2 にもみられるように、この早材仮道管の潰れは各半径列についてほとんど1細胞のみに限られており、それに隣接する上下の仮道管には顕著な変形はみられない。これは歪が局部的に集中することを示している。また、この局所的な潰れにより圧縮応力下での組織内の歪エネルギーが解放されるため、破壊部に隣接する上下の仮道管には顕著な変形がみられないものと考えられる。

初期の破壊過程で注目すべきことは、すでに Photo 2 および Photo 3 で示されているように、半径方向に並ぶ仮道管の列が破壊部で互いにずれていることである。また、Photo 2 には潰れる直前の仮道管 (矢印) が横方向へずれながら変形している状態が明らかにみられる。これは初期の破壊過程中的仮道管に半径壁に対する軸応力とともに横方向にせん断応力が作用していることを示唆するものである。このせん断力による変形は、仮道管の安定性に強く影響を及ぼすものと推察される。

放射組織の座屈現象は、これまで Bodig<sup>12)</sup>, Kunesh<sup>18)</sup> および王<sup>19)</sup> らによって指摘されているように荷重方向に対して放射組織の軸方向が平行なため長柱に類似した挙動を示すものと判断される。また、この安定性は Photo 2 に示されているように放射組織を囲む仮道管の破壊に強く依存しているように思われる。Kunesh<sup>18)</sup> は仮道管は荷重の支持よりも放射組織を横から支持する役割により重要性があると指摘している。

初期破壊の後さらに圧縮を続けると、最初に破壊を生じた同一年輪内の早材部で、破壊部を境にして接線方向へ互いに寄りながら破壊が発達し、半径方向に厚く漸次層状化する過程が観察された (Photo 4-1)。この段階における破壊過程は比較的緩慢な現象であった。Bodig<sup>12)</sup> は最初の破壊以後、応力-歪曲線が鋸歯状を呈し、それが破壊の層状化する過程と対応することを報告しているが、ここでの観察からも寄り層の形成を特徴づける形状であることが確認された。

このようなずれの現象は圧縮破壊後の肉眼的観察<sup>1), 2), 4), 15), 16), 17)</sup> により古くから認められ、注目されてきた。光学顕微鏡的研究では、Kunesh<sup>18)</sup> が最初の破壊後、早材部で接線方向に寄り現象が起きると報告している。また、高橋<sup>17)</sup> はこの寄り現象は接線方向へ二次的な応力が働くためと指摘している。ここでの観察および強度試験による結果<sup>23), 24)</sup>、すなわち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から針葉樹材の木口面内において早材部がせん断応力に対して極めて弱いことが示唆される。この原因として横断面における細胞の構造が大きく寄与しているものと思われる。

圧縮をさらに続けていくと、すでに発生している1年輪内での破壊が進行する過程で隣接する年輪の早材部に新たな破壊を生じた (Photo 4-2)。この現象は、おし潰された仮道管の層状化により結果としてその部分が強化され、それが試験片全体の応力分布に変化を生じることにより起きるものと推察される。このような Photo 4 に示される初期破壊以後の破壊の進行は、Bodig<sup>12)</sup>、Kunesh<sup>18)</sup> および王<sup>19)</sup> らの光学顕微鏡的観察とほぼ一致し、針葉樹材の破壊経過の一般的なものとみなされる。

Photo 5 (Plate 2) に早材仮道管の変形・破壊過程の一連の写真を示す。初期の破壊過程では現象が瞬時に起こり、またそれがどの部分に生じるかを予測できないため、高倍率での観察は困難であったが、破壊がある程度進んだ段階では、その現象が比較的緩慢となり詳細に観察することができた。Photo 5-1 は仮道管が早材部の接線方向へのずれのため、横へずれながらせん断変形している状態を示す。半径壁は細胞コーナー部にある壁の結合部に曲げモーメントが作用するため曲げ変形を起こしているが、接線壁には顕著な変形はみられない。この後、Photo 5-2, 3 に示すように半径壁の急激な座屈により仮道管は潰れる。この破壊様式は初期の破壊過程でみられたものと類似しており、半径方向圧縮において多くみられる様式である。

別の破壊様式を Photo 6 に示す。この場合は仮道管が横方向の移動を拘束された状態で座屈を起こしたもので、半径壁は弓状に曲げられるとともに接線壁も細胞壁の結合部に働く反力モーメントにより弓状に曲げられる。

これらの早材仮道管の破壊様式の観察結果から、半径方向圧縮における個々の早材仮道管の破壊様式の模式図を Fig. 4 に示す。両図とも木口面における仮道管の状態を示している。(A) の場合は、単一の早材仮道管がせん断応力の影響を受けて横方向へずれるとともに、半径壁には軸方向の応力が作用しているため半径壁は図に示されるような座屈を起こし、結果として潰れる破壊様式を示す。一方、(B) の場合は単一の早材仮道管が半径壁に対して軸方向に働く応力により半径壁は弓状に座屈し、それに伴って細胞コーナー部に働く反力モーメントにより接線壁も弓状に曲げられ、潰れる破壊様式を示す。

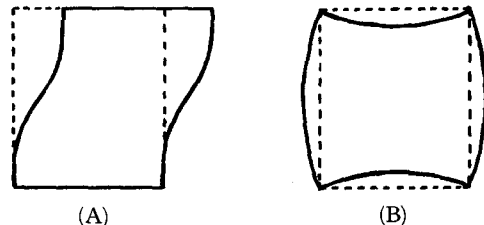


Fig. 4. Schematic representation of failure modes of an earlywood tracheid.

(A) the tracheid buckles sideways  
(B) the tracheid buckles symmetrically  
The original shape of tracheids is indicated by the dotted lines.

#### 4. 結 論

半径方向圧縮による針葉樹材の木口面における細胞・組織の変形・破壊過程を直接連続的に観察して得られた結論は次の通りである。

- (1) 半径方向圧縮による針葉樹材の初期の破壊は、試験片の外側の仮道管が半径方向に潰

れるのを起点として仮道管の潰れが、順次、接線方向へ瞬時に伝達する過程である。

(2) この初期の破壊過程中、早材仮道管は横方向へずれながら座屈し、また破壊後の半径方向の仮道管の列が破壊部で互いにずれているのが観察されることから、仮道管には軸応力とともにセン断応力が作用するものと推察される。

(3) 初期破壊以後の破壊経過は、早材部におけるセン断に対する弱さからくる接線方向へのすべり現象に伴って、仮道管が漸次おし潰され、層状化する過程である。

(4) 個々の仮道管の破壊様式には、横へずれながら座屈する型と横への移動を拘束された状態で座屈する型の2つがあり、前者の破壊様式が多くみられる。

(5) 半径方向圧縮における初期の破壊は非常に短時間内に、急激に起こる現象であったが、これは細胞が荷重方向に対してほぼ規則的に配列していることに起因すると考えられる。

## 5. 要 約

半径方向圧縮による針葉樹材の木口面における変形・破壊過程を SEM と VTR を併用して動的に観察することを試みた。

最初に起こる破壊現象は極めて短時間内に生じた。破壊発生直前まで細胞に顕著な変化はみられず、急激に1年輪内の早材部で破壊が起きた。この破壊は、試験片の外側の仮道管が半径方向に潰れるのを起点として、仮道管が接線方向へ、順次に潰れる過程であった。この初期破壊過程中、仮道管が横方向へずれながら座屈するのがみられた。

圧縮の増加とともに早材仮道管は漸次おし潰され、層状化する過程がみられた。さらに、1年輪内での破壊の進行中に別の年輪に新たな破壊を生じた。この破壊の発達過程において、破壊部で接線方向に互いに亡る現象がみられた。

個々の仮道管の破壊様式には、横へずれながら潰れる型と横への移動を拘束された状態で潰れる型の2つがみられたが、前者の型がはるかに多かった。

## 文 献

- 1) 森 徹：木材の機械的性質に関する二三の研究。建築雑誌，45，881-899 (1931)。
- 2) GABER, E.: Druckversuche quer zur Faser an Nadel-und Laubholzern. Holz Roh-Werkstoff, 3, 222-226 (1940)。
- 3) 北原覚一・蕪木自輔・村木正男：木材の圧縮に関する研究。東大演報，47，1-64 (1954)。
- 4) 山井良三郎：木材の応力-歪曲線 (第1報)。横圧縮応力-歪曲線 (1)。林業試験場研究報告，77，103-152 (1955)。
- 5) 山井良三郎：木材の圧縮異方性に関する研究。林業試験場研究報告，113，57-112 (1959)。
- 6) 沢田 稔：木材の強度特性に関する研究。林業試験場研究報告，108，115-224 (1958)。
- 7) PRICE, A. T.: A Mathematical discussion on the structure of wood in relation to its elastic properties. Philos. Transact. Royal Soc. (London), 228, 1-62 (1929)。
- 8) 金谷紀行・山田 正：木材の多孔性と弾性率について。木材研究，33，47-55 (1964)。
- 9) PERKINS, R. W.: Fundamental concepts concerning the mechanics of wood deformation. Geometrical Models. For. Prod. J., 17, 59-70 (1967)。

- 10) GILLIS, P. P.: Orthotropic elastic constants of wood. *Wood Sci. Technol.*, **6**, 138-156 (1972).
- 11) ROBINSON, W.: The microscopical features of mechanical strains in timber and the bearing of these on the structure of the cell-wall in plants. *Philos. Transact. Royal Soc. London*, **210 B**, 49-82 (1920).
- 12) BODIG, J.: The effect of anatomy on the initial stress-strain relationship in transverse compression. *For. Prod. J.*, **15**, 197-202 (1965).
- 13) Dinwoodie, J. M.: Failure in timber. Part I. Microscopic changes in cell-wall structure associated with compression failure. *J. Inst. Wood Sci.*, **4**, 37-53 (1968).
- 14) KEITH, C. T.: The anatomy of compression failure in relation to creep-inducing stresses. *Wood Sci.*, **4**, 71-82 (1971).
- 15) 東 巽: 杉材の圧縮強度に就きての一考察. *日本林学会誌*, **22**, 687-692 (1940).
- 16) Frey-Wyssling, A. and Stüssli, F.: Festigkeit und Verformung von Nadelholz bei Druck quer zur Faser. *Schweiz. Zeit. Forstwesen*, **99**, 106-114 (1948).
- 17) 高橋 徹: 光弾性皮膜法による木材のひずみ測定 (第8報). 横圧縮ひずみ分布の年輪傾角依存性. *木材学会誌*, **12**, 203-209 (1966).
- 18) KUNESH, R. H.: Strength and elastic properties of wood in transverse compression. *For. Prod. J.*, **18**, 65-72 (1968).
- 19) 王 松 永: 木材集成品の横圧縮に関する研究 (第4報). スンプ法による素材の組織変形の観察. *木材学会誌*, **20**, 172-176 (1974).
- 20) 相内泰三・石田茂雄: 走査型電子顕微鏡による木材の横圧縮変形・破壊について. *日本木材学会北海道支部講演集*, **7**, 1-4 (1975).
- 21) AIUCHI, T. and S. ISHIDA: An observation of the failure process of softwood under compression perpendicular to the grain in the scanning electron microscope. *Mokuzai Gakkaishi*, **24**, 507-510 (1978).
- 22) 朝日新聞社編: アサヒカメラ教室 (6), 特殊写真. 朝日新聞社, 89-99 (1966).
- 23) 金 俊三: 圧縮及び捻り実験による木材の剪断弾性係数の比較に就て. *北大工学部彙報*, **1**, 144-156 (1948).
- 24) 沢田 稔: 直交異方性材料としての木材の弾性および強度. *材料*, **12**, 749-753 (1963).

### Summary

Macroscopical observations on the failure of the softwood compressed transversely have been made by many workers. These observations showed that the failure of the softwood in radial compression always occurred in the relatively weak earlywood layers. Moreover microscopical observations made using optical microscope by several workers showed the general outline of the progressive failure of the softwood in radial compression. However macroscopical examinations of the failure in radial compression have been restricted, in the past, to the detailed observation after failure has occurred, and also optical microscopical examinations have lacked the detailed information on the micro deformation process at the cellular level owing to the limitation of its ability.

Since the failure process is essentially a dynamical process, the need for continuous observation during stressing is evident. However it has been difficult to observe experimentally the details of the process as they take place. In the previous paper the authors tried to observe continuously the failure process of the softwood during compression perpendicular to the grain in the SEM which is equipped with TV-scan and a VTR. It was shown that it was possible to observe in some detail the deformation process at the cellular level by this method. In this paper the changing process in the transverse plane of the softwood block

(Fig. 1) during compression perpendicular to the grain in the radial direction was observed directly to examine the micro deformation at the cellular level using a SEM.

#### 1. Failure process in the initial stage of softwoods in radial compression

It has been observed using optical microscope by Bodig, KUNESH and WANG that the first failure of softwood in radial compression is located in the earlywood layer within an annual ring. However the detailed information on the initial failure process in radial compression is very few.

Photo 1 shows the initial failure process of Todomatsu wood during compression in the radial direction. These SEM micrographs were obtained from the TV images reproduced by the VTR. Photo 1-1 shows the earlywood layer of a particular annual ring just before failure. Remarkable changes of wood tissue are not seen. Subsequently, as shown in Photo 1-2, each ray in the earlywood layer was observed to abruptly buckle sideways and simultaneously earlywood tracheids of each radial row were observed to be crushed in the radial direction. Such crushing of earlywood tracheids was clearly observed to start from both sides (Photo 1-2, arrows) of the specimen and immediately it was observed to occur successively in the tangential direction. It was difficult to observe the instantaneous movement such as cell deformation displayed on a TV-monitor since the phenomenon of failure in the initial stage of radial compression was very rapid. In the present study such problem was overcome in some degree by using a VTR for stop-motion. Photo 2 shows the details of the initial failure process of Ezomatsu wood. This photograph was obtained from a stationary image of VTR. This micrograph clearly gives evidence that crushing of earlywood tracheids occurs progressively from the outside of the specimen. It should be noticed that earlywood tracheids were clearly observed to buckle sideways as shown in Photo 2 (arrow) in the initial failure process. Photo 3 shows a SEM micrograph taken after the initial failure shown in Photo 1-2. Rays in the earlywood layer were clearly buckled and earlywood tracheids were crushed due to the breaks of their radial walls. While tracheids adjacent to the crushed cells were relatively unchanged. These observations give evidences that the initial failure in radial compression occurs as a result of the local failure in the earlywood layer of a particular annual ring.

#### 2. Failure development of the softwood in radial compression

Photo 4 shows failure development within an annual ring of Karamatsu wood compressed radially. As the compression progresses, additional failures occurred in the same (Photo 4-1) and in another earlywood layers (Photo 4-2, arrow). Such progressive failure in radial compression agrees with those observed using optical microscope by other workers. Moreover it was noticed that the failure zone of the earlywood layer developed by the process in which the tangential plane normal to the direction of a compressive stress slide relative to one another. As pointed out by many workers, this phenomenon is due to low shear rigidity in the transverse plane of softwood. A series of SEM micrographs shown in Photo 5 shows the failure process of an earlywood tracheid during compression. Because of shearing action in the tangential plane of the earlywood layer, the tracheid displaces laterally (Photo 5-1) and immediately the radial walls buckle abruptly as shown in Photo 5-2. While tangential walls of the tracheid were relatively unchanged. Eventually the tracheid was crushed due to breaks of radial walls (Photo 5-3). Photo 6 shows another buckling failure of an earlywood tracheid. Radial walls of the tracheid buckled severely due to normal stresses. This buckling was

accompanied by the bending of tangential walls due to reactive moments acting at the juncture of the cell wall. In this case it is considered that lateral movement of the tracheid was restricted to circumferential effect. From the detailed observations made using the SEM, the importance of structural geometry to cell deformation was demonstrated more clearly.

### Explanation of photographs

\* The compressive force loaded is in a direction from top to bottom of each photograph.

\* All the photographs show transverse surfaces of softwoods.

**Photo 1.** SEM micrographs showing the initial failure process of Todomatsu wood during compression in the radial direction. Photographs were obtained from the TV images reproduced by the VTR. 1: the earlywood layer of a particular annual ring just before failure. 2: each ray in the earlywood layer abruptly buckled sideways and simultaneously earlywood tracheids of each radial row were crushed in the radial direction. The crushing of earlywood tracheids started from both sides (arrows) of the specimen and occurred successively in the tangential direction.  $\times 70$

**Photo 2.** SEM micrograph showing the details of the initial failure process of Ezomatsu wood. The photograph was obtained from a stationary image of the VTR. The crushing of earlywood tracheids occurs progressively from the outside of the specimen. Note that an earlywood tracheid (arrow) buckles sideways just now.  $\times 180$

**Photo 3.** SEM micrograph taken after the initial failure shown in Photo 1-2. Rays in the earlywood layer buckle clearly and earlywood tracheids are crushed due to the breaks of their radial walls. Note that tracheids adjacent to the crushed cells are relatively unchanged and that each radial row slides one another in the crushed areas.  $\times 110$

**Photo 4.** SEM micrographs showing failure development within an annual ring of Karamatsu wood compressed radially. 1: after the first failure additional failures occur in the earlywood layer. note that the failure zone of the earlywood layer develops by the process in which the tangential plane normal to the direction of a compressive stress slide relative to one another. 2: as compression progresses failure occurs in another earlywood layer (arrow).  $\times 60$

**Photo 5.** A series of SEM micrographs showing a failure process of an earlywood tracheid of Todomatsu wood during compression. 1: the tracheid displaces laterally due to shearing action in the tangential plane of the earlywood layer. 2: immediately radial walls of the tracheid buckle. 3: the tracheid is crushed due to breaks of radial walls.  $\times 330$

**Photo 6.** SEM micrograph showing buckling failure of an earlywood tracheid of Todomatsu wood. Radial walls of the tracheid buckle severely. Note that this buckling is accompanied by the bending of tangential walls due to reactive moments acting at the juncture of the cell wall.  $\times 1,700$

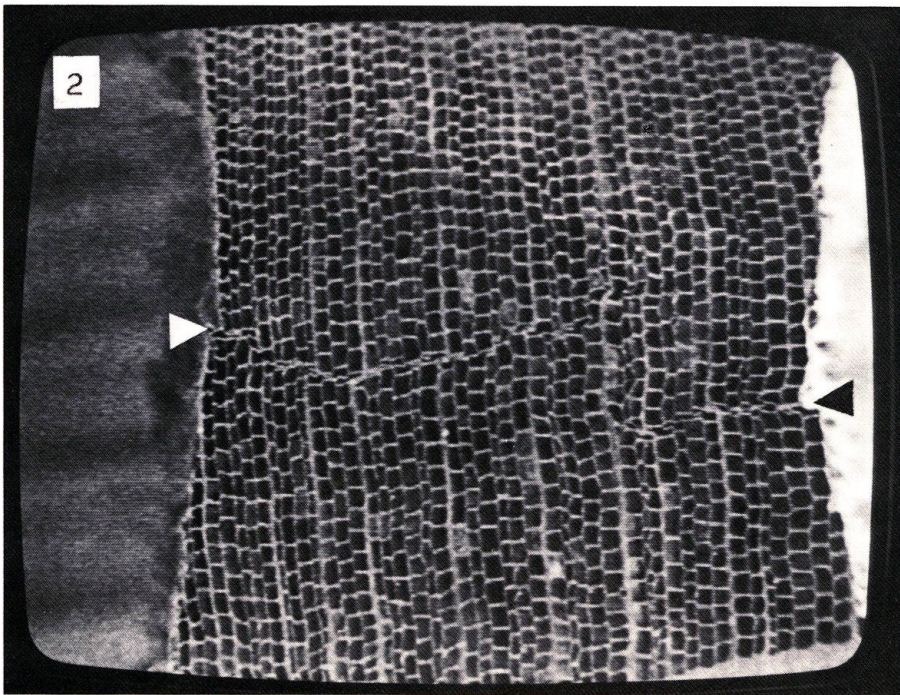
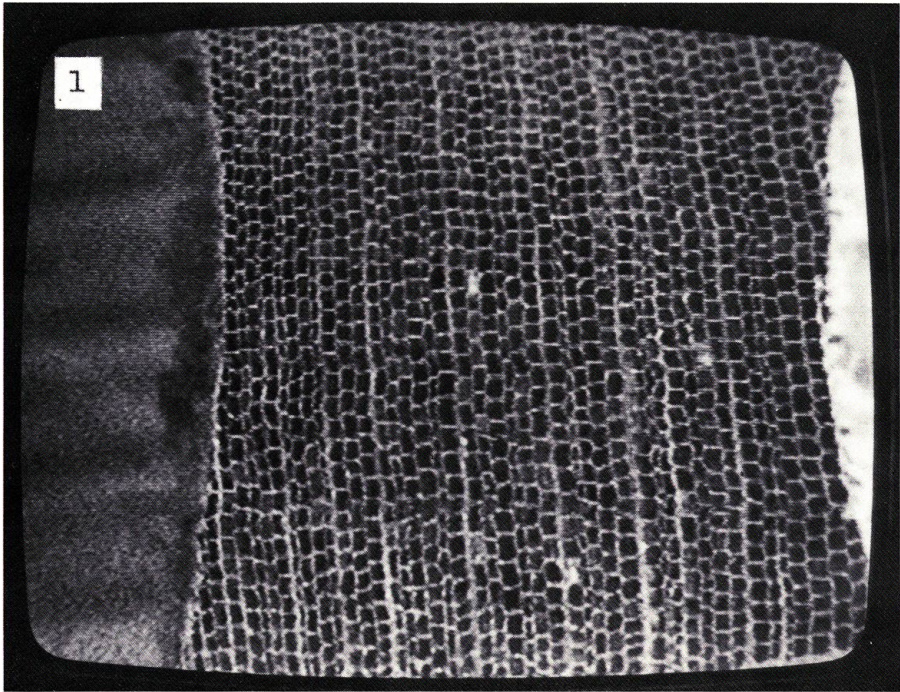


Photo 1

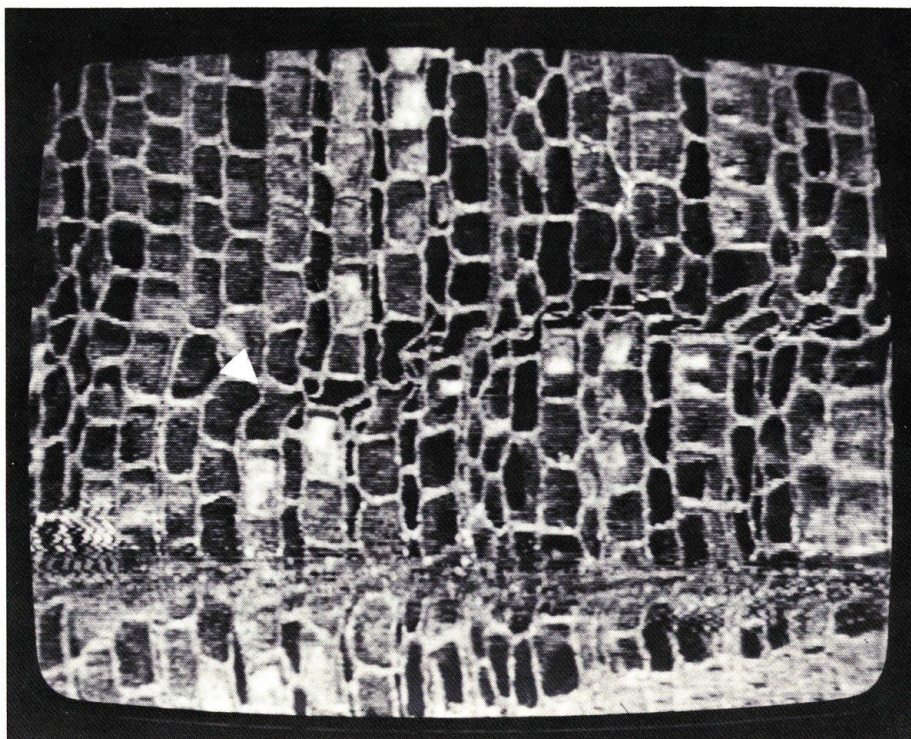


Photo 2

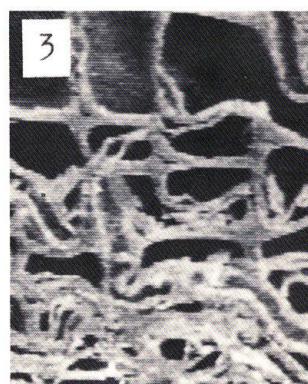
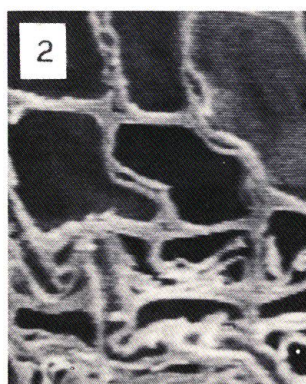
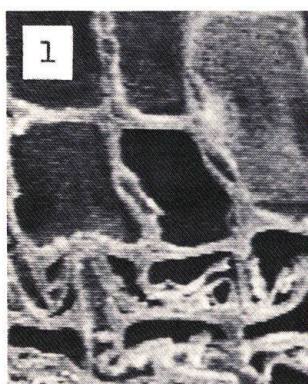


Photo 5

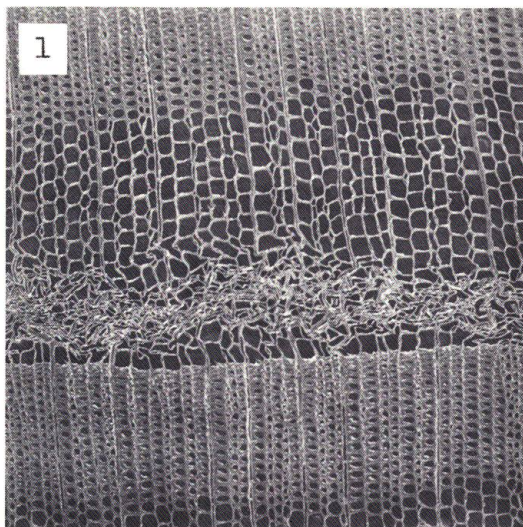


Photo 3

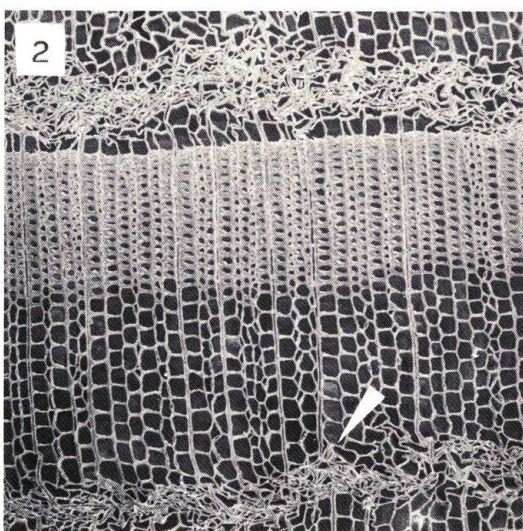


Photo 4

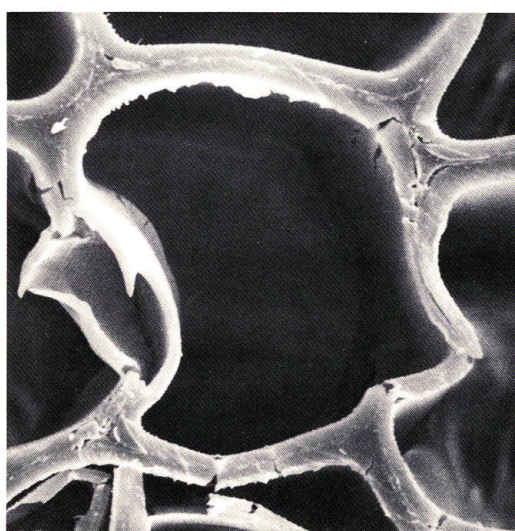


Photo 6