



Title	超軟X線による木材内部構造に関する一研究
Author(s)	石田, 茂雄; 大谷, 諄; 黒沢, 厚基; 今川, 一志
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 25(1), 35-60
Issue Date	1967-11
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/20845
Type	bulletin (article)
File Information	25(1)_P35-60.pdf



[Instructions for use](#)

超軟 X 線による木材内部構造 に関する一研究

石田茂雄* 大谷 諄**
黒沢厚基*** 今川一志****

A Study on the Inner Structure of Wood by
the Ultra-soft X-ray

By

Shigeo ISHIDA, Jun OHTANI, Koki KUROSAWA
and Hitoshi IMAGAWA

目 次

緒 言	36
I. 超軟 X 線とその発生装置	37
1. 超軟 X 線の特性と X 線像	37
2. 使用した超軟 X 線装置	38
II. 超軟 X 線による木材組織の観察	38
1. 供試材および実験方法	38
2. 結果と考察	39
III. 超軟 X 線による木材比重分布の測定	41
1. 試験片および実験方法	42
2. 結果と考察	44
IV. 超軟 X 線による合板内部の観察	54
1. 供試材料および実験方法	54
2. 結果と考察	55
要 結	57
参 考 文 献	58
Summary	58
写 真	61

* 北海道大学農学部林産学科 教授 林学博士

** 北海道大学農学部林産学科 助手

*** 北海道大学農学部農学科 学生

**** 北海道大学農学研究科 (林産学専攻)

緒 言

X線が木材質をよく透過する性質をつかって、木材の内部形態を外部から非破壊的に観察調査しようとする試みは、X線透視技術の発達とともにかなりはやくから行なわれてきた。しかし、他の工業分野たとえば金属工業などにおいてその内部観察検査のためにX線が比較的広く、かつ効果的に用いられてきたのに比べれば、木材工業におけるその利用はほとんど問題とするに足らない。工業生産面における各種技術の適用はその経済性に左右されることは勿論であり、木材工業においてX線があまり使われていない現状にはいろいろな事情が関係しているものと思われる。しかし、一面その適用の可能性についての機器、適用法両面からの技術的検討が十分でないとも考えられる。

数年前から波長の非常に長いいわゆる“超軟X線”による木材組織研究ないしは木材の非破壊検査に関する若干の報告が出されている^{1)~11)}。このX線は管球電圧5~20kVPから発生する波長0.5~2.5Åのもので、普通の医療用あるいは工業用として使われている軟X線(0.1~0.5Å)、硬X線(0.05~0.1Å)、……などに比べるとかなり長い波長のX線である。一方この超軟X線は、同じく一種の電磁波である可視光線に比べるとその1/1000以下の短波長のものである。

このような波長特性が、従来適用を試みられ乍らあまりその効果を発揮しなかったX線による木材の構造研究にあらたな進展をもたらし、又合板、削片板……などの木質材料、木材接合部などの細部の非破壊検査に効力を発揮するものと考えられるが、上掲論文にもそれらの若干例が報告されている。

X線透視像は言うまでもなく、ある立体的構造の平面投影像であり、これから内部的立体構造をよみ取るには両者の関係をあらかじめ十分に調べておかなければならない。このことは木材に適用される場合も全く同様であり、木材の正常組織、自然的・人為的異常組織、木材の実質量分布、……などについての透過X線像による検討が、その実際的な適用に際しての最も基礎的かつ不可欠のことがらである。このような見地から、筆者らは木材の非破壊検査の基礎となるべき木材組織そのもの、また木材実質量の指標である比重の分布に関する若干の観察測定をおこない、さらに木材加工製品の一つとしての合板の内部観察への超軟X線の適用の可能性について検討した。また、予備的な段階ではあるがその結果の概要を報告する。

本研究の一部は北海道科学研究費補助金によってすすめられた。ここに記して厚く謝意を表す。

I. 超軟 X 線とその発生装置

1. 超軟 X 線の特性と X 線像

超軟 X 線とは、管球電圧約 5~20 kVP から発生する波長約 0.5~2.5 Å の X 線のことであり、普通の医療用あるいは工業用に用いられている軟 X 線 (波長 0.1~0.5 Å), 硬 X 線 (波長 0.05~0.1 Å), あるいはさらに波長の短い超硬 X 線にくらべるとかなり波長の長い X 線である。一方この超軟 X 線は、同じく一種の電磁波である可視光線にくらべると 1/1000 以下の短波長のものである。

このような波長特性が、この X 線の物質透過性を特徴づけ、これを木材に適用する場合、ある厚さをもった木材の内部構造のかなり微細なところまでの観察を可能にするように思われる。

X 線が物質中を通過するとその強さは次第に減少する。この減少の程度は、X 線の波長、物質の種類、厚さおよび密度によって異なる。

いま、波長 λ の X 線が、原子番号 z , 厚さ d , 密度 ρ の物質層に垂直に入射する場合 (Fig. 1), 吸収層の表面での入射 X 線の強度を I_0 , 吸収層通過後の X 線の強度を I とすれば、その関係は実験的に次式で表わされる¹²⁾。

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (1)$$

上式において、 μ は吸収係数と呼ばれ、 $\mu = az^3 \rho \lambda^3$ (但し a は比例定数) で与えられる。

X 線は写真作用を有するから、ある物質をとおして X 線をフィルム上に曝射し、その内部構造をフィルム上で観察することが出来る。フィルム面上の X 線像が被写体の構造を忠実に示すかどうかは、極めて簡単な構造の場合は別として、一般には被写体の種々雑多な部分によりフィルム上に投影された像は個々の像の重畳したものとして示されるから、これから実際のものの構造、空間的位置を知る事は簡単ではない。ただ像が比較的単純であり、内部構造一般がよくわかっている場合には、像と被写体の対応が明瞭であり、その像からそれに対応する内部構造を読みとることができる。

いま、被写体に当る直前の X 線強度を I_0 , 被写体の隣接する二つの部分を透過した後の X 線強度をそれぞれ I_1, I_2 とすると、X 線対照度は I_1/I_2 , 又は $\log_{10} I_1/I_2$ であたえられ、この比が大きい程その二つの部分は X 線によって区別され易いことになる。又 (1) 式からも明らかなようにこの比は X 線の波長 λ の大きい程大きくなる。即ち波長の長い X 線を用いる程 X 線による対照度はよくなる。

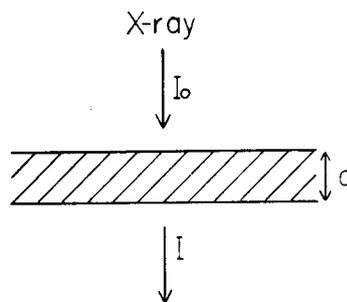


Fig. 1. A sketch showing absorption of X-ray.

2. 使用した超軟 X 線装置

実験に使用した超軟 X 線発生装置は大日本ソフテックス社製 Softex IE 型であり、使用電圧は 0~30, 0~60 kVP の 2 段切替式である。X 線発生管球は KM-2 (Softex) 型で焦点の大きさは 2.0 mm×2.0 mm である。

II. 超軟 X 線による木材組織の観察

上述のような非常に長い波長の X 線 (0.5~2.5 Å) によって、いわゆる木材の細胞組織が、ある程度厚い木片 (たとえば数 mm 以上、したがって JONGEBLOED ら⁴⁾ とは立場を異にする。) においてどの程度まで観察されるかということが問題である。ここでは使用 X 線の諸条件、試験片の厚さおよび方向 (木理)、写真撮影条件などとの関係について若干の針・広葉樹材を供試材として検討する。

1. 供試材および実験方法

i. 供 試 材

供試材は、針葉樹としてエゾマツ (*Picea jezoensis* CARR.), 広葉樹としてハルニレ (*Ulmus davidiana* PLANCH. var. *japonica* NAKAI) をそれぞれ代表例としてえらんだ。

これらの気乾材から X 線透過方向 (木材の三基本方向) の厚さ 5.0~11.0 mm の試験片を多数作製し、X 線写真撮影あるいは透視観察に供した。

ii. X 線撮影および X 線写真

試験片の X 線像の観察は、いわゆる透視法では木材組織の細部まではよくわからないので、透視法によらず、もっぱら、撮影された X 線フィルムにより行なわれた。

X 線写真撮影の概略は Fig. 2 に示す通りである。フィルムは黒い遮光紙の袋に入れて、X 線照射口の下に置き、試験片をその上に密着させて撮影した。

使用フィルムは Fuji Softex F. G. (微粒子用) で、その大きさはキャビネ版であり、フィルムの現像は下記に示す規定条件に従った。

現像液 (Fuji Rendol)	5 (min.)
停止液 (1% 酢酸液)	1 (min.)
定着液 (Fuji Renfix)	10 (min.)

(上記液温はすべて 20°C である)

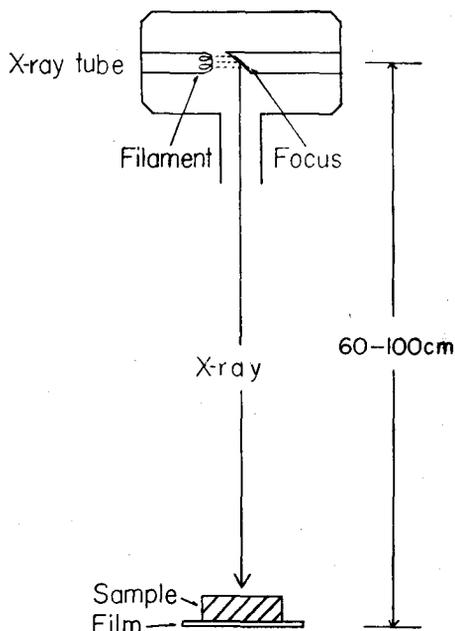


Fig. 2. Outlined arrangement of the ultra-soft X-ray photography.

一般に優良な X 線写真とは、1) 歪形のないもの、2) 対照度 (コントラスト) の良好なるもの、3) 鮮鋭度の大きなものとされている。まず予備実験として、各試験片につきいろいろな条件で X 線撮影し規定現像された撮影フィルム面上で上記の諸点を考慮し観察した結果得られた最適な条件を本実験のそれぞれの撮影条件とした。各試験片の撮影条件は Table 1 に示す通りである。

Table 1. Specimens used and the ultra-soft X-ray photographic conditions.

Photo No.	Specimens				Ultra-soft X-ray photographic conditions			
	Japanese name and genus name	Surface irradiated by the X-ray	Thickness in X-radiation direction (mm)	Moisture condition	Tube voltage (kVP)	Tube current (mA)	Irradiation time (sec)	Film-focus distance (cm)
1	Kara-matsu, <i>Larix</i>	transverse	10	air-dry	19	5	60	100
2	Ezo-matsu, <i>Picea</i>	"	4	"	12	4	100	60
3	"	radial	5	"	10	6	180	60
4	"	tangential	5	"	10	6	180	60
5	"	"	5	"	10	6	180	60
6	Haru-nire, <i>Ulmus</i>	transverse	5	"	10	6	240	60
7	"	radial	11	"	10	6	720	60
8	"	tangential	11	"	12	4	96	60
9	Ezo-matsu, <i>Picea</i>	transverse	16	green	12	4	20	60
10	"	"	16	air-dry	12	4	90	60
11	Ezo-itaya, <i>Acer</i>	radial	18	"	20	6	40	60

iii. 観察方法

撮影された X 線フィルムの観察はすべていわゆる Schaukasten (蛍光灯入り観察箱) 上で肉眼又は低倍率光学顕微鏡で行なったが、同時に試験片を適宜切断し主として光学顕微鏡により、X 線像と対応させながら、その構造の確認を行なった。

2. 結果と考察

実験結果の一部を、撮影されたフィルムを焼付けした陽画写真で示し個々につき順次説明することにする。写真は便宜上附図として後に一括掲載する。

Photo 1 は下方が樹心、上方が樹皮方向で 5 年輪にわたるカラマツ材横断面の X 線写真 (横断面に X 線を垂直に照射し撮影したもの。以下同様) である。春材は淡く、夏材は濃く示されている。年輪界は非常に明瞭であり、春材から夏材への推移の急激な状態がその部分の濃淡差として極めて明瞭に示されている。上から第 2, 4, 5 年輪内に散在する数個の黒い点々は垂直樹脂道である。又このフィルムを部分的に拡大して観察した結果、仮道管の配列、放射組織の走向など構成細胞単位まで判読することが出来た。

Photo 2 は下方が樹心、上方が樹皮方向で13年輪にわたるエゾマツ材横断面である。春材は比較的淡く、夏材は濃くあらわれ、年輪界は非常に明確である。Photo 1にくらべ春材から夏材への推移のゆるやかな状態が、その濃淡差として明瞭にわかる。個々の年輪内(写真の中央部2年輪を除く)に散在する黒い点々は垂直樹脂道である。X線照射方向と垂直樹脂道の走向が一致している場合、垂直樹脂道は点としてあらわれるが、それらが一致していない場合、それはやや細長い黒い線状にあらわれる(写真左側の部分)。

Photo 3 は左方が樹心、右方が樹皮方向で11年輪にわたるエゾマツ材柾目面(柾目面にX線を垂直に照射し撮影したもの)である。年輪界、春材・夏材の区別、春材から夏材への推移状態はPhoto 2と同様に明瞭である。右方から第2, 4, 5, 6年輪目の各年輪中央部に縦に走る黒い線は垂直樹脂道である。又放射組織の走向も左右に走る線として認められる。

Photo 4 はエゾマツ板目面(板目面にX線を垂直に照射し撮影したもの)である。右方の黒い大きな紡錘形の部分は節である。写真中央部において小さな黒い点として数多く認められる部分が紡錘型放射組織であり、さらに小さな無数の細い黒い線が単列放射組織である。これらより紡錘型放射組織、単列放射組織の分布が判読出来る。写真中央部が特に鮮鋭度がよいのはX線照射方向と放射組織の方向が一致している結果であり、写真左右両端の鮮鋭度があまりよくないのはそれらが一致していないためである。上下方向に走る白い細い線は仮道管であり、節附近の繊維方向が乱れているのがわかる。

Photo 5 はPhoto 4の中央部をさらに拡大した写真である。Photo 4で説明した紡錘型放射組織、単列放射組織が詳細に認められ、前者中央部の白い点は水平樹脂道である。さらにフィルムを拡大鏡でみれば、撮影条件によっては紡錘型・単列放射組織を構成している各細胞まで識別出来る。

Photo 6 は下方が樹心、上方が樹皮方向の9年輪にわたるハルニレ横断面である。年輪内の孔圏内道管、孔圏外道管の配列状態が年輪幅により異なることがよくわかる。即ち写真下方の年輪幅の狭い年輪では、孔圏内の大道管はほぼ2列であり、孔圏外の小道管は連合して数列波状を呈する。ところが写真の上から3, 4番目の広い年輪においては、明らかに道管配列状態により一年輪が3つの層に区別出来る。即ちまず3~4列の大道管の配列があり、次に径の少し小さな道管の波状配列があり、さらに狭い年輪の場合と同様小さな道管の連合した数列の波状配列がある。又上下方向に数多く走る黒い線は放射組織である。

Photo 7 は左方が樹心、右方が樹皮方向の8年輪にわたるハルニレ材柾目面である。年輪界、春材から夏材への推移、道管の配列方向など識別出来、又放射組織は横方向に走る黒い線として認められる。

Photo 8 はハルニレ材の板目面である。写真中央部に無数に散在する黒い小さな紡

錘形が放射組織である。Photo 4, 5 からわかるように放射組織の型, 分布などは板目面で極めて明瞭に判読出来る。

Photo 9 は下方が樹心, 上方が樹皮方向の 11 年輪にわたるエゾマツ水喰材の (生材) 横断面で **Photo 10** は Photo 9 と同一試験片の気乾材である。Photo 9 において上半分の黒い部分が, 水喰材部分の自由水の存在を示す部分であり, 個々の仮道管あるいはその数個単位内の自由水の分布状態が明瞭にわかる。Photo 10 に示されているように, 気乾材では Photo 9 のような水分分布は示されず, 正常材と同様である。なお Photo 9 の下半分の個々の年輪内に散在する黒い細長い点は Photo 10 からわかるように垂直樹脂道である。

Photo 11 はかなすじ (mineral streak) を含むエゾイタヤ材の柾目面である。かなすじは鉱物質が沈積したものと考えられるが, 正常な木部に比べ X 線の吸収が非常に著しく, 写真左側の暗色部として明瞭にあらわれる。中央部の暗色部は入皮であり, その附近の複雑な組織形態が示されている。これらのかなすじ, 入皮などは, 試験片の表面からはわからないものであった。

以上説明したように, 適正な X 線, 写真撮影条件をえらべば, ある程度以上厚い (例えば数 mm 以上) 試験片を用いて木材の年輪構造から構成細胞単位まで観察することが出来る。即ち木口面, 柾目面では, 主として仮道管, 道管の配列, 垂直樹脂道の分布状態 (Photo 1, 2, 3, 6, 7) などが, 又板目面では, 主として放射組織の形, 分布 (Photo 4, 5, 8) などが観察出来た。

X 線照射方向と木材構成細胞の配向が一致した場合にその細胞の最も鮮鋭度の高い観察しやすい X 線写真像が得られるわけである (Photo 4, 8)。X 線の性質と木材組織とを考慮すれば, X 線照射方向と構成細胞の配向を完全に一致させることは非常にむずかしいが, X 線装置, 撮影される木材試験片の厚さ, 焦点と撮影フィルム間の距離などを必要に応じて変えることによりある程度それは可能であると思われる。

節, 附近の繊維の乱れ, 水喰材, かなすじのような異常組織, 異常材部は実験に供した試験片では, 表面から肉眼でそれらを確認出来ないものであったが, X 線により試験片内部の状態を明確に観察することが出来た。特に水喰材, かなすじは, 水やある種の鉱物質の特異な X 線吸収にもとづくためであるが, これらについてはさらに詳細な研究を進めなければならない。

III. 超軟 X 線による木材の比重分布の測定

木材の物理的性質に大きな影響を与える要素の一つは, 木材単位容積中の細胞膜質の量であり, それは比重として示されるから, 木材の比重は, その物理的性質の最も有効な

指標の一つとみなすことが出来る。

従って木材の比重を迅速且つ正確に測定することは重要であり、種々の方法が検討されているが、ここでは超軟 X 線による個々の木材片の平均比重 (実験 I) と 1 年輪内におけるその分布 (実験 II) について検討する。

1. 試験片および実験方法

i. 試験片

実験 I: 一木材片の平均比重とその木材片を透過した X 線によるフィルム像の平均濃度との関係を検討するために下記の樹種をえらんで実験をおこなった。

和 名	学 名
エゾマツ (Ezo-matsu)	<i>Picea jezoensis</i> CARR.
カラマツ (Kara-matsu)	<i>Larix leptolepis</i> GORD.
スギ (Sugi)	<i>Cryptomeria japonica</i> D. DON
アサダ (Asada)	<i>Ostrya japonica</i> SARG.
ウダイカンバ (Udai-kanba)	<i>Betula maximowicziana</i> REGEL
ブナ (Buna)	<i>Fagus crenata</i> BLUME
カツラ (Katsura)	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> SIEB. et ZUCC.
ホオノキ (Hô-no-ki)	<i>Magnolia obovata</i> THUNB.
アズキナシ (Azuki-nashi)	<i>Sorbus alnifolia</i> C. KOCH
エゾイタヤ (Ezo-itaya)	<i>Acer mono</i> MAXIM. var. <i>glabrum</i> HARA
ミズナラ (Mizu-nara)	<i>Quercus crispula</i> BLUME
ハルニレ (Haru-nire)	<i>Ulmus davidiana</i> PLANCH. var. <i>japonica</i> NAKAI
コシアブラ (Koshi-abura)	<i>Acanthopanax sciadophylloides</i> FRANCH. et SAVAT.
ヤチダモ (Yachi-damo)	<i>Fraxinus mandshurica</i> RUPR. var. <i>japonica</i> MAXIM.
カプール (Kapur)	

これらの気乾材より、比重の異なる木理に平行な二方柱の立方体小試験片 (放射方向 1 cm, 接線方向約 1 cm, 繊維方向約 2.5 cm) を 24 個作製した。各試験片は少なくとも 2 年輪を完全に含むように木取りし、表面は Jung 社製の大型マイクロトームで仕上げた。

実験 II: 年輪内の比重分布測定試験片として、エゾマツ、カラマツ気乾材から繊維方向 1 cm (放射方向約 2.5 cm, 接線方向約 1 cm) の小試験片を作製した。

なおすべての試験片は、X 線写真撮影時の気乾比重、含水率を求めた。

ii. 超軟 X 線写真撮影方法

X 線像の歪みをなくするために、焦点とフィルムの距離をできるだけ長く (本実験では 1 m) し、黒い遮光紙につつんだ X 線フィルム上に試験片を密着させて置き撮影した。

X 線照射方向は、実験 I では各試験片の材の組織・不均一性を考慮し放射方向

に、実験 II では繊維方向に、それぞれ一致させた。

X 線撮影条件は一貫して下記の通りであった。

管電圧 (二次電圧)	19 kVP
管電流	5 mA
照射時間	1 min.

使用フィルム、フィルム現像条件は II (38 頁掲載) と同じである。

iii. 濃度の測定

ある黒さのフィルムで光をさえぎってみるとそれが黒い程フィルムを透過して来る光の強さは弱くなる。投射光の強度を I_0 、透過光のそれを I_1 とすれば、 I_1/I_0 を透明度、 I_0/I_1 を不透明度と呼び、そのフィルムの濃度 (Optical density) は次のように定義される。

$$S = \log_{10}(I_0/I_1) \quad (2)$$

各試験片を X 線撮影したフィルムの濃度をナルミ製マイクロフォトメーター NLM-VII 型により次の方法で測定した。マイクロフォトメーターのスリット面積を $20 \mu \times 250 \mu$ に固定し、Fig. 3 に示すように、撮影フィルムを、実験 I では試料の接線方向に、実験 II では放射方向に走査させ、それらの濃度曲線を記録測定した。実験 I では、各々の試験片につき撮影されたフィルムの走査距離約 1 cm の濃度曲線から 1/4 mm 間隔に濃度の値を読みとり、その値を算術平均し、各試験片の平均濃度とした。

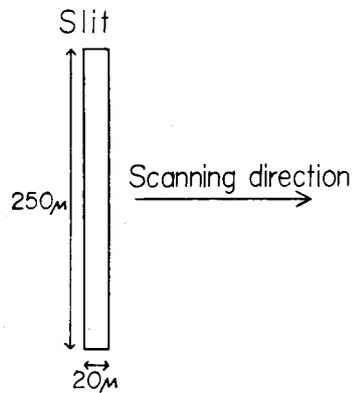


Fig. 3. Slit size of the densitometer used for measurement of the specific gravity of specimens from the film which moves to the scanning direction.

iv. 木材の比重とフィルム濃度¹¹⁾

フィルムの濃度は透過 X 線量に関するから、(1) 式より明らかなように、X 線の波長、物質の原子番号、密度、厚さにより決定される。

木材の元素組成は、特殊なものを除いて樹種、樹幹内の各部位によって殆んど差がない¹³⁾ から、使用した木材試験片の原子番号は一定とみなす。

いま、試験片の厚さ d 、原子番号 z 、入射 X 線の波長がすべて一定とすれば、(1) 式は次のようになる。

$$I = I_0 e^{-k\rho d} \quad (3)$$

ここに I : 試験片透過後の X 線の強度 ρ : 試験片の密度
 I_0 : 試験片表面の入射 X 線の強度 k : 定数

さて、フィルム濃度の低い範囲では、その撮影条件、現像条件が一定ならば、フィルムの黒さは、そのフィルムへの入射 X 線エネルギーに比例する。 I, I_0 に対するフィルムの不透明度を O, O_0 、フィルム濃度を S, S_0 とすれば、次式が成立する。

$$O = O_0 e^{-k\rho} \quad (4)$$

両辺の対数をとれば、

$$\log_{10} O = \log_{10} O_0 - (\log_{10} e) k\rho \quad (6)$$

即ち

$$S = S_0 - (\log_{10} e) k\rho \quad (6)$$

したがって、フィルム濃度 S は試験片の密度 ρ 、即ち木材試験片の容積比重の一次関数で示される。

実験 I においては iii で求めたフィルムの平均濃度と撮影時に測定した気乾比重から両者の相関関係を検討し、濃度と比重の関係式を実験的に求めた。

実験 II では、実験 I で求めた実験式より濃度に対する比重の値を求め濃度曲線によって年輪内の比重分布を検討した。

2. 結果と考察

i. 比重と濃度の関係

実験 I での各々の試験片の X 線フィルム濃度曲線とこの濃度曲線を得た X 線フィルムからの陽面写真を Fig. 4 (1~24) に示す。

Fig. 4. Optical density curves of the specimens obtained by the densitometric scanning of their X-radiation films. Scientific names of species studied are in page 42.

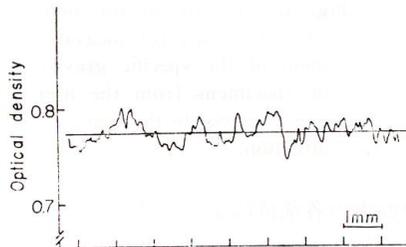


Fig. 4-1. Ezo-matsu (heartwood)

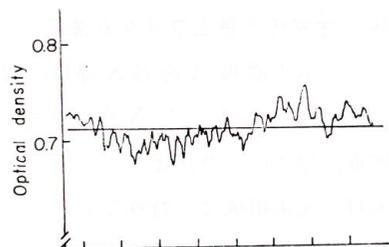


Fig. 4-2. Kara-matsu (heartwood)



Fig. 4-3. Kara-matsu (sapwood)

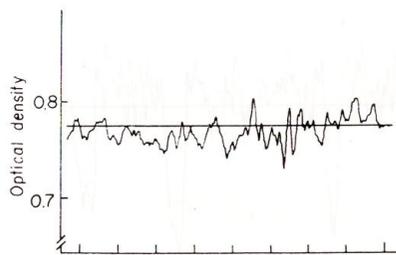


Fig. 4-4. Sugi (heartwood)

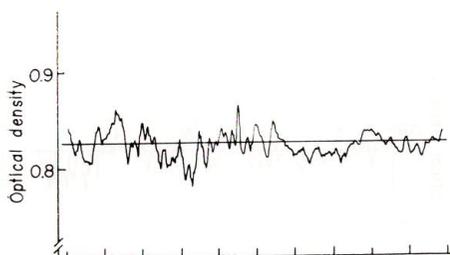


Fig. 4-5. Sugi (sapwood)

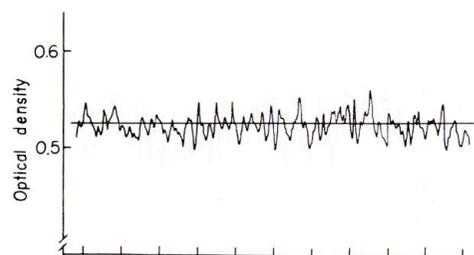


Fig. 4-6. Asada (heartwood)

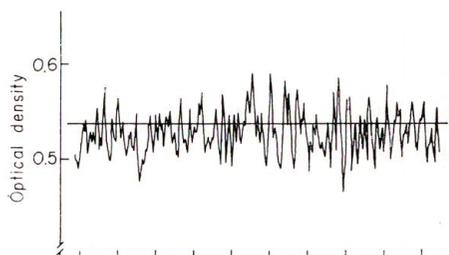


Fig. 4-7. Asada (sapwood)

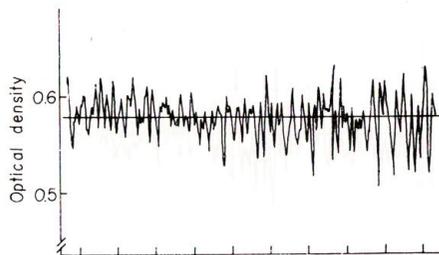


Fig. 4-8. Udai-kanba (sapwood)

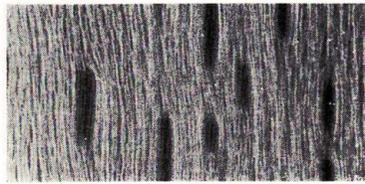
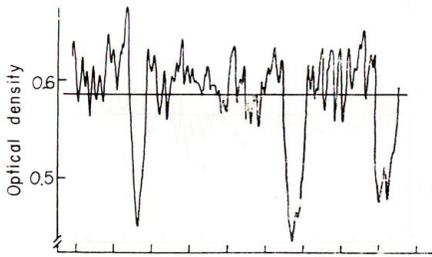


Fig. 4-9. Buna (sapwood)

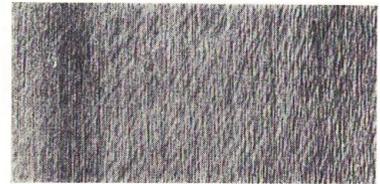
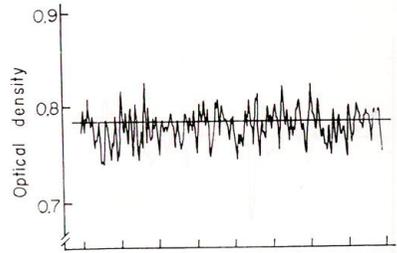


Fig. 4-10. Katsura (heartwood)

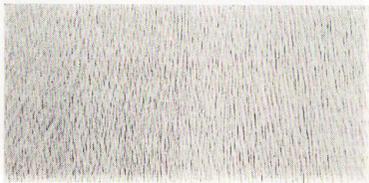
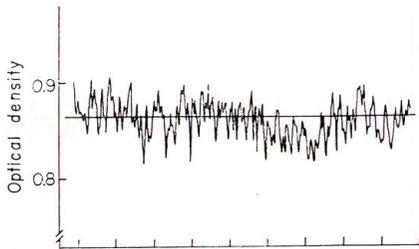


Fig. 4-11. Katsura (sapwood)

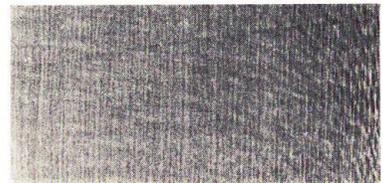
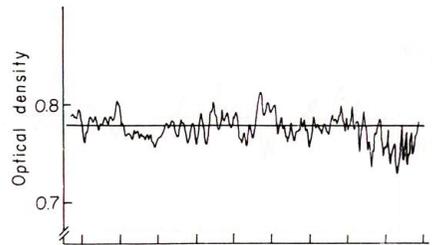


Fig. 4-12. Hô-no-ki (heartwood)

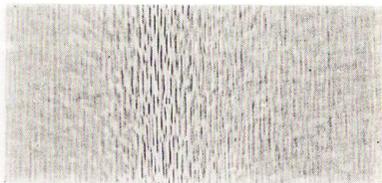
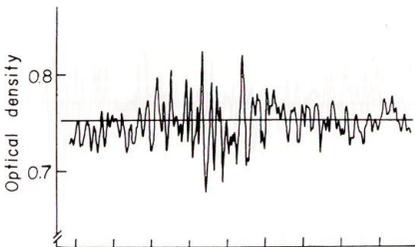


Fig. 4-13. Hô-no-ki (sapwood)

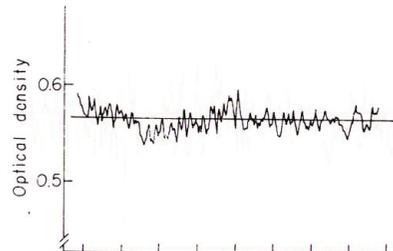


Fig. 4-14. Azuki-nashi (heartwood)

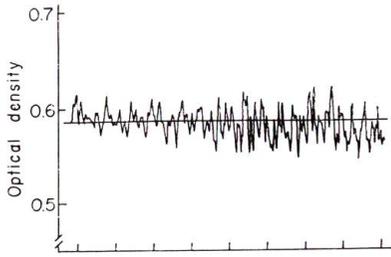


Fig. 4-15. Azuki-nashi (sapwood)

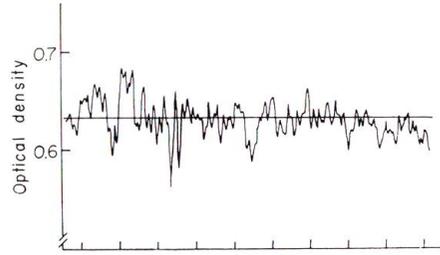


Fig. 4-16. Ezo-itaya (sapwood)

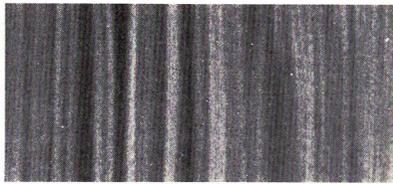
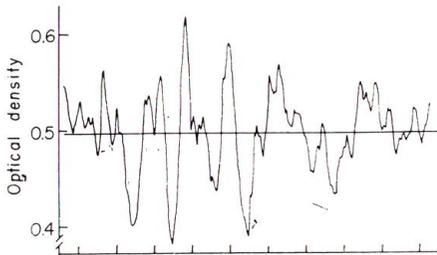


Fig. 4-17. Mizu-nara (heartwood)

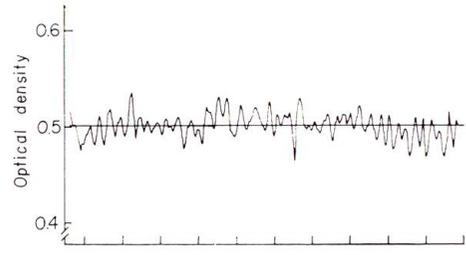


Fig. 4-18. Haru-nire (heartwood)

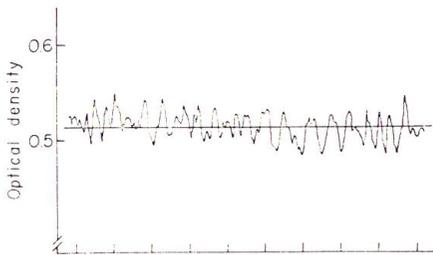


Fig. 4-19. Haru-nire (sapwood)

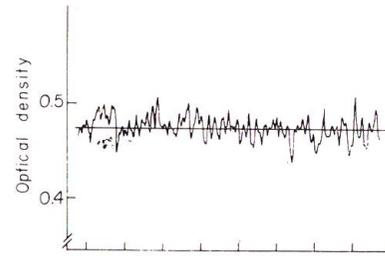


Fig. 4-20. Koshi-abura (heartwood)

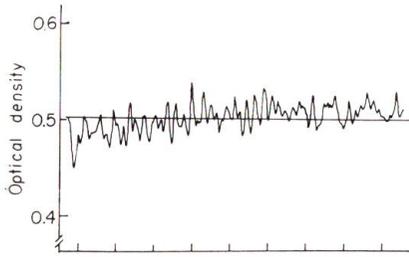


Fig. 4-21. Koshi-abura (sapwood)

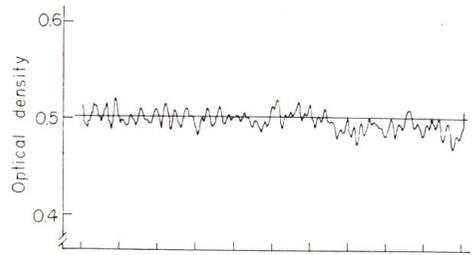


Fig. 4-22. Yachi-damo (heartwood)

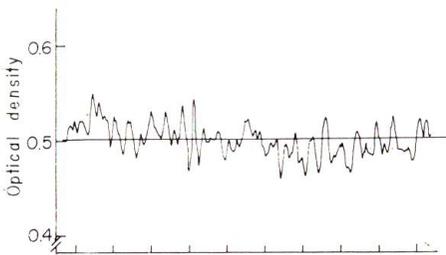


Fig. 4-23. Yachi-damo (sapwood)

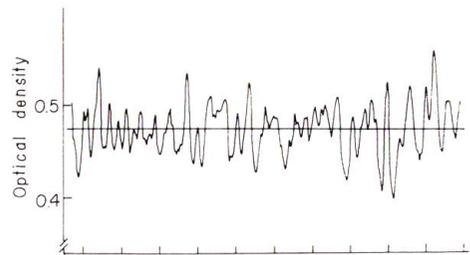


Fig. 4-24. Kapur

本実験では、それぞれの試験片について、X線照射方向と構成細胞の配向の関係が必ずしも同じでないため、それらの濃度曲線の詳細な比較は出来ないが、Fig. 4より明らかのように、濃度曲線の形は樹種により異なる。特にブナ (Fig. 4-9)、ミズナラ (Fig. 4-17)では、他の樹種にくらべ濃度の差が大きいのは、放射組織の影響が現われたためであると考えられる。

各試験片のX線写真濃度曲線からそれらフィルムの平均濃度を求め、これを実測された気乾比重と対照検討した。各試験片の気乾比重とそのフィルムの平均濃度の値をTable 2に、又それらの関係をFig. 5に示す。

試験片の実測気乾比重は、0.357 (カツラ辺材)~0.754 (ミズナラ心材)であり、Fig. 5より明らかのように濃度と気乾比重は負の相関関係にあり、相関係数 -0.992 、回帰直線

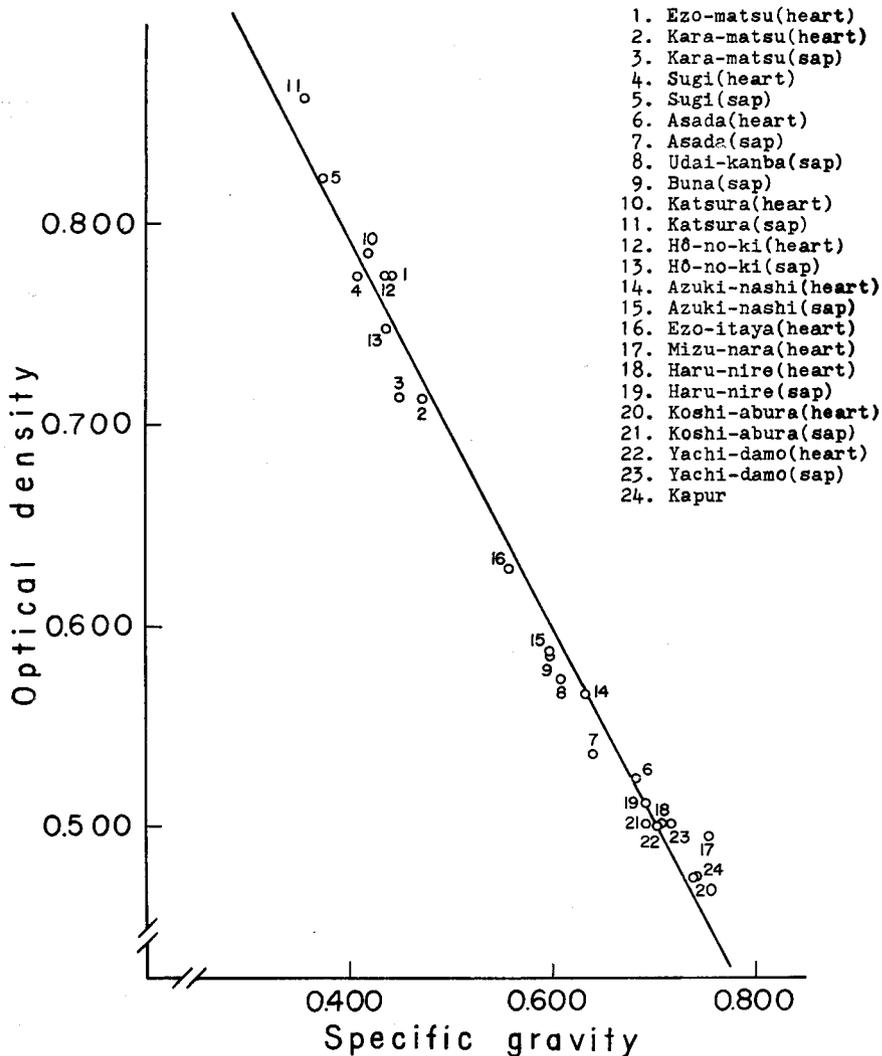


Fig. 5. Relation between optical density of the film irradiated by X-ray through wood and the specific gravity of the wood in air dry.

Correlation coefficient :

$$R = -0.992$$

Line of regression of Y on X:

$$Y = -0.959X + 1.179$$

Y: optical density

X: specific gravity

$Y = -0.959X + 1.179$ (Y: 濃度, X: 気乾比重) を得る。バラツキの原因としては、走査位置と他の部分との材質相異が考えられるが、両者はよく相関する。

Table 2. Numerical values of specific gravity of the wood specimens used and of optical density of the films irradiated by X-ray through the specimens.

Specimen No.	Species*	Optical density	Specific gravity	Moisture content (%)	Average width of annual rings (mm)
1	Ezo-matsu (heart)	0.774	0.447	11.6	2.7
2	Kara-matsu (heart)	0.716	0.473	13.0	3.5
3	Kara-matsu (sap)	0.717	0.450	13.5	3.8
4	Sugi (heart)	0.775	0.409	10.4	3.3
5	Sugi (sap)	0.826	0.376	11.4	3.0
6	Asada (heart)	0.525	0.687	12.4	1.3
7	Asada (sap)	0.537	0.644	12.3	1.2
8	Udai-kanba (sap)	0.576	0.612	11.0	1.5
9	Buna (sap)	0.588	0.601	12.2	1.6
10	Katsura (heart)	0.788	0.418	9.9	0.6
11	Katsura (sap)	0.866	0.357	10.5	0.2
12	Hô-no-ki (heart)	0.778	0.439	12.0	3.3
13	Hô-no-ki (sap)	0.752	0.439	12.1	1.5
14	Azuki-nashi (heart)	0.567	0.634	12.8	1.5
15	Azuki-nashi (sap)	0.589	0.601	12.1	2.0
16	Ezo-itaya (sap)	0.632	0.560	12.1	1.1
17	Mizu-nara (heart)	0.497	0.754	9.6	2.1
18	Haru-nire (heart)	0.502	0.712	11.8	2.7
19	Haru-nire (sap)	0.513	0.695	12.0	1.5
20	Koshi-abura (heart)	0.476	0.734	11.4	2.5
21	Koshi-abura (sap)	0.502	0.695	11.7	3.0
22	Yachi-damo (heart)	0.501	0.705	12.0	2.1
23	Yachi-damo (sap)	0.501	0.719	11.0	1.4
24	Kapur	0.476	0.745	11.7	—

* Scientific names are in page 42.

ii. 年輪内の比重分布

実験 II で求めたエゾマツ、カラマツ材試験片の濃度曲線とそれに対応する X 線写真を Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 に示す。

これら濃度曲線即ち比重分布曲線(ここでは実験 I の成果をそのまま適用する)およびその試料の X 線写真から明らかなように、両樹種をくらべると、春材から夏材への推移は、エゾマツではゆるやかであり、カラマツでは急激である。

エゾマツ材(熟材)(Fig. 6)では年輪幅 2.0~3.0 mm (5年輪)で平均含水率 12.9%の気乾比重は最大値 0.802, 最小値 0.213, 平均値 0.440 である。又一年輪内での比重分布は、春材から夏材に向って半径方向にほぼ直線的に増加する傾向が認められる。

カラマツ材 (心材) の狭い年輪幅 1.5~1.8 mm (Fig. 7 の右方 2 年輪) の年輪では、含水率 13.7% の気乾比重は最大値 0.864, 最小値 0.140, 平均値 0.496 であり、春材から夏材へほぼ直線的に増加している。中庸年輪幅 3.0~4.3 mm (Fig. 7 の左方 3 年輪) の年輪では、含水率 13.7% の気乾比重は最大値 0.854, 最小値 0.140, 平均値 0.371 であるが、これに

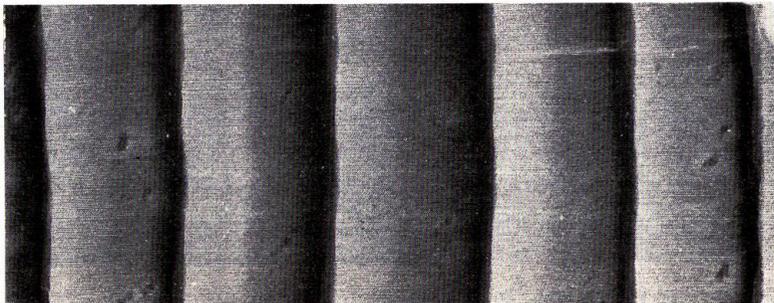
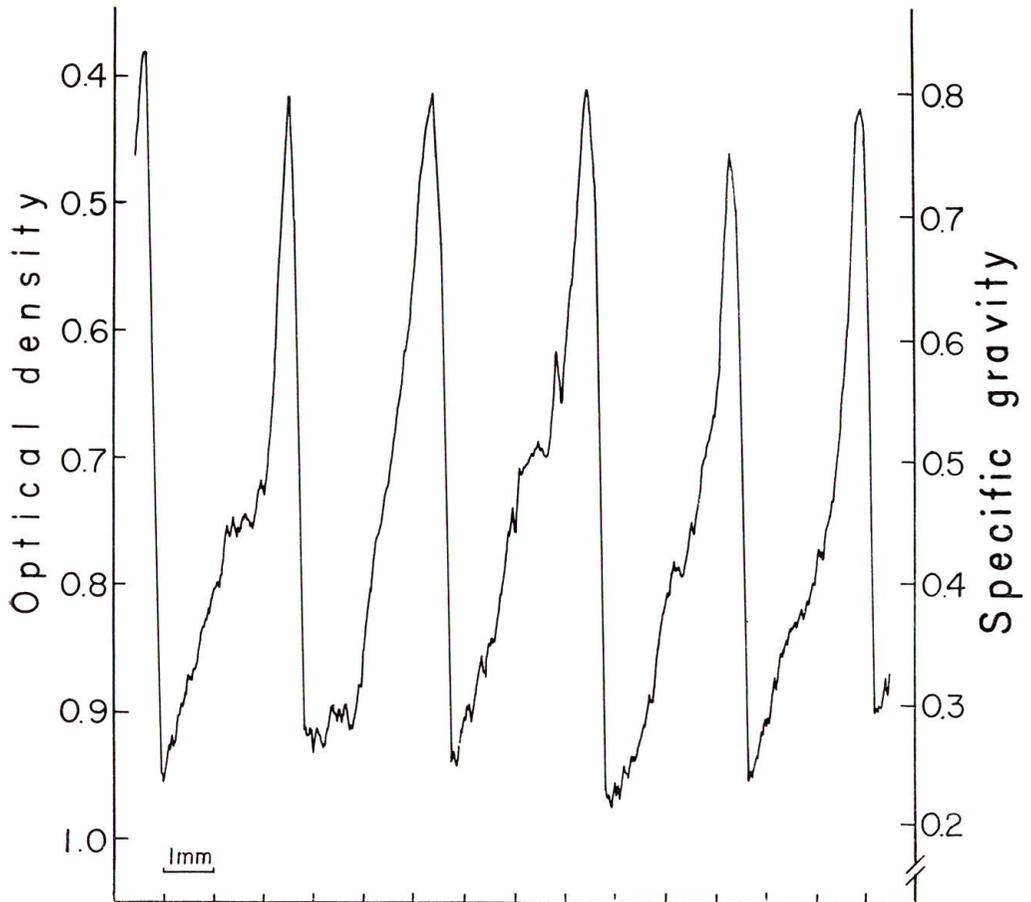


Fig. 6. Specific gravity (in air dry) variation within the growth increment: Ezo-matsu.

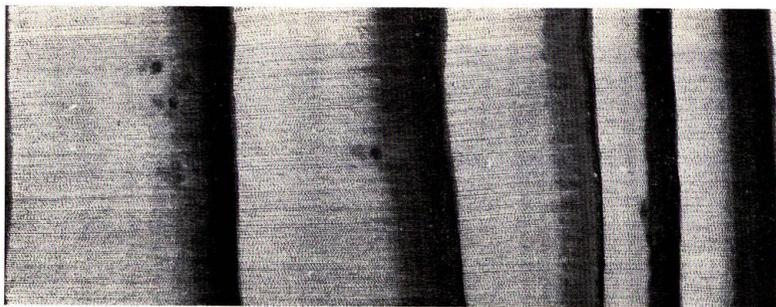
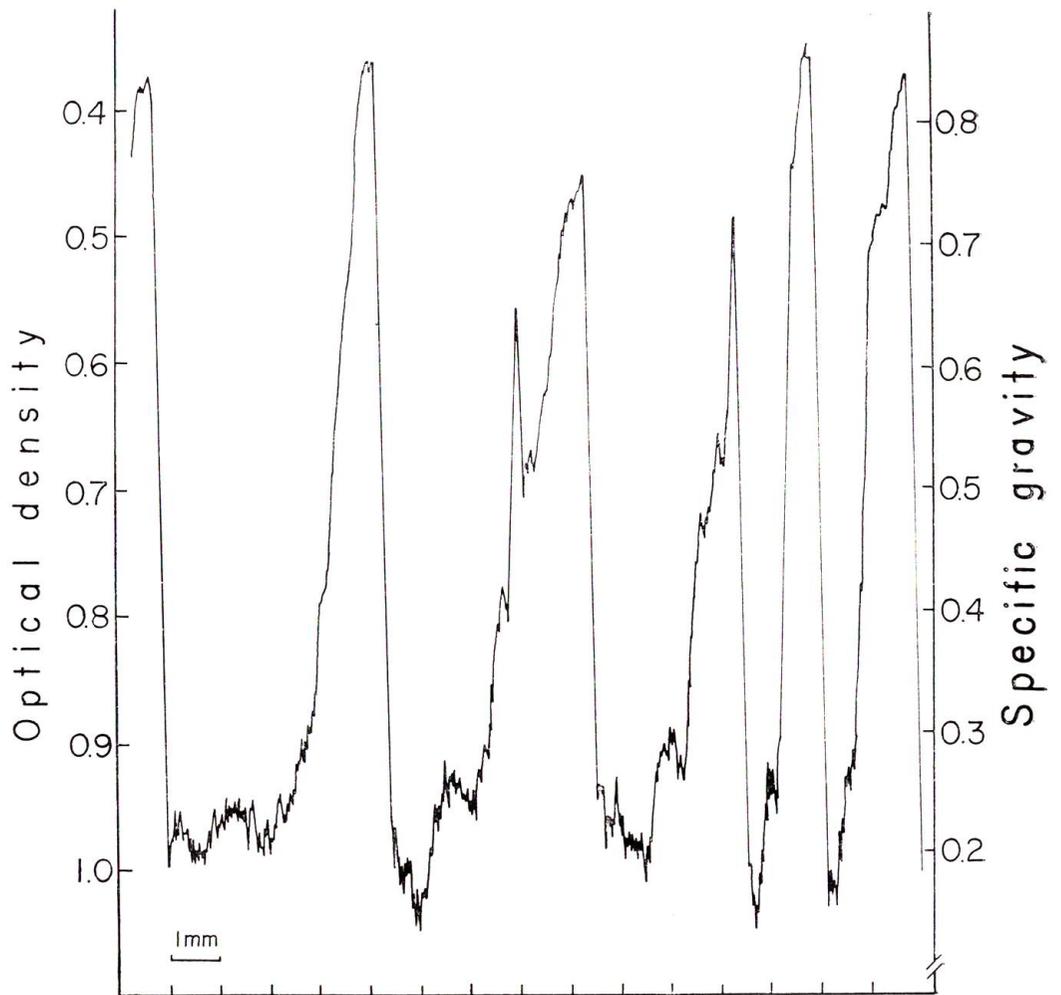


Fig. 7. Specific gravity (in air dry) variation within the growth increment: Kara-matsu.

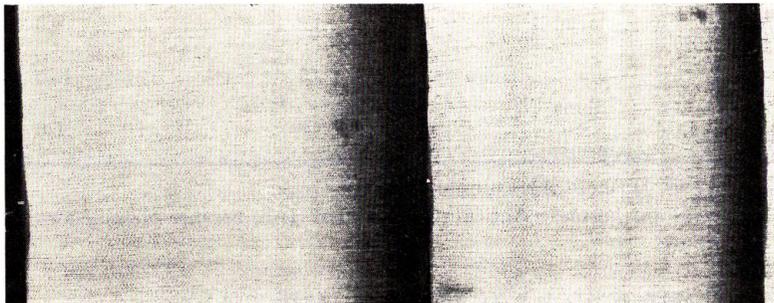
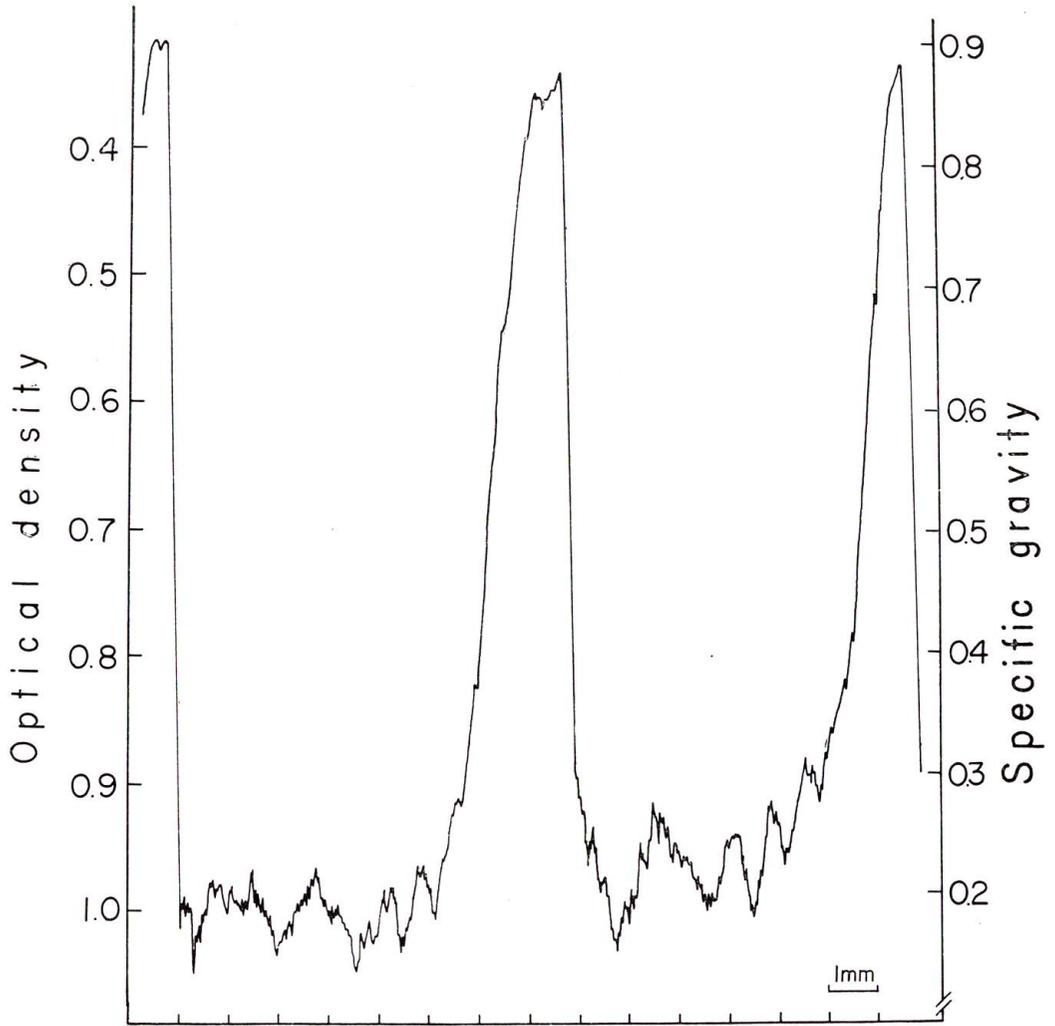


Fig. 8. Specific gravity (in air dry) variation within the growth increment : Kara-matsu.

含まれている3年輪を個々に比較すれば、それぞれの年輪内での気乾比重の最大値(0.854, 0.760, 0.724)に0.130の差が認められた。Fig. 7の右から2年輪目の年輪において、中央部のX線吸収の大きい部分は、垂直樹脂道の部分である。広年輪幅6.5~7.8 mm (Fig. 8)の年輪では、含水率13.5%の気乾比重は最大値0.880, 最小値0.135, 平均値0.325であるが、春材部での比重の変動が目立つ。例えば、Fig. 8の左側の年輪の春材部では、気乾比重0.135~0.223の変動があり、その状態はX線写真からも直接肉眼的に確認出来る。

以上の実験から明らかなように、撮影処理条件を一定にするか、あるいは標準資料を併用する事により、木材片(ないしは材部)のX線透過フィルム像の平均濃度からその材片(材部)の平均比重を、又そのフィルムの濃度曲線から走査方向における木材比重の変動を精細に測定することが出来る。

IV. 超軟X線による合板内部の観察

上述のように、II, IIIにおいては、超軟X線による木材素材の組織観察、比重測定を行ない、その可能性を示した。これら素材についての基礎的知見をもとにして、超軟X線を木材加工品の一つである合板の内部検査に適用出来るかどうかを検討し、合板内部の非破壊検査の基礎的資料を得るために本実験を行なった。

1. 供試材および実験方法

i. 供試材

供試材は、市販2類合板(JAS)と不合格合板(工場内検査で、合板の表面から何らかの欠点が認められ不合格になった合板)であり、その詳細をTable 3に示す。

Table 3. Explanation of the plywood specimens used.

Type of plywood	Number of plies	Wood species			Thickness (mm)				Adhesive
		face veneer	cross-band veneer	core veneer	face veneer	cross-band veneer	core veneer	total	
Type-two plywood*	3	lauan	—	lauan	1.3	—	3.5	6.0	urea resin
”	5	”	lauan	”	2.5	4.0	2.5	15.0	”
Rejected plywood**	3	Shina Sen Kanba	—	lauan	1.0	—	4.0	6.0	”

* “Qualified” by Japanese Agricultural Standard (JAS).

** “Disqualified” by Japanese Agricultural Standard (JAS) because of some visible defects on the surface.

これら供試合板を適当な大きさに切断し、X線撮影に供した。

ii. 撮影方法および撮影条件

撮影された試験片の厚さは6~15 mmである。

撮影方法は II と同様である。試験片を種々の条件で予備撮影し、フィルムを規定現像した結果を検討し、上述理由 (39 頁) より最適と思われる条件を決定し、それにしたがって撮影した。これらの条件を Table 4 に示す。なお使用フィルム、現像条件は II, III と同様である。

Table 4. X-ray photographic conditions for the plywood.

Samples	Tube voltage (kVP)	Tube current (mA)	Irradiation time (sec)
Type-two plywood* {3-ply plyw.	16	5	240
{5-ply "	16	5	600
Rejected plywood* (3-ply plyw.)	14	4	120

* See Table 3.

iii. 観察方法

撮影された X 線フィルムの観察はすべて、Schaukasten 上で肉眼又は低倍率光学顕微鏡で行ない、同時に試験片を適宜切断し、X 線写真像と対応させながら、主として光学顕微鏡により写真上に認められるものの確認を行なった。

2. 結果と考察

得られた結果の一部を、撮影された X 線フィルムを焼付けした陽画写真により説明する。写真は附図として一括後掲してある。

i. 合板の繊維方向交叉状態

Photo 12 は市販 2 類 5 プライラワン合板の X 線平面写真 (X 線 ⊥ 合板表面) である。上下、左右に走る白い線は各プライの道管であり、各プライの繊維方向交叉状態がわかる。なお心板の道管の数個に水銀を注入し、撮影することにより、その道管の方向をより一層明確にすることが出来た。写真左右に走る黒い太い線がそれである。

Photo 13 は市販 2 類 3 プライラワン合板の X 線平面写真である。写真の左右に走る線が表板の繊維方向であり、上下縦方向に走る線が心板の繊維方向である。白い細線は各プライの道管であり、表板、心板の繊維方向交叉状態がよくわかり、その交叉状態は完全な直交から少しはずれている。各プライには格別の欠点もなく正常な合板と判断することが出来る。

Photo 14 は市販 2 類 5 プライ合板の X 線平面写真である。左右横方向に走る線は表板、心板の繊維方向であり、上下縦方向に走る線は添心の繊維方向である。それぞれのプライの繊維方向を完全に識別することは不可能だが、それらの交叉状態はわかる。

ii. 節

Photo 15 は市販 2 類 3 プライ合板の X 線平面写真であり、表面から全く認められな

い心板にある節を示す。写真中央部および下部にあるのが節であり、節の近くの繊維の乱れなどもわかる。

iii. 虫 食

Photo 16 は不合格3プライラワン合板のX線平面写真であり、表面からは認められない心板にある虫孔の状態を示す。縦方向に走る数個の淡い線が虫孔である。

iv. 裏 割 れ

Photo 17 はシナ7プライ合板のX線断面写真(合板から切り取ったストリップ状試片の側面にX線を垂直に照射して撮影したもの)である。上から2番目と4番目のプライに数個の裏割れがみられる。横に走る4本の黒い線は接着層であり、個々の裏割れの接着層に近い部分は写真では黒く認められ、その部分に接着剤が浸透していることを示している。又裏割れのその他の残部は白く認められ、空隙になっている状態がよくわかる。なお裏割れは合板の平面写真では一般的には判別が不可能であった。

v. 単板の割れ、浸透した接着剤

Photo 18 は市販2類5プライラワン合板のX線平面写真であり、表面からは認められない添心の割れに接着剤が浸透集積している状態を示す。写真中央部に走る数本の黒い線が添心の割れに接着剤が浸透した部分である。

Photo 19 は市販2類3プライラワン合板のX線平面写真であり、心板の割れにともなう接着剤の異常集積を示す。心板にかなり大きな割れがあり、写真の暗色部が接着剤の集積した部分である。それに隣接するやや淡い部分が空隙である。なお試験片の表面からはこれらの状態は認められなかった。

vi. ハギ合せ、補修部

Photo 20 は不合格3プライラワン合板のX線平面写真であり、心板のハギ合せ、補修部を示す。写真中央のやや暗い台形の部分が、修理のために入れた単板であり、中央やや左方を縦に走る黒い細い線は、Photo 18で説明したように、単板の割れに接着剤が浸透した部分である。写真左端の縦に走る線はハギ合せ部であり、それらはよく密着しハギ合せが良好に行なわれている。写真右端のハギ合せは、その境界には隙間があり、いわゆるダンゴが詰められているけれども、大きな空隙(写真では白く示されている部分)があり、ハギ合せはあまり良好に行なわれているとは云えない。なおこれらの状態は試験片の表面からは認められなかった。

Photo 21 は市販2類5プライラワン合板のX線平面写真であり、添心におけるハギ合せ部を示す。写真中央部の上下に走る線がハギ合せ箇所であり、ハギ合せには隙間もなく良好であるが、その線の左右に濃淡があるのはハギ合せに使われた左右単板の比重の差により生じたものといえる。左側の合板比重は0.55、右側のそれは0.46であり、それに

もとづく X 線吸収の差が両者の濃淡差として表われたものである。

vii. 極端な心板不良

Photo 22 は不合格 3 プライラワン合板の X 線平面写真である。心板に節(この写真からははずれていて見えない)その他の欠点があり、そのために著しい接着不良が認められ、又繊維直交の状態もよくない。接着剤は写真では濃淡のムラとしてその異常な状態が認められる。なおこの不正常状態は試験片の表面からも若干認められた。

以上より明らかなように適正な撮影条件をえらべば、表面からは認めることが出来ない各プライの組織、即ち節、それにともなう繊維の乱れ、繊維方向(したがって合板としては繊維方向交叉状態)などを識別する事が出来る。又各プライの組織外のいろいろな欠点、即ち割れ、虫食、著しい裏割れ、ハギ合せ不良、極端な接着不良なども識別出来る。

裏割れ、接着不良は重要な問題であるが、合板の X 線平面写真から裏割れを識別する事は本実験ではほとんど不可能であった。接着剤ないしは接着層については、極端な接着不良と考えられる場合のみ識別出来たが、さらに詳細な研究が必要である。

要 結

超軟 X 線によって木材の品質の非破壊検査を行なうための基礎的研究として超軟 X 線による木材組織の観察、比重の測定を行ない、さらにこれらの知見をもとにして木質材料の一つである合板の内部観察を行ない、その品質判定への超軟 X 線の適用の可能性を検討した。これらの結果を要約すれば次の通りである。

1. 木材組織については、得られた X 線写真から明らかなように撮影(観察)条件によっては木材の年輪構造(春・夏材の区別、春材から夏材への推移など、Photo 1, 2, 3, 6, 7)から、可成り微細な組織構成要素(仮道管、道管、放射組織、樹脂道など、Photo 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)にいたる形態観察が可能である。

2. エゾマツ材の水喰(Photo 9)、エゾイタヤ材のかなすじ(Photo 11)などで示されたように、種々の異物質にもとづく X 線吸収の特性は、木材中に含まれる一部の水分、鋳物質などの分布の研究を可能にする。

3. 針葉樹、広葉樹合計 15 樹種より 24 個の小試験片(厚さ 1 cm)を作製し、一定の撮影条件(本文 43 頁参照)、現像条件(本文 43 頁参照)により得られたフィルム濃度と気乾比重との相関関係を検討し、相関係数 $R = -0.992$ 、回帰直線 $Y = -0.959X + 1.179$ (Y : フィルム濃度, X : 気乾比重)を得た(Fig. 5, Table 2)。

4. 年輪内の比重分布の測定は、エゾマツ材、カラマツ材について行なった(Fig. 6, 7, 8)。これら樹種の気乾比重の変動は年輪幅などにより異なるが、本測定での一例を示せばエゾマツ材 0.230~0.794、カラマツ材 0.190~0.854 であった。

5. 合板の内部観察では、得られた写真より明らかなように、合板の表面から認める事が困難である各プライの組織、即ち節 (Photo 15), 繊維の乱れ (Photo 15), 繊維走向従って合板としては繊維方向交叉状態 (Photo 12, 13, 14) が識別された。又単板の割れ (Photo 18, 19), 虫食 (Photo 16), 裏割れ (Photo 17) のようなプライに存在する組織外の各種の空隙, さらにハギ合せ (Photo 20, 21), 極端な接着不良 (Photo 22) などのいろいろな合板内部の欠点が識別された。

参 考 文 献

- 1) BERGER, H.: Radiography as a Tool of Nondestructive Testing, F. P. J., Vol. 14, No. 7 (1964).
- 2) GALLIGAN, W. L.: Nondestructive Testing in Wood, F. P. J., Vol. 14, No. 5 (1964).
- 3) GREGORY, A. B. et al.: Proceeding of the Symposium on Nondestructive Testing of Wood, FPL-040 (1964).
- 4) JONGBLOED, W. L., and S. M. JUTTE: X-Ray Production Microscopy of Crystals in Tropical Heartwood, *Holzforsch.*, 19 (1965).
- 5) 石田茂雄・大谷 諄・黒沢厚基: 超軟 X 線による木材組織の研究, 日本林学会北海道支部講演集, 第14号 (1965).
- 6) 石田茂雄・大谷 諄・今川一志: 超軟 X 線による合板内部の観察, 第16回日本木材学会大会研究発表要旨 (1966).
- 7) 畔柳 鎮・西田晃昭: 超軟 X 線写真による木材内部構造の研究 (第1報), 針葉樹の年輪構成について, 岡山大学農学部学術報告, 26 (1965).
- 8) 畔柳 鎮・西田晃昭: 超軟 X 線による木材内部構造の透視に関する研究 (第2報), 樹種による超軟 X 線の透過率の比較, 第15回日本木材学会大会研究発表要旨 (1965).
- 9) 畔柳 鎮・西田晃昭: 超軟 X 線による木材内部構造の透視に関する研究 (第4報), 木材内部の機械的破壊部の超軟 X 線像について, 第16回日本木材学会大会研究発表要旨 (1966).
- 10) MILLER, D. G.: Detection of Rot in Wood by Electronic X-Ray Fluoroscopy, *Forest Prod. Res. Branch, Canada, Cont. No. p-54* (1964).
- 11) POLGE, H.: Structural Analysis of Wood by Densitometric Studies of Radiographs, *Rept. Center National de la Rech. For.* (1965).
- 12) 例えば 江藤秀雄: 放射線医学 (基礎編), 医学書院 (1964).
- 13) 例えば 右田伸彦: 木材化学 (基礎編), 産業図書 (1961).

Summary

An attempt was made on the application of radiography to observe the inner structure of wood and plywood by using of an instrument made by Nippon Softex Co. Ltd., Softex-IE, which enables low energy X-radiation to radiate. The arrangement used for the purpose is illustrated in Fig. 2. The radiographs in the text were all taken using a beryllium window X-ray tube operated at about 12 kilovolts, 5 milliamperes and the film used was Fuji Softex FG X-ray Film. The materials used for the test were approximately 5 mm in thickness. The results obtained are as follows:

- 1) As illustrated in photos 1, 2, 3, 6 and 7, it is easy not only to separate the

earlywood and the latewood from each other within an annual ring but also to trace a transitional feature of wood element from the innermost outwards within the ring. Tracheids, wood rays and resin canals of both vertical and transverse in softwood, pore distribution in early- and latewood, wood rays in hardwood can also be observed well on the photographs as illustrated in photos 1-8.

2) Photos 9 and 10 were taken before and after drying a piece of Ezo-matsu heartwood which included a slight wetwood. A unique distribution of water within the growth ring of the wood was observed. From this fact, therefore, be may think that observation of free water movement in a wood block is possible. Mineral streaks in maple wood is apparently detected.

3) High correlation was obtained between the specific gravity of wood and optical density of the film that was exposed to the X-ray transmitted through the wood specimen; -0.992 of the correlation coefficient was obtained through a series of measurements by using some 15 species of soft- and hardwood of different specific gravity from 0.357 (Katsura, sapwood) to 0.754 (Mizu-nara, heartwood). Precise determination of specific gravity (X) of test pieces of wood by radiography may be possible by substitution in the empirical formula, of Y (optical density of film) = $-0.959X$ (specific gravity of wood) + 1.179 . (Fig. 5, Table 2).

4) Micro distribution of specific gravity of wood within a growth layer was tested by using a microdensitometer to measure the optical density of the X-ray film. Size of light spot of the meter used for the study was $250 \mu \times 20 \mu$ (scanning direction). As examples, $0.190 \sim 0.854$ of the specific gravity for Kara-matsu, $0.230 \sim 0.794$ for Ezomatsu are described. Figures 6, 7, 8 show some samples of specific gravity distribution pattern within an annual ring of some softwoods.

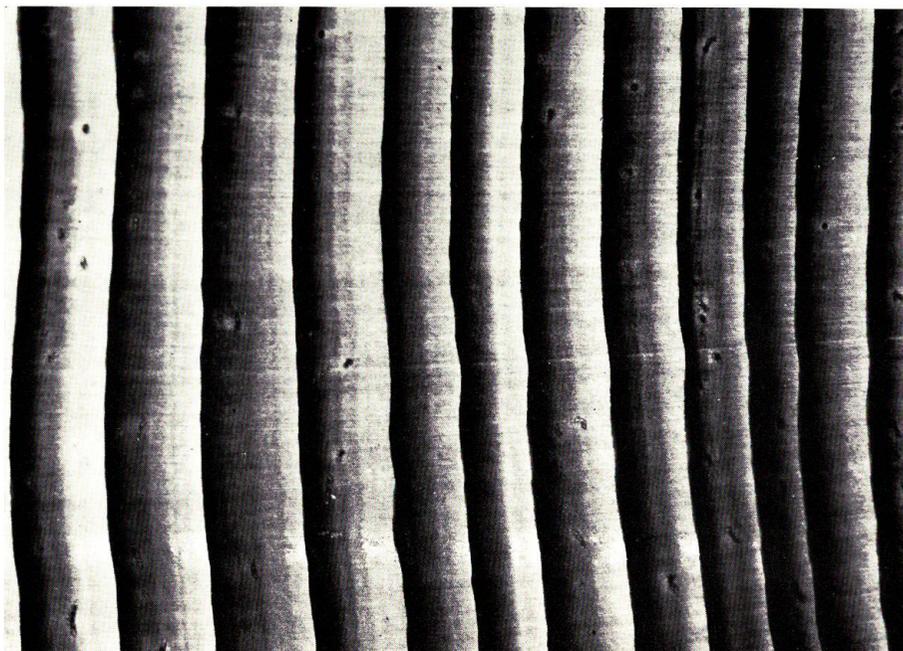
5) Ultra-soft X-ray was applied on the surface at right angle to see into the inside structure of plywood. Concerning the core ply veneers, fiber direction (photos 12, 13, 14), knots included in them (photo 15), tunnels due to boring insects (photo 16), voids (and sometimes fine cracks such as cutting checks) (photo 17), both normal and abnormal glue lines spliced (Photos 20, 21), bad bonding places, etc., these can be detected.

Explanation of plates

- Photo 1.** Cross sectional X-ray photograph of Kara-matsu, *Larix leptolepis* GORD., showing the constitution of several annual rings, especially the clear transition from early- to late-wood and the distribution of vertical resin canals. $\times 11$.
- Photo 2.** Cross section of Ezo-matsu, *Picea jezoensis* CARR., showing the constitution of several annual rings, especially the transition from early- to late-wood and the distribution of vertical resin canals. $\times 4$.
- Photo 3.** Longitudinal radial section of Ezo-matsu showing the constitution of several annual rings. $\times 4$.
- Photo 4.** Longitudinal tangential section of Ezo-matsu showing a general view of distribution

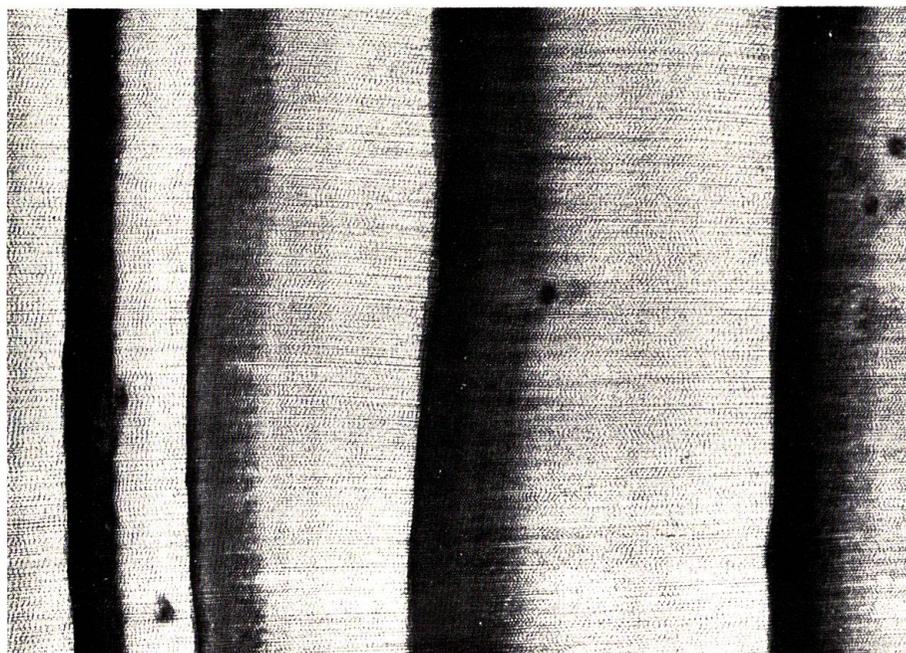
of the two types of rays. $\times 4$.

- Photo 5.** Longitudinal tangential section of Ezo-matsu showing fusiform and uniseriate rays. $\times 11$.
- Photo 6.** Cross section of Haru-nire, *Ulmus davidiana* PLANCH var. *japonica* NAKAI, showing the arrangement of pores in several annual rings. $\times 4$.
- Photo 7.** Longitudinal radial section of Haru-nire showing the constitution of several annual rings. $\times 4$.
- Photo 8.** Longitudinal tangential section of Haru-nire showing the cross sectional shape of rays and their distribution. $\times 4$.
- Photo 9.** Cross section of Ezo-matsu heartwood showing the distribution of the free water of wetwood (Naßkern) in green. $\times 4$.
- Photo 10.** Cross section of Ezo-matsu, the same sample as shown in Photo 9, but in air-dry condition, showing no wetwood. $\times 4$.
- Photo 11.** Longitudinal radial section of Ezo-itaya, *Acer mono* MAXIM. var. *glabrum* HARA, showing a mineral streak and a bark pocket. $\times 4$.
- Photo 12.** X-ray photograph of 5-ply type-two plywood showing thickness and direction of vessels in plies. $\times 8.5$.
- Photo 13.** X-ray photograph of 3-ply type-two plywood showing the crossing of fibers in plywood. $\times 3.5$.
- Photo 14.** X-ray photograph of 5-ply type-two plywood showing the crossing of fibers in plywood. $\times 3.5$.
- Photo 15.** X-ray photograph of 3-ply type-two plywood showing a knot and irregularity of fiber directions associated with it in the core veneer. $\times 4$.
- Photo 16.** X-ray photograph of 3-ply rejected plywood (according to Japanese Agricultural Standard) showing pin holes in core veneer that are unable to be detected on the surface. $\times 1.5$.
- Photo 17.** Side view of 7-ply plywood showing glue lines and lathe checks. $\times 11$.
- Photo 18.** X-ray photograph of 5-ply type-two plywood showing penetrating of adhesive into lathe checks in core veneer. $\times 3.5$.
- Photo 19.** X-ray photograph of 3-ply type-two plywood showing voids and abnormal accumulation of adhesive due to cracks in core veneer. $\times 4$.
- Photo 20.** X-ray photograph of 3-ply rejected plywood (according to Japanese Agricultural Standard) showing joint hair line and repairing part in core veneer. $\times 1.5$.
- Photo 21.** X-ray photograph of 5-ply type-two plywood showing joint hair line in crossband veneer. $\times 4$.
- Photo 22.** X-ray photograph of 3-ply rejected plywood (according to Japanese Agricultural Standard) showing abnormal gluing and irregularity of fiber directions resulting from some defects in core veneer. $\times 1.5$.



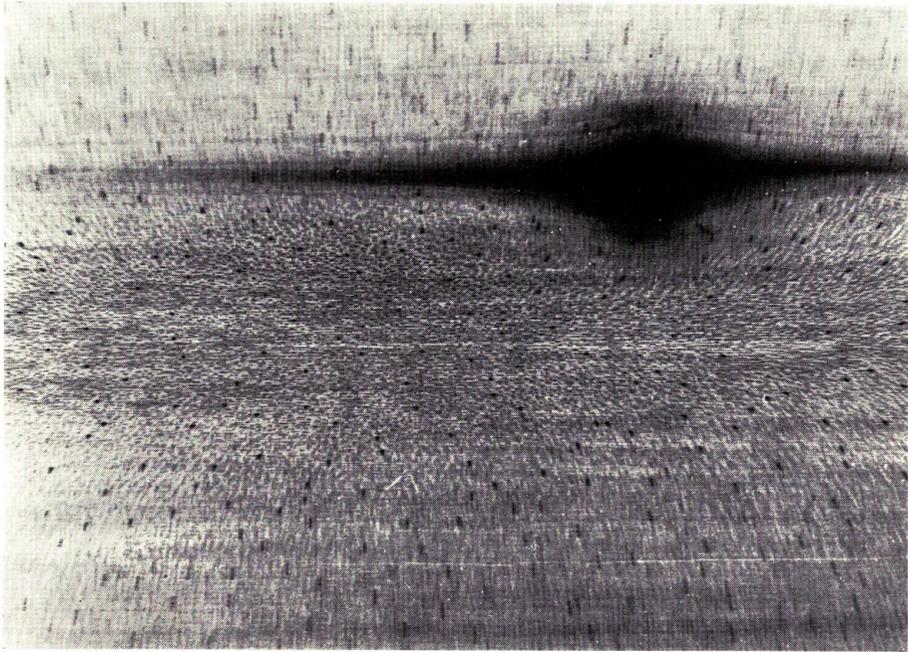
× 4

Photo 2.



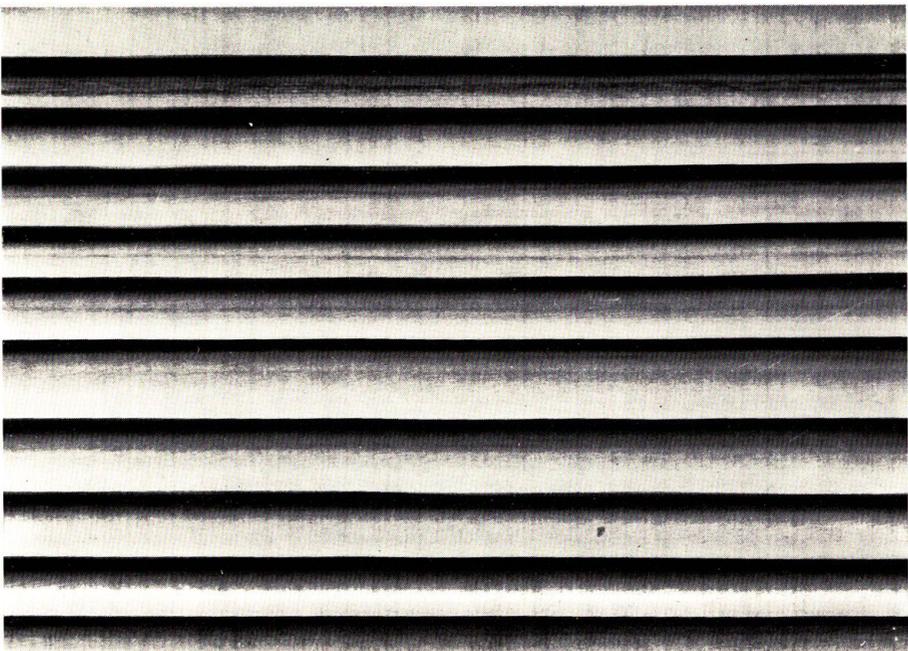
× 11

Photo 1.



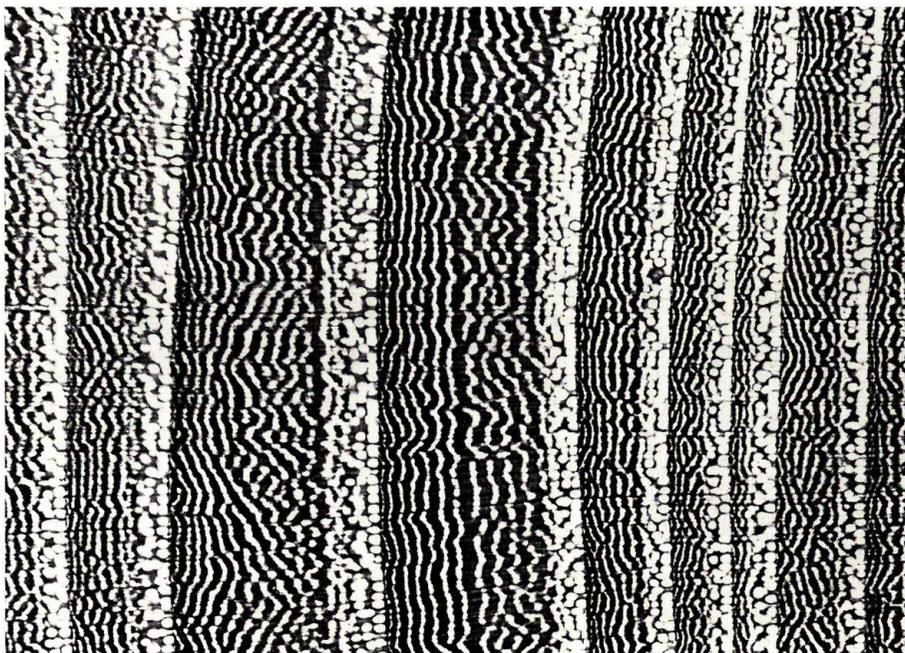
× 4

Photo 4.



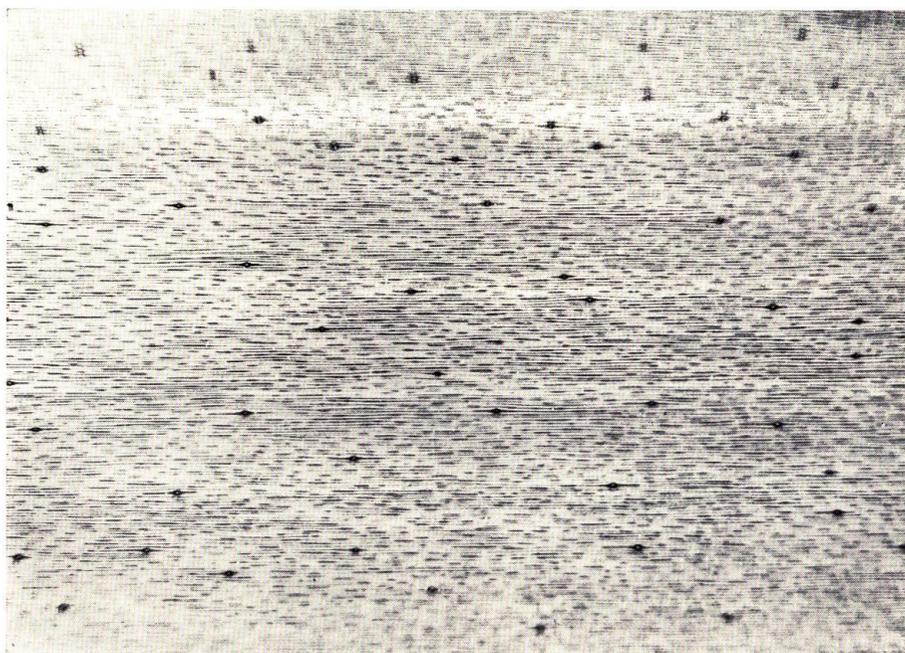
× 4

Photo 3.



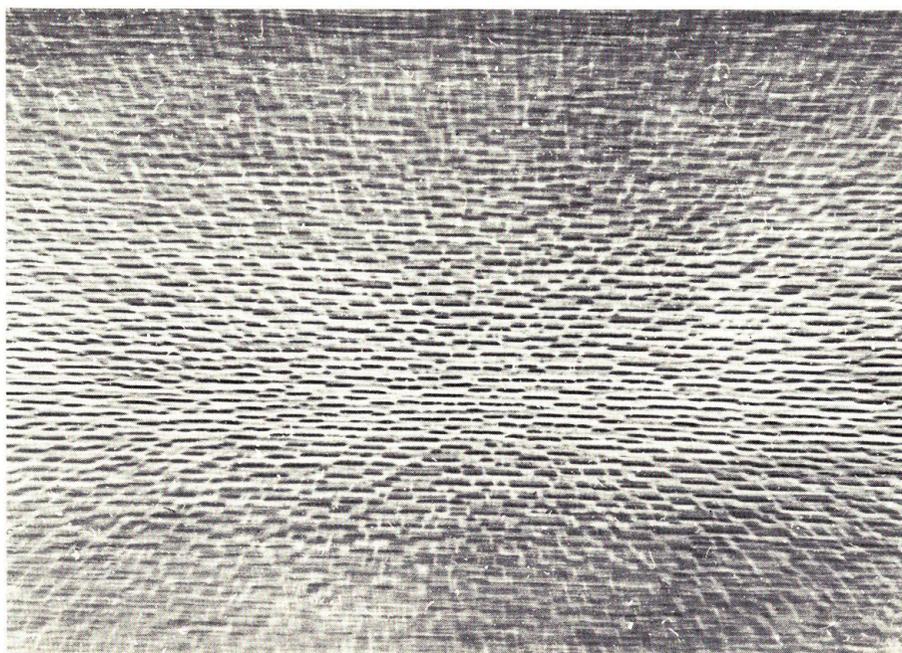
× 4

Photo 6.



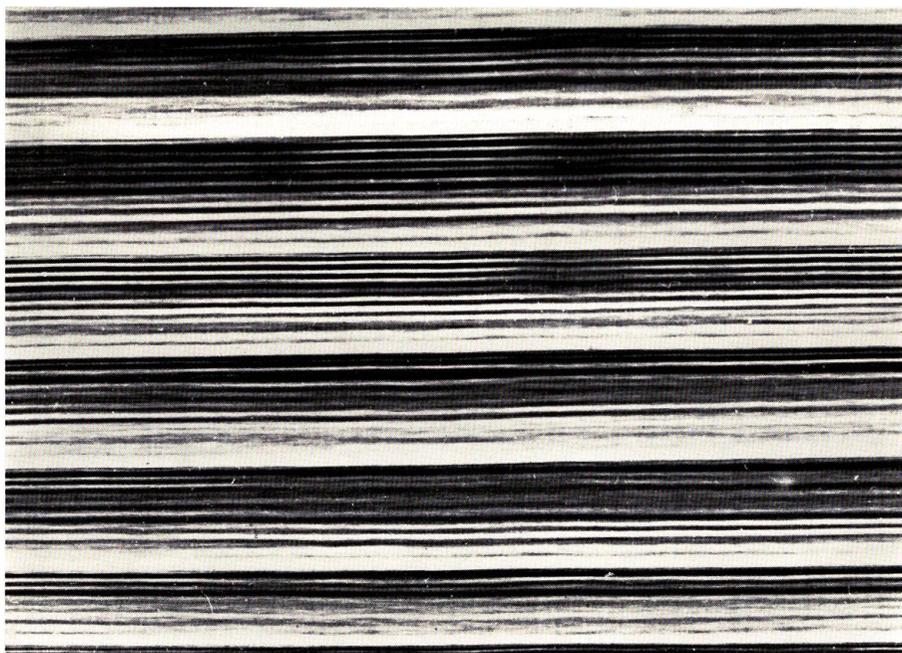
× 11

Photo 5.



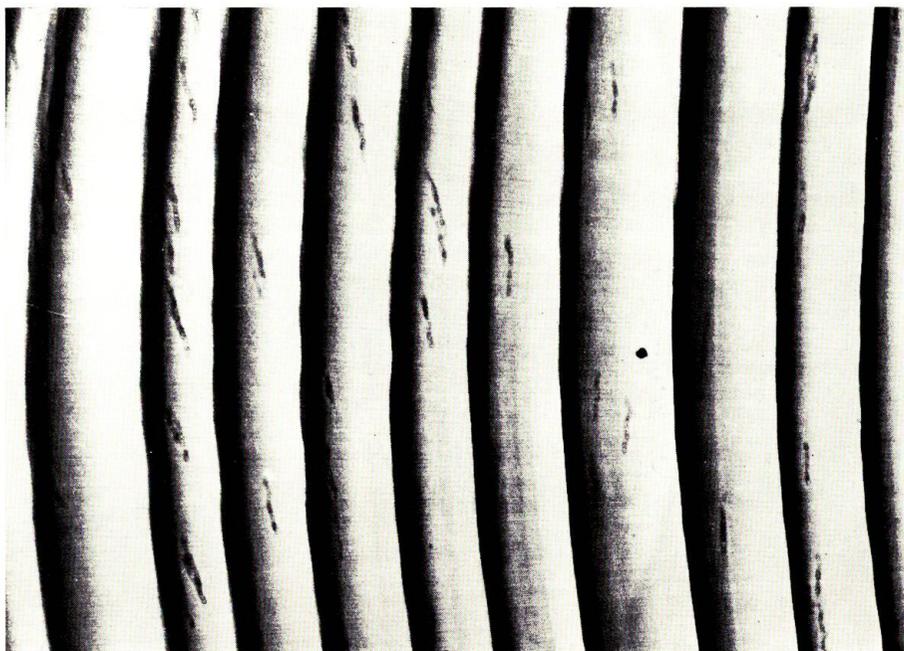
× 4

Photo 8.



× 4

Photo 7.



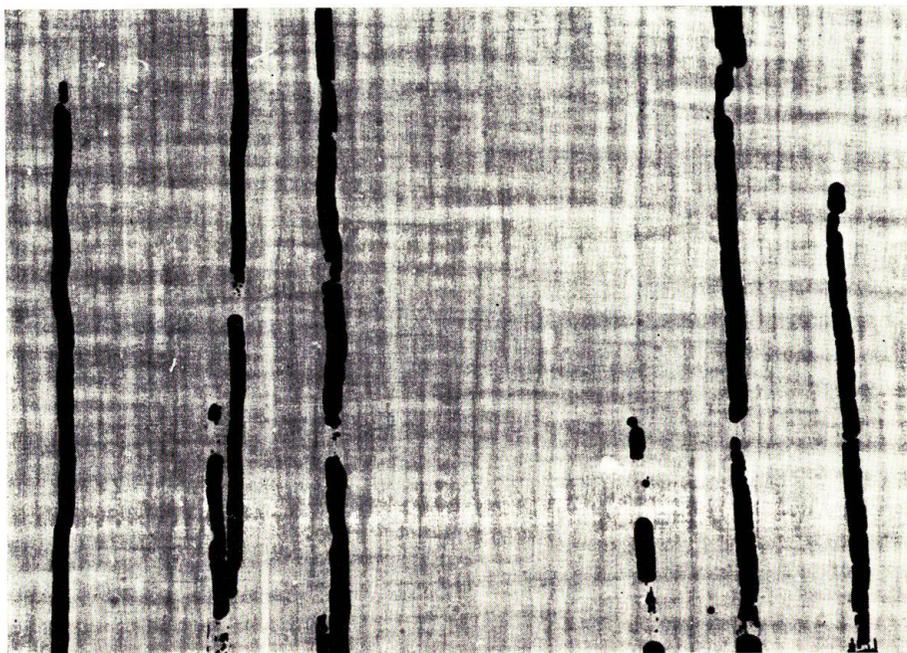
× 4

Photo 10.



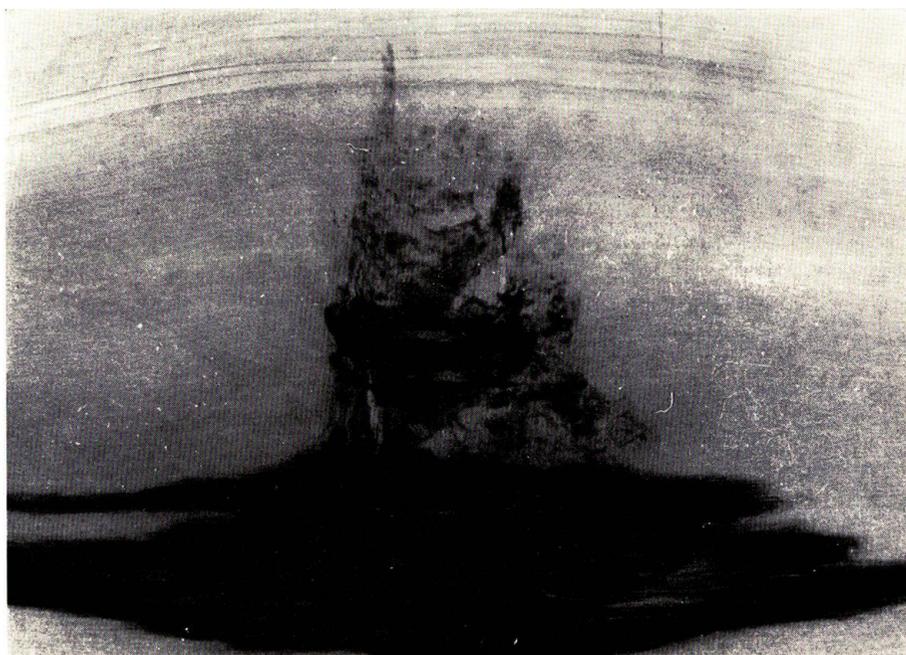
× 4

Photo 9.



×8.5

Photo 12.



×4

Photo 11.

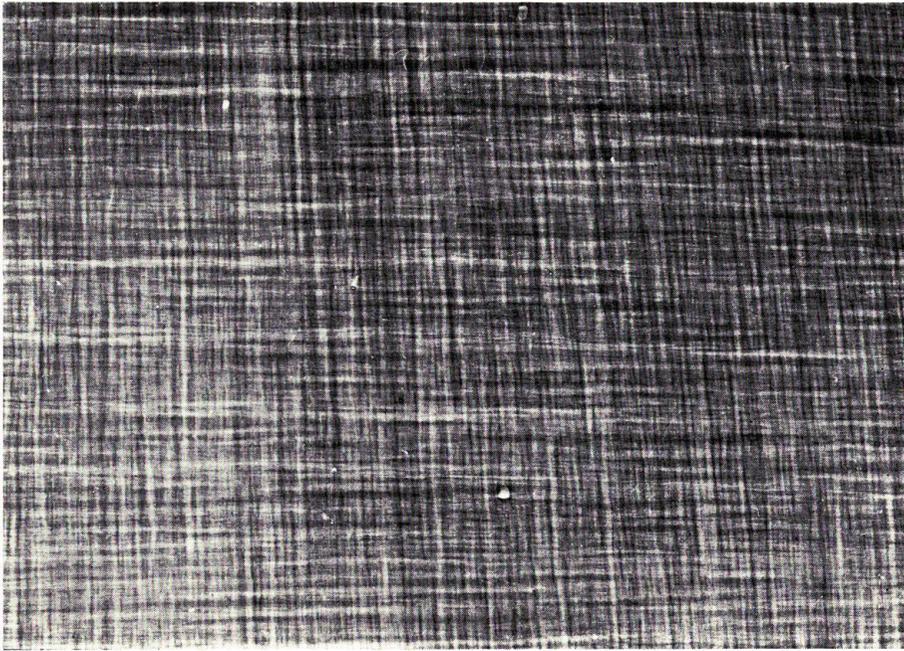


Photo 13.

×3.5

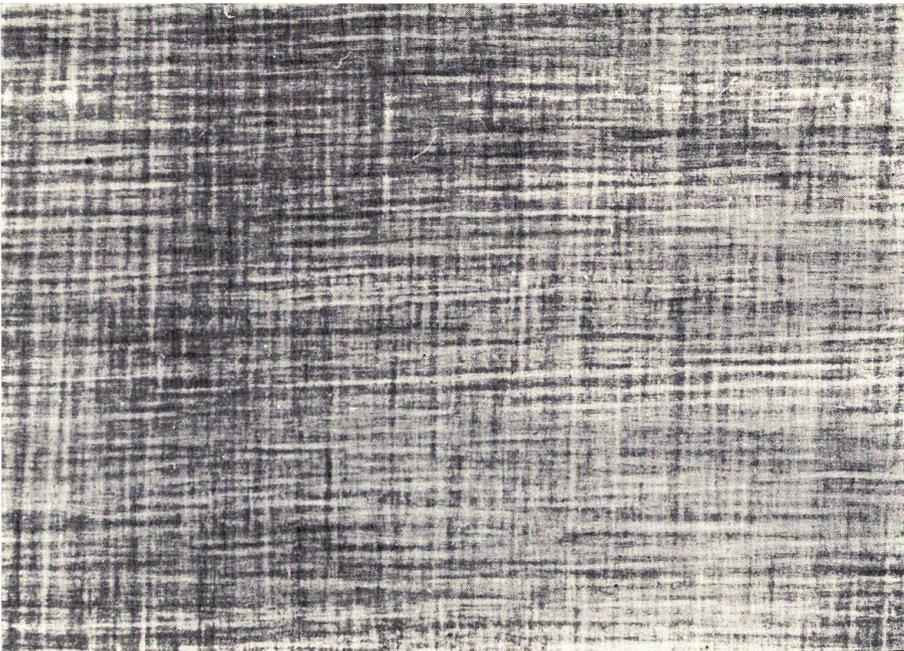


Photo 14.

×3.5

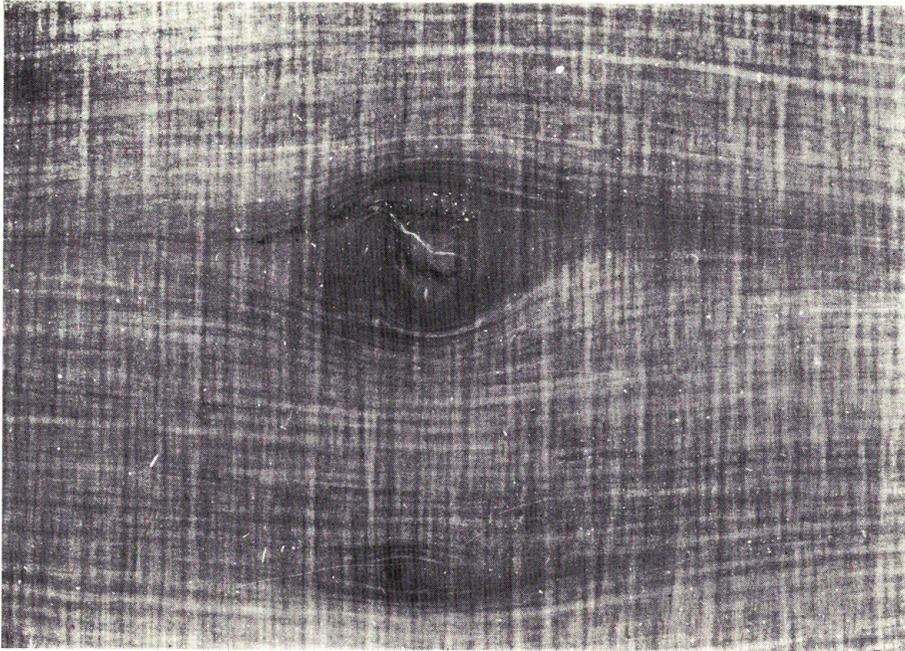


Photo 15.

× 4

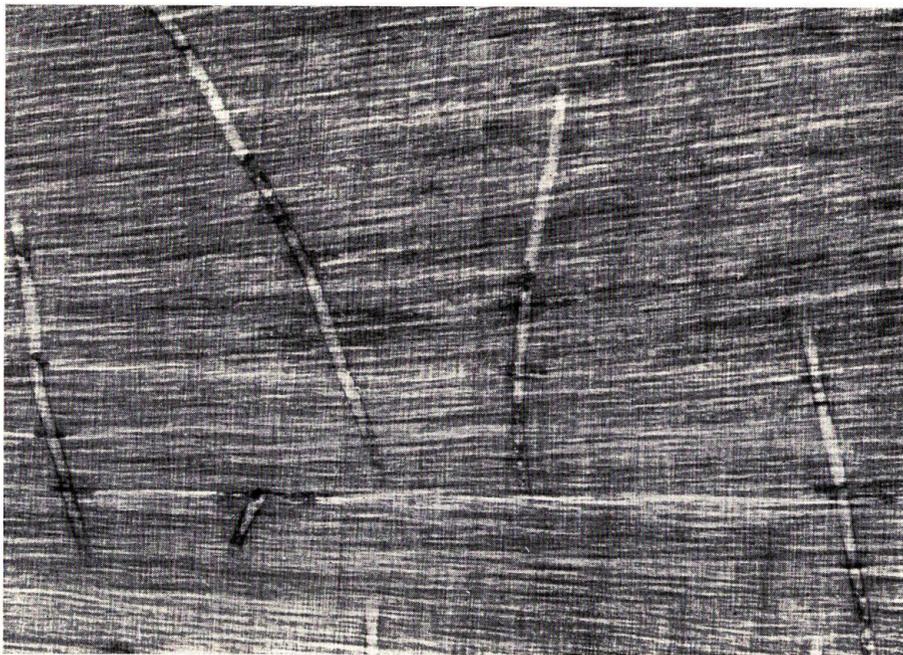


Photo 16.

× 1.5

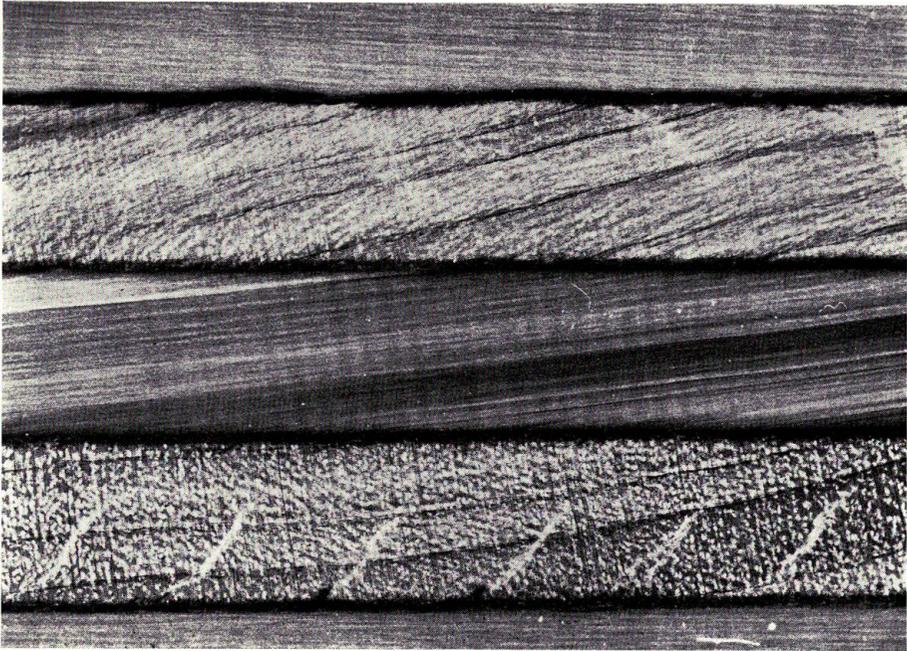


Photo 17.

×11

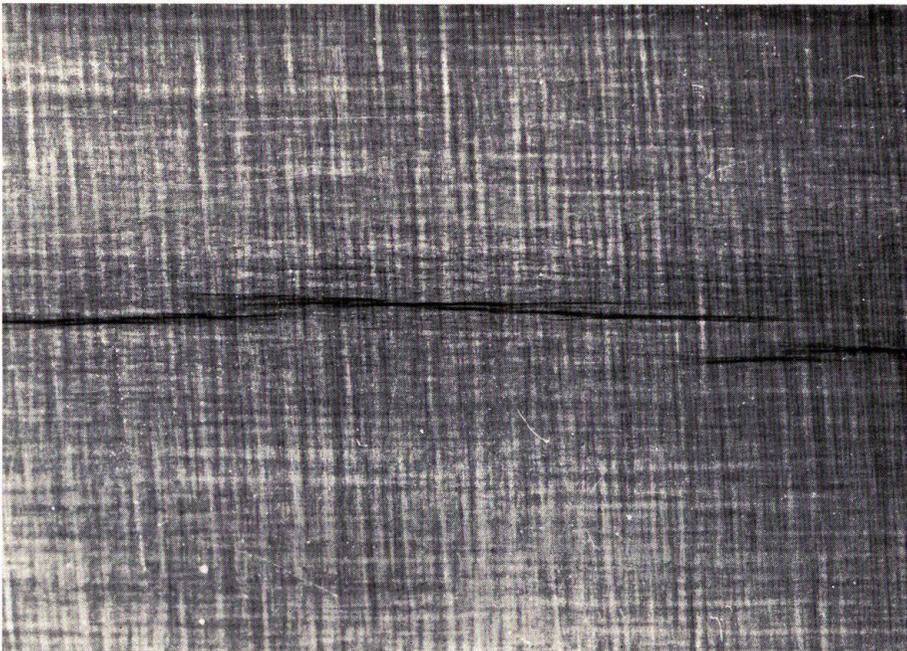


Photo 18.

×35

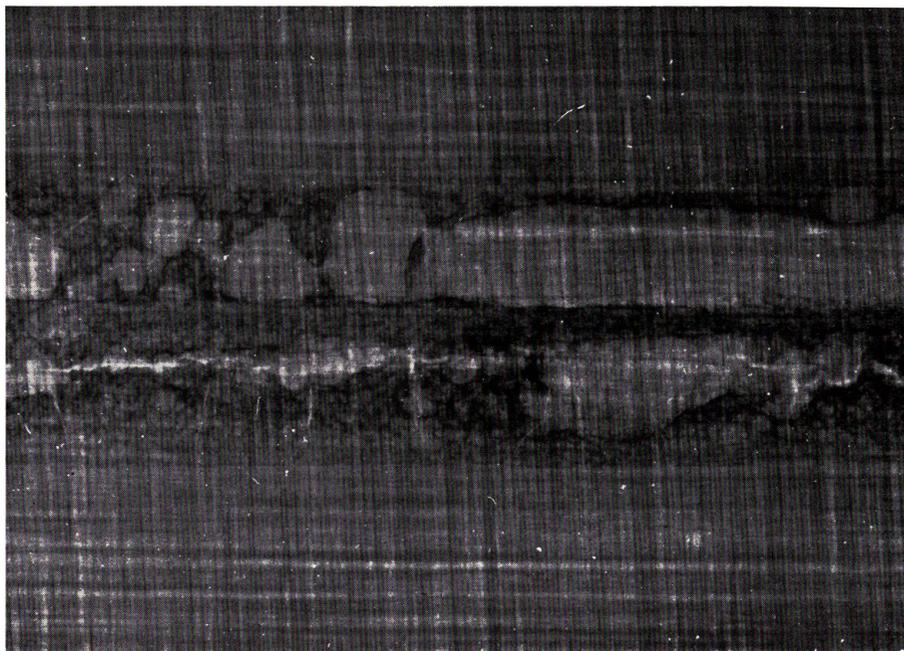


Photo 19.

× 4

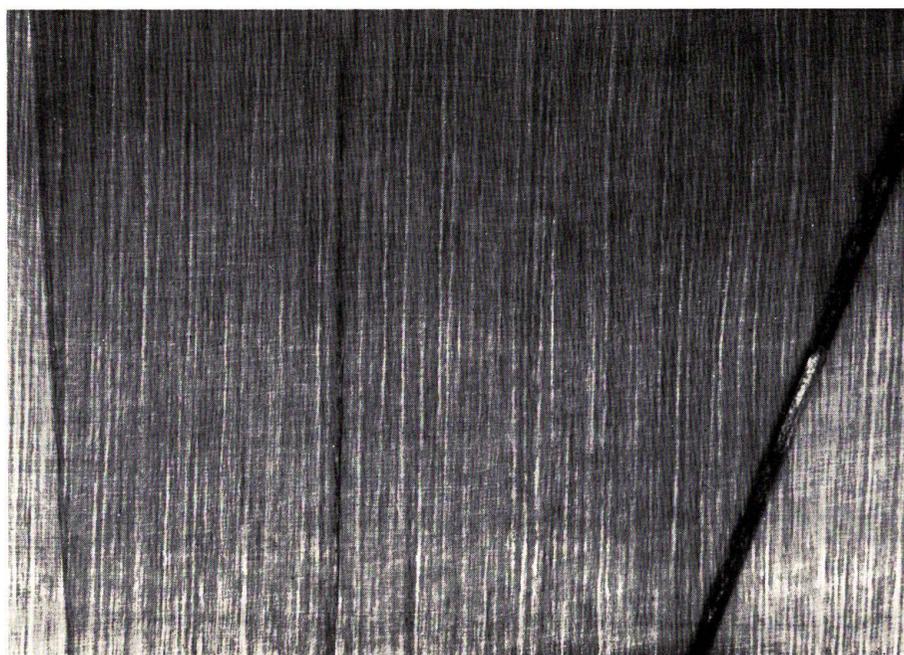


Photo 20.

× 1.5

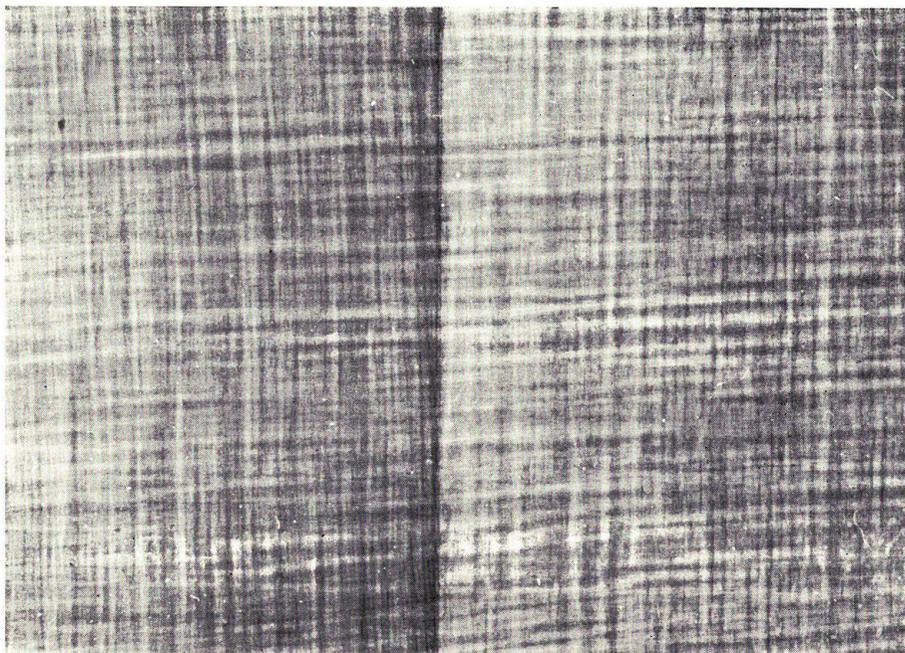


Photo 21.

× 4

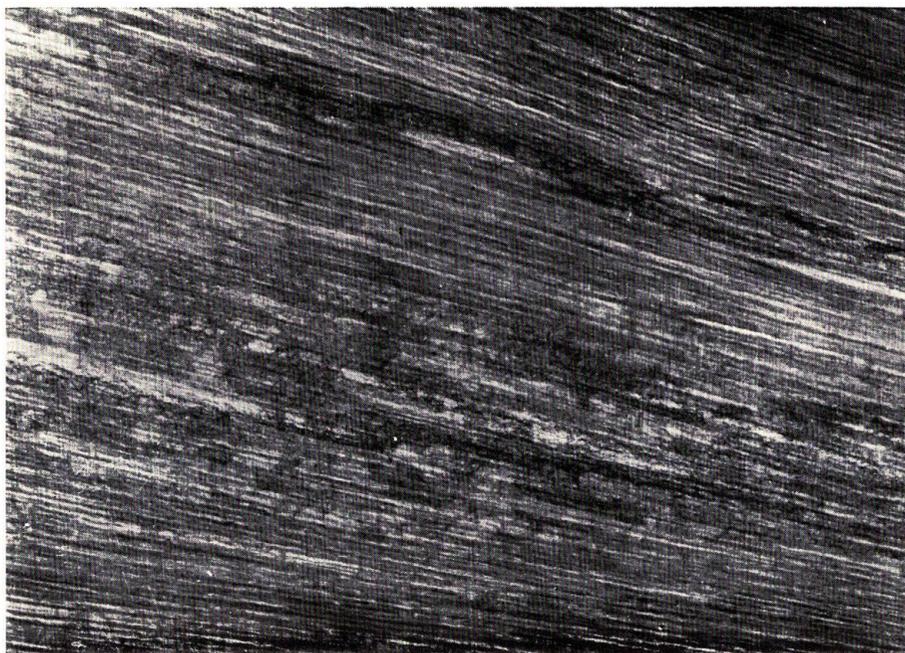


Photo 22.

×1.5