

数種の広葉樹材繊維の横断面寸法の年輪内変動

藤原 健・奥 恭行・佐伯 浩

Variation of Cross-sectional Dimensions of Wood Fibres
within Annual Ring in Some Hardwood Species

Takeshi FUJIWARA, Yasuyuki OKU and Hiroshi SAIKI

要 旨

環孔材4種、散孔材4種の横断面切片で、画像解析装置を用いて繊維横断面の内こう寸法、壁厚、細胞壁率の年輪内変動および内こうフェレ径の頻度分布を検討した。

内こうフェレ径では、環孔材で孔圏から孔圏外への減少が見られたが、散孔材では年輪ターミナルに向かったの顕著な変化は見られなかった。内こう面積の変動には環孔材、散孔材ともにフェレ径の変動と同様の傾向が見られたが、その変動の程度はフェレ径に比べて小さかった。

年輪内における壁厚の変動は環孔材と散孔材の間で特徴的な違いを示さず、ターミナルに向かいわずかに増加する例も見られたが、多くは少し変動する程度であった。

細胞壁率は、環孔材でイニシアルからターミナルへ増加する傾向が見られた。散孔材では多少の増減を示すものがあるものの、変化が少なくほぼ一様であった。

1. は じ め に

広葉樹材繊維は形成層から分裂後伸長生長を行い、分化の進んだ樹種では紡錘形始原細胞の数倍の長さには達するとされている¹⁾。そのうえに道管の拡大生長などがあり、繊維の配列の乱れや寸法の変化が著しい。繊維の寸法のうち、繊維長の年輪内変動に関する研究は数多く、年輪後半で繊維長が最大になるという結果が得られている²⁾³⁾。しかし横断面寸法の測定に関しては、顕微鏡や写真では多数の繊維についての測定に時間がかかるばかりでなく、測定する細胞の抽出方法、さらに横断面のどの部分を径とし、どの部分を壁厚とするかという測定上の基準をどのように定めるかなどの問題が生じる。そのため横断面寸法の変動を定量的に評価する試みはあまりなされていない。

近年、画像解析の技術の進歩とともに木材解剖学に画像解析法の導入が試みられている。MCMILIN⁴⁾はショートリーフパインの晩材の横断面切片を用いて内こう面積などを測定し、内こう面積率から空げき体積を求めている。LEEら⁵⁾はトウヒ、カラマツの横断面切片を用い、細胞壁面積、内こう面積を測定し、内こう面積に対する細胞壁面積率などを求め、これらの値の年輪内変動のパターンを対比してトウヒとカラマツの識別を行った。これらはいずれも画像測定値およびそれらの計算値を利用したにとどまり、またいずれも針葉樹材について行われたものである。広葉樹材への応用についても報告されているが、測定例を示す程度にとどまり十分な成果

は得られていない。

そこで本実験では画像解析装置を用いて繊維横断面の内こう面積、内こうフェレ径、内こう面積率を測定し、測定値から壁厚を推定した。さらにこれらの計測から主として繊維からなる広葉樹材基礎組織の年輪内変動の実体の追究を試みた。この研究の実施と取りまとめに協力していただいた木材構造学研究室の各位に心から謝意を表します。なお、本報告の概要は第36回日本木材学会大会（1986，4，静岡）および第37回同学会大会（1987，4，京都）において口頭で発表した。また、本研究は昭和59～61年度文部省科学研究費補助金一般研究B（代表者 佐伯 浩，村上浩二）によって行った。

2. 材料と実験方法

キリ (*Paulownia tomentosa* STEUD.), クリ (*Castanea crenata* SIEB. et ZUCC.), ケヤキ (*Zelkova serrata* MAKINO), シオジ (*Fraxinus spaethiana* LINGELSH.) の環孔材4種と、イタヤカエデ (*Acer mono* MAXIM.), オニグルミ (*Juglans sieboldiana* MAXIM.), ホオノキ (*Magnolia obovata* THUNB.), マカンバ (*Betula maximowicziana* REGEL) の散孔材4種から小ブロックを採取した。試料は日本木材加工技術協会作製の日本産主要木材50種の標本および京都大学農学部木材構造学研究室所蔵の標本の中から、おおむね成熟期の材で、欠点がなく、過度に広いあるいは狭い年輪幅の部分を避けて採取した。ブロックを10～15分間煮沸後、水中に浸漬し、滑走式ミクロトームにより20 μ m厚の横断面切片を作製した。切片に鉄ヘマトキシリン・サフラニン二重染色をし、脱水後、永久プレパラートとした。

測定には画像解析装置 PIAS-II（ピラス製，512×512画素，256階調）を用いた。PIAS-IIはビデオカメラからの映像信号をリアルタイムにA/D変換し，パーソナルコンピュータのCRT上の対話メニューによりファンクションコマンドを入力し，種々の画像解析を行うシステムである。

測定条件の設定は，画面上の任意位置にX軸方向（放射方向）の走査線を定め，その走査線上の輝度変化をあらわす一次元ヒストグラムを用いて行った。BH顕微鏡のレンズ倍率を対物20倍，接眼3.3倍あるいは5倍，緑色フィルター，12Vハロゲンランプの4V照明とし，コンデンサしほりを変えて入力した画像の一次元ヒストグラムを比較し，細胞内こうと細胞壁の輝度差が最も大きくなるしほりを決定した。対物レンズの開口数0.40に対し，しほりは0.25～0.30であった。さらに，CCDカメラからのビデオ信号をA/D変換する際の変換範囲を決めるリファレンスレベルは，しほりを上記の条件とし，得られた一次元ヒストグラムで画像の最低輝度を求め，その値を用いた。

画像解析を行うにあたっては画像を2値化する必要があり，そのしきい値を決定しなければならない。前述の操作を行い入力した画像で一次元ヒストグラムを出力させ，画像とヒストグラムを対照した。Fig. 1において内こうの輝度は255（プレパラートの切片を含まない個所の輝度と等しい），壁の輝度はおおむね50以下である。図中，矢印のピークは，一次元ヒストグラム測定の走査線が壁と内こうとの境界のくまどりの部分と重なった場合の輝度変化を示している。したがって，輝度A以上は明らかに内こうであり，輝度C以下は明らかに壁と判定できるのでそのほぼ中間の輝度Bをしきい値とした。壁・内こうの境界に接する場合を除いて，内こうから壁部への輝度変化は急激で，2～3画素で低輝度レベルになる。したがってしきい値Bの決め方による誤差は±1画素，寸法にして±0.5 μ m程度である。対物レンズの性能を損なわず，再現性のある条件設定であるとして採用した。

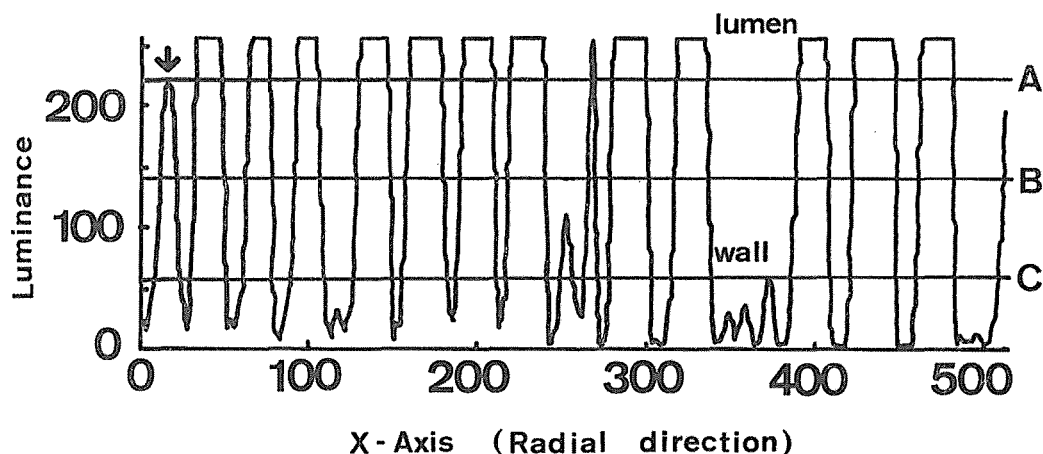


Fig. 1. Determination of threshold level on a profile of each sample section.
 Arrow indicates the luminance at the boundary between cell wall and lumen.
 Luminance: A < lumen, C > cell wall,
 B = threshold level (average value of A and C).

測定領域は一年輪内5ヶ所とし、約90000 μm^2 のウィンドウ(合計80~100細胞の測定を目標とした)を設定した。ウィンドウ枠にかかった内こうを除外する条件で内こう面積、内こうフェレ径、除外しない条件で内こう面積、内こう面積率を測定した。ウィンドウ枠内には道管など他の要素を含まないようにし、避けられない場合は修正計算を行った。壁厚は後に述べる方法により計算によって求めた。

3. 結果と考察

3-1 内こうフェレ径の年輪内変動

環孔材ではイニシアル(孔圏)で放射、接線両方向ともフェレ径が大きく、ターミナルに向かって減少するが、孔圏外ではほぼ安定した値を示す傾向が見られた(Fig. 2 キリおよび Fig. 3)。

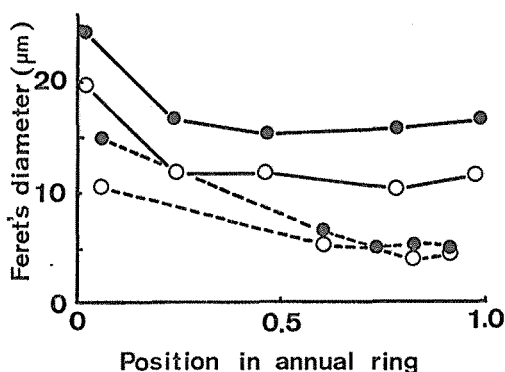


Fig. 2. Variation of Feret's diameter of fibre lumen within an annual ring in ring-porous wood (1).

Note: ● radial diameter,
 ○ tangential diameter,
 — kiri, kuri.

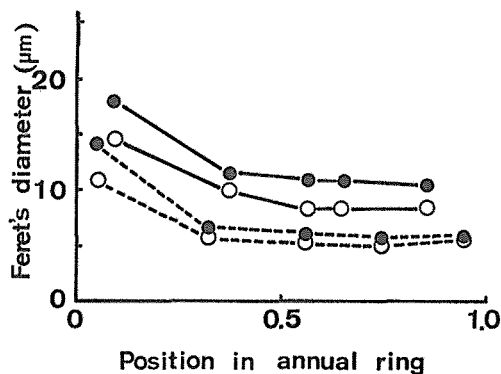


Fig. 3. Variation of Feret's diameter of fibre lumen within an annual ring in ring-porous wood (2).

Note: ● radial diameter,
 ○ tangential diameter,
 — shioji, keyaki.

この傾向は年輪幅が大きく孔圏の幅も広いキリ、孔圏から孔圏外への移行の急なケヤキ、シオジで明瞭である。しかし、クリでは孔圏からターミナルへ連続的な減少を示している。これは孔圏の周囲仮道管から孔圏外の繊維状仮道管へ連続的に変化していることを反映していると考えられる。

一方、散孔材ではイニシアルからターミナルへ向かう変動に顕著な特徴は見られなかった。Fig. 4 にはイタヤカエデ、オニグルミ、ホオノキの例を示す。イタヤカエデではわずかの増減はあるが年輪内ではほぼ同程度の値で経過し、オニグルミではイニシアルから年輪中央にやや減少、ターミナルで再びやや増加している。しかし、イニシアルから中央にむしろ増加した後、減少する傾向を示す例（ホオノキ）もあり、年輪内の経過には多少のばらつきが見られた。

細胞内このフェレ径の変動は、内この形状が方形～六角形～だ円形で、その長辺あるいは長径の方向が放射方向あるいは接線方向に対してあまり変化しない場合には、細胞の径（外径）と壁厚が主要な因子となる。

壁厚の変動は後述のように（Fig. 7）、年輪内ではほぼ一定か、あるいはターミナルに向かいわずかに増加する程度であり、変動幅も小さいので、フェレ径の変動は細胞外径のそれとほぼ同様であると考えられる。細胞外径の変動は、道管の拡大や、繊維の伸長による配列の乱れや変形がなければ、接線径は年輪内ではほぼ一定、放射径は年輪の前半で大きく、ターミナルへ向かい減少するという針葉樹仮道管の寸法変動パターンが基準として考えられる。

このような観点から径の変化を見ると、まず環孔材では、針葉樹晩材での径の減少と異なり、孔圏から孔圏外へ接線フェレ径、放射フェレ径とも急減している。Fig. 5a に見られるように孔圏外には小径の繊維が多数あらわれ、細胞列が乱されている。孔圏ではキリのように構成要素が軸方向柔細胞である場合はもちろんであるが、周囲仮道管や繊維状仮道管であっても伸長は極めて少ないと考えられ、孔圏外では繊維の伸長が盛んで、断面に小径の繊維が多数あらわれ、フェレ径平均値が減少することになる。

次に散孔材では、全体として年輪内の変動が少ないが、マカンバやホオノキでは年輪中央でやや増大する例がみられた。これらは繊維の伸長が少ないとされている樹種であるが、年輪中央で道管の拡大の影響が少ないと思われる部位では接線径、放射径が増大することがあるようである。ただしこのような場所の存在は道管の位置に左右されるのか、ほかの要因によるのか不定で、そのため測定位置により測定値がばらつくのだと考えられる。一方で、イタヤカエデとオニグルミは繊維の伸長が大きいとされている樹種であるが、接線径、放射径ともに変動が少ない。Fig. 5b に見られるようにイタヤカエデでは特に細胞列の乱れが大きいですが、フェレ径に大きな変動があらわれていない。このことは小径の繊維断面のあらわれ方から、年輪内のどの位置でもほぼ同様に伸長が生じていることによると思われる。

3-2 内こう面積の年輪内変動

繊維細胞内こう面積の年輪内変動の例を Fig. 6 に示す。環孔材では内こうフェレ径の変動と同

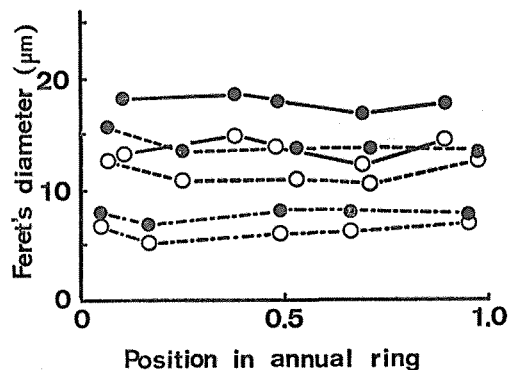


Fig. 4. Variation of Feret's diameter of fibre lumen within an annual ring in diffuse-porous wood.

Note : ● radial, ○ tangential,
—— hoonoki, onigurumi
----- itayakaede.

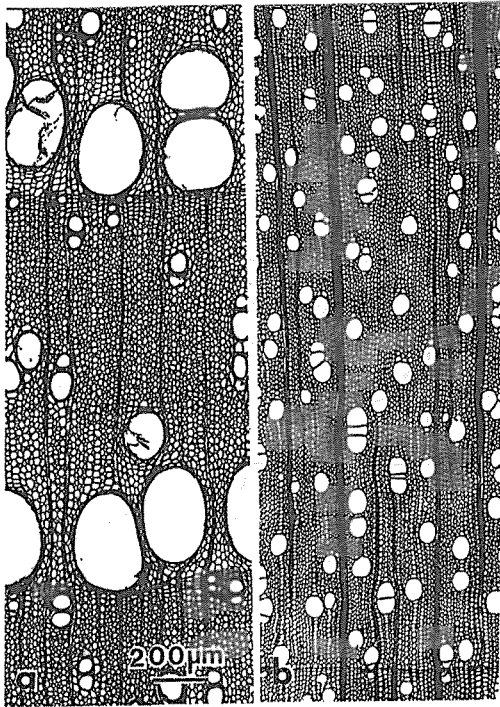


Fig. 5. Transverse section of shioji (a) and itayakaede (b).

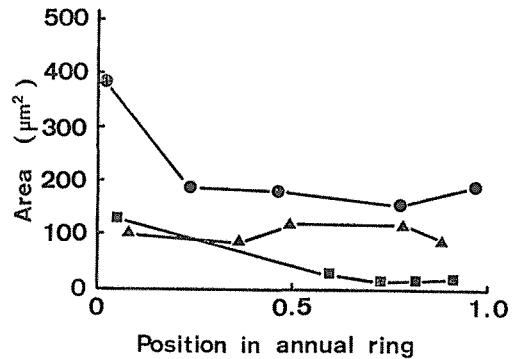


Fig. 6. Variation of area of fibre lumen within an annual ring.

Note : ● kiri, ▲ makanba, ■ kuri.

様に孔圏から孔圏外への減少が顕著に認められたが、散孔材では変動が少なく、概してフェレ径よりも年輪内変動は小さいようである。

3-3 壁厚の推定とその年輪内変動

画像解析装置による木口断面の測定では、細胞内この寸法が求められるが、細胞そのものの直径や壁厚は測定されない。しか

し、既往の解剖学的データと対比するとき、また、内この寸法の変化の要因を調べるときなどに、直径・壁厚の数値が必要となる。そこで、画像解析装置で自動計測できる内このフェレ径、面積、面積率、内この周囲長などから壁厚の推定を試みた。推定にはウィンドウ枠にかかった内この除外しないで求めた内この面積率、枠にかかった内この除外して求めたフェレ径、面積、周囲長を用いた。

推定にあたって内この形は円または正方形、壁厚は一様と仮定し、内この面積率の実測値から壁厚を計算で求めた。その際、内この形と寸法の決め方として、次の6種を用い、写真測定の結果と対比した。

- A : 内この放射、接線フェレ径を2辺とする長方形と周囲長が同長の正方形。
- B : 同上の長方形と面積の等しい正方形。
- C : 内この周囲長と同じ周囲長の正方形。
- D : 内この周囲長と同じ周囲長の円。
- E : 内この面積と同面積の円。
- F : 内この面積と同面積の正方形。

オニグルミとイタヤカエデを用い、年輪内2個所で画像の計測とA～Fの計算を行うとともに、同一個所を同倍率に引き伸ばした写真上で十数個の細胞について各々4方向に壁厚を測定し対比した。その結果、写真測定の壁厚を100としたとき、A : 104～109～118, B : 103～108～118, C : 82～88～95, D : 106～112～120, E : 107～117～122, F : 95～103～109であった。Cは過小な値を、D, Eは過大な値を与え、A, Bもやや大きい値を示し、Fが最も近い値を示すと判断された。Fでは計算も容易であり、次式で求められる。

$$\text{壁厚 } W(\mu\text{m}) = 1/2 \cdot \sqrt{A_L} (1/\sqrt{F} - 1) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで A_L は内こう面積 (平均値) μm^2 , F は内こう面積率 (内こう面積合計/測定面積) である。

なお, オニグルミとイタヤカエデの繊維内こうの形状はターミナル部を除いて放射方向のフェレ径が大きく (アスペクト比 F_R/F_T は約1.2), その面積は放射・接線フェレ径を2辺とする長方形の面積の約75%, 形を模式化すれば六角形が当てはまりがよい⁶⁾。

次に細胞の放射径 R と接線径 T はそれぞれ放射フェレ径 F_R と接線フェレ径 F_T に $2W$ を加えて求めることができる。

$$\text{放射径 } R(\mu\text{m}) = F_R + 2W \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{接線径 } T(\mu\text{m}) = F_T + 2W \quad \dots\dots\dots(3)$$

直径については写真上の測定との対照は行わなかった。

式(1)を用いて壁厚の年輪内変化を調べた結果を Fig. 7 に示す。壁厚の年輪内変動は一般に小さい。環孔材孔圏外における壁厚の増加はクリではやや顕著であるが, その他では認められてもわずかであり, 散孔材でも同様に, ほとんど一定か, 年輪後半で微増する程度であった。各樹種ごとにまとめた壁厚の平均値と範囲を Table に示す。

3-4 細胞壁率の年輪内変動

細胞壁率はウィンドウ内のすべての内こうの面積率(%)を100(%)から減じたもの

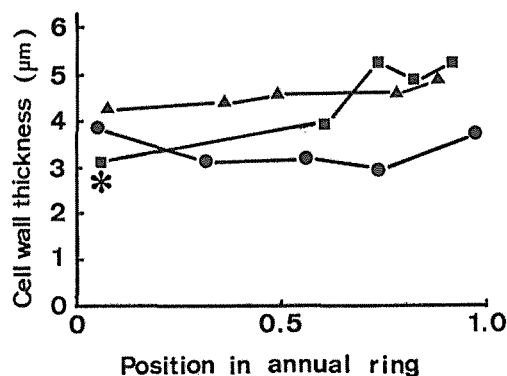


Fig. 7. Variation of estimated fibre wall thickness within an annual ring.

Note: ● keyaki, ▲ makanba, ■ kuri.

* Wall thickness of vasicentric tracheids.

Table Estimated values of wall thickness of fibres.

Species	Min.	Wall thickness (μm)		
		Mean	Max.	
Kiri	1.8	2.5	3.8	(1.5—2.5)
<i>Paulownia tomentosa</i>		1.9	*1	
Kuri	3.9	4.4	5.3	(3.0—5.0)
<i>Castanea crenata</i>		3.1	*2	
Keyaki	2.7	3.0	4.2	(3.0—5.0)
<i>Zelkova serrata</i>				
Shioji	2.0	2.3	2.5	(1.5—3.0)
<i>Frazinus spaethiana</i>				
Itayakaede	2.4	3.1	3.5	(2.0—3.0)
<i>Acer mono</i>				
Onigurumi	2.6	3.1	3.5	(2.0—4.0)
<i>Juglans sieboldiana</i>				
Hoonoki	2.7	3.0	3.4	(2.0—4.0)
<i>Magnolia obovata</i>				
Makanba	3.6	4.3	4.9	(3.0—4.0)
<i>Betula mazimowicziana</i>				

*1 Axial parenchyma.

*2 Vasicentric tracheids.

(): Value in "Nihon no Mokuzai" published by Wood Technological Association of Japan (1966) .

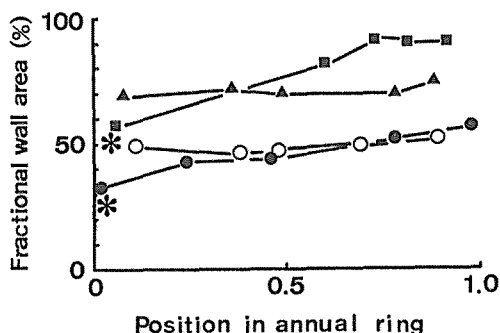


Fig. 8. Variation of fractional wall area of fibre within an annual ring.

Note: ● kiri, ○ hoonoki, ▲ makanba, ■ kuri.

* Vasicentric tracheids in kuri, axial parenchyma in kiri.

高い層との2層構造が一層明確になると考えられる。一方、散孔材では繊維の細胞壁率の変動が少なく、年輪内においてほぼ均一な基礎組織の中に道管が分布する構造を持つ。しかしながら、道管周辺部で繊維寸法が小さくなり、細胞壁率が高くなっているように思われる樹種もあり (Fig. 5b), このような基礎組織内での細胞壁率のばらつきに注目する必要がある。

3-5 内こうフェレ径の頻度分布

横断面写真を見ると割り込み生長をした繊維先端とみられる小径の細胞や、道管の拡大に影響されて変形した細胞などが存在し、内こう径の変動には個々の繊維自体の大小による変動に加えて

である。

年輪内変動の例を Fig. 8 に示す。環孔材ではイニシアルからターミナルに向かって増加する傾向がみられたが、散孔材では年輪を通じて変化が小さくほぼ一様であった。

細胞壁率は木材実質である細胞壁の量を示し、広葉樹材では基礎組織である繊維の細胞壁率は広葉樹材の物理的・機械的性質の構造上の指標としての意義があると考えられる。環孔材では、孔圏で繊維細胞壁率が低く、さらに大きい道管が存在するため空隙が多くなっている。しかも、孔圏外では繊維の細胞壁率も高くなっているから環孔材では細胞壁率の低い層と、細胞壁率の

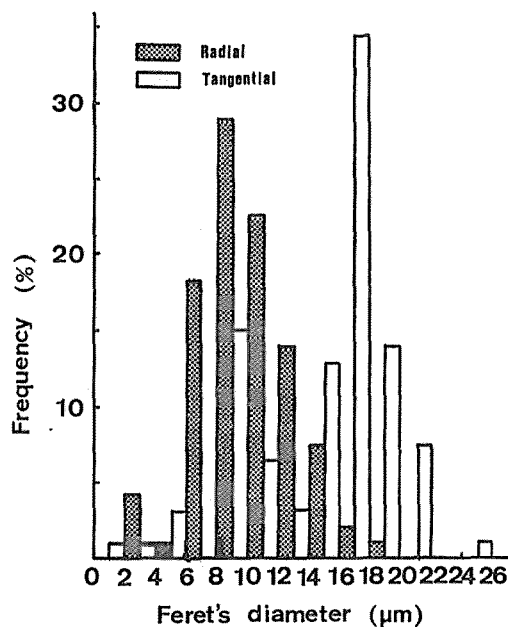


Fig. 9. Frequency of Feret's diameter of fibre lumen at the center of an annual ring of makanba.

繊維の横断された位置による変動がある。このため年輪内のある個所における細胞寸法の変動には繊維の軸方向の形状の変化についての情報が含まれているはずである。ここでは年輪内の各測定領域におけるフェレ径の頻度分布の中から特徴的な例をあげて問題点を述べる。

Fig. 9 はマカンバの年輪中央における放射フェレ径と接線フェレ径の頻度分布を示す。放射フェレ径の頻度分布は正規分布に近い形をしているが、接線フェレ径の頻度分布には2つのピークが認められる。このことは、接線フェレ径が著しく異なる大小2つのグループが存在するのではなく、各々の繊維の長さ方向に接線径の大きいいわゆる Body と呼ばれる太い部分と、伸長して幅の狭くなっている先端部分との太さの異なる2部分を持つと考えられる。このように頻度分布曲線から繊維の形についての情報を引き出すことができると考えられ

るが、分布曲線の解析の方法、モードや偏差などの統計量と繊維の形との関連性について検討する必要がある、引続いて研究を行なっている。

引用文献

- 1) CHALK, L.: Fibres, in "Anatomy of the Dicotyledons" Vol. 2. C. R. METCALFE and L. CHALK. CLARENDON PRESS. Oxford. 1983. pp 28-38
- 2) Süß, H.: Über die Längenänderungen der parenchymstränge, Holzfasern und Gefäßglieder von Laubhölzern im Verlauf einer Zuwachperiode. Holz als Roh-und Werkstoff. 25(10). 369-377, 1967
- 3) TAYLOR, F. W.: Fiber length variation within growth rings of certain angiosperms. Wood and Fiber. 8(2). 116-119, 1976
- 4) McMILLIN, C. W.: Application of automatic image analysis to wood science. Wood Science. 14(3). 97-105, 1982
- 5) LEE, J. and ROSEN, D.: On the use of automated microscopy in wood reserch. Holzforschung. 39(1). 1-6, 1985
- 6) 奥恭行: 画像解析装置による広葉樹繊維の横断面寸法の計量. 京大農学部林産工学科課題研究論文, 1986
- 7) 村上浩二・佐伯浩: 広葉樹材の繊維組織の構造に基づく材質分類の研究. 昭和61年度科研費(一般B) 研究成果報告書. 1987, pp 28

Résumé

Hardwood fibres have great variability in their shapes, dimensions and arrangement on the transverse section of wood, because of their elongation growth and adjustment to enlarging vessels during their differentiation. Application of an image analyzing system makes possible rapid measurements on such diversified fibre dimensions. This paper describes examples of the measurement on the cross-sectional dimensions of fibres and variation of these dimensions within the annual rings in several hardwood species by means of a simple image analyzing system (PIAS-II). Microscopic images were input to the system through a CCD-video camera attached to an ordinary microscope for biological use.

In ring-porous wood, the radial and the tangential Feret's diameters of the fibre lumen decreased from the initial toward the terminal within an annual ring. In diffuse-porous wood, Feret's diameters remained almost constant or fluctuated slightly toward the terminal without any remarkable decrease. The variation of lumen area within an annual ring showed similar behavior to that of Feret's diameter, but the former was much smaller than the latter.

Fibre wall thickness was estimated from fractional lumen area and average lumen area of fibres. In some samples fibre wall thickness increased slightly toward the terminal within an annual ring, but in others both ring-porous wood and diffuse-porous wood it showed slight fluctuations through the annual ring.

The fractional wall area of the fibres increased gradually toward the terminal in ring-porous wood. This area was almost constant through the annual ring in diffuse-porous wood, though it showed a slight increase toward the terminal or a slight decrease around the center of the annual ring.