

針葉樹材における構造の年輪内変移
に関する研究

1 9 6 8

佐 伯 浩

針葉樹材における構造の年輪内変移
に関する研究

1 9 6 8

佐 伯 浩

針葉樹材における構造の年輪内変移に関する研究

目 次

緒 言	1
第 1 章 既 往 の 研 究	3
第 2 章 構成要素の種類および形態の年輪内変移	5
第 1 節 構成要素の種類と分布	5
第 2 節 仮道管の形態の変移	7
第 3 節 仮道管の形態と早材・晩材の区分	14
第 4 節 要 約	19
第 3 章 細胞膜率の年輪内変移	20
第 1 節 細胞膜率の測定法	20
第 2 節 細胞膜率の年輪内変移	27
第 3 節 仮道管の直径および膜厚が細胞膜率の年輪内変移に及ぼす影響	34
第 4 節 幹内の部位別および冠級別にみた細胞膜率の年輪内変移	39
第 5 節 要 約	45
第 4 章 細胞膜の構造の年輪内変移	46
第 1 節 膜 層 構 成 の 変 移	46
第 2 節 フィブリル傾角の変移	52
第 3 節 膜 孔 分 布 の 変 移	56
第 4 節 細胞膜の化学的組成および結晶構造の変移	59
第 5 節 要 約	64

第 5 章	構造の年輪内変移と比重および吸湿性	65
第 1 節	真 比 重	65
第 2 節	比 重	69
第 3 節	吸 湿 性	77
第 4 節	要 約	83
第 6 章	構造の年輪内変移と縦引張強さおよび弾性	84
第 1 節	縦引張試験法の検討	84
第 2 節	縦引張強さおよびヤング係数	85
第 3 節	破 壊 形	93
第 4 節	構造の年輪内変移と縦引張強さおよび弾性との関連	98
第 5 節	要 約	105
結 言		107
総 括		109
引 用 文 献		112

緒 言

木材は生物体である樹木の代謝生産物であり、工業的に製造された材料にくらべその性質の変動がきわめて大きい。したがって木材の合理的利用のためには性質の変動について詳細なデータを得るとともに、それについての基礎的研究が必要である。

温・暖帯産の木材の横断面をみると一般に年輪が認められ、年々の生長層の積層した状態が観察されるが、1生長期間に形成された木材は必ずしも一様な性質を示すものではない。

針葉樹材の年輪には生長期の初めに形成された早材（春材）と後半に形成された晩材（夏材、秋材）という肉眼的にあきらかに異なった2層があり、細胞の形態に差異があるばかりでなく、物理的ならびに化学的にも異なった特性をもつ。たとえば、スギの晩材の全乾比重は0.71、早材のそれは0.27と報告されている¹¹⁴⁾。日本産の主要な針葉樹材の平均的な全乾比重をみると最大値はクロマツで0.51、最小値はサワラで0.31である⁵⁶⁾から、スギの早材と晩材の差異は樹種間のそれよりも大きい。このように1生長期間にわたって木材の構造と性質は著しく変化するが、このうつりかわりを本研究では年輪内変移と呼ぶこととする。

木材は年々の生長層のシリーズであるから木材の性質の生長層内での変移（年輪内変移）の究明は木材全体での変動をあきらかにするためにきわめて重要と考えられる。

前述したような早材と晩材の性質の著しい差異は木材利用上影響するところが多い。したがって木材の構造の年輪内変移すなわち早材から晩材への変移のパターンを正確に把握し、それに応じた利用を考える必要がある。

また年輪内においては構造上の変移と木材の性質の変移とが対応していると考えられるから、両者の関連をあきらかにすることは木材の性質の構造への依存性を究明する上で有意義と考えられる。

木材の性質の年輪内変移に関する研究にはいろいろな立場および方法があるが、その本質的な木材の構造に対して大きな関心を払うことなく、全く物理的あるいは機械的な方法で追究する傾向がみられる。しかしながら木材は種々の細胞の集まった組織であり、また生長期間中の樹木の生理的変化が細胞の形成・分化に影響して年輪内に構造上の変移をもたらすのであるから、年輪内変移に関する研究においては木材構造学的な観点からの研究が他の方法による研究

に先行すべきであると考え。

本研究では始めに年輪内における構造の変移について述べ（第2・3・4章）、次に構造の年輪内変移と2, 3の物理的性質との関連について述べた（第5・6章）。

本研究では同一年輪内の方位による変動、接線方向の変動は対象とせず、またすべて正常材の年輪について調べた。

年輪内における構造上の変移では仮道管のディメンション変化を重視する立場から、第2章においてその変移曲線を求めて検討し、第3章では細胞膜率との関連づけを通じてディメンションの年輪内の変移の意義を考え、第4章では細胞膜の構造とくに膜層構成割合ならびに化学的組成との関連を検討した。

木材の性質と構造との関連性の究明には木材物理学・木材化学などの専門的立場からの基礎的研究を必要とする。また木材の構造の変移も複雑であって、第2～4章で調査したものはそのうちの数種の要因にすぎない。したがってここでは調査した要因の年輪内変移が2, 3の物理的性質にどのように影響するかを相対的評価ないしはそれらの性質の年輪内変移の指標としての意義をあきらかにすることを目標に、第5章において真比重、比重および吸湿性、第6章において縦引張強さおよび弾性との関連を検討した。

本研究のうち、第2～3章に関する実験は主として鳥取大学農学部森林利用学研究室において、第4～6章に関する実験は京都大学農学部木材工学研究室および木材構造学研究室で行なった。この間終始御指導ならびに御援助を賜った京都大学原田浩教授、同中戸莞二教授、同貴島恒夫教授、鳥取大学酒田金治教授、同岸本潤助教授、林業試験場木材部加納孟材料科長に謹んで感謝する。また機器の使用等にあって格別の御援助をいただいた木材工学および木材構造学研究室の各位に、実験に協力された鳥取大学林学科森林利用学研究室の専攻生諸氏（昭和35～40年）に深謝する。

第1章 既往の研究

針葉樹材の年輪では2, 3の樹種を除いて晩材が顕著に認められ, その年輪幅に対する割合すなわち晩材率(秋材率・夏材率)は年輪の構成の最も簡単で代表的な表現方法であり, 測定の容易な指標として年輪幅とともに広く採用されている。

晩材率に関する調査研究はその変動に関するものと, 比重など木材の性質との関連についてのものに大別される。

変動については樹種間の変動, 個体間の変動, 樹幹内の変動, 樹齢との関係, 環境, 保育方法などの影響について多くの報告がある^{16) 30) 44) 66) 95) 97) 109)}。晩材率と木材の性質との関連については, とくに比重との間に密接な関連があることが報告されている^{66) 88) 95) 97)}。

多くの晩材率に関する研究に共通的な弱点は早材と晩材の区分が年輪内の材色の濃淡の推移から測定者の主観により定められることで, 晩材への移行がゆるやかな場合には種々の工夫が行なわれているが⁹⁷⁾, 個人的な片寄りがかなり大きくなる⁸⁴⁾。

また年輪を単に早材・晩材の2層に区分するのみで, それぞれの構造的変化が全く無視されるのは, とくに木材の性質との関連を考えると不十分である。

早材と晩材の境界を正確に定める基準を構造上の特徴に求めようとするのは当然であり, Morkの定義⁵⁷⁾が基本となり, それを2, 3修正した方法がある^{31) 107)}。このような一定の基準による区分は晩材率の正確な測定にはよいが, 一方では年輪内の複雑な構造変化や, その樹種による特徴を把握することができない。

木材の性質の年輪内変移については物理的・機械的方法たとえば光の透過度⁵⁸⁾, 硬度⁵²⁾などによるミクロな分析が早くから行なわれ成果をあげた。最近では表面あらさ測定による年輪分析および比重の推定⁴⁸⁾, β 線による比重測定が試みられ^{38) 80)}, 年輪内変移の正確かつ自記的測定が可能となりつつある。

これに対して解剖学的測定によって年輪の特徴の表現を試みたのはV. Pechmann⁶⁵⁾であり, 仮道管の直径と膜厚の年輪内変移を図示した。

年輪内における仮道管のディメンションの変移については, 仮道管長のそれが詳細に研究されている^{6) 62)}。横断面のディメンションについては樹種の解剖学的記載に際して広く調査された

が、年輪内変移の解析を目的とした研究^{30) 65) 107)}は少ない。

また近年、解剖学的な特性の一つとして細胞膜面積あるいはその細胞面積に対する割合（本研究では細胞膜率と呼ぶ）が注目され、その測定方法および比重との関連が報告されているが^{40) 86) 98)}、年輪内変移については全く検討されていない。

年輪内における木材の性質の変移、とくに早材・晩材の差異については多くの研究がある。

比重あるいは容積密度数については年輪を早材・晩材別に分割した小試片を作り測定した結果が多数報告されている^{64) 97) 99) 113) 114) 115)}。これらの調査では一般に晩材の比重は早材のそれにくらべ分布が広く樹種による差異も大きい⁹⁷⁾。すなわち肉眼的に濃色の層を画一的に晩材としているが、その構造が単一でないことを示している。また細胞膜の比重（または packing density）について早材の細胞膜は多孔性であるため、晩材のそれにくらべ低いとする報告がある^{27) 116)}。

収縮・膨脹における早材・晩材の差異についての研究も多く、目やせの観察⁷⁾、分割した試片についての測定^{12) 99)}、顕微鏡的研究^{11) 29) 59)}がなされている。

力学的性質における早材・晩材の差異、年輪内の変移については前述したごとく硬度試験および縦引張試験が多く行なわれている。とくに後者では改良された方法²⁴⁾によって研究が行なわれ、比重・縦引張り強さ・ヤング係数の年輪内変化があきらかにされ^{22) 23) 25) 34)}、関連する因子についても検討がなされている²²⁾。

一方、化学的組成については Ritter と Fleck⁶⁹⁾による米国産針葉樹材についての報告、細胞膜中における多糖類の分布^{53) 54)}、 α セルロース含有量¹⁷⁾などの報告があり、また最近、年輪内における化学的組成の変化について詳細な研究がなされ¹¹⁰⁾、わずかではあるが、化学的組成に差異があることがわかってきた¹¹⁾。

以上の既往の研究について次の2点が指摘できる。

第1に木材の性質の年輪内変移における構造の意義が十分に認識されていない。たとえば仮道管のディメンションは生育期間中の樹木の生理と関係しているから^{45) 105)}、その変移のパターンは他の性質のそれを検討する際の基礎となる。しかし、木材の性質のうち比重や硬さなどの測定は機械的に行なわれる傾向が強く、ディメンション変移との関連は検討されていない。

第2に木材の性質と構造との関連の検討が、収縮（膨脹）関係の研究をのぞき一般に不十分である。材質試験を行なった試料の構造を調査し、その関連を検討しているものが少ない。化学的組成変化についての研究もこの点では同様である。

この原因として、構造の調査には木材解剖の専門技術を必要とすること、木材の分類上必要な構造的特徴と材質との関連上問題となるそれとは異なる場合が多いこと、木材全体の構造の特徴を数値的に把握することが困難であることなどが考えられる。

第2章 構成要素の種類および形態の年輪内変移

第1節 構成要素の種類と分布

針葉樹材を構成する要素は仮道管および放射柔細胞が基本的で、樹種により放射仮道管、樹脂細胞、軸方向・放射方向樹脂道のエピセリウム細胞をもつ。このうち仮道管がもっとも多く約95%を占めている。

1. 構成要素率

各構成要素の割合を調査する方法には全数調査法、散点法、斜線法など種々考えられている。針葉樹材では仮道管以外の要素の占める割合がきわめて小さいので、全数調査法によるのがよい。放射組織および樹脂道について顕微鏡写真の切抜秤量法を用い、樹脂細胞については年輪内で層化して、各層における分布数と細胞1個の平均面積とを乗じて求めた。この研究に用いた針葉樹材のうち、特徴的な年輪内構造変移をもつ5種についての調査結果はTable 1のとおりである。

Table 1 構成要素率

樹種	仮道管 %	放射組織 %	樹脂道 ¹⁾ %	樹脂細胞 %	平均年輪幅 mm
アカマツ	95.2	4.0 ²⁾	0.8	—	1.6
スギ	95.6	4.0	—	0.4	1.9
ヒノキ	96.3	3.5	—	0.2	2.5
カラマツ	95.3	4.5 ²⁾	0.2	—	0.9
コノテガシワ	94.0	5.9	—	0.1	2.5

1) 軸方向樹脂道 エピセリウム細胞を含む。

2) 放射方向樹脂道を含む。

Table 1にみられるように、樹脂道あるいは樹脂細胞が1年輪内で占める割合は1%に満たない。

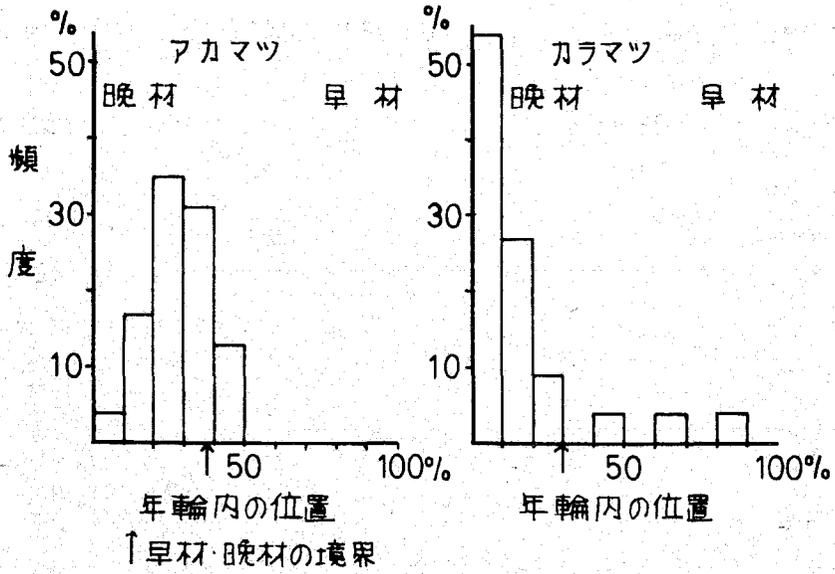


Fig.1 軸方向樹脂道の年輪内分布

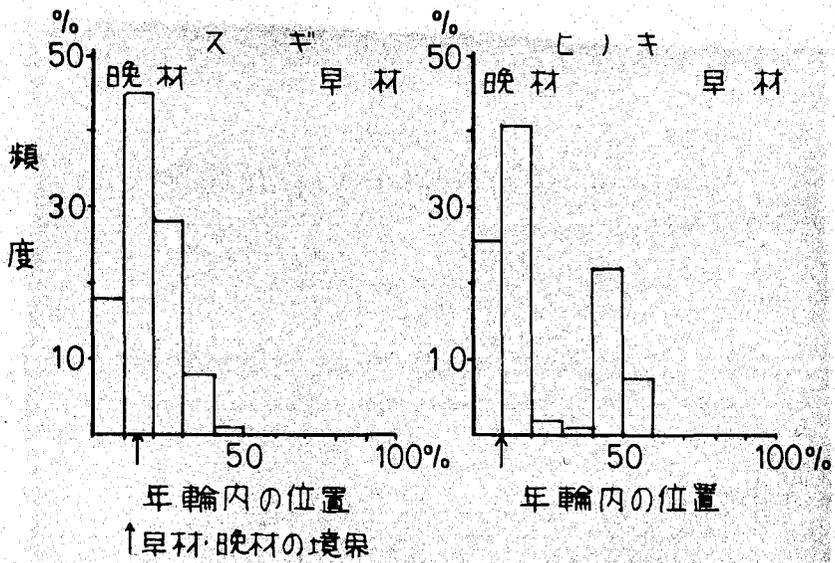


Fig.2 樹脂細胞の年輪内分布

2. 構成要素の年輪内分布

次に、これらの要素の年輪内分布を考える。放射組織の占める割合は同一年輪内の早材と晩材とで、ほとんど差異がない。一例をあげれば Table 1 の試料でスギでは早材、晩材とも平均 4 %、ヒノキでは早材平均 4 %、晩材平均 3 % であった。

軸方向樹脂道は早材より晩材への移行部分から晩材側に多く存在する。アカマツとカラマツにおいて年輪内における軸方向樹脂道の分布状態を調査した結果を Fig. 1 に示す。軸方向樹脂道の平均的な位置はアカマツでは年輪の外周から 29 %、カラマツでは同じく 17 % である。

Table 1 の軸方向樹脂道の割合は、1 年輪全体に対する値であるから、樹脂道の集中している部位についてその割合を求めた。年輪界に平行に、軸方向樹脂道を含むベルトを設定し、そのベルト内における軸方向樹脂道の割合をみると、アカマツでは 4 ~ 9 %、カラマツでは 2 ~ 4 % であった。

樹脂細胞もまた年輪内に均等に散在する樹種（例 イヌガヤ、イヌマキなど³⁶⁾）は少なく、スギやヒノキでは接線状・帯状に配列することが多い。分布の状態は Fig. 2 の通りであり、年輪の外周から 10 ~ 20 % の位置に最も多い。コノテガシワはスギやヒノキと異なり散在する傾向が強い。

樹脂細胞が集中して存在するところに、同様にベルトを設け、ベルト内における割合を調査したところ、スギでは 1 ~ 2 %、ヒノキでは 1 ~ 3 %、コノテガシワでは 1 ~ 2 % であった。

第 2 節 仮道管の形態の変移

針葉樹材の主構成要素である仮道管の形態は 1 年輪内において著しく変化する。生長期の初期に形成された早材仮道管は薄膜、大径であり、後期に形成された晩材仮道管は一般に厚膜、小径である。一般によく知られている仮道管の形態上の変移を要約すると次の通りである。

- 1) 横断面において、仮道管の接線方向直径の変化は少ないが、半径方向直径は晩材に向かい著しく減少する。従って晩材仮道管は横断面で偏平な形状を示す。
- 2) 細胞膜厚は、早材で薄く 晩材では厚い。
- 3) 仮道管の長さは晩材になると大きくなり、約 12 ~ 25 % 増加する。⁶³⁾
- 4) 早材仮道管は大形の有縁膜孔が多く、2 次膜中層のフィブリル傾角が大きい。

上記のうち、1)～3)項は仮道管のディメンションの変化であり、単純な事柄であるが、年輪内における構造の変移の基調をなすもので、以下これについてのべる。なお4)項は細胞膜の構造に関するものであり第4章で論ずる。

1. 仮道管のディメンション変移の測定

年輪内における仮道管のディメンションの変移を検討するためには、まずディメンションを正確に把握しなければならない。ところが、仮道管のディメンションは同一部位でもきわめて変動が大きいので、測定する細胞の選択や測定数を適切にとる必要がある。

(1) 直径と膜厚の測定

仮道管の大きさの変化は木口断面において最も容易にみることができる。プレパラートの作成法は種々あるが、この研究では通常、木材ブロックを蒸和罐により $140^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ で3時間軟化し、 $15\sim 20\mu$ の切片をとり、酢酸メチルグリーンで染色、水洗後、ゴムシロップ（水溶性）で封入し、 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{C}$ で乾燥定着させて仕上げた。

プレパラート作成過程において、細胞のディメンションには種々の変化が生ずるが、上記の方法で仕上げたプレパラート中の細胞のディメンションは、飽水材を蒸煮処理をしないで切片とし、水で封入した一時プレパラート中の細胞のそれに近い⁷³⁾。

ディメンションの測定は顕微鏡写真上、あるいは、顕微投影器による投影像上で測定した。拡大像の鮮明さは根本的には顕微鏡の解像力あるいは区画力に依存するが、写真の場合は乳剤中の粒子の大きさ、投影像の場合は、スクリーンのすりガラスの精粗が著しく影響する。この研究では、通常40倍（開口数0.70）の対物鏡を用い、500倍の写真あるいは投影像について測定を行なったが、像の周縁の決定には約 0.1mm （ 0.2μ ）の誤差を見込む必要がある。このようなことから、500倍の拡大像で 5mm 以上のディメンションは透明の物差しを用い $1/2\text{mm}$ まで、これ以下のディメンションではルーペ（ $1/10\text{mm}$ 目盛付）を用い $1/4\text{mm}$ まで読みとった。

年輪内の早材から晩材への仮道管のディメンション変化を測定するのであるから、半径方向に測定の基線を設ける。基線上に定めた測定点で接線方向にサンプリング線を取り、その線上の仮道管のディメンションを測定して平均値を求め、測定点における仮道管のディメンションとする。投影像による場合は、プレパラート上に基線を描き、それを投影スクリーンの十

字線の縦線に合せ横線をサンプリング線とする。

この場合平均値の誤差は接線方向におけるディメンションの変動の程度と、測定数に依存する。接線方向におけるディメンションの変動を、アカマツ、スギおよびヒノキについて調査した結果、接線方向直径の変動係数は25~30%で最も大きく、半径方向直径および膜厚のそれは10~20%であった。

平均値の標準誤差を、接線方向直径では標準偏差の $1/4 \sim 1/5$ 、半径方向直径および膜厚では $1/2 \sim 1/3$ になるようにするには、

$$\text{測定数 } n = (\text{標準偏差} / \text{標準誤差})^2$$

であるから、前者では $n = 16 \sim 25$ 、後二者では $n = 4 \sim 9$ となる。これより測定数は、接線方向直径については20個、半径方向直径および膜厚については5個を測定した。

次に、基線上の測定点は等間隔にとらないで、年輪内の変化をよく把握できるように適宜に定め、早材から晩材への移行部など、変化のはげしいところでは密にとる。年輪始点から測定箇所までの距離はプレパラートを置いた載物台の移動距離を顕微鏡にとりつけたダイヤルゲージ ($1/100 \text{ mm}$) で読み取るのが簡単でよい。

このようにして得られたディメンションの変移曲線は、細部の凹凸には差があるが、全体としては再現性がよい⁷⁴⁾。晩材の測定点における直径と膜厚の平均値の偏差は、変動係数にして3~9%である。また膜厚が最大になる点(後出Fig.3参照)あるいはMorkの定義(後出第3節参照)による早材・晩材境界の点についても、細胞数にして1~2個の誤差で求めることができる。直径と膜厚については、前述の方法で得られた変移曲線を用いて、その年輪内変移を検討することができる。

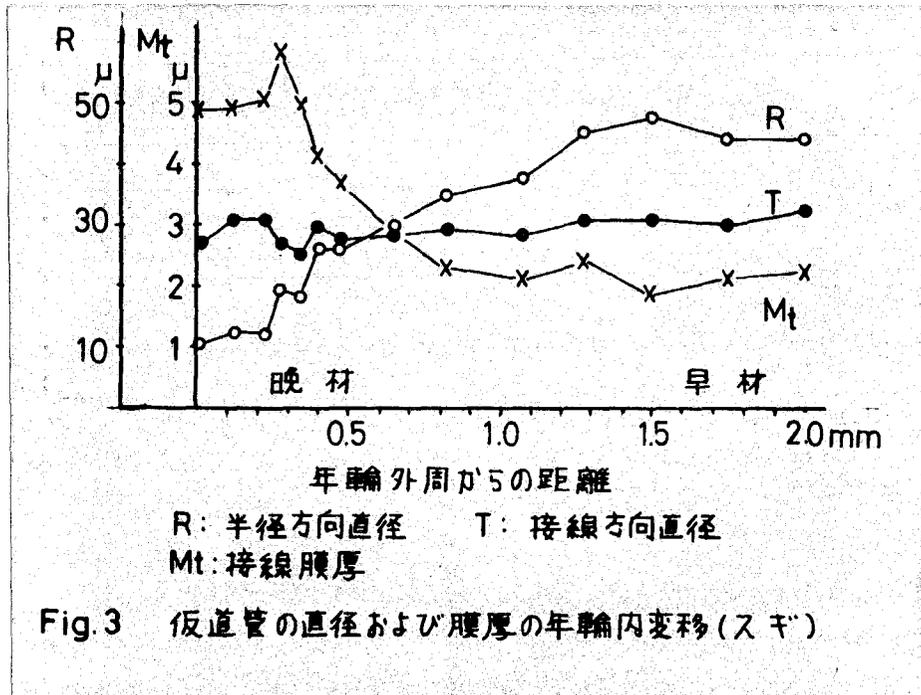
(2) 仮道管長の測定

仮道管長の年輪内変移をみるためには、1年輪内より連続した板目切片をとり、その各々について解織法、あるいは、細胞先端法 (cell-tip method³⁹⁾) によって仮道管長を測定する。この研究では早材・晩材別に分割した材片をJeffrey氏液により解織し、投影像 (50倍) で測定した。また、解織に際して、仮道管は先ず半径膜間で剝離する傾向があるが、これを利用して、同一の始原細胞から形成された半径方向の1細胞列をとり出すことができる。これによって年輪内における仮道管長変移を調べることができる。

2. 直径と膜厚の変移

(1) 変移の概要

年輪内における半径方向直径R, 接線方向直径Tおよび接線膜厚Mtの変移の一例(スギ55年)をFig. 3に示す。Rは早材では大きい, 晩材に向かい減少し, 年輪界(晩材最終細胞)で最小となる。Tは晩材に向かい僅かに減少するが(後出Table 2参照), ばらつきが著しく必ずしも晩材最終細胞のそれが最小となるものでもない。Mtは早材では小さく, 晩材で増加して最大値に達した後, 晩材最終細胞に向かい減少する。半径膜厚Mrもほぼ類似の経過を示す。



直径と膜厚の変移の度合いをみるために変移曲線上で, 直径については早材最大値に対する晩材最小値の比, 膜厚については早材最小値に対する晩材最大値の比を計算し, Table 2に示す。

どの樹種においても, TにくらべてRの変移が著しく, 晩材(最終細胞)の直径は, 早材最大値の $1/5 \sim 2/5$ に減少する。膜厚については, 樹種により差異があり, カラマツの晩材

Table 2 年輪内における仮道管直径および膜厚の変化 (早材と晩材の比)

樹 種	接線方向直径	半径方向直径	接線膜厚
	$\frac{T_{Lmin}}{T_{Emax}}$	$\frac{R_{Lmin}}{R_{Emax}}$	$\frac{M_{Lmax}}{M_{Emin}}$
イ チ イ	0.75	0.25	1.7
カ ヤ	0.95	0.34	1.4
イヌ マ キ	0.89	0.41	1.3
モ ミ	0.95	0.26	3.6
ト ド マ ツ	0.90	0.20	3.3
ト ウ ヒ	0.99	0.23	2.9
カ ラ マ ツ	0.87	0.19	4.3
ア カ マ ツ	0.91	0.22	2.8
ゴ ヨ ウ マ ツ	0.94	0.21	1.8
ツ ガ	0.80	0.30	2.5
ス キ	0.93	0.29	3.6
ヒ ノ キ	0.91	0.24	2.1
サ ワ ラ	0.99	0.26	2.2
ヒ バ	0.83	0.26	1.5
コ ノ テ ガ シ ワ	0.92	0.32	1.1
ネ ズ ミ サ シ	0.92	0.31	1.6

T_{Lmin} , R_{Lmin} : それぞれ晩材仮道管の接線方向直径および半径方向直径の最小値

T_{Emax} , R_{Emax} : それぞれ早材仮道管の接線方向直径および半径方向直径の最大値

M_{Lmax} : 晩材仮道管接線膜厚最大値

M_{Emin} : 早材仮道管接線膜厚最小値

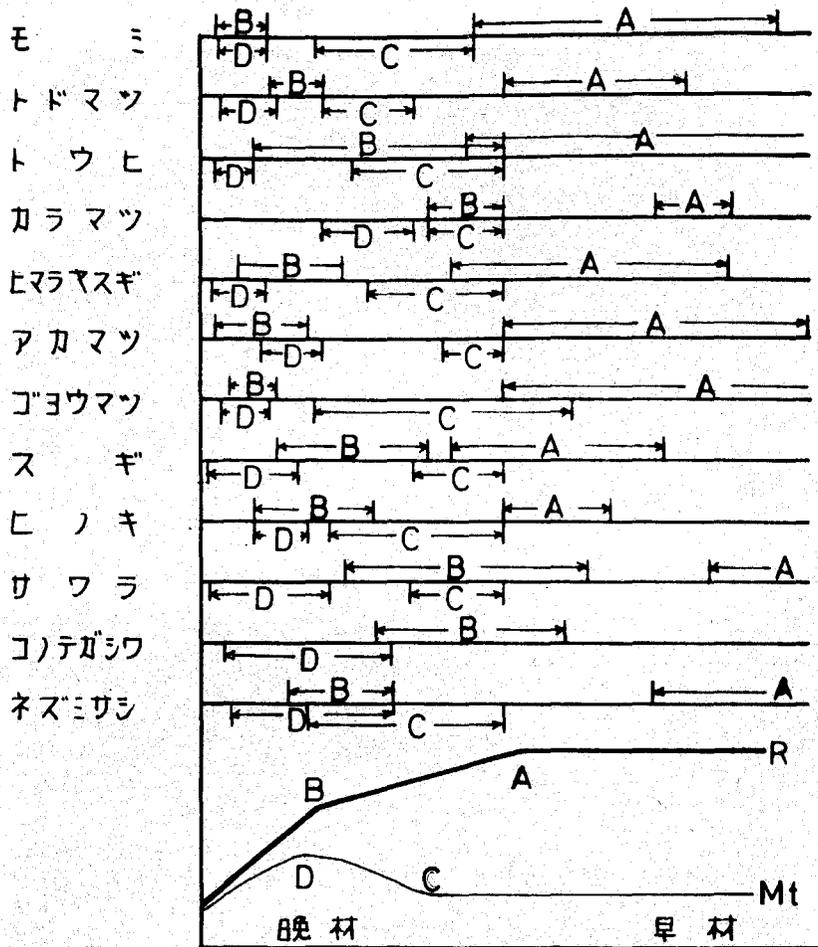
は早材の4.3倍の厚さに達するのに対し、コノテガシワの晩材の膜厚は早材の1.1倍にすぎない。

(2) RとMtの変移の関連性

直径と膜厚の年輪内変移の概要は前述の通りであるが、この中で、変移の顕著な半径方向直径Rと接線膜厚Mtについて、年輪内の変移における関連を検討した。

RとMtの変移曲線上で、Rが漸減しはじめる点(A)、急減に移る点(B)、Mtが急増しはじめる点(C)および最大となる点(D)を定めて(Fig. 4下図)、各点の相対的な位置関係を

示すと，Fig.4上図の通りとなる。



A : 半径方向直径R漸減開始点

B : 半径方向直径R急減開始点

C : 接線腹厚Mt急増開始点

D : 接線腹厚Mt最大の点

Fig.4 半径方向直径および接線腹厚の

年輪内変移の比較

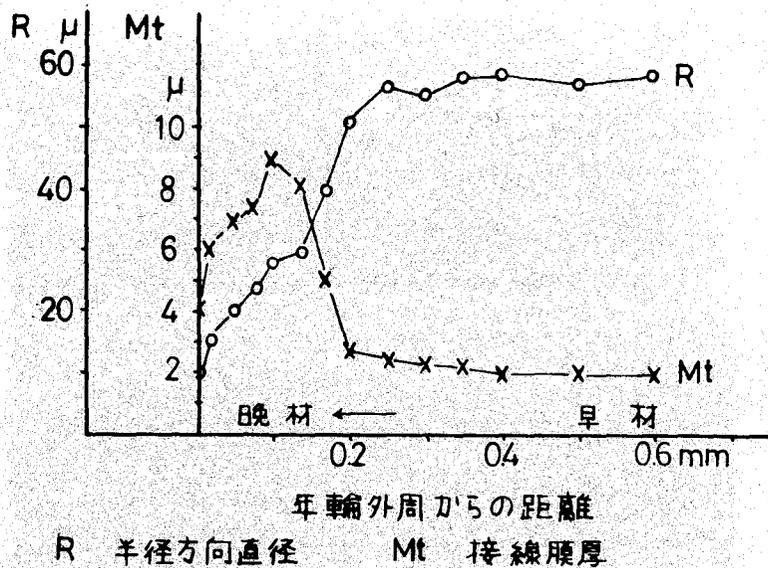


Fig. 5 仮道管の直径および膜厚の年輪内変移 (カラマツ)

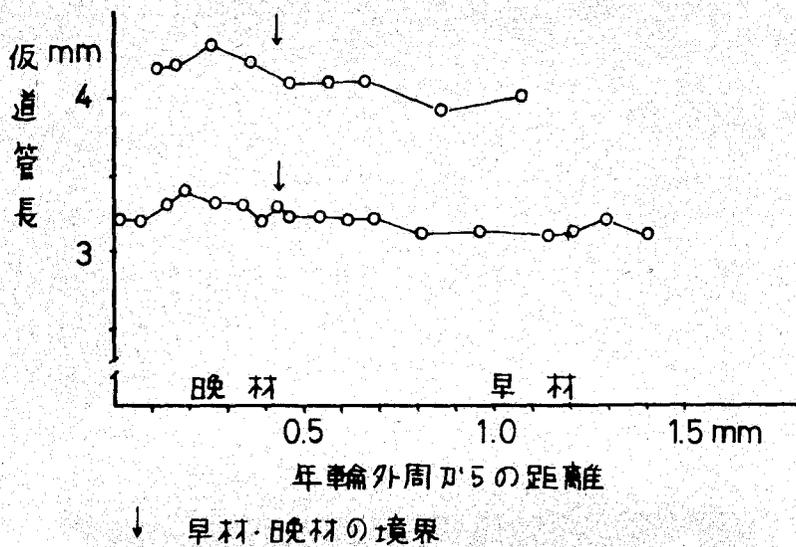


Fig. 6 仮道管長の年輪内変移 (スギ)

概括的にみれば、まずRが徐々に減少しはじめ、次にMtの増加が著しくなり、その後Rの急激な減少と、Mtの最大値が相前後してあらわれる。多くの樹種ではRが急減しはじめてから、Mtが最大となるが、アカマツではMtの最大点が先行し、カラマツではRの急減とMtの増加が同時に起こる場合が多い (Fig.5)。

RとMtの変化点(A)~(D)の相対的位置には、同一樹種の連続した年輪間においてもかなりの変動があり、また、前述のアカマツとカラマツを除けば、樹種の特徴も明瞭でない。

生育期後半におけるRとMtの変化の間に、前述のように、規則性が見出されないことは、両者の変化が、同一の生理学的機構によって制御されていないこと^{45) 105)}の現われと思われる。

3. 仮道管長の変移

年輪内における仮道管長の変移は、横断面における直径や膜厚の変移ほどには顕著でない。Fig.6はスギの55年の年輪からとり出した半径方向の1細胞列における仮道管長の変移を示したものである。

仮道管長は早材から晩材への移行部より増加しはじめ、晩材部中央で最大に達したのち、減少する。年輪内で連続的にとった板目切片を解繊して求めた平均仮道管長について同様の結果⁶²⁾が得られている。

次に、この研究に用いた針葉樹のうち、主要な5樹種の試料について、肉眼的に早材と晩材に分割し、解繊して平均仮道管長を求め、早材と晩材との比を計算するとTable 3の通りとなる。晩材の仮道管長は4~22%大きい。

Table 3 早材と晩材の仮道管長の比

樹種	晩材仮道管長 早材仮道管長
カラマツ	1.04
アカマツ	1.21
スギ	1.08
ヒノキ	1.22
コノテガシワ	1.10

第3節 仮道管の形態と早材・晩材の区分

年輪を肉眼的にみた場合、早材は淡色であり、晩材は濃色であるので、この色の推移から早材と晩材とを区分する。ところが、早材・晩材の移行がゆるやかな材では、両者の区分が困難であるから、境界を明らかにするため、例えば、マラカイト・グリーンとメチレンブルーの

ルコール溶液で材を染色するなどの工夫がなされている。しかし、外見による区分は測定者の主観に左右されることが多いので、古くから早材と晩材の境界を定める一層の確実な基準として、仮道管の形態、ディメンションの変化に関心がもたれた。

構造的な基準として、最もよく用いられるのはMork⁵⁷⁾の定義である。Mork⁵⁷⁾は、ノールウェイ・スプルース (*Picea abies* (L.) Krast) について、仮道管の半径方向の内腔径 L_r と接線膜厚 M_t の比 $L_r/2M_t$ が2に達した所で、早材・晩材の境界があたえられるとした。のちに、Wiksten¹⁰⁷⁾はこの定義を修正して疑わしい場合は仮道管接線方向直径 T と半径方向直径 R の比を考慮して、早材・晩材の境界は $T/R=1.1$ であるとし、これをもってMorkの定義を補うよう提案した。

既往の研究では^{31) 38) 118)}、前述の $L_r/2M_t$ 、 T/R あるいは R/T および M_t などを、単独に、あるいは、組合せて基準としている。このような仮道管の形状による早材・晩材の区分に際しての問題点についてのべる。

1. $L_r/2M_t$ および R/T の年輪内変移

$L_r/2M_t$ の年輪内における変移をみると、最大値は早材部にあらわれ、最小値は晩材部の

Table 4 $L_r/2M_t$ および R/T の年輪内変移

樹種	$L_r/2M_t$		R/T		
	最大値 (早材)	最小値 (晩材)	最大値 (早材)	$L_r/2M_t=2$	最小値 (晩材)
モミ	7.5	0.19	1.33	0.95	0.37
トドマツ	10.0	0.19	1.28	0.86	0.28
トウヒ	9.2	0.15	1.37	0.86	0.30
カラマツ	12.9	0.20	1.55	0.90	0.32
ヒマラヤスギ	6.2	0.08	1.29	0.80	0.35
アカマツ	7.1	0.52	1.45	0.97	0.32
ゴヨウマツ	8.5	0.65	1.35	0.71	0.29
スギ	9.2	0.10	1.18	0.80	0.37
ヒノキ	5.7	0.12	1.18	0.84	0.31
サワラ	7.9	0.22	1.40	0.75	0.33
コノテガシワ	3.0	0.13	1.11	0.96	0.36
ネズミサシ	3.2	0.11	1.26	0.96	0.40

L_r : 半径方向内腔径
 M_t : 接線膜厚

R : 半径方向直径
 T : 接線方向直径

年輪界あるいはその近くにある。樹種ごとにみると最大値は6~13で、コノテガシワとネズミサシは例外的な小さい値を示す。最小値は、アカマツとゴヨウマツを除き、おおむね0.1~0.2である (Table 4)。

早材から晩材への $L_r/2Mt$ の経過をみると、多くの年輪では Fig. 7 の (c) のように、 $L_r/2Mt=2$ の前後では、比較的急傾斜で直線的に減少する。このような年輪では Mork の定義によって早材・晩材の境界を明確に区別できる。しかし、早材の $L_r/2Mt$ の値が小さい年輪、あるいは、早材から晩材への移行のゆるやかな樹心付近の年輪では、 $L_r/2Mt=2$ 前後における変化が不規則で、Mork の定義による区分は困難である。

R/T の年輪内変移をみると、最小値を示すのは年輪の最終細胞であり、樹種による差は少なく 0.3~0.4 である。最大値は早材にみられ、その値は大体 1.2~1.5 である (Table 4)。接線方向直径 T は早材から晩材に向かったの変化が少ないので、 R/T の年輪内変移は半径方向直径 R のそれに類似する。

$L_r/2Mt=2$ における R/T の値は、0.7~1.0 で、樹種により多少の差異がある (Table 4)。

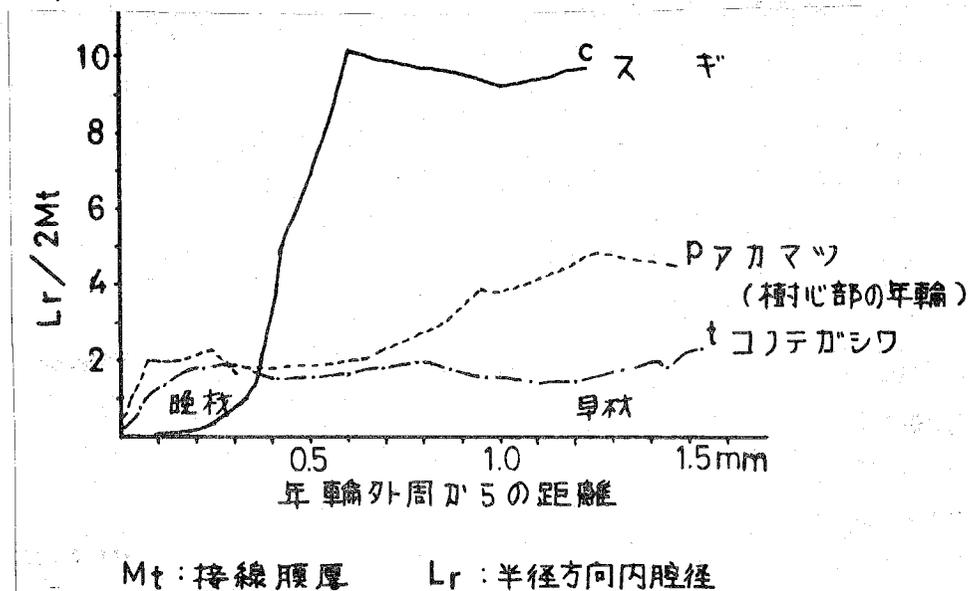


Fig. 7 $L_r/2Mt$ の年輪内変移

2. 材色の濃淡の変移と $L_r/2Mt$ および R/T との関連

材色の濃淡の変移により早材・晩材を区分することは、前述したように、測定者の主観に左右される欠点があるが、実用上簡便で、多く用いられている。この外観的な区分と、 $L_r/2Mt$

など構造的な区分との間の関連をみるために、年輪内において、晩材に向って材色が徐々に濃くなり始める点、および全く濃色となる点における $Lr/2Mt$ および R/T の値を調査した (Table 5)。

Table 5 材色の濃淡の変移と $Lr/2Mt$ および R/T

樹種	色調変化開始点		濃色層始点	
	$Lr/2Mt$	R/T	$Lr/2Mt$	R/T
モミ	2.6	1.0	1.2	0.9
トドマツ	2.6	0.9	1.0	0.7
トウヒ	2.2	0.8	0.9	0.7
カラマツ	—	—	0.9	0.8
ヒマラヤスギ	1.9	0.8	0.9	0.7
アカマツ	2.5	1.0	1.7	0.8
ゴヨウマツ	1.9	0.6	1.2	0.5
スギ	2.7	0.9	0.9	0.6
ヒノキ	1.7	0.8	0.6	0.6
サワラ	—	—	0.8	0.5
コノテガシワ	—	—	0.7	0.6
ネズミサシ	1.3	0.9	0.6	0.6
平均	2.2	0.9	1.0	0.7

Lr : 半径方向内腔径

R : 半径方向直径

Mt : 接線膜厚

T : 接線方向直径

全樹種を平均したとき徐々に色調変化が始まる点の $Lr/2Mt$ は 2.2 であるが、樹種別にみれば最小値 1.3 (ネズミサシ)、最大値 2.7 (スギ) であり、かなりの差異がある。色調がさらに濃くなって明らかな濃色層となるのは全樹種の平均で $Lr/2Mt=1$ であるが、樹種ごとにはかなりの差がある。

R/T についてみれば、色調変化開始点における平均が 0.9、濃色層始点の平均が 0.7 であるが、 $Lr/2Mt$ の場合と同様、樹種によりかなりの差がある。

なお、色調の変化点と、仮道管のディメンションの変移との間には直接的な関連はみられない。

ここでのべた色調の変化点は、あくまでも著者の認定したものであるが、 $Lr/2Mt=2$ および $R/T=0.9$ の点の前後より材色は濃色化するものと思われる。したがって、外観的な区

分と、MorkあるいはWikstenの定義による区分とは関連があり、晩材幅や晩材率の測定値も近似するものと思われる。しかし、サワラ・コノテガシワ・ネズミサシなどでは著しく異なる。

3. 仮道管のディメンションと早材・晩材の区分

樹木の生長期間の前期から後期にかけて、肥大生長に転期があり、それが仮道管のディメンションの変化をもたらすものと思われる。したがって、変化の著しい半径方向直径Rや膜厚Mによって、年輪内を区分することは生理学的観点では望ましいと考えられる。しかしながら、生長あるいは生理上の転期を、RまたはMの変化のどの点にもとめてよいか不明であるから、それらによって早材・晩材を区分したとしても、樹木生理との関連は明確でなく、人為的な区分にすぎない。

また、RとMは、樹種によって変移に差が著しいので、どちらか一方のみを用いた区分法^{38) 118)}は一般的に用いるには不十分である。⁷⁵⁾

早材から晩材への移行は、カラマツのような例外的な樹種をのぞき、本質的には漸進的なものであり、その間を区分することはどのような方法によっても人為的性格を免がれない。むしろ、年輪内を区分する目的に応じて、適当な基準を定めるべきものと思われる。

Morkの定義は仮道管のディメンションを用いるが、 $Lr/2Mt$ は半径方向の空隙対膜量の比を示すもので、細胞膜率の指標である。したがって、早材と晩材を細胞膜率あるいは密度の異なった層として区分するものである(第3章第2節参照)。

Morkの定義によって、早材・晩材区分が有効に行なわれるためには、(1)早材における $Lr/2Mt$ の値が高いこと(少なくとも4以上)、(2)晩材において $Lr/2Mt$ が2以下になること、(3) $Lr/2Mt=2$ 前後における変化が急で直線的であること、が必要である。

主要な針葉樹材のうち、イヌマキ、コノテガシワ、ネズミサシは(1)項を欠き(Fig.7(t))、ヒノキ、ヒバなど早材における $Lr/2Mt$ の値が比較的低い樹種ではしばしば(3)項を欠くことにより、Morkの定義の適用が困難である。またマツ類の樹心の年輪も(3)項を欠くことにより定義の適用が困難である(Fig.7(p))。

前記の(2)項が満足されない、すなわち、晩材において、 $Lr/2Mt > 2$ の例は、ラディアータ・パイン(Pinus radiata D. Don)において例外的に存在するといわれる。⁹⁴⁾

前述の樹種や事例を除き、Morkの定義は早・晩材の区分に極めて有効であり、外観的な区分との関連性も高く、測定も比較的簡単である。問題は、適合し難い事例に当たったときの修

正の方法である。Wiksten¹⁰⁷⁾は T/R によって補っているが、前述のように、Morkの定義が細胞膜率ないし密度に関連する性格をもっているから、修正する方法も、同様の立場から年輪を区分するものであることが望ましい。

次章で詳述するが、 $Lr/2Mt$ と細胞膜率とは密接な関係がある。したがってMorkの定義の適用できない樹種の年輪については、細胞膜率の年輪内変移および外観的な区分との関連を検討した上で、 $Lr/2Mt$ の変移曲線上で区分点を定めるのがよい。このような検討をした結果ヒノキ、コノテガシワおよびネズミサシに対しては $Lr/2Mt=1$ の点、アカマツの樹心付近の年輪に対しては $Lr/2Mt=3$ の点が区分点として適当であった。

第4節 要 約

- (1) 針葉樹材を構成する要素の割合をみると、仮道管の占める割合が最も大きく約95%である。放射組織の占める割合は早材と晩材とでほとんど差異がなく、軸方向樹脂道および樹脂細胞は年輪内で特有の分布傾向を示すが、これらの占める割合は年輪内の最も集中した個所で数%にすぎない。したがってこれらの要素が針葉樹材の構造の年輪内変移に寄与するところはきわめて少ないと考えられる。年輪内の構造上の変移は主要素である仮道管に求めなければならない。
- (2) そこで仮道管のディメンションの年輪内変移を測定する方法を検討し、それによって年輪内における変移曲線を得た。

仮道管の大きさは晩材に向かって直径は減少し長さは増加する。その増減の程度は長さおよび接線方向直径では10~20%であるが、半径方向直径では70~80%に達する。仮道管の細胞膜厚は晩材で最大に達したのも年輪界に向かって減少する。増加の程度には樹種により著しい差異がある。

- (3) 仮道管のディメンションの年輪内変移にもとづき早材・晩材を区分することが考えられるが、この場合最もよく用いられるのはMorkの定義である。この定義に用いられる $Lr/2Mt$ の年輪内変移を調べた結果、ほとんどの樹種について適用できるが、イヌマキ、コノテガシワ、ネズミサシ、ヒノキおよびヒバには適用できない。またアカマツの樹心付近の年輪にも適用できない。 $Lr/2Mt$ は細胞膜率の指標の一種であるから、Morkの定義は早材と晩材を細胞膜率の差異により区分しているものである。この定義の適用できない年輪についても同じ観点から区分すべきであり、 $Lr/2Mt$ の変移曲線と細胞膜率曲線(次章)との組合せによって区分点を定めることができる。

第3章 細胞膜率の年輪内変移^{73) 74) 75) 76) 77) 78) 79)}

細胞膜率とは 横断面において細胞全面積中に占める細胞膜面積の割合である。すなわち横断面上の実質率であって、比重あるいは密度に匹敵する基本的な材質指標としての意義をもつ。年輪内における細胞膜率の変移を支配するのは仮道管の細胞膜率である。以下その年輪内変移についてのべる。

第1節 細胞膜率の測定法

最も基本的な方法は木材の横断面を適当に拡大した像（顕微鏡写真，投影像あるいはカメラ・ルシダによる描画像など）を作り，内腔などの空隙部分あるいは細胞膜の面積を測定して求めるものである。面積はプランメーターによって直接求める方法と，拡大図から測定対象の組織あるいは細胞を切抜き，その重量と空隙部分を切取った残部（膜部分）の重量との比から間接的に求める方法（以下，秤量法と呼ぶ）がある。

さらに投影面にランダムにあるいは規則的に分布する一定数の測点を設け，細胞膜上に落ちた測点を数えて細胞膜率とする方法^{40) 98)}，簡略法として測定線に沿って細胞の内腔径と膜厚を測定し積算して計算する方法²⁷⁾がある。

前述のように拡大像の面積を測定する代りに細胞の横断面を適当な幾何学的図形とみなし，その図形の面積を計算するために必要なディメンションを測定し，計算式によって細胞膜面積および細胞膜率を求める方法が考えられる。この方法によれば仮道管のディメンションの年輪内変移（第2章）から細胞膜率のそれを求めることができる。

1. 計算式

横断面における仮道管の外形および内腔の形状を簡単に長方形とすると（Fig. 8），細胞膜率 W (%) は次式により求められる。

$$W = \frac{1}{T \cdot R} \cdot \{T \cdot R - (T - 2Mt)(R - 2Mt)\} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、T：接線方向直径 μ ， Mt：接線膜厚 μ

R：半径方向直径 μ ， Mr：半径膜厚 μ

仮道管の横断面の形状は、一般に早材では長方形あるいは、これに近い形が多いが、晩材への移行部分では、4～6角形で不規則な形状が多い。年輪界近くの晩材仮道管では、細胞の外⁸⁶形は長方形に近いが、内腔の形状は長だ円形⁸⁶、あるいはひし形など種々の形状を示す。これらの種々の形状を画一的に長方形とすると、断面積に誤差は生ずるが、計算はきわめて容易である。

(1)式において、

$$x = \frac{Lr}{2Mt} = \frac{R - 2Mt}{2Mt} = \frac{R}{2Mt} - 1, \quad y = \frac{R}{T}$$

$$z = \frac{Mt}{Mr}, \quad \text{とにおいて 整理すると,}$$

$$W = \frac{(z+y)x+z}{z(x+1)^2} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。次に、 $y' = y/z$ とおくと、

$$W = \frac{(1+y')x+1}{(x+1)^2} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式のグラフを描くと Fig. 9 のようになる。このような計算図表によって仮道管のディメンションの測定値から求めた x, y, z ならびに y' を用いて細胞膜率 W を求めることができる。x および y は第 2 章第 3 節で述べたように、早材と晩材の区分の際の指標としてとりあげたものであるから、仮道管形状の変移と細胞膜率との関連を検討する上で、(2), (3)式はきわめて便利である。

半径膜厚 Mr に対する接線膜厚 Mt の比 ($z = Mt/Mr$) の値も年輪内で変移する。一般に早材では接線膜の方が厚いが ($z > 1$)、晩材では半径膜が厚くなる ($z < 1$)。

y ($= R/T$) と z との関係をみると、y が 0.8～0.9 以上では z の平均値は 0.9～1.2 の範囲にあって y とは無関係であるが、y がそれより小となると z は直線的に減少する。Fig. 10-A にアカマツについて測定した結果を示した。y < 0.8 における y と z の関係が類似した樹種のグループごとに直線式を求めると次の通りである。

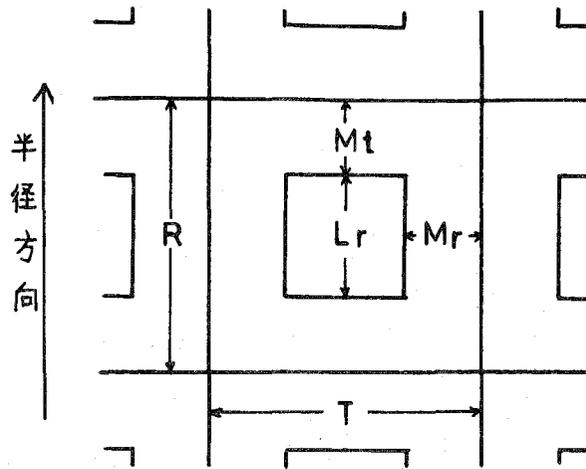


Fig. 8 仮道管の横断面模式図

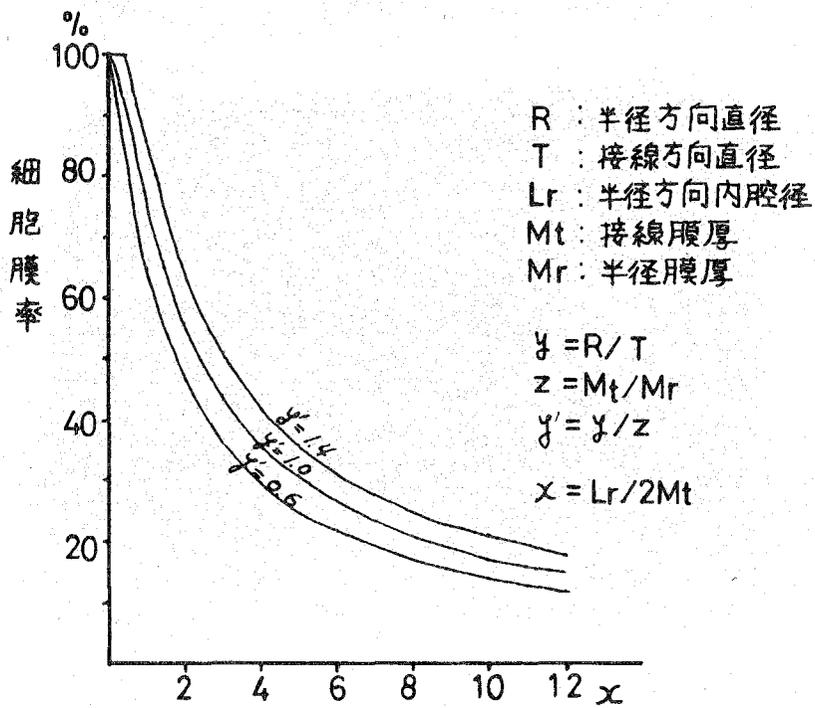
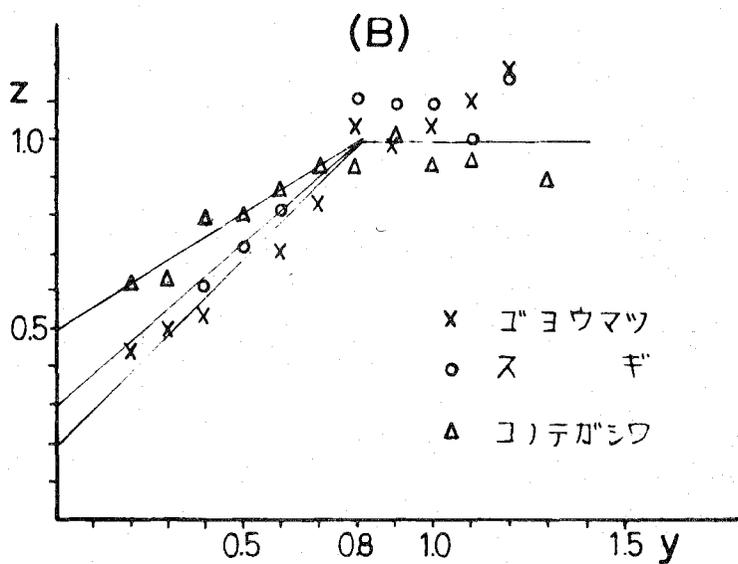
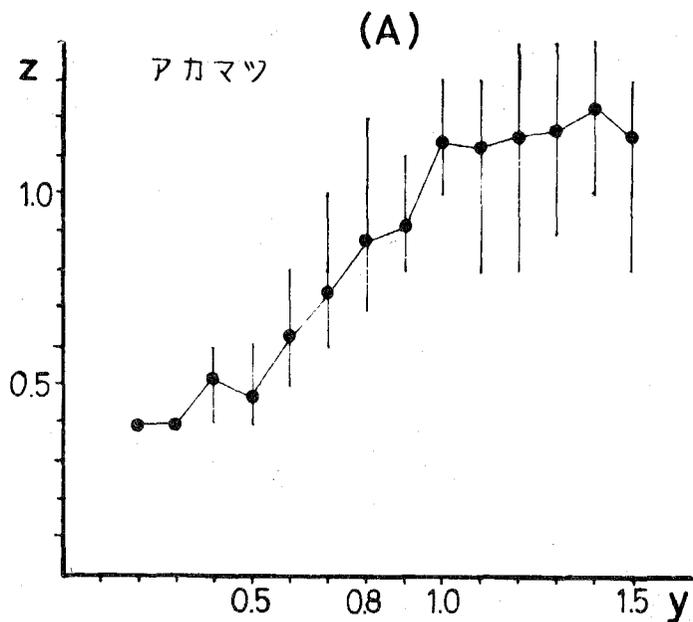


Fig. 9 (3)式のグラフ



$y = \text{半径方向直径} / \text{接線方向直径}$

$z = \text{接線膜厚} / \text{半径膜厚}$

Fig.10 y と z との関係

アカマツ	$z = y + 0.06$	} (4)
ゴヨウマツ	$z = 0.85y + 0.23$		
スギ・モミ トドマツ }	$z = 0.78y + 0.35$		
トウヒ・ヒノキ・カラマツ	$z = 0.59y + 0.44$		
サワラ・コノテガシワ ネズミサシ }	$z = 0.58y + 0.52$		

ただし, $z = M_t / M_r$, $y = R / T \leq 0.8$

ここで, z と y との関係を単純化する。すなわち, $y \leq 0.8$ では, (4)式を $y = 0.8$ のとき $z = 1$ となるように次式のように変更する。

アカマツ	$z = \frac{10}{8} \cdot y$	} (5)
ゴヨウマツ	$z = y + 0.2$		
スギ・モミ・トドマツ	$z = \frac{7}{8}y + 0.3$		
トウヒ・ヒノキ・カラマツ	$z = \frac{6}{8}y + 0.4$		
サワラ・コノテガシワ・ネズミサシ	$z = \frac{5}{8}y + 0.5$		

$y > 0.8$ では $z = 1$ (5')

とする。

Fig. 10-Bにゴヨウマツ, スギおよびコノテガシワの例を示した。

$y' = y/z$ において (5), (5') 式の関係を用いると, 次のようになる (Fig. 11)。

$y > 0.8$ では	$y' = y$	} (6)
$y \leq 0.8$ では	$y' = y/(ay+b)$		

ただし, a, b は (5) 式の定数

前述の (4) 式の関係はアカマツ, ゴヨウマツ, スギ, ヒノキおよびコノテガシワで調査した結果では, 個体および幹内の部位によってあまり変動しない。したがって, (3) 式により細胞膜率を求める場合, 半径膜厚 M_r をいちいち測定しないで (6) 式の関係を用いて,

$y > 0.8$ では $y' = y$	$W = \frac{(1+y)x+1}{(x+1)^2} \times 100$ (%)	} (7)
$y \leq 0.8$ では	$W = \frac{(1+y')x+1}{(x+1)^2} \times 100$ (%)		

ただし, y' は Fig. 11 により求める, として簡単に W (%) を求めることができる。

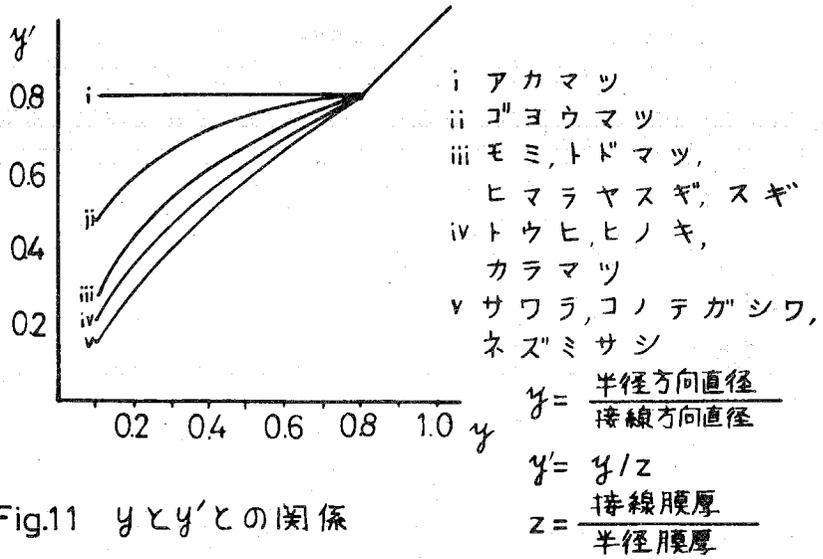


Fig.11 yとy'との関係

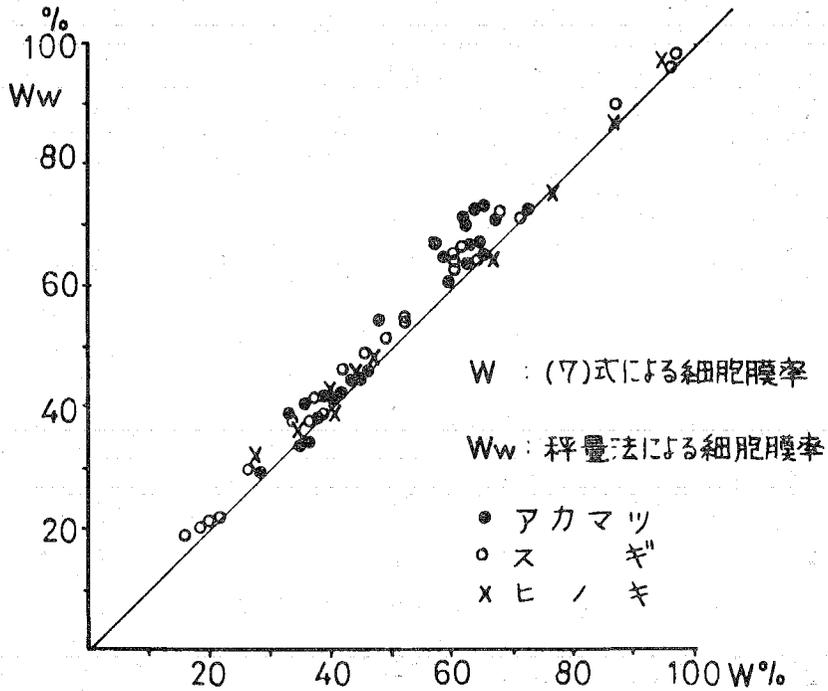


Fig.12 計算法および秤量法による細胞膜率の比較

2. 細胞膜率測定値の誤差

すでに第2章第2節でのべたように500倍の拡大像について測定する場合、像の周縁の決定に0.2 μ 程度の誤差が生ずることはさげられない。細胞膜の厚い晩材仮道管の膜面積を測定する場合にはこの誤差の影響は少ないが、薄膜の早材仮道管の場合には決定的な影響をもつ。

第2章第2節でのべた測定基準、すなわち、500倍の拡大像で、5 mm 以上のディメンションでは1/2 mm まで、5 mm 未満のものではルーペを用いて1/4 mm まで読取るとき、(7)式によるWの計算値の誤差 ΔW は、実測例について計算した結果、次の通りであった。

アカマツ 晩材	W=45~75%のとき、	$\Delta W=3\sim 4\%$
早材	W=20~30%	$\Delta W=2\sim 3\%$
スギ 晩材	W=80~95%	$\Delta W=3\sim 5\%$
早材	W=15~20%	$\Delta W=2\sim 3\%$
ヒノキ 晩材	W=75~90%	$\Delta W=4\sim 6\%$
早材	W=30~50%	$\Delta W=3\sim 4\%$

このように早材ではW値の約1割の誤差が含まれる可能性をもつこととなる。

次に秤量法と計算法とを比較した結果についてのべる。

顕微鏡写真上で互いに隣接している6~10個の仮道管のディメンションを測定し、(7)式に

Table 6 細胞膜率測定法の比較

樹種	y	W (%)	W _w (%)	測定数
アカマツ	≤ 0.8	61.9	66.3	14
	> 0.8	44.6	46.3	26
	全体	50.7	53.3	40
$\Delta = -2.6 \pm 2.6$				
スギ	≤ 0.8	88.0	89.3	4
	> 0.8	31.6	33.8	6
	全体	54.5	56.0	10
$\Delta = -1.5 \pm 2.6$				
ヒノキ	≤ 0.8	81.6	81.5	4
	> 0.8	39.1	40.8	6
	全体	56.4	57.1	10
$\Delta = -0.7 \pm 1.8$				

y: 半径方向直径/接線方向直径

W: (7)式による細胞膜率

W_w: 秤量法による細胞膜率

Δ : W-W_w

によって計算した細胞膜率を W とし、次にそれらの仮道管を切抜き、秤量法によって求めた細胞膜率を W_w とし比較すると Table 6 および Fig. 12 の通りとなる。

$y \leq 0.8$ のときアカマツでは両者の間に比較的大きい差があり、 W の値が小さいが、スギとヒノキでは、ほとんど差がない。平均して W は W_w よりも 1~3% 小さいことがわかる。

秤量法では拡大像を切り抜くことが必要で、その際、像の周縁が正確に判定できない欠点があるが、(7)式による計算法は仮道管のディメンションの測定により細胞膜率の年輪内変移曲線を簡単に求めることができ、その曲線の再現性も細部の凹凸を除き全体としては良好である。したがって細胞膜率の年輪内変移ならびにそれと仮道管のディメンションとの関係を検討するのに適している。

第2節 細胞膜率の年輪内変移

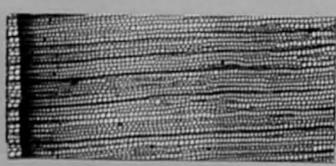
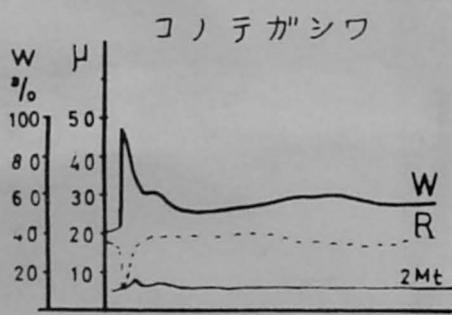
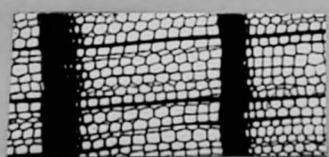
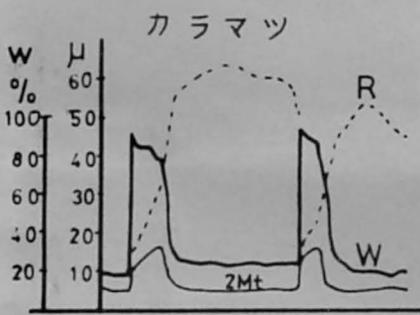
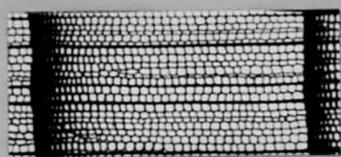
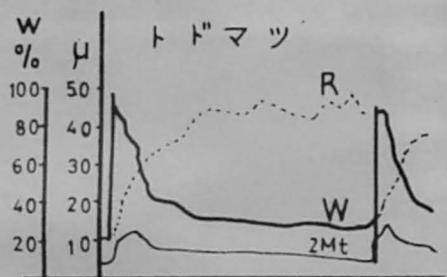
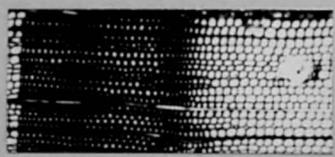
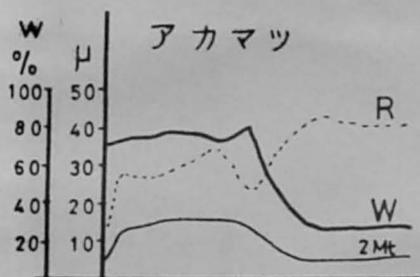
前節の方法により仮道管のディメンションの変移から仮道管の細胞膜率の変移曲線を求めることができる。仮道管以外の構成要素が細胞膜率の年輪内変移に及ぼす影響はわずかであり(第5章第2節参照)、針葉樹材の細胞膜率は仮道管の細胞膜率によってほとんど決定されると考えられるので、以下その年輪内変移について述べる。

1. 年輪内の変移

仮道管の半径方向直径 R と接線膜厚 M_t と細胞膜率 W の年輪内変移の例を Fig. 13 に示す。 W は早材部においてはほぼ一定で、 R の減少および M_t の増加とともに、はじめは徐々に、のち急激に増加し、多くの場合年輪界において最大となる。樹種ごとに細胞膜率の最大値 W_{\max} (晩材部に生ずる) と早材の平均値 \bar{W}_e を示すと Table 7 の通りである。

\bar{W}_e は多くの樹種では 20~30% であるが、ヒノキとヒバは約 35% でやや高く、イヌマキ、ネズミサシは 40% を越え、コノテガシワは 51% で最大の値を示す。 W_{\max} は多くは 80% 以上で、最大はスギの 97% である。イヌマキとゴヨウマツはやや低く、最小がカヤで 54% にすぎない。

$W_{\max} - \bar{W}_e$ および W_{\max} / \bar{W}_e の値は年輪内における材質変動の大ききの指標となり、その樹種の年輪の特徴の一つである。この数値は後述(第4節)するように、幹内の部位や生育状況



R : 半径方向直径 (μ) Mt : 接線膜厚 (μ)

W : 細胞膜率 (%)

Fig. 13 半径方向直径,接線膜厚および細胞膜率の年輪内変移

Table 7 年輪内における細胞膜率の変移

樹種	(1) W_{max}		(2) \bar{W}_e		(1) - (2)	(1) / (2)
	平均	最小～最大	平均	最小～最大		
イチイ	91 %	86 ~ 95 %	33 %	29 ~ 37 %	58 %	2.76
カヤ	54	45 ~ 61	21	19 ~ 23	33	2.57
イヌマキ	74	69 ~ 79	43	41 ~ 47	31	1.72
モミ	93	88 ~ 100	31	26 ~ 35	62	3.00
トドマツ	92	87 ~ 98	27	22 ~ 32	65	3.40
トウヒ	92	88 ~ 98	31	28 ~ 37	61	2.96
カラマツ	90	88 ~ 93	20	18 ~ 22	70	4.50
アカマツ	82	76 ~ 86	28	24 ~ 30	54	2.92
ゴヨウマツ	78	69 ~ 85	23	18 ~ 35	55	3.39
トガサワラ	93	92 ~ 94	20	16 ~ 23	73	4.65
ツガ	86	83 ~ 90	29	21 ~ 34	57	2.96
スギ	97	96 ~ 98	24	19 ~ 27	73	4.04
ヒノキ	95	85 ~ 100	36	31 ~ 41	59	2.64
サワラ	88	84 ~ 94	27	25 ~ 29	61	3.26
ネズコ	88	83 ~ 90	34	29 ~ 39	54	2.59
ヒバ	80	76 ~ 84	35	32 ~ 38	45	2.28
コノテガシワ	92	88 ~ 95	51	40 ~ 60	41	1.80
ネズミサシ	94	89 ~ 98	46	37 ~ 52	48	2.04

 W_{max} : 細胞膜率最大値 (晩材) \bar{W}_e : 早材細胞膜率平均値

によって多少変動するが、Table 7の数値は、樹心に近い年輪や、年輪幅の異常に小さい年輪を除いた正常な試料についての測定結果であり、ほぼ各樹種の特徴を示していると考えられる。そこで、 $W_{\max} - \bar{W}_e$ の値によりグループ分けすると次の通りとなる。

- a) $W_{\max} - \bar{W}_e \geq 70\%$ (年輪内の細胞膜率の変移が大きい樹種) カラマツ, トガサワラ, スギ。
- b) $W_{\max} - \bar{W}_e \geq 50\%$ (年輪内の細胞膜率の変移が中の樹種) イチイ, モミ, トドマツ, トウヒ, アカマツ, ゴヨウマツ, ツガ, ヒノキ, サワラ, ネズコ。
- c) $W_{\max} - \bar{W}_e < 50\%$ (年輪内の細胞膜率の変移が小さい樹種) カヤ, イヌマキ, ヒバ, コノテガシワ, ネズミサシ。

W_{\max} / \bar{W}_e の値は、a) のものでは4以上であり、一方c) のものでは、おおむね2.5以下である。

2. 細胞膜率の変移と年輪内区分

第2章第3節において年輪区分の基準として用いた $Lr/2Mt = x$ と細胞膜率 W とは (3), (7) 式により関数関係にあることがわかる。

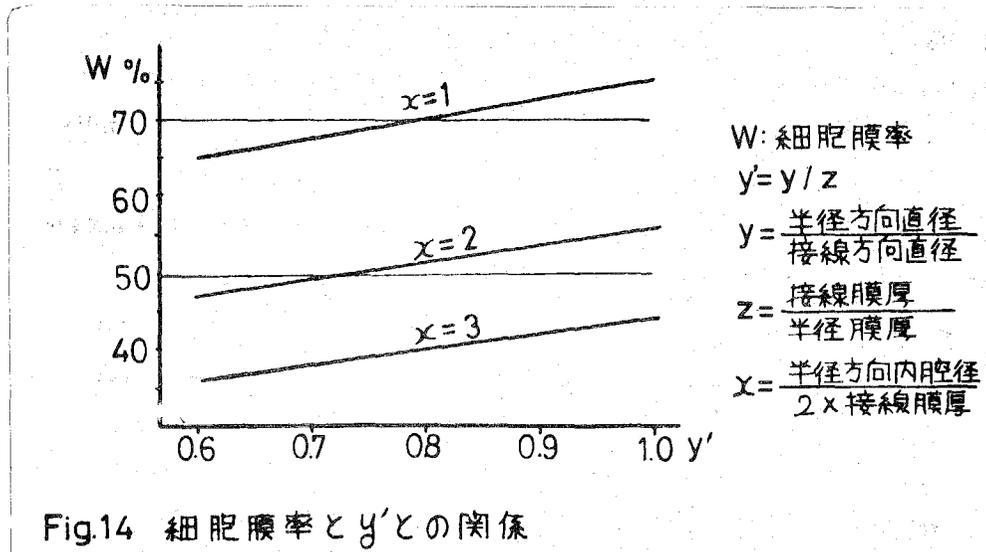


Fig.14 細胞膜率と y' との関係

Morkの定義, すなわち $x=2$, および 濃色な晩材層となる $x=1$ における W は (7) 式によれば Fig. 14 の通りである。 $x=2$ のとき y' は 0.75~0.79 であり, ゆえに $W=50\sim 54\%$, $x=1$ のとき y' は 0.65~0.83 であり, ゆえに $W=66\sim 71\%$ となる。

したがって, Morkの定義は年輪内を細胞膜率約 50% を境界として 早材と晩材に区分していることとなる。

年輪内における W は早材部ではほぼ一定であるが, やがて明らかに増加しはじめる。その点の W は 25~40% であって, 色調の変化はわずかで認めがたい。さらに W が増加して 50% ($x=2$) より大きくなると濃色化が認められ, 70% ($x=1$) 以上では 典型的な濃色の晩材となる。

このような変移過程は多くの針葉樹の正常な年輪で見られる。 W が明らかに増加しはじめた点より晩材 (広義) とし, その内部をさらに W の大きさで区分すると次のようになる (Fig. 15-a)。

早材 W がほとんど一定。 晩材 (広義) W が増加する。

$W < 50\%$, 移行帯あるいは不顕著な晩材 T

$W \geq 50\%$, 識別できる晩材 (Morkの晩材) L_1

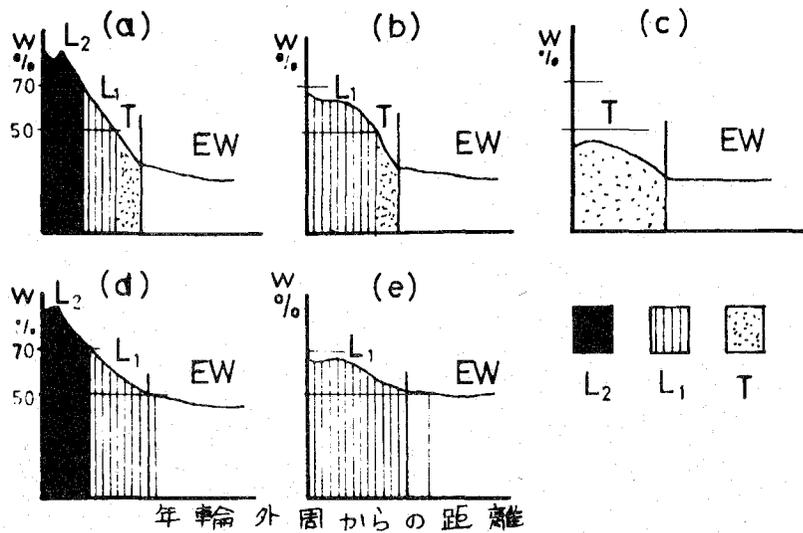
$W \geq 70\%$, 典型的な晩材 L_2

この区分は Table 7 において \bar{W}_e が比較的小さく (Morkの定義が適用できる), W_{\max} が 70% 以上の樹種に適用される。カヤヤアカマツの樹心に近い年輪のように, W_{\max} の小さい年輪では L_2 を欠く場合がある (Fig. 15-b)。さらにラディアータ・パイン (*Pinus radiata* D. Don) で報告されているように, Morkの晩材が存在しない ($x < 2$) 場合が考えられる (Fig. 15-c)。他方, \bar{W}_e が大きく Morkの定義が適用できないコノテガシワ や ネズミサシ では広義の晩材部の構成は L_1 と L_2 のみとなる (Fig. 15-d)。このような樹種で $W_{\max} < 70$ の場合は Fig. 15-e となるが, このような年輪は見いだされていない。 Fig. 15-c および 15-e の年輪では, 外見上は晩材を識別できないであろうが, W 曲線上では晩材を区分できる。 Fig. 16 は Fig. 15-a, 15-b, 15-d, の実例を示したものである。

3. 細胞膜面積の変移

以上, 細胞膜率の年輪内変移についてのべたが, ここで, 仮道管の横断面の細胞膜面積そのものの年輪内変移について簡単に説明する。

細胞膜面積の年輪内変移は樹種により異なり, Fig. 17 にみられるように三つのタイプがあ



EW: 早材, W: 細胞膜率

T: $W < 50\%$ 移行帯あるいは不顕著な晩材

L_1 : $W \geq 50\%$ 識別できる晩材 (Morkの晩材)

L_2 : $W \geq 70\%$ 典型的な晩材

晩材部(広義)の構成

(a) T, L_1 , L_2

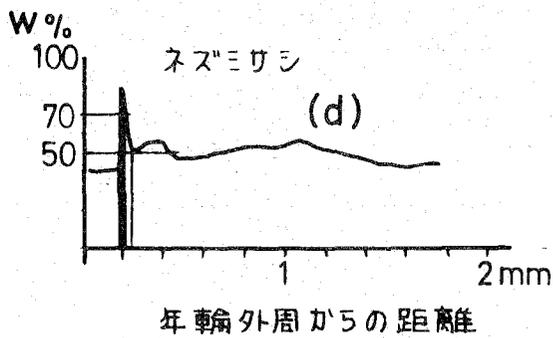
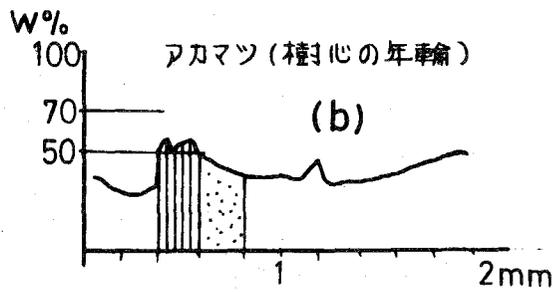
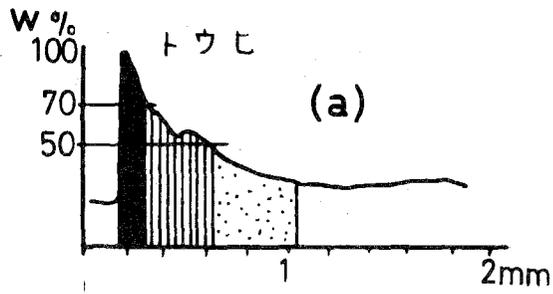
(b) T, L_1

(c) T,

(d) L_1 , L_2

(e) L_1

Fig.15 細胞膜率の年輪内変移と年輪区分



W : 細胞膜率

(a) (b) (d) Fig.15 の晩材部構成の型

Fig.16 細胞膜率による年輪区分の例

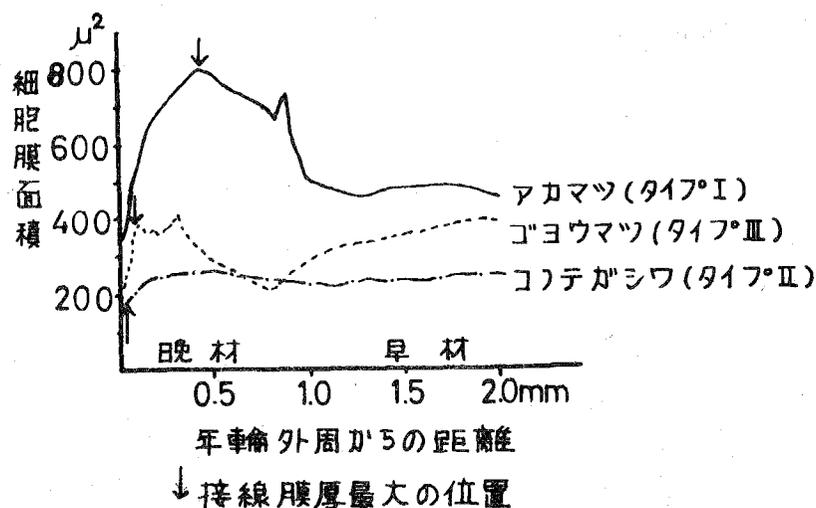


Fig. 17 細胞膜面積の年輪内変移

る。タイプ I は晩材において細胞膜の肥厚が著しいカラマツ，アカマツに典型的にみられ，細胞膜面積は膜の肥厚とともに急増し，最大に達したのも減少する。タイプ II は晩材における細胞膜の肥厚の少ないコノテガシワやネズミサシに典型的にみられ，細胞膜面積の変化が少なくほぼ一定であるが，年輪界で減少する。タイプ III はタイプ I とタイプ II の中間で，細胞膜面積は晩材で増加するが顕著でない（例ゴヨウマツ）。タイプ I およびタイプ III において細胞膜面積の最大は接線膜厚 Mt の最大の位置あるいはその直前に起こる。いずれの場合にも年輪界に向かい細胞膜厚が減少しはじめると細胞膜面積は急減する。

第 3 節 仮道管の直径および膜厚が細胞膜率の年輪内変移に及ぼす影響

晩材においては，仮道管の半径方向直径が減少し（直径減少），同時に多くの樹種では細胞膜が肥厚して（膜肥厚），細胞膜率が增大する。しかし直径減少と膜肥厚とが細胞膜率の増大に影響している程度は樹種により差がある。このことは，晩材における細胞膜の肥厚の程度から

推測できるが、(3)、(7)式を用いれば、細胞膜率の増加に及ぼす直径減少と膜肥厚の効果を分離して検討することができる。

1. 直径減少効率および膜肥厚効率

解析の方法として、まず早材部の仮道管の平均接線膜厚 $\bar{M}te$ を基準にとり、膜厚は晩材においても一定(= $\bar{M}te$)と仮定したときの細胞膜率 W' をもとめる。すなわち、

$$Mt = \bar{M}te \text{ (一定)}, \quad x' = \frac{R - 2 \cdot \bar{M}te}{2 \cdot \bar{M}te}, \quad y = R/T, \quad y' = y$$

とするとき、(7)式より、

$$W' = \frac{(1+y')x'+1}{(x'+1)^2} \times 100 \text{ (\%)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。

接線方向直径 T は年輪内変移がきわめて少ないので、 W' の変移は主として R の減少のみによる細胞膜率の増加を示すものとみなすことができる (Fig. 18)。

これに対して $(W-W')$ の値は膜厚の増大による細胞膜率の増加分となる。

そこで、Fig. 18に示すように晩材内の一点 d における W および W' の値をそれぞれ W_d 、 W'_d 、早材の平均細胞膜率を $\bar{W}e$ とするとき、

$$\text{直径減少効率} \quad \Delta FL = W'_d - \bar{W}e \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{膜肥厚効率} \quad \Delta TH = W_d - W'_d \quad \dots\dots\dots (10)$$

とする。

年輪内における直径減少効率 (ΔFL) と膜肥厚効率 (ΔTH) の変移の代表的な例を示すと、Fig. 19のとおりである。

ΔFL は直径の減少により 始め徐々に増加し年輪界近く (年輪界より 0.1mm 前後の位置) より急増し、通常、年輪界の最終細胞で最大となる。

ΔTH は膜厚の増加とともに急増し、膜厚の最大点あるいはその付近で最大となったのち、年輪界に向かい減少する。 ΔFL の変移にくらべ、樹種による差が著しい。コノテガシワでは ΔTH が著しく小さく、カラマツではきわめて大きい。アカマツでは ΔTH の値が大きいばかりでなく、そのひろがりも大きい。

ΔFL および ΔTH の最大値を樹種別にみると Table 8 の通りとなる。 ΔFL_{max} は おおむね 25~45% であり、18種の平均は約 36% である。

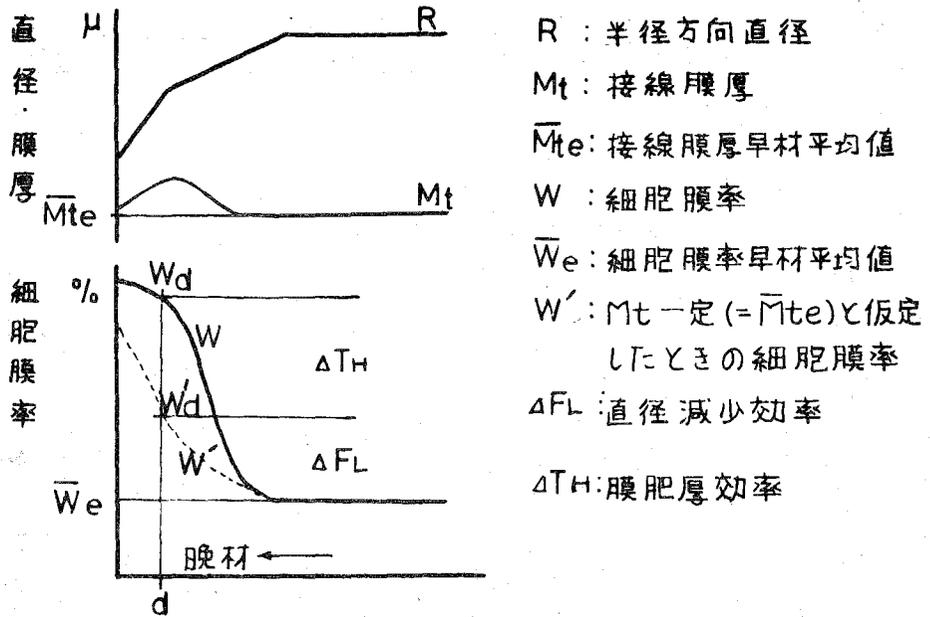


Fig. 18 直径減少効率および膜肥厚効率の計算模式図

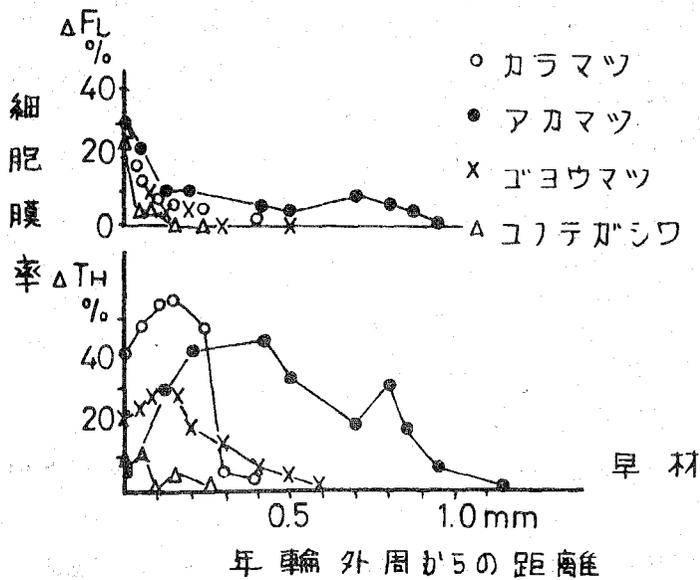


Fig. 19 直径減少効率および膜肥厚効率の変移

Table 8 直径減少効率および膜肥厚効率の最大値

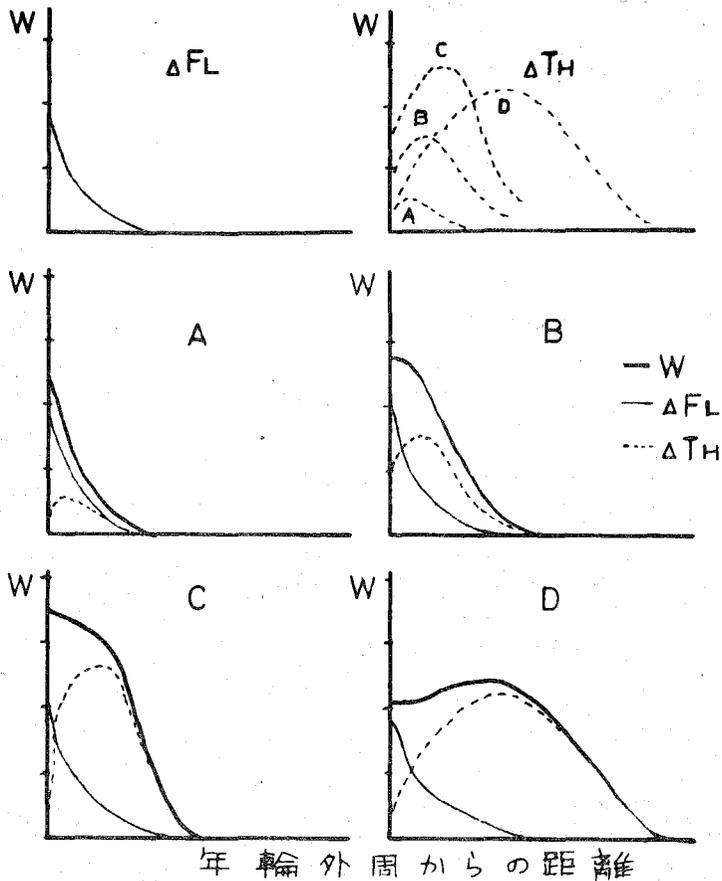
樹種	ΔFL_{max}		ΔTH_{max}		$\frac{\Delta TH_{max}}{\Delta FL_{max}}$
	平均	最小~最大	平均	最小~最大	
イチイ	43%	35~54%	23%	19~26%	0.53
カヤ	23	14~36	12	7~21	0.52
イヌマキ	28	24~34	7	0~14	0.25
モミ	36	32~46	43	38~51	1.20
トドマツ	48	36~56	35	27~47	0.75
トウヒ	45	34~59	32	27~42	0.77
カラマツ	35	26~42	51	39~58	1.51
アカマツ	42	33~58	44	34~47	1.08
ゴヨウマツ	39	25~46	21	7~32	0.66
トガサワラ	19	15~22	40	34~47	2.10
ツガ	29	23~31	40	37~43	1.38
スギ	29	19~40	52	44~62	1.92
ヒノキ	45	36~65	28	18~35	0.65
サワラ	34	25~44	34	26~45	1.08
ネズコ	28	24~31	25	16~31	0.89
ヒバ	45	42~50	15	5~33	0.33
コノテガシワ	42	30~53	13	9~19	0.31
ネズミサシ	40	28~51	14	2~21	0.40

ΔFL_{max} : 直径減少効率の最大値, ΔTH_{max} : 膜肥厚効率の最大値

樹種別にはトガサワラが19%で最小, トドマツが48%で最大である。 ΔTH_{max} は7~52%で樹種による差が大きい。イヌマキが7%で最小, カラマツ, スギが51~52%で最大である。 $\Delta TH_{max}/\Delta FL_{max}$ の値はイヌマキが0.25で最小, トガサワラが2.10で最大である。

2. 直径減少効率および膜肥厚効率の変移と細胞膜率

Fig. 19に示した直径減少効率 ΔFL および膜肥厚効率 ΔTH の変移を模式的に描くとFig. 20上段の通りとなる。 ΔFL の変移曲線は樹種による差が少ない。もしも晩材において, 膜厚が全く増加しなかったならば, W の変移は各樹種とも大同小異で, 晩材への移行状態は, どの樹種のどの年輪をとってみても外見上はおそらくほとんど差異がないであろう。晩材部が樹種



W : 細胞膜率
 ΔFL : 直径減少効率
 ΔTH : 膜肥厚効率

A : 直径減少型 B : 中固型
 C : 膜肥厚型 D : 広膜肥厚型

Fig.20 直径減少効率と膜肥厚効率の組合せと細胞膜率曲線の型

により、また年輪個々にきわめて変化にとむのは、細胞膜の肥厚がそれぞれで異なった経過で生じているためである。すなわち、 ΔT_H の変移曲線の頂点の高さと、ひろがり が樹種により著しく変化し、この横軸に凸な曲線が、横軸に凹な ΔF_L の曲線に加算されて種々のW曲線となる。

このような考え方からW曲線を解析するとき、 ΔF_L 曲線と ΔT_H 曲線の重なり合いを数値的に把握することが必要となる。 ΔF_L 曲線の勾配、 ΔF_{Lmax} の大きさ、 ΔT_H 曲線の ΔT_{Hmax} のあらわれる位置とその大きさ、凸部のひろがりなどを測定し整理しなければならないので、実際にはきわめて困難である。そこでW曲線の簡単な定性的な解析として、 $\Delta T_{Hmax}/\Delta F_{Lmax}$ の数値により次のようにおおまかに分類することを考えた (Fig. 20 A~D)。

- (A) $\Delta T_{Hmax}/\Delta F_{Lmax} \leq 0.5$ [直径減少型] ΔT_H が小さく、晩材部のWの変移は ΔF_L に支配され横軸に凹な曲線を示す。(Fig. 20 A) イヌマキ、ヒバ、コノテガシワ、ネズミサシ。
- (B) $\Delta T_{Hmax}/\Delta F_{Lmax} \leq 1.0$ [中間型] ΔT_H がやや大きくなり、 ΔT_H 曲線の影響でW曲線に凸な部分があらわれてくるが、全体としては ΔF_L の横軸に凹な曲線が支配的である。(Fig. 20 B) トドマツ、トウヒ、ヒノキ。
- (C) $\Delta T_{Hmax}/\Delta F_{Lmax} > 1.0$ [膜肥厚型] ΔT_H が大きく、W曲線の変移は ΔT_H の横軸に凸な曲線が支配的となる。(Fig. 20 C) モミ、カラマツ、アカマツ、トガサワラ、ツガ、スギ。
- (D) [広膜肥厚型] (C)のうち、 ΔT_{Hmax} の値が大きいばかりでなく、凸部のひろがりの大きいもので、アカマツに典型的にみられる (Fig. 20 D)。

第4節 幹内の部位別および冠級別にみた細胞膜率の年輪内変移

細胞膜率Wの年輪内変移はその年輪の幹内の部位および樹木の生育状況により変化すると考えられる。幹内の部位に関しては、樹心から外側への変化(経年変化)、軸方向の変化、方位による変化などが考えられ、生育状況に関しては、立地条件、立木密度、生長の優劣および保育法などの影響が考えられる。これらのうち、本節では、幹内における樹心から外側への変化および密植した幼令樹における冠級別の差異についてその概略をのべる。

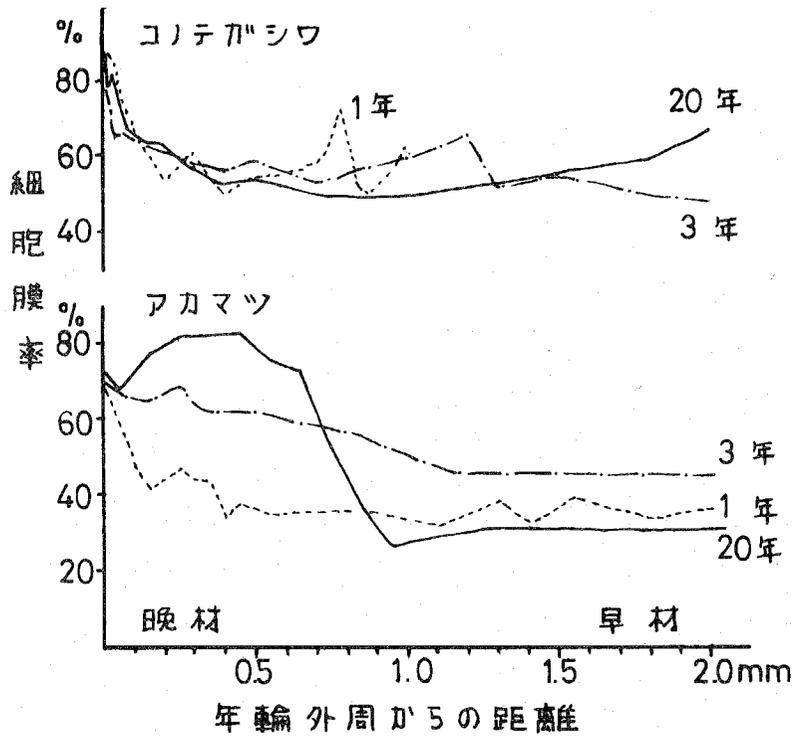


Fig.21 樹心からの年数と細胞膜率曲線

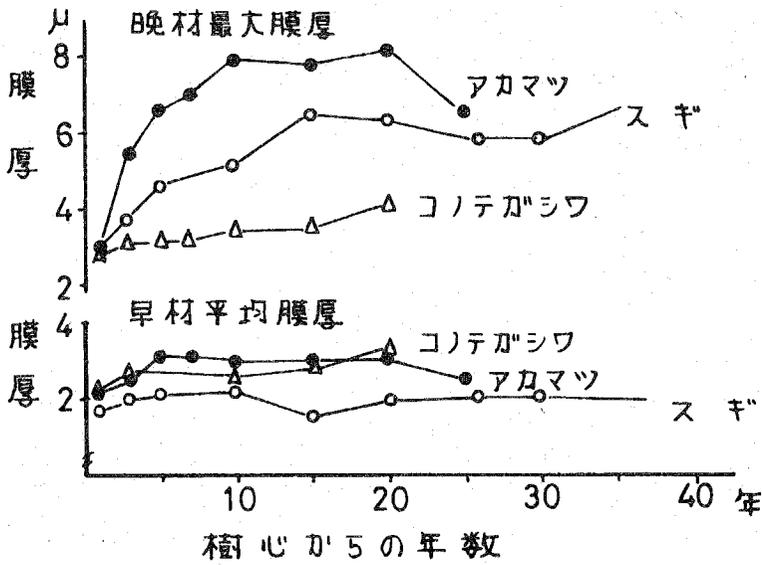
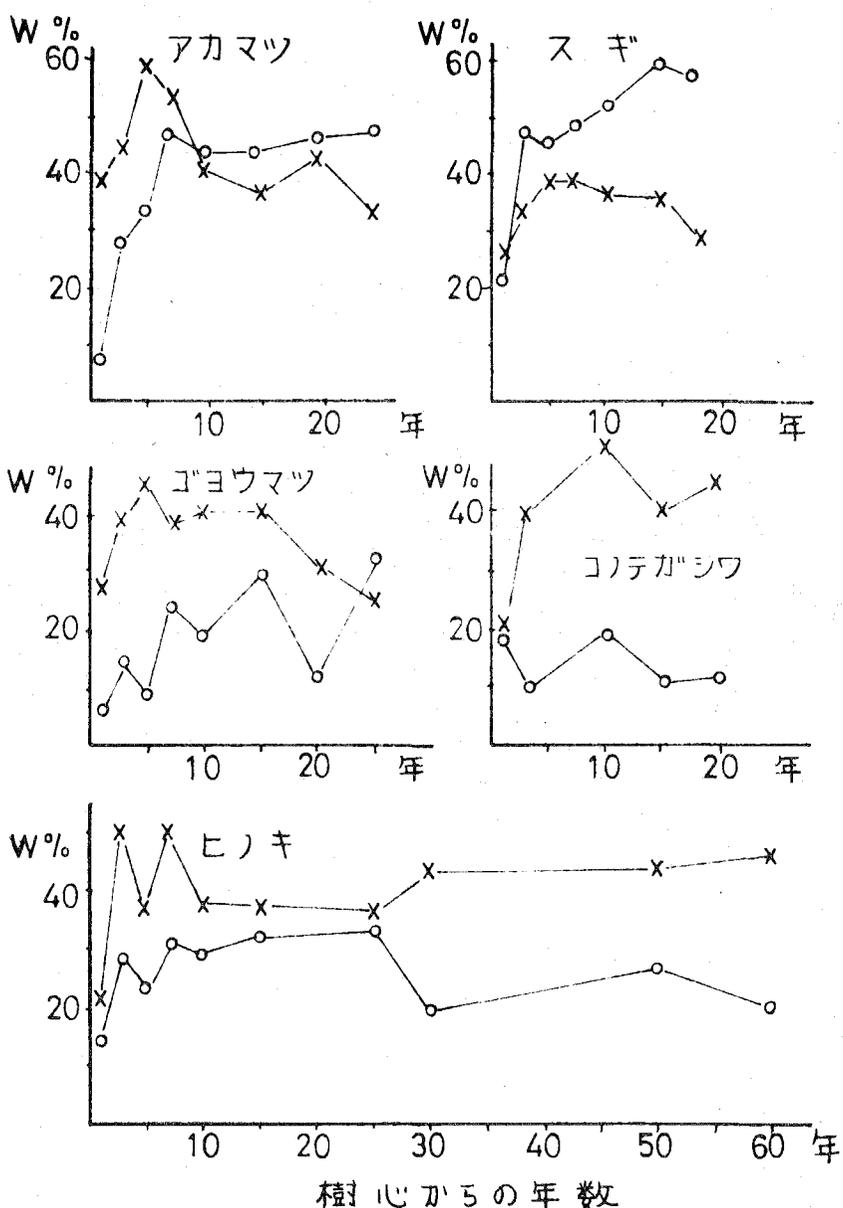


Fig.22 樹心からの年数と接線膜厚



-x- 直径減少効率最大値
 -o- 膜肥厚効率最大値 W:細胞膜率

Fig.23 樹心からの年数と直径減少効率
 および膜肥厚効率の最大値

1. 幹の中心から外側への変化（経年変化）

晩材における細胞膜率 W の変移曲線を、樹幹横断面の樹心部と外側部で比較した例をFig. 21に示した。コノテガシワでは樹心の年輪と20年目の年輪とくらべて大差がないが、アカマツでは顕著な差がある。

このような差異は、各樹種の晩材における膜肥厚の経年変化の差異によって説明される。Fig. 22に示すように晩材における接線膜厚の最大値は、アカマツやスギでは樹心から外側へ10～15年まで著しく増大する。これとともに、膜肥厚効率 ΔTH_{max} も増大する。Fig. 23にみられるように、アカマツの樹心では $\Delta TH_{max} < \Delta FL_{max}$ であるが、外側に向かって ΔTH が増加して、やがて $\Delta TH_{max} > \Delta FL_{max}$ となる。これに対してコノテガシワでは膜厚最大値はわずかに増加するのみで ΔTH_{max} は変化せず、樹心でも、外周でも $\Delta TH_{max} < \Delta FL_{max}$ である。したがって、アカマツの W 曲線は、前節でのべた直径減少型から膜肥厚型へと変化するのに対して、コノテガシワのそれは直径減少型のままである。アカマツのように顕著ではないが、スギその他の膜肥厚型の樹種の W 曲線は樹心から外側に向かい類似の変化をする。

またFig. 21にみられるようにアカマツの外側の年輪では晩材における細胞膜率の増加が急でその細胞膜率も高い。すなわち、晩材の平均の細胞膜率がアカマツやスギなど膜肥厚型の樹

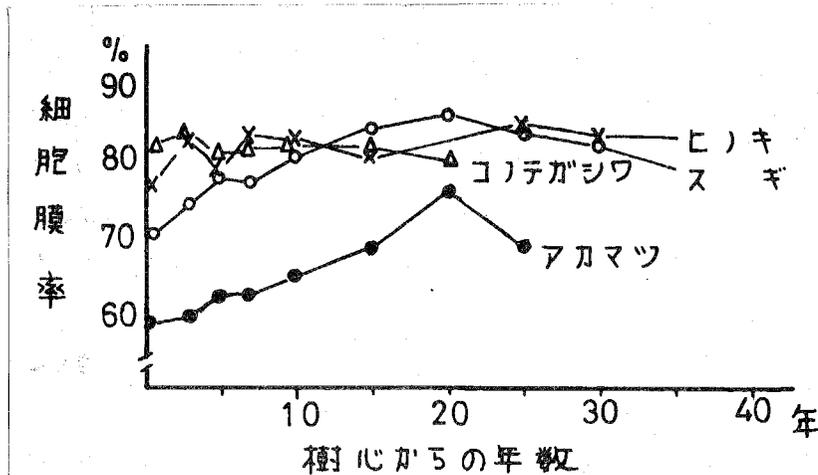


Fig. 24 樹心からの年数と晩材の平均細胞膜率

種では樹心から外側に向かい増加する。しかしコノテガシワやヒノキなど、直径減少型ないし中間型の樹種ではほとんど一定である (Fig. 24)。

早材部のWの経年変化は晩材のそれと異なり樹心から外側に向かい減少する。これは早材の膜厚がほとんど変化しないのに対して仮道管の直径が樹心から外側へ著しく増大することによるものである。⁷⁸⁾

2. 冠級別供試木における差異

苗畑で密植して育生したアカマツ6年生、スギ7年生の幼令樹の中から冠級別に供試木 (Table 9) をえらび最外側の年輪について仮道管のディメンションを測定し、W曲線を求めた。

Table 9 冠級別の供試木

冠級別	アカマツ		スギ	
	樹高	針葉重量	樹高	針葉重量
優勢木 A	3.20 ^m	1434 ^g	3.65 ^m	5720 ^g
〃 B	3.16	759	3.48	2586
劣勢木 C	2.76	271	3.50	1170
〃 D	2.03	87	2.33	750

晩材部における細胞膜率Wの変移曲線は Fig. 25 に示すように、優勢木では曲線の上昇がなだらかであるが、劣勢木では急である。前述したように、アカマツとスギの樹心近くの年輪では晩材における曲線の上昇がゆるやかであり、外周の年輪 (20年) は上昇が急激で、画然とした晩材がみられた。ここで調査した年輪は、樹心よりアカマツでは3年、スギでは4年であるが、劣勢木は外周の年輪と同様の画然とした晩材をもつ。

晩材の平均の細胞膜率は劣勢になるに従い大きくなるが、外周の年輪のそれ程は大きくない。アカマツの被圧木ではかえって減少する。

このような晩材部のW曲線におよぼす直径減少効率と膜肥厚効率をみると、劣勢になるに従い、後者が大きくなる。すなわち優勢木では $\Delta T_{Hmax} < \Delta F_{Lmax}$ であるが、劣勢木および被圧木では $\Delta T_{Hmax} > \Delta F_{Lmax}$ となる (Fig. 26)。このように優勢から劣勢への変化は樹心から外周への変化と似ているが、前者では早材における半径方向直径Rが減少し、その結果 ΔF_L が減少している点で後者と全く異なる。

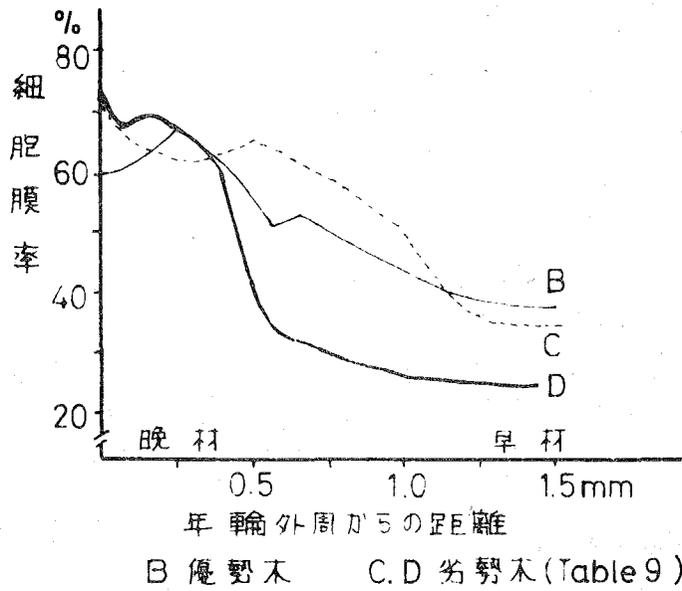
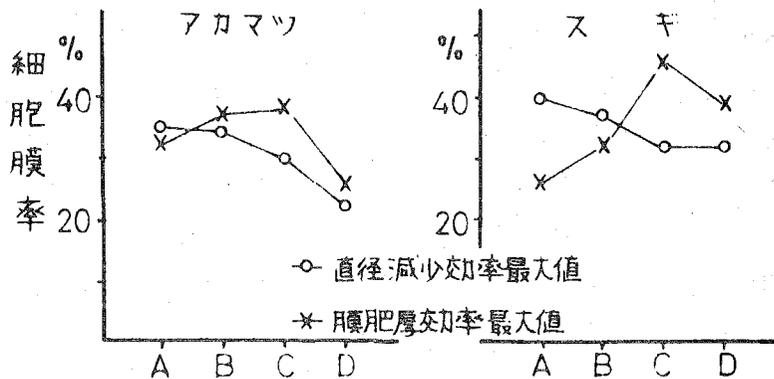


Fig.25 冠級別供試木における細胞膜率曲線
(アカマツ3年)



A, B, C, D: 冠級別 (Table 9)

A, B. 優勢木 C, D 劣勢木

Fig.26 冠級別供試木における直径減少効率および膜肥厚効率

早材の平均の細胞膜率はあまり変化しないが、劣勢になるに従いや増加する傾向がみられる。

第5節 要 約

仮道管の横断面におけるディメンションを測定し、それから細胞膜率（細胞全面積中に占める細胞膜面積の割合）を計算する方法を工夫し、その年輪内変移について検討した。

(1) 仮道管の断面の形状（細胞の外形と内腔の形状）を長方形として計算式を導いたが、この方法は細胞のディメンションと細胞膜率との関係を検討するのに便利であり、グラフや数値表を作製することにより細胞膜率を簡単に求めることができる。

(2) 細胞膜率は早材ではほとんど一定であるが、晩材では増大し多くの場合年輪界で最大となる。細胞膜率の早材平均値 \bar{W}_e 、晩材の最大値 W_{max} および 両者の差（または比）は細胞膜率の年輪内変移の特徴を示す数値である。

(3) 細胞膜率の変移曲線からみて、細胞膜率が明らかに増加し始める点までを早材とし、それ以後を晩材（広義）とすることができる。Mork の定義による早材・晩材の境界は細胞膜率が約 50% の点であり、濃色で典型的な晩材はおおむね細胞膜率が 70% 以上の部分である。

(4) 晩材部における半径方向直径の減少と細胞膜厚の増加が細胞膜率の増加にどの程度影響しているかを検討するため、晩材部においても細胞膜厚が全く増加しないと仮定した場合の細胞膜率 \bar{W} を求め、これより直径減少による細胞膜率の増加分 ΔFL （直径減少効率）および膜の肥厚によって付加する細胞膜率の増加分 ΔTH （膜肥厚効率）を計算した。

ΔFL の年輪内変移は樹種による差異が少なく最大値 ΔFL_{max} は年輪界にあらわれる。 ΔTH の年輪内変移は樹種により差異があり、最大値 ΔTH_{max} はおおむね接線膜厚の最大点付近にあらわれる。両者の比（ $\Delta TH_{max}/\Delta FL_{max}$ ）により細胞膜率の年輪内変移曲線の特徴を直径減少型、膜肥厚型、両者の中間型および広膜肥厚型に区分できる。

(5) 細胞膜率の年輪内変移曲線を幹内部位別に比較すると、膜肥厚型の樹種では樹心から外側に向かい、晩材において細胞膜率が急激に増加するようになる。これに対して直径減少型の樹種では樹心部と外側部との差が少ない。

(6) アカマツとスギの幼令樹について冠級別に比較すると、優勢木の年輪よりも劣勢木の年輪の方が、晩材において細胞膜率が急激に増加する。

第4章 細胞膜の構造の年輪内変移

前章においてのべた細胞膜率の変移は、年輪内における細胞膜物質の容積的な分布状態を示すものである。しかし年輪内においては細胞膜は量的に変化するばかりでなく、構造上の変化が生じる。木材の性質の年輪内の変移を解明するためには、主要素である仮道管の細胞膜の構造上の変移をあきらかにしなければならない。

第1節 膜層構成の変移

細胞膜の膜層構成は既によく知られており、各膜層のうち、2次膜中層 (S_2) は細胞膜中で占める割合が大きく、その性質を支配すると考えられている。細胞膜中で各膜層の占める割合については、いくつかの報告^{19) 26)}があるが、年輪内においてどのように変化するかについては報告されていない。Bailey⁴⁾は、仮道管、繊維状仮道管および真正木繊維等の細胞における2次膜外層 (S_1) と内層 (S_3) とは、細胞の種類を問わずその厚さは比較的一定であり、 S_2 の厚さの変動が2次膜の厚さに影響するとのべている。このことから、晩材において膜厚が増大するのは S_2 の増大を意味すると考えられている。

しかしながら S_2 以外の膜層が年輪内で全く変化しないとは考えられない。Fig. 27 は光学顕微鏡による測定であるが、接線膜 (重複細胞膜) の中で、細胞間層とその両側の1次膜 (P) および2次膜外層 (S_1) を含んだ層の厚さは、早材から晩材に向かい増大し、最大値に達した後減少する。このような各膜層の厚さおよび構成割合の変移は、細胞膜の性質の年輪内変移の根源をなすものである。

1. 膜層構成割合の測定法

横断面の拡大像 (写真) をとり、各膜層の厚さおよび面積を測定する。光学顕微鏡では重複細胞膜において細胞間層とその両側の P と S_1 を含んだ層 ($S_1 + P + I + P + S_1$) は容易に識別

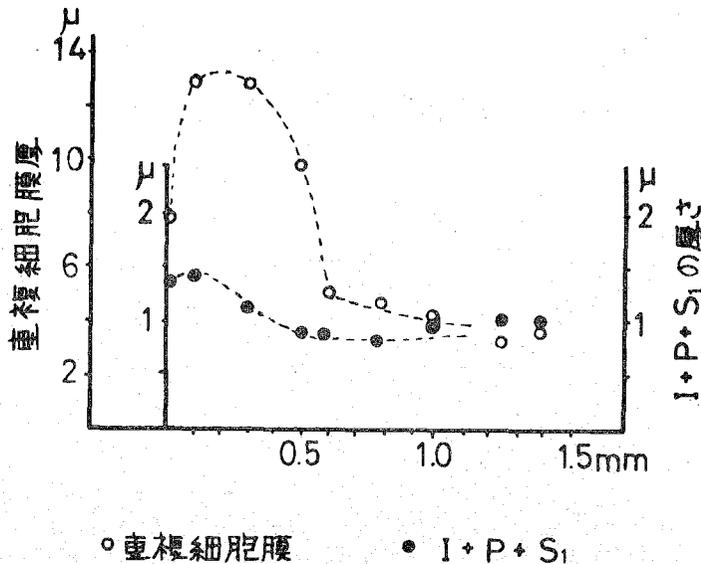


Fig.27 重複細胞膜におけるI+P+S₁の厚さの年輪内変移(アカマツの接線膜)

され (Fig. 27), その厚さ測定値は電子顕微鏡による値によく近似する。しかし各膜層については偏光顕微鏡により層の分別はできても解像力にもとづく制約があり, 厚さ測定値はきわめて不正確となる。光学顕微鏡により膜層構成割合を測定した例^{49) 82)}があるが, 正確な測定は電子顕微鏡像によらなければならない。この研究で用いた方法を略記すると次の通りである。

試料をメタクリレートで包埋し, ダイヤモンドナイフで超薄切片とし, 脱包埋後白金-パラジウムでシャドウィングを行ない, 電子顕微鏡で観察, 1500~6000倍で写真を撮影した。細胞膜各層の厚さは3000~6000倍に引伸した写真上で1/10mmの目盛付ルーペを用いて測定した。面積割合は秤量法により求めた。

この場合測定の精度に影響するのは包埋剤による試料の膨潤, 切削による変形, 電子線照射による切片の収縮などである。

メタクリレートは木材を膨潤させ, 軽度のかさ効果をもつ⁸³⁾といわれるが, 本研究ではサッカーで吸引して材中に浸透させたので膨潤効果は少ないと考えられる。切削による変形は切片が薄いとき, とくに著しいが, また厚すぎると電子線照射による収縮が大きくなる。測定に適した切片はとくに晩材では得がたいが, 多数の切片の中から良好なものをえらび測定に用いた。

測定した樹種はアカマツ (樹心からの年数43~47年), スギ (54~57年), ヒノキ (44~

48年), カラマツ(20~28年), コノテガシワ(18~21年)で, いずれも枝下の円盤(地上高1.3~2.3m)から試料を採取した。

2. 膜層の厚さと構成割合の変化

電子顕微鏡写真上で各膜層を区分しようとするとき, 最も明瞭に区分できるのは S_1 と S_2 の境界である。IとP, Pと S_1 の境界は, 細胞のコーナーの部分のをぞいて不明瞭なことが多い。したがって, 計測に際してはIとPを区別しないでI+Pを測定した。 S_2 と S_3 との境界はシャドウイングのかりかたにより不明瞭な場合がある。

接線膜と半径膜の中央部における細胞膜および各膜層の厚さをTable 10にまとめて示した。早材の各膜層の厚さは既往の報告^{19) 26)}と, 類似している。

晩材のI+Pの厚さは早材のそれとくらべ, 半径膜では1.6~4.8倍, 接線膜では1.3~3.0倍となる。半径膜のI+Pの厚さは接線膜のそれよりも一般に厚く1.5~3倍(平均2倍)である。Pの厚さが半径膜と接線膜でほとんど同一であるとする⁶³⁾と半径膜のIの厚さは大となる。接線膜のIは写真上では識別困難で隣接した2つの細胞のPが互に接して一層となっているように見受けられる。晩材の半径膜ではIの厚さが著しく大きいことがある。Pの厚さについては十分なデータが得られなかったが, アカマツおよびスギの早材で0.05~0.15 μ , 晩材で0.1~0.3 μ であった。

S_1 についてみると, 晩材では早材の1.2~3.8倍となる。接線膜と半径膜の差は少ない。

S_2 の厚さは晩材において著しく増大し, 早材の1.6~6.2倍となる(いずれも, 細胞膜厚の増大率よりも大きい)。接線膜と半径膜で比較すると早材では前者において, 晩材では後者において S_2 が厚い。 S_3 は早材・晩材による差および接線膜・半径膜による差がほとんどない。

次に各膜層の厚さが細胞膜中で占める割合をみると, I+P, S_1 および S_3 の割合は晩材では減少し, S_2 の割合は増加する。また S_2 の割合は樹種による差がかなりみられ, カラマツおよびコノテガシワでは, アカマツ, スギ, ヒノキにくらべて, その割合が小さい。

細胞膜の性質を考えるとときには, 細胞膜面積中に占める各膜層面積の割合が重要となるので, 電子顕微鏡写真を切抜き秤量する方法によって求めた。その際I+Pと S_1 , S_2 と S_3 の境界の不明瞭な場合があるので, I+P+ S_1 と S_2 + S_3 として切り抜き, 秤量した。 S_3 の量は細胞内腔の周縁の長さにTable 10の S_3 の厚さ測定値を乗じて求めた。結果をTable 11に示す。

晩材における S_2 の割合の増加は, ヒノキが最小で約3%, カラマツが最大で約12%である。晩材における S_2 の割合をみると, アカマツ, スギ, ヒノキはほぼ同じレベルにあり約80

Table 10 細胞膜の膜層の厚さ

樹種	膜層	早材			晩材			晩材 / 早材		
		最小～最大 μ	平均 μ	割合 %	最小～最大 μ	平均 μ	割合 %			
アカマツ	半径膜	I+P	0.11～0.35	0.20	8.9	0.20～0.50	0.38	4.7	1.9	
		S ₁	0.20～0.40	0.29	12.9	0.42～1.00	0.62	7.7	2.1	
		S ₂	0.90～2.25	1.66	73.8	4.90～8.78	6.94	85.9	4.2	
		S ₃	0.05～0.20	0.10	4.4	0.10～0.20	0.14	1.7	1.4	
		計		2.25	100.0		8.08	100.0	3.6	
	接線膜	I+P	0.05～0.17	0.10	4.2	0.10～0.30	0.22	3.9	2.2	
		S ₁	0.20～0.40	0.30	12.7	0.30～0.60	0.46	8.2	1.5	
		S ₂	1.10～2.90	1.86	78.9	3.20～7.00	4.82	85.4	2.6	
		S ₃	0.05～0.20	0.10	4.2	0.10～0.20	0.14	2.5	1.4	
		計		2.36	100.0		5.64	100.0	2.4	
	スギ	半径膜	I+P	0.05～0.25	0.12	8.3	0.16～0.70	0.36	4.9	3.0
			S ₁	0.10～0.18	0.14	9.7	0.20～0.80	0.53	7.2	3.8
			S ₂	0.80～1.38	1.12	77.2	3.33～8.67	6.34	86.4	5.7
			S ₃	0.04～0.10	0.07	4.8	0.05～0.20	0.11	1.5	1.6
計				1.45	100.0		7.34	100.0	5.1	
接線膜		I+P	0.04～0.12	0.08	5.0	0.03～0.30	0.10	2.1	1.3	
		S ₁	0.12～0.25	0.18	11.3	0.33～0.66	0.43	9.0	2.4	
		S ₂	0.94～1.67	1.25	78.7	3.00～5.63	4.14	86.8	3.3	
		S ₃	0.06～0.10	0.08	5.0	0.07～0.17	0.10	2.1	1.3	
		計		1.59	100.0		4.77	100.0	3.0	
ヒノキ		半径膜	I+P	0.08～0.15	0.13	5.5	0.15～0.30	0.22	4.6	1.7
			S ₁	0.13～0.30	0.23	9.7	0.25～0.60	0.37	7.7	1.6
			S ₂	1.20～2.88	1.93	81.8	1.95～6.00	4.14	86.0	2.1
			S ₃	0.05～0.11	0.07	3.0	0.05～0.13	0.08	1.7	1.1
	計			2.36	100.0		4.81	100.0	2.0	
	接線膜	I+P	0.03～0.10	0.07	2.8	0.05～0.15	0.09	2.3	1.3	
		S ₁	0.20～0.43	0.28	11.1	0.30～0.50	0.38	9.7	1.4	
		S ₂	1.82～2.62	2.08	82.5	2.05～4.88	3.39	86.2	1.6	
		S ₃	0.07～0.10	0.09	3.6	0.05～0.10	0.07	1.8	0.8	
		計		2.52	100.0		3.93	100.0	1.6	
	カラマツ	半径膜	I+P	0.08～0.20	0.14	9.5	0.20～1.50	0.69	8.9	4.8
			S ₁	0.17～0.30	0.23	15.6	0.40～1.05	0.74	9.5	3.2
			S ₂	0.60～1.40	1.00	68.1	5.00～7.00	6.20	79.9	6.2
			S ₃	0.07～0.12	0.10	6.8	0.10～0.15	0.13	1.7	1.3
計				1.47	100.0		7.76	100.0	5.3	
接線膜		I+P	0.07～0.17	0.11	8.0	0.15～0.50	0.33	6.8	3.0	
		S ₁	0.10～0.25	0.19	13.9	0.40～1.00	0.72	14.8	3.8	
		S ₂	0.75～1.50	0.99	72.3	2.80～5.38	3.69	76.1	3.7	
		S ₃	0.07～0.10	0.08	5.8	0.09～0.15	0.11	2.3	1.4	
		計		1.37	100.0		4.85	100.0	3.5	
コノテガシワ		半径膜	I+P	0.08～0.20	0.15	9.2	0.10～0.35	0.24	8.2	1.6
			S ₁	0.25～0.40	0.35	21.5	0.30～0.70	0.42	14.3	1.2
			S ₂	0.70～1.33	0.98	60.1	0.80～2.88	2.13	72.7	2.2
			S ₃	0.10～0.20	0.15	9.2	0.08～0.20	0.14	4.8	0.9
	計			1.63	100.0		2.93	100.0	1.8	
	接線膜	I+P	0.07～0.20	0.11	7.0	0.05～0.22	0.14	5.1	1.3	
		S ₁	0.15～0.40	0.31	19.8	0.30～0.50	0.43	15.6	1.4	
		S ₂	0.72～1.40	1.01	64.3	1.20～3.00	2.05	74.6	2.0	
		S ₃	0.07～0.22	0.14	8.9	0.08～0.20	0.13	4.7	0.9	
		計		1.57	100.0		2.75	100.0	1.8	

	S ₁	0.20~0.43	0.28	11.1	0.30~0.50	0.38	9.7	1.4
	S ₂	1.82~2.62	2.08	82.5	2.05~4.88	3.39	86.2	1.6
	S ₃	0.07~0.10	0.09	3.6	0.05~0.10	0.07	1.8	0.8
	計		2.52	100.0		3.93	100.0	1.6
カラマツ								
半径膜	I+P	0.08~0.20	0.14	9.5	0.20~1.50	0.69	8.9	4.8
	S ₁	0.17~0.30	0.23	15.6	0.40~1.05	0.74	9.5	3.2
	S ₂	0.60~1.40	1.00	68.1	5.00~7.00	6.20	79.9	6.2
	S ₃	0.07~0.12	0.10	6.8	0.10~0.15	0.13	1.7	1.3
	計		1.47	100.0		7.76	100.0	5.3
接線膜	I+P	0.07~0.17	0.11	8.0	0.15~0.50	0.33	6.8	3.0
	S ₁	0.10~0.25	0.19	13.9	0.40~1.00	0.72	14.8	3.8
	S ₂	0.75~1.50	0.99	72.3	2.80~5.38	3.69	76.1	3.7
	S ₃	0.07~0.10	0.08	5.8	0.09~0.15	0.11	2.3	1.4
	計		1.37	100.0		4.85	100.0	3.5
コノテガシワ								
半径膜	I+P	0.08~0.20	0.15	9.2	0.10~0.35	0.24	8.2	1.6
	S ₁	0.25~0.40	0.35	21.5	0.30~0.70	0.42	14.3	1.2
	S ₂	0.70~1.33	0.98	60.1	0.80~2.88	2.13	72.7	2.2
	S ₃	0.10~0.20	0.15	9.2	0.08~0.20	0.14	4.8	0.9
	計		1.63	100.0		2.93	100.0	1.8
接線膜	I+P	0.07~0.20	0.11	7.0	0.05~0.22	0.14	5.1	1.3
	S ₁	0.15~0.40	0.31	19.8	0.30~0.50	0.43	15.6	1.4
	S ₂	0.72~1.40	1.01	64.3	1.20~3.00	2.05	74.6	2.0
	S ₃	0.07~0.22	0.14	8.9	0.08~0.20	0.13	4.7	0.9
	計		1.57	100.0		2.75	100.0	1.8

Table 11 細胞膜の膜層の面積割合

樹種		早材				晩材				ΔS_2
		I+P+S ₁	S ₂	S ₃	計	I+P+S ₁	S ₂	S ₃	計	
アカマツ	半径膜	15.7 [%]	36.4 [%]	2.2 [%]	54.3 [%]	8.9 [%]	40.2 [%]	1.2 [%]	50.3 [%]	10.4
	接線膜	10.3	33.6	1.8	45.7	8.6	40.2	0.9	49.7	
	計	26.0	70.0	4.0	100.0	17.5	80.4	2.1	100.0	
スギ	半径膜	16.4	45.5	2.7	64.6	9.8	29.0	0.2	39.0	6.5
	接線膜	8.3	25.6	1.5	35.4	12.1	48.6	0.3	61.0	
	計	24.7	71.1	4.2	100.0	21.9	77.6	0.5	100.0	
ヒノキ	半径膜	13.0	48.7	1.6	63.3	8.3	32.2	0.3	40.8	3.0
	接線膜	7.3	28.3	1.1	36.7	9.8	48.8	0.6	59.2	
	計	20.3	77.0	2.7	100.0	18.1	81.5	0.9	100.0	
カラマツ	半径膜	21.8	36.1	3.8	61.7	11.9	31.3	0.4	43.6	12.1
	接線膜	11.4	24.9	2.0	38.3	14.0	41.8	0.6	56.4	
	計	33.2	61.0	5.8	100.0	25.9	73.1	1.0	100.0	
コノテガシワ	半径膜	27.5	31.2	5.1	63.8	17.8	25.4	1.5	44.7	11.1
	接線膜	14.0	19.6	2.6	36.2	17.2	36.5	1.6	55.3	
	計	41.5	50.8	7.7	100.0	35.0	61.9	3.1	100.0	

 ΔS_2 : 晩材におけるS₂の面積割合増加量 (%)

%であるが、カラマツは73%、コノテシガワは62%で低い値を示す。コノテシガワの早材はとくに S_2 の割合が少なく、約50%である。

3. 膜層の構成割合と細胞膜厚との関連

各膜層の厚さと細胞膜全体の厚さの関係をみると Fig. 28 および 29 のように、 S_2 の厚さは細胞膜厚の変化に関係なくほぼ一定であるが、I+P および S_1 の厚さは膜厚とともに増加する。膜厚の増加分中に占める S_2 の増加分の割合をみると (Table 12)、カラマツでは約80%他の4樹種では約90%である。したがって、膜厚の増大とともに S_2 の割合が増加することとなるが、膜厚と S_2 の割合との関係は Fig. 30の通りで、 S_2 の割合は膜厚3 μ 以上ではあまり増加せず、86~87%にとどまる。

Table 12 晩材における細胞膜厚の増加分中に占める S_2 の厚さの増加分

樹種	$\Delta S_2 / \Delta T \times 100$	
	半径膜	接線膜
アカマツ	91%	90%
スギ	89	91
ヒノキ	90	93
カラマツ	83	78
コノテシガワ	89	88

ΔS_2 : S_2 の厚さ増加量
 ΔT : 細胞膜厚の増加量

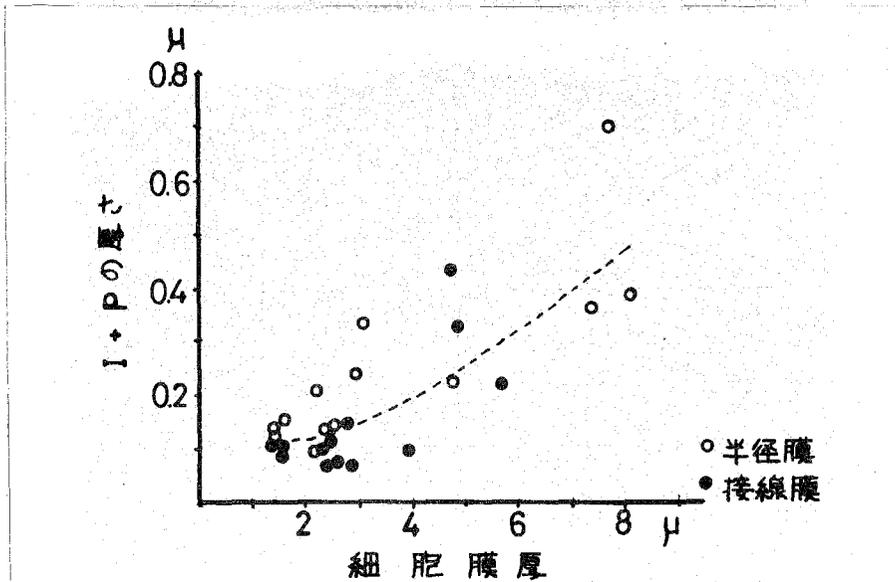


Fig. 28 細胞膜厚と I+P の厚さ

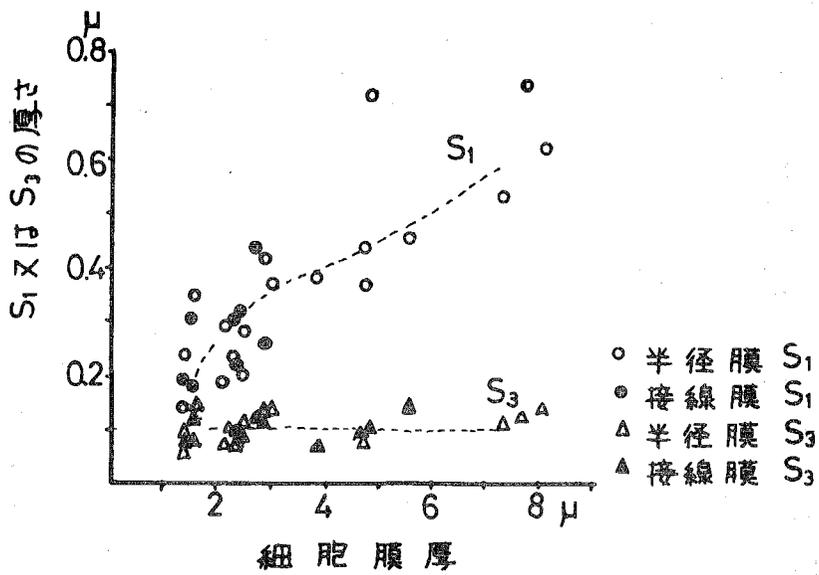


Fig.29 細胞膜厚と S_1 および S_3 の厚さ

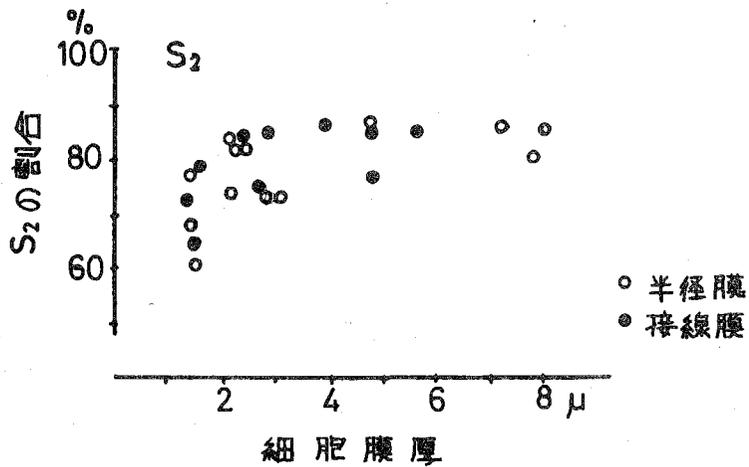


Fig.30 細胞膜厚と S_2 の割合

細胞膜中における S_2 の割合は 樹種によりかなりの差異があるが、膜厚の増加と S_2 の割合増加との関係においても同様に樹種によりかなりの差異がみられる。すなわち、コノテガシワでは晩材における膜厚の増加が少ないが(1.8倍)、 S_2 割合の増加は大きく(11%)、スギでは膜厚の増大が著しいが(3.0~5.1倍)、 S_2 の割合の増加は比較的少ない(6.5%)。

第2節 フィブリル傾角の変移

フィブリル傾角、とくに S_2 のそれが、同一年輪内において 早材から晩材に向かい変移することについては多くの報告があり^{97) 103)}、早材と晩材の細胞膜の性質、とくに収縮および弾性に著しく影響すると考えられている。^{9) 14) 22) 82)}

1. フィブリル傾角の測定法

光学顕微鏡による方法としてはヨウソ法^{3) 35) 55)}、蛍光染料を利用する方法⁵¹⁾、オプティカル・レプリカを用いる方法⁵⁵⁾、偏光顕微鏡を用いる方法^{47) 55) 67)}などがある。その他、X線による方法^{55) 67)}、電子顕微鏡による方法がある。

これらの方法にはそれぞれ得失があるが、ヨウソ法、とくにその簡略法^{35) 55)}は比較的簡単に多数の試料について S_1 および S_2 のフィブリル傾角を測定できる。これに対し オプティカル・レプリカは S_3 のその測定に適している。

本研究ではヨウソ法(小林氏簡易法)³⁵⁾により S_1 と S_2 のフィブリル傾角を測定し、次にその切片を水洗、乾燥して封入しないで検鏡し、 S_3 のフィブリル傾角を測定した。

角度は顕微鏡写真上で測定した。測定に際して1本の仮道管の中でのばらつきが大きいことに注意すべきであり、放射組織の付近など異常な個所をさけ、できるだけ多数の測定値をとるようにした。

2. 年輪内におけるフィブリル傾角の変移

仮道管の2次膜各層のフィブリル傾角を早材・晩材別に示すとTable 13の通りである。 S_1 のフィブリル傾角は平均 $64^\circ \sim 83^\circ$ で半径膜において $2^\circ \sim 13^\circ$ 大きい。早材と晩材とでは、ヒノキを除き晩材の値が大きい。晩材の S_1 のフィブリル傾角が早材のそれより大きいことは、

Table 13 細胞膜各層のフィブリル傾角

(単位:度)

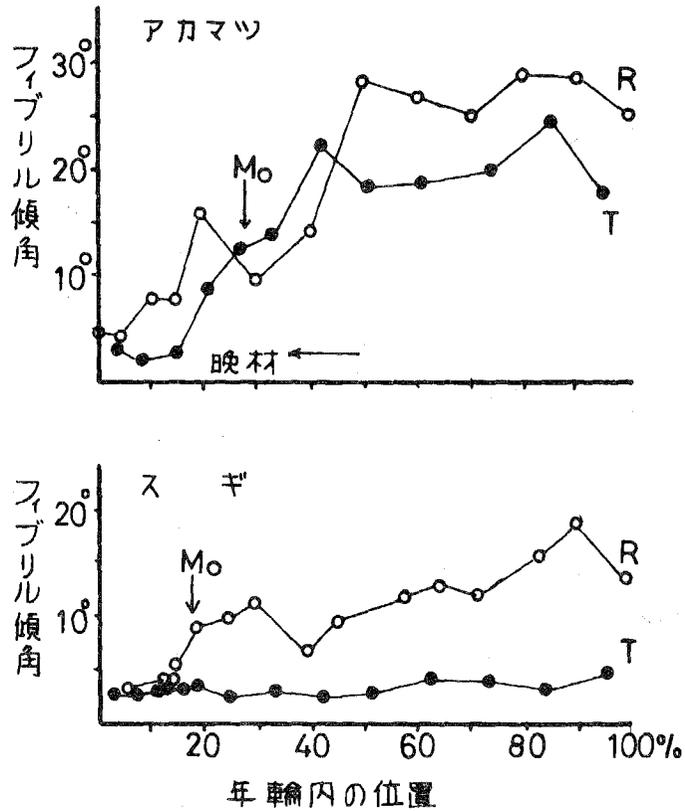
樹種	早材			晩材		
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₁	S ₂	S ₃
アカマツ(45年)						
半径膜	71 (66~81)	26.5 (18~39)	83 (76~88)	77 (69~81)	8.0 (0.5~24)	79 (73~76)
接線膜	68 (65~72)	20 (11~31)	83 (79~90)	75 (73~79)	5.5 (0.5~21)	83 (77~87)
スギ(55年)						
半径膜	68 (61~86)	14 (8.5~20)	81 (75~85)	83 (72~90)	3.5 (0.5~9.5)	85 (84~88)
接線膜	64 (59~76)	3.5 (0.5~11)	85 (74~90)	80 (71~89)	3.0 (0.5~5.0)	82 (75~87)
ヒノキ(44,46年)						
半径膜	81 (70~89)	14 (12~18)	82 (78~86)	77 (68~88)	8.0 (1.0~18)	83 (83~87)
接線膜	68 (62~71)	6.5 (1.5~14)	79 (66~88)	66 (56~72)	4.5 (1.0~11)	81 (76~84)

すでに原田¹⁸⁾が数種の針葉樹材について報告していることで、一般的傾向と思われる。

S₃のフィブリル傾角は平均79°~85°であり、早材と晩材、接線膜と半径膜との差がほとんど認められない。

S₂のフィブリル傾角は早材で3.5°~21°、晩材で2.8°~7.8°であり、晩材の値が小さい。スギとヒノキの接線膜では変化が少ない。また接線膜と半径膜とでは早材・晩材ともに後者の値が大きい。

年輪内における変移の例をFig. 31 および 32に示す。アカマツでは接線膜、半径膜のどちらも、晩材に向かい著しく減少するが、スギでは接線膜の変移はわずかである。またフィブリル傾角の減少は、Morkの定義による早材・晩材境界よりやや早く始まるようである。カラマツでは早材から晩材へ急激に減少し、コノテガシワでは年輪界付近で急減する。



R: 半径膜 Mo: Morkの定義による
 T: 接線膜 早材・晩材の境界

Fig.31 S₂のファイブレル傾角の年輪内変移

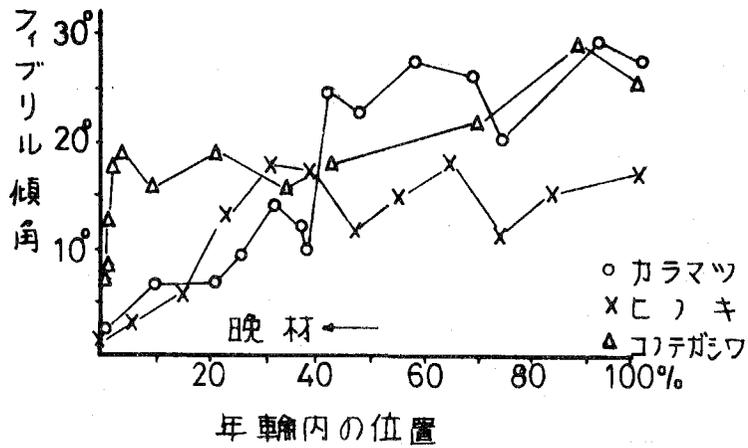


Fig.32 半径膜 S_2 の microfibril 傾角の年輪内変移

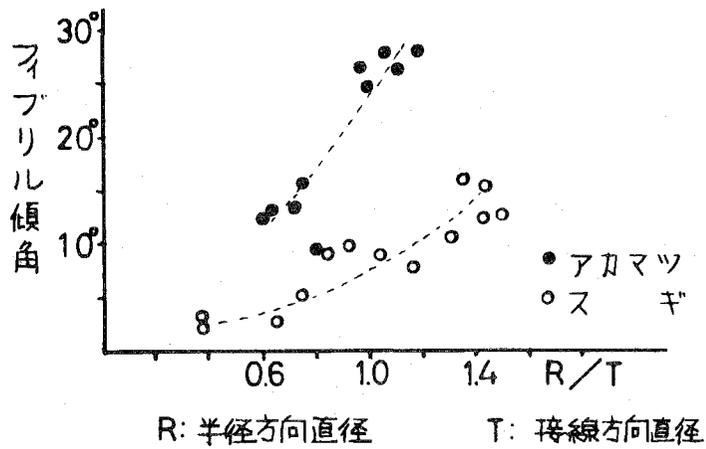


Fig.33 R/T と半径膜 S_2 の microfibril 傾角

3. 仮道管のディメンションの変移とフィブリル傾角

仮道管長とフィブリル傾角との関係はよく調査されている。Preston⁶⁷⁾によれば一般に

$$L = K \cdot \cot \theta \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 L は仮道管長、 θ はフィブリル傾角、 K は定数が成立するとしている。またHiller²¹⁾はロブロリ・パイン (*Pinus taeda* L.) とスラッシュ・パイン (*P. elliottii* Eng.) で晩材の細胞膜厚とフィブリル傾角が直線関係にあることを報告している。しかしこれらは樹心から外側への変化についての調査にもとづくものと思われる。

1年輪内における仮道管のディメンションの変移とフィブリル傾角との関係を検討すると、Fig. 31および32にみられるように、半径膜のフィブリル傾角の年輪内変移は半径方向直径の変移と関連しているように思われる。

アカマツおよびスギにおいて半径方向直径 R と S_2 のフィブリル傾角との関係をみると、 R がある値以下になるとフィブリル傾角は顕著に減少する。 y (半径方向直径 R /接線方向直径 T)との関係をみるとFig. 33のように y の減少とともに S_2 のフィブリル傾角が小さくなる傾向がみられる。

第3節 膜孔分布の変移

早材の仮道管にはその半径膜に大径の膜孔が多く存在するが、晩材仮道管では小径となり分布も一般に少ない。細胞膜は膜孔の部分で特異な構造をもち、その存在状態は仮道管の性質を考える上で見のがすことができない。また晩材ではしばしば、接線膜にも膜孔ができる。これを晩材の特徴として早材と晩材の区分点とする考え方もある⁴⁹⁾。すなわち、接線膜に膜孔があらわれはじめの点をもって早材・晩材の境界とするものである。しかし、晩材において接線膜に膜孔が多くあらわれる樹種 (例 スギ) もあるが、きわめて少ない樹種 (例 アカマツ) があって、普遍的な拠点としては適当でない。

膜孔自身の微細な構造も年輪内で変移すると思われるが、ここでは単に細胞膜上にあらわれる個数と占有面積の変移についてのべる。

1. 膜孔分布の測定法

常法により板目および柾目の切片のプレパラートを作り、分布数の測定は板目断面の投影像（ $\times 100$ ）上で、大きさ（膜孔縁の外周の直径）の測定は柾目断面の顕微鏡写真（ $\times 600$ ）上で測定した。膜孔の面積は膜孔縁の長径と短径の平均値を直径とする円として計算した。

測定に際して仮道管の半径面をオーバーラップ域OL（上下の仮道管が重なりあって接合している部分）、放射組織との交差域RCおよびクリヤー域CL（OL, RC 以外の部分）に区分し、各区分の長さの割合とOLおよびCLにおける膜孔の大きさと数を測定した。RCにおける分野膜孔については測定しなかった。

2. 膜孔分布の変移

板目断面で 仮道管の半径面を調査した結果をTable 14に示す。

まず区分についてみると、仮道管の半径膜は3～4個の放射組織に接し、その接合部RCは仮道管の長さの約10%を占める。OLは20～25%、CLは65～70%であり、早材・晩材による差異は少ない。

有縁膜孔の数は早材の仮道管に30～60個存在し、晩材に向かいアカマツでは顕著に減少するが、スギとヒノキでは接線膜に有縁膜孔があらわれ、かえて増加する。

有縁膜孔の分布をみると、OLに40～70%（平均56%）が集中している。すなわち、半径面の $1/4 \sim 1/5$ の部分に有縁膜孔数の約 $1/2$ が存在している。仮道管の長さ1mm当りの分布密度をみればあきらかなごとく、CLとの間に大差がある。

有縁膜孔の直径は早材と移行部とはあまり変化しないが晩材ではやや減少する。早材では仮道管の半径方向直径の約 $2/5$ であるが、晩材では $1/2 \sim 3/4$ となる（Fig. 34）。

CLにおいて膜孔が占める面積は、3樹種の平均で早材部5%、移行部7%、晩材部3%である。スギおよびヒノキの晩材における接線膜の有縁膜孔は大きさも小さく（直径 $6 \sim 8 \mu$ ）、その面積は1～2%である。

OLには多数の膜孔が集中し、軸方向の通導に都合よくできていることがわかる。仮道管の性質とくに強度的性質を考える場合には、CLに存在する有縁膜孔が問題となるが、面積割合は数%にとどまり、RCの面積よりも少ない。

Table 14 仮道管の半径面における区分および有縁膜孔の分布

樹種	仮道管長	膜孔数	Ray 本数	各区分の割合(長さ)			膜孔数分布割合		分布密度			CLにおける 膜孔面積
				RC	OL	CL	OL	CL	OL	CL	平均	
	mm	個	本	%	%	%	%	%	個/mm	個/mm	個/mm	%
アカマツ 早材	5.10	57.8	3.7	9.6	18.6	71.8	40.8	59.2	24.8	9.5	11.3	8.4
移行部	5.28	26.8	4.3	9.8	18.3	71.9	64.2	35.8	17.8	2.6	5.1	2.1
晩材	5.25	9.8	4.3	10.5	17.0	72.5	70.5	29.5	7.7	0.8	1.9	0.4
スギ 早材	3.00	33.2	2.7	9.3	26.0	64.7	58.2	41.8	24.8	7.3	11.0	4.3
移行部	3.46	51.2	3.6	10.0	20.2	69.8	46.0	54.0	33.8	11.5	14.8	8.9
晩材	3.53	16.7	2.9	9.1	24.8	66.1	68.3	31.7	13.0	2.3	4.7	1.3
		(71.4)									(20.2)	
ヒノキ 早材	2.61	41.5	2.6	8.0	26.8	65.8	56.0	44.0	33.4	6.4	15.9	3.0
移行部	2.81	47.2	3.5	12.1	28.8	59.1	57.8	42.2	33.6	9.7	16.8	8.3
晩材	3.24	54.2	4.0	12.3	18.5	69.2	40.5	59.5	36.5	14.7	16.7	6.3
		(13.2)									(4.1)	

() 接線膜に存在する有縁膜孔 OL: オーバーラップ域 CL: クリヤー域 RC: 放射組織との交差域

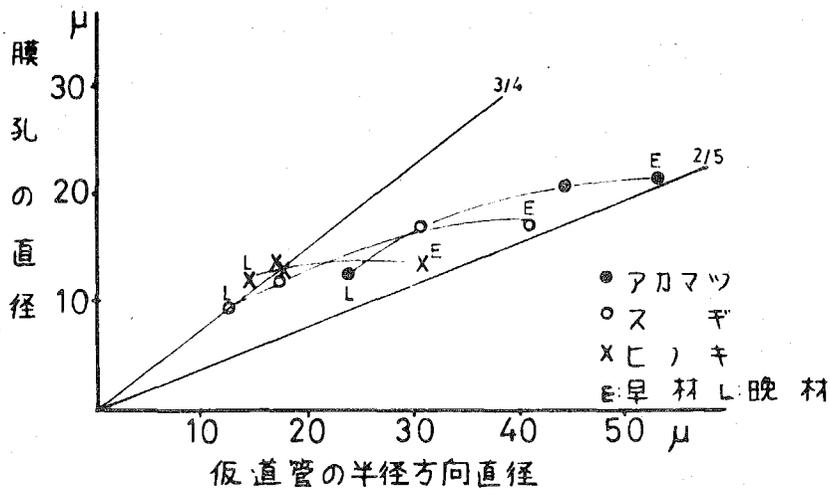


Fig. 34 仮道管の半径方向直径と有縁膜孔の直径

第4節 細胞膜の化学的組成および結晶構造の変移

木材の主要な構成成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの含有量には同一年輪内の早材と晩材とで多少の差異が認められる。これらの構成成分の細胞膜中における分布が早材と晩材で同一であるかどうかは細胞膜の構造上重要な問題であるが、ここでは単に早材と晩材における化学的組成の差異と膜層構成割合との関連についてのべ、またセルロースの結晶構造（結晶化度）について若干の知見をのべる。

1. 化学的組成および結晶化度の測定法

常法では化学的組成の各要素の定量には1測定に1~2gを必要とし⁹⁶⁾、年輪内の変移の測定には不適當であり、種々の方法が工夫されている^{13) 83) 104)}。しかし、ここでは早材と晩材の平均的な差異について確実な測定値を得るため、多数の年輪を移行部分が入らぬよう早材と晩材に分割し、木粉とし、常法により分析した。木粉は、あまり粒子を小さくすると、とくに晩材試

料の場合、細胞膜の粉末になり易い部分が多く含まれてくることが予想されたので、40~60メッシュのものを用了。

晩材幅のきわめてせまい ヒノキ およびコノテガシワではマイクローム切片(厚さ約100 μ)より顕微鏡下で晩材を切り出し、それをきざんで試料とした。試料はきわめて少量であったので常法の1/10で行ない、リグニン量のみを求めた。

全セルロース量は亜硫酸ソーダー、さらし粉溶液処理を繰返し残さが白色となるまで行なうのであるが、⁹⁶⁾晩材では処理回数を多くする必要があり、残さ重量が安定することを確かめて全セルロース量とした。リグニンについても同様72%硫酸処理時間を延長して残さ重量の安定を確かめた。

結晶領域および非晶領域の相対量を測定する方法には X線の干渉強度分布による方法、吸着法、比重法、酸加水分解法、重水置換法など多くの方法⁸⁷⁾があるが、それぞれの方法で把握する結晶域あるいは非晶域に差異があり、厳密な比較は困難である。ここではスギの早材と晩材について酸加水分解法により非晶領域量を求めた。

2. 早材と晩材におけるセルロース およびリグニン 含有量の差異

Table 15のとおり、全セルロース量は晩材で4~5%多く、リグニンは早材でどの樹種も約3%大きい。Ritter およびFleck⁶⁹⁾はダグラス・ファー(Pseudotsuga menziesii (Mirb) Franco) およびロブリン・パイン(学名:前出)で調査しリグニンは早材で1~3%多く、セルロースは晩材で約3%多いとしている。

また、数種のカナダ産針葉樹の年輪内で、ホロセルロース量が最高となるのは晩材のはじめの部分で77~78%であり、最低となるのは最初と最終に形成された木部で、72.5~73.5%であると報告

Table 15 早材・晩材のセルロースおよびリグニン含有量

樹 種	区分	全セルロース	リグニン
アカマツ	早材	50.2 %	28.4 %
	晩材	54.0	25.1
スギ	早材	49.1	33.0
	晩材	54.3	30.1
ヒノキ	早材		33.4
	晩材		30.4
コノテガシワ	早材		36.4
	晩材		33.5

110) されており, 約5%の差がある。

リグニン含有量については晩材の値が2~3%高いと報告されているが^{17) 69) 110)}, 差が認められなかった樹種〔ウエスタン・ヘムロック (*Tsuga heterophylla* (Raf.) Sarg.)〕もある¹¹⁰⁾。

全セルロースにおける差と, ホロセルロースの差がほぼ類似しているのので, ヘミセルロースの含有量については, 早材と晩材の差が少ないと思われる。

晩材においてセルロースが多く リグニンが少ないのは, 晩材の細胞膜ではセルロースに富む S_2 の割合が多く, リグニンに富む I の割合が少ないことによるとされている。

細胞膜中におけるこれらの化学成分の分布をみると^{43) 53) 63)}, リグニンは複合細胞間層で最も多く 71%, S_2 では18~25%, S_3 では11~18%であると推定されている。

セルロースは P で10%, S_2 では50%以上となり, S_3 ではやや減少し, ヘミセルロースは P で20%前後, S_2 で25~30%, S_3 では30~35%であるとされている。

Meier^{53) 54)} によれば, オウシュウアカマツ (*Pinus sylvestris* L.) においてグルコマンナンは膜の外部から内方に向かい増加し, グルクロノアラビノキシランは S_1 および S_3 に多い。晩材は早材より S_2 の割合が大きいののでグルコマンナンに富み, 早材は S_1 , S_3 の割合が晩材に比べ大きいからグルクロノアラビノキシランに富む。

各膜層の化学的組成が早材と晩材とで差異がないとすれば, 細胞膜全体の化学的組成は本章第1節でのべた膜層割合に依存することとなる。

$I+P+S_1$ の面積割合と, リグニン含有量 (Fig. 35), S_2 の面積割合と全セルロース量 (Fig. 36) を見ると, それぞれ, ほぼ直線的な関係が認められる。樹種によって かなりのばらつきを示すが, 概略的な傾向としては, S_2 の割合の増加はセルロース量の増加を, $I+P+S_1$ の割合増加は, リグニン量の増加をもたらす。

Fig. 35~36 において破線は

$$\text{リグニン含有量 (\%)} = 20 + 42A'/100 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{全セルロース } \kappa \text{ (\%)} = 16 + 48A''/100 \quad \dots\dots\dots (13)$$

ただし A' : $I+P+S_1$ の面積割合 (%)

A'' : S_2 の面積割合 (%)

を示している。

これらの式は, 各膜層の化学的組成が樹種および早材・晩材で差異がないと仮定し, S_2 と S_3 のリグニン含有量を約20%, S_2 の全セルロース量を60%前後 (上式では64%) と想定し

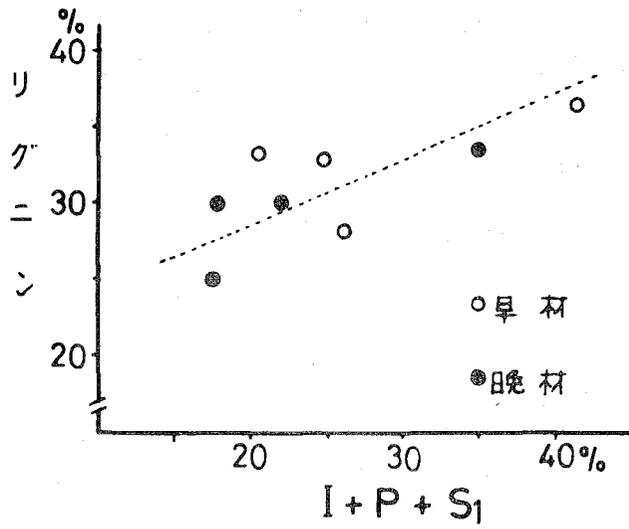


Fig. 35 I+P+S₁ の割合とリグニン量

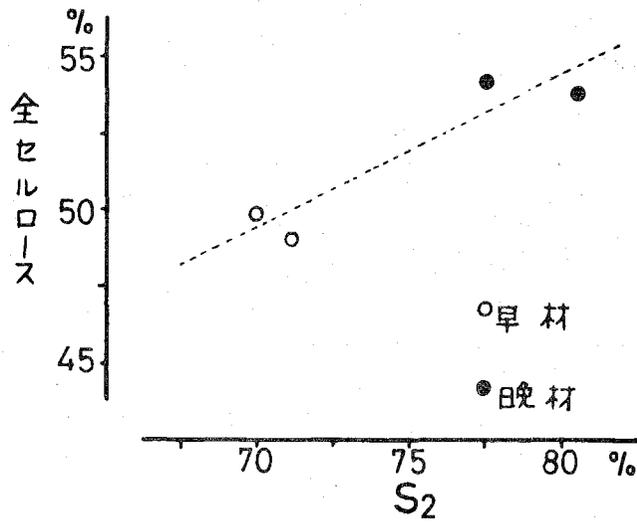


Fig. 36 S₂ の割合と全セルロース量

て、定めたものである（実測値から求めた回帰式ではない）。 $I+P+S_1$ のリグニン量は 62%、 $I+P+S_1+S_3$ の全セルロース量は 16% となる。実測値との適合がよく、各膜層の化学的組成は、この想定に近似しているものと考えられる。

3. 結晶領域量の差異

酸加水分解法で求めたスギの非晶領域と、既往の文献の結果^{60) 93)}をまとめると Table 16 の通りである。早材と晩材の差異はおおむね 0~2% で、きわめて小さい。X 線回折法により

Table 16 木材セルロースの非晶域

樹種	測定法	早材	晩材	測定者
スギ 辺材	酸加水分解法	52.1 %	52.1 %	著者
スギ 心材	〃	48.9	47.1	〃
スギ	〃	48.72	47.76	谷口 ⁹³⁾
スギ 心材	〃	38.62	36.43	中戸 ⁶⁰⁾
スギ	〃	36.37	35.02	〃
カラマツ	〃	39.50	37.32	〃

求めた結晶化度は原田ら²⁰⁾によればアカマツの早材 48%、晩材 49%、トガサワラの早材 46%、晩材 50% であり、Lee⁴⁶⁾はウエスタン・ヘムロックのパルプおよびホロセルロースについての測定より晩材の結晶化度が 0.4~0.8% 大きいことを報告している。その他セルロースの結晶構造に関連して、早材・晩材の差異をあきらかにしたものは少ないが、晩材のセルロースの分子鎖の平均長は早材のそれより約 6% 長い¹¹⁰⁾と報告され、また原田ら²⁰⁾はアカマツについてミセルの幅を測定し、早材 21.9 Å、晩材 22.3 Å であり、両者間に差がないとしている。

いずれにせよ、細胞膜の骨格物質であるセルロースの構造に関しては早材・晩材間の差異は少ないものと思われる。

第5節 要 約

仮道管細胞膜の構造の年輪内変移について検討した。

- (1) 晩材における膜厚増加を膜層別にみると次のようになる。すなわち I+P および S_1 は厚さを増し、 S_3 はほとんど変化しない。 S_2 の厚さは飛躍的に増大し、膜厚増加分の 80~90% を占める。しかしながら細胞膜面積中に占める割合の増加は比較的少なく 3~12% である。
- (2) 2次膜のフィブリル傾角をみると、 S_1 においては晩材でやや大きくなり、 S_2 の傾角は減少するが、 S_3 のそれは変化しない。また半径膜の S_2 のフィブリル傾角は仮道管の半径方向直径の変移と関連がある。
- (3) 仮道管の半径膜には多数の有縁膜孔が存在するが、その約半数は仮道管長の 20~25% のオーバーラップ域に集中している。仮道管長の 65~70% を占めるクリアー域では有縁膜孔は少なく、その数% にすぎない。有縁膜孔分布を早材・晩材で比較するとアカマツでは晩材の分布密度が著しく小さいが、スギとヒノキでは一定の傾向が認められない。
- (4) 年輪内における化学的組成の変移、とくに早材・晩材の差異をみると、晩材ではセルロースが多く、早材ではリグニンが多い。この化学的組成の差異は細胞膜の膜層構成割合の変移と関連する。またセルロースの結晶領域については早材・晩材の差異は少ない。

第5章 構造の年輪内変移と比重および吸湿性⁷³⁾

本章では木材の物理的性質の中で基本的な真比重、比重および吸湿性と構造の年輪内変移との関連についてのべる。

第1節 真 比 重

木材の真比重は木材実質の化学的組成とその構造に依存すると考えられる。したがって年輪内における真比重の変移は第1に、早材と晩材における化学的組成の差異と関連するものと考えられる。第2にそれらの物質の細胞膜中における充てん状態、すなわち細胞膜の多孔性の影響が考えられる。

1. 真比重の測定法

真比重の測定法には比重ビン法、浮遊法、ヘリウムガス法、密度勾配管法などがある。

木材実質の体積を液体置換で測定する方法では、用いる液体の性質によって得られる真比重の値が異なる。⁹⁰⁾ 水を用いた場合とベンゼンを用いた場合とでは真比重が著しく異なることは周知の通りである。また、液体を用いる方法では木材中の空気をとり去り、液体で完全に空隙を埋めることが必要である。本研究では比重ビン法および浮遊法¹⁰⁸⁾を用いた。

比重ビン法による測定——辺材から移行部分を含まないように注意して、早材・晩材別に調製した40～60メッシュの脱脂木粉を比重ビンに入れて全乾状態とし、Y字型の真空注入装置を用いて試料中の空気を排除したのち、水を注入、25℃で温度平衡させて秤量した。

浮遊法による測定——木口切片(100～200 μ)より早材・晩材を切りとり、脱脂して調製した試料を共栓のガラスビンに入れて全乾状態とし、同様にY字型の真空注入装置を用いて、四塩化炭素・トルエン混合液(比重約1.40)を注入し、テトラブromエタン(比重2.967)を滴下して試料を浮遊状態とし、そのときの液の比重を比重ビンで測定した(25℃)。

2. 早材と晩材の真比重

比重ビンによる測定結果は Table 17 の通りで、晩材の比重は早材よりもアカマツで 0.008, スギで 0.004 大きい。測定のはらつきがかなりあり、平均値の差の有意性はアカマツでは水準 5%, スギでは 10% であった。

Table 17 早材・晩材の真比重
(置換液体：水)

樹種	測定数	真比重		
		平均 ± S.D.	最小 ~ 最大	
アカマツ	早材	5	1.532 ± 0.0050	1.527 ~ 1.539
	晩材	5	1.540 ± 0.0037	1.537 ~ 1.546
スギ	早材	5	1.524 ± 0.0038	1.520 ~ 1.528
	晩材	5	1.528 ± 0.0020	1.527 ~ 1.531

S.D. : 標準偏差

浮遊法による測定結果は Table 18 の通りで、晩材の^直比重がどの樹種でも大きく、その差はカラマツで最も大きく 0.015 でその他の樹種では約 0.01 である。

水 (25°C) を用いて測定した真比重は 1.51 ~ 1.55 であり⁹⁰⁾ Table 17 の平均値 1.52 ~ 1.54 は妥当な数値と思われる。

Table 18 早材・晩材および木材物質の真比重
(置換液体：トルエン・四塩化炭素・テトラブromエタン)

試料	測定数	真比重		
		平均	最小 ~ 最大	
アカマツ	早材	3	1.453	1.450 ~ 1.457
	晩材	3	1.462	1.460 ~ 1.463
スギ	早材	3	1.443	1.440 ~ 1.446
	晩材	3	1.452	1.448 ~ 1.454
ヒノキ	早材	5	1.450	1.447 ~ 1.454
	晩材	5	1.461	1.457 ~ 1.462
カラマツ	早材	3	1.434	1.432 ~ 1.436
	晩材	3	1.449	1.446 ~ 1.451
コノテガシワ	早材	5	1.437	1.431 ~ 1.442
	晩材	5	1.449	1.444 ~ 1.453
全セルロース	5	1.530	1.504 ~ 1.548	
ホロセルロース	6	1.500	1.469 ~ 1.528	
リグニン	4	1.340	1.322 ~ 1.360	

トルエンおよび四塩化炭素は木材をわずかに膨潤させる⁹⁰⁾。テトラブromエタンの木材に対する作用は不明であるが、トルエン-四塩化炭素-テトラブromエタンによる真比重値の範囲は、1.43 ~ 1.46 で、ベンゼンによる測定値 1.42 ~ 1.46⁹⁰⁾ にほぼ等しい。

早材と晩材の真比重の差については、同様の浮遊法により、Wilfong¹⁰⁸⁾ はロブロー・パイんで、早材 1.446, 晩材 1.500

と報告している。

3. 早材と晩材の化学的組成と真比重

真比重を測定した試料と同一年輪の早材・晩材別の全セルロースおよびリグニン含有量は Table 15 に示した通りである。脱脂木材を全セルロース、ヘミセルロース、リグニンの三者からできているとして、全量（100%）より全セルロースおよびリグニンを引いた残りをヘミセルロースとする。そして Vorreiter¹⁰⁰⁾ による各化学成分の真比重（セルロース 1.58，ヘミセルロース 1.50，リグニン 1.40）を用いて、化学的組成の差異が早材と晩材の真比重にどの程度影響するかを計算すると、Table 19 に示すように晩材のそれは 0.006~0.007 大きい。

Table 19 早材・晩材の化学的組成と真比重の差異

区 分	ア カ マ ツ		ス ギ	
	早 材	晩 材	早 材	晩 材
全セルロース	50 %	54 %	49 %	54 %
ヘミセルロース	22	21	18	16
リグニン	28	25	33	30
置換液体：水				
計 算 値	1.508	1.514	1.502	1.509
	$\Delta=0.006$		$\Delta=0.007$	
実 測 値	1.532	1.540	1.524	1.528
	$\Delta=0.008$		$\Delta=0.004$	
置換液体：トルエン・四塩化炭素・テトラブromエタン				
計 算 値	1.448	1.455	1.442	1.450
	$\Delta=0.007$		$\Delta=0.008$	
実 測 値	1.453	1.462	1.443	1.452
	$\Delta=0.009$		$\Delta=0.009$	

$$\Delta = (\text{晩材の真比重}) - (\text{早材の真比重})$$

$$\text{計算値} = \frac{100}{\sum p_i / \rho_i} \quad p_i : \text{各化学成分の百分比} \quad \rho_i : \text{各化学成分の真比重}$$

次に、アカマツおよびスギの全セルロース、ホロセルロースおよびリグニン（クラートン・リグニン）の真比重を浮遊法により測定すると Table 18 の通りである。これよりヘミセルロ

ースの真比重を推定すると約 1.42 となる。この数値を用いて、前と同様に 化学的組成の差異が、早材と晩材の真比重にどの程度影響するかを計算すると、Table 19 のように晩材の真比重値は 0.007~0.008 大きい。

このように実測値における早材・晩材の差と、化学的組成の比率から計算した差とがほぼ同じオーダーであることから、早材・晩材の真比重の差は、主としてその化学的組成に依存し、また、それらの物質の細胞膜中での充てん状態は、早材・晩材であまり差異がないと考えられる。

4. 真比重と構造との関連

早材・晩材の化学的組成の差異は、前章でのべたように細胞膜の膜層構成割合の差異と関連すると考えられる。

調査した 5 樹種の早材・晩材の S_2 の割合と真比重とを対比すると Fig. 37 のとおりで、お

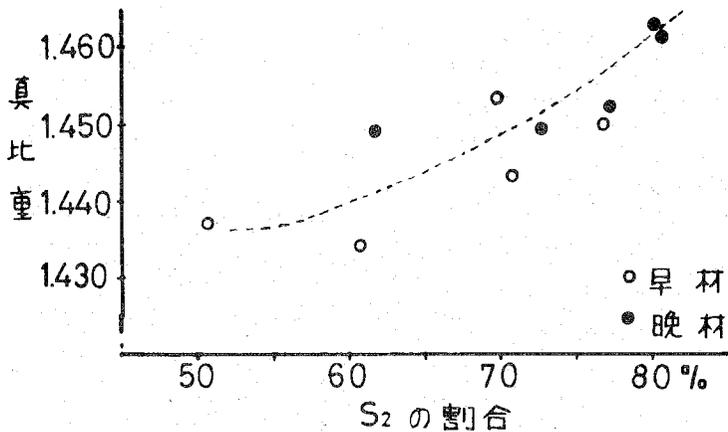


Fig. 37 S_2 の割合と真比重

おむね S_2 の割合とともに真比重が増加する傾向を示している。 S_2 の面積割合の早材と晩材の差は前章 Table 11 にみられるようにカラマツ>コノテガシワ>アカマツ>スギ>ヒノキの順であるが、真比重の早材と晩材の差 (Table 18) はカラマツ>コノテガシワ>ヒノキ>アカマ

ツ・スギとなる。

すなわち概略の傾向として真比重は S_2 の割合とともに増加するが、他の膜層の割合やその化学的組成の影響などにより樹種による差異があらわれると思われる。

第2節 比 重

木材が種々の細胞から構成されているとき、木材の比重は各要素の構成割合、細胞膜率および細胞膜の比重の積を総計したものとあらわされる。すなわち、

$$\text{木材の比重} = \sum (\text{構成割合}) \times (\text{細胞膜率}) \times (\text{細胞膜の比重}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

である。(14)式右辺はすべて木材の構造に関するものであり、木材の比重は物理的性質の中で最も構造への依存性が高いものである。

1. 細胞膜の比重

Table 18の真比重および第3節Table 21の繊維飽和点を用い、細胞膜中の水の平均比重を1.115とし、⁸⁹⁾ 湿潤体積基準の細胞膜の比重 r'_w (G_0/V_w , 容積密度)を計算すると、アカマツの早材については

$$r'_w = \frac{1.453}{1 + \frac{1.453 \times 0.304}{1.115}} = 1.04 \quad \dots\dots\dots (15)$$

であり、同様に計算するとTable 20に示すように1.03~1.06となり、早材と晩材の差は少ない。

気乾状態の細胞膜の比重 r'_u (G_u/V_u)は、含水率を15%とし、15%までの水の平均の比重を1.165とすると⁸⁹⁾、アカマツの早材については

$$r'_u = \frac{1.453 \times 1.15}{1 + \frac{1.453 \times 0.15}{1.165}} = 1.41 \quad \dots\dots\dots (16)$$

であり、同様に計算した結果は1.40~1.42となり、早材と晩材の差は少ない。

以上の計算は細胞膜の体積が、吸着圧縮された水の体積だけ膨張するとの仮定にもとづいて計算している。

Table 20 細胞膜の比重

樹種	区分	真比重	繊維飽和点 ¹⁾	細胞膜の比重	
				G_0/V_w	G_u/V_u
アカマツ	早材	1.453	30.4	1.04	1.41
	晩材	1.462	28.8	1.06	1.42
スギ	早材	1.443	30.5	1.03	1.40
	晩材	1.452	28.1	1.06	1.41
ヒノキ	早材	1.450	29.5	1.05	1.40
	晩材	1.461	30.9	1.04	1.41

1) 飽和水蒸気中における平衡含水率 (Table 21)

細胞膜の比重については、Jayme と Krause²⁷⁾ は 0.71~1.27 とし、Yiannos¹¹⁶⁾ もまた同様に細胞膜は多孔性であり、真比重よりも値が低いと述べている。しかし細胞膜がこのように多孔性であるかどうかについては疑問がもたれている^{5) 24)}。水銀を用いたポロシメーター (porosimeter) により測定した細胞膜の比重がほぼ真比重値に近似しており⁹¹⁾ (このとき水銀は 0.06 μ の孔隙まで達し得る)、Wilfong¹⁰⁸⁾ によれば、ヘリウムが到達することができて、水銀が到達することのできない毛管は、細胞膜の体積のわずか 1.75% にすぎない。

Smith および Miller⁸⁵⁾ が飽水状態で測定したレッドウッド (*Sequoia sempervirens* Endl.) の晩材の細胞膜の比重が 0.974~1.106 であり、計算により求めた値 1.03~1.06 (Table 20) にほぼ等しい。これらにより細胞膜は Jayme らの主張するように多孔性でないと考えられる。

仮道管以外の要素の真比重は測定されていない。放射組織柔細胞および軸方向柔細胞 (樹脂細胞) の化学的組成をセルロース 35%、ヘミセルロース 35%、リグニン 30% とし⁴⁹⁾、Table 18 の真比重を用いると、真比重は 1.441 となり、膜の比重 G_0/V_w および G_u/V_u は、それぞれ 1.03 および 1.39 となる。すなわち早材の値とほぼ等しいと考えられる。

2. 各構成要素の細胞膜率と木材の比重

(1) 構成要素

針葉樹材では仮道管の割合が約 95% であるので他の要素の影響は少ない。

スギおよびヒノキの樹脂細胞の細胞膜率は 19~38%、放射組織柔細胞のそれは 33~36%

であった。樹脂細胞の細胞膜率を30%，放射組織柔細胞のそれを35%とし，構成要素率（第2章Table 1）および細胞膜の気乾比重1.39を乗じて（14）式により単位体積（ 1cm^3 ）の木材中に含まれるこれらの細胞の重量を求めるとスギの場合，樹脂細胞の集中域で0.028gにすぎない。樹脂細胞および放射組織を無視して仮道管の細胞膜率を材全体の細胞膜率と見なすと，早材ではほとんど影響がないが，仮道管の細胞膜率が高い晩材では比重が高い方に片寄る。しかしスギの場合，樹脂細胞集中域で仮道管の細胞膜率を60%としたとき，気乾比重が約1%高くなるにすぎない。

軸方向樹脂道はエピセリウム細胞を除き空隙であるから細胞膜率を減少させる。したがって軸方向樹脂道は無視すると，その集中域において比重はアカマツで4~9%，カラマツで2~4%高い方にかたよる。

このように仮道管以外の構成要素を無視しても，アカマツの軸方向樹脂道の集中域をのぞき，誤差はきわめて小さい。

(2) 仮道管の細胞膜率と針葉樹材の比重

前項でのべたように針葉樹材の場合，仮道管の細胞膜率と細胞膜比重より木材の比重を求めることができる。すなわち，

$$\text{針葉樹材の比重 } r \doteq (\text{仮道管の細胞膜率}) \times (\text{細胞膜の比重}) \quad \dots\dots\dots (17)$$

仮道管の細胞膜率として第3章でのべた細胞膜率(W%)を用い，細胞膜の比重をDとすると，

$$r = D \cdot W / 100 \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。そこで年輪内の種々の位置からとった小材片について比重と細胞膜率を測定し，上式について検討した。

3. 比重の測定

アカマツ，スギおよびヒノキの1年輪内の早材，移行部および晩材から，長さ10~15mm，幅8~10mm，厚さ0.2~1.5mmの薄い試片をとり，これを2分して一方は比重の測定に，他方は木口切片をとり細胞膜率の測定に用いた。

試片の容積密度 $r_w (G_0/V_w)$ の測定は最大含水率法によるのが，測定値のばらつきが少なく能率がよかった。すなわち最大含水率 u_{\max} を求め，次式により計算する。

$$r_w = 1 / (u_{\max} + 0.667) \quad \dots\dots\dots (19)$$

細胞膜率の測定法は第3章第1節と同様である。

気乾比重 (G_u/V_u) と細胞膜率との関係を求めるために、後述する縦引張試験片 (第6章) について測定を行なった。体積の測定は試片のディメンションを測定、計算により求め、試験片の一端より木口切片をとり、スライドガラス上で気乾状態とし、バルサムで封入して細胞膜率を測定した。

4. 細胞膜率と比重

容積密度 $r_w (G_0/V_w)$ と細胞膜率 $W (%)$ との関係は Fig. 38 の通りである。明らかに直線的な関係が認められ、樹種ごとに原点を通る直線として関係式を求めると、

$$\left. \begin{array}{l} \text{アカマツ} \quad r_w = 0.768 W / 100 \\ \text{スギ} \quad r_w = 0.818 W / 100 \\ \text{ヒノキ} \quad r_w = 0.784 W / 100 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

となる。3樹種の間には差が認められないので、全体について求めると、

$$r_w = 0.785 W / 100 \approx 0.8 W / 100 \quad \dots\dots\dots (21)$$

となる。

気乾比重 $r_u (G_u/V_u)$ と細胞膜率 $W (%)$ との関係は Fig. 39 の通りで、同様に直線関係が認められ、その関係式は

$$r_u = 1.26 W / 100 \quad \dots\dots\dots (22)$$

である。

湿潤体積基準の細胞膜の比重 r'_w が 1.03~1.06 であるのに (21) 式では 0.80 であり、約 20% の差がある。気乾状態における細胞膜の比重 r'_u は 1.40~1.42 であるが、(22) 式ではこれに対して 1.26 であり、10~11% の差がある。

このように計算された細胞膜の比重よりも係数が小さい値となる原因には次の3点が考えられる。

1) 木材の容積密度および気乾比重の測定誤差

最大含水率法による容積密度の測定において試験片の表面に付着した水が多い場合ならびに気乾比重の測定において試験片の厚さ測定にシックネス・ゲージを用いた場合、容積密度および比重は過小となる。

2) 細胞膜率 W の測定誤差 (第3章参照)

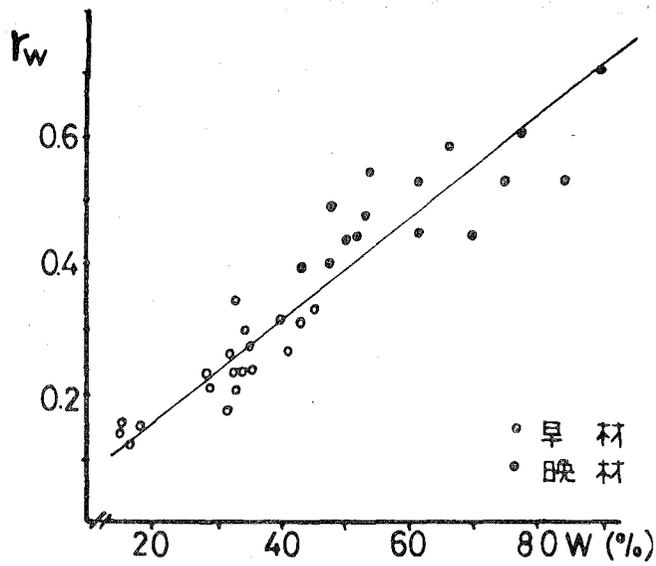


Fig.38 細胞膜率 W と容積密度 r_w との関係

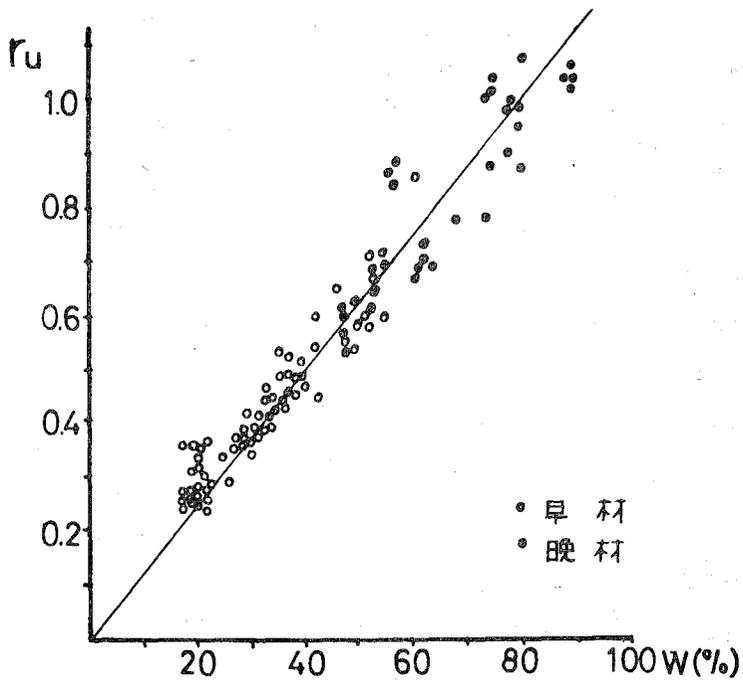


Fig.39 細胞膜率 W と気乾比重 r_u との関係

細胞断面の拡大像において細胞膜を測定するとき、周縁の判定の仕方により測定値が過大になる可能性がある。また W の計算において膜孔の影響を考慮していないため、 W 値が2~3%過大になっていると考えられる。

3) 細胞膜の多孔性 (porosity)

細胞膜にかなりの細孔 (pore) があるとすれば、(15) (16) 式により計算した細胞膜の比重は実際の細胞膜の比重 (packing density) よりも過大になっていると考えられる。

しかし、(21) (22) 式によって細胞膜率 W から比重が推定できることがあきらかとなった。 W は仮道管の半径方向直径 R 、接線方向直径 T および接線膜厚 Mt の測定により求められる (第3章)。すなわち、 R 、 T および Mt の測定によって年輪内の比重の変移を知ることができる。

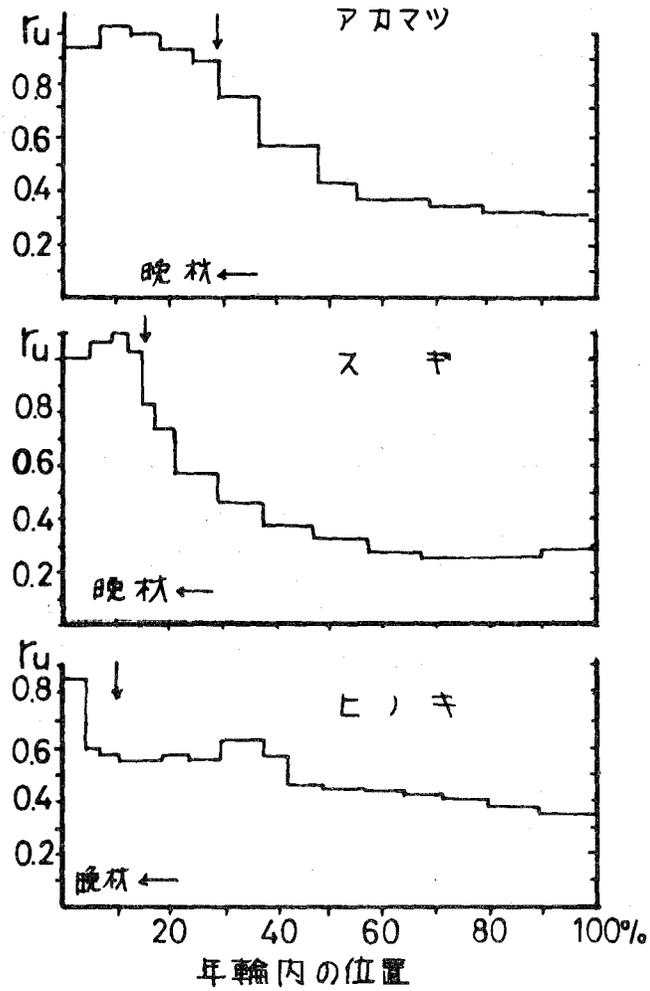
5. 年輪内における比重の変移

前項 Fig. 38~39 にみられるように、細胞膜率 W と比重との間には原点を通る直線関係が認められた。したがって第3章においてのべた年輪内の W の変移に関する記述は、年輪内の比重の変移に適用できる。すなわち、比重は早材ではほぼ一定で、仮道管の半径方向直径 R の減少、および膜厚 M の増加とともにはじめ徐々に、のち急激に増加し、多くの場合年輪界で最大となる。アカマツ、スギ およびヒノキについて実測した結果を Fig. 40 に示す。Mork の定義による早材・晩材境界における気乾比重 r_u は 0.63~0.68、典型的な晩材となるのは 0.83~0.90 である。

年輪内の比重変移の大きさは同様に細胞膜率の変移 ($W_{max} - \bar{W}_e$) により次のように区分される。

- a) $W_{max} - \bar{W}_e \geq 70\%$ r_u の変移大, 約 0.9 以上 カラマツ, トガサワラ, スギ
- b) $W_{max} - \bar{W}_e \geq 50\%$ r_u の変移中, 約 0.6 以上 イチイ, モミ, トドマツ, トウヒ, アカマツ, ゴヨウマツ, ツガ, ヒノキ, サワラ, ネズコ
- c) $W_{max} - \bar{W}_e < 50\%$ r_u の変移小, 0.6 以下 カヤ, イヌマキ, ヒバ, コノテガシワ, ネズミサシ

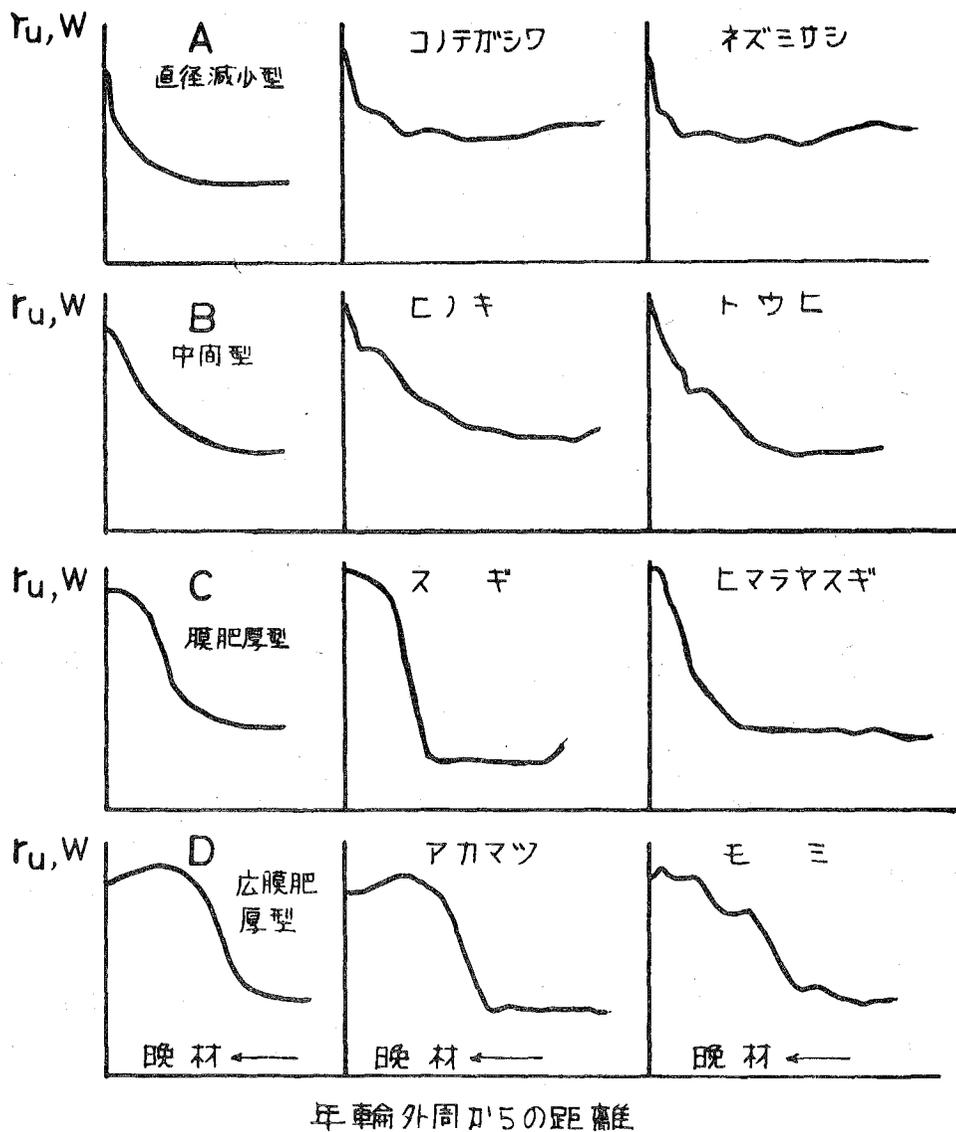
¹¹⁴⁾ 矢沢 は数種の針葉樹の早材と晩材の比重を求め、容積密度数の晩材/早材の値を、トドマツ 1.65 アカマツ 2.20 スギ 2.48 ネズコ 2.07 を報告している。これに対して W_{max} / \bar{W}_e はトドマツ 3.40 アカマツ 2.92 スギ 4.04 ネズコ 2.43 であり著しく大きい。それは前者は早材・晩材の平均容積密度数の比であるのに対し、後者は晩材最大値と早材平均とを対比し



↓: Mork の定義による早材・晩材の境界

r_u : 気乾比重

Fig.40 気乾比重の年輪内変移



A, B, C, D : 年輪内変移の型

r_u : 気乾比重

W : 細胞膜率

Fig.41 細胞膜率および比重の年輪内変移の型

ていることによる。晩材の容積密度数の実測値は試片の作成法により著しく異なるので、年輪内の比重変移の指標としては $(W_{\max} - \bar{W}_e)$ または W_{\max} / \bar{W}_e の方がすぐれている。

Wの年輪内変移と同様に、比重の変移もまた仮道管のRとMの変移に支配される。

すなわち、年輪内における比重変移のパターンはFig. 41に示すように、

- (A) 直径減少型では、晩材における比重の変移は横軸に凹な曲線を示す（イヌマキ、ヒバ、コノテガシワ、ネズミサシ）
- (B) 中間型 比重の変移は (A) にくらべて横軸に凸な部分があられるが、全体としては横軸に凹な曲線を示す（トドマツ、トウヒ、ヒノキ）
- (C) 膜肥厚型 比重変移は横軸に凸な曲線が支配的となる（モミ、カラマツ、アカマツ、トガサワラ、ツガ、スギ）

(D) 広膜肥厚型

(C) のうち凸部のひろがりの広いもの（アカマツ）

となる（第3章Fig. 20参照）。Fig. 40においてアカマツは(D)型、スギは(C)型、ヒノキは(B)型を示す。

Ifjuら²⁵⁾はダグラスファーの年輪内の容積密度を測定しているが、その変移曲線は(D)型である。

第3節 吸 湿 性

木材の吸湿性は主成分であるセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンの構成割合と各々における吸着点の状態に左右される。したがって年輪内の構造の変移との関連は次の2点において考えられる。

- (1) 早材と晩材における化学的組成と結晶構造の変化
- (2) 膨潤による吸着点の新生に及ぼす木材の構造の影響

1. 吸湿試験方法

通常の真空系の吸湿測定装置で吸湿測定管を2本とし、その各々に同一年輪からとった早材および晩材試料をつった石英スプリングを装置し、 $28 \pm 1^\circ\text{C}$ で種々の蒸気圧における平衡吸

湿量を測定した。

早材および晩材試料はアカマツ、スギおよびヒノキの辺材からとった1年輪内の連続板目切片（厚さ200 μ ）より移行部分を除いて選んだものである。

次に飽和水蒸気中での吸湿量を求めるため、蒸溜水を下部に入れたデシケーター中に前記と同一の試料を入れ、20 \pm 1 $^{\circ}$ Cで吸湿平衡させた。

2. 早材と晩材の吸湿性の差異

(1) 吸湿等温線について

得られた吸湿等温線をFig. 42に示す。関係湿度30%以下ではいずれの樹種においても晩材の吸湿量が早材のそれよりもわずかに大きい。30~80%では、早材・晩材の差異が少なく、どちらの吸湿量が大きいかわからない。さらに関係湿度が高くなるとアカマツおよびスギでは早材の吸湿量、ヒノキでは晩材のそれが大きくなる場合が多かった。

飽和水蒸気中での吸湿はTable 21の通りである。アカマツとスギでは早材の値が大きく、ヒノキでは晩材の値が大きい。

以上の結果をまとめると、低関係湿度域では晩材の吸湿がわずかに大きく、中関係湿度域では早材・晩材の差は少なく不定、高関係湿度域ではアカマツとスギでは早材の吸湿量が大きく、ヒノキでは晩材のそれが大きい。

Table 21 飽和水蒸気中における平衡含水率(20 $^{\circ}$ C)

樹種	早材	晩材
アカマツ	29.0~32.2% 30.4	28.1~29.6% 28.8
スギ	28.1~33.0 30.5	26.8~29.2 28.1
ヒノキ	28.2~30.3 29.5	29.0~32.1 30.9

(2) 吸着式とその定数について

山田および梶田^{28) III)}の吸着式

$$S = \frac{cS_m h}{1+ch} \left\{ 1 + (R'+R'') \frac{h-h^n}{1-h} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

において、 $(R'+R'') \div 1$ として

$$S = \frac{cS_m h}{1+ch} \cdot \frac{1-h^n}{1-h} \dots\dots\dots (24)$$

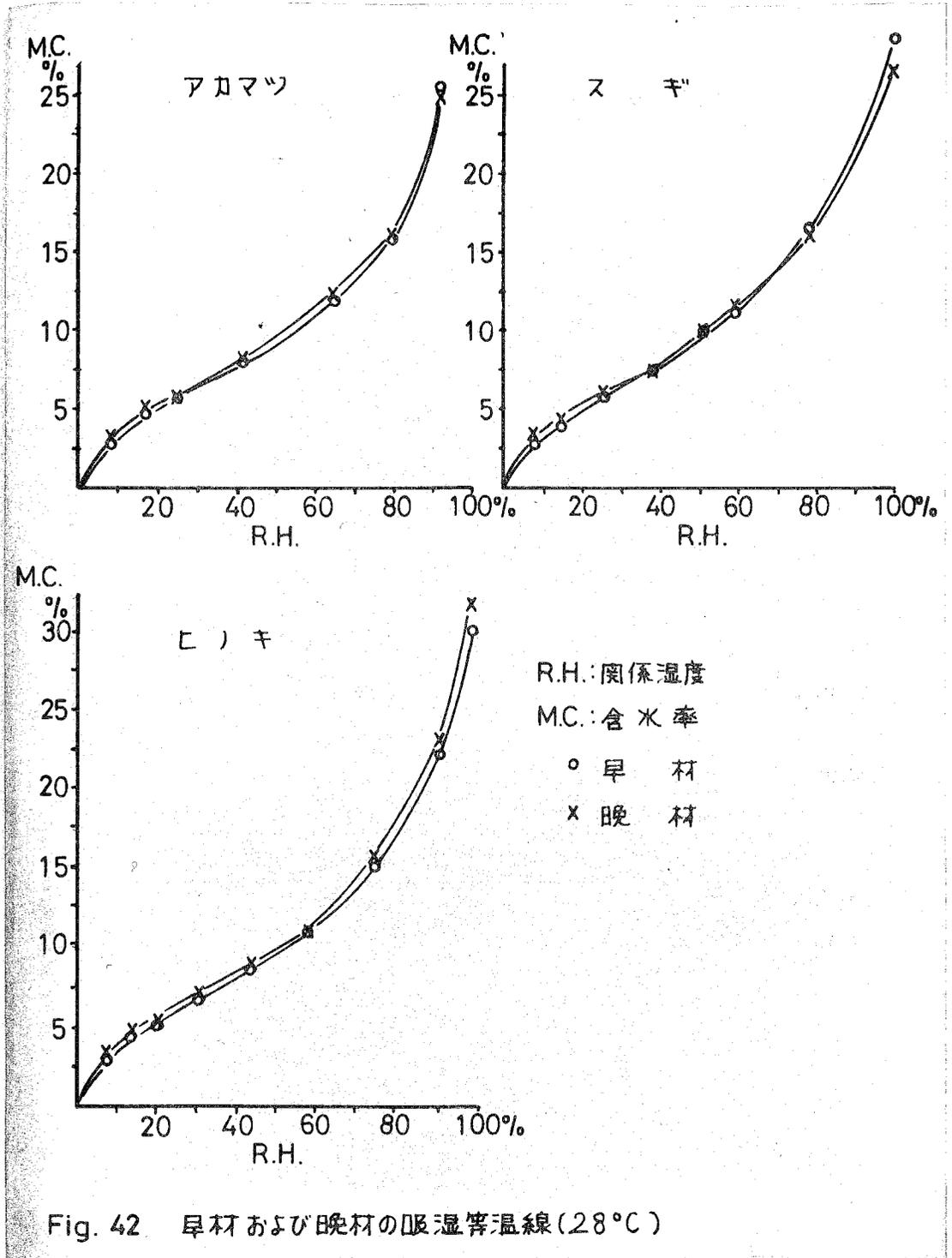


Fig. 42 早材および晩材の吸湿等温線(28°C)

の定数を求めた。

なお上式において、 S ：吸着量， S_m ：第1次吸着点が水分子によって単分子的に 被われたときの吸着量， c ：定数， h ：関係湿度， n ：吸着点の次数， R' ：吸着量—変形量に関する変数， R'' ：毛管凝縮に関する定数，であって，厳密には $(R'+R'') \cong 1$ である^{28) 11)}。

$h/S(1-h)$ 対 h はどの場合も， h が 0.4 以下では，ほぼ直線関係を示した。この直線関係から S_m ， c を求め，それらを (24) 式に代入して， h が 0.7~0.8 の場合の n を求め，この n を用いて (24) 式により， S_m ， c ， n を定めた (試謬法による計算を 2 回行なったことになる)。

結果を Table 22 に示す。 S_m の値のばらつきはスギではやや大きい，他の 2 樹種では比較的小さい。3 樹種とも早材より晩材の値が小さい。 c は S_m にくらべ全体にややばらつきが大きい，早材よりも晩材の値が大きい。 S_m と c の早材・晩材の差を概観すると，その差はアカマツ→スギ→ヒノキの順に小となっている。 n は 4.4~4.8， $n \cdot S_m$ は 25~28% であって早材と晩材の差は少ない。

Table 22 吸着式のパラメーターと早材・晩材の差異

樹種	パラメーター	早材		晩材		Δ
		平均	最小~最大	平均	最小~最大	
アカマツ	S_m %	6.2	6.0~6.4	5.9	5.8~6.0	-0.3
	c	10.5	9.8~10.9	14.4	13.1~15.2	+3.9
	n	4.5	4.2~4.7	4.8	4.4~5.1	+0.3
	$n \cdot S_m$ %	28	25~30	28	26~30	0
スギ	S_m %	5.9	5.7~6.2	5.7	5.3~6.1	-0.2
	c	9.4	8.7~10.6	12.1	10.6~14.0	+2.7
	n	4.4	4.4	4.7	4.4~5.1	+0.3
	$n \cdot S_m$ %	26	25~27	27	26~27	+1
ヒノキ	S_m %	5.9	5.8~5.9	5.7	5.6~5.9	-0.2
	c	11.3	10.6~11.8	13.2	11.7~14.3	+1.9
	n	4.4	4.3~4.5	4.4	4.1~4.8	0
	$n \cdot S_m$ %	26	25~27	25	23~27	-1

$$\Delta = (\text{晩材の値}) - (\text{早材の値})$$

このように早材と晩材では吸湿性に差異がみられるが，以下，これについて 吸着式の定数の意義^{28) 72) 112)} にもとづき考察する。

晩材では第1次の吸着点が早材よりもわずかに少ない。セルロースでは吸着点となる自由なOH基は非晶部分に多いから吸着量を結晶化度ないし、水に対するアクセシビリティと対応して考え得るが、木材の場合はセルロースの他にヘミセルロースとリグニンがあり、3者の構造と吸着量との関係を考えなければならない。ヘミセルロースの吸着点の状態はセルロースの非晶域のそれに類似するとされている⁷²⁾。リグニンはセルロース・ヘミセルロースに比して吸湿性が小さく^{8) 70)} 吸湿性を抑制ないし妨害する作用も考えられる^{70) 72)}。

早材と晩材ではセルロース量とリグニン量に差異があり、それは細胞膜の膜層構成割合の変移と関連する(第4章)。したがって吸湿の差異についても細胞膜の構造との関連を検討する必要がある(後述)。

定数cは吸着エネルギーに関する値である。吸着エネルギーについての検討は吸着熱の測定

Table 23 木材および木材物質の吸着式パラメーター

	温度 ℃	吸着式	S _m %	c	n	内部表面積 m ² /g	文献
木材 アカマツ 早材	28	Y.K.	6.2	10.5	4.5	308	
晩材	〃	〃	5.9	14.4	4.8	290	
スギ 早材	〃	〃	5.9	9.4	4.4	293	
晩材	〃	〃	5.7	12.1	4.7	283	
ヒノキ 早材	〃	〃	5.9	11.3	4.4	290	
晩材	〃	〃	5.7	13.2	4.4	284	
ヒノキ	25	〃	5.3	12.5	4.1		112
ブナ	〃	〃	4.4	14.2	4.0		71
シトカスプレー	20	B.E.T.	5.16			254	
リグニン	25	B.E.T.	4.78			235	90
セルロース							
綿	25	B.E.T.	2.82			139	
ホロセルロース (ヘムロック)	〃	〃	5.38			263	
ヘミセルロース							
アカマツ	25	Y.K.	6.7	5.3	3.6		92
ブナ	16	〃	10.7	6.9	5.8		72
キシラン		〃	19.6	0.9	5.1		28

B.E.T.: Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E.²⁸⁾ による。

Y.K.: 山田・梶田式

S_m, c, n.: 吸着式のパラメーター。

値について行なうべきであるが、既往のデータ^{28) 72) 90) 92)}と比較した結果を述べる(Table 23)。

C値は晩材では10.6~15.2、早材では8.7~11.8で晩材の値が大きい。Stamm⁹⁰⁾の値から計算するとシトカ・スプルースでは13.6、リグニンでは9.8、綿では15.2、ホロセルロースでは11.2である。ヘミセルロースでは5~7あるいはそれ以下である^{28) 72) 92)}。概括するとヘミセルロース<早材<晩材<綿とすることができる。

3. 吸湿性と構造との関連

第4章でのべたように、早材・晩材は細胞膜の膜層構成割合の相違によって晩材ではセルロースが多く、早材ではリグニンが多い。またヘミセルロースについては晩材ではグルコマンナンが多く、早材ではグルクロノアラビノキシランが多い。

細胞膜各層の吸湿における役割を考えると、リグニンの多いI+Pのうち、少なくともIは吸湿性が劣ると考えられ⁷⁰⁾、Pは多孔性でヘミセルロースによる吸着が考えられるがリグニンも多く、細胞膜中に占める割合も少ないから、全体の吸湿に対する影響は少ないと思われる。最大の面積割合をもつS₂はリグニンが少なく、木材の吸湿において主たる役割を果たし、その構成成分より、セルロース・マンナンの吸湿挙動を示すと考えられる。これに対してS₁およびS₃の吸着にはキシランの吸着挙動があらわれてくると考えられる。セルロースもマンナンも第1級のOH基を1個もつが、キシランは第2級のOH基のみである。したがって、前者は低関係湿度域での吸湿が大きく、後者は高関係湿度域で吸湿量が增大すると考えられる¹⁾。

前項でのべた晩材の吸湿挙動は、早材にくらべS₂の吸湿性の特徴が強くあらわれていると解釈できる。これに対して、早材ではS₁およびS₃の影響が晩材よりも強くあらわれると考えられる。とくに、細胞内腔に面しキシランの多いS₃の割合が早材で高いことは、吸湿性に強く影響すると思われる。

S₂の面積割合の早材・晩材による差異の大きさは(第4章Table 11)アカマツ>スギ>ヒノキの順であり、S_mと~~も~~の早材・晩材による差異の大きさもまたアカマツ>スギ>ヒノキの順である。このことは、晩材はS₂により強く支配された吸着挙動を示すという推論を裏付けるものである。

n値は膨潤によって順次新生される吸着点の次数である。早材と晩材の構造上の差異は各々の膨潤に影響し、n値も異なってくると思われるが、測定結果には差異がみられなかった。関係湿度が高くなるとアカマツとスギでは早材の吸湿量が多くなる傾向がみられたが、高関係湿度域における吸湿量については毛管凝縮および吸着量：変形量の関係を考慮に入れて検討する

必要がある。

第4節 要 約

構造の年輪内変移と木材の真比重，比重および吸湿性との関連を調べた。真比重と吸湿性については早材と晩材の差異と構造との関係を検討し，比重については細胞膜率との関係を求めて，これより年輪内変移を考察した。

- (1) 晩材の真比重は早材のそれよりも0.009～0.015大きく，その差異は化学的組成の相違によるものと思われる。また真比重は S_2 の割合とともに増加する。
- (2) 木材の比重は各構成要素の割合，細胞膜率および細胞膜の比重の3者の積を総計したものとしてみなされる。針葉樹材では仮道管が約95%を占めるので，仮道管の細胞膜率を材全体の細胞膜率とみなすことができる。
- (3) 仮道管の細胞膜率 W と気乾比重 r_u との関係は原点を通る直線式

$$r_u = 1.26 W / 100 \quad \dots\dots\dots (22)$$

であらわされる。(7)式(第3章)および(22)式を用いると，仮道管の直径と膜厚の測定により気乾比重の年輪内変移を知ることができる。比重の年輪内変移のパターンは W のそれと同様に直径減少型，膜肥厚型，両者の中間型および広膜肥厚型に区分できる。

- (4) 早材と晩材の吸湿性を比較すると，低関係湿度で晩材の吸湿量が早材のそれよりもわずかに大きい。これは細胞膜の膜層構成割合にもとづく化学的組成の差異に起因するものと考えられる。

第6章 構造の年輪内変移と縦引張強さおよび弾性

構造の年輪内変移と機械的性質との関係は2点から考えられる。第1は比重の変化を通じての関係である。前章でのべたように年輪内における比重の変移は構造の変移と密接な関連をもつが、その比重と機械的性質は一般に比例的関係にある。第2に細胞膜の構造（膜層構成割合、フィブリル傾角など）および細胞の形態と機械的性質との直接的な関連が考えられる。

機械的性質の年輪内の変移については圧縮、引張、硬さ^{97) 166)}などについて試験されているが、1年輪をいくつかに分けた薄片については引張試験が行ないやすい。本章においても機械的性質のうち、縦引張強さおよびヤング係数と構造の年輪内変移との関連について述べる。

第1節 縦引張試験法の検討

薄片の引張試験には試料の作製および試験方法などに種々の問題があるので、2、3の検討を行なった。

1. 試料の作製および試験方法

アカマツ、スギおよびヒノキの辺材から1年輪内の連続板目切片をとり、幅3~5mm、スパン25mmとして切片の両端に補強用の板紙をアルルダイトで接着し、試験片とした（Fig. 49参照）。試験機は島津オートグラフIM-100型で、フルスケール20Kg、クロス・ヘッドの速度5mm/min、チャートの送り速度500mm/min、室温12°~16°C、の条件で試験した。

各切片の一端から小片をとり、その木口切片を気乾状態でバルサムにより封入、プレパラートを作り、仮道管のディメンションを測定して細胞膜率を求めた。さらに小片の残部について小林氏法³⁵⁾により接線膜のフィブリル傾角を測定した。半径膜のそれは同一年輪の柎目切片について測定した。

次に縦引張による破壊形を光学顕微鏡および電子顕微鏡により観察し、構造との関連を追求した。

2. 試験片についての検討

(1) 試験片の形 ヤング係数を求めるため、たんざく型の試験片を用いたが、この型の試験片は試験機への取付けに注意すれば中央の幅をせまくした型に比べ種々の利点があるとされている²⁴⁾。しかし、とくに早材試験片では補強部との境界で破断する場合があります(全体で30%)、これらは測定結果より除外した。

(2) 試験片の厚さ 切片の最外側の細胞は切削により損傷しているため、信頼できる強度値を得るためには幾列かの完全な細胞を含むように試験片厚さを決定する必要がある。

スギの早材から種々の厚さの切片をとり試験した結果、薄い切片の強さは低く、厚さとともに増加し150 μ 以上で一定となることがわかった。これは細胞数で4~5細胞列以上に相当する。厚すぎると切削が困難となり、裏割れなどの損傷も多くなるので4~5細胞列を含むように厚さを定めた。早材ではアカマツとスギが220 μ 、ヒノキ150 μ 、晩材ではアカマツ90 μ 、スギとヒノキでは50 μ 、移行部分では120~150 μ とした。

(3) 裏割れおよびスリップ・ライン 切削時ルーズ・サイドに繊維方向の裏割れが生じ易いが、前述した厚さで切削すれば、割れの発生は少なく、良好な試験片を得ることができる。

晩材試片の細胞膜にはしばしばスリップ・ラインが見いだされる。スギの晩材で検討した結果、マイクローム刀のバイヤス角85°で繊維方向に切削すると、スリップ・ラインはわずかとなり、強度値が高いことがわかった。

(4) 試験片の厚さ測定 厚さはシクネスゲージ(1/1000mm)により1試験片につき15箇所を測定した。晩材試験片にはかなりの厚さむらがあった。またシクネスゲージの示す厚さは測定個所の平均厚さより大きい値を示す(約5 μ 大きい)。

第2節 縦引張強さおよびヤング係数

本節では縦引張強さおよびヤング係数の年輪内変移、比重との関係および応力-ひずみ曲線における早材・晩材の差異について述べる。

1. 強さ、ヤング係数およびひずみ

早材・晩材別に試験結果をまとめるとTable 24の通りである。縦引張強さ σ_t 、同比例限度力 σ_p 、および同ヤング係数 E_t の晩材/早材の値は1.9~4.5で、気乾比重のそれよりも大

Table 24 早材と晩材の縦引張強さ，ひずみおよびヤング係数

樹種	区分	測定数	r_u	σ_t Kg/cm ²	σ_p Kg/cm ²	ϵ_p ×10 ⁻³	ϵ_{max} ×10 ⁻³	E_t 10 ⁴ Kg/cm ²	σ_t/r_u Kg/cm ²	E_t/r_u 10 ⁴ Kg/cm ²
アカマツ	早材	22	0.307	796	303	4.87	16.0	6.05	2590	19.7
	晩材	33	0.925	3448	1140	4.42	15.9	26.6	3730	28.8
	(晩材/早材)		(3.0)	(4.3)	(3.8)	(0.91)	(0.99)	(4.4)	(1.44)	(1.46)
スギ	早材	22	0.274	794	355	5.23	12.2	6.84	2900	25.0
	晩材	31	0.932	3558	1307	4.40	12.6	29.8	3820	32.0
	(晩材/早材)		(3.4)	(4.5)	(3.7)	(0.84)	(1.03)	(4.4)	(1.32)	(1.28)
ヒノキ	早材	30	0.416	1510	532	4.65	14.1	11.5	3630	27.8
	晩材	26	0.694	2880	1031	4.83	16.4	21.4	4150	30.8
	(晩材/早材)		(1.7)	(1.9)	(1.9)	(1.04)	(1.16)	(1.9)	(1.14)	(1.11)

r_u : 気乾比重, σ_t : 縦引張強さ, σ_p : 同比例限応力

ϵ_p : 縦引張比例限ひずみ, ϵ_{max} : 同破壊ひずみ

E_t : 縦引張ヤング係数

さい。

ひずみでは早材と晩材の差異が少なく、その比は0.84~1.16である。比例限ひずみ ϵ_p ではアカマツとスギの晩材は早材よりも小さい値を示すが、ヒノキでは両者の値はほぼ等しい。破壊ひずみ ϵ_{max} では、これに対して、アカマツとスギでは両者の値がほぼ等しく、ヒノキでは晩材の値が大きい。Ifju²³⁾はダグラス・ファーでは晩材の破壊ひずみが早材のそれよりも大きいことを報告している。

2. 縦引張強さおよびヤング係数と比重との関係およびその年輪内変移

一般に木材の機械的性質は比重に比例する。縦引張強さ σ_t およびヤング係数 E_t と気乾比重 r_u との関係を、原点を通る直線であらわすと (Fig. 43) ,

$$\text{アカマツ (45年) では } \sigma_t = 3596 r_u \quad \text{Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$E_t = 26.5 r_u \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\text{スギ (55年) では } \sigma_t = 3635 r_u \quad \text{Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$E_t = 29.7 r_u \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (28)$$

$$\text{ヒノキ (46年) では } \sigma_t = 3822 r_u \quad \text{Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$E_t = 28.8 r_u \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2 \quad \dots\dots\dots (30)$$

となる。

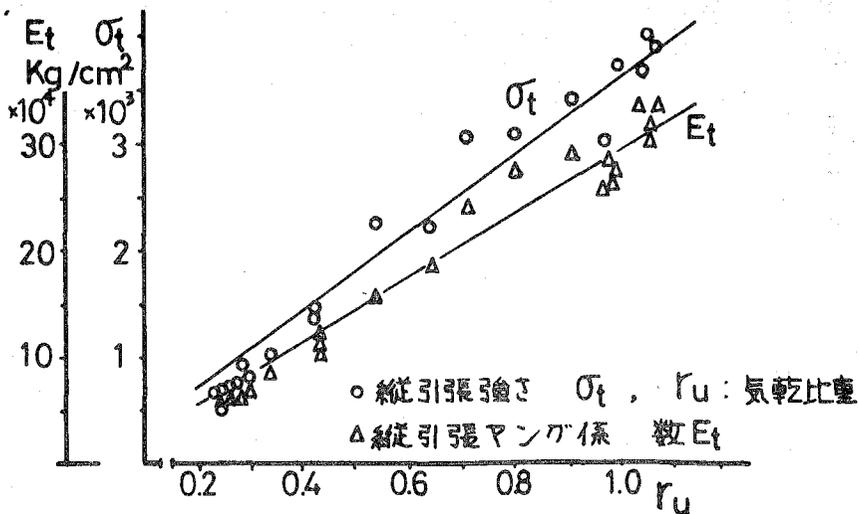
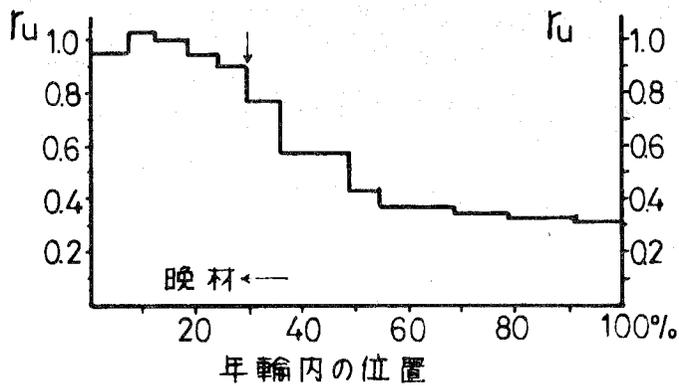
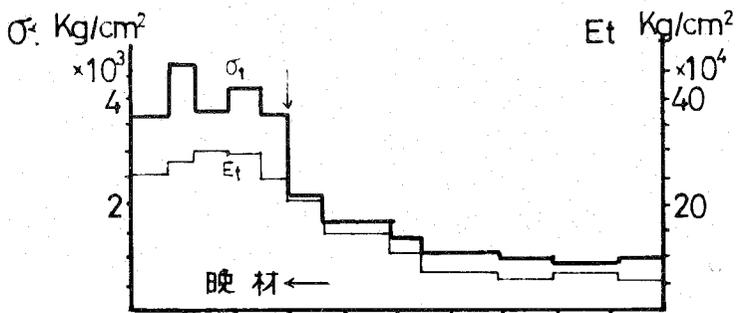
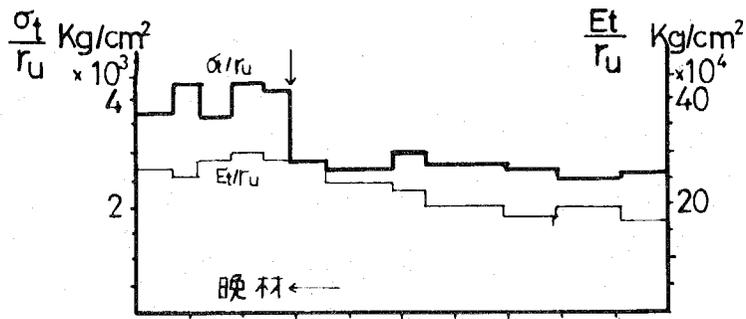


Fig. 43 気乾比重と縦引張強さおよび同ヤング係数との関係 (スギ 54~55年)

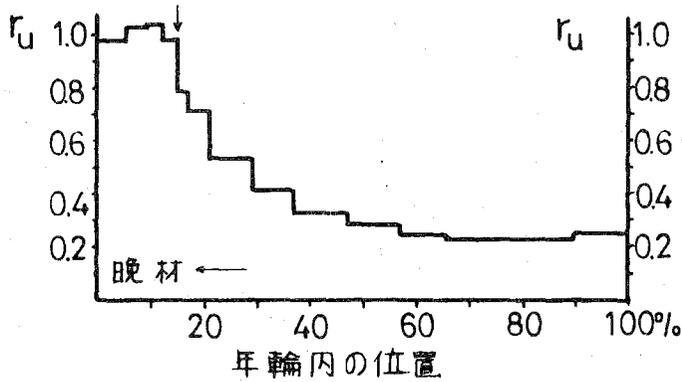
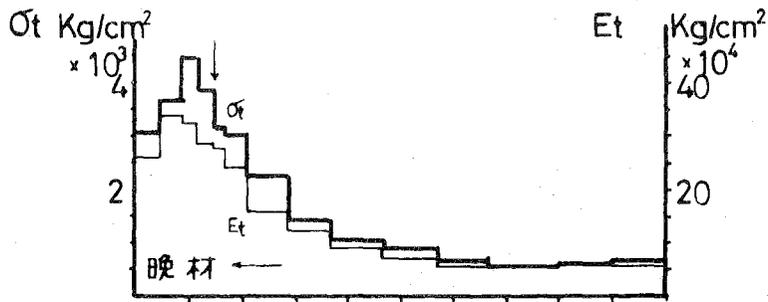
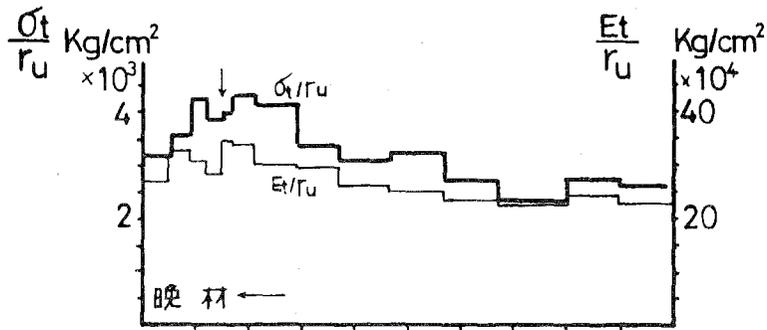


r_u : 気乾比重 σ_t : 縦引張強さ

E_t : 縦引張ヤング係数

↓: Morkの定義による早材・晩材の境界

Fig. 44 r_u , σ_t , E_t , σ_t/r_u および E_t/r_u の年輪内変移
(アカマツ45年)



r_u : 気乾比重 σ_t : 縦引張強さ

E_t : 縦引張ヤング係数

↓: Mork の定義による早材・晩材の境界

Fig.45 r_u , σ_t , E_t , σ_t/r_u お及び E_t/r_u の年輪内変移
(スギ 55年)

上式 (25)~(30) を用いて年輪内における σ_t および E_t の全変動のうち、比重による変動が占める割合を求めると σ_t では 86~96%, E_t では 92~94% となった。ダグラス・ファーについて Ifju²⁵⁾ も同様に比重による変動は年輪内の全変動の 92% を占めると報告している。したがって σ_t および E_t の年輪内変移のパターンは前章でのべた比重 r_u の変移のそれに類似する。

Fig. 44~46 は r_u , σ_t , E_t , σ_t/r_u および E_t/r_u の年輪内変移を示したものである。 σ_t および E_t の変移のパターンは r_u のそれに類似しているが、 σ_t/r_u , E_t/r_u もまた年輪内で変移する。すなわち早材では始めはほぼ一定であるが、晩材に向かって増大し最大値に達したのち減少する。最大値は Mork の定義による早材・晩材境界付近から接線膜厚 Mt が最大となるまでの晩材前半に起こることが多い。

ダグラス・ファーでは比重が一定の早材部においても σ_t , E_t の値は増加し、変移曲線は早材・晩材の境界で最大となる放物線であらわされると報告されている²⁵⁾ が、ここで調査したアカマツ、スギ、ヒノキの年輪では認められなかった。 σ_t/r_u , E_t/r_u の年輪内変移も全体としては比重の変移に類似している。

σ_t/r_u の晩材/早材の比は 1.1~1.4, E_t/r_u のそれは 1.1~1.5 であり、あきらかに晩材の値が大きい。これについては早材と晩材の構造と関連して後節で検討する。

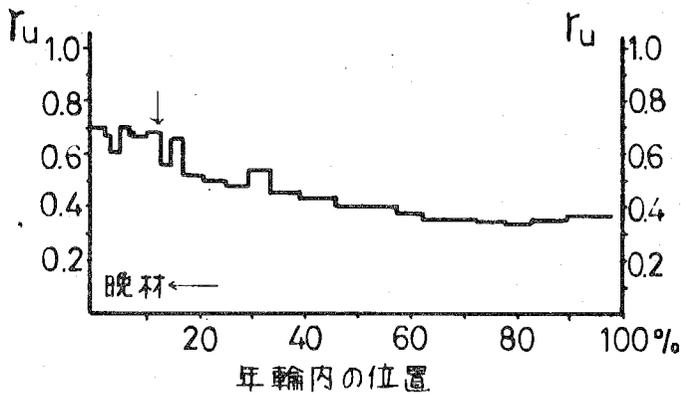
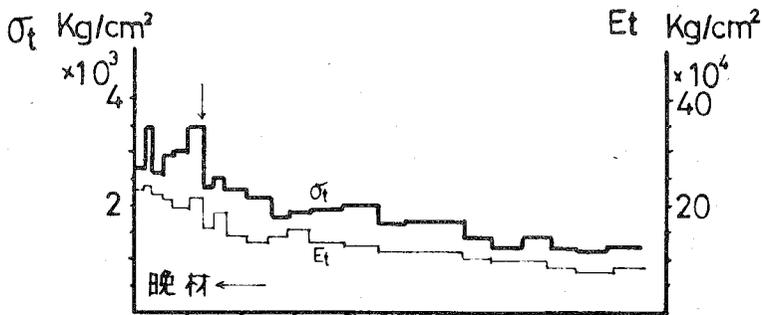
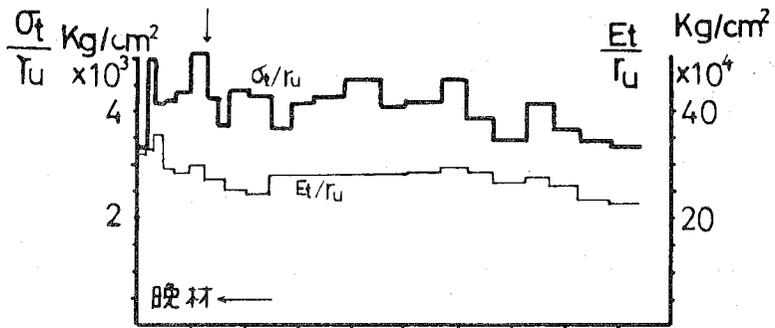
3. 応力-ひずみ曲線

縦引張強さ σ_t , 同比例限応力 σ_p , 同ヤング係数 E_t , 同比例限ひずみ ϵ_p , 同最大比例変形度⁸¹⁾ ϵ_0 および破壊ひずみ ϵ_{max} の相互関係を求めて応力-ひずみ曲線の特性を検討した (Table 25)。

σ_t と E_t との関係を見ると Fig. 47 に示すように直線関係が認められる。 $\sigma_t/E_t = \epsilon_0$ は Table 25 に示すように 0.0116~0.0135 の範囲にある。沢田⁸¹⁾ は通常の引張試験体についてアカマツ 0.0096, スギ 0.0089 と報告しており、本実験の値は早材・晩材のどちらもやや大きい。晩材/早材の比は 0.98~1.03 でありほとんど差異がない。

σ_p/σ_t の値は 0.33~0.45 であるが、アカマツとスギでは晩材の値が小さく、ヒノキではほぼ等しい。

ひずみを検討すると $\epsilon_p/\epsilon_{max}$ は 0.30~0.43 であり、晩材の値が早材の値よりも 10~20% 小さい。すなわち晩材のひずみ曲線では早材のそれよりも直線部分が少なく、曲線部分の占める割合が大きい。



r_u : 気乾比重 σ_t : 縦引張強さ
 E_t : 縦引張ヤング係数
 \downarrow : Mork の定義による早材・晩材の境界

Fig.46 $r_u, \sigma_t, E_t, \sigma_t/r_u$ および E_t/r_u の年輪内変移
 (ヒノキ 45年)

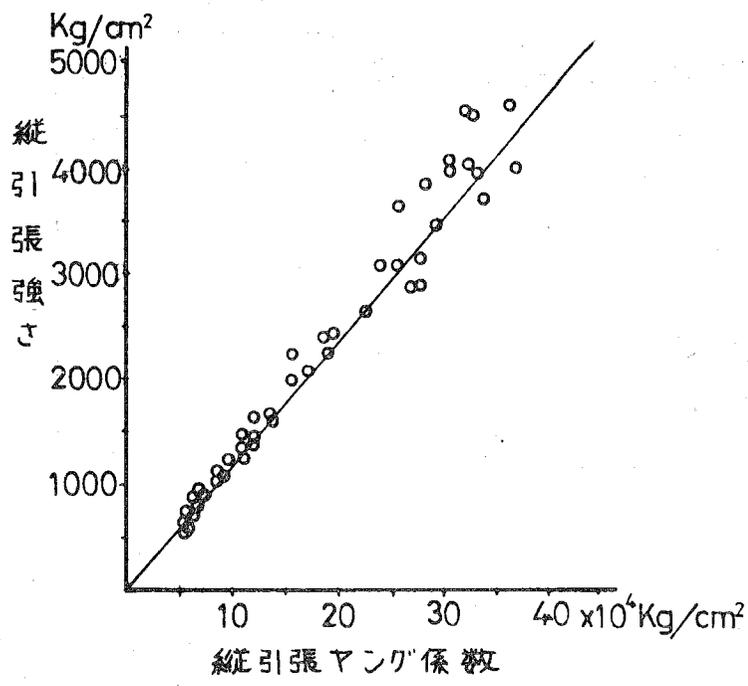


Fig.47 縦引張強さと同ヤング係数との関係

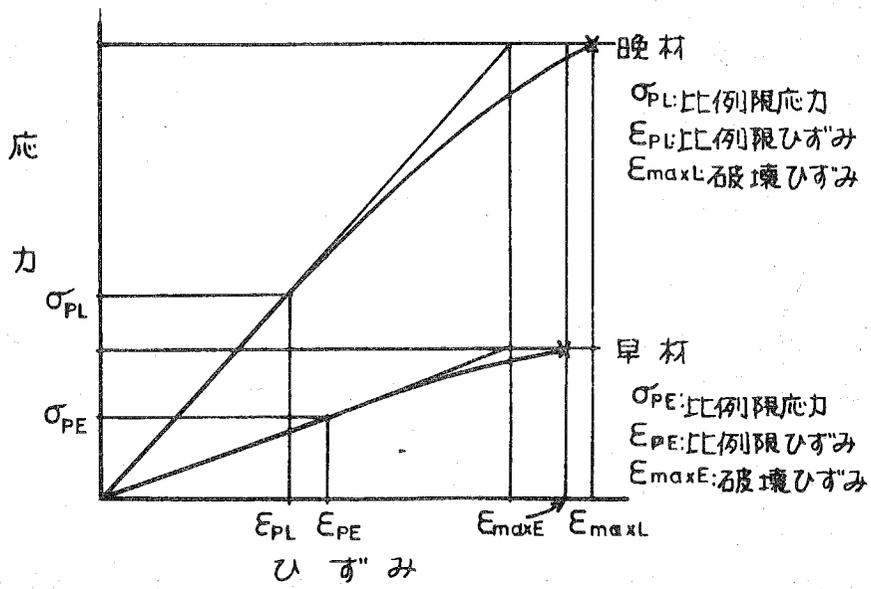


Fig.48 早材・晩材の応力-ひずみ曲線の模式図

Table 25 縦引張における応力-ひずみ曲線の特徴

樹種	区分	σ_t/E_t $\times 10^{-3}$	σ_p/σ_t	$\epsilon_p/\epsilon_{max}$	$\epsilon_0/\epsilon_{max}$
アカマツ	早材	13.2	0.38	0.30	0.83
	晩材	13.0	0.33	0.28	0.82
	(晩材/早材)	(0.98)	(0.87)	(0.93)	(0.99)
スギ	早材	11.6	0.45	0.43	0.95
	晩材	11.9	0.37	0.35	0.95
	(晩材/早材)	(1.03)	(0.82)	(0.81)	(1.00)
ヒノキ	早材	13.1	0.35	0.33	0.93
	晩材	13.5	0.36	0.30	0.82
	(晩材/早材)	(1.03)	(1.03)	(0.91)	(0.88)

$$\epsilon_0 : \text{最大比例変形度}^{81)} = \sigma_t/E_t$$

$\epsilon_0/\epsilon_{max}$ の値を早材・晩材別に比較するとアカマツとスギではほとんど差がないが、ヒノキでは早材の値が大きい。

Table 24 および 25 に示した結果を総括すると、比例限度を越えてから破壊に達するまでの過程すなわち応力-ひずみ曲線の塑性域の割合は晩材の方が大きい。早材・晩材別の平均値を求め早材の ϵ_0 を基準にして応力-ひずみ曲線の模式図をえがくと Fig. 48 の通りとなる。

第3節 破壊形

外力が作用したとき木材を構成する各細胞がどのように挙動するかを知ることは、木材の機械的性質と構造との関係を研究する上で重要であり、破壊形の観察はその手掛りを与えるものと思われる。

1. 試験片および仮道管の破壊形

一般に早材の試験片は繊維方向にほぼ直角に破断するが、晩材試験片ははけ状にささくれた破壊形を示す。1年輪内における破壊形の変移の典型的な例を Fig. 49 に示す。早材から晩材

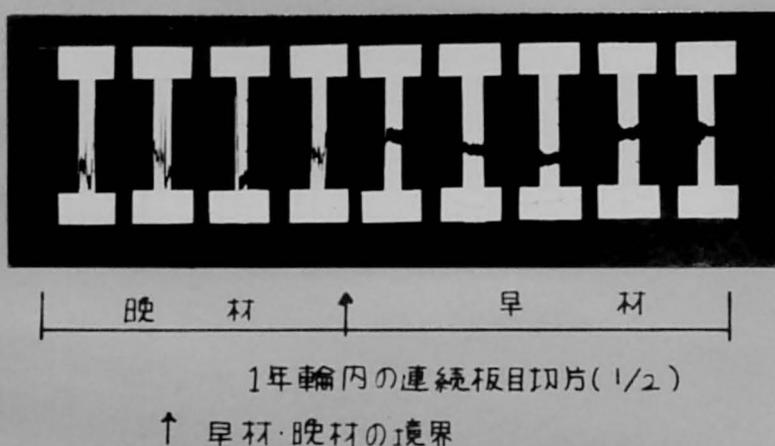


Fig.49 アカマツの1年輪内における破壊形の変移

に向かってのこのような破壊形の変移は、調査したすべての年輪で観察された。

仮道管の破壊を検討する場合に第1に個々の仮道管の破断状態、第2に仮道管相互間の破壊状態の2点について観察する必要がある。

仮道管の破壊形には長軸方向にほぼ直角に破断するもの (a)、2次膜中層 S_2 のフィブリルの走向に沿うもの (b)と両者の中間のもの (あるいは混在するもの) (c)の3者がみられる (Fig. 50)。

次に仮道管相互間の破壊をみると、1本の仮道管の破断部から次の仮道管の破断へと破断が連続している場合 (仮道管相互間にせん断破壊がない) (A)、晩材の破壊によく見られるように (Fig. 52)、仮道管の境界に沿った長軸方向のせん断破壊があきらかに存在するもの (B)、および (B)の極端な例として仮道管が破断しないで引き抜けたもの (C) (Fig. 53) がある。

このようなタイプがどの程度あらわれるか、スギでの測定例を示すと (Fig. 51)、早材では (A) とくに (Ac) が多く、(B) (C) は晩材に多い。早材では (C) はきわめてまれであるが、晩材ではかなり多く、破壊部の仮道管の14%であった。

ここで軸方向の破壊は図からもわかるように、仮道管相互間のせん断によるものである。したがって縦引張破壊部には仮道管の引張破断と仮道管相互間のせん断破壊とが存在し、早材と晩材

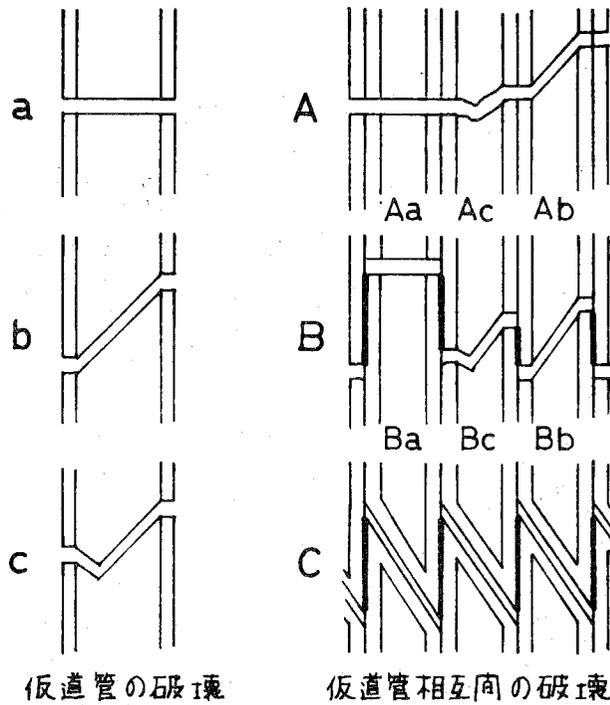


Fig.50 仮道管の破壊形(模式図)

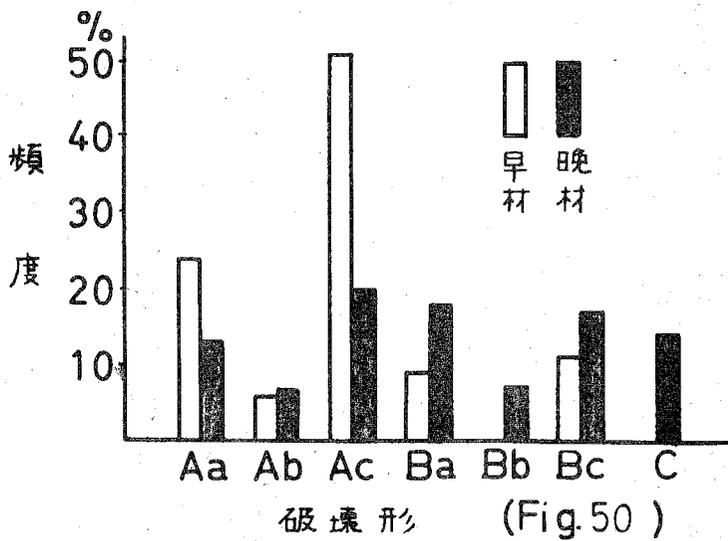
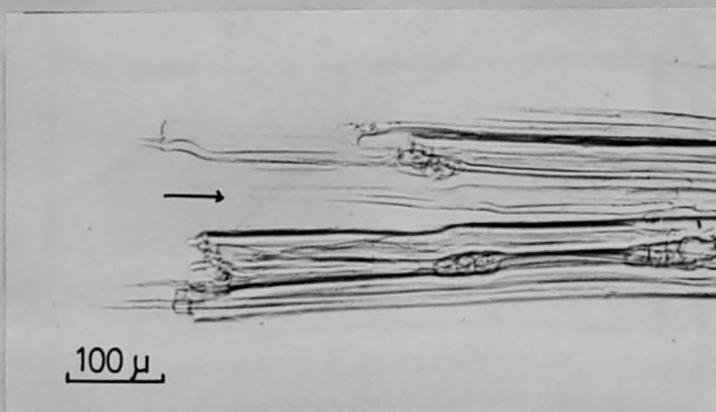


Fig.51 仮道管破壊形のあらわれる頻度(スギ)



→ せん断破壊部を示す

Fig.52 晩材仮道管の破壊形(スギ)



→ 引き抜けた仮道管を示す

Fig.53 晩材仮道管の破壊形(スギ)



Fig.54 細胞膜の破壊(1)ヒノキの早材

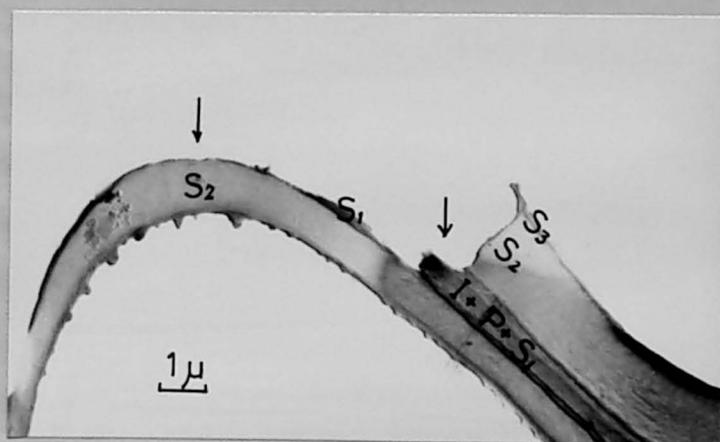


Fig.55 細胞膜の破壊(2)ヒノキの早材

- | | |
|------------|------------------------|
| ↑ : 破壊部を示す | S ₁ : 2次膜外層 |
| I : 細胞間層 | S ₂ : 2次膜中層 |
| P : 1次膜 | S ₃ : 2次膜内層 |

の破壊形の差異はこのせん断破壊の多少ということになる。

2. 細胞膜の破壊

前述のように縦引張破壊部には仮道管の引張破断と仮道管相互間のせん断破壊が存在するが、その木口断面を観察すると早材にはFig. 54のように重複細胞膜が破壊しているのが多く見られる。また重複細胞膜が完全に破断しないで細胞の境界に沿ってせん断破壊している場合もある (Fig. 55)。晩材では細胞膜を横断した破壊は少なく細胞境界に沿ったせん断破壊が多い (Fig. 56)。

このようなせん断破壊はFig. 55および56にみられるように S_1 内あるいは S_1 と S_2 の境界に沿って生じている。Wardrop¹⁰¹⁾はマウンティン・アッシュ (*Eucalyptus regnans* F. v. M.) で縦引張破壊は S_1 と S_2 の境界で生ずるとし、Mark⁵⁰⁾はイースターン・レッドセダー (*Juniperus virginiana* L.) で S_1 内に生ずるとしている。観察した結果では S_1 内といっても S_2 との境界に接近して破壊しており、それが S_1 と S_2 との境界に沿った破壊に移行することが多い。

一方、ミクロトーム切削時に薄片のルーズ・サイドに割れが生ずることが考えられるが、このような横引張による破壊はIとPとの間あるいはPと S_1 との間に生ずる³⁷⁾。晩材の板目切片でミクロなせん断試験を行なったとき、破壊は同様に S_1 と S_2 の境界付近に生じた。したがってFig. 55および56の破壊は細胞間に横方向の力が作用して生じたものでなく、縦引張においてせん断により生じたことはあきらかである。

このように早材・晩材のどちらでもせん断破壊は S_1 内あるいは S_1 と S_2 の境界で生ずる。

第4節 構造の年輪内変移と縦引張強さおよび弾性との関連

縦引張強さおよび弾性における早材・晩材の差異と構造の年輪内変移との関連を検討する。

1. 破壊形と構造との関連

繊維の集合した組織の縦引張破壊には、個々の繊維の機械的性質と繊維相互の結合の状態が影響する。繊維相互の結合が弱いときは繊維が破壊にいたる前に繊維間の結合がやぶれて組織

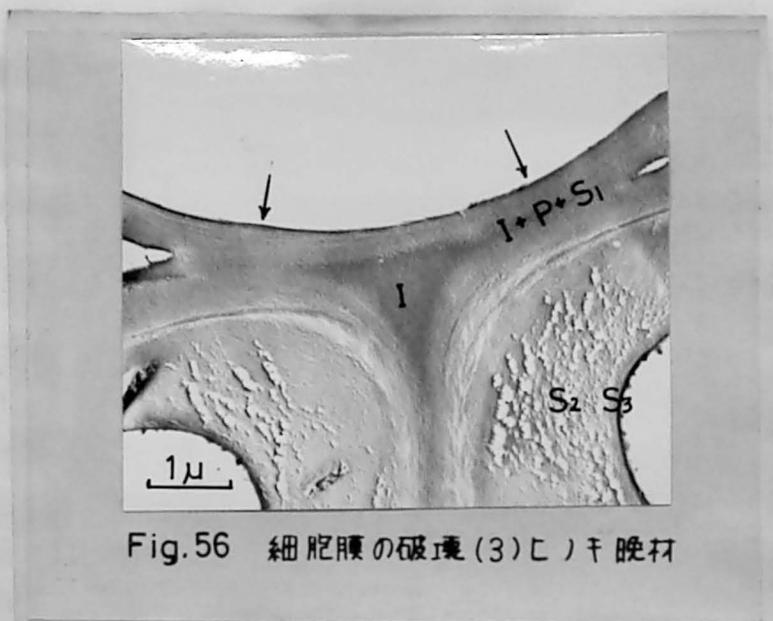


Fig.56 細胞膜の破壊(3)Cノキ晩材

は破壊する。結合力が強いときは繊維の破断により組織は破壊する。このように繊維個々の強さと相互の結合強さの相対的な強弱は繊維相互間の破壊形に影響し、結合力が強いときは Fig. 50のA型、弱いときはC型の破壊をすると考えられる (B型はA型とC型との中間の型)。

早材ではA型、晩材ではB型およびC型が多く観察された。晩材において仮道管が破断しないで引き抜けたり、仮道管相互間にせん断破壊が多く見られることは、晩材の仮道管が早材のそれよりも破断しがたいことを示している。これは晩材仮道管では S_2 の割合が大きく、そのフィブリル傾角が小で縦引張強さが大きいこと、仮道管相互間の結合に関しては半径方向直径の減少により結合面積が減少していることと関連すると考えられる。

ここで横断面における仮道管のディメンションとの関連をみるため、 S_2 の面積は細胞膜全面積と、また結合面積は仮道管の周囲長と比例関係にあるとみなして、両者の比をとると、

$$\frac{\text{細胞膜全面積}}{\text{仮道管の周囲の長さ}} \div \text{細胞膜厚} \dots\dots\dots (31)$$

となり、細胞膜厚に近似した値となる。この値が大きいことは S_2 が大で 仮道管の縦引張強さが大きく、仮道管相互間にせん断破壊が生じやすい傾向を示す。すなわち、膜厚は早材から晩材への破壊形変移の指標となる。

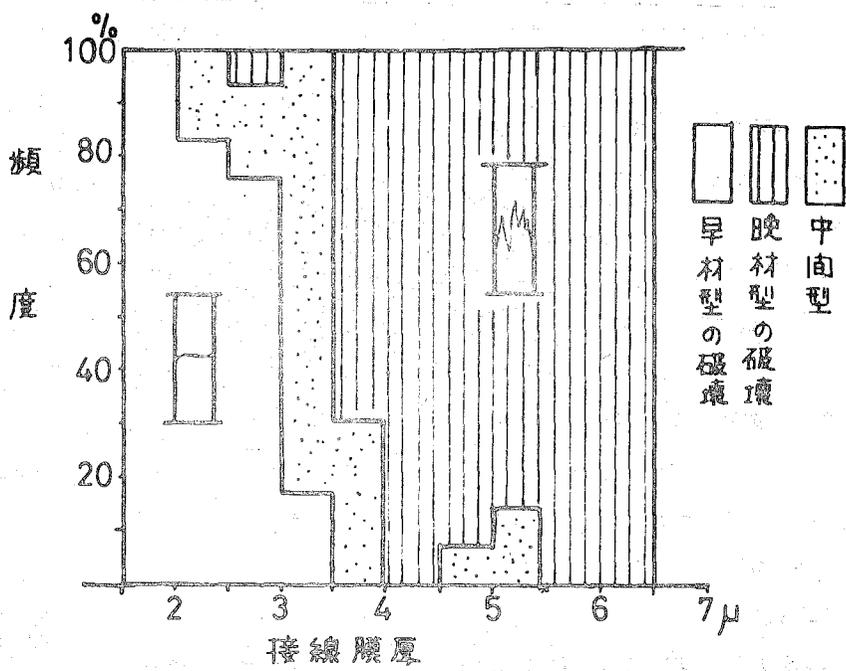


Fig. 57 細胞膜厚と破環形
(アマツ・スギ・ヒノキ 試験片131個)

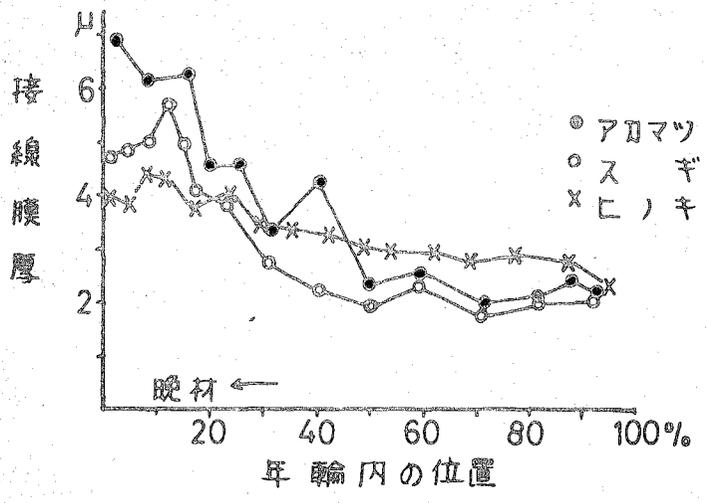


Fig. 58 縦引張試験片における細胞膜厚の年輪内変移

アカマツ、スギおよびヒノキの131個の試験片についての調査結果をまとめると、早材型の破壊は接線膜厚が2.5~3 μ まで、晩材型の破壊は3.5~4 μ 以上で生ずる (Fig. 57)。

2. 縦引張ヤング係数と構造との関連

仮道管の縦引張ヤング係数を支配するのは細胞膜の S_2 と考えられる。しかし S_2 の細胞膜中で占める割合およびフィブリル傾角は早材と晩材で異なるから (第4章)、このような構造上の差異が縦引張ヤング係数にどのように影響するかを検討する必要がある。

仮道管の細胞膜における引張応力については、Mark⁴⁹⁾ 50) が詳細な解析を行っており、またフィブリル傾角とヤング係数との関係についてはCowdreyとPreston¹⁰⁾の研究がある。前者の方法は早材・晩材の差異を検討するには煩雑にすぎ、後者はらせん状のスプリング模型を用いているので、膜層の割合、半径膜と接線膜におけるフィブリル傾角の差異などを考慮することができない。ここでは次の簡略な検討法を用いた。

- 1) 早材仮道管の各膜層と晩材仮道管のそれらとでは、断面における面積割合とフィブリル傾角が異なるのみで、他の性質は同一と仮定する。
- 2) 半径膜の各膜層と接線膜のそれらについても、1)と同様に仮定する。
- 3) 半径膜と接線膜についてI+p, S_1, S_2, S_3 の各4層 合計8層を考え、各膜層の面積割合を A_1, A_2, \dots, A_8 、ヤング係数を E_1, E_2, \dots, E_8 とすると、仮道管の細胞膜のヤング係数(Etc)は

$$Etc = \sum_{i=1}^8 E_i \cdot A_i \quad \dots\dots\dots (32)$$

により求められるものとする。

- 4) 各膜層のヤング係数 (E_i)は次の方法により求める⁵⁰⁾。

2次膜 (S_1, S_2, S_3)のヤング係数 ($E_{i(s)}$)は次式でもとめる。

$$\frac{E_L}{E_{i(s)}} = \cos^4 w + \frac{E_L}{E_T} \sin^4 w + \left(\frac{E_L}{GLT} - 2\mu_{LT} \right) \sin^2 w \cdot \cos^2 w \quad \dots (33)$$

ここで、 E_L : フィブリルに平行のヤング係数 = $73.704 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$

E_T : フィブリルに直角のヤング係数 = $4.015 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$

GLT : せん断弾性係数 = $1.397 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$

μ_{LT} : ボアソン比 = 0.194

w : フィブリル傾角

I+Pのヤング係数 ($E_{i(I+P)}$) = $2.251 \cdot 10^4 \text{ Kg/cm}^2$ とする。⁵⁰⁾

Table 26 細胞膜の各層のヤング係数計算値

樹種	膜層	早材				晩材			
		半径膜		接線膜		半径膜		接線膜	
		E_i	A_i	E_i	A_i	E_i	A_i	E_i	A_i
		10^4Kg/cm^2	%	10^4Kg/cm^2	%	10^4Kg/cm^2	%	10^4Kg/cm^2	%
アカマツ	I+P	2.25	6.4	2.25	2.4	2.25	3.4	2.25	2.8
	S ₁	3.75	9.3	3.70	7.9	3.86	5.5	3.83	5.8
	S ₂	7.52	36.4	11.44	33.6	36.67	40.2	49.93	40.2
	S ₃	3.97	2.2	3.97	1.8	3.90	1.2	3.97	0.9
	小計	3.32	54.3	4.26	45.7	15.08	50.3	20.39	49.7
	全体	Etc = $7.58 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$				Etc = $35.47 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$			
スギ	I+P	2.25	7.6	2.25	2.5	2.25	4.0	2.25	2.3
	S ₁	3.70	8.8	3.66	5.8	3.97	5.8	3.93	9.8
	S ₂	19.22	45.5	62.09	25.6	63.21	29.0	65.81	48.6
	S ₃	3.94	2.7	3.99	1.5	3.99	0.2	3.95	0.3
	小計	9.35	64.6	16.22	35.4	18.66	39.0	32.43	61.0
	全体	Etc = $25.57 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$				Etc = $51.09 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$			
ヒノキ	I+P	2.25	4.7	2.25	1.5	2.25	3.1	2.25	1.9
	S ₁	3.94	8.3	3.70	5.8	3.86	5.2	3.68	7.9
	S ₂	19.22	48.7	47.28	28.3	38.47	32.2	56.91	48.8
	S ₃	3.95	1.6	3.90	1.1	3.97	0.3	3.94	0.6
	小計	9.86	63.3	13.67	36.7	12.67	40.8	28.13	59.2
	全体	Etc = $23.53 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$				Etc = $40.80 \cdot 10^4 \text{Kg/cm}^2$			

E_i : 各膜層のヤング係数計算値, A_i : 各膜層の面積割合, Etc : 仮道管細胞膜全体のヤング係数計算値

5) 各膜層の面積割合とフィブリル傾角は第4章Table 10, 11 および 13の結果を用いる。

これらの数値は縦引張試験片の一端あるいは同一の年輪で調査したものである。

6) 膜層の面積割合とフィブリル傾角以外の膜の構造(有縁膜孔など)の影響は無視する。

計算した結果をTable 26に示す。仮道管のヤング係数Etc中でS₂のそれが占める割合はきわめて高く、早材で87~97%(平均93%), 晩材では98~99%(平均98%)に達する。

すなわち、仮道管のヤング係数はほとんどS₂によって決定される。

実測したヤング係数はTable 24に示されているが、これは試験片の断面積当りの数値であるから、これを細胞膜面積当りに換算しなければならない。縦引張試験片は各々について乾乾比重r_u(G_u/V_u)が測定されているので、r_u = 1.26W/100(第5章)の関係から細胞膜率Wを求めることができる。すなわち、細胞膜面積当りのヤング係数E'tcは

$$E'tc = \frac{E_t}{W/100} = \frac{E_t}{r_u} \times 1.26 \quad \dots\dots\dots (34)$$

により求められる。

Table 27 仮道管細胞膜のヤング係数計算値

樹 種		Etc	E'tc
		10 ⁴ Kg/cm ²	10 ⁴ Kg/cm ²
アカマツ	早 材	7.58	24.8
	晩 材	35.47	36.3
	(晩材/早材)	(4.68)	(1.46)
スギ	早 材	25.57	31.5
	晩 材	51.09	40.3
	(晩材/早材)	(1.98)	(1.28)
ヒノキ	早 材	23.53	35.0
	晩 材	40.80	38.8
	(晩材/早材)	(1.74)	(1.11)

Etc : 仮道管細胞膜全体のヤング係数計算値

E'tc : 実測値から求めた仮道管細胞膜のヤング係数

Table 27は上式により計算したE'tcと(32)式で計算したEtc, ならびに晩材/早材の値を示している。早材ではE'tcの値がEtcよりも大きく、晩材では両者がほとんど等しいか、Etcの値が大きい。

ここで目的とするところは、早材・晩材における膜層構成割合とフィブリル傾角の影響を検討することである。Etcの晩材/早材の値はこれらの影響の度合を示すものであり、Table 27にみられるように1.7~4.7である。これに対して実測値から推定した細胞膜のヤング係数 E_{tc} の晩材/早材の値は1.1~1.5でありEtcのそれにくらべかなり低い値を示す。

この不一致の原因として次のことが考えられる。

- (1) Etcの計算に用いた弾性定数および(33)式の適否。たとえばアカマツの早材においてEtcの値が著しく小さく、 E_{tc} との差が大きい。これはアカマツの S_2 のフィブリル傾角が大きいためであるが、ここで用いた弾性定数および計算式ではフィブリル傾角の影響が強くなりすぎるように思われる。
- (2) (34)式の適否ならびに仮道管の膜壁の有縁膜孔や他の要素の影響。
- (3) 仮道管のヤング係数と材のヤング係数との関係。Etcの値は1本の仮道管の各膜層のヤング係数を総和したものである。その値をそのまま多数の仮道管が集合した試験片のヤング係数に適用できるか検討する必要がある。

前述した原因が、それぞれどの程度 E_{tc} の晩材/早材の値に影響するかわからないので、ヤング係数におよぼす構造の影響について明確な結論は下せない。

3. 応力-ひずみ曲線と構造との関連

第2節でのべた応力-ひずみ曲線における早材・晩材の差異と構造の関連について考察する。

比例限度 σ_p と強さ σ_t との比(σ_p/σ_t)をみると(Table 25)、アカマツとスギでは晩材の値が早材のそれにくらべかなり小さい値を示す。また σ_p の晩材/早材の値(Table 24)は σ_t やEtのそれよりも小さい値を示す。すなわちこれらの樹種では σ_t やEtの大きさのわりに低い応力で比例限度を越え塑性域に入っていることになる。これに対してヒノキでは σ_p/σ_t が早材・晩材でほとんど差がなく、また σ_p の晩材/早材の値が σ_t あるいはEtのそれとほぼ等しい。

この3樹種の試験片の接線膜厚の年輪内変移はFig. 58に示したとおり、アカマツ・スギでは早材・晩材の差が大きく、ヒノキでは早材の接線膜厚が μ 前後であり晩材のそれと差が少ない。ヒノキがアカマツ・スギと異なるのは、早材・晩材の膜厚の差異が少ないことによると思われる。

このような結果から晩材型の破壊をした試験片は σ_t のわりに低い応力で塑性域に入ったと考えられる。晩材仮道管の S_2 は早材仮道管のそれにくらべきわめて高いEtをもち(Table 26)、同様に σ_t も大きいと思われるが、それにもかかわらず σ_p が低いのは、晩材ではせん断による

細胞間のすべりが早く生ずるためではないかと推測される。

最後に破壊強さ σ_t について付言する。仮道管の細胞膜には有縁膜孔や放射組織との交差部など強度上の弱点がある。これらの弱点は E_t よりも σ_t に強く影響すると考えられる。しかし早材と晩材において σ_t/E_t の値はほぼ等しく、これらの弱点の影響は早材と晩材で差異がないと思われる。

早材仮道管の半径膜には大径の有縁膜孔があるがそのうち約50%はオーバーラップ域にあり、これらは縦引張強さにはあまり関与しないと考えられる。クリヤー域にある膜孔は数%の面積を占めアカマツでは早材・晩材の差が大きく、とくに早材仮道管の膜壁の強さを損なうと思われるが、破壊部を調査したところでは膜孔で破壊を生じている例は少ない。

これに対して放射組織との交差部は半径膜の10%を占め早材・晩材の差異が少ない。破壊部の調査で放射組織との交差部における破壊が早材・晩材のどちらでも多く見られた。このことから有縁膜孔と放射組織交差部とをくらべたとき、後者の方が細胞膜の強度的弱点となると考えられる。

第5節 要 約

縦引張強さ、同ヤング係数および破壊形の年輪内変移を調べ、これらと構造との関連を検討した。

- (1) 縦引張試験法、とくに試験片の厚さ、きずなどについて検討した。試験片の厚さは完全な細胞を4~5列含むようにし、また切削に際してはスリップ・ラインの生じないように切削角などを検討した。
- (2) 縦引張強さおよびヤング係数の年輪内変移曲線は比重の変移曲線と同一のパターンを示す。縦引張強さの晩材/早材の値をみると、アカマツでは4.3、スギでは4.5、ヒノキでは1.9であり、形質商も晩材における値が大きい。また、ひずみ量は早材・晩材の差異が少ないが、晩材の応力-ひずみ曲線は早材のそれにくらべ塑性域の割合が大きい。
- (3) 破壊形についてみると、早材では繊維方向にほぼ直角に破断するが、晩材ではささくれた破壊形を示す。また仮道管相互間のせん断破壊は早材では少ないが、晩材では多くあらわれ、その典型的なものとして、しばしば引き抜けた仮道管がみられる。なお、このせん断破壊は早

材・晩材何れの場合も S_1 内あるいは S_1 と S_2 との境界に生ずる。

(4) 破壊形と仮道管の構造との関連をみると、早材に比し晩材では S_2 の割合が大で、そのフィブリル傾角が小さいこと、また仮道管横断面における周囲長が小さいことなどが、その破壊形が晩材型をなす原因と考えられる。そして細胞膜厚を指標としたとき、その破壊形は接線膜厚 $2.5 \sim 3 \mu$ までは早材型、 $3.5 \sim 4 \mu$ 以上では晩材型を示す。

(5) 仮道管の細胞膜の縦引張ヤング係数と構造との関連をみるため、早材と晩材の膜層構成割合およびフィブリル傾角の差異がそれぞれの細胞膜のヤング係数に及ぼす影響を計算し、その計算値における早材・晩材の差異とヤング係数および細胞膜率の実測値から求めた早材・晩材の差異とを比較検討した。

結 言

針葉樹材の性質が年輪内で変移することはよく知られ、物理的および機械的性質の変移のパターンについてはマイクロな分析法により知見が得られてきた。しかし年輪内変移の根源である木材構造の変移、すなわち木材を構成する細胞の種類、形態および細胞膜の構造などの年輪内変移については詳細な検討がなされていなかった。

そこで本研究では針葉樹材における構造の年輪内変移が、主として仮道管の形態変化によることを確かめたのち、とくに仮道管の横断面におけるディメンションの変移に注目し、サンプリング法など測定法を検討して変移曲線を求めた。

次に仮道管のディメンションの変移と木材の性質のそれとの関係をあきらかにするため、まず仮道管の直径および膜厚より細胞膜率を計算し、これと比重との関係をあきらかにした。これによって仮道管のディメンションの変移曲線から細胞膜率および比重の変移曲線を描くことができた。

さらに仮道管の半径方向直径と膜厚の変移が細胞膜率の変移におよぼす効果を評価し、膜厚が細胞膜率の変移曲線を特徴づけることを見いだした。

比重の年輪内変移は将来 β 線などにより自記的に測定できると思われるが、得られた変移曲線について樹種的特徴、幹内における変化および生育条件の影響などを解析しようとするとき、構造の年輪内変移についての知識が必要となる。本研究は複雑な年輪内変移を解析し整理するための基礎になるものである。

仮道管のディメンションとともに細胞膜の構造は木材の性質の変移に重要な役割を果たす。膜層の構成割合の変移は化学的組成に差異をもたらし、真比重および吸湿性に影響する。

構造および性質の変移を通じて仮道管の膜厚は重要な意義をもつ。すなわち (1) 膜厚の変移は細胞膜率および比重の年輪内変移のパターンを特徴づける、(2) 膜厚の変化には膜層構成割合の変化を伴ない、化学的組成に影響する、(3) 膜厚は縦引張破壊形の年輪内変移の指標となる。一般に細胞膜厚は細胞の強さの指標と考えられ、組織内における細胞の力学的挙動を左右すると考えられる。

最後に将来、一層の研究を必要とする問題について述べ結びとする。

第1は細胞膜各膜層の化学的組成，密度，多孔性など，細胞膜の構造，物理的性質および化学的性質について高度の手段を用いて詳細に研究する必要がある。とくに細胞膜の形成過程にさかのぼっての基礎的研究が重要と思われる。

第2に木材を構成する各種の細胞の性質と相互の有機的つながりについて研究する必要がある。各構成要素の性質を調べ，それらが全体の木材の性質にどのように影響するかをあきらかにすべきである。

本研究がこうした今後の研究の端緒となれば幸いである。

総 括

針葉樹材の性質が年輪内で変移することはよく知られているが、年輪内変移の根源である構造における変移については詳細な研究がなされていなかった。本研究では針葉樹材における構造の年輪内変移ならびにこれと2, 3の物理的性質との関連について検討した。

(1) 針葉樹材では仮道管が約95%を占め、その他の構成要素は構造の年輪内変移にほとんど影響しない。したがって構造の年輪内変移は主として仮道管の形態、とくにディメンションの変化に依存する。

(2) 仮道管の横断面のディメンションの変移を把握するための測定法を確立し、その変移曲線を求めた。仮道管のディメンションの中で変移の大きいのは半径方向直径Rと膜厚Mであり、接線方向直径と仮道管長の変化は比較的少ない。Rは晩材部で年輪界に向かって減少し、Mは増加して最大値に達した後、減少する。Rは早材における大きさから70~80%減少し、樹種による差異は少ない。これに対しMの増加は接線膜で10~330%であり、樹種による差異が著しい。

(3) 仮道管の形態によって年輪内を早材・晩材に区分するにはMorkの定義によるのがよい。Morkの区分点が適用できない年輪については、細胞膜率の年輪内変移を調べ、これにもとづいて別に区分点を定める。

(4) 細胞膜率(細胞全面積に対する細胞膜面積の百分率)の計算法は次の通りである。

仮道管の接線方向直径T, 半径方向直径Rおよび接線膜厚Mtを用い,

$$x = \frac{R}{2Mt} - 1, \quad y = \frac{R}{T}$$

接線膜厚の半径膜厚に対する比zを求め,

$$y' = y/z$$

細胞膜率Wは

$$W = \frac{(1+y')x+1}{(x+1)^2} \times 100 \quad (\%)$$

上式により、直径および膜厚の変移曲線から細胞膜率のそれを求めることができる。

(5) 晩材における細胞膜率の増加におよぼす直径と膜厚の影響を、直径減少効率 ΔF_L と膜肥厚効率 ΔT_H として算出し、細胞膜率の年輪内変移曲線の特徴が、主として ΔT_H によることをあきらかにした。

(6) ΔF_L および ΔT_H の最大値により細胞膜率の年輪内変移曲線を直径減少型、膜肥厚型、両者の中間型および広膜肥厚型の4種に区分した。この型は細胞膜率ばかりでなく、比重の年輪内変移曲線に適用できる。

(7) 直径減少型の樹種では幹内において細胞膜率の変移曲線の変化が少ないが、膜肥厚型の樹種では変化が著しい。

(8) 晩材における膜厚増加の80~90%は2次膜中層 S_2 の増加によるもので、細胞膜全面積中に占める S_2 の割合も早材より3~13%増加する。細胞間層+1次膜 (I+P) および2次膜外層 S_1 も晩材に向かうに従って厚さを増す。

(9) S_2 のフィブリル傾角は晩材に向かうに従いが減少する。とくに半径膜において著しく、その変移は半径方向直径のそれと関連がある。

(10) 化学的組成の早材・晩材の差をみると、晩材ではセルロースが多く、早材ではリグニンが多い。この化学的組成の差異は細胞膜の膜層構成割合の変移と関連する。またセルロースの結晶領域については早材・晩材の差異は少ない。

(11) 晩材の真比重は早材のそれよりも0.009~0.015大きく、その差異は化学的組成の相違によるものと思われる。また真比重は2次膜中層の割合とともに増加する。

(12) 針葉樹材の比重は仮道管の細胞膜率と膜の比重によって決定される。仮道管の細胞膜率 W と気乾比重 r_u との間には次の関係がある。

$$r_u = 1.26 W / 100$$

(13) 吸湿性もまた早材と晩材で相違するが、これも主として化学的組成の差異によるものと思われる。

(14) 縦引張強さおよびヤング係数の年輪内変移のパターンは比重のそれと同一であるが、晩材における増加は比重よりも著しい。すなわち形質商が晩材において増加する。

(15) 縦引張ひずみでは早材・晩材の差異が少ないが、晩材の応力-ひずみ曲線は早材のそれより塑性域の割合が大きい。

(16) 縦引張破壊形は年輪内で著しく変化し、早材では繊維方向にほとんど直角に破断するが晩材ではささくれた破壊形を示す。細胞膜厚はその変化の指標となり膜厚が3.5~4 μ 以上では仮道管相互間におけるせん断破壊が多く生じ、ささくれた破壊形となる。

本研究は針葉樹材における構造の年輪内変移をあきらかにするとともに、木材利用の立場からその意義を追求したものである。すなわち、構造の変移の詳細な調査をもとに、(1) 案出した計算法により細胞膜率を求め、これによって仮道管のディメンションと最も普遍的な木材材質指標である比重とのつながりをあきらかにして比重の年輪内変移の型を区分する基礎とし、(2) 仮道管のディメンションと細胞膜の構造の変移が、真比重、吸湿性、縦引張強さおよび弾性におよぼす影響をあきらかにした。

引用文献

- 1) Assab, A.G., Haas, R.H. and Purves, C.B.: *J. Am. Chem. Soc.* 66, 66 (1944), 61)による。
- 2) Asunmaa, S.: *Intern. Conf. Electron Microscopy*, 1958, 4, 722 (1960) 102)による。
- 3) Bailey, I.W. and Vestal, M.R.: *J. Arnold Arb.* 18, 185 (1937) 35)による。
- 4) Bailey, I.W., and Kerr, T.: *Contributions to Plant Anatomy Chronica Botanica*, 72-90, Waltham, Mass., (1954) 50)による。
- 5) Berlyn, G.P.: *F.P.J.* 14, 467-476 (1964)
- 6) Bisset, I.J.W. and Dadswell, H.E.: *Aust. Forestry* 13, 86-96 (1949) 62)による。
- 7) Brown, F.L.: *F.P.J.* 7, 416-423 (1957)
- 8) Christensen, G.N. and Kelsey, K.E.: *Holz als R.u.W.* 17, 189-203 (1959)
- 9) Cockrell, R.A.: *J. Forestry* 44, 876-878 (1946)
- 10) Cowdrey, D.R. and Preston, R.D.: *Cellular Ultrastructure of Woody Plants*. Côté, W.A. Jr. ed. 473-492. Syracuse Univ. Press N.Y. (1965)
- 11) Ellwood, E.L. and Wilcox, W.W.: *F.P.J.* 12, 235-242 (1962)
- 12) Erickson, H.D.: *F.P.J.* 5, 241-250 (1955)
- 13) Erickson, H.D.: *Tappi* 45, 710-719 (1962)
- 14) Frey-Wysling, A.: *Holz als R.u.W.* 3, 43-45 (1940)
- 15) 深沢和三: 岐大農学部研究報告 第25号, 47-128 (1967)
- 16) Hale, J.D.: *Tappi* 45, 538-542 (1962)
- 17) Hale, J.D. and Clermont, L.P.: *J. Polymer Sci. Part C No.2*,

253-261 (1963)

- 18) 原田浩・貴島恒夫・梶田茂：木材研究 No.6, 34-42 (1951)
- 19) 原田浩：Cellular Ultrastructure of Woody Plants, Côté, W.A. Jr. ed. 215-233, Syracuse Univ. Press, N.Y. (1965)
- 20) 原田浩・谷口謙：未発表
- 21) Hiller, C.H.: Tappi 47, 125-128 (1964)
- 22) Ifju, G.I. and Kennedy, R.W.: F.P.J. 12, 213-217 (1962)
- 23) Ifju, G.I.: F.P.J. 14, 366-372 (1964)
- 24) Ifju, G.I., Wellwood, R.W. and Wilson, J.W.: F.P.J. 15, 13-14 (1965)
- 25) Ifju, G., Wellwood, R.W. and Wilson, J.W.: Pulp Paper Mag. Canada 66, T475-483 (1965)
- 26) Jayme, G. und Fengel, D.: Holz als R.u.W. 19, 50-55 (1961)
- 27) Jayme, G. und Krause, T.: Holz als R.u.W. 21, 14-19 (1963)
- 28) Kadita, S.: Wood Research Kyoto Univ. No.23 (1960)
- 29) 加納孟：林試研報 No.46, 71-110 (1950)
- 30) 加納孟：林試研報 No.52, 23-51 (1952)
- 31) 加納孟：林試研報 No.71, 15-28 (1954)
- 32) Keylwerth, R., und Kleuters, W.: Holz als R.u.W. 20, 173-181 (1962)
- 33) 貴島恒夫・林昭三：木材研究 No.22, 35-42 (1959)
- 34) Kloot, H.H.: Aust. J. Sci. 3, 125-143 (1952)
- 35) 小林彌一：日林誌 34, 392-393 (1952)
- 36) 小林彌一：林試研報 No.98, 1-84 (1957)
- 37) Korán, Z.: Tappi 50, 60-67 (1967)
- 38) Kraus, J. F. and Spurr, S.H.: J. Forestry 59, 510-511 (1961)
- 39) Ladell, J.L.: Forestry 32, 124-125 (1959)
- 40) Ladell, J.L.: J. Inst. Wood Sci. No.3, 43-56 (1959)
- 41) Lange, P.: Svensk Papperstidn 57, 501 (1954) 102)による。
- 42) Lange, P. and Kjaer, A.: Norsk Skogind 11, 425 (1957) 102)

による。

- 43) Lange, P. : 4th Cellulose Conference, State Univ. College of Forestry, Syracuse, N.Y., Oct. (1962)
- 44) Larson, P.R. : Tappi 45, 443-448 (1962)
- 45) Larson, P.R. : Formation of Wood in Forest Trees. Zimmermann, M.H. ed. 345-365 Academic Press, N.Y. (1964)
- 46) Lee, C.L. : F.P.J. 11, 108-112 (1961)
- 47) Manwiller, F.G. : F.P.J. 16, 26-30 (1966)
- 48) Marian, J. E. and Stumb, D.A. : Holz als R.u.W. 18, 287-296 (1960)
- 49) Mark, R. : Cellular Ultrastructure of Woody Plants. Côté, W. A. Jr. ed. 493-533 Syracuse Univ. Press N.Y. (1965)
- 50) Mark, R. : Cell Wall Mechanics of Tracheid. Yale Univ. Press, New Haven (1967)
- 51) Marts, R.O. : Stain Technology 30, 243-248 (1955)
- 52) Meyer-Wegelin, H. : Allg. Forst-u. Jagdztg., 122, 12 (1950)
97) による。
- 53) Meier, H. : J. Polymer Sci. 51, 11-18 (1961)
- 54) Meier, H. : The Formation of Wood in Forest Trees. Zimmermann, M.H. ed., 137-151 Academic Press, N.Y. (1963)
- 55) Meylan, B.A. : F.P.J. 17, 51-58 (1967)
- 56) 木材工業編集委員会 : 日本の木材 日本木材加工技術協会 (1966)
- 57) Mork, E. : Nyt. Mag. Naturvid, 64, 234 (1926) 97) による。
- 58) Müller-Stoll, H. : Planta 35, 397-426 (1947) 97) による。
- 59) 中戸莞二 : 木材誌 4, 100-105 (1958)
- 60) 中戸莞二 : 西京大学学術報告 農学第10号 37-44 (1958)
- 61) 中戸莞二 : 木材工学, 梶田茂編, 86-146 養賢堂 東京 (1961)
- 62) Nicholls, J. W.P. and Dadswell, H.E. : Div. For. Prod. Tech. Paper No. 24 C.S.I. R.O. Aust. (1962)
- 63) Panshin, A.J. and De Zeeuw, C. : Text book of Wood Technology

- Vol. 1 2nd ed. McGraw-Hill N.Y. (1964)
- 64) Paul, B.H.: J. Forestry 37, 478-482 (1939)
- 65) V. Pechmann, Frhr. H.: Forstwiss. Cbl. 73, 65 (1945) 97) による。
- 66) Pillow, M.Y.: U.S. Dept. Agr. For. Prod. Lab. Rept. No. 1989 (1954)
- 67) Preston, R.D.: The Molecular Architecture of Plant Cell Walls. Chapman & Hall, London (1952)
- 68) Preston, R.D.: Cellular Ultrastructure of Woody Plants. Côté, W.A. Jr. ed. 1-31, Syracuse Univ. Press, N.Y. (1965)
- 69) Ritter, G.J. and Fleck, L.C.: Ind. Eng. Chem. 18, 608 (1926)
- 70) Runkel, R.O.H. and Lüthgens, M.: Holz als R.u.W. 14, 424-441 (1956)
- 71) 佐道 健・梶田 茂 : 木材誌 3, 100-102 (1957)
- 72) 佐道 健 : 京府大学術報告 農学第12号 111-118, 119-123 (1960)
- 73) 佐伯 浩 : 木材誌 8, 19-25 (1962)
- 74) 佐伯 浩 : 鳥取農学会報 15, 57-61 (1963)
- 75) 佐伯 浩 : 木材誌 9, 231-236 (1963)
- 76) 佐伯 浩 : 木材誌 9, 237-243 (1963)
- 77) 佐伯 浩 : 木材誌 11, 1-6 (1965)
- 78) 佐伯 浩 : 木材誌 11, 185-190 (1965)
- 79) 佐伯 浩 : 鳥取農学会報 19, 131-135 (1966)
- 80) Sandermann, W., Schweers, W. and Gandert, P.: Forstarch. 31, 126 (1960)
- 81) 沢田 稔 : 林試研報 No. 108, 115-224 (1958)
- 82) Schniewind, A.D.: Holz als R.u.W. 24, 502-506 (1966)
- 83) Siau, J.F., Mayer, J.A. and Skaar, C. : F.P.J. 15, 426-434 (1965)
- 84) Smith, D.M.: U.S. Dept. Agr. For. Prod. Lab. Rept. No. 2035 (1955)

- 85) Smith, D.M. and Miller, R.B. : Tappi 47, 599-604 (1964)
- 86) Smith, D.M. : F.P.J. 15, 325-334 (1965)
- 87) 祖父江寛・右田伸彦 : セルロース・ハンドブック 朝倉 東京 (1958)
- 88) Spurr, S.H. and Hsiung, W. : J. Forestry 52, 191-220 (1954)
- 89) Stamm, A.J. : Ind. Eng. Chem. 30, 1280 (1938)
- 90) Stamm, A.J. : Wood and Cellulose Science, Ronald Press Co. N.Y. (1964)
- 91) Stayton, C.L. and Hart, C.A. : F.P.J. 15, 435-440 (1965)
- 92) 鈴木正治・山中 寛 : 京大卒業論文 林学教室 585 (1958)
- 93) 谷口栄一 : 山形農専研究報告 No.2, 54-58 (1950)
- 94) Tappi, For. Biol. Committee : Tappi 46, 150A (1963)
- 95) 田島俊雄 : 東教大農学部紀要 No.13, 65-210 (1967)
- 96) 東大農学部林産化学教室編 : 林産化学実験書 産業図書, 東京 (1965)
- 97) Trendelenburg, R. : Das Holz als Rohstoff. Carl Hanser Verlag, München (1955)
- 98) Tsoumis, G. : Tappi, 47, 675-677 (1964)
- 99) Vintila, E. : Holz als R.u.W. 2, 345-357 (1939)
- 100) Vorreiter, L. : Holz als R.u.W. 13, 185-187 (1955)
- 101) Wardrop, A.B. and Add-Ashong, F.W. : Proc. Melbourne Univ. Eng. Dept. Symp. on Fracture. (1963)
- 102) Wardrop, A.B. : Formation of Wood in Forest Trees. Zimmermann, M.Hed. 87-134, Academic Press, N.Y. (1964)
- 103) 渡辺治人・堤 寿一・小島敬吾 : 木材誌 9, 225-230 (1963)
- 104) Watson, A.J. : Tappi 45, 722-724 (1962)
- 105) Whitmore, F.W. and Zahner, R. : Forest Science 12, 198-210 (1966)
- 106) Wichkow, W.E. : Trady. Inst. Lesu 4, 174 (1949) 97) による。
- 107) Wiksten, A. : Medd. Skogsforskn Inst. Stockholm 34, 451-496 (1944/45) 97) による。
- 108) Wilfong, J.G. : F.P.J. 16, 55-61 (1966)

- 109) Williams, R.F.: J. Forestry 59, 662 (1961)
- 110) Wilson, J. W. and Wellwood, R.W.: Cellular Ultrastructure of Woody Plants. Côté, W.A. Jr. ed. 551-559, Syracuse Univ. Press, N.Y. (1965)
- 111) 山田 正・梶田 茂 : 科学 23, 318 (1953)
- 112) 山田 正・梶田 茂 : 木材研究資料(京大木研) No.4, 65 (1953)
- 113) 矢沢亀吉・楯 茂・岩田広俊 : 日林誌 33, 34-39 (1951)
- 114) 矢沢亀吉 : 岐大農学部研究報告 No.2, 42-46 (1953)
- 115) 矢沢亀吉・深沢和三 : 北大農学部演習林報告 20 (1), 93-117 (1959)
- 116) Yiannos, P.N.: Tappi 47, 468-471 (1964)
- 117) Ylinen, A.: Acta For. Fenn. 50, 5 (1942) 97)による。
- 118) Zahner, R. and Oliver, W.W.: For. Sci. 8, 51-63 (1962)
- 119) Zobel, B.J. and McElwee, R.L.: Tappi 41, 167-170 (1958)