

木竹材の異方的収縮に関する研究

中 戸 莞 二

Studies on the Anisotropic Shrinkage of Wood and Bamboo

Kanji NAKATO

目	次
緒 言……………157	1. 顕微鏡的構成要素の異方的収縮……………163
I 木竹材の異方的収縮……………159	2. 顕微鏡的構造と異方的収縮……………164
1. 木材の異方的収縮……………159	a. 木材の顕微鏡的構造と異方的収縮……………164
a. 構造三軸と収縮……………159	b. 竹材の顕微鏡的構造と異方的収縮……………166
b. 比重と異方的収縮……………160	IV 木材細胞膜の微細構造と異方的収縮……………167
2. 竹材の異方的収縮……………161	1. 仮導管細胞膜の収縮……………167
II 年輪と異方的収縮……………162	2. 誘電性と収縮積分値……………168
1. 春材・秋材の異方的収縮……………162	3. リグニンと異方的収縮……………170
2. 年輪と異方的収縮……………162	総 括……………171
III 木竹材の顕微鏡的構造と異方的収縮……………163	引用文献および Summary……………171

緒 言

木材の欠点の一つに湿気をすって膨脹し、乾燥して収縮する性質がある。これを飽水状態から絶乾状態までの体積収縮についてみると、節・腐れその他のキズを含まない正常な木材の場合、樹種・個々の樹幹・同一樹幹における部分位置等でことなるが、ほぼ7～22%の範囲である。また、長さの収縮膨脹は同じ材でも方向によってその大きさがことなり、年輪に切線方向で4～12%、年輪の半径方向で2～8%、繊維の長軸（幹軸）方向で僅かに0.1～1.0%の範囲であり、これら三者の比はほぼ、10：5：0.5～1である。しかも、木材のこのような収縮膨脹における異方性は、たとえばゼラチンのように温度等の環境条件で一時的に示されるものでなく、木材の構造にもとづく性質で、いわゆる真の異方性である。このような異方的な収縮膨脹は木材の利用にあたって欠点となり、その取扱いを困難にする。たとえば適度に乾燥されていない木材から、四方桁木取りの柱材をとったとき、木材の切線収縮が半径収縮よりも大きいことによって、その後の乾燥で方形の断面が菱形に変わる。また、同一丸太から製材した板材も、その板が桁目であるか板目であるか追桁であるかによって、板の幅の収縮を相当量ことにする。したがって、このような木材を部材として木構造等をつくる場合、木材がその横断面において異方的収縮を示すことや、木材の長軸収縮が無視出来るほど小さいことを念頭において、部材の木取りや組合せを決定しなければならない。また、適度に乾燥した木材を使用した場合でも、木材は環境の乾湿に適応して収縮膨脹を繰り返し、構造部材ではこれが外部からの力のかかった状態のもとで行なわれることが多く、その結果異常収縮を伴い、この場合にも方向性が認められる。したがって適度に乾燥した木材についても既述の配慮が必要となる。これらの結果、木材は鉄材その他にくらべて取扱いの厄介な構築材料であり、用途によっては使用出来ない場合も少なくない。そこで木材の異方的収縮は、学問上興味ある問題であるとともに、木材利用上意義ある問題として、すでに1919年J. B. Wagner によって注目されて以来、多くの研究者によって検討され、その機構について諸説が唱えられている。

竹はその程が木材と同様に木質化する多年生植物であるが、単子葉類中の禾本科に属し、稈の形状

・顕微鏡的構造・化学組成・材質等において木材と異なることが多い。顕微鏡的構造について、竹稈壁の量的主要部である中心柱と木材とを比較すると

(1) 木材の基本組織が針葉樹において仮導管、広葉樹において木繊維等のいわゆる「繊維」であるに反して、竹材のそれは「繊維」と細胞膜の構造および性質を異にする柔組織であり、構成要素の量的な主客が転倒している。

(2) 木材がその半径方向に細胞長軸をもつ射出線を含むのに反して、竹材の顕微鏡的構成要素の全てはその細胞長軸を竹稈の長軸方向に配列している。したがって竹材はその木口断面について、柔細胞・維管束の粒状混合体として模式化しうる。

(3) 木材が多くの年輪をもっているのに反して、竹材は稈壁全体が1年輪に相当し、その外側部から内側部に向って維管束(靱皮繊維)の分布密度が減少している。したがって、竹材中心柱についての顕微鏡的構成要素の割合と材質との関連性の検討が比較的容易である。

竹材は実用的立場では古くから「木竹材」として木材と並べて呼ばれる材料であるが、前述のように顕微鏡的構造では木材と顕著な相違を示す。そこで、これらの相違点に着目して木竹材の異方的収縮を比較検討することは、木材の異方的収縮の機構を考究する一助となるものであろう。

木竹材の異方的収縮には長軸断面におけるものと横断面におけるものとに区別される。後者は木竹材にだけみられる特異な性質であるか、すくなくとも木竹材においてはじめて問題になる現象である。しかも、その機構は長軸断面における異方的収縮の機構よりもさらに複雑なものと思われる。果して木材の横断面における異方的収縮の機構については多くの説があるが、主要なものを挙げると次の通りである。その一つは、細胞長軸に対するフィブリル傾斜角が、細胞の半径膜におけるよりも切線膜において小さいという Bailey 等の観察結果にもとづいて、切線膜におけるフィブリル自体の収縮の細胞長軸に直角方向における分力が、半径膜におけるそれよりも大きいとし、これが木材の横断面における異方的収縮の主な原因であるとした Trendelenburg のフィブリル傾斜角説⁴⁵⁾である。この説は長軸断面における異方的収縮にも適合するといわれている。他の一つの説は、木材の半径方向にその細胞長軸を配列している射出線が、材の長軸方向に配列している仮導管・木繊維その他の繊維状組織の半径方向における収縮を制約する結果、木材が横断面において異方的収縮を示すとする、いわゆる射出線の制約作用説である。この説は多くの研究者によって支持され、Barkas²⁾はこれに理論的な根拠を、Clarke⁵⁾および McIntosh¹⁸⁻²⁰⁾は実証的な結果をあたえている。これら二つの説のほか、薄膜で大きい細胞の木材中での配列が、半径方向におけるよりも切線方向において隙間なく整然としている結果、切線収縮が半径収縮のように材内部で消滅することなく外部に伝達されることによるとする、いわゆる Mörath²¹⁾説がある。また、針葉樹材については切線方向に短く半径方向に長い横断面をもつ春材仮導管が存在することによって、切線方向における細胞膜の出現数が半径方向におけるそれよりも多く、しかも、細胞膜の中葉に等方的で大きい変形をするペクチン質を含むこと⁷⁾によって、木材の切線収縮が半径収縮よりも常に大きいとした、いわゆる Frey-Wyssling³⁷⁾の中葉説がある。さらに春材と秋材の木材における配置(年輪)に関連した説等がある。

以上の既往の諸説にみられるように、木材の横断面における異方的収縮は、木材構造のミクロからマクロの大きさにわたるいろいろの要因に関連して考えられる。もちろん、これは木材があらゆる大きさの段階で、物理的・化学的に異質な材料であることによる。したがって、このような材料の性質は単一な機構で説明されるものでなく、主要な機構に他の一、二の機構がつけ加えられて明かにされるものであろう。しかし反面、既往の説が多岐にわたる原因として、既往の個々の研究が単に一つの大きさの領域における一、二の要因についての結果によって、異方的収縮の機構を云々したことが注目される。ここに、木材構造と異方的収縮についての、構造のミクロからマクロの領域にわたる一貫

的な検討の必要性がある。

本報においては、主として二、三の針葉樹材について構造のミクロからマクロの領域にわたって一貫的に検討した結果と、竹材について得たところを記述し、木材の横断面における異方的収縮の機構を総括的に考究し、併せて竹材横断面における収縮の方向性について考察しようとする。

本研究にあたり多年御指導を賜った恩師梶田先生、御指導御援助を頂いた京都府立大学農学部林学教室、京都大学木材研究所ならびに農学部林学教室の各位に対し深甚の謝意を表する次第である。

I 木竹材の異方的収縮

1 木材の異方的収縮

木材の変形はそれを生ぜしめる力によって、圧縮による縮み、引張による伸び等のように外力による機械的変形と、吸湿による変形、熱による伸縮等のように分子力にもとづく物理的変形とに区別される。これらの変形は木材の構造三軸についていずれも異方的である。すなわち、いずれの変形も切線方向において最大で、長軸方向において最小である。しかし、変形の種類によって各軸方向における最大変形量、長軸断面および横断面における異方度がことなる。Table 1 は Keylwerth¹⁴⁾ によってのもので、表における括弧内の数値は彼が掲げた値の中央値について、個々の変形の切線方向にお

Table 1. Deformation of Wood % (by Keylwerth¹⁴⁾)

Deformation		Longitudinal	Radial	Tangential
Mechanical deformation	Compression	0.2~2.0 (20)	0.5~2.5 (25)	1~10 (100)
	Tension	0.3~1.0 (45)	0.5~1.3 (65)	0.8~2.0 (100)
Physical deformation	Swelling	0.1~0.9 (5)	2~11 (65)	5~15 (100)
	Thermally elongation (0°→100°C)	0.02~0.10 (10)	0.26~0.35 (60)	0.32~0.73 (100)

る値を基準とした比率である。以下、木材の吸湿変形、とくに収縮の異方性について記述する。

a. 構造三軸と収縮 木材の任意方向における吸湿変形については Greenhill・井阪⁸⁾等のほか多くの研究がある。Greenhill⁹⁾は板目または柃目のどちらでもない板の厚さの収縮について理論式を提案している。この Greenhill 式を木材の構造三軸中の二 (x, y) 軸を含む面について一般化するとき、次式が得られる。

$$\beta_{\theta} = 100 - \sqrt{(100 - \beta_x)^2 \cos^2 \theta + (100 - \beta_y)^2 \sin^2 \theta} \dots (1)$$

ここに β_{θ} : x 軸から θ 偏った方向の収縮率%, β_x, β_y : x および y 軸方向の収縮率%
また, x 軸となす角度 θ の収縮による変化量 ω は

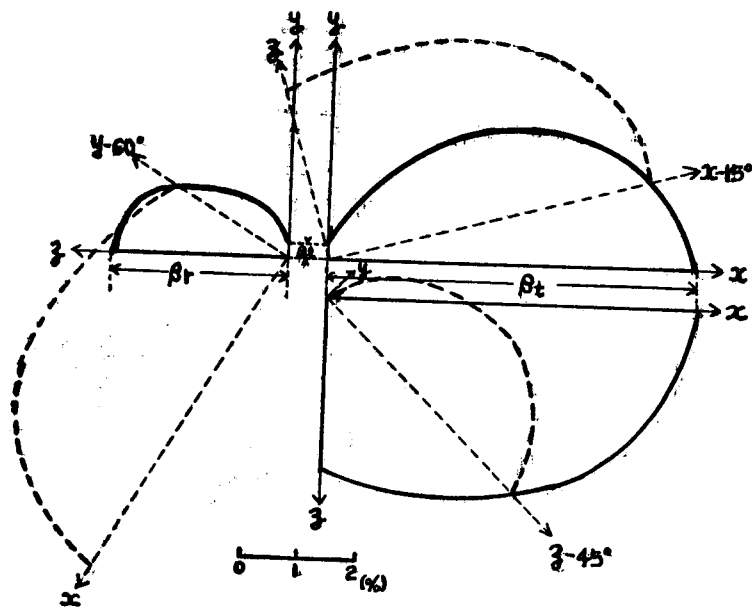
$$\omega = \sin^{-1} \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta (\beta_y - \beta_x)}{\sqrt{\cos^2 \theta (100 - \beta_x)^2 + \sin^2 \theta (100 - \beta_y)^2}} \dots (2)$$

さらに(1)式は x および y 軸方向の収縮率の高次微小項を無視するとき、次式になる。

$$\beta_{\theta} \approx \beta_x \cos^2 \theta + \beta_y \sin^2 \theta \dots (3)$$

長野営林局三股営林署管内産の繊維走向の通直なヒノキ材について求めた任意方向における吸湿変

形の実測値と、(1) 式による計算値とはよく一致し、その異方的収縮は Fig. 1 のように示すことができる。¹¹⁾



β_t : Tangential shrinkage, β_r : Radial shrinkage,
 β_l : Longitudinal shrinkage

Fig 1. Stereographic projection of the anisotropic shrinkage of Hinoki-wood

b. 比重と異方的収縮 一般に木材は樹種によって個々の比重範囲をもつ。一樹種についても遺伝的要素・成育環境の諸条件・樹令等により、また、一樹体についても成育中の諸条件の変化等によって、木材の比重はいちぢるしいムラを伴う。したがって、ある樹種の比重は単なる平均値にすぎない。しかし、このような比重も、その大きさが木材実質の多少によるものであるため、木材の物理的・機械的

Table. 2. Degree of anisotropic shrinkage and swelling in the transverse section of wood

Specific gravity	β_t/β_r by	α_t/α_r by Mörath ²¹⁾			β_t/β_r by Mathewson ¹⁷⁾
	Forsyth ³⁹⁾	Coniferous tree	Broadleaved tree	Mean	
0.3~0.4	2.0	2.22	2.04	2.08	3.68~1.52
0.4~0.5	1.9	1.89	1.92	1.90	
0.5~0.6	1.6	1.59	1.81	1.70	2.26~1.41
0.6~0.7	1.3	1.41	1.75	1.56	
0.7~0.8			1.66		2.08~1.29
0.8~0.9			1.55		
0.9~1.0			1.39		1.76~1.23
1.0~1.1			1.41		
1.1~1.2			1.30		
1.2~1.3			1.19		

α_t, α_r : Tangential and radial swelling

β_t, β_r : Tangential and radial shrinkage

諸性質の最も有効な尺度として重要である。木材の横断面における収縮異方度（切線収縮の半径収縮に対する比）は、比重が大になるにしたがって1に近づく傾向、すなわち、重い材ほど横断面における収縮がより等方的であるといわれている。たとえば多くの属・樹種についての結果は Table 2 の通りであり、比重の増大で横断面における収縮異方度は双曲線的に減少する。これに反して Rosshard は比重 0.2~1.0 の範囲の 80 樹種について、この減少が直線的であるとしている。わが国および欧米の多数の報告にもとづいた鳥海の世界有用木材性質表⁴⁴⁾について、針葉樹 52 樹種、広葉樹 96 樹種、これらの容積密度 0.3~0.8 g/cm³ にわたり、容積密度と横断面における収縮異方度との関係を検討した結果は

Fig. 2. Relations between the degree of anisotropic shrinkage in transverse section (β_t/β_r) and the specific gravity based on oven-dry weight and green volume (R)

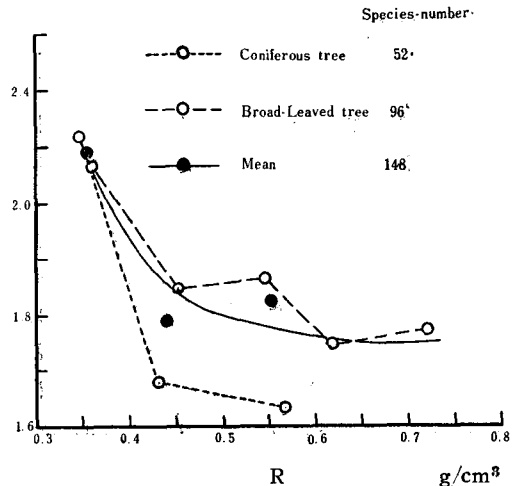


Fig. 2 の通りである。図に示すように、容積密度の増加で横断面における収縮異方度は双曲線的に減少し、この減少の程度は広葉樹材よりも針葉樹材において大きく、これは Table 2 に示した Mörath の結果と一致している。²⁰⁾ しか、多くの属・樹種にわたるこのような検討は、比重と収縮の広い変動範囲に及ぶが、多くの研究者による実験値を含み、場合によってかなり異なった測定法による結果を含む危険さがある。さらに、多くの属・樹種にわたることは、本質的な不都合、すなわち、比重で代表されないところの異方的収縮に関する要因の影響を対象に含むこととなる。そこで Clarke の Ulnus 属 2 樹種についての実験値について、気乾比重と横断面における異方的収縮の関係を推計学的に検討した。その結果、比重と横断面における収縮異方度とは直線関係で、その有意性は高く、両者の相関係数は、 $-0.21 < \rho < -0.88$ で大きい。²⁹⁾ このように、両者の関係が多属について曲線的であり、1 属少樹種について直線的であることは、異方的収縮の要因のすべてが比重で代表されないことにもよるものであろう。

2 竹材の異方的収縮

竹材はその稈壁の最外部・最内部にそれぞれごく薄い皮部・髓層をもち、両者の間に、柔組織の中に維管束が外側部ほど密に散在している中心柱をもつ。したがって、竹稈壁はその厚さ方向の部位によって顕微鏡的構成要素の種類や割合を異にする。その結果、竹材の収縮は、例えばモウソウチクについての北村の結果にみられるように、稈壁の厚さ方向の部位によって収縮の絶対値と径切両収縮の関係を異にする。ここに、竹材の半径収縮とは稈壁の厚さ方向の収縮であり、切線収縮とは竹稈横断面において厚さに直交する方向の収縮である。モウソウチクについての既往の結果によると、竹林の主要部である中心柱を外側部と内側部の 2 部に区分した場合、外側部の径切両収縮と内側部の半径収縮の三者にくらべて、内側部の切線収縮は小さく、また、外側部の横断面における収縮異方度（切線収縮/半径収縮）が、1.05~1.21~1.42 であるのに反して、内側部のそれは 0.40~0.58~0.95 である。¹⁵⁾

このような収縮量の相違は本質的には外側部が厚膜でいちぢるしく収縮する靱皮繊維を多く含み、内側部が薄膜で収縮量の少い柔組織を多く含むことによるものであろう。なお鈴木⁴¹⁾によると、竹材において占める靱皮繊維の割合、すなわち竹材の繊維率は外側部と内側部で、とくに下稈部でいちぢるしい差があり、例えばモウソウチクの皮部に近い部分で63% (比重1.20)、内側部で9.5% (0.54) である。しかし、ここに注意しなければならないのは、竹材の乾燥過程において主として柔細胞で collapse⁴²⁾ が容易に発生することである。したがって、既述の竹稈中心柱の内外側部における収縮のいちぢるしい相違の全てが、繊維率の相違によるものとは考えられない。そこで、collapse の発生を少なくする乾燥法および試験体条件 (中心柱を内外側部に区分し、断面はほぼ方形の小片を切線および半径方向に積層接着した試験体) で、モウソウチクとマダケの径切両収縮を検討した結果、竹稈の皮部を除いた外側部では切線収縮が半径収縮よりも大きく、横断面における収縮異方向度がモウソウチク1.20、マダケ1.14であり、髄層を除いた内側部では横断面においてほぼ等方的な収縮を示し、異方向度がモウソウチク1.00、マダケ0.95である。なお、前記の試験体条件であることは、扁平な試験体の場合稈壁厚さ方向に進行しやすい collapse^{16), 29)} を避けるとともに、径切両方向の測長精度を同程度にする。

木材と竹材の横断面における異方的収縮を比較するとき、次の二点において明らかな相違が認められる。その一つは、木材においても、また針葉樹^{23), 26)}の春材・秋材においても、横断面における収縮異方向度が比重の増大によって双曲線的に減少したのに反して、竹材の中心柱外側部は内側部に比べて、比重が大であるにも拘らず収縮異方向度が大きいことである。他の一つは、木材においてはどのように比重の大きい材でも、横断面における収縮異方向度が明らかに1よりも大きいのに反して、竹材では中心柱内側部がほぼ等方的な収縮を示すことである。このような相違は、木材と竹材の横断面における異方的収縮がかなり異なった機構によることを意味するものであろう。

Ⅱ 年輪と異方的収縮

1. 春材・秋材の異方的収縮

樹木はその成長に周期があるとき、始期と終期の細胞の形状性質を異にし、周期が1年の場合、樹幹の横断面において薄膜方形の春材細胞の層と厚膜扁平の秋材細胞の層よりなる同心円状構造、すなわち、年輪を形成する。春材と秋材は材質の有効な尺度である比重についてもいちぢるしく異なり、針葉樹の春材に対する秋材の比重の比は1.7から3.4におよぶ。そこで、分離した春材と秋材について横断面における異方的収縮を、径切両収縮がほぼ等しい精度で得られる積層試験体について検討した結果はTable 3の通りである。このTableから収縮と比重の直線関係が認められるので、それぞれの収縮の比重による増加係数を求め、Vintila⁴³⁾の結果とともに示すとTable 4の通りである。ここに注目しなければならないのは、春材の切線収縮の比重による増加係数が春材の半径収縮、秋材の径切両収縮の3者のそれよりもいちぢるしく大きく、この差にくらべて3者相互の差が小さいことである。

2. 年輪と異方的収縮

分離した春材と秋材はTable 3に示すように、横断面における異方的収縮についていちぢるしく相違する。木材片横断面での年輪はこのような春材と秋材が交互に接続して層状構造をしているものと模式的にみなされる。Pentoneyは木材の切線収縮を両端固定の春材・秋材の組合せ棒の収縮とみなし、半径収縮を春材・秋材それぞれの半径収縮の和、これと春材・秋材間に発生する応力による切線方向の歪とポアソン比³⁷⁾によってきまる半径方向の歪の代数和とみなして、年輪と異方的収縮に関する煩雑な理論式をたてている。これらの式は次のように簡略化される。

Table 3. Anisotropic shrinkage in transverse section of isolated
spring- and summerwood

Species	Sample	R	Shrinkage		
			β_t %	β_r %	β_t/β_r
Sugi (A)	Sp.	0.187 ± 0.015	4.41 ± 0.45	1.20 ± 0.26	3.87 ± 0.93
	Su.	0.575 ± 0.057	7.16 ± 0.35	6.22 ± 0.98	1.18 ± 0.18
Sugi (B)	Sp.	0.194 ± 0.010	4.81 ± 0.43	2.19 ± 0.35	2.25 ± 0.40
	Su.	0.542 ± 0.073	6.60 ± 0.59	5.64 ± 0.98	1.20 ± 0.22
Momi	Sp.	0.234 ± 0.014	4.66 ± 0.52	2.26 ± 0.29	2.07 ± 0.22
	Su.	0.622 ± 0.041	8.40 ± 0.71	6.87 ± 1.05	1.25 ± 0.17
Karamatsu	Sp.	0.249 ± 0.019	6.29 ± 0.78	2.12 ± 0.32	2.99 ± 0.35
	Su.	0.699 ± 0.044	9.81 ± 0.49	7.29 ± 0.73	1.36 ± 0.12

Sp. : Springwood, Su. : Summerwood, R : Specific gravity based on oven-dry weight and green volume, β_t , β_r : Tangential and radial shrinkage.
Specimens-number of a sample is 20.

$$\beta_t = \frac{\beta_{t1}E_0 + \beta_{t2}A_0}{A_0 + E_0} \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_r = \frac{(A_0 + E_0)(\beta_{r1} + \beta_{r2}A_0) + A_0(\beta_{t1} - \beta_{t2})(P_1 - E_0P_2)}{(A_0 + E_0)(1 + A_0)} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\beta_t}{\beta_r} = \frac{(\beta_{t1}E_0 + \beta_{t2}A_0)(1 + A_0)}{(A_0 + E_0)(\beta_{r1} + \beta_{r2}A_0) + A_0(\beta_{t1} - \beta_{t2})(P_1 - E_0P_2)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに β_t , β_r : 木材の切線および半径収縮 %, β_{t1} , β_{t2} : 分離した秋材・春材の切線収縮 %, β_{r1} , β_{r2} : 分離した秋材・春材の半径収縮 %, $E_0 = E_1/E_2$ (E_1 , E_2 : 分離した秋材・春材の強性係数), $A_0 = (1-A)/A$ (A : 秋材率), P_1, P_2 : 分離した秋材・春材のポアソン比²²⁾。これらの近似式は同一年次の春材・秋材の境界が比較的明らかなカラマツについてよく適合する。

以上の結果、年輪と異方的収縮との関係は春材・秋材の弾性係数・ポアソン比・収縮率・容積割合等に関係する単なる力学的なものにすぎない。一方、年輪を構成している春材と秋材それぞれの異方的収縮は、Table 3 に示すように顕著な相違を示す。すなわち、春材にくらべて秋材の収縮率は大きく、切線収縮で1.4~1.8倍、半径収縮で2.6~5.2倍である。また、横断面における収縮異方度は春材で2.0~3.9、秋材で1.2~1.4であり、春材が秋材よりもいちぢるしい異方性を示す。そこで、以下分離した春材・秋材について検討を進める。

Ⅲ 木竹材の顕微鏡的構造と異方的収縮

1. 顕微鏡的構成要素の異方的収縮

木材の顕微鏡的構成割合は樹種その他によって異なるが、針葉樹では仮導管が約90%を占め、広葉

Table 4. Ratio of tangential or radial shrinkage (β_t or β_r) to specific gravity (R) of the isolated spring- and summerwood

Species	β_r/R			β_t/R		Literature cited
	Sp.	Su.	Sp. and Su.	Sp.	Su.	
Sugi (A, B)	9.5	10.8	10.5	22.6	13.2	23)
Momi						
Karamatsu						
Douglasie	10.0	12.8	—	23.3	16.1	46)
Kiefer						
Lärche						
Tanne						

Sp., Su. : Spring- and summerwood

樹では木繊維がほぼなかばを、導管・射出線・木柔組織がそれぞれ10~20%を占める。また、既述のように竹材中心柱は柔組織と維管束からなり、その構成割合は程壁厚さ方向における部位によって異なる。

そこでまず、木竹材のこれら顕微鏡的構成要素の個々について、木竹材の切線および半径方向に相当する方向における収縮を次の方法によって検討した。すなわち、厚さ10~20 μ の木口切片（ときに柁目切片）から、ある特定の構成要素のみをもつ微小切片をとり、これらの乾燥および湿潤状態の顕微鏡写真について収縮率を決定した。その結果、木竹材の顕微鏡的構成要素は個々の収縮について次のように区分される。

(1) 異方的収縮を示すもの……春材仮導管（スギ・モミ・カラマツの異方度²⁶⁾ 2.4~2.7²⁷⁾）、木繊維（ミズナラ 1.3²⁶⁾）、微小射出線（モミ 1.4・カラマツ 2.1²⁷⁾）、広射出線（ミズナラ・beech・red oak 1.6~2.6^{18), 20)}）

(2) ほぼ等方的な収縮を示すもの……木柔組織（ミズナラ 7.8~7.7²⁷⁾）、竹材柔組織（モウソウチク 1.03・マダケ 1.0³³⁾）、竹材靱皮繊維（モウソウチク 1.2・マダケ 1.0³³⁾）

(3) 独自の収縮を示さないで、周辺の他の要素によっていろいろの異方的変形をするもの……導管²⁷⁾

2. 顕微鏡的構造と異方的収縮

既述のような収縮を示す顕微鏡的構成要素からできている木竹材について、収縮にさいしての構成要素の収縮および相互作用等について検討した結果、次の通りである。

a. 木材の顕微鏡的構造と異方的収縮 木材の顕微鏡的構造における異方的収縮の要因は次のように区分される。

(1) 切線収縮を大きくして、収縮異方度を大にする要因……射出線量

(2) 半径収縮を小さくして、収縮異方度を大にする要因……春材仮導管半径膜の重紋孔

(3) 切線収縮を大きくし、半径収縮を小さくして、収縮異方度を大にする要因……春材および秋材仮導管の横断面における細胞形状

(4) 異方的収縮と無関係な要因……導管・収縮の方向における細胞膜の出現数その他

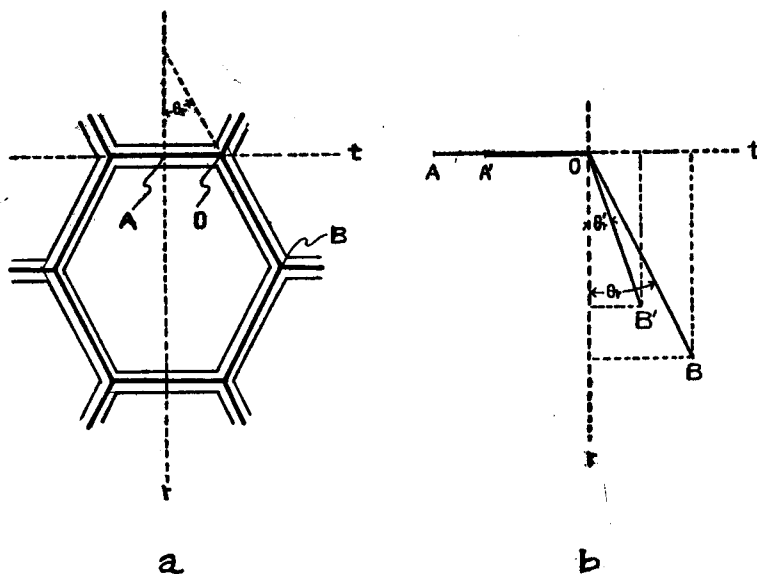
既述のように射出線の制約作用説は、多くの研究者によって支持されているが、またこれに反対する研究者も多い。射出線と異方的収縮に関する既往の成果は、(1)射出線は木材の半径収縮を制約することが可能な細胞膜におけるマイクロフィブリル配列をもつこと、(2)射出線の制約作用は、射出線が規則的に分布する薄い切片で認められるが、ブロックでは明らかでない、(3)木材の射出線量と異方的収縮は、明らかな関連性を示さない等に要約される。そこで、スギ・ミズナラについて射出線量と異方的収縮の偏相関を推計学的に検討した結果、射出線量と半径収縮が無意低相関であり、切線収縮が有意低相関である結果、射出線量と横断面における収縮異方度は、比較的低い正相関をもち、しかも有意である^{12), 13)}。また、両側に微小射出線をもち、その間に半径方向に並ぶ繊維細胞列を切線方向に5～6列もった小木口切片について収縮を検討した結果、繊維細胞の半径収縮に及ぼす射出線の制約作用は、隣接する繊維細胞1列において僅かに認められるが、2列目以遠に及ばない。これらのことから、一般針葉樹におけるように射出線量が約10%以下の材では、木材の半径収縮に対する射出線の有意な制約作用が認められない。また、10～30%の射出線をもつ広葉樹材の場合には、射出線が繊維細胞と直接接しない多くの細胞を含む結果、多量の射出線をもつにも拘らず、木材の半径収縮に対して有意な制約を示さない。しかし、射出線量の増大が、木材の切線方向における細胞膜の厚さの総和を大にする結果、射出線量と切線収縮は有意な正相関を示して、横断面における収縮異方度の有意な増大を招く。なお、射出線の制約作用がいちぢるしくない原因は、射出線細胞と繊維細胞との連結、すなわち、その間の細胞間層の構造に関係するものと思われる、これについては今後の検討を要する。

春材仮導管の半径膜に多く存在する重紋孔と異方的収縮の関係について Stamm⁴⁰⁾ は次のように指摘している。すなわち、半径膜のフィブリルが多くの紋孔を囲む結果、切線膜のフィブリルよりも細胞長軸に対する平均傾斜角が大きくなり、長軸に直角方向におけるフィブリルの収縮の分力が小となり、これが木材の横断面における異方的収縮の一因であるとしている。Erickson はこの説を支持し、半径膜における紋孔の存在が半径膜と切線膜との傾斜角における本来の差以上の差をもたらしとしている。他方、顕微鏡写真的に検討した結果、細胞膜の収縮にさいして重紋孔はその輪帯部が扁平となり、紋孔口が大きくなる変形を示し、紋孔の外径や環径は伸長するか僅かに縮少する²⁰⁾。そこで、このような重紋孔がほとんど半径膜に存在することは、春材の半径収縮を小にして収縮異方度を大にする。

横断面において春材仮導管の多くは薄膜の亀甲型を、秋材仮導管は厚膜で切線方向に大きい扁平な形を示している。そこで、春材・秋材それぞれの少数仮導管のみを含む微小小木口切片について、収縮のさいの細胞腔の変形を検討した結果、春材および秋材仮導管の細胞腔は切線方向に縮小し、半径方向に僅かに伸長する。これを春材仮導管について詳述すると次の通りである。針葉樹春材仮導管の多くは横断面において Fig. 3 に示す亀甲型で、このような細胞がつらなると春材全粒で粗い網目状を呈する。いま、Fig. 3 における切線膜 $\overline{OA}$ 、半径膜 $\overline{OB}$ が収縮してそれぞれ $\overline{OA'}$ 、 $\overline{OB'}$ となると、仮導管単細胞の切線および半径方向における収縮 β_t' 、 β_r' はそれぞれ

$$\beta_t' = \frac{\beta_{t1}''/100 + L \sin \theta_r - L(1 - \beta_{r2}''/100) \sin \theta_r'}{1 + L \sin \theta_r} \times 100 \% \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\beta_r' = \frac{\cos \theta_r - (1 - \beta_{r2}''/100) \cos \theta_r'}{\cos \theta_r} \times 100 \% \quad \cdots \cdots (8)$$



$\overline{OA}$ (A) : Tangential wall, $\overline{OB}$ (B) : Radial wall, t, r : Tangential and radial direction

Fig. 3. Schematic cross section of a springwood tracheid illustrating the shape of a cell (a) and the deformation of tangential and radial wall in the case of shrinkage (b)

ここに $\beta_{t1}'' \cdot B_{r2}''$: 切線および半径膜の膜幅方向における収縮 %, $L : = \overline{OB} / \overline{OA}$, $\theta_r \cdot \theta_r'$: 湿润および乾燥状態における半径膜が半径方向となす角度°

これらの式による計算値と実験値はスギ・モミ・カラマツについてよく一致する。

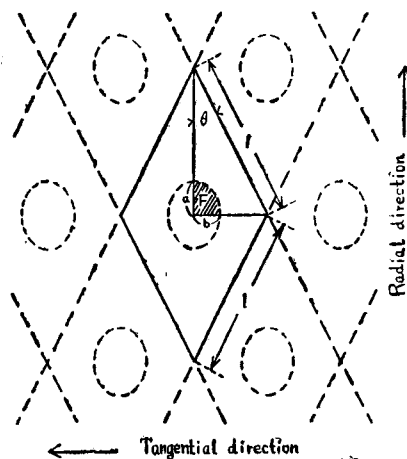
b. 竹材の顕微鏡的構造と異方的収縮

既述のように、モウソウチク・マダケの稈壁中心柱について、竹材の外側部は内側部に比べて比重が大であるにもかかわらず横断面における収縮異方向度が大であり、しかも内側部は横断面においてほぼ等方的収縮をしめた。また、竹材の主要な構成要素である柔組織および靱皮繊維は、それぞれの横断面においてほぼ等方的収縮を示し、竹材の横断面における収縮が異方的または等方的であることの主要な原因が、顕微鏡的構造においてあることを示唆した。竹材中心柱の顕微鏡的構成要素（維

F : Vascular bundle (bundle sheath)

P : Parenchyma

Fig. 4. Schematic transverse section of bamboo



管束(靱皮繊維)・柔組織)の容積割合, 維管束の横断面形状(半径方向における最大幅の切線方向におけるそれに対する比)等は, 稈壁の厚さ方向における部位によっていちぢるしく異なる。そこで, これらを変動因子とする竹材の顕微鏡的構成単位は, 横断面において Fig. 4 のように模式化される。すなわち, 基本組織である柔組織の中に, 長短径 a および b の楕円形で示す靱皮繊維が粒状に分散し, したがって柔組織は 1 個の楕円を囲む菱形で示され, その角度 θ の変化で靱皮繊維の分布密度に相違をもたらす, これと楕円面積によって繊維率を変動せしめる。この模型について, 竹材の切線収縮 β_t と半径収縮 β_r はそれぞれ

$$\begin{aligned}\beta_t &= \beta_F \cdot P_{Ft} + \beta_P(1 - P_{Ft}) \\ \beta_r &= \beta_F \cdot P_{Fr} + \beta_P(1 - P_{Fr})\end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \% \\ \text{‰} \end{array} \right\} \dots \dots \{a\}$$

ここに $\beta_F \cdot \beta_P$: 靱皮繊維および柔組織の横断面における収縮率 $\%$, $P_{Ft} = 0.798(P_F \cdot \cot \theta)^{1/2}(T/R)^{1/2}$, $P_{Fr} = 0.798(P_F \cdot \tan \theta)^{1/2}(R/T)^{1/2}$, P_F : 繊維率, $T \cdot R$: 切線および半径方向における維管束の最大幅モウソウチクについて, これらの式による計算値と実験値は収縮異方度 (β_t/β_r) において, θ が外側部 29° , 内側部 44° ではば一致し, これらの角度は供試モウソウチクについて妥当な値である。³⁴⁾

このように, 竹材が稈壁外側部において異方的収縮 ($\beta_t > \beta_r$) を, 内側部においてはほぼ等方的収縮 ($\beta_t \approx \beta_r$) を示すことは, 横断面における維管束の大きさ, 形状・分布密度等の顕微鏡的構造によるものと考えられる。

IV 木材細胞の微細構造と異方的収縮

1. 仮導管細胞膜の収縮

一般に細胞膜の厚薄は第二次膜, とくに中層のそれによってきまる。しかも, 第二次膜中層のセルロース結晶体の定位性は, 同一仮導管の切線膜と半径膜とでことなる。そこで木材の異方的収縮の主要な要因が第二次膜, とくにその中層にあるものとの考えから, 横断面における異方的収縮の機構について, 既述のフィブリル傾斜角説が注目される。すなわち, 細胞長軸に対するフィブリル傾斜角が切線膜におけるよりも半径膜において大きいという Bailey 等の観察結果にもとづいて, Trendelenburg は切線膜におけるフィブリル収縮の細胞長軸に直角方向の分力が, 半径膜におけるそれよりも大きいとし, これが木材の横断面における異方的収縮の主原因であるとした。このフィブリル傾斜角説は Vintila,⁴⁶⁾ Tiemann,⁴³⁾ Desch 等⁴⁾によって定性的に妥当であるとして支持された。

Table 5. Relationship between the decreasing order of β'' and the increasing order of θ

	Summerwood		Springwood	
	Radial wall	Tangential wall	Tangential wall	Radial wall
β'' (Sugi-A and -B, Momi, Karamatsu) %	11~17 > 7.5~12.5 > 6~8 > 3~5			
θ (Ichii, Sugi, Hinoki, Akamatsu and so on ³⁹⁾ ³⁶⁾)	4~15 < 6~20 < 10~31 < 14~33			

β'' : Shrinkage in the width of tracheid cell walls, θ : Fibrillar orientation angle to the longitudinal axis in the central layer of the secondary wall of tracheid cell

そこで細胞膜自体の収縮を次のようにして決定した。すなわち、春材・秋材のそれぞれから5～7個の仮導管細胞だけを含む多数の微小木口切片（辺長約0.1mm）をとり、これらの乾湿両状態における顕微鏡写真について、切線および半径膜の幅ならびに厚さの収縮を決定した。その結果、スギ・モミ・カラマツについて、仮導管の膜幅の収縮は半径膜と切線膜とで異なり、その大きさの（大→小）順位は Table 5 の通りである。この順位は原田等による針葉樹6樹種の仮導管細胞膜の第二次膜中層におけるフィブリル平均傾斜角の順位（小→大）と一致する。^{(9), (36)}（Table 5 参照）。これら二つの順位の一一致は、仮導管細胞膜の膜幅収縮について、既述のフィブリル傾斜角説が定性的に妥当であることを示すものであろう。

単一な仮導管細胞膜について膜幅収縮 β'' は $\beta'' = \beta_r \cdot \cos^2 \theta$ %……(10)

ここに β_r : フィブリル自体の横軸方向における収縮 %, θ : 細胞長軸に対するフィブリル傾斜角° したがって、半径膜の膜幅収縮 β_r'' に対する切線膜のそれ β_t'' の比は

$$\frac{\beta_t''}{\beta_r''} = \frac{\beta_{rt}}{\beta_{rr}} \cdot \frac{\cos^2 \theta_t}{\cos^2 \theta_r} \dots\dots\dots (11)$$

ここに $\frac{\beta_{rt}}{\beta_{rr}}$ 切線膜および半径膜のフィブリルの収縮 %, $\theta_t \cdot \theta_r$: 切線膜および半径膜のフィブリル傾斜角° いま、単一細胞膜についてフィブリル傾斜角説が定量的に妥当な場合、(11)式は次のようになる。

$$\frac{\beta_t''}{\beta_r''} = \frac{\cos^2 \theta_t}{\cos^2 \theta_r} \dots\dots\dots (12)$$

既述のように仮導管細胞の膜幅収縮について、フィブリル傾斜角説は定性的な妥当性を示した、したがって、仮導管の切線膜と半径膜との膜幅収縮の相違は、セルロース結晶体の定位性（フィブリル傾斜角）によるほか、フィブリル自体の収縮、いかえると切線膜と半径膜の組織化学的相違にもよるものであろう。すでに、1948年 Desch⁽⁴⁾ はセルロース結晶領域量およびリグニンの分布等の細胞膜の組織化学的性質が、木材の異方的収縮に関連することを指摘し、また、Bosshard⁽³⁾ (1956) は切線膜と半径膜の木化の程度の相違が、異方的収縮の一因であるとしている。すなわち、彼によると一般に半径膜は切線膜よりも木化の程度がたかく、その結果吸湿変形が小さく、しかもこのことは脱リグニン処理によって木材の半径収縮が大となり、横断面における収縮異方度が小となる事実によって証明されるとしている。しかし、ここに次のことを注意しなければならない。すなわち、既述の仮導管細胞膜の収縮は、単一な細胞膜について決定されたものでなく、細胞間層を共有して隣接する二つの細胞膜、重複細胞膜について決定したものであり、前記の Desch と Bosshard の記述もこれについてのものである。したがって、フィブリル傾斜角説が仮導管細胞の膜幅収縮について定性的な妥当におわる一つの事由としては、細胞間層 (true middle lamella) ないし中間層 (compound middle lamella) の組織化学的性質や細胞膜において占める割合等が考えられる。これらは隣接細胞間の変形の伝達に関係するであろう。そこで、仮導管重複細胞膜について、フィブリル傾斜角説が定性的な妥当におわる要因として、主として第二次膜の非晶領域の組織化学的性質によるフィブリル自体の収縮の相違と、第二次膜以外の膜層の組織化学的性質による隣接細胞間の変形伝達の相違とが考えられる。

2. 誘電性と収縮積分値

絶乾木材の誘電性と木材の吸湿変形とは、ともにセルロースのミセル表面・非晶領域等に存在する活性水酸基および房状ミセルの電波または水分子に対する応答である。しかも、水酸基はそのスピンの軸方向に最大の吸湿変形をもたらし、これと直角方向の電波に対して最大の分極および吸収を示す。したがって変形と誘電性とは相互に直交性を示すものと考えられる。そこで、ある方向の収縮とそれに直角方向における誘電性に関する値、横断面における収縮異方度、すなわち、切線収縮の半径収縮

に対する比と、半径方向に電場がある場合の誘電性に関する値の切線方向に電場がある場合のそれに対する比、等においてかなり高度な関連性が期待される。³⁰⁾

もちろん、ここに誘電性に対応する収縮とは細胞膜の吸湿変形に直接関係するものであり、収縮にさいして木材内部に発生する応力、たとえば、春材と秋材の間に生じ年輪に関係して発生する応力、射出線と垂直組織との間に発生する応力、春材仮導管半径膜の幅方向における収縮と紋孔膜のそれとの著しい相違によって発生する応力²⁶⁾等にもとづく変形を含まないものである。その理由は木材または春材・秋材それぞれの収縮が木材異質ないし細胞膜のそのままでなく、肉眼的・顕微鏡的木材構造における前記の各種要因によって収縮にさいし発生する応力により、ある場合には正に、ある場合には負に作用した総合的な結果であり、しかも、これらの発生応力による変形が木材の収縮に関係しても、絶乾木材の誘電性には直接関係しないからである。したがって、木材の誘電性に対応するある方向における収縮は、構成細胞の膜自体の収縮をその方向の細胞膜量について積分した値、すなわち、²⁴⁾「収縮積分値」 $\sum \beta_t''$ とも呼ぶべきものである。切線および半径方向における細胞膜の収縮積分値 $\sum \beta_t'' \cdot \sum \beta_r''$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \sum \beta_t'' &= \beta_{t1}''(1-F_2') + \beta_{t2}'' \cdot F_2' \\ \sum \beta_r'' &= \beta_{r1}'' \cdot F_1' + \beta_{r2}''(1-F_1') \end{aligned} \right\} \frac{\%}{\%} \dots\dots (13)$$

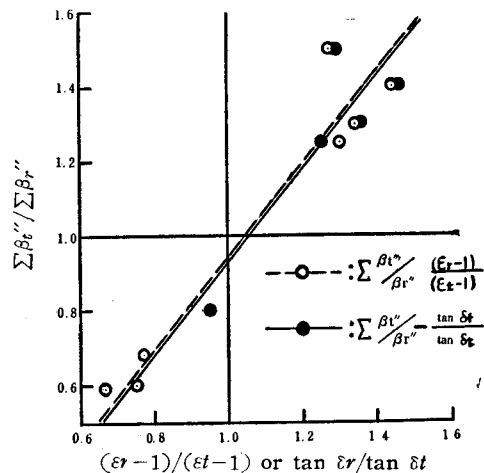
ここに $\beta_{t1}'' \cdot \beta_{r1}''$ ：切線膜の幅および厚さ方向の収縮率 $\%$ ， $\beta_{r2}'' \cdot \beta_{t2}''$ ：半径膜の幅および厚さ方向の収縮率 $\%$ ， $F_1' \cdot F_2'$ ：射出線を除いた木材における切線膜および半径膜の容積割合

絶乾木材の誘電性に関する常数（誘電率・誘電体損失）の決定は次の方法によった。すなわち、スギ・モミ・カラマツの3樹種4供試木から、分離した春材および分離しない春秋材のマッチ軸木状（木口：2.5×2.5mm，長さ：30mm）試験体それぞれ約100個宛をとり、これらの同一試料について電場が材の半径方向にある場合と切線方向にある場合の誘電的常数を、同心円状3極電極およびQメーター等を用いて決定した（文献参照³¹⁾）。また、これらの結果から分離した秋材の誘電常数を、木材を春材・秋材の層状混合誘電体とみなしての理論式によって算定した。²⁴⁾

分離した春材・秋材について、絶乾状態における誘電性と収縮積分値の対応性、すなわち、半径誘電率 ϵ_r （誘電体損失 $\tan \delta_r$ ）に対する切線収縮積分値、切線誘電率 ϵ_t （誘電体損失 $\tan \delta_t$ ）に対する半径収縮積分値、横断面における誘電性に関する異方度（誘電率： $(\epsilon_r-1)/(\epsilon_t-1)$ ，誘電体損失： $\tan \delta_r/\tan \delta_t$ ）に対する収縮積分値の異方度が、それぞれ若干の散布を伴うほぼ原点を通る直線関係である。³¹⁾

たとえば、誘電率または誘電体損失の異方度と収縮積分値のその関係を示すと Fig. 5 の通りで

Fig 5. Anisotropy-degree of integral shrinkage in transverse section ($\sum \beta_t''/\sum \beta_r''$) of the isolated spring- and summerwood of a few coniferous woods plotted against the anisotropy-degree of dielectric constant and dielectric loss $((\epsilon_r-1)/(\epsilon_t-1), \tan \delta_r/\tan \delta_t)$ in oven dried condition



ある。これらの結果は春材・秋材の異方的収縮に関して、細胞膜中に存在する活性水酸基の分布密度が重要な因子であることを意味し、この要因が既述の切線膜と半径膜の幅方向における収縮の相違の一因であると考えられる。しかも、この活性水酸基の分布に関連するものとして、既述の切線膜と半径膜のフィブリル傾斜角および非晶領域における組織化学的性質の相違が考えられる。

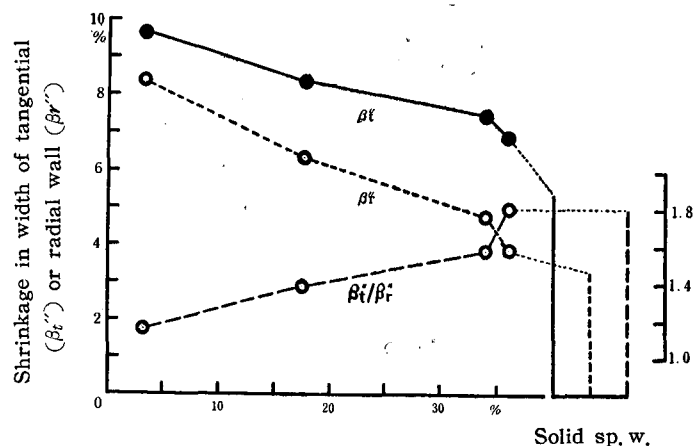
3. リグニンと異方的収縮

木材の構成化学成分の細胞膜厚さ方向における分布は、次のように考えられている（文献参照⁴⁷⁾）。すなわち、セルロースは細胞の外周から内膜に向って増大し、ヘミセルロースは第一次膜および第二次膜外層附近で最大量を示し、内膜に向って減少する。その結果、ホロセルロースは第一次膜および第二次膜でほぼ均等に分布することとなる。

これに反してリグニンはその約70%が中間層に集中し、この層の大部分がリグニンで構成されている。また、膜層の充填密度は中間層が最低であって、この層における拡散や滲透が比較的容易であるに反して、内腔に近い膜層は配列度が高く化学反応に高い抵抗を示す。他方、これら木材の化学成分は膨潤性について次のように区分される。すなわち、

- (1) 親水膨潤性成分：ヘミセルロース・セルロース、 (2) (1)よりも低い膨潤性成分：リグニン、
(3) 親水膨潤性でない成分：灰分、 (4) 嫌水性成分：樹脂様物質・タンニン

既述のように細胞膜の組織化学的性質と異方的収縮は、次の2点において有意な関連性が考えられる。その一つは第二次膜の非晶領域の組織化学的性質とフィブリル自体の収縮であり、他の一つは第二次膜以外の膜層の組織化学的性質と隣接細胞間の変形伝達である。そこで、まづ木材から嫌水性成分である樹脂様物質を除き、つぎに第二次膜非晶領域に若干含まれ、中間層の主要成分で低い親水膨潤性であるリグニンを、逐次累加的に抽出処理した場合における仮導管細胞膜の収縮の変移を検討した。スギ春材についての結果は Fig. 6 の通りである。図に示すように



Lignin contents of the springwood extracted with alcohol-benzol

Fig 6. Relations between the delignification and the shrinkage in width of tracheid cell-wall — Springwood of Sugi

(1) 脱脂および脱リグニン処理によって、仮導管の膜幅収縮は、切線膜・半径膜ともに増大する。しかも、脱脂処理による増大よりも脱リグニン処理によるそれが、また、脱リグニン処理による切線膜における増大よりも半径膜におけるそれが大きい。

(2) 膜幅収縮についての半径膜に対する切線膜の比 (β_t''/β_r'') は脱脂処理によって変らないのに反して、脱リグニン処理によって著しく低下する。

(3) リグニンを含まない切線および半径膜の膜幅収縮は、フィブリル傾斜角説に定量的にも適

合するものと思われる。その根拠は次の通りである。すなわち、原田等⁹⁾のスギ春材仮導管第二次膜中層のフィブリル平均傾斜角は、切線膜において (θ_t) $9.8 \pm 0.3^\circ$ 、半径膜において (θ_r) $19.4 \pm 0.3^\circ$ である。したがって $\cos^2 \theta_t / \cos^2 \theta_r = 1.09$ となり、これは Fig. 6における β_t'' / β_r'' のリグニン含有量 0 の外挿値 (1.08) にはほぼ一致する。このことはリグニンを含まない切線および半径膜の膜幅収縮が、重複細胞膜についてもフィブリル傾斜角説に定量的に適合することを示すものと考えられる。

以上の結果、木材細胞膜中のリグニンと異方的収縮の関係は、次のように考えられる。すなわち、細胞膜中のリグニンの約70%が集中している中間層は、第二次膜にくらべて親水膨潤性が低く、その結果細胞膜の収縮にさいして第二次膜の収縮を制約するものと思われる。そこで、中間層のリグニンの量および存在状態等における切線膜と半径膜との相違は、異方的収縮の一因と考えられる。また、少量のリグニンを含む第二次膜について、切線膜と半径膜とでリグニン含有量に差がある場合、これらの組織化学的構造を異にして水分吸着点の分布密度を異にするものと思われ、これも異方的収縮の細胞膜構造における一因と考えられる。しかも、これらリグニンに関連した異方的収縮の要因は、既述のフィブリル傾斜角の切線膜と半径膜における相違よりも重要であろう。

総 括

木竹材がそのほとんどの材質について異方的であることは、構築材料その他に用いる場合一つの欠点である。なかでも木竹材が吸湿・乾燥して大きさをかえ、しかもこの変形が異方的であることは重大な欠点である。そこで木材の異方的収縮の機構については多くの説が唱えられているが、いまだ解明されるにいたっていない。そこで本研究は構造の単純な針葉樹材について、ミクロからマクロの領域に亘る木材の異質的構造にあずかる要因と異方的収縮の関係を一貫的に検討し、併せて、木材と構造を異にする竹材についても検討した。なお、木竹材の横断面における異方的収縮は、長軸断面におけるそれよりも複雑な機構によるものと思われ、また木竹材に特有の現象ないし問題である。そこで、本研究では横断面における異方的収縮について検討した。得た結果を総括すると次の通りである。

木材の横断面における異方的収縮の機構は、木材の異質な構造によって多くの要因が関与する複雑なものである。しかし、その主要な要因は細胞膜の構造におけるものであり、これには同一細胞の切線膜と半径膜におけるセルロース結晶体の定位性、リグニンの含有量および存在状態等の相違が考えられる。これらのうちリグニンに関係する要因はフィブリル傾斜角よりも重要なものである。また、リグニンと異方的収縮の関係は、細胞膜の収縮にさいして第二次膜の収縮を制約すると考えられる中間層におけるものと、水分吸着点となる活性水酸基その他の分布密度に関係すると思われる第二次膜におけるものとがある。これらの両者のうち、主要なものが何であるかは今後の検討にまたなければならない。以上の細胞膜の構造におけるもののほか、収縮の方向における細胞膜の厚さの総和、春材および秋材仮導管の横断面における細胞の形状、春材仮導管半径膜における重紋孔、射出線量等の顕微鏡的要因が、木材の異方的収縮について第二義的なものとして考えられる。

木材と構造・材質をいちぢるしく異にする竹材は、横断面において中心柱外側部で異方的収縮を、内側部ではほぼ等方的収縮を示す。この主要な原因は、横断面における維管束の形状・分布および靱皮繊維の割合等、竹材の顕微鏡的構造によるものであり、木材に比較して対照的である。

引 用 文 献

- 1) Bailey, I. W. and M. R. Vestal (1937): Jour. Arno. Arbo., **18**, 185, 196
- 2) Barkas, W. W. (1941): Trans. Farad. Soc., **37**, 535
- 3) Bosshard, H. H. (1956): Holz R. W., **14**, 285
- 4) Desch, H. E. (1948): Timber, its structure and properties, Appendix I, London, P. P. 273/278
- 5) Clarke, S. H. (1930): Forestry, **9**, 93

- 6) Erickson, H. D. (1955) : For. Prod. Jour., 5, 241
- 7) Frey-Wyssling, A. (1940) : Holz R. W., 3, 349
- 8) Greenhill, W. L. (1940) : Div. For. Prod. Coun. Sci. Indu. Res. (Aust.) Pamph. No. 97, 45
- 9) 原田浩・貴島恒夫・梶田茂 (1951) : 木材研究, No. 6, 34
- 10) 井阪三郎 (1943) : 皇室林野局北海道林試彙報, No. 4, 35
- 11) 梶田茂・中戸莞二 (1950) : 日林誌, 32, 346
- 12) 梶田茂・中戸莞二・並木保次 (1953) : 日林誌, 35, 51
- 13) 梶田茂・中戸莞二・金高伸義 (1955) : 日林誌, 37, 153
- 14) Keylwerth, R. (1950) : Holz R. W., 8, 253
- 15) 北村博嗣 (1952) : 新潟大, 農, 学術報告, No. 2, 42
- 16) ————— (1955) : 日林誌, 37, 110
- 17) Kollmann, F. (1951) : Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Erst. Bd., S. 419, München
- 18) McIntosh, D. C. (1954) : Jour. For. Prod. Res. Soc., 4, 39
- 19) ————— (1955) : For. Prod. Jour., 5, 67
- 20) ————— (1955) : For. Prod. Jour., 5, 355
- 21) Mörath, E. (1932) : Studien über die hygroskopischen Eigenschaften und die Härte der Hölzer, Hannover
- 22) 中戸莞二・梶田茂 (1955) : 日林誌, 37, 22
- 23) 中戸莞二 (1958) : 木材学会誌, 4, 94
- 24) ————— (1958) : 木材学会誌, 4, 100
- 25) ————— (1958) : 木材学会誌, 4, 134
- 26) ————— (1958) : 木材学会誌, 4, 183
- 27) ————— (1958) : 木材学会誌, 4, 187
- 28) ————— (1958) : 木材学会誌, 4, 205
- 29) ————— (1958) : 西京大演林集. No. 2, 15
- 30) ————— (1958) : 西京大学術報告, 農. No. 10, 37
- 31) ————— (1958) : 西京大学術報告, 農. No. 10, 45
- 32) ————— (1959) : 西京大演林集. No. 3, 1
- 33) ————— (1959) : 京府大学術報告, 農. No. 11, 95
- 34) ————— (1959) : 京府大学術報告, 農. No. 11, 105
- 35) ——— (1960) : 京府大学術報告, 農. No. 12, 98
- 36) 尾中文彦・原田浩 (1951) : 日林誌, 33, 60
- 37) Pentoney, R. E. (1953) : Jour. For. Prod. Res. Soc., 3, 27
- 38) Preston, R. D. (1934) : Phil. Trans. Roy. Soc., 224, 131
- 39) 関谷文彦 (1933) : 木材工藝学, p. 151, 東京.
- 40) Stamm, A. J. (1952) : Wise, L. H. and Jarn, E. C. : Wood chemistry, Sec. Ed., P. P. 241/250
- 41) 鈴木寧 (1948) : 東大演林報, No. 36, 136
- 42) ————— (1953) : 東大演林報, No. 44, 159
- 43) Tiemann, H. D. (1946) : Wood technology, New York, P. P. 136/168
- 44) 烏海勲 (1948・1949) : 木材工業, 3, 5・6・9・10, 4, 1・4
- 45) Trendelenburg, R. (1939) : Holz R. W., 2, 12
- 46) Vintila, E. (1939) : Holz R. W., 2, 345
- 47) 横田徳郎 (1957) : 木材工業, 12, 377・436・483

Summary

1) The principal cause of anisotropic shrinkage in the transverse section of wood are based upon the cell-wall structure. And the following factors in cell-wall structure for the anisotropic shrinkage are indicated :

- a. the microchemical structure of compound middle lamella in cell-wall
- b. the microchemical structure of amorphous region in secondary wall
- c. the fibril angles in central layer of secondary wall

2) The factors a and b in 1) are closely connected with the contained lignin in cell-wall. And the effect of factors a and b upon the anisotropic shrinkage of wood is larger than the one of factor c.

3) The relation between factor a, and anisotropic shrinkage in transverse section seems to be due to the restraint action of compound middle lamella for the shrinkage of secondary wall in cell-wall. And the relations between factors b or c and anisotropic shrinkage seems to be due to the connections of these factors with the distribution of active hydroxyl groups.

4) The secondary cause of anisotropic shrinkage in the transverse section of wood are based upon the microscopical structure of wood, above all the volumetric proportions of tangential and radial wall of tracheid in the transverse section of spring- and summerwood, the shapes of tracheid cell in the transverse section of spring- and summerwood, the bordered pit in tracheid radial wall of springwood and the volumetric proportion of wood ray in wood.

5) The cause of anisotropic shrinkage in transverse section of bamboo are based upon the microscopic structure, above all the proportion of bundle sheath and the ratio of maximum width in radial direction to the one in tangential direction of a vascular bundle.