

スギおよびヒノキ材の年輪幅による細胞寸法と 年輪構造の変動*¹

藤原新二*²

Changes in Tracheid Dimension and Ring Structure Related to Ring Width in Sugi (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*)*¹

Shinji FUJIWARA*²

The changes in the percentage of latewood, tracheid cross-sectional dimensions, and ring structure related to ring width in sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) were investigated. The percentage of latewood decreased with ring width in both species. The percentage of cell-wall area of boundary cells between earlywood and latewood by Mork's definition was about 67%. Cross-sectional area of sugi had a remarkable decrease in rings of less than 0.4 mm width. Cell-wall thickness of earlywood showed an increase in sugi and a decrease in hinoki in rings of less than 0.4 mm width. Cell-wall thickness of latewood of hinoki had a significant decrease in rings of more than 2 mm width. Percentages of cell-wall areas of rings decreased with increasing ring width in sugi, but in contrast those of hinoki were almost constant in rings of more than 1 mm width. The percentages of cell-wall areas of earlywoods were almost equal to those of latewoods in cases where the percentages of the latewoods of rings of more than 1 mm width were about 18% in sugi and about 21% in hinoki.

Keywords : percentage of latewood, cross-sectional-area of cell, cell-wall thickness, percentage of cell-wall-area.

スギおよびヒノキ材の年輪幅と晩材率および仮道管横断面寸法との関係を明らかにし、年輪幅による年輪構造の変動について検討した。スギおよびヒノキ材ともに晩材率は年輪幅とほぼ反比例の関係が認められた。早・晩材の境の細胞の細胞壁率はスギおよびヒノキ材ともに約67%であった。仮道管の横断面積は年輪幅が減少すると両樹種ともに減少する傾向があり、特に年輪幅0.4 mm以下のスギ材では年輪全体で顕著な減少がみられた。早材の細胞壁厚は年輪幅0.4 mm以下になるとスギ材では増大し、ヒノキ材では減少した。晩材の細胞壁厚はヒノキ材の年輪幅2 mm以上の年輪で有意な減少がみられた。年輪の平均細胞壁率は、スギ材では年輪幅ともに減少するが、ヒノキ材では年輪幅1 mm以上の年輪ではほぼ一定であった。早材と晩材の細胞壁率がほぼ等しくなる晩材率は、スギ材で約18%、ヒノキ材で約21%である。

1. 緒 言

木材の性質が成長状態によってどの様に変動するかという問題は、木材生産者ばかりでなく利用者にとっても重要な問題であり、これまでいろいろな分野で多くの研究が行われている。本研究では針葉樹

*¹ Received October 7, 1994.*² 高知大学農学部 Faculty of Agriculture, Kochi University, Nankoku, Kochi 783

材の基本的な材質指標である比重と密接な関連がある細胞寸法および晩材率について、その変動を年輪幅との関連で調査し、年輪構造が年輪幅によってどのように変動するのかを明らかにしようと考えた。細胞寸法の年輪幅による変動について、田島¹⁾はアカマツ、スギ、ヒノキの細胞寸法と比重との関連を報告している。また、樹冠量を調節して、肥大成長の抑制程度と組織構造との関連を明らかにしようとする研究もみられる²⁾。しかし、細胞寸法は、測定の高難しさもあり、早材あるいは晩材の一部の細胞について、成長状態との関連を見たものがほとんどである。針葉樹材の年輪構造については、佐伯³⁻⁸⁾の一連の研究があり、主として年輪内の細胞寸法の変動を報告している。また、ソフトX線写真とデンシトメータにより年輪内の密度変化の解析が行われている⁹⁻¹¹⁾。この方法は年輪内の密度に関するいろいろな情報を容易に求めることができ、年輪構造の解析には有効な方法であるが、細胞の大きさや壁厚の変化はわからない。また、比重と密接な関連があると考えられる晩材率は年輪幅によって異なっており、年輪幅による年輪構造の変動をみる場合には晩材率の変動と関連づけて考える必要がある。

本研究は、スギおよびヒノキ材の年輪幅と晩材率の関係を明らかにした上で、年輪幅による細胞の横断面積、壁厚、壁率の年輪内の変動を調べ、肥大成長と年輪構造との関連性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材料

我国の主要な造林樹種であるスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don) とヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) を供試木に選んだ。スギ材の仮道管横断面寸法は産地によって異なることが見出されたので¹²⁾、高知県産で近接している林分のスギおよびヒノキ造林材を使用した。スギおよびヒノキの丸太それぞれ10本の胸高部位から円板を採取した。胸高部位での年輪数はスギ42~45年、ヒノキ47~50年であった。各円板より髓から樹皮にかけて連続の横断面切片を作製した。

2.2 晩材率および細胞寸法の測定

これまでの研究で、細胞寸法は年輪幅が約1 mm以下に減少すると、著しく影響を受けることがわかったので¹²⁾、本研究では年輪幅4 mmまでの比較的狭い年輪に限定し、狭い年輪における細胞寸法の変動をより詳しくみるために、年輪幅4 mmまでの全ての年輪を、0~0.4 mm、0.5~0.9 mm、1.0~1.9 mm、2.0~2.9 mm、3.0~3.9 mmの5段階に分け

た。そして、それぞれの年輪幅範囲内の平均晩材率をもとめた。晩材率は成熟材部と考えられる年輪(全ての供試木について髓より20年輪以上の材部とした)の横断面切片から光学顕微鏡で測定した。早・晩材の境の細胞はMork¹³⁾の定義により選定したが、本研究ではDenne¹⁴⁾による公式2に従い、同一の細胞の放射内こう直径が二つの接線壁厚の和に等しい細胞とした。スギおよびヒノキ材の早・晩材の境付近の細胞300個について、その細胞壁率を測定した結果、樹種、年輪幅、細胞の横断面積に関係なく約67%であった。従って、本研究では細胞壁率67%を早・晩材の境とした。次に平均値に近い晩材率をもつ年輪を10個選んだ。細胞寸法を測定する標準的な細胞列の選定は、佐伯⁹⁾の方法に準じ、年輪の接線方向約5 mm幅にある細胞列について、明らかに細胞の先端が現れているとみなされる小さい横断面の細胞列を除いた全ての細胞の平均接線直径を求め、次にその平均値に近い接線直径をもつ細胞列を1年輪当たり3~5列選び、年輪内の細胞の連続走査電子顕微鏡写真(×1000)を撮った。装置の制約により写真から直接、細胞の寸法を測定することができないので、写真の個々の細胞をトレーシングペーパーにトレースし画像解析装置で細胞の横断面積、細胞壁面積、細胞壁率(細胞壁面積/横断面積×100)、接線細胞壁厚を測定した。それぞれの細胞は年輪の初めからの距離を測定し年輪幅の値とから、年輪内の相対的な位置を求めた。

3. 結果と考察

3.1 年輪幅と晩材率の関係

スギおよびヒノキ材の各年輪幅範囲内の平均晩材率をTable 1に示した。スギ、ヒノキ材ともに年輪幅が広くなると、晩材率は減少する傾向を示した。一般的に、針葉樹林の年輪幅と晩材率との関係は反比例するといわれており、スギ材についてもそのよ

Table 1. Variations of percentages of latewoods and average percentages of cell-wall areas of rings.

Ranges of ring width (mm)	Percentages of latewoods		Average percentages of cell-wall areas in rings	
	Sugi	Hinoki	Sugi	Hinoki
0-0.4	22.4	15.7	37.9	35.5
0.5-0.9	19.5	10.5	32.5	32.5
1.0-1.9	16.6	6.4	29.1	29.8
2.0-2.9	12.7	3.7	28.4	30.7
3.0-3.9	11.4	2.5	26.5	29.9

うな反比例の報告が多い¹⁵⁻¹⁸)。ヒノキ材についてもスギ材と同様に年輪幅と晩材率との間に反比例の関係が報告されている^{19,20})。これらの報告では、晩材率の平均値は産地により差異がみられるが、本研究に用いた供試木間には顕著な差異は認められなかった。そして、従来の報告とほぼ近似した年輪幅と晩材率の関係を示した。

3.2 年輪幅による仮道管横断面寸法の変動

スギおよびヒノキ材の仮道管横断面の横断面積、細胞壁厚、細胞壁率の年輪内の変動を Fig. 1~Fig. 3 に示した。これらの図における年輪内の細胞寸法の変動は、年輪幅0.9 mm 以下の年輪については50細胞、年輪幅1.0 mm 以上の年輪については100または200細胞毎の平均値を曲線で結ぶことにより求めた。

スギ材では年輪幅が1 mm 以下になると年輪幅全体で仮道管横断面積が小さくなっていた。しかし、1 mm 以上の年輪では有意な差は認められなかった。ヒノキ材の仮道管横断面積も年輪幅1 mm 以下の年輪で早期の早材部と晩材部で減少する傾向がみられた。又、年輪幅3 mm 以上の年輪では早材部(比較のために、年輪幅の10~49%を早材とした)の横断面積の減少がみられた。しかし、その差はわずか

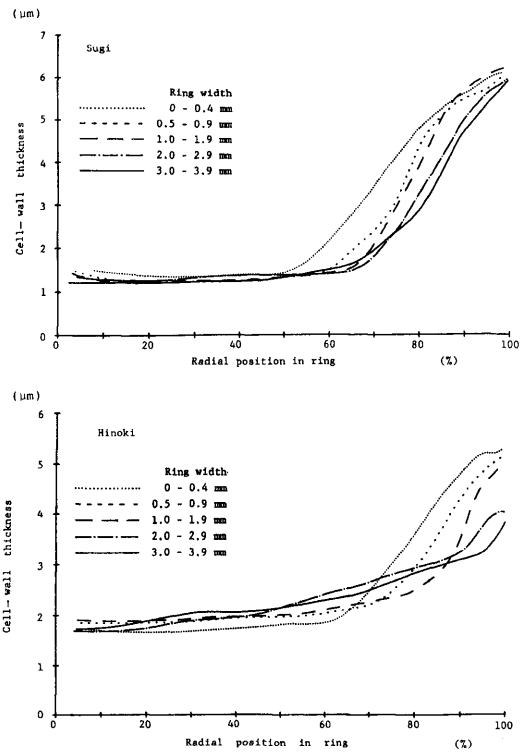


Fig. 2. Variations of cell-wall thicknesses.

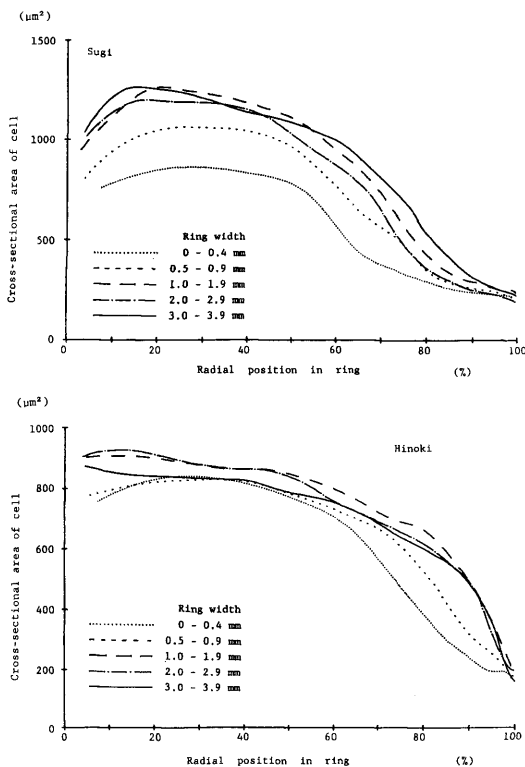


Fig. 1. Variations of cross-sectional areas of cells.

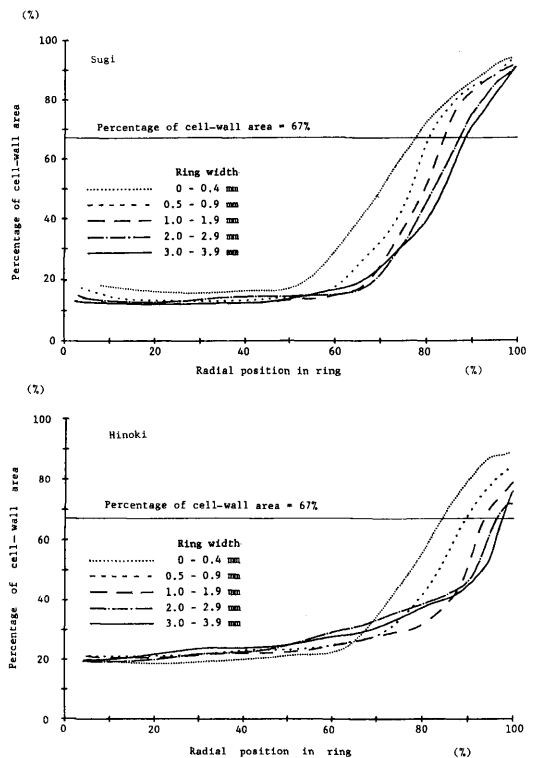


Fig. 3. Variations of percentages of cell-wall areas.

であった。年輪幅1 mm以上の年輪の横断面積は、スギ材では年輪内約60%、ヒノキ材では約80%ぐらいまで漸減した後急激に減少する。スギ材の仮道管横断面積は全体的にヒノキ材よりもかなり大きく、年輪幅による年輪内の変動も大きい。

早材部の細胞壁厚は0.4 mm以下の年輪では、スギ材では最も厚く、ヒノキ材では最も薄くなる傾向がみられた。ヒノキ材の晩材における細胞壁厚は年輪幅2 mm以上の年輪で有意な減少を示した。このような年輪幅の増大に伴って晩材の細胞壁厚が減少する例として、間伐と施肥を同時に行い年輪幅の増大したDouglas-firの晩材細胞で報告されている²¹⁾。肥大成長を著しく促進するような条件の下では、成長後期においても細胞分裂が盛んなために、細胞壁を形成する物質の細胞当たりの量が減少するためではないかと推定される。また、非常に年輪幅の狭い年輪でも、晩材細胞壁が著しく減少するといわれているが²²⁾、スギおよびヒノキ材ともに0.4 mm以下の狭い年輪でその様な晩材細胞壁厚の極端な減少はみられなかった。年輪幅1 mm以上の年輪では、スギ材の早材細胞(年輪幅の約10~60%)の壁厚はほぼ一定であるが、ヒノキ材の壁厚は早材から晩材にかけて徐々に増大する傾向が認められる。

年輪幅0.4 mm以下の年輪の早材細胞壁率はスギ材で最大、ヒノキ材で最小を示した。これはスギ材では年輪幅が狭くなると、細胞の横断面積が減少するとともに、細胞壁厚が増大するためである。ヒノキ材でも細胞の横断面積がわずかに減少するが、細胞壁厚の減少割合の方が大きいため細胞壁率が小さくなった。また、ヒノキ材の晩材では、年輪幅が増大するにつれて細胞壁厚が減少するために、結果として晩材細胞の壁率の減少が認められた。細胞壁率の年輪内の変動をみると、スギ材の早材では比較的一定の値で推移し、その後晩材にかけて急激に増大する。一方、ヒノキ材では年輪幅の80~90%までは徐々に増加する傾向がみられ、細胞壁率の年輪内の変動傾向は樹種の特徴を示している。細胞壁率と比重は高い相関が認められており^{23,24)}、細胞壁率の変動は近似的には比重の変動とみることができる。そして、この細胞壁率²⁵⁾および比重²⁶⁾の年輪内の変動パターンは品種固有の特徴があることも報告されており、肥大成長に対する細胞寸法の反応は樹種あるいは品種によって異なるものと考えられる。他の樹種についてみると、Norway spruceでは年輪幅と細胞直径あるいは細胞壁厚とは相関がみられなかった^{27,28)}。red woodの細胞直径と壁厚は、年輪幅の増大とともに早材細胞では増大したが晩材細胞は減少

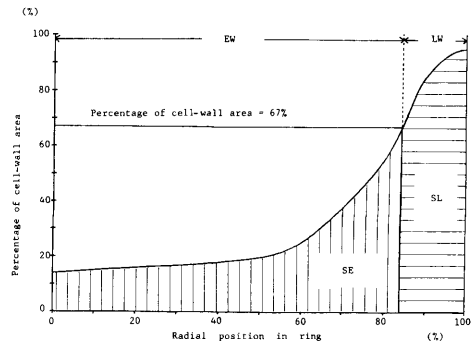


Fig. 4. Schematic diagram of variations of percentages of cell-wall area in a ring.

Legend: EW: Earlywood width, LW: Latewood width, SE: Percentage of cell-wall area in earlywood, SL: Percentage of cell-wall area in latewood.

したと報告されている²⁹⁾。また、Douglas-firでは細胞直径と年輪幅とは正の相関がみられているが³⁰⁾、*Abies pindrow*では負の相関が報告されている³¹⁾。

Fig. 4は年輪内の細胞壁率の変動を模式的に示したものである。佐伯⁵⁾は針葉樹材の細胞壁率を測定し、Morkの定義による早・晩材の境の細胞の細胞壁率を49~56%であると報告している。そこで、比較のために隣接する細胞の重複接線壁厚が放射内こう径と等しい細胞を早・晩材の境の細胞とした場合の細胞壁率を、スギおよびヒノキ材それぞれ100個の細胞について測定した。平均値はスギ材66.8%、ヒノキ材67.5%であった。同一の細胞の壁厚と内こう径を用いる方法と重複細胞壁厚を用いる方法で選定した早・晩材の境の細胞の大部分は重複しており、2つの方法による細胞壁率の平均値は近似した値を示した。このような細胞の形態とは別に、密度を基準に早・晩材を区分することが提唱されており、スギ⁹⁾、アカマツ⁹⁾、ツガ³²⁾、アカエゾマツ³³⁾では0.55 g/cm³、カラマツ³⁴⁾では0.56 g/cm³が早・晩材の境界として設定されている。本研究で求められた早・晩材の境の細胞壁率67%と密度0.56 g/cm³の関係については今後検討してみたい。年輪の平均細胞壁率は細胞壁率の年輪内変動曲線とX軸で囲まれた面積であり、早材の細胞壁率(SE)および晩材の細胞壁率(SL)は、細胞壁率67%を境にして、細胞壁率の変動曲線とX軸で囲まれた部分の面積である。この様にして求めたそれぞれの年輪幅範囲における年輪の平均細胞壁率をTable 1に示した。また、年輪幅による早材と晩材の細胞壁率の変動をFig. 5に示した。スギ材では年輪幅が1 mm以下になると年輪

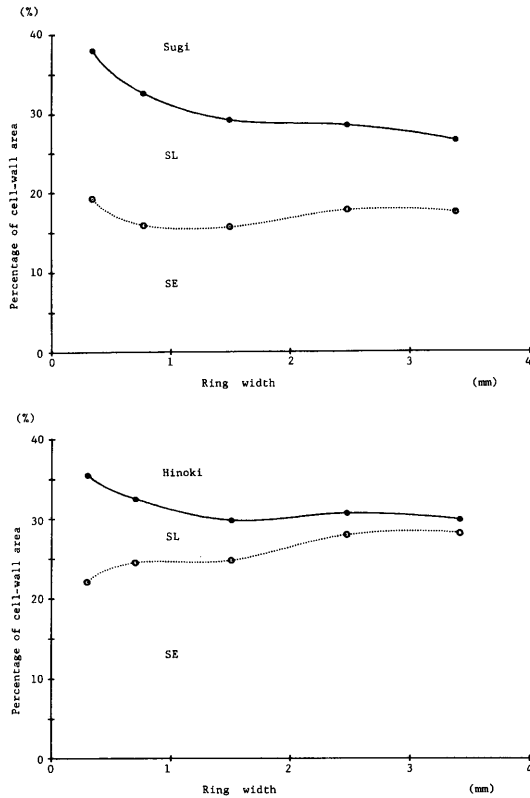


Fig. 5. Relationships between ring width and percentages of cell-wall areas in earlywoods and latewoods.

Legend: SE: Percentages of cell-wall areas in earlywoods, SL: Percentages of cell-wall areas in latewoods.

の細胞壁率は急激に増大している。これは、晩材率が増大するためで、晩材仮道管壁面積が全体の面積の50%に達していた。ヒノキ材でも年輪幅1mm以下の年輪では年輪の平均細胞壁率は増大するがスギ材ほど顕著ではない。ヒノキ材は年輪幅が1mm以下に減少しても晩材率は小さく、年輪内の晩材の細胞の全体に占める割合は40%以下である。年輪幅2mm以上の年輪では、早材の細胞壁率(SE)の占める割合は、スギ材では62~66%、ヒノキ材では91~94%であった。

Fig. 3に見られるように、スギおよびヒノキ材ともに年輪幅0.4mm以下の年輪では早材の細胞壁率に差異が見られるので、0.5mm以上の年輪について年輪幅に対する晩材幅の割合として表現される晩材率(PL)と晩材の細胞壁率(SL)との関係を見ると、スギ($y = -0.323 + 0.852x$, $r = 0.998$), ヒノキ($y = -0.127 + 0.780x$, $r = 0.999$)ともに両者の間に

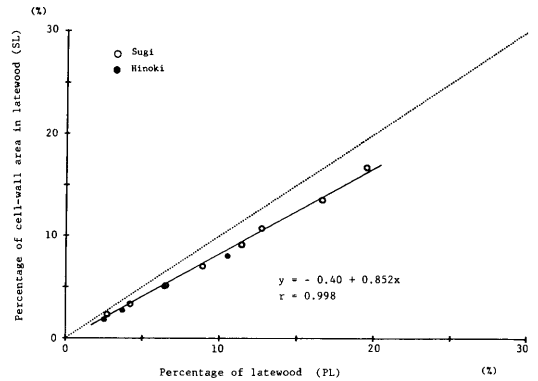


Fig. 6. Relationships between percentages of latewoods (PL) and percentages of cell-wall areas in latewoods (SL).

Note: Dotted line denotes $PL = SL$.

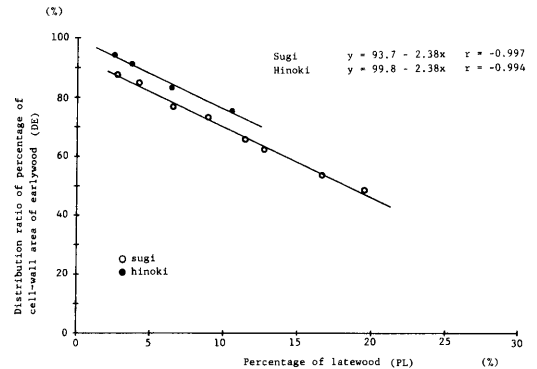


Fig. 7. Relationships between percentages of latewoods (PL) and cell-wall areas of earlywoods (DE).

Note: $DE = SE / (SE + SL) \times 100$.

は高い相関が認められた。また、それぞれの回帰式は近似しており、Fig. 6に示したように同一の回帰式で表すことができた。図中の破線は $PL = SL$ を表している。晩材率でもとめる晩材の量よりも実際の晩材の量の方がわずかに高い値を示しており、その差は晩材率が高い年輪ほど大きくなると推定される。

一般的に針葉樹材では材の比重は晩材率に比例するが、スギやヒノキ材では晩材率が小さく、早材の比重が年輪の比重を支配しているといわれている^{1,35,36}。そこで、早材の細胞壁率の構成割合(DE)と晩材率との関係を見たのが、Fig. 7である。スギ、ヒノキ材ともに高い負の相関があり、かつ両樹種の回帰直線は平行しているのが認められた。ヒノキ材では早材と晩材の細胞壁率の差がスギ材よりも小さ

く、同一晩材率で比較すると、早材の細胞壁の割合が高い。また、ヒノキ材では、年輪幅の増大に伴って晩材仮道管の壁厚および細胞壁率が減少するが、晩材率が小さいために年輪の平均細胞壁率への影響は小さい。この回帰式から早材の細胞壁率の割合が50%以下になる晩材率を求めると、スギ材は19%、ヒノキ材は21%となる。Table 1から明らかなように、両樹種ともにこれ以上の晩材率を有する年輪は、平均的には年輪幅1 mm以下の極めて肥大成長の悪い年輪となり、造林木で一般的にみられる1 mm以上の年輪では早材の比重が年輪の比重を支配することが、細胞壁率の点からも明らかである。しかし、スギ材の晩材率は品種的な特徴を示し、高い晩材率をもつ品種があるとともに、容積密度数と高い相関がみられることから材質育種の際の指標になるという報告^{25,37)}もみられるので、今後は年輪構造を品種的な面からも検討してみたい。年輪幅の変異による年輪構造の変動はスギ材で大きく、ヒノキ材で小さい。両樹種ともに年輪幅1 mm以下になると細胞寸法の変動が大きくなる。年輪幅による細胞寸法の変動からみて、年輪幅2~4 mmの年輪では細胞寸法は比較的安定している。特に、ヒノキ材では年輪幅2 mm以上では晩材仮道管の壁厚が減少するために年輪内の細胞壁率の変動はよりゆるやかになる。

文 献

- 1) 田島俊雄：東京教育大学農学部紀要，**13**，65-210 (1967)。
- 2) 久保隆文：木材学会誌，**29**(11)，725-730 (1983)。
- 3) 佐伯 浩：鳥取農学会報，**15**，57-61 (1963)。
- 4) 佐伯 浩：木材学会誌，**9**(6)，231-236 (1963)。
- 5) 佐伯 浩：同上，**9**(6)，237-243 (1963)。
- 6) 佐伯 浩：同上，**11**(1)，1-6 (1965)。
- 7) 佐伯 浩：同上，**11**(5)，185-190 (1965)。
- 8) 佐伯 浩：鳥取農学会報，**19**，131-135 (1967)。
- 9) 太田貞明：木材学会誌，**24**(7)，429-434 (1978)。
- 10) 太田貞明：同上，**25**(9)，561-566 (1979)。
- 11) 太田貞明：同上，**27**(3)，157-162 (1981)。
- 12) Fujiwara, S.: *IWA Bulletin n.s.*, **11**(1), 97-101 (1990)。
- 13) Mork, E.: *Der Papier-Fabrikant*, **26**, 741-747 (1928)。
- 14) Denne, M. P.: *IWA Bulletin n.s.*, **10**, 59-62 (1989)。
- 15) 酒田金治, 佐伯 浩：木材学会誌，**4**(6)，231-236 (1958)。
- 16) 加納 孟：林業試験場研究報告，**125**，95-119 (1960)。
- 17) 加納 孟：同上，**134**，115-139 (1961)。
- 18) 深沢和三：岐阜大学農学部研究報告，**25**，47-127 (1967)。
- 19) 矢沢亀吉：材料，**12**，678-683 (1963)。
- 20) 久保隆文, 藤田正三, 蕪木自輔：東京農工大学農学部演習林報告，**14**，11-16 (1978)。
- 21) Brix, H.; Mitchell, A. K.: *Can. J. For. Res.*, **10**(2), 121-128 (1980)。
- 22) 佐伯 浩, 河毛真智子：木材学会誌，**26**(11)，707-713 (1980)。
- 23) 佐伯 浩：同上，**8**(1)，19-25 (1962)。
- 24) 久保隆文, 蕪木自輔：第29回日本木材学会大会研究発表要旨集，208 (1979)。
- 25) 長尾博文, 見尾貞治, 堤 壽一：九州大学農学部演習林報告，**55**，201-211 (1985)。
- 26) 矢幡 久ほか10名：同上，**57**，149-173 (1987)。
- 27) Stairs, G. R.; Marton, R.; Brown, A. F.; Rizzio, M.; Petrik, A.: *Tappi*, **49**, 296-300 (1966)。
- 28) Petrik, A. W.: *For Prod. J.*, **18**, 62 (1968)。
- 29) Gray, R. L.: *Tappi*, **54**, 989 (1971)。
- 30) Bannan, M. W.: *Can. J. Bot.*, **42**, 603-631 (1964)。
- 31) Ahmad, S. S.: *Pakistan J. For.*, **20**, 89-109 (1970)。
- 32) 太田貞明：木材工業，**25**，131-133 (1970)。
- 33) 野掘嘉裕ほか5名：日本林学会誌，**73**(5)，339-343 (1991)。
- 34) 野掘嘉裕, 永田義明, 千葉 茂：第99回日本林学会大会発表論文集，239-240 (1988)。
- 35) 矢沢亀吉, 深沢和三, 梅村節夫：木材学会誌，**3**(3)，91-95 (1957)。
- 36) 矢沢亀吉, 深沢和三：北海道大学農学部演習林報告，**20**(1)，93-117 (1959)。
- 37) 小田一幸, 古賀信也, 堤 壽一：九州大学農学部演習林報告，**58**，109-122 (1988)。