

## 広葉樹材の構造と誘電率の異方性\*

西野 吉彦\*\*・則元 京\*\*\*

### Structure and Anisotropy of Dielectric Constant in Hardwood\*

Yoshihiko NISHINO\*\* and Misato NORIMOTO\*\*\*

(平成2年8月1日受理)

The dielectric constants in the three principal directions of hardwood were evaluated on the basis of the rule of mixture using the models in which proportions of the chemical constituents in the cell wall substance and various anatomical structures in hardwoods were taken into account, and the effects of the structure on the dielectric anisotropy were discussed. The dielectric constant in the longitudinal direction was greater than those in the transverse directions as is generally recognized. In the transverse directions, the dielectric constant in the radial direction was slightly greater than that in the tangential direction, and this mainly depended on arrangement of vessels, percentage of ray element, and irregular array of wood fibers. The estimated values were in satisfactory agreement with the experimental ones and could express the dielectric anisotropy in hardwood.

#### 概 要

広葉樹材の3主軸方向の誘電率を、細胞壁を構成する化学成分の割合と広葉樹材の多様な組織構造が考慮されているモデルを用いて、混合則に基づいて算出し、組織構造が誘電率の異方性に及ぼす影響について考察した。一般に認められているように、繊維方向の誘電率は、繊維に直角方向のそれらに比べて大きい値を示した。放射方向と接線方向については、概して放射方向の値が大きく、両方向の差は、木材の横断面における道管の配列、放射組織の占める割合、木繊維の配列のみだれなどに依存していることが明らかになった。計算値は、実験値と比較的によく一致し、広葉樹材の誘電率の異方性を表現することができた。

#### 1. 緒 言

木材のような多成分系の直交異方性固体の誘電率を巨視的構造から分子・原子段階に至るあらゆる段階の構造と関連づけて理論的に算出することは、現時点では不可能に近い。しかし、現在までに蓄積されている各木材構成成分の誘電率の測定値を用いて、混合則を基礎とすることによって、細胞壁の微細構造から巨視的な木材の組織構造に至る構造の範囲で、木材の誘電率と構造を関係づけることは可能であろう。

\* 本研究の一部は、第38回日本木材学会大会(1988年7月、旭川)にて発表した。

\*\* 島根大学 (Faculty of Agriculture, Shimane University, Matsue, Shimane 690)

\*\*\* 木材物理部門 (Research Section of Wood Physics)

Key Words : Dielectric constant, Mixture rule, Hardwood, Anatomical structure, Dielectric anisotropy

一般に、木材の誘電率は、繊維方向で最も大きく、放射方向と接線方向では、やや放射方向で大きい場合が多い。その原因を、木材の細胞壁の構造および組織構造と結びつけて考察することができる。木材の構造は、特に組織構造の段階において樹種または個体間でさまざまであるため、誘電率を算出するために用いる構造モデルは、これらを十分表現できるものでなければならない。特に、広葉樹材においては、針葉樹材に比べ構造がより複雑なため、単純化を重ねていく中で、構造の特徴が適確に盛り込まれていなければならない。

広葉樹材は、組織的には、道管、木繊維、放射組織などから構成されている。そして、道管の配列によって、散孔材、環孔材、放射孔材などに分類される。放射組織の分布・割合などによっても、樹種それぞれの特徴をもっている。したがって、広葉樹材の誘電率を求めるための構造モデルは、このような一般的に捉えられている組織構造の特徴に対応できる視覚的なものであることが望ましい。

これまでにも、木材の誘電率の異方性に関するいくつかの研究がある。KRÖNER<sup>1)</sup>、TRAPP<sup>2)</sup>、上村<sup>3)</sup>、中戸<sup>4)</sup>らは、木材を細胞壁物質と空気より成る単純な積層体あるいは構造体に近似して、誘電率の異方性について考察している。しかし、木材の細胞壁における微細構造や組織構造をより現実に近い状態にまで取り入れて木材の誘電率と構造の関係を考察した研究はない。本報において、まず、広葉樹材を構成する化学成分の種々の相対湿度における誘電率のデータを基に、細胞壁物質の誘電率を求める。つぎに、広葉樹材の組織構造モデルを構築し、それを用いて材全体の誘電率を算出し、組織構造と誘電率にみられる異方性について考察する。最後に、ミズメ材 (*Betula grossa*) について求めた実験データと、それを想定して計算した値との比較を行い、モデルの妥当性を検討する。

## 2. 木材の構造のモデル化と誘電率の算出

### 2.1 細胞壁モデル

細胞壁モデルについて、Fig. 1A に示すものを仮定する。このモデルは、結晶部分 ( $c$ ) と非晶部分 ( $n$ ) からなるマイクロフィブリルと、それを取りまくマトリックス物質 ( $M$ ) で構成されている。ここでは、図に示すような、1-, 2-, 3-軸をもつ直交座標系を用いる。マイクロフィブリルを構成するセルロース分子は、細胞壁の繊維方向 ( $L$  方向) と  $\theta$  の角度をもち1-方向に平行に配向している。また、マイクロフィブリルの横断面 (2-3面) は、正方形であると仮定している。Fig. 1B には、計算のための単位モデルを示す。図中の記

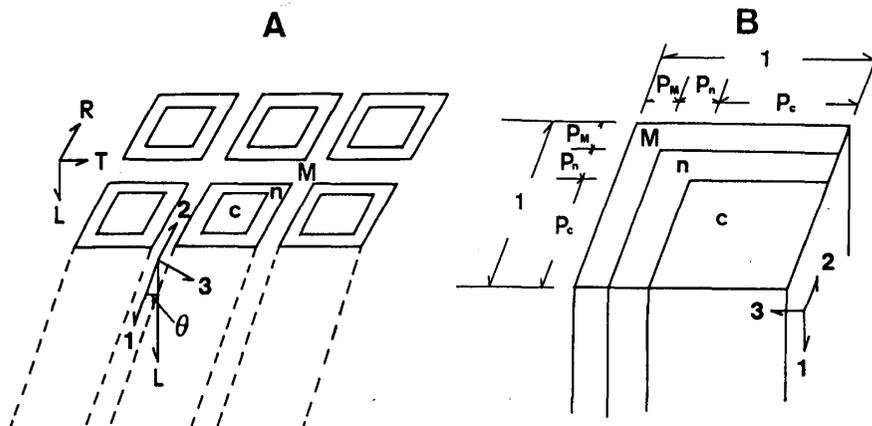


Fig. 1. A. Cell wall model ( $c$ : crystalline region,  $n$ : noncrystalline region,  $M$ : matrix,  $\theta$ : average microfibril angle), B. Unit cell wall model. Note:  $P_c$ ,  $P_n$  and  $P_m$  show length fractions of  $c$ ,  $n$  and  $M$ , respectively.

号は、長さ分率を表す。

## 2.2 化学構成成分の体積分率

代表的な国産樹種についての木材構成成分の重量分率が文献に示されているので、それらと各成分の比重より、成分の体積分率を計算することができる。右田<sup>6)</sup>は、代表的な広葉樹材の化学構成成分の重量分率を示している。ここでは、それらの平均を用いることによって、広葉樹材を代表させることとした。まず、計算の都合上、リグニンの平均の重量分率を22.4%と定めた。ついで、残りの77.6%を3つの多糖類、セルロース、マンナン、ペントザンに振り分けた。一般に、広葉樹材のヘミセルロースは、ガラクトグルコマンナンとアラビノグルクロノキシランの2種類からなる。ここで、広葉樹材の糖分析のデータを用い、おおまかに、マンナンはマンノースとガラクトースの合計、またペントザンはキシロースとアラビノースの合計を用いることにする。このようにして得られるセルロース、マンナン、ペントザンの木材全体に対する重量分率は、それぞれ、48.1, 3.8, 25.7%である。

セルロースは、結晶部分と非晶部分に分けることができる。それぞれの重量分率を求めるためには、木材セルロースの結晶化度を知ることが必要である。天然セルロースの比重は 1.550 (比容  $\Psi=0.6452$ )<sup>7)</sup> であり、その吸着比 ( $SR$ ) は1.000と定義されている。セルロース I の結晶の比重は 1.592 ( $\Psi_c=0.6281$ )<sup>7)</sup> なので、非晶セルロースの比重 1.469 ( $\Psi_n=0.6806$ ) が、 $SR=(\Psi_n-\Psi_w)/(\Psi-\Psi_c)$  (ただし  $SR=3.070$ )<sup>9)</sup> より導かれる。

木材セルロースの結晶化度  $\alpha$  は、 $\alpha=(\Psi_n-\Psi_w)/(\Psi_n-\Psi_c)$  より 0.58 と計算される。ただし、 $\Psi_w$  は木材セルロースの比容で、0.6502<sup>7)</sup> と見積もられる。結晶セルロースと非晶セルロースの重量割合はそれぞれ 58, 42%となり、木材全体に対する結晶セルロース、非晶セルロース、マンナン、ペントザン、リグニンの重量分率は、それぞれ 27.9, 20.2, 3.8, 25.7, 22.4% となる。

ヘミセルロースの比重は、化学構造や物理的性質の類似している点が多いことから、非晶セルロースのそれと同じ 1.469 と仮定する。リグニンの比重については、1.340 と報告されている<sup>10)</sup>。いま、1g の広葉樹材を考えると、結晶セルロース、ヘミセルロースを含む非晶セルロース、リグニンのそれぞれの重量は、0.279, 0.497, 0.224 g で、それぞれの占める体積は、0.1753, 0.3383, 0.1672 cm<sup>3</sup> となる。1g の木材の体積は 0.6808 cm<sup>3</sup> となり、全乾状態の木材実質の比重 1.469 が得られる。

それぞれの構成要素は、ある相対湿度において、異なった吸湿量と膨潤量を示す。したがって、体積分率は、それぞれの相対湿度において、修正しなければならない。非晶セルロースとリグニンの種々の相対湿度

**Table 1** Estimated volume fractions  $\delta$  of chemical constituents in hardwood at various relative humidities (H).

H (%)	crystalline cellulose $\delta_c$ (%)	noncrystalline cellulose $\delta_a$ (%)	mannan $\delta_m$ (%)	pentosan $\delta_p$ (%)	lignin $\delta_l$ (%)
0	0.257	0.202	0.038	0.257	0.246
10	0.246	0.208	0.038	0.265	0.243
20	0.241	0.211	0.040	0.268	0.240
30	0.238	0.214	0.039	0.271	0.238
40	0.234	0.216	0.040	0.274	0.236
50	0.230	0.218	0.041	0.277	0.234
60	0.225	0.220	0.042	0.280	0.233
70	0.219	0.223	0.043	0.284	0.231
75	0.216	0.226	0.042	0.286	0.230

での重量増加は、それぞれの吸着等温線により与えられている<sup>11,5)</sup>。また、結晶セルロースは、いかなる相対湿度においても吸湿を示さないものと考え、それぞれの相対湿度における各構成成分の重量分率が求められる。

ここで、吸湿による化学構成要素の体積増加は、吸着水の体積分に等しいと仮定すると、STAMM<sup>12)</sup>の報告している吸着水の比重を用いて、それぞれの相対湿度での比重を計算することができる。こうして得られた重量分率と比重より、Table 1 に示す化学構成要素の各相対湿度での体積分率を得た。

### 2.3 細胞壁要素の誘電率

Fig. 1 b の細胞壁の単位モデルを用いて、木材実質の誘電率を計算するためには、化学構成成分の誘電率が必要となる。前報において<sup>5)</sup>、20°C、1 MHz でのセルロースの誘電率を求めた。この場合、セルロースの誘電率の異方性は、可視光線領域の屈折率に異方性があることによるものと仮定している。結晶セルロースの 1-, 2-, 3-方向の誘電率は、相対湿度にかかわらず、それぞれ 4.25, 4.01, 4.01 である。マンナンは、非晶セルロースと密接にむすびついて木材中の非晶領域を形成していると考え、それらの構造的類似性も考慮した上で、同等のものとする。ペントザンの絶乾状態での誘電率は、メチロール基による緩和過程が存在しないという点で、結晶セルロースのそれにほとんど等しいと考えることができる<sup>13)</sup>。リグニンの各相対湿度での誘電率は、MWL について実験的に求められている<sup>14)</sup>ものを用いる。それぞれの化学構成成分の各相対湿度での誘電率は、2つの種類の吸着水、すなわち、水和水と溶解水のそれぞれの比極より計算し

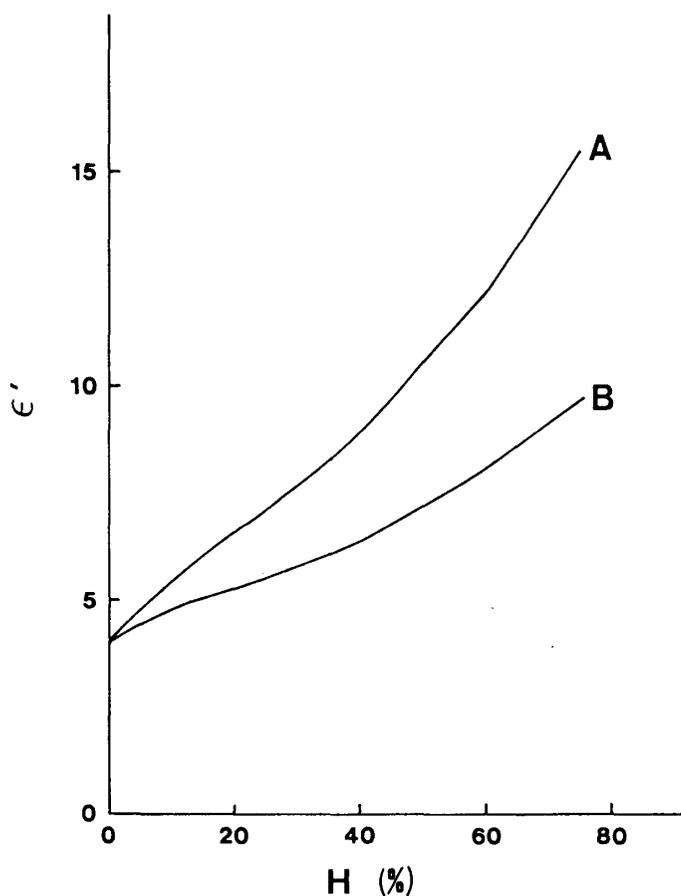


Fig. 2. Relative humidity dependence of dielectric constants of matrix at 20°C and 1 MHz (A: Hardwood matrix, B: Coniferous wood matrix)

た<sup>15)</sup>。

細胞壁中のマトリックスは、リグニンとその中に球状に分散しているペントザンからなると仮定し、そのような系の誘電率を、BRUGGEMANN の式を用いることによって、計算することができる<sup>15)</sup>。Fig. 2 に、広葉樹材と針葉樹材のマトリックスの誘電率<sup>3)</sup>を計算して比較している。広葉樹材と針葉樹材とでは、リグニンとペントザンの構成比が異なるので、誘電率の値も異なる。リグニンよりも多くの水分を吸着することのできるペントザンが多い分、広葉樹材のマトリックスの誘電率が高くなっている。Table 2 に、各相対湿度での非晶セルロースとマンナン、リグニン、ペントザン、および広葉樹材のマトリックスの誘電率を示す。

**Table 2** Estimated dielectric constants of chemical constituents and matrix in hardwood at various relative humidities (H).

H (%)	noncrystalline cellulose and mannan in 1-direction $\epsilon_{n1}$	noncrystalline cellulose and mannan in 2-direction $\epsilon_{n2}$	lignin $\epsilon_1$	pentosan $\epsilon_p$	matrix $\epsilon_M$
0	8.21	8.00	4.04	4.01	4.02
10	10.73	10.51	4.45	6.52	5.46
20	12.87	12.63	4.70	8.64	6.56
30	14.99	14.73	4.95	10.78	7.63
40	17.48	17.24	5.25	13.28	8.86
50	20.64	20.37	5.80	16.49	10.52
60	24.02	23.74	6.30	19.88	12.19
70	28.32	28.00	7.00	24.15	14.37
75	30.58	30.33	7.30	26.48	15.49

#### 2.4 細胞壁の誘電率

化学構成成分の体積分率と、1-, 2-, 3-の各方向の誘電率の値が得られると、Fig. 1 B の細胞壁の単位モデルを用いて、細胞壁の誘電率を求めることができる。誘電率を求めるにあたり、混合則を用いて計算を行なう。1-, 2-, 3-方向の細胞壁の誘電率  $\epsilon_{MF1}$ ,  $\epsilon_{MF2}$ ,  $\epsilon_{MF3}$  は、次の式によって求めることができる。

$$\epsilon_{MF1} = \delta_c \cdot \epsilon_{c1} + (\delta_n + \delta_m) \cdot \epsilon_{n1} + (\delta_p + \delta_1) \cdot \epsilon_M, \quad (1)$$

$$\epsilon_{MF2}^{-1} = \epsilon_{MF3}^{-1} = P_n \cdot \epsilon_{Pc}^{-1} + P_n \cdot \epsilon_{Pn}^{-1} + P_M \cdot \epsilon_{PM}^{-1}, \quad (2)$$

ここに、 $\epsilon_{Pc}^{-1} = P_c \cdot \epsilon_{c2}^{-1} + P_n \cdot \epsilon_{n2}^{-1} + P_M \cdot \epsilon_M^{-1}$ ,

$$\epsilon_{Pn}^{-1} = (1 - P_M) \cdot \epsilon_{n2}^{-1} + P_M \cdot \epsilon_M^{-1},$$

$$\epsilon_{PM} = \epsilon_M,$$

$$P_c = \sqrt{\delta_c},$$

$$P_M = 1 - \sqrt{\delta_c + \delta_n + \delta_m},$$

$$P_n = 1 - (P_c + P_M).$$

$\epsilon_{c1}$  と  $\epsilon_{c2}$  は、それぞれ結晶セルロースの 1- および 2- 方向の誘電率、また、 $\epsilon_{n1}$  および  $\epsilon_{n2}$  は、非晶セルロースのそれら、また、 $\epsilon_M$  は、マトリックスの誘電率である。 $P_c$ ,  $P_M$ ,  $P_n$  は、Fig. 1 B 中の単位モデルの長さ分率を表している。結晶セルロース、非晶セルロース、マンナン、ペントザン、リグニンの体積分率をそれぞれ  $\delta_c$ ,  $\delta_n$ ,  $\delta_m$ ,  $\delta_p$ ,  $\delta_1$  で表している。計算は、各相対湿度について行なう。

木繊維のモデルを構築するにあたり、その細胞壁の層構造を考慮に入れることが必要である。しかし、その大部分は、2次壁の中層 ( $S_2$ 層) で占められており、したがって、モデルの単純化のために、細胞壁は

一定のフィブリル角  $\theta$  をもつ単純な単一層構造をもつものとした。

木繊維の誘電率の異方性を考えるとき、マイクロフィブリルが繊維軸に対して一定の角度をもって螺旋状に走行している構造を、考慮に入れなければならない。L 方向については、次式によって誘電率を算出した。

$$\epsilon_{cwL} = \epsilon_{MF}(\theta), \quad (3)$$

ここに、 $\epsilon_{MF}(\theta)^{-1} = \cos^2 \theta \cdot \epsilon_{MF1}^{-1} + \sin^2 \theta \cdot \epsilon_{MF2}^{-1}$  とする。

繊維に直角方向の誘電率に関しては、次の2つの極端な場合、つまり電場がマイクロフィブリルの走行に対して、直角に作用する場合、もう1つは、 $90^\circ - \theta$  の角度に作用する場合を考えて、その中間値を採用することにする。したがって、繊維直角方向の木繊維細胞壁の誘電率は、次のように表される。

$$\epsilon_{cwT} = \frac{\epsilon_{MF2} + \epsilon_{MF}(90^\circ - \theta)}{2}, \quad (4)$$

$$\text{ここに、} \frac{1}{\epsilon_{MF}(90^\circ - \theta)} = \frac{\cos^2(90^\circ - \theta)}{\epsilon_{MF1}} + \frac{\sin^2(90^\circ - \theta)}{\epsilon_{MF2}}$$

典型的な広葉樹材の平均的なフィブリル傾角として、 $\theta = 13^\circ$  を採用して計算した。広葉樹材の木繊維細胞壁の繊維方向と繊維直角方向の各相対湿度での誘電率の値を Table 3 に示す。

**Table 3** Calculated dielectric constants of cell wall with a microfibril angle of  $13^\circ$  in hardwood at various relative humidities (H)

H (%)	longitudinal direction $\epsilon_{cwL}$	transverse direction $\epsilon_{cwT}$
0	5.60	4.68
10	6.42	5.84
20	7.54	6.72
30	8.62	7.54
40	9.90	8.49
50	11.58	9.72
60	13.34	10.97
70	15.65	12.60
75	16.87	13.64

## 2.5 木繊維の誘電率

木繊維の L 方向と R 方向の誘電率  $\epsilon_{fL}$ ,  $\epsilon_{fR}$  を求めるためのモデルを Fig. 3A に示す。このモデルにおいて、木繊維の断面は正方形で、円形の内孔をもつものと仮定している。 $\epsilon_{fL}$  および  $\epsilon_{fR}$  は、次の式によって計算される。

$$\epsilon_{fL} = \frac{\pi r_f^2}{4} \epsilon_{air} + \left(1 - \frac{\pi r_f^2}{4}\right) \epsilon_{cwL}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{fR} = (1 - r_f) \epsilon_{cwT} + r_f \int_0^1 \left( \frac{r_f \sqrt{1-x^2}}{\epsilon_{air}} + \frac{1 - r_f \sqrt{1-x^2}}{\epsilon_{cwT}} \right) dx, \quad (6)$$

ここに、 $r_f$  は、細胞内孔の半径を相対的に表したもので、 $\epsilon_{air}$  は、空気の誘電率である。

前報<sup>3)</sup>で、細胞の不規則な配列が、針葉樹材の誘電率の異方性に大きく影響することが明らかになった。そこで、広葉樹材においても、接線方向の誘電率を計算するにあたって、木繊維の細胞配列のずれ  $Z_t$  を考

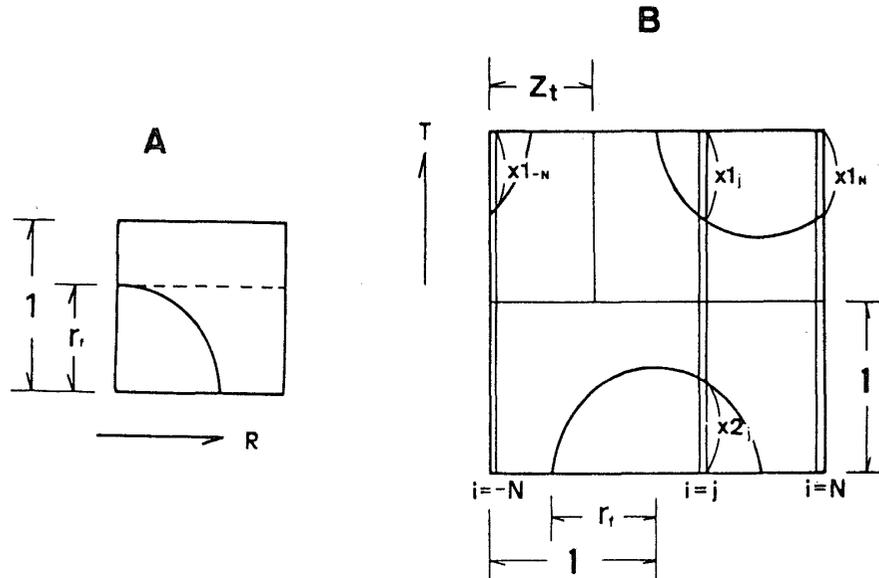


Fig. 3. A. Unit model for calculating  $\epsilon_{fR}$  and  $\epsilon_{fT}$  ( $r_f$ : fractional radius of lumen), B. Unit model for calculating  $\epsilon_{tT}$  ( $Z_t$ : parameter indicating irregular array of cells)

慮に入れた。Fig. 3 B に、木繊維の接線方向の誘電率  $\epsilon_{fT}$  を計算するための繰り返し基本単位を模式的に示す。計算は、次に示す手順で行なった。

$$\epsilon_{fT} = \frac{1}{2N} \sum_{i=-N}^N \frac{1}{(x1_i + x2_i)(2\epsilon_{air})^{-1} + \{2 - (x1_i + x2_i)\}(2\epsilon_{cwT})^{-1}} \quad (7)$$

$$r_1 > 0 \text{ のとき, } x1_i = \sqrt{r_1}$$

$$r_2 > 0 \text{ のとき, } x1_i = \sqrt{r_2}$$

$$r_1 \leq 0 \text{ かつ } r_2 \leq 0 \text{ のとき, } x1_i = 0.$$

$$r_3 < 0 \text{ のとき, } x2_i = \sqrt{r_3}, \text{ それ以外は } x2_i = 0.$$

$$\text{ここに, } r_1 = r_f^2 - (x + 2 - Zt)^2,$$

$$r_2 = r_f^2 - (x - Zt)^2,$$

$$r_3 = r_f^2 - x^2.$$

$$\text{ただし, } x = i/N.$$

$N$  の値は、 $\epsilon_{fT}$  が収束するよう、十分大きな値とした。

## 2.6 広葉樹材モデル

広葉樹材の誘電率を得るための道管、木繊維、放射細胞からなるモデルを Fig. 4 に示す。このモデルでは、道管が、多数の木繊維の細胞からなる方形の板にあげられた穴として表現されている。道管自身の細胞壁は、その寄与が小さいものとして、考慮には入れられていない。しかし、誘電率に与える道管の影響は、このような方法でよく表現されるものと思われる。放射細胞の細胞壁については、木繊維のものとは、実際には異なった構造をとっているものと思われる。しかし、それに関する正確な情報を欠いているので、ここでは、便宜上繊維の軸が放射方向を向いている点を除いては、木繊維と同一とした。さまざまな広葉樹材の特徴は、モデルの中のパラメータを変化させることによって表現できる。パラメータと構造の関係の一部は、次の式によって表される。

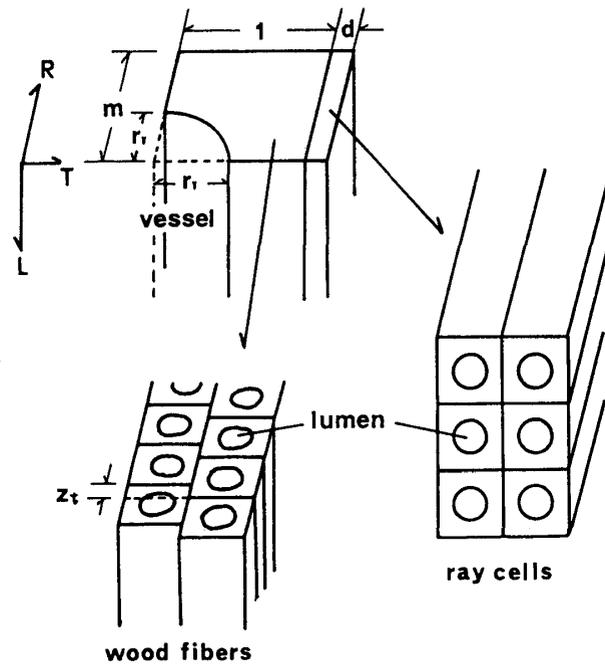


Fig. 4. Hardwood model ( $r_v$ : fractional radius of vessel,  $m$ : parameter indicating arrangement of vessels,  $d$ : proportion of ray element in the tangential direction)

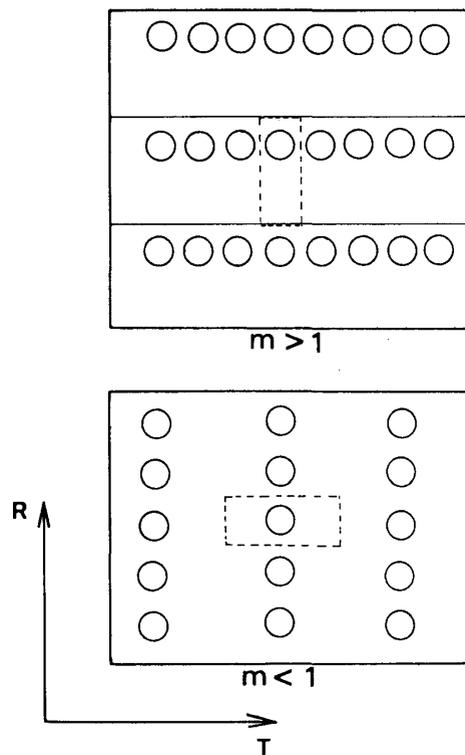


Fig. 5. Schematic model of  $m$ , a parameter to explain the distribution of vessels.

$$r_v = \sqrt{\frac{4ma}{\pi(a+b)}} \quad (8)$$

$$d = \frac{c}{1-c} \quad (9)$$

ここに、 $a, b, c$  は、それぞれ広葉樹材中の道管、木繊維、放射組織の体積分率である。図中の  $m$  は、道管の配列を表すパラメータである。 $m$  が 1 より十分大きいとき、道管は、接線方向に配列する傾向を示す。逆に、1 より小さくなると、半径方向に配列する。Fig. 5 は、横断面における道管の配列に与える  $m$  の値の影響を模式的に表したものである。この値を用いることによって、広葉樹材の散孔材や環孔材、放射孔材などの特徴的な道管の配列が、どのように誘電率の異方性に影響を与えるかについて検討することができる。 $d$  は、接線方向における放射組織の幅を示す長さ分率である。広葉樹材の 3 主軸方向の誘電率  $\epsilon_L, \epsilon_R, \epsilon_T$  は、次式によって計算される。

$$\epsilon_L = \frac{\pi r_v^2 \epsilon_{air} + (4m - \pi r_v^2) \epsilon_{fL} + dm \epsilon_{fR}}{4m(1-d)} \quad (10)$$

$$\epsilon_R = \frac{r_v}{1+d} \int_0^1 \left( \frac{r_v \sqrt{1-x^2}}{m \epsilon_{air}} + \frac{m - r_v \sqrt{1-x^2}}{m \epsilon_{fR}} \right)^{-1} dx + \frac{(1-r_v) \epsilon_{fR} + d \epsilon_{fL}}{1+d} \quad (11)$$

$$\epsilon_T = \frac{r_v}{1+d} \left\{ \frac{1}{(1+d) \epsilon_{T1}} + \frac{d}{(1+d) \epsilon_{T2}} \right\}^{-1} + \frac{r_v}{m} \left\{ \frac{1}{(1+d) \epsilon_{T3}} + \frac{d}{(1+d) \epsilon_{T4}} \right\}^{-1}, \quad (12)$$

ここに、 $\epsilon_{T1} = \epsilon_{fT}$ ,

$$\epsilon_{T2} = \epsilon_{T4} = \epsilon_{fR},$$

$$\epsilon_{T3} = \int_0^1 \left( \frac{r_v \sqrt{1-x^2}}{\epsilon_{air}} + \frac{1 - r_v \sqrt{1-x^2}}{\epsilon_{fT}} \right)^{-1} dx.$$

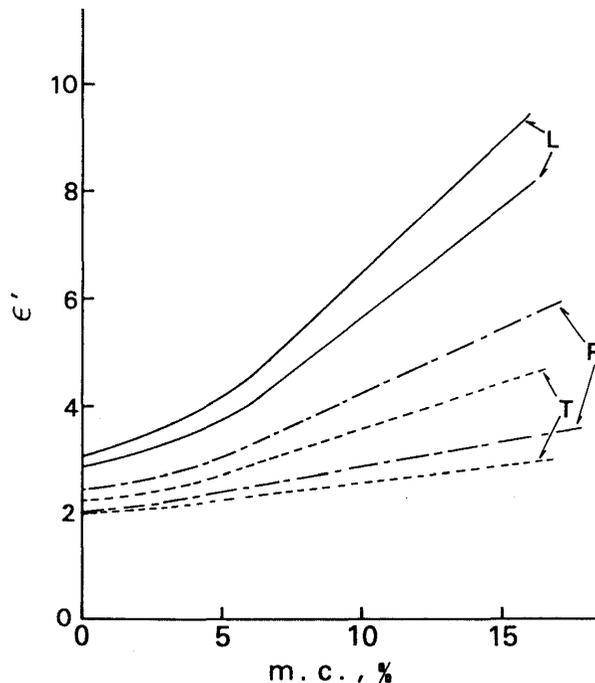


Fig. 6. The calculated values of dielectric constant  $\epsilon'$  at 20°C and 1 MHz of hardwood (specific gravity 0.75) at various moisture contents m.c. (L: longitudinal direction, R: radial direction, T: tangential direction)

広葉樹材の比重  $S$  が既知のとき、木繊維の内孔半径を示す  $r_f$  は、次式で表される。

$$r_f = \sqrt{\frac{4}{\pi} - \frac{4S}{1.469\pi(1-a)}} \quad (13)$$

Fig. 6 に比重 0.75 の広葉樹材の各含水率における繊維、放射、接線方向の誘電率の計算値を示す。計算に用いたパラメータを操作することによって、各値はそれぞれの線の間の範囲に分布する。誘電率は、 $L$  方向において最も大きく、繊維直角方向では、概して、 $R$  方向が  $T$  方向に比べ大きくなる。しかし、お互いに重なり合う部分が生じ、パラメータの数値の組み合わせにより、 $R$  方向と  $T$  方向の値の順位が決まる。

ここで構造を表すパラメータが、誘電率の異方性にどのような影響を及ぼすかについて考察する。材全体に対する放射組織の割合  $c$  と、主軸方向の誘電率との関係を Fig. 7 に示す。この場合、他のパラメータは一定にしている。 $c$  の値の増加とともに  $\epsilon_R$  は増加し、 $\epsilon_L$  は低下する。 $T$  方向に関しては、木繊維と放射組織の取扱いを同じような細胞構成としたため、変動はなかった。結果として、放射組織の量の増加は、繊維方向と放射方向の誘電率の差を小さくし、放射方向の誘電率が接線方向のそれと比較して、大きくなる要因となる。

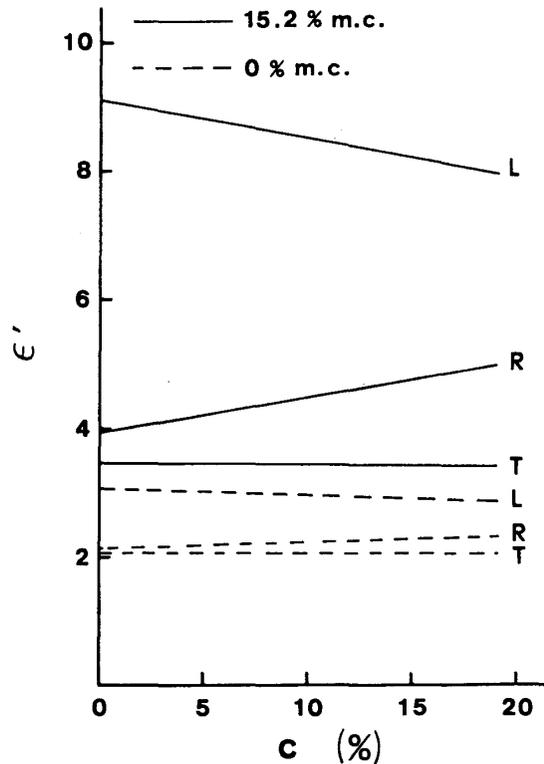


Fig. 7. Dielectric constant  $\epsilon'$  at 20°C and 1 MHz as a function of percentage of ray elements ( $a=0.12$ ,  $m=1$ ,  $Zt=0.2$ ,  $S=0.75$ )

Fig. 8 には、横断面における道管の配列を示す係数  $m$  と誘電率の関係を示す。 $m$  の値が、1 より大きくなるにしたがい、つまり接線方向に配列する傾向が強くなるにしたがい、 $R$  方向の誘電率は低くなり、 $T$  方向のそれは大きくなる。一般の場合、 $R$  方向の誘電率は  $T$  方向に比べて大きいので、 $m$  値が大きくなると、それぞれの値が接近する。逆に、 $m$  値が 1 より小さくなると、その差がますます大きくなる。

Fig. 9 に示す誘電率と接線方向の細胞の配列のずれを示す係数  $Zt$  との関係を見ると、 $\epsilon_T$  が  $Zt=0.3$  に

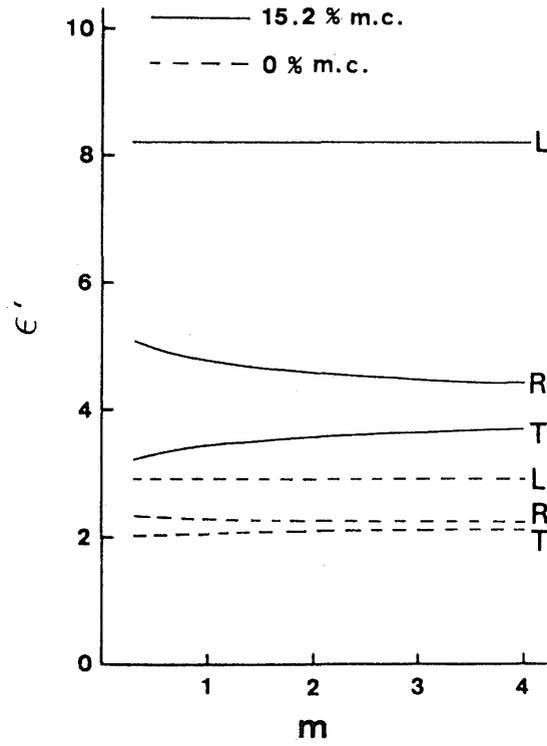


Fig. 8. Dielectric constant  $\epsilon'$  at 20°C and 1 MHz as a function of  $m$  ( $a=0.12$ ,  $c=0.15$ ,  $Zt=0.2$ ,  $S=0.75$ )

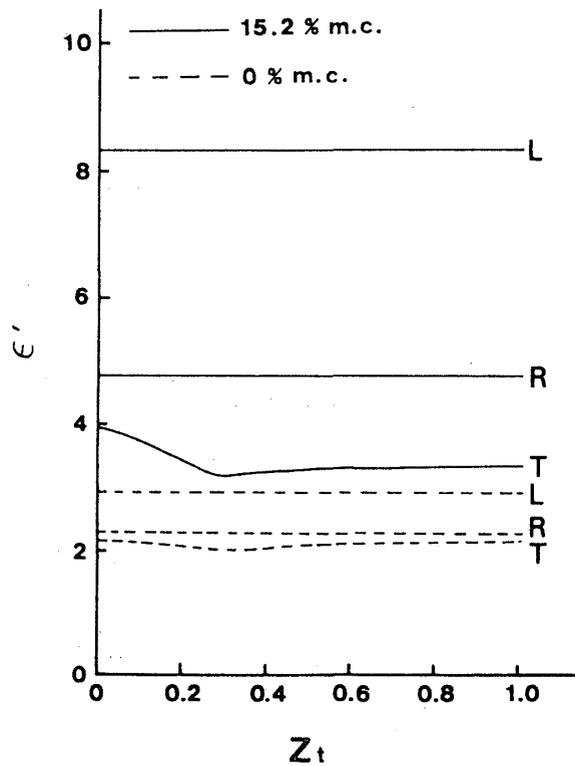


Fig. 9. Dielectric constant  $\epsilon'$  at 20°C and 1 MHz as a function of  $Zt$  ( $a=0.12$ ,  $c=0.15$ ,  $m=1$ ,  $S=0.75$ )

において最小の値を示すことがわかる。木繊維の細胞は、横断面を観察すると、一般に放射方向には比較的規則正しく配列しているが、接線方向では互い違いになっている。放射方向の誘電率が、接線方向のそれに比べて大きい主な原因は、このような接線および放射方向の繊維の微妙な配列の相違によるように思われる。一方放射組織の増大によって、放射方向の誘電率は大きくなるが、その影響は比較的小さい。以上議論した誘電率の異方性と各パラメータの影響は、高湿度において、より顕著に現われる。

### 2.7 モデル化による誘電率の計算値の実測値との比較

以上の方法により求めた計算値が妥当であるかどうかを検討するために、実験データとの比較を行なった。

誘電率の測定用試片として、ミズメ材 (*Betula grossa*) から、3主軸方向の試料を作製した。全乾状態において、比重は0.75であった。誘電率の測定は、KK 安藤電気製 TR-10C 型ブリッジと 3E-30 型電極を用いて、20°Cのもと、1 MHz の周波数で行なった。

結果を Fig. 10 に示す。図中実線で表した計算値は、パラメータに、 $S=0.75$ ,  $a=0.165$ ,  $c=0.126$ ,  $m=1$ ,  $Zt=0$  をそれぞれ代入して求めたものである。計算によって得られた  $\epsilon_L$  の値が、実測値に比べやや大きく、また、 $\epsilon_R$  と  $\epsilon_T$  に関しては、反対に実測データの方がやや大きくなる。この原因は、木材中のメチロール基の回転配向が、20°C, 1 MHz において方向性をもたないと仮定していることと、木材中のマトリックスに異方性を考慮しなかったことも原因の一つのと考えられる。

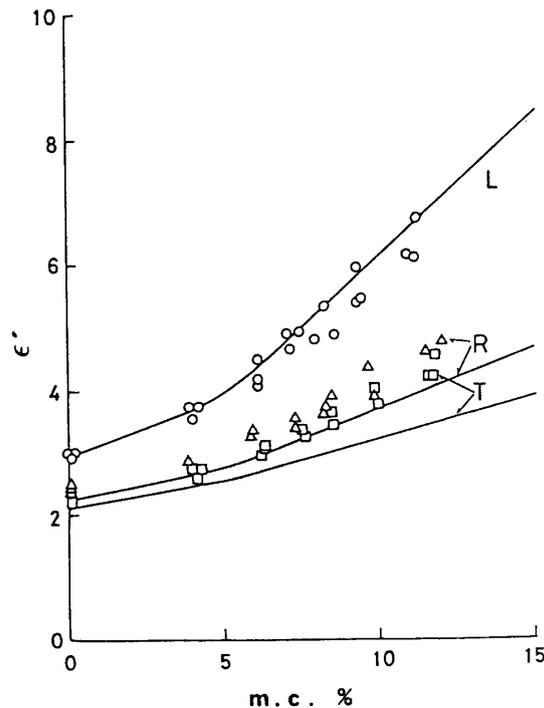


Fig. 10. Dielectric constant  $\epsilon'$  of Mizume wood at 20°C and 1 MHz as a function of moisture content m.c. (solid lines : calculated, plots : experimental)

しかし、計算値と実測値は比較的よい適合を示していると判断できる。特に、実測値が示す誘電率の含水率依存性が、計算によって、よく表現されている。以上のような解析的手法によって複雑な組織構造をもつ広葉樹の誘電率の異方性の定性的な特徴を表現し得ること、さらに誘電率の定量的算出もある程度可能であることが示された。

文 献

- 1) K. KRÖNER und L. PUNGS: *Holzforschung*, **6**, 13-16 (1952)
- 2) W. TRAPP und L. PUNGS: *Holzforschung*, **10**, 65-68 (1956)
- 3) 上村 武: *材料*, **12**, 699-702 (1963)
- 4) 中戸莞二, 梶田 茂: *日本林学会誌*, **36**, 95-100 (1954)
- 5) M. NORIMOTO, S. HAYASHI and T. YAMADA: *Holzforschung*, **32**, 167-172 (1978)
- 6) 右田伸彦: *木材化学*, 上, pp.65-80, 共立出版 (1968)
- 7) P.H. HERMANS: *Physics and Chemistry of Cellulose Fibers*. Elsevier Pub. Co., Inc., New York, pp. 181-213 (1949)
- 8) L. VALENTINE: *J. Polymer Sci.*, **27**, 313-333 (1958)
- 9) W. KAST: *Z. Elektrochemie*, **57**(7), 525-530 (1953)
- 10) 佐伯 浩: *京都大学学位論文* (1968)
- 11) G.N. CHRISTENSEN und K.E. KELSEY: *Holz-Roh-Werkst.*, **17**(5), 189-203 (1959)
- 12) A.J. STAMM: *Ind. Eng. Chem.*, **30**(11), 1280-1284 (1938)
- 13) M. NORIMOTO: *Wood Research*, No. 59/60, 106-152 (1976)
- 14) 則元 京, 山田 正: *木材学会誌*, **23**, 99-106 (1977)
- 15) D.A.G. BRUGGEMANN: *Ann. Physik*, **24**, 636-671 (1935)