

## 木材の誘電的挙動への含水率の影響

坊野, 喜彦  
神崎製紙株式会社

堤, 嘉一  
九州大学農学部

<https://doi.org/10.15017/15905>

---

出版情報 : 演習林集報. 25, pp.151-160, 1974-02-28. Kyushu University Forests  
バージョン :  
権利関係 :

# 木材の誘電的挙動への含水率の影響

坊野喜彦\*・堤壽一

Effect of Moisture Content on Dielectric Behavior of Wood

Yoshihiko BOHNO\* and Juichi TSUTSUMI

## 1. はじめに

木材の物理的・力学的性質は、吸着された水によって著しく影響されることが知られている。木材への水の吸着の機構については、今までにも、多くの研究者達によって報告されている。すなわち、木材実質中の親水性をもつ基、おもに-OH基が吸着点となり、水を吸着するとされている。さらに、木材への水の吸着熱は、実験によると  $5.0\sim 5.4$  kcal/mol であるとされ、水素結合のエネルギー  $5\sim 7$  kcal/mol とほぼ一致することから、吸着点となる-OH基と水の結合は水素結合<sup>1)</sup> によっていると考えられている。また、木材-水系の吸着等温線は、典型的な Sigmoid 型である<sup>1)</sup> とされている。そして、普通、高分子は極性表面が吸着質を分極させて吸着し、その分極された吸着層が、さらにつぎの吸着分子を分極させて吸着し、多分子層を形成する<sup>2)</sup> と考えられている。

さて、木材の誘電的性質を検討するにあたって、さらに次のようなことが考慮されねばならない。すなわち、全乾木材の誘電率は  $2.0\sim 3.0$  であり、これに比べ、水の誘電率は  $81.0$  と著しく大きいことから、水を含む木材は不均質な誘電体と考えられる。そこで、MAXWELL-WAGNER の理論で取り扱われるような、いわゆる不均質誘電体としての木材の誘電的な挙動について検討することは、DEBYE のというような分子の双極子運動に基づく誘電的挙動を調べることに、非常に重要である。

以上のような取り組みかたによる木材の誘電的挙動に関する研究は、竹田<sup>3)</sup>、TRAPP と PUNGS<sup>4)</sup> などによって始められ、最近では、堤<sup>5)</sup>、LIN<sup>6)</sup>、NANASSY<sup>7)8)</sup>、VENKATESWARAN<sup>9)</sup> などの報告がある。しかし、いずれの報告でも、測定された周波数範囲は、おもに約  $100$  Hz 以上である。ところが、吸着された水をもつ木材の誘電的挙動は、低周波ないしは超低周波の領域において特徴的であることが推定されており<sup>5)</sup>、今までに報告されているよりも、さらに低い周波数における研究が必要である。

そこで、この研究では、周波数を  $0.1$  Hz $\sim 1$  MHz の範囲にとり、今までに報告されているよりも低い超低周波の領域にまで測定を広げ、吸着されている水が木材の誘電的挙動に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 試 験 片

伐採のあと長期間にわたって室内に放置され、じゅうぶんに気乾状態に達しているシオ

\* 現. 神崎製紙株式会社 Kanzaki Paper Mfg. Co., Ltd.

ジ (*Fraxinus commemoralis*) 材から、電界の方向と試験片の厚さ方向、つまり電界の方向と繊維方向が一致するように厚さ 4 mm の試験片を木取った。

## 2・2 実験条件と誘電的性質の測定法

木材の含水率が誘電的挙動に与える影響を調べるために、水分の脱着過程と吸着過程の

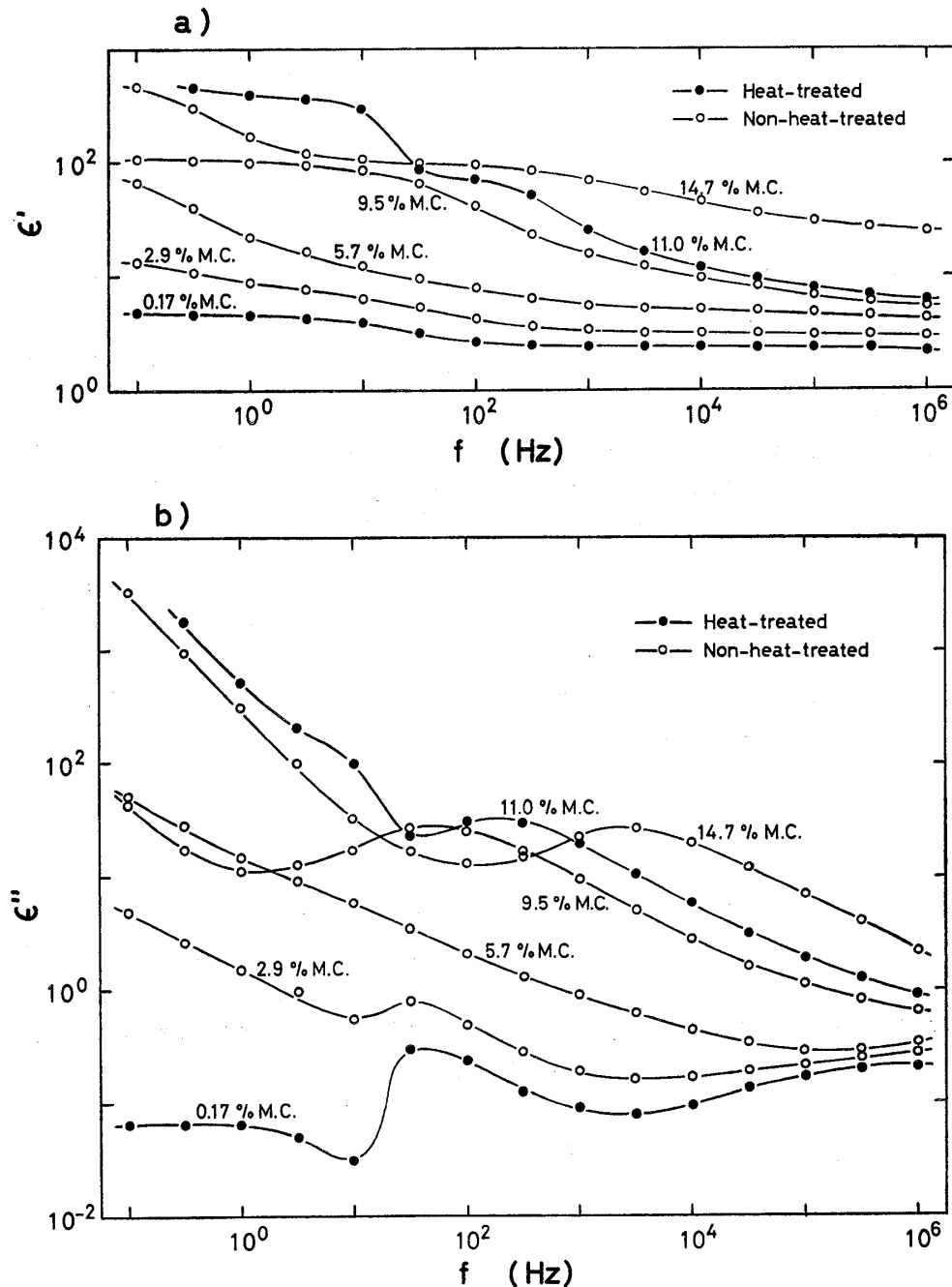


Fig. 1 Effect of frequency ( $f$ ) on dielectric properties for different moisture contents at 20°C: a) dielectric constant ( $\epsilon'$ ), and b) dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ).

SHIOJI(*Fraxinus commemoralis*)-wood.

9.5 and 11.0% M.C.: In process of adsorption.

0.17, 2.9, and 5.7% M. C.: In process of desorption.

2つに分けて実験を行った。すなわち、含水率 14.7% から 2.9% までの脱着過程と、3.4% から 13.1% までの吸着過程について実験を行った。また、熱処理の履歴によって与えられる影響についても調べるために、103°C で3日間の熱処理を行い、全乾に達したのち、含水率 0.17% から 11.0% まで吸湿させ、その間の吸着過程についても実験を行った。

この研究では、測定によって求める誘電的性質として、誘電率  $\epsilon'$ 、誘電損率  $\epsilon''$ 、および電気伝導率  $\sigma$  をとりあげ、これらの測定には安藤電気(株)製のブリッジを用いた。すなわち、0.1 Hz から 10 Hz の超低周波領域では TR-4 型超低周波ブリッジ、30 Hz から 1 MHz の領域では TR-1 B 型ブリッジを用いた。

なお、すべての測定が温度 20°C のもとで行われた。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 周波数分散と含水率の関係

誘電体は、一般に、幾つかの分散を持っていることがよく知られ、それぞれの分散は分極と密接に関係している<sup>10)</sup>。木材についても、分極の種類と分散の関係について報告されている<sup>5)</sup>が、今までの報告は約 100 Hz 以上の周波数についての結果であり、超低周波領域での分散については、必ずしも、じゅうぶんに検討されているとは言えない。

さて、この研究で得られた誘電率  $\epsilon'$  と周波数  $f$  の関係、および誘電損率  $\epsilon''$  と周波数  $f$  の関係を、それぞれ Fig. 1 a) と b) に示している。この図で超低周波領域から高周波領域を見るとき、周波数分散は超低周波、低周波、および高周波の3個所に存在することがわかり、特に 0.1 Hz の超低周波まで測定範囲を広げることによって、含水率の増加とともに、超低周波領域に著しい分散を認めることができた。しかも、熱処理の履歴を持つものでは、履歴のないものよりも著しい分散を示すことがわかった。たとえば、Fig. 1 に示すように、熱処理の履歴を持つ含水率 11.0% における  $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  に比べ、履歴を持たない含水率 14.7% の場合、30 Hz 以下で、含水率が高いにもかかわらず、低い  $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  の値を示している。この理由として、熱処理を受けた木材では、親水性の基、たとえば -OH 基を持っている木材実質の内部表面積が小さくなり、そのため、水に活性な吸着点の数が少なくなり、同じ含水率の熱処理を受けていない木材よりも、吸着力の小さな水を持っていることによると考えられる。なお、低周波領域の分散は、木材へ吸着されている水の吸着力と特に密接に関係することが、すでに報告されている<sup>5)</sup>。

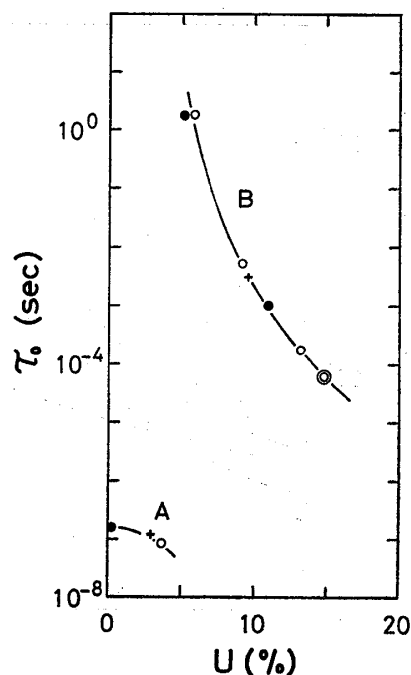


Fig. 2 Effect of moisture content (U) on mean relaxation time ( $\tau_0$ ) at 20°C. SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood.

- A: In high frequency region,
- B: In low frequency region,
- + : In process of desorption,
- : Heat-treated,
- : In process of adsorption,
- ⊙ : Initial (Non-treated).

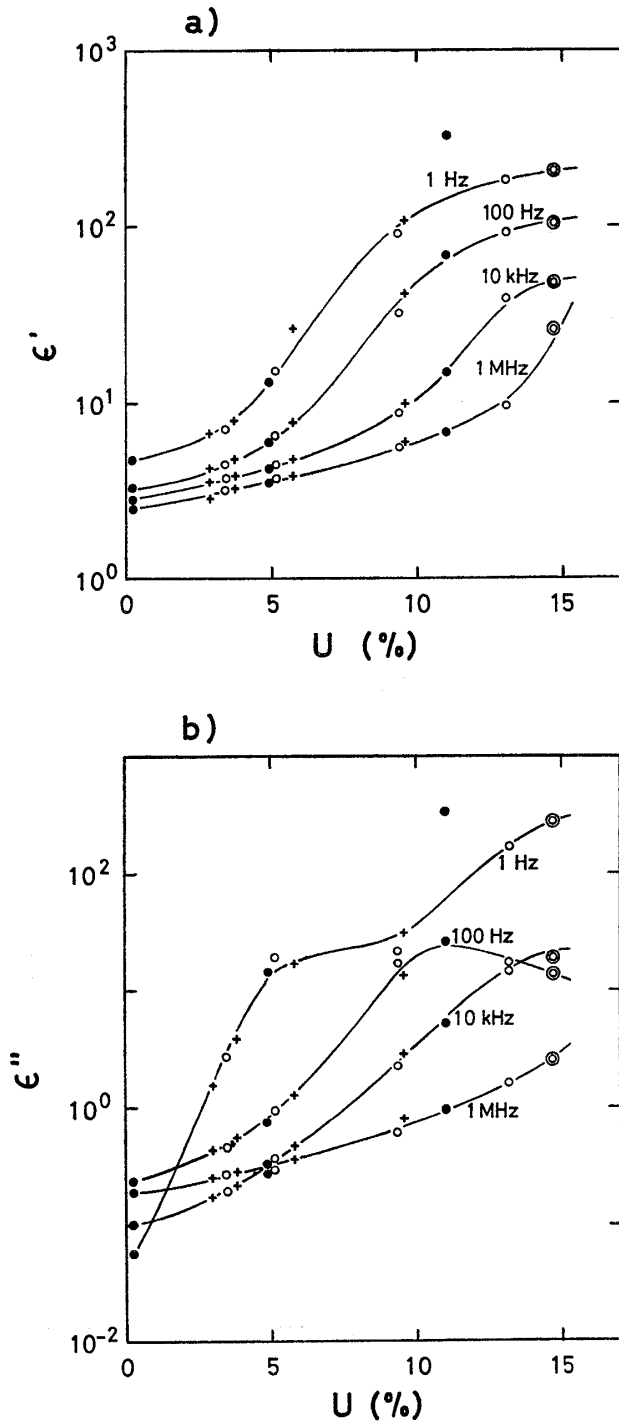


Fig. 3 Effect of moisture content (U) at different frequencies on dielectric properties: a) dielectric constant ( $\epsilon'$ ), and b) dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ). SHIOJI (Fraxinus commemoralis)-wood.

- + : In process of desorption,
- : Heat-treated,
- : In process of adsorption,
- ⊙ : Initial (Non-treated).

Fig. 2 は、低周波領域と高周波領域に存在する分散から求めた平均緩和時間  $\tau_0$  と含水率  $u$  の関係を示す。低周波領域の分散は、含水率の増加とともに  $\tau_0$  が著しく小さくなり、逆に含水率の低下とともに  $\tau_0$  が著しく大きくなり、含水率約 5% のあたりで、 $\tau_0$  が無限に大きくなる傾向にあることがわかった。一方、高周波領域の分散では、全乾状態で  $\tau_0$  が約  $10^{-7}$  sec となり、含水率が約 3~5% よりも高くなると  $\tau_0$  は著しく小さくなる。なお、熱処理の履歴の有無、および吸・脱着過程のいずれでも、平均緩和時間  $\tau_0$  への含水率の影響は認められないことが確かめられた。

### 3.2 誘電率 $\epsilon'$ 、誘電損率 $\epsilon''$ と含水率の関係

誘電率  $\epsilon'$  と誘電損率  $\epsilon''$  が、含水率に大きな影響を受けることはよく知られ、特に高周波領域での結果は、含水率計として実用にも供されている。しかし、低周波領域に関する研究報告は少なく、せいぜい 100 Hz どまりである<sup>4)5)</sup>。

さて、含水率  $u$  と、この研究で得られた  $\epsilon'$  および  $\epsilon''$  との関係を図 3 に示す。

高周波の電界中で、含水率の増加とともに繊維飽和点に至るまで、木材の  $\epsilon'$  の値は連続して大きくなるのが、SKAAR によって報告されている<sup>11)</sup>。一方、Fig. 3 から、低周波になるに伴って、 $\epsilon'$  と含水率の関係はつぎのようになることがわかった。すなわち、全乾状態から含水率約 5% に至るまでは  $\epsilon'$  の値の変化は比較的小さく、ついで含水率約 5~15% の範囲で含水率の増加に伴っ

て  $\epsilon'$  の値が急激に上昇し、さらに含水率約 15% 以上で  $\epsilon'$  の値は比較的安定した傾向をうかがうことができる。このよらな、高周波領域と低周波領域における  $\epsilon'$  の挙動の相異は、分極と密接に関係し、詳しくは、木材と水の吸着の機構とともにあとで述べることにする。

また、Fig. 3 において、含水率 11.0%，周波数 1 Hz についての結果で、 $\epsilon'$  と  $\epsilon''$  のプロットが、1 Hz に関する曲線から上方にはずれている。これは、周波数分散でも認められたように、熱処理を受けた木材は、同じ含水率の無処理のものに比べ、小さな吸着力の水を持っていることによると考えてよいであろう。

なお、吸・脱着過程の相異による影響は認められなかった。

### 3.3 電気伝導率 $\sigma$ と含水率の関係

Fig. 4 には電気伝導率  $\sigma$  と周波数  $f$  の関係が示され、Fig. 5 には電気伝導率  $\sigma$  と含水率  $u$  の関係が示されている。これらの結果から、約 100 Hz 以上では、周波数の上昇とともに電気伝導率も上昇するが、低周波ないし超低周波領域では、含水率によってその挙動は著しく異なる。すなわち、低周波ないし超低周波領域の場合、含水率約 5~10% を境にして、高い含水率では周波数に無関係に、ほぼ一定の電気伝導率を示す傾向になろうとする。このことについては、周波数範囲 50 Hz ~100 kHz での VENKATESWARAN の報告<sup>9)</sup>でも同じような結果が示されている。しかし、Fig. 4, Fig. 5 からわかるように、周波数が 10 Hz 以下で含水率が低いとき、周波数と

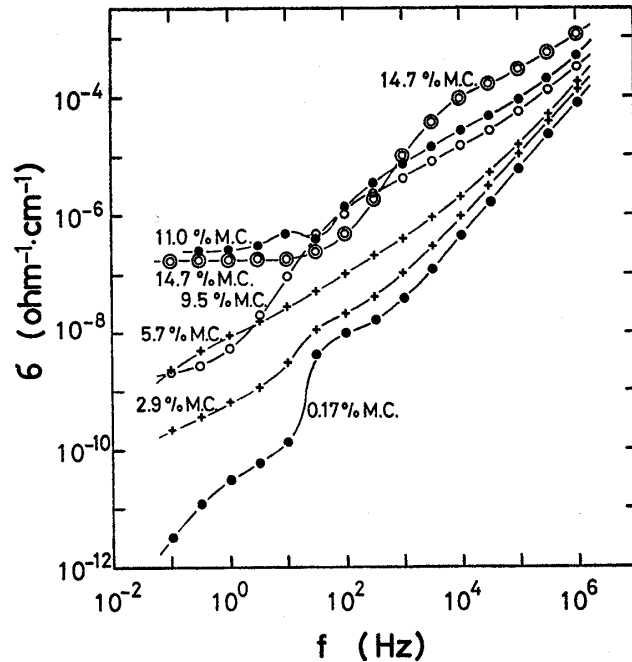


Fig. 4 Effect of frequency ( $f$ ) on electric conductivity ( $\sigma$ ) for different moisture contents at 20°C. SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood.  
+: In process of desorption, •: Heat-treated, ○: In process of adsorption, ⊙: Initial (Non-treated).

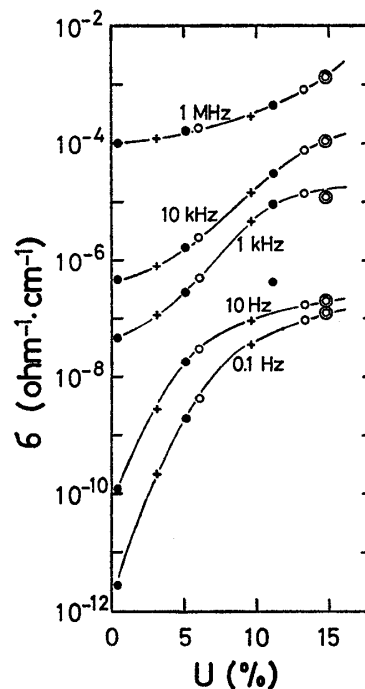


Fig. 5 Effect of moisture content ( $U$ ) on electric conductivity ( $\sigma$ ) for different frequencies at 20°C. SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood.  
+: In process of desorption, •: Heat-treated, ○: In process of adsorption, ⊙: Initial (Non-treated).

含水率の低下につれて電気伝導率も低下することが認められた。

これらの挙動の原因について、約 100 Hz 以上では VENKATESWARAN が行った説明<sup>9)</sup>、すなわち、木材の電気伝導は、要するに  $-OH$  基の多少、水素結合の数、および吸着された水の量に支配されているということから理解される。また、低含水率・低周波領域における挙動が高含水率・低周波領域におけるものと異なるのは、後者の電気伝導の機構であるイオン伝導が、前者では含水率の低下とともに起こりにくくなるためと考えてよいであろうが、さらに詳細な検討を要する。

吸・脱着過程の相異による電気伝導の挙動の相異は認められなかったが、熱処理を受けたもので含水率 11.0% のとき、無処理のものよりも、超低周波で高い電気伝導率を認めた。この理由は、前に述べたと同様に、熱処理を受けた木材が吸着力の小さな水を持っていることによるのであろう。

### 3.4 木材への水の吸着の機構と誘電的挙動

木材への水の吸着の機構については、すでに、STAMM によって詳しく説明されている<sup>11)</sup>。すなわち、全乾状態から含水率約 5% までの範囲で、木材へ吸着されている水は単分子層吸着水として存在し、含水率約 5% 以上では、多分子層吸着水と膨潤によって新生した内部表面での単分子層吸着水が共存し、その機構はきわめて複雑であるとしている。さらに、多分子層吸着水は、幾つかの樹種で、最大 6~8 分子層の厚さであったとしている。つまり、含水率約 5% 以下では、吸着水はほぼ一様な強さで強く吸着されていると考えられる。それに反して、含水率約 5% 以上では、吸着面上に積み重ねられる吸着分子層の数が増加するに伴って、吸着力は小さくなるはずである。このような吸着の状態を呈している間隙性伝導系である木材では、含水率の変化とともに、吸着イオン層の電気的な等価回路も変化し<sup>12)</sup>、誘電的性質は影響を受けるはずである。

さて、Fig. 3 の 1 MHz の高周波領域での結果、あるいは SKAAR の 2 MHz および 15 MHz での結果<sup>11)</sup> と異なって、Fig. 3 a) の低周波領域の曲線では、3つの含水率範囲によって、 $\epsilon'$  の挙動を異にしていることはすでに述べた。Fig. 4 と Fig. 5 からわかるように、超低周波から低周波の領域で高含水率の場合の電気伝導率  $\sigma$  と、低含水率で超低周波から高周波での  $\sigma$ 、あるいは高周波領域・高含水率での  $\sigma$  の間では異なった挙動にある。つまり、前者では界面分極が支配的であるのに対し、後者では双極子の配向による分極に支配されていると考えてよいであろう。そこで、低周波領域の分散が界面分極に由来する<sup>5)</sup> とすれば、誘電現象の機構から、誘電的挙動は吸着層の層数に著しい影響を受けるので、水が単分子層吸着水として存在する含水率約 5% 以下では、含水率の変化によって  $\epsilon'$  の値が大きく影響を受けないのに対し、含水率約 5% 以上では、含水率のわずかな増加が  $\epsilon'$  の値の急激な上昇となる。しかも、含水率約 15% 以上で含水率が増加しても、 $\epsilon'$  の値の大きな上昇とはならないようである。つまり、多分子層吸着水を持つ木材で、界面分極によって演じられる誘電的挙動は、含水率約 15% を境にして 2 分されていることがわかったが、このことについては、さらに詳細な研究を要する。

気乾状態の木材の誘電率  $\epsilon'$ 、誘電損失率  $\epsilon''$ 、および電気伝導率  $\sigma$  と周波数  $f$  の関係は、一般に、Fig. 6 に示すとおりである<sup>13)</sup>。すなわち、気乾状態で、超低周波領域の  $\sigma$  はほぼ一定の値を示し、また Fig. 4 からわかるように、含水率が減少するとき、周波数の低下とともに  $\sigma$  の値は低下する。すなわち、ある程度以上の含水率で、超低周波領域の誘電

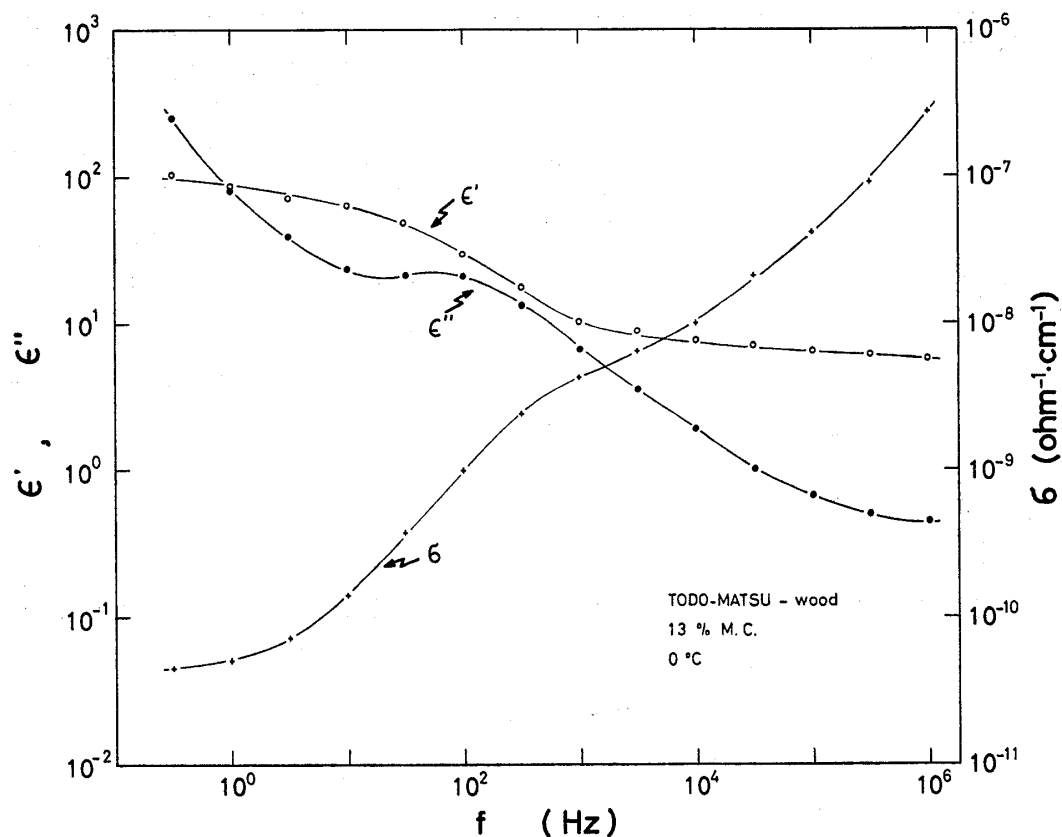


Fig. 6 Effect of frequency ( $f$ ) on dielectric constant ( $\epsilon'$ ), dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ), and electric conductivity ( $\sigma$ ) for 13% M.C. at 20°C. TODO-MATSU(Abies Mayriana)-wood.

的挙動は荷電体である吸着水イオンの移動による電気伝導が著しくなることで説明がつき、超低周波領域では伝導性の分散を生じていると考えてよいであろう。

### 3.5 COLE-COLE の円弧と含水率の関係

超低周波から高周波にわたる領域で、木材の誘電分散が3個所に存在することは、すでに述べた。そして、超低周波領域での分散は伝導性の分散として理解され、低周波領域と高周波領域での分散は、それぞれ界面分極と双極子の配向分極に由来するものと考えられる。さらに後二者は、いわゆる緩和型の分散であり、Fig. 7 に一例を示すように、COLE-

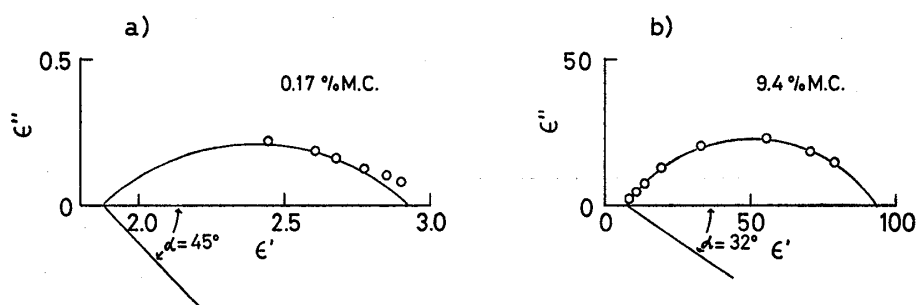


Fig. 7 An example of COLE-COLE plot for dielectric dispersion: a) in high frequency region, and b) in low frequency region at 20°C. SHIOJI(*Fraxinus commemoralis*)-wood.



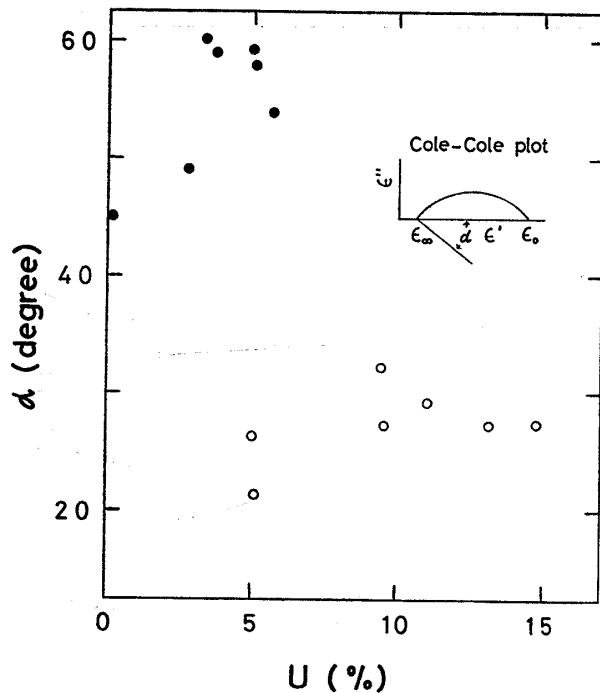


Fig. 8 Effect of moisture content on distribution parameter ( $\alpha$ ) for relaxation time at 20°C. SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood.  
 ●: For high frequency region dispersion.  
 ○: For low frequency region dispersion.

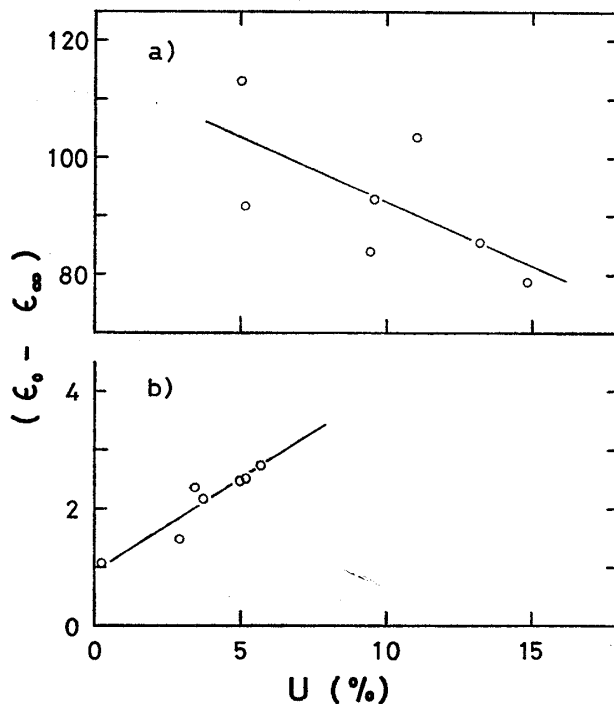


Fig. 9 Effect of moisture content on  $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$  obtained from COLE-COLE plot: a) for low frequency region dispersion, and b) for high frequency region distribution. SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood.

COLE の円弧を満足することができ  
 る。図中の  $\alpha$  の値は、緩和時間の  
 分布の大きさを示すが、含水率が  $\alpha$   
 の値に与える影響を Fig. 8 に示し  
 ている。つまり、低周波領域で認め  
 る分散の緩和時間の分布は、高周波  
 領域におけるそれよりも、じゅうぶ  
 んに小さいことが認められる。な  
 お、Fig. 7 から得られる  $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$ 、  
 すなわち、分散の大きさを Fig. 9  
 に示している。

#### 4. 結 論

吸着された水を持つ木材は、低周  
 波から超低周波の領域にわたる誘  
 電的挙動が特徴的であると考えられ  
 ている。そこで、この研究では、  
 0.1 Hz から 1 MHz にわたる広い  
 周波数範囲で、全乾から気乾状態に  
 わたる含水率のシオジ材を用いて、  
 温度 20°C で、木材の誘電的挙動と  
 含水率の関係について検討を行い、つ  
 ぎの結論を得た。

1) 超低周波、低周波、および高  
 周波領域の 3 個所で分散を認め、超  
 低周波領域での分散は含水率の増加  
 に著しい影響を受けることがわかつ  
 た。(Fig. 1)

2) 吸着過程と脱着過程の間で、  
 誘電的挙動に相異は認められなかつ  
 たが、熱処理の履歴を持つもので含  
 水率 11.0% のとき、無処理の場合  
 の同じ含水率のものよりも、低周波  
 領域と超低周波領域で、誘電率  $\epsilon'$  と  
 電気伝導率  $\sigma$  の高い値を持つこと  
 がわかった。この理由として、熱処  
 理を受けたものでは吸着点を持つ内  
 部表面積の減少が考えられる。(Fig.  
 1, Fig. 3~4)

3) 平均緩和時間  $\tau_0$  は、高周波

領域の分散で含水率3～5%において著しく小さくなり、低周波領域の分散で含水率約5%において著しく大きな値となる傾向を認めた。(Fig. 2)

4) 低周波から超低周波の電界中で、全乾から含水率約5%、含水率約5%から約15%、および含水率約15%以上の3つの含水率範囲で、木材の誘電率  $\epsilon'$  と含水率の関係は異なった挙動を示し、これは木材への水の吸着の機構と密接に関係すると考えられる。(Fig. 3)

5) 超低周波の電界中で、ある程度以上の含水率の木材は、荷電体である吸着イオンの移動による電気伝導が生じ、ほぼ一定した電気伝導率  $\sigma$  を示す。(Fig. 4～5)

6) 低周波領域と高周波領域の分散では、COLE-COLEの円弧を満足し、緩和時間の分布の大きさと関係する  $\alpha$ 、分散の大きさと関係する  $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)$  を求めた。(Fig. 7～9)

#### 文 献

- 1) Stamm, A. J.: Wood Science and Cellulose Science, Ronald, New York (1964)
- 2) Hoover, S. R., and E. F. Mellon: Application of polarization theory to sorption of water vapor by high polymers, J. Amer. Chem. Soc., 72, 2562 (1950)
- 3) Takeda, M.: Studies on dielectric behavior of bound water in timber in the high frequency region, Bulletin of the Chemical Society of Japan, 24, 169 (1951)
- 4) Trapp, W., und L. Pungs: Einfluß von Temperatur und Feuchte auf das dielektrische Verhalten von Naturholz im großen Frequenzbereich, Holzforschung, 10, 144 (1956)
- 5) 堤 壽一: 木材の誘電性, とくに誘電率, 誘電損率の周波数, 含水率および温度への依存性に関する研究, 九州大学農学部演習林報告, No. 41, 109 (1967)
- 6) Lin, R. T.: Review of the dielectric properties of wood and cellulose, F. P. J., 17, 61 (1967)
- 7) Nanassy, A. J.: Overlapping of dielectric relaxation spectra in oven-dry yellow birch at temperatures from 20 to 100°C, Wood Science and Technology, 4, 104 (1970)
- 8) Nanassy, A. J.: Dielectric measurement of moist wood in a sealed system, Wood Science and Technology, 6, 67 (1972)
- 9) Venkateswaran, A.: Application of dissociation hypothesis to electrical conduction in wood, Wood Science, 3, 183 (1971)
- 10) たとえば 押田勇雄編: 技術者のための物性物理, 日刊工業新聞社 (1962)
- 11) Skaar, C.: The dielectrical properties of wood at several radio frequencies, N. Y. State College of Forestry, Technical Publication No. 69 (1948)
- 12) Murphy, E. J., and H. H. Lowry: The complex nature of dielectric absorption and dielectric loss, Journal of Physical Chemistry, 34, 598 (1930)
- 13) 堤 壽一: 未発表

### Résumé

It has been suggested by one of the authors, Tsutsumi, in the previous paper that the adsorbed water in wood should have the prominent effects on the dielectric behavior of wood in low frequency region. There were, however, few papers on the dielectric behavior in very low frequency; so, in this paper, the experiment dealing with the effects of the moisture content on the dielectric constant ( $\epsilon'$ ), the dielectric loss factor ( $\epsilon''$ ), and the electric conductivity ( $\sigma$ ), at frequencies from 0.1 Hz to 1 MHz, was carried out.

SHIOJI (*Fraxinus commemoralis*)-wood was used in this study. The specimens were cut at right angles to the grain, and the applied field was parallel to the grain direction. Moisture contents in specimens were from 0.17% to 14.7%, and all measurements were done at 20°C.

From the results of this study the following conclusions may be drawn:

1) The dielectric dispersions in very low frequency region are affected remarkably by moisture content.

2) There is no difference of the dielectric behavior of wood between in process of adsorption and in process of desorption.

3) In low or very low frequency region, the specimen having of heat-treating at 100°C has greater values of  $\epsilon'$  and  $\sigma$  as compared with nontreated specimen at 11.0% M. C.. This result may suggest that the size of the internal surface of wood becomes small by the heat-treating.

4) The mean relaxation time ( $\tau_0$ ) for high frequency region dispersions and for low frequency region dispersions are calculated from the dielectric dispersion curves.

As shown in Fig. 2,  $\tau_0$  value for high frequency region dispersions decreases near about 5% M. C., and  $\tau_0$  value for low frequency region dispersion increases remarkably near about 5% M. C..

5) In very low frequency electric field, the movement of adsorbed ion occurs in wood of over certain moisture content; so the value of electric conductivity ( $\sigma$ ) is nearly fixed in very low frequency region.

6) The COLE-COLE circle diagrams are satisfied in low and high frequency region dispersion.