

誘電率による木材含水率の測定に 関する基礎的研究

上 村 武⁽¹⁾

目 次

はしがき	95
1. 電氣的含水率測定方法	97
1.1 電気式含水率計	97
1.2 電気抵抗式含水率計	98
1.3 高周波型含水率計	99
2. 木材の誘電率測定と測定上の問題	100
2.1 木材の静電容量の測定方式	100
2.2 電極の edge effect の影響	104
2.3 電極の air gap の影響	111
3. 木材の誘電率と含水率との関係	116
3.1 測定装置および測定法	116
3.2 温度の影響	118
3.3 測定方向の影響	123
3.4 比重の影響	127
3.5 木材の誘電率と含水率との関係式	133
4. 木材含水率の測定に影響する因子	147
4.1 木材中の水分分布の影響	147
4.2 含水率の増加に伴う高周波抵抗の混入	151
むすび	163
摘 要	163
文 献	164
Résumé	167

は し が き

木材は吸湿性の物質であつて、普通の状態では若干の、場合によつては相当多量の水分をその中に含んでいる。しかもその水分含有量の変化は比重はもとより、強度、膨張収縮、加工に対する性質、薬液の浸透度、温度その他の伝導等、あらゆる基本的な木材の物理的性質に著しい影響をおよぼすことはいまさらこと新しく申しのべるまでもない。

このように木材の性質の最も重要な指標となる木材の含水率については多くの研究があり、木材の諸性

(1) 木材部材料科長

質におよぼす含水率の影響そのものについてはかなり明らかになっているにもかかわらず、実際面においては、含水率が測定されることはほとんどなかつた。木匠たちが、材面に手をあてて、触覚によつてその乾湿を判定したり、つちで木材を打撃することによつて乾湿を判断したりすることが、有効、かつ価値高きものと考えられていたのはかなり最近までのことであり、現在においてもこのような方法しか取られていない場合がすくなくない。これは、木材の含水率をただちに、かつ容易に測定する適当な方法がなかつたことが原因であつた。測定さるべき木材の一部分を切り取り、これを全乾して重量測定により含水率を求める方法は、時間、手間、および設備を多く要すること、実用材を破損すること、局部的な測定しかできないことなどから、現場的な含水率測定法として最適なものではない。

1927年 A. J. STAMM³⁹⁾ は木材の電気抵抗がその含水率と密接な相関関係にあることを明らかにした。

この関係は、木材の含水率を測定する方法として有効なものであつたので、木材の直流抵抗を測定して計器に指示させ、含水率を測定する方法が普及しはじめた。最近においては直流抵抗式含水率計は、かなり広く木材業界に利用されるにいたり、木材の品質を表示するのに重要な役割をはたしている。わが国においても終戦後、ようやく木材の含水率に対する一般の認識が高まり、木材加工技術の向上とも相まつて電気式含水率計の利用度は著しく増加してきた。現在では直流抵抗式含水率計は外国製品にならそん色のないものが国内で製作使用されている。

しかし、直流抵抗式含水率計は、後述するような多くの致命的欠点をもっている。たとえば、その読度を局部的含水率によつて支配される性質は、木材のように固体で内部に水分傾斜をもちやすい物質にははなはだつごうが悪い。ことに、最近のように木材の人工乾燥技術が普及してくると、木材含水率の現場測定の実用性はますます増大するが、一方、表層のみの水分しか指示し得ない直流抵抗方式は利用しにくいものとなつてくる。

このような直流抵抗方式の欠点を補つた方式として、木材の誘電率を測定してこれによつて含水率を表示する方法が一部に期待されていた。また外国には 1, 2 この方式で製作された計器もある⁴⁰⁾。しかし、木材の誘電的性質に関する研究は比較的すくなく、誘電率を利用して木材の含水率を測定するための基礎的資料として役立つものはほとんどなく、さらに実用に際しての測定上の諸問題を解明したものは皆無である。

著者は、木材の含水率測定が木材および木製品の品質管理上きわめて重要であることにかんがみ、かねてから、木材の誘電率を媒介としてその含水率を測定する方法を確立するために研究を進めていたが、一応の成果を得、応用上の見とおしもついたので、ここに取りまとめることにした。この研究において得られた木材の誘電率および誘電体損失に関する多くの新知見は、単に含水率の測定にとどまらず広く木材を高周波加工する場合の基礎資料としても有用なものであることを信じる。なお本研究の一部の成果を利用して作られた誘電率型の木材含水率計が、すでに⁴¹⁾東京芝浦電気株式会社の手によつて市販され、広く利用されていることを付記しておく。

この研究を行なうにあたり、研究の機会と便宜を与えられ、御指導を賜つた農林省林業試験場齋藤美鷲場長、小倉武夫木材部長、終始適切な御助言と御指導をいただいた九大の渡辺治人教授その他の諸先生方、研究遂行上多くの助言と示唆を与えられた東大の星合正治教授、名大の篠原卯吉前教授、その他含湿量測定装置委員会のかたがた、装置の製作に御援助および御助言をいただいた東京芝浦電気の新井正技師、静岡大学の一条文二郎教授、実験の一部を分担しあるいは取りまとめに御協力をいただいた農林省林

業試験場の中村 章, 宮崎幸男, 大沼加茂也, 斎藤寿義, 小玉牧夫各技官および戸枝俊男, 岡西高男両君その他木材物理研究室の各位に対して深じんなる謝意を表する。

1. 電氣的含水率測定法

1.1 電気式含水率計

木材は含水率の影響でその物理的性質を変えるので, 反対に木材のある物理的性質を測定すれば含水率を推定することができる。たとえば, 木材の打撃音によつて含水率を推定することもあるが, これは木材の弾性係数を測定して含水率を知る簡便な一方法であるともいえる。しかし, このように木材の物理的性質を測定してその含水率を知るためには, その測定が容易になしうること, その測定結果が確実であり, 他の因子によつて大きく左右され難いこと, 装置があまりに複雑, あるいは膨大なものでないことが必要である。これらの必要条件に最も適合するものは木材の電氣的な性質を測定する方法であろう。電気式含水率計と総称されるものの中には, 電極そのものに湿度によつて電氣的性質を変化する素子を用い, 試料の vapour を測定するもの^{12) 29) 32)}があるが, これはむしろ電氣的な湿度計であり, 試料そのものの電氣的性質の変化を利用する本来の電気式含水率計とは区別して考えられなければならない。

木材の電気式含水率計が最初に考えられたのは, はじめに記したとおり STAMM によつてである。STAMM は木材の電気伝導度の対数が繊維飽和点以下では木材の含水率とはほぼ直線関係にあり, 樹種, 比重, 材の形状等の因子に比して含水率がかかるに支配的であることを確認した³⁹⁾。これによつてかれは実用的な電気抵抗測定回路を作り, これが水分測定上有効であることを明らかにしている⁴⁰⁾。その後電気抵抗と含水率との関係については多くの研究がなされているが, KOLLMANN¹²⁾ はこれら多くの研究結果を検討して, 木材の含水率が繊維飽和点以下で狭い範囲では,

$$\log \rho = -au + c \dots\dots\dots 1.1.1$$

あるいは広い範囲では,

$$\log\left(\log \frac{1}{\rho}\right) = bu \dots\dots\dots 1.1.2$$

なる関係が成立するとした。ただし, ρ は電気伝導度で電気抵抗の逆数, u は含水率, a, b, c は常数である。電気抵抗式含水率計はこれらの研究とともにしだいに発達し, その構造および取扱いが容易であることも大きな原因となつてかなり普及するにいたつた。

木材の電氣的な性質として, 電気抵抗 (あるいは電気伝導度) は最も代表的なものであるが, 木材を誘電体として高周波電界においた場合には, 木材はその構成因子の内部に変位や摩擦を生じ, その結果ある程度の電気容量と, ある程度の誘電体損失を生じることとなる。このように高周波電界にある木材に対して測られる電気容量, 誘電体損失, これから誘導される誘電率, 誘電正切, 等の値は相当複雑なものであるが, 含水率との間には規則的な関係が成立することが知られている。したがつて, これらの誘電的性質を測定することによつて含水率を測定することができるであろうことは以前から推測されていた^{25) 44)}。しかし実用面においては基礎的な資料が不足のままに若干の計器が市販されたことがあるだけである。

電気抵抗式含水率計は, 便利な方法ではあるが, 実際に測定されるのは, 電極と接触している部分あるいはそれに接する部分の電気抵抗であつて, きわめて試料の表面状態の影響を受けやすい⁵¹⁾。たとえば表面塗装をほどこした試料を表面電極で測定することは無意味であるし, 表面のみがぬれた試料では表面電

極でも針状電極でも深部含水率のいかんにかかわらず低抵抗、すなわち高含水率として測定される。また、水分傾斜のある材では含水率は平均含水率としては測定できず、電極部分の含水率のみしか示し得ない。さらに温度係数の大きいこと¹⁰⁾や、繊維飽和点以上での測定の不可能なこと^{20) 51)}、打込電極では材に傷をつけること等不利な点が多い。これにくらべて、高周波型の含水率計、特に誘電率型の含水率計は、これら電気抵抗式含水率計の欠点を補うことが期待されていた。損失型の計器については、直流抵抗型計器と誘電率型計器の中間のものとして、両者の長所よりはむしろ両者の欠点をより多くそなえているのではないかが危ぶまれていたが、市販になつている 2, 3 の計器についての著者の実験および若干の資料^{7) 52)}によると、かなり大きな誤差を伴うように思われる。

1.2 電気抵抗式含水率計

電気抵抗式含水率計は、計器としては要するに、広範囲の高抵抗測定装置であるということができる。実際の含水率計に用いられている回路は数多くあるが、基本的なものはおおむね次のようになる。

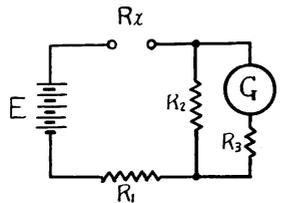


Fig. 1.2.1 テスター型
含水率計の回路
Circuit of simple moisture
meter

a) テスター型

最も簡単な抵抗測定法であつて、Fig. 1. 2. 1 に示すように、電池 E と抵抗 $R_{1,2,3}$ と電流計（電圧計） G を組みあわせたもので、 R_2 または R_1 を除けば G はそれぞれ電流計あるいは電圧計として働いて、試料 R_x を通る電流あるいはこれに加わる E の分圧を測定することになる。この型の計器は回路が簡単なので小型の計器となり、携帯や取扱いにも便利である一面、あまり高抵抗は測定できないので、低含水率部分は測定困難である⁵¹⁾。この方式のものには Mundinger, 木研式等の製品がある。

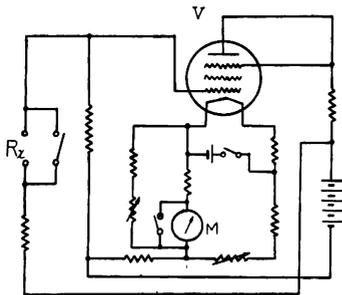


Fig. 1.2.2
真空管電圧計型含水率計の回路
Circuit of tube voltmeter type
moisture meter

b) 真空管電圧計型

高抵抗、すなわち低含水率の部分を精度よく測定するためには、前者よりも微小電流または微小電圧を測定する必要がある。そのため最も多く用いられているのは、真空管電圧計方式によるもので、抵抗式の含水率計中最も多く利用されている型式である。Fig. 1. 2. 2 にその一例を示すが、試料抵抗 R_x は真空管 V のグリッド回路に挿入されており、 R_x の変化はグリッド電圧の変化となつて、陽極電流を大きく変化させるので、計器 M にその指示を直接読みとれるようになつている。この型の計器には

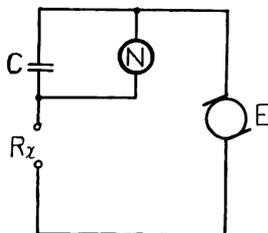


Fig. 1.2.3
充電型含水率計の回路
Circuit of charging current
type moisture meter

c) 充電型

真空管を用いずに高抵抗を測定する方法として、 CR 回路を利用して充放電時間を測定する方法がある。Fig. 1. 2. 3 に原理図を示すが、電源 E の電圧は試料 R_x と蓄電器 C の直列回路にかかり、 R_x を通じて C は充電

され、一定電圧まで充電されると放電管 N が点火する。この充電時間は、電源 E として小型発電器を用いてその回転数から求めるか、あるいは E には電池を利用し、 R, C, N の回路をもう 1 組設け、その回路の R は固定してその C を変化することにより、2 組の放電管の点火時間を同一になるように調整して C の回転角から求められる。この方法は表示方式が異なるだけで他の抵抗式と性能的に大差なく、むしろ測定に時間を要する点が多少不便である。この方式のものには、Blinker, Tsni-Mod 等がある。

d) その他

簡単に電源を要しないものとして、絶縁抵抗の測定に用いるメガーをそのまま用いたものに Kett, 岡本式等があるが測定範囲はあまり広くない。また、電源に乾電池とバイブレーターを用いて高電圧を発生し、指示計器として静電電圧計を利用した Siemens 含水率計⁵⁰⁾ があり、これは測定範囲も含水率 3~25% にわたり目盛の直線性も比較的良好であるが、この計器独特のものである。

これらの抵抗式含水率計に利用される電極は打込式電極、押当式電極、挿込式電極、狭圧式電極の 4 種類に分類することができる。打込電極は木材中に針または刃状の電極を打ち込むもので、おおむね電極の打ち込まれた部分中で含水率の多い部分の状態を指示する傾向⁵¹⁾ があるが、押当および狭圧電極は材の表面状態を測定することになる。挿込電極は、試料に孔をあけて測定したい深さまで電極を挿し込むものであつて、任意の深さでの含水率を指示できるが⁵⁰⁾、手数がかかり試料には大きな傷を残す。

1.3 高周波型含水率計

この型の含水率計は前述のごとく、容量型と損失型に分けることができる。

a) 容量型計器

2. 1. c. 2 に示す容量変化法の原理によつて試料の電気容量を測定する方式で Gann-Hydromat, Australian capacity meter 等がある。前者は可変蓄電器によつて木材の容量を置換して蓄電器の目盛で容量値を指示し、後者は容量変化による発振周波数の変化を計器に指示させるようになってい

b) 損失型計器

Fig. 1. 3. 1 に損失型の計器 Moisture register の回路を示す。試料 X が、真空管 V の左の発振回路に生じた発振勢力に損失を引き起こす程度によつて、右方のブリッジ回路の電流が変化し、この変化を M によつて読み取るようになってい

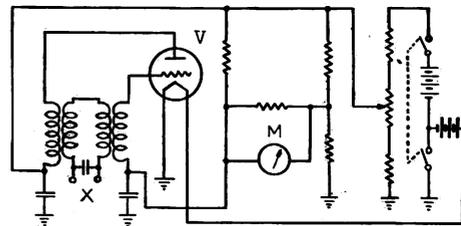


Fig. 1.3.1 誘電体損失型含水率計の回路
Circuit of dielectric loss type moisture meter

る。2. 1. c. 1 に示すような Q を測定することによつて含水率を測定しようとする誘電体損失型の含水率測定器もあるが、測定値と含水率との関係は相当に分散するようである⁷⁾。

高周波型の計器の電極は、表面押当式のいわゆる格子電極と、試料を間にはさむ平行板電極との 2 種類が用いられる。試料の深部の含水率をも検出する目的には後者の方が有利であるが、測定の簡易さからは前者の方が有利である。ただしこの場合にもある程度以下の厚さの試料に対しては厚さの補正を行なわねばならないし、ある程度以上の深さの含水率は測定できない場合がある⁵²⁾。

2. 木材の誘電率測定と測定上の問題

2.1 木材の静電容量の測定方式

ある誘電体の内部において、任意の閉曲面を貫く電気変位 D は、この閉曲面の内部に含まれる電荷の総和 σ の 4π 倍に等しい。また、この場合の電場の強さを E とすると MAXWELL の電磁理論によつて、

$$D = \epsilon E \dots\dots\dots 2.1.1$$

である³⁾。ただし ϵ は物質によつて定まる常数で誘電率とよばれる。したがつて、

$$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} \dots\dots\dots 2.1.2$$

いま電気力線に直角な相対向する 2 平面を考え、その距離を s とすると、両平面間の電位差 V は、

$$V = \int_0^s E ds = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} s \dots\dots\dots 2.1.3$$

両平面間の電気容量 c は、

$$c = \frac{\sigma}{V} = \frac{\epsilon}{4\pi s} \dots\dots\dots 2.1.4$$

ゆえに間に誘電体をおいた、相対する面積 A なる 2 平面電極間の電気容量 C は、

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi s} \dots\dots\dots 2.1.5$$

実用単位に換算すると、

$$C = \frac{\epsilon A}{4\pi s} \cdot \frac{10}{9} = \frac{\epsilon A}{11,3 s} (pf) \dots\dots\dots 2.1.6$$

ただし s は cm 、 A は cm^2 であらわした電極の距離と面積である。ゆえに平行板電極で木材をはさみ、その時の C を測定すれば ϵ が求められる。

C の測定方式としては多くの方法が発表されているが、その測定原理にしたがつて充電法、ブリッジ法、発振法に大別される。

a) 充電法 (直流法)

Fig. 2. 1. 1 において X は試料、 G は Galvanometer であるが、接点 S を入れると電池 E は X を充電する。充電が終わつて S を接地すると X の電荷は G を通して放電する。実験的に G の読度から C_x を求めることができる。この原理は特に直流での誘電率を求める場合に使用されることがあるが、回路抵抗を正確におさえ、時間と電圧とを精密に求めねばならぬので、便利な方法とはいいがたい。

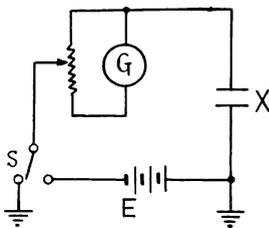


Fig. 2.1.1
充電法による容量測定回路
Circuit used in measuring
capacitance with
charging current method

b) ブリッジ法

ブリッジ法にはかなり多くの種類があり、シェリングブリッジ、変成器ブリッジ、抵抗ブリッジ等をそれぞれさらに工夫したものが用いられている。また、測定には比較法と置換法とが用いられる。いま、Fig. 2. 1. 2 のようなブリッジに交流電源 f により電圧を加え、検知器 v によつて検出したがら、試料 X の容量および抵抗 C_x および R_x を C_0 および R_0 によつて平衡せしめ、その時の C_0 および R_0 の値を C_1 、 R_1 、試料のない時の C_s 、 R_s の値を C_0 、 R_0 とすれば、

$$C_x = C_1 - C_0 \dots\dots\dots 2.1.7$$

$$R_x = R_1 R_0 / (R_0 - R_1) \dots\dots\dots 2.1.8$$

で C_x, R_x が求められる。置換法の場合には X のかわりに既知のアドミッタンスを挿入して、そのアドミッタンスを調節することにより試料挿入時と同様な平衡をとるので、残留インピーダンスの影響を防いで精度をあげることができる。

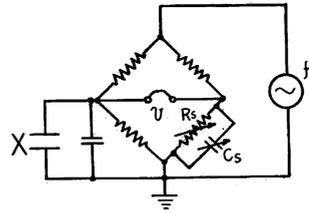


Fig. 2.1.2
ブリッジ法による容量測定回路
Circuit used in measuring
capacitance with bridge method

ブリッジ法は比較的低周波で測定を行なうに適した方法であり、可聴周波域においては問題ないが、周波数が高くなるにつれて浮遊容量、対地アドミッタンス、回路の誘導、残留インピーダンスの影響等が増加して測定が困難となり、誤差も多くなるので、回路によつても異なるが、普通、MC以下の周波数での測定に用いられている。木材関係では接着剤を塗布した単板の抵抗を測定⁹⁾した例はあるが、一般にはあまり用いられない。

c) 共振法

木材の誘電的性質は高周波域において問題になるのが普通であるが、共振法は高周波領域において十分な精度をもつので、木材の誘電的性質の測定に広く利用されている。共振法は一般に、LC発振器の発振または同調回路に試料を挿入して同調をとり、その同調点あるいは同調条件から、または試料と標準電器または標準抵抗を置換して、その値から目的の値をうるものであるが、さらに大別するとQメーター法、容量変化法、複同調法等に分けられる。

1) Qメーター法

Qメーターは各方面に広く普及して、利用しやすく、また広範囲の周波数での測定が容易にできるのでしばしば用いられている。Fig. 2.1.3において、インダクタンス L 、等価直列抵抗 R なるコイルと可変コンデンサー C_s との直列回路に、 C_s と並列に試料 X を接続し、一定の高周波電圧 v を加えて共振させた時、 C_s の値を C_{s1} 、 C_s の端子電圧を V_1 、試料を取り除いてふたたび共振させた時の C_s の値を C_{s2} 、 C_s の端子電圧を V_2 とすれば、

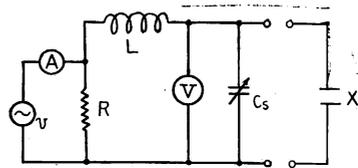


Fig. 2.1.3
Qメーター法による容量測定回路
Circuit used in measuring
capacitance with Q meter method

$$\frac{v}{V_1} = \frac{1}{Q} + \tan \delta_1 \dots\dots\dots 2.1.9$$

$$\frac{v}{V_2} = \frac{1}{Q} + \tan \delta_2 \dots\dots\dots 2.1.10$$

ただし、

$$Q = \frac{\omega L}{R}, \quad \tan \delta_1 = \frac{G_0 + G_x}{\omega C_1}$$

$$\tan \delta_2 = \frac{G_0}{\omega C_{s2}}, \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC_{s2}}}$$

したがって、

$$G_x = \omega C_{s2} \left(\frac{v}{V_1} - \frac{v}{V_2} \right) \dots\dots\dots 2.1.11$$

$$C_x = C_{s2} - C_{s1} \dots\dots\dots 2.1.12$$

として求められる。 G_x, G_0 は試料および回路の等価並列コンダクタンスを示す。

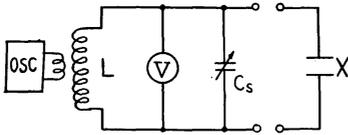


Fig. 2.1.4

容量変化法による容量測定回路
Circuit used in measuring
capacitance with variable
capacitance method

の C_s の値を C_{s1} とし、同調曲線上に $V = V_{r1}/\sqrt{2}$ となるような対照点を求め、両点における C_s の値 C_s' と C_s'' との差を ΔC_1 とする。同様に試料を取り除いてふたたび共振させ、同様に V_{r2} , C_{s2} , ΔC_2 を求めれば、

$$C_x = C_{s1} - C_{s2} \dots\dots\dots 2.1.13$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\omega(\Delta C_1 - \Delta C_2)}{2} \dots\dots\dots 2.1.14$$

$$\frac{1}{R_x} = \frac{\omega \Delta C_2}{2} \left(\frac{V_{r2}}{V_{r1}} - 1 \right) \dots\dots\dots 2.1.15$$

または、

で求められる。

この方法は回路と部品を適当に選ばば相当高い精度で測定することができるが、試料の損失が相当に大きい場合には 4.2. C に示すように R_x の影響が C_x に混入してきて C_x は過大に測られることになり、また、同調曲線は緩傾斜となつて同調点が見だしにくくなるので誤差が大きくなりやすい。小倉²⁵⁾、中戸²⁶⁾らはこの方法で木材の誘電率を測定している。

3) 複同調法

この方法は、いわゆるコンダクタンス変化法をさらに発展させたもので、損失の非常に大きい場合でも容量分と抵抗分を完全に分離して測定することができるものである。この方法は一条³⁾によつて考案されたものであるが次にその概要をのべる。

Fig. 2. 1. 5 において結合コンデンサー C_0 より左側の部分を第 1 同調回路、右側の部分を第 2 同調回路とすれば、第 2 同調回路は Fig. 2. 1. 6 (a), さらに (b) のように置きかえることができる。したがつて同調回路全体は (c) に示すように、 R_p C_p を第 1 同調回路の端子 A B 間に並列に接続したものとみなすことができる。(a) を (b) に等価であるとすると、

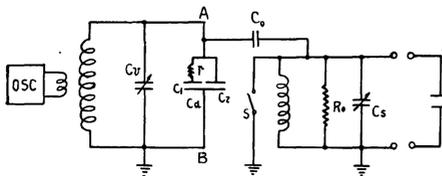


Fig. 2.1.5 複同調法の測定回路
Circuit used in measuring capacitance
with double resonant method

Q メーター法は、誤差が比較的大きく³⁴⁾, R_x が著しく高いかあるいは低い場合には一般にはなほだしい誤差を伴つて測定が困難になる。山本³⁵⁾, SKAAR³⁵⁾らは Q メーター法の原理によつて、木材の誘電的性質を測定している。

2) 容量変化法

Fig. 2. 1. 4 において、共振回路 LC_s に試料 X を並列に接続し、可変蓄電器 C_s を変化せしめてその端子電圧 V を測定して同調点を求め、その時の V の極大値を V_{r1} , V_{r1} を与える時

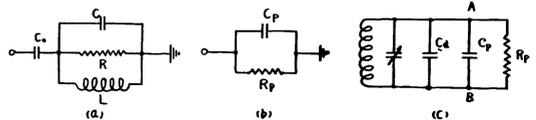


Fig. 2.1.6 複同調法の等価回路
Equivalent circuit of double resonant
method

$$\frac{1}{R_p} + j\omega C_p = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_0} + \frac{1}{1/R + j(\omega C - 1/\omega L)}}$$

これより,

$$R_p = \frac{1}{\omega^2 C_0^2 R} + \frac{R}{\omega^2 C_0^2} \left\{ \omega(C + C_0) - \frac{1}{\omega L} \right\} \dots\dots\dots 2.1.16$$

$$C_p = C_0 \frac{1 + R^2 \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \left\{ \omega(C + C_0) - \frac{1}{\omega L} \right\}}{1 + R^2 \left\{ \omega(C + C_0) - \frac{1}{\omega L} \right\}^2} \dots\dots\dots 2.1.17$$

2.1.16 式において $\omega(C + C_0) - 1/\omega L = 0$ の時 R_p は最少となり, R_p の値は,

$$R_{pmin} = 1/\omega^2 C_0^2 R \dots\dots\dots 2.1.18$$

また, このとき,

$$C_p = C_0 \dots\dots\dots 2.1.19$$

であらわされる。すなわち, R_p の最少値を与える C の値は,

$$C = \frac{1 - \omega^2 L C_0}{\omega^2 L} \dots\dots\dots 2.1.20$$

となり, R_{pmin} を与える C の値は R に全く影響されない。

いま, スイッチ S を閉じて C_v を調整して同調をとり, 次に S を開いて試料を含む第 2 同調回路を接続し, C_s によりふたたび同調をとり, この時の C_s の値を C_{s1} とする。試料を取り除いて C_s によりさらに同調をとり, この時の C_s の値を C_{s0} とすれば, 試料の容量 C_x は,

$$C_x = C_{s0} - C_{s1} \dots\dots\dots 2.1.21$$

で求められる。

C_d は試料の損失 R_x を求めるために設けられた差動コンデンサーで, ダイヤルの回転によつて, 標準抵抗 r を接続した側の容量 C_1 と r のない側の容量 C_2 とは逆方向に変化するが $C_1 + C_2$ は常に一定値 C_d になるように設計されている。 R_x を求める際には, まず r を短絡して S を閉じ, C_v により同調をとつた後 S を開き試料の接続されていない第 2 同調回路を接続し, C_s により同調をとつて, 第 1 同調回路の電流 I_g を最少となるように調節する。この時の I_g の値を I_{g0} とすると, S をふたたび閉じ, r を開放して C_d を調整し, I_g の値が I_{g0} を示すようにすれば, この時の C_1 の値 C_{10} より,

$$R_p = \frac{1}{\omega C_0^2 R_0} = \frac{1}{\omega C_{10}^2 r} \dots\dots\dots 2.1.22$$

したがつて,

$$R_0 = \frac{C_{10}^2}{C_0^2} r \dots\dots\dots 2.1.23$$

同様に試料を接続して同一操作を繰り返した時の C_1 の容量 C_{11} を求めれば R_0 と R_x の合成値 R_r は,

$$R_r = \frac{C_{11}^2}{C_0^2} r \dots\dots\dots 2.1.24$$

ただし,

$$R_x = \frac{R_0 R_r}{R_0 - R_r} \dots\dots\dots 2.1.25$$

によつて求められる。

この方法は, 測定法はかなり複雑であるが, 回路および部品を適当に選ぶことにより木材含水率の全域にわたつて広範囲にその誘電的性質を測定することができる。この方法によつては一条⁹⁾, 押山²⁸⁾ らの木

材に対する若干の測定結果がある。

d) 周波数の選定

一般に物質の誘電的性質は周波数が変化することによつて大きく変化する。この現象は物質の分極をおこす部分が周波数によつて異なるためにおこるものであるから、物質の構成、内部構造によつて差がある。

誘電体の分極を大別すると、原子の内部において電子と核の相互位置の変化によつて生じる電子分極、原子間の相互位置の変位による原子分極、双極子分子の回転によつて生じる双極子分極、物質中の自由イオンの移動によつて生じる界面分極に分けられる⁵⁷⁾。前 2 者はそれぞれ光波域、熱波域においておこるものであつて実用的な意味で誘電率を測定する対象とはなり難く、また測定装置も簡単なものではない。最後のものは、可聴周波以下の低周波域において見られるものであつて、周波数が低いほど直流の場合のように物質の表面状態に支配されるようになり、木材の含水率検定等に利用する上からは好ましいものではない。したがつて、水分検定のために利用されるべき周波数は主として、双極子分極をおこす周波数域、すなわちいわゆる放送周波数域に限定されることになる。

この周波数領域においては、木材の誘電率も高周波抵抗も周波数の増大に伴い減少する傾向にある⁴⁴⁾。KRÖNER⁴⁵⁾ は、木材の誘電的性質の周波数による分散についてさらに豊富な実験を行なつている。KRÖNER によると、木材の誘電率は、含水率のいかんにかかわらず周波数の増加につれてゆるやかに減少していくが、 $\tan \delta$ は周波数の変化によつて変動し、 $10^5 \sim 10^6 \sim$ 付近で最低を、 $10^7 \sim 10^8 \sim$ 付近で最高を示す。後述するように木材の誘電率、したがつて容量測定値は誘電体損失が大きいほど、その影響による誤差を生じやすい。この意味で誘電率測定に好つごうな周波数は $10^5 \sim 10^6 \sim$ 程度のものであるが、さらに含水率が変化する場合を考えると、誘電率は測定周波数を異にしても、含水率変化に対する誘電率の変化率はあまり変動しないが、 $\tan \delta$ の変化率は測定周波数により大差があり、KRÖNER の測定結果を検討すると $10^6 \sim$ 付近が著しく変化率が少なくなつている。この事實は、もし、誘電率の測定に際し、誘電体損失に基づく誤差が混入してくる場合でも、含水率の変化に対する混入誤差の影響は最少限度におさえられることを意味している。これらの点から、木材の含水率検定のための誘電率測定周波数は $10^6 \sim$ 付近が最も望ましいものと考えられる。

測定計器の面から考えると、 $10^7 \sim$ 以上の高周波では種々の誘導の影響が大きく、実用計器の構成が困難であり、 $10^5 \sim$ 以下の低周波では共振法によるのが困難でブリッジ法を用いることになり不便であるから、この意味でも $10^6 \sim$ 付近を利用することは好つごうである。本報告はこの意味で、すべて $1 \times 10^6 \sim$ において測定を行なつたものである。

2.2 電極の edge effect の影響

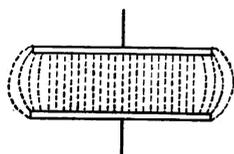


Fig. 2.2.1 平行板電極における高周波電気力線の経路
Schematic diagram of parallel plate electrode showing path of electric flux

今、平行板電極における高周波電気力線の通路を考えると、極板の中心付近においては電場が整つているため、電気力線は極板面に垂直に最短距離を通過する。しかし、極板の周辺付近においては電場は乱れ、電気力線は極板の周辺より外部に凸出するようになる (Fig. 2. 2. 1)。したがつてこの電極によつて実際に測定される C の値は 2.1.6 式により算出されたものより、この乱れに相当する分だけ過大である。この現象は edge effect と呼ばれているが、実際面では任意の広がりをもつ木材試料を特定の電極で測定することになるので、この場合極板の間隔が測定値に大きな影響を

与える。したがって edge effect の補正の問題は、木材の誘電率測定上最も大きな問題である。

KIRCHHOFF は、この関係を追求して次の実験式を導いている。

$$\frac{\Delta C_e}{C_e} = \frac{1}{\pi r} \left\{ d \log \frac{16\pi(d+t)r}{d^2} + t \log \frac{d+t}{t} - 3d \right\} \dots\dots\dots 2.2.1$$

ただし、 C_e は測定された全容量、 ΔC_e は edge effect による容量、 r は円型電極の半径、 d は極板間の距離、 t は極板の厚さである。その後 J. J. THOMSON は角型の電極について、

$$\begin{aligned} \Delta C_e = & 1.113 \frac{l}{4\pi^2} \left[1 + \log \left\{ 1 + \frac{\pi b}{d} + \log \left(1 + \frac{\pi b}{d} \right) \right\} \right] \\ & + 1.113 \frac{b}{4\pi^2} \left[1 + \log \left\{ 1 + \frac{\pi l}{d} + \log \left(1 + \frac{\pi l}{d} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots 2.2.2 \end{aligned}$$

なる式を導いた。ただし l 、 b は電極の長さおよび幅でその他は前式と同様である。2.2.1~2 式は SCOTT および CURTIS²¹⁾ により、数 %~10% の誤差を生じることが指摘されている。C. SKAAR は、COURSEY の著書を引用して、

$$C_e = 0.0282 l \left\{ \frac{\pi b + d}{d} + \log \left(\frac{\pi b + d}{d} + \log \frac{\pi b + d}{d} \right) \right\} \dots\dots\dots 2.2.3$$

なる式を使用している。これは 2.2.2 式を簡略にしたものと考えられるが、電極の $l:b$ 比を任意に選んだ場合の一般式としては使用できず、特殊な場合にしか用いられない。押山²⁷⁾ は COURSEY の式自体も、KIRCHHOFF の式とともに試料が相当薄い場合にしか適用できないことを指摘している。

上村および中村は、任意の木材を平行板電極にはさんで誘電率を測定する場合の edge effect の修正式として、

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon - pd}{1 + qd} \dots\dots\dots 2.2.4$$

なる近似式を提示した⁴³⁾。ただし ε_t は木材の真の誘電率、 ε は edge effect を含んだ実測容量から、edge effect を無視して算出された見かけの誘電率、 d は木材の厚さ、すなわち電極間の距離、 p および q は電極によつて定まる常数である。

この式は、 d のある範囲では近似的に実際とよく適合するが、元來曲線的に変化する ΔC_e を近似的に直線とみなしているので、広範囲の厚さに対する測定には無理であり、また電極ごとに常数を決定しなければならない不便がある。

著者は木材の誘電率を平行板電極によつて測定するとき生じる edge effect の一般的な関係をあきらかにする目的で、以下にのべる一連の実験を行なつた。測定装置は複同調法によるもので、3.1 に後述する B 装置を用いたものである。

2.2.1~2 式等の edge effect の計算式は、空気蓄電器を対象として導かれたものであるが、兩極板の間に誘電率 ε なる木材その他の誘電体をはさんだときには edge effect にもとづく C の増加も近似的に ε 倍されるものと考えられる。なんとなれば電気力線の分布型は、 ε の多少によつて変化はしないはずで、edge effect を含まぬ計算上の容量を C_i 、edge effect を含んで増加した容量を C_x 、 $C_x - C_i$ を ΔC_x とすれば、 C_x が ε 倍されれば C_i も ΔC_x も ε 倍さるべきであるからである。この際、極板の側方には、多少電気力線が空気中を通過している部分ができるが、これは全体の容量にくらべるときわめて少部分にすぎないはずである。

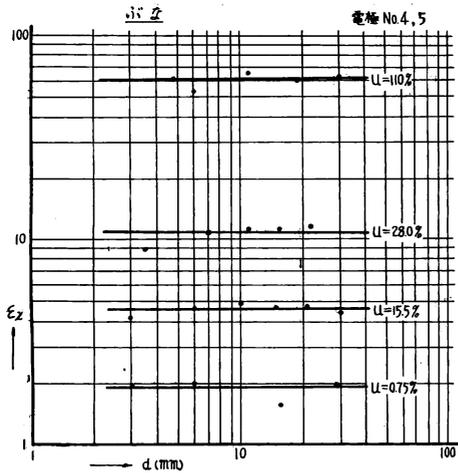


Fig. 2.2.2 電極と同大の試料における試料の厚さと誘電率との関係 (ブナ)
含水率 110% は電極 No. 5, その他は電極 No. 4 による

Variation of measured dielectric constant (ϵ_x) with thickness of samples (d) they are equal to the plate of electrode in size (Buna)

The samples 110% moisture content were measured with electrode No. 5, and other samples were measured electrode No. 4

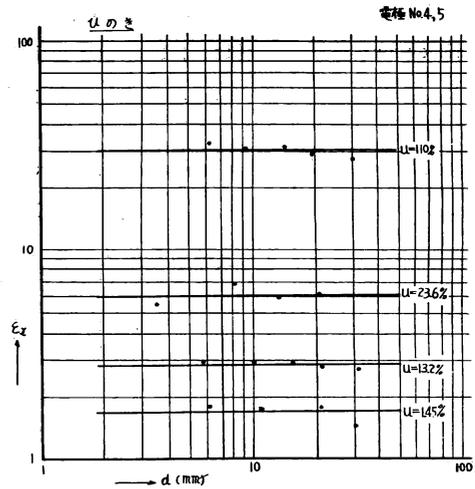


Fig. 2.2.3 電極と同大の試料における試料の厚さと誘電率との関係 (ヒノキ)
含水率 110% は電極 No.5, その他は電極 No. 4 による

Variation of measured dielectric constant (ϵ_x) with thickness of samples (d) they are equal to the plate of electrode in size (Hinoki)

The samples 110% moisture content were measured with electrode No. 5, and other samples were measured electrode No. 4

以上は誘電体が左右に大きな広がりをもつた場合であるが、誘電体の広がり少なく、電極板の大きさに近づくと、力線の乱れた部分のうち一部は誘電体の外側すなわち空気中を通過することになり、edge effect は減少してくる。もし、試料がちょうど電極板と同大である場合には、試料中を通る力線には乱れはほとんどなくなり、試料の C_x は C_e に一致するはずである。もちろんこの際 C_x 中には試料の側面にある空気中を通っている電気力線が多少残つて、空気による edge effect がおこっているが、木材の場合、試料の ϵ が空気比に相当大きいので、この edge effect は一般に無視しうる程度のものであろう。Fig. 2. 2. 2~3 はそれぞれヒノキおよびブナの数種類の含水率で平衡した試料をちょうど電極の大きさに木取り、これをしだいにかなで削つて薄くしてゆき、厚さ別の C_x を測定して、その C_x から 2.1.6 式によつて ϵ_x を算出した結果である。電極は Table 3. 1. 1 に示す No. 4, 5 を用いた。図から明らかのように、誘電率は試料の厚さに無関係にはぼ一定の値をとり、含水率および樹種が異なつてもこの関係はかわらない。また、試料側面の空気中の edge effect による ΔC_x の影響も見られないようである。

Fig. 2. 2. 4~5 は、試料の縁辺が電極外部に張り出した程度と edge effect の量との関係を検討した結果である。試料としてはカツラ、エゾマツの板を用いたが、試料は電極よりも面積が大きく、電極の周辺より、各辺 15~30 mm ずつ側方に張り出すようにした。板は周辺を逐次切り落しながら、そのつど ϵ_x を測定した。試料の厚さは、5, 10, 20 mm の 3 種とし、No. 4 の電極を用いて測定したが、電極の縁辺から、板の周辺までの距離 l が小となるにしたがつて、 ϵ_x ははじめゆるやかに、後やや急激に減少する。前述の結果より、 $l=0$ の点の ϵ_x が edge effect のない誘電率 ϵ_e を示すことになる。平衡してい

る含水率が、試料別に多少差があるので ϵ_x の値は同一樹種のもので一致してはいないが、共通にいえることは、厚さが増加しても edge effect があまり増加しなくなる時の ϵ_x の値は、厚い試料ほど大きい傾向にあること、そのときの edge からの距離 l は、厚さの厚いほど大きく、大略試料の厚さの 0.5 ~ 1.0 倍程度であることである。これは、電極の縁辺における電気力線は、試料が厚いほど広く外方に広がるが、それにはある限度があることを示している。この関係は含水率が異なってもほぼ同様であった。

なお、電気力線の広がる方向が電極の縁辺から繊維方向に対してである場合と、繊維と直角方向に対してである場合とでは、その広がり方に差のあることが考えられるので、 f_{\perp} 、 f_{\parallel} 両方向別々に試料の縁辺を切り取ってゆき、その影響を調べたが、有意なる結果は得られなかつた。したがつてこの差は比較的小さいものと思われる。結局これらの結果から実際に電極よりも大きな板材の誘電率を測定する場合には、電極の周辺より板の厚さの 1.0 倍以上の広がりをもつたものについて、後に示す edge effect の補正を加えればよいことになる。

次に十分な広がりをもつた任意の厚さの板材の edge effect であるが、この場合 ϵ_x は試料の厚さを増すにしたがい増加するが、その増加は電極の形状ともまた関係があることはすでに著者ら⁴⁸⁾が報じたところである。元来 edge effect による容量 ΔC は電極の周辺に生じるものであるから、電極の面積よりも、電極周辺の形状特に周辺の長さによつて支配されるはずである。 ϵ_x と電極の周辺長との関係を調べるため、十分な広がりをもつたヒノキ乾材を試料として、電極の面積はさきに用いた No. 4 と同大であり、辺長の比がそれぞれ 1:1~7 である矩形電極を作り、それぞれの電極によつて ϵ_x を測定したところ、Fig. 2. 2. 6 のようになった。図中 n は矩形電極の短辺に対する長辺の比であり、 d は同一試料を逐次鉋削して厚さを減じた場合の試料の厚さである。図から明らかなように、 n が増加すると ϵ_x の値も増加する。いま任意の n に対する辺長を算出して l とし、 $n=1$ すなわち正方形電極に対する辺長を l' とすれば、 n と $l-l'$ との関係は、Fig. 2. 2. 7 に実線で示すごと

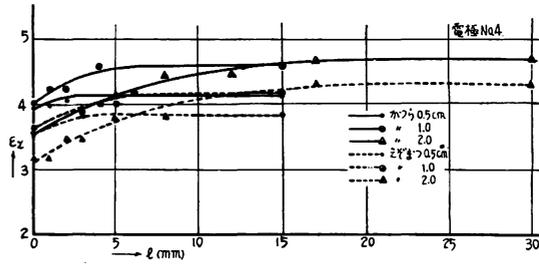


Fig. 2.2.4

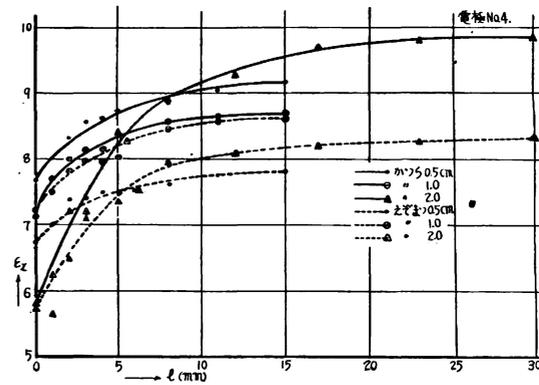


Fig. 2.2.5

Fig. 2.2.4~5 板のひろがりか測定誘電率におよぼす影響
Influence of extension of board edge (l) to measured dielectric constant (ϵ_x)
Electrode No. 4, —Katsura, -----Ezomatsu.

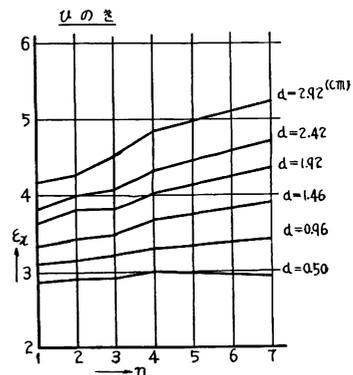


Fig. 2.2.6 矩形電極の長短両辺の比 n と edge effect の増加の関係
Ratio of two edges of rectangle electrode (n) and increase of edge effect (Hinoki)
 d : Thickness of sample.
 ϵ_x : Measured dielectric constant.

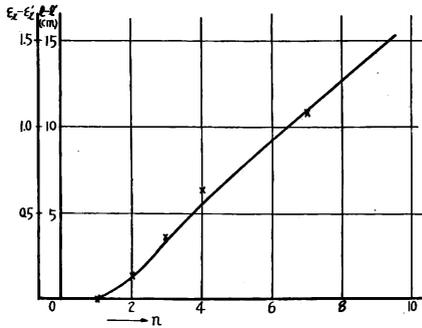


Fig. 2.2.7 電極の辺長の増加と edge effect の増加との関係

Relation between increase of edge length ($l-l'$) and increase of edge effect ($\epsilon_x - \epsilon_{x'}$)
 n : Ratio of two edges of rectangle electrode.
 —Showing the relation between ($l-l'$) and n , \times showing the relation between ($\epsilon_x - \epsilon_{x'}$) and n .

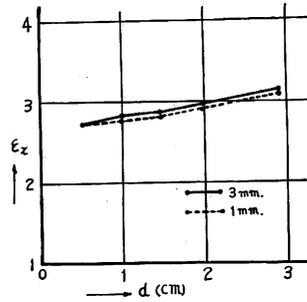


Fig. 2.2.8 電極の厚さの edge effect におよぼす影響

Relation between edge effect and thickness of plates of electrode
 d : Thickness of sample.
 ϵ_x : Measured dielectric constant.

くであるが、これに対して l に対応する ϵ_x から l' に対応する $\epsilon_{x'}$ を差し引いた値は、図中に \times 印で示すようにほとんど同一の傾向を示す。図には試料の厚さ 2.92 cm の場合を示した。

また、電極の厚さが edge effect に影響することは 2.2.1 式によつても明らかであるが、実用的な電極を考えた場合、相当の広がりをもつた平行板電極が堅固に支持されるためには数 mm 程度の厚さをもつことが必要である。本報告に使用した電極は、すべて 3 mm 厚のものを使用した。これ以上の厚さは実際上そう必要でないので、電極を薄くした場合、どの程度の影響が見られるかを Table 3.1.1 の No. 3 の電極と、これと同大で厚さを 1 mm に減じたものによつてヒノキ材の誘電率を測定した。その結果を Fig. 2.2.8 に示す。測定結果はわずかに 3 mm 厚の電極の方が ϵ の値は多くであるが、その差はきん少で試料の厚さ d を減じてこの関係に大きな変化は見られなかつた。したがつて以下にのべる edge effect の検討は、電極の厚さを 3 mm に一定のものとして行なつたものである。

さて、

$$\Delta C = C_x - C_t \dots\dots\dots 2.2.5$$

$$\Delta \epsilon = \epsilon_x - \epsilon_t \dots\dots\dots 2.2.6$$

であるから、2.1.6 式より、

$$\Delta \epsilon = \frac{11.3d}{A} \Delta C \dots\dots\dots 2.2.7$$

ΔC は l の変化に比例し、またすでにのべたとおり、 ΔC は ϵ_t にも比例して増加すべきであるから、 K を比例常数とすれば、

$$\Delta \epsilon = \frac{K \cdot d \cdot l}{A} \epsilon_t \dots\dots\dots 2.2.8$$

2.2.6 式より、

$$\epsilon_x = \epsilon_t \left(1 + \frac{d \cdot l}{A} K \right) \dots\dots\dots 2.2.9$$

なる関係が成り立つ。しかし前述のように ϵ_x と d との関係は d の広い範囲では直線的ではない。また ϵ_x と l との関係は Fig. 2.2.7 に示すようにほぼ直線的であるが、相似形の電極で A を変化した場合

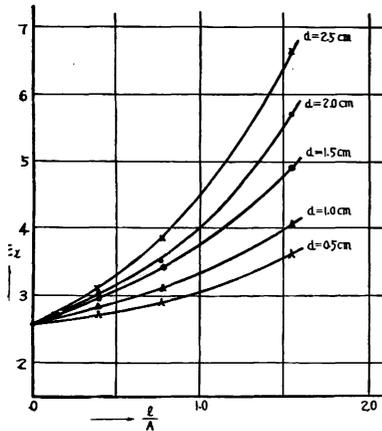


Fig. 2.2.9 l/A と ϵ_x との関係
Relation between l/A and ϵ_x

l : Total length of 4 edges of electrode plate.

A : Area of electrode plate.

ϵ_x : Measured dielectric constant.

d : Thickness of sample.

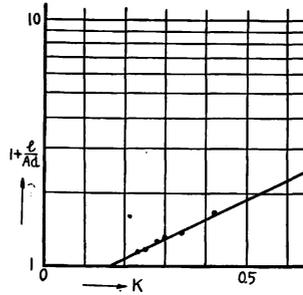


Fig. 2.2.10 A, d, l の値と K の値との関係

Relation between K and A, d, l

Table 2.2.1 K と l/A との関係
Relation between K and l/A

電極 No.	5	4	3	備考
$A \text{ cm}^2$	7.1	28.3	113.2	} $d = 2.5 \text{ cm}$
$l \text{ cm}$	10.86	21.72	43.44	
l/A	1.53	0.767	0.384	
K	0.418	0.300	0.250	

Table 2.2.2 K と d との関係
Relation between K and d

$d \text{ cm}$	2.0	3.0	5.0	備考
K	0.340	0.280	0.240	電極 No. 4

には l も同時に変化して、間接の影響を受ける。この際 A および l の影響が K におよべば、 d を一定にした場合にも l/A と ϵ_x との関係は直線的ではない。 ϵ_x と l/A との関係を検討するために、相似形の電極で A の比を

1 : 2 : 4 と変化した電極 (Table 3.1.1, No. 3~5) を作り、ヒノキ気乾試料を同一部材から木取つて、 ϵ_x を異なる電極によつて測定した。板の厚さは 0, 5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 cm の 5 種類で、もちろん周辺は電極に対して十分な広がりをもつてゐる。 l/A と ϵ_x との関係は Fig. 2.2.9 のごとくであるが、 l/A が増加するにしたがつて ϵ_x の増加率も増してゆく傾向にある。すなわち K の値は l/A が増すにしたがつて増加する。また、後に実験例を示すように d の増加にしたがつて ϵ_x の増加率が減少することから、 K の値は d が増すにしたがつて減少するはずである。 K の値を検討するため、前同様に No. 3~5 の電極によつて、ヒノキ気乾材を試料として d および l/A と K の値との関係を実験的に求めたところ Table 2.2.1~2 のごとくつた。この K の値は図示してみると Fig. 2.2.10 のように $1+l/Ad$ に対して、対数的な関係にある。したがつて、

$$K = \alpha + \beta \log\left(1 + \frac{l}{Ad}\right) \dots\dots\dots 2.2.10$$

とおいて、Table 2.2.1~2 の値から α, β を求めると、 $\alpha = 0.165, \beta = 1.20$ となる。2.2.9 および 2.2.10 式より、

$$\epsilon_x = \epsilon_t \left[1 + \frac{d \cdot l}{A} \left\{ 0.165 + 1.20 \log\left(1 + \frac{l}{Ad}\right) \right\} \right] \dots\dots\dots 2.2.11$$

である。矩形電極の場合、

$$l = 2\sqrt{\frac{A}{n}}(n+1) \dots\dots\dots 2.2.12$$

であらわされるから、2.2.11 式は書きかえると、

$$\epsilon_x = \epsilon_t \left[1 + \frac{4d(n+1)^2}{l \cdot n} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \frac{\frac{4(n+1)^2}{ln} + d}{d} \right\} \right] \dots\dots\dots 2.2.13$$

として電極面積に関係なく示すことができる。

また、円形電極では、同様に、

$$\epsilon_x = \epsilon_t \left[1 + \frac{2d}{r} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{2}{rd} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots 2.2.14$$

となる。ただし r は電極の半径である。

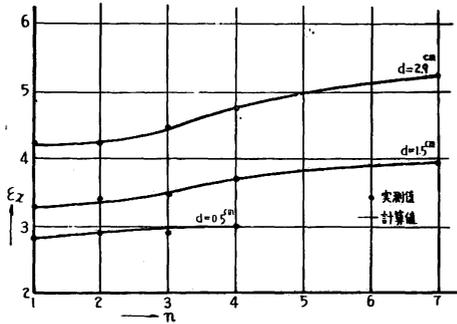


Fig. 2.2.11

Edge effect の補正式の検討 (n との関係)

Check of equation 2.2.11

d : Thickness of sample, n : Ratio of two edges of rectangle electrode, \bullet Actual value, — Calculated value.

2.2.11 式における l/A と ϵ_x との関係、 A が固定して l が変化した場合にも適用しうるかを Fig. 2.2.6 の結果と 2.2.13 式によつて計算したものとについて比較検討してみると、 n と ϵ_x との関係は Fig. 2.2.11 のごとくなり、計算値と実測値はおおむね一致した。

2.2.11~14 式を検討するため、含水率の平衡した試料を種々の樹種から木取り、小型の slicer で鉋削して厚さを減少しながら ϵ_x と厚さ d との関係測定し、2.2.11~14 式で計算した値と比較したところ、いずれもよく一致した。電極も Table 3.1.1 に示す No. 1~8 の各種電極を使用した、どの電

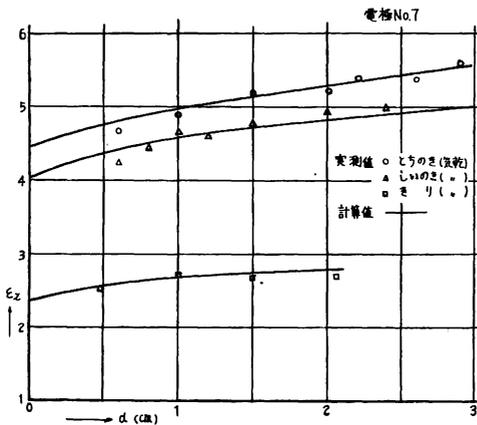


Fig. 2.2.12

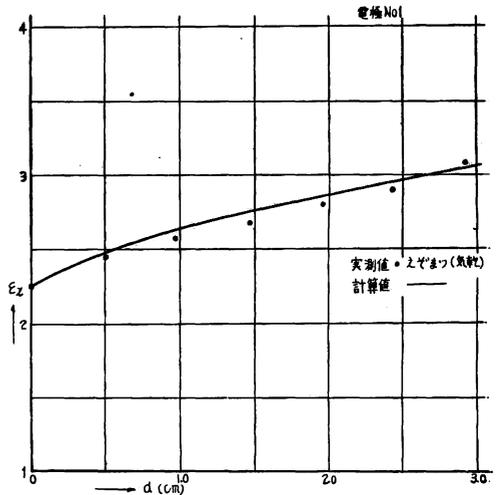


Fig. 2.2.13

Fig. 2.2.12~15 Edge effect 補正式の検討

Check of equation for correct the edge effect

— Calculated value. Electrode No. is Fig. 12—No. 7, Fig. 13—No. 1, Fig. 14—No. 4, Fig. 15—No. 5.

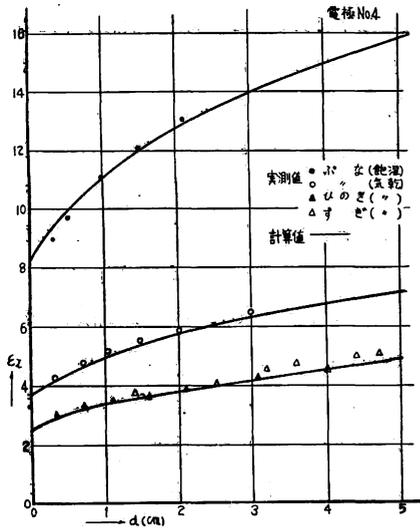


Fig. 2.2.14

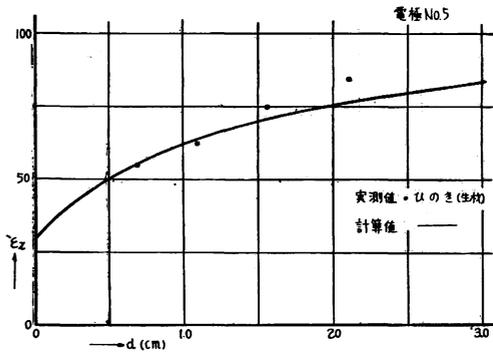


Fig. 2.2.15

極にも適用できた。その結果を Fig. 2. 2. 12~15 に例示する。なお Fig. 2. 2. 12 は 3.1 にのべる共振法による装置 A によつて測定されたものである。また、ヒノキ生材 (Fig. 2. 2. 15) の実測値は計算値より多少高目

にてだが、これは若干水分傾斜があつたものを鉋削したためと推定される。

2.3 電極の air gap の影響

平行板電極間に木材をはさんでその誘電率を測定する場合、edge effect とともに誤差の大きな原因となるものに電極と木材とが密着しないために生じる air gap の影響がある。電極は完全に平面状に作られ、完全に平行状態を保つていたとしても、木材が電極との接触面において、十分に平面でなく、また平行状態でなかつたとすると、電極と木材片の間には空けきが生じる可能性がある。実験的にはこのような場合錫箔を試料面にはりつけて電極とする場合があるが、実用面ではこのようなことはできない。木材の上下両面が十分な平面である場合には、その平行度は多少不完全でも、電極の方を自在接合にして保持しておくことにより、air gap はつくりたくないが、木材の表面が著しく凹凸があつたり、あるいはそれ自体が反張している場合等は電極板と木材間に air gap が必ずはいつてくる。電極板が木材に密着している場合には、平行度は多少不完全でも測定される全容量は、電極各部分のもつ容量の並列合成値であるから、平均的に誘電率が測定されるが、air gap が生じると、木材のもつ本来の容量と air gap の容量とが直列にはいつて一諸に測定されるので、無視できない誤差を生じることになる。

いま、Fig. 2. 3. 1 において、上下両電極の距離を d 、板の厚さを d_w 、air gap の厚さを $d-d_w=d_a$ とし、木材および空気の誘電率および容量をそれぞれ $\epsilon_w, \epsilon_a, C_w, C_a$ とすれば、木材および空気を含めた容量 C は、

$$C = \frac{C_a C_w}{C_a + C_w} \dots\dots\dots 2.3.1$$

であり、したがつてこの場合の複層誘電率 ϵ は、

$$\frac{\epsilon}{d} = \frac{\epsilon_a \epsilon_w}{\epsilon_a d_w + \epsilon_w d_a} \dots\dots\dots 2.3.2$$

$$\frac{d_a}{d_w} = \frac{1}{x}, \quad \epsilon_a = 1 \text{ とおくと,}$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon_w (x+1)}{x + \epsilon_w} \dots\dots\dots 2.3.3$$

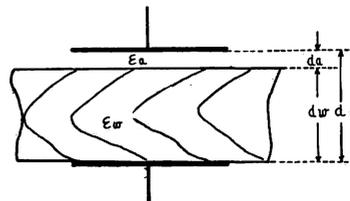


Fig. 2.3.1

電極と試料との間に空けきがある場合 Schematic diagram of test capacitor with an gap between dielectric medium and plate of electrode

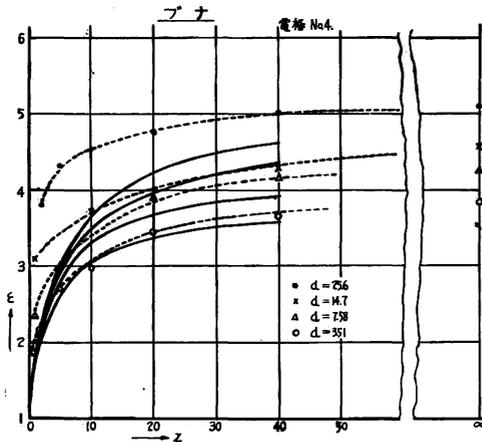


Fig. 2.3.2 空げき比と測定された誘電率との関係
Relation between ratio (x) of air gap (d_a)
—sample thickness (d_w) and measured
dielectric constant ϵ (Buna, electrode No. 4,
—calculated value,actual value)

よび x の大きい場合、すなわち電極間隔 d の小さい場合にはほぼ一致するが、その他は大きく離れている。これは d によつて大きく変化する値、すなわち edge effect の影響であろうことが容易に想像される。複層の場合、前節にのべた edge effect、すなわち電気力線の分布の影響は、木材部分のみに働くのではなく、電気力線は空気層と木材層とを通じて Fig. 2. 2. 1 のごとき $d_a=0$ の場合とほとんど同形の分布をするものと想像される。

したがつて実際に測定された誘電率を ϵ_s とすることと、2.2.11 式により、

$$\epsilon = \epsilon_s / \left[1 + \frac{d \cdot l}{A} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{l}{Ad} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots 2.3.4$$

によつて ϵ は求められねばならない。Fig. 2. 3. 2 の結果を 2.3.4 式によつて補正した ϵ と、 $d=d_w$ のときの ϵ_s から同様 ϵ すなわち ϵ_w を求め、2.3.3 式によりそれぞれの x に対して算出した ϵ とを比較した結果を Fig. 2. 3. 3 に示す。それぞれの厚さの試料には含水率および比重に多少差があるが、 ϵ_w は 3.18~3.24 の範囲内にあつて、その差が小さかつたので、計算値は ϵ_w の平均値によつて求めたものである。実験値はよく計算値と一致した。

同様の実験は Table 3.1.1 の電極 No. 1, 2, 3, 4, 5 等によつて行なつたが、いずれも同様の結果が得られた。Fig. 2. 3. 4 に円形電極 No. 1 による測定例を示す。

2.3.3 式から明らかなように、air gap の影響は ϵ_w が大きくなるほど大となる。 x と ϵ との関係を 2.3.3 式によつて ϵ_w 別に示せば、Fig. 2. 3. 5 のごとくなる。 x が著しく大きい場合、すなわち air gap がわずかである場合には、 ϵ は ϵ_w とほとんど等しく、air gap の影響は問題にならないが、 ϵ_w が大きくなるにしたがい、同一の x においての ϵ と ϵ_w の差は大きくなり、air gap の影響に対する補正を考えなければならなくなつてくる。Fig. 2. 3. 6 は ϵ_w に対する ϵ の関係を種々の x の場合について示したものであるが、図中点線で示したのは $(\epsilon_w - \epsilon) \times 100 / \epsilon_w = \varphi$ とおいたときの誤差率 φ を示す限界線で、 x の線が $\varphi=0$ 、すなわち $\epsilon = \epsilon_w$ の比例線から遠ざかり、ある φ の値を示す線を越える場合が、すなわ

となるはずである。この関係を検討するために、ブナ気乾材から 4 種類の d_w を有する柁目板を正確に木取り、電極 No. 4 の間に置いて、 d をしだいに変化せしめ、 ϵ と d を測定した。測定には 2.2 の場合と同様 B 装置を用いた。試料の表面は特に平滑に仕上げ、上下両面の平行度もできうる限り完全に保つた。 d は Fig. 3. 1. 4 の micrometer により 1/100 mm まで精密に測定した。測定された ϵ と、 x との関係を Fig. 2. 3. 2 に示す。各厚さとも、 $x=\infty \sim 40$ 付近までは ϵ にほとんど変化をみないが、後 x の減少、すなわち air gap の増加に伴い急激に ϵ を減少するにいたる。図中に実線で示したのは、 $d=d_w$ のときの ϵ を ϵ_w として 2.3.3 式より計算した ϵ の値であるが、計算値と実測値は試料の厚さの薄い場合お

ち測定された ϵ の値が air gap に対する許容誤差率 φ の範囲内で $\epsilon = \epsilon_w$ として補正なしに利用しうる部分を示す。この範囲は、図から明らかなように割合せまいので、 ϵ_w が大きく、しかも air gap をともなう場合には 2.3.3 式により補正を加える必要がある。実際には電極は板面に押しつけられるので空げきは試料の全面にわたって一様に生じるのではない。したがって x は電極から最も離れた材面までの距離、たとえば粗面に原因するものはその凹凸差、電極の圧着不足によるものは電極と試料間に最もすき間のできた部分の間げき厚を d_n として計算すると air gap による誤差を過大に見つめることになる。 x はこのようにして求めた値の約 2 倍として推定して差し支えない。板の反張による場合は、電極と材面の弧のなす最大矢高を d_n として計算をすれば近似的に補正をすることができる。また、たとえばフローリングのように、一定寸度の空げき伴う試料を測定する場

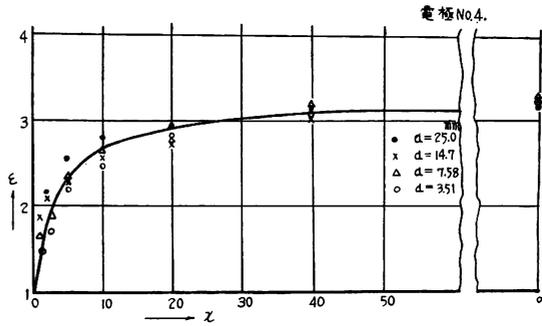


Fig. 2.3.3

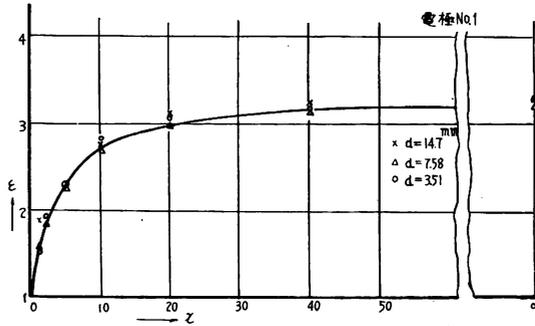


Fig. 2.3.4

Fig. 2.3.3~4 空げきおよび edge effect の補正式の検討
Check of equation for correct the air gap effect and edge effect (Comparison of calculated value with actual value)

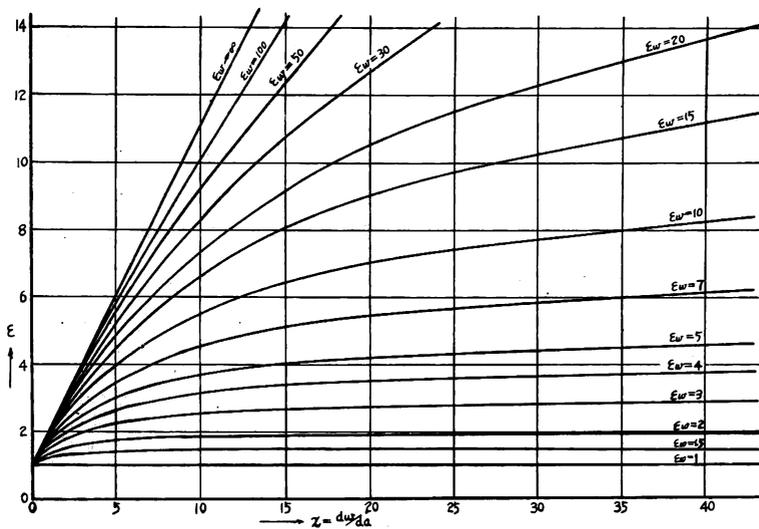


Fig. 2.3.5 空げき比と測定された誘電率との関係

Calculated diagram of measured dielectric constant (ϵ) for dielectric constant of wood (ϵ_w) and air gap ratio (x)

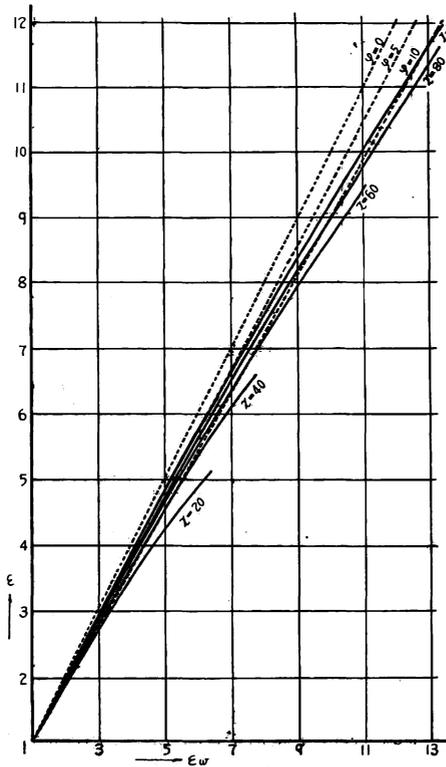


Fig. 2.3.6 空けきによる誘電率の誤差率
Error due to air gap at measurement
of dielectric constant
($\phi = (\epsilon_w - \epsilon) / \epsilon_w \times 100$, $x = d_w / d_n$)

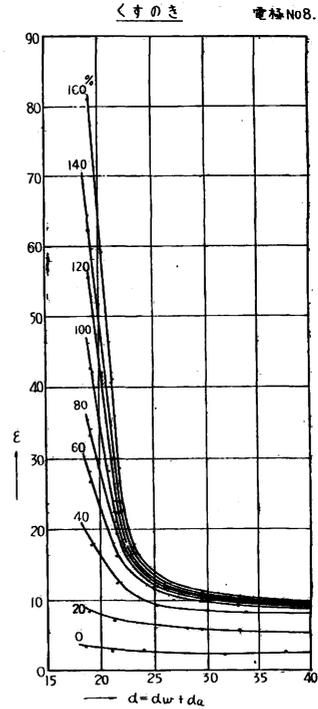


Fig. 2.3.7
試料間に空けき層を伴う場合の測定
Measurement of dielectric constant
of woods with air gap between each
board (Kusunoki, electrode No. 8)

合にもこのような関係を利用して補正することができる。

以上は試料と電極の接触面の間に僅少の空けきが存在する場合についてであるが、極板の間に相当量の空けきを伴って試料を挿入する場合、たとえば棧積されたままの被乾燥材全体を電極の間にはさんでその含水率変化を直読したい場合などについても全く同様に取扱うことができる。Fig. 2. 3. 7 は後述する装置 A と電極 No. 8 により厚さ 6.5 mm のクス生材 3 枚を空けきをおいて重ね合わせ、室内に放置して含水率を徐々に減少させながら、板の間隔を変えて ϵ を測定した例である。Fig. 2. 3. 5 からも明らかのように、板の間隔が広くなるにつれて測定値に対する間隔変化の影響は減少し、含水率変化の影響のみがみられる。このような場合には補正された ϵ_w を算出せず、一定の間げきにおける ϵ の値の比較から直接含水率を知る方式を採用した方が好つごうである。ただし試料の含水率があまり高い場合には含水率が変つても ϵ はほとんど変化しなくなるので測定が困難になるから、このような方法は含水率の低い場合において利用するべきであろう。

次に一定の間隔 d を保つ電極間に任意の厚さの木材が挿入される場合——これは製品の流れ工程中における連続測定の場合等にあられるが——についてのべる。測定さるべき板の厚さを d_w としたとき、厚さの変化が $\pm \Delta d_w$ だけあつたとして、 $\Delta d_w / d_w = y$ とおき、また $d_w / d = z$ とおけば 2.3.2 式は $\Delta d_w = 0$ のとき、

$$\epsilon = \frac{\epsilon_w}{z + (1-z)\epsilon_w} \dots\dots\dots 2.3.5$$

したがって、

$$\epsilon_w = \frac{\epsilon z}{1 - \epsilon(1-z)} \dots\dots\dots 2.3.6$$

いま、 d_w が Δd_w だけ増加または減少した場合の見かけの ϵ を ϵ' とし、これから Δd_w を無視して算出された ϵ_w を ϵ_w' とすれば、

$$\epsilon' = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_w - (\epsilon_w - 1)(1 \pm y)z} \dots\dots\dots 2.3.7$$

$$\epsilon_w' = \frac{\epsilon' z}{1 - \epsilon'(1-z)} = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{\epsilon_w}\right)(1 \pm y)} \dots\dots\dots 2.3.8$$

これより、

$$\frac{1 - \frac{1}{\epsilon_w'}}{1 - \frac{1}{\epsilon_w}} = 1 \pm y \dots\dots\dots 2.3.9$$

となり、板の厚さの変化にもとづく誘電率測定の誤差は、電極間隔、および電極間隔と板の厚さとの比とは無関係に、板の厚さの誤差率 y によつて支配されることがわかる。この際 edge effect の影響は、 ϵ_w にも ϵ_w' にもほとんど同様な影響を与えているので、無視することができる。

Fig. 2.3.8 に、 ϵ_w に対する ϵ_w' の値を y が 2~10% の範囲内で変化した場合について図示する。図から明らかなように、 y が 1% より少ない程度の場合には $\epsilon_w = \epsilon_w'$ と見なしても大きな誤差は生じない。しかし木製品の厚さムラは、種類により一定ではないが単板では 1~5%¹⁹⁾、床板では 3% 程度²⁰⁾であるから、このような測定法を一般の木製品に応用することは ϵ_w の相当小さい場合のほかは賢明でないと思われる。

なお、電極が air gap でなく、他の薄い絶縁板を介して試料に接触する構造の電極を利用する場合も考えられるが、このような場合には 2.3.2 式の ϵ_a の代わりに絶縁板の誘電率 ϵ_i を、 d_a の代わりに絶縁板の厚さ d_i を用い、 $d_i/d_w = 1/x$ とおくと、式 2.3.3 同様に、

$$\epsilon = \frac{\epsilon_w \epsilon_i (x+1)}{\epsilon_i x + \epsilon_w} \dots\dots\dots 2.3.10$$

によつて ϵ_w を求めることができる。

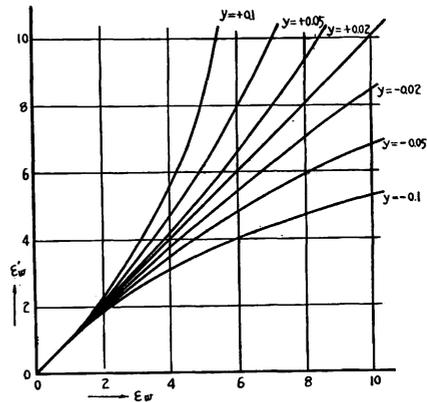


Fig. 2.3.8
厚さの誤差率と測定された誘電率の誤差
Relation between error ratio of sample
thickness and error of measured dielectric
constant

3. 木材の誘電率と含水率との関係

木材は代表的な高分子物質であるが永久双極子を有する有極性物質であつて高周波電界に置かれると分極をおこす⁵⁷⁾。同時に水も代表的な有極性物質であつて同様に分極するが、その分極の程度を示す誘電率は木材実質のそれにくらべて著しく高い。したがつて木材は含水率が増加するにつれてその見かけの誘電率を増加する。この増加の様子は本来比較的単純なものであるべきだが、木材が複雑な構造を有するため、その内部構造のいかんによつてもその値は大きく変化する。実際に木材の誘電率を測定するためには、含水率以外に木材の誘電率を変動させる因子についてその影響を検討しておかねばならないので、著者は木材の誘電率と含水率との関係を検討するにあたり、まず、以下にのべるように木材の誘電率に影響をおよぼす構造因子は比重および電界方向であらうと考えて検討を加えることとした。さらにこれらの因子を考慮にいれて木材の誘電率と含水率との関係を検討した結果をのべることとする。なお、同時に実用上問題の多い温度因子の影響についても検討を加えた。

3.1 測定装置および測定法

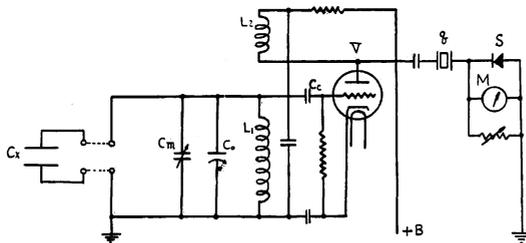


Fig. 3.1.1 測定装置 A の回路
Circuit of measuring apparatus A used in this study

本実験に用いた誘電率の測定装置は 2 種類であつて、その 1 つは共振法中の容量置換法に属するもので、他は差動蓄電器を利用した複同調法によつたものである。

前者は Fig. 3.1.1 のごとき回路構成であるが、真空管 V は線輪 $L_1 L_2$ 、可変蓄電器 C_m 、測定用電極 C_x とともに結合 condenser C_c を通じて発振回路を形成している。LC

回路の発振周波数 f は、

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots 3.1.1$$

で定まるから、 L 一定、 f 一定であれば C は容易に求めることができる。この装置では、発振勢力の一部は右側の検出回路に取りだされ、整流器 S で整流されて meter M を振らせるが、回路は $1 MC$ の固有振動数をもつ水晶片 q に接続されているので M は LC 回路の発振周波数がちょうど $1 MC$ になつたときのみ激しくふる。このようにして求められた C の値は、

$$C = C_x + C_m + C_0 \dots\dots\dots 3.1.2$$

であるから、 C_x が変化したとき C_m によつて同調をとれば、

$$C_{x2} - C_{x1} = C_{m1} - C_{m2} \dots\dots\dots 3.1.3$$

いま、常に一定した C_{x1} に対し C_{m1} を一定値 P に固定して C_0 で同調をとつておけば常に、

$$C_{x2} = (P + C_{x1}) - C_{m2} \dots\dots\dots 3.1.4$$

となり、試料の容量 C_{x2} は、 C_m の目盛板上に直接表示される。 C_m は特別に設計された精密な可変蓄電器であつて、総容量 $1,200 pf$ (精度 $\pm 1 pf$)、 $120 pf$ (精度 $\pm 0.2 pf$)、 $12 pf$ (精度 $\pm 0.02 pf$) のものを使用目的に応じて交換して使用した。この装置は電圧変動および温度変化に対しては、 $80 \sim 110 V$ の範囲内および気温の範囲内ではなんら影響が認められなかつた。この装置を装置 A とする。

装置 A は操作が簡単で使用には便利であるが、試料の等価並列抵抗があまり低くなると後述のごとく、高周波損失の影響による見かけの容量が増加して誤差を生じるので、さらに、操作は複雑であるが、復同調法による装置 (Fig. 3. 1. 2) を組み立てて A と併用した。これを装置 B とする。B は前章のべたように、試料の等価並列抵抗と、等価並列容量とを完全に分離して測定することができる。

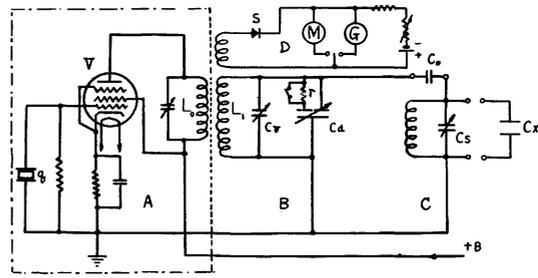


Fig. 3.1.2 測定装置Bの回路
Circuit of measuring apparatus B used in this study

Fig. 3. 1. 2 において、点線から左の部分 A はハートレイ方式による発振回路で、水晶片 q により $1 MC$ の周波数で発振する。この発振回路は L_0, L_1 により点線から右の第 1 同調回路 B と結合している。同調回路 B, C およびその部品 C_v, C_d, C_0, C_s, r 等の機能についてはすでにのべたとおりであるが r および C_0 は種々の値のものと交換可能に構成されており、 r は炭化皮膜標準抵抗で抵抗値 $21.2 \Omega, 27.3 \Omega, 63.4 \Omega, 153.3 \Omega, 352.0 \Omega$ のものを、 C_0 はチタニウム標準蓄電器で、容量 $1.8 pf, 4.6 pf$ のものを目的に応じて交換して使用した。 C_s は全容量 $60 pf$ 、精度 $\pm 0.05 pf$ の可変蓄電器を装置に組み込んで使用した。電源部分、電源電圧を安定に保つために定電圧放電管 2 本を用い、また、電源部分、同調部分は十分にシールドして静電的電磁的な誤差の混入を防いでいる。回路電流 I_g の検出部分 D は $50 \mu A$ の精密級電流計 M を用いたが、さらに同調点の検出には、電流計回路に逆電流を流して $I_g = 0$ とした後、 M と並列に接続した $7 \times 10^{-8} A$ 級指針検流計 G に切り換え、零位法によることとした。したがって測定精度は著しく向上した。

この装置によつて実際に C_e, R_e を測定するにあつては、あらかじめ横河電気製作所製標準蓄電器および富士製作所製無誘導標準抵抗を試料のかわりに接続して回路特性を検定し、万全を期した。また、東京芝浦電気製電圧安定器を使用して、電圧変動の影響を防止した。温度についても、器内の温度が割合に高いためか、気温の影響は見られなかつた。

本報告においては、精密な測定を要する実験および後述のごとく高周波抵抗の混入する恐れのある実験に際しては、装置 B を用い、その他の場合には操作が簡単で多数試料の測定に適した装置 A を用いることとした。

両装置とも、さらに精密を要する測定に際しては、横河電気製の標準可変蓄電器容量 $100 pf$ 、測定精度 $0.01 pf$ のものを回路に並列に接続して C_m または C_s にかえて測定を行なつた。

電極は、電極板を交換しうる形式のものとし、保持装

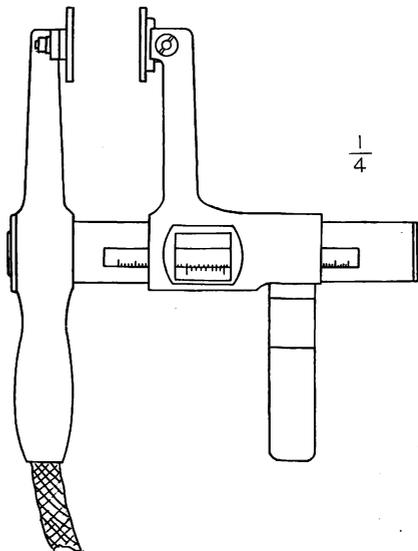


Fig. 3.1.3 ノギス式電極
Calipers type electrode used in this study

Table 3.1.1 供試電極板の形状と大いさ
The electrode plates used in this investigation

電極番号 Plate No.	形状 Form	寸法 Dimention	面積 Area	厚さ Thickness
1	円板 Disk	Diameter 60 <i>mm</i>	28.3 <i>cm²</i>	3 <i>mm</i>
2	〃	Diameter 30 <i>mm</i>	7.1 <i>mm</i>	3 <i>mm</i>
3	矩形 Rectangle	86.8 × 130.4 <i>mm</i>	113.2 <i>mm</i>	3 <i>mm</i>
4	〃	43.4 × 65.2	28.3	3
5	〃	21.7 × 32.6	7.1	3
6	〃	30.0 × 50.0	15.0	3
7	〃	84.0 × 204.0	171.4	3
8	〃	44.0 × 64.0	28.1	3

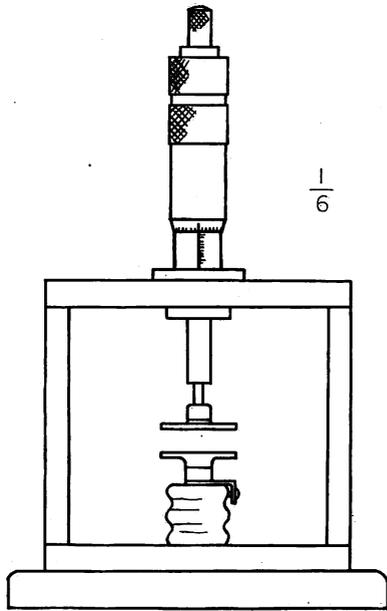


Fig. 3.1.4 マイクロメーター式電極
Micrometer type electrode used in this study

注：1. 電極はすべて真鍮板製，表面を平滑に仕上げ，ニッケル1号メッキを施してある。
2. 電極板 No.7 および 8 の接地電極は⊕電極より周囲 4mm ずつ大きく，大きさおよび面積は平均値を示す。
1. The plate were made of brass, the faces were finished flatly and nickel-plated.
2. The earth plate No. 7 or No. 8 is larger 4 mm than another plate at the edges. The dimention and area in the table shwo the average value of two plates.

置は試料の厚さを 1/10 mm まで読めるノギス形式にしたもの (Fig. 3. 1. 3) と，1/100 mm まで読めるマイクロメーター形式にしたもの (Fig. 3. 1. 4) の 2 種類を準備し，厚さの厚い材を多数測定する場合には前者を，厚さの薄い試料あるいは特に厚さを精密に測定する必要がある場合には後者を使用した。電極板は Table 3. 1. 1 に示す 8 種類のものを用いた。電極は裏面を支持部分に螺着したが，+極は球窩接合として，試料の面に常に密着するようにしてある。

試料は，Table 3. 1. 2 に示す 39 の樹種を使用した，含水率は 20°C において 95~30% の各種の関係湿度を一定に保持する恒温恒湿室に長期間貯蔵したもの，または，MgCl₂，NH₄NO₃，NaCl，KCl，KNO₃ の飽和水溶液および CaCl₂ を入れたデシケーター中に長期間貯蔵したものを用い，高含水率の試料は，生材を製材して水分傾斜のあまりないものを，飽水の試料は試料をデシケーターに水を満した中に浸し，真空ポンプで減圧して，もはや吸水しなくなった状態にあるものを使用した，乾燥途上のもを試験する場合には，含水率の高い場合は室内に放置，それ以外のもは定温器中において，はじめ 40°C，乾燥速度が落ちてからは 60°C で乾燥しながら，その過程において測定のとど取り出し，デシケーター中にて冷却するのをまつて測定を行なつた。重量含水率，比重その他の測定はすべて JIS Z 2101~2102 によつた。また，側面から早急に脱湿，吸湿をするおそれのある場合には，側面を石炭酸樹脂塗料によつて被覆した試料を用いた。

3.2 温度の影響

誘電体は熱によつてその電気的な moment を変化するので，その誘電率は当然温度の影響を受けて変化するはずである。すでにのべたように，誘電体の分極は 4 種類にわけることができるが，放送周波数帯においては，双極子分極の影響が支配的である。

Table 3.1.2 供試樹種名一覧表
The common and scientific names of the tree species producing the woods used in this investigation

樹種名 Common name	学名 Scientific name	
モミ	Momi	<i>Abies firma</i> S. et Z.
トドマツ	Todomatsu	<i>Abies sachalinensis</i> MASTERS
カラマツ	Karamatsu	<i>Larix leptolepis</i> GORDON
トウヒ	Tōhi	<i>Picea jezoensis</i> CARR. var. <i>hondoensis</i> REHD.
エゾマツ	Ezomatsu	<i>Picea jezoensis</i> CARR.
アカマツ	Akamatsu	<i>Pinus densiflora</i> S. et Z.
ツガ	Tsuga	<i>Tsuga Sieboldii</i> CARR.
スギ	Sugi	<i>Cryptomeria japonica</i> D. DON
コウヤマキ	Kōyamaki	<i>Sciadopitys verticillata</i> S. et Z.
ヒノキ	Hinoki	<i>Chamaecypris obtusa</i> S. et Z. ap. ENDL.
アスナロ	Asunaro	<i>Thujaopsis dolabrata</i> S. et Z.
ハンノキ	Hannoki	<i>Alnus japonica</i> STEUD.
ミズメ	Mizume	<i>Betula grossa</i> S. et Z.
マカンバ	Makanba	<i>Betula Maximowicziana</i> REGEL
アサダ	Asada	<i>Ostrya japonica</i> SARGENT
シイノキ	Shiinoki	<i>Castanopsis cuspidata</i> SCHOTTKY
ブナ	Buna	<i>Fagus crenata</i> BLUME
ミズナラ	Mizunara	{ <i>Quercus mongolica</i> FISCHER. var. <i>grosseserrata</i> REHD. et WILS.
クヌギ	Kunugi	<i>Quercus acutissima</i> CARR.
アカガシ	Akagashi	<i>Quercus acuta</i> THUNB.
シラカシ	Shirakashi	<i>Quercus myrsinaefolia</i> OERST.
イチイガシ	Ichiigashi	<i>Quercus gilva</i> BLUME
ハルニレ	Harunire	<i>Ulmus Davidiana</i> PLANCH. var. <i>japonica</i> NAKAI
ヤマグワ	Yamaguwa	<i>Morus bombycis</i> KOIDZ.
カツラ	Katsura	<i>Cercidiphyllum japonicum</i> S. et Z.
ホオノキ	Hōnoki	<i>Magnolia obovata</i> THUNB.
クスノキ	Kusunoki	<i>Cinnamomum Camphora</i> SIEB.
タブノキ	Tabunoki	<i>Machilus Thunbergii</i> S. et Z.
イスノキ	Isunoki	<i>Distylium racemosum</i> S. et Z.
ヤマザクラ	Yamazakura	<i>Prunus Jamasakura</i> S. ex KOIDZ.
ヒロハノキハダ	Hirohanokihada	{ <i>Phellodendron amurense</i> RUPR. var. <i>sachalinense</i> FR. SCHM.
イタヤカエデ	Itayakaede	<i>Acer Mono</i> MAXIM.
トチノキ	Tochinoki	<i>Aesculus turbinata</i> BLUME
シナノキ	Shinanoki	<i>Tilia japonica</i> SIMONKAI
ハリギリ	Harigiri	<i>Kalopanax septemlobus</i> KOIDZ.
ヤチダモ	Yachidamo	<i>Fraxinus mandshurica</i> RUR. var. <i>japonica</i> MAXIM.
コバノトネリコ	Kobanotoneriko	<i>Fraxinus Sieboldiana</i> BLUME
シオジ	Shioji	<i>Fraxinus Spaethiana</i> LINGELSH.
キリ	Kiri	<i>Paulownia tomentosa</i> STEUD.

DEBEY²⁾ は、有極性分子の分子分極は絶対温度に逆比例することを証明した。すなわちこの場合温度が増加することにより誘電率は減少することになる。しかしこれは DEBEY 自身も明らかにしているごとく、分子の相互依存性が無視される場合においてである。木材に限らず、固体においては誘電率におよぼす温

度の影響は複雑で、場合により正または負の温度係数をもっているが⁸⁶⁾、木材のごとき複雑な構造をもつ物質に対しては分子論的な立場から理論的解析を行なうことはきわめて困難である。

木材の誘電率に対する温度の影響についてはまとまつた研究は見あたらないが、篠原⁸⁸⁾によると、木材の誘電率の温度係数は、各含水率においてかなり大きな正の値をとるとされている。しかしこのように大きな温度係数は、水の誘電率に対する温度係数からおしても考えにくいものである。A. R. VON HIPPEL と A. G. H. DIETZ は全乾木材において正の、含水率 6% の木材において若干負の温度係数を見だしているが⁸⁷⁾、温度範囲が明らかでなく、また実用上最も必要な気乾あるいはそれ以上の誘電率の温度係数に関しては不明である。また、中戸²¹⁾らは含水率 2~14% の範囲内で定性的に正の温度係数を認めている。

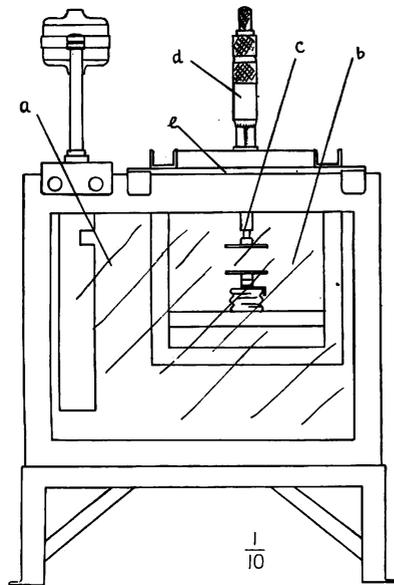


Fig. 3.2.1 温度の影響の測定装置
Measuring apparatus of temperature effect including water bath a, air box b, electrode c, micrometer d, support of air box e

著者は、誘電率方式によつて木材の含水率を測定する場合、温度がその誘電率に影響する程度を調べるため、ヒノキおよびブナ材を用いて次の実験を行なつた。Fig. 3. 2. 1 において a は恒温水槽、b は a 中にあつて電極および試料を入れる密閉箱で、側面はガラス張りにしてあり、常時内部を観察できる。e は b のふたに Fig. 3. 1. 1 に示した電極支持装置を取りつけたものでマイクロメーター部分 d によりふたの外部から上部電極 c を上下して試料をしめつける構造で、ふたをするとき電極部分は b の中にはいり、b と一体になるように設計してある。なお、b のふたになつてゐる部分には、b と結合した場合温度計および温度調節計、重量測定のための吊線等を挿入するために若干の小孔があけてある。

測定装置は B、電極は No. 4, 5 を用い、試料は含水率を一定に調整したものを電極と同形同大に仕上げて用いた。測定面は征目とし、厚さの異なる数種類のものを用いた。はじめ試料を電極間に正確に保持した後、試料を電極とともにビニールテープにて緊密に包み込んで温度の上昇に伴う試料からの水分の蒸発を防ぎ、恒温槽中に装着し、外部水槽の温度を徐々に上昇せしめながら、その誘電率を測定した。測定は槽内の温度をある温度まで上昇せしめた後、試料の温度こうばいが平衡に達するに十分と思われる時間¹⁰⁾ (約 1 時間) その温度に保ち、その後で誘電率を測定し、さらに温度上昇を繰り返した。同時に対照試料をビニールテープで包んだものを電極槽の上部から針金でつるしておき、その重量変化を温度上昇中皿天秤を利用して連続測定したが、重量の減少はきわめてわずかで、減少の多い場合も含水率 0.5% にも達しなかつた。また、試料および電極をビニールで包んだための静電容量の増加は、試料のない状態で電極をビニールテープで包み、測定された容量を、試料について測定された容量値から差し引いた。なお、この値はきわめて僅少であり、この値に対する温度上昇の影響もほとんど見られなかつた。

ヒノキ材に対する測定の結果を Fig. 3. 2. 2~3 に示す。測定された容量 C_x は明らかに温度の上昇に伴つて増加している。また、その傾向はほとんど直線的あるいはわずかに放物線的であるように思われる。この C_x から ϵ を算出すると、Fig. 3. 2. 4~5 のごとくなり、試料相互の間に含水率および比重の

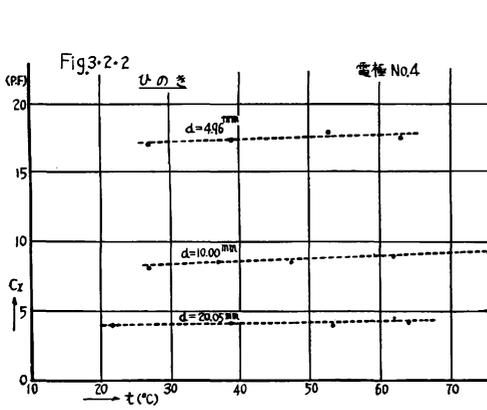


Fig. 3.2.2

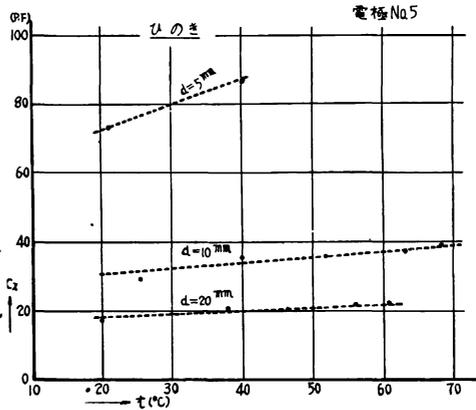


Fig. 3.2.3

Fig. 3.2.2~3 容量測定値と温度との関係

Relation between capacitance of wood and wood temperature (Hinoki, electrode No. 4 and 5)

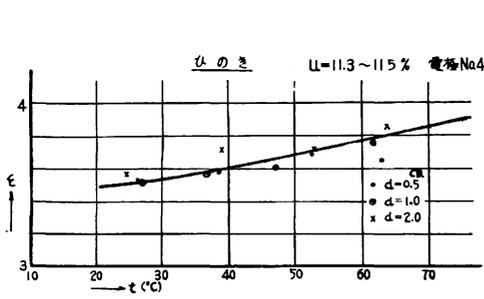


Fig. 3.2.4

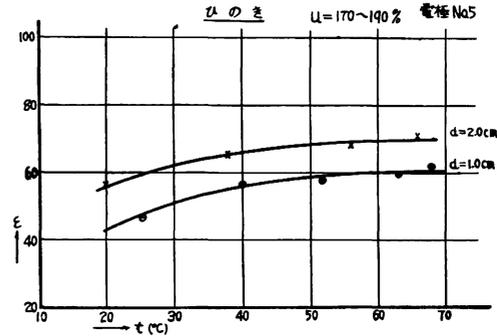


Fig. 3.2.5

Fig. 3.2.4~5 誘電率と温度との関係

Variation in dielectric constant of wood with temperature (Hinoki, electrode No. 4 and 5)

若干の差があるため多少測定値には差があるが、気乾材、飽水材それぞれの間では明らかに同様な傾向を示している。

誘電率と温度との関係式としては種々のものがあるが、一般に、

$$\epsilon_{t_1} = \epsilon_{t_0} + \alpha(t_1 - t_0) + \beta(t_1 - t_0)^2 \dots\dots\dots 3.2.1$$

あるいは、

$$\epsilon_{t_1} = \epsilon_{t_0} \{1 + \alpha(t_0 - t_1) + \beta(t_0 - t_1)^2\} \dots\dots\dots 3.2.2$$

のような関係式がよく用いられる。これらの式はいずれも電気抵抗の温度補正に用いられると同様な実験式である。ただし ϵ_{t_0} , ϵ_{t_1} はそれぞれ t_0 , t_1 °C における誘電率、 α , β は温度係数で、ときにより正または負の値をとる。いま、3.2.2 式によつて Fig. 3.2.4 の測定結果からヒノキ材に対する温度係数を求めると、気乾材では、

$$\alpha = -1.37 \times 10^{-3}, \beta = -7.7 \times 10^{-6}$$

となる。

Fig. 3.2.6 に示すブナ材の実験結果からは、

$$\alpha = -2.24 \times 10^{-3}, \beta = -3.65 \times 10^{-6}$$

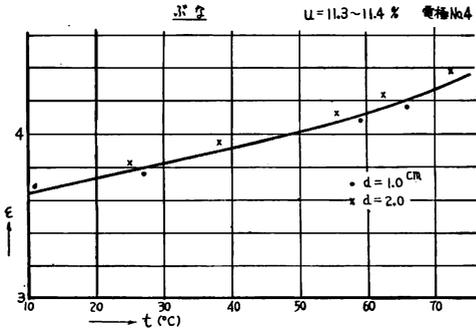


Fig. 3.2.6

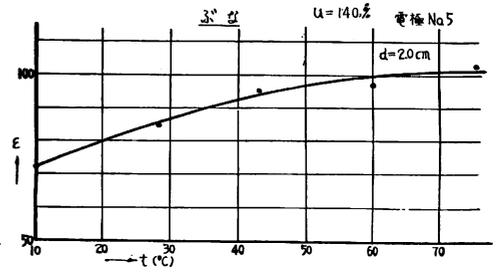


Fig. 3.2.7

Fig. 3.2.6~7 誘電率と温度との関係
Variation in dielectric constant of wood with temperature (Buna, electrode No. 4 and 5)

となり、傾斜は多少急になるが、ヒノキ材の場合とほとんど同一の傾向を示す。

次に、飽水材の温度係数は同様に 3.2.2 式に対してヒノキ材 (Fig. 3. 2. 5) で、

$$\alpha = -9.45 \times 10^{-3}, \beta = 1.26 \times 10^{-4}$$

ブナ材 (Fig. 3. 2. 7) で、

$$\alpha = -9.0 \times 10^{-3}, \beta = 1.09 \times 10^{-4}$$

となり、 β は正の値をとるので温度と誘電率との関係曲線ははじめ上昇傾向にあるが、温度が高くなるにしたがい下降傾向をもつようになる。この傾向は蔗糖やアルブミン水溶液に対して認められた結果²³⁾と酷似しているが、ヒノキ材およびブナ材の飽水の場合の α, β の値がほとんど同一であることとあわせてはなはだ興味深い。水の温度係数は WYMAN⁵⁵⁾ によると $\alpha = 4.6 \times 10^{-3}, \beta = 8.8 \times 10^{-6}$ であることから考えあわせると、おそらくはこの温度範囲では温度が上昇するにつれて誘電率が增加する傾向を有する木材

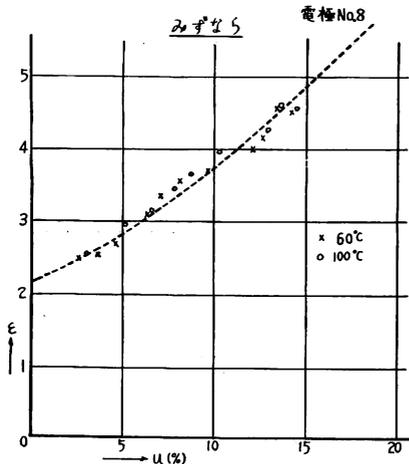


Fig. 3.2.8 60°C および 100°C での乾燥における誘電率の測定
Effect of drying temperature to dielectric constant of wood
(Mizunara, electrode No. 8, ϵ : Dielectric constant of wood, u : Moisture content of wood)

実質が、水分を含有することにより徐々に下降傾向を示すにいたり、飽水状態においては自由水の影響が大きく働いて高分子水溶液に類似の温度変化を示すようになるものと思われる。

木材誘電率の温度による変化は結局、以上のように比較的小さいものであり、10°C の変化に対して数 % にすぎず、飽水の場合でも 10% に達しない。直流電気抵抗の温度係数がきわめて大きく、温度が 10°C 増加すると抵抗値は 1/2 あるいはそれ以下にも減少する⁴⁾⁴³⁾ ことを考えれば、誘電率の温度による影響は 10~80°C の範囲内では、実用上特に考慮する必要はないように思われる。後述するように、高周波抵抗に対する温度の影響はかなり大きいので、木材の誘電率に対する温度係数が過大に見つもられている場合には、おそらく測定上高周波抵抗が混入しているものであろう。Fig. 3. 2.8 に 60°C および 100°C の定温乾燥器中で別々に乾燥したミズナラ材 (75 mm × 95 mm × 8.5 mm) の誘電率を乾燥過

程で高温のまま測定した結果を示したが、温度の影響による両測定値の差は特に認められない。なおこの試料は同一部分より採材したものを室内に放置し、含水率が平衡状態に達したものであつた。

要するに、以上のべたごとく、木材の誘電率は一般に温度の影響を受けることが少なく、含水率測定に際して温度条件が問題になる場合には電気抵抗に比べて有利であるといえよう。

3.3 測定方向の影響

木材の諸性質の異方性に関しては従来多数の研究が行なわれており、その異方性の原因は、あるいはその顕微鏡的細胞配列構成にあるとされ、あるいはその細胞膜中の微細構造の異方性に基づくと考えられ、いまだ定説はない。木材の誘電率に関しても、その電界方向の影響については若干の研究が行なわれているにすぎない。

SKAAR は 2 MC と 15 MC における測定から、木材の誘電率は電場方向と繊維方向を一致せしめたとき大きく、繊維と直角方向のとき小さいことをのべ、その原因は細胞膜中の繊維素結晶が長軸方向に鎖状結合をしているため、その -OH 基あるいはそれに結合する水分子の振動と回転が長軸方向においてより容易であることによるとしている³⁵⁾。

KRÖNER も Buche, Fichte, Eiche の誘電率の測定値が各種の周波数について、繊維方向の誘電率は他の方向に比し著しく大きく、繊維に直角方向では、Fichte が放射方向 > 切線方向で、他は放射方向 < 切線方向であるが大きな差はないとした¹⁵⁾。そのほか、小倉²⁵⁾、山本⁵⁶⁾、竹田⁴⁴⁾、中戸²²⁾らは、それぞれイタヤカエデ、ヒノキおよびナラ、シナノキ、ヒノキについてその 3 方向の誘電率を測定しているが、繊維方向における誘電率は他の 2 方向のものより相当高いが、放射方向および切線方向については、前者の方が後者よりもわずかに高いか、ほとんど同一であるか、ある場合には不定であつた。

KRÖNER¹⁵⁾ らは木材誘電率の異方性の原因を細胞の配列構成に求めようとした。KRÖNER によると、いま繊維方向における誘電率を ϵ_l 、放射方向および切線方向における誘電率を ϵ_r 、 ϵ_t とすれば、細胞膜質の誘電率を ϵ_f 、空気の誘電率を ϵ_a 、その混和率をそれぞれ δ_1 、 δ_2 としたとき $\epsilon_r \approx \epsilon_t$ であり、 ϵ_l はそれに比してかなり大きいところから、 ϵ_l は ϵ_f と ϵ_a が並列の関係にあり、 ϵ_r および ϵ_t は ϵ_f と ϵ_a が直列の関係にある。したがつて、

$$\epsilon_l = \epsilon_f \delta_1 + \epsilon_a \delta_2 \quad \dots\dots\dots 3.3.1$$

$$\frac{1}{\epsilon_r} \approx \frac{1}{\epsilon_t} = \frac{\delta_1}{\epsilon_f} + \frac{\delta_2}{\epsilon_a} \quad \dots\dots\dots 3.3.2$$

なる関係式が成立するので、この両式から、

$$\epsilon_f = \frac{1}{2(\epsilon_t - \epsilon_a)} \cdot \left[(\epsilon_l \epsilon_t - \epsilon_a^2) + \sqrt{(\epsilon_l \epsilon_t - \epsilon_a^2)^2 - 4 \epsilon_a \epsilon_t (\epsilon_l - \epsilon_a)(\epsilon_t - \epsilon_a)} \right] \quad \dots\dots 3.3.3$$

$$\delta_1 = \frac{\epsilon_l - \epsilon_a}{\epsilon_f - \epsilon_a} \quad \dots\dots\dots 3.3.4$$

なる式を提示している。繊維に平行と直角方向の誘電率の差を単に細胞の配列にのみ基因せしめて、SKAAR の述べた繊維素結晶の配列方向を全く無視しうるかどうかは疑問であるが、この考えかたは細胞構造から ϵ の異方性を考える場合の一つの手がかりにはなるであろう。

しかし、誘電率の測定上最も実際的に問題となるのは、 ϵ_l と ϵ_r あるいは ϵ_t との関係ではなくて、むしろ ϵ_r と ϵ_t との関係である。すなわち木材の木口面を平行板極電ではさむことは実用上ほとんど考えられず、実際に測定の対象となるのは、常に繊維に直角方向であるからである。既往の研究成果は比較的

放射・切線両方向の異方度の小さい樹種について行なわれたものが多い。異方度の小さい場合は特に問題となることはないので、著者は ϵ_t と ϵ_r との違いを検討するために、特に異方度の大きいと思われるナラ材を用いて、 ϵ_r および ϵ_t を測定した。測定には装置 A ならびに電極 No. 7 を用い、板目板 2 枚、板目板 3 枚を恒温恒湿槽を用いて、初期含水率約 50% の状態の試料を乾球温度 45→50°C、関係湿度 95→65% の範囲で徐々に乾燥させ、その途中で誘電率を測定した。なお 4% 以下の含水率および誘電率はそれぞれ同一装置により 80°C で乾燥後測定したものである。

測定結果は Fig. 3.3.2 に示すごとく、各含水率段階において ϵ_r は ϵ_t に比し相当大であり、その差は含水率が大きくなるほど著しくなる。この結果は ϵ_r が ϵ_t より大きいことで従来の研究と一致するが、また異方度の大きい樹種においては、板目板測定値の差は諸家の例と異なりかなり大きい場合があることを示している。これは、同時に同様の方法で行なつた比較的異方度の小さいと思われるハンノキ材の試験結果 (Fig. 3.3.3) と比較しても明らかである。

さて ϵ_r と ϵ_t との差については中戸らの研究がある。中戸らは KRÖNER の方式を拡張して、 ϵ_r と ϵ_t との差の原因を繊維方向に直角に電場を加えた場合、木口断面において電場の方向に直角に配列した細胞膜の空気と直列の容量と考え、電場の方向にある細胞膜を、前記の直列合成容量と並列の容量と考えて KRÖNER と同様の計算をおこない、次式を得た²⁹⁾。

$$\epsilon_r = \epsilon_f \delta_1 \theta_{2r} + \frac{\epsilon_f (1 - \delta_1 \theta_{2r})^2}{\epsilon_f (1 - \delta_1) + \delta_1 \theta_{1r}} \dots\dots\dots 3.3.5$$

$$\epsilon_t = \epsilon_f \delta_1 \theta_{2t} + \frac{\epsilon_f (1 - \delta_1 \theta_{2t})^2}{\epsilon_f (1 - \delta_1) + \delta_1 \theta_{1t}} \dots\dots\dots 3.3.6$$

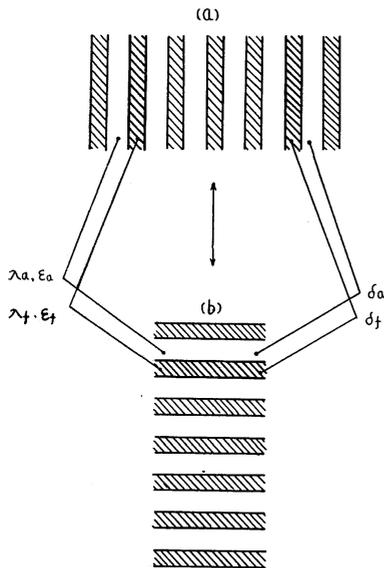


Fig. 3.3.1 細胞膜排列の模式図
Schematic diagram of cell wall disposition

Model showing: a. All cell wall substance and lumen distribute parallel to electric line of force. b. All cell wall substance and lumen distribute perpendicular to electric line of force.

ただし δ_1 は木材容積中の細胞膜容積分前、 θ_{1r} 、 θ_{2r} 、 θ_{1t} 、 θ_{2t} はそれぞれ放射および切線方向に電場をおいたときの電場に直角および平行の細胞膜実質の容積分前である。このような計算法は繊維についてすでに坂上³⁰⁾らによつても行なわれていたが、木材においては細胞模型の考え方いかんによつて θ_1 に属するか θ_2 に属するか不定の部分が生じ、実際には θ を定め難いこと、 θ の測定そのものも容易でないことから、実際をよく説明しうるものとはいえない。

さて、F. KOLLMANN は木材および木質材料の熱伝導率が繊維構造によつて異なつてゐることを説明するために、次のような式を発表¹⁹⁾している。

すなわち、いま Fig. 3.3.1 において斜線を施した部分を木材質、その中間の部分空氣層と考え、それぞれの平均的な厚さを δ_a 、 δ_f とすると、最も極端なる場合——熱流方向と層状構造が平行な場合 (a) および直角な場合 (b)——が考えられる。(a) の場合は熱伝導率 λ は最大であり、(b) の場合は最少になる。木材および木質材料は一般にこの中間の値をとるはずであるから、実際の λ は、

$$\lambda = \xi \lambda_{max} + (1 - \xi) \lambda_{min} \dots\dots\dots 3.3.7$$

ただし $0 \leq \xi \leq 1$ である。

$\xi=0$ の場合は Fig. 3. 3. 1 (b), $\xi=1$ の場合は同図 (a) の場合を示す。さらに,

$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_a \delta_a + \lambda_f \delta_f}{\delta_a + \delta_f} \dots\dots\dots 3.3.8$$

$$\lambda_{min} = \frac{\lambda_a \lambda_f (\delta_a + \delta_f)}{\lambda_a \delta_f + \lambda_f \delta_a} \dots\dots\dots 3.3.9$$

であるから,

$$\lambda = \xi \left[\lambda_a + \frac{r}{\rho_f} (\lambda_f - \lambda_a) \right] + \frac{(1-\xi) \lambda_f \cdot \lambda_a}{\lambda_f - \frac{r}{\rho_f} (\lambda_f - \lambda_a)} \dots\dots\dots 3.3.10$$

ただし r は比重で,

$$r = \frac{\delta_f}{\delta_a + \delta_f} \rho_f \text{ [g/cm}^3\text{]} \dots\dots\dots 3.3.11$$

ρ_f は木材の細胞膜質部分の比重で, 含水率が 0 のときには,

$$\rho_f = 1.50 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

であるが, 一方含水率を u とすると,

$$\rho_f = \frac{1.5+u}{1+u} \dots\dots\dots 3.3.12$$

とおくことができる。

この考え方は, 木材や繊維板の繊維配列度の影響を説明するために提案されたもので, 柎目方向と板目方向との差異を説明したものではないが, これらの材料の熱伝導率の差をよく説明している。

さて, 木材の細胞壁中の繊維素分子は, 一定のミセル配列を保つて細胞壁を形成しているが, 繊維素ミセルの配列は, 木材の大部分をしめる厚膜細胞の肥厚膜においては細胞長軸に対し, ある角度を保つてら旋状に配列していることが知られている。したがって, 細胞長軸方向と直角方向とでは繊維素ミセルはその性質上著しい異方性を示すのが普通である。したがって木材の誘電率が細胞膜長軸方向に著しく大きい値を示すのは, 恐らく SKAAR のいうごとく, 繊維素分子の配列がおもな原因となつているのであろう。しかし繊維素分子は, その配列方向から考えても, 放射方向あるいは切線方向のいずれかに対しては特定の配列型をとるとは考え難く, 木材の ϵ_r と ϵ_t との差はやはり分子配列よりは細胞構造そのものに基づくものとするのが妥当である。この場合は細胞実質と細胞膜内外の空けきとの配列の様式いかに支配的因子となるが, 配列の最も極端な場合は Fig. 3.3.1 (a) および (b) に示すごとく, 細胞実質と空けきとが電場方向に対し直列あるいは並列に配置された場合である。実際の木材においては形状も大きさも一定でない細胞が不規則に集合しているのであるから, 細胞実質と空けきとは, 局部において, ある部分は直列配置の部分が並列に接続された形をとり, ある場合には並列配置の部分がさらに直列に接続された状態となつて, 電気力線は相当乱れていると思われる。したがって簡単に模型的な解析を考えることは困難であるが, 実際の誘電率は, 木材の部分部分を Fig. 3. 3. 1 のように考えて直列結合あるいは並列結合とおいた場合の混合状態であつて, その中間の値を示すであろうことも容易に想像することができる。この意味において, KOLLMANN が熱伝導率について示した 3.3.7 式以下の計算式は ϵ_r と ϵ_t の計算にも利用することができる。

いま Fig. 3.3.1 において, 矢印を電流方向 λ_f を ϵ_f , λ_a を ϵ_a に置きかえると,

(a) の場合

$$\varepsilon_{max}(\delta_a + \delta_f) = \varepsilon_a \delta_a + \varepsilon_f \delta_f$$

3.3.11 式によつて、

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_a + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - \varepsilon_a) \dots\dots\dots 3.3.13$$

(b) の場合

$$\frac{\delta_a + \delta_f}{\varepsilon_{min}} = \frac{\delta_a}{\varepsilon_a} + \frac{\delta_f}{\varepsilon_f}$$

前と同様に、

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_a \cdot \varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - \varepsilon_a)} \dots\dots\dots 3.3.14$$

並列部分と直列部分の混和率を K とすると、3.3.7 式と同様にある状態における誘電率は、

$$\varepsilon = K\varepsilon_{max} + (1-K)\varepsilon_{min} \dots\dots\dots 3.3.15$$

ただし $0 \leq K \leq 1$ となる。したがつて、

$$\varepsilon = K \left[\varepsilon_a + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - \varepsilon_a) \right] + \frac{(1-K)\varepsilon_f \varepsilon_a}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - \varepsilon_a)} \dots\dots\dots 3.3.16$$

$\varepsilon_a = 1$ とおくと、

$$\varepsilon = K \left[1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) \right] + \frac{(1-K)\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)} \dots\dots\dots 3.3.17$$

K は樹種、細胞配列等に複雑な関係をもつ常数で、比重や含水率には直接関係しない。

さて、ある特定の木材を考え、その放射方向における誘電率 ε_r を測定したとすると、

$$\varepsilon_r = K_r \left[1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) \right] + \frac{(1-K_r)\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)}$$

であるが、これに直角な方向の誘電率 ε_t は、

$$\varepsilon_t = K_t \left[1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) \right] + \frac{(1-K_t)\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)}$$

で、

$$K_r = 1 - K_t \dots\dots\dots 3.3.18$$

の関係にあると考えられる。なぜならば、放射方向に電場があつたときに直列要素および並列要素として働く木材の各部分はすべて切線方向に電場をおいた場合にはこれと反対の並列要素および直列要素として働くものと考えてよいからである。

したがつて両方向の誘電率の平均値は常に、

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r + \varepsilon_t}{2} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)} \right\} \dots\dots\dots 3.3.19$$

となり、 $K=0.5$ すなわち直列要素と並列要素が均等に分布している場合と等しくなる。 K の値は異方性

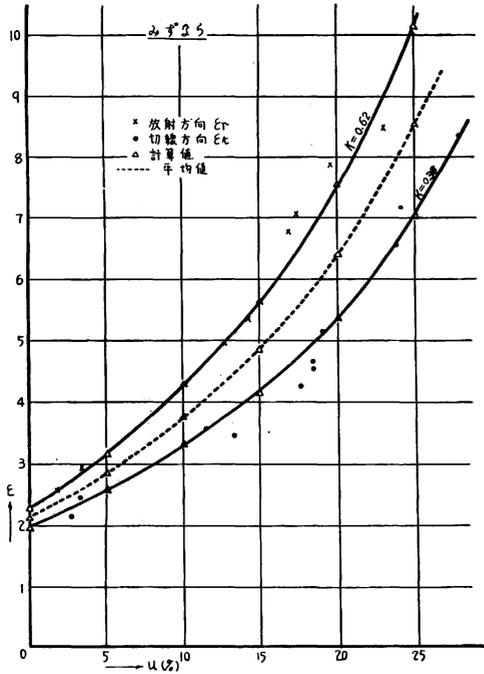


Fig. 3.3.2 Mizunara wood

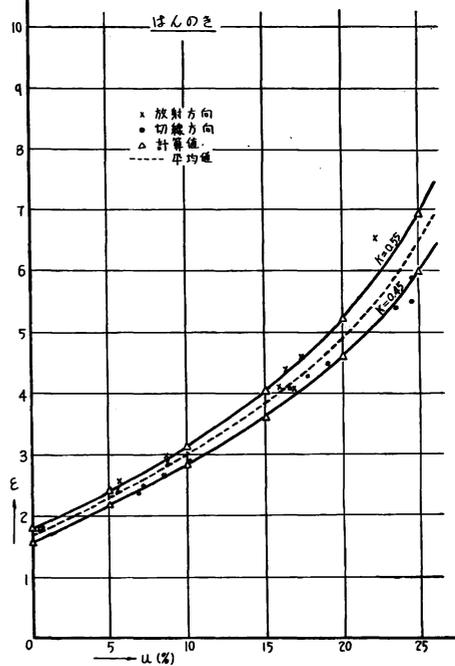


Fig. 3.3.3 Hannoki wood

Fig. 3.3.2~3 電界方向の異なる場合の誘電率
 Dielectric constant of wood at radial and tangential direction
 × Radial direction. • Tangential direction. △ Calculated value.
 Average curve of two direction.

が小さくなるほど 0.5 に近づくが、実際の誘電率測定にあつては一般に ϵ_r と ϵ_t との差は僅少であり、測定値は ϵ_r と ϵ_t との間にあるので、3.3.19 式によつてその樹種 (あるいは比重階) の ϵ を代表せしめて差し支えない。またナラのように、異性が極端に大きい場合でも、追証面での測定値はやはり、同式によつて示すことができるはずである。

K の値は、樹種および同一樹種においても年輪幅、秋材率、髓線率、導管の状態等によつて異なるべきものであるが、Fig. 3.3.2, Fig. 3.3.3 に示したミズナラおよびハンノキ材について K_r の値を求めた結果は、ナラ 0.62, ハンノキ 0.55 となつた。 ϵ_t に対しては、3.3.18 式により、それぞれ 0.38, 0.45 の値をうる。この K_r および K_t の値を用いて、 ϵ_r および ϵ_t の値を 3.3.17 式から計算した結果を図上に示したが、測定値とよく一致した。この際、 ϵ_r と ϵ_t を示す両曲線の平均値として、その中央に示された線がすなわち 3.3.19 式を示すものとなる。

3.4 比重の影響

物質の誘電率はその物質の構成分子における平均電気能率の総和によつて決定される。この関係は CLAUDIUS-MOSOTTI の法測によつて、

$$\frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} = \frac{4\pi}{3} n\alpha \dots\dots\dots 3.4.1$$

であらわされる。ただし n は単位体積中の分子数、 α は分子の分極率で物質により一定の分子常数である。この関係は、物質の誘電率はその密度の増加とともに増加することを示しているが、一般に分子の相

相互作用が無視できる場合、すなわち気体や希薄溶液において成立するものである³⁾。木材のごとき固体においても、密度の増加はなんらかの形で電場における分子の数を増し、電気能率を増加せしめることになるので、当然比重の増加は誘電率を増加せしめることが期待できる。本来同一含水状態における木材の比重差は、もつぱら木材実質と空げきとの割合によつて生じるもので、木材実質の密度に大きい差が生じる

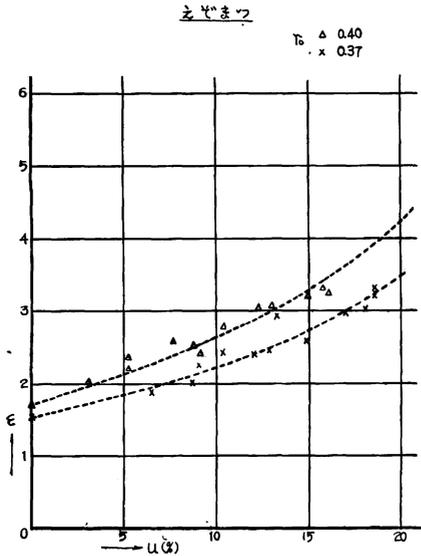


Fig. 3.4.1

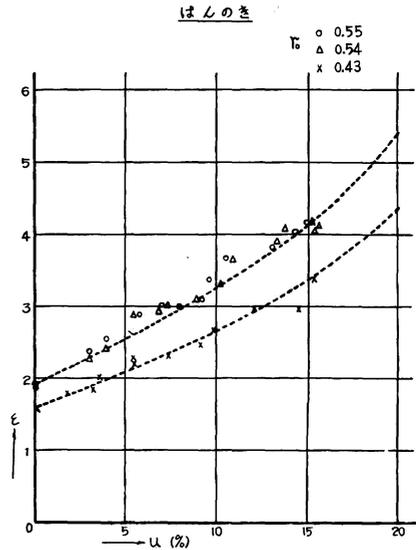


Fig. 3.4.2

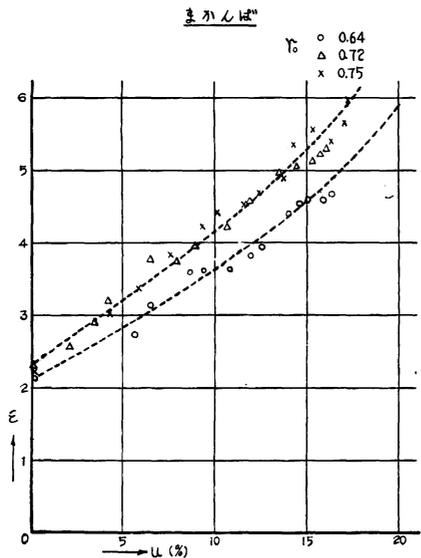


Fig. 3.4.3

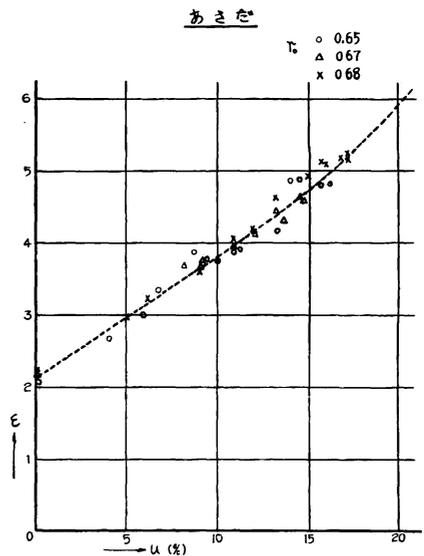


Fig. 3.4.4

Fig. 3.4.1~15 比重の異なる樹種の誘電率と含水率との関係
Relations between the dielectric constants and moisture contents of various wood species having differential densities

- 1—Ezomatsu, 2—Hannoki, 3—Makanba, 4—Asada, 5—Buna, 6—Mizunara,
7—Shirakashi, 8—Harunire, 9—Katsura, 10—Isunoki, 11—Itayakaede,
12—Shinanoki, 13—Harigiri, 14—Yachidamo, 15—Kiri.

ものではない。したがって、木材の比重がその誘電率にいかに関係するかについては、この見地から検討するべきであろう。

木材の誘電率と比重との関係については従来 SKAAR²⁵⁾ の研究がみられるのみである。すなわち SKAAR は、30 種の木材について 0, 5, 10, 15% の含水状態において誘電率を測定し、同一含水率において木材の誘電率とその気乾比重とは直線的に比例することを定性的に示している。

著者は、誘電率と含水率との関係を明らかにする前提として、木材の比重がその誘電率にどのような影響を与えているかを定量的に明らかにする目的をもって、比重を異にする 15 樹種について乾燥器中にて徐々に乾燥しながら含水率および誘電率を測定し、それぞれ Fig. 3. 4. 1~15 のごとき結果を得た。な

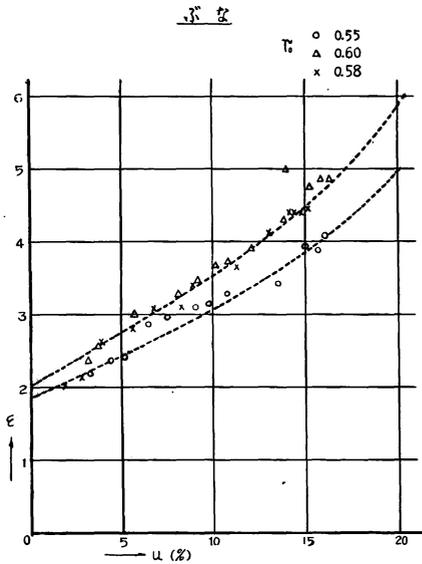


Fig. 3.4.5

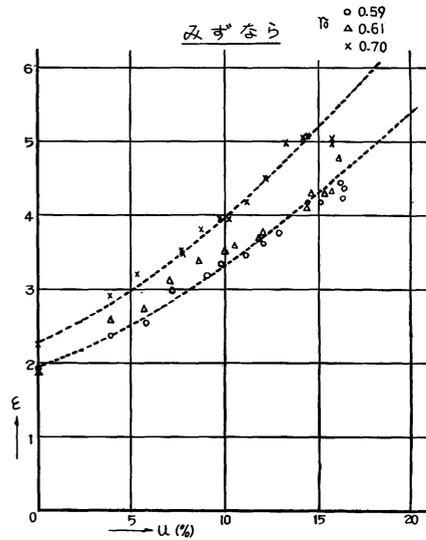


Fig. 3.4.6

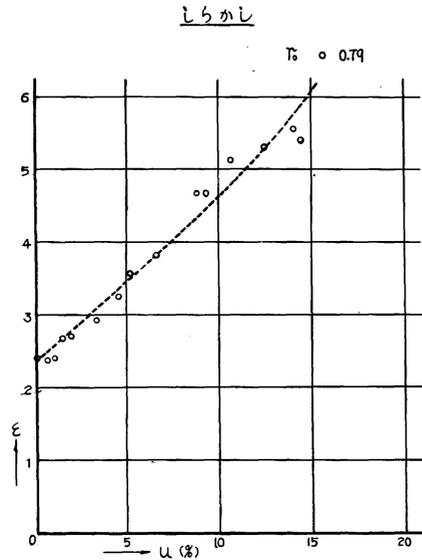


Fig. 3.4.7

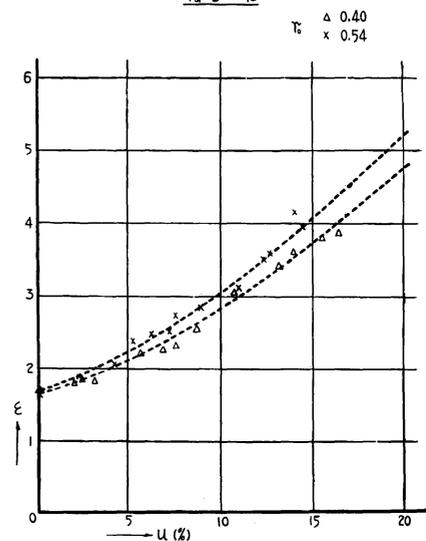


Fig. 3.4.8

お装置は A, 電極は No. 8 を用い, 試料は気乾材 $70\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 5.5\text{ mm}$ のものそれぞれ 2~3 枚あて用いたものである。誘電率と含水率との関係は, 図上に点線で示すように, 次節にのべる指数的關係を示したが, 同一含水率に対する誘電率の値は比重によつて差があり, 一定でない。いま図示された多数の測定値中から含水率が 5, 7, 10, 15% \pm 0.2% の範囲内にあるときの誘電率 ϵ の値を拾い, それぞれの試料の全乾比重 r_0 に対して図示すると Fig. 3. 4. 16 のように規則的な關係がえられる。図から明らかのように, ϵ は r_0 に対してほぼ比例的な關係にある。この關係は, 含水率のいかんを問わず $r_0=0$, すなわち試料が空気のみになつた場合には $\epsilon=1$ となるべきものであるが, r_0 と ϵ との關係をよく検討してみると SKAAR の示したように直線とみなすよりは, むしろゆるやかな曲線とみなすべきであるように

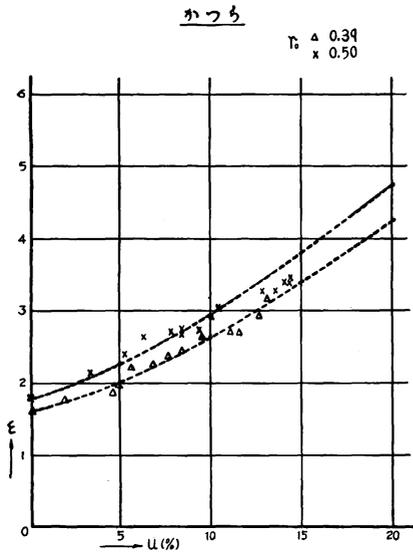


Fig. 3.4.9

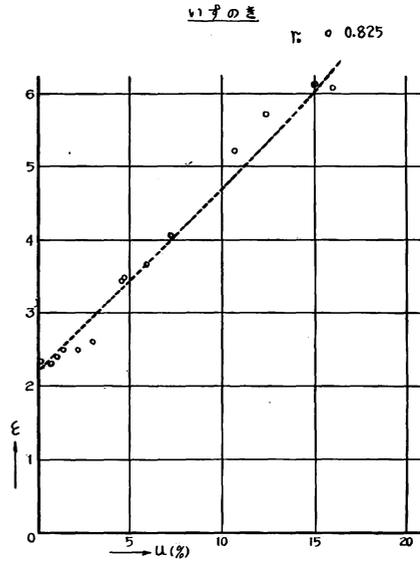


Fig. 3.4.10

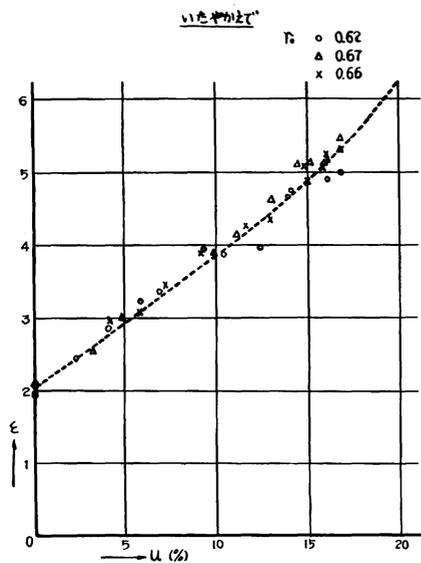


Fig. 3.4.11

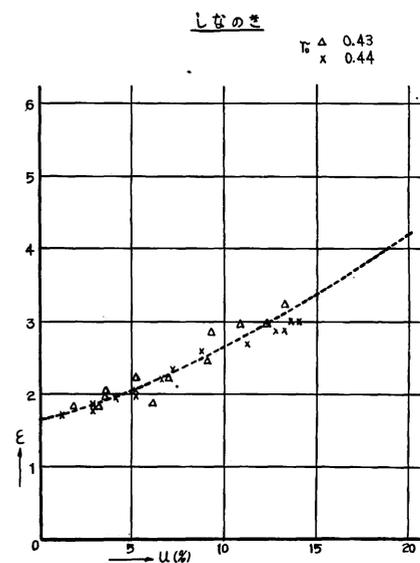


Fig. 3.4.12

思われる。

前節において、著者は誘電率と細胞配列との関係についてのべたが、この設定が正しいものとするれば誘電率と比重との間には 3.3.19 式の関係が成り立つものと考えられる。Fig. 3.4.16 に示した測定値は、板柃両面に対する測定値が混在しているので、3.3.18 式の K の値に対し特に考慮を払う必要はない。3.3.19 式

はりきり

γ Δ 0.44
x 0.48

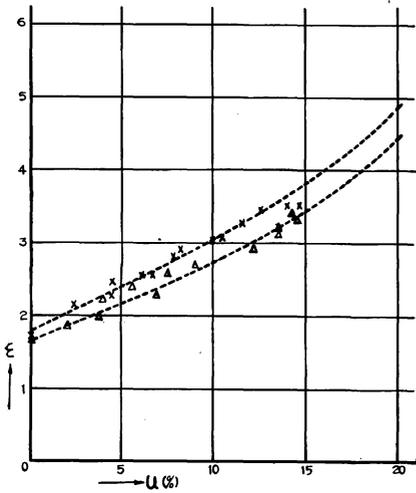


Fig. 3.4.13

きり

γ \circ 0.20
 Δ 0.23
x 0.24

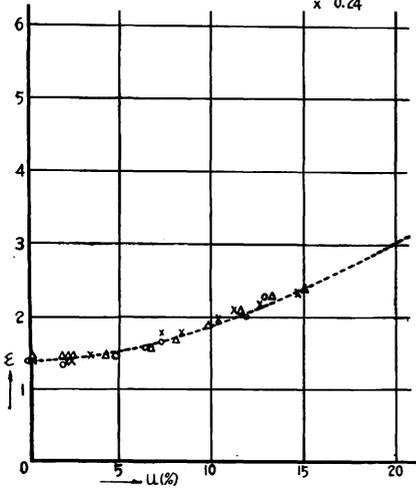


Fig. 3.4.15

やうだも

γ Δ 0.48
x 0.44

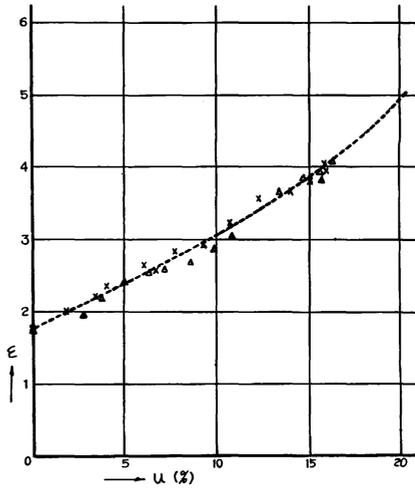


Fig. 3.4.14

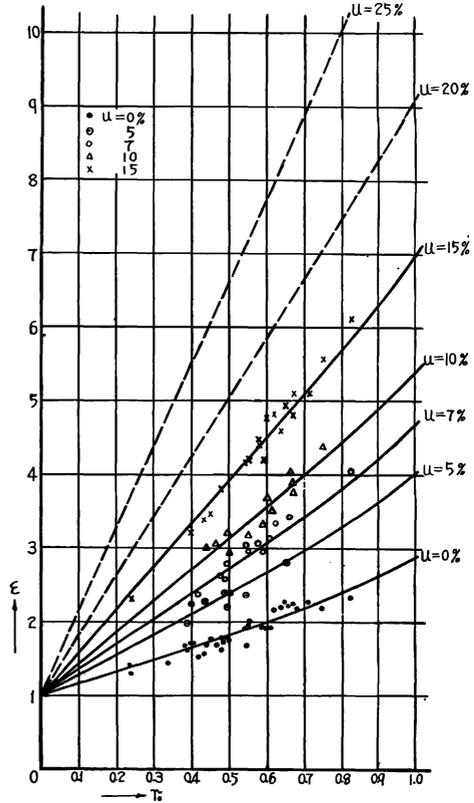


Fig. 3.4.16 誘電率と比重との関係
Relation between the dielectric constants and the densities of the tested woods

にしたがえば ε と r_0 との関係はわずかに曲線的であるべきであるので、以下 3.3.19 式によつて ε と r_0 との関係を検討することとした。

3.3.19 式における r/ρ_f の値は、全乾の場合には $r_0/1.50$ として示しうるのは前節にのべたごとくであるが、任意の含水率における r/ρ_f の値については KOLLMANN の示した 3.3.12 式は若干問題があるように考えられる。いま、木材細胞膜実質中に重量比 u だけの結合水があるとすると、 $u=0$ のとき、3.3.11 式のとおり、

$$r_0 = \frac{\delta_{f_0}}{\delta_{a_0} + \delta_{f_0}} \rho_{f_0} \dots\dots\dots 3.4.2$$

式が成立する。ただし $r_0, \rho_{f_0}, \delta_{f_0}, \delta_{a_0}$ はそれぞれ全乾時の木材の比重、細胞膜実質の比重（真比重）、細胞膜実質の容積、細胞空隙の容積である。これに対し、 $r_u, \rho_{f_u}, \delta_{f_u}, \delta_{a_u}$ を任意の含水率の場合の木材の比重、結合水を含めた細胞膜の比重、結合水を含めた細胞膜の容積、細胞空隙の容積とすれば、

$$r_u = \frac{\delta_{f_0} \rho_{f_0} + \delta_u \rho_u}{(\delta_{a_0} + \delta_{f_0})(1 + u \cdot \alpha_v)} \dots\dots\dots 3.4.3$$

となるべきである。ただし δ_u は結合水の容積、 ρ_u は結合水の比重、 α_v は含水率 1% あたりの平均容積膨脹率である。 α_v は r_0 とおおむね直線的な関係にあるものとして、その比例常数も種々求められているが、研究者によつて多少差があり、KOLLMANN はその平均的な値として、 $\alpha_v = 0.84 r_0$ をえている¹²⁾。したがつて 3.4.2~3 式によつて、

$$r_u = \frac{\delta_{f_0} \rho_{f_0} + \delta_u \rho_u}{\delta_{f_0} \cdot \frac{\rho_{f_0}}{r_0} (1 + 0.84 u r_0)} \dots\dots\dots 3.4.4$$

また、

$$\rho_{f_u} = \frac{\delta_{f_0} \rho_{f_0} + \delta_u \rho_u}{\delta_{f_0} + \delta_u} \dots\dots\dots 3.4.5$$

これより、

$$\frac{r_u}{\rho_{f_u}} = \frac{r_0}{\rho_{f_0}} \cdot \frac{1 + \rho_{f_0} \cdot u / \rho_u}{1 + 0.84 u r_0} \dots\dots\dots 3.4.6$$

となる。

なお結合水の ρ_u は通常 1 よりも大きく、含水率が減少するにしたがい強固な結合を示すにいたるため、しだいに増大する。STAMM¹¹⁾ によると、 u が 0, 0.1, 0.2, 0.3 の場合、 ρ_u はそれぞれ 1.3, 1.2, 1.14, 1.113 の値を示す。

以上より r_u/ρ_{f_u} の値は定まるので、 ε_f の値が明らかとなれば、3.3.19 式によつて ε と r_0 の関係を示すことができる。 ε_f の値は含水率が一定の場合には樹種比重のいかんを問わず一定と考えられる値であり、含水率一定の場合 ε と r_0 が知られていれば 3.3.19 式によつて求めることができる。いま、Fig. 3.4.16 に示した r_0 と ε の測定値から 3.3.19 および 3.4.6 式によつて ε_f を算出し (Table 3.5.1)、それぞれの含水率に対して 3.3.19 式による r_0 と ε の関係曲線を描けば、Fig. 3.4.16 に実線で示すようになり、実験値とよく一致した。ただし、3.4.6 式における ρ_u の値は STAMM のえた値を補間して求めたものを用いた。同様に次節 3.5.7 式によつて求められる ε_f の値から含水率 20%, 25% の状態における r_0 と ε との関係を求めると同図に破線で示すごとくである。この関係式はさらに次節のべるように、多くの測定値と照合されたが、よく一致することが明らかとなった。

なお 3.3.19 式は書きなおすと、

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) + 1 + \frac{\frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)}{\left(1 - \frac{r}{\rho_f}\right) \varepsilon_f + \frac{r}{\rho_f}} \right\} \\ &= 1 + \frac{r}{2\rho_f} (\varepsilon_f - 1) \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{\rho_f}\right) \varepsilon_f + \frac{r}{\rho_f}} \right\} \dots\dots\dots 3.4.7 \end{aligned}$$

となる。ρ_f が 1.5 ないしそれに近い値をとるのに対し、r は実際の場合ほとんど 1 以下の値をとるため、ε_f が比較的大きいときは { } 中の第 2 項は 1 に比して相当小さい値をとる。Fig. 3. 4. 16 においても含水率が高い場合ほど r₀ と ε との関係が直線に近くなるのはこのためである。3.4.7 式は { } 中の第 2 項を無視すると、

$$\varepsilon = 1 + \frac{(\varepsilon_f - 1)}{2\rho_f} r \dots\dots\dots 3.4.8$$

となり、ε と r の直線関係をあらわす。SKAAR の示した ε と r の直線関係は、この関係が近似的に示されたものと解することができる。

3.5 誘電率と含水率との関係式

木材の誘電率と含水率との関係については古く MÖRATH¹⁸⁾ によつて研究がなされている。彼は任意の含水率の木材の誘電率と、水および木材のみの誘電率との間に対数混和法則が成立するものと考え、次式を提案した。

$$\log \varepsilon = (1-x) \log \varepsilon_H + x \log \varepsilon_w \dots\dots\dots 3.5.1$$

ただし ε は木材と水の混合物の理論的誘電率値、ε_H は全乾木材の誘電率、ε_w は水の誘電率 (81.0)、x は水分含有割合である。

この式は木材の誘電率と含水率とが指数的關係にあることを示すものであるが、BRAKE¹¹⁾ らおよび山本⁵⁶⁾、上村および中村⁵⁾ らも同様両者の間の指数的關係を認めた。この式は書きかえれば、

$$\log \varepsilon - \log \varepsilon_H = x (\log \varepsilon_w - \log \varepsilon_H) \dots\dots\dots 3.5.2$$

となり、木材の比重が変化しても ε_H が変化するのみで ε と含水率との関係を示す曲線の傾斜はあまり変化せず、また、さきにのべたように、比重と ε との関係は、含水率のいかんにかかわらず比重 0 においては 1 に収斂するはずであるが、この式からは比重と ε との関係も 1 に収斂しない。

SKAAR³⁹⁾ は定性的にはあるが、含水率と ε との関係は指数的であり、比重が増加するほどその傾斜は急になることを示している。

一方木材を木材実質と水との均一な混合体とみなした場合 3.4.1 式より ε を誘導し、あるいは溶媒中における媒質の分散系として混合誘電率を求めることも試みられている。竹田⁴⁵⁾ らは MAXWELL-WAGNER 理論を適用して ε を計算したが実験値よりは著しく低い値をえた。したがつてこの理論を適用するためには水粒子を柱状のものと考え、またその断面積の合計が、繊維に直角方向では水の木材に対する容積比 p の 1/3、繊維に平行方向では p の 2/3 であると仮定して次式を提出している。

$$\varepsilon_{\parallel} = \varepsilon_H + \frac{2}{3} p \varepsilon_w \dots\dots\dots 3.5.3$$

$$\varepsilon_{\perp} = \varepsilon_H + \frac{1}{3} p \varepsilon_w \dots\dots\dots 3.5.4$$

細胞膜中の水が柱状であつた方が好つごうであることは中戸²¹⁾らも言及しているところであるが、この式は仮定そのものにも問題があり、また全乾のとき $\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{\perp}$ となつて事実と適合しない。

最近、岸・三野¹¹⁾は VAN DEN AKKER らが 3.4.1 式を基本として紙、パルプの ϵ を算出した考え方を修正して、

$$\frac{\epsilon_m - 1}{\epsilon_m + 2} = k_c p_c \rho_c + k_{\omega} p_{\omega} \rho_{\omega} \dots\dots\dots 3.5.5$$

なる式を提案し、さらにこの式から、

$$\epsilon_m = \epsilon_0 + \frac{\gamma p_c k_{\omega}'}{(1 - p_c k_c')^2} P + 3 \frac{(\gamma p_c k_{\omega}')^2}{(1 - p_c k_c')^3} P^2 + \dots\dots\dots 3.5.6$$

なる実用式を導いた。

ただし、

$$k_c \equiv \frac{\epsilon_c - 1}{\epsilon_c + 2} \cdot \frac{1}{\rho_c}$$

$$k_{\omega} \equiv \frac{\epsilon_{\omega} - 1}{\epsilon_{\omega} + 2} \cdot \frac{1}{\rho_{\omega}}$$

$$\epsilon_0 \equiv \frac{3}{1 - k_c p_c} - 2$$

$$\gamma = \frac{\rho_c}{\rho_{\omega}}$$

$$P = \frac{p_{\omega} \rho_{\omega}}{p_c \rho_c}$$

ここに ϵ_m は見掛誘電率、 ϵ_c 、 ϵ_{ω} 、 ρ_c 、 ρ_{ω} 、 p_c 、 p_{ω} はそれぞれ繊維および水の誘電率、密度および混合容積割合であり、 $k_c' \equiv k_c \rho_c$ 、 k_{ω}' は $k_{\omega} \cdot \rho_{\omega}$ に相当するものであるが、強誘電体である水の双極子能率を考慮して修正した値である。この式はサージおよびモスリンに対して実験値と一致したと報告されているが、これを木材に対して適用してみると 3.5.6 式は一定値に収斂しない級数となり、3.5.5 式も実験値とは全く一致しなかつた。

木材の誘電率は、その多孔質な状態と板板両方向の組織的異方性から考えて、恐らくはこのように単純な混合誘電体の模型を考えるべきではなく、むしろすでに述べたごとく細胞膜と細胞空隙との混在状態を考えて、3.3.19 式をもつてあらわすことが妥当であると思われる。誘電体中に空孔の多数に存在することを前提として繊維と水分との関係式を導いたものには、坂上³⁰⁾の報告があるが、これは繊維質の中に自由水のみ存在を想定し、繊維の膨潤を考慮していない点と、2 軸等方性の試料について考えられたものであることからそのまゝ木材に適用しがたい。

いま、3.3.19 式における r/ρ_f の値を 3.4.6 式によつて定めれば、 ϵ_f の値は実測された ϵ の値から求めることができる。Fig. 3.4.16 に示す実験値から求められた ϵ_f の値は Table 3.5.1 のごとくである。

Table 3.5.1 細胞膜の誘電率と含水率との関係
Relation between dielectric constant of cell wall substance and its moisture content

含水率 Moisture content %	0	5	7	10	15	20	25	28
ϵ_f	4.8	7.6	9.3	11.2	15.1	(20.6)	(27.9)	(33.6)
σ	0.485	0.572	0.762	0.780	0.820	—	—	—

() Show calculated value.

全乾の場合の木材の ϵ_f の値は、純粋な繊維素の誘電率 6.1²¹⁾ および中戸らがヒノキ材について求めた全乾細胞膜の誘電率 3.4²²⁾ と比べて妥当なものと思われる。水の分子ははじめ繊維素分子と緊密に結合し、しだいにゆるやかな結合状態に移ることは、木材の含水率の減少に伴なつて結合水の密度が増加する STAMM⁴²⁾ の報告によつても明らかであるが、このため木材の結合水は含水率の少ない間は繊維素分子の電界に強く制約されて、その分極を拘束され、含水率の増加するにつれて、その拘束からのがれるものと想像される。この関係はすなわち細胞膜実質の誘電率 ϵ_f が、含水率となんらかの指数的関係にあるであろうことを想像させる。いま、Table 3.5.1 の ϵ_f の値を含水率に対して図示すれば Fig. 3.5.1 のごとくなり、 ϵ_f の対数は含水率約 6% の点を境として、その前後においてそれぞれ含水率と直線関係にあるように思われる。木材の諸性質が約 6% の前後においてなんらかの変化を示す報告は少なくないが¹⁷⁾、誘電率に対しても含水率 0~5% 付近までは変化の異なることが報告⁴⁴⁾されている。これは恐らく水が繊維素と結合する場合の分子層に関係するものと思われるが、なお今後の検討にまつべきである。

とにかく、Fig. 3.5.1 のごとく木材の含水率 u と ϵ_f の対数との間に直線的な関係が成立するとすれば、この関係から任意の含水率における ϵ_f を求めることができる。Table 3.5.1 の結果から $u=6\%$ 以上における ϵ_f と u との関係式を求めてみると、

$$\epsilon_f = 6.08 \cdot 10^{0.10u} \dots\dots\dots 3.5.7$$

となつた。

3.5.7 式および Fig. 3.4.15 により、任意の u に対する ϵ_f の値を求めて、3.3.19 式および 3.4.6 式より含水率と ϵ との関係の求めると Fig. 3.5.2 のごとくである。

Fig. 3.5.3~25 に、装置 A および電極 No. 8 を用いて多数の樹種に対して含水率と誘電率との関係を求めた結果を示すが、Fig. 3.5.2 に示す計算値と比較すると、ほぼ一致した結果がえられた。なお、Fig. 3.5.3~25 において図中に破線で示した曲線が、Fig. 3.5.2 と同様に式 3.3.19, 3.4.6, 3.5.7 から求めた計算値である。

この実験は、各樹種 5 枚の試料を選び、飽湿状態にあつたものを徐々に乾燥しながら、全乾状態まで達せしめて測定を行なつたものである。別にデシケーター中にて長期間調湿した試料について測定した結果を Fig. 3.5.26 に示すが、この結果も計算値とおおむね一致している。ただし装置は B、電極は No. 6 を用いた。

前項において著者は、3.4.7 式中の { } 中の第 2 項は ϵ_f が比較的大きいときは、ほとんど無視しうることをのべたが、含水率 6% 以上では ϵ_f は 9 以上の大きな値を示すので、第 2 項の値は最大の場合でも 0.1~0.25 程度であり、含水率が增大するか比重が減少すれば一層小さくなる。この場合 3.4.7 式

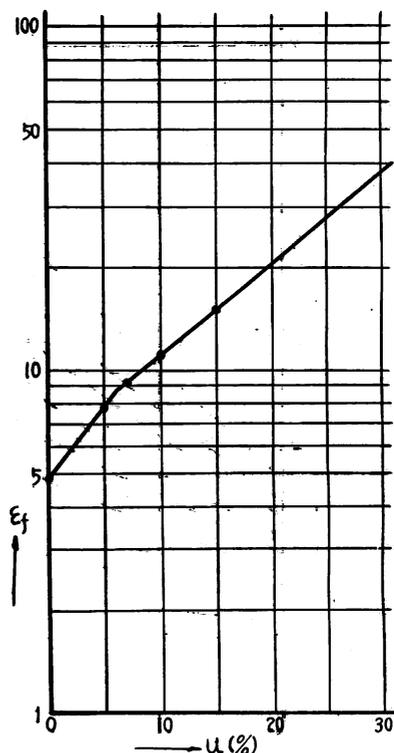


Fig. 3.5.1
細胞膜実質の誘電率と含水率との関係
Relation between dielectric constant
of cell wall substance and its
moisture content

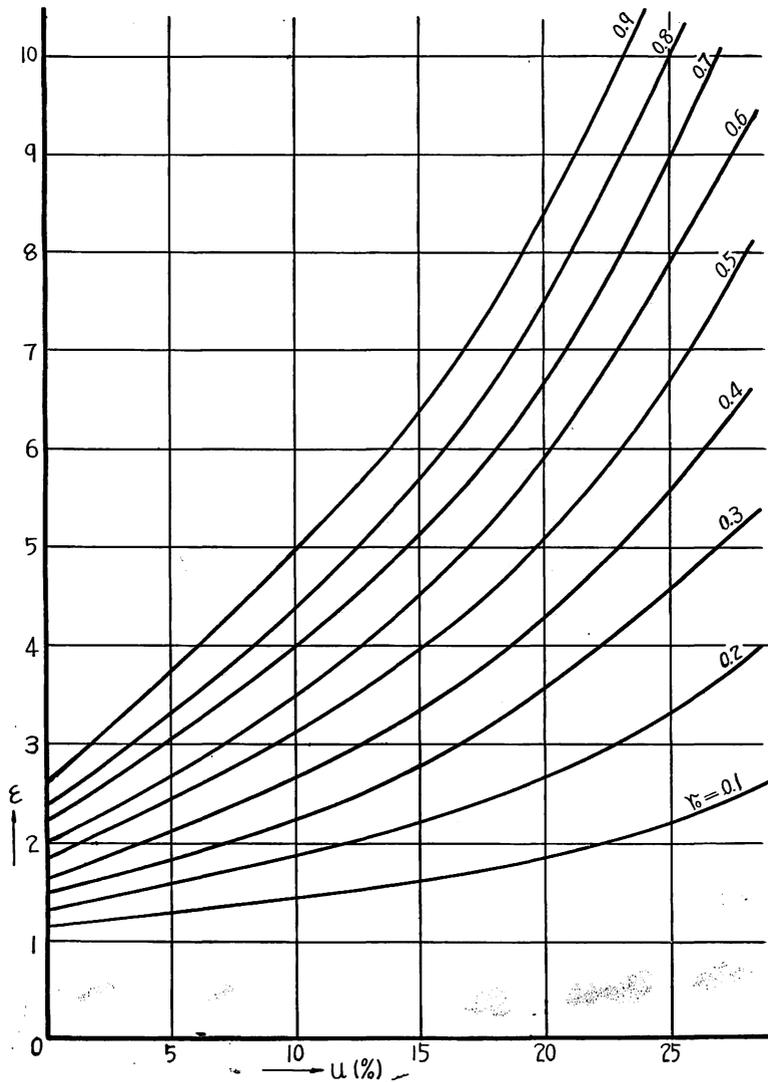


Fig. 3.5.2 木材の誘電率と含水率との関係 (結合水領域)
 Variation in dielectric constant of wood with density and moisture content below the fiber saturation point

は近似的に、

$$(\epsilon - 1) = \frac{r}{2\rho_f} (\epsilon_f - 1) \dots\dots\dots 3.5.8$$

として示すことができる。ε_f - 1 はほぼ ε_f に近いとみなすことができるが、この場合、

$$(\epsilon - 1) = \frac{6.08 r}{2\rho_f} 10^{0.10u} \dots\dots\dots 3.5.9$$

となり、ε - 1 の含水率に対する指数関係を示す。この関係は和田および小田が繊維について ε - 1 と含水率とが指数的關係にあることを指摘した⁵⁴⁾のとも一致している。はじめにのべた指数關係を示す諸式も、このような關係が近似的に示されたものと解することができる。

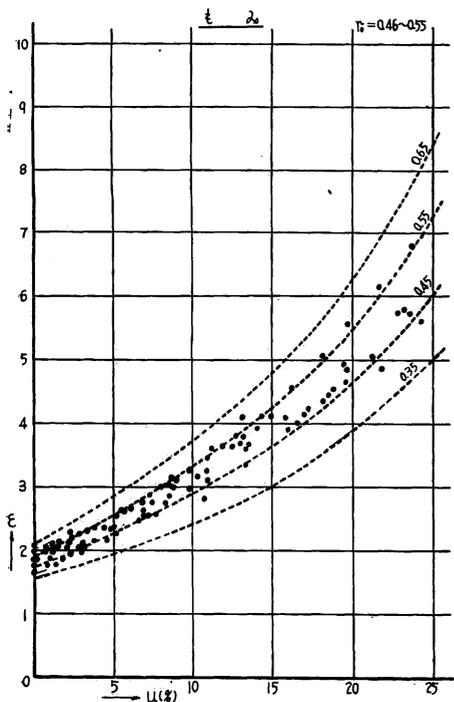


Fig. 3.5.3 Momi

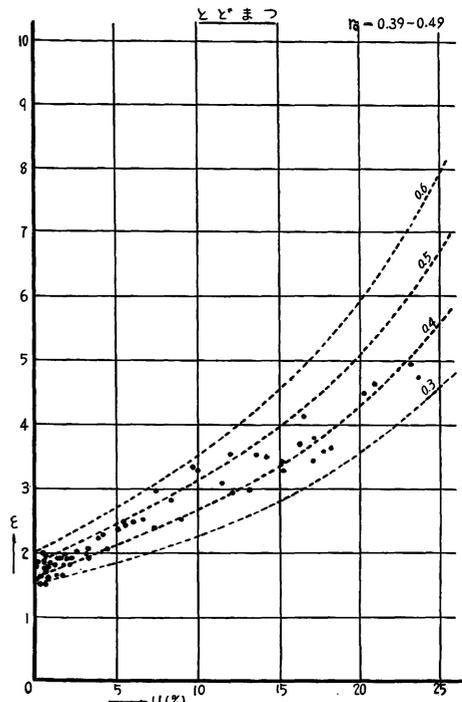


Fig. 3.5.4 Todomatsu

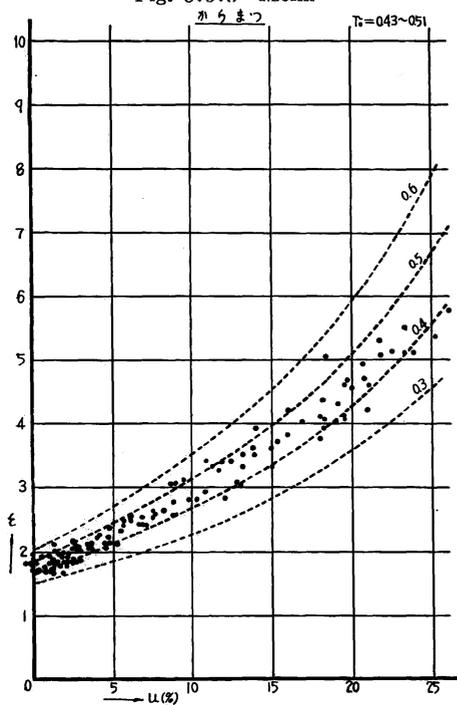


Fig. 3.5.5 Karamatsu

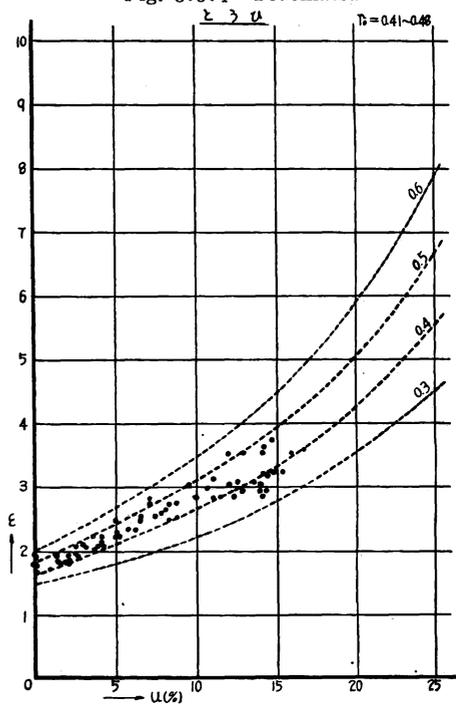


Fig. 3.5.6 Tōhi

Fig. 3.5.3~25 各樹種の誘電率と含水率の関係 (乾燥過程)
 Relation between dielectric constants and moisture contents in the woods of
 differential species (at drying process)
 Dotted lines showing the calculated values.

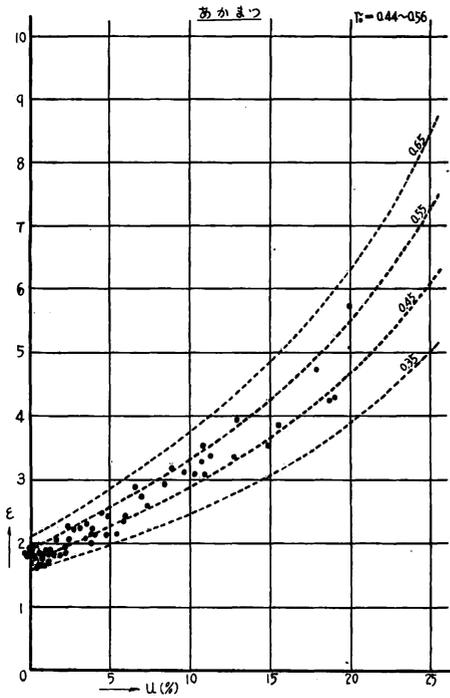


Fig. 3.5.7 Akamatsu

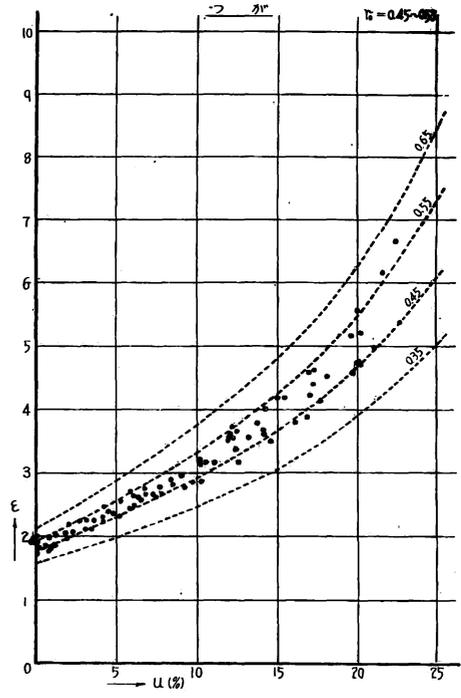


Fig. 3.5.8 Tsuga

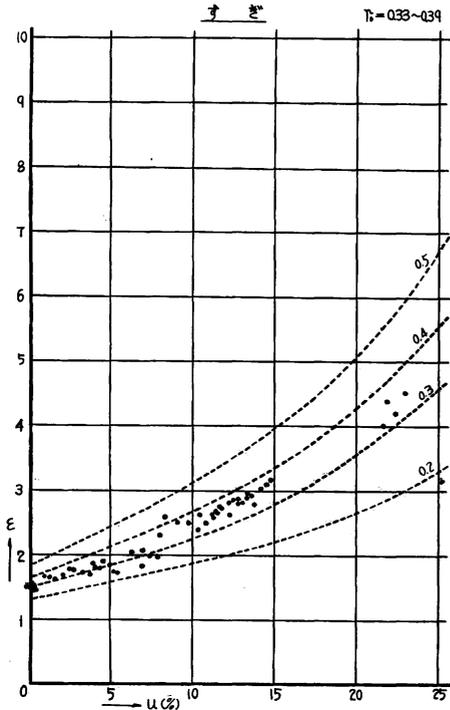


Fig. 3.5.9 Sugi

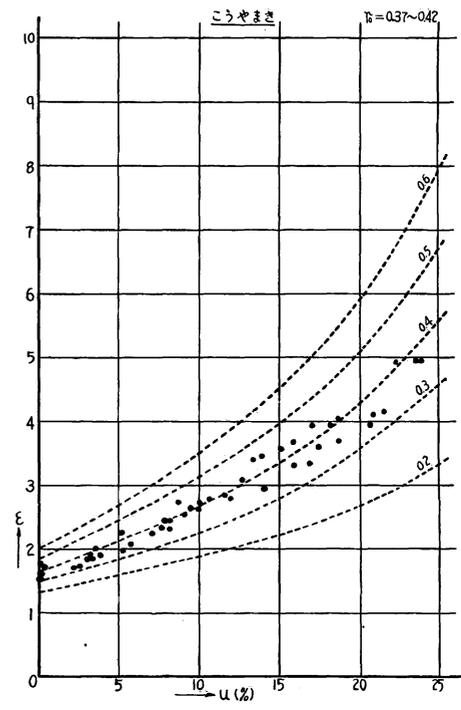


Fig. 3.5.10 Kōyamaki

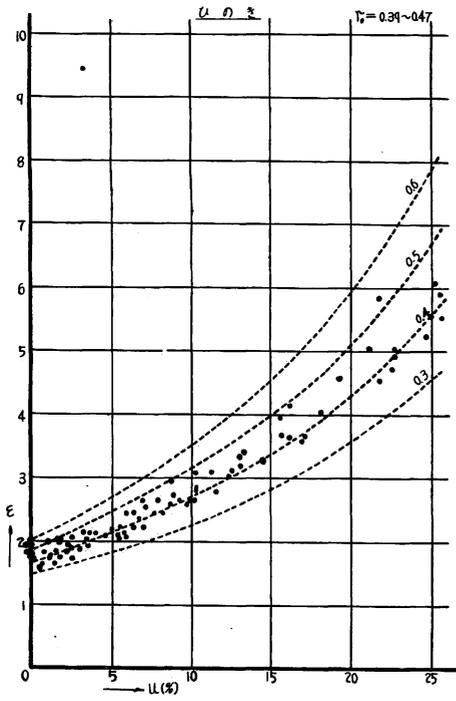


Fig. 3.5.11 Hinoki

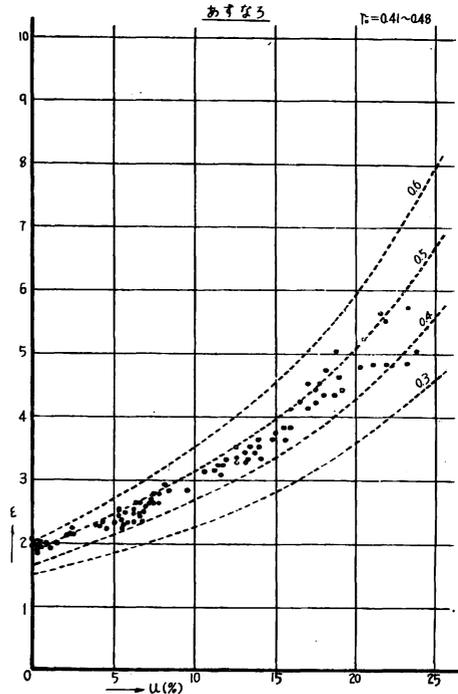


Fig. 3.5.12 Asunaro

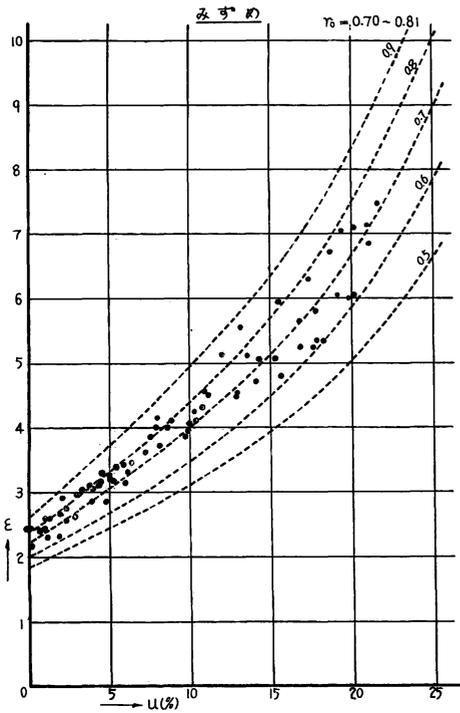


Fig. 3.5.13 Mizume

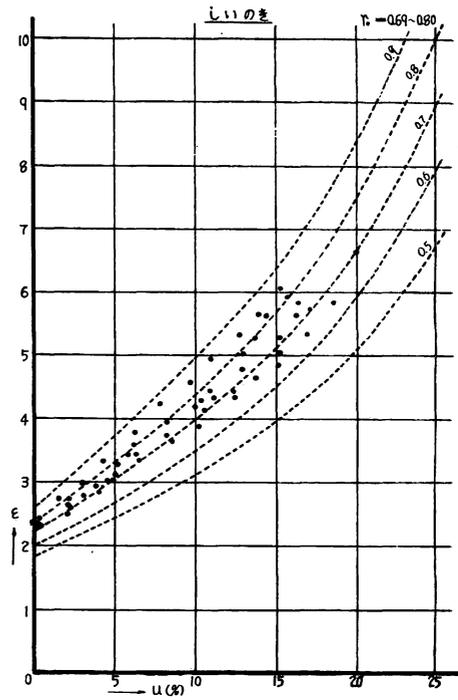


Fig. 3.5.14 Shiinoki

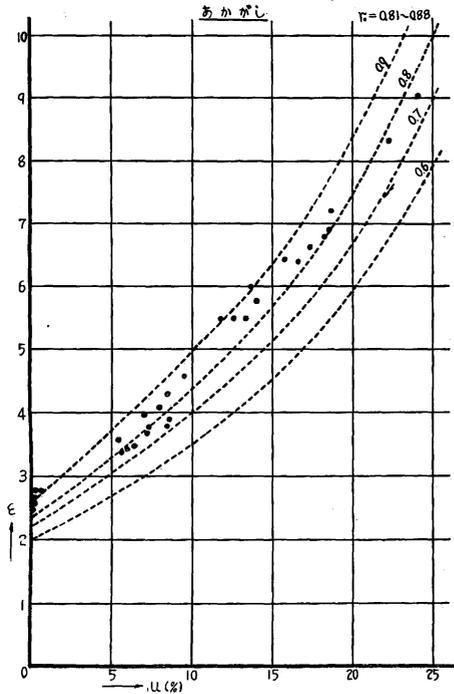


Fig. 3.5.15 Akagashi

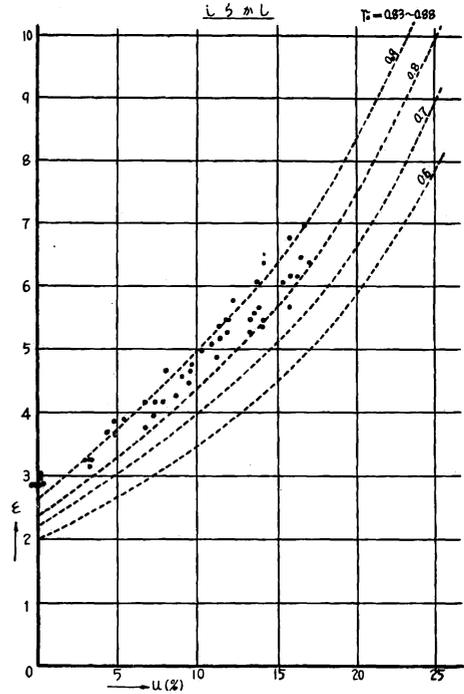


Fig. 3.5.16 Shirakashi

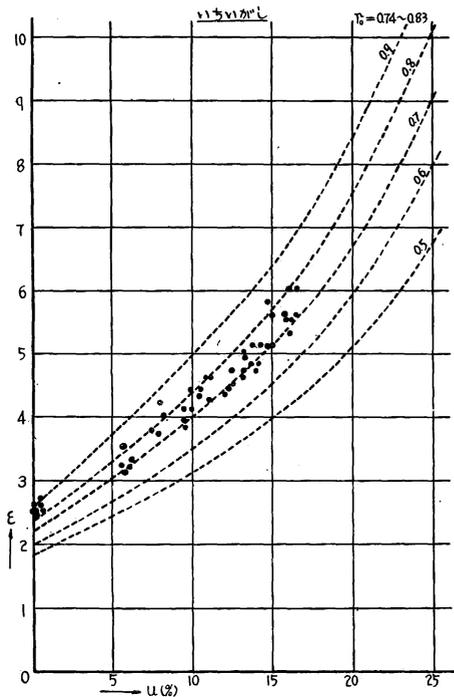


Fig. 3.5.17 Ichiigashi

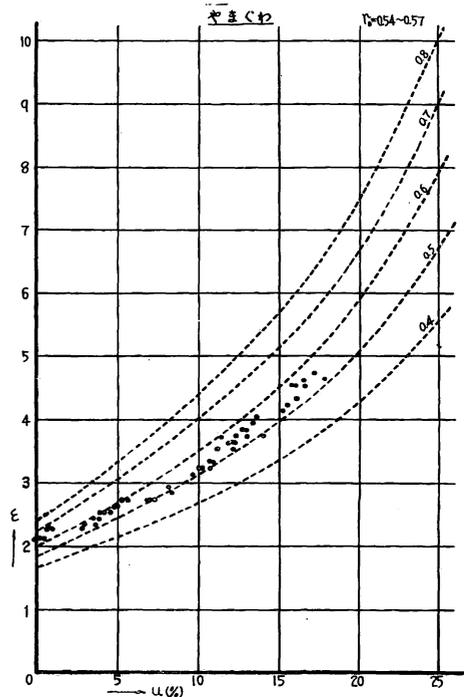


Fig. 3.5.18 Yamaguwa

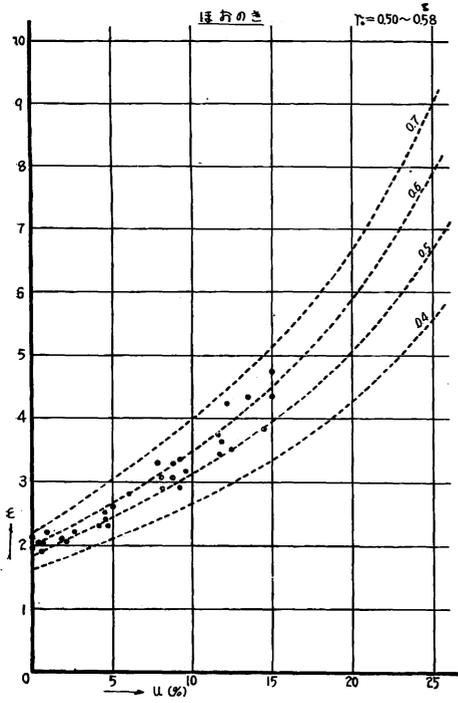


Fig. 3.5.19 Hōnoki

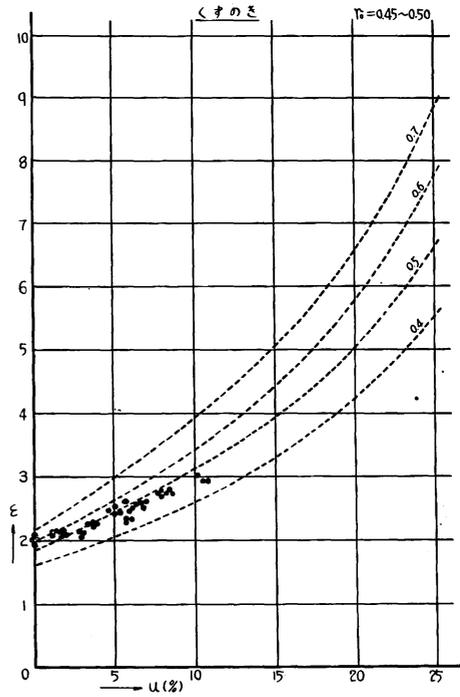


Fig. 3.5.20 Kusunoki

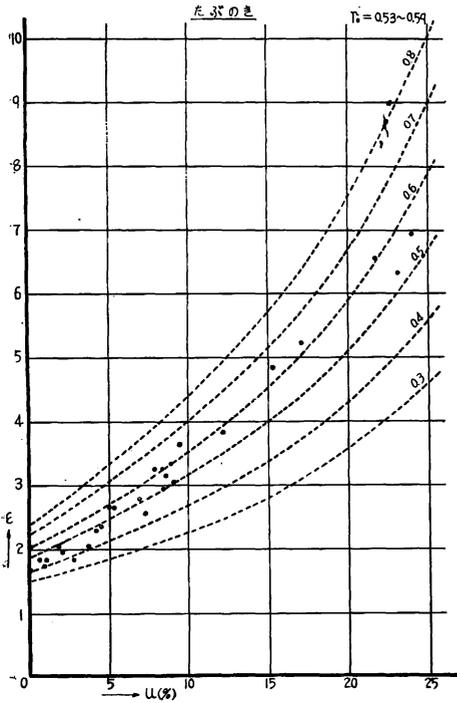


Fig. 3.5.21 Tabunoki

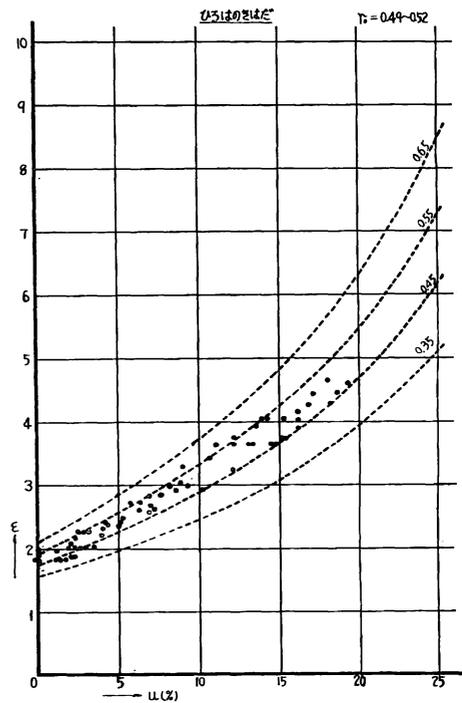


Fig. 3.5.22 Hirohanokihada

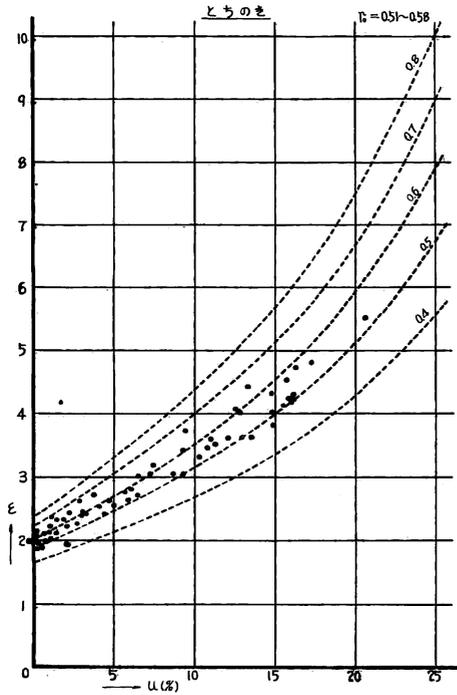


Fig. 3.5.23 Tochinoki

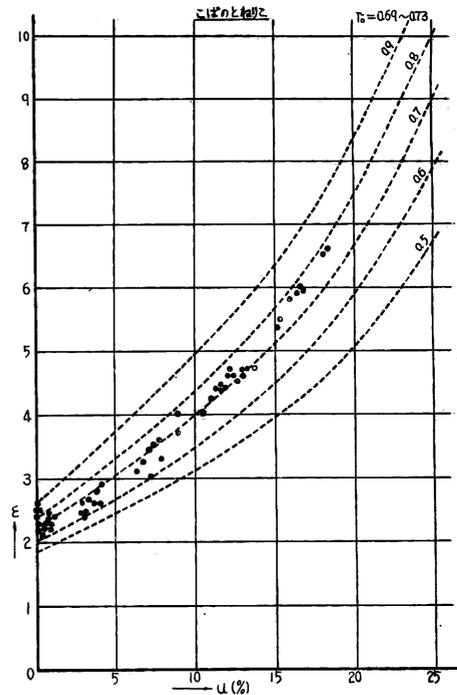


Fig. 3.5.24 Kobanotoneriko

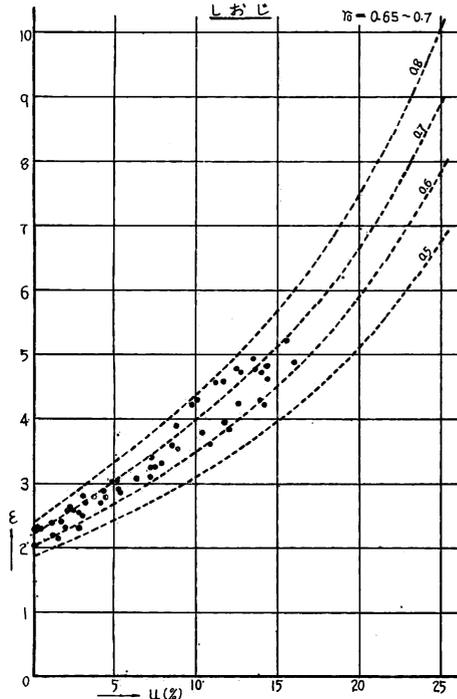


Fig. 3.5.25 Shioji

以上繊維飽和点以下、すなわち結合水領域における含水率と誘電率との関係についてのべたが、繊維飽和点以上、すなわち自由水領域においては、木材中における水の存在様式が変わるので、3.3.19式は適用できなくなる。繊維飽和点においては細胞膜に含まれる結合水は飽和状態に達し、 ϵ_f は最大となる。この ϵ_f はそれ以上含水率が増加しても変化することなく一定値をとるべきものであり、水は細胞空腔内に停留して 3.3.16 式の ϵ_n に相当する細胞空腔の誘電率を増加せしめる。いま細胞空腔内の水と空気の混合誘電率を $\epsilon_{\omega'}$ とすると、3.3.19 式は、

$$\epsilon = \frac{1}{2} \left\{ \frac{r_s}{\rho_{fs}} \epsilon_{fs} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \right) \epsilon_{\omega'} + \frac{\epsilon_{fs} \epsilon_{\omega'}}{\frac{r_s}{\rho_{fs}} \epsilon_{\omega'} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \right) \epsilon_f} \right\} \dots 3.5.10$$

ただし ρ_{fs} , r_s , ϵ_{fs} はそれぞれ繊維飽和点における結合水を含んだ細胞膜実質の比重、木材の比

重、結合水を含んだ細胞膜実質の誘電率である。 ϵ_{fs} は一定であり、 r_s/ρ_{fs} は r_0 が明らかであれば容易

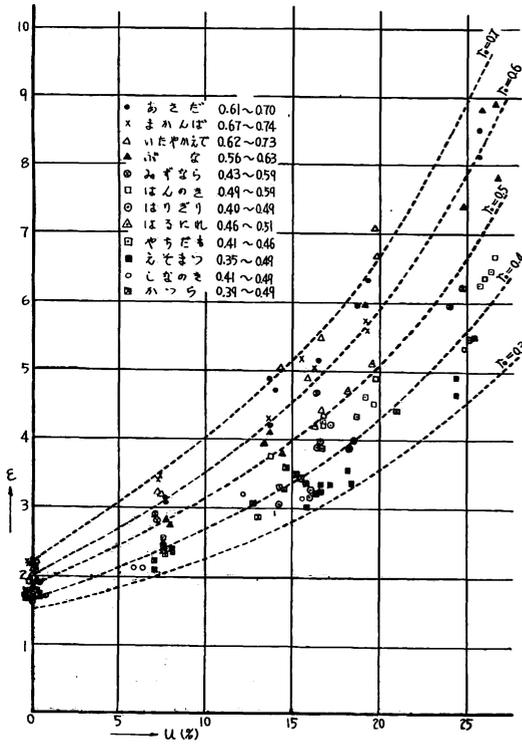


Fig. 3.5.26

各樹種の誘電率と含水率の関係 (平行状態のもの)
Relation between dielectric constants and moisture contents in the woods of differential species (at equilibrate condition)

- Asada, ×—Makanba, △—Itayakaede,
- ▲—Buna, ⊗—Mizunara, □—Hannoki,
- ⊙—Harigiri, △—Harunire, □—Yachidamo,
- Ezomatsu, ○—Shinanoki, ⊠—Katsura.

くほぼ直線関係をうることができた。なお図中含水率 70~80% における測定値は生材を水中に長期間放置したものの値である。装置は B, 電極は No. 5 を用いた。繊維飽和点およびそのときの誘電率を u_s および ϵ_s , 自由水領域での任意の含水率およびそのときの誘電率を u および ϵ とすると, この場合,

$$(u - u_s) \propto (\epsilon - \epsilon_s)$$

となる, サクラ材において見られたこの関係は比重一定の材に対してであつて, ϵ の値が比重によつて大きく支配されるべきことは, 3.5.10 式からも予想されるところである。

Fig. 3.5.28 および Table 3.5.2 は比重の異なる種々の樹種から試料を採り, 繊維飽和点以下の誘電率を

に求められるので, 任意の含水率における ϵ は, $\epsilon\omega'$ の状態が明らかであれば算出しようはずであるが, 細胞腔内における自由水の挙措はきわめて不安定なものと思われ, その模型的な解析を試みることは困難と思われる。したがつて 3.5.10 式はそのまま自由水領域には利用できない。

SKAAR³⁵⁾ は自由水領域において, 木材の含水率と誘電率が, ほぼ直線な関係を保つことを報じている。このことは, 自由水は ϵ_{fs} なる誘電率をもつ木材中に平均的に分散し, その量が増加するのに比例して ϵ を増加せしめる働きをなすことを示していると考えられる。著者もサクラ生材を水をはつたデシケーター中に放置して徐々に含水率を低下せしめ, 繊維飽和点に達してからは室内乾燥して, 含水率に対する ϵ の変化を測定したところ, 繊維飽和点以上の含水率では ϵ は含水率に対し Fig. 3.5.27 のごと

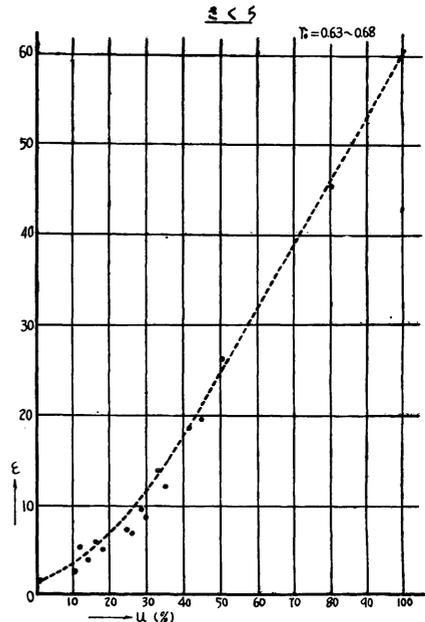


Fig. 3.5.27

自由水領域における誘電率と含水率との関係
Relation between the dielectric constant and the moisture content in the wood of Sakura, at high moisture content region

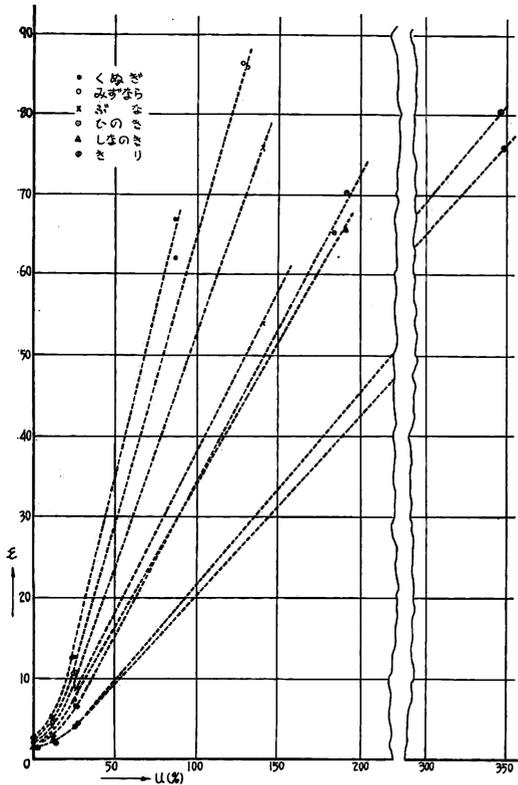


Fig. 3.5.28 自由水領域における誘電率と含水率との関係におよぼす比重の影響

Influence of densities to the relation between dielectric constant and moisture content of wood

●—Kunugi, ○—Mizunara, ×—Buna, ◎—Hinoki, △—Shinanoki, ⊗—Kiri.

Table 3.5.2 飽水材の誘電率
The dielectric constants of differential woods saturated with water

樹種 Wood species	r_0	u %	ϵ	ϵ_s	ϵ_ω	K
Kiri 1	0.262	346	80.3	4.3	81.2	0.239
Kiri 2	0.255	348	76.1	4.5	77.5	0.224
Hinoki 1	0.410	193	70.3	6.7	103.8	0.386
Hinoki 2	0.400	184	65.2	6.4	95.6	0.377
Shinanoki 1	0.458	183	63.0	7.3	92.4	0.353
Shinanoki 2	0.444	190	65.7	7.2	97.2	0.359
Buna 1	0.557	141	53.9	8.6	78.6	0.450
Buna 2	0.570	140	76.0	9.0	141.3	0.598
Nara 1	0.604	130	85.9	10.4	213.4	0.741
Nara 2	0.603	129	86.2	10.5	220.3	0.790
Kunugi 1	0.830	85.4	61.9	12.5	152.3	0.857
Kunugi 2	0.822	86.5	66.8	12.9	174.6	0.922

3.5.10 式と 3.3.19 式により,

$$(\epsilon_{max} - \epsilon_s) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{r_s}{\rho_{fs}} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \right) \epsilon_\omega + \frac{\epsilon_{fs} \epsilon_\omega}{\frac{r_s}{\rho_{fs}} \epsilon_\omega + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \right) \epsilon_{fs}} \right\}$$

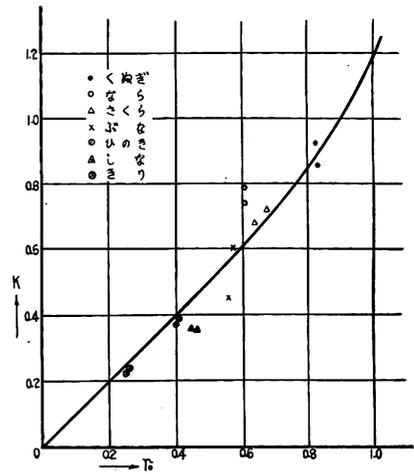


Fig. 3.5.29 K と比重との関係

Relation of K and density of wood K showing $(\epsilon - \epsilon_s)/(u - u_s)$, where ϵ_s and u_s is the dielectric constant and moisture content of wood at fiber saturation point 測定するとともに、同様の試料を飽水状態まで達せしめて、その誘電率を測定したものであるが、比重の大きいものほど、同一含水率に対する誘電率は大きくなっている。いま、

$$\frac{\epsilon - \epsilon_s}{u - u_s} = \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_s}{u_{max} - u_s} = K$$

ただし、 $K=f(r_0)$ として、 K の値を Table 3.5.2 に示した実験値から求め、えられた r_0 と K との関係を図示すると Fig. 3.5.29 のごとく密接な相関関係を示す。 K の値は $r_0=0$ のとき $K=0$ 、 $r_0=\rho_0$ のときは $u_{max}=u_s$ であるから $K=\infty$ になるべき性質をもっている。なお、図中のサクラ材の値は、完全飽水ではないが、Fig. 3.5.27 に示した最高含水状態の値から求めたものである。

一方、飽水状態においては自由水は細胞腔中を完全に満しているため、3.5.10 式は ϵ_ω' を自由水の誘電率 ϵ_ω に等しいとおくことによりそのまま成立するものと思われる。したがって

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \left\{ \frac{r_s}{\rho_{fs}} \varepsilon_{fs} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) + \frac{\varepsilon_{fs}}{\frac{r_s}{\rho_{fs}} \varepsilon_{\omega} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) \varepsilon_{fs}} \right\} \\
 & = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\omega} - 1) \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) + \frac{1}{2} \frac{(\varepsilon_{\omega} - 1) \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) \varepsilon_{fs}^2}{\left\{ \frac{r_s}{\rho_{fs}} \varepsilon_{\omega} + \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) \varepsilon_{fs} \right\} \left\{ \frac{r_s}{\rho_{fs}} - \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) \varepsilon_{fs} \right\}}
 \end{aligned}$$

整理すれば、

$$(\varepsilon_{max} - \varepsilon_s) = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\omega} - 1) \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) \left\{ 1 + \frac{1}{\left\{ 1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{fs}}\right) \right\} \left\{ 1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\omega}}{\varepsilon_{fs}}\right) \right\}} \right\} \quad \dots 3.5.11$$

$1/\varepsilon_{fs}$ は 1 に比してきわめて小さいから、

$$\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{fs}}\right) \approx 1$$

とおくことができる。また、

$$\left(\frac{\varepsilon_{\omega}}{\varepsilon_{fs}} - 1\right) = n$$

とおくと、前式は、

$$(\varepsilon_{max} - \varepsilon_s) = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\omega} - 1) \left\{ \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) + \frac{1}{1 + n \frac{r_s}{\rho_{fs}}} \right\} \dots \dots \dots 3.5.12$$

一方、 $u_{max} - u_s$ は KOLLMANN¹²⁾ によると、

$$u_{max} - u_s = \frac{\rho_0 - r_0}{\rho_0 r_0} \dots \dots \dots 3.5.13$$

である。

ゆえに、

$$K = \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon_s}{u_{max} - u_s} = \frac{\frac{1}{2} (\varepsilon_{\omega} - 1) \left\{ \left(1 - \frac{r_s}{\rho_{fs}}\right) + \frac{1}{1 + n \frac{r_s}{\rho_{fs}}} \right\}}{\frac{\rho_0 - r_0}{\rho_0 r_0}}$$

となるが、簡単のため $r_s/\rho_{fs} \approx r_0/\rho_0$

とおき、整理すると、

$$K = \frac{1}{2} (\varepsilon_{\omega} - 1) r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left(1 + n \frac{r_0}{\rho_0}\right)} \right\} \dots \dots \dots 3.5.14$$

となる。{ } 内の第 2 項は r_0 が 1 以下のときは r_0 によつてあまり変化しないから、 K の値は r_0 にはほぼ比例的であることがわかる。 n の値は ε_{ω} によつて定まるので ε_{ω} に影響されるが、それは { } 内の値を大きく変えるものではない。

さて、純粋な水の誘電率は普通 81 とされているが、細胞空隙中の自由水は多くの遊離イオンの存在によつて不純となつてはいるはずである。コロイド状溶液の誘電率は純水よりはかなり高い³⁰⁾ので自由水の誘電率は一般に純水のそれより高いことが考えられる。このことは飽水材の誘電率が 80 に近く、あるいは 81 以上の値を示すものすらあることから推定される。いま 3.5.10 式に Fig. 3. 5. 28 に用いた試料の実

験値を代入して ϵ_{ω}' (この場合 $\epsilon_{\omega}' = \epsilon_{\omega}$: 自由水の誘電率) を算出すると, ϵ_{ω} の値は Table 3.5.2 に示すごとく, かなり幅をもつたものになり, 自由水の誘電率は予想以上に高い。また, ナラのごとく溶解性物質の多いものは著しく高い値を示すが, キリ材のごとく溶解性の物質の少ないと思われるものは, ほとんど 81 に近い値を示している。

Table 3.5.2 の ϵ_{ω} の値の中から, 異常に高い値を示すナラ材の ϵ_{ω} を除き, その他の試料の ϵ_{ω} を平均すると, $\epsilon_{\omega} = 109.5$ となる。また $\epsilon_{fs} = 33.6$ (Table 3.5.1) として n の値を求めると 2.26 となる。 ϵ と u との関係を示す一般式は 3.5.10, 3.5.14 式よりこの ϵ_{ω} の値 109.5, n の値 2.26 を用いて,

$$\begin{aligned} \epsilon - \epsilon_s &= \frac{1}{2}(\epsilon_{\omega} - 1)(u - u_s)r_0 \left[1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon_{\omega}}{\epsilon_{fs}} - 1\right) \frac{r_0}{\rho_0} \right\}} \right] \\ &\approx 54.75(u - u_s)r_0 \left[1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left\{ 1 + 2.26 \frac{r_0}{\rho_0} \right\}} \right] \dots\dots\dots 3.5.15 \end{aligned}$$

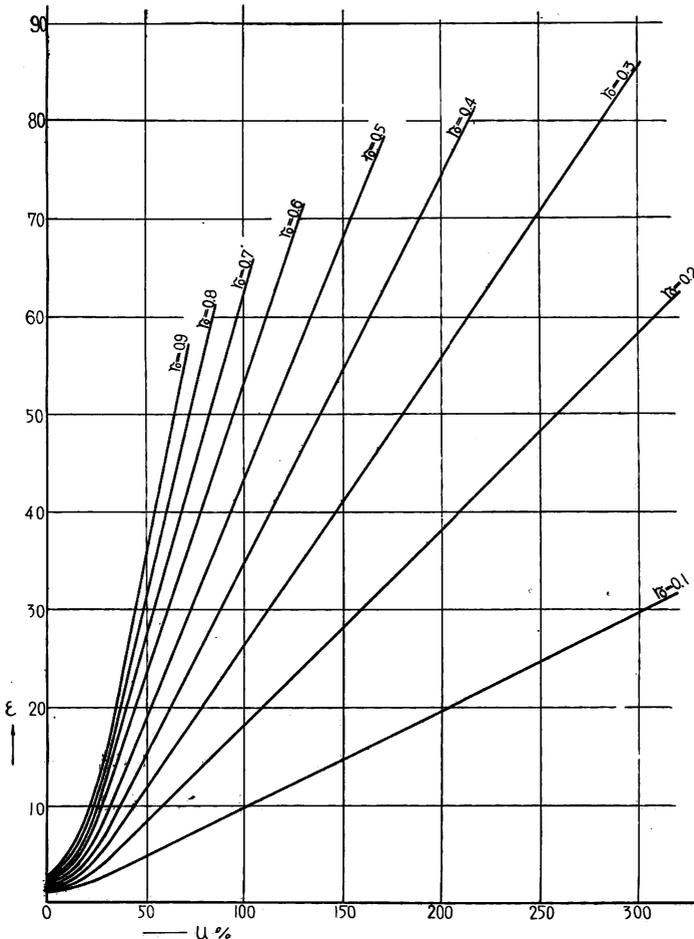


Fig. 3.5.30 木材の誘電率と含水率との関係 (自由水領域)
Variation in dielectric constant of wood with density and moisture content above the fiber saturation point

となるが, この式から K の値の計算値を求めたものを Fig. 3.5.29 に実線で示したが, 実験値をよく説明することができた。

3.5.15 式において最も注意すべきことは, ϵ が u によつて支配されるほかに, ϵ_{ω} によつても大きく左右されることである。 ϵ_{ω} が一定であれば, なんら問題はないが, さきにのべたように自由水の誘電率はその溶解物質や溶解程度のかんによつて必ずしも一定ではない。したがつて, 自由水領域における木材の誘電率は, 含水率, 比重のほかにも ϵ_{ω} を考慮しなければならない。いま, ϵ_{ω} の平均な値を 109.5 とすれば, Table 3.5.2 の値から ϵ_{ω} の標準偏差は 32.3, 変化係数は 29.5% となるので, ϵ_{ω} による $\epsilon - \epsilon_s$ の変化は

ほぼ 30% 程度とみることができる。これは同様に $u-u_0$ が 3 割ほど変化した場合に相当する。したがって誘電率を測定することによつて一般の木材の自由水領域における含水率を測定する場合には、 ϵ_ω の差によりこの程度の誤差の混入はまぬがれない。たとえば木材の比重 0.5 の場合、 $u_0=28\%$ とすれば、3.5.10 式により ϵ_0 を求めた場合 $\epsilon_0=8.0$ となり、したがつて $u=100\%$ の場合は 3.5.15 式から、 ϵ は 43.5 になるが $\epsilon-\epsilon_0$ は 35.5 となり、これに約 30% の誤差をとまなうとすれば、 ϵ の測定値から計算上推定される含水率は Fig. 3. 5. 30 から $u=100\pm 20\%$ の範囲内に分散することになり $u=40\%$ の場合には同様に考えると、 $u=40\pm 2\%$ の範囲内に分散して示されることになる。さきに示したナラ材のごとく、 ϵ_ω が特に大きいときには、さらに大きな誤差を混入する可能性がある。したがつて自由水領域での測定にあつてはほぼその含水率の程度を示すことは十分に可能であるが、正確にその含水率を指示することは困難であるといわねばならない。もつとも特定の樹種に対して ϵ_ω の影響を含む樹種補正を加えれば、その精度はかなり向上する。なお、3.5.10 式および 3.3.19 式によつて求めた含水率全域におよぶ ϵ と u との関係は Fig. 3. 5. 30 に示した。

4. 木材含水率の測定に影響する因子

4.1 木材中の水分分布の影響

木材の含水率を全乾法によらず、外部から測定しようとする場合に大きな障害となるものに水分傾斜の問題がある。長期間平衡状態におかれて、内部と外部が同一の含水率状態にある木材の場合には問題はないが、通常含水率を測定したい木材は多くの場合、内部が高含水率であり、外部が低含水率で、厚さの方向にいわゆる水分傾斜をもっている場合が多い。表面層の局部含水率が測定されればこと足りる場合には、含水率測定は直流抵抗方式でも誘電率方式でも容易であるが、木材全体の平均含水率が要求される場合には、木材の外部から内部の含水率をも含めて測定する必要がある。直流抵抗方式はすでにのべたごとく、本来電極のある部分の局部含水率を示すものであるから、内部含水率の測定には木材表面から孔をあけて電極を挿入し、あるいは特別に長い針状電極を打ち込む方法をとるが^{49) 50)}、材に傷をつけ、あるいは手数を多く要する。これに比して誘電率方式は、高周波電流が木材中を貫通することによつて木材の構成分子自体がおこす反応を測定するものであるから、木材中の水分分布が一様でなくとも、内外の水分状態に応じた反応が測定されるはずである。含水率分布と誘電率との関係についての研究はまだ見あたらないが、この点を明らかにすることは誘電率方式によつて含水率を測定せんとする場合重要なことである。

いま、木材の厚さを d 、表面から厚さ x の部分における含水率、誘電率をそれぞれ u 、 ϵ とすると、平均含水率 u_{av} は、

$$u_{av} = \frac{1}{d} \int_0^d u dx \quad \dots\dots\dots 4.4.1$$

であり、板の両面をはさんだ平行板電極によつて測定される誘電率 ϵ_m は 2.1.2~4 式により、

$$\frac{d}{\epsilon_m} = \int_0^d \frac{dx}{\epsilon} \quad \dots\dots\dots 4.1.2$$

となる。

すなわち、平均含水率 u_{av} は厚さの方向における各層の含水率の算術平均であるが、 ϵ_m は各部分の誘電率の調和平均に相当する。 ϵ_m がはたして木材各部分の ϵ の調和平均値を示すかどうかを確かめるために次の実験を行なつた。

試料としてはヒノキ材平均厚さ 1.9 mm の単板を種々の含水率に調整し、内部に高含水率の単板を外部に低含水率の単板を配置して合計 6 ~ 8 枚を積層し、両面から平行板電極でしめつけ、その誘電率 ϵ_m を測定する。一方、一枚ごとの厚さ d' と誘電率 ϵ_m' をそれぞれ測定しておき、その調和平均値 ϵ_h を、

$$\epsilon_h = \frac{\sum d'}{\sum \left(\frac{d'}{\epsilon_m'} \right)} \dots\dots\dots 4.1.3$$

によつて求めた。なお装置は B、電極は No. 4 を用いた。

Table 4.1.1 含水率の異なる単板を重ねた場合の誘電率
Dielectric constants of veneer piles having differential moisture gradients

試料 Sample	A	B	C	D	E	
ϵ_m'						
試料番号 Veneer No.	1	2.58	2.65	2.60	2.80	3.65
	2	4.77	5.42	7.00	5.71	5.28
	3	15.2	13.2	14.8	28.2	75.4
	4	22.0	16.5	81.5	80.4	75.7
	5	4.84	8.40	15.7	71.0	5.37
	6	2.48	6.04	6.53	25.2	3.75
	7	—	2.66	2.67	5.15	—
	8	—	—	—	3.12	—
ϵ_h	4.55	5.14	5.84	6.96	6.37	
ϵ_m	4.69	4.82	5.66	6.46	6.89	
ϵ_c	8.65	7.84	17.17	27.70	29.70	
単板の含水率範囲 Range of moisture content (%) of veneers	8.5~85	9.8~45	9.4~218	11.2~215	1.7~204	

その結果を Table 4. 1. 1 に示す。Table から明らかなように積層された内外単板の含水率差が比較的少ない場合でも大きい場合でも ϵ_m は ϵ_h とほぼ同一の値を示し、 ϵ_m' の算術平均値 ϵ_c とは全然一致しない。また、試料 A の組合せを変え、高含水率のものを外側に、低含水率のものを内側に配置して ϵ_m を測定してみたが、結果は内高外低の場合と同一であつた。 ϵ_m と ϵ_h の間に多少差があるのは、単板含水率の相互移動および膨潤状態にある飽水単板の d' の測定誤差に基づくものと思われる。

以上により、水分傾斜のある材において測定される ϵ は、試料の各層における ϵ の調和平均値であらわされることが明らかとなつたが、水分傾斜のある材で一般に含水率測定の対象となるものは u_{av} 、すなわち試料各層の含水率の算術平均値である。したがつて水分傾斜があつても、測定された ϵ_m から前章にのべた関係式によつて逆に求められる u_m の値が u_{av} と近似である場合には測定値をそのまま利用することができるが、 u_m と u_{av} との差が著しい場合には、測定値 ϵ_m から直接 u_{av} を知ることは困難である。 ϵ_m の性質からおして水分傾斜が急であるほど u_m と u_{av} との差は大となることが予想される。

木材の乾燥過程における含水率の分布は、材の厚さと放物線的關係にあることが知られている。SONNLEITHNER²⁷⁾によると、この關係式は 2 次 ~ 4 次の放物線式で示されるが、一般に 2 次の關係を示すことが多く、繊維飽和点以下ではすべて 2 次式で示される。いま、簡単のために木材の含水率分布が 2 次の放物線式を示すものと仮定し、材の厚さを d 、材の厚さの中央部分の含水率を u_{max} 、最外部の含水率を u_{min} とすれば、厚さの中央から x の距離における含水率 u は、

$$u = u_{max} - nx^2 \dots\dots\dots 4.1.4$$

ただし、 $n = \frac{4(u_{max} - u_{min})}{d^2}$ なる關係にある。

したがって u_{av} は 4.1.1 式より,

$$u_{av} = \frac{1}{d} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \left(u_{max} - \frac{4(u_{max} - u_{min})}{d^2} x^2 \right) dx = \frac{1}{3} (2u_{max} + u_{min}) \dots\dots\dots 4.1.5$$

この場合に実測されるべき誘電率 ϵ_m は, 板を厚さの方向に N 等分して考えれば, 繊維飽和点以下では, 3.5.9 式により,

$$\epsilon_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{1}{\frac{6.08r}{2\rho_f} / e^{10u_i} + 1}} \dots\dots\dots 4.1.6$$

ただし, u_i は 4.1.4 式によつて求められる任意の含水率である。

繊維飽和点以上では, 3.5.15 式により,

$$\epsilon_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^{i=N} 54.75(u_i - u_s)r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 - \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left(1 + 2.26 \frac{r_0}{\rho_0}\right)} \right\}} + \epsilon_s \dots\dots\dots 4.1.7$$

によつて求めることができる。

実際には, 任意の含水率に相当する ϵ の値は, Fig. 3.5.2 および Fig. 3.5.30 から容易に求められるので, 木材の全乾比重 0.3, 0.5 および 0.8 の場合について, 種々の水分傾斜の場合, すなわち種々の $(u_{max} - u_{min})$ の場合について, 4.1.5 式により u_{av} を求め, u_{av} に相当する誘電率の値 ϵ_{av} を Fig. 3.5.2, Fig. 3.5.30 から求め, また 4.1.4 および 4.1.6~7 式より同一の場合の ϵ_m を算出して, 両者を比較すれば Table 4.1.2 のごとくなる。さらに $(u_{max} - u_{min})$ が異なる場合 u_{av} に対する ϵ_m の関係を Table 4.1.2 の値から図示してみると Fig. 4.1.1 のごとくなる。図中 $(u_{max} - u_{min}) = 0$ の場合がすなわち水分傾斜のない場合で, Fig. 3.5.2, Fig. 3.5.30 に示される ϵ と u の一般的

Table 4.1.2 水分傾斜の誘電率測定値におよぼす影響
Influence of moisture gradient of wood to measured dielectric constant

u_{max} (%)	r_0	$u_{max} - u_{min}$ (%)															
		5		10		15		20		25		30		35		40	
		ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m	ϵ_{av}	ϵ_m
15	0.3	2.53	2.53	2.35	2.33												
	0.5	3.60	3.60	3.35	3.30												
	0.8	5.20	5.20	4.80	4.70												
20	0.3	3.20	3.20	3.00	2.95	2.75	2.70										
	0.5	4.65	4.65	4.30	4.25	3.90	3.85										
	0.8	6.80	6.80	6.30	6.20	5.70	5.55										
25	0.3	4.10	4.10	3.85	3.75	3.50	3.40	3.20	3.10								
	0.5	6.05	6.05	5.60	5.50	5.10	4.90	4.70	4.45								
	0.8	9.10	9.10	8.40	8.10	7.50	7.20	6.80	6.30								
30	0.3	5.30	5.30	4.90	4.90	4.50	4.50	4.10	4.05	3.90	3.65						
	0.5	8.10	8.10	7.30	7.30	6.70	6.70	6.00	5.90	5.60	5.25						
	0.8	11.80	11.80	10.90	10.75	10.00	9.80	9.10	8.80	8.40	7.60						
40	0.3	8.50	8.50	8.00	7.75	7.40	7.20	6.70	6.40	6.50	5.70	6.00	5.15	5.30	4.50		
	0.5	13.20	13.10	12.50	12.20	11.50	11.00	10.70	9.80	9.90	8.60	9.20	7.50	8.10	6.60		
	0.8	20.80	20.70	19.50	18.80	17.70	16.70	16.00	14.70	14.70	12.90	13.50	11.30	11.60	9.65		
50	0.3	11.50	11.40	11.00	10.90	10.30	10.25	9.90	9.50	9.20	8.65	8.80	7.80	8.40	6.80	8.00	6.15
	0.5	18.40	18.20	17.30	17.10	16.50	16.20	15.80	14.80	14.80	13.40	14.00	11.60	13.20	10.40	12.50	9.00
	0.8	29.00	28.80	28.00	27.20	26.20	25.30	24.80	23.20	22.80	21.50	22.00	18.20	20.50	15.70	19.50	13.75

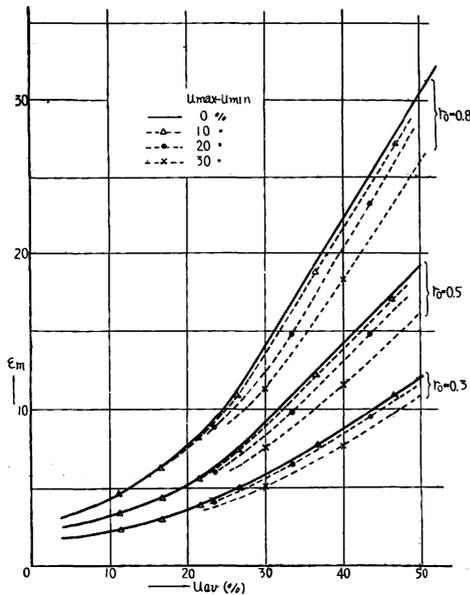


Fig. 4.1.1

水分傾斜が誘電率測定値におよぼす影響
Influence of moisture gradient of wood to measured dielectric constant

な関係を示すものである。 $(U_{max}-U_{min})$ が大きいほど、すなわち水分傾斜が著しいほど ϵ と u の関係を示す曲線は水分傾斜のない場合の曲線から遠ざかり、同一の u_{av} に対して ϵ_m は少なく測定され、したがって含水率計を対象にするときは、見かけの含水率は少な目に標示されることとなる。この傾向は比重が大きい場合ほど大きく、また、平均含水率が高い場合ほど大きい。繊維飽和点以下においては、 $(U_{max}-U_{min})$ が約 15~20% 程度まではほぼ支障のない測定ができるが、 $(U_{max}-U_{min})$ がそれ以上になると、見かけの含水率は真の u_{av} よりも少なくなってくる。繊維飽和点以上では、 $(U_{max}-U_{min})$ が 10% 以下でも比重の大きい場合には明らかに含水率は少な目に測定される結果になるので、水分傾斜のなはだしい場合、特に高含水率域においては、十分この点に留意しなければならない。これは Table 4. 1. 1 の結果からも明らかである。

Fig. 4. 1. 2 に、繊維飽和点以下における水分傾斜のある材の測定例を示す。供試材はエゾマツの $220 \times 105 \times 16 \text{ mm}$ の板で、A、B は周囲に石炭酸樹脂で防水処理をしたものを、片面を水浸して後 90 時間放置し 2~4 日間飽和水蒸気中に置いて水分分布を平滑化し、さらに浸水した面をおおって大気中に放置し、中途において 45°C で反対側の面から短時間の乾燥を行ない、水分傾斜をもたせたもので、C は水分傾斜のない材である。測定の終わった試料は特殊なかんなで削り、一定間隔ごとに飽屑をとって全乾して含水率分布を測定した。図に矢印で示した値は、試料全体の ϵ_m を装置 A と電極 No. 7 で測定し、この ϵ_m に対する u_m の値を Fig. 3. 5. 2 から求めたものである。各部分の含水率の平均値と求められた u_m とは、試料の個体差があるため完全には一致しないが、ほぼ一致しており、水分傾斜の影響はあら

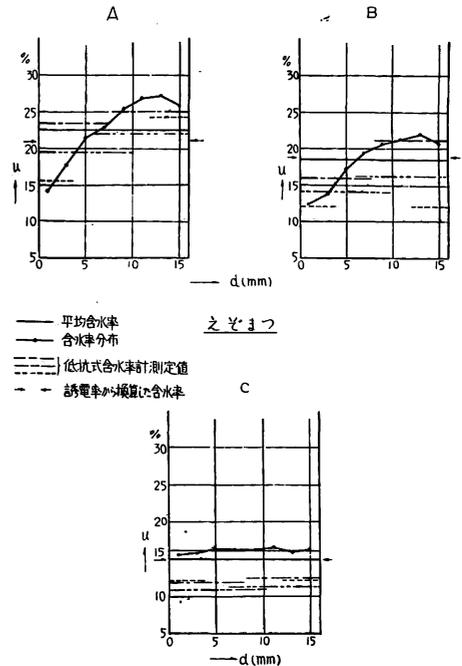


Fig. 4.1.2 水分傾斜のある材の含水率測定
Measurement of moisture contents of wood boards having moisture gradient (Ezomatsu)
—— Average moisture content.
- - - Moisture distribution.
- - - } Measurement with resistance type moisture meters.
- - - } Calculated values with measured dielectric constants.

われていない。図中に示した針状電極を有する直流抵抗式含水率計の測定値が、針を打ち込む面によつて明らかに水分傾斜の影響を受けている⁵¹⁾のと比較すると、水分傾斜のある場合、誘電率方式の計器が有利であることがわかる。

4.2 含水率の増加に伴う高周波抵抗の混入

一般に誘電体の電気的性質は、その電気的定数が Fig. 4. 2. 1 (a) のごとき等価並列静電容量 C_x と、等価並列抵抗 R_x から成り立っているものとして表示されている。誘電率はこの静電容量 C_x から計算されるものであるが、発振法によつて実際に測定される容量値は複同調法を除いては、 C_x 、 R_x の並列回路を同図 (b) のように容量 C_e と抵抗 R_e の直列回路と等価と考えた場合の C_e である。(a) の場合端子から見たインピーダンス Z_a は、

$$Z_a = \frac{Z_c Z_R}{Z_c + Z_R} = \frac{R_x}{1 + j\omega C_x R_x}$$

$$= \frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} - \frac{j\omega C_x R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \dots\dots 4.2.1$$

(b) の場合は、

$$Z_b = R_e - j\frac{1}{\omega C_e} \dots\dots 4.2.2$$

である。ただし $\omega = 2\pi f$ で f は周波数を示す。

Z_a と Z_b が等価であるためには

$$R_e = \frac{R_x}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \dots\dots 4.2.3$$

$$\frac{1}{\omega C_e} = \frac{\omega C_x R_x^2}{1 + \omega^2 C_x^2 R_x^2} \dots\dots 4.2.4$$

でなければならない。

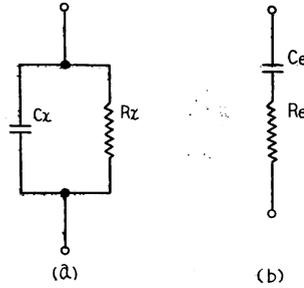


Fig. 4.2.1 試料の誘電的性質を示す等価回路 Schematic diagram showing the dielectrical properties of wood Where R_x is the parallel Resistance, C_x is the parallel capacitance, R_e is the equivalent resistance, C_e is the equivalent capacitance.

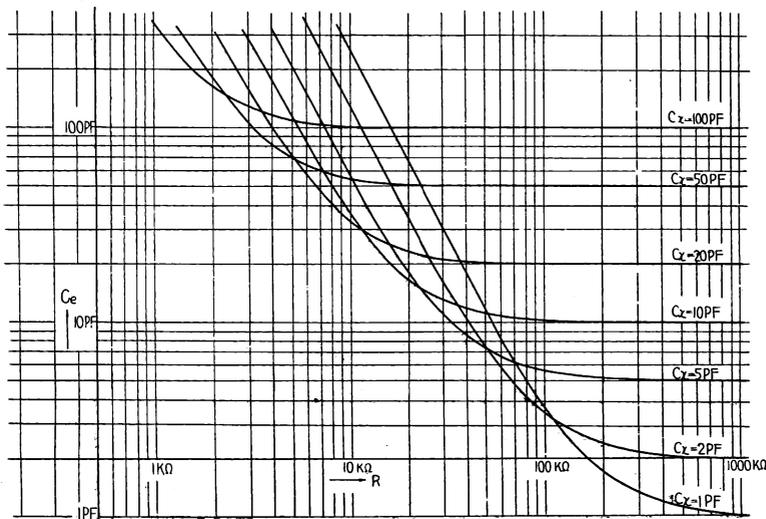


Fig. 4.2.2 R_x の変化に対する C_e と C_x との関係 (計算値) Relation between C_e and C_x for the variation of R_x (Calculated value)

したがって、

$$C_e = C_x \left(1 + \frac{1}{\omega^2 C_x^2 R_x^2} \right) \dots\dots\dots 4.2.5$$

すなわち見かけの容量 C_e は同波数一定の場合、実際の容量 C_x よりは $1/\omega^2 C_x R_x^2$ だけ多く測定されることになる。 R_x が大きい場合にはこの値はきわめて小さく、 $C_e \approx C_x$ とみなすことができるが、 R_x が小さい場合は C_x に比して無視しえない値となる。いま $f=1MC$ の場合 C_x に対する C_e の値がどのように変化するかを 4.2.5 式から計算してみると、Fig. 4. 2. 2のごとくなる。図はある C_x の値をもつた発振回路において、等価並列抵抗の値がある一定値以下になると急速に C_e の値が増加することを示している。たとえば $C_x=100 \mu f$ の場合には $R_x=10 k\Omega$ 以下になると R_x の影響があらわれてくる。Fig. 4. 2. 3 は、装置 A において試料としてブナ気乾材をはさんだ電極と並列に種々の値を有する標準抵抗を

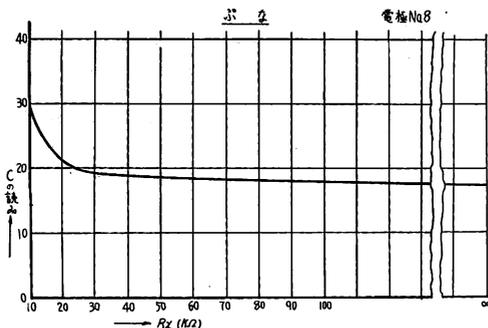


Fig. 4.2.3 R_x の変化による C_e の変化
Variation in C_e with value of R_x (Buna)

接続してその影響をみたものであるが、このような影響が明らかにあらわれている。すなわち複同調法以外の簡単な共振法の装置によつて誘電率を測定しようとする場合、試料の等価並列抵抗が著しく小さいときは、試料の C_x したがって ϵ は実際よりも高く測定され正しい値をうることができない。

さて木材の誘電率、したがってその静電容量は含水率の増加するにしたがって増加するが、一方木材の高周波損失も含水率の増加するにつれて増

加することが知られている⁵⁷⁾。ゆえに木材がある程度以上の含水率になった場合、その高周波抵抗の値のいかによつて C_x の測定値は実際以上に高くなり、またそのために、高周波抵抗に影響する諸因子が測定値に二重の誤差として混入してきて、測定が不正確になるおそれがある。この意味で著者は木材の高周波抵抗の値がどの程度のものであり、含水率その他の諸因子によりどの程度変化するかを明らかにすることとした。測定装置としてはすべて B を用い、試料の等価並列抵抗 R_x と等価並列静電容量 C_x とを完全に分離測定した。この場合、試料の体積固有抵抗 R は、

$$R = \frac{AR_x}{d} \dots\dots\dots 4.2.6$$

で定まる。ただし A は電極の面積 (cm^2)、 d は試料の厚さ (cm) である。

正しい意味では測定値 R_x は、試料の体積抵抗 R_v と、それと並列にはいる表面抵抗 R_s と、 R_v および R_s と直列にはいる試料と電極間の接触抵抗値 R_c との合成値であり、

$$R_x = R_c + \frac{R_v R_s}{R_v + R_s} \dots\dots\dots 4.2.7$$

として示されるので真の体積固有抵抗値は $R' = AR_v/d$ で示される値であるが、実際に木材の誘電率を平行板電極によつて測定する場合に測定値に混入してくるのは R_x であつて R_v ではない。共振法において R_v と R_s を分離することは簡単でないが、高周波の電気力線は Fig. 2. 2. 1 に示したような経路を通り、試料の表面を通るものが多数あるとは考えられないこと、実際の試料では試料の表面は相当な広がりをもっていること等から、 R_s は R_v に比して相当大きいと予想される。また、 R_c は後にのべるよう

にかなり小さいので本稿においては、 R' にかえて 4.2.6 式によつて示される R を求め、これを近似的な体積固有抵抗値と考えて比較することとした。

A. 高周波抵抗に影響する諸因子

a) 厚さの影響と edge effect

R_x の値が試料の厚さの増加とともに増加するのは、4.2.6 式によつても明らかである。電極面積と同大の試料にあつては、 R_x は厚さの増加に比例して増加すると思われるが、電極面積よりも大きい試料にあつては、誘電率の場合と同様に edge effect が予想される。Fig. 4. 2. 4~5 は Fig. 2. 2. 2~3 と同一の試料と電極によつて求めた R の値である。試料は電極と同大であり、 R_x は厚さに比例して直線的に増加するので、算出された R の値は厚さとは無関係に示されていることは Fig. 2. 2. 2~3、と同様である。また、電極の両辺の長さを a, b 、表面固有抵抗を R_s' とすると、4.2.7 式は、

$$R_x = R_c + \frac{dR'R_s'}{R' + abR_s'}$$

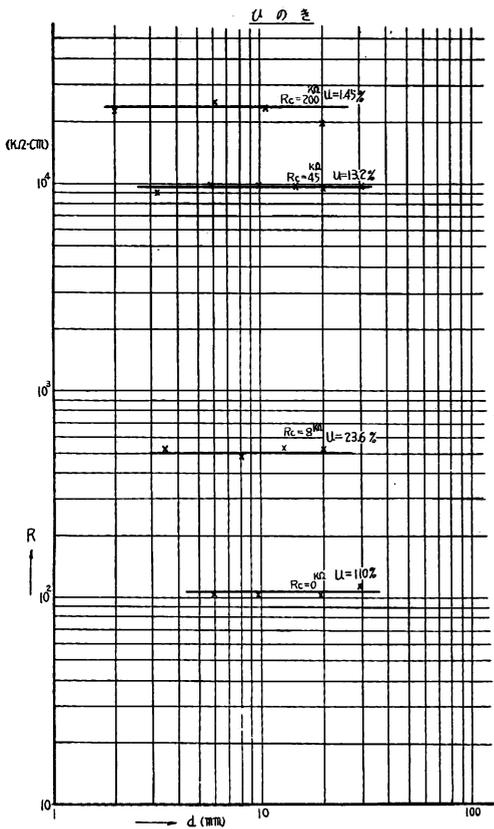


Fig. 4.2.4 電極と同大の試料における試料の厚さと高周波抵抗との関係 (ヒノキ)
Variation of measured resistivity (R) with thickness of samples (d) they are equal to the plate of electrode in size (Hinoki)

Where R_c is the contact resistance, u is moisture content.

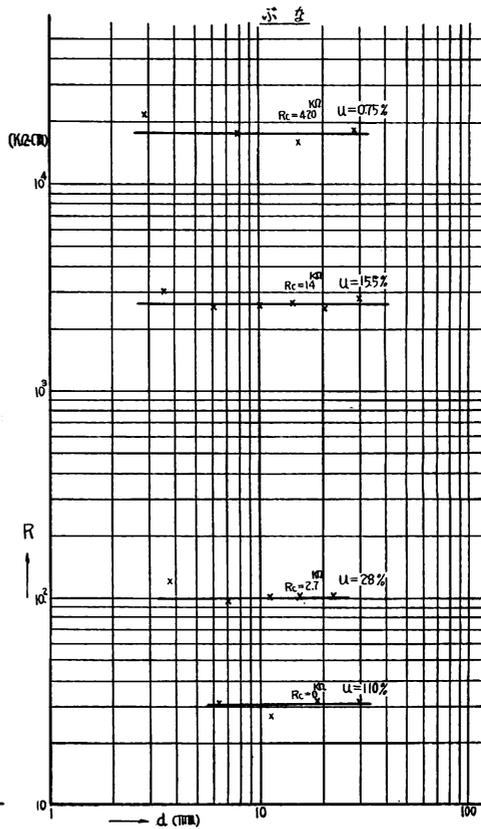


Fig. 4.2.5 電極と同大の試料における試料の厚さと高周波抵抗との関係 (ブナ)
Variation of measured resistivity (R) with thickness of samples (d) they are equal to the plate of electrode in size (Buna)

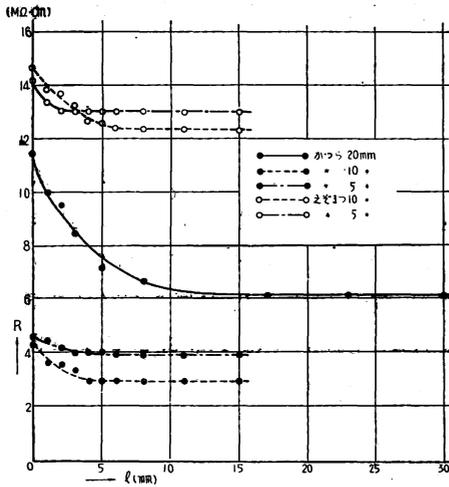


Fig. 4.2.6 板の広がりが高周波抵抗の測定値におよぼす影響
Influence of extension of board edge (l) to measured resistivity (R)
●—Katsura, ○—Ezomatsu

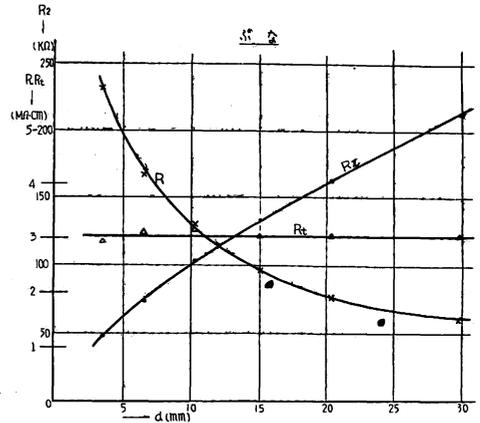


Fig. 4.2.7 厚さの変化と高周波抵抗との関係
Relation between measured resistivity (R) total resistance (R_x), corrected value of resistivity (R_t) and thickness of sample board (d) (Buna)

となり、 d が 0 のとき $R_x = R_0$ となるので、 R_x と d との直線関係から $d=0$ のときの R_x の値、すなわち R_0 の値を求めて図中に記した。 R_0 の値は繊維飽和点以上では 0 であるが、繊維飽和点以下では含水率の減少につれて増大している。しかし、 R の値に比べて相当小さいので、実際の測定に際しては大きな混入因子とはなりえないと思われる。

次に Fig. 2. 2. 4~5 と同様に電極より大きい試料の周辺と電極の縁辺との距離をしたいにせばめていた場合の測定値を Fig. 4. 2. 6 に示す。試料の edge によつて R_x が増加しなくなるための試料の周辺から電極の縁辺までの距離 l は、誘電率の場合と同程度かまたは若干小さいように思われる。この傾向は、誘電率の場合と同じく、含水率が異なつてもほぼ同様であり、繊維方向と縁辺との関係についても誘電率の場合と同様に特別な関係は見られなかつた。

十分な広がりをもつた任意の板厚の試料について誘電率の場合と同様な方法で板厚を減少させながら R_x を測定してみると、Fig. 4. 2. 7 のように R_x は厚さに対して曲線的に変化し、この R_x の値から、そのまま R の値を計算すると、 R は図に示したように厚さが減少するにつれて著しく多くなつてくる。図は電極 No. 4 の場合であるが、他の電極を用いても傾向は同一であつた。これは edge effect のあらわれたものと思われるので、試みに 2.2.11 式をそのまま利用して、

$$R_t = R \left[1 + \frac{ld}{A} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{l}{Ad} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots 4.2.8$$

として計算してみると、edge effect を除去した抵抗値 R_t の値は図のごとく厚さに無関係な値となる。図はブナ気乾材に対するものであるが、同様にヒノキおよびブナ材の含水率の異なる試料についてもとめた R_t の値を Fig. 4.2.8~9 に示す。 R_t の値は含水率のいかにかわからず厚さに無関係に一定値をとっている。なおヒノキ材 170% の値が若干山型の分布をしているのは、この試料が完全飽水でなく、表面の方が多少含水率が高かつたからで、片面から飽削していくことによつてその影響があらわれたものであると思われる。

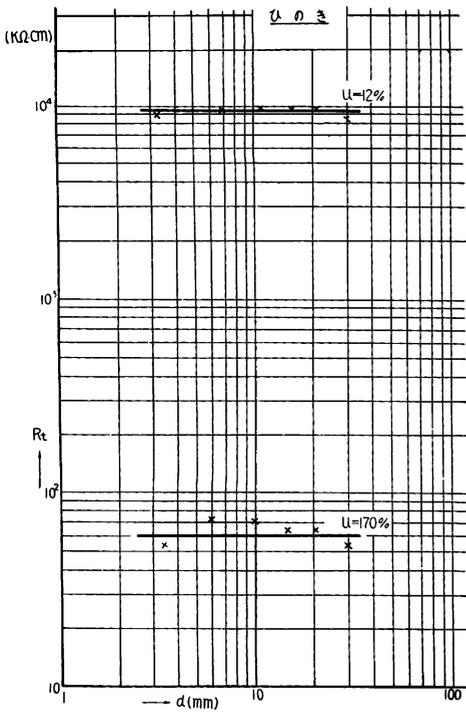


Fig. 4.2.8 Edge effect を補正した高周波抵抗値 (ヒノキ)
Resistivity not including the edge effect (Hinoki)

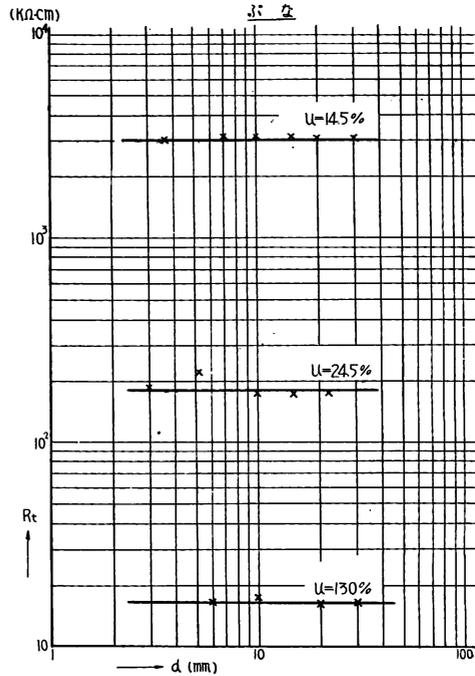


Fig. 4.2.9 Edge effect を補正した高周波抵抗値 (ブナ)
Resistivity not including the edge effect (Buna)

b) 高周波抵抗におよぼす温度の影響

木材の直流電気抵抗が温度の増加にしたがって低下することについては多くの報告がある。

高周波領域においても、木材の電気抵抗が温度の上昇とともに減少することであることは容易に予想されることであるが、その影響の程度についてはいまだ明らかにされていない。誘電率と高周波損失とによつて左右される $\tan \delta$ の値が、温度によつて相当影響を受ける^{46) 33)} ことからおせば、高周波抵抗は相当大きい温度係数を有することが予想される。

Fig. 4. 2. 10 は 3.2 において誘電率の温度係数の測定に用いたと同一の試料について、3.2 においてのべたと同様の操作にしたがい、高周波抵抗と温度との関係を測定したものである。図に見られるように、温度と抵抗の対数とはほぼ直線の関係にあるように、見受けられる。この関係を図の実験値から求める、とヒノキ気乾材については、

$$R_{t_0} = R_{t_1} e^{1.94t \times 10^{-2} (t_1 - t_0)} \dots 4.2.9$$

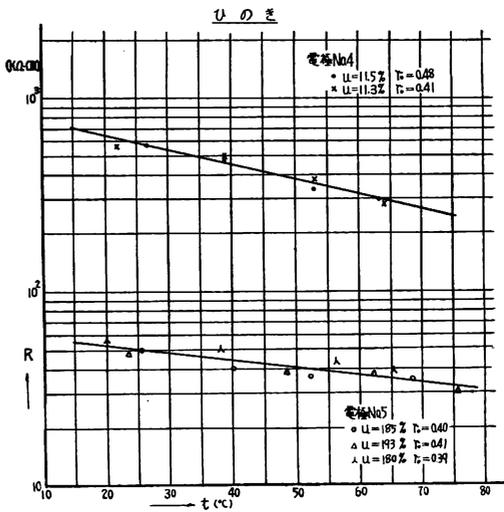


Fig. 4.2.10 高周波抵抗と温度との関係
Variation in resistivity of wood with temperature (Hinoki, electrode No. 4 and 5)

同じく飽水材については、

$$R_{t_0} = R_{t_1} e^{0.954 \times 10^{-2} (t_1 - t_0)} \dots\dots\dots 4.2.10$$

なる式で示すことができる。

この温度係数は、3.2 においてのべた誘電率のそれと比較してみるとかなり大きく、抵抗値は直流抵抗の場合ほどではないが、温度によつて相当な影響を受けている。前述したように、試料の容量値に比較し

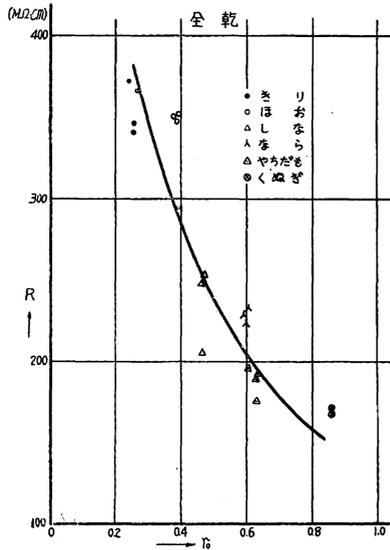


Fig. 4.2.11

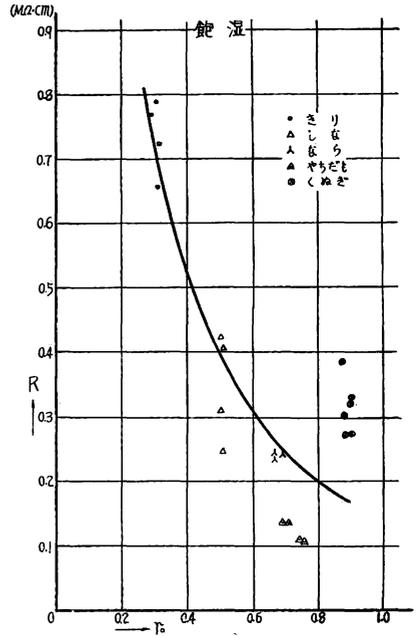


Fig. 4.2.13

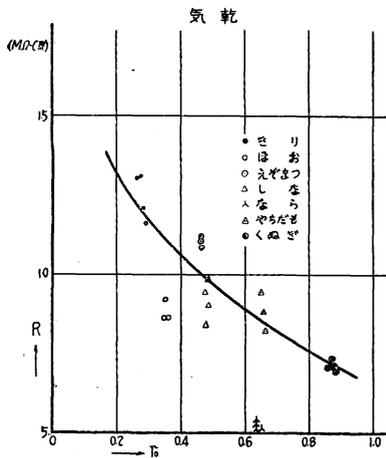


Fig. 4.2.12

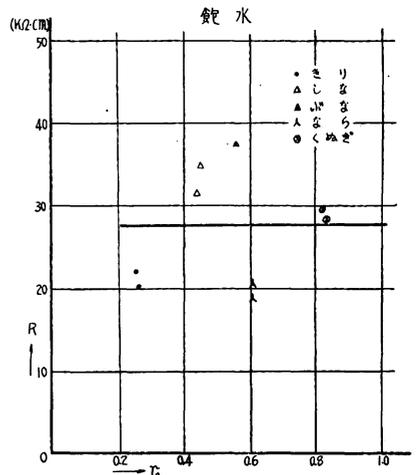


Fig. 4.2.14

Fig. 4.2.11~14 高周波抵抗と比重との関係

Relation between resistivity (R) and density (r_0) of wood

●—Kiri, ○—Hō, △—Shina, 人—Nara, △—Yachidamo, ⊗—Kunugi.

11—Oven dry condition, 12—Air dry condition, 13—Saturated condition with moisture, 14—Saturated condition with water.

て抵抗値が相当小さいときは、高周波抵抗の値のわずかな変化は、見掛けの容量値を大きく変えるので、誘電率の測定に際して高周波抵抗の混入をまねいている場合は、測定された見かけの誘電率は相当に大きく温度の影響を受けることになる。

B. 高周波抵抗と比重および含水率との関係

a) 比重と高周波抵抗

木材の直流電気抵抗と比重との関係は誘電率の場合ほど顕著なものではない。比重の大きい木材は比重の小さいものに比べて、電気抵抗は小さいが³⁴⁾、その差は僅少

で含水率との関係に比べればおおむね無視することができる³⁵⁾。この点は抵抗式含水率計が誘電率型の含水率計にくらべて著しく有利な点である。高周波抵抗についても比重の増加に伴い電気抵抗が減少することは推測されていたが⁵⁷⁾、資料としてみるべきものはない。著者はこの点を検討するために、比重の異なる数樹種を、それぞれ全乾、気乾、飽湿、飽水状態に調整して、比重と電気抵抗の関係を調べた。装置はB、電極は飽水の場合はNo. 5、その他はNo. 4で電極と同大で厚さ15 mmの試料を各樹種3～4個ずつ測定した。結果はFig. 4. 2. 11～14に示すごとくで、比重の影響は直流抵抗の場合に比しかなり大きい。抵抗値が比重によつて変化する割合は各含水率においてはほぼ同程度であるが飽水材においては比重との関係は全く見られない。これは飽水状態においては木材の抵抗より、自由水の抵抗が支配的となり、しかも自由水の抵抗は誘電率の場合と同様にあるいはそれ以上

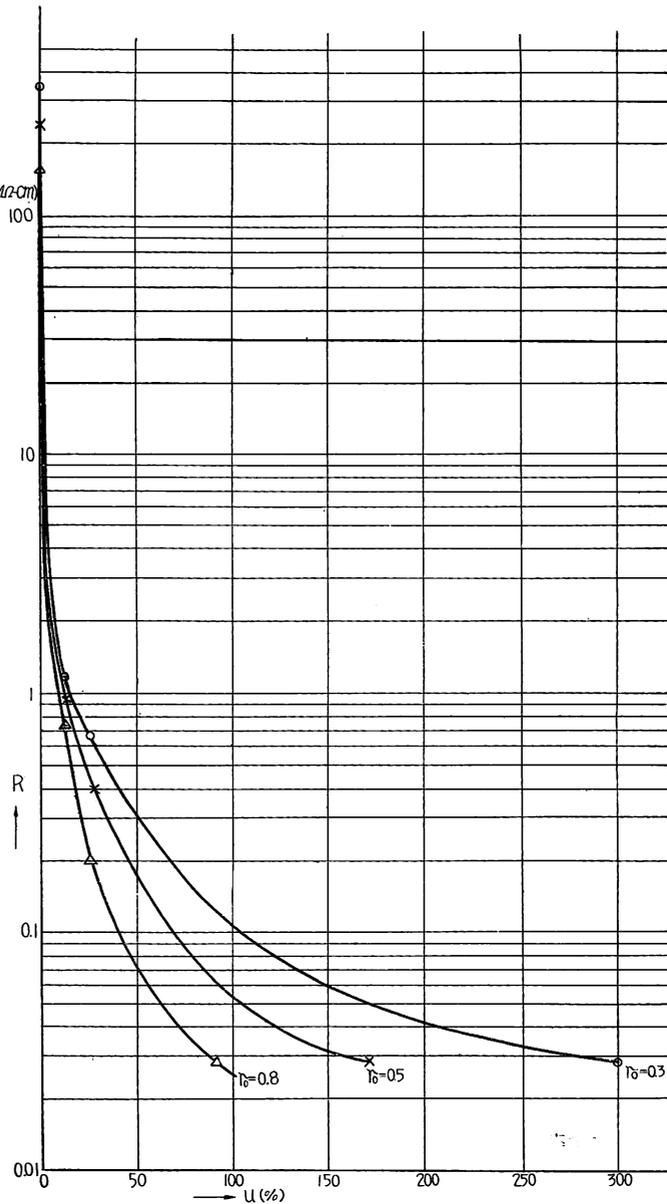


Fig. 4.2.15 高周波抵抗と含水率との関係
Relation between resistivity (R) and moisture content (u) of wood

に、その中に含まれるイオンの状態によつて左右されるからであろう。なお気乾、飽湿の場合には試料の含水率に多少差があるため、全乾の場合よりも測定値は分散が大きい。

このように比重は、木材の高周波抵抗値にかなりの影響を与えるので、さきにも述べたように、損失型の計器は、直流抵抗型の計器に比べて分散が大きくなりがちである。しかし Fig. 4. 2. 15 にみられるように含水率 10% 以下においては、比重の影響に比し含水率の影響が著しく大きくなるので、比重の影響は急に減少するにいたる。

b) 含水率と高周波抵抗

1.1 においてすでにのべたとおり、木材の直流抵抗 R と含水率 u との間には、対数あるいは二重対数的な関係が成立する。今までのべたように高周波抵抗は直流抵抗に類似の性質を有する点が多いが、含水率と高周波抵抗の関係も、含水率の減少に伴つて急激に高周波抵抗が増加する点から、やはりこのような対数的関係が見いだされそうである。いま、Fig. 4. 2. 11~14 に示した、電気抵抗と比重との関係の平均的な値から、含水率と高周波抵抗との関係を $r_0=0.3, 0.5, 0.8$ の場合に対して描いてみると Fig. 4. 2. 15 のごとく二重対数的な関係が見られる。各比重の平均的な値として $r_0=0.5$ の場合をとり、

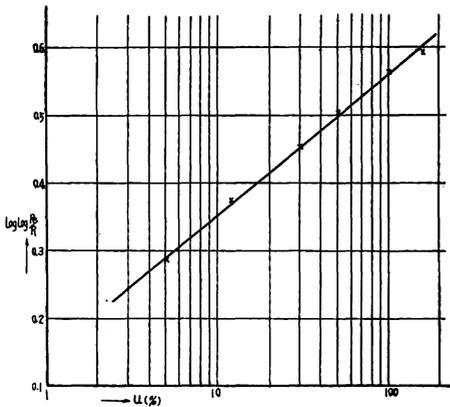


Fig. 4.2.16 高周波抵抗と含水率との関係
Relation between $\log \log \frac{R_0}{R}$ and moisture content (u) of wood

Where R, R_0 is resistivity of wood at wet and oven dried condition. The density is 0.5.

と同様な式であるが、係数の小さいことおよび u の指数が 1 より小さいことと、高周波抵抗は直流抵抗より、その値が小さく、傾斜もゆるやかであることがわかる。また、この式は含水率全域にわたり、含水率と抵抗との関係を示すことができる。

このように、高周波抵抗は含水率が増加するにつれてはじめ急激に、後ゆるやかに減少するので、誘電率の測定において高周波抵抗を混入するおそれのあるのは、もつぱら高含水率域においてである。以下、高周波抵抗の混入を検討するために誘電率と高周波抵抗との関係について検討を加えることとする。

C. 誘電率と高周波抵抗との関係

以上の検討によつて、木材の高周波抵抗 R が、いかなる性質を示すものであるかがほぼ明らかとなつたので、ふたたび木材の高周波抵抗と誘電率との関係について検討してみることにする。木材試料の抵抗値 R_x と容量値 C_x とは見かけの容量値 C_0 に対して 4.2.5 式によると、

$\log \log \left(\frac{R_0}{R} \right)$ と $\log u$ との関係を図示してみると Fig. 4. 2. 16 のごとく、直線関係にあることが明らかである。いま、

$$\log \log \left(\frac{R_0}{R} \right) = a \log u + b \dots 4.2.11$$

ただし u は含水率、 R_0 は $u=0$ のときの抵抗値とにおいて、Fig. 4. 2. 16 から R と u の関係を求めれば、

$$\log R = -1.38 u^{0.21} + 2.38 \dots 4.2.12$$

となる。ただし R は $M\Omega$ で、 u は % で示した高周波抵抗と含水率の値である。この式は NUSSE²⁴⁾ の示した、

$$\log R = -0.32 u + 13.25 \dots 4.2.13$$

と同様な式であるが、係数の小さいことおよび u の

$$C_e = C_x + \frac{1}{\omega^2 C_x R_x^2} \dots\dots\dots 4.2.14$$

なる関係にある。したがって C_x の見かけ上の増加 ΔC_x は、

$$\Delta C_x = \frac{1}{\omega^2 C_x R_x^2} \dots\dots\dots 4.2.15$$

である。これより実際の容量 C_x に対する ΔC_x の比は、

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \left(\frac{1}{\omega C_x R_x} \right)^2 \dots\dots\dots 4.2.16$$

となる。 $1/(\omega C_x R_x)$ はすなわち誘電体力率 $\tan \delta$ であるから、

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = (\tan \delta)^2 \dots\dots\dots 4.2.17$$

で決定され、電極や試料の形状や大きさには無関係な値となる。

また、この場合の真の誘電率 ϵ に対する見かけの誘電率の増加量 $\Delta \epsilon$ の比をとれば、2.1.6, 4.2.6, 2.2.11, 4.2.8 等の式より、

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \left(\frac{11.3}{\omega \epsilon R} \right)^2 \dots\dots\dots 4.2.18$$

周波数 $1 MC$ の場合には R を $M\Omega \cdot C_m$ であらわすと、

$$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} = \left\{ \frac{11.3}{(2\pi \times 10^6) \epsilon R \times 10^{-6}} \right\}^2 = \left(\frac{1.8}{\epsilon R} \right)^2 \dots\dots\dots 4.2.19$$

となる。含水率に対する $\tan \delta$ の値は、3.5 および 4.2 に示した誘電率および高周波抵抗の含水率およ

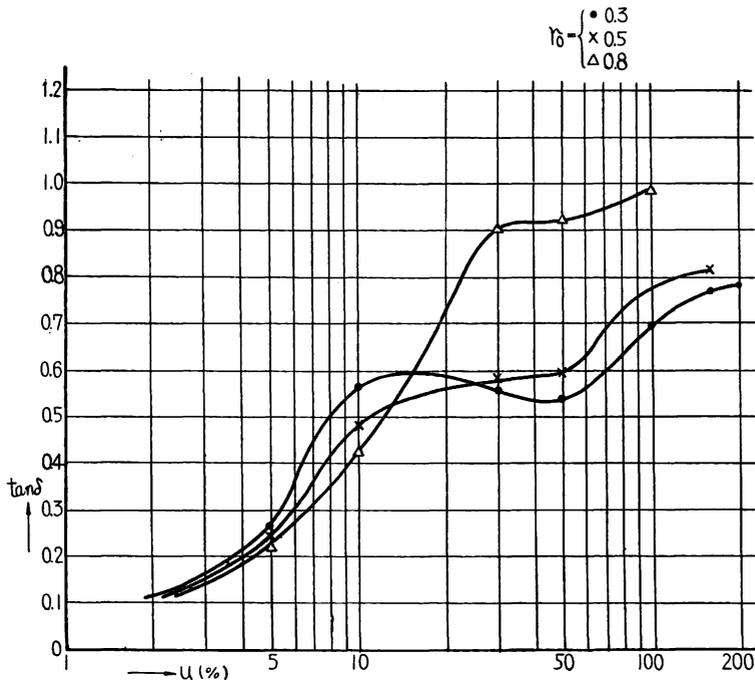


Fig. 4.2.17 $\tan \delta$ と含水率との関係
Variation in $\tan \delta$ of wood with moisture content and density

び比重に対する関係から計算できるので、このようにして求めた $\tan \delta$ の値を図示すれば Fig. 4. 2. 17 のごとくなる。

図に示す $\tan \delta$ の値は低含水率域においては含水率の増加に伴い増加してゆくが、その傾向は、BRAKE および SCHÜRZE³¹⁾ が 13% 以下の木材について求めたものによく似ている。また、その傾斜は比重の多いほどゆるやかである。しかし、高含水率域においては含水率ともなう $\tan \delta$ の増加率は減少し、また、比重との関係は含水率 20% 付近から逆転して比重の大きいものほど $\tan \delta$ が大きくなる。また、含水率 50% 付近においてわん曲点が認められるのは、はなはだ興味深い。 $\tan \delta$ の値を木材の含水率全域にわたって求めた例は、篠原³³⁾ のものが見られるのみであるが、篠原の測定値にも 50% 付近にこのわん曲点を見いだすことができる。この点なお今後の検討を要する。

容量の測定値に対する高周波抵抗の混入による誘電率の誤差率は、この $\tan \delta$ の値の 2 乗として容易に求めることができるが、さらに 4.2.19 式の ϵ と R との関係からも算出することができる。

いま、4.2.19 式を検討すれば、 ϵ の対数と R の対数とは、 $\Delta\epsilon/\epsilon$ を一定とした場合、直線的な逆比例関係にあることが明らかである。いま、 $\Delta\epsilon/\epsilon$ を 1%, 5%, 10%, 50% とおいて ϵ と R の関係を図示してみると Fig. 4. 2. 18 のごとくなる。実際の木材の ϵ と R との関係を図上に示したとき、その点が ϵ のある誤差率を示す直線より外側にくる場合には、誘電率の測定に際し高周波抵抗が混入しても、 ϵ はその直線の示す誤差率よりも高い精度で測定できるが、 ϵ と R との関係が、その直線の内側にくれば、その誤差率以上の誤差を混入することになる。前と同様に、3.5 および 4.2 に示す ϵ と R との関係から比重 0.3, 0.5 および 0.8 の場合について各含水率に対する ϵ と R との関係を図上に示したが、全乾付近はなんら問題はないが、含水率 5% では高周波抵抗の混入により 5~10% の誤差を生じ、30% 付近以上からは 50% もの誤差を生じることになる。したがって、簡単な共振回路に、直接試料のみを挿

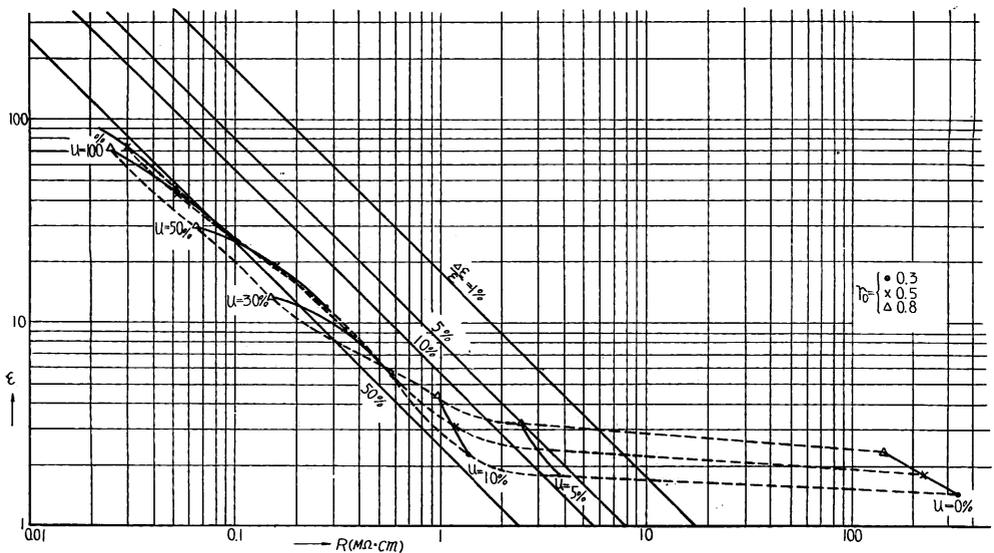


Fig. 4.2.18 誘電率と高周波抵抗との関係

Relation between dielectric constant (ϵ) and resistivity (R) of wood

$\frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$ showing percentage error of dielectric constant due to resistivity

入して誘電率を測定する方式の含水率計においては、ほとんど高周波抵抗が大きく混入して、誘電率は過大に測定され、さらに誘電率および高周波抵抗にそれぞれ影響を与える因子が二重に混入して測定値を大きく分散させることになるので、このような回路は誘電率、含水率等の測定に使用すべきではない。

また、Fig. 4. 2. 18 においてはなほだ興味があるのは、 ϵ と R との関係が、含水率約 6% 付近において著しく傾向が変わつてゐることであつて、すでにのべた ϵ_f の場合とあわせ考えると、繊維素分子と水分子の結合のあり方に密接な関係をもつように思われる。しかしこの点についてはさらに十分な検討が加えらるべきであらう。

以上は試料の C および R のみが直接発振または同調に関与する形式の計器についてであつたが、Fig. 2. 1. 3, Fig. 2. 1. 4 等の同調置換方式をとる計器にあつては、回路の容量 C は、試料の容量 C_x と C_e のはいつた場合の同調蓄電器の値 C_s との並列容量であつて、器械によつて一定に設計されている。したがつてこの場合には 4.2.5 式は、

$$C_e = (C_x + C_s) + \frac{1}{\omega^2(C_x + C_s)R_x^2} \dots\dots\dots 4.2.20$$

見かけ上の C_x の値 C_x' は實際上、

$$C_x' = C_e - C_s$$

によつて求められるから、 C_x の誤差 ΔC_x は、

$$\Delta C_x = C_x' - C_x = \frac{1}{\omega^2 C R_x^2} \dots\dots\dots 4.2.21$$

$$\frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x} \cdot \frac{1}{\omega C R_x} = \tan \delta \cdot \frac{1}{\omega C R_x} \dots\dots\dots 4.2.22$$

となり、回路の同調容量 C 、試料の R_x および $\tan \delta$ によつて定まる。 C が増加すれば、誤差を生ずる R_x の値は低下することは Fig. 4. 2. 2 からも明らかであるが、 C は回路によつて一定であり、また、 $\tan \delta$ の値の変化は R_x に比して比較的小さいので、この場合の誤差混入率は、ほとんど R_x によつて定まることになる。いま $\tan \delta$ の値を Fig. 4.2.17 から、安全をみて最高の 1.0 にとり、種々の C の値における R_x の影響を Fig. 4. 2. 18 同様に図示すると Fig. 4. 2. 19 のごとくである。さらに 4.2.6 式および Fig. 4. 2. 15 の R と u との関係を図上に示した。図によると、たとえば回路の全容量 $C = 100 \text{ pf}$ 、電極の $A/d = 3 \text{ (cm)}$ とすれば、木材の比重 0.5 の場合、高周波抵抗が誤差として誘電率に混入する割合が 1% 以下になるのは含水率約 20% 以下の場合であり、回路の全容量が 1000 pf の場合には含水率約 100% 以下の全域が安全に測定できる。このようにして Fig. 4. 2. 19 は特定の回路および電極に対する高周波抵抗の混入の程度を見だし、または逆に高周波抵抗の混入なく誘電率を測定しうる回路あるいは電極の設計に利用することができる。試みに本報告の実験に使用した装置 A (回路の全容量 $C_m = 120 \text{ pf}$ のとき通常の状態で約 400 pf) と電極 No. 8 に対する誤差率を求めてみると、試料の厚さ 10 mm のときには比重 0.5 の材で含水率 25% 以下は誤差率最大 2% 以下、試料の厚さ 5~6 mm のときは同様に誤差率最大 4~3% 以下で測定しうるようになる。本実験に使用した装置 A による測定値は、そのつど検定の結果高周波抵抗の混入によるこのような誤差を無視しても差し支えないものであつた。

簡単な共振回路を利用して木材の誘電率を測定しようとするとき、特に高含水率材を対象とする場合等には、以上のべた理由によつて回路をできるだけ容量性におけば高周波抵抗の混入を防止することができる。また、電極面積はなるべく小さい方が安全であることも Fig. 4. 2. 19 から明らかである。この

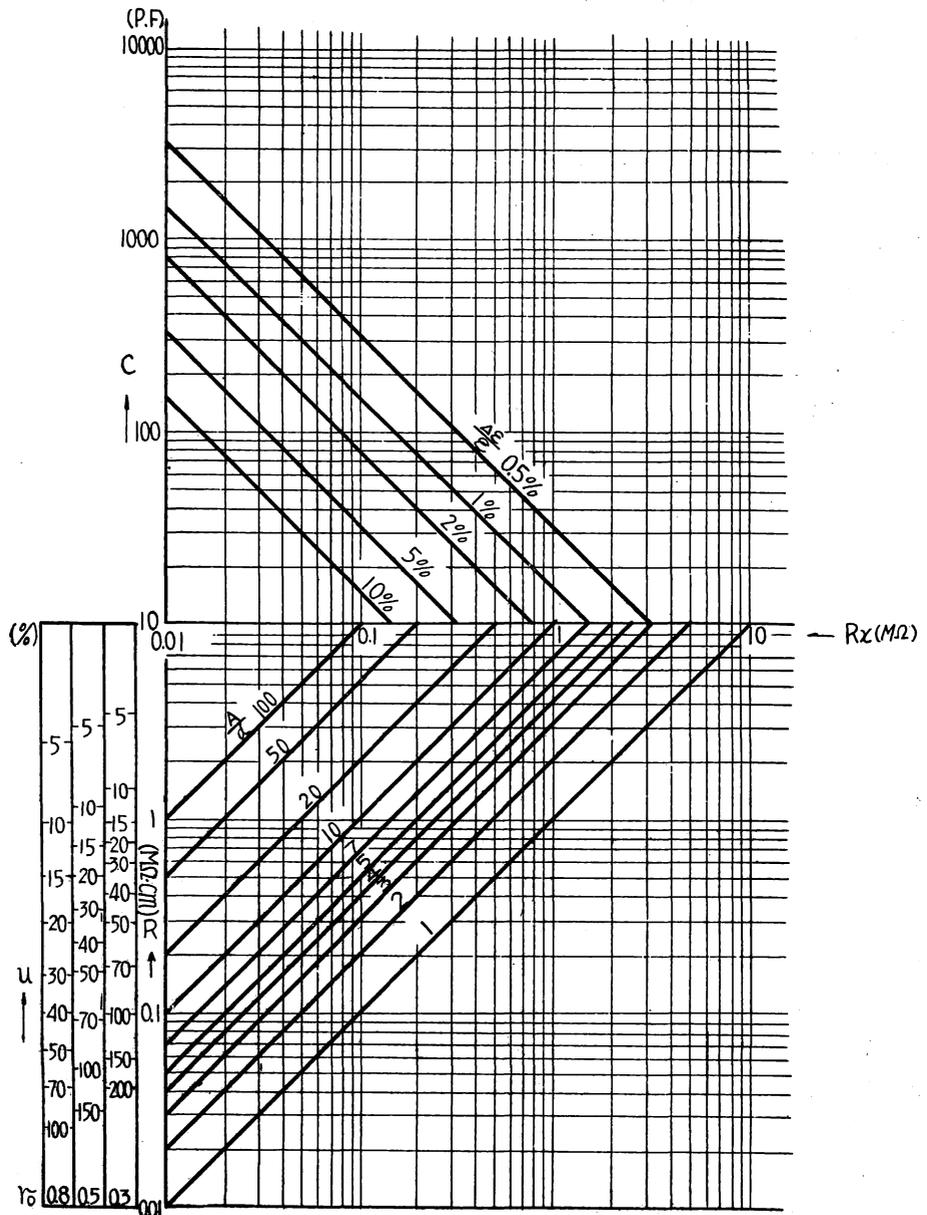


Fig. 4.2.19 高周波抵抗の混入誤差の計算図表

Calculated diagram of error of dielectric constant due to resistivity

$\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$: Percentage error of dielectric constant, C : Total capacity of measuring circuit,

R_x : Measured resistance of sample, R : Resistivity of sample, r_0 : density of oven dried sample, u : moisture content of sample.

When r_0 and u of sample be clear, R is determined. R value and A/d line determine the R_x of sample. $\Delta \epsilon / \epsilon$ may be calculated, though C is constant.

ような点に十分注意を払えば、簡単な構成の計器でも安全に誘電率を測定することが可能である。

む す び

著者は本報告において、まず電気式含水率計の重要性を説き、実際に用いられる電氣的含水率測定法の概要を説明した。これら諸測定方法のうち、木材の誘電率を測定する方式は直流抵抗方式の欠点を補う有利な方法と考えられるにもかかわらず、その測定上の問題および誘電率と含水率との関係、またこの関係を変動せしめる諸因子等についてよく知られていなかったことは、はじめに述べたとおりである。著者は本報告において木材の誘電率測定に関するこれらのいまだ検討されていなかった諸問題を研究してこれを解明することができた。

木材の誘電率と含水率との関係を定量的に含水率全域にわたって明らかにしえたことは、木材の誘電率を測定することによつて直ちにその含水率を知ることが可能にしたし、さらに比重、電界方向、温度等の影響を知ることによつては、誘電率型含水率計の誤差とその補正の問題を解決することができた。また、電極の edge effect, air gap の影響を明らかにし、その補正式を導びくことによつて、実用的な電極を用いて木材の誘電率を測定することを可能ならしめた。さらに木材の含水率を測定する場合に最も重要な問題であり、他の方式の含水率計によつては測定が困難な、水分傾斜を有する材の平均含水率測定および高含水率材の測定の問題を取り上げ、誘電率の測定によつてその測定が可能なることを示し、測定しうる限界をも明らかにした。また、木材の誘電率とともにその高周波抵抗を測定して、その諸特性を検討したが、これによつて共振回路を利用して木材の誘電率を測定する場合におこる高周波抵抗の影響をも明らかにすることができた。

以上のような研究により、木材の誘電率の測定およびこれを媒介とする含水率の測定は著しく容易となり、実用的に利用しうるものとなつた。また、本研究の成果を活用することによつて計器回路や電極の合理的実用的な設計が可能となり、含水率を直読する計器を構成することも容易となつた。これらの成果を利用して、誘電率型含水率計が今後発達し、より広範囲な、より精度の高い含水率測定が可能なることを期待するものである。

なお、この研究から明らかとなつた木材の誘電率的性質に対する多くの新発見は、木材の高周波加工にも有意義な資料を与えるものと信じる。

摘 要

木材の含水率を測定することは木材工業にとつて欠くべからざる重要な作業の一つである。その測定法には種々あるがそれぞれ一長一短がある。木材の誘電率を測定することによつてその含水率を知ることが有利な方法と見られながら従来あまり研究されていなかった。著者は木材の誘電率と、その測定上におこる問題を研究して次のような事からを明らかにすることができた。

1) 平行板電極を利用する場合、必ず電極には edge effect がおこる。edge effect を含んだ誘電率と電極の形状、試料の形状との間には規則的な関係が見いだされるので、これを検討し edge effect の補正式を求めた。

2) 電極板と木材試料との間に空げきがあるときには誘電率の測定値に誤差を生じるので、その程度と補正方式を検討し、あわせて、一定間げきを有する電極間に厚さ不整の試料が挿入される場合、試料が

げきをおいて層状に重ねられた場合の空げきの影響を検討した。

3) 木材の誘電率が温度によつてどの程度変化するかを 10~80°C の範囲内でたしかめ、誘電率は温度の上昇とともにわずかに上昇するが、その程度は著しいものではないことを明らかにした。

4) 木材の誘電率は電界の方向が幹軸に対し、切線方向の場合と放射方向の場合では、前者の方が後者より小さいこと、異方性の大きい樹種においてはこの差は無視しえないことを明らかにし、その平均的な値を数式によつて表示することができた。

5) 木材の誘電率は比重によつて顕著な影響を受けるので、多数樹種についてこの関係を実験的に求めた。誘電率と比重との関係は含水率が一定の場合直線に近い緩曲線を描くが、これを理論式によつて示すことができた。またこの式は実験値とよく一致した。

6) 多数の樹種について誘電率と含水率との関係を検討した結果、繊維飽和点以下において細胞膜の誘電率と含水率との関係は樹種、比重とは無関係に含水率約 6% の前後においてそれぞれ指数的な関係を示し、この細胞膜の誘電率の値と、さきのべた誘電率と比重との関係を示す理論式から、木材の誘電率と含水率および比重との関係を求め、これを図示した。この関係は多くの実験値とほぼ一致した。繊維飽和点以上においては、誘電率と含水率との関係は比重によつて傾斜の異なる直線的な関係にあり、また、自由水の誘電率によつて支配されるのでかなり分散はするが、この関係も実験式および図によつて示すことができた。

7) 水分傾斜のある材を測定するときには、傾斜の比較的小さい場合、材の比重の小さい場合、平均含水率の少ない場合には誘電率の測定によつてその平均含水率を知ることができるが、これに反する場合は測定値は過少になることを知り、またその程度を確かめた。

8) 木材の高周波抵抗は、直流抵抗に比べて比重の影響が大きく、誘電率に比べて温度の影響が大きい。また、含水率との間に二重対数的な逆比例関係が成り立つことが明らかとなつた。通常の共振法で誘電率を測定する場合には、含水率がある程度増加すると高周波抵抗が低下し、誘電率の誤差として混入してくるので大きい誤差の原因となる。この誤差の混入度を検討し、誤差混入率を算出するため計算図表を作成した。このような誤差の混入は回路をできるだけ容量性にすればある程度避けられる。また、誘電率と高周波抵抗の測定値から、 $\tan \delta$ と含水率および比重との関係を求めることができた。

以上の研究によつて、従来知られていなかった木材の誘電的性質およびその測定上の問題に対する多くの知見がえられた。この結果は誘電率型木材含水率計の設計や応用に役立つものであるが、また木材の高周波加工などの場合にも利用しうるものである。

文 献

- 1) BRAKE, E. · H. SCHÜTZE: Dielektrische Eigenschaften Hölzer, Elektr. Nachr. Techn., 12, (1935)
- 2) CURTIS, H. L. · F. M. DEFENDORF: The dielectric constant of air and inorganic compounds, Int. Critical Table, 6, (1929)
- 3) DEBEY, P.: Polar Molecules, Reinhold Publ. Corp. N. Y., (1928)
- 4) DUNLOP, M. E. · E. R. BELL: Electrical moisture meter for wood, F. P. L. Rep., R. 1660, (1949)

- 5) 平井信二: 木材の性質, 木材加工技術協会テクニカルノート No. 71, (1949)
- 6) 堀岡邦典・岩下 陸・加藤昭四郎: ペニアエッジグルーイングに関する実験, 林試研報, 68, (1954)
- 7) 磯部宏策: 含湿量計の実用例, 含湿量測定委員会資料, (1951)
- 8) ICHIO, B.: On the new method of measuring dielectric constant and loss angle of semiconductor, J. of App. Phys., 24, 3, (1953)
- 9) 一条文二郎: 電気水分計について, 計測, 6, 10, (1956)
- 10) KEYLWERTH, R.・D. NOACK: Über den Einfluss höher Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip, Holz als R. und W., 14, 5, (1956)
- 11) 岸 直行・三野勝美: 織布の含有水分率と見掛誘電率との関係について, 応用物理, 26, 8, (1957)
- 12) KOLLMANN, F.: Technologie des Holzes und Der Holzwerkstoffe, 1, (1951)
- 13) KOLLMANN, F.・L. MALMQUIST: Über die Wärmeleitzahl von Holz und Holzwerkstoffen, Holz als R. und W., 14, 6, (1956)
- 14) KRÖNER, K.: Über dielectricische Untersuchungen an Naturhölzern und deren mechanischen und chemischen Abbaustoffen im grossen Frequenzgebiet, Diss. T. H. Braunschweig, (1944)
- 15) KRÖNER, K.・L. PUNGS: Zur dielektrischen Anisotropie des Naturholzes im grossen Frequenzbereich, Holz-forschung 6, 1, (1952)
- 16) 満久崇磨: 木材の熱伝導に関する研究, 木材研究, 3, (1949)
- 17) 松本秋男: KETT 木材水分測定器による水分測定について, 木材工業, 5, 7, (1950)
- 18) MÄRATH, E.: Dielektrizitäts konstante Hölzer, Kolloid Chem., 33, (1931)
- 19) 中村源一: ローターレースによる単板切削に関する研究, 林試研報, 101, (1957)
- 20) 中村源一・ほか: 床板の加工精度, 林試研報, 107, (1958)
- 21) 中戸莞二・梶田 茂: 木材の誘電性における含水率および温度特性について, 日林講集, 63, (1954)
- 22) 中戸莞二・梶田 茂: 絶乾木材の誘電率について, 日林誌, 36, 4, (1954)
- 23) 糖沢健次: 二, 三の水溶液の糧波範囲における吸収, 科学, 18, 1, (1948)
- 24) NUSSER, E.: Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit durch des elektrischen Widerstandes, Holz als R. und W., 1, 11, (1938)
- 25) 小倉武夫: 木材誘電率と水分との関係, 日林誌, 25, 10, (1943)
- 26) 小倉武夫・大沼加茂也: 電気抵抗による木材水分分布の推定について, 林試研報, 53, (1952)
- 27) 押山保常・相川孝作: 誘電率測定における電極構造の影響について, 山梨大工研報, 3, (1952)
- 28) 押山保常・相川孝作: 木材の電気的特性, 山梨大工研報, 3, (1952)
- 29) 斎藤幸男・井沢竜之助: 電気湿度計, 材料試験, 3, 12, (1954)
- 30) 坂上常次郎・江端為夫・甲斐野市三郎・田中康年・高岸栄次郎: 高周波誘電率による繊維水分測定法について, 繊維学会誌, 7, 45~48, (1951)
- 31) SCOTT, A. H.・CURTIS, H. L.: Edge correction in the determination of dielectric constant, J. of Research of the N. B. S., 22, 6, (1939)
- 32) 関谷文彦: 二, 三の木材水分測定器, 木材工芸, 4, 4, (1937)
- 33) 篠原卯吉: 木材の高周波乾燥並に接着の研究, 最新の高周波応用, CQ 出版社, (1949)

- 34) 篠原卯吉・大島重威・渡辺与八：Qメーター方式含水計の精度に対する考察，名大工報，4，2，(1952)
- 35) SKAAR, C.: The dielectric properties of wood at several radio frequencies, Tech. Pub. 69, N. Y. S. College of For. at Syracuse Univ., (1948)
- 36) SMYTH, C. P.: Dielectric behavior and structure, Int. chem. Ser., McGraw-Hill, (1955)
- 37) SONNLEITHNER, E.: Verlauf der Feuchtigkeit innerhalb des Holzes während der Trocknung, Forsch-Ber. Holz, 1, (1933)
- 38) STAMM, A. J.: The electric resistance of wood as a measure of its moisture content, Ind. Eng. Chem., 19, 9, (1927)
- 39) STAMM, A. J.: The fiber saturation point of wood as obtained from electrical conductivity measurements, Ind. Eng. Chem., Anal. Ed., 1, (1929)
- 40) STAMM, A. J.: An electrical conductivity method for determining the moisture content of wood, F. P. L. Rep., R. 1023, (1930)
- 41) STAMM, A. J.: Calculation of the Void Volume in Wood, Ind. Eng. Chem., 30, 11, (1938)
- 42) STAMM, A. J.: Specific gravity of native cellulose, Textile Research J., 20, (1950)
- 43) TAKECHI, O.・O. INOSE: Analysis on the fundamental properties of electric resistance of wood II, Scientific Rep. of the Matsuyama Agr. Col., 10, (1953)
- 44) 竹田政民：木材と電波，科学，18，1，(1948)
- 45) 竹田政民・糖沢健次：10 cm の電波に対する木材の複素誘電率におよぼす水分の影響について，科学，7，6，(1947)
- 46) TRAPP, W.・L. PUNGS.: Einfluss von Temperatur und Feuchte auf das dielectricische Verhalten von Naturholz im grossen Frequenzbereich, Holzforschung, 10, 5, (1956)
- 47) 上村 武：誘電率による木材含水率計について，木材工業，4，6，(1949)
- 48) 上村 武・中村 章：木材の誘電率と厚さとの関係，日林誌，32，5，(1950)
- 49) 上村 武：海外の木材含水率計，木材工業，8，11~12，(1953)
- 50) 上村 武・戸枝俊男：シーメンス含水率計の性能試験，林誌研報，90，(1956)
- 51) 上村 武：2，3の電気抵抗式木材含水率計の特性について，林誌研報，90，(1956)
- 52) 上村 武：板の厚さが含水率計の読度におよぼす影響，木材学会誌，2，1，(1956)
- 53) 上村 武・斎藤寿義：2，3の高周波型含水率計の特性について，林誌研報，113，(1959)
- 54) 和田八三久・小田 実：繊維の含水率による高周波誘電率の変化について，高分子化学，9，91，(1952)
- 55) WYMAN, J.: Measurements of the dielectric constants of conducting media, Physical Rev., 35, (1930)
- 56) 山本 孝：高周波による木材加工に関する研究，東大農演報 41，(1951)
- 57) YAVORSKY, J. M.: A review of electrical properties of wood, Tech. Pub. 73, N. Y. S. College of For. at Syracuse Univ., (1951)

Dielectrical Properties of Woods as the Indicator of the Moisture

Takeshi UYEMURA

(Résumé)

As properties of woods vary remarkably according to the moisture contents of woods, the woods must be dried sufficiently and the moisture content equilibrated to keep the properties steady before they are utilized. Nowadays the kiln drying process is used in all wood industries, and the electrical moisture meter is used on all occasions so that the moisture content of woods may be rapidly measured as an indicator of wood qualities.

Of many moisture meters, that of the resistance type has been studied, and its ability is fairly evident. As to the dielectric constant type moisture meters called the capacity type, some of them have been practicably used, and it has been assumed that they have the demerits of the resistance type, but their characters and abilities are not evident enough. They have not developed, for the relation of the wood to the variation of the dielectric constant is not clear. Nevertheless, even to-day they are frequently used despite the inherent big errors attending their use.

This study has made clear the unknown dielectrical properties of woods, some problems on the measurement of these properties, especially some factors which vary the dielectric constant of woods, and the relation between the dielectrical constant and the moisture content of woods. The knowledge thus gained will be useful in the development of capacity type moisture meters, and will make the correct inspection of the moisture content of woods possible.

Moreover, my study has yielded new, fundamental data about the characters of the dielectrical properties of woods, which will be very useful for the radio frequency heat process.

(1) The problems of the measuring method

a) Measuring apparatus used in this study. The variable capacitance circuit and the double resonant circuit were used. The former (Apparatus A—Fig. 3.1.1) is the simplest and most accurate comparatively in some moisture conditions. The latter (Apparatus B—Fig. 3.1.2) has not the error of the dielectric constant due to resistivity; besides, by this circuit the dielectric loss can be measured too.

The frequency used was 1.0 megacycle, for it is known that this frequency gives the stablest measuring condition and the minimum effect of resistivity at the measurement of the dielectric constant of woods. The frequency of both apparatuses was kept stable by the pieces of the crystal. The parallel plate capacitors were used as electrodes (Fig. 3.1.3~4), and various plates shown in Table 1, were compared and examined.

b) At the measurement of the dielectric constant of woods, the edge effect of the electrode plates gives big errors. Although this edge effect is inevitable in practical problems, it has not been sufficiently examined.

The electrodes having different forms and dimensions were used to measure the samples having different kind of species and moisture contents, and the following equation was derived. The equation is

$$\varepsilon_x = \varepsilon_t \left[1 + \frac{d \cdot l}{A} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{l}{Ad} \right) \right\} \right]$$

where ε_x and ε_t are the dielectric constant including or not including the edge effect, A is the area of the plate in square centimeters, d is the thickness of the sample that is the distance of plates in centimeters, l is the total length of the plate in centimeters. This equation may be applied to the disk and rectangle electrodes. Then, in the rectangle electrode the equation is

$$\varepsilon_x = \varepsilon_t \left[1 + \frac{4d(n+1)^2}{l \cdot n} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \frac{\frac{4(n+1)^2}{l \cdot n} + d}{d} \right\} \right]$$

where n is the ratio of the long edge and the short one of the plate. In the disk electrodes the equation is

$$\varepsilon_x = \varepsilon_t \left[1 + \frac{d}{r} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{1}{rd} \right) \right\} \right]$$

where r is the radius of the plate.

c) When the samples have rough surfaces, —warpings, knifemarks etc.—the plates of the electrode can not touch the samples closely. The measurement of the dielectric constant of woods with the air gap between wood samples and plates of electrodes were examined, and the following equation was derived.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_w(x+1)}{1 + \varepsilon_w}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_s / \left[1 + \frac{d \cdot l}{A} \left\{ 0.165 + 1.20 \log \left(1 + \frac{l}{Ad} \right) \right\} \right]$$

where,

ε_w and ε_s are the dielectric constants of the wood, not including or including the air gap effect and the edge effect, x is the ratio of thickness of the wood sample and total thickness of the air layer. This equation gives the safety range of measurement, and the corrected values beyond this range, when the electrode plates are not in contact with samples. In the case of inserting wood samples, which have the errors of thicknesses between the two plates keeping constant distance, the following equation was obtained.

$$\frac{1 - \frac{1}{\varepsilon_{w'}}}{1 - \frac{1}{\varepsilon_w}} = 1 \pm y$$

where,

$y = \frac{\Delta d_w}{d_w}$, d_w is average thickness of wood samples, Δd_w is increase or decrease of thickness, ε_w is the correct dielectric constant of samples, $\varepsilon_{w'}$ is the dielectric constant including the error due to Δd_w . There is no relation between the error of ε_w and distance of plates d , or the ratio of d and d_w . This equation is useful to continuous measurement of the moisture content in the mass-production process of veneer, flooring, and other wooden products. But the measurement is attended with big errors when y or ε_w is big.

(2) **Relation between the dielectric constant and the moisture content of woods**

a) Temperature effect.

The dielectric constant of green woods and air-dry woods at 10~80°C were measured, and the following equation was derived.

$$\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t0} [1 + \alpha(t_0 - t_1) + \beta(t_0 - t_1)^2]$$

where, ε_t , and ε_{t_0} are the dielectric constant of woods at $t_1^\circ\text{C}$ and $t_0^\circ\text{C}$, $\alpha = -1.37 \times 10^{-3}$, $\beta = -7.7 \times 10^{-6}$ in air-dry Hinoki woods, $\alpha = -2.24 \times 10^{-3}$, $\beta = -3.65 \times 10^{-6}$ in air-dry Buna Woods, $\alpha = -9.0 \times 10^{-3}$, $\beta = 1.26 \times 10^{-4}$ in green Hinoki woods. $\alpha = -9.0 \times 10^{-3}$, $\beta = 1.09 \times 10^{-4}$ in green Buna woods. This relation shows that the woods have a tendency to increase the dielectric constant according to the rise in temperature, and the temperature coefficient of the dielectric constant falls off according to the increase of the moisture content of woods, and approaches the coefficient as in the water solution of high polymers.

Then, it is clear that the temperature coefficient of woods is smaller than that ever known, and in this respect the measurement of moisture by the dielectric constant method is more advantageous than that by the electric resistance method.

b) Effect of measuring direction.

It is known that the parallel-to-grain dielectric constant differs from the perpendicular-to-grain dielectric constant. About the perpendicular-to-grain dielectric constants, it is important in practical use, that the dielectric constant at the radial direction be bigger than at the tangential direction. And the difference of these two directions is negligible when the anisotropy of woods is small; but when the anisotropy of woods is big, the difference becomes considerably big.

The measured dielectric constant ε is

$$\varepsilon = K \left[1 + \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1) \right] + \frac{(1-K)\varepsilon_f}{\varepsilon_f - \frac{r}{\rho_f} (\varepsilon_f - 1)}$$

where, ε_f is the dielectric constant of the cell wall substances, r is density of sample woods, ρ_f is density of the cell wall substance, K is the constant showing the anisotropy. When K is replaced by $(1-K)$, each of the ε shows the dielectric constant at the radial and the tangential directions; accordingly when K is 0.5 the ε calculated by this equation shows the average dielectric constant at the perpendicular-to-grain direction.

c) Relation between the dielectric constant and density of woods.

When the swelling and the shrinkage of woods according to the change of the moisture content are examined the value of $\frac{r}{\rho_f}$ is as follows:

$$\frac{r}{\rho_f} = \frac{r_0}{\rho_0} \left(\frac{1 + u \cdot \rho_0 / \rho_w}{1 + 0.84 r_0 u} \right)$$

where, r_0 and ρ_0 are density of oven-dried woods and cell wall substances, u is the moisture content of woods, ρ_w is density of absorbed water, in normal condition $\rho_0 = 1.5$, $\rho_w = 1.3 \sim 1.113$ according to this moisture content of woods.

In this equation and in the former equation, ε_f of various kind of wood species having different densities was calculated (Table 3.5.1), and then the general equation indicating the relation between the dielectric constant and density of woods was derived (Equation 3.4.7). The relation is indicated in the slack curve which is almost a straight line when the density of woods is below the fiber saturation point (Fig. 3.4.16), and these calculated values coincide with actual values. In practical use this relation can be regarded approximately as the straight line relation in the following equation when the density is below 1.0

$$\varepsilon = 1 + \frac{(\varepsilon_f - 1)}{2 \rho_f} r$$

d) Relation between the dielectric constant and the moisture content of woods.

It is known that absorbed water combines closely with wood substances at the low moisture content and, the more the moisture content increases, the looser that combination becomes. It became clear by this study that the dielectric constant of woods increased exponentially according to the increasing of the moisture content of woods, though the polarization of absorbed water was restricted by the electric field of the cellulose at the low moisture content, and it became looser according to the increasing of the moisture content. Relation of ϵ_f and the moisture content of woods show in Table 3.5.1 was indicated as the exponential line having the point of inflexion at the 6% moisture content (Fig. 3.5.1). The equation of this relation was above 6%

$$\epsilon_f = 6.08 e^{6 \cdot 10 u}$$

By this equation and the equation 3.3.19, the relation between the dielectric constant and the moisture content below the fiber saturation point for the densities of the woods is indicated in Fig. 3.5.2. The calculated values coincide with many actual values (Fig. 3.5.3 ~26).

These equations can be indicated approximately by the following equation

$$(\epsilon - 1) \doteq \frac{r}{2\rho_f} (\epsilon_f - 1)$$

$$(\epsilon - 1) \doteq \frac{6.08 r}{2\rho_f} e^{6 \cdot 10 u}$$

At the free water region (above the fiber saturation point) the linear relation between the dielectric constant and the moisture content was found (Fig. 3.5.30). The equation showing this relation is

$$\begin{aligned} \epsilon - \epsilon_s &= \frac{1}{2} (\epsilon_\omega - 1) (u - u_s) r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{\epsilon_\omega}{\epsilon_{fs}} - 1\right) \frac{r_0}{\rho_0} \right\}} \right\} \\ &\doteq 54.75 (u - u_s) r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left(1 + 2.26 \frac{r_0}{\rho_0}\right)} \right\} \end{aligned}$$

where, ϵ_ω is the dielectric constant of free water, ϵ_{fs} is the dielectric constant of the cell wall substance at the fiber saturation point. The average actual value of ϵ_ω and ϵ_s was $\epsilon_\omega = 109.5$, $\epsilon_s = 33.6$. But the value of ϵ_ω varied about $\pm 30\%$ if compared to the average value, according to the species or individualities, and so the value of $u - u_s$ varied $\pm 30\%$ too. Accordingly it became evident, at the free water region, that not only the correct value but also the rough value of the moisture content could be measured by measurement of the dielectric constant.

(3) Affecting factors at measurement of the moisture content of woods

a) Effect of the moisture gradient in woods.

Usually, the moisture content of woods does not distribute equally but has a moisture gradient. And in this case, the dielectric constant of each part of the woods has a different value.

The veneers having different moisture contents were laminated and the dielectric constants of each veneer was compared to the apparent dielectric constants of the veneer piles. As a result it was shown that the apparent dielectric constant was always equal to the harmonic mean of the dielectric constants of each part in the parallel direction to the electric flux. This can be explained theoretically.

Now, if the distribution of the moisture content follows the relation $u = u_{max} - nx^2$ (where,

n is the constant, x is distance from the center section to the surface of the wood board), the measured dielectric constant ϵ_m is

$$\epsilon_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{1}{\frac{6.08r}{2\rho_f} e^{6.10n_i} + 1}}$$

below the fiber saturation point,

$$\epsilon_m = \frac{N}{\sum_{i=1}^{i=N} \frac{1}{54.75(u_i - u_e)r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{r_0}{\rho_0}\right) \left(1 + 2.26 \frac{r_0}{\rho_0}\right)} \right\}}}$$

above the fiber saturation point.

The moisture content u_m calculated from measured ϵ_m was compared to the mean value of the moisture content of each part $u_{av} \left(= \frac{1}{3}(2u_{max} - u_{min}) \right)$ at various moisture conditions and the moisture gradients.

Below the fiber saturation point and when $u_{max} - u_{min}$ was smaller than 15~20%, the error due to the moisture gradient was negligible, but above the fiber saturation point the error was apparent, particularly at high density woods, and the bigger the $u_{max} - u_{min}$, the bigger the error was.

Consequently the average moisture content of woods having the moisture gradient can be measured by the dielectric constant method provided the moisture gradient is not extremely steep, but in other cases, when the moisture gradient is especially steep, adequate correction will be needed.

b) Effect of mingled resistance.

When the dielectric constant is measured by the simple circuit, the resistance mingles with it as the apparent capacitance, and creates the cause of the error. At the measurement of resistance, the edge effect could be corrected by the same equation as the measurement of the dielectric constant (Fig. 4.2.7~9), but the effect of the temperature, density, and the moisture content showed different tendencies from the dielectric constant.

The relation between resistivity R and temperature t in Hinoki-wood is

$$R_{t_0} = R_{t_1} e^{a \times 10^{-12}(t_1 - t_0)}$$

where, $a=1.845$ in air-dry woods, or $a=0.954$ in water-saturated woods (Fig. 4.2.10).

This effect of the temperature was much greater than that of the dielectric constant.

The effect of density was greater than that of the direct current resistance. Below the fiber saturation point the effect of density was not remarkable as in the case of dielectric constant, but the more the moisture content increased, the greater it became (Fig. 4.2.15). R of water-saturated woods had no relation to density of woods. Below 10% moisture content, the effect of the moisture content to resistivity was remarkably greater than the effect of density, and the measured moisture content by measurement of resistivity was not affected by density of woods.

The equation showing the relation between R and moisture content u is

$$\log R = a u^b + c$$

where each of a , b , c is -1.38 , 0.21 , 2.38 respectively when the density of woods is 0.5 (Fig. 4.2.15). This equation is similar to that of the direct current, but at the direct current $b=1$ and the gradient of the curve showing the equation is steeper than at the high frequency

current.

Thus, the resistivity at the high frequency current is very small at the high moisture content, and makes the error in measuring the dielectric constant. The mixing ratio of resistivity, namely the ratio of the error $\Delta\varepsilon$ and the correct dielectric constant ε is

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = (\tan \delta)^2,$$

at 1 MC frequency

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \left(\frac{1.8}{\varepsilon R}\right)^2$$

where δ is the loss angle of wood samples.

Tan δ can be calculated by the already-known ε and R (Fig. 4.2.17). And the maximum value of $\tan \delta$ has not passed 1.

Calculated $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ is 5~10% at about the 5% moisture content, and is about 50% above about the 30% moisture content. Then, the measurement of the dielectric constant by the simple resonance method can not be used generally, for it makes extra errors and brings the dispersion of data upon the moisture-dielectric constant relation. It was found that $\log \varepsilon$ and $\log R$ had the linear relation having inflexion at about the 6% moisture content (Fig. 4.2.18).

At the variable capacitance circuit, the total capacity of the circuit C is always constant, and usually consists of the samples and the parallel capacitance.

The equation showing the error of ε is

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \tan \delta \frac{1}{\omega CR_x}$$

where, $\omega = 2\pi f$, f is frequency. When f is 1 megacycle, and $\tan \delta$ shows maximum value ($\tan \delta = 1$), the error ratio of ε due to mingled resistance can be calculated by Fig. 4.2.19.

The more the circuit is capacitive and the smaller $\frac{A}{d}$ is, the smaller this error becomes. Therefore, the dielectric constant of woods at the broad range of moisture can be measured by the simple resonance circuit if the circuit and the electrode are suitably selected.