九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

木材の電気伝導と電場依存性に関する研究

黒田，尚宏

堤，壽一

https://doi.org/10.15017/10829

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 57, pp.185-228, 1987-03-30. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

木材の電気伝導と電場依存性に関する研究

黒　田　尚　宏・堤　　壽　一

Studies on Electrical Conduction and its Field Dependece of Wood

Naohiro KURODA and Juichi TSUTSUMI

要　　旨

木材細胞壁中の微細空げきは，水分や薬液の細胞壁内通導の通路であり，さらに，水分吸着によって引き起こされる膨潤・乾縮とも重要な関係を持っている．したがって，木材の性質・挙動と細胞壁の構造との有機的な関係づけが極めて大切な研究課題である．

ところで，電気伝導の主要な通路は細胞壁中に形成される水分の吸着層であり，しかも含水率が電気伝導率に与える影響は極めて大きいことがよく知られている．そこで，この研究では，木材の吸・脱湿に伴う含水率および細胞壁構造の変化を考え併せながら，異なった電場条件下に置かれた木材の電気的刺激に対する応答性，すなわち①電気伝導の周波数依存性，②電気伝導に与える印加電圧の影響，③電気伝導に与える電場方向の影響を検討し，ひいては電気伝導のメカニズムと細胞壁中での水分の存在状態および細胞壁構造とのかかわりを考察した．

高周波（1 MHz）から極めて低い周波数（0.0001 Hz）にわたる範囲で，含水率と温度のそれぞれが低いほど，周波数の低下に伴う電気伝導率の減少がより低い周波数に至るまで見られた．常温下でかつ約5%以上の含水率範囲では，低い周波数の側での電気伝導率の周波数依存性は印加電圧によって影響を受け，イオン伝導に基づく非可逆的な分極によるものと推定した．この電気伝導率および電気伝導の挙動に与える電圧の影響は，含水率が増加するほど大きくなり，吸着イオンが吸着点から脱着される量と脱着後の移動速さが電圧によって異なることに基づくと考えた．他方，電気伝導率の周波数依存性に関係する分極現象は含水率5%以下で可逆的であり，しかも電圧による影響を認めなかった．したがって，水分が単分子層で吸着されている低含水率の範囲では，吸着イオンの脱着および解離とその移動が，電気伝導にかかわりを持たないことを推定した．電気伝導の異方性は，電圧および周波数によって影響を受け，印加電圧が大きくかつ周波数が低いほど，軸方向と横方向との間の電気伝導の異方度が大きくなる傾向を認めた．これは，細胞壁中での電気伝導の異方性が電荷担体である伝導イオンの移動距離と関係し，細胞壁内の空げき構造がイオンの移動度に与える影響とも関係することを示唆している．ちなみに，含水率が電気伝導率およびその異方度に与える影響は，含水率約8%を境にしてその上下の範囲で異なった挙動が得られ，とくに水分吸着に伴う細胞壁中の構造変化と密接なかかわりを持つことを推定できた．

低周波から直流領域で電場条件（周波数，印加電圧，電場の方向）を変えたとき，電気

的挙動とその機構は含水率の範囲によって異なっている．これは水分子と木材実質との間の吸着力がイオンの解離度および移動度に与える影響，そして細胞壁構造がイオンの移動度に与える支配的な影響に起因すると推定した。このように，含水率の変化に伴って生じる細胞壁構造と水分との相互的な作用が電気伝導のメカニズムと密接に関係するために，木材の電気伝導を論じるには水分の量だけでなく，細胞壁中の空げき構造を含めた水分の存在状態の影響を十分に考慮しなければならない．

目　　次

はじめに
1. 研究の背景
2. 実験方法と実験
2.1. 直流コンダクタンスと交流コンダクタンスの関係
2.2. 電気伝導の測定法
2.2.1. 交流域
2.2.2. 直流域
2.2.3. 電気伝導率 σ の算出法
2.2.4. 電極
2.3. 供試した試験片
2.4. 測定条件
2.4.1. 試験片に与えた電圧
2.4.2. 含水率と温度の調整法
3. 電場の周波数が電気伝導にもたらす影響
3.1. 電気伝導率の周波数依在性への含水率の影響
3.2. 電気伝導率の周波数依存性への温度の影響
3.3. 要約
4. 電場の強さが電気伝導にもたらす影響
4.1. 電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率の減少への電圧の影響
4.2. 直流電気伝導率への電圧の影響
4.3. 要約
5. 電場の方向が電気伝導にもたらす影響
5.1. 電気伝導の異方性への印加電圧の影響
5.2. 電気伝導の異方性への周波数の影響
5.3. 電気伝導の異方性への含水率の影響
5.4. 要約
6. 水分吸着と細胞壁構造との相互作用と電気伝導との関係
6.1. 電気伝導のメカニズムと含水率
6.2. 電気伝導のメカニズムと電気的挙動とのかかわり
6.3. 水分吸着による細胞壁の構造変化が電気伝導に与える影響
6.4. 要約
7. 結論
引用文献

は　じ　め　に

木材は温度変化や蒸気圧の変化，あるいは荷重などの物理的・力学的刺激を受けながら実用に供される場面が多く，それらの刺激への応答は木材の組織・構造と重要なかかわりを持っている．

一方，生物遺体である木材の組織・構造は，いろいろなオーダーの構成単位からなり，かつ吸湿性を持っている．そこで，木材の性質は，複雑な組織・構造との関連で，さらには広い含水率の範囲でとらえられる必要がある．すなわち，木材に与えられる物理的・力学的刺激に対する応答の機構は，いろいろなオーダーの構成単位ごとに考察しなければならず，木材の性質・挙動を一義的にとらえることは困難である．したがって，近年に至っ

て，木材の性質・挙動と組織・構造および含水率との関係を，静的あるいは動的な物理的，力学的刺激とかかわらせた数多くの研究成果が報告されるようになった．

木材加工の原点ともいえる木材の乾燥，防腐処理，さらにはパルプ製造時の薬液の注入などに，細胞内こうのような大きな空げきはもとより，木材細胞中の微細な空げきが重要な役割を果している．すなわち，細胞壁中の微細空げきは，水分や薬液の細胞壁内通導の通路であり，さらに，水分吸着によってひき起こされる膨潤・乾縮などとも重要な関係をもっている．したがって，水分吸着が細胞壁にひき起す現象とも併せて，細胞壁の構造と木材の性質・挙動を有機的に関連づける研究が極めて大切である．とくに，木材の吸・脱湿に伴って生じる膨潤・乾縮による細胞壁の構造変化を考え併せながら，水分と木材細胞壁構造との相互的な作用と，木材の物理的・力学的刺激に対する応答の仕組みとのかかわりを明らかにすることは，重要な研究課題であろう．

以上のような観点から，水分吸着に敏感に応答できる電場中に置かれた木材の応答性とのかかわりで，水分の存在状態と細胞壁構造とのかかわりを検討することを目的に，この研究を行った．

1. 研究の背景

木材の電気的性質・挙動についての研究は古くは比留間（1913）の直流電気抵抗の測定に始まり，その後，広い周波数範囲で研究が進められてきた．とくに，木材の直流電気伝導率と含水率との関係は，STAMM（1929）をはじめとする多くの研究者による一連の研究成果によって，電気抵抗式の木材含水率計の実用化へと発展した．また，小倉（1943）やSKAAR (1948) が木材の誘電的性質の研究を誘電率の測定によって始め，容量式の木材含水率計の関発，誘電加熱法による木材の乾燥，接着，曲げ加工への応用へと発展させた．

一方，木材の誘電的挙動については，kHz オーダーよりも高い周波数領域でさまざまのことが明らかにされた（TRAPP *et al.*, 1956）（堤，1967）（NORIMOTO, 1975）が，さらには超低周波，ないしは直流領域における誘電的挙動についても検討が進められた（坊野ら，1974）（橘田，1977）．しかし，高周波領域に比べて，直流領域をも含めた低い周波数領域における木材の誘電的な性質・挙動とその機構は，いまだに十分に明らかにされているとは言いがたい．また，木材が吸湿性誘電体であるために，すでに明らかにされている高周波領域だけでなく，低い周波数領域にも誘電分散の存在が推測され，この低い周波数領域の誘電分散は，吸着水分の導電性と著しくかかわっていることが示唆されている（堤，1967）．しかし，低い周波数領域の誘電性に関与する導電的挙動や機構については，今までのところ十分な検討が行われていない．

さて，木材は吸・脱湿に伴って繊維飽和点以下でその寸法を変化させ，いわゆる膨潤・乾縮を起こす．この現象は，細胞壁中のフィブリルやラメラ間へ水分吸着が起こる機構と密接なかかわりを持っている．すなわち，全乾材が吸湿するとき，細胞壁の構成成分の親水性基に水素結合によって水分子が吸着され，まず木材細胞壁の内部表面に単分子層の水分吸着層を作り，吸着の進行に伴ってさらに新たな吸着点の数と内部表面積を増しながら多分子層を作っていく，とする考え方（STAMM, 1964）（中戸，1971）（渡辺，1978）がある．そして，この吸着された水分子層は，電気伝導のメカニズムと密接に関係しあって電

流の主要な通路となるはずである．すなわち，吸着された水分，および吸着された水分子層内に溶解しているイオンが，荷電担体 (charge carrier) として木材の電気伝導に寄与すると考えられている (LIN, 1965) (LIN, 1967)．これらの水分子，あるいはイオンは電場の下で吸着点から脱着され，吸着水の層内，あるいは吸着水の層と木材実質との界面で分極を起こし，ひいては木材中の電気伝導を引き起こすであろう．ところで，1)木材実質と水分子が引き合う力，すなわち木材実質への水分子の吸着力は，吸着点から離れるにしたがって小さくなる（高分子学会，1972）と考えられることから，吸着層のそれぞれは異なった吸着力の下にあり，2)水分子を吸着させることができるフィブリルやラメラの配向には方向性があるため，吸着された水分子の層も方向性を持っているはずである．以上の2点を考え併せるとき，電場を作用させた木材の吸着イオンの挙動には，電場の強さ，電場を作用させてからの経過時間，および電場の方向による影響を考慮しなければならない．したがって，木材の電気的性質と挙動とを明確に説明するためには，直流電場を作用させてからの経過時間(交流電場ではその周波数)，電場の強さ，および電場の方向によって，木材の導電的な挙動が受ける影響を検討する必要がある．

ところで，吸湿した木材の電気伝導率は，交流電場の下では周波数，そして直流電場の下では電圧を与えてからの時間経過によって影響を受けることがすでに報告されている．すなわち，Takeda (1951) は 2×10^5～3×10^9 Hz の範囲，HEARMON *et al.* (1954) は 10^3 Hz 以上，坊野ら (1974) は 10^{-1} Hz 以上，そして NANASSY (1972) は 10^{-2}Hz 以上で周波数の低下に伴う交流電気伝導率の減少を報告している．また，VENKATESWARAN (1971)，および坊野ら (1974) は交流電気伝導率が周波数に依存する度合いを広い含水率の範囲で検討し，周波数が低下するにつれて交流電気伝導率の減少傾向に特徴があることを明らかにしている．一方，直流では TAKECHI *et al.* (1953)，SKAAR (1964)，伊藤 (1960) などが気乾含水率よりも高い木材の直流電気伝導率を，電圧印加後の時間経過との関係で求めて報告している．

吸湿した木材の電気伝導率が，与えられる電圧の大きさによっても影響を受けることがすでに知られている．TAKECHI *et al.* (1953) は含水率 14.4%，15.5%，および 20.6%の木材で実験を行い，一般に低い電圧の範囲では電圧の増加につれて絶縁抵抗は低下するが，30 V 以上では絶縁抵抗は電圧と無関係であるとしている．SKAAR (1964) は含水率 24.3%の木材に 1～100 V の直流電圧を与えたとき，電圧が増加するにつれて絶縁抵抗が低下するが，約 10 V 以下の領域の電圧でその効果が特に著しいことを報告している．VERMAAS (1975) は電気伝導率の測定にあたって留意すべきことがらとして，電圧の影響を指摘している．一方，BROWN (1962) は 60 Hz 以上の交流電気伝導率は電圧に依存しないことを明らかにし，さらに NANASSY (1972) は含水率 28.9%では約 20 kHz より低い周波数で，16.4%では約 5 kHz より低い周波数の範囲で，交流電気伝導率が電場強さに依存することを報告している．

SKAAR (1948) は，2 MHz の交流電気伝導率が電場方向によって受ける影響を考察している。また，直流電気伝導率の異方性が，古くは比留間 (1913) や STAMM (1929) をはじめ多くの研究者によって報告され，それらの結果が STAMM (1964)，LIN (1967)，上村 (1963) などによって総説にまとめられている．

以上のように，電場の周波数(直流電場では電圧印加後の経過時間)，強さ，および方向

によって，吸湿木材の電気伝導率が影響を受けることについて，ある程度は明らかにされている．しかし，それらの影響の相互的な関係や細胞壁への水分吸着の機構と関連させた考察はほとんど行われていない．したがって，この研究では，高周波から極めて低い周波数に至る範囲で実験を行い，木材の電気伝導が電場の強さと方向の変化によってもたらされる影響を，水分吸着の機構と有機的に関連づけることを試みているが，とくに直流電場下での挙動に重点を置いて詳細に検討を行っている．

2.　実験方法と実験

2.1.　直流コンダクタンスと交流コンダクタンスの関係

誘電体に直流電圧を与えたあと，実験によって測定できる誘電体を流れる電流 I は，次のように表すことができる．

$$I = I_c + I_{dc} \tag{1}$$

電流 I をコンダクタンス G に置き換えると，(1) 式は次のようになる．

$$G = G_c + G_{dc} \tag{2}$$

ここで，G_c は時間経過とともに減少する吸収電流 I_c に相当するもので，G_{dc} は直流もれ電流 I_{dc} に相当し時間の経過によらないとされる．

一方，交通電場の下での誘電体のコンダクタンス G は次のように示される．

$$G = G(\omega) + G_0 \tag{3}$$

ここで，$G(\omega)$ は周波数の低下とともに減少し，(2)式の G_c に対応するものである．また G_0 は G_{dc} に対応し，周波数とは無関係である．

ところで，周波数をかえて G を求めるためにブリッジ法が適用できるのは 0.1 Hz 以上の周波数範囲に限られ(高分子学会，1963)，0.1 Hz 以下で G を求めるには直流法によらなければならない．したがってこの研究では，2.2. 項で述べるように，0.1 Hz より高い周波数範囲では交流コンダクタンス G，0.1 Hz 以下の範囲では直流電圧を与えたあとの電流 I が求められた．

2.2.　電気伝導の測定法

2.2.1.　交流域

0.1～10 Hz の周波数範囲では超低周波ブリッジを組み込んだ安藤電気（株）製 TR-4 型超低周波誘電体損測定器が，30 Hz～100 kHzの範囲では変成器ブリッジを組み込んだ安藤電気（株）製 TR-10C 型誘電体損測定器がコンダクタンス G の測定に用いられた．なお，試料のコンダクタンス G は測定器のダイアルから直接読み取られた．

2.2.2.　直流域

0.1 Hz 以下の周波数範囲での測定には，測定回路の概略図が図 1 に示される直流電気伝導測定装置が使われた．図 1 (a) に示されるように，試験片中を流れる電流値が 10^{-5}A 以下では，標準抵抗による電位降下から電流値を求める方法がとられ，標準抵抗と増幅器が

一体となったタケダ理研（株）製 TR-84M 形振動容器型微少電流電位計が用いられた．電流値が 10^{-5} A 以上では図 1 (a) が示すように，（株）横河電機製作所製 2709 形直流トランジスタ検流形で，試験片中を流れる電流値を直接測定した．なお，電圧を与えた直後から 10 秒以内の電流値の経時変化の記録には（株）横河電機製作所 2901 形フォトコーダーが用いられ，電圧印加後 10 秒以後の記録には（株）横河電機製作所製の自動平衡型電位差記録計が用いられた．

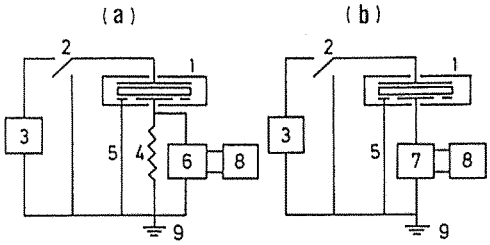

Fig. 1 Schematic diagram of circuits for direct-current measurements: (a) below 10^{-5} A and (b) above 10^{-5} A; 1 assembly of electrodes; 2 switch for applying voltage to specimen or discharging of specimen; 3 regulated d-c power supply; 4 standard resistance; 6 d-c amplifier; 7 galvanometer; 8 self-balancing recorder or electromagnetic oscillograph; 9 ground.

図 1　直流電気伝導測定回路の概略図
(a) 10^{-5}A 以下の場合 (b) 10^{-5}A 以上の場合
1. 電極部　2. スイッチ　3. 標準電圧発生装置　4. 標準抵抗　5. ガード電極　6. 直流増幅器　7. 検流計　8. 自己平衡型記録計，もしくはフォトコーダー　9. アース

2.2.3. 電気伝導率 σ の算出法

0.1 Hz より高い周波数の電気伝導率 σ は，測定器で読み取ったコンダクタンス G から次式によって求められた．

$$\sigma = G \cdot l/S \qquad (\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1}) \tag{4}$$

ここで G はコンダクタンス (Ω^{-1})，l は試験片の厚さ (cm)，S は試験片と接している主電極の面積 (cm^2) である．

0.1 Hz より低い周波数の電気伝導率 σ は，記録計に記された電流値から次式で求められた．

$$\sigma = I/E \cdot l/S \qquad (\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1}) \tag{5}$$

ここで I は電流値 (A)，E は試験片への印加電圧 (V) である．なお，l と S は式 (4) におけると同様である．

ところで，σ の周波数依存性を検討するにあたって，0.1 Hz 以下の低い周波数領域の σ を求めるために，直流電圧を与えたあとの経過時間 (t) から周波数 (f) への換算法として，直流領域の誘電損率の求め方（中島，1964）（橘田，1977）と同様に Hamon の式から $f = 0.1/t$ の関係を適用した．なお，この方法が有用であることを確めるために，予備実験で図 2 に示すように直流電圧印加後の経過時間 $t = 1$ 秒のとき，すなわち，$f = 0.1$ Hz で直流法による測定値と交流ブリッジ法による測定値とがよく一致することを確かめた．

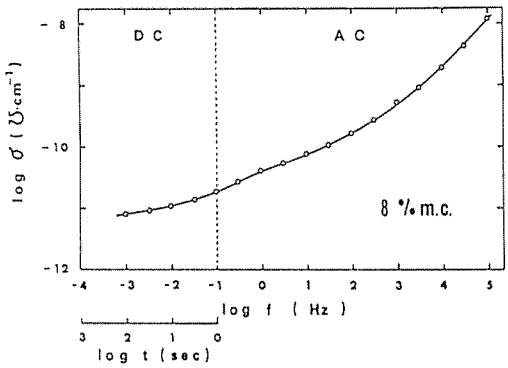

Fig. 2　Effect of frequency (f) on conductivity (σ). Conductivity was measured by the d-c transient method below 10^{-1} Hz, and by the bridge method between 10^{-1} and 10^{5} Hz. Time (t) elapsed after having the d-c voltage applied is converted to frequency (f) by using the expression, $f=0.1/t$.

図2　交流電気伝導率と直流電気伝導率との関連性

(1) 10^{-1} Hz より低い周波数範囲の電気伝導率の測定は，直流電気伝導測定測置による．

(2) 10^{-1}～10^{5} Hz の簡囲の周波数では，ブリッジ法による．

注：(1)における直流電圧印加後の経過時間 t から周波数 f への換算は，$f=0.1/t$ の関係を使って行われている．図中の m. c. は含水率を表す．

2.2.4.　電　　極

絶縁体の電気伝導率は測定回路，とりわけ電極の形状と接触抵抗に影響受ける（高橋，1958）ので，ASTM 試験法 D 257（1958）を参考にした電極を用いた．すなわち，図3に模式的に示すように，主電極，対電極およびガード電極から成り立つステンレス製の電極に試験片を一定の力ではさみこみ，表面もれ電流の除去と測定値の再現性に留意した．

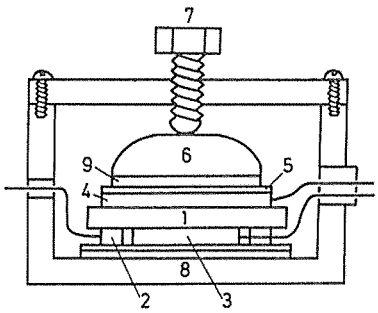

Fig. 3　Electrode arrangement : Electrodes were made of stainless steel ;
1 test specimen ; 2 guard electrode ; 3 guarded electrode ; 4 unguarded electrode ; 5 insulator (teflon plate) ; 6 iron plate ; 7 screw bolt to make the specimen and the electrodes come closely into contact ; 8 guarded steel box ; 9 insulator (rubber plate).

図3　電極の概略図

1．試験片　2．ガード電極　3．主電極

4．対電極　5．絶縁のためのテフロン板

6．鉄鋼板　7．試験片を圧縮するためのボルト

8．ガードされた金属性の容器　9．ゴム板

2.3. 供試した試験片

伐倒後長期間にわたって放置され，十分に気乾状態に達した九州大学農学部粕屋演習林産の約85年生のスギ（*Cryptomeria japonica* D. Don）材から，繊維方向あるいは接線方向が電場方向になるように厚さ3.5～3.8 mm，および直径50 mmの円板を切り出して試験片とした．

なお木材の電気伝導の実験では，試験片表面と電極表面間に生じる接触抵抗をできるだけ小さくすることに留意しなければならない（TAKECHI *et al.*, 1953）（VERMASS, 1975）（CHANMAMEDOV, 1973）．そこで，試験片は，微細粒のサンドペーパーを使い十分に平滑で厚さむらのない表面に仕上げられた．

2.4. 測定条件

2.4.1. 試験片に与えた電圧

0.1 Hzより高い周波数の範囲では，試験片に与えられた実効電圧がほぼ1Vであった．一方，直流電圧はその都度，実験の目的に合わせて0.1～50 Vの範囲にとられた．

試験片に電圧を一定時間与えたあと主電極と対電極の間を短絡すると，そのあと長時間にわたって残留起電力（放電吸収電流）が認められるので，同一試験片に繰り返し電圧を与えて測定が進められる際には，残留起電力が十分に小さくなったあと，次の測定を行うようにした．このようにしたとき，電圧を与えられた履歴を無視できることが予備実験で確かめられている．

2.4.2. 含水率と温度の調整法

硫酸水溶液をはって槽内の相対温度を調製したデシケーター中に，長時間にわたって試験片を封入し，試験片内部に含水率こう配が生じないように留意して調湿した．なお，このようにして得られた試験片の含水率範囲は，2%と25%の間にあった．

また，温度の調整，とくに低温の調整には，図3に示した電極装置を安藤電気（株）製SE-1型恒温槽中に組み入れ，この恒温槽の油槽に満たしたメタノール中にドライアイスを投入することによって行なわれた．この研究で調整された温度は－40～20 °Cであり，測定中の温度の変動は±1°Cである．

3. 電場の周波数が電気伝導にもたらす影響

木材の電気伝導率が周波数によって受ける影響は，今まで0.1 Hz以上の領域でしか確かめられていない．また，電気伝導率の周波数依存性を含水率と温度との相互的な関係で求めた研究も，今までのところ報告されていない．

そこで，高周波から直流領域にわたる広い周波数範囲で木材の電気伝導率の周波数依存性を含水率と温度を変えて求め，これを与えられる電圧の大きさと関係づけて検討し，ひいては低い周波数領域における導電的挙動の概要を明らかにする．

3.1. 電気伝導率の周波数依存性への含水率の影響

電圧と含水率をパラメーターにして，電気伝導率σが周波数によって受ける影響を求

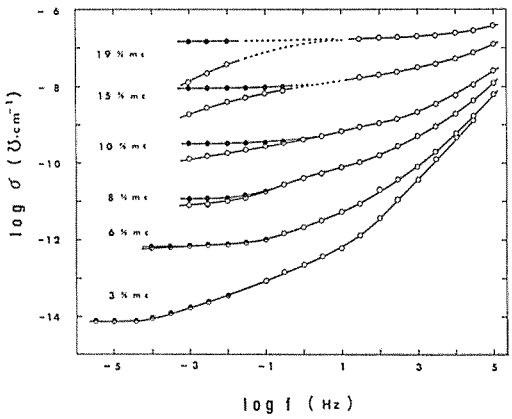

Fig. 4　Effect of frequency (f) on electric conductivity (σ) for various moisture contents at 20°C. Applied d-c voltages were one and ten volts: the clear circles (○) show the values obtained from one volt, and the dark circles (●) from ten volts, respectively.

図4　木材含水率が電気伝導率の周波数依存性へ与える影響

注：測定温度 20°C，白丸（○）は 1 V 印加時，黒丸（●）は 10 V 印加時の測定値を示す．

め，その結果を図4に示している．10^{-1} Hz よりも高い周波数でのプロットは，実効電圧 1 V を与えたときの測定値である．一方，10^{-1} Hz 以下の周波数では，直流電圧 1 V と 10 V のそれぞれを与えたときの測定値がプロットされている．含水率 8 %以上での曲線では，極めて低い周波数の範囲で，10 V を与えたときの曲線（黒丸を結んだ曲線）が 1 V の曲線（白丸を結んだ曲線）との間に隔たりを生じる傾向を示し，σ が電圧によって影響を受けていることを示す．この傾向を持つ周波数の範囲は含水率が高いほど高い周波数の側に拡がっており，σ への電圧の影響が含水率と周波数に依存することが明らかである．また，含水率 3%では，測定周波数の全領域で 1 V と 10 V の曲線は良好な一致を示した．

さて，10 V が与えられたときある周波数を境にして，σ の値が周波数に依存する範囲と依存しない範囲に分けられることが明らかである．すなわち，低含水率，たとえば含水率 3%のとき，10^5 Hz から 10^{-4} Hz の範囲では周波数が低くなるに伴って σ が急激に減少するが，約 10^{-4} Hz 以下では周波数が低下しても σ はほぼ一定の値を保つ傾向がある．また，含水率が高くなるにつれて σ の値は周波数の影響を受けることが少なくなり，しかも含水率が高ければ高い周波数ですでに σ が周波数に依存しなくなる範囲が始まることが明らかとなった．これと同様の結果は HEARMON *et al.* (1954) によって 10^3Hz 以上の周波数範囲で，坊野ら (1974) によって 10 Hz 以上ですでに得られている．また，VENKATESWARAN (1971) は HEARMON らの実験結果を引用し，低い周波数の範囲で σ が周波数に依存しなくなる現象は，電気抵抗のメカニズムが誘電的なものからイオン伝導へ移ることに原因があるとした．

MURPHY *et al.* (1936) は吸湿した cotton の電気伝導系を間隙性伝導系 (Interstitial Conduction System) と呼び，この系では，水分吸着層が分極と電気伝導に対して重要な役割を果たすとした．cotton におけると同様に，絶縁性のセルロース・ミクロフィブリルやラメラ，そしてそれらの間に存在する吸着水分層とで，木材の電気伝導系が形成されて

いる．したがって，吸湿した木材の電気伝導系をも，間隙性伝導系として差し支えない．さて，この間隙性伝導系の電気的性質は，電気的等価回路に置き換えられる．すなわち，図5に示すように，木材実質の等価回路を容量成分 C_m と抵抗成分 R_m の並列回路で表し，さらに吸着された水分の層のそれぞれを容量成分と抵抗成分とに分け，コンデンサーの充電に対する抵抗 R_{cn} と直列接続した容量 C_n とが並列に組み立てられた単位とし，それらの並列回路で木材の等価回路が表わされる．図4で認められる周波数の低下に伴う σ の減少は，電圧印加後等価回路中のコンデンサーに充電が進むと，次第に回路中を流れる電流が減少することによってもたらされ，この減少は木材の分極の仕組みを簡単に説明していると考えられる．一方，図4の σ の値が周波数に依存しない範囲では，コンデンサーが充電しつくしされ，等価回路中の直流抵抗のみが電気伝導に寄与しており，この電気伝導はイオン伝導が主役であろう．

さて，含水率が高くなるにつれて移動度（mobility）の大きな吸着イオンの層，言い換えれば，図5の抵抗成分 R_n に抵抗値の小さい回路が増え，このために電気伝導率が大きくなる．一方，分極の起こりにくさを表すために等価回路中の容量成分 C_n と直列に入っている抵抗成分 R_c も小さくなり，その結果コンデンサーは短時間で充電される．そこで，容量成分 C_n を満たすために要する時間も短かくなると考えられる．つまり，図5の電気的等価回路は，吸着水を持つ木材の電気伝導率の周波数依存性を定性的に説明するのに有用である．

ところで，誘電体の吸収現象に寄与する分極は誘電体内の電荷の変位（電気変位）に基づくものであるが，分極の種類によって，電場を作用させたのちその電場を取り去るとき

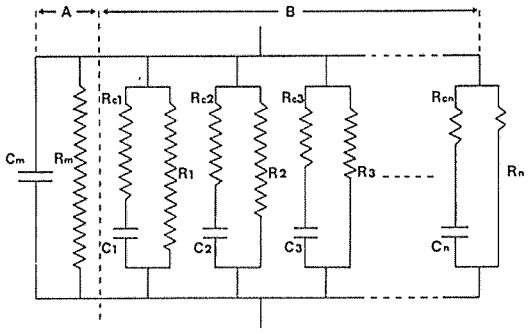

Fig. 5 Equivalent circuit model that expresses current flow in wood.
A : Equivalent circuit for wood substances
B : Equivalent circuit for adsorbed water
Note : C_m and R_m is the capacitance due to polarization and the direct current resistance of wood substances, repectively. $C_1 \sim C_n$ are capacitances due to polarized distribution of adsorbed ions. $R_{c1} \sim R_{cn}$ are resistances equivalent to frictional forces which impede the process of forming a polarized distribution of adsorbed ions. $R_1 \sim R_n$ are the direct current resistances of polymolecular layers of adsorbed ions.

図5　吸湿した木材の電気的等価回路
A：木材実質の等価回路
B：水分吸着層の等価回路
注：C_m と R_m はそれぞれ木材実質の電気的容量と直流抵抗，$C_1 \sim C_n$ は，吸着水の分極によって生じる電気的容量成分，$R_{c1} \sim R_{cn}$ は，吸着水の分極を阻止しようとする電気的成分を表す抵抗，$R_1 \sim R_n$ は，それぞれの吸着層の直流抵抗．

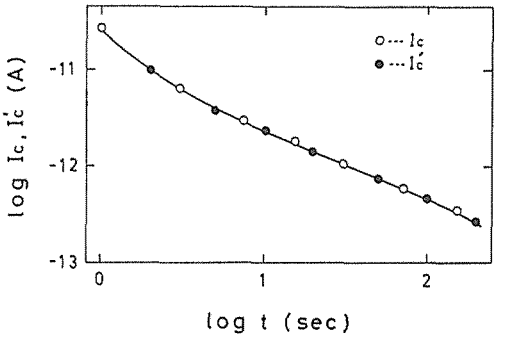

Fig. 6　Relationship of charging current (I_c) and discharging current (I_c') to time (t) at 4.0% moisture content. Applied voltage was 10 volts and charging was for 1000 seconds.
図 6　充電時の吸収電流 I_c と放電時の吸収電流 I_c' の関係
（含水率 4.0%）

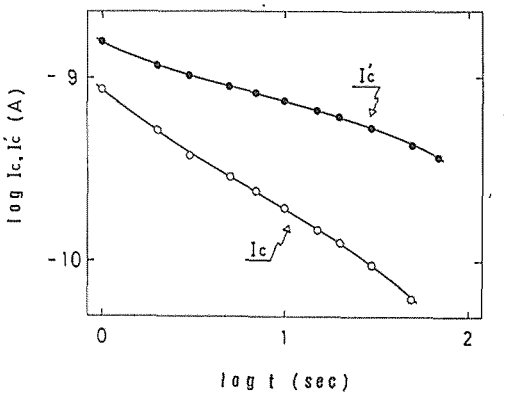

Fig. 7　Relationship of charging current (I_c) and discharging current (I_c') to time (t) at 8.0% moisture content. Applied voltage was 10 volts and charging was for 1000 seconds.
図 7　充電時の吸収電流 I_c と放電時の吸収電流 I_c' の関係
（含水率 8.0%）

に電荷の分布がもとの状態に戻るもの（可逆的な変位）と戻らないもの（非可逆的な変位）がある．前者は誘電体内の双極子の配向分極や不均質誘電体の界面分極などの分極現象で，これらに起因した吸収電流は線形性を持ち，一方，後者では空間電荷分極や誘電体内でのイオン密度の変化に基づくものなどが考えられ，その吸収電流は非線形を示す．さて，含水率が高くなって導電性が高くなるとともに，低い周波数の領域ではイオン伝導による荷電担体（charge carrier）の非可逆的な移動が活発になることを推測でき，周波数の低下に伴う σ の減少が，低い周波数領域では可逆的な分極によるとは限らないと考えられるであろう．そこで，0.1 Hz よりも低い周波数範囲の σ で考察するために，直流電圧を与えているときの吸収電流に関与する分極で，その可逆性を実験的に確かめた．すなわち，図 6 と図 7 に，10 V を与えたときの充電時と放電時の吸収電流の重ね合わせの結果が示されている．図 6 に示すように，含水率 4 %では重ね合わせが成り立ち，他方図 7 から，含水率 8%では重ね合わせが成立しないことが明らかである．すなわち，含水率 4%での吸収電流が可

逆的な分極によるものであるのに対し，含水率8%では含水率の増加によって可逆性が失われている．このことから，高周波から直流領域にわたる電気伝導率の周波数依存性を一つのメカニズムだけで説明することができないことはもちろん，さらに周波数領域が同じであっても含水率が異なれば，そのメカニズムは影響を受けることが確かめられた．したがって，図5の簡単な等価回路が成り立つのは，限られた周波数と含水率の範囲内だけであるかもしれない．

3.2. 電気伝導率の周波数依存性への温度の影響

異なる温度と電圧のもとで，電気伝導率が周波数によって受ける影響を図8に示している．含水率が8%～14%，および20%のそれぞれで，温度が低くなれば全周波数の範囲で

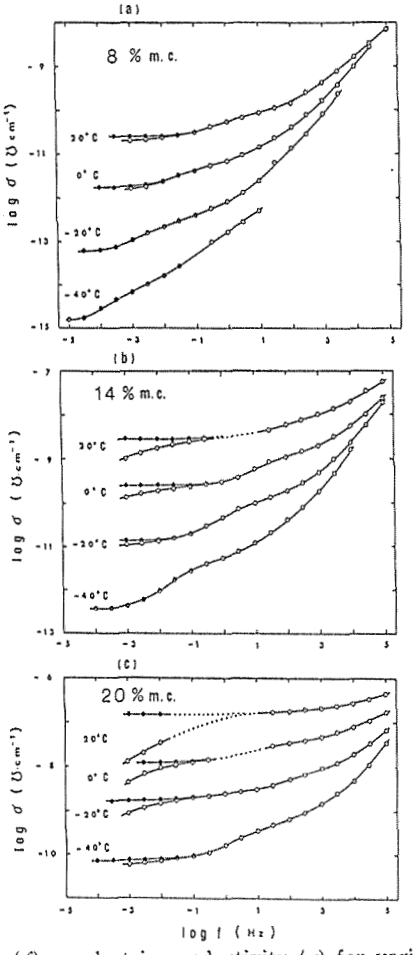

Fig. 8 Effect of frequency (f) on electric conductivity (σ) for various temperatures at moisture contents of 8 (a), 14 (b), and 20 percent (c). Applied d-c voltages were one and ten volts: the clear circles (○) show the values obtained from one volt, and the dark circles (●) from ten volts, respectively.

図8　電気伝導率の周波数依存性への温度の影響

注：測定温度20°C，白丸（○）は1V印加時，黒丸（●）は10V印加時の測定値を示す．

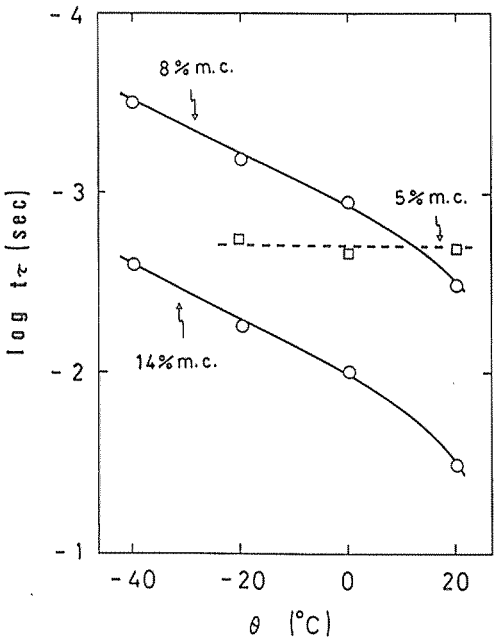

Fig. 9　Effect of temperature (θ) on t_τ at which the current has attained to the constant value after having the voltage of 10 V applied.

図9　t_τ と温度 θ との関係

注：t は直流電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率の減少が認められなくなる時間を示す．
印加電圧は 10 V（電場強さ 29 V/cm）．

σ が小さくなり，同時に σ が周波数によって影響を受ける範囲は，温度が低いほど低い周波数の領域にまで広がっている．また，高い周波数の範囲では，温度を異にする曲線間で隔たりが少なく，σ への温度の影響の小さいことが明らかであるのに対して，周波数が低ければ低いほど温度を異にする曲線間の隔たりは増し，σ への温度の影響が著しくなることが示された．すなわち，周波数が低くなるほど，吸着イオンの導電性が σ に対して大きな影響を与えていることを示唆している．高い含水率でしかも低い周波数での電気伝導が直流もれ電気伝導に近づき，吸着イオンの活性化（Lin, 1965）を伴うものであるため，σ への温度の影響が大きくなると考えられる．なお σ が直流領域で温度によって受ける著しい影響については，すでによく検討されている（Clark *et al.*, 1933）（Takechi *et al.*, 1953）（Lin, 1965）．

ところで，直流電圧印加後の時間経過に伴う σ の減少がもはや認められなくなる時間を求めて t_τ とし，10 V 印加時の t_τ と温度との関係が図9に示されている．含水率5%では t_τ への温度の影響がほとんど認められないのに対して，含水率8%と14%では温度によって著しい影響を認めることができる．すなわち，含水率5%では，吸着イオンが温度の上昇によって活性化が進んだとしても，このことが吸収電流の原因となる分極のメカニズムに影響するとは考えられない．一方，含水率が5%を越えると，温度上昇に伴う吸着イオンの活性化によって，吸着イオンの非可逆的な移動が吸収電流に寄与し始めるようになり，その結果，t_τ への温度の影響が認められるようになると考えられる．このことは，3.1．で検

討した吸収電流の重ね合わせ，すなわち分極の可逆性についての考察で得た結果を支持している．

すでに図4で明らかにしたが，含水率3%では極めて低い周波数に至るまでσへの電圧の影響が認められない．一方，σへの電圧の影響を認めることができる周波数領域，つまり図中で白丸を結んだ曲線と黒丸を結んだ曲線とに隔たりを生じている周波数の範囲は，含水率が高くなるにつれて高い周波数の側へと移行することが明らかである．さらに，σへの電圧の影響が認められる周波数範囲は温度によっても左右され，図8は電圧が相違するときに生じる曲線の分岐は高い温度ほど高い周波数側へ移動することを示している．しかも，この研究でカバーしている周波数の全領域にわたってみるとき，1 V と 10 V の電圧で得たσの曲線に隔たりを生じる範囲は，図4と図8で黒丸を結んで得られた部分，すなわち曲線がほぼ水平に描かれている周波数の範囲と一致している．

これらのことから，低い周波数領域の電気伝導率は，含水率と温度とによって著しい影響を受けるとともに，電圧の大きさとも関係することが明らかであり，ひいては電気伝導のメカニズムとの重要なかかわりが推測される．この点については，4.で詳しい検討を行っている．

3.3. 要　　約

周波数の変化につれて電気伝導率が変化することは良く知られているが，この電気伝導率の周波数依存性は，含水率と温度によって著しい影響を受ける．しかも周波数の低下に伴う電気伝導率の減少は，含水率が低いほど，あるいは温度が低いほど低い周波数領域に至るまで認められる．

含水率が約5%よりも低いとき，電圧と温度条件が変わっても，周波数の低下に伴う電気伝導率の減少傾向への影響が認められない．なお，約5%以下では，10^{-1} Hz 以下の極めて低い周波数領域でも，周波数の低下に伴う電気伝導率の著しい減少を認めることができ，この減少には可逆的な分極が関与していると推定した．

一方，含水率が約5%を越える範囲では，含水率が高くなるにつれて，低い周波数領域での周波数の低下に伴う電気伝導率の減少が著しくなくなる．また，この周波数領域では電気伝導率が電圧に影響され，しかも電気伝導率の周波数依存性には非可逆的な分極が関与していることを推定できた．このことは，高い周波数から極めて低い周波数に至るまでに認められる電圧の影響の出現が，高周波領域では誘電的なものが支配的であり（可逆的分極に基ずく），直流域の電気伝導ではイオン伝導現象（非可逆的な分極を伴う）が主役となることになり，電気伝導機構の移り変わりを示唆している．

4.　電場の強さが電気伝導にもたらす影響

3.で明らかにされたように，電気伝導率が電圧の影響を受けるのは低い周波数範囲に限られている．したがって，この章では直流域に限って電気伝導率への電圧の影響を詳しく検討する．

吸湿した木材の直流電気伝導率が電圧によって影響を受けることは，いくつか報告されている（TAKECHI *et al.*, 1953）（SKAAR, 1964）（VERMAAS, 1975）が高含水率域に限られ，含

水率との関係については知見が得られていない．また 3．から，吸収電流に基づく直流電気伝導率の減少が明らかになっているが，直流電気伝導率への印加電圧の影響を，電圧印加後の時間経過と関連させた成果は今日に至るまで報告されていない．

そこで，直流電気伝導率が電圧によって受ける影響を，電圧印加後の経過時間との関連で求め，併せて木材の水分吸着の機構との関係を明らかにする．

4.1.　電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率 σ の減少への電圧の影響

含水率 2.8%，10.5%，および 18.9%の木材に，0.1～50 V の直流電圧を与えた直後から 100 秒にわたって，時間経過に伴う電気伝導率 σ の変化を求め，その結果を図 10 に示している．なお，ここでは 0.1 V は 0.263 V/cm，50 V は 132 V/cm の電場強さに相当している．

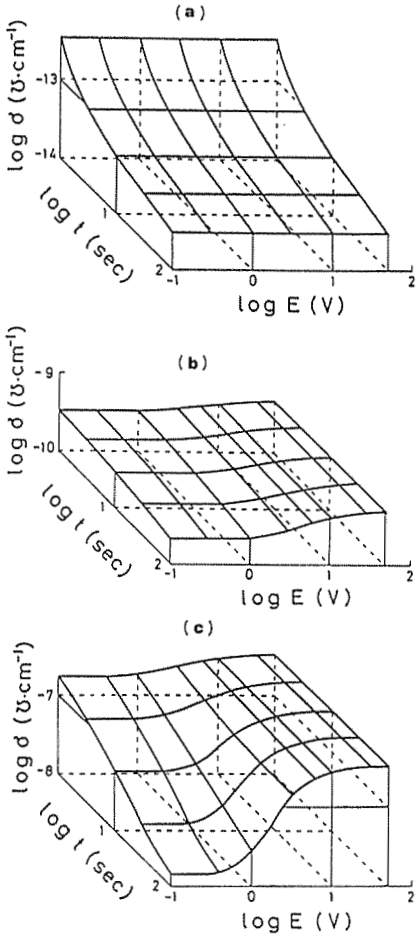

Fig. 10　Effect of voltage (E) and time (t) elapsed after having the voltage applied on conductivity (σ) at three moisture levels: (a) 2.8%; (b) 10.5%; (c) 18.9%.

図 10　電気伝導率 σ への電圧印加後の時間経過 t と電圧 E の影響（a）2.8%（b）10.5%（c）18.9%
注：測定温度 20°C，電場方向は軸方向．

吸収電流に原因する σ の減少は，図 10 (a) に示す含水率 2.8%のとき，0.1～50 V の電圧の範囲でいずれの電圧でも同じ経過をたどっている．他方，含水率 10.5%と 18.9%では図 10 (b)，(c) に示されるように，30 V と 50 V を与えたときには時間が経過しても σ の減少が認められないのに対し，ほぼ 30 V より低い電圧の範囲では吸収電流が認められ，さらに電圧が低くなるほど時間経過に伴う σ の減少が著しくなっている．

一般に，可動イオンの移動に基づく誘電体内での荷電粒子濃度の分布変化が原因して生じる吸収電流は，充電時と放電時のそれぞれの吸収電流の間に重ね合わせが成立しないと言われている(岡ら，1960)（中島，1964)．ところが，**3.1.** で図 6 に示したように，含水率 4%では重ね合わせが成立しており，吸着イオンが可動イオンとして分極に関与するとは考えられない．

ところで，MURPHY *et al.* (1936) は電場の影響の下で cotton の吸着イオンの挙動について考察し，電場の下で吸着イオンが絶縁性ミセルの表面に沿って移動し，その結果一種の分極状態をとることによって吸収電流が生じると考えた．さらに，含水率が高くなって自由イオンが増えてくると，電解によって自由イオンが電極付近に蓄積されることで吸収電流が認められると推論している．また，吸湿した含浸紙の吸収電流について，MCLEAN *et al.* (1938) は MURPHY *et al.* の考え方を引用して，電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率の減少は，含浸紙内部を吸着イオンが吸着力の及ぶ範囲で微視的に移動して生じる分極に原因していると説明している．さらに，吸着イオンの移動に基づく可逆的な分極が *"break down"* すると，吸着イオンが伝導イオンとなって電流に寄与するとした．

さて，電気伝導の量を表わす全電流 I と，電圧を与えたあと蓄えられた電荷の量と関係する放電吸収電流 I_c' との関係について検討するために，便宜的に，図 11 には含水率 12.5%の木材で，電圧印加 5 秒後の全電流値 I_5 と，電圧を取り去ったあと 5 秒後の放電吸収電流値 I_{c5}' とが，それぞれ電圧との関係で示されている．図 11 から明らかなように，I_5 が電圧の上昇に伴って直線的に増加するのに対して，I_{c5}' は 0.6 V までは電圧の上昇に伴って漸増するが約 0.6 V 以上ではほぼ一定値を示した．このことから，電圧が高いほど分極が

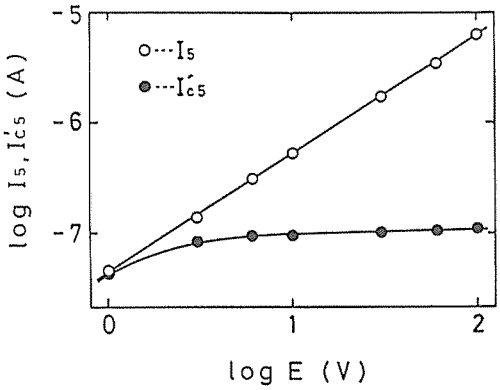

Fig. 11 Relationship of I_5 and I_{c5}' to applied voltage (E), at 12.5% moisture content.
I_5 and I_{c5}' are, respectively, current at 5 seconds after charging and discharging current at 5 seconds after removing of voltage.

図 11 電圧印加 5 秒後の全電流 I_5 と電圧除去後 5 秒後の放電電流 I_{c5}' に与える電圧の影響
注：測定温度 20°C，電場方向は軸方向．

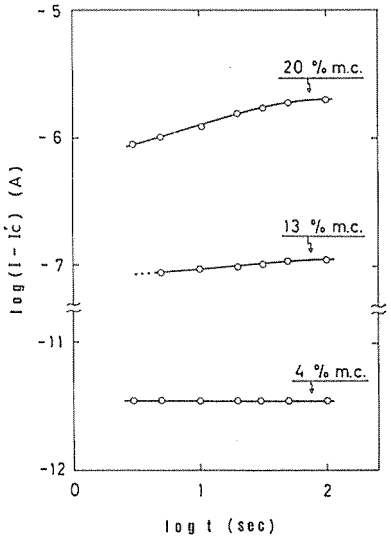

Fig. 12　Effect of time (t) elapsed after having the voltage of 3 V applied on net current, ($I-I_c'$) at 20°C. Current was along the grain.

図 12　真の伝導電流 ($I-I_c'$) への電圧印加後の時間経過 t の影響
注：印加電圧 3 V，測定温度 20°C，電場方向は軸方向.

短時間のうちに "*break down*" し，その結果ほとんどすべての吸着イオンが電気伝導にあずかる．すなわち，図 10 が示すように高い電圧の範囲では，含水率 10.5%と 18.9%とで，ほぼ 1 秒以後には吸収電流が認められなくなっている．しかしながら，10 V 以下の電圧ではイオンの移動を起こす力が小さくなっるために，分極の形成に要する時間，言い換えれば図 5 の等価回路中のコンデンサー C_n を充電するのに要する時間が長くなる結果，電圧印加後の時間経過に伴う σ の減少が長時間にわたって認められるようになる．

図 12 には，全電流 I から放電時の吸収電流 I_c' を差し引いた電流 ($I-I_c'$)，つまり真の伝導電流を電圧印加後の時間経過に対応させ，その変化を示している．すなわち，含水率 4% では ($I-I_c'$) は電圧印加後の時間経過によらず一定であるが，含水率 13%と 20%では時間経過に伴って上昇する傾向にある．つまり，含水率が高くなると，吸着イオンが電圧印加後の時間とともに伝導イオンへ形を変えていくことを，この理由として指摘できるであろう．このことは，吸着イオンが関与する分極の "*break down*" の程度が電圧に依存することに加えて，電圧印加後の時間経過によっても影響を受けることを意味している．したがって，含水率が高いとき，直流域では図 5 の等価回路で容量成分に蓄えられるための電流だけはなく，抵抗成分を流れる電流も時間とともに変化すると考えざるを得ない．このように，時間経過とともに吸着イオンが伝導イオンへ変化していくことによって伝導電流が増える結果，電気伝導率が印加電圧によって影響を受けるような含水率と時間の範囲では，吸収電流の可逆性が失われることを推定できそうである．

電圧を与えたあと σ の減少を認めなくなる時間 t_τ と電圧との間には，図 13 に示すように，含水率 4%と 12.5%との間に全く異なる現象が認められる．すなわち，含水率 4%では電圧の影響を受けないのに対し，12.5%では電圧の上昇とともに t_τ は著しく減少する．こ

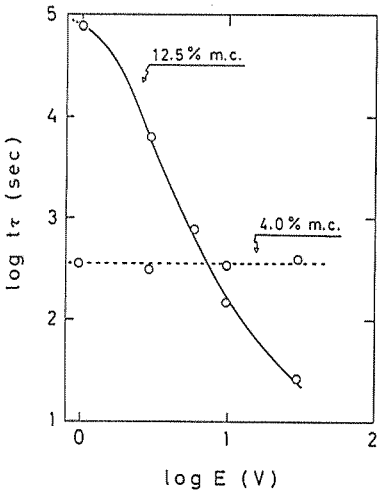

Fig. 13 Effect of voltage (E) on t_τ, at which the current has attained to the constant value after having the voltage of 10 V applied, at 4.0% and 12.5% moisture contents. Current was along the grain.

図 13 t_τ への電圧（E）の影響

注：t_τ は，直流電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率の減少が認められなくなる時間を示す．10 V 印加時の電場強さは 29 V/cm，測定温度 20°C，電場方向は軸方向．

のことから，含水率 4%では吸収電流が線形性を示すことが裏付けられるとともに，含水率 12.5%での吸収電流がイオンの移動に基づくことを示唆している．すなわち，含水率が高くなれば，木材実質に吸着されているイオン層ごとの吸着力のこう配を生じ，木材実質から遠く離れて弱く吸着されたイオンは小さな電圧の影響で吸着点から脱着されて移動を起こし，その移動の速さが電圧に依存すると考えられる．したがって，吸着点から脱着され解離されたイオンは木材細胞壁の微細空げき中を移動し，空げきをとりまく細胞壁実質と吸着層との間に一時的にとどまることによって 1 種の界面分極を起こすか，あるいはイオンの移動の結果，細胞壁の局部的な荷電粒子の濃度低下（局部的な電位こう配のひずみ）を引き起こすと考えられる．イオンの移動がさらに活発になれば，電極との界面にも蓄積されること（MURPHY *et al.*, 1936）を考慮しなければならないであろう．このように含水率が高いときには，電圧印加後に解離された吸着イオンによって示される挙動が，時間の経過とともに生じる σ の減少に関係していることを推測できる．電圧印加後に吸着イオンが示す挙動は，局部的にしろあるいは試験片全体にしろ，結果的にはイオン濃度の分布こう配の変化に関係すると考えられる．ところで，中島（1964）は液体誘電体の吸収電流について考察し，荷電粒子の濃度変化が吸収現象に関与しているとき，吸収現象を支配する緩和時間 τ が次のようになるとした．すなわち，

$$\tau = d/\mu V \tag{6}$$

ここで，d は電極間の距離，μ はイオンの移動度，V は直流電圧である．吸湿した木材の場合，中島が研究に用いた液体誘電体と異なってイオンが木材実質に吸着しており，同時に移動できる距離は細胞壁の構造によって極端に制限されている．したがって，τ を簡単に

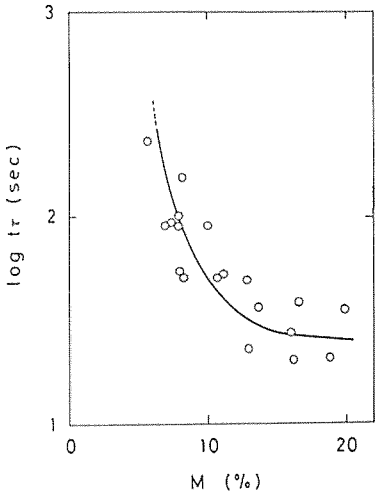

Fig. 14　Effect of moisture content on t_τ, at which the current has attained to the constant value after having the voltage applied. Applied d. c. electric-field intensity was about 29 V/cm, and the field was along the grain.

図 14　t_τ への含水率の影響

注：t_τ は，直流電圧印加後の時間経過に伴う電気伝導率の減少が認められなくなる時間を示す．印加電圧 10 V（電場強さ 29 V/cm），測定温度 20°C，電場方向は軸方向．

電極間の距離と結びつけることはできないが，電極間の距離 d をイオンの移動できる距離に置き換えることで，(6)式は含水率が高い場合の木材の吸収電流の緩和時間を説明できるかもしれない．ところで，電圧印加後の時間経過に伴って生じる σ の減少から，単純に吸収電流の緩和時間を求めることはできないが，緩和時間の目安として t_τ を取り上げて図 13 に示した結果は，(6)式が定性的に含水率 12.5%の木材にあてはまることを示唆している．

10 V の電圧を与えたときの t_τ と含水率との関係を図 14 に示す．図から，含水率約 5%以上の範囲で t_τ が含水率の増加につれて急激に小さくなり，ほぼ気乾状態を越えた高い含水率の範囲（約 15%以上）では，t_τ の減少がほとんど認められなくなる傾向が得られた．すなわち，含水率約 5%以上では含水率の増加に伴って移動度の大きな吸着イオン層が増え，つまり (6) 式の μ が大きくなることによって緩和時間が短くなり，その結果 t_τ は小さくなる．ところが，約 15%以上の含水率の範囲では，含水率が高くなることによって新たに吸着されるイオンは自由イオンに近い性格を持ち始め，μ にほとんど影響を受けないと考えられる．つまり，細胞壁中に取り込まれる水分の吸着力が，ほぼ 15%の含水率を境にして異なることを示唆している．

4.2.　直流電気伝導率への電圧の影響

4.1．ですでに，直流電気伝導率への電圧印加後の時間の効果，すなわち図 5 の等価回路の容量成分の電気伝導率への寄与について考察した．ここではさらに，容量成分の寄与がないものと考えた場合の，すなわち電圧印加後の時間経過によって十分に直流もれ電気伝導に近づいた電圧印加 100 秒後の直流電気伝導率をとりあげ，印加電圧との関係で検討を

進める．

含水率2.8%のとき，つまり図10(a)では電圧を加えた100秒のとき，電圧ごとのσの値に相違が認められず，σが電圧によって影響を受けていないことが明らかである．他方，含水率が高くなるとき，たとえば図10(b)，(c)では電圧が0.3〜1 Vの領域を越えて高くなればσの値が急激に上昇し，さらに10〜30 Vの領域を越えるときσはほぼ一定の値に落ち着く傾向を認めた．

さて，約30 V以下の電圧をヒノキ（*Chamaecyparis obtsusa*）材の軸方向（1.5 cm）に与えたとき（TAKECHI *et al.*, 1953），あるいは約10 V以下の電圧をDouglas-fir(*Pseudotsuga menziesii*）材の繊維方向に対して直角方向（0.4 cm）に与えたとき（SKAAR, 1964），いずれも気乾以上の含水率でσへの電圧の影響が著しいことが報告されている．これらの研究で採用された温度と含水率の条件が，この研究におけるものと厳密には異なっているとしても，σに影響を与える電圧の値の範囲を電場強さに換算したとき，両者とも20〜50 V/cmより小さい電場強さの範囲にあり，ほぼ同じ挙動として評価してよいであろう．

ところで，吸湿したcottonの絶縁抵抗は電圧によって影響を受けることが認められており（MURPHY, 1929），cottonに吸着しているイオンの吸着力のこう配に原因が求められている（MURPHY *et al.*, 1936）．すなわち，含水率がある値を越えるとき，cottonに吸着しているイオンの吸着力の大きさにこう配を生じ，電気伝導に関与できるイオン，すなわち伝導イオンとなりうる吸着イオンの数は印加電圧の大きさによって異なることが推論されている．この推論に従えば，すべての吸着イオンが同じ大きさの力で吸着されている場合，σへの電圧の影響は生じないはずである．したがって，含水率2.8%でσへの電圧の影響が認められないことは，木材実質へのイオンの吸着力にこう配がないことを示唆している．

さて，電圧の上昇に伴ってσの値が増加する傾向を図15に示し，$\log\sigma$と電圧Eとの間の直線関係が，含水率10.5%では0.3〜6 Vの範囲，18.9%では0.3〜3 Vの範囲で認められた．そこで，この直線の傾きm_dと含水率との関係を求めて，図16を得た．すなわち，約5%以下の含水率範囲ではm_dは0になり，σへの電圧の影響が認められない．一方，含水率が約5%を越えて高くなるとσへの電圧の影響が認められ始め，含水率の増加とともにm_dは急激に大きくなっている．ところで，約5%以下の含水率範囲では水分子が単分子層を作って木材実質に吸着しているといわれている（堤，1967）（NORIMOTO, 1975）．したがって，イオンの吸着力は一様でその大きさにこう配がなく，σへの電圧の影響が認められないのであろう．一方，含水率の増加に伴って多分子層の吸着水を持つようになり，吸着層ごとの吸着力の差を生じ，σが電圧の影響を受けるようになる．すなわち，含水率の増加とともに吸着層の数が増し，吸着点から脱着され得るイオンの数を増加させる．その結果，吸着力の大きさのこう配が大きくなるに伴い，σへの電圧の影響が著しくなるであろう．図15に示されている電圧の上昇に伴うσの増加が吸着イオンの吸着点からの脱着によって生じるのであれば，σへの電圧の影響は吸着イオンと木材実質との間の吸着力と密接に関係することになる．つまり，弱く吸着されているイオンほど脱着に要する力が小さく，弱い吸着力のイオンが増えれば，低い電圧の範囲でも電圧の上昇に伴うσの著しく増加が認められよう．図15で$\log\sigma$とEとの間に認められる直線関係の立ち上がりは，含水率が高いほど低い電圧の範囲にあり，この推論を裏付けるものである．図16では，含水率が増加するに伴ってm_dが激増し，含水率が高くなれば低い電圧でも脱着できる吸着イオンの数

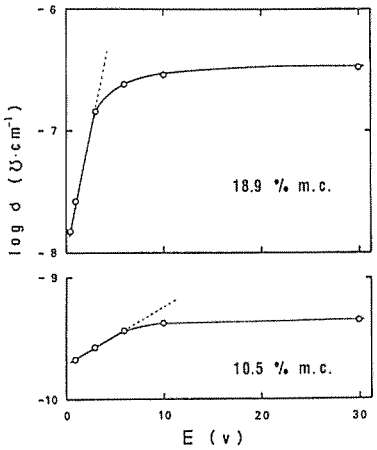

Fig. 15　Effect of applied voltage (E) on conductivity (σ) at 18.9% and 10.5% moisture contents.
図 15　電気伝導率 σ に及ぼす印加電圧の影響
注：σ は，電圧印加後 100 秒における値，測定温度 20°C，電場方向は軸方向．

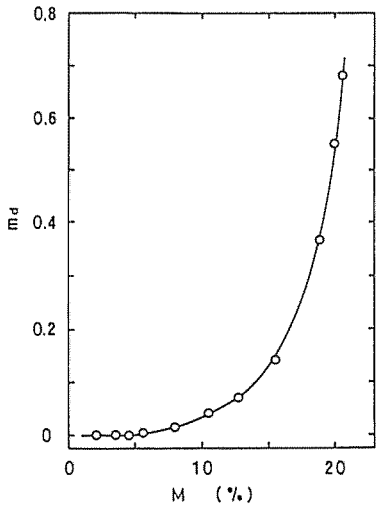

Fig. 16　Effect of moisture content on m_d which is the slope of the straight line between log σ and E.
図 16　電圧の上昇に伴って生じる σ の増加を表すための指標 m_d への含水率の影響
注：m_d は，図 15 で電圧 E に対して log σ が示す直線の傾きである．

が著しく増すことを示している．

また，30 V を与えたときの電気伝導率 σ_{30} と 0.3 V を与えたときの電気伝導率 $\sigma_{0.3}$ との差，すなわち電圧の上昇に伴う電気伝導率の増加量として ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) を使い，電気伝導率への電圧の影響を評価するために log ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) と含水率との関係を図 17 に示した．約

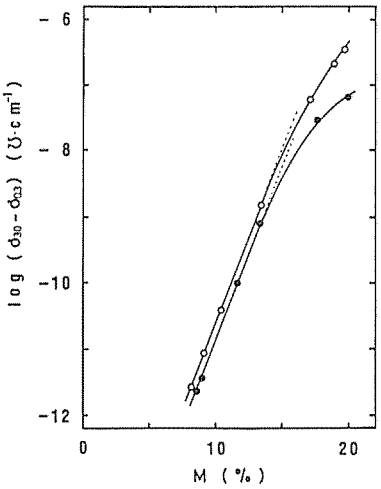

Fig. 17 Effect of moisuture content on ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) which shows the increase of conductivity in the range of voltage from 0.3 to 30 V at 20°C. The clear circles (○) show the values for longitudinal direction and the dark circles (●) for tangential direction of the field, respectively. The values were measured at 100 seconds after charging.

図 17 電圧の上昇に伴う電気伝導率の増加量の指標 ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) と含水率との関係

注：測定温度 20°C, σ は電圧印加後 100 秒値，白丸 (○) は軸方向，黒丸 (●) は接線方向での測定値を示す．

15%よりも低い含水率の範囲では，log ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) が含水率Mの増加とともに直線的に増加し，約 15%を境に直線から外れ始めている．さらに，含水率が約 15%を越えるとき，約 15%以下の含水率範囲に比べて，含水率の増加とともに生じる ($\sigma_{30}-\sigma_{0.3}$) の増加の割合が小さくなることが明らかになった．ところで，十分にぬれた状態の吸湿性繊維質絶縁物では，絶縁抵抗の値が電圧の影響を受けないとされている (岡ら，1960)．したがって，電圧の上昇に伴って σ が増加することは，さきに考察したように吸着イオンの脱着によって伝導イオンが増加することを意味し，他方，吸着力の束縛を受けていない自由イオンは σ の増加に寄与しないと考えられる．このことから，約 15%以上の含水率範囲で吸着されるイオンは，自由イオンに近い性格を持つと推論できるであろう．この推論は，4.1. で t_τ と含水率との関係について行った考察を支持している．

これらの結果，含水率約 5%と約 15%とを境にして，電圧が与えられたあとの吸着イオンの挙動と関連して生じる吸湿木材の電気的挙動が異なる原因を，木材細胞壁への水分吸着の機構の変化に求めてよいであろう．交流電場の下で，電気的挙動が含水率の範囲で異なることがすでに報告されている．例えば，VENKATESWARAN (1971) は，電気伝導率と含水率との関係を異なる周波数の下で求め，全乾〜6%，6〜16%，それに 16%以上の 3 つの含水率範囲で，それぞれ異なった挙動を認めた．また，坊野ら (1974) は低周波から超低周波領域の電場の下で，誘電率と含水率との関係が含水率 5%と約 15%を境にして異なることを，さらに則元ら (1976) は 9.4 GHz における誘電率と含水率との関係が約 5%と約 15%とで異なることを報告している．なお，直流電場の下で得られたこの研究の成果は，それらの報告で明らかにされた現象をも十分に説明できるであろう．

4.3.　要　　約

3．で明らかにされたように，低い周波数範囲で電気伝導率への電圧の影響が顕著であるので，直流電気伝導への電圧の影響を含水率と関連させて考察した．

含水率約5%以下の範囲では，電圧印加後の吸収電流の時間経過パターンに電圧の影響を認めることができない．一方，含水率約5%を越えると，吸収電流への電圧の影響が認められ，電圧印加後の時間経過に伴って生じる電気伝導率の減少は印加電圧が小さいほど長時間にわたって認められる．すなわち，含水率が約5%を越えるとき，電圧印加のあと細胞壁内でイオン濃度が「局部的に」変化して吸収電流の機構に影響を及ぼすと推論した．

約5%以上の含水率範囲で認められる電気伝導率への電圧の影響は，印加電圧の大きさによって吸着イオンが吸着点から脱着される量，および脱着後の移動の速さを異にすることで生じると考えられる．吸着イオンが伝導イオンとして働くために吸着点で生じる脱着は，吸着イオンと木材実質との間の吸着力に依存すると考えられる．すなわち，電圧によって電気伝導率が受ける影響とイオンの吸着力との間には，密接な関係があることを推論した．

直流電圧を与えられた吸着イオンの挙動に関連する電気的挙動は，含水率と密接な関係を持ち，含水率約5%と約15%を境にしてその挙動が異なることを明らかにした．なお，この原因は，木材実質への水分吸着の機構の変化にあることを推論した．

5.　電場の方向が電気伝導にもたらす影響

3．および4．では，電気伝導率が周波数と電圧とによってもたらされる影響を検討した結果，いずれの影響も水分子と木材実質との間の吸着力によっていることを推定できるとした。しかし，吸湿した木材の電気伝導の通路が，主に吸湿によって細胞壁中に一時的に形成されている微細な空げき，つまり "Transient capillaries" (STAMM, 1964) から成り立つことから，含水率の変化に伴って生じる細胞壁の構造変化が，電気伝導に重要な影響を持つと考えねばならない。

そこで，細胞壁の構造によってもたらされると推定できる電気伝導の異方性を，電圧と周波数を変えて求め，含水率との関連で検討した。

5.1.　電気伝導の異方性への印加電圧の影響

含水率が約5%を越えると電気伝導への電圧の影響が認められ，また電圧上昇に伴うイオンの移動速さの増加が電気的挙動にもたらす影響についてもすでに論じた。ところで，イオンの移動速さはイオンを移動させる通路の構造によって影響されるはずであり，移動の速さへの電圧の影響と併せて、さらに印加電圧の大きさが電気伝導の異方性にも関与すると考えられるであろう．

さて，電場方向を軸方向と接線方向とにとり，直流もれ電気伝導率 σ_{dc} への電圧の影響を含水率13%で求め，図18に示している．さらに，図18で得た σ_{dc} の軸方向と接線方向との異方度 $\sigma_{dcL}/\sigma_{dcT}$ を，電圧との関係で図19に示している．すなわち，ほぼ1Vよりも低い電圧では電気伝導率の値が電場方向にほとんど左右されないのに対して，電圧がほぼ1

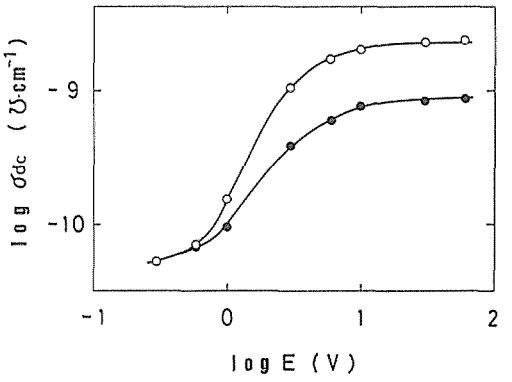

Fig. 18 Effect of field direction on d-c conductivity-increase with applied voltage at 20°C. The clear circles (○) show the values for longitudinal direction and the dark circles (●) for tangential direction of the field, respectively. The σ values were measured at 100 seconds after charging.

図 18 電圧の上昇に伴う直流もれ電気伝導率の増加に与える電場方向の影響

注：測定温度 20°C，σ は電圧印加後 100 秒値，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

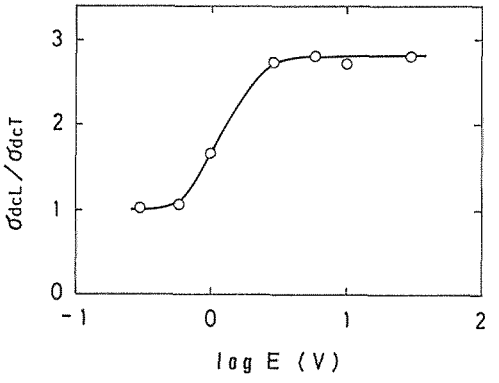

Fig. 19 Effect of applied voltage (E) on the anisotropy of d-c conductivity ($\sigma_{dcL}/\sigma_{dcT}$).

図 19 直流もれ電気伝導率の軸方向と接線方向での異方度（$\sigma_{dcL}/\sigma_{dcT}$）への電圧の影響

V を越えて高くなると電気伝導率に異方性を認め始め，とくに 1 V から 10 V の範囲で異方性に大きな変化が生じる。

また，イオンの移動度に関係し，かつ直流電場の下での分極形成の速さの目安の一つともなる t_τ の異方度を電圧をかえて検討するために，含水率 13%で得た軸方向と接線方向の結果を図 20 に示している。すなわち，ほぼ 1 V 以下の電圧では軸方向の接線方向の二つの曲線が重なり，t_τ の異方性を認めにくいが，電圧が 1 V を越えると t_τ は電圧の上昇に伴って急激に減少し，二つの曲線に隔たりを生じて異方性が認められる．

この結果は，電圧が低ければ吸着イオンの吸着点からの脱着が起こりにくいために伝導イオンとなる吸着イオンの数が少なく，たとえ伝導イオンの通路の構造が電場方向によって影響されたとしても，その構造の変化に応答するほどの電場伝導量の差として現われに

くいことを示唆している．すなわち，電圧が低ければ吸着イオンの脱着とその後の吸着イオンの挙動がほとんど無視され，一方，電圧が高ければ吸着イオンは吸着点から脱着され，同時に解離とその移動を生じるために，電気伝導は伝導イオンの移動に関与する通路の構造に影響を受けるであろう．

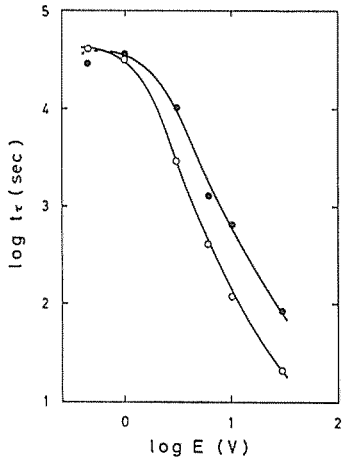

Fig. 20　Effect of applied voltage (E) on t_τ, at which the current has attained a constant value after application of d-c voltage, for longitudinal (○) and tangential (●) directions, at 13% moisture content.

図 20　t_τ の電圧依存率に与える島場方向の影響

注：含水率 13%，測定温度 20°C，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

5.2.　電気伝導の異方性への周波数の影響

電場方向を軸方向と接線方向とにとって電気伝導率 σ の周波数依存性を求め，その結果を図 21 に示し，さらに図 22 には σ の軸方向と接線方向での異方度，すなわち軸方向の電

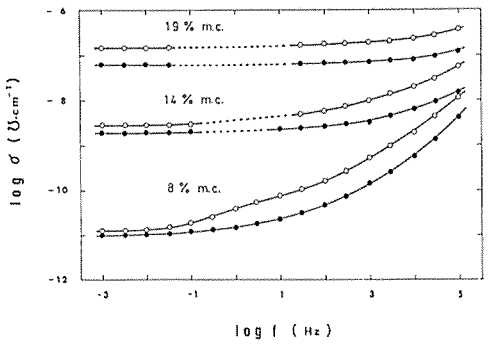

Fig. 21　Effect of frequency on the electric conductivity for the longitudinal and tangential directions at moisture contents of 8, 14, and 19 percents.

図 21　電気伝導率の周波数依存性に与える電場方向の影響

注：直流域での印加電圧 10 V，測定温度 20°C，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

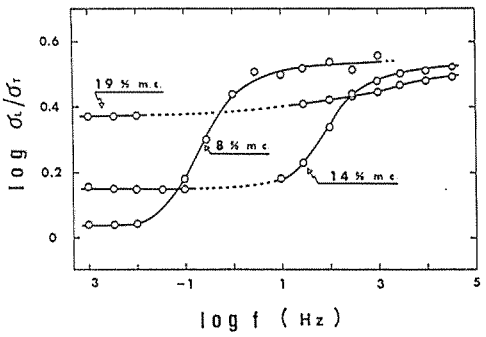

Fig. 22 Effect of frequency on the electric-conductivity anisotropy at moisture contents of 8, 14, and 19 percent.

図 22 電気伝導率の軸方向と接線方向での異方度 (σ_L/σ_T) への周波数の影響

気伝導率 σ_L と接線方向の電気伝導率 σ_T との比 σ_L/σ_T を周波数との関係で示している。図 22 で含水率 19%のとき，σ_L/σ_T の値が周波数の低下とともに単調にわずかに減少する傾向を示すものの，周波数による著しい影響が認められない。一方，含水率 14%と 8%とではある周波数の範囲を境にして，σ_L/σ_T の値に大きな変化を認めた．すなわち，14%では $10\sim10^3$Hz，8%では $10^{-2}\sim10$ Hz のそれぞれの範囲で，周波数が低くなるにつれて異方度が急激に減少している．

さて，図 21 で周波数の低下とともに認められる σ の減少は，含水率 19%では軸方向と接線方向とでほぼ一様なこう配を示し，含水率 14%と 8%では軸方向と接線方向で異なるこう配が得られた．たとえば，含水率 8%で電場方向を軸方向に取ったとき，周波数の低下に伴う σ の減少のこう配が大きくなっているが，接線方向では上述の傾向を認めることができない．このように，周波数が低くなるに伴って生じる σ の減少傾向が，軸方向と接線方向とで異なり，このことが図 22 で認められる異方度 σ_L/σ_T の著しい変化の原因となるのであろう．

ところで図 23 には，電場方向を軸方向と接線方向にとって求めた含水率 8%における誘電率 ε' と誘電損率 ε'' とを，電気伝導率 σ と対比させ，周波数との関係で図示している．σ の値の減少のこう配が大きくなり始める周波数，たとえば図 21 で述べた 10 Hz 以下の周波数領域が，図 23 の軸方向の ε' の値が著しく周波数に影響を受け，ε'' の曲線に極大値を認める周波数，すなわち誘電分散の位置とほぼ一致している．一方，図 23 で接線方向に電場方向をとったとき，低い周波数領域の誘電分散が，軸方向に電場方向をとったときに比べて認めにくく，高周波領域から直流領域に至るまで，σ がほぼ単調で一様な曲線で減少を示し，軸方向の σ の挙動とは異なっている．これらの検討結果から，電気伝導率の異方度が周波数に影響を受けることが明らかになるとともに，その現象が低周波数領域で認められる誘電分散とも関係することを推論できる．さて，このような推論を背景に，電場方向を軸方向と接線方向にとって求めた誘電率を，それぞれ ε'_L，ε'_T とし，その比 $\varepsilon'_L/\varepsilon'_T$ と周波数との関係を求めて図 24 に示している．含水率 8%で 10 Hz のあたり，14%で 10^3 Hz のあたりを境にして，周波数が低くなるとともに誘電率の異方度が急激に大きくなる傾向が認められる．すなわち，図 24 で含水率 8%を例にとるとき，周波数が 10^5 Hz から次第に低く

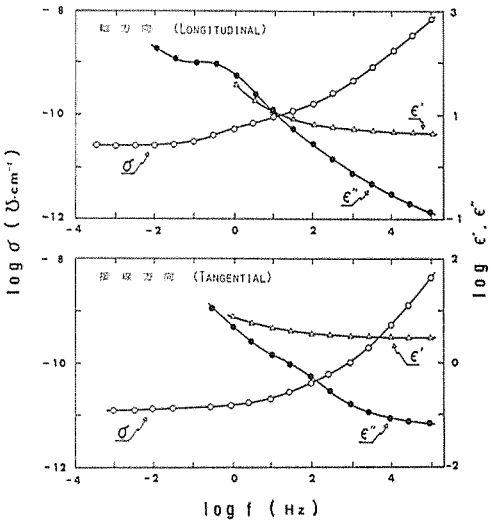

Fig. 23　Effect of frequency on the dielectric constant (ε'), the dielectric loss factor (ε''), and the electric conductivity (σ) for the longitudinal and tangential directions at eight percent moisture content.

図 23　誘電率 ε'，誘電損率 ε''，および電気伝導率 σ への周波数の影響

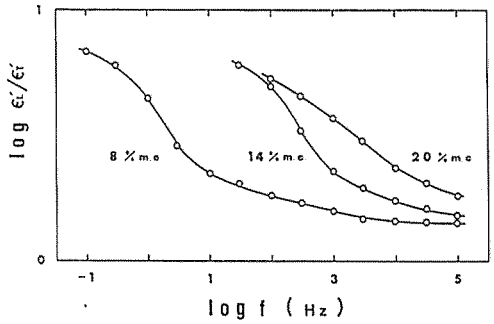

Fig. 24　Effect of frequency on the anisotropy of dielectric constant at moisture contents of 8, 14, and 20 percents.

図 24　誘電率の軸方向と接線方向での異方度 ($\varepsilon_L'/\varepsilon_T'$) への周波数の影響
注：測定温度 20°C.

なり 10 Hz のあたりに至るまでは，$\varepsilon_L'/\varepsilon_T'$ の値は単調かつ一様に増している．ところが，ほぼ 10 Hz あたりを超えてさらに周波数が低くなるとき，$\varepsilon_L'/\varepsilon_T'$ の値は急激に増しており，ε_L' の増加の程度のほうが ε_T' よりもはるかに大きくなることを意味している．すでに述べたように，低い周波数領域で導電性の異方性は小さくなる傾向にあったが，ここでは誘電性の異方性は逆に大きくなることが明らかとなった．

3．で明らかにしたように，周波数の範囲によって電気的刺激に対する応答の仕組みが異なり，高周波側では“微視的”な電荷の動きを行うのに対して，低い周波数の範囲では“巨視的”な電荷の移動を主に考慮しなければならない．さて，図 25 (A)～(D) には，木材細

胞壁の巨視的な構造から微視的な構造に至る概略が，模式的に示されている．(A) は WARDROP *et al.* (1959) が木材細胞壁を構成する層構造ごとのミクロフィブリルの配向の違いを模式的に示したもので，(B) は KERR *et al.* (1975) が細胞壁を構成する化学成分の分布を模式的に示したものである．さらに，(C) は PANSHIN *et al.* (1970) が一つのエレメンタリーフィブリルの長さ方向の外観を模式化したもので，(D) はセルロース結晶の単位胞を示している．このように，木材細胞壁はオーダーが異なる構造単位から成り立っており，電気的刺激に応答する仕組みにも多くのものが併存し，このことが木材の電気的性質や挙動を一義的に論ずることができない理由となっている．高周波領域の誘電現象は，今までにも十分に論じられた (NORIMOTO, 1975) のように，細胞壁中の微細な構造，たとえば図 25 (C)，(D) のセルロース結晶表面の化学的に活性な基や，親水性基と結合した水分子の配向分極などの観点から論じることができるであろう．一方，低い周波数の範囲では，もっと大きなオーダーとして，図 25 (A)，(B) に示すミクロフィブリルの中，さらにミクロフィブリルやラメラ間に存在する水分吸着層を通して生じるイオンの移動 (migration) などを併せて考慮しなければならず，このことは 4. の考察で得られた結果からも明らかである．このようなことから，膨潤・乾縮と密接に関係する細胞壁中の構造，すなわち吸湿に伴って生じ脱湿によって閉じる細胞壁中の微細空げきの構造をも含めて，吸着された水分の存在する内部表面が低い周波数領域での木材の分極，ひいては電気伝導に対して重要な影響を及ぼす因子であることを推論できるであろう．

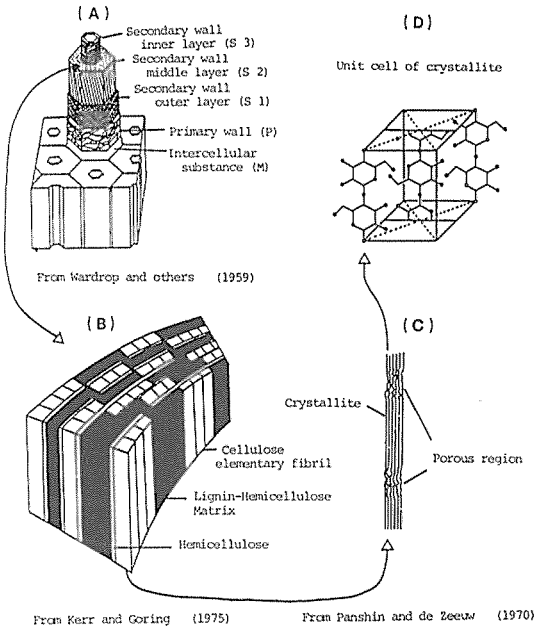

Fig. 25 A schematic diagram of the structure of a coniferous wood.
図 25 針葉樹材を構成する構造単位の模式図

5.3.　電気伝導の異方性への含水率の影響

電場方向を軸方向と接線方向とにとって，直流電気伝導率への含水率の影響を求め，その結果を図 26 に示す．軸方向の電気伝導率 σ_L および接線方向の電気伝導率 σ_T と含水率M との関係は，図 26 (a)，(b) から含水率約 8%を境にして曲線の傾きに差を生じ，実験式の形が異なることは明らかである．そこで，含水率 8%を境にしてその上下の含水率の範囲で，次の実験式を得た．すなわち，

含水率 8%以上：

$$\log \sigma_L = 11.1 \log M - 21.0 \tag{7}$$

$$\log \sigma_T = 9.93 \log M - 20.1 \tag{8}$$

含水率 8%以下：

$$\log \sigma_L = 0.593M - 15.7 \tag{9}$$

$$\log \sigma_T = 0.694M - 16.8 \tag{10}$$

上の式から，直流電気伝導率の軸方向と接線方向での異方度 σ_L/σ_T は，次のような式で表すことができる．

含水率 8%以上：

$$\sigma_L/\sigma_T = 0.126M^{1.17} \tag{11}$$

含水率 8%以下：

$$\sigma_L/\sigma_T = 10^{-0.101M+1.1} \tag{12}$$

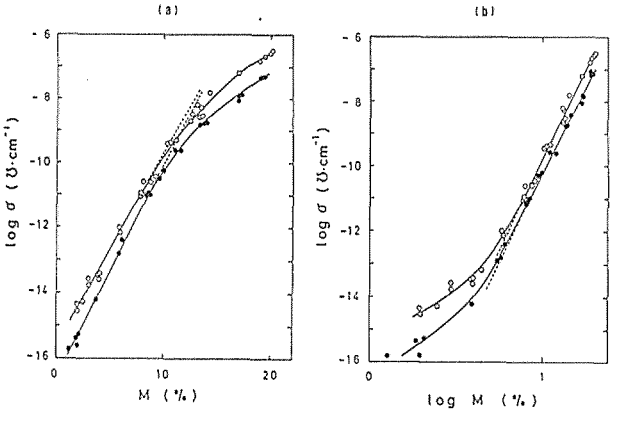

Fig. 26　Relationship between electric conductivity and moisture content for longitudinal (○) and tangential (●) directions. Conductivity values are at a hundred seconds after application of d-c voltage ; (a) $\log \sigma - \log M$ relationship, (b) $\log \sigma - M$ relationship.

図 26　直流電気伝導率と含水率との関係

(a) $\log \sigma$ と $\log M$ との関係　　(b) $\log \sigma$ と M との関係

注：σ は電圧印加後 100 秒値，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

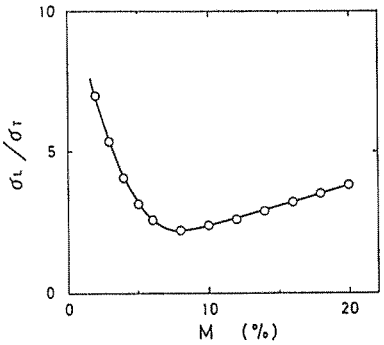

Fig. 27 Effect of moisture content on the electric-conductivity anisotropy.
図 27 直流電気伝導率の軸方向と接線方向での異方度 (σ_L/σ_T) への含水率の影響

式 (11) と式 (12) における σ_L/σ_T と含水率Mとの関係を図示して，図 27 が得られた．なお，ここで使っている直流電気伝導率 σ は電圧印加 100 秒後の σ 値であり，図 21 で示すと 10^{-3} Hz のときの電気伝導率に相当し，全含水率範囲を通じてほぼ安定した電気伝導現象を認める周波数領域の値である．すでに，図 22 で，高い周波数の範囲での σ_L/σ_T の値は含水率が異なってもほぼ等しく大差がないのに対して，周波数が低い場合には電気伝導率の異方度は含水率によって著しい影響を受けることが明らかになっている．これは，図 27 に示す結果からも明らかであり，全乾状態から含水率が高くなるにつれて異方度は急激に減少して含水率 8%で極小値を示し，さらに，それを越えると含水率の上昇とともに異方度が大きくなる傾向を得た．

直流電気伝導率の異方性は，古くは比留間(1913)をはじめとして，多くの研究者によって報告されている。それらの結果の一部が STAMM(1964)によって要約され，含水率約 8%から約 20%の範囲で，繊維に直角方向と繊維に平行方向の電気伝導率の比は 1：2〜3 であるとし，加えて直流電気伝導率の異方度は含水率によって影響を受けないとされている。この研究によると，図 22 の高い周波数領域で含水率 8〜20%の範囲では，電気伝導率の異方度への含水率の影響はさほど著しくないと見ることもできる．しかし，すでに考察したように，周波数が低くなるに伴って電気伝導率の異方度 σ_L/σ_T への含水率の影響が大きくなり，さらに図 27 に示すように含水率約 8%を越えて 20%に至る範囲で異方度は増加している．一方，約 8%以下の含水率範囲では，含水率の低下に伴って異方度が大きくなった．結局，含水率約 8%を境に含水率が高くても低くても，異方度が大きくなることを明らかにした．ところで，図 26 (a) から明らかなように，含水率約 8%以下では約 8%以上の含水率範囲におけるよりも曲線のこう配が大きく，電気伝導率への含水率の影響が大きいといえる．つまり，含水率約 8%以下の電気伝導率に与える含水率の著しい影響は，図 27 の含水率約 8%以下で認める大きな異方度と関係していることに留意しなければならないであろう．

HART (1964) は電気伝導率の異方性の仕組みを，針葉樹材の巨視的構造の特徴に基づき，仮道管配列の様式が異方性に与える影響として理論的に考察した．すなわち，細胞壁を軸方向の抵抗値が等しい等方性と考え，細胞壁の配列を考慮した計算によって求められる軸方向と横方向の電気伝導率の比が基本的には 2：1 であるとした．さらに，その比は半

径方向と接線方向での細胞の整列の程度の相違，仮道管の横断面での細胞壁の占める割合，生長輪や放射組織の存在などによって，いくらかは影響を受けると考えた．この HARTが求めた計算値は，これまで実験的に多く得られている電気伝導率の異方度の値とも一致している．しかし前述したように，電気伝導率の異方度は含水率によって影響を受けるので，細胞壁の巨視的な配列だけで木材の電気伝導の異方性を説明しつくすことはできない。すなわち，細胞壁の電気抵抗そのものが異方性をもち，しかもこの細胞壁の異方性が含水率とかかわりを持つことを考慮しなければならない．したがって，電気伝導の異方性への含水率の影響は，含水率の変化に伴って生じる電気伝導のための通路の変化に関係し，ひいては含水率の変化に伴って生じる細胞壁の膨潤・乾縮，つまり，細胞壁中の微細空げき構造の変化とも関係しあうことが推論できるであろう．

5.4．要　　約

含水率が高いときの電気伝導の異方性は印加電圧に依存し，電圧が高いとき，つまり電気伝導の量が大きいときに異方性は顕著となる．

電気伝導の異方性への周波数の影響は含水率 20％では顕著ではないものの，8％と 14％では周波数による著しい影響を認めるとともに，この周波数の影響は低周波数領域で認められる誘電分散と関係しあっていることが明らかとなった．

低い周波数の範囲では，電気伝導の異方性は含水率によって著しく影響を受け，さらに含水率約 8％を境にして低含水率域と高含水率域とでは，含水率による影響の現れ方が異なっている．この異方性への含水率の影響は，木材細胞壁中の構造，とくに膨潤・乾縮に伴って生じる空げき構造の変化と関係することを推論した．

6．水分吸着と細胞壁構造との相互作用と電気伝導との関係

電場条件の諸因子と木材の電気伝導との関係は含水率によって左右されるので，これらについて 3.，4.，および 5．で考察を与えた．すなわち，含水率の範囲によってその挙動に相違を生じることを明らかにし，木材への水分吸着力のこう配と吸湿によって細胞壁中に生じる微細空げきの構造とが，密接に関与することなどを指摘した．

この章では，3.，4.，および 5．の考察に基づき，電気伝導の電場依存性と電気伝導のメカニズムとの関係を明らかにし，併せて木材への水分吸着の機構と電気伝導との関係について考察を展開している．

6.1．電気伝導のメカニズムと含水率

直流電気伝導率は含水率の増加とともに一様に増加するのではなく，含水率の範囲によって増加の程度の異なることが報告（LIN, 1967）（STAMM, 1964）されており，このことを図 26 の実験結果にも示している．この現象の原因は，荷電担体として働く吸着イオンと木材実質との間の吸着力，および電気伝導のための通路でもある細胞壁中の構造の変化が，全乾状態から約 20％の含水率の範囲で一様に生じるのではないことを 4．および 5．の検討から推論できるであろう．

したがって，全乾から 20％に至る含水率範囲で，木材の直流電気伝導をその定量的な問

題も含めて一つのメカニズムで説明することは難しいであろう．他方，電解質を含んだ高分子材料に関連して提唱されている HEARLE の理論を幾人かの研究者達が木材へ適用することを試み（BROWN *et al.*, 1963）（LIN, 1965）（VENKATESWARAN, 1971），含水率約 20%以下の範囲であれば，木材の電気伝導をおおよそ説明できるとしてきた．

さて，HEARLE の理論によれば，木材の電気伝導率 σ は次のように表すことができる．

$$\sigma = N\mu\alpha e \tag{13}$$

ここで，N は単位体積当りの荷電担体の数（number of charge carrier），μ はイオンの移動度（mobility），α は解離度（degree of dissociation），e は電荷（charge）である．$N\times\alpha$ は伝導イオン（conducting ions）の数を意味し，水分子と吸着水分層に溶解したイオンの解離度によって決定される．また，μ で表わされる移動度は吸着イオンと吸着点との間の吸着力，およびイオンの移動のための通路の構造に影響を受けると考えられる．

ところで，電気伝導の通路となる細胞壁中の微細空げき内の吸着水分は，すべてが一様な性質を持つわけでなく，細胞壁実質への水分子の吸着力は吸着点からの距離で異なっている．そのために，微細空げき中の吸着イオン層のコンダクタンスはその値にこう配を生じており，ひいては伝導イオンの数を表わす $N\times\alpha$ および移動度 μ は，それぞれの吸着層で異なっていると考えなければならない．したがって，電気伝導率 σ をつぎのように表すことができる．

$$\sigma \propto N_1\alpha_1\mu_1 + N_2\alpha_2\mu_2 + \cdots + N_n\alpha_n\mu_n \tag{14}$$

ここで，1，2，…，n は，吸着点からの距離の指標，すなわち吸着面から数えた吸着層の番号を示すとすれば，$\alpha_1<\alpha_2<\cdots<\alpha_n$，また $\mu_1<\mu_2<\cdots<\mu_n$ である．ところで，図 28 はそれぞれの吸着層に存在するイオンのエネルギーレベルを模式的に示している．すなわち，

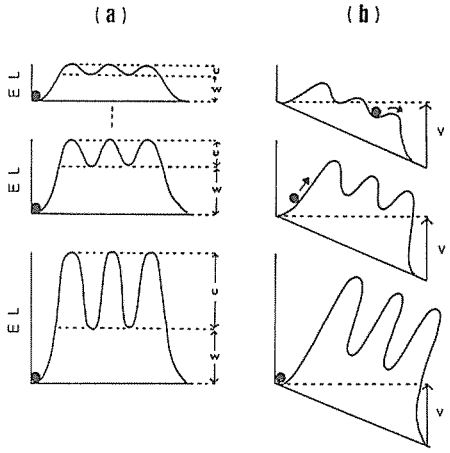

Fig. 28 A shcematic diagram for energy level of a adsorbed ion in wood:
(a) before voltage application, (b) after voltage application.
Note: EL and V in the scheme show energy level and voltage, respectively.

図 28 吸着イオンのエネルギーレベルこう配の模式図
(a) 電圧印加前 (b) 電圧印加後
注：EL はエネルギーレベル，V は電圧を表す．

最低のポテンシャルエネルギーの位置，つまりポテンシャルの安定な位置に吸着された吸着イオンを脱着および解離を起こさせさらに移動させるためには，脱着と解離とを起こさせるためのエネルギー W (dissociation energy) と周囲のポテンシャル障壁を越えさせるためのエネルギー U (energy for mobility) が必要である．また，図 28 (a) に示されているように，吸着面からの距離が大きくなるほど，つまり数字で示された吸着層の番号が大きくなるほど，W，U ともに減少すると考えられる．すなわち，含水率が高くなることは吸着点からの距離の大きな吸着層が増えることと等価であり，含水率が高くなるにつれて解離度 α が増加し，かつ移動度 μ も増加する．また，吸着層が高くなることはイオンの移動のための通路の拡大を意味し，このことによっても μ はますます増加するに違いない．したがって，含水率が高くなるほどWとUが小さくなる (Lin, 1965) ことを意味している．

電圧の上昇に伴って σ が大きくなることを示した 4.2. の結果は，電圧の上昇に伴って吸着点からの吸着イオンの脱着の度合が増し，その結果解離度 α も増し，ひいては伝導イオンの数 $N\times\alpha$ が増えることを意味している．すなわち，図 28 (b) に示すように，吸着点からの距離が大きい場所に吸着されている吸着イオン層では，イオンのWとUが小さいために小さな電圧の下でも脱着さらには解離を起こし，容易に伝導イオンとなることができる．一方，吸着点からの距離が小さい場所に存在するイオン層では，伝導イオンとなるには大きな電圧の作用を必要とする．したがって，単分子層の吸着水のみが存在するとみなすことができる約 5%以下の含水率範囲では，σ への電圧の影響が認められないことから，電圧の上昇に伴って生じる吸着イオンの脱着による伝導イオンの増加を期待できない．他方，含水率が高くなるにつれて吸着層内に吸着力のこう配が生じるとともに，電圧の作用

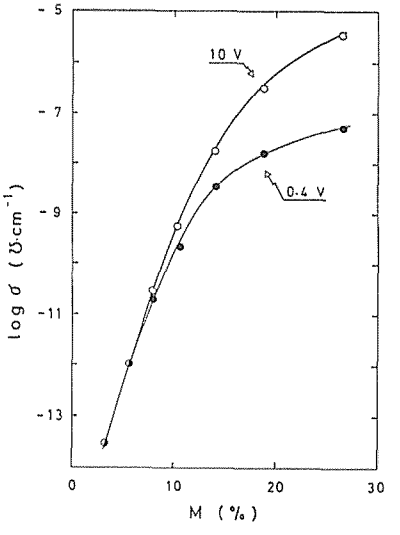

Fig. 29　Effect of moisture content on the electric conductivity. Applied d-c voltage were point four and ten volts: the dark circles (●) for point four volts, and the clear circles (○) for ten volts.

図 29　直流電気伝導率と含水率との関係に及ぼす印加電圧の影響

注：σ は電圧印加後 100 秒値，白丸 (○) は 10 V，黒丸 (●) は 0.4 V 印加時の測定値を示す．

の下で脱着されるイオンの層が増加することによって伝導イオンの数 $N\times\alpha$ が増し，併せて電気伝導の通路の拡大によって伝導イオンの μ が増加し，σ はますます大きくなることができる．このようなことから，実験的に電圧をかえて σ と含水率との関係を求めると，図 29 に示すように約 5%以下の低い含水率の範囲では，σ のプロットが 0.4 V と 10 V とを与えたとき同じ曲線上にある．また，図 29 で含水率が高くなるほど電圧の上昇が電気伝導率 σ に寄与する割合が大きく，含水率が高くなるにつれて 10 V の曲線と 0.4 V の曲線の隔たりが大きくなっている．このことは，吸着イオンを吸着点から脱着させ，さらに解離を起こさせるためのエネルギーWが含水率の増加に伴って急激に減少することを意味し，ひいては σ への解離度の大きな寄与を示している．ちなみに，イオンの移動を起こさせることに効果を持つエネルギーUへの含水率の影響に比べて，解離を起こさせるためのエネルギーWへの影響が著しく，またUとWの差は含水率が高くなるほど小さくなる（Lin, 1965）とされている．

6.2. 電気伝導のメカニズムと電気的挙動とのかかわり

電気伝導率 σ への印加電圧と電圧印加後の経過時間の影響が，木材の吸湿に基づいた導電性のメカニズムと密接に関係することを，これまでの考察で明らかにした．ところで，導電性の指標である σ は，含水率，温度，および電場の方向によって影響を受けることがよく知られており，さらにこの研究の結果からも確認できた．前項で考察したように，含水率の上昇に伴って起こる σ の増加は，主に水分量の増加によってもたらされる荷電担体の数Nの増加に加えて，解離度 α と移動度 μ の増加を起こすことによっていると推定される．温度の上昇に伴って起こる σ の増加は，主に温度の上昇に伴う解離度 α と移動度 μ の増加でもたらされると考えられ，吸着水分量および電気伝導の通路の拡大と直接的には無関係である．さらに，電場方向を変えて生じる σ の相違は移動度 μ の相違によってもたらされ，これは主に電気伝導の通路の構造が違うことによると考えられる．すなわち，含水率，温度，および電場方向が異なる条件の下にあるとき，σ の値が同じであっても，式(13)における N，α，μ が σ へ寄与する割合は，条件が異なれば相違を生じると考えなければならない．ところで，1. と 2.，さらには前項で，電気伝導率が電圧の上昇に伴って増加する現象は，吸着点から吸着イオンが脱着され，ひいては解離度 α が増加することに原因が求められた．また，電圧印加後の時間経過に伴って生じる σ の減少には，吸着イオンの移動度が関与していることを推論した．このようなことから，電気伝導率への印加電圧および経過時間の影響と，含水率，温度，および電場方向が異なる条件で求められた直流もれ電気伝導率 σ_{dc} との関係を検討することによって，低い周波数領域の電気的挙動と電気伝導のメカニズムとのかかわりを考察する．

さて，電気伝導率への電圧の影響を詳しく検討するために，直流電圧 10 V を与えたときの電気伝導率 σ_{10} と 1 V を与えたときの電気伝導率 σ_1 との差の対数 $\log(\sigma_{10}-\sigma_1)$ に対する $\log\sigma_{dc}$ の関係を図 30 に示している．また，直流電圧印加のあと σ への電圧の影響が認められる始める時間 t_v を求め，その対数 $\log t_v$ と $\log\sigma_{dc}$ との関係が図 31 に示されている．図 30 と図 31 のいずれでも，極めて高い相関関係が示されており，図 30 は電圧によって σ が影響を受けやすいのは σ_{dc} が高い場合であることを示し，さらに図 31 は σ_{dc} が高ければ σ への電圧の影響が電圧印加後短時間で現れ始めることを示している．このことは，印加電

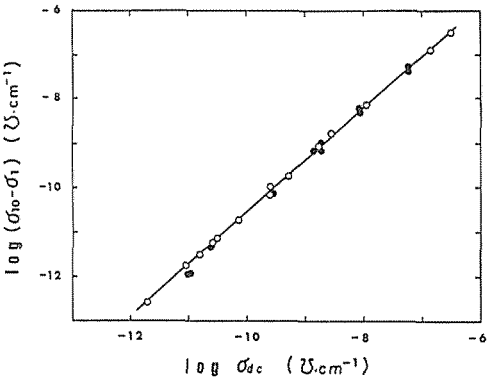

Fig. 30　Relationship between d-c leakage conductivity at ten volts and $(\sigma_{10}-\sigma_1)$ which is the conductivity increase due to the voltage increasing from one to ten volts. σ_{10} and σ_1 were measured at 100 seconds after having the d-c voltage applied. The dark circles (●) are for tangential, and the clear circles (○) for longitudinal direction of the field.

図 30　$(\sigma_{10}-\sigma_1)$ と直流もれ電気伝導率 σ_{dc} との関係

注：$(\sigma_{10}-\sigma_1)$ は，印加電圧が 1 V から 10 V まで上昇するときの σ の増加量，σ は電圧印加後 100 秒値，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

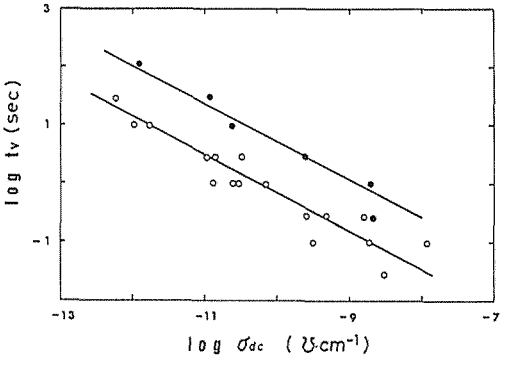

Fig. 31　Relationship between d-c leakage conductivity at ten volts and t_v at which the voltage effect on conductivity begins to occur after having the voltage applied. The dark circles (●) are for tangential, and the clear circles (○) for longitudinal direction.

図 31　t_v と直流もれ電気伝導率 σ_{dc} との関係

注：t_v は電圧印加後，電気伝導率への電圧の影響が認められ始める時間，白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

圧が木材の電気伝導のメカニズムと密接に関係していることを示唆するものである．すなわち，直流域での電気伝導のメカニズムが吸着イオンの脱着および解離とその移動に基づいており，さらにこの吸着イオンの吸着点からの脱着の度合は電圧に依存している．吸着イオンの脱着のしやすさには，吸着イオンと木材実質との間や吸着イオン相互間の結合力が支配的な影響を持っている．そこで，脱着および解離は含水率と温度によって大きな影響を受けるはずである．また，4.2．でも考察したように，吸着イオンが関与した可逆的な分極が "break down" して，短時間で伝導イオンを作り出すことができるとするならば "break down" の速さは印加電圧の大きさに依存すると考えられ，σ への電圧の影響が認

められ始める電圧印加後の時間 t_v を，分極が "break down" する時間，ひいては分極に可逆性が失われる時間と考えて差し支えないであろう．したがって，t_v は電圧印加のあと吸着イオンが脱着するのに要する時間，ひいては脱着のしやすさを表す指標と考えることができる．一方，印加電圧を高くすることによって生じる σ の増加 $(\sigma_{10}-\sigma_1)$ は，脱着された吸着イオンの量と関係するものと理解してよいであろう．すなわち，$\log(\sigma_{10}-\sigma_1)$ と $\log \sigma_{dc}$ との間の関係には電場方向による相違がなく，一本の直線上にプロットされている．一方，$\log t_v$ と $\log \sigma_{dc}$ との関係は電場の方向に依存し，σ_{dc} の値が同じであるとき，接線方向のほうが軸方向に比べて吸着イオンの脱着が難しいことを示していると推定される．

他方，電圧印加後の時間経過に伴って生じる σ の減少が認められなくなる時間 t_τ と σ_{dc} との関係を，図 32 に示している．電場の方向を軸方向と接線方向の二つの方向に取ったとき，二つの曲線の傾向の間に著しい相違を認めることができる．すなわち，σ_{dc} が 10^{-13} ～$10^{-9}(\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1})$ の範囲で，軸方向では σ_{dc} の増加とともに t_τ が著しく減少するが，接線方向では著しい t_τ の減少を認めることができない．

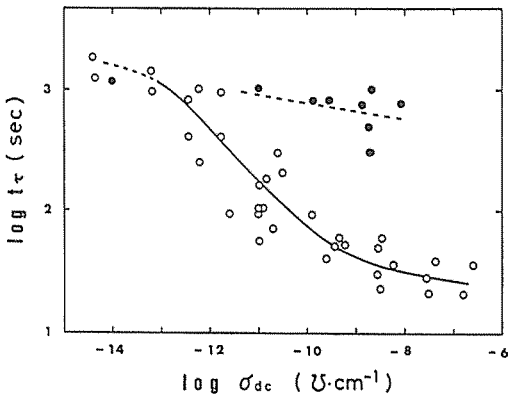

Fig. 32 Relationship between d-c leakage conductivity at ten volts and t_τ at which the current has attained to a constant value after having the voltage applied. The dark circles (●) are for tangential, and the clear circles (○) for longitudinal direction.

図 32 t_τ と直流もれ電気伝導率 σ_{dc} との関係

注：白丸（○）は軸方向，黒丸（●）は接線方向での測定値を示す．

温度 20°C の下で含水率 5%以上の σ_{dc} の範囲，すなわち図 32 で σ_{dc} が約 $10^{-13}(\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1})$ よりも高い範囲では，4. での吸収電流と t_τ についての考察結果から，次のように考えられる．イオンが細胞壁内の微細空げき中を移動して，吸着水分層と細胞壁実質との間や吸着水分層と電極との間の界面にとどまり，その結果局部的にイオン濃度の変化がもたらされることを推論できる．この機構によって生じる吸収電流の緩和時間には，イオンの移動度とイオンの移動距離が密接に関与していると考えられる．したがって，t_τ に関係してイオンの移動度の重要性をすでに指摘したが，さらにイオンの移動方向と移動距離，すなわち細胞壁の微細空げきの構造との関係についても考慮しなければならない．さて，軸方向に電場方向がとられるとき，含水率と温度が高くなることによってイオンの解離度と移動度とが大きくなり，加えて含水率が高くなれば細胞壁の膨潤がひき起され，その結果，細胞壁中に一時的に生じる微細空げきの数と大きさを増し，そこに新たな吸着イオン

層を生じて，σ_{dc} の値はますます大きくなり，同時に t_τ の値は小さくなると考えられる．一方，接線方向に電場方向がとられるとき，イオンの移動方向が細胞壁中のフィブリルの配向に対してほぼ直角の方向，あるいは細胞壁を構成するラメラ面に直交する方向であるため，含水率の増加に伴う微細空隙の数や大きさの増加が，イオンの移動度や移動距離の変化にはほとんど影響を与えず，含水率と温度が上昇して σ_{dc} が大きくなったとしても，t_τ の値にほとんど影響しないであろう．なお，図 32 で σ_{dc} が $10^{-13}(\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1})$ よりも小さい範囲では，σ_{dc} の変化や電場方向の違いのいずれにも t_τ は影響を受けず，t_τ の値はほぼ一定と見てよいであろう．すなわち，分極の形成に対する導電性の寄与を認めることができず，吸着イオンの脱着やその移動が t_τ とは無関係であることを示唆している．

ところで，軸方向に電場方向をとったときの t_τ は，$\log \sigma_{dc}$ の増加に伴って減少する傾向が図 32 で認められるが，$\log \sigma_{dc}$ が約 $-9(\Omega^{-1}\mathrm{cm}^{-1})$，すなわち温度 20°C で含水率約 15%での σ に相当する点を境にして曲線の傾きが変化することが明らかである．この結果は，4. 2. の図 14 で行った考察の結果と同じものであり，温度が変化したとしても t_τ と含水率との間の関係に影響を与えないことを示している．すなわち，ここでとり上げた範囲の温度変化では，温度の変化が細胞壁中の微細空げきの構造を変化させることには無関係であることを示すものである．したがって，温度が上昇することによってイオンの移動度は大きくなるが，この移動度の変化が t_τ に与える影響よりも，含水率の変化が細胞壁構造の変化をもたらすことで t_τ に与える影響のほうが大きいことを意味している．

6.3. 水分吸着による細胞壁の構造変化が電気伝導に与える影響

木材細胞壁を構成する主要成分の一つである天然セルロースの空げき構造について，連続ミセル説 (KOLLMANN, 1951) に基づく“連続空げき構造”でミクロフィブリル間げきが組み立てられているとする考え方，また細胞壁のマルティラメラ構造説 (EMERTON, 1955) に基づく“マルティラメラ空げき構造”であるとする考え方がある．STONE *et al.* (1965)，および SCALLAN (1974) は，マルティラメラ空げき構造の考え方を発展させて，膨潤した細胞壁で“honeycomb”構造を明らかにしている．KERR *et al.* (1975) は細胞壁中のセルロース，ヘミセルロース，およびリグニンの分布に考察を与えて，SCALLAN (1974) の細胞壁中のセルロースフィブリルによって構成されている“honeycomb”構造の考え方を支持している．これらの推論は，主に単離したセルロースや脱リグニン処理を受けた細胞壁に関する実験に基づくものであるが，細胞壁中への水分吸着によって生じる微細空げきが，フィブリル，ミクロフィブリル，さらにはラメラ間の間げきであり，かつ，これらの間げきが細胞壁中を網目状に，すなわち軸方向と横方向に 3 次元的に連絡を保っていることを示唆している．2 次壁中層 (S 2 層) が細胞壁の物理的性質を左右する主役であることはすでに多くの研究者によって支持されているが，S 2 層のミクロフィブリルはほぼ軸方向に配向しており，さらに細胞壁がラメラの層構造から成り立っていることから，水分吸着に伴う細胞壁の膨潤は主に軸方向よりも横方向に対して生じる．したがって，木材中の主要な電気伝導路と考えられる吸着水を保持した微細空げきがミクロフィブリルやラメラに沿っていることを考え併せて，細胞壁中の電気伝導のための通路は横方向よりも軸方向のほうがより緊密な広がりを持つと考えられる．なお，SAIKI (1973) は細胞壁中への銀粒子の沈着を電子顕微鏡で観察し，銀粒子の沈着がミクロフィブリルに平行方向に広がっ

ていることを報告した．また，沢辺（1979）は窒素吸着法による細胞壁中の空げきの構造を円筒モデルで表わすことを提唱した．

含水率の変化が木材細胞壁中の空げき構造にもたらす変化については，なお不明の部分が多く，細胞壁の層構造や細胞壁中の空げきの構造を詳細に論じることはできない．しかし，SCALLAN (1974) は脱リグニン処理したパルプ繊維の観察から，含水率が変化することに伴って生じる細胞壁のフィブリルの層構造の変化をモデル化して論議している．このモデルによれば，図 33 の矢印が進むにつれて，つまり全乾状態から含水率が上昇するに伴って，フィブリルの層構造は（A）から（D）へと変化し，細胞壁中の内部表面積が増加していくことが明らかである．しかし，空げきの径や形状に与える含水率の影響が，広い含水率の範囲にわたって一律であるとは考えにくい．すなわち，KEYLWERTH（1962）は，木材の膨潤・乾縮について考察し，樹種によって異なるとはするものの，約 3〜10％の範囲よりも低い含水率領域では，水分子と木材実質との間の強い結合力によって吸着水の占有体積が小さくなり含水率変化 1％あたりの膨潤・乾縮率が，高含水率の領域におけるよりも小さいことを指摘している．また，全乾木材が吸湿する初期段階では，吸湿したにもかかわらず収縮を起こす現象，すなわち "negative swelling" が認められ，この現象は，吸着された水分子が単分子層を形成することと関係を持つとされている（CHUDINA, 1966）．つまり，単分子層の吸着だけが生じると考えられる低含水率の範囲では，それ以上の含水率の範囲と比べて，含水率の変化に伴って起こる空げきの容積変化が著しく小さいか，もしくは無視できると考えてよいであろう．このように，高含水率領域と低含水率領域とでは，含水率が細胞壁の構造変化に与える影響が異なり，このことは図 26 で確かめられる電気伝導率への含水率の影響，ひいては図 27 での電気伝導率の異方度への含水率の影響が，含水率約 8％を境にして異なっていることの原因として考えてもよいであろう．

さて，軸方向と接線方向での電気伝導率の異方度への含水率の影響は，含水率約 8％を境にして含水率の増加が低含水率側では異方度を小さくする働きを持ち，他方，高含水率側では異方度を大きくする働きを持つことをすでに述べた．5.3. で明らかにしたように，含

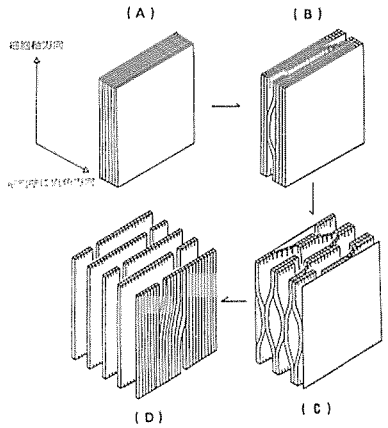

Fig. 33 The pattern of internal fibrillation of the cell wall with progressive swelling follows SCALLAN's scheme (1974).

図 33 膨潤に伴う細胞壁中のラメラ構造の変化を示す模式図
（SCALLAN, 1974 による）

水率1%の増加に伴って生じる電気伝導率の上昇率は，軸方向と接線方向とを比べると，含水率約8%以下では接線方向，約8%以上では軸方向で，それぞれ含水率の影響が大きくなっている．ところで，図33に示されているように，含水率が増加するに伴って細胞壁を構成するラメラ構造が空げき構造を変化させると，空げき間の連絡はラメラに直角方向よりとラメラに平行方向に著しく増加し，その結果，軸方向のイオンの移動のしやすさのほうが直角方向よりも相対的に大きくなると考えられる．しかし，図33（B）段階のような低含水率領域では，吸着される水分子が吸着表面を広げるが，広げられれた空げき間に新しい立体的な連絡が生じるまでに至らない．このような状態では，吸着水分と木材実質との間の強い吸着力はもちろんのこと，空げき間の立体的な連絡が十分でないことと相まって，イオンの移動が極めて起こりにくい．したがって，高含水率の範囲におけるように連続した吸着水分層を，イオンによって行なわれる連続した電荷の伝達ができなくなり，その結果，図33（B）に相当するような低い含水率領域では，細胞壁中の微細空げきの連絡を電気伝導の異方性に影響を与える主要因子として考慮しなくてもよいであろう．空げきの連絡にかわって，木材実質表面上の電気伝導に活性な基や，活性な基に吸着された水分子の並び方の軸方向と横方向とでの相違に基づいた微細な異方構造が，電気伝導の異方性を支配するようになると推定される．つまり，含水率の低下による荷電担体の減少に伴って，細胞軸に対して直交方向への電荷の伝達は極めて難しくなるが，一方，軸方向では電荷の伝達の方向がおおよそ活性基のならぶ方向に沿っているために，直交方向におけるほど含水率の低下による影響は受けないであろう．

6.4．要　　約

木材への水分吸着機構については，水分子と木材実質との間の吸着力のこう配，および吸着水分子層が存在する細胞壁中の微細空げきの構造とを考慮する必要があり，非常に複雑である．したがって，水分吸着に対して敏感な応答を示す木材の電気伝導のメカニズムを電解質の電気伝導の理論によっておおよそ定性的には説明のできるものの，さらに吸着水分層内の吸着力のこう配，および電気伝導のための通路の機構を支配する細胞壁構造との関連が考察されなければならない．

また一般に，木材の電気伝導率はイオンの解離度と移動度に関係づけることができるが，さらに解離度には吸着点からの吸着イオンの脱着が関与していることを考慮に入れなければならない．吸湿した木材に電場を作用させたとき，電圧の大きさによって電気伝導率が受ける影響は解離度と，そして電圧印加後の時間経過による影響は移動度と関係づけられることを推定した．さらに，木材への水分吸着の機構は，水分子と木材実質との間に存在する吸着力が解離度と移動度とに影響を与え，一方，吸湿による細胞壁中の空げき構造は移動度に支配的な影響を与えることで，木材の電気伝導のメカニズムと密接に関係づけられることをここでは推論した．

水分吸着に伴って生じる細胞壁の膨潤は，電気伝導のための通路を作り出してイオンの移動度を高める．しかし，イオンの移動は細胞壁の層構造によって支配されているために，含水率によってその移動できる距離が異なると考えなければならない．したがって，電気伝導の異方性への含水率の影響を考察することによって，木材の電気伝導と細胞壁構造とのかかわりが求められよう．

7. 結　　論

木材が吸湿性かつ多孔性材料であるために，木材の性質・挙動は含水率や空げきの構造によって大きな影響を受ける．他方，木材はいろいろなオーダーの組織・構造から成り立っているため，その性質・挙動と組織・構造との関係を一義的に論じることができない．ところで，木材の吸湿性，多孔性，および組織・構造は，木材の吸・脱湿に伴う膨潤・乾縮を通じて相互に深いかかわりを持っている．すなわち，木材細胞壁中の微細空げきは主として吸湿によって生じ，脱湿によって閉じるところのいわゆる一時的な空げき（transient capillaries）であり，その空げき構造は細胞壁のミクロフィブリルやラメラ構造による壁の層構造と関係する．このようなことから，木材細胞壁の膨潤・乾縮と物理的性質・挙動とのかかわりを考察するためにこの研究を行った．

木材に電気的刺激を与えたときの応答の仕組みは，木材が吸湿性材料であり，かつ複雑な組織・構造で構成されるために，応答が刺激の大きさや刺激を与える方向によって受ける影響を考慮しなければならない．とくに，木材細胞壁への水分吸着とのかかわりを考慮するとき，低い周波数での応答のしくみが重要であると推論でき，電気的刺激に対する応答として捉えやすい電気伝導をとりあげた．

ところで，細胞壁の膨潤機構の説明には，木材実質と吸着された水分子との相互作用，すなわち木材実質が水分子を吸着し，一方で吸着された水分子が細胞壁中のフィブリルやラメラ間を押し拡げる作用，を考えねばならない．そこで，木材と水分との相互作用と電気伝導の電場依存性とを関連づけるための考察を進めた．

さて，3．では電気伝導率の周波数依存性についてその概要を明らかにし，4．では電圧が電気伝導に与える影響について詳しい考察を行い，さらに5.で電気伝導の異方性と電場および含水率との関係について考察した．6.ではこれら電場依存性についての実験結果および考察を基にして，水分と細胞壁構造との相互作用，そして電気伝導のメカニズムとの密接な関係について考察を加えた．

このようにして得られた結論を要約すると，つぎの通りである．

1)　吸湿した木材の電気伝導率は，周波数，電圧，および電場方向によって影響を受け，またそれぞれの影響は，電場の下での吸着イオンの挙動を軸にして相互にかかわりを持つ．

2)　電気伝導率への周波数および電圧の影響は含水率によって著しい影響を受け，しかも約5%以下，約5～15%の範囲，および約15%以上の三つの含水率範囲で異なった挙動を認める．電圧印加後の吸着イオンの挙動はイオンと木材実質との間の吸着力に依存し，さらには細胞壁の構造に影響を受けると考えられる．そこで，この挙動は，含水率の範囲によって水分と木材実質との間の吸着力，および細胞壁中の微細空げきの構造に与える含水率の影響が異なることを示唆している．

3)　含水率5～8%以下の低含水率範囲では，吸着イオンの吸着点からの脱着および解離とその移動が，電気伝導に対してほとんどかかわりを持たない．一方，5～8%以上の含水率範囲では，電気伝導のメカニズムに吸着イオンの脱着が大きな影響を持つと推察され，さらにこの吸着イオンの脱着には印加電圧が関係している．

4)　木材の電気伝導への含水率の影響は水分量の変化による影響だけでなく，水分子と

細胞壁構造との相互的な作用に関連させて，解離度および移動度が含水率によって受ける影響を十分に考慮する必要がある．吸着イオンの吸着点からの脱着に依存する解離度が，水分子と木材実質との間の吸着力によって支配的な影響を受けるのに対して，移動度は細胞壁中の構造によっても大きな影響を受けると推察される．したがって，移動度がかかわりを持つと考えられる電気伝導の異方性および電圧印加後の時間依存性は，含水率との関係を通じて膨潤・乾縮による細胞壁中の微細空げきの構造変化と密接に関係する．

引　用　文　献

坊野喜彦，堤　壽一（1974）：木材の誘電的挙動への含水率の影響．九大演集報　**25**：51

BROWN, J. H. (1962): Some Factors Involved in the Mechanism of Electrical Conduction in Wood. Ph. D. Thesis, State Univ. New York, Coll. For. at Syracuse Univ., Syracuse , New York. [LIN, R. T. (1964): Review of the Dielectric Properties of Wood and Cellulose. *Forest Prod. J.* **17** (7): 54]

BROWN, J. H., DAVIDSON, R. W. and SKAAR, C. (1963): Mechanism of Electrical Conduction in Wood. *Forest Prod. J.*, **13**, 455

CHANMAMEDOV, K. M. (1973): Zum Problem der Untersuchung der electrischen Leitfahigkeit von Holz. *Holztechnologie* **14**: 47

CHUDINA, B. S. (1966): Svoistva Drev. Ee Zashch. Nov. Drev. Mater.: 30 [VENKATESWARAN, A. (1970): Sorption of Aqueous and Nonaqueous Media by Wood and Cellulose. *Chemical Review* **70**: 619]

CLARK, J. D. and WILLIAMS, J. W. (1933): The Electrical Conductivity of Commercial Dierctrics and its Variation with Temperature. *J. Phys. Chem.* **37**: 119

EMERTON, H. W. (1955): The Specific External Surface of Fibre - Some Theoretical Considerations. *Pulp Paper Mag. Can.* **56**: 65

HART, C. A. (1964): Theoretical Effect of Gross Anatomy upon Conductivity of Wood. *Forest Prod. J.* **14**: 25

HEARMON, R. F. S. and BURCHAM, J. N. (1954): The Dielectric Properties of Wood. Her Majesty's Stationery Office London Forest Prod. Res. Special Report No. 8: 1

比留間重次郎（1913）：木材の電気伝導試験．材試報告 No. **10**　61

伊藤清一（1960）：飽水木材の電圧—電流特性（第3報）加電後数 sec 間の特性．木材誌　**6**：118

KERR, A. J. and GORING D. A. I (1975): The Ultrastructural Arrangement of the Wood Cell Wall. *Cellulose Chem. Technol.* **9**: 563

KEYLWERTH, R. (1962): Untersuchungen überfreie und behinderte Quellung von Holz—Erste Mitteilung Freie Quellung. *Holz als Roh-und Werkstoff* **20**: 252

橘田紘洋（1977）：直流電界下における木材の電流特性（第2報）吸収電流法による誘電損率の決定．愛知教育大学研究報告　第 **26** 輯：p. 73

高分子学会編（1972）：高分子と水分．幸書房

高分子学会編（1963）：高分子工学講座　14　高分子材料試験法．地人書館：168

KOLLMANN, F. (1951): Technologie des Holzes und Holzwerkstoffe, Ernst Bd.: 119-121

LIN, R. T. (1965): A Study on the Electrical Conduction in Wood. *Forest Prod. J.* **15**: 506

LIN, R. T. (1967): Review of the Dielectrical Properties of Wood and Cellulose. *Forest Prod. J.*

17 (7): 54

MURPHY, E. J. and LOWRY, H. H. (1936): The Complex Nature of Dielectric Absorption and Dielectric Loss. *J. Phys. Chem.* **34**: 598

中島達二 (1964)：電気絶縁材料の超低周波誘電特性に関する研究．電気試験所研究報告 No. **647**

中戸莞二 (1971)：木材中の水．材料 **20**：1354

NANASSY, A. J. (1972): Dielectric Measurement of Moist Wood in a Sealed System. *Wood Science and Technology* **6**: 67

則元 京，山田 正，橋田紘洋，堤 壽一(1976)：木材の誘電分散地図及び緩和スペクトルの作成とその利用に関する研究．科学研究費報告書：129

NORIMOTO, M. (1975): Dielectric Properties of Wood. *Wood Reserch* No. **59**: 106

小倉武夫 (1943)：木材誘電率と水分の関係．日林誌 **25**：502

岡 小天，中田 修 (1960)：固体誘電体論．岩波

PANSHIN A. J. and DE ZEEUW, C. (1970): Textbook of Wood Technology. Vol. 1 3rd ed, McGraw-Hill, New York: 76

SAIKI, H. (1973): Electron Microscopy of Wood Cell Wall Impregnated with Aqueous Solution of Silver Nitrate. *Mokuzai Gakkaishi* **19**: 367

沢辺 攻 (1979)：木材細胞壁の空隙構造に関する研究．京都大学学位論文

SCALLAN, A. M. (1974): The Structure of the Cell Wall of Wood—A Consequence of Anisotropic Inter-Microfibrillar Bonding? *Wood Science* **6**: 266

SKAAR, C. (1948): The Dielectrical Properties of Wood at Several Radio Frequencies. New York State College of Forestry at Syracuse Univ., Tech. Pub. No. **69**: 1

SKAAR, C. (1964): Some Factors Involved in the Electrical Determination of Moisture Gradients in Wood. *Forest Prod. J.* **17**, 54

STAMM, A. J. (1929): The Fiber-Saturation Point of Wood as Obtained from Electrical Conductivity Measurements. U. S. FPL, Report No. **R859**: 1

STAMM, A. J. (1964): Wood and Cellulose Science. Ronald Press, New York.

STONE, J. E. and SCALLAN, A. M. (1965): A Study of Cell Wall Structure by Nitrogen Adsorption. *Pulp Paper Mag. Can.* **66**: 407

高橋 茂 (1958)：オーム社 誘電体損と絶縁抵抗の測定．

TAKECHI, O. and INOSE, O. (1953): Analysis on the Fundamental Properties of Electric Resistance of Wood II, On the electric Resitance of Wood in Relation to the Moisture Content and the Temperature. Sci. Rep. Matsuyama Agr. College No. **10**

TAKEDA, M. (1951): Studies on Dielectric Behavior of Bound Water in Timber in the High Frequency Region. *Bull. Chem. Soc. Jap.* **24**: 169

TRAPP, W. and PUNGS, L. (1956): Einfluß von Temperatur und Feuchte auf das dielektrische Verhalten von Naturholz in großen Frequenzbereich. *Holzforschung* **10**: 144

堤 壽一 (1967)：木材の誘電性，とくに誘電率・誘電損率の周波数・含水率および温度への依存性に関する研究．九大演報 **41**

上村 武 (1963)：電気的性質の異方性．材料 **12**：699

VENKATESWARAN, A. (1971): Application of Dissociation Hypothesis to Electrical Conduction in Wood. *Wood Science* **3**: 183

VERMAAS, H. F. (1975): Experimental Variables Affecting the Measurement of the DC Resistance of Wood. *Holzforschung* **29**: 140

WARDROP, A. B. and BLAND, D. E. (1959): The Process of Lignification in Woody Plants. Proc.

Forth Intl. Congr. of Biochem., Pergamon Press, New York.
渡辺治人 (1978)：木材理学総論. 農林出版

Summary

The transient micro-capillaries, as formed in the wood cell wall with moisture uptake by wood, make the conducting path of various liquids in the wood cell walls and are also associated with a mechanism of swelling/shrinkage of wood. Therefore an importance of studying the relationship of physical properties and behaviours with the cell-wall structure should be pointed out. The mechanism of electrical conduction in wood, of which dominant current path is formed by the water-molecule layers in the cell walls as revealed by a remarkable effect of moisture content on the electric conductivity, must be dependent on the cell wall structure as well as moisture content. The purpose of the paper is to study the mechanism of response under the influence of electric stimulus through the dependence of conduction on frequency, applied voltage, and field direction, with relation to moisture content by using sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don), and to discuss the dependence of the mechanism of electrical conduction on the mechanism of moisture adsorption includes the structural change of the cell walls with moisture content.

The decrease of conductivity with decreasing frequency was extended to lower frequency range as moisture content and temperature were decreased, in the range from high (1 MHz) down to very low frequency (0.0001 Hz). The frequency dependence of conductivity in lower frequency range was affected by the applied voltage in the moisture-content range above 5% at 20°C, and it was therefore thought to be due to the irreversible polarization owing to the ionic conduction. The voltage effect on conductivity and conductive behaviour were developed with moisture content increased over 5%, and that were assumed to be due to the difference in quantity and mobility of ions forced to break from the bonding sites with applied voltage. On the other hand the behaviour of polarization worked for the decreasing conductivity with frequency below the moisture content of 5% was reversible, and it was not affected by the applied voltage. Thus the electrical conduction in the wood cell walls where the bound water molecules make just the mono-layer of water molecule does not accompany the ionic breakage from the bonding sites following the dissociation and migration of ions. The electrical anisotropy expressed as the ratio of longitudinal to transverse conductivity tended to increase with decreasing frequency and increasing voltage at air-dried condition which were supposed to affect the ionic mobility and the number of conducting ions, respectively. The anisotropy was also affected by the moisture content ; it was increased with moisture content above 8% and was decreased below 8%. These anisotropic behaviours suggested to relate to the effect of intra-cell wall structure on mobility of conducting ions, or to the structural change of cell-wall structure with moisture content, especially of the inter-connecting structure of transient intra-cell wall capillaries.

The electrical behaviours and those mechanism resulting from the conditional change of the field with frequency, intensity, and direction were different among moisture-content ranges, and it was therefore confimed that not only the quantity but the nature of bound water surrounded by the cell walls should be considered as far as the electrical conduction in wood is discussed. Thus the mechanism of electrical conduction in wood should be closely related to the interdependence of moisture and cell wall structure with the change of moisture content, through the effect of the

attractive force induced among water molecules or between the water molecules and the wood substance on the degree of dissociation or the mobility of adsorbed ions, and through the dominant effect of intra-cell wall structure on the ionic mobility.