

木材高含水率の計器測定

齋藤 寿義⁽¹⁾Hisayoshi SAITO : Instrumental Measurement of High
Moisture Content of Wood

要 旨：木材の加工工程での水分管理に電気式含水率計が広く用いられており、繊維飽和点以下の含水率域に関する限り、その性能は著しく向上している。一方、乾燥工程、薬剤処理工程などにおいて繊維飽和点以上の高含水率の計器測定に対する要求は強いが、現在最も一般的な直流抵抗方式では、高含水率域において含水率変化に対する抵抗変化が少ない特性から、高含水率測定には基本的な問題がある。このため従来ほとんど用いられていなかった方法である熱伝導、電極電位計、および交流抵抗の三方式をとりあげ高含水率測定法としての適応性を検討した。測定器は熱伝導方式には非定常熱伝導率測定装置を、交流抵抗方式には LCR メーターを応用し、電極電位計方式は特注装置を使用した。供試樹種は針葉樹 3 種、広葉樹 11 種を選び、飽水状態に近い湿潤材をゆっくり乾燥させ、各段階の含水率に調整した。

実験結果では三方式とも繊維飽和点以上の高含水率域で含水率と計器指示値との間に直流抵抗方式以上に密接な関係が示された。熱伝導、交流抵抗の二方式では比重をパラメーターとする双曲線的関係であり、電極電位計方式では樹種グループによって異なる直線関係である。従って基本的には三方式とも高含水率の計器測定法として可能性をもつが、実用化にあたっては比重補正、樹種補正、応答時間など、いくつかの問題が残されている。

はじめに

木材含水率の計器測定は、直流電気抵抗式を主軸として高周波による誘電率方式など最近のエレクトロニクスの発展に伴って計器の性能はかなり向上してきている。小型軽量化した含水率計は使いやすく、木材工業の多くの分野で広く普及している。しかし、その含水率計も木材の電気的特性および生物材料である木材のもつ個体差などから精度的に一定の限界をもっており、高含水率域や精密な測定の場合には、やはり絶乾法に頼らざるを得ないのが現状であろう。優れた電気式木材含水率計も、あくまで繊維飽和点 (F. S. P.) 以下の含水率範囲でのことである。

一般に利用されている直流電気抵抗式についてみれば、木材の直流電気抵抗値は F. S. P. を境にして、それ以下と以上では含水率と抵抗との関係が大きく異なり、高含水率域では抵抗値の変化が含水率変化に対して非常に小さいこと⁽²⁾がよく知られている。したがって、かりに計器の単なる目益の拡張を考えたのでは信頼性に問題が残ることになる。一方、木材の加工あるいは利用面、例えば乾燥工程、防腐処理工程の含水率、住宅部材の含水率など高含水率域での迅速簡易な含水率把握の必要性は益々強まっている。

そのため本報告では、直流電気抵抗式以外の一、二の電気的方式と熱伝導方式の計器による高含水率測定の可能性について検討を行った。

この研究を行うにあたり、葉石猛夫物理研究室長にご助言、ご協力を頂いた。また、本稿をまとめるに際し、筒本卓造木材部長並びに須藤彰司材料科長に懇切なるご指導を頂きました。ここに深じんなる謝意を表します。

I 選定した計測法

木材の含水率はその物理的諸性質に少なからず影響することはよく知られている。このことから逆に木材のある物理的性質を測定して含水率を推定するのが含水率計の基本的発想である。Fig. 1 は水分量にかかわるいくつかの物理的諸量を図示したものであるが、実的に含水率計として応用し得る物理量としては、現在のところ前述の電気的諸量がある。大型の製造機械に附属した水分管理用としては、γ線、赤外線等の放射線を用いたものもあるが手軽に使用し得るものではない。

電気的諸量以外で方法的に含水率計に应用でき、定量的把握が可能なものとしては、音、雰囲気湿度(木材近傍の空気湿度)、熱伝導等が考えられるが実用に供せられている例はない。硬さ、強さ等の強度的パラメーターを用いることも考えられるが、手軽な機器では定量的判定に困難さがある。したがって、それらの諸物理量から含水率の全域あるいは高含水率域に適用し得る計測手段を選ぶとすれば、既に実験もしくは理論的に含水率との関係が求められている交流電気抵抗¹⁾と熱伝導量²⁾が期待できる。その他、

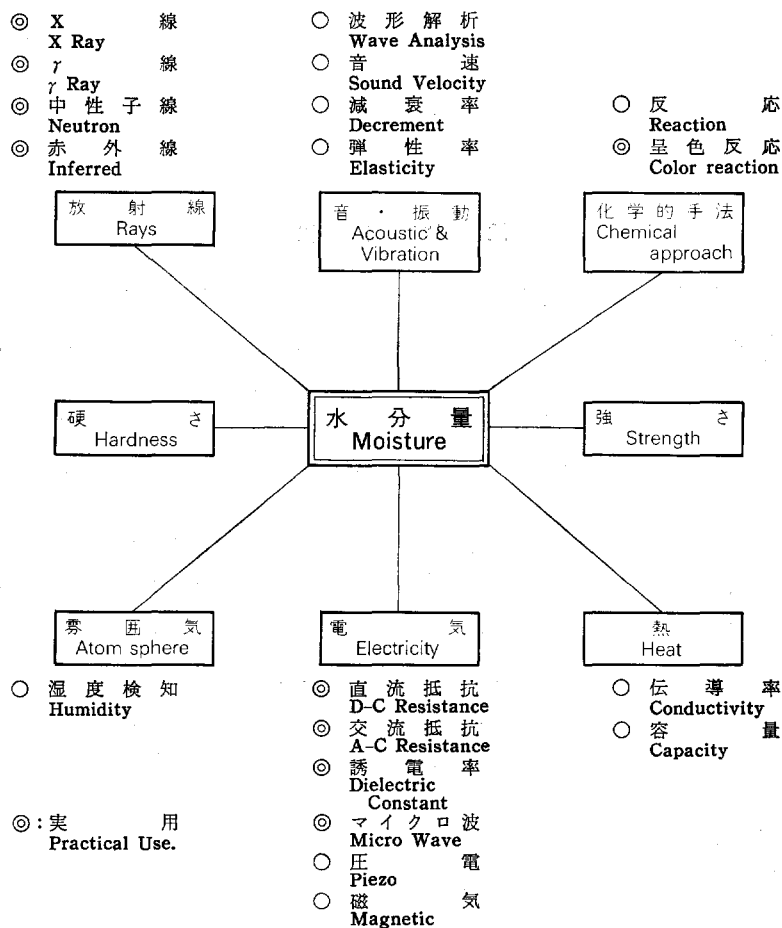


Fig. 1. 水分量の機器による検知手段
Scheme of possible approaches to the measurement of moisture contents of wood.

木材中の水分状態によってイオン集積が異なるために生じる電極電位現象を利用することも検討の対象になり得る。以下この三手段を用いた測定手法について述べる。

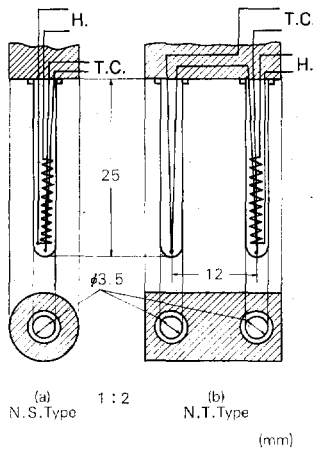
1. 熱伝導方式

この方式は木材の熱伝導率が含有水分量によって変化することを利用する方式である。含水率計に応用するには測定対象の大きさ、形状にかかわらず、測定時間が短く、装置が比較的簡易であることが必要である。それらの条件を考慮すると、プローブあるいは熱線を用いた非定常測定法に限られよう。プローブ法は ASTM の D 2326⁴⁾ で断熱材料の熱伝導率測定法として規定されており、それによる熱伝導率 λ は、プローブに加わる電力、測定時間、プローブ温度から次式によって求められる。

$$\lambda = AI^2 R \log (t_2/t_1) / (\theta_2 - \theta_1)$$

ここで、 A は常数、 $I^2 R$ は電力であり、 θ_1, θ_2 は時間 t_1, t_2 におけるプローブの温度である。

この方法で、電力および測定時間を一定にすると、 λ はプローブの温度差 $\Delta\theta = (\theta_2 - \theta_1)$ に反比例する関係で求められる。一方、木材の λ は含水率 u が大きくなるにつれて大きくなり、その変化率も大きくなる²⁾ので、プローブの温度差 $\Delta\theta$ は含水率 u の増加にともなって減少する関係が得られる。このことから $\Delta\theta$ を測定することによって u の推定ができることになる。その際、 λ と u の関係が比重をパラメーターにして対応しているため²⁾、 $\Delta\theta$ と u の関係も同様のことが考えられる。また、 $\Delta\theta$ は常数 A にかかわるプローブの構造や形状によって異なることも考えられるため、妥当な測定条件を実験的に求めることが必要になる。ここでは、熱伝導率を求めるのではないので、プローブあるいは熱線の直径、長さについては試験片との関係で都合のよい寸法を選んでいる。また、プローブの温度変化はそれに接した熱電対の起電力の変化として直接含水率と対応させることとした。



H : ヒーター
Heater
T. C. : 熱電対
Thermocouple
G : 保護板
Guard

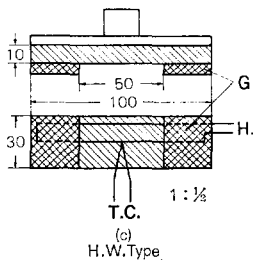
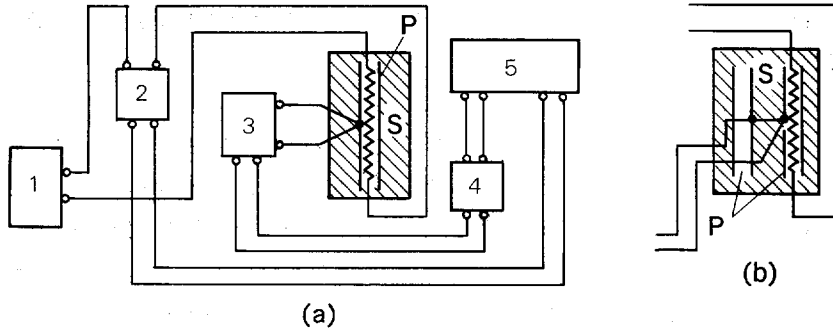


Fig. 2. 熱伝導方式の各プローブ
Probes used for measuring of thermal conduction for measurement of high moisture contents of wood.



S : 試験片 Sample, P : プローブ Probe

1. 電源 Source. 2. 時間掃引器 Time Sweeper. 3. O接点補償器 Junction Box.
4. 電圧増幅器 Voltage Amplifier. 5. XY レコーダー XY Recorder.

Fig. 3. 熱伝導方式のブロック図

Block diagram of the device by means of thermal conduction.

(1) 測定器の概要

Fig. 2 に使用したプローブの概要図を示す。図の (a) が単針型 (NS 型) で、厚さ 0.3mm, 直径 3.5 mm, 長さ 25mm の真鍮製パイプ中にコイル状のヒーターと熱電対が封じ込んである。(b) は比較用プローブを加えて複針型 (NT 型) としたものである。プローブは単針型と同様であり、二本のパイプ間隔は 12mm である。(c) が熱線式 (HW 型) プローブで、無機材を混入した耐熱性のウレタン発泡材を基板とし、それに熱線として線径 0.3mm のマンガン線を引き、線の中央に熱電対を接続した。図中、G は試験片の繊維に直交する方向で測定する場合、熱線が長すぎて両端部が試験片の外に露出するので、その部分を保温するための保護板である。熱電対は (a)~(c) とともに線径 0.25mm の C-C 型 (JIS T 型) である。

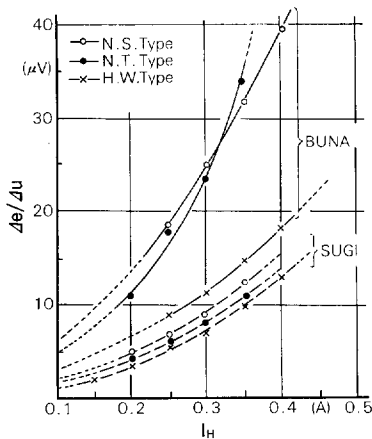


Fig. 4. 熱伝導方式におけるプローブのヒーター電流 I_H と含水率 1% 当たりの起電力 $\Delta e/\Delta u$
Relation between electromotive force per 1% moisture content ($\Delta e/\Delta u$) and electric current of heater of probe.

Fig. 3 の (a) に三形式のプローブに共通した測定回路のブロック図を示した。図の (b) は複針型の測定部を示したものである。回路の基本はコイルヒーターあるいは熱線用の定電流電源と時間掃引器からなる加熱回路と、プローブの温度上昇を求める測温回路から構成されている。時間掃引器はヒーターに電流を通ずると同時に作動し、あらかじめ定めた任意の時間が経過した時点で電流を遮断するためのものである。

(2) ヒーター電流と起電力

計器の小型軽量化を考慮するとヒーター電流は小さいほど好ましいが、測定時間の短縮やプローブあるいは熱線の温度変化に対応した熱電対の起電力を充分な精度で測定するために、ある程度大きな電流を与えて温度変化を大きくする必要がある。Fig. 4 は気乾および湿潤状態にある試験片を用い、前途のプローブで測定時間を 20 秒と定め、ヒーター電流の大きさとプローブ温度の含水率に対する変化率の関係を求め

たものである。縦軸の $(\Delta e/\Delta u)$ は乾湿両試験片を測定して、その起電力の差を Δe とした含水率差 1% 当たりの起電力であり、横軸はプローブのヒーター電流である。図中、実線は全乾比重 0.58 のブナ材、点線は同じく 0.29 のスギ材によるものである。ヒーター電流を増すことによるプローブの一定時間における温度上昇は試験片の温度伝導度によるから、試験片の含水率 u と木材比重 r_0 が小さいほど大きくなるが、 $(\Delta e/\Delta u)$ の増加率は r_0 が大きいほど大きくなることからわかる。一方、この変化傾向はプローブの熱容量、すなわち、材質や構造によっても異なることが考えられるので、短い時間で測定を行うためにはプローブの熱容量をできるだけ小さくして、熱に対する応答性をよくすることが望ましいことになる。直熱式の熱線プローブ (HW 型) では、針状型にくらべ $(\Delta e/\Delta u)$ が小さく、とくにブナ材ではそれが著しい。これは、HW 型プローブが押当式で、試験片との接触が必ずしも完全でないこと、および試験片の表面の含水率が外気にふれて低下しやすいことなどのため Δe が小さくなるにかかわらず Δu に平均含水率を用いたことによるものと推測される。これらの結果や、電源、計器構成の上からヒーター電流は小さいほどよいが、測定精度の低下も考慮して、電流値を 0.3~0.4 A の間に定めるのが適当であると判断した。すなわち、図からヒーター電流 0.35 A に対する $(\Delta e/\Delta u)$ はブナ材で 32~34 μV 、スギでは 10~12 μV 、その中間で 23 μV になる。含水率変化 $\Delta u = 10\%$ とすると Δe は 0.23 mV 程度の値が得られることになるので高含水率測定用としては実用上問題のない感度と考えられる。したがって、前記 3 形式のプローブを用いた熱伝導方式における測定条件を測定時間は 20 秒、ヒーター電流を 0.35~0.4 A とした。

2. 電気的方式

電気的測定法、とくに直流抵抗方式は F. S. P. 以下の低含水率域を対象とする場合、計器構成、電極構成および使い勝手などから含水率計として最適なものであると考えられる。しかしながら、F. S. P. 以上の高含水率用としては、高周波方式を含め種々の工夫がなされているが、いまだ信頼性の高いものがないのが現状であろう。そこで、ここでは従来の測定方式とは若干原理が異なる電極電位計方式と、交流抵抗方式の二方式について検討を行った。

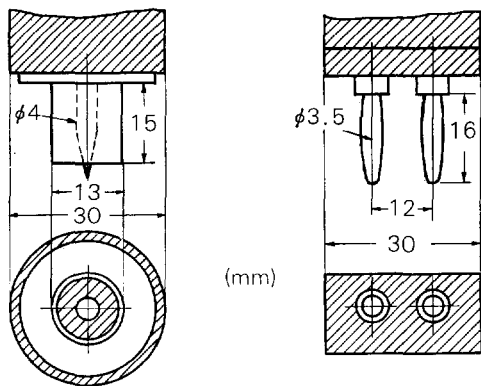


Fig. 5. 電 極
Electrodes.

- a) 電極電位計方式用 For Potentiometer
- b) 交流抵抗方式用 For A-C electric resistance

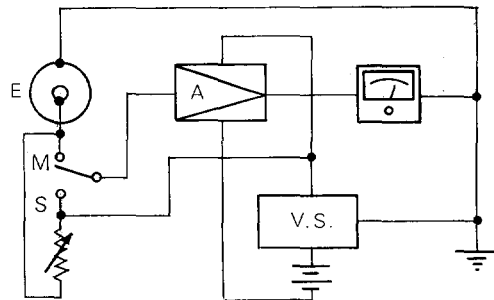


Fig. 6. 電極電位計方式のブロック図
Block diagram of potentiometer for measurement of high moisture contents of wood.

- E: 電極 Electrode, A: 増幅器 Voltage amplifier,
- V. S.: 定電圧電源 Stabilized source.

(1) 電極電位計方式

湿潤な木材と金属製電極の界面では、溶液と金属の接する面でイオンの自由な動きが妨げられてイオンが集積しやすいため界面起電力が発生する。この場合は木材中の水分が溶液の役割をして、異種の金属電極間に起電力の差が生ずる。その起電力差は含水率（高含水率）によって変動することが経験的に知られている。このことから含水率-起電力の間に一定の関係があるか、また含水率を知る手段になり得るか、を検討した。計器は定電圧回路と1個のオペアンプを用いた電圧増幅回路からなるごく簡単な微小電圧測定器が基本になっており、用いた電極を Fig. 5 の (a) に、そのブロック図を Fig. 6 に示した。電極に使用した材質は針状の (+) 極が鉄、円筒状の (-) 極が銅である。

(2) 交流抗抵方式

含水率が低い状態にある木材は絶縁体あるいは誘電体と見なされるが、高含水率状態にある場合はその電気抗抵値が相対的に著しく低下し $10^8 \Omega$ 程度となり、直流的には不安定な抵抗体としての挙動を示す。しかしながら、交流を用いた場合は、比較的安定した測定が可能であると考えられる。ここで用いた交流電気抗抵計は安藤電気社製の LCR メーターで、その R モードで測定を行った。使用周波数は 1 KHz である。電極は市販のパナナチップが前節の熱伝導方式のプロープ径とちょうど一致したので、それとアクリル樹脂板を用いて Fig. 5 の (b) に示す形のものを作って使用した。

上記の三方式についてブナとスギ材を用い予備的な実験を行った結果、各測定法における含水率計器指示値の関係は測定値にかなりの乱れがあったものの、各方式それぞれ特有な含水率に対する変化傾向がみられた。そこで、これらの三方式についてさらに含水率測定のための適応性を検討するため各種の比重をもつ主要な樹種を選んで下記の試験を行った。

II 各方式による適応試験

1. 試験方法

(1) 試験片とその含水率調整

試験片は Fig. 7 に示すように幅 5cm、長さ 10cm、厚さ 1.5cm の大きさで、樹種は Table 1 に示した気乾比重 0.3~0.8 の範囲にある 14 種である。個数は 1 樹種 3 個とした。試験片は減圧注水によって一部の試験片が水に沈む程度の含水率状態にしてから、側面の中央部に測定用の孔をあけた。予備実験において減圧注水すなわち、減圧度を変え、含水率（吸水量）を調整する方法が必ずしも好結果でなかったことや、試験片の数が多くなることを考慮して、ここでは湿潤試験片の含水率を減らしながら適当な時点で測定に供することにした。方法は、まず、試験片を水中に浸漬して高含水率状態にする。次に内容積 60 cm^3 程度の精密恒温器の器底に水をはったバットを置き、その上方の網棚に試験片を並べ、器内温度

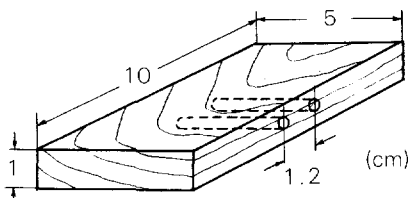


Fig. 7. 試験片
Test piece.

を 40°C に保ち、除々に乾燥する。試験片のなかから代表としてヒノキの 1 枚を用いて恒温器上に設置したロードセルと針金で連結し重量減少量をモニターした。それによって、所定の測定時点（含水率状態）を定め、恒温器から試験片を取り出し常温の飽湿デシケーター中に移し、一日置いて測定に供した。測定終了後は再び恒温器に移し、次の含水率状態まで乾燥した。各時点の含水率

Table 1. 試 験 片
Test piece.

No.	樹 種 Specimen	気 乾 比 重 Specific gravity	注 水 時 含 水 率 Moisture content after water impregnation
1	スギ SUGI <i>Cryptomeria japonica</i> D. DON	0.39	184 ~ 187 (%)
2	トドマツ TODOMATSU <i>Abies sachalinensis</i> Fr. SCHM.	0.43	145 ~ 189
3	ヒノキ HINOKI <i>Chamaecyparia obtusa</i> ENDL.	0.44	106 ~ 181
4	キリ KIRI <i>Paulownia tomentosa</i> STEUD.	0.23	189 ~ 293
5	シナノキ SHINANOKI <i>Tilia japonica</i> SIMK.	0.51	154 ~ 162
6	ホホノキ HOHONOKI <i>Magnolia obovata</i> THUNB.	0.51	49 ~ 58
7	シオジ SHIOJI <i>Fraxinus spaethiana</i> LINGELSH	0.52	145 ~ 150
8	ヤチグモ YACHIDAMO <i>F. mandshurica</i> RUPR.	0.71	95 ~ 103
9	ミズナラ MIZUNARA <i>Quercus crispula</i> BL.	0.61	102 ~ 130
10	ケヤキ KEYAKI <i>Zelkova serrata</i> MAKINO	0.77	58 ~ 60
11	マカンバ MAKANBA <i>Betula maximowicziana</i> REGEL	0.77	79 ~ 82
12	ブナ BUNA <i>Fagus crenata</i> BL.	0.63	118 ~ 120
13	アピトン APITONG <i>Dipterocarpus</i> sp.	0.78	77
14	レッドラワン RED LAUAN <i>Shorea</i> sp.	0.58	83 ~ 95

はすべての含水率段階での測定が終了したあと、試験片を全乾して求めた。

(2) 測定法

測定は同一試験片を三方式の測定法で逐次測定する方法で行った。すなわち、まず試験片を秤量してから、試験片側面のプローブ孔で熱伝導方式の単・複針型(N型)プローブおよび交流抵抗方式による測定を行い、次いで熱線プローブ(HW型)および電極電位計方式のプローブを試験片の上下両面のほぼ中央部に当てて測定した。熱伝導方式のプローブ加熱電流はN型が0.3A、HW型は0.4Aとし、測定時間を20秒とした。プローブ温度を示す熱起電力 e_p は加熱電流が遮断されると同時に急速に減少したため、ホールド機構を有するデジタル電圧計を用い、最大値をホールドして読み取った。電気的二方式についてはとくに面倒な操作はなく、交流抵抗方式ではレンジの切換えも自動で行われるので速やかに測定値を求めることができた。

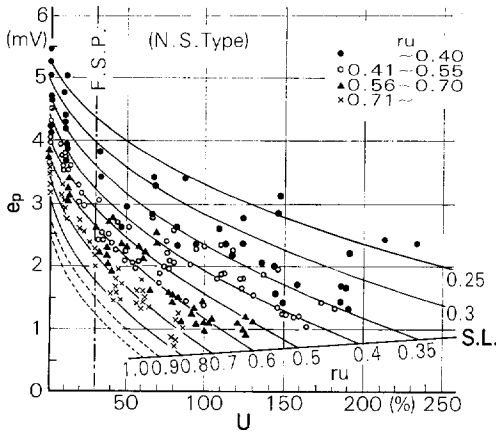


Fig. 8. 熱伝導方式による測定結果
(単針型プローブ)

Relation between moisture content of wood (U) and electromotive force (e_p) that indicate the temperature of probe (Single needle probe).

r_u : 気乾比重, S.L.: 飽和含水率線
 r_u : Specific gravity in air dry.
 S.L.: Water saturation line by reference 3).

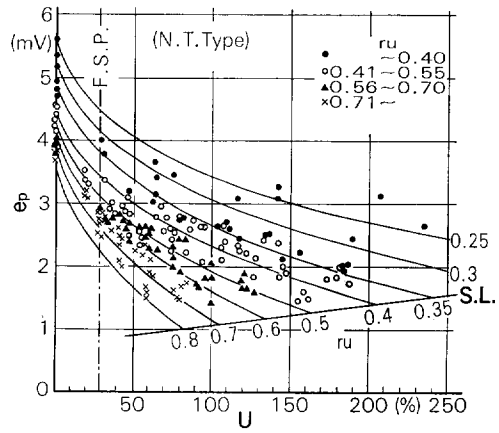


Fig. 9. 熱伝導方式による測定結果
(複針型プローブ)

Relation between moisture content of wood (U) and electromotive force at probe (e_p) (Twin needle probe).

r_u : 気乾比重, S.L.: 飽和含水率線
 r_u : Specific gravity in air dry.
 S.L.: Water Saturation line by reference 3)

2. 試験結果

(1) 熱伝導方式

種々の樹種について熱伝導方式を用い、含水率とプローブ温度 e_p との関係求めた結果を Fig. 8~10 に示す。Fig. 8 は単針型プローブ、Fig. 9 が複針型、Fig. 10 が熱線型プローブによるものである。木材細胞壁実質と空腔との直並列モデルから比重をパラメーターとして求められた木材の全含水率域における含水率 u と熱伝導率 λ の関係²⁾ によると、 λ は含水率および比重が大きいほど大きく、その変化率も大きくなる。本測定の場合も λ を e_p に置き換えることにより、逆の形で同様の関係がかなり明確に現われている。すな

わち、比重の小さい材では λ が小さく、プローブで発生した熱は材中へ伝導しにくいいため、プローブの温度が上昇し e_p は大きくなる。また、F.S.P. 以上の含水率域において同じ率の含水率が増加したとしても、比重の小さい材は大きい材に比べ単位容積内での水分増加量は少ないので、 λ の増加は相対的に小さく現われる。したがって、プローブの温度変化による e_p の下り方も少なく含水率の増加とともにゆるやかに減少していくので測定値は図の上部に分布する。比重の大きい材での e_p は逆の理由によって、同

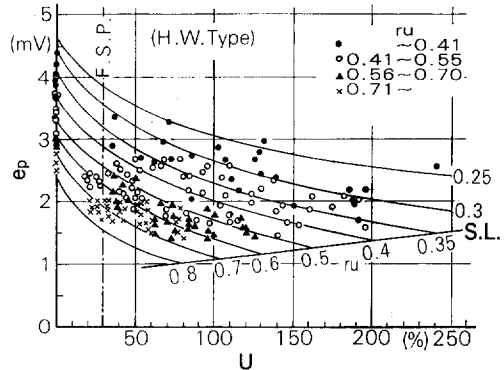


Fig. 10. 熱伝導方式による測定結果
(熱線プローブ, \perp 方向)

Relation between moisture content of wood (U) and electromotive force (e_p) (Hot wire probe, \perp grain).

r_u : 気乾比重, S.L.: 飽和含水率線
 r_u : Specific gravity in air dry.
 S.L.: Water Saturation line by reference 3)

一含水率では常に比重の小さい材より小さい値を示し、含水率が増加すると急勾配で減少することになる。そこで図に示すような比重をパラメーターとする曲線をあてはめると、曲線と測定値の対応がかなりはっきりする。なお、図中、各曲線の先端を結んだ直線は KOLLMAN, F. 等による比重と含水率の関係曲線から求めた含水率の限界を示したものである。本方式の測定値は後述の交流抵抗方式と異なり、F. S. P. までは含水率の増加とともに e_p はやや急に低下するが、全体としてはなだらかな曲線になる。したがって、その変化範囲は小さく、全乾時と飽水時でせいぜい 4~5 倍程度であるため、含水率の全域が測定可能ではあるが、精度的に問題が生ずることにもなる。Fig. 8 の単針型プローブの測定結果は含水率に対する e_p の変化が比較的大きく、測定値と曲線の対応も比較的良好。比重の大きい材では含水率差 50% 当たりの e_p の差が約 1 mV、小さい材でも 0.7 mV 程度となり、適正な比重補正手段がなされれば指示値の $\pm 10\%$ 程度の精度での測定が期待される。Fig. 10 の熱線プローブを試験片の繊維方向に直角に当て、測定した結果は、含水率変化に対する e_p の変化が小さく、よい結果とは言い難いが比重による測定値の階層的分布がかなり明瞭にみられる。しかし、加熱電流が大であるにもかかわらず e_p の値が針状型に比べ低めなので、熱線などのプローブの改良を行えば針状プローブなみの応答性は得られよう。材の水分分布が一様であるものや単板等を測定対象にする場合はこのプローブの方がむしろ有利な点もある。

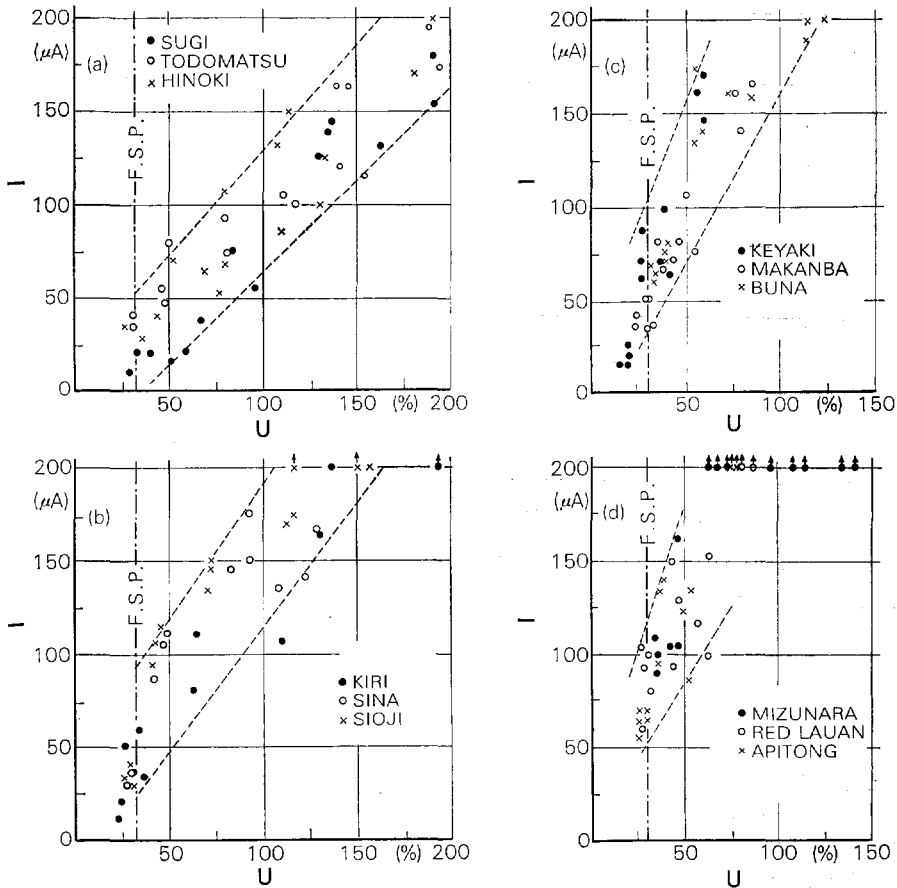


Fig. 11. 電極電位計方式による測定結果
Relation between meter reading (I) and moisture content (U).
(a) : Soft wood species. (b)~(d) : Hard wood species.

(2) 電気的方式

(i) 電極電位計方式

Fig. 11 の a, b, c, d は電極電位計方式による測定結果で、計器指示値 I と含水率 u との関係を示したものである。図の a は針葉樹、b~d は広葉樹であり同じ含水率に対する計器指示値の小さい順に 3 グループに分けて図示した。図からどの樹種の場合も含水率 u に対して指示値 I が比例的に増大することがわかる。その比例関係はおおむね比重の大きい樹種ほど勾配が急のようであるが、例外もあることから樹種の特性によるものと考えるべきであろう。針葉樹は広葉樹に比べ指示値が小さくなるようであり、広葉樹のなかでも d グループのミズナラ、レッドラワン、アピトンでは指示値がとくに大きく、含水率が 60% 程度でほとんどの場合で目盛を超えてしまった。この点を調整すると、この方式は含水率と指示値の関係が比例的であり、かつ十分な応答性があるので、特定の樹種あるいはグループを対象とした場合、良好な計測性が期待できそうである。また、スギ、ブナについて個体の異なる試験片を用いた予備実験の結果もこの結果とほぼ同様の傾向であり、かなりの再現性があるものと考えられる。

(ii) 交流電気抵抗方式

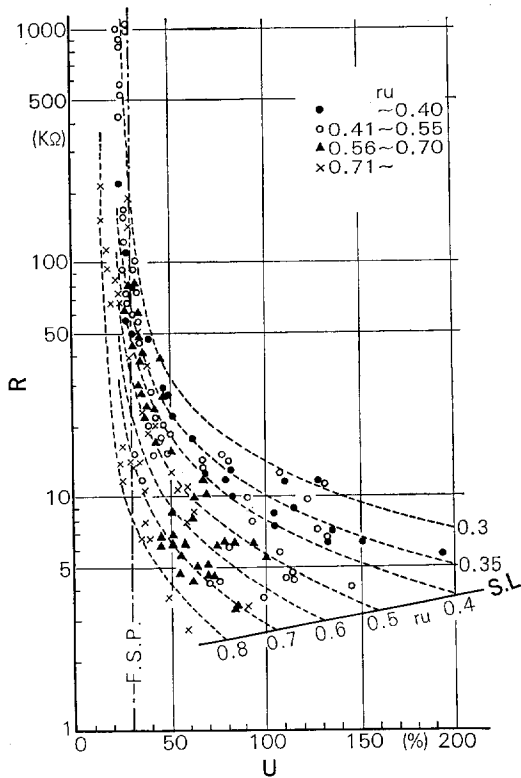


Fig. 12. 交流電気抵抗方式による測定結果
(r_u : 気乾比重)

Relation between moisture content of wood (U) and A-C electric resistance (R) (r_u : Specific gravity in air dry).

S.L.: Water saturation line by reference 3)

LCR メーターを用いた周波数 1 KHz の交流抵抗値 R の含水率 u に対する測定結果を Fig. 12 に示す。図では F. S. P. 以下と以上の含水率域で R の変化率が著しく異なること、F. S. P. 以上の範囲で測定値が分散する傾向は熱伝導方式以上に顕著なことが示されている。とくに F. S. P. 以上の測定対象範囲に分散する測定値は 2~50 kΩ の範囲にあつて、試験片の比重に依存していることがわかる。そして 1 MHz の高周波を用いた上村の研究³⁾と類似した結果を示している。試験片の比重をパラメーターにして比重別に曲線をあてはめると図に示したように測定値の比重依存性がある程度明らかになってくる。この曲線上の測定値をみると、同比重の材では F. S. P. 時と飽水に近い含水率における R の比はほぼ 5 倍程度であり、含水率の高い範囲についてみると、 R の比は含水率差 50% でせいぜい 2 倍か、それ以下になると考えられる。F. S. P. 以下の指数的に変化することに比べると格段の相異があり、この方式による高含水率域の測定の難しさが示されている。

Ⅲ まとめと問題点

木材の高含水率域（自由水領域）における含水率の計器測定を目的に、木材の熱伝導に基づく方法と、電極電位および交流抵抗による電氣的二方法を取りあげ、それらの含水率測定への適応を検討した。

熱伝導および交流抵抗の二方式での実験結果は、測定値が含水率変化に対応して比重をパラメーターとする曲線上に、電極電位計方式ではその測定値は樹種によって大きく異なるが、含水率に関して急勾配の直線的な変化を示した。各方式の計測特性はおおむね次のようである。

1) 熱伝導方式による測定結果は、含水率の増加にともなって測定値は大きく分散しながら減少する傾向を示した。その分散傾向は、ほぼ同じ比重の試片が示す測定値を通る曲線をあてはめることによって、曲線と測定値とは比較的よい対応を示した。F. S. P. 以下の低含水率域ではその曲線はやや急であったが比重依存性が少なく、高含水率域で指示値と含水率の関係に比重依存性を顕著に示す漸減傾向を示した。この方式は測定用プローブ孔を必要とすること、測定時間が長くなるなどの測定上に不利な点があること、また、軽比重材では含水率変化に対する指示値の変化がかなり小さくなることなど、計測特性は必ずしもよいものではないが、含水率の全域、とくに飽水状態に近い高含水率域でも安定した計測が行えた。使用した三型式のプローブでは単針型がよい結果を示した。材の表面に押し当てる型式の熱線プローブは材の表面含水率によって計器指示がなされるため、一般に表面層で急な水分傾斜を有する高含水率材の測定には問題があると考えられた。

2) 電極電位計方式は原理的に不明確な点もあるが、F. S. P. 以上の高含水率域で含水率と計器指示値の間にはほぼ直線的な関係が得られた。その関係はおおむね比重の大きい材ほど直線の勾配が大きくなるが、例外もあり、樹種個々に特有の傾向がみられた。とくにナラ、アビトンなど一部の樹種で勾配が大きく、含水率が50~60%程度で指示限界になる場合があった。また、この方式はF. S. P. 以下の含水率域ではほとんどの樹種で指示針が振れず、高含水率専用向きといえる。

3) 交流電気抵抗方式（1 KHz）による測定結果は、既報¹⁾の高周波（1 MHz）を用いた場合とほぼ同様の傾向を示した。すなわち、含水率 u と電気抵抗 R の関係は F. S. P. を境にして、それ以下の含水率域で抵抗値は含水率の減少にともない対数的に増大する一方、測定対象である高含水率域では含水率が増加するにしたがって漸減し、1) の熱伝導方式と同様に比重によって末広型に分散する傾向にあった。F. S. P. から飽水に至る含水率域での抵抗値変化をみると、比重の大きい材で $15\text{k}\Omega$ から $3\text{k}\Omega$ 、軽比重材では $100\text{k}\Omega$ ~ $10\text{k}\Omega$ 程度となり、その変化範囲は5~10倍の範囲にとどまり、50%の含水率変化に対する抵抗値変化は2~5 $\text{k}\Omega$ 程度であった。

以上、F. S. P. を超える高含水率の計器測定を目的に取りあげた三方式の手法はいずれも含水率に対応した計器指示値が得られ、その間には各方式に特有な関係が求められた。このことから含水率計への応用を考えた場合、基本的にはどの方式も計測手法としての有効性を示唆しているが、実用化については各方式それぞれに問題点があった。とくに熱伝導および交流電気抵抗方式における比重依存特性、および電極電位計方式における樹種特性に関する補正手段が計器を構成する上で最も重要な課題になろう。熱伝導方式については、手法がやや複雑であるため、計器構成およびプローブの改善法を考える必要がある。電極電位計方式では、はじめての応用でもあり電極構成の妥当性の検討とともに原理的な検討を重ねる必要がある。

引用文献

- 1) 上村 武：誘電率による木材含水率の測定に関する基礎研究，林誠研報，119，(1960)
- 2) KOLLMANN, F. & MALMQUIST, L. : Holz als Roh- und Werkstoff, 14, 6, 201, (1956)
- 3) KOLLMANN, F. & CÔTÉ, W. A. : Principle of Wood Science and Technology, 167, Springer-Verlag (1968)
- 4) ASTM D 2326-70 : Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Cellular Plastics by Means of Probe.
- 5) NUSSEK, E. : Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit durch elektrischen Widerstandes. Holz als Roh- und Werkstoff J. 1, H. 11, (1938)

Instrumental Measurement of High Moisture Content of WoodHisayoshi Saito⁽¹⁾

Summary

For one or two decades the instrumental moisture measurement of wood by electric moisture meters has prevailed as a routine work in the wood industry with their remarkable advance in the performance. However, the measurement of high moisture content, by expanding the scales of conventional moisture meters over the fiber saturation point to the considerably wet range, has been questioned in their accuracies because such scales exceed their method's intrinsic and practical ranges.

Therefore, the author discussed the possibility of measurement of high moisture content and of the practical application with the results obtained by the following methods: thermal conduction method, potentiometer method and A-C electric resistance method.

A device for measurement of thermal conductivity in a unsteady state was applied to the thermal conduction method, and for the potentiometer method a specially designed instrument was used. An LCR meter was utilized for the A-C electric resistance method. The probes used for the measurements were of needle type except the hot-wire method (Fig. 2, Fig. 5).

The results are as follows;

1) The meter-readings from measurements taken by thermal conduction and A-C electric resistance methods appeared closely dependant on the specific gravities: the larger the specific gravities: the larger the specific gravity is, the higher the reading becomes, moreover, the higher the moisture content is, the greater the dispersion of meter-readings. Then, the moisture content could be known by applying the scaling curves that consisted of even specific gravity lines to those scattered data (Figs. 8~10, Fig. 12).

2) The reading of potentiometer method gave a good linear reading of the moisture content, but the behavior differed considerably among wood species. Some hardwood showed very inclined gradients for the reading of moisture content (Fig. 11).

3) In the case of the thermal conduction method, the hot-wire probe proved unsuitable for measuring the high moisture content of solid wood, because the hot-wire probe touches only the surface, unlike needle type probes. The hot-wire method may be applicable for measuring the high moisture content of thin sliced woods (Fig. 10).

4) All three methods are principally applicable to measure the high moisture content of wood, but there are several problems hindering practical application.