

木材の乾燥機構に関する研究

第3報 木材水分の蒸発速度について

Takeo OGURA: Studies on the mechanisms of wood drying.
(3) On the evaporating rate of moistures in wood.

農林技官 小 倉 武 夫

I 緒 言

木材乾燥の機構は表面における蒸発と内部における水分の移動、即ち拡散とに区別して考えられる。含水率の多い間の乾燥は主として表面層水分のみの蒸発によるが、この結果表面の含水率が低下し、内部水分との間に水分傾斜を生じて内部水分が表面へ移行し乾燥が次第に進捗する。併し内部水分の移動は表面における蒸発より遙かに困難であるため、表面で蒸発しただけの水分が絶えず内部から移動されるものとは考えられない。このために表面における蒸発量即ち乾燥速度の決定因子は乾燥初期の表面蒸発から次第に内部水分の拡散に推移し、亦乾燥速度も最初の恒率から減率に移り変ることは言う迄もない。それ故に木材乾燥の研究に当つて内部水分の拡散を無視して考察することは出来ないが、蒸発が表面層においてのみに行はれるので、成る可く内部水分拡散の影響をうけない様にし、種々な外周条件での蒸発速度を観測しておくことも亦必要なことであろう。この様な意味から先ず恒率乾燥を示す含水率の限界とその時の蒸発係数を知ると共に、減率乾燥を起させる原因等について考究しておかねばならないと考え、若干の実験を試み考察を加えてみた。

ここにその結果を発表して御批判を乞う次第である

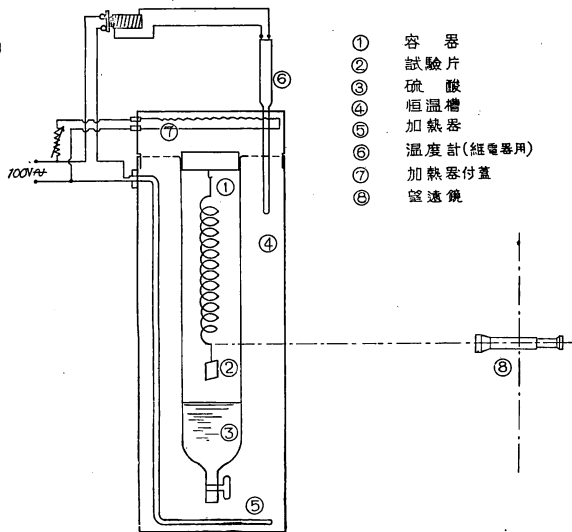
本実験を行うに際して種々と予期せざる困難に逢着したにも拘らずよく克服し、完遂された内野助手、並びに終始御援助を賜つた斎藤木材部長に謹みて謝意を表す。

II 実 験 方 法

実験装置は第1図に示す如く試験片を入れる容器を恒温槽の中に入れ、容器内には硫酸を入れて所望の關係湿度に保持し、試験片を石英スプリングに吊し、標点をカセットメーターにて測定し重量の減少経過を求めた。

容器上部の空気温度は恒温槽の温度に比べて低いいため容器内の關係湿度が不均等になるので、上部も恒温槽温度と同一温度を保つ様に加熱器を設けた蓋で覆つた。

容器中の温度が50°Cになる様に恒温槽の温度を保ち、關係湿度は硫酸の濃度によつて80,



第1図 実験装置

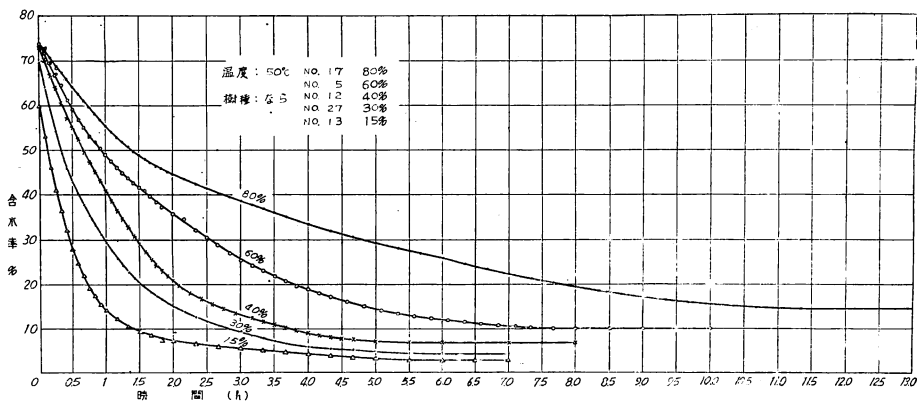
時を以て平衡状態に達したものと認め実験を終了とし、この試験片を天秤にて実測したる後全乾重量を求めた。

60, 40, 30 及び 15% に保つた。

(この際の硫酸濃度と関係湿度は Wilson の表によつた) 試験片には主に、なら材の板目を用い、寸法は $3.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 0.15\text{ cm}$ で、厚さの側面にはセルロイド被膜でおおつた。各条件に対して夫々数回の実験を試み、類似の減少経過を辿つた実験資料に就いて結果を求めた。重量の測定は最初は 5~10 分毎に、平衡に近くなるにつれて測定間隔を長くし、実験末期には 1 時間毎に行い、同一重量を少くとも数時間保持した

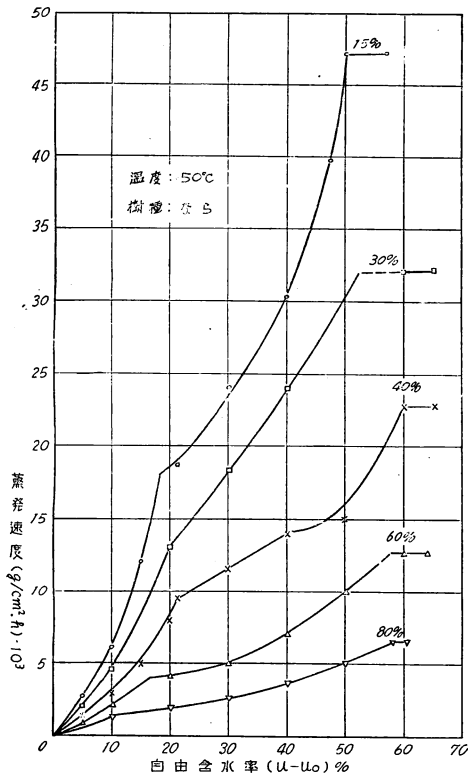
Ⅲ 実験結果と考察

上述の条件下で重量減少の経過を測定した結果の一例を第2図に示した。この曲線の各種含



第2図 実験結果の例 (水分減少の関係湿度による影響)

水率における接線から、蒸発速度を求め、単位面積当りに換算した値は第3図の通りである。木材でも含水率の多い間は乾燥速度が一定で所謂恒率乾燥を示し、その後漸次蒸発速度は低下して減率乾燥の過程に入ることは既に認められているが³⁾、本実験でも恒率乾燥の期間は極めて短かくはあつたが確認され、減率の過程と略々明瞭に区別された。此等の実験結果から恒率乾燥における表面蒸発係数を求め、減率乾燥に関してはその起因に就いて若干の考察を加えた。



第3図 各含水率に應ずる蒸発速度

はめることは出来ないであろう。

今、各種条件下の実験資料から表面蒸発係数 k を求めてみると第1表の如くなる。

第1表 k の 値

関係湿度	$\frac{dw}{Adt}$ g/cm²·h	P_w mm Hg	P_0 mm Hg	$P_w - P_0$ mm Hg	k (g/h.cm².mmHg.)
75	$\times 10^{-3}$	mm Hg	mm Hg	mm Hg	$\times 10^{-3}$
80	6.5	75.7	74.1	1.6	4.1
60	12.7	60.0	55.6	4.4	2.9
40	22.8	44.1	37.0	7.1	3.2
30	32.2	36.5	27.8	8.7	3.7
15	47.2	26.0	13.9	12.1	3.9

亦蒸発速度 dw/Adt と $P_w - P_0$ との関係を図示すれば第4図の如く原点を通る直線と見做すことが出来、

$$\frac{dw}{Adt} = 0.00358(P_w - P_0) \dots \dots \dots (2)$$

なる関係を得たので、表面蒸発係数は 3.58×10^{-3} g/h.cm².mmHg であると言うことが出来る。当然ではあるがこの値は第1表の平均値と全く同じ値であつて、木材の表面蒸発係数は略

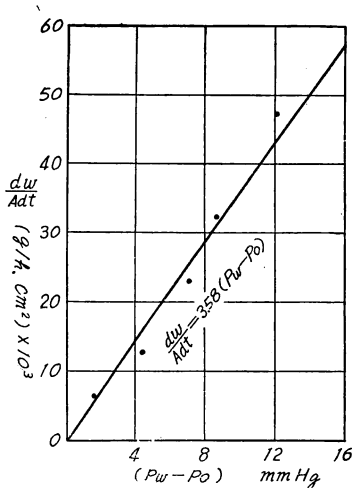
1 表面蒸発係数

この期間の乾燥速度は一般に

$$-\frac{dw}{Adt} = k(P_w - P_0) \dots \dots \dots (1)$$

但し $\frac{dw}{dt}$: 乾燥速度 (g/h)
 P_w : 表面における蒸気圧 (湿球温度に対する飽和蒸気圧) (mm Hg)
 P_0 : 外周空気の蒸気圧 (mm Hg)
 k : 表面蒸発係数 (g/h.cm².mmHg)
 A : 表面積 (cm²)

で表わされる。第3図から明らかな様に或時刻における含水率を $u\%$ 、外周条件と平衡を保つ木材の含水率、換言すれば乾燥によつて到達すべき窮極の含水率を $u_0\%$ 、とすれば $(u - u_0)$ が50~60% のまでは恒率を示している様である。併しこれは板厚に影響されることが多く、かかる結果は本実験の様な板の厚さの場合に限られたことで、これをそのまま他の場合に当て



第4図 恒率乾燥における各 ($P_w - P_o$) に対する蒸発速度

0.0036 g/h.cm². mmHg と見做して差支えないと思われる。

尙、この値が正しいか否かを別に重量減少の経過を測定して得た 2, 3 の実験資料から検討してみる。

(1) 関係湿度を NH_4NO_3 により 60% の略一定に維持した温度 50°C の恒温器の中で、含水率 150% 以上の杉板目 (寸法 14.8cm×10.0cm×1.0cm) をスプリング秤に吊して重量減少経過を測定したが、約 7 時間恒率乾燥を示し毎時間平均 4.27g 宛減少した。この結果から k を求めて 3.27×10^{-3} を得た。

(2) 本実験に用いた装置で温度を 45°C、関係湿度を硫酸で 50% の一定に保ち、寸法 2.3 cm×1.3 cm×0.15 cm のぶな材について k を求めた結果 3.6×10^{-3} を得た。

(3) 次の項で述べる様に k の値は材料には無関係であるので、木材でも樹種は勿論のこと木取にも影響されることはない筈である。この点を明らかにするために極端な例として杉材の木口面と板目面とを選らび (寸法は何れも略 2.0cm×3.0cm×0.2cm)、50°C、60% の条件下で実験して両者の k の値を比較したが、前者では $3.3 \sim 4.0 \times 10^{-3}$ 、後者では $4.1 \sim 4.2 \times 10^{-3}$ を得た。この様に大体類似の値であつて k の値は木取にも影響されないものと言うことが出来る。

(4) 恒率乾燥では (1) 式が示している様に材料に関係する因子は何等含まれていない。従つて表面蒸発係数 k の値は材料の如何によることなく、空気中における水蒸気の拡散のみに左右される。それ故風速には著しい影響をうけるが、これらの外周条件が同一である場合には容器中における水の蒸発と同様の値を示す筈である。この事は単に木材のみならず一般に恒率乾燥を示す材料に就いて言われることであつて、既に木材、其の他の材料の k の値を自由水と比較して求めた研究もある。即ち Shepherd 等²⁴⁾ は砂の k の値が自由水と同様に $3.6 \sim 3.7 \times 10^{-3}$ であることを報じ、Sherwood & Comings²⁵⁾ は多湿な材料と水とは同様の値を得たと報じている。亦多湿な材料に対して k を求めたものに龜井⁵⁾ はパルプに対して $3.4 \sim 3.9 \times 10^{-3}$ 、粘土に対して $4.8 \sim 5.7 \times 10^{-3}$ 、Hoügen³⁾ は Chrome Leather に対して 3.1×10^{-3} 、等何れも本実験の結果と大差のない値を示している。併し Ceaglske N. C. and Hoügen⁴⁾ は砂に対して $14.7 \sim 17.0 \times 10^{-3}$ を得、この値は自由水と略同様の値であつたと報じている。これに反して Stacey A. E²⁵⁾ によるとパルプ、カーボン粉、粘土等は略 $0.15 \sim 0.17 \times 10^{-3}$ 、自由水も 0.12×10^{-3} 等の著るしく小さな値を得ており、Sharpley²¹⁾ 等は自由水に対して $1.1 \sim 1.3 \times 10^{-3}$ であると報じている。

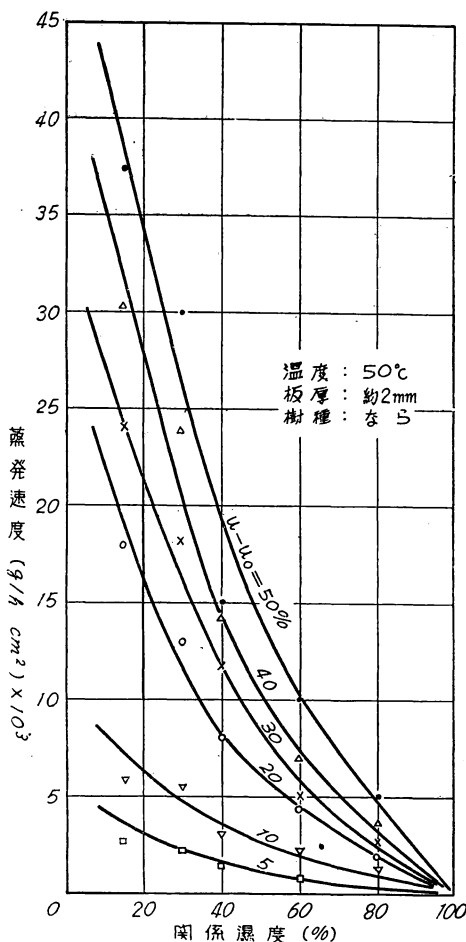
この様に蒸発係数の値は研究者により区々であつて、特に自由水に対しては相当の差異が認

められているが、これらは実験装置に断熱的な考慮の払はれている程度に依つて生ずる誤差もあるものと思われる。実際に直径 5 cm 程度のビーカーを用い、石綿により外周を充分に保温し断熱的に充分とは謂えないまでも可成りの考慮を払つて k を求めたが、略 4.3×10^{-3} を得た。些か大きい様であるが、この結果は実験装置の不備と実験誤差によるものと考えられ、上述の値と近似的であるということが出来る。

以上の如く本実験で得た値 $k = 3.58 \times 10^{-3}$ は既往の凡ての値と一致していると謂うことは出来ないが Shepherd 外数名の研究結果とよく一致し、而も自由水の値とも略々一致しているので、先ず信頼し得る表面蒸発係数の値と認めて差支なからう。

2 外周条件による蒸発速度の影響

さきに示した第3図は温度を 50°C とし、関係湿度を種々に変えた場合の含水率の減少に応ずる蒸発速度の推移を示しているが、外周条件による蒸発速度の相違を更に判然たらしめるために乾燥進行中の或含水率 ($u\%$) における蒸発速度を外周条件毎に比較検討してみた。併し



第5図 関係湿度と蒸発速度の関係

水分の蒸発は一般に条件に相応する平衡含水率 ($u_0\%$) に到達すれば停止し、而も平衡含水率は各々条件によつて異なるので、蒸発速度を比較するには含水率から平衡含水率だけを差引いた含水率 ($u - u_0\%$) における値をもつてするのが妥当であると考えられる。従つて第3図から同じ ($u - u_0\%$) における蒸発速度を各条件に対して求めて図示すれば第5図の如く平滑な曲線として結ぶことが出来る。かくて得た値が絶対に正しいとは言えないが、大体の傾向は十分に察知されるものと思われる。本図から明らかになることは、

- (i) 各 ($u - u_0\%$) の曲線は $P_w - P_0 = 0$ 即ち関係湿度 100% に集束して蒸発速度はここにおいて零になること。
 - (ii) 乾燥せしめる力、即ち蒸気圧差 ΔP が大きくなる程即ちこの場合は関係湿度の低い程蒸発速度は急激に大きくなり、
 - (iii) 而も ΔP に応じて蒸発速度の大きくなる割合は ($u - u_0\%$) が大きい程著しい。
- 等である。

ここに注意すべきことは、この結果は、なら材

の厚さ約 1.5 mm の薄板に対する値である点であつて、他の樹種並びに厚さに対しては絶対値の異なる結果を示すであろう。併し外周条件による影響に就いては略々同様の結果が得られるものと思われる。この結果を実用的見地から見ると、関係湿度を高く保つて ΔP を少くしておけば、蒸発速度は極めて小さいけれども、反対に操作上の不注意から関係湿度を低下させた場合には蒸発速度は急激に増大し表面のみが乾燥して、特に比重が大きくて水分の内部移動が困難であり、収縮率の多い樹種では割れ等の損傷を生ずる危険が極めて大きくなることを暗示している。併しこの様な現象も含水率の多い期間だけのことであつて、含水率が少くなり、平衡状態に接近するにつれて ΔP を大きくしても蒸発速度はそれ程大きくならないので、含水率の低下と共に関係湿度を低下して ΔP を可成り大きくしても何等差支ないことを示している。亦同一速度で乾燥させる為には本図の曲線から $(u-u_0)\%$ の低下につれて同一速度を得るための ΔP を求め、外周条件をこれに調節すればよいことを知るであろう。

3 蒸発抵抗圧

含水率の多い材を或条件の下に放置すると最初は恒率乾燥を示すが、その期間は極めて短かく、大部分は減率乾燥の経過を辿るものである。この事実に対する説明として既に 1, 2 の研究者によつて見解が発表されているが、何れも概念的なものに止まつているので、本実験結果に基づいて減率に関する筆者の見解を述べてみたい。

木材の減率乾燥に関しては J. F. Martley¹³⁾, K. Lüdwig¹¹⁾, K. Egner¹⁾ 及び松本¹⁴⁾ 等が夫々説明を加えている。即ち J. F. Martley は水分が木材内部を移動する場合一種の抵抗があるものとして、これを Surface resistance と名付け、この抵抗に相当する厚さだけが常に木材の眞の厚さに加算されるものと仮定した。従つてこの値は木材の含水率には関係がなく一定の値であつて、これが常に表面に働いているとした。この表面抵抗は水分の蒸発許りでなく、内部の移動にも関係ある因子であつて、この考え方は水分の蒸発に対して抵抗なる因子によつて説明せんとした最初のものであろう。K. Egner によると多湿な木材表面の近くには外周空気よりも著しく湿潤な空気の薄膜があるため、その蒸発力は外周空気の条件によるものより弱められているので、蒸発を弱めんとする原因を表面抵抗と見做した。従つてこの表面抵抗は木材内部を移動する水分には関係なく、単に木材の表面層における蒸発にのみ影響されるものであつて、而も蒸発量の減少と共に低下するものと考えなければならない。これに対して松本は結合水の蒸発は水分子の木材質に対する凝着力に打勝つて行われる筈であるから、余分の熱量を要するものであり、而も凝着力は水分の減少と共に大きくなるので益々蒸発には多量の熱量を要する様になる。即ち水分の減少と共に表面抵抗が益々大きくなり、その結果蒸発量も減少していくものと解している。この考え方は慥かに實際的であるが、同氏はこれに対して理論的な説明を何等行つていない。筆者はこれに対して次の様な説明を試みたい。既に木材でも含水率の多い間は恒率乾燥をしてその表面蒸発係数は自由水の場合と略同じであること、亦恒

率乾燥の場合は蒸発した水蒸気が木材との境界層において外周条件の湿球温度に対して飽和しており、この飽和水蒸気が外周の空気へ拡散していくために恒率を示すのであつて、材料には関係するものでないこと等を述べた。恒率乾燥の式 $-dw/Adt = k(P_w - P_0)$ で、表面蒸発係数 k は水蒸気の空気中における拡散を示す値に相応しているが、必らずしも恒率乾燥の場合に限られることなく、更に減率乾燥の場合でも蒸発した蒸気の拡散には同じ関係にあるものと考えて差支ない。ただ恒率乾燥の場合には外周空気の蒸気圧 P_0 に対して境界層の蒸気圧が湿球温度に対する最大蒸気圧 P_w になつており、この蒸気圧差が最大且一定であるため恒率を示しているに過ぎないのである。減率乾燥になつた場合は上式の左辺が減少するが、これは k の値が小さくなるのではなく、境界層の水蒸気圧が P_w から次第に減少する結果と解釈出来るのである。この様に境界層の蒸気圧が減少したのは蒸発した水分量が減少したためであつて、更にこれは松本の指摘している如く木材の細胞膜に含まれている水分が蒸発するには木材質との凝着力に打勝たねばならぬので、自由水の蒸発よりも余分の熱量を要するため、一定条件の空气中で乾燥している場合は供給熱量が略一定であるから、必然的に蒸発量が次第に少なくなつていくものと考えられ、その結果境界層の蒸気圧が低くなるのであろう。この様な考え方によつて減率乾燥を説明するのが正しいとすれば、上述した如き木材質との凝着力を一種の蒸発に対する抵抗、即ち蒸発抵抗と見做して細胞膜中の水分が蒸発する為には、この抵抗に打勝たねばならないので余分の熱量が消費され減率となり、而も含水量が減少する程益々抵抗が大きくなるということが出来る。水分の蒸発は一般に蒸気圧差によつて行われるが、今この抵抗のために蒸発が妨げられるものとすれば、抵抗に相応する蒸気圧、即ち表面蒸発抵抗圧 P_r を仮定し、これが蒸発を妨げる方向に働いているものと見做すことが出来る。即ち蒸発速度の式は、

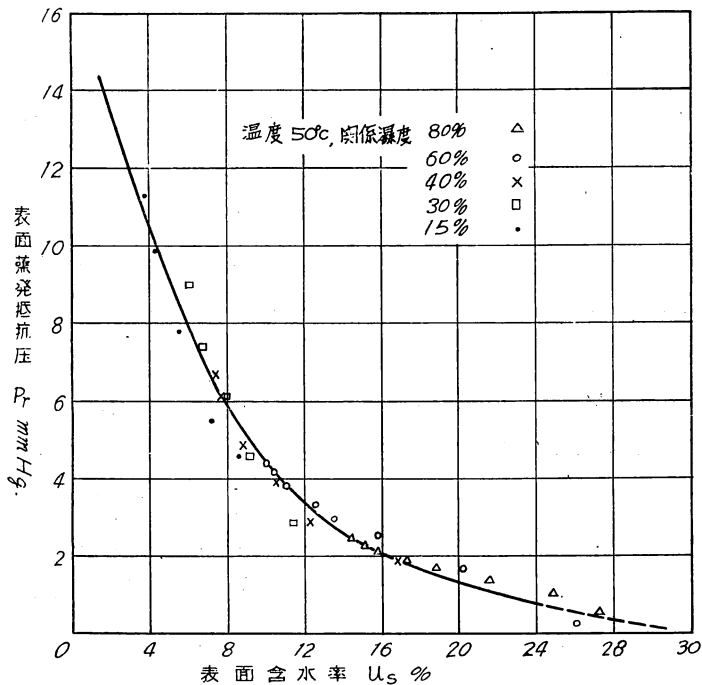
$$-\frac{dw}{Adt} = k(P_w - P_0 - P_r) \dots\dots\dots (3)$$

となる。蒸発抵抗圧の値は本式のうち k は既に求めた値であり、蒸発速度 dw/Adt は実験結果から求められるので計算することが出来るのである。

4 蒸発抵抗圧と表面含水率

上述した様に木材の表面では含水率の低下に伴つて蒸発抵抗圧が生じ減率の経過を辿るが、この場合の蒸発抵抗圧と含水率との関係を求めてみる。減率の過程においては表面層の示す蒸気圧は $P_w - P_r$ であるから、表面層の含水率は瞬間的にはこの蒸気圧と平衡を保つ含水率になつているものと考えられる。従つて重量減少の測定結果によつて或る平均含水率に対する P_r を求めれば、これに應ずる表面含水率 u_s を知ることが出来る。ただこの場合に問題になるのは表面層の温度である。湿っている物体が加熱され乾燥している場合の表面層の温度を測定することは技術的に極めて困難であるが、恒率の間の表面温度は龜井の指摘している様に略湿球温度に近いものと考え、減率になつた場合には除々に上昇し全く蒸発が停止した時に乾球温度になるものとして表面温度を推定した。この推測は大胆な如く思われるが、多くの温度測

定の資料から、この傾向は充分推定されるのであつて決して無暴な推測ではなからう。尤も今後更に精密な測定によつて表面に近い層の温度上昇経過の測定を試みる予定である。斯くて求めた P_r と u_s との関係は第 6 図の如くで、



第 6 図 表面含水率に対する蒸発抵抗圧

$$P_r = 17.2 e^{-0.1336 \cdot u_s} \dots \dots \dots (4)$$

で表わされる。尚、この関係を求めた計算例の一つを第 2 表に示した。第 6 図によると蒸発抵抗圧 P_r の値は表面含水率が繊維飽和点以上の場合は略 0 mmHg であるが、含水率の低下と共に加速度的に大きくなり、その傾向は後述する蒸発熱量と同様な関係にある。

第 2 表 u_s の 計 算 例

湿 度: 50°C $u_0=7.0\%$ $t_w=35.8^\circ\text{C}$

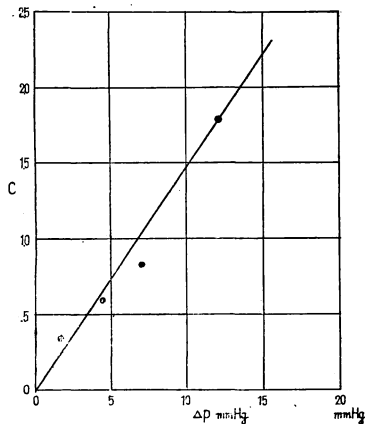
関係湿度: 40% $k=3.58 \times 10^{-3}$ $P_w - P_0 = 44.1 - 37.0 = 7.1 \text{ mmHg}$

u %	$u - u_0$ %	$\frac{dw}{Adt}$ $\times 10^{-3}$	$P_w - P_r - P_0$ mmHg	P_r mmHg	$P_w - P_r$ mmHg	温 度 C°	関係湿度 %	u_s %
57	50	19	5.30	1.80	42.3	38	85	17
47	40	15	4.19	2.91	41.2	40	71	12
37	30	11.2	3.13	3.97	40.1	43	63	11
27	20	8.0	2.24	4.86	39.2	45	54	8.8
17	10	3.5	0.98	6.12	38.0	47	46	7.7
12	5	1.2	0.33	6.77	37.3	48	43	7.4
7	0							7.0

亦上述の方法で表面含水率の時間的減少経過を求め、これを式で示すと、 u_s の繊維飽和点附近の場合のみを除けば外周条件の如何を問わず次の型で表わされる。

$$u_s = 7.28 e^{-c \cdot t} + u_0 \dots \dots \dots (5)$$

u_0 = 平衡含水率



第7図 ΔP に対する c の値

而して係数 c は乾燥の条件に因り異なり、この場合は蒸気圧差に対して第7図から求めることが出来る*。従つて、

$$P_r = 17.2 e^{-0.1336(7.28 \exp(-c \cdot t) + u_0)} \equiv f(t) \dots \dots (6)$$

即ち乾燥条件が定まれば(5)式中の c , u_0 が決められ、 t のみの函数となるので、乾燥速度の式は一般に、

$$-\frac{dw}{Adt} = k(P_w - P_0) - kf(t) \dots \dots \dots (7)$$

で表わされ、これを解くことも出来るであろう**。

更に観点を換え P_r と u_s との関係について細胞膜の構造から考察を加えてみたい。細胞膜中の水分が多くの学者により支持されている様に、ミセルの被膜の様な型でミセル

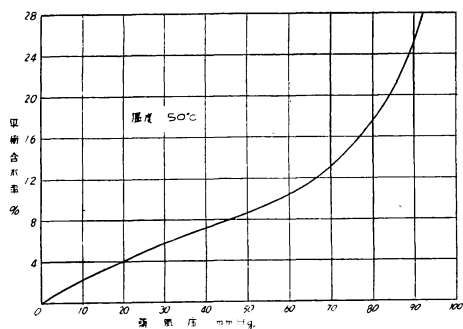
間隙に含まれているとすれば、ただ表面層のみを考えれば此等の水分はミセル間隙に相応する極めて微細な半径の毛細管に含まれた水分とも見做すことが出来る。尤も事實は細胞膜の構造がここに仮定する様な単純なものでなくて、特にミセル間隙は非晶領域、結晶領域があつて区々であると認められているが、統計学上の平均的数値をもつたものと仮定したのである。これ等の水分が蒸発する為には水分子とミセルとの附着力に打勝たねばならない。この附着力が蒸発に対する抵抗に相当するものと考えられるが、この強さは毛細管の径に影響されるものと想像して差支ない。

各含水率におけるミセル間隙は X 線、偏光光学等によつても正確に測定することは出来ないが、或含水率のミセル間隙はミセル間が水分によつて膨潤し毛細管の如くなつていものとすれば、その表面の蒸気圧は低下し、その大きさは毛細管の径に関係するので、これらの関係を示す Kelvin の方程式を用いて毛細管の径を知ることが出来る。ミセル間隙に関する研究は種々の人によつてなされているが、A. Frey²¹⁾ は偏光光学及び X 線図から計算して気乾時と最大に膨潤した時の比は 1 : 12 であり、後者の大きさは 100 Å 程度とし Pidgeon & Maass²⁰⁾ は Kelvin の式を用いて繊維飽和点附近で 760 Å、最も小さい時で 9 Å、亦 Lavine & Gänge¹⁰⁾ は気乾時で 30 Å、25% 附近で 100 Å とした。

筆者は別に数種の樹種に対して実験から求めた 50°C における平衡含水率曲線(恒温吸着

* 他の厚さに対しては厚さと乾燥速度に一定の関係があるため計算することが出来る。後日発表の予定。

** これに関しては後日発表の予定である。



第8図 平衡含水率曲線 (50°C)

線) 第8図から Kelvin の式

$$r = \frac{2\sigma M}{SRT \ln(P_s/P_w)} \dots \dots \dots (8)$$

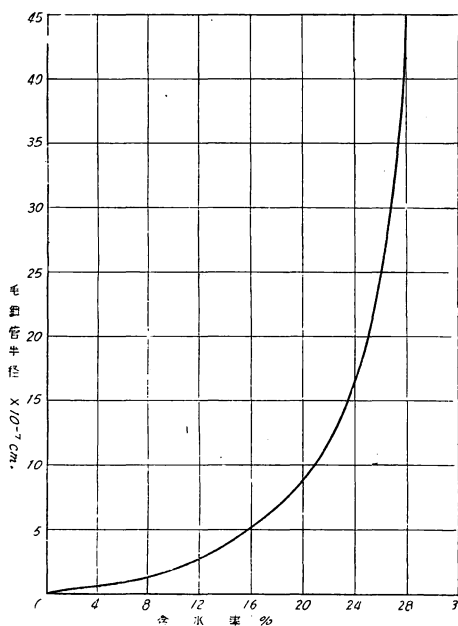
但し $\left\{ \begin{array}{l} \sigma : \text{水の表面張力 (dyne/cm)} \\ M : \text{水の分子量} \\ S : \text{水の比重} \\ R : \text{ガス恒数 (erg/dyne.mol.)} \\ P_s : \text{飽和蒸気圧} \\ P_w : \text{蒸気圧} \end{array} \right.$

を用いて各含水率に対するミセル間隙を計算して第9図を得た。例の一つを第3表に示した。この図から気乾時に対する繊維飽和点附近のミセル間隙の比を求めると 1:10~12 の程度で A. Frey の結果と略一致している。

今含水率の低下に伴う蒸発抵抗増加の関係を究明する為に、乾燥進行中の減少しつつある表

第3表 r の計算例

u_s %	T °C	σ dyne/cm	S g/cm ³	P_s/P_w	r cm
16.8	311.0	69.74	1.00705	1.176	5.9
12.2	313.5	69.34	1.00801	1.404	2.8
10.6	316.0	68.93	1.00901	1.577	2.1
8.8	318.2	68.56	1.00994	1.852	1.5
7.7	320.6	68.16	1.01098	2.164	1.2
7.4	321.1	68.07	1.01121	2.326	1.1
7.0	323.0	67.74	1.01207	2.500	1.0

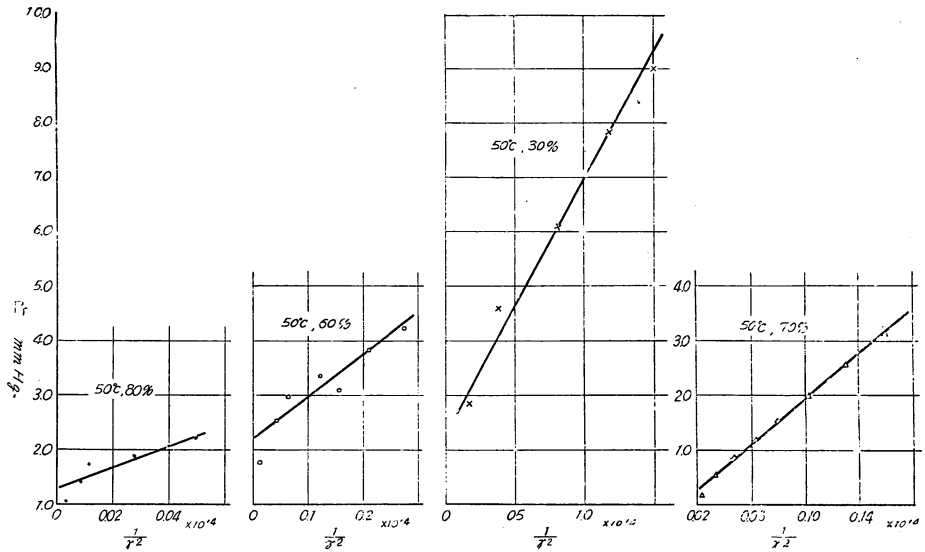


第9図 含水率に対する毛細管半径

面含水率に対するミセル間隙を第9図より求めて P_r と毛細管半径 r との関係を求めてみた。ミセル間隙には或種の力が働いていて、それを押しきつて水分が入り膨潤しているものとすれば、これ等の水分が蒸発する場合には間隙が狭くなるにつれて蒸発抵抗が増加するものと想像しても差支えなからう。これらの間の関係を見出すために P_r と $1/r^2$ の関係を図示してみる

と、特に最低の含水率では多少偏差の大きいものもあつたが、大部分は略直線上にある。その若干列を第10図に示した。即ち蒸発抵抗はミセル間隙、即ち毛細管径の自乗に逆比例して増加することを示している。このことはミセルの間に何等かの力が作用しているとすれば上述の推理が正しい様に思われる。

この様に追究して来るとミセル間隙の水分が蒸発するに対して抵抗をうけ、而もその大きさが毛管径の小くなる程大きくなることも理解されたわけで、蒸発抵抗圧の意味も解される様に思われる。



第 10 図 蒸発抵抗圧 P_r と $\frac{1}{r^2}$ の関係

5 蒸発抵抗圧と蒸発熱量

上述の様に蒸発抵抗圧の意義も明らかになり、含水率との間には第 6 図の様な関係にあるが、更に熱力学的見地から検討してみる。

木材の様な繊維素は吸湿膨潤すると発熱を伴い、この量を微分膨潤熱で表わすことが出来る。而も微分膨潤熱 ΔH は直接測定することなく、余り距つていない 2 つの温度における吸着恒温線から熱力学的に誘導された次の Clausius-Clapeyron の式を適用して求めることが出来る。

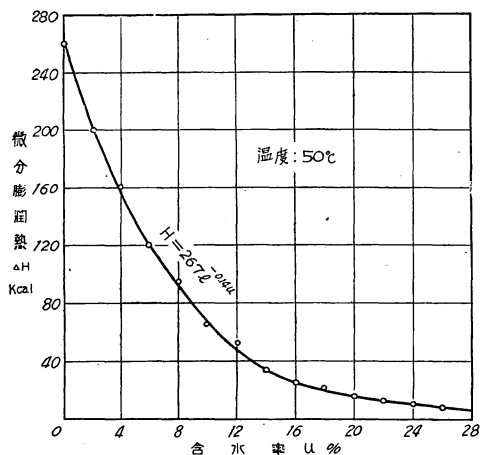
$$\Delta H = \frac{RT_1 T_2}{M(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{P_{01}}{P_{02}} \right) \dots\dots\dots (9)$$

但し $\left\{ \begin{array}{l} R : \text{ガス恒数} \quad M : \text{水の分子量} \quad T_1, T_2 : \text{絶対温度} \\ P_1, P_2 : \text{温度 } T_1, T_2 \text{ にて夫々水 1 g を吸湿した時平衡を保つ蒸気圧} \\ P_{01}, P_{02} : T_1, T_2 \text{ に於ける飽和蒸気圧} \end{array} \right.$

今別の実験によつて求めた温度 45, 55°C の含水率～蒸気圧曲線から式 (9) を用いて各含水率における微分膨潤熱を求めると第 11 図を得た。この曲線の実験式を求めると、

$$H = 267 \cdot e^{-0.14u} \dots\dots\dots (10)$$

となり、これを積分して平均値を求めると、約 71 kcal となる。この値が Moll¹⁵⁾ の示す繊維飽和点以下の水分 1 kg を蒸発させるための分離熱約 80 kcal に相当するものと思われる。即ち微分膨潤熱は前述の様に吸湿膨潤した場合の発熱量を示しているので、逆に水分を蒸発する



第11図 微分膨潤熱

ために要する熱量とも考えることが出来る。従つて第11図は各含水率において水分1kgを蒸発するために必要な熱量を与えているのである。この曲線の型は第6図の蒸発抵抗圧と全く一致しているので、蒸発抵抗圧の意味も更にここで裏付けられたのではないと思われる。

以上の様に細胞膜の構造と蒸発熱の両面から蒸発抵抗圧を考究してその意義に背首出来るものを見出すと共に、この様な蒸発抵抗が減率乾燥の起因をなすことを明らかにした。亦減率乾燥速度は式(3)で表わすことが出来るが、蒸発

抵抗圧は乾燥条件が定まると時間 t のみの函数となるので、乾燥速度は一般に(7)式で表わすことが出来る。更に今後の研究によつて凡ゆる場合の解法を得たいと思つている。ここではただ蒸発抵抗圧を仮定し、これをもつて減率の起因を説明したに過ぎないことを断つておく。

摘 要

木材中の水分は、これが多ければ初期の短期間だけは恒率的に、その後は減率的に乾燥し、その程度は乾燥条件即ち恒温の場合には関係湿度によつて異なる。これらの関係を明らかにするために、ならの供試片(寸法 3.5 cm × 2.5 cm × 0.15 cm)を用い、硫酸で関係湿度を一定に(温度 50°C で、80, 60, 40, 30 及び 15%)した容器中(第1図)で実験を行つた。実験結果の概略は次の如くである。

1 恒率乾燥中の乾燥速度は、

$$-\frac{dw}{A dt} = k (P_w - P_0)$$

で表わされる。この表面蒸発係数 k の値を求めたが、外周条件には関係なく、 $k = 3.58 \times 10^{-3}$ (g/cm²·h·mmHg)を得た。この値は材料には無関係な筈であつて、樹種、木取りには勿論のこと、自由水に対しても略々同じ値であることも確かめた。

2 減率乾燥における乾燥速度は関係湿度との間に第5図の如き関係を得た。

次に減率乾燥を示す原因について次の様に考究した。

3 表面含水率が繊維飽和点以下になると、蒸発のために余分の熱量を要し、これを蒸発抵抗と見做して圧力で表わし、この蒸発抵抗圧 P_r が減率乾燥を起す原因であるとして乾燥速度を、

$$-\frac{dw}{A dt} = k(P_w - P_0 - P_r)$$

但し $P_r \equiv f(t)$ [時間 t のみの函数]

で表わした。実験結果から表面含水率に対する P_r を求めて第6図を得た。

更に繊維飽和点以下の水分蒸発には抵抗があるとの仮定に対しては次の考察によりこれを明らかにし、上式の正しさを説明した。

4 繊維飽和点以上の水分をミセル間隙、即ち毛細管に含まれているものとし、毛細管径 r を恒温での蒸気圧—平衡含水率曲線を用いて Kelvin の式により求めて $-\frac{1}{r^3}$ と P_r は直線関係にあつたので、ミセル間には或る力が作用して、蒸発に対し抵抗を与えていると見做すことが出来た。

5 亦繊維飽和点以下の水分に対する蒸発熱を Clausius-Clapeyron の式を応用して求め第11図を得た。これは第6図と同様の型で、蒸発抵抗圧は蒸発熱に相応し同じ意味のものであることを確かめた。

引用文献

- 1) Egner, K: Beiträge zur Kenntnis der Feuchtigkeitsbewegung in Hölzern, von allem in Fichtenholz, bei der Trocknung unterhalb des Fasersättigungs-punktes. Forschungsberichte Holz. Heft 2. 1934
- 2) Frey A: Naturwiss. Bd. 15 1927
- 3) Hougén O. A.: Rate of Drying Chrome Leather. Ind. & Eng. Chem. Vol 26 No. 3 1934
- 4) Hougén O. A. and Ceaglske N. H.: Drying granular solids. Ind. & Eng. Chem. Vol 29 No. 7 1937
- 5) Kamei, S.: Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe. Memoirs of the College of Engineering Kyoto Imperial University. No. 1 Vol. III 1934, No. 2 Vol. IX 1935, No. 3 Vol. X 1937
- 6) 亀井三郎: 空気の調湿及び乾燥 昭和 23 年
- 7) 亀井三郎其外 2 名: 化学工学
- 8) 金丸競, 祖父江寛: 高分子構造論 上巻
- 9) Kollmann, F.: Technologie des Holzes. 1936
- 10) Lavine I. and Gauger A. W.: Studies in the Development of Dakota Lignite. Ind. & Eng. Chem. Vol. 22 No. 11 1930
- 11) Ludwig K.: Beiträge zur Kenntnis der künstlichen Holztrocknung mit besonderer Berücksichtigung des Einfluss der Temperatur. Forsch. Holz. Heft 1. 1933
- 12) Luric M. and Michailoff N.: Evaporation from free water surface. Ind. & Eng. Chem. Vol. 28. No. 3 1936
- 13) Martley J. F.: Moisture movement through wood. The steady State, Forest Prod. Res. Tech. paper No. 2 1926
- 14) 松本文三: 木材乾燥法

- 15) Moll Fr. : Künstliche Holz Trocknung. 1930
- 16) Molstad M. C., Farevaag P. and Farrell J. A. : Rate of Evaporation from a free water surface by a perpendicular air stream. Ind. & Eng. Chem. Vol. 30 No. 10 1938
- 17) 長沢武雄 : 木材繊維ミセルの大きさ 日本林学会誌 第 19 卷 第 9 号
- 18) 岡田元 : 基礎繊維素化学 昭和 18 年
- 19) 押田勇雄 : 蒸発, 乾燥 昭和 25 年
- 20) Pidgeon L. M. and Naass O. : The adsorption of water by wood. Jour. of Amer. Chem. Soc. Vol. 52, 1930
- 21) Sharpley B. F. and Baelter L. M. K. : Evaporation of water into quite air from a one-foot Diameter surface. Ind. & Eng. Chem. Vol. 30. No. 10 1938
- 22) Sherwood T. K. : The Drying of Solids. I ~ VII Ind. & Eng. Chem. Vol. 21 No. 10. 1929 ~ Vol. 26 No. 10. 1934
- 23) Sherwood T. K. and Comings E. W. : Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 27. 1932
- 24) Shepherd C. B., Hadlock C. and Brewer R. C. : Drying materials in Trays Evaporation of surface moisture. Ind. & Eng. Chem. Vol. 30 No. 4 1938
- 25) Stacey A, E. : Evaporation rate of moisture from a wet materials and from a free water surface. Ind. & Eng. Chem. Vol. 30. No. 12 1938
- 26) Stamm A. J. : Passage of Liquids, Vapors, and dissolved materials through softwoods. Tech. Bull. No. 929 1946
- 27) Stamm A. J. & Loughborough W. K. : Thermodynamics of the swelling of wood. Jour. of Phys. Chem. Vol. 39, No. 1 1935
- 23) Tiemann. H. D. : Wood Technology 1944
- 29) Weise : Wood Chemistry. 1946
- 30) Wilson R. E. : Humidity control by means of Sulfuric acid Solutions, with critical compilation of vapor Data. Ind. & Eng. Chem. Vol. 13, 1921

Résumé

It is said that the moistures in wood evaporated at constant rate only in short period of the begining contained large amounts of moistures, afterward at decreasing rate and its grade was affected on the drying conditions viz, relative humidity at constant temperature. The experiments to research these relationships were made on test pieces (size; $3.5 \times 2.5 \times 0.15 \text{ cm}^3$) of nara in the vessel, in which sulfuric acid have kept at constant relative humidity (80, 60, 40, 30 and 15% at 50°C).

The results obtained are roughly as follows.

1) The drying rate in constant rate of drying is shown by the equation $-\frac{dw}{A dt} = k(P_w - P_o)$. The surface evaporating coefficient k was calculated by use of both above equation and the experimental data and its value was $k = 3.58 \times 10^{-3}$ ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$) independent of surrounding conditions. The value is seemed to be not affected on the materials and this experiments ascertained it was approximately equal to the values for not noly species, conversion of timber, but free water in a vessel.

2) The drying rate in decreasing rate of drying were affected on the relative humidity and these relationships were as shown in Fig. 5. Why the decreasing rate of drying are made were considered as follows.

3) Evaporation of moistures in wood seems to have to necessitate more much calories below fibersaturation at the surface layer of wood than above and its amount was represented by pressure regarding it as evaporating resistance. Under the assumption the evaporating resistance pressure P_r caused the decreasing rate of drying, the drying rate in decreasing course was shown by the equation $-\frac{dw}{A dt} = k(P_w - P_o - P_r)$.

The relation between P_r and surface moisture contents was made by means of the results of experiments as shown in Fig. 6.

Further the assumption that the moisture below fibre saturation point evaporates against resistance was shown to be right by the following consideration, and it was shown, too, the above equation seemed reasonable.

4) It seemed to be right that a certain force existed between micelles and its force caused the resistance to evaporate the moistures below fibresaturation point, because P_r were straightly related with $\frac{1}{r^2}$, r was capillary-radius and calculated by Kelvin's equation by use of equilibrium moisture content at constant temperature assuming the moisture below fibresaturation point were contained between micelles viz. capillaries.

5) The evaporation heat calculated by Clausius-Clapeyron-equation for the moistures below fibresaturation point are shown in Fig. 10, this curve was very similar that of Fig 6. It could be said, therefore, to be proved that the evaporating resistance pressure P_r corresponded to evaporation heat and both had the same meaning.