

# 木材の乾燥機構に関する研究

## 第4報 水分伝導度の外周条件による影響

Takeo OGURA: Studies on the mechanisms of drying of wood.  
4. On the effects of surrounding conditions on moisture conductivity.

農林技官 小 倉 武 夫

### I 緒 言

繊維飽和点以下の水分移動を示す式  $\delta u/\delta t = K \delta^2 u/\delta x^2$  の係数  $K$  の値は木材の水分移動性を与える係数であるが、この絶対値は言う迄もなく外周の条件によつて左右されるので、今後理論的な取扱いをする上に、これの外周条件による影響を求めておく必要がある。外周条件としては風速・温度及び関係湿度等であるが、風速に関しては実験の都合上後日に譲り、今回は温度及び関係湿度による影響のみを求めた。併し乾燥速度に影響を及ぼすのは単なる関係湿度より寧ろ蒸気圧差 ( $P_w - P_0$ ) (第3報参照)<sup>(4)</sup> であると考えられるので、この見地から実験を行い、これらの関係を明らかにした。極めて簡単ではあるが、発表して御批判を乞う。

尙本実験は主として木材物理研究室大沼技官、梅原助手に負う処多く深く謝すと共に、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

#### 1. 恒温において蒸気圧差のみを変えた実験

温度を一定にし蒸気圧差  $P_w - P_0 = \Delta P$  のみを変化させた場合の実験については実験装置、実験材料及び条件等は凡て第3報<sup>(4)</sup>に述べたのと同じであるから、詳細は省略し、たゞ供試材はナラ板目、大きさ  $3.5 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 、厚さ約  $1.5 \text{ mm}$  で、温度  $50^\circ \text{C}$ 、関係湿度を 80, 60, 40, 30 及び 15% としたことのみに記す。

#### 2. 蒸気圧差を一定にし温度のみを変えた実験

電気恒温器 (45 cm × 40 cm × 40 cm) の底に容器を置き、これに適当な塩類を入れて蒸気圧を保持させた。この塩類は次の如く、

温度 °C	40	50~60	70
塩 類	CaCl <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>

温度によつて適当なものを選んだ。時には乾燥器上部の換気孔を調節して、蒸気圧を一定に保つたこともある。蒸気圧差は温度の如何に拘らず約 5.3 mmHg (乾湿球温度差約  $10^\circ \text{C}$ ) と

し、温度は 40, 50, 60 及び 70°C の4種に変化させた。

供試材はブナ板目、寸法は約 15 cm × 10 cm × 1.0 cm で重量の変化をスプリングバランスで測定した。

### III 実験結果及び考察

#### 1. 各種蒸気圧差における水分伝導度

(A) 実験結果 各蒸気圧差における試験材の重量減少測定値は第3報第2図の如くである。この結果から既に第1報<sup>(2)</sup>にて述べたと同様の方法で水分伝導度Kを求めた。たゞこの場合注意すべきは K を求めるための条件たる実験当初の含水率  $u_b$  を何れの場合も略々同一にしなければならぬことである。従つて  $u_b$  は何れも略々 60~70% とし、計算の基本数  $\frac{u_m - u_0}{u_b - u_0}$  の分母を成る可く同一になる様に努め、K を計算する含水率はその時の水分々布が誘導した基本式に合致するを要するので、少くとも平均含水率が繊維飽和点以下の場合とした。かくて各蒸気圧差に対して求めた  $\frac{u_m - u_0}{u_b - u_0}$  と  $\frac{t}{(\frac{s}{2})^2}$  の関係及びKの値は夫々 Fig. 1, Table. 1 の如

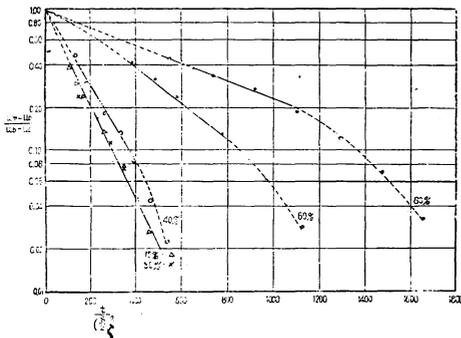


Fig. 1 Curves of  $\frac{u_m - u_0}{u_b - u_0}$  calculated for  $\frac{t}{(\frac{s}{2})^2}$

in a equation showing moisture distribution in wood.

くである。Fig. 1 をみると関係湿度 30, 15% の場合は  $\frac{u_m - u_0}{u_b - u_0}$  と  $\frac{t}{(\frac{s}{2})^2}$  の関係が直線的で

誘導式の理論に合致しているが、他の場合は乾燥経過の平衡状態に近付くにつれて直線から外れ、数式に合致しなくなっている。しかもこの傾向は蒸気圧差の少い程即ち関係湿度の高い程著しい。この現象は本実験の如き薄い材に対して現われた結果で、厚さが異なると亦別の結果になるものと思われる。要は水分々布状態が理論式に合致しないからである。何れにしてもKの値は常に若干は変化しているので、こゝではその平均値を以て水分伝導度とした。更に厚さによる影響を除くため、凡て 1.5 mm の値 Kc に換算した。Kc と  $\Delta P$  又は関係湿度との関

Table. 1

relative humidity %	vapor pressure difference mmHg	thickness mm	$K(\frac{cm^2}{h})$	$Kc(\frac{cm^2}{h})$
80	2.40	1.47	$\times 10^{-3}$ 0.56	$\times 10^{-3}$ 0.57
60	4.25	1.44	0.82	0.85
40	6.85	1.74	2.22	1.97
30	9.35	1.85	2.74	2.31
15	11.75	1.45	2.74	2.80

Remark: Kc is the value of K based on  $s=1.5mm$ .

係は Fig. 2 の如くで、乾燥条件が大きく即ち外周条件が峻になる程 K の値は大きくなつて  
 いるが、両者とも原点を通る略直線と見做すことが  
 出来る。

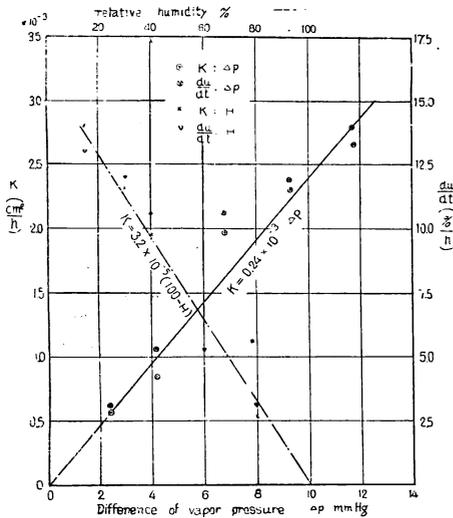


Fig. 2 Relations between the moisture conductivity and the difference of vapor pressure  $\Delta P$ , relative humidity.

(B) 考察 乾燥速度  $\frac{du}{dt}$  は自由水或は恒率乾燥の場合には明らかに蒸気圧差  $\Delta P$  に比例するが、減率の段階においては表面における蒸発抵抗  $P_r$  を考慮しなければならぬので、単に  $\Delta P$  に比例するのではなく、 $\Delta P - P_r$  に比例するものと考えるべきであることを第 3 報で述べた。亦同報によると  $P_r$  と表面含水率  $u_s$  との間には、

$$P_r = 17.2 e^{-0.1336u_s} \dots\dots\dots (2)$$

なる関係式があるので、表面の含水率  $u_s$  が繊維飽和点 (即ち  $P_r = 0$ ) よりその条件に応ずる平衡含水率に迄変化する場合これに応ずる  $P_r$  の平均値を求めることが出来る (Table. 2 を参照)。従つて減率乾燥の段階になつてからは  $\Delta P$  より

Table. 2

relative humidity %	vapor pressure difference mmHg	equilibrium moisture content $u_0$ %	$P_r$ * mmHg	$\Delta P - P_r$ mmHg
80	2.4	14.5	1.1	1.3
60	4.2	10.5	1.5	2.7
40	6.9	7.2	2.1	4.8
30	9.3	5.5	2.4	6.9
15	11.7	3.5	3.0	8.7

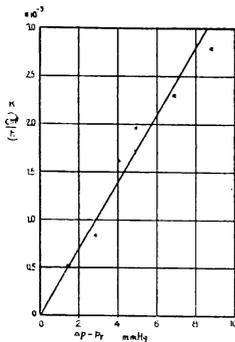


Fig. 3 Relation between K and  $\Delta P - P_r$ .

$$* : P_r = \frac{1}{u_r - u_0} \int_{u_0}^{u_r} 17.2 e^{-0.1336u_s} du_s$$

但し  $u_r$  は繊維飽和点の含水率

この  $P_r$  の値だけ低い蒸気圧差  $\Delta P - P_r$  で乾燥が行われていたことになるので、この蒸気圧差と K との関係を探ると Fig. 3 の如くで当然原点を通る直線関係にある。

亦重量減少経過 (第 3 報の第 2 図) の曲線から或時刻に対する乾燥速度  $du/dt$  を求めると、これも時間の経過と共に減少するので、全時刻に対する平均値を以て、その条件に対する乾燥速度とし、この値と  $\Delta P - P_r$  及び関係湿度との関係を求めると夫々 Fig. 2, Fig. 3 の如く何れも K との関係と略同様の結果を得たが、これは当然のことである。

扱 K の値に対する蒸気圧差の影響も亦関係湿度の影響も何れも概略的には同様であるが、乾燥条件としての両者は決して同じではない。

この両者の関係は Fig.4 に示した如く直線関係ではないので、K との関係も両者により

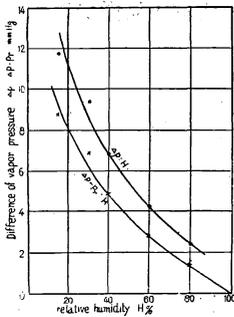


Fig. 4 The difference of vapor pressure corresponding to various relative humidities.

少々異なるのは当然である。併し  $\Delta P - P_r$  と関係湿度との何れが適しているかは、これだけの結果から判断することは出来ない。何れにしても K の値は乾燥条件が峻になる程大きくなることは明らかで、同図に示した関係式が認められる（但しこの式は一般的でない）。

K と関係湿度との関係を求めたのに龜井<sup>1)</sup>の研究がある。即ち粘土、パルプ及び木材に対して実験した結果によると何れも直線関係であるが、原点を通るものと、然らざるものもあり、木材に対しては原点を通っていない。この原因については説明が加えられていないが理論的には原点を通るのが適当であると考えられる。

2. 各種温度における水分伝導度

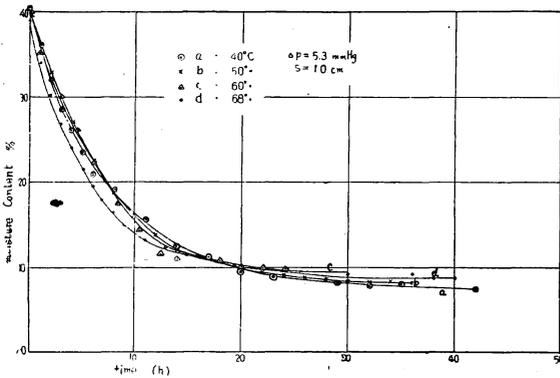


Fig. 5 Courses of decreasing moisture in wood at various temperatures and the same difference of vapor pressure ( $\Delta P$ ).

(A) 実験結果 各温度(略40, 50, 60 及び 70°C)において測定した重量減少経過曲線は Fig.5 の如くで、これから  $u_m - u_0 / u_b - u_0$  と

$$\frac{t}{\left(\frac{S}{2}\right)^2}$$

に示した様に略直線となり拡散の基本式適用の妥当性を現わしている。前述と同様の方法で K の値を求め、温度との関係を図示して Fig.7 を得た。即ち蒸気差が等しくても温度の高くなる程 K の値は若干大きくなる。

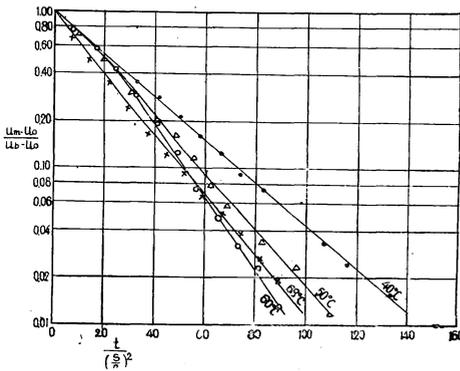


Fig. 6 Curves of  $\frac{u_m - u_0}{u_b - u_0}$  calculated for  $\frac{t}{\left(\frac{S}{2}\right)^2}$

in a equation showing moisture distribution in wood.

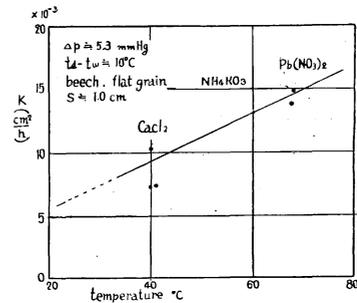


Fig. 7 Effect of temperature on K.

(B) 考察 乾燥せしめる条件を同一に保てば乾燥速度即ち K の値も同一になるものと考

えられるが、温度の高い程  $K$  の値が大きくなった理由に就いて若干考察を加えてみたい。減率乾燥を示す段階においては内部水分の表面への移動が主因子であつて、これの内部における水分移動が温度により影響をうけるものと考えられる。

木材中における水分移動は殊に繊維飽和点以下では気相液相の何れによるかに関しては未だ明らかでないが、両面における蒸気圧の差によつて細胞膜壁のミセル間隙及び非晶領域を通過して行われることは間違いないと思われる。一般に毛細管中の水分流動はこれが圧力差に基くとして理論的に誘導した Hagen-Poiseuille の式に従うと見做されている。

$$Q = \frac{Pz\pi r^4}{8\eta l}$$

但し  $Q$ : 水分移動量,  $P$ : 圧力差,  $z$ : 時間,  $r$ : 毛細管径,  $\eta$ : 水の粘性係数,  
 $l$ : 移動の距離

木材中の水分移動に関しても、ミセル間隙を毛細管と見做せばこれを適用することが出来る。たゞこの場合問題となるのはミセル間隙を通過するのが液相か気相かは明らかではないのに上式を用いることであるが、ここでは細胞間隙には気相の型で含まれていても、細胞膜壁を通過するのは液相であるとして上式を適用してみる。この式においては樹種、寸法等を同一にし、蒸気圧差を同一に保つた場合には、水分移動量  $Q$  は水分の粘性係数  $\eta$  のみの影響を受け、しかも  $1/\eta$  に比例する。今本実験に用いた  $40\sim 70^\circ\text{C}$  の水の  $1/\eta$  を図示すれば Fig. 8 の如くで、温度による影響は  $K$  の値と全く同様の関係を示している (Table. 3)。従つて温度が

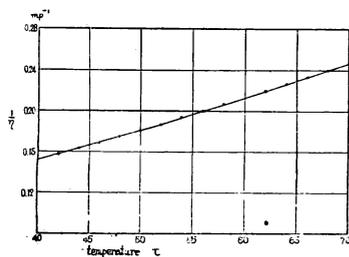


Fig. 8 Relation between the reverse of viscosity coefficient and temperature.

Table. 3

temperatur °C	$1/\eta$ m.P-1	K ( $\frac{\text{cm}^2}{\text{h}}$ ) $\times 10^{-3}$	comparison	
			$1/\eta$	K
40	0.152	9.3	100	100
50	0.181	11.2	119	120
60	0.213	13.0	140	140
70	0.247	15.0	162	161

高くなれば水分移動の容易になるのは、温度上昇による水分粘性係数の低下に基くものと説明することが出来る。

以上の結果から水分伝導度  $K$  は外周条件によつて或る一定の関係で影響をうけるので、条件の異なる  $K$  の値を比較するには、この影響を考慮しなければならない事を明らかにした。

次に何れの影響が大きいかを比較してみる。

上記の2つの実験は供試材の厚さが異なるので厚さ 1.0 cm の基準に換算してこれを図示すると Fig. 9 の如くなる。この  $Kc$ -関係湿度の関係を一般式で表わせば、

$$Kc = \alpha \times 1.48 \times 10^{-3} (100 - H)$$

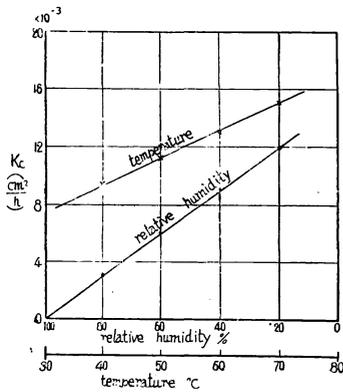


Fig. 9 Comparison of effect of temperature upon Kc with that of relative humidity.

但 H：関係湿度 %，

$$\alpha = \text{厚さ } 1\text{cm に対する } s \text{ の換算係数： } \alpha = s^{n-2}$$

この2つの直線を比べてみると Kc の同一値を増すためには、温度約 11°C の増加に対して関係湿度 13% の低下が相当する。これだけから何れの因子が Kc に及ぼす影響の大きいかを知る事は出来ないが、実際の乾燥操作上からは関係湿度 10~15% の調節は温度差 10°C の調節より遙かに困難であるので、温度よりも関係湿度の調節に留意しなければ失敗の公算が大きいものと言うことが出来る。亦温度の高い程水分伝導度が大きくなることは、成る可く温度を高く保つた操作の方が有利なことを示している。

### 摘 要

水分伝導度  $K(\delta u / \delta t = K \theta^2 u / \delta x^2)$  の係数は外周条件によつて異なることが明らかであるので、温度を一定とし蒸気圧差（関係湿度）の異なる場合と、蒸気圧差を一定として（即ち乾燥条件が同一）温度を異にした場合とにつき、実験を試み K の値のこれら条件による影響を求めて次の結果を得た。

I 温度一定、蒸気圧差の異なる場合（温度 50°C、関係湿度 80, 60, 40, 30 及び 15%）

(1) K（厚さ 1.5mm に換算した値）と関係湿度及び蒸気圧差  $\Delta P$  との関係は Fig.2 に示した如くで、乾燥条件が峻になる程 K の値は大きくなり、而も原点を通る略直線的関係を得た。

(2) 併し減率乾燥では蒸発抵抗圧  $P_r$  を考慮すべきであり蒸気圧差は  $\Delta P - P_r$  となるので、これと K との関係は Fig.3 の如く原点を通る直線となつた。

II 蒸気圧差一定、温度の異なる場合（温度 40, 50, 60, 70°C、 $\Delta P = 5.3$  mmHg）

(1) Kc（厚さ 1.0cm の K の値）と温度との関係は Fig.7 の如くで、蒸気圧差が等しくても温度の高い程 Kc の値は若干大きくなつた。

(2) この理由は木材中の水分移動が Hagen-Poiseuille の式に従うとすれば、温度の高い程水分の粘性係数  $\eta$  が低下するためで、Kc の温度と  $1/\eta$  との関係は全く同様であつた。

III Kc に対する温度と関係湿度との影響を比較した結果 Kc の同一値を増すためには温度 11°C の増加と関係湿度 13% の低下とが相当している。

従つて実際の乾燥操作では温度を高くするのが有利であるが、湿度の調節に特に留意しなければならぬことを知る。

### 文 献

- 1) S. Kamei: Untersuchung über die Trocknung fester Stoffe. Mem. college of Engin. Kyoto Univ. 1934—1937
- 2) 小倉武夫: 林業試験場研究報告 第 42 号 1949
- 3) 同 : 同上 第 45 号 1950
- 4) 同 : 同上 第 51 号, 1951

## Résumé

As the values of moisture conductivity  $K$  (coefficient of  $\partial u/\partial t = K \partial^2 u/\partial x^2$ ) are obviously effected on the surrounding conditions, the experiments on the moisture conductivity were made on the case of constant temperature, various vapor pressure difference and on that of constant vapor pressure difference, various temperature in order to research these relations between value of  $K$  and surrounding conditions. The results obtained were as follows.

I. The case of constant temperature and various vapor pressure difference (50°C, r.H. 80, 60, 40, 30, and 15%).

(1) The relations between  $K$  ( $K$  value of 1.5mm thick) and relative humidities, vapor pressure difference  $\Delta P$  were nearly linear through origin as shown in Fig. 2, and  $K$ -value became greater as drying conditions were severer.

(2) The vapor pressure difference are seemed to be  $\Delta P - P_r$ , as the pressure of resistance for evaporation  $P_r$  is to be taken into consideration in the case of decreasing rate of drying. Accordingly the relations between  $K$  and  $\Delta P - P_r$  were obtained and linear through origin as shown in Fig. 3.

II. The case of constant vapor pressure difference and various temperature (temp. 40, 50, 60, and 70°C,  $\Delta P = 5.3$  mmHg).

(1) The relations between  $Kc$  ( $K$  value of 1.0 cm thick) and temperature were shown in Fig. 7, the value of  $Kc$  were slightly greater as temperature raised even if the vapor pressure difference was equal.

(2) Assuming that the moisture move through wood in accordance with the Hagen-Poiseuille equation, the fact expressed above was seemed to be owing to that the viscosity coefficient of water  $\eta$  was the lower, the higher the temperature, and the effect of  $Kc$  on the temperature were the same on  $1/\eta$  (Table 3).

III. By the results of comparing the effect of the temperature on  $Kc$  with that of relative humidity, the increase of  $K$  value by raising 11°C was agreed with the decreasing relative humidities 13%. Consequently it is advantageous to keep high temperature in the practice of wood drying, but particullary the control of relative humidity should be taken notice.